モーターコア打抜き金型の系統化調査

1

Systematic Surver on Stamping Tooling for Motor Core

尾畑　隆一 *Ryuichi Obata*

■ 要旨

金型とは材料の塑性または流動性の性質を利用して、材料を成形加工して製品を得るための、主として金属材料を用いて造った型の総称である。私たちが日常生活で使っている様々な製品の多くが金型によって生産されている。エアコン、テレビ、冷蔵庫などの家電製品、パソコン、携帯電話などの情報・通信機器、ペットボトル、食器などのプラスチック製品等々、金型が工業製品の製造に関わってその品質と生産量を支えているので、金型は工業製品の産みの親などと言われている。

本調査では、プレス用金型の中の「モーターコア打抜き金型」について述べる。モーターはエアコン、冷蔵庫、洗濯機、電子レンジなどの家電製品から、あらゆる産業機械においても欠くことのできない動力装置である。我が国は国内生産、海外生産を含めたモーターの生産台数において世界でトップレベルの生産国であり、それを裏で支えたのが金型メーカーの存在である。しかし、戦後直後の金型製造は熟練技能者に委ねられていて、主要な構成部品はヤスリで手仕上げ加工され金型を製造していたので生産能力も精度上も限界があった。しかし、そのような状況から金型メーカーが様々な工夫や努力をして、モーターメーカーから出されるその時代の要求に応え、さらに時代を先取りした金型を開発し製造した過程を纏めた。

第１章では、本調査の範囲を述べる。

第２章では、金型を分類してその特徴と製品および生産状況について述べる。

第３章では、モーターコア打抜き用の金型製造方法としてノッチング金型から始まり、ワンスタンプ金型、順送り金型について述べる。そのなかでヤスリ仕上げから熱処理後の研削仕上げにいたる加工方法の進歩についても述べる。

第４章では、スチール（鋼）金型の１研削あたりの打抜き枚数に比べ、飛躍的に打抜き枚数を向上させた超硬金型の開発について、その鍵となったダイヤモンド砥石を使った研削加工方法の開発とともに述べる。

第５章では、モーターコアの生産システムまで変えてしまった自動積層金型の誕生について述べる。さらに自動積層金型システムを応用した回転積層金型について、ステッピングモーター用金型に活用した事例および自動積厚制御システムの開発について述べる。

第６章では、自動積層金型の誕生した後、その金型技術を基本として種々のモーター製品に活用された事例を取り上げる。

■ Abstract

Dies and molds are collective terms for forms, usually made of metal, which make use of the plasticity or fluidity of a material to form shaped products.

Many of the various products we use in daily life are produced using dies and molds. Home appliances such as air conditioners, televisions, and refrigerators; information and communication devices such as personal computers and mobile phones; various plastic products such as PET bottles and plates—since dies and molds affect quality and output in the manufacturing of industrial products, they have been called a founding father of industrial products.

This survey covers motor core stamping dies. Motors are units which drive home appliances such as air conditioners, refrigerators, washing machines, and microwaves, and are also indispensable in all sorts of industrial machines. Japan is a world-class producer when considering the number of motors produced domestically and overseas. This has been supported by the die manufacturers working behind the scenes. However, die production immediately after World War II was dependent on experienced craftsmen. Since dies were produced by hand-filing the major components for completion, there were limits to both the production capability and precision. This survey tells the process of the creativity and effort of die manufacturers since then—how they responded to the needs of motor manufacturers at that time and how they went on to develop and produce dies and molds which were ahead of the times.

Chapter 1 describes the scope of this survey.

Chapter 2 categorizes dies and molds and describes their characteristics, products, and production statuses.

Chapter 3 describes notching dies as a method for producing dies for motor core punching, followed by one-stamp dies and progressive dies. The progress in processing methods from filing to grinding finish after heat treatment is also described.

Chapter 4 describes the development of tungsten carbide dies, which dramatically increased the number of stampings compared to what was possible per one grinding of a steel die, along with the key development of a grinding method using diamond grindstones.

Chapter 5 describes the emergence of automated stacking dies, which even changed the production system of motor cores. Also described are rotated stacking dies, further application of the automated stacking die system, a case of it being utilized for dies for stepping motors, and the development of automated stack height control systems.

After the emergence of automated stacking dies, chapter 6 describes cases of how this die technology was utilized as a basis for various motor products.

■ Profile

尾畑　隆一 *Ryuichi Obata*

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

昭和 54 年 3 月　九州大学工学部鉄鋼冶金学科卒業
同年　　4 月　株式会社三井工作所（現三井ハイテック）入社
金型製造に係わる設計及び MAC 金型用制御装置の設計・製造等の業務に従事
平成 29 年 4 月　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

■ Contents

1. はじめに …… 3
2. 金型の概要 …… 4
3. モーターコア金型の発展史 …… 7
4. 超硬金型
（タングステンカーバイドダイ）の誕生 …… 22
5. 画期的な生産方式、自動積層金型の開発 …… 34
6. 現代の金型技術 …… 48
7. おわりに …… 56

1 はじめに

金型とは材料の塑性または流動性の性質を利用して、材料を成形加工して製品を得るための、主として金属材料を用いて造った型を総称し、プレス用金型、プラスチック用金型、鍛造用金型、鋳造用金型、ダイカスト用金型、ゴム用金型、ガラス用金型などに分けられる。

私たちが日常生活で使っている様々な製品の多くが金型によって生産されている。例えば、キッチンや浴室にあるプラスチック製品は樹脂材料を金型に注入し成型加工をして造られる。自動車製造においては、ボディーは金属板をプレス用金型によって成形加工し、エンジンは金属材料を鋳造用金型で、窓ガラスはガラス用金型で、タイヤはゴム用金型によってそれぞれ成形加工を行っている。このように様々な量産品の製造工程に金型が関わって品質を支えているので、金型は工業製品の産みの親などと言われている[1)]。

本報告書では、プレス用金型の中の「モーターコア打抜き金型」について述べる。モーターは私たちの身の回りでなくてはならない製品である。エアコン、冷蔵庫、洗濯機、電子レンジ、換気扇など家中のどこにでもある。また、あらゆる産業機械においてもモーターは欠くことのできない動力装置である。我が国は国内生産、海外生産を含めたモーターの生産台数において、世界でトップレベルの生産国である。その生産台数の増大を裏で支えたのが高品質の金型を需要に応じて大量供給できた金型メーカーの存在である。しかし、戦後まもないころの金型製造は熟練技能者に委ねられていて、主要な構成部品はヤスリ加工で手仕上げされていた。その中から先人たちは様々な工夫や努力をして顧客の要望に応えて金型を製造した[2)]。

さらに1950年代半ばに入ると高度成長時代と共に家電ブームが訪れ、家電の「三種の神器」と呼ばれた洗濯機、冷蔵庫、掃除機（のちに白黒テレビ）の需要が増加し、大量生産、大量消費の時代へと変わっていく。これに応えるために金型も大きな技術進歩を求められ、大量生産に耐える金型の開発、精度向上、生産性向上、自動化を目指す開発などが行われた。

1990年代では、景気・為替の変動、市場のグローバル化と共に生産工場の海外移転が進み、金型の輸出の時代から現地調達の時代と変わり、中国をはじめ新興諸国の金型メーカーの技術向上もあって価格競争を余儀なくされる時代となった。コスト競争だけでは日本の金型メーカーとして生き残れない時代となっている現在、品質や技術の差別化を図るため、モーターメーカーと技術協力しての新しいモーター開発への取組みや金型技術の開発などについても述べた。

参考・引用文献

1） 一般社団法人　日本金型工業会　ホームページより，金型とは，“http://www.jdmia.or.jp/mold/”

2） モータコア50年史編纂企画委員会：「モータコア50年史　戦後モータ技術50年の歩み」，三井金型振興財団／三井ハイテック，2000年

2 金型の概要

多種多様な金型が製造されているが、この章では金型の種類と製品および特徴について述べる。

2.1 金型の種類[1)]

金型は成形加工する被加工材の材質や成形加工方法によって、その呼ばれ方が変わるが、大きくは次のように分類される。

(1) プレス用金型

プレス用金型は、打抜き型、曲げ型、絞り型、圧縮型などがあるが、材料である鋼板や非鉄金属などを加工し、自動車、家電、雑貨など多方面にわたる部品の製造のために利用されている。

(2) 鍛造用金型

鍛造用金型は、熱間鍛造型、冷間鍛造型に分類され、棒鋼材、非鉄金属などを材料として自動車の重要保安部品、建設機械部品などの製造のために用いられている。加工される部品の主なものに自動車のクランクシャフト、オートバイ部品、工具のスパナなどがある。

(3) 鋳造用金型

鋳造用金型は、シエルモールド、ロストワックス、重力鋳造、圧力鋳造などに分類され、アルミ合金などを材料として、工業用部品、建設機械部品、農業機械部品などの製造に用いられている。

(4) ダイカスト用金型

ダイカスト用金型は鋳造用金型の一種で、材料であるアルミ合金、亜鉛合金などを加工し、自動車、精密機械、家電などの部品を製造するために用いられる。加工される部品の主なものに自動車のエンジン回り、カメラのボディーなどがある。

(5) プラスチック用金型

プラスチック用金型は、射出成形、圧縮成形、移送成形、吹込成形、真空成形などの各種金型に分類され、プラスチック材料を加工してさまざまな部品の製造のために使用されている。加工される部品の主なものに通信機器、OA 機器、家電製品、各種雑貨などがある。

(6) ガラス用金型

ガラス用金型には押型と吹型があり、ガラス材料を成形して、主にウィスキーボトル、ビール瓶、照明器具部品、食器類などを製造するのに用いられている。

(7) ゴム用金型

ゴム用金型は、合成ゴム、天然ゴムを材料として、工業用部品、自動車部品、履物などの製品のために使用される。成形される部品の主なものにタイヤ、キーボードカバー、靴などがある。

2.2 金型の特徴

金型は他の製品の製造方法と比べ「長所」として、以下のことがあげられる。

①同一形状の製品を同じ精度で連続的に大量に生産できる。

金型では一度に複雑な形状の加工ができ、製品寸法や形状は安定している。よって同じ精度の製品を繰り返し大量に作ることができる。

②製品加工速度が早く、安く作れる。

材料を金型に投入すれば製品を得ることができるため、穴あけや切断など別々な工程で加工を行う製造方法とは加工速度が違う。よって、大量に速い速度で加工することで製品を安く作ることができる。モーターコアの金型では 1 分間に数百枚のコア打抜きが可能である。

③加工作業が簡単である。

複雑な製品形状も金型に材料を投入すれば、金型で必要な製品の形状、寸法に成形できるので、作業者は難しい作業を必要としないで生産できる。

④生産ラインを自動化しやすい。

金型は搭載する設備と共に加工速度を変えることができるため、ライン全体の生産能力に合わせた運転が可能であり、容易に自動化できる。

また、「短所」としては以下のことがあげられる。

①金型の製作に費用と時間がかかる

製品を生産する前に金型の製作が必要だが、その費用と製作時間（納期）がかかる。そのため数量の少ない製品の生産には不向きである。

②金型製作の高度な技術が必要になる。

製品の形状が複雑で精密になるほど必要とされる金型の設計、製作は困難になり、高度な技術が必要となる。

2.3 金型の生産状況

金型産業の生産額（平成 26 年）は総額で約 1 兆 2,775 億円で、プレス用金型が 4,743 億円（37.1％）、プラスチック用金型が 4,018 億円（31.5％）、鋳造用・ダイカ

スト用金型 1,013 億円（7.9％）、鍛造用金型 488 億円（3.8％）、ゴム用・ガラス用金型 429 億円（3.4％）、その他 2,084 億円（16.3％）となっている（図 2-1）。

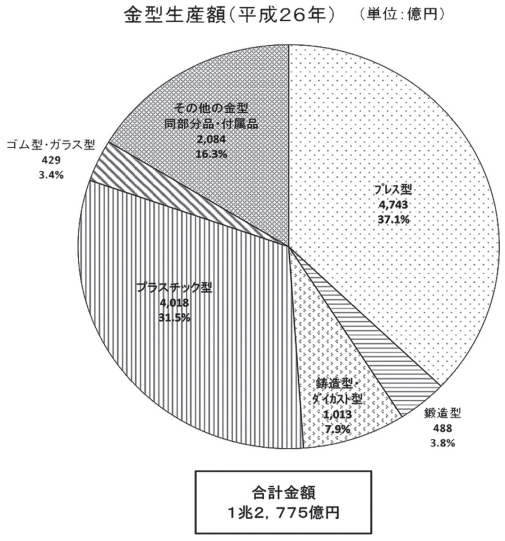


図 2-1　型別の金型生産額 [2)]

（工業統計・品目編）

一方、金型を製造する事業所を従業員数（平成 26 年）で見ると、9 人以下が 75.8％、10～19 人以下 12.2％で合わせて 88％となり、零細企業が大多数を占める産業構造となっている（図 2-2）。

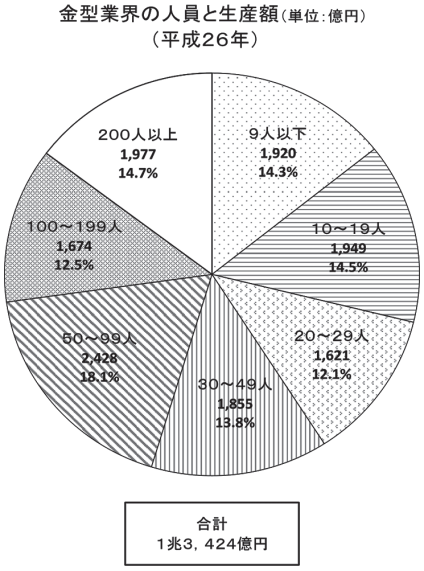
2.4　プレス用金型

本報告書の対象である「モーターコア打抜き金型」はプレス用金型に入るので、さらに詳しく分類すると次のようになる。

2.4.1　打抜き型

コイル状または短冊の材料を使用し、2 次元的な加工を行う金型である。打抜き型の基本構成を図 2-3 に示す。打抜き型の種類としては、ノッチング金型、ワンスタンプ金型、順送り金型などがある。ノッチング金型は、パンチ、ダイの数が少ない金型で、短冊材または材料の外側の形状が製品形状になっているものなどを使用し、材料を一定角度で回転させるなど同じ形状の打抜きを繰り返すことで 1 枚の製品を完成させる方法で使用される。1 枚の製品を仕上げるのに複数回の打抜きと完成した製品の取り出しが必要なため、製品完成までに時間と作業がかかる（人の手作業か自動機で行う作業）。

ワンスタンプ金型は、製品に必要とされる形状（例えば、製品の内径、外径、その他製品に含まれる形状）の打抜きを 1 回の打抜きで作り上げる型で、製品完成



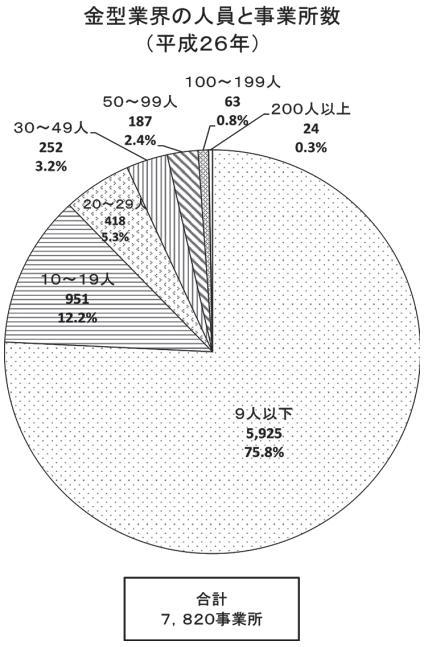


図 2-2　金型業界の規模と生産額 [2)]

（工業統計・産業編）

の時間は短いが、製品を取り出す作業（人の手作業か自動機の作業）が必要である。金型のデメリット面としては、金型内に配置するパンチ、ダイの強度の関係から接近した打抜きはできないため、緻密な製品加工に使用するには限界がある。

順送り金型は、製品を構成する形状の打抜きをいくつかの行程に分散し、行程ごとに材料を送りながら抜くことで製品の形状が完成する金型である。主にコイル材料を使用し、連続的に材料送りを行うことで次々に製品ができ、製品の排出も材料の送りに合せて自動で排出されるタイプや金型内に製品が抜き落とされ、金型の下方（プレスの下）からシュートなどで排出さ

れるタイプがある。材料の送りが自動で行われば、人の手をかけずに自動化が可能なため、生産性向上が可能な金型タイプである。また行程を多数設置するため、緻密な形状の打抜きも刃物を分散することで強度上の問題が解消され、より高度な製品に採用される金型である。

また、打抜き加工状態を表したのが図2-4～図2-6である。高精度の製品を得るために重要なのがクリアランス（パンチとダイの隙間）であり、適正なクリアランスによって、製品寸法とパンチ、ダイの寿命が保たれる。

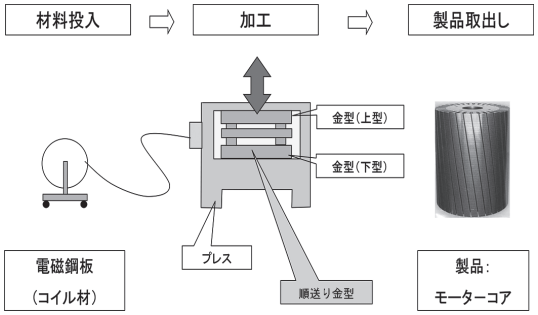


図 2-3　打抜き型

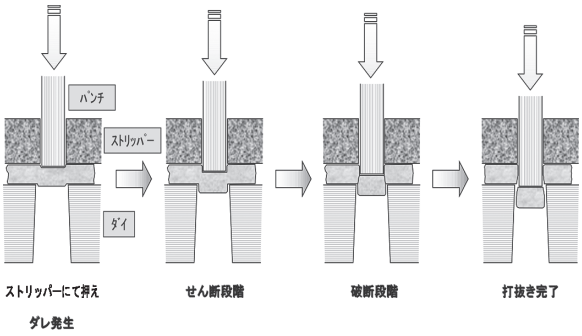


図 2-4　打抜き加工状態（1）

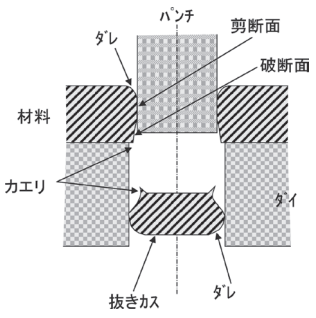


図 2-5　打抜き加工状態（2）

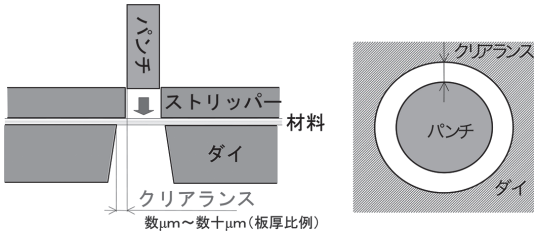


図 2-6　クリアランス

2.4.2　曲げ型

金属材料（コイル状の材料を使用する場合が多い）を成形行程ごとに1行程ずつ送り、徐々に製品の形状を作るとともに製品の一部又は多数の箇所を上下に折り曲げて製品を完成させる金型である。例えば電線ケーブルの接続に使用する端子は曲げ型で生産する。この金型も製品が立体的なため、曲げ深さによってプレスのストローク長さが長いものを使用する場合が多い（図2-7）。

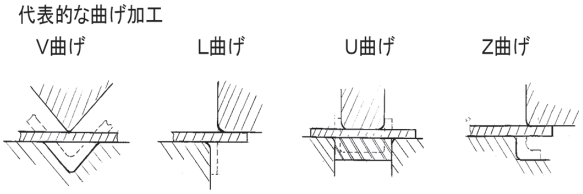


図 2-7　曲げ型

2.4.3　絞り型

コイル状または短冊の金属板材料を使用し、例えば筒状の製品になるように材料を立体的に伸ばしながら製品の形を形成する型である。製品の例としては、モーターの外枠ケースがある。金型の特徴は、立体的な製品を作るため、製品絞り深さによって上下に動く距離が決まる。使用するプレスもストローク長さが長いものを使用する。さらに金型内の行程ごとに製品を運ぶ機能を持ったトランスファー金型などがある（図2-8）。

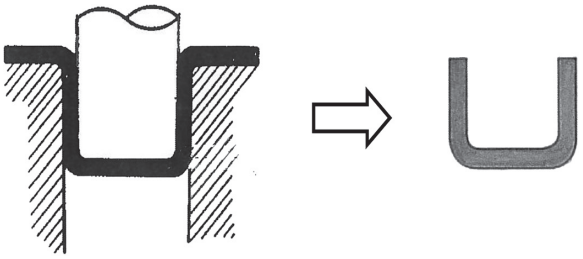


図 2-8　絞り型

参考・引用文献

1)　一般社団法人　日本金型工業会　ホームページより，金型とは，“http://www.jdmia.or.jp/mold/”
2)　一般社団法人　日本金型工業会，工業統計データ（経済産業省）を基に作成

3 モーターコア金型の発展史

モーターコア金型は、モーターのコア（鉄心）を打抜くための金型であるが、そのモーターの主な構成要素は以下のようになる（図 3-1）。

①ロータ（回転子）。
回転する部分
②ステータ（固定子）。
常に動かない部分、ロータに回転力を与える。
③巻線
④モーターケース
⑤出力軸
⑥軸受
⑦配線（箱）。

また、モーターコアはステータコアとロータコアがあり、その代表的な形状は図 3-2 のようになる。

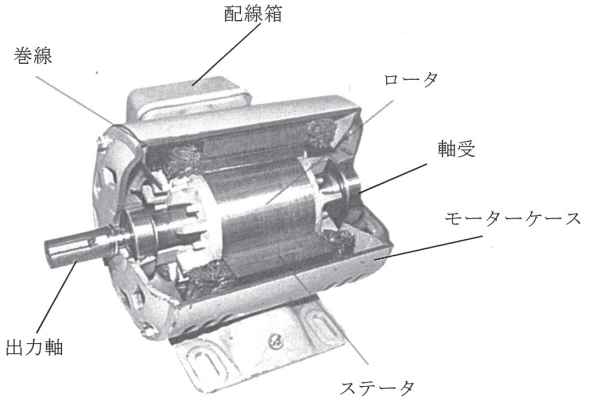


図 3-1　モーターの構成要素 [1)]

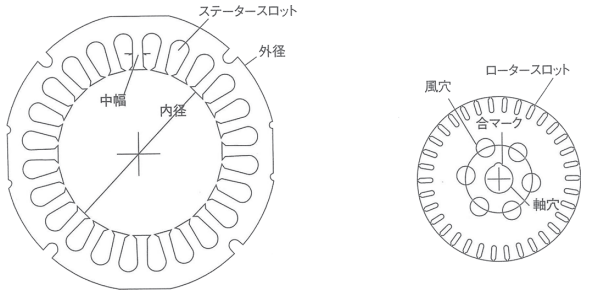


図 3-2　代表的なロータコア、ステータコア [1)]

3.1 ワンスロット抜きノッチング金型 [1)]

モーターコアのコアとは鉄心であり、シリコン（Si）を混入した鋼板で電磁鋼板と呼ばれる材料が使用される。ワンスロット抜きノッチング金型は材料を回転させながら、1 回の打抜きで 1 スロットずつ形状を加工して、所定の製品形状を得る金型である。図 3.2 のステータコアでは 24 スロットあるから、15 度ずつ 24 回打抜いて 1 枚のコアができあがることになる。

モーターコアを打抜き金型で製作する方法として、国内で最初に確立された方法である。このノッチング金型は今も使われている技術で、生産量の少ない機種や ϕ 400mm を超える大型のモーターコアはこの加工方法で製作される。ノッチング金型は専用のノッチングプレスに取り付けて加工を行う。図 3-3〜4 は当時の加工方法を現在に残しているノッチングプレスと金型である。

図 3-3 ではステータコアを打抜いている。インデックス機構を用いたターンテーブルでスロット数だけ回転させて 1 枚のコアを製作。

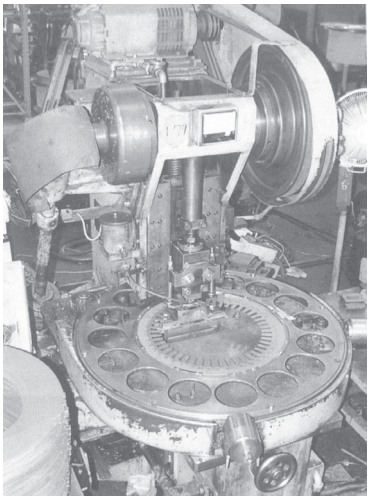


図 3-3　ノッチングプレス（ステータコア打抜き）[1)]
（写真提供：恒成工作所）

図 3-4 ではロータコアを打抜いている。ターンテーブルで回転させている。

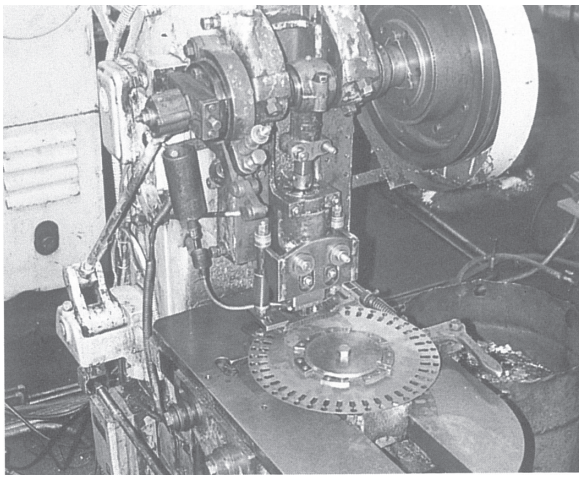


図 3-4　ノッチングプレス（ロータコア打抜き）[1)]
（写真提供：恒成工作所）

図 3-5 は金型を取り付けた部分の拡大を示す。ホースから打抜き油を給油。

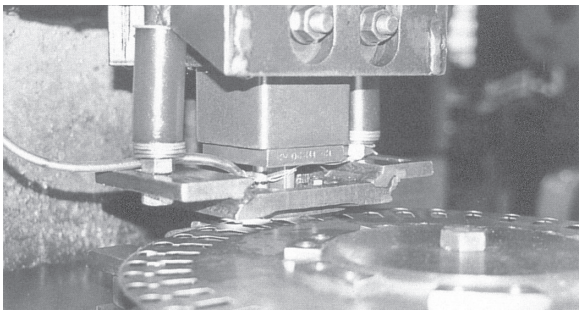


図 3-5　金型取付け部の拡大 [1)]

（写真提供：恒成工作所）

図 3-6 はノッチングプレスのクランクシャフトから駆動軸を取り、インデックスを利用してスロット数に合わせて割り出すのを示す。

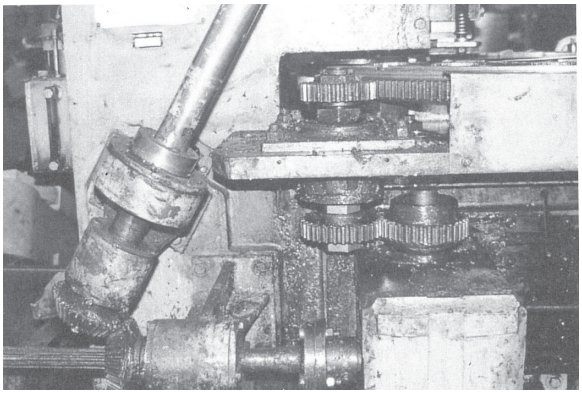


図 3-6　ノッチングプレスのインデックス機構 [1)]

（写真提供：恒成工作所）

スロットの打抜きに使われるノッチング金型は、コアを打抜くパンチと、それを受けるダイおよびパンチに食いつくコアをはがすストリッパーから構成されている。パンチ、ダイのスロット形状は複雑な形をしており、一度の加工で製品形状にするのは困難であり大変時間のかかる作業である。パンチ、ダイは電磁鋼板を打抜くために耐摩耗性を要求されるので、合金工具鋼に熱処理を施して製作される。

しかし、戦前から戦後間もない時代では金型加工用の工作機械がないので、ほとんどがタガネ、ノコ、ヤスリ等を使った手作業であった。その時代の加工方法を図 3-7～8 に示す。それは、大工がノミで木材に穴を開けるように、鋼にタガネで加工を加えていくのだから、相当の体力と根気が要る作業であった。当時のヤスリ仕上げで金型を作っていた人の手はごつくて、特に親指は足の親指ほどの大きさになっていたという。毎日ヤスリを握り、鋼を削って鍛えた職人の手であった。

ノッチング金型は先にパンチを作るが、ダイを仕上げるモデルにもなるのでベテランの職人しか作れない。図 3-7 のように、型削り盤（セーパー）を使って矩形から大体のスロット形状まで作り、後はゲージに合わせ、寸法を測りながらヤスリで仕上げる。

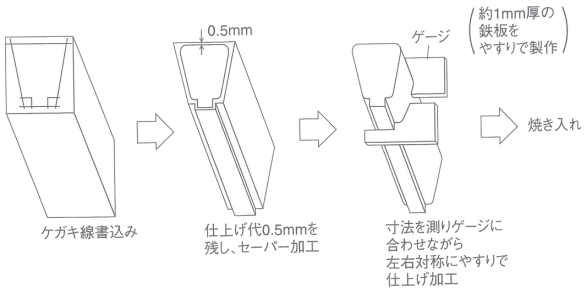


図 3-7　パンチのヤスリ仕上げ工程図

ゲージとしては図 3-8 のようなものがあり、多い人だと一人で 50～60 枚もゲージを持っていたが、絶対に人に貸すようなことはしなかった。ゲージの出来・不出来はできあがったパンチの良し悪し、すなわち金型の打抜き枚数、寿命に大きく影響をするので、職人として腕の見せどころであったし、そんな大事なものをおいそれと他人に貸せないという職人気質がうかがえる話である。

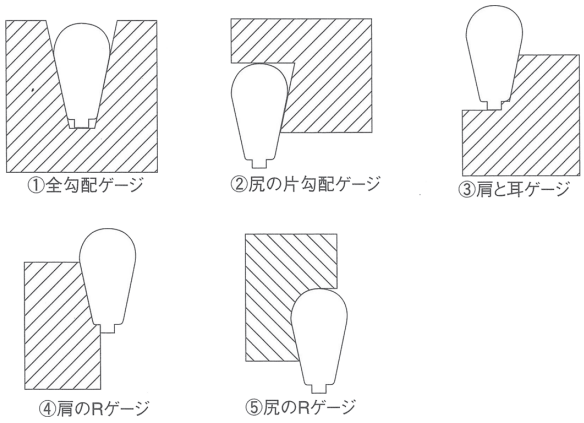


図 3-8　各種のスロットゲージ

ダイは先に作ったパンチに合わせて図 3-9 のように作るが、このころの加工方法ではパンチとダイの間のクリアランス（すき間）をつけないで、ゼロギャップに近い寸法に仕上げる。抜き落とし勾配（ダイの切刃部に設けられた勾配のこと。打抜き加工時の抜きカス排除を容易にしてパンチにかかる負荷を軽減する）は勘で付けるが、寸法をゲージで測っていた。パンチをハンマーで叩きこんで盛り上がった所をヤスリで削ってはまた叩きこんで、盛り上がった所をヤスリで削り取る繰り返し作業を行って、残りが後 1～2mm くらいになったところでダイをひっくり返して表面から最初にけがいた線に合わせてパンチを置いて、ハンマーで力一杯パンチをたたく。この時パンチの形状に沿ってダイの周囲が平均してくぼめばいいのだが、偏っていると片方だけにパンチが入り込み修正が必要になる。

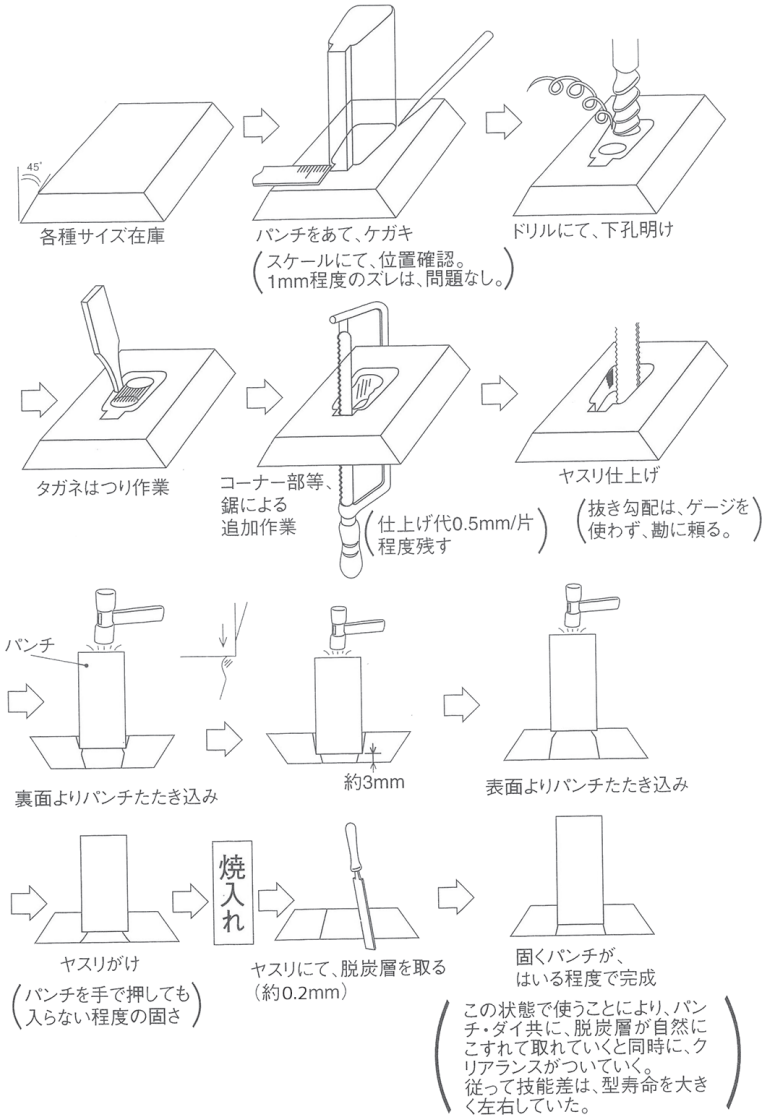


図 3-9　ダイのヤスリ仕上げ工程図

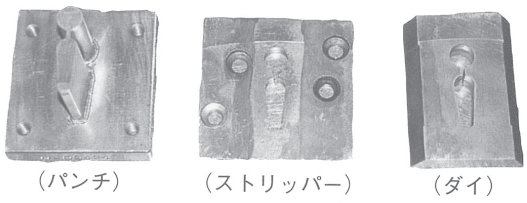
そしてうまく入ったところで上からトントンと叩いて、一番下までパンチが入らないといけないが普通は上から 3〜4mm しか入らない。なぜかといえば、パンチ自体が焼き入れで曲がったり、スロットの耳部の向きが揃ってなかったりしていたからだ。そしてこれを手直しするのが大変難しい。こうしてできあがったダイをそのまま熱処理に回すわけにはいかない。熱処理で伸びそうな部分はあらかじめタガネを使って、ダイの側壁を内側に張り出させておくのである。そしてスコヤを当てながら張り出した側壁をまっすぐにならしておく。反対に、熱処理によって縮みそうな個所は最初からパンチとすき間を付けておき熱処理をするのである。

この材料とこの形状であれば熱処理によって、どの部分が伸びてどの個所が縮むかとう判断は経験年数、熟練度が大きくものをいう。

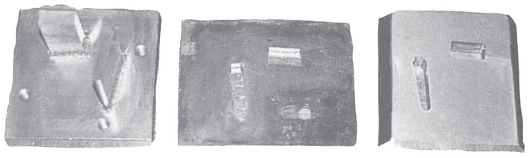
熱処理が終わったダイはパンチを入れてみて全く入らなかったら、油砥石（石英の微粉を少量の結合剤で固めた硬い砥石、水の代わりに油で砥ぐのでこの名がある）を小さく割った物でパンチに合わせながらダイを少しずつ削っていく。できあがったダイにパンチを入れてチェックする。少しでもすき間があったら不合格。全くすき間がないように仕上げなければならない。すき間がはっきり見える場合は「焼きもどし」といって、ダイを 150〜600℃ に再加熱して硬度を落とし、軟らかくなったところで、すき間の出たところをタガネでガンガン叩きだし、表面をヤスリで削ってもう一度合わせ直すことになるが、この修正方法も 2〜3 回までが限度であった。それ以上行うと修正も効かなくなって、作り直しとなるから、当時の熱処理作業が花形部門であった。いかに歪みの少ない焼き入れをするかというのが大変重要で、一番少ない誤差の焼き入れ作業をできる人が良い技術を持っていると言われた時代であった。

パンチやダイは100分代（1mmの1／100）の寸法が要求されるので、10年以上の経験がないとできないため新人には全くやらせてもらえなかった。頼んでも何もやらせてもらえないので、職人がするのを横でみて覚えていった。黙ってみていても、いつまでも仕事がもらえないので、自分でできそうなものを探しては、見よう見まねでやっていた。ノッチング金型のストリッパーはコンマ代（1mmの1／10）程度の精度で十分であったので、新人の仕事はもっぱらストリッパー加工であった。

このようにして完成した金型は図3-10のようになる。金型はプレスに取り付けてモーターコアを打抜いていくうちに、パンチとダイの表面に付いている熱処理時の脱炭層が自然に擦れて取れていって、パンチとダイの間にクリアランスが付いてくるので、金型寿命は職人の技能の差に大きく左右されていた。



a：ロータスロット抜用金型



b：スロットとコア外周円切り用金型

図3-10　ノッチング金型[1)]

（写真提供：恒成工作所）

3.2　ワンスタンプ金型（コンパウンド金型）[1)]

ノッチング金型がモーターコア製品のスロットの数と同じ回数だけ材料を回転させて打抜き、1枚のコア製品を得るという方法に対し、1回の打抜きで1枚のコア製品を得ることができる金型をワンスタンプ金型またはコンパウンド金型と言い、総抜き型とも呼ばれた。生産性の向上が図れるが、金型のパンチ、ダイの刃物形状がロータ、ステータと同じ形状を必要として金型構造がノッチング金型に比べ複雑となり、費用が高く納期も長くなる。

図3-11にワンスタンプ金型による打抜き工程を示す。短尺の電磁鋼板をステータコア用金型で打抜いてステータコア製品を取り出す。同時にステータスロットの抜きカスも出てくるが、その内側をロータコア用金型で打抜いてロータコア製品を取り出すことできる。「花コア」とは、ステータスロットの抜きカスが花びらのように見えることから呼ばれた。

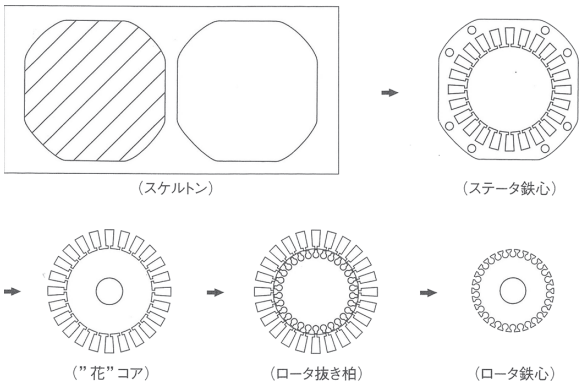


図3-11　ワンスタンプ金型による打抜き行程[1)]

ワンスタンプ金型の特徴としては、上型にダイ、下型にパンチを取付けていて、ノッチング金型や後で述べる順送り金型と逆の構造になっていることと、抜きカスを抜き落とす以外の所は、ダイであっても抜き落とし勾配をつける必要がないということである。製品の特徴として平坦度が良い、コアの内径と外形を同時に打ち抜くので製品の同軸度の良いことがある反面、型構造が複雑で加工が困難であり、製品とスクラップの取り出し、除去に問題が起こりやすいことが欠点である。図3-12にワンスタンプ金型の写真を示す。

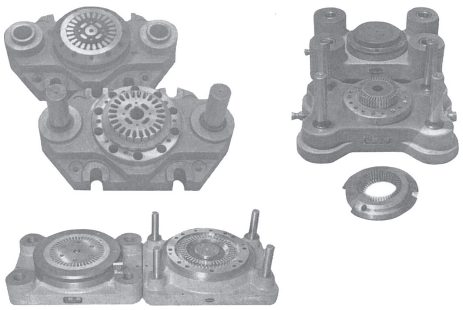


図3-12　ワンスタンプ金型[1)]

3.3　戦前のモーターコア打抜き金型の製造[1) 2) 3) 4)]

国産初の誘導電動機は1895年芝浦製作所（現東芝）により、銅鉱山ポンプ用6極25馬力の二相誘導電動機として誕生した。その後の産業発展に伴い、大正時代までに重電機メーカーが競って電気機械の開発製造を始めた。モーターコア打抜き金型は、各メーカーの製造の一部署として誕生していった。

芝浦製作所は1899年ころから三相誘導電動機を市場に送り出し、工場としても様々な工作用機械が整備されていて、1903年の主要工作用機械類表には旋盤、ボール盤、フライス盤などに加え、ノッチングプレス、ブランキングプレスなどの打抜き用プレスが記録されているので、ノッチング金型は使用されていたようで

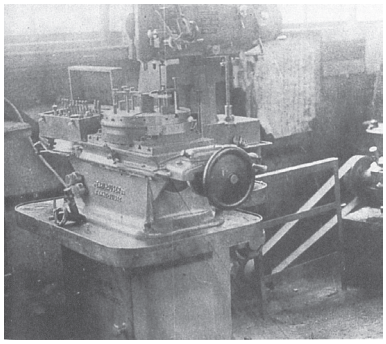


図 3-14　ハウザー治具ボーラ―#0

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

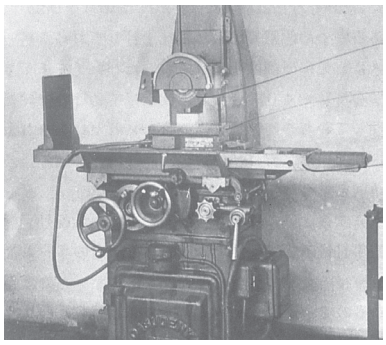


図 3-15　東京瓦斯電気製 小型平面研削盤

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

ある（図 3-13）。

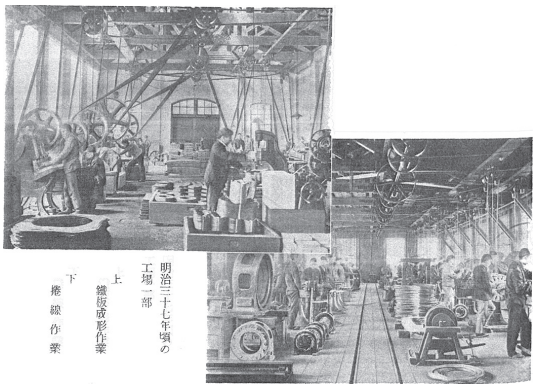


図 3-13　芝浦製作所　工場写真（1904 年頃）[2)]

日立製作所は、1910 年にその当時の久原鉱業所日立鉱山（現・JX 金属）の工作課で 5 馬力の誘導電動機を製造したが、山手工場に工具課があった 1934 年ごろ米国からモーターコア打抜き金型を輸入した。当時、ヤスリ仕上げで金型を製作していたが、米国の金型の刃物構造が分割構造で、しかも総研削仕上げで製作されていたことに大きな刺激を受けたと記録されている。1938 年～1939 年に量産に対応するため工具工場を多賀工場に設置した。機械設備として旋盤、フライス盤などの切削機械の他に平面研削盤 4 台、万能円筒研削盤 2 台、ハウザー社製（スイス）の治具ボーラ 1 台があった（図 3-14～15）。当時、金型のパンチは小型研削盤を用いて研削仕上げを行っていた。しかし、ダイは研削仕上げする技術を持っていなかったので、先にパンチを研削で仕上げ、あとでそれに合わせてダイをヤスリ仕上げするやり方で金型を製造し、この方法は終戦後まで続いたのであった。モーターコア用金型としてワンスタンプ型でロータ用、ステータ用で各 15～20 型／月くらい製造した。

ロータコア金型の製作方法として、初めにパンチをフライス盤と平面研削盤によって六面体に加工後、フライス盤でスロット形状に粗加工し、熱処理後にゲージに合わせながら、成形研削仕上げを行った。次に円筒状に加工したブランクダイにフライス盤でスロット基準穴を加工し、あらかじめノコ盤で切断し粗仕上げしておいたピースに研削仕上げしていたパンチをモデルにして、ヤスリで合わせて仕上げてその後熱処理していた。一体物に組み合わされたパンチとダイは最後に円筒研削盤で内外径の研削をする。

安川電機ではモーターコア用金型としてワンスタンプ型を 1927 年ころから作り始めているが、当時の作り方としてはブロック状の材料にケガキをしてボール盤で穴あけして、タガネではつり作業をしてヤスリ仕上げをするというノッチング金型と同じ方法であった。その後 1935～1936 年ころドイツからヤスリ盤とノコ盤を輸入して次第にタガネ作業をしないで済むようになった。1936 年には ϕ 165mm、ϕ 190mm、ϕ 230mm のやすり仕上げによるワンスタンプ型が稼働していた。しかし、その後戦争が始まり熟練工が戦争に行ったことと抜き型の需要に伴い、熟練技術を要するワンスタンプ型の製造を中止し、ノッチング金型に切り替えて乗り越えていった。

日立製作所でも戦局が厳しくなった 1945 年に多賀工場の疎開を始めた。コア抜き金型関係は太田中学（現太田一高）に第一陣として 3 月に疎開した。体育館を使用したが、屋根瓦も窓枠もなく、雨を避ける程度の骨組みだけの状態で窓にムシロをつるして寒さをしのぎ震えながら金型製作を続けたという。疎開した機械はフライス盤、旋盤、工具フライス盤、ノコ盤、ボール盤、平面研削盤各 1 台で、生産目標は毎月モーターコア打抜きワンスタンプ金型 8 台であった。多賀工場は 7 月に艦砲射撃、焼夷弾攻撃を受け倒壊したが大部分の機械は疎開し、建屋のほか古い機械を失い、多賀工場の生産はほとんど停止した。

3.4　戦後直後の金型製作 [1) 4)]

戦後、モーターメーカーは金型生産を再開するが、

金型の熟練工員が極度に不足していた。安川電機では1946年初めに、金型製作の遅延が生産の重大な支障となり全社的な問題となったと記録されている。金型の方式は戦前から続くノッチング金型、ワンスタンプ金型であったが、いずれにしても金型仕上げ工員のヤスリ仕上げ作業に金型製作は依存していた。ワンスタンプ金型の製作では、戦前から研削盤を揃えパンチの熱処理後に、角度付け加工やRの加工を研削加工で行っているモーターメーカーもあったが、ダイの加工はパンチに合わせてヤスリ仕上げする方法しかなかった。

ヤスリ仕上げによる金型製作の問題点として、以下のようなことが挙げられる。

①金型の生産量も品質も金型工員の熟練度に大きく左右される。

1研削あたりの打抜き枚数が多いほど出来上がりの良い金型と言われたが、出来上がりの悪い金型だと目標とする8,000～10,000枚を打ち抜く前に金型をプレスからおろして調整することになり生産計画に狂いが生じる。さらに金型寿命も短くしてしまう。

②熱処理後の歪み発生で手直し、調整作業が必要となり納期も長くなる。

熟練金型工員が熱処理後の歪みを経験上から予測してヤスリ仕上げ加工しても、熱処理後は手直し調整が必要である。熱処理で割れたり、クラックが入ったりあるいは修正が無理となって作り直しになると、金型納期が6ヶ月から1年近くかかり納期遅れとなってしまう。

③金型の採算が合わない。

金型の修正を繰り返したり、作り直しになってしまうと費用が嵩み採算が合わなくなる。モーターメーカーの自社部門でも大変な問題であるが、金型専業メーカーでは即死活問題である。納期遅れが続くと注文も取れなくなってしまう。

この問題点を解決するために研削加工が有効なことは海外製の金型を見て知られていたが、当時はモーターメーカーも金型専業メーカーも依然としてヤスリ仕上げ加工による型製作を続けていた。さらにモーターメーカーではワンスタンプ金型で増産に対応するために様々な改善を行った。

1949年頃の日立製作所のモーターコア打抜きは、ワンスタンプ金型が主流であった。ロータ、ステータ及びエアギャップの抜きカスが全て金型の上に残るのでこれらの処理が大変であった。亀戸工場ではプレス作業員と別に女性作業員をプレス後ろに配置して、モーターコアと抜きカスを処理させていた。多賀工場でもそれにならって作業をさせていた。しかし、全てのプレスに女性作業員を付けられないので、コアと抜きカスを分離する装置を作った。2個のローラー間に通すことにより、ロータ、ステータ及び抜きカスの曲がり方の違いによって分離する方法であった。

安川電機では、1951年汎用モーターの増産にともない、2～5HPのワンスタンプ金型をロールフィードとマガジンによる材料送り機構を備えた4工程分割方式に変更して生産した。4台のプレスに4台のワンスタンプ金型を載せてコアを打抜く方法で、ワンスタンプ方式から次の技術である順送り方式への一歩前の技術であった。このことで金型の構造が簡単になり、4台の金型を並行して製作することが可能となって製作期間が従来の1/3程度に縮まった。プレスは斜めに設置され、打抜かれたコアは自重で落とす仕組みになっており、プレス作業時間も約20%短縮された。熟練金型工員の不足を解消する方法、熟練金型工員に頼らない金型の製作技術として、順送り金型技術に応用されていく（図3-16）。

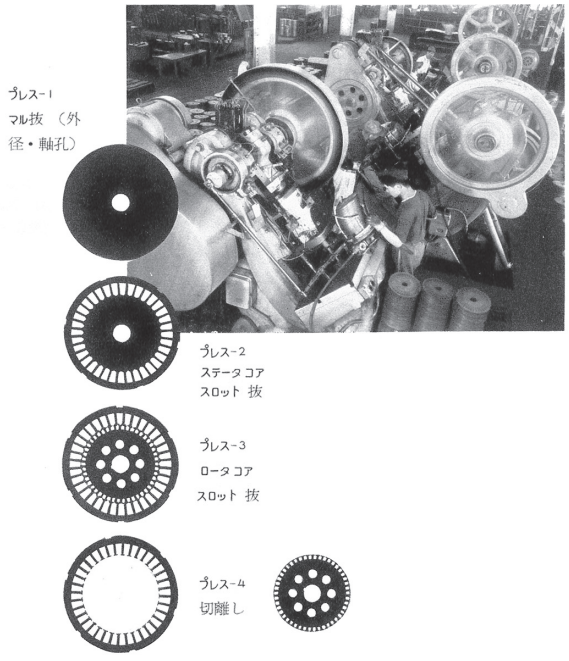


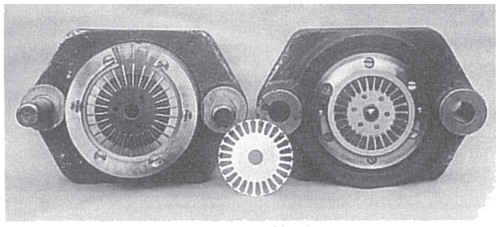
図3-16　4行程分割方式によるプレスとワンスタンプ金型[4)]
（写真提供：安川電機）

3.5 熱処理後の総研削仕上げ金型の誕生[1)]

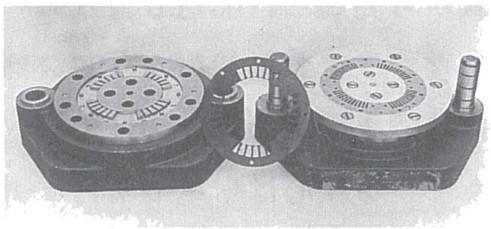
金型を製作する技術はモーターメーカーが持っていて社内工場で製作していた。1950年頃、それ以外では小規模な金型専業メーカーがわずかに製作している程度だった。しかし、ヤスリ仕上げの問題点を解決して、熱処理後の総研削仕上げの金型を初めて製作したのはその金型専業メーカーであった。

黒田挟範製作所（現黒田精工）はゲージ製作の技術

が優秀で戦前から創業していたが、その技術を活かしてモーターコア打抜き金型の製作を望んでいた。ちょうどそのころ金型の生産能力不足を外注で補うことを計画したモーターメーカーとタイミングが合って金型の外注を始めた。最初の金型製作を手がけたのは1947年、芝浦製作所小浜工場から受注したワンスタンプ金型であった。芝浦製作所にとってもワンスタンプ金型は初めて取り組むものであった。パンチは研削仕上げで製作したが、ダイは今までと同じ製作方法で分割せずにドリルで穴あけ後、ヤスリ仕上げで製作した（図3-17）。



a：ロータ抜型



b：ステータ抜型

図3-17　パンチ研削加工によるワンスタンプ金型

（写真提供：黒田精工）

1948年の夏、日立製作所亀戸工場は金型の製造能力不足を補うため、黒田挟範製作所に外注製作の依頼をした。黒田挟範製作所はそれまでの金型製作の慣習にとらわれず、全部焼き入れ後の総研削仕上げの分割型方式で作るようにした。これは当時として画期的な金型製作方法であった。この金型を亀戸工場で使ってみると目標の10,000枚以上が抜けたので、亀戸工場から表彰されたそうである。

日立製作所多賀工場でも黒田挟範製作所に金型を発注する一方で、社内で分割総研削方式による金型製造技術を確立することが工具課の当面の最大の課題とされていた。再研削1回あたり、通常8,000枚程度のコア打抜き枚数が黒田挟範製作所の金型ではその1.5〜2倍の成績であったからだ。　多賀工場には1950年当時、平面研削盤が3台くらいあった。小さなマグネットチャックを傾けてパンチの角度付けの研削加工を行っていた。しかし、分割総研削方式で金型を製作することが急務となり、輪郭形状の研削を可能とする技術を確立させることが必要であった。このことはモーターコアの製品形状と反対の形状を砥石に成形しなければならない。多賀工場ではネジ研削で使われていた「クラッシュフォーミング」（所望の輪郭に造られたロールが砥石をクラッシュしてロールと逆の形を造り、この砥石で工作物を研削して再びもとの形を工作物に写す方法）を採用した。ロールを研削するのに半分壊れかけた光学式倣研削盤（ワシノ製）を遊休機械置場から持ち込んで修理して、なんとか精度を出してロールの研削を行った。分割総研削方式の金型を製作するためには少しでも精度の良い機械が欲しかった。そのころ賠償機械の払い下げの制度があったので、それを利用して平面研削盤に重点を置き、理研製の油圧式小型研削盤を4〜5台集めた。中型の研削盤（ブラウン・シャープ製）1台も入手した。これらの機械を使って分割総研削方式の金型の製作に取り組んだ。

金型専業メーカーとして1949年に創業した三井工作所（現三井ハイテック）でも精度と計画通りの生産を確保するため、金型製作における焼き入れ後の歪みの問題を解決することに取り組んでいた。軍需工場の中古品やスクラップ置き場から研削盤として使えそうなものを買い集め、モーターを取り付けたりして自社製の平面研削盤を1950年に作って総研削金型の開発に取り組んだ（図3-18）。さらに1953年に中古の平面研削盤（アサヒナ製）を購入して研削仕上げによる金型製作の開発に拍車をかけた。従来のヤスリ仕上げでは、形の違うヤスリを何本も使い、熟練の金型工員が手仕上げで作りあげていく方法であったが、研削加工は平面仕上げ用の円形の砥石で加工するので思い通りの形状ができるのか全く手さぐりの状況であった。焼

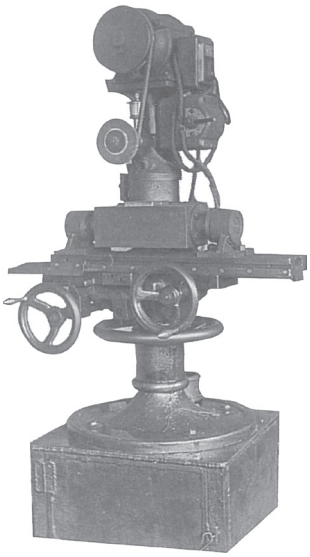


図3-18　自社製研削盤

（写真提供：三井ハイテック）

き入れをすると歪が出て修正に手間がかかるというなら、先に熱処理をして歪みを出した後に研削加工で仕上げたら良いという逆転の発想で、常識的にはできないと言われた研削仕上げの開発に毎日毎日、技術陣と現場工員が議論しながら取り組んだ。1954 年 3 月熱処理後総研削仕上げのワンスタンプ金型が完成し、安川電機に納入された。当時のヤスリ仕上げの金型が 1 研削 10,000 枚の打抜き枚数に対し、この金型は 50,000 枚と 5 倍も打抜くことができた（図 3-19）。

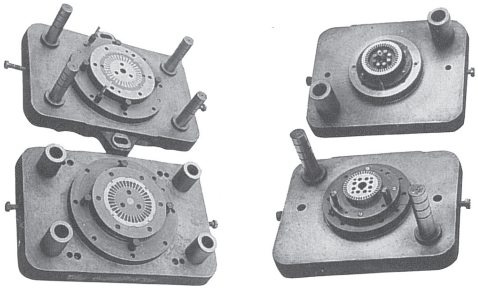


図 3-19　熱処理後総研削仕上げ金型

（写真提供：三井ハイテック）

3.6　砥石成形による研削加工

従来のヤスリ仕上げ加工は、ゲージの形状に合わせて見ながら加工物を手仕上げで削って形状の精度を出す方法である。それに対して研削加工は研削盤テーブルに加工物を固定して、テーブルを前後左右にハンドル操作で移動させ、上下する回転砥石で削って必要な形状の精度を出す加工方法であるが、ヤスリ仕上げのようにゲージ合わせしながら加工状態を見ることが難しい。そこで加工形状は複雑に見えても直線、R、角度で形成されていることに着目し、研削加工の優れている直線部は除いて、加工困難な R 部と角度部を研削加工できる方法の開発に挑戦する（図 3-20）。

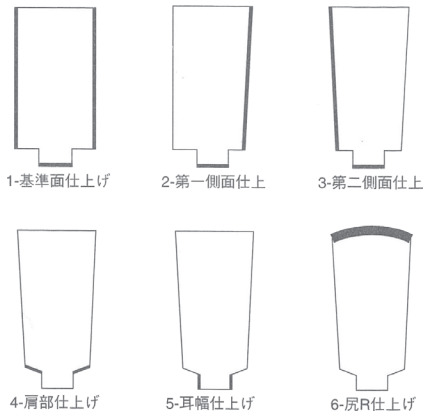


図 3-20　スロットパンチ研削手順

3.6.1　ダイヤモンド使用による砥石成形法

① R 成形専用治具

砥石の R 部の形状成形のためにダイヤモンドドレッサーとそれを保持する弓状の治具で構成されたものを R 成形専用治具と呼ぶ。ブロックゲージを使用してダイヤモンドドレッサー先端を正確に測定することによって R 寸法を決め、手動で弓の部分を左右に振って砥石に凸 R または凹 R の形状を成形する（図 3-21～24）。

図 3-21　R 成形治具使用による凸 R 砥石の成形

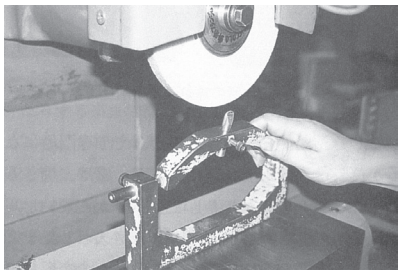


図 3-22　R 成形治具使用による凹 R 砥石の成形

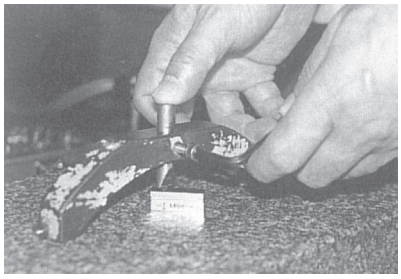


図 3-23　ブロックゲージを使用した凸 R 成形寸法の設定

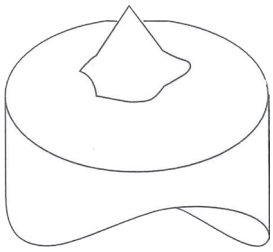


図 3-24　円錐型ダイヤモンドドレッサー

②マグネット式チャック

加工物のパンチ、ダイは鋼製なので磁石で容易に固定できることを利用し、研削盤テーブルにマグネット式チャックを取付けて固定した。マグネットは交流だと N 極 S 極が入れ替わるたびに磁力が切れ、加工物が研削抵

抗で飛ばされてしまうので、直流に変換しなくてはならない。高価な直流変換器は買えないので、安価なセレン整流器を利用して自社で製作した。また任意の角度に高精度で傾けられる可傾式マグネットチャックも活用した。

③サインバー式角度形成治具

角度部の成形に使用する治具で三角関数のサインの計算式を活用する。マグネットチャックに100mmの間隔で2本の丸棒を固定し、一方に必要とする角度から計算された寸法のブロックゲージを敷いて任意の角度にセットできる治具を三井工作所は考案した。治具上にダイヤモンドドレッサーを取付け、手動で移動させて砥石の側面、周面に求められる角度を成形加工する。任意の角度に高精度で傾けられる可傾式マグネットチャックと併用して、部品の角度付け加工に大いに活用した（図3-25）。

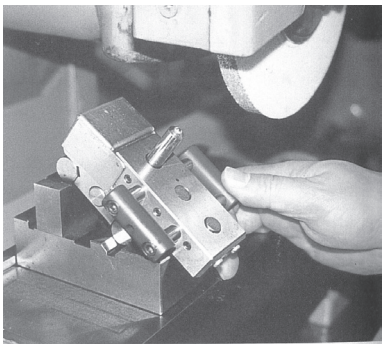


図3-25　サインバー式角度成形治具

3.6.2　クラッシャーロールによる砥石成形法 [1)]

求める部品形状に加工されたクラッシャーロールを使って、クラッシャーロールと逆形状に砥石を成形する方法である。この砥石で加工物を研削すれば求める形状を得ることができる。クラッシャーロールの材質は炭素工具鋼や特殊鋳鉄が利用され、焼き入れはされていなかった。これはクラッシャーロールの使用回数が増え形状が崩れたときに再度、元の形状に復元する際にバイトで削るためである。ロール形状が砥石成形の基となるので、ロール形状を良い精度で仕上げるのが課題であった（図3-26）。

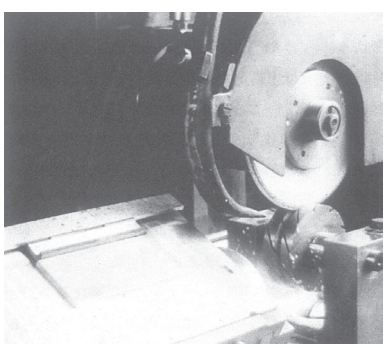


図3-26　クラッシャーロールによる砥石成形

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

またモーター特性上は好ましくないが、角度を付けたスロット形状にしていた。これは垂直に砥石成形しても砥石側面では研削困難で精度も出しにくいため、クラッシャーロール成形方法を考慮した設計になったためである（図3-27）。図3-28はクラッシャーロールと成形した部品例である。

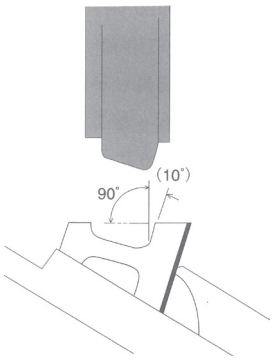


図3-27　クラッシャーロール成形による砥石成形とステータスロット形状

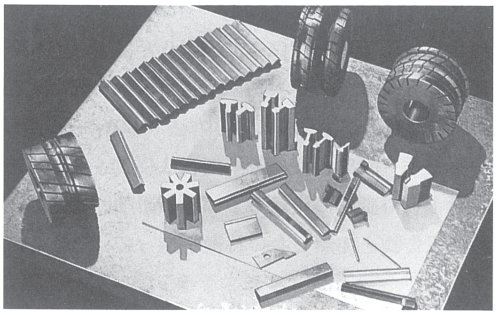


図3-28　クラッシャーロールと成形部品例 [5)]

日立製作所多賀工場、安川電機などのモーターメーカーではこの方法で研削砥石を成形した。クラッシャーロールによる砥石成形法は加工された金型部品はダイヤモンド使用による砥石成形法に比べ、仕上がり精度のばらつきが大きかったので、金型専業メーカーの三井工作所や黒田挟範製作所ではダイヤモンド使用による砥石成形法で金型部品を研削加工した。

3.6.3　パンタグラフ方式による砥石成形法 [1)]

分割型の総研削金型の製作はプランジカット研削方法なので、砥石の摩耗がそのまま製品の形状精度に影響する。日立製作所多賀工場は研削技術の研究をしていたが、イギリスの「ダイヤフォーム」という砥石成形装置を知り1951年購入した。砥石成形用ダイヤモンドのラッピングも自前のラップ盤を作って実施した。

三井工作所も1966年イギリス製「ダイヤフォーム」というパンタグラフ方式の砥石成形装置とドイツのユング社の研削盤を同時に購入して砥石成形を行った。砥石の成型方法は加工物の10倍に拡大したテンプ

レートを先ず製作し、このテンプレートに倣ってダイヤモンドドレッサーで研削砥石を求める形状に成形する。しかし、側面加工の問題、専用砥石使用の制約があり、多数個のスロットの部品加工では2〜3倍の能率が上がったが、砥石の消耗が従来品の約3倍早く、期待した精度も得られなかったので1台限りでこの方法の成形は断念した（図3-29〜30）。

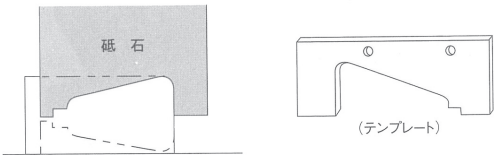


図3-29　テンプレートと研削砥石

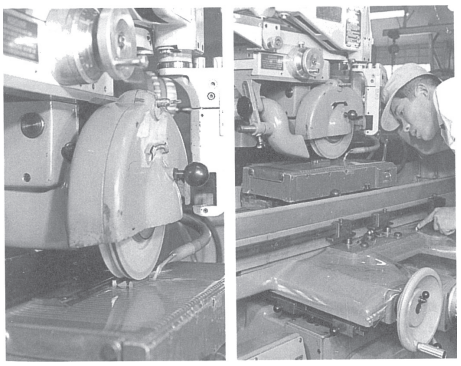


図3-30　ダイヤフォーム付ユング研削盤と加工状態
（写真提供：三井ハイテック）

研削加工への加工方法の変化は、形状によって加工が制約される部分があるので部品を加工できるように分割する必要があった。そのため金型構造を設計から大きく変えることになり、さらに研削加工により仕上げ精度が飛躍的に向上したので、分割総研削型と呼ばれるようになった。また、分割することによって部品を分散して同時に加工する分業ができるようになり、金型の製作期間の大幅な短縮が可能となった。

研削仕上げで部品加工ができることにより、これまでの大きな課題であった焼き入れ後の歪み問題を解決するという技術開発となった。さらに重要なことは研削砥石の成形方法の選択である。モーターメーカーがクラッシャーロールによる成形方法やダイヤフォームによる成形方法を選択したが、金型専業メーカーはダイヤモンドによる成形方法を選択した。前者は部品の形状を1回で成形するのでクラッシュロールを製作するのも大変であり、研削抵抗が大きかった。そのため大きな砥石軸をもった大型の研削盤が必要であった。後者は部分的に砥石を成形し部品も加工するので、研削抵抗が小さく小型の平面研削盤で十分であった。しかも加工された部品の精度も後者の方が優れていたので、金型専業メーカーではダイヤモンドによる成形方法を選択して普及した。

3.7　順送り金型

一機種のモーターコアを生産するために、ワンスタンプ金型ではロータコア用、ステータコア用の各金型と金型仕様に合ったプレスが必要であった。それに対して順送り金型は1台の金型と1台のプレスでロータコア、ステータコアを打抜くことができ、効率化と生産性のアップが実現できた。順送り金型は大量生産ができる打抜き方式であり、φ400mmを超える大型のモーターコアや生産量の少ないモーターを除き、ほとんどのモーターコアの打抜きに現在でも使用されている金型である。

3.7.1　順送り金型の導入[1)]

戦後になってモーターの需要が急増し、モーターメーカー各社は大量生産できるモーターの製造方法を求めていた。日立製作所亀戸工場は1953年モーターコア打抜きの順送り金型と125トンプレスをドイツのワインガルテン社から導入して生産増強した。国内でもこの金型をモデルにして順送り金型を製作するために、黒田挟範製作所に発注した。受注した黒田挟範製作所では製作するに当たって製造設備や検査機器が不足していたので、国の「応用研究補助金制度」を活用して補助金の交付を受け、必要な設備機器を購入して総研削仕上げの順送り金型を製作した。1954年10月国産第1号の0.4kwモーターコア順送り金型は苦労を重ねながらも完成し、亀戸工場で試抜きが行われた。その結果は、ワインガルテン社製の金型で作られたモーターコアに劣らない製品との評価を得た。

日立製作所多賀工場でもドイツのシュラー社から0.2kwのモーターコア用順送り金型と125トンプレスを1954年に導入した（図3-31〜32）。当時、長尺帯状のコイル材が無かったので、サブロク材（3フィート×6フィートの定尺材）を長手方向に切断して材料ストッカーに重ね置き、1枚ずつバキュームで吸い上げローラーフィードで金型内に送り込んで打抜いた。

一方、多賀工場の技術者はシュラー社の順送り金型について詳細な調査を行った。その金型の特徴は6本のガイドポストとスロット部分のみがストリッパーとなった構造であった。当時の多賀工場でも順送り金型の設計を既に進めていたが、それは4本のガイドポストと全工程のストリッパーを1体物で製作する金型構造であった（図3-33）。シュラー社から1台しか金型を購入していなかったので、自社製の予備型を至急製

作する必要があり、多賀工場の設計で製作を進めることが決まった。切刃のパンチとダイの加工方法もそのころには分割総研削技術もマスターしていたので加工にはそれほど苦労しなかったが、順送り金型でロータコアとステータコアを同時に打ち抜くので必然と金型が大きくなり、組立作業に苦労した。出来上がった金型をシュラープレスに取り付けてプレスを動かしてみたが調子がよくない。クリアランス（パンチとダイのギャップ）が変化する。おかしいと思いながらもそのまま打抜き作業を開始したら、ガイドポストとガイドブッシュに焼き付き（軸と軸受などの摺動面で摩擦のため熱せられ、金属の一部が溶融し表面が粘着する現象）が起こった。ガイドポストとガイドブッシュはともに焼き入れ鋼であったので潤滑の問題と考え、油みぞの工夫、強制注油などを行ったが解決しなかった。さらに調査して原因は偏心荷重（脚注 1）のためプレスのスライドが十分に耐えられず、ガイドポストに無理な力が働き、さらに摺動速度が速くて繰り返し作用したためと判断された。そのあとガイドポストも 6 本に変え、ガイド方式もプレーンガイドからボールガイド方式（図 3-34）に変更して焼き付き問題は解決し生産を開始した。

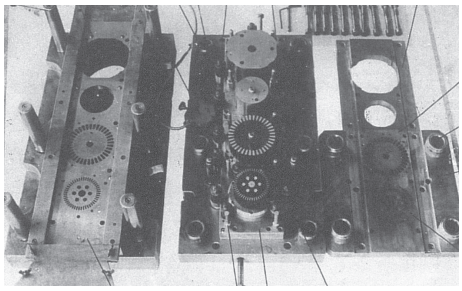


図 3-31　シュラー社製の順送り金型

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

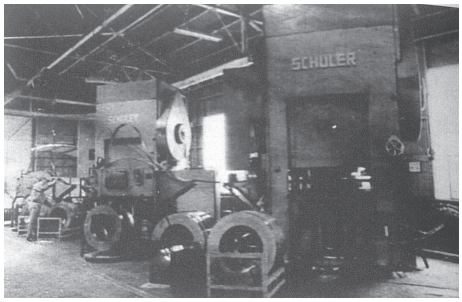


図 3-32　シュラー社製 125 トンプレス

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

（脚注 1）　偏心荷重：順送り金型の打抜き荷重中心と取付けプレスの中心が一致しない状態をいう。プレスの能力の設計は、プレスの中心周りの領域に荷重がかかることを条件としている。偏心荷重がかかればプレス能力が低下し、許容範囲を超えればスライドが傾き金型に損傷を与える。

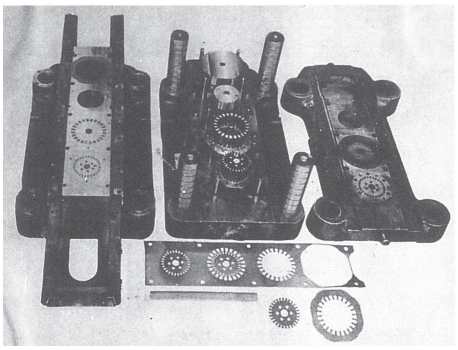


図 3-33　日立製作所製の順送り金型

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

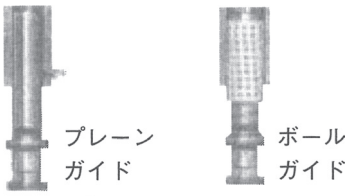


図 3-34　プレーンガイドとボールガイド [1)]

安川電機は 1954 年の技術誌の記事で、ワインガルテン社（ドイツ）では順送り金型でモーターコアを既に生産していること、日本でも黒田挟範製作所が順送り金型を製作中であることを知り、同年 7 月黒田挟範製作所を訪問して金型製作状況を見学して、金型の見積りを依頼した。しかし予想以上の価格であったため社内製作に方針を変え、1956 年に初めての順送り金型を製作した（図 3-35）。

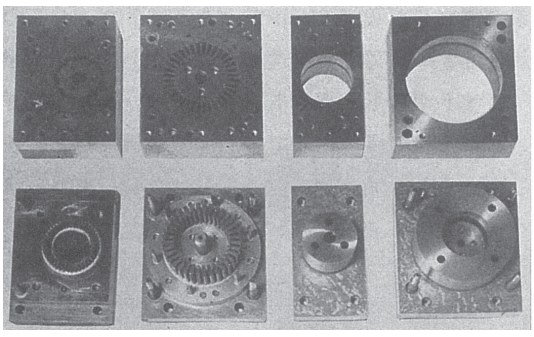


図 3-35　安川電機の第 1 号 150 トンプレス用順送り金型部品 [4)]

（写真提供：安川電機）

金型専業メーカーとして分割総研削仕上げの金型製作の技術を確立し、順送り金型に着目していた三井工作所も同じ 1954 年に黒田挟範製作所の金型製作状況を見学して、大いに触発され、翌 1955 年 5 月に 5 工程抜き順送り金型を製作し出荷した（図 3-36）。モーターコア用材料の電磁鋼板を打抜くパンチとダイの材料は合金工具鋼の SKD-1（別名ダイス鋼）が使われ、耐摩耗性を上げるために硬さが必要なので HRC60 程

度に熱処理を施し、総研削加工で仕上げられた。靱性、耐疲労性を高めるために焼き戻しを２回行った。靱性が低いと打抜いているときにパンチやダイの角がポロポロと刃こぼれするチッピングを生じてしまう。

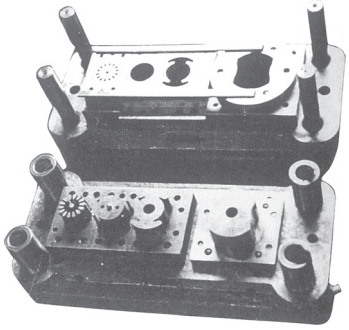


図 3-36　自社製第１号の順送り金型部品
（写真提供：三井ハイテック）

3.7.2　順送り金型の特徴

順送り金型は以下の特徴がある。

・長所

①高効率で大量生産に適している。

②複雑な形状のモーターコア製品も簡単な形状に分割して、複数の行程に分けて打抜くことができる。そのため、パンチやダイを簡単な形状で製作できるので加工が簡単になる。

③打抜きレイアウトを工夫することによって材料費を節約できる（図 3-37）。

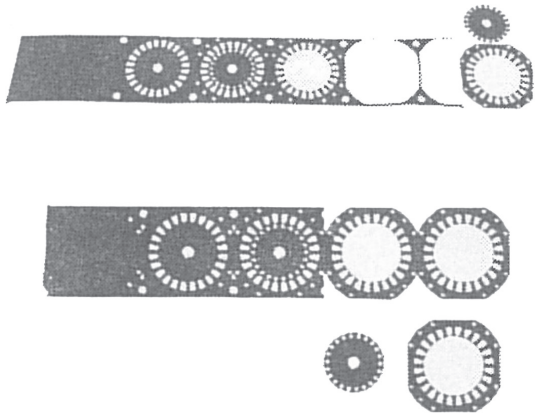


図 3-37　レイアウトの比較 [1)]

・短所

①製品精度はワンスタンプ金型に比べやや劣る。

②打抜かれた製品に歪みが出やすい。

③打抜かれた製品のバリ方向が同一でない。

詳細に述べると次のようになる。

(1) モーターコアの製品精度について

順送り金型ではコアの内径、外径、小穴等を打抜く刃物を多行程に分けて配置し、材料を１行程ずつ送ってコア形状を作り上げる。この際、内径はパンチ寸法、外径はダイ寸法が基準となるので、送られる材料の位置決め精度によって内径と外径等の同軸度が左右される。ステータコアの内径と外径の同軸度を向上させる方法の例として、ステータの内径・外径同時抜きがある。この金型の製作費は高くなるが製品精度がよくなるので、この方式の選択は要求される製品精度、金型費用さらにプレス能力などを加味して決定される。

(2) 製品に歪みが出やすい

複雑な形状のモーターコア製品を多行程に分けて打抜くので、材料に均一なせん断応力が働かない。そのため残留応力も均一にはならないので製品に歪みが生じやすい。また、順送り金型のダイには抜き落とし勾配があるので、金型の打抜き枚数が増え再研削を繰り返すとダイ寸法が変化してくることやダイの側面摩擦で製品に湾曲が出たりすることがある。

(3) 製品のバリ方向が一定でない

順送り金型では内径や小穴等のパンチで打抜かれた部分が製品寸法となる箇所と、外径のようにダイで打抜いた部分が製品寸法になる箇所があるので、製品の中でバリ方向が逆になるが、特別にバリ方向の指定がある場合以外は問題となることはない。

バリの大きさは刃物のクリアランスや材料の材質や硬さによって差はあるが、金型の設計段階でバリが大きくならないように設定を行うので、問題になるケースは少ない。

このような特徴のある順送り金型は多行程抜きのため、金型が大きくなり部品点数も増えて製作費用も高額になったが、モーターメーカーにとっては、金型、プレス各１台と一人の作業者で５倍以上に生産性が向上するので、大量生産を要求される時代に適した金型である。

3.7.3　スクラッププレス方式のレイアウト開発 [1)]

順送り金型がモーターメーカーに定着し、大量生産によって国内の需要が落ち着くと、家電メーカーは製品の輸出に力を注ぎ始めた。しかし、海外市場では強力な欧米メーカーが存在する。そのためモーターメーカーの工場では徹底したコストダウンが実施され、工場のコア打抜き部門も金型メーカーに対して、コストダウンの協力を求めてきた。金型メーカーにとって金型原価の中で人件費の割合は高く、値下げに応じれば人件費に波及し優秀な金型技術者を失うことにもなりかねない。モーターメーカーにとって値下げの効果は一時的であり、長期間値下げができることでもな

い。それよりも金型メーカーの弱体化はモーターメーカーにとってデメリットとなってくる。値下げは双方にとって真にメリットとならないので、もっと技術的な違いでコストダウンしようと着目したのがスクラッププレス方式のレイアウトである。モーターコアの材料の電磁鋼板は大量に消費されるので、その歩留まりを向上させ材料費を削減することによって、金型費用の値下げ以上の効果をねらった同方式の金型を開発した（図 3-38）。

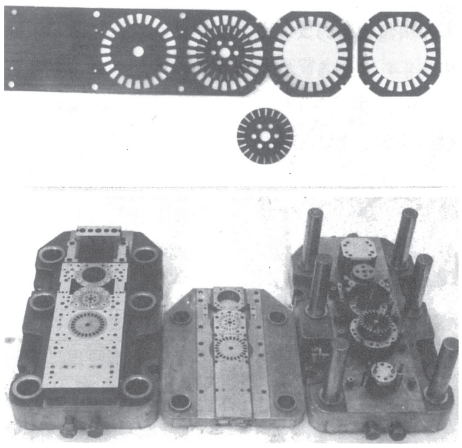


図 3-38　スクラッププレス方式順送り金型

（写真提供：日立アプライアンス㈱）

レイアウト比較で前述した図 3-37 を見ると、上段が内径・外径別抜きのレイアウトであり、下段が内径・外径別抜きのスクラッププレス方式のレイアウトである。この方式の金型は材料の両端部分とコアの間の製品とならない部分を取り除いて、材料の歩留まりを向上させたものである。この方式では 4〜6%の材料節約ができるので、大幅なコストダウンとなる。

1965 年頃、安川電機で 1 馬力のモーターコア（ϕ 135〜ϕ 165mm）用の金型において、スクラッププレス方式に変えることによってどれだけの材料削減効果がでるか試算すると、1 年間で約 10 億円削減の結果が出た。安川電機がスクラッププレス方式を採用したのは 1961 年である。モーターコアの順送り金型の生産主力が福岡県八幡工場から小倉工場へ移転する際に、200 トンプレス 2 台、125 トンプレス 1 台を会田鐵工所（現アイダエンジニアリング）に発注した。このプレスにはステータコアをプレス機械の外側で切断するという特別仕様が付けられていた、これはこれまでの順送り金型の 4 行程抜きから 3 行程抜きに変更されたことによるものである（図 3-39）。この変更で金型を小さくすることができ、プレスの中心と金型の抜き荷重中心を簡単に合わせて偏心荷重をゼロにし、金型寿命を大幅に延ばすという発想である。そこでプレスメーカーにステータコアをカットするための「製品カッター装置」を製作依頼していたが、プレスメーカーにこの構想を当初は理解されず、要求通りの仕様になっていなかった。そしてプレスが 1961 年 12 月に搬入された後、2 か月間突貫工事で苦労を重ねて製品カッター装置を完成させた。完成した製品カッター装置は、上下、左右ともにカット位置を 10mm 程度動かせるようにしたものだった（図 3-40）。

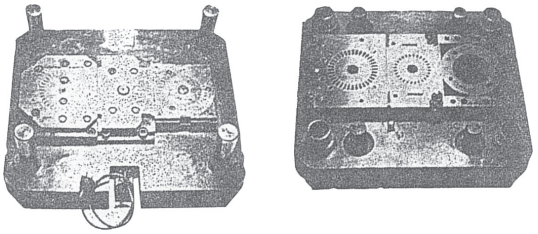


図 3-39　3 行程抜き順送り金型

（写真提供：安川電機）

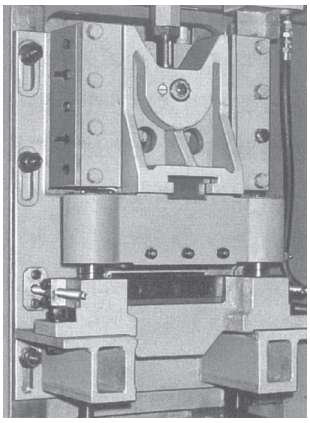


図 3-40　製品カッター装置 [6)]

3.8　順送り金型に対応するプレス

順送り金型が誕生する前のワンスタンプ金型では 1 分間に 60〜70 枚のモーターコアを打抜いていたのに対して、順送り金型では 1 分間に 200〜300 枚連続して打抜くことができ 5 倍以上の生産性向上を図れるので、大量生産を目指すモーターメーカーは競って取り入れようとした。しかし、順送り金型の打抜き加工ができるプレス機械はその急激な需要の増加に供給力不足の状態であった。

3.8.1　大型高速自動プレス [1)]

当時の海外プレスメーカーではドイツのシュラー社やワインガルテン社が有名で、日立製作所の亀戸工場、多賀工場が 1953 年〜1954 年に導入したことは前述したが、高額なプレスなので簡単に購入できるものではなかった。

安川電機では、1955 年に 150 トンの国産プレスを

導入したが、このプレスは技術的に未完成な部分が多く、納入後に安川電機で修正して何とか1分間に230枚程度打抜けるようにした。

プレスメーカーの会田鐵工所（現アイダエンジニアリング）は1956年に通産省の要請を受けて、順送り金型によるモーターコアの打抜きができる大型の高速自動プレスの開発に取り組み、完成した200トン高速自動プレスは、ベッド、テーブル、フレームガイドの平行度および真直度がいずれも1.5〜2mにつき0.02mm以内と当時としては非常に厳しい精度を要求されたプレスであった。このプレスは日立製作所亀戸工場に納入され（図3-41）、更に会田鐵工所は1958年、当時のモーターコア打抜きの順送り金型用のプレスとして国内最大の300トン高速自動プレスを完成させた（図3-42）。

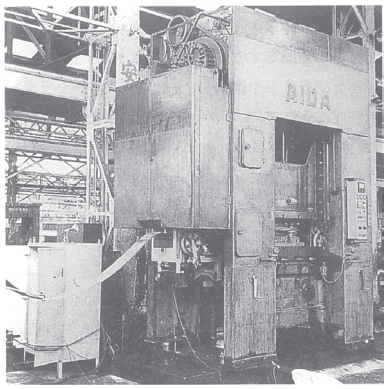


図3-41　200トン高速自動プレス[7)]

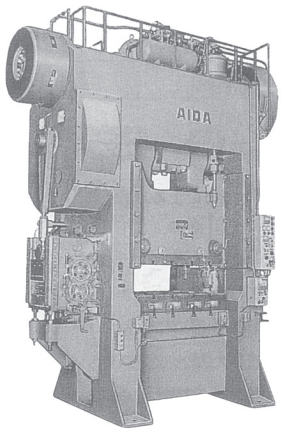


図3-42　300トン高速自動プレス[7)]

1954年〜1956年順送り金型が国内で開発され、さらに高速自動プレスも国内で開発されたことによりモーターコアの生産性は一挙に5倍以上に上がり、大量生産時代の幕開けを告げるものとなった。

3.8.2　タンデム方式によるモーターコアの打抜き

モーターメーカーは順送り金型で早く増産をしようと高速自動プレスの納入を計画したがプレスの納期が長くて入手できない。また、大型プレスを設置する場所がなくて、工場を増設しないといけないなど、直ぐに生産性をあげる体制が整えられないという切実な問題も生じた。

モーターメーカーが互いにシェア競争をしている時に、金型メーカーとしても生産性の向上のために過渡的な措置を考えなければならなかった。その一例がタンデム方式による生産方法だった。材料送り装置を備えた既存のプレスを横一列に2台並べて、ロータ、ステータにそれぞれ分割した順送り金型2台を載せて自動で連続打抜きを行うシステムである（図3-43〜44）。このタンデム方式は、生産性を向上させて競合する他社に遅れることがないように、プレスの納期が間に合わない時に、あるいはプレスを設置する場所がない時に生まれた生産方法であった。しかし、新しい設備を導入しないでモーターコアの生産性を上げた素晴らしいアイデアだった。

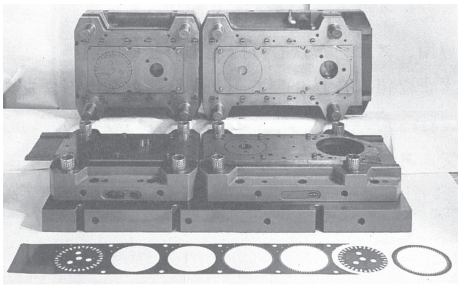


図3-43　2分割順送り金型

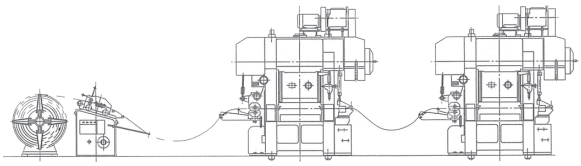


図3-44　2分割プレス配置図

このタンデム方式は、大きなモーターコアの生産を行うときに金型が大型になり、プレスも大型にする必要が出て、新たに設置すると大きな投資金額が要求される場合に、金型を2分割にし、既存プレスを活用して生産ができるということで、現在もよく使われる方法である。

3.9　モーターコア取出し用シュート[1)]

順送り金型で1分間に200枚の速さで打抜かれたモーターコアは100mm/分の速さで金型から連続して排出されるため、それを集めるためにシュートが設置される（図3-45）。このシュート製作は簡単なようで経験が必要とされるものだった。モーターコアは金型内からその直径より約2mm大きな抜き落とし穴から落下してくる。金型の下方にあるシュートの所では

約5mmコア直径よりも大きくし、さらにシュートの曲線部では約10mmの大きさの余裕を持たせている(図3-46)。

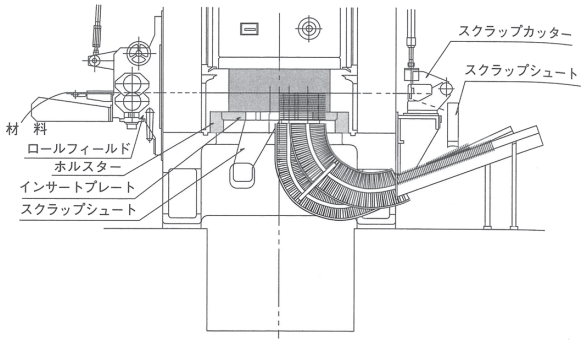


図3-45　製品シュート

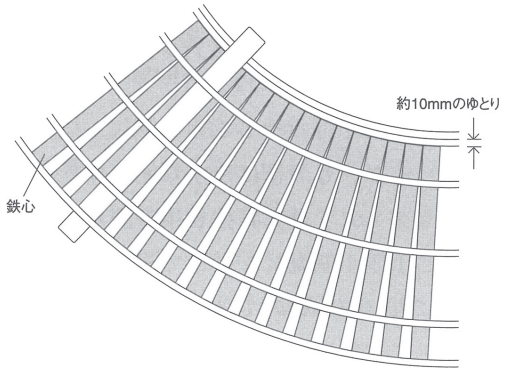


図3-46　シュート曲線部

また、シュートの曲線部の半径は最低でもコア直径の10倍以上が必要とされていた。図3-46で示すように曲線部の内径と外径の周長が違うので、ちょうど扇が開いたように内側ではモーターコア各々が接した状態にあるが、外側ではモーターコアは開いた状態である。このようなモーターコアの位置関係にするために、シュート曲線部半径はプレス周りの諸条件から経験値で出されたものである。

ダミーの製品を詰めたシュートをプレスに取付け、金型をセットして打抜きを始めるが、ダミーの後に打ち抜かれたコア製品が曲線部を無事に通過して出てくるまでが大変な作業であった。プレス周りが広々として制約がなく、十分な曲線部の半径が取れているシュートなら問題もほとんどないが、無理な設計の曲線半径を取ったシュートでは作業者が苦労した。プレス下に潜り込んで、頭上から落下してくるスクラップに悩まされながら打抜かれたコアが無事に曲線部を通過し、扇が開いたような整列した状態で流れるまでシュートをハンマーで叩きながら修正していた。当然、叩き方にコツがあって誰でもできるものではなく、悪戦苦闘していた。シュートの製作、設置がうまくいかないと製品の取り出しによるトラブルで毎回泣かされることになってしまう。プレスが狭い所に設置されたり、プレスピットの深さが浅い等の悪条件のときは、現場に合わせて工場の床にチョークで曲線を描いて、シュート製作用のϕ 8～ϕ 10mmのみがき丸棒を曲げて溶接していた。設計・製作の実態は図面等はほとんど無く現物合わせで、町工場の熟練した溶接工の作業であった。

参考・引用文献

1) モータコア50年史編纂企画委員会：「モータコア50年史　戦後モータ技術50年の歩み」，三井金型振興財団／三井ハイテック，2000年
2) 木村安一：「芝浦製作所六十五年史」，東京芝浦電気，P265，1940年
3) 日立製作所創業100周年プロジェクト推進本部社史・記念誌編纂委員会：「開拓者たちの挑戦　日立100年の歩み　1910-2010」，日立製作所，2010年
4) 安川電機40年史編修委員会：安川電機40年史1915-1955，P298，1956年
5) ムーア　カタログ
6) アイダエンジニアリング　カタログ'871105.Si
7) アイダエンジニアリング：「Aida75年　1917-1992」，アイダエンジニアリング，1992年

4 超硬金型（タングステンカーバイドダイ）の誕生

順送り金型と高速自動プレスが開発されたことによりモーターコアの生産性が5倍以上にあがり、大量生産の幕開けとなったことを前章で述べたが、この章では更に画期的に生産性を向上させた超硬金型の誕生について述べる。

4.1 超硬合金について

タングステンカーバイドとは、タングステン（W）と炭素（C）を混合して1,300℃程度の高温に加熱して造られた炭化物のことで炭化タングステン（WC）とも呼ばれる。このタングステンカーバイドを主成分として、コバルト（Co）を結合材として高温で焼結して製造された複合材料はダイヤモンドに次ぐ硬さで、超硬合金の代表的なものとして打抜き型の刃物（パンチ、ダイなど）に使われている。

超硬合金の歴史としては、1918年ドイツで「Schröter特許」としてタングステン粉末と黒煙粉末を還元雰囲気中で加熱し、炭化反応を起こさせてタングステンカーバイドとし、コバルトをこれに加えて焼結させる方法が公表され飛躍的に発展した。この後、この特許をもとにドイツのKrupp社より「Widia」という商品名称で販売され、その後世界各国で研究が進み、WC系にさらにチタンカーバイド（TiC），タンタルカーバイド（TaC）を含む複炭化物やTiC-Ni-Mo系などが実用化された[1)]。

4.1.1 超硬合金の製造方法[1)]

超硬合金は図4-1に示すような工程で製造されるが、WCと結合材であるCoを混合する時に、粉体間の滑りを良くし、圧縮成形の条件を良くするために潤滑材としてパラフィンを入れる。この圧縮成形された状態ではもろいので、さらに複雑な形状の成形を必要とする場合には、半焼結（仮焼結）を行ってチョーク（白墨）程度の固さになった後に、旋盤やフライス盤などで成形加工をした後、本焼結を行って完成品を得る。本焼結後には体積で約半分、1辺の長さで約20%の収縮が起こるが、その収縮にバラツキがあるため、後工程の加工（研削）の仕上げ代をできるだけ少なく、かつ一定にすることが必要であるから、収縮の条件設定は超硬材料メーカーの重要なノウハウとなっている。

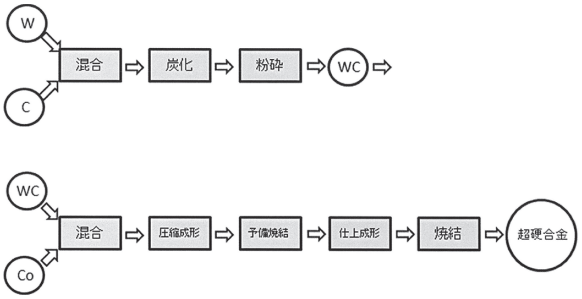


図4-1 超硬合金製造工程図[2)]

4.1.2 超硬合金の機械的性質[1)]

超硬合金の機械的、物理的性質は図4-2に示すようにCo量およびWC粒度によって大きく左右される。硬度はCo量が少なくなるほど高くなり、同じCo量であるならばWC粒度が小さくなるほど高くなる。図4-3はCo量と靱性の目安となる抗折力の関係を示す。抗折力はある一定の量まではCo量が多くなるほど高くなり、同じCo量ではWC粒度が小さくなるほど高くなる。図4-4はCo量と圧縮強度の関係を示したものである。

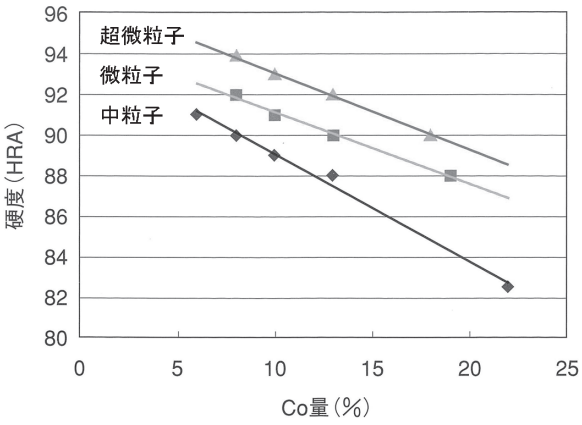


図4-2 Coと硬度量の関係[3)]

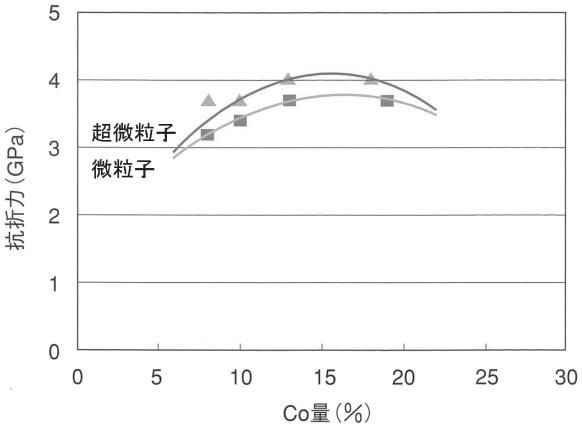


図4-3 Co量と抗折力の関係[3)]

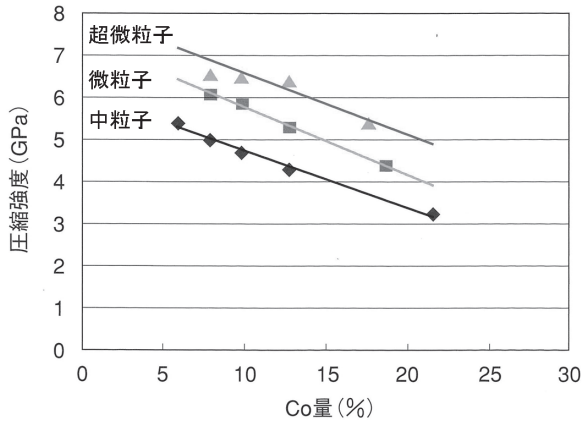


図 4-4　Co 量と圧縮強度の関係 [3)]

切削用超硬合金などでは WC-Co 系の他に WC の一部を置換する形で TiC，TaC，VC などが入ったものがある。これらは焼結時の WC 粉の成長を防ぎ、WC-Co 系よりも靱性を低下させるが、硬さを高くし切削時のチップすくい面に生ずるクレータ摩耗を防ぐ役目をするが、金型用の超硬材料は耐摩耗、耐衝撃性を要求されるので、ほとんど WC-Co 系の超硬合金が使われる。また、図 4-5 は金型用超硬合金の顕微鏡写真の一例である。

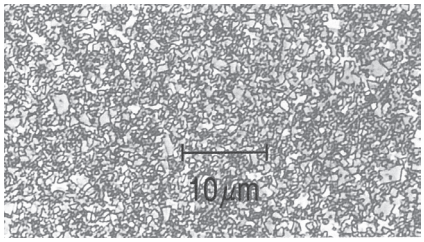


図 4-5　超硬合金の顕微鏡写真 [3)]

モーターコア打抜き金型で使われる超硬合金は、切削工具に使われる超硬合金に比べて内部欠陥の巣孔がないことが絶対条件である。金型専業メーカーとして国内初の超硬金型を 1958 年に開発した三井工作所は、国内の超硬メーカーの超硬合金ニッタンロイ（現日本タングステンの商品名）を使用した。超硬合金は硬いので加工するのに非常に苦労したが、超硬材料の品質にも悩まされることがあった。部品の出来上がり間近になって超硬材料の表面に黒いスジが現れたりすると加工者のショックは大きかった。シックネスゲージを入れて、材料内部に欠陥の巣孔があることが判明すればもうこの部品は使えないので、初めからの作り直しとなり、今までの苦労が水の泡となってしまう。モーターコア打抜き用超硬金型の量産型第 1 号機では国内超硬メーカーを使ったが、それ以降の超硬合金はアメリカの Carboloy、Carbidie などからの輸入品を使ってみた。しかし、巣の問題は皆無とならず、納期も 6ヶ月以上と長いので国産品に戻した。国内の超硬メーカーの協力があり、その後も HIP 処理の導入など品質向上に努めてもらったことにより、現在ではモーターコア打抜き金型の超硬材料は国産品で十分に満足できるものとなった。

その対策の製造方法としての HIP（熱間静水圧プレス法）処理について述べると、超硬合金製造工程における半焼結品に機械加工を加えた後、真空炉により一次焼結を行って気泡などの除去をする。その後に図 4-6 に示す HIP 装置により一次焼結品をアルゴン雰囲気中で MAX1,750℃、2000 気圧という高温高圧処理を施す。HIP 処理では、全周方向から均等な高い圧力が作用するため、巣孔が無くなってしまうとともに、抗折力、靱性などの機械的強度のばらつきが小さくなるなどモーターコア打抜き金型として優れた超硬合金が得られる。

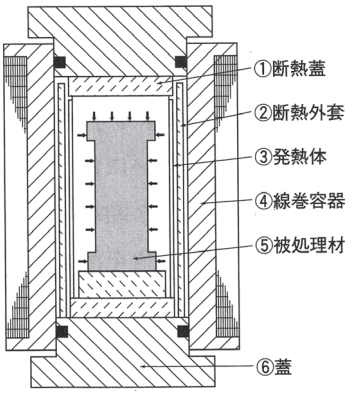


図 4-6　HIP（熱間静水圧プレス）装置 [4)]

4.2　超硬金型の開発

4.2.1　超硬金型の開発への取組み [1)]

安川電機 40 年史では、「1951 年頃から金型材料をダイス鋼から超硬合金へと転換を始め、1952 年 5 月スロット抜き型に、そのあと続いてφ 230mm の丸抜き型に適用して、1 研磨あたりの抜き枚数が従来のダイス鋼の 20 倍程度に飛躍した。」と社史に記述されていることから、国内において超硬合金をモーターコア打抜き型に取り入れることが、1951 年ころから始まっていたことが分かる。

アメリカにおいては 1951 年発行の技術書において、すでに超硬合金を使った順送り金型で電気カミソリ用のモーターコアが例として記述されていて、全ての超硬部品は精密に仕上げるために分割され、精密研削加工した後にラップ（磨き加工）がされていると説明されていた。さらに刃物を再研削するまでの打抜き枚数

がスチール（鋼製）金型の35倍もあることが記述されている。

国内においてもタングステンカーバイドをモーターコア打抜き金型の刃物材料として活用する方法はないか研究はされていたが、量産型としての超硬金型は製造されることはなかった。その理由は、超硬合金がダイヤモンドの次に硬いといわれる材料であるから、その加工方法が限られていたためである。一部の加工しやすい部品の抜き型として、ローラーチェーンに使用されるスチール製まゆ型リンクのように緩やかな曲線の形状をもった打抜き型では、すでに超硬合金を治具研削仕上げ加工して金型を製作していたが、モーターコア打抜き金型の刃物のような複雑で、鋭い角度の多い形状の成形は研削加工が不可能とされていたので、ダイの加工では放電加工が唯一の加工手段として使われていた。

放電加工は狭い間隔でのアーク放電によって加工するため、電流さえ流れればどんなに硬い材料でも加工することができたので、焼き入れ硬化されたダイス鋼や超硬合金でも銅や黄銅などの軟らかい材料を電極とすることによって、容易に加工することができる。

また、電極の向かい合った面の近い距離の所から順次放電が始まり、極間の距離が均一になるように加工が進んでいくので、加工形状と電極形状は微小間隔を隔てた現物合わせ形状の関係になり、放電加工が進めば電極の進行方向に投影された形状が加工されることになる。従って、電極さえ加工できれば任意の形状に加工できるので、焼き入れ硬化されたダイス鋼製の順送り金型でも放電加工は盛んに使われている（図4-7）。

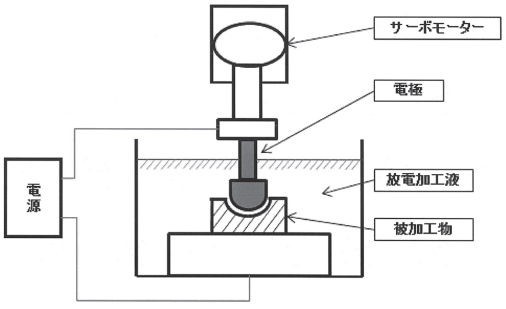


図4-7　放電加工機の原理

しかし、放電加工は加工液中で高温高圧のアーク放電による放電痕の累積形状であるから、材料表面の微小深さまでは放電の影響で母材とは異なった加工変質層が存在し、特に超硬合金では、加工部分にマイクロクラック（微細亀裂）が発生しやすい欠点を持っている。近年はワイヤーカット放電加工機の進歩や加工電源の改良や放電加工後の加工変質層を除去するラップ（磨き）などを取り入れて、マイクロクラック、加工変質層対策を実施するようになったが、超硬金型開発の1951～1952年当時はまだそのような技術は無かった。

また、パンチの超硬合金への取り組みは、超硬合金はダイス鋼の約20倍の高価格であることもあり、旋盤やフライス盤のバイトに使われている超硬ろう付けの方法と同じ要領で、パンチの刃先10～15mm部分だけに超硬合金をろう付けしていた。しかし、ろう付けは超硬合金にクラック発生の要因となることや繰り返し荷重に弱いことから、打抜きをしている時にろう付け部分が外れて落下し、ダイまで破損する事故を繰り返していて、超硬合金の接着技術の向上に必死に取り組んでいた。

このように超硬合金が金型の材料として適していると各社が注目し超硬金型の開発に取り組んでいたが、適した加工方法を国内では見つけきれずに量産型の誕生までには至らなかった。

4.2.2　量産用超硬金型の開発

1957年、日本生産性本部による中小企業金型専門視察団の選抜があり、全国から12社が選ばれた。米国務省の招待で当時金型先進国と言われていたアメリカの金型メーカーを視察するという目的で、翌1958年8月視察団は35日間の日程で渡米した（図4-8）。

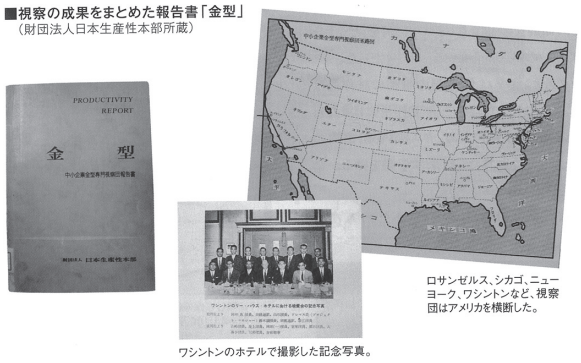


図4-8 中小企業金型専門視察団[5)]

九州から1社選ばれたのは三井工作所であったが、社長の三井は当時超硬金型の開発、特に超硬材料の加工方法について模索していたので、この視察でアメリカの金型製造現場を見て回れる機会を得られたことに大いに期待した。視察団は、ロサンゼルス、シカゴ、ピッツバーグ、デトロイト、ニューヨーク、ワシントンの金型工場を視察した。しかし、視察団は鍛造、ゴム、ダイキャスト、プラスチックなどいろいろな業種の編成であり、精密金型を製作するのは三井工作所だけであったため、見学コースに精密金型工場は1社も無かった。そのため、どの金型工場にも三井の疑問に答えるヒントもなかった。しかし、このまま手ぶらで帰国することはできないと三井は視察終了後もアメリカに留まった（図4-9）。

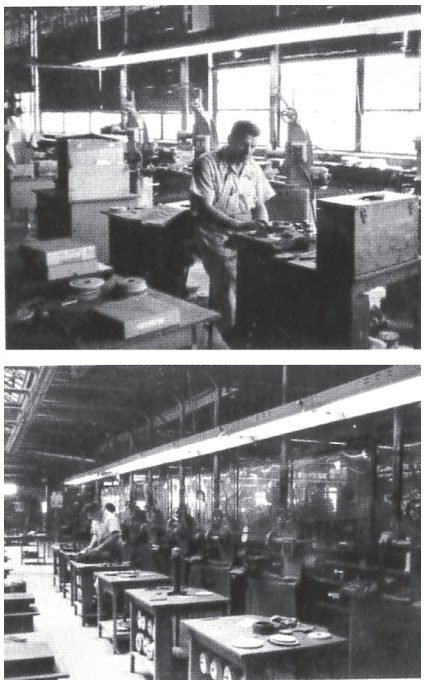


図 4-9　米国の金型工場 [5)]

一人アメリカに残った三井は、視察中に訪問したピッツバーグにある米国金型工業会本部から金型会社のリストをもらっていて、その中から生産品目がカーバイドダイと記載されている金型工場を訪問する日々を送った。しかし、そのほとんどがアルミや合金の引き抜きダイのメーカーで解決のヒントを見つけることができずにいた。ところが意外なところから問題解決の道は拓けた。節約のためシカゴの安いホテルに泊まっていたが、ある日、ロビーで一人のアメリカ人に「日本人は金持ちだからダイヤモンドを買わないか？」と声をかけられた。「金はないよ」と断ったが、「ダイヤのカットするところだけも見ないか」とさらに言われ近くでもあったので、とりあえず見学だけということで行ってみると驚くことに問題解決の鍵があった。そこではダイヤの原石を銅板で切っていた。0.1mm くらいの厚さの銅の円板を高速で回転させ、そこにダイヤモンドの粉を入れてカットしていた。砥石の代わりに 0.1mm くらいの厚さの銅円板でカットするこの方法で行えば、超硬合金も削れる。三井はそれからいろいろ質問したが、相手も親切に教えてくれた。次の日も行って教えてもらった。ダイヤを削れるのはダイヤである。ダイヤの次に硬いと言われるタングステンカーバイドもダイヤなら削ることができる。カギは削る時の角度とスピードであった。超硬材料の加工方法のヒントを得た三井はホテルに戻り、すぐに考えを整理して加工するための砥石の作り方などさまざまな図面を作成し速達で日本に送った。そして帰国するまでに超硬金型の試作型造りの準備をするように指示した。

国内の技術者たちは送られてきた図面やレポートを見てみれば、何もかもが初めて見るものばかりで、何から手を付けたらいいか分からず、数日間は寝食を忘れて悩み抜いたという。加工技術についても、超硬合金は非常に硬いので、通常使っていた研削砥石では削れないのは分かっていた。超硬合金を削るなら、これよりも硬いダイヤモンドしかないわけだが、ダイヤモンドは高価で使えないという考えから放電加工が使われていたのである。また超硬合金も、当時 1kg で 3 万円もする高価な材料だったので国内では部分的な使用であったが、アメリカでは一体物で使われていて、接着技術を使用していなかった。接着する方法は超硬合金を節約する加工方法として行っていたが、作り替えなどで却って無駄な使い方をしていたことになっていた。アメリカからの資料で初めて見聞する超硬材料の研削方法が皆目見当もつかない中で、三井の技術者は試行錯誤を繰り返し、後述するが銅板によるダイヤモンド砥石の研削技術にようやくたどり着いた。

このように苦労して分割総研削による超硬金型の試作型が完成したのは、1958 年 11 月、三井がアメリカから 10 月に帰ってから 1ヶ月後のことだった。当時の三井工作所には自動プレスがなかったので安川電機のプレスを借りて打抜き耐久テストを実施した。当時、刃物の再研削までの連続打抜き枚数は、やすり仕上げ金型で 1 万枚、熱処理後の総研削仕上げ金型で 5 万枚であったので当初の予想は 10 万枚程度に見ていたが、10 万枚、20 万枚打抜いても金型の刃物に支障はない。とうとう、年を越した翌 1959 年 1 月には 100 万枚を打抜いてしまった。ダイス鋼を熱処理硬化させたスチール金型の 20 倍の打抜き枚数である。まだ金型には異常が認められず 107 万枚まで打抜くことができたが、安川電機の生産の状況でプレスを借りることができなくなったので、打抜きテストは終了した。当初の予想をはるかに上回る成果を得たこと、さらに 100 万枚という大台を超えるまで連続して打抜ける確信が得られた（図 4-10）。

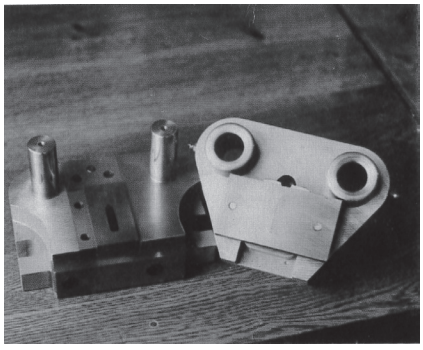


図 4-10　超硬金型の試作型

（写真提供：三井ハイテック）

この超硬金型試作型のテストが大成功を収めたので量産型でも十分に耐久性があると確信ができた。また、超硬合金の研削技術も開発できたことに加え、今までの順送り金型製造までの経験と技術を活用して、1959年5月に早くも量産型超硬金型第1号機、蓄音機用フォノモーター、7工程打抜き順送り金型が松下電器放出工場に納入された（図4-11）。超硬合金（タングステンカーバイド）を使用したモーターコア打抜き用順送り金型として、国内で初めての量産型の開発に成功し、松下電器大東工場で使用した結果は極めて好成績だったので、三井工作所が金型量産に着手したというニュースは画期的な開発として、当時の新聞でも全国に報道され、金型業界や家電メーカーに大きな反響を呼んだ（図4-12）。1研削あたりの打抜き枚数がヤスリ仕上げのノッチング金型が1万枚、熱処理分割総研削仕上げのスチール金型でさえ5万枚程度が限界だったのに対し、一挙に20倍の100万枚も打抜ける超硬金型が量産化できるようになったので、業界は大きなショックを受けた。1953年が電気元年といわれ、1955年ころからいわゆる3種の神器として洗濯機、冷蔵庫、掃除機（のちに白黒テレビ）が人気となり電化ブームとして家庭に急速に普及したが、1954年に順送り金型、1959年に超硬金型の開発ができたこと、特に今までのスチール金型の20倍の打抜き能力を持つ超硬金型の量産化が可能になったこともその背景にあったといえる（図4-13）。

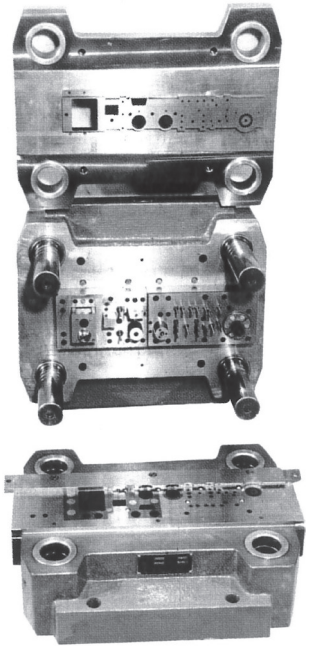
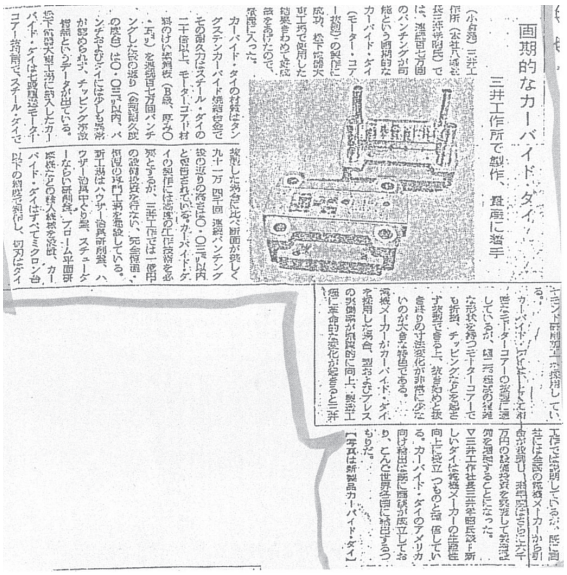


図4-11　超硬金型の量産型第1号機

（写真提供：三井ハイテック）

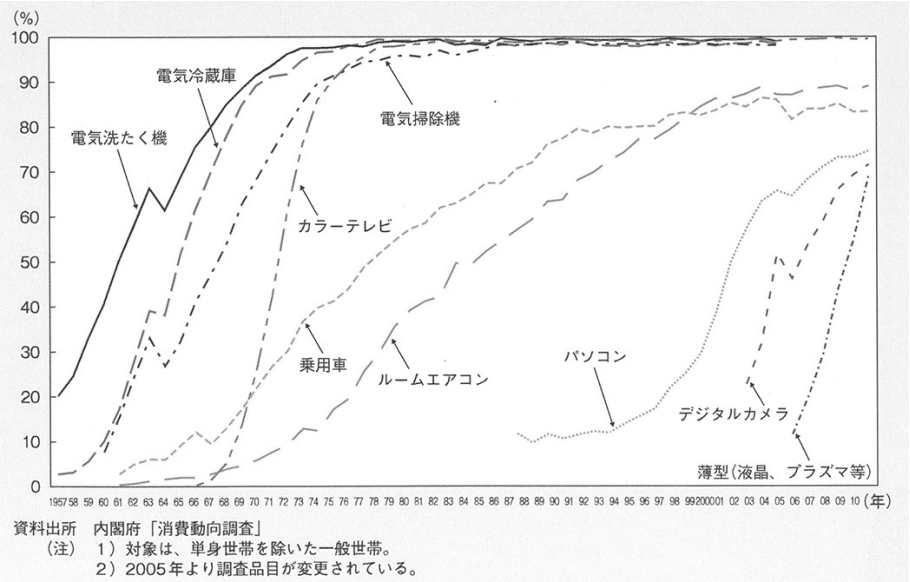


画期的なカーバイド・ダイ

三井工作所で製作、量産に着手

図4-12　超硬金型第1号機の報道

（日刊工業新聞 1955.12.8）



資料出所　内閣府「消費動向調査」
（注）　1）対象は、単身世帯を除いた一般世帯。
2）2005年より調査品目が変更されている。

図4-13　主要耐久消費財の普及率[6)]

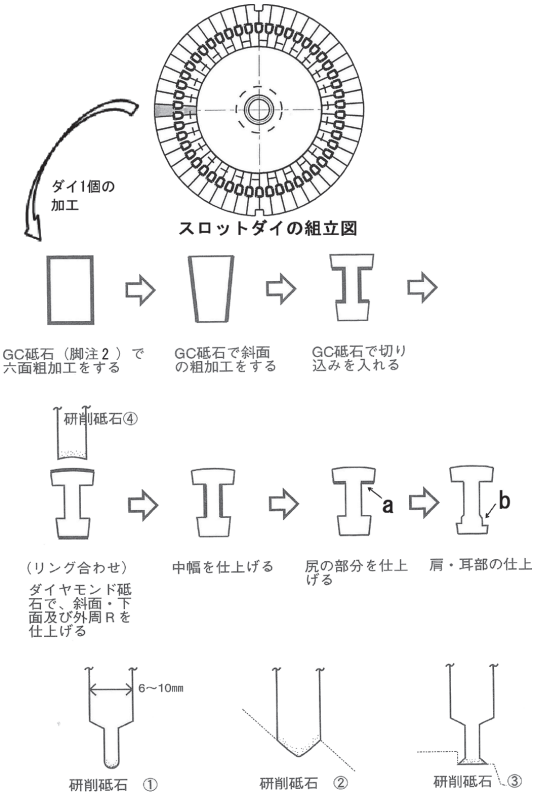
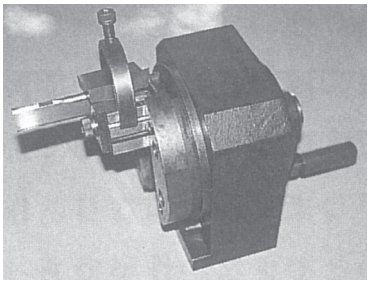


図 4-14　スロットダイの加工例

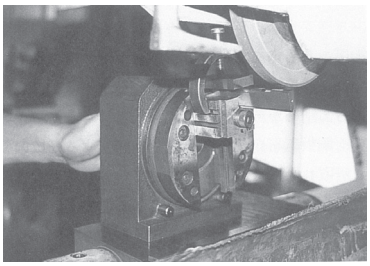
4.2.3　ダイヤモンド砥石の成形技術

超硬合金を金型の刃物部品に使って開発型を製作し、打抜きテストで一度も再研削をしないで 107 万枚も連続して打抜くことに成功して、わずか 4 か月後に量産型の順送り金型を完成させることができたのは、ダイヤモンド砥石の成形技術にあった。

1 例として、開発当時のスロットダイの加工方法を図 4-14 に示す。中幅部の直線部分は市販されていたダイヤモンド砥石でも加工できたが、砥石は使用していると両端部が摩耗して中高になったり、表面が波打ったりして真っ直ぐに削れなくなるので修正が必要になる。しかし、修正するとダイヤモンドが取れてもったいないのでこの砥石は粗加工用に転用する。その代わりに自作で先端を狭くしたダイヤモンドを付けた銅板砥石（①）を使用して加工をしていた。またスロットダイ a 部の形状で最も難しいのは直線部と R 部の角度の交わる部分で細心の注意を払って加工した。側面加工用の砥石がなかったので②のような砥石を作って、研削盤の可傾式マグネットチャックを使用して加工した。またスロットの b 部の成形も市販の砥石では側面加工ができないので、ここも自作の銅板砥石の幅を狭くした先端にわざと横バリを出すように成形して（③）、側面加工で仕上げていた。スロットダイの外径 R 加工は同様に④のような銅板砥石で加工していた。このようにスロットダイ 1 個を仕上げるのに 4 枚の銅板砥石を自作することになる。1960 年ごろには、ベアリング入りの鋳物製治具を自作して砥石の R 成形を行っていたが、その後は同一機能の市販品が出たのでそれを使うようにした（図 4-15（1）（2））。



（1）自社製 R 成形治具



（2）自社製 R 成形治具による加工例

図 4-15

ダイヤモンド砥石による超硬合金の成形方法の考え方の基本は、ダイス鋼を焼入れ硬化させたスチール金型の成形研削技術である。スチール金型の成形方法は前章で述べたが、あらゆる形状、あらゆる寸法の R 成形には前述した R 成形治具が使用されていたが、ダイヤモンド砥石の成形においてもこの治具を利用した。モーターコアの形状にはさまざまな R 形状があり、その成形に一つひとつダイヤモンド砥石を購入していたのでは、多額の費用が掛かってしまう。そのため、スチール金型で使っている砥石成形方法を利用してダイヤモンド砥石の成形ができないか試行錯誤を重ねていたが、技術誌からヒントを得た。それで銅製のリム付砥石を準備して、外側の銅のリングにダイヤモンドの粒を押し込んで、ダイヤモンド砥石を試作してみたらうまくいった。その方法では先ず基準となるマスターゲージを作らなければならない。マスターゲージの材質はダイス鋼を HRC60 程度に熱処理硬化させたものを使用し、成形しようとする形状や R 形状をこのマスターゲージに研削加工で成形する。スチール

（脚注２）　GC 砥石：緑色炭化珪素質砥粒。炭素と珪石を電気炉で加熱して 98%以上の純粋な SiC の結晶インゴットを砕いて整粒したもの。緑色をしているので Green Carborundum とも言われる。劈開性が強く超硬工具や発熱して困るような加工物の精密研削に適している。

金型の成形技術がないとマスターゲージさえ作ることはできない（図 4-16〜17）。

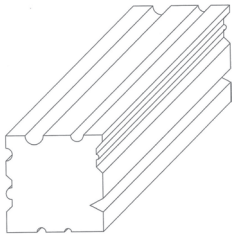


図 4-16　ダイヤモンド砥石成形マスターゲージ

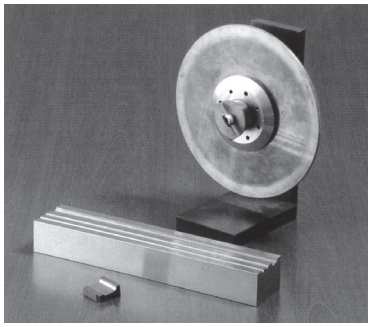


図 4-17　超硬研削用の砥石と製作治具（レプリカ）
（写真提供：三井ハイテック）

砥石となる銅板の厚みは 6〜10mm 程度で、研削するところに合わせて先端を細くしたりして製作していたが、あまり細くするとダイヤモンドを圧入するときに変形してしまう。銅板の成形には、スチール金型の成形で使う R 成形治具、角度成形治具に手作りの超硬バイトを組み合わせて加工していた。

銅板の成形が終わった後、マスターゲージを研削盤のテーブルの上に固定し、マスターゲージの成形された部分に時計油（透明で適度の粘度があり、凹みの中央に集まらない程度）をつま楊枝みたいな竹べらで薄く塗布し、その上に工業用ダイヤモンド粉末を均一になるように落としていき、その上から銅板を押し付けた状態で研削盤のテーブル上をゴロゴロと何度も往復させながら銅板を転がすのである。もちろんこの時は主軸モーターの回転は止めておく。研削盤にとってはかなり無理な力がかかっていた。当時の機械精度では銅板をマスターゲージに押し付けておかないと、テーブルを左右に転がした時に主軸が逃げてダイヤモンドが銅板の中に完全に入らなかった。しかし、先端が細い銅板では力が強すぎると銅板が曲がってしまうこともあり、作業者の経験と勘が必要な作業であった。

マスターゲージは 4 方向が使えるように 4 面加工したものを作業者は何本も持っていた。その長さは研削盤のテーブルの動き量で制限され、250mm 以上はできなかったので、銅板砥石がテーブル上で 1 回転するだけの長さが取れず、マスターゲージの長さだけ銅板砥石を回転させると、一度銅板砥石を上にあげて再びマスターゲージにダイヤモンドの粒を並べて銅板砥石の全周に切れ目なくダイヤモンドの粒が配置されるように、2〜3 回同様の作業をおこなう。銅板砥石の全周に切れ目なくダイヤモンドが付いていないと、超硬合金を削っている時に削るどころか反対に銅板砥石がえぐり取られて、加工物が吹っ飛んでしまい大変危険である。しかし、ダイヤモンドの集積度の基準はなく、作業者の経験に委ねられていたので、砥石の切れ味には個人差があった。

ダイヤモンドの粉末が銅板にきれいに圧入されているかは表面の光沢でも分かるが、薄い鉄板の縁をシューッと削ってみれば切れ味で分かるし、成形した形状がいいかどうかの判断は超硬合金を試しに削らなくても、割り箸のような薄い木片を削ってストレート部と R 部がうまく合っているかは目視で確認できた。

最初作成した銅板砥石では研削した面が粗く、金型部品として使えるものではなかったが、ダイヤモンドの粒子の大きさをいろいろと変えて試行することにより、研削面がきれいにできるようになった。ダイヤモンドの粒は＃ 100 のものから、最終仕上げは＃ 500 のものまで使用した。＃ 500 のダイヤモンドの粒を埋め込んだ銅板砥石の表面は見た目にはツルツルであるが、これで超硬合金が削れるのである。

銅板砥石の開発当時、三井工作所社内でも成形方法については極秘に進めていた。一般社員が退社した後、特命を受けた 2 人だけが工場に残り毎日終電時間まで開発に取り組んでいたので、社外はもちろん社員にも知られず開発した。金型部品の成形のうち直線部分の加工は市販のダイヤモンド砥石で十分加工できる部分もあったが、独自開発の銅板砥石の作成に時間がかかり、スロットパンチ 1 本を仕上げるのに 4〜5 日もかかっていたが、研削設備の近代化を図り分業体制を整備することで製作日数の問題は解決していった。

当時使用していた日本製のダイヤモンド砥石はハブの部分がベークライト製であったから、切込みすぎると焼けて砥石が燃えてしまったりすることもあった。超硬金型の加工に関しては、ダイヤモンド砥石メーカーもほとんど実績を持っていなかったので、金型メーカーの設計技術の方が先行し砥石メーカーはその後を付いてきて、金型メーカーの指定する砥石を作るという状況であった。

4.3　超硬金型の設計、加工技術

超硬合金の成形研削技術はスチール金型の成形研削

技術を応用できたが、スチール金型と比べて 20 倍の寿命を持つ超硬金型の構造は、スチール金型よりも十分な剛性を持たせる必要があった。超硬合金の刃物を保持するパンチプレートやダイプレートの材質では、スチール金型は炭素工具鋼を使用していたが、超硬金型ではダイス鋼を用い HRC60 程度に熱処理をした後、全て研削加工仕上げを行い、打抜き中に絶対にガタが出ないようにした。ダイセットの材質も開発当時は FC-32 や鋳鉄など鋳物としては最高級品を使った。また、ガイドポストのサイズもスチール金型が ϕ 32 ～40mm に対して、超硬金型は ϕ 50mm と一回り大きなサイズにして剛性を上げていた。

4.3.1　放電ネジ切り機の開発

超硬合金は硬度が高いので焼き入れ前のスチールのようにネジ加工ができないため、固定方法として当初はスチールブッシュ製のナットによるネジ止め方式としていた。超硬合金には素材の段階でスチールブッシュの入るザグリ加工をして、納入後の追加の加工を不要にしていた。スチールブッシュにはネジを切っているが、ボルト締めの際に回転しないようにネジの中心とスチールブッシュの中心と 1mm 偏心させていた（図 4-18）。しかし、超硬合金は焼結時の収縮によって孔間ピッチの誤差が大きく、その誤差をスチールブッシュで調整するためにスチールブッシュの外径を必要以上に大きくすることになり、超硬合金の素材の大きさも必要以上に大きくせざるを得ないという問題が生じた。

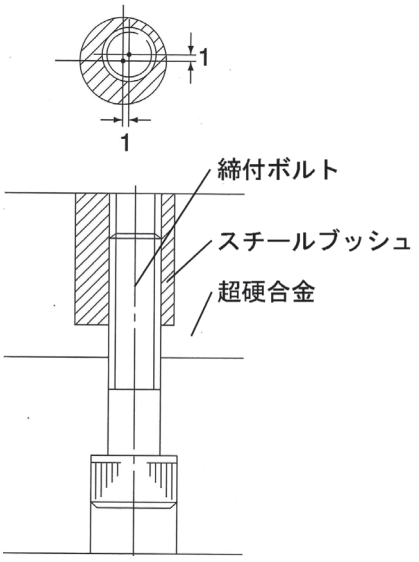


図 4-18　スチールブッシュによる超硬合金の固定

この問題を解決するために 1962 年放電加工機による放電ネジ切り機を開発した。この発明は、放電加工を利用して超硬合金や焼き入れ硬化されたスチールなど、通常のタップ加工ができない材料に容易にネジを加工するものであった。図 4-19～20 に示すように、外周に雄ネジを切った放電加工用の電極を被加工物の中心軸孔内に挿入し、電極を自転することなく、被加工物の中心軸を中心にして公転をさせながら、次第にその公転半径を広げて放電加工によって雌ネジを被加工物に加工するものである。

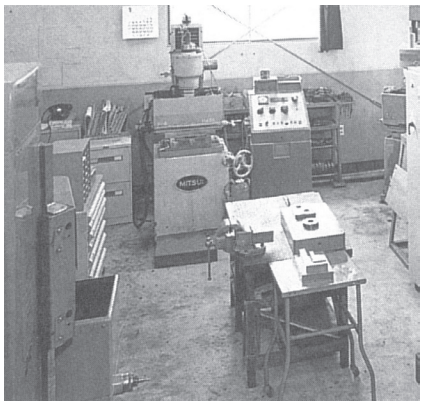


図 4-19　自社製放電ねじ切り機

（写真提供：三井ハイテック）

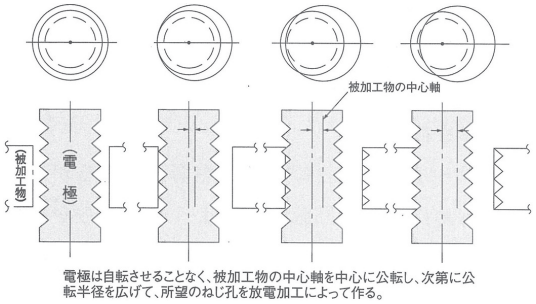


図 4-20　放電ねじ切りの原理

その後、超硬合金の焼結技術やろう付け技術の進歩によって、熱膨張の小さいインバー合金（鉄 - ニッケル合金、室温付近でほとんど熱膨張が生じない）をろう付けした超硬合金が超硬メーカーから供給できるようになったことから、ネジ加工性に優れたインバー合金のろう付け方式が主なものとなった。インバー合金のろう付けができない特定な加工物のみ放電ネジ加工を行っている。

4.3.2　パンチの固定方法

ノッチング金型ではたがねを使ったコーキング方式であったことはすでに述べたが、その後のワンスタンプ金型ではセロ合金によるパンチ固定も広く使用された。セロ合金はビスマス系の低融点合金で、103℃で軟化し 116℃で流動点になるので簡単に溶かして作業することができた。さらに凝固する際にわずかに膨張する性質を有するため、これを利用してパンチとそれを固定するパンチプレートの間の複雑な形状に流し込

み、凝固させて固定した。しかし、この固定方法ではこの後に開発された順送り金型には強度的に耐えることができなかった（図 4-21～22）。

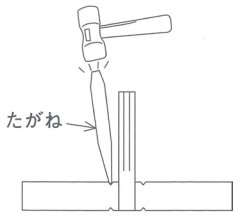


図 4-21　コーキングによるパンチの固定

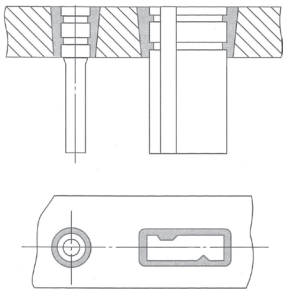
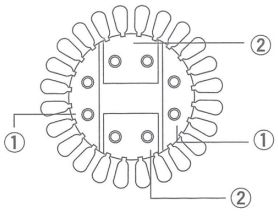


図 4-22　セロ合金によるパンチの固定

(1) リテーナーによるパンチ固定

そこで考えられたのがリテーナー式のパンチ抜け止めである。リテーナー式抜け止めとはパンチに切込みを付け、リテーナーで押さえてボルトで固定する方法である。設計当初ではリテーナーを数個に分割していたが、締め付けボルトの数が増えたり、打抜き中にリテーナーが動いて落下事故があったりしたので、分割をやめて一体物でパンチを固定できるように改良した（図 4-23～24）。



4分割タイプとその取付け順序

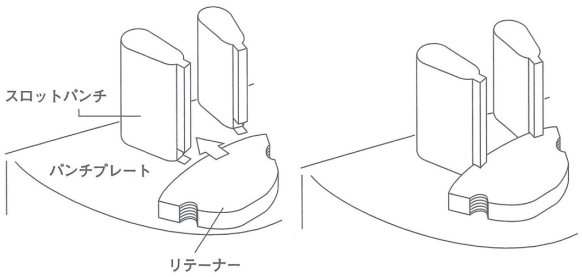


図 4-23　リテーナーによるパンチの固定（1）

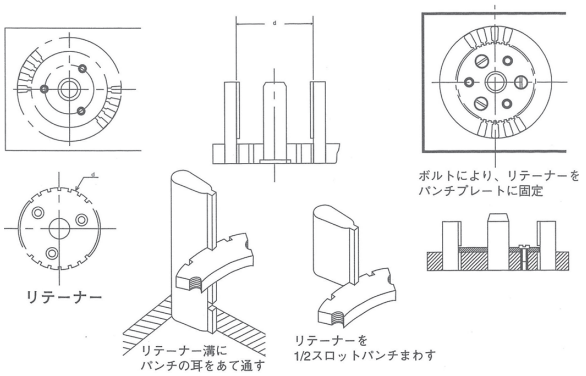


図 4-24　リテーナーによるパンチの固定（2）

(2) スパイダーによるパンチ固定

モーターコアはステータにもロータにもスロットがあり、それらはコアの中心から放射状に一定の角度で配列されている。従って、パンチもスロット数だけ必要になり、多数のパンチを放射状に一定の角度で固定する技術は難しいものである。ノッチング金型では 1 本のパンチを固定する技術でよかった。ところがワンスタンプ金型になると、一気にパンチと同じ数だけのパンチを固定する技術が必要になるので、熟練技能者の独壇場になってしまう。スロットパンチの固定もワンスタンプ金型の初期のころは 1 本ずつヤスリ仕上げで固定していた。しかし、成形研削技術が開発されて部品精度がよくなってくると、それらを固定する手段も精度を要求されるようになってくる。セロ合金で固定する方法が現れてきたが、順送り金型には強度不足であったから、何とか機械的に固定する方法がないかと考えられてきたのがスパイダー方式であった。しかし当初は研削仕上げの技術までは開発されなかった。スパイダーは日本語では蜘蛛であるが、モーターコアのスロットの配列状態がコアの中心から放射状に規則正しく配列してあるので、保持するプレートをスパイダーパンチプレートと呼んでいた（図 4-25）。

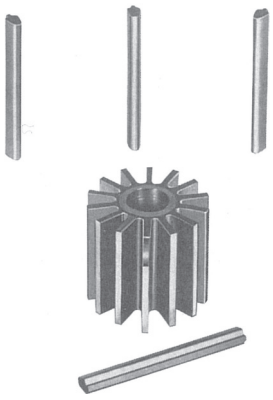


図 4-25　スパイダー式パンチプレート

スパイダーパンチプレートの最初の作り方はゲージを使ってヤスリ仕上げで行っていた。素材を旋盤で丸く削った後、内径と外径は円筒研削であらかじめ仕上げておく。その後1スロットずつ放射状にけがき、コンターマシンを使ってけがき線に沿って不要な部分を切除するが、ヤスリ仕上げ代を片側0.5mm残しておく。仕上げ用のゲージは1.2mmの鉄板でピッチゲージ、側面ゲージ、モデルゲージ、深さゲージの4種類を準備しておき、順番に使って1本ずつ、1周して仕上げる。加工はやすり盤を使って透き見台（台の上面がすりガラスになっていて、すりガラスの上に加工物を置き、下から光をあてて加工物とゲージのすき間を見る）の上でのぞきながら、片面1ヶ所ずつ仕上げていき、片方の面が全て仕上げ加工が終われば次に歯厚マイクロメータと側面ゲージを使ってスパイダーパンチプレートの歯厚を仕上げる。そのあとモデルゲージで仕上がり状態を確認しながら、最後に深さゲージを使って深さを仕上げるとヤスリ仕上げによるスパイダー式パンチプレートは完成する。割り出し精度は±0.005mm程度である（図4-26〜27）。

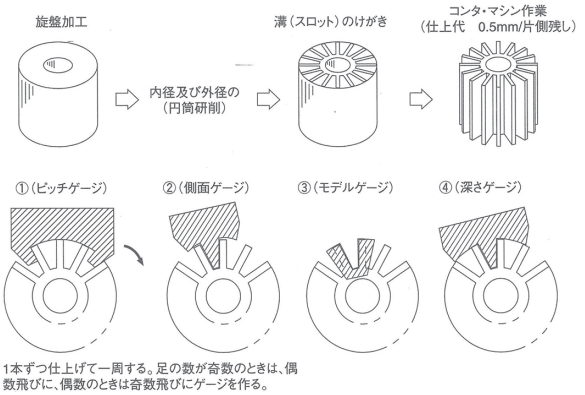


図4-26　スパイダー製作の仕上げ用ゲージ

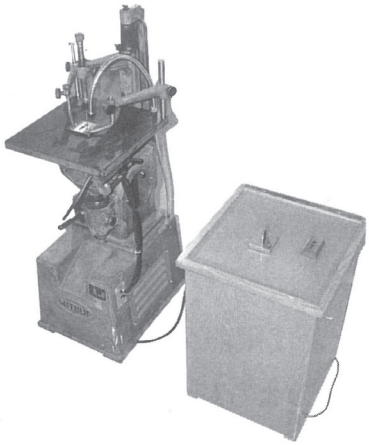


図4-27　ヤスリ盤と透き見台

外径φ100mm、スロット数24のスパイダーパンチプレートのヤスリ仕上げによる製作日数は約2日間であったが、スロットパンチを組み立ててみると作業者の熟練度によって、直角度、平行度、ピッチおよび幅の精度にバラツキがあり、最終的には組立作業者のコーキングの技能で精度を補正していた。

しかし、やすり仕上げによるスパイダーパンチプレートでは、超硬金型の求める耐久性や精度に応えることはできないので、熱処理、総研削仕上げはどうしてもやらなくてはいけない技術であった。そこで図4-28に示すような研削治具が開発された。基準となるテンプレートは必要とされるスパイダーの足の数に合わせて24等分、28等分あるいは48等分などにそれぞれジググラインダーで回転テーブルを利用して製作された。

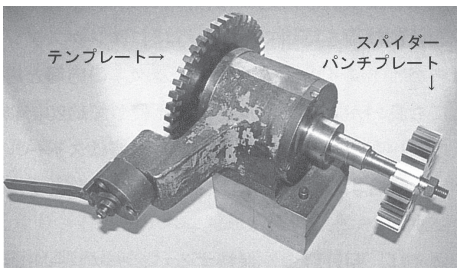


図4-28　スパイダー研削用治具

テンプレートと加工されるスパイダーパンチプレートは研削治具に仮締めして、定盤の上でテンプレートとスパイダーパンチプレートを交互にダイヤルゲージで測定しながら位置決めを行ったあと加工に入る。基準となるゲージの外形は仕上がり寸法よりも片側0.01mm大きく仕上げてあるので、スパイダーパンチプレートの底面寸法は片側0.01mmまでゲージに切り込むように研削すれば、それでスパイダーパンチプレートの底面は仕上がることになる（図4-29）。

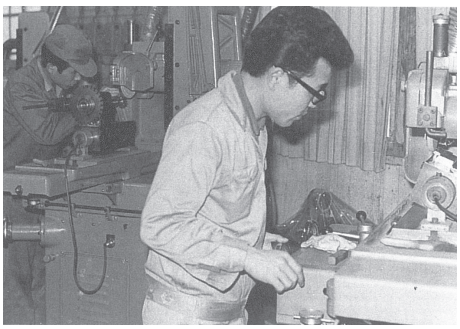


図4-29　金型部品の研削作業
（写真提供：三井ハイテック）

初めは1ヶ所の溝を中心に対して左右振分けに成形された研削砥石で加工するが、既にできあがっているスロットパンチを確認用のモデルとして使用して仕上げる。最初の溝加工ができたら隣の溝仕上げに移るが、この時歯厚マイクロメータで測定しながら、1周

360 度仕上げていく。この治具により研削加工でパンチを精度よく組み立てることができるようになったので、コーキングによるパンチとダイのクリアランス修正は完全に不要となった。

4.3.3　精密機械の導入

スチールダイの 20 倍の生産能力の超硬金型はモータメーカーとりわけ家電メーカーからの需要が急増し、これに応えるためにはその当時の加工方法では限界がくるのは明らかであり、三井工作所は安い原価で技術的にも優れた金型を生産することを目標に、加工工程の徹底的な機械化を進めてきた。そして機械化を進めたうえにスチール金型の成形加工技術を活用することができたので超硬金型を短期間で開発できた。

しかし、各部品の精度は作業者の技術、技能で仕上げることができても、位置精度を確保するには機械精度に頼る以外にないという考えで、精密機械を導入した。例えば、1956 年三井精機のジグボーラ―、1959 年ハウザー社（スイス）のジググラインダー、1960 年ハウザー社のジググラインダー、ジグボーラ―及び、ホンメル社（ドイツ）の光学式倣い研削盤及び、1961 年スチューダー社（スイス）のパンタグラフ式倣い研削盤及びペテベ社の光学式倣い研削盤などである。この後も毎年精密機械を導入し、金型専業メーカーとしてトップクラスの機械化を行い生産工程の分業化を進め、流れ作業による金型の量産化を推進した（図 4-30～33）。

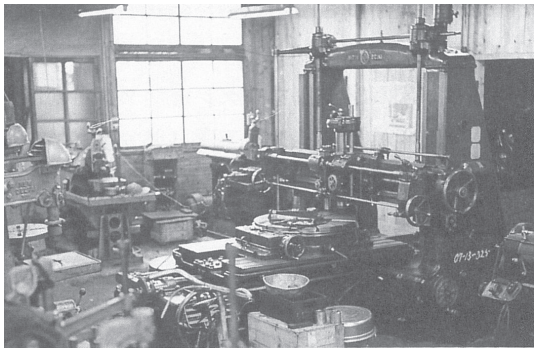


図 4-30　三井精機製ジグボーラー#6

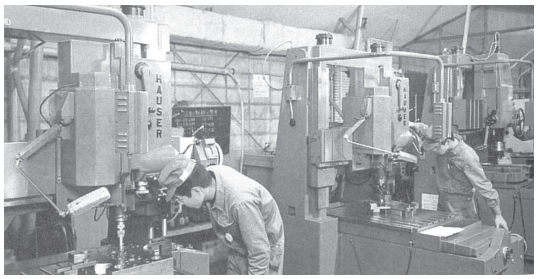


図 4-31　ハウザー社製ジグボーラ―#5 とジググラインダー#5

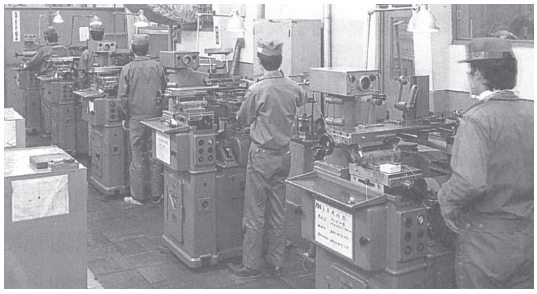


図 4-32　スチューダー社製パンタグラフ式倣い研削盤

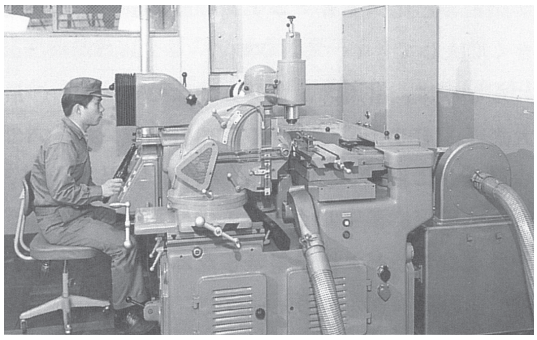


図 4-33　ホンメル社製光学式倣い研削盤
（写真提供：三井ハイテック）

銅板砥石を成形してダイヤモンド砥石を作り超硬合金を成形する方法も次第に機械による加工方法に置き換えられていった。スロットダイについては光学式倣い研削盤、パンタグラフ式倣い研削盤の導入により、砥石の成形をしなくても加工できるようになった。さらにスロットパンチも 1980 年に開発された CNC 平面研削盤で加工できるようになり、この技術も過去のものとなってしまったのである。

4.4　超硬金型のモーター小型化への貢献 [1)]

超硬金型で打抜かれたモーターコアは連続して打抜いても寸法精度もせん断面も良好であり、電磁鋼板の改良による打抜き性の向上も加わって、その打抜きバリがヤスリ仕上げのノッチング金型が 0.2mm、焼き入れ研削仕上げのスチール金型で 0.1mm に対し、0.05mm 以下というコアを安定して打抜くことが可能となり、モーターの性能向上に大きく寄与することができた。

それまでは打抜いた時に発生するバリが巻線を痛めるので、ファイバー（木綿、麻、木繊維などを重ね合わせ、強圧して作られた繊維、主に電気の絶縁材料に用いられる。）、紙あるいは絹布などを巻いて巻線を保護し絶縁を保った。バリが小さくなったことでファイバーなどを巻かなくてもすむことになり、より多くの巻線が巻けるようになったのでステータ巻線の占積

率が向上し、出力が増してモーターの小型化が可能となった。

さらにモーターの小型化に貢献したのがエアーギャップ（空隙）を金型で打抜くことができるようになったことである。それまでは打抜かれたロータコアを必要枚数だけ積層し、ダイキャストをしたのち外径を切削加工してステータコアとのエアギャップを保っていたが、その加工は電磁鋼板の断続切削という悪条件で、超硬合金を使ったバイトで削ってもコアの大きさにもよるが数十台ほどしか削れないという。これを金型で打抜いて外径を削らずにそのまま組み立てることができれば量産品では大きな成果をもたらす。

安川電機では1953〜1954年ごろエアギャップ抜きを単発金型で行い量産型に組み込もうと試みたが、ロータダイキャスト技術が問題になった。ロータの外径がダイキャスト前に仕上がってしまうと、ダイキャストする際にアルミの湯がロータ外周に回ってしまい不良となってしまう。この問題を解決しなければ量産化はできない。反対意見もあったが、ロータスロットの形状をオープンスロットからクローズスロット（脚注3）に変更して量産化を図ったのは1975年のころであった。厚さ0.5mmの電磁鋼板で0.3mm幅のリングがきれいに抜けて金型から出てくるのを見て作業員は驚いた（図4-34）。打抜きとダイキャスト、さらにモーター組み立てを同期させて自動化ラインを構築した。モーター特性も従来と全く変わらず、小倉工場の小型モーターの生産は全てこの方式となった。ロータコアの無切削革命であった。名前はAutomatic die casting machineを略して「Aダイキャスト」と呼んだ。

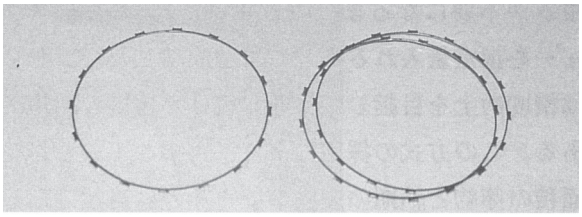


図4-34　エアギャップ抜き例

（写真提供：三井ハイテック）

参考・引用文献

1）モータコア50年史編纂企画委員会：「モータコア50年史　戦後モータ技術50年の歩み」，三井金型振興財団／三井ハイテック，2000年

2）タンガロイ　カタログ　6109（AD）を基に作成

3）共立合金製作所　カタログを基に作成

4）タンガロイ　カタログ　6009（AD）

5）60周年記念事業プロジェクト：「三井ハイテック60年史」，三井ハイテック，2009年

6）厚生労働省：平成23年版労働経済の分析，P91，2011年

5 画期的な生産方式、自動積層金型の開発

超硬金型が開発されたことでモーターコアの打抜き枚数がスチール金型に比べ一気に 20 倍の 100 万枚に達して、モーターコアの大量生産に著しく貢献したことを前章で述べたが、この章ではモーターコアの生産システムまで変えてしまった自動積層金型の開発について述べる。

5.1 自動積層金型の誕生

モーターコア打抜き用の自動積層金型とは金型内でコアを積層し結束した形状で金型の外へコアを出す金型のことで、1974 年初めて開発したのは三井工作所で「MAC システム」（ミツイ・オートマチック・コア・アセンブリ・システム）と呼んだ。

5.1.1 MAC システムとは

MAC システムでは、金型で材料を打抜きながらモーター1 台当たりに必要なコアの枚数を自動的に計量し、1 枚 1 枚を金型内で打抜きと同時にかしめて結束する。ロータ、ステータともに外径を基準に結束されるので、従来に比べてコアの揃い方が格段に向上し、積みずれがないので、ロータ外径は仕上がり寸法に打ち抜くことが可能になり、しかもスキュー（ロータの斜め方向に入った溝）まで付けられるので、ロータ外径を切削しないですむようになる。これまでのモーターコア生産方式に比べて、製造工程や作業者を大きく低減できる、日本で初めて実用化に成功したモーターコア打抜きシステムである。

モーターのロータを作る工程として、従来の生産方法では金型で打抜かれたコアをシュートから作業者が取り出した後、モーター製品 1 台分の必要な枚数に装置を使って計量し、専用機械によってスキューする。さらに 1 枚 1 枚の積みずれを矯正するとともに、スキューが乱れないように内径に仮のシャフトを挿入する。この状態でダイキャスト工程に回してアルミをロータコアのスロット穴の中に充填する。その後仮シャフトを抜いて、外径の荒削り加工を実施した後でシャフト孔のブローチ仕上げ加工を行う。最後に正規のシャフトを圧入し、最終の工程でロータ外径を仕上げ加工してロータが完成する。

この方法ではだいたい 10 工程を経てしまうが、MAC システムでは金型内で打抜かれたコアをモーター1 台分に結束して、さらにスキューされた状態で出されてくる。しかも、積みずれもないので後はダイキャストして正規のシャフトを圧入して完成品となるので従来の 1/5 の 2 工程になり大幅な工程の短縮となる。

ステータコアの場合の従来の方法では、金型で抜かれたコアをシュートで取り出した後、モーター1 台分に計量してコア内径に治具を入れて積みずれを矯正する。そのあとコア外周を溶接やかしめあるいはボルト締めなどによってステータコアを完成させる。

MAC システムではこれら計量から溶接までの工程を全て金型内で完了してしまうため、ロータコアと同様に取り出し、計量、ずれ矯正などが不要となり 5 工程が 1 工程と短縮される。このあとは必要に応じ焼鈍工程を経て、巻線工程に回りステータコアができる。

これまでの生産方法と MAC システムを比較したのが図 5-1 である。工程の削減はその工程で使われる計量装置、溶接機、溶接用ガス、かしめピンや治具類が不要になり、何より工程が少なくなってしまうから作業スペースや作業者が不要となる。このことは最も合理化が遅れていたモーターコア打抜き工程を変えるだけでなく、既に自動機の導入などで合理化を進めていた打抜き後の工程までも変革した画期的な生産方式であった。

5.1.2 MAC システムの初公開

1975 年 11 月 14 日、福岡県北九州市の三井工作所では大手の電機メーカーや家電メーカーおよび大勢の報道陣を隣接する直方市のプレス工場に招いて、新製品「MAC システム」の公開デモンストレーションを行った。招待された人には従来の 1/2 の生産コストでモーターコアを打抜くことができる画期的な金型システムを開発したので公開するという説明しかされていなかった。当時モーターコア打抜き工程は、後工程のロータダイキャスト工程やステータ巻線工程に比べ合理化が難しく、合理化の遅れた工程と言われていた。200 トンプレスに取り付けられた MAC 金型に電磁鋼板が送られ打抜きが始まると招待者の間からどよめきの声が上がった（図 5-2-1、2）（図 5-3）。この公開デモンストレーションは、翌 11 月 15 日日経産業新聞に「モーターコア、大幅に安く」の大見出しで一面を飾り、さらに 11 月 20 日に日刊工業新聞にも「“かしめ”まで自動的に」の大見出しで掲載され、その中で富士電機製造（現富士電機株式会社）の生産技術担当者が MAC システムについて「冷蔵庫、洗濯機、換気扇、プレーヤー用など小型モーターの生産には画期的な技

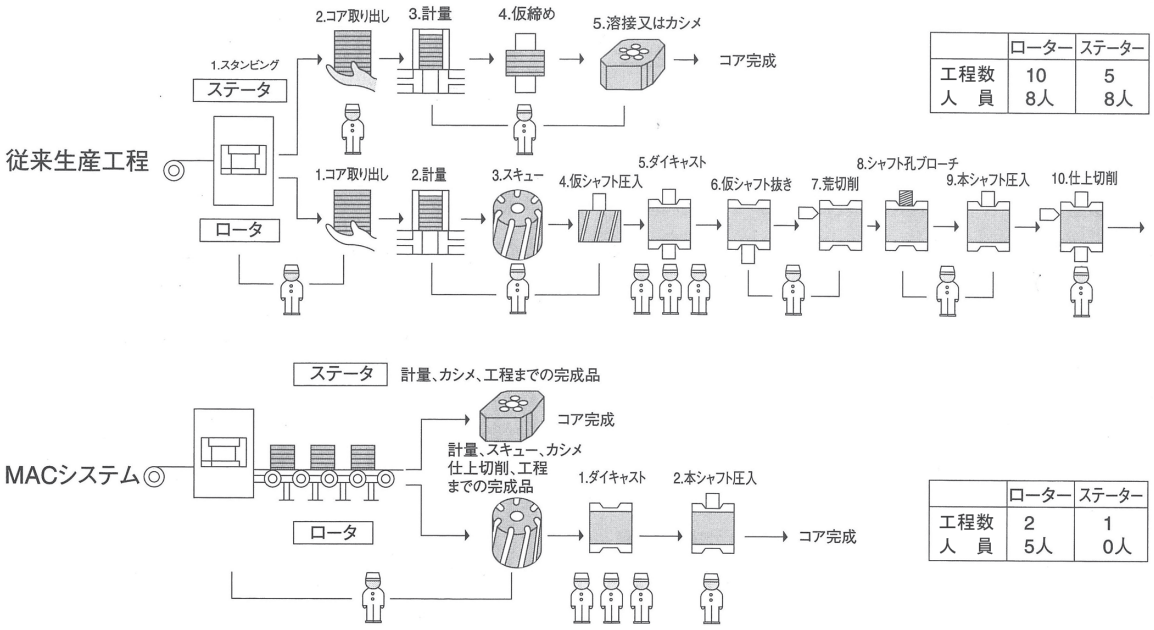


図 5-1　モーターコア生産工程の比較

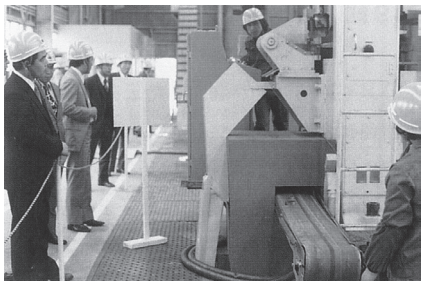


図 5-2-1　MAC システムの公開（三井工作所）

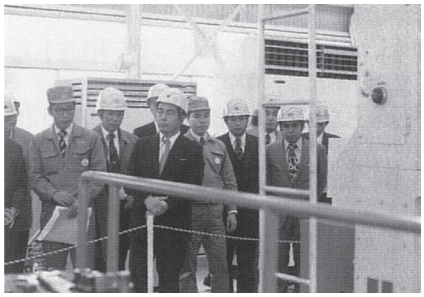


図 5-2-2　MAC システムの公開（三井工作所）

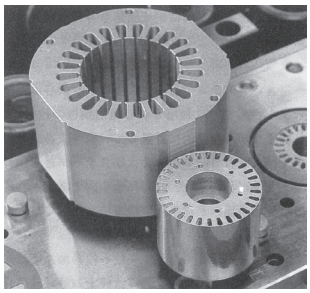


図 5-3　MAC システムで積層されたロータコア、ステータコア

図 5-4-1　MAC システムの新聞記事
（日経産業新聞 1975.11.15）

術で、生産コストが二分の一に低減されるというのは決して過大評価ではない。とくにロータコアに自動的にスキューを与えるのは世界でも初の技術だろう」と紹介している。毎日新聞や朝日新聞などにも取り上げられ、アメリカの GE 社（ゼネラルエレクトリック）などからも引き合いが来て、国内だけでなく海外からも関心を集めた（図 5-4-1、2）（図 5-5）。

昭和50年11月20日　木曜日　(14)

プレス加工

生産コストも半減

三井工作所　一貫システムを開発

〝かしめ〟まで自動的に

MACシステムではステーターコア（上）ローターコア（下）は完成品として出てくる

科学技術

図 5-4-2　MAC システムの新聞記事

（日刊工業新聞 1975.11.20）

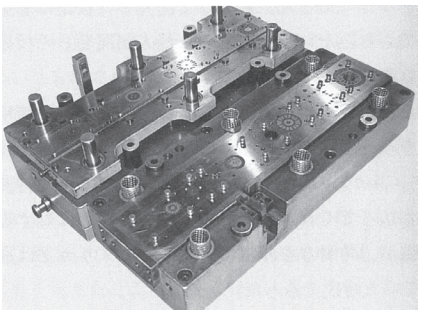


図 5-5　MAC 金型　1 号機（三井工作所）

5.1.3　MAC システムのかしめ

従来のモーターコアの打抜き方法では、打抜かれたコアをシュートで取り出す時にシュートによるすり傷がついたり、必要数に積み上げた際のコアの積みずれによって引き起こされるステータの巻線時の絶縁紙の破れなど中間工程でモーターコアの品質を劣化させることがあった。しかし、MAC システムではモーター 1 台分の厚さに積層された完成品が金型内で製作できるようになり、中間工程でモーターコアの品質を落とすことがなくなった。その技術は材料のコアに半抜きあるいは切り起こしの突起を成形し、外周の打抜き加工と同時に 1 枚ずつ突起の切り口面の摩擦抵抗を利用して積層固着させる方法であり、さらにロータにはスキューまで付けられるようなかしめ形状になっている。しかも 1 枚 1 枚の位置精度、あるいは「はめあい精度」が精度よく出ているので、しっかりと固着強度が出ている。金型にはこれまでと違って打抜きプラス組立機能が加わったことになり、三次元の精度管理が必要になり、さらに金型が大型化したにもかかわらず、刃物精度や位置精度が一層厳しく求められるようになるので、この困難な精度の壁を破って初めて顧客が満足する金型ができるのである（図 5-6）。

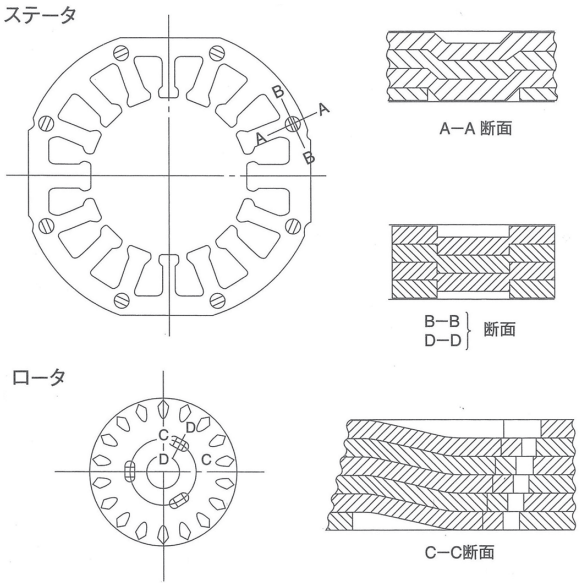


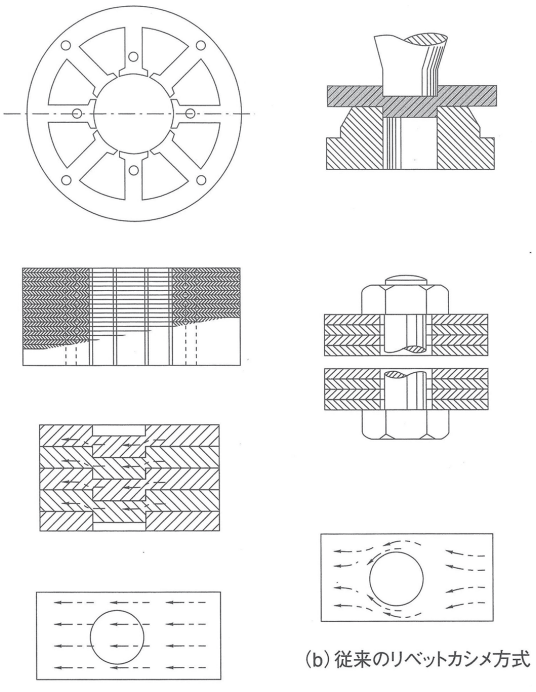
図 5-6　モーターコアの代表的な切り起こし [1)]

5.1.4　MAC システム開発のいきさつ [1)]

MAC システムがなぜモーターを生産するメーカーからではなく、金型専業メーカーから誕生したのであろうか。そのいきさつを述べると三井工作所はこのシステムを開発する前に、モーターコアの増え続ける需要に応えるために高速化あるいは多列化金型の開発に取り組んだ。その超高速化金型の開発のなかで、自社製の 1,000spm のプレスを作ったが品質的に満足できず断念した。その後国内、海外のプレスメーカーに打診したが、結局海外プレスメーカーに決定した。1974 年末にミンスター社（アメリカ）から 1,600spm のプレスを導入し、モーターコアの超高速打抜きテストを始めた。その超高速打抜きの中で思わぬ問題が起こった。打抜きスピードが速すぎて製品取りが間に合わないのである。これまでの毎分 200 回の打抜きスピードであれば、作業者も枚数を数えながら梱包することができたが、5 倍の毎分 1000 回の打抜きスピードでは間に合わないのである。休む間もなく作業を続けなけ

ればいけないので、作業者は嫌がってすぐに辞めてしまう。作業環境を改善する必要があり、そこで自動結束装置を作った。コア 100 枚でモーター1 台分なら 1 台分 100 枚ずつ結束したらどうかと考えたが、それならむしろ打抜いたコアを瞬間的に接着する方法はないかと接着剤を探したが適当な接着剤が見つからなかった。圧着でも試したがうまくいかなかった。

そこで特許を調べていると、大阪の藤井電機の「鉄心の一部を半抜きにして、かしめる」という特許が見つかったのである（図 5-7）。この特許は 1974 年 4 月に失効したが、ステータの組み立て方法には適用できる技術であっても、スキューを付けるロータの組み立て技術は入っていない。アメリカにも金型を輸出していたのでシカゴ駐在員が調査すると、GM 社（ゼネラルモーター社）が持っていて、世界各国でこの特許を取得していたが日本だけは藤井電機の特許に阻まれていたようだった。シカゴ駐在員は GM 系列会社からサンプルを入手し、1973 年 7 月の帰国時にサンプルを持ち帰った。初めは二人の技術員で分析、試作し、その後 1974 年 8 月に開発プロジェクトチームを編成した。藤井電機、GM 社の 2 社とも特許は取得していたが実用化していなかったので、これらの特許に手を加えれば実用化できると判断し、GM 社の特許を購入することにしてモーターコアの自動かしめ技術の開発に取組み、完成したのが MAC システムである。



(a) ダボカシメ方式　　(b) 従来のリベットカシメ方式

図 5-7　モーターコアのかしめ特許（藤井電機）[1)]

5.1.5　GM 社との特許交渉

アメリカの GM 社との特許交渉では、初めは「何を買いに来たのか？」と三井工作所の担当者に疑わしい態度で応対した。この特許は GM 社の子会社であるデルコ社（アメリカ）が試作程度のサンプルを作って特許を取得したのを GM 社が買い取っていたものであった。GM 社ではこの特許の存在すら社内では知られていなかったのである。そのような特許をなぜ日本の金型メーカーが必要とするのか理解できなかったようであった。GM 社の意見は「三井工作所が日本で GM 特許を使った金型でモーターコアを打抜いても、GM 特許権が日本にはないので GM 特許との抵触関係は起こりえない。また、日本の電機メーカーに金型を売っても、その金型で打抜かれた製品をアメリカに輸出する電機メーカーが GM 特許に気を付けなければならないが、三井工作所としては GM 特許を心配する必要はないのではないか。GM も未だかつてこの特許を金型メーカーに使わせたことがない」というものであった。

これに対して三井工作所の担当者は「技術志向の会社として創業以来、技術を尊重することを学んできたので、他人の技術も尊重しなければならないことは十分に心得ているつもりだから、御社技術を使うにあたり了解をいただきにきたのもそのためである。」と伝えたところ、GM 社は快く受け入れてくれた。

MAC システムの開発は 1973 年から本格的に着手された。GM 社の特許を基本技術にしたものだったが、GM 社との特許実施許諾契約が締結されたのは 1976 年であった。GM 社にとってこの特許は休眠特許であったが、契約の場で初めて MAC 開発の進捗状況とともにその実用化の状況、コアかしめ技術の完成状態を知らされて驚いていた。

モーターコアを金型で結束する考えは 1956 年に出願された藤井電機の特許や 1961 年の GM 特許に見られるように古くからあったが、商品化して採算ベースに乗る実用化技術としたのは、三井工作所の MAC システムが最初である。

5.1.6　自動積層特許

GM 社のモーターコア自動積層の特許は、ロータコアのスキューも同時に行なうもので、日本には出願されていなかったが、アメリカ、カナダ、フランスなど世界各国に出願されていた。三井工作所が基本特許を導入した後、日本国内の金型専業メーカーも競って導入を図った特許である。

安川電機は 1971 年、GM 社とは異なったかしめ形態の「電気機器鉄心の積層固着方法」および「電気機

器鉄心の製作法」で特許出願を行っている。かしめの突起形状はモーターコアに流れる磁束の流路を遮断しないように‘V’字形状をしていて、コア1枚1枚を結束する方法である。

そのあと1972年に日本電装、1974年には三井工作所、松下電器から特許出願がされていたことから自動積層技術への関心がすでに始まっていたことがわかる。そのような中、1975年11月に三井工作所が行ったMACシステムの公開は大きな関心を集め、モーターコア自動積層化時代の幕開けとなった。

MACシステムの導入にあたって、当時の家電メーカーは導入前に必ずかしめサンプルの提出を求めたので、簡易テスト用金型を製作し、コアの1枚1枚にかしめ突起を作り、積層加圧して試作品を提出した。家電メーカーでは特性テストを実施し、特性が従来品と違う結果が出れば、かしめ突起の位置を変えたりかしめ形状を変更したりして、特性の維持に対応していたが、1〜2年も経つと家電メーカーからの要求もほとんど出ないようになった。また、ステータコアの焼鈍テストを行っていた時に、電磁鋼板メーカーの技術者から「珪素鋼板はデリケートな材料で、表面にひっかき傷をつけただけでも1ランク特性が下がるのに、特性を落とすようなかしめ形状を付けて、特性を落とさずに製品化しようとするなんて、焼鈍なんかしても無意味ですよ」と言われたこともあった。開発当時は、今のように磁場解析技術も進んでいなかったのでこのような意見もあったが、自動積層システムが普及するに伴って、現在ではあらゆるかしめ形状が問題なく採用されている。当時と比べ、モーターの周辺技術が大きく進歩し、さまざまな技術開発がなされた結果である。

5.2 代表的な自動積層金型

自動積層システムの商品化に向けて各社が競って参入したが、その代表的なものを紹介する。

5.2.1 VICSシステム（安川電機）[1)]

VICS（V-integrate core system）システムは、安川電機が1971年に開発したモーターコア積層システムである。モーターコア1枚1枚を結束するかしめ形状が‘V’字形状だったのでこの名称がつけられたが、1978年社内の金型部門を分離独立し安川精機として、それまで社内だけで使われていた同システムを1979年から外販を始めた。

VICSシステムの特徴としては次のような点があげられる。

①かしめ形状が‘V’字形状になっていること。

‘V’字形状の突起で結束されたモータコアのかしめ強度が高い。かしめの突起がコアを2〜3枚串刺しするくらい高く突き出せるので、プレス下死点精度も厳しく要求されずにすみ、今まで使用していたプレスで十分積層が行える設計である。

②再かしめ方式であること

a）プレスに取り付けられた順送り金型内で、打抜きと同時にロータおよびステータのそれぞれ1台分の計量分離を自動的に行う。

b）ロータコアはスキュー量に相当する角度を1枚ずつ、コアの中心と同心状にずらした‘V’字形状の突起を成形して積層する。

c）ステータコアは‘V’字形状の突起を成形して積層する。

d）積層されたコアを1台ずつベルトコンベアで金型から取り出す。

e）金型から出たコアを油圧プレスで再加圧し、かしめ力を強化してそのまま次工程のロータダイキャストやステータ巻線へ送る（図5-8）。

③ロータのスキュー機構が独特であること

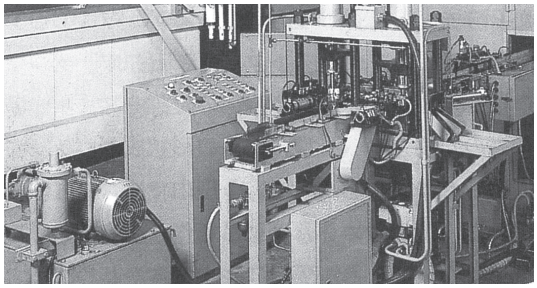


図5-8　型外再加圧装置

（写真提供：安川電機）

かしめが‘V’字形状のため、ロータコアにスキューをつけることが難しい。そのため工夫を凝らした設計になっている。一般的には、下型のブランクダイを回転させて、ロータコアを1枚ずつ打抜きながらスキューを付ける方式になっている。VICSシステムでは、プレスの1ストロークごとに上型に取り付けられたかしめ形状成形パンチをロータコアの中心と同心状にスキュー量に相当する角度ずつ回転させて、‘V’字形状のかしめ突起をコアに成形し、金型内ではスキューの付かない仮かしめ状態の積層製品を作り、金型から取り出した後で再加圧機により加圧することによって本かしめすると同時に‘V’字形状の突起の求心性を利用してスキューを付ける方法になっている（図5-9）。

1980年には液体シリンダーをつかった背圧方式に

よる金型内での本かしめ技術も採用し、1981年から実用化されて仮かしめおよび本かしめの両方ができるように改良されたシステムになった。またその後にはロータコアの‘V’字形状のかしめ方式から他社と同じようにGM社方式のかしめ形状に変わってきて、ブランクダイを回転する方式に変わった。

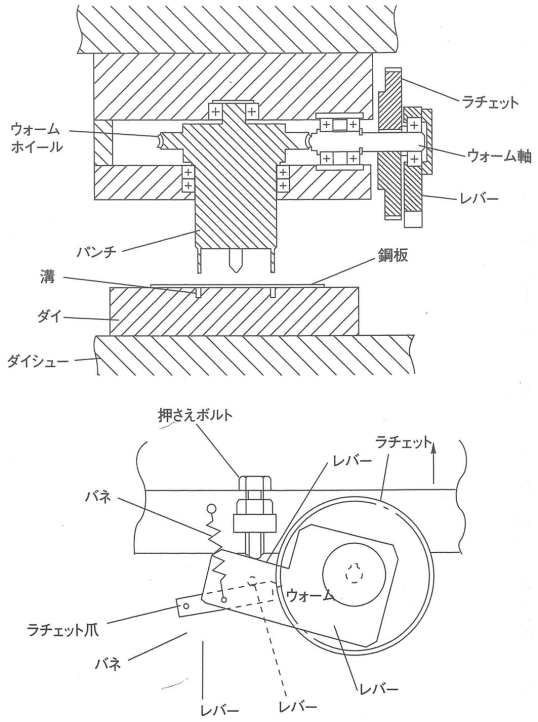


図5-9　パンチ回転機構[2)]

5.2.2　MACシステム（三井工作所）

MAC（Mitsui automatic core assembly system）システムは三井工作所がゼネラルモーター社の基本特許を購入して、油圧を利用した背圧によって打抜かれたモーターコアを金型内で完成品とする技術を付加し、1974年に開発したモーターコア自動積層システムである（図5-10）。

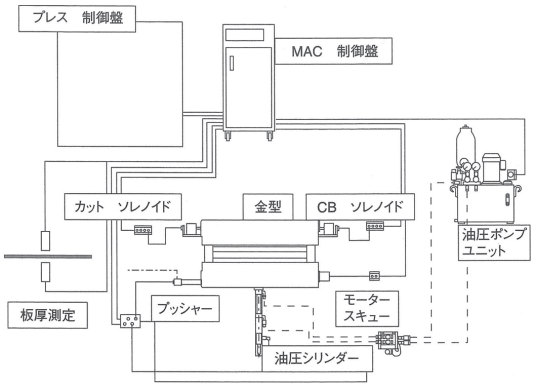


図5-10　MACシステムの構成

開発経緯はすでに述べたが、その特徴は次のようなものである。

①金型内でかしめて完成品を取り出す。

型外での再加圧は全く不要である。金型の中で積層し完成した製品は金型の側面から1個ずつエアシリンダーによって排出されて出てくる（図5-11）。

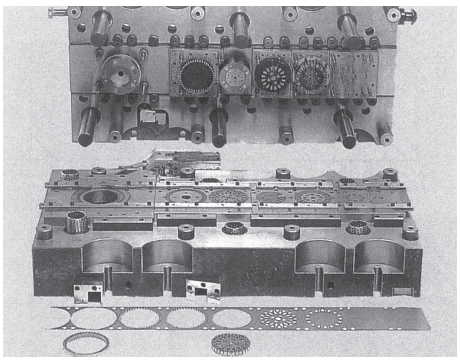


図5-11　ロータ、ステータコア超硬順送り金型（三井工作所）

②油圧による背面加圧方式である。

金型内でかしめて完成品とするために、プレスによる加圧と油圧による背面加圧する方式を採用したのが大きな特徴である。

開発当初はGM特許と同じ側圧だけでかしめる方法で試作を始めたが、製品がうまくできなかった。側圧というのは側面加圧の略語で、打抜かれたコアの側面とそのコアが通過していくブランクダイの側面との摩擦抵抗をさして言う。この側圧を利用してモーターコアの1枚1枚を打ち抜くと同時にかしめる方法を側圧かしめという。製品の取り出しは、自動車のジャッキと同じ要領でヘッドに製品を載せて下降させ、下死点付近でストッパーに当ててヘッドを傾かせ、製品を転がり落とす方式となっている。問題はこのGM特許で使われた側圧かしめでは試作した製品がうまくかしまらなかったことである（図5-12）。試作を重ねるうちに、モータコアの形状によってコア側面の摩擦抵抗に大きな差が出ることが分かった。うまく条件がそろってもコア外径寸法が約80mm程度までが側圧かしめの限界であることも分かった。さまざまな経験値が必要となり側圧かしめだけで全ての製品に対応できないと側圧方式を断念し、次に取り組んだのがエアーシリンダーで下からコアを受けることで試作を行った。しかし、エアーではコアをかしめるのに必要な力を出せなかった。そこで今度は油圧で試作することにして、さらに背圧を受けるヘッドの部分に突き上げ防止センサーを埋め込んで、製品の突き上げ防止を図った。さらに製品を転がして取り出す方法も安定した製品取り出し方法でなかったので、エアーシリンダーで金型の側面から突き出す方法に改良した。GM特許に油圧による背圧方式を加えた改良を付加したことによって、GM特許には無かった金型内で完全にかしめ

ることのできる新しいシステムが誕生し、日本、アメリカ、カナダ、ドイツ、フランスで特許を取得した。

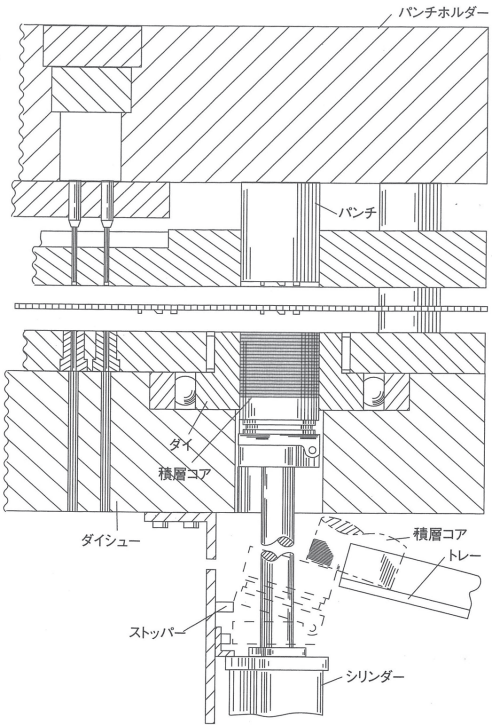


図 5-12　積層コア製品取り出し機構 [3)]

③ロータスキュー機構

a）メカニカル方式

1974 年の開発時点では、ブランクダイを回転可能にして逆転防止を付けて、かしめ形状の角度だけでスキューができるだろうと試作したが失敗した。次にカムを使って回転させ、スキューを付けようと試みたが、少し大きな製品になると安定したスキューが得られない問題が生じた。これはモーターコアを一枚一枚打ち抜いて積層し、かしめると同時にスキューも付けるブランクダイに製品が詰まってくると回転負荷が増えて、しかも背圧に使っている油圧が作動している時と作動していない時のクラッチの滑り、またプレスの打抜きスピードが変わると慣性によってスキュー量も変わるなどしたことである。そこで、プレスのクランクシャフトから同期タイミングを取って、インデックスユニットに独自のギヤーボックスを組み合わせたスキューユニットを製作した（図 5-13）。しかし、さらにコンパクトなスキュー装置が要求されたことで、プレスの上下動を利用したギヤ―交換式を開発した（図 5-14）。

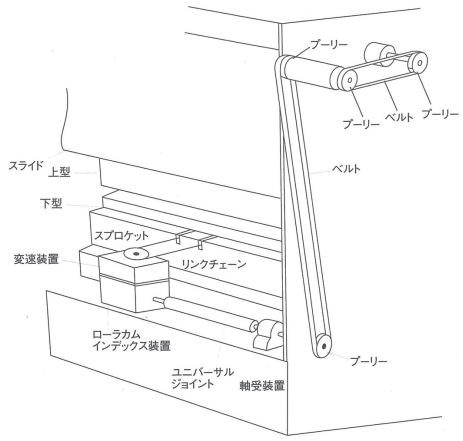


図 5-13　ロータスキューユニット [4)]

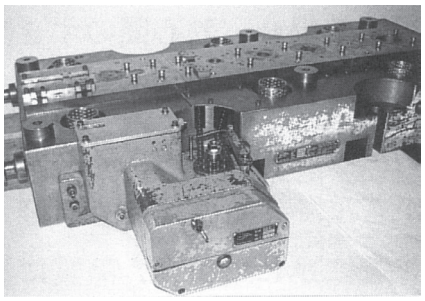


図 5-14　ロータスキューユニット

b）電動式（ステッピングモーター駆動）。

しかし、ギヤ―交換式のスキューユニットでもコンプレッサーなどのモーターコアを 200 枚も積層する積み厚の高い製品では、要求される微小なスキュー量の調整には不向きであったため、ステッピングモーターによるスキュー装置を採用した（図 5-15）。

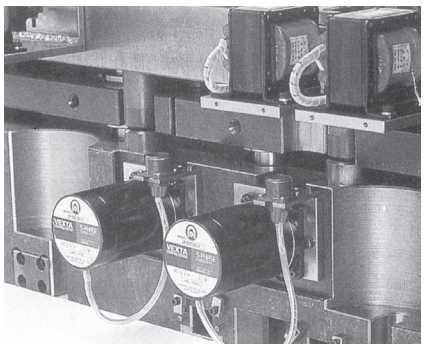


図 5-15　ステッピングモーター式スキューユニット

このステッピングモーター駆動によるスキュー装置は、自動積層システムの開発当初から導入を検討していたが、メーカーの専門家から「ステッピングモーターは振動、衝撃に弱いのでプレス加工には耐えられない」とのアドバイスをそのまま受け入れて採用しなかった。ダメと思ってもやってみて、その結果ダメであればそれでいい。出されたアイデアは何でもやってみるべきだと開発にあたった技術者が述べている。

④かしめ形状

当初はGM方式のかしめ形状であったが、図5-16のように使い分けている（図5-16）。

カシメ形状	カシメ力	密着度	備考
角平カシメ、丸平カシメ	弱い	良好 すき間 0.003～0.005	製品の倒れが出やすい 最小φ0.5
丸台形カシメ	やや強い	良い すき間 0.005～0.008	成形が難しい
Vカシメ	強い	やや悪い すき間 0.005～0.010	倒れにくい
	普通	良い すき間 0.005～0.008	

図5-16　かしめ形状と特徴

5.2.3　FASTECシステム（黒田精工）

FASTEC（Fastening and skewing technology）システムは黒田精工がアメリカのゼネラルモーター社から1978年に基本特許を導入して開発したコア積層方式で1984年には商標登録されている。FASTECのモータコア自動積層システムには次のような特徴がある（図5-17）。

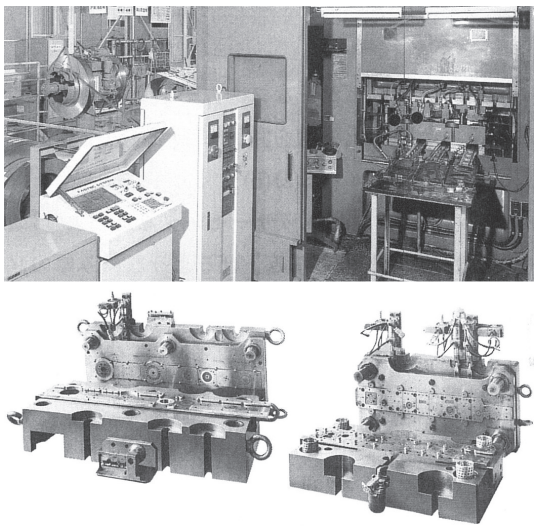


図5-17　FASTECシステムとFASTEC超硬順送り金型[5]

（写真提供：黒田精工）

①側圧かしめである。

前述の側圧を利用してモーターコアの1枚1枚を打ち抜くと同時にかしめる方法である。

②かしめ形状

GM社の基本特許を導入し開発しているので、前記かしめ形状とほぼ同じである。

③ロータのスキュー機構

a）メカニカル方式

金型の上型に取り付けられた引っ掛け棒（1）は、ギヤ（3）と連結されたアーム（2）をプレスのストロークが上がる時に持ち上げる。この動きでギヤ（3）を回転させると同時にウォーム（5）とウォームホイール（6）とで連結されたブランクダイ付きのスクイズリング（7）を1ストロークごとにロータコアに必要なスキュー角度分だけ回転させる方式である（図5-18）。

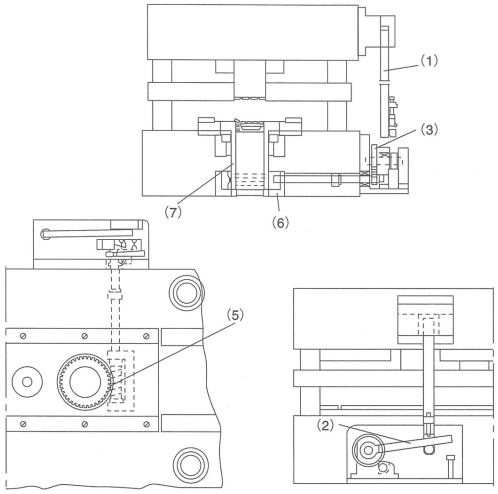


図5-18　メカニカルスキュー装置の略構造図[6]

b）電動式（ステッピングモーター駆動）。

メカニカル方式の代わりにステッピングモーターを駆動源に使った。構造が簡単で取り扱いも楽になり、最近の制御技術の進歩でほぼ無段階に回転角度を選定できる。

5.2.4　PACシステム（松下電器産業）

PAC（Pana auto clamp）システムは松下電器産業がゼネラルモーター社から1977年に基本特許を導入して開発したモータコア自動積層システムで次のような特徴があるが、このシステムは外販されず、グループ各社で専ら使われている。

①側圧かしめである。

②かしめ形状

GM社の基本特許を導入し開発しているのでMACシステムとほぼ同じである。

③ロータのスキュー機構

電動式でステッピングモーター駆動である。

5.3　自動積層金型の周辺技術への影響

5.3.1　プレス機械に与えた影響[1]

自動積層金型の大型化に対応して、金型を載せるプレスのベッドがひとまわり大きくなったが、特に下死点精度が要求されるようになった。図5-6に示したステータ、

ロータの代表的な切り起こし形状で分かるように、かしめ突起の切り起こし深さは電磁鋼板の厚み以下に設定されている。おおよそ電磁鋼板厚さの70～80％であるが、深すぎると電磁鋼板を突き破ってしまうことになりコアとコアを結束することはできないし、浅いとコアのかしめ強度が低下する。そのため許容範囲は厚さ0.5mmの電磁鋼板の場合で70～80％として、厚さの10％しか許容されない。つまり、0.05mmの下死点精度が要求される。今でこそ自動積層システムに使われるプレス機械は特に剛性が重要であることが知られているが、特別仕様として「積層金型に対応したプレス」が開発された。

5.3.2　電磁鋼板に与えた影響

モーターコアの主な材料である電磁鋼板の圧延技術もモーターコア自動積層システムの開発と実用化によって格段の進歩を遂げた。自動積層システムの開発当初は、材料の板厚偏差に泣かされた。自動積層システムを導入した電機メーカーも同様に板厚偏差とバラツキに悩まされた。たとえば板厚偏差が20 μmあったとすれば、厚さ120mmのモーターコアには0.5mmの電磁鋼板で240枚積層しなければならないが、4.8mmも段差ができる。かしめもできないし、エアギャップの確保もできないことになる。それで、最初の頃は、1,200mm幅の電磁鋼板の材料で、板厚偏差の小さい真ん中3列くらいを自動積層システムのモーターコア用に、両端の材料はそれ以外のモーターコア用として使い分けていた。その後、材料メーカーは技術力の高さを発揮して要求する精度の材料を開発した。このように自動積層金型の開発から、プレス精度も改良され、さらに金型精度も向上し、電磁鋼板の精度も上がり相乗効果をもたらした。

5.4　回転積層金型の開発

5.4.1　電磁鋼板の板厚偏差

モーターコアの材料には主に無方向性電磁鋼帯が使用されており、この鋼帯は圧延加工によって作られているが、圧延ロールが弾性変形することによって鋼帯の幅方向の厚さの変化が中央部では微小なのに対し、両端部では大きくなる。この幅方向の板厚偏差をクラウンと呼び、圧延機械の構造上の問題である（図5-19）。

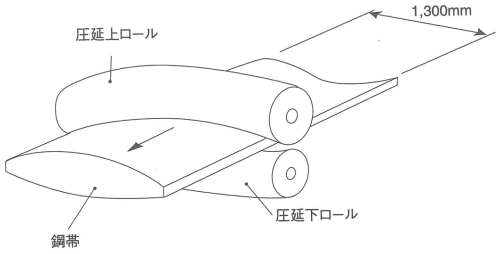


図5-19　鋼帯の圧延状態図[1)]

JIS規格では無方向性電磁鋼帯の幅方向の厚さの偏差について、幅150mmを超える鋼帯にだけ許容差を定めている。幅150mmを超え1000mm以下の鋼帯の場合、呼称厚さ0.5mmについては0.020mm以下である。幅150mm未満は受渡当事者間の協定によるとされていて、電磁鋼板メーカーの規格例を表5-1に示す。

モーターコアを生産するために電磁鋼帯を必要な寸法幅にスリットするラインを図5-20に示す。スリットされた電磁鋼帯の中で板厚の偏差が大きい両端の部分を使って打抜かれたモーターコアには図5-21に示されるような板厚偏差が残ることになる。ステータコアでは一般的に数十枚から数百枚を積層しているから、1枚当たりの板厚偏差が数ミクロンでもコア全体での積厚の偏差は大き

表5-1　寸法および横曲りの許容差[7)]

幅 mm	呼称厚さ mm	厚さの許容差 %	幅方向の厚さ偏差 mm	幅の許容差 mm	横曲り（長さ2mにつき） mm
30を超え150以下	0.50	± 8	≦ 0.02	+0.2 0	≦ 1.0

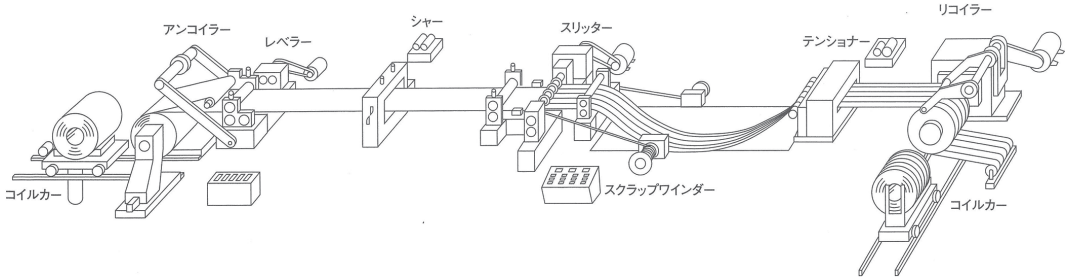


図5-20　スリッターライン図[1)]

なものになる。例えば、幅方向の厚さ偏差が0.01mmある0.5mmの電磁鋼板を使用し、厚さが100mmのモーターを生産すれば、コア200枚を積層するので積層されたコアの板厚は0.01mm × 200 = 2mmすなわちコア4枚分の偏差が出てしまう。そうなると両端面を基準にロータ軸受フランジを取り付け固定するモーターでは図5-22のように傾き、両端の軸受中心線が一致せず軸受（ベアリング）に無理な負荷がかかり、モーターの騒音が異常に大きくなったり、ベアリングの寿命低下、あるいは最悪の場合はロータがステータコアに接触し回転不良になるなど多くの品質異常を引き起こす。

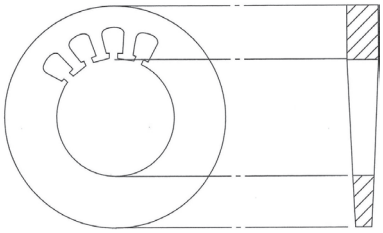


図5-21　板厚偏差があるモーターコア

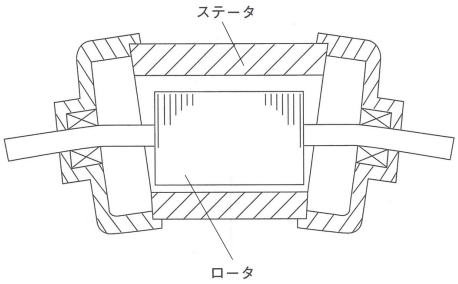


図5-22　板厚偏差の大きいコアを使ったモーターの例[8)]

この板厚偏差を解消する従来の方法として、ステータコアを同じ方向で積層せずに、積層する約1/2の厚さで、180度方向を変えて積層する方法が取られていたが、コアの形状が180度回しても形状が揃う対象形のものに限られていた（図5-23）。また、ピンでかしめたり、溶接するコアの場合、組立治具で板厚偏差をある程度補正することができるため、大きな問題とならなかったので、1975年に公開された自動積層システム（MACシステム）では板厚偏差対策まで考えられていなかった。しかし、自動積層システムでは金型でモーターコアを連続して打抜きながら、金型内でかしめて積層されてしまうため、板厚偏差は補正されることなく偏差が累積してしまう。特にコアの積厚の厚い冷蔵庫用のコンプレッサーモーターなどで大きな問題となり、電機メーカーが電磁鋼板メーカーに改善を申し入れしたが、JIS規格を盾に断られた。当時でもJIS規格の1/2程度で電磁鋼板を製作していたので、要求された数ミクロンの許容差は受け入れられるものではなかった。

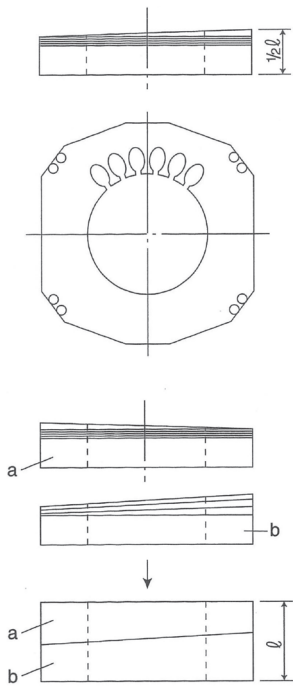


図5-23　板厚偏差を相殺した例（180° 反転）[9)]

5.4.2　回転積層金型

そこで、金型で板厚偏差を吸収することができないかを考えた。毎回のプレスストロークごとにブランクダイを回転させるという案が出され開発されたのが回転積層金型であり、略して転積金型ともいい、イメージ図を図5-24に示す。

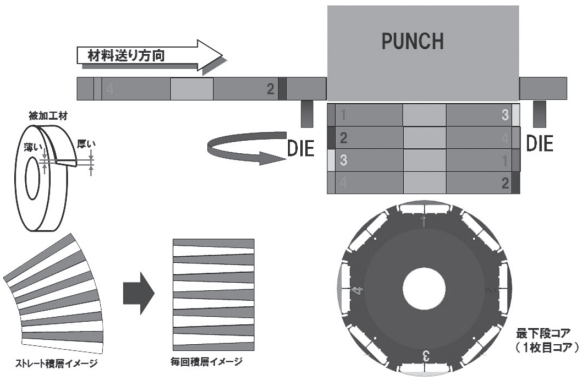


図5-24　回転積層金型

その構成は、プレスのクランクシャフトを駆動源にして、ベルト等で連結し、ローラカムインデックスにて所要の角度割り出しを行い、プレスのストローク毎にブランクダイを回転させてモータコアの板厚偏差を相殺しながら打抜いて積層するシステムである（図5-25）。金型は超硬順送り金型であり、かしめ突起の成形は通常の自動積層金型（MAC金型）と同じであるが、回転積層なので凸と凹のはめあいがどの位置でもできるように金型精度を一段厳しく求められる（図5-26）。

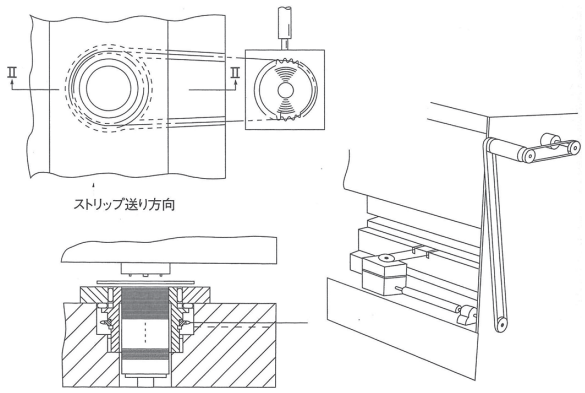


図 5-25　ブランクダイの回転機構 [10)]

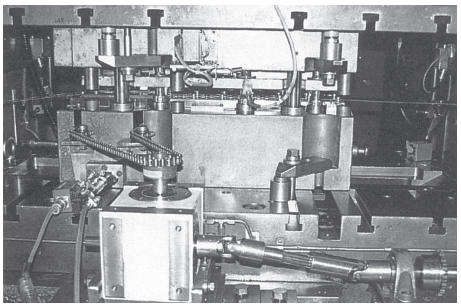


図 5-26　プレスと金型の回転機構

(1) ステッピングモーターコア 90 度回転積層金型

三井工作所が開発した回転積層金型（以下転積金型）の量産化第 1 号はステッピングモーターで、プレスストローク 1 回ごとにコアを 90 度回転させる金型であった。ロータとステータのエアーギャップが汎用モーターの 0.3mm に対し 0.05mm と一段と精度が必要になる。さらにステータのコア端面基準で組み立てられているので、ステータコアの端面と内径の真直度（端面振れ）が重要である（図 5-27）。

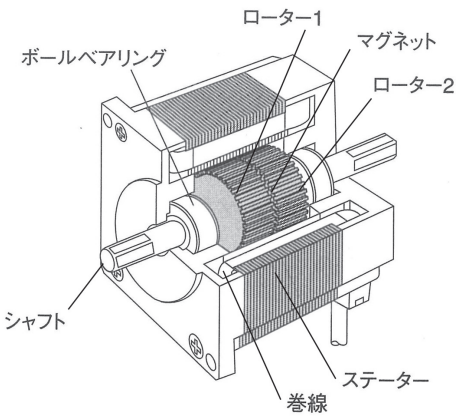


図 5-27　ステッピングモーターの構造図 [11)]

ステッピングモーターも当初は回転させない自動積層金型を導入したが、自動積層しても板厚偏差のために端面振れが大きくて製品として使えなかった。それで積層したコアの内径を加工し、内径基準に円筒研削盤で端面を研削加工して端面振れを規格内に入れたが、コストがかかり過ぎる。そこで最初に回転積層に取り組んだのは、42mm 角、4 極、ステップ角 3.6 度のステッピングモーターのステータ―用転積金型であった。モーターメーカーはこれまで溶接や接着で 1 個 1 個手作りで製作していたが、会社の中でステッピングモーターを主力製品として毎月 10,000 ずつ増産していく急激な増産計画となり、至急転積金型の導入が必要となった。メーカーの解決したい問題点としては次の 3 つがあった。

①ステップ角度が厳しく、TIG 溶接するとコア内径の真円度が悪くなり、角度精度も安定しない。
②コストのかかるコア内径の加工を止める。そのためにはコア内径の打抜き精度を安定させる。
③磁歪現象で電磁鋼板の送り方向に対して 30 度のところが非真円であるので、90 度回転させることによって磁歪現象を打ち消すことができる。

(2) 回転ミス対策レイアウト

万一、打抜き中で回転に不具合があっても、モーターコアの外周が丸い形状であれば、パンチとダイはそのままかみ合って事故も起こらないが、製作の依頼を受けたステッピングモーターは外周に少し丸い部分がある以外は 42mm 角の異形状である。異形状のダイが万一決められた位置に来ない場合、プレスの非常停止が働いても高速打抜き中では直ちに停止できないため、パンチがダイに当たって金型の破損事故を引き起こしてしまう。対策として回転ミス検出装置を付けてパンチを強制的に引き下げる方式を取ったが、金型メーカーはそれでも不安である。万一、そのような事故になれば、高価な金型を作り替えなくてならないほどの大きな事故になることは目に見えている。そこで、コアの外周形状が直線と丸い形状で構成されていることに着目して、直線部分を前工程で打抜き、丸い形状部分を後工程で打抜く方法に改良したのである。その結果、ブランクダイは丸い形状で打抜くことができるので回転ミス検出装置も付ける必要がなくなったのである。モーターメーカーは材料歩留まりが悪くなると最初は難色を示したが、金型の破損防止のために承認した（図 5-28）（図 5-29）。

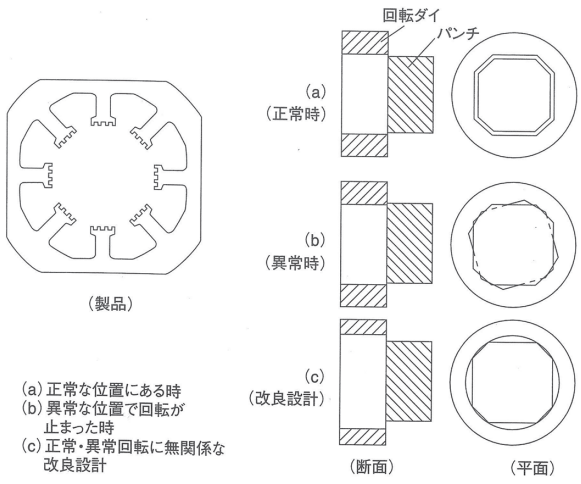


図 5-28　回転ミス防止対策構造図 [12)]

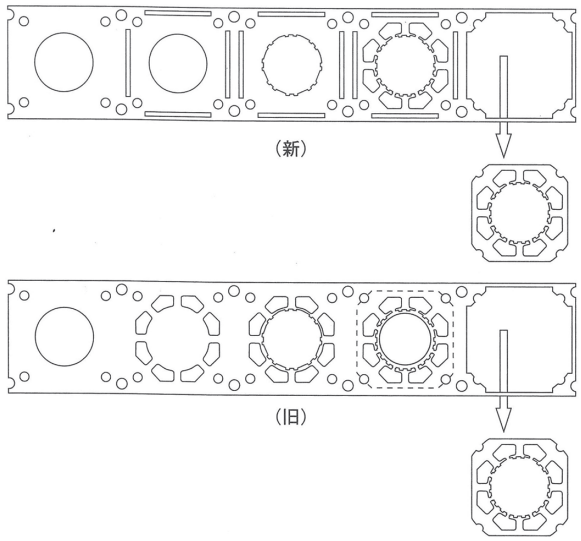


図 5-29　回転ミス防止対策レイアウト図 [13)]

このレイアウト変更は大きな相乗効果をもたらした。回転積層されたモーターコアの内径真円度に大きな影響を与えていることが分かったのである。前工程で直線部を打抜き、後工程で丸い部分を打抜くことで、打抜きによって生じる内部応力や加工歪みを効果的に吸収し寸法精度の高いモーターコアを打抜くことができたのであった。

回転積層されたモーターコアの品質は予想以上のものであった。無方向性電磁鋼板であっても圧延加工されるから、圧延方向とそれに直角方向では約 10％以下の方向性があった。これを 90 度の回転積層することによって方向性が相殺されモーター特性が良くなったのである。さらに問題であった板厚偏差も完全に相殺されて、それまでの約 0.3mm あった端面振れは約 1/10 になってしまった。内径の真円度まで良くなって、内径のホーニング加工も不要となって、プレスで打抜かれたモーターコアのまま巻線工程に送ることができるようになり大きな効果を出すことができた。モーターメーカーではそれまでの製造方法で、月に 20～30 台だったので、50 台の注文が来たら大変な状況になる生産能力であったのが、月 10,000 台の生産能力になり、毎月 10,000 台ずつ増産していった。

5.4.3　非対称製品の回転積層

回転積層金型はステッピングモーターの機能とその構造において、その生産に欠くことのできない技術である。前述したがロータとステータのエアギャップが汎用モーターの 0.3mm に比べて 0.05mm と格段に小さく、ステータ端面を基準にロータが組みつけられるので、ステータコアの端面振れが大きければエアギャップの確保ができなくなる。そのため、モーター設計上でも回転積層が前提であったという。従って、ステータコアの形状は、ほとんどがコアの中心に対して点対称になっている。しかし、なかにはどうしても点対称にならない製品もあった（図 5-30）。そうすると回転積層金型で生産できないので、また元の 1 枚 1 枚積み上げて、内径をホーニング加工し端面振れを修正しなければロータとステータのエアギャップが確保できない。生産コストと製品品質が回転積層金型で生産したものと全く違うので、製品形状は変更できないが回転積層を工夫してできないか検討した。ステータコアの形状を見ると、大きい 8ヶ所のスロットはコアの中心に対して点対称の位置にあるから回転積層できるが、先端の小歯の配列が点対称ではなく問題である。設計の皆で検討して前工程で分けて打抜けば可能という妙案が出た。つまり外周打抜きの前工程で非対称の小歯部分だけ 2 工程に分けて交互に抜いておけば、ブランクダイは常に 180 度回転するだけで 1 枚ごとに 180 度ずつ回転したステータコアが打抜き積層される。小歯抜きをプレス 1 ストロークごとに打抜いたり打抜かなったりすれば、すなわち小歯打抜きパンチを出し入れする機能を付ければできるという結論が出た（図 5-31）。

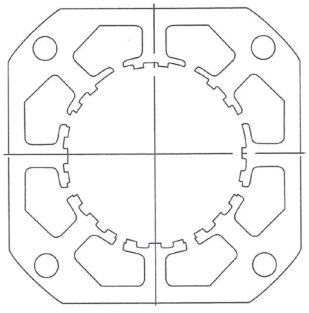


図 5-30　非対称に設計されたステッピングモーターコア

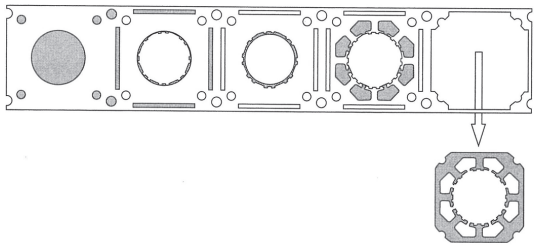


図 5-31　非対称なコアの打抜きレイアウト

小歯打抜きパンチの出し入れする機能はすでに開発した自動積層金型（MAC システム）で使っている機能の応用でできる。心配したことは小歯を 2 工程に分けて打抜くので、180 度回転したときにきっちりと合うだろうかということであった。パンチの出し入れ機能をつければパンチが上下に可動することになり、可動させるためにはギャップを付けなくてはならない。ギャップがあるということはそれだけ打抜かれた製品寸法にバラツキが出ることが想定される。種々検討して金型を製作してコアを生産したところいい結果が出て、特許として登録した（図 5-32）。

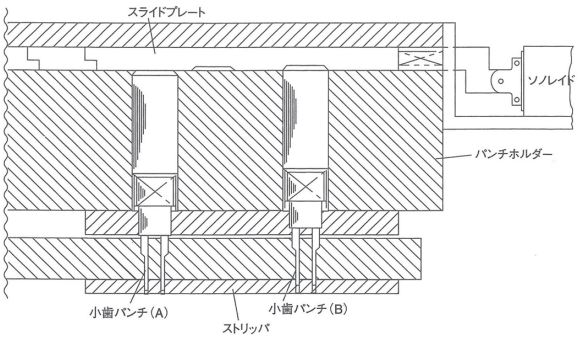


図 5-32　非対称なコアの小歯抜きパンチ駆動図 [14)]

この発明によって、非対称品でも工夫をすれば回転積層が可能となり、回転積層システムの応用範囲が広がった（図 5-33）。

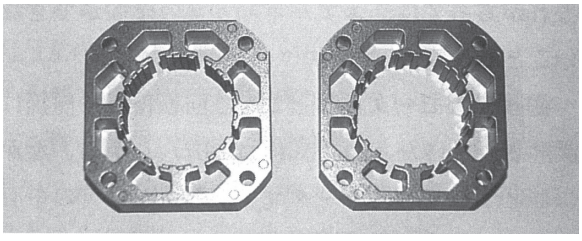


図 5-33　非対称の回転積層コア

5.4.4　自動積厚制御システム

モーターコアを金型内で積層する自動積層システムの普及によって電磁鋼板の板厚のバラツキと偏差がクローズアップされ、顧客であるモーターメーカーからの厳しい要求に応え、電磁鋼板メーカーはより高精度・高品質の電磁鋼板へ改良を加えた。同様の対応が求められた金型メーカーは板厚偏差に対しては回転積層金型で対応したが、板厚のバラツキは避けることのできない問題であった。

自動積層システムは自動積層金型と積層される枚数を数えて、モーターコア 1 台分の積厚（製品高さ）になるように管理する制御盤等で構成されている（図 5-34）。その方法は制御盤で積層枚数を設定し、プレスからストローク回数（打抜き数）を信号で受け取り、既定回数に達すると金型に取り付けられたエアーシリンダーやソレノイドに信号を出してスライドカムを動作させる。スライドカムが動作すると今までかしめ突起加工をしていたパンチが飛び出してかしめ突起部分を打抜いてモーターコア 1 台分の製品ができる。そのあとカム及びかしめ突起パンチも再び元の状態に戻るという一連の動作でコアの積層枚数を制御するのである（図 5-35）。この方式では、積層されるコアの枚数をカウントするだけで積厚を計測していない。そのため金型から排出された積層コアの積厚を実測し、設定した積厚枚数との誤差を修正して、積厚枚数を再設定することが必要であった。

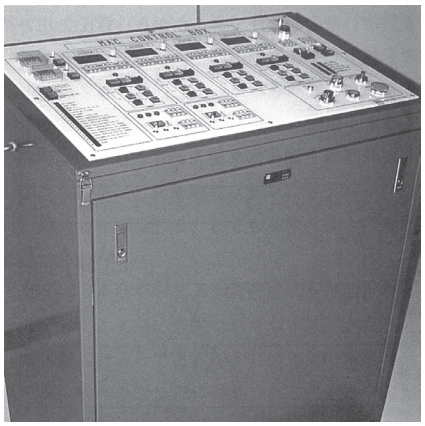


図 5-34　枚数管理の制御盤

（写真提供：三井ハイテック）

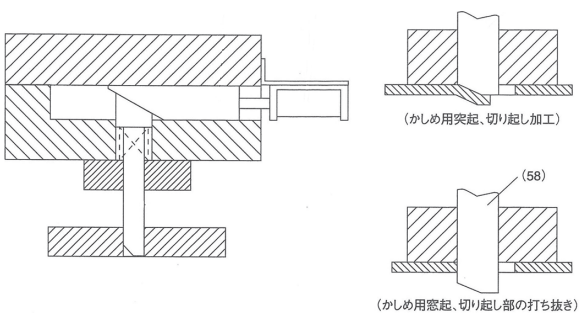


図 5-35　自動積層金型のモータコア計量機構

それに対して自動積厚制御方式では電磁鋼板自体の厚さを実測し、その測定値で積層コアの積厚を制御す

る方式であり、積層枚数は変わるかもしれないがコア1台分の積層厚さを規格内におさめる制御方式である。

三井工作所の自動積厚制御方式の第1号は1983年、アメリカ向けに収めたロータコアを120度回転させて積層し、さらにスキューを付ける金型であった。金型内でロータコアの背圧用として使用している油圧シリンダーのピストンロッドの移動量をロータリーエンコーダで読み取り、打抜き回数で割算して平均板厚を計算し、モーターコア1台分の積厚を制御する方式であった（特開昭61-219429）。その後も1986年、金型内の積層コアの厚さを測定できるように改良したが、いずれの方法もコアのすきま、バリ高さなどの検出ができず満足のいく結果ではなかった。

今までの積厚枚数制御の問題点は電磁鋼板の板厚自体の測定を実施していなかったことである。そこで1987年、三井ハイテック（旧三井工作所）は電磁鋼板の板厚を連続して打抜きながら実測し、積層コアの積厚を制御できる自動積厚制御方式を開発した。プレスストロークごとに送られた電磁鋼板の厚さのデータは制御盤で処理され、金型、スキュー用ステッピングモーターおよび油圧装置に送られる（図5-36）。自動積厚制御方式のプレスライン構成を図5-37に示す。高速で流れる材料の板厚を数ミクロンの精度で測定しなければいけないので、表面に付着していたゴミの問題のため板厚測定センサーは非接触式を採用した（図5-38）。このシステム導入により、ある家電メーカーではそれまでの不良率5～6%が2%以下に減少した。

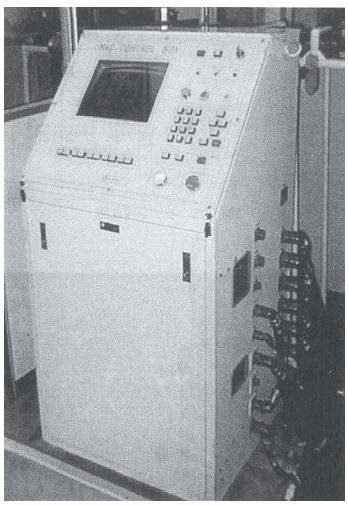


図5-36　自動積厚制御盤
（写真提供：三井ハイテック）

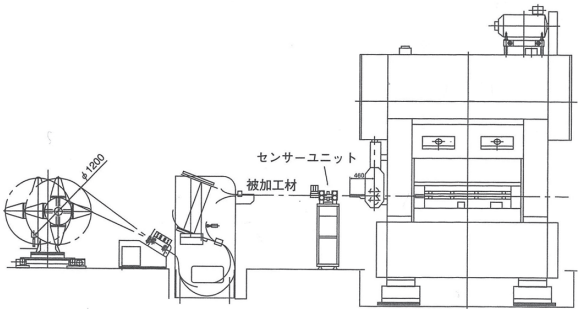


図5-37　自動積厚制御方式のライン構成図

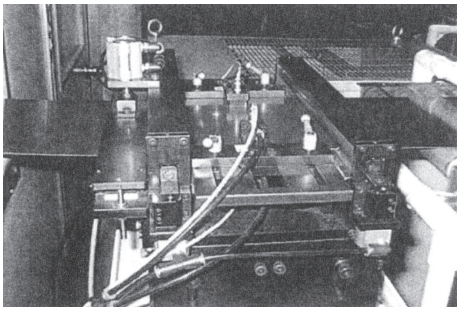


図5-38　非接触式板厚センサーユニット

参考・引用文献

1）　モータコア50年史編纂企画委員会：「モータコア50年史　戦後モータ技術50年の歩み」，三井金型振興財団／三井ハイテック，2000年
2）　特許公報：実開昭55-106527
3）　米国特許：第4,272,579号
4）　特許公報：特開昭56-001746
5）　黒田精工　カタログ
6）　特許公報：実開昭56-171567
7）　新日鐵住金　カタログを基に作成
8）　特許公報：特開昭55-160956
9）　特許公報：特開昭59-108935
10）特許公報：特開昭55-129557
11）オリエンタルモーター　カタログ
12）特許公報：特開昭60-190146
13）特許公報：特開昭63-001347
14）特許公報：特公平2-036332

6 現代の金型技術

自動積層システムの開発がモーターコアの生産システムを変えたことを前章で述べたが、そのあとも自動積層技術を基本として、顧客の求める金型を開発し製造して現在に至っている。

6.1 巻き重ねステータコア

リング状のステータコアを電磁鋼板などの薄板鋼板から打抜いて、多層に積み重ねて出来上がるステータコアは、鋼板の中央部分に多くの無駄な部分が出て、材料の歩留まりが大変悪い。そのため、幅の狭い帯状の薄板鋼板を金型で打抜いて平面的に旋回積層して巻き重ね、ステータコアを製作する方法は古くからあったが、積層かしめ技術を活かして製作する方法を開発した。

帯状の鋼鈑にスロットを所定間隔で打抜き、同時に積層かしめ用の切り起こしを成形する。その後打抜かれた鋼板のスロットを内側にして、積層方向に押しつぶす力を作用させた状態で巻き回しながら積層かしめを行う（図6-1）。また、製作ラインを図6-2-1、2で示す。この方法で製造されるモーターは、現在のところ、自動車のオルタネーター（発電機）などに用途は限られているが、周辺技術の進歩と共に、モーターコア材料の省資源のメリットを活かしてその他の汎用モーターにも応用されてくる可能性がある技術である。

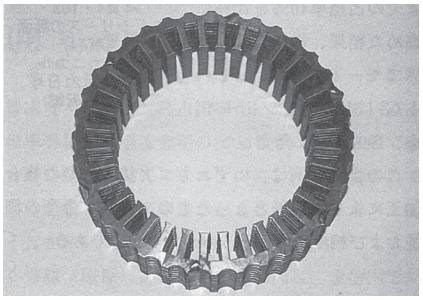


図6-1　ステータ巻き重ねコア[1)]

6.2 レーザー光による積層技術[1)]

家電メーカーや電機メーカーは、社内で自動積層システムを応用してモーターの生産ラインを変革している。

6.2.1 PACシステムの応用例

①フラッシュ焼鈍への活用

松下電器産業（現パナソニック）は自動積層技術であるPACシステムを採用したプレス工程と、中周波誘導加熱法を採用した小型モーターコアの連続式焼鈍工程を直結した画期的な生産システムを開発し、1987年ころには量産に使用されていた。ソレノイド型加熱コイル内をコンベアにより連続的に自動積層されたモーターコアを移動させ焼鈍するシステムであり、この焼鈍をフラッシュ焼鈍と命名した。このシステムにより、冷蔵庫やエアコンに使用されるハーメチックモーターの固定子（ステータ）製造が、プレス打抜き工程から巻線完成工程までの全行程において、1個流し生産方式が完成し、大幅なリードタイムの短縮、省エネルギーが実現した（図6-3）。

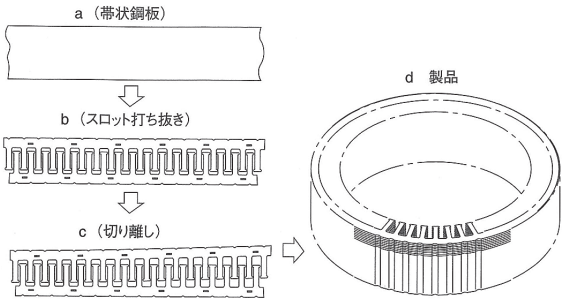


図6-2-1　ステータ巻き重ねコアの製作工程図[2)]

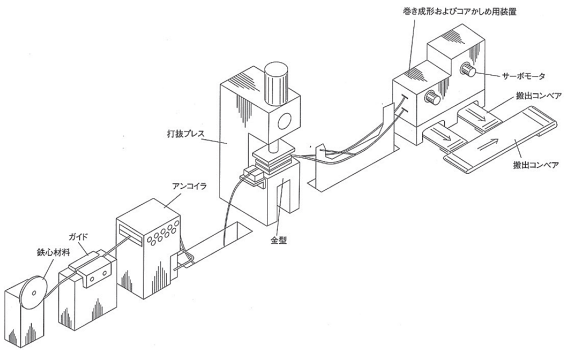


図6-2-2　ステータ巻き重ねコアの製作ライン図[2)]

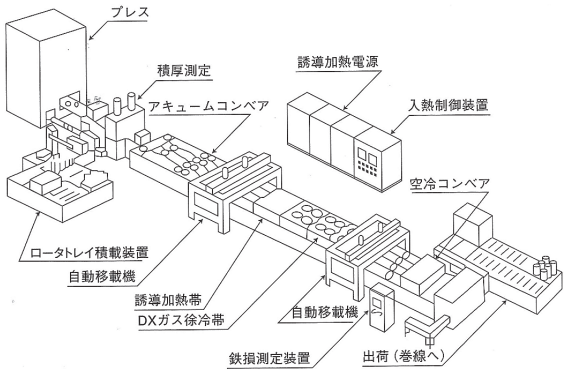


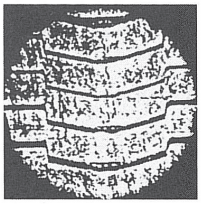
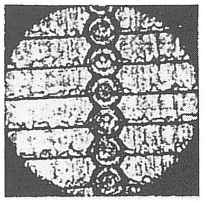
図6-3　フラッシュ焼鈍のライン構成図[3)]

②レーザーPACシステムの開発

モーターアコアにかしめ用の突起を成形して積層する従来の自動積層システムにおいて、かしめ突起の成

形は磁力線の流れを妨げることやモーターコアの絶縁を不完全にすることから、モーターコアの効率をわずかでも低下させる問題があり、積層枚数を増やすなどの対応で補っていた。また、さらなる小型、高精度、高効率のモーターを製造するために、積層コアの高精度化（円筒度、真直度など）について、従来の自動積層システムでは加工の限界に挑戦している。

従来の積層方法に比べて精度を高めて、しかも生産性を確保した新たなモーターコアの積層方法として、金型内においてレーザー光を用いてスポット溶接を行うレーザーPAC システムが 1993 年開発・実用化された（図 6-4）。

	従来工法PAC工法	型内レーザ固着工法
		
	ダボ部断面	レーザー溶接部
複合形態*	ダボかしめ	側端面をスポット溶接
座崩れ*	100	15
平行度*	100	30
真直度*	100	65
高さのばらつき*	100	25
固着強度*	100	150

※各数値は指数である。精度は小さい方がよく、固着強度は大きい方がよい。

図 6-4　従来の PAC とレーザーPAC の比較 [4)]

レーザービームを使ったモーターコアの溶接は、特許公報などによれば、1973 年ごろからあったようだが、金型内で打抜き加工をしながらスポット溶接をするという考えは、1980 年ごろになる。1988 年ごろからは、各社が実用化に向けて開発にしのぎを削り始めた。

レーザーPAC システムは図 6-5 のようにプレス加工部、レーザー発振部、コア検査部、コントローラ部から構成されている。プレス加工部は金型でモーターコアを打抜き、レーザー溶接を行うとともに、カムの角度信号をコントローラ部に送る。レーザー発振部はコントローラ部からの出射信号を受けるとレーザー光を発振し、光ファイバを介して金型内に送る。コア検査部は、プレス加工部から出てきたモーターコアの完成品を検査し、合格品のみ巻線工程に送る。コントローラ部は、プレス、レーザー装置、コア検査装置の運転の監視とコアの積み枚数の制御などを行う。

図 6-6 は、レーザー溶接部の金型の構造を記している。レーザー光は光ファイバを介してレーザー発振部から導かれ、出射ユニットで集光してスポット溶接を行う。ダイは側面に穴が開けられていて、パンチがプレス下死点を越えた辺りでレーザー光を 1 パルス出射して、コアの溶接を 1 枚ずつ行う。コントローラが出射信号を止めて、レーザー溶接を休止させれば積層コアを分離することができる。

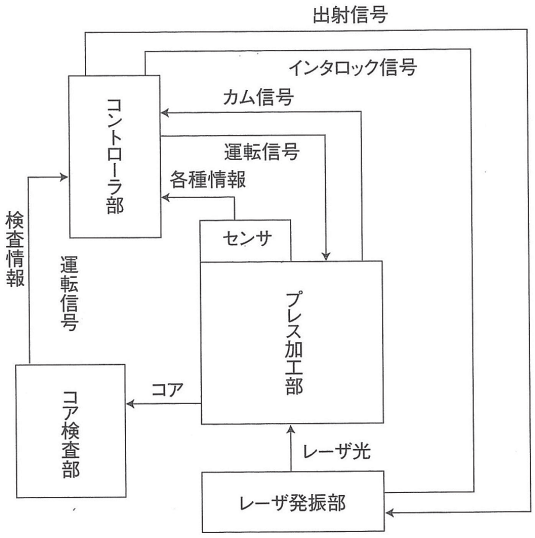


図 6-5　レーザ PAC システムの構成 [4)]

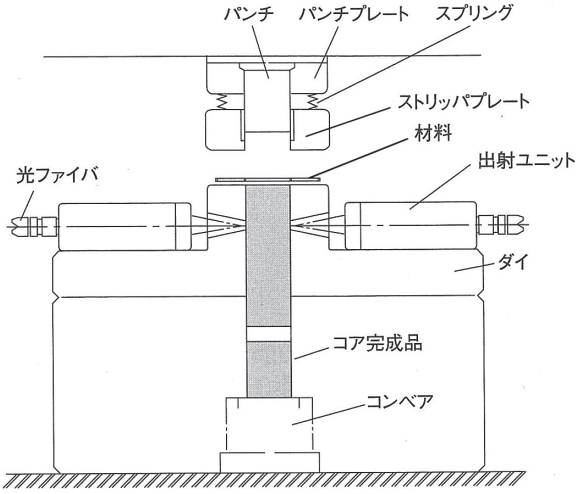


図 6-6　レーザ PAC 金型の構造 [4)]

レーザーPAC システムは、単極歯ごとにコアを分離する方式の採用が可能となり、モーターの生産技術の概念まで変えてしまった。松下電器産業の「MINAS」シリーズとして開発されたモーターでは、例として 12 個に分割された単極歯のコアを金型内でレーザー溶接した後、単極歯のコアごとに巻線された後、12 個の部品（セグメント）としてセットされ、溶接で合体させてモーター1 台分が完成する。単極歯ごとに巻線されるので、巻かれた銅線はきれいに整列されており、従来の巻線機のために必要であったデッドスペースも小さいために、巻線の占積率も従来の

40%から70%へと大きく改善された。その結果、モーターの体積と重量を従来の1/3へと小型化することができ、高性能化にも大きく寄与した。

③Σ（シグマ）シリーズモーターへの活用（安川電機）

安川電機は従来のかしめ方式ではあるが、モーターのステータコアを外コアと内径でつながっている内コアに2分割にした構造にした。この構造により制約されることなく巻線されたボビンをステータ内コアに挿入して、ステータ外コアと組み合わせる方法でステータコアを完成させた結果、巻線の占積率を従来の40%から70%へと向上させて、産業分野用のモーターの大きさと重量を従来の1/2〜1/3へと小型化、軽量化した高性能なΣ（シグマ）シリーズのACサーボモーターを1992年に開発し製品化した。

モーターの小型化に最も影響するのは巻線密度の向上策である。コアのスロット部に巻線をぎっしりと詰め込み、デッドスペースを無くさなければいけない。そこでコアの組み立て方法を見直して、巻線を容易にする方法、すなわちステータコアを分割して巻いてから組み立てるという発想に至ったのである。

④LASER　FASTEC（黒田精工）

黒田精工は1990年からYAGレーザーを使った積層技術の開発に着手し、1992年からLASER FASTECの商標で実用化している。

6.3 「ポキポキモーター」用コア

地球環境問題から省エネルギー、高効率なモーターが近年要求されるようになり、従来の主流であった誘導モーターに代わって、小型・高効率を特徴とするブラシレスDCモーターが急速に普及しているが、ロータには高性能希土類磁石を使用する一方、ステータでは磁極歯ごとにコイルが配置される磁極集中巻きが増えている。

従来の方法では円筒形状に一体型となっているステータコアの内側でコイルを巻くため、狭いスペースで巻線ノズルを駆動させることになり、コイルの整列性や巻線速度に限界があった。この問題を改善するためにステータコアを分割する方法があるが、部品点数の増加とコイル端末線の接続数の増加などの問題があった。

三菱電機ではこのような従来のステータ製造に関する問題を解決するために、1993年に通称「ポキポキモーター」という独自のステータ構造と、これに基づく「展開したコアに巻線してから丸める」という製造プロセスを開発した。この製造方法では広いスペースが確保できるので高速で均一に巻線作業ができるようになり、従来の方法に比べ磁極の根元まで巻線が可能で、その結果小型で高効率なモーターを製造することができる。「ポキポキモーター」はブロック薄肉連結型、薄肉連結型、逆反り型、関節型などのバリエーションが開発され、情報機器、FA機器、家電機器、自動車機器、昇降機等に適用されている。モーター効率は3〜10%改善され、高効率化、低消費電力化、小型化が実現された（図6-7、6-8）。

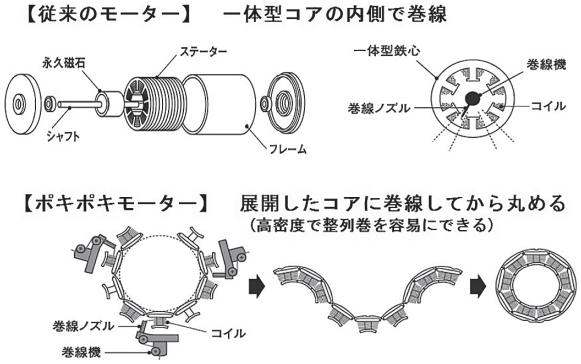


図6-7　従来モーターとポキポキモーターの巻線比較[5)]

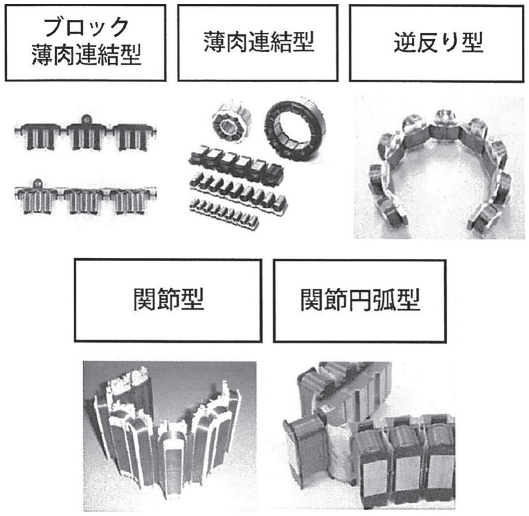


図6-8　ポキポキモーターのバリエーション[6)]

この「ポキポキモーター」を製造する金型でも自動積層の金型技術は欠くことはできない。ポキポキと丸くする連結部には一工夫されたかしめ突起部が採用されている。さらに従来のステータコアの打抜きでは円板形状に打ち抜くため中央部分に無駄な材料が出てしまうが、「ポキポキモーター」方式の打抜きでは材料を大幅に削減でき、電磁鋼板の材料歩留まりを向上させる効果があり、モーター製造のコストダウンとなっている。

6.4 洗濯機に使用されるDDモーター用コア

このコアを分割してモーターを製造する方法はそれ

以外のモーターメーカーでも活用されるが、洗濯機の事例を以下に示す。

洗濯機は生活に欠かせない家電製品であるが、近年のライフスタイルの変化から早朝や夜間でも洗濯する人が増え、従来の洗い・すすぎ・脱水などの洗濯機本来の性能以外に、低騒音・低振動の性能が強く要求されるようになった。

東芝はこれらの要求に応えるためにダイレクトドライブ（DD）インバータ技術を開発し、1997年9月に国内で初めてDDインバータ全自動洗濯機として商品化した。従来の洗濯機の駆動方式は、誘導電動機を用いてベルトとギヤで減速する方法であり、これらの減速機構から発生する騒音が大きいことが課題であった。これに対してDD方式は可変速モーターをインバータで制御して、パルセータ（回転翼）および脱水槽を直接駆動するものである。ベルトとギヤによる減速機構を廃止できるので、より静かな洗濯機が実現できた。DDインバータ技術とは、これを実現するためのモーターやその駆動制御技術の総称であり、東芝はその技術の中心となるモーターとして、アウターロータ式ブラシレスDCモーターを開発し搭載した（図6-9）。ブラシレスDCモーターは誘導電動機のような電磁音が発生しないので静かであり、またアウターロータ式にしたことでモーターの中心からステータとロータの間のギャップまでの距離が大きくとれ、より高効率なモーターにできた。

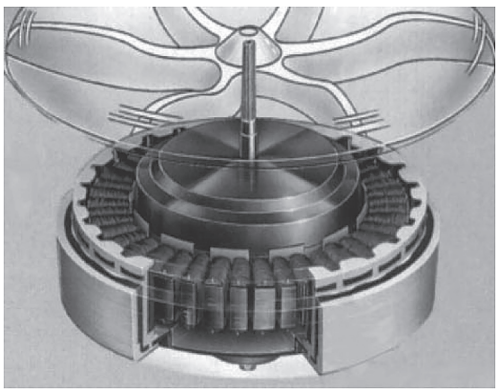
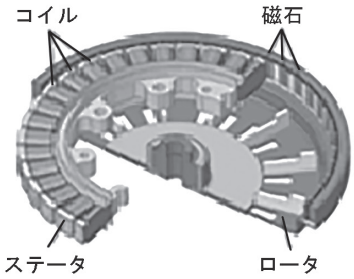


図6-9　アウターロータ式ブラシレスDCモーター[7)]

2000年代に入ると洗濯機の低騒音化がさらに求められるようになり、東芝はDDインバータ技術を洗濯乾燥機にも応用するなどして、低騒音化、省エネ性能向上化などを実現したドラム式洗濯乾燥機を開発した。ドラム式洗濯乾燥機は全自動洗濯機とは異なり、洗い運転時にはドラムを回転させて洗剤液を含んだ衣類を重力に逆らって持ち上げて落とす、いわゆるたたき洗いをしているため、より高いトルクが必要になる。また、乾燥運転時の省エネを図るために、脱水時に高速回転をすることで脱水率を向上させる必要がある。ドラム式洗濯乾燥機が持つこれらの特徴のため、DDインバータモーターには、より高いトルクと高速回転が求められる。東芝はこれを実現するために、ロータの磁石を従来のフェライト磁石からネオジム磁石に変更し、コンパクト化・高トルク化・高速化を実現するS-DDモーターを開発し、ドラム式洗濯乾燥機として2005年に商品化した（図6-10）。



（a）S-DDモーター構造

項　目	現行DDモータ	S-DDモータ	特　長
マグネット極数	24極	48極	回転制御向上
マグネット材料	フェライト	ネオジウム	高トルク　高効率化
質　量	6.5 kg	5.0 kg	軽量化
ステータコアの厚み	27 mm	19 mm	コンパクト化
脱水時の出力密度	0.07 (W/cm³)	0.14 (W/cm³)	高出力

（b）モーター性能比較

図6-10　ドラム式洗濯乾燥機[8)]

パナソニックはドラム式洗濯乾燥機にデュアルロータ構造のDDモーターを開発し、モーターのトルクをシングルロータに比べ40％以上増加させ、出力密度を大幅に向上させることができ、さらに低騒音化も実現した。デュアルロータ構造のモーターは1つのステータをもち、ステータの内側と外側にアウターロータとインナーロータの2つのロータを配置している。またアウターロータとインナーロータは共にステータ

と微小なギャップをもっている。そしてアウターロータとインナーロータは1つの出力軸を持つように樹脂モールドにより連結されている。また、ステータにはトロイダル巻線でステータヨーク部に直接巻線が施されているのが特徴である（図6-11、6-12）。

日立アプライアンスはドラム式洗濯乾燥機のDDモーターを開発した。その特徴は56極42スロットの永久磁石（ネオジム）モーターであり、ステータの巻線はコイルエンドを短縮するため集中巻を採用している。ロータコアは永久磁石の漏れ磁束の抑制、ステータコアは材料歩留まりの観点から、分割コア構造となっている（図6-13）。

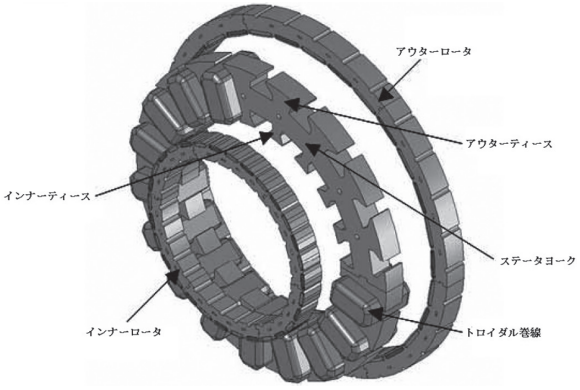


図6-11　デュアルロータ構造のモーター形状[9)]

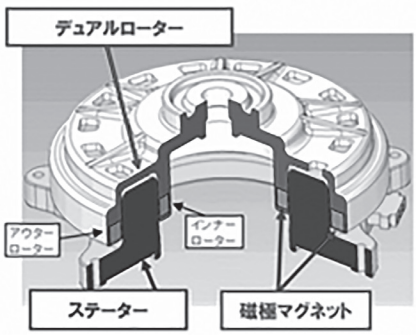


図6-12　ドラム式洗濯乾燥機[10)]

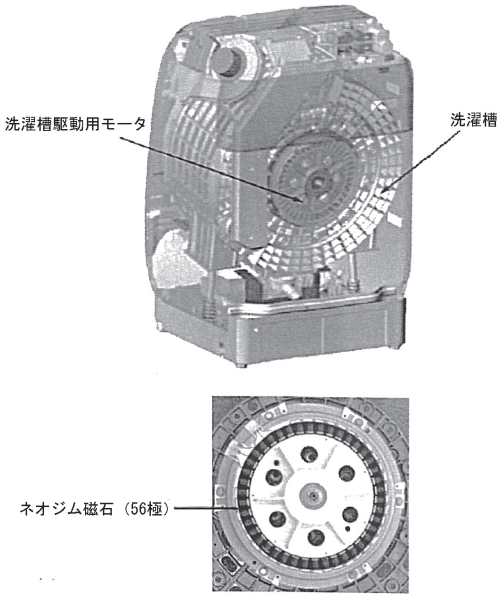


図6-13　ドラム式洗濯乾燥機[11)]

6.5 ハイブリッド自動車に搭載されるモーター用コア

ハイブリッド自動車はエンジンとモーターそれぞれの長所を活かして、低燃費を実現した自動車のことである。一般的にガソリン車のエンジンは、発進、低速走行時には燃費が悪い。ハイブリッド自動車はエンジンの燃費が悪いそのような時に、電気で動くモーターを使って走行し、エンジンの燃費が良くなる通常走行時になるとエンジンに切り替えて走行する自動車である（これと異なるシステムのハイブリッド自動車もある）。このシステムによって、ガソリン車に比べて燃費が向上するので、CO_2や排気ガスの排出量を抑えることができるので、地球環境にやさしいシステムである。

冷蔵庫や洗濯機などの家電品のモーターのサイズはϕ150mm以下が多数だが、大きなものでもϕ200mmくらいの大きさ程度が一般的である。それに対して、ハイブリッド自動車に搭載されるモーターは、そのコアサイズがϕ300mmと大きく、材料である電磁鋼板の板厚が0.35mmと通常の0.5mmより薄かったため、求められる金型の精度が従来以上に厳しかった。金型の大きさも大きくなり、当初は作るための製造設備も十分でなかったが、金型を分割し既存の設備をなんとか活用して製作した。さらに組立、試抜き調整など困難な問題を乗り越えて、三井ハイテックは1997年10月に完成した金型を自動車メーカーに納品した。これは量産型ハイブリッド自動車用として同社が初めて製作したモーターコアの金型である。しかし、この金型は1枚1枚バラバラに打抜く金型であり、自動積層の金型ではなかった。このあと、新しい製造設備、新しいプレスなどを導入して2003年に自

動積層金型を完成させ、2004 年からは自動積層金型で製造されたモーターコアが搭載された（図 6-14）。

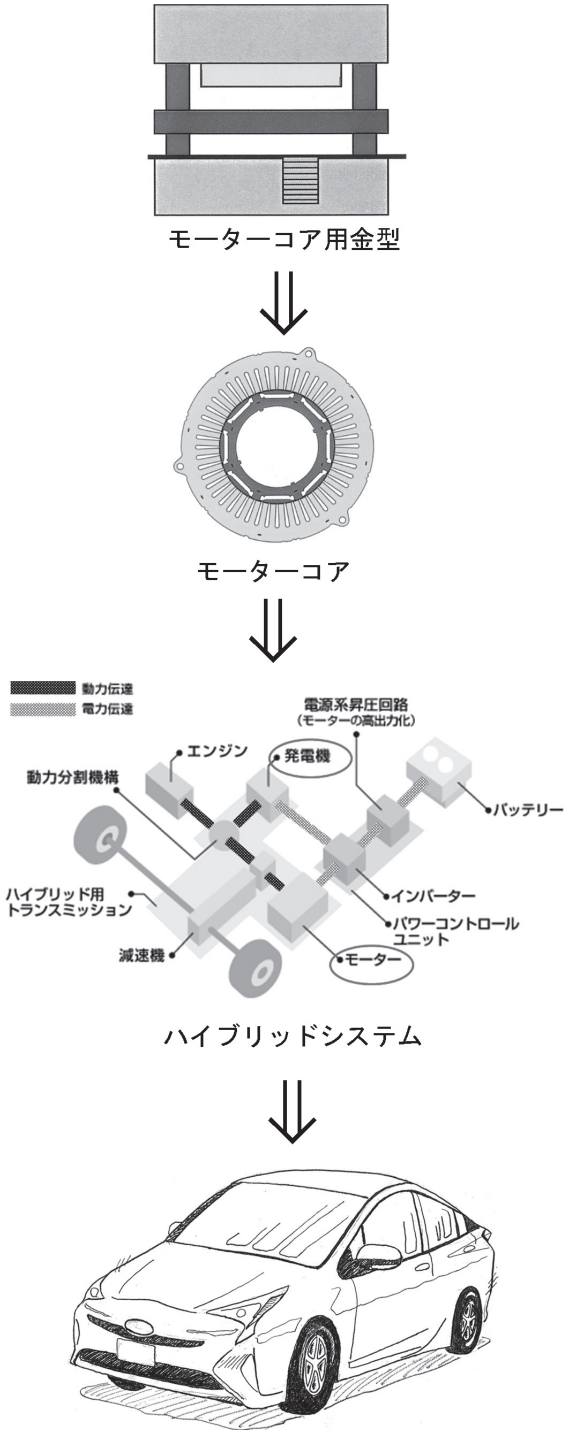


図 6-14　ハイブリッドカー用モーターコア [12)]

6.6　さらに発展する金型技術

既に記述した松下電器産業のフラッシュ焼鈍による 1 個流しの生産方式や MINAS シリーズの AC サーボモーターにおける生産方式、あるいは安川電機のΣ（シグマ）シリーズの AC サーボモーターの生産方法などに見られるように、モーターの生産方式そしてモーターの設計思想にも金型技術は大きな影響を及ぼしてきた。

6.6.1　限界に挑む金型技術

①外径 2.7mm の極小モーターコア

世の中の老若男女を問わず持っているスマートフォン（スマホ）や携帯電話には着信したことを伝えるバイブレーション機能があるが、この振動は内部に組み込まれた振動モーターによって生じている。この振動モーターも時代の要請でより小さなものが求められる中、当時はレーザー光の溶接でしかできなかったものを自動積層技術である MAC システムによって生産性を向上させたいという顧客の要望に応え、金型メーカーは 2000 年 7 月に外径 2.7mm の極小のモーターコアを開発した。豆粒ほどの小さいモーターコアの製作には設計と組立に苦労したが、できたモーターコアの性能が高く、多くの顧客から引き合いがあり、国内外の多くの携帯電話に搭載された（図 6-15）。また、その後の技術改良によって外径は 2.1mm まで小さくなっている。

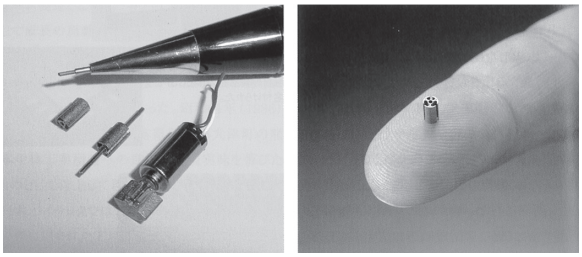


図 6-15　外径 2.7 mmのモーターコア

（写真提供：三井ハイテック）

②板厚 0.15mm の極薄板のモーターコア

モーターコアは積層する電磁鋼板の板厚が薄くなるほど電流損失が減少し、モーターとしての性能が向上する。しかし、板厚が薄くなるほど加工が難しくなり、積層するかしめ力も弱くなってしまう。そのため、自動積層のモーターコア金型に使われる当初の板厚は 0.5mm が一般的であった。高性能のモーターが要求される中で、電磁鋼板の板厚は、0.35mm、0.30mm になり、さらに 0.27mm、0.20mm までは一部で実用化された。また、これが金型内積層の限界

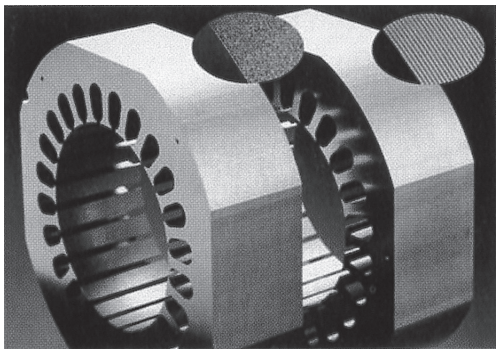


図 6-16　左：板厚 0.2 mm 右：板厚 0.5 mmのモーターコア

（写真提供：三井ハイテック）

だと言われていた（図 6-16）。一方、電磁鋼板の材料メーカーは、冷間圧延技術などを発展させて、板厚 0.15mm までのものが製造できるようになった。しかし、材料費が高く、それを打抜き加工できる金型も製作されていなかったので、板厚 0.15mm の電磁鋼板を使ったモーターコアは実用化されていなかった。

しかし、モーターの高性能化のニーズは日増しに高まるばかりで、同じサイズでより高い特性をもつモーターを作るため、コア材料の薄型化が必要とされた。これに応えるため、金型メーカーと電磁鋼板メーカーが共同して研究を行い、電磁鋼板メーカーからの試作の依頼によって、板厚 0.15mm の電磁鋼板を自動積層する金型が開発できた。この際、開発の最も大きな課題は板厚が薄くなったことで、パンチとダイのクリアランス（すき間）がわずか数ミクロンしかなったことだ。そのため金型刃物部品の精度をそれまでより数段あげることが要求され、さらに生産工場内の温度管理も要求された。しかし、ここで IC リードフレームの金型製作で 0.15mm、0.125mm の極薄板厚材料の打抜きをしていたことが活かされた。また、かしめ強度を確保するのにも苦労した。こうしていくつもの壁を乗り越え、板厚 0.15mm の薄板モーターコアの製造技術を確立したのは 2000 年 10 月のことであった。この業界の常識を打ち破った薄板モーターコアは、同じサイズのモーターコアと比べて、同じ出力を少ない電力で得られると、業界紙などにも大きく取り上げられた（図 6-17）。

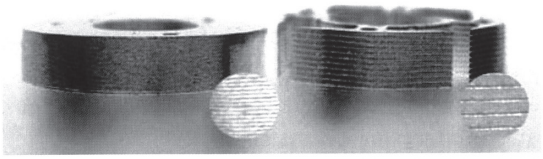


図 6-17　左：板厚 0.15 mm 右：板厚 0.5 mmのモーターコア
（写真提供：三井ハイテック）

③薄型、高効率モーターコア

モーターコアを作るにあたって、ステータコアに効率よく多くの巻線を実現する方法として、ステータコアを分割して打抜き、巻線後に組み合わせて環状にする生産方式を取っていた。しかし、こうした方法では最終的な形である環状に連結させることが難しいという問題があった。

ある電機メーカーはコアを環状にする際の問題点を解決するため、分割コアが支点を基準に可動する機構を持つ積層コアを加工できる金型製作を要望してきた。この要望に応え、金型メーカーが積層しながら隣り合うコアを分割、連結させる構造の金型を開発したのは 1998 年であった。その当時、家電業界の競争が激化しており、省エネ・省資源につながるモーターコアをいかに開発し、取り入れるかが、生き残りを賭けた競争に打ち勝つためには不可欠という背景があった。

しかし、この金型の製作は、従来のモーターコア用金型に比べて部品点数が約 2 倍の 2,400 点にも上ったうえ、全長が 1,800mm の金型の大きさになり、位置決め精度の難しさはもちろん、刃物寸法精度をさらに向上させなければならかった。そうしなければコアを開閉する際に精度に誤差が生じることになる。1 号機の金型の完成後も、コアを閉じた際に切り曲げ部分にすき間ができる、切り離し部分が広がってしまうなどクリアしなければならない問題が多く、試行錯誤を繰り返しながら、1 つ 1 つ解決しなければならなかった。このようにして、エアコン用コンプレッサーモーターコア用金型の試作型が完成したのは 1998 年であった。翌 1999 年にはエレベーター用モーターコアの試作用金型が完成した。この後、量産用金型を製作、実用化したが、このコアにはこれまで以上に銅線を効率よく、多く巻けるようになったので、より高出力が出せるようになり、同じ出力のモーターをさらに小型化することが可能となった。

④モーターコアの 3D（三次元）積層技術の開発

2000 年頃になると家電メーカー数社から 3D 積層技術を開発してほしいという要望が出されるようになっていた。金型メーカーはこの 3D 積層技術として、パンチを自在に動かすパンチ可動技術、ダイを回転させ自由な角度で積層できるダイ回転技術などを開発してきたが、顧客からの要望に応えるためには、金型自体を動かすことでこれまで不可能だった形状に自動積層することができる金型駆動技術の開発が不可欠であった。

2003 年の春、家電メーカーから「ワンランク上の技術開発に取り組みたい。ぜひ協力をしてほしい」と相談をもちかけられたのを契機に金型メーカーは本格的に取組むことになった。顧客の要望は、エアコンに使うファンモーターの効率を上げるため、ピラミッドのように階段状に斜めに積層したモーターコアが欲しいということであった。それは当時、粉末冶金でしかできないような 3D 形状のコアを自動積層金型で製作するという独創的な技術開発の依頼であった。すぐに開発に着手したが、課題がたくさん出てきた。とりわけ、斜めにずらしながらコアを積層させるために金型を可動させる際の制御方法とその精度の保持が最大のポイントとなった。しかし、サーボモーターによる高精度位置決め制御技術や今までに蓄積した金型技術を

活かして難題を克服し、2004年試作型が完成、そのあと顧客からの要望に応じて量産型を納品した。

このようにモーターコア用金型は、自動積層技術を基本として発展していくことは間違いないであろうが、自動積層技術だけでなく、この技術を核とした生産システム化がますます要求されてくるに違いない。また、製品開発の段階から金型メーカーに様々な要求も増えてくるだろう。

自動積層技術に関しては、これまでのようにかしめ突起を電磁鋼板に成形して、1枚1枚打抜きながらコアを機械的に積層する方法とは別に、レーザー光を使ってスポット溶接して積層する方法が実用化された。レーザー溶接の解決すべき課題はまだ残されているが、これまでのかしめ方法と比べて、積層コアの精度と固着強度において優れたモーターコアが得られるので、レーザー発振機等の低価格化、コンパクト化が大いに進展すれば、普及の可能性はある。また、その他に接着して積層コアを得る技術も出てきたが、まだこれからどうなるかというところである。

一方、地球環境問題を抜きにして物を作ることができない時代になり、多くの電気を消費するモーターの生産にも省エネ・省資源を考慮した設計思想が取り入れられて、金型内でシェービング加工を行ったり、つぶし加工を取り入れたりとますます多様化してくる。さらにOA機器に使われているステッピングモーターのように、より高精度・高機能のモーターコアが要求されてくる。

最近はエンジンの無い電気自動車の普及スピードが上がってくるのではないかと話題になっている。しかし、電気自動車にもモーターは搭載される。今後もモーターコアが無くならない限り、モーターコアを打抜く金型は、生産性の向上と高効率・高機能のモーターを製造するために、顧客の要求に応える努力を続けていくであろう。

参考・引用文献

1) モータコア50年史編纂企画委員会：「モータコア50年史　戦後モータ技術50年の歩み」，三井金型振興財団／三井ハイテック，2000年
2) 特許公報：第2，651，420号
3) National technical report Vol.33 No.5 Oct.1987
4) National technical report Vol.39 No.5 Oct.1993
5) 首相官邸ホームページ：資料4物作り技術の革新と知的財産　ポキポキモータR三菱電機株式会社，2005年を基に作成
6) 三菱電機技報，Vol.76，No.6，2002年
7) 東芝レビュー，Vol.69，No.2，2014年
8) 東芝レビュー，Vol.60，No.5，2005年
9) Panasonic Technical Journal，Vol.55，No.3，2009年
10) パナソニックプレスリリース：ななめドラム洗濯乾燥機「NA-VR2200L」他新シリーズを発売，2007年9月6日
11) 日立評論，Vol.96，No.11，2014年
12) トヨタホームページを基に作成

7 おわりに

私たちの身の回りには大量生産で産まれた工業製品が溢れているが、それらのほとんどが金型によって作り出されていると気づく人は少ない（一般的には知られていない）。その大量生産を支える多種の金型で、プレス金型の中のモーターコア打抜き金型の技術の発展の歴史について調査した。

モーターコア打抜き金型製作の始まりは、薄板材料にスロットを1つずつ打抜いて、ロータコア、ステータコアを作るワンスロット抜きノッチング金型である。国産の誘導モーターは1895年に最初に製造され、ノッチング金型製作もこのころに始まったとされているが、金型としての記録は見出されていない。この後、電機メーカーがモーターの生産を始める過程の中で、その製造方法の一部として金型製作も始まったが、このノッチング金型製作の技術は、職人の技術、技能によるものであった。材料を打抜く刃物（パンチとダイ）は、ロータ、ステータ共に複雑な形状をしており、金型加工用の専用機械などが全くない時代であるから、ほとんどがヤスリ、ノコ、タガネなどで行う手作業で作られた。また、刃物は硬度を上げるために熱処理を行うが、熱による変形を予想して仕上げを行うことが金型職人の腕の見せどころで、ここに至るまでの先人の苦労と工夫は並大抵でなかったと推測する。

次に生まれた金型は、ワンスタンプ金型（コンパウンド型）であった。ノッチング金型が1スロットずつ、スロットの数だけ回転して打抜き、1枚のロータコア、ステータコアを得るのに対し、1回の打抜きで1枚の各コアを生産できるから生産性が向上する。ワンスタンプ金型製作の始まりは定かではないが、安川電機40年史によると、1936年にはϕ 165、ϕ 190、ϕ 230のワンスタンプ金型が各1台稼働していたと記録されている。この頃からは、金型製作の工作機械が導入され、研削盤も使われ始める。しかし、コアの寸法を決定するパンチやダイの仕上げ加工まで行う技術は無かった。熟練金型工のヤスリ仕上げによる方法に頼らざるを得ず、この製作方法は第二次大戦後まで続いたのである。

終戦後、電機メーカーでは熟練金型工の不足により、金型製作が遅延しモーター生産に影響を及ぼすことも起こったが、終戦後から金型専業メーカーが生まれるなど金型製作が活発化した。

次に誕生したのは順送り金型であった。ノッチング金型とワンスタンプ金型がロータコア用、ステータコア用の金型とそれぞれのプレスを必要としたのに対し、順送り金型はロータコアとステータコアを1台の金型と1台のプレスで生産できるので、生産性の大幅な向上ができた。しかも大量生産に適した打抜き金型であり、大型のモーターコア、生産数量の少ないモーターコアを除き、ほとんどのモーターコアがこの順送り金型で現在も生産されている。

4章では、スチールを熱処理した刃物よりもさらに硬度、耐摩耗性が高い超硬合金の加工方法として、研削加工の開発を中心に述べた。ダイヤモンド砥石による研削加工方法の確立により開発された超硬金型は、それまでの熱処理後総研削の順送りスチール金型で、1研削当たりの打抜き枚数が50,000枚程度であったのに対し、一気に20倍の100万枚も打抜けるようになった。折しも、洗濯機、冷蔵庫、掃除機などの電化ブームでモーターの需要が激増してきたが、超硬金型の開発があったことが、モーターコアの大量生産を可能とした重要な要因であったといえる。

5章においては、さらに画期的な金型技術である自動積層金型について述べた。前章で述べた超硬金型の開発までは、1台の金型の1研削当たりの打抜き枚数を5倍、20倍と増やすことにより、生産性の向上と大量生産をできるようにした開発であったが、自動積層金型の開発は、金型を使うプレス工程の生産性向上だけでなく、後工程の大幅な工程短縮を可能とし、モーターの製造工程までも変革した金型技術であった。また、材料の板厚偏差を吸収する金型技術として、回転積層金型についても述べた。

6章では、さらに自動積層技術を基本として開発されたモーターコアの生産システムを紹介し、未来の展望としながら本調査を終了したが、近い時代のことは公開できない情報もあり、十分に記述できないところもあった。

今回、産業技術系統化調査に参画し、調査のために資料を収集して改めて認識したことは、金型やその製造の技術に関して、過去の情報を記録したものがほとんどないということであった。モーターという製品が完成されるまでに、コア作りが最初の重要な工程ではあるが、あくまで一つの工程であり、使われる金型も一つの道具であり消耗品に過ぎない。このため電機メーカーなどの情報を調べても、金型の情報についてほとんど記述がないのも当然であると言えるだろう。

他方、金型業界は顧客からの注文に従い、要求通りの金型を製作して収めるが、その製品情報、金型情報は秘密のため、情報が顧客ならびに金型メーカー間で行き交うことは無く、各社特有の金型技術を持つ結果になり、さらにそれをまとめて記録したものがほとんどないのが実情である。そのため限られた情報の故に、一部の企業の情報を取り上げ、それ以外の企業の金型技術を紹介することがほとんどできなかったことをお許しいただきたい。例えば、ノッチング金型は生産数量の少ない大型のモーターコアに使用されるが、現在は全自動のノッチングプレスが開発され、生産効率が格段に上昇していることなども紹介できなかった。また、金型製作の発展のために大きく貢献した、マシニングセンターや高精度ワイヤーカット放電加工機などの工作機械、あるいはCAD／CAMについて、時間の制約があり記述できなかったことも残念であった。しかし、顧客の要望に応えるために、新たな技術を取り入れ、画期的な技術を開発してきたモーターコア金型の技術発展の過程を大まかに記述できたと考えている。

謝辞

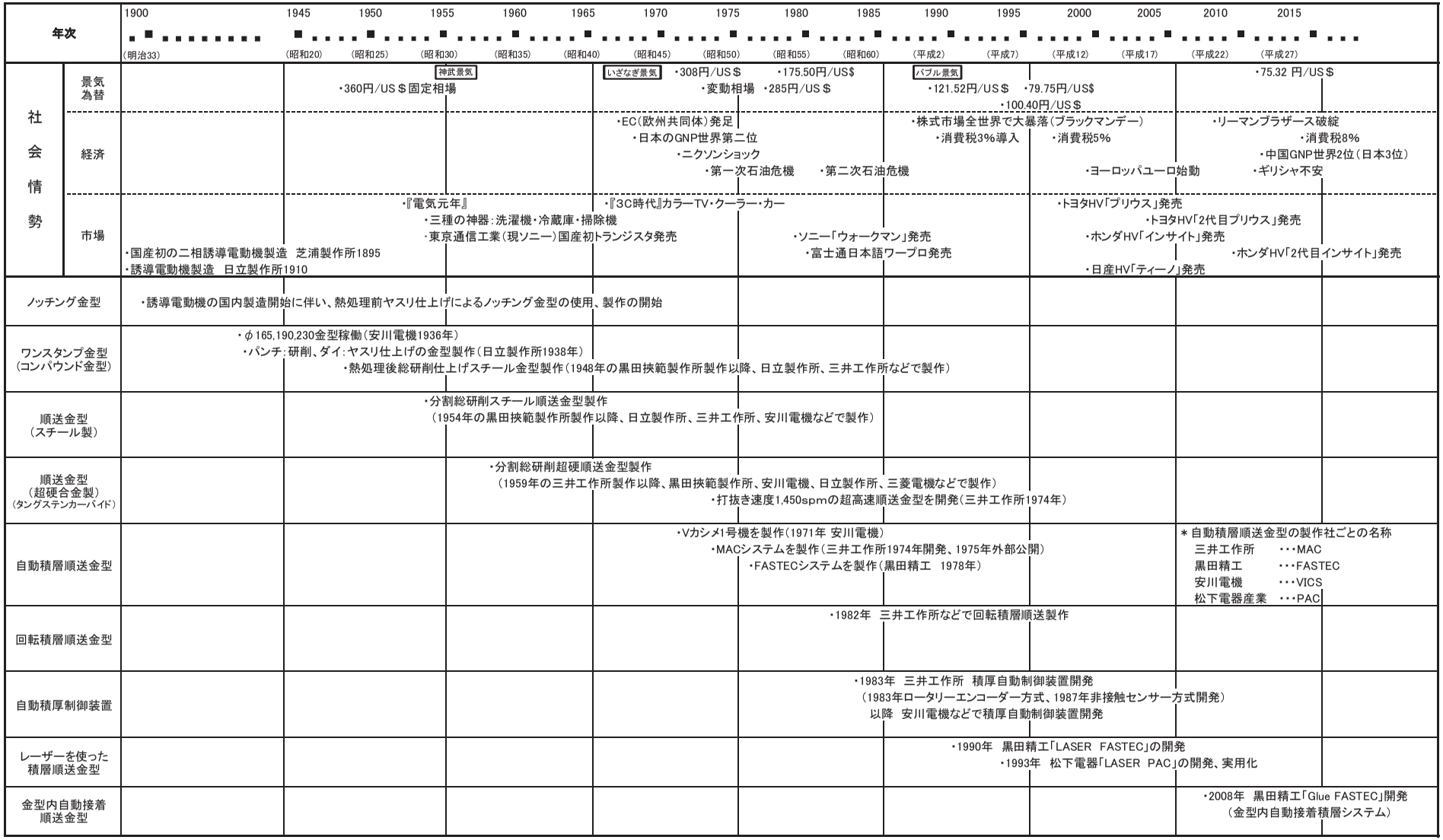
今回の調査に当たっては、「モーターコア50年史―戦後モータ技術50年の歩み―、三井金型振興財団／三井ハイテック、2000年」の内容に負うところが大であった。

また、ご協力、ご助力を賜り、貴重な情報、写真や資料の提供をいただいた方々の会社名、組織名を以下に記して厚く御礼を申し上げます。

日立アプライアンス株式会社
株式会社安川電機
有限会社恒成工作所
一般社団法人　日本金型工業会
黒田精工株式会社

最後に、作成した調査報告について、ご意見、ご助言をいただいた株式会社三井ハイテック　谷垣敏雄氏、山下賢二氏に謝意を表します。

モーターコア打抜き金型系統図



モーターコア打抜き金型　産業技術史資料　所在確認

番号	名称	製作年	製作者	資料の種類	資料の現状	所在地	選定理由
1	平面研削盤	1950年	㈱三井工作所 （現㈱三井ハイテック）	現物	展示	㈱三井ハイテック	・中古機械の部品を組み合わせて製作した自社製の平面研削盤1号機 ・この研削盤の完成により、熱処理後総研削仕上金型の製作への道を拓いた
2	超硬金型 量産型1号機	1959年	㈱三井工作所 （現㈱三井ハイテック）	写真	保存	㈱三井ハイテック	・超硬合金（タングステンカーバイド）素材を研削加工で仕上げた刃物で打抜く精密順送り金型 ・従来のスチール製金型の20倍の耐久性をもち、一研削当たり100万枚のモーターコアを打ち抜くことができる量産型の国内1号機
3	超高速金型	1974年	㈱三井工作所 （現㈱三井ハイテック）	量産品	保存	㈱三井ハイテック 研修センター	当時のモーターコア打抜き金型の打抜きスピードは300～400spmが限界と言われていたが、生産性の5倍向上のため開発した超高速金型で、1450spmの打抜きスピードを達成
4	自動積層金型 MAC1号機	1975年	㈱三井工作所 （現㈱三井ハイテック）	量産品	保存	㈱三井ハイテック 研修センター	・金型内でモーターコアを積層し、結束した状態で金型の外へコアを出す自動積層金型として、商品化された国内初の精密順送り金型 ・プレス工程の後工程まで大幅な工程圧縮を可能とし、モーターの製造工程までも変革した金型技術
5	ICリードフレーム 打抜き金型	1969年	㈱三井工作所 （現㈱三井ハイテック）	量産品	展示	㈱三井ハイテック 金型事業所	当時、エッチング方式でしか製造できなかったICリードフレームを、プレス打抜きにより大幅なコストダウンを実現させた世界初の精密順送り金型

モーターコア打抜き金型の系統化調査　正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 共同研究編11集 2018年3月 （誤）	全文PDF版 2019年3月 （正）
3	右	6	テレビ、冷蔵庫、洗濯機	洗濯機、冷蔵庫、掃除機(のちに白黒テレビ)
7	左	下から3	図3.2では	図3.2のステータコアでは
8	左	9	ケイ素鋼板	電磁鋼板
9		図3-9 (4段目中図)	脱炭層を取る（約10mm）	脱炭層を取る（約0.2mm）
10	右	図3-11	～打抜き工程	～打抜き行程
11	右	28	行ったのと	行ったことと
12	右	図3-16	4工程分割方式	4行程分割方式
17	左	4	ロータ用、ステータコア用	ロータコアとステータコア
18	左	10	複数の工程に分けて	複数の行程に分けて
18	左	13	材料歩留まり	材料費
23	左	下から2	Carbididie	Carbidie
25	左	15	0.1mmくらいの	0.1mmくらいの厚さの
25	左	17	0.1mmくらいの	0.1mmくらいの厚さの
29	右	6	雄ネジ	雌ネジ
33	左	12	もたらす。（脚注3）	もたらす。
42	左	17	電気メーカー	電機メーカー
44	右	24	異形状の場合、万一、ダイの位置が	異形状のダイが万一、
50	左	16	導線	巻線
54	左	5	板厚1.5mm	板厚0.15mm
56	左	24	総抜き	コンパウンド
59	番号4	製作年	1974年	1975年