

## ■ 要旨

金属を接合する溶接は、今日の工業製品にとって欠くことのできない重要な加工技術となっている。その溶接では、接合部を局所的な高温に高めるために、電気的なエネルギーを利用した種々な手法が開発されているが、とりわけ、アーク熱を利用して母材を溶融するアーク溶接があらゆる産業分野で大きな役割を果たしている。アーク溶接に用いられるアークは 1807 年に発見され、発電機が出現した 1860 年頃以降アークを用いる溶接法の適用が本格化し、現在の主要なアーク溶接法のほとんどは 1950 年前後に開発された。1914 (大正 3) 年にアーク溶接が導入されたわが国では、その後の 100 年間でアーク溶接技術は大きく発展し、近年では、世界の溶接界をリードする主要国としての立場を確立している。

本報告は、このようなアーク溶接技術のわが国における発展経過を中心にまとめたもので、その構成は次のようである。第 1 章では、本報告のテーマである溶接技術の概要と加工技術としての位置付けを述べるとともに、その中でアーク溶接法の占める役割を説明した。第 2 章では、アーク溶接法の概要を説明するために、溶接アークの性質ならびに主なアーク溶接法の原理と特徴を述べた。

第 3 章からは本報告の本題であり、第 3 章ではアーク溶接プロセスの発展経過をアーク溶接法ごとにまとめた。取り上げたアーク溶接法は、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、ティグ溶接、ミグ溶接、マグ溶接、パルスマグ・ミグ溶接およびその他のアーク溶接である。その他のアーク溶接としては、プラズマアーク溶接、セルフシールドアーク溶接、エレクトロガスアーク溶接、アークスタッド溶接ならびに狭開先溶接を取り上げている。第 4 章ではアーク溶接に用いられる溶接機・溶接電源の発展経過について、時期を 1900 年代前期の萌芽期、1900 年代中期の開拓期、1900 年代後期の発展期および近代 (1969 年以降) に分け、それぞれの時期ごとにアーク溶接機および電源の発展経過を記述した。第 5 章では、溶接棒、溶接ワイヤなどのアーク溶接材料と、アーク溶接に用いられるシールドガスの発展経過について述べた。

第 6 章は本報告のまとめであり、第 3 章～第 5 章で述べたアーク溶接技術の発展経過を整理し、溶接プロセス、溶接電源および溶接材料それぞれの発展経過の概要をフロー図としてまとめた。また、アーク溶接技術の今後の課題についても概説した。

## ■ Abstract

Welding, the fusing together of metals, has become a processing technology indispensable for the industrial products of today. Many methods using electric energy have been developed to raise the localized temperature at the joint for welding. Arc welding, in particular—using heat from an electric arc to fuse the base material—plays a major role in various industrial fields. The electric arc used in arc welding was discovered in 1807. The application of welding methods using this arc became full-fledged since electricity generators appeared in 1860, and most major arc welding methods in use today were developed around 1950. Arc welding was introduced to Japan in 1914. In the 100 years since, its arc welding technology has developed greatly, and Japan has established itself in recent years as a major country leading the welding world globally.

This report outlines such arc welding technology, focusing on the course of its development in Japan, and is organized as described below. Chapter 1 gives an overview of the theme of the report—welding technology—and where it stands as processing technology, as well as the role played in it by arc welding. Chapter 2 is an overview of the arc welding method, describing the characteristics of the welding arc and the principles and features of the major methods.

The main subject of this report starts in Chapter 3, laying out the course of development of processes in arc welding, categorized by arc welding method. The arc welding methods featured include shielded metal arc welding, submerged arc welding, Tungsten Inert Gas (TIG) welding, Metal Inert Gas (MIG) welding, Metal Active Gas (MAG) welding, and pulsed MAG/MIG welding. Other arc welding featured are plasma arc welding, self-shielded arc welding, electrogas arc welding, arc stud welding, as well as narrow-gap welding. Chapter 4 documents the course of development of welding equipment and welding power supply used in arc welding, classified by period: the embryonic phase of the early 1900's, the pioneering phase of the mid-1900's, the progressive phase of the late 1900's, and the modern phase (since 1969). Chapter 5 describes the course of development of arc welding materials such as welding rods and welding wire, and shield gases used in arc welding.

Chapter 6 is the conclusion of this report, and reiterates the course of development of arc welding technology described in Chapters 3 to 5. The course of development of welding processes, welding power supplies, and welding materials are each summarized in a flow chart. Issues currently facing arc welding technology are also outlined.

## ■ Profile

**三田 常夫** *Tsuneo Mita*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1972年 大阪大学工学部溶接工学科卒業  
1991年 大阪大学 博士(工学)  
1972年 (株)宮地鐵工所 入社  
1975年 同社 退社  
1975年 日立精工(株)(現ピアメカニクス(株)) 入社  
2005年 同社退社  
2006年 ダイヘン溶接メカトロシステム(株) 入社  
2015年 同社 退職  
2015年 大阪大学接合科学研究所招聘教授

## ■ Contents

1. はじめに .....	391
2. アーク溶接の概要 .....	394
3. アーク溶接プロセスの発展経過 .....	405
4. 溶接機・電源の発展経過 .....	479
5. 溶接材料の発展経過 .....	500
6. おわりに .....	520
付表 .....	523

# 1 | はじめに

人類が金属を利用し始めたのは紀元前の青銅器時代であるが、それ以来金属を切断したり接合したりして、生活に役立つ様々な品物や道具を製作してきた。現在使用されている金属の種類や製作される品物・道具は、当時とは比べものにならないほど高機能化し、その適用も広範囲にわたり、金属の切断・接合は今日の工業製品にとって欠くことのできない重要な加工技術となっている。

金属の接合方法を、接合機構と接合エネルギーで分類すると、リベットやボルトなどを用いて力学的なエネルギーで部材を接合する“機械的接合”、接着剤や樹脂などを用いて化学的なエネルギーで部材を面で接合する“化学的接合”、および種々なエネルギーを利用して冶金的に接合する「溶接」に大別される。

溶接は、「2個以上の部材の接合部に熱、圧力もしくはその両者を加え、さらに必要であれば適当な溶加材も加えて、連続性を持つ一体化された1つの部材とする操作」である。そしてその接合機構面から、液相（熔融）接合である“融接”、固相または液相接合である“圧接”、および液相-固相反応接合である“ろう接”に細分される。これら溶接の3形態を図示すると表1.1のようであり、“融接”は被溶接材（母材）の接合部を加熱、熔融して、母材の熔融金属あるいは母材と溶加材を融合させた熔融金属を生成し、その熔融金属を凝固させることによって機械的圧力を付加せずに接合する方法である。“圧接”は接合部へ摩擦熱・電気抵抗によるジュール熱などの熱エネルギーを加えた後に、機械的圧力を付加して接合する方法、“ろう接”は母材より低融点の溶加材（ろう材）を熔融し、その毛管現象を利用して接合面の隙間にろう材を充填することによって、母材を熔融せずに接合する方法で

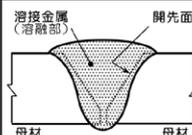
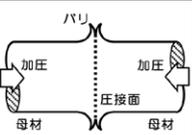
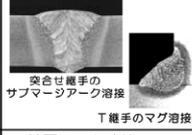
ある。

母材より低融点のろう材を利用して接合する“ろう接”は、高温を作り出すことが極めて困難であった古代でも利用されており、メソポタミア地方で発見された銅製のレリーフの一部に使用されていたことが知られている。また、熱した金属を重ねてたたく（鍛える）と、重ね合わせた金属を接合・一体化することができる。このような接合方法は“鍛接”と呼ばれ、“圧接”に分類される。鍛接の歴史も古く、青銅器や鉄器の接合に多用されていたことが知られている。特に、延性が良好な鉄には適した接合方法であることから、紀元前15世紀頃に鉄が発明された小アジアから、鍛接は鉄とともに世界各地へ広まったようである。わが国へも紀元前3世紀頃に伝わり、後の日本刀は鍛接の代表例となっている。

もう一つの古い金属接合法として、接合母材間に熔融させた金属を流し込んで接合する“鑄掛け”と呼ばれる方法がある。鑄掛けでは、母材の縁が溶けるまで熔融金属を流し込むため、その接合機構は“融接”に極めて近いといえる。鑄掛けの代表例には鎌倉の大仏があり、注意して観察すれば、溶接ビードの余盛りのような鑄掛け部が認められる。鑄掛けは金属製品のひび割れや穴明きを補修する方法として、比較的近年（昭和30年代頃）まで、わが国でも使われていた。

しかし本格的な“融接”を行うためには、比較的狭い部分を集中して加熱することが必要であり、そのためにはかなりの高温が要求される。したがって、近代的な“融接”が行われるのは、電気やガスを利用して母材を集中的に加熱することができるようになる産業革命以降であり、金属を熔融させて接合することが可能となったのは19世紀に入ってからである。

表 1.1 溶接における接合形態

	融接	圧接	ろう接
接合形態			
適用例	 突合せ継手のサブマージアーク溶接 T継手のマグ溶接	 鉄筋のアブセット溶接 抵抗スポット溶接	 銅と黄銅のろう付け プリント基板のはんだ付
主な溶接法	<ul style="list-style-type: none"> <li>被覆アーク溶接</li> <li>サブマージアーク溶接</li> <li>ティグ溶接</li> <li>マグ・ミグ溶接</li> <li>レーザ溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>抵抗スポット溶接</li> <li>アブセット溶接</li> <li>フラッシュ溶接</li> <li>摩擦圧接</li> <li>ガス圧接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>トーチ（炎）ろう付</li> <li>誘導加熱ろう付</li> <li>光ビームろう付</li> <li>はんだ付</li> </ul>

今日では、溶接部を局所的な高温に高めるために、圧力や摩擦力などの力学的なエネルギー、化学反応によって生じる発熱などの化学的なエネルギー、アーク熱や抵抗発熱などの電気的なエネルギーあるいはレーザーに代表される光エネルギーを利用した種々な手法が開発されている。溶接部に加えられるエネルギーと接合形態で主な溶接方法を分類すると表1.2のようであり、化学的エネルギーと電気的エネルギーはいずれの接合形態にも利用されている。

これらのうちのユニークな溶接法としては、接触面を相対運動させることによって発生する摩擦熱で接合部を加熱して溶接する摩擦圧接、超音波振動を利用して母材表面を加熱・加圧して溶接する超音波圧接、酸化鉄とアルミニウム粉末の化学反応で発生する熱を利用するテルミット溶接、火薬を爆発させることによって発生する母材とクラッド材の間の衝撃圧力を利用する爆発圧接などがある。

現在の溶接法の主流は、比較的簡便な機器と操作で溶接を行うことができるアーク溶接と抵抗溶接であるが、これら2つの溶接法のうちでも、アーク熱を利用して母材を溶融するアーク溶接があらゆる産業分野で大きな役割を果たしている。近年レーザー溶接など新しい溶接法の適用・実用化も進んでいるが、適用性・経済性・操作性などを考えると、アーク溶接に大きく取って代わることは当分の間なさそうである。

アークは、産業革命発祥の地英国で1807年に発見された。しかし、比較的大電流を必要とする溶接アークを長時間持続させるためには電力容量の大きい電源が必要である。しかし当時としてはそのような電源は存在せず、溶接アークに関心もたれることはほとんどなかった。アークを用いた溶接が本格化するのには、1860年頃に開発された発電機が出現してからである。

一般に、アーク溶接実用化の第1歩はベナードス(N. V. Benerdos)による炭素アーク溶接の発明とされており、1885年にはその特許が成立している。その後、1892年にスラビヤノフ(N. Slavyanov)が消耗電極溶接法の元祖となる金属アーク溶接法を発見し、1907年にチェルベルヒ(O. Kjellberg)が裸棒に被覆剤を塗布した被覆アーク溶接棒を発明することによって、アーク溶接が本当の意味で実用化されることとなった。なお、現在のアーク溶接の主流であるガスシールドアーク溶接は、1926年のウェバー(L. J. Weber)によるヘリウムシールド裸金属棒溶接法が起源である。

実用化されている主なアーク溶接法が開発された時期は図1.1のようであり、ティグ溶接・ミグ溶接・マグ溶接など、現在の主要なアーク溶接法のほとんどは1950年前後に開発されている。またこの時期には、くしくも、近年のアーク溶接には欠かせない溶接ロボットの原型とも言うべき産業用ロボットの開発も行われている。すなわち20世紀の中期は、溶接技術の黎明期に携わった先人の知恵と工夫が一挙に花開いた時期であるといえる。

わが国にアーク溶接が導入されたのは1914(大正3)年であり、1922年には交流アーク溶接機が、1925年には直流アーク溶接機が国産化された。その後の80年でアーク溶接機は大きく変貌し、主要なアーク溶接法が発明されてから約50年後の20世紀末には、デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化が本格的に始まった。制御回路の大部分をアナログ制御からデジタル制御へと変更することによって、溶接条件の再現性向上、個体差・個人差の排除、操作性・機能の向上などを目指した開発が進められた。そして近年では、高速制御素子を用いた出力

表 1.2 金属の接合方法とそのエネルギー

		電気的 エネルギー	化学的 エネルギー	力学的 エネルギー	光 エネルギー
機械的接合				リベット かしめ ボルト接合 焼きばめ 折り込み	
化学的接合			接着		
冶金的 接合 (溶接)	融接	アーク溶接 エレクトロ・ スラグ溶接 電子ビーム溶接	ガス溶接 テルミット溶接		レーザー溶接
	圧接	抵抗溶接 アプセット溶接 フラッシュ溶接	爆発圧接	常温圧接 摩擦圧接 摩擦攪拌溶接 超音波圧接 拡散接合	
	ろう接	誘導加熱ろう付	トーチろう付 (炎ろう付)		光ビームろう付

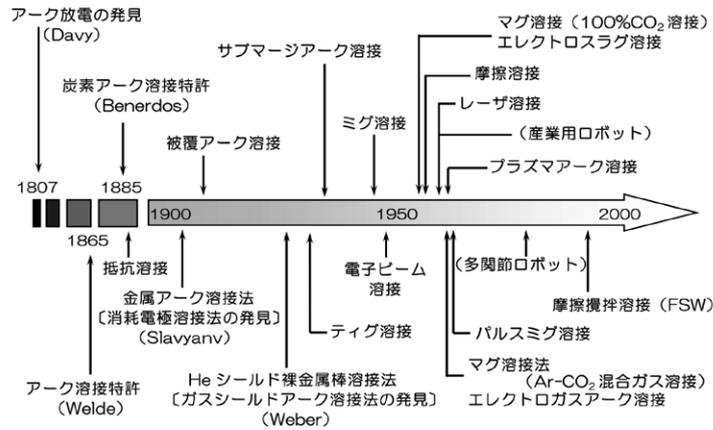


図 1.1 主なアーク溶接法の開発時期

制御の高速化が積極的に推進され、溶接現象やアーク現象を高速で制御することができる高性能なデジタル制御溶接電源も市販されるようになってきている。

アーク溶接は成熟技術であると言われるが、開発されてからわずか 100 年も経過しておらず、必ずしも完成された技術となっているわけではない。作業性

の改良・品質の改良・能率の向上・生産性の向上・作業環境の改善など、現在も地道な開発・改良が続けられている。本報告では、このようなアーク溶接の特徴について概説するとともに、わが国における溶接プロセス、溶接電源・機器および溶接材料・シールドガスの発展経過について報告する。

# 2 | アーク溶接の概要

## 2.1 アーク溶接とその分類

アーク溶接はアーク熱を利用して被溶接材（母材）の接合部を加熱、溶融することによって、母材の溶融金属あるいは母材と溶加材を融合させた溶融金属を生成し、それらの溶融金属を凝固させて接合する手法である。アーク溶接は、連続的に一体化された継手部を形成できるため、以下のような長所を持つ。

- ①継手効率（継手強度）が高い。
- ②継手構造を簡素化することができる。
- ③優れた気密性や水密性を持つ。
- ④厚さに対する制約をほとんど受けない。
- ⑤材料を節減でき、経済的である。

一方、継手部の加熱あるいは溶加材添加などの影響を受けるため、以下のような短所も併せもつ。

- ①溶接金属という新しい異質な材料が生成される。
- ②溶接熱によって、母材の性質が局所的に変質する。
- ③局所的な加熱と冷却によって、溶接変形が発生する。
- ④残留応力が発生し、継手強度に悪影響を及ぼすことがある。
- ⑤溶接品質に対する外観での良否確認が困難である。

このようなアーク溶接は、アークを発生する電極の特性によって大別され、電極の溶融をほとんど生じない非溶極式（非消耗電極式）溶接と、電極が連続的に溶融、消耗する溶極式（消耗電極式）溶接の2種類に分類される。非溶極式溶接での電極はアークを発生させるためのみ用いられ、それ自体はほとんど溶融しない。したがって図2.1 (a) に示すように、溶着金属の添加が必要な場合には溶加材を別途加えなければならない。しかし、溶接電流と溶加材（棒またはワイヤ）の添加量はそれぞれ独立に変化させることができ、溶接条件選定の自由度は大きい。ただし溶加材の溶融は、一般に、アークおよび溶融池からの熱伝導によって行うため、非溶極式溶接の作業能率は比較的低い。

一方、溶極式溶接での電極は、アークを発生させると同時に、それ自体が溶融して溶着金属を形成するため、高能率な溶接作業を行うことが可能である。ところが図2.1 (b) に示すように、電極（ワイヤ）の溶融

量は溶接電流に強く依存し、電極の溶融量と溶接電流とをそれぞれを独立に制御することができない。そのため溶接条件選定の自由度は制限され、適切な溶接条件の設定には熟練が要求される。

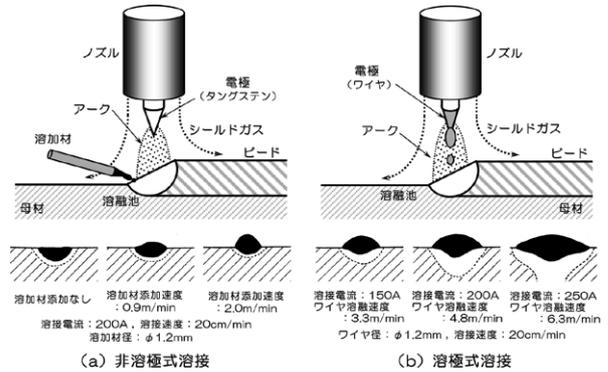


図2.1 溶極式溶接と非溶極式溶接

溶融金属中に大気（空気）が混入すると、図2.2 (a) に示すように、ポロシティ（プローホールおよびピット）発生の大い要因となる。すなわち母材を溶融して溶接するアーク溶接では、大気中の窒素や酸素から溶融金属を保護することが重要である。溶融金属を大気から保護する手法には、図2.2 (b) に示す、「フラックスを利用する方法」と「シールドガスを利用する方法」がある。

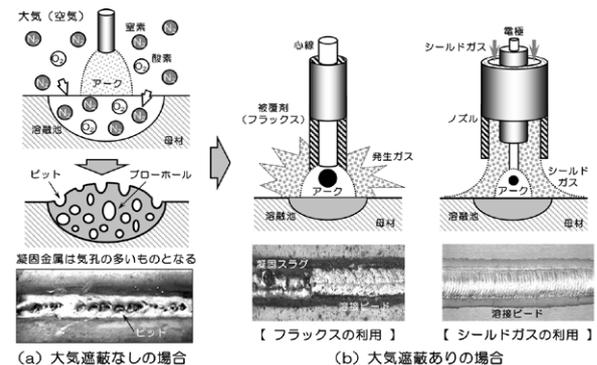


図2.2 溶融金属（溶接金属）の大気からの保護

フラックスを利用する方法では、被覆剤（フラックス）の溶融によって発生するガスで溶融池金属を大気から保護する。この場合、ビード表面は凝固スラグで覆われるため、溶接後にその除去が必要である。シールドガスを利用する方法では、アルゴン、炭酸ガスあるいはそれらの混合ガスなどを溶接部近傍に吹き付け、溶融池金属を大気から保護する。フラックスを用

いないためスラグの剥離はほぼ必要なく、自動化やシステム化などにも比較的容易に対応することができ、広範囲な産業分野で適用されている。なお、シールドガスを利用して溶融金属を大気から保護するアーク溶接法は、“ガスシールドアーク溶接”と総称される。

ガスシールドアーク溶接に用いられるシールドガスには表 2.1 に示すようなものがあり、適用できるガスの種類や組成は溶接法および母材の材質によって異なる。タングステン電極を用いるティグ溶接やプラズマアーク溶接で使用するシールドガスは、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He) または Ar+He 混合ガスなどの不活性ガス、あるいはアルゴンと水素の混合ガス (Ar+H<sub>2</sub>) などに限定され、酸素 (O<sub>2</sub>) を含むガスは使用できない。タングステンは、融点が三千数百℃の高融点金属であるが、酸化すると融点が千数百℃まで急激に低下するためである。また Ar+H<sub>2</sub> 混合ガスが使用できるのは、ステンレス鋼 (SUS) とニッケル (Ni) およびその合金に限られる。

表 2.1 シールドガス組成と母材材質の組合せ

溶接法	シールドガス組成	母材材質						
		軟鋼	低合金鋼	SUS	Al 合金	Cu 合金	Ni 合金	Ti 合金
ティグ プラズマ	Ar	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + H <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
マグ	CO <sub>2</sub>	○	○	●	○	○	○	○
	Ar + CO <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + O <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He + O <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> )	●	○	○	○	○	○	○
ミグ	Ar	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He	○	○	○	○	○	○	○

○：一般的な適用 ●：特殊用途

消耗ワイヤを電極とするマグ溶接では、軟鋼・低合金鋼の場合、100%炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) あるいは Ar+20%CO<sub>2</sub> の混合ガス (いわゆるマグガス) が多用される。またステンレス鋼では、ソリッドワイヤの場合は Ar+2~5%O<sub>2</sub> あるいは Ar+5~10%CO<sub>2</sub> の混合ガスが、フラックス入りワイヤの場合は主に 100% CO<sub>2</sub> あるいは Ar+20%CO<sub>2</sub> の混合ガスが使用される。ステンレス鋼や軟鋼・低合金鋼には、シールドガスに不活性ガスを用いるミグ溶接を適用することはできない。シールドガスに 100% Ar を用いると、アークの著しいふらつきや偏向現象が生じ、多量のスパッタが発生し、ビード外観も不均一なものとなるためである。このような不安定現象には陰極点を形成する酸化物が大きく関与しており、Ar に数%の O<sub>2</sub> あるいは CO<sub>2</sub> を添加して母材表面での酸化物生成を助長することによって陰極点の形成を安定化し、アークの偏向現象を

抑制する。

アルミニウム (Al)、銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、チタン (Ti) およびそれらの合金には O<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> を含むガスは使用できないため、100% Ar あるいは Ar+He 混合ガスをシールドガスとするミグ溶接が用いられる。これらの非鉄金属の場合、母材表面には十分な酸化物が存在し陰極点は安定して形成され続けるため、シールドガスに O<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> を添加しなくてもアークやビード形状が乱れることはない。

アーク溶接を細分化すると図 2.3 のように分類され、非溶極式溶接には“ティグ溶接”と“プラズマアーク溶接”があり、いずれの溶接法もシールドガスを利用して溶融金属を大気から保護する。溶極式溶接には、フラックスを利用して溶融金属を大気から保護する“被覆アーク溶接”、“サブマージアーク溶接”および“セルフシールドアーク溶接”と、シールドガスを利用して溶融金属を大気から保護する“ミグ溶接”、“マグ溶接”および“エレクトロガスアーク溶接”がある。なお“アークスタッド溶接”はフラックスもシールドガスも用いない溶接法であり、溶融金属を外周部に排出することによって健全な溶接継手を形成する。

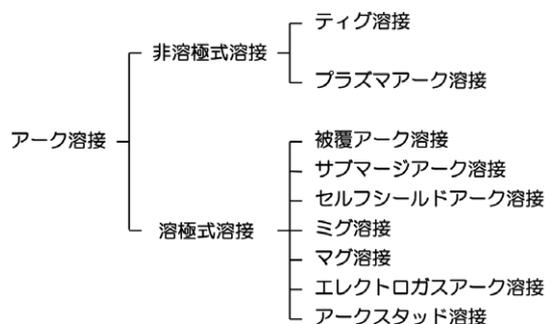


図 2.3 アーク溶接の分類

## 2.2 溶接アークの性質

### 2.2.1 アークの特性

アークは、図 2.4 に示すように、2つの電極を接触 (短絡) させて通電し、そのままの状態では引き離すと電極間に発生する。溶接棒、溶接ワイヤあるいはタングステン電極棒などの比較的細径電極と母材との間に発生するアークは、一般に電極から母材に向かって拡がりベル形の形状となる。アークは高温の気体であり、例えばティグアークの場合、中心部で 1 万数千℃、外周部でも 1 万℃程度の高温を示す。アークは、原子や分子などの中性粒子と、その一部が電離して生じる

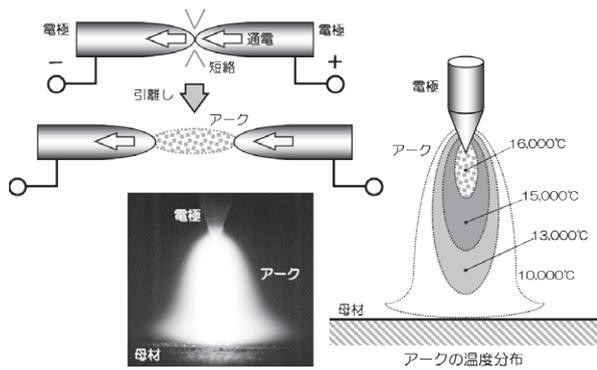


図 2.4 アークの性質

イオンや電子のような荷電粒子とで構成された導電性を持つ電離気体（プラズマ）である。その電流はほとんど電子によって運ばれ、電流と電圧との積で表されるエネルギー（電力）によって維持される。

アーク電圧は図 2.5 に示すように、陰極（マイナス極）および陽極（プラス極）近傍の電圧降下と、その間のアーク柱電圧降下とで構成される。アーク柱電圧はアーク長に応じて変化するが、陰極降下電圧および陽極降下電圧はアーク長が変化してもほとんど変わらない。このためアーク長を極端に短くしても、アークが発生している限り、アーク電圧が数V（陰極降下電圧と陽極降下電圧の和）以下になることはない。

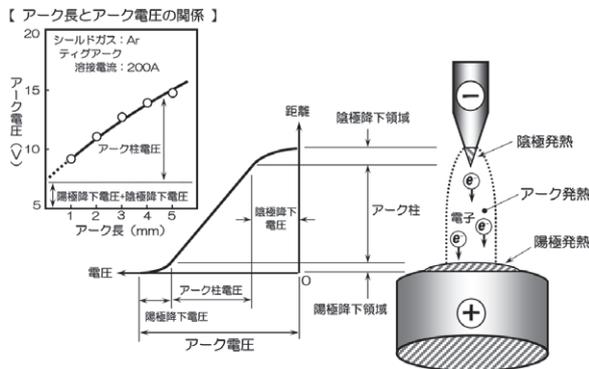


図 2.5 アーク電圧の構造

溶接電流とアーク電圧の関係（アークの電流 - 電圧特性）は図 2.6 のようであり、大電流域では電流の増加にともなって電圧が緩やかに増大する“上昇特性”を示すが、小電流域では電流の減少にともなって電圧が急激に増加する。またアーク長が変化すると、この特性曲線は電圧（縦）軸に沿って上下方向にほぼ平行移動する。すなわちアーク長とアーク電圧はほぼ比例し、アーク長を短くするとアーク電圧は減少し、長くするとアーク電圧は増大する。

アーク長が同じであっても、シールドガスの種類によってアーク電圧は変化する。アークを維持するため

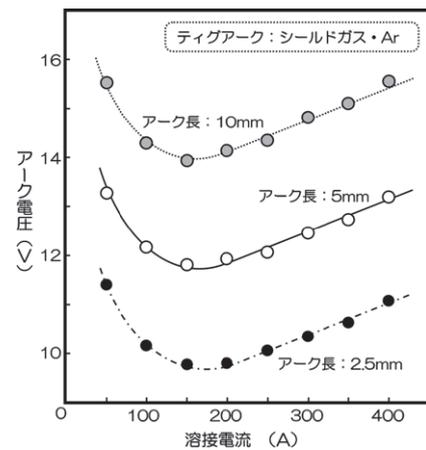


図 2.6 溶接電流とアーク電圧の関係

に必要なエネルギーは、ガスの種類によって異なるためである。たとえば熱損失の大きい He をシールドガスに用いると、図 2.7 に示すように、アーク電圧は Ar を用いた場合の 2 倍近い値となり、母材への入熱が増加して深い溶込みが得られる。ただし、アークの電圧増加はアーク切れを生じやすいことにつながるため、He 使用時には十分な出力電圧が得られる溶接電源を用いなければならない。

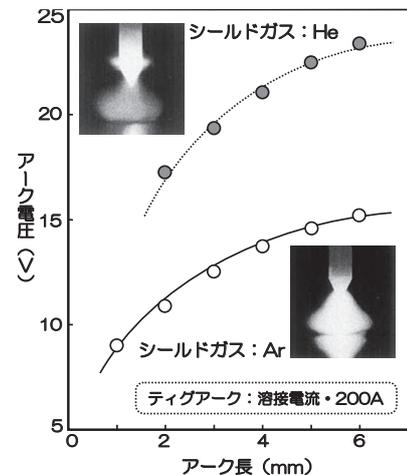


図 2.7 シールドガスの影響

アークで発生した熱は、電子流とガス気流からの熱伝達とによってアーク柱を介して母材へ運ばれる。その一部は熱放射によって失われるが、大部分の熱は母材に持込まれ、母材を溶融して溶融池を形成する。母材に投入された熱のほとんどは溶融池内を移動し、溶融池と母材との境界（固液界面）を通過して母材へ流れ、熱伝導によって散逸する。また溶融池金属の蒸発が発生する場合には、その表面からも熱の散逸がある。

平行な導体に同一方向の電流が通電されると、導体間には電磁力による引力が発生する。アークは気体で

構成された平行導体の集合体とみなせるから、平行導体間に発生する引力はアークの断面を収縮させる力として作用する。このような作用を“電磁的ピンチ効果”といい、その力を“電磁ピンチ力”という。

電磁的ピンチ効果は、溶接ワイヤにおいても同様に作用する。図 2.8 に示すように、固体部分は電磁ピンチ力を受けても変形することはないが、液体となった先端部の溶滴は電磁ピンチ力の作用で断面が減少し、溶滴にはくびれが発生してワイヤ端から離脱する。なおアークには、冷却作用を受けると断面を収縮させ、表面積を減少させることによって熱損失を抑制しようとする作用もあり、この作用は“熱的ピンチ効果”と呼ばれる。

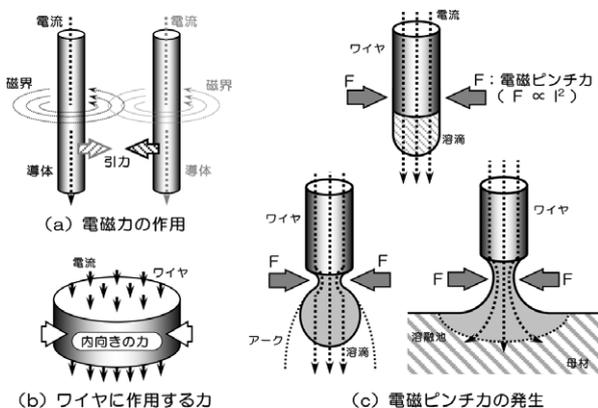


図 2.8 電磁ピンチ力

アーク溶接では、その周囲に溶接電流による磁界が形成され、図 2.9 に示すように、フレミング左手の法則に従う電磁力が発生する。またアークの電流路は電極から母材に向かって拡がるため、電流密度の大きい電極近傍での電磁ピンチ力は、電流密度が小さい母材近傍でのそれよりも大きく、アーク柱内部の圧力は母材表面より電極近傍の方が高くなる。このような電磁力と圧力の差は、シールドガスの一部をアーク柱内に引き込み、“プラズマ気流”と呼ばれる電極から母材に向かう高速のガス気流を発生させる。

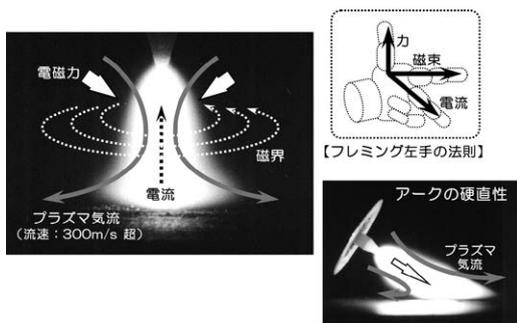


図 2.9 プラズマ気流とアークの硬直性

プラズマ気流の流速は 300m/秒を超えることもあり、溶滴移行や溶込みの形成に大きく関与する。上向溶接や横向往溶接などにおいて、重力が作用するにもかかわらず溶滴が溶融池へスムーズに移行するのは、プラズマ気流が存在するためである。またアークは電極と母材との最短距離で発生するとは限らず、トーチを傾けてもプラズマ気流の作用で軸方向に発生しようとする傾向がある。このようなアークの直進性を“アークの硬直性”という。なお電磁ピンチ力は電流値に大きく依存し、電流値が小さくなるとその力は低下してプラズマ気流も弱くなるため、小電流域でのアークは硬直性が弱まり不安定でふらつきやすくなる。

溶接電流によって発生した磁界や母材の残留磁気がアーク柱を流れる電流に対して著しく非対称に作用すると、その電磁力によってアークは偏向する。このようなアークの偏向現象を“アークの磁気吹き”といい、典型的な例を図 2.10 に示す。(a) は母材の中央部と端部とで磁界の形成形態が異なることによって生じる現象である。磁界を形成する磁束は鋼板中に比べて大気中の方が通りにくいいため、アークが母材端部に近づくとき非対称な磁界が形成されてアークが偏向する。(b) は溶接線近傍に断面積の大きい鋼ブロックが存在する場合に発生しやすい現象で、鋼ブロック側に磁束が吸い寄せられて非対称な磁界が形成されることが原因で発生する。(c) は母材側ケーブルの接続位置に起因したもので、溶接電流の通電によって形成される電流ループの影響によって生じる現象である。溶接電流のループによって形成される磁界の強さ(磁場)は、ループの外側より内側の方で強くなるため、磁場の弱い方すなわち電流ループの外側へアークが偏向する。

磁気吹きは磁性材料の直流溶接で発生しやすい現象であり、極性が頻繁に変化する交流溶接や非磁性材料の直流溶接などで発生することは比較的少ない。磁気吹きの防止対策としては、母材へのケーブル接続位置

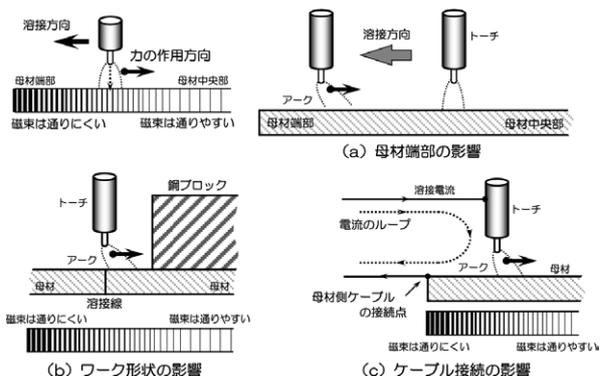


図 2.10 磁気吹き

や接続方法を工夫する、母材やジグの脱磁処理を実施するなどが基本的な対処方法であるが、現実的には試行錯誤の繰返しとなることが多い。

## 2.2.2 母材の溶融

アーク溶接の溶融池には、図 2.11 に示すような力が作用して溶融池金属の流れを支配する。すなわち溶融池内には、プラズマ気流によって生じる対流、溶融池表面上の温度勾配に起因した表面張力対流、溶融池内を流れる電流によって生じる電磁対流および溶融池内の温度差によって生じる熱対流の 4 種類がある。なお表面張力対流は、母材中に含まれる微量元素の影響を受けてその流れの方向が逆転することが知られている。表面張力は、通常（不純物濃度が低い場合）、温度が高くなるほど低下するため、表面張力によって生じる溶融池金属の対流は高温の溶融池中央部から低温の周辺部へ向かう方向に形成される。しかし酸素 (O) や硫黄 (S) などの不純物濃度が高くなると、温度が高くなるほど表面張力が増大して、対流の方向は溶融池周辺部から中央部に向かう方向へと変化する。

これら 4 種類の対流が複合され、中央部から周辺部へ向かう溶融金属の流れが形成されると、溶込みは幅が広く浅いものとなる。反対に周辺部から中央部に向かう方向の流れが形成されると、幅が狭く深い溶込みとなる。

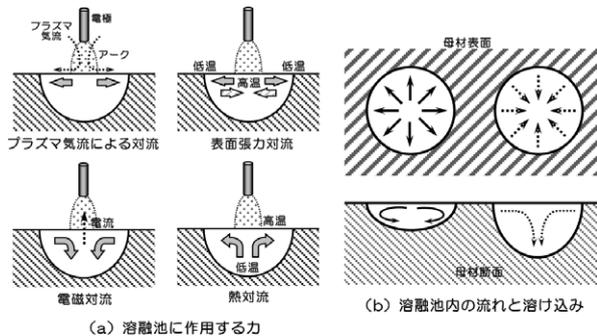


図 2.11 母材の溶融形態

溶接ビード形成におよぼす溶接条件（溶接電流、アーク電圧および溶接速度）の影響を、溶加材を添加しないティグ溶接の例で示すと図 2.12 のようである。アーク電圧（アーク長）と溶接速度を一定にして、溶接電流を増加させると母材への入熱が増加して、ビード幅と溶込み深さが増大する。溶接電流と溶接速度を一定にして、アーク電圧を高くするとビード幅が広がって溶込み深さは減少する。しかし所定値以上にアーク電圧を高くすると、母材への入熱が過度に分散してビード幅と溶込み深さはともに減少し、母材を溶

融することができなくなる。また溶接電流とアーク電圧を一定にして溶接速度を速くすると、単位長さ当たりの入熱量が減少するためビード幅と溶込み深さはともに減少する。

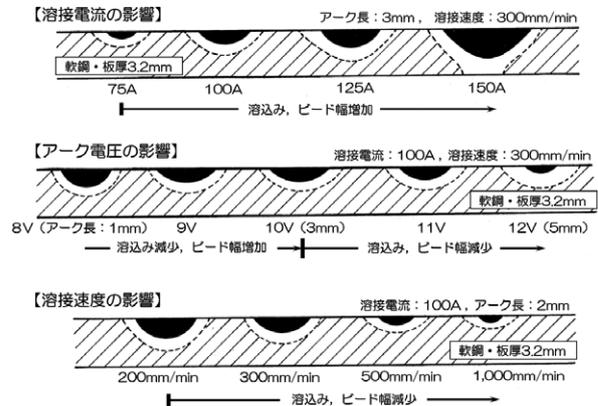


図 2.12 溶込みにおよぼす溶接条件の影響（ティグ溶接の場合）

溶接ビードの形成におよぼす溶接電流と溶接速度の関係は、一般に図 2.13 のようである。溶接電流が小さく溶接速度が速い小電流 / 高速域では、入熱が不足して母材に十分な入熱が付与されないため溶込み不足が生じる。反対に溶接電流が大きく溶接速度が遅い大電流 / 低速域では、母材に過大な熱が加えられて溶接金属の溶落ちや薄板では母材の穴あきが発生する。また溶接電流が大きく溶接速度も速い大電流 / 高速域では、アークによる母材の掘り下げ作用が強くなるため、母材の溶融幅がビード幅より広がって、アンダーカットやハンピングが発生しやすくなる。溶融池金属は一旦溶融池の後方へ押しやられた後、逆流して溶融池前方に戻される。しかし溶接速度が速くなると、溶融池は後方へ長く伸びて形成され、十分な溶融池金属が前方まで戻りきる前に後方で凝固して、溶融池前方でのビードを形成する溶融金属量が不足するためである。

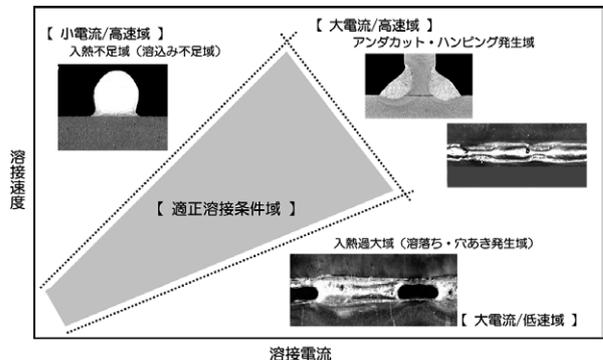


図 2.13 ビード形成におよぼす溶接条件の影響

アーク溶接は図 2.14 に示すような種々の溶接姿勢

に適用されるが、そのビード形成や溶接作業性は溶接姿勢によって大きく異なる。下向溶接では重力による溶融池金属の垂れ落ちを考慮する必要がないため、大きい溶融池が形成される高能率な溶接も可能である。立向上進溶接では、重力の影響を受けて溶融池金属が溶融池後方に垂れ下がり、溶込みは深くビードは凸となりやすい。立向下進溶接では、溶融池金属の垂れ下がりを防ぎ、溶融池金属の垂れ落ちが生じないようにしなければならない。ビードは扁平で溶込みが浅く、裏波ビードの表面は凹形になりやすい。上向溶接では、表面張力で溶融池金属を保持してビードを形成しなければならない。溶融池が大きくなり過ぎると重力が表面張力より大きくなって溶融池金属の落下が生じる。溶込みは浅くビードはやや凸形で、裏波ビードは立向下進溶接と同様に凹形となりやすい。横向溶接では溶融池金属の上部が垂れ下がり、ビードの上端部が凹、下端部が凸のビード形状（ハンギングビード）となりやすいため、下向溶接のように大きい溶融池を形成することはできない。

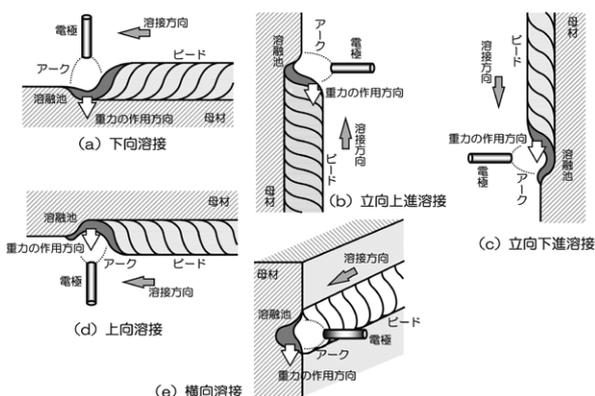


図 2.14 溶接姿勢の影響

なお下向き溶接であっても溶接線が傾斜している場合には、アーク力および重力の影響を受けて、図 2.15 に示すように、上り坂溶接では立向上進溶接に近い特性となつて凸ビードになりやすく、下り坂溶接では立向下進溶接に近い特性となつて溶融池の先行が生じやすくなる。

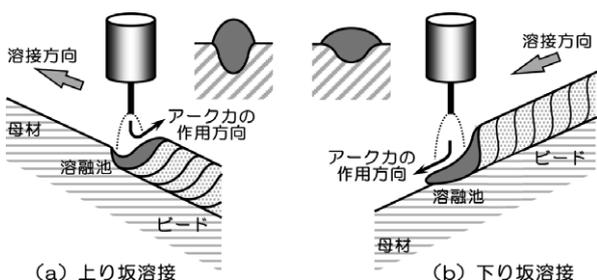


図 2.15 傾斜のある溶接

## 2.2.3 溶滴の移行形態

溶極式溶接では溶滴が電極先端部から離脱して溶融池へ移行するが、その形態は溶接法、溶接条件あるいはシールドガスの種類などによって異なる。例えば I IW（国際溶接学会）では、溶滴の移行形態をその大きさ、形状および形態によって図 2.16 のように分類している。

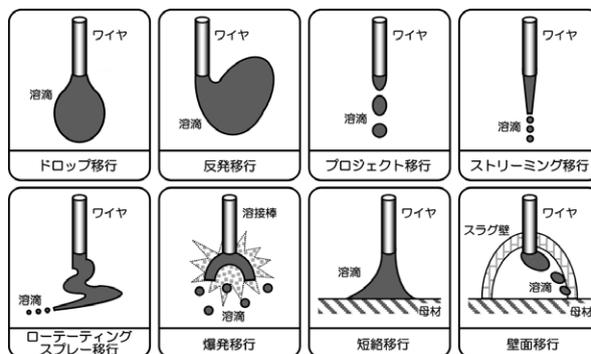


図 2.16 溶滴移行モードの I IW 分類

ドロップ移行はワイヤ径より大きい径の溶滴がワイヤ端から離脱する移行形態、反発移行は大塊となった溶滴がワイヤ方向へ押し上げられて不規則な挙動を呈しながらワイヤ端から離脱する移行形態であり、両者を包含してグローブール移行という。

プロジェクト移行はワイヤ径とほぼ等しい径の溶滴がワイヤ端から離脱する移行形態、ストリーミング移行は先鋭化したワイヤ端からワイヤ径より小さい径の溶滴が離脱する移行形態、そしてローテーティングスプレー移行は比較的長く伸びたワイヤ先端部の溶融金属が回転しながら小粒の溶滴を離脱する移行形態で、これらを包含してスプレー移行という。

また、爆発移行は内包されたガスが膨張して溶滴を破裂させる被覆アーク溶接で生じやすい移行形態、短絡移行は 1 秒間に数十回以上の短絡とアークを交互に繰り返す移行形態、壁面移行は溶融したフラックスで形成される空洞壁面に沿って移行するサブマージアーク溶接での移行形態の 1 つである。

溶極式ガスシールドアーク溶接でのアークおよび溶滴の挙動は、シールドガスの種類によって大きく異なる。その詳細については、後述する 3.6.2 項で述べる。

## 2.3 主なアーク溶接法の原理と特徴

### 2.3.1 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接は、図 2.17 に示すように、金属心線に被覆剤（フラックス）を塗布した被覆アーク溶接棒を電極としてアークを発生させる溶接法である。溶

接棒と被溶接材（母材）との間に発生させたアークは、その熱で溶接棒と母材を溶融する。溶接棒に塗布されたフラックスは、溶融されてガスを発生し、溶融金属を大気から保護する。また同時に溶融スラグを形成し、その溶融スラグは溶融金属との間で冶金反応を行うとともに凝固時のビード形状を整形する。

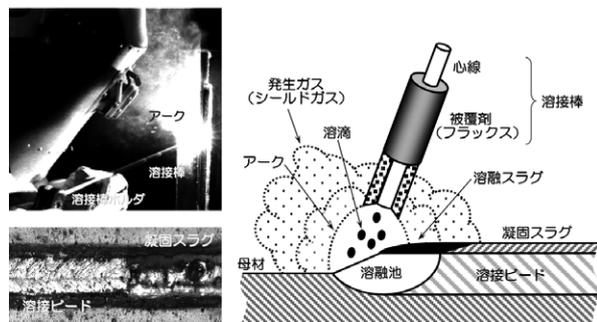


図 2.17 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接は簡便な溶接法で適用範囲も広いことから、炭素鋼や合金鋼などの鉄鋼材料を始めとして、ニッケル合金や銅合金などの非鉄金属材料の溶接にも広く適用されている。溶接は、一般に、溶接作業者が溶接棒ホルダを手動で運棒操作して溶接を行うが、傾斜したスライドバーに取り付けられた溶接棒ホルダが、溶接棒の溶融につれて自重で下降して自動溶接する“グラビティ溶接”と呼ばれる方法もある。

被覆アーク溶接には次のような長所がある。

- ①簡便な機器で信頼度の高い溶接が手軽に行える。
- ②溶接設備費は安価である。
- ③グラビティ溶接機などの簡易溶接装置を1人で数台使用すれば、溶接能率の向上が可能である。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接の出来栄が溶接作業者の技量によって大きく左右される。
- ②マグ溶接に比べ溶着速度が遅く、溶接能率が劣る。
- ③溶接棒交換による溶接の中断が多く、長尺の連続溶接ができない。

わが国での被覆アーク溶接の適用比率は、マグ溶接・ミグ溶接の普及に伴い減少している。

### 2.3.2 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接は、図 2.18 に示すように、散布した粒状フラックス中にワイヤを自動送給し、ワイヤと母材との間にアークを発生させて溶接する方法

である。すなわち、被覆アーク溶接棒の心線とフラックスを分離させて、自動溶接を可能にした溶接法といえる。ワイヤには、通常、直径 3.2~6.4mm 程度の太径ワイヤを用い、数百~千数百 A 程度の大電流を通電することによって、高溶着・高能率な溶接を行うことができ、溶込みの深い溶接ビードが得られる。

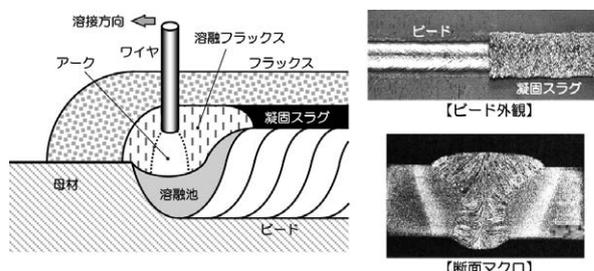


図 2.18 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接には次のような長所がある。

- ①太径ワイヤによる大電流溶接が可能で、溶着速度が極めて大きい。
- ②小断面開先で溶込みの深い溶接ができ、能率的である。
- ③アークはフラックス中で発生するため、アーク光に対する遮光は不要である。
- ④スパッタや溶接ヒューム（気化した金属が急冷却凝縮して生成する 0.1~数 μm の固体粒子）の発生が少ない。
- ⑤風の影響をほとんど受けない。
- ⑥作業者の技量によらず、安定したビード形状と均質な継手品質が得られる。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接姿勢は下向、水平および横向きに限られる。
- ②継手形状は直線またはそれに近い形状あるいは曲率の大きい曲線などに限定される。
- ③フラックスの供給・回収やスラグの剥離が必要となる。
- ④溶接入熱が過大になると、熱影響部の軟化やぜい化を生じることがある。

サブマージアーク溶接は 1950 年頃わが国に導入され、高能率な溶接法として、主に造船、橋梁、建築分野や大径鋼管の製造に適用されている。

### 2.3.3 ティグ (Tungsten Inert Gas) 溶接

ティグ溶接は、図 2.19 に示すように、高融点金属であるタングステンまたはタングステン合金を非溶極式電極として、母材との間にアークを発生させて溶接

する方法である。炭素鋼・低合金鋼・ステンレス鋼・ニッケル合金・銅合金・アルミニウム合金・チタン合金・マグネシウム合金など、ほとんどの金属に幅広く適用できる。また他の溶接法に比べ溶接金属の清浄度が高く、じん性・延性・耐食性に優れるなどの特長をもつ。

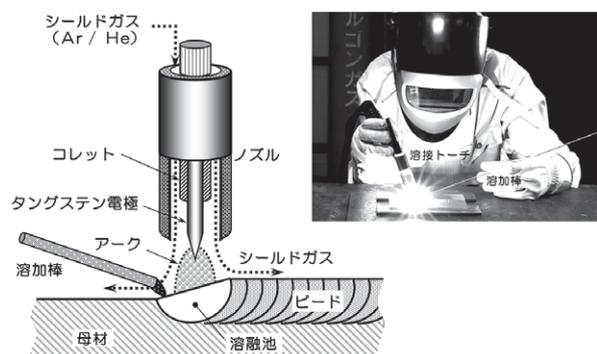


図 2.19 ティグ (TIG) 溶接

適用できるシールドガスは、Ar、HeまたはAr+Heなどの不活性ガスあるいはArとH<sub>2</sub>の混合ガスなどに限定され、酸化性ガス（活性ガス）は使用できない。タングステンは融点が三千数百℃の高融点金属であるが、酸化すると千数百℃程度まで融点（昇華点）が急激に低下するためである。

溶着金属が必要な場合には、溶加材（棒またはワイヤ）を別途添加しなければならない。しかしこのことは、溶接入熱と溶着量をそれぞれ独立に制御できることを意味し、全姿勢溶接や初層裏波溶接などを比較的容易に行うことができる。

ティグ溶接には次のような長所がある。

- ①酸化のない美しいビード外観および高品質・高性能の溶接継手が得られる。
- ②小電流から大電流までの広範囲な電流域で安定なアーク状態が得られる。
- ③母材への入熱と溶着量をそれぞれ独立に設定・制御でき、溶接姿勢や継手形状の制約が少ない。
- ④溶融池の挙動は穏やかで安定しているため、その挙動を明瞭に観察できる。
- ⑤溶接ヒュームの発生が少なく、作業環境が良好である。
- ⑥スパッタやスラグの発生はほとんどなく、溶接後の仕上げ作業が不要である。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接速度が一般に遅く、作業能率が劣る。
- ②溶込みは比較的浅く、深い溶込みが必要な溶接

には適さない。

- ③手動溶接での溶加棒添加が必要な場合、トーチ操作と溶加棒添加動作を左右それぞれの手で、個別に行わなければならない、作業者にはかなりの熟練と技量が要求される。
- ④風の影響を受けやすいため、状況に応じた防風対策が必要になる。
- ⑤アルゴンやタングステン電極は比較的高価で、溶接経費がやや高くなる。

### 2.3.4 マグ (Metal Active Gas)・ミグ (Metal Inert Gas) 溶接

マグ溶接およびミグ溶接は、図 2.20 に示すように、自動供給される細径ワイヤ（直径0.8～1.6mm程度）と母材との間にアークを発生させて溶接する方法である。ワイヤはアークを発生する電極としての役割を果たすとともに、それ自体が溶融して母材の溶融部とともに溶融池を形成する。アークと溶融池はシールドガスによって大気から保護される。

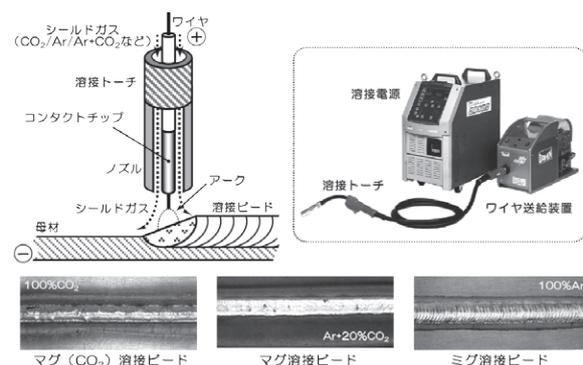


図 2.20 マグ・ミグ溶接

マグ溶接とミグ溶接はシールドガスの種類で区別され、CO<sub>2</sub>あるいはAr+CO<sub>2</sub>混合ガスなどの活性ガス（酸素を含む酸化性ガス）をシールドガスとして用いるものを“マグ溶接”、Arなどの不活性ガスをシールドガスとするものを“ミグ溶接”という。なおCO<sub>2</sub>のみをシールドガスに用いる溶接法は“炭酸ガスアーク溶接”と呼ばれ、マグ溶接とは区別されることもあるが、炭酸ガスアーク溶接はマグ溶接の一種である。またArに微量のO<sub>2</sub>またはCO<sub>2</sub>を添加した混合ガス（Ar+数%O<sub>2</sub>・Ar+数%CO<sub>2</sub>）を用いる場合、慣例的にミグ溶接として取り扱われることもあるが、これらのガスも活性ガスであるため、マグ溶接に分類される。

マグ溶接およびミグ溶接には次のような長所がある。

- ①細径ワイヤに比較的大電流を通電する高電流密度の溶接法であるため、溶着速度が速く、深い溶込みを得ることができる高能率な溶接法である。
- ②ワイヤが機械的に連続供給されるため、連続溶接が可能である。
- ③簡便な装置で半自動・自動溶接が行え、ロボット溶接にも適する。
- ④ソリッドワイヤを用いると、溶接金属中の拡散性水素量が少なく、低温割れ感受性が低い。
- ⑤アークや溶融池の状況を目視観察できる。
- ⑥溶接姿勢の制約を受けることが少なく、種々の溶接姿勢に適用できる。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①CO<sub>2</sub>のみをシールドガスに用いると、中・大電流域でのスパッタが多くなる。
- ②横風によるシールド性劣化があるため、屋外作業などでは防風対策が必要である。
- ③被覆アーク溶接に比べてトーチが重く長さの制約もあるため、作業範囲が制約される。
- ④アーク光の強度は被覆アーク溶接より強く、作業者に与える負荷が大きい。
- ⑤磁気吹き現象が生じやすく、アークが乱れる場合がある。

マグ溶接では、溶滴が短絡移行やグロービュール移行する条件で溶接を行うことが多く、ワイヤ先端に形成された溶滴が頻繁に溶融池へ短絡する。短絡を解放してアークを再生するためには大電流の通電が必要であり、ヒューズの溶断と同様に、その通電によって溶滴や溶融池金属の一部が周囲に飛散してスパッタとなる。スパッタは母材やトーチのノズルなどへ比較的強固に付着して作業性やビード外観を損ねるため、その抑制や低減がマグ溶接では重要な課題となる。

## 2.3.5 その他のアーク溶接

### (1) プラズマアーク溶接

プラズマアーク溶接は、ノズル電極による熱的ピンチ効果を利用して得られる細く絞られたプラズマアークを熱源とする溶接法である。その原理をティグ溶接と比較して図 2.21 に示す。プラズマアーク溶接では、ノズル電極に設けた直径 1~3mm 程度の小径穴を通して、タングステン電極と母材との間にアークを発生させる。一般に、プラズマアークを発生させるための作動（プラズマ）ガスには Ar を、溶融金属を大気から保護するシールドガスには Ar または Ar+H<sub>2</sub> の混合ガスを用いる。ティグアークは母材に向かって拡

がるベル形の形状を呈するが、プラズマアークは集中性が向上して拡がりが少ないくさび形の形状となる。

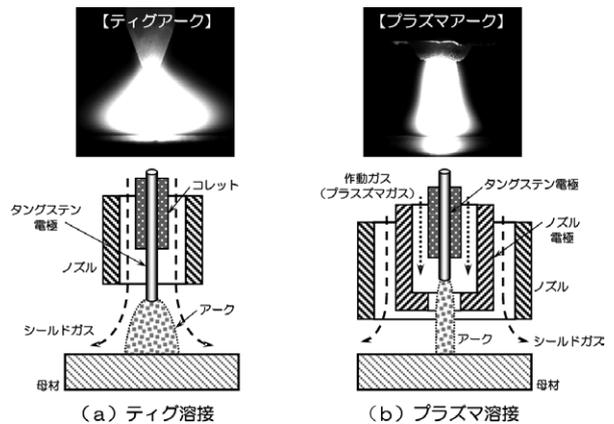


図 2.21 ティグ溶接とプラズマ溶接の比較

プラズマアークの発生方式には図 2.22 に示す 2 つの方式がある。(a) は“移行式プラズマ”と呼ばれ、タングステン電極とノズル電極との間に高周波高電圧で小電流のパイロットアークを起動し、このパイロットアークを介して、タングステン電極と母材との間にプラズマアークを発生させる。溶接では通常この移行式プラズマを用いる。(b) は“非移行式プラズマ”と呼ばれ、タングステン電極とノズル電極との間にプラズマアークを発生させる方式である。母材への通電が不要で、非導電材料への適用も可能であるが、熱効率が悪くノズル電極の熱負担も大きいため、溶接に用いることは少ない。表面改質などを行う溶射にはこの非移行式プラズマが用いられ、プラズマジェットと呼ばれることもある。

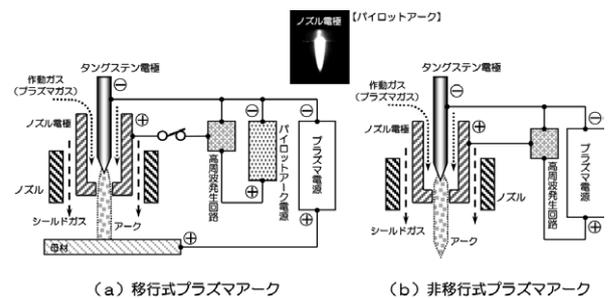


図 2.22 プラズマアークの発生機構

### (2) セルフシールドアーク溶接

セルフシールドアーク溶接は、図 2.23 に示すように、自動供給されるフラックス入りワイヤを電極として、シールドガスを流さずに大気中で自動または半自動溶接する方法である。ワイヤに内包されたフラックスはアーク熱で溶融され、ガスを発生してアークおよ

び溶融金属を大気から保護するとともに、溶融金属を強力に脱酸および脱窒する。

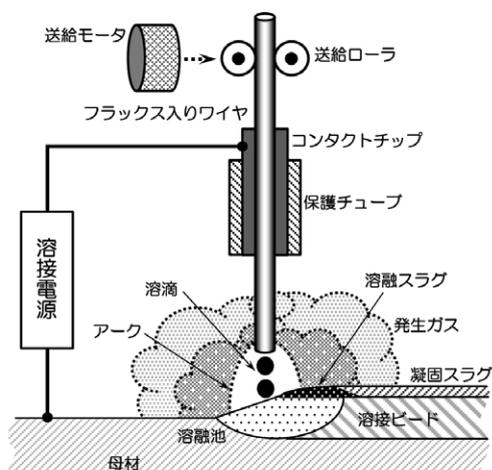


図 2.23 セルフシールドアーク溶接

シールドガスによる大気からの遮蔽がないため、ワイヤ先端に形成される溶滴は直接大気にさらされることが多く、大気中の酸素や窒素を多量に吸収しやすい。そのためフラックスには合金剤、アーク安定剤ならびにスラグ形成剤などの他に、大気の侵入軽減を目的としたガス発生剤、侵入した酸素や窒素を除去・固定するための脱酸および脱窒剤が含まれている。

セルフシールドアーク溶接には独特の施工要領があり、ワイヤ突出し長さは長め（30～50mm 程度）にし、アーク長は極力短くしてシールド性を十分確保する。また後戻りスタート法によってアーク起動部で発生しやすい溶接欠陥を再溶融するなどの操作も行う。

セルフシールドアーク溶接には次のような長所がある。

- ①シールドガスを必要としない。
- ②風の影響を受けにくい。
- ③トーチは軽量で操作性が良い。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接ヒュームの発生量が多い。
- ②溶込みが浅い。
- ③継手の機械的性質や耐気孔性は他の溶接法に比べて多少劣る。

セルフシールドアーク溶接は現場溶接作業に適した溶接法であるため、建築鉄骨、鉄塔、海洋構造物あるいは鋼管杭などの現地溶接に適用されている。

### (3) エレクトロガスアーク溶接

エレクトロガスアーク溶接は、立向姿勢で厚板を1パス溶接する高能率な自動ガスシールドアーク溶接で

ある。図 2.24 に示すように、溶接部の表裏面を水冷銅当て金で挟み、ワイヤと溶融池との間にアークを発生させ、トーチとは別系統でシールドガスを供給して溶接する。溶融池を銅当て金で保持して凝固させ、溶接の進行とともに銅当て金を移動させて溶接ビードを形成する。

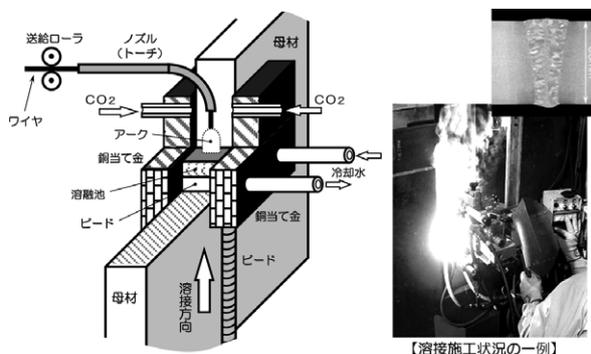


図 2.24 エレクトロガスアーク溶接

シールドガスには  $\text{CO}_2$  を用いることが多いが、場合によっては  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 、 $\text{Ar}+\text{O}_2$ 、 $\text{Ar}$  あるいは  $\text{Ar}+\text{He}$  も用いられる。溶接ワイヤには細径のフラックス入りワイヤまたはソリッドワイヤを用いるが、通常はスラグを形成して優れたビード外観が得られるフラックス入りワイヤを使用することが多い。溶接電源には直流定電圧特性電源が多用されているが、直流定電流（垂下）特性電源が用いられることもある。

エレクトロガスアーク溶接には次のような長所がある。

- ①大電流を使用するため溶着速度が大きく、高能率な溶接ができる。
  - ②1パス溶接施工が基本であり、角変形が小さい。
  - ③開先精度に対する裕度が比較的大きい。
- 一方、短所としては次のようなものがある。
- ①溶接姿勢は立向に限られる。
  - ②溶接入熱が大きく継手の軟化やぜい化を生じやすい。
  - ③溶接を中断すると修復に時間を要する。

エレクトロガスアーク溶接は1パス溶接が基本で、その適用板厚は通常 10～35mm 程度である。しかし、固定式の銅または固形フラックスを裏面の当て板に用い、電極（トーチ）揺動や2電極溶接を採用して、より厚板にも適用できる手法が開発され、船の側外板・貯槽タンク・圧力容器・橋梁などの立向突合せ継手の溶接に適用されている。

#### (4) アークスタッド溶接

アークスタッド溶接は、図 2.25 に示すように、ボルト、丸棒、鉄筋またはそれと同様な部品（スタッド）そのものを電極として、母材との間にアークを発生させ、電極としたスタッドを母材上に植えつけるようにして溶接する方法である。

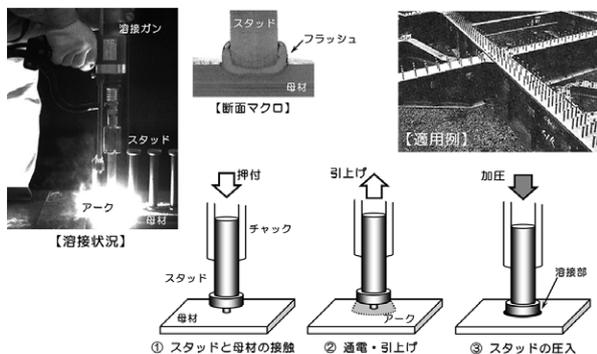


図 2.25 アークスタッド溶接

耐熱性磁器で外周部を覆われた補助材（フェルルールまたはカートリッジ）をスタッドの先端部に取り付け

た後、特殊な溶接ガン（スタッド溶接ガン）を使用して、スタッドと母材との間でアークを発生させる。アーク発生から所定の時間が経過して、スタッドの先端部が十分に加熱された状態になると、その先端部を電磁力やスプリング力などを利用して母材に押し付けて溶接部を形成する。

フェルールの内部にはシールド補助剤も兼ねる導電性物質が充填されており、これを介して通電することによってスタッドの端面全体にアークが発生する。その結果、溶接部はスタッドの全端面にわたって形成され、周辺部にはフラッシュと呼ばれるバリが発生する。

アークスタッド溶接は、建築鉄骨の梁や床板、橋梁の床板、海洋構造物など広範囲な産業分野で適用されている。なお、船舶の断熱材・防水材、車両のバンパー・計器・内装材あるいは配電盤・家電製品フレームなどで使用される細径の取付けボルトの溶接には、コンデンサ放電式（CD式）スタッド溶接が用いられ、このスタッド溶接の加熱方式はアークスタッド溶接とは異なる。

# 3 | アーク溶接プロセスの発展経過

1807年に英国のデービー（H. Davy）が2,000個のボルタ電池を用い、水銀を浸した木炭片を電極にして、電極間に放電火花を発生させる実験を公開で行った。電池容量の関係で放電の持続時間は極めて短いものであったが、弓形に曲がった放電光が発生し、この放電光を“Electric Arc（弧状の放電光）”と名付けた。これがアークの発見とされている。しかし、この頃の電源は容量の少ない電池のみであったため、持続時間の短いアークが利用されることはほとんどなかった。

1832年に発電機が発明され、大容量の電源が得られるようになると、アークはアーク灯として照明に利用されるようになり、1850年頃には灯台や街路灯に使用されるようになった。わが国でも1882（明治15）年に、初めてのアーク灯が銀座に設置されている。

その一方で、光としてではなく、アークの高温を利用した金属の溶解という発想が出現し、溶接への適用が検討され始めた。実験段階での溶接に成功したという話はいくつかあるようであるが、正式な記録として残されている最初の利用は、イギリスのベルデ（Welde）が1865年に取得した特許である。固定した電極間のアークに、金属棒を挿入して熔融金属を形成する方法が特許として認められた。

しかし、一般に、アーク溶接実用化の始まりは、ロシアのベナードス（N. V. Benerdos）とオルゼウスキー（S. Olszewski）による“炭素アーク溶接”の発明とされている。ホルダで挟んだ炭素棒を電極として母材との間にアークを発生させ、横から溶加材を添加しながらアークを移動する方法で、1885（明治18）年にその特許が成立している。その後、1890（明治23）年にロシアのスラビヤノフ（N. Slavyanov）が裸棒（棒状の単体金属棒）を電極として、消耗電極溶接法の元祖となる“金属アーク溶接法”を発明した。1907（明治40）年にはスウェーデンのチェルベルヒ（O. Kjellberg）が裸棒に被覆剤を塗布した被覆アーク溶接棒を発明した。これによって、アーク溶接が本当の意味で実用化されることとなった。現在のアーク溶接の主流であるガスシールドアーク溶接は、1926（大正15）年のウェバー（L. J. Weber）によるヘリウムシールド裸金属棒溶接法が起源である。

以来、アーク溶接技術は工業的に急速に浸透し、種々な産業分野で広く利用され、現在実用に供されているアーク溶接法の原型が19世紀から20世紀にかけ

て続々と開発された（前述図1.1参照）。ここでは各アーク溶接法について、その溶接プロセスの発展経過を述べる。

## 3.1 開発初期のアーク溶接

ベナードスとオルゼウスキーが発明した“炭素アーク溶接”は、図3.1に示すようである。今日の被覆アーク溶接で使用されているものと同様の絶縁されたホルダに炭素棒を挟み、それを電極として母材との間に電池を電源としたアークを発生させる。そして横から溶加材を挿入しながら、ホルダを移動させて溶接を行う。この溶接方法は1885年にベルギー、英国、ドイツおよびスウェーデンで、1886年にはロシアで、1887年には米国で特許を取得している。

ベナードスはキエフ大学で教育を受け、生涯で200件近くの特許・実用新案を出願し、アーク溶接の実用化で表彰されている。しかし当時は鉛を溶接することが多かったためか、鉛中毒で死亡している。なお共同発明者のオルゼウスキーについては、明らかな経歴が残されていない。

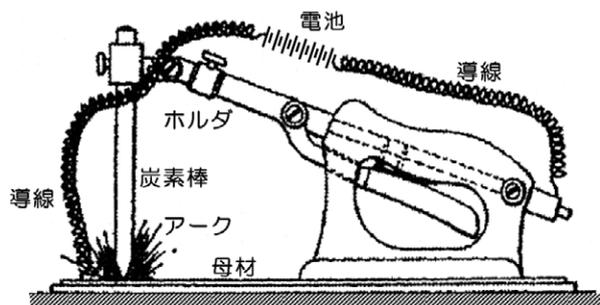


図3.1 炭素アーク溶接<sup>1)</sup>

この炭素アーク溶接では、ツェルナー（C. Zenerer）の発明した図3.2に示すような装置を用いた溶接（インダイレクトアーク溶接）も行われていたようである。この溶接装置では、2本の炭素棒電極間に発生させたアークを、電磁石の作用で母材方向に偏向させる。そしてスタンドにつり下げた装置全体を、足踏み調整で母材に接近させるなどの方法で溶接を行う。炭素アーク溶接には、電極から炭素が侵入して溶接継ぎ手部の硬化やぜい化を生じるといった問題があった。そのため、アークを母材へ直接発生させずに、偏向させたアークの一部で母材を熔融して、炭素

による硬化を防ぐように工夫したようである。<sup>1)</sup>

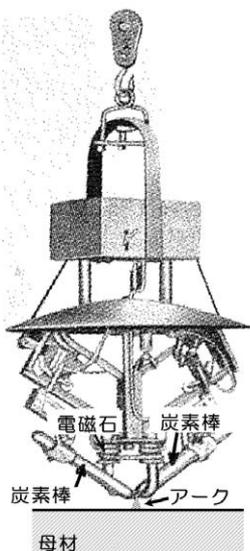


図 3.2 インダイレクトアーク溶接装置<sup>1)</sup>

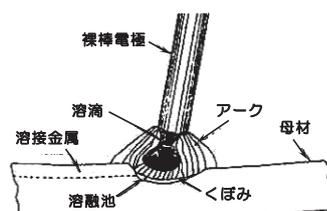
わが国に炭素アーク溶接が導入されたのは1904(明治37)年で、三菱合資会社三菱造船所(長崎)が英国のパーソン・マリン・スチーム社からタービンエンジンの製造権を買い取り、鑄造設備一式を輸入した際に、鑄造品の巢埋め用具として入っていた。また、鑄造で水道鉄管を量産していた東京小石川の陸軍造兵廠東京工廠が、多発する鑄巣対策として炭素アーク溶接機を輸入し、鑄鋼品の補修に使用し始めている。しかし、この日時は明確でなく、1906(明治39)年頃となっている。当時はガス溶接がすでに導入されていたため、炭素アーク溶接の適用は、ガス溶接の適用が困難であった厚物の補修作業が主な対象であったのではないと思われる。炭素アーク溶接状況の一例を図3.3に示す。<sup>2)</sup>



図 3.3 炭素アーク溶接例<sup>3)</sup>

上述した炭素電極による溶接継手部の硬化・ぜい化の抑制を目的として開発された手法が、溶極式(消耗電極式)溶接法の元祖とされている、スラビアノフが

発明した“金属アーク溶接”である。金属アーク溶接は、図3.4に示すように、炭素棒の代わりに溶着金属となる裸棒(棒状の単体金属棒)をホルダで保持し、これを電極として母材との間にアークを発生させる溶接法である。金属アーク溶接法は、1890(明治23)年にフランス、英国およびドイツで、1891年にロシアで、1897年には米国で特許が成立している。なおスラビアノフとは別に、1889年に米国のコフィン(C. A. Coffin:後のゼネラル・エレクトリック社社長)が独自の米国特許を取得していたとの話もある。<sup>1)</sup>



(a) 金属アーク溶接プロセス



(b) 溶接用ホルダ

図 3.4 金属アーク溶接<sup>2) 4)</sup>

金属アーク溶接では、図3.5のように、長さ500mm程度の直線棒を電極として用いる手溶接が一般的であった。溶接ビードは直接大気にさらされるため、外観は美麗といえず、スパッタの付着も多かった。



図 3.5 金属アーク溶接例<sup>3)</sup>

1925(大正14)年頃になると、図3.6に示すような金属アーク溶接の半自動溶接装置が開発されている。コイル状に丸めた裸棒ワイヤを、電氣的または機械的に定速送給してアークを連続的に発生させながら、台

車に取り付けた車輪を利用し、アークの発生点を手で移動させて溶接を行ったようである。

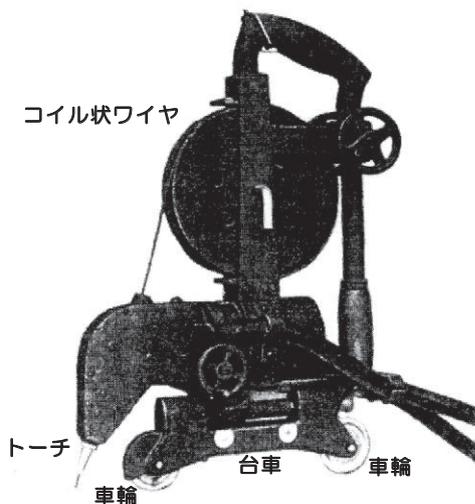


図 3.6 金属アークの半自動溶接機<sup>2)</sup>

わが国における金属アーク溶接の適用に関する記述・記録はほとんど見当たらず、大正初期は炭素アーク溶接が主流であったことから判断すると、金属アーク溶接の適用は昭和初期頃からはないと推測される。この頃になると後述する被覆アーク溶接棒も出現するが、その価格は裸棒の数倍であったため、1935（昭和10）年頃までは金属アーク溶接が使用されていたようである。1925（大正14）年の溶接専門誌には、図3.7に示すような広告が掲載されている。

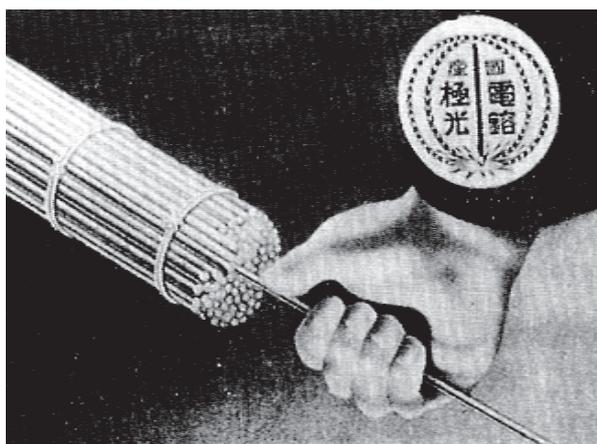


図 3.7 金属アーク溶接用裸棒の広告（1925（大正14）年）<sup>3)</sup>

半自動金属アーク溶接についての資料はほとんど残されていないが、1932（昭和7）年に撮影された横須賀海軍工廠での航空母艦「龍驤」甲板での溶接作業には、輸入機と思われる半自動溶接装置が写っている。この例から判断すると、ごく一部では半自動の金

属アーク溶接も行われていたと推察される。<sup>2)</sup>

## 3.2 被覆アーク溶接

### 3.2.1 被覆アーク溶接棒の開発

金属アーク溶接は、炭素アーク溶接に替わる溶接法としてしばらくの間一般化した。この溶接法の問題点は溶接継手の信頼性に欠けることであった。大気による溶融金属の酸化・窒化に起因した溶接継手のぜい化がその大きい要因である。

このような問題点を解決したのがチェルベルヒであり、1907年に「溶接熱で加熱された対象物から溶接継手の化学的・機械的性能を著しく劣化させる酸素を除去する」とした特許が登録された。また1910年には、裸棒の表面に珪砂や炭酸カルシウムなどの被覆剤を塗布した被覆アーク溶接棒を開発した。すなわち被覆剤の溶融によって生じるガスで溶融金属を被包し、大気中からの酸素や窒素の溶接金属への混入を防いだ。これが被覆アーク溶接の始まりであるが、被覆剤はフラックスの塗布によって形成されていたため、溶接棒の被覆は薄く、アークは不安定で清浄な溶接金属を得ることはかなり困難であった。そのため金属アーク溶接と溶接結果にそれほど大きい差異はなく、溶接棒の価格も高価であったため、開発当初の被覆アーク溶接はほとんど普及しなかった。

その後、被覆剤として塗布するフラックスとアーク安定剤に関する種々な研究・開発が行われ、1912（大正1）年に英国のストロメンジャー（Strohmenger）社が、チェルベルヒとは原理の異なる被覆アーク溶接棒を開発・実用化し、米国で特許を取得した。この溶接棒は裸棒の表面にアスベストを巻き付けたもので、アーク熱によって溶融・蒸発した被覆剤（アスベスト）は溶融スラグを生成して、溶融金属を大気から保護する。

前述したチェルベルヒの溶接棒はフラックスを塗布して被覆を形成するため“Coated electrode”と呼ばれ、上記ストロメンジャーの溶接棒はアスベストを巻き付けて被覆を形成するため“Covered electrode”と呼ばれる。なおストロメンジャーの溶接棒を使用し発生させたアークは、裸棒を用いて発生させたアークとは多少感じが異なっていたため、疑似アークという意味で“クアシアーク（Quasi-Arc）”と呼ばれた。

第1次世界大戦（1914（大正3）年～1918（大正7）年）が勃発すると、溶接は船舶・鉄道などのあらゆる産業分野で補修用として多用されるようになった。米国では、ドイツ潜水艦による船舶への攻撃の影響を受

けて、英国からのクアシアーク溶接棒の輸入が途絶えた。そのため独自の溶接棒開発が必須となり、1918（大正7）年に米国のスミス（Smith）社が、裸棒に紙テープを巻き付けた後に薬品を塗布したセルロース系溶接棒の原型となる被覆アーク溶接棒を開発した。この溶接棒は非常に優れた性能を持ち、溶接継手で20%もの伸びが得られたため、種々な分野での適用・実用化が進んだ。

わが国に被覆アーク溶接が導入されたのは、造船関連2社の欧州からの技術導入によってである。両社ともに視察旅行の主目的ではなかったが、事前に溶接技術についての相当な調査をしていたものと思われる。その1社は現在の三菱重工業長崎造船所で、スウェーデンのチェルベルヒ社（後のエサプ：ESAB社）から1914年（大正3年）に特許権を購入し、被覆アーク溶接棒の製造法や使用方法を習得するために3名の技師をスウェーデンに派遣した。そしてその翌年には、輸入した直流多人数型溶接機を使って、鋳鋼品の補修（巣埋め）作業を始めている。被覆アーク溶接棒の製法は造船所内でも極秘事項とされ、担当技師が毎日の消費分だけ調合した被覆剤を、女子工員が裸棒に塗布していたようである。被覆剤の主成分は石灰、ホウ酸、二酸化マンガンおよび重炭酸ソーダであったが、この配合が公開されたのは戦後のことである。図3.8に溶接作業の一例を示す。カンカン帽をかぶり、ハンドシールドは木製である。

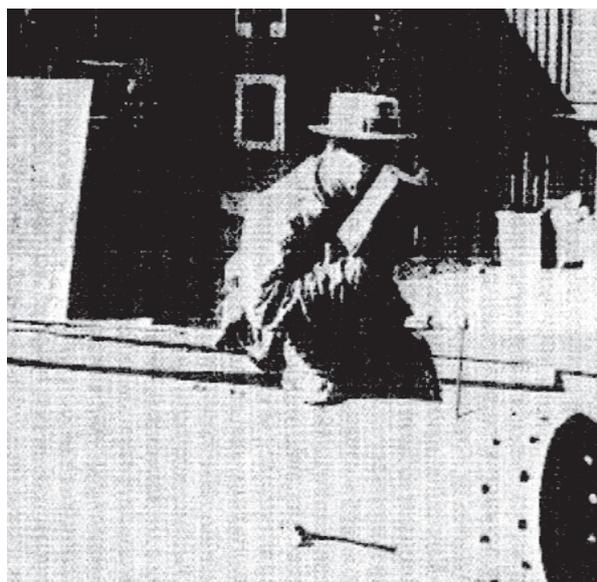


図3.8 アーク溶接状況（1920（大正9）年）<sup>3)</sup>

もう1社は日本製鎖であり、1918（大正7）年に英国のクアシィ社からアーク溶接装置の製造販売権を購入した。この時の被覆アーク棒は薬品をしみ込ませた

アスベストを裸棒に巻き付ける方式のもので、当時英国と米国で多用されていたものである。導入後、日本製鎖は被覆棒の販売と並行して、出張工事をする溶接請負業としても活動していたが、程なく経営上の問題で溶接事業からは撤退している。

米国やドイツなどからの輸入被覆アーク棒は高価であったが、大正期後半にはその需要も増大した。特に1928（昭和3）年から輸入されたベルギー・アーク社のスタビレンド棒は、国産品の20倍といわれるほど高価であったにも拘わらず、当時の陸・海軍工廠では作業性と継手性能を高く評価し、採用していた。

これに対し国産の被覆アーク棒専業メーカーも、軟鋼用で角丸工業、鋳物用で新宮鉄工所などが1925（大正14）年頃から製造を始め、1945（昭和20）年頃には製造メーカーの数は推定で80社程度にまで達していたようである。しかしそのほとんどは零細企業で、裸棒を独自に調合した被覆剤の液に浸した後、それを持ち上げて天日乾燥させることによって溶接棒を製造していた。また一部では紙巻棒も製造されていたようであり、提灯用として知られている厚手の水戸・西の内紙を使用すると、ガスの発生が多く使いやすかった話が残っている。図3.9は当時の被覆材塗布状況を示したもので、(a)は溶剤への1本ごとの浸漬、(b)は溶剤への多本同時浸漬、(c)は溶剤を浸み込ませた紙の巻付けである。

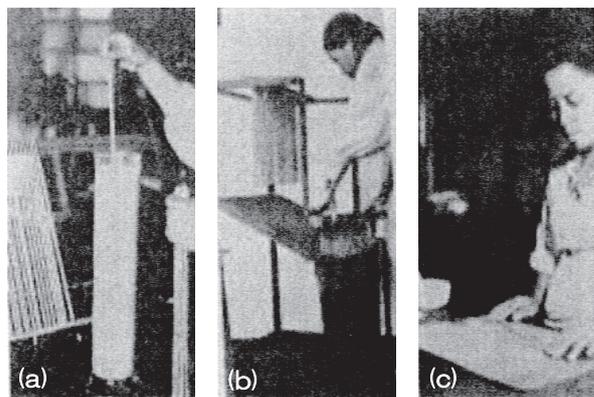


図3.9 被覆材の塗布方法（1937（昭和12）年）<sup>3)</sup>

その他、造船所などの大工場の一部では、自前の被覆棒製造場を持っていたところもあった。しかし第2次大戦後（1945（昭和20）年以降）になると、機械塗装の普及や溶接棒の種別と系統の整備が進み、1952（昭和27）年頃には大工場の自前で製造は姿を消し、全て専業メーカーからの購入に切り替わった。そして、溶接棒メーカーとしての規模が安定してくると、大手製鋼所の系列下での製造販売が増え、今日に至ってい

る。これらの詳細については、後述する第5章5.1節で述べる。

### 3.2.2 グラビティ溶接（重力式溶接）

被覆アーク溶接の普及に伴い、各造船所では溶接の高速化・高能率化についての検討が実施され、心線の直径が8~12mmの大径溶接棒の適用と、これに使用する半自動溶接装置に重点を置いた開発が行われた。この溶接法の特長は、溶接速度が速く熟練を必要としないことであり、各造船所で広く採用された。しかし、このような大径棒は溶接用として特別に製作されたものがなかったため、間に合わせとしてリベット・バーの細いものが流用された。リベット・バーが不足すると、鋼板を圧延機で伸ばして大径棒を作り、それを溶接棒として使用した工場もあったようである。また大径棒の不足を補うために、通常の溶接に用いられていた直径3mm、4mm、5mmなどの細径棒を2本合体させて1本とし、双子棒・親子棒などと称して大径棒の代わりに用いる方法も考案されている。細径棒を2本合体させて1.5倍の溶接電流で溶接した場合のビード外観の一例を図3.10の上段に、下段に通常の溶接ビード外観を示す。

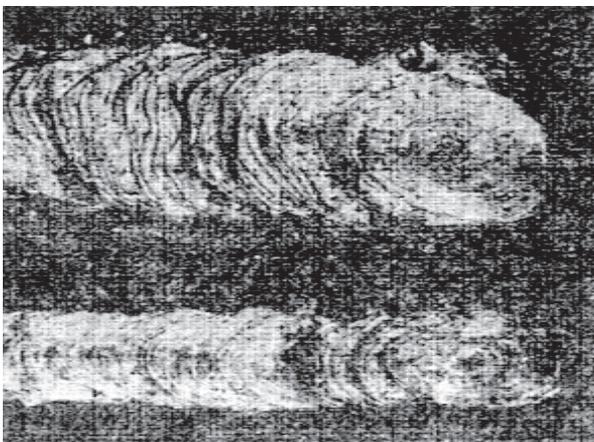


図3.10 ビード外観の比較<sup>3)</sup>

大径溶接棒を用いた溶接の普及に伴って、大径溶接棒を手で保持する代わりに、機械的に溶接棒を支えて自動溶接する溶接法が種々考案され、呉船式（呉海軍工廠）、横船式（三菱横浜造船所）など今日のグラビティ溶接の原型が作られた。図3.11は呉船式溶接装置の原理を示したもので、垂直柱にピンで留められたホルダに被覆棒を挟み、アークを発生させると溶接棒は先端部から溶融して溶接棒は次第に短くなる。アークによって溶融された溶接棒の長さに応じてホルダが自重で自動的に落下するため、制御装置もモータも使

わなで連続した溶接が自動的に行える。

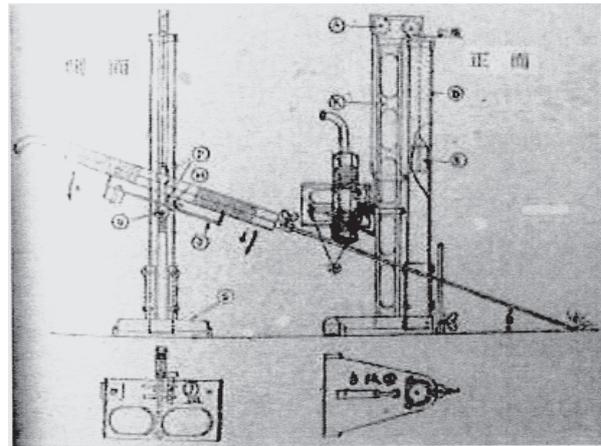


図3.11 呉船式溶接装置<sup>3)</sup>

横船式溶接装置は、図3.12に示すように、ホルダを一点で固定して、ばねの力で溶接棒の先端を母材に押し付け、溶接棒の溶融によって溶接棒が短くなると、ホルダの角度が変化して溶接を継続する。図3.13は横船式装置による大径棒溶接の一例を示したものであり、直径13mm×長さ1mの大径溶接棒を使用した溶接の状況である。

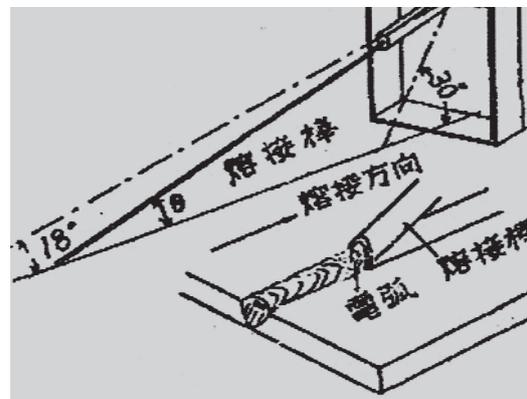


図3.12 横船式溶接装置<sup>3)</sup>

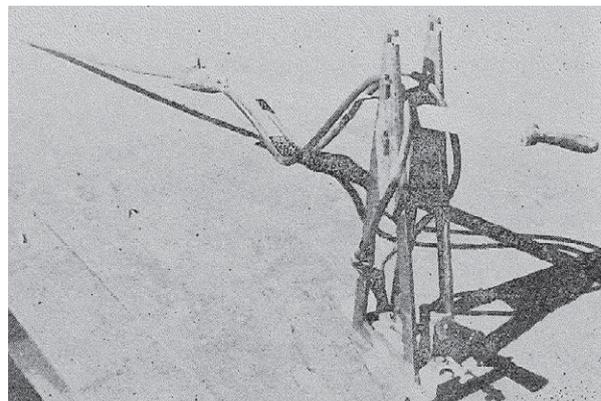


図3.13 横船式溶接装置による大径棒溶接<sup>5)</sup>

この間、わが国経済は1950（昭和25）年に勃発した朝鮮事変による特需や1960年代初頭の国民所得倍増計画などにより高度成長の道を突き進んでゆく。その中で大量生産大量消費の機運が高まり、橋梁・高層ビル・発電設備などの大型構造物が次々と製作され、重厚大型産業がわが国の経済をけん引した。例えば造船分野では、スケールによる経済効果を追求して船体構造はますます巨大化した。1948（昭和23）年に戦後初めての全溶接小型タンカー「新和丸：1,200総トン」を建造した後、1962（昭和37）年には当時世界最大の13万トンタンカー「日章丸」を、1966（昭和41）年には20万トンタンカー「出光丸」を、1971（昭和46）年には37万トンタンカー「日石丸」を、そして1975（昭和50）年には48万トンタンカー「日精丸」を建造した。

このような構造物の大型化に伴って溶接の高速化・効率化が強く求められるようになり、手動操作の被覆アーク溶接が主流であった昭和41年頃に、呉船式溶接装置を改良した“重力溶接装置”が開発・実用化された。図3.14に示すように、溶接装置には傾斜させた溶接ホルダのスライドバーと2本の支柱を組み合わせた、安定性の良い三脚方式が採用された。この溶接装置は、1957（昭和32）年から、米国NBC社（National Bulk Carriers Co.:旧日本海軍呉工廠の造船設備を運営していた世界的な海運会社）の管理下にあった呉造船部で多用され、わが国の造船分野全体での適用が急速に拡大した。重力溶接の普及拡大に伴い、1959（昭和34）年には水平すみ肉専用長尺溶接棒も開発された。この溶接棒は、棒長を従来の約2倍の900mmとすることによって溶接棒交換の頻度を少なくし、溶接作業能率の向上を図ったものである。<sup>5)</sup>

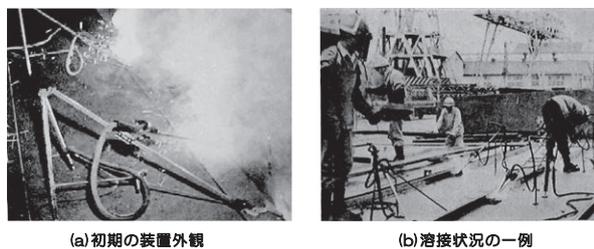


図 3.14 グラビティ溶接<sup>3)</sup>

重力溶接では、図3.15に示すように、傾斜したスライドバーに取り付けられた溶接棒ホルダが、溶接棒の溶融につれて自重で自動的に下降して溶接を継続する。また、溶接棒ホルダの取付け角度は任意に調整することができるため、スライドバーと溶接棒の

角度を大きくすると ( $\theta_1$ )、1本の溶接棒で溶接する距離が長くなって単位長さあたりの溶着量は少なくなる。反対に、その角度を小さくすると ( $\theta_2$ )、1本の溶接棒で溶接する距離が短くなって単位長さあたりの溶着量は多くなる。

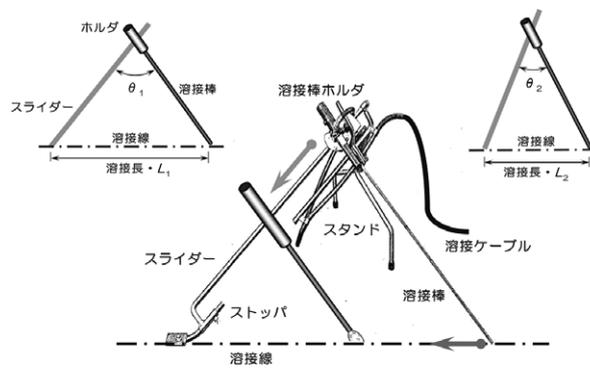


図 3.15 グラビティ溶接の原理

重力溶接に少し遅れて、横船式溶接装置を改良した低角度溶接装置も開発されている。この溶接装置は、図3.16に示すように、ばねを使って溶接棒を溶接線に押し付けるようにしたものである。重力溶接装置に比べて場所を取らないこと、狭隘な場所にも適用できること、装置の移動が便利なことなどが特徴である。しかし溶接棒の角度は一定で変更できないため、運棒比（溶接棒長に対する溶接長の比率）はほぼ1:1で、その比率を変えることはできない。重力溶接装置と低角度溶接装置の特徴比較を表3.1に示す。

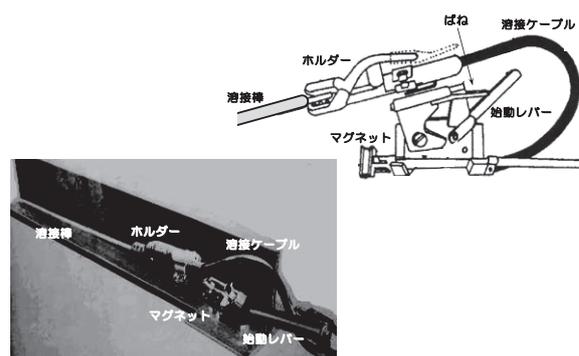
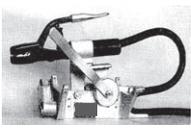


図 3.16 低角度溶接機<sup>3)</sup>

重力溶接装置や低角度溶接装置によるすみ肉溶接の高能率化は、昭和40年代の大型船舶の短工期・大量建造の切り札とされた。外板と骨材で構成される平板パネルの溶接に重力溶接装置を一度に数十台投入し、図3.17に示すように、パネルの水平すみ肉溶接を一斉に消化する工法が広く用いられた。1人で何台の重力溶接装置を操作できるか、1

表 3.1 溶接装置の比較

		グラビティ溶接	低角度溶接
溶接装置	外観		
	形状	やや大型	比較的小型
	質量	約 8.0kg	約 4.5kg
適用性	作業スペース	約 1m <sup>2</sup> のスペースが必要	狭い場所への適用も可能
	選棒比	1 : 1.5 まで可能	ほぼ 1 : 1
溶接作業性		装置の取扱いはやや複雑であるが、選棒比は変更可能。	装置の取扱いは比較的簡単であるが、選棒比の変更は不可。

人で何ヶ所同時にアークを出せるかが競われた。これらの自動溶接法はわが国造船界の生産性向上に大きく貢献し、1974（昭和 49）年の第 1 次石油ショックまで溶接技術の主流として急速に増え続けた<sup>4)</sup>。しかし近年では、マグ溶接の普及・拡大に伴って、これらの適用は大きく減少している。



図 3.17 造船におけるグラビティ溶接<sup>6)</sup>

### 3.2.3 エンクローズ溶接

エンクローズ溶接は、図 3.18 に示すように、レールに一定の間隔（約 17mm）を設けて I 型開先の状態に突き合せた後、低水素系被覆アーク溶接棒を用いて下向姿勢で手動溶接する方法である。溶接施工はレール足部の初層裏波溶接および多層溶接工程、レール柱部から頭部への連続溶接工程およびレール頭頂部の多層溶接工程の 3 つの工程で構成される。レール足部の溶接は底部銅当金のみを使用した通常の溶接であるが、レール柱部から頭頂部にかけての溶接は、銅当金で取り囲まれたレール端面の狭い空間での溶接となることからエンクローズ溶接と呼ばれている<sup>7)</sup>。

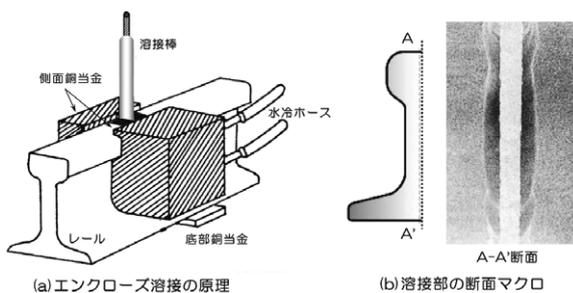


図 3.18 鉄道レールのエンクローズ溶接<sup>7)</sup>

この溶接では溶接施工時にレールを加圧・圧縮する必要がないため、レールを軌道上に敷設した状態での溶接が可能であるが、作業には高い技能が要求される。しかし、溶接によって生じる長さの変化は極めて少なく、機材が簡便で機動性に優れている。

被覆アーク溶接によるエンクローズ溶接は、1950 年代後半にオランダで鉄道用レールおよび太径丸棒を対象として開発され、わが国では 1963（昭和 38）年から東海道新幹線レールの現場溶接に使用された。東海道新幹線の建設は 1959（昭和 34）年 4 月 20 日に着工し、東京オリンピック開会直前の 1964（昭和 39）年 10 月 1 日に開業した。これに使用された長尺レールの接合では、継目 8 万ヶ所のうち、5 万ヶ所がガス圧接で、1.5 万ヶ所がテルミット溶接で施工され、エンクローズ溶接は途中から新たに加えられた。鉄道レールのエンクローズ溶接の一例を図 3.19 に示す<sup>8)</sup>。またエンクローズ溶接は、図 3.20 に示すように、異形鉄筋の溶接にも適用されている<sup>9)</sup>。

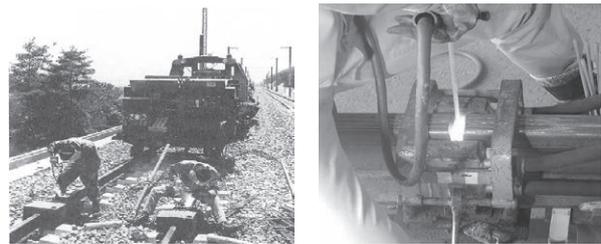


図 3.19 エンクローズ溶接による鉄道レールの溶接<sup>7)</sup>

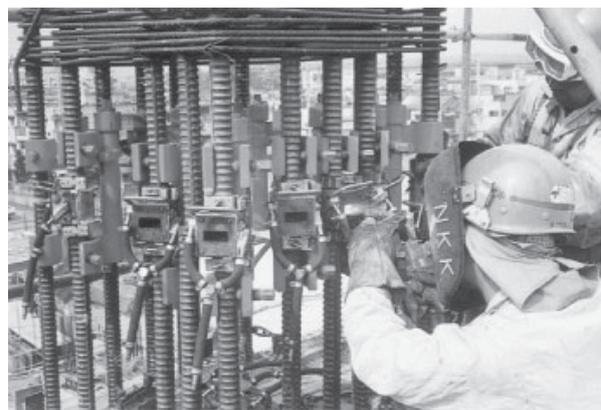


図 3.20 異形鉄筋のエンクローズ溶接<sup>9)</sup>

しかし近年では、被覆アーク溶接に代わり、連続送給可能な溶接ワイヤを使用して炭酸ガス雰囲気中で溶接を行うマグ溶接によるエンクローズ溶接が多用されるようになってきている。マグ溶接を用いると、普通レールの場合、1 継手の溶接にかかる時間は約 30 分に短縮され、被覆アーク溶接の場合の約半分となる。

### 3.3 サブマージアーク溶接

#### 3.3.1 黎明期の自動アーク溶接

アーク溶接作業を自動化しようとする試みは古くからなされていた。1930年代の初めには、裸の電極ワイヤを電動の送給装置で送給する方式の自動アーク溶接機が製作されている。しかし、前述したように、これにはアーク近傍の溶融金属を大気の影響から防護するための配慮がなされていなかったため、満足できる溶接金属の性能は得られなかった。そのため、被覆剤を塗布した長尺の溶接ワイヤ（電極ワイヤ）を、自動溶接機に用いようとする研究が活発になされた。被覆剤は電気の絶縁物であるため、これを避けていかに溶接ワイヤに給電するかが最大の問題点で、その解決のために、次のような方式が考案された。

- (1) ヒューズアーク溶接法：英国フューザーク社が開発した溶接法で、溶接ワイヤの外周に細線をスパイラル状に巻き付け、細線の隙間に被覆剤を塗り込めて、ワイヤ外周の細線から給電してアークを発生させる溶接法。（図 3.21）

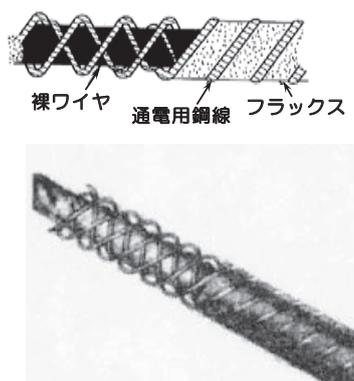


図 3.21 ヒューズアーク溶接ワイヤ<sup>9)</sup>

- (2) カバーチェーン溶接法：裸ワイヤ（ソリッドワイヤ）を用い、通電（給電）点通過後、鎖状に連結した半円筒状の被覆剤細片を両側から溶接ワイヤを覆うように押し付けてアークを発生させる溶接法。（図 3.22）
- (3) スリッティングヘッド溶接法：フラックスを塗布したワイヤ（被覆ワイヤ）のフラックスを、被覆カッターで部分的に除去し、この部分から通電してアークを発生させる溶接法。（図 3.23）
- (4) トルネード溶接法：米国リンカーン社が開発した溶接法で、炭素棒で発生させたアークを磁力で母材に集中させ、紙に薬品を浸み込ませたオートゲナイザを供給し、オートゲナイザから

発生するガスで溶融金属を保護する溶接法。（図 3.24）

これらの溶接法は、1931（昭和 6）年にはわが国にも輸入されているが、良好な溶接部は熟練溶接工、上記自動溶接、未熟練溶接工の順という評価であっ

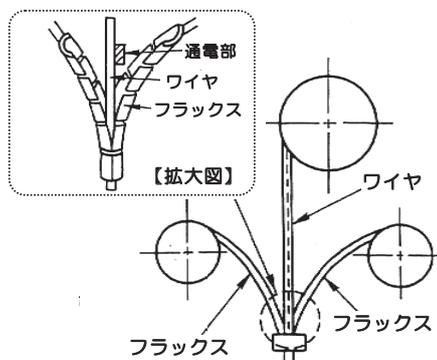


図 3.22 カバーチェーン溶接<sup>1)</sup>

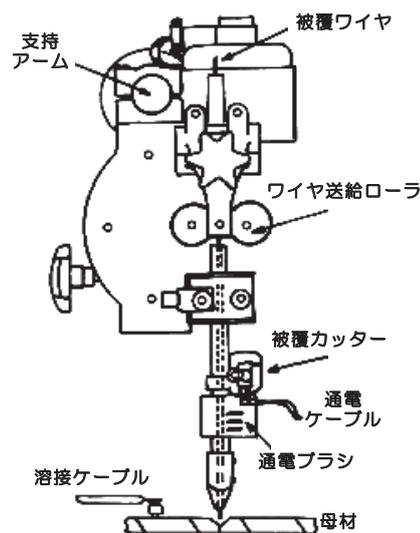


図 3.23 スリッティングヘッド溶接機<sup>1)</sup>

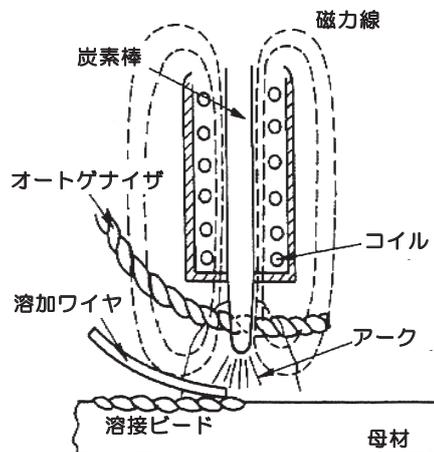


図 3.24 トルネード溶接法<sup>1)</sup>

た<sup>1)</sup>。海外でも、構造が複雑で操作も煩雑なことから広く普及するには至らず、一部の用途に採用されるに止まった。そして、後述するサブマージアーク溶接法が出現すると、これらの溶接法はほとんど姿を消すこととなった。

### 3.3.2 サブマージアーク溶接の開発と普及

米国のケネディ (H. E. Kennedy) は、1935 (昭和 10) 年に、母材上に散布した砂状のフラックス中に通電した裸の溶接ワイヤを送給して、フラックス中でアークを発生させることによって、電流の給電と大気からの保護という 2 つの問題点を同時に解決したサブマージアーク (潜弧) 溶接を開発した。ケネディはウェスタンパイプ & スチール社との共同研究でサブマージアーク溶接法を発明したが、同社はこの溶接法の価値を認めなかったため、改めてリンデ (Linde) 社と契約している。リンデ社の親会社はユニオンカーバイト & カーボン社であったため、リンデ社はサブマージアーク溶接機を“ユニオンメルト”の商標で市販を開始した。また同社の販売権を持っていたドイツのリンデ・アイスマシーネン社は、この溶接法をエリラ溶接と名付けて市販した。ユニオンメルトのフラックスは熔融型であったため、米国のリンカーン社はボンド型のフラックスを開発して“リンカーンウェルド”と名付けた。しかしリンカーン社は、ユニオンカーバイト & カーボン社との特許裁判で敗訴している。

ケネディの特許では、サブマージアーク溶接は溶けたスラグの抵抗発熱によって溶接を行う抵抗溶接であるとしていたが、その後この溶接法ではアークが発生していることが明らかにされ、アーク溶接の代表的な溶接法の 1 つとなっている。

翌 1936 (昭和 11) 年には、18,500 トンの大型タンカー建造にサブマージアーク溶接法が全面的に採用され、全溶接船“J・W・バン・ダイク号”の完成が溶接関係者を驚かせた。また太平洋戦争が始まると、米国は大量の輸送船を必要としたが、サブマージアーク溶接はこの要求に応える大活躍をした。この溶接法は下向姿勢の突合せ溶接とすみ肉溶接にしか適用できないため、船の建造方法は大きく変化し、下向溶接だけで船の建造が可能なブロック建造法が採用されることとなった。戦争中には、5,000 トン級のリバティ型およびビクトリア型の戦時標準船や T-2 タンカーが、この溶接法を用いて約 5,000 隻も建造されている。

わが国では、戦後の 1950 (昭和 25) 年に、ヒューズアーク溶接機 1 台とともに、ユニオンメルト溶接機 9 台の輸入が初めて許可されている。また、大阪変圧

器 (現ダイヘン) はリンデ社と技術提携し、1952 (昭和 27) 年にユニオンメルト溶接機を国産化した。同社は、海軍艦政本部からの要請を受けて、1943 (昭和 18) 年からサブマージアーク溶接の研究を続けていた。そして 1949 (昭和 24) 年に、図 3.25 に示すサブマージアーク溶接機の試作品 (SW-1) を完成させた。ところが、ユニオンカーバイト & カーボン社がわが国に出願したサブマージアーク溶接法に関する広範囲な基本特許 (特許 119705 号) が 1943 (昭和 18) 年に成立し、戦時中の一時中断の後 1949 (昭和 24) 年に復活して、それ以降の 10 年間有効であることが判明した。そこで同社は、ユニオンメルト溶接機、フラックスおよびワイヤの日本総代理店契約をユニオンカーバイト & カーボン社と結び、その後の技術導入を目指した。サブマージアーク溶接 (ユニオンメルト) の技術導入に関しては多数の競争者があったようであるが、独自に開発したサブマージアーク溶接機の技術レベルと実績が評価され、1951 (昭和 26) 年にユニオンカーバイト & カーボン社と同社の間で技術援助契約が成立した。この契約に基づき、1952 (昭和 27) 年に、図 3.26 に示す国産初のサブマージアーク溶接機 (SW-3 および SW-3A) が市販されるようになった。なお、サブマージアーク溶接用ワイヤが国産化されるのは 1955 (昭和 30) 年から、国産フラックスが市販されるのは 1960 (昭和 35) 年以降になってからである。これらのワイヤとフラックスについての詳細は、後述する第 5 章 5.2 節で述べる。

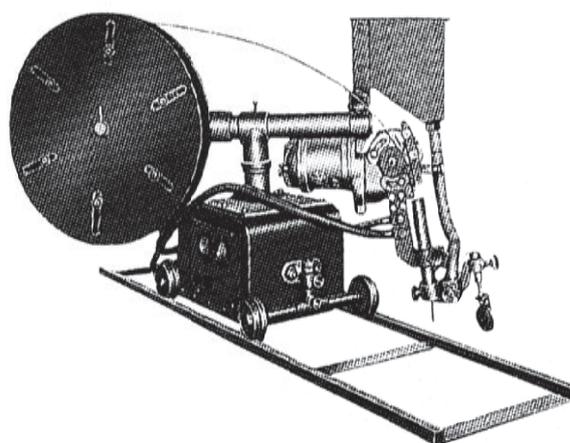


図 3.25 サブマージアーク溶接機の試作品<sup>10)</sup>

この新しい溶接法は、造船業界が生産性向上のために久しく待ち望んでいた画期的なものであった。しかし当時のわが国では鋼材の原料にスクラップを多用していたため、鋼板には硫黄分が多く含まれており、溶

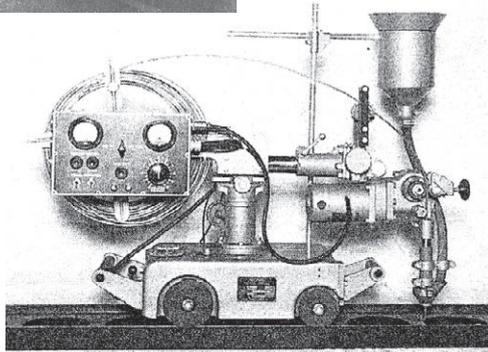
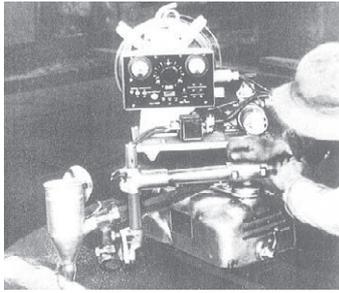


図 3.26 国産初のサブマージアーク溶接機 (SW-3A) とその使用状況<sup>10)</sup>

接時に硫黄割れ (サルファクラック) を生じることが多かった。また米国船級協会 (ABS) はわが国の溶接機の性能を容易に認めなかった。そのため、サブマージアーク溶接法の普及はほとんど進展しなかった。

そのような状況の 1953 (昭和 28) 年頃、NBC 呉造船部が米国製サブマージアーク溶接機 20 台の修理を大阪変圧器に依頼し、修理後のサブマージアーク溶接機を新造船の建造に全面的に使用した。この実績を見て、採用に消極的だったわが国の造船所もこれに倣い、サブマージアーク溶接法が普及するきっかけとなった。そしてひとたび普及が始まると、造船業界だけにとどまらず、溶接の自動化・高能率化を目指して、1955 (昭和 30) 年頃には貯槽・圧力容器分野、重電機分野、車両分野および自動車分野で、1960 年代には建築鉄骨や橋梁などの分野でも幅広く採用されるようになった<sup>5)</sup>。

サブマージアーク溶接は欧米を始祖とするが、片面裏波溶接法、高能率多電極溶接法あるいは帯状電極肉盛溶接法 (バンドアーク溶接法) などの研究や小型溶接機器の開発・適用など、わが国独自の研究・開発が積極的に行われ、これらの技術は世界的に注目を浴びるものとなった。

### 3.3.3 サブマージアーク溶接の実際

サブマージアーク溶接では、図 3.27 (a) に示すように、溶接線に沿ってあらかじめ散布された粒状のフラックス中にソリッドの電極ワイヤを送り込み、電極

ワイヤの先端と母材との間にアークを発生させて溶接を行う。フラックスは、通常、フラックス散布ホースから溶接トーチの少し前方に自動供給され、アークおよび溶融金属を覆って、アークを安定させるとともに溶接金属を大気から保護する。また、アーク熱によって溶融されたフラックスはスラグとなって溶融金属と反応し、健全な溶接金属の生成に寄与するとともに、美しくかつ均一な溶接ビードの形成に大きく貢献する。

この溶接法が開発された当初は、溶融スラグを介して電流が流れ、溶接金属は抵抗発熱によって形成されると信じられていた。しかし、その後に実施されたオシログラフによる電流・電圧波形の挙動解析によって、溶接電流のスラグへの分流はほとんど生じておらず、電圧波形は矩形波であることから、サブマージアーク溶接は完全なアーク溶接であることが確認されている。

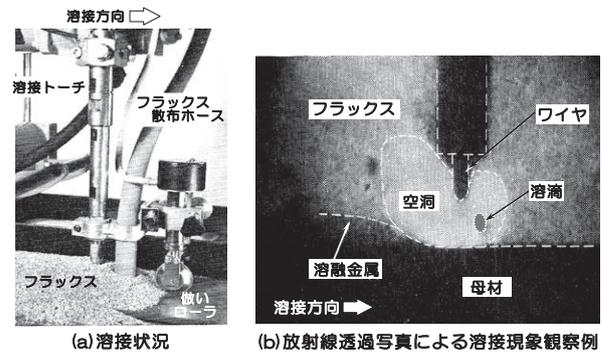


図 3.27 サブマージアーク溶接の状況<sup>11)</sup>

アークは散布されたフラックスの内部で発生するため、溶接状況を直接観察することはできない。そのため、溶接現象の観察には放射線 (X線) による透過写真撮影が利用される。図 3.27 (b) はその代表例を示したもので、アークの周辺には空洞が形成されていることが分かる。この空洞は常に激しく変動しており、アーク電圧が高い (アーク長が長い) ほど、溶接速度が遅いほど大きい空洞が形成され、その変動も大きいことが知られている。また、アーク電圧が低い (アーク長が短い) 場合あるいは溶接速度が速い場合には、ワイヤの直前まで未溶融のフラックスが残り、空洞はワイヤの後方に形成されることが観察されている。なお空洞の大きさは極性によっても変化し、電極プラス (EP: Electrode Positive) 極性の場合より、電極マイナス (EN: Electrode Negative) 極性の場合に空洞は大きくなる。

放射線透過写真撮影を利用した溶接状況の観察では、アークの形状を観察することはできないが、ワイ

ワイヤの溶融状態は観察することができる。その観察結果から判断すると、電極マイナス極性でのアークはワイヤの上方まではいあがっているようである。溶滴のワイヤ端から溶融池への移行形態は、溶接速度が遅い場合には前面のスラグ壁面に沿って移行する壁面移行（前掲図 2.16 参照）が多く、溶接速度が速くなるとワイヤの後方に移行するものが多くなる。溶滴の移行回数は、電極マイナス極性で 10 回 / 秒程度、電極プラス極性では数十回 / 秒程度である。移行溶滴の大きさは、いずれの極性においても比較的小さく、溶滴の直径はワイヤ径とほぼ同じ大きさとなっている。電磁ピンチ力の作用、溶融スラグとの接触などがその理由であろうと思われる。なお、溶滴の大きさや移行回数は、スラグの化学成分および物理的性質によって大きい影響を受ける<sup>11)</sup>。

溶接ワイヤには、図 3.28 に示すように、直径 3.2～6.4mm 程度の太径ワイヤが用いられる。ワイヤ径によって異なるが、溶接電流として数百～千数百 A 程度の大電流を通電して溶接するため、高溶着・高能率な溶接を行うことができ、溶込みの深い溶接ビードが得られる。ただし、母材に加えられる溶接入熱も大きくなるため、熱影響部の軟化あるいはぜい化に対する注意が必要である。図 3.29 に断面マクロの一例を示す。

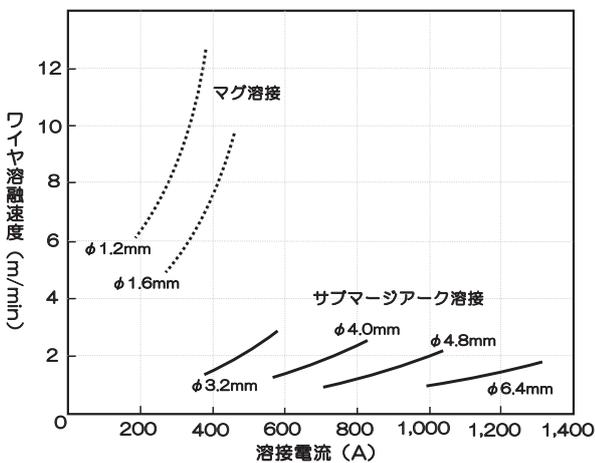
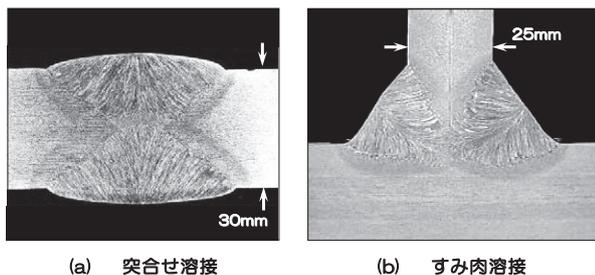


図 3.28 ワイヤ溶融速度の比較



(a) 突合せ溶接

(b) すみ肉溶接

図 3.29 サブマージアーク溶接の断面マクロ

サブマージアーク溶接に用いられるフラックスは、表 3.2 に示すような、溶融フラックスとボンドフラックスに大別される。溶融フラックスは、混合した鉱物原料を電気炉などで溶融してから粉碎し、ふるい分けによって粒度を整えたガラス質のフラックスである。溶解工程を含むため、炭酸塩などのガス成分やケイ素 (Si)・マンガン (Mn) などの脱酸剤および合金の添加は不可能である。フラックスの主成分は酸化物やフッ化物などであり、冷却や粉碎方法によって異なった性状のフラックスが製造され、均一な組成で耐吸湿性に優れる。

表 3.2 サブマージアーク溶接用フラックスの特性比較

	溶融フラックス	ボンドフラックス
製造方法	混合した鉱物原料を加熱溶融後、冷却して粒度調整。ガラス質で吸湿性はほとんどなし。	鉱物・脱酸材・合金元素などの粉末に、粘結材(水ガラス)を加えて、低温で造粒焼成。
合金元素の添加	不可	可
炭酸塩の添加	不可	可
切欠きじん性	やや劣る	良好
耐吸湿性	良好	劣る
拡散性水素量	やや多い	少ない
高速溶接性	良好	劣る
使用溶接電流	小～中	中～大
フラックス消費	多い	やや多い

ボンドフラックスは、粉末原料に粘結剤 (水ガラス) を混合して練り合わせ、キルンなどを使用して造粒および乾燥を行った後、ふるい分けによって粒度を整えたフラックスで、その乾燥温度が 400～600℃ のボンドフラックスと 700～1,000℃ の焼結フラックスに分類される。ボンドフラックスは乾燥温度が低温のため、炭酸塩、合金成分および鉄粉などの添加が可能であり、溶接金属の低水素化・低酸素化や機械的性能・能率の向上が図れる。焼結フラックスは乾燥温度が比較的高温であるため、炭酸塩・合金成分・鉄粉などの添加に制限を受け、ボンドフラックスと同様な特性が得られない場合がある。しかし、粘結剤などの吸湿性は低下するため、フラックスの耐吸湿性は溶融フラックスに近くなる。

標準的なサブマージアーク溶接機の一例を示すと、図 3.30 のようである。レール走行する自走台車上に、溶接トーチ、ワイヤ送給装置・モータ、溶接ワイヤ、ワイヤ送給速度や溶接条件などを制御する制御盤およびフラックスを収納・搬送するフラックスホッパーなどを搭載している。コイル状に巻かれた溶接ワイヤはワイヤリールに装着され、ワイヤ送給装置に引き出されて、アークを発生させる電極として溶接トーチに供給される。フラックスはホッパーに充填され、散布

ホース内を自由落下してアーク発生点の前方に散布され、アークおよび溶融金属を覆って大気から保護する。

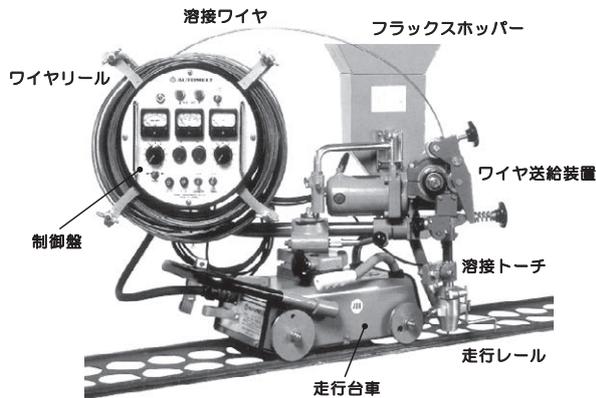


図 3.30 サブマージアーク溶接機

サブマージアーク溶接では電極として太径ワイヤを用いるため、その先端を溶断してアークを発生させるには1,000Aをはるかに超える大電流を供給しなければならず実用的ではない。そのため、図 3.31 に示すような、スチールウールを利用したアーク起動手が用いられる。母材上に丸めたスチールウールを置き(①)、ワイヤで軽く加圧したのち(②)、その上にフラックスを散布する(③)。その状態で通電を開始す

ると、スチールウールは溶断して(④)、ワイヤと母材の間に空隙ができアークが発生する(⑤)。スチールウールの加圧には多少の熟練が必要であり、強く加圧し過ぎるとワイヤが母材に溶着してアークを起動できない。また加圧が弱過ぎると、スチールウールのみ溶断してアークは発生しない。

サブマージアーク溶接の溶接電源には垂下特性の可動鉄心形交流電源を用いることが多く、可動鉄心をモータ駆動して出力を調整する。しかし垂下特性電源にはアーク長を一定に保つ作用(アーク長の自己制御作用：後述 3.6 節参照)がないため、アーク長の制御にはアーク電圧のフィードバック制御を用い、アーク電圧が所定の値となるようにワイヤの送給速度を増減してアーク長を一定に保つ。サブマージアーク溶接に用いるワイヤは太径であり、ワイヤの溶融(送給)速度は遅い。そのため、外乱などによってアーク長が変動した場合、ワイヤ溶融速度を変化させて対処するよりも、ワイヤ送給速度を制御して対処する方が、アーク長をより速く所定の値に近づけることができる。すなわち、図 3.32 に示すように、アーク電圧の検出値とその設定値との差を操作量として、アーク電圧(アーク長)が所定の値より高く(長く)なるとワイヤ送給速度を速くし、所定の値より低くなるとワイヤ送給速度を遅くして、アーク電圧が適切な値となるよ

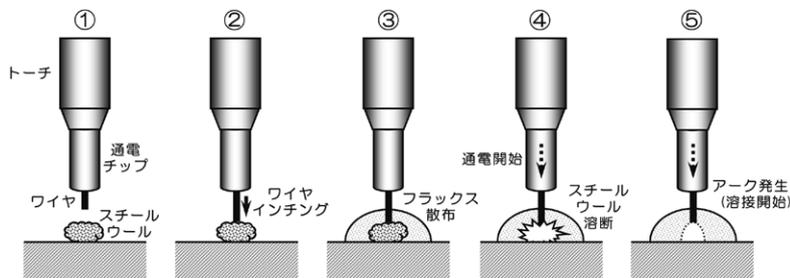


図 3.31 サブマージアーク溶接のアーク起動手

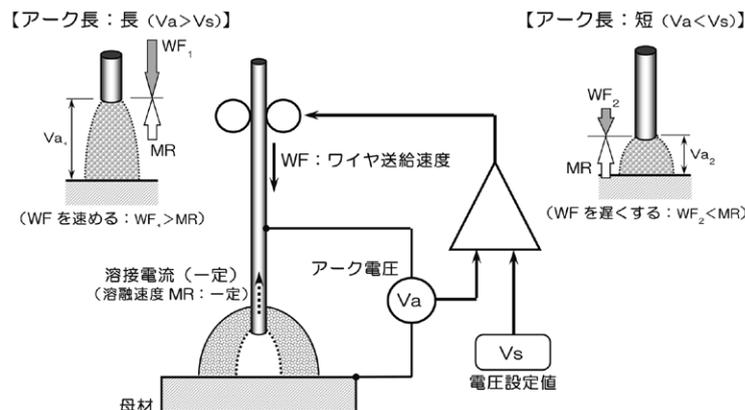
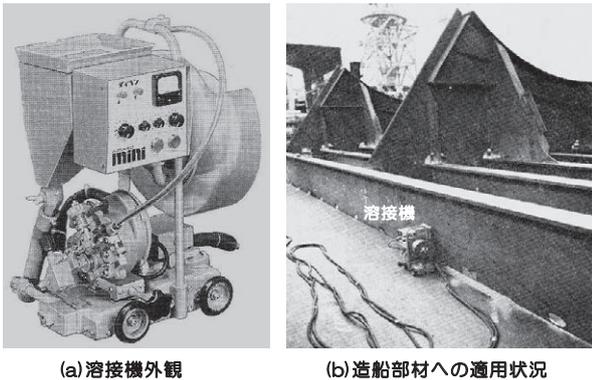


図 3.32 サブマージアーク溶接の定アーク長制御

うにワイヤ送給速度を増減制御する。

なお可搬性や操作性の向上を目的として、図 3.33 に示すような、細径ワイヤ（直径 1.2～1.6mm 程度）を用いるサブマージアーク溶接機も開発され、一部で適用されている。その場合には、定電圧特性の溶接電源を用い、ワイヤは一定速度で送給する。前掲図 3.28 に示したように、電流密度の高い細径ワイヤの熔融速度は速く、ワイヤ送給速度の増減でアーク長を一定に保つことが困難なためである。定電圧電源の定アーク長制御については後述する第 3 章 3.5 節 3.5.2 項で述べる。



(a) 溶接機外観

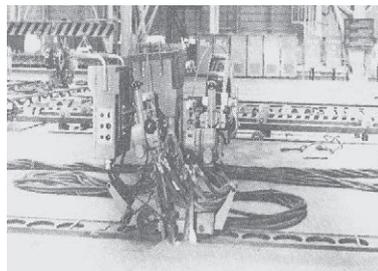
(b) 造船部材への適用状況

図 3.33 細径ワイヤサブマージアーク溶接<sup>11)</sup>

サブマージアーク溶接の主な適用例を示すと図 3.34 のようである。(a) は H 形鋼を製作するための下向きすみ肉溶接、(b) は造船部材の板継を行う下向突合せ溶接、(c) は橋梁鋼床板の現地突合せ溶接、(d) は重電部品である大型シャフトの円周突合せ溶接、そして (e) は造管工場における鋼管縦継手の突合せ溶接



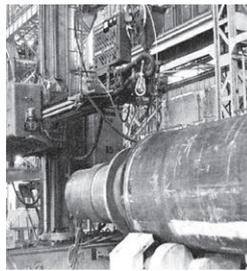
(a) H 形鋼の下向きすみ肉溶接



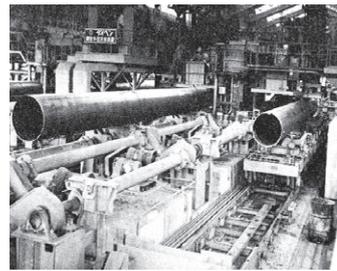
(b) 突合せ継手の下向肉溶接



(c) 鋼床板の現場溶接



(d) 大型シャフトの円周溶接



(e) 鋼管縦継手の溶接

図 3.34 サブマージアーク溶接の適用例<sup>11)</sup>

接である。サブマージアーク溶接は 1960 年以降に広範囲な産業分野で適用され始めたが、ピーク時に比べると近年の使用比率は減少しており、アーク溶接全体に占める割合は 10～15% 程度となっている。

### 3.3.4 片面裏波溶接

厚板の突合せ溶接では、通常、両面から下向姿勢で溶接する施工方法が用いられ、片側の溶接が完了すると継手部材を反転させて、裏面側の溶接を裏はつり後に実施する。また部材の反転ができない場合には、上向姿勢で裏面の溶接を行う。しかし、部材の反転や上向姿勢での溶接は作業能率の低下を招く大きな要因であり、片側からの下向溶接のみとすることができれば溶接能率の向上・作業時間の短縮・設備費の節減など生産性向上に大きく貢献する。

薄板の溶接では、比較的古くから、銅またはステンレス鋼製の裏当金を用いて初層裏波ビードを保持して、溶接継手を完成する片面溶接が行われていた。しかし、厚板の高効率溶接法としての片面溶接が注目されるようになったのは、1965（昭和 40）年頃から開発が始まった、造船分野における片面サブマージアーク溶接の実用化からである。

1950 年代後半（昭和 30 年代）になると、タンカーの大型化に伴ってブロック建造法が確立され、能率向上と生産性増大を図るために、船体の主要部分はコンベア上で組立て溶接されるようになった。しかし鋼板の表裏面からそれぞれ溶接しなければならない板継ぎ溶接では、作業の途中で鋼板の表裏を反転させる作業が必要となる。この反転作業には天井クレーンが必ず

必要となるため、クレーン待ちなどによる作業の一時中断など、コンベア上の一連の作業工程を乱す最も大きい要因となることが多かった。

三菱重工業長崎造船所では、板継ぎ溶接における銅板の反転作業を排除するために、片面からの溶接のみで良好な裏波ビードを形成する手法の開発に取り組んだ。工場面積、地形的な問題および既存工場建屋の低い天井などの制約事項があるにもかかわらず、建造船の大型化に伴う平板ブロック比率の増大に伴って、溶接組立て工場における平板ブロック製作のコンベア化を実現するためには、片面裏波溶接の実現は必要にせまられた課題であったようである。

片面サブマージアーク溶接法に関する研究の歴史は意外に古く、Berkeley mill 法と呼ばれる銅バックキング法などが、第2次世界大戦中の米国で一部の溶接に適用されていた。しかし、このバックキング法では裏波ビード形成の均一性・安定性に問題があり、実用化には至らず、その後の発展はなかったようである。

片面裏波溶接では、裏面から裏当材を当てて熔融金属が落下しないように保持するが、裏当材と母材との密着度が悪いと、裏当材による裏波ビードの保持が不完全となって熔融金属は溶け落ちてしまう。すなわち片面裏波溶接の最も大きい課題は、溶接継手の裏面に生じる板厚差や、溶接中に生じる溶接変形に起因した当金の密着度低下であり、溶接中の裏当材と母材との密着度をいかにして確保するかである。また溶接欠陥を作ることなく、適切な幅と高さを持つ美しい裏波ビードを均一かつ安定に形成することも重要である。

これらの問題を解決するために、三菱長崎造船所では溶接施工条件を熱解析および実験の両面から検討し、板厚を種々変化させた実用化実験を重ねた。その結果、適切な溶接条件を確立するとともに、図 3.35 に示すような自動溶接装置と裏当金を考案した。母材を電磁石で固定し、冷却水管を内蔵した銅当金を裏面から水圧を利用して母材へ強く押し付ける。銅当金は、比較的自由的な動作が可能となるように工夫されている。この溶接装置による最初の実施工は 1963 (昭和 38) 年 9 月であり、大型タンカー (90,000 トン) の外板の突合せ溶接継手 (板厚 32mm、継手長さ 16 m) に対し、母材の反転なしで溶接継手を完成させる片面裏波溶接が行われた。片面裏波溶接法はそれまでの不可能を可能にし、非常識を常識に変えてしまった。そして造船所にとってはなくてはならないものとなり、新鋭造船所も含め、わが国のほとんどの造船所で片面裏波溶接が採用され、作業の合理化と生産の向上に大きく寄与した<sup>12)</sup>。

その後、各種のバックキング方法や裏当材に関する改良がおこなわれ、図 3.36 に示すような、フラックスを利用した裏当方法が考案された。(a) はフラックス・銅バックキング (FCB: Flux Copper Backing) 法と呼ばれる方法で、銅板上に裏当フラックスを散布し、銅板の裏面からエア圧力を加えることによって、裏当フラックスを母材裏面に密着させる方法である。銅板を使用しているため、比較的大電流の適用が可能であり、極厚板も一層で溶接が可能である。しかし母材の板厚が異なり、裏面に板厚差がある継手では

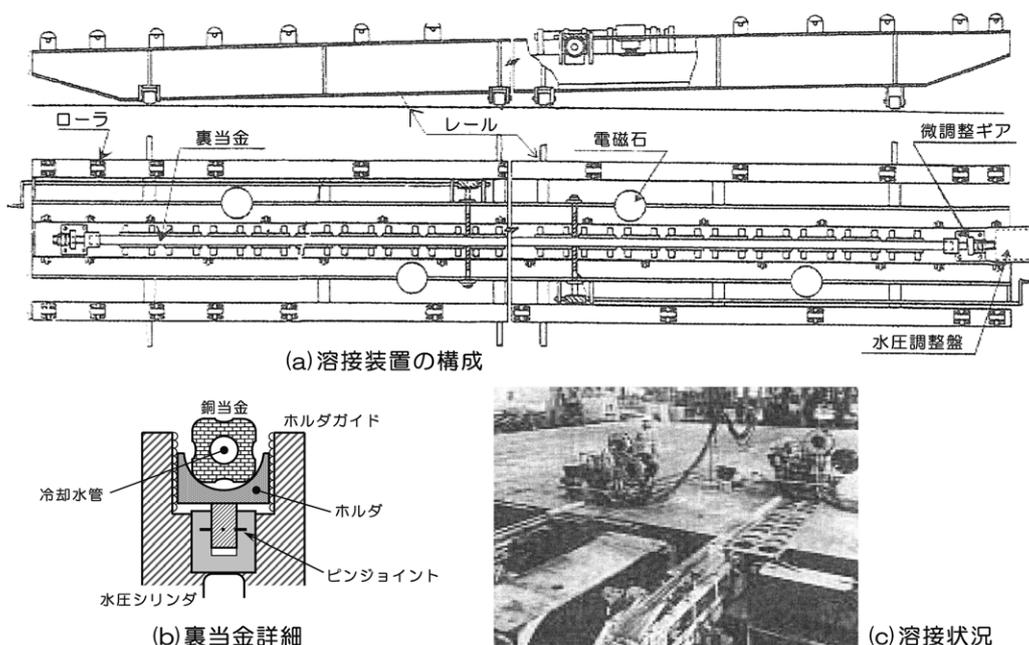


図 3.35 開発当初の片面自動溶接<sup>12)</sup>

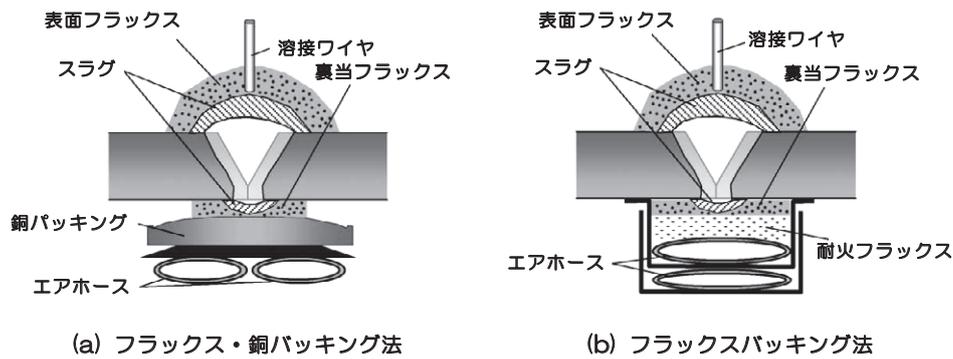


図 3.36 片面サブマージアーク溶接の裏当方法<sup>11)</sup>

密着性を確保することが難しく、銅板からの冷却で裏波形成に不均一な影響が加えられると、裏波に横割れが発生することがある。(b) はフラックスバックング (RF: Resin Flux) 法と呼ばれる方法で、フラックスのみをエア圧力によって母材裏面に密着させる施工法である。極厚板への適用性に若干の難点はあるが、銅板裏面の目違いやひずみに対する追随性に優れている。両面溶接と片面裏波溶接の断面マクロ写真の比較例を図 3.37 に示す。

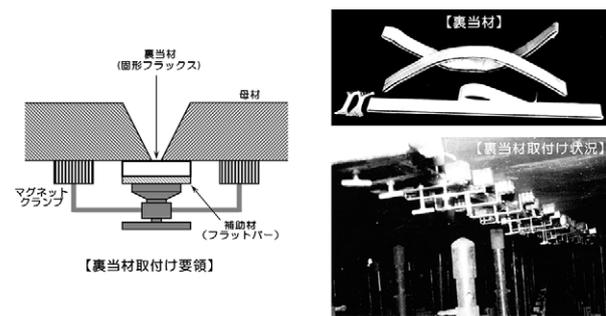


図 3.38 簡易裏当 (FAB) 法

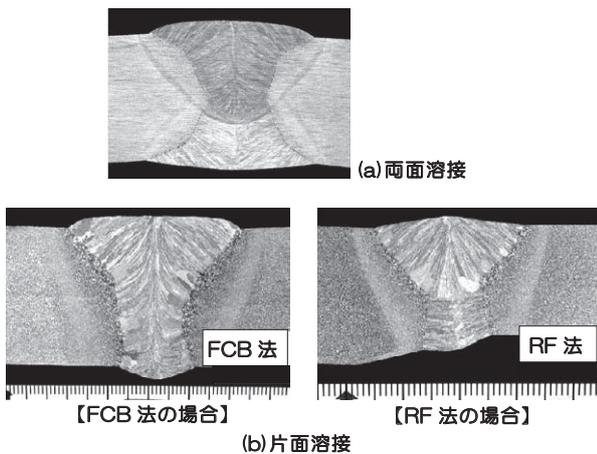


図 3.37 断面マクロの比較<sup>13)</sup>

また 1972 (昭和 47) 年には、図 3.38 に示すような、簡易裏当 (FAB) 法と呼ばれる方法も開発されている。ガラステープや固形フラックスなどから構成された固形裏当材を、マグネットなどを用いて母材裏面に密着させる施工法である。固形裏当材は持ち運びが容易で、曲げることも可能であり、裏当材を取り付けるための専用の装置は不要である。固形フラックスは、100~150℃で溶融固化する熱硬化性樹脂と組成・粒度・密度を適正化したフラックスとで構成され、溶接前は粉末状であるが溶接時に加えられる熱で固形状になる。

### 3.3.5 多電極サブマージアーク溶接

溶接電流を増大すれば、溶着量が増加して能率は向上する。しかし溶接電流をむやみに増大させると、アークや溶融池は乱れ適切な溶接が行えない。また放射熱も多くなり、作業性の面からの制約も増加する。したがって、溶接電流を増大することによって能率を向上させるには、1本の電極で通電電流を増加させるのではなく、複数の電極に電流を分割して通電すれば作業性を低下させずに高能率な溶接が可能となる。

多電極溶接は、複数のトーチそれぞれの電極から同時にアークを発生させて、ワイヤ溶融 (溶着) 速度を向上させる溶接法である。サブマージアーク溶接やマグ溶接での適用が多く、2本またはそれ以上のトーチ (電極) を溶接線方向に直列 (タンデム)、あるいは並列 (トランスバース) などの配置にして溶接する。タンデム配置の標準的な 2 電極サブマージアーク溶接機の一例を示すと図 3.39 のようであり、2組のワイヤ送給機構とトーチが 1つの走行台車上に搭載された構成となっている。また制御盤には、2本のワイヤから発生するアークをそれぞれ個別に制御するために、2組の調整ボリューム類や電流・電圧計が設けられている。

複数の電極から同時にアークを発生させると、それぞれのアーク間には電磁力による作用 (磁気吹き) が発生し、電極と母材とを流れる電流が複雑に作用して

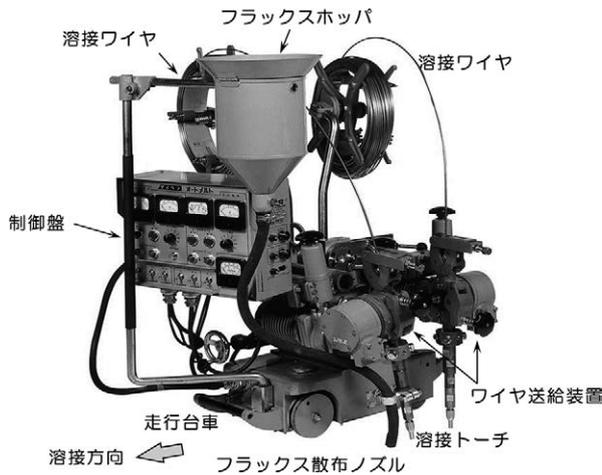


図 3.39 2 電極サブマージアーク溶接機

アークの偏向現象が生じる。この偏向現象はビード形成に大きい影響を及ぼし、極端な場合にはアークが不安定となって、アンダカットやオーバラップなどのビード形状不良、スラグの巻込みあるいはブローホールなどの内部欠陥発生の原因となる。すなわち多電極サブマージアーク溶接では、使用目的に応じた適正な溶接条件（溶接電流、溶接電圧および溶接速度）の選定とともに、交流電源への入力結線方式を最適化することも重要となる。

交流電源を使用したアーク溶接では、2本のワイヤ間で生じる電流位相のずれは、結線方法によって0～180°の間で変化する。2つのアークが同時に発生している場合、それらの極性が同じであれば互いに引き合い、逆の極性になった場合には互いに反発し合う。このようなアークの挙動はビード形状や溶接結果に大きく影響し、位相差が小さいほど溶込みは浅くなって、ビード幅は広くなる傾向がある。したがって、各電極に過大な電磁力が作用しないよう、また後行電極には溶接進行方向に適切な電磁力が作用するように、電源

入力の適切な結線方式を選定しなければならない。

2 電極溶接の場合における電源の結線方法の一例を示すと図 3.40 のようである。(a) はスコット結線と呼ばれる結線方法で、電源への入力  $U \cdot V \cdot W$  相の位相はそれぞれ  $120^\circ$  ずれてバランスしているが、2本の電極を流れる電流の位相は  $90^\circ$  ずれる。(b) は V 結線と呼ばれる結線方法で、U 相と V 相との位相差は  $60^\circ$ 、それらと W 相との位相差は  $150^\circ$  であり、その位相差が 2本の電極を流れる電流の位相差となる。(c) は逆 V 結線と呼ばれる結線方法で、入力の位相差は V 結線の場合と同様であるが、2本の電極を流れる電流の位相差は  $120^\circ$  となる。したがって、薄板の高速溶接には位相差が小さいスコット結線 (a) および V 結線 (b) が適しており、厚板の大電流溶接には位相差が大きく、アーク・溶融池ともに安定し深い溶込みが得られる逆 V 結線 (c) が適している。

2 電極および 3 電極サブマージアーク溶接の適用例を図 3.41 に示す。3 電極溶接の場合も、入力電源の結線方法によってアークの挙動が変わるため、2 電極溶接の場合と同様に、高速溶接と大電流低速溶接では異なった位相の出力が得られる結線方法を用いる。また厚板の溶接では、後行 2 電極は交流とするが、先行電極には直流を用いて深い溶込みを得るようにしたものもある。近年では 4 電極以上の溶接法も開発されており、4 電極サブマージアーク溶接では、図 3.42 に示すように、先行する 2つの電極 (①および②) で母材を裏面まで溶融して裏波を形成し、後行 2 電極 (③および④) でビード形状および外観を整形する。

サブマージアーク溶接の高能率化については 1960 年代後半から様々な検討がなされ、種々な産業分野で多電極サブマージアーク溶接法が適用されている。図 3.43 は UOE 大径鋼管の溶接装置を示したもので、鋼管の縦継手を内面および外面から突合せ溶接して、内

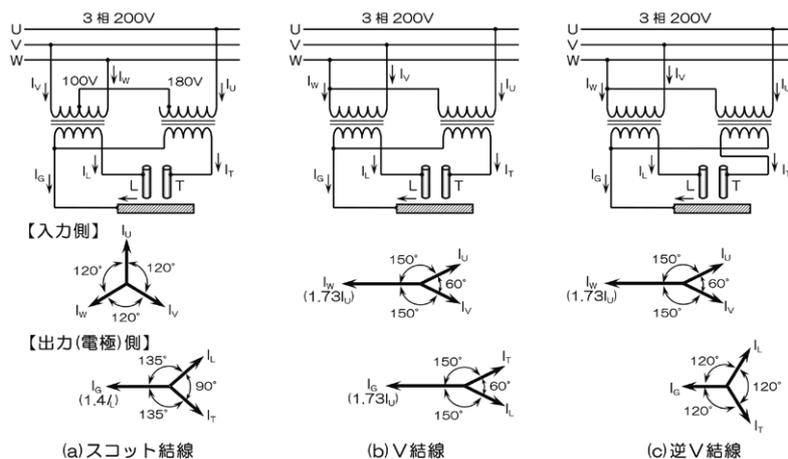
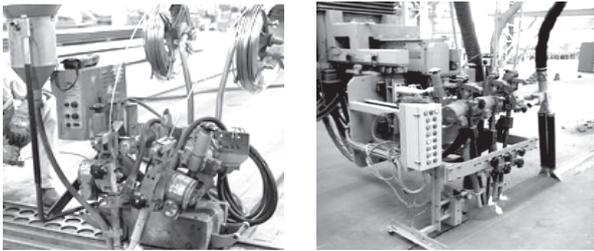


図 3.40 2 電極溶接機の結線方法<sup>14)</sup>



(a) 2電極溶接 (b) 3電極溶接

図 3.41 多電極サブマージアーク溶接

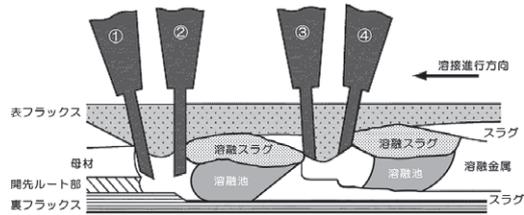


図 3.42 4電極サブマージアーク溶接

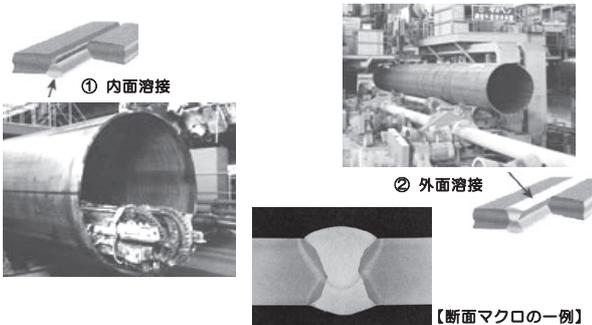
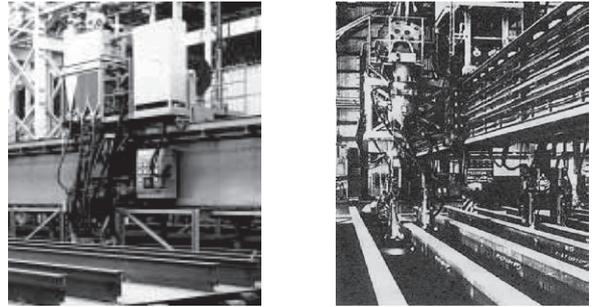


図 3.43 UOE 鋼管の多電極サブマージアーク溶接<sup>15)</sup>

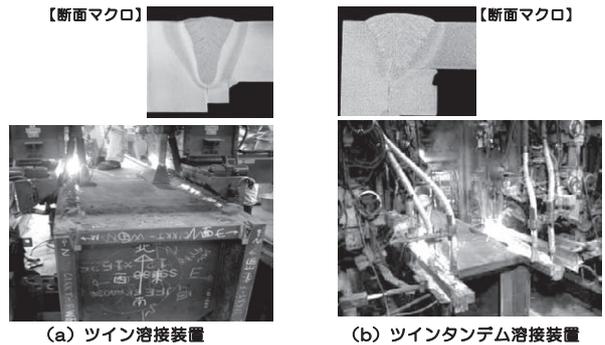
外面をそれぞれ1パスで継手を形成する。製造時の生産性は縦継手の溶接速度に大きく左右されるため、1981（昭和56）年頃から5～6電極の高速サブマージアーク溶接が採用されている。またスパイラル鋼管の製造ラインでも、1982（昭和57）年頃から3電極以上の多電極サブマージアーク溶接が採用されている。

造船分野においても1965（昭和40）年以降に多電極サブマージアーク溶接が取り入れられており、その一例を示すと図3.44のようである。(a)は板継突合せ溶接を行うFCB法（前述3.3.4項参照）を用いた4電極の片面裏波溶接装置、(b)は片側2電極の対向式タンデムでロンジ（縦通材）の水平すみ肉溶接を行う4電極の自動溶接装置（ラインウェルダ）である。また図3.45は建築鉄骨部材への適用例で、(a)はボックス柱の両端2ヶ所の角継手をそれぞれ1電極で同時に溶接するツイン溶接装置、(b)は2電極サブマージアーク溶接機2台を使用してボックス柱の両端2ヶ所の角継手を同時に溶接するツインタンデム溶接装置である。



(a) 4電極片面裏波溶接装置 (b) 4電極水平すみ肉自動溶接装置

図 3.44 造船における多電極サブマージアーク溶接装置<sup>6)</sup>



(a) ツイン溶接装置 (b) ツインタンデム溶接装置

図 3.45 ボックス柱の多電極サブマージアーク溶接<sup>16) 17)</sup>

### 3.3.6 帯状電極サブマージアーク溶接（バンドアーク溶接）

耐食肉盛溶接は、炭素鋼や低合金鋼の耐食性向上を目的として腐食性物質と接する面に施工される。各種プラントの反応容器（リアクター）に多用されているが、火力発電所の煙突、石炭を細粉化する微粉炭機およびごみ焼却施設などにも適用されている。肉盛溶接では、希釈率（母材溶融断面積 / 溶接金属の断面積）の低減と溶着速度の増大が重要な事項である。

サブマージアーク溶接は溶込みが深い溶接法であるため、肉盛溶接に適用するには希釈率を低減できる溶接方法を工夫しなければならない。図3.46は、肉盛溶接へ適用するために開発された帯状電極サブマージアーク（バンドアーク）溶接方法を示したものである。電極には肉厚0.4mm×幅25～75mmの帯状ワイヤを用い、アークを電極の幅方向に分散して発生させることによって、希釈率の小さい高溶着溶接を実現する。また溶接機には、帯状ワイヤの送給が可能な専用の溶接機を用いる。図3.47に溶接状況および溶接部の断面マクロの一例を示す。

帯状電極サブマージアーク溶接が実用化されたのは1966（昭和41）年であり、日本製鋼所が溶込みの浅いことが要求される肉盛溶接に適用したことが始まりである<sup>5)</sup>。圧延ローラの肉盛溶接への適用例を図3.48に示す。

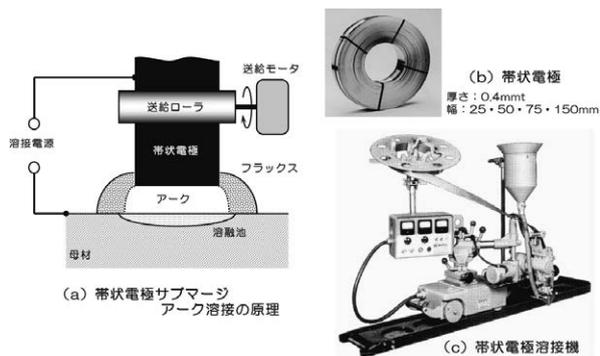


図 3.46 帯状電極サブマージアーク（バンドアーク）溶接

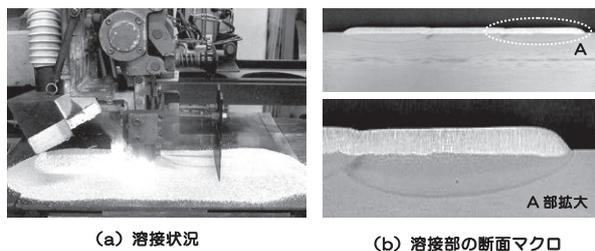


図 3.47 バンドアーク溶接とその断面マクロ



図 3.48 圧延ローラの肉盛溶接<sup>18)</sup>

### 3.4 ティグ溶接

#### 3.4.1 ティグ溶接の開発とわが国への導入

不活性ガス中での初めての溶接は、1927（昭和2）年に米国の実験物理学者コンプトン（A. H. Compton）が、被覆アーク溶接における空気中の酸素の効果を調べるために、アルゴンやヘリウム中で行った溶接である。しかし本当に不活性ガス溶接といえる溶接は、1930（昭和5）年に、米国ゼネラルエレクトリック（GE）社のホバート（H. M. Hobart）とデバース（P. K. Devers）が行っている。従来の溶接法では難しかったアルミニウム合金などの溶接を目的に実用化が進められ、不活性ガス中でのアーク溶接の特許を取得し

た。ただしアルゴンやヘリウムは高価なため、実用化は困難と判断して会社は機器の開発を中断した。この溶接法が実用化されるのは、戦時色が強くなった1940（昭和15）年頃からである。

1940年になって、ノースロップ航空機会社の溶接技師メレディス（R. Meredith）は、マグネシウム合金の溶接を手掛けた。マグネシウム合金は空気中の酸素と反応して燃えやすく、その溶接は困難を窮めた。そこで彼は、アルゴンは“怠け者”という意味の不活性ガスであり、このガスで溶接部をシールドすればうまく溶接できるのではないかと考えた。最初は、溶接部をアルゴンでシールドし、マグネシウムの棒と母材との間でアークを発生させて、溶接部へそのマグネシウム棒を手で添加する方法を試みた。しかし、アーク長を一定の長さに保つことは極めて困難であったため、この方法で溶接することをすぐにあきらめた。そして、図 3.49 に示すような、被覆アーク溶接棒用ホルダにタングステン電極とシールドガス用ノズルを取り付けた溶接トーチを考案し、この溶接トーチを用いて溶接実験を行った。この方法では極めて良好な溶接結果が得られ、翌年には“ヘリアーク溶接”という名称で特許を取得している。これがティグ溶接の始まりであり、図 3.50 に示す、全マグネシウム合金製の航空機 XP-56 の製作にこの溶接方法を適用した。なお、この XP-56 は極めて変則的な航空機で、後部に二段のプロペラを持った尾翼のない前翼のみの構造で、安定性不良などの問題が多く試作 2 機のみで開発中止となっている<sup>1)</sup>。

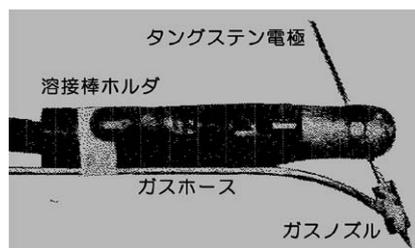


図 3.49 メレディスが考案したティグ溶接トーチ<sup>1)</sup>



図 3.50 初めてのティグ溶接航空機（マグネシウム製 XP-56）<sup>1)</sup>

わが国では、1948（昭和23）年に初めてティグ溶接法が公開実演されたが、アルゴンガスの入手が極めて困難であったことなどの理由によって、普及することにはなかった。1951（昭和26）年になると、運輸省運輸技術研究所が不活性アーク（ヘリアーク）溶接機を輸入し研究を始めた。また、日本アルミが丸紅を通じて米国に発注していた溶接用アルゴンのボンベ48本が神戸港に届いた。翌年からは連続輸入され、アルゴンの常備が可能となったが、そのアルゴンは高価であったため、ティグ溶接の実用化は当分の間期待できないとされていた。

ティグ溶接が実用化されたのは1952（昭和27）年以後で、この年に東亜精機が、図3.51に示すような、国産初のアルゴンアーク溶接機（ティグ溶接機）を製造した。また、朝鮮戦争が始まりアルミニウム製の航空機用落下タンクの多量発注が始まったため、電元社製作所と大阪変圧器もティグ溶接機の製造販売を開始した。その後、ステンレス鋼、銅とその合金およびチタンとその合金などの溶接にも適用されるようになり、ティグ溶接は急速に普及した。

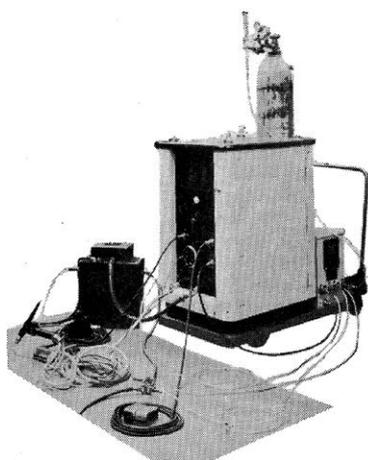


図 3.51 アルゴンアーク溶接機<sup>5)</sup>

1953（昭和28）年には三菱重工業・下関造船所が、わが国初の全アルミ合金船である、海上保安庁の巡視艇「あさかぜ」の建造にティグ溶接を使用した。1955（昭和30）年には、溶接ビードの美麗さに着目して、自動車製造ラインでフェンダーの溶接などに使われ始めた。またボデーの床や柱には、ティグ・アークスポット溶接が適用された。ティグ・アークスポット溶接は片側だけの溶接で、溶接部の信頼性も高いことが評価されたようである。

その後、上部構造とハッチカバーに180トンのアルミを使ったボーキサイト船・サンウォーカーの浦賀船渠での建造（1957年）、旧国鉄・大宮および小倉工場

でのアルミニウム溶接の適用開始（1958年）、原子力研究所のドイツ・グリスハイム社からのティグ溶接機購入（1960年）など、ティグ溶接の適用分野は拡大していった<sup>5)</sup>。また、わが国初の深海調査船・しんかい2000の三菱・神戸造船所での建造（1981年）、三菱・名古屋製作所での宇宙開発事業団・H-2ロケットの1~2段タンクの製作（1994年）にもティグ溶接が適用された。

### 3.4.2 ティグ溶接の基礎事項

#### (1) ティグアークの特性

タングステン電極と母材との間にアークを発生させるティグ溶接では、電極の極性によってアークの挙動や母材の溶融現象などが異なる。電極が陰極となる棒マイナス（EN: Electrode Negative）極性では、図3.52に示すように、電極直下の母材に集中した指向性の強いアークが発生する。その結果、幅が狭く溶込みの深い溶融部が得られ、電極の消耗も少ないため溶接に適した特性が得られる。

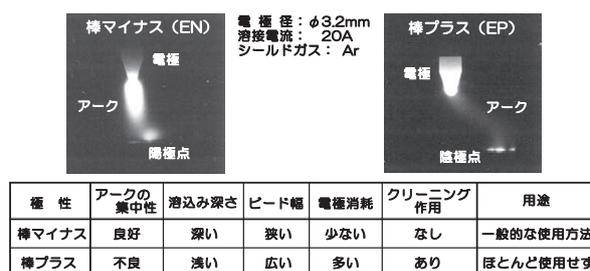


図 3.52 ティグアークにおける極性の影響

一方、電極が陽極となる棒プラス（EP: Electrode Positive）極性では、陰極点（電子放出の起点）が母材表面上を激しく動き回る。棒プラス極性では陰極点が母材表面に形成され、この陰極点は酸化物が存在する箇所が発生しやすい傾向がある。酸化物があると比較的少ないエネルギーで電子を放出できるためである。陰極点では局所的に著しいエネルギー集中が生じるため、図3.53に示すように、電子放出時に生じる一種の爆発的な現象によって陰極点近傍の酸化皮膜は破壊される。酸化皮膜が破壊・消滅すると、陰極点は新しい酸化物を求めて移動し、他の酸化物が存在する箇所に新たな陰極点を形成するが、その酸化物も電子放出時の爆発的な現象によって再び破壊されて消滅する。その結果、母材表面の酸化皮膜は次々に破壊・除去され、アーク直下（溶融池）周辺には酸化皮膜のない清浄な母材表面が現れる。この現象をクリーニング（清浄）作用という。陰極点のこのような移動はアークの集中度を著しく劣化させ、溶融部は幅が広く溶込

みの浅いものとなる。さらに、電極は過熱されて電極消耗も極めて多くなる。

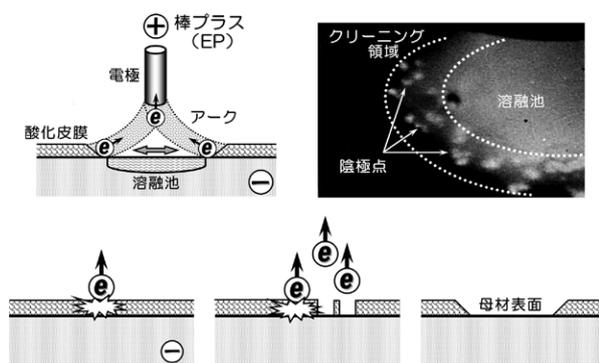


図 3.53 クリーニング (清浄) 作用

## (2) タングステン電極

ティグ溶接の電極として用いられるタングステン電極の JIS 規格は 1963 (昭和 38) 年に制定されたが、当時の電極の種類は純タングステンと 1 および 2% 酸化トリウム ( $\text{ThO}_2$ ) 入りタングステンの 3 種類であった。しかし、1985 (昭和 65) 年頃に、酸化ランタン ( $\text{La}_2\text{O}_3$ )・酸化セリウム ( $\text{Ce}_2\text{O}_3$ )・酸化イットリウム ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) を 1~2% 程度含むタングステン電極の研究が行われた。そして、これらの新しい氧化物入りタングステンは、従来の酸化トリウム ( $\text{ThO}_2$ ) 入りタングステンより良好な電極消耗特性およびアーク起動特性を示すことが明らかにされた。

この結果を受けて JIS 規格が改正され、1990 (平成 2) 年に「JIS Z 3233: ティグ溶接用タングステン電極棒」が制定された。従来の 3 種類に、1 および 2% 酸化ランタン入りタングステンと 1 および 2% 酸化セリウム入りタングステンの 4 種類が新たに加えられ、タングステン電極の種類は合計 7 種類となった。なお、酸化イットリウム ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 入りタングステンは、市場での使用量が少なかったため JIS 化は見送られた。

2001 (平成 13) 年になると、この JIS は ISO6848: 1984 に基づいて再び改正され、「JIS Z 3233: イナートガスアーク溶接並びにプラズマ切断及び溶接用タングステン電極」として制定された。この新しい JIS 規格は、1990 (平成 2) 年に制定された旧 JIS 分類 (A 系列) と ISO 分類 (B 系列) を併記した二重規定となっている。しかし、一般に、わが国では表 3.3 に示す A 系列が用いられ、B 系列が用いられることは極めて少ない。

タングステン電極に添加される氧化物には、電子放出に必要なエネルギー (仕事関数) を低減する作用が

表 3.3 ティグ溶接用タングステン電極 (JIS Z3233<sup>2001</sup>)

種類	記号	成分	識別色
純タングステン	YWP	W	緑
1% トリアタングステン	YWTh-1	W+1% $\text{ThO}_2$	黄
2% トリアタングステン	YWTh-2	W+2% $\text{ThO}_2$	赤
1% 酸化ランタンタングステン	YWL a-1	W+1% $\text{La}_2\text{O}_3$	黒
2% 酸化ランタンタングステン	YWL a-2	W+2% $\text{La}_2\text{O}_3$	黄緑
1% 酸化セリウムタングステン	YWCe-1	W+1% $\text{Ce}_2\text{O}_3$	桃色
2% 酸化セリウムタングステン	YWCe-2	W+2% $\text{Ce}_2\text{O}_3$	灰色

ある。そのため氧化物入りタングステン電極を用いると電極の負荷は軽減され、純タングステンの場合より良好な電極消耗特性が得られる。その一例を示すと表 3.4 のようであり、同一条件での溶接にも拘らず、2% 酸化ランタンタングステンや 2% 酸化セリウムタングステンでの電極の消耗や変形は極めて少ない。また氧化物入りタングステンは、純タングステンに比べてアークの起動性にも優れる。

表 3.4 電極消耗状況の比較

	DC180A×60分 (電極径: φ1.2mm)		AC100A×15分 (電極径: φ3.2mm)	
	外観	断面マクロ	先端部外観	外観
純タングステン (W)				
2% トリアタングステン (W+2% $\text{ThO}_2$ )				
2% 酸化ランタンタングステン (W+2% $\text{La}_2\text{O}_3$ )				
2% 酸化セリウムタングステン (W+2% $\text{Ce}_2\text{O}_3$ )				

## (3) 電極の先端形状

タングステン電極の先端形状はアークの集中性・溶込み形状・ビード外観などに大きく影響するが、その適切な形状は溶接電流や極性によって異なる。直流棒マイナス極性の場合の標準的な電極先端角は一般に 45~60° であるが、この角度は電流値によって多少変化する。タングステンには電極温度が高くなるほど電子放出が容易となって安定なアーク状態が得られやすくなる性質があるため、溶接電流 100 A 以下の電流域では電流が小さくなるほど先端角を小さくして、電極の先端温度を速く上昇させることが必要となる。250~500 A の電流域では、先端部を尖らせたとしてもアーク発生とほぼ同時に先端部が溶損するため、先端

部を少し扁平に加工した円錐台形状のものを使用する。

この形状は200 A以下の交流溶接にも適用されるが、交流溶接ではアークの集中性が比較的乏しく電極消耗も多いため、直流溶接の場合ほど先端形状に注意する必要はない。棒プラス極性の500 A以上の直流溶接および200 Aを超える交流溶接では電極消耗が極めて多いため、電極先端部を半球形に加工して用いることが多い。各電流域における標準的なタングステン電極の先端加工形状を図3.54に示す。電極先端形状の加工には卓上グラインダが多用されているが、均一な先端形状を得るには専用の電極研磨機を用いる。電極研磨機では、電極の先端部を専用の砥石側面に押し付けて、回転する砥石でその先端部を所定の均一な形状に研磨する。タングステン電極研磨機の一例を図3.55に示す。

電極先端形状				
直流 (EN)	≤ 100A	≤ 250A	≤ 500A	> 500A
交流 (AC)			≤ 200A	> 200A

図 3.54 タングステン電極の先端加工形状



図 3.55 タングステン電極研磨機の一例

### 3.4.3 ティグ溶接機

#### (1) ティグ溶接機の構成

ティグ溶接機の一般的な構成は図3.56のようであり、溶接電源、溶接トーチ、遠隔制御箱（リモコンボックス）、ケーブルホース類（母材側ケーブル・ガスホース類）および付属品（ガス調整器・冷却水循環装置）

などで構成される。高周波発生装置、シーケンス制御回路およびシールドガス制御回路などの制御装置は、通常、溶接電源に内蔵されたものが大半である。小電流溶接には作業性を考慮して空冷トーチが多用されるが、トーチ部での発熱量が大きく十分な冷却が必要となる大電流溶接には水冷トーチが用いられる。その場合には、トーチに冷却水を供給する冷却水循環装置を用いることが多い。

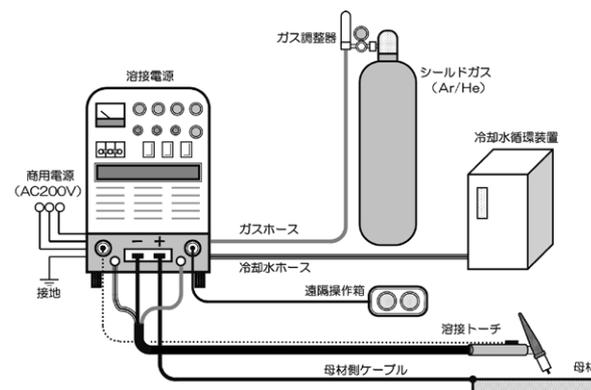


図 3.56 ティグ溶接機の構成

ティグ溶接の導入当初は、可飽和リアクトル式電源や可動鉄心形電源（後述第4章参照）と、図3.57に示すような、ティグ溶接制御装置とを組み合わせで使用していた。ティグ溶接制御装置は、アークの起動・停止制御回路、シールドガスの流出・停止機構および高周波高電圧発生装置などで構成されたものである。しかし、1966（昭和41）年にティグ溶接の専用溶接電源が市販されると、この制御装置の機能は溶接電源に内蔵されるようになった。それ以降は、いずれのティグ溶接電源にもそれらの制御機能が内蔵されることとなったため、近年でのティグ溶接制御装置の使用は皆無に近い。

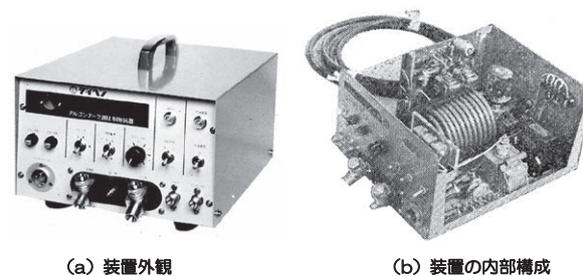


図 3.57 ティグ溶接制御装置<sup>19)</sup>

#### (2) 溶接電源

ティグ溶接に用いる溶接電源の外部特性（電流と電圧の静的な関係）には、図3.58に示すような、アー

ク長変化に伴う溶接電流の変動を抑制する垂下特性あるいは定電流特性が用いられる。垂下特性電源では、アーク長が $L_0$ から $L_1$ に伸びると、アーク電圧は大きく増加( $\Delta V$ )するが、溶接電流の減少( $\Delta I$ )は少ない。反対にアーク長が短くなった場合も、アーク電圧は大きく減少するが、溶接電流の増加は少ない。すなわち、アーク長の変化によってアーク電圧は大きく変化するが、溶接電流の変化は少なく、溶接電流の変化に起因する溶込み深さの変動や作業性の変化などを抑制できる。

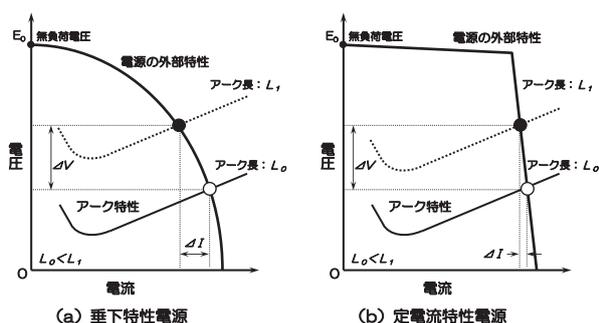


図 3.58 ティグ溶接電源の外部特性と動作点

定電流特性電源の場合も、垂下特性電源の場合と同様に、アーク長変化に対すると溶接電流の変化は少なく、その変化幅は垂下特性電源の場合よりさらに小さいものとなる。そのため近年では垂下特性電源の採用は減少し、アーク長変動による電流変化がより少ない定電流特性電源がティグ溶接電源の主流となっている。

### (3) 溶接トーチ

ティグ溶接トーチは、保持したタングステン電極に溶接電流を通电してアークを発生させるとともに、溶接部を大気から遮蔽するシールドガスを供給するものである。トーチの一例を示すと図 3.59 のようであり、冷却方法によって空冷式と水冷式に大別される。空冷トーチは小型・軽量で作業性も良好であり、その構造は比較的簡素である。しかし使用電流は低い値に制限され、定格電流は通常 200 A 程度以下となっている。水冷トーチは構造が複雑でやや重くなるが、溶接ケーブルおよびノズル部分を水冷することによってトーチの耐熱性を向上させており、大電流・高使用率の溶接にも対応できるようになっている。

### (4) アークの起動

ティグアークの起動方法は表 3.5 のような 3 種類に大別され、一般には、母材と非接触でアークを起動で

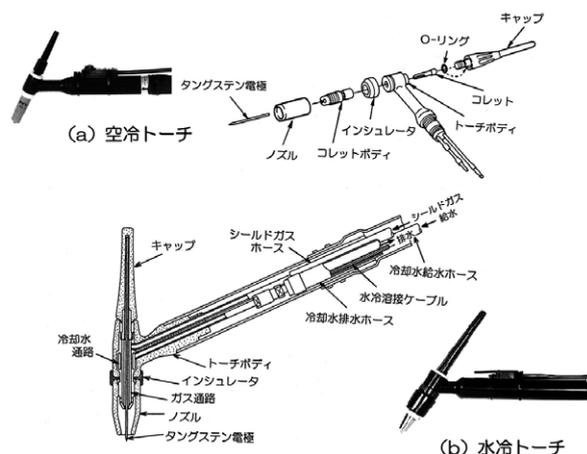
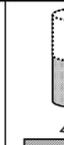


図 3.59 ティグ溶接トーチ

きる“高周波高電圧方式”が多用されている。“高周波高電圧方式”のアーク起動では、図 3.60 (a) に示すような高周波発生回路を用い、(b) のような高周波放電電圧を発生させる。そして、この高周波電圧で電極と母材間の絶縁を破壊し、電極を母材へ接触させないでアークを起動する。高周波の基本周波数はラジオやテレビ放送の周波数帯域を避けているが、火花放電方式であるためその周波数帯域は広く、強い電磁ノイズに起因した電波障害を発生することがある。

表 3.5 ティグアーク起動方法とその比較

アーク起動方式	高周波高電圧方式	電極接触方式	直流高電圧方式
アーク起動時の発生ノイズ	大	極めて小	小
アーク起動特性	良好	良好 (電極溶込みの可能性あり)	良好
アーク起動の原理 (絶縁破壊方法)			

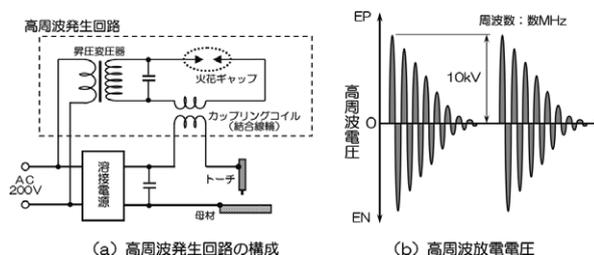


図 3.60 高周波発生回路

“電極接触方式”は、図 3.61 に示すように、タングステン電極を母材へ接触させてから通电を開始し、通电開始後に電極を引き上げることによってアークを起動する方法である。このアーク起動方式を用いると、電磁ノイズに関する問題はほとんど生じない。しかし、比較的大きな電流でアークを起動すると電極先端

部の損傷が生じ、傷損したタングステンが溶接部に巻き込まれて溶接欠陥となる恐れがある。そのため、必要最小限の電流値でアークを起動した後に本溶接電流へ移行させる「スタート電流制御」が適用されている。スタート電流はできるだけ小さく設定することが望ましいが、設定値があまりに小さ過ぎると、アーク起動は不安定になって良好なアーク起動性能が得られないため、通常 20~30 A 程度の電流を用いる。

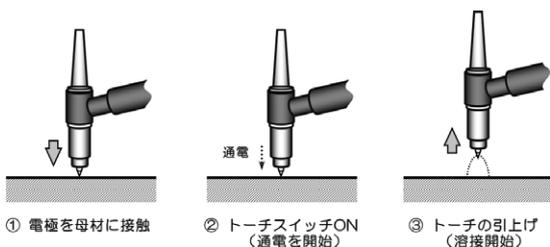


図 3.61 電極接触方式によるアーク起動

“直流高電圧方式”では、図 3.62 に示すように、タングステン電極と母材との間に数千 V 程度の直流高電圧を加えて両者間の絶縁を破壊してアークを起動し、アークが発生すると高電圧の付加を停止して本溶接でのアーク電圧へ移行する。直流電圧による電磁ノイズは比較的小さいため、強い電磁ノイズに起因した高周波高電圧方式のような電波障害を発生することはほとんどない。この方式を搭載した溶接電源には高電圧から保護するための回路を別途設けることが必要となるため、価格は比較的高価なものとなる。また使用するトーチの絶縁対策などについての制約も受けるため、その用途はティグ溶接ロボットや特殊目的の自動溶接システムなど一部の特殊なものに限定されている。

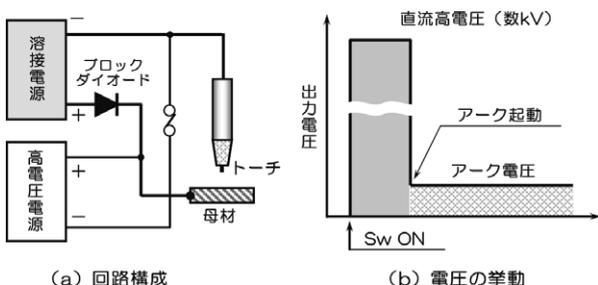


図 3.62 直流高電圧方式アーク起動

### (5) 動作シーケンス

ティグ溶接の一般的な動作は図 3.63 のようであり、トーチスイッチを ON している間のみ溶接が行える“自己保持なし”の動作モードと、溶接の開始時と終了時にそれぞれトーチスイッチを操作する“自己保持あり”の動作モードがある。

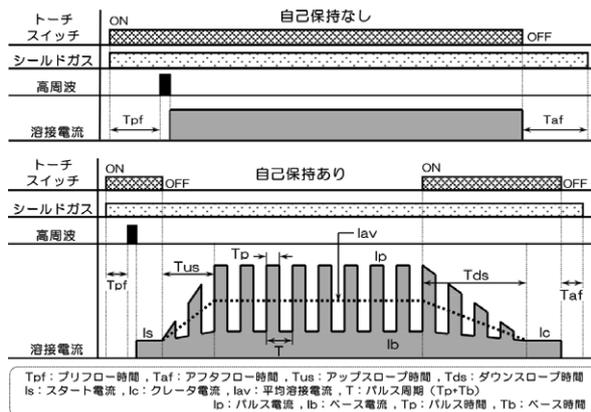


図 3.63 ティグ溶接のシーケンス制御

“自己保持あり”の動作モードは厚板の溶接や溶接線の長い場合に使用され、トーチスイッチを ON するとシールドガスが流れ始め、所定のプリフロー時間 ( $T_{pr}$ ) が経過すると高周波高電圧が印加され、それに導かれてアークが点弧する。アークが発生すると高周波高電圧の印加は停止し、スタート電流・ $I_s$  による溶接が開始される。次に、トーチスイッチを OFF にすると電流は徐々に増加し、アップスロープ時間 ( $T_u$ ) が経過すると、所定の本溶接電流 ( $I_w$ ) に到達して本溶接へ移行する。再びトーチスイッチを ON すると  $I_w$  の通電は終了し、電流は徐々に減少してダウンスロープ時間 ( $T_d$ ) が終了するとクレータ電流 ( $I_c$ ) が通電される。この状態でトーチスイッチを OFF にすると、 $I_c$  の通電が停止して溶接を終了するが、シールドガスは流れ続け、アフターフロー時間 ( $T_{af}$ ) の経過後にガスの流出を停止して一連の動作が完了する。

“自己保持なし”の動作モードは薄板の溶接や短い溶接線に適用され、トーチスイッチを ON すると、初めから  $I_w$  が通電される。またトーチスイッチを OFF すると  $I_w$  の通電を停止する。シールドガスの流出・停止や高周波高電圧の印加は、自己保持ありの場合とほぼ同様であるが、スタート電流制御やクレータ電流制御などは行われず、通電される電流は一定である。

### 3.4.4 直流ティグ溶接

前述したように (3.4.2 項 (1) 参照)、ティグ溶接では電極マイナス (EN) の極性の場合に、集中した指向性の強いアークが得られる。そのため、一般に、直流ティグ溶接ではアークの集中性に優れ、電極の消耗も少ない直流電極マイナス (DCEN) 極性を採用する。直流電極プラス (DCEP) 極性は、溶接に適した特性が得られず電極消耗も極めて多いため、この極性

が単独で使用されることはほとんどない。

直流電極マイナス（DCEN）極性のアークは極めて安定で、アーク音もほとんど発生しない。また、溶融池は静かで変動も少ないため、アークの状態や溶融池の挙動を明瞭に観察することができる。この溶接法は炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、ニッケル・ニッケル合金、銅・銅合金、チタン・チタン合金、金および銀など、アルミニウム・マグネシウムおよびそれらの合金を除く、ほとんどの金属に幅広く適用することができる。

ティグ溶接では、直流ティグ溶接に限らず全てのティグ溶接に共通するが、溶着金属の添加が必要な場合には溶加棒または溶加ワイヤを供給・添加しなければならない。手動ティグ溶接では、図 3.64 に示すように、一方の手で溶接トーチの操作を行いながら、他方の手で溶加棒の添加操作を行う。溶加棒は親指と人差指で持ち、中指と薬指の間を通した状態で保持する。そして溶加棒を添加する際には、中指と薬指をガイドにして親指のみあるいは親指と人差指で少しずつ送り出して溶融池へ添加する。作業にはかなりの熟練が要求される操作である。

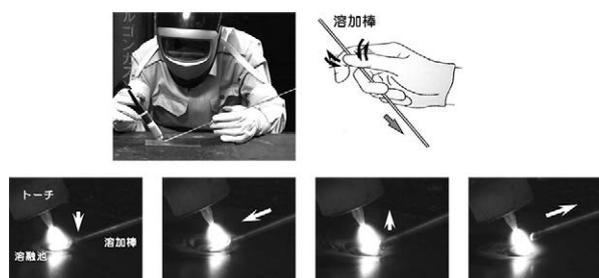


図 3.64 溶加棒の添加操作

自動ティグ溶接や半自動ティグ溶接では、図 3.65 に示すような溶加ワイヤ自動供給システムなどを用いて、溶加ワイヤを溶融池へ自動的に添加する。溶加ワイヤは、ワイヤ送給装置によって自動送給されるため、溶加材添加に対する熟練度は不要となる。また溶



図 3.65 溶加ワイヤ自動供給システム

加材の添加が安定して行われるため、均一なビード外観が得られるといった長所も得られる。なお溶融池へのワイヤ添加位置を調整するためのワイヤ添加機構（ワイヤガイド）は、標準ティグ溶接トーチの先端部へ容易に装着できるように工夫されている。

### 3.4.5 交流ティグ溶接

#### (1) 交流ティグ溶接の特徴

アルミニウムの融点は約 660℃であるが、その表面には融点が 2,000℃を超える高融点（2,049℃）の酸化皮膜（ $Al_2O_3$ ）が存在する。この酸化皮膜を除去することなく表面からアークで加熱しても、酸化皮膜が邪魔をして健全な溶接部を得ることができない。アルミニウムの溶接に直流ティグ溶接が使用されることもあるが、クリーニング作用（前述 3.4.2 節 (1) 参照）を利用して酸化皮膜を除去するには、電極プラス（EP）の極性を用いなければならない。しかし電極プラス極性では、電極に電子が流入して過大なエネルギーが電極に加えられるため、電極は著しく加熱され消耗が極めて多くなる。そこでアルミニウムの溶接では、電極マイナス（EN）極性での集中した指向性の強いアークと、電極プラス極性でのクリーニング作用の両者を利用できる交流ティグ溶接の適用が検討された。しかし交流溶接では、極性の反転時に電流は一時的に零となり、アークは消滅するため交流溶接の適用は不可能であった。このような問題を解決するために、1946（昭和 21）年に、アークの起動に用いる高周波高電圧をアークが起動しても停止させず、高周波高電圧を交流電流に常時重畳しながら溶接する方法が考案された。極性反転時に電流が一時的に零となってアークが消滅しても、極性反転後には高周波高電圧によってアークは再点弧し、アークは見かけ上連続して発生する。

なお、交流ティグ溶接には次のような問題もある。図 3.66 に示すように、母材が陰極となる棒プラス（EP）極性の半波では、アークの発生（電子の放出）に比較的大きなエネルギーを必要とするため、アーク電圧が高く、溶接電流は小さくなる傾向がある。反対に、タンガステン電極が陰極となる棒マイナス（EN）極性の半波では、電子放出に必要なエネルギーが比較的小さく、アークの発生が容易であるため、アーク電圧は低く、溶接電流は大きくなる。その結果、溶接電源の出力電流は非対称な交流波形となり、直流成分（IDC）を含んだ不平衡電流が通電されることとなる。この傾向は、アルミニウムおよびその合金の溶接で特に著しく、場合によっては直流成分が交流成分の 1/3

に達することもある。また、電極プラス極性の半波電流が部分的に消滅して、アークが不安定になることもある。

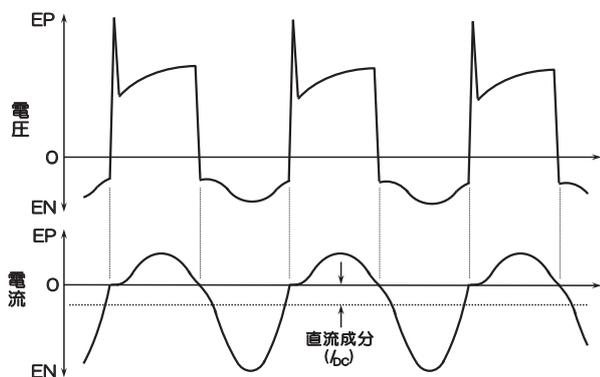


図 3.66 交流アークの整流作用<sup>19)</sup>

このような直流成分が発生すると、電源の変圧器鉄心は一方方向に磁化されて飽和し、電源の入力側には著しい磁化電流が流れて電源を焼損することがある。そのため交流ティグ溶接電源では、直流成分の存在を考慮して定格出力電流や定格使用率を規定している。また直流成分を打ち消すために、溶接電源の出力回路に抵抗やコンデンサを挿入するなどの対策も行っている。

交流ティグ溶接が導入される以前は、アルミニウムの溶接にガス溶接が適用されており、事前に溶接部へフラックスを塗布することが必要であったとともに、そのフラックスが溶接後も残留して溶接部を腐食するという問題もあった。しかし交流ティグ溶接ではフラックスの事前塗布が不要となり、非常に美しい溶接ビードが得られ、腐食の問題もないとの評価を得た。交流ティグ溶接によるビード外観の一例を図 3.67 に示す。溶接ビード周辺の白くなった部分が、クリーニング作用で酸化被膜が除去されたクリーニング領域である。

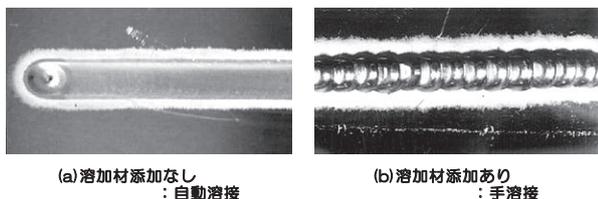


図 3.67 アルミニウムの交流ティグ溶接

交流ティグ溶接では、電極プラス極性期間中の電極加熱によって、酸化物がなくても比較的安定にアークを維持できるため、従来は純タングステン電極の使用

が推奨されていた。トリアタングステンが消耗すると先端部が多数の空孔を持つ軽石状になって欠けやすく、その一部が熔融池へ落下すると溶接欠陥になるためである。しかし酸化物入りタングステンであっても、前述 3.4.2 項 (2) で述べたように、2%酸化セリウムタングステンでは先端部が軽石状に変形することはなく、純タングステンに比べて電極消耗もはるかに少ないため、近年では交流ティグ溶接用電極として2%酸化セリウムタングステンの使用が増加している。

なお、母材表面に2,800℃の酸化皮膜を持つマグネシウムやその合金の場合も、クリーニング作用を利用して酸化被膜を除去するために交流ティグ溶接が適用される。

## (2) 極性時間比率制御

近年の交流ティグ溶接電源には、電極プラス (EP) の極性時間と電極マイナス (EN) の極性時間との比率 (EP 極性時間比率: 棒プラス極性時間 / 交流周期) を任意に変化させることができる機能が付加されている。EP 極性時間比率を変化させるとクリーニング作用の効果も変化し、図 3.68 に示すように、EP 極性時間比率が小さくなるとクリーニング幅およびビード幅は減少し溶込み深さが増加する。また、EP 極性時間比率は電極消耗にも大きく関与し、その比率が大きくなるほど電極消耗量が増加する。EP 極性時間比率が30%を超えると電極の消耗は特に著しくなり、電極先端形状は大きく変化する。

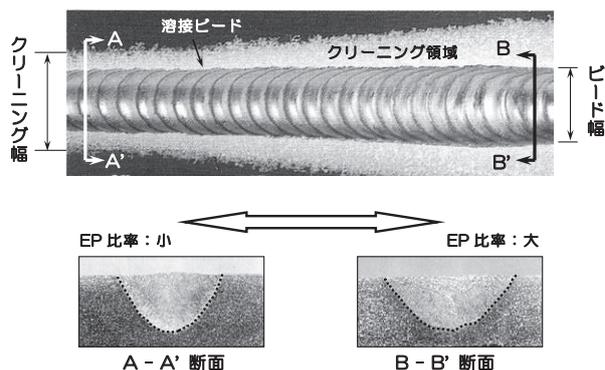


図 3.68 ビード形状におよぼす EP 極性時間比率の影響

溶接結果におよぼす極性時間比率の影響は表 3.6 のようであり、EP 極性時間の比率を増加させると、ビード幅およびクリーニング幅が増加し溶込み深さは減少する。また EP 極性時間が長くなるほど、電極への負担が大きくなって電極の消耗・変形が多くなる。

このような極性時間比率の制御が可能となったのは、1970 年代前半に開発されたサイリスタ制御電源

の出現によってであり、それ以前の可動鉄心形電源では不可能な制御であった。しかし極性の極端なアンバランスが生じると、サイリスタ制御電源では偏磁による変圧器への負荷が増加して、変圧器を焼損することもある。そのためサイリスタ制御電源のEP極性時間比率の変化幅は、せいぜい5%程度とせざるをえなかった。

表 3.6 EP 極性時間比率制御の効果

EP極性時間比率	ビード外観	断面マクロ	電極消耗
10%			
30%			
50%			

EP極性時間比率=EP極性時間/交流周期, 母材: A5052・6mmt φ3.2mm・W+2%CeO<sub>2</sub>  
(AC・200AX6分)

ところが、1987（昭和62）年に出現した出力と極性とをそれぞれ独立に制御する交流インバータ制御電源では、極性に極端なアンバランスがあっても変圧器への負荷が増加することはない。すなわち、EP極性時間比率を0~100%の広範囲で制御することができ、EP極性時間比率は通常25~30%程度に設定されている。サイリスタ制御電源とインバータ制御電源の極性時間比率制御の比較を表3.7に示す。溶接電源の構成や特徴などの詳細については後述の第4章4.4.3項で述べる。

表 3.7 極性時間比率制御の比較

EP極性時間比率	サイリスタ制御	インバータ制御
最小		
標準		
最大		

50A/div, 4ms/div

### (3) 交流周波数制御

従来の交流ティグ溶接電源の交流周波数は、溶接電源の構成上、商用周波数（関東以北で50Hz/中部・関西以西で60Hz）に限定されていた。しかし近年の交流ティグ溶接電源では、交流周波数を任意に変化させることが可能である。交流周波数を増加させるとアーク圧力は図3.69のように上昇し、交流アークであるにも拘らず、そのアーク圧力分布は直流アークのアーク圧力分布に近づく。すなわち交流周波数を増加させると、交流アークの指向性・集中度が向上し、交流溶接においても直流溶接に類似したアーク特性が得られるようになる。交流周波数とビード形状の関係は表3.8のようであり、交流周波数の増加とともに、ビード幅および溶込み深さが増加して、クリーニング幅は減少する。交流周波数が200Hzを超えるとその効果は特に著しく、溶込み深さは大幅に増加し、ビード止端部が明瞭に区別できるようになる。

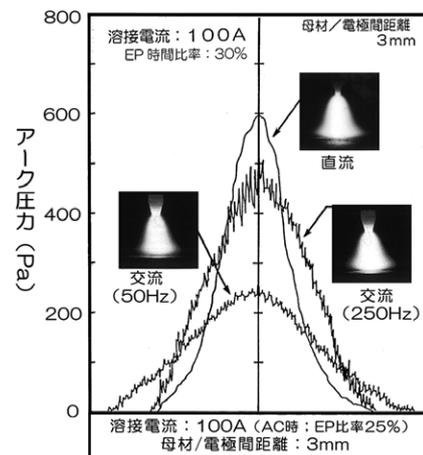


図 3.69 アーク圧力分布の比較

表 3.8 交流周波数制御の効果

交流周波数	ビード外観	断面マクロ
25Hz		
50Hz		
100Hz		
200Hz		
250Hz		

AC100A・EP時間比率30%  
シールドガス: Ar (20ℓ/min), 母材: A5052・6mmt

このような交流周波数制御は、1989（平成1）年にわが国で開発されたが、その後はしばらくの間適用されることはほとんどなかった。しかし2004（平成16）年頃になると、国内の電源メーカー各社が採用を始め、近年では市販交流ティグ溶接電源の標準的な仕様となっている。

交流周波数制御の効果の一例を示すと、図3.70のようである。アルミニウムおよびその合金のティグ溶接では、熱伝導の影響で、溶接の進行に伴ってビード幅が広くなりやすい。しかし、交流周波数200Hzの溶接では、溶接の進行に伴うビード幅の増加はほとんど認められない。また角溶接では、交流周波数50Hzの場合にはアークの集中性に乏しいため、肩垂れを生じてビード幅が広がる。しかし交流周波数が200Hzの場合には、集中性に富むアーク状態が得られ、肩垂れをほとんど生じない美しいビード外観が得られている。

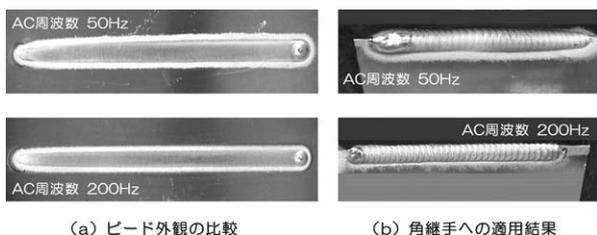
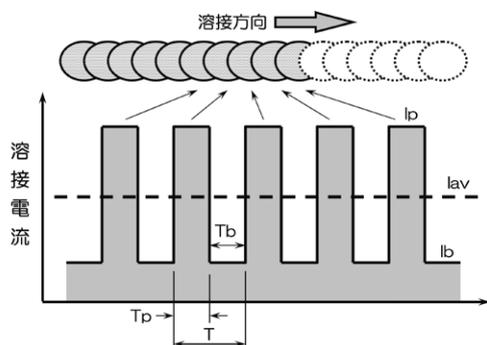


図 3.70 交流周波数制御の効果

### 3.4.6 パルスティグ溶接

溶接電流を周期的に変化させてティグ溶接する方法をパルスティグ溶接といい、図3.71に示すように、パルス電流、ベース電流、パルス期間およびベース期間などのパルスパラメータを変化させることによって種々な特性や効果が得られる。パルスティグ溶接は、一般に、直流ティグ溶接で使用されることが多く、パ



lp: パルス電流 lb: ベース電流 Tp: パルス期間 Tb: ベース期間  
 T: パルス周期 (= Tp + Tb) f: パルス周波数 { = ( Tp + Tb ) }  
 lav: 平均溶接電流 { = ( lp × Tp + lb × Tb ) / ( Tp + Tb ) }

図 3.71 パルスティグ溶接の原理

ルス周波数によって20Hz程度以下の“低周波パルス溶接”、20~500Hz程度の“中周波パルス溶接”および1kHz程度以上の“高周波パルス溶接”に大別される。ただし、これら各パルス溶接の周波数域は厳密に区別されているわけではない。

#### (1) 低周波パルス溶接

低周波パルス（ローパルス）溶接は、1962（昭和37）年にペトロフ（A. V. Petrov）らが、1963（昭和38）年にブライン（A. G. Brain）らが提案した溶接法である。初層溶接で生じやすい溶落ちを防止したり、立向溶接や横向溶接などでのビードの垂れ下りを抑制したりするために、数Hz以下の周波数で溶接電流を大小交互にかつ周期的に変化させて、母材への入熱を制御する。

低周波パルス溶接では、大電流が通電されるパルス期間中に母材を溶融して溶融池を形成し、小電流が通電されるベース期間中に溶融池の凝固を促進するといった動作を周期的に繰り返して溶接が進行する。ビード外観におよぼすパルス周波数の影響は表3.9のようであり、極端な場合（表3.9ではパルス周波数1Hzの場合）には、スポット溶接ビードを重ね合わせて溶接が進行することとなる。溶融池の形成時間がパルス期間に、凝固時間がベース期間にそれぞれ対応するため、パルス周波数にはおのずから限界があり、通常、その上限は20Hz程度に制限される。溶接電流は極めて速い速度で応答できるが、溶融池の応答はそれほど速くないためである。

表 3.9 ビード外観におよぼすパルス周波数の影響

パルス周波数	ビード外観
1 Hz	
2.5 Hz	
5 Hz	
10 Hz	
25 Hz	

lav = 100A (lp = 150A・lb = 50A・パルスデューティ=50%),  
 アーク長=3mm, 溶接速度=200mm/min, 母材: SPCC・2.3mmt

溶接ビードはパルス周期に同期して形成されるため、波目が均一にそろったビード外観を得ることがで

き、パルス電流の作用でビード幅も広くなる。しかし、溶込み深さは溶接電流の変化に応じて変動する（パルス期間で深くベース期間では浅くなる）ため高速溶接などには適さない。

ステンレス鋼と低炭素鋼などの異種材料継手や板厚が異なる部材で構成された継手（差厚継手）などの溶接では、それぞれの部材の熱伝導特性が異なるため、電流値が一定の直流溶接で良好な溶接結果を得るには溶接作業者に相当の熟練が要求される。しかしこのような継手に低周波パルス溶接を適用すると、パルス電流で母材が集中的に溶融されるため熱伝導の影響を受けにくく、熟練度に関係なく良好な溶接結果が得られやすい。また低周波パルス溶接では、パルスパラメータをそれぞれ独立かつ任意に設定することができるため、母材の溶融と凝固をきめ細かく制御することが可能となり、裏波ビードの形成やビードの垂下り防止に効果がある。低周波パルスティグ溶接の適用例を図 3.72 に示す。

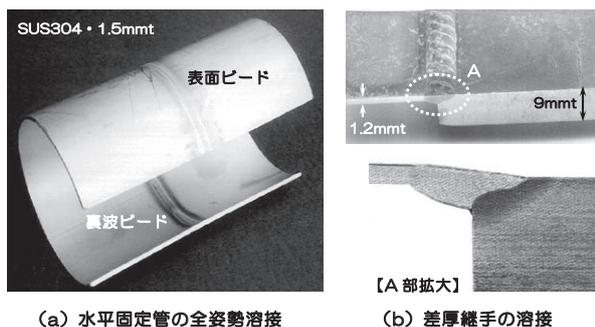


図 3.72 低周波パルス溶接の適用例

## (2) 中周波パルス溶接

中周波パルス（ミドルパルス）溶接は、1986（昭和 61）年に坂部らが提案した溶接法であり、出力を高速で制御できるインバータ制御溶接電源の開発によって可能となったティグ溶接法である。中周波パルス溶接では、小電流溶接や高速溶接での作業性を改善するために、溶接電流を数十～数百 Hz の周波数で大小規則的に変化させて、アークの指向性や集中度を向上させる。パルス周波数が高いため、電流変化に溶融池の挙動が追従できず、低周波パルス溶接のような明瞭なビード波が形成されず、母材への入熱を制御する効果もほとんどない。

溶接電流 10A 程度の直流（パルスなし）溶接を行うと、アークのふらつきが頻繁に発生して、集中した指向性の良いアーク状態は得られない。パルス周波数を 50Hz 程度まで増加させると、アークの指向性や集中度は多少改善されるが、必ずしも作業性の良いアーク

状態とはならない。しかしパルス周波数を 250Hz 程度以上にすると、表 3.10 に示すように、アークの指向性や集中度が大幅に向上して作業性の良好なアーク状態が得られるようになる。

表 3.10 アークの硬直性におよぼすパルス周波数の影響

パルス周波数	アーク形態	ビード外観
パルスなし (直流)		
50Hz		
250Hz		

平均溶接電流：10A、パルス電流：50A、ベース電流：5A、  
パルスデューティ：50%、母材：SUS304 (0.4mmt)、母材-電極間距離：7.5mm

パルス周波数を増加させると溶込み深さはやや減少する傾向を示すが、溶加材を添加しても溶融池の乱れは少ないため通常より太径の溶加材を使用することができる。また仮付け溶接ビードなどの影響を受けにくい、大電流溶接時のアーク圧力の増加が抑制されて溶融池の凹みが比較的少なくなるなどの効果も得られる。

パルス周波数が 15～25Hz の領域では溶融池の振動とパルス周期とが同期して、極めて均一かつ美しいビード外観が得られることもあるが、電流変化にともなうアーク光のちらつき（フリッカー）が非常に目障りとなる。また、パルスパラメータや溶接速度の設定を誤るとアンダカットなどの欠陥を発生しやすいため、この範囲の周波数が採用されることは少ない。中周波パルス溶接の効果は、通常、パルス周波数が 200Hz を超えた領域で最も得られる。

## (3) 高周波パルス溶接

アークの指向性・集中度をより一層高めるとともに、溶融池へ高周波振動を付加することを目的として、パルス周波数をさらに増加させたものが“高周波パルス（ハイパルス）溶接”である。この溶接法は、1976（昭和 51）年に後藤らによって提案された。パルス周波数としては、通常、10k～25kHz が用いられるが、パルス周波数 17kHz 以下の領域では高音程の耳障りなアーク音が発生する。

溶接電流が高い周波数で変化するため、溶融池には高周波による振動が加えられ、溶融池金属の攪拌作用や脱気泡作用が生じて、金属組織の微細化やブロー

ホール抑制などの効果が得られる。また小電流でのアークの安定性や集中性に優れ、平均溶接電流 1A 程度でも安定なアーク状態が得られるため、板厚 0.05mm 程度の極薄板の溶接も可能である。しかし高周波パルス溶接の電源・装置は極めて高価であり、溶接ケーブル長さの影響を受けやすく、耳障りなアーク音が発生するなどの問題点も多いため、その適用は一部の特殊な用途に限られている。高周波パルスティグ溶接の適用例を、中周波パルスティグ溶接の適用例と合わせて、図 3.73 に示す。

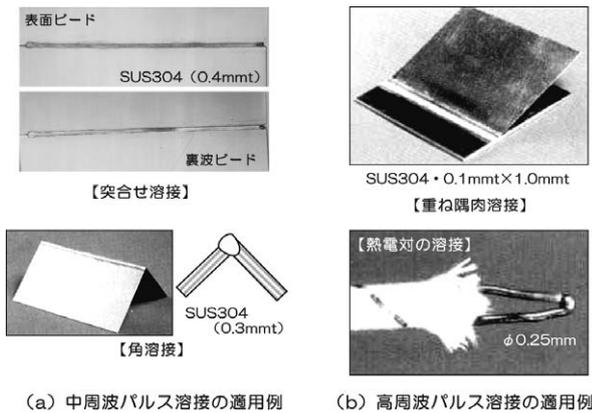


図 3.73 中・高周波パルス溶接の適用例

#### (4) 交流パルス溶接

交流ティグ溶接においてもパルス溶接は存在し、図 3.74 に示すように、“交流低周波パルス溶接”ではパルス期間およびベース期間それぞれに対応して溶接電流の振幅が大小に変化する。“交流中周波パルス溶接”では、出力レベルを制御する 1 次側（入力側）インバータで作った直流中周波パルスを、極性を制御する 2 次側（出力側）インバータで交流に変換する。なお交流中周波パルス溶接は、1989（平成 1）年にダブル・インバータ制御方式の交流溶接電源が開発されて可能となった溶接法である。

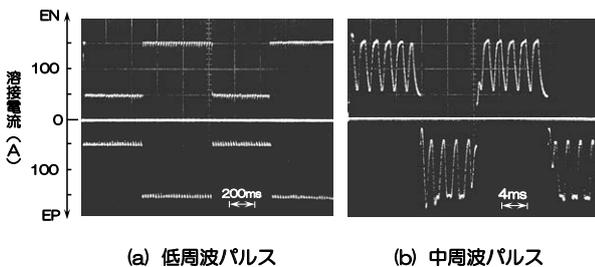


図 3.74 交流パルスティグ溶接の電流波形

交流パルス溶接の効果は、直流パルス溶接の場合とほぼ同様であり、交流低周波パルス溶接ではパルス周

波数に同期した規則的なビード波が形成され、母材への入熱制御が必要な水平固定管の全姿勢溶接などに有効である。交流中周波パルス溶接では、交流アークの集中度が改善されるため、小電流域での作業性が向上し、板厚 0.4mm のアルミニウム合金の突合せ溶接においても均一な裏波ビードを比較的容易に形成することができる。交流低周波パルス溶接および交流中周波パルス溶接の主な適用例を図 3.75 に示す。

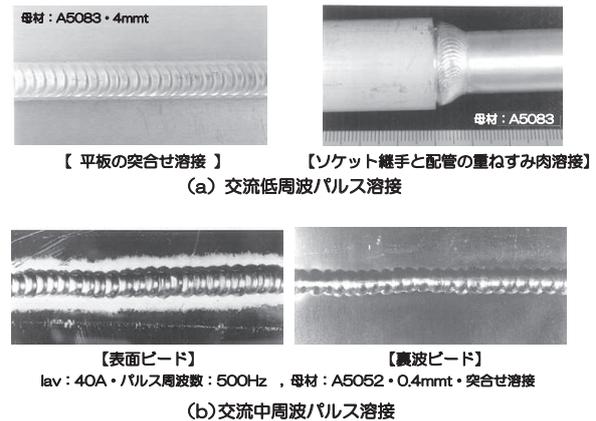


図 3.75 交流パルスティグ溶接の適用例

#### 3.4.7 ホットワイヤ・ティグ溶接

ティグ溶接は取扱いが比較的容易で、高品質な溶接継手が得られる、母材への入熱と溶着量をそれぞれ独立に制御することができる、溶接条件の適正範囲が広いなど多くの長所を持つ。しかしマグ溶接などに比べると溶着速度が遅く、高能率な溶接ができないという短所がある。“ホットワイヤ・ティグ溶接”はティグ溶接の短所である溶着速度の向上を目的として、図 3.76 に示すように、溶接電源とは別に設けた電源で溶加ワイヤに通電して、抵抗発熱による加熱を利用して溶着速度を増大させる溶接方法である。通電加熱された溶加ワイヤは半溶融状態で溶融池に添加されるため、通常のティグ溶接（コールドワイヤティグ溶接）に比べ、図 3.77 のように溶着速度を 3 倍程度まで増加させることが可能となり、厚板溶接の能率向上や薄板溶接の高速化などに効果を発揮する。ホットワイヤの効果は通電による抵抗発熱 ( $I^2R$ : 電流  $2 \times$  固有抵抗値) で決まるため、固有抵抗値が大きいオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル合金などでは特に大きい効果が得られる。しかし固有抵抗値が小さいアルミニウムやその合金などでは、得られる抵抗発熱量が比較的少ないため、それほど大きい効果は期待できない。

ホットワイヤ・ティグ溶接のアイデアは 1970 年代

に考案されたが、上述図 3.76 のような構成でワイヤに直流電流を通電すると、ティグアークと溶加ワイヤに同一方向の電流が通電されるため、両者間にはお互いに引き合う力が作用してアークはワイヤ側に大きく偏向し、いわゆる磁気吹きが発生する。このような磁気吹きによる作業性劣化を軽減するために、通電電流を交流として、半サイクルごとにアークの偏向方向を変化させて溶接作業への悪影響を緩和する方法なども検討されたが、実用化までは至らなかった。

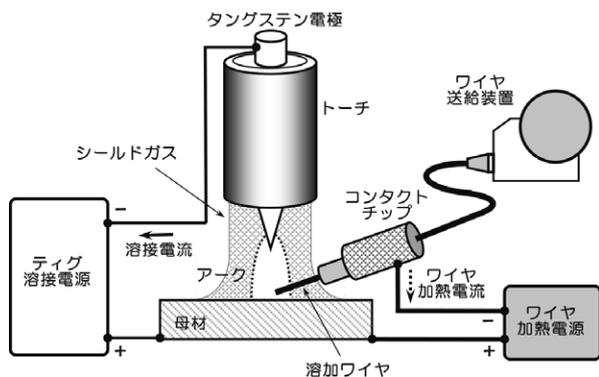


図 3.76 ホットワイヤ・ティグ溶接

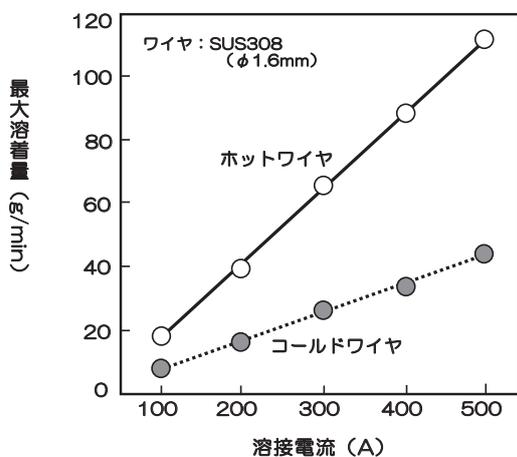


図 3.77 最大溶着量の比較

1990 (平成 2) 年になると、パルス電流を用いてワイヤを通電加熱することによって、磁気吹きの影響を軽減する方法が開発された。パルス電流の通電方法には、溶接電流を直流としてパルス通電加熱と組み合わせる方法と、溶接電流をパルス電流として、そのベース期間中のみパルス通電加熱を行う方法の 2 種類がある。溶接作業性に及ぼす磁気吹きの影響を比較すると表 3.11 のようであり、溶接電流および通電加熱電流をそれぞれパルス状にして、ワイヤへの通電をベース期間中のみ限定すると磁気吹きの影響は大幅に抑制され、極めて良好な溶接作業性が得られる。

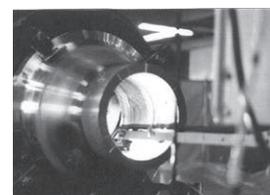
表 3.11 磁気吹きにおよぼすワイヤ加熱電流の影響

加熱方式	直流通電加熱	交流通電加熱	パルス通電加熱	パルス同期通電
溶接電流	直流通電	交流電流	パルス電流	パルス電流
ワイヤ加熱電流	直流通電	交流電流	パルス電流	パルス電流 ベース電流期間に加熱電流を通電
磁気吹き	一方向の磁気吹き	磁気吹きの方向が変化	ワイヤ通電時磁気吹き発生	ベース期間のみ磁気吹き発生
溶接作業への影響	× (大)	△ (やや大)	○ (比較的小)	◎ (小)

パルス通電加熱方式のホットワイヤ・ティグ溶接は、比較的広範囲な産業分野で実用化されており、その一例を図 3.78 に示す。



(a) ボイラチューブの自動溶接



(b) ステンレス部品の肉盛溶接



(c) 鋼管の半自動ティグ溶接

図 3.78 ホットワイヤ・ティグ溶接の適用例<sup>20)</sup>

## 3.5 ミグ溶接

### 3.5.1 ミグ溶接の発展経過

ミネソタ大学のウェバー (L. J. Weber) は 1926 (大正 15) 年に、ヘリウムをシールドガスに用いることによって鉄の溶接金属部の特性が極めて改良されることを実験によって示した。しかし、電位傾度 (単位長さのアークを維持するために必要な電圧) が高いヘリウム気中でのアークの維持はかなり困難であったため、この方法が実用化されることはなかった。電位傾度が比較的低い (ヘリウムの約 1/2) アルゴンをシールドガスに用いる溶極式アーク溶接法は、リンデ (Linde) 社とバツテル記念研究所 (Battelle Memorial Institute) の共同研究によって、1947 (昭和 22) 年に開発された。溶接ビードはティグ溶接に比べてやや劣るが、溶接品質は良好で溶接速度が速いことが特長であった。また 1948 (昭和 23) 年には、

エア・リダクション (Air Reduction) 社のソーン (J. S. Sohn) によって、コイル状消耗式電極を用いてアルゴンシールド雰囲気中でアーク溶接する方法についての報告がなされている。そして1951 (昭和26) 年には、リンデ社が“シグマ溶接”の商品名で、エア・リダクション社が“エアコマテック溶接”の商品名で、それぞれミグ溶接機の市販を開始した<sup>5)</sup>。

溶接機の概略構成は図3.79 (a) のようであり、リールから引っ張り出されたワイヤは送給機構によって溶接ヘッドへ挿入される。不活性ガスはガスボンベから溶接ガンへ供給され、溶接電流は直流発電機から得る。制御回路に起動信号を入力すると、溶接回路の接点が開いてガスバルブが開き、不活性ガスの流出が始まる。ワイヤへの通電を開始しアークが発生すると、ワイヤ送給モータへ電圧が加えられワイヤの送給が開始し、アークが維持されている限りワイヤ送給速度に応じた溶接金属が形成される。起動信号を停止すると溶接回路の接点が開き、アークは消弧してガスの流出も停止する。(b) はワイヤ送給モータユニットを示したものであり、リールからワイヤを引っ張る送給機構と、それを送給ローラへガイドする機構で構成されている。ワイヤ送給モータが励起され、送給ローラが回転を開始すると、リールから引っ張り出されたワイヤは溶接ヘッドの中へと導かれる。送給モータには、速度調整用のノブが付加されている。この装置はフィラデルフィア (Philadelphia) 海軍造船所の設計技師が設計し、“半自動不活性ガスシールドメタルアーク溶接装置”と呼ばれて、1952 (昭和27) 年時点ではリンデ社とエア・リダクション社の二社が生産・販売していた<sup>21) 22)</sup>。

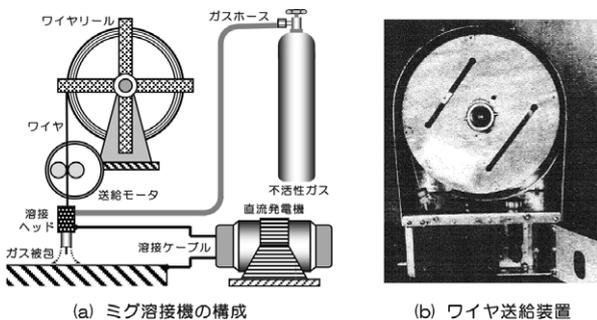


図 3.79 開発当初のミグ溶接機<sup>21) 22)</sup>

1949年には、米国海軍が長さ30.5mのアルミニウム構造船の建造にミグ溶接を採用し、極めて良好な溶接結果が得られたことを報告した。そして米国海軍は、この溶接法を多くのアルミニウム合金構造物の製作に適用した。エンジンルーム内の縦骨材と横骨交差

部の溶接、海底清水タンク、ガンの方向支持台、アルミ合金三脚マスト、アルミ合金製魚雷巡視艇などである。魚雷搭載巡視艇では、全てのロンジフレームとトランスフレームとの交差部がミグ溶接されている。

ミグ溶接は米国の産業分野で積極的に導入され、様々なタイプのコンテナ・ベッセル・タンクなど、初期の頃は主に化学産業分野を主体に適用された。その後、輸送産業分野でも軽車両の製作でミグ溶接の利用価値を見だし、アルミニウム合金製ダンプカー車体の溶接やディーゼルエンジンのピストン摩耗補修などに適用した。また多種類のアルミニウム・アルミニウム合金構造物の製造によって、様々な溶接条件や溶接姿勢に対応できること、銅・マグネシウム・ニッケルおよびそれらの合金などにもミグ溶接は十分適用可能であることが短期の間に明らかにされた。

わが国へは、1950 (昭和25) 年頃にミグ溶接機が輸入され、一部でアルミニウム合金やステンレス鋼に利用されたようである。しかし本格的に普及するのは、1954 (昭和29) 年に大阪変圧器が国産のミグ溶接機を“シグマ溶接機”の商品名で市販するようになってからである。そのシグマ溶接機の外観を図3.80に示す。

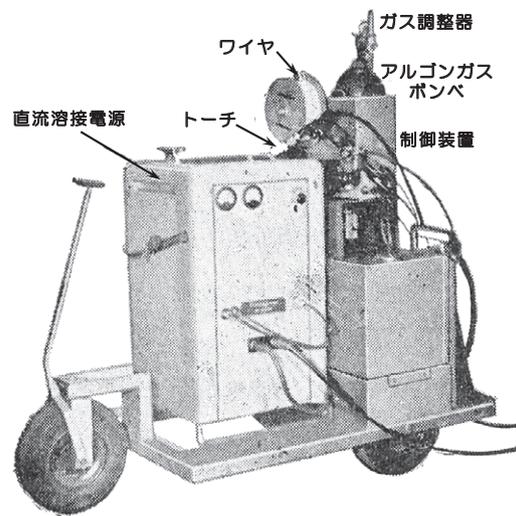


図 3.80 シグマ溶接機<sup>5)</sup>

同年には、播磨造船所がアルミ合金製のホルマリントank (50トン) を全溶接で製作した。これがわが国での初めてのミグ溶接の本格的な採用とされている。また1957 (昭和32) 年には、浦賀船渠がミグ溶接とティグ溶接を多用して、上部構造とハッチカバーで180トンのアルミを使った9,000トンのボーキサイト船「サンウォーカー」を建造した。その後、1966 (昭和41) 年には301型全アルミ国鉄通勤電車が全てミ

グ溶接で施工され、1977（昭和 52）年にはアルミ球形タンク構造によるわが国初の LNG 船が川崎重工業で建造された。1981（昭和 56）年には、大型押出型材と溶接を組み合わせたアルミ合金製車両が山陽電鉄で採用され、以後通勤用・地下鉄用でアルミ合金製の車体（構体）構造が増えることとなった。これらの溶接にはミグ溶接が大きい役割を果たしている<sup>5)</sup>。

比較的初期のミグ溶接の適用例を図 3.81 に示す。(a) はアルミニウム製タンクの溶接、(b) はアルミニウム製車両の溶接、(c) はアルミニウム製高速艇の溶接そして (d) はアルミニウム製プールの溶接である。なおアルミニウムワイヤには剛性が小さく座屈しやすいなどの問題があるため、1962（昭和 37）年には、図 3.82 に示すような小型プルトーチも開発されている。このトーチは、ワイヤ送給機構と数百 g のワイヤを巻いたスプールとが一体化したスプール・オン・トーチとなっており、狭隘な場所でも良好な作業性が得られる<sup>11)</sup>。

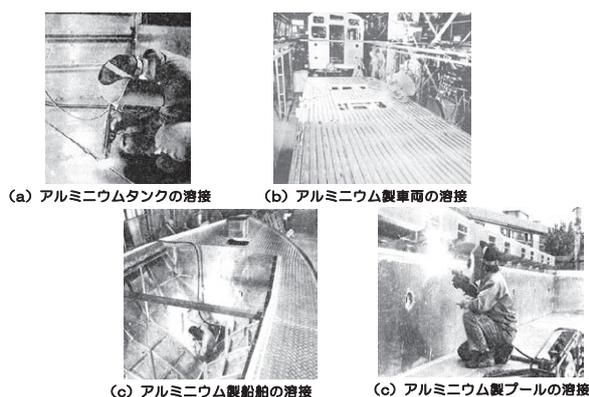


図 3.81 ミグ溶接のアルミニウムへの適用<sup>11)</sup>

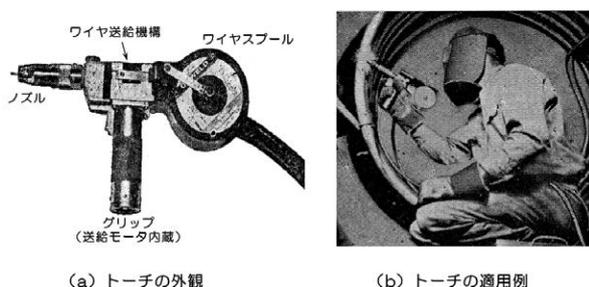


図 3.82 小型プルトーチ<sup>18) 19)</sup>

### 3.5.2 ミグ溶接の基礎事項

#### (1) アークを安定に保つ仕組み

ミグ溶接はアークを発生する電極（ワイヤ）自身が溶融する溶極式溶接法であるため、ワイヤの供給量と溶融量とのバランスを保つことが、アークを安定に維持するための重要なポイントである。図 3.83 はその仕組みを示したもので、遠隔操作箱（リモコンボックス）

には電流および電圧をそれぞれ設定するためのダイヤルが設けられている。電流設定ダイヤルはワイヤ送給モータの回転速度を指令するダイヤルであり、この設定値によって溶接部へ供給されるワイヤの送給量が決まる。電圧設定ダイヤルは溶接電源の出力レベル（図中の  $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ ）を指令するダイヤルであるが、通電される溶接電流値（図中の  $I_0$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ ）をアーク特性との関係で等価的に決定する。すなわちアーク状態は、電流設定つまみに応じた速度で定速送給されるワイヤ送給量（WF）と、電圧設定つまみに応じて間接的に決まる溶接電流（I）で支配されるワイヤの溶融量（MR）のバランスで決まり、WF と MR が等しい場合にアーク長は一定に維持されて安定なアーク状態が得られる。

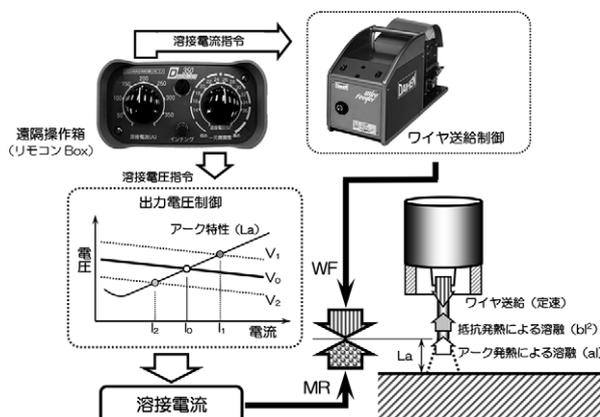


図 3.83 ワイヤ送給量と溶融量のバランス

MR は、下式のように、アーク発熱による溶融量 ( $aI$ ) と、ワイヤ突き出し部で発生する抵抗発熱による溶融量 ( $bI^2$ ) との和として与えられる。そしてこれら 2 つの溶融量は、いずれも  $I$  によって支配される。

$$\text{ワイヤ溶融量 (MR)} = \text{アーク発熱による溶融量 (aI)} + \text{抵抗発熱による溶融量 (bI}^2\text{)}$$

(a, b : 定数, I : 溶接電流)

すなわちミグ溶接における適切なアーク状態の選定は、ワイヤの送給量とその溶融量が等しくなるように、電流設定ダイヤルと電圧設定ダイヤルを操作することを意味する。しかしワイヤ溶融量を支配する溶接電流は出力電圧によって間接的に決まり、このことが適切なアーク状態が得られる溶接条件の選定に熟練を必要とする大きい要因の 1 つとなっている。

太径ワイヤ（直径 3.2～6.4mm）を用いるサブマージアーク溶接では、電流変化の少ない垂下特性電源を用いる。その場合、ワイヤの送給（供給）速度は比較的遅い（毎分 1～3m 程度）ため、アーク長（アーク

電圧)の変化に応じたワイヤ送給速度の増減制御でアーク長を一定に保っている(前述 3.3.3 節 / 図 3.32 参照)。

一方ミグ溶接は、細径ワイヤ ( $\phi 0.8\sim 1.6\text{mm}$ ) に大電流を通電する高電流密度の溶接方法であるため、溶接ワイヤを毎分 3~15m の比較的高速で送給(供給)しなければならない。しかし、このような高速で送給されるワイヤの送給速度を瞬時に増減して、アーク長の変化に対応することは極めて困難である。そのためミグ溶接では、一定の速度でワイヤを送給(定速送給)し、それに見合った電流でワイヤを溶融することによって、ワイヤの供給量と溶融量とをバランスさせて安定なアーク状態を維持する。溶接電源に定電圧特性電源を用いると、アーク長変動に伴う電圧の変化は少ないが、電流は比較的大きく変化し、その変化はアーク長を一定に保つことに大きく寄与する。

図 3.84 はその作用を示したもので、アーク長が  $L_0$  で維持されている状態ではワイヤの送給速度  $WF$  とその溶融速度  $MR_0$  は等しく、両者がバランスを保つためアーク長は変化しない。しかし何らかの原因でアーク長が  $L_1$  に伸びると、電流が  $I_0$  から  $I_1$  まで減少するため、ワイヤ溶融速度も低下して  $MR_1$  となる。その結果  $WF$  が  $MR_1$  より速くなり、アーク長を減少させようとする作用、すなわち長くなったアーク長を元の長さに戻そうとする作用が生じる。そして、アーク長の減少に伴って電流は増加するため、アーク長が元の長さ  $L_0$  に戻ると電流も元の値  $I_0$  となり、送給速度 ( $WF$ ) と溶融速度 ( $MR_0$ ) が再びバランスして、アーク長は  $L_0$  に維持される。反対にアーク長が減少して  $L_2$  となった場合には、電流が  $I_2$  まで増加するため、ワイヤの溶融速度は  $MR_2$  まで増加する。その結果  $MR_2$  は  $WF$  より大きくなり、アーク長を増加させようとする作用が発生して、アーク長は元の長さ  $L_0$  に戻されてその長さが維持される。

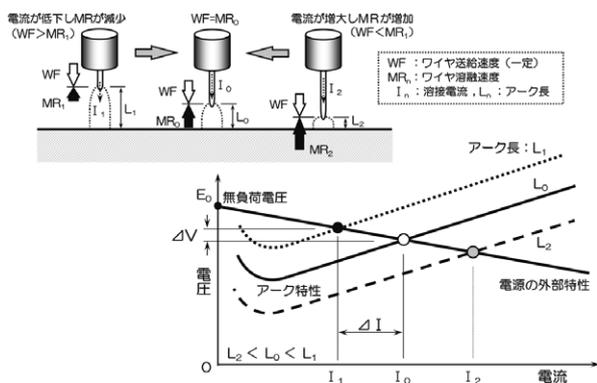


図 3.84 アーク長の自己制御作用

細径ワイヤを所定の速度で定速送給する溶極式アーク溶接では、定電圧特性電源を用いることによって、アーク長の変動に応じた溶接電流の変化が自動的に発生し、特別なアーク長制御を付加しなくてもアーク長を元の長さに復元・維持することができる。定電圧特性の溶接電源が持つこのようなアーク長の制御作用を“電源の自己制御作用”という。

## (2) 溶滴の移行形態

ミグ溶接などの溶極式アーク溶接では、極性によって溶滴の移行形態は大きく異なる。図 3.85 はその一例を示したもので、電極プラス (EP) の場合 (a) は、アークの陽極点がワイヤ端の溶滴下部に形成され、ここに電流が集中する。そのため、電極ピンチ力はワイヤ先端の溶滴を離脱させる力として有効に作用し、比較的小粒の溶滴がワイヤ端からスムーズに離脱して、溶融地 (母材) へ移行する。また、母材表面ではクリーニング作用も行われる。

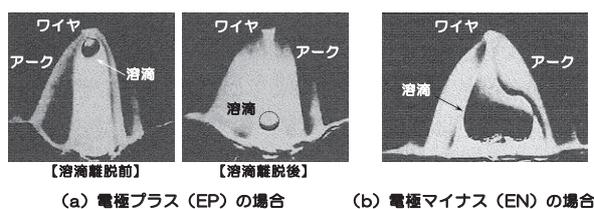


図 3.85 溶滴移行形態におよぼす極性の影響<sup>23)</sup>

反対に電極マイナス (EN) の場合 (b) は、ワイヤ側にクリーニング作用が生じ、アークの陰極点は溶滴上部のワイヤ表面まではいあがり、その表面を激しく移動して電流は一点に集中しない。その結果、電磁ピンチ力は分散し、溶滴の離脱に必要な力が減少する。そして、大きく成長した溶滴が大きな塊となってワイヤ端にぶら下がり、重力の助けを得て離脱する。またアーク長は、ワイヤ側で生じるクリーニング作用の影響を受けて、電極プラス極性の場合より長くなる。これらの現象は溶接電流が変化しても同様であり、大粒の溶滴が不規則な挙動を示し、アークは不安定で、溶込みも浅く実用的ではない。したがって溶極式アーク溶接では、通常、電極プラスの極性を採用する。

電極プラス極性のミグ溶接では、図 3.86 に示すように、電流域によって溶滴の移行形態が変化する。溶接電流が比較的小さい電流域では、(a) のような“短絡移行”となる。ワイヤ端に形成された小粒の溶滴が溶融池へ接触(短絡)する短絡期間と、それが解放されてアークが発生する期間とを、比較的短い周期 (80~120 回 / 秒程度) で交互に繰り返す。中間的な電流

域では、(b) のような“ドロップ移行”となる。ドロップ移行はグロービュール移行に大別され、ワイヤ端にはワイヤ径より大きい溶滴が形成されるが、その移行は比較的スムーズで、スパッタの発生も少ない。比較的大きい電流域になると、電磁ピンチ力が強力に作用してワイヤ端を先鋭化するため、(c) のような“スプレー移行”となる。ワイヤ先端に形成された溶滴は、熔融池と短絡することなく熔融池へ移行する。なおスプレー移行は、ワイヤ径とほぼ等しい径で溶滴がワイヤ端から離脱する“プロジェクト移行”と、先鋭化されたワイヤ端からワイヤ径より小さい径の溶滴が離脱する“ストリーミング移行”に細分される。溶滴の移行形態がグロービュール移行からスプレー移行へ推移する電流値は「臨界電流」と呼ばれ、その値はワイヤ径、材質、シールドガス組成によって異なる。

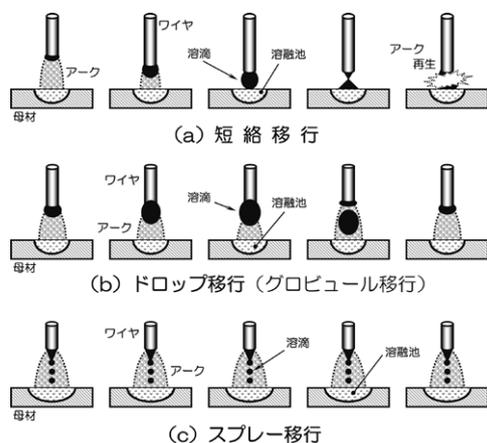


図 3.86 溶滴の主な移行形態

### 3.5.3 ミグ溶接機

#### (1) ミグ溶接機の構成

ミグ溶接機の代表的な構成は図 3.87 のようである。溶接電源には、一般に、直流定電圧特性電源が用いられる。アーク長は、定電圧特性電源のアーク長自己制御作用（上述 3.5.2 項参照）で自動的に制御されるため、特別なアーク長制御は必要としない。溶接トーチは、ワイヤ送給装置を介して溶接電源のプラス (+) 端子に接続される。溶接ワイヤは、ワイヤ送給装置によって定速送給され、溶接トーチのコンジットケーブルに内蔵されたライナーに案内されて、トーチ先端部へ導かれる。そして、その先端部に設けられたコンタクトチップから給電されて、母材との間にアークを発生させる。

ミグ溶接においても、ティグ溶接の場合と同様に、“自己保持なし”の動作モードと“自己保持あり”の動作モードがある（前述 3.4.3 項参照）。ミグ溶接で

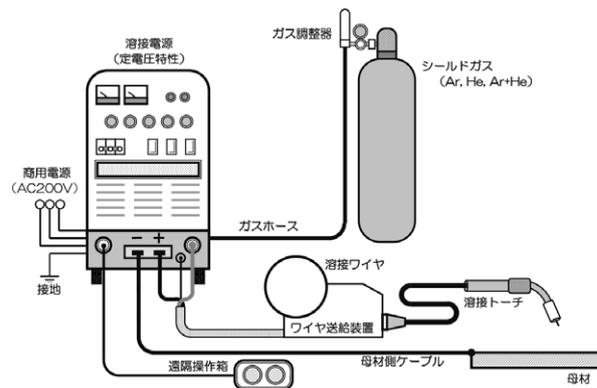


図 3.87 ミグ溶接機の構成

は、シールドガスのプリフロー時間・アフターフロー時間の有無、ワイヤスローダウン制御およびクレータ制御の有無など、種々な制御モードを組み合わせるが、代表例を図 3.88 に示す。“自己保持なし”の動作モード (a) では、トーチスイッチを ON するとシールドガスが流れ始め、同時に無負荷電圧の出力およびワイヤの送給を開始する。ワイヤが母材に短絡すると溶接電流が流れ始め、電圧は無負荷電圧からアーク電圧に変化する。トーチスイッチを ON している間は、所定の溶接が行われ、トーチスイッチを OFF するとワイヤ送給の停止指令が出され、ワイヤ送給モータは回転を停止しようとするが、モータは慣性で少しの間回転を続け、その速度および溶接電流は徐々に低下する。その時ワイヤが熔融池へスティックするのを防ぐために、アーク電圧もワイヤ送給に合わせて徐々に減少させてワイヤ先端に球滴を形成し、アークが消滅すると電圧は再び無負荷電圧へ移行する。無負荷電圧が発生してから所定の時間が経過すると電圧の出力を停止し、同時にシールドガスの供給も終了する。

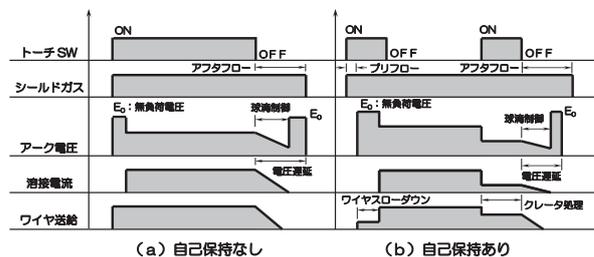


図 3.88 ミグ溶接機の動作シーケンス

“自己保持あり”の動作モード (b) では、トーチスイッチを ON するとシールドガスが流れ始め、所定のプリフロー時間 ( $T_{pr}$ ) が経過すると、無負荷電圧の出力ならびにワイヤのスローダウン速度での送給を開始する。ワイヤが母材に短絡して溶接電流が流れ始めると、ワイヤ送給速度は所定の速度に切り替わり、

電圧も無負荷電圧からアーク電圧に変化する。この時トーチスイッチをOFFしても溶接は続行し、次に再びトーチスイッチをONすると溶接電流、ワイヤ送給速度およびアーク電圧がクレータ制御条件へ切り替わる。トーチスイッチをONしている間はクレータ制御条件での溶接が継続し、OFFすると上記自己保持なしの場合と同様の経過をたどって溶接を終了する。

## (2) ワイヤ送給装置

溶接ワイヤの送給方式は図3.89に示す3種類に大別される。溶接トーチとの接続部に設けたワイヤ送給装置から、コンジットケーブル（トーチケーブル）を介して、ワイヤを押し出すようにして送給する方式(b)は“プッシュ（Push）式ワイヤ送給”と呼ばれ、広範な分野で多用されている標準的なワイヤ送給方式である。溶接トーチとワイヤ送給装置を一体化し、ワイヤを引っ張り込むようにして送給する方式(a)は“プル（Pull）式ワイヤ送給”と呼ばれ、コンジットケーブルを介さずにワイヤ送給装置と溶接トーチが直結されるため、軟質のアルミニウムワイヤや直径1.0mm以下の細径ワイヤなどでも良好なワイヤ送給性能を得ることができる。なお市販のプル式ワイヤ送給装置では、数百g巻の専用ワイヤスプールを使用することによって操作性の向上を図るなどの工夫がなされている。プッシュ式ワイヤ送給とプル式ワイヤ送給を組み合わせた方式(c)は“プッシュ／プル式ワイヤ送給”と呼ばれ、プル式ワイヤ送給よりさらに良好な送給特性が得られる送給方式である。近年、溶接ロボットの先端（手首）部へ取り付け可能な小型・軽量（質量数kg程度）のプル式ワイヤ送給装置が開発され、プッシュ／プル式ワイヤ送給採用に対する問題点が大幅に改善され、ロボット溶接などでのワイヤ送給トラブルに対する有効な対策として適用が拡大している。

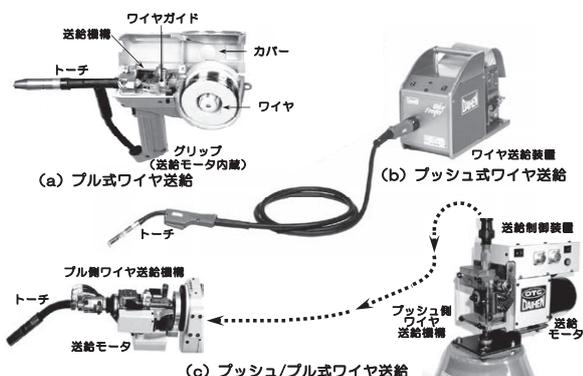


図 3.89 ワイヤ送給方式と装置外観

ワイヤの送給機構は、図 3.90 (a) に示すように、

上下に配したそれぞれ1個の送給ローラと加圧ローラでワイヤを上下から加圧し、その摩擦力を利用して送給する2ローラ駆動機構が一般的である。しかし近年、同図 (b) に示すような4ローラ駆動機構の採用が増加している。4ローラ駆動機構では、モータ軸に取り付けられたドライブギアが、その前後に設けられた送給ローラを、ギアを介して同期駆動する。上下それぞれ2点（合計4点）でワイヤを加圧する4ローラ駆動方式では、図 3.91 に示すように、大きいワイヤ押出し力が得られ、ワイヤ送給の安定性が大幅に向上する。また、2ローラ駆動方式よりワイヤの加圧力を減少させることができるため、ワイヤの変形抑制・切り粉発生量の低減などの効果も得られる。

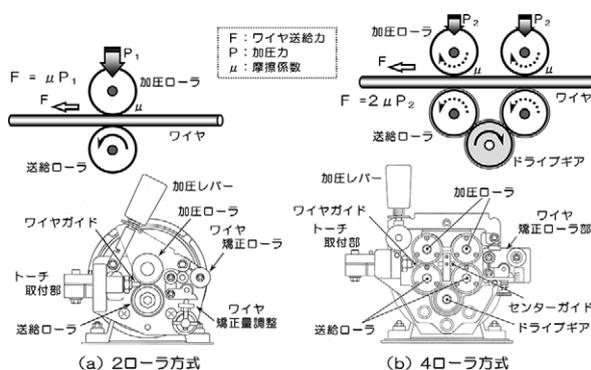


図 3.90 ワイヤの送給機構

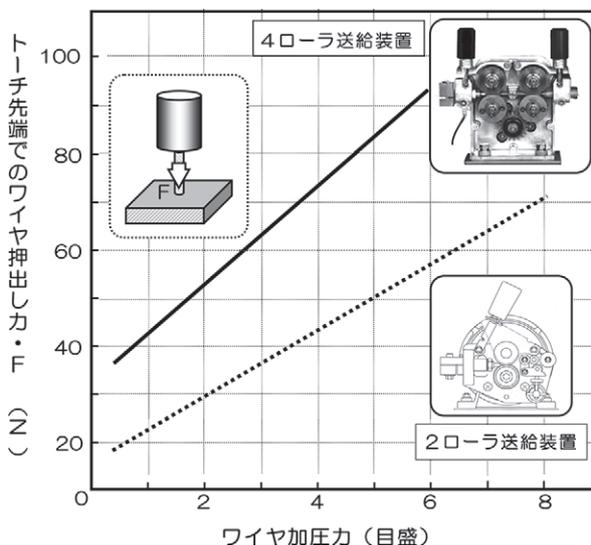


図 3.91 ワイヤ送給機構とワイヤ押し出し力

アルミニウムワイヤ仕様の送給機構部の一例を示すと図 3.92 のようであり、銅・ステンレス鋼 (SUS) ワイヤ用の加圧ローラはギアなしである。しかし軟質で剛性の低いアルミワイヤ用では、送給ローラ、加圧ローラともにギア付きとして、少ない加圧力でもローラ部でのスリップを抑制するなどの工夫がなされてい

る。また、送給ローラの溝形状もU溝としてワイヤとの接触面積を多くする、ワイヤ矯正機構を設けて送給抵抗を少なくするなど、ワイヤ送給のより一層の安定性向上を図っている。

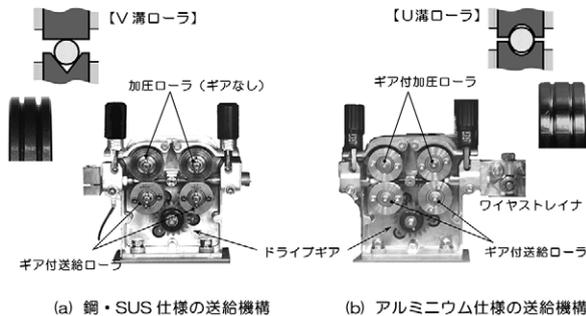


図 3.92 ワイヤ送給機構の比較

従来のワイヤ送給制御では、図 3.93 (a) に示すように、送給速度指令電圧と送給モータの再起電圧が一致するように、送給モータの駆動電圧をアナログ回路でフィードバック制御していた。しかしこの方法では、必ずしもモータの回転数を制御していることにはならず、場合によっては送給速度の変動を生じることがある。20 世紀末に始まった溶接電源のデジタル化とともに、ワイヤ送給制御にもデジタル制御が適用されるようになった。ワイヤ送給のデジタル制御は、(b) に示すように、送給モータに付加したエンコーダで検出した回転数と、送給速度指令に基づいて演算した回転数が一致するように、デジタル制御回路で送給モータのサーボ制御あるいはフィードバック制御を行う。ワイヤ送給制御のデジタル化によってもたらされる送給速度変動の抑制は、アークの安定性向上に大きく寄与している。

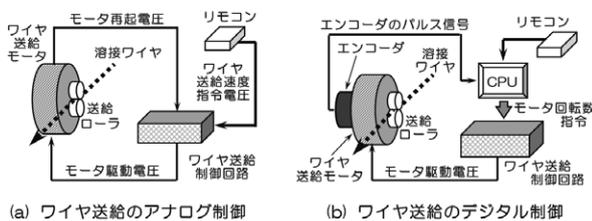


図 3.93 ワイヤ送給速度制御方式の比較

### (3) 溶接トーチ

ミグ溶接トーチは、ワイヤ送給装置によって供給される溶接ワイヤを溶接部へ導くとともに、電源から供給される溶接電流（電圧）を溶接ワイヤに印加して、アークを発生させる役割を持つ。また健全な溶接部を形成するために、アークによって溶融された液体金属（溶融池金属）を大気から保護するシールドガスの供

給も行う。その構成は図 3.94 のようであり、比較的小型・軽量でかつ安価な器具であるにも関わらず、その構造は複雑である。溶接ワイヤは、コンジットケーブルの内部に装着されるライナーを介して 3m 先のトーチ先端部まで導かれ、その先端部のチップで給電されて、アークを発生させる電極となる。なおアルミニウムやその合金のミグ溶接では、一般に樹脂ライナーが用いられる。鋼ワイヤなどの場合に使用されるステンレスあるいは鋼のスプリングライナーでは良好なワイヤ送給性能が得られない。そのため、純アルミニウムワイヤにはテフロンライナーが、アルミニウム合金ワイヤには硬質樹脂（ジュラコン）ライナーが多用されてきた。しかし近年では、鋼スプリングの表面を潤滑剤である二硫化モリブデン（ $\text{MoS}_2$ ）でコーティングしたライナーが出現し、アルミニウムワイヤ用のライナーとして用いられている。ライナー材質とその送給性を比較した一例を図 3.95 に示す。

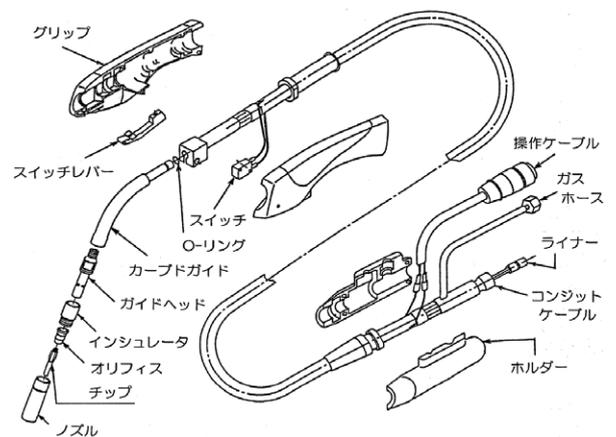


図 3.94 ミグ溶接トーチの構造

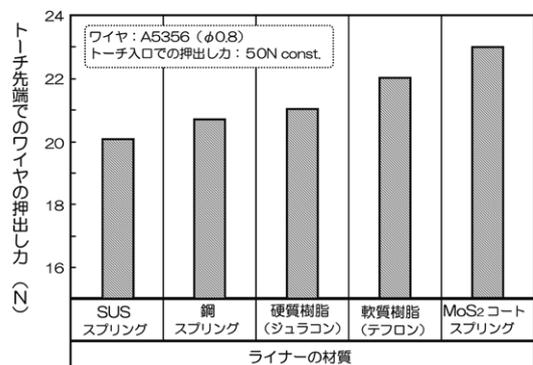


図 3.95 ワイヤ送給性におよぼすライナー材質の影響

ミグ溶接トーチの一例を示すと図 3.96 のようであり、標準的なトーチとして広範囲な分野で多用されているカーブド形と、アルミニウム合金の比較的大電流溶接などに用いられるピストル形とがある。ピストル

形トーチは、トーチ内のワイヤ経路を直線にして送給抵抗を極力少なくするとともに、ワイヤガイドケーブルとコンジットケーブルとを分離して、ワイヤの送給性向上を図ったトーチである。また、コンタクトチューブを用いて、ワイヤへの給電部を長くすることによってアークの安定性を向上させている。その他、シールドガスの流出経路を長くして層流域を拡大する、あるいはコンジット内にもパージガスを供給するなど、アルミニウムの溶接に対する特別な配慮がなされている。なお、小電流用トーチは操作性を重視して空冷であるが、大電流用トーチは水冷式で、グリップ部には遮熱カバーが設けられている。

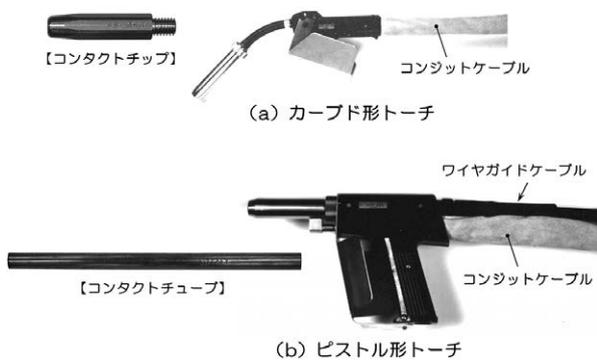
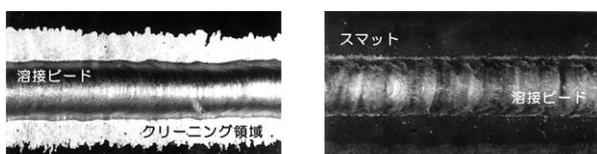


図 3.96 ミグ溶接トーチ

合金元素としてマグネシウム (Mg) を含む 5000 系アルミニウム合金などのミグ溶接では、トーチのシールド性が極めて重要である。溶接部の適切なシールドが行えないと、図 3.97 (b) に示すように、ワイヤや母材から蒸発した Mg が大気中の  $O_2$  と反応して  $MgO$  を生成し、溶接ビードやその周辺に付着する。この付着物はスマットと呼ばれ、ビード外観を著しく阻害する。そのためミグ溶接トーチでは、良好なシールド性の確保が重要な課題である。表 3.12 は、ノズル形状とガス流量を変化させて、シールドガスの流出形態をシュリーレン観察した一例である。適切なシールド効果が得られる層流域の長さは、いずれのノズル形状においても、ガス流量を増加させると減少するが、その減少度合いはテーパノズルが最も少ない。



(a) シールド良好の場合 (b) シールド不良の場合

図 3.97 シールド性の影響

したがってアルミニウム溶接用ミグトーチでは、わずかに ( $3\sim 5^\circ$  程度) テーパーを付けたノズル形状を採用するとともに、ノズル長さをできるだけ長くするなどの工夫がなされている。

表 3.12 シールドガスの流出形状

	ガス流量 ( $\ell/min$ )			
	10	15	20	25
テーパノズル				
ストレートノズル				
ダイバージェントノズル				

### 3.5.4 ステンレス鋼のミグ溶接

アルミニウムのミグ溶接では、シールドガスに 100% Ar を用いて安定な溶接が行える。しかしステンレス鋼などの溶接のシールドガスを 100% Ar とすると、図 3.98 に示すように、アークには著しいふらつきや偏向現象が生じる。また多量のスパッタが発生し、ビード外観は不均一なものとなる。このような不安定現象は、陰極点を形成する酸化物と大きく関与している。母材表面に多量の酸化物が存在するアルミニウムでは、陰極点からの電子放出によって酸化物が多少破壊されても、酸化物は十分に残存する。そのため陰極点はアーク直下に形成され続け、安定したアーク状態を維持できる。

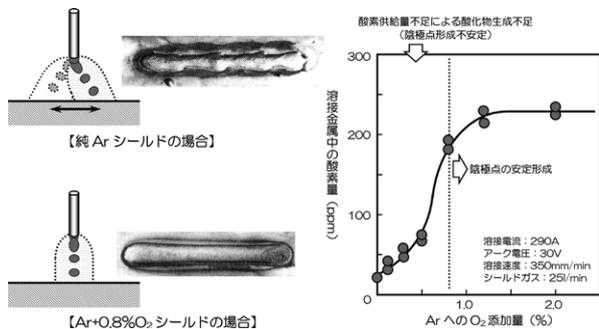


図 3.98 陰極点の安定生成

しかしステンレス鋼などでは、母材表面の酸化物は少なく、電子放出によって酸化物が破壊されると、母材表面に残存する酸化物は欠乏する。その結果、陰極点は酸化物を求めて母材表面上を広範囲に動き回り、

アークには不安定な偏向現象が生じることとなる。したがってステンレス鋼や低合金鋼などのミグ溶接では、Arに数%のO<sub>2</sub>あるいはCO<sub>2</sub>を添加したガスをシールドガスに用いる。シールドガスに添加されたO<sub>2</sub>あるいはCO<sub>2</sub>が、母材表面での酸化物生成を助長するため、陰極点はアーク直下に安定的に形成されて、アークの偏向現象は抑制される。

なお、Arに微量のO<sub>2</sub>あるいはCO<sub>2</sub>を添加した混合ガスを用いる場合、従来は慣例的にミグ溶接の一種として取り扱われていたが、完全な意味では不活性ガスではないため、近年はマグ溶接として扱われるようになってきている。

### 3.5.5 大電流ミグ溶接

アルミニウムおよびその合金のミグ溶接で溶接電流を大きくし過ぎると、図3.99に示すように、光沢がなく象の肌に似た不均一な不良ビードが形成される。このビードは“パッカリングビード”と呼ばれ、陰極点が溶融池内部に入り込み、陰極点によるクリーニング作用が消滅するとともに、アーク力が溶融池底部に集中して溶融金属を激しく揺動させることによって生じるものである。パッカリングを生じない電流の上限値は500A程度であるため、アルミニウムの高能率な大電流溶接は困難と考えられていた。

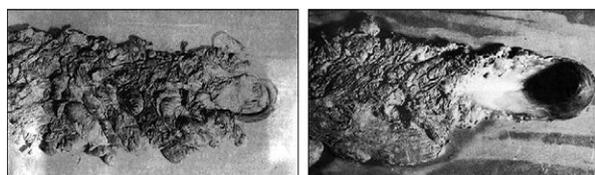
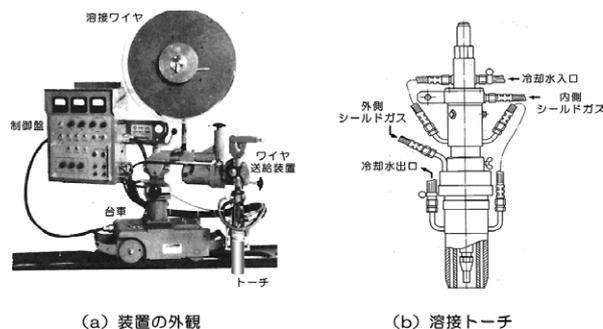


図 3.99 パッカリングビード<sup>24)</sup>

このような問題を解決するために提案されたアルミニウム合金の大電流溶接法が、1978（昭和53）年に開発された“大電流ミグ溶接”である。図3.100はその溶接装置を示したもので、溶接電源には定格電流1,000A程度の大容量定電流特性電源を用い、トーチにはシールド性に優れた大口徑二重シールドノズルを装着した大容量ミグ溶接トーチを、溶接ワイヤには直径3.2mm以上の太径ワイヤを適用する。そしてシールドガスにArまたはAr+He混合ガスを用いて、大電流溶接における過大なアーク力の発生を抑制する。

この溶接法では、最大45mm程度の極めて深い溶込みを得ることが可能であり、表裏両面からのそれぞれ1パス溶接によって、板厚80mm程度の厚板突合せ継手の完全溶込み溶接が可能である<sup>24)</sup>。大電流ミグ溶接の溶接条件および断面マクロの一例を表3.13



(a) 装置の外観 (b) 溶接トーチ

図 3.100 大電流ミグ溶接装置<sup>24)</sup>

に示す。大電流ミグ溶接は、主にLNG船などのA5083材の溶接に適用されている。また、ブスパーなどに用いる純アルミニウムの1100材や、構造用アルミニウム材としての7N01材などにも利用されている。

表 3.13 大電流ミグ溶接

板厚 (mm)	使用 ワイヤ径 (φmm)	シールドガス		溶接条件		
		組成	流量 (l/min)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)
25	3.2	Ar	100	480~530	29~30	30
38	4.0			630~660	30~31	
45	4.8	Ar + He	150	780~800	37~38	20
60			180	820~850	38~40	

溶接ワイヤ: A5083

## 3.6 マグ溶接

### 3.6.1 マグ溶接の発展経過

シールドガスに炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)のみを用いるアーク溶接は、従来「炭酸ガス溶接」として、アルゴンと炭酸ガスとの混合ガスを用いる「マグ(MAG: Metal Active Gas)溶接」とは区別されていた。しかし、ISO規格との整合性を考慮して2003(平成15)年に改正された、溶接用シールドガスのJIS規格(JIS Z 3253:2003)では、炭酸ガスは活性ガスの一種として取り扱われるようになった。そのため近年では、炭酸ガス溶接はマグ溶接に含まれるとされるようになった。すなわち、炭酸ガス溶接は“100%CO<sub>2</sub>をシールドガスに用いるマグ溶接”などと表記することが必要となった。しかしそれでは記述が複雑となるため、本稿では従来の“炭酸ガス溶接”を用いることとする。

## (1) 炭酸ガス溶接の進展

1920～1930年代に米国で溶接の自動化機運が高まった折り、ワイヤを消耗電極としてフラックスやガスをその周辺に供給する溶接法が種々考案された。アルミニウムやステンレス鋼などの溶接にはミグ溶接（前述 3.5 節参照）が適用されたが、軟鋼への適用は対象外とされた。アルゴンは極めて高価（1950年当時で約2万円/ボンベ）で、コスト高となるためであった。このため、軟鋼には比較的安価（アルゴンの1/8～1/10程度）な炭酸ガスを用いるアイデアが生まれ、1926（大正15）年にはリンカーン（J. C. Lincoln）が米国特許を取得した。

しかし、同年に行われたゼネラル・エレクトリック社のアレクサンダー（P. Alexander）が行った炭酸ガス溶接の実験では、溶着金属の酸化が著しく、溶接としては使用できなかった。炭酸ガス（ $\text{CO}_2$ ）は高温のアーキによって一酸化炭素（ $\text{CO}$ ）と酸素（ $\text{O}$ ）に分離し、この時生じた酸素が溶融金属を著しく酸化するためである。これに対して、金属アーク溶接（前述 3.1 節参照）では、溶接箇所におがくずを散布して溶接すると、おがくずの燃焼で発生した炭酸ガスが溶接部をシールドすることになる。この方法で溶接すると溶接継手性能は向上するため、炭酸ガス溶接は一概に不適切な溶接法とは言えないとの見解も出された。しかし当時は、サブマージアーク溶接（前述 3.3 節参照）が急成長していたこと、ミグ溶接の研究・実用化が進んでいたことなどから、炭酸ガス溶接の研究は一時中断状態となった。

1953（昭和28）年になると、リューバフスキー（Lyubavskii）とノボシロフ（Novoshilov）が、適切な脱酸成分を含んだワイヤを用いて溶接すれば満足すべき溶着金属が得られるとの論文を発表した。その結果、炭酸ガス溶接は見直されることとなった。オランダのフィリップス（Philips）社は、溶接ワイヤ中に Mn および Si などの脱酸剤を 0.3% 以上添加して酸素を除去する方法を開発した。この手法は、1956（昭和31）年にわが国での特許が成立している。この頃、ロシアでも炭酸ガスをシールドガスに利用することが試みられているが、良い結果は得られなかったようである。

米国では1954（昭和29）年に、バーナード社のバーナード（A. Bernard）がフラックス入りワイヤを用いる軟鋼用炭酸ガス自動溶接機を開発し、市販を始めた。なお後になるが、ベルギーのアーコス（Arcos）社も断面形状が異なるフラックス入りワイヤを用いて、炭酸ガス中で溶接する方法を提案している。1955

（昭和30）年には、バーナード社の溶接機が米 O.A. スミス社の軟鋼構造物の溶接に本格的に採用され、これを契機に炭酸ガス溶接の適用は次第に増加することとなった。

なお、ユニオンメルト法を開発したリンデ社のケネディ（前述 3.3.2 項参照）は、バーナードより1～2年遅れたが、図 3.101 に示すように磁性フラックスをワイヤに付着させて、炭酸ガスシールド中で溶接する  $\text{CO}_2$  フラックス溶接法（ユニオンアーク溶接）を開発した。そして、美しいビード外観とスパッタの少ないことをセールスポイントとして、上記炭酸ガス溶接法に対抗した。

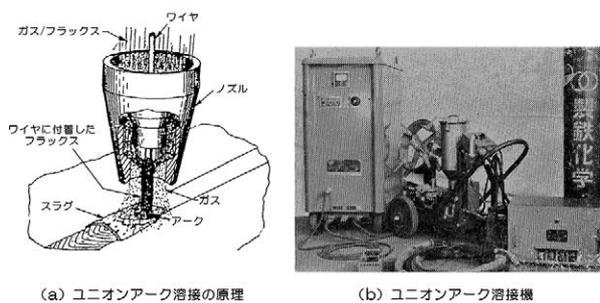


図 3.101 ユニオンアーク溶接<sup>1) 5)</sup>

一方リンカーン社は、1954（昭和29）年にソリッドワイヤによるノンガス（セルフシールド）アーク溶接法を、その後フラックス入りワイヤによるノンガスアーク溶接法を開発し、炭酸ガスを使用しない方向に進んだ。セルフシールド溶接の詳細については後述する第3章 3.8 節で述べる。

炭酸ガス溶接は高能率で適用範囲も広いと、広範囲な産業分野での適用が進んだが、ミグ溶接と同様に、薄板溶接への適用が困難であった。この問題点を解決したのが短絡移行アーク溶接法（ショートアーク溶接法）であり、1957（昭和32）年に米国で開発された。この溶接法は、溶接条件を小電流・低電圧として、溶滴の母材への短絡移行現象を利用する溶接方法で、短絡とアークとを1秒間に数十回以上交互に繰り返しながら溶接が進行する（前掲図 3.86 (a) 参照）。短絡時に電流は増加するが、アーク期間では電流が減少するため、平均溶接電流は比較的小さく、薄板の低入熱溶接が可能となる。リンデ社は“ショートアーク（Short Arc）溶接”、エアコ（Airco）社はディップトランスファ（Dip Transfer）溶接と呼んでいた。なお、この時期には英国やロシアでも同様の研究がなされていたようであるが、その成果などは報告されていない。

わが国では1950年代前半に、名古屋大学の関口教

授が炭酸ガスと酸素の混合ガスでシールドする  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  アーク溶接法を開発している。フィリップス社特許の回避も念頭にあったと思われるが、 $\text{CO}_2$  に  $\text{O}_2$  を添加したガスをシールドガスに用いればアークが安定し、スパッタが減少して溶接ビードも美しくなると考えた。そしてそのためには、より脱酸作用の大きいワイヤが必要であり、Mn および Si を通常より多く含む低炭素ワイヤ（いわゆる関口心線）を開発した。関口博士は、1946（昭和 21）年頃、Mn および Si を多く含む裸棒を心線とした被覆アーク溶接棒を考案し、大同製鋼がその溶接棒を製品化して販売していた。この実績が関口心線の開発につながったと思われる。 $\text{CO}_2\text{-O}_2$  混合ガスと関口心線を用いるアーク溶接法は、1959（昭和 34）年に特許として認められ、炭関（炭酸ガス関口心線）アーク溶接と呼ばれた。しかし名称のイメージが悪く、短期間のうちにその名称は使用されなくなった。

1956（昭和 31）年には、関口線材を使用する炭関半自動アーク溶接機を東亜精機が市販した。図 3.102 はその溶接機を示したもので、電源には直流モータ発電機（MG）が用いられている。これが、わが国初の炭酸ガス溶接機である。そして 1960（昭和 35）年には、松下電器がオランダのフィリップス社と技術提携して、図 3.103 に示すような半自動炭酸ガス溶接機の販売を始めた。1965（昭和 40）年頃には、国内の主なアーク溶接機メーカー各社が、図 3.104 に示すような半自動溶接機をそれぞれ市販している。溶接電源には、松下電器と大阪変圧器がセレン整流方式の直流定電圧特性電源、日立製作所と大阪電気が垂下特性の交流／直流両用電源を用いている。なお東亜精機も、この頃には電源をセレン整流方式の直流定電圧特性電源としている。

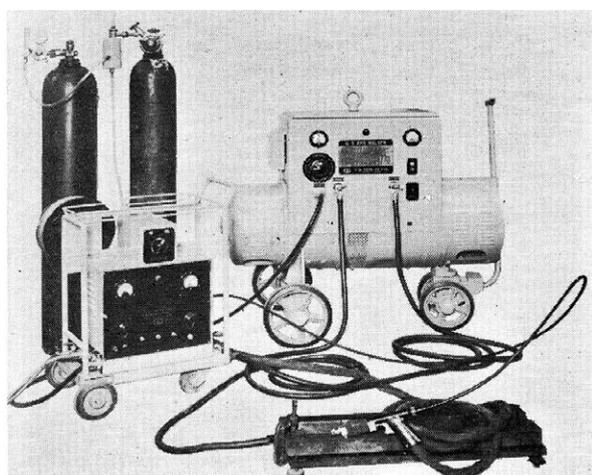
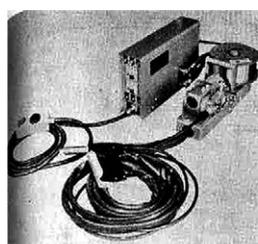


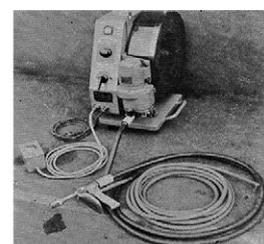
図 3.102 わが国初の炭酸ガス溶接機



図 3.103 半自動炭酸ガス溶接機<sup>5)</sup>



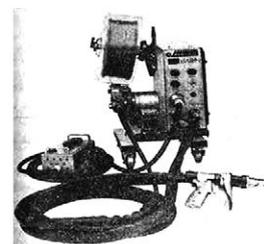
(a) 松下電器



(b) 日立製作所



(c) 大阪電気



(d) 大阪変圧器

図 3.104 市販半自動溶接機（昭和 40 年頃）<sup>25)</sup>

わが国で炭酸ガス溶接が普及するのは 1960 年以降であるが、当初は、炭酸ガス溶接のビードは被覆アーク溶接のビードより数段見劣りするため、グラインダ仕上げを行う箇所にはしか使えないといわれていた。しかし 1960（昭和 35）年には、自動車部品の溶接に炭酸ガス溶接が使われ始めた。この溶接ではビードの仕上げ研削作業が必要とされており、ビード外観は問題とされなかった。むしろ安価なコストで、早く手軽に溶接が行えることが評価されたようである。

1961（昭和 36）年には、炭酸ガス溶接用フラックス入りワイヤが国産化され、市販が始まった。また 1971（昭和 46）年には、フィリップス社が持っていた炭酸ガス溶接用ワイヤに関する日本特許が失効し、以後国産溶接材料メーカーが競ってこの分野に参入した。ワイヤの成分改良やフラックス入りワイヤの進歩などによって、溶接ワイヤを多量に消費する造船や建築分野などで、1970 年代後半から炭酸ガス溶接の採

用が目立って増加した<sup>5)</sup>。そして1984(昭和59)年になると、図3.105に示すように、マグ溶接ワイヤの国内年間生産量が、それまで首位であった被覆アーク溶接棒を追い抜くまでに成長した<sup>26)</sup>。

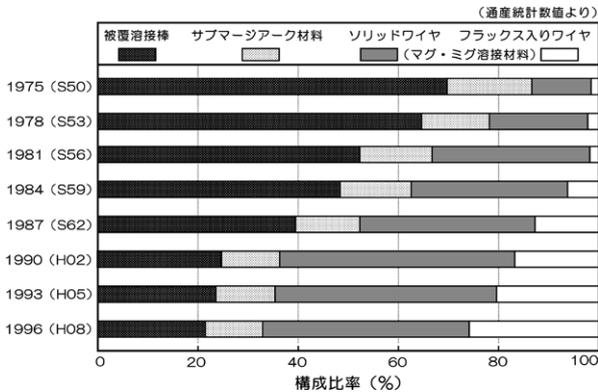


図 3.105 溶接材料年間生産量の構成比率

炭酸ガス溶接は、被覆アーク溶接より高能率かつ経済的な溶接方法で、半自動および全自動で使用可能であり、溶接姿勢に対する制約もほとんど受けない。その適用は広範囲な分野に拡大し、造船・橋梁・建築鉄骨・鉄道車両・自動車などの産業分野で、薄板から中・厚板まで幅広い板厚に利用されるようになった。1970年代後半頃までの主な産業分野における炭酸ガス溶接の適用状況の例を図3.106に示す。

## (2) マグ (MAG) 溶接の進展

アルゴン (Ar) と炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) との混合ガスをシールドガスに用いるアーク溶接いわゆる“マグ溶

接”は、1961(昭和36)年に、ドイツのウォルフ (Wolff) とコンマース (Kommers) によって開発された。この溶接法では、炭酸ガス溶接に比べ、スパッタの発生が少なく美しいビードが得られた。

わが国では、昭和40年代後半頃から Ar-CO<sub>2</sub> 混合ガスの使用が始まった。アルゴンの価格が、ボンベ1本 (7m<sup>3</sup>) 3,000~4,000円程度と比較的安価になったためである。しかしそのガス混合比は一様でなく、Ar+10~20% CO<sub>2</sub> や場合によっては Ar+50% CO<sub>2</sub> なども使用されており、スパッタの低減や美しいビード外観の形成の他、小電流域でのアーク安定性向上なども主要な使用目的であった。

Ar+20% CO<sub>2</sub> の混合ガスは、1976(昭和51)年に、帝国酸素が“アタルガス”の商品名で販売を始めた。以来この組成のプレミックスガスは“マグガス”と呼ばれ、マグ溶接に用いる代表的な混合ガスとなっている<sup>27)</sup>。また1979(昭和54)年には、共同酸素が“粗アルゴン”を用いた低価格タイプのマグ溶接用混合ガスを発売した。アルゴンは純度99.9%以上の不活性ガスであるが、粗アルゴンは精製工程の一部を省略してアルゴンの純度を96%以上(4%以下のO<sub>2</sub>を含む)としたものである<sup>28)</sup>。

1982(昭和57)年には、カナダ・ウェルドプロセス社のチャーチ (J. Church) が Ar-He-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> の4元ガスを用いてローテーティング・スプレー移行を安定化させる大電流マグ溶接法を開発し、特許を取得した。この溶接法は“タイム・プロセス”と名付けられ、わが国ではライセンス契約した愛知産業がその機器を販売した<sup>29)</sup>。大電流を用いた厚板の高能率溶接を目的

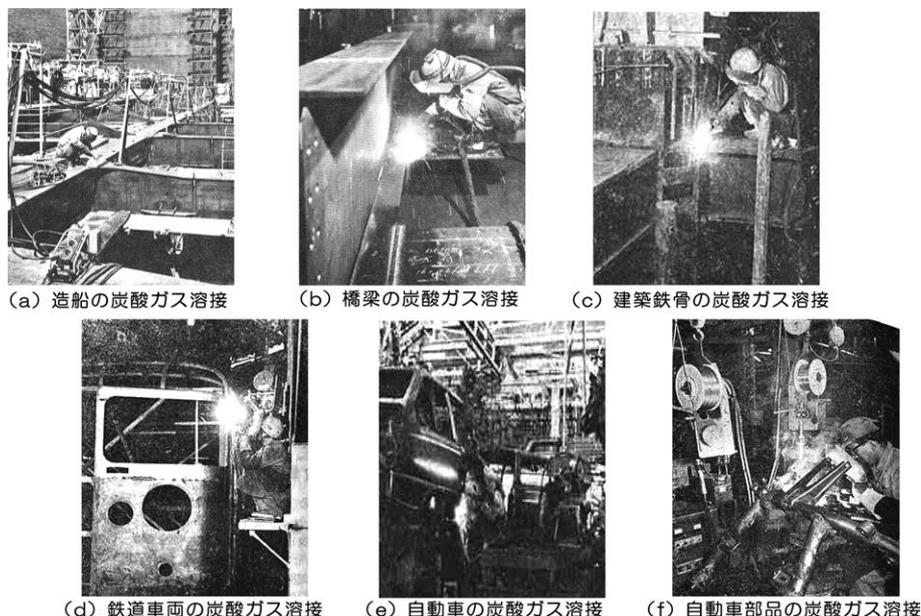


図 3.106 炭酸ガス溶接の適用例<sup>11)</sup>

とした溶接法であったが、ワイヤの高速送給（送給速度：20～30m/分）が必要でワイヤの送給が不安定になりやすいこと、強烈的な放射熱が生じることなどの理由で、わが国では数年でほとんど姿を消した。その後国内のガスメカ各社も、種々な特徴を持った三元系ガス（Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>・Ar-He-CO<sub>2</sub>）や四元系ガスを開発し、その適用は徐々に拡大しつつある。

### 3.6.2 スパッタの発生現象

マグ溶接においても、アークを安定に保つ仕組みや溶接機器・装置の構成などは前節（3.5節）のミグ溶接と同様であるため、本節での説明は省略する。また以下に述べるスパッタは、ミグ溶接においても問題となる事項であるが、その度合いは炭酸ガス溶接に比べると比較的小さい。

炭酸ガス溶接法は開発から約60年が経過し、これまでの溶接電源および溶接材料の改良・開発によって、近年ではアーク溶接法の主流を占めるまでに発展してきた。しかし炭酸ガス溶接の最も大きい問題点は、多量かつ大粒のスパッタの発生である。図3.107に示すように、溶接時に発生したスパッタは周辺に飛散して、ビード近傍に付着する。粒径が大きいスパッタほどビードの近くに付着し、溶接部の外観を障害する。また、このような大粒のスパッタは母材へ強固に付着するため、その剥離にはかなりの工数が必要となる。そのため、スパッタの低減による溶接作業性の改善は炭酸ガス溶接の最重要課題とされている。

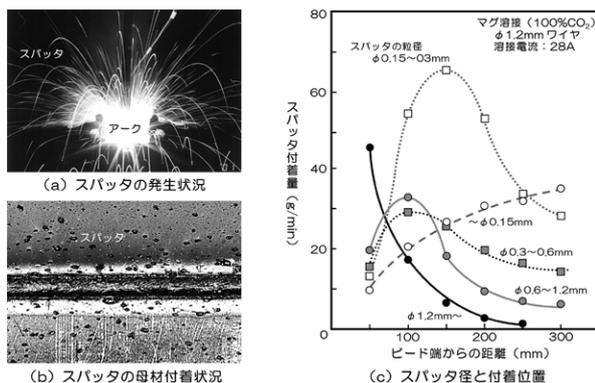


図 3.107 スパッタの発生と付着

炭酸ガス溶接における多量かつ大粒のスパッタの発生には、溶滴の移行形態が大きく関係している。マグ溶接でのアークおよび溶滴の挙動は、表3.14に示すように、シールドガスの種類によって大きく変化する。CO<sub>2</sub>は高温になるとCOとOに解離し、その時アーク雰囲気から多量の熱量（283kJ）を奪う。アークは強い冷却作用（熱的ピンチ作用）を受けて収縮し、

溶滴の下端部に集中して発生することとなる。その結果、溶滴はアークによる強い反力を受けてワイヤ方向に押し上げられ、溶滴をワイヤ端から離脱させるように働く電磁ピンチ力の効果は、その押し上げ作用によって弱められる。このような現象は溶接電流が大きくなるほど著しく、中・大電流域での溶滴は大塊となってワイヤ端から離脱し、大粒で多量のスパッタが発生しやすい。一方、不活性ガスのArでは解離などの変化は全く生じないため、アーク柱からの熱放散は比較的少なく、アークは熱的ピンチ作用をほとんど受けずに溶滴全体を包み込むように発生する。すなわち、溶滴に加えらるアークの反力は分散し、溶滴の押し上げ作用はほとんど生じないため、溶滴には電磁ピンチ力が有効に作用してワイヤ端から溶滴がスムーズに離脱する。また溶滴は溶融池方向に伸びて形成されるため、プラズマ気流による摩擦力も溶滴表面へ有効に作用し、溶滴のワイヤ端からの離脱を助ける。

表 3.14 溶滴移行におよぼすシールドガスの影響

シールドガス	炭酸ガス (CO <sub>2</sub> )	アルゴン (Ar)
熱的ピンチ作用 (サーマルピンチ作用)		
電磁ピンチ作用		

マグ溶接の溶滴移行形態は、シールドガス組成と溶接電流値によって図3.108のように変化する。小電流・低電圧域ではシールドガス組成に関係なく短絡移行となり、ワイヤの先端部に形成された小粒の溶滴が溶融池へ接触（短絡）する短絡期間と、それが解放されてアークが発生するアーク期間とを比較的短い周期（60～120回/秒程度）で交互に繰り返す。中電流・中電圧域では、シールドガスにCO<sub>2</sub>混合比率が28%以下のAr+CO<sub>2</sub>混合ガスを用いると、溶滴移行形態はドロップ移行となる。ワイヤ端にはワイヤ径より大きい径の溶滴が形成されるが、その移行は比較的スムーズでスパッタの発生も少ない。しかしCO<sub>2</sub>混合比率が28%を超えると溶滴移行形態は反発移行となり、大塊の溶滴がワイヤ端に形成され、アーク反力による強い押し上げ作用の影響を受けて不規則で不安定な挙動を示す。大電流・高電圧域では、電磁ピンチ力が強力に作用してワイヤ先端部の溶融金属を先鋭化させるため、溶滴移行形態はスプレー移行となる。グロ

ビュール（ドロップ）移行からスプレー移行へ推移する電流値は臨界電流と呼ばれ、その値は Ar への CO<sub>2</sub> 混合比率が多くなるほど大きくなる。ただし大電流・高電圧域であっても、CO<sub>2</sub> 混合比率が 28% を超えるシールドガスを用いると溶滴のスプレー移行化は実現せず、移行形態はグロービュール（反発）移行のままでも臨界電流は存在しない。

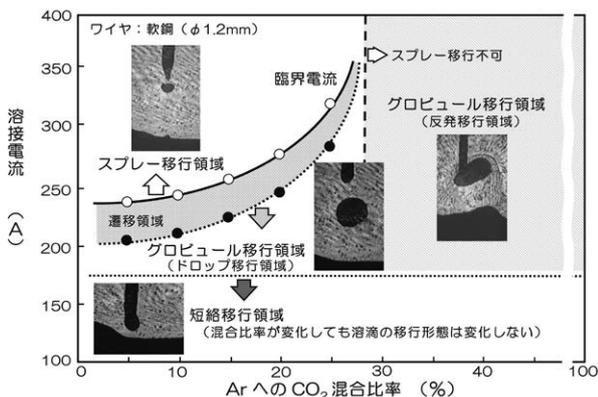


図 3.108 マグ溶接の溶滴移行形態

ワイヤ径 1.2mm のソリッドワイヤを用いた炭酸ガス溶接におけるスパッタ発生量の一例を図 3.109 に示す。溶接電流 200A 未満の電流域では、ワイヤ先端に形成される小径の溶滴が移行する短絡移行となるため、スパッタの発生量は比較的少ない。しかし溶接電流が 200A を超えると、溶滴の移行形態はグロービュール移行（反発移行）となり、ワイヤ先端に形成される溶滴は大塊となって溶融池へ移行する。そのため多量のスパッタが発生するようになり、その傾向は溶接電流の増加と共に著しくなるが、溶接電流が 300A を超えるとスパッタの発生はやや減少する。溶接電流 300A 以上の電流域になると、電磁ピンチ力の増大が溶滴の大径化をやや抑制するようになり、比較的小粒の溶滴が不規則に移行するようになる。その結果、短

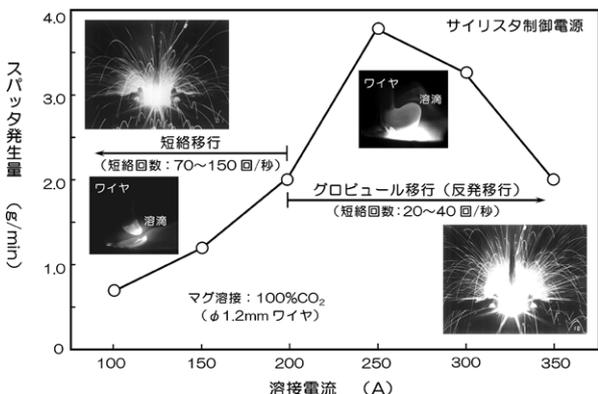


図 3.109 溶接電流とスパッタ発生

絡時間が短く、短絡回数が多くなり、スパッタ発生量は減少する傾向を示す。

マグ溶接におけるスパッタの発生には、ワイヤ先端に形成された溶滴の溶融池への短絡が大きく関与する。炭酸ガス溶接の等価回路は図 3.110 (a) のように表され、アーク長などによって多少変化するが、アークの抵抗値は 0.4~0.7 Ω 程度、短絡時の抵抗値は 0.03~0.08 Ω 程度である。そのため、ワイヤ先端に形成された溶滴が溶融池へ短絡すると、抵抗値が減少するため溶接電流は増加し、短絡が解放されてアークになると抵抗値が増加して、溶接電流は減少する。溶融池と短絡（接触）した溶滴は、表面張力や電磁ピンチ力の作用で溶融池へ移行し、溶滴と溶融池の橋絡部にはくびれが発生する。断面積が減少したくびれ部では電流密度が増加するため、橋絡部のくびれの進展は一層促進され、過電流状態となったくびれ部は溶断されてアークが発生（再生）する。この時、ヒューズの溶断時にその一部が周辺に飛び散ると同様に、溶滴や溶融池の一部が周囲に飛散しスパッタとなる。

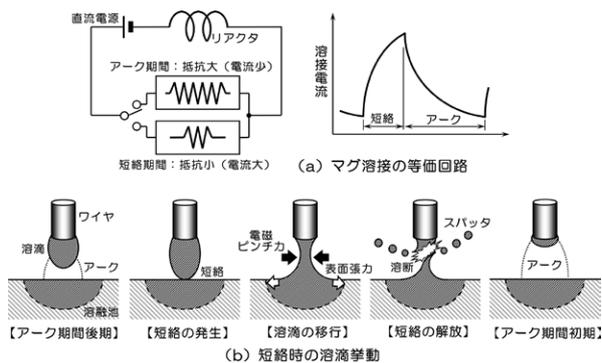


図 3.110 スパッタの発生原理

炭酸ガス溶接で発生するスパッタの発生形態は、一般に、図 3.111 のように分類されている。(a)、(b) および (c) はアーク再生時のヒューズ作用によって発生する現象で、(a) は上述したアーク再生時のヒューズ作用によって発生するもの、(b) は極めて短時間の短絡（瞬間的短絡）の解放時に通電される大電流に起因したアーク力によって発生するもの、(c) は埋もれアークの短絡時に溶融池が大きい盛り上がりを生じて発生するものである。(d) および (e) は溶滴・溶融池からの気泡放出によって発生する現象で、(d) は溶融池あるいは溶滴からの気泡の放出にともなう柱状隆起から発生するもの、(e) は溶滴中に含まれたガスが膨張・爆発して発生するものである。(f) および (g) はアーク力そのものによって溶滴が飛散する現象で、(f) はアークの押し上げ作用を受けて大塊となった溶滴から発生するもの、(g) は

電極 - 溶滴 - 母材間に直列アークが形成されて発生するものである。

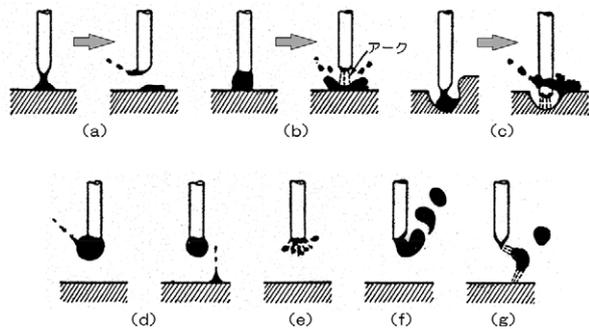


図 3.111 スパッタの発生形態<sup>30)</sup>

炭酸ガス溶接の導入当時は、これらのスパッタのうちの (c)、(f) および (g) によるスパッタの発生が著しいとされていた。しかし、その後の溶接電源やワイヤなどの改良・改善によってスパッタの発生は大幅に抑制され、近年では図 3.112 に示す 4 種類が主な発生形態となっている。(a) は短絡の解放に伴って発生するスパッタ、(b) はアーク期間中の溶滴が極めて短い時間 (1~2ms 以下) 溶融池へ接触する瞬間的短絡によって生じるスパッタ、(c) は溶滴中に生成したガスの急激な膨張によって、あたかも風船の破裂のように、溶滴内でのガス爆発が生じ、その一部がスパッタとなるもの、(d) は溶融池からのガス放出に伴って発生するスパッタを示している。なお従来問題視されていた、アークの押し上げ作用を受けて大塊となった溶滴から発生するスパッタ (前掲図 3.111 (f) や、電極 - 溶滴 - 母材間に直列アークが形成されて発生するスパッタ (前掲図 3.111 (g)) は、ほとんど認められなくなっている。

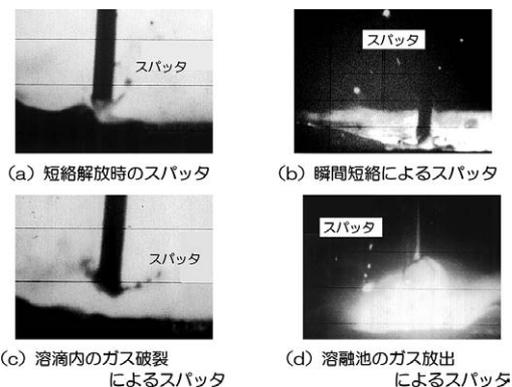


図 3.112 マグ溶接のスパッタの発生形態

図 3.112 に示した 4 種類のスパッタの発生頻度は図 3.113 のようであり、小電流域では短絡の解放に起因したスパッタが大部分を占めるが、中電流域では短絡

解放時のスパッタの他に、瞬間的短絡によって発生するスパッタの比率がかなり高くなる。溶滴内のガス爆発に起因したスパッタは電流値が変化してもほとんど変わらないが、溶融池のガス放出に伴うスパッタは電流値によって異なる。これはワイヤの種類によるもので、YGW11 ワイヤに添加されているチタン (Ti) の効果である。

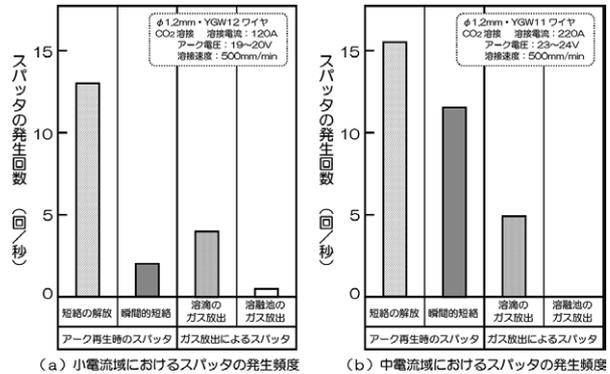


図 3.113 マグ溶接におけるスパッタの発生頻度

### 3.6.3 電流波形制御によるスパッタの低減

マグ溶接で発生するスパッタは直流リアクタのインダクタンスと密接に関係し、図 3.114 に示すように、サイリスタ制御などの電源では、電源回路のインダクタンスが大きいものほどスパッタの発生量は減少する。この傾向は溶接電流値が異なっても同様である。一方、溶接電流波形とインダクタンスの関係は表 3.15 のようであり、インダクタンスが小さい場合は電流変化が大きく、短絡解放時のピーク電流が高くなる。これがスパッタ増大の主要因である。反対に、インダクタンスが大きい場合は電流変化が抑制され、短絡解放時のピーク電流も低くなるため、短絡の解放に起因したスパッタは減少する。短絡回数が比較的に少ない大電流域の溶接では、このような電流変動の少ない直流に近い電流波形の方が良好な溶接結果が得られる。しかし短絡回数が増える小電流域では、短絡解放に長い

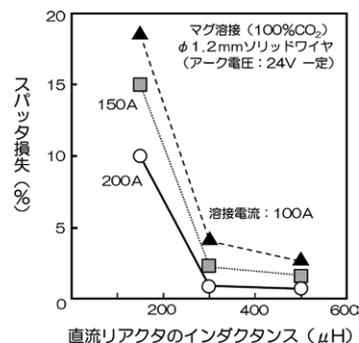


図 3.114 スパッタ損失におよぼすインダクタンスの影響<sup>30)</sup>

時間を必要とするため、溶融池の温度低下などが生じてアークの安定性は損なわれ、良好な溶接結果は得られない。

表 3.15 インダクタンスの影響

溶接電流	インダクタンス		
	小 (≒150μH)	中 (≒300μH)	大 (≒500μH)
180A			
300A			

ワイヤ: φ1.2mmソリッドワイヤ, シールドガス: CO<sub>2</sub>

すなわちサイリスタ制御などの従来制御電源では、スパッタの低減およびアークの安定性確保それぞれの立場からすれば不十分であるが、両者ともにほぼ満足できる中間的なインダクタンスを微妙に選定し、小電流から大電流に至る全溶接電流範囲に対して、多少の不満足さを含みながらも使用に耐えられる特性を実現していた。

わが国におけるインバータ制御電源（後述 4.4 節参照）は、1982（昭和 57）年にティグ溶接電源として初めて開発された。そして、その翌年にはインバータ制御を採用したマグ溶接電源も出現した。インバータ制御電源では、サイリスタ制御電源（後述 4.3 節参照）の百倍以上の速度で出力を制御することが可能であるため、電子回路で電流の変化速度 (di/dt) を任意にコントロールすることが可能である。そこでインバータ制御マグ電源では、スパッタと密接に関係する電流の変化速度を電子回路で任意に制御する“電流変化速度の電子制御方法”が採用された。

図 3.115 はその代表例を示したもので、トレース方

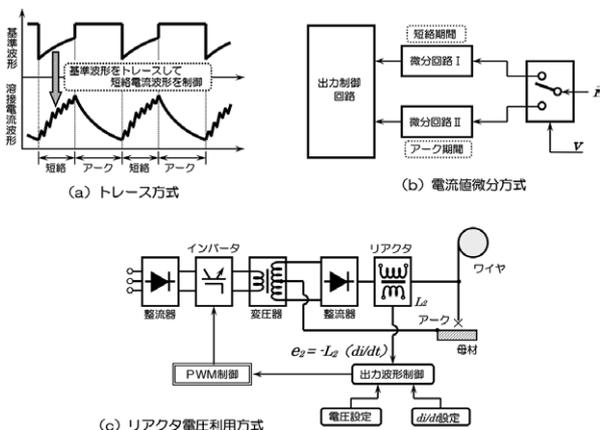


図 3.115 電流変化速度の制御方法

式 (a) はあらかじめ定められた基準波形と一致するように電流をトレースして短絡電流を制御する方法である<sup>31)</sup>。電流値微分方式 (b) では、溶接電流の検出値 (i) を短絡期間とアーク期間それぞれに対応する微分回路へ入力し、微分回路を通して得られた電流の変化量 (di/dt) が基準値と一致するように、短絡期間およびアーク期間の出力をそれぞれフィードバック制御する<sup>32)</sup>。またリアクタ電圧利用方式 (c) は、直流リアクタの 2 次巻線の端子電圧 ( $e_2 = -L_2 (di/dt)$ ;  $L_2$  は 2 次巻線のインダクタンス) を利用して、等価的な電流変化速度 (di/dt) を検出し、その値を用いて電流の増減速度を制御する方法である。

電流変化速度制御の作用は図 3.116 のようであり、溶接電源の前面パネル上に設けられた電流波形制御ダイヤルの操作で電流増減速度を任意に設定して、アーク状態、スパッタ発生量およびビード形状などを広範囲に選定することができる。また電流変化速度制御を採用したマグ溶接電源では、表 3.16 に示すように、溶滴の移行形態が異なる電流域に対応して、電流変化速度 (di/dt) が自動的に最適値へ切り換わるように設計されている。電子制御による di/dt の最適化によって得られるスパッタの低減効果は図 3.117 のようであり、スパッタ発生量はサイリスタ制御電源の 1/3 ~ 1/2 程度に低減され、特に溶滴がグローブユール移行中・大電流域での効果が顕著である。

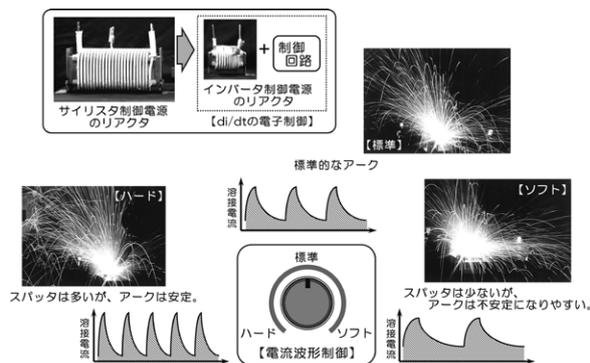


図 3.116 電流変化速度 (di/dt) 制御の作用

表 3.16 電流変化速度の電子制御

電流域	小電流域	中電流域	大電流域
(数個φ1.2ワイヤ)	(~200A)	(200~300A)	(300A~)
溶滴移行形態	短絡移行	グローブユール移行	
溶滴の大きさ	小粒	大粒	やや小粒
アーク状態	安定	やや不安定	比較的安定
スパッタ	小粒・比較的少量	大粒・多量	比較的小粒・やや多量
適正電流波形			
電流変化速度 (di/dt)	速い (di/dt : 大)	中 (di/dt : 中)	遅い (di/dt : 小)

\* di/dt の電子制御では、電流の変化速度を、電流域に応じて自動的に切り換える。

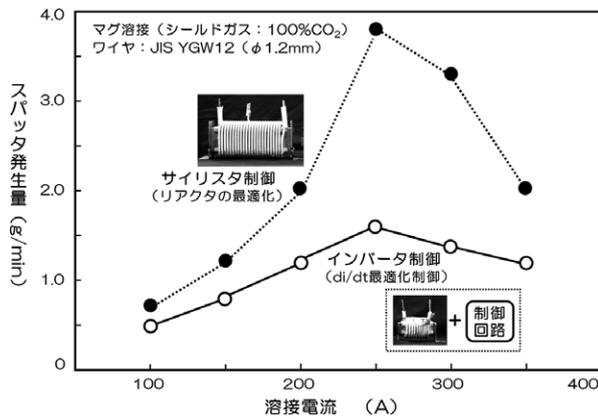


図 3.117 出力制御方法とスパッタ発生量

上述のように、インバータ制御の高速制御性を活用した電流変化速度の電子制御によって、炭酸ガス溶接のスパッタは大幅に低減された。しかし、さらにスパッタの発生を抑制する手法が、1985（昭和 60）年に提案され“センサーク”という商品名で市販された。短絡とアークは、アーク電圧と判定電圧（ $V_j:10\sim 15V$ 程度）との大きさを比較することによって容易に判別できる。ところがセンサークで採用された手法は、短絡からアークへ移行する直前のタイミングを出力制御に用いるというものであった。短絡からアークへ移行する現象の詳細は図 3.118 のようであり、短絡時間の経過に伴って溶滴の溶融池への移行が進行する。そして、溶滴が溶融地へ完全に橋絡（ブリッジ）した後も溶滴の溶融池への移行は進行するため、溶滴には「くびれ」が発生し、このくびれが進展し続けて細くなった橋絡部が溶断してアークが再生する。

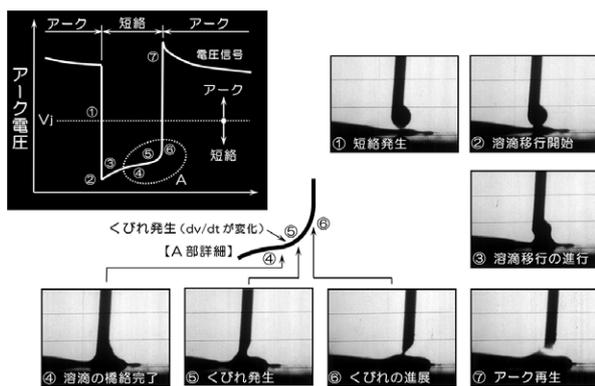


図 3.118 溶滴の短絡移行詳細

溶滴と溶融池の橋絡部にくびれが発生すると、その断面は減少するため抵抗値は増大し、直線的に増加していた電圧波形は丸みを帯びるようになり、電圧の変化量（ $dv/dt$ ）が変化する。すなわち、短絡期間中の  $dv/dt$  変化点を検出することによって、橋絡部にくびれが発生したことを検出できる。センサークに用いら

れた電流の制御方法とその溶接電流およびアーク電圧波形は図 3.119 のようであり、それぞれのタイミングで次の 7 種類の電流制御を行う<sup>33)</sup>。

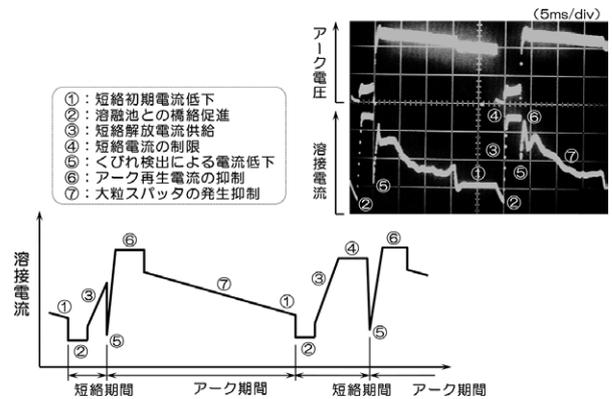


図 3.119 “センサーク”の電流波形制御<sup>33)</sup>

- ①短絡初期電流低下制御：短絡開始時の電流を低下させて、瞬間的短絡の発生を抑制する。
- ②溶融池との橋絡促進制御：小電流を保持して、溶滴と溶融池との橋絡を強固にする。
- ③短絡解放電流供給制御：短絡を解放するための電流を供給する。
- ④短絡電流の制限：短絡時間が長くなると、短絡電流の上限値を抑制する。
- ⑤くびれ検出による電流低下制御：くびれを検出して電流値を低減させ、小電流でアークを点弧する。
- ⑥アーク再生電流抑制制御：アーク再生後の電流値を、所定値以下に制限する。
- ⑦大粒スパッタ抑制制御：電流減少速度の適正化で、瞬間的短絡による大粒スパッタの発生を抑制する。

インバータ制御電源の登場によって、直流リアクタの特性で支配されていたスパッタの発生現象を、電子回路で制御する手法が開発された。しかし、図 3.120 の上段に示すように、この方法も直流リアクタの作用に基づいた出力制御方法であり、溶接電流の増減速度適正化を課題としたものであった。ところが上記センサークの出現によって、溶接電流の制御方法は溶接現象そのものに密着したものとなり、マグ溶接そのものの特性改良を目的とした種々な出力制御方法が、他の溶接電源メーカーでも開発された。図 3.120 の下段は、各社で開発された電流波形の制御方法をまとめたものである。

“短絡電流増加遅延制御”は、短絡初期の所定時間中は電流の増加を抑制して溶滴と溶融池の接触を確実

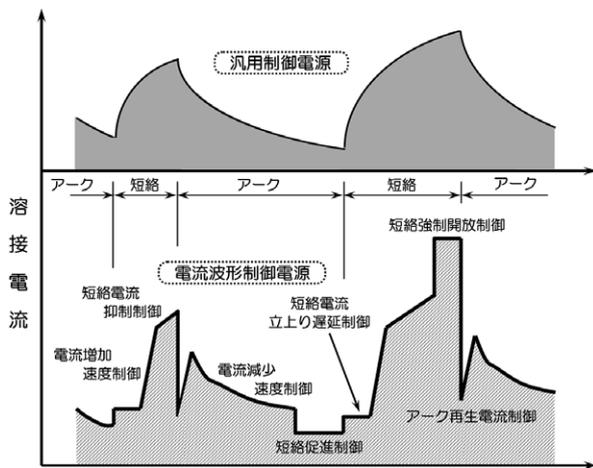


図 3.120 マグ溶接における電流波形制御

にし、主に瞬間的短絡の発生を防止する制御である。“電流増加速度制御および短絡電流増加抑制制御”は、短絡時に通電される電流を必要最小値に抑えるための制御、“アーク再生電流制御”は、短絡解放直前の電流値を低下させるための制御であり、それぞれアーク再生に伴うスパッタの抑制が目的の制御である。また“短絡強制開放制御”は、異常短絡発生時に最大エネルギーを供給して、アーク切れなどの不安定現象を防止するための制御、“電流減少速度制御および短絡促進制御”は、異常な溶滴の形成・成長を阻止するための制御である。

この種の電流波形制御溶接では、溶接条件や制御パラメータの設定はかなり複雑なものとなるが、目的に応じた適切な制御パラメータの選定・設定を行うことによって、スパッタ発生量の大幅な低減や、溶接速度が3m/分を越える高速溶接の実現も可能となる。電流波形制御電源におけるスパッタ発生量は、図 3.121 のようであり、従来制御電源と比較すると、サイリスタ制御電源の1/10以下、インバータ制御電源の1/5程度まで減少する。

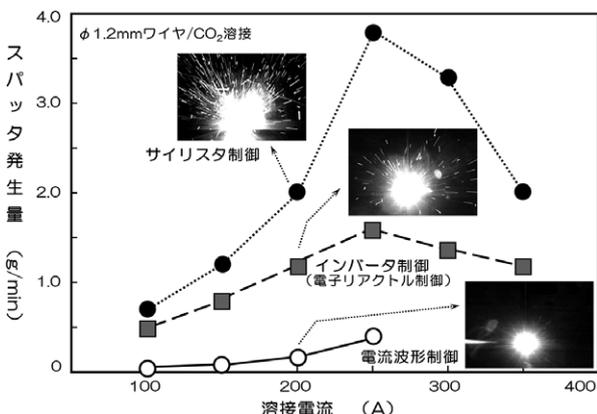


図 3.121 出力制御方法とスパッタ発生量

マグ溶接のスパッタ低減を目的とした出力制御溶接法の開発は、他国の追随を許さないわが国電源メーカーの優位技術であったが、2005（平成 17）年になると、オーストリアのフローニウス（Fronius）社が出力制御とワイヤ送給制御を組み合わせた新しいマグ溶接プロセスを開発した。この新プロセスは“CMT（Cold Metal Transfer）溶接”と呼ばれ、図 3.122 に示すように、短絡の発生を検出して溶接電流を小電流まで低減すると同時に、溶接ワイヤを引き戻す（後退送給する）。短絡は機械的に解放されるため、小電流での再アークが可能となり、スパッタの発生は大幅に抑制される<sup>34)</sup>。この溶接に用いられるワイヤ送給装置の応答性は、一般的なワイヤ送給装置より1桁以上速い数十 Hz とされており、その応答性向上が溶接プロセスの特性に大きく寄与している。

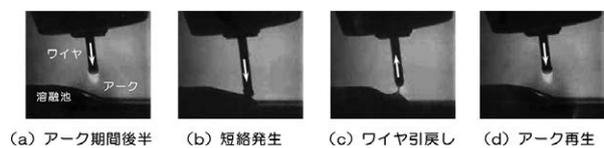


図 3.122 CMT（Cold Metal Transfer）プロセス

しかし、上述した電流波形制御溶接や CMT 溶接プロセスは、主に溶滴が短絡移行する小電流域での溶接（直径 1.2mm 鋼ソリッドワイヤの場合、溶接電流 200A 程度以下／あるいはワイヤ送給速度 7m/min 程度以下での溶接）を対象としたものであり、溶滴移行がグロービュール移行、特に反発移行となる中電流域の炭酸ガス溶接に対しては十分な効果が得られるとは言えない。この問題に対しては 2010（平成 22）年に、図 3.123 に示すような新しい電流波形制御溶接方法が提案されている。この溶接法では、従来の短絡電流立ち上がり遅延制御、アーク再生電流制御など（前掲図 3.120 参照）の他に、溶滴の押上作用を抑制する制御を付加している。アーク再生直後の溶滴が形成される期間では、溶滴がアークによる強い押し上げ作用を受けて不規則な挙動を示して、スパッタ発生の大い

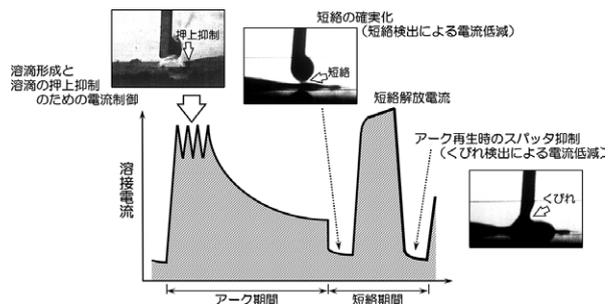


図 3.123 新電流波形制御

因となる。その不規則な溶滴挙動を規則化することを目的として、アーク再生直後の電流を規則的に増減させ、アークによる押し上げ作用を分散させながら溶滴を形成する。このような出力制御は、溶接電源のデジタル化（後述 4.4.4 項参照）に伴う出力制御の高速化によって可能となったものである。新しい電流波形制御の効果の一例を示すと図 3.124 のようであり、上述した電子リアクタ制御電源に比べると、スパッタ発生量は 1/5 程度まで減少し、特に大粒のスパッタ発生量が激減していることが分かる。

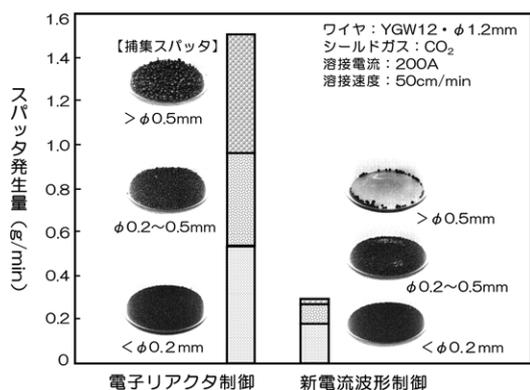


図 3.124 スパッタ発生量の比較

### 3.6.4 ファジィ制御による溶接条件の適正化

わが国産業界における労働力不足は 1986（昭和 61）年以来深刻な問題となったが、溶接業界では特にこの傾向が強くなり、1990（平成 2）年の労働省職業能力開発局調査では、在職する溶接作業員約 21 万人に対して約 6 万人の不足が報告されている。とりわけ高度技能を持った熟練溶接作業員の不足は深刻で、在職者 38.5 千人に対して、その 46.5% に当たる 17.9 千人が不足しているという状況であった。また、溶接作業員の高齢化という問題もあった。このような状況に対応するために、1990（平成 2）年頃には、経験の浅い溶接作業員でも熟練作業員と同レベルの溶接が行えるように、溶接電源の知能化による脱技能化が積極的に推進された。そのために採用された手法がファジィ制御であり、そこで用いられたファジィ推論は「定性的な理解は比較的容易であるが、定量的な理解は相当困難である」事象・現象を取り扱うには便利な手段である。

電極 - 母材間距離（Ext）は、特別な場合を除き、一定に保って溶接を行うことが原則であるが、実溶接施工ではワーク形状の複雑さなどが原因で一定に保てないことも多い。そのような場合、溶接作業員は溶接条件の微調整を行う。Ext が伸びるとワイヤ送給量を増加させ（溶接電流を大きくし）、逆に短くなるとワ

イヤ送給量を減少させる（溶接電流を小さくする）。その際、微調整によって生じる溶着量や溶込み深さの変動が、溶接継手の強度に悪影響を及ぼさないようにしなければならない。すなわち、微調整量をどの程度にするかは極めて重要な事項であるが、多くの場合は溶接作業員の経験や勘に頼っている。

このような溶接作業員の経験や勘に頼っていた溶接条件の微調整に、図 3.125 に示すようなファジィ制御が適用された。Ext が長くなれば溶接電流は小さくなり、その状態でワイヤ送給量を多くすると溶接電流が大きくなることは定性的に分かっている。しかし溶接電流値によって溶滴移行形態が異なるため、三者（Ext、溶接電流およびワイヤ送給量）の関係を定量化することは極めて困難である。ファジィ推論はこれら三者の関係を定量化するために適用された。溶接条件の設定は遠隔制御器などを使って、電流指令値や電圧指令値を変更することで行われるが、電流指令値（ワイヤ送給速度指令値）が変更されるごとに、ファジィ推論 I で基準 Ext を推定し、最新の値を記憶する。それと同時に基準 Ext を基にしてこの時の脚長を表す脚長係数を推定し、以降の制御の基準となる値を決定する。溶接中はファジィ推論 I で推定した Ext と先に求めた基準 Ext とを比較し、両者の値が異なっていると、脚長係数に基づいて脚長を一定にするために必要なワイヤ送給量をファジィ推論 II で決定する。また、その状況に応じた適正電圧も決定して同時に出力電圧を制御する。以上のようなファジィ推論と制御とを溶接中は常時繰り返して実行することによって、適切な脚長の制御を行うことができる<sup>35)</sup>。

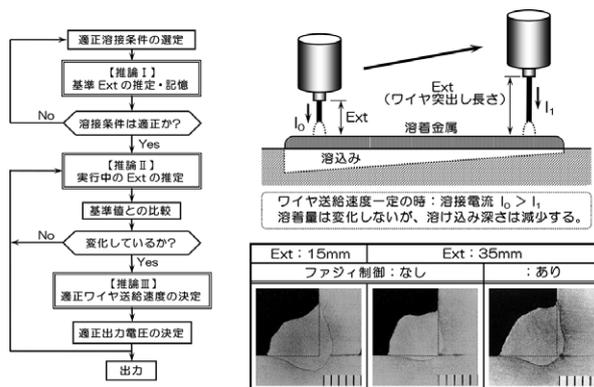


図 3.125 ファジィ制御による溶接電流補償<sup>35)</sup>

マグ溶接では、溶接電流に応じた適正アーク電圧の設定を一元的に行う機能（一元制御）を持った溶接電源の採用が大部分を占めている。しかし一元制御といっても、ワイヤ突出長さ、溶接速度あるいは溶接

ケーブル長などが変化すると、実際の施工条件に応じたアーク電圧の微調整が必要となる。また、溶接の進行に伴う溶接部材状況の変化などによって、溶接条件を再設定しなければならない事態も発生する。このような問題に対して開発された手法が、図 3.126 に示す、短絡時間率によるアーク電圧の自動設定である。短絡移行マグ溶接では、ワイヤを溶融して溶滴を形成するアーク期間と、これを溶融池へ移行させる短絡期間が所定の周期（短絡周期）で繰り返される。そして、この短絡時間比率（短絡時間 / 短絡周期）は、適正アーク電圧が変化してもほとんど変化しない。したがって、溶滴移行形態が異なる溶接電流に応じてこの短絡時間比率が適正な値となるように、ファジィ推論を利用して電源の出力電圧を自動的に調整する。このようなファジィ制御の採用によって出力電圧は適正値に自動調整され、常に良好な溶接条件を維持できる。また、溶接速度の変化に応じて、常に適正なアーク状態となるように出力電圧が自動調整され、溶接速度が速くなくても良好なビード外観が得られるなど、溶接品質の向上・安定化に著しい効果が得られる<sup>36)</sup>。

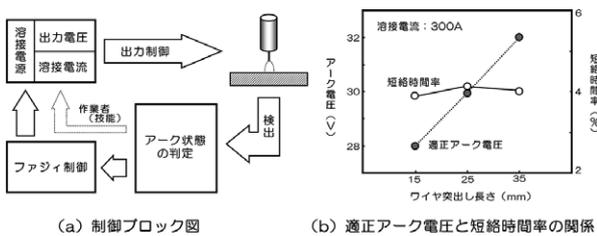


図 3.126 短絡時間率によるアーク電圧の自動設定<sup>36)</sup>

図 3.127 も、ファジィ制御を用いて適正アーク電圧を自動設定する方法である。溶接時のアーク電圧波形から、短絡周期ごとの短絡時間 (Ts) およびアーク時間 (Ta) を検出する。そして、それらの標準偏差

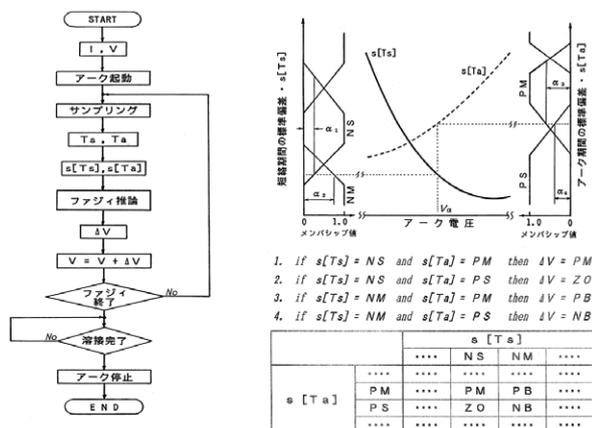


図 3.127 適正アーク電圧の自動設定方法

$s[Ts]$  および  $s[Ta]$  を演算し、これらをパラメータとしたファジィ推論によって出力電圧の増減操作量 ( $\Delta V$ ) を求めることによって、適正アーク電圧を自動設定する。ファジィ推論による適正アーク電圧の自動設定結果の一例を示すと図 3.128 のようであり、初期設定値がどのような値であっても、1~3 回の推論によって適正值の  $\pm 0.5V$  以内に収束している。

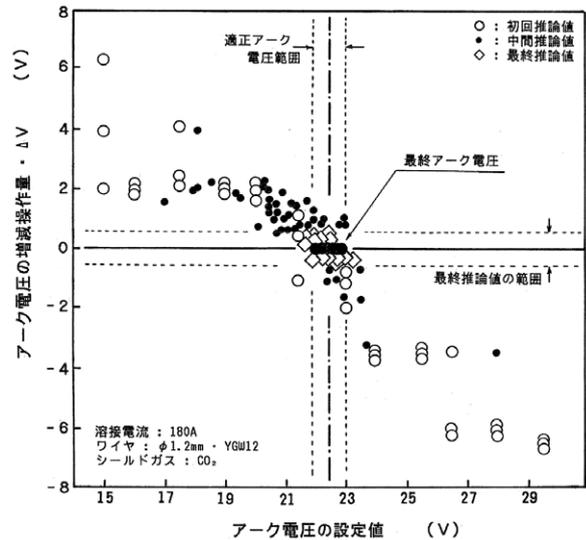


図 3.128 適正アーク電圧の自動設定結果（溶接電流 180A）

### 3.6.5 低周波交流マグ溶接

自動車ボデーなどの溶接には抵抗スポット溶接が多用されているが、抵抗スポット溶接ではワークを両面から挟み込むことが必要であり、部位によっては電極を挿入するための作業穴を設けるなどの対策を講じることが必要となる。一方、マグ溶接は片面作業で作業穴などの設置を必要としないが、近年の車体の軽量化を目的とした鋼板の薄肉化に伴い、相対的な入熱過大に起因した溶接金属の溶落ち（穴明き）を生じやすいといった問題がある。したがって、自動車ボデーなど板厚 1mm 以下の極薄鋼板にアーク溶接を適用するためには、溶接金属の溶落ちや穴明きを生じない溶接方法を開発することが必要である。このような課題に対して開発された手法が、1999（平成 11）年に開発された“低周波交流マグ溶接”である。極薄鋼板（板厚 1mm 以下）のアーク溶接では継手の熱容量が小さいため、表 3.17 に示すように穴明きや溶落ちが極めて生じやすい。特にギャップが大きくなるほどその傾向が著しく、一般に、溶落ちや穴明きを生じない限界ギャップは板厚の 1/2 以下とされている。

表 3.18 は極薄亜鉛めっき鋼板に対するアーク溶接の適用性を比較した一例で、直流パルスマグ溶接、交

表 3.17 極薄板の直流マグ溶接

ギャップ	ビード外観
なし	
1mm	
2mm	

試験片：60/60Zn めっき鋼板 (0.6mmt)、重ねすみ肉継手  
 溶接ワイヤ：YGW12 (φ0.6mm)、シールドガス：Ar+20%CO<sub>2</sub>  
 ワイヤ送給速度：7.6m/min (溶接電流≒53A)、溶接速度：18mm/min

表 3.18 極薄 Zn めっき鋼板のマグ溶接に関する検討結果

No.	溶接方法	溶接電流波形	特徴	評価
1	直流 マグ溶接		◆溶融池の振動・変動が少ない ◆ビード幅がやや広い	○
2	直流 パルスマグ溶接		◆ビード幅・裏波が扁平で広い ◆溶接電流を低くする必要あり	○/△
3	交流 パルスマグ溶接		◆溶融池の振動がやや大きい ◆溶滴移行ミス時に穴あき発生	△
4	交/直複合 パルス マグ溶接	低周波 (1.7Hz) 	◆溶融池の振動が大きい ◆アーク切れ発生時に穴があく	△
5	中周波 (17Hz) マグ溶接		◆アーク切れが多く、やや不安定 ◆高速溶接でも穴あき発生	×
6	低周波交流マグ溶接 (交流周波数：3.3Hz)		◆溶融池の振動・変動が少ない ◆表面・裏波ビードともやや凸 ◆EN 時間比率で溶込みが可変	◎

流パルスマグ溶接、交流/直流複合パルスマグ溶接 (これらの溶接方法については後述の 3.7 節で詳述する) および低周波交流マグ溶接など 6 種類の電流波形が、穴明きなどにおよぼす影響をまとめたものである。比較的長時間の短絡など溶融池に強い圧力や振動が加わると、シャボン玉の破裂と同様に、溶接ビードの溶落ちや穴明きが発生しやすい。そのため、溶接電流の急激な変化に起因して生じるアーク圧力の変化が比較的大きい直流パルス溶接や交流パルス溶接より、その変化が比較的小さい直流マグ (パルスなし) 溶接の方が溶落ち・穴明きの抑制に対して効果がある。ワイヤの溶融速度は、図 3.129 に示すように、極性によって異なる。例えば、ワイヤ径 0.6mm のソリッドワイヤを用いて溶接電流 50A の溶接を行う場合、ワイヤをプラス (DCEP) とする通常の直流マグ溶接でのワイヤ溶融速度は約 7.8m/min である。それに対して、ワイヤをマイナス (DCEN) とした直流マグ溶接でのワイヤ溶融速度は約 9.5m/min まで増加する。したがって、EP 極性と EN 極性を数 Hz で交互に繰り返す低周波交流マグ溶接では、ワイヤ溶融量が増加

し、母材への入熱を低減できるため、極薄板の溶接では溶落ちや穴明きを生じにくく、最も良好な溶接結果が得られる。

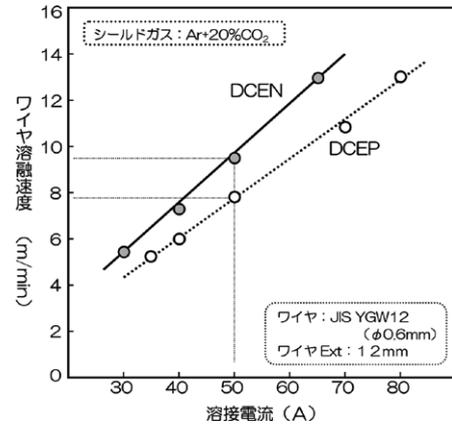


図 3.129 ワイヤ溶融速度におよぼす極性の影響

電流波形を交流にすると、穴明きの防止・ギャップに対する橋絡 (ブリッジ) 性の向上などの効果が得られることに加え、EP/EN 極性時間比率を変化させることによって、溶込み深さやビード形状を制御することが可能となる。表 3.19 は 2mm のルートギャップを有する板厚 0.6mm の重ねすみ肉鋼板の溶接結果を示す一例で、直流マグ溶接では溶接開始直後に溶落ちが発生して良好な溶接結果は得られないが、低周波交流マグ溶接では過大なルートギャップが存在するにもかかわらず、良好な溶接ビードを形成できる。断面マクロを比較すると、直流マグ溶接では溶接金属の大部分が裏波として裏面に垂れ下がっている。しかし低周波交流マグ溶接では、溶接金属の一部が裏波として裏面に出ているのみで、溶落ちや穴明きを生じる気配はほとんどない。

表 3.19 極薄板の重ねすみ肉溶接

	ビード外観	断面マクロ
直流マグ溶接		
低周波交流マグ溶接 (AC3.3Hz /EN:50%)		

60/60Zn めっき鋼板 (0.6mmt)、ルートギャップ：2mm  
 ワイヤ：YGW12 (φ0.6mm)、シールドガス：Ar+20%CO<sub>2</sub>  
 ワイヤ送給速度：7.6m/min (溶接電流：DC≒53A, AC≒40A)、溶接速度：180mm/min

低周波交流マグ溶接電源の構成は図 3.130 のよう

あり、EP 極性時と EN 極性時でのワイヤ溶融速度のアンバランスによって生じるアーク長の変動を防止するために、EN 極性時の出力設定を EP 極性時より低くする調整機能が設けられている。また交流周波数、EN 極性時間比率も任意に設定できるようになっている。低周波交流マグ溶接の自動車ボデーへの適用結果の一例を図 3.131 に、介護ベッド部品への適用状況を図 3.132 に示す。

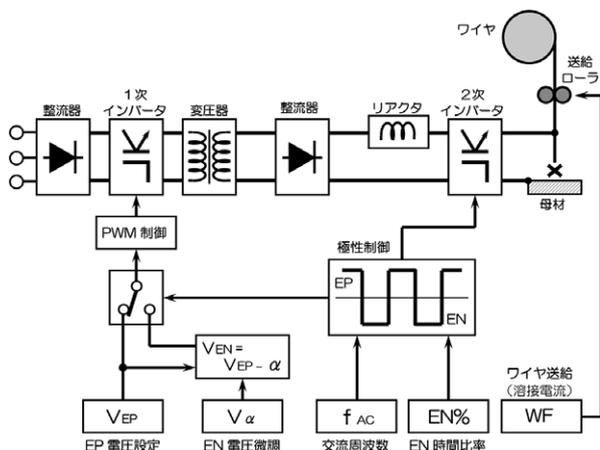


図 3.130 低周波交流マグ溶接電源の構成

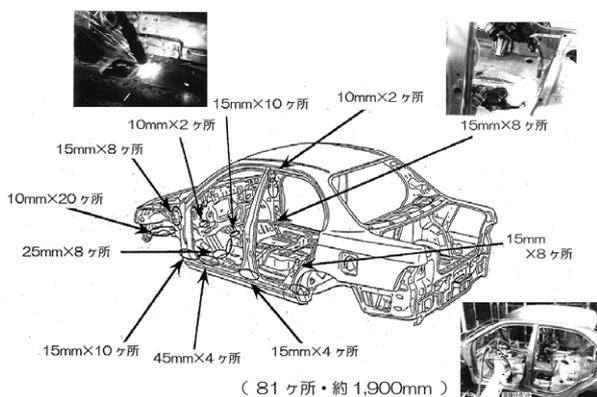


図 3.131 低周波交流マグ溶接の適用箇所 (81ヶ所・約 1,900mm)

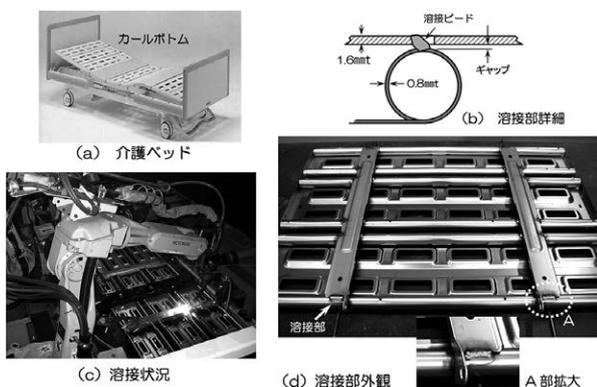


図 3.132 カールボトムの溶接

### 3.7 パルスマグ・ミグ溶接

#### 3.7.1 パルスマグ・ミグ溶接の開発経過

パルスマグ・ミグ溶接法は、臨界電流以上の大電流を通電する期間とアークを維持するために通電する小電流の期間とを、それぞれ所定の周期で交互に繰り返して溶接する溶極式のガスシールドアーク溶接法である。ワイヤ先端に形成された溶滴は、溶融池へ短絡することなくワイヤ端から離脱して母材 (溶融池) へ移行するため、スパッタをほとんど発生させない溶接が可能となる。

このような溶極式パルスアーク溶接法は、英国溶接研究所 (TWI) のニーダム (J. C. Needham) が、小電流域でのアルミニウム溶接で溶滴移行を安定化する手法として 1962 (昭和 37) 年に発表したことに始まる<sup>37)</sup>。そして 1965 (昭和 40) 年には、パルス電流波形によって溶滴の移行特性が変化することを報告している<sup>38)</sup>。当時使用された溶接電源は、商用交流を半波整流したパルス波形を出力するセレン整流式電源である。パルス電流のピーク値のみを変化させることが可能で、パルス幅およびパルス周波数は一定値に固定されていた。また、米国・エアコ (Airco) 社のアンダーソン (Anderson) も、小電流に周期的なパルス電流を重ねることによって、ワイヤ端に形成された融滴を 1 個ずつ溶融池へ移行させるパルスミグ溶接法を開発し、1963 (昭和 38) 年に特許を取得している。1965 (昭和 40) 年頃には、このようなパルスアーク溶接についての研究が活発に行われ、溶滴移行に関するいくつかの基礎的な報告が精力的になされた<sup>39)</sup>。ところが、この溶極式パルスアーク溶接法については、彼らより早い 1962 (昭和 37) 年に大阪変圧器がすでに特許を取得していた<sup>5)</sup>。当時のパルス電流発生装置の一例を図 3.133 に示す。小電流 (ベース電流) を通電する直流定電圧電源と、パルス電流を付加する単相直流電源 (パルス電流発生装置) とが並列に接続された構成となっている<sup>19)</sup>。

その後、パワーエレクトロニクス技術の発展とともに、1960 年代後半には出力をサイリスタで制御する溶接電源の開発が行われ、サイリスタによる点弧位相制御を採用した定電圧特性電源が市販されるようになった。そして 1975 (昭和 50) 年頃には、サイリスタ制御のパルスマグ・ミグ溶接電源も市販品として製品化され、広範囲な産業分野でパルスマグ・ミグ溶接が使用される基礎を築いた。サイリスタ制御の導入によって、パルス電流のピーク値とパルス幅を変化させ

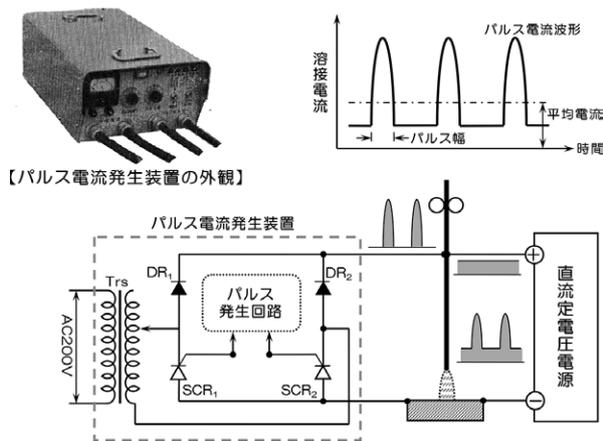


図 3.133 パルス電流発生装置<sup>19)</sup>

ることが可能となった。しかし、その変化はパルス変圧器の出力特性に依存した点弧位相制御であり、パルス電流のピーク値と幅は連動して正弦波上を移動する。そのため、それぞれの因子を独立に変化させることはできなかった。また電源の構成上、パルス周波数は商用周波数またはその倍数に限定され、適切なパルス溶接条件の選定・設定には相当な熟練を必要とした。

トランジスタを出力制御に用いた溶接電源は1975（昭和50）年に開発され、高速かつ精密な出力制御が可能なシリーズ・レギュレータ方式のユニバーサル電源として、主に研究・開発分野で大いに活用された<sup>40)</sup>。このトランジスタ制御電源の出現により、パルス電流のピーク値、パルス幅およびパルス周波数などのパルスパラメータは、それぞれ独立かつ任意に設定・変化させることが初めて可能となった。そしてワイヤの材質、径およびシールドガス組成などに応じて、適切なパルスパラメータ（パルス電流、パルス幅ならびにベース電流）を選定し、ワイヤ送給量に応じてパルス周波数（ベース時間）のみを変化させるパルスアーク溶接法が、TWIのアミン（M. Amin）らによって提案された。このパルスアーク溶接法では、いずれの電流域においてもパルス周期に同期した溶滴移行いわゆる1パルス1溶滴移行を実現できることが報告され、このパルス溶接方法は“シナジーックパルス（Synergic Pulse）溶接”と名付けられた<sup>41)</sup>。

上記シリーズ・レギュレータ方式のトランジスタ制御電源は高機能・高性能な溶接電源として重宝されたが、汎用溶接電源として広い範囲で使用するには高価過ぎるという問題があった。しかしトランジスタ制御電源の低価格化という課題は、大容量トランジスタの開発とチョップ制御方式の導入によって解決された。低価格のトランジスタ・チョップ制御パルスマグ溶接

電源が、1980（昭和55）年にわが国で世界に先駆けて開発され、市販されるようになった。この種のトランジスタ制御パルスマグ溶接電源には、パルスに同期した溶滴移行（1パルス1溶滴移行）の安定化を目的として、電流を正確に制御できる定電流特性が採用された。しかし定電流特性電源では、定電圧特性電源のようなアーク長自己制御作用は得られない。そのためアーク電圧をフィードバックして、パルス幅あるいはパルス周期（ベース時間）などを増減させることによって、アーク長を所定の長さに保つ定アーク長制御方式が導入された。この定アーク長制御については後述3.7.4項で詳述する。

しかし当時のパワーエレクトロニクス技術の進展は目覚ましく、トランジスタ・チョップ制御電源はわずか数年で姿を消すこととなった。そして、新しく登場したインバータ制御電源がパルスマグ・ミグ溶接電源においても主流を占めるようになった。1987（昭和62）年に開発されたインバータ制御パルスマグ・ミグ溶接電源では、アーク長自己制御作用を活用できる定電圧特性が採用され、従来の定アーク長制御を省略するとともに、ベース期間などで発生する短絡にもスムーズに対応できるようになった。さらに1989（平成1）年には、定電流特性のパルスマグ・ミグ溶接電源で最も問題となっていたベース期間中に発生した短絡に対応するために、短絡を検出してその短絡解放電流を供給する短絡補償制御が開発された。

パルスマグ・ミグ溶接電源のインバータ制御化以降、パワーエレクトロニクス技術・電子制御技術・デジタル制御技術の著しい進展を背景にして、その高性能化・高機能化が次々に推進され、2種類のパルス波形を所定の周期で切り替える低周波パルス重畳制御、ベース期間をEN極性とする交流パルスマグ・ミグ溶接、直流パルスと交流パルスを所定の周期で交互に切り替える交流/直流複合パルスマグ・ミグ溶接、微小短絡を検出してアーク電圧を適正值に自動設定する機能を持つパルスマグ溶接電源などが次々に開発された。そして近年では、出力をより高速・精密に制御することが可能なデジタル制御を採用して、ワイヤの材質に応じて異なったパルス電流波形を出力するパルスマグ・ミグ溶接電源も出現している。

### 3.7.2 パルスマグ・ミグ溶接の原理

マグ溶接およびミグ溶接で発生するスパッタの大部分は、ワイヤ先端に形成された溶滴と溶融池との短絡に起因したものである。したがって溶滴を短絡させずにワイヤ端から離脱させて、溶融池へ移行させること

ができれば、スパッタの発生を大幅に低減できる。このような観点から開発された溶接法がパルスマグ・ミグ溶接であり、溶滴のスプレー移行（前述 2.2.3 項参照）現象を利用するために、電流波形を図 3.134 のように制御する。臨界電流以上の大電流を通電する期間（パルス期間）では、ワイヤを溶融してその先端部に溶滴を形成し、電磁ピンチ力を利用して、その溶滴をワイヤ端から離脱させる。ワイヤ端から離脱した溶滴は、パルス期間後半から小電流が通電されるベース期間前半にかけて溶融池へ移行する。ベース期間中はアークを維持するために必要な最小限の電流を通電するが、通常、この期間中にワイヤの溶融はほとんど生じない。溶滴は溶融池と短絡（接触）することなくワイヤ端から離脱して母材（溶融池）へ移行するため、短絡の解放に伴うスパッタの発生はほとんどなく、スパッタ発生量が極めて少ない溶接が可能となる。

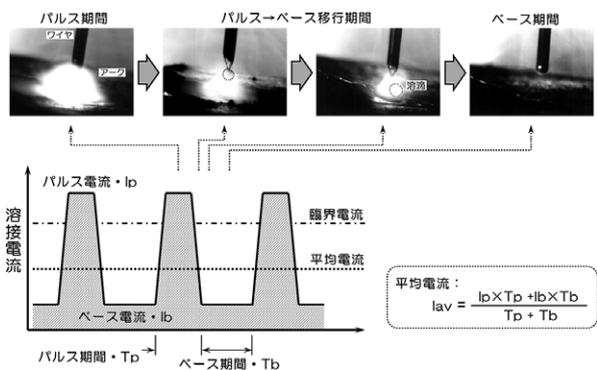


図 3.134 パルスマグ溶接・パルスミグ溶接

パルス電流波形を設定するには少なくとも 4 種類の波形パラメータの設定が必要であり、通常、パルス電流 ( $I_p$ )、ベース電流 ( $I_b$ )、パルス時間（またはパルス幅： $T_p$ ）およびベース時間 ( $T_b$ ) の 4 種類が用いられる。ベース電流およびその時間は、それぞれバックグラウンド電流、バックグラウンド時間と呼ばれることもある。また、時間に関するパラメータとしてパルス周波数も頻繁に使用されるが、パルス周波数はパルス周期 ( $T$ ：パルス時間とベース時間の和) の逆数 ( $1/T$ ) であり、1 秒間に発生するパルスの個数を表す値である。

パルス溶接における溶接電流の表示には平均溶接電流 ( $I_{av}$ ) を用いるが、これはパルス電流 ( $I_p$ ) とパルス時間 ( $T_p$ ) の積 ( $I_p \times T_p$ ) とベース電流 ( $I_b$ ) とベース時間 ( $T_b$ ) との積 ( $I_b \times T_b$ ) の和を、パルス周期 ( $T$ ) で除したものであり、下式で算出され、1 パルス周期中に通電される電流の平均値を示す。

平均溶接電流 ( $I_{av}$ ) =

$$(I_p \times T_p + I_b \times T_b) / (T_p + T_b)$$

溶滴の移行形態を大きく左右する電流波形パラメータは、パルスの高さ ( $I_p$ ) とその幅 ( $T_p$ ) である。パルス電流に同期してワイヤ端から 1 個の溶滴を離脱させるための適正パルス条件（パルス電流とパルス期間の適切な組合せ）は、一般に図 3.135 に示すような右下がりの領域となる。すなわちパルス電流が大きい場合にはパルス期間を狭く、パルス電流が小さい場合にはパルス期間を広くすることによって、パルス電流に同期して 1 個の溶滴がワイヤ端から規則的に離脱する溶滴移行形態である“1 パルス 1 溶滴移行”を実現できる。適正パルス領域より左下の領域では、溶滴の形成・離脱に必要なパルスエネルギーが不足するため、パルスに同期した溶滴移行は得られず、数回のパルスで 1 個の溶滴がワイヤ端から離脱する“n パルス 1 溶滴移行”あるいは溶滴が溶融池と接触して移行する短絡移行となる。適正パルス領域より右上の領域では過大なパルスエネルギーが加えられ、1 回のパルスで数個の溶滴がワイヤ端から離脱する“1 パルス n 溶滴移行”となる。この領域での溶滴は溶融池との短絡を生じないため実用性があるように思われるが、溶滴離脱後のワイヤ端に残存する溶融金属量は必ずしも一定せず、各パルス周期で移行する溶滴の大きさや個数が変動してアークは安定性・規則性に欠ける。

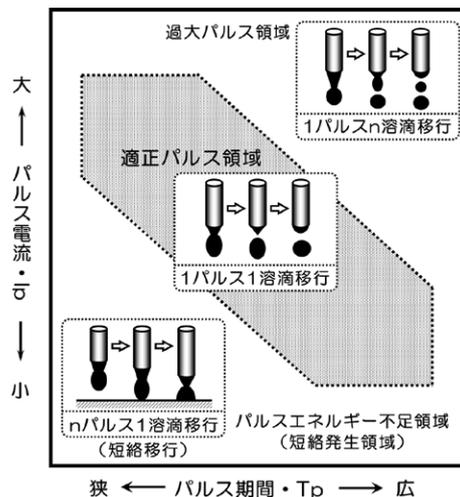


図 3.135 適正パルス条件

溶接電流、アーク電圧を変化させた場合の適正パルス領域は図 3.136 のようであり、溶接電流が変化しても適正パルス領域はほとんど変化しない。アーク電圧が変化すると適正パルス領域も変化するが、その変化は高エネルギー側（適正パルス領域の右上側）の上限値のみであり、低エネルギー側（適正パルス領域の左

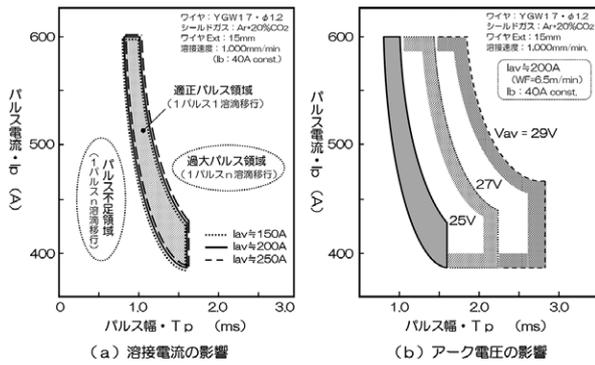


図 3.136 適正パルス条件領域の比較

下側)の下限値は変化しない。高エネルギー側ではパルスによるワイヤ溶融量が増加して、ワイヤ先端に形成される溶滴が大きくなる。そのため、アーク電圧が低く(アーク長が短く)なって溶滴端と溶融池表面との間隔が小さい場合には、溶滴がワイヤ端から離脱する前に溶融池と短絡して溶滴移行の安定性を乱すこととなる。したがって、平均アーク電圧 ( $V_{av}$ ) が低く、アーク長が短い場合には、適正パルス領域の上限は制約され、むやみに大きくすることはできない。しかしアーク電圧が高く(アーク長が長く)なると、ワイヤ端と溶融池の間には十分な間隔が生じるため、大きい溶滴が形成されても溶滴は溶融池と短絡する前にワイヤ端から離脱することができようになるため、アーク電圧を高く(アーク長を長く)するほど適正パルス領域の上限値は拡大することとなる。

ワイヤ径、材質およびシールドガス組成などに応じて適切なパルス電流 ( $I_p$ )、ベース電流 ( $I_b$ ) およびパルス期間 ( $T_p$ ) を設定すると、溶接電流すなわちワイヤ送給速度が変化してもこれらの値を変化させる必要はない。ベース期間 ( $T_b$ ) のみを変化させることによって、溶接電流(ワイヤ送給速度)とともにパルス周波数 ( $f: 1/(T_p + T_b)$ ) が 50~500Hz 程度の範囲で変化する。その結果、小電流から大電流に至る全ての電流域で安定したスプレー移行(プロジェクト移行)を実現でき、薄板から厚板までの広範囲な継手への適用が可能となる。このようにパルス周期と溶滴移行が同期した溶接法を“シナジック(同期した)パルス溶接”という。

パルス期間中に形成された溶滴を、パルス周期に同期してワイヤ端から離脱させ、溶融池へ移行させるシナジックパルス溶接においても、ワイヤ送給量(WF)とワイヤ溶融量(MR)の関係は同様である。ただし1つのパルスで1個の溶滴の形成とその離脱を確実にを行うために、パルス電流、ベース電流およびパルス幅は一定として、出力電圧設定ダイヤルで設定さ

れるベース時間(パルス周波数)をWFに応じて変化させる。すなわち、小電流が通電されるベース期間中にはワイヤの溶融がほとんど生じないとすれば、図 3.137 に示すように、所定長さのワイヤが送給されるごとに1個のパルスを発生させて、そのパルスで所定長さのワイヤの溶融と溶滴の形成および1個の溶滴のワイヤ端からの離脱を行うようにする。溶接電流の設定値を増/減させるとワイヤ送給量(WF)も増/減するが、その変化に応じてベース期間の減/増(パルス周波数の増/減)を行い、所定長さのワイヤが送給されるごとに1つのパルスを発生させるようにする。そうすると、1つのパルスで形成・離脱させる溶滴の大きさは電流値(ワイヤ送給量)に関係なく一定となり、いずれの電流域においても均一かつ規則的な溶滴移行を実現できることとなる。ワイヤ径、材質およびシールドガス組成などに応じた適正なパルス電流、ベース電流およびパルス幅を選定すると、ワイヤ送給量に変化してもこれらの値を変化させる必要はない。ベース時間(パルス周波数)のみを変化させることによって、全ての電流域でパルスに同期した1パルス1溶滴移行を実現することができる。

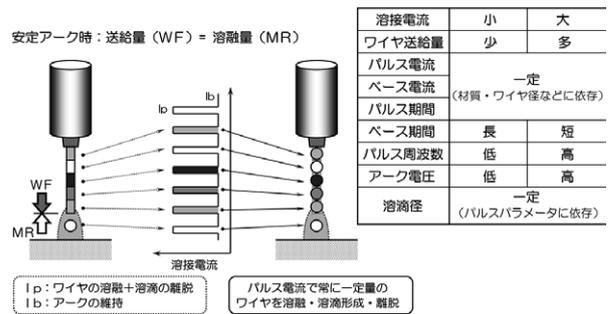


図 3.137 シナジックパルスの原理 (1パルス1溶滴移行の原理)

以上のように、安定した1パルス1溶滴移行を実現するためには、パルス電流(電圧)およびパルス幅の適切な選定が極めて重要であるが、これらの値はワイヤの溶融特性、溶滴のワイヤ端からの離脱特性と密接に関係するため、ワイヤの材質や径などに応じてパルス波形の適正值は異なる。図 3.138 は、主なワイヤに対する適正パルス電流波形の一例を示したものである。ワイヤの材質が同じであっても、その径が太いものほど大きいパルス電流、広いパルス幅が必要である。またワイヤ径が同一であっても、その材質が異なると融点・電気伝導度・熱伝導度・粘性などの影響によって、適切なパルス電流波形は異なったものとなる。

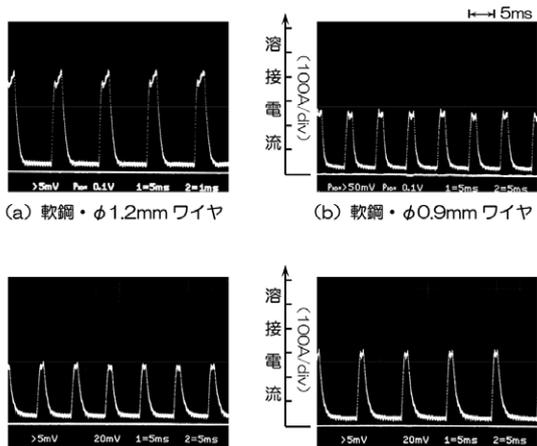


図 3.138 主なパルス溶接電流波形

### 3.7.3 パルスマグ・ミグ溶接の溶滴移行特性

パルスマグ溶接における溶滴移行現象は図 3.139 のようであり、Tb 期間 (1 コマ目) から Tp 期間に入るとワイヤ先端部での溶融が始まり (2 コマ目)、その溶融が十分進行した Tp 期間の中盤になると電磁ピンチ力による溶滴のくびれが発生する (3 コマ目)。Tp 期間の後半では溶滴のくびれが加速度的に進行し (4 コマ目)、ワイヤ端から離脱した溶滴は溶融池へ移行する (5 コマ目)。Tb 期間に入るとワイヤはほとんど溶融されないため、溶滴離脱後のワイヤ端に残存した溶融金属 (6 コマ目) は、表面張力の作用でワイヤ側に引き戻され、ワイヤの先端形状をほぼ半球状に整形して次のパルスに備える (7 コマ目)。Tb 期間の初期に整形されたワイヤ端は、その後もほぼ同一の形状を維持して (1 コマ目)、上述の現象を繰り返す。

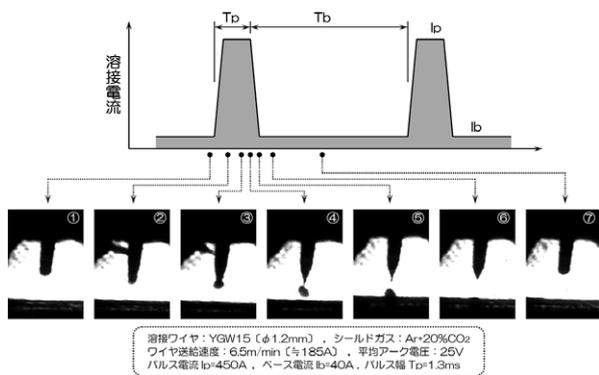


図 3.139 パルスマグ溶接の溶滴移行現象

アルミニウムワイヤを用いたパルスミグ溶接においても、図 3.140 に示すように、溶滴はパルスマグ溶接とほぼ同様の挙動を示すが、融点は軟鋼などに比べて低いため、小電流しか通電されない Tb 期間中にも少量のワイヤ溶融が発生し、Tb 期間終了時のワイヤ先

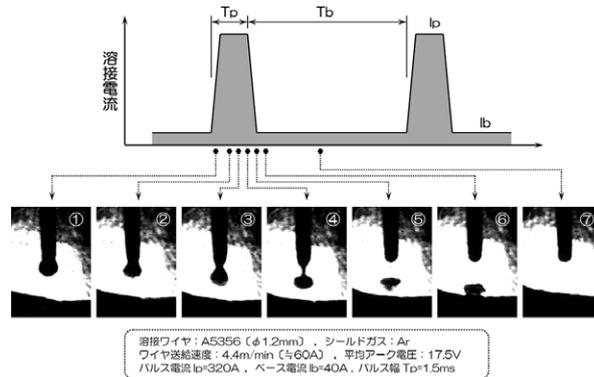


図 3.140 パルスミグ溶接の溶滴移行現象

端に形成される溶融金属量 (1 コマ目) は、Tb 期間前半 (7 コマ目) よりやや多くなる。

シナージックパルス溶接では、パルス電流、ベース電流およびパルス幅を一定として、パルス周波数 (ベース時間) を変化させてワイヤ送給速度の変化に対応する。溶接電流すなわちワイヤ送給速度が増加するにつれて、ベース時間が減少し、パルス周波数が増大する。ワイヤ送給速度とパルス周波数の値に基づいて、パルス周期に同期して溶融池へ移行する溶滴 1 個の径を算出すると表 3.20 のようである。ワイヤ送給速度をパルス周波数で除して 1 パルス当たりのワイヤ溶融長さを求め、その溶融長さからワイヤ径から 1 パルス当たりのワイヤ溶融体積を計算する。そして溶滴を球形と仮定し、その溶融体積から溶滴径を算出する。平均溶接電流の変化に伴ってワイヤ送給速度とパルス周波数はそれぞれ変化するが、パルスに同期して溶融池へ移行する溶滴径は、いずれの電流値においても直径 1.0 mm 程度のほぼ一定値を示している。すなわち、平均溶接電流の増加にほぼ比例してワイヤ送給速度とパルス周波数は増大するが、移行溶滴径は変化せずほぼ一定の値となる。なお、ここでの移行溶滴径はワイヤ径 (直径 1.2 mm) より小さい直径 1.0 mm 程度となっているが、これは高温粘性が比較的低いワイヤ (JIS YGW17) を用いたためである。一般的なマグ溶接ワイヤ (JIS YGW15 あるいは JIS YGW16 ワイヤなど) での移行溶滴径は、ワイヤ径にほぼ等しい値となることが知られている。

表 3.20 パルスマグ溶接の溶滴移行特性

平均溶接電流 (A)	ワイヤ送給速度 (m/min)	パルス周波数 (Hz)	1パルス当たりのワイヤ溶融長さ (mm/Pulse)	1パルス当たりのワイヤ溶融体積 (mm <sup>3</sup> /Pulse)	移行溶滴径 (mmφ)
150	4.5	177.9	0.42	0.475	0.966
200	6.5	245.0	0.44	0.497	0.984
250	8.5	333.3	0.43	0.486	0.976

ワイヤ: YGW17 (φ1.2mm), シールドガス: Ar+20%CO<sub>2</sub>, ワイヤExt: 15mm

### 3.7.4 パルスマグ・ミグ溶接電源の出力特性

パルス電流の挙動が溶滴移行の安定性などと密接に関係するパルスマグ・ミグ溶接では、通常、電流値を正確に制御することができる定電流特性電源が用いられる。しかし定電流特性電源にはアーク長を一定に保つ自己制御作用（前述 3.5.2 項参照）がない。そのため定電流特性のパルスマグ・ミグ溶接電源では、アーク電圧を検出し、その値に基づいて平均溶接電流を増減させることによって生じるワイヤ溶融速度の変化を利用してアーク長を所定の長さに保つ制御が行われる。平均溶接電流を増減させる方法を大別すると図 3.141 のようである。“パルス幅 (Tp) 変調”は、アーク長が伸びて平均アーク電圧 (Vav) が高くなると、パルス周期 (T) は変化させずに、Tp を Tp1 に狭めて平均溶接電流を低下させることによって、ワイヤの溶融を抑制してアーク長を元に戻す制御である。反対に、アーク長が短くなって Vav が低くなると Tp を広くして平均溶接電流を増加させ、ワイヤの溶融を促進してアーク長を元に戻す。“パルス周波数 (T) 変調”では、アーク長が伸びると、Tp は変化させずに、T を T1 に狭めることによって平均溶接電流を低下させる。またアーク長が短くなると、T を広くすることによって平均溶接電流を増加させる。“パルス電流 (Ip) 変調”は、アーク長が伸びると、T および Tp はそのまま、Ip を Ip1 まで低下させて平均溶接電流を減少させ、アーク長が短くなると Ip を増大させることによって平均溶接電流を増加させる。なお、パルスマグ・ミグ溶接には定電圧特性電源も用いられており、その場合には電源のアーク長自己制御作用によって、パルス電流変調とほぼ同様の挙動を示す。

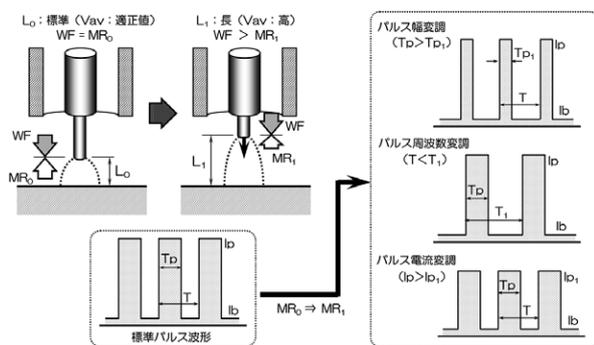


図 3.141 定アーク長制御

定電流特性電源と定電圧特性電源のパルスマグ・ミグ溶接における特性を比較すると、表 3.21 のようである。定電流特性電源では、溶滴移行と密接に関係するパルス電流 (Ip) およびベース電流 (Ib) の値が所定

値に制御されるため、溶滴移行の安定性に優れたアーク状態が得られやすい。しかし、定電流特性電源にはアーク長の自己制御作用がないため、アーク電圧はアーク長の変化などの外乱によって変動することとなり、その変動を抑制するための定アーク長制御を付加することが必要となる。一方、定電圧特性電源の場合、パルス電圧 (Vp) およびベース電圧 (Vb) の値すなわち平均アーク電圧 (アーク長) はほぼ一定に保たれるが、パルス電流 (Ip) およびベース電流 (Ib) は外乱などによって変動する。しかし、この変動は電源のアーク長自己制御作用に基づく現象で、アーク長を所定の長さに維持するために不可欠な変動である。このような Ip と Ib の変動、特に Ip の変動は特別な定アーク長制御の付加を不要としている重要な要素であるが、溶滴移行に直接影響するため、Ip の値を決定するパルス電圧 (Vp) の設定は大きい制約を受ける。

表 3.21 パルス溶接電源の出力制御特性の比較

	定電流特性	定電圧特性	備考
電流電圧波形			アーク長変化により、定電流特性ではアーク電圧が変動する。定電圧特性では溶接電流が変動する。
定アーク長制御			定電流特性ではアーク電圧フィードバックによる定アーク長制御が必要。定電圧特性では電源のアーク長自己制御作用を利用できる。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ アーク長が変化しても、Ip と Ib はほとんど変動しない。</li> <li>○ 溶接ケーブル長の影響は比較的受け難い。</li> <li>● 定アーク長制御が必要。</li> <li>● 短絡に対する補償制御が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 定アーク長制御は不要。</li> <li>○ 短絡に対する補償制御は不要。</li> <li>● アーク長変化にともなう Ip と Ib の安定化制御が必要。</li> <li>● 溶接ケーブル長の影響を受け難い。</li> <li>● 短絡に対する補償制御が必要。</li> </ul>	定電流特性では安定な電流出力を得られるが、定アーク長制御を付加することが必要。定電圧特性では制御回路を簡素化できるが、電流出力は外乱の影響を受け難い。

パルスマグ・ミグ溶接では、何らかの原因でパルス期間中に適切な溶滴移行が行われなかった場合に、ベース期間中に溶滴が溶融池へ短絡する。ワイヤ端に比較的大量の溶融金属が取り残された場合、あるいはアーク長を短くすることによってワイヤ端から溶滴が離脱するために必要な距離が得られなかった場合などである。ベース期間中には数十 A の電流が通電されているが、定電流特性電源の場合は短絡が生じても電流の増加はほとんどなく、この程度の電流値では短絡の解放に必要なエネルギーは得られない。短絡の解放は、次のパルス期間で供給される数百 A の大電流で行われることとなる。急峻かつ大電流のパルス電流で短絡を解放すると、アーク再生時に爆発的な現象が発生して溶融池へ激しい振動を与え、大粒のスパッタが大量に発生する。このような問題を解決するために、図 3.142 (a) に示すような短絡電流の補償制御が開発されている。ベース期間中に短絡が発生したことを検出

すると、溶滴と溶融池が確実に接触するための遅延時間が経過するのを待って適切な増加速度の電流を通電し、その電流で短絡を解放する。短絡電流補償制御の効果の一例を示すと (b) のようであり、短絡電流補償制御なしの場合に比べ、スパッタの発生量は1/5程度に低減され、その効果はアーク電圧が低くなるほど顕著である<sup>42)</sup>。

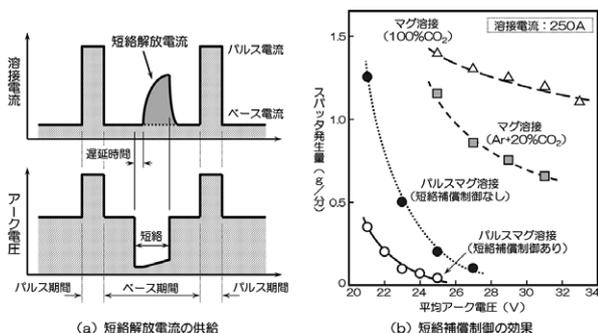


図 3.142 短絡補償制御<sup>42)</sup>

なお定電圧特性のパルスマグ・ミグ溶接電源では、その自己制御作用によって短絡の解放に必要な電流がおのずと供給され、必要最小限の電流値で短絡の解放が行われる。そのため、短絡電流補償制御の付加は不要である。しかしパルス電流の立ち上がり時には、電流を所定の  $I_p$  までできるだけ速く増加させたいが、パルス電流によるワイヤの溶融が急速に進み、アーク長は増加し続けている。そのため、電源の自己制御作用による電流減少作用が生じ、パルス電流の立ち上がり速度を抑制するように作用する。この電流増加抑制作用はアーク長によって異なり、ワイヤ先端の溶滴形成状況や溶融池の挙動によって大きく左右されるため、定電圧電源で均一なパルス電流を供給することは極めて困難なこととなる。またベース期間においても、アーク長増加にともなう電流減少が限界値を超えると、アークの維持が不可能となってアーク切れを生じることとなる。したがって定電圧特性のパルスマグ・ミグ溶接電源では、このような問題点を解消してアークの安定性を向上させることが必要となり、パルス電流波形の均一化を図るパルス電流立ち上がり制御およびベース期間中のアーク切れを抑制する最小電流補償制御が付加されている。

### 3.7.5 パルスマグ・ミグ溶接の電流波形制御

#### (1) 大電流パルスマグ溶接

パルスなしのマグ・ミグ溶接においても、溶接電流を臨海電流値以上に設定すると、安定した溶滴のスプレー移行を実現することができる。しかし臨界電流近

傍の値に設定したベース電流に、ピーク値が比較的低く幅も狭いパルス電流を重畳することによって、その溶滴移行特性をさらに改善することができる。このようなパルスマグ溶接法（大電流パルスマグ溶接）は、1970年代前半に米国のエアコ（Airco）社によって開発された。大電流パルスマグ溶接の効果は図 3.143 のようである。(a) はパルスなしの場合の溶滴のスプレー移行であるが、粘性の大きいステンレス鋼ワイヤ（SUS308）を用いたこともあって、ワイヤ端の溶滴が溶融池方向に長く引き伸ばされ、アーク長を比較的に長くしなければ短絡を抑制することができない。一方、(b) の大電流パルス溶接では、ワイヤ端の溶融金属は長く引き伸ばされる前に溶滴となってワイヤ端から離脱し、短いアーク長でも短絡を生じないアーク状態を実現している。

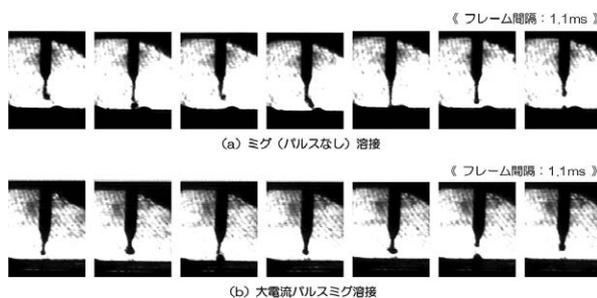


図 3.143 溶滴移行におよぼすパルス電流の影響

大電流パルス溶接と上述したシナージックパルス溶接（前述 3.7.2 項参照）との溶滴移行を比較すると表 3.22 のようである。大電流パルス溶接ではパルスに同期した 1 パルス 1 溶滴移行は行われず、パルス周波数と溶滴移行回数が同期しない“ $n$ パルス $m$ 溶滴移行”となる。しかしベース電流期間中にも大電流が通電され、重畳されるパルス電流の勢力もそれほど強くないため、パルス期間とベース期間によるアーク形態の差異はわずかである。またそれらの溶接の特性を比較すると表 3.23 のようである。シナージックパルス溶接ではアーク電圧（アーク長）の調整をパルス周波数で行うが、大電流パルス溶接ではパルス周波数を固定し、ベース電圧（ベース電流）の増減でアーク電圧（アーク長）を調整する。すなわちシナージックパルス溶接は小電流から大電流まで広範囲な電流域で適用でき、そのアーク状態はパルス電流によって支配される。しかし、大電流パルス溶接の場合は臨界溶接電流よりやや低い電流値が下限電流となり、そのアーク状態はベース電流によって支配され、ベース電流による溶滴のスプレー移行化が困難な小電流域での使用は不適切である。

表 3.22 溶滴移行形態の比較

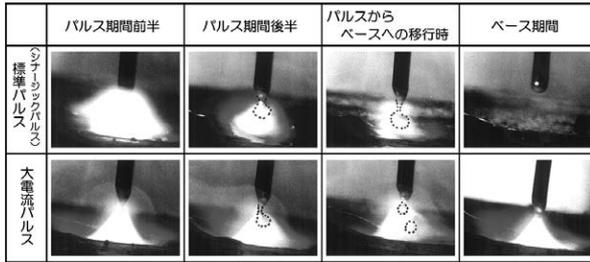


表 3.23 パルスモードの特性比較

	標準 (シナージック) パルス	大電流 パルス
溶接電流波形		
パルス電流	大	比較的小
ベース電流	小 (数 10A)	大 (臨界電流値近傍以上)
パルス周波数	アーク電圧で変化	固定 (~ 300Hz)
アーク電圧調整	パルス周波数	ベース電圧
使用電流範囲	小電流域 ~ 大電流域	中電流域 ~ 大電流域
溶滴移行形態	プロジェクト移行	ストリーミング移行
アークの集中性	比較的良好	極めて良好
アーク支配因子	パルス電流	ベース電流
短絡時スパッタ	やや多い	比較的小ない
ワイヤ溶融量	多い (実効電流大)	やや少ない (実効電流小)
溶込み深さ	比較的小	深い
ワイヤの影響	大きい	比較的小ない

大電流パルス溶接ではパルスに同期した規則的な溶滴移行は得られないが、アーク長を短くしても短絡を生じにくいアーク状態が得られるため、狭開先溶接や厚板の深溶込み溶接などに適用されている。しかし、溶融金属の粘性が低いアルミニウムの溶接に大電流パルス溶接を適用するとアーク圧力が強過ぎるため、微小なスパッタが多発してビード周辺部に付着しやすく、アルミニウムやその合金の溶接への適用は好ましくない。また大電流パルス溶接のワイヤ溶融量はシナージックパルス溶接に比べて少なく、得られる溶込みは深く、ワイヤの種類や銘柄などによってパルスパラメータが受ける影響も少ない。

## (2) 矩形波パルス溶接

溶接電源へのインバータ制御方式の導入によってパルス電流波形は急峻化され、アーク特性の改善に大きく寄与してきた。しかしインバータ制御溶接電源のパルス電流波形は基本的に台形波で、パルス電流の増加・減少時に多少の傾斜を持つ。このようなパルス電流の傾斜をなくし、ほぼ矩形波状のパルス電流波形が得られるようにした溶接電源 (矩形波パルス溶接電源) が 1998 (平成 10) 年に開発されている。溶接電

源の構成は図 3.144 のようであり、パルス電流を出力するパルス電源回路、ベース電流を出力するベース電源回路およびパルス電流の供給を制御するスイッチング素子 (IGBT: 絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ) などから構成される。

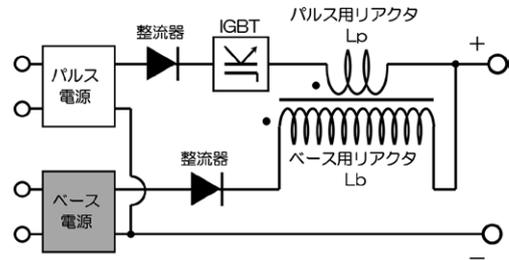
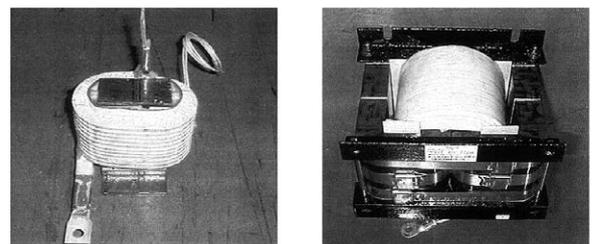


図 3.144 矩形波パルス溶接電源の構成

通常の溶接電源に用いられる直流リアクタの形状は図 3.145 (a) のようであり、I 形断面の棒状コアが用いられる。しかし矩形波パルス溶接電源では、(b) に示すような外鉄形コアを採用し、直流リアクタ  $L_p$  と  $L_b$  の結合が良好となるようにしている。 $L_p$  と  $L_b$  との結合が極めて良好であると、パルス期間からベース期間へ移行する際には、 $L_p$  に蓄えられた全てのエネルギーが  $L_b$  へ変換される。またベース期間からパルス期間へ移行する際にも、 $L_b$  に蓄えられたエネルギーは全て  $L_p$  へ変換される。そして、いずれのリアクタにおいてもアンペア・ターン (電流×コイルの巻数) は等しくなる。



(a) 汎用電源の棒状コア・リアクタ (b) 矩形波パルス電源の外鉄コア・リアクタ

図 3.145 直流リアクタの形状比較

よって、パルス電源回路のリアクタ  $L_p$  のコイル巻き数を  $N_p$ 、ベース電源回路のリアクタ  $L_b$  のコイル巻き数を  $N_b$  とすれば、ベース期間からパルス期間への移行直後の電流  $I_p'$  は、ベース電流  $I_b$  から

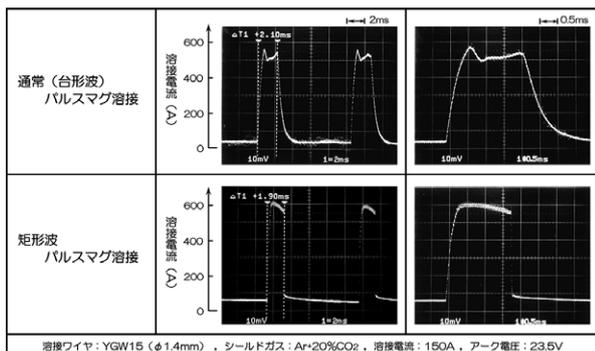
$$I_p' = (N_b/N_p) \times I_b$$

まで急激に増加し、その後は緩やかに増大して所定のパルス電流  $I_p$  に到達する。またパルス期間からベース期間へ移行直後の電流  $I_b'$  は、パルス電流  $I_p$  から

$$I_b' = (N_p/N_b) \times I_p$$

まで急激に低下し、その後は緩やかに減少して所定のベース電流・I<sub>b</sub>に到達する。以上のようにして得られるパルス電流波形は表3.24のようであり、ほぼ矩形波状のパルス波形を示す。パルス電流波形が台形状となる標準パルス溶接の場合と比較して、矩形波パルス溶接電源で得られるパルス電流の変化は極めて急峻である。

表 3.24 パルス電流波形の比較



アークスポット溶接を用いて、マグ（パルスなし）溶接、標準パルスマグ溶接および矩形波パルスマグ溶接の溶込みを比較すると表3.25のようである。溶込みはマグ溶接の場合に最も少なく、標準パルスマグ溶接では比較的深い溶込みを得ることができる。しかし、溶接時間1.5秒の結果に着目すると、矩形波パルスマグ溶接では母材に貫通孔が形成されるが、標準パルスマグ溶接では溶融池金属の半分程度が残存している。急峻なパルス電流波形を用いる矩形波パルスマグ溶接では、その急激な電流変化に伴うアーク圧力の増加が著しく、その圧力増加が深い溶込みを形成する要因となっているものと推察される。

表 3.25 アークスポット溶接における溶込み深さの比較

溶接時間	マグ(パルスなし)溶接	標準パルスマグ溶接	矩形波パルスマグ溶接
0.5秒			
1.0秒			
1.5秒			
溶接条件	ワイヤ送給速度：12m/min (≒320A) アーク電圧：31V	ワイヤ送給速度：12m/min (≒320A) 平均アーク電圧：31V	ワイヤ送給速度：12m/min (≒310A) 平均アーク電圧：28V
母材：SS400 (6mm) 、 シールドガス：Ar+20%CO <sub>2</sub> 、 ワイヤ：YGW15 (φ1.2mm) 、 ワイヤ突出長さ：20mm			

### (3) 適正アーク電圧の自動設定制御

パルスマグ溶接における平均アーク電圧とその時に

発生する短絡の継続時間の平均値（平均短絡時間）の間には図3.146に示すような関係があり、平均アーク電圧の低下に伴って平均短絡時間は増加する。ワイヤ送給速度が変化すると短絡の発生が認められなくなる平均アーク電圧は変化するが、上記の傾向は同様で、平均アーク電圧の低下とともに平均短絡時間はほぼ一定の比率で増加する。そこで、常時ごく短時間の短絡（微小短絡）が定期的に発生するようなアーク状態で得られる平均短絡時間を目標値として、図3.147に示すように出力電圧の設定を制御する。すなわち、アーク電圧が低く平均短絡時間が目標値より長い場合には出力電圧の設定値を増加させ、アーク電圧が高く短絡が発生しない、あるいは平均短絡時間が目標値より短い場合には出力電圧の設定値を減少させる。このように出力電圧の設定を変化させれば、アーク電圧がどのような値に設定されていたとしても、その値を自動的に適切な値に補正することができる。すなわち短絡の発生状況をセンサとして、アーク電圧の自動設定制御を行うことができる。このような出力電圧の制御方法は1996（平成8）年に開発された。

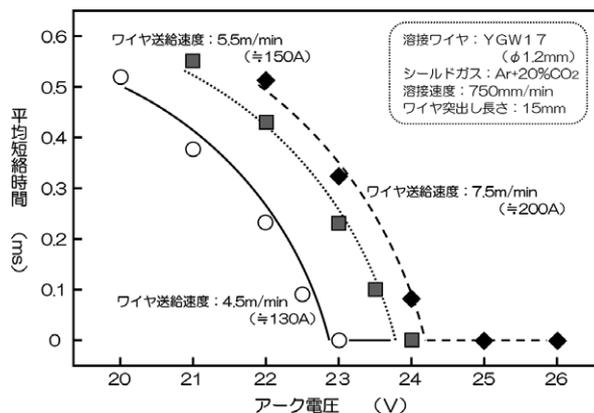


図 3.146 アーク電圧と平均短絡時間の関係

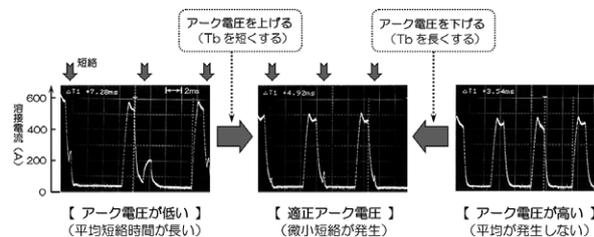


図 3.147 適正アーク電圧の自動設定方法

上記アーク電圧の自動設定制御方法をブロック図で示すと図3.148のようであり、まずパルス周期ごとに発生する短絡時間を移動平均して求めた平均短絡時間(T<sub>s</sub>)と所定の基準短絡時間(T<sub>j</sub>)を比較する。そしてT<sub>s</sub>の値がT<sub>j</sub>より小さい場合にはアーク電圧が高

いと判定して、所定量増加させたベース時間 (Tb) を新しい Tb として出力制御回路へ指令する。反対に、Ts の値が Tj より大きい場合はアーク電圧が低いと判定して、所定量減少させた Tb を出力制御回路へ指令する。ただし、強い外乱などによって短絡の開放に長い時間を必要とする異常短絡などが発生すると、Ts の値は一挙に増大して極めて大きい操作量が必要となり、制御の安定性を阻害することとなる。そのため Ts の値には上限値 (TsMAX) を設け、異常に大きい Ts の値が入力されたとしても、TsMAX 以上の値は出力しないようにして制御の安定化を図っている。

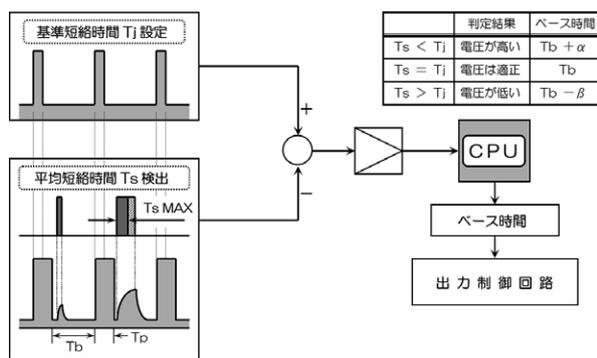


図 3.148 適正アーク電圧の自動設定制御

アーク電圧自動設定制御の効果を示すと図 3.149 のようである。初期アーク電圧が適正アーク電圧  $\pm 3V$  程度の範囲内に設定されていれば、初期設定がいずれの値であっても、自動設定制御によってアーク電圧は自動的に適正值へ補正されている。また、溶接電流やワイヤ径が変化してもこの制御は有効であり、ワイヤ径 1.2mm ワイヤにおいても、ワイヤ径 1.6mm ワイヤにおいても、アーク電圧は広範囲な溶接電流域で適正值へ自動的かつ比較的短時間で収束している。

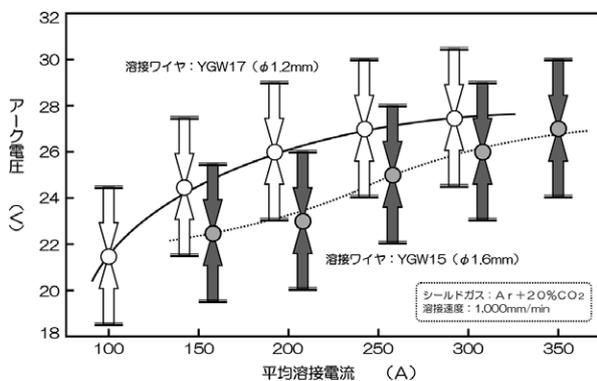


図 3.149 適正アーク電圧の自動設定結果

#### (4) 低周波パルス重畳制御

パルスマグ・ミグ溶接の溶接作業性の向上などを目的として、2種類のパルス波形を数 Hz 程度で交互に切り替える低周波パルス重畳制御が 1990 (平成 2) 年に開発されている。低周波パルス重畳制御は、図 3.150 に示すように、溶融池を形成して所定のビード幅と溶け込みを確保するために供給される大きいパルス電流 (パルス I) を通電する期間と、溶融池の冷却を促進するために供給される比較的小さいパルス電流 (パルス II) を通電する期間とを、所定の周期で交互に繰り返す溶接法である。

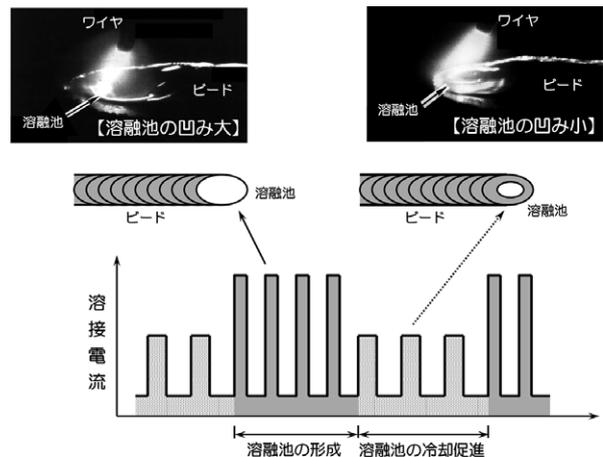


図 3.150 低周波パルス重畳パルスによる溶融池の制御

アルミニウム合金に対する低周波パルス重畳制御の効果の一例を示すと表 3.26 のようである。一般に溶液中に存在するガスの浮上速度は、飲料中に含まれた炭酸ガスの気泡のように、溶液に適度な振動を加えることによって速くなる。すなわち 2 種類のパルス電流の切替え動作によって、溶融池内の溶融金属には振動が発生し、溶融金属中に内包された気泡の浮上速度を増加させることができる。パルスミグ溶接では、溶融池金属の振動が少なく、大径かつ多数のブローホールが発生している。しかし低周波パルス重畳パルスミグ溶接では、溶融池金属の活発な振動が内包ガスの浮上を促進し、ブローホールの発生は激減する。なお、低周波パルス重畳パルスミグ溶接でもブローホールが少し発生しているが、これはブローホールに大きく影響する水素 (H<sub>2</sub>) をシールドガスに微量添加したためである。このような低周波パルス重畳パルスミグ溶接で生じる溶融池金属の振動は、表 3.27 に示すように、結晶粒の微細化にも効果があり、低周波パルスの周波数を増加させるほど微細な結晶粒が得られる。アルミニウムやその合金の溶接では、一般に、結晶粒が微細化するほど耐割れ性が向上する。その他、低周波パル

ス重畳パルスミグ溶接には母材への入熱制御効果やビード波の明瞭化効果がある。その一例を示すと図3.151のようであり、(a)は板厚差が大きく、穴あきが生じやすいバンパー部品への適用、(b)は美しいビード外観が要求されるオートバイ・フレームへの適用例である<sup>43)</sup>。

表 3.26 低周波パルス重畳によるブローホールの低減<sup>43)</sup>

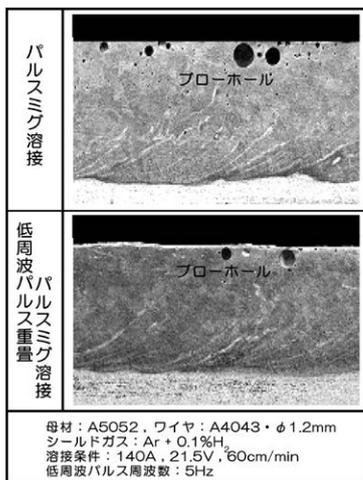


表 3.27 低周波パルス重畳による結晶粒の微細化<sup>43)</sup>

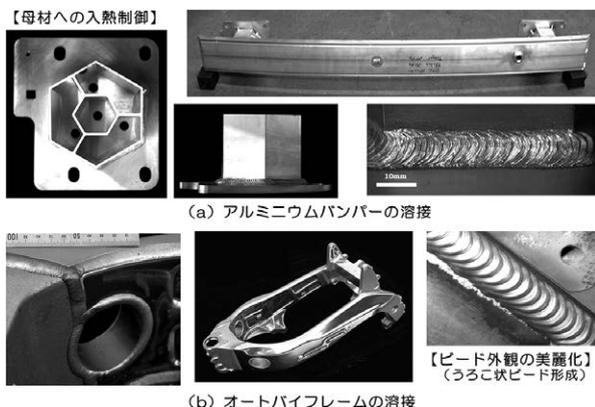
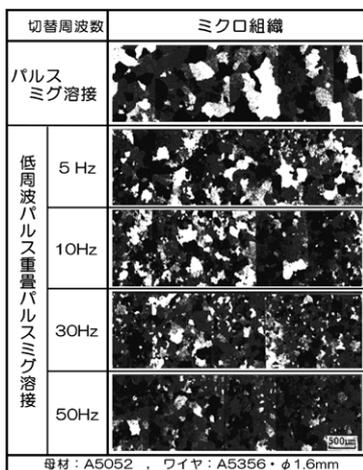


図 3.151 低周波パルス重畳パルスミグ溶接の適用例

亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉溶接などでは、図3.152に示すような気孔を発生することが多い。アーク熱によって溶融、気化したルート部近傍の亜鉛は大気中への逃げ道を失うと、侵入が比較的容易な溶融池金属に入り、溶融池金属の凝固時までその表面まで浮上できなかった亜鉛ガスが取り残されて気孔となる。この場合にも、低周波パルス重畳制御による溶融池振動によって生じる、溶融金属中の気泡の浮上速度増加作用を利用することができる。図3.153はその効果の一例を示したもので、母材へ機械的な振動を与えながら溶接した場合の結果と比較している。母材振動を加えないで溶接した場合には、溶接長100mm当たり30個程度のブローホールが発生する。しかし母材を振動させると、ブローホールはその振動周波数の増加とともに減少する。振動周波数が30Hzを超えるとブローホールの発生は完全に抑制され、振動による溶融池金属中の気泡の浮上速度増加作用の効果は顕著である。しかし実ワークの溶接では、母材を振動させることはほぼ不可能である。そのため低周波パルス重畳制御によるアーク圧力の変化を利用して溶融池に振動を加えると、低周波パルス重畳周波数が20~50Hzの範囲でブローホールの発生は抑制され、その周波数が50Hzを超えるとブローホールは再び増加する傾向を示す。母材振動および低周波パルス重畳制御いずれにおいても、周波数が30~40Hz程度の領域で顕著なブローホール抑制効果が認められる。この周波数帯域は溶融池金属の共振周波数に近く、溶融池金属に加えられる振動が大きくなるためである<sup>44)</sup>。

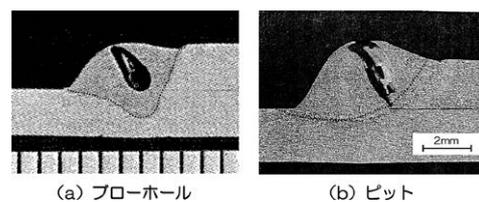


図 3.152 重ねすみ肉溶接における気孔

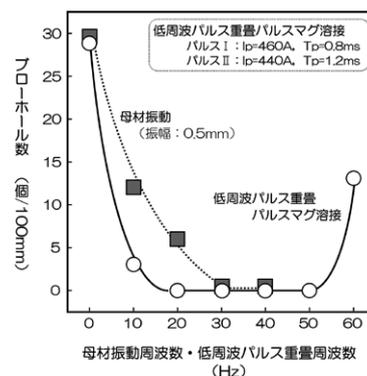


図 3.153 低周波パルス重畳パルスミグ溶接の効果<sup>44)</sup>

### 3.7.6 交流パルスミグ溶接

#### (1) 交流パルス溶接

交流パルス溶接は1991（平成3）年に開発された、DCEN極性におけるワイヤ溶融量増加を活用した溶接方法である。図3.154に示すように、直流パルス溶接におけるベース期間中に、ベース電流（ $I_b$ ）と同一の値で極性のみをDCENとした電流（ $I_{EN}$ ）を通電する。DCEP極性のパルス電流（ $I_p$ ）とその期間（ $T_p$ ）は、それぞれ直流パルス溶接におけるパルス電流（ $I_p$ ）およびパルス期間（ $T_p$ ）と同様の値である。

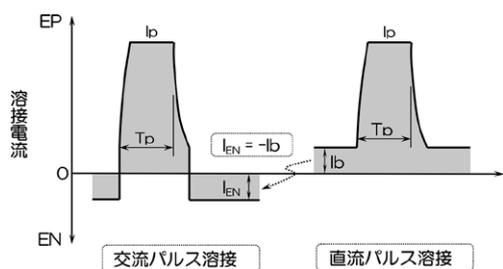


図 3.154 交流パルス溶接の電流波形

交流パルスミグ溶接の溶滴移行形態は図3.155のようであり、EP極性の電流によってワイヤ端に形成された溶滴には電磁ピンチ力によるくびれが発生し（②コマ目）、溶滴は大電流の通電が終了する時点でワイヤ端から離脱する（③コマ目）。EP極性からEN極性への移行時にいったん消滅したアークは、EN極性への移行とともに再点弧し、EN極性の小電流によってアークは維持される（④コマ目）。そして時間の経過に伴って、ワイヤ先端に形成される溶滴径は大きくなり（⑤、⑥コマ目）、次のEP極性の電流が通電される期間へ移行する（①コマ目）。すなわち交流パルスミグ溶接では、EP極性のパルス電流に同期して1個の溶滴がワイヤ端から離脱して溶融池へ移行する、“1サイクル1溶滴移行”を定期的に繰り返す。

交流パルスミグ溶接のビード外観および断面マクロ

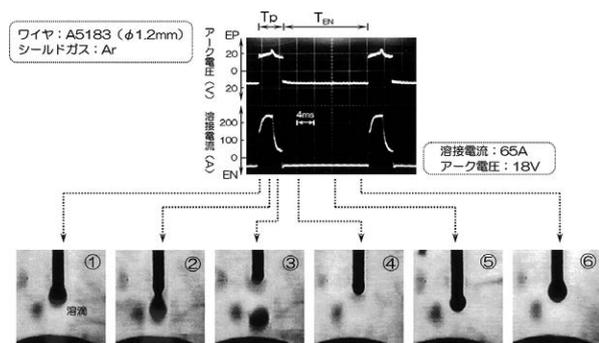


図 3.155 交流パルスミグ溶接の溶滴移行現象

の一例を示すと表3.28のようである。一般にアルミニウムやその合金の溶接では、溶接性を考慮してシールド性良好な専用のミグ溶接トーチを用いる。しかし、この溶接では汎用ミグ溶接トーチを用いたため、直流パルスミグ溶接ではビード表面に多量のスマット（母材に含まれたMgに起因して発生する黒い粉末状の物質）が付着して、美しい外観は得られない。ところが交流パルスミグ溶接では、いずれのパルス条件においても、金属光沢のある美しいビード外観が得られ、ビード近傍へのスマットの付着は全く認められない。また交流パルスミグ溶接のビード断面形状は、パルス条件によって多少変化するが、直流パルスミグ溶接に比べ、いずれの場合も溶込みが浅く、ビード幅が狭く、余盛の高い形状を呈する。交流パルスミグ溶接の溶接金属組織を観察すると、直流パルスミグ溶接に比べて結晶粒が微細化されている。上記表3.28の結果と合わせて考えると、交流パルスミグ溶接における母材への入熱は直流パルスミグ溶接より相当低減されたものになっていると推察される。

表 3.28 ビード外観および断面マクロの比較

		ビード外観	断面マクロ
直流パルス	$I_p=250A$ $T_p=3ms$ $I_b=50A$		
	$I_p=250A$ $T_p=3ms$ $I_b=50A$		
交流パルス	$I_p=300A$ $T_p=2ms$ $I_b=50A$		
	$I_p=225A$ $T_p=4ms$ $I_b=50A$		

母材：A5052（3mmt）、溶接ワイヤ：A5183（φ1.2mm）、シールドガス：Ar  
ワイヤ送給速度：7.5m/min（φ100A）、溶接速度：300mm/min

#### (2) 交流 / 直流複合パルス溶接

交流パルス溶接の適正パルス条件（パルス電流  $I_p$  およびその幅  $T_p$ ）は図3.156のようである。“1サイクル1溶滴移行”を実現できる適正パルス条件領域は、細部については多少異なるものの、規則的な1パルス1溶滴移行が得られる直流パルス溶接の適正パルス条件領域（図中破線で示す）と大部分が一致する。したがって、図3.157に示すように、パルス波形（ $I_p$  および  $T_p$ ）を同一とし、溶接期間中に直流パルスと交流パルスを交互に切り替える交流 / 直流複合パルス溶接においても、規則的な溶滴移行を安定して行うことができる。直流パルス期間ではパルス周期に同期した1パルス1溶滴移行が、交流パルス期間では交流周

期に同期した1サイクル1溶滴移行が規則的に行われる。ただしEN極性電流の作用で、交流パルス期間でのアーク長はやや長くなり、移行溶滴径も直流パルスの場合より多少大きくなる。

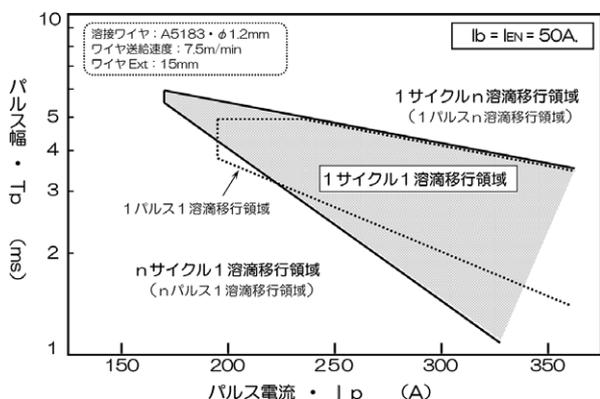


図 3.156 適正パルス波形条件の比較

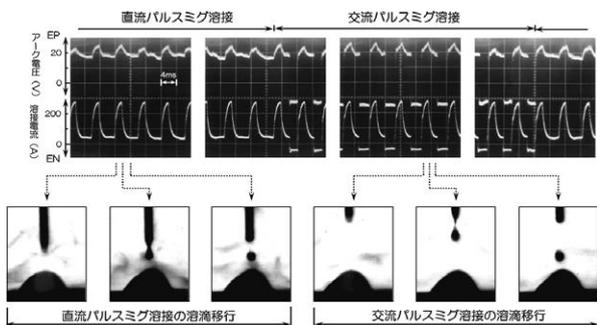


図 3.157 交流 / 直流複合パルスミグ溶接

交流 / 直流複合パルス溶接では、交流パルス期間の比率（交流時間比率 = 交流パルス期間 / [交流パルス期間 + 直流パルス期間]）を変化させることによって、ビード形状を制御することが可能となる。その一例を示すと表 3.29 のようであり、交流時間比率が増加す

表 3.29 溶込み形状におよぼす交流時間比率の影響

交流時間比率	横断面マクロ	縦断面マクロ
0 (直流パルス)		
25%		
50%		
75%		
100% (交流パルス)		

母材: A5052 (6mm), 溶接ワイヤ: A5183 (φ1.2mm)  
ワイヤ送給速度: 7.5m/min (≒100A), アーク電圧: 21V  
交流/直流切替周波数: 1Hz, 溶接速度: 500mm/min

るにしたがってビード幅と溶込み深さが減少し、余盛高さが増加する。なお交流時間比率 25~75%の縦断面マクロで生じている溶込み深さの変動は、交流 / 直流切り替え周波数に起因したものである。

本節 (3.7 節) で述べた主なパルスマグ・ミグ溶接の電流波形とその特徴を整理すると表 3.30 のようである。標準直流パルス溶接はパルス電流で溶滴移行を制御することが主目的で、パルス周期に同期した規則的な1パルス1溶滴移行が行われ、広範囲な電流域でスパッタの発生がほとんどない溶接を行うことができる。標準交流パルス溶接は、主にアルミニウムおよびその合金のミグ溶接に適用され、標準直流パルス溶接と同様に、溶滴移行を制御して交流周期に同期した規則的な1サイクル1溶滴移行を実現する。またEN極性電流の効果で、ワイヤ溶融速度を増加させて母材への入熱量を低減する作用もある。

表 3.30 主なパルスマグ・ミグ溶接の電流波形とその特徴・効果

パルスの種類	電流波形	制御対象			主な特徴・効果
		溶滴移行	溶融池	母材入熱	
標準パルス制御 直流		◎	-	-	・1パルス1溶滴移行 ・スパッタレス溶接 ・汎用性大
		○	-	◎	・1サイクル1溶滴移行 ・極性効果で溶込み減少 ・ワイヤ溶融速度増大
低周波パルス重畳制御		○	◎	-	・波形切替で溶融池制御 ・溶融池振動で欠陥防止 ・ビード波の明瞭化
		○	◎	○	・波形切替で溶融池制御 ・耐溶着性大幅改善 ・入熱制御効果あり
交流/直流複合パルス		○	◎	◎	・交流/直流時間比率制御 ・溶融池制御+入熱制御 ・広範囲溶込み制御可能 ・ビード波の明瞭化作用大

◎: 制御の主目的 ○: 効果あり -: 直接は関係せず

低周波パルス重畳制御は、直流パルス溶接および交流パルス溶接のいずれにも用いられる。低周波パルス重畳直流パルス溶接では溶滴移行と溶融池の制御を同時に行い、溶接欠陥の抑制あるいは明瞭なビード波の形成などに効果がある。低周波パルス重畳交流パルス溶接も溶滴移行と溶融池の制御に有効であるが、その他に、母材への入熱を制御して溶接ビードの溶落ちを防止するといった効果もある。交流 / 直流複合パルス溶接は、溶滴移行の制御はもちろんのこと、溶融池や母材への入熱の制御に重点を置いた出力制御方法である。交流パルスと直流パルスの通電時間比率を変化させることによって、ビード形状や溶込み深さを広範囲に制御することが可能で、より明瞭なビード波の形成にも極めて有効な手法である。低周波パルス重畳交流パルスミグ溶接の一例を図 3.158 (a) に、交流 / 直流複合パルスミグ溶接のアルミニウム合金部材の突合せ

継手への適用例を同図 (b) に示す。(a) は比較的ギャップが生じやすいアルミニウム合金の角パイプと丸パイプとのすみ肉溶接であるが、溶落ちなどの発生はなく、明瞭なビード波を持つ美しいビード外観が得られている。また (b) では、ミグ溶接であるにも拘らず、ティグ溶接のビード外観に近いビード波が得られている。

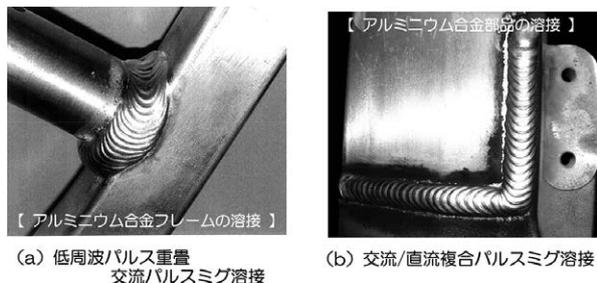


図 3.158 交流パルスミグ溶接の適用例

## 3.8 その他のアーク溶接

### 3.8.1 プラズマアーク溶接

プラズマアークは、ノズル電極内部で発生させたアークによって加熱・膨張した周囲の高温ガスを、小口径ノズルから高速で噴出させて得られるもので、中心部の温度が 30,000K 程度に達する超高温の現象である。プラズマアークに関する研究は 1950 年代半ばから行われ、1955 (昭和 30) 年にはプラズマ切断が開発されている。その後も研究を続けた米・リンデ (Linde) 社では、1957 (昭和 32) 年にジュアンニニがプラズマアーク溶接を発明した。なお、このプラズマアーク溶接法がわが国に紹介されたのは 1963 (昭和 38) 年になってからであった

わが国では、大阪大学・岡田実教授の指導で開発を始めた大阪電気が、1958 (昭和 33) 年に図 3.159 に示すようなプラズマジェット (非移行式プラズマ) 装置を製品化し、切断に適用している。しかし、プラズマアークの溶接への適用が始まったのは 1970 年代に



図 3.159 プラズマジェット装置<sup>5)</sup>

入ってからであり、日立製作所やオリジン電気などがプラズマ溶接機を製品化した<sup>5)</sup>。

### (1) プラズマアーク溶接の特性

プラズマアークは、ノズル電極およびプラズマガスの冷却作用 (熱的ピンチまたはサーマルピンチ効果) によって細く絞られ、表 3.31 に示すように、その拡がりが少ないくさび形の形状となる。そのため電流密度は著しく高められ、極めて高温で集中性・直進性に富むアーク状態が得られる。ティグ溶接に比べ、幅が狭く溶け込みの深い溶接部が得られ、アーク長 (スタンドオフ: ノズル電極 - 母材間距離) が変化しても溶け込み深さはそれほど変化しない。

表 3.31 ティグとプラズマの特性比較

	ティグ溶接	プラズマ溶接
アーク形態	アーク	アーク
溶込み形状	溶込み形状	溶込み形状

プラズマを発生させるためのプラズマガス (作動ガス) には、一般にアルゴン (Ar) を用いる。しかし、その外周部を覆うシールドガスには、表 3.32 に示すように、材質に応じて異なる組成のガスが用いられる。シールドガスに水素 (H<sub>2</sub>) などの 2 原子ガスを少量添加すると、その分子が高温のアークによって原子に解離する際にアーク柱から熱を奪い、その熱的ピンチ効果によってアークは収縮する。ステンレス鋼など水素の添加が可能な材料では、Ar+5~10% H<sub>2</sub> 混合ガスをシールドガスとして使用することによって、よ

表 3.32 プラズマ溶接のシールドガス

シールドガス組成	溶込み形状	材質
100%Ar	 (100%Ar)	軟鋼・低合金鋼 高張力鋼 ステンレス鋼* チタン・チタン合金 タンタル、モリブデン
Ar+5~10%H <sub>2</sub>	 (Ar+5%H <sub>2</sub> )	ステンレス鋼** ニッケル ニッケル合金
Ar・Ar+He	 (100%He)	銅・銅合金 ジルコニウム

\* フェライト系・マルテンサイト系 (400 番台: SUS430/SUS410)  
\*\* オーステナイト系 (300 番台: SUS304/SUS316)

り集中性に優れたアーク状態が得られ、プラズマ溶接の特徴を最大限に活用できる。しかしチタン (Ti) や銅 (Cu) などでは、水素がわずかに混入しても溶接部に悪影響を与えるため、水素が添加されたガスを使用することはできない。このような材質の場合には Ar のみとするか、ヘリウム (He) を添加した Ar+He 混合ガスを用いる。ヘリウムの添加によってアークの集中性は向上するが、その効果は水素より弱いいため、ヘリウムを用いる場合にはその添加量を多くすることが必要となる。

比較的大電流のプラズマアーク溶接では、細く絞られたプラズマアークが母材を局部的に加熱するとともに、細径ノズルから高速で噴出するプラズマガスが溶融池金属を強く押し下げる。そのため、溶融池先端部には図 3.160 に示すような小さい丸穴 (キーホール) が形成される。キーホールの先端は溶接の進行にともなって母材を溶融しながら進むが、溶融金属は溶融池壁面に沿って後方へ移動してキーホールの後方をふさぐため、キーホールの形状はほぼ一定に保たれる。このような溶接方法を“キーホール溶接”と呼び、裏波ビードを安定して形成できるプラズマ溶接の最も特徴的な手法となっている。キーホール溶接を用いると、軟鋼・低合金鋼では板厚 3~7mm、ステンレス鋼では 3~10mm の鋼板の突合わせ継手を、開先加工なしで裏波溶接することができる。

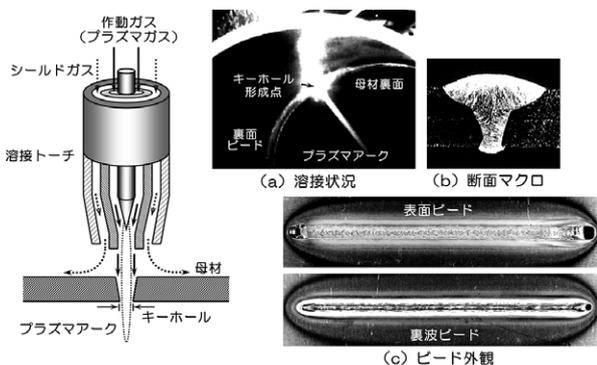


図 3.160 キーホール溶接

プラズマアークはノズル電極の穴径を小さくするほど細く絞られ、アークの硬直性・集中性は増加する。しかし、その穴径をむやみに小さくすることはできない。ノズル電極の穴径に対して溶接電流が過大になると、図 3.161 に示すように、“シリーズアーク (ダブルアーク)” が発生する。シリーズアークは、大電流によって過熱されたノズル電極の外周部に酸化皮膜が形成されることが原因で発生する現象である。シリーズアークが生じるとメインアークは消失し、タング

ステン電極とノズル電極との間に発生したアークと、ノズル電極と母材との間に発生したアークが直列に発生する。シリーズアークが発生すると、アークの集中性は損なわれ、極端な場合にはノズルが焼損する。

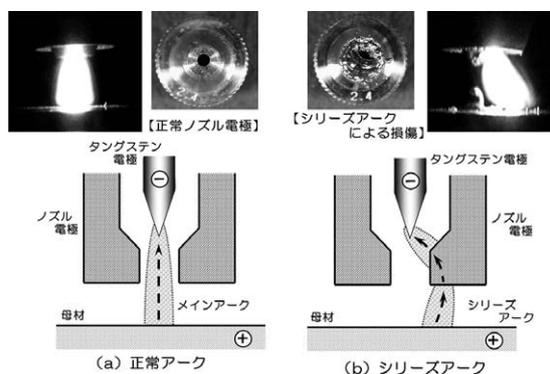


図 3.161 シリーズアーク

プラズマアーク溶接の主な適用例を図 3.162 に示す。近年では薄板部材への適用が多く、ステンレス鋼製の日用品や自動車・二輪部品などの溶接に多用されている。



図 3.162 プラズマ溶接の適用例

## (2) プラズマ溶接機

プラズマ溶接機は、一般に溶接電源、溶接トーチ、手元操作箱、冷却水循環装置などから構成され、図 3.163 のように接続される。溶接電源の構成は直流電源部と制御回路部に大別され、制御回路部には高周波高電圧発生回路、パイロットアーク発生回路、シーケンス制御回路、プラズマおよびシールドガス制御回路などが含まれる。直流電源の出力特性は、ティグ溶接電源などと同様に、定電流特性であり、棒マイナス (EN) 極性のアークを発生させる。しかしその定格負荷電圧は高く、ティグ溶接電源の 1.5~2 倍の電圧が得られるように設計されている。なお、従来のプラズマ溶接機では直流電源部と制御回路部が分離され、それぞれ別のケースにまとめられていたが、最近では両者を一体化したものがほとんどである。また出力の制

御方式も、ほとんどがインバータ制御（後述 4.5 節参照）となっている。溶接トーチには通電、プラズマおよびシールドガスの流出、冷却水の流入・流出などが要求されるため、その構造はかなり複雑なものとなる。

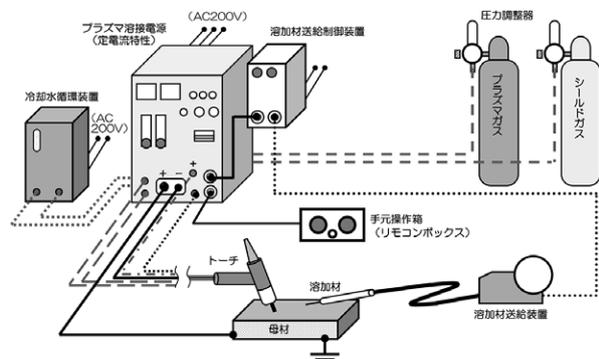


図 3.163 プラズマ溶接機の構成

### (3) プラズマアーク溶接の展開

#### (a) プラズマ・ミグ溶接

プラズマ溶接とミグ溶接が一体化された溶接法で、1972（昭和 47）年にオランダのフィリップス社が開発した比較的古い溶接法である<sup>45)</sup>。しかしトーチが受ける過大な熱負荷など、実用上の諸問題によって長い間実用化されることはなかった。その後、諸問題に対する種々な工夫がなされ、近年では再び注目されるようになってきた。図 3.164 は溶接装置の構成を示す一例で、通常プラズマアーク溶接と同様にタングステン電極と母材との間に発生させたプラズマアーク中に、ワイヤを供給してミグアークも同時に発生させる。すなわちミグアークは、プラズマアークに包まれた状態で発生し、純アルゴン（100%Ar）シールドでも安定したアーク状態を実現できる。ワイヤはミグアークを発生させる電極として機能するとともに、その先端が溶融して溶着金属の形成に寄与する。した

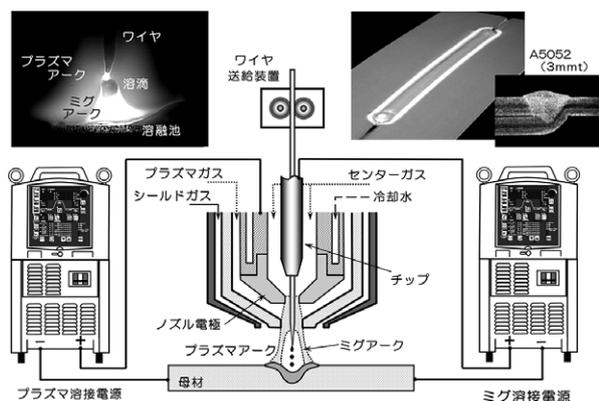


図 3.164 プラズマ・ミグ溶接

がって、プラズマミグ溶接方法は、厚板の高効率溶接や薄板の高速溶接などに使用されている。

#### (b) ホットワイヤ・プラズマ溶接

溶加材（ワイヤ）添加量の増大を目的として、1975（昭和 50）年にわが国で開発された溶接法である。図 3.165 に示すように、通電加熱したワイヤをプラズマアーク中に自動送給し、溶融したワイヤを溶融池へ添加する。溶加ワイヤは通電加熱とプラズマアークによって溶融され、流れるように溶融池へ移行する。通電加熱しない場合（コールドワイヤ）に比べ、溶着速度は 2～3 倍になる<sup>46)</sup>。

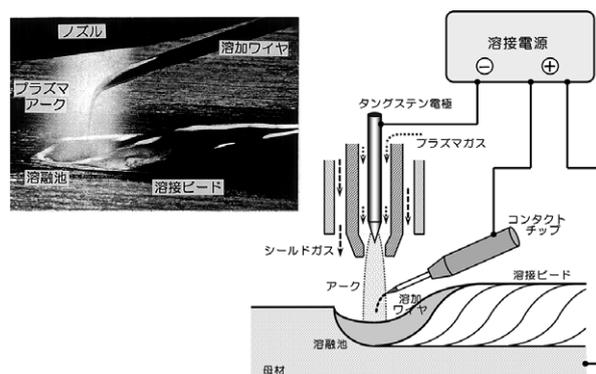


図 3.165 ホットワイヤ・プラズマ溶接<sup>46)</sup>

#### (c) 逆極性（DCEP）プラズマ溶接

逆極性プラズマ溶接は、1978（昭和 53）年にわが国で開発された溶接法である。図 3.166 に示すように、タングステン電極の代わりに水冷銅電極を用い、その電極をプラス（EP）極性とする。またクリーニング幅の制御を目的として、シールドガスに微量の酸素（O<sub>2</sub>）を添加した Ar+O<sub>2</sub> 混合ガスを用いる。電極プラス（EP）極性の効果で、母材はクリーニング作用を受けるが、溶込みは浅いため、肉盛溶接などに適用される<sup>47)</sup>。

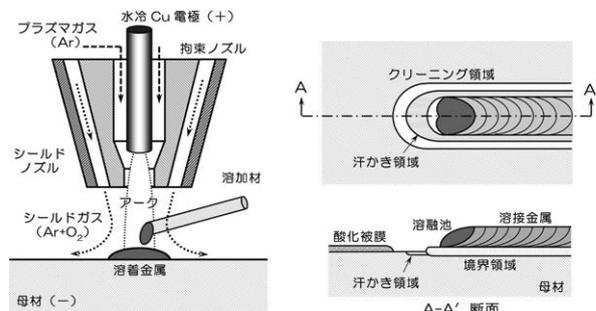


図 3.166 逆極性（DCEP）プラズマ溶接<sup>47)</sup>

#### (d) パルス・プラズマ溶接

プラズマ溶接は溶接条件パラメータに対して敏感

で、適正な溶接結果が得られる条件範囲は比較的狭い。特にキーホール溶接では、プラズマアークの圧力、溶融池の重力および表面張力などの力のバランスを一定に保ちながら溶接が進行するため、その傾向はより一層顕著となる。このような問題を解決するために、わが国で1983（昭和58）年に開発された溶接法がパルス・プラズマ溶接である。図3.167に示すように、大電流期間と小電流期間とを所定の周期で交互に繰り返すパルス・プラズマ溶接では、母材（溶融池）に対する入熱制御作用などを利用することによって、適正キーホール領域を拡大することができる。なおパルス周波数が20~50Hzの領域では、溶融池の共振現象の影響を受け、適正キーホール領域は狭くなる。パルス周波数が10Hz程度以下の低周波パルス溶接では、パルス期間中にキーホールを形成し、ベース期間中にその凝固を促進する“1パルス1キーホール溶接”とすることによって、水平固定管の全姿勢キーホール溶接を行うことも可能となる<sup>48)</sup>。

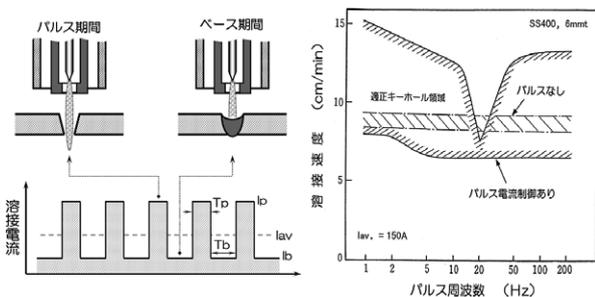


図 3.167 パルス・プラズマ溶接<sup>48)</sup>

### (e) 交流プラズマ溶接

アルミニウムなどのキーホール溶接を目的として、1987（昭和62）年にわが国で開発された溶接法である。図3.168に示すように、電流波形を交流として、EP極性期間でのクリーニング作用とEN極性期間での深溶込みの両者を活用する。溶接電源はインバータ制御方式で、出力レベルを制御する1次側インバータ

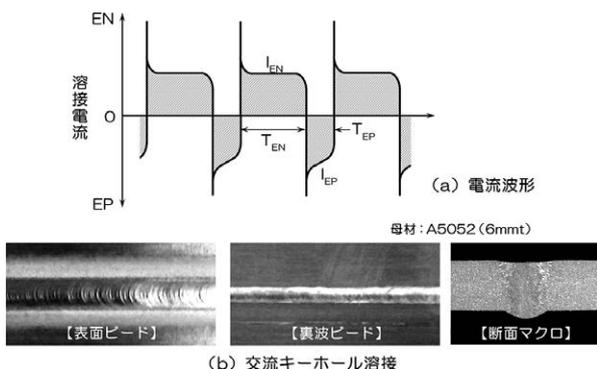


図 3.168 交流プラズマ溶接<sup>49)</sup>

と極性を制御する2次側インバータの2つのインバータ回路を持つ構成となっている<sup>49)</sup>。

### (f) セミ・プラズマ溶接

プラズマ溶接では、一般に、プラズマガスにArを、シールドガスにAr+H<sub>2</sub>を用いる。しかし、1995（平成7）年に開発されたセミ・プラズマ溶接では、図3.169に示すように、プラズマガスにAr+H<sub>2</sub>を、シールドガスにArを用い、プラズマガス中のH<sub>2</sub>の解離熱を利用してアークを狭窄する。セミ・プラズマ溶接でのアークは、プラズマ溶接の場合ほど細くは絞られないが、ティグアークとプラズマアークの中間的なくさび形の形状となる。亜鉛めっき鋼板の溶接に通常のプラズマアーク溶接を適用すると、アーク熱によって気化した亜鉛蒸気がノズル電極やタングステン電極に付着する。そしてノズル電極やタングステン電極の異常消耗、あるいはアーク起動不良などを発生しやすくなる。しかしセミ・プラズマ溶接では、インナーノズル内を流れる高速のプラズマガスがセラミックノズル内への亜鉛蒸気の侵入を阻止し、亜鉛めっき鋼板の溶接を長時間実施しても、インナーノズルやタングステン電極の損傷、アーク起動不良などの不具合をほとんど生じない。その他セミ・プラズマ溶接は、変圧器の鉄心として用いられるケイ素鋼板の溶接、モータ用ステータコアの溶接などにも効果がある<sup>50)</sup>。

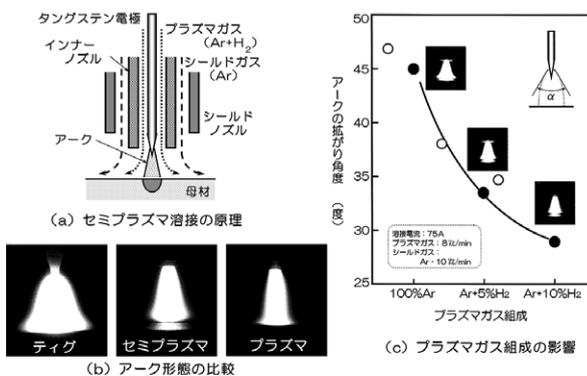


図 3.169 セミプラズマ溶接

## 3.8.2 セルフシールドアーク溶接

セルフシールドアーク溶接は、1954（昭和29）年に米国・リンカーン社が開発した溶接法で、ノーガスアーク溶接またはインナーシールドアーク溶接と呼ばれることもある。この溶接法では、シールド効果を持った専用のフラックス入りワイヤを使用するため、シールドガスの使用は不要となる。ワイヤに充填されたフラックス中のアルミニウムなどの強脱酸剤や窒化物形成元素および各種添加成分から発生するガスと、溶接ビード上に形成されるスラグに覆われて、溶接金

属は大気から保護される。ガス発生剤としては、 $\text{CaF}_2$ などのフッ化物、 $\text{CaCO}_3$ などの炭酸塩、Mgなどの低沸点金属が用いられる。また、これらのシールド作用を突破して溶滴や溶融池へ侵入する窒素 ( $\text{N}_2$ ) や酸素 ( $\text{O}_2$ ) に対しては、それらとの親和力の強い Al・Ti・Si・Mn・Zr などの元素を添加して、 $\text{N}_2$  や  $\text{O}_2$  を窒化物や酸化物として固定することによって、窒素や酸素の悪影響を低減できるように工夫されている。

この溶接法が国内で実用化され始めたのは、1960年代初期である。当初は、被覆アーク溶接に用いられる交流垂下特性電源と太径ワイヤ（直径 2.4mm または 3.2mm）の組合せで、土木・建築・造船分野での溶接に適用された。近年でもこの方法は土木分野などで適用されているが、適用産業分野は比較的狭い分野に限定されている。また、直流定電圧特性の電源（通常のマグ溶接用電源）と細径ワイヤ（直径 1.2mm または 1.6mm）を組み合わせて使用する方法も開発されている。

マグ溶接では、溶接部近傍の風速が 1.2m/sec 程度であっても気孔（ブローホール・ピット）が発生する恐れがある。しかしセルフシールドアーク溶接では、シールドガスで溶接部を被包する必要がないため、風による溶接作業への影響は比較的軽微である。また近年では、風速 8~10m/sec 程度の強風が吹いていても、健全な溶接継手が得られるワイヤが開発されている。そのため本溶接法は屋外作業での使用に適しており、建築鉄骨、橋梁、鋼管杭、煙突および海洋構造物などの溶接などに適用されることが多いが、対象鋼種は軟鋼および高張力鋼に限られる。なお、ワイヤに充填されたフラックスの主成分はフッ化物系であるため、他のアーク溶接法に比べて溶接ヒュームの発生量は多い。

セルフシールドアーク溶接機は、図 3.170 に示すように、溶接電源、ワイヤ送給装置および溶接トーチで構成される。マグ溶接機とほぼ同様の構成であるが、シールドガスボンベやその圧力調整器などは不要である。屋外の現場溶接に用いられることが多いため、近年では、溶接電源にエンジン発電式電源を用いることも多い。一般に、溶込み深さは比較的浅いため、溶接継手の開先には被覆アーク溶接とほぼ同様の形状が用いられる。



図 3.170 セルフシールドアーク溶接機の一例<sup>51)</sup>

### 3.8.3 エレクトロガスアーク溶接

米国のホプキンス (R. K. Hopkins) は、1940 (昭和 15) 年にエレクトロスラグ溶接を開発した。その後、ウクライナのパトン研究所とチェコスロバキヤの溶接研究所で改良が加えられ、旧ソ連では 1951 (昭和 26) 年以来実施工にエレクトロスラグ溶接が使用されていた。この溶接法では、図 3.171 に示すように、溶融したスラグ浴の中に溶接ワイヤを連続的に供給し、通電電流によって生じる溶融スラグの抵抗発熱を利用して母材を溶融する。溶融金属は、表裏面から水冷銅当て金で保持して凝固させ、溶接ビードは、溶接の進行とともに銅当て金を移動させて形成する。わが国へは 1960 (昭和 35) 年に導入され、主に重電機や压力容器などの厚肉円筒構造物の溶接に使用された。エレクトロスラグ溶接は熱効率が極めて高く、厚板を立向き姿勢で能率よく 1 パスで溶接できる溶接法である。しかし溶接入熱が大きいため、溶接金属や熱影響部のじん性劣化を生じやすく、板厚が薄くなると適用できないという短所がある。

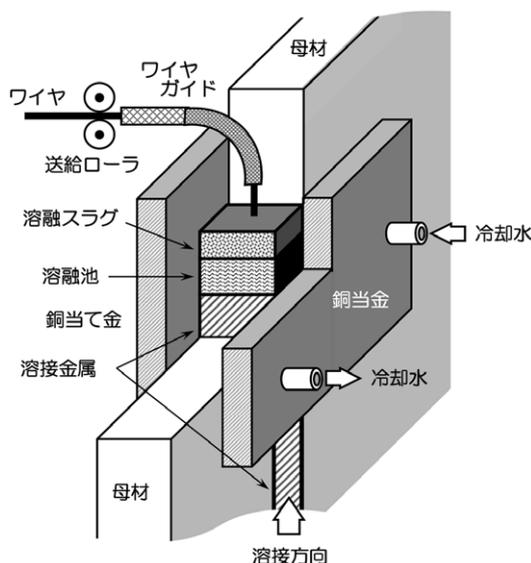


図 3.171 エレクトロスラグ溶接

そこでベルギーのアーコス（Arcos）社は、エレクトロスラグ溶接装置を改良して、1961（昭和36）年にエレクトロガスアーク溶接を開発した。溶接継手の表面と裏面とを水冷銅板で囲み、立向姿勢で1パス溶接することはエレクトロスラグ溶接と同様であるが、シールドガスを供給してアークを発生させる。すなわち、エレクトロスラグ溶接では抵抗発熱によって母材を溶融するが、エレクトロガスアーク溶接ではアークで母材を溶融する。エレクトロスラグ溶接より溶接入熱を低減できるエレクトロガスアーク溶接は、薄板にも適用できるとともに、溶接金属や熱影響部のじん性劣化を抑制することができる。わが国でも、同年にエレクトロガスアーク溶接装置が開発され、船の側外板・貯槽タンク・圧力容器などの立向き溶接に適用された<sup>5)</sup>。

エレクトロガスアーク溶接は立向き姿勢での溶接が極めて高能率に行えるが、溶接装置の設置には時間を要するため、能率よく適用できる溶接線の長さとしては最も短い場合でも2m程度は必要である。また1パス溶接が基本であるため、適用板厚は通常10～35mm程度である。そのため、短尺の溶接線が多い鉄骨・橋梁分野の立向き溶接は、被覆アーク溶接またはマグ溶接に頼っていた。しかし溶接工数低減の要望に対処するために、溶接線が短い（200～500mm）継手用として、図3.172に示すような簡易エレクトロガスアーク溶接装置が開発された。この装置は可搬性が良好で、セッティングも容易な装置となっている。また専用のフラックス入りワイヤも開発され、橋梁の箱桁ウェブや鋼製脚ウェブの現場継手などに適用されている<sup>52)</sup>。

なお近年では、厚鋼板へのエレクトロガスアーク溶接の適用に対する要望が強まり、それに対応した溶接装置も開発されている。通常のエレクトロガスアーク溶接が適用できる最大の板厚は35mm程度であり、それ以上の板厚になると、溶融金属が継手全体に拡がらず、融合不良などの溶接欠陥が発生する。しかし、図3.173に示すように、溶接トーチをウィーピング（揺動）させる機能がある溶接装置を用いると、溶融金属の幅を拡大することができる。市販されているこの方式の溶接装置には、1電極タイプと2電極タイプがあり、後者を用いると最大70mm程度の板厚まで適用することができる。図3.174はその適用を示す一例であり、高剛性が要求されるコンテナ船の上部垂直外板や縁材の立向き溶接の状況を示している。

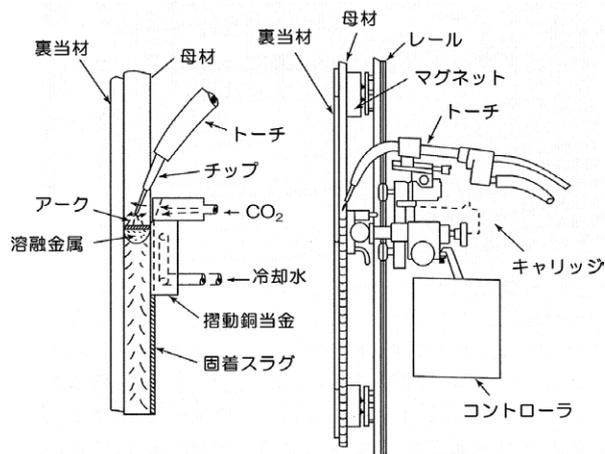


図 3.172 簡易エレクトロガスアーク溶接装置<sup>52)</sup>

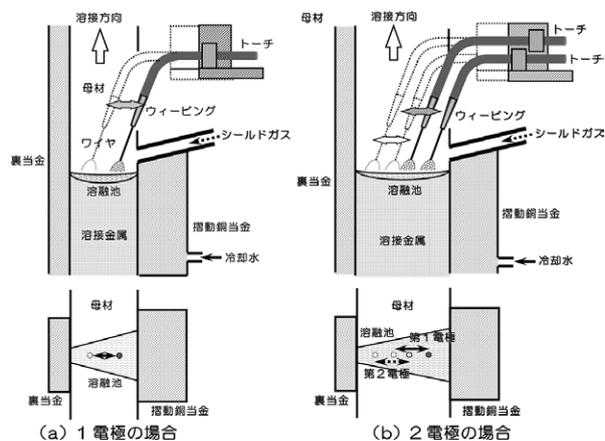


図 3.173 厚鋼板のエレクトロガスアーク溶接<sup>53)</sup>

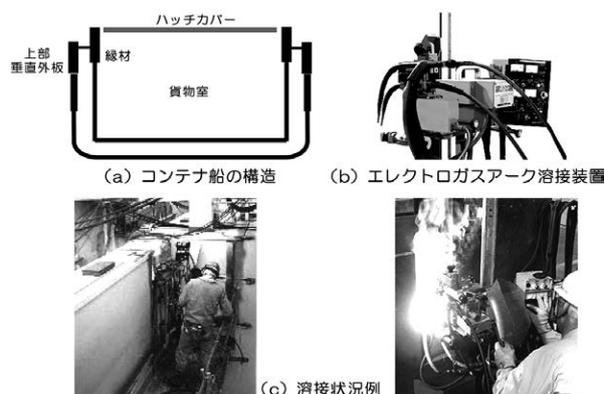


図 3.174 エレクトロガスアーク溶接による船体外板の溶接<sup>53)</sup>

### 3.8.4 アークスタッド溶接

スタッド溶接が実際に使用されたのは1918（大正7）年で、英・ポーツマスの造船所での適用が最初であるといわれている。先端にスタッド（棒状の金属）を挿入し、これを引き上げる電磁コイルを備えた軽量の溶接工具が使用されたようである。その後、ス

ティール (L. J. Steel) とマーティン (H. Martin) が、鉄板にスタッドを溶接する自動溶接機を開発した。一方、米国では1939 (昭和14) 年に、海軍工廠でネルソン (T. Nelson) が、航空母艦のメタルデッキに木甲板を留めるために、鋼の丸棒やねじボルトからアークを発生させてスタッド溶接した。これがアークスタッド溶接の最初である。以来、グレゴリー・インダストリー (Gregory Industry: 現 Nelson Stud Welding) 社によって研究・開発が進められ、アークスタッド溶接は急速に進歩した。

わが国では、1956 (昭和31) 年に大阪変圧器が、英国のクロムトン・パーキンソン社と技術提携し、ネルソン型アークスタッド溶接機を国産化した。また1959 (昭和34) 年には、松下電器産業がオランダのフィリップ社と技術提携し、フィリップ型のスタッド溶接機の市販を開始した。このような背景のもと、1957 (昭和32) 年に着工した国立国会図書館の現場工事では、建築として初めてアークスタッド溶接が適用されている。また1960 (昭和35) 年には、橋梁の鋼桁とコンクリート床板とを合成するジベルへのアークスタッド溶接の適用試験が行われ、翌 (昭和35) 年には豊川橋 (東京都) に採用されている<sup>5)</sup>。

アークスタッド溶接は、図3.175に示すように、専用の溶接ガン (スタッド溶接ガン) を使用し、アーク熱を利用してスタッドを母材上に溶接する方法であ

る。接合部はスタッドの全端面にわたって形成され、加圧によってスタッドの周囲へ押し出された金属はフラッシュと呼ばれる。アークスタッド溶接機は、図3.176に示すようなスタッド溶接ガン (a) と溶接電源 (b) とで構成される。溶融金属はフラッシュとして外周部へ押し出されるため、溶接部を大気から遮蔽するシールドガスは不要である。スタッド (c) の先端部には、適切な溶接金属を得るための種々な脱酸精錬材が塗布・付着されている。フェールル (d) は、主に溶融金属に対する鑄型の役割を果たし、その内部にはスタッドの端面全体にアークが発生するようにシールド補助剤も兼ねる導電性物質が充填されている。アークスタッド溶接は、建築鉄骨・橋梁・海洋構造物などの広範囲な産業分野で適用されており、その一例を示すと図3.177のようである。

### 3.8.5 狭開先溶接

開先角度を小さくして開先断面積が少なくなれば、溶接時間が短縮されて能率向上や溶接材料の節約が図れ、板厚が厚くなるほどその効果は大きくなる。このような観点から採用される施工法が狭開先溶接である。図3.178に示すように、通常、ルート間隔を狭くしたI開先またはそれに近い形状の開先を採用して、厚板を1層1~2パス程度で多層アーク溶接する。しかし、垂直に近い開先の壁面および前層ビードの止端

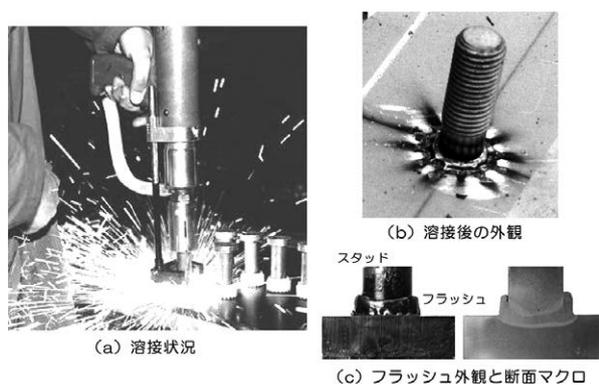


図3.175 アーク・スタッド溶接

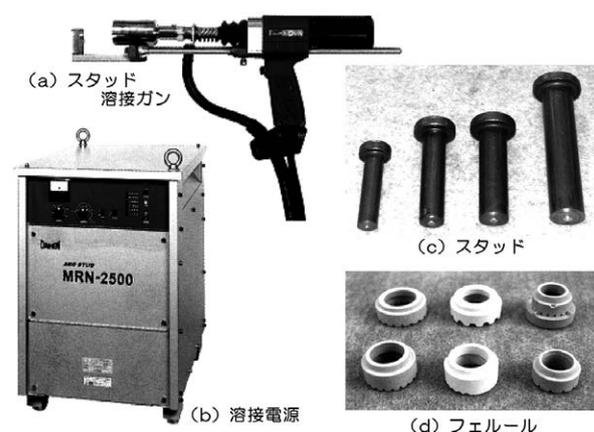


図3.176 アーク・スタッド溶接機と溶接材料

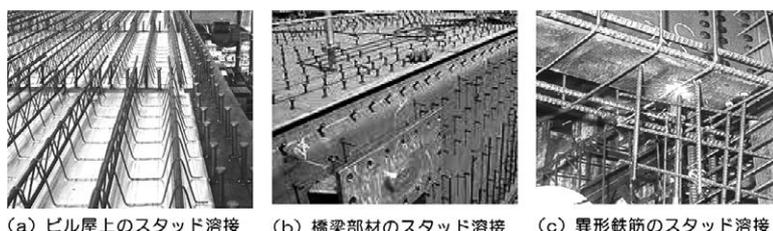


図3.177 アーク・スタッド溶接

部を確実に溶融して溶接欠陥を防止することが重要であり、融合不良などを防止するための工夫が必要となる。

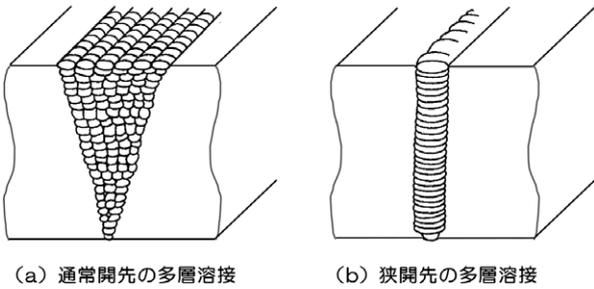


図 3.178 積層方法の比較

狭開先溶接は、米国のパイプラインの自動溶接で初めて適用された。米国のパイプライン溶接は、それまでハイセルロス系溶接棒による下進溶接で行われていた。しかし短絡移行式マグ溶接の開発が契機となって、1959（昭和 34）年にエアコ（Airco）社がエッソ（Esso）社とバツテル（Battell）記念研究所との共同研究で、矩形状狭開先を用いる円周自動マグ溶接装置を開発した。しかし、この装置は小径管には適したが、大径管には適さず普及することはなかった。その後バツテル記念研究所は、シールドガスに 50～70%Ar+50～30%CO<sub>2</sub> の混合ガスを、ワイヤに直径 0.9～1.0mm の細径ワイヤを用いる全姿勢狭開先溶接法を開発した。この溶接法は 1963（昭和 38）年に、わが国へも紹介されている。なお米国のパイプライン溶接では、その後に CRC 社やプライス（H. C. Price）社などによって円周狭開先溶接法が確立され、今日に至るまで主流の溶接法として定着している。

わが国では 1966（昭和 41）年に、三菱重工業長崎造船所が直径 3.2mm の太径ソリッドワイヤを用いて、比較的高電流を使用する狭開先マグ溶接法を開発し、ボイラとその配管の下向溶接に適用した。これがわが国の狭開先溶接の始まりである。その後 NH・PAW 法や NOW 法など、鉄骨の現場横向き溶接を対象とした狭開先溶接法が開発されたが、その適用は一部の分野に限られていた。狭開先溶接の研究・開発・実用化が本格化したのは、1970 年代後半に入ってからであり、採用された溶接法のほとんどがマグ溶接であった。サブマージアーク溶接を用いた狭開先溶接が実用化されるようになったのは、その数年後（昭和 50 年代後半）のことである<sup>54)</sup>。なお狭開先溶接は、マグ溶接、ティグ溶接およびサブマージアーク溶接で採用されているが、垂直に近い開先の壁面および前層ビードの止端部を確実に溶融して溶接欠陥を防止すること

が重要であるため、溶接法に応じた融合不良防止に対する種々な工夫がなされている。

### (1) 狭開先マグ溶接

1970 年代中頃から数年の間に、種々な狭開先溶接法がファブリケータや溶接機器メーカーなどによって次々に開発された。そして、圧力容器・ボイラ・大型産業機械などの極厚構造物に適用され、狭開先溶接は一大ブームとなった。溶接法としてはマグ溶接、ティグ溶接およびサブマージアーク溶接の 3 種が適用されたが、適用実績は高能率で自動化も容易なマグ溶接が圧倒的に多かった（約 80% を占める）。

マグ溶接を用いた狭開先溶接では、開先側壁の均一な融合を確保するために、狭い開先内でアークを効果的に揺動させるための種々な方法が開発されており、主な方法とその概要は次のようである<sup>55)</sup>。

- ①ループナップ法：一定曲率の曲げ癖を付加することによって、ワイヤを捻転させてアークを揺動させる方法。
- ②回転アーク法：ワイヤに緩いらせん状の曲げ癖を付加してアークを回転させる方法。
- ③ツイストワイヤ法：より合わせた 2 本のワイヤを用いてアークを回転させる方法。
- ④屈曲ワイヤ法：屈曲整形する歯車によってワイヤを屈曲させてアークを揺動させる方法。
- ⑤波形ワイヤ法：開先の幅方向に連続的な波状の曲げ癖をワイヤに付加してアークを揺動させる方法。
- ⑥高速回転アーク法：偏心させた通電チップの孔を通してワイヤを送給し、トーチを高速回転させてアークに回転動作を与える方法。

これらの方法のうち最も多用されたのは、図 3.179 に示す、波形ワイヤ法 (⑤) と高速回転アーク法 (⑥) である。波形ワイヤ法 (a) では、ワイヤ送給ローラに入る前のワイヤを溶接線直角に塑性変形させ、そのワイヤをそのまま溶接トーチに供給する。その結果、ワイヤの溶融に伴ってアークは左右に揺動し、開先壁の十分な溶融が可能となる。使用する特殊トーチの厚さは 5mm 程度であり、幅約 10mm の開先内にも余裕を持って挿入することができる。また、溶接には前述した大電流パルスマグ溶接 (3.7.5 節 (1) 参照) を用い、短いアーク長でも短絡を生じないアーク状態が得られるようにしている。そのため、狭い開先内でもアークが開先壁に向かって発生することはなく、溶融池上に確実に発生する。高速回転アーク法 (b) は、高速回転 (～120Hz) する電極ノズル先端に設けた通

電チップ位置を偏心させることによって、アークは開先内で高速回転し、その回転運動によって開先壁の十分な溶融を確保する。アークの回転は高速であるため、開先の左右端で移動速度の差が生じることはなく、安定した溶け込みが得られる。これら狭開先マグ溶接の適用例を図 3.180 に示す。(a) は波形ワイヤ法による板厚 300mm の円筒ボイラ部品の長手突合せ溶接、(b) は高速回転アーク法による板厚 235mm のプレス部品の円周突合せ溶接である。

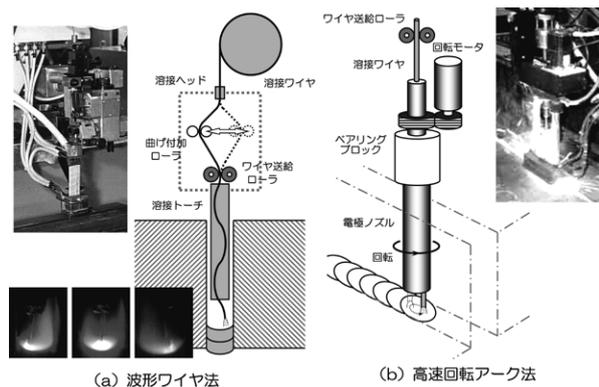


図 3.179 主な狭開先マグ溶接法<sup>54)</sup>

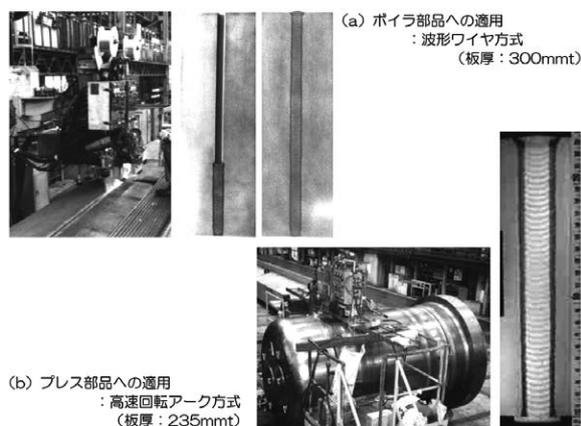


図 3.180 狭開先マグ溶接の適用例<sup>54)</sup>

## (2) 狭開先ティグ溶接

狭開先ティグ溶接は、1994（平成 6）年頃に開発された非溶極式アークによる狭開先溶接法である。開先幅 8～15mm 程度の厚板 I 形開先継手を、ティグ溶接を用いて 1 層 1 パス（または 2 パス）で多層溶接する。溶接法はティグ溶接であるため、不活性ガス中での溶接となり、適用材質や溶接姿勢に対する制限がなく、高品質な溶接継手が得られる。しかしティグ溶接では溶加材の添加が必要なため、溶接装置はやや複雑になるが、マグ溶接と同様に、開先内でアークを揺動させる方式が採用されている。少し傾斜させてトーチに取り付けられたタングステン電極は、トーチ軸を左右に

捻じることによって開先内で揺動する。その結果、タングステン電極の動作に伴って、アークも開先内で左右に揺動し、開先壁の十分な溶融が得られる。

図 3.181 はパイプの円周継手への適用を示す一例で、(a) には開先形状の例を、(b) には溶接装置に用いられる溶接ヘッドを、(c) には狭開先ティグ溶接による溶接継手の断面マクロを示す<sup>8)</sup>。

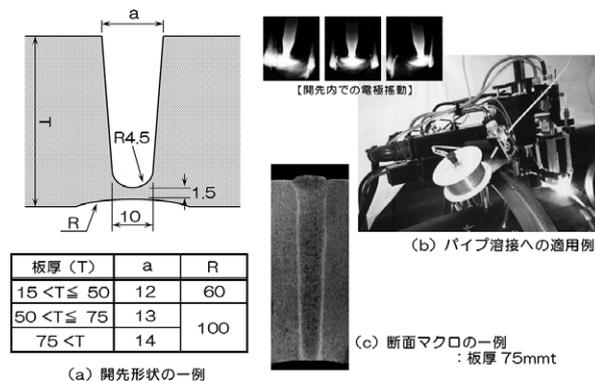


図 3.181 狭開先ティグ溶接<sup>8)</sup>

## (3) 狭開先サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接を用いた狭開先溶接が実用化されるようになったのは、1980 年代前半（昭和 50 年代後半）のことである。マグ溶接ではアークの揺動（ウィービング）を利用して、開先壁面および前層のビード止端部を確実に溶融させ、溶接欠陥の発生を防止している。しかしサブマージアーク溶接では、太径ワイヤならびにそれに見合った溶接トーチを用いるため、アークを揺動させることが極めて困難である。そのため、I 開先のルート間隔（開先間隔）を 12～15mm 程度とし、溶接電流を 600 A 程度の大電流として、開先壁面への健全な溶込みを確保する。なお、I 開先では健全な溶込みの確保が困難な場合には、開先角度が 2～5° 程度の V 開先を用いることもある。

サブマージアーク溶接で発生したスラグが開先壁面へ多量に付着・残存すると、次層の溶接で残存したスラグを再溶融することができず、スラグ巻きみや融合不良などの溶接欠陥が発生する。スラグの剥離は開先幅が狭くなるほど困難になるため、狭開先溶接ではスラグの剥離性が極めて大きい問題となる。そのため狭開先溶接用として、狭い開先角度・狭い開先幅においてもスラグの剥離性が良好なフラックスが開発されている。狭開先サブマージアーク溶接の例を図 3.182 に示す。開先角度、板厚、継手の重要度および溶接能率などに応じて、1 層 1～3 パスの積層方法が選択される。

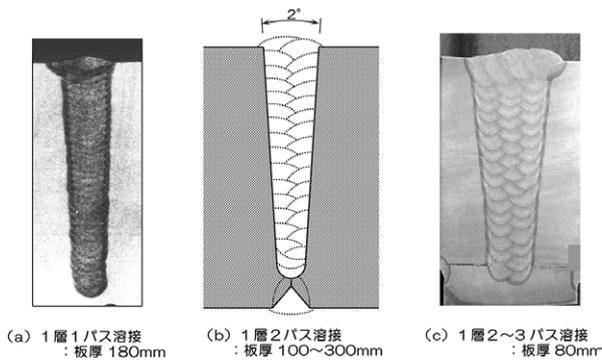


図 3.182 狭開先サブマージアーク溶接

参考文献：

- 1) 浜崎：溶接の歴史と特徴，溶接技術 1994 年 4 月号，PP. 50-56，産報出版
- 2) 中村：溶接ことはじめ，溶接技術 2000 年 2 月号，PP. 98-104，産報出版
- 3) 中村春雄記念ライブラリー：溶接文献資料，SANPO WEB，産報出版
- 4) 杉谷：溶接自動化の歴史 (2)，溶接技術 2005 年 2 月号，PP. 116-117，産報出版
- 5) 溶接五十年史編集委員会：溶接五十年史，産報 (1962)
- 6) 豊原：造船の溶接，溶接技術 2000 年 2 月号，PP. 83-91，産報出版
- 7) 山本：レールの溶接技術，溶接学会誌 2012 年第 8 号，PP. 11-19
- 8) 才田他：レールの溶接技術の動向と今後の展開，新日鉄住金技報第 395 号 (2013)，PP. 85-94
- 9) 溶接・接合技術 Q&A1000 編集委員会編：溶接・接合技術 Q&A1000，産業技術サービスセンター (1999)
- 10) ダイヘン八十年史，ダイヘン (2001)
- 11) 益本他：半自動・自動アーク溶接，産報出版 (1978)
- 12) 三谷：片面自動溶接の夜明け，溶接技術 2002 年 5 月号，PP. 78-80，産報出版
- 13) 村西：高効率な大入熱サブマージアーク溶接法，神戸製鋼技報 Vol.63 No.1 (apr.2013)，PP. 27-31
- 14) 溶接学会編：溶接・接合便覧，丸善 (1990)
- 15) 新日鉄技報：高強度 UO 鋼管のシーム溶接技術，第 385 号 (2006)，PP. 93-94
- 16) 吉村他：2 電極タンデムサブマージアーク溶接の角継手 70mm1 パス工法に関する研究，駒井ハルテック技報，Vol.4 (2014)，PP. 46-49
- 17) 岩田他：多電極 SAW 状況のモニタリングと溶込み深さ制御システムの実用化，JFE 技報 No.21 (2008.8 月)，PP.27-30
- 18) 鈴木：最新溶接ハンドブック (増補版)，山海堂 (1962)
- 19) 安藤他：新版電気溶接機器 (上)，産報 (1967)
- 20) 堀 他：ワイヤ加熱にパルス電流を用いたホットワイヤ TIG 溶接法の開発，溶接学会論文集 Vol.3 (2003)，PP. 362-373
- 21) 杉谷：溶接自動化の歴史 (8)，溶接技術 2005 年 8 月号，PP. 126-127，産報出版
- 22) 杉谷：溶接自動化の歴史 (9)，溶接技術 2005 年 9 月号，PP. 110-111，産報出版
- 23) 杉谷：溶接自動化の歴史 (11)，溶接技術 2005 年 11 月号，PP. 112-114，産報出版
- 24) 脇野：大電流 MIG 溶接法の厚板への適用，溶接技術 1978 年 6 月号，PP. 57-69，産報出版
- 25) 鈴木：炭酸ガスアーク溶接法，溶接技術 1965 年 5 月号，PP. 49-52，産報出版
- 26) 西川：溶接材料に見る 20 世紀，溶接技術 2000 年 2 月号，PP. 105-110，産報出版
- 27) 田中：溶接作業の改善にあたるアタルガス，溶接技術 1976 年 2 月号，PP. 45-48，産報出版
- 28) 中田他：経済的な溶接用粗アルゴンについて，溶接技術 1979 年 12 月号，PP. 65-68，産報出版
- 29) 今泉他：大電流マグ溶接法「タイム・プロセス」の開発，溶接技術 1990 年 2 月号，PP. 74-84，産報出版
- 30) 安藤他：溶接アーク現象《増補版》，産報 (1962)
- 31) 土師他：インバータ制御 CO<sub>2</sub>/MAG 自動溶接機「バナスター-HF350」の新技術と特長，溶接技術 1983 年 10 月号，PP. 54-58，産報出版
- 32) 長坂他：インバータ制御溶接機の進歩，溶接技術 1987 年 2 月号，PP. 52-58，産報出版
- 33) 丸山他：ガスシールドアーク溶接における電源の出力制御方法，溶接学会誌 Vol.57 (1988) No.7，PP. 39-47
- 34) K. Himmelbauer：The CMT-process, A revolution in welding technology, IIW Doc. XII -1875-05 (2005)，PP. 20-27
- 35) 印南他：ファジィを応用した CO<sub>2</sub>/マグ自動溶接機の開発，溶接技術 1992 年 8 月号，PP.69-73，産報出版
- 36) 原田他：溶接電源から見たマグ・ミグ溶接の知能化，溶接技術 1995 年 2 月号，PP. 106-114，産報出版
- 37) J.C.Needham：Control of Transfer in Aluminum Consumable Electrode Welding, Physics of the

- Welding Arc, A Symposium, LONDON, (1962)
- 38) Needham 他：Material Transfer Characteristics with Pulsed Current, Brit. Weld. J, May (1965)
- 39) 松縄他：パルスアーク溶接法, 溶接学会誌 Vol.53 (1984) No.6, PP. 20-58
- 40) Watkins 他：The Transistor Controlled DC Welding Power Source, TWI Research Report, Oct/1975
- 41) M.Amin 他：Synergic Pulse MIG Welding, TWI Research Report, Aug./1977
- 42) 山本：インバータ制御によるアーク溶接機の進歩と自動化への適用, 溶接学会誌 Vol.58 (1989) No.4, PP. 56-63
- 43) 山本他：アルミニウムおよびその合金の低周波パルス MIG 溶接法の開発, 溶接法研究委員会資料 SW-2034-90 (1990)
- 44) 松井他：溶融池の気泡に及ぼす湯流れの効果, 溶接学会全国大会講演概要, 第 53 集 (1993)
- 45) W.G. Esaers 他：Arc Characteristics and Metal Transfer with Plasma-MIG Welding, Met. Const., Vol.4, No.12 (1972), PP.439-447
- 46) 田口他：ワイヤ通電方式プラズマアーク溶接の特性, 溶接学会誌 Vol.48 (1979), No.12, PP. 51-55
- 47) 島田他：逆極性ソフトプラズマによる高品質肉盛溶接法, 溶接技術 1978 年 4 月号, PP. 63-69, 産報出版
- 48) 羽田他：全姿勢プラズマキーホール溶接法の検討, 溶接学会論文集 Vol.4 (1986), No.2, PP. 22-27
- 49) 藤山：アルミニウムの交流プラズマ溶接, 溶接技術 1987 年 11 月号, PP. 60-64, 産報出版
- 50) 斉藤他：新プラズマ溶接法の開発とその適用, 溶接法研究委員会資料, SW-2390-95 (1995)
- 51) デンヨー (株) 溶接機カタログ / セルフシールド・炭酸ガス溶接機
- 52) 岩崎：超高層と長大橋に至る溶接技術, 溶接技術 2000 年 2 月号, PP. 92-97, 産報出版
- 53) 笹木他：高能率 2 電極エレクトロガスアーク溶接法の開発, 新日鉄技報第 380 号 (2004), PP. 57-63
- 54) 堀 他：狭開先アーク溶接, 溶接学会誌 Vol.68 (1999) 第 3 号, PP. 41-62
- 55) 溶接学会溶接法研究委員会編：ナローギャップ溶接 (狭開先溶接), 溶接法ガイドブック 1 (1984)

# 4 | 溶接機・電源の発展経過

前述したように（3.1節参照）、わが国でのアーク溶接の始まりは、1904（明治37）年の三菱・長崎造船所での炭素アークによる鋳鋼品の補修である。その時は自家発電した直流を、水抵抗を使って溶接用に調整し、特別な溶接機は使用していなかったようである（図4.1参照）。その後、1915（大正4）年に長崎造船所がスウェーデンのチェルベルヒ社から、1台で数人の溶接工が使用できる多人数形の電動発電機式直流溶接機（出力40kW）を初めて輸入した（図4.2参照）。これより4年遅れて大阪製鎖も、英国のコーシー社から無負荷電圧60Vの直流溶接機と100-110Vの交流溶接機を輸入している。この二社に限らず、1917（大正6）年には川崎造船所が米・リンカーン社製溶接機を6台購入している。また1919（大正8）年には伊藤忠商事が米国のエレクトリックアーク・カッティング・アンド・ウェルディング社（Electric Arc Cutting & Welding Co.）から可動コア形交流溶接機を輸入し、それを京都大学でテストした。さらに旧国鉄小倉工場では米・ゼネラル・エレクトリック社の直流溶接機（出力33kW）を使い、機関車部品の肉盛補修を行っている。

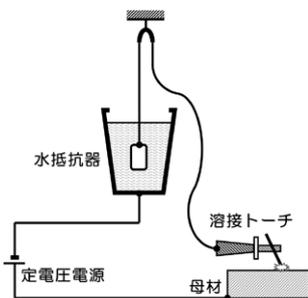


図4.1 水抵抗器を用いた溶接施工

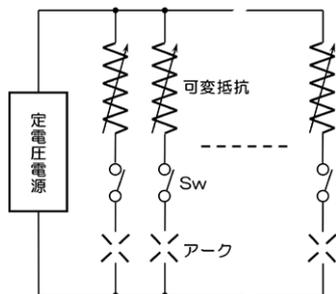


図4.2 多人数形溶接機

このような輸入機時代の1922（大正11）年に、米国製をモデルした単式交流アーク溶接機を日本電気熔

接機が製作し、これが国産溶接機の初めとされている。そして1925（大正14）年には、専門メーカーとして大阪電気などが登場して、本格的な溶接機の国産化時代が始まった。この当時、欧米ではアークの安定性に優れ、電撃の危険性も少ない直流溶接機が多用されていた。しかしわが国では、作業者の器用さと価格面の有利さで交流溶接機が主流であった。

その後1935（昭和10）年頃には可動コイル形の交流溶接機も開発されているが、溶接電流の粗調整はタップ切替で、微調整はハンドル回転の可動コイルで行う複合タイプの交流溶接機であったようである。そして1953（昭和28）年頃から、変圧器の絶縁塗料にシリコン・ワニスが使われるようになり、溶接変圧器の耐熱性が向上した。その結果、それまでは常識であった溶接電源背面の冷却扇は姿を消し、溶接電源の容量も大容量タイプ（定格出力電流500A）が一般化した。その間、遠隔操作で電流調整が可能な操作子（1952年頃）や、感電事故を防止する電撃防止装置（1956年頃）なども溶接機の機能を高める付属装置として開発されている。マグ溶接の普及に従って、1970（昭和45）年頃より交流溶接機は溶接機の生産量トップの座から後退したが、汎用溶接機としての一定の地位は保っている。

一方、初期の直流溶接には、電動発電機（MG：Motor Generator）式の溶接電源が多く用いられた。しかし1955（昭和30）年頃に、小型で安価なセレン整流形溶接電源が市販されるようになると、電動発電機形溶接電源は姿を消すこととなった。次いで1959（昭和34）年頃より、過負荷に弱いセレン整流形溶接電源に替わって、シリコン整流形溶接電源が登場した。その後、1969（昭和44）年にサイリスタ制御の溶接電源が開発され、マグ溶接の普及に伴ってサイリスタ制御電源の適用は拡大したが、1985（昭和60）年頃からはインバータ制御溶接電源に主役の座が移っている。以下に、わが国の主なアーク溶接機の発展経過について述べる。

## 4.1 萌芽期（1900年代前期）の溶接機

1917（大正6）年頃のわが国の交流アーク溶接は、商用交流電源の出力を抵抗またはリアクタンスを介して調整し、それを溶接電流として供給することによって行われていた。また、一般電力用変圧器と同様に、

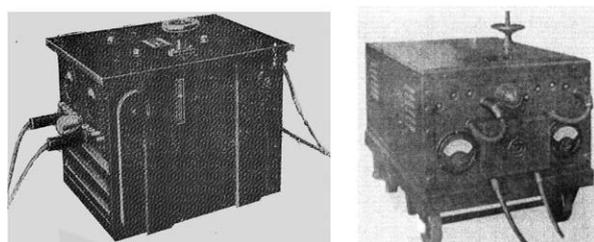
出力電圧を 80V 程度とした変圧器を用い、これに溶接作業者の人数分の直列可変リアクトルを並列に接続して溶接電流を得る方法も採用されていた。しかし後者の多人数形方式は共通導線中の電圧降下が大きく、1つのアークが起動するとすでに起動している他のアークに影響を与えるため、良好な溶接作業は行えなかったようである。

第1次世界大戦が終了した1919（大正8）年頃、ホルスラグ（C. J. Holslag）が可動コア形交流アーク溶接機を開発した。この溶接機は、伊藤忠によってエレクトリックアーク・カッティング・アンド・ウェルディング社からわが国へ輸入され、当時溶接機の研究を進めていた京都大学・岡本越教授がその溶接機の試験・調査を行った。また浜野兵次はこの溶接機を参考にして新たに設計し、1922（大正11）年にわが国初の国産交流アーク溶接電源である“浜野式溶接機”を開発した。浜野に電気溶接の重要性・将来性について教示したのは、久保山少言である。久保山は早くから電気溶接に興味を持ち、容易に入手できなかった文献を収集し、抵抗溶接機などの設計を試みていた。浜野は久保山からから電気溶接機の興味と将来性を説かれるとともに、その設計を譲り受けた。これによって浜野の溶接機製作が始められ、わが国のアーク溶接電源国産化の第1歩となった。なお浜野は、3～4名の設計事務所的な形ではあったが、1922（大正11）年に日本電気溶接機を設立している。しかし日本電気溶接機は比較的短期間で消滅し、その後の浜野および久保山の消息は伝えられていない。

本格的な溶接機メーカーの誕生は、1925（大正14）年に創立された大阪電気が最初である。続いて、1926（大正15）年に日立製作所および東洋電気溶接機が電動発電機（MG）式の直流アーク溶接電源を製作し、1927（昭和2）年には佐藤電気工業所（後の東京電熔機）が交流アーク溶接機の生産を開始するなど、アーク溶接機の国産化が次々に進められた。交流アーク溶接機はこれらの専門メーカーによって製作・市販され、被覆アーク溶接棒の国産化と相まって、わが国の溶接界発展の大きな契機となった。しかし、当時は溶接そのものの啓発がまだ不十分な時代であり、かつアーク溶接は直流の方が優れているということが通説となっていたため、交流アーク溶接機の普及・拡大には相当苦労したようである。

当時の交流アーク溶接電源の一例を示すと図4.3のようである。出力の調整はタップ切替式で、木製の電源ケース（木箱）内には、溶接変圧器、出力調整用タップ、冷却扇が内蔵されていた。また電源正面には、接

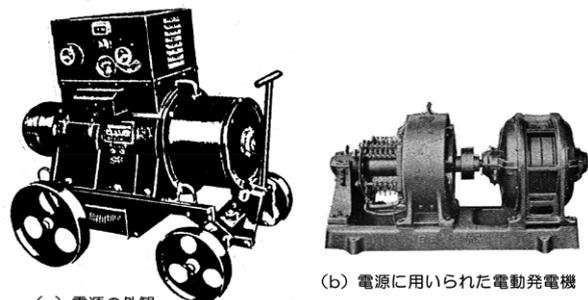
続タップや電圧計・電流計が取り付けられていた。溶接電流の粗調整はタップ切換でコイルの巻数を変化させることによって行い、微調整は可動コアによる漏洩磁束の変化を利用して行う。その後、可動コアのハンドルの位置が電源の上部蓋から前面下部へ、移動用ハンドルが車輪に、大きさ・重量の軽減、冷却扇の省略、および無負荷電圧の低減と効率の上昇など多少の変更が行われた。しかし基本的な構成は、1940年代後半（昭和20年代前半）頃までは各社とも全く同じであった。



(a) 1925年：大阪電気製 (b) 1931年：日立製作所製

図 4.3 初期の国産交流アーク溶接電源<sup>1)</sup>

当初の直流アーク溶接は、上述した三菱・長崎造船所を初めとして、直流定電圧電源を用いた多人数形溶接電源を用いて行われていた。その後、輸入機である溶接専用の電動発電機駆動の直流定電圧電源へと移っていった。そして1926（大正15）年に、日立製作所が国産初の直流アーク溶接電源として、図4.4に示すような、電動発電機（MG）式の溶接電源を開発した。これは定格出力電流300Aの垂下特性電源で、幅600mm×奥行1,200mm×高さ1,200mmで質量が900kgと極めて大型で重い溶接電源であった。また1929（昭和4）年には、三相誘導電動機、溶接用発電機、励磁機、調整装置およびリアクタで構成されたポータブルでコンパクトな多励磁発電機式溶接電源（定格出力200、300、400A）が開発された。この電源では、励磁機回路の可変抵抗を調整して、励磁機からの電流で励磁された溶接用発電機の無負荷電圧を調整する。大阪電気は1930（昭和5）年に、この種の直



(a) 電源の外観

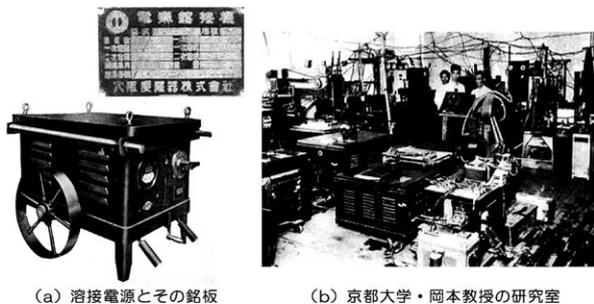
(b) 電源に用いられた電動発電機

図 4.4 国産初の直流アーク溶接電源<sup>1)</sup>

流アーク溶接電源としては当時の世界最大容量といわれた定格出力 600A の電源を製作した。また同年、芝浦製作所も 7.5kW-300A の電源および 60kW-1000A の電動発電機式定電圧溶接電源を自家用として製作している。その他、ドイツ・ジメンス社と提携した富士電機製造および米・ウェスティングハウス社と提携した三菱電機などが直流アーク溶接機の生産準備を始めるなど、1930（昭和 5）年前後には総合電機メーカーのアーク溶接機製作への進出が目立った<sup>1)</sup>。

## 4.2 開拓期（1900 年代中期）の溶接機

1931（昭和 6）年の満州事変勃発を契機として、わが国の機械工業は長く続いた恐慌から脱出し、再び急速な発展を開始した。上海事変（1932（昭和 7）年）、日華事変（1937（昭和 12）年）から第 2 次世界大戦へと進む準備段階的な時代であったが、機械工業のあらゆる分野に需要層を持つアーク溶接機メーカーにとっては、発展と普及のための好条件がそろっていた。アーク溶接の需要増加に伴い、国産アーク溶接機メーカーが次々と誕生した。1933（昭和 8）年の主なアーク溶接機メーカーは、日本電気溶接機、大阪電気、東洋電気溶接機、日立製作所、東京電溶機、芝浦製作所、三菱電機、富士電機製造、帝国酸素株式会社などの 9 社に達し、翌年には大阪変圧器と三葉製作所も加わった。この年大阪電気は、わが国の溶接機生産量の約 80% を占め、当時の溶接機専門工場としては世界的な規模といわれた新工場を建設した。また 1935（昭和 10）年には電元社が、1937（昭和 12）年には日本溶接機材が新たに参入している。1935（昭和 10）年に大阪変圧器が開発した交流アーク溶接電源は図 4.5 のようであり、研究用として京都大学・岡本越教授の実験室に納入された。



(a) 溶接電源とその銘板 (b) 京都大学・岡本教授の研究室  
図 4.5 研究用に納入された交流アーク溶接電源（1935 年）<sup>2)</sup>

1931（昭和 6）年に日立製作所は、図 4.6 に示すよ

うな、電流計付き可動コア形強制空冷交流アーク溶接電源の生産を開始した。また 1934（昭和 9）年には、電流計なしの汎用電源の市販を開始した。さらに大阪変圧器と三葉製作所も交流アーク溶接電源の生産を開始した。いずれの溶接電源も漏洩変圧器形のもので、溶接電流の調整は 2~5 段のタップ切換で粗調整を行い、可動コアによって微調整を行うものであった。溶接電源の構造・機能は、全般的に、実用的な汎用機への傾向を示し、計器その他の付属品をなくして、軽量・小型・頑丈でかつ廉価なものとなっていた。なお帝国酸素は、タップ切換の組合せのみで溶接電流を調整する方式の電源を販売している。

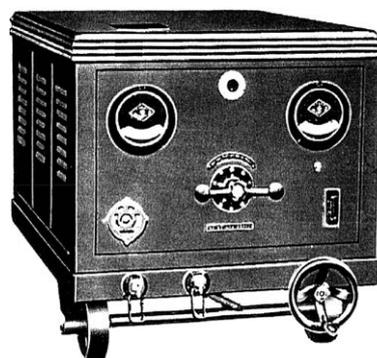


図 4.6 可動コア形強制空冷交流アーク溶接電源（1931 年）<sup>1)</sup>

この頃の交流アーク溶接電源の無負荷電圧は一般に 130~180V で、薄板用の電源では 230V にも及ぶものがあつた。1932（昭和 7）年頃、呉海軍工廠から人命尊重のために無負荷電圧を下げる電撃防止器開発の指示が出された。それに応じて大阪電気は、図 4.7 に示すような、電撃防止器内蔵の交流アーク溶接電源を開発し、今日の電撃防止装置の始まりとなった。なお 1935（昭和 10）年の旧海軍規格では、感電死原因調査結果に基づいて、交流アーク溶接電源の無負荷電圧を 80V 以下にするという決定がなされている。

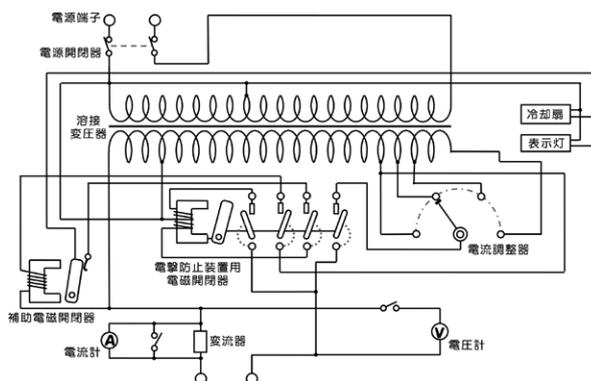


図 4.7 電撃防止装置付き交流アーク溶接電源<sup>1)</sup>

1933（昭和8）年頃から、大阪電気に続いて電元社、三葉製作所、日立製作所などの各社が高周波付交流アーク溶接電源の製作を開始した。この電源は、直流に比べてアークの安定性に欠ける交流の欠点を補うものとして開発され、板厚1mm以下の軟鋼の小電流交流アーク溶接を可能にした。すなわち高周波電圧を重ねることによって、交流アークの極性反転時の再点弧性を向上させ、小電流溶接においてもアークの安定性が向上した。いずれの溶接電源においても、高周波発生装置は全て溶接電源に内蔵されていた。また三菱電機は、ウェスティングハウス社の電源を参考にした高周波付交流アーク溶接電源を製作した。この電源は抵抗によって垂下特性を与える方式であったが、高周波発生装置の性能が良好で、交流アークの安定性が極めて優れていたようである。

黄銅のスタッド溶接は1933（昭和8）頃に造船分野で採用され始めたが、溶接電源には直流電源が採用されていた。当初は、直流定電圧電源に直流抵抗を付加した輸入装置がそのまま用いられ、断続的な瞬間負荷に耐えられるように、溶接電源には極めて大きい誘導電動機駆動電源が用いられていた。この誘導電動機は、起動してから全速に達するまでに5分以上の時間を必要としたようである。後日この溶接電源は、京都大学・岡本越教授の研究で、通常の垂下特性アーク溶接電源に置き換えられた。そして1935（昭和10）年には、大阪電気によって交流アークスタッド溶接機が製作されている。1937（昭和12）年になると、大阪変圧器が図4.8に示すような全交流アークスタッド溶接機（サイクアーク）を開発した。高周波発生装置を含む制御装置は、溶接電源と別箱となっている。さらに1939（昭和14）年には、三葉製作所も交流アークスタッド溶接機の製作を開始し、交流アークスタッド溶接機は海軍工廠や造船工場向けに多数製作された。

その他、芝浦製作所は1935（昭和10）年に、わが国初の可動コイル形交流アーク溶接電源を開発し、高能率アーク溶接電源の口火を切っているが、その当時は普及しなかった。

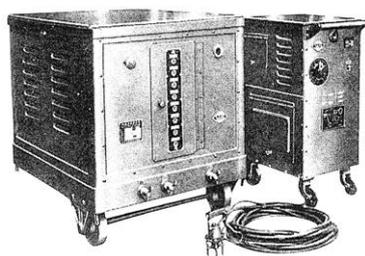


図4.8 全交流アークスタッド溶接装置（サイクアーク）<sup>1)</sup>

1937（昭和12）年に勃発した日華事変から1941（昭和16）～1945（昭和20）年の第2次世界大戦へと続くこの間のアーク溶接機メーカーは、他の産業と同様に、軍需をいかに消化するかのみへの対応に追われていた。兵器の大量生産が至上命令として各産業に下され、全ての能力をこれに集中したにも拘らず、未消化受注高は生産能力の4～5倍にも達した。このアンバランスを埋めるために、大量生産方式と近代的な合理化が要求された。そのため電気溶接機器の需要は飛躍的に伸び、各メーカーとも増産と拡充が相次いだ。既存メーカーは工場・人員の急激な拡充を図り、アーク溶接機メーカーであった日立製作所、大阪変圧器、電元社、三葉製作所および芝浦製作所などは抵抗溶接機の分野にも積極的な進出を見せた。また1937（昭和12）年には、日本溶接機材が設立された。

軍需生産期9年間の電気溶接機器の需要は、陸軍兵器本部からの工具製造用の溶接機、弾頭用フラッシュ溶接機、自動車エンジン・バルブ用アプセット溶接機など、ほとんどが兵器部品の生産に用いる溶接機器であった。また海軍の艦政本部からは、造船用のアーク溶接機器が求められた。しかしその後期になると、陸海軍ともに航空本部が主力となり、航空機製造用の溶接機器に重点が置かれた。ところがこの頃になると、資材の入手難や人員・設備不足などが徐々に表面化し、十分な成果が得られなくなっていた。

#### 4.3 発展期（1900年代後期）の溶接機

1945（昭和20）年の終戦によって戦時経済は崩壊し、溶接機器工業も再出発しなければならなくなった。全産業が戦争遂行のための軍需機械の生産に集中していたため、各産業分野とも遊休溶接機が多く、戦災によって工場設備が破壊された溶接機メーカーも少なくなかった。このような情勢下で、やむを得ず農機具や電熱器具などを製作して時期を待つという溶接機メーカーも出現している。戦前は世界最大の生産規模を持っていた大阪電気は、1943（昭和18）年“会社乗っ取り”の策動に遭遇した。その解決手段として出された軍当局の命令によって、大阪電気は一時預託の形で日本冶金に合併され、日本冶金・住吉工場となったが、1949（昭和24）年には不況のため閉鎖・解散に至った。その一部は、1944（昭和19）年に設立されていた新しい大阪電気に受け継がれ、溶接機の生産が再開された。また下請工場によって命脈が保たれていた他の部門は、東亜精機として後1952（昭和27）年に再出発することとなる。

1949（昭和24）年には、日本電気溶接機、東京電機溶接機および三葉製作所などが、アーク溶接機の本格的な生産を始めた。また電元社も回転形アーク溶接機を製作するなど、各メーカーとも再建への活動が進められた。しかし、戦時中の経済的な混乱と停滞の中で、溶接機器の発展は停滞していた。そのため、欧米各国の戦中・戦後を通じた急速な発展に比べ、相対的に、わが国の溶接機器の技術水準は大きく遅れることとなった。アメリカ溶接協会・副会長のピアース（H. W. Pierce）が、キャンベル（R. S. Campbell）賠償調査団の一員として1947（昭和22）年に来日し、欧米における最新の溶接状況や新知識（船体のぜい性破壊・イナートガスアーク溶接の活用・粉末ガス切断法など）について報告した。その時、わが国の溶接技術は欧米に比べて30年は遅れているとのコメントがなされた。

上述のような混乱した時代であったが、日立製作所は1947（昭和22）年に、終戦間近に試作していた、二分割コイル方式の交流アーク溶接電源を製品化した。1次（入力側）および2次（出力側）コイルをそれぞれ二分割して主鉄心（コア）へ対称にはめ込み、その中央部に回転軸に沿って移動する可動鉄心（コア）を設けた。電流調整は、図4.9に示すように、可動鉄心の移動のみで行うことができる。従来電源に比べ、溶接電流設定時の二重性（粗調整と微調整）を排除し、電力損失を少なくして効率を高め、外形寸法も小形化した。いわば、現在の可動鉄心形交流アーク溶接電源の原型となった電源である。その外観と内部構造を図4.10に示す。

可動コイル形交流アーク溶接電源は、1935（昭和10）年に芝浦製作所によってすでに試作されていたが、1950（昭和25）年に電元社がこれを改良した電源を開発した。電源の構造を外鉄形とし、漂遊負荷損を低減させて効率の向上を図るとともに、無負荷電

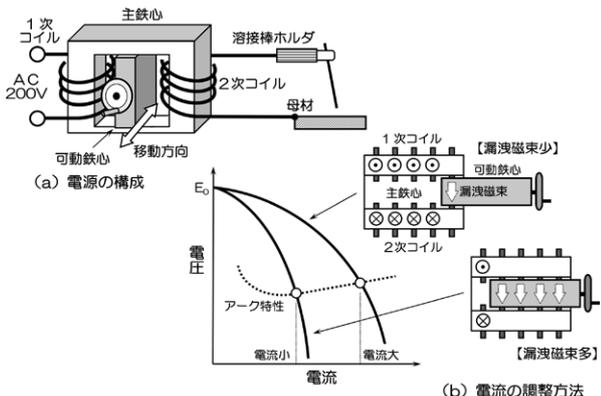


図 4.9 可動鉄心形アーク溶接電源の原理

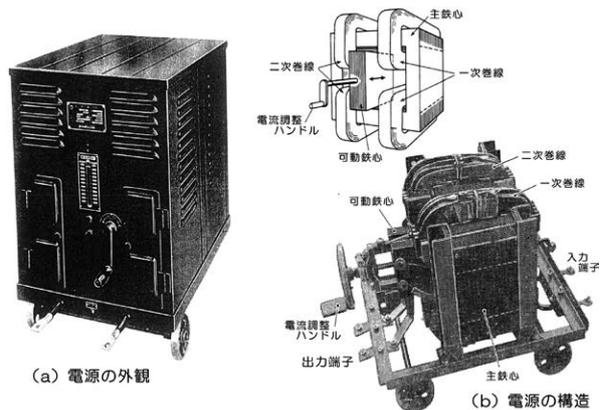


図 4.10 可動鉄心形交流アーク溶接電源<sup>1) 3)</sup>

圧を低くして入力を低減させ、電源の設置（床）面積も縮小させた。可動コイル形交流アーク溶接電源では、図4.11に示すように、変圧器の二次巻線を固定して一次巻線を移動させ、一次巻線と二次巻線との間の距離を変化させることによって溶接電流を調整する。両者が離れていればリアクタンスが大きくなって出力電流は小さくなり、近ければリアクタンスが小さくなって出力電流は大きくなる。この交流アーク溶接電源は、当時はその理由は不明であったが、優れたアークの安定性を示した。そこで、大阪大学の安藤弘平教授がこの電源についての研究を始め、アークの安定と溶接機の標遊負荷損との関連を明らかにした。その研究成果は、その後の溶接機の改善・改良に大きな影響を与えることとなった。なおこのタイプの溶接電源は、他のメーカー数社でも製品化されている。

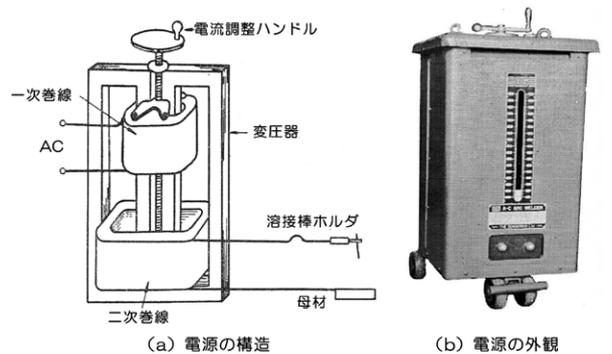


図 4.11 可動コイル形交流アーク溶接電源<sup>1) 3)</sup>

1953（昭和28）年に東芝は、同社で国産化したシリコン・ワニス可動コイル形交流アーク溶接電源の絶縁に使用し、わが国初のH種絶縁溶接電源を完成した。翌1954（昭和29）年から1955（昭和30）年にかけて、日立製作所および大阪電気も二分割コイル方式でH種絶縁を採用し、空冷（自冷）方式とすることによって冷却扇の使用を廃止した。その一例を図4.12に示す。これによって電源の大幅な小形化とコス

トダウンが実現し、その後この方式と構造は全メーカーに及び、今日の交流アーク溶接電源の基礎となった。



図 4.12 空冷式可動鉄心形交流アーク溶接電源<sup>1)</sup>

1949 (昭和 24) 年には、日本経済安定策としてのドッジ・ラインが示され、戦後恐慌といわれた一時的な不景気をもたらした。しかし、1950 (昭和 25) 年に勃発した朝鮮動乱とそれに伴う特需の増大によって、溶接機器工業の本格的な進展が始まった。さらに同年には外資導入法が公布施行され、外国技術の導入も開始できるようになった。また、科学技術者の自主的な海外渡航も復活した。1952 (昭和 27) 年には企業合理化促進法が成立施行され、研究開発の援助・重要産業近代化・機械設備などの特別償却・産業関連施設の整備なども行われた。これらのでこ入れ策と海外からの新技術導入によって、各産業分野の生産設備更新と新增設が始まり、溶接機の市場も拡大して、復活と発展のための好条件が整った。そして、交流アーク溶接機の生産は、1950 (昭和 25) 年の年間 894 台に対し、1954 (昭和 29) 年には約 5 倍の 4,625 台に急上昇した。この生産規模は、1954 (昭和 29) のデフレになっても減少することはない。

1952 (昭和 27) 年には日本冶金の溶接機部門として東亜精機が設立され、国産化第 1 号のアルゴン・アーク溶接機 (3.4.1 項図 3.51 参照) を発表した。電元社および大阪変圧器も、同年にアルゴン・アーク溶接機を完成させ、その後多数のメーカーが加わってティグ溶接機は急速に普及した。

1954 (昭和 29) 年には三芝電気商会が設立され、図 4.13 に示すような、可動鉄心形交流アーク溶接電源用の遠隔操作装置が製作された。そして 1954 (昭和 29) 年には、無線式遠隔操作装置 (電子管式) を開発した。これらの装置を用いると、溶接棒と母材との間に遠隔操作子を挿入することによって、溶接電流を増減させ

ることが可能となる。造船などの大型構造物では、溶接を行う場所と溶接電源の設置場所とは相当離れている。そのため電源の前面パネルに設けられた電流調整ハンドルを操作して溶接電流の微調整を行うには、2 人作業とするなど、極めて手間のかかる作業となっていた。遠隔操作装置はこのような問題を解決するために開発されたものである。溶接棒と母材との間に遠隔操作子を挿入すると、溶接電源に取り付けられたモーターが可動鉄心の移動軸を駆動して、溶接電流を増減する。

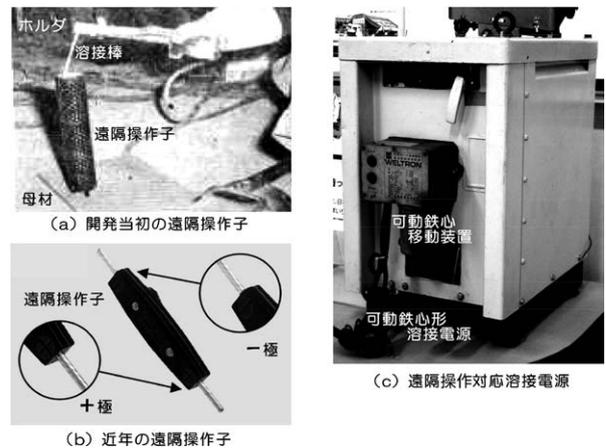


図 4.13 可動鉄心形溶接電源の遠隔操作

戦後になって始められたセレン整流器の国産化が達成されると、そのアーク溶接電源への適用研究が始まった。そして 1951 (昭和 26) 年には電元社が、図 4.14 に示すような、国産初の可動鉄心形整流器式直流アーク溶接電源を完成させ、直流アーク溶接電源の先駆的な役割を果たした。

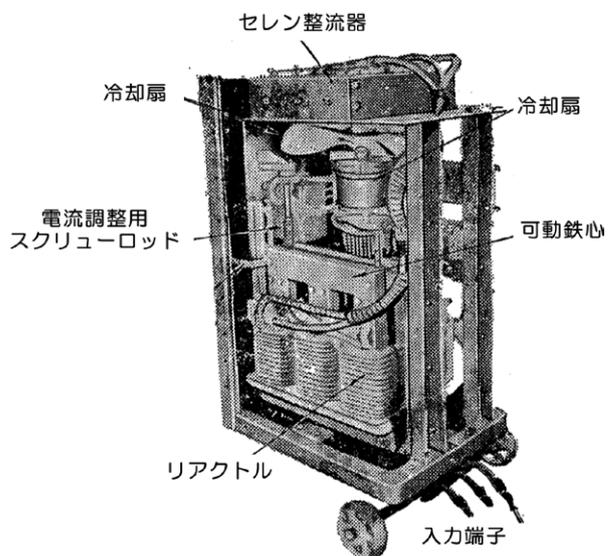


図 4.14 セレン整流式直流アーク溶接電源<sup>4)</sup>

1955（昭和30）年に始まった世界的な海運ブームは、わが国機械工業の発展を推進した。輸出船舶を中心に、船舶、鉄鋼、耐久消費財（家庭電気器具・自動車）など、いずれの産業分野においても大規模な近代化投資が行われ、市場は画期的に拡大した。溶接機メーカーの全てが創業以来の活況を呈し、生産・販売実績は未曾有の高記録を樹立した。溶接機の需要はメーカーの生産能力をはるかに超えていたため、各メーカーともに生産体制の充実と増強が図られ、軟弱であった企業体質は大幅に改善され、近代化と量産に即応したユーザの急速な技術革新にも対応できるようになった。各溶接機メーカーの生産・販売方針に特徴が表れたのもこの時期であり、大阪電気は標準アーク溶接機と抵抗溶接機の両者に、電元社および東京電熔機は抵抗溶接機に重点を置いた。そして日本電気溶接機は回転式アーク溶接機に、日立製作所は交流アーク溶接機の量産に、大阪変圧器はアーク溶接機と自動アーク溶接機に重点を置いた生産体制を敷いていた。

このような状況の1957（昭和32）年に松下電器産業が、図4.15に示すような、わが国初のコンデンサ内蔵形交流アーク溶接電源を開発し、溶接機メーカーとしての名乗りを上げた。被覆アーク溶接棒を用いる交流アーク溶接では、図4.16に示すように、極性が半サイクルごとに変化し、電流は極性変化時に一瞬必ず零となる。電流が零になるとアークはいったん消滅し、次の半サイクルで反対極性のアークを再点弧しなければならない。そのため交流アーク溶接電源では、リアクタンスを利用して、アークの再点弧時に供給される電圧が高くなるようにしている。すなわち、溶接電流の位相が無負荷電圧の位相より遅れた関係（低力率）となるように設計されており、低力率がアークを安定に維持するための必須条件である。電力会社は電源設備の減価償却的な意味を持つ基本料金を割高に設



図 4.15 コンデンサ内蔵可動鉄心形交流アーク溶接電源<sup>6)</sup>

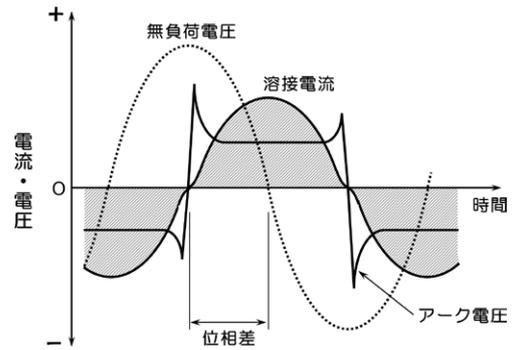


図 4.16 交流アークの電圧・電流波形

定し、これが中小企業の大きな負担となっていた。進相コンデンサを取り付けると力率を改善できるが、コンデンサの技術水準・コンデンサ付加による電源価格の上昇・電力会社との話合いなど、実施を妨げる要因は多かった。松下電器産業は、ユーザの省電力に貢献するために、溶接機メーカーに自社の進相コンデンサの売込みを図ったが、コストアップなどの理由で断られ、自社で溶接電源を製作することを決意したようである。その後、1960（昭和35）年には日立製作所および大阪変圧器もコンデンサ内蔵形交流アーク溶接電源を販売するようになった。

また同年には日本溶接機材が、小型軽量を主目的に、使用率を低くするとともに冷却扇を使用して、現場作業などに適する交流アーク溶接電源を製作した。このタイプの電源は現在でも市販されており、その一例を図4.17に示す。その他、1953（昭和28）年にユニオンメルト溶接機を国産化した大阪変圧器は、1959（昭和34）年に改良を加えた普及標準形のユニオンメ

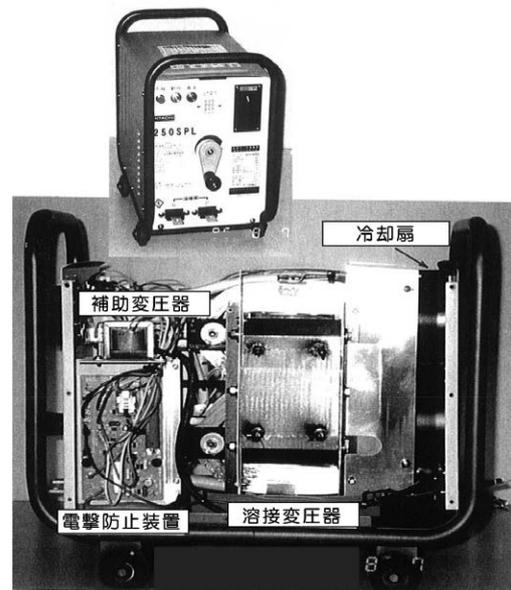


図 4.17 小型交流アーク溶接電源

ルト溶接機を開発した<sup>1)</sup>。その溶接電源として、図4.18に示すような、大容量（定格出力～2,000A）の可動鉄心形交流アーク溶接電源の販売も開始した。電源内部に可動鉄心移動用のモータを内蔵し、前面パネルの電流増減スイッチを操作して溶接電流の調整を行う。1963（昭和38）年には、図4.19に示すような、電流調整ハンドルを電源の上蓋に設けた交流アーク溶接電源を日立製作所が発売した。しかしこの電源は極めて不評で、最大の交流アーク溶接機メーカーであった同社のシェアを大きく低下させたようである。振動による可動鉄心位置の変化に起因した溶接電流の変動が生じること、当時の造船業界では一般化しつつあった溶接電源の多段積への対応ができないことなどが不評の理由であった。



図 4.18 大容量可動鉄心形交流アーク溶接電源

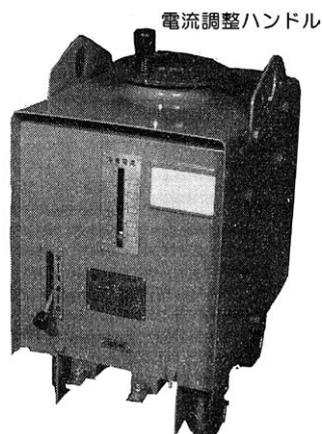


図 4.19 上ハンドル式可動鉄心形

1966（昭和41）年に日立製作所は、図4.20（a）に示すような、可動鉄心形の交流／直流両用電源を世界に先駆けて開発した。ティグ溶接への適用を念頭にした開発で、特に交流ティグ溶接の性能に優れていたようである。当時の溶接電源には、交流用端子と直流用

端子とがそれぞれ個別に設けられていた。しかし近年の電源では、（b）に示すように、出力端子は1つとなり、前面パネルに設けた切替レバーの操作で、電源内部に設けられた電磁接触器が作動して交流出力と直流出力とを切り替えられるようになっている。交流／直流両用電源の原理は図4.21のようであり、図中のA-A'間では同一方向の電流が流れ、B-B'間では電源周波数に応じて電流の通電方向が変化する。したがって、A-A'間で出力を取り出せば直流が得られ、B-B'間で出力を取り出せば交流が得られる。

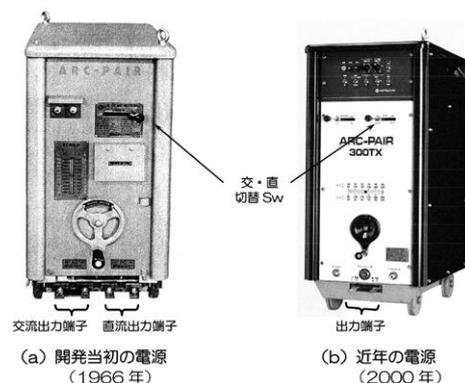


図 4.20 可動鉄心形交流／直流両用アーク溶接電源

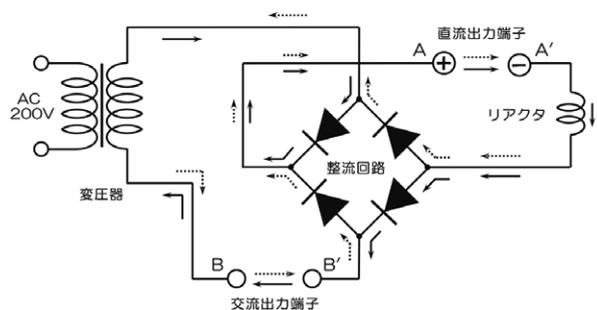


図 4.21 交流／直流両用電源の原理

なお、この後の可動鉄心形交流アーク溶接電源についての大きい進展は得られていない。現在、その使用台数は大きく減少しているが、可搬性・作業性に富む安価な溶接電源として一定の割合（溶接電源全体の数%程度）は保っている。

上述4.2節で、1932（昭和7）年頃に大阪電気が開発した電源内蔵の交流アーク溶接電源の電撃防止器について述べたが、この電撃防止機能を別箱にした装置が1955（昭和30）年頃に開発された。吉村電機や宮本電機などが最初に開発し、その後1957（昭和32）年には三芝溶接機器、松下電器産業および大阪電気が製作を開始した。さらに1959（昭和34）年には、大阪変圧器と日立製作所も製作を始めた<sup>1)</sup>。交流アーク溶接電源には起動スイッチがないため、アーク休止中

も 80V 程度の無負荷電圧が常時出力されており、その電撃は死亡に至る危険性を持っている。電撃防止装置はその危険性を排除する装置で、アークが発生していない（無負荷電圧が出力されている）時、溶接棒ホルダと母材との間の電圧を安全電圧（現在では 25V）以下に低減する装置である。その構成と動作は図 4.22 のようであり、アークが休止している場合の溶接電源からの出力電圧を、補助変圧器から出力される低い安全電圧へ切り替える。溶接棒を母材へ接触（短絡）させると、電磁接触器が作動して電撃防止装置への接続を遮断し、瞬時（0.06 秒以内）に溶接電源の無負荷電圧へ切り替わる。溶接が終了してアークが消滅すると再び無負荷電圧が出力されることになるが、ただちに安全電圧への切り替えは行わず、約 1 秒（ $1 \pm 0.3$  秒）の運動時間が経過した後に安全電圧へ切り替える。このような運動時間を溶接終了時に設けているのは、タック溶接（仮付溶接）などの短い間隔での連続溶接における作業性を考慮してのことである。別箱式の電撃防止装置とその溶接電源への取り付け状況を図 4.23 に示す。なお電撃防止装置は、導電体に囲まれた狭隘な場所あるいは 2m 以上の高所での使用を、昭和 47 年に施行された労働安全衛生規則で義務付けられている。

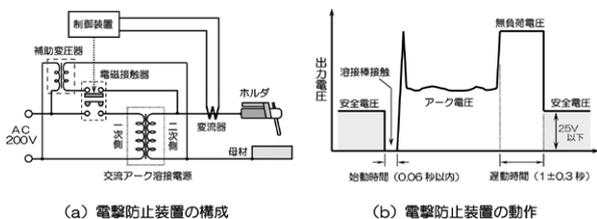


図 4.22 電撃防止装置



(a) 別箱式電撃防止装置



(b) 溶接電源への取付状況

図 4.23 別箱式電撃防止装置<sup>1)</sup>

この時期（1900 年代後期）の直流アーク溶接電源の主流は、図 4.24 に示すようなセレン整流器式となり、回転式の電源は日本電気溶接機材などにおいて製作される程度となった。大阪変圧器は 1955（昭和 30）年に、大阪電気は翌 1956（昭和 31）年に、可飽和リ

アクトルによる電流調整方式を採用した直流アーク溶接電源を開発した。可飽和リアクトルは三脚形鉄心を持つリアクトルで、図 4.25 に示すように、その鉄心には出力電流が流れるリアクトルと可変抵抗に接続された制御巻線が巻かれている。この制御巻線に制御電流と呼ばれる直流電流を通電すると、交流リアクトルとしての実効リアクタンスが変化して出力電流を調整することができる。1958（昭和 33）年には松下電器産業、1960（昭和 35）年には日立製作所も同様の直流アーク溶接機の生産を開始している。しかし直流アーク溶接機の使用目的は、特殊合金の被覆アーク溶接、ティグ溶接、ミグ溶接あるいはサブマージアーク溶接など多岐にわたる。また作業性に関しても、遠隔操作装置（リモコン）、クレータ処理、スタート制御、電撃防止装置、各種保護装置、電流・電圧計など様々な機能・アクセサリがある。そのため、直流アーク溶接機の仕様や機能は、各メーカーがそれぞれ独自の仕様を採用した溶接機を販売することとなった。

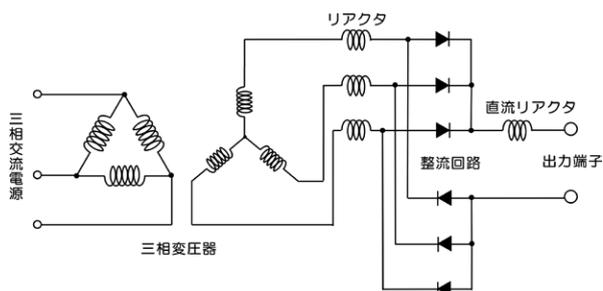


図 4.24 整流器式直流アーク溶接電源の回路構成例<sup>2)</sup>

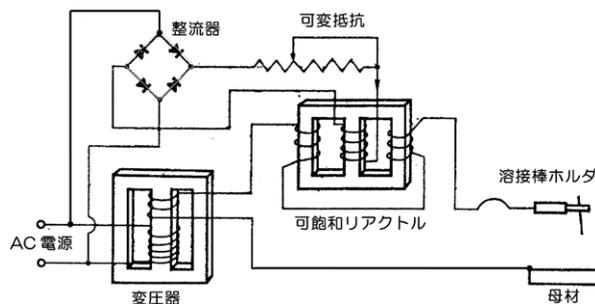


図 4.25 可飽和リアクトルによる電流調整<sup>2)</sup>

1959（昭和 34）年に大阪変圧器は、電源の外部特性の調整が可能な自己飽和リアクトルを用いた直流アーク溶接電源を開発した。自己飽和リアクトルは可飽和リアクトルの一種で、図 4.26 に示すように、三脚形鉄心の中央に可飽和リアクトルと同様の制御巻線が巻かれている。電流が通電されると、鉄心の磁束は飽和する方向に変化し、この磁束変化を利用して電源の外部特性を定電圧特性としたり、定電流特性としたりすることができる。その溶接電源の外観を図 4.27

に示す。松下電器産業は、同年以降に、ガウジング兼用アーク溶接機・電撃防止装置・遠隔操作機能付交流アーク溶接機など、種々な機能を備えたアーク溶接機を矢継ぎ早に市販している。

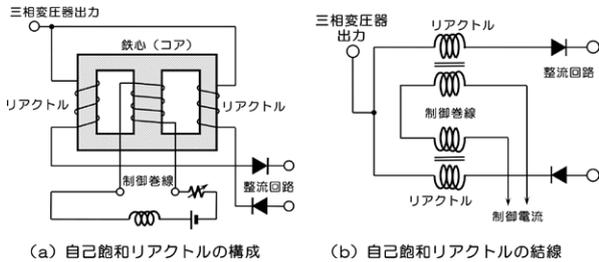


図 4.26 自己飽和リアクトル<sup>3)</sup>

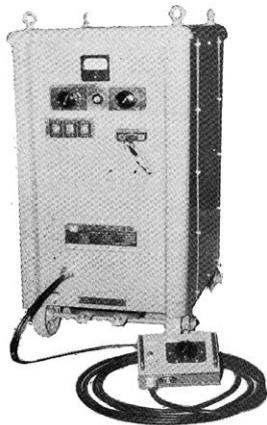


図 4.27 自己飽和形直流アーク溶接電源<sup>1)</sup>

接機がある。この溶接機では、ガソリンまたはディーゼルエンジンに直結した直流発電機を駆動して溶接電源に用い、日立製作所、電元社、東亜精機および日本電気溶接機材などが製作していた。しかし1955（昭和30）年以降は、日本電気溶接機材以外のほとんどのメーカーは生産を中止している。

アークスタッド溶接機は、交流式を大阪変圧器が、直流式を電元社が戦後に開発していた。しかしその後、前述の3.8.4項で述べたように、大阪変圧器が英国のクロムプトン・パーキンソン社と提携し、1956（昭和31）年に、図4.28に示すようなネルソン・スタッド溶接機を国産化した。また1959（昭和34）年には、松下電器産業もフィリップス社と提携して、アークスタッド溶接機の製作を開始している<sup>1)</sup>。

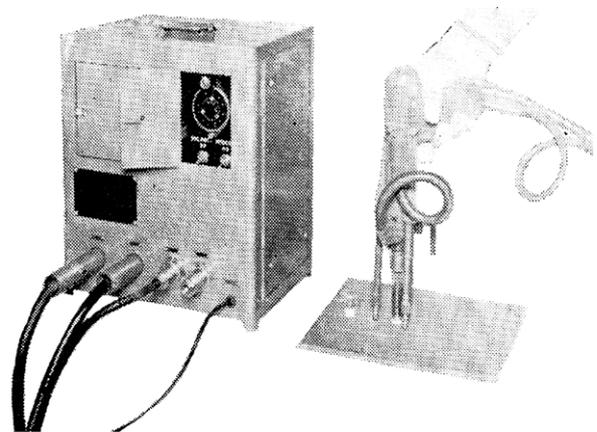


図 4.28 ネルソン・スタッド溶接機<sup>1)</sup>

また1959（昭和34）年には、過負荷に弱いセレン整流器に替わるシリコン整流器が国産化されたのを受けて、大阪電気はシリコン整流器式直流アーク溶接電源を開発した。そして日立製作所や三芝溶接機器なども同様の溶接電源の製作を始めた。

戦後いち早く生産された溶接機の1つに、土木建築現場での作業用として使用される回転式直流アーク溶

#### 4.4 近年（1969年以降）の溶接電源

近年のアーク溶接電源の発展経過を整理すると図4.29のようである。サイリスタ制御電源は1969（昭和44）年に出現し、一元制御、クレータ制御あるい

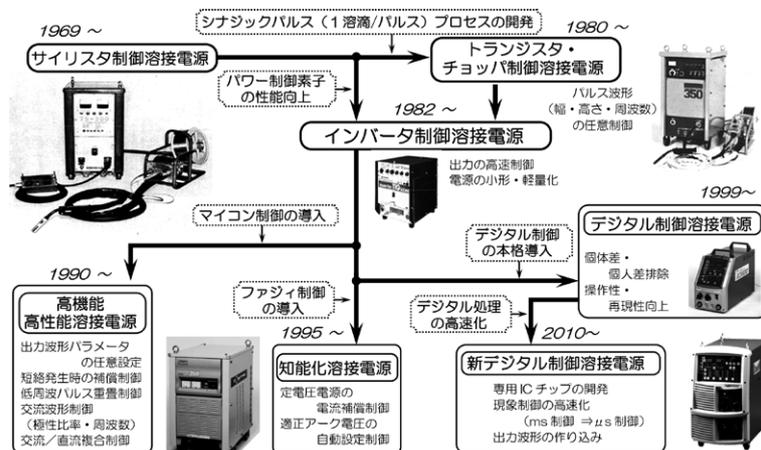


図 4.29 アーク溶接電源の開発経過

はパルス制御などが可能となったが、その制御は比較的単純なものに限られていた。現在のパルスマグ・ミグ溶接の原形となるシナージックパルス（1パルス1溶滴移行）プロセスを搭載したトランジスタ制御電源は1980（昭和55）年に開発され、世界初の汎用・低価格トランジスタ制御溶接電源として市販された。しかし1982（昭和57）年には、出力の高速制御性を活用したインバータ制御溶接電源の開発・実用化が本格化し、トランジスタ制御溶接電源は短期間で姿を消すこととなった。

その後のアーク溶接電源の進歩は、全てインバータ制御に基づくものであり、1990（平成2）年にはマイコン制御と組み合わせた高性能・高性能溶接電源が、1995（平成7）年にはファジィ制御を搭載した知能化溶接電源も出現した。そして20世紀末には、デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化が本格化した。制御回路の大部分をアナログ制御からデジタル制御へと変更することによって、溶接条件の再現性向上を目指した開発が進められた。近年では、高速演算素子を用いた出力制御の高速化が積極的に推進され、溶滴移行現象やアーク現象を高速で制御することができる高性能な溶接電源が市販されるようになってきている。

#### 4.4.1 サイリスタ制御電源

##### (1) マグ溶接電源

サイリスタ（制御機能付きシリコン整流器）の点弧位相を制御して出力を変化させるサイリスタ制御のアーク溶接電源は、世界に先駆けて、1969（昭和44）年に日立製作所がマグ溶接電源として開発した。図4.30（a）はその外観を示したものであるが、（b）に示す近年のマグ溶接機に比べても、大きい差異はほとんど認められない。

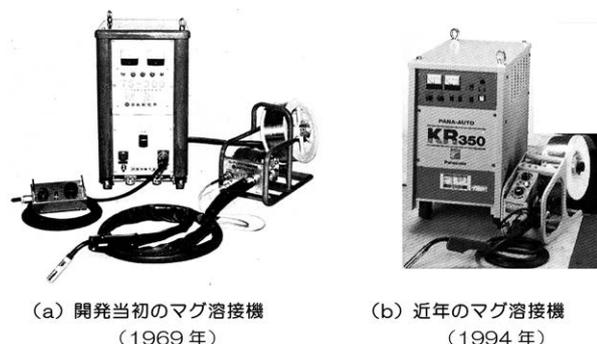


図 4.30 サイリスタ制御マグ溶接機<sup>6)</sup>

サイリスタ制御マグ溶接電源の回路構成としては、図4.31に示すような、相間トランス付の二重星形結

線が多用されている。星形結線された2つの三相変圧器の出力側コイルを相間トランスで結び、6個のサイリスタを用いて三相全波整流する。出力の大/小はサイリスタ点弧時間の長/短で決まり、サイリスタ回路で制御された出力はリアクタで平滑して溶接に用いる。なお二重星形結線の電源では、図4.32（a）に示すように、リアクタに制御巻線（二次巻線）を付加して、その動特性を改善することによってアークの起動性やスパッタ発生量の低減を図った電源も開発されている。（b）は他の回路構成を示す一例で、三相変圧器の出力側コイルを単体の星形結線として相間トランスを省略した三相全波整流の電源である。この場合、サイリスタ回路の出力リップル（脈動）はかなり大きくなるため、大容量（10,000 $\mu$ F程度）の平滑コンデンサを付加してリップルの低減を図っている。

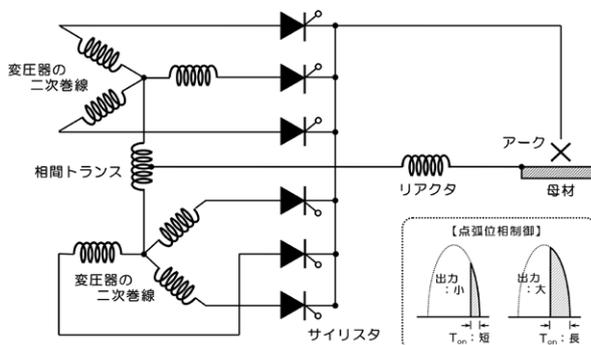


図 4.31 二重星形結線サイリスタ制御アーク溶接電源

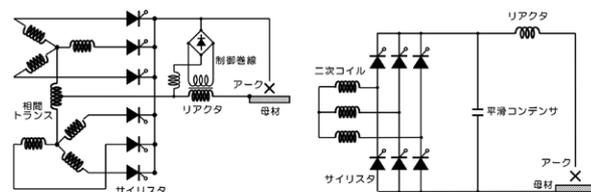


図 4.32 高性能サイリスタ制御電源

また、図4.33に示すように、サイリスタ・ダイオード混合方式の電源も開発されている。（a）はサイリスタ・スタックを用い、相間トランスを省略して回路を簡素化するとともに、電源の小型化・軽量化を図った電源である。（b）も相間トランスを省略した電源であるが、ダイオードの整流回路で得られる所定の出力にサイリスタ回路で得られる調整可能な出力を重ねて電源の出力を制御する。この方式では電圧リップルが大きくなるため、ダイオード回路とサイリスタ回路をそれぞれに設けリアクタの結合を利用してリップルを抑制している。上述した主な電源の溶接電流および

アーク電圧の波形は図 4.34 のようである。(a) は中間トランス付の二重星形結線電源 (図 4.31 参照) の場合であり、これを基準にすると、(b) の平滑回路付星形結線電源 (図 4.32 (b) 参照) での電流・電圧リップルは極めて少なく、(c) のサイリスタ・ダイオード混合方式電源でのリップルはやや大きくなっている。

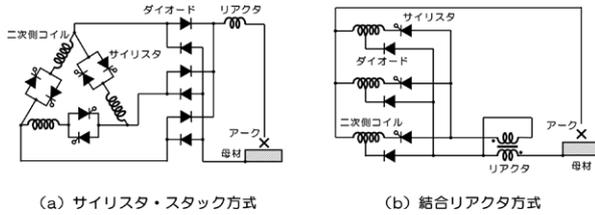


図 4.33 サイリスタ・ダイオード混合方式<sup>7)</sup>

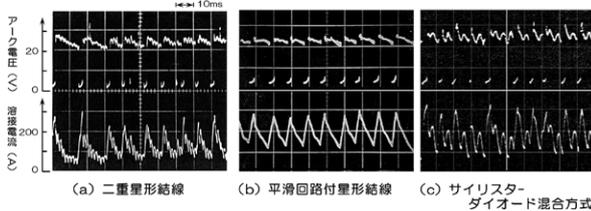


図 4.34 サイリスタ制御電源の溶接電流・電圧波形

炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) をシールドガスに用いるマグ溶接法は、1958 (昭和 33) 年に日本へ導入され、その優れた溶接性と高い経済性ならびに溶接機の性能向上などによって 1965 (昭和 40) 年以後急速に普及した。しかし溶接機の設置台数で見ると、1978 (昭和 53) 年時点での普及率は十数%程度にしか達しておらず、被覆アーク溶接用の交流アーク溶接機が大部分を占めていた。交流アーク溶接機は単相入力で使用するようになっており、工場全体としては三相で受電をしていますが、交流アーク溶接機の設置場所には単相で配線されていた。このような分野でのマグ溶接の適用拡大を目的として、単相入力のサイリスタ制御電源が開発されている。単相入力の整流波形は、図 4.35 (a) に示すように、三相入力の整流波形 (b) に比べ、電圧リップルが大きく瞬間的には電圧が零となる期間も生じる。そのため、単相入力のサイリスタ制御電源では、(c) に示すように、整流回路と並列に、コンデンサと飽和性リアクトルとで構成した平滑回路を付加して、出力 (電圧) の安定化が図られている。

1981 (昭和 56) 年には、世界に先駆け、サイリスタ制御マグ溶接機の全ての制御をマイクロコンピュータによって集中制御する溶接電源が開発された。熟練オペレータ不足、溶接品質の管理あるいは自動溶接化への対応などがその主な目的であった。その外観と

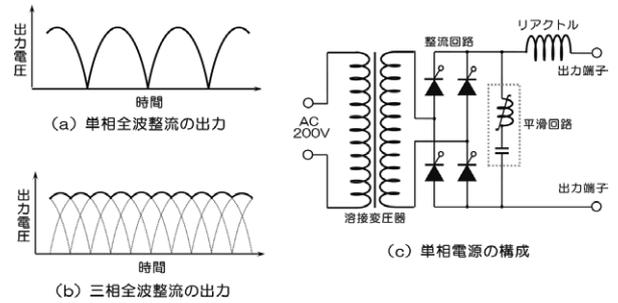


図 4.35 単相サイリスタ制御溶接電源<sup>8)</sup>

制御ブロック構成は図 4.36 のようであり、当時のマイクロコンピュータの性能としては限界に近いサイリスタの点弧位相制御を実現した。その他、適正溶接条件の記憶・再生機能、アーク休止中に使用可能な溶接条件の設定・確認機能、溶接電流に応じて適正電圧を自動設定する一元制御機能の精度向上、溶接条件や機器の異常モニタ表示機能など、従来電源になかった新しい機能も追加された。

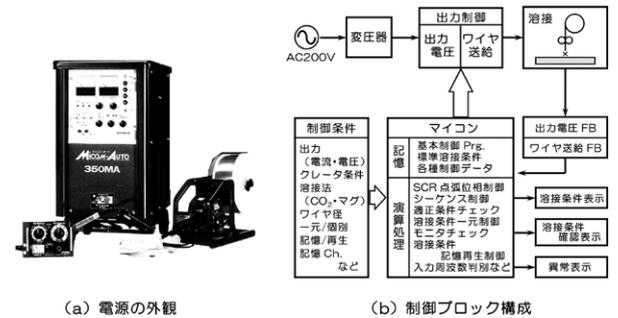


図 4.36 マイコン搭載サイリスタ制御電源<sup>9)</sup>

## (2) ティグ溶接電源

ティグ溶接に用いられるサイリスタ制御電源には、直流溶接電源と交流 / 直流両用溶接電源とがある。直流溶接電源の構成は図 4.37 のようであり、その構成は前述した整流式直流溶接電源 (前掲図 4.27 参照) とほぼ同様である。ただし、整流器をサイリスタと置き換えることによって、交流回路のリアクトルは省かれている。

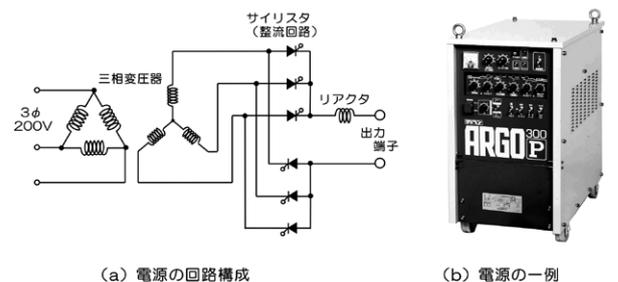


図 4.37 サイリスタ制御直流ティグ溶接電源

交流 / 直流両用溶接電源の構成は図 4.38 のようであり、直流溶接電源の場合と同様に、可動鉄心形交流 / 直流両用溶接電源（前掲図 4.21 参照）の整流器をサイリスタと置き換えた構成となっている。

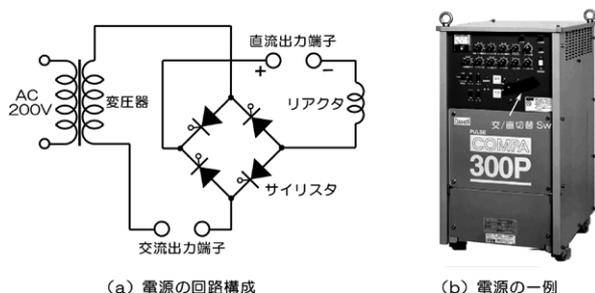


図 4.38 サイリスタ制御交流 / 直流両用ティグ溶接電源

### (3) パルスマグ・ミグ溶接電源

サイリスタ制御パルス電源は図 4.39 (a) に示すように、単相のパルス電源と三相のベース電源を組み合わせた構成となっており、パルス電流とベース電流はそれぞれ独立した電源回路から出力される電圧によって制御される。(b) はその溶接電流波形を模式的に示したものであり、三相全波整流によって発生する電流の脈動がそのままベース期間の電流リップルとなる。パルス電流は単相パルス変圧器出力の点弧位相制御で決まり、そのピーク値は正弦波上を移動する。そのため、パルス電流のピーク値が低い場合は幅が狭く、ピーク値が高くなるとその幅も広くなる。すなわちパルス電流のピーク値とパルス幅は連動して変化し、それぞれを独立に設定することはできない。なおパルス電源回路に半波整流回路を用いると商用周波数と同一のパルス周波数 (50/60Hz) が、全波整流回路を用いると商用周波数の 2 倍のパルス周波数 (100/120Hz) が得られる。

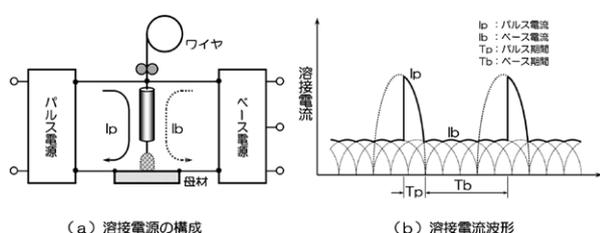


図 4.39 サイリスタ制御パルスマグ・ミグ溶接電源

パルスマグ溶接では、パルス電流で溶滴の形成およびワイヤ端からの離脱を行うため、臨界電流以上のパルス電流を通電することが必要である。しかし、サイリスタ制御電源のパルス電流の幅と高さは連動して変化し、それぞれを独立に設定することはできない。す

なわち、図 4.40 (a) に示すように、パルス電流波形はパルス変圧器の出力特性によって支配される。大電流を通電するためには通電時間（パルス期間）を長くしなければならず、溶滴離脱に必要なパルス電流を得ようとするパルス期間が長くなり、パルスエネルギーが過剰となって安定した溶滴移行が得られない。高いピーク値や急峻な電流増加が要求される場合には、高出力のパルス変圧器を用い、正弦波の急峻な傾斜部のみを用いてパルス電流を制御するなどの工夫が必要となる。一方、溶接電流が臨界電流以上になると、パルス電流を加えなくても溶滴のスプレー移行を実現できる。しかし、パルス電流を付加することによって、アーク長を短くしても短絡を生じないアーク状態が得られる（前述 3.7.5 項 (1) 参照）。開先幅の狭い狭開先溶接では、アーク長が長くなると開先底部より開先壁にアークが発生しやすくなるため、アーク長を極力短くすることが重要である。ベース電流を臨界電流近傍に設定した大電流パルス溶接では、アーク長を短くするために必要なパルス電流はベース電流の 1/5 程度であり、小電流パルス溶接のように落差の大きいパルス電流を必要としない。すなわちアーク状態はベース電流によって支配されるため、ベース電源の特性によってアークの安定性や溶接結果が大きく左右される。そのため、電源のインピーダンスや電流リップルが大きいと、アーク長を短く保つことができず、融合不良などの溶接欠陥を生じやすいといった問題が生じる。

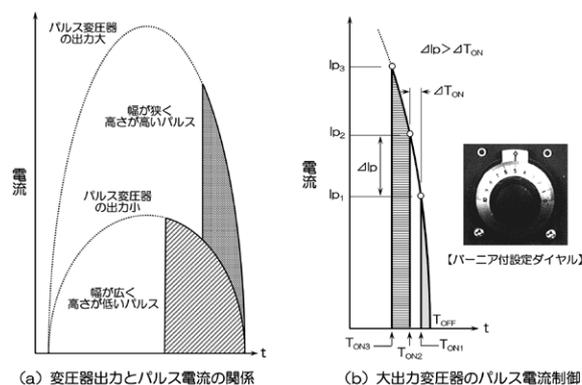


図 4.40 パルス電流の特性

これらの問題点を解決した高機能なサイリスタ制御パルスマグ溶接電源が 1979（昭和 54）年に開発されている。この電源では、パルス電源の変圧器に最大出力 2,000A 程度のパルス変圧器を採用し、幅が狭く高さが高いパルス波形が得られるようにしている。しかし、このようなパルス変圧器で数百 A のパルス電流を正確に出力するには、図 4.40 (b) に示すように、サ

イリスタの点弧位相を正弦波の急峻な傾斜部で微妙に設定しなければならない。そのため、パルス電圧の設定ダイヤルには100等分できるバーニア機構が用いられている。電源の構成は図4.41のようであり、ベース電源の変圧器をデルタ結線として相間トランスをなくし、電源のインピーダンス低減を図っている。またベース電源の出力端に大容量（約1万 $\mu\text{F}$ ）のコンデンサを付加して、電流リップルの大幅低減を実現している。なお小電流の安定化を目的として、ベース電流は抵抗を介して通電するようにしているが、十分なベース電流を確保する必要がある大電流パルス溶接時には、ベース電源回路の抵抗を短絡（ $\text{Sw}_2$ をOFF）できるようにしている。

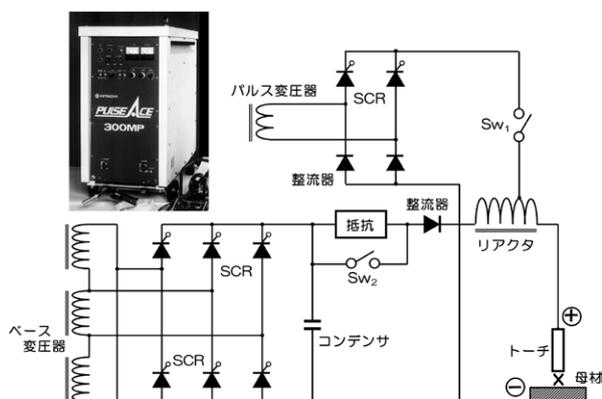


図 4.41 高機能パルスマグ溶接電源

パルス電源回路のスイッチ（ $\text{Sw}_1$ ）と抵抗の短絡スイッチ（ $\text{Sw}_2$ ）の両者をOFFすると、低インピーダンス・低電流リップルの定電圧特性電源として使用できる。したがって、このパルス電源では、「パルスなし溶接」、「小電流パルスマグ溶接」および「大電流パルスマグ溶接」の3溶接モードの選択が可能となる。それぞれの電流・電圧波形およびアーク現象の代表例を表4.1に示す。

表 4.1 溶接電流・アーク電圧波形とそのアーク現象

電流・電圧波形	アーク現象
	(a) パルスなし（短絡移行）溶接・120A/18V
	(b) 小電流パルス溶接・130A/23V
	(c) 大電流パルス溶接・300A/30V

(10ms/div)  $\phi 1.2\text{mm}$  ソリッドワイヤ、シールドガス：Ar+20%CO<sub>2</sub>

また1970年代後半には、図4.42に示すような、パルスミグ・ブレイズ溶接機も開発されている。この溶接機は、シリコン・ブロンズワイヤ（数%のSiを含む銅ワイヤ）を用いて、自動車ボデーなどの薄鋼板をアークろう付けする溶接機である。それまでは自動車ボデーに多用されているせぎり継手の溝をはんだで充填していたが、鉛害が問題となってはんだを使用することができなくなった。そのため、はんだに替わるせぎり継手の溝充填方法として、シリコン・ブロンズワイヤを用いたパルスミグ・ブレイズ溶接が採用された。溶接電源は単相入力で、抵抗への通電によって安定化された小電流をベース電流とし、それにパルス電流を重畳する。ミグ・ブレイズ溶接の電流波形と溶接結果の一例を図4.43に示す。

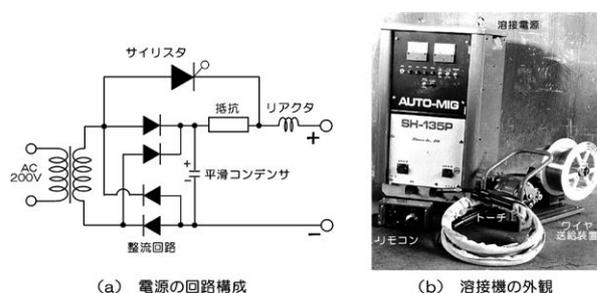


図 4.42 パルスミグ・ブレイズ溶接機

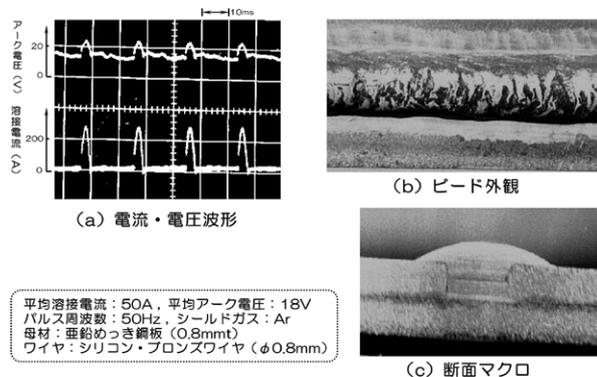


図 4.43 ミグ・ブレイズ溶接

#### 4.4.2 トランジスタ制御電源

トランジスタ制御電源では、直流電源部と負荷との間にパワートランジスタを接続し、このトランジスタで溶接電流やアーク電圧を制御する。制御方式には、図4.44に示すように、スイッチング制御とアナログ制御とがある。スイッチング制御では、トランジスタをスイッチとして用い、その開閉時間の比率を変化させることによって出力を制御する。そのためスイッチング制御では、出力の複雑な波形制御はできない。一方、アナログ制御では、制御信号に比例する領域でト

ランジスタの出力を制御することによって、トランジスタに可変抵抗と同様の役割を持たせる。すなわちアナログ制御でのトランジスタの出力は、いずれの瞬間においても制御信号に比例した出力となり、矩形波、台形波あるいは三角波などの形状も任意に実現することができる。

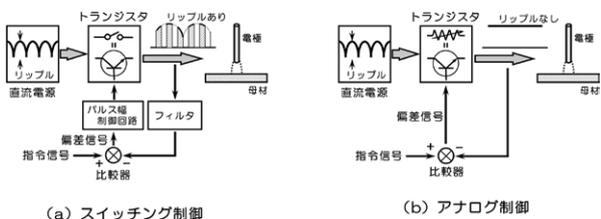


図 4.44 制御方式の比較<sup>10)</sup>

アナログ・トランジスタ制御電源の回路構成は図 4.45 のようであり、電流および電圧に対応する 2 つのフィードバック制御系を持つ。そのため出力電流と出力電圧を任意に設定でき、出力波形、リアクトルの特性あるいは外部特性などを自由に作り出すことができる。また電流波形は、全くリップルのないものが得られる。この電源は英国の TWI で試作され、1976 (昭和 51) に技術導入契約を締結した大阪変圧器が、その翌年に図 4.46 のような電源を開発して国内での販売を開始した。出力の制御装置はユニット化されており、各ユニット間の信号の受・送信は前面パネルのプラグイン式コンセント間の接続によって行う。出力の外部特性を定電流から定電圧まで任意に設定できる万能直流電源で、1~800A までの任意な急峻パルスをも 1/1,000 秒 (1ms) で出力することが可能であった。そのため、アーク現象の解明、溶接品質の改善あるいは溶接プロセスの研究・開発などに取り組んでいた大学、研究所、大手企業がこぞってこの電源を購入した。その後この溶接電源を用いた研究・開発が積極的に推進され、今日のアーク溶接プロセスの進展に極めて大きく貢献した。

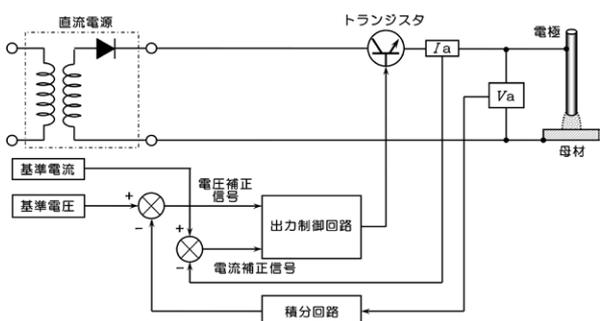


図 4.45 アナログ・トランジスタ制御電源の回路構成<sup>10)</sup>

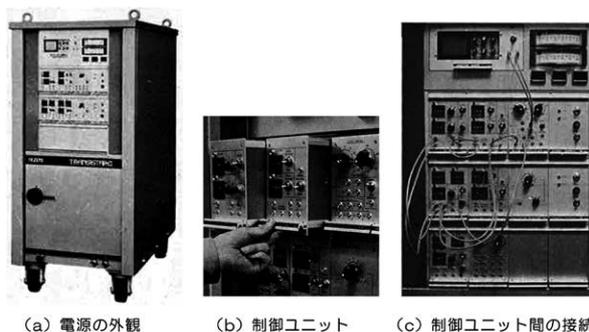


図 4.46 アナログ・トランジスタ制御電源<sup>10)</sup>

1980 (昭和 55) 年に三菱電機が、汎用溶接電源としては世界初となる、図 4.47 に示すようなトランジスタ制御溶接電源を開発した。この電源は出力のチョッパ (スイッチング) 制御によってパルス電流を制御するもので、ワイヤの送給速度に同期してパルス周波数を変化させるシナージックパルス溶接プロセス (前述 3.7.2 項参照) を実現するパルスマグ溶接電源としても世界に先駆けたものであった。また少し遅れて、大阪変圧器や松下産機も同様のパルスマグ溶接電源を開発している。



図 4.47 トランジスタ・チョッパ制御電源<sup>11)</sup>

電源の構成は図 4.48 のようであり、サイリスタ制御のパルス電源に比べると構成は簡素化され、パルス出力、ベース出力ともに同一の溶接変圧器を使用する。しかし、出力制御回路はパルス出力、ベース出力それぞれに対応したものが必要である。パルス出力を制御するトランジスタ ( $Tr_2$ ) で制御されたパルス出力は直流リアクタ  $DCL_2$  を介して、ベース出力を制御するトランジスタ ( $Tr_1$ ) で制御されたベース出力は直流リアクタ  $DCL_1$  および  $DCL_2$  を介して溶接アークへ供給される。なおダイオード  $D_1$  ならびに  $D_2$  は、それぞれ直流リアクタ  $DCL_1$ 、および  $DCL_2$  に対応するフライホイール・ダイオードである。トランジスタ

は、電流値が目標値（パルス電流またはベース電流）より所定量が小さく（ $-\alpha$ ）になると導通を開始し、目標値より所定量が大きく（ $+\alpha$ ）になると導通を停止する。 $\alpha$ は制御回路のヒステリシス（応答遅れ）である。

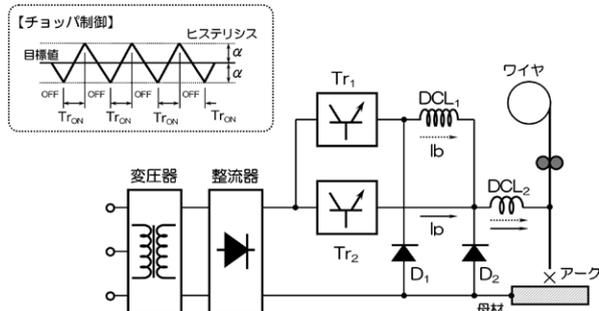


図 4.48 トランジスタ・チョッパ制御パルスマグ溶接電源

増減によって行う。なお、サイリスタ制御やトランジスタ・チョッパ制御などでは変圧器の出力側で電源の出力を制御するが、インバータ制御では変圧器の入力側で電源の出力を制御する。

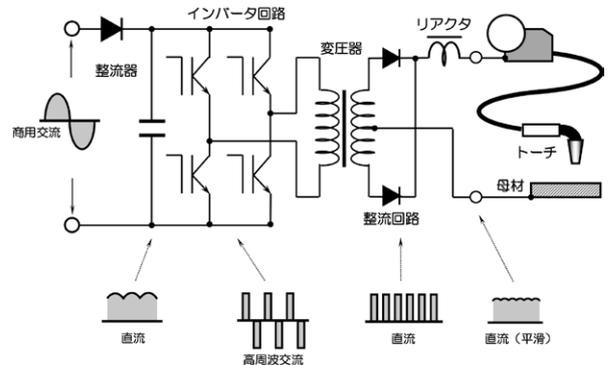


図 4.49 インバータ制御溶接電源の構成

#### 4.4.3 インバータ制御電源

電力変換回路へのインバータ制御の適用は1950年代に考案され、当初は、1950年代後半に出現したサイリスタを制御素子としたサイリスタ・インバータが主流であった。その後、制御素子はパワートランジスタやGTO (Gate Turn-off Thyristor) に移行し、1970年代後半から1980年代前半にかけてインバータ制御技術は急速に進展した。この時期の欧州では、すでにインバータ制御アーク溶接電源が開発されているが、制御素子はサイリスタで制御周波数もそれほど高いものではなかった。わが国で最初にインバータ制御アーク溶接電源が開発されたのは1982（昭和57）年で、松下産機（元松下電器産業 / 現パナソニック溶接システム）が直流ティグ溶接電源として発表した。また1983（昭和58）年には日立精工（日立製作所から分離）が、制御周波数16kHzのインバータ制御電源を開発し、溶接電源の大幅な小型・軽量化を実現した。同年には、松下産機がインバータ制御のマグ溶接電源の販売を始めている。

インバータ制御電源の構成は図4.49のようである。商用交流を整流して得た直流を、変圧器の入力側（1次側）に設けたインバータ回路に入力し、パワートランジスタで構成したインバータ回路でその直流を高周波交流に変換する。そして、得られた高周波交流を変圧器で所定の電圧に降圧した後、整流回路で再び直流に変換して溶接電源の出力とする。この時得られる直流は断続的なくし歯状のものであるため、リアクタで変動の少ない連続した直流に平滑して溶接に用いる。出力の制御はインバータ回路を構成するトランジスタの導通時間の増減、またはインバータの制御周波数の

インバータ回路に用いられるパワースwitching素子には表4.2に示すようなものがあり、出力制御周波数など、インバータ回路の制御特性はこれらの素子によって大きく左右される。わが国では、当初バイポーラトランジスタが多く用いられた。しかしその後は、比較的高耐圧で駆動特性に優れたIGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）が主流となり、近年では高速制御性が良好なMOSFET（金属酸化半導体構造・電界効果トランジスタ）が多用されている。インバータ制御による出力の制御方法には、表4.3に示すように、周波数（FM）制御とパルス幅（PWM）制

表 4.2 パワー・スイッチング素子の特徴比較

素子名称	バイポーラトランジスタ	IGBT	MOSFET
表示記号			
電流量	◎ ~1,000A	○ ~500A	△ ~100A
耐電圧	○ ~1,000V	◎ ~1,500V	△ ~500V
制御周波数	△ ~7.5kHz	○ ~20kHz	◎ ~100kHz
駆動特性	△ 電流駆動 (ドライブ電流大)	○ 電圧駆動 (ドライブ電流小)	◎ 電圧駆動 (ドライブ電流小)

表 4.3 インバータの出力制御方法

出力制御方法	周波数変調	パルス幅変調
	FM (Frequency Modulation)	PWM (Pulse Width Modulation)
インバータ出力		
外部出力		
インバータ周波数	変動	一定
出力制御因子	周波数	パルス幅
変圧器の種類	漏洩変圧器	定電圧変圧器

御との2つがある。開発当初の電源では周波数制御が用いられていたが、電流値によってアーク音が変化するなどの問題があり、近年の電源には全てパルス幅制御が採用されている。

インバータ制御電源は、サイリスタ制御電源に比べ、かなり複雑な回路構成となるが、出力を高速で制御できるという長所を持つ。例えばインバータ回路で40kHzの高周波交流を造ると、その出力制御回数は4万回/秒となり、サイリスタ制御の約100倍以上の速度で出力を制御できる。図4.50の溶接電流波形は、ティグアーク起動時の電流挙動を比較したものである。所定の電流値(100A)へ到達するまでに、単相サイリスタ制御で90ms以上、三相サイリスタ制御で約35msの時間が必要である。一方、インバータ制御ではほぼ瞬時に(数μsで)設定値へ到達しており、出力の制御性は制御周波数に大きく依存することがよく分かる。すなわち、インバータ制御ではサイリスタ制御の百~数百倍の速度で出力を制御できるため、ほぼ瞬時に設定された出力が得られ、このような出力の高速制御性はアーク起動性能の向上・電流波形制御によるスパッタの低減・抑制などに極めて有効となる。

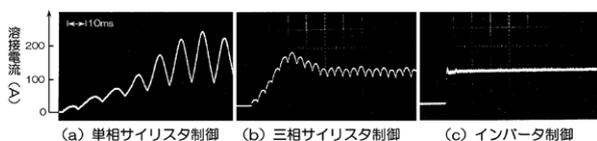


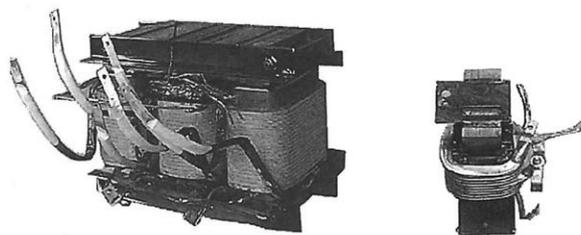
図 4.50 アーク起動時の溶接電流挙動

溶接変圧器の出力には、下式で示すような関係がある。

$$\text{変圧器出力} = \text{磁束密度} \times \text{変圧器体積} (\text{: 鉄心断面積} \times \text{コイルの巻数}) \times \text{出力制御周波数}$$

すなわち、溶接電源の出力制御周波数と変圧器の体積との間には、ほぼ反比例する関係がある。そのため、出力制御周波数が高いインバータ制御電源の変圧器は、図4.51に示すように、サイリスタ制御電源の変圧器に比べ大幅に小形・軽量化される。その結果溶接電源の質量は、図4.52に示すように、サイリスタ制御電源の1/4~1/2程度まで軽減される。さらに、インバータ制御では直流をパルス幅制御して出力を制御するため、点弧位相制御で出力を制御するサイリスタ制御より力率は向上する。またインバータ回路は変圧器の入力側に設けられるため、休止中の変圧器への負荷は加わらず無負荷損失をカットできる。溶接電流と溶接電源への入力電流との関係は図4.53のようであり、いずれの溶接法においても、インバータ制御電

源への入力電流はサイリスタ制御電源の場合より小さい。インバータ制御電源の特長をまとめると表4.4のようである。



(a) サイリスタ制御電源の変圧器 (b) インバータ制御電源の変圧器

図 4.51 溶接変圧器の比較

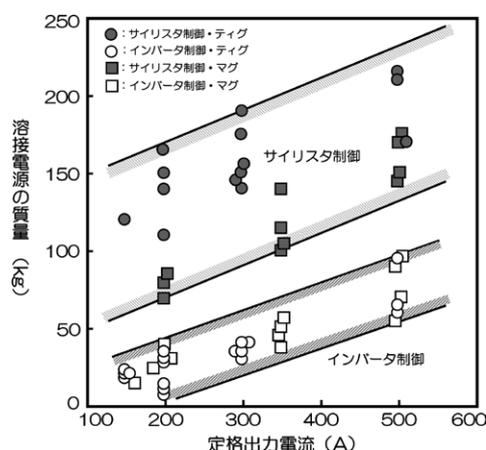


図 4.52 溶接電源の定格出力と質量の関係

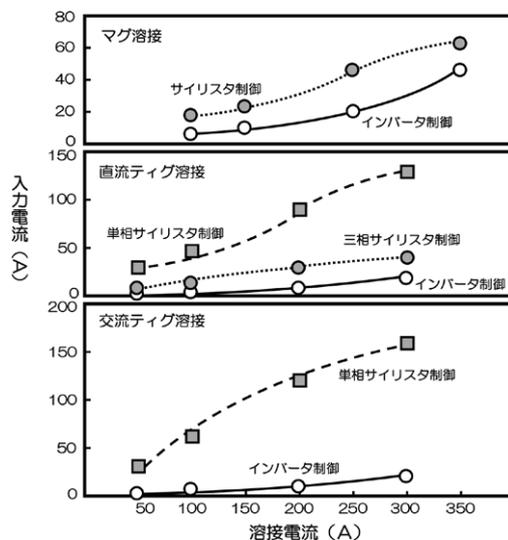


図 4.53 溶接電流と入力電流の関係

1986(昭和61)年には、パルスマグ・ミグ溶接電源にもインバータ制御が導入された。表4.5に示すように、サイリスタ制御電源ではパルス電流とパルス幅が連動し、それぞれを独立に制御することはできなかった。またパルス周波数も、商用周波数またはその

表 4.4 インバータ制御溶接電源の特長

特 長										
出力の高速制御	◎ 高周波制御による出力制御速度の向上 <table border="1"> <tr> <th>制御方式</th> <th>制御回数 (回/秒)</th> <th>応答速度比</th> </tr> <tr> <td>サイリスタ制御</td> <td>100~300</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>インバータ制御</td> <td>数万~10万</td> <td>数百~千</td> </tr> </table>	制御方式	制御回数 (回/秒)	応答速度比	サイリスタ制御	100~300	1	インバータ制御	数万~10万	数百~千
制御方式	制御回数 (回/秒)	応答速度比								
サイリスタ制御	100~300	1								
インバータ制御	数万~10万	数百~千								
電源の小形・軽量化	◎ 制御周波数増加による変圧器の小形化 (制御周波数と変圧器体積は反比例する) $E = 4 \times B \times A \times n \times f$ (変圧器出力) (変圧器体積) B: 磁束密度, A: 鉄心断面積 n: コイル巻数, f: 制御周波数									
省エネルギー	◎ PWM制御による力率の向上 ◎ 溶接休止中の無負荷損カット									

表 4.5 パルスマグ・ミグ溶接電源の推移

種類	サイリスタ制御溶接電源	トランジスタ制御溶接電源	インバータ制御溶接電源
時期	1975~(1981頃)	1979~(1990頃)	1986~
電流波形			
回路構成			
パルス波形	高さ・幅は連動	高さ・幅は任意に設定可能(独立制御可)	
パルス周波数	商用周波数またはその倍	任意に設定可能(商用周波数による制約なし)	
電源特性	定電圧特性		定電流特性
アーク長制御	不要(電源の自己制御作用)		アーク電圧フィードバックによるアーク長制御

倍数に限定されていた。トランジスタ・チョッパ制御電源の開発によって、パルス電流とパルス幅の独立設定およびパルス周波数の任意設定が可能となり、パルス電流に同期した1パルス1溶滴移行がいずれの電流域においても実現できるようになった。そしてインバータ制御電源では、それまで別回路として設けられていたパルス出力部は姿を消し、制御信号のみでパルス電流とベース電流とをそれぞれ制御できるようになった。また電流リップルは大幅に抑制され、パルス波形の急峻化も実現した。

1986(昭和61)年には、インバータ制御の交流溶接電源が開発された。この電源は、図4.54に示すように、変圧器の入力側と出力側とにそれぞれインバータ回路を持つ。十数~数十kHzの高周波数で駆動される入力側のインバータは出力を、数百Hz以下の比較的低い周波数で駆動される出力側のインバータは極性を、それぞれ独立に制御する。極性による出力レベル差や極性維持時間の大幅なアンバランスが存在しても、サイリスタ制御電源などのように溶接変圧器を焼損することなく、極性時間比率を大きく変化させてビード形状を制御することも可能である。またサイリスタ制御電源では、図4.55に示すように、極性の反転時に短時間(約0.3ms)の電流休止時間が発生してアークの消弧が生じる。そのため、アークのスムーズ

な再点弧を目的として、溶接中は高周波高電圧を常時重畳している。しかしインバータ制御電源では極めて短時間で極性を反転させることが可能となり、極性反転時にも高周波高電圧の重畳なしでアークを再点弧することができる。高周波高電圧は、前述3.4.3項(4)で述べたように、強い電磁ノイズに起因した電波障害を引き起こす恐れがある。インバータ制御交流溶接電源では、高周波高電圧をアーク起動時のみ用い、溶接時には使用しないため、高周波高電圧の電磁ノイズによって生じる電波障害は大きく低減される。

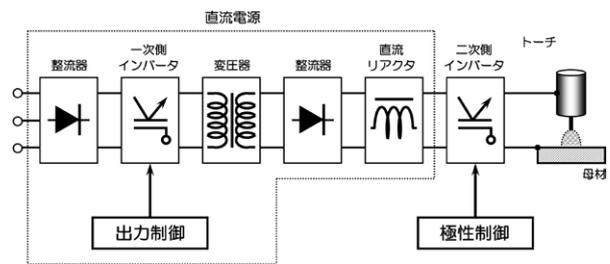
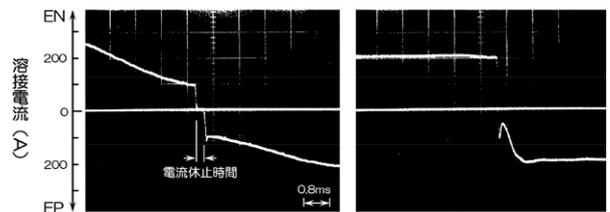


図 4.54 インバータ制御交流溶接電源の構成



(a) サイリスタ制御 (b) インバータ制御

図 4.55 極性反転時の電流の挙動

#### 4.4.4 デジタル制御電源

デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化は20世紀末から本格化し、制御回路の大部分がアナログ制御からデジタル制御へと変更された。溶接電源デジタル化の当初の目的は、電源が持つ個体差の排除、個人差による設定誤差の抑制あるいは操作性・再現性の向上などを目指した初期段階的なデジタル化にすぎなかったが、近年では高速演算素子による出力制御の高速化が積極的に推進され、溶接現象やアーク現象を高速で制御して溶接特性や作業性を大幅に改善した高性能な溶接電源が市販されるようになった。

アーク溶接電源へのデジタル制御の適用は表4.6に示すように推移してきた。シーケンス制御のデジタル化は比較的早くから取り組まれ、1970年代後半にはICロジック回路の適用が始まり、1980年代に入ると一部でマイクロコンピュータを用いたデジタル制御が採用され始めた。そして1990年代になると、溶接電源の全てのシーケンス制御はデジタル化された。溶接

プロセスに関わる電流波形制御は長い間アナログ制御であったが、1990年代後半になると一部にデジタル制御が採用され、アナログとデジタルの混合制御となった。電流波形制御が全てデジタル制御化されたのは、高速演算処理が可能なマイクロプロセッサが開発・市販されるようになった2002年以降である。なお出力制御信号のデジタル化は2000年頃から行われるようになり、溶接電源もデジタル制御電源と呼ばれるようになった。またサイリスタ制御電源においても、表示・操作部を除き、デジタル化が進展している。

表 4.6 溶接電源デジタル化の推移

電源	時期	出力	電流波形制御	シーケンス制御	メータ	操作パネル	リモコン
サイリスタ電源	1970年代後半	アナログ制御	アナログ制御	ICロジック	アナログ	アナログ	アナログ
	1981年			デジタル制御			
	2000年	デジタル制御	デジタル制御				
インバータ制御電源	1983年		アナログ制御	ICロジック			
	1990年						
	1994年	アナログ制御	アナログ制御 + ファジィ制御	デジタル制御	アナログ	アナログ	アナログ
デジタル制御電源	1996年		アナログ制御 + デジタル制御				
	2000年	デジタル制御	デジタル制御	デジタル制御	デジタル	デジタル	デジタル (アナログ)
	2002年		デジタル制御				

2000（平成12）年に市販されたデジタル制御ティグ溶接電源では、図4.56に示すように、前面パネルからボリューム類は全て排除され、“ジョグ・ダイヤル”と呼ばれるロータリーエンコーダが設けられた。ロータリーエンコーダは、ダイヤルの回転によって設定される値を、その回転に応じて発生するパルス数のカウントによって読み込むデジタル入力器で、溶接条件や各種パラメータの設定は全てこのジョグ・ダイヤルによって行われる。



図 4.56 ジョグ・ダイヤル操作のティグ溶接電源

デジタル制御マグ溶接電源の構成の一例を示すと図4.57のようであり、出力を制御する主回路の構成は従来のインバータ制御電源と全く同一である。デジタル制御は電源の出力や種々な動作を制御するために用いられ、電源の前面パネルやワイヤ送給装置とは同期シリアル通信で、デジタルリモコン（あるいはティーチ

ングペンダント）とはCANバスで結ばれている。また、A/D変換器を用いることによって従来のアナログリモコンも使用可能となり、デジタル式のリモコンあるいは溶接ロボットのティーチングペンダントを接続すると溶接モードや設定データを遠隔で変更することもできる。電源に搭載されたマイクロコンピュータは、インバータ回路を駆動するための制御信号（PWM制御）、前面パネルの表示およびワイヤ送給装置などを制御する。

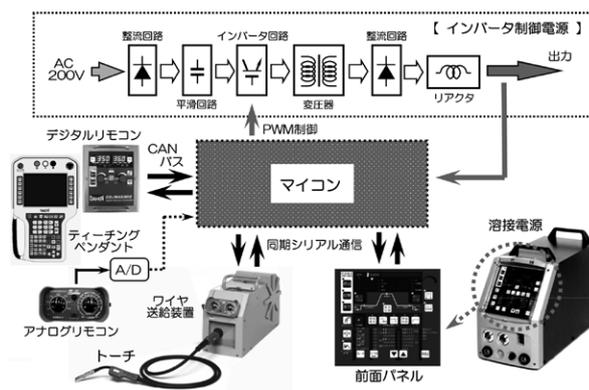


図 4.57 デジタル制御電源の構成

デジタル制御電源の制御部の概要は図4.58のようであり、出力、ワイヤ送給、シールドガスおよび各種シーケンスの制御の他、電源パネルの表示あるいは各種センサ信号に基づく動作などが全てデジタル信号で処理される。データベースの一部は、ユーザが自由に書込み・呼出しができるように、EEPROMを搭載するなどの工夫もなされている。また通信機能を利用して、外部の制御装置やIT機器と接続することも可能であり、ロボットのティーチングペンダントなどから

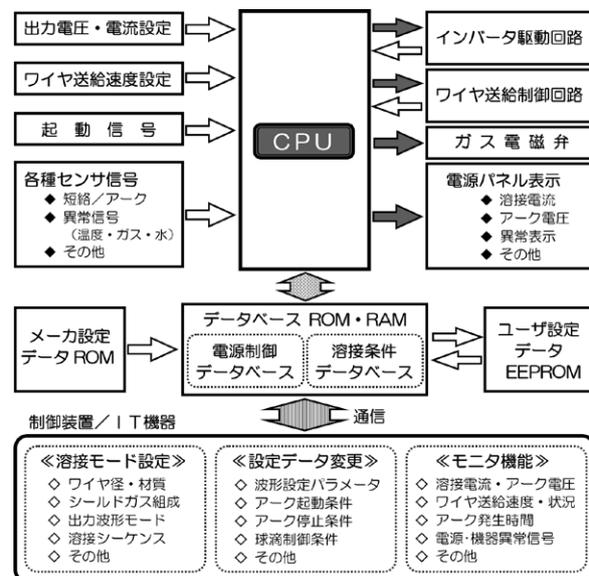


図 4.58 アーク溶接電源のデジタル制御

の信号によって、溶接モードや設定データを変更することもできる。

溶接電源と溶接ロボットとの間の信号の授受は、一般にインターフェイス (IF) を介して行われる。しかしIFを介することによって、信号のタイミングにわずかであるが遅れが発生し、場合によっては溶接結果に悪影響を及ぼすこともある。このような問題を解決するために、溶接電源とロボット制御装置を一体化したものが開発されている。図 4.59 はその一例を示したもので、ロボット制御装置の下部に電源ユニットが内蔵されている。ハードウェア構成の概要は図 4.60 のようであり、ロボット側から見ると、電源ユニットやワイヤ送給ユニットは、ロボットの関節軸や外部軸と同様に取り扱われる。

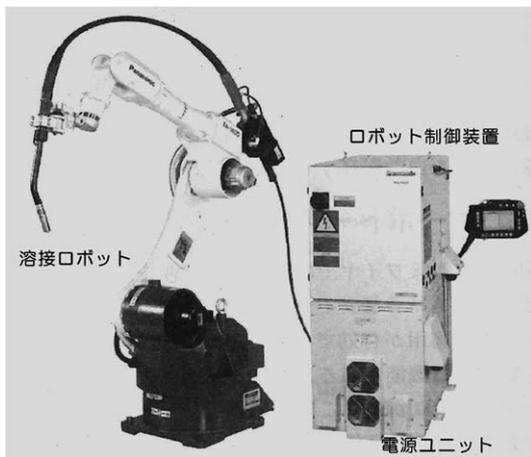


図 4.59 溶接電源とロボット制御装置の一体化<sup>14)</sup>

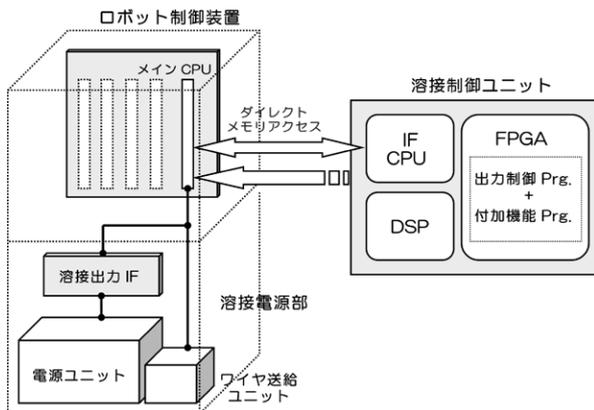


図 4.60 溶接電源一体化ロボット制御装置の構成<sup>15)</sup>

なおデジタル制御溶接電源には、品質管理に対応するために、図 4.61 に示すような、溶接電流やアーク電圧の出力結果、溶接時間、ワイヤ消費量などの各種データを記録・管理する機能 (ウェルディングモニタ)、イーサネット (Ethernet) やインターネット (Internet) を利用して多数の溶接電源を一括管理す

るシステムへの対応機能なども装備されている。

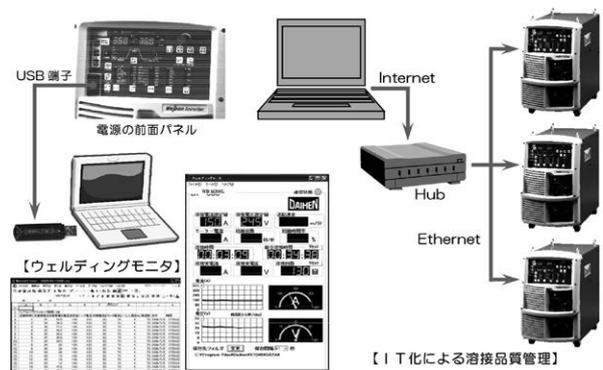


図 4.61 デジタル制御溶接電源の品質管理機能

溶接電源のデジタル制御化はインバータ回路の制御周波数増加にもつながり、表 4.7 に示すように、近年では出力制御周波数 100kHz の溶接電源も出現し、電源の小形・軽量化がより一層進行している。また、デジタル制御を採用したサイリスタ制御溶接電源も開発されているが、そのデジタル化はインバータ制御溶接電源のデジタル化と様相が少し異なり、出力制御の高速化より機能性・操作性の向上に主眼を置いたものとなっている。

表 4.7 溶接電源の種類と特徴

溶接電源の種類	サイリスタ制御溶接電源		インバータ制御溶接電源	デジタル制御溶接電源
開発時期	1969~	2000~	1983~	1999~
電源の外観				
制御方式	主回路	サイリスタ制御		インバータ制御
制御回路	アナログ制御	デジタル制御	アナログ制御	デジタル制御
出力制御周波数	100/120 ~ 300/360Hz	300/360Hz	15 ~ 40kHz	80 ~ 100kHz
外形寸法 (mm) (幅×奥行×高さ)	380×660 ×659	372×690 ×659	376×549 ×613	250×560 ×370
質量 (kg)	103		47	28

デジタル制御電源に用いられる演算素子は、マイクロコンピュータの高速処理化・メモリの大容量化ともなって表 4.8 に示すように推移してきた。当初は 16

表 4.8 デジタル制御溶接電源の変遷

時期	第1世代 1966~2000	第2世代 2001~	第3世代 2008~	第4世代 2010~
電源外観				
演算素子	16bit マイコン	32bit マイコン	FPGA*	ASIC**
演算速度	100 μs	25 μs	1 μs	20ns (0.02 μs)
処理量	1	4	16	64

\* FPGA : Field Programmable Gate Array  
\* ASIC : Application Specific Integrated Circuit

ビット・マイクロコンピュータや32ビット・マイクロコンピュータが採用されていた。しかし近年では、汎用的なゲートアレイであるFPGA (Field Programmable Gate Array) や、溶接電源の制御に特化した専用のLSI (Large Scale Integration) であるASIC (Application Specific Integrated Circuit) を採用した電源も開発され、演算速度や情報の処理量は格段に向上している。

主なアーク溶接現象の動作時間は図4.62のようである。高い出力制御周波数を持つ近年のデジタル制御溶接電源は、大部分の溶接現象に十分対応できる制御速度を持つようになり、最も高速な現象とされている陰極点の挙動も制御できるレベルに達しているといえる。しかし、それらの挙動をどのように制御するかはまだ十分に解明されているとはいえず、今後のさらなる研究・開発の課題となっている。

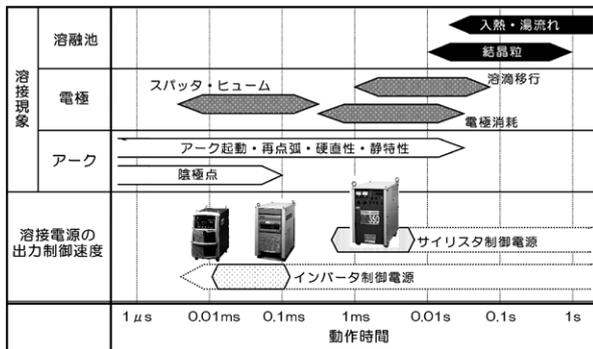


図 4.62 主な因子の動作時間と溶接電源の出力制御速度

### 参考文献

1) 溶接五十年史編集委員会:溶接五十年史, 1962年, 産報

2) (株)ダイヘン:ダイヘン八十年史, 2001年  
 3) 安藤 他:新版電気溶接機機(上), 1957年, 産報  
 4) 鈴木:最新溶接ハンドブック(増補版), 山海堂(1962)  
 5) 中村春雄記念ライブラリー:溶接文献資料, SANPO WEB, 産報出版  
 6) 社史「産機のあゆみ」編集委員会:産機のあゆみ(産業機器事業50年&松下産業機器20年), 1997年  
 7) 野田 他:炭酸ガス・アーク溶接機(NAS-AUTOシリーズ), 溶接技術1975年10月号, PP. 40~47, 産報出版  
 8) 奥 他:半自動アーク溶接機の進歩, 溶接技術1978年5月号, PP. 25~31, 産報出版  
 9) 麻生 他:マイクロコンピュータ制御・CO<sub>2</sub>自動溶接機(日立マイコンオートについて), 溶接技術1981年5月号, PP. 29~31, 産報出版  
 10) 山手:アナログ・トランジスタ式溶接電源について, 溶接技術1977年8月号, PP. 71~76, 産報出版  
 11) 鶴飼 他:トランジスタパルスマグ半自動溶接機の特性, 溶接技術1981年7月号, PP. 31~40, 産報出版  
 12) 坂部 他:インバータ制御アーク溶接機, 溶接学会誌, Vol.55(1986), No.7, PP. 31~40  
 13) 大崎 他:小型フルデジタル制御溶接機の開発, 溶接技術2000年8月号, PP. 56~62, 産報出版  
 14) 林:フルデジタル溶接電源一体型ロボットの開発, 溶接技術2003年1月号, PP. 72~75, 産報出版  
 15) 川本:溶接電源融合型ロボット「TAWERS」のアーク溶接制御, 溶接技術2005年12月号, PP. 86~89, 産報出版

# 5 | 溶接材料の発展経過

わが国のアーク溶接は、被覆アーク溶接法の発明から遅れること10年、1914（大正3）年に三菱長崎造船所がスウェーデンから被覆アーク溶接棒を輸入し実用化検討を始めたことに始まる。そして、1925（大正14）年には被覆アーク溶接棒の国産化が始まり、艦船を中心に压力容器や橋梁などにも適用が拡大していった。1950（昭和25）年になるとサブマージアーク溶接機が輸入され、造船所で使用が始まった。その後1960（昭和35）年頃までに、ティグ溶接・ミグ溶接・マグ溶接（含炭酸ガス溶接）などのガスシールドアーク溶接が導入された。

アーク溶接に用いられる溶接材料その国内生産量は、図5.1に示すように推移してきた。1970年代前半までの溶接材料の急激な進展は、ほとんどが被覆アーク溶接棒によるものである。1950年代から1973（昭和48）年の第1次石油ショックまでの、高度経済成長に伴う重厚長大産業の発展期には、被覆アーク溶接棒が溶接材料の主役であった。溶接構造物は大型化・高級化が進み、新しい鋼材が開発され、それに伴って溶接材料の低水素化・高強度化・高靱性化が進められた。1973年における被覆アーク溶接棒が溶接材料の生産量に占める比率は73%に達し、被覆アーク溶接は最盛期を迎えていた。また高効率な溶接法も積極的に開発され、人と物を大量に投入して増産を図る技術、例えば、被覆アーク溶接棒を用いたグラビティ溶接、片面サブマージアーク溶接あるいはフラックス入りワイヤを用いたエレクトロガスアーク溶接などが発達した。

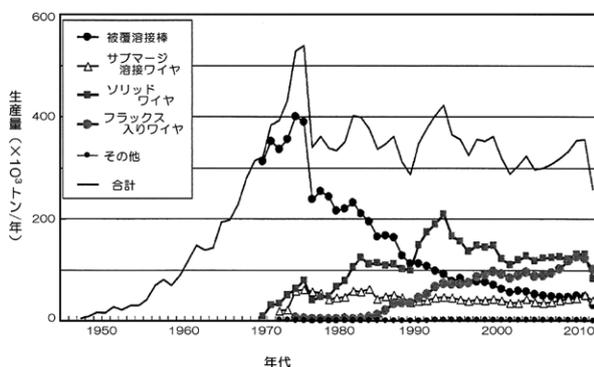


図 5.1 溶接材料生産量の推移<sup>1)</sup>

石油ショック以降は重厚長大産業の成長も鈍化し、被覆アーク溶接棒から、より効率の高いソリッドワイヤの使用量が増え始めた。特に自動車産業や建築・鉄

骨業界におけるソリッドワイヤの需要が伸び、1988（昭和63）年には被覆アーク溶接棒とソリッドワイヤの生産比率が逆転し、ソリッドワイヤが生産量の首位となった。また当時の造船業界は韓国の追い上げを受け、大幅な効率化に取り組みざるを得なくなっていた。その結果、被覆アーク溶接棒よりも効率の高いフラックス入りワイヤの需要が、この頃から急激に増加することとなった。すなわち、造船を始めとした重厚長大産業の国際競争力強化および自動車産業の急成長に対応するために、溶接材料の開発は「ワイヤ」に主軸が移った。そして、細径（直径1.2mm）を中心としたマグ溶接用ソリッドワイヤや、全姿勢溶接用およびすみ肉溶接用のフラックス入りワイヤの開発が活発に展開された。また、高強度鋼・耐熱鋼・高合金鋼に対応する溶接材料の開発も行われた。1985（昭和60）年に実用化された細径フラックス入りワイヤは、造船業界などの強い要望を背景に数量を伸ばし、2009（平成21）年にはソリッドワイヤを抜き、溶接材料生産量の首位となっている<sup>1)</sup>。

ガスシールドアーク溶接には、アルゴン（Ar）・炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）・ヘリウム（He）の単体ガスの他、Ar+CO<sub>2</sub>、Ar+O<sub>2</sub>およびAr+H<sub>2</sub>などの二元混合ガス、あるいはAr+He+CO<sub>2</sub>やAr+He+O<sub>2</sub>などの三元混合ガスなど、多種多様なガスがアーク溶接のシールドガスとして用いられている。しかし、業種によってシールドガスの種類および使用比率は異なり、近年での一例を示すと図5.2のようである。最も多く使用されているシールドガスはCO<sub>2</sub>で、全業種平均で全体の70%を占めている。特に、建築・鉄骨、造船、橋梁といった中・厚板を用いる産業分野での使用比率が圧倒的に高い。一方、輸送機（自動車や車両など）・

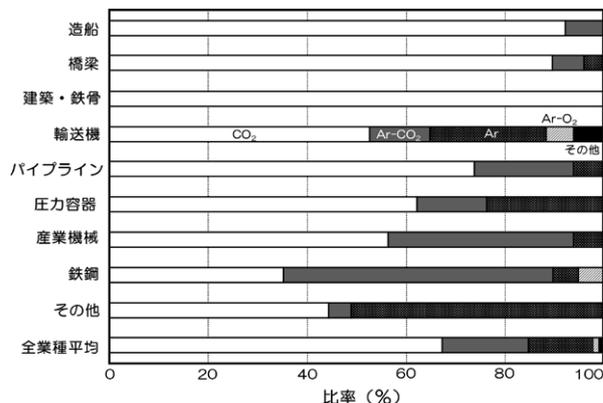


図 5.2 各業種のシールドガス使用比率<sup>1)</sup>

パイプライン・圧力容器・産業機械・鉄鋼などの産業分野では、Ar、Ar+CO<sub>2</sub>の混合ガスあるいはAr+O<sub>2</sub>の混合ガスなどのAr系ガスが比較的多く用いられている。

## 5.1 被覆アーク溶接棒

### 5.1.1 黎明期の被覆アーク溶接

1914（大正3）年に、三菱・長崎造船所の稲垣鉄郎と工具2名がスウェーデンのチェルベルヒ社に赴き、被覆アーク溶接棒の製造方法や使用方法などを学んで帰国した。また翌1915（大正4）年には、チェルベルヒ社から購入した多人数形の直流溶接機（前述第4章図4.2参照）が届けられた。そして長崎造船所では、稲垣鉄郎の指導のもとに、チェルベルヒ社の被覆アーク溶接棒を使用した溶接を開始し、汽缶部品の試作や肉盛溶接に適用した。溶接棒の被覆剤の成分は、炭酸石灰：20%、重炭酸ソーダ：13%、黄血塩（フェロシアン化カリウム）：5%、木炭粉末：10%、ホウ酸：24%、二酸化マンガン：20%、酸化ケイ素：8%であった。しかしこの成分と比率は極秘扱いで、長い間公表されなかった。一方、大阪製鎖は1920（大正9）年に英国のクアシアーク溶接棒を輸入し、適用分野の開拓に尽力した。クアシアーク溶接棒は、心線にアスベストを巻き、その上に炭酸石灰を塗布したきわめて簡単なものであったといわれている。

以上のように、わが国への被覆アーク溶接棒の導入は、チェルベルヒとクアシアークとの二種類の溶接棒が先鞭をつけた。チェルベルヒの溶接棒はガスシールドタイプ、クアシアークの溶接棒はスラグシールドタイプであった。それぞれ様式の異なる代表的な被覆アーク溶接棒が、ほぼ時を同じくしてわが国に導入され、比較されながら普及した。

1914～1919（大正3～8）年の第1次世界大戦中、諸外国で溶接の利用価値が認識され、溶接の適用範囲は次々に拡大した。その成果はわが国へも伝えられ、造船に溶接を採用する機運が次第に高まった。そして1920（大正9）年には、排水量421トンの全溶接船諏訪丸が長崎造船所において建造された。また、ほぼ同期に、英国でも326トンの全溶接船フラガー（Fullager）号が竣工した。東西で竣工された2隻の溶接船の建造に使われた溶接棒は、前者はチェルベルヒの溶接棒、後者はクアシアークの溶接棒である。それぞれタイプの異なる被覆アーク溶接棒が、いずれも良好な溶接結果を示したことは、溶接に対する信頼感をより一層高めることとなった。

第1次大戦後の1922（大正11）年、ワシントンで世界列強による軍縮会議が開かれた。その結果、わが国では戦力増強のために予定していた八八艦隊の建造が中止となり、以後の新造軍艦の重量も制限されることとなった。そのため、制限重量内ですべての装備のよい軍艦を作るために溶接の採用が重視され、軍艦の建造に溶接が広く採用されるようになった。一方、艦隊建造のために準備されていた大量の鋼材は、民需産業に放出され、この時期を境にして民需産業でも本格的に溶接が適用されるようになった。従来、造船関連分野を中心に発展してきた溶接が民需産業にも普及し、陸上の重工業分野で溶接の採用が進んだ。その結果、溶接だけでも企業として成り立つようになり、日本溶接工業（大正11年）や片山工業所（大正14年：後のアジア溶接工業）などの溶接専門業者が出現した。

民間工事にも溶接が多用されるにつれ、溶接に関する民間の統括機関が必要となったため、1926（昭和1）年に孕石元照を会長とする電気溶接協会（後の溶接学会）が設立された。しかし当時は規模も小さく、大きな成果を挙げることはできなかった。その後、1931（昭和6）年に本部を大阪帝国大学に移し、基礎固めと会務の拡張がなされた。この頃になると、各大学を始めとして各種研究所でも溶接の研究が総合的に行われるようになり、技術・経済の両面から広く一般にも溶接が認識され、溶接を採用・適用する産業分野は一気に拡大した<sup>2)</sup>。

### 5.1.2 被覆アーク溶接棒の国産化

第1次世界大戦後、欧米を始めとする各国は深刻な不景気に見舞われた。その例にもれずわが国も不景気に見舞われ、政府は輸入抑制・国産奨励の措置を発動した。そしてこの措置を契機にして、ほとんどを輸入に頼っていたアーク溶接棒の国産化が真剣に検討されることとなり、溶接棒に用いる心線はもちろんのこと、被覆剤に関する種々な研究・開発が行われた。

国産の被覆アーク溶接棒を初めて製造したメーカーは角丸工業と新宮鑄工所である。1925（大正14）年に、角丸工業は軟鋼用被覆アーク溶接棒を、新宮鑄工所は鑄物用被覆アーク溶接棒を試作した。1930（昭和5）年の国際連盟脱退、1931（昭和6）年の満州事変勃発と続く不安定な政治情勢の下、溶接を取り巻く環境は、外国依存主義を脱して、完全な自給体制を築くことが強く要請された。そのため溶接棒国産化の流れは、以前にもまして重要視されることとなった。この頃被覆アーク溶接棒の製造を開始したメーカーは、前述

の角丸工業と新宮鋳工所の他、1929（昭和4）年からの帝国酸素および三葉電熔社（後の不二電極）、1931（昭和6）年からの日本油脂、1933（昭和8）年からの田村アークおよび特殊電極、1934（昭和9）年からの東洋電極工業および日本電極工業などである。また井口庄之助、今城亀之助ならびに孕石元照などは、個人的に被覆アーク溶接棒の研究・開発を行っていた。当時の主な溶接棒とその特徴は表5.1に示すようである。イルミナイト系被覆剤はチタン鉄鈹（FeTiO<sub>3</sub>）を主成分とするスラグタイプの溶接棒、セルロース系被覆剤は有機物を被覆剤に含むガスシールドタイプの溶接棒である。これらの溶接棒のうち、ホウ酸系被覆剤を塗布した帝国酸素の16番・17番と呼ばれた溶接棒が好評で、当時の代表的な被覆アーク溶接棒とされていた。

表5.1 初期の国産溶接棒メーカーと主な被覆アーク溶接棒<sup>2)</sup>

会社名	溶接棒の名称	特徴
帝国酸素	16番	ホウ酸系被覆剤塗布
	17番	16番の2度塗り
	18番	イルミナイト系被覆剤塗布
	120番	セルロース系被覆剤塗布
今城	イマシロード	アスベスト巻・スラグシールドタイプ
田村アーク	不明	ホウ砂カルシウム系太径棒
角丸工業	アスベストロード	上向溶接専用棒
	不明	特殊鋼用溶接棒
関東工業	不明	セルロース系・紙巻（内部にベニガラ）
日本油脂	不明	軟鋼用溶接棒
孕石（個人）	G棒	イルミナイト系被覆剤塗布

上述した溶接棒メーカーの他、日立製作所・石川島重工業・三菱長崎造船所・神戸製鋼所などの比較的大手造機・造船メーカーは、自家消費溶接棒の被覆剤についての改良や研究を行った。そして、それぞれ独自に被覆アーク溶接棒を開発し、種々な構造物の溶接に積極的に使用した。日立製作所では、1928（昭和3）年にガスシールドタイプとスラグシールドタイプの、特性が異なる二種類の被覆アーク溶接棒を開発している。また同社は1933（昭和8）年に、溶着金属の性能向上を目的とした被覆の厚い溶接棒も実用化している。鉄道技術研究所においても溶接および溶接棒の研究が行われ、特性の優れた被覆アーク溶接棒が開発されている。

以上のように続々と国産化された被覆アーク溶接棒は、各産業分野のアーク溶接に幅広く活用されるようになったが、時折思わぬ事故も発生し、その事故の原因は不十分な溶着金属性能ならびに不適切な溶接施工にあることが指摘された。そのため不慮の事故を未然に防止する措置として、海軍および各都市の水道局は

1930（昭和5）年に、帝国海事協会、鉄道省および陸軍工廠などは1933（昭和8）年に、それぞれ個別の溶接規格を公布した。

これらの溶接規格公布に対応するために、溶接協会（後の溶接学会）が中心となって、1934（昭和9）年に当時の市販溶接棒66種の機械的性質についての調査が行われた。その結果、引張強さが41kg/mm<sup>2</sup>以上かつ伸びが20%以上の良好な溶接継手は全体の23%しかなく、国産被覆アーク溶接棒の品質性能は極めて悪いことが判明した。そして溶接規格の公布は、溶着金属の性能を向上させようという強い意欲を溶接棒製造メーカーに与えることとなった。市販の被覆アーク溶接棒の中には機械的性質の良好なものもあったが、十分な信頼は得られていなかった。そのため重要構造物の溶接には、アークス社（ベルギー）のスタビレンド溶接棒が使用されていた。特に海軍関係の溶接では、スタビレンド溶接棒の使用が必須事項となっていた。

1940（昭和15）年になって、市販溶接棒108種についての調査が再び溶接協会を中心に行われた。その結果は、引張強さが41kg/mm<sup>2</sup>以上で伸びが20%以上のものは全体の25%、引張強さが30~39kg/mm<sup>2</sup>で伸びが10~14%で所定の性能を満足していないものが大多数であった。翌年には、鋼用被覆アーク溶接棒の臨時日本標準規格（第196号）が、引張強さは41kg/mm<sup>2</sup>以上、伸びは1級の場合に32%以上、2級の場合に26%以上、シャルピー衝撃値が1級の場合に12kg・m/cm<sup>2</sup>以上、2級の場合に6kg・m/cm<sup>2</sup>以上といった内容で公布された。しかし1942（昭和17）年に実施された市販被覆アーク溶接棒50種について再々調査でも、引張強さが40~44kg/mm<sup>2</sup>のものが全体の40%、伸びが30~34%のものが全体の28%、シャルピー衝撃値が10~14kg・m/cm<sup>2</sup>のものが全体の32%という結果で、必ずしも満足できる結果は得られなかった。なお当時の海軍が採用していた造船用被覆アーク溶接棒の規格値は、引張強さが41kg/mm<sup>2</sup>以上、伸びが32%（当時の暫定措置として28%）以上、シャルピー衝撃値がノッチなしで30kg・m/cm<sup>2</sup>以上となっており、臨時日本標準規格より厳しい規格であった<sup>2)</sup>。

### 5.1.3 被覆アーク溶接棒の性能向上

被覆アーク溶接棒の国産化は国策として活発に行われたが、比較的良好な機械的性質を示す溶接棒も一部存在したものの、国産溶接棒全体としての性能は不満足なものであった。そのため、重要構造物の溶接には

依然として輸入品のアーコス社・スタビレンド溶接棒が使用された。しかし、1936（昭和11）年の日独伊3国同盟締結、1937（昭和12）年の日華事変勃発などによる国際情勢の極度の悪化に伴って、わが国に対する海外列強の経済封鎖が進展した。そのため、重要構造物の溶接に用いられていた高性能溶接棒（スタビレンド溶接棒）の輸入も困難となり、国産化して自給自足しなければならない事態に直面した。軍部が主唱者となって、アーコス社のスタビレンド溶接棒より良好な性能の被覆アーク溶接棒を作ること为目标に、各所で高級被覆アーク溶接棒の研究・開発が精力的に行われた。そして大阪造兵廠の犬飼末雄は、アーコス溶接棒に匹敵する、引張強さが $52\sim 53\text{kg/mm}^2$ で伸びが27~28%の被覆アーク溶接棒を完成した。

一方、1938（昭和13）年に東光社および日本油脂が、1939（昭和14）年に神戸製鋼所が、また1941（昭和16）年に富士鋼業などが海軍の依頼で、高性能な被覆アーク溶接棒についての本格的な研究を開始した。これらの会社では、専門技術者を溶接棒の開発担当者とし、被覆アーク溶接棒の学術的な見地からの研究が行われた。その結果、従来の外国製品模倣の傾向は徐々に薄れ、国産原料を活用した日本独自の被覆アーク溶接棒の開発へと進展していった。

また、それまでの溶接棒の被覆材塗布は手塗りで、生産は極めて非能率的であるとともに、被覆の厚さも不均一で品質管理の点からも不適切であった。そのため、生産の能率化・製品の均一化についての考慮がなされ、解決策として機械塗装の導入が検討された。神戸製鋼所は1939（昭和14）年に海軍から、国産原料を活用してアーコス・スタビレンド棒同等の品質性能を備えた被覆アーク溶接棒を機械塗装で作るよう依頼された。そして翌年の1940（昭和15）年には、溶接棒被覆剤の機械塗装装置の開発を終え、被覆剤の機械塗装による被覆アーク溶接棒の生産を開始した。また被覆剤の研究においても、海外に例のないイルミナイト（チタン鉄鉱・ $\text{FeTiO}_3$ ）を主成分とする極めて性能の優れた被覆剤を開発した。さらに新しい品質良好な溶接棒心線も開発され、この心線とイルミナイト系被覆剤を組み合わせた被覆アーク溶接棒は、輸入溶接棒に代わって海軍の重要構造物の溶接に本格的に使用されるようになった。神戸製鋼所は1943（昭和18）年に、わが国初の本格的な機械塗装装置を備えた被覆アーク溶接棒製造工場（日高工場）を建設している。また東光社や富士鋼業なども、性能に優れた被覆アーク溶接棒を開発し、海軍関係の工事に使用されるようになった。

1935（昭和10）年以降に設立された被覆アーク溶接棒メーカーには、1936（昭和11）年の東洋酸素・アジレ社・三菱金属鉱業、1938（昭和13）年の万興電極、1939（昭和14）年の東京化学・東亜製作所（後の北日本電極）、1940（昭和15）年の日鋼熔材、1941（昭和16）年の神東電極・吉川金属工業、1943（昭和18）年の中山製鋼所・福島熔材などがある。

#### 5.1.4 戦前・戦中の被覆アーク溶接棒

1939（昭和14）年以降、他の鉄鋼製品と同様に、民間に出回っていた手塗りの被覆アーク溶接棒も統制品となり、自由に売買することができなくなった。メーカーの製造した被覆アーク溶接棒は、全て溶接棒組合に納入され、この組合から民間需要家に配給されていた。このような統制は、当時としてはやむを得ない措置であったかもしれないが、多くの溶接棒製造メーカーの意欲を消失させた。統制によって各メーカーは、溶接棒を売り込む努力が不要となり、現状維持の状態に甘んじてしまった。一方これらのメーカーとは別に、軍部から特命を受けた特定メーカーもあり、好むと好まざるとに関わらず、軍部からの厳しい要求で高性能な被覆アーク溶接棒の開発を行わなければならなかった。しかし現状維持に甘んじた一般メーカーと、常に溶接棒の性能向上に取り組んだ特定メーカーとの技術的な相違は、後日（戦後）に大きな格差として現れることとなる。

1941（昭和16）年の太平洋戦争開始以来、夜を日についての兵器・艦船の製造が行われた。このような戦時体制下では能率向上が絶対の目標であり、溶接においても能率の向上が強く求められ、自動アーク溶接の採用が検討された。しかし自動アーク溶接装置に不可欠な電気部品は、ほとんど全てが電波兵器の製造に割り当てられており、装置の実用化には至らなかった。仮に必要な電気部品が入手でき、装置の開発に着手できたとしても、当時の技術水準では短期間で自動アーク溶接を実用化することはできなかったように思われる。

戦争が激化するにつれて熟練溶接工も続々と応召され、生産現場での熟練溶接工不足が大きな問題となった。特に造船・造機関係職場の熟練溶接工不足は深刻であった。このような熟練溶接工不足に対応するために、各事業所とも独自で“呉船式”、“日立式”、“横船式”、“長船式”、“赤崎式”などと呼ばれた被覆アーク溶接の自動溶接方法を考案・実用化した。これらの溶接法では、被覆剤を塗布した太径（直径 $8\sim 12\text{mm}$ ）心線の溶接棒を用い、溶接棒を人の代わりに機械で支

え、自動的に溶接を進行させるという手法が採用されている。誰にでも容易に取り扱え、熟練を必要としない高能率な溶接法であった（前述 3.2.2 項参照）。

上記自動溶接法の採用は積極的に推進されたが、当時は太径溶接棒用に製造された心線がなかったため、最初のうちは細径のリベット・バーを流用していた。しかし戦局が次第に不利になり、鋼材不足が目立つようになるとリベット・バーも入手できなくなった。そこで、伸鉄材を利用して太径溶接棒を作ったり、直径 3~5mm の細径溶接棒心線を 2 本合体させてその上から被覆剤を塗布して 1 本の溶接棒としたりして、太径溶接棒線材の不足を補った。後者の被覆アーク溶接棒は、双子棒・親子棒・ひょうたん棒などと呼ばれた。この頃は、輸入の途絶と国産資源の不足から、一般鋼材はもとより特殊鋼材に至るまで極度に不足し、国策として鋼材の節約が強く要求されていた。そのため、以前に増して、継手効率の高い溶接の採用がさらに重要視されるようになっていった<sup>2)</sup>。

### 5.1.5 戦後生産再開時の被覆アーク溶接棒

1945（昭和 20）年の太平洋戦争終結後、わが国のあらゆる産業は麻痺状態に陥った。溶接棒メーカーもこの例に漏れず、市場には戦時中の軍部や組合のストック品が大量に出回り、溶接棒の生産は一時休止同様の状態に陥った。終戦前までは製品の大部分が軍需関係に使用され、軍需に頼る比率が極めて高かった。そのため他の軍需産業と同様に、軍の解体によって大きな苦境を迎えることとなった。終戦前に存在した溶接棒メーカー（約 75 社）の大半は、この混乱した時期に直面して、将来展望の暗さから生産再開の努力を取りやめた。しかし、神戸製鋼所は将来の平和産業での発展を期待して、溶接棒の量産化に踏み切った。上述したように、神戸製鋼所は重要構造物の溶接に使用できるイルミナイト系被覆アーク溶接棒を 1942（昭和 17）年から機械塗装で生産し、終戦前には約 600 トン/月の生産を行っていた。その他、東洋電極工業・富士興業・ツルヤ工場・永岡興業・日本油脂・吉川金属工業も、生産量は極めて少なかったが生産を続けていた。

戦後の復興期には戦時中のストック品が大量に出回ってはいたものの、あらゆる物資が不足していた。そのため戦災からの復旧はもとより、その他の民間需要も極めて旺盛で、被覆アーク溶接棒は羽が生えたようによく売れ、被覆アーク溶接棒は全くの売手市場となった。1947（昭和 22）年以降には、生産の再開を見送っていたメーカーも続々と被覆アーク溶接棒の生産を再開している。1945（昭和 20）年の角丸工業、

1946（昭和 21）年の神東電極、1947（昭和 22）年の日本電極工業、1948（昭和 23）年の大同製鋼と富士溶接棒、1950（昭和 25）年の新報国製鉄と特殊電極などである。またその後、万興電極・中山製鋼も被覆アーク溶接棒の生産を再開した。

しかし物資不足は深刻で、被覆アーク溶接棒の製造に適した線材や被覆剤原料の流通量は少なかった。とりわけまだ統制が解除されていなかった鉄鋼と有機物の不足は甚だしく、各溶接棒メーカーは溶接棒に用いる線材や有機物の獲得に苦慮し、溶接棒の生産は極めて困難な状態に陥った。そのため、戦災で焼け残った焼線を線引きして作った心線を用いたり、溶接棒用の心線材として不適切な雑線を使ったりした、粗雑な溶接棒がかなり生産され市場に相当量が出回っていたようである<sup>2)</sup>。

### 5.1.6 被覆アーク溶接棒の復活

戦後わが国の鉄鋼・造船などの重工業メーカーのほとんどは、戦災にあって壊滅に近い状態となっていた。また戦災にあわなかったメーカーも、原料不足・輸送の麻痺・深刻な食糧難などによって復活は思うように果たせなかった。さらに賠償や企業の解体など、占領軍の管理化での問題も山積していた。しかし 1947（昭和 22）年になると、米・ソの対立をめぐる微妙な変化が現れ、これが対日政策の上にも反映されて、占領軍の方針が“苛酷”から“融和”へ、“制限”より“緩和”へと切り替えられた。それに伴って、わが国重工業メーカーも復活の速度を速め、その年に始まった復興金融金庫の重工業に対する重点融資によって完全に復活した。時を同じくして、政府の財政的な保護のもとに、わが国の海運復興を目的とした計画造船が実施された。この計画造船は回を重ねるにつれて建造量が増加したため、それに伴って被覆アーク溶接棒の固定した需要が確立された。そして建造量の増加にほぼ比例して、被覆アーク溶接棒の生産量も次第に増大することとなった。

造船業の復活に伴って、外国船の修理さらには将来の外国船建造も予想されるようになり、溶接棒メーカーは被覆アーク溶接棒に対するアメリカ船級協会（ABS）やロイド船級協会の認定を取る必要にせまられた。溶接棒メーカーはこれらの認定取得のために競って受検した。1948（昭和 23）年には神戸製鋼所が、1949（昭和 24）年には東洋電極工業がロイド船級協会の認定を取得している。また 1950（昭和 25）年には、ツルヤ工場・東洋電極工業・神東電極・神戸製鋼所・白山鉄業・由基製作所がアメリカ船級協会の認定

を取得し、神戸製鋼所・東洋電極工業・由基製作所は日本海事協会（NK）の認定を取得した。また翌年の1951（昭和26）年には神戸製鋼所・東洋電極工業・福知山溶接棒が、翌々年の1952（昭和27）年には日本電極工業が日本工業規格（JIS）の認定を取得した。

わが国経済の自立と安定とのために実施された、均衡財政の実施・為替レートの1本化・補助金の削減などの財政金融引き締め政策（ドッジ・ライン）によって、戦後長い間続いたインフレに終止符が打たれ、経済界はようやく戦後の混乱期から抜け出した。そして、戦後の物資不足のために行われていた重要物資の統制も次々に解除され、わが国の経済は従来の統制経済から自由経済に移行した。溶接棒業界においても、統制されていた溶接棒用線材の統制が解除され、公定価格も廃止されて完全な自由競争時代に突入した。

1951（昭和26）年になると輸出船の建造が開始され、年を経るにしたがってその建造量は増加し、計画造船による建造量を合わせた全体の建造量は莫大な量に達した。そのため造船における溶接継手の採用は飛躍的に増加し、1948（昭和23）年頃の採用率は継手全体の30～40%程度であったが、1951（昭和26）年頃には70～80%に達し、1953（昭和28）年以降はほぼ限界に近い90%以上に達した。このような造船分野の旺盛な需要を中心に、電源開発計画も加わって、鉄鋼・機械・車両・化学・繊維など、溶接を取り巻くあらゆる産業分野の生産が活発化した。また設備の合理化を目的として、外国の先進技術も続々と取り入れられた。

被覆アーク溶接棒の需要量の急激な増加に伴って、生産設備の合理化・工場の拡大や増設が行われ、各溶接棒メーカーはいずれもそれぞれの工場の新設や増設を活発に行うこととなった。しかし当時の溶接棒の被覆剤塗布作業は、図5.3に示すように、旧態依然とした手塗り塗装（a）を行っているメーカーと、専用装置を用いた機械塗布（b）しているメーカーとが混在していた。機械塗布設備で溶接棒を生産する方が合理的で生産性も高いが、機械塗布装置を備えた工場は極めて少なく、戦後直後のメーカーのほとんどは手塗り生産であった。1949（昭和24）年頃になると被覆剤の機械塗布装置も国産化されるようになり、資金力のあるメーカーはこの装置を設置するようになった。しかし被覆剤の塗布設備が完備されると、次に問題となるのは溶接棒の乾燥設備である。機械化によって被覆材の塗布速度が速くとも、塗布能力に合った乾燥設備がないと円滑な溶接棒の生産はできない。そのため、1950（昭和25）年には、塗布装置と離れた場所に設

置されていた乾燥設備（乾燥炉）が、塗布装置と直結した流れ作業のラインの中に取り入れられるようになった。被覆剤塗布装置と連続乾燥炉の一例を図5.4に示す。

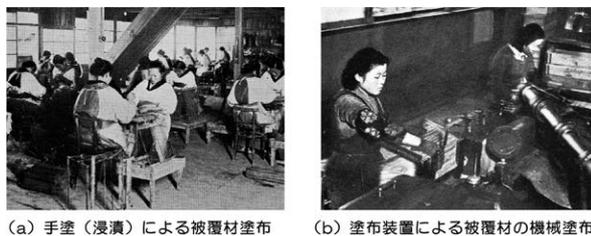


図 5.3 被覆アーク溶接棒の被覆剤塗布作業<sup>1)</sup>

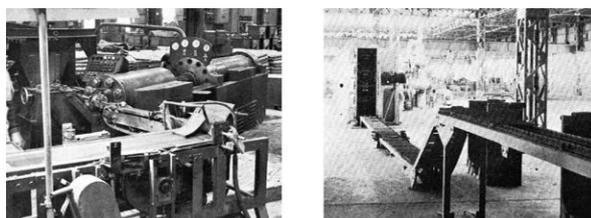


図 5.4 被覆アーク溶接棒の製造装置<sup>1)</sup>

1951（昭和26）年になると被覆アーク溶接棒の需要は著しく伸長し、それまでの生産設備では需要を消化できない状態となり、各メーカーともに設備の増強や新工場の建設に踏み切った。被覆剤塗布設備についても、さらなる能率化を目指して、海外から高性能な被覆剤塗布装置が輸入された。しかし、このような高性能の被覆剤塗布設備を備えることができたのは比較的大手のメーカーのみで、いまだに手塗り作業で溶接棒を生産していた中小メーカーもかなり存在していた。

1953（昭和28）年にアメリカ船級協会が、認定を取得して被覆アーク溶接棒を製造していたメーカーを対象に、抜打的品質検査を行った。そして手塗りで作成された被覆アーク溶接棒を生産していたメーカーに対し、被覆剤の機械塗布装置を使用して製品を作らなければアメリカ船級協会の認定を取り消すとの声明を出した。品質管理の徹底と製品の統一化が目的である。当時は国産の塗布装置も市場に出回り、高性能な輸入塗布装置も自由に購入できるようになっていた。これらの装置を導入することによって問題は容易に解決できるが、多くの中小メーカーは装置の購入資金および工場改造資金の調達に苦しみ、溶接棒の製造を断念した。

1953（昭和28）年には川崎製鉄が溶接棒の生産を開始し、これを契機として他の製鉄会社の被覆アーク溶接棒生産への進出が始まった。1955（昭和30）年には、八幡製鉄が福知山溶接棒と共同出資の形で日本溶接棒を設立し、系列化の先鞭をつけた。翌1956（昭

和31)年には溶接棒メーカーの系列化がさらに促進され、神戸製鋼所・川崎製鉄・富士製鉄・住友金属工業・住友電工といった製鉄・製鋼メーカーは、自社工場あるいは傘下メーカーに対する設備投資、原料供給および役員派遣などを行ってその関係を強化した。そのため、大企業およびその傘下メーカーと、この流れに残されたその他の中小メーカーとの企業格差は大きく拡大することとなった。1957(昭和32)年になると製鉄会社による系列化はさらに進み、富士鋼業と日鋼熔材の技術提携(住友系)、富士製鉄の東京化工への心線供給、八幡製鉄系の東洋電極工業と日本溶接棒との合併検討など、系列内での体制固めがさらに進んだ。そして1958(昭和33)年には、東洋電極工業と日本溶接棒が合併した八幡溶接棒が発足した。これによって、神戸製鋼所と八幡溶接棒の二大主流が形成され、川崎製鉄・住友金属工業・富士製鉄がそれに続くといった製鉄・製鋼メーカーによる系列化は表5.2に示すような組み合わせでほぼ完了した。なおこの年には、従来の極めて非能率的な天秤による被覆剤の秤量・配合に代わって、自動配合装置による被覆剤の自動秤量・自動配合が導入されている。

表5.2 鉄鋼メーカーによる溶接棒メーカーの系列化<sup>2)</sup>

	系列溶接棒メーカー
神戸製鋼	なし(自社工場:茨木・日高・藤沢)
八幡製鉄	八幡溶接棒東京工場(元東洋電極工業) 八幡溶接棒福知山工場(元福知山溶接棒) ツルヤ工場・神東電極・吉川金属工業 永岡興業・万興電極棒・四国熔材製造所 不二電極
富士製鉄	富士溶接棒(元東京溶接棒) 北日本電極・福島熔材
住友金属	富士興業・角丸工業
川崎製鉄	なし(自社:千葉製鉄所内)
日本金属工業	日本油脂
日本冶金	日本ウェルディングロッド

鍋底景気にあえいだ1958(昭和33)年が過ぎ翌年になると、産業界は再び活況を呈し始め、被覆アーク溶接棒の需要も急激に伸長した。そして1960(昭和35)年の被覆アーク溶接棒生産量は、10,000トン/月を突破した。その後所得倍増計画が発表されたこともあり、各溶接棒メーカーの設備更新・増強計画は他産業と同様に一段と活気を帯び、生産設備の増強あるいは新工場建設が急務となった。1960(昭和35)年には神戸製鋼所が関東地方(藤沢)で新工場の建設を始め、それに続いて八幡溶接棒や富士溶接棒なども新工場の建設に着手した。また川崎製鉄・富士鋼業・日本電極工業、さらに特殊電極・日本油脂・日本ウェルディングロッドなど特殊溶接棒メーカーも、次々と被覆

剤塗布装置その他の増設を行った<sup>2)</sup>。

### 5.1.7 被覆アーク溶接棒の進展

1950(昭和25)年頃までのわが国の被覆アーク溶接棒は、イルミナイト系溶接棒のみの生産であった。しかし米国からの新しい情報で、数種の被覆剤が開発され、用途によって溶接棒をそれぞれ使い分けていることが分かった。そのためわが国でも、1949(昭和24)年以降新しい被覆剤の研究・開発が開始された。当時のわが国と米国との被覆アーク溶接棒を比較すると、わが国のイルミナイト系溶接棒は、被覆剤の資源面と溶着金属の機械的性質とにのみ重点が置かれ、作業性は軽視されていた。それに反して、米国の被覆アーク溶接棒は作業性に重点を置き、それに若干の機械的性質を加味した溶接棒が作られていた。溶接棒の被覆は高セルロース系、高酸化チタン系および高酸化鉄系の3種類である。

以上のような事情から、わが国のイルミナイト系溶接棒も作業性の面から再び検討されるようになった。また、高セルロース系および高酸化鉄系の被覆剤の研究も始められた。そして1950(昭和25)年に、従来のイルミナイト系溶接棒より作業性の良い改良型イルミナイト系溶接棒、高セルロース系溶接棒および高酸化鉄系溶接棒が完成した。1950(昭和25)年の貿易再開によって、高酸化チタン系被覆剤の原料であるルチール(チタニヤ:TiO<sub>2</sub>)がオーストラリアから輸入できるようになり、酸化チタン系の被覆アーク溶接棒の研究・開発が可能となった。また欧州で古くから使用されていた、石灰石(CaCO<sub>3</sub>)が主原料で有機物は全く含まない低水素系溶接棒の研究も本格的に実施されるようになった。

1951(昭和26)年に完成した高酸化チタン系溶接棒は、従来のイルミナイト系、セルロース系および酸化鉄系などの溶接棒に比べ、スパッタの発生が少なく溶込みも浅いため薄板の溶接に適した。またビード外観が美しく作業性が良く、立向下進溶接も可能であった。石灰石を主成分とする低水素系溶接棒も同年に完成し、従来の各種被覆アーク溶接棒と異なる特性を示した。溶接金属中の水素は極めて少なく、脱酸剤としてフェロシリコン(Fe-Si)を含有しているため、耐割れ性や機械的性質、特にじん性に優れ、厚板や鋳鋼品の溶接に極めて優れた性能を発揮した。また米国から紹介されて注目を集めていた、鋳物溶接用の共晶合金被覆アーク溶接棒についても国産化の研究が各所で行なわれた。そして1951(昭和26)年に、アジア溶接工業所で国産化に成功し、輸入品の被覆アーク溶接棒

と肩を並べて、鋳物の溶接に使用されるようになった。

1952（昭和27）年には、戦時中にわが国で開発された太径溶接棒が造船界で再認識され、酸化鉄系の被覆剤を塗った太径溶接棒が大々的にすみ肉溶接に使用された。また、火力発電および船舶のボイラやタービンの高温・高圧化に伴って、これらの装置内のパイプには耐熱鋼であるCr-Mo鋼が使用されるようになった。そのため、Cr-Mo鋼用の被覆アーク溶接棒の研究・開発が行われ、1951（昭和26）年には数種類のCr-Mo鋼用溶接棒が市販された。

1953（昭和28）年には、被覆剤の系統が全く新しいライムチタニヤ系の被覆アーク溶接棒が開発された。ライムチタニヤ系溶接棒は、戦後の欧州で開発された溶接棒で、溶着金属中の水素が比較的少なく、機械的強度が優れていた。またアングカットは生じにくく、溶込みはイルミナイト系溶接棒より浅いがスラグの包被性が良好で、美しいビード外観が得られた。この年には、前年（昭和27年）以来、造船分野で多く使われるようになった太径の酸化鉄系被覆アーク溶接棒の改良・深溶込み被覆アーク溶接棒・高張力鋼用被覆アーク溶接棒などの研究・開発も活発に行われた。

上述したように、この年（昭和27年）にはアメリカ船級協会が手塗り被覆アーク溶接棒の採用を拒否する声明を出しているが、同時に、わが国独自のイルミナイト系被覆アーク溶接棒もアメリカ船級協会では認めないとの声明が出された。手塗り溶接棒の問題とは異なり、わが国の代表的な被覆アーク溶接棒であるイルミナイト系溶接棒が、海外で認められるか否かは極めて重大な問題である。溶接棒メーカーと日本溶接協会は一丸となってこの措置に反対し、イルミナイト系溶接棒の優秀性を指摘した論文を作成して反駁した。論文提出後も再び認められないとの回答がなされるなど幾多の屈折を経たが、1954（昭和29）年にはわが国の主張が認められた。そしてアメリカ船級協会本部は、特別証明書を発行してイルミナイト系溶接棒の使用を認めた。

1954（昭和29）年になると、当時の造船分野で多用され高能率を発揮していた太径の酸化鉄系被覆アーク溶接棒のさらなる能率向上が提案された。そこで、従来の酸化鉄系被覆剤に鉄粉を添加することが検討され、すみ肉溶接用の鉄粉酸化鉄系被覆アーク溶接棒がこの年に完成した。また数年来の懸案であった、深溶込み被覆アーク溶接棒と高張力鋼用被覆アーク溶接棒もこの年に完成し、市販されるようになった。そして、高張力鋼を艦船に使用する検討を始めていた防衛

庁は、国内溶接棒メーカーに高張力鋼用被覆アーク溶接棒の提出を求めた。神戸製鋼所、福知山溶接棒および東洋電極の高張力鋼用被覆アーク溶接棒が選定され、防衛庁での採用が決定した。さらに1955（昭和30）年になると、高張力鋼を用いた船舶・橋梁・車両・タンクなどが続々と作られるようになり、これらの溶接に用いる高張力鋼用被覆アーク溶接棒は次第に普及した。

鉄粉酸化鉄系被覆アーク溶接棒は1956（昭和31）年に完成したが、完成当初はそれほど注目されなかった。しかし造船業界が活況になるにつれて、能率面で認識され始め、その使用量は次第に拡大した。1950（昭和25）年頃から始まった諸外国企業との技術提携も年を経るにしたがって急激な増加を示し、火力発電・航空機・応用化学・石油精製などの分野では続々と生産設備の近代化が行われた。それに伴って特殊被覆アーク溶接棒は、品種と品質の高度化が要求されるようになった。そのため被覆アーク溶接棒の研究は、極めて広範囲におよび、あらゆる材料の溶接について、あらゆる角度からの研究・開発が行われた。

1957（昭和32）年になると、化学工業の発達にともない、冷凍機器・ガスの液化・石油精製・LPGタンカーなど、低温で使用される圧力容器や装置の需要が増加した。そのため低温で使用される低温用鋼材の溶接も必要となり、2.5%および3.5%のNiを含む低温鋼用被覆アーク溶接棒が開発された。その他、化学機器で 사용되는異種金属継手の溶接に適した各種被覆アーク溶接棒、および耐熱鋼用の9Cr-1Mo系被覆アーク溶接棒も開発された。

1955（昭和30）年に米国から超高張力鋼“Carilloy T-1”が紹介され、実用化によって利点や優秀性などが認められた。そして1958（昭和33）年には、従来の52kg/mm<sup>2</sup>級高張力鋼に加えて、55および60kg/mm<sup>2</sup>級高張力鋼が続々と国産化されるようになった。それに伴い種々な高張力鋼用被覆アーク溶接棒も次々に開発され、大々的に使用されるようになった。

裏側から溶接ができないパイプの溶接などでは、表面からの溶接で裏側まで完全に溶融することは困難で、裏面に未溶融部を残したまま実用に供されていた。しかし、溶接棒の被覆を低水素系の被覆剤で二重被覆とすることによって、裏側まで完全に溶融して完全な裏波ビードを形成できることが判明した。そして二重被覆の裏波溶接棒が開発され、1959（昭和34）年には広範囲な産業分野で実用化されるようになった。また、溶接棒メーカーは一重被覆の裏波溶接棒の開発も始め、この年には二重被覆の溶接棒に勝るとも劣らな

い、一重被覆の裏波溶接棒を完成した。その他、従来の各種タイプの軟鋼用被覆アーク溶接棒については品質の向上、作業性の向上を目指して各メーカーはさらなる研究を継続するとともに、需要増加に伴って一層の品質の向上が望まれていたステンレス鋼溶接棒および表面硬化溶接棒の品質向上や新しい溶接棒の開発に重点を置いた研究が推進された。

1960（昭和35）年以降は、新しい被覆剤に関する開発研究は行われず、すでに開発された被覆アーク溶接棒の品質や作業性を向上させるための改良研究が行われるようになった。また、能率向上を目的として被覆剤に鉄粉を添加し、従来と同様の作業性・溶接性を備えた被覆アーク溶接棒を作ることにも重点が置かれた。特殊被覆アーク溶接棒では、化学工業の設備増強に対処するために、品質の向上とともに作業性に重点を置いた開発が行われた<sup>2)</sup>。

上述した溶接棒の被覆剤として用いられた主な物質とその効果をまとめると表5.3に示すようであり、アークの安定化・スラグの生成・シールドガスの発生・作業性の改善など、目的に応じて種々な物質を組み合わせて被覆剤としている。また軟鋼用被覆アーク溶接棒の主な種類と特徴は次のようである。

- ・イルミナイト系溶接棒：被覆剤にイルミナイト（チタン鉄鉱・ $FeTiO_3$ ）を30%程度含んだ、わが国独自の溶接棒である。スラグの流動性は比較的良好で、全ての溶接姿勢に適用が可能である。アークはやや強く、溶込みは深い。スラグの除去が容易で、ビード波は細かく美麗であるため、あ

らゆる構造物の溶接に広く使用されている。

- ・セルロース系溶接棒：被覆剤に有機物を20%以上含んだ溶接棒である。有機物の燃焼で多量のガスを発生して溶着金属を保護するガスシールドタイプの溶接棒で、アークは強く、溶込みは深い。
- ・酸化鉄系溶接棒：酸化鉄を主成分とした被覆剤の溶接棒である。主に水平すみ肉溶接で使用され、溶滴はスプレー移行するためスパッタは少ない。スラグは完全に溶着金属を覆い、剥離性も良好である。ビード表面は滑らかで、等脚長に近い平らなすみ肉形状を形成する。
- ・低水素系溶接棒：石灰石などの塩基性炭酸塩を主成分とした被覆剤の溶接棒である。被覆剤中の水素源が少なく、炭酸塩が分解されて発生する炭酸ガスでアークをシールドする。溶接割れに影響を及ぼす水素量は極めて少なく（低水素系：4~7ml/100g）、機械的性質に優れるため、厚鋼板の溶接などに適する。
- ・チタニア系溶接棒：被覆剤に酸化チタンを35%程度含む溶接棒である。アークはおだやかで、スパッタの発生は少ない。スラグの粘性は大きく、溶着金属の被包も良好で、全ての溶接姿勢に適用できる。溶込みは浅く、薄板の溶接に適し、軽構造物の溶接に使用される。
- ・ライムチタニア系溶接棒：被覆剤に酸化チタンを約30%、石灰石などの塩基性物質を約20%程度含む溶接棒である。アークはおだやかで、全ての溶接姿勢に適用が可能であるが、特に下向・立向すみ肉溶接に適する。チタニア系溶接棒と同様に

表 5.3 被覆剤に用いられる物質とその効果<sup>2)</sup>

物質名	アーク安定剤	スラグ生成剤	脱酸剤	還元ガス発生剤	酸化剤	合金剤	流動性改善	固着剤	スラグ剥離改善
炭酸ソーダ ( $Na_2CO_3$ )、重炭酸ソーダ ( $NaHCO_3$ )、酸性白土	○	○							
炭酸カリ ( $K_2CO_3$ )、石灰 ( $CaO$ )、石灰石 ( $CaCO_3$ )	○	○							
黄血塩 ( $K_4Fe(CN)_6$ )	○	○					○		
螢石 ( $CaF_2$ )	○	○					○		○
ホウ砂 ( $Na_2B_4O_7(OH)_4 \cdot 8H_2O$ )、ホウ酸 ( $B(OH)_3$ )、苦土 ( $MgO$ )、製鋼スラグ		○							
炭酸マグネシウム ( $MgCO_3$ )、アルミナ ( $Al_2O_3$ )		○							
氷晶石 ( $Na_3AlF_6$ )		○					○		
珪砂 ( $SiO_2$ )、二酸化マンガン ( $MnO_2$ )	○	○			○		○		○
酸化チタン ( $TiO_2$ )、石綿	○	○					○		○
ペニガラ ( $Fe_2O_3$ )、ミルスケール ( $Fe_3O_4$ )、砂鉄	○	○			○		○		
フェロシリコン ( $FeSi$ )、フェロチタン ( $FeTi$ )、フェロバナジウム ( $FeV$ )			○			○			
酸化モリブデン、酸化ニッケル					○	○			
マンガン ( $Mn$ )、フェロマンガン、クロム ( $Cr$ )、フェロクロム			○			○			
アルミニウム ( $Al$ )、マグネシウム ( $Mg$ )			○						
ニッケル ( $Ni$ )、クロム線、銅 ( $Cu$ )						○			
水ガラス (ケイ酸ソーダ・ $Na_2SiO_3$ )、ケイ酸カリ ( $K_2SiO_3$ )	○	○						○	
小麦粉	○		○	○				○	
綿糸、綿布、紙、木材鋸屑	○		○	○					
炭粉			○	○		○			
フノリ、膠、カゼイン、ゼラチン、アラビア護膜、糖蜜				○					○

酸化チタンを多量に含むが、チタニア系溶接棒より機械的性質に優れる。

上述したようなわが国の被覆アーク溶接棒の技術は海外でも認められるようになり、1959（昭和34）年には、八幡溶接棒がイルミナイト系溶接棒の製造技術をスイスのエリコン社へ技術輸出した。1960（昭和35）年には、神戸製鋼所が中国の鋸条公司に対して技術輸出を行った。また同社は、わが国の被覆アーク溶接棒開発当初の目標であったスタビレンド溶接棒の開発国であるベルギーへ、被覆アーク溶接棒を輸出するようにもなった。

1955（昭和30）年頃を境にして電源開発や道路建設が盛んになると、ブルドーザーその他建設機械が続々と国産化された。それらの部品補修に、古くから機械部品や鋳山機械の補修に使用されていた表面硬化肉盛溶接棒が盛んに使用されるようになった。また部品補修とは別に、新品への肉盛溶接も行われるようになり、年を経るにつれて表面硬化肉盛溶接棒の需要は増大した。さらに各工業での活発な設備増強によって工業用地が不足し、海岸を埋め立てた臨海工業地帯の造成が、千葉を皮切りに名古屋・堺・岡山など続々と行われた。この埋め立て工事に使用されるサンドポンプ・ケーシングの内面およびカッターナイフの刃先は、砂礫と岩盤による摩耗が著しく、これらの補修に大量の表面硬化肉盛溶接棒が用いられた。そのため埋め立て工事の増大とともに、溶接棒の需要も急激に増加し、品質の改良や新しい表面硬化肉盛溶接棒の開発が積極的に推進された。

極低温海域で使用される海洋構造物や低温用アルミキルド鋼が用いられるLPGタンカーやタンクなど、低温環境で使用される構造物用の溶接材料として、Ti-B系およびNi-Ti-B系の低温用鋼用被覆アーク溶接棒も実用化された。海洋構造物の溶接には厳しい低温靱性が要求され、靱性の向上には、低酸化とともに、溶接金属組織の微細化が必須である。YP550MPa以下の鋼材用の溶接棒では被覆剤にTi-Bを複合添加して、YP600MPa以上の鋼材用の溶接棒では被覆剤にNiを添加することによって、組織の微細化が図られている。

代表的な大型構造物の一つである水圧鉄管（ペンストック）では、重量軽減や溶接工数低減を目的として早くから高強度化への取組みが行われていた。近年では、東京電力・神流川発電所の水圧鉄管に国内で初めて950MPa級の高張力鋼が採用されている。950MPa級高張力鋼用被覆アーク溶接棒では、脆性破壊の発生を防止するために高靱性化が必要であり、フラックス

中の脱酸性原料の選択と適正化などが行われた<sup>2)</sup>。

## 5.2 サブマージアーク溶接材料

わが国のサブマージアーク溶接は、1951（昭和26）年に、大阪変圧器が米国のユニオンカーバイド社と自動溶接に関する技術提携契約を締結し、ユニオンメルト溶接装置として製造販売を開始したことに始まる。当初はその需要がほとんどなかったが、1954（昭和29）年頃から徐々に需要が増加し始め、溶接の能率化が重視されだした1955（昭和30）年には、造船を始めとして造機関係などでも採用されるようになった。サブマージアーク溶接の需要の増大に伴って、輸入品に頼っていた溶接ワイヤの国産化も検討され、神戸製鋼所および大同製鋼が国産のサブマージアーク溶接用ワイヤを開発した。当初は炭素鋼の溶接を対象としたSi-Mn系のワイヤのみであったが、その後、高張力鋼用のNi系およびNi-Cr-Mo系ワイヤ、耐熱鋼用のMo系およびCr-Mo系ワイヤ、耐候性鋼用のCu-Cr系およびCu-Cr-Ni系ワイヤなどが次々に開発された。

溶接装置、溶接ワイヤの国産化に続いて、1959（昭和34）年には、阪神溶接機材がフラックスの国産化に成功した。翌1960（昭和35）年には、ユニオンメルト溶接法の特許が期限を過ぎて失効した。それまでは特許の関係で、溶接ワイヤ、フラックスともに限られたメーカーでしか製造できなかったが、特許の失効と同時に川崎製鉄や八幡溶接棒なども溶接ワイヤとフラックスの生産・販売を開始した。この頃のフラックスは熔融型で、原料鉱石を混合・溶解し、それを急冷凝固させた後に粉碎・整粒したものである。熔融型フラックスには、ガラス状のものと軽石状のものがあるが、いずれも表面はガラス状で耐吸湿性に優れる。また一般に、フラックスの融点が低い場合、高速溶接に適する。

しかし熔融型フラックスには、得られる溶着金属の切欠きじん性が低いという欠点がある。この欠点改良についての研究が行われ、1961（昭和36）年に、じん性に富む溶着金属が得られる焼結型のフラックスが開発された。焼結型フラックスはわが国独自の画期的なフラックスで、海外にはこの種のフラックスはない。焼結型フラックスは、石灰石（CaCO<sub>3</sub>）・ほたる石（CaF<sub>2</sub>）・酸化マグネシウム（MgO）・アルミナ（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）などを主成分とする原料粉や金属粉・合金粉を混合し、それに水ガラスを添加して造粒した後、

600℃程度で焼成する。そのため脱酸成分や合金成分を任意に添加することが容易であり、炭酸塩・金属粉・合金粉などの添加によって、溶接金属の低水素化・低酸素化ならびに溶着速度の向上などが可能となる。またフラックスの耐熱性は高いため、大入熱溶接などにも適用できる。しかし、溶融フラックスに比べると吸湿性が大きいため、通常は、使用前に300℃で1時間程度の乾燥を行うことが必要である（溶融型フラックスと焼結型フラックスの主な特性の比較は3.3.3項・表3.2参照）。

さらに高いじん性が要求される高張力鋼用のフラックスについての研究・開発も行われ、種々な高張力鋼用の焼結フラックスが開発・市販された。近年では、フラックス中の脱酸剤成分とその成分比率を適正化して高じん性を確保した、950MPa級高張力鋼用のフラックスも開発されている。

発電プラント用ボイラ分野では、地球環境問題(CO<sub>2</sub>低減)の関係から、高い発電効率が求められ、蒸気条件の高温・高圧化が進められた。鋼材には、従来から使用されているMod. 9Cr-1Mo耐熱鋼の他、さらに高温強度特性を改善した高Cr-W系の鋼材の適用が検討された。それに対応して開発されたサブマージアーク溶接用の12Crフェライト系耐熱鋼用フラックスでは、Crを増加させることによって耐酸化性を向上させるとともに、Wを添加して固溶強化やNb・Vの増加による析出硬化などが図られた<sup>2)</sup>。

昭和50年代後半には、狭開先サブマージアーク溶接への適用を目的として、狭い開先角度・狭い開先幅においてもスラグの剥離性が良好なフラックスが開発された。

## 5.3 マグ・ミグ溶接ワイヤ

### 5.3.1 ソリッドワイヤ

炭酸ガスをシールドガスに用いるマグ溶接では、前述(3.6.1項(1)参照)したように、適切な脱酸成分を含んだワイヤを用いることによって満足すべき溶着金属を得られることが、1953(昭和28)年にリユーバフスキーとノボシロフとによって見出された。そしてオランダのフィリップス社が、溶接ワイヤにSiおよびMnなどの脱酸剤を0.3%以上添加して酸素を除去する方法を発明し、1956(昭和31)年に日本での特許が成立している。またわが国では1950年代前半に、名古屋大学の関口教授が炭酸ガスと酸素の混合ガスでシールドするCO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>アーク溶接法を提案し、それに用いるワイヤとしてSiおよびMnを通常より多く含む低炭素のワイヤ(いわゆる関口心線)を開発した。1971(昭和46)年には、フィリップス社が持っていた炭酸ガス溶接用ワイヤに関する日本特許が失効し、それ以後国産溶接材料メーカーが競ってこの分野に参入し、ワイヤ成分の改良などによって種々なタイプのマグ溶接用ワイヤを開発した<sup>2)</sup>。1970年代後半には、溶接ワイヤを多量に消費する造船や建築分野などでマグ溶接の採用が大幅に増加し、1984(昭和59)年になると国内のマグ溶接用ワイヤの年間生産量は、それまで首位であった被覆アーク溶接棒の生産量を追い抜くまでに増大した<sup>1)</sup>。

軟鋼・高張力鋼のマグ溶接に用いられる主なソリッドワイヤは表5.4に示すようであり、JIS規格(JIS Z 3312)では、ワイヤの化学成分および溶着金属の機

表5.4 軟鋼・高張力鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3312:2009 抜粋)

記号	シールドガス	ワイヤの化学成分 (vol%)									溶着金属の機械的性質				
		C	Si	Mn	P	S	Cu*	Mo	Al	Ti + Zr	引張強さ (MPa)	降伏点 0.2% 耐力 (MPa)	伸び (%)	温度 (℃)	吸収エネルギー (J)
YGW 11	CO <sub>2</sub>	0.02~0.15	0.55~1.10	1.40~1.90	0.030以下	0.030以下	0.50以下	—	—	0.02~0.30	490~670	400以上	18以上	0	47以上
YGW 12			0.50~1.00	1.25~1.90						—		—			
YGW 13			0.55~1.10	1.35~1.90						0.10~0.50	0.02~0.30	430~600	330以上	20以上	27以上
YGW 14			1.00~1.35	1.30~1.60						—	—				
YGW 15	Ar+CO <sub>2</sub>	0.02~0.15	0.40~1.00	1.00~1.60	0.030以下	0.030以下	0.50以下	—	0.02~0.15	490~670	18以上	-20	47以上		
YGW 16			0.85~1.60	—							—			—	
YGW 17			0.20~0.55	1.20~2.10						—	—	430~600	330以上	20以上	27以上
YGW 18	0.55~1.10	1.40~2.60	0.40以下	0.30以下	550~740	460以上	17以上	0	70以上						
YGW 19	0.40~1.00	1.40~2.00								—	—	—	—	—	—

\* 鋸めつきが施されている場合は、めっきの鋼を含む。

機械的性質が規定されている。YGW11 ワイヤは、シールドガスに 100% CO<sub>2</sub> を用いるマグ溶接の大電流域で使用するわが国独特のワイヤである。溶接金属中の酸素を低減させるために、酸素 (O<sub>2</sub>) との親和力が強い Ti・Zr・Al が微量添加されている。酸素を低減させることによって溶接金属の粘性は増大するため、水飛沫のように溶融池から飛び出すスパッタを抑制する効果が得られる。

シールドガスの種類によって、溶接に用いるワイヤは異なる。シールドガスに 100% CO<sub>2</sub> を用いる YGW11 や YGW12 などワイヤでは、Ar-CO<sub>2</sub> 混合ガスを用いる YGW15 や YGW16 などと比べ、ワイヤ中の Si と Mn の量を多く規定している。CO<sub>2</sub> の酸化力は Ar-CO<sub>2</sub> 混合ガスより強いため、溶接金属の脱酸に Si と Mn がより多く使用され、溶接金属中に残存するそれらの量が少なくなるのを避けるためである。表 5.5 は同一のソリッドワイヤ (YGW16) を用い、シールドガスの Ar 混合比を変えた場合の溶接金属の化学成分の変化を示したものである。シールドガス中の CO<sub>2</sub> の比率が増加するに従って溶融金属中の酸素量も増加し、酸素との親和力が強い Si および Mn による脱酸が進行して、溶接金属中の Si および Mn の歩留まりは減少する。したがって 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 混合ガス用ワイヤを、誤って 100% CO<sub>2</sub> のシールドガスで使用すると、溶接金属中の Si と Mn が減少し過ぎ、表 5.6 に示すように、溶接継手の強度は低下し、じん性は高くなる。反対に 100% CO<sub>2</sub> のシールドガス用ワイヤを、80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 混合ガスで使用すると、継手強度は高くなるが、じん性 (吸収エネルギー) は低下する。

表 5.5 シールドガス組成と溶着金属の化学成分

シールドガス	化学成分 (Vol.%)				
	C	Si	Mn	P	S
CO <sub>2</sub>	0.10	0.22	0.62	0.015	0.009
Ar + 20%CO <sub>2</sub>	0.10	0.39	0.80	0.014	0.007
Ar + 10%CO <sub>2</sub>	0.09	0.39	1.06	0.014	0.007

表 5.6 シールドガス組成と溶着金属の機械的性質

シールドガス	機械的性質			
	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	吸収エネルギー (J・0°C)
CO <sub>2</sub>	400	500	36	140
Ar + 20%CO <sub>2</sub>	420	540	34	120
Ar + 10%CO <sub>2</sub>	460	550	30	110

YGW17 は、自動車部品のパルスマグ溶接の改善を目的として、1986 (昭和 61) 年に開発された低 Si 系のワイヤである。ワイヤ中の Si を低減させることに

よって、ワイヤ先端に形成される溶滴の粘性は低下し、溶滴のワイヤ端からの離脱が容易になる。その結果、ワイヤ端から離脱する溶滴径は小粒となり、アーク長を短くしても短絡が生じにくくなるため、溶接速度の高速化が可能になる。

YGW18 および YGW19 は、大入熱・高パス間温度に対応するために、1997 (平成 9) 年に開発されたワイヤである。建築鉄骨の溶接施工では、近年、より厳格な溶接施工管理が要求されるようになってきた。日本建築学会の鉄骨工事技術指針では、溶接部の健全性確保のために、「溶接入熱 40kJ/cm 以下かつパス間温度 350°C 以下」を溶接時の熱管理の目安としている。建築鉄骨の柱-梁仕口溶接部の溶接長は、一般の溶接構造物に比べて短く、連続で溶接するとパス間温度が 300~600°C まで上昇することがある。パス間温度が高くなると、溶接部の冷却速度が遅くなり、溶接金属の引張強さもじん性も規格値を満たさなくなる。そのため、Mo を添加した Ti-B 系 (高じん性) のソリッドワイヤが開発され、YGW18 および YGW19 として JIS 規格に追加された。これらのワイヤでは、従来ワイヤ (YGW11) の場合より溶接入熱を大きく、パス間温度を高くしても、良好な機械的性質の溶接金属が得られる。すなわち入熱管理の煩わしさを軽減できるばかりでなく、パス間温度の拡大による冷却待ち時間の短縮が可能となり、高品質・高能率な施工が可能となる。

ソリッドワイヤでは、一般に、通電性・送給性の向上と防錆を目的として、ワイヤ表面には銅めっきが施されている。従来常識とされていたこのような銅めっき処理を行わない、銅めっきレスワイヤが 2000 (平成 12) 年開発された。特殊な表面処理を施すことによって銅めっき処理を省き、優れたワイヤ送給性や通電性を確保して、良好なアークの安定性や低スパッタ化などを実現した。両者の通電抵抗の変化を比較すると図 5.5 のようであり、銅めっきワイヤではめっき被膜の微小クラックの影響でめっき部と地金露出部で通電抵抗値が変化する。一方、銅めっきレスワイヤでの通電抵抗値はやや高い値となるが、その変動は少なく均一な通電状態が得られる<sup>3)</sup>。

その他、耐候性鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3315)、モリブデン鋼およびクロムモリブデン鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3317)、鋳鉄用ソリッドワイヤ (JIS Z 3252)、ニッケルおよびニッケル合金用ソリッドワイヤ (JIS Z 3334)、銅および銅合金用ソリッドワイヤ (JIS Z 3341) が開発され、規格化されている。またティグ溶接に用いる溶加材として、高張力鋼および

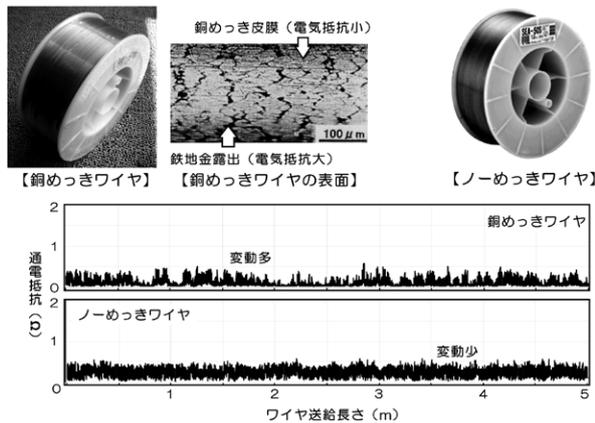


図 5.5 銅めっきワイヤとノーめっきワイヤの比較<sup>3)</sup>

低温用鋼用ワイヤ (JIS Z 3316) と 9% ニッケル鋼用ワイヤ (JIS Z 3332) が開発され、規格化されている。なお、ステンレス鋼およびアルミニウムのソリッドワイヤについては後述する。

### 5.3.2 フラックス入りワイヤ

わが国初のフラックス入りワイヤは、日立製作所が開発した炭酸ガス溶接機 (ハイアーク溶接機) に用いられるワイヤとして、1961 (昭和 36) 年に国産化された。神戸製鋼所、八幡溶接棒および富士溶接棒が、それぞれ異なった形式のフラックス入りワイヤを開発して市販している。しかし、いくつかの新技術も自社開発されてはいるものの、依然として外国の技術に依存する度合が極めて大きかった<sup>2)</sup>。

1973 (昭和 48) 年のオイルショック以降、造船分野では船の建造量が激減し、1980 (昭和 55) 年にはピーク時の約 1/3 にまで落ち込んだ。そのため造船メーカーは生き残りを賭けて徹底したコストダウンに取り組み、建造工数に占める比率の高い溶接作業の合理化 (生産性向上) が重点的に取り上げられた。被覆アーク溶接やグラビティ溶接に替わる新しい溶接法についての検討がなされ、自動車分野や建築鉄骨分野で先行していたソリッドワイヤによる半自動マグ溶接の適用が進められた。マグ溶接は多量のスパッタ発生や操作性の悪さが問題となったが、それ以上の致命的な問題点として、船殻の製作特有の全姿勢溶接に十分な対応ができないことが判明した。

ソリッドワイヤを用いるマグ溶接では、下向や水平姿勢で高電流・高能率な溶接が可能であるが、立向や上向姿勢では低電流・低能率の溶接に限定され、作業能率は大きく低下する。また船殻の溶接継手には、水平、下向、立向および上向の溶接線がある。そのため溶接作業者は溶接姿勢が変わる度に、溶接条件を再調

整するために遠方の溶接機まで往復しなければならず、高能率は一層阻害されることとなった。そこで強く望まれたのは、同一高電流で全姿勢溶接が可能な新たなワイヤの開発であった。そしてこのニーズに応えるには、重力に逆らって溶融池を支えるスラグに頼るしかないと考え、新しいフラックス入りワイヤの開発が始められた。ソリッドワイヤの欠点としては、上記した溶接姿勢による能率低下の他、多発するスパッタの除去、少量の硬い付着スラグの除去、ビード外観不良の手直しなどの後処理工数の増大も大きな問題であった。

立向下進溶接で良好な作業性を示すチタニア系および低水素系被覆アーク溶接棒には、主要スラグ形成剤として、アークを安性化しかつ溶融スラグの粘度を適正化する酸化チタン (チタニア:  $\text{TiO}_2$ ) が含まれている。そこで、この  $\text{TiO}_2$  の作用と効果に着目した研究が行われ、チタニア系細径フラックス入りワイヤが 1965 (昭和 40) 年に開発された。その頃ある造船所で、溶接ビード表面の平滑度に厳しい基準を設定した船が連続して建造されることとなり、スパッタの除去はもちろんのこと、溶接ビードの全長でグラインダ研削が必要とされた。新しいフラックス入りワイヤのビード表面の平滑さに着目した溶接スタッフは、発注者にその溶接ビードを見せて説得し、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接のビードはグラインダ研削が不要であるとの見解を引き出した。そしてフラックス入りワイヤを全面的に採用することによって、膨大な後処理工数が不要となって、大幅な工数低減を達成した。その後、下向溶接などに限定して安価なソリッドワイヤを使用することも検討されたが、溶接作業者の反対が強く、部分的なソリッドワイヤの使用は取りやめとなった。それまでの被覆アーク溶接に比べて溶接材料 (ワイヤ) の価格は高くなるが、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接の溶着効率は極めて高いため、高溶着率化と手直し工数の削減で、単位溶接長あたりのトータルコストは従来の 1/2 以下となった<sup>4)</sup>。

その後、伸線技術、潤滑技術、表面処理技術さらには低水素化技術などの実用化研究も短期間で集中的に行われた。造船溶接技術者の強い要望に応じて開発された、高電流で上向溶接も立向溶接も可能な全姿勢溶接用の細径フラックス入りワイヤは、瞬く間にわが国の造船業界へ驚異的に普及した。1980 (昭和 55) 年の生産量は約 2,000 トン/年であったのが、5年後の 1985 (昭和 60) 年には約 25,000 トン/年に急増し、1990 (平成 2) 年には 60,000 トン/年を超え、20年後の 2000 (平成 12) 年には 100,000 トン/年近くに

まで増大した<sup>5)</sup>。

フラックス入りワイヤは、一般に、連続的に供給される外皮帯鋼をU型に成形し、その中にフラックスを充填した後、外皮帯鋼を造管整形して製造される。そのため外皮金属の表面には、造管整形時の合わせ目（シーム）が残り、フラックスの吸湿に起因する溶接欠陥（例えばピットやガス溝など）が発生しやすい。また銅めっきなどの湿式表面処理もできない。このような問題を解決するために、外皮金属に造管整形時の合わせ目が残らないフラックス入りシームレスワイヤが1981（昭和56）年に開発された。このワイヤの製造では、フラックス充填後の造管工程に溶接を採用し、外皮金属の造管溶接によってフラックス充填管を作る。銅めっきを施すことができるフラックス入りシームレスワイヤは、ワイヤとコンタクトチップ間の通電性を改善し、チップの耐摩耗性も向上させる。そのため、アークの安定性やワイヤの送給性を向上させる効果が得られ、フラックスの吸湿に起因した溶接欠陥の発生も抑制できる。

造船や橋梁などの部材ではすみ肉溶接継手が大きい比率を占め、その大部分が水平すみ肉溶接として施工される。しかし水平すみ肉溶接で得られる最大の脚長は8mm程度で、それ以上の脚長を得ようとしても、図5.6に示すようなアンダカットやオーバラップが発生し、良好なすみ肉溶接ビードは得られない。そこで、フラックス中の鉄粉添加量を増加させるとともにフラックスの特性も改良した、大脚長すみ肉溶接用フラックス入りワイヤが1985（昭和60）年に開発された。このワイヤを使用した溶接では、表5.7に示すように、脚長8mmを超える水平すみ肉溶接が可能となり、1パス溶接で最大10.5～11mm程度の脚長を得ることもできる。

また、フラックス中にスラグ形成剤を含まない新しいタイプのフラックス入りワイヤとして、メタル系フラックス入りワイヤも開発されている。このワイヤのフラックスは鉄粉、合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成され、スラグ形成剤は全く含まれていな

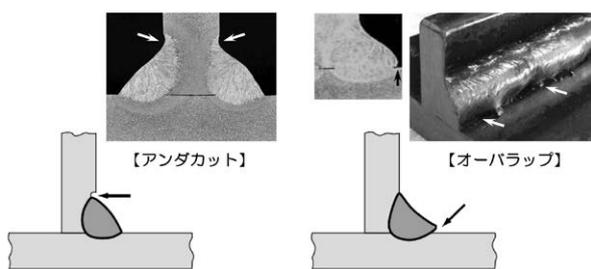


図 5.6 大脚長水平すみ肉溶接で生じやすい溶接欠陥

表 5.7 大脚長水平すみ肉溶接<sup>5)</sup>

脚長 (立板×下板)	断面マクロ	スラグ被包状態	ビード外観
8.5mm × 9.0mm			
9.5mm × 9.6mm			
10.5mm × 11.0mm			

φ1.4mmワイヤ、溶接電流：320A、アーク電圧：32V  
\* 一般に、水平すみ肉溶接での脚長の上限は8mm程度。

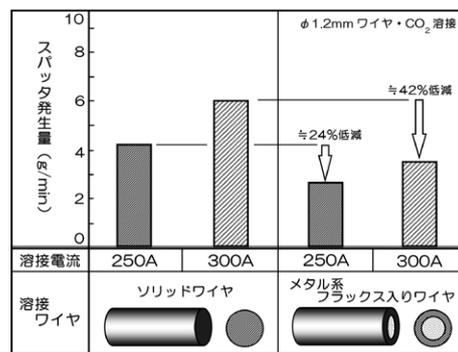


図 5.7 メタル系フラックス入りワイヤの効果

い。メタル系フラックス入りワイヤの効果の一例を示すと図5.7のようであり、ソリッドワイヤを用いた溶接に比べ、発生するスパッタは大幅に低減される。

1990年代中頃になると、職場の環境改善への関心が高まり、溶接作業現場においても「脱3K」への取り組みが進められ、特に溶接ヒュームへの対策が強化されるようになった。フラックス入りワイヤを用いた溶接は、一般に高電流を使用した溶接となるため、単位時間当たりの溶接ヒューム発生量が多く、溶接作業者の健康管理のためにも低ヒューム化が大きな課題であった。このような市場ニーズを背景に、ヒューム発生現象についての基礎研究が行われ、ワイヤの低炭素化やフラックスへのアルカリ金属の添加などが溶接ヒュームの低減に有効であることが明らかにされた。そして、フラックス入りワイヤの特性・特徴を保ちながら、ヒュームとスパッタの発生量を大幅に低減させた低ヒューム・低スパッタのフラックス入りワイヤが、1995（平成7）年に開発・実用化された。このフラックス入りワイヤでは、従来のフラックス入りワイヤに比べ、ヒューム発生量とスパッタ発生量はいずれも約40%減少し、作業環境の大幅な改善に寄与した。その他、塩基性フラックスの使用が常識とされていた

溶接金属の低酸素化をチタニア系フラックスで実現し、低温じん性を向上させたフラックス入りワイヤや、焼戻しぜい化を抑制するフラックス入りワイヤなども開発された<sup>6)</sup>。

フラックス入りワイヤの構造は図5.8 (a) のようであり、チューブ状の外皮金属（シース）の内側にフラックスが充填されている。その代表的な断面形状は (b) のようであり、①および②の形状は主に直径1.2～1.6mmの細径ワイヤに適用され、外皮金属に合わせ目（継目）がないシームレスタイプ（①）と合わせ目があるタイプ（②）に大別される。③および④の形状は主に直径2.4～4.0mmの太径ワイヤに適用され、アーク発生時に生じやすいフラックス柱（外皮金属に比べて溶融しにくいフラックスが半溶融状態となってワイヤ中央部に残存する現象）の発生を抑制する効果がある。しかし、近年は太径ワイヤの使用量が大幅に減少し細径ワイヤの適用が拡大しているため、フラックス入りワイヤの大部分は①または②の形状となっている。また、②の外皮金属に合わせ目（継目）があるタイプでも、造管時の工夫で合わせ目の間隔をより狭く整形できるようになっており、フラックスの耐吸湿性はシームレスワイヤと遜色ないレベルに達している。

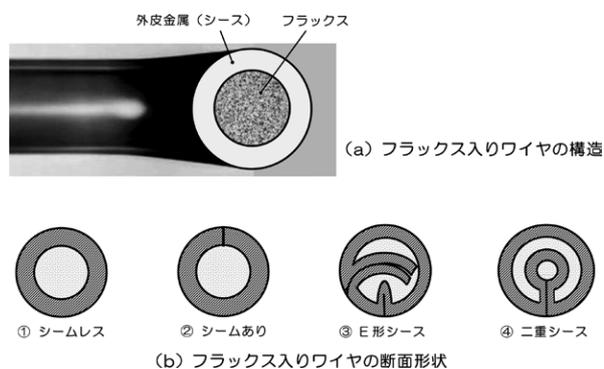


図 5.8 フラックス入りワイヤ<sup>3)</sup>

フラックス入りワイヤは図5.9のように分類され、溶接法、フラックスの種類およびシールドガスの組成

に応じて、それぞれ異なったワイヤが使用される。主なワイヤのフラックスの構成は図5.10のようであり、代表的なスラグ系ワイヤであるルチール系ワイヤのフラックスは、スラグ形成剤、合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成されている。もう一つのスラグ系ワイヤであるすみ肉溶接用ワイヤのフラックス構成もルチール系ワイヤと同様であるが、フラックスに添加される鉄粉量は多い。メタル系ワイヤのフラックスは多量の鉄粉と合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成され、スラグ形成剤はほとんど含まれていない。スラグ系ワイヤを用いた溶接では溶接後のビード表面が凝固スラグで覆われるが、メタル系ワイヤを用いた溶接のビード表面に付着するスラグは極めて微量である。

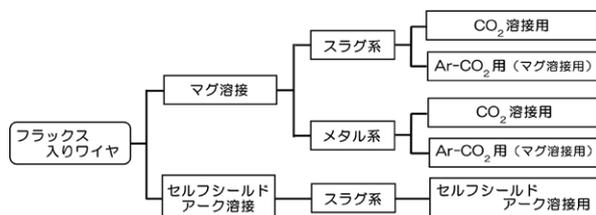


図 5.9 フラックス入りワイヤの種類

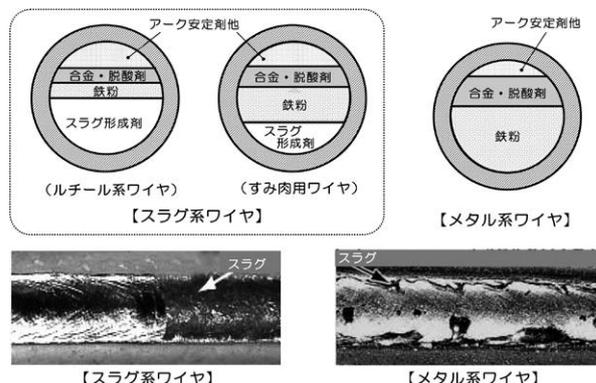


図 5.10 スラグ系ワイヤとメタル系ワイヤ<sup>4)</sup>

ルチール系フラックス入りワイヤの溶滴移行は図5.11 (a) のようであり、溶滴の移行形態はグローブユール移行となる。このワイヤが使用できる電流域は、中～大電流域（直径1.2mmワイヤでは180～320A程度）

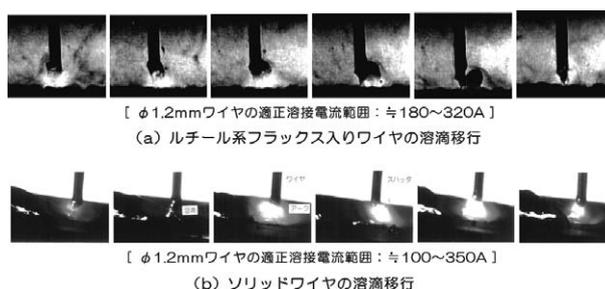


図 5.11 溶滴移行形態の比較<sup>4)</sup>

に限定される。ソリッドワイヤを用いる溶接では、小電流域（直径1.2mm ワイヤでは200A以下の電流域）での溶滴移行形態が（b）に示すような短絡移行となる。しかしルチール系フラックス入りワイヤを用いる溶接では、溶滴の短絡移行を実現できず、小電流域では安定なアーク状態が得られない。

細径フラックス入りワイヤの適用は造船分野の半自動溶接から始まって、多電極自動すみ肉溶接、簡易車による自動すみ肉溶接ならびに溶接ロボットを用いた自動溶接にも適用を拡大していった。また造船分野の他、橋梁や建築鉄骨分野など、他の産業分野にも急速に普及していった。被覆アーク溶接棒で培った技術を背景に、溶接材料メーカーが競って顧客の要求に対応した各種のフラックス入りワイヤを開発していったことが、被覆アーク溶接の比率が比較的高い米国やソリッドワイヤを使用したマグ溶接の比率が高い欧州とは異なるわが国独自の世界を創りあげた最大の理由であろうと思われる。

## 5.4 ステンレス鋼用ワイヤ

ステンレス鋼の溶接は1935（昭和10）年頃から検討され、日本油脂が1938（昭和13）年にステンレス鋼用の被覆アーク溶接棒を開発した。当初、ステンレス鋼の溶接は兵器産業で多用されたが、一般構造物でも、鋳鋼バルブの弁や弁座の肉盛溶接、水車ランナの肉盛溶接、圧力容器の溶接、タービンの翼車と車軸の溶接などに使用され始めた。また日本油脂は1943（昭和18）年に、防弾鋼板などの特殊鋼溶接に必要なオーステナイト系ステンレス被覆アーク溶接棒を国産化した。しかし日本油脂が製造した高級ステンレス溶接棒は、ほとんどが陸軍および海軍の軍需品製造に用いられ民間には出回らなかった。民間では、他のメーカーによって作られた手塗りのステンレス溶接棒が使用されていたようである。

戦後の化学工業分野での設備増強・新設に伴って、ステンレス鋼被覆アーク溶接棒の需要は急激に増加した。それまでの化学プラントに用いられた装置や機器は海外で製作され、わが国ではそれらの据付けのみが行われていた。しかし1957（昭和32）年になるとステンレス鋼用の被覆アーク溶接棒のJIS規格が制定され、国産ステンレス鋼材の品質も向上したため、従来輸入に頼っていた化学プラントの装置や機器は次第に国産化されるようになった<sup>2)</sup>。

ステンレス鋼は優れた耐食性や耐熱性を有すること

から、各種工業分野で幅広く適用され、その使用量は年々増加している。ステンレス鋼の溶接には、炭素鋼の場合と同様に、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、ティグ溶接など種々な溶接法が適用されている。最も多く適用されている溶接法はマグ溶接であるが、炭素鋼の場合に比べ、ステンレス鋼のマグ溶接におけるソリッドワイヤとフラックス入りワイヤの使用比率は、フラックス入りワイヤの方がとりわけ高い比率となっている。ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの生産量は1985（昭和60）年頃から飛躍的に増加し、1991（平成3）年にはステンレス鋼用被覆アーク溶接棒の生産量を越え、近年では全ステンレス鋼溶接材料に占めるフラックス入りワイヤの比率は50%近くにまで達している。比較的熟練を要せずに高能率な半自動溶接ができることおよび自動化に適したワイヤであることなどが、フラックス入りワイヤの適用増加の大きな要因であろうと思われる。

ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの規格は、1974（昭和49）年にAWS（米国溶接協会）が“AWS A 5.22 SPECIFICATION for FLUX CORED CORROSION-RESISTING CHROMIUM and CHROMIUM-NICKEL STEEL ELECTRODES”として制定した。わが国では1983（昭和58）年に、“JIS Z 3323：ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ”として14種類のフラックス入りワイヤのJIS規格が制定された。近年ではJISの規格以外のワイヤも開発され、主要なステンレス鋼の溶接にはほぼ全てフラックス入りワイヤが使えるまでに多品種化され、被覆アーク溶接棒からの置換えが進んでいる。

初期のステンレス鋼用フラックス入りワイヤは、直径2.0mm以上の太径ワイヤが主流であった。しかし、その後の製造技術の進歩によってワイヤの細径化が推進され、1979（昭和54）年頃には直径1.6mm、1981（昭和56）年頃には直径1.2mmのワイヤが市販されるようになった。その結果、汎用マグ溶接機の送給装置をそのまま使用できるようになり、適正溶接条件範囲が広いこともあって、フラックス入りワイヤの適用は一層拡大することとなった<sup>7)</sup>。近年では、薄板用として直径0.9mmおよび0.8mmの極細ワイヤも使用されるようになっている。初期のステンレス鋼フラックス入りワイヤには、前述した炭素鋼用フラックス入りワイヤ（5.3.2項参照）と同様に、複雑な断面形状が用いられていた。しかし細径化に伴って、ワイヤの断面形状は単純なものへと推移している<sup>8)</sup>。

ワイヤの外皮金属（シース）には、通常、溶接金属の組成を安定化するためにステンレス鋼を用い、充填

フラックスには溶接作業性改善のためのアーク安定剤やスラグ形成剤（炭酸塩・ケイ酸塩・フッ化物・金属酸化物など）の他、合金成分の酸化消耗分補充や溶着量向上および合金元素添加を目的とした金属粉末が用いられる。フラックス入りワイヤを使用する場合のシールドガスとしては、通常、溶接金属の性能面を重視してCO<sub>2</sub>を使用することが多い。しかし、スパッタの発生を抑制したい場合や母材からの希釈を抑えたい肉盛溶接などの場合には、Ar+20%CO<sub>2</sub>混合ガスも使用される。特殊鋼種の溶接では、ワイヤメーカーから専用のシールドガスが指定されていることも多い。

ステンレス鋼の溶接に用いられる主な溶接ワイヤには表5.8のようなものがあり、詳細は“JIS Z 3321：溶接用ステンレス鋼溶加棒、ソリッドワイヤ及び鋼帯”ならびに“JIS Z 3323：ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ及び溶加棒”に規定されている。化学組成（鋼種）に応じて種々なタイプに分類されているが、ソリッドワイヤ・溶加棒は「YS+3桁の数字」で、フラックス入りワイヤ・溶加棒は「TS+3桁の数字」でその種類を表す。また、ワイヤの種類は母材の鋼種に応じて表5.9のように選定される。マルテンサイト系およびフェライト系ステンレス鋼の溶接では、一般に、それぞれSUS410（13%Cr）、430（17%Cr）またはそれらにNbを添加したワイヤ（SUS410NbおよびSUS430Nb）が用いられる。Nbが添加されたワイヤでは組織が微細化し、延性やじん性が向上する。また、じん性向上と低温割れ防止の観点から、オーステナイト系のSUS309（23Cr-13Ni）やインコネル系（15Cr-65Ni-2Nb）のワイヤが用いられることもある。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接では、基本的に母材と同一成分のワイヤを用いて溶接するが、SUS304（18Cr-8Ni）の溶接には母材と多少異なる組成のSUS308（19Cr-9Ni）ワイヤなど、溶接性を考慮してワイヤを選定することもある。

表 5.8 ステンレス鋼用マグ溶接ワイヤ

溶接ワイヤ		主成分	特徴・適用鋼種
ソリッド	フラックス入り		
YS410	TS410C	13Cr	SUS403・SUS410などの溶接 予熱、パス間温度の管理要
YS430	TS430C	18Cr	SUS430の溶接
YS308	TS308C	19Cr-9Ni	SUS304の溶接
YS309	TS309C	22Cr-12Ni	SUS309Sの溶接 炭素鋼とステンレス鋼の溶接
YS310	—	25Cr-20Ni	SUS310の溶接、耐酸化性優 高温割れが発生し易い
YS316	TS316C	18Cr-12Ni-2Mo	SUS316の溶接、耐高温割れ感受性良 耐食性、高温強度、延性比較的優
YS317	TS317LC	18Cr-12Ni-3Mo	SUS317の溶接、耐食性優
YS347	TS347C	19Cr-9Ni-Nb	SUS321・SUS347の溶接

表 5.9 ステンレス鋼母材とワイヤの組合せ

分類	母材		ワイヤ
	JIS 規格	代表組成	JIS 規格
マルテンサイト系	SUS403	18Cr-低Si	YS410・YS309・YS310
	SUS410	12Cr	
	SUS410S	13Cr-低C	
フェライト系	SUS405	13Cr-0.2Al	YS410・YS309・YS310
	SUS430	18Cr	
	SUS434	18Cr-1Mo	
オーステナイト系	SUS304	18Cr-8Ni	YS308
	SUS304L	18Cr-8Ni-低C	YS308L・YS347
	SUS309S	22Cr-12Ni	YS309
	SUS310S	25Cr-20Ni	YS310S
	SUS316	18Cr-12Ni-2.5Mo	YS316・YS316L
	SUS316L	18Cr-12Ni-2.5Mo-低C	YS316L
	SUS317L	18Cr-12Ni-3.5Mo-低C	YS317L
	SUS321	18Cr-8Ni-Ti	YS347

## 5.5 アルミニウム用溶接ワイヤ

アルミニウムは地球を構成する外殻地層の7.5%を占めるといわれており、ケイ素（25.8%）に次ぐ地球上第2位の金属元素で、その量は鉄（4.7%）よりも多い。しかし、金属アルミニウムとして始めて出現したのは1825年で、デンマークのオルステッド（Oersted）が実験室で製造したとされている。アルミニウムは主に酸化物として存在し、酸素との親和力が強固なため、鉄などに比べると極めて還元されにくい。そのため、化学的方法に頼っていた当時の金属アルミニウム生成はすこぶる困難視されていた。1886（明治19）年に米国のホール（Hall）とフランスのエルー（Heroult）が、偶然同じ年に、溶融塩によるアルミニウムの電解製造法を工業的生産方式として始めて確立した。この方法はホール・エルー法と呼ばれ、発明以来100年以上経過した現在も、基本的にはこの製造方法が採用されている<sup>9)</sup>。

わが国でのアルミニウム溶接は1951（昭和26）年のアルゴンの輸入に始まり、1953（昭和28）年には全アルミニウム船のティグ溶接が三菱・下関造船所で行われている（前述3.4.1項参照）。また、ミグ溶接も同時期に適用が検討されている<sup>2)</sup>。アルミニウムの溶接に用いられるアーク溶接はほとんどがティグ溶接およびミグ溶接で、溶加材としてはソリッドの溶加棒またはワイヤが用いられる。アルミニウムの特性上、フラックスを用いる被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接およびフラックス入りワイヤを用いたミグ（マグ）溶接が適用されることはない。

アルミニウムおよびその合金の溶接用ワイヤと溶加棒は、“JIS Z 3322：アルミニウム及びアルミニウム合金溶加棒並びに溶接ワイヤ”に規定されている。化学成分によって33種類に分類されているが、多用されている主なワイヤ・溶加棒は表5.10に示す4種類

である。A1100は純アルミニウムならびにAl-Mn系合金の溶接に使用され、溶接性、耐食性および延性いずれも良好である。Al-Si系合金であるA4043は、溶接金属の高温（熱間）割れを抑制する効果が大きいいため、溶接割れを生じやすい熱処理系のアルミニウム合金や鋳物などの溶接に用いられる。ただし溶着金属の延性とじん性はやや劣り、アルマイト（陽極）処理を行った溶接部は母材と異なる灰色に変色する。Al-Mg-Mn系合金のA5183は、溶接性が極めて良好で、溶着金属の延性やじん性に優れ、機械的性質や耐食性も良好であるため、各種アルミニウム合金の溶接に最も多用されている。Al-Mg系合金のA5356は、少量のチタンの添加によって結晶粒の微細化を図ったワイヤであり、溶接性および機械的性質ともに良好で、Al-Mg系合金およびAl-Mg-Si系合金の溶接などに適用される。

表 5.10 主な溶加材の特徴・特性

種類	特徴・特性
A1100	純アルミ (Al $\geq$ 99.00%) 溶接性・耐食性良、延性・じん性優 溶接継手の引張強さは 74~108MPa 程度
A4043	5.0%Siを標準組成とするAl-Si系合金 耐高温割れ性優、延性・じん性劣、アルマイト処理で変色 溶接継手の引張強さは 167~245MPa 程度 6000系合金・アルミ合金鋳物などの溶接に適用
A5183	4.5%Mg、0.75%Mnを標準組成とするAl-Mg-Mn系合金 溶接性優、機械的性質・耐食性良、延性・じん性優 溶接継手の引張強さは、274~304MPa 程度
A5356	5.0%Mgを標準組成とするAl-Mg系合金 Tiの微量添加で結晶粒を微細化して機械的性質を改善 溶接性良、耐力・じん性はA5183よりやや劣 溶接継手の引張強さは、265~304MPa 程度 広範囲な溶接に適用

溶加材（溶加棒およびワイヤ）の種類は、溶接継手の強度・延性・耐食性および溶接の難易度（耐溶接割れ性）などを考慮して、母材の材質や要求される継手の特性に適したものを選定しなければならない。母材と溶加材との一般的な組合せは“JIS Z 3604：アルミニウムのイナートガスアーク溶接作業標準”に規定されており、その主な部分を抜粋すると表5.11のよう

表 5.11 母材と溶加材の組合せ

	純 Al	Al-Mg 合金		Al-Mg-Si 合金	Al-Zn-Mg 合金	Al 鋳物
	A1100	A5052	A5083	A6N01	A7N01	AC4C
A1100	A1100 (A4043)	A4043 (A5356)	A5356	A4043	A5356 (A4043)	A4043
A5052		A5356 (A4043)	A5356	A4043 (A5356)	A5356	A4043 (A5356)
A5083			A5183 (A5356)	A5356	A5356	A4043 (A5356)
A6N01				A4043 (A5356)	A5356 (A4043)	A4043 (A5356)
A7N01					A5356	A4043 (A5356)
AC4C	(4043)：用途によって用いても良い (5356)：用いても良い					A4043

である。Al-Mg系合金やAl-Zn-Mg系合金の溶接ではAl-Mg系合金のA5356が用いられることが多く、Al-Mg-Si系合金やAl鋳物の溶接にはAl-Si系合金であるA4043が多用される。Al-Si系合金は融点が低く、熱間ぜい性による割れに対する抵抗力が大きいためである。

## 5.6 シールドガス

溶接部を大気から保護するために用いられるシールドガスには、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He)、炭酸ガス (CO<sub>2</sub>)、酸素 (O<sub>2</sub>) および水素 (H<sub>2</sub>) がある。アルゴン、ヘリウム、炭酸ガスは単体ガスとしても用いられるが、酸素と水素は単体で用いられることはなく、アルゴンや炭酸ガスとの混合ガスとして用いられる。

アルゴンは1894（明治27）年に、レイリー卿とラムゼーとが空気中から発見した。アルゴンという名称は、ギリシャ語の“不活発・不活性”という意味の言葉が語源である。大気の中で3番目に多く含まれている気体で、その容量濃度は0.93%と、炭酸ガス(0.039%)より多い。アルゴンは、空気をマイナス200℃近い極低温まで冷却し、空気の主成分である窒素や酸素との沸点の差を利用して取り出される。ただし、空気中に含まれる量はわずかであるため、一般的には、酸素や窒素を製造する際に併産されている。

ヘリウムは1868（明治1）年に、仏の天文学者ピエール・ジャンサンが皆既日食観察時に太陽光線のスペクトルから発見し、ギリシャ語で「太陽」を表すheriosにちなんで命名された。無色、無臭、無味、無毒で最も軽い希ガス元素である。また、全ての元素の中で最も沸点が低く、加圧下でしか固体とはならない。空気に占める比率は極めて微量（0.0005%）であるが、天然ガスと共に産出する。天然ガスの井戸から採取される成分は主にメタンであるが、時々0.5~1%程度のヘリウムを含むガスが出る井戸があり、このガスを分離してヘリウムを造る方法が商業ベースでは採用されている。わが国にはヘリウムを多く含む天然ガスの井戸はなく、米国・アルジェリア・ポーランド・ロシアなどで生産されている。これらの国のうち最も生産量が多いのは米国で、カンザス州・テキサス州・オクラホマ州などに多くのヘリウム生産工場がある。従来、わが国のヘリウムは全て米国から輸入していたが、近年ではカタールからも輸入されている。

炭酸ガスは1756年に、スコットランドの化学者ジョセフ・ブラックが発見したとされている。また

1577年に、木炭の燃焼時に発生する捉えどころのない気体（実は炭酸ガス）の存在に気付いたベルギーの化学者ヘルモント（J. B. von Helmont）を発見者とする説もある。ブラックは自分が発見した気体を「固定空気」と呼び、その後ラボアジエは同じ物質を「白亜酸」と呼んだと記録されている。この時点ではまだ「酸素」は発見されておらず、「二酸化炭素」と呼ばれるようになったのは酸素の発見（1774年）以降であり、水分の存在下で酸を生じる物質であることから「炭酸ガス」と呼ばれるようになった。

炭酸ガスは、空気中の二酸化炭素としてはごくわずかしか含まれていないため、通常、空気分離で製造されることはない。工業的には、アンモニア合成工業の副生ガス、製鉄所の副生ガスおよび重油脱硫用酸素プラントなどの副生ガス（低純度の粗炭酸ガス）を精製して、高純度の炭酸ガスを製造する。炭酸ガスは無色・無臭／不燃性のガスで、液化炭酸ガスやドライアイスとして使用される。

わが国でのアルゴンは、日本酸素（現大陽日酸）が1949（昭和24）年に国内初のアルゴン分離装置を完成させ、翌年から市販を開始している。国内の溶接メーカーがマグ溶接機の市販を開始したのは1965（昭和40）年頃、フィリップス社が持っていた炭酸ガス溶接用ワイヤに関する日本特許が失効し、国産溶接材料メーカーが参入したのは1971（昭和46）年頃である（3.6.1項（1）参照）。そのため炭酸ガスの本格的な市販は比較的遅く、1973（昭和48）年頃からである。また1976（昭和51）年には、俗にマグガスと呼ばれる80%アルゴンと20%炭酸ガスの混合ガスが、帝国酸素（現日本エア・リキード）から発売されている<sup>10)</sup>。

わが国の溶接用シールドガスに関する最初の規格としては、“JIS K 1106：液化炭酸ガス”が1954（昭和29）年に、“JIS K 1105：溶接用アルゴンガス”が1958（昭和33）年にJIS規格として制定されている。また日本溶接協会規格として、“WES 5401：アーク溶接用アルゴン-炭酸ガス混合ガス”が1986（昭和61）年に制定されている。しかし、これらのシールドガス規格は数度の改正を経て、現在はISO規格に準拠した“JIS Z 3253：溶接及び熱切断用シールドガス”として新しいJIS規格が制定されている。これらのガスの中、アーク溶接に用いられるのは表5.12に示す24種類であり、溶接時の反応挙動に基づいて、不活性、弱酸化性、強酸化性および還元性の4種類に大別される。アルゴンやヘリウムならびにそれらの混合ガスである不活性ガスは、ミグ溶接、ティグ溶接お

よびプラズマアーク溶接に用いられる。弱酸化性ガスは、炭酸ガスや酸素の添加量が比較的少ないアルゴンとの混合ガスである。強酸化性ガスは、炭酸ガスや酸素の添加量が比較的多いアルゴンとの混合ガス、炭酸ガスおよび炭酸ガスと酸素の混合ガスであり、マグ溶接に用いられる。アルゴンと水素の混合ガスである還元性ガスは、オーステナイトステンレス鋼やニッケル・ニッケル合金のティグ溶接およびプラズマアーク溶接に用いられる。

表 5.12 アーク溶接に用いられるシールドガスの種類

反応挙動	種類		組成 (vol%)					適用溶接法
	大分類	小分類	酸化性		不活性		還元性	
			CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>	
不活性	I	1			100			ミグ溶接 ティグ溶接 プラズマアーク溶接
		2				100		
		3			残部	0.5~95		
弱酸化性	M1	1					0.5~5	マグ溶接
		2						
		3			残部			
		4	0.5~5	0.5~3				
強酸化性	M2	0	5~15					マグ溶接
		1	15~25					
		2						
		3	0.5~5	3~10				
		4			残部			
		5	5~15	0.5~3				
		6	15~25	3~10				
	7							
	M3	1	25~50					マグ溶接
		2		10~15				
		3	25~50	2~10	残部			
		4	5~25	10~15				
	C	1	100					マグ溶接
2		残部	0.5~30					
還元性	R	1					0.5~15	ティグ溶接 プラズマアーク溶接
		2					残部	

### 参考文献

- 1) 西川：溶接材料に見る溶接の20世紀、溶接技術2000年2月号，PP.105~110，産報出版
- 2) 溶接五十年史編集委員会：溶接五十年史，1962年，産報
- 3) 伊藤 他：高性能銅めっきレスマグ溶接用ソリッドワイヤの開発と適用，溶接技術2000年8月号，PP.68~72，産報出版
- 4) 酒井：新しいフラックス入りワイヤの開発と普及，溶接技術2002年5月号，PP.92~94，産報出版
- 5) 清水：アーク溶接の材料とプロセス，溶接学会誌Vol.80（2011），No.8，PP.21~30
- 6) 菅：溶接材料の現状と今後，神戸製鋼技報Vol.54，No.2（Aug.2004），PP.6~10

- 7) 相原：フラックス入りワイヤによるステンレス鋼溶接の実際，溶接学会誌，Vol.61（1992），No.7，PP.18～21
- 8) 渡辺 他：ステンレス鋼フラックス入りワイヤの開発動向，神戸製鋼技報 /Vol. 54, No. 2（Aug. 2004），PP.47～51
- 9) 軽金属溶接構造協会編：アルミニウム合金構造物の溶接施工管理《第4版》，軽金属溶接構造協会（2009）
- 10) 田中：溶接作業の改善にあたる“アタールガス”，溶接技術 1976年2月号，PP.45～46，産報出版

# 6 | おわりに

産業革命発祥の地英国で1807年に発見されたアークは、1885年のベナードスによる炭素アーク溶接の発明、1892年のスラビアノフによる金属アーク溶接法の発明、1907年のチェルベルヒによる被覆アーク溶接棒の発明などを経て、金属を接合する溶接の重要な熱源としての適用範囲を拡大してきた。そして現在では、アークを熱源とする種々なアーク溶接法は、今日の工業製品の製造では欠くことのできない重要な加工技術となっている。

わが国にアーク溶接が導入されたのは1914（大正3）年であるが、製造メーカーと溶接機器・溶接材料メーカーとが一体化した研究・開発によって、その後の100年間でわが国のアーク溶接技術は大きく発展し、近年では、世界の溶接界をリードする主要国としての立場を確立している。このようなアーク溶接技術の進歩は、第2次世界大戦の終戦までは主に軍部がけん引し、終戦後の約30年間は造船などの重厚長大産業が、そしてその後は自動車などの薄板溶接分野が先駆的な役割を果たしてきたと思われる。

本報告では、このようなアーク溶接技術の発展経過について述べてきた。その主な内容を溶接プロセス、溶接電源および溶接材料に分けて整理すると、それぞれ図6.1～6.3のようである。日華事変（1937（昭

和12）年から第2次世界大戦（1941（昭和16）～1945（昭和20）年）と続く軍事優先期の停滞によって、戦後の1947（昭和22）当時、わが国の溶接技術は欧米諸国に比べ30年は遅れているといわれていた。しかし、その後の継続的な研究・開発によって、わが国が世界に先駆けて開発したグラビティ溶接法・片面裏波溶接法・サイリスタ制御溶接電源・裏波溶接棒・チタニア系細系フラックス入りワイヤなどのアーク溶接技術が、1960年代後半頃から次々に登場するようになった。そして1980年以降、電流波形制御による新しいガスシールドアーク溶接プロセスの開発は、欧米諸国を圧倒するようになったといっても過言ではない。このような技術開発には、高性能な国産パワー半導体の存在と、わが国の商用電源電圧が欧米諸国（400±20V）より低い電圧（200V）であったことが大きく寄与したと思われる。すなわち、入力電圧が400V級であれば耐圧600V程度以上のパワー半導体が必要となるが、入力電圧が200Vであれば耐圧400V程度のパワー半導体を用いることができる。

鋼材の進歩や市場ニーズの変化などに呼応して、新しいアーク溶接手法やプロセスが次々に開発され、それらの溶接技術は各産業分野の合理化・コストダウンに大きく貢献してきた。近年では、船舶・橋梁分野で

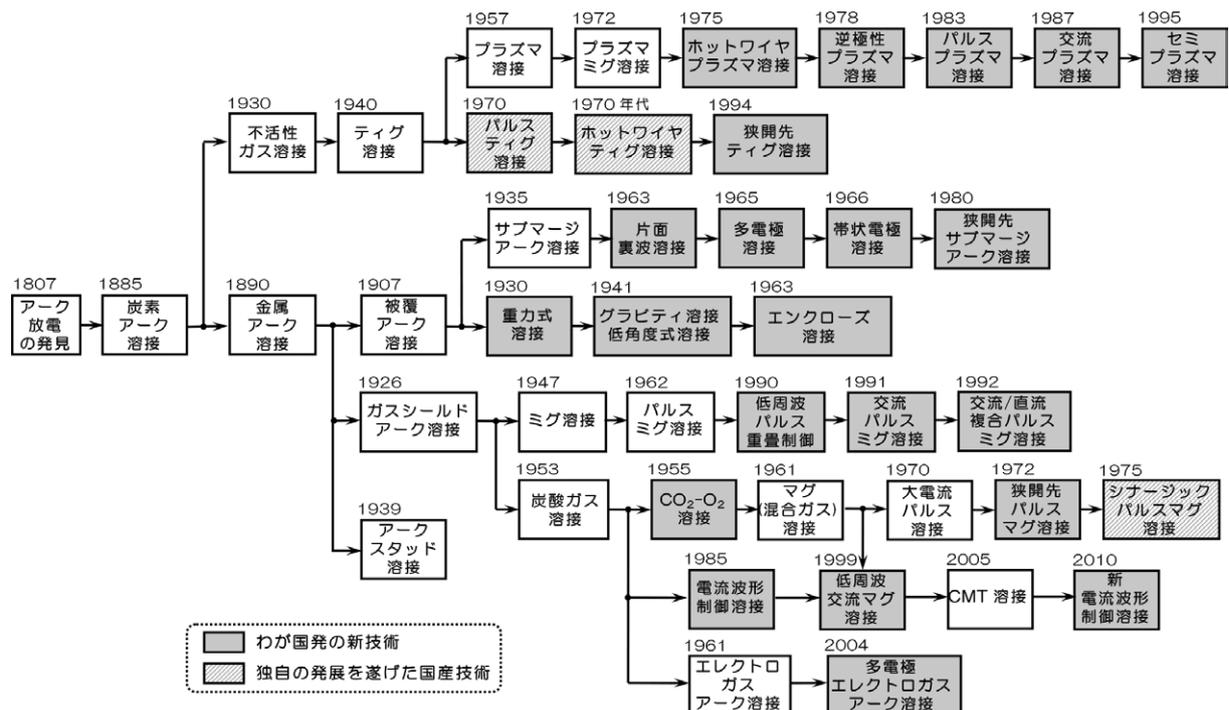


図 6.1 アーク溶接プロセスの発展経過

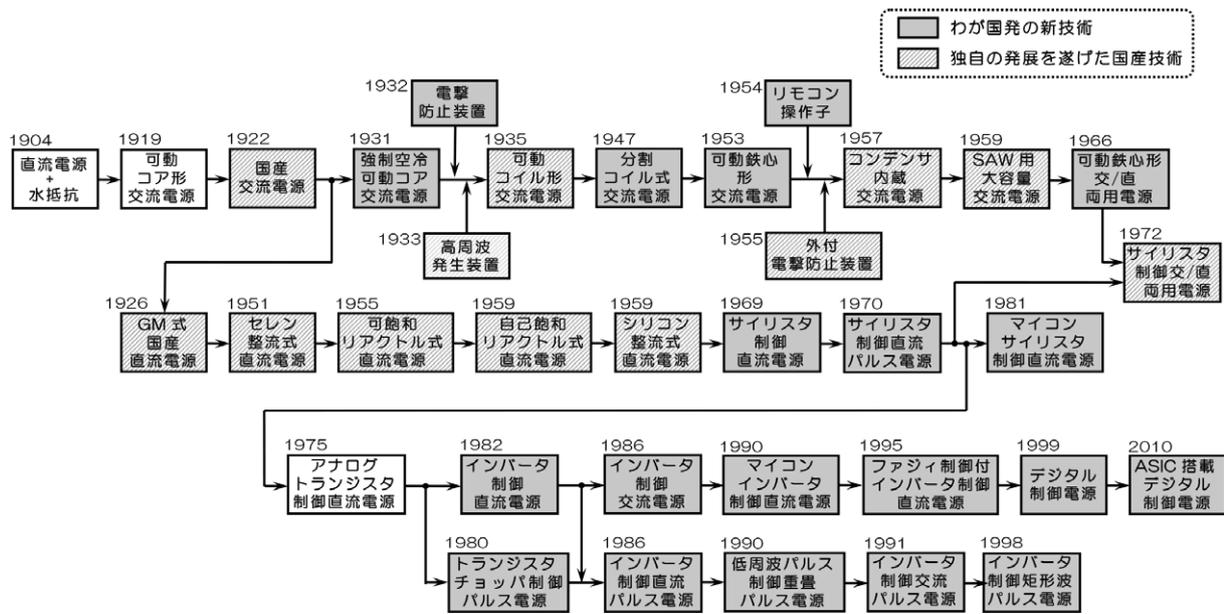


図 6.2 アーク溶接電源の発展経過

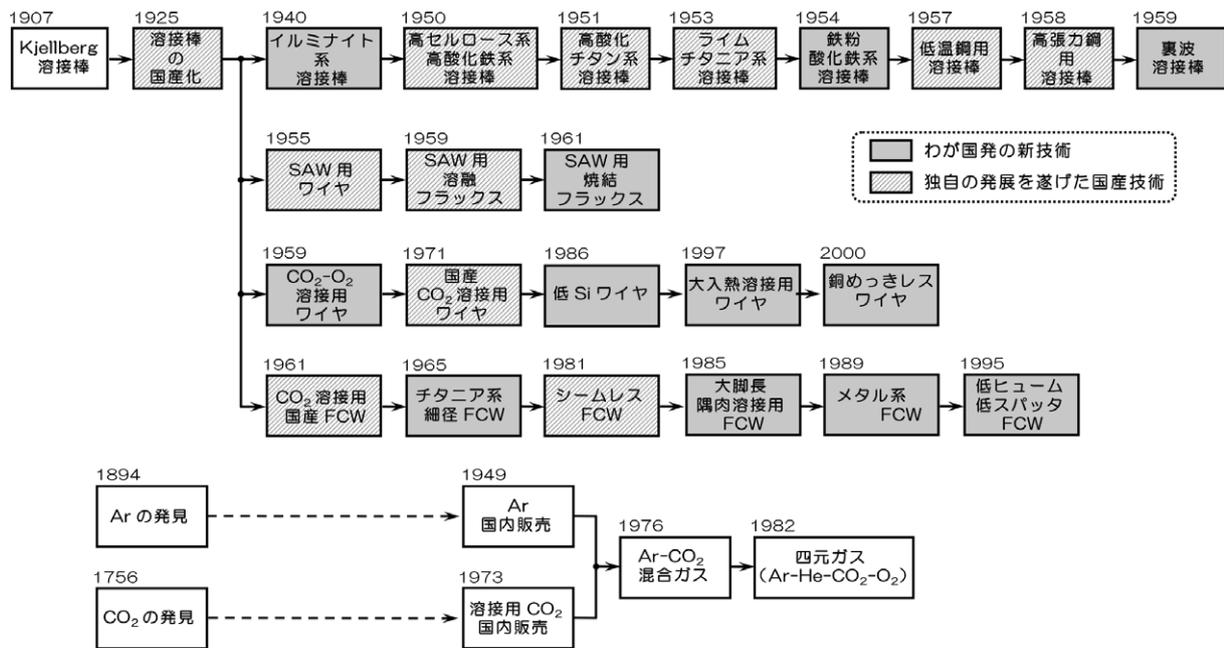


図 6.3 溶接材料の発展経過

の半自動・自動溶接化や自動車・建築鉄骨分野でのロボット溶接化の推進などに見られるように、消耗電極（溶接ワイヤ）を用いるマグ溶接がアーク溶接の主流となっている。またその溶接機器開発では、溶接電源単体の性能向上を目指した開発からワイヤ送給装置や溶接トーチを総合したシステムとしての性能向上へと開発目標が推移している。さらに、複数の溶接プロセスを複合したハイブリッド溶接システムの開発とその実用に向けた取組みも盛んに行われている。

しかしアーク溶接のさらなる進歩・発展には、アーク現象を主体とした溶接現象のより一層の理解が不可

欠の要素であり、今後その重要性はさらに増してくるものと思われる。また一方では、自動化の究極である無人溶接に向けた技術開発や、これまで困難とされてきた溶接技術を具現化する取組みも盛んに行われており、溶接電源・機器、溶接ワイヤならびにシールドガスそれぞれの機能・特性・特長を生かした総合的な技術開発がますます重要になるものと推察される。近年、コンピュータの性能が格段に向上し、複雑なアーク溶接現象をモデル化してシミュレーションすることによって、複雑に入り組んだ現象の理解を容易にする環境が整いつつある。また大学や研究所などでは、溶

接現象に関する様々なモデル化とシミュレーションの研究・開発が盛んに行われており、これらの成果を活用することによって次代を担うアーク溶接機器の開発をより一層加速することも可能になるであろうと思われる。一方では、電子制御技術の進歩に伴って溶接電源・機器の特性や機能が著しく改善され、電源の制御技術も大幅な進歩を遂げ、直流波形から交流波形まで、広範かつ複雑な電流・電圧波形制御も比較的容易に実現できるようになってきた。すなわち、従来はm秒オーダーで制御されていた出力を、 $\mu$ 秒さらにはn秒オーダーで制御できるようにすることも決して不可能ではなくなってきた。しかし、残念ながら、現状では必ずしも従来の出力波形制御手法を根本から覆すまでには至っていない。もう一歩踏み込んだ溶接プロ

セスの解析・開発などの積極的な推進によって、全く新しいプロセスおよび出力の制御手法・方法をどのようにして作り込むかが今後の重要な課題である。

本報告を作成するに当たり、資料の収集や情報の提供などで、西田順紀氏（元松下産業機器株式会社）、後藤康宏氏（松下溶接システム株式会社）、三木昭彦氏（株式会社神戸製鋼所）、菅哲男教授（大阪大学接合科学研究所）、須田一師氏（日鐵住金溶接工業株式会社）、神山誠宏氏（日本エア・リキード株式会社）、佐藤豊幸氏（太陽日酸株式会社）、松下和憲氏（ダイヘン溶接メカトロシステム株式会社）ならびに山内康義氏（産報出版株式会社）には、多大なご尽力をいただいた。深く感謝いたします。

## アーク溶接技術に関する産業技術史資料の所在確認調査結果

番号	名称	製作年	製作者	資料の種類	資料の現況	所在地	資料の概要
1	進相コンデンサを内蔵した高力率型交流アーク溶接機 (型式名: LAW 型)	1957年 (S32年)	松下電器産業 (株)	量産品	展示 (公開)	パナソニック 溶接システム (株) :大阪府豊中市	低力率の交流アーク溶接機を、進相コンデンサを用いて高力率とした、わが国初の高力率可動鉄心形交流アーク溶接機。松下電器産業(現パナソニック)溶接システム)が溶接機の生産・販売を開始する契機となった溶接機でもある。展示品は、造船所で47年間実稼働していたもので、操作子を用いて出力を遠隔操作できるように改造されている。
2	トランジスタ式 直流溶接電源 (型式名: TR-800)	1980年 (S55年)	大阪変圧器 (株)	量産品	稼働中 (非公開)	(株)ダイヘン 六甲事業所 :兵庫県神戸市	英国のTWIで試作され、大阪変圧器が製品化したアナログ・トランジスタ制御の直流溶接電源。出力の外部特性を任意に設定できるとともに、急峻な電流変化が可能であることから、国内の主な大学・研究所および大手企業に導入され、電流波形制御や溶接プロセスの解析など、今日のアーク溶接技術発展に大きく貢献した。
3	トランジスタ・インバータ制御 CO <sub>2</sub> /MAG溶接機 (型式名: YD-350HF)	1985年 (S60年)	松下産業機器 (株) 溶接機事業部	量産品	展示 (公開)	パナソニック 溶接システム (株) :大阪府豊中市	トランジスタ・インバータ制御を採用したわが国初のマグ溶接電源。従来直流リアクタの特性に頼っていた溶接電流の挙動を、電子回路で高速かつ任意に制御することによって、マグ溶接の特性を大幅に改善し、インバータ制御溶接電源の普及に大きく貢献した。今日の高性能能波形制御マグ溶接電源の端緒となった電源でもある。
4	フルデジタル 直流TIG溶接機 (型式名: YC-300BM1)	2000年 (H12年)	松下溶接 システム (株)	量産品	保存 (非公開)	パナソニック 溶接システム (株) :大阪府豊中市	溶接電源の制御に初めてデジタル制御を全面的に採用した直流デジタル溶接電源。前面パネルからボリウム類は全て排除され、ジョグダイヤルと呼ばれるパラメータを全て排除し、ジョグダイヤルや種々なパラメータを設定する方式が採用された。その後の各種デジタル制御電源では、この操作方法が踏襲されることとなった。

付表 アーク溶接技術開発のあゆみ

年代	一般事項	溶接プロセス	溶接電源	溶接材料
1800	アーク灯の開発 (1808) 発電機 (dynamo) の発明 (1832) わが国でのアーク灯設置 (1882) 日清戦争 (1894~1895)	アーク放電の発見 (1807)  炭素アーク溶接 (1885) 金属アーク溶接 (1890)		
1900	日露戦争 (1904~1905) 第1次世界大戦 (1914~1918)  日本電気溶接協会 (現溶接学会) 創立 (1926) 世界恐慌 (1929) ロンドン軍縮会議 (1930) 満州事変 (1931)	被覆アーク溶接 (1907)  ガスシールドアーク溶接 (1926)  重力式溶接 (1930) 不活性ガス溶接 (1930)  サブマージアーク溶接 (1935) アークスタッド溶接 (1939) ティグ溶接 (1940) グラビティ溶接・ 低角度式溶接 (1940) ミグ溶接 (1947)	可動コア形交流電源輸入 (1919) 国産交流電源 (1922) MG式国産直流電源 (1926)  強制空冷 可動コア形交流電源 (1931) 電撃防止装置内蔵電源 (1932) 高周波発生装置内蔵電源 (1933) 可動コイル形交流電源 (1935)  分割コイル式交流電源 (1947)	チェルベルヒ 被覆アーク溶接棒 (1907) クアシイ溶接棒 (1912) セルロース系溶接棒 (1918)  溶接棒の国産化 (1925) スタビレンド溶接棒 輸入開始 (1928)  イルミナイト系溶接棒 (1940)

年代	一般事項	溶接プロセス	溶接電源	溶接材料
	ドッジラインの関示 (1949) 日本溶接協会設立 (1949)			アルゴン国内販売開始 (1949)
1950	朝鮮戦争 (1950~1953 休戦)  神武景気 (1955~1957)  岩戸景気 (1958~1961)	炭酸ガス溶接 (1953)  CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> 溶接 (1955)  プラズマ溶接 (1957)	セレン整流式直流電源 (1951) 可動鉄心形交流電源 (1953) リモコン操作子 (1954) 外付電撃防止装置 (1955) 可飽和リアクトル式 直流電源 (1955) コンデンサ内蔵交流電源 (1957)  自己飽和リアクトル式 直流電源 (1959) サブマージアーク溶接用 大容量交流電源 (1959) シリコン整流式直流電源 (1959)	高セロロース系・ 高酸化鉄系溶接棒 (1950) 高チタン系溶接棒 (1951) ライムチタニア系 溶接棒 (1953) 鉄粉酸化鉄系溶接棒 (1954) サブマージアーク 溶接用ワイヤ (1955)  低温鋼用溶接棒 (1957) 高張力鋼用溶接棒 (1958) CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> 溶接用ワイヤ (1959) サブマージアーク溶接用 溶融フラックス (1959) 裏波溶接棒 (1959)
1960	東海道新幹線開通 (1964) いざなぎ景気 (1965~1970)  東名高速道路開通 (1969)	エレクトロガス アーク溶接 (1961) マグ (混合ガス) 溶接 (1961) エンクローズ溶接 (1963) 片面裏波溶接 (1963) 多電極溶接 (1965) 帯状電極 (バンドアーク) 溶接 (1966)	可動鉄心形 交流/直流両用電源 (1966) サイリスタ制御直流電源 (1969)	サブマージアーク溶接用 焼結フラックス (1961)  チタニア系細径 フラックス入りワイヤ (1965)

	一般事項	溶接プロセス	溶接電源	溶接材料
1970	石油ショック (1973)	パルスティグ溶接 (1970) 大電流パルスマグ溶接 (1970)  プラズマミグ溶接 (1972) 狭開先パルスマグ溶接 (1972) ホットワイヤ ティグ溶接 (197?) ホットワイヤ プラズマ溶接 (1975) シナージック パルスマグ溶接 (1975)  逆極性プラズマ溶接 (1978)	サイリスタ制御 直流パルス電源 (1970)  サイリスタ制御 交流/直流両用電源 (1972)	国産・炭酸ガス溶接用 ワイヤ (1971)  炭酸ガス国内販売開始 (1973)  Ar-CO <sub>2</sub> 混合ガス 国内販売開始 (1976)
1980	イラン・イラク戦争 (1980~1988)  チェルノブイリ 原発事故 (1986)  青函トンネル開通 (1988) ベルリンの壁崩壊 (1989)	狭開先サブマージ アーク溶接 (1980)  パルスプラズマ溶接 (1983) 電流波形制御溶接 (1985)  交流プラズマ溶接 (1987)	トランジスタチョップ制御 直流パルス電源 (1980) マイコン・サイリスタ制御 直流パルス電源 (1981) インバータ制御直流電源 (1982)  インバータ制御 直流パルス電源 (1986) インバータ制御交流電源 (1986)	シームレス フラックス入りワイヤ (1981) Ar-He-CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> 四元系混合ガス (1982)  大脚長すみ肉溶接用 フラックス入りワイヤ (1985) パルスマグ溶接用 低Siワイヤ (1986)  メタル系フラックス入り ワイヤ (1989)

	一般事項	溶接プロセス	溶接電源	溶接材料
1990	<p>バブル経済崩壊 (1991)</p> <p>ソビエト連邦崩壊 (1991)</p> <p>関西国際空港開港 (1994)</p> <p>阪神淡路大震災 (1995)</p> <p>欧州単一通貨 (ユーロ) の発足 (1995)</p> <p>アキライン開通 (1997)</p> <p>明石海峡大橋開通 (1997)</p>	<p>低周波パルス 重畳制御 (1990)</p> <p>交流パルスミグ溶接 (1991)</p> <p>交流/直流 複合パルスミグ溶接 (1992)</p> <p>狭開先ティグ溶接 (1994)</p> <p>セミアズマ溶接 (1995)</p> <p>低周波交流マグ溶接 (1999)</p>	<p>マイコン・インバータ制御 直流電源 (1990)</p> <p>低周波パルス重畳 直流パルス電源 (1990)</p> <p>インバータ制御 交流パルス電源 (1991)</p> <p>ファジィ制御付 インバータ制御直流電源 (1995)</p> <p>インバータ制御 矩形波パルス電源 (1998)</p> <p>デジタル制御電源 (1999)</p>	<p>低ヒューム・低スパッタ フラックス入りワイヤ (1995)</p> <p>大入熱溶接用ワイヤ (1997)</p>
2000		<p>多電極エレクトロガス アーク溶接 (2004)</p> <p>CMT 溶接 (2005)</p> <p>新電流波形制御溶接 (2010)</p>	<p>FPGA 搭載 デジタル制御電源 (2008)</p> <p>ASIC 搭載 デジタル制御電源 (2010)</p>	<p>銅めっきレスワイヤ (2000)</p>
<p>FPGA : Field Programmable Gate Array</p> <p>ASIC : Application Specific Integrated Circuit</p>				

## アーク溶接技術発展の系統化調査 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 第23集 2016年3月 (誤)	全文PDF版 2016年10月 (正)
407	右	2	3.2 溶接被覆アーク溶接	3.2 被覆アーク溶接