

進化するモータ

Historical Evolution of Motor Technology

三上 浩幸 井出 一正 清水 幸昭
Mikami Hiroyuki Ide Kazumasa Shimizu Yukiaki

妹尾 正治 関 秀明
Senoo Masaharu Seki Hideaki

日立製作所の創業者である小平浪平は、外国の技術ではなく国産技術でモータをつくるという強い思いを持ち、1910年に5馬力モータを世に送り出した。1世紀を経た現在、モータには多くの技術が適用され、その大きさや性能も確実に進化している。そして、社会基盤を支えるキーデバイスとして、発電、産業、交通、家電など、多くの分野で利用されるに至った。

1. はじめに

2010年は日立製作所の創業100周年にあたり、その創業製品が5馬力誘導モータであることは周知のとおりである(図1参照)。日立製作所の創業者である小平浪平は、当時外国製モータが主流であった状況において、外国の技術ではなく国産の自分たちの技術でモータをつくるという強い意志を持ち開発に取り組んだ。その結果、多くの技術課題を克服し、明治43(1910)年に5馬力モータを3台製造した。これが日立製作所におけるモータの起源であり、モータ技術開発の起点ともなっている。

日立製作所創業から1世紀を経た今、モータは社会基盤を支えるキーデバイスとして、発電、産業、交通、家電な

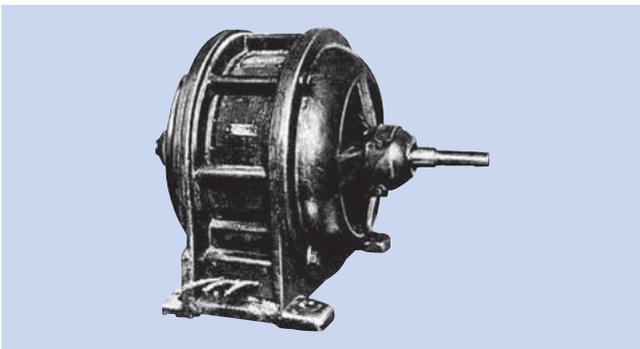
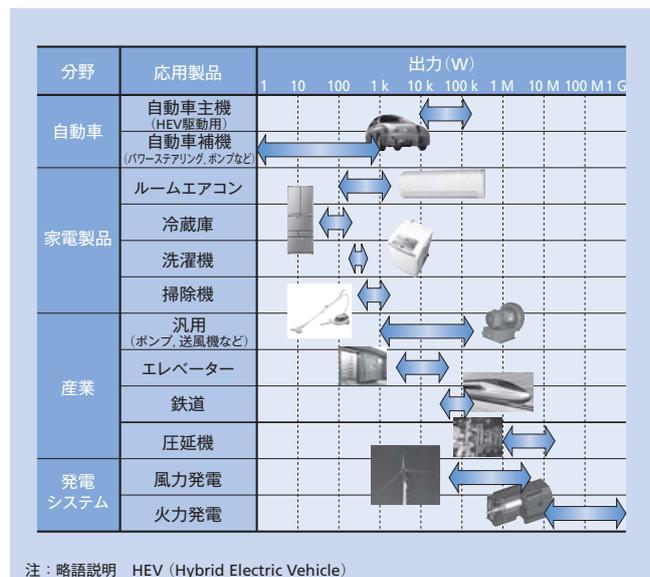


図1 | 5馬力誘導モータ

電気機械の修理を通じて経験と技術を蓄積し、高尾直三郎(後の副社長)が設計、英国から鉄板加工機は購入して部品を製作したが、コイルの巻線機は内製し、外径約400 mm、質量約150 kgの誘導モータを3台完成させた。

ど多くの分野で利用されるに至っている(図2参照)。特に1980年代以降のマイクロエレクトロニクス技術や、パワー半導体素子の発展とともに、電力変換装置の一つであるインバータと、これにモータを組み合わせた駆動制御システムが急速に進展した。これは、「制御」という要素が、システム用途ごとに異なるきめ細かいモータの動作特性供給を可能としたことに加え、省エネルギー化を進めようとする時代の流れからも有益であったためと推察される。今日、電力発電のほとんどに発電機が使用される一方、モータは動力源として工場、鉄道、家電や自動車機器、情報機器に至るまで幅広く用いられ、電力消費量の約40%がモータで消費されていることは広く知られている¹⁾。モータはこれまでの産業界の発展に大きく貢献すると同時に、現代社会はまたモータ、発電機といった回転電気機械に支えられていると言っても過言ではない。



注：略語説明 HEV (Hybrid Electric Vehicle)

図2 | 日立グループにおけるモータ応用製品の例
モータ、発電機は社会基盤を支えるキーデバイスとして進展した。

ここでは、モータに加え、発電機やインバータ制御の要素も含め、それらにおける技術の歴史的発展の経緯と、将来に向けたモータへの取り組み事例、および今後の展望について述べる。

2. モータ技術の変遷

モータと周辺技術の歴史を図3に示す。19世紀前半のファラデーによる電磁誘導の法則を契機とし、モータにおける一連の発明がなされて以来、すでに2世紀弱の歴史を経た。モータは当初、電池を電源としていたために直流モータを中心として発達した。その後、交流電力技術の発達とともに実用的な誘導モータや同期モータが考案された。今日存在するモータの原型はほぼ19世紀中に発明され、その後、設計、材料、生産技術という三大要素技術の進歩を反映させ、確実に進化している。

前述した「5馬力モータ」も進化の例外ではない。日立製作所における5馬力モータの質量変遷を図4に示す。創業製品である1910年製の質量に比べ、現在では多くの技術導入によって約 $\frac{1}{3}$ まで小型化し、さらに生産技術の進展

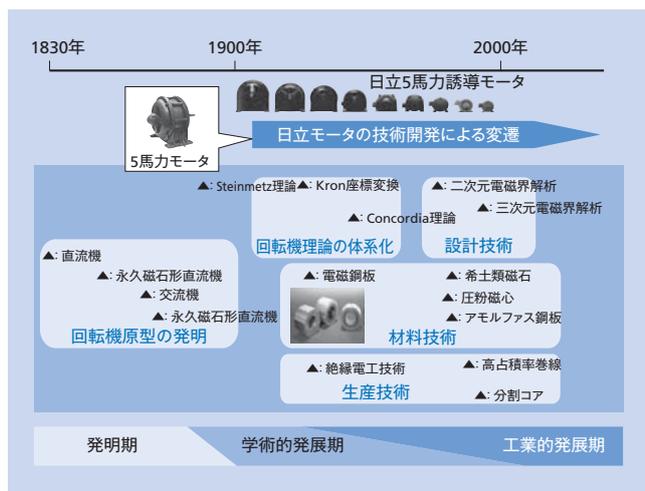


図3 | モータと周辺技術の歴史

1830年代にモータは発明され、20世紀に学術的、工業的発展を遂げた。

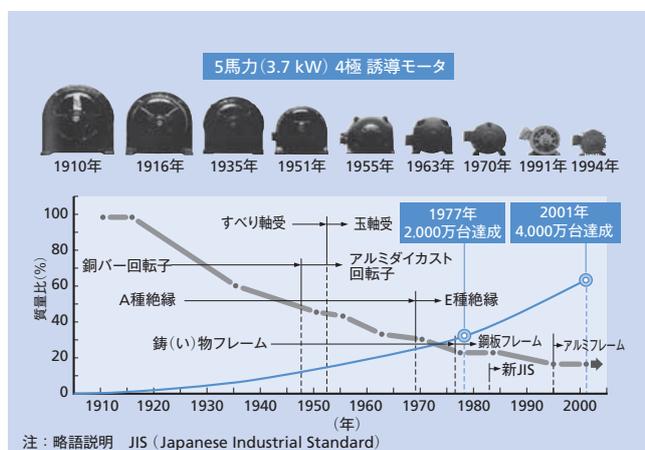


図4 | 日立製作所における5馬力モータの質量変遷
多くの技術開発によって小型・軽量化が進んだ。

により、その累積生産台数も2010年1月には4,500万台を超えた状況にある。

モータにおける進化を支えた基盤技術である設計（解析）、材料、生産技術の変遷について、以下に述べる。

2.1 設計・解析技術

ここでは、モータ、発電機における設計・解析技術の中で、最も重要と言える電気、磁気設計を担う電磁界解析を例として取り上げる。

電磁界解析の進展を、最大容量級の回転機としてのタービン発電機の容量変遷と合わせて図5に示す。大容量発電機の開発では、実機相当の試作に基づく検討は難しいことから、電磁界解析の黎明（れい）期から設計検討の一環として電磁界解析に取り組んできた経緯がある。1960年代に擬似的な三次元解析、二次元解析が適用され始め、現在は必要三次元有限要素解析が広く利用されている²⁾。この間の計算速度は、計算機自体の能力向上はもちろんであるが、幾つかの計算技術も採り入れながら高速化してきた。このトレンドと、当初から電磁界解析を適用してきた日立製作所のタービン発電機容量の増加は対応しており、大容量化に解析技術が貢献してきたことの傍証を与えている。

二次元の電磁界解析において、モータの回転部分（回転子）が機械的に移動することを考慮して解析できるようになったのが1980年台後半である。当時は莫（ばく）大な計算時間がかかり、すべてのモータの運転条件を模擬した解析が必ずしもできたわけではなく、限定的に用いられていた。この種の制約を打破するため、モータ理論を基に、モータ内部の各種周期性を活用することによる計算時間の短縮化技術を日立製作所では開発した³⁾。これにより、誘導モータの回転子電流のように、波長の長い成分と波長がきわめて

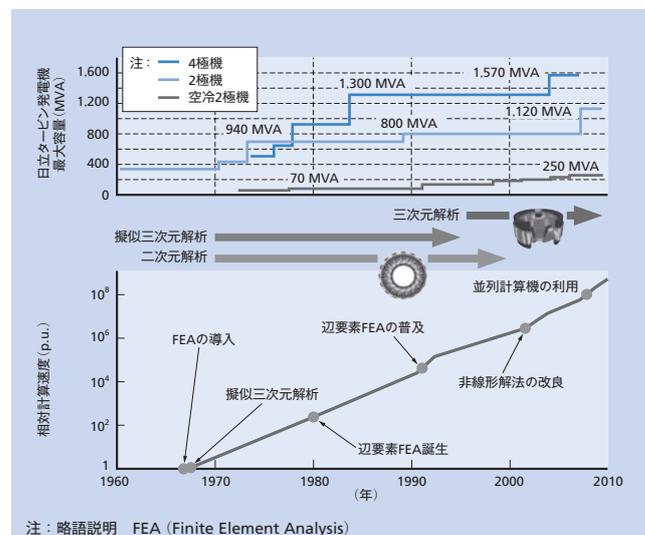


図5 | 電磁界解析に見る解析・設計技術の進歩

計算環境進化による大規模・複雑解析が、モータや発電機開発を促進した。

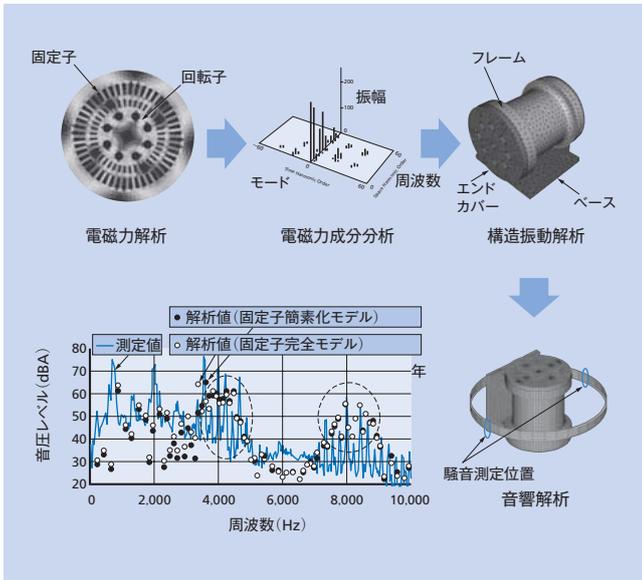


図6 | モーターの電磁騒音解析
電磁力、構造、流体一貫解析によってモーター騒音を定量的予測する。

短い成分を有する解析対象も、特定区間の解析情報から1周期の完全な波形として算出できるようになり、解析可能な事例が拡大した。このような解析技術を基として、モーターの構造によって発生する波長の短い高周波成分に起因した損失が計算可能となり、電磁力成分はモード、周波数ごとに完全に分離できるようになった⁴⁾。さらには、電磁界解析と構造解析、振動・騒音解析などのように連成解析技術が進展し、近年では電磁力、構造、流体一貫解析によってモーター騒音を解析することも可能となっている⁵⁾ (図6参照)。

2.2 材料および生産技術

近年のモーターの高性能化には、材料と生産技術の寄与が大きい。材料技術では、1960年代に電磁鋼板の量産が開始され、いち早くモーターへの適用が進められてきたこと、さらには1983年に発明された希土類磁石材料がモーターの小型化や性能向上に大きく寄与した。

永久磁石の発展と磁石モーターの進化を図7に示す。磁石は、フェライト、アルニコ、サマリウムコバルトとエネルギー積を向上させてきた。早くから広く適用されてきたのは安価なフェライトであったが、最強のネオジウム磁石が発明されて、一気に磁石モーターへの適用が始まった。日立製作所におけるエアコン圧縮機用モーターの変遷との関係を示すと、当初、フェライト磁石の回転子に、分布巻の固定子を組み合わせていたが、ネオジウム磁石の適用にあたって固定子も集中巻とし、同図に示すコイルエンドの小型化も達成できた。集中巻のコイルエンドは小さいが、磁束分布には大きな高調波成分が含まれるため、回転子、固定子の形状設計も重要なポイントであった。すなわち、先に述べた電磁界解析技術と磁石材料の進歩が相まって半分程度の軸

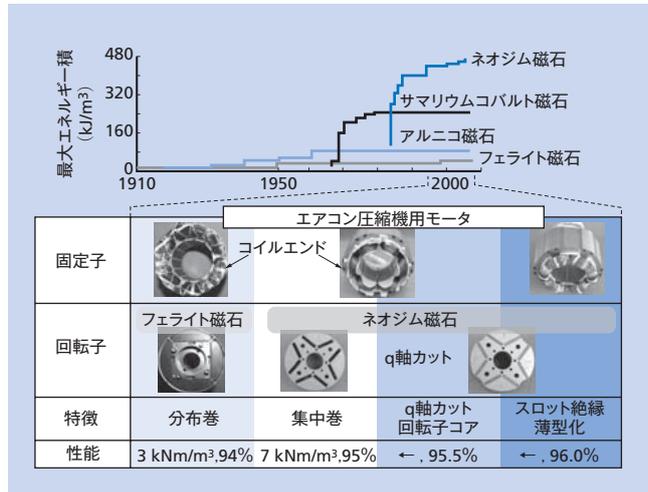


図7 | 希土類磁石によるモーターの発展
ネオジウム磁石の発明によってモーター性能は飛躍的に向上した。

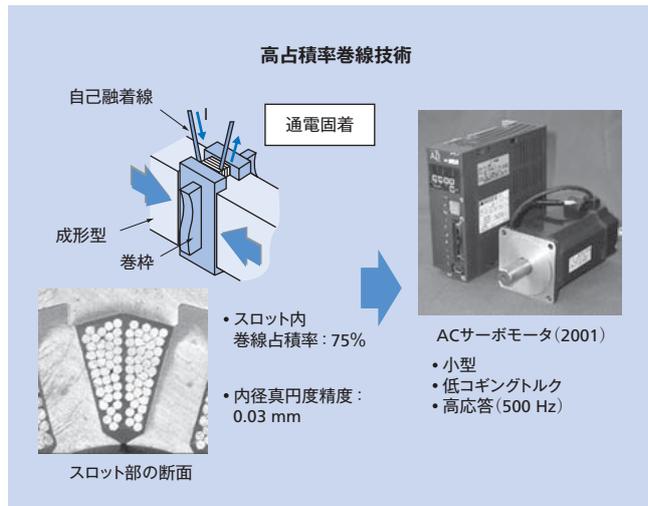


図8 | 分割コアと高占積率巻線
コイル高占積率化と分割コアの高精度組立によってモーターの高性能化を実現した。

長低減と効率向上が達成されている。

生産技術としては、分割コアによる高占積率化技術が挙げられる。整列して巻線されたコイルをプレス成形によって圧縮成形し、スロット内の巻線密度を高めた技術の事例を図8に示す。金型に巻線されたコイルの絶縁性能を保持したまま、スロットと呼ばれる巻線を納める溝の形状に成形し、高い占積率を実現する。同時に、分割して再組み立てした固定子コアを高精度な真円度で組み立てる技術も開発され、小型、低コギングトルクが実現された。これら技術は2000年以降の産業用サーボモーターに適用されている⁶⁾。

3. インバータとドライブ制御の技術

3.1 可変速システムの変遷

モーターの可変速制御は、1980年代を境に、それまでの直流から、交流モーターに主体が替わって適用されてきた。モータードライブ制御の発展の歴史を図9に示す。ドライブ制御を発展させた要因はインバータの主回路素子、マイコ

	1960年	1970年	1980年	1990年	2000年
モータ	直流モータ	直流モータ	交流モータ (誘導, 同期)	交流モータ (誘導, 同期)	交流モータ (誘導, 同期)
電力変換器 (モータ発電機組合せ)		サイリスタ	サイクロコンバータ	PWMインバータ	PWMインバータ
制御回路	アナログ	アナログ/デジタルハイブリッド	デジタル (マイクロプロセッサ), ASIC	デジタル (マイクロプロセッサ), ASIC	デジタル (マイクロプロセッサ), ASIC
制御アルゴリズム	シーケンス制御, PI制御	シーケンス制御, PI制御	ベクトル制御, 制振制御	ベクトル制御, 制振制御	ベクトル制御, 制振制御
性能	精度 (%)	直流モータ 0.25	交流モータ 1.0	0.05	0.01
	応答性 (rad/s)	直流モータ 2	交流モータ 15~20	60	500~1000
	速度レンジ	直流モータ 1:5	交流モータ 1:40	1:200	1:1000~

注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation), ASIC (Application Specific Intergrated Circuit), PI (Proportional/Integral)

図9 | モータドライブ制御の発展の歴史

制御と電力変換器の進歩で交流可変速モータシステムの性能が向上した (参考資料：平成13年電気学会産業応用部門大会S11-1)。

ンの高性能化である。制御は、次第に交流モータのベクトル制御が主流となり、精度、応答性、速度レンジの性能面で、交流モータは直流モータを完全に凌駕 (りょうが) するレベルになった。

3.2 センサレス制御

誘導モータのベクトル制御の変遷を図10に示す。誘導モータ制御は、汎用インバータが技術を牽 (けん) 引してきた。1989年にセンサレスベクトル制御が汎用インバータに搭載された。従来のV/F (Voltage/Frequency) 制御という磁束振幅を一定にする制御に比べ、トルク成分を制御することで大幅に低速トルクを改善することができた。1999年には、ゼロ Hz センサレス技術が製品に適用され、それまで不可能であったゼロ Hz でのベクトル制御が実現された。

磁石モータのセンサレス制御技術の変遷を図11に示す。

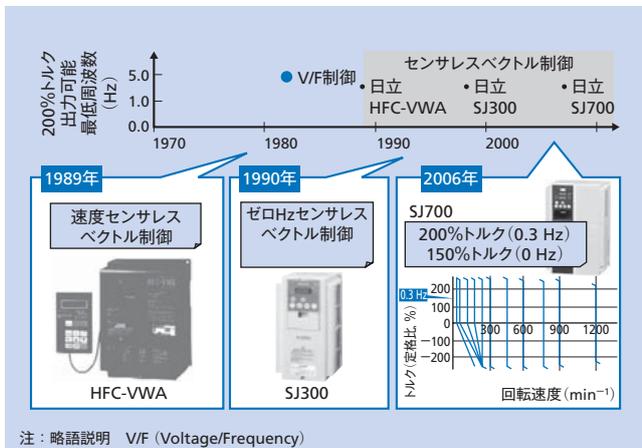
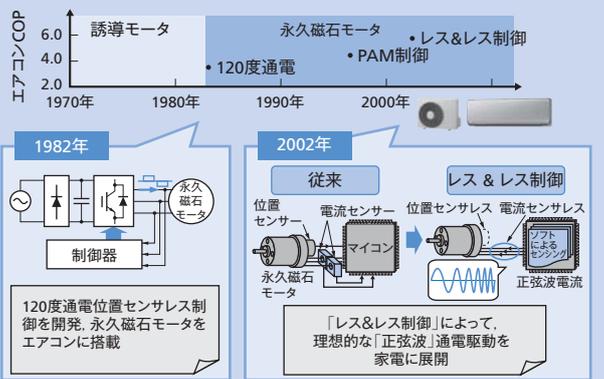


図10 | 誘導モータのベクトル制御の変遷
ベクトル制御の進展がモータの高機能化を実現した。



注：略語説明 COP (Coefficient of Performance), PM (Permanent Magnet)

図11 | 磁石モータのセンサレス制御技術の進展

エアコンで培われた磁石モータの位置、電流センサレス制御技術の進化を示す。

磁石モータの制御は、白物家電のエアコンで開発が進んだ。磁石モータは、希土類磁石が発明されて一気に小型、高効率化が進んだが、インバータによる制御がないと起動できないため、制御技術にも支えられて用途を拡大してきたと言える。

1982年に、磁石モータが日立製作所のエアコンに搭載され、その時点からセンサレス制御が量産品に適用されている。以後、エアコンは磁石モータとセンサレス制御が業界の標準となっている。その後、パルス電圧の振幅を制御するPAM (Pulse Amplitude Modulation) 制御が開発され、2002年にはモータを理想的な正弦波電流で駆動する技術が開発された。この時点で、モータをベクトル制御で駆動するために本来必要な位置センサー、電流センサーを使わないセンサレス技術が開発され、究極の回路構成で理想的なドライブを実現している⁷⁾。

位置センサー、電流センサーを使わないセンサレス制御は、現在では冷蔵庫、コードレスクリーナ、洗濯機などの家電から、産業、自動車補機などに、幅広く適用されている。

4. 今後に向けた取り組み事例

近年、地球温暖化防止の観点から、モータによるエネルギー消費を抑制するため、さらなる小型化、高効率化が求められている。モータの小型化と高効率化を両立するには、モータ内で発生するさまざまなエネルギー損失を可能な限り抑制するとともに、小型化に伴う放熱性能の低下を補う必要がある。

このような背景から、日立製作所の創業100周年にあたる2010年、今後のさらなるモータの小型化を想定したコンセプトモータの試作を、株式会社日立産機システムとともに行った。この試作にあたっては、高放熱化技術、およ

びモータ内の磁束と熱の流れを同時に解析する磁界-熱連成解析技術、さらにはこの解析技術に基づく最適設計技術を開発した。ここでは、小型化設計に最も寄与した解析技術を紹介し、その技術の適用によって検討した試作モータについて述べる⁸⁾。

4.1 熱-磁界連成・形状最適化解析技術

今回の試作では、モータを小型化するという目的から、磁石モータを採用することとした。磁石モータの設計に必要な技術を大きく分類すると、電気設計、冷却設計、減磁評価（減磁：磁石の磁力が失われる現象）となる。従来の設計では、電気設計、冷却設計、減磁評価のように損失や温度を媒体として個別に解析して設計をすることが中心で

ある。また、材料特性のばらつきや寸法公差など、設計段階において設定する条件が所定の幅を持っていることが多い。したがって、最悪条件下においても性能が出せるように厳しい条件で解析せざるを得ない。このような設計手法が、結果として性能や体格に必要以上の過剰分をもたらすこともあり、この場合、設計後に試作を繰り返すことで、過剰となった体格や性能分を調整することになる。

一般にモータの体格は、要求されるトルク性能と温度上昇の許容値によって決まる。同じ出力・効率を維持したままモータを小型化する場合、体格が小さいうえに同程度の損失が発生することや、放熱面積の縮小から過度な温度上昇が問題となる。温度上昇は永久磁石の磁力の低下や巻線抵抗値の増加などを引き起こし、モータのトルク特性を低下させる。すなわち、小型化と温度上昇はトレードオフの関係にある。したがって、温度上昇とトルク性能をバランスよく設計することが、小型化設計のポイントであり、このバランス設計を実現するためには、モータにおける実際の駆動状態の温度を考慮した特性解析が必須と言える。

そこで、二次元有限要素法による電磁界解析と、熱等価回路網法による熱解析を連成し、さらに数理計画法に基づく形状最適化技術を合わせることで、磁石モータの小型化設計を実現できる解析技術を開発した。開発した解析技術の流れを図12に示す。この解析では、まずモータの各種変数を設定し、それに基づき二次元磁界解析を行い、次いで熱解析を実施する。この結果が設定した目的関数（今回は体格最小化）を満たすまで、所定の制約条件の下で最適化エンジンが各種変数を再設定し、繰り返し計算がなされることになる。

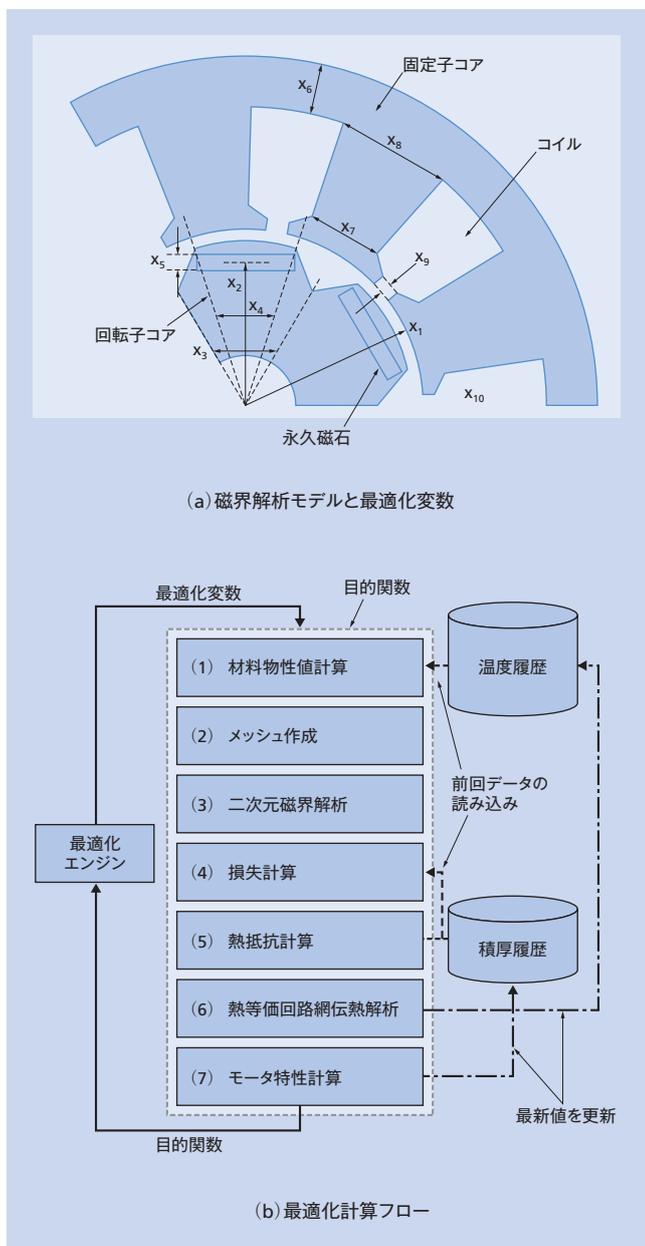


図12 | 開発した熱-磁界連成・最適化解析技術
熱と磁界を連成、形状最適化することで、設計期間短縮とモータの小型化を同時に実現した。

4.2 試作結果

前節で述べた技術を適用して試作した5馬力磁石モータ

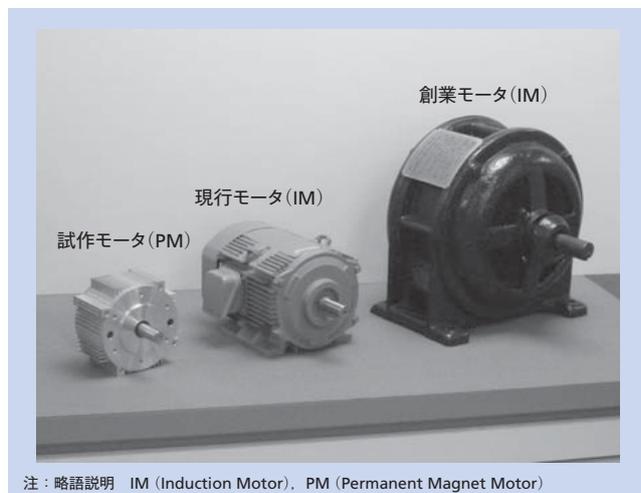


図13 | 5馬力創業モータ、現行モータと試作モータの比較
試作モータは創業モータに対して体格が1/10である。



図14 | 日立uVALUEコンベンション2010における試作モータの展示状況
日立製作所デザイン本部によるデザインを採用し、「100周年記念展示」コーナーで試作モータを展示した。

は、1910年の日立製作所創業製品である「5馬力誘導モータ」に比べ、 $\frac{1}{10}$ の体積（現行5馬力誘導モータに比べ、 $\frac{1}{3}$ ）を実現することができた（図13参照）。また、回転子に日立金属株式会社のネオジム磁石を適用したほか、日立電線株式会社のエナメル線、日立化成工業株式会社の有機材料など、日立グループの先端材料を結集して開発している。

さらに、この試作モータは、日立製作所デザイン本部のデザインを加え、2010年7月に開催された「日立uVALUEコンベンション2010」の「100周年記念展示」コーナーで一般公開された（図14参照）。

このモータは、大幅な小型化を実現しながらも、連続運転試験では約94%の高効率性能を実現している。

5. 今後の展望

モータの進化は設計技術、生産技術、材料技術によって支えられてきた。特に近年では、さまざまなシミュレーション技術や、永久磁石に代表される材料技術の進展が、モータの高性能化に大きく寄与した。今後は環境負荷軽減の観点から、さらなる高効率化はもちろんのこと、小型軽量化による使用材料の低減が図られるとともに、希少材料を含まない材料選定も視野に入れた構造検討がなされていくものと推察される⁹⁾。また最近ではインバータとモータが普通に用いられるようになり、モータ、インバータ、そしてモータ制御は、構造的にも、設計的にも一体化していくと予想される。制御としては120度通電から始まり、ベクトル制御が普及してきたが、小型軽量化と制御性を両立させるために、今後はモータの磁気飽和による非線形性を考慮した制御も実用化されるように思われる¹⁰⁾。同時に設計技術としても、これまでインバータ、モータ、制御の個別設計を組み合わせて調整する形から、全体最適を見た設計を経て、一体の設計が行われていくと考えられる。

6. おわりに

ここでは、磁気応用製品の一つであるモータ、発電機、さらに駆動側としてのインバータによる制御の歴史的発展の経緯と今後の展望について述べた。

モータと制御、モータとインバータの関係のように、今後は、モータとインバータが一体になって設計できることで、さらなる信頼性、体格、価格のバランス設計が可能となり、電動化がますます進んでいくことが期待される。

参考文献

- 1) 阿部：Energy Efficiency in Motor Driven Systems 2007 カンファレンス出席報告、日本電機工業会機関紙「電機」、14 (2007.10)
- 2) 湧井、外：タービン発電機における固定子端部の3次元磁界解析、電気学会論文誌D、Vol.124-D、No.1、77 (2004.1)
- 3) 三上、外：高調波二次電流を考慮した三相かご形誘導電動機の機内高調波磁場解析、電気学会論文誌D、Vol.116-D、No.2、158 (1996.2)
- 4) 井出、外：正相・逆相分を考慮した同期機空疎磁束波の高調波分析、平成4年電気学会全国大会講演論文集、No.708、(1992)
- 5) 塩幡、外：電磁力励起による電動機の振動放射音解析法、電気学会論文誌D、Vol.118-D、No.11、1301 (1998.11)
- 6) 榎本、外：分割コアモータのコギングトルク要因分析、電気学会論文誌D、Vol.124-D、No.1、85 (2004.1)
- 7) 川端、他：位置センサレス・モータ電流センサレス永久磁石同期モータ制御に関する検討、平成14年電気学会産業応用部門大会講演論文集、No.171 (2002)
- 8) 岩崎、外：熱-磁界連成最適化による永久磁石同期モータの小形化設計と試作機による性能評価、電気学会回転機研究会資料、RM-10-66 (2010.5)
- 9) 天野、外：アモルファス巻き鉄心の永久磁石モータへの適用検討、電気学会回転機研究会資料、RM-08-122 (2008.11)
- 10) 名倉、外：磁束飽和およびdq軸間磁束干渉をモデル化した新ベクトル制御法、平成21年電気学会産業応用部門大会講演論文集、No.1-151 (2009)

執筆者紹介



三上 浩幸

1990年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センタ モータシステム研究部 所属
現在、モータ、発電機、ドライブ制御の研究開発に従事
博士(工学)
電気学会会員、IEEE会員



井出 一正

1988年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センタ パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
現在、モータを含むパワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事
博士(工学)
電気学会上級会員、IEEE会員



清水 幸昭

1972年日立製作所入社、電動応用統括推進本部 モータ事業本部 所属
現在、モータ、インバータの開発強化プロジェクトに従事



妹尾 正治

1975年日立製作所入社、電動応用統括推進本部 モータ事業本部 第2開発部 所属
現在、モータ、インバータの開発強化プロジェクトに従事
電気学会会員



関 秀明

1979年日立製作所入社、電動応用統括推進本部 所属
現在、モータ、インバータの開発強化プロジェクトに従事