

# 小型・高効率の永久磁石モータ

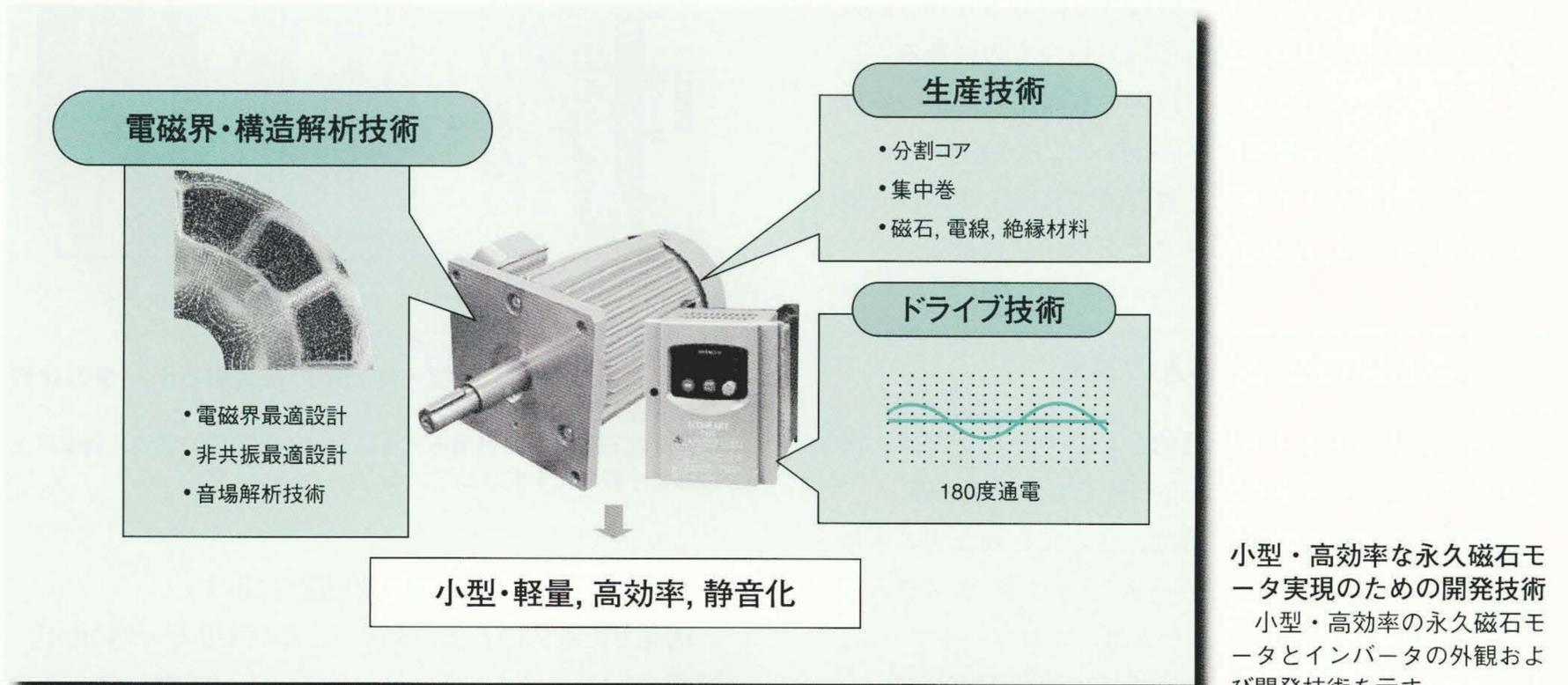
Compact and High-Efficiency Permanent-Magnet Motors

小林孝司 Takashi Kobayashi

鈴木利文 Toshifumi Suzuki

佐藤和雄 Kazuo Satô

李 東偉 Li Dong-Wei



小型・高効率な永久磁石モータ実現のための開発技術  
小型・高効率の永久磁石モータとインバータの外観および開発技術を示す。

省エネルギー・省資源の強い社会的要請により、モータの高効率化が求められている。これにこたえるために、回転子に永久磁石を用いた永久磁石モータとドライブ技術を開発し、回転数が $3,600 \text{ min}^{-1}$ の250 Wから3.7 kWまでをシリーズ化した。従来の汎用モータに比べて容積を50%以下とし、効率を9%向上させ、静音化も実現した。この小型・高効率の永久磁石モータの開発に当たっては、電磁界解析と振動・音場解析を統合した解析ツールを駆使し、構造を最適化した。これにより、固定子巻線の端線材長を短縮することができ、モータの軸方向を短くできる「集中巻」や、占積率を向上させる「分割コア方式」の生産技術を用いた製造を可能にしている。電流波形を正弦波で通電するドライブ技術でモータを駆動しているため、高効率かつ低騒音のモータを幅広い回転速度で運転することができる。

日立グループは、総合技術力を生かし、省エネルギー実現の主要製品であるモータとドライブのためのさまざまな技術を開発することにより、環境に優しい社会基盤構築への貢献を目指している。

## 1 はじめに

環境問題に対する世界的な関心が高まり、1997年の「地球温暖化防止京都会議」で二酸化炭素の排出量を削減する目標が決められ、これに対応して、省エネルギーを推進する法律が1999年4月に施行された<sup>1)</sup>。それに伴い、産業分野では、省エネルギーへの取組みが加速している。

工場やプラントでは、約70%の電力はモータで消費されている。したがって、高効率のモータの開発が省エネルギーの目標達成には必要不可欠であり、これまで広く用いられている誘導モータの高効率化の研究開発が強力に推進されている。一方、永久磁石の電磁特性やモータの生産技術などの進歩により、永久磁石をモータに採用した製品も数多く使用されるようになってきた。

永久磁石モータでは、永久磁石自体が界磁磁束を作る。また、誘導モータのように回転子側にアルミニウムや銅の電気良導体を使用していないので、回転子側の渦電流損はほとんど発生しない。このため、永久磁石モータは、誘導モータよりも効率よく運転することができる。さらに、主要構成部品である鉄心と電線を少なくすることが可能になったことから、同一出力を維持しながら、従来の汎用モータよりも大きさを小さくすることができ、省資源の観点からも望ましい製品と言える。

しかし、小型・軽量化に伴い、モータの出力密度が必然的に増加する。従来のモータの固定子やハウジングの構造をそのまま縮小すると、剛性が低下し、振動や騒音が増大する場合も想定される。したがって、低振動・静音化の技術が必要不可欠である。日立製作所は、この低

振動・静音化を達成するために、構造系とドライブ技術の二つの手法を組み合わせた技術を開発した。

また、永久磁石モータは従来の汎用モータに比べて小型・軽量でかつ高効率・低騒音なので、応用分野も拡大し、これに応じて負荷変動も多種多様なものになる。したがって、モータとドライブ技術にも高精度でかつ多様な用途に対応できる柔軟性を併せ持つことが求められる。

ここでは、省エネルギーと省資源に貢献する、日立製作所が開発した永久磁石モータとドライブ技術について述べる。

## 2 永久磁石モータ導入の効果

一般に、省エネルギーを目的としたドライブでは、汎用モータとインバータを組み合わせたものを用いる。

これに対して、日立製作所は、さらに有効な省エネルギーが実現できる永久磁石モータドライブシステムを開発した。このドライブシステムは、ブロワーやファン、ポンプなど長時間連続運転する機械の消費電力節減で大きく貢献できる。

モータを用いるさまざまな機器にこの小型・高効率化した永久磁石モータを搭載することにより、小型化はもちろんのこと、損失低減による温度上昇抑制により、ユーザーの冷却装置の負担を軽減し、トータルとして機械の省スペース化も可能になる。

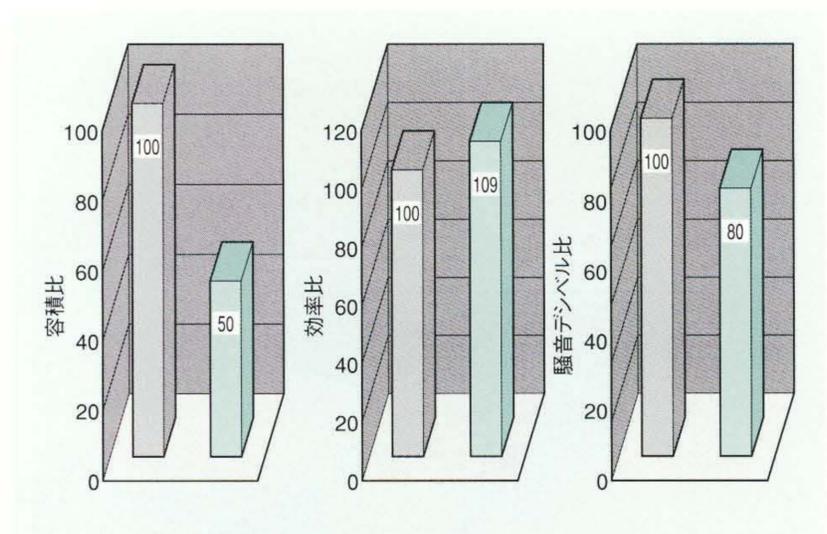
開発した永久磁石モータでは、汎用モータのベアリングサイズとの互換性を持たせることで、ユーザーが培ってきたフィールド信頼性を損なうことなく、置き換えができるように配慮している。

さらに、永久磁石モータを採用することによって振動や騒音が低減されるので、静粛性が要求される用途や場所への適用も可能になる。

また、可変速運転の際にも高効率を達成できるように、駆動電流と電圧を制御することができるほか、急激な負荷変動に追従できるドライブ技術により、多様な用途が広がる。

## 3 永久磁石モータの特徴

日立製作所は、1983年にエアコンの圧縮機用に永久磁石モータを業界に先駆けて開発し、以降、この永久磁石モータの効率を改善してきた。また、産業界では、ファンやポンプにも永久磁石モータが広く利用されるようになってきた。このようなさまざまな用途での要望にこたえるように進化、発展させた日立製作所の永久磁石モ



注：□ (汎用モータ), □ (永久磁石モータ)

図1 汎用モータと小型・高効率の永久磁石モータの比較 (3.7 kW, 3,600 min<sup>-1</sup>)

永久磁石モータは汎用モータに比べると容積の低減、効率向上に加え、静音化を実現している。

と汎用モータの性能の比較を図1に示す。

開発した永久磁石モータは、従来の汎用モータに比べ、容積で50%、効率で9%向上している。また、モータの小型化に伴う冷却ファンの小型化は通風騒音の低減に貢献し、さらに、独自の非共振構造を適用することにより、電磁騒音の低減も実現している。

日立製作所は、出力が250 Wから3.7 kWまで、回転数が3,600 min<sup>-1</sup>の永久磁石モータをシリーズ化した。

## 4 永久磁石モータを支える開発技術

永久磁石モータは産業分野での利用が広まりつつあり、さまざまな環境や負荷条件で使用されるようになった。これらの多様な用途でのさまざまな条件にこたえる、信頼性の高い永久磁石モータを開発するために、独自のモータ解析CAE (Computer-Aided Engineering) ツールを開発した(図2参照)。

効率の高い永久磁石モータの設計、生産、およびドライブ技術について以下に述べる。

### 4.1 電磁界解析と構造解析技術

永久磁石モータを高効率化するためには、モータの電磁気的特性を高精度に解析し、最適化するツールが必要である。

磁気回路を高精度に設計するためには、鉄心の磁気特性の非線形性や、永久磁石の磁気特性データも考慮した、有限要素法を用いた電磁界解析プログラムツールにより、トルクやインダクタンスなどのモータ定数や特性を高精度に算出する。また、このツールでは、図2に示すような磁束分布が可視的に表示できるので、モータ構

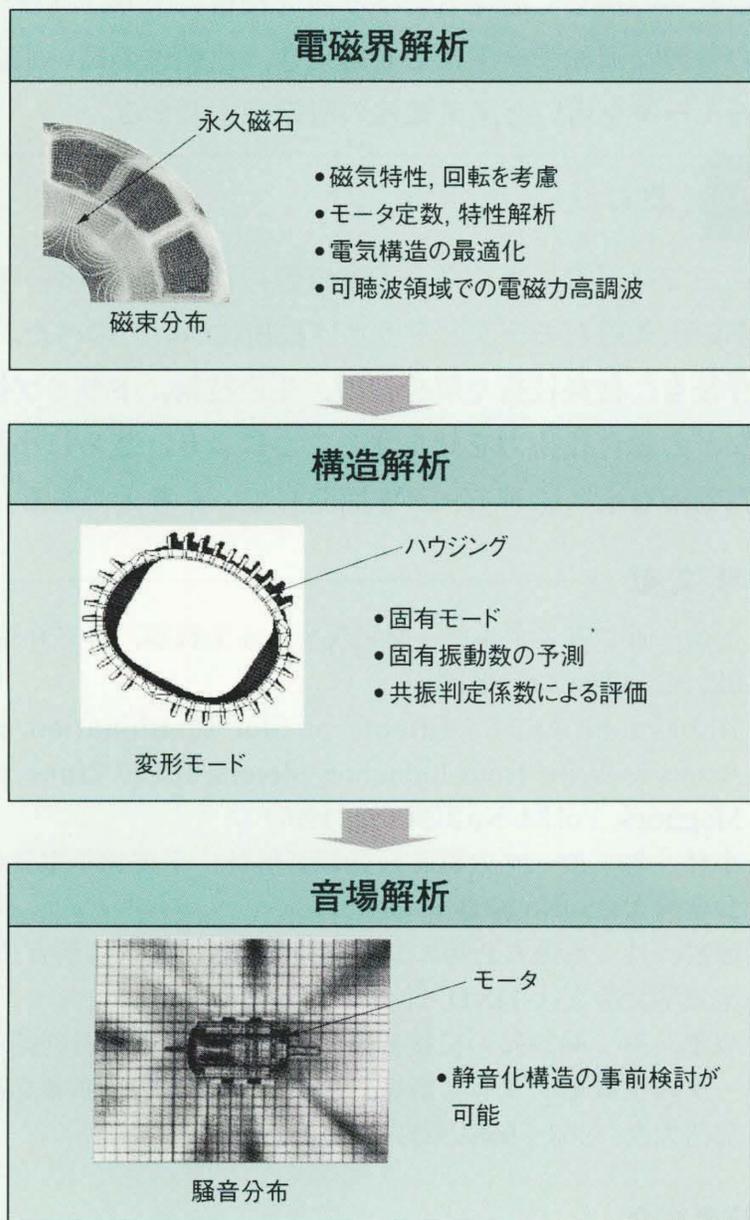


図2 電磁・構造系一貫解析ツール

この解析ツールによって電気構造を最適化でき、騒音を精度よく予測することが可能なので、効率のよい非共振設計ができる。

造の細部にわたって電気構造を検討できる。

最適化では、固定子鉄心の形状や、回転子に組み込まれる永久磁石の配置、形状などの多変数を同時に最適化できる手法を用いて、体積当たりの効率を最大化するように設計する。また、モータの発熱も定量的に把握できるので、信頼性を高める永久磁石モータを設計することができる。

高効率化のほかに、低振動、静音化も重要な課題である。モータの主要な騒音に電磁力に由来する電磁騒音がある<sup>2)</sup>。モータ内で発生する電磁力の変動が固定子を変形させ、この変形がハウジングや脚部に伝達され、さらに、周囲の空間に音となって放射される。特に電磁力の変形モードと周波数がモータの固有振動数に一致したときに共振が起き、大きな騒音となる。

従来は、電気系と機械系で個別に解析し、実験によって試行錯誤を繰り返して静音化を検討していた。このた

め、低振動・静音化モータを迅速に開発するための、電気系と機械系を有機的に結合した解析ツールの開発が待たれていた。

日立製作所は、電磁界解析と機械系の振動解析および音場解析まで一貫して解析できる手法を開発した<sup>3)</sup>。この手法では、固定子に働く電磁力を構造系の加振力として変換後、振動解析を行い、可聴周波数領域での電磁振動音を予測する。さらに、電磁力と変形モードの相関関係を定量的に評価する係数(共振判定係数)を導出した。これらの一貫解析ツールを用いることにより、電気系と機械系の共振状態を回避する最適設計が効率よく行えるようになり<sup>4)</sup>、3 dB程度の誤差での騒音の事前評価を可能にした。この手法により、小型・軽量でありながら、低振動・静音のモータを迅速に開発することができる。

#### 4.2 生産技術

モータの生産効率を上げるためには、各部品で生じる損失を分析し、これらをバランスよく低減しなければならない。

損失の要因には、一次銅損(巻線で発生するジュール熱損失)や鉄損などがある。一次銅損を低減させるために、トルクには寄与しない端部の巻線を短くした「集中巻」を採用する(図3参照)。集中巻では、一つのトウース(歯)を周回するように巻線を施す。一方、分布巻では、複数の歯をまたいで巻線することから、巻線の渡り部の構造が複雑になる。集中巻では、端部の長さを分布巻の40%程度に削減できる。これに伴い、モータの軸方向の長さが短くなり、モータの体積も小さくなる。巻線抵抗も小さくなるので、一次銅損も減少し、効率も向上する。

日立製作所は、さらに、分割コア方式を採用して占積率(電線の総断面積のスロット面積に対する比率)を向上

方式	集中巻	分布巻
項目	集中巻	分布巻
構成	<p>40%</p> <p>コイル</p> <p>トウース</p>	<p>100%</p> <p>トウース</p> <p>コイル</p>
体積	小さい	大きい
損失	低い	高い
効率	高い	低い

図3 巻線方式の比較

集中巻を採用することにより、高効率化が可能となる。

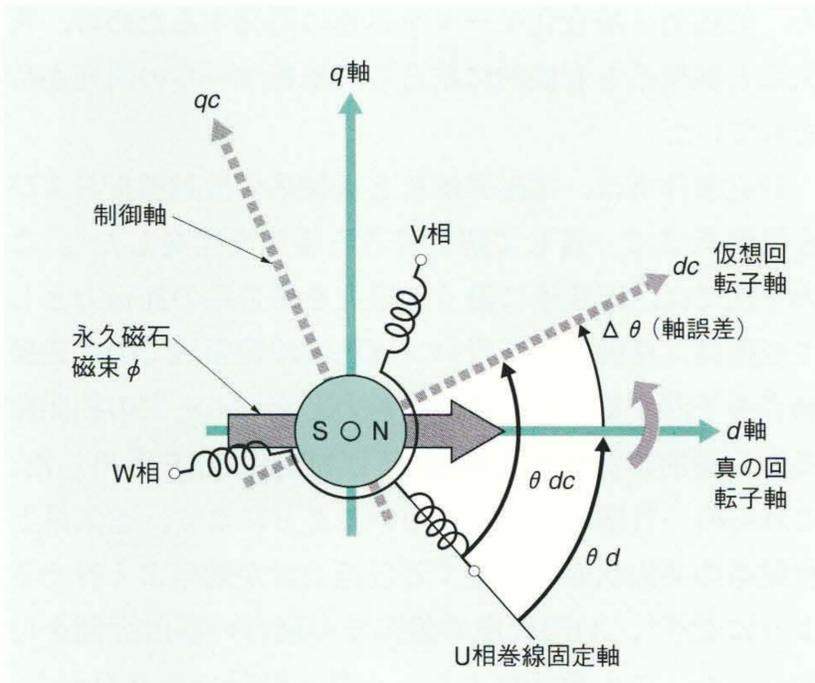


図4 センサレス制御のベクトル図  
センサレス制御の原理を示す。

させることにより、高出力・密度化を図っている。

### 4.3 ドライブ技術

永久磁石モータのドライブ技術には、120度通電と180度通電がある。日立製作所は、振動と騒音の観点から、180度通電方式を採用した。

最近、磁極位置センサレス制御が注目されている。日立製作所は、独自の磁極位置センサレス制御方式を開発した<sup>5)</sup>。この方式の原理は、モータの電圧・電流とモータ電気定数からモータが回転することによって電機子巻線に誘導される誘起電圧を求め、それを基に回転子位置を推定するものである。

開発した方式では、軸誤差(制御系で仮定した仮想回転子軸と真の回転子軸との差)によって位置を推定する。この軸誤差は、以下の式に示すように、永久磁石モータの回転子座標系であるd-q座標系の次の電圧方程式を制御系に変換することにより、直接求めることができる。

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = (r + Lp) \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \omega_r L \begin{pmatrix} -I_q \\ I_d \end{pmatrix} + \omega_r \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_0 \end{pmatrix}$$

ここに、 $\omega_r$ ：回転子速度、 $L$ ：巻線インダクタンス、 $r$ ：巻線抵抗、 $\phi_0$ ：磁束、 $p$ ：微分演算子、 $V_d$ 、 $V_q$ ：d軸、q軸電圧、 $I_d$ 、 $I_q$ ：d軸、q軸電流

磁極位置センサレス制御では、回転子位置の検出が不可能であり、回転子速度 $\omega_r$ は求められない。そのため、制御系で仮定した仮想回転子座標系dc-qc軸を導入する。dc-qc座標とd-q座標は位相 $\Delta\theta$ だけ軸誤差( $\theta_{dc} - \theta_d$ )があるものとし、この $\Delta\theta$ をゼロにするように周波数を制御す

ることにより、回転子速度を推定する(図4参照)。

これらの新しく開発したドライブ技術により、ユーザーの多様な運転モードにも対応でき、信頼性の高い永久磁石モータを用いた産業機械の用途が拡大する。

## 5 おわりに

ここでは、省エネルギー・省資源に貢献する小型・高効率の永久磁石モータとドライブ技術についてのべた。

今後も、材料技術や解析技術、生産技術、ドライブ技術などの総合技術力を結集することにより、さらに小型で高効率な永久磁石モータを開発していく考えである。

### 参考文献

- 1) 上金, 外: 省エネルギーを実現する産業機器, 日立評論, 82, 6, 423~426(平12-6)
- 2) Kobayashi, et al.: Effects of Slot Combination on Acoustic Noise from Induction Motors, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.2(March 1997)
- 3) 小林, 外: モータの電磁振動騒音解析, 平成10年電気学会全国大会, No.1033
- 4) 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D, 118-D, 11, 1301~1307(1998)
- 5) 坂本, 外: 軸誤差の直接推定演算による永久磁石同期モータの位置センサレス制御, 平成12年電気学会産業応用部門大会, 963~966(2000)

### 執筆者紹介



**小林孝司**

1981年日立製作所入社, 産業機器グループ 開発本部 開発センタ 所属  
現在, 高効率モータの研究開発に従事  
電気学会会員  
E-mail: takoba @ gm. narashino. hitachi. co. jp



**佐藤和雄**

1985年日立製作所入社, 産業機器グループ 株式会社日立ドライブシステムズ DCBL製品化プロジェクト 所属  
現在, 永久磁石モータの開発に従事  
E-mail: satou @ gm. narashino. hitachi. co. jp



**鈴木利文**

1991年日立製作所入社, 産業機器グループ 株式会社日立ドライブシステムズ DCBL製品化プロジェクト 所属  
現在, 永久磁石モータの開発に従事  
E-mail: TSUZUKI @ gm. narashino. hitachi. co. jp



**李 東偉**

1998年日立製作所入社, 機械研究所 第一研究部 所属  
現在, 振動・騒音低減化技術の研究開発に従事  
工学博士  
日本機械学会会員  
E-mail: lidw @ gm. merl. hitachi. co. jp