

一橋大学 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内賞ケース研究プロジェクト

三菱電機 ポキポキモータ
新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発

軽部大
小林敦

2004 年 11 月

CASE#04-15

本ケースは、一橋大学・文部科学省 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」から経費の支給を受けて進められている「大河内賞ケース研究プロジェクト」(<http://www.iir.hit-u.ac.jp/research/21COE.html>)の研究成果のひとつである。同プログラムの支援に感謝するとともに、本プロジェクトを進めるに際して多くのご協力をいただいた大河内記念会に対して心よりお礼を申し上げたい。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

一橋大学
文部科学省 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内賞ケース研究プロジェクト

三菱電機ポキポキモータ：
新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発

2004/11/22
一橋大学イノベーション研究センター
軽部大*
一橋大学大学院商学研究科 MBA コース在籍
小林敦

*〒186-8603 東京都国立市中 2-1
Phone: 042-580-8429 Fax: 042-580-8410
Email: karube@iir.hit-u.ac.jp

本ケースは、軽部大と小林敦が共同で執筆したものであり、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」(大河内賞ケース研究プロジェクト)からの財政的な支援を受けている。本ケースの記述は企業経営や技術開発の巧拙を示すことを目的としたものでなく、分析ならびにクラス討議上の視点と資料を提供するために作成されたものである。また本ケースの内容は全てケース執筆時点におけるものであり、その後起きたことは記述に含まれない。本文および参考文献中の所属・役職も、すべて取材当時のものである。

本ケース作成では、多忙な合間を縫って講演および長時間のインタビューに応じてくださった中原裕治氏(三菱電機生産技術センター)、三瓶利正氏(三菱電機ライフサービス郡山支店)には大変お世話になった。この場を借りて心よりお礼を申し上げたい。本ケースの内容、主張、解釈はケース著者によるものであり、三菱電機の意見を代表するものではないことを注意されたい。もちろん、本ケースに含まれるいかなる誤りもケース著者に帰されるものである。著者の許可なく複製・転載・引用を行うことを禁ずる。

はじめに

工場や鉄道の動力から家電・AV製品や自動車機器、情報機器に至るまで、我々の生活はモーターに支えられている。モーターは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する代表的な変換機器であり、実に日本の電力消費量 9782 億 kw の約 50%は、モーターによるものである。モーターのエネルギー変換効率を高めることは、省エネに大きく寄与する¹。例えば、モーターの効率を 1% 向上することで、年間 180 万トンの CO2 削減に寄与できると言われている(図表 1)。

ファラデーによる電磁誘導の法則の発見を契機にして、モーターの基本原理が発明されて既に 170 年が経っている。モーターの原型は、当初電池を電源としていたために DC (直流) モーターを基点として発達した。DC モーターとは、鉄心にコイルを巻いた電磁石と永久磁石とを組み合わせ、コイルに電流を流して電磁誘導により回転力を発生させるモーターである。その基本原理は、19 世紀初頭以来現在も変わっていない。

技術的には成熟していると思われたこのモーター分野において、新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発が認められ、1998 年 3 月 11 日に第 44 回大河内記念賞(平成 9 年度)を受賞したのが、三菱電機の新型鉄心構造を持つモーター(通称、ポキポキモータ)である。モーターの機能設計の原点にまでさかのぼり、「モーターは丸い鉄心から作る」という製作上の固定観念を打破したからこそ、可能になったモーター構造であり製造法であった。高密度巻線に注目した生産設計を行い、巻線機の開発にも取り組むことで、モーターの特性向上と生産性向上の両立を実現することとなっている。

ポキポキモータ関連の同社の生産額は、200 億円を越えており、技術的成果も少なくない。国内では 85 件の関連特許を出願し、これまでに 20 件が登録されている²。大河内賞受賞後は、2001 年に「第 11 回日経 BP 技術賞部門賞」を、2002 年には平成 14 年度「機械振興協会賞」を、2004 年には平成 15 年度「日本機械学会賞(技術)」と平成 16 年度「近畿地方発明表彰(日本弁理士会会長奨励賞)」を受賞している³。

また、コイルを乱れなく高密度で巻くことにより、銅損と呼ばれるコイルからの発熱を抑え、製品の消費電力の低減にも寄与している。例えば、エアコンのコンプレッサに採用されたポキポキモータでは、エネルギー変換効率が最大 96%を達成し、電気エネルギーのロスは僅か 4%である。三菱電機はポキポキモータを商標登録し、この呼び名を使った営業活動や企業広告も展開している。

三菱電機グループは、環境に“巻き”で答えを出していきます。閉じてから苦勞しながら巻くより、開いたままカンタンに巻く。そんな従来とは全く逆の発想でつくられているのが、「ポキポキモータ」です。これまでは、閉じた鉄心の内側のせまい部分にノズルを通してコイルを巻いていました。「ポキポキモータ」は鉄心を開節のように分割し、これを反転して広げた状態でコイルを

¹ 大河内記念賞資料 p.1

² 『日経産業新聞』(2003 年 12 月 10 日(1))

³ 「モーター巻線の占積率を上げられるコアの製法」(第 11 回日経 BP 技術賞部門賞 日経 BP 社)「開節型連結コア適用による高効率圧縮機用モーターの開発」(平成 14 年度「機械振興協会賞」財団法人機械振興協会)「スパイラル状連結鉄心によるモータ製造技術」(平成 15 年度日本機械学会賞(技術)財団法人日本機械学会)「直線及び逆反り状鉄心によるモータ製造技術」(平成 16 年度「近畿地方発明表彰」社団法人発明協会)

巻いてから、再び反転してまるめていくことでコイルを高密度化しています。高効率・コンパクト化の実現により、省エネ、二酸化炭素の削減、資源の節約に大きく役立つこのモーターを、三菱電機グループは、エアコンや情報機器、エレベータ、自動車機器など、幅広く展開中です。
<三菱電機のホームページより>⁴

ポキポキモータはどのような経緯で開発されたのだろうか。また、開発過程でどのような技術的困難に直面し、事業化においてどのような課題に直面し、それらの問題はいかに組織的に解決されたのだろうか。まずモーター業界と市場動向および主要なプレーヤーとそのポジションについて触れた上で、開発経緯をふり返ることにしよう。

モーターの種類

モーターは、モーターの容量サイズや駆動方式、そして最終用途の違いによって様々な種類がある(図表 2)。例えば、駆動方式の違いによって、交流(AC)で駆動する AC モーターや直流(DC)で駆動する DC モーターに代表される一般的な回転系モーターと、ステッピングモーターや超音波モーターに大別することができる。AC モーターは、モーターが最終的に組み込まれる用途の違いによって、家電や AV 機器、そして電子機器や情報機器などに搭載される民生用モーターと、半導体製造装置や産業用ロボット、そして様々な加工機械に組み込まれる産業用モーターとに分類されることもある。

AC モーターは、ロータの構造の違いによって同期(シンクロナス)モーターと誘導(インダクション)モーターとに分けられる。同期モーターには、永久磁石型や積層鉄心型などがある。また、AC モーターには、単相誘導モーターや三相誘導モーターがある。単相誘導モーターとは、一般家庭で使われる単相交流で駆動する誘導モーターであり、三相誘導モーターとは、主として工場などの大量に電気を消費する需要者に供給される三相交流で駆動するモーターである。

一方 DC モーターには、大別してブラシ(整流子)付きとブラシレスの 2 つの種類がある。ブラシとはモーターの回転に従って電磁石の極性を切り替えていくための接点であり、ブラシレス DC モーターでは接点を排除する代わりに、ホール素子という非接触のセンサやエンコーダの信号によりモーターの回転角を検出し、電子回路により電磁石に流す電流の極性を切り替えている。ステッピングモーターとは、ステップ動作のような間欠的に動作するモーターであり、超音波モーターとは、磁気の代わりに超音波振動を利用したモーターである。

従来は、ホール素子や電子部品のコストが高かったために、DC モーターはブラシ付きが圧倒的に主流であったが、近年はこれらのコストが改善されてきたのに加えて、長寿命、メンテナンスフリー、ローノイズなどの特長から、ブラシレス DC モーターの需要が急増している。ブラシレス DC モーターの用途としては、パソコンやビデオレコーダの HDD(ハード・ディスク・ドライブ)や自動車のパワーステアリング用モーターなどがあり、1つの機器に何台ものブラシレス DC モーターが搭載されるようになってきている。

⁴ http://www.mitsubishielectric.co.jp/hightech/pokipoki/index_i.html

モーター市場の動向

経済産業省『機械統計年報』によれば、2002年に国内だけで3億4890万個生産され、生産金額は5880億円にのぼっている。そのうち、生産数量の93%、生産金額の52%を占めるのが70W未満の小型モーターであり、その中でも小型DCモーターは、モーター市場全体の生産数量の41%(1億4500万個)、生産金額の28%(1660億円)を占める最も大きな市場セグメントである。また、生産金額ベースでは、それに次いで交流モーターの一つである非標準三相誘導モーター市場(1330億円)やサーボモーター市場(959億円)、そして小型ACモーターの市場(555億円)などのセグメントが大きい(図表3)。ただし、これらの数字はあくまでも国内生産金額であり、かなり過小に見積もった市場規模と見るべきであろう。この業界でも特に小型モーターの分野では、日系メーカーによる総生産量の90%が海外生産によるものであるからである⁵。例えば、ブラシ付きDCモーター市場でトップメーカーのマブチモーターは、1990年代以降中国、台湾、マレーシア、ベトナムで全量生産しており、国内では生産していない⁶。

図表4は、モーターの国内総生産金額とそれに占める70W以上の交流モーターおよび70W未満の小型モーターと小型DCモーターの構成比の推移を示したものである。総生産高は1991年の9484億円をピークにして、それ以降伸び悩んでいる。また、80年代に小型モーターの構成比が上昇する一方で、70W以上の中容量以上の交流モーターの構成比が低下している。

国内の生産規模が頭打ちになっている理由は、激しい価格競争への対応として、多くのメーカーが労働集約的なモーター製造工程の海外移転を図っているためである。中小型モーター分野では韓国・中国メーカー、大型モーター分野ではドイツやスイスの欧州メーカーによる低価格品の国内流入は、価格競争をさらに激しいものになっている。モーターが組み込まれる最終製品の海外現地生産化が、モーター業界の国内空洞化を生んでいるという面もある。

例えば、大型モーターの単価は、75kW以上で1993年から1998年間に約3割値下がりし、1000kW級ではほぼ半値に下落している⁷。特に産業用モーターの場合、多くのメーカーが過剰な生産能力を抱えていると言われている。このことが、モーター業界の再編の契機ともなっている。1999年に産業用大容量モーター分野で国内1位の東芝と2位の三菱電機は大容量モーター事業を統合し、TMAE(現TMEIC:東芝三菱電機産業システム)社を設立したのはその一例である。

国内の需要とそれに伴う設備投資が高度成長期のように伸びない時代において、激しい価格競争への対応として生産性向上を通じたコスト競争力の向上がモーター業界では日々必要とされる。さらに近年では、低トルクリップル・高速応答・低騒音などの高性能化もさることながら、CO2排出規制に伴う高効率化や分解リサイクル性が求められている。生産効率追求か差別化追求かという単純な二律背反ではなく、生産効率を追求した上で競争力のある差別化商品を展開することがこの業界では特に必要とされている。

⁵ 矢野経済研究所(2003)『2003年度版 注目されるモーターの最新市場動向と中期展望』p.45

⁶ マブチモーター(2004)『第63期 有価証券報告書』p.11

⁷ 日経産業新聞『モーターが攻める(中) 伝統を超え協業、欧米に対抗』(1999年4月22日:13)

モーター業界の主要なプレーヤーとポジション

矢野経済研究所の推定によれば、2002年の小型ブラシ付きDCモーターの市場規模が数量ベースで27億5200万台であり、小型ブラシレスDCモーターは7億9100万台と推定されている。また、金額ベースでは、ブラシ付きDCモーターの市場規模が3880億円であるのに対して、ブラシレスDCモーターは3330億円であると推定されている⁸。小型ブラシ付きDCモーター市場で圧倒的な市場シェアを維持しているのがマブチモーターであり、それに松下電器産業が続いている。2001年の生産数量シェアは、マブチモーターが61.8%であるのに対して、松下電器が8.2%であり、それに三菱電機の4.7%が続いている。この市場には、これら3社の他に、アスモ、三洋精密、三協精機、日本電産コパル、東京パーツ工業、日本ミニモーター、ミツバ、自動車電機工業などが参入している。

これに対して、小型ブラシレスDCモーター市場では、日本電産がシェア31.6%でトップ、それに三協精機製作所の13.9%、松下電器産業の10.4%が続いている。これらの3社の他に、ミネベア、日本ビクター、ソニー、三洋精密、ミツハシ電機、東京パーツ工業、キャノン精機、シナノケンシなどがこの市場に参入している。小型のDCモーターは、松下を除けばマブチや日本電産のような大手モーター専門メーカーが大きなシェアを握り、中小メーカーが残りのシェアを分け合う構図となっている。

モーター業界の中でも最大市場セグメントである小型DCモーター市場は、松下電器を除いてモーターの外販を主体とする専門メーカーが支配する市場である。三菱電機は上記の推定シェアにおいて名前さえ登場しない。その理由は、第一に三菱電機のモーター事業は社内需要を主体としており、社内向け製品へのモーター製品を数多く展開していること。また、三菱電機は、東芝や日立、そして富士電機に代表される大手重電メーカーと同様に、歴史的に容量で言えば中型以上のモーターに相対的に強く、駆動方式で言えばACモーターに、そしてサーボモーターや標準誘導モーターのような産業用途のモーターが主体であるからである。

同社のモーター事業は、特定の応用分野で強みを発揮している。同社が電動用パワーステアリング用モーター分野で市場の65%を超えるシェアを握っているのは、その一例である⁹。また、2002年の産業用サーボモーター市場では、生産数量ベースでのシェアで20.4%のファナック、19.9%の安川電機に次いで14.5%と3位のポジションに位置している。また、2002年の産業向け高効率モーターの市場では、生産数量ベースで27.9%の東芝と24.7%の日立製作所を押さえて42.1%のシェアを握っている。

ポキポキモータとは何か

ポキポキモータとは、三菱電機独自のステータ構造(新型の分割鉄心構造)を持つモーターの総称である。鉄心構造と巻線方法に着目して製品設計を根本的に見直すことにより、設計と製造の双方にメリットを持つのがこのモーターの特徴である。分割されているものの相互に連結した鉄

⁸ 矢野経済研究所(2003:3)

⁹ 「三菱電 電動パワステ用モーター量産」『日刊工業新聞』(2003年10月28日(4))

心を直線状または逆反り状に展開した状態で巻線し、丸めることで製造される。ポキポキとは、鉄心を開いた状態でコイルを巻き上げ、最後にそれを<ポキポキ>と折り曲げて円形にするという製造方法に由来している。

最初のポキポキモータは、1993年にFDD(フレキシブル・ディスク・ドライブ)向けモーター開発プロジェクトの過程で誕生した。ブロック薄肉連結型ポキポキモータと呼ばれるこのモーター開発を契機にして、最終製品の用途に応じて様々なタイプのポキポキモータが開発された。例えば、1994年に薄肉連結型ポキポキモータ、1995年に逆反り型ポキポキモータ、1998年に関節型ポキポキモータ、1999年に関節円弧型ポキポキモータ、2001年には提灯型ポキポキモータが開発され、モーターの省エネ高効率化、省資源化、軽薄短小化、高性能化のニーズに応えることとなっている(図表5)。

ポキポキモータが組み込まれる最終製品も当初のFDDから、薄肉連結型はFA機器や家電機器用として展開され、逆反り型はエアコンのファンモーターとして、関節型はエアコンの圧縮機モーターとして、関節円弧型はエレベータ用薄形巻上機の大口徑DD(ダイレクト・ドライブ)モーターとして、提灯型はAV機器向けモーターとして展開されている。様々な分野で使われるのも、モーター設計者のみならず最終製品の設計者にもたらすメリットが大きいからでもある。

モーターは、ロータ(回転子)とステータ(固定子)の間に生じる磁力によってロータが回転する。モーターの回転力は、ロータとステータとの間で発生する磁力の大きさによって規定され、磁力の大きさは、ロータやステータに巻かれる銅線コイルの密度によって規定される。つまり、高密度に巻線が可能であれば、小型で高効率なモーターを製造することが可能となる。

ブロック薄肉連結型ポキポキモータの開発以前に、コイルの整列性や巻線速度の改善するための手法として一体型鉄心を分割する方式があった。この手法は、ステータ鉄心をバラバラにすることで巻線が容易になるため、コイルの整列性や巻線速度を向上させるメリットがあった。しかし他方で、鉄心を完全にバラバラにすることは、部品点数の増大やコイル終端線の接続数が増える等の生産性低下をもたらすという新たな課題を生んでいた。

三菱電機では、ポキポキモータというステータ鉄心を完全にバラバラにせず、完全に連結した形で巻線を可能とした新たなステータ構造が発案されたのであった。分割鉄心構造を採用しつつも、ステータ鉄心が相互にバラバラではないところに、新型鉄心構造と呼ばれる理由がある。ポキポキモータは新型分割鉄心構造を採用することで、巻線性を改善し、生産性向上を可能にした。また、コイルの整列性と高密度化によってモーター特性の改善も実現したのである(図表6)。モーターの製造効率とモーター特性の同時追求は、「巻いてからポキポキ折り曲げる」という新たな発想によって初めて可能となった。

中津川製作所飯田工場の要請

ポキポキモータとそれに伴う新しいモーター製造法の開発は、三菱電機生産技術研究所(現:生産技術センター、尼崎市)の中原裕治を中心に進められた。中原のポキポキモータの着想のきっかけは、1990年代初頭の三菱電機中津川製作所での経験に端を発している。その後1993年に

三菱電機郡山製作所での FDD(フレキシブル・ディスク・ドライブ)用スピンドルモーターの開発過程で花開くこととなる。

大学院で生産機械工学を専攻し金属切削を研究していた中原は、1981 年に大学院を修了し、1988 年まで造船メーカーの技術研究所で溶接ロボットの開発に従事し、1988 年に三菱電機生産技術研究所(現生産技術センター)に転職した技術者である。中原はモーター設計・製造に無縁の技術者であった。モーターに関わるきっかけとなったのは、1989 年の三菱電機中津川製作所から三菱電機生産システム技術センター(現 生産技術センター)への依頼であった。それは、換気扇用新型モーター開発に伴う生産設計および製造工程の自動化の支援要請であった。

三菱電機中津川製作所は、後述する FDD 生産拠点となる郡山製作所と同じく、1943 年に名古屋製作所の疎開工場として操業を開始し、換気扇や扇風機やモーターの生産拠点として成長してきた事業所である。1945 年から換気扇の生産を始め、50 年以上モーター改良を続けてきた。現在では、業界最大手のジェットタオルの生産拠点でもあり、1998 年からは太陽電池の生産拠点でもある。中津川製作所所轄の飯田工場は、換気扇の生産拠点として 1974 年に設立され、換気扇需要の約三分の一強を生産する国内でも有数の工場である¹⁰。

この飯田工場では、取付場所や取付状態の違いによって多様な種類の換気扇用単相モーターが数多く作られており¹¹、図表 7 に示されるように一体型ステータ鉄心にコイル巻落し・インサート方式による巻線が行われていた。あらかじめ巻かれたコイルを一体型鉄心のスロットに自動挿入することによって自動化・省力化が可能となったものの、バラバラになったコイル端末線は手作業で外部リード線と半田接続することで結線処理されていた¹²。当時このコイル端末線の結線処理には、多くの人手を要し、完全自動化のボトルネックとなっていた。この労働集約的な工程の海外シフトも考えられたが、多数の機種揃えと短納期が求められる換気扇市場では、国内生産での自動化を志向する必要があった¹³。

「常識」への挑戦

「何と人が多いラインかと、最初はびっくりした」。1989 年当時飯田工場を訪れた中原の最初の印象であった。飯田工場のモーター製造ラインの光景は、当時の中津川製作所製造管理部長の言葉を借りれば「まるで電線のかたまりと格闘する人間の群れ」であった¹⁴。内側に仕切りがあるドーナツ状の鉄心に、コイルの束を力任せに押し込む作業を自動化できたものの、ボサボサの髪の毛のようにコイルから飛び出した端末線をつまみ出し、一つ一つリード線につなげる作業は人間にしかできなかった。

中津川製作所主体に開発プロジェクトが発足し、図表 8 に示される従来の一体型鉄心を外輪鉄心と内輪鉄心とに分割した内外輪分割鉄心によるモーター製造法が考えだされた。その後、1989 年に中津川製作所、中央研究所(現 先端技術総合研究所)、材料研究所(現 先端技術総合

¹⁰ 「三菱電機(飯田工場)―換気扇生産をCIM化」『日経産業新聞』(1992 年 10 月 7 日(7))

¹¹ 中原(2000:14)

¹² 中原(2004:1)

¹³ 中原(2000:14)

¹⁴ 「素人感覚で無人化を実現 モーター設計に革新」『日経産業新聞』(1993 年 5 月 24 日(9))

研究所)、生産技術研究所(現 生産技術センター)の一大プロジェクトが発足し、研究者と設計者と生産技術者が連携できる体制ができた。

生産技術研究所から参加したのが、生産システム部第 2 グループマネージャーである東健一(現 常務執行役 生産システム本部長)とその部下の春日芳夫(現 生産技術センター工機部長)と中原であった。東もまた大学では機械工学を専攻し、中央研究所から生産技術研究所に 1970 年の創設と同時に異動し、一貫して生産技術畑を歩んできた技術者であった。

東は、生産技術者の立場から「全自動化」と「徹底した直材ミニマム」を前提にした生産設計が重要であることを主張し、「進展がなくても月一回のミーティングを開催する」ことを貫いた。ミーティングでは、モーター設計者が製品知識の先生役を果たし、生産技術者が新規な(珍奇な)アイデアを提案するなど、専門分野や職場の階層にとらわれない自由な討議で生産設計アイデアが盛り込まれていった。

モーター設計者は、モーターの性能向上を追求して設計する。生産技術者は、設計者が書いた図面を前提に生産効率を追求する。結線工程における自動化の困難さは、既存のモーター製造法の延長で生産性向上を目指す生産現場と、モーター製造法の根本的な改革まで立ち入ることのないモーター設計者の双方に原因があった。しかし、このプロジェクトでは、「モーター作りには人手がかかるのが当然」という工場の「常識」を払拭し、開発初期の段階からモーター設計者と生産技術者が互いの制約を理解し、作りやすさを念頭において製品構造の根本を見直すことができた。それは、モーター設計・製造の常識への挑戦であった。

プロジェクトの成果により、鉄心を内輪と外輪に分割することで、巻線は内輪鉄心の外側からフライヤ巻き方式により高速(5000rpm)に巻線でき、しかも、巻線機のフライヤノズル先端を NC 駆動することで、コイル始末端を絡げピンに自動接続することが可能となった。

また、ロータを内輪鉄心に収めた状態でコイルが最短経路となるように巻線することで、コイルに使用する銅材を従来比約 50%減らすことが可能となった。つまり、鉄心を分割することに加え、ロータ巻き込みにすることで、モーターの基本構造ががらりと変わり、モーター特性を飛躍的に向上させることができたのであった¹⁵。プレス機による鉄心の打ち出す工程から、巻線工程、鉄心の圧入組立、コイル端末とリード線の接合まで、全ての工程の自動化が実現することとなり、生産性が約 6 倍に向上した。春日と中原は、コンデンサをモーター内の端子台プレートに配置する構造に基づいて、コイル端末が絡げられたピンとコンデンサやリード線を自動接続する配結線自動ライン(全長20m)を開発し、飯田工場に導入した。

内外輪分割方式を採用した単相誘導モーターは、1990 年 5 月より飯田工場生産が開始され、92 年にサイズ・出力の大きいモーターに機種拡大しており、飯田工場生産される多種多様の換気扇に対応して、年間 200 万台以上が生産されることとなった¹⁶。鉄心を分割してモーターの生産効率とモーター特性を向上させる内外輪分割鉄心構造は、のちのポキポキモータと新たなモーター製造法確立の発想が生まれる下地となった。

¹⁵ 中原(2004:1)

¹⁶ 中原(2000:24)

中原にとってここで得た数々の経験の意義は大きかった。あるプロジェクト会議の時、モーター設計者から換気扇のファンがロックするとコイルが異常発熱するという説明がなされた。東はその場で換気扇にボールペンを突っ込んでファンを人為的にロックさせるという実験を行った。しかしながら、異常発熱という現象は実際には観察されなかった。実験結果を信じ、ベテラン設計者の言葉を鵜呑みにしないという中原の信条は、常識に挑戦し原理に立ち返って問題を検討することで培われた。飯田工場でのモーター製造の自動化の経験は、それから3年後の1993年にポキポキモーター誕生の土台となる。きっかけは郡山製作所におけるFDD事業であった。

郡山製作所におけるFDD事業

三菱電機郡山製作所は、戦時中の1943年に軍需増大と疎開目的で操業を開始し、高度経済成長期にはダイヤトーン(DIATONE)の名で知られたスピーカーに代表される音響機器の生産を中心に成長してきた事業所であった。この事業所に訪れた最初の転機は、1980年代初頭のオーディオ不況であった。1982年には当時約900名いた従業員の約3割にあたる260名を、三菱電機鎌倉製作所(鎌倉市)、計算法製作所(同)、通信機製作所(尼崎市)、北伊丹製作所(伊丹市)の四工場に配置転換した¹⁷。1983年春には当時需要が拡大していたFDDの量産工場として、計算法製作所からFDD事業が移管されたのであった。

三菱電機の事業所の中でも、郡山製作所のように事業内容を大きく変えながら存続してきた事業所はあまりない。当時、郡山製作所には、FDD事業以外には年間数十億の売上規模のスピーカー事業しか残っておらず、そのスピーカー事業もラジカセの台頭などにより、縮小傾向にあった。郡山製作所を発展させるためには、FDD事業の展開に期待するしかなかった。当時のFDDのディスクサイズは、大型コンピュータ用として多く使われる8インチおよびOA機器向けの5インチが主流の時代であり、パソコン向けの3.5インチが出始めた時代であった。郡山製作所でFDDの量産を開始した当時は、5インチFDDのユニット価格が約35,000円もした。

1985年春にはこの郡山製作所のFDDの月間生産量が15万台に達し、コンピュータ向けFDDの世界的な生産拠点となり¹⁸、1986年には従業員960人のうち8割がFDDに配置されていた¹⁹。このFDDの生産移管によって、郡山製作所は名実ともに音響機器からFDDの生産拠点として転換をはかることとなったのである²⁰。1988年には1987年から5.25インチのパソコン用FDDの生産を始めたタイ工場(タイメルコマニュファクチュリング)²¹と合わせて、1988年には世界シェア7%²²となり、最盛期の1989年には郡山製作所のFDDは月産40万台²³にまで成長した。

¹⁷ 「三菱電、オーディオ不況で郡山工場の3割260人を配転」『日本経済新聞』(1982年6月5日(6))

¹⁸ 「三菱電機郡山、効率化で生産増強——主要部品の内製化促進」『日本経済新聞』(1985年3月14日 地方経済面(東北A):2)

¹⁹ 「三菱電郡山、63年度生産500億円に——FDD・スピーカー増産」『日本経済新聞』(1986年8月10日 地方経済面(東北A):2)

²⁰ 雇用の配置転換による事業転換の例として、工場内クレーンを製造していた福岡製作所(福岡市)の半導体工場への転換、火力発電機の長崎製作所(長崎市)の大型映像装置の拠点としての転換などの例がある(「企業内構造調整(産業が変わる・第5部エレクトロニクス:4)」『朝日新聞』1987年2月6日:8)

²¹ 「三菱電 近く新会社5.25インチのFDD生産→タイに全面移管」『日経産業新聞』(1987年7月23日:1)

²² 「三菱電機、タイでFDD生産——来春に月産15万台体制」『日経産業新聞』(1988年8月22日:2)

²³ 「三菱電・情報通信機器、生産体制を再編」『日本経済新聞』(1992年3月22日:5)

比較的市場参入が早かった郡山製作所の FDD 事業は、8 インチから 5 インチの時代には三菱電機と提携関係にあったスペリー社との FDD 生産をきっかけに、3.5 インチを主体とするパソコン用 FDD では、米国コンピューターメーカー数社を主要な納品先として成長していった。主要な納品先であった米国コンピューターメーカーは、早いうちから 720KB/1.44MB 共用 (2 モード) の FDD を求めており、それに迅速に答えたのが三菱電機であったところから、信頼関係ができていった。

磁気ヘッドや小型モーターなどの部品を社内の他の事業所や社外メーカーから調達し、それらを組み立てるところから FDD の量産を開始した郡山製作所は、コスト削減を推し進め、部品の共通化を手始めに、筐体もアルミダイキャスト製から板金加工への変更などのコスト削減に取り組み、また磁気ヘッドなどの主要部品の内製化に取り組んでいった (図表 9)。

しかしながら、FDD 市場で激しい競争に起因した急激な価格低下によって、コスト削減の方策は徐々に行き詰まっていった。3.5 インチの FDD を例にとると、1992 年時点の材料費を 1994 年に 25% 削減したところで、ほぼ手を尽くした感があった。特に、FDD を駆動させるスピンドルモーターは、1986 年時点で直接材料費の約 20% を占めていたが、1994 年には 30% を占めるようになり、コスト削減のボトルネックとなっていた (図表 10)。

また、パソコンの小型化やノートパソコンの登場により、FDD も薄型化が求められるようになっていった。3.5 インチ FDD では、三菱電機は 1987 年に従来製品で厚さ 32 ミリだったものを 25.4 ミリまで圧縮、重量も 550 グラムから 450 グラムまで減らした新製品を発売した²⁴。その後、1991 年には厚さ 14.8 ミリの製品を投入、競合するティアックも 12.7 ミリの製品を、またセイコーエプソンが 15 ミリの製品を投入²⁵するなど、薄型化競争が激化していった。

もう一つの転機

オーディオ不況を契機に主力製品を音響機器から情報機器への転換を図ったのが最初の転機であったとすれば、もう一つの転機は 1992 年に訪れた。それは、中津川製作所の FDD 用専用小型モーターの生産からの撤退であった。当時中津川製作所では、郡山製作所に向けて薄型 FDD に組み込むことを前提としてステータの磁気ヘッド動作空間を切り欠いた専用設計のインナーロータ型モーターを量産していた。

FDD のスピンドルに使われるブラシレス DC モーターは、その構造からアウターロータ型、インナーロータ型、及び面対向型の 3 つのタイプがある。最もポピュラーで構造が簡単なアウターロータ型は、日本電産や三協精機などモーター専門メーカーが得意としており、海外生産も進んでいる。また、面対向型はソニーや日本ビクターなど AV 機器メーカーが得意としている (図表 11)。

一般に、FDD 用スピンドルモーターとしてはアウターロータ型が主流であった。しかしながら、FDD の薄型化に対応するためには、インナーロータ型が最も適した構造である。なぜなら、ロータ外周と磁気ヘッドとの干渉を避けるために、ロータ外径は制約を受ける。アウターロータ型と面対向型の場合、ステータ外径も制約を受けるが、インナーロータ型であれば、磁気ヘッド動作空間を切

²⁴ 「三菱電機、小型軽量の 3.5 インチ FDD」『日本経済新聞』(1987 年 3 月 4 日:8)

²⁵ 「3.5 インチ FDD 薄さを競う、各社相次ぎ新製品」『日本経済新聞』(1991 年 7 月 22 日:11)

り欠けばステータ外径を制約なしに大きくできる。よって、インナーロータ型であれば、同トルクにおいて安価な磁石が利用でき、直材費を抑制できるというメリットがある。しかし、インナーロータ型ステータにコイルを巻線するには、ステータ内側の狭隘なスペースから巻線ノズルをスロット開口部に通過させて磁極歯周りに駆動する必要がある、コイルの整列性や巻線速度に限界があった²⁶。

郡山製作所で当時 FDD 用磁気ヘッド設計課長だった三瓶利正(現 三菱電機ライフサービス郡山支店長)は、生産設備を中津川製作所から引き取って、小型モーターの量産を継続したいと考えていた。当時の FDD は薄型化の要求が年を追う毎に強くなり、スピンドルモーターメーカーもモーターの薄型化に注力していた。他社に先駆けて FDD の薄型化を実現するには、競合 FDD メーカーも使えるような汎用品ではなく、専用モーターが必要であった。社内の中津川製作所の撤退は、FDD を生産する郡山製作所にとって、競合他社への大きな差別化武器を失うことにも等しかった。

三瓶は 1966 年に郡山の工業高校の電子科を卒業し、群馬でモーターやオーディオ機器を製造していた電機メーカーに就職し、その後 1973 年に三菱電機に転職した技術者である。当時、三菱電機の郡山製作所では、スピーカーやテープレコーダなどのオーディオ機器の開発・製造を行っており、三瓶もテープレコーダの生産現場に配属された。三瓶は、電気と機械の橋渡しを担う制御工学の分野を中心に、生産の自動化など主に生産現場を歩んできた。モーターの量産を引き取る意義について、三瓶は次のように述べている。

「この頃、FDD の製造コストのうちでモーターが占める割合が大きくなっていました。まるで、モーターを売るために FDD を売っているようなものであり、顧客の価値に基づく対価になっていないとの思いがありました。また、我々は、コンピューターメーカーから求められた FDD のスピンドルモーターの仕様を、そのまま中津川製作所や他のモーターメーカーに提示して部品調達しており、モーターの理解が不十分なままで、コスト削減への取り組みも十分に出来ていませんでした。キーデバイスとしてモーターを内製化することで、主体性をもってコスト削減や設計の簡素化、過剰品質の防止などに取り組むことが必要な時期に来ていたのです²⁷。」

社外のモーターメーカーの対応が保守的だった点も三瓶には不満であった。例えば、当時あるモーターメーカーに対して、1つのモーターに2つ組み込まれている軸受け(比較的高価なボールベアリングが使用されていた)の許容誤差をある程度緩和して安価なオイルベアリングに変更しても、モーター全体としての軸のブレは許容誤差以内に収まるのではないかと提案したことがあった。

しかし、モーターメーカー側としては世界中に出荷しているモーターで品質問題を起こすことは、世界規模の回収や問題解決が求められるため、危険なコスト低減案であるとして応じなかった。三

²⁶ 『三菱電機技報』・Vol.76・No.6・2002 <http://www.mitsubishielectric.co.jp/giho/0206/0206113.pdf>

²⁷ 2004年3月16日、郡山製作所三瓶氏へのヒヤリングによる

菱電機だけが納品受け入れ後に自主的に軸のブレが許容誤差以内であることを全数検査することにしても、他社もそれに応じなければ足並みが揃わないということもあった。三瓶は再三の説得を続け、ようやくモーターメーカーに試作をさせて、問題がないことは確認できた。その後、モーターメーカーは三菱電機だけではなく、他社に対しても同じコスト低減措置を展開するようになっていった。

郡山製作所でモーターを内製したいとする三瓶の主張に対しては、社内では中津川製作所が既に撤退を決めた小型モーターの生産をそのまま郡山製作所に移しただけで成功するとは考えられず、郡山製作所への事業移管は理解が得られなかった。

モーター内製化の提案

しかし逆に、三瓶は郡山製作所でのモーター内製化をきっかけに、「組立て作業以外」のキーデバイス技術を郡山製作所の中に育てたいと考えていた。そうでなければ、郡山製作所は将来有利な事業展開が困難となる。1993年1月に、困り果てた三瓶は、モーターの構造を大きく変更し「FDD用モーター」ではなく「FDD用アクチュエータ」と表現も改め、新たな事業という形で郡山製作所への生産ラインの導入計画を書き上げ、経営上層部に提出した。

その内容は、中津川製作所からモーター事業を引き取るのではなく、新たにアクチュエータ事業を郡山製作所で興すというストーリーであった。但し、その実現方式は中津川製作所が最後に生産していたような通常のインナーロータ型ではなく、生産設備投資を抑えるためのアイデアとして、市販のチップコイルを基板上に面実装することでステータとし、チップコイルの両端をロータマグネットで囲む方法を考え出した。このアイデアは事後的にふり返ると未熟なものであり、プロジェクト承認後技術的な問題に直面することとなった(図表12)。

丸の内の本社で行われた設備導入計画の審議会では、三瓶自らが情報通信システム事業本部長の遠藤裕男(当時)に事業化の内容を説明した。遠藤の周りには、技術に精通した技術者や関係本社スタッフが20人も座っていた。ここで技術的に細かな点を突かれると説明がつかない。三瓶はFDD事業に賭ける意気込みと熱意、それから成功への信念だけを繰り返し訴え続けた。

話を聞いた遠藤は、中津川製作所の開発部長、精密小型モーター製造部長として小型モーターの開発を立ち上げた功労者である山崎宣典に良く相談するよう条件をつけた上で、郡山製作所でのモーター事業化にOKを出した。遠藤の指示は、まったくモーターの技術者を持たない郡山製作所がモーターを事業化することに対し副社長と言う立場で、三菱電機のモーター関係者を集め、郡山製作所を支援させる配慮で実に遠藤の親心であった。これにより、設備導入計画が承認された。山崎はその頃既に、エアコンなどを生産する静岡製作所の所長に転じていたが、社内に分散しているモーター開発の経験者に声をかけ、技術的な相談に乗るように指示してくれた。また、郡山製作所の人事担当に対しては、人材の集中投入を進言してもくれた。山崎は、自らが立ち上げた小型モーター事業の郡山製作所での存続を喜んだ。

生産技術センターの参加

郡山製作所のモーター内製化のプロジェクト・メンバーは、総勢 20 名にもなった。量産技術については生産技術センターに、機構・回路設計についてはパーソナル情報機器研究所(現 情報技術総合研究所)に研究依頼をした。三瓶から当初依頼された内容は、図表 12 に示されるチップコイルの表面実装方式の研究であった。棒状の鉄心にコイルを巻いた市販のチップコイルをプリント基板の上に円形に並べて、そのまま炉に入れて接着するという量産工程の設計依頼であった。市販のチップコイルを使用することで、量産コストを抑制するところに狙いがあった。

生産技術センターは、1970 年に設立された生産技術研究所から 1994 年に改組された全社的な研究開発組織である。このセンターの使命は、現行のモノ作りの方法に縛られない新しい製造技術の開発である。全国に分散する工場を対象に、製品開発における生産設計、自動機開発や生産ライン立上げ支援、製造に関わる要素技術開発や試作支援、半導体プロセスの改善、JIT活動推進や品質・良品率向上支援、さらにはキーパーツの開発を主たる業務としている。

工場側の設計技術者の主眼は品質の確保にあり、その観点で製品を開発する。また、他社動向を踏まえた製品企画も工場側の設計技術者が主体となる。即ち、市場に近く、顧客に近いのが工場側の設計技術者である。これに対して、生産技術センターは要素技術をもって製品設計や量産ラインの立ち上げを支援する。工場側には事業責任があり、どうしても保守的になる。これに対して、生産技術センター側はその存在価値をアピールするためにも、製品機能の本質に迫ったアイデアや革新的なアイデアを打ち出すような場面がある²⁸。

当初、郡山製作所から生産技術センターへの研究依頼の計画工数は 0.1 人分という、プロジェクト参加の理由付けだけのものであった。三瓶も最初は、どのような支援が受けられるのか、またどのような研究成果が期待できるのか、よくわからなかったのである。(しかし、その後 2~3 年間で数億円の予算規模になってゆく)

トルク計算の誤りとひらめき

一方、郡山製作所の内部でも、FDD 事業に従事していた技術者らを再編成して、モーターの内製化に対応した。三瓶のもとで磁気ヘッドの設計を担当していた阿久津悟(現 姫路製作所)もその一人で、同じ「磁気」ということで急遽モーターの技術者に仕立て上げられていた。

FDD 用モーターを内製するプロジェクトを立ち上げた当初から三瓶の頭にあったのは、アウターロータ型モーターのステータの代わりに、チップコイルを基板に表面実装する方法であった。この方法について、計算してみたところでは、チップコイルによる方式はモーターとしてうまく回り、十分なトルク(回転力)も得られる見通しが得られた。三瓶らは、プロジェクト会議を重ね、実現方式を検討していった。

1993 年 7 月のプロジェクト会議の前日、三瓶らはいかねてから検討してきたチップコイルによる方法で実際に試作をしてみた。プロジェクト会議で、試作品が回るところを皆に見せたかったのである。ところが、回してみるとどうしても試算通りのトルクが出ない。棒状のチップコイルを円形に並べ

²⁸ 2004 年 2 月 3 日、生産技術センター中原氏の講演による

ただけという構造上、磁束が乱れてしまっていたのである。そこであらためて机上で検算をしてみると、以前の計算は 1 ケタ計算間違いをしていたことが判明した。実際には当初の計算結果の 1/10 のトルクしか出なかった。

しかし、プロジェクト会議は翌日に迫っている。そこで、三瓶はとっさのひらめきで、そのモーターのチップコイルの鉄心を UVW 相の 3 本 1 組ごとに分割し、その 1 組だけでもモーターとして回るかどうかだけ、急遽実験してみることにした。三瓶は「恐らく回るはず」と考えた。実際、3 本 1 組のチップコイルだけでもモーターが回ることは確認できた。DC ブラシレスモーターは、U 相、V 相、及び W 相と呼ばれる 3 つの磁極が順番にロータのマグネットを引き付けてゆくことで、回転力を発生させる。原理的には、UVW 相が最低一組あれば回転力は発生するのである。もし、UVW 相の組が複数あれば、それだけ回転力が倍増されることになる。

翌日のプロジェクト会議では、部長級の間も含めて全社から 20 人以上が集まった中で、三瓶はとりあえず無難にことを進めた。あくまでこの時点ではチップコイルによる方式であるとして、それをインナーロータ型とするかアウターロータ型とするかをその場の主題とし、インナーロータ型の方が薄型化に適するという結論をもってプロジェクト会議を終えた。それまで検討を重ねてきた方式が、今さら駄目だとは言い出せなかったのである。チップコイルによる方式を前提として、その周辺の課題の検討を中心にして会議を乗り切ったのであった。

プロジェクト会議の後、郡山市街で懇親会が行われた。その席で、三瓶は中原だけに計算間違いを打ち明けた。「チップコイルを使用した方式ではモーターは回らない。もう 1 度相談に乗って欲しい。」中原は、翌日は静岡に移動する予定であったが、郡山製作所で午前中を過ごすことにした。この頃、実は中原の方でも逆提案の機会をうかがっていたのである。中原は次のように言う。

「プロジェクト会議に先立って、バラバラのチップコイルを組み立てる方法は、生産設計としては下手なやり方であり、気に入りませんでした。チップコイルごとに 2 つ出る終端線を全て半田付けせねばならないのも、生産性を悪くするものでした。生産技術の観点では、この方法は部品点数を増やし、作業工数を増やすものとして、上手な設計とはいえなかったのです。それに、元々の研究依頼の内容は、チップコイルの表面実装方式の研究だったのですが、自分は表面実装の専門家でもなかった。だから、せめてチップコイル間の渡り線だけでも切らずに連結した薄肉連結チップコイル方式(図表 13)を逆提案しようと考えていました。表面実装の技術は苦手だったので、代案を出して逃げようとしたのです²⁹。」

翌日の午前中、中原は三瓶の席を訪ね、2 人だけの相談が始まった。中原がステータの一部が切り欠かれてもモーターは回るのか、と尋ねたところ、三瓶は UVW 相 3 本 1 組の鉄心だけでもモーターが回ることを中原に教え、3 本 1 組の鉄心を円形に配置する方法を提案した。ところが、3 本 1 組の鉄心を円形に配置する方法においても、バラバラの鉄心を組み立てるのはうまいやり方ではない。それぞれの鉄心に巻いたコイルの終端を結線する作業も煩雑になる。何とか最初から 1 つ

²⁹ 2004 年 2 月 3 日、生産技術センタ中原氏の講演による

に繋げられないか。——「それでは、3本1組の鉄心を1ブロックとして、ブロック同士を薄肉で繋ぐ方式ではどうか。それなら巻線も容易になる」と中原が言い出した。

これが、ポキポキモータのアイデアが生まれた瞬間であった。ブロック同士は薄肉で連結した一体のものとしておき、各ブロック毎に巻いたコイルも切らずにブロック間を渡してゆく、そして最後に薄肉部をポキポキと折り曲げるというアイデアである。これなら、部品点数を抑え、またコイルの結線作業も最小限にできる。(図表 14)。ステータコアを直線上に展開可能と言う点でバラバラのようで、完全にはバラバラではないというブロック薄肉連結型というアイデアは、全く思いつきで生まれたものではなかった。それは、特許検索で遭遇したチップ型インダクタに関する他社特許にヒントを得たものであった。それは、1本のコアに連続的に巻線してから複数のインダクタに分離することにより、インダクタの生産性を向上させる製造法であった。インダクタ(電子部品)というモーターとは異なる分野にモーター製造技術があったのだ。それは、中原自身が鍵となる他社特許に常に目配せし、自らが「パラパラ」と呼ぶアイデア創出法(常日頃からパラパラ漫画のように特許資料をめぐっておく)による地道な努力と準備の賜物でもあった。

しかし三瓶は、それまでにモーターメーカー等と交渉してきた経験などから、この生産方式ではモーターとして重要な真円度が出せないのではないかという不安を持った。鉄心を円形に折り曲げる際に歪みが生じたり、その加工誤差が大きかったりすると、モーターの回転ムラの原因となるのである。一方、チップコイルによる方式が駄目と判った今となつては、三瓶は何にでもすがりたい心境でもあった。どうせ他にアイデアはなく、この方法にかけてみようと思った。

三瓶は、部下にインナーロータ型ステータを糸鋸で3本1ブロックとなるように分断することを指示し、実測によってモーターがその影響を受けずに回ることを実証した。時を同じくして、中央研究所(現 先端技術総合研究所)のグループマネジャー阪部茂一(現 先端技術総合研究所主管技師長)によって、バックヨークの寸法を確保することでUVW3本を1ブロックとすることがモーターの特性に影響を及ぼさないことを磁界解析で確認した。

パーソナル情報機器研究所の橋本昭(現 生産技術センター)は、早速に試作を繰り返し、モーターの特性評価とFDD本体へのビルトイン構造の検討を進めていった。その中で、鉄心の薄肉部のスプリングバック(復元力により外側に開こうとすること)が作用する範囲内で樹脂製プレートの枠内に押し込める方法により、当時求められていた誤差 0.2mm 以内の真円度に収めることができた。

1993年9月、郡山製作所のFDD用モーター内製プロジェクトは、ポキポキモータの量産ライン構築に向けて動き出した。ポキポキモータにより巻線の困難さを解消することで、量産にかかるコストを抑制できる見通しが立ち、さらにコイルの整列巻きが可能となるため、高いトルクとエネルギー効率も同時に実現できる見通しが立った。

さらに幸いなことに、インナーロータ型のポキポキモータは、磁気回路が過不足なく形成できるという理由で、社内でモーター磁界解析の権威者であった阪部の支持を得ることができた。社内での阪部の説得力は大きく、当初のチップコイルによる方式からの軌道修正は速やかに行われた。三瓶は、昼間は仕事仲間と囲まれて慌ただしく過ごすものの、夜8時になり周囲に誰も居なくなる

と、体中にじんま疹ができたと言う。そのような時には、職場近くのゴルフ練習場で1時間ほど打ちっぱなしをして気分転換し、残る技術課題の対策やモーター量産ライン立ち上げまでのプレッシャーに耐えた。

巻線機の自社開発

郡山製作所のFDD事業は、1995年頃には米国大手のコンピューターメーカー数社から大量の受注を獲得するまでに拡大していた。そして、1996年3月に出荷する新型FDD(MF355F-2)から、ポキポキモータを採用することが決まった。

従来、鉄心にコイルを巻くための巻線機は専門の巻線機メーカーから購入していた。競合他社も含めモーターメーカーは皆、同じ巻線機メーカーから巻線機を購入しており、それがモーターメーカーの差別化の障壁になっていた。同じ巻線機を使用している限りは、生産効率においても、また巻線精度(品質)においても、他社との差はつけられない。さらに、それまでモーターメーカーは独自の製品を開発しても、巻線機メーカーを通じて技術が陰に陽に競合他社に流出していた。巻線機メーカーは、あるモーターメーカーの新しい生産ラインの技術を、他のモーターメーカーにも紹介することで、自社の巻線機の販売を促進していた。業界内でモーターの生産ライン技術の情報が巻線機メーカーに集まる構図となっていたのである。

また、従来の鉄心製造技術に依拠した一体型鉄心は巻線が困難で、専門メーカーから購入した巻線機を使ってもきれいに巻けず、コイルの中は「すかさすか」であった。原点に立ち返って巻線工程をシンプルにするには、新型の分割鉄心構造を採用すると同時に、専用の巻線機を自社開発する必要があった。単純で高速な巻線機は、従来は同時3本×毎分300回転だった巻線能力を、同時12本×毎分1200回転まで引き上げることが可能となり、つまり巻線機1台当たりで16倍の生産性を実現した。従来の巻線機メーカーは「製品設計を変えて、それに合った新型製造装置を作る」ことは出来ず、顧客であるモーターメーカーの製品設計に合わせて巻線機を作るしかなかった。三菱電機はモーターメーカーとして巻線機の自社開発に踏み込むことで、既存の巻線機による制約を解いたのである(図表15)。

中原らは元々「装置開発屋」を自負しており、巻線機の自社開発は得意とするところであった。しかし、生産技術センターが開発した巻線機はなかなかうまく動作しなかった。もともと鉄心の部材と巻線ノズルのクリアランスが70 μ mしかない設計だったために、数万円もするノズルが頻繁に折れる問題に悩まされたのである。その対策に、中原の部下である三宅展明、秋田裕之らは、巻線ノズルの軌跡を鉄心の断面形状に合わせて四方に丸みのある長方形(従来は円形)に変更して、鉄心とノズルのクリアランスを広げ、そのクリアランス値をもとに装置の各ユニットに公差配分を行い、安定して稼動する改良型の巻線機を開発した。

巻線機のトラブルへの対処や工夫は生産技術を洗練させ、技術者を育てた。巻線機のような装置は、個別設計、個別製造のいわゆる一品モノであり、なかなかうまく立ち上がらない。生産技術センターの技術者は、徹夜をしてでも量産ラインを期日までに立ち上げなければならない。この苦労が装置の改良だけでなく製品設計上の工夫にも踏み込んでゆく動機につながる。これがもし、

装置を自社開発していなければ、技術者は装置メーカーに電話をして督促をする「手配師」になるだけである。

また、巻線機は複数の巻線ノズルを一括駆動して、同時並行作業的に巻線を行うものであるが、その同時並行作業をする単位について三瓶が3本×5段(同時15本)を要求したのに対して、中原は不慮のトラブルで巻線機が停止した場合の量産への影響度等を考慮し、3本×4段(同時12本)に制約した。この辺りは、生産技術屋としての中原の直感であった。

この他にも、通常鉄心打ち抜きで発生するバリやカエリを無くしティース部にエッジ丸め加工を金型内で施す技術が実現したことで、コイル線の被覆を薄くすることができた。また、鉄心の電着塗装においては、本来数億円の加工設備が必要(電着塗装は自動車メーカーが主要顧客ゆえ、大規模な加工設備しか頭に無い業界である)と言われながら、学校の理科室での実験のような水槽と電極を利用した数万円程度の設備で10万台規模の量産をこなしてもらった。これは当時ヘッド技術係長の大内博文(現 鎌倉製作所)が主体になり進めた。設備投資を抑えれば、それを製品の価格に上乗せしなくて済む。

駆動回路においては、モーター駆動用ICと信号処理用ICを一体化した。それまでは、モーター駆動には大電流が流れるため、微小信号を扱う信号回路に悪影響を及ぼすというのが通説であった。しかし、実際に大電流が流れるのはモーター起動時だけであり、その段階では信号処理は不要であることから、一体化は問題ないということが分かった。

これらの細かな、地道な改善もあって、3.5インチFDDの大幅なコスト削減を実現した。最終的に量産に必要な5台の巻線機が完成したのは1995年1月17日、つまり阪神大震災の日であった。尼崎にある生産技術センターで出荷直前の巻線機は奇跡的に無事であった。三瓶らは、ポキポキモータを使用した新型FDD10万台を、米コンピューター大手メーカーに向けて出荷した。新型FDDでは、モーターの厚さは僅か3.5mmまで薄くすることができた。1996年度、全世界のFDD市場は約8300万台、年率約10%の成長を遂げた³⁰。郡山製作所のFDDの生産台数も、月産75万台(ピーク時)に達した。

特許と競合企業の追従

中原、橋本らが1993年11月8日に出願したのを皮切りに、三菱電機がポキポキモータに関連して国内で出願した特許は85件にのぼった。中原は、当時の心境を次のようにふり返っている。

「モーターは鉄と銅と磁石を組み合わせただけの単純な仕組みで出来ています。この世界で特許を他社に奪われると、もはやモーターは作れなくなってしまう。ポキポキモータ方式を社内の各工場安心して採用できるようにするために、早く特許を取得しておく意義は大きいのです。特許に安住の地はありません。登録までに時間がかかり、それを待っている間にも工場ではどんどん量産が進んでしまいます。登録になるまでの期間、技術者は不安になるのです。この不安解消の唯一の方法は、次々に特許を出願してゆくしかないのです。一種の保

³⁰ 大河内記念賞資料 p.1

険のようなものです³¹。」

実際、ポキポキモータの特許が1996年1月19日に公開になると、競合他社からも類似の特許が出願されることとなった。また、特許ではなくモーター鉄心構造の意匠出願という形で追従を試みる競合企業もあった。というのも、特許登録と違って、意匠登録は短期間で容易に取得できるからである。量産段階になってから他社特許の侵害が判明すると大変な損害ともなるため、特許出願や意匠出願は事業の事前防衛という点で重要である。

FDD 事業からの撤退

ただし、ポキポキモータの開発の契機となった郡山製作所の FDD 事業はその後必ずしもうまく行かなかった。ポキポキモータを採用し、強力にコスト削減を進めてきた FDD 事業は、売上高が頭打ちになり、ポキポキモータが量産に乗った以降は開発案件も少なくなった。そこで、郡山製作所は 120MB という大容量の新フォーマット FDD の製品化³²に重点を移していった。

初期の 1 インチ厚の製品では、社外メーカーから部品を調達して郡山製作所で組立を行い、1996 年 10 月に発売した。その後、ポキポキモータを使用した 1/2 インチ厚の製品を自主開発して、1997 年 8 月には自社で発売を開始した。当時はまだ 1/2 インチ厚の製品は少なく、これなら高く売れるはずであった。

しかし、光ディスクをはじめとする大容量の記録デバイスとの競争の中で、120MBFDD のフォーマット自体が普及しなかった。しかも、120MBFDD の量産に伴って、生産はタイの工場に移管することとなった。

郡山製作所の FDD 事業は、1999 年に撤退することとなり、1995 年 6 月に郡山製作所の敷地内に独立した事業体として設立されたディスクドライブ統括事業部は、2000 年 5 月には終息することとなった。

郡山製作所は、現在では監視カメラシステム、映像通信システム、デジタル放送システムを生産する事業所となり³³、1981 年に 1000 人近くいた従業員数も 2004 年 3 月時点で 233 人程度まで減少している³⁴。監視カメラのチルト機構に名古屋製作所製の汎用モーターを組み込んでいるが、郡山製作所ではこれが唯一のポキポキモータの生き残りとなった。

実は、三菱電機は 1992 年春に情報通信機器の生産体制再編計画を発表している。計画によると、この時点で通信機製作所(尼崎市)から監視カメラやテレビ会議システムを郡山製作所に移管し、郡山製作所の FDD はタイの工場に移すことは決まっていた³⁵。ポキポキモータは FDD 生産の海外移転が進められる中で開発され、国内生産の存続に一石を投じたものの、最後まで踏みとどまることはできなかった。

³¹ 2004 年 2 月 3 日、生産技術センタ中原氏の講演による

³² 「次世代フロッピー普及に弾み、三菱電機駆動装置生産へ」『日経産業新聞』(1996 年 6 月 19 日:8)

³³ <http://www.mitsubishielectric.co.jp/keireki/pdf/2004/p8-13.pdf>

³⁴ <http://www.mitsubishielectric.co.jp/keireki/pdf/2004/p14.pdf>

³⁵ 「三菱電・情報通信機器、生産体制を再編」『日本経済新聞』(1992 年 3 月 22 日:5)

他の事業への横展開

ポキポキモータは、製造メリットだけでなく設計メリットを発揮した。即ち、高い生産性だけではなく、コイルの巻線密度を高めて高効率や高トルクを実現したり、スロット開口幅を最適化する(巻線ノズルの通道の確保という製造都合による制約を排除して、設計上最も望ましい鉄心形状を実現)ことにより、コギングトルクやトルクリップルを抑えた高性能を実現できた。生産技術センターの中原、三宅、秋田らは、郡山製作所のFDD事業で蓄積した技術やノウハウをもって、積極的に他の事業所にもポキポキモータを展開していった。モーターの技術は比較的汎用性が高いため、他の事業所にも転用はし易かった(図表 16)。

名古屋製作所で生産する産業用 AC サーボモーター(ブラシレスDCモーターと機構的には同一であり、ポキポキモータを採用している)は、ファクトリオートメーション分野の需要増大に合わせて今年度も市場は好調であり、名古屋製作所のポキポキモータの量産ラインは盛況となっている。

ポキポキモータを採用したエレベータでは、特に設計メリットが発揮された。稲沢製作所で製造している機械室レスエレベータ(屋上に巻上機を設置するための機械室が無いタイプのエレベータ)「ELEPAQi」シリーズにおいては、ポキポキモータにより巻上機を約 5 分の 1 まで薄型化し、昇降路内に巻上機を配置することが可能となった。そして、ブレーキ機構をモーター内に直接組み込むなど、モーターをエレベータ巻上機に一体化して部品点数を削減した。これは、他社からモーターを部品として調達しては実現しえなかったものである。稲沢製作所では、ポキポキモータを差別化技術の鍵の一つと位置づけ、業界では珍しく巻上機用モーターのための工場を新設している。

姫路製作所や三田製作所で生産する自動車機器でもポキポキモータが生産されている。排出ガス規制の強化に伴い高効率化や小型軽量化が求められている自動車機器において、ポキポキモータはコイルの巻線密度を 40% 向上し、またモーターの質量、体積も 20% 減少させた³⁶。三瓶の部下であった阿久津は、姫路製作所にて電動パワーステアリング用ブラシレスDCモータ(ポキポキモータ)の開発に従事している。このほかにも 2001 年には三菱電機製ルームエアコン「霧ヶ峰」の省エネ高効率化のキーデバイスとして、圧縮機モーターとファンモーターにポキポキモータが採用されている。

2000 年 7 月、生産技術センターにはモータ製造技術推進部が設立され、各事業所への横展開とともに、ポキポキモータの技術革新が続けられている。開いた鉄心を折り曲げるところでは、鉄板をプレスで打ち抜いて、抜きかしめ法で(ピンを使用せずに)関節を実現するなど、鉄心加工の専門家にとっては無茶とも思える加工方法を次々に実用化している。

ポキポキモータの将来

ポキポキモータの開発で中心的な役割を果たした生産技術センターの中原も、郡山製作所の三瓶もまたモーターの設計者ではなかった。いわゆる「モーター屋」以外の人物が研究プロジェクトの主力メンバーにいたことが、モーター屋の間では非常識とも思われたアイデアへの取り組みを可

³⁶ 三菱電機技報 2000/9 月号特集論文「ポキポキモータの車載機への応用」

能とした。中津川製作所と郡山製作所でそれぞれ行われた取り組みで共通するのは、巻線と結線工程での生産上のボトルネックに立ち返って、モーター設計の基本をモーターの構造から根本的に見直そうとする姿勢であった。

モーター設計者はモーターの性能向上を追求して設計し、生産技術者は設計者が書いた図面を前提に生産効率を追求する。開発の上流にいるモーター設計者は、しばしば自分のモーターを設計するのに精一杯になってしまい、巻線や結線などの後工程は生産現場の責任で勝手にやるものと考えてしまいがちである。しかし、実際に必要なのは、開発と製造との間に無用な壁を作らず、むしろ開発初期の段階でモーター設計者と生産技術者とが互いの制約を理解し、それらを打破することが必要なのである。事前に作りやすさを念頭に置いていたからこそ、上流の製品設計を根本的に見直すことが可能となり、ポキポキモータという全く新しいモーターが誕生することとなった。それには、設計者が生産技術者の言葉や価値体系を理解し、生産技術者もまた設計者の言葉や価値体系を理解する必要がある。また、開発の上流か下流かに関わりなく、上流から下流にいたる一連の開発生産工程において、どこがボトルネックなのかを考える全体観が必要となる。

もちろん、順調に受け入れられてきたかに見えるポキポキモータも、必ずしも社内の事業所から難なく受け入れられてきたわけではない。ポキポキモータには、特殊な鉄心金型や巻線機を導入する必要があり、量産立ち上げまでの費用面から、オーソドックスな生産方式に固執する意見が社内にはないわけではない。事業所の製品設計担当者から「ある大手専門メーカーのモーターでなければ使わない」と言われることもある。保守的な製品の設計技術者は、オーソドックスなモーターで十分と考える。海外生産による安いモーターの台頭もあり、外部調達可能であれば、わざわざ巻線機の購入のような新規投資の発生するモーター製造には乗り出さないのである。

既に述べたようにポキポキモータを同社内で最初に採用した FDD 事業は撤退に追い込まれた。また、一日のうちの使用時間が短い家電製品などでは、省エネのメリットが出せずに試作レベルで終わったケースもある。

生産技術センターでモータ製造技術推進部長となった中原は、ポキポキモータでの成功体験を各事業所に広め、モノ作り革新の風土を広めることに努めると共に、部内の若手に対しては「脱ポキポキ」、「脱モーター」を掲げ、枠をはめずに自由に発想することを奨励している。三瓶は三菱電機ライフサービスの支店長として、新規事業の立ち上げに奔走している。

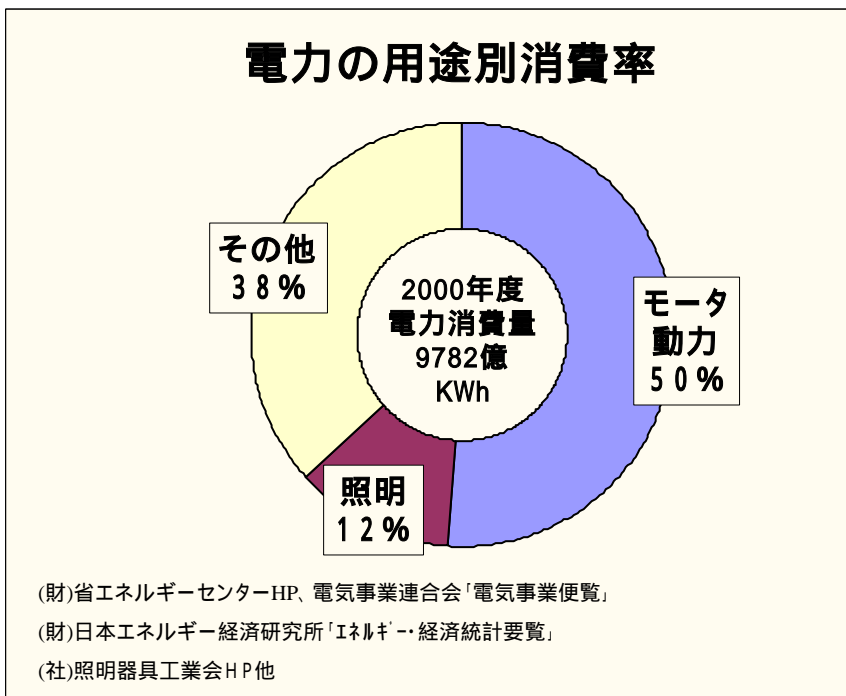
2003 年 12 月には、生産技術センターは、これまでの社内向けに絞ったポキポキモータの展開から大きく舵を切っている。ポキポキモータ製造技術のライセンス供与である。自社の主力製品と直接競合しない分野からライセンス供与を行い、ライセンス収入によって研究開発費を回収し、知的財産権を積極的に活用するとのことである³⁷。今後ポキポキモータは、どのように展開されるのだろうか。

³⁷ 『「ポキポキモータ」製造技術 三菱電が社外供与』『日経産業新聞』(2003 年 12 月 10 日(1))

参考文献・資料

- 中原裕治氏(三菱電機生産技術センターモーター製造技術推進部長)による講演およびインタビュー(2004年2月3日 一橋大学イノベーション研究センター)
- 三瓶利正氏(三菱電機ライフサービス株式会社 郡山支店長)へのインタビュー(2004年3月16日 三菱電機郡山製作所内 三菱電機ライフサービス(株)郡山支店)
- 大河内記念会資料
- 中原裕治「分割鉄心による中小型モーター製造技術に関する研究」(2000年12月)
- 中原裕治「分割鉄心によるモーター製造技術—ポキポキモータの進化」(大河内賞ケース研究プロジェクト講演会用論文 2004年2月3日)
- 中原裕治「モノづくり革新、ポキポキモータ」(大河内賞ケース研究プロジェクト講演会用パワーポイント資料 2004年2月3日)
- 矢野経済研究所(2003)『2003年度版 注目されるモーターの最新市場動向と中期展望』p.45
- マブチモーター(2004)『第63期 有価証券報告書』p.11
- 「三菱電、オーディオ不況で郡山工場の3割260人を配転」『日本経済新聞』(1982年6月5日(6))
- 「三菱電機郡山、効率化で生産増強——主要部品の内製化促進」『日本経済新聞』(1985年3月14日 地方経済面(東北A):2)
- 「三菱電郡山、63年度生産500億円に——FDD・スピーカー増産」『日本経済新聞』(1986年8月10日 地方経済面(東北A):2)
- 「企業内構造調整(産業が変わる・第5部 エレクトロニクス:4)」『朝日新聞』(1987年2月6日(8))
- 「三菱電機、小型軽量の3.5インチFDD」『日本経済新聞』(1987年3月4日(8))
- 「三菱電 近く新会社5.25インチのFDD生産—タイに全面移管」『日経産業新聞』(1987年7月23日(1))
- 「三菱電機、タイでFDD生産——来春に月産15万台体制」『日経産業新聞』(1988年8月22日(2))
- 「先端拠点はいま、三菱電機中津川製作所」『日経産業新聞』(1989年4月24日(9))
- 「3.5インチFDD 薄さを競う、各社相次ぎ新製品」『日本経済新聞』(1991年7月22日(11))
- 「三菱電・情報通信機器、生産体制を再編」『日本経済新聞』(1992年3月22日(5))
- 「三菱電機(飯田工場)—換気扇生産をCIM化」『日経産業新聞』(1992年10月7日(7))
- 「素人感覚、無人化を実現 モーター設計に革新」『日経産業新聞』(1993年5月24日(9))
- 「次世代フロッピー普及に弾み、三菱電機駆動装置生産へ」『日経産業新聞』(1996年6月19日(8))
- 「先端研究最前線 モーター製造の効率化に貢献—工程をガラリと変えた新技術」『科学技術ジャーナル』1998年6月号 pp.46-47.
- 「三菱電 電動パワステ用モーター量産」『日刊工業新聞』(2003年10月28日(4))
- 「『ポキポキモータ』製造技術 三菱電が社外供与」『日経産業新聞』(2003年12月10日(1))
- 『三菱電機技報』・2000/9月号、特集論文「ポキポキモータの車載機への応用」
- 『三菱電機技報』・Vol.76・No.6・2002

図表 1: 電力の用途別消費率 (出所下記、三菱電機株式会社生産技術センタ資料より)

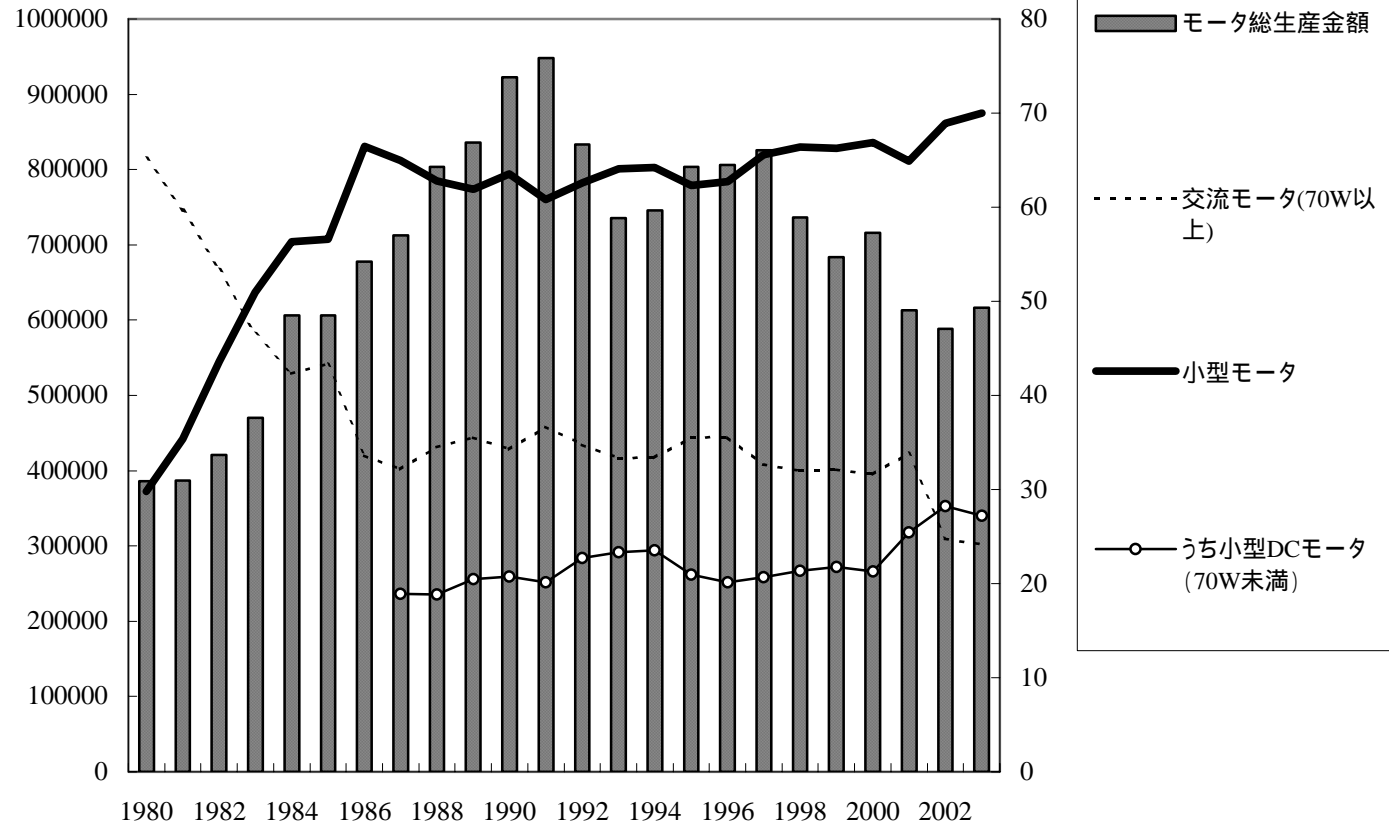


図表3:モータ市場規模の推移 2002年のセグメント別市場規模
出所:『機械統計年報』(経済産業省)

	金額(百万円)	金額シェア
単相誘導モータ	30140	5.1
標準三相誘導モータ	12485	2.1
11kw以下	77419	13.2
11kw～37Kw	16362	2.8
37kw～75Kw	8996	1.5
75kw～1000Kw	23296	4.0
1000kW以上	7153	1.2
その他交流モータ	6936	1.2
サーボモータ	95995	16.3
小型直流電動機:small capacity DC motors	166090	28.2
小型交流電動機:small capacity AC motors	55566	9.4
ステッピングモータ:Stepping motors	39688	6.7
その他小型電動機:Miscellaneous small capacity motors	9369	1.6
超小型電動機(入力3W以下)Micro motors less than 3W	38620	6.6
交流モータ	182787	31.1
非標準三相誘導モータ	133226	22.7
小型電動機(70W未満):small capacity motors	309333	52.6
交流モータ(小型も含む)	238353	40.5
合計	588115	100.0

	数量(台)	数量シェア
単相誘導モータ	11752104	3.4
標準三相誘導モータ	720953	0.2
11kw以下	5772857	1.7
11kw～37Kw	105900	0.0
37kw～75Kw	30435	0.0
75kw～1000Kw	19714	0.0
1000kW以上	513	0.0
その他交流モータ	2583569	0.7
サーボモータ	2089581	0.6
小型直流電動機:small capacity DC motors	145909521	41.8
小型交流電動機:small capacity AC motors	44199298	12.7
ステッピングモータ:Stepping motors	21581414	6.2
その他小型電動機:Miscellaneous small capacity motors	10680998	3.1
超小型電動機(入力3W以下)Micro motors less than 3W	103455609	29.7
交流モータ	20986045	6.0
非標準三相誘導モータ	5929419	1.7
小型電動機(70W未満):small capacity motors	325826840	93.4
交流モータ(小型も含む)	65185343	18.7
合計	348902466	100.0

図表4 モータ(電動機)の国内生産金額(1980~2003)



図表5 ポキポキモータのラインナップ

ものづくり技術

+

磁界解析技術

環境

省エネ高効率
省資源



ポキポキモータ



製品価値

軽薄短小
高性能
(低トルクリップル・低発熱)



適用機器のラインナップ

情報機器

家電・FA・自動車・昇降機器



ブロック
薄肉連結型



提灯型



薄肉連結型



逆反り型



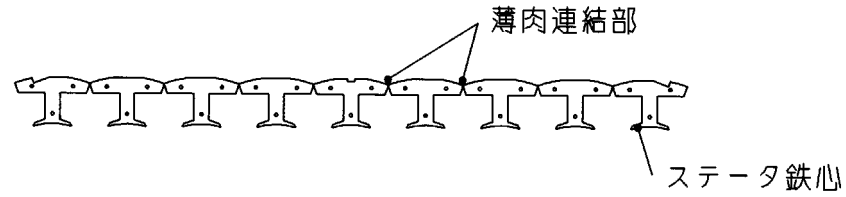
関節型



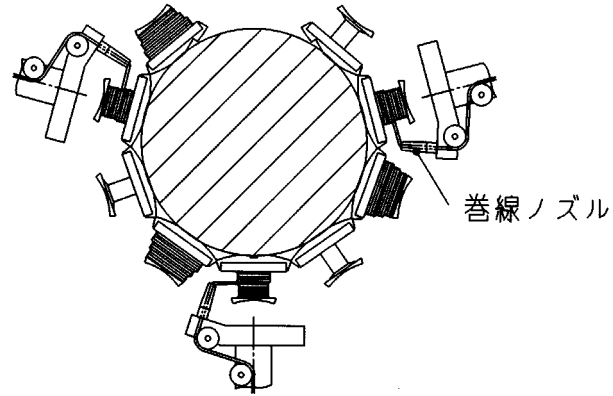
関節円弧型

図表6 ポキポキモータの製造プロセス

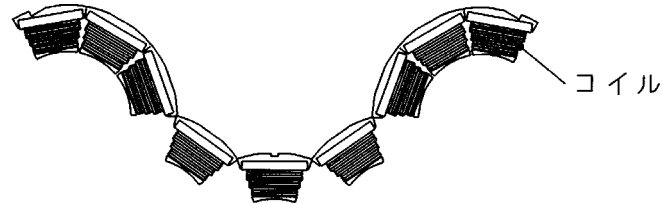
鉄心積層



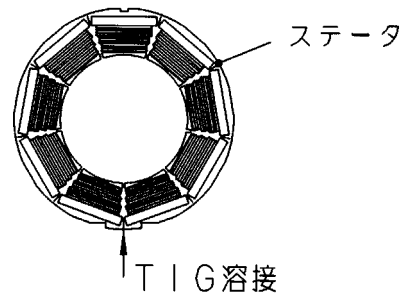
巻線



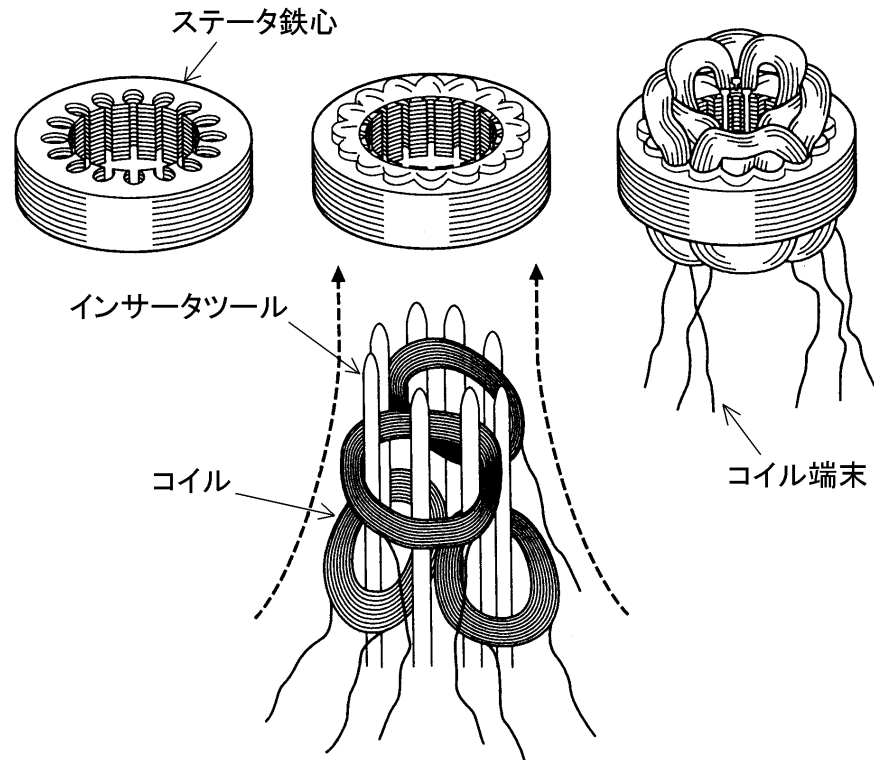
折り曲げ



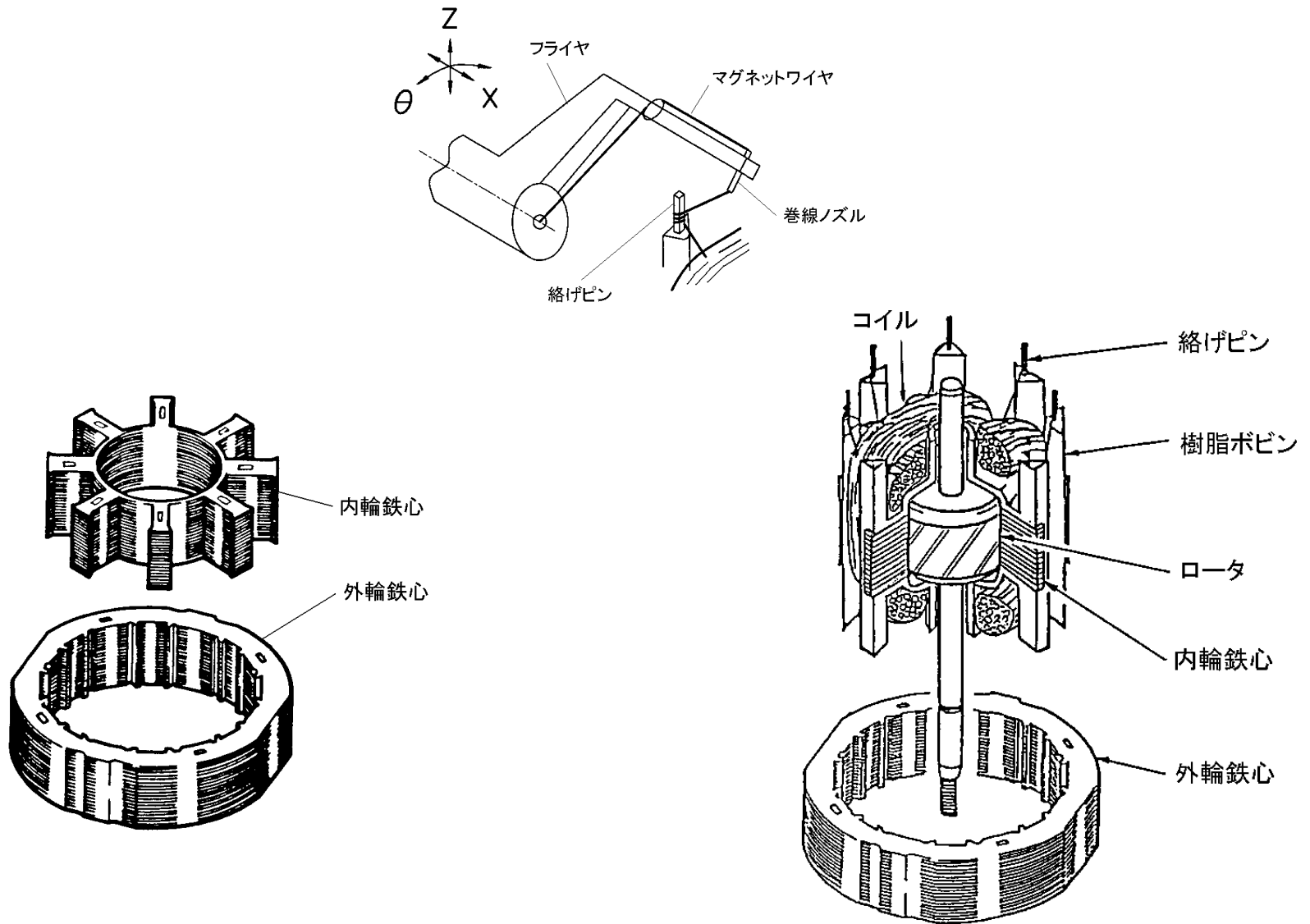
溶接



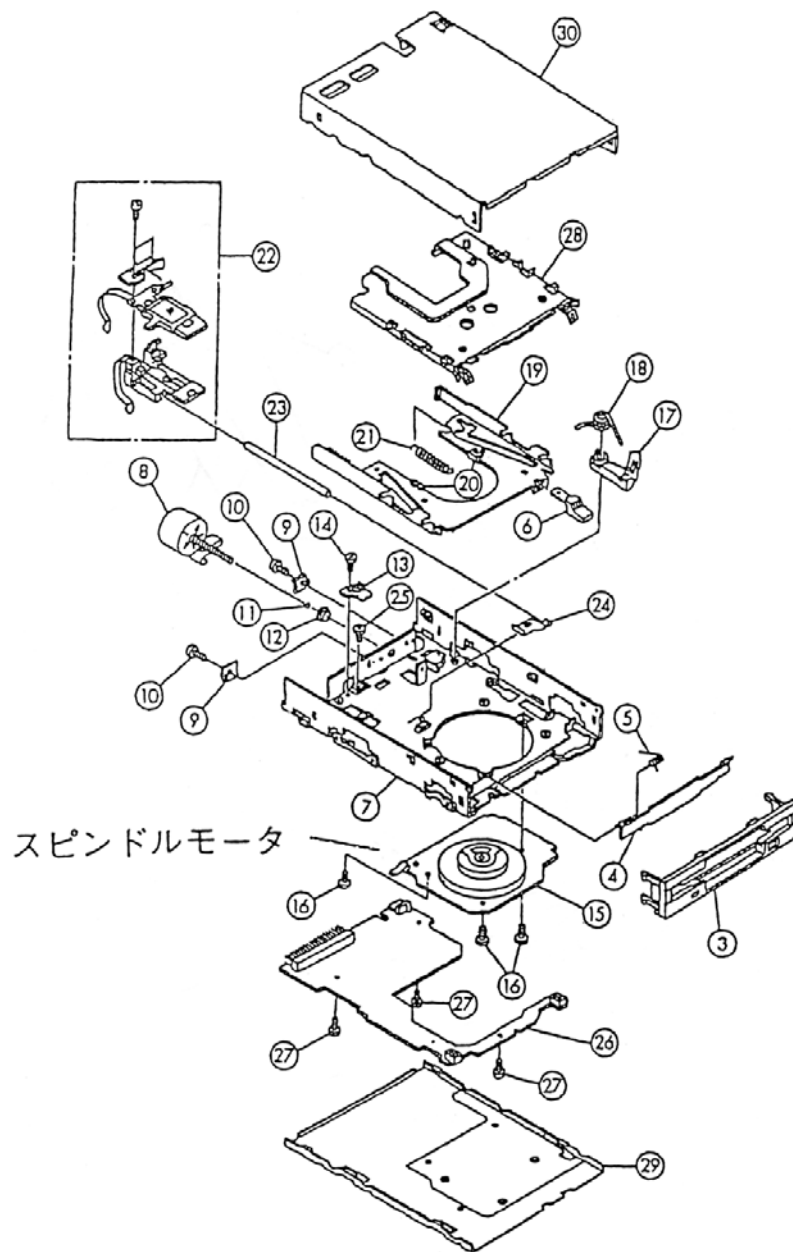
図表7 コイル巻落し・インサート方式による巻線



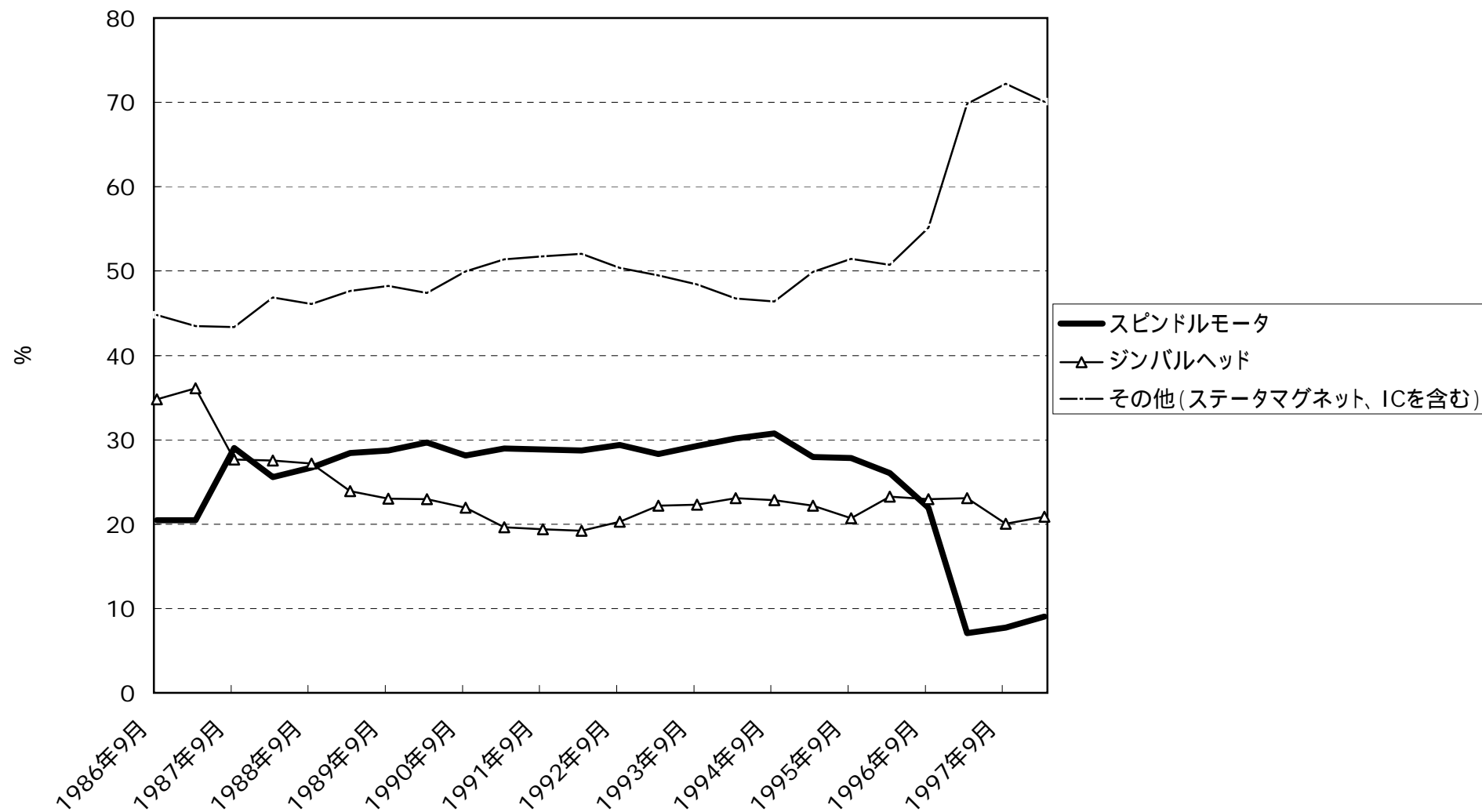
図表8 内外輪分割鉄心とロータ巻き込み巻線法



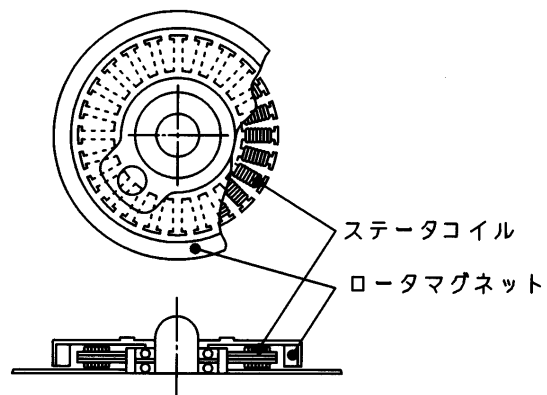
図表9 板金フレーム化されたFDDの構造



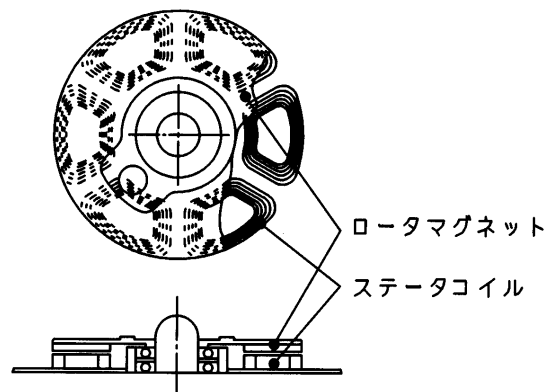
図表10:FDDの材料費推移:
三菱電機製2MB FDDの直接材料費に占めるモータの構成比



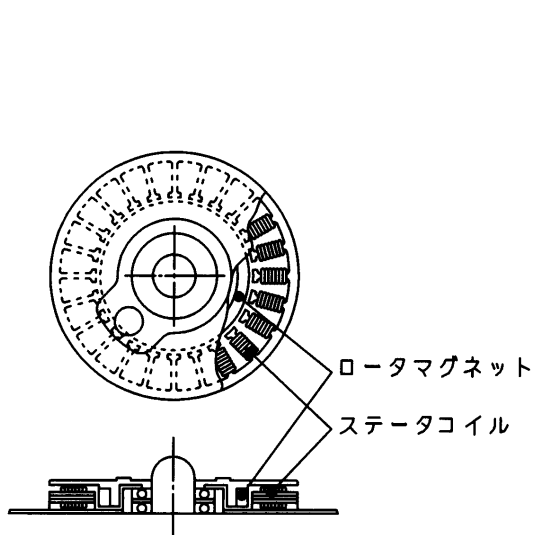
図表11 FDD用スピンドルモータの形態



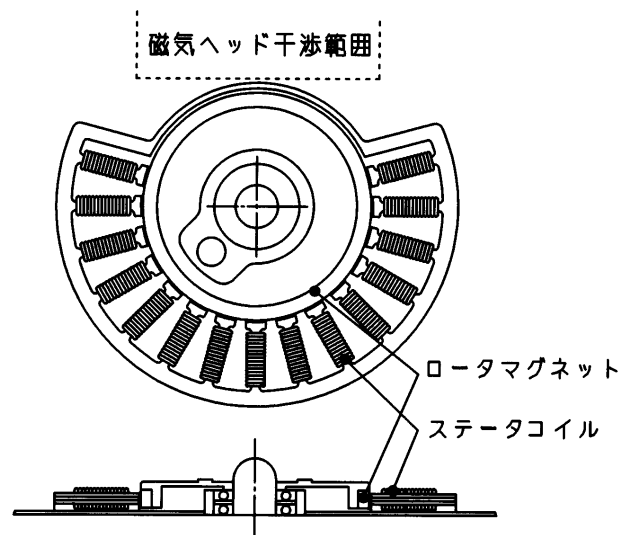
(a) アウトロータ型



(b) 面对向型

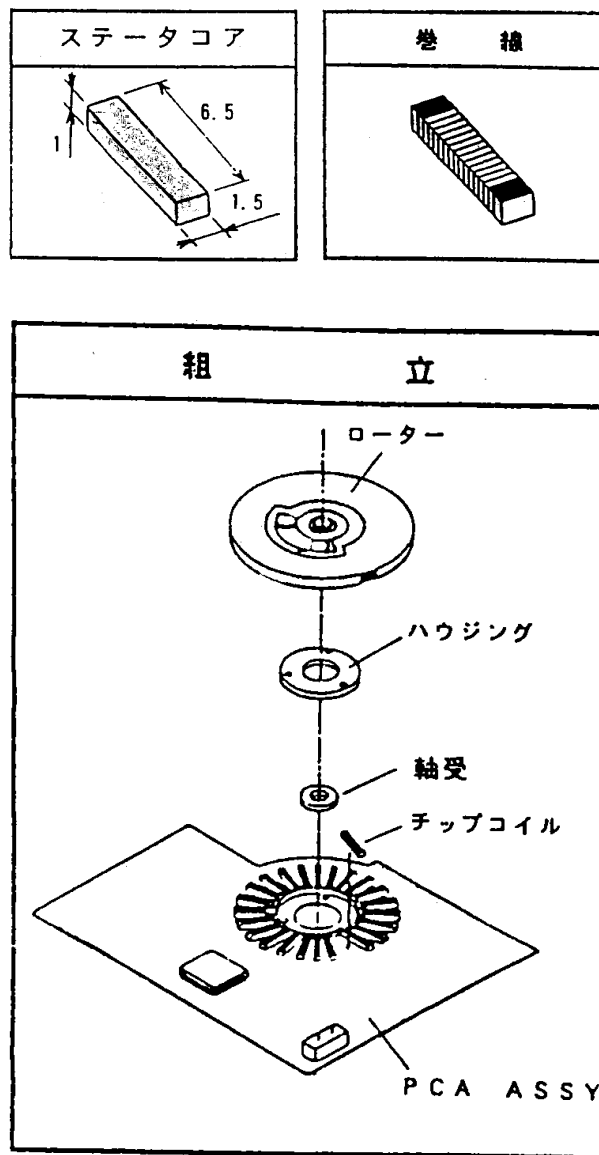


(c) インナロータ型

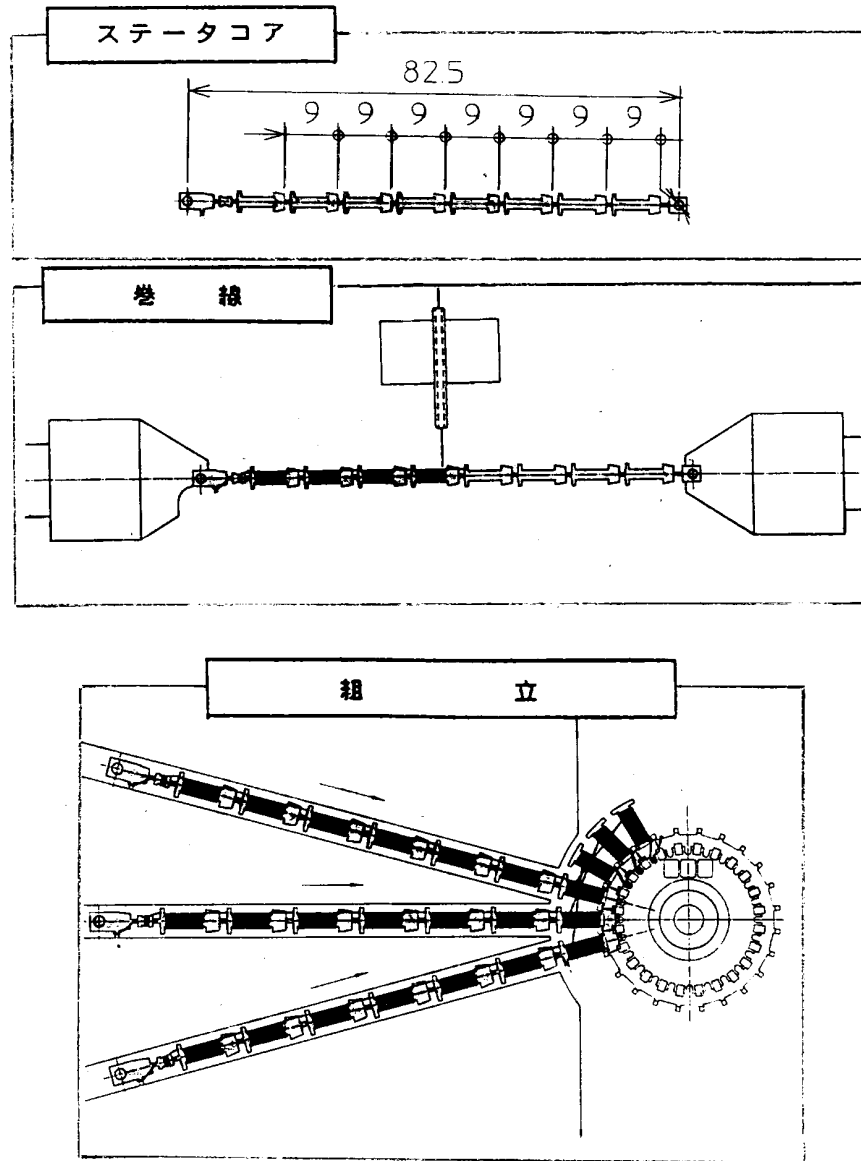


(d) 切り欠きインナロータ型

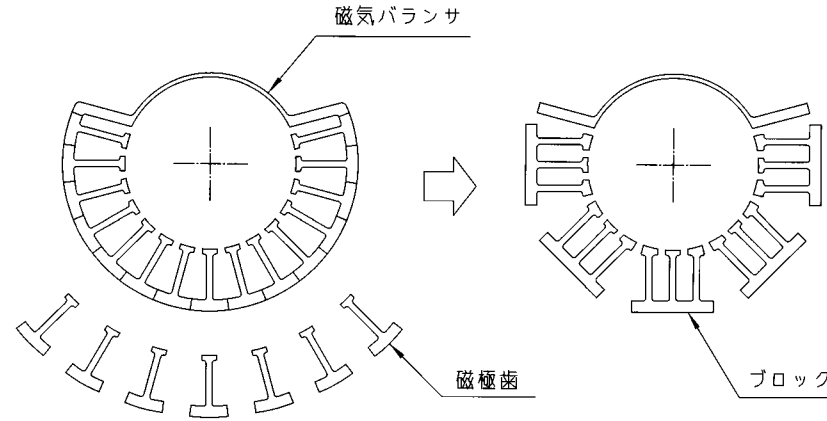
図表12 チップコイルの表面実装によるモータ製造法(三瓶案)



図表13 薄肉連結チップコイルによるモータ製造法(中原案)

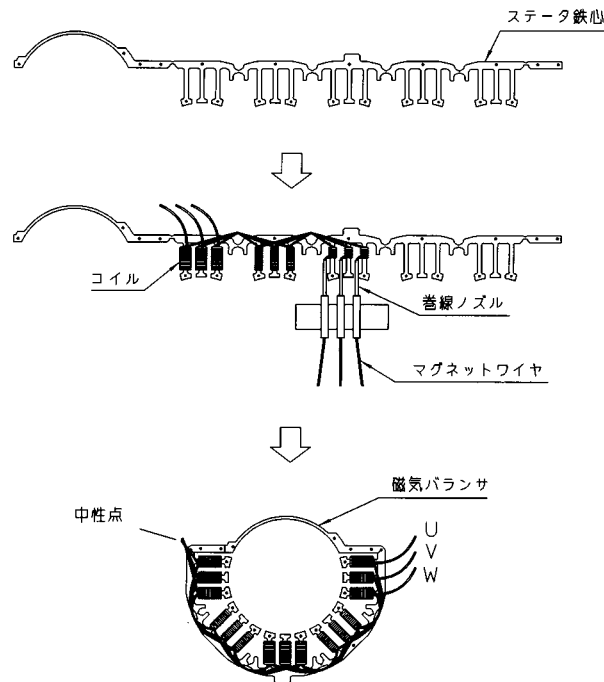


図表14 ポキポキモータのアイデア発想プロセス



バラバラであれば巻線し易いが、
コイル接続とコア組立が大変！

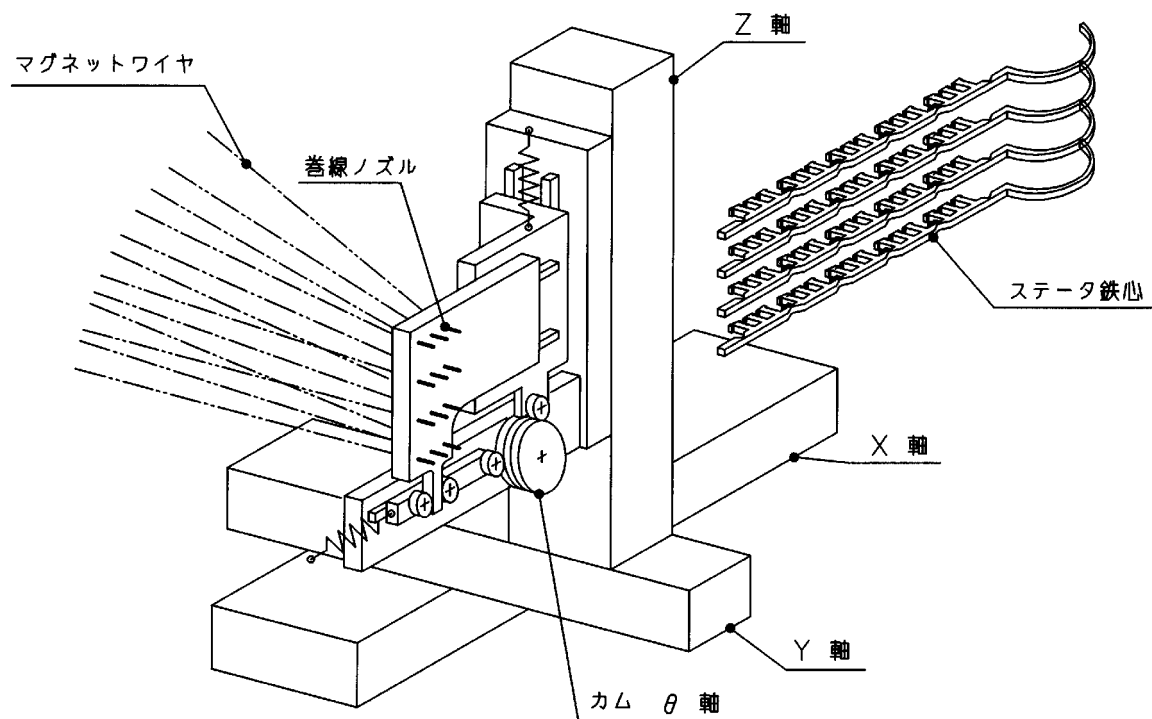
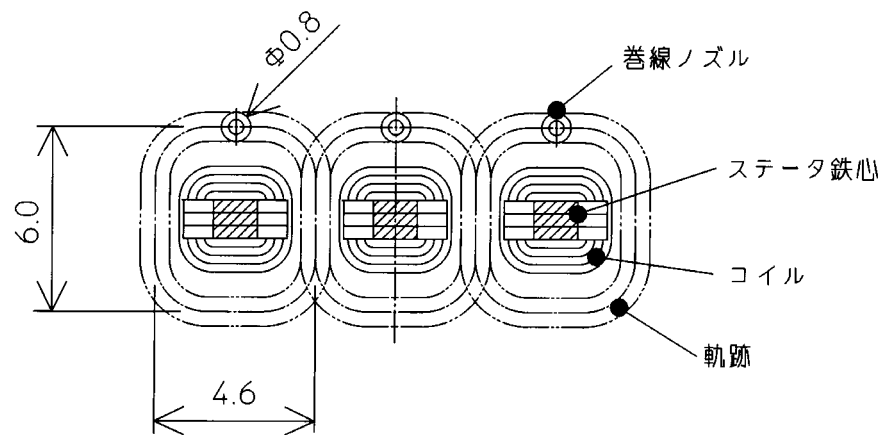
ブロック単位にまとめても
コイル接続が大変！



渡り線を切らずに連続に巻く。

鉄心を「ポキポキ」と折り曲げる。

図表15 自社開発による巻線機



図表16 ポキポキモータの製品展開



汎用ACサーボモータ



排ガス還流バルブ



エアコン用圧縮機



エレベータ用巻上機

IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2009

NO.	著 者	タ イ ト ル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003 年 2 月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004 年 3 月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004 年 3 月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004 年 3 月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004 年 3 月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績 V 字回復への改革」	2004 年 3 月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004 年 3 月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004 年 3 月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004 年 3 月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004 年 3 月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004 年 10 月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004 年 10 月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004 年 11 月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
------------	--------------	---	------------