

航空機用アルミニウム合金の系統化調査

Systematic Survey on the Development of Aluminum Alloys for Aircraft

吉田 英雄 Hideo Yoshida

■要旨

戦前の日本のアルミニウム工業は航空機用材料の生産が中心であった。その材料開発の中で世界最強の超々ジュラルミンが発明された。それが零戦主翼に採用されたことで零戦の性能を飛躍的に向上させ、零戦は先の戦争初期には華々しい成果をあげた。米軍は零戦の秘密を解き明かそうとして、不時着した零戦を調べ、その主翼にAl-Zn-Mg-Cu系合金の超々ジュラルミンが使用されていることを明らかにし、アルコアに同じような合金を作らせた。これが7075であり、戦後の代表的な航空機用合金となり現在でも使用されている。超々ジュラルミンが7075の産みの親と言える。アルミニウム発見から超々ジュラルミン開発に至るまでの合金開発に焦点を当てて、日本の航空機用アルミニウム合金開発の系統化調査を行った。そして戦後世界の航空機と材料開発の発展との関係も明らかにした。以下にその要点をまとめる。

第一は、アルミニウムの発見である。アルミニウムは1820年代にエールステッドやヴェーラーにより金属アルミニウムが初めて抽出された。その後1855年にはナポレオン3世に後押しされたドヴィルが量産できる工場を作るところまでになった。1886年米国のホールとフランスのエルーが同時に熔融塩電解法を発明し、大量生産ができるようになり大幅にコストダウンが可能となった。こうして20世紀に入ると台所用品や建築、車などにアルミニウムが多く使用され始めた。

第二は、1906年、ドイツのヴィルムによって、偶然にアルミニウムに銅とマグネシウムを添加した材料を焼入れした後、室温に放置しておくで自然に硬くなる時効硬化現象が発見された。このAl-Cu-Mg系合金はジュラルミンと名づけられた。この材料を飛行船の骨組みの材料に適用したのがツェッペリン伯爵である。ドイツは第一次世界大戦でツェッペリン飛行船をロンドンなどの空爆に利用した。しかしながら、一方で、飛行船より速い航空機も発達して、飛行機は木製からジュラルミンを用いた全金属製となった。戦争で勝利を収めるには軽量で高速の戦闘機が必要になり、ジュラルミンよりもさらに高強度が求められるようになった。こうした要請のなかで、米国のアルコアはAl-Cu-Mg系の超ジュラルミン24S(2024)を開発した。

第三は、日本海軍は24Sよりもさらに高強度の合金開発を住友に要求した。その結果開発されたのが超々ジュラルミン,ESDである。住友の五十嵐勇らはAl-Zn-Mg-Cu系合金で高強度化を達成したが、問題は応力腐食割れであった。彼らは応力腐食割れの評価法を確立し、微量元素の影響を徹底的に調べた。その結果Cr添加が最も有効であることを明らかにし、開発開始から1年以内に特許を出願した。この合金に注目したのが、三菱で零戦の試作機の設計に当たっていた主任技師の堀越二郎であった。彼は五十嵐からの説明を聞いて、飛行機の重量は30 kg軽くなるのがわかり、すぐに海軍に使用許可を願い出て、押出材での使用が認められた。その結果、ESDを主翼の桁材に用いることで零戦の軽量化に成功した。

第四は、第一次世界大戦の頃の日本はアルミニウム板材を大量生産できる機械や設備、人材もなかった。第一次世界大戦で日本はドイツに対して戦勝国であったので、賠償の一環としてドイツの技術を学ぶことができた。第一次世界大戦も終了すると、アルコアはアルミニウム地金を売るために日本にも進出して住友と共同でアルミニウムの板や押出、鍛造品の製造工場を作ることになった。日本はドイツや米国の技術をベースに製造技術確立した。しかし、第二次世界大戦までにはアルコアは製造技術をさらに進化させ、連続鑄造技術や熱間圧延でのタンデム圧延技術を完成させ、先の戦争では日米間で大きな技術力の差ができた。

第五に、第二次世界大戦後は日本の航空機の製造や研究が禁止され、多くの航空機関係者は、鉄道車両、自動車、モーターサイクルに移った。鉄道車両の構体のアルミ化が検討され、戦前、研究開発されたAl-Zn-Mg-Cr系の押出材が適用された。応力腐食割れ防止のためにCrが添加されたが、焼入れ感受性が敏感なため冷却速度が遅くなると強度が出にくいのが問題で、五十嵐らの研究を受け継いだ馬場義雄はZrを添加して焼入れ感受性を鈍感にしたAl-Zn-Mg-Zr合金7N01(7204)を世界に先駆けて開発した。さらに馬場により7204のMg量を低減させ押出性を向上させた7003が開発され、新幹線の車両構体を初め自動車のバンパーやトレーラーのコンテナ、モーターサイクルのリムなどに適用された。

■ Abstract

Before World War II, Japan's aluminum industry was mainly focused on the production of aircraft materials. In the process of developing these materials, the world's strongest aluminum alloy was invented. The use of this material in the main wings of the Zero fighter, named after the Type Zero Carrier-Based Fighter, dramatically improved its performance, helping it achieve spectacular results in the early stages of the Pacific War. In an attempt to unlock the secrets of the Zero fighter, the U.S. military examined Zero fighter planes that had been crash-landed and discovered that their main wings were made of an Al-Zn-Mg-Cu alloy called Extra Super Duralumin (ESD), and had Alcoa produce almost the same alloy. This is 7075 alloy, which became the typical aircraft alloy after the war and is still used today. It can be said that ESD is the originator of 7075. Focusing on the development of alloys from the discovery of aluminum to the development of ESD, we conducted a systematic survey of the development of aluminum alloys for aircraft in Japan. The relationship between the development of materials and aircraft in the postwar period was also clarified. The main points are summarized below.

The first is the discovery of aluminum. In the 1820s, the first metallic aluminum was extracted by H. C. Ørsted and F. Wöhler. Then, in 1855, Sainte-Claire Deville, encouraged by Napoleon III, built a plant capable of mass production. In 1886, C.M. Hall in the United States and P. Héroult in France both invented the method of molten salt electrolysis at about the same time, which enabled mass production and significantly reduced costs. Thus, in the 20th century, aluminum began to be widely used in kitchenware, construction, cars, etc.

Second, in 1906, A. Wilm in Germany serendipitously discovered the phenomenon of age hardening, which occurred when aluminum with copper and magnesium was quenched and left at room temperature to harden naturally. This Al-Cu-Mg alloy was named Duralumin. It was Count Zeppelin who applied this material to the framework of airships. In World War I, Germany used Zeppelin airships to bomb London and other cities. At the same time, however, faster airplanes than airships were developed, and airplanes went from being made of wood to being made of all-metal with Duralumin. In order to win the war, lighter and faster fighter planes were needed, and the aluminum alloy had to be even stronger than Duralumin. In response to these demands, the Al-Cu-Mg based alloy, Super Duralumin 24S (2024) was developed by Alcoa in the United States.

Third, the Japanese Navy requested Sumitomo to develop an alloy with even higher strength than 24S. The result was the development of Extra Super Duralumin (ESD). Isamu Igarashi and his colleagues at Sumitomo achieved high strength with an Al-Zn-Mg-Cu alloy. However, the problem of stress corrosion cracking remained. They established an evaluation method for stress corrosion cracking and thoroughly investigated the effects of trace elements. As a result, they found that addition of Cr was the most effective countermeasure and applied for a patent within a year of starting the development. This alloy attracted the attention of Jiro Horikoshi, a chief engineer at Mitsubishi who was working on the design of the Zero fighter prototype. After hearing Igarashi's explanation, he realized that the weight of the plane could be reduced by 30 kg, and he immediately requested permission from the Navy to use the alloy in extruded materials. As a result, he succeeded in reducing the weight of the Zero fighter by using ESD as a spar of the main wing.

Fourth, at the time of World War I, Japan did not have the machinery, equipment, or human resources to mass produce aluminum alloy sheets. Since Japan was the victor against Germany in World War I, it was able to learn German technology as part of the reparations. After World War I ended, Alcoa expanded into Japan to sell aluminum ingots, and worked with Sumitomo to build a plant to manufacture aluminum sheets, extrusions, and forgings. Japan's manufacturing technology was based on those of Germany and the United States. However, by the time of World War II, Alcoa had further developed its manufacturing technology, perfecting continuous casting technology and tandem hot rolling technology, and the Pacific War created a huge technological gap between Japan and the United States.

Fifth, after World War II, Japan was prohibited from manufacturing and researching aircraft, and many aircraft developers moved on to railroad cars, automobiles, and motorcycles. The use of aluminum for the body structure of railroad cars was considered, and Al-Zn-Mg-Cr extrusions, which had been researched and developed before the war, were applied. Cr was added to prevent stress corrosion cracking, but this

time it was difficult to obtain high strength when the cooling rate was slow because of high quench sensitivity. Yoshio Baba, who continued the research of Igarashi, developed Al-Zn-Mg-Zr alloy 7N01 (7204) with low quench sensitivity by adding Zr, ahead of the rest of the world. In addition, Baba developed 7003, which has improved extrudability, achieved as a result of reducing the amount of Mg in 7204, and this has since been used in Shinkansen train bodies, automobile bumpers, trailer containers, and motorcycle rims.

■ Profile

吉田 英雄 *Hideo Yoshida*

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

- ・ 1975年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了
- ・ 1975年 住友軽金属工業株式会社入社
- ・ 1988年 同, 技術研究所 金属材料研究部
主任研究員
- ・ 1991年 学位授与 工学博士 (京都大学)
- ・ 1996年 同, 研究開発センター 第一部長
- ・ 2004年 同, 理事 研究開発センター 特別研究員
- ・ 2007年 同, 常務執行役員待遇理事
研究開発センター 常務研究員
- ・ 2009年 軽金属学会副会長
- ・ 2013年 研究開発センター顧問 その後合併により
株式会社UACJ 技術開発研究所顧問
- ・ 2015年 軽金属学会賞受賞
- ・ 2017年 UACJ退社, 超々ジュラルミン研究所設立
軽金属学会名誉会員
- ・ 2020年 日本金属学会フェロー認定

■ Contents

1. はじめに	386
2. 19世紀におけるアルミニウムの発見と 製錬技術の確立	387
3. 20世紀における急速なアルミニウムの 地金の生産と市場の形成	392
4. ジュラルミンおよび超ジュラルミンの開発 ..	401
5. 日本におけるアルミニウム材料の生産	421
6. 日本のアルミニウム合金の研究開発	439
7. 超々ジュラルミンの開発	447
8. 堀越二郎と艦上戦闘機	461
9. アルコアの7075開発とESD以降の 日本の合金開発	470
10. 第二次世界大戦後の航空機材料の発展	477
11. おわりに	489

1 | はじめに

戦前の日本のアルミニウム工業は航空機用材料の生産が中心であった。その材料開発の中で世界に誇る超々ジュラルミンが発明された。それが零戦に採用されたことで零戦の性能を飛躍的に向上させ、零戦は先の戦争初期には華々しい成果をあげた。米軍は零戦の秘密を解き明かそうとして、撃墜や不時着した零戦を調べ、その主翼に Al-Zn-Mg-Cu 系合金の超々ジュラルミンが使用されていることを明らかにし、アルコアに同じような合金を作らせた。これが 7075 であり、戦後の代表的な航空機用合金となり現在でも使用されている。

この超々ジュラルミンがなぜ日本で発明できたのか、欧米よりも研究開発力が遅れているとみなされていたにもかかわらず可能となったかをアルミニウムの発見やジュラルミンの開発の歴史に遡って明らかにする。それによって本調査の目的である材料開発の系統化調査ができることと考える。なお戦後の航空機用アルミニウム合金の開発は、日本での航空機開発がないためほとんど欧米によるもので、概略だけ述べることにした。

アルミニウムは英国人のデービーによってその存在が明らかにされ、それを化学的方法によりエールステッドやヴェーラーによって抽出され、さらにフランス人ドヴィルによって量産されるまで約 30 年、しかしドヴィルのアルミニウムは「粘土からの銀」と言われるように非常に高価であった。その約 30 年後、米国のホールやフランスのエルーにより溶融塩電解法が発明され、アルミニウムが安価に製造でき、広く利用できる金属となった。この安価に製造できた背景を説明する。

高強度合金を追求する中で、ドイツ人のヴィルムは偶然にも、アルミニウムに銅とマグネシウムを添加して、高温から焼入れし、室温で放置すると非常に硬くなる時効硬化現象を発見した。アルミニウムではこうした現象が Al-Cu-Mg 系、Al-Mg-Si 系、Al-Zn-Mg 系合金で生じることが明らかになり、合金開発が促進された。ヴィルムの発見した Al-Cu-Mg 合金はジュラルミンと命名された。

この材料に目をつけたのがドイツではツェッペリン伯爵である。彼の開発したツェッペリン飛行船に適用された。硬いジュラルミンがどのように加工されたかを明らかにする。ツェッペリン飛行船は第一次世界大戦のロンドン空襲などで活躍したため、各国の軍事関係者は注目し、自国で飛行船を作ることを試みた。飛行船とともに戦闘機などの飛行機も性能が向上した。特に戦闘機は軽量で高速で飛行することが求められたために、さらに高強度の超々ジュラルミンの開発が要求された。英独ではジュ

ラルミンにケイ素を添加した超ジュラルミンが開発された。これに対し、米国ではジュラルミンのマグネシウム量を増やした 24S がアルコアで開発された。これが DC-3 で最初に使用され、世界各国もこれに倣うようになった。なぜ米国で 24S が開発できたのか、なぜ英独そして日本では開発できなかったのかを明らかにする。

日本の海軍も当初、英独に倣ってケイ素を含有した超ジュラルミンの開発を行っていたが、1935 年になって急遽 24S に切り替えた。そして同時に 24S よりも高強度で 60 kg/mm² が得られる合金開発を住友に命じた。住友は五十嵐勇を中心に合金開発を進め、一年以内という短期間で結果を出した。合金開発のポイントは強度と加工性を兼ね備えた成分で、応力腐食割れを生じさせない合金であった。強度と加工性は過去に研究された合金を組み合わせることでできた。問題は応力腐食割れであるが、このために割れの評価法を明らかにし、負荷応力と腐食環境の影響を徹底的に調べた。その結果クロムを添加することで解決でき、Al-Zn-Mg-Cu-Mn-Cr 系の超々ジュラルミンを開発することができた。なぜ短期間で開発できたかその理由を明らかにする。

この合金に注目したのが三菱の堀越二郎であった。彼はこの合金を用いれば 30 kg 軽くすることができると試算し、海軍に使用許可を願い出て、海軍も押出材での使用を許可した。堀越は当時試作していた十二試艦上戦闘機（零戦の試作機）主翼桁に採用し軽量化に成功した。

戦後は航空機材がなくなり、それに替わって鉄道車両の構体に高強度で押出が容易な Al-Zn-Mg-Zr 合金が開発された。この合金にはクロムに替わってジルコニウムが使用されたことである。この開発にも五十嵐の研究を受け継いだ馬場義雄の独創的な研究が生きている。

現在、航空機材料は輸入材が 8 割以上を占めていて国産材の割合は非常に少ない。航空機材のマーケットが他のアルミニウム製品と比べて非常に小さいために、技術開発も材料開発もできず、欧米や中国に完全に遅れをとっているのが現状である。これを打開することが今後の日本にとって重要である。本報告書でもこのための技術方策を提示したが、五十嵐勇や馬場義雄のような高強度材料の開発のできる人材の育成がまずは必要である。

戦前の超々ジュラルミンの開発の歴史からその教訓を学び、今後の材料開発に生かし、世界に誇れる最高強度の材料が開発できれば、技術の歴史、その系統化技術を学ぶことに意義があると考えられる。

2 | 19世紀におけるアルミニウムの発見と製錬技術の確立

2.1 アルミニウムの発見

古代エジプトでは、採掘して得られた明礬の一種 (Alumen) が繊維や皮革の染色に用いる色揚げ・色留め (媒染) 剤、なめし剤として用いられた。また消毒性、収斂性があるので止血・殺菌・消臭等の用途にも用いられた¹⁾。ミョウバンの利用法についてはプリニウスの博物誌に詳しく述べられている²⁾。フォーブスの「古代の技術史」ではメソポタミアでは明礬石 (Alunite) を水で煮ることで明礬を作ることも行われたとある³⁾。ベックマンの「西洋事物起原」によればローマ人が alumen と称していたものは緑礬 (鉄の緑色硫酸塩) だとのことである⁴⁾。天然の明礬は地中に存在することは稀だからである。彼によれば明礬の製造技術は12世紀以降東洋から伝わってシリア、トルコに伝播し、15世紀にはイタリアでは明礬工場が作られたとある。明礬石からの精製技術が進歩し明礬の良質なものを alum と称した。アグリコラの「デ・レ・メタリカ」には図 2.1 に示すように16世紀当時の明礬の製造法が詳しく書かれている^{5), 6)}。

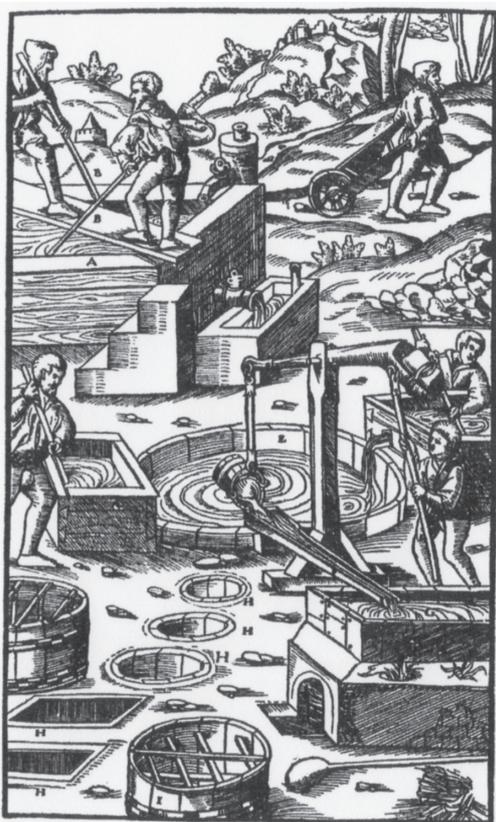


図 2.1 明礬の製造

(G. Agricola, DE RE METALLICA, Dover, p.567. より)⁵⁾⁶⁾

18世紀には alum は金属の酸化物と考えられ、英国では alumina と呼ばれた。1808年英国のデーヴィ (Humphrey Davy) は、明礬 (alum) に因んでその金属にアルミアム (aluminium) という名を与えた。その後アルミナム (aluminum) に改称、さらにその後フランスのドヴィル (Henri Sainte-Claire Deville) によりアルミニウム (aluminium) と正式に命名される¹⁾。以後、現在でも学術的にはアルミニウムの表記に2種類あり、欧州では aluminium が一般的であるが、米国では aluminum が主に用いられている (注)

(注) 米国では1828年の Noah Webster's Dictionary が aluminum を採用しているが、1890年代半ばまでは両方が使用されていた。公式には1925年 The American Chemical Society が Aluminum を採用したことによる。一方、世界的には The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) が公式に aluminium を採用し、現在は論文でも両方が用いられている⁷⁾。

2.2 化学的還元法

デーヴィは、アルミナ中の金属をヴォルタの電池を使って抽出しようと試みたが成功しなかった。その後1825年デンマークのエールステッド (Hans Christian Ørsted) が塩化アルミニウムとカリウムアマルガムから金属アルミニウムを初めて取り出したと言われている。1827年にはドイツのヴェーラー (Friedrich Wöhler) が塩化アルミニウムとカリウムを反応させてアルミニウムを分離した¹⁾。1854年にはフランスのドヴィル (Henri Sainte-Claire Deville) はカリウムに代わって価格の安いナトリウムによって塩化アルミニウムを還元しアルミニウムを分離した。この時のアルミニウムの大きさはおはじき玉程度であった。ドヴィルは皇帝ナポレオン三世のあと押しを得て、1856年、パリ郊外に生産能力2トンの工場を作り、これが最初のアルミニウム製錬工場となった^{1), 8)}。

ドヴィルの用いた原料のアルミナはボーキサイトであった。ボーキサイトは1821年フランスのレ・ボー (Les Baux-de-Provence) (コラム参照) でベルティエ (Pierre Berthier) により発見されボーキサイトと名づけられた。この土地で赤い土が見つかり、鉱物学

コラム レ・ボー・ド・プロヴァンス

レ・ボーはフランスのプロヴァンス地方、アルル (Arles) とアビニオン (Avignon) の間に位置し、小高い白い岩山の上にボー一族が支配した城跡 (図1) が残っている。筆者はなぜここでボーキサイト (図2) が発見されたのかを確かめたくて、2006年6月ここを訪れた。(詳細は「レ・ボーを訪ねて」、軽金属、57 (2007)、p.389を参照)。なお余談ではあるが、この城跡は観光地になっていて、松本清張の小説「詩城の旅人」(日本放送出版協会、1989年)の舞台でもある。

この一帯はアルピユ山脈の端に位置し、アルプス山脈とピレネー山脈が形成された時の地殻変動で海底から隆起してできた石灰岩の地層である。ボーキサイト鉱床は一般に母岩と成因によりカルスト型ボーキサイト鉱床とラテライト型ボーキサイト鉱床に分類される。カルスト型鉱床は炭酸塩の分解とそれに伴うAl珪酸塩の風化由来する残留アルミニウムの濃集によって形成されたアルミニウム酸化物鉱床である。レ・ボーのボーキサイトは白亜紀前期あるいはジュラ紀の石灰岩の風化作用によって生成し、鉱床生成後に沈降して海中に没してその上に白亜紀中後期の石灰岩堆積しその後再び隆起して現在に至ったもので、カルスト型ボーキサイト鉱床と言われている。その主要分布地域は地中海北岸、ジャマイカ、米国である。レ・ボーの鉱床は掘り尽くされている。ラテライト型鉱床はAl珪酸塩岩から亜熱帯ないし熱帯気候の条件下でラテライト風化作用によって形成され、世界のボーキサイトの約90%を占める。北および南西オーストラリア地域、西アフリカ地域(主としてギニア)、南アメリカ(ギアナ楕状地、ブラジル楕状地)、インド地域、東南アジア地域に分布する。(嶋崎吉彦・岡野武雄:産総研地質総合センター(旧地質調査所),地質ニュース 1964年10月号 No.122, pp.28-39.)



図1 ボー城の跡, 写真上の丸く囲った場所が採掘跡
(観光案内書レ・ボーより)



図2 レ・ボーの観光案内所の入り口に
展示されているボーキサイト鉱石¹⁰⁾

者のベルティエに分析を依頼したところ、鉄分が少なく鉄鋼業者を失望させたが、アルミナの成分が多いことが分かった。35年後これに目つけたのがドヴィルであった⁹⁾。

ドヴィルの化学的還元法は塩化アルミニウムをナトリウムで還元する方法である。図2.2に示すように塩化アルミニウムはアルミナ、塩化ナトリウム、粉碎した石炭を混合し加熱した中に塩素を通して作る。その後フラックス、ナトリウム、塩化アルミニウムを混合

して加熱した図2.2に示す炉にEから投入して溶融させ反応を促進させ、その結果スラグは炉の底に沈降する。レンガDを取り除くとスラグとアルミニウムが坩堝Jに流れ込む方式である^{9), 10)}。

彼の作ったアルミニウムの平均の純度は97%であった。ドヴィルの作ったアルミは1855年のパリ万博で「粘土から得た銀」(l'argent issu de l'argile, the silver from the clay)と呼ばれ、非常に高価なものであった。もともと甲冑を軽くしたいとの思いを持って

いたナポレオン三世は大のアルミ好きで、特に大切な客には金や銀ではなくアルミ製フォークやナイフ、スプーンで接待したとの逸話は有名である。しかしながら、ドヴィルの化学的還元法では、まだまだ高価なナトリウムを用いなければならないことと、不純物の鉄やケイ素が多くなり、耐食性に乏しいため用途に限られるといった問題があった。このため電気化学的に抽出する方法も試みられたが、大量の電力を必要としたため工業的には実現しなかった。おりしも1870年発電機がベルギーのグラムによって発明され、1878年には英国で世界最初の水力発電が行われた。

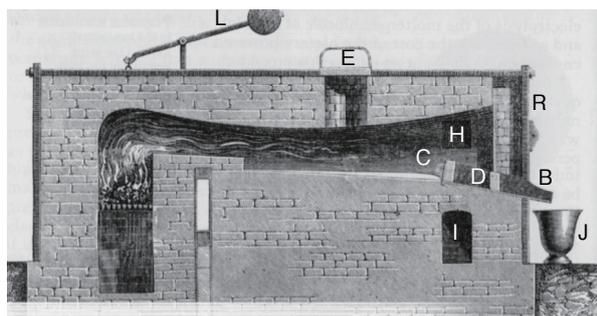


図 2.2 ドヴィルの化学的還元法^{9), 10)}

2.3 熔融塩電解法

1886年2月23日、米国の23歳のホール（Charles Martin Hall）（図2.3左）は電気分解によるアルミニウムの製造に成功した。彼はオハイオ州オーバリン大学（Oberlin College）で指導教官のF. F. ジュウエット（Frank Fanning Jewett）教授（注）の下でアルミニウムの分離に取り組み、1885年に大学卒業した後も研究を継続していた^{11), 12)}。彼の方法は水晶石を溶剤にしてアルミナを溶かし、その熔融塩を電気分解してアルミニウムを還元抽出するという画期的な方法であった。1795年グリーンランドで発見された水晶石は、アルミナの融点（2,050℃）を1,000℃以上も下げ、980～1,000℃で熔融することができ、アルミニウムの製造を容易にした。ホールの発明とほぼ同時に、フランスのエルー（Paul Louis Toussaint Héroult）（図2.3右）も同じ方法を見出した。エルーはサント・バルブ学校でドヴィルのアルミニウムの研究のことを学び、15歳のときに彼の有名な論文を読んだ。1885年相続した小さなめし革工場の蒸気機関とダイナモを利用してさまざまなアルミニウム化合物の電気分解を試みた結果、アルミニウムの分離に成功した^{8), 9)}。

図2.4はアルコアの前身Pittsburgh Reduction Companyの製錬設備とその電解炉を示す。ホールの

方法は1889年に米国で、エルーの方法は1888年フランス、ベルギー、イギリスなどで特許が取得された。彼らの電解炉構造の概略図を図2.5に示す^{13), 14)}。最近のプリバーク式電解炉の構造の模式図を図2.6に示す。彼らの方法は実質的に同じ方法なので、「ホール・エルー法」と呼ばれている。彼らは同年の生まれで、発明も同年、亡くなったのも同じ1914年で歴史の偶然である。このため二人はAluminum Twinsと呼ばれた⁹⁾。

（注）F. F. ジュウエット：1844年生まれで、イエール大学で化学と鉱物学を学び1870年卒業、1873年から1875年、ドイツのゲッチンゲン大学で化学を研究し、アルミニウムの分離に成功したヴェーラー教授と出会った。1876年イエール大学総長から東京大学で科学を教えるよう推薦され、翌年東京大学の教壇に立った。1880年、日本を離れ、36歳でオーバリン大学の化学・鉱物学の教授となった。ホールは大学に入学してジュウエットと会い、ヴェーラー教授からももらったアルミニウムの小片を見せられ、「アルミの経済的製法を発明したものは人類に恩恵を与えるだけでなく、巨万の富を得ることができるだろう」といわれ、ホールのアルミに対する関心はいっそう深まったとのことである¹⁵⁾。

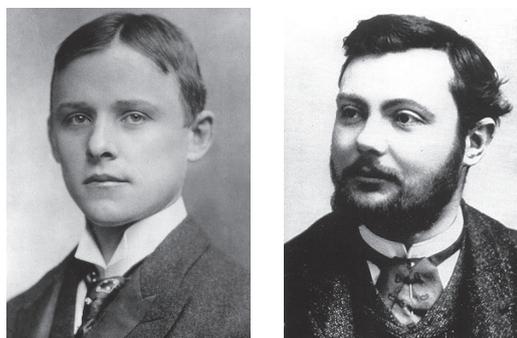


図 2.3 ホール（左）¹⁶⁾ とエルー（右）¹⁷⁾

ホール・エルー法は従来のドヴィルの化学的還元法に比べて大幅にコストを下げることができ、純度も99.7%程度まで向上した¹³⁾。この発明には水力発電、そのためのベルギーのグラム（Z.T. Gramme）による直流発電機の発明とグリーンランドで発見された水晶石が大きく関わっている。アルミナに水晶石を加えることで銅の融点と同じくらいの温度まで下げることができ、工業的に製造が非常に容易になった。

エルーはスイス資本とドイツ資本の合弁会社AIAGを設立し、ライン川上流のスイスのノイハウゼンに工場を作りライン川瀑布の電力を利用して製錬を始めた。

一方、ホールはピッツバーグで会社を設立し製錬を

始めた。当初は火力発電で始めたが、ナイアガラ滝の発電所ができるまで最初の顧客になった。これがのちのアルコアになる。1888年にはオーストリアのバイヤー(K.J. Bayer)が、図2.7に示すようなボーキサイトを処理してアルミナを得るバイヤー法を發明して、このアルミナがホール・エルー法の原料となった。これはボーキサイトを苛性ソーダに溶かし、アルミン酸ナトリウム液とし、これを加水分解し水酸化アルミニウムを晶析させ、これを焼成し水分を除去してアルミナを製造する方法である。アルミナは明礬石だけでなく、霞石、礬土頁岩などいろんな鉱石に含まれているが、特にケイ酸が少なく、アルミナが約50%以上含まれるのがボーキサイトである。

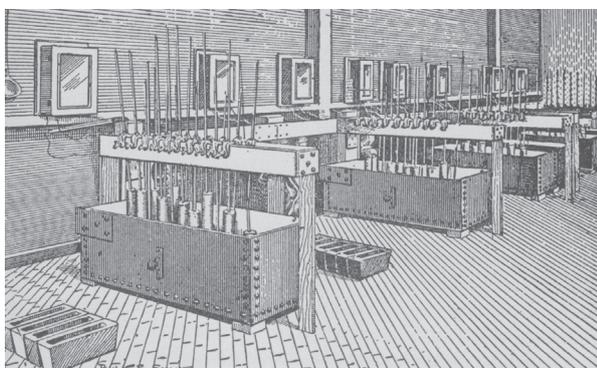
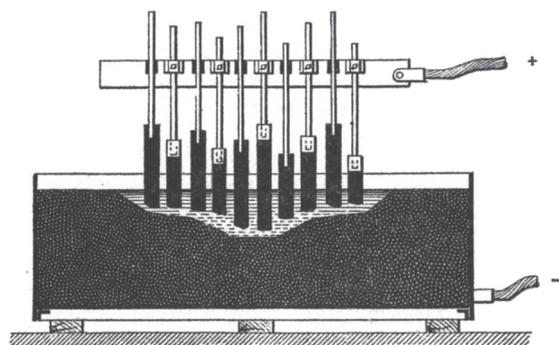
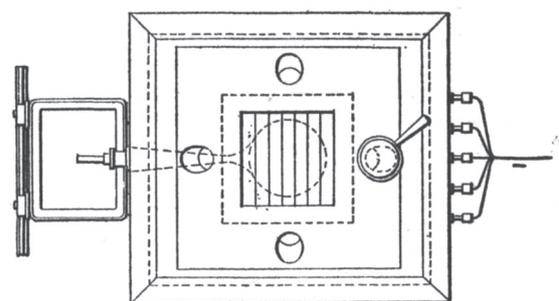
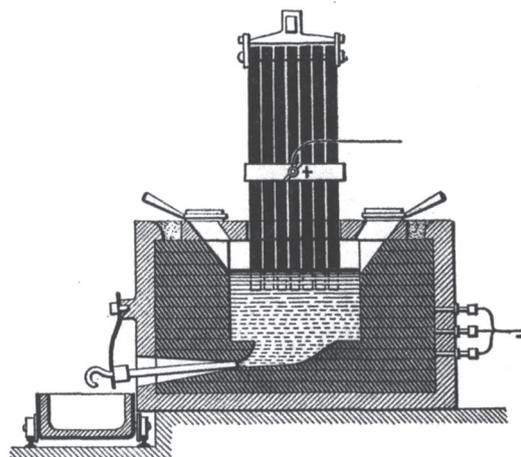


図2.4 アルコアの前身
Pittsburgh Reduction Companyの電解炉¹³⁾



(a) ホールの電解炉



(b) エルーの電解炉

図2.5 ホールとエルーの電解炉構造の模式図¹⁴⁾

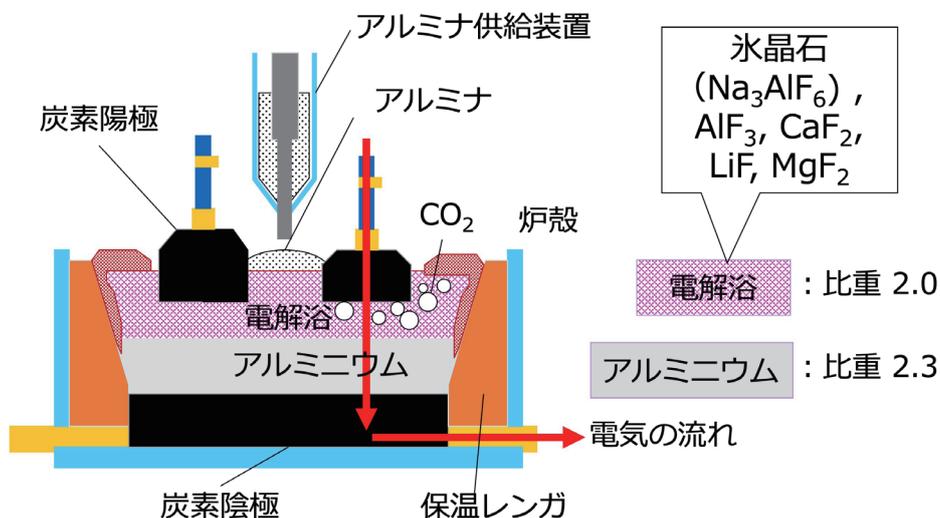


図2.6 最近の電解炉の模式図(プリベグ式)

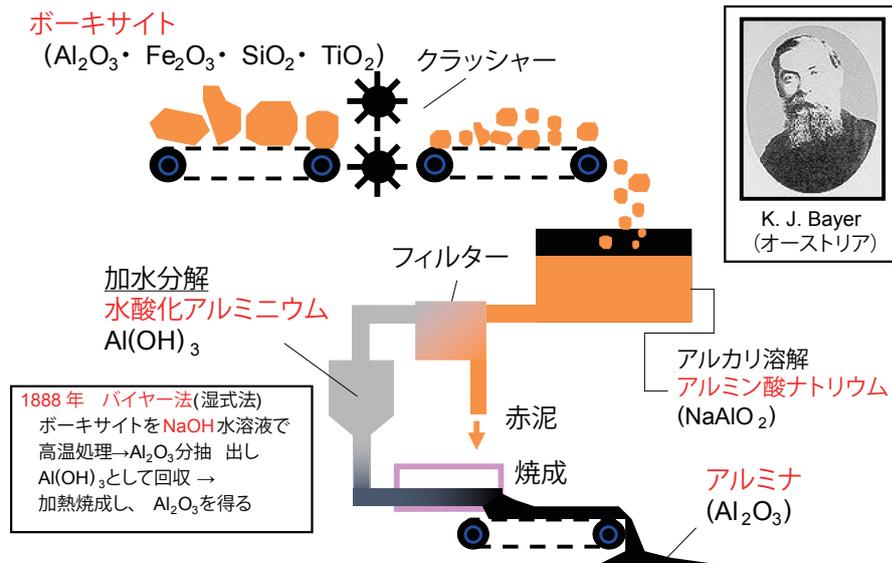


図 2.7 バイヤー法

参考文献

- 小林藤次郎：アルミニウムのおはなし，日本規格協会，(1985)，5.
- 中野定雄ほか：プリニウスの博物誌 3，雄山閣，(1986)，1343-1482.
- フォーブス：古代の技術史（下1），平田寛ほか監訳，朝倉書店，(2008)，196.
- ヨハン・ベックマン：西洋事物起原（I），特許庁内技術史研究会訳，ダイヤモンド社，(1980)，337，西洋事物起源（二），岩波文庫，岩波書店，(1999)，20.
- Georgius Agricola: DE RE METALLICA, Dover Publications, Inc., 564.
- 三枝博音：デ・レ・メタリカー全訳とその研究，近世技術の集大成，岩崎学術出版社，488.
- <http://www.worldwidewords.org/articles/aluminium.htm> (2021.8.31)
- M.E. ウィークス，H.M. レスター：元素発見の歴史，大沼正則訳，朝倉書店，(2010).
- Ivan Grinberg: Aluminum Light at heart, Gallimard (2003)，16. 原図、原本は 10) 参照
- https://fr.wikisource.org/wiki/Fichier:T4-d701_-Fig._437_%E2%80%94_Four_pour_la_pr%C3%A9paration_de_l%E2%80%99aluminium.png (2021.11.28)
- https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Merveilles_de_la_science/L%E2%80%99Aluminium (2021.11.28)
- C.C. Carr: ALCOA An American Enterprise, Rinehart & Company, Inc. (1952)，5.
- Q.R. Skrabec: Aluminum in America, A History, McFarland & Company, Inc., (2017)，26.
- The Aluminum Industry, Aluminum and Its Production, edited by J.D. Edwards, F.C. Frary and Z. Jeffries, McGraw-Hill Book Company, (1930)，321.
- R.J. Anderson: The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys, Henry Carey Baird & Co., Inc. (1925)，99.
- 小寺純雄：アルトピア，2月 (1997)，62.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Martin_Hall (2021.8.31)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_H%C3%A9roult (2021.8.31)

3 | 20世紀における急速なアルミニウムの地金の生産と市場の形成

3.1 アルミニウム工業の形成

3.3.1 ホール・エルー法によるアルミニウムの生産開始

エルーは新しい溶融塩電解法の工業化のため、最初は化学的還元法でアルミニウムを製造していたアレ・カマルグ社 (Produits Chimiques d'Alais et de la Camargue) の A.R. Pechiney に特許を売ろうとしたが断られたため、まず 1888 年スイス資本とドイツ資本の合弁でアルミニウム・インダストリー社 (Aluminium Industrie A.G. 略称 AIAG、後のスイスアルミニウム) を設立し、スイスのノイハウゼン (Neuhausen) に工場を建設し、ライン川の瀑布を利用した水力発電でアルミニウムの生産を始めた。その後、フランスの Société Électrométallurgique Française に実施権を与え、グルノーブルの近くのフロージュ (Froges) に 1889 年最初のアルミニウム工場を設立した^{1)~3)}。

エルーの申し出を断った A.R. Pechiney は、フロージュでの生産に危機感を覚え自らの会社を閉め、電解法での生産に変えるため、1897 年フロージュの会社を買収し、1921 年、アレ・フロージュ・カマルグ社 AFC (Compagnie des Produits Chimiques et Électrométallurgique d'Alais, Froges et Camargue、その後ペシネー社 (Pechiney)) と名称を変更した²⁾。

イギリスでも、1894 年ブリティッシュ・アルミニウム社 (British Aluminium Co., Ltd.) が設立され、エルーの特許を譲り受けてスコットランドのフォイヤーズ (Foyers) で生産を始めた。エルーの特許権の保護のもと、製造会社も 4 社に限定されていた。欧州でのアルミニウム生産量は 1890 年には 150 トンであったのが、1900 年には 4100 トンまで増大した。図 3.1 は 1860 年から 1900 年までのアルミニウム地金価格の変動を示す⁴⁾。アルミニウムの価格もこの 1889 年から 10 年で 1/10 程度まで低下したことがわかる。溶融塩電解法によりアルミニウム地金の大幅なコストダウンが可能となった。

1901 年エルーの特許が切れると多数の企業が操業を開始した。欧州では 1913 年には 11 企業、20 工場に達し、世界生産の 57% を占めるようになった¹⁾。

一方、ホールは 1888 年 7 月 31 日にピッツバーグで新会社を設立した。当初、ピッツバーグ・アルミニウム社 (Pittsburgh Aluminium Company、注 1)⁵⁾ と

したが、二ヶ月後の 1888 年 10 月 1 日にピッツバーグ・リダクション社 (The Pittsburgh Reduction Company) に変更⁶⁾、1907 年には今日のアルコア (Aluminum Company of America = ALCOA) に改称した⁶⁾。

(注 1) 面白いことにこの会社の最初の名に Aluminum でなく Aluminium が用いられていることで、当時、米国でも両方の綴りが用いられていたことを物語っている。この会社が Aluminum を用いたのは、印刷屋が同社の或る便箋に Aluminium の i を不注意で抜かしてしまっただけで、その印刷屋が倒産してしまい刷りなおすための 300 ドル支出するよりこのまま使おうと決めたからだとの真偽のほどのわからぬ逸話が残っている⁵⁾。同社は 300 ドルの支出さえままたらないのが実態だったそうである。

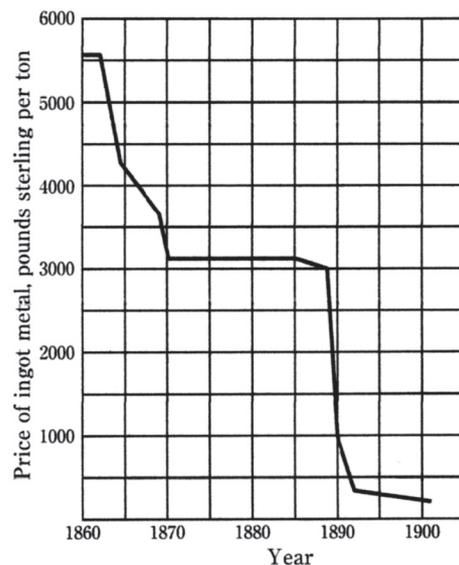


図 3.1 1860 年から 1900 年までのアルミニウム地金の価格⁴⁾
(*1GBP=\$5、1880-1920)

ドヴィルによれば 1855 年のパリ万博では \$90/lb (注 2) であったが、その 2 年後には \$27/lb まで下がり、1859 年には \$17/lb、ホールが発明した年 1886 年には \$8/lb (1886 年 \$1 = 2020 年 \$29.21) に下がっていた。ホールのプロセスで 1889 年には \$2/lb、その後量産が進むにつれて 1891 年には \$1.50/lb、1893 年には \$0.75/lb まで下がった⁷⁾。

(注2) 現在の価格で比較すると、当時の1ドルは現在の28.18ドル(1855年\$1 = 2020年\$28.18)。過去のドル価値と現在のドルの価値の比較は参考文献8を参照のこと。

\$90/lb = \$5,586/kg (2021.5.5)、1 lb = 0.454 kg、\$1 = 109.34円(2021年5月5日)とすると610,773円/kg。現在の金や銀と比較すると、Au: 7,000円/g、Ag: 100円/gの中間。ナポレオン三世の時代アルミニウムは「粘土からの銀」と呼ばれた。現在(2021年9月1日)のアルミニウム地金のLME(London Metal Exchange)価格は\$2.718/kg(= 299.64円/kg)⁹⁾(1ドル = 110.24円)

1888年12月、日産6ポンドの生産であったが、その後、さらに新工場を建設して、1900年には3,200トンにまで増加した。電力は当初火力発電であったが、その後低廉な水力発電に切り替えた。1893年ナイアガラ・フォールズ電力会社(Niagara Falls Power Co.)から電力を買っていたが、1896年にはこの会社を買収した。その後、各地の電力会社を買収して生産を拡大した。続いて1903年にニューヨーク州マッセナに電解工場を建設し、電力はセントローレンス電力会社(St. Lawrence Water & Power Co.)と長期契約を結んだが、1906年同社を買収した。1910年にはテネシー渓谷一帯の水力発電に着手し、1914年にはテネシー州に電解工場を完成させた。

1899年にはアルコアはカナダ、シャウイニガン(Shawinigan)に製錬工場を建設し、1901年操業を開始した。この工場の生産はノーザン・アルミニウム社(Northern Aluminium Co.)が行い、1925年にアルキャン(Aluminium Company of Canada = ALCAN)に社名を改称した。アルコアによる独占体制に対する批判が1920年代に盛り上がり、同社は政府の勧告を受け入れ、1928年にカナダにアルミニウム・リミテッド(Aluminium Limited Co., 1966年アルキャン・アルミニウム・リミテッド、Alcan Aluminium Limitedと改称)を設立し、持株を新会社へ移管した。ノーザン・アルミニウム社(ALCAN)はその中核会社となった。ボーキサイトに関しても当初はアルミナを購入していたが、原料の確保が重要となってきた。1889年以来ジョージア州でボーキサイトの採掘を行ってきたジョージア・ボーキサイトを買収し、1903年イリノイ州にアルミナ工場を建設した。続いて1904年アーカンソー州のゼネラル・ボーキサイト会社を、1909年にはレバブリック鉱山会社を買収し、全米のボーキサイトの鉱床を独占していった。その後南アメリカの

スリナム、ギアナなどにも鉱区を拡大して行った。

北米のアルミニウム生産量は1900年の3,200トンから1913年には27,400トンと急激に増加した。1900年頃のアルミニウム市場は家庭用器物が50%、ついで鉄鋼脱酸剤が25%であったが、その後送電線、自動車部品、機械部品、容器の蓋などに利用されるようになった¹⁾。

3.2 大量生産時代

1925年当時のアルミニウムの用途として約半分は鋳物用、残り半分は板材、線材、棒材(角、丸)、管材の純アルミニウム製品、粉末、箔、粒状形状の製品になった。米国ではアルミニウムの消費量の40%が自動車用製品に用いられた。板製品の用途としては台所用品、容器、タンク、炊事用品、多様な化学工業用の装置、自動車の車体に用いられた。線材としては電気製品の配線、高圧の送電線用の電線に用いられた。鋳物材は砂型、金型、ダイカストで製品が作られ、自動車部品としてクランクケース、オイルパン、ピストン、ハウジング、マニフォールド、車体、小さな部品に用いられた。

1900年から1943年までの各国のアルミニウム地金の生産量の推移を表3.1に示す¹⁰⁾。1914年から1934年までの世界のアルミニウム地金の生産量と消費量の推移を図3.2に示す¹¹⁾。

表3.1 世界のアルミニウム地金の生産量(1900～1943年)¹⁰⁾

年	地金生産量(1,000トン)									
	1900	1905	1910	1915	1920	1925	1930	1935	1940	1943
アメリカ	3.2	5.1	15.4	45.0	62.9	63.0	103.9	54.1	187.1	834.8
カナダ			3.5	8.5	12.0	14.1	34.9	21.0	99.0	449.7
オーストリア				2.5		3.0	3.0	2.4	6.7	44.2
フランス	1.0	3.0	9.5	7.5	12.3	20.0	24.6	70.8	61.7	46.5
ドイツ				2.0	31.2	27.2	30.7	13.8	204.8	203.1
イタリア			0.8	0.9	1.7	1.9	8.0	15.3	38.8	46.2
ノルウェー			0.9	3.5	5.6	21.3	27.4	1.2	27.8	23.5
スイス	2.5	3.0	8.0	12.5	14.0	21.0	20.5	15.1	28.3	18.5
イギリス	0.6	1.0	5.0	6.0	8.0	15.0	13.2		19.3	56.6
ユーゴスラビア									2.0	2.0
スペイン							1.1	1.8	1.3	0.8
スウェーデン								11.7	1.6	3.6
ソ連								15.5	59.9	62.3
ハンガリー								0.3	3.2	9.5
日本								2.6	45.9	149.7
世界合計	7.3	12.1	43.1	88.4	147.7	186.5	267.3	247.6	787.4	1,952.3

データは「日本軽金属20年史」。
日本の数値は朝鮮、台湾、中国(満州)の合計。

第一次世界大戦はアメリカに膨大な軍需市場を提供し、アメリカのアルミニウム地金の生産量は1915年の4万1,100トンから、19年には5万8,300トンに急増した。大戦終了後、各国は余剰在庫を抱えたため、欧州からアメリカへの輸出が活発となり、アメリカは国内市場の防衛のため関税障壁を設けてアルコアの独占を強化することとなった。またアルコアは1920年代に入ると欧州への進出を図り、ノルウェーの会社に資本参加し、フランス、イタリアの会社を買収した。さらには欧州諸国のボーキサイト資源や水力発電の買収も行い、各地にアルミニウム加工および製品工場を建設した。このようにして、ボーキサイト鉱山、水力発電所、アルミナ製造工場、電解工場、圧延・鋳物などの加工工場を展開し、アメリカのみならず北米大陸さらには第一次世界大戦後も海外の鉱山や製錬工場を系列下におき、世界最大のアルミニウム企業へと成長した。このように海外活動の多角化に伴って、国内事業と海外事業を分離して管理することとなった。1928年カナダにアルミニウム・リミテッド (Aluminium Limited、1966年 Alcan Aluminium Limited と改称) を設立し海外事業をこの会社に移管した。形式的には別会社として分離したが、大株主は共通なので、事実上アルコアの支配下にあった。その後トラスト法により1950年完全に分離独立した。1931年世界恐慌に見舞われアメリカ、カナダの生産量は半減したが、国際カルテルと軍備拡張により、1936年以降急速に拡大し、北米の生産は39年22万3,000トンに達し、世界全体の三分の一を占めた¹⁾。

1934年から1950年までの世界のアルミニウム地金の生産量と消費量の推移を図3.3に示す¹²⁾。第二次世界大戦の1943年の200万トン弱がピークであることがわかる。その需要の大半が航空機用であった。参考までに2016年時点での世界のアルミニウム地金の生産量は5,755万トンに及び、1943年の30倍の生産量である¹²⁾。その内訳は、中国が約55%を生産し、これにロシア、カナダを加えた3か国で生産量の約2/3を占める。

第二次世界大戦による軍需の増大は、図3.3に示すように、アルミニウム産業の飛躍的な発展をもたらした¹¹⁾。アメリカ政府は一層の設備拡張をするため、1926年以來タバコ包装用アルミニウム箔の生産を行っていたレイノルズメタル (Reynolds Metals Corp.) に融資を行ってアルミニウム製錬事業に進出させ、アルコアの独占が事実上崩壊した。この結果、1943年アルコアが年産44万トン、レイノルズメタルが年産8万5,000トンの能力となった。

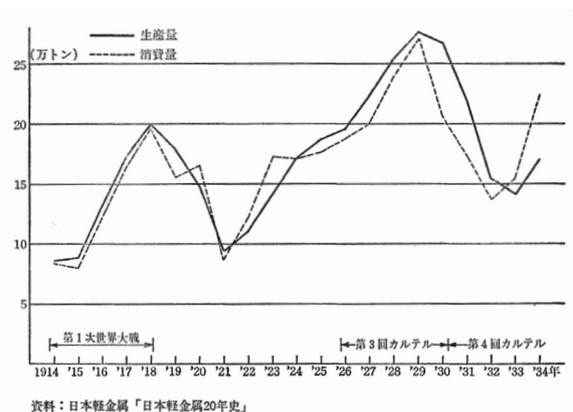


図3.2 世界のアルミニウム地金の生産量と消費量の推移 (1914～1934)¹¹⁾

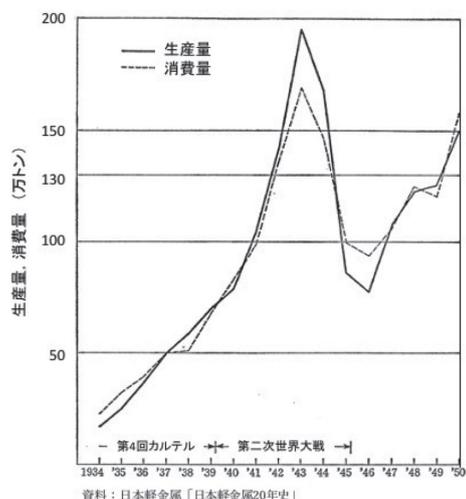


図3.3 世界のアルミニウム地金の生産量と消費量の推移 (1934～1950)¹¹⁾

また政府は国防工場公社 (Defense Plant Corporation) が新施設を自ら建設しそれを航空機メーカーやアルミニウムメーカーに貸与する制度をつくり、アルミニウム関係ではDPCが7億ドルの資金を投じて、アルミナ工場を2工場、電解工場を9工場、加工工場を25工場建設し民間業者に委託した。これらの大部分をアルコアが設計・建設・運営した。1943年には83万4,800トンの生産をあげた。

カナダにおいてはアルミニウム・リミテッドが海外事業を展開し、その直系のアルキャンがカナダ唯一のアルミニウム企業として発展した。その原動力はカナダ国内の豊富で低廉な水力電源である。1925年サグネ川 (Saguenay River) に20万kwの水力発電所を建設し、4マイル先のアーバイダ (Arvida、創立者のArthur Vining Davisの頭文字をとって命名) に新工場を建設した。その後も発電所の建設や設備の拡張を行い、1943年には45万トンの生産をあげ、世界第2位を占め、カナダはアルミニウムの世界最大の輸出

国となった。同国の第二次世界大戦下 1940～44 年間の生産量のうち、55% はイギリス、32% はアメリカ、7% はそのほか各国に輸出され、自国内の消費は 6% に過ぎなかった。

ドイツの地金生産は第一次世界大戦前までは、スイス系の Rheinfelden 製錬所が生産する年間 800 トンに過ぎず、14,000 トンにも達していた当時の国内消費は輸入に頼っていた。第一次世界大戦の勃発とともに 3 製錬工場を建設し、1917 年国営の VAW (Vereinigte Aluminium Werke) を設立し、3 製錬所と新たに建設した 3 工場を国営及び半国営とした¹³⁾。軍備拡張を背景として、1918 年には、14,100 トンであったが、1925 年、27,200 トン、1936 年 70,700 トン、1943 年 203,100 トンと増大し、第二次世界大戦では、アメリカ、カナダ、に次ぐ世界第 3 位の生産国になった。日本は 1943 年では世界第 4 位であるが、アメリカの 1/8 でドイツの約半分の生産量であった。

ドイツは日本と同じくボーキサイトの資源を持っていないので、海外、主として欧州各国にボーキサイト原料を求めた¹⁴⁾。第二次世界大戦前、欧州では主としてフランス、ハンガリー、イタリア、ユーゴスラビア、ギリシアがボーキサイトを生産していた。第二次世界大戦の始まる 1939 年以前では、ドイツのボーキサイトはハンガリー、ユーゴスラビアからの輸入が多かったが、第二次世界大戦開始後は、ハンガリー以外にヴィシー政権下のフランス、枢軸国であったイタリアからの輸入が増えた。ドイツの輸入量は第二次世界大戦前までは欧州の生産量の半分を占めていたが、大戦中は欧州のボーキサイト生産量の 7 割にまで増加した¹³⁾。世界主要企業の発展過程を図 3.4 に示す¹⁾。

3.3 生産技術の発展

3.3.1 鑄造技術

(1) 傾斜鑄造法

連続鑄造方式が始まる前はブックモールド方式の角状、丸状の金型に鑄込んでいた。鑄込みの方法は傾斜鑄造法と言われるもので、鑄型に坩堝から溶湯を、ビールを注ぐように鑄込んでいく方法で、その鑄込みの原理図と鑄型の形状を図 3.5 に示す¹⁵⁾。鑄型は当初傾けておき、注湯とともに立てていく。そこで使用されていた鑄型は図 3.5 (a) に示すような湯道付き鑄型であった。湯道には鉄製金網を使用し、湯口から注がれた溶湯はこの金網を通過して徐々に底部より鑄型内に流入する。湯道も当初はつけていたが、切断ロスや切

断工数がかかるため (b) のように端面を屋根形状にした。

英国の国立物理学研究所 (National Physical Laboratory) のローゼンハイン (W. Rosenhain) が考案した傾斜鑄造法を図 3.6 に示す¹⁶⁾。写真上は彼の鑄造実験室で写真下は傾斜鑄造機である。彼の方式はハンドルで傾斜させる方法である。図 3.7 はアルコアの鑄造工場の鑄塊を製造している様子を示す¹⁷⁾。傾斜式炉で溶解したアルミニウム溶湯を板用の角型鑄型に鑄込んで製造している。

3.3.2 連続鑄造技術

ドイツや米国ではアルミニウムの生産性を上げるために、圧延、鍛造、押出用インゴットの大型化が要求されるようになった。従来の金型に鑄込む鑄造方法では介在物、偏析、キャビティ、シュリンケージ・キャビティ、柱状晶、パイプ (引け巣) 等の鑄造欠陥の発生が問題となったため、新たな鑄造方法の開発が必要になった。特に結晶粒微細化と逆偏析の低減を図るためには冷却速度を上げることが必要であった。

このため、図 3.8 (a) に示すように厚み 1/8 in. (3mm) の鋼の鑄型に鑄込み、一定速度で水冷する Bucket Casting が開発されたが、鑄型に接触したアルミが凝固収縮して隙間が開いて熱伝達が低下する問題があった¹⁸⁾。これに対し Züblin は図 3.8 (b) に示すような鑄造法を発明した。鑄型側面の片側を開けて、移動式の平板で閉じて垂直に下げていき、先に凝固した層の上に順次 1～2 in. 深さごとに溶湯を注いでいく方法である¹⁸⁾、¹⁹⁾。その後これらの方法を改良した方法が開発された。図 3.8 (c) は Zunckel の開発した方法で、底台が下方に移動して長尺のピレットができるようになった²⁰⁾。

アルコアも 1930 年頃より従来の鑄鉄の鑄型に鑄込む方法では、インゴットサイズ 121 × 305 × 508 mm (4.75 × 12 × 20 in.) が限界で、生産性を上げるためにインゴットの大型化が要求された。インゴットを大型化すれば皮むき (Scalping) 工程での切削量も削減できる効果もあった。1930 年、マッセナ (Massena) 工場のエノア (W.T. Ennor) によって新しい DC 鑄造法が検討された。1934 年、エノアは底面がない鑄型を用い、凝固した殻に直接冷却剤をあてることで凝固速度を上げて組織を微細化する方法を考案した²¹⁾。この方法は 2S などの軟らかい合金には適したが、17S や 24S などの硬い合金では冷却中に割れが生じることがわかった。工場関係者だけではこの問題が解決できなくなったため、ARL の物理試験部門が共同で

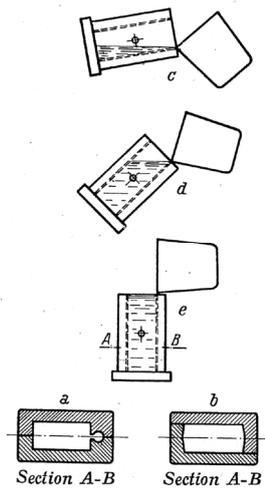
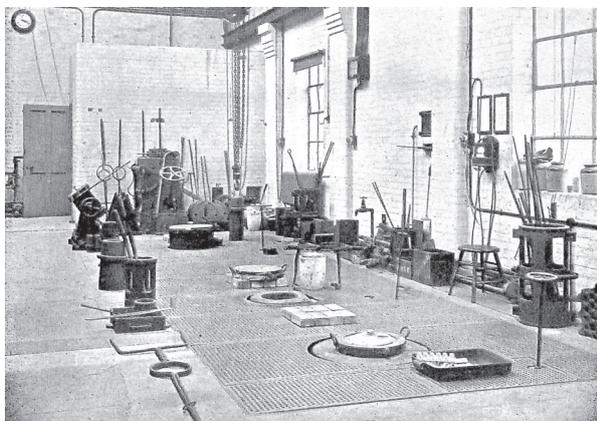
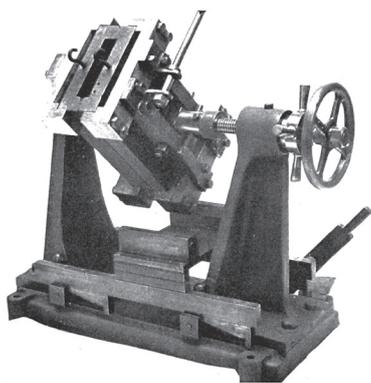


図 3.5 傾斜鑄造機の原理図と鑄型形状¹⁵⁾



(a) NPL での鑄造実験室

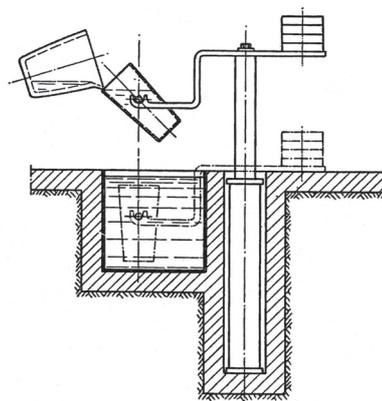


(b) NPL の傾斜鑄造機

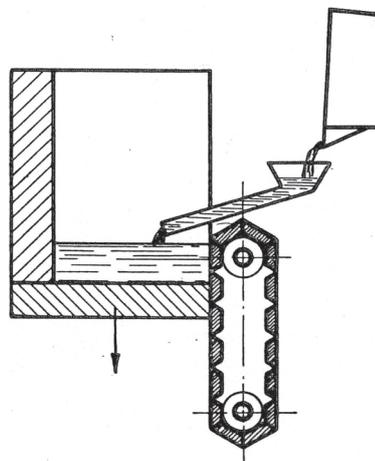
図 3.6 英国国立物理学研究所 NPL の鑄造実験室と傾斜鑄造機¹⁶⁾



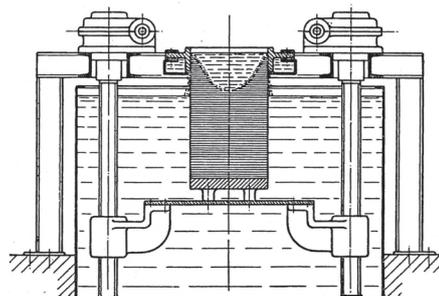
図 3.7 板用鑄塊を製造しているアルコアの鑄造工場¹⁷⁾



(a) Bucket (Bag) 鑄造法



(b) Züblin 鑄造法



(c) Zunkel 鑄造法

図 3.8 鑄造法の変遷¹⁸⁾

取り組むことになり、工場が鑄造速度、水温と水量、鑄型に接する金属の温度、合金成分のデータを集積して、ARLが熱応力解析を進めることで解決できた。1937年末までに、DC鑄造法はアルコア圧延工場の半数までに適用され、第二次世界大戦中にはすべての高強度合金が、まだ多少の割れは含んでいたが、DC鑄造法で製造されることになった。エノアの鑄造法は1937年、アルコア冶金研究者の会合で報告され、エノアは「Daddy of the DC ingot」と呼ばれた²¹⁾。図3.9は1938年出願の特許に掲載されたDC鑄造法である²²⁾。

3.3.3 圧延技術

熱間圧延は生産性を上げるためにできるだけ高速で行うことが必要である。このためには最適な圧延温度で製造することが重要であるが、粗圧延時の熱間割れを防ぐために熱間開始時は速度を遅くする必要がある。端面割れを防止するためにVertical edging rollが導入された²³⁾。通常熱間圧延は、粗圧延機と仕上げ圧延機の二つの圧延機で行われる。当時のジュラルミンの圧延条件は、二段熱間粗圧延機で8 in.厚のスラブを用いて130 ft/minの速度で4 in.厚まで50秒、10パスで圧延し、その後、三段熱間仕上げ圧延機で450 ft/minの速度で、20パス、0.280 inch厚まで150

秒で圧延する工程であった。熱間圧延に使用された三段圧延機を図3.10に示す²⁴⁾。二段圧延機や四段圧延機のように板の圧延方向を変えなくて一方向で圧延が可能である。二段、三段、四段圧延機の生産速度の比較を図3.11に示す²⁴⁾。四段圧延機の高生産性が高いことがわかる。

3.3.4 タンデム圧延技術^{23)~27)}

図3.12に熱間粗圧延機^{23), 24)}と熱間タンデム圧延機を示す。図3.12(c)は、第二次世界大戦中にアメリカ政府の国防工場公社DPCが建設し、管理運営をアルコアに委託し、戦後はカイザーアルミニウム(Kaiser Aluminum)に払い下げられたトレントウッド(Trentwood)

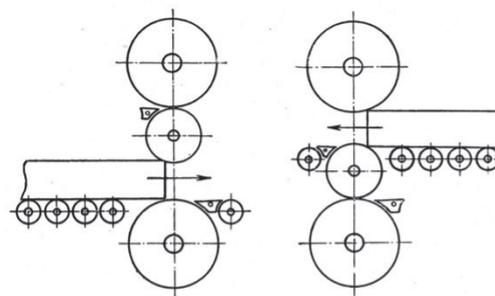
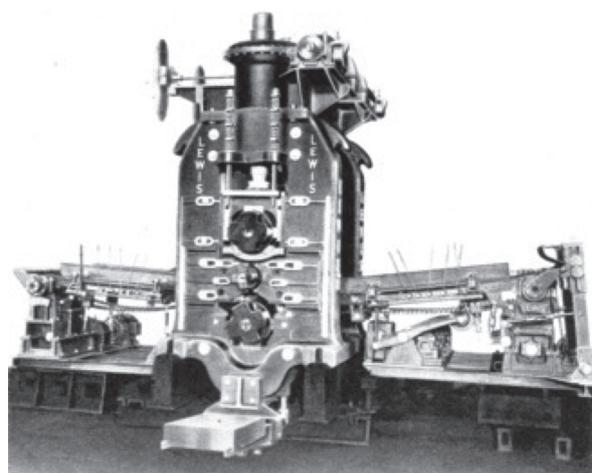


図3.10 三段熱間圧延機と圧延の模式図²⁴⁾

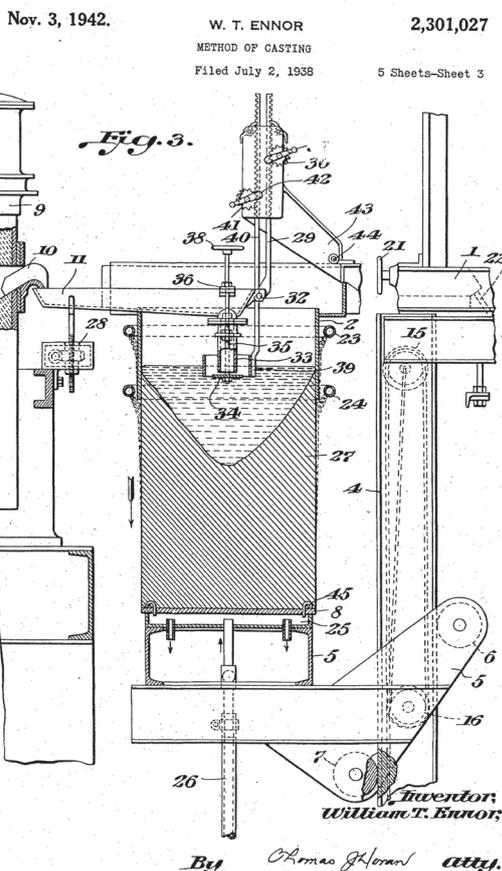


図3.9 アルコアのエノアのDC鑄造法²¹⁾

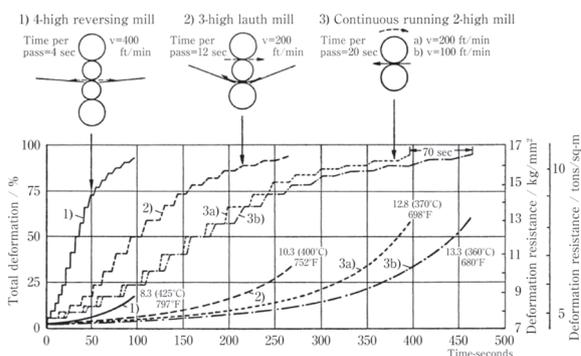
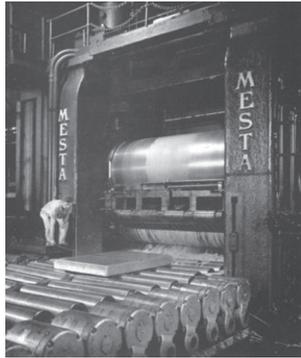
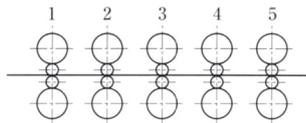


図3.11 二段、三段、四段ロール熱間圧延機の高生産速度の比較²⁴⁾

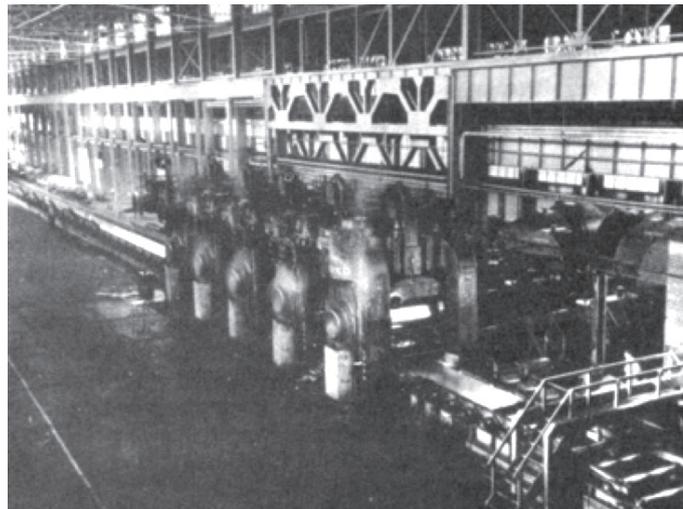


(a) 熱間四段粗圧延機



Rolling speeds (ft./min)	364	458	574	610	900
Stock thickness (inch)	.360	.296	.236	.188	.120
Reduction (%)	22	20	20	19	21

(b) タンデム四段熱間仕上げ圧延機の
圧延速度の一例²⁴⁾



(c) 5スタンドタンデム四段熱間仕上げ圧延機

図 3.12 熱間四段粗圧延機^{23), 24)} とトレントウッド工場の5スタンドタンデム四段熱間仕上げ圧延機²⁵⁾

工場のタンデム圧延機である²⁵⁾。通常の熱間圧延は粗圧延と仕上げ圧延の2台（あるいは粗・仕上げ兼用で1台）であるが、当時の最新鋭の熱間圧延機は全部で7台の熱間圧延機（二台の1スタンド四段圧延機と一台の5スタンドタンデム四段圧延機）で構成されている。表面切削した鋳塊の両面に純アルミニウムを貼り付け、その鋳塊を加熱炉に入れて、495-516℃まで加熱し、一定時間後に炉から出し、圧延温度427-454℃まで下げて粗圧延機で圧延開始する。幅広の圧延材に対しては、圧延機にターンテーブルがあり、90°回転し幅出し圧延をする。温度が低下するために圧延材を再加熱して次の粗圧延機に移して圧延を行う²⁶⁾。最初の粗圧延は鋳造組織を壊すことに専念でき、残りの圧延機は生産性の高い非常に合理的な生産設備となっており、高力系アルミニウム合金の熱間圧延の加工熱処理に最適であると考えられる。従来の圧延機より50倍もの速度で生産できると言われた²⁷⁾。

粗圧延機は可逆式で5000馬力のDCモーターで130～450 ft/minの圧延速度が出せる四段の熱間粗圧延機（8→3 in.）がある。その粗圧延機と5スタンドタンデムの仕上げ熱間圧延機の間と同じタイプの四段中間熱間圧延機（3→1 in. 以下）があり、その中間圧延機の前に再加熱工程がある。最後に5スタンドタンデム四段仕上げ圧延機で0.100～0.120 in. まで圧延する工程になっている。5スタンドタンデム圧延機のロール速度、厚み、圧下率を図3.12 (b) に示す²⁴⁾。

参考文献

- 1) 佐藤眞住、藤井清隆著：現代の産業アルミニウム工業、東洋経済新報社、(1968).
- 2) <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/pechiney-sa-history/> (2021.9.1)
- 3) The Aluminum Industry, Aluminum and Its Production, edited by J.D. Edwards, F.C. Frary and Z. Jeffries, McGraw-Hill Book Company, (1930), 35.
- 4) N.F. Budgen: Aluminium and Its Alloys, Second Edition, Pitman Publishing Corporation, (1947), 22.
- 5) C.C. Carr : ALCOA, An American Enterprise, Rinehart & Company, Inc., (1952), 25.
- 6) <https://www.alcoa.com/global/en/who-we-are/history> (2021.9.1)
- 7) J.H. Donn and L.S. Sewell, Jr.: Aluminum Vol.2, edited by K.R. Van Horn, ASM, (1967), 15.
- 8) <https://westegg.com/inflation/> (2021.9.1)
- 9) <https://www.bloomberg.co.jp/quote/LMAHDS03:COM> (2021.9.1)
- 10) 日本軽金属20年史, (1959), 514-515.
- 11) 中島崇行, 村津寿美男：アルミ業界, 教育社, (1976).
- 12) <https://www.aluminum.or.jp/basic/worldindustry.html> (2021.9.1)

- 13) 清水啓：アルミニウム外史（上巻），戦争とアルミニウム，カロス出版，(2004).
- 14) H.O. Frøland: ALUMINUM ORE, The political Economy of the Global Bauxite Industry, ed. by R.S. Gendron, M. Ingulstad and E. Storli, UBC Press, Vancouver, (2013), 79-106.
- 15) A. von Zeerleder: The Technology of Aluminium and Its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, Amsterdam, (1936), 108.
- 16) W. Rosenhain, S. L. Archbutt and D. Hanson: Eleventh Report to The Alloys Research Committee: on Some Alloys of Aluminium, Inst. of Mech. Engrs. August, (1921).
- 17) J.D. Edward, F.C. Frary and Z. Jeffries: The Aluminum Industry, Aluminum Product and Their Fabrication, McGraw-Hill Book Company, (1930), 278.
- 18) A. Zeerleder: The Technology of Light Metals, Elsevier Publishing Company, (1949), 122.
- 19) US Patent 1734786 (1929), Züblin
- 20) DR Patent 678534, (1939), filed 1935, Zunckel
- 21) M.B.W. Graham and B.H. Pruitt : R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa, Cambridge, (1990). 262.
- 22) US Patent 2301027, (1942), filed 1938, Ennor
- 23) J. Alden: Nonferrous Rolling Practice, Institute of Metal Division, Symposium Series, Vol.2 edited by D.K. Crampton, (1948), 129-151.
- 24) A. Zeerleder: The Technology of Light Metals, Elsevier Publishing Company, (1949), 167-185.
- 25) G.D. Smith: From Monopoly to Competition, The Transformation of Alcoa, 1888-1986, Cambridge University Press, (1988).
- 26) T. J. Ess : Metal Industry, No.13, 64(1944), 194-195.
- 27) <https://news.google.com/newspapers?nid=1314&dat=19450113&id=h3RWAAAIBAJ&sjid=k-QDAAAIBAJ&pg=4368,2651394&hl=ja> (2021.11.22)

4 | ジュラルミンおよび超ジュラルミンの開発

4.1 ジュラルミンの開発とツェッペリン飛行船

4.1.1 時効硬化の発見

ドイツのヴィルム (Alfred Wilm、図4.1) は1901年、ベルリン近郊のノイバーベルスベルグ Neubabelsberg にある理工学中央研究所 (Zentralstelle für wissenschaftliche-technische Untersuchungen) に招聘され、翌年ドイツ兵器弾薬製造会社から真鍮製の薬莖をアルミニウム合金で代替するための開発委託を受け研究を開始した。彼は Al-4%Cu 合金を鋼と同じように焼入れして、引張強さ 152 ~ 225 MPa、伸び 5 ~ 7% を得たが、真鍮の代替には及ばなかった。1903年この熱処理法で特許を申請した (DRP170085)。その後研究を続け、1906年時効硬化現象を発見した。この発見にまつわる次のエピソードは有名な話である^{1), 2)}。



図 4.1 アルフレッド・ヴィルム (Alfred Wilm)³⁾

1906年9月のある土曜日、Al-4%Cu-0.5%Mn 合金に 0.5%Mg を添加した 3 mm 厚みの板材を作成し、520℃の塩浴炉で加熱後焼入れた。ヴィルムは午後の1時頃、退出間際の助手のヤブロンスキ (Jablonski) に硬度の測定を命じて計ったところ、その変化はわずかであった。その続きを翌々日の月曜日に行ったところ著しく増加していることに驚いて、測定器をチェックし実験を繰り返した。その結果、硬さが焼入れ後2時間まではほとんど変化せずにそれ以降4日間にわたって増加し、その後一定になることを確認した。この熱処理により、引張強さ 390 MPa、伸び 20 ~ 25% が得られた。

1907年1月11日、Al-4%Cu 合金をベースに微量マグネシウム添加の影響を調べ、「2%以下のマグネシ

ウムと5%以下の銅を含むアルミニウム合金で、特に Cu 4% に Mg 0.25 ~ 0.5% を含むアルミニウム合金が効果的」として特許を申請した (DRP204543、1908年11月認可)。マグネシウム量2%以下としたことについては、当時アルミニウムの強度を高めるには2%以上のマグネシウム添加が必要なことは、マグナリウム (Magnalium) 合金に代表されるように既に知られており特許も出されていたためである。その後、系統的な実験を行い、「マグネシウムを含むアルミニウム合金の熱処理法」として D.R.P.244554 (1909年3月20日申請、1912年3月9日認可) の特許を取得した。特許請求範囲は「工程の最後に 420℃以上に加熱し、少し成形加工する場合もあるが、常温に放置することを特徴とするマグネシウムを含むアルミニウム合金の処理方法」と書かれている。Wilm は先の2件を含めて4件の特許を米国で取得した⁴⁾。図4.2はヴィルムが論文に掲載した Al-3.5%Cu-0.5%Mg 合金の硬さに及ぼす室温時効時間および焼入れ温度の影響を示す⁵⁾。

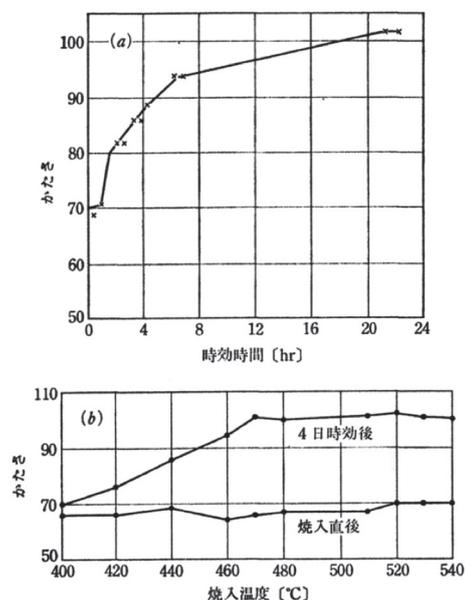


図 4.2 Al-3.5% Cu-0.5% Mg 合金の硬さに及ぼす室温時効時間および焼入れ温度の影響⁵⁾

4.1.2 ジュラルミンの工業化

この材料の製造については、1908年ドイツ兵器弾薬製造会社の姉妹会社でデューレン (Düren) にあるデュレナ・メタルベルケ (Dürener Metallwerke A.G.) でのジュラルミン板の工場試作が行われたが、研究所はこの発明に関心を持たなかった。これは彼が特許を

申請した1909年、彼を招聘した研究所長が交替したため、ヴィルムの研究は中止となり、ヴィルムはジュラルミンを自分の手で工業化するために研究所と交渉の上、ジュラルミンの特許を彼の名義とし研究所を辞めた。幸いにもデュレナ社がヴィルムの特許の使用権を得て、同社技術役員ベック (R. Beck) 博士の協力のもとで工業化に成功した^{2), 6)}。

1909年ヴィルムとデュレナ社の間でこの新製品に対する商品名の相談があり、ヴィルムは当初ドイツ語で硬いという意味のHartをつけたHartaluminiumを提案したが、国際市場を考え、フランス語で硬いというDurを用いてDuraluminにした。Duraluminは地名のデューレン (Düren) あるいは地名を冠した会社名のDürener Metallwerke A.G. から来たとも言われているが、現在のドイツ人の多くはDüralumin (Dürener-Alumin) よりDur-Aluminとして理解して

いるとのことである⁶⁾。Durが用いられたのはこの合金が初めてでなく、デュレナ社の開発した多くの合金のトレードマークとして”DuranaMetalle”がすでに国際的にも認知され用いられていたことも関係していた⁶⁾。

英国のヴィッカーズ社 (Vickers Company、その後The Vickers Sons & Maxim Ltd.) は1909年、剛性の高い英海軍飛行船”メイフライ (Mayfly)”の建造を開始した。1910年、デュレナ社はジュラルミンを12.75トン生産したが、そのうち10トンをヴィッカーズ社に供給した。しかし、この船は1911年9月、試験飛行のため格納庫から移動するときに、操作ミスで真二つに折れてしまった。これはこの合金が「ドイツ製」(注1)だからとの疑いをもたれたことで、ヴィッカーズ社は、1911年、ヴィルムから製造の許諾を得て自らこの合金の生産を開始した⁶⁾。ヴィッカーズ社は、英国、フランス、スペイン、ポルトガル、イタリ

コラム ヴィルムの生涯

ヴィルムは1869年6月25日ローワーシレジア (Low Silesia) のハイナウ (Haynau) に近いニーダー・シェレンドルフ (Niederschellendorf) で生まれた。父は領地を所有し、母は大きな宝石商の娘であった。1886年ヴロツワフ (Breslau、現在のポーランドのWroclaw) の王立専門学校 (Königliche Gewerbeschule) に学んだ後、ベルリンにあるシャルロテンブルグ (Charlottenburg) 工科大学の化学の聴講生となり、特にウィーレン (Julius Weeren) 教授の下で理論的かつ実践的な講義を受けた。彼はまた王立鑄鉄工場 (Königliche Eisengießerei) で初めて冶金学を習得した。さらにカッセルの鉱山局で3ヶ月の実習に参加してバリウム、ストロンチウム、カルシウムの分離法に習熟した。1893年11月1日ゲッティンゲン (Göttingen) 大学の助手となった。在籍した研究室はヴェーラー (F.W. Wöhler, 1800-1882) が50年間、研究と教育を行っていた所でその流れを引き継いで研究した。1897年3月からエッセンのゴールドシュミット (Th. Goldschmidt) 社で働き、ゴールドシュミット (Hans Goldschmidt) と一緒に金属アルミニウムで金属酸化物を還元するテルミット反応 (aluminothermy法とも呼ばれる。また、この方法はゴールドシュミットにより発明されたのでゴールドシュミット法とも呼ばれる) を利用して酸化物からCr、Mn、Co、Ni、Taなどの金属を分離する研究に従事した。

1901年春には、エッセンの会社を辞めて、ノイバーベルスベルグにあるストライベック (Stribeck) 教授が所長を務める理工学中央研究所に移った。1902年から、ヴィルムはストライベック教授の厚い信頼を受けてアルミニウム合金の系統的な研究を開始した。1906年、Al-Cu-Mn合金に微量のMgを添加して焼入れすると硬くなることを発見し、特許を取得した。1909年ストライベック教授がエッセンのクルップ (Krupp) 社に移るために理工学中央研究所を辞めるまで合金成分や熱処理を研究した。ストライベック教授の後任の所長は粉末の専門家が高強度アルミニウム合金には関心を持たなかったため、1909年出願の特許については、前述したようにヴィルム本人が特許権者となり研究所を辞した。

ヴィルムの晩年についてはドイツのアルミニウムセンター (Aluminium Zentrale) のハース (M.H. Haas) 博士が1935~40年頃に詳しくまとめている^(*)。ハース博士によれば、ヴィルムは第一次世界大戦後1919年、妻と6人の子供たちとともに鶏を育てることに専念するために生まれ故郷のシレジアの山村に引退した。養鶏でもアルミニウム合金で培ってきた方法で採卵鶏、中でも白色レグホーンを改良して名声を得た。その後1937年8月6日、68歳で亡くなったとのことである。

(*) M.H. Haas: Aluminium, 18(1936), 1936; 17(1935), 502; 22(1940), 497.

アさらに米国で製造する権利を有した。後述するが、メイフライ号の失敗もドイツでのジュラルミンのロール成形技術にあったようである⁷⁾。

(注1) 当時のドイツの技術は発展途上の新興国と同じで経済発展が凄まじく、生産量は増大したが、製品の品質面ではまだまだイギリスには劣っていたと考えられる。当時のイギリスでは安価な汎用品で「メイド・イン・ジャーマニー」と言えば、粗悪輸入品の代名詞であった⁸⁾。しかしながら当時のハイテク部門の電機と化学の両部門や物理や化学などの自然科学の分野ではドイツは完全に世界をリードしていた。

4.1.3 ツェッペリン (Zeppelin) 飛行船⁹⁾

(1) ツェッペリン伯爵

ジュラルミンはまず飛行船に用いられた。有名なツェッペリン飛行船はツェッペリン (Ferdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin) 伯爵⁹⁾ (図4.3) によって発明された。ヴィルムやツェッペリンが生きた時代背景をまず述べておく⁸⁾。

1869年ヴィルムはプロイセン王国で生まれた。当時のドイツは1861年プロイセン王ヴィルヘルム1世が即位し、そのもとでプロイセン王国の首相にビスマルクが就任すると、「鉄血政策」によってドイツ統一に努め、鉄血宰相と呼ばれた。彼はプロイセン・オーストリア戦争で隣国オーストリアの影響を排除し、北ドイツ連邦をまとめ、さらにプロイセン・フランス戦争によりバイエルン王国などの南ドイツ諸邦を束ねて1871年ドイツ帝国を成立させた。ドイツ帝国成立とともに初代宰相となり、皇帝の厚い信任のもとで、約20年間、帝国の発展とドイツの国際的地位の向上に努めた。しかし、1888年に若きヴィルヘルム2世が即位すると、ビスマルクのドイツ帝国を「守る」政策に不満を抱きビスマルクを引退させ親政を開始した。彼は「世界政策」を唱えて海軍力増強などで軍備拡張し、「守り」から「攻め」の政策に切り替えた結果、ベルリン、ビザンチン、バグダードをバグダード鉄道で結ぶ3B政策ではイギリス、フランス、ロシアと対立して、第一次世界大戦を引き起こすきっかけを作ることになった。竹中享によれば、この「帝政ドイツの時期に経済規模は4倍弱に成長し、ことに工業の伸びは6倍近くに及んだ。農業国から欧州随一の工業大国へと躍進した。特にヴィルヘルム2世の時代はドイツ経済がとりわけ好調な時期だった」とのことである⁸⁾。

ツェッペリンは1838年7月8日ドイツ南部ボーデ

ン湖近くのコンスタンツの貴族の家に生まれた。彼は軍人になるために1853年陸軍士官学校に入学した。卒業後、軍人としてアメリカの南北戦争を視察するためにアメリカに赴き、ミシシッピ川の河畔で偵察用の繫留気球に乗ったこと、さらにその後プロイセン・フランス戦争に参加し、フランスは通信手段として有人気球を使用していたことがわかり飛行船の研究を始めた。軍隊を1年間休職してチュービンゲン大学に通いエンジンについて学んだ。軍務のかたわら飛行船の研究を行い、彼の行き着いた飛行船は20人が乗れ、郵便物を運ぶ巨大なものであった。彼の構想を実現するために、1890年ドイツ皇帝ヴィルヘルム2世に飛行船構造を進言したが理解されず、自ら飛行船を作るべく1890年陸軍少将を退役した⁹⁾。

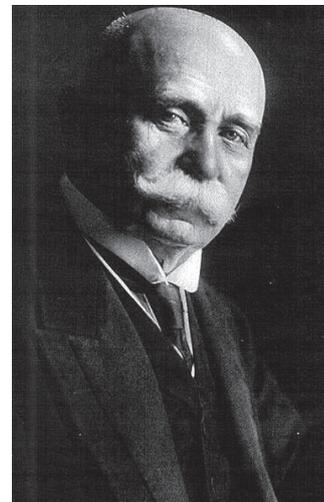


図4.3 ツェッペリン伯爵⁹⁾

(2) 軟式飛行船^{7), 10)}

飛行船が発明される前には、空気を加熱して浮力を得る熱気球で空を飛ぶことがなされた。その後水素が発見されると水素気球が主流となったが、気球には飛行は風まかせで思う方向に飛んで行けないという欠点があった。その後ゴンドラにプロペラを取り付け、手回しで操縦できる気球ができるようになった。これを契機にプロペラと原動機をつけ操縦できる飛行船が開発された。その後、蓄電池を用いて電気モーターで駆動する飛行船がフランスで開発された。1884年シャルル・ルナール (Charles Renard) の全長50m、最大直径8.5m、モーター出力9馬力の飛行船“ラ・フランス (La France)” が時速24kmを出し、大成功をおさめた。しかしながら推進装置の重量が大きいため実用化にならなかった。1885年、ドイツのカール・ベンツ (Karl Friedrich Benz) とゴットリープ・ダイムラー (Gottlieb Wilhelm Daimler) が別々に実用的な4サイクルのガソリン・エンジンの開発に成功し、

これを機に飛行船の実用化は一気に進んだ。しかし、これまでの飛行船はガス漏れしない柔軟な外皮の中にガスを満たした軟式飛行船で、高度や温度に応じて膨張・収縮するために構造的にあまりに大きくすることができず、悪天候の気流に耐えることができなかった。

(3) 硬式飛行船⁷⁾

ハンガリー生まれのユダヤ人で材木商のダヴィット・シュヴァルツ (David Schwarz) は、1892年、ロシア人研究者が提案した外皮に金属を用いた硬式飛行船をロシア政府の支援で作ることになった。金属はカール・ベルグが製造したアルミニウムを使うことになったが、残念ながら金属の外皮はガス充満中に壊れて失敗した。その後、1894年に彼はプロシアにこの飛行船を提案した。この時はツェッペリンの二つの飛行船を前後に繋いだ列車型飛行船とのコンペになり、シュヴァルツのデザインが採用された^{7), 10)}。シュヴァルツの飛行船は図4.4に示したように全長47.6 m、直径12 mの円筒状で片側に円錐をつけた構造でこの中に水素ガスを満たし、ダイムラー12馬力エンジンを載せ、ベルトで4個のプロペラを回すことになっていたが⁷⁾、完成を見ずにシュヴァルツは亡くなった。彼の死後1897年11月、初飛行したが、ベルトにトラブルが生じ墜落して2号船も失敗した。

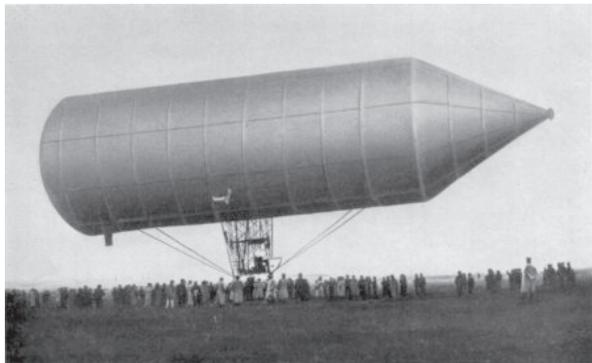


図4.4 シュヴァルツの飛行船¹¹⁾

シュヴァルツとのコンペでは、ツェッペリンのアイデアは選定委員会では採用されなかったが、委員からはツェッペリンの考えに感銘を受け建設的な意見が出された。その意見をまとめた陸軍省 (War Ministry) からの手紙には、葉巻状にして外皮で覆い、内部はシュヴェトラー (J.W. Schwedler) が考案した正多角形のリング状肋材 (フレーム) を長手方向に一定間隔毎に配置しワイヤーで固定した構造にすべきであるとの重要な提案があった。ツェッペリンはこの構造が採用される可能性が高いと判断し硬式飛行船を設計し、1897

年12月特許を申請した。彼は全財産を投じて1898年自ら飛行船建造会社を自分の生まれ故郷に近いスイスとの国境にあるボーデン湖畔のマンツェルに設立した。

ツェッペリンの飛行船の構造は従来のガス嚢に水素を詰める軟式飛行船ではなく、金属で骨組みを作り、外皮 (麻布か木綿布) で覆ってその中に水素ガスを詰めたガス嚢 (注2) を数個並べるといった硬式飛行船であった。その理由は (1) 船体を金属の骨組みで作れば、飛行船が大型になっても、また多少ガス嚢がしぼんでも変形しないこと、(2) 水素ガスを数個のガス嚢に分散して詰めれば、その内の1つに穴が開いてガスが流出しても安全であることであった。船体の骨組みは鉄で作るつもりだったが、重くなることが懸念され、アルミニウムが用いられた。ツェッペリン伯爵は当時硬い合金と言われていた亜鉛アルミニウム合金を採用した。亜鉛アルミニウム合金というのは亜鉛20%程度含んだ合金のことである⁷⁾。

(注2) 初期の飛行船のガス嚢は気密性の高いことをはじめ、軽く、柔軟で、湿気を吸いにくいことが要求される。一般にその素地は目の細かい木綿布で、内面となる側にゴムを薄く塗り、その上に牛の盲腸を切り開いて加工したゴールドビーターズ・スキンを特殊なニカワで一重または二重に貼り、さらにその上に塗料を塗ってガスの漏洩を少なくしたものである。1頭の牛から得られる盲腸の大きさは700×150 mm～1,000×250 mmであるから、大型硬式船一隻、例えば16個のガス嚢を持ったR 101 (英国の硬式飛行船) に必要な牛の盲腸は約15万頭分とのことである。ガスの漏洩度は24時間につき、0.1～1.0 l/m²といわれた。米国の飛行船では木綿布にゴム・ラテックスやゼラチン・ラテックスを塗ったものが用いられた¹⁰⁾。

1900年6月、全長128 m、直径11.65 mのツェッペリン第一号硬式飛行船 LZ1 (注3) が完成した。ツェッペリン伯爵はジュラルミンに変える1914年まではこの材料を用い続けた。当時のジュラルミンは同じ重さのアルミニウムに比べて2.5～5倍の強度を持っていたが、1910年当時、飛行船の桁に必要な断面形状を製造することが困難で、当初、ツェッペリンはこのため採用を拒否した。図4.5はツェッペリン飛行船 LZ1の内部構造とボーデン湖上の離陸する LZ1 である。LZ1は正24角形の筒状でアルミニウムの骨組みの上に羽布を張り、内部に水素ガスを詰めた17個のガス

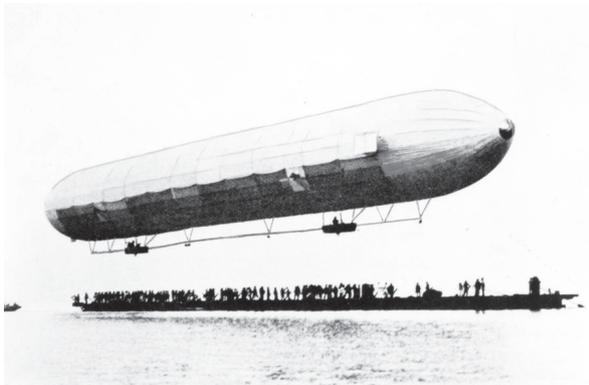


図 4.5 ツェッペリン飛行船 LZ1 の内部構造 (上)¹⁰⁾ と
ボーデン湖上で初飛行直前の LZ1 (下)¹²⁾

囊を収納する構造であった^{10),12)}。以後、40年間ツェッペリンの飛行船はこの構造様式を踏襲した¹⁰⁾。組み立てはフリードリヒスハーフェン (Friedrichshafen) に近いボーデン湖上に浮かぶ格納庫で行われた。これには土地を購入する資金の問題もあったが、湖上では格納庫を回転させることができ搬出や搬入のときに横風を受けにくくすることができるメリットもあった。この LZ1 は不幸にも 400 m 上昇し、15 分ほどボーデン湖上を飛び回ったところで、異常が生じ、船体が折れ曲がり墜落した。この失敗で、「狂人伯爵」とまで陰口をたたかれたが、それにめげることなく、1905 年 LZ2 を建造した。そのころ皇帝は自国の海軍がイギリス海軍に遅れを取っていることに懸念を抱き、空飛ぶ戦艦ともいえるツェッペリン飛行船に期待をかけて国費を投じることを決め、1906 年 LZ3、1908 年 LZ4 が建造された。これらの飛行船の成功とともにツェッペリン伯爵は一躍「国民的英雄」となった。1908 年 9 月、飛行船建造会社の「ツェッペリン飛行船有限会社」をフリードリヒスハーフェンに設立し、翌 1909 年に世界初の旅客を専門とする商業航空会社「ドイツ飛行船運輸株式会社 (DELAG)」をフランクフルトに設立した¹⁰⁾。

(注 3) LZ はツェッペリン社の機体製造番号 (L: Luftschiff, Z: Zeppelin)。LZ の番号とは別に、第一次世界大戦中は、陸軍は LZ (ただし生産数を秘匿するために 30 を加えた数字を用いた)、海軍は L で識別した。これに対し、ライバルのシュッテ・ランツ (Schütte-Lanz) 社の飛行船は SL で識別された。ツェッペリン飛行船は 1900 ~ 1940 年で 130 隻 (LZ1 ~ LZ130) が、シュッテ・ランツ飛

行船は 1909 ~ 1918 年で 22 隻 (SL1 ~ SL22) が建造された。

ドイツは、1914 年までにジュラルミンで部品が製造可能なレベルになり、代替案として考えられていたマグネシウム合金より優れていたことが証明された⁷⁾ため、この合金は 1914 年、独海軍ツェッペリン飛行船用に規格登録され、1914 年の LZ26 からジュラルミンが使われ、1916 年までに 720 トン生産された¹³⁾。図 4.6 はフリードリヒスハーフェンにあるツェッペリン博物館に展示されている飛行船の骨格とそのロール成形工程を示している⁷⁾。メイフライ (Mayfly) 号の失敗もジュラルミンのロール成形技術にあったようである。メイフライ号の製造に当たっては、ドイツで基本形状に加工された材料を英国に輸入したが、これらの 75% は所定の形状にロール成形ができていないために用いることができなかったといわれている⁷⁾。ジュラルミンが飛行船に採用されるにはロールフォーミングの加工技術も進歩する必要があった。

飛行船の内部構造を図 4.7 に示す。この図はグラフ・ツェッペリン (Graf Zeppelin) L127 の船体の骨格である¹³⁾。ジュラルミンを用いた複雑な骨組みがわかる。一機あたり約 9 トン使用され、1914 年から 1918 年の間にツェッペリン船 88 隻、シュッテ・ランツ船 20 隻が建造された。シュッテ・ランツ飛行船建造会社は木材とベニア合板と接着剤で接合させた骨組みを持つ硬式船を作ったが、水に弱い構造的な欠陥があったため主として陸軍で用いられた。1918 年以後のシュッテ・ランツ船には、木材に代わってジュラルミン、主としてパイプが多用された¹⁰⁾。表 4.1 は世界の代表的な飛行船の仕様と機体に用いられた材料の一覧を示す⁷⁾。

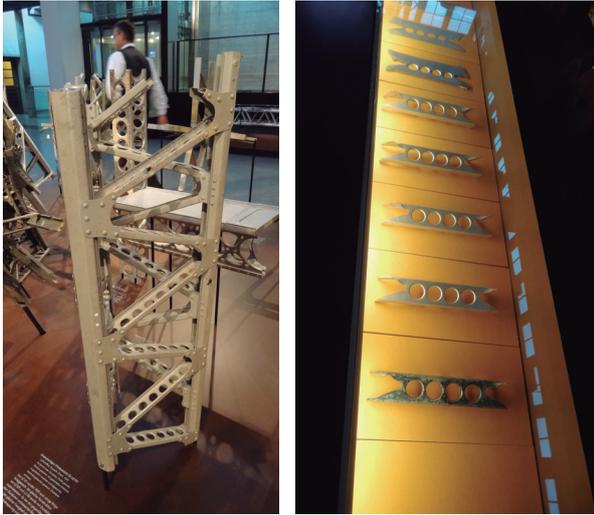


図 4.6 ツェッペリン博物館（フリードリヒスハーフェン）に展示されているツェッペリン飛行船の骨格の一部（上左）とそのロール成形工程（上右）とそのロールおよびリベット接合の治工具（下）（著者撮影）

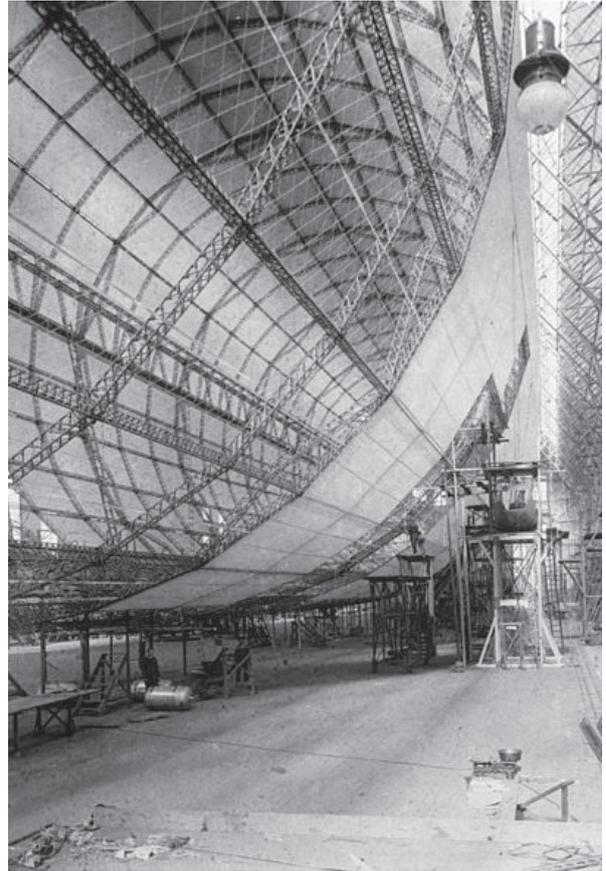


図 4.7 グラフ・ツェッペリン飛行船 L127 の骨格構造¹⁴⁾

コラム ドイツにはツェッペリン博物館が四つもある！

ツェッペリンの飛行船にいつからジュラルミンが用いられたかを知りたいと考えていた時に、ドイツには四つのツェッペリン博物館があることを小前ひろみ著「とってもドイツ博物館めぐり」（東京書籍、2000年）で知り、この四つの博物館を訪問することにした。2012年10月に、休暇をもらって家内とドイツに行ったときは、時間の関係で北にある博物館だけは行くことが出来なかった。幸い、2014年6月、ノルウェー、トロンハイムでアルミニウム合金国際会議ICAA14が開催され、講演発表するために参加したが、その帰りにドイツに行く機会ができ、残りの四つ目の北にある博物館を訪問することができた。

2012年10月9日、鉄道でスイスとの国境にあるボーデン（Bodensee）湖畔にあるフリードリヒスハーフェン（Friedrichshafen）に向かった。ここに目指す第一のツェッペリン博物館がある。入り口にはツェッペリン飛行船を模したモニュメントがあった。後ろからみると子供の滑り台になっていた。博物館内部に入ると、骨格の部材の残材（図4.6）やマイバッハのエンジンを搭載したゴンドラとプロペラの残骸が並べられていた。さらに行くと当時の骨格の加工技術（図4.6）や飛行船の実物大の断面や客室が展示されていた。骨格は板のロールフォーミングで成形し、リベットで接合していることがわかった。翌朝10日、曇りがちで時々小雨が降る天気の中、フリードリヒスハーフェンからメアスブルグ（Meersburg）までバスで行き、30分ほどで着いた。メアスブルグは湖上に面した古城を中心に観光地となっている。古城の反対側に第二の博物館はあった。しかしながら、ここは個人が経営する博物館で、個人的に収集した約一万点のコレクションがあるが、筆者の興味を引くものは少なかった。12日シュトゥットガルトから鉄道でフランクフルトに向かい、第三の博物館に行った。フランクフルト空港に近いツェッペリン

ハイムにある。フランクフルト空港は元々、ツェッペリンがフランクフルトにドイツ飛行船運輸株式会社（DELAG）を設立したところから始まったといわれる。社員のための住宅地を空港近くの森の中に作り、ツェッペリンハイムと名付けた。閑静な住宅地の中にツェッペリン博物館はあった。

館内は比較的小ぢまりとしていて、展示物もあるが、写真による説明が多いと思った。その中にパイプが展示されていて、ジュラルミンのシームレス管とすれば技術レベルが高く、当時の管の製造技術ほどの程度のものであったのかあらためて調べる必要があると思った。また1937年、爆発炎上したHindenburg（LZ129）号の残材も展示されていた。表面は黒くて塗装が火災で焼け残っているように思えた。もし塗装されているとしたら、どのような塗装がいつから施されたかも興味深かった。

最後の第4の博物館、ノルトホルツ・アエロノーティクム（Nordholz Aeronauticum）はブレーメン（Bremen）から約80 km北のノルトホルツ（Nordholz）にある。列車でブレーメンから約1時間の距離である。2014年6月21日、トロンハイムでの国際会議を終えドイツに渡り、翌日21日に、ブレーマーハーフェン（Bremerhaven）経由でノルトホルツに行った。駅から15分ほど歩いたところに、海軍航空基地があり、アエロノーティクム博物館はその海軍航空基地に隣接していた。博物館入口には、ツェッペリン伯爵の像が建てられていた。内部には実物大に近い模型も含めて各種の模型や写真が数多く展示されていた。日本でも最近は零戦を展示する博物館も増えてきたが、日本には過去の製品や技術を残して展示するという習慣が少ない。ドイツではツェッペリン飛行船や各種の航空機をはじめとして工業製品に関する博物館が非常に多い。改めて工業技術を大事にする国であることを認識した。

（このコラムは<https://www.jilm.or.jp/page-essay066>、アルトピア, No.1(2015),17-25より転載）



a) フリードリヒスハーフェンの博物館



b) ツェッペリンハイムの博物館



c) ノルトホルツの博物館

図 各地のツェッペリン博物館正面の風景（著者撮影）

表 4.1 ツェッペリン飛行船の仕様と骨格に使用された材料⁷⁾

飛行船	製造番号、名称	国	初飛行	ガス容量	エンジンメーカー	型式	搭載数	総馬力 hp	長さ m	直径 m	最高速度 m/s	構造材料	製造 台数
Schwarz	No.2	独	3.11.97	3,700	Diaimler	P1896	1	12	47.5		7.5	Aluminium	1
Zeppelin	LZ1	独	2.7.00	11,300	Diaimler	N1899	2	28	128.0	11.7	7.8	Zn-Al Alloy	1
Zeppelin	LZ2	独	17.1.06	10,400	Diaimler	H4L	2	160	128.0	11.7	11.0	Zn-Al Alloy	2
Zeppelin	LZ4	独	20.6.08	15,000	Diaimler	J4	2	210	136.0	13.0	13.5	Zn-Al Alloy	2
Zeppelin	LZ6	独	25.8.09	15,000	Diaimler	J4L	2	230	136.0	13.0	13.5	Zn-Al Alloy	1
Zeppelin	LZ7, Deutschland	独	19.6.10	19,300	Diaimler	J4F	3	360	148.0	14.0	16.7	Zn-Al Alloy	2
Vickers	No.1	英	22.5.11	18,800	Wolseley		2	320	156.0	14.6	(18.8)	Duralumin	1
Zeppelin	LZ10, Schwaben	独	26.6.11	17,800	Maybach	A-Z	3	435	140.0	14.0	21.0	Zn-Al Alloy	3
Schütte-Lanz	S.L.1	独	17.10.11	20,500	Diaimler	J8L	2	480	131.0	18.4	19.7	Wood	1
Zeppelin	LZ11, Viktoria-Luise	独	14.2.12	18,700	Maybach	B-Y	3	450	148.0	14.0	21.0	Zn-Al Alloy	2
Zeppelin	LZ14 (L1)	独	7.10.12	22,470	Maybach	B-Y	3	540	158.0	14.9	21.2	Zn-Al Alloy	6
Zodiac	13 Spiess	仏	4.13	12,800	Chenu		2	420	113.0	13.5	18.0	Wood	1
Zeppelin	LZ18 (L2)	独	9.9.13	27,000	Maybach	C-X	4	840	158.0	16.6	21.0	Zn-Al Alloy	1
Zeppelin	LZ21 (ZV1)	独	10.11.13	20,870	Maybach	C-X	3	540	148.0	14.9	20.5	Zn-Al Alloy	1
Zeppelin	LZ22 (ZV2)	独	8.1.14	22,140	Maybach	C-X	3	540	156.0	14.9	20.0	Zn-Al Alloy	2
Schütte-Lanz	S.L.2 (S.L.2)	独	28.2.14	25,000	Maybach	C-X	4	720	144.0	18.2	24.5	Wood	1
Zeppelin	LZ24 (L3)	独	11.5.14	22,470	Maybach	C-X	3	540	158.0	14.9	23.4	Zn-Al Alloy	12
Zeppelin	LZ26	独	14.12.14	25,000	Maybach	C-X	3	540	161.2	16.0	22.5	Duralumin	1
Schütte-Lanz	S.L.3	独	4.2.15	32,410	Maybach	C-X	4	840	153.1	19.7	23.5	Wood	3
Zeppelin	LZ36	独	8.3.15	24,900	Maybach	C-X	3	540	161.4	16.0	23.6	Duralumin	2
Zeppelin	LZ38	独	3.4.15	31,900	Maybach	C-X	4	720	163.5	18.7	26.7	Duralumin	22
Schütte-Lanz	S.L.6	独	19.9.15	35,130	Maybach	C-X	4	840	162.1	19.7	25.8	Wood	2
Zeppelin	LZ59	独	21.12.15	35,800	Maybach	H-S-Lu	4	960	178.5	18.7	26.5	Duralumin	12
Schütte-Lanz	S.L.8	独	30.3.16	35,130	Maybach	H-S-Lu	4	960	174.0	20.1	26.9	Wood	10/12
Zeppelin	LZ62	独	28.5.16	55,000	Maybach	H-S-Lu	6	1440	198.0	23.9	28.7	Duralumin	17
Vickers	No.9	英	27.11.16	25,180	Maybach	C-X	4	600	161.5	16.2	20.1	Duralumin	1
Zeppelin	LZ91	独	22.2.17	55,500	Maybach	H-S-Lu	5	1200	196.5	23.9	27.7	Duralumin	2
Zeppelin	LZ93	独	1.4.17	55,800	Maybach	H-S-Lu	5	1200	196.5	23.9	28.9	Duralumin	2
Zeppelin	LZ59	独	22.5.17	55,800	Maybach	H-S-Lu	5	1200	196.5	23.9	29.9	Duralumin	5
Zeppelin	LZ100	独	8.8.17	56,000	Maybach	H-S-Lu	5	1200	196.5	23.9	29.9	Duralumin	10
Schütte-Lanz	S.L.20	独	10.9.17	56,000	Maybach	H-S-Lu	5	1200	198.3	22.9	28.5	Wood	3
Vickers	No.23	英	19.9.17	28,250	Rolls-Royce	Eagle	4	1000	163.1	16.2	23.2	Duralumin	4
Zeppelin	LZ102	独	26.9.17	68,500	Maybach	H-S-Lu	5	1200	226.5	23.9	28.6	Duralumin	2
Admiralty	R27	英	29.6.18	28,050	Rolls-Royce	Eagle	4	1200	164.3	16.2	24.6	Duralumin	2
Zeppelin	LZ112	独	1.7.18	62,200	Maybach	Mb Iva	7	1715	211.1	23.9	36.4	Duralumin	3
Admiralty	R31	英	1.8.18	43,975	Rolls-Royce	Eagle	6	1800	187.3	20.1	31.8	Wood	2
Admiralty	R33	英	6.3.19	55,460	Sunbeam	Maori IV	5	1250	196.0	24.0	26.8	Duralumin	2
Zeppelin	LZ120, Bodensee	独	20.8.19	20,000	Maybach	Mb Iva	4	980	120.8	18.7	36.8	Duralumin	2
Vickers	R80	英	19.7.20	35,680	Maybach	Mb Iva	4	980	162.0	21.3	26.8	Duralumin	1
Admiralty	R36	英	1.4.21	60,030	Sunbeam Maybach	Cossack Mb Iva	3 2	1540	205.0	24.0	29.1	Duralumin	1
RAW	R38	英	23.6.21	77,600	Sunbeam	Cossack	6	2100	211.8	26.0	29.5	Duralumin	1
NAF	ZR-1, Shenandoah	米	4.9.23	60,915	Packard	1A-1551	6	1800	207.3	24.0	28.0	Duralumin	1
Zeppelin	LZ126, Los Angels	独	27.8.24	70,000	Maybach	VL1	5	2000	200.0	31.9	32.7	Duralumin	1
Zeppelin	LZ127, Graf Zeppelin	独	18.9.28	75,000	Maybach	VL2	5	2650	236.6	30.5	35.6	Duralumin	1
Metalclad	ZMC-2	米	19.8.29	5,720	Wright	J-5 Whirlwind	2	440	45.5	16.0	27.7	Duralumin and Alclad	1
RAW	R101	英	14.10.29	141,540	Beardmore	Tornado III	5	2925	222.9	40.0	31.3	Duralumin and Steel	1
AGC	R100	英	16.12.29	146,060	Rolls-Royce	Condor IIIB	6	4020	216.1	40.5	36.3	Duralumin	1
Goodyear-Zeppelin	ZRS4, Akron	米	25.9.31	193,970	Maybach	VL2	8	4560	239.3	40.5	37.6	Duralumin	2
Zeppelin	LZ129, Hindenburg	独	4.3.36	200,000	Diaimler-Bentz	DB 602	4	4200	245.0	41.2	37.5	Duralumin	2

コラム 飛行船構体の加工を支えるロールフォーミング技術

一般に板材を曲げ加工で所定の断面形状にする場合、ダイス（金型）に材料と同じ厚みの所定の断面形状に溝を切って、その溝の中に板材を通すことでその形状に引抜き加工する。一回でその加工をするのが難しい形状の場合には数段階に分けて徐々にその形状に近づけていく。この板製品をプロフィール（左図）と呼び、押出では難しい薄い形状に適用した。これを連続的に行うためにダイスの溝の代わりに右図に示すように二つのロール間でその形状を作り、それをいくつものロールの中を連続的に通すことで所定の形状に加工する。これをロールフォーミング加工と呼んでいる。

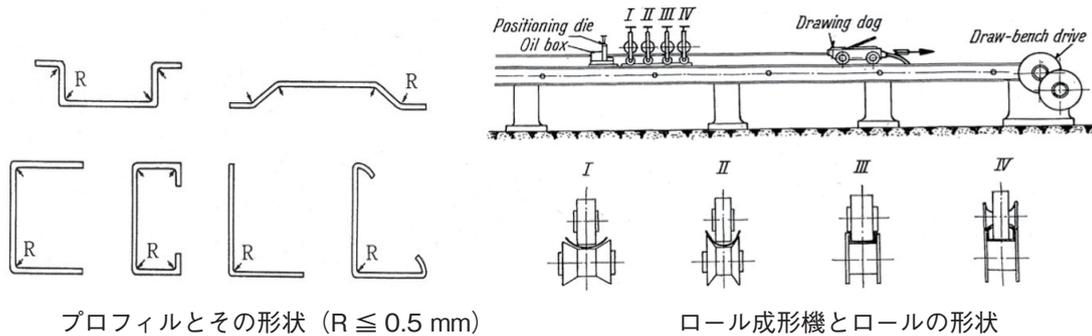


図 プロフィルの形状（左）とロール成形機（右）

出典：A. Zeerleder: The Technology of Aluminium and its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, (1936), 31.

4.1.4 ツェッペリン飛行船と第一次世界大戦

第一次世界大戦では、ドイツは、イギリス、フランスに対して飛行船を用いた空爆を行った。ロンドンへの初空襲は1915年5月31日の深夜に陸軍のLZ38により行われた。1915年から1918年間の襲撃回数は、パリでは3回であったが、ロンドンは51回に及んだ。

ロンドン空襲で最大のものは1916年9月2日の深夜に行われた。この日は一度に陸海軍の飛行船16隻がロンドンとその周辺を襲い、460発以上の爆弾を投下した。戦争が長引くにつれて、イギリスも高射砲や戦闘機で反撃し撃墜される飛行船も増えてきた。9月23日は12隻が出動し、その中で、Super Zeppelin（全

長189 m、最大直径24 m）と呼ばれる海軍のL30、L31、L32、L33がロンドンを爆撃した¹⁵⁾。この中のL33は対空砲火と戦闘機の攻撃により北海を越えて帰還するのは不可能と判断し、24日、エセックス州リトル・ウィグボロー（Little Wigborough）に不時着した。乗員たちは船体の焼却を試みたがかりうじて一部を燃やすことができただけだった。図4.8はエセックス州で不時着し焼却されたL33飛行船の残骸である。

イギリスの技術者はその骨格を調査し、後日、英国の飛行船R33およびR34を建設する際の基礎とした^{7), 15)}。米国や日本もツェッペリン飛行船の残骸を入手して、飛

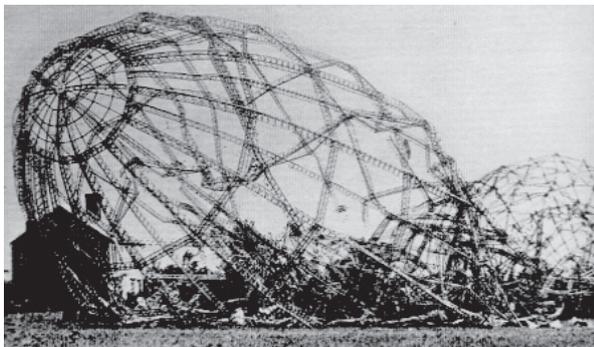


図4.8 エセックス州リトル・ウィグボローで不時着し焼却されたL33 (LZ76) の残骸。(IMPERIAL WAR MUSEUM PHOTOGRAPH ARCHIVE COLLECTION より)^{7), 15)}



図4.9 波板状ジュラルミンを使用した全金属製旅客機 Junkers F.13 (© 2006 Andi Szekeres)¹⁶⁾

飛行船の製造を始めた。一方で、この飛行船による爆撃を阻止するために戦闘機の性能も向上した。

ドイツでは、ジュラルミンは飛行船だけでなく航空機にも採用され、ドイツのユンカース (Junkers) 社は 1917 年に単発複葉攻撃機 J4 に初めてジュラルミンを使用し、1919 年には波板状ジュラルミンを使用した全金属製旅客機 F.13 (図 4.9)¹⁶⁾ も開発している。なお、ツェッペリン伯爵は 1917 年 3 月肺炎がもとで急逝している。平時であれば国民的英雄として盛大な葬儀が模様されたであろう¹⁰⁾。

4.1.5 第一次世界大戦後の飛行船

第一次世界大戦後は、飛行船は高高度で航続距離が長く、重量物を運べるのが長所 (有効搭載量は LZ127 で 30 トン、LZ129 で 88 トン¹⁰⁾) で、郵便や旅客輸送の手段として活躍する。1929 年、全長 236.6 m のグラフ・ツェッペリン (Graf Zeppelin) (LZ127) 号⁷⁾ はツェッペリン伯爵の夢であった世界一周を果たす。フリードリヒスハーフェンを出発し、シベリアを横断後、日本の霞ヶ浦の海軍基地にも寄航し、次の寄航地ロサンゼルスに向かった。

1933 年ヒトラーが政権に就くと飛行船が対外宣伝に効果抜群と考え、多額の資金援助を与え、さらに大きなヒンデンブルグ (Hindenburg) 号 (LZ129) を製造し、1936 年完成した。全長 245.0 m、直径 41.2 m、ガス囊 16 個、ダイムラー・ベンツ製の 1150 馬力のディーゼルエンジン 4 基を搭載し、船体の断面は正 36 角形で、乗員 40 名、乗客 50 名が乗ることができ、その船内は、客室、食堂、ラウンジ、トイレ、シャワールーム等を備え、ラウンジにはアルミ製のピアノまで積み込んだ近代的な設備であった^{7)、10)、17)}。五輪のマークを施したヒンデンブルグ号 (図 4.10 上) は同年開催されたベルリンオリンピックをはじめ、ナチスの国威発揚に貢献したが、1937 年、ニュージャージー州レイクハースト (Lakehurst) 海軍飛行場で着陸寸前、「ヒンデンブルグ号の悲劇」と呼ばれる爆発・炎上を起こした (図 4.10 下)。この発火の原因は 1997 年に NASA・ケネディ宇宙センターの元水素計画マネジャー、アディソン・ペインが当時の証言、映像分析、そして実物の外皮の分析により、事故の原因はヒンデンブルグ号の船体外皮の酸化鉄・アルミニウム混合塗料 (テルミットと同じ成分である) であると発表した。彼の説は、ヒンデンブルグ号の飛行中に蓄積された静電気が、着陸の際に着陸用ロープが下ろされた瞬間に、外皮と鉄骨の間の繋ぎ方に問題があったために十分に電気が逃げず、電位差が生じて右舷側尾翼の前方付け

根付近で放電が起こったことから外皮が発火・炎上した、というもので、現在ではこの説が有力になりつつある¹⁸⁾。

この爆発と第二次世界大戦の勃発により飛行船の時代は終了する。航空機が速度が向上し飛行船を上回るようになったため、ナチスによってすべての飛行船は解体され、航空機の機材に転用された^{10)、17)}。

4.1.6 ジュラルミンに対する英仏の対応

ヴィルムの研究成果は、論文としては Metallurgie に 1911 年発表された。その論文に掲載された時効硬化曲線が前述の図 4.2 である。ジュラルミンの研究が発表されると、ヴィルムの論文は同年、ル・シャトリエ (Le Chatelier) によりフランスの金属学会誌 Revue de Métallurgie に、翌年に英国の金属学会誌 Journal of the Institute of Metals にその要約が掲載された。残念なことに、フランスでは学会や工業界からの支持を得た研究組織が作られなかった。これに関して、西村秀雄京都大学教授 (1892-1978) は、軽金属時代の随筆・軽合金史 (其六) に、「ジュラルミンがドイツで生まれたためか、フランスではこの方面に

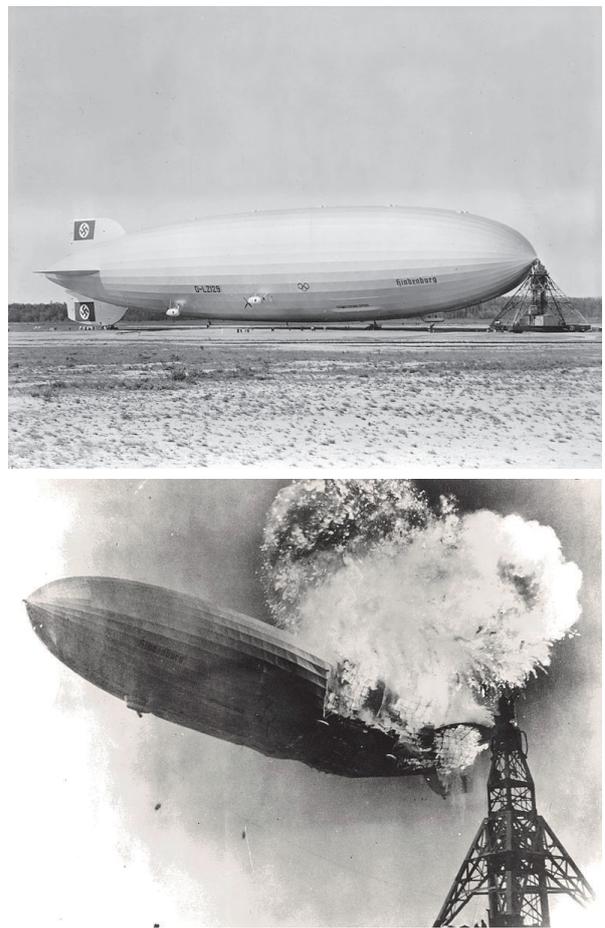


図 4.10 機体側面にオリンピックマークを配したヒンデンブルグ号と爆発の惨事¹⁸⁾

関して 1920 年頃まで余り語るべき学術的な発表はない。元来、フランス人は創意に富んだ国民であって、近代的な発明とか発見に多くの名を残しているが、他の国で既に研究したことなどを、追従することを好まないのである¹⁹⁾」と書いている。

英国は、国立物理学研究所の冶金部長であったローゼンハイン (W. Rosenhain) らが、1910 年、Al-3% Cu-1%Mn 合金が優れた性質を有していることを報告している。ジュラルミンの成分がこの合金に近いので、この報告書のデータが利用されてジュラルミンができたものでドイツの発明ではないとの疑いがかけられた。こうした中で、1913 年ジュラルミンは英国のヴィッカース社の発明であるかのような記事がでてきて、ヴィルムは、直ちに "Improvement of aluminium and its alloys, and in particular Duralumin, for armament" と題した記事を書いて反論している^{6), 20)}。ここにヴィルムの発明に対する思いが込められているのでその内容を紹介する。

- 1) この 10 年間、わが国の軍事当局者 (Military Authorities) は、アルミニウムは非常に軽いためにアルミニウムを採用しようとしてきた。ところがドイツ軍部 (German Military Department) はアルミニウムの導入に関心をほとんど持たなかった。期待してもしばしば失望することが多いが、軍事の世界ではアルミニウムはその輝きを決して失ってはならず、たゆまない熱意で新しい実験がなされている。
- 2) 小さな武器の改良や発射速度を増加させるには自ずと弾薬の軽量化が問題となる。非常に重要なことは、ジュラルミンの存在はわがプロシア陸軍省にとって役立つものとなるということである。
- 3) わが軍事当局者はアルミニウムが軍備品に寄与するとして、アルミニウムが果たすべき条件を発表し、わが国の国内産業は問題解決に着手した。
- 4) ベルリンとカールスルーエ (Karlsruhe) にあるドイツの武器弾薬工場は、主にベルリン近郊のノイバーベルスベルグの理工学研究所を通して仕事を行っていた。1902 年、私はアルミニウムの大気中での耐食性向上とともに機械的性質向上の研究のために、この研究所で正式な職を得た。
- 5) それゆえ、ジュラルミンの発見はドイツでなされた長年の研究の成果である。それは、1906 年にアルミニウムに他の金属を添加することと、薬莖として使用できるための必要な強度と硬さが得られる熱処理を組み合わせることによって成功した。
- 6) ドイツにおいて、ジュラルミンはこの数年デュー

レンの鑄鉄工場で製造されてきた。この工場はドイツで製造販売する独占的な権利を有している。

英独のジュラルミン発明の先陣争いに関する論争はこれ以降も続く。なお、ローゼンハイン自身は、自分の著書 "An introduction to the study of physical metallurgy" の 1914 年発行の初版では、ヴィルムの論文を引用しながら Al-Cu-Mn に 0.5%Mg 添加することで、室温で徐々に強度が増加する「奇妙な現象」を述べているので、ヴィルムの功績は認めていると思われる。

問題は肝腎のプロイセンがヴィルムの優れた研究成果に気がつかずに、英国が先に彼の発見・発明に気がつき材料を発注していることである。この原因はヴィルムも反論の中で述べていたように、軍事作戦に必要な人的・物的資源を準備するプロイセン陸軍省・陸軍大臣が軍の急拡大を望む参謀本部としばしば対立して、アルミニウムの導入に無関心であったことである。これにはプロイセン/ドイツ軍の保守的で非近代的な性格と密接に関係した問題があったようである²¹⁾。

4.2 超ジュラルミンの開発(その1) 欧米各国の状況

4.2.1 英国国立物理学研究所 (National Physical Laboratory (NPL))

ヴィルムと同様に Al-Cu-Mn 合金を研究していたローゼンハイン (Walter Rosenhain, 1875 - 1934、図 4.11²²⁾) は 1875 年、ベルリンで生まれ、5 歳のときにオーストラリアに移住した。メルボルン大学を卒業後、ケンブリッジ大学のユーイング (J.A. Ewing) 教授の下で研究した。1906 年英国テディントン (Teddington) にあった NPL の Metallurgy and Metallurgical Chemistry の初代の部長になり、1931 年まで



図 4.11 英国国立物理学研究所 (NPL) のローゼンハイン²²⁾ (NPL のご好意により掲載)

このポストにおいて、アルミニウム合金の発展に大きく貢献した。特に耐熱合金であるY合金の発明者として知られている。1934年58歳で亡くなった^{23), 24)}。彼の率いた部門は、1910～1930年大きな成果を上げ、その後のアルミニウム合金の研究に大きな影響を与えた。ここでは1921年8月英国機械学会のEleventh Report to the Alloys Research Committee on Some Alloys of Aluminium (Light Alloys) (図4.12)で報告され、その後の研究に大きな影響を与えた三つの合金について述べる²⁵⁾。この報告書は第一次世界大戦中から戦後

にかけてのNPLの研究成果をまとめたものである。

(1) E合金

ローゼンハインの前述の著書(第1版)では、アルミニウム合金に関してはAl-CuとAl-Zn合金に関して状態図があるくらいで少ないが、Al-Zn系合金の状態図についてはかなり詳細に述べている。それは1911年ローゼンハインとアーチバット(S.L. Archbutt)とがJ. Inst. Metalsに発表したものを引用していることによる^{26), 27)}。その後、彼は第一次世界大戦中から戦後にかけて、MgやMnを添加したAl-Cu-Zn合金に焦点を当てて研究を行い、それを上記の英国機械学会合金研究委員会へのEleventh Reportで報告している²⁵⁾。その報告書でAl-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mnの組成を有するE合金(Zinc Duralumin)は高い強度を示すことを明らかにした。彼らの報告書のデータをもとに合金成分と製造条件と強度の関係を作成したものを表4.2に示す²⁵⁾。図4.13は押出棒の熱間圧延に用いた当時の孔型圧延機(溝付き圧延機)である²⁵⁾。この孔型圧延機で熱間圧延したE合金を400℃で焼入れ後室温にて5日間時効させると629MPaの引張強さを示す。この値はこの報告書で最高の強度であると書かれている。アルコアのアーチャー(R.S. Archer)は「この合金の1mm(18 Gauge)板材は引張強さ87ksi(600MPa)、伸び10%に到達する可能性を秘めていたが、この系の合金は重大な弱点を有していた。まず比重が大きいくこと、製造が困難なこと、腐食しやすいこと、引張強さよりかなり小さな応力が負荷され続けると粒界割れ感受性、すなわち応力腐食割れ性が高くなることがある。しかし、この合金の応力腐食割れはMn添加で大きく改善された」と述べている²⁸⁾。

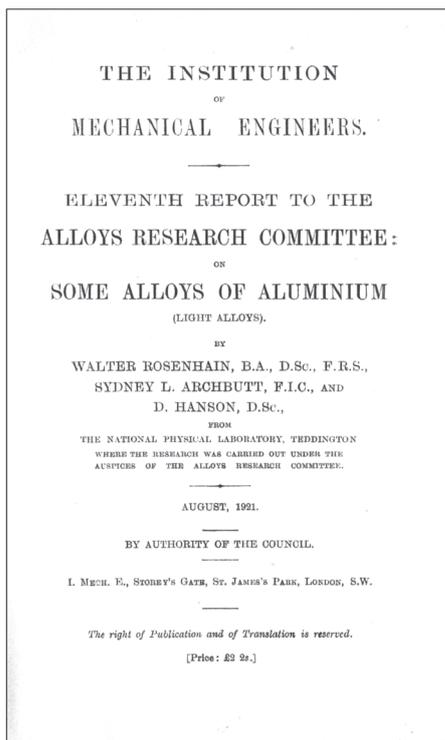


図 4.12 第 11 回アルミニウム合金に関する合金研究委員会報告書標頭紙²⁵⁾

表 4.2 Al-Zn 系合金の強度特性 (第 11 回合金研究委員会報告書より)²⁵⁾

合金系	記号	Zn	Cu	Mg	Mn	押出棒	圧延	時効条件	YS(MPa)	TS(MPa)	E(%)
Al-Zn-Cu系	W188	25	3			1.25"	押出まま		352	448	16.0
	W236	12	4			1.5"	熱延 →0.875"(*)		108	292	22.0
	W235	15	4			1.5"	同上		257	374	17.0
	W240	20	4			1.5"	同上		318	426	14.0
Al-Zn-Cu-Mg系	W191	15	3	0.25		1.25"	押出まま		329	432	17.0
	W193	13	2.5	0.5		1.25"	同上		263	395	19.0
	W191	15	3	0.25		1.25"	同上	450℃焼入れ, 時効	335	482	22.0
	W193	13	2.5	0.5		1.25"	同上	450℃焼入れ, 時効	286	442	22.0
Al-Zn-Mg系	W194	15		0.5		1.5"	熱延 →0.875"(*)		287	377	25.0
	W194	15		0.5		1.5"	同上	500℃焼入れ, 時効	215	377	28.0
Al-Zn-Cu-Mn系	W241	20	2.5		0.5	1.5"	熱延 →0.875"(*)		329	419	16.0
	W241	20	2.5		0.5	1.5"	同上	350℃焼入れ, 時効	210	426	21.0
Al-Zn-Cu-Mn-Mg系 (E合金)	W242	20	2.5	0.5	0.5	1.5"	熱延 →0.875"(*)		366	459	15.0
	W242	20	2.5	0.5	0.5	1.5"	同上	350℃焼入れ, 1.5時間時効	259	459	20.0
	W242	20	2.5	0.5	0.5	1.5"	同上	350℃焼入れ, 5日間時効	508	584	12.0
	W242	20	2.5	0.5	0.5	1.5"	同上	400℃焼入れ, 5日間時効	334	629	9.0

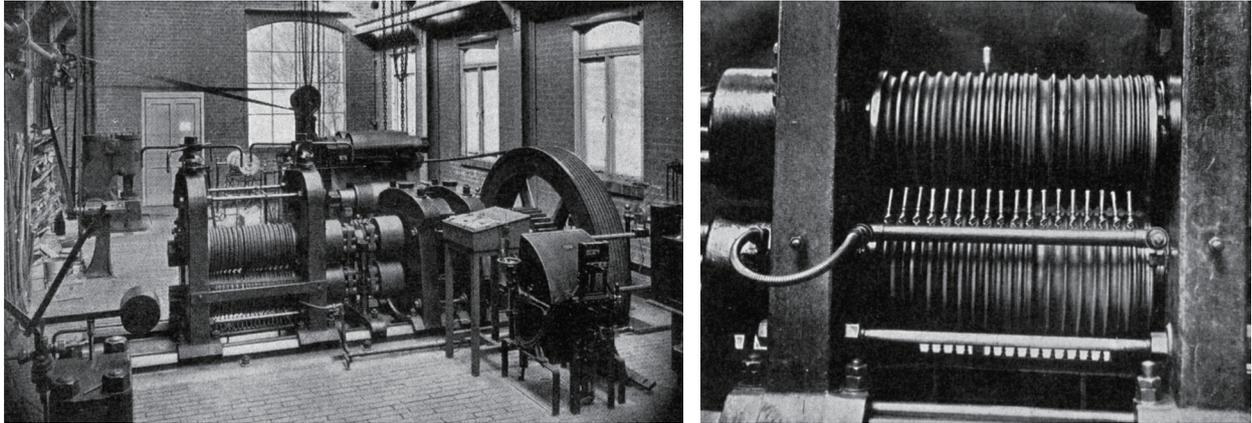


図 4.13 NPL で使用されていた孔型圧延機（溝付き圧延機）。ガスバーナーでロールを予加熱（右）²⁵⁾

(2) Y 合金

この合金についても同じく Eleventh Report で報告された。その報告書の中に軽合金の高温強度についてまとめたものがあり、そこに Y 合金が記載されている^{25), 29)}。Y 合金というのは試験片番号に付したアルファベットをそのまま用いたもので、特に意味がない。この合金の組成は Al-4%Cu-1.5%Mg-2%Ni である。この合金には後述する 24S と同様にマグネシウムが 1.5% 添加されていることが興味深い。

金型に鑄込んだ材料を 480℃ から焼入れして 4 日間室温時効させた材料の室温強度は 374 MPa、伸びは 24% であったが、圧延材では 433 MPa、伸びが 15 ~ 18% 得られることがわかった²⁵⁾。アルコアでもこの合金を追試したところ、鍛造品を 520℃ で 24 時間加熱後一週間時効したときの引張強さは 427 MPa、伸びは 23%、150℃ で 16 時間時効すると引張強さは 448 MPa、伸びは 18% を示した²⁸⁾。この系の合金は 260 ~ 370℃ での高温強度がジュラルミンや 14S 系超ジュラルミン（後述）より優れているために、英国ではロールス・ロイス (Rolls-Royce) が RR56 (Al-2% Cu-0.8%Mg-1.3%Ni-1.3%Fe-0.65%Si-0.08%Ti) としてピストンに実用化した。切削性は素晴らしいが、鍛造性は劣るために生産性が悪いのが問題であった²⁸⁾。その後 High Duty Alloys, Ltd 社が超ジュラルミンとして鍛造品、板材を製造した。

(3) Al-Mg-Si 系合金

NPL のハンセン (D. Hansen) とゲーラー (Marie L.V. Gayler) の両氏は、Al-Mg₂Si の準二元系の状態図を作り、Mg₂Si はアルミニウムに固溶するが、これも高温から低温になるにつれて著しく固溶度が減少することを上記の Eleventh Report で報告した^{25), 30), 31)}。1922 年、ゲーラーは Al-CuAl₂-Mg₂Si の準三元系合金の状態図を明らかにし、ジュラルミンの硬化には CuAl₂

と Mg₂Si の両方の析出硬化が寄与すると考えた³²⁾。さらに 1923 年には Al-Cu-Mg 系三元合金状態図を研究し、アルミニウム固溶体と平衡するのは CuAl₂、Al₆Mg₄Cu、Al₃Mg₂ であることを報告した³³⁾。Al₆Mg₄Cu については 1919 年ドイツのボーゲル (Z. Vogel) がすでに発見していたが³⁴⁾、これを再確認したとのことである²⁾。

なお、Al-Mg₂Si 準二元系状態図の研究と Mg₂Si を含むアルミニウム合金の時効については、英国で研究され発表されたが、それを実用合金として利用しようとしたのは、スイスのジュリーニ (Giulini) 社で、すでに 1916 年アルジュール (Aludur) という名称で、焼入れ焼戻しにより析出強化させる合金として特許 (Swiss Patents No.85606) を取得している²⁾。

Aludur 533 : Al-1.3%Si-0.7%Mg-0.4%Fe、砂型鋳物熱処理後、引張強さ、250 ~ 350 MPa、伸び 8-18%^{36), 37)} その後スイスの AIAG によってアルドライ (Aldrey) という名称の合金が導電率の高いアルミニウム合金として、特許が成立した。このアルドライは焼入れしてから線引きをして焼戻しすると強度がさらに向上し導電率も高いので送電線に用いられた³¹⁾。

Aldrey: Al-0.55%Si-0.43%Mg

熱処理後：引張強さ 300 ~ 340 MPa、耐力 260 ~ 300 MPa、伸び 7 ~ 9%^{36), 37)}

4.2.2 ドイツ デュレナ社、ゴールドシュミット社

(1) デュレナ社の Super-Duralumin

ドイツのデュレナ社の主任技術者であったマイスナー (K.L. Meissner) も 1930 年、英国の金属学会で講演発表し、論文名 “The Effect of Artificial Ageing upon the Resistance of Super-Duralumin to Corrosion by Sea-Water”, “The Artificial Ageing of Duralumin and Super-Duralmin” として英国金属学会誌に投稿している^{38), 39)}。論文で Super-Duralumin が出てくるのはこれが最初である^{40), 41)}。マイスナーの超ジュ

ラルミンはCu 4%、Mg 0.5%、Si 0.8%、Mn 0.5%、Al 残分という合金で、ジュラルミンと比較してケイ素が多い。この合金の板材の焼入れ焼戻し後の引張強さは490 MPa近くなる。マイスナーはNPLのゲラーらの影響を受けてCuAl₂とMg₂Siの析出を組み合わせると時効硬化すると考えてこの成分を選んだと考えられる。こうした基礎研究をもとに、デュレナ社は超ジュラルミン681ZB (Al-4.2%Cu-0.9%Mg-0.6%Mn-0.5%Si) とその強度を10%向上させたDM31 (Al-4.2%Cu-1.2%Mg-1.2%Mn-0.5%Si) と称する超ジュラルミン合金を開発した^{42), 43)}。西村教授は、もし常温時効をする合金を目標にしたら、もっと変った方向に進んだかもしれないと述べている⁴⁰⁾。

(2) ゴールドシュミット社の Sander 合金

ドイツのエッセンにあるゴールドシュミット社 (Th. Goldschmidt A.G.) の金属研究所のザンダー (W. Sander) は1923年、1924年マイスナーと連名でAl-Mg-Si-Zn系合金の状態図と機械的性質を発表している^{44), 45)}。Al-Zn-Mg系の状態図は既に1913年エーガー (G. Eger) によって発表されていたが^{46), 47)}、ザンダーとマイスナーは、この三元系状態図を再検討し、Al-MgZn₂が擬二元系をつくり、しかも溶解度が温度とともに減少し、475℃での最大固溶度28%から室温の4~5%まで変化することがわかった。そこでMgZn₂を4~10%含むアルミニウム合金をつくらせて常温時効性を調べた。それらの合金の中のAl-8%Zn-1.5%Mg-0.2%Si合金の常温時効特性を表4.3に示す^{45), 48)}。

この合金はその後、Mnが添加され人工時効によってさらに強力なものが得られることがわかり、Constructal 8 (Al-7%Zn-2.5%Mg-1%Mn-0.2%Si) が開発された²⁾。その引張性質は、引張強さ590 MPa、伸び9~10%である^{48), 49)}。

表 4.3 Al-Zn-Mg 系合金の焼入れ温度と室温時効特性^{45), 48)}

成分 %				焼入れ温度 ℃	焼入れ直後		5日間時効	
Al	Zn	Mg	Si		引張強さ MPa	伸び %	引張強さ MPa	伸び %
90.3	8	1.5	0.2	150	234	4.2	234	4.2
				300	237	15.2	419	12.3
				450	216	18.1	413	13.4
				520	241	20.5	424	15.1

京都大学西村教授もまた、「昭和2年(1927年)に、西原清廉氏の卒業論文の実験として、MgZn₂のアルミニウムに於ける固溶度を調べるとともに、時効硬化を調べて貰ったが、焼入した試料にブリネル硬度計で窪みを造ると甚だしいときは直に、或いは時間が経て

から、その周辺に割れ目が生じて、所謂時期割れの現象を認め、この合金は使用し得ないという結論になった。Constructal 8も同様の現象のためだったのであろう。使用されないで終わった。」と記している⁴⁸⁾。

4. 2. 3 米国標準局 (U.S. Bureau of Standards)

米国政府も合金の研究開発を支援するために、1913年、米国標準局はメリカ (P.D. Merica) を長とする非鉄金属研究班を組織し冶金専門家を投入した。彼はベルリン大学で学位を取得したばかりであった⁶⁾。1919年米国鋳山冶金学会 (AIME) の講演会でジュラルミンに関する報告を行い、1921年AIMEの会誌にも発表された^{50), 51)}。その発表内容を西村教授の「随筆軽合金史 (其三)」から引用して紹介する⁵²⁾。Mericaらは、Cu 0.04~3.74%、Mg 0~3.5%を含む16種の試料を造塊、熱間圧延、冷間圧延、焼鈍により0.8mmの板を作り、この板を熱処理して引張試験と硬度を測定した。478~525℃から焼入れして20℃および100℃で時効した。最も強度が高い成分はCu 3.18%、Mg 0.46%、Fe 0.34%、Si 0.24%であった。引張強さが340~350 MPaでジュラルミンより強度が低いが、これはCuが少なく、Mnが含まれないためと考えられた。その他、Cu 3.74%、Mg 1.08%、Fe 0.52%、Si 0.3%という合金を515℃から焼入れして125℃で14日間時効すると引張強さ440 MPa、伸び11%を得ている。この成分はその後開発された超ジュラルミンに近く、既にジュラルミンを超える材料が示唆されている。

4.3 超ジュラルミンの開発 (その2) アルコアの合金開発

4. 3. 1 リナイト研究所を吸収してできたアルコアの中央研究所

米国海軍は第一次世界大戦の開戦とともにドイツの硬式飛行船の開発に異常な興味を示し、アルコアに高強度材料の開発と生産を促した。大戦前のアルコアは地金生産工程の研究開発に重点を置いていたので、画期的な加工製品の開発や、それを量産化する技術を持っていなかった。また、アルコアの創始者の一人であるホールが中央研究所の創設といった考え方を拒否していたので、材料研究に必要な実験設備はないに等しいかあっても原始的なものであり、実験ができるスタッフもない状況だった⁵³⁾。

1914年ホールが亡くなり、生産した地金の販路のため新しいアルミニウムの市場を開拓する必要性が出てきた。このため体系的な研究計画を進める中央研究

所を設立することとなり、1919年 Technical Department が設立された⁵⁴⁾。その結果アルコアは当時米国では最高級の非鉄金属の技術者を抱えていた ACC (Aluminum Casting Company) のリナイト研究所 (Lynite Laboratories) を手に入れた。リナイト研究所の所長であったジェフリース (Zay Jeffries、図 4.14、コラム参照)^{55), 56)} は、研究から得られた知識やノウハウを体系化し文書化すること、そして冶金学的なプロセスを正確に書き記すことで技術者がそれを見れば再現できることが必要であると考えていた⁵⁴⁾。1920年リナイト研究所はアルコアの研究部門と合併された。1930年には、ニューケンジントンに設立された ARL (Aluminum Research Laboratories、1950年代、Alcoa Research Laboratories に改称) に統合された⁵⁴⁾。



図 4.14 ジェフリース (1888-1965)⁵⁶⁾

4.3.2 ジュラルミン相当合金 17S の生産

1916年、アルコアは米海軍からドイツが使用している合金と同等かより高い強度の合金が求められ、ツェッペリン飛行船の初期に採用されていた Al-Zn 合金の棒材で試験していた。同じ頃、海軍のハンサカー中佐 (Commander Jerome Hunsaker) はフランスで墜落したツェッペリン飛行船の桁の破片を国立標準局 NBS とアルコアに送った。NBS に送ったのは海軍がジュラルミンに関して系統的な共同研究をしていたためである。この調査結果から、素材は Cu、Mg、Mn が添加された薄板であることがわかった⁵⁴⁾。

1917年米国はドイツに宣戦布告をしたため、国内でも高強度合金を生産できる必要性から海軍はアルコアにヴィルムの特許や高強度合金の製造法に関する技術情報を提供した。さらにヴィルムのジュラルミンに関する特許を使用する認可を与えた⁵⁴⁾。この使用は戦争期間限定となっていたが、アルコアのサンダース (R.E. Sander, Jr.) によると第一次世界大戦後も特許を使用する権利をアルコアは得たとのことである⁵⁷⁾。

しかしながら、当時のアルコアには高強度合金材の圧延や熱処理、板材の成形技術に関する知見がなかったため、所定の平坦度、平滑度、均一な厚さを製造する圧延では苦勞したが、そこで新たに得た知見がその後のアルコアの発展に繋がった。こうした圧延技術では米国はドイツに完全に遅れをとっていた。また材料の熱処理やその時効硬化の機構ではメロカをはじめとする NBS の支援を受けた。アルコアにとって今後さらに高強度材の開発、製造が自前でできるようにするため、中央研究所の設立は喫緊の課題であった。

コラム ジェフリース

ジェフリース (1888-1965) : 1888年サウスダコタで生まれ。1909年サウスダコタ鉱山技術大学の機械工学を卒業後、クリーブランドのケース応用科学大学 (現在 Case Western Reserve 大学) の冶金学インストラクターとして採用された。その後クリーブランドでの新技術に関するコンサルタントになり、GE のタンガステンランプの事業所やアルミニウム鑄造の ACC で働いた。1918年ハーバード大学から学位を授与された。1920年アルコアのコンサルタントになり、1920年代のアルコアの鑄造や鍛造でのアルミニウム合金研究を發展させた。その後、政府の多くの委員会で活動し、1945年には GE の副社長となった。日本では日本金属学会のジェフリース賞でその名前はよく知られている。昭和 26 年、日本金属学会は博士の業績と日米間交流の尽力を評価して名誉員に推薦した。その折に 100 ドルの寄贈を受けた学会では、この寄付金を賞金として新進気鋭の研究者、技術者に奨学を主眼とする懸賞論文を募集して、昭和 29 年からジェフリース賞が出されるようになった。現在では賞牌がなくなったため終了している (木村尚 : ジェフリース博士の志を忘れまい、日本金属学会会報, 25(1986), 782.)。

<https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/jeffries-zay>

アルコアは試行錯誤しながらも引張強さ 425 MPa、耐力 275 MPa、伸び 22 % を有するジュラルミン相当合金 17S (Cu 4.0%, Mg 0.5%, Mn 0.5%) を圧延生産できるようになった。一方、アルコアは海軍の建造する飛行船シェナンドア (Shenandoah) 号のための 17S 圧延材を供給する義務を負った。1922 年末には、高強度合金板、年間 25000 トンの生産が可能となり、17S (注 4) が主役となった⁵³⁾。

1923 年秋にアルコアの祝賀行事としてシェナンドア号はニューケンジントン工場の上空を飛行した。しかし、1925 年、この飛行船は嵐の中で三つに割れて墜落し、14 名が死亡するという悲劇が生じた (図 4.15⁵⁸⁾)。この事故の情報を受けて、アルコアは飛行船の事故は金属が原因で起こしたかどうか確認するためにすぐに事故現場に向かい、残骸を確認して破壊点がすべて綺麗で腐食がないことを確かめた。これに対し、国立標準局や MIT 教授から粒界腐食の嫌疑がかけられたため、アルコアの試験部は同業他社に先んじた高性能の試験装置を開発しその嫌疑を晴らすこととなっ

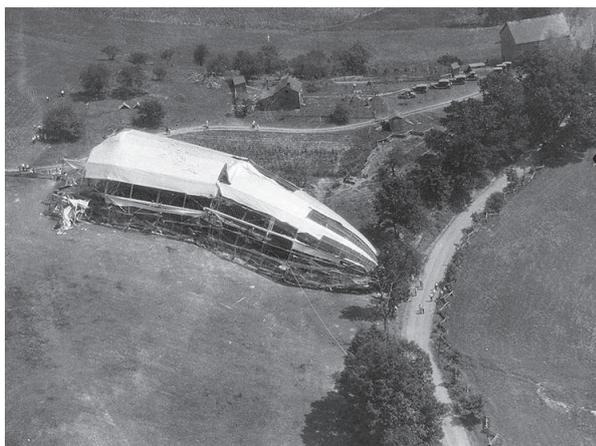


図 4.15 1925 年 9 月 3 日、オハイオ州コールドウェル郡の麦畑隣に遭難したシェナンドア号⁵⁸⁾。乗船していた 11 人の将校と 31 人の乗客のうち、14 人が死亡、2 人が負傷した。



図 4.16 リンドバークとスピリットオブセントルイス号 (Smithsonian National Air and Space Museum⁵⁹⁾)

た⁵³⁾、⁵⁴⁾。

1927 年には、リンドバーク (C.A. Lindbergh) のスピリット・オブ・セントルイス号 (図 4.16) による大西洋横断がなされた。この飛行機にはアルコア製のスキン材とエンジンにはアルコア製の鋳物が用いられていた。これを契機にオールアルミニウム製の航空機が主役の時代に突入し、アルコアは航空機材のメインサプライヤーとしての確固たる地位を築いた⁵⁴⁾。

さらに耐食性向上のため、アルコアのディックス (Edgar H. Dix, Jr.) により、17S 板材に高純度アルミニウムを板厚の 2.2 ~ 10% 表面に貼り付けたクラッド材が開発された。1928 年に実用化され、アルクラッド (Alclad) と呼んだ²⁸⁾、⁶⁰⁾。図 4.17 はディックスらの開発したアルクラッド材の断面写真である²⁸⁾。皮材の純アルミニウムと芯材の間に拡散層が形成されて接合されていることがわかる。

(注 4) 17S、14S、24S はアルコアの合金名称で、戦後規格が統一され、国際規格では現在それぞれの合金は 2017、2014、2024 と呼称されている。

4.3.3 ケイ素含有超ジュラルミン 14S の合金開発

アルコアがリナイト研究所を吸収することで新合金が誕生した。その最初の成果が、リナイト研究所から来たアーチャー (R.S. Archer) とジェフリーによる 25S、51S、14S の合金開発である。いずれの合金も 1919 年から 1920 年にかけて開発され、1921 年 12 月の特許申請、1923 年 10 月特許に登録された²⁸⁾。

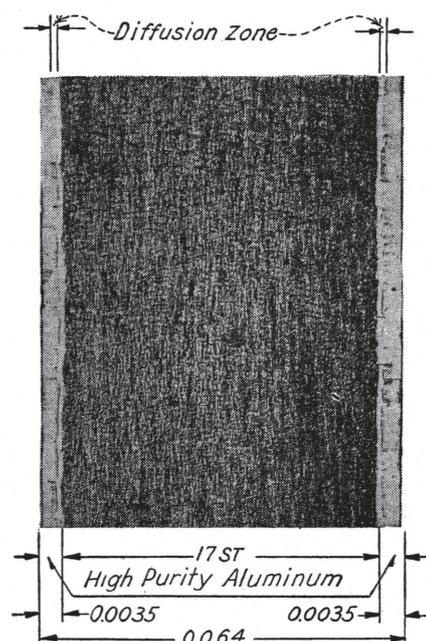


図 4.17 17S のクラッド材 (Alclad 17S)²⁸⁾

25S は Al-4.4%Cu-0.8%Si-0.75%Mn 合金で、1921 年には鍛造用合金として生産された。ジュラルミンに比べて、Mg を含まないために熱間加工性に優れていることである。このため航空機のプロペラやコネクティング・ロッドに利用された。さらにこの合金の特徴として焼入れ後、室温時効硬化を示さずに高温時効で硬化してジュラルミンと同等の強度が得られることであった²⁸⁾。零戦のプロペラもこの合金で製造された。

51S は Al-1.0%Si-0.6%Mg 合金で、熱間や冷間での加工性がよく、鍛造、押出、管などに加工でき、1921 年に商品化され各種の用途に利用された。25S、51S は薄板では高温時効後で粒界析出を伴うので過酷な腐食環境での使用には注意が必要とされた²⁸⁾。

14S は Al-4.4%Cu-0.4%Mg-0.9%Si-0.8%Mn 合金で、ジュラルミンに Si を 0.5% 以上添加し高温時効することでジュラルミンより高い強度が得られる。1925 年、Si 添加したジュラルミンの時効硬化について米国鉱山学会誌 AIME (American Institute of Mining Engineers.) に論文投稿した。西村秀雄京都大学教授 (1892-1978) によれば超ジュラルミン (Super-Duralumin) という名称は 1927 年、米国の機械学会 (ASME) のクリーブランドの講演会で、ジェフリースが引張強さ 370 ~ 430 MPa の強力なアルミニウム合金ができ、これを Super-Duralumin という名称で発表したのが最初と言われている⁴⁰⁾。

アルコアは 1928 年 14S を商品化した。焼入れ焼戻しで引張強さ 485 MPa 耐力 415 MPa が得られたが、伸びが 13% と低いので、板材としてよりも鍛造品で多く用いられた⁶¹⁾。当時、Si を多く含有した超ジュラルミンを含ケイ素超ジュラルミンと称していた²⁾。今ではこの合金は超ジュラルミンと言われることは少ないが、これが「もう一つの超ジュラルミン」である。

4.3.4 高純度地金を使用した超ジュラルミン 24S の合金開発

14S に対し、24S (Cu 4.5%、Mg 1.5%、Mn 0.6%) がアルコアによって 1931 年開発された。ジュラルミンの Mg 量を 1.5% まで増加させたもので、含ケイ素超ジュラルミンが人工時効を必要とするのに対し、24S は室温時効だけでジュラルミンの強度を大きく越える特徴がある。これを 24S 型超ジュラルミンと称した²⁾。現在では超ジュラルミンというと 24S を指すことが多い。

24S-T3 は、代表値で引張強さ 485 MPa、耐力 345 MPa、伸び 18% で、17S-T4 は引張強さ 430 MPa、耐力 280 MPa、伸び 22% で、17S に比べ耐力が 23 % 高

い (注 5)。14S のように高温時効しないと強度が得られない合金では、室温時効で曲げ加工してその後高温時効処理するという加工上のデメリットがあったが、24S では 17S と同様に室温時効で高強度が得られそのまま曲げ加工ができるという大きなメリットがあるので、すぐに 17S-T4 に取って代わった。そしてそのクラッド材 Alclad 24S-T3 は航空機の胴体の材料としていまなお使われているが、その最初の飛行機が DC-3 (図 4.18)⁶²⁾ である。



図 4.18 アルコアの Alclad 24S-T3 を胴体のスキンに用いた DC-3⁶²⁾

(注 5) T4 は焼入れ後自然時効させた調質を指すのに対し、T3 調質では圧延材や押出材を焼入れ後平坦あるいは真っ直ぐに矯正あるいは残留応力を最小限にするために数%の冷間加工をする調質を指し、冷間加工で耐力が上がる。

DC-3 は DC-2 に比して定員を 5 割増としながら、その運航経費は僅か 3% ほどの増に過ぎなかった。それ以前のアメリカ合衆国の航空旅客輸送は旅客運賃収入だけでは必要なコストを賄えず、連邦政府の郵便輸送補助金を受けることで何とか成り立っていた。ところが DC-3 はその収容力によって自らの運賃収入だけでコストを賄うことができた。郵便補助金に頼る必要のない「飛ばせば儲かる飛行機」の出現は、航空輸送の発展において画期的なことであった。これはひとえに 24S 合金開発によるところが大きい。さらに第二次世界大戦では、連合軍欧州総司令官でありのちにアメリカ合衆国大統領となったアイゼンハワー (D.D. Eisenhower) は、第二次世界大戦の連合軍勝利に著しく寄与したのは「ダコタ (Dakota、DC-3 の英国向け軍用輸送機の名称) とジープとバズーカ砲である」と述べている。ダコタと C-47 スカイトレイン (米軍

輸送機の正式名称) だけで1945年までに約1万機生産された。

4.3.5 24Sが開発できた背景

17Sや14Sの生産から24Sへの生産は、Mgを1%増加させたただけだが、製造がより困難になる。この合金を製造するには、溶解、鋳造、圧延技術の進歩がかかせなかったとアルコアのノックス (J.A. Nock, Jr.) は述べている⁶³⁾。ディックスもまた板材の製造は非常に困難であったが、第二次世界大戦中に高速で圧延できるようになったと述べている⁶⁴⁾。押出性も非常に悪かったが、同じく第二次世界大戦前の生産設備を10倍にして製造した。これらの技術の進歩に付け加えて、筆者は当時標準的な99.5%の地金に対しアルコアが三層電解法の発明で、1920年台半ばに比較的純度の良い99.8%の地金を安価に製造できるようになったことも関係しているのではないかと考えている⁶⁵⁾。

(1) ジュラルミンの不純物

ティード (P.L. Teed) の著書 “Duralumin and Its Heat-Treatment” に掲載されているジュラルミンの分析値はAl: 93.94%, Cu: 4.20%, Mg: 0.56%, Mn: 0.69%, Fe: 0.40%, Si: 0.21%である。英国のジュラルミンの成分規格ではCu: 3.5~4.5%, Mg: 0.4~0.7%, Mn: 0.4~0.7%, Fe: 0.7%以下, Si: 0.7%以下, Ti: 0.3%以下, Al: 残である⁶⁶⁾。日本の陸海軍航空材料規格では、高力アルミニウム合金第一種(ジュラルミン相当)の成分はCu: 3.3~4.2%, Mg: 0.3~0.7%, Mn: 0.3~0.7%, Fe: 0.6%以下, Si: 0.5%以下である⁶⁷⁾。何れにしても不純物の許容量が大きいことがわかる。ジュラルミンの不純物量はアルミニウムやマグネシウムの地金の不純物量に依存する。6.3で述べるように、鉄やケイ素が増えると強度や伸びが低下する。したがって強度や伸びの向上には不純物の低減が必要であった。

(2) 地金の不純物

アルミニウム地金の純度は製錬の方法に依存する。世界で初めてアルミニウムの量産を行ったフランスのドヴィーユ (Sainte-Claire Deville) はナトリウムによる還元法でアルミニウムを製造したが、その純度は97%程度であった⁶⁸⁾。ホール・エルー法による電解製錬が開発されても純度が99.7%以上のものできなかった (現在では99.85%が一般的)。不純物の多くは電解浴やアルミナ、陽極カーボンに起因している。グラード (C. Grard) の著書 “Aluminium and Its Alloys” によれば、1921年当時のフランスの地金

規格では

Grade I : 99.5%、鉄とケイ素のトータルは0.5%以下

Grade II : 99.0%、鉄とケイ素のトータルは1.0%以下

Grade III: 98~99%、鉄とケイ素のトータルは2%以下。

不純物としては (a) Fe、Si、(b) carbides、sulphides、Cu、Zn、Sn、Na、N、B、Ti、(c) aluminaであるが、aluminaは分析するとAlと一緒にになってしまうことが問題であった⁶⁹⁾。米国、英国、ドイツ各国の規格も不純物量の規定は若干異なるがほぼ似ている。

(3) 精製技術の進歩

溶融塩を用いた最初の高純化プロセスは1900年アルコアの電気技師であったフープス (W. Hoopes) によってなされた⁶⁸⁾。フープスの提案は、三層になった液体の精製槽を用いるもので、溶けたアルミニウムを陰極としてこれより重い電解浴の上に浮かせ、その電解浴の下により重い溶けた合金を陽極として配置するものであった。1919年頃、フープスはアルコアの研究陣と一緒に工業的生産法を完成させた。図4.19は三層電解精製炉を示す⁷⁰⁾。電解浴は氷晶石、アルミニウムフッ化物、バリウムフッ化物、ナトリウムフッ化物、アルミナで構成されている。1000℃で純アルミニウムが電解浴に浮くためには80%の氷晶石に20%のバリウムフッ化物が必要である。こうして得られる平均の純度は99.8%以上である。実際、多くのメタルは99.90%であり、その幾つかは99.99%の純度のものが得られた。フープスは1924年1月亡くなった。フープスの出願した多くの特許は1925年登録されている⁶⁷⁾。この頃、高純度地金が工業的に利用できる段階になってジュラルミン17Sの機械的特性及ばす不純物の影響が明らかになったと考えられる。

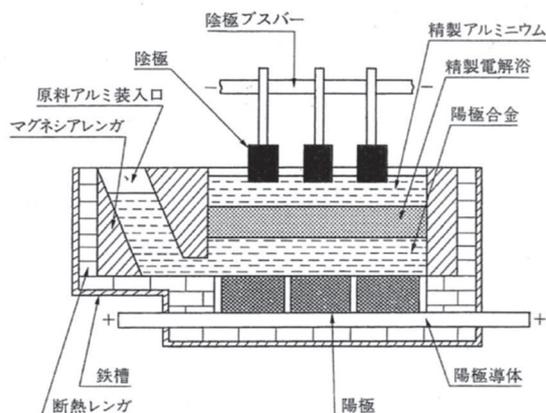


図 4.19 三層電解精製炉の構造⁷⁰⁾

参考文献

- 1) M.H. Haas: Wie das Duralumin erfunden wurde, Aluminium, 18 (1936), 366.
- 2) 幸田成康: 時効硬化研究の歩み, 合金の析出, 幸田成康監修, 丸善 (1972), 1.
- 3) M.H. Haas: Aluminium, 17 (1935), 502.
- 4) 鈴木雄一: 金属, 83 (2013), 1077-1084.
- 5) A. Wilm: Metallurgie, 8 (1911), 225.
- 6) O.H. Duparc: Z. Metallkde, 96 (2005), 398.
- 7) P.W. Brooks: Zeppelin: Rigid Airships, 1893-1940, Smithsonian Institution Press, (1992), 58, 174, 現在は Putnam Aeronautical Books, (2004) から出版.
- 8) 竹中亨: ヴィルヘルム 2 世, 中公新書, 中央公論新社, (2018), 120.
- 9) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferdinand_von_Zeppelin.jpg (2021.9.4)
- 10) 牧野光雄: 飛行船の歴史と技術, 成山堂書店, (2010).
- 11) [https://en.wikipedia.org/wiki/David_Schwarz_\(aviation_inventor\)#/media/File:SchwarzAirship.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/David_Schwarz_(aviation_inventor)#/media/File:SchwarzAirship.jpg) (2021.9.4)
- 12) https://en.wikipedia.org/wiki/Zeppelin_LZ_1#/media/File:First_Zeppelin_ascent.jpg (2021.11.14)
- 13) H.Y. Hunsicker: History of Precipitation Hardening, The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy, ed. by C.S. Smith, Gordon and Breach Science Publishers, (1963), 271.
- 14) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild_102-00834,_Friedrichshafen,_Luftschiff_Graf_Zeppelin.jpg (2021.11.14)
- 15) Ian Castle : London 1914-17, The Zeppelin Menace, Osprey Publishing, 2008.
<https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/205315620> (2021.11.14)
- 16) <http://www.idflieg.com/junkers-f13.htm> (2021.9.4)
- 17) 柘植久慶: ツェッペリン飛行船, 中公文庫, (2007).
- 18) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hindenburg_at_lakehurst.jpg?uselang=ja
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hindenburg_burning.jpg (2021.11.15)
- 19) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其六), 軽金属時代, No.177, 4月 (1949), 2-4.
- 20) A. Wilm: Kriegstecchnische Zeitschrift, 16 (1913) .
- 21) 飯倉章: 1918 年最強ドイツ軍はなぜ敗れたのか, 文春新書, 文藝春秋, (2017), 50.
- 22) <https://www.npl.co.uk/famous-faces/walter-rosenhain> (2021.9.4)
- 23) https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Rosenhain (2021.9.6)
- 24) <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830903737.html> (2019.9.6)
- 25) W. Rosenhain, S. L. Archbutt and D. Hanson: Eleventh Report to the Alloys Research Committee on Some Alloys of Aluminium (Light Alloys), Inst. of Mech. Engrs. August, (1921) .
- 26) W. Rosenhain and S. L. Archbutt: Journ. Inst. Metals, No.2, 11 (1911), 236-258.
- 27) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其三), 軽金属時代, No.174 (1949), 2.
- 28) R.S. Arther: The Aluminum Industry Vol.2, Aluminum Products and Their Fabrication, by J.D. Edwards, F.C. Frary and Z. Jeffries, McGraw-Hill Book Company, (1930), 60-272.
- 29) W. Rosenhain, S. L. Archbutt and S.A.E. Wells: Journ. Inst. Metals, 29 (1923), 191-209.
- 30) D. Hansen and Marie L.V. Gayler: Journ. Inst. Metals, 26 (1921), 321-359.
- 31) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其七), 軽金属時代, No.178 (1949), 27.
- 32) Marie L.V. Gayler: Journ. Inst. Metals, 28 (1922), 213-252.
- 33) Marie L.V. Gayler: Journ. Inst. Metals, 29 (1923), 507-528.
- 34) Z. Vogel: Z. Anorg. Allgem. Chem., 107 (1919), 265.
- 35) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其 11), 軽金属時代, No.182 (1949), 14.
- 36) A. Zeerleder: The Technology of Aluminium and its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, (1936), 19-40.,
- 37) A. Zeerleder: The Technology of Light Metals, Elsevier Publishing Company, (1949), 15-43.
- 38) K.L. Meissner: J. Inst. Metals. 35 (1931), 187.
- 39) K.L. Meissner: J. Inst. Metals. 35 (1931), 207.
- 40) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (第 20 回), 軽金属時

- 代, No.191 (1950), 2.
- 41) 西村秀雄: アルミニウム及其合金, 共立社, (1941), 231.
- 42) 田邊友次郎: 各國超デュラルミンの現況, 住友金属工業・研究報告, 第2巻第10号 (1937), 1021-1040.
- 43) 田邊友次郎: 現代の工業用軽合金に就て (II), 日本金属学会誌, 1 (1937), 107.
- 44) W. Sander und K.L. Meissner: Z. Metallkunde, 15 (1923), 180-183.
- 45) W. Sander und K.L. Meissner: Z. Metallkunde, 16 (1924), 12-17.
- 46) G. Eger: Inten. Z. Metallog., 4 (1913), 29.
- 47) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其14), 軽金属時代, No.185 (1949), 9.
- 48) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其15), 同上, No.186 (1950), 2.
- 49) W. Sander: Z. Metallkunde, 19 (1927), 21, J. Inst. Metals, 37 (1927), 445.
- 50) P.D. Merica, R.G. Watenberg and J.R. Freeman: Trans. of AIME, 64 (1921), 3.
- 51) P.D. Merica, R.G. Watenberg and H. Scott: Trans. of AIME, 64 (1921), 41.
- 52) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (其三), 軽金属時代, No.174 (1949), 2.
- 53) 清水啓: アルミニウム外史 (上巻), 戦争とアルミニウム, カロス出版, (2002).
- 54) M.B.W. Graham and B.H. Pruitt: R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa, Cambridge, (1990).
<https://edan.si.edu/slideshow/viewer/?eadrefid=NASM.1996.0017>
- 55) https://en.wikipedia.org/wiki/Zay_Jeffries (2021.9.4)
- 56) <http://nasonline.org/member-directory/deceased-members/20001118.html?referrer=https://www.google.nl/> (2021.9.4)
<http://aimehq.org/programs/award/bio/zay-jefferies-deceased-1965> (2021.9.4)
- 57) R.E. Sanders, Jr.: JOM, 53 (2) (2001), 21-25.
- 58) [https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Shenandoah_\(ZR-1\)#/media/File:USS_Shenandoah_Wreck.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Shenandoah_(ZR-1)#/media/File:USS_Shenandoah_Wreck.jpg) (2021.9.4)
- 59) <https://airandspace.si.edu/collection-media/NASM-A19280021000-NASM2016-02744> (2021.11.15)
- 60) J.T. Staley: History of Wrought-Aluminum Alloy Development, Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications, edited by A.K. Vasudevan and R.D. Doherty, Academic Press, Inc. 1989, 3.
- 61) W.A. Anderson: Precipitation From Solid Solution, ASM, (1959), 150.
- 62) <http://www.boeing.com/history/products/dc-3.page> (2021.9.4)
- 63) J.A. Nock, Jr.: Physical Metallurgy of Aluminum Alloys, ASM, (1949), 167.
- 64) E.H. Dix, Jr.: Metal Progress, (1950), 484.
- 65) 吉田英雄: まてりあ, 57 (2018), 263-270.
- 66) P.L. Teed: Duralumin and Its Heat-Treatment, Charles Griffin & Company, (1937), 1-9.
- 67) 陸海軍航空材料規格 (アルミニウム及其の合金ノ部): 陸軍航空本部, 海軍航空本部, (1939).
- 68) J.D. Edward: The Aluminum Industry Vol.1, Aluminum Products and Their Fabrication, by J.D. Edwards, F.C. Frary and Z. Jeffries, McGraw-Hill Book Company, (1930), 1-15, 299-335.
- 69) C. Grard: Aluminium and Its Alloys, Constable & Company, (1921), 15-17.
- 70) 土橋倫男: 軽金属基礎技術講座, 軽金属学会, (1985), 1-12.

5 | 日本におけるアルミニウム材料の生産

5.1 日本におけるアルミニウムの生産開始^{1)~4)}

ホールとエルーがアルミニウムの電解精錬法を発明した1886年の翌年には、少量のアルミニウムが陸軍砲兵工廠に輸入され、貴重品扱いで金庫に保管されたようである。その後、軍需用器物として使用されたのは1894年からである。当時の陸軍は飯ごう、水筒その他携帯用軍装品にアルミニウムを使用することを決定し、地金を輸入して、東京および大阪砲兵工廠で生産を開始した。住友伸銅場は1897年安治川に開設され、翌年、陸軍砲兵工廠から地金を受取り、アルミニウムを圧延して納入した。

この頃、アルミニウムは最初、陸軍がつけた名前「礬素」と呼ばれていたが、通りが悪いため、新たに銀のように美しく、銀よりも軽い「軽銀」という名前が考案された⁵⁾。明治30年代になると民間でもアルミニウム什器が製造されるようになり輸入地金は1900年の100トンから1912年には約1,000トンへと増大した。第一次世界大戦の開始で欧州からの地金の輸入が中断したが、その間隙を縫ってノーザン・アルミニウム社が日本に進出し、日本の市場はアルキアの支配下に入った。1920年には、国内需要の増加とともに、大戦で欧州からの輸入が困難となった東南アジアへの器物輸出が増えて地金消費量が2,000トンへと増大した⁶⁾。

1913年7月、住友伸銅所（同年6月に伸銅場から伸銅所と改称）は農商務省技師で金属製品の分析・試験に従事していた杉浦桐三^{しげぞう}を招いて試験係に任じた。1916年には、杉浦は「自身で研究開発しなければ、何時までたっても外国の下位に立たねばならない」、「工場に研究が専属することによって、官立の試験所では出来ないような工場規模の研究が行える」と発案し研究課が設けられた。日本で工場に研究課が設置されたのはこれが最初である²⁾。

1916年末海軍艦政本部、大阪海軍監督官長経由で図5.1に示すようなZeppelinの骨材が住友伸銅所に持ち込まれ、翌年この材料の調査を行ったのが研究課の杉浦であった。その分析結果や英国金属学会誌JIMの文献をもとに、工場における試作研究を開始し、1919年工場試作が完了し、「住友軽銀」（ジュラルミンとルビがふられた）と命名された。この住友軽銀の成分はCu 4%、Mg 0.5%、Mn 1.0%、Al 残である。

海軍から住友伸銅所にこの調査依頼した経緯は明らかでないが、杉浦は戦後の航空機用軽金属材料に関する座談会で「当時は金属に関する研究機関が少なく、住友伸銅所は一つの独立した金属専門の研究部門を持っていたためではないか」と述べている⁷⁾。



図 5.1 UACJ に保管されている英国で撃墜されたツェッペリン飛行船の骨材

1921年伸銅所は初めてジュラルミンの工業生産を行い、横須賀海軍工廠において英国ヴィッカーズ（Vickers）社製SS式軟式飛行船を国産化するために吊り船やその他の構造材料として板管棒計1トン余りを受注した。海軍は1919年英国ヴィッカーズ社に発注した飛行船の Gondola（吊船）を木製からジュラルミン製に変えたSS式1号飛行船は1921年完成したが、2ヶ月後格納庫で試験中に爆発した。このため設計図と予備部品をもとにして1922年国産化を行った。これをSS式3号飛行船（図5.2）と呼んだ^{8),9)}。

この飛行船もその後全面改修されたが1924年空中爆発を起し、5名が殉職した。ヒンデンブルグ号爆発の13年も前のことである。

当時のジュラルミン製造技術はきわめて初歩的なもの

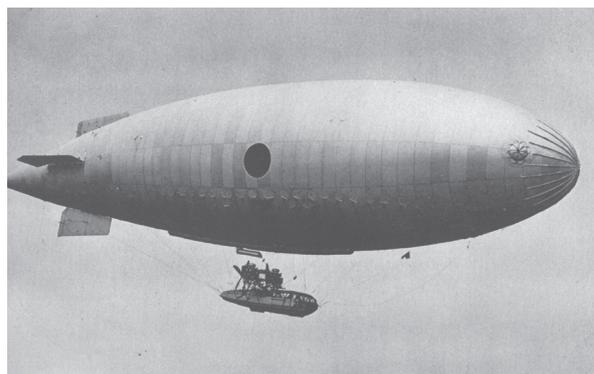


図 5.2 日本海軍のSS式3号飛行船⁹⁾

のであったため、海軍は飛行艇を建造するため招聘した技術者の中で、ペーガン (T.W. Pagan) を伸銅所に推薦してきた。彼は英国の国立物理学研究所 (NPL: National Physical Laboratory) のローゼンハインに師事して英国のアルミニウム製造技術を把握していたことによる。1922年1月から8ヶ月間、住友伸銅所に嘱託として採用され、鋳造、圧延、押出、抽伸の各部門と波板と形材の製造方法について指導した。また、従来造塊方法である「平流し法」(図5.3)や「縦流し法」から傾斜鋳造法(図5.4)に改められた。

これによりジュラルミン鋳塊は板用が厚さ57 mm (2.25 in)、棒用が直径89 mm (3.5 in)となった。焼入れにも彼の指導で硝石炉を使用するようになった¹⁾。

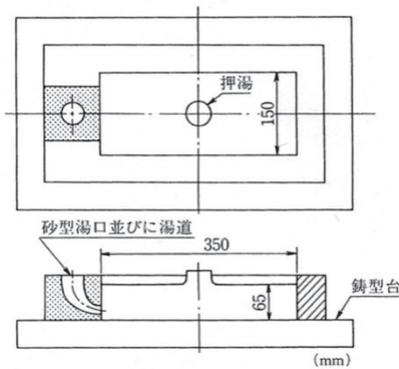


図 5.3 平流し法^{1), 2)}

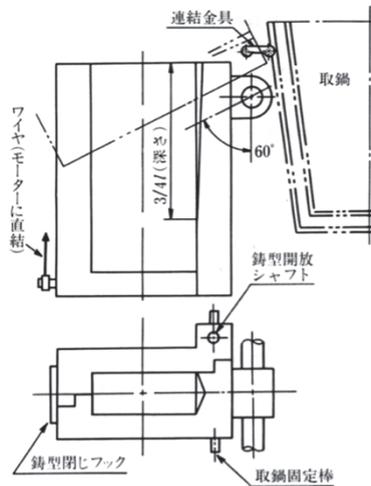


図 5.4 住友伸銅所の傾斜鋳造機^{1), 2)}



図 5.5 中島式ブレゲー型飛行機 (1922)¹⁰⁾

この年の4月中島式ブレゲー (Breguet) 型飛行機 (中島 B-6 複葉機) の機体構造にはじめて伸銅所製ジュラルミンが使われ、「軽銀」号と命名された (図5.5)^{10) ~ 12)}。ジュラルミンの本格的採用は1930年以降の全金属製の機体となってからである。

5.2 ジュラルミン製造技術習得団^{1)~4)}

1922年、第一次世界大戦が終わり、日本は戦勝国としてドイツから賠償の1つとして何百台かの飛行機を受け取ることになっていたが、「飛行機を得るのは全くの一時の利得であり、むしろ、その製作技術、例えば機体の設計とか軽合金の製法を習得する方が国家百年の大計である」とされ、その結果ジュラルミン製造技術習得団が派遣されることになった。1922年3月、習得団は、海軍造機大佐石川登喜治 (図5.6、コラム参照) を団長とし、陸海軍それぞれ若干名と住友伸銅所の技術者4名をもって組織された。1922年4月20日出発、7月下旬デューレン (Düren) に到着し、9月中旬まで、デュレナ・メタルヴェルケ社でジュラルミン製造技術を実習、その後ドイツ、英国の工場を見学して、翌年2月23日帰国した。デュレナ社では「同社の作業員と同様に勤務して習得した内容を毎週取りまとめ、同社提供のジュラルミン製造方法習得書と照合検討の上、疑問点は質問して技術の真髄を習得するように努めた」とのことである。なお、ジュラルミンは同社がヴィルムの特許を工業化したもので、当時、英米仏等の諸国に特許を分譲していた関係から、一行の技術習得に関して住友の名において有償契約の締結が要望され、その結果、陸海軍関係者も形式上は住友派遣員として実習した。なお、ジュラルミン製造技術習得団とともに金属機体製造技術習得団も渡独している。

ジュラルミン製造技術習得団に関しては、団長の石川登喜治博士が、戦後、日本経済新聞の昭和33年3月16日付けに「ジュラルミン秘話」と題して書かれた記事があるので、これを紹介する。「戦勝国はドイツからの戦利品を早いもの勝ちでとりあった。アメリカなどはいち早く、ツェッペリン号二台と飛行機数十台を確保してしまった。日本は出足がおくれて、もらい分というたいしたものはない」そうである。石川博士によると、「実は日本でほしいのはツェッペリン飛行船である。さらに突っ込んでいえば、ツェッペリンの材料であるジュラルミンの秘密なのだ。この合金をどうやって冶金するか。どうやって薄くのばすか。どうやってそれをまげるか等々の秘密なのであ

る」。石川博士には1915 - 1916年、英国のグラスゴー大学に留学した時に、ドーバーで墜落されたツェッペリン飛行船のジュラルミンのかけらをひろい、日本にもちかえたものの、それを作る方法がわからず、それに近いものは出来るのだが、金属としてずっと性能の低いものしかできなかったという苦い経験があった。こういった事情があって、ツェッペリン二台分を作る材料をもらいたいと申し入れた。その結果、デュレナ社に図面の提供、管、板、アングルなどを作ってもらうことに契約がまとまり、現地の工場見回りとして派遣されたとのことである。いよいよ製作が始まると、肝心なところに来ると私たちに見せないようにする。工場内ではノートを出してメモをとってはいけないうことになっており、すべては目で見ただけの習得でなくてはならなかった。日本ではその工場で行っているのと同じスケジュールでジュラルミンを作る態勢をととのえていて、同じものをつくりつつあった。工場で知りえたことは秘密電報で本国に送り、本国ではその知識にもとづき製作をするといった段取りであった。

まえもって相当研究してかかったが、わからないこともあった。たとえばジュラルミンの板がでこぼこになっているのが一晩経つとピンと平らになる。技師長に質問すると「これは夜になると伸びるんです」といって追及を避けた等々。詳細は記事を読んでいただくとしていろいろな苦労話があったようで、これがその後の製造技術の発展の礎になった。

なお、1921年、日本も戦利品としてツェッペリン飛行船L37 (LZ75) 1隻と飛行船格納庫1棟を受け取るようになったが、これを日本に運ぶことは無理と考えたのか、2年間も格納庫に入れたままにしたため劣化してしまい、飛行船はその場で解体して、船首部、尾部、ゴンドラおよび船体の一部、気囊、計器、無線

電信機、発動機（六基）が運ばれてきたという。一方、格納庫は霞ヶ浦に移築され、東京駅が二つ入ってしまう大きさだといわれた。この格納庫は日本海軍が飛行機の格納に使用していたが、1929年、Graf Zeppelin号が日本に立ち寄った際に一時的にこの飛行船の格納庫として使用された^{8), 13)}。

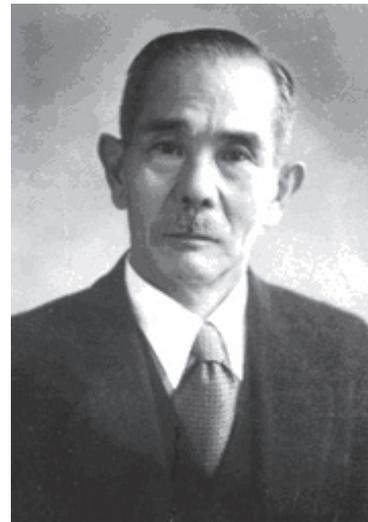


図 5.6 石川登喜治博士¹⁴⁾

5.3 住友におけるジュラルミン製造技術の確立（桜島新工場建設）^{1)~4)}

1923年、ペーガンの指導と「ジュラルミン製造技術習得団」によってもたらされた技術を組み合わせることによって、新しい製造設備を起業する計画が立てられた。溶解には圧風式可傾炉を用い、200 mm (8 in.) 角型鋳塊を傾斜鋳造機にて造塊し、この鋳塊を1,000トン型水圧機で鍛造後、帯状圧延しようとする製造法である。しかし、この計画は工場移転の議が起り、1928年の桜島新工場移転まで持ち越さ

コラム 石川登喜治

1879年（明治12年）に九州の柳川市に生まれ。東京帝国大学を卒業後、海軍佐世保工廠に勤務、その間に英国に留学。1919年には船用プロペラの材質、マンガング銅の研究で帝国学士院賞を受賞。その後、1930年に海軍造機中將を退き、当時の日本鋳物協会（現：日本鋳造工学会）の初代会長を務めた。住友金属工業の顧問となる。1937年1月、早稲田大学は石川登喜治博士を招聘。早稲田大学教授に就任し、鋳物研究所開設鋳物研究所創立し初代所長となる。鋳造技術は全ての金属製品を作る根底をなすものであるから、鋳物研究所をわが国の金属工業は勿論、工業全般の進歩に寄与する存在にしたいと考えていた。その後、鍛造・圧延・プレス・押し出しなどの塑性加工の実験棟を建設。1946年3月所長辞任。1964年（昭和39年）6月23日、享年84歳で逝去。

（早稲田大学各務記念材料技術研究所のホームページより）

れた。この間、1926年住友合資会社より分離して住友伸銅管株式会社が設立され、アルコアとの提携が1928年成立した。アルコアは地金販路拡大のため、日本の加工会社との提携を模索しており、1925年株式会社住友電線製造所との提携が成立、この関係から住友伸銅管もアルコアと提携し、溶解炉とアルミ板専用の圧延工場を建設することとなった。なお、1925年アルコアはカナダの子会社 Northern Aluminum Company を Aluminium Company of Canada, Ltd. (アルキャン、Alcan) と名称を変更し、1928年5月、カナダ法人のアルミニウム・リミテッド (Aluminium Limited) として分離、設立したため提携先も海外事業を主とするアルミニウム・リミテッド (アルキャン) に変わった。1930年、アルミニウム・リミテッドとの合弁で桜島の板工場と八尾の箔工場を母体に住友アルミニウム株式会社 (現、東洋アルミニウム) が設立された。

桜島移転に伴い、プロペラ翅素材やクランクシャフトなどの大型鍛造品、薄板を板曲げとダイ抽伸で製造するプロフィール品、また鋳造、圧延、押出ならびに抽伸に関する設備の拡充と新技術の採用が行われた。当時の飛行船などの骨組みに使用されたのはジュラルミン板を曲げ加工しその後ダイス抽伸を数回繰り返して製造するプロフィールである。大量生産になるとロール成形に置き換わった。押出型材の最小肉厚は3mmが限度であったため、板からのプロフィールが用いられた。プロフィールは厚さが0.4～0.6mm程度、長さが4～5mである。1939年頃になると押出最小肉厚は1.2mmとなり、これより薄くする場合には圧延と抽伸で仕上げた。

5.3.1 鋳造技術

この桜島新工場の鋳造設備は、可傾炉4基、坩堝炉48基である。最初は80kg角型鋳塊、直径140mmの40kg鋳塊が傾斜鋳造法で鋳込まれたが、1931年には、鍛造素材用に280～330mm(11～13in.)角型鋳塊(110～120kg)が、管用には直径150mmの30kg鋳塊または直径230mm(9in.)の50kg鋳塊が造塊され、逐次大型化に移行した。鋳型も図5.7のように、湯口付き鋳型で湯口から注がれた溶湯は金網を通過して徐々に底部から鋳型内に流入するDüren方式(左)から予め鋳型片面に金網付湯口をつけた方式(右)に改良された。いずれもフィルターとして金網が用いられている。溶解炉はアルミニウム・リミテッドと協議した結果9トン反射炉を初めて採用した。

反射炉の前には図5.8のように傾斜鋳造機が4列、

計16基が配置され、朝8時半から鋳込み開始し午後3時半鋳込み終了、炉内清掃し、夜間に11トン溶解する一日一溶解方式であった。鋳型はブックモールドで、鋳造方法は反射炉より溶湯を取鍋に入れ、60度傾斜している鋳型に鋳込み始め、鋳型を徐々に回転させ垂直になって鋳込みが終了する。この当時の板用鋳塊寸法は110×280×610mm(4.5×11×24in.) (約53kg)であった。

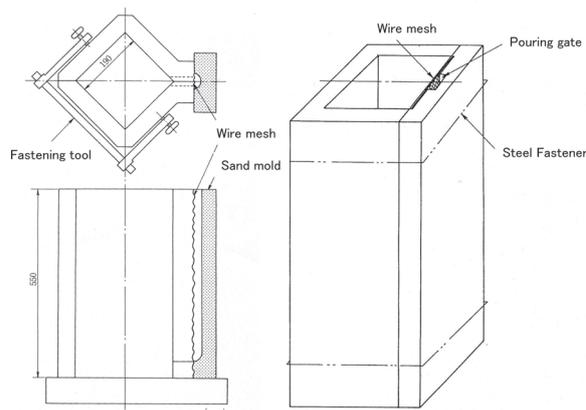


図5.7 Düren方式(左)と改良方式(右)の鋳型^{1), 2)}

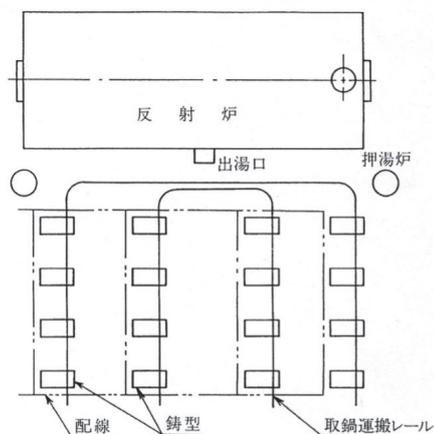


図5.8 反射炉と傾斜鋳造機の配置^{1), 2)}

1928年、プロペラ翅素材の鍛造が始まり、大型鋳塊の必要が生じた。プロペラ翅鍛造用鋳塊はバケツ型で、1931年頃は上部直径330mm、下部直径305mm、高さ483mm、110kgで、これが次第に大きくなって、1942年頃には、上部直径が600mm、高さが800mm、500kg鋳塊が用いられている。材質は25S (Al-4.5%Cu-0.8%Si-0.8%Mn)である。

1931～1940年、鋳型を木炭で加熱後、反射炉から注湯し、空タンク内に入れ、鋳型の下部を周囲から放水して冷却し、逐次、放水を鋳型上部に移して凝固させる方式を採用しており、水冷鋳型法と称した。問題は鋳塊の中心に巨大金属間化合物が生じやすいこ

とである。これを改良するために図 5.9 に示すような加熱水冷式鋳造法 (SKS - II 式, SKS は Sumitomo Kinzoku Sindosho の略) が開発された。溶湯を入れた鉄製取鍋を木製水槽の中に徐々に降下させ冷却させるが、水槽に入るまでをガスバーナーと水スプレーで冷却速度を調節する方式である。

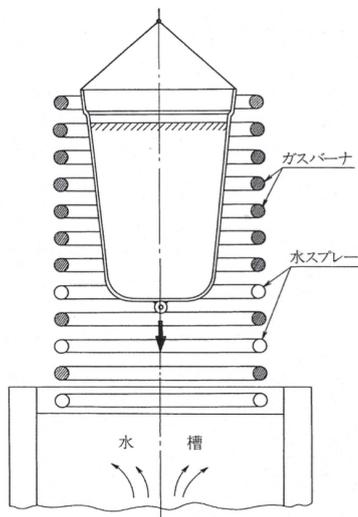


図 5.9 加熱水冷式鋳造法 (SKS - II 式) ^{1), 2)}

5.3.2 圧延技術

板工場の主要設備は三段熱間圧延機 1 基、大型二段圧延機 10 基、小型二段圧延機 12 基、板引張矯正機 1 基、石炭炉 10 基であった。内、新設したものは幅 100 mm (4 in) 迄圧延可能なクルップ (Krupp) 社製三段熱間圧延機、英国ロバートソン (Robertson) 社製小幅用圧延機、石炭炉はロックウェル (Rockwell) 社から購入した特許に基づいて製作された炉であった。三段熱間圧延機 (図 3.10) はロール回転を逆回転しなくてもよいので、二段熱間圧延機より効率がよいことが特徴である。鋳塊はすべて傾斜鋳造法によるものであり、1931 ~ 32 年頃の 60 kg 鋳塊から 80 kg へ、さらに鋳塊端面が丸型の 70、90 kg、1939 年頃には 120 kg 鋳塊が使用された。

熱間圧延の工程は、ジュラルミンの場合、500℃、8 時間の均質化処理を施したのちに、440℃で鋳塊厚さ 120 mm を 75 mm まで圧延し、その後面削したのちに再加熱し、同じく 440℃で熱間圧延して 6.4 mm まで圧延する工程である。この工程を図 5.10 に示す。ここで特徴的なことは、鋳塊をまずその厚さの 2/3 程度までに圧延し、面削で疵を除去後再加熱し、通常の熱間圧延を行う圧延方式である。通常圧延の前の圧延を「押え圧延」と称した¹⁾。

押え圧延の考え方は、戦後の高靱性高強度合金の開発の中で提唱された中間加工熱処理の考え方の原型となるもので、鋳造組織を予備圧延 (鍛錬) によって如何に壊すかということが課題である。他社では押え圧延の代わりにプレフォーミングと称して熱間鍛造が行われた。クラッド材については、鋳塊の両面に所定の厚さに圧延した皮材を被覆し、鉄のバンドで締め付けたあと熱間圧延で圧着したが、その後、鋳造時に皮材を溶着させてからは皮付き鋳塊を用いて前述の工程で熱間圧延された。

冷間圧延では、大板は 910 × 1,830 mm (3 × 6 ft)、1,220 × 2,440 mm (4 × 8 ft)、1,520 × 3,050 mm (5 × 10 ft) ならびに 1,000 × 2,000 mm の 4 種類、小板は 400 × 1,200 mm、500 × 1,200 mm の 2 種類が標準寸法で、大板の最小板厚は 0.5mm、小板は 0.3 mm であった。大板の圧延には二段圧延機 660 × 1,670 mm (26 × 66 in.) が用いられ、6.4 mm (0.25 in.) 熱間圧延板を焼鈍後圧延し、中間焼鈍を施してから途中で 2 枚合わせにし、0.8 mm まで圧延した。0.6 mm、0.5 mm 板は 3 枚重ねの圧延である。焼入れ後は冷間スキンプラス上がり為主で、引張矯正は必要に応じて行った。板厚 1.0 ~ 1.5 mm のものはすべてロール矯正である。小板圧延には、Schmitz 社製 2 基と Farrel 社製 1 基の小型帯板圧延機を用いた。プロフィール用素板には長さ 5,000 mm に切断後、引張矯正したがコイルで出荷したのもあった。

1935 年ころから、超ジュラルミンが飛行機の外板材として量産に入ってから多忙を極めた。そこで桜島の伸銅所に大板を専門とする製板課第二工場が建設される。1938 年頃から稼働し、主要設備は圧延機 12 基である。大板の生産には、熱間圧延機として米国 Mesta 社製の三段圧延機 ((22, 30) × 66 in.) 1 基、冷間圧延機には United Engineering (U.E.) 社製の三段圧延機 ((20, 30) × 66 in.) 1 基と二段圧延機 (28 × 60 in.) 4 基、日立製作所製二段圧延機 2 基 (28 × 61 in., 28 × 66 in.)、その他 U.E. 社製四段帯板圧延機 1 基有していた。製板第一工場で「押え圧延」された熱間圧

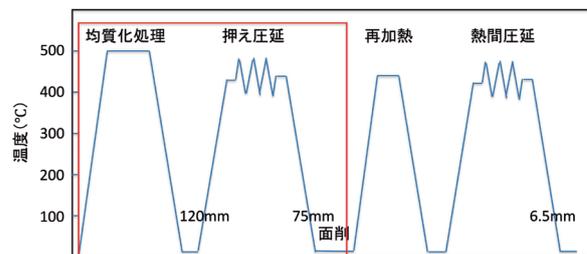


図 5.10 押え圧延法 (図内の数値は板厚を示す) ^{1), 2)}

延板を用いて大板が製造された。大板の圧延工程は次のようであった。

加熱→熱間圧延 (0.25 in.) →焼鈍→両耳切断→地取切断→冷間圧延 (三段圧延機、3 mm) →地取切断→焼鈍→傷取り→冷間圧延 (1.5 mm) →焼鈍→二枚合せ圧延→0.8 mm →焼入れ→洗浄→スキンパス (→焼戻し)

熱間圧延での問題点としては、第一に、押え圧延では端面割れが多かったが、時折表面割れも発生し、この場合は両面を5～6 mm面削した。第二に、三段圧延機では軽圧減率の加工なのでクロコダイルを発生しやすいことや合せ板圧延開始時に上側皮材が剥離し飛ぶことがあった。第三に、熱間圧延板のキャンバが不揃いであったため、圧延ごとに冷却水量の調整が必要であった。

5.3.3 押出技術・鍛造技術

管・棒・線用としてはKrupp社製1,000トンの横型水圧押出機が1基で、1935年頃にシュレーマン(Schloemann)社製2,000トン1基が設置された。前者にはコンテナヒータがなく、薪を焚いて暖めた。鋳塊は直径140 mm (5.5 in.) のものが使用された。後者は複動型で、コンテナはガスバーナー方式で、鋳塊は180 mm (7 in.) のものが使用された。堅型水圧押出機はハイドロリック (Hydraulik) 社製600トン2基が設置され、小径管の素管の押出に使用された。そのほか、丸棒の熱間圧延と管の熱間マンドレル圧延用に3段溝ロール圧延が3基、2段溝ロールが2基用いられた。

押出形材については、住友は1924年頃、Krupp社製1,000トン横型水圧押出機を用いて、一辺が50 mm、肉厚3 mm以上のジュラルミンL型形材の製造に成功し、川西機械(株)の水上機のフロートの小骨に使用されたのが実用化の最初と言われている。1928年安治川から桜島に新工場を移転してからも一基のみで需要がなかった。当時は大凡の形状を作り圧延と抽伸で仕上げたようである。1935年、シュレーマン社製2,000トン横型水圧押出機(複動型)が設置され、住友の超ジュラルミンSD (24S) が、1936年、全金属製低翼単葉機の九六式艦上戦闘機に採用されたことで、軍用機全盛時代の需要期を迎えることになった。

鍛造には、プロペラ翅素材用として1930年6トンエアーハンマーが設置された。その後、1,000トンの堅型水圧機3基、スクリュープレス4基、3トンエアーハンマーが2基設置された。

5.4 名古屋軽合金製造所の設置^{1)~4)}

1935年、住友伸銅鋼管(株)は(株)住友製鋼所と合併し、住友金属工業(株)が設立された。同年におけるアルミニウム合金の生産高は1,400トンであったが、後半から国際情勢の緊迫化による航空戦力の大幅増強の必要から飛行機材料の増産が要求された。1937年2月にはプロペラ需要激増による鍛造工場拡充計画が立案された。さらに、陸・海軍による3回の増産計画により、陸軍は7,418トン/年、海軍は4,400トン/年の目標が立てられ、大阪桜島の伸銅所に飛行機材料専門の製板課第二工場、管棒課第二工場が建設され、1938～1939年稼動を開始した。1938年末に、海軍航空本部から月産1364トンのアルミニウム合金生産の要請があり、既定の増産計画の3倍もの要求で、伸銅所には拡張の余裕がなく、新工場の敷地が検討された。新工場敷地としては、空襲、天災などの危険も考慮に入れて、各地を物色したが、結局航空機製造の中心地となっている名古屋に決定した。

敷地は、1939年はじめ、航空機事業を手がけていた愛知時計電機(株)青木鎌太郎社長の斡旋で、名古屋市港区千年の水田に、工場付属地として博覧会跡地4万余坪を加えた約19万坪を入手した。この地域は、1937年、名古屋市長の大岩勇夫が名古屋開港30周年、国際都市としての名古屋をアピールするため名古屋汎太平洋平和博覧会(コラム参照)を開催した会場跡地になっていた。もともとこの会場となった南区熱田前新田(現在の名古屋市港区港明・港楽一帯)は、1935年に会場が決定した当時は、港北耕地整理組合が管理する葦の茂る田んぼにすぎない地域であった。大岩には名古屋に自動車産業を誘致して「中京デトロイト」にする構想があり、その一環として、交通網などインフラ整備のため博覧会が開催されたものと考えられる。名古屋汎太平洋平和博覧会(コラム)は1937年3月15日から5月31日まで開催され、入場者数は480万人、海外からの参加は29カ国であった^{15)、16)}。

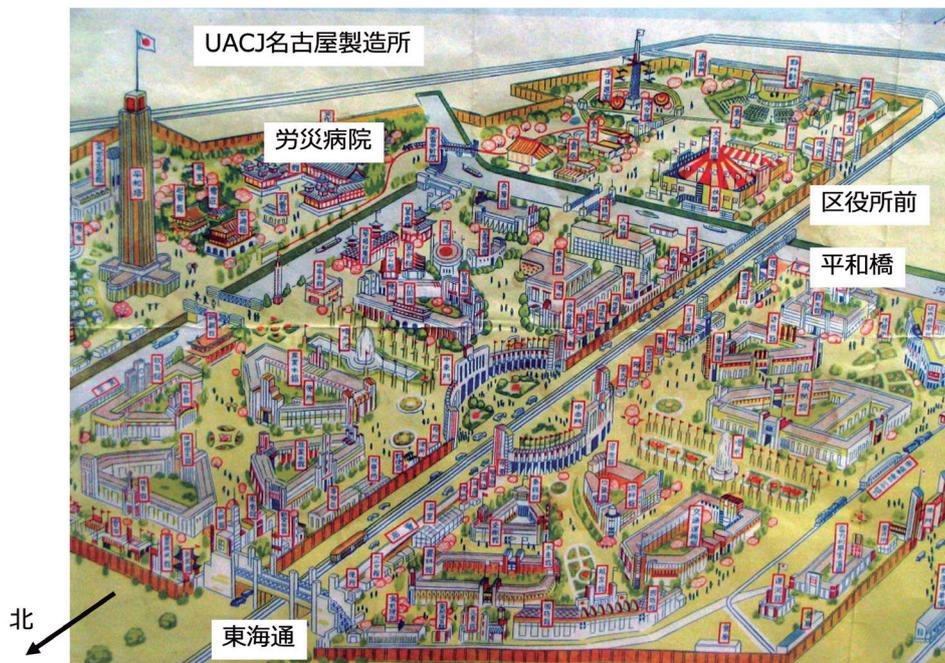
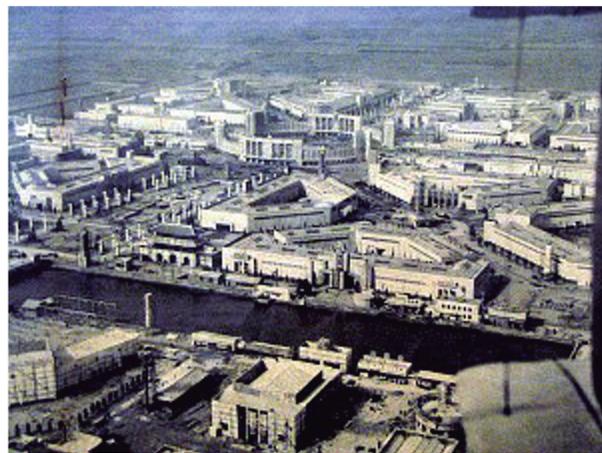
1939年7月杉浦稠三を部長として臨時名古屋工場建設部が設置され、鋳造、製板、管棒、鍛造を持つ総合的軽合金専門工場の建設にあたった(図5-11)。同時期に、国家総動員法の公布で伸銅所軽合金関係工場、プロペラ製造所全工場などが陸海軍共同管理工場となり、管理官が派遣され、生産または修理の業務に関し、陸海軍大臣の指揮監督を受けることになった。1941年9月名古屋軽合金製造所が設置された。所長に杉浦稠三、副所長に丸山正男が就任し、五十嵐博士もこの

コラム 名古屋汎太平洋平和博覧会

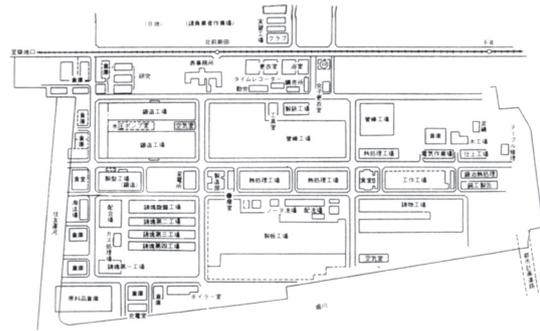
名古屋開港 30 周年、国際都市としての名古屋をアピール (名古屋市長 大岩 勇夫)



1937 (昭和 12) 年 3 月 15 日 - 5 月 31 日
入場者数 480 万人, 海外参加 29 カ国



参照 http://underzero.net/html/tz/tz_213_1.htm (2021.11.15)、名古屋都市センター、ニュースレター Vol.62 (2004.12)、名古屋汎太平洋平和博覧会ガイドブック、(財)名古屋都市センター、(2005).



名古屋軽合金製造所平面図（ただし、B地・C地は略）

（約19万坪の土地です。名古屋港の海底からサンドポンプで土砂を運んだり 住友運河を掘った土で、南側から埋立てて整地しました。）

図 5.11 名古屋軽合金製造所の外観と平面図²⁾

ときに研究部長となった。1942年2月名古屋軽合金製造所も陸海軍共同管理工場となった。この工場は、当時伸銅所で開発中であった連続鋳造法による大型鋳塊を用いることを前提としたストリップ方式圧延の製板工場を目標とした。

1943年に入ってから工場の整備が急速に進み、反射炉30基、わが国最初の連続鋳造設備、可逆式二段熱間圧延機ならびに四段冷間圧延機、大型押出型材生産用3,600トン横型水圧押出機、プロペラ翅素材生産用の4,000トン縦型水圧機、35,000kg-m エアーハンマー等を設備した総合軽合金工場となり、その生産量は最盛期には月産4,000トンであった。なお、鋳物関係は1943年名古屋軽合金製造所鳴海支所と伸銅所豊橋製作所、伸銅所堅田製作所が設置され、そちらに移管された。鋳造、圧延、管棒、型材、鍛造の技術の進歩を紹介する。

5.4.1 鋳造技術

製板技術の発展に伴い、ストリップ方式で圧延を行うためには、高品質でかつ大型鋳塊の必要性が生じてきた。1936年春頃の外国雑誌に、「これからは連続鋳造法に向かわねばならぬ」という二三行の記事があり、これに着目したのが佐藤新治である。1937年彼は「物事すべて根本は素質である。素質のないものでも努力すれば上手の域に達するが、努力だけでは名人になれない・・・、しかして、素質のよい鋳塊を作るには連続鋳造法以外にない」という趣旨の報告書を当時の製造部長である丸山五男に提出し、許可を得て実験を開始した。その後、建設中の名古屋軽合金製造所は米国のUnited Engineering社のストリップ方式圧延設備を導入することとなり、製板用角型大型鋳塊を必要としたため、大型鋳塊連続鋳造技術の完成が必須となった。これを担当した鹿子木立郎は銅製鋳型を用い、鋳型内面に塗油し、溶湯注入の工夫や底板にダ

ミーブロックをおくなどして、1941年6月、長さ1,200mm、約400kgの鋳塊を製造するSKS-V式と呼ぶ鋳造法を完成させた（図5.12）。

1942年には、反射炉の前に深さ5m余のピットを作り、其の中にダミーブロック付き降下装置を据え付け、鋳型を設置し、二つの取鍋で交互に鋳型の中に樋を通じて溶湯を流しこんで、最大1,400kg、厚さ220mm、幅600及び800mm、長さ4,000mm程度のものが造塊された。実際の圧延には400kg、600kg鋳塊が用いられたので、一本のスラブから3枚取りまたは2枚取りされた。当初、VLW社（Vereinigte Leichtmetallwerke GmbH）の技術導入で製造する予定であったが、古河電工が先に交渉していたため技術

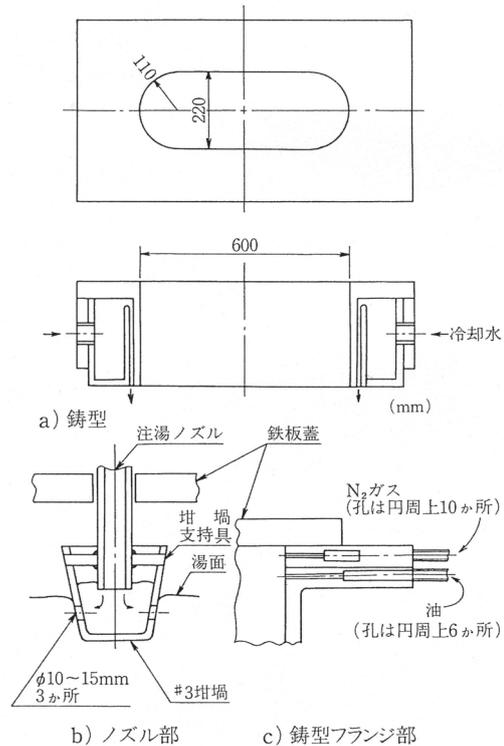


図 5.12 板材用スラブの連続鋳造用鋳型およびノズル部^{1), 2)}

導入はできなくなった（コラム参照）。このため鹿子木は1937年のドイツのAluminium誌に掲載された連続鋳造法に関する記事やVLW社のイタリア特許を参考に、大型鋳塊の製造の実験を行い、鋳型、形状、鋳込み法、冷却法、亀裂防止、異常結晶粒や発汗の防止に独自の技術を確立し3件の特許を取得し、1942年名古屋軽合金製造所にて量産化した。連続鋳造法の確立は製板工場のストリップ方式圧延設備の生産性向上に大きく貢献した。この連続鋳造法ではジュラルミン、超ジュラルミンだけで、超々ジュラルミンは鋳込んで放置すると割れるといった問題があり、Züblin法（SKS-VI式）が適用された。Züblin法は鋳型の一方の縁を解放しておき、そこから水平な樋で溶湯を流し込み、鋳型を降下させていくと同時に縁の解放された部分を逐次塞いでいく方式である（図5.13）。

Züblin法によるESD板用鋳塊は、厚さ120 mm × 幅400 mm × 長さ600 mm（約80 kg）程度のものであった。

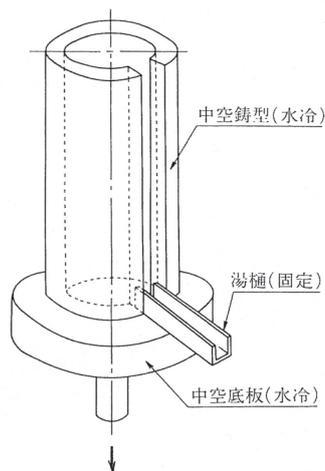


図5.13 棒用ビレットのZüblin鋳造法^{1), 2)}

5.4.2 圧延技術

名古屋軽合金製造所の熱間圧延では連続鋳造法による大型鋳塊をストリップ方式で圧延する、当時としては世界でも極めて新しい試みで圧延が行われた。この方式では幅1000 mm板用スラブをU.E.社製可逆式二段圧延機（図5.14上）で厚さ6 mmまで熱間圧延後、コイルアップする。焼鈍後、冷間粗圧延はU.E.社製2スタンドタンデム四段冷間圧延機（図5.14下）で3パス通板し、中間焼鈍を入れて、その後シングルU.E.社製4段冷間圧延機で圧減率50%の仕上圧延を行い、板厚0.5 mmならびに0.6 mmとした。ストリップ方式で圧延した板はジュラルミン（D2）、超ジュラルミンとその合せ板（SD、SDC）の3種類で、板厚は0.4

～1.2 mm、幅1,250 mm以下である。超々ジュラルミンESDとESDCは従来の圧延方式であった。

可逆式二段熱間圧延での超ジュラルミン合せ板（SDC）の圧延工程は次のようである。

400kgスラブ→押え圧延（厚さ135 mm × 幅850 mm）→面削（片面10 mm）→洗浄→皮板付け→加熱→熱間圧延（厚さ6 mm × 幅1,100 mm）→両耳切断（幅1,050 mm）

傾斜鋳造法による鋳塊の熱間圧延には、日立製作所製二段圧延機（30 × 70 in.）2基、冷間圧延にはU.E.製三段圧延機（(31, 21) × 72 in.）1基、ならびにU.E.製二段圧延機（(32, 36) × (66 ~ 96) in.）7基が用いられた。小幅コイルの冷間圧延には、Schmitz社製（500 × 800 mm）2基、Farrel社製（20 × 32 in.）1基の二段可逆式圧延機があり、そのコイル単重は50 ~ 60 kgであった。その他、マグネシウム合金圧延用に日立製作所製二段圧延機（36 × 130 in.）4基、復水管板用ネーバル黄銅板熱間圧延用に日立製作所製二段圧延機（36 × 130 in.）1基が据え付けられていた。

焼入れには硝石炉を使用し、大板はつり下げ方式であるが、小板の場合には寸法によってコイル（最終単

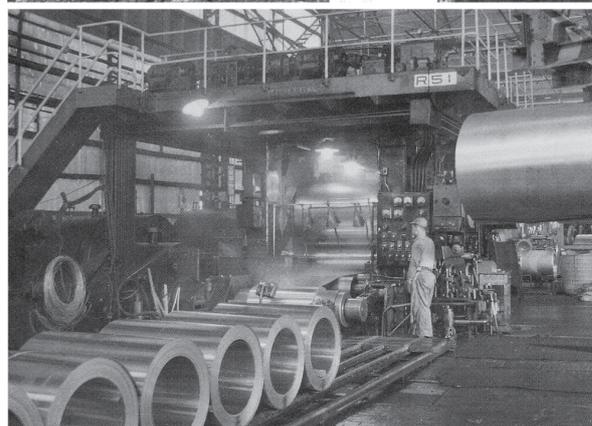
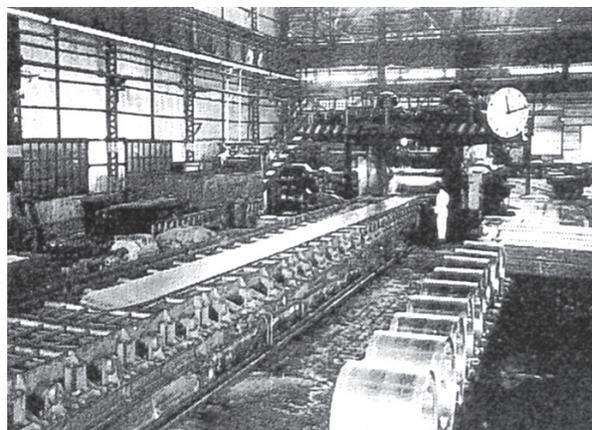


図5.14 住友の圧延機
（上：二段熱間圧延機、下：2タンデム4段冷間圧延機）²⁾

重 40～50 kg) のまま焼入れしたこともあった。

現在行われているストリップ方式の圧延技術の基礎は、小幅圧延から始まり、連続鋳造法の開発と相俟って、1942 年以降、名古屋軽合金製造所によって完成された。1944 年における伸銅所製板課第二工場アルミニウム合金生産量は 500～600 トン/月、名古屋軽合金製造所製板工場は最盛期には 2,000 トン/月(内、ストリップ方式が 1,500 トン/月)である。

5.4.3 押出技術

管棒生産用に 1941 年、主要設備として、横型水圧押出機 8 基、縦型水圧押出機および縦型水圧機 1 基、プロペラ翅素材用の圧延溝ロール 3 基、鎖式抽伸機 17 基、20 トン及び 300 トン引張り矯正機各 1 基、リール矯正機が設置された。いずれの工場でも、ビレットの直径は 5”、7”、9”、10” で、傾斜鋳造法で製造され、名古屋では連続鋳造法も併用された。焼入れは硝石炉が用いられた。生産量は伸銅所(桜島)、名古屋でいずれも管棒が 300 トン/月であった。

押出型材生産用に横型水圧押出機が 7 基設置された。その後増設され、計 11 基となった。ESD は 2,000 トン級以上の押出機で生産され、最小肉厚は 4 mm としたが、主に 6 mm 以上の肉厚であった。押出速度は SD が 2～2.5 m/min、ESD が 1～1.5 m/min であった。図 5.15 は名古屋軽合金製造所に設置された 3,600 トン横型水圧押出機である。ESD 大型型材の押出に用いられた。

当時の押出型材生産上の問題は、押出材尾部の結晶粒粗大化、押出性が形状寸法に依存すること、押出材尾部のまくれ込みであった。押出型材の矯正方法は、引張り矯正、叩き矯正、プレス矯正、ツイスタによる振り矯正である。矯正は傷取りと同様、非常に手数がかかり、人海戦術であった。生産量は桜島と名古屋でそれぞれ 700 トン/月であった。名古屋では ESD の生産が 500 トン/月であった。

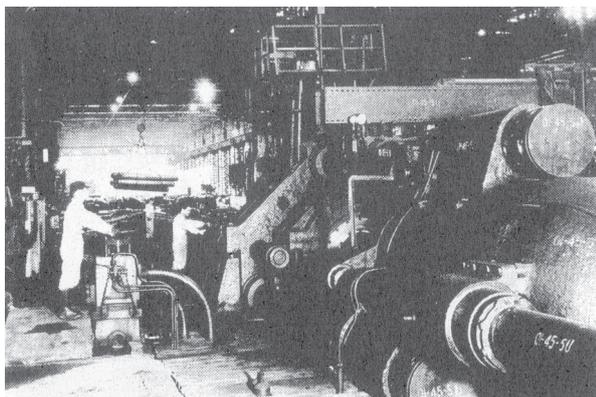


図 5.15 3,600 トン横型水圧押出機²⁾

5.4.4 鍛造技術

設備の大型化、大型クランクプレスの採用、鍛造ロール、アプセッタの使用、黒皮を残す鍛造、製型工場の設置を基本に工場ができた。4,000 トン型水圧機 2 基、1,000 トン横型水圧機(アプセッタ) 1 基、Beche 社製 35,000 kg-m カウンタブローハンマ 1 基、鍛造ロール 1 基が設置された。小型鍛造品専用にはピストン用スクリュープレス 4 基、1 トン及び 3 トンエアハンマ各 1 基設置、その後米国 National 社製 1,500 トンクランクプレス 2 基、国産の 700 トン 3 基、200 トン 2 基クランクプレスが増設された。図 5.16 は UACJ に保管されている航空機用プロペラ用の鍛造金型である。



図 5.16 UACJ に保管されている航空機用プロペラの鍛造金型

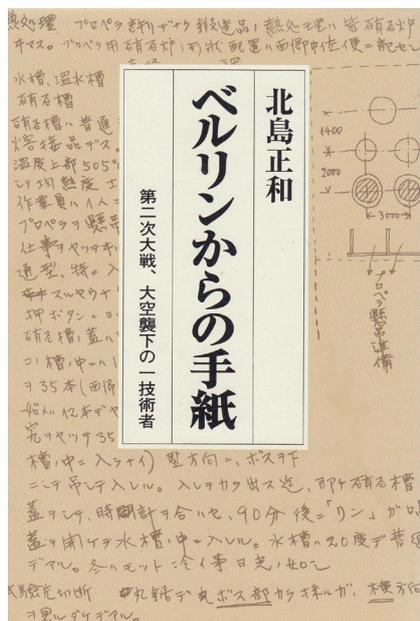
5.5 製錬技術の導入、電力事業とアルミニウム製錬¹⁷⁾

5.5.1 日本における輸入地金、住友と古河の対応

わが国におけるアルミニウム市場の形成は軍需品に始まったことはすでに述べたが、1894 年陸軍はアルミニウム地金を輸入して東京および大阪の砲兵工廠で飯ごう、水筒そのほかの携帯用軍需品を生産することを決めた。輸入地金は 1987 年安治川に開設された住友伸銅場にて圧延され、アルミニウム板として工廠に納入された。その後民間でもアルミニウム什器が製造されるようになり、1900 年に約 100 トンに達した輸入地金は 1912 年には約 1,000 トンへと増大した。第一次世界大戦の開始によって、フランス、スイス、イギリスからの地金輸入は中断したが、その間隙を縫って、アルコアの子会社の Northern Aluminum Company (アルキャンの前身) が日本に進出し、以来、わが国のアルミニウム市場はアルキャンの支配下に入った。1920 年には地金消費量は約 2,000 トンに拡

コラム 古河電工のVLWからの技術導入 - 「ベルリンからの手紙」より-

古河電工は1937年9月の工場事業管理令に基づいて、日光と大阪の工場が陸海軍の管理を受けるようになった。特に古河は陸軍からの要請で航空機用アルミニウム合金の大量生産のための新工場の建設が必要になった。新工場建設にあたっては外国の最新の技術導入することが不可欠であった。1938年VLWから技術提携の話があり、鋳塊を作る技術ではVLWが優れていると判断し、1939年8月古河とVLWは契約を結び、溶解鋳造、圧延、鍛造、押出、研究に関して技術導入を行い、技術習得のために三カ年で技術者を三回派遣することとなった。派遣されたのは松尾敏彦、川村知、北島正元の三名で、1941年5月シベリア経由でドイツに向かった。6月にベルリンに着いたが、12日後、ドイツはソ連に対し宣戦布告をした。7月にハノーバーに着き、空襲の最中VLWでの研修、VLWの連続水冷鋳造法などの技術習得を行なった。11月にハノーバーを引き上げたが、日米開戦の危機ですぐに帰国することは難しくなった。購入機械類や技術資料は潜水艦で日本に運ばれた。1942年9月、帰国手続きをとったが、ソ連を通過するビザが取れず翌年まで持ち越された。1943年の春、技術資料や駐在員との連絡で日光では連続水冷鋳造設備を作ら上げた。その結果、24SはできたがESDは良品ができなかった。1943年10月ようやくソ連通過ビザがおりたが、一社2名までということで北島にはビザは発給されなかった。一人残された北島はベルリンの空襲の中、肺をやられて闘病生活となり、陸軍の計らいでドイツ陸軍傷痍軍人療養所に入った。戦況が悪化し1945年1月にはスイスの結核療養所に移ったが、9月18日39歳で客死した。これらの経緯について、北島正元の長男である北島正和が執筆した「ベルリンからの手紙、第二次世界大戦、大空襲下の一技術者」が2005年中央公論事業出版から出版されている。(図：北島の手紙が本の表紙になっている)



北島正和：ベルリンからの手紙、第二次大戦、大空襲下の一技術者、中央公論事業出版、(2005). より

大した⁶⁾。

古河電工は1908年の日光電気精銅所の完成と同時に製線も開始し、アルミニウム線にも関心を示し、1911年、高橋本枝（コラム）を欧州に派遣してアルミニウム送電線の調査に当たらせた。

1919年、古河合名はBritish Aluminium Ltdとアルミニウム・ワイヤー・バーの独占販売権と技術導入契約を結び、銅芯アルミニウムの製造を始めた。これに対抗して住友電線もアルコアからの技術導入により1925年生産を開始した。住友はアルコアからの原料であったが、古河は競争上、原料を廉価に入手する必要があった。また古河は住友のジュラルミン製造に刺激されて、鳥羽安行技師を東大の航空研究所に派遣し研究させた。1926年陸軍航空本部からジュラルミンの試作命令を受け、1928年には陸軍は日光電気精銅所をジュラルミン板の製造指定工場とする決定を行った¹⁸⁾。

5.5.2 国産地金の開発

国産地金に関しては、1916年日本軽銀(株)が年産200トンの電解工場を名古屋に建設したのがわが国最初のアルミニウム製錬企業である。この計画は知多半島の白粘土を原料として苛性ソーダで処理してアルミナを製造し電解するという方式であった。しかし原料が不適でコスト的に合わず一年で閉鎖された。その後、同社の経営は藤田組（同和鋳業）に委ねられ、名古屋工場を研究を続け、1918年長野県大町に電解工場を建設した。この工場は藤田組系列の明治水力電気の3万kwの電源開発に対応したものであったが、第一次世界大戦後の不況で挫折した⁶⁾。1921年軍部は航空機を中心とする軍需の拡大に対応させるために軍需工業研究奨励金を交付してアルミニウム製錬の企業化を促進した。この政府助成を得て、日本軽銀大町工場工

業化試験が再開されるとともに、政府機関である東京工業試験所でもアルミナの製造研究が進められた。

(1) 明礬からの製錬—昭和電工、住友化学^{6), 18) ~21)}

1931年9月の国際連盟脱退以降、アルミニウム地金の輸入に不安があり、当時、日本の統治下にあった朝鮮の明礬石や満州の礬土頁岩を用いて地金を国産化する機運が急速に高まった。浅田明礬製造所の浅田平蔵の発明した明礬石によるアルミナ製造法の特許は1930年成立し、浅田は日本^{コード}沃度（その後1934年日本電工、1939年昭和電工）と朝鮮の明礬石を用いて、1932年昭和肥料の川崎工場内に試験工場を作り試験をした。

浅田法は酸法の一つで、明礬石を焙焼し、硫酸を添加すると溶液は硫酸礬土（硫酸アルミニウム）となって、珪酸および鉄は残渣中に残り、分離ろ過すると粗明礬が得られる。さらに加圧分解して硫酸カリと硫酸礬土が得られ、焙焼後に水で抽出して水酸化アルミニウムが得られる方法である。しかし、その後、浅田法ではなく東京工業試験所の田中弘博士の特許を採用し⁶⁾、1934年日本電工は横浜にアルミナ工場、大町に電解工場を建設し、アルミニウム製錬の企業化に成功した²²⁾。田中法は明礬石を焙焼分解し、アンモニア水で処理してその含有する硫酸分を硫酸、カリウム分を硫酸カリウムとし抽出液を蒸発させ、硫酸カリウム硫酸の混合

物を作る。抽出残渣は苛性ソーダで処理してアルミン酸ナトリウム液を作り、これを炭酸ガスで分解して水酸化アルミニウムを析出させ、焼成してアルミナとする。母液の炭酸ナトリウム液は苛性化して工程に循環させるというものである。しかし、その後ボーキサイトのほうが回収率のよいことがわかったため1937年ボーキサイトに切り替わった。

浅田は日本沃度を諦め、1931年住友合資会社へ事業化を申し入れ、浅田の持つ朝鮮、玉埋山^{おくめ}明礬石（注）の鉱区権移転と共に事業化する契約が成立した。住友が契約したのは、肥料の原料としての硫酸カリも副産物として採れるということにも注目したからである。住友の肥料関係は1913年、住友総本店の直営事業として新居浜で肥料製造所が設置され、1925年、(株)住友肥料製造所として独立、1934年商号を住友化学工業株式会社に変更した。

住友化学は、浅田法で製造を試みたが、装置が硫酸で腐食され、耐酸性の装置にする適当な材料もなくて浅田法では順調に操業できないため、同社で開発した住友法によって明礬石からアルミナ製造を行い、1934年、年産1,500トンの製錬能力を有する住友アルミニウム製錬(株)を発足させた。住友法は、明礬石を酸およびアルカリで処理する方法で、明礬石を粉砕して焙焼しさらに粉砕し硫酸を添加して粗明礬と硫酸礬土に分離する。硫酸礬土をアンモニアで中和すると水酸化ア

コラム 高峰讓吉のアルミニウム精錬事業

1917年、ジアスターゼの発見で有名な高峰讓吉（1854-1922）も、高峰の生誕地・高岡には、古くから銅加工の技術があり、富山湾に面する良港を有するこの地（富山県）でアルミ工業を起こせばその技術が生きると考え、アルコアと日本の共同出資で企業を設立し、アルコアの技術を導入してアルミニウム製錬の計画をたてた。そして大量の電気が必要なアルミ工業を起こすには、無尽蔵とも言える水資源の利用が最適であると考え、1917年から黒部川の調査に乗り出した。1919（大正8）年12月、三共本社内には東洋アルミナム株式会社を設立し、まず黒部川の電源開発に着手した。1921（大正10）年、東洋アルミナムは黒部鉄道株式会社を設立し、鉄道建設に着手した。宇奈月を電源開発の基地とし、同時に温泉地として発展させれば、一般客の取り込みも可能になり、鉄道事業の運営、電源開発と地域開発が同時に行なえると考えた。しかし、第一次世界大戦後の経済不況の中、1922（大正11）年7月に高峰博士が亡くなると、東洋アルミナムによる電源開発事業は縮小し、同年、東洋アルミナムはアルミ製造事業を断念した。高峰博士とともに代表を務めていた塩原又策は、会社の全株式を日本電力に譲渡し、東洋アルミナムの社長には日本電力の山岡順太郎が就任し、電力事業は日本電力（現在は関西電力）に引き継がれた。アルミ精錬事業は、1934年、「日本沃度」という会社を経て「日本電工」が初めて生産に成功した。一方アルミ加工産業では「三協アルミ」と「立山アルミ」（現在は合併して三協立山株式会社）が、1960年に竹平政太郎・栄次兄弟によって創業され、本社を高岡に置いている。

(<http://www.npo-takamine.org/works/05.html>)

コラム アルミナの製造法、アルカリ法と酸法

アルミナは両性化合物でアルカリにも酸にも溶けるので、アルミナ製法にはアルカリ法と酸法がある。アルカリ法は水に溶解しているアルミン酸ソーダにアルミナを結合させるためにアルカリ（苛性ソーダ、炭酸ソーダ）で原鉱石を処理する。この処理によって鉄、ケイ素、チタンなどの不純物は赤泥となって分離され、アルミン酸ソーダから水酸化アルミニウムを分離する。アルカリ法では鉄やチタンの分離は比較的容易であるが、ケイ素はアルカリに容易に溶解するからアルカリ法においてはできるだけケイ素の少ない原鉱石を使用することが望ましい。アルカリ法の基になっているのはバイヤー法で現在も広く利用されている。オーストリアの化学者 K.J. Bayer は、第一に、アルミン酸ソーダ溶液での自発的に分解析出が生じることと水酸化アルミニウムを添加するとこの析出が促進されること、第二に、ボーキサイト中に含まれるアルミナは、オートクレーブ中でアルミン酸溶液の分解後の母液を用いて、アルカリ溶液に溶解することを発見した。これらの発見でバイヤー法を完成させた。バイヤー法の工程を図左に示す。アルカリ法では上述の湿式法以外に乾式法がある。この方法では原鉱石をアルカリ土類金属塩またはアルカリ金属塩（炭酸ソーダ、炭酸カルシウムなど炭酸塩）と共に回転炉で加熱乾燥するか、アーク炉で固体アルミン酸塩を得るために熔融させる。アルミン酸塩は水またはソーダ溶液によって抽出するとアルミン酸ソーダ溶液が得られ、これを分解させて水酸化アルミニウムを得る。

一方、酸法では原鉱石を無機酸（硫酸、塩酸、硝酸）で処理すると硫酸アルミニウムまたは三塩化アルミニウムなどになり、それを分解して水酸化アルミニウムを得る。酸法では鉄及びチタンの酸化物は多少溶解するが、ケイ素はほとんど溶解しない。酸溶液からの鉄の除去はかなり難しいので鉄の含有量の少ない原鉱石を使用することが望ましい。また装置が耐酸性のものであることが必要である。図右は酸法の一つである浅田法を示す。(森永卓一：アルミニウム製錬、日刊工業新聞社、(1968))

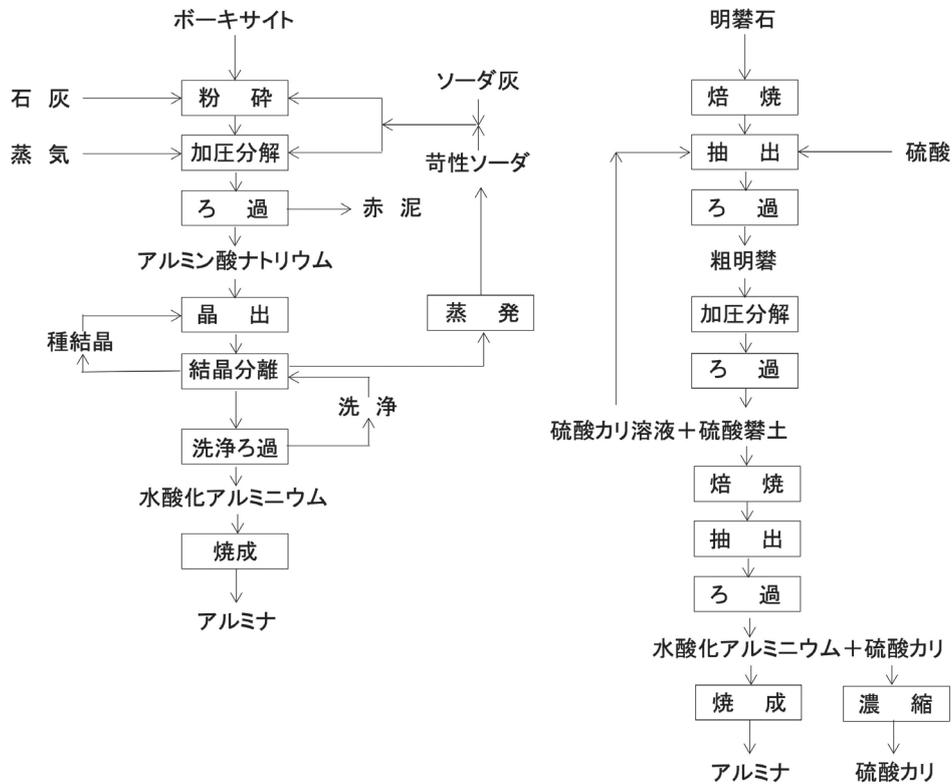


図 Bayer 法（左）と浅田法（右）の製造工程

ルミニウムが得られ、これを苛性ソーダに溶解してアルミン酸ソーダにする。沈殿槽で水酸化アルミニウムを析出させると、珪酸および鉄は残渣中に残る。アンモニアで中和して水酸化アルミニウムをろ過した後のろ液から硫酸カリおよび硫酸が得られる方法である。結局、住友化学も明礬からのアルミナの回収は技術面でもコスト面でもうまくいかず、また不純物が多くジュラルミンには使えないとのことで、住友も1938年ボーキサイトに切替えた。

(注) 玉埋山の明礬石の成分²²⁾、 Al_2O_3 : 24 ~ 33%、 SiO_2 : 14 ~ 15%、 SO_2 : 22 ~ 33%、 Fe_2O_3 : 0.5 ~ 15%、 K_2O : 6 ~ 8%、 H_2O : 9 ~ 10%

(2) 礬土頁岩からの製錬—日満アルミ、満洲軽金属^{23) ~ 26)}

ばんどけつがん
礬土頁岩とは、1924年煙台（中国東北地方の鞍山と瀋陽の間に位置する）にある煙台炭鉱で耐火粘土の調査中に発見された。粘土の中には微細なダイアスポア結晶を極めて多く含むことが確認され、当時の地質調査所長村上飯蔵博士によって「礬土頁岩」と命名された²³⁾。礬土頁岩にはアルミナ分が多いため、ボーキサイトの供給が途絶えた場合のことを考えて礬土頁岩をアルミニウムの原料にすることが国策として検討された。礬土頁岩は白味を帯びた茶褐色の岩石であるが、ボーキサイトに比べ風化の度合いが小さいためか珪石が多い。ボーキサイトは珪酸分が少なく5%以下であるが、礬土頁岩は少なくとも10%、多いものは40%もあり、苛性ソーダで処理しても珪酸分が溶け出してしまう難点があり、ボーキサイトから製造するバイヤー法に比べてこれらの不純物を取り除く工程が増え採算がとれるかどうかの問題であった。

理化学研究所は満洲の礬土頁岩を用いて乾式アルミナ製造法を開発した。1933年この方式を採用した日満アルミニウム(株)が設立され、富山県の東岩瀬町に工場を建設した。同工場は年産3,000トンの規模で1935年操業を開始した。理化学研究所で研究された方法は鈴木庸生博士の「鈴木式乾式法」と呼ばれるもので、礬土頁岩を電気炉でコークスと一緒に高温で溶融させ、珪酸、酸化鉄、酸化チタンを還元させて、溶融した「珪素チタン鉄」と「アルミナ」を比重差で分離させ、分離したアルミナに塩素ガスを通じて不純物を除去する方法である^{19) ~ 21)}。日満アルミニウムは1943年昭和電工に買収され、同社の富山工場となった。

一方、満鉄中央研究所にても礬土頁岩²³⁾からアルミナを抽出する研究開発がなされ、彼らの研究では、

礬土頁岩の高品質鉱と低品質鉱では製造方法が異なり、高品質鉱 (Al_2O_3 : 50%、 SiO_2 : 20%、 Fe_2O_3 : 10%) では珪酸が少ないので、アルカリ法でかつ乾式が、低品位鉱 (Al_2O_3 : 20 ~ 40%、 SiO_2 : 40%、 Fe_2O_3 : 3%) では珪酸が多いので酸法がよいと判断された。満鉄ではすでに量の多い低品質鉱から硫酸にてアルミナを製造する小規模実験がなされていた。これは明礬石からのアルミナ製造法の応用で、礬土頁岩を焼いて脱水した後、硫酸に溶かすと硫酸礬土の水溶液ができる。これにアンモニアを加え、アンモニウム明礬の結晶を作り、さらにアンモニアを作用させると水酸化アルミニウムが結晶として取り出される。これを焼いて脱水してアルミナとする方法で、電解が容易で純度が高いアルミナが得られた。

しかしながら、満鉄は関東軍からの強い要請で理研の鈴木式乾式法で取り組み始めた。日満アルミニウムから理研法の特許の使用する権利を得て、日満アルミニウムには礬土頁岩を供給する契約を結んだ。1934年には奉天（現在の瀋陽）に近い撫順に試験工場ができた。電力は撫順炭鉱発電所から供給を受けた。満鉄中央研究所の内野正夫技師は、高温塩素ガスの取扱い、溶融させたアルミナの粉碎、アルミナの電解の困難さに悩まされた。最後のアルミナの電解問題は酸法で作ったアルミナを加えると反応が進みうまくいくことがわかり、礬土頁岩からアルミナができることが実証された²⁴⁾。その後フランスの製錬工場を見学してゼータベルグ方式で製錬することを決めた。内野らは「満洲軽金属法」を完成させ、1936年11月満洲軽金属製造株式会社を設立させ、年産4,000トンの工場を撫順に建設し、1938年操業を開始した。

「満洲軽金属法」は第一段階が鉱石から礬酸石灰（アルミン酸カルシウム）を製造する工程で、焙焼炉で礬土頁岩と石灰石を焼いて、水分や有機物を除去し、アーク炉で溶融させ、コークスと鉄を添加する。還元反応で珪素鉄が形成され沈殿する。上澄み液から礬酸石灰を取り出す。第二段階は礬酸石灰から精製アルミナを製造する工程である。溶解槽で礬酸石灰に炭酸ソーダを加えるとアルミン酸ソーダが生成し、これを洗浄シクナーでろ過し、その後、脱珪酸処理を行う。上澄み液は精製槽を通して沈殿槽に導かれ、炭酸ガスを吹き込むと水酸化アルミニウムが沈殿する。脱水処理後ロータリーキルンで焙焼するとさらさらのアルミナができる。第三段階は精製アルミナから金属アルミニウムを取り出す電解工程である。その工業化を満洲軽金属が行い、日本独自開発の技術としてアルミニウムの製錬に成功した^{25) ~ 27)}。

5.5.3 国産地金からの撤退、ビントアン島ボーキサイトからの製錬

古河は地金確保のため、1926年、アルミニウム産業の育成を目的として、アルミニウム製錬工業関係6社（三井鉱山、三菱鉱業、住友鉱山、藤田鉱業、古河鉱業、大成化学）による「アルミニウム工業促進協議会」を結成した。その後の金融恐慌で解消したが、1930年「アルミニウム製造事業諮問委員会」として復活、その間、古河電工の主催する「三社アルミニウム協議会」（古河電気工業、東海電極、大成化学）が中心となって政府にアルミニウム事業への支援を要請した。委員会と並行して3社が中心になった日本アルミニウム・シンジケートが設立された。

古河の高橋本枝は欧米からの帰国後も朝鮮、中国、東南アジアのアルミニウム鉱石の調査を続け、中国や朝鮮の有力な明礬石鉱床を確認したが、アルミナの経済的な生産には欧米と同様ボーキサイトを原料とすることが不可欠であると確信し、マレー半島ジョホール帯、リオ群島バタム、ビントアン島の調査結果に基づき、採掘願いを提出したが採掘権はすでにピリトン社などが有していて蘭印当局によって却下された。1928年 Billiton 社と交渉して開発に際しては古河に優先権を与えることを確認させ、1934年日本向けに一手販売契約が日本アルミニウム・シンジケートと締結された。日本アルミニウム・シンジケートは台湾電力などと電力を契約し、1935年、ビントアン島ボーキサ

イトによるバイヤー法アルミナ生産のための日本アルミニウムを設立し、台湾高雄にアルミナ工場、電解工場を建設した。新会社には三井、三菱、古河、台湾電力などが出資した。年産6,000トン規模で生産を開始した。一方、住友は1934年独自に住友アルミニウム精錬を設立した。1938年ピリトンとの契約は日蘭商事が窓口になり、ビントアン島ボーキサイト ($Al_2O_3: 55 \sim 56\%$, $SiO_2: 3 \sim 4\%$, $Fe_2O_3: 9 \sim 11\%$)¹⁸⁾ は日本アルミニウム以外に日本曹達や住友アルミニウム精錬にも販売された。1941年の太平洋戦争と共に古河鉱業が軍から委託され鉱山運営に当たった。

1935年、三井、三菱、古河の共同出資で設立された日本アルミニウムは、ビントアン島のボーキサイトを原料としてわが国最初のバイヤー法による会社となった。日本電工、住友化学も1937年頃からコスト的に有利なボーキサイト原料に転換した。1936年には日本曹達、満州軽金属の二社が、1937年には東北振興アルミニウムがアルミニウム製錬に進出した。朝鮮窒素は計画したもの、操業まで行かないうちに終戦となった。アルミニウム製錬工業創始期における各社の状況を表5.1にまとめる^{28), 29)}。

1939年古河電工と東京電灯との共同出資で日本軽金属(株)が設立され、地金生産は年産能力5.4万トンをもつわが国最大のアルミニウム製錬会社が出来た。1933年から1945年までの日本のアルミニウム生産量を表5.2にまとめる^{28), 29)}。終戦時にはわが国の地金生産能力は年間、内地13万トン、外地（朝鮮、台湾）5.4

表 5.1 アルミニウム製錬工業創始期における製錬会社の状況^{28), 29)}

会社名	住友アルミ	日本電工	日満アルミ	日本アルミ	日本曹達	朝鮮窒素	満州軽金属	東北振興アルミニウム
資本金	1,000万円	5,000万円	1,000万円	1,000万円	1,600万円	800万円	2,500万円	1,000万円
設立年月日	1934年6月 (昭和9年)	1938年 (昭和12年)	1933年11月 (昭和8年)	1935年6月21日 (昭和10年)	-	-	1936年11月10日 (昭和11年)	1936年11月10日 (昭和11年)
生産能力	3,000 t	7,000 t	5,000 t	6,000 t	3,000 t	4,000 t	4,000 t	1927年12月23日 (昭和11年)
設立時	1,500 t	5,000 t	3,000 t	6,000 t	2,000 t	4,000 t	4,000 t	4,000 t
将来	3,000 t	10,000 t	-	14,000 t	6,000 t	-	10,000 t	-
操業開始	1936年 (昭和11年)	1934年1月 (昭和9年)	1936年1月 (昭和11年)	1936年11月29日 (昭和11年)	1937年5月1日 (昭和12年)	-	1938年6月 (昭和13年)	-
アルミ製造工場名	住友化学 飾磨化学	横浜工場	岩瀬工場	高雄工場	高岡工場	興南工場	撫順工場	-
原鉱石名	明ばん石	明ばん石	ばん土頁岩	ボーキサイト	ボーキサイト	明ばん石	ばん土頁岩	-
原鉱石鉱山	朝鮮玉理山	朝鮮声山	満州煙台	蘭印	蘭印	朝鮮加沙里	煙台、小市	-
アルミ製造法	住友法 浅田谷口法	岡沢、田中法 (工試法)	鈴木、田中法 (理研法)	バイヤー法	自社技術	乾式法(曹達石灰法)	硫安法 (乾湿併用法)	-
電解工場名	新居浜工場	大町工場	岩瀬工場	高雄工場	高岡工場	興南工場	撫順工場	-
電極製造	自給	自給	自給	自給	自給	自給	自給	-
氷晶石供給	購入	購入	購入	購入、自給	自給	自給	自給	-
電力供給先	四国中央電力	自家発電 東信電気	日本海電力 県電	台湾電力	日本電力	自家発電	炭礦電力	-

出所：中島崇行、村津寿美男『アルミ業界』補足

表 5.2 戦前の日本におけるアルミニウム生産量^{28), 29)}

(1) 内地におけるアルミニウムの生産量

(単位 t)

会社名	1933年 (昭和8年)	1934年 (昭和9年)	1935年 (昭和10年)	1936年 (昭和11年)	1937年 (昭和12年)	1938年 (昭和13年)	1939年 (昭和14年)	1940年 (昭和15年)	1941年 (昭和16年)	1942年 (昭和17年)	1943年 (昭和18年)	1944年 (昭和19年)	1945年△ (昭和20年)
日本軽金属(浦原)	—	—	—	—	—	—	—	2,024	10,219	16,524	34,604	24,793	1,709
〃(新潟)	—	—	—	—	—	—	—	217	6,880	14,739	19,284	12,844	200
日本曹達	—	—	—	—	953	2,753	4,413	5,090	5,418	9,119	10,390	8,723	349
昭和電工(喜多方)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	166	5,061	765
〃(大町)	19	1,002	2,997	3,533	6,168	8,995	9,464	10,233	16,276	19,685	21,655	13,740	439
〃(富山)*	—	—	214	1,187	3,471	3,517	3,289	3,713	3,829	5,531	5,834	5,304	987
住友アルミ	—	—	—	872	1,066	2,494	3,113	6,971	11,453	16,443	18,668	15,421	955
東北振興アルミ	—	—	—	—	—	—	1,379	2,372	2,008	3,170	3,456	2,368	0
計	19	1,002	3,211	5,592	11,658	17,759	21,658	30,620	56,080	85,211	114,057	88,254	5,404

(注) △ 4月1日から6月30日まで
* 1935~42年(昭和10~17)日満アルミは昭和電工に買収される

(2) 朝鮮および台湾におけるアルミニウム生産量

(単位 t)

会社名	1936年 (昭和11年)	1937年 (昭和12年)	1938年 (昭和13年)	1939年 (昭和14年)	1940年 (昭和15年)	1941年 (昭和16年)	1942年 (昭和17年)	1943年 (昭和18年)	1944年 (昭和19年)	1945年△ (昭和20年)
朝鮮軽金属*	—	—	—	—	—	582	2,266	3,579	2,838	382
三井軽金属**	—	—	—	—	—	—	—	5,690	6,009	328
日本窒素	—	—	—	240	1,481	2,538	2,100	3,260	4,096	533
計	—	—	—	240	1,481	3,120	4,366	12,529	12,943	1,243
日本アルミ(花蓮)	—	—	—	—	—	329	1,415	3,813	1,638	0
〃(高雄)	210	2,776	4,608	7,661	8,762	12,218	12,083	10,685	7,563	0
計	210	2,776	4,608	7,661	8,762	12,547	13,498	14,498	9,201	0

(注) △ 4月1日から6月30日まで
* 1941~43年(昭和16~18)、朝鮮理研は朝鮮軽金属となる。
** 1943年(昭和18)、東洋軽金属は三井軽金属となる。
出所：中島崇行、村津寿美男『アルミ業界』

万トンの規模に達し、米国、カナダ、ドイツに次いで世界第4位を占めた⁶⁾。その需要は軍需に極めて偏っていた。

日本の製錬、圧延関係のアルミニウム企業の戦前・戦後の発展過程を図 5.17 に纏める。

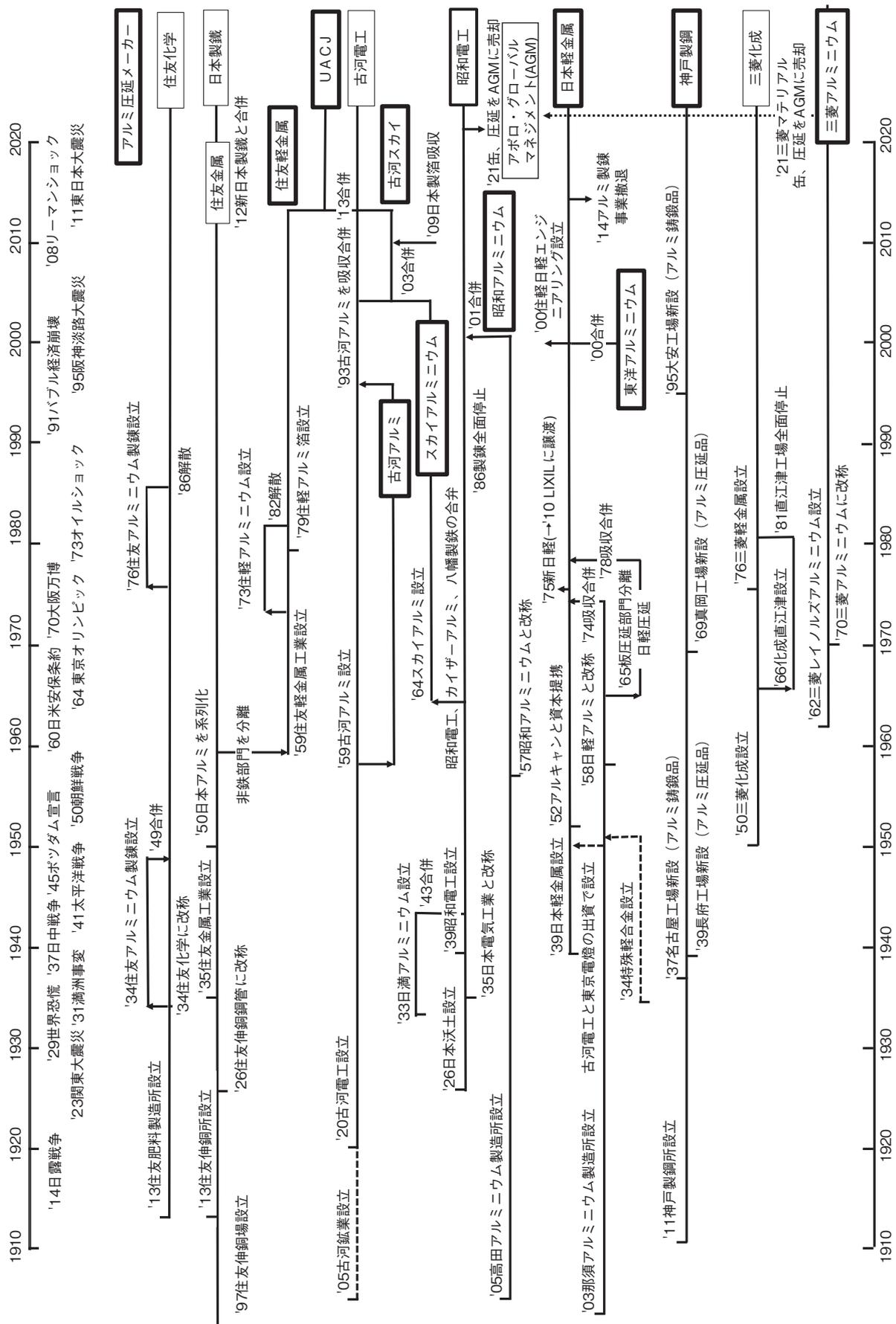


図 5.17 日本の製錬、圧延関係のアルミニウム企業の戦前・戦後の発展過程⁶⁾ (1970 以降は原図に著者追記)

参考文献

- 1) 竹内勝治：アルミニウム合金展伸材—その誕生から半世紀—，軽金属溶接構造協会，(1986).
- 2) 竹内勝治：技術の歩み，住友軽金属工業株式会社，1995. (非売品)
- 3) 吉田英雄：住友軽金属技報、53 (2012), 60-78.
- 4) 吉田英雄：住友軽金属技報、54 (2013), 264-326.
- 5) 小林藤次郎：アルミニウムのおはなし，日本規格協会，(1985)，20.
- 6) 佐藤眞住、藤井清隆著：現代の産業アルミニウム工業，東洋経済新報社，(1968).
- 7) 軽金属工業発達史 (その1)，航空機用軽金属材料について：軽金属 No.6 (1953-2)，103-137.
- 8) 秋本実：日本飛行船物語，光人社 NF 文庫，光人社，(2007)，296.
- 9) 航空70年史-1，ライト兄弟から零戦まで，1900-1940，朝日新聞社，(1970)，42.
- 10) <http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html> (2021.11.15)
野沢正編：日本航空宇宙工業会監修，日本航空機総集 (中島篇)，改訂新版，出版協同社，(1983) .
- 11) 松崎豊一，鴨下示佳：図説 国産航空機の系譜上，グランプリ出版，(2004)，59.
- 12) 桂木洋二：歴史のなかの中島飛行機，グランプリ出版，増補新訂版，(2017)，110.
- 13) 牧野光雄：飛行船の歴史と技術，成山堂書店，(2010)，105.
- 14) <https://www.waseda.jp/fsci/zaiken/about/history> (2021.12.2)
- 15) http://underzero.net/html/tz/tz_213_1.htm (2021.11.15)
- 16) 名古屋都市センター，ニュースレター Vol.62 (2004.12)
- 17) 吉田英雄：軽金属，66 (2016)，136-149.
- 18) 清水啓：アルミニウム外史 (上巻)，戦争とアルミニウム，カロス出版，(2004).
- 19) 森永卓一：アルミニウム製錬，日刊工業新聞社，(1968).
- 20) 森永卓一：軽金属，25 (1975)，30-40.
- 21) 置村忠雄編：軽金属史，金属工業調査会，軽金属協議会，(1947).
- 22) 西村秀雄：アルミニウム及其合金，共立社，(1941)，7.
- 23) 岩崎廣和：Chemistry & Chemical Industry，67 (2014)，599-601.
- 24) 村仁信編著：彼方の礬土，—満洲軽金属・その誕生から終焉まで—，満洲軽金属製造株式会社，社友しろかね会，(1996). アルミニウム協会に保管。
- 25) 内野正夫：軽金属時代，No.372 (1965, 7号)，27-30.
- 26) 森永卓一：火鍋子，カロス出版，(1965)，「舊満洲國に於ける軽金属工業の實相」，軽金属時代，(其の1) No.186 ~ (其の9) No.194 を集め，その他の海外訪問記と合本したもので，アルミニウム協会に保管。
- 27) 未理周平：消えた理想郷—先端コンビナート都市・撫順の成長と「終末」，丸善プラネット，(2010).
- 28) 中島崇行，村津寿美男：産業界シリーズ，アルミ業界，教育社新書，(1976).
- 29) 秋津裕哉：わが国のアルミニウム製錬史にみる企業経営上の諸問題，建築資料研究社，(1995).

6 | 日本のアルミニウム合金の研究開発

本章では京都大学の西村秀雄教授と住友金属の研究を紹介する。住友金属の五十嵐勇は西村と同じ1892年の生まれで、同じ京都大学の出身であるが、西村は工学部で五十嵐は理学部出身という違いがある。

す^{4)~7)}。時効硬化の研究では多くの日本人研究者も活躍していることがわかる。

6.1 京都大学教授 西村秀雄の状態図の研究、S相の発見

6.1.2 京都大学教授西村秀雄の状態図の研究、S相の発見

ここではAl-Cu-Mg合金の研究に関して、主として京都大学の西村の研究を紹介する。

6.1.1 時効析出の研究

京都大学の西村(図6.1左)は、1925年頃、銅マグネシウムを含んだ合金を調べようとして、状態図の研究を始めたが、その頃まだ日本にマグネシウムはできておらず純粋なものが手に入るのが困難な状況で研究は中断したことを述べている⁸⁾。この当時「デュラルミンの時効の原因は(NPLのゲラーの研究で)、 Al_2Cu と Mg_2Si という化合物の析出に関係したものと考えられていた。硬化の機構はとにかく、この化合物がアルミニウムに固溶していたものが時効によって析出する過程に硬化が生じる、と信じられていた。しかし、実際 Al_2Cu のみを含むアルミニウム銅合金も、 Mg_2Si のみを含むアルミニウム合金も、どれも焼入れて常温では時効をあまりしない。 Mg_2Si を含む合金

公表されたデュラルミンの研究は、1921年(大正10年)9月に本多光太郎のもとで研究を行っていた今野清兵衛博士の発表が最初である^{1)~3)}。11月には、海軍航空技術廠の大谷文太郎が学会館で軽合金という名称を用いて発表した。軽合金という名称が使われたのはこれが最初である³⁾。NPLが1921年8月英国機械学会でE合金やY合金、Al-Mg-Si合金を報告したのとはほぼ同時期である。住友の杉浦が発表したのは海軍との秘密保持の関係で1925年になってからである。西村秀雄および大日方一司の論文に掲載された時効硬化研究の発展史に若干追記した年表を表6.1に示

表6.1 時効析出研究の歴史(西村、大日方の表に追記)^{4)~7)}

年	研究者	主要研究事項	文献
1906 ~1911	Wilm	デュラルミン時効硬化現象の発見。	Metallurgie, 8(1911), 225
1919	Merica, Waltenberg & Scott	デュラルミンの時効現象はAlに対する Al_2Cu の固溶度変化に起因し、硬化の原因は Al_2Cu の析出による。	Sci. Pap. Bur. Stand., No.347(1919), AIME(1919), 913.
1921	Jeffries & Archer	迂り干渉説の提唱。	Chem. Met. Eng., 24(1921), 1057.
1921	Rosenhain, Archbutt, Hanson & Gayler	Al-Al ₂ Cu-Mg ₂ Si擬三元系状態図を決定。デュラルミンの時効硬化には Al_2Cu と Mg_2Si の固溶度の変化が寄与しているとした。	Eleventh Report of Alloy Research Committee, J. Inst. Mech. Eng. London, 26(1921), 321. J. Inst. Metals, 29(1923), 491.
1922	今野清兵衛	デュラルミンの時効硬化は析出前の特殊な中間状態(β)に起因する。 X線により結晶格子に変化がないことを指摘。	東北帝大理科報告, 11(1922), 269. 金属の研究, 2(1925), 13.
1925	杉浦綱三	時効硬化を固溶体内の変化と考えた。	デュラルミンの研究並びに単一固溶体合金の健全性及低温軟化による硬化効果に就て
1928	後藤正治	化合物を作るべき原子の変位によって格子に歪みが生じ、これが硬化の原因。	航空研究所彙報, 39(1927), 271. 合金学 (1929), 267.
1929	Gayler & Preston	化合物の析出に基づく格子歪みによって硬化。格子歪みを精密X線法により推定。	J. Inst. Metals, 41(1929), 191.
1930	本多光太郎, 小久保定次郎	デュラルミンの時効硬化は過飽和固溶体中における溶質原子の移動のため格子に歪みを生じるのが原因。	金属の研究, 7(1930), 343. 東北帝大理科報告, 24(1930), 365.
1926 ~1930	Schmid & Wassermann	時効中 X線的には何らの変化を認められないゆえに析出説を否定。	Naturwiss., 14(1926), 980. Metallwirtsch., 7(1928), 1329; 9(1930), 421.
1930	Meissner	含ケイ素超デュラルミンの研究発表。	J. Inst. Metals, 44(1930), 204.
1931	Hengstenberg & Wassermann	デュラルミンの時効中における反射線の幅の広がり測定。溶質原子が過飽和固溶体内の一部に集合する結果と推定。	Z. Metallkunde., 23(1931), 114.
1935	Wassermann & J. Weert	Al-Cu合金の人工時効中に、 Al_2Cu の析出に先立ち中間相(正方晶)の出現することを発見。	Metallwirtsch, 14(1935), 605.
1936 ~1937	西村秀雄	Al-Cu-Mg三元状態図の決定。デュラルミンの時効硬化は主としてS化合物のAlに対する溶解度の変化に起因する。	日本鉱業誌, 52(1936), 381. 日本金属学会誌, 1(1937), 8, 59, 262.
1936	鳥羽安行	24S型超デュラルミンの時効及ぼすSiの影響の発表。	古河電工, (1936), B号, 1.
1936	Fink & Smith	Debye-Scherrer写真において中間相の干渉線を認め、平衡相 Al_2Cu の θ 相に対し、この新相を θ' と名づけた。	AIME, Met. Div., 122(1936), 284.
1937	五十嵐勇	Al-Cu-Mg合金のCu, Mg量を変えて強度分布を明らかにした。	住友金属工業, 研究報告, 第2巻, 第10号(1937), 991.
1938	Preston	200°Cで現れる中間相は母相の{001}面に平行な平板状の外形をとることを明らかにした。 Al-Cu合金単結晶に単色 X線を照射することで時効初期のAl-Cu合金溶質原子の集合体を発見。	G.D. Preston: Phil. Mag. 26(1938), 855. Nature, 142(1938), 570.
1938 ~1939	Guinier	X線小角散乱法を用い時効初期のAl-Cu合金で、溶質原子の集合体を発見。 初期の時効変化はGPゾーンの形成で、高温の弱い硬化は中間相の析出であることを明らかにした。	Nature, 142(1938), 569. J. Inst. Metals, 6(1939), 177.



図 6.1 京都大学教授西村秀雄と彼の著書

などは全く硬化を示さないのである。これが両方の化合物を含んだ時に、どうして常温で硬化が著しいのか不思議でならなかった。アルミニウム、マグネシウム、銅の三元系合金になると、どうしてジュラルミンのように常温時効が進むのか、この疑問に答えるような研究はなかった⁹⁾ので、1934年頃、状態図の研究を再開した。「その結果 Al と平衡すべき三元化合物に S と名称を与え、その固溶度が 24S の時効の原因をなすことを提唱した」と述べている¹⁰⁾。

西村は日本金属学会誌第 1 巻第 1 号 (1937) に「Al を主成分とせる Al-Cu-Mg-系合金の状態図に就て」¹¹⁾、同第 2 号に「Al を主成分とせる Al-Cu-Mg-系合金の時効硬化に就て」¹²⁾、同第 7 号に「超ジュラルミンの

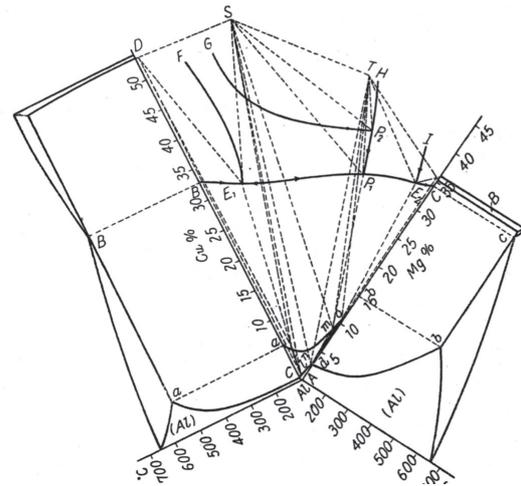


図 6.2 Al-Cu-Mg 系三元状態図^{11), 14)}

研究 (第 1 報)¹³⁾ を立て続けに発表している。1941 年にはこれらの研究成果も入れて、「アルミニウム及其合金」(図 6.1 右)¹⁴⁾ を上梓している。この本は、アルミニウムの歴史から製錬、各種アルミニウム合金の状態図と性質、鑄造から加工 (表面処理、溶接) まで、基礎からわかりやすく書いている。これだけ全般にわたり、一人で執筆していて、アルミニウムに関して幅広い関心があったと推察される。この関心の広さは随筆「軽合金史」にも反映されている。この本では一章を割いて「ジュラルミン及超ジュラルミン」について解説している。図 6.2 は西村教授の研究によってでき

コラム 西村秀雄

1892 年京都市に生まれる。1918 年 7 月京都帝国大学採鉱冶金学科卒業、三菱鉱業研究所に勤務後、約 2 ヶ年で母校に戻り、講師、助教授を経て 1930 年京都帝国大学教授に昇進、工学研究所長、工学部長を歴任する。1955 年退官し、京都大学名誉教授となる。この間、金属材料学および金属加工学の講義および研究を担当する。退官後も財団法人応用科学研究所長として人材の育成に尽力された。1962 年日本金属学会賞、1963 年本多記念賞を受賞、1970 年日本学士院会員に選出、1968 年勲二等旭日重光章が授与され、1978 年に 86 歳で逝去された。村上陽太郎教授によると「絵や書をよくされ、平素はご多忙でゆっくり絵を描かれる時間的余裕もないが、たまの日曜日にとか夏休みなど暇を作ってお書きになる。絵をご覧になることも好きであるので、展覧会等には研究室全部をつれて頂いて、先生からお得意のご説明を伺い、一向に知識のないわれわれにも楽しめる機会に恵まれた」とのことである。古河電工におられた田中道夫氏によると「先生がパリーに御留学中一日お宅を訪問しますと、部屋中絵であり、冶金の学者の部屋のようではありませんでした」といわれるくらい絵画や書にも造詣の深い文化人でもあった。「軽金属時代」の「軽合金史」にも自らのスケッチを掲載していた。晩年には都会の喧騒を避け、小豆島に自ら設計した「碧水居」を訪ねては随筆などの執筆、書画などの創作をした。今回参考にした「軽金属時代」に発表した膨大な「随筆 軽合金史」等々は単行本として出版される予定だったが、「軽金属時代」の廃刊によって実現しなかったとのことで残念なことである。アルミニウムのみならず金属組織学、金属加工学が学問として確立し始めた頃の議論が今でも貴重で参考になる。是非、学会が中心になって復刻して欲しいものである。

た Al-Cu-Mg 系三元状態図である。Cu:Mg の量比を変えた実験を行い、Al 固溶体から Al_2Cu および S 化合物の析出する区域の合金では常温時効による硬化の割合が大きく、Cu 量 4% を標準とすると Mg 量 0.5 ~ 1.0% を含む合金の常温時効硬化の割合が高く、Mg 量が 1.5 ~ 2.5% 程度を含む合金では時効硬化によって硬度が最高値に到達することを明らかにした¹⁴⁾。S 相を見出し Al-Cu-Mg 系合金の時効析出現象を解明したことは西村教授の大きな業績であり、日本の金属学のレベルの高さを示したものである。西村秀雄の京都の文人墨客としての一面をコラムに示す¹⁵⁾。

6.2 住友の超ジュラルミン開発

6.2.1 陸軍・海軍との共同研究

住友伸銅所では日本で初めて工場に研究課を新設した杉浦稠三を継いで、ジュラルミンや伸銅などの研究を行ってきたのが、松田^{つとむ}博士である。さらに松田博士の後を受けて田邊友次郎博士、その後に五十嵐勇博士が登場してくる。当時、ジュラルミンは引張強さ 42 ~ 45 kg/mm² (410 ~ 440 MPa) 程度で、この強度レベルを超える合金は合金系に拘らずどれも超ジュラルミンと呼ばれた。日本においても、1931、32 年頃になると飛行機の性能向上につれて、材料の比強度の向上が要求された。

1933 年 10 月の陸軍航空本部技術部（立川）への出張報告（松田、研究報告 No.2270, 1933.10）や研究報告「超 Duralumin 見本提出ニ至ルマデノニ・三ノ試験」（五十嵐、中田、研究報告 No.2363, 1933.12）をみると、この当時、二種類の「超」ジュラルミンが記されている。五十嵐博士らの社内報告では第一種超ジュラルミンとして、Al-4.2%Cu-0.70%Mg-0.65%Mn-0.65%Si-0.45%Fe 合金が、第二種超ジュラルミンとして、Al-6.0%Mg-4.0%Zn-0.45%Mn-0.15%Si-0.36%Fe 合金の試験結果が報告されている。前者の第一種超ジュラルミンは含ケイ素超ジュラルミンで、後者の第二種超ジュラルミンは Al-Mg-Zn 系合金である。後者の合金は海軍技術研究所の五百旗頭中佐の指示によるものである（「五百旗頭式超 Duralumin 製作に関して海軍技術研究所へ出張報告」, 五十嵐, 研究報告 No.2167, 1933.8.7）。この五百旗頭中佐の下に、二年後超々ジュラルミンを五十嵐勇博士と一緒に開発することになる北原五郎技手がいた。

6.2.2 世界の動向調査

田邊博士は 1933 年 8 月から 1934 年 4 月にかけて、松田博士も 1935 年 10 月から 1936 年 4 月欧米に相次いで出張し航空機用アルミニウム合金や銅合金の調査を行った。この背景としては、アルミニウム合金では各国で航空機用の超ジュラルミンやピストン用合金の開発がしのぎを削っていたことによるものと思われる。住友金属工業・研究報告に掲載された田邊博士の報告、「欧米に於ける航空機用非鉄合金に就て」¹⁶⁾ では、当時の状況を「ご承知の如く世界は其の何れの国たるを問わずナショナリズムの波澎湃として其岸を洗ひ、工場見学は極めて困難で、航空機に関して殊に甚しい。就中ドイツに於てはゲーリングが航空相として極度の秘密主義を採り航空研究所の見学すら思ふに任せぬ」とある。こうした状況の中、精力的に欧米を視察してきた。

ドイツに於ける軽合金については、「之は独りドイツのみではないが、航空機用強力鍛錬アルミニウム合金としては依然としてデュラルミンが斯界の王座をすべっていない。併しながら、引張強さ 45 kg/mm² (440 MPa) 以上、出来得べくんば 50 kg/mm² (490 MPa) 以上のものを得んとする即ち超デュラルミンの研究が盛んである」¹⁶⁾ と。デュレナ社では従来の超ジュラルミン 681ZB (Al-4.2%Cu-0.9%Mg-0.6%Mn-0.5%Si) とその強度 10% 向上させた DM31 (Al-4.2%Cu-1.2%Mg-1.2%Mn-0.5%Si) と称する超ジュラルミン合金を開発している。米国に於ける軽合金では、アルコアの開発に係わるもので、「現今最も注目すべきは 24ST 及び 24SRT である。その組成は Al-4.2%Cu-1.5%Mg-0.6%Mn で、これらのクラッド材もある」と報告している。英国では RR56 や RR59 のピストン材を調査している。表 6.2 は欧米各国の超強力鍛錬合金一覧を示す¹⁶⁾。

6.2.3 米国 24S の情報と調査

1933 年頃には米国の 24S 合金の情報が入ってくると、住友は海軍航空本部からの「御注意」もあり、9 月に Alcoa 製の 24SRT 材を注文して、12 月には入手しすぐに確性調査を行っている。12 月の「米国製 24SRT 板 試験成績 (第 1 報)」(松田、研究報告 No.2381, 1933.12) では、成分に関して、Al-3.98%Cu-1.59%Mg-0.46%Mn-0.16%Si-0.22%Fe で、「注意すべき点は、普通のジュラルミンに比し、① Mg の量の非常に大なること、② Si の量の小なること、③ Fe の量の小なること、④ 各板の成分よく一致せること、等で、Mg は焼入状態における引張強さ、降伏点を増し、伸びをも増加する性質を有する点より特にその量

表6.2 欧米の超強力鍛錬合金一覧¹⁶⁾

		Cu	Ni	Mn	Mg	Fe	Si	Ti	Cr	耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %
独	DM31-1(*1)	3.5-4.5 3.66		0.9-1.5 1.17	0.9-1.5 1.38	0.29	0.2-0.9 0.65			310-390	450-510	16-10
	DM31-2(*2)									390-410	490-510	12-10
独	681ZB-1(*1)	4.2		0.6	0.9		0.5			270-330	410-450	18-12
	681ZB-2(*2)									350-370	450-470	12-10
米	24ST(*1)	4.2		0.6	1.5					290	450	20
	24SRT(*2)									360	470	13
米	C17ST	4		0.5	0.5		1.25			340-380	430-480	14-8
仏	Avial	1.5-3.5	0.5-1.5		0.25-1.0		0.5		0.5-1.0	290-370	430-530	20-10
英	DTD252 Duralmin F	3.5-4.7		0.4-1.5	0.4-1.5	<0.7	0.7-1.5		340	>430		
英	RR56	1.5-3.0 2	0.5- 1.51.3		0.4-1.0 0.8	0.8-1.5 1.35	<1.0 0.6	<0.2 0.08		380-420	430-490	20-10

(*1)-1, ST: 焼入れ時効 (*2)-2, SRT: 焼入れ時効+常温加工

を増加したるもの・・・」と記している。24SRT材は従来の超ジュラルミンよりも、Mg量が多く、Si量の少ないことが特徴であった。入手した材料は引張強さ 48 kg/mm² (470 MPa)、耐力 40 kg/mm² (390 MPa)、伸び 16%であるが、反復屈曲回数がかなり小さいことが指摘されている。これは焼入れ後常温圧延を行うことで耐力が上昇したことによるものと考えられた。

6.2.4 ケイ素含有超ジュラルミン合金

アルコアの24Sを調査したにもかかわらず、1934年当時の研究報告書を見る限り、住友では、ドイツの681ZBやDM31合金と同様に焼入れ焼戻しするケイ素含有超ジュラルミンが研究開発の対象であり、前述の第一種超ジュラルミンをSD (Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si)、またSA1 (Al-1.2%Mn-0.8%Cu)を被覆した合わせ板をSDCと称して、これらの合金を社内で制定したばかりで、これらの合金の評価を専ら行っていた。制定された時期は明確でないが、SDCの名称が社内の研究報告書で初めて使われたのが1934年9月8日の報告書からである。1934年8月31日海軍航空廠にて、SDC研究会が開催されているが、ここでの議論も前述のケイ素超ジュラルミンSDC、45 kg/mm² (440 MPa)ジュラルミン板材の特性評価と各種形状での強度試験結果についてであった(「SDC研究会概況」(8月31日海軍航空廠、研究報告No.2731, 1934.9.18)。1935年2月付けの研究報告(松田、研究報告No.2965, 1935.2)をみると、「超ジュラルミン及超ジュラルミンクラッドノ規格ハ板ニ就テハ、サキニ海、陸軍相次イテ制定発布セラレ、陸軍ニ就テハ、最近更ニ、管及棒ノ規格発布セラレ、超ジュラルミンクラッドノ規格モ亦近ク発布ノ筈デアル。・・・参考トシテ米国の24S系合金ノ規格モ知ラレ居ル丈ケ収録シタ」とあり、SD、SDC規格制定の動向が書かれている。成分規格をみると、海軍と陸軍で異なり、海

軍はCu: 3.5 ~ 4.5%、Mg: 0.4 ~ 1.0%、Mn: 0.4 ~ 1.0%、Si: 0.4 ~ 1.0%、Fe: 0.6%以下で、陸軍はCu: 4.0 ~ 4.5%、Mg: 1.0%以下、Mn: 1.0%以下、Si: 1.0%以下、Fe: 0.7%以下である。クラッド材の被覆合金は、海軍、陸軍ともに同じで、Mn: 1.0 ~ 2.0%、Mg: 0.4 ~ 1.0%、Cu: 0.25%以下、Si: 0.3%以下、Fe: 0.6%以下である。ちなみに、米国の24Sはこの報告書によるとCu: 3.6 ~ 4.7%、Mg: 1.25 ~ 1.75%、Mn: 0.3 ~ 0.9%である。

6.2.5 24Sへの方向転換

しかしながら、1935年5月頃からの社内の報告書を見ると、T3およびT3C合金の試験結果が報告されるようになる。「従来、SD及SDC板ニ代ワツテ、コノ数ヶ月以前カラ、新配合ノT3(従来、SDヨリMg多シ)並ニ之ノ中味トスルT3C板ノ製造ガ開始セラレタ」とある(「T3及T3C板ニ就テ(第1報)」(東尾、研究報告No.3200, 1935.6)。住友軽金属の年表と符合する。T3合金押出材の成分はAl-4.14%Cu-1.36%Mg-0.68%Mn-0.14%Si-0.28%Fe(武富、研究報告No.3202, 1935.6)で、まさに24S合金である。

この頃から、住友は超ジュラルミンに関して、大きく舵を切ることとなる。当時、松田孜研究部長のもとで副長をしていた田邊友次郎博士は7月31日付けの研究報告「所謂「超ジュラルミン」ヲ截ル」(研究報告No.3306, 1935.7.31)で次のように総括して今後の方向を述べている。

「1) 超ジュラルミンには、大別して、Al-Cu-Mg系、Al-Zn系、Al-Mg系があるが、薄板の工業生産可能なものはAl-Cu-Mg系に限られている。

2) 現行のSD合金(筆者注: 含ケイ素超ジュラルミンのこと)は焼入れ焼戻しを行うが殆ど完璧に近い。Cu、Mgをさらに増加すれば、多少靱性は犠牲となるが、より高い強度が得られる。

3) 米国の24Sは99.8%のような高純度地金が相当自由に使える国柄で発達したものである。大勢ならば

致し方ないが、日本がこれを採用するには疑問を持つ。米国でも 24S は高価すぎて、一般材として最近 SD 合金そっくりの 27S (Al-4.5%Cu-0.8%Mg-0.8%Si) を採用したのではないか。

4) そうは言っても、Mg 量を 1.5% まで上げたことはアルコアの努力に深甚なる敬意を表せざるを得ない。かのデュレナ社もデュラルミンの Mg 量の範囲を 0.2-0.7% から 0.2-2.0% と上げている。世界の大勢に我等は盲目であってはならぬ。将来、高級超デュラルミンは Si フリー、Fe フリーの字義通り、Al-Cu-Mg 合金によって支配されるべきは確信にて疑わざる処。

5) 我等は、我国は、徒に 24S に心酔せず、欧州各国の事例を参照し、我国独自の立場を、今しばらくとるべきではあるまいか。99.8% 地金の輸入が途絶えた暁はどうするか、深く思わざるべからず。

6) Al-Zn 系、E 合金 (筆者注: 英国 Rosenhain が開発、Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn)、Scleron (Al-12%Zn-3%Cu-0.5%Mg-0.6%Mn-(0~0.1)%Li 系)、Constructal 8 (Al-7%Zn-2.5%Mg-1%Mn-0.2%Si 系)¹⁷⁾ など圧延が困難として、すでに過去の遺物となっているが、再認識して合金開発すべきではないか。五十嵐君発見の Al-Zn-Li 系は何とか完成させたいものである。Al-Mg 系も地金純度が上がると可能性はあるので、注目を忘れるべからず。」

この直後に、五十嵐博士の超々ジュラルミンの研究開発開始の意思を示した 8 月 10 日付けの「強力軽合金の探求 (No.1)」(研究報告 No.33326, 1935.8.10) がでてくる。

14S 系超ジュラルミンから 24S に転換した背景には、焼戻しが必要とのことでコストが高くなることや、

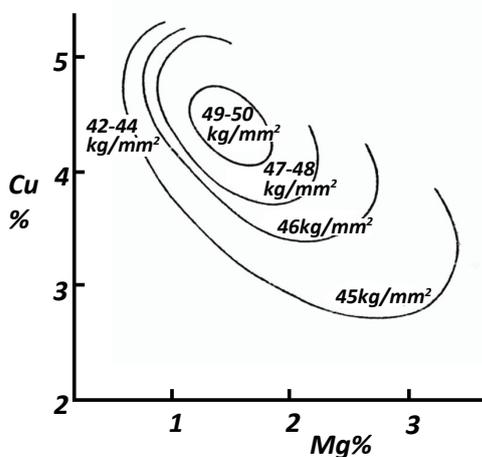


図 6.3 ジュラルミン系合金の引張強さに及ぼす銅、マグネシウム添加量の影響^{14) 21) 22)}

14S 系が T6 で使用するために、24S-T3 に比べて伸びが比べて小さくなることや粒界腐食性が劣るといった性能面での問題があった。しかしながら住友が容易に 24S 系に踏み切れなかったのは、当時、国策として国産アルミニウムを使うことが前提とされていたが、当時日本に併合されていた満州の礮土頁岩や朝鮮半島の明礮石から製錬した国産アルミニウム地金には不純物が多い問題もあった^{18), 19)}。1935 年、台湾の高雄に日本アルミニウムのアルミナ、電解工場が設立され、オランダ領ビンタン島からのボーキサイトが入手できるようになって、不純物の問題は解消された。しかし、1940 年 5 月にオランダがボーキサイトの禁輸措置を講じたことも引き金となって、日本軍の仏印進駐となり先の戦争に突入したと言われている^{19), 20)}。

6.3 五十嵐博士の 24S の研究

6.3.1 24S 型超ジュラルミンに関する研究

五十嵐博士は、1937 年、住友金属工業・研究報告に「超デュラルミン“SD” 及超デュラルクラッド“SDC” に就て」を報告している²¹⁾。社内の研究報告書を見ると、研究自体は 1935 年頃行われている。丁度、住友が超ジュラルミンとして 24S に舵を切った頃である。五十嵐博士は 99.8% 地金を使用し、Mn 量は 0.6% と固定して、Cu 量、2.4 ~ 5%、Mg 量を 0.5 ~ 3.8% と変化させ、505 ~ 515°C から水焼入れ後 7 日間時効したときの強度マップを図 6.3 に示す^{14), 21), 22)}。この図から、Cu、4.1 ~ 4.7%、Mg、1.2 ~ 1.8% で引張強さ 50 kg/mm² が得られることがわかる。

しかしながら残念なことに、西村教授、五十嵐博士などの研究はいずれもアルコアの 24S が発表された後のことである。

不純物の Fe の影響も明らかにされた。田邊博士のもとで超ジュラルミンを研究していた中田兵次は「時局の進展と共に資源の節約が益重要な問題となってくる」として 24S に対する鉄の影響を検討した²³⁾。99.8% のアルミニウム地金を用いて鉄量を 0.2 ~ 1.2%、0.2% ごとに変化させた鋳塊を圧延により 1 mm 板にして、475 ~ 505°C で 1 時間加熱し室温時効させた材料の引張強さと伸びを図 6.4 に示す。鉄が増えることで引張強さも伸びも低下することがわかる。鉄が増加することで Al-Cu-Fe 系の晶出物や析出物が増加して、銅の濃度低下の原因となる。これらの化合物は溶体化処理では分解せずに残存し伸びの低下の原因ともなっている。

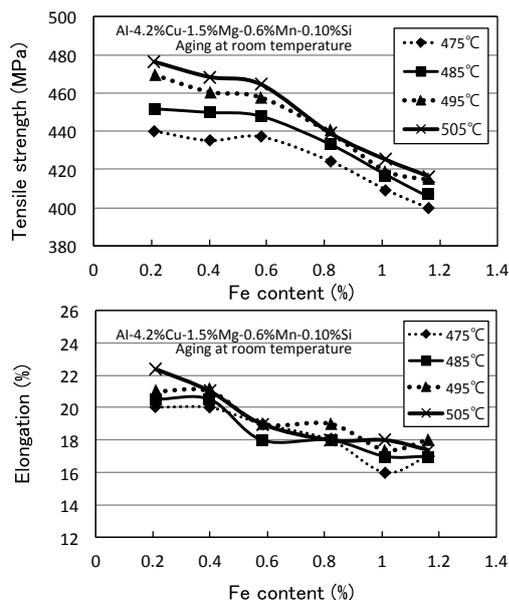


図 6.4 24S 超ジュラルミンの強度特性に及ぼす不純物 Fe 量の影響²³⁾

Si の影響については図 6.5 に示す²⁴⁾。図 6.5 は西村の著書に掲載された古河電工の鳥羽安行のデータ¹⁴⁾²⁴⁾をもとに成した図で、500°C、30 分加熱後焼入れし、7 日後の引張特性である。Si が多く含まれると常温時効後の引張強さも伸びも低くなる。超ジュラルミンに Si が多く含まれると、Mg₂Si を形成するため S 化合物を形成する Mg 量が減少し時効硬化が阻害されてくる。S 化合物は今日では Al₂CuMg と表記されている。

6.3.2 クロム添加 24S の開発

五十嵐博士 (図 6.6) は、入社当時はシルミンなどの Al-Si、Al-Si-Zn や Al-Si-Cu 系の鋳物材やザンダー (Sander) 合金、E 合金系の Al-20%Zn-3%Cu 材への 0~2.0% Mg 添加の影響を調査している。その後、銅合金、鋳物用及び鍛錬用マグネシウム合金やその耐食性に関する一連の研究も行っている。社内研究報告書を見ると、Al-Cu-Mg-Ni-Fe 系 Y 合金などのピストン用鋳物合金、ジュラルミン、Al-Cu-Si 系のラウタル (Lautal) 合金、Al-Mg-Si 系のアルジュール (Aludur) 合金、Al-Zn-Mg 系のザンダー合金、Al-Mg-Mn 系合金の 3S、4S、SA3 (Al-1.2%Mn-0.55%Mg)、Al-(5~7)% Mg 系ヒドロナリウム (Hydronalium) 合金、クラッド材などの各種アルミニウム合金の機械的性質や耐食性を一通り調査、研究している。1937 年発行の共著「軽金属及軽合金最近の進歩」(工業図書株式会社)には、これらの研究結果も一部取り入れ、「耐食性アルミニウム合金」の章を執筆している²⁵⁾。このような入社して 10 年間くらいの幅広い合金の研究がその後

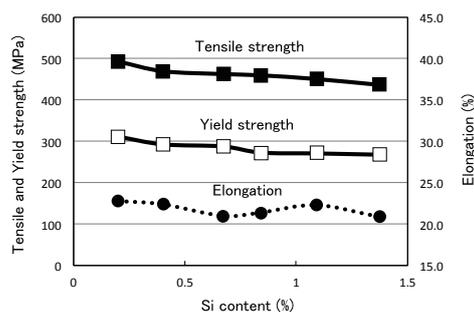


図 6.5 24S 超ジュラルミンの引張特性に及ぼす不純物 Si 量の影響^{14), 24)}

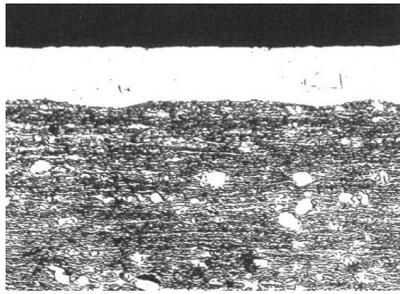
の超々ジュラルミンの開発に大いに役立っていると考えられる。

また、超々ジュラルミン開発の決め手となったクロム添加も住友では各種合金系ですでに試みられていた。1926 年 10 月 12 日の研究報告「Al-Cu-Cr 合金に就て」で、田邊博士は Al-(4~6)% Cu にクロムを 0.5~1% 添加し、焼入れままでは差はないが、焼戻しすることで強度が向上することを報告している。その後、1932 年 10 月、田邊博士の上司の松田博士も研究報告 No.1842「特殊『デュラルミン』ノ研究 (第 1 報)」及び 12 月の研究報告 No.1935 第 2 報で、各種微量元素を 1% 以下で添加し、その強度を比較し、クロムは 0.6% までは多少強度を増加させるが、多すぎると有害であることを述べている。1933 年 3 月の研究報告 No.2019 第 3 報では耐食性を調査して、ジュラルミンの耐食性を著しく改善することはないが、クロムが 0.91% 添加されると腐食による強度低下が少なかったと述べている。

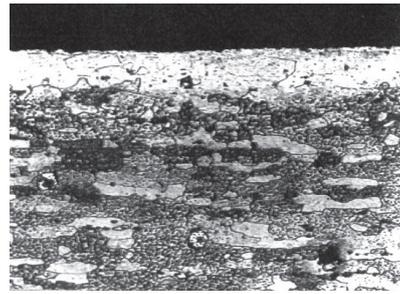
五十嵐博士も 1933 年 7 月研究報告 No.2136 で、5.5% Mg 合金に銅、クロム、コバルト、バナジウム、タンゲステン、モリブデンを添加し、強度と耐食性を比較して、銅添加は耐食性を劣化させ、クロム添加は最も



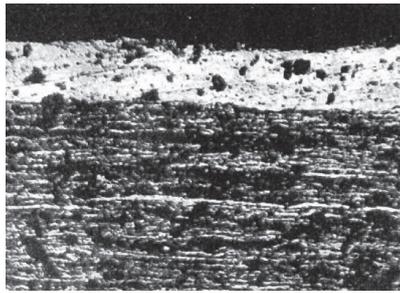
図 6.6 五十嵐勇博士 (1892-1986)



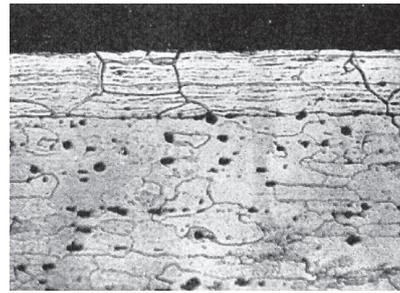
a) SDC 材圧延まま



b) SDC 材焼入れ焼戻し 510°C/1 h WQ → 170°C/22h



c) 24S クラールクラッド材圧延まま



d) 24S クラールクラッド材焼入れ 495°C/6h WQ

図 6.7 SDC 材(SD と SA3 のクラッド材)¹⁾ 1 mm 板の圧延ままと焼入れ焼戻し後、24S のクラールクラッド材 1 mm 板の圧延ままと焼入れ後の断面マイクロ組織。SDC では皮材と心材の境界が溶体化処理で銅の拡散層が形成されるため不明瞭になるが、クラールクラッド材では 6 時間の溶体化処理でも明瞭で、銅の拡散がほとんど生じていないことがわかる。

¹⁾ SD: Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si, SA3: Al-1.5%Mn-0.55%Mg、

(東尾：研究報告「米国式に作った Alclad 及 SA3-clad (SDC) に就て」(1934 年 12 月, No.2852) より)

良いと報告している。

超々ジュラルミンの開発を開始した直後の 1935 年 10 月 18 日の研究報告 No.3455「T3C 板の新 Clad 材」で、五十嵐博士は溶体化処理時に心材の 24S の銅がクラッド材の皮材（純アルミニウム）に拡散して耐食性を阻害し強度や伸びを低下させるとして、皮材へ銅が拡散しにくくするためにクロムを約 0.3% 添加した皮材 (Al-Cr 合金) を開発した。これを「クラールクラッド (Cralclad)」と称した^{22), 26)}。住友は、すでにアルコアの純アルミニウムよりも強度や耐食性に優れた皮材 SA3 (Al-1.2% Mn-0.55% Mg 合金) を開発していたが²⁶⁾、クラールクラッドではこの SA3 よりも銅の拡散が少ない結果を得ている。図 6.7 は焼入れでの溶体化処理に銅が皮材に拡散する様子を示した断面マイクロ組織である。SA3 では 1 時間の溶体化処理で皮材と心材の境界が不明瞭になるが、クラールクラッド材では 6 時間の処理でも明瞭で銅がほとんど拡散していないことがわかる。クラールクラッド材の銅の皮材への拡散量は、板厚にもよるが SDC 材に比べて約 1/20 ~ 1/5 程度であった。

1935 年 11 月 5 日の堀そうじ慥爾の研究報告 No.3480「Cr 入超ジュラルミン板」では、超ジュラルミン 24S にクロムを 0.55% 添加した合金の強度、耐食性を調査し、

耐食性でやや悪い結果がでたが、これは Al-Cr 系の化合物が多いためであろうと結論付けている。これらの試験結果をもとに、1935 年 12 月には心材の 24S にクロム 0.13%、皮材にクロム 0.23% 添加した新 SDC 材を開発した。

参考文献

- 1) 今野清兵衛：東北帝大理科報告, 11 (1922), 269.
- 2) 今野清兵衛：金属の研究, 2 (1925), 13.
- 3) 軽金属工業発達史 (其の一), 航空機用軽金属材料について, 第一回軽金属座談会記録, 軽金属, 6 (1953), 103.
- 4) 幸田成康：時効硬化研究の歩み, 合金の析出, 幸田成康監修, 丸善, (1972), 1.
- 5) 幸田成康：金属学への招待, アグネ技術センター, (1998), 135.
- 6) 西村秀雄：日本金属学会誌, 1 (1937), 59.
- 7) 大日方一司：日本金属学会誌, 3 (1939), 81.
- 8) 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其 15), 軽金属時代, No.186 (1950), 2.
- 9) 西村秀雄：随筆・軽合金史 (第 23 回), 軽金属時代, No.194 (1950), 17.

- 10) 螺秀雄：続・軽合金史（第六回），軽金属時代、No.227（1953），22.
- 11) 西村秀雄：日本金属学会誌，1（1937），8-18.
- 12) 西村秀雄：日本金属学会誌，1（1937），59-71.
- 13) 西村秀雄：日本金属学会誌，1（1937），262-270.
- 14) 西村秀雄：アルミニウム及其合金，共立社，（1941），231
- 15) 村上陽太郎：西村秀雄先生退官功績記念会記事，軽金属，No.16（1955），15.
- 16) 田邊友次郎：住友金属・研究報告，第2巻第2号（1934），147-159.
- 17) A. von Zeerleder: The Technology of Aluminium and Its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, Amsterdam, (1936), 26.
- 18) グループ 38：アルミニウム製錬史の断片，カロス出版，（1995），8.
- 19) 秋津裕哉：わが国のアルミニウム製錬史にみる企業経営上の諸問題，建築資料研究社，（1995），59.
- 20) 藤井非三四：「レアメタル」の太平洋戦争，学研パブリッシング，（2013）.
- 21) 五十嵐勇：住友金属・研究報告，第2巻，第10号（1937），991.
- 22) 五十嵐勇：航空機用材としての軽合金の研究（学位論文），大阪帝国大学（1939），37.
- 23) 中田兵次：住友金属・研究報告，Vol.4, No.4（1941），329-334.
- 24) 鳥羽安行：古河電工，（1936），B号，1.
- 25) 五十嵐勇：軽金属及軽合金最近の進歩，工業図書株式会社，（1937），182-197.
- 26) 五十嵐勇：住友金属・研究報告，第2巻，第10号（1937），991-1020.
- (注) Duralumin の日本語表記は、戦前はデュラルミン、デュラルミンと著者や文献によって異なったが、戦後はデュラルミンに統一された。論文名、引用は著者の表記に従った。

コラム 五十嵐勇

超々ジュラルミンの発明は五十嵐勇の主導によってなされたものである。この五十嵐の経歴と研究のバックグラウンドを振り返っておきたい。

五十嵐勇（1892-1986）の生家は、現在の玉名市溝上にある浄土真宗大谷派東光明寺で、父、善立（第11世住職）と母、ミキの三男四女の長男として1892年1月15日出生した。東光明寺は現在、五十嵐の末弟秀雄（第12世住職）の長男で、勇とは甥にあたる五十嵐聖が第13世住職となっている。五十嵐は1913年広島高等師範学校卒業後、台湾の中学で教鞭を執った後1919年京都帝国大学に入学、1922年同大学理学部物理学科を卒業後、30歳で住友合資会社に入社し、同伸銅所に勤務した。同年5月より翌年7月まで、住友家が本多光太郎の発明したKS鋼や研究所設立を支援した関係からか、東北帝国大学金属材料研究所に留学し、所長の本多に師事した。金属材料研究所は、1922年その前身の鉄鋼研究所が研究対象を鉄と鋼だけでなく銅合金や軽合金などにも広げるために改称されたものである。1924年には月刊誌「金属の研究」が発刊され、その第一巻には五十嵐の「焼入合金の時効に就て」や松田の「青銅、アルミニウム青銅及び真鍮の変態に就て」の論文が掲載されている。住友金属からも多くの研究者が派遣された。1935年超々ジュラルミンの開発に取り組み、1936年にはその合金特許を出願した。1939年、「航空機用材としての軽合金の研究」で大阪帝国大学より工学博士を授与された。1941年名古屋製造所研究部長、1943年住友金属工業株式会社金属研究所長兼伸銅所研究部長、金属研究所は伸銅所と名古屋軽合金製造所の研究技術部門を横断的に統括するために1943年設立、1945年技師長兼名古屋製造部技術部長を歴任し、1946年退社した。その後、東北帝国大学に講師として招聘され、翌年工学部教授、1951年秋田大学鉱山学部教授を兼務、1958年岩手大学教授、1962年定年により退職、住友軽金属工業株式会社研究顧問、1970年同顧問を退く。この間、1968年勲三等旭日中授章、1974年公益財団法人本多記念会の本多記念賞が授与された。博士は熊本市島崎で余生をおくり、1986年3月7日他界した。享年94歳であった。

7 | 超々ジュラルミンの開発

7.1 海軍からの要請による研究開発と五十嵐勇の開始宣言

1935年8月10日付けの住友金属社内（以下、社内と記す）の研究報告No.33326、五十嵐「強力軽合金の探求（No.1）」（図7.1）がある。これが超々ジュラルミン開発の第一報である。ちょうど住友が24Sの生産を始めた年である。五十嵐博士は43歳で、彼の上司は彼より3歳若い田邊博士である。その第一章はしがきに五十嵐博士はこう述べている。「最近、日本電工75 kg/mm² 軽合金の声が高い。

はたして、それが何物であるかは本年中頃には自然とわかって来る。が、周囲の時勢は其余裕を許さない。命を受けて、ここに強力軽合金の探求をはじめ。幸なる哉、時に北原五郎君（コラム参照）の来援あり。君は先に海軍技術研究所にありて、松山博士と共に超々ジュラルミンの発見あり（（抗張）力54～58 kg/mm²（530～570 MPa）、伸び20～12%）。五百旗頭博士と共に、所謂、技研式超々ジュラルミンの発明がある。其途の先達である」。

ここで日本電工（のちの昭和電工）の75 kg/mm²（740 MPa）軽合金（トム Thom 合金）とは、京都大

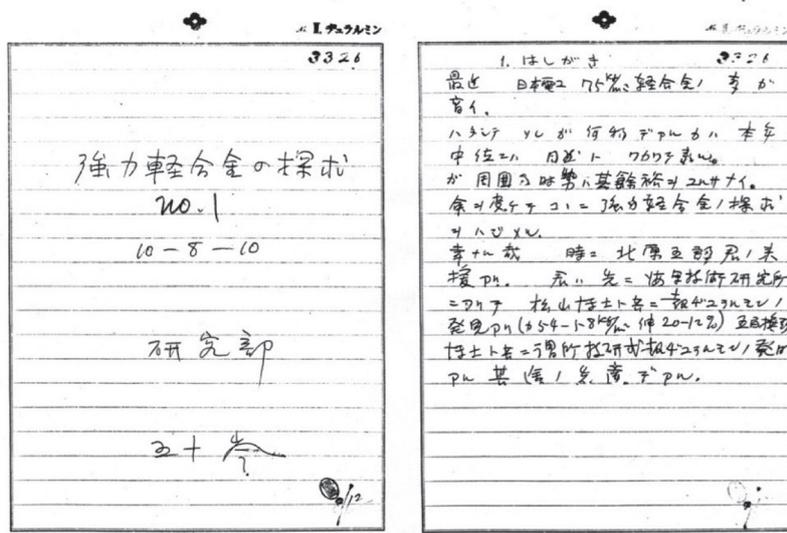


図 7.1 超々ジュラルミンの研究開始宣言の研究報告書、「強力軽合金の探求（No.1）」の表紙と概要

コラム 北原五郎

北原五郎氏（1892-1971）は秋田鉱山専門学校（秋田大学鉱山学部の前身）卒業後、海軍技術研究所に入所。20数年勤務後、1935年住友伸銅鋼管株入社。名古屋工場誕生とともに研究課長として名古屋に移り、1945年堅田鋳物製作所研究部長となった。22歳年下で、同時期に入社した住友軽金属元常務取締役深井誠吉氏は、「当社が世界に誇る強力合金 ESD の発明開発について五十嵐博士の片腕として、もっと端的にいえば、五十嵐、北原両雄の名コンビがあったからこそ ESD は誕生したと思います」。さらに「北原さんの人柄を語ることは後輩の私には不可能ですが、非常に善良でまた性急な人でした。私もよく聴きましたが『俺は兎に角実験するのだ、考えるのはその後だ。余り考えたり参考文献を調べると迷いが出る』といった調子でいわゆる『手が早くて』しかも実験が上手で、広範囲にわたる実験をする人でした。五十嵐さんがアイデアを出し北原さんがそれを実験する、というこの組合せは誠に絶妙であったと思います。「研究とか開発には、明晰な頭脳と立派な指導者は欠くことのできぬ要素であります、もう一つスピードが必要だと思えます。どんな優秀な発明も他に先んじられては影が薄くなります。ESD のような大きな仕事が極く短時日の間に完成されたのは北原さんの『迅速なる手』が大きな要因であったかも知れません」と述べている（深井誠吉、「北原五郎氏の逝去を悼む」¹⁾）

学教授西村秀雄の言葉を借りると、「トム合金は喧伝されたが、海外までそのニュースが伝わってドイツなどでも問題となった。しかし応力割れの問題が解決されてなかったの、実用にならなかった。しかし、トム合金がESDの誕生の動機を造ったことは明白であるから、日本火工株式会社（日本電工系、現在の日本冶金）松永陽之助氏が昭和10年12月13日に（特許）申請したアルミニウム合金を茲に紹介したい。これはMg 3～6%、Zn 6～14%、Fe 0.1～0.5%、Si 0.1～0.7%、Mn 0.1～1.5%、Ti 0.1～0.5%、Ni 1～5%を含むアルミニウム合金で、熱処理すると引張強さ80 kg/mm² (780 MPa)になるといふ」合金で、「唯、時期割れに関して注意の払われていなかったことは、その記述から知ることは出来るが、惜しいことであった」²⁾。

トム合金に関しては、海軍も相当気にしていて、松永陽之助が海軍大学で講演をした後、当時海軍航空本部の材料主務者であった大谷文太郎は上層部から呼びつけられ、こういう良い材料があるのに何をしているのかと言われたことがある³⁾。これに対し大谷は「これはすでにザンダーが10年前に発表したものである。これがシーズンクラックを何とか解決して実用に供したいと思って、すでに住友に指令しております」と回答した。「住友としてはこの指令の前にどの程度研究

が進んで居ったかこの点は知りませんが。共研究指令を出した覚えがあります。それより前に陸軍としては、このトム合金の仮規定を採用しました。海軍としては時期割れ防止の解決研究なきトムは採用出来ぬとして住友の研究を待ち、この研究結果を航空廠の川村君と相談研究会を度々開いて検討してあれを採用した。採用する時は実に悲壮な決意を持って採用した。但し、その採用する時分には板はいかん、まず押出型材を特に採用しました。華厳の滝から飛んだようなつもりであった。そして規格に制定してESDを初めて世の中にだしたのである」と回想している。

柳田邦男の「零式戦闘機」（文芸春秋社）⁴⁾では、この開発研究を命じたのは、海軍航空廠発動機部員で材料研究者担当の川村宏矣機関中佐とのこと。この本の中で、「当時すでに45キロ超ジュラルミンが開発されていましたが、将来戦闘機を飛躍させるには、同じように軽く、しかももっと強力な、一平方ミリメートル当たり五十キロから六十キロ位の張力にまで耐えられるような軽合金が欲しいということになりましたね。それで住友金属に対し、海軍航空廠として、研究開発を要請したのですよ」と川村は述べている。残念ながら、戦後すぐに焼却されたのか、これに関する公式記録は現在のところ見つかっていない。

コラム 五十嵐勇博士の随想「研究室の片隅から」⁵⁾

「軽金属」誌の「研究室の片隅から」という五十嵐博士の随想に、超々ジュラルミンの開発を始めた頃の話が掲載されている。その一部を紹介する。

「前々号から先輩諸賢の華やかな御話、勇ましい思い出興味深く拝見していた。ところが此度は僕に軽金属工業の回顧を書くようにとのことだが、研究室の片隅にジメジメと一生をおくった僕にはそれ等と逆な思い出のみに過ぎない。だが然し谷があつての山で皆が山ならば山はなくなる。勇ましい御話の引立役にジメジメした回顧も一つ位あつてもよからう。

僕は学校を卒業以来会社の研究室でずっと軽金属を弄つていた。はじめはアルミニウムという事だったが丁度日本に於けるアルミ合金の勃興期で先輩諸賢が皆アルミに手をつけられるので大変気楽にボヤボヤしていることが出来た。

やがてマグネシウムを取扱わねばならぬ時代が来た。僕はその方の手伝をする事になった。マグネシウムは取扱にくいので誰も手を出さぬ。不精な僕も止むを得ずいろんな実験をやらねばならなかつた。」

「先輩が夫々立身出世されると馬鹿な我輩も止むを得ず研究の凡てを見ねばならぬことになった。丁度その頃デュラルミンは板につきSD（筆者注、超ジュラルミン）、SDC（筆者注、SDに皮材としてSA3（Al-1.2% Mn-0.55% Mg合金）をクラッドした合わせ板）も工業化出来てやれやれと思っているとトム合金と云うものが華やかに宣伝された。第一次大戦当時英国にはE合金というのがある。其の後独乙にSander合金と云うのがある。別にめずらしい合金ではないが時期割れがあるので使いものにならぬ。学業成績は優秀でもLoadがかけられない秀才見たようなものである。とはいつても世間はうるさいし。止むを得ず吾々は使いものにするようにしようではないかと相談した。」

7.2 高強度で加工性に優れた合金の探求

7.2.1 各種合金の研究

かくして、先人たちの研究をベースに軽合金の探求が開始された。Al-Zn-Cu系E合金、Al-Zn-Mg系ザンダー合金、Al-Cu-Si系ラウタル(Lautal)合金、海軍技術研究所のAl-10%MgZn₂系の松山合金、Al-6%Mg-3.5%Zn系の五百旗頭合金、住友伸銅所のAl-8.5%Zn-1.5%Mg-1.5%Mn系の松田合金などのデータをベースに、まずは強度と加工性から合金系の予備検討がなされた。これはかつて圧延加工で大いに苦しんだことによるものであろう。興味深いことにAl-Zn-Mg-Liも検討された。ここでE合金というのは、英国国立物理学研究所のローゼンハインらの開発合金でその組成はAl-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn、亜鉛を20%まで含みZinc Duraluminとして知られていた。圧延材の強度は1.04mm板を400°Cで焼入れ後、時効したときの引張強さ62.7kg/mm²(615MPa)、耐力48.7kg/mm²(478MPa)、伸び11%であった(研究報告No.3326, 1935.8.10)。

しかしながら、亜鉛が高い合金は引張強さに比べて十分小さい応力でも長時間の負荷で割れを生じる時期割れ(応力腐食割れ)が問題であった。腐食雰囲気では割れは促進されたが、Mn添加で結晶粒が伸長して割れの感受性は低下したと報告されている。超々ジュラルミン合金開発の合金選定の経緯を示す研究報告書の一覧を表7.1に示す⁹⁾。

7.2.2 超々ジュラルミンの候補材の選定

最終的にはSanderのAl-MgZn₂系合金、超々ジュラルミンのA-Cu-Mg系合金、そして英国のローゼンハインのE合金をベースに成分が検討された。学位論文には、「第一のもの(S)はMg-Zn、第二のもの(D)はCu-Mg、第三のもの(E)はCu-Zn-Mgを主成分とするアルミニウム合金である。Zn、MgおよびCuはAgを除いては、Alと最も多く固溶体を作り、またその温度による溶解度の変化も最も多いものである。従って最強力にして最熱処理効果大なる实用合金(Agの如き貴金属の添加は工業用合金としては面白くない)は此の系にあることが想像される。航空機構成材料としては強度の大なる事は勿論必要であるが薄板及び型材に製作可能という事がその強力材料を生かし使用する上にかく可らざる必要条件である。従って先づ此のS、D、及びE、の三元系に於いて焼鈍状態に於いて最も軟く熱処理状態に於いて最も強い、即加工性

最大にして熱処理効果最大なる点」⁷⁾を見いだすことで合金探索が行われたとある。この点が工業的には非常に重要な視点である。

それぞれの合金成分は、

D: Al-4%Cu-1.5%Mg-0.5%Mn、

S: Al-8%Zn-1.5%Mg-0.5%Mn、

E: Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn

である。まず「D-S-E三元系の全系に渡る金型鋳物を鋳造し400°C、450°C、500°Cに各4時間保ち投入し7日間時効し後其ブリネル硬度を測定し、尚此等を150°Cに24時間焼戻しを行ひ再び其硬度を測定し、次に300°Cに5時間焼鈍し炉冷して三度其硬度を測定した」。D、S、E合金の比率を変えて実験した詳細なデータ(時効後と炉冷後の硬さ)を表7.2に示す。

次に「焼鈍した硬度を基礎とし之と焼入焼戻により得られた硬度とを比較して其硬化率(注:硬化率=(最高硬度-焼鈍硬度)÷焼鈍硬度)を求める。此硬化率の大なる事は最高硬度の高き割合に焼鈍状態に於いて軟らかき材質なる事を示すものなるが故に加工等も容易に出来得る筈である」との確信に基づいての事である。この結果、No.57、No.61が硬く、「其成分は亜鉛8及10%、銅2.5%前後である」として、三つの合金が選定されたとある^{9)~10)}。

・Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti (ESD No.1合金)

・Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti (ESD No.2合金)

・Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti

これらの合金の板、棒、押出型材、管について各種の特性を調査し、「新強力軽合金E.S.Dは耐力36~65kg/mm²(350~640MPa)、引張強さ58~70kg/mm²(570~690MPa)、伸び8~20%、硬度150~200を有し、現在使用されつつある軽合金に比して著しく優秀なる機械的性質を有し航空機構成材料として画期的な新材料と思われる。然るに、本合金は或る特殊な状態の下に於て時刻の経過に従って亀裂を生ずるが如き致命的な欠陥を有する。独逸のSander合金及び英のE合金が優秀なる機械的性質を有するにかかわらず实用化されざる所以のものは、主として此の種の欠陥あるによる」⁸⁾(学位論文より)として時期割れの対策の検討に入る。

社内の研究報告でE.S.D.合金の名称が表題に出てくるのは、研究報告No.3854「超強力軽合金の研究(第10-5)、E.S.D.合金の「クラッド」材の機械的性質」(1936.6.30)からである。多分この頃、合金の方向性が決まったことによるものと考えられる。E.S.D.の各

表 7.1 超々ジュラルミン関係の研究報告書一覧⁶⁾

報告書番号	表題	作成年月日	概要
No.3326	強力軽合金の探求 (No.1)	1935.8.10	探索の開始宣言
No.3363	超高力軽合金の研究 (其 2)	1935.8.29	ラウタル (Al-4% Cu-2% Si-0.5% Mg) 系合金及ばす MgZn ₂ の効果を調査
No.3379	強力軽合金の探求 (第 3報)	1935.9	E (Al-20% Zn-2.5% Cu-0.5% Mg-0.5% Mn) 合金系の強度に及ばす成分の影響調査
No.3385	超強力軽合金の研究 (其 4)	1935.9.10	Al-(Al ₂ Zn ₃ Mg ₇) 系および Al-(Al ₃ Mg ₂ Cu) 系合金の時効硬化性並びに焼戻硬化を報告
No.3427	強力軽合金の探求 (第 5報)	1935.10	E合金系の性能評価
No.3479	超強力軽合金の研究 (其 6)、新軽合金数種の引張強さ試験	1935.11.5	ラウタル+ (Al ₂ Zn ₃ Mg ₇) 8~10%添加材、Al+ (Al ₂ Zn ₃ Mg ₇) 10~14%添加材の 1 mm板の引張試験
No.3538	超強力軽合金の研究 (其 7)、No.23及 24合金の熱処理と機械的性質との関係	1935.12.17	前報の合金の最適な熱処理条件の検討
No.3586	超強力軽合金の研究 (其 8)、D (Duralumin) - S (Sander's alloy) - E (Ealloy) 三元合金に就て	1936.2.4	D (Al-4% Cu-1.5% Mg-0.5% Mn)、S (Al-8% Zn-1.5% Mg-0.5% Mn)、E (Al-20% Zn-2.5% Cu-0.5% Mg-0.5% Mn) 合金の配合比率を変えて「Al-Cu-Zn-Mg四元系合金には相当優秀なものが有りはしないかと云ふ仮想の許」に研究
No.3719	超強力軽合金の研究 (其 9)、60 kgジュラルミンの機械的性質に就て	1936.4.25	其 8の結果に基づき、四種類の合金 Al-9.6% Zn-1.2% Mg-2.0% Cu-0.5% Mn、Al-10% Zn-1.3% Mg-2.5% Cu-0.5% Mn、Al-6.5% Zn-3.0% Mg-0.5% Mn、Al-7.5% Zn-3.5% Mg-0.5% Mnが優秀であるとして、1 mm板を試作して機械的性質を調査
No.3800	超強力軽合金の研究 (其 10)、60 kgジュラルミン押出棒の機械的性質に就て	1936.6.2	Al-10% Zn-1.5% Mg-2.5% Cu-0.5% Mn、Al-9.0% Zn-2.0% Mg-1.0% Cu-0.5% Mn合金の 30 mm径押出棒を試作して引張強さを調査。焼入焼戻後は耐力 60 kg/mm ² 以上、引張強さ 65 kg/mm ² 以上、伸び 8%以上を示す。押出頭部と尾部では尾部が硬くて強度が著しく高い
No.3810	超強力軽合金の研究 (其 10の 2) 60kgジュラルミンの機械的性質に就て	1936.6.8	圧延板と形材について機械的性質を調査。板材の引張強さ 60 kg/mm ² 、耐力 50~52 kg/mm ² 、伸び 10~15%、形材は棒材と同等
No.3851	超強力軽合金の研究 (其 10の 3) 超強力軽合金の性質に及ばす他元素の影響	1936.6.26	Al-10% Zn-1.3% Mg-2.5% Cu-0.5% Mn合金と Al-8% Zn-3% Mg-0.5% Mn合金に Ni、Fe、Cr、Ca、Ti、V等の元素を添加し機械的性質と耐海水性を調査。「Cr(少量)、Ca、V及び Tiの各添加元素は基合金の性質を低下させることなく、而もその耐食性を改善する効果あり」
No.3852	超強力軽合金の研究 (其 10の 4) 超強力軽合金の加工性に就て	1936.6.26	T415 (ESD: Al-10.1% Zn-1.61% Mg-2.3% Cu-0.52% Mn-0.28% Fe-0.18% Si)、T418 (トム合金: Al-9.33% Zn-2.0% Mg-1.0% Cu-0.53% Mn-0.28% Fe-0.21% Si) の圧延材の屈曲試験による曲げ加工性を比較
No.3854	超強力軽合金の研究 (其 10の 5) E.S.D.合金のクラッド材の機械的性質	1936.6.30	Cr入りアルミニウム皮材をクラッドした E.S.D.合金を試作。密着性は良好。加熱による拡散性は長時間になると著しくなるが、規定時間内では考慮するまでもない程度
No.3859	超強力軽合金の研究 (其 10の 6) E.S.D.軽合金の熱処理	1936.7.4	最適な焼入温度と焼戻時間を決定
No.3865	超強力軽合金の研究 (其 10の 7) E.S.D.合金の耐海水性	1936.7.6	試験方法として腐食液に浸漬後に腐食減量測定と引張強さ測定で評価。裸材では耐海水性は良好でなく、結晶間腐食が生じた。Cr入りクラッド材は著しく改善した。
No.3892	超強力軽合金の研究 (其 10の 8) E.S.D.合金の焼鈍温度	1936.7.18	最適な焼鈍温度と時間を調査

表 7.2 D 合金、S 合金、E 合金の配合比率と強度および硬化率 (加工性) の関係 (五十嵐博士の学位論文)^{8)~10)}

Alloy Number	D (%)	S (%)	E (%)	Zn (%)	Mg (%)	Cu (%)	Mn (%)	400°C /4h WQ		450°C /4h WQ		500°C /4h WQ		300°C /5h WQ	Hardenability (%)
								RT/7days	150°C /24h	RT/7days	150°C /24h	RT/7days	150°C /24h		
39	80	20	0	1.6	1.5	3.2	0.5	94.2	93.0	116.0	109.0	107.0	113.0	52.8	120
40	60	40	0	3.2	1.5	2.4	0.5	96.8	99.2	110.0	106.2	96.4	105.0	63.0	75
41	40	60	0	4.8	1.5	1.6	0.5	102.0	132.4	109.0	131.2	95.0	126.4	56.2	136
42	20	80	0	6.4	1.5	0.8	0.5	114.0	140.0	101.0	137.4	95.0	147.2	62.6	136
43	80	0	20	4	1.3	3.7	0.5	105.8	104.0	121.0	118.0	108.0	120.0	59.8	102
44	60	0	40	8	1.1	3.4	0.5	120.0	138.8	130.0	153.2	107.4	145.8	83.6	74
45	40	0	60	12	0.9	3.1	0.5	130.0	154.6	140.2	161.2	120.0	147.2	83.0	94
46	20	0	80	16	0.7	2.8	0.5	153.0	156.4	143.0	153.2	114.0	131.2	95.4	64
47	0	80	20	10.4	1.3	0.5	0.5	116.0	147.2	125.2	158.0	110.0	156.0	76.4	107
48	0	60	40	12.8	1.1	1	0.5	134.8	162.7	140.2	161.2	127.6	158.0	63.6	89
49	0	40	60	15.2	0.9	1.5	0.5	134.8	158.0	140.0	151.6	130.0	144.4	94.8	67
50	0	20	80	17.6	0.7	2	0.5	147.2	161.2	141.6	159.6	118.0	138.8	95.4	69
51	80	10	10	2.8	1.4	3.45	0.5	102.0	97.6	113.0	116.0	108.0	113.0	57.4	102
52	10	80	10	8.4	1.4	0.65	0.5	119.0	151.6	110.0	147.2	109.0	159.6	73.0	116
53	10	10	80	16.8	0.7	2.4	0.5	153.0	165.8	150.0	153.2	119.0	131.2	97.6	116
54	60	20	20	5.6	1.3	2.9	0.5	109.0	119.0	115.0	130.0	117.0	132.4	77.6	74
55	20	60	20	8.8	1.3	1.3	0.5	117.0	150.0	122.0	154.8	109.0	153.2	67.6	129
56	20	20	60	13.6	0.9	2.3	0.5	145.8	161.2	144.4	164.2	127.6	145.8	86.6	137
57	40	30	30	8.4	1.2	2.35	0.5	126.4	156.4	125.2	161.2	109.0	123.0	65.0	148
58	30	40	30	9.2	1.2	1.95	0.5	124.0	154.8	128.8	169.4	120.0	159.6	73.6	129
59	30	30	40	10.4	1.1	2.2	0.5	131.2	156.4	115.0	150.0	115.0	145.8	74.0	112
60	20	40	40	11.2	1.1	1.8	0.5	127.6	153.2	131.2	161.2	103.0	140.2	75.6	113
61	40	20	40	9.6	1.1	2.6	0.5	122.0	150.0	130.0	167.6	118.0	151.6	67.6	148
62	40	40	20	7.2	1.3	2.1	0.5	113.0	115.0	116.0	162.7	116.0	148.6	71.2	128
63	100	0	0	0	1.5	4	0.5	94.2	93.6	113.0	105.0	113.0	117.0	53.6	118
64	0	100	0	8	1.5	0	0.5	108.2	136.0	112.0	143.0	111.0	148.6	73.8	101
65	0	0	100	20	0.5	2.5	0.5	158.0	161.0	145.8	144.4	124.0	124.0	89.8	79

アルファベットの後ろにピリオドがある表現になっている。この名称に決まった背景については研究報告には特に記述がない。深井誠吉によると超々ジュラルミンを ESD (Extra-Super-Duralumin) と名付けたのは住友金属専務取締役で伸銅所所長の古田俊之助で 1936 年 5～6 月頃とのことであるが、住友軽金属年表では、「1937 年、研究の基礎となった E 合金、S 合金、D 合金 (超ジュラルミン) の頭文字をとって ESD と命名した」¹¹⁾ とある。

7.2.3 トム合金

興味深いことに、1936 年の 5、9、11 月の住友金属の社内の研究報告では、「アルミニウム軽合金界に一大センセーショナルを投げた」引張強さ 75 kg/mm² と称する日本電工製のトム合金板材、棒材、鍛造丸棒を入手して性能の確性調査を行っている。西村教授が先に述べたように如何にこのニュースの衝撃が大きかったかを物語るものである。研究報告 No.3738 「Thom Alloy に就いて」(1936.5.5) で、この入手したトム合金板材の組成は Al-9.05%Zn-2.15%Mg-0.9%Cu-0.49%Mn-0.22%Fe-0.27%Si で引張強さは 61.7 kg/mm² (605 MPa)、耐力 43.2 kg/mm² (424 MPa)、伸びは 13%であった。この合金は「60 kg デュラルミン」と成分、機械的性質ともによく類似すと報告書にはコメントが付記されている。この「60 kg デュラルミン」とは E.S.D. のことであろう。

7.3 時期割れ (応力腐食割れ) の評価方法の確立

7.3.1 時期割れの発生の詳細な観察

さて、ここからが五十嵐、北原のコンビが本領を発揮した時期割れ対策である。1936 年 8 月 20 日の社内の研究報告 No.3939 「E.S.D. 新合金の「割れ」に就いて(第一報)」がそれである。この研究報告の概要を少々長い重要なので引用する。執筆者はその筆跡からして北原氏によるものと思われる。

「E.S.D 軽合金の残留内部応力の下に於ける割れを発生する特殊現象を調査し且つ現象の防止対策に就き考究した。

(1) 割れの試験方法としては下記三方法を使用した。

1. 刻印法 2. 圧搾法 3. 屈曲法

(2)

i) 銅を含むと否とに係らず本系合金は残留内部応力の下に於いて自然に割れる傾向性を有す。勿論これはその成分又は状態の如何によりて多少の緩急

の差はあるもいずれも割れる。

- ii) 割れは静的外力を受けた場合よりも衝撃外力を受けた場合が遥かに甚だしい。
- iii) 割れ疵は常に結晶境界線に沿っておる。また故意に破壊せし処も同様に概ね境界線に沿って割れる傾向にある。これは結晶の大きさに密接な関係があると思う。
- iv) 焼入時効せるものは刻印法及び圧搾法では本試験の期間内では疵を生じないが屈曲法では割れる。
- v) Al-Zn 二元合金では Zn20%を含有するものが、その焼入れ時効せるもの 300°C 焼鈍せるものが割れを生じ、焼入焼戻せるもの圧延せるものは起こらない。勿論 20%以下のものはいずれの状態においても疵を生ぜず (屈曲法)。
- vi) 本合金は「デュラルミン」で「リバッチング」せるも割れを生じない。
- vii) 本現象は本系軽合金の本質的特性が所謂 Season Cracking に類似せる物と考えるのが妥当である。

(3) 本系合金の割れの現象は焼入及び焼戻温度の適当なる調節により、緩和する事を得、例えば E.S.D. 合金の 430°C 焼入 100°C 焼戻せるものは刻印法及び圧搾法で割れを生じない。然し屈曲法によれば時間の長短はあるが焼入時硬せんものでさえも割れを生ずるに到る。即ち焼入及び焼戻温度の調節では割れを完全に防止する事はできない。

(4) 本系合金の割れの現象はその金相学的組成上 Al-Zn 系合金に於ける γ 相 (注、最近の状態図では α 相) の存否に影響するところ多いという仮説にもとづき下記五種合金につき試験した。

Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn (製鋳失敗)、

Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn、

Al-7.5%Zn-3%Mg-0.5%Mn、

Al-7.0%Zn-3%Mg-0.5%Mn、

Al-6.5%Zn-3%Mg-0.5%Mn

- 1) 銅の少量の添加は割れを緩和する作用があるらしい。
- 2) 銅を含有せざる三種は Cu 入に比して著しい
- 3) 之等合金中 Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 合金がもっとも良質で割れを生じ難く、他のものは焼入時効せるものも割れたるも、之は割れず而もその抗張性は E.S.D. と伯仲である。
- 4) Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 及び E.S.D 合金の割れに及ぼす焼戻温度の effect は 125°C

最悪でそれより高くも低くも順次良好となる傾向を有す。

5) Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 合金は実用上下記(略)程度の屈曲には十分堪え得るものと考えた。

(5) 本系合金並びに Al-4%Zn-3%Mg-(1~2)%Cu-0.5%Mn 合金は之に Ti0.1%内外の添加によりて著しく割れの減少を阻止し屈曲法実施後五日後経過するも猶割れず、先本問題を解決せらるるのではないかと思わる。然し予断は許されない。機械的性質は E.S.D. に伯仲す。」とあり、まずは簡便な試験方法で時期割れの実験結果をよく観察していることがわかる。

7.3.2 時期割れの評価方法：応力負荷方法

実験方法を更に詳しく見てみよう。実験方法は日本金属学会誌や住友金属・研究報告に報告されているのでこれをもとに紹介する。時期割れの評価方法は「元来時期割れと称せらるる現象は銅合金就中真鍮に特有なものとして一般には好く知られて居る。これに関する研究論文は内外通じて沢山にある。軽合金に於いても亜鉛の多くを含むアルミ合金の時期割れを起こす傾向のある事は相当古くから言われて居るものの研究文献に至っては内外国を通じて全然皆無と言っても差し支えないであろう」^{9), 10)} ということ、実験・評価方法の確立から始まる。図 7.2 に試験方法を示す。

〔(1) 刻印法

試料の表面に 7 mm 角大きさの英字又は数字の鑿を持って刻印し亀裂の生ずる状況を検するに図に示す様に概ね文字の角立てる部分に早きは刻印後数時間にして割れを生じた。

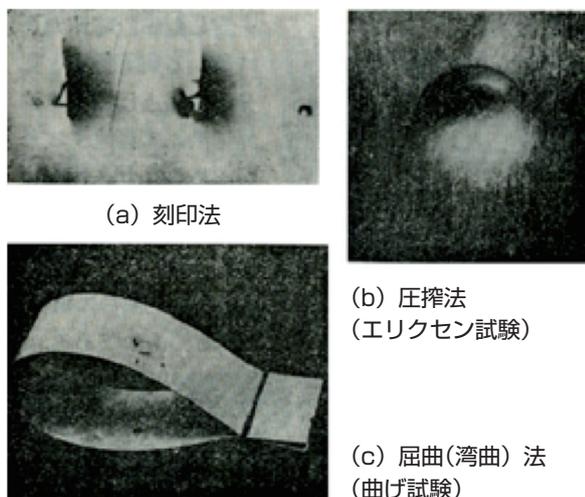


図 7.2 各種の応力腐食割れの評価方法^{9), 10)}

(2) 圧搾法

エリキセン試験機により最大深度をそのエリキセン値とし、種々の深度に圧搾し放置せるに深度の甚だしきものは十数時間後に早くも割れを生じた。圧搾度の少なきものは数日後更に少なきものは数ヶ月後を経過するも割れを生じない。

(3) 屈曲法(湾曲法)

幅 25 mm、長さ 180 mm の試片を図 7.3 に示すように両端を以て湾曲し略ぼ両端より 15 mm 内外の所でその間隔を色々に変えて銅線にて束ね室内に放置して割れの発生を調査した。試験結果はその間隔が零のものは言い換えれば全く密着せるものは僅々数十分にして割れを生じ、その距離を次第に遠ざくるに従って割れるまでの経過時間は大となり、或る距離以上に達すると殆ど割れを生じない。換言すれば湾曲試片の頂部に於ける屈曲半径の大きさに比例して割れるまでの経過時間は増減する。即ち割れは一定以上の応力を必要とする。」^{9), 10)}

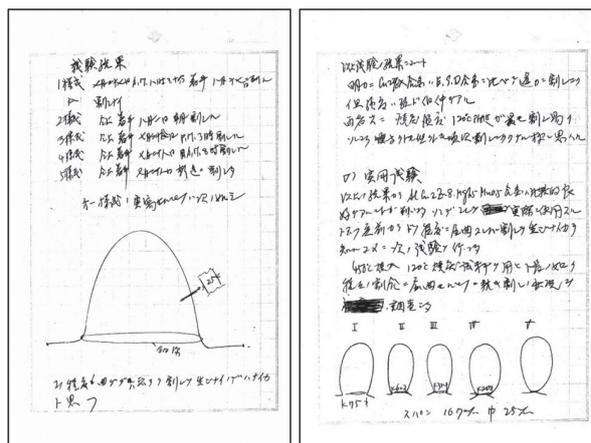


図 7.3 屈曲試験による応力腐食割れの評価 (1936.8.20 の研究報告 No.3939)

そのほかに、管の扁平試験や「時期割れの発生は複合応力の引張応力に依り、圧縮応力に依りては絶対的に起こらないと言われ、又は以上の諸実験に於ける割れが常に引張応力の働く側に限られて起る事実」に照らしても明らかなことである」として引張試験が行われた。「引張応力と時期割れを生ずる迄の経過時間との関係曲線に依れば時期割れは応力の小なるに従って起り難くなり、而も曲線の傾向から判断して大約 15 kg/mm² 以下の応力では割れは起り得ないのではないかと思われる」として時期割れの生じる応力に関して閾値の存在を示唆している。

7.3.3 腐食環境

「時期割れは結晶粒界に沿うこと及び合金の引張強

さよりも遥かに小なる応力でさえも割れを生ずることの実験的事実から考えて応力が時期割れに対する充分にして満足なる条件とは考えられない。また金属の内部的变化に依るが如き本質的な例証も認められない。さすれば応力と外部的要因との合成作用によるものと考えざるを得ない」ということで試験環境の影響を検討した。真鍮の時期割れは純粋な空气中や Ni メッキを施した場合には生じないとのことで、大気中のいかなる要素がもっとも影響があるものかを確認するために、大気中、乾燥空気、酸素、窒素、水素、真空中で湾曲法により試験した。この結果、水蒸気中に於ける場合がもっとも激烈で大気中の約十分の一で割れた。なお特に顕著なことは大気中では 30 分内外で割れを生じるものが真空中では割れを生じないことであった。次に、結晶粒界に沿って割れることから、結晶間腐食性を有する水溶液も割れを促進すると考え、各種水溶液で試験した所、食塩水及び塩酸水溶液中でその効果が甚だしいことが判明した。さらに真鍮や鋼は半田付け時に応力を負荷しながら行なうと容易に亀裂を生じることから、80°C の低融点金属 (PbSn、BiCd) の溶液に浸すと 1 ~ 2 分で割れた。これも時期割れの一種とみなしてもよいと考えた。外部的要素をなくするために合わせ板で試験した所全く時期割れを生じなかったと報告している。

7.3.4 時期割れに及ぼす合金元素の影響

前節の 1936 年 8 月作成の第 1 報に引き続き、板厚 0.5 mm 板を製作し屈曲曲げによる時期割れの研究がなされた。表 7.3 に時期割れに対する合金元素の影響に関する社内の研究報告書の一覧を示す⁶⁾。同年 12 月作成の第 11 報 (No.4144) の最後に総括として、「今、超強力軽合金 (E.S.D.) の化学成分を仮定すれば次の

如し。Al、R (残)、Cu 2%、MgZn₂ 11 ~ 12%、Mn 0.5%、Cr 0.3%、Cu、Cr、Mn の添加量に関しては更に研究を要す。機械的性質は引張強さ 55 kg/mm² (540 MPa)、耐力 45 kg/mm² (440 MPa)、伸び 8% 以上」とある。図 7.4 は学位論文に掲載された時期割れに及ぼす添加元素の影響を示す⁸⁾。クロムが 0.17% 添加された合金はこの実験範囲内では時期割れを示さないことがわかる。

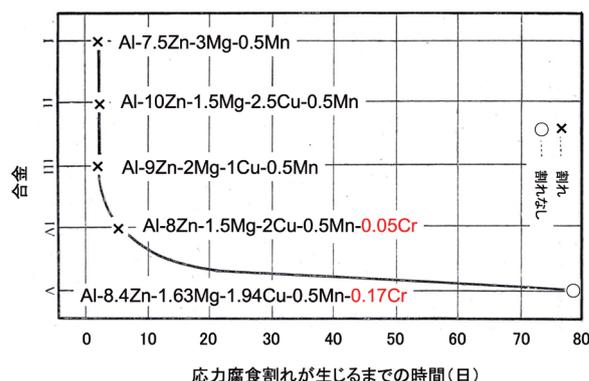


図 7.4 Al-Zn-Mg 系合金の時期割れに及ぼすクロム添加の影響⁸⁾

ほぼ成分も固まり、いよいよ工業的試作の段階に入る。研究報告 No.4241 「E.S.D. 軽合金の研究、E.S.D.-No.2 試作品の二三性能に就いて」(1937.2.22) では、E.S.D.No.2 (Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn) と E.S.D.No.2+Cr0.3 について工場試作し、E.S.D.No.2+Cr0.3 は引張強さ 58 ~ 60 kg/mm² (570 ~ 590 MPa)、耐力 48 ~ 52 kg/mm² (470 ~ 510 MPa)、伸び 10 ~ 16% で所定の規格 (引張強さ 53 kg/mm² (520 MPa) 以上、耐力 45 kg/mm² (440 MPa) 以上、伸び 8% 以上) を満足し、180° 曲げ試験で半径 3t と良好、耐破壊性でも二ヶ月以上経過しても割れないで極めて優良であると結論づけ

表 7.3 時期割れに対する合金元素の影響⁶⁾

報告書番号	表題	作成年月日	内容
No.3939	E.S.D.新合金の「割れ」に就いて(第一報)	1936.8.20	E.S.D.軽合金の残留内部応力の下に於ける割れを発生する特殊現象を調査し且つ現象の防止対策に就き考究
No.3988	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第二報)	1936.9.19	低亜鉛 E.S.D. (Al-4%Zn-3%Mg-1or2%Cu) 合金、E.S.D. No.2 (Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn) 合金の焼入、焼入焼戻検討で実用性あり
No.4017	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第三報)	1936.9.30	E.S.D. No.2 使用に耐え得る。Ti、Mo で置き割れ防止可能
No.4030	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第四報)	1936.10.12	Mn1.2、1.5% 添加、結晶粒の発達、破壊性阻止。Li 入り合金も調査
No.4047	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第五報)	1936.10.23	E.S.D. No.1 (Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu)、Mn 1.2% 以上で耐破壊性顕著
No.4092	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第六報)	1936.11.18	E.S.D. No.2 に Mo 0.5 ~ 1.67% 添加。Mo 1% 以下の添加で耐破壊性著しく緩和
No.4099	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第七報)	1936.11.27	E.S.D. No.1 (Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn) に Mo、Cr、Co、Ti、Cu、Mg、Be 添加。引張強さは Co 添加が、耐破壊性は Cr 添加が優秀。Mo は No.2 ほどでない。Mn 1.5% は多過ぎ
No.4112	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第八報)	1936.12.1	E.S.D. No.2 系に Mn 0.5、Mo 0.3、Cr 0.3、Ti 0.1 と Mo 0.3、Cr 0.3、Ti 0.1 添加。耐破壊性良好。
No.4113	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第九報)	1936.12.2	E.S.D. No.1、E.S.D. No.2 ベースに Mn、Cr の単独添加、複合添加の影響調査。No.2 系優秀
No.4121	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第十報)	1936.12.5	E.S.D. No.1 の ZnCuMg ベースに Ni 添加。引張強さ増加するが、耐破壊性は効果なし
No.4144	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第十一報)	1936.12.21	E.S.D. No.1 系に Ag、Ca、Si、Sn を添加したが、耐破壊性は改善できず
No.4244	E.S.D.合金の Cracking に就いて(第十二報)	1937.2.24	E.S.D. No.2 系の耐破壊性に及ぼす Cu、Zn、Cr、Bi、Sb の影響。Cr 0.1 ~ 0.35% 内では変化少ない。Sb、Bi の耐破壊性に対する効果少ない

ている。これ以降の E.S.D.No.2 合金に関しては 0.2 ~ 0.3% Cr が添加されている。ほぼ 2 月の時点で ESD の合金成分は Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn-0.25%Cr となったと考えられる。

その後の研究報告 No.4352「超強力軽合金 E.S.D.-No2 に就いて、E.S.D.-No.2 クラッド材の性能」(1937.4.27)では、皮材に Al-2.5%Zn-0.5%Cr を用いたクラッド材の性能調査を行っている。引張強さは 55 kg/mm² (540 MPa)、耐力 49 kg/mm² (480 MPa)、伸び 10% で裸材に匹敵し、耐破壊性、耐食性は良好との結果であった。このクラッド材に就いては 5 月の時点で特許申請中との事であった。

7.4 特許出願と論文発表

7.4.1 特許

ESD に関する基本特許は、「鍛錬用強力軽合金」として、1936 年 6 月 9 日に出願されている。公告は 1939 年 10 月 24 日、特許としては第 135036 号としては 1940 年 2 月 28 日成立。発明者は五十嵐勇と北原五郎で、特許権者は住友金属工業株式会社である。この特許の第一ページを図 7.5 に示す。

「発明の性質及び目的の要領」

「本発明は亜鉛 3 乃至 20%、「マグネシウム」1 乃至 10%、銅 1 乃至 3%、「クローム」0.1 乃至 2% を含む「アルミニウム」より成ることを特徴とする鍛錬用強力軽合金に係り其の目的とする処は強力にして時期割性無

き鍛錬用軽合金を得んとするにある」。1935 ~ 1937 年かけて五十嵐博士により出願された表 7.4 に示すように Al-Zn-Mg 系に関する合金特許は 5 件で、それも Cr に関するもの 2 件のみである。それらの特許は関連のあるものも含めて出願順に表に示す⁶⁾。



図 7.5 超々ジュラルミンの特許¹²⁾

コラム 「割れるやつなら大いに割って見よう！」⁵⁾

時期割れに関してを五十嵐博士は次のように語っている。

「割れるやつなら大いに割って見よう」と云うので最も時期割れの甚だしいのを作つてそのよつて来る原因をつかまうとつとめた。種々の気体の中、液体の中、真空中、等で割らして見た。その結果から此の種の時期割れは水分による結晶粒界の局部腐蝕が重大なる原因をなすことがわかつた。そこで腐るものに腐るなどは無理な話だから腐りたければ大いに腐らしてやろう。それも局部腐蝕などケチな事わずに全面腐らすようにもって行こう。それには全面に析出する Mn を増して 1.2% にもつて行けば全面腐蝕になり時期割れはなくなる。処が大物鑄塊では Mn 化合物が大きく発達して物にならぬ。そこで Mn を減じて Cr で補うことにした。そしてその limit が ESD の Mn、Cr の成分になつた。他の成分は量産の目的で最も加工し易い点をとつた。量産を考えないならば 80 kg/mm² 程度は出せる。かくて ESD は出来上つたが素人はおそろしいもので“完全に時期割れはないか”等と詰問されたものである。吾々の見解からすればデュラルミンでも時期割れをおこさせることが出来るのであつて絶対に割れないなどいい切ことは出来ない。実用上差支えないと答える以外に道はない。大事なことは実用の限度と量産と力とのかねあいである。それらは見る人の心にまかせおくよりしかたがない。そして少し成分をいじれば注文通りのものがつくれる」と。

表7.4 Al-Zn-Mg 系合金に関する特許⁶⁾

特許	名称	発明者	出願・公告・特許	明細
114321	硬度高き「アルミニウム」軽合金	五十嵐	出願 1935.4.5 公告 1935.10.25 特許 1936.2.4	Zn 5~25%、Mg 5%以下、Li 3%以下
135036	鍛錬用強力軽合金	五十嵐 北原	出願 1936.6.9 公告 1939.10.24 特許 1940.2.28	Zn 3~20%、Mg 1~20%、Cu 1~3%、Cr 0.1~2%、(Mn 0.1-2%) 時期割れなし
133183	強力軽合金	五十嵐 北原	出願 1936.9.9 公告 1939.8.12 特許 1939.11.13	Zn 4~20%、Cu 1~3%、Mg 1~3%、Ti 0.01~0.5%、Mn 1.2~3%
145112	「アルミニウム」軽合金	五十嵐 北原 小崎	出願 1936.9.19 公告 1941.4.30 特許 1941.8.22	CuAl ₂ 0.5~10%、Mg ₂ Si 0.5~5%、MgZn ₂ 2~20%、Mn 1.2~2.0、Cr 0.1~0.5%、Ti 0.1~0.5、Mo 0.1~2%結晶粒粗大化防止
133193	硬度高き「アルミニウム」軽合金	五十嵐 北原	出願 1936.10.15 公告 1939.8.12 特許 1939.11.13	(114321号の追加発明) Zn 5~25%、Mg 1~5%、Li 3%以下、Cu 3%以下、補足(ブリネル硬度 150以上)
155806	亜鉛を含む強力「アルミニウム」合金合せ板	小兒	出願 1939.10.14 公告 1942.12.26 特許 1943.4.2	Znを含むAl合金にZn 0.5~1.5、Mn 0~2%を含む合金を被覆材とする合せ板、耐食性
161892	鍛錬用強力軽合金	北原 小玉	出願 1942.5.29 特許 1944.2.19	Zn 3~20%、Mg 1~10%、Cu 1~3%、Cr 0.1~2%、Bi 0.01~0.2%、(Mn 0.1~2%)、時期割れなしを目的

なお、このESD関連特許に関しては1938年頃から米国、英国、ドイツ、フランス、イタリアに特許出願している。米国特許2166495(出願1938.6.20、特許1939.7.18)ではZn 4~20%、Mg 1~2%、Cu 1~3%、Mn 0.1~1.5%、Cr 0.05~1.0%、Ca 0.01~0.2%を必須成分とし、加工性や特性を向上させるためにMo 0.01~0.2%、Ti 0.01~0.5%、Fe、Siを1%以下としている。米国特許ではなぜMgの請求範囲を狭め、Caを必須成分としたのかはよくわからない。

ここで興味深いことはESDの特許「鍛錬用強力軽合金」の出願が1936.6.9であることだ。この時点でどこまでCrによる時期割れ改善の問題を把握していたかが不明である。Crを添加した合金について言及した報告書は研究報告No.3851「超強力軽合金の研究(第十の三)、超強力軽合金の性質に及ぼす他元素の影響」(1936.6.26)まで見当たらない。それも時期割れのための試験ではない。時期割れに及ぼすCr添加の影響については、研究報告No.4099「E.S.D.合金のCrackingに就いて(第七報)」(1936.11.27)の報告書が最初と思われる。

勿論、実験結果と報告書執筆では現在でも数ヶ月のタイムラグのある場合もあるので、実験結果はもっと早く出ていただろうと推定されるが、多分、ESD合金の制定の6月頃には、簡便な方法での時期割れの評価結果は出ていて、この結果に基づいて特許が出願されたものと考えられる。

7.4.2 論文発表と学位授与

論文に関しては、五十嵐と北原連名で、1937年2月住友金属・研究報告「新強力軽合金の研究(其1)」¹³⁾を発表している。(其3)がなく、1938年3~10月

に「新強力軽合金の研究」(其4~6)^{14)~16)}を、其2は少し遅れて1939年5月に「新強力軽合金の研究(其2)、超々デュラルミン”ESD”及び其のクラッド材”ESDC”に就て」¹⁷⁾で、次いで、1939年9月に「高力Al合金の時期割れと其防止に就て」¹⁰⁾が報告されている。其2ではESD(ピリオドはなくなっている)をExtra-Super-Duralminと呼び、ESDとそのクラッド材ESDC(Extra-Super-Duralclad)の皮材の成分が明らかにされており、このためか、(其2)の発表時期が遅らされていると考えられる。

「鉄と鋼」¹⁸⁾や日本金属学会誌⁹⁾に、住友金属・研究報告で報告された内容とほぼ同じものが報告されている。さらに1939年9月号の日本航空宇宙学会誌にも五十嵐と北原の論文「超々デュラルミンESD及びESDCに就て」¹⁹⁾が掲載されている。ESDの成分が明らかにされたのは、ESDの基本特許である特許135036が公告として公開された時期と重なっていることがわかる。米軍やアルコアは果たしてこれらの論文に目を通していただろうかである。

五十嵐博士は以上の研究論文と、これまでに発表してきたジュラルミン、超ジュラルミン、4.5~8% Mgを含むHydronaliumなどの耐食性合金、3Sや4SなどのAl-Mn系合金、ジュラルミン系プロペラ用鍛造品、鋳材、マグネシウム合金の防食性についてまとめ、1939年4月学位論文(図7.6)として大阪帝国大学工学部に提出し工学博士が授与された。

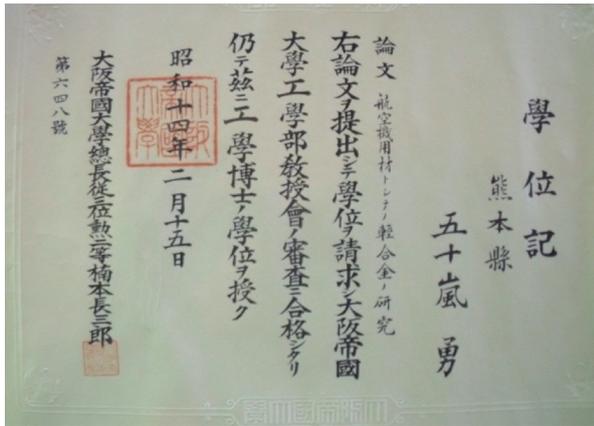


図 7.6 五十嵐博士の学位記
(五十嵐 聖様のご好意により撮影)

7.5 なぜESDは短期間で開発できたのか？

住友軽金属の元専務取締役で技術研究所長であった寺井士郎博士は ESD が開発できた要因を次の六点にまとめている²⁰⁾。

(1) 具体的なニーズ

1935 年当時は、準戦時下であり、列国より優位な軍事力、特に優秀な戦闘機の開発それに伴う機体構造材としての高力アルミニウム合金の強度向上に対する軍の要求は切実であった。引張強さ 60 kg/mm² 級の新強力軽合金の開発が海軍航空本部より要求された。

(2) 非凡なる発想

応力腐食割れの解決の難しさから、リスクの少ない Al-Cu-Mg 系合金を選択せずに、強度的には Al-Zn-Mg 系合金に勝る合金なしと考え、応力腐食割れ防止によって実用化せんとした積極的発想と、アルミニウム合金の応力腐食割れが局所的な結晶粒界での割れであることに着目し、むしろ全面的に腐食させることで割れを防止しようとした、逆転の発想は非凡である。

(3) 的確な実験対象

実験対象として、D 合金、S 合金、E 合金を選定し、それぞれの配合比率と強度マップの関係からの的確な合金を選択したことと、粒内に全面に析出させて全面腐食させる微量添加元素の選択が的確であったこと。

(4) 系統的な実験

応力腐食割れ防止について金属組織、環境、応力、成分及び熱処理に関し系統的な実験を短期間に実施し、Mn および Cr の微量添加が有効であるとの結論を得て、合金特許を取得した。

(5) 創造に対する執念

五十嵐博士は、「研究室で出来たものが、工場で出

来ない筈がない。必ず物にするという執念で事に当たれば、自然が、これでもか、これでもかと呼び掛けてくれるものだ。この自然の呼び掛けを聞く耳をもたねばならない」とよく言われていた。

(6) 優れた協力者

ESD は工場生産技術者の協力なしでは、工業製品としては恐らく開花しなかったであろう。当時の生産技術は、製造部長の丸山五男の献身的な協力に負うところが多かったと五十嵐博士は述懐している。

7.6 五十嵐勇語録

(1) 経歴

まず五十嵐は、生家が浄土真宗大谷派（本山：東本願寺）に属し、東光明寺（注）で長男として出生したこと、これは五十嵐のものの考え方、生き方に大きく反映されているように思われる。

(注) 東本願寺（大谷派）の光明寺という意味。近くに西光明寺もある。現在の玉名市溝上に承応 3 年（1654 年）開基。現在は五十嵐勇の末弟秀雄の長男である五十嵐聖が第 13 世住職である。五十嵐勇は三男四女の長男として出生。勇は先妻いきとの間に一男三女を儲けた。先妻は 1929 年、33 歳で早世し、後妻シズ江を迎えた。晩年は熊本市鳥崎で余生をおくった。長男の全は秋田大学鉱山学部講師として研究をされ、1960 年頃には「軽金属」にも勇と連名で論文を執筆していたが、2003 年他界した。詳細は筆者の「超々ジュラルミンの発明者、五十嵐勇博士の生家を訪ねて」²¹⁾を参照のこと。

京都大学に入る前に広島高等師範学校を卒業後、八代中学・台湾中学で教鞭をとり、再び 1919 年京都大学理学部物理学科に入学した。なぜ教師を辞めて理学部物理学科に入学したのか、最初から金属を研究するつもりであったのかどうかかわからないが、住友軽金属技報 15 周年記念号（1975 年）に寄せた巻頭言²²⁾で述べているように「大自然の理法」を身につけたいとの気持ちはあったようだ。当時の物理学はアインシュタインの相対性理論や光量子仮説の発表、量子論から量子力学の確立に向けて大きく変化を遂げていく段階で、自然に対する価値観も変わっていく激動の時代ではなかったかと思う。日本では長岡半太郎や本多光太郎が活躍していた頃である。7 年ほど後にノーベル賞を受賞した湯川秀樹や朝永振一郎が理学部物理学科に

コラム 「ものをよく見よ！」²³⁾

時期割れの対策に関しては「逆転の発想」ということで寺井博士が紹介されたが、同じく元社長で技術研究所長の佐藤史郎博士はセレンディピティの観点から次のように述べている。

「五十嵐博士から、我々研究に当たる物に対して、最も心すべきこととして対象を徹底的に観察することの重要性を説かれた。“ものをよく見よ。理屈（理論）は後からつけたらよい。もし誰かがつけてくれるならばそれでよい。とにかく、ものをよく見よ”」と。「応力腐食割れに関しては「光学顕微鏡で応力腐食割れの組織を観察すると、結晶粒界が割れている。応力腐食割れに析出物が関与していることは明白である。そこで、応力腐食割れを徹底的に観察しようという魂胆もあった。これらの合金の試験片の応力腐食割れ試験を実施した結果、意外なことに応力腐食割れが著しく改善（抑制）されている合金があった。その添加元素がCrであり、Cr添加が組織を微細化し、析出物の析出形態を粒界析出型から粒内均一析出型へ変えていた」ことを見だしてESDの発明に繋げた。すなわち、入念な光学顕微鏡観察と柔軟な洞察—セレンディピティと言うに十分値する—により達成されたものであることは疑う余地がない」と述べている。

入学している。五十嵐博士の求めた「大自然の理法」は、万物は流転するといった古代ギリシアのヘラクレイトスの考え方や仏教の「縁起の理法」とも相通ずるところがあるように思われる。住友軽金属技報の巻頭言では次のように書かれている。

「すべてのものは時とともに永遠に流れてやまない。人間はその流れに節をつくり、句切りをつける。昔は男子生れて15年たては元服のお祝いをした。一人前の男と認められる。今でいへば成人式である。これもひとつの句切りである。句切りができれば、そこを元として新たに出発せねばならぬ。独立独歩、ヘビが出るか、ジャが出るか、大黒様がころげ出ぬとはかぎらぬ。

世の中は非常な速度で変わりつつある。その変化を追ってはいつまでたっても追いつかぬ。15年の経験実績、これが大きな宝である。その中にいろんな鍵が含まれている。鍵は小さい。その小さい鍵を押せば大きな扉が開く。

リンゴや柿は熟すれば落ちる。それは当たり前のことである。どんな当り前の小さなことでもすべて大自然の理法に従って動いている。その小さいできごとの中に大自然の理法を見る目を養わねばなるまい。一木一草ことごとく大自然の理法のあらわれである。

人間15才ともなれば若い血潮のあふれでるときである。『皆んなついて来い』と雄たけびをあげてもよからう。大衆とともに、ナポレオンはフランス国民とともにウォーターローで戦って一敗血にまみれた。だが、フランス国民は今なお健在である。

理屈でなく、実績をもとに立ちあがろう。雄たけびをあげよう。それを我々皆んな拍手をしてたたえよう²²⁾と。

(2) 研究方法

五十嵐博士から直接指導を受けた元常務取締役深井誠吉博士との対談では次のように次のように語っている²⁴⁾。

「今度は考え方を全く変えて、どのように割れるかを研究することにした。そこで、いろいろ研究して、一番割れやすいものを作った。普通なら時期割れは1カ月から2年ほどの間に起るが、曲げて5～10分で割れるのができた。割れは結晶粒界で起こる。ここが腐って割れるので、酸、アルカリにつけて腐らせてみたらもっと割れやすくなると思った。ところがより割れるはずなのが割れない。人間の考えがいかに馬鹿なものであるか、これで明らかである。頭から割れるはずだと思い込んでいたものが割れない。

そこで別れの原因を調べてみると、空気中でも割れるので、その因子を調べるために、酸素、窒素、いろいろやってみたが、一番影響するのは水蒸気。次に調べねばならないのは、金属それ自体が、割れるかということすな。そこで真空中で調べた。普通なら4～5分で割れるのが1日たっても、2日たっても割れない。それでわかった。つまり水蒸気があると割れる。純アルミで割れないのはわかっている。そこで酸、アルカリにつけると全面が腐るので割れなくなる。ここで問題が決ってくるわけですな。

結局、結晶粒界と同じ速度で全面を腐らせる。全面が平均して腐るためには微細な析出物を全面に作る。そうすると全面の腐り方と結晶粒界の腐り方の歩調がそろおう。こうすれば割れない。結局1ミリ腐るのに、何年もかかるから、金属の腐食が進む前に、飛行機の方が駄目になる。研究はこれで終り。後は何を何%、

何を何%と実験すればすぐできる。それから先は、アメリカ流にサーッとやればよい。」と。

昭和28年卒業の奥田彰氏は東北大学金属工学科創立75周年記念誌(2000年、p.124)で、五十嵐博士の思い出を次のように語っている。「事実、事実が大切なんだ!」。「いろいろ理屈は言わないこと。質問は出るだろうが、何故なんて、分かりもしない理屈は言わないこと。こうやったら、こうなったとだけ言えばいいのだ」これが、卒業論文発表前日の先生からの訓示だったそうであり、その年の春の学会発表当日も同じ注意をいただいたとのことである。いかにも五十嵐先生らしい話である。「残念だったことは、超々ジュラルミンの体験談は一回も聞かれなかったことである。お聞きしても、くわえたタバコを唾液でクチャクチャさせながら、ただ笑っていただけかもしれないが、何しろ、自慢話は聞いたことがない。」と、五十嵐博士は大変謙虚な方だったと飯島嘉明元岩手大学教授は、「超々ジュラルミンと五十嵐勇」²⁵⁾の中で付け加えている。

同様に「総て物事は徹底すること、徹底すれば新事実を見出すことができる、真理は理屈ではない、実験の結果が真理である」(深井誠吉氏、五十嵐博士への弔辞より)とまで言い切っている。

住友軽金属に顧問として戻って来られた頃について、当時、研究部軽合金研究室にいた高島章氏は次のように語っている。

「日常は顧問室で研究報告書を丹念に見ておられることと思うが、ある日ちょっと来てくれとのこと。今まで直接お話などしたことがない先生にお叱りでもあるのかと思い、直立不動で先生の前に立った。『多くのレポートを見ているが、君の報告書が一番面白い』まさかどこが面白いのかななどと失礼なことは聞けず、『はあ』とだけ言ったら、次に『最近の学会誌はあまり面白くないな。屁理屈が多すぎる。前(軽金属学会の前身である軽金属研究会のことか?)の方が面白かった』

博士の持論の『理屈は結果に対しての討論で、もっと現象というか過程をよく観て、これだと思うことはすぐやれ』と言いたかったのだと思う。博士との話は禅問答のようでもあった。(軽金属、60(2010)、475.)

(3) 企業での研究のあり方

五十嵐博士と深井博士の対談²⁴⁾では、

1) 企業での研究のあり方について

「技術者は第一にその企業、住友軽金属なら住友軽

金属の技術を体得しなくてはいかん。学校を出たと、よその会社で優秀だったとかいって、偉そうなことをいっていても駄目。また単に表向きだけ「ああ、そうか」と頭の中を素通りしただけでは駄目。学校の講義ならそれでいいが、物はとても作れない。だからまずその企業の技術を体得する。これが第一です。次に、少なくとも4~5年やって、ここが割れたとか、ここが切れたとか、ここがどうなったとか、その技術自身に附属して起こるいろんな問題をしつかり把握することです。それで始めて技術が体得されたといえる。ここでやっと技術者の卵が生まれるわけですな。ここまでできて始めて、さっきお話したような建築の共同研究会等ができた際に、それをどのように応用していくかという市場の開拓ができます。」

2) 基礎研究については、

「技術を体得してやっているうちにわからないところが生まれてくる。それを解明するために基礎研究が必要となってくる。だから基礎研究といっても常に企業と関連のあるものです。そして、そうした基礎研究を徹底させることによって、思いがけない結果が出てくる。これが本当の創造であり、新しいアイデア、新しい商品の生まれてくるゆえんです。

今までできたものをよそに使うとか、よそと一緒にするとかいうことに創造はあり得ません。疑問を当り前だと見過すようでは困ります。どうしてだ、どうしてこうなんだ、と徹底的に突込んでいかなくては駄目です。できるか、できないかわからないけれど、とにかく徹底させる。そこからだけ新しいものが生まれるのです。」

3) 人づくりについて

「それは人によって違う。最近人づくりの話がよく出ますが、近頃の教育のように、なるべく広く常識を養えというのは、一面ではいいが、壁にぶつかったときは駄目ですね。彼等は徹底させることを知らない。アメリカ式の技術屋ならどんどん生まれますが、ぶつかった壁をぶち抜いてゆくだけの徹底した知識を持った人は生まれません。ではどういうふうに教育するかというと、教育で人がつくれると思うことが間違いなんです、本質的な問題ですな。(笑声)」「その辺のところは非常に難しいですな。一般には、今のようにアメリカ式の研究所を考えて、そこで働く人をつくるということならいけますな。しかし、その人がぶつかった壁を切り開くことができるかということ、私はそれを望む方が間違っていると思う。」「テーマが大事だとか、そのテーマは誰が選ぶとか、結局そのテーマが与えられた人は、馬車馬のように走れということですな。そ

こでテーマを出す人、それは技師長です。」

アメリカ式というのは、超々ジュラルミンの開発では住友では7～8人でしていた研究を海軍研究所とアルコアでは600人でやっていたということを意識しての発言かと思われる。

(4) 著書より

五十嵐博士は生前に一冊の著書を執筆されている。図7.7に示す鉄鋼新聞社発行の「アルミニウム技術入門」²⁶⁾である。現在でも十分通用する入門書で、必要にして最小限の事柄について書かれている。ところどころ実際に経験していないとわからないようなことを簡潔に書き、ハッと気がつかされることが多い。この本の前書きでは執筆の動機について語っている。

「万物は生成流転する。瞬時もとどまることを知らない。アルミニウムについても広範な新しい業績が山のように集められつつある。集りつつある新しい業績によって新しい理論が組立てられ、ふるいものと代りつつある。日に月に、しかも急速に。

戦後家庭の台所で黒い鉄は白いアルミニウムに代った。金と思った万年筆のキャップはアルミニウムだった。ダラリの帯の金糸銀糸もアルミニウムと聞いて驚いた。ビルの外壁はアルミニウムのカーテンウォールとなった。時速250kmの新幹線の電車は全アルミニウムで計画されつつある。このときに当ってアルミニウムとはどんなものかを書いてみよう。難しい理屈や細かい数値は専門家におまかせして、ここではアルミニウムの常識を、そして常識さえあれば必要に応じて情報センターは最新の数値を引きだしてくれることにもなろう。僅かの暇で読めるような素人の常識、だれでもよめばわかる常識、しかもそれは今日の常識であって、新しい事実はたえずこの常識を覆しつつ進歩するであろう。」



図7.7 五十嵐博士の著書、アルミニウム技術入門

そのあとがきでは、どのように読むべきかの心構えが書かれている。科学技術に関する五十嵐博士の思いが込められている。

「これからアルミニウムの仕事にはいろいろという新人にアルミニウムとはどんなものかを知ってもらうために、アルミニウムの常識を書いてみた。理屈めいたことはできるだけ簡素化した。また実用に必要な細々としたデタも2、3例を示すにとどめた。科学でもなく、技術でもない、常識である。

科学技術振興が叫ばれている。科学は自由な発想の下で何の牽制も受けないときにのみ、のびのびと発展する。その前によこたわる第一の障壁は官僚化であり第二の障壁は大衆化である。技術は科学を基礎としながらもプロジェクトが与えられて官僚化し、できた結果は大衆化してその効果を増す。呉越同舟ともいべき渾沌たるなかに常識という^{ぬえ}襦みたようなものをほり込んでどちらからも叩かれるであろう。だが文句なしに読んでみていただきたい。『アルミニウムができるまで』はスッとよめる。『アルミニウムの性質』はすこしでもややこしいと思った場所とはばしてもよからう。『アルミニウムの合金』はアルミニウム合金そのものの大要である。『アルミニウムの加工』はそれぞれ自分の行く道だけでよからう。そうすれば数時間で済むはずである。ズブの素人はそれで大要がわかる。専門家はおかしな点に気がつかれるはずである。どうか凝の目でその点を睨みかえしていただきたい。そこには大穴がまちかまえて新しい飛躍を待望している。そこに発展があり進歩があり流転してとどまることを知らないであろう。」

戦後については、深井誠吉博士が日本金属学会誌で「名誉員の近況」の中で次のように書かれている²⁷⁾。

「終戦直後の昭和22年暮、扶桑金属工業株式会社(占領軍の指令により住友金属工業は数年間社名を変更した)を停年退職された五十嵐先生は東北大学工学部、秋田大学鉱山、岩手大学工学部教授として数多くの俊秀を育てられた。」「一応形は顧問ということで研究、技術全般について、敗戦日本を救うものは若人であり、その若人を指導、教育するのが自分の使命であるとの御信念に基づくものであろうか。とくに若い技術陣の指導をお願いしているが、現職のときでもいわゆる指示とか指導はお嫌いな五十嵐先生は例の調子で悠々閑と構えられ、正に大人の風格がある。他人には寛容、自己にはきわめて厳しい御性格は昔も今も変わらず、朝9時から夕方4時までキッチンと勤務されている。もともと外国語に堪能な五十嵐先生は内外の文献、図

1. 自社の歴史、人、技術等の一切を体得することが第一。4~5年はかかる。学校の講義だけでは駄目。
2. 理論も実験も日に日に進んでこそ工業も発展する。未熟な理論を絶対だと考えてもらっては困る。
3. 事実が大切なんだ！あれこれ理屈を言わないこと。思った結果と矛盾した事実が示されたときのみ進歩があり、発展がある。
4. 疑問を生じたとき、どうしてだ、どうしてこうなるのかなと繰り返し、徹底的に突っ込んで調べなくては駄目だ。
5. テーマが大事だが、誰がテーマを決めるのか。

図 7.8 五十嵐語録²⁸⁾

書、あるいは社内の研究報告などは隔々まで精読されて、要点はメモされ、それを五十嵐流に分析、整理される。したがつてときどき部屋へ伺って無駄話をしているときでも鋭い閃きを感じ思わずハッとさせられたり、また自分の文献調査が間に合わないときには五十嵐さんのものを利用していただくが、別に嫌な顔もされない。よき時代、明治に生を享けられた五十嵐先生が、いま最大の関心を持っておられるのは日本の将来というか、文化国家日本が世界の強豪を相手に堂々と太刀打ちするにはどうするか、科学技術の振興も人作りも量の問題ではなくて質の問題である。さらに一步を進めると良質のものの協調だ、と考えておられるようだ。』

(5) 五十嵐語録

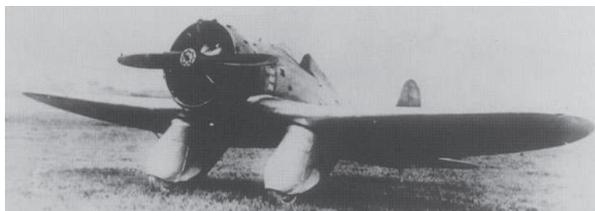
元副社長、技術研究所長であった永田公二博士は、以上の五十嵐博士が語った中から、いくつか選んで五十嵐語録（図 7.8）なるものを紹介している²⁸⁾。

参考文献

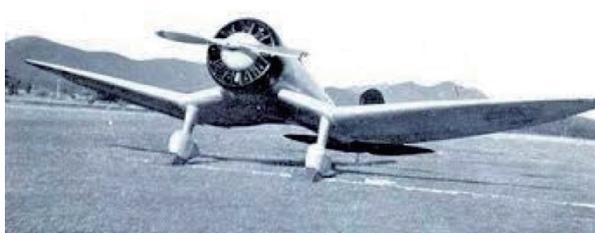
- 1) 深井誠吉：「北原五郎氏の逝去を悼む」，社内報，住友軽金属，昭和 46 年 11 月。
- 2) 西村秀雄：随筆・軽合金史（其 29），軽金属時代，No.200（1951），10。
- 3) 軽金属工業発達史（其の一），航空機用軽金属材料について，第一回軽金属座談会記録，軽金属，No.6（1953），103-137。
- 4) 柳田邦男：零式戦闘機，（文春文庫），文芸春秋社，（1980），288。
- 5) 五十嵐勇：軽金属，5（1952），29。
- 6) 吉田英雄：住友軽金属技報，54（2013），264-326。
- 7) 五十嵐勇：住友金属・研究報告，第 2 卷，第 12 号，（1937），1280-1294。
- 8) 五十嵐勇：航空機用材としての軽合金の研究（学位論文），（1939），37。
- 9) 五十嵐勇，北原五郎：日本金属学会誌，3（1939），66-76。
- 10) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告第 3 卷，第 6 号（1939 年 9 月），531-552。
- 11) 住友軽金属年表（平成元年版），住友軽金属工業株式会社，（1989）。
- 12) 特許第 135036 号、五十嵐勇、北原五郎、昭和 15 年 2 月 28 日。
- 13) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告，第 2 卷，第 9 号（1937），883-899。
- 14) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告，第 3 卷，第 1 号（1938），1-17。
- 15) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告，第 3 卷，第 3 号（1938），232-246。
- 16) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告，第 3 卷，第 3 号（1938），247-256。
- 17) 五十嵐勇，北原五郎：住友金属・研究報告，第 3 卷，第 6 号（1939），455-474。
- 18) 五十嵐勇，北原五郎：鉄と鋼，23（1937），447-451。
- 19) 五十嵐勇，北原五郎：日本航空学会誌，53（1939），982-996。
- 20) 寺井士郎：住友軽金属技報，29（1988），93-98。
- 21) 吉田英雄：軽金属，62（2012），502。
- 22) 五十嵐勇：住友軽金属技報，16（1975），1。
- 23) 佐藤史郎：アルミニウム 11（2004），38-43。
- 24) 深井誠吉，社内報，住友軽金属，No.68（1965 年），3-7。
- 25) 飯島嘉明：超々ジュラルミンと五十嵐勇，金属，76（2006），1132。
- 26) 五十嵐勇：アルミニウム技術入門，鉄鋼新聞社，（1969）。
- 27) 深井誠吉：日本金属学会誌，（1963 年），149。
- 28) 永田公二：軽金属，60（2010），192-201。

8 | 堀越二郎と艦上戦闘機

宮崎駿のアニメ「風立ちぬ」が描いていた飛行機¹⁾は、零戦ではなく、そこに至るまでの七試艦上戦闘機（七試艦戦、図 8.1 a）²⁾、「七試」は昭和7年度に海軍が試作発注したことを示す）や九試単座戦闘機（九試単戦、図 8.1 b）²⁾）である。九試単線の成功で九六式艦上戦闘機（図 8.1 c）²⁾（「九六式」は1936年（皇紀2596年）度に海軍が制式採用したことを示す）、十二試艦上戦闘機を経て零式艦上戦闘機（1940年（皇紀2600年）制式採用。末尾の零をとって「零式」とした）へと繋がる。



a) 七試艦上戦闘機



b) 九試単座戦闘機



c) 九六式艦上戦闘機

図 8.1 堀越二郎の設計した戦闘機²⁾

8.1 七試艦上戦闘機とジュラルミンの利用

1932年（昭和7年）試作発注された七試艦戦は、三菱（1920年三菱内燃機製造→1921年三菱内燃機→1928年三菱航空機→1934年三菱重工業と社名が変更、以下三菱と記す）の堀越二郎（注、図 8.2）が設計主務者として初めて手がけた金属構造を持つ単葉戦

闘機であった。先進的な低翼単葉機ではあったが、主翼は全金属製ではなく金属骨格に麻布を張った羽布張りという中途半端な構造であった³⁾。当時まだジュラルミンの大きな押出形材が容易に入手できなかったため、主桁は重量的に有利なジュラルミンの押出形材ではなく、薄板の重ね合わせでリベット留めとなり、片持ち式主翼に十分な強度を与えようとして必要以上の厚さとなった^{4), 5)}。また大直径の主車輪を支える旧式構造の脚柱とそれを覆うスパッツも見るからに空気抵抗の大きなものとなった。堀越は、「胴体は不恰好で、どうひいき目に見ても全体がどこことなく調和がとれていなかった」⁴⁾として、この試作機を「鈍重なアヒル」とか「醜いアヒルの子」と自嘲した^{3) ~ 5)}。この試作機は分厚い主翼、太く無骨な胴体、太い主脚といった空力的に不利な構造のため、目標とされた350 km/hの速度に達せず、また墜落事故も起こして失敗作となった。



図 8.2 堀越二郎（1947年撮影）
（国立科学博物館 鈴木一義より提供）

8.2 九試単座戦闘機と九六式艦上戦闘機に用いられた二つの超ジュラルミン

8.2.1 九試単座戦闘機と九六式艦上戦闘機

三菱も中島（中島飛行機）も七試艦戦ではともに不合格となったため、1934年（昭和9年）あらためて試作機が発注されたのが九試単戦である。七試艦戦の苦い失敗の反省から、堀越は当時の最新の技術をこの九試単戦に全面的に取り入れた^{3) ~ 6)}。分厚い金属骨格羽布張りの主翼は押出形材でできた主桁を持つ全金属製の薄翼に置き換えられ、主脚も小さな直径の車輪と単支柱を組み合わせて細くまとめ直され、逆ガル形式の主翼とし主脚を短くして重量を軽減した。また細

コラム 堀越二郎

1903年6月22日、群馬県藤岡市に生まれる。1924年東京帝国大学工学部航空学科に入学。1927年東大航空学科第五期生の9人の一人として卒業し、同年三菱内燃機株式会社に入社。1929～1930年、欧米視察。ドイツのユンカース社、アメリカのカーチス社にて機体技術を研究。1932年、七試艦上戦闘機の設計主務者に抜擢される。七試艦上戦闘機は失敗に終わったが、その大胆な挑戦は低迷していた三菱に技術的飛躍をもたらし、1934年、再び九試単座戦闘機の設計主務者に任じられた。制式採用された九六式艦上戦闘機は海軍の期待をも上回る高性能を実現して傑作機となり、1937年、十二試艦上戦闘機の設計主務者となり、零式艦上戦闘機を開発した。その後、1940年、十四試局地戦闘機（雷電）、1942年、十七試艦上戦闘機（烈風）の設計主務者となった。1944年12月、病に倒れ、約半年静養。1945年三菱重工業参事。1963年、新三菱重工業参与で退職。1964-1965年、東京大学宇宙航空研究所講師。1965年東京大学工学博士授与。1965-69年、防衛大学教授。1972-73年日本大学理工学部、生産工学部教授。1973年勳三等旭日中綬章。1982年1月11日逝去。享年78歳。

部に至るまで流線形化を図り、表面の空気抵抗を抑えるため皿頭にした沈頭鋸を初めて採用した。エンジンも軽量で大馬力を発揮する中島製「寿」五型として、最大速度450 km/hを出すことが出来た^{3)～6)}。この九試単戦は1936年11月制式採用され、九六式艦上戦闘機（九六式艦戦）となった。九六式艦戦と九試単戦は必ずしも同じではなく、主翼の逆ガルは航空母艦での着艦の際、安定性を失う危険があるため通常の楕円翼に、胴体も細長い無線電話装置などの搭載が困難で太く再設計された。主脚も胴体に対応して太目の固定脚となった^{4) 6)}。九六式艦戦の性能は「世界の水準に追いついた。あるいは追いついた」との高い評価を得た⁴⁾。この九六式艦戦の成功が次の十二試艦戦（零戦の試作機）の開発に繋がった。

8.2.2 九試単座戦闘機に使用された超ジュラルミン

前述のアニメの中にL字型の押出型材が出てきて、「軽いな、ジュラルミンの押し出し材とはぜいたくなものだ・・・」と宮崎は語らせている（図8.3）¹⁾。この九試単戦の主翼桁材に用いられた押出型材に関して、堀越は「翼厚を薄くできたのは、外板をジュラル



図8.3 アニメ「風立ちぬ」の中のジュラルミン押出型材¹⁾

ミンとし、かつ桁フランジに厚い押出型材を採用することができたからである^{3) 6)}と書いているが、厚い押出型材がどのような合金であるのかは明瞭に書いていない。

ただ、十二試艦戦での超々ジュラルミンの採用時に、堀越は「主桁の上下縁材とウェブ板だけにESD材を使ったとしても、従来のSD材に比して、十二試艦戦で300 kg（原文ママ、30 kgの間違いか）の重量節減が可能であった⁷⁾と書いており、九試艦戦で用いられたのはSD、すなわち超ジュラルミンであることが推測される。

柳田邦男は、「零式戦闘機」（文春文庫）の中で次のように書いている。堀越の言葉として、「七試のときにはなかった桁フランジ用の押出型材もできるようになったし、強度の大きい新しいジュラルミンも開発されたというから、今度は金属張りの薄翼を作れると思う。これは大事なことなので、自分で住友金属まで行って調べてくるつもりだ⁸⁾（p.164）とあって、実際に大阪の住友金属まで出張しているとのこと。「堀越がいま九試単戦に使おうとしている新しいジュラルミンとは、一平方ミリ当たり45キログラムまでの張力に耐えられる、強度の大きな軽合金で、「45キロ超ジュラルミン」あるいは「SDH」と呼ばれていた。」⁸⁾（p.166）と書かれている（筆者注：SDHとは焼入れ後室温時効硬化させたSDのこと）。この記述が間違いないとしたら、あのアニメに登場してくる押出型材はジュラルミンではなく、超ジュラルミン、一般的にはよく知られている24S（2024）合金ということになる。

ところが問題はそう簡単ではない。住友軽金属（住友金属からアルミと伸銅部門が昭和34年（1959年）

に分離してできた)の年表平成元年版(p.60)には「松田(筆者注:研究部長兼製造所副所長)は、再び24S系の工業化の研究に移り、昭和10年(1935年)4月ころ、それに成功、のちに24S系のものを超ジュラルミンと呼ぶようになった⁹⁾とある。九試計画が海軍航空本部から通知されたのは昭和9年(1934年)2月はじめで、基本設計がまとまったのは3月後半とのこと⁷⁾、設計開始からわずかに10ヶ月後の1935年1月に1号機が完成している⁵⁾。この1号機に24S系超ジュラルミンが用いられているとしたら、少なくとも半年から一年前には工場試作なり製造技術が完成していないと実機には適用できないと考えられる。また海軍の軍用機であるので、海軍の材料規格制定も必要である。

1934年当時の社内の研究報告書を見る限り、住友では、ドイツの681ZBやDM31合金と同様に焼入れ焼戻しする含ケイ素超ジュラルミンが研究開発の対象であり、SD(Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si)、またSA1(Al-1.2%Mn-0.8%Cu)を被覆した合わせ板をSDCと称して、これらの合金を社内で制定したばかりで、これらの合金の評価を専ら行っていた。したがって、1934年に試作された九試単戦主桁に使用された押出材は上記の含けい素超ジュラルミンSD(Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si)と推定される。

しかしながら、1935年5月頃からの社内の研究報告書を見ると、T3およびT3C合金(T3、T3Cは住友の合金名称)の試験結果が報告されるようになる。T3押出材の成分はAl-4.14%Cu-1.36%Mg-0.68%Mn-0.14%Si-0.28%Feで、まさに24S合金である。この頃から、住友は超ジュラルミンに関して、大きく舵を切ることとなる。24S型超ジュラルミンT3はSD、その合わせ板T3CはSDCと称されるようになった。SDCの皮材は

SA3(Al-1.5%Mn-0.55%Mg)合金で、アルコアの24SCより高強度の合わせ板となった^{10),11)}。1935年、シュレーマン(Schleomann)社製2,000トン横型水圧押出機(複動型)が設置され、SDの材が量産できるようになった。住友の超ジュラルミンSD(24S)は1936年制定の全金属製低翼単葉機の九六式艦上戦闘機に採用され、軍用機全盛時代の需要期を迎えた^{12),13)}。

8.3 十二試艦上戦闘機と零式艦上戦闘機と超々ジュラルミンの利用

8.3.1 十二試艦上戦闘機

1937年10月6日、三菱重工業名古屋航空機製作所の堀越二郎は課長からカナまじりの和文タイプで打られた一通の書類を受け取った。それは、「十二試艦上戦闘機計画要求書」であった。「十二試」とは昭和12年試作発令、艦上戦闘機とは航空母艦上から発着する戦闘機のことである。堀越は「この要求書は、当時の航空界の常識ではとても考えられないことを要求していた。もし、こんな戦闘機がほんとうに実現するのなら、それはたしかに、世界のレベルをはるかに抜く戦闘機になるだろう³⁾と述べている。その要求書は表8.1に示すような内容である³⁾。この十二試艦上戦闘機はのちに太平洋戦争前半、空の王者として君臨した「零戦」の試作段階の呼び名であった。

このような要求が出てきた背景には、当時、日華事変での戦闘機の護衛なしで裸同然の出動した日本海軍自慢の新鋭攻撃機が、予想に反して迎え撃つ敵の戦闘機にばたばたと落とされる事態が起ったためである。そこで大型機を落とすために20ミリ機銃を持ち、同時に、攻撃機を護衛までして敵地まで長距離を往復し、

表 8.1 十二試艦上戦闘機計画要求書³⁾

項目	要求内容
用途	掩護(えんご)戦闘機として、敵の戦闘機よりもすぐれた空戦性能をそなえ、迎撃戦闘機として、敵の攻撃機をとらえ、撃滅できるもの。
大きさ	全幅、つまり主翼のはしからはしまでの長さが12メートル以内。
最大速度	高度4,000mで時速500km/h
上昇力	高度3,000mまで3分30秒以内で上昇できること
航続力	機体内に備え付けられたタンクの燃料だけで、高度3,000mを全馬力で飛んだ場合、1.2時間ないし1.5時間。 増設燃料タンクをつけた過荷重状態で、同じく1.5時間ないし2.0時間。 ふつうの巡航速度で飛んだ場合、6時間ないし8時間。
離陸滑走距離	航空母艦上から発進できるようにするため、向かい風秒速12mのとき70m以下。(無風ならこの2.5倍内外)
空戦性能	九六式艦上戦闘機2号1型に劣らないこと。
機銃	20ミリ機銃2挺。7.7ミリ機銃2挺。
無線機	ふつうの無線機のほかに、電波によって帰りの方向を正確にさぐりあてる無線帰投方位測定器を積むこと。
エンジン	三菱瑞星13型(高度3,600mで最高875馬力)か、三菱金星46型(高度4,200mで最高速度1,070馬力)を使用のこと。

しかも、そこで待ち構えている敵の戦闘機に打ち勝つ空戦能力をもたせたいという要求が出てきた³⁾。

当時、三菱の設計主務者の堀越は、この機体の設計の問題点を四つに整理していた。第一にエンジンの決定。第二にプロペラの選択、第三に重量軽減対策、第四に空力設計、つまり機体の空気抵抗を少なくし、同時に理想的な安定性、操縦性を実現することであると。第一のエンジンは重量の軽い三菱製「瑞星」を使うことに決め（その後、試作三号機より馬力の大きい中島製「栄一二型」に換装）、第二のプロペラは新式の定回転プロペラの使用することになっていた。なお、このプロペラに関して、ジュラルミン翅の鍛造からプロペラの製作まで住友金属が関わった。第四の空力設計は、胴体の形状、主翼の断面と面積、翼端の形状、尾翼の大きさと形状などを検討し、最適な形状を決めていった。空気抵抗を減らすために、引き込み脚や沈頭鉚が採用された。

最大の難関は第三の重量軽減対策であった。このため一律であった安全率の見直しや、グラム単位での重量軽減のために、「肉落とし」と称して、強度に関係のないところをくりぬくことも行われた。重量の軽減には、このほか、どのような材料を使うかということもおおいに関係がある。

特に、内部構造で最も重要な主翼の桁についても、可能な限り軽くてしかも強い材料を使いたかった。前の九六式艦戦のときは45キロ超ジュラルミン（SDH）が開発され、その押出材材が生産されていたので、翼は、機体がさらに大きくなるため、重量増加が避けられない。九六式艦戦では桁を薄くでき重量軽減に大いに役立った超ジュラルミンであるが、十二試艦戦では押出材材を分厚くしなければならずその結果重量増加につながり、桁の部分が分厚くなると翼も厚くせざるをえなくなり、いっそう悪くなると考えられた。

8.3.2 超々ジュラルミンとの出会い

従来のジュラルミンを更に改良したものか、あるいは、別のもっとすぐれた軽い金属はないだろうかを堀越が考えていたところに次のような住友のESDとの出会いがあった。

「ある日、会社の材料購入を担当している木村技師が、堀越氏の机にぶらりとやってきて、次のような話をしていった。『堀越さん、いま住友で非常に強い新しい合金ができかかっているらしいですよ』と。話によれば、従来のジュラルミンの成分を少し変えて、強度の高い材料を開発し、試験的に生産に入れる段階だという。私はこの話におおいに興味をそそられた。そ

こで、住友金属に問い合わせると、担当者が直接私に説明しながら、実物を見せたいという返事がきた。早速、大阪の住友の工場に飛んで行って、五十嵐博士と小関技師から『60 kg/mm²の強度があることについては、住友として責任を持って保証できます。海軍の材料規格にはまだ採用されていませんが、時期割れの問題は、押出材材に関する限りすでに技術的には解決しています』^{6), 14)}との説明を聞き、実物を見せてもらっているうちに、私は、これは使えるぞ、と判断した。そして、この新材料を使用するにあたって、注意しなければならない点をよく聞いてきた。私は、さしあたり、主翼の桁だけに押出材材を使うとして、大まかに重量を計算してみると、30 kgは軽くなることがわかった。そこで、会社からこの新しい金属の使用を航空本部に願い出た。すると、航空本部でもすでにこの金属に注目しており、許可する一歩手前まで来ていたとのことだった。海軍側はむしろ願い出を喜んで、この新材料の使用を認めてくれた^{3), 6), 8), 14)}。

このESDを押出材材に限定したことは、最近発刊された杉田親美著「三菱海軍戦闘機設計の真実」（曾根嘉年技師の秘蔵レポート）の中の曾根技師の打合せ記録にも記述がある¹⁵⁾。曾根技師は堀越技師を補佐した技術者で戦後三菱自動車の社長になった。昭和13年7月16日、三菱が左右主翼の結合金具をESDの鍛造品で成形できないかと住友金属に相談に行った時の記録である。住友は「ESDの簡単な形状の鍛造は可能なるもひび割れ発生の恐れあり、十分注意を要す。押出材材ならば強度上最も有利にして、ひび割れ等の懸念もなし。押出より機械加工後、曲げ作業にて仕上げる方法が一番無難と考えらる」とある。ここの「ひび割れ」は時期割れ（応力腐食割れ）と考えられるが、鍛造品の場合、焼入れで再結晶組織になると強度低下が生じ、時期割れが生じやすくなるからである。

図8.4は零戦主翼の図版と主桁の断面図である^{16), 17)}。前・後桁縁材とあるのが、超々ジュラルミンが採用された2本の主翼主桁である。図右に示すように上下のフランジと垂直の壁板ウェブで構成されるがフランジにはT字型のESD押出材材が用いられた。ウェブには時期割れ対策のためにESDの板にAl-Zn-Cr合金をクラッドしたESDCが用いたとされるが、実際にはあまり使用されずに24Sのクラッド材SDCが使用された。これはESDのDC鑄造が困難で生産性が悪かったことが原因と考えられる¹⁸⁾。

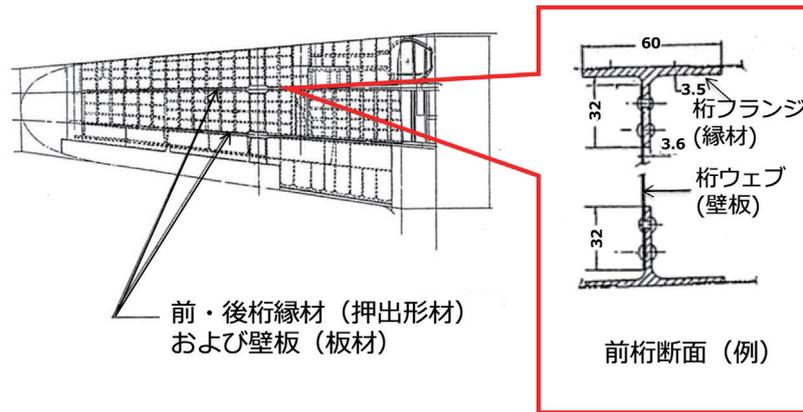


図 8.4 零戦主翼とその図版および主桁前桁の断面図^{16), 17)}

8.3.3 十二試艦上戦闘機の試作

かくして、堀越の言によれば、「千篇一律的な安全率の規定を洗い直して、新たな合理性のうえに設計方針を立てるといふ冒険の方法にはじまって、超々ジュラルミンの採用という、日本の航空機史上画期的な事件にいたるまであらゆる手段を研究し取り入れ³⁾て、1939年3月試作第一号機が完成した。試作機は数個の部分に分解され梱包されて、3月23日午後7時過ぎに、牛車2台に分載されて、名古屋市の南はずれ、港区大江町の工場を出発、名古屋市内を夜のうちに通過し、小牧、犬山を経て、まる一日がかりで、約48kmはなれた岐阜県各務原飛行場の片隅に或る三菱の格納庫に着いた。初飛行は4月1日で、ほぼ満足の結果も得たが、問題点も明らかとなった。その後、特に設計要件の見直しをすることにより操縦応答性の面で画期的な進歩を遂げた。1940年4月末までに十二試艦戦を前線に送ろうとしていた矢先、3月11日、十二試の2号機が横須賀で空中分解して、パイロットが殉職したとの連絡があり、この原因解明が緊急に必要なになった。3月16日、検討会が開催され、機体強度研究の主任である空技廠飛行機部山名正夫技師が、十二試艦戦で始めて採用した超々ジュラルミンESDの主翼桁の疲労強度に疑わしい点があることと、外板打ち付けのための沈頭鉋が外板にしわが寄るほど強い力が加わったときに、抜けるおそれがあるのではないかといつて、主翼が単なる衝撃で折れたのか、ESDの時期割れか金属疲労によるひびが入って飛行中に折れたのか実験中であると述べた⁸⁾。

3月18日の空技廠の事故調査委員会で、折れていた主翼桁の破断面を観察した結果、心配されていた超々ジュラルミンの時期割れの現象は起っていないことが確認されたこと、さらに疲労試験も行なったところ、空中分解となるような疲労破壊も起っていないことが確認されたこと、ただし桁の削り落とし部分は、段付の

シャープコーナーになっているため耐用時間が予想よりかなり短いことが明らかとなった。枕頭鉋も今回の事故と関係がないことが明らかとなった。他に先駆けて採用した超々ジュラルミンに濃厚な疑いをかけられたが、「シロ」ということで落着いたが、切り欠き疲労強度の低下はそれ以降のコーナーの形状変更となった⁸⁾。

この事故の原因は昇降舵マスバランスの横揺れ振動が繰り返し起り、次第にマスバランスの腕に疲労破壊が生じてマスバランスが脱落して、その後尾部でフラッタが起り、空中分解したとの結論に達した。図8.5に示すようにマスバランスとは、舵がフラッタを起こさないようにするためにつけられた一種の錘である^{3), 19)}。低速の飛行機ではいらぬが、高速になればなるほど気流によって舵が振動を起こしやすくなるため、九六艦上戦闘機あたりからつけられるようになったものである。フラッタというのは、飛行機が速度を増すと、主翼や尾翼あるいは補助翼や昇降舵、方向舵などが、旗が風にはためくような振動を起こす現象である^{3), 7)}。このフラッタ問題は前述の杉田の著書の曾根技師の出張記録にも掲載されている¹⁵⁾。また最近発刊の安藤隆幸

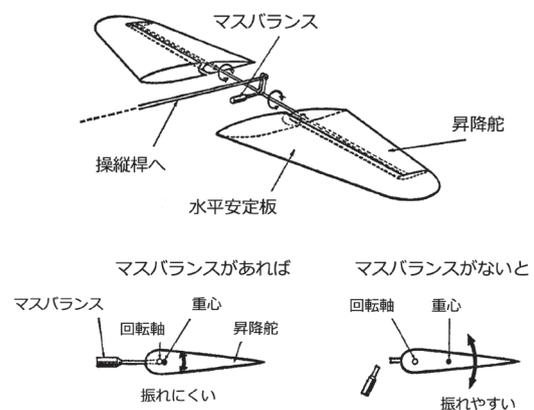


図 8.5 昇降舵のマスバランスとマスバランスが欠落したときの振れ^{19), 20)}

表 8.2 九六式艦上戦闘機と零式艦上戦闘機の性能比較（日本海軍制式機大鑑より）²²⁾

	九六式四号艦上戦闘機	零式艦上戦闘機二一型
最大速度	432 km/h(高度 3,160 m)	533 km/h(高度 4,550 m)
上昇力	3,000 m/3分 35秒	6,000 m/7分 27秒
航続距離	1,120~1,652 km	2,222~(増槽使用) 3,502 km
武装	7.7 mm機銃× 2、30 kg 爆弾× 2	20 mm機銃× 2、7.7 mm 機銃× 2 60 kg爆弾× 2または 30 kg 爆弾× 3
翼面荷重	106.6 kg/m ²	107 kg/m ²
主翼桁材質	超ジュラルミン(45 kg/mm ²)	超々ジュラルミン(60 kg/mm ²)
エンジン	「寿」680馬力(3,000 m)	「栄」一二型 950馬力(4,200 m)

著「零戦の振動」でも材料力学的な観点から詳しく解説されている²⁰⁾。空技廠の川村宏矣中佐も「主翼の破面が材木を折ったような破面なので、飛行機の落ちた原因はESDのシーズンクラック(時期割れ)ではないかと随分突っ込んで調査した」と述べている²¹⁾。

堀越はこうした殉職も伴いながら、十二試艦上戦闘機の改修を続けた。1940年7月、海軍は制式化前であったが長距離飛行が可能な10数機の十二試艦上戦闘機を中国大陸に配備し、実戦使用しながら現地で改修作業を行い、7月末、十二試艦戦は零式一号艦上戦闘機の名称で制式採用された。9月の重慶への侵攻では、13機の零戦で27機の中国空軍機を全機撃墜するという大きな戦果を上げた。表 8.2 に九六式艦上戦闘機と零式艦上戦闘機の性能の比較を示す²²⁾。

8.4 零式艦上戦闘機

1940年7月末、十二試艦戦は制式機として採用され、その年が日本紀元2600年であったところから、その末尾の零をとって、「零式一号艦上戦闘機」と名付けられた。「零戦」とは「零式艦上戦闘機」の略称である。「ゼロ戦」というのは外国のパイロットから「ゼロ・ファイター (Zero Fighter)」、「ジーク (Zeke)」と呼ばれ、外国の評判などから戦後生まれた零戦の愛称といわれているが、実際は「れいせん」、「ぜろせん」どちらの呼び方も使用されていたようである²³⁾。

型式は、1942年の夏に最初の数字が機体の変更を、二つ目の数字がエンジンの変更を表す呼び名となり、二一型(図 8.6²⁴⁾)は二つ目の機体に一つ目のエンジンを搭載していることを意味する²³⁾。海軍航空本部は大陸での零戦の目覚ましい活躍でその性能の優秀さを認め、中島飛行機にも零戦を生産させる事を決めた。これは、三菱の量産能力に対し、当時最新鋭だった新設の中島飛行機小泉製作所がアメリカ流のオートメーション生産ラインを整え、その量産能力が高く評価されたためである²³⁾。こういう場合、「製造権や特許権

の問題は、民間同士に於ける場合とは違い、開発を担当した会社に対して適当な額の報償を支払い、海軍が指定した製造を受け持つ会社にいっさいの技術資料と技術援助を与えること³⁾で決着がついた。第67号機以降は、艦上での取り扱いやすいように、左右の翼端を折り曲げられるようにした零式艦上戦闘機二一型に変更された。その後、主翼翼端の折りたたみ機構を廃止し、高高度では回転数を高い方に切り替えができる二速過給器付きの中島製「栄二一型」エンジンに替えた零戦三二型となった。

8.5 堀越二郎と零戦

零戦もまた、軍の要求に非常に合致した航空機で戦争の初期での戦果はめざましいものがあり、戦後も零戦伝説として称賛されている。しかしながら、その負の側面も見ておく必要があるであろう。当時の軍の考え方もあってか、初期には防弾に対しては考慮がなされていなかったので「開戦前からの熟練した優秀なパイロットを何百人も失う」³⁾結果となった。防弾がないために軽量化が徹底できたという側面も否定できないが、堀越も防弾に関して「零戦の最初の計画要求に、一行たりとも触れられていなかった」³⁾といっている。さらに日本軍の「始めから終わりまで零戦に頼らざるを得ない事態を招いた」技術政策のまずさに対し、米

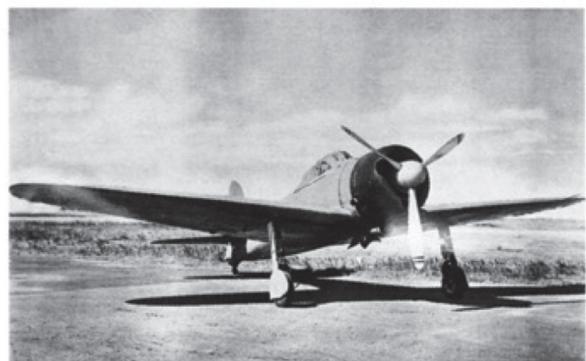


図 8.6 零式艦上戦闘機二一型 (A6M2b)²⁴⁾

野原茂：「零戦の系譜図」，柘出版社，(2006)，16より転載

国海軍は零戦から制空権を奪うべく技術開発力を集中して、零戦の二倍近い馬力のエンジンを積んだ新型戦闘機 F6F を開発した。堀越は質的にも量的にも圧倒的な F6F から「雨のような銃弾を浴びせられ、われわれが丹精をこめて作り上げた零戦は、つぎつぎに遠い南方の紺碧の海に散っていった」³⁾と語っているが、ここにはわが子を無残にも亡くしていくような心境が表れているように思える。零戦が特攻隊の飛行機として利用されることを知ったときは、「なぜ零戦がこのような使い方をされなければならないのか」、「戦争のためとはいえ、ほんとうになすべきことをなしていれば、あるいは特攻隊というような非常な手段に訴えなくてもよかったのではないか」³⁾と語っている。

8.6 第二次世界大戦での日米の航空戦力比較

第一次世界大戦で航空機が戦争遂行にとりはるかに重要であることが認められたが、欧州で戦争が勃発した 1939 年における軍用機の生産数を比較すると、米国では 2,141 機で、日本の 4,467 機、ドイツの 8,295 機よりはるかに少なかった。1940 年春のドイツの奇襲攻撃でドイツ空軍の優れていることがわかり、ルーズベルト大統領は年間 5 万機の航空機を生産する声明を発した。生産を推進するために国防助言委員会 (National Defense Advisory Commission) に自動車メーカー GM の社長 W.S. Kudsen を任命し、生産に責任をもたすことになった²⁵⁾。

この計画には巨額の生産設備を要するが、航空機各社の資金では不足するために、復興金融公社 RFC (Reconstruction Finance Corporation) の子会社として国防工場公社 DPC (Defense Plant Corporation) 設置の制度が作られた。この制度により軍が自ら工場施設を建設しそれを航空機会社に運営させるようになり、資金問題は一応解決した。新工場の建設、航空機が生産が急増したのは 1941 年真珠湾攻撃以後であった。大統領は 1942 年 6 万機の生産を、1943 年には 12 万 5000 機の生産目標を掲げた。当初、自動車メーカーの量産体制を利用すれば短期間に大量の航空機が生産可能であると考えられていたが、航空機と自動車では部品数も大きく違い、航空機では絶えず設計変更があり、これに対応するには従来の自動車メーカーのシステムをそのまま持ち込むことは困難であることがわかった。その後、直線的生産組織の整備、組立の大部分の下請化、労働者訓練、権限の分散等による生産能力の大幅増加がなされ、このような技術進歩には量

産方式を航空機の生産に導入しようとしたフォード社との提携に負うところが少なくなかった。実際、爆撃機 B-24 の生産では、他の航空機メーカーが 1 日 1 機の生産能力に対し、Ford 社は 24 時間体制によって 1 時間 1 機で B-24 を生産したと言われている²⁶⁾。また自動車メーカーは主として航空機の部品やエンジンの製造にあっていた。図 8.7 は第二次世界大戦中に製造された参戦諸国の航空機生産数の推移を示す²⁷⁾。1944 年で比較すると米国は日本の約 4 倍である。日米間の比較を軍用機のカテゴリごとに分けたのが表 8.3 である²⁸⁾。単発の小型機では米国は日本の約 3 倍の生産力を持ち、輸送機や大型 (四発) 爆撃機にいたっては、日本は圧倒的に少なかったというのが航空機生産数から見た先の戦争であった。

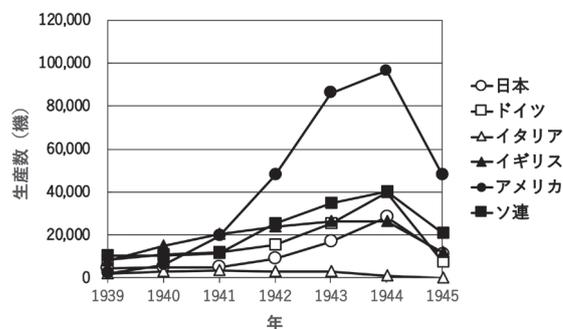


図 8.7 第二次世界大戦参戦諸国の航空機生産数²⁷⁾

表 8.3 第二次世界大戦で製造されたカテゴリー別軍用機生産量（機数）の日米の比較²⁸⁾

戦闘機	九六式艦上戦闘機	980	F4F「ワイルドキャット」	8,061
	九七式戦闘機	3,396	P-39「エアラコブラ」	9,558
	零式艦上戦闘機	10,425	P-40「ウォーホーク」	16,802
	一式戦闘機「隼」	5,751	P-38「ライトニング」	9,924
	二式戦闘機「鍾馭」	1,225	F4U「コルセア」	12,571
	二式陸上偵察機	470	P-51「マスタング」	15,586
	三式戦闘機「飛燕」	2,783	P-47「サンダーボルト」	15,634
	四式戦闘機「疾風」	3,488	F6F「ヘルキャット」	5,200
	局地戦闘機「雷電」	470	P-61「ブラックウイドウ」	740
	局地戦闘機「紫電」 「紫電改」	1,413	P-63「キングコブラ」	3,305
	五式戦闘機	396		
	局地戦闘機「月光」	470		
	日本軍合計	3,1267	米軍合計	97,381
単発攻撃機	九六式艦上攻撃機	205	SB2C「ヘルダイバー」	7,140
	九六式艦上爆撃機	428	SBD「ドントレス」	5,936
	九七式艦上攻撃機	1,149	TBD「デバスターター」	250
	九七式軽爆撃機	686	TBF「アベンジャー」	9,837
	九八式軽爆撃機	854	A-31/35「ベンジャンス」	1,931
	九九式艦上爆撃機	1,492		
	九九式襲撃機	1,472		
	艦上爆撃機「彗星」	2,157		
	艦上攻撃機「天山」	1,266		
	艦上攻撃機「流星」	117		
日本軍合計	9,826	米軍合計	25,094	
双発攻撃機	九六式陸上攻撃機	1,048	A-20「ハボック」	7,385
	九七式重爆撃機	2,064	167F「メリーランド」	290
	一式陸上攻撃機	2,416	B-25「ミッチェル」	10,000
	九九式双発軽爆撃機	1,977	B-26「マローダー」	5,157
	百式重爆撃機「呑龍」	819	「バルチモア」	1,575
	二式戦闘機「屠龍」	1,691	A-26「インベーター」	2,466
	四式重爆撃機「飛龍」	698		
	陸上爆撃機「銀河」	1,002		
日本軍合計	11,715	米軍合計	26,873	
四発爆撃機	九七式飛行艇	217	B-17「フライングフォートレス」	12,731
	二式飛行艇	167	B-24「リベレーター」	19,203
			B-29「スーパーフォートレス」	3,970
日本軍合計	384	米軍合計	35,904	
輸送機	零式輸送機	487	C-47「スカイトレイン」	10,048
	九七式輸送機	351	C-45「エクスぺディター」	4,500
	一〇〇式輸送機	507	C-56「ロードスター」	625
	一式貨物輸送機	121	C-46「コマンドウ」	3,140
			C-54「スカイマスター」	1,164
日本軍合計	1,466	米軍合計	19,477	
計	日本軍合計	54,658	米軍合計	204,729

参考文献

- 宮崎駿：アニメージュ・コミック・スペシャル「風立ちぬ」上，下巻，徳間書店（2013）。
- 日本航空機総集（第一巻）三菱篇，改訂新版，出版協同社（1981），22。
- 堀越二郎：零戦，その誕生と栄光の記録，カッパ・ブックス，光文社，（1970），角川文庫，角川書店，（2012）。
- 堀越二郎と零戦：歴史群像8月号別冊，学研パブリッシング，（2013）。
- 古峰文三：堀越二郎，零戦への道，丸，8月号別冊，潮書房光人社，（2013），81。
- 堀越二郎，奥宮正武：零戦，航空戦史シリーズ，朝日ソノラマ，（1982），学研M文庫，学研パブリッシング，（2013）。
- 堀越二郎：零戦の遺産，光人社NF文庫，（1995）。

- 8) 柳田邦男：零式戦闘機，文春文庫，(1980)。
- 9) 住友軽金属年表，平成元年版，住友軽金属工業株式会社，(1989)。
- 10) 吉田英雄：住友軽金属技報，54 (2013)，264。
- 11) 吉田英雄：軽金属，65 (2015)，627-637。
- 12) 竹内勝治：アルミニウム合金展伸材－その誕生から半世紀－，軽金属溶接構造協会，(1986)。
- 13) 竹内勝治：技術の歩み，非売品，住友軽金属工業株式会社，(1995)。
- 14) 吉村昭：零式戦闘機（新潮文庫），新潮社，(1978)。
- 15) 杉田親美著「三菱海軍戦闘機設計の真実」（曾根嘉年技師の秘蔵レポート）。
- 16) 大隈真：航空機，機体構造材料の変遷・展望，軽金属学会第75回秋期大会，超々ジュラルミン（ESD）開発50周年記念特別講演集，(1988)，34。
- 17) 野原茂：零戦－零式艦上戦闘機－，グリーンアロー出版社，(2003)，127, 129。
- 18) 馬場義雄：軽金属，39 (1989)，378-395。
- 19) Jiro Horikoshi: Eagles of Mitsubishi – The story of the Zero Fighter – , University of Washington Press, (1981), 91, translated from Zerosen published in Japanese in 1970, by Kappa books, Kobunsha Co., Ltd.
- 20) 安藤隆幸：零戦の振動，機体振動とエンジン・プロペラ振動のメカニズム，オリンピック印刷，(2019)，42。
- 21) 軽金属工業発達史（其の一），航空機用軽金属材料について，第一回軽金属座談会記録，軽金属，6 (1953)，103-137。
- 22) 秋本実：日本海軍制式機大鑑，別冊航空情報，酣燈社，(2000)。
- 23) 零戦のしくみ，新星出版社，(2011)。
- 24) 野原茂：零戦の系譜図，榎文庫，(2008)，16。
- 25) 宇野博二：http://www.gakushuin.ac.jp/univ/eco/gakkai/pdf_files/keizai_ronsyuu/contents/1003/1003-25uno.pdf
- 26) B-24（航空機）：https://ja.wikipedia.org/wiki/B-24_%28%E8%88%AA%E7%A9%BA%E6%A9%9F%29
- 27) 石津朋之、ウイリアムソン・マーレー：21世紀のエア・パワー、日本の安全保障を考える、芙蓉書房出版、(2006)，94-130。
- 28) 安藤英彌，伊吹龍太郎，嶋田久典，谷井成章：軍用機パーフェクト Book，第二次大戦までの名機508，コスミック出版，(2009)。

9 | アルコアの 7075 開発と ESD 以降の日本の合金開発

9.1 アルコアの7075開発

9.1.1 米海軍の無傷の零戦の回収

1942年6月のミッドウェー海戦と同時に行われたアリューション作戦で、アメリカは対空砲火で被弾してエンジンオイルが噴出してアクタン島に不時着したほとんど無傷の零戦一機（零式艦上戦闘機二一型）を手に入れ、零戦の弱点をつかむことに成功した¹⁾。図9.1に不時着した零戦とその搬出作業を示す²⁾、³⁾。それまでも「アメリカは、真珠湾攻撃以来、落ちた零戦の切れはしを寄せ集めてまでも、謎の飛行機と言われる零戦の秘密を解き明かそうとしていた」⁴⁾。そこで「真珠湾攻撃の際に撃墜された機体も数機分回収されており、まずそれらの分析が進められた。機体の構造や材質については詳細なデータが取られた。米軍を驚かせたのは主翼に使われた ESD の強度の高さであった。それは当時、日本の航空機開発技術に対して「欧米に数年は遅れている」と考えていたアメリカの陸海軍や航空機産業関係者の目を覚まさせる一因となった」⁵⁾。アメリカ軍は早速、アルコアにこの合金と同等な合金を作らせた。これが戦後の代表的な航空機用アルミニウム合金 7075 の誕生となった。しかし、アルコアは現在もなお日本の ESD に基づいて開発したとは公式には言っていない。このことが国際会議の航空機用アルミニウム合金開発の歴史の講演では、米国の著名な教授が日本の ESD についてはスルーする一因になっている。

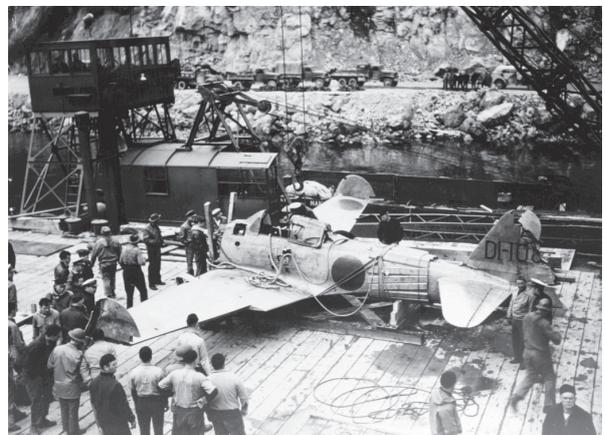
9.1.2 五十嵐勇と GHQ

住友軽金属常務取締役、研究部長であった畑栄一は住友軽金属技報の中で、次のように書いている。「戦後、75S の inventor に会いたいという目的で、米軍の将校が名古屋工場に現れたことがあった。五十嵐博士はすでに東北大学に去られたあとであった。アメリカは捕獲された零戦に ESD の使用されていることを知り 75S をつくったとの噂は聞いていたが、米軍が五十嵐博士を 75S の発明者として正式に認めていることは、その時初めて知った」⁶⁾ とのことである。米軍は撃墜された零戦の材料を分析し、それに基づいて 75S を開発したことを裏付ける貴重な証言である。

東北大学名誉教授大平五郎は東北大学金属工学科創立 75 周年記念誌（2000 年、p.112）で次のように語っている。「五十嵐教授着任後のある日、アメリカの海軍研究所の高級技師とアルコア研究所の人が突然やってきた。ESD のことについて質問があり、名古屋の住友金属に伺ったら此処に居るので仙台まで来たという。そして、教授にすぐにアメリカに来ないかという。先生の返事は唯一つ、『負けた国のものが勝った国へ行って何かいいことがあるか。断る』。その結果は毎月 1～2 回、ときには 3 回必ず 2～3 人の技術者が訪ねてきた。ほぼ 2 年は続いたと思う。先生は自分のやった仕事だけにこの次は多分これを聞きに来るだろうと話していたが、大体その予想通りになっていたのには敬服した。住友では 7～8 人でしていた研究を海軍研究所とアルコアでは 600 人でやっていたという」⁷⁾。



a) 不時着した零戦



b) 零戦の搬出作業

図 9.1 アリューション列島アクタン島に不時着し横転した零戦²⁾とその搬出作業³⁾

五十嵐博士の上司で研究部長も務めた田邊友次郎は「戦争の末期某米機の或重要部品の巨大な鍛造品が Al-Zn-Mg-Cu 系合金である事を知ったが、ESD よりも Zn 少なく、Mg 多く、確か Cr の含入はなかった。思へば是が 75S 或は其の初期のものであったらしい。敗戦後 Alcan のカタログに依り、75S の如何なるものなりやを知り、更に Materials & Methods 誌 (June, 1949) によって其詳細を知り得た。Reynolds の R303 も同種類のものであろう。全く同系統であって其性能も大同小異であり、合せ板の表皮も落ちつく所に結着しているのは愉快である。私共はクロム添加によって時期割れを防止したが 75S に於いても恐らく然りであろう」⁸⁾と述べている。

9.1.3 住友の ESD とアルコアの 75S

住友の ESD とアルコアの 75S 合金の成分比較を現在の AA の国際規格も併せて表 9.1 に示す^{8)~10)}。Mn は現在では不純物元素扱いであるが、この当時、Mn は ESD、75S ともに必須成分として扱われている。アルコアの特許で応力腐食割れに最も重要な Cr 添加の合金が特許としてでてくるのは米国特許 2,240,940¹¹⁾で、その請求項は次のようである。

- 1) Zn 4~6%、Mg 0.75~2.5%、Cu 0.1~2%、Mn 0.1~1%に、少なくとも Ti 0.02-0.25%、B 0.005~0.1%、Zr 0.01~0.15%、Mo 0.02~0.25%、W 0.02~0.2%、Co 0.02~0.2%、Cr 0.05~0.5%、V 0.02~0.2%を 1 種類以上添加
- 2) Zn 4~6%、Mg 0.75~2.5%、Cu 0.1~2%、Mn 0.1~1%、Cr 0.05~0.5%、Ti 0.02~0.25%、
- 3) Zn 4~6%、Mg 0.75~2.5%、Cu 0.1~2%、Mn 0.1~1%、Ti 0.02~0.25%

第二項がほぼ 7075 合金に相当するが、実施例として Cr を添加した合金はなかった。ちなみに住友の日本国特許 135036¹²⁾では Zn 3~20%、Mg 1~10%、Cu 1~3%、Cr 0.1~2%、Mn は 0.1~2% 添加あるいは添加せずとなっている。これが米国特許 2,166,495¹³⁾では、Zn 4~20%、Mg 1~2%、Cu 1~3%、Mn 0.1~1.5%、Cr 0.05~1.0%、Ca 0.01~0.2% を必須成分とし、加工性や特性を向上させるために

Mo 0.01~0.2%、Ti 0.01~0.5%、Fe、Si を 1%以下としている。米国特許ではなぜ Mg の請求範囲を狭め、Ca を必須成分としたのかはよくわからない。

表 9.1 のアルコアの 75S の Zn と Mg の成分を住友の ESD と比較すると、Zn は ESD のほぼ下限以下、Mg は上限以上と ESD の成分を外しているのがわかる。これは偶然なのか意図されたものか。アルコアも同時期に Al-Zn-Mg-Cu 合金の強度特性を調べていたので、偶然の可能性もあるが、75S の成分を決める段階で日本の文献で新合金を調べた可能性が高いと筆者は考えている。アルコアの研究者 Dix が 1949 年に発表した論文¹⁴⁾の表の中に 75S の比較として ESD の成分が出てくるが、その引用文献として 1939 年 9 月号の日本航空宇宙学会誌に掲載された五十嵐と北原の論文「超々ジュラルミン ESD 及び ESDC に就て」がある¹⁵⁾。この論文に ESD およびクラッド材 ESDC の成分、機械的性質、応力腐食割れ性について全て書かれている。同様な内容は住友金属・研究報告¹⁶⁾にも書かれている。米国特許が登録された段階である。アルコアも日本の文献を丁寧にフォローすれば ESD と同等のものが作れたことがわかる。しかし、アルコアが 75S を開発したと発表したのは 1943 年のことである。それ以前にクロムを添加した Al-Zn-Mg-Cu 系合金は見当たらない。アルコアは多分、1942 年零戦が捕獲され米軍に指摘されるまでは日本の文献は調べていなかったと考えられる。

9.1.4 住友金属・田邊友次郎の 75S に対する評価

田邊友次郎は、「今両者の優劣を詳細に比較し難いが、75S の 5.5%Zn、ESD の 8%Zn は種々の点で前者に有利になるは否み難く、我国で主として実用した押出型材は規格として引張強さ 58 kg/mm² (570 MPa) 以上を呼号したものであったが、75S の 54 kg/mm² (530 MPa) でも実用上何等差支えないであろう。ここら当たり徒に強力を求める我国の通弊をみる。参考までにアルコアの 75S の性能表を表 9.2 にしめす。我国では合せ板はほとんど実用されなかったが、米国では必ずや相当に使われていると思ふが、其実態を知りたいものである。尚又米国では 0.3 mm の板も規定されてい

表 9.1 住友 ESD とアルコア 75S の成分比較 (mass%)^{8)~10)}

	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Ti
住友 ESD	6.0~9.0	1.2~1.8	1.5~2.5	0.3~1.0	0.1~0.4	0.6	0.6	
住友 ESD 皮材	0.5~3.0	—	0.2	—	0.1~0.4	0.5	0.5	
Alcoa 75S	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.1~0.30	0.15~0.40	0.7	0.5	0.2
Alcoa 75S 皮材	0.75~1.25	0.10	0.10	0.10	—	—	—	—
AA7075	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.30	0.18~0.28	0.50	0.40	
AA7072 皮材	0.8~1.3	0.10	0.10	0.10		0.70		

表 9.2 アルコア社の 75S 合金性能表 (Materials and Methods, June 1949) ⁸⁾

組成%											
	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	其他の不 含純物	其他の不 純物全量	
本合金	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.15~0.40	0.1~0.30	<0.7	<0.5	<0.2	<0.05	<0.15	
合せ材表皮	0.75~1.25	0.10	<0.10	—	<0.10	—	<0.7	—	<0.05	<0.15	
(2) 機械的性質											
状態	厚さ mm	抗張力 kg/mm ²		降伏点 (0.25%) kg/mm ²		伸 (50mm) %					
75 S (裸)											
A (焼鈍)	0.279~12.7	<28.2		—		>10					
T (焼入焼戻)	0.406~0.991	>53.5		>45.5		>7					
	1.016~12.68	>54.0		>46.5		>8					
	12.72~25.4	>54.0		>46.5		>6					
	25.42~50.8	>54.0		>46.5		>4					
75 SC (合せ材)											
A (焼鈍)	12.7迄	<25.3		—		>10					
T (焼入焼戻)	0.991迄	>49.0		>42.0		>7					
	1.016~12.68	>50.5		>43.5		>8					
	12.72~25.4	>54.0		>46.5		>6					
	25.42~50.8	>54.0		>46.5		>4					
(3) 物理的性質											
	A				T						
	裸	合板		裸	合板						
剪断抗力 kg/mm ²	—	—		26.0	—						
ロツクウエル硬度	H86 ~ H96	H86 ~ H96		B85 ~ B95	B80 ~ B90						
弾性率 kg/mm ²	—	—		7300	—						
剛性率 kg/mm ²	—	—		2700	—						
ポアソン比率	—				0.33	—					
比重	—				2.8	—					
熱伝導率 100°C C.G.S	—				0.101	—					
膨脹係数	—				0.000129	—					
	20~100°C				0.000135	—					
	20~300°C				0.000144	—					
電導率 (標準銅) %	—				30	—					
(4) 熱処理方法											
熱処理	温度 °C	加熱時間	記号	備考							
焼鈍	410	2~3	75S-O	長時間放熱の必要ある時は更に約240°Cに6時間加熱の要あり							
焼入	470	—	75S-W	板は左記より多少高温に焼入する事も可能							
焼戻	120	22~26	75S-T6	二段熱処理、100°Cに4~6時間、更に157°Cに8~10時間)も板の場合可能、但しこれは米國特許#1,858,092なり							

るが、私共は之を 0.5 mm に止めた、組成及製造方法の差異はあるが、彼に一日の長がある」⁸⁾

ESD の組成は、現在でも鑄造での鑄塊割れや押出での押出性など生産性で非常に問題が多く、当時の技術でよくこれだけ生産できたものと感心させられる。

米国は鑄造性や圧延性、押出性などの生産性を重視したのか、あるいは応力腐食割れを考慮したためか、Zn 量を ESD より大幅に減らしている。また薄板の圧延についても、米国から導入した圧延機であったが米国の圧延技術はさらに進んでいて、この生産技術面での日本の技術は相当遅れていたといわざるを得ない。当時の空技廠からの無理難題な高強度の要求に応えながら成分を決めていかざるを得ない状況がよくわかるが、この要求がなければ世界に誇る材料もできなかったであろう。これは何時の時代も変わらない。

田邊博士は続けて「航空機工業禁止の現時日本ではこの種優秀合金は恐らく活用の道はなかりうけれど、兎に角斯界の歴史に些少なりと足跡を残し得た事を五十嵐博士ら舊同僚諸君等と共に喜びたい。尤も、ESD といえども全然新しいものではなく、独の Sander 合金、英の E 合金等先哲の業績を再検討し、E-S-D 系を組織的に開拓して生まれたものであるが、少なくとも其耐時期割れ性増進のためクロム添加の如きは、五十嵐、北原両氏の前人未踏の偉業なることを付記して置く」⁸⁾と田邊氏は結んでいる。戦後の航空機用高強度アルミニウム合金開発では ESD の成分と同じ高 Zn 化の方向に開発が進んでいる。

9.1.5 アルコアの ESD に対する対応

1930 年以來、応力腐食割れについて研究を続け、アルコアの材料開発で中心的役割を果たした E. H. Dix は “Alcoa 75S, after many years of research,

was put into commercial production for clad sheet and extrusions in 1943 and later for nonclad sheet, wire, rod and bar, and forgings.”¹⁷⁾ と述べている。

同じく、米国特許 2,240,940 の発明者でもあり 7075 の開発に関係したアルコアの J.A. Nock, Jr. は、M.B.W. Graham らの著書 “R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa”¹⁸⁾ で次のように紹介されている。“Ultimately, Joseph Nock, working with small DC ingots cast on the premises at Alcoa Research Laboratories, solved the problem empirically, demonstrating that small amounts of chromium added to Al-Zn-Mg-Cu composition yielded resistance to SCC that had long been sought.”。その Nock は、“This alloy is the culmination of a number of years’ intensive work.”¹⁹⁾ と述べ、これはその後の 1949 年 ASM の単行本でも “Years of extensive laboratory investigation, including painstaking studies of susceptibility to stress corrosion cracking, finally terminated in the selection of the alloy composition designated 75S.”²⁰⁾ 述べていて、75S の成分を決めたのは自分たちの研究の成果だと述べている。

アルコアの物理冶金部門のリーダーだった H.Y. Hunsicker もまた然りで、“Continuing alloy development efforts led to the discovery that the addition of a small amount of chromium greatly reduced the sensitivity to stress corrosion.”²¹⁾ と述べている。

1960 ~ 1980 年代、アルコアの航空機材料開発の中心的役割を果たしたステイリー (J.T. Staley) は 1989 年、Al-Zn-Mg-Cu 合金について、アルコアは 1940 年 7076 (Al-7.5Zn-1.6Mg-0.7Cu-0.6Mn) を鍛造用合金として開発しプロペラ・ブレードに用いた。1938 年までにラボでは板での応力腐食割れの問題は解決できたので、X74S (Al-5.2Zn-2.1Mg-1.5Cu-0.4Mn) を主翼の一部に用いたが、この合金板材はフィールド試験で、時効材を加工して用いると応力腐食割れに敏感になることが判明した。このため、高融点の微量添加元素の影響を調べ、クロムを 0.2 から 0.35% 含む合金が応力腐食割れに強いことがわかった。強度も少し向上させて耐応力腐食割れ性にも良好な、今日良く知られている 7075-T6 を 1943 年開発したと述べている²²⁾。

その記述の後に、“Interestingly, chemical analysis of sheet from a downed Japanese Zero fighter aircraft disclosed that the composition was almost the same as that of 7075.” (興味深いことに、墜落した零戦からの板を化学分析した結果 7075 合金の成分とは

とんど同じであった) とあり、この新合金はすぐに機体の設計に反映され、7075-T6 板は B-29 スーパーフォートレス (Superfortress) 後期モデルの主翼上部のスキン材やストリンガー材として用いられたと書かれている²²⁾。アルコアの研究者が零戦について記述したのはこれが初めてではないかと推察されるが、決して日本の ESD のプライオリティを認めているわけではない。それまでのアルコアの研究者も、7075 はアルコアの長年の研究の成果だといって、日本の ESD のプライオリティを認めてこなかった。発明というのは、大概同じ時期に同じような研究をしているので結果的に同じ結論に達することはホールやエールの発明をみても理解できる。しかしながらどのような研究をしてアルコアが 7075 を開発したのか公表されたデータはほとんどないのが実情である。

このように、歴代のアルコアの材料研究者が日本の ESD について敢えて触れてこなかったためか、2008 年ドイツのアーヘンで開催されたアルミニウム合金国際会議 ICAA11 の最初の基調講演、ヴァージニア大学の E.A. Starke, Jr 教授の “Precipitation Hardening: From Alfred Wilm to the Present” の講演で、Al-Zn-Mg-Cu の開発の歴史が語られたが、彼の示したパワーポイントの図の中には全く ESD が入っていないことに、東京工業大学里教授や小職も含めて日本から来た参加者は驚いた。同時に配布された本の中には “The early alloys were susceptible to stress-corrosion cracking but later examination of small addition, of first Mn and then Cr, proved that alloys containing 0.2 to 0.35% Cr had high resistance to stress-corrosion. In 1940 Sumitomo developed an Al-Zn-Mg alloy for the Mitsubishi A6M2 (Zero) airframe. The chemical composition of the Sumitomo alloy was very similar to the Al-Zn-Mg alloy 7075 developed by Alcoa and introduced in 1943.”²³⁾ と書かれているにも係らず。ここでも住友の発明のプライオリティについては直接触れていない。

しかしながら、技術史が専門のスクラベック (Q.R. Skrabec) は最近の著書で “Aluminum in America” で “Most of the Japanese aircraft were built on their top-secret equivalent of 75S (7075) aluminum alloy developed by Sumitomo Metal Industries in 1936, ahead of ALCOA’s research. ALCOA was probably aided by the capture of a Japanese Zero early in the war.” と記述している²⁴⁾。住友の ESD がアルコアの開発よりも前にできたことを明確に書いている。米国も徐々に変化してきているように思われる。

9.2 超々ジュラルミン以降の合金開発 その他の超々ジュラルミン

9.2.1 軍官学共同研究による HD 合金と ND 合金

(1) HD 合金

HD 合金と次項で述べる ND 合金については、西村教授が「随筆軽合金史」(第 34、35、38 回)に詳しく書いているので、それを紹介する^{25)~27)}。

1941 年 11 月下旬、本多光太郎教授などが主宰者として、陸軍が後援で日本学術振興会の航空機に関する総合研究をするための特別委員会の準備会合が東京の如水会館で開かれた。第 3 小委員会として強力軽合金に関する研究部会が企画され、本多博士が委員長として、大学側から東北大大日向一司教授、早稲田大学石川登喜治教授、京都大学西村秀雄教授、製造業者は住友金属、古河電工、神戸製鋼の三社であった。陸軍が主宰したため海軍からは協力がなかったとのことである。第一回の会合は 1942 年 4 月、初空襲の最中開催された。西村教授は、「研究方針を定めることになり、どうするかと云って別に案がなかったから、銅を用いないで超ジュラルミンの代用になるような合金を造ってはどうかと提案した。銅は軽合金に使用される量はさほど多くないが、しかし我国の銅資源は必ずしも豊富とは云えない、少しでも節減が出来るなら時局に役立つではないかという考えであった」と述べている²⁵⁾。その結果、Al-Zn-Mg 系合金を取り上げることとなった。超ジュラルミンと同等の強度で、焼入れして常温で時効硬化を示すような材料をこの系統の合金で造ることが出来るか検討した。まず成分の目標を定め三社が試作してそれを検討することから始めた。

住友金属から Zn 6%、Mg 2%、Mn 0.8%、Cr 0.25% を目標として造られた板は引張強さ 45 kg/mm² (440 MPa)、伸び 18% を示し、超ジュラルミンの規格値 (引張強さ 43 kg/mm² (420 MPa) 以上、伸び 14% 以上) を満たしたが、焼鈍材は規格値以上となり加工性に問題があったので、「もうこの研究はこれで打ち切って新しい方向に向かうことにしようかと考えたが、折角研究を始めたのであるから、鍛造材とか押出型材を造ってみてはということになって、その試作することにした」²⁶⁾。古河電工での Al-6%Zn-2%Mg-0.75%Mn-0.35%Cr 押出材の試作結果は非常に良好で、

引張強さは 50 ~ 54 kg/mm² (490 ~ 530 MPa)、伸びは 12 ~ 15%、超ジュラルミン SD の規格値を十分満足していた。この時、西村教授は「押出が容易で、その速度を数倍にしても差支えないことを知った。これは予期しなかった一つの発見であった。当時、押出型材の製造が航空機製造の一つの隘路となっていた。急に押出機を製造することは困難であったから、若し押出性能の良い材料があったならば、それだけ製造能力が増すことになる訳であるから、注目すべき発見であった」と述べている²⁶⁾。押出性能に関しては、神戸製鋼でも実験をし、超ジュラルミンの 2 倍程度の速度が得られた。この合金は HD ということが陸軍からの提案でまとまった。これは本多博士が委員長であった関係で H のイニシャルを取ったものである。こうして HD (Honda's Duralumin) という合金が生まれた。化学成分は表 9.3 に示す²⁸⁾。この合金は、戦後、三元合金として新幹線や二輪車などに適用され大きく発展することとなる。

(2) ND 合金

先の戦争も終わりに近づくにつれて、アルミニウム新地金が不足して、航空機の解体屑やそのほかの返り材 (再生塊) を使用する率が多くなり、Fe、Si、Zn などの不純物の混入が増してきて、航空機に不可欠の品質の良い超ジュラルミン SD の生産が困難になってきた。そこで、上記の不純物の許容は範囲を拡げ、SD に匹敵する機械的性質を有する材料の開発が要望され軍官民で開発した合金が ND である²⁷⁾。

ND は Nippon Duralumin という意味である。その成分を表 9.3 に示す。機械的性質は焼入れ後常温時効で引張強さ 44 kg/mm² (430 MPa) 以上、耐力 32 kg/mm² (310 MPa) 以上、伸び 10% 以上である。西村教授は、結果的には「アルコアで 14S として既に使用されていたものを多少変えたものに過ぎず、25S にマグネシウムを加えたものになった。ND と称した材料は軽合金としては止むを得ない事情から造られたものであって、進歩した材料とは云えない」が、ND の研究から「ケイ素が 0.8% も含まれていても焼入れ時効材の機械的性質が SD のように低下することもなく、また鉄も時効を阻止しない理由は不明のまま残っていて」、学術的な問題を提供してくれたので、無駄な研究ではなかったと述べ

表 9.3 HD (Honda's Duralumin) と ND (Nippon Duralumin) の化学成分 (mass%)²⁸⁾

	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Al
HD	5~5.8	1.5~1.8	<0.8	0.3~0.8	0.1~0.4	<0.6	<0.5	残
ND	<1.0	0.6~1.2	4.0~4.8	0.6~1.0	—	<0.8	0.3~1.0	残

表 9.4 NSD と超々ジュラルミン ESD の化学成分 (mass%) ²⁹⁾

	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Al
規格 *1)	7.0~9.0	1.2~1.8	0.8~1.7	0.3~1.0	0.1~0.4	<0.6	<0.6	残
NSD	8.5	1.6	1.1	0.45	0.2	(<0.6)	(<0.45)	88.15
ESD	8	1.5	2	0.45	0.2	(<0.6)	(<0.5)	87.8

*1) 航空機規格 7222、チ 263

ている ²⁷⁾。

9.2.2 ESD の押出性向上、Al-Zn-Mg-Cu 系 NSD

住友でも超々ジュラルミン ESD の押出速度が 1 ~ 1.5 m/分 で超ジュラルミンの押出速度 2 ~ 2.5 m/分 と比べて約半分であった。このため、ESD の生産性を上げるのが急務となっていた。「強度は ESD より多少低下しても、押出速度の高いものを」という発想で 1943 年開発されたのが NSD である ^{28), 29)}。N は Nagoya の N からつけた。ESD の銅量 2% を 1.1% に減らし、Mg 量を少し増すと 3 m/分の速度が得られたが、強度が出ないとの問題がでた。これは不純物のけい素量の増加に起因したことがわかり亜鉛量を増やして実用化した。NSD の成分を ESD と比較して表 9.4 に示す ²⁹⁾。NSD は 1944 年の航空機規格 7222、チ 263 として制定された。

9.2.3 その他の超々ジュラルミン

幸田教授によれば「同じ頃、東京大学航空研究所石田四郎教授らによって、通称航研超々ジュラルミンが發明され、また古河電気工業株式会社において SSD なる超々ジュラルミンが發明された。前者は Sn 添加により、後者は Zr 添加によって応力腐食感受性を防止したものである。しかし、ESD ほど効果的でなかったためか、実用にはならなかった」³⁰⁾ とある。

石田教授らの特許は、五十嵐らより約 2 年遅れて出願されている。成分は Zn 6.0 ~ 10.0%、Mg 1.0 ~ 3.0%、Cu 1.5 ~ 4.5%、Mn 0.5 ~ 1.5%、Sn 0.1 ~ 1.0%、Si 0.8% 以下、Fe 0.8% 以下である ³¹⁾。古河電工の特許は成分は Zn 4 ~ 10%、Mg 0.5 ~ 3%、Cu 0.5 ~ 4%、Mn 0.1 ~ 1.5%、Si 0.4 ~ 1%、Zr 0.05 ~ 1% である ³²⁾。特に、ケイ素とジルコニウムの作用により時期割れが防止されたとある。最近の航空機用アルミニウム合金は焼入れ感受性等の理由からクロム添加からジルコニウム添加を基本とする合金に代わってきたが、この特許はその走りとも言えよう。これに関して、古河スカイ (現 UACJ) の小山克己博士は「当時は十分な組織制御ができなかったためか、実用化にはいたらなかった」と記している ³³⁾。

太平洋戦争以後、航空機材料の生産は急を告げ、陸軍ならびに海軍の各航空本部から、ESD の特許の実施権を(株)神戸製鋼所と古河電気工業(株)へ委譲する要請があり、住友はこれを許諾した。1943 年、(株)神戸製鋼所は、当社にアルミニウム合金に関する技術指導を要請し、その内容は溶解・鑄造・装置・図面・工場実習・特許を含むすべてであったが、住友は承諾して技術指導等が名古屋軽合金製造所で行なわれた ²⁸⁾。

参考文献

- 1) ジム・リアドン：古賀一飛曹の零戦，榎出版社，(1993)。
- 2) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AkutanZero1.jpg>
- 3) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akutan_Zero_shipped.jpg
- 4) 堀越二郎、零戦 その誕生と栄光の記録，角川文庫，角川書店，(2012)，206。
- 5) おちあい熊一：零戦激闘伝説 謎 101，学研パブリッシング，(2009)，138。
- 6) 畑 栄一：住友軽金属技報，29 (1988)，91。
- 7) 飯島嘉明：金属，76 (2006)，1132。
- 8) 田邊友次郎：軽合金雑筆 - 追想と見透 -，軽金属時代，186 (1950)，5。
- 9) 五十嵐勇、北原五郎：住友金属・研究報告，3 (1939)，455-474。
- 10) AA: Aluminum standard and data (The Aluminum Association)。
- 11) US Patent 2,240,940. Aluminum Alloy, J.A. Nock, Jr., ALCOA, Application Sept. 28, 1940. Patented May 6, 1941.
- 12) 日本国特許 135036 鍛錬用強力軽合金，出願 1936.6.9，特許 1940.2.28。
- 13) US Patent 2,166,495. Aluminum Alloy, Isamu Igarashi and Goro Kitahara, Sumitomo Kinzoku-Kogyo Kabishiki Kaisha, Application June. 20, 1938, Patented July 18, 1939.
- 14) E.H. Dix, Jr.: 24th Campbell Memorial Lecture, Transactions of the ASM. 42 (1950)，1057-1127。

- 15) 五十嵐勇、北原五郎:日本航空学会誌, 53 (1939), 982-996.
- 16) 五十嵐勇, 北原五郎:住友金属・研究報告, 第3巻, 第6号 (1939), 455-474.
- 17) E.H. Dix, Jr.: Aluminum Alloys-1940 to 1950, Metal Progress, (1950), 484.
- 18) M.B.W. Graham : R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa, Cambridge University Press, (1990), 263.
- 19) J.A. Nock, Jr.: 75S-Alcoa' s New High-Strength Aluminum Alloy, Metals and Alloys, (1944), 922.
- 20) J.A. Nock, Jr.: Commercial Wrought Aluminum Alloys, Physical Metallurgy of Aluminum Alloys, ASM, (1949), 167.
- 21) H.Y. Hunsicker: History of Precipitation Hardening, The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy, ed. by C.S. Smith, Gordon and Breach Science Publishers, (1963), 271.
- 22) J.T. Staley: History of Wrought- Aluminum-Alloy Development, Aluminum Alloys - Contemporary Research and Applications, Edited by A.K. Vasudevann and R.D. Doherty, Treatise on Materials Science and Technology, Vol.31, Academic Press, Inc., (1989), 3.
- 23) E.A. Starke, Jr: Precipitation Hardening: From Alfred Wilm to the Present, Aluminium Alloys, Their Physical and Mechanical Properties, (ICAA11 in Aachen) Vol.1 Edited by J. Hirsch, B.S. Skrotzki and G. Gottstein, DGM, Wiley-VCH, (2008), 3.
- 24) Q.R. Skrabec: Aluminum in America, A History, McFarland & Company, Inc., Publishers, (2017), 142.
- 25) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (第34回), 軽金属時代, No.205 (1951), 6.
- 26) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (第35回), 軽金属時代, No.206 (1951), 2.
- 27) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (第38回), 軽金属時代, No.209 (1951), 11.
- 28) 竹内勝治: 技術の歩み, 非売品, 住友軽金属工業株式会社, (1995).
- 29) 竹内勝治: アルミニウム合金展伸材 - その誕生から半世紀 -, 軽金属溶接構造協会, (1986) .
- 30) 幸田成康:合金の析出, 幸田成康監修, 丸善, (1972), 1.
- 31) 特許第 137117 号 (出願 1938.4.15、公告 1939.8.19, 特許 1940.7.1)
- 32) 特許第 147525 号 (出願 1938.11.25, 公告 1941.9.30, 特許 1942.1.12)
- 33) 小山克己: Furukawa-Sky Review, 6 (2010), 7.

10 | 第二次世界大戦後の航空機材料の発展

10.1 戦後の状況

敗戦とともにアルミニウム製錬は軍需産業であったため、連合軍によって生産停止を指令され、製錬設備をカリ肥料、石灰窒素などの生産に転用して細々と経営をはかる事態に追い込まれた。一方、加工企業は戦時中抑制されていた家庭用品の需要が顕在化し、異常なブームを迎えた。加工企業の多くは航空機を解体したアルミニウム合金屑を原料として、鍋・釜をはじめとした家庭用器物の生産を再開した。しかし、これらの製品は耐食性の悪いジュラルミン系合金屑を原料とした粗悪品であったため、アルミニウム製器物は腐食しやすいという誤った印象を与え、その後の製品開発に大きな悪影響を与えた¹⁾。

戦後復興とジュラルミンの関係は、東京駅にも見られる^{2),3)}。東京駅丸の内駅舎は、1945年(昭和20年)、

戦災により南北のドームと屋根・内装を焼失した。戦後、3階建の駅舎を2階建て駅舎に復興した。最近行われた「保存・復原工事」では、鹿島建設が中心となり、外観を創建時の姿に忠実に再現するのはもちろんのこと、さらに未来へ継承するため、鉄骨煉瓦造の下に地下躯体を新設し、巨大地震にも耐えうる建築とするため、「免震工法」で施工した。修復前後の東京駅とその天井ドームを図10.1と図10.2に示す。この戦後復興させた駅舎天井の内面(図10.1)には、図10.3に示すようにアルミ製リベットで接合された0.8mm厚みの航空機用ジュラルミン板とトタン板が塗装を施して使用されていた。この板の成分分析値はAl-4.2%Cu-0.43%Mg-0.79%Si-0.74%Fe-0.80%Znと鉄や亜鉛などの不純物が非常に多いことがわかる。このジュラルミン板は戦争中に製造されたもので、終戦近くなるとスクラップを多く用いていたことを裏付けるものである。

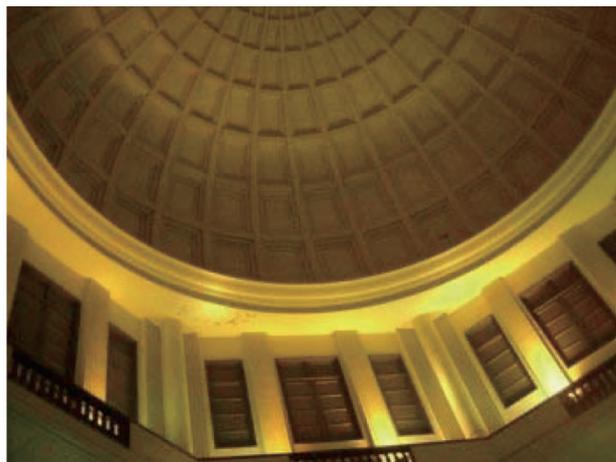


図 10.1 修復前の東京駅とその天井ドーム



図 10.2 修復後の東京駅とその天井ドーム
(左：国立科学博物館、室谷周良、右：同左、亀井修 提供)



図 10.3 修復前の天井ドーム

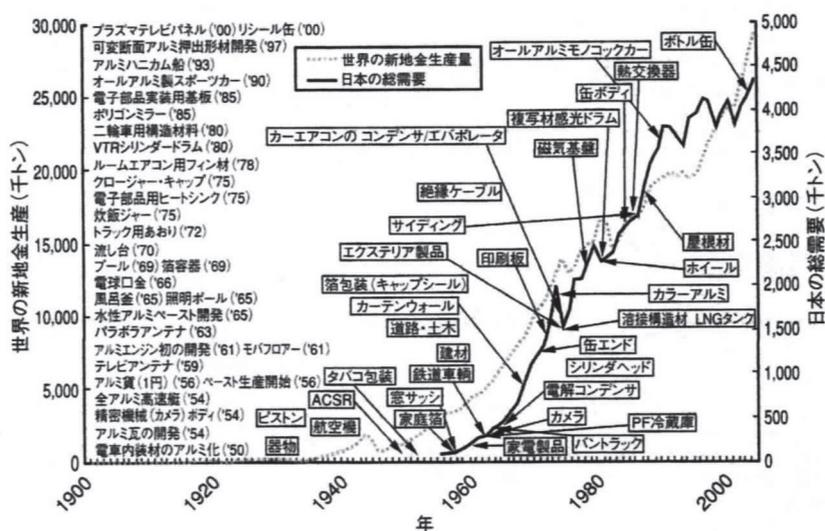


図 10.4 世界の新地金生産量と日本の総需要（日本アルミニウム協会）⁴⁾

アルミニウムの需要は、第二次世界大戦中では需要の大半を航空機用が占めていたが、戦後は大幅に縮小し、図 10.4 に示すように、まず家庭用器物、日用品の需要が急激に伸び、続いて自動車、車両、機械などの分野に新需要を開拓した。その後、サッシ、ドア、カーテンウォールなどの建築部門、自動車、トラック、トレーラー、鉄道車両、船舶などの輸送機関、テレビ、電気洗濯機などの電機通信機器、電力の送電線、包装容器などの一般民需市場が急激に拡大した⁴⁾。

10.2 戦後の構造材料開発の流れ、航空機から鉄道車両、自動車、モーターサイクルへ

戦後、GHQ により航空禁止令が布告され、航空機の研究開発、製造は禁止されていたため、戦争中、航空機に携わっていた研究者や技術者の多くは鉄道車両、自動車やモーターサイクル開発に移っていった。先の戦争中に研究開発された超々ジュラルミンから Cu を抜いた Al-Zn-Mg 系の HD 合金（ホンダ・ジュラルミン、

Al-5.4Zn-2.0Mg-0.55Mn-0.25Cr）は戦後、日本では三元合金として航空機以外の鉄道車両、自動車、モーターサイクルに使用されて大きく発展した。戦後の三元合金の開発においても日本の材料研究者が大きく関わっていた。

10.2.1 鉄道車両

日本の鉄道車両の車体にアルミニウム合金が用いられたのは、1945 年、終戦直後の物資不足から航空機のジュラルミンが転用されたのが最初であったが、腐食が激しく改造された。本格的な鉄道車両への採用は、1962 年にデビューした山陽電鉄 2000 形電車に始まる。山陽電鉄 2000 形電車に代表される第 1 世代では、当初、鋼製車体の外板の置換えに始まったが、その後、台枠に溶接性の劣る 6061 合金を用いたため、ブロックごとに溶接され、ブロック相互はリベットで結合された車体となった。日本では接合に関しては、戦前は溶接技術の未熟さもありリベット接合が主体であったが、戦後は、第二次世界大戦中に米国で高純度ガス生

産ができるようになった結果、アルゴンアーク溶接法が研究され、TIG、MIG法が開発された。このことでAl-Zn-Mg系合金の溶接が可能になった⁵⁾。

1961年ごろ欧州ではAlZnMg1、AlZnMg2やUnidurなどのAl-Zn-Mg系合金が溶接後、室温放置で著しく強度が回復することが注目され、車両、橋梁などの大型構築物に利用され始めた。少し遅れてアルキャン7004やアルコアの7005などが登場して来た⁶⁾。これらの欧米の合金は日本のHD合金と同様にMn、Crが添加されているのが特徴であった。しかしCrが多く添加されると casting時に粗大なCr系化合物が発生し製品の靱性を低下させる恐れがあった。このため住友軽金属の馬場義雄らは微量のZrを添加することでCr添加量を減らし粗大なCr系化合物の発生を抑制した^{7), 8)}。Zr添加は耐応力腐食割れ性や溶接割れにも効果のあることを見出し1961年末に特許出願した。しかしこの合金を工場で作ると焼入れ感受性が敏感で、押出後の冷却速度が遅い場合は高温時効後の強度がでにくいことが明らかとなった⁹⁾。馬場らはCr系化合物界面で冷却中に時効硬化に寄与するZnやMgが析出して強度低下を引き起こすことを明らかにして、Crを添加しない新合金を開発し、1965年2月特許申請した¹⁰⁾。「Zn 3～8%、Mg 0.5～3%、Zr 0.05～0.3%、Mn 0.1～0.5%、そしてZrの効果を出すために400℃以上で鑄塊の熱処理を行うこと」を特徴としている。なお溶接割れ感受性も少なくなることも認められている。その後、欧米のAl-Zn-Mg系合金も必須成分としてZr 0.1～0.2%添加されるようになった^{7), 8)}。ここでも超々ジュラルミンと同様、日本人研究者の先見性が示されたといえよう。

この合金は押出後も空冷で高強度が得られ、冷却による歪も少なく生産性がよいため国内各社も開発し、1970年JIS A7N01(2005年に国際登録され、AA7204と呼称、代表値：Al-4.5Zn-1.5Mg-0.45Mn-0.15Zr)が制定された。さらに馬場らは肉厚方向での応力腐食割れ抑制に対しては、0.15%前後の微量のCu添加が有効であることを明らかにした^{11), 12)}。第2世代の車両(構体を図10.5(a)、京都地下鉄10系を図10.6(a)に示す)では、7N01合金が骨組み、外板はもとより台枠も含めた全溶接構造のアルミニウム合金製車体となった。骨組み、台枠の張りに押出形材が多用され、従来の鋼製車体の重量に比較して1/2以下となった¹³⁾。

A7N01のMg量を減らし、Zn量を増加させて、さらに押出性を高めた合金も、1967年馬場らによって開発され、その後AA(Aluminum Association)に

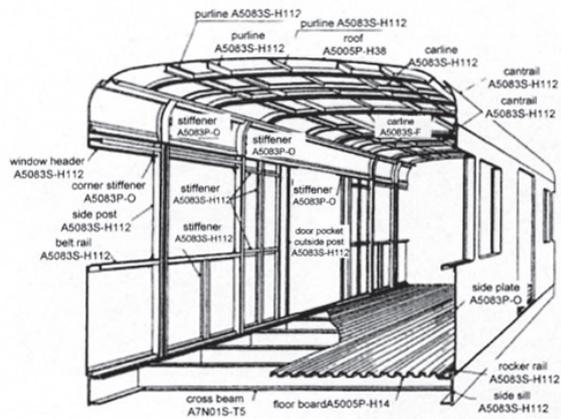
7003合金(代表値：Al-6Zn-0.75Mg-0.15Zr)として国際登録された^{15)～17)}。この合金により広幅の大型形材の製作が可能となった。一方、1969年には四日市市に圧延業界が共同出資の軽金属押出開発(KOK)が設立され、わが国最大の9,500トン押出機が設置された。最大幅520mmの形材が押出可能となり、新幹線車両軒桁に7003合金広幅大型形材が採用された。これが図10.5(b)に示す第2.5世代といわれた車両構体と図10.6(b)に示す200系新幹線である。その後床板、側構などに大量に使用された。この7003合金は、図10.7に示すように鉄道車両はもとより、コンテナ、バンおよびトレーラー等の強度メンバー、また中空押出も可能でオートバイや自転車のリム、自動車のバンパーなどにも広く利用された。

アルミ合金製車両は鋼製車両に比べてイニシャルコストが高いため、さらに押出性、溶接性、耐食性に優れた合金が求められていた。欧州ではAl-Mg-Si系の6005Aが開発され、車両に使われていた。この合金は、Mn+Crを0.12～0.5%含むが、添加量や押出条件次第では結晶粒が粗大化したり、MgとSiの量比如何では、靱性が劣ったり、溶接でマイクロフィッシュなどの割れが発生しやすいことがわかった。各社は成分等の最適化を図り、1980年、それらを集約してJIS 6N01合金が制定された¹⁸⁾。この合金は薄肉で中空の押出形材が製造可能で、構体がすべて押出形材で構成されるようになった。これが第3世代の車両構体(図10.5(c))と300系新幹線(図10.6(c))である。強度が必要とされる台枠の枕はり・横はり等については7N01が依然として使用された。1990年代に入ってから、次世代車両構体といわれる中空トラス断面押出形材によるダブル・スキントップの構体構造が主流となり、さらに枕はりや横はりも6N01合金に置き換えられている(図10.5(d))と700系新幹線、図10.6(d))。また新技術として、ろう付けハニカムパネル¹⁹⁾や摩擦攪拌接合(FSW)²⁰⁾も利用されるようになった。

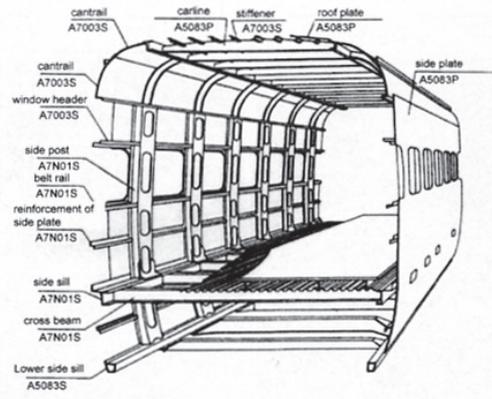
10.2.2 モーターサイクル、スポーツ用品

モーターサイクルも航空機に次いでアルミニウムの使用量の多い輸送機器で、オフロードレーサーではアルミニウム材料は重量の約3割を占めているといわれている。モーターサイクルは軽量高性能化へのニーズが高く、早くからアルミニウム部品の採用には積極的であり、シリンダーヘッド・ケースなどエンジンの外郭となる部品は当初よりアルミ合金で設計されてきた。

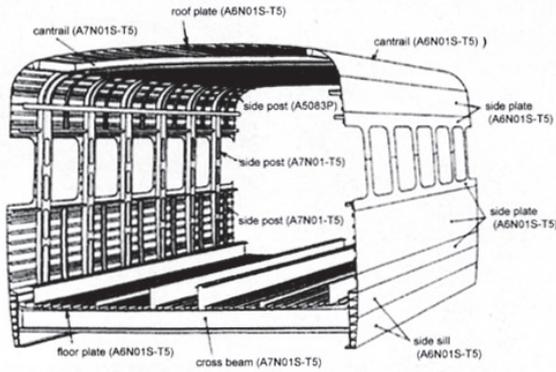
1980年ごろより、スポーツ車において軽量化とデザインニーズが高まり、ホイール、フレーム、スイン



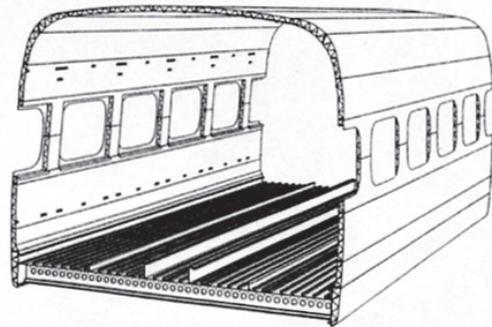
(a) Kyoto subway 10series (generation 2)



(b) JR East 200series (generation 2.5)



(c) JR Central & West 300series (generation 3)



(d) JR Central & West 700series (next generation)

図 10.5 アルミ製鉄道車両構体の変遷¹³⁾



(a) 第2世代 (京都地下鉄 10系)



(b) 第2.5世代 (新幹線 200系)



(c) 第3世代 (新幹線 300系)



(d) 次世代 (新幹線 700系)

図 10.6 アルミ製車両の代表例¹⁴⁾

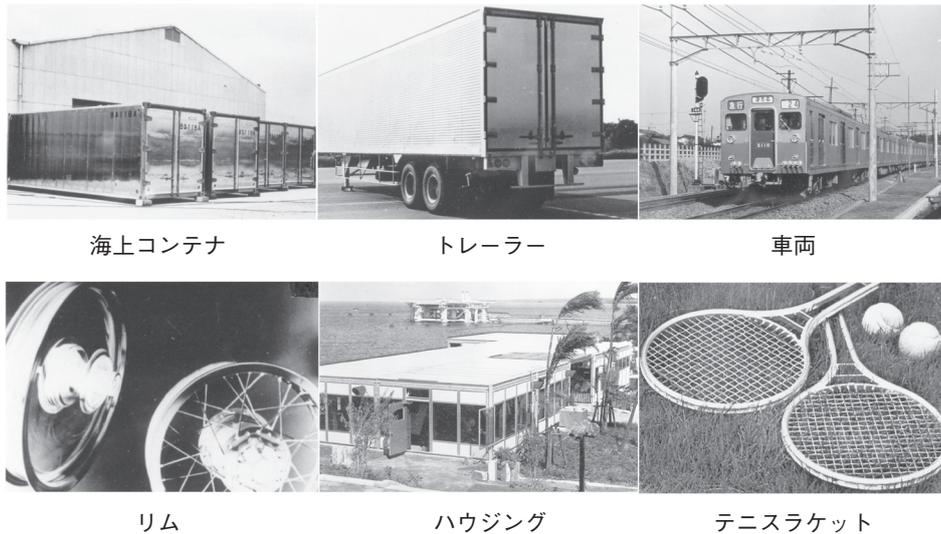


図 10.7 7003 合金の適用例¹⁶⁾

グアム、ラジエータなどアルミ化が進んだ。比較的早かったのはホイールで、スポークホイールのリムに Al-Zn-Mg 系合金 7003 合金が用いられ始めた。これは高強度で溶接性が良好なためである。通常軟化処理材 (O 材) で曲げ加工後、フラッシュバット溶接を行い、その後スポーク穴用に張出し加工を行ってから焼入れをする。最近では、銅が多く添加された Al-Zn-Mg-Cu 系合金も用いられている。図 10.8 (a) は高強度 7000 系押出材が用いられているモーターサイクルの部位を示す¹⁸⁾。

溶体化処理時の結晶粒粗大化はその後の表面研磨、アルマイト処理した後の外観品質に影響を及ぼすため、押出材の組織制御も重要な課題であった。一般に高力合金押出材は強度、靱性、耐応力腐食割れ等の観点から Mn、Cr、Zr などが微量添加されるため繊維状組織を有するが、押出表層はダイスとのせん断加工を受け再結晶組織となりやすい。溶体化処理で再結晶組織は厚くなるが、この後の研磨、アルマイト加工で再結晶組織と繊維状組織が混在すると、光沢の違いで斑が生じるため、外観上どちらかの組織に制御する必

コラム 馬場義雄

馬場義雄は 1935 年生まれ、1958 年京都大学工学部冶金学科を卒業、西村秀雄の研究室を受け継いだ村上陽太郎研究室の出身で、チタンの研究開発に従事したくて住友金属に入社したとのこと。入社翌年、住友軽金属が独立するとともに第一期生となり、アルミニウム合金の研究開発に取り組んだ。1969 年、京都大学から工学博士を授与される。1972 年、住友軽金属工業 (株) 主任研究員。筆者が入社時 (1975 年) は主任研究員で、Al-Zn-Mg 系三元合金の溶接部の応力腐食割れの研究のテーマが、その後、Al-Zn-Mg- (Cu) 系合金の機械的性質、応力腐食割れに及ぼす Zr 添加の影響の研究テーマが与えられた。1985 年、同社取締役、1992 年、豊橋技術科学大学客員教授兼任 (3 年間)、1999 年、同社専務取締役退任し顧問。1974 年、「新しい Al-Zn-Mg 系三元合金の研究開発」で第 9 回小山田記念賞受賞、1978 年、第 36 回日本金属学会功績賞 (金属材料部門) 受賞、1980 年、「焼入れ性の優れた溶接構造用強力 Al-Zn-Mg 系合金の製造法」で全国発明表彰、1996 年、「航空機テーパー・ストリンカー用高力アルミニウム合金板材およびその加工技術の開発」で第 9 回中日産業技術賞受賞、2000 年、第 3 回軽金属学会賞受賞。2012 年惜しくも 77 歳で逝去。



馬場義雄博士
(1935-2012)



図 10.8 モーターサイクル、スポーツ用品への鉄道車両用および航空機用合金の適用 (UACJ のカタログから)

要がある。フレームのメインパイプ部やスイングアームのアーム部には 7N01、7003 押出材が用いられ、ヘッドパイプやブラケット部の鋳造品や鍛造品と溶接で接合された。また一部のプレス成形では溶接性の良好な 5083 合金板材が採用された。

フロントフォークは車体とフロントタイヤを繋ぐサスペンションで、操舵と緩衝および懸架の役割があり、衝撃を吸収するため二重管で構成され、インナーチューブには高張力鋼が、アウターチューブにはアルミニウム合金鋳造材が用いられてきた。1990 年頃、モトクロスなどのオフロードレーサーではジャンプ着地時に大きな衝撃力が加わるため、鋳造材よりも高強度高靱性合金が必要とされ、航空機用 Al-Zn-Mg-Cu 系合金が注目された。この中でも、Zr 添加合金は、間接押出後の表層結晶粒粗大化を抑制でき、また焼入れ感受性が鈍感になるため、水冷に替わりポリアルケレングリコールを用いた縦型焼入れ炉を用いることで不均一な残留応力を低減できた。現在ではアルミニウム合金で最も高強度高靱性材料が、フロントフォークのアウターチューブに実用化されている (図 10.8 (b))²¹⁾。戦前の航空機用材料開発の伝統がモーターサイクル用材料の開発に生きている例といえよう。なお、製管の技術は高校の硬式野球バットにも活かされている。春夏の甲子園の高校野球大会で用いられている硬式野球バットの半数以上は UACJ の高強度 Al-Zn-Mg-Cu 系合金の押出で製造されたものである。アルミニウム製野球バットの例を図 10.8 (c) に示す。

きる与圧室が実用化され、空気の乱れの少ない高空を高速で飛ぶことができるようになった。1945 年にはロッキード社の L-049 がワシントン D.C. パリ便から就航した。1947 年には乗客 50-100 名のダグラス DC-6 が初飛行した。1950 年代にはプロペラ機の 2 倍近い速度が出せるジェット旅客機が登場した。1957 年、巡航速度 973 km/時、乗客 140 ~ 200 名で、従来のプロペラ 4 発機の 2 倍の速度と 2 倍の搭載量を有する画期的な 4 発ジェット旅客機、ボーイング 707 が初飛行した。ダグラス社もこれに対抗して 1958 年 4 発ジェット旅客機 DC-8 が初飛行した。

1960 年代に入り、旅客機の大衆化時代に入った。ボーイング社は 1963 年、中・短距離路線向けに、巡航速度 964 km/時、乗客数最大 189 名、本格的 3 発ジェット旅客機のボーイング 727 を、1967 年には乗客 100-120 名クラスの双発小型リージョナルジェット機ボーイング 737 を登場させた。ボーイング 737 はその後エアバス社の A320 に対抗するために拡張されて乗客 200 名に増やしてベストセラー機になった。1969 年、長距離路線向けに、巡航速度 910 km/時、乗客 350-594 名、4 発ジェット機ボーイング 747 ジャンボジェットが登場した。客室内に 2 本の通路を持つ最初のワイドボディ機であり、慣性誘導装置等の最新鋭の機器を搭載していた。1970 年には、巡航速度 876 km/時、乗客 206-380 名、エンジンは 2 基が主翼に、1 基が垂直安定板の中間に備えた米ダグラス社製の 3 発ワイドボディ機、DC-10 (後継機 MD-11) と、巡航速度マッハ 0.85、乗客 255-326 名、DC-10 と同時期に同様な条件で設計されたロッキード社の 3 発ワイドボディ機、L-1011 トライスターが登場してきた。

1972 年には、巡航速度 875 km/時、乗客 200-300 名、ヨーロッパ域内を乗客 300 名乗せて飛ぶことを想定して設計された双発ワイドボディ機、エアバス A300 が初飛行した。エアバス社はその後 1987 年、巡航速度 840 km/時、乗客 107 ~ 220 名、小型ナローボディ

10.3 戦後の世界の民間航空機開発と材料開発の動向

10.3.1 世界の民間航空機開発の動向

戦後、輸送機は軍用よりも民間旅客機としての利用が高まった。それまで旅客機は酸素マスクの必要ない低空を飛んでいたが、高空でも快適な環境を提供で

の最新鋭の技術を投入したハイテク旅客機、エアバス A320 シリーズを出し、この A320 シリーズが大成功を収めることで、エアバス社がボーイング社と並ぶ 2 大旅客機メーカーの 1 つに成長することになった。

ボーイング社は 1980 年以降、日本、イタリアと国際共同体制で開発・製造して、1982 年中距離用に中型機ボーイング 767 が、1994 年長距離用に大型機ボーイング 777 が初飛行した。2009 年には中・長距離用の中型双発機のボーイング 787 が初飛行した。787 の機体には従来のアルミニウム合金に替わりに約 50% の炭素繊維複合材料が使用され、軽量化を図った。一方、エアバス社は、中距離用に双発のエアバス A330 及び長距離用に 4 発のエアバス A340 を開発し、1990 年代初期に運航が開始された。1989 年からエアバスはボーイング 747 に対抗できる大型機体の実現に向けて作業を開始し、2000 年 A380 として開発に入った。2005 年初飛行し、2007 年納入された。定員は 3 クラス 525 名、モノクラス 853 名で、座席数はファースト・ビジネス・エコノミーの 3 クラスからなる標準座席仕様で B747-400 の約 1.3 倍である。さらに「787 と同等以上の性能の機体を、より安価で容易に開発する」とした新しい世代の中型双発機を開発することを目的として、A350 が出てきたが、その後 2006 年再設計され A350XWB が開発され、2013 年初飛行となった。787 と同様に炭素繊維複合材料を 53% 使用する機体になった。この間、ロッキード社は民間航空機から撤退し、マクドネル・ダグラス社はボーイングに吸収され、現在は中・大型機はボーイング社とエアバス社の二強となっている。

10.3.2 世界の航空機用材料開発の動向²²⁾

表 10.1 は航空機用アルミニウム合金の開発の歴史とそれが最初に適用された航空機との関係である²³⁾。Warren のデータの一部補足している。超々ジュラルミン ESD 合金をベースにアルコアが開発した 7075 は朝鮮戦争時に活躍した B-29D (B-50) に使用された。この表にある 7150、7055 は 7075 の Zn、Mg、Cu の成分量を変え不純物を低減させることで強度や靱性を向上させ、Al-Zn-Mg 系合金と同様に微量添加元素の Cr を Zr に置き換えることで焼入れ感受性や耐応力腐食割れを向上させた合金である。これらの合金開発は戦後のアルコアの研究開発の成果であるが、基本的には ESD がベースになっているとも言えよう。2000 系合金に関しては 2324、2524 があるが、延性、靱性、疲労亀裂進展特性を改善するために 2024 の地金純度を高純度化したもので、基本的な成分は 2024 と変わっ

表 10.1 航空機とそれに用いられた新合金^{23)(*)}

初飛行	航空機	合金・調質
1903	Wright Brothers	Al-Cu casting
1919	Junkers F13	2017-T4
1935	DC-3	2024-T3
1939	Zero Fighter	ESD-T6
1945	B-29D (B-50)	7075-T6
1957	Boeing 707	7178-T651
1970	DC-10	7075-T7351
1970	L-1011	7075-T7651
1981	Boeing 757, 767	2324-T39, 7150-T651
1994	Boeing 777	7055-T7751, 2524-T3
2003	Boeing 777-300ER	2324-T39 Typell (2624-T39)

(*) Warren のデータの一部補足した。

ていない。

図 10.9 は耐力と破壊靱性の関係を示している²³⁾。一般に耐力をあげると破壊靱性は低下する反比例の関係にあるが、戦後この反比例の関係が右肩上がりになっている。これは不純物の制御や加工熱処理法により組織制御することで材料の靱性を向上させてきたことによる。図 10.10 はボーイング 777 の各部位に使用されている代表的な合金を示す²⁴⁾。図 10.11 に欧米の航空機用合金開発の流れを示す²⁵⁾。表 10.2 に AA (The Aluminum Association) に登録された航空機用合金を示す²⁶⁾。高純度地金を用いて破壊靱性や疲労き裂進展速度を向上させていることが特徴的である。7000 系合金では亜鉛が 7~10% 程度まで添加された合金

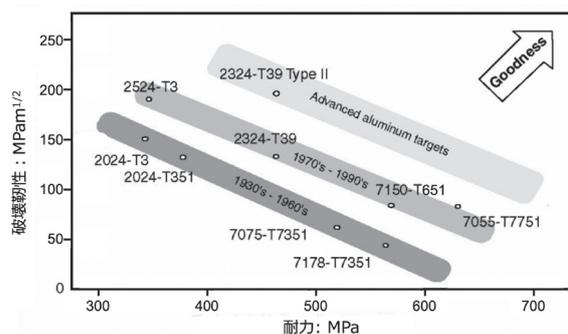


図 10.9 航空機用アルミニウム合金開発の高強度高靱性化の流れ²³⁾

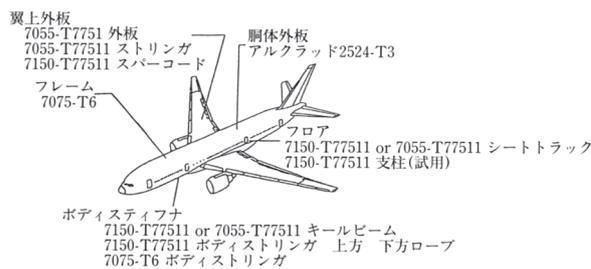


図 10.10 ボーイング 777 に使用されている航空機用アルミニウム合金²⁴⁾

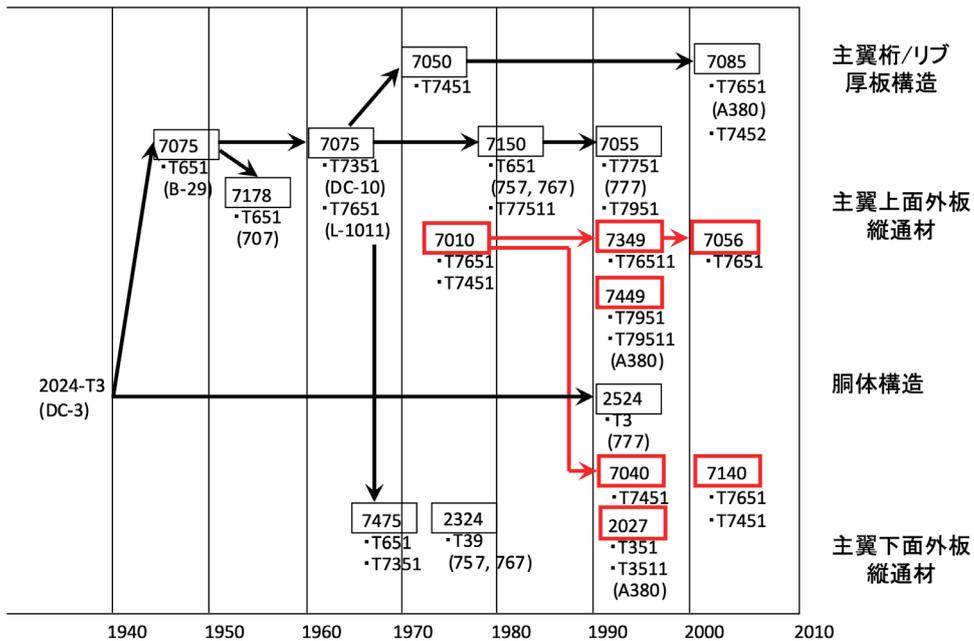


図 10.11 航空機の部位と開発されたアルミニウム合金の関係、黒枠はアルコア、太枠（赤枠）はアルキャン（現コンステリウム） J.D. Bryant, Alcoa Aluminum : Rolled Product, March 18, 2015. に追記²⁵⁾

表 10.2 AA に登録されている航空機用アルミニウム合金の成分 (mass%)²⁶⁾

No.	Date	By	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti
2013	2003	JAPAN	0.6-1.0	0.40	1.5-2.0	0.25	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25		0.15
2014	1954	USA	0.50-1.2	0.7	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.8	0.10	0.25	0.20 Zr+Ti	0.15
2017	1954	USA	0.20-0.8	0.70	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-0.8	0.10	0.25		0.15
2024	1954	USA	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10	0.25	0.20 Zr+Ti	0.15
2124	1970	USA	0.20	0.30	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10	0.25	0.20 Zr+Ti	0.15
2424	1994	USA	0.10	0.12	3.8-4.4	0.30-0.6	1.2-1.6		0.20		0.10
2524	1995	USA	0.06	0.12	4.0-4.5	0.45-0.7	1.2-1.6	0.05	0.15		0.10
2624	2009	USA	0.08	0.08	3.8-4.3	0.45-0.7	1.2-1.6	0.05	0.15		0.10
2025	1954	USA	0.50-1.2	1.0	3.9-5.0	0.40-1.2	0.05	0.10	0.25		0.15
2026	1996	USA	0.05	0.07	3.6-4.3	0.30-0.8	1.0-1.6		0.10	0.05-0.25	0.06
2027	2001	FRANCE	0.12	0.15	3.9-4.9	0.50-1.2	1.0-1.5		0.20	0.05-0.15	0.08
2056	2003	FRANCE	0.10	0.12	3.3-4.3	0.10-0.50	0.6-1.4		0.40-0.8		
2219	1954	USA	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02		0.10	0.10-0.25	0.02-0.10 0.05-0.15 V
2519	1985	USA	0.25	0.30	5.3-6.4	0.10-0.50	0.05-0.40		0.10	0.10-0.25	0.02-0.10 0.05-0.15 V
2618	1954	USA	0.10-0.25	0.9-1.3	1.9-2.7		1.3-1.8		0.10		0.04-0.10 0.9-1.2 Ni
7010	1975	UK	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	5.7-6.7	0.10-0.16	0.06
7136	2004	USA	0.12	0.15	1.9-2.5	0.05	1.8-2.5	0.05	8.4-9.4	0.10-0.20	0.10
7037	2006	GERMANY	0.10	0.10	0.6-1.1	0.50	1.3-2.1	0.04	7.8-9.0	0.06-0.25	0.10
7040	1996	FRANCE	0.10	0.13	1.5-2.3	0.04	1.7-2.4	0.04	5.7-6.7	0.05-0.12	0.06
7140	2005	FRANCE	0.10	0.13	1.3-2.3	0.04	1.5-2.4	0.04	6.2-7.0	0.05-0.12	0.06
7049	1968	USA	0.25	0.35	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10-0.22	7.2-8.2		0.10
7149	1975	USA	0.15	0.20	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10-0.22	7.2-8.2		0.10
7249	1982	USA	0.10	0.12	1.3-1.9	0.10	2.0-2.4	0.12-0.18	7.5-8.2		0.06
7349	1994	FRANCE	0.12	0.15	1.4-2.1	0.20	1.8-2.7	0.10-0.22	7.5-8.7	0.25 Zr+Ti	
7449	1994	FRANCE	0.12	0.15	1.4-2.1	0.20	1.8-2.7		7.5-8.7	0.25 Zr+Ti	
7050	1971	USA	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7	0.08-0.15	0.06
7150	1978	USA	0.12	0.15	1.9-2.5	0.10	2.0-2.7	0.04	5.9-6.9	0.08-0.15	0.06
7055	1991	USA	0.10	0.15	2.0-2.6	0.05	1.8-2.3	0.04	7.6-8.4	0.08-0.25	0.06
7255	2009	USA	0.06	0.09	2.0-2.6	0.05	1.8-2.3	0.04	7.6-8.4	0.08-0.15	0.06
7056	2004	FRANCE	0.10	0.12	1.2-1.9	0.20	1.5-2.3		8.5-9.7	0.05-0.15	0.08
7068	1996	USA	0.12	0.15	1.6-2.4	0.10	2.2-3.0	0.05	7.3-8.3	0.05-0.15	0.10
7075	1954	USA	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.25 Zr+Ti	0.20
7175	1957	USA	0.15	0.20	1.2-2.0	0.10	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1		0.10
7475	1969	USA	0.10	0.12	1.2-1.9	0.06	1.9-2.6	0.18-0.25	5.2-6.2		0.06
7085	2002	USA	0.06	0.08	1.3-2.0	0.04	1.2-1.8	0.04	7.0-8.0	0.08-0.15	0.06
ESD	1936	JAPAN			1.5-2.5	0.3-1.0	1.2-1.8	0.1-0.4	6.0-9.0		

が多くなっていることである。日本で戦前発明され零戦に採用された超々ジュラルミン ESD の亜鉛が 6～9%であったので、世界はようやく超々ジュラルミンのレベルまできたともいえよう。

10.4 戦後日本での航空機産業と航空機材料の研究開発

航空機産業は朝鮮戦争特需で国内の航空機産業は復活した。その結果、1956年、通産省は国産民間航空機計画を策定し、1959年官民共同の日本航空機製造(NAMC)が設立され双発ターボプロップ旅客機 YS-11 (図 10.12) が開発された。この YS-11 も海外でのセールスでは非常に苦戦しており、事業収支では悪化し 1971年に YS-11 を 182 機で打ち切った。YS-11 は国内外の民間旅客機だけでなく、航空自衛隊などの軍用機や海上保安庁や国土交通省などの官庁でも使用された。その後は、米国のボーイング社のボーイング 767、777、787 機体の一部を生産することで成長してきた。



図 10.12 戦後初の国産旅客機 YS-11 (青木勝 撮影提供)

しかし残念なことに、現在の日本では航空機産業が欧米に比べて規模が圧倒的に小さく、ボーイング社の機体の製造を請け負うことがメインで、日本のアルミニウム産業もまた缶材や自動車材に比べて航空機材の量が圧倒的に少なく、生産設備に投資ができず生産コストも高くなっていく。このため航空機材は海外の安価な輸入品が多く、国産品は量が少なく 1～2 割程度である。日本での航空機材の研究は、あくまでもボーイング社の材料認定取得で、新材料開発には至らないのが現状である。日本のアルミニウム材料研究者にとって残念なことは、航空機材は缶材や自動車材に比べて市場規模が小さすぎて実用化研究があまりできていないことである。高強度合金開発およびその製造技術に関しては完全に欧米に遅れていると言わざるを得ない。マーケットのないところには研究開発も製造技術も育たないのである。航空機産業を活性化させるこ

とが重要である。

日本の航空機開発では、海外で生産している Honda Jet を除けば、量は少ないが川崎重工が中心になり防衛省むけの対潜哨戒機 P-1、輸送機 C-2 (図 10.13) を開発した。また現在開発中の三菱の国産リージョナルジェット機 MRJ (現在 SpaceJet と名称変更、図 10.14) があるが、後者は現在コロナ禍で中断している。それ以外に現在計画されている機体はない。

戦前の日本は航空機大国で材料開発も熱心に行われて来た。その蓄積があったからこそ戦後日本のアルミニウム産業の発展もあった。残念ながら戦後の航空機産業は規模が小さく、材料も安価な輸入材に頼らざるを得ない状況である。その分、鉄道車両、自動車、モーターサイクル、建材、サッシ、飲料缶、空調器、印刷板、



a) P-1



b) C-2

図 10.13 対潜哨戒機 P-1²⁷⁾ と 輸送機 C-2²⁸⁾



図 10.14 三菱航空機の SpaceJet (三菱航空機(株) 提供)

箔といった分野で需要を大きく伸ばした。ユーザーの要求に対してきめ細かいアルミニウム材料を開発し提供することで、ユーザーとともに世界に通用するアルミニウム製品を作り上げて世界市場で需要を伸びて来た。

戦後日本の航空機用材料開発では外国ができなかった板材を用いたテーパーロールストリンガー材（縦通し材、図 10.15）の開発を行いボーイング 767 等に搭載された^{29) ~ 32)}。さらに鉄道車両と同様な中空押出が可能で 2024 と同程度の強度が得られる 2013 を開発し、AA 国際合金登録や航空宇宙機器の開発、及び製造に不可欠の金属材料データ集 MMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization) に登録された³³⁾。産業界にとって航空機材のような高度な技術を要する材料を製造できるということは、その会社の技術に対する信頼の証でもある。



図 10.15 テーパーロール加工したストリンガーを用いたボーイング 767 の胴体^{31), 32)}

ラルミンの歴史を知っていれば可能な目標であると考えている。問題は図 10.9 からわかるように高強度にすると靱性や延性が低下することである。この原因は図 10.17 (a) に示す鑄造組織にあり、高濃度の成分の偏析や化合物が粒界に残存して圧延熱処理後（図 10.17 (b)）もその結晶粒界に残存してしまうことによると考えている^{35), 36)}。

これを解決するには鑄造組織に巨大歪みを付加することで結晶粒界を剪断により破壊することである。金武教授らは基礎研究の結果、温間圧縮ねじり加工法が有効であることを明らかにした。この加工法を連続化して工業化するための手段の一つとして、リナシメタリ (<http://rinascimetalli.co.jp/12.html>) の中村克昭九州工大教授が発明したクレオ (CREO) という熱間ねじり加工装置がある。図 10.18 にその原理図を示す³⁴⁾。これは我が国独自の技術である。このような革新的な技術と相俟って新合金は開発できるものと考えている³⁷⁾。

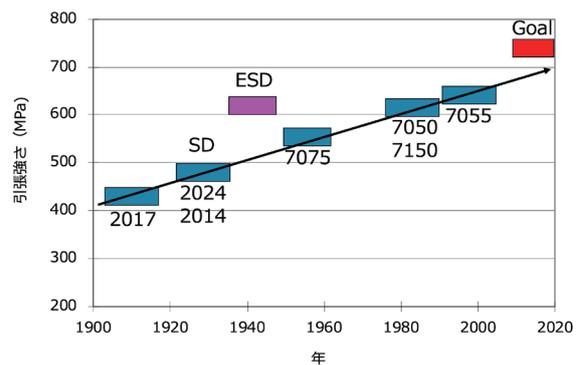
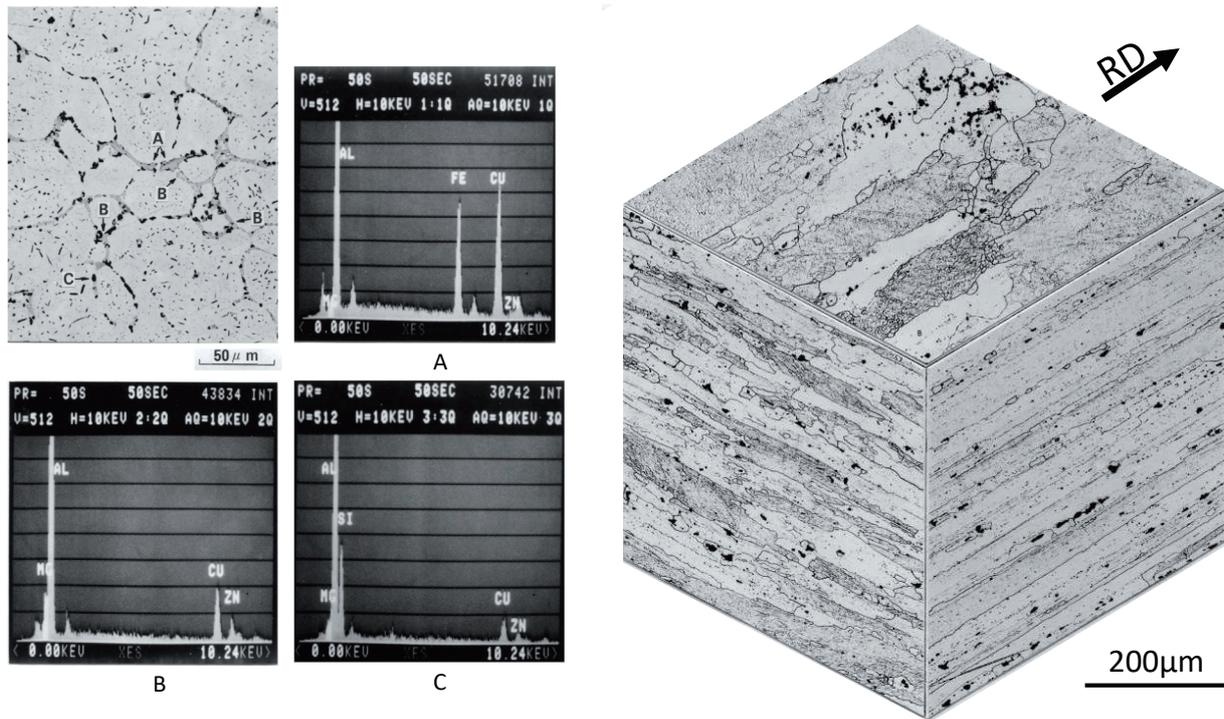


図 10.16 高強度アルミニウム合金開発の歴史と今後の目標

10.5 今後の航空機材料の展望

このままでは欧米や中国との高強度アルミニウム合金の開発競争からも取り残されとの思いから、欧米の Al-Li 合金の比強度に対抗すべく、図 10.16 に示すように従来の 7000 系合金の靱性を保ちつつ従来合金の引張強さを 25% アップした 700 MPa 以上にする高靱性高比強度合金を開発すること目的として、名古屋大学の金武直幸教授らと一緒に 2013 年国家プロジェクト「高強度・高靱性を有する革新的アルミニウム合金の開発」を始めた³⁴⁾。これが完成すれば世界に先駆けた超・超々ジュラルミンの開発となる。超々ジュ



(a) 鋳造時に生成する化合物

(b) 熱間圧延後の化合物の分散状況

図 10.17 7150 合金の鋳造時に生成する化合物 (a) と化合物が圧延後に粒界に分散した状況 (b) ³⁶⁾

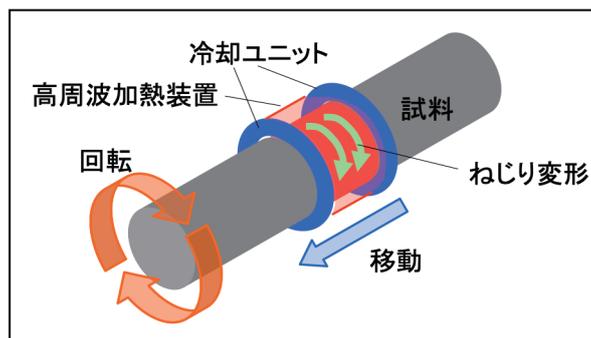


図 10.18 熱間ねじり加工装置クレオの原理図 ^{34), 37)}

参考文献

- 1) 佐藤眞住、藤井清隆：現在の産業，アルミニウム産業，東洋経済新報社，(1968)，27.
- 2) 林章：東京駅はこうして誕生した（ウェッジ選書 24），ウェッジ，(2007)，249.
- 3) 東京駅丸の内駅舎保存，復元 ～いま、甦る赤レンガ駅舎～，JR 東日本パンフレット，(2007).
- 4) 現場で生かす金属材料シリーズ，アルミニウム，(社)日本アルミニウム協会，工業調査会，(2007) . 9.
- 5) 小林藤次郎：住友軽金属技報，1 (1960)，129.
- 6) 寺井士郎，馬場義雄：住友軽金属技報，10 (1969)，42.
- 7) 馬場義雄：住友軽金属技報，41 (2000)，91.
- 8) 馬場義雄：アルミニウム，7巻，35号 (2000)，80.
- 9) 馬場義雄：住友軽金属技報，9 (1968)，24, Y. Baba: Tran. JIM., 7 (1966)，224.
- 10) 特許出願 昭 40-9319, 公告 昭 42-14292, 昭 49-1121.
- 11) 馬場義雄、高島章：住友軽金属技報，17 (1976)，28.
- 12) 吉田英雄、福井利安、馬場義雄：住友軽金属技報，19 (1978)，95.
- 13) 原純：アルミニウム，11巻，25号 (2004)，23.
- 14) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kyoto_Subway_1111.JPG
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shinkansen_200kei_G45.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JRW_Shinkansen_300_series_F4.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JRW_Shinkansen_700_series_B10.jpg (2021.11.21)
- 15) 馬場義雄，福井利安，高島章：住友軽金属技報，

- 15 (1974), 117.
- 16) 馬場義雄、吉田英雄：住友軽金属技報, 18 (1977), 68.
- 17) Technical Data Sheet, 構造用 Al-Zn-Mg 合金 ZK60 の諸性質：住友軽金属技報, 10 (1969), 49.
- 18) 吉田英雄：住友軽金属技報, 46 (2005), 99.
- 19) 伊藤泰永、難波圭三：住友軽金属技報, 39 (1998), 130.
- 20) 熊谷正樹：住友軽金属技報, 52 (2011), 107.
- 21) 吉田英雄, 毛利英一, 平野清一, 箕田正, 日比野壮美, 岡島賢三, 伊藤日出国, 塚本鎮正：住友軽金属技報, 37 (1996), 185, 軽金属, 46 (1996), 89.
- 22) 吉田英雄, 林稔, 則包一成：軽金属, 9 (2015), 441-454.
- 23) A.S.Warren: Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, Edited by J.F. Nie, A.J. Morton and B.C. Muddle, IMEA, (2004), 24-31.
- 24) M.V. Hyatt and S.E. Axter: Science and Engineering of Light Metals (RASELM ' 91), Edited by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, The Japan Institute of Light Metals, (1991), 273-280. アルミニウムの製品と製造技術, 軽金属学会, (2001), 273.
- 25) J.D. Bryant, Alcoa Aluminum : Rolled Product, March 18, 2015. に加筆
http://www.alcoainnovation.com/fr/pdf/Alcoa_Aluminum_GRP_webinar_03_18_15.pdf
- 26) International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, The Aluminum Association.
- 27) [https://ja.wikipedia.org/wiki/P-1_\(%E5%93%A8%E6%88%92%E6%A9%9F\)#/media/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:JMSDF_P-1_\(4\).jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/P-1_(%E5%93%A8%E6%88%92%E6%A9%9F)#/media/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:JMSDF_P-1_(4).jpg)
- 28) [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kawasaki_C-2_%E2%80%98878-1206_206%E2%80%99_\(33981020348\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kawasaki_C-2_%E2%80%98878-1206_206%E2%80%99_(33981020348).jpg)
- 29) T. Uno, H. Yoshida and Y. Baba: Aluminum Alloys; Their Physical and Mechanical Properties, Vol.1. ed. by E.A. Stark, Jr. and T.H. Sanders, Jr., EMAS, (1986), 371-385.
- 30) 新製品紹介, 航空機ストリンガー用微細結晶粒 7075 合金板：住友軽金属技報, 23 (1982), 120.
- 31) 馬場義雄：軽金属, 50 (2000), 398-408.
- 32) 吉田英雄：住友軽金属技報, 46 (2005), 99-116.
- 33) 佐野秀男, 松田眞一, 吉田英雄：住友軽金属技報, 45 (2004), 168-173.
- 34) 森久史, 箕田正, 尾村直紀, 戸次洋一郎, 兒島洋一, 渡辺良夫, 田中宏樹：軽金属, 69 (2019), 9-14.
- 35) 吉田英雄：軽金属, 34 (1984), 689.
- 36) 革新航空機技術開発に関する研究調査, 日本航空宇宙工業会, No.702 (1983), 207-341.
- 37) 吉田英雄：超々ジュラルミンと零戦, 昭栄社印刷所, (2020).

11 | おわりに

筆者はこの10年間ほど先輩たちが開発してきた超々ジュラルミンの歴史を調べてきた。このきっかけとなったのは、2008年アーヘンで開催されたアルミニウム合金国際会議 ICAA11での米国の著名な教授の講演であった。講演はアルミニウム材料の時効硬化の歴史についての基調講演であった。当然、超々ジュラルミンについても講演されるであろうと思い聴講していたが、彼の時効硬化を利用した航空機用アルミニウム合金開発に関するスライドには、日本の超々ジュラルミンに関する記述が全くなく完全に無視されていた。もちろん彼の講演の概要集にはアルコアの7075合金によく似た住友の合金があり零戦に採用されたとの記述があるので教授は全く知らないわけではない。しかしながら日本のアルミニウム材料研究者にはよく知られている超々ジュラルミンではあるが、海外では無視されるか、あるいはほとんど知られていないことがわかった。これは本文でも明らかにしたようにアルコアの研究者のプライドが関係していると考えている。長年、航空機材料を研究してきた筆者は先輩たちの研究に敬意を表する意味でも、海外に超々ジュラルミンの歴史を発信し続けたいと考えている。

超々ジュラルミンは住友軽金属（現在 UACJ）に入社した我々にとってはアイデンティティみたいなものであり、入社して先輩たちがその業績を教えてくれる。しかし、詳細はどの程度知っているか怪しかった。幸い、住友軽金属の図書室には戦前からの世界各国の学術誌、学術本などと同様に手書きの研究報告書が系統的に保管されている。これらの資料以外にも竹内勝治博士が当時の製造技術の状況を詳しくまとめて本にしている。残念ながら彼は材料技術者ではないので、合金開発の状況については詳しくはない。そこで先輩たちがそうしたように図書室の奥深いところに分け入って当時の手書きの報告書などをコピーして読んだ。またこれらの報告書以外に当時の住友金属では、社外向けの製本された「住友金属・研究報告」という研究論文誌も発刊されていた。系統的にこれらの報告書を読み解くと、短期間で開発できた謎も解けてきた。

いずれにしても当時の研究者たち、それと研究を指導してきた先輩たちに感謝したい。研究成果を不十分でも記録として必ず残す、そして重要な成果は特許取得する。その後、会社の雑誌や学会に論文として投稿し、学位の必要な研究者は学位を取得するというシステムを自然に作り上げていたことに。このシステムは

現在でも十分学ぶ価値のあることで、技術を後世に伝える意味でも重要である。

この報告書の「はじめに」で掲げていた疑問に対しては次のようにまとめることができる。

第一に、アルミニウムが安価にできたのは、ホール・エーラー法では水力発電を利用することで大量に製造することに成功したからである。この水力発電というクリーンなエネルギーを利用してアルミニウムが製錬できることは現在の環境問題からも重要である。また硬いジュラルミンを製造したり、飛行船や航空機で利用するためには鋳造・圧延等の製造技術、ロールフォーミングなどの加工技術の進歩も不可欠であった。

第二に、アルコアが超ジュラルミン 24Sを開発でき、英独や日本ができなかった背景には、アルコアのアルミニウムの高純度化技術がある。ジュラルミンの高強度化にとって不純物元素である鉄やケイ素は強度や延性を低下させる原因である。アルコアは三層電解法を1920年中頃までに完成させ、高純度地金を量産できたことが24Sの開発につながった。この不純物はどのような原料を使用するかという問題と深く関わっている。ボーキサイトを使用することで他の鉱石に比べて不純物量を減らすことができた。戦争ではボーキサイトの資源をいかに確保するかが材料開発にとって重要であるかが明らかとなった。これは早くから製錬の研究に関わっていないとできない問題であった。

第三に、超々ジュラルミンが短期間で開発できた理由は、五十嵐も含め先輩研究者がクロムを添加する研究を超々ジュラルミン開発の前に行っていたこと、五十嵐はまた24Sクラッド材の耐食性向上研究でクロムを添加し、その有効性を確認していたことが関係していると考えている。こうした幅広い知見と経験をもとに、応力腐食割れにも効果的だとの感触を持って研究を進めていたものと思われる。そうでなければ1年以内に成果を出せるような問題ではないと考える。もちろん彼の研究方法も関係はしているが。

最後に、今後の航空機材料開発の展望であるが、残念ながら日本での独自の航空機開発の計画は、三菱のMRJ（SpaceJetに改称）がコロナ禍で凍結された現在他にないと言える。しかし今後回復し、復活する可能性も十分ある。航空機は最先端の技術の集約であり、航空機材料もまたしかりである。航空宇宙を目指さない限り、日本の新たな発展はないと言える。航空機材の研究には国の支援が必要である。そのための研究課

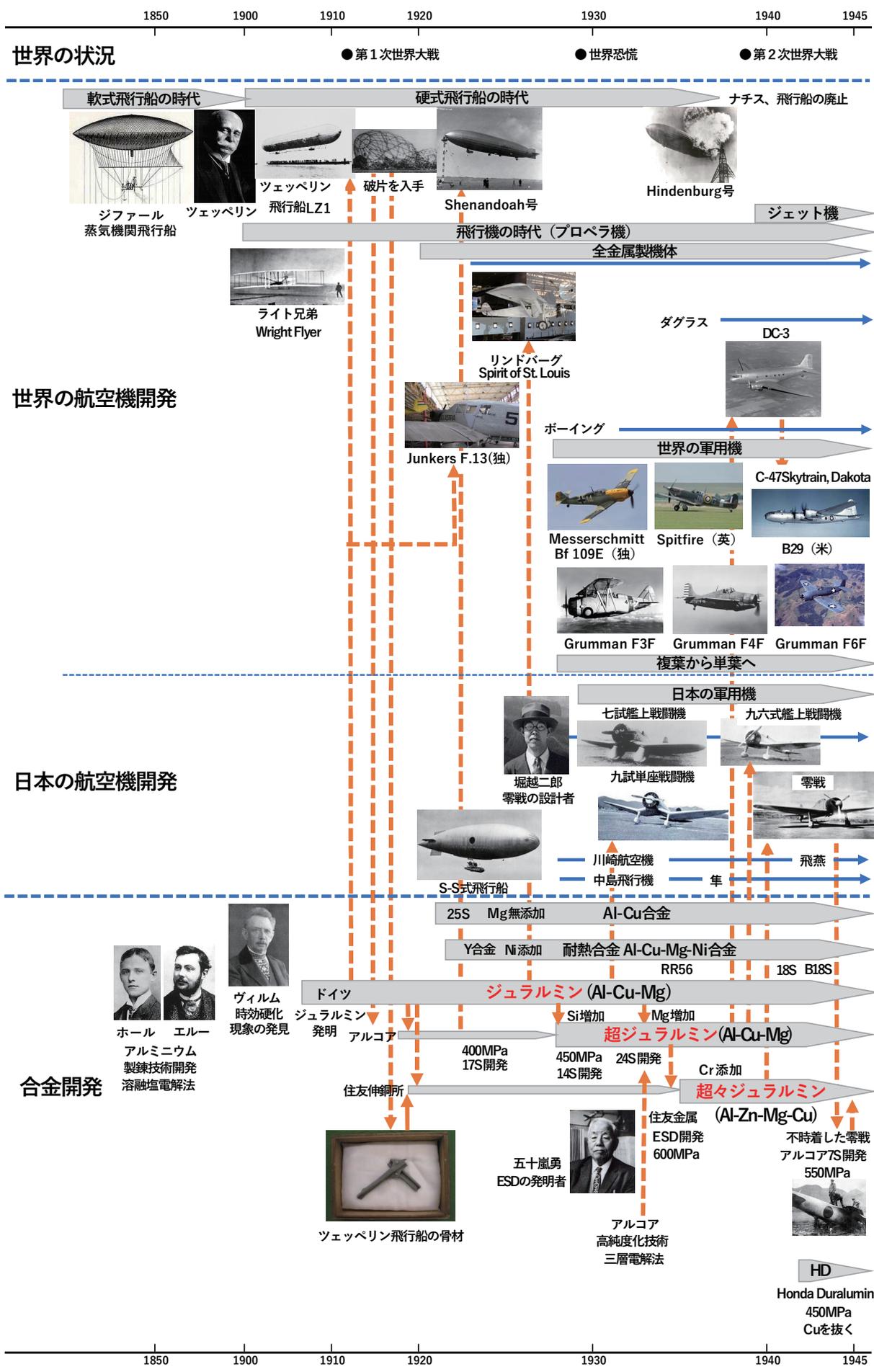
題も明らかにしてきたが、これを担える人材の確保、育成が企業も含めて最も重要になっている。

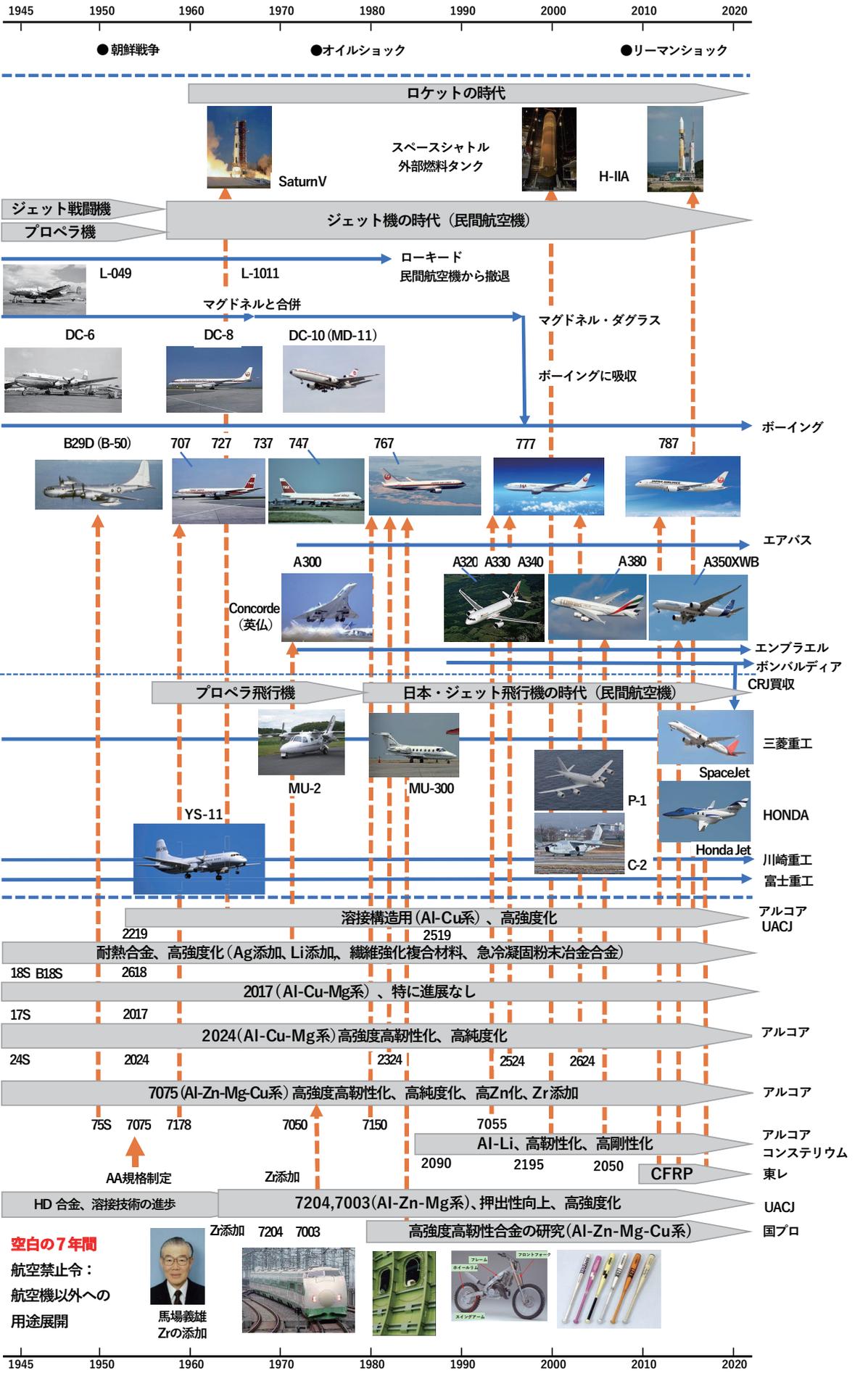
謝辞

本執筆にあたり、筆者を推薦いただいた UACJ R&D センターの前所長渋谷和久様には大変感謝申し上げます。また超々ジュラルミンに関わる重要科学技術資料の保管に関して快くお引き受けいただいた平野清一所長、兒島洋一副所長に篤く御礼申し上げます。

また、製造技術の歴史については元住友軽金属技術研究所、技術調査役竹内勝治博士の「技術の歩み」を、戦前の軽合金史については博士が集録された西村秀雄著「随筆・軽合金史」、「続軽合金史」など貴重な技術資料を参照させて頂きました。改めて感謝申し上げます。

航空機用アルミニウム合金開発の系統図





航空機用アルミニウム合金の系統化調査 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	製作年	製造社	所在地		選定理由
1	ツェッペリン飛行船の骨材	1910年代	ツェッペリン飛行船	UACJ, R&D センター	愛知県名古屋市 港区千年 3-1-12	ジュラルミンを用いたツェッペリン飛行船の骨材で、英国で墜落した飛行船の残材を海軍が日本に持ち帰り、住友に調査依頼した材料。日本が航空機用アルミニウム合金の研究開発およびその製造を始める契機となった材料で、先の戦争でその戦禍をまぬがれて保管されてきた貴重な歴史遺産である。
2	零戦用プロペラの鍛造金型	1940~1945	住友金属工業株式会社	UACJ 正門中庭	愛知県名古屋市 港区千年 3-1-12	ジュラルミン系素材を用いた零戦向けプロペラの鍛造金型。現在、当時のアルミニウムの製造技術を示すものはほとんど残っていないが、この金型は形状からも明らかのように戦闘機のプロペラの製造を示す貴重な歴史遺産である。
3	超々ジュラルミン開発時の研究報告書	1920-1945	住友伸銅所、住友金属	UACJ, R&D センター	愛知県名古屋市 港区千年 3-1-12	ジュラルミンから超々ジュラルミンまでの当時の手書きの研究報告書。この研究報告書を系統的に読み解くことで、世界最高強度の超々ジュラルミンが開発された経緯とその実験結果が記録された第一級の資料で貴重な歴史遺産である。ここに書かれたデータを元に超々ジュラルミンが開発された。
4	海中から引き揚げた零戦(52型)の残材	1995年9月頃調査	1940年代	UACJ, R&D センター	愛知県名古屋市 港区千年 3-1-12	当時の超々ジュラルミンの残材は残されていないが、実際に海中から引き揚げた零戦の部品を調査することで、当時零戦に使用された材料の成分および性能を明らかにすることができた。その結果、主翼桁に使用された超々ジュラルミンは Al-8.0Zn-1.6Mg-1.4Cu-0.35Mn-0.16Cr で、強度は引張強さ 670 MPa, 耐力 591 MPa, 伸び 12% で、現在使用されている最高強度のアルミニウム合金と同等であることが確認できた。耐力力腐食割れ性も同等であった。それを示す唯一の貴重なサンプルである。その調査結果は UACJ の研究報告に残されている。