

# 回転機の高性能化による環境負荷低減

大穀晃裕\*

Environmental Load Reduction by Performance Advances in Rotating Machines

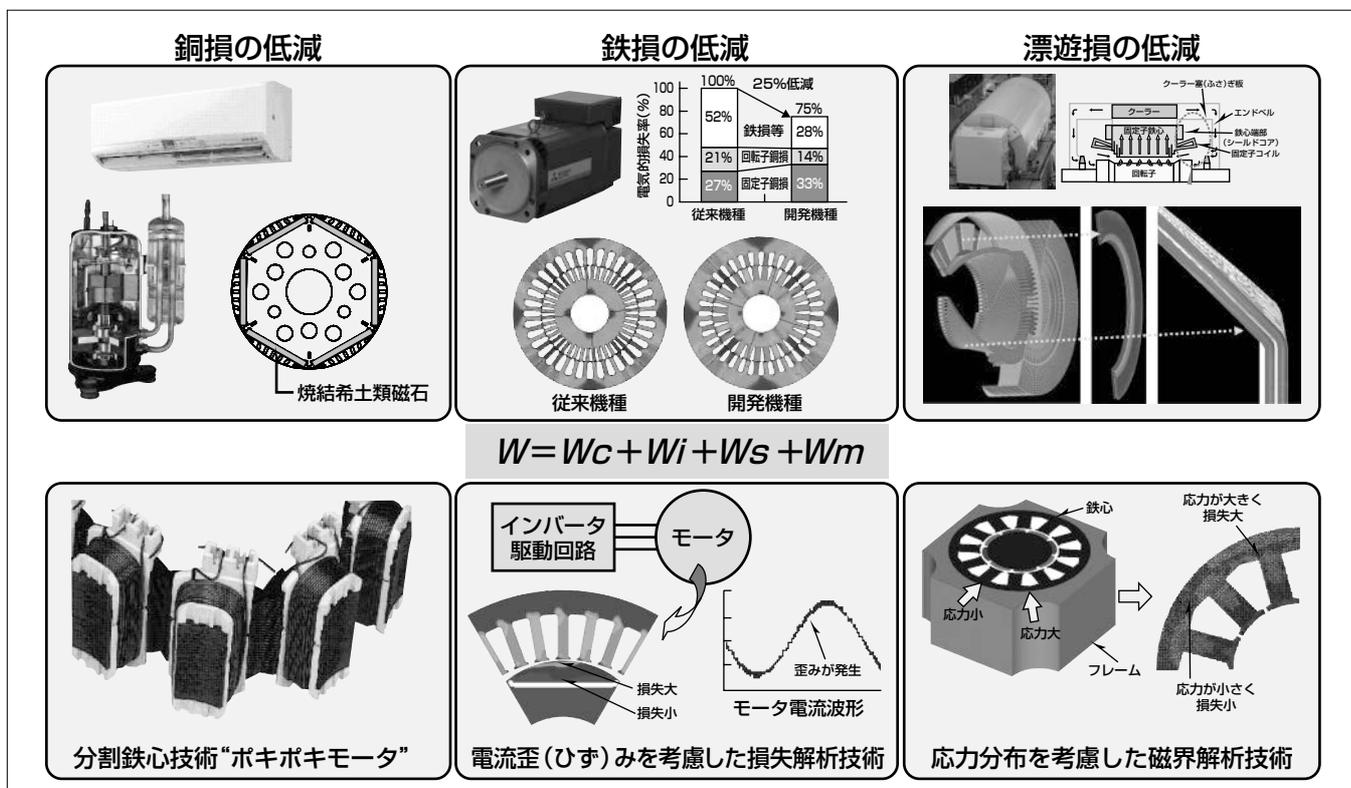
Akihiro Daikoku

## 要旨

電気は現代生活で最も重要なエネルギーインフラの一つである。日本では全電力消費量の半分以上をモータで消費していると言われており、モータの高効率化による消費電力削減は、環境負荷低減に大きく貢献する。また、従来は油圧駆動を行っていた分野を電動化(モータ駆動化)することで、待機時の消費エネルギーを削減することができる。その一方で、電気エネルギーを作り出す側に注目すると、発電所における発電機の高効率化も非常に重要である。大型発電機の基本的な磁気回路はすでに完成の域に達しており、効率も約99%となっているが、出力が数百MWにも及ぶため、効率が非常に高く損失の割合が小さくても、損失量としては非常に大きい。そのため構造部材での損失低減など地道な効率改善活動が必要である。

三菱電機では、家電から産業用、社会インフラ、車載に

至る様々な分野で回転機応用製品を展開しており、各々について環境負荷低減を目指した高性能化開発を行い、製品を世に送り出している。中小型回転機では、高効率化のための磁気構造設計と生産設計の両面を考慮した製品開発を進めており、極数/スロット数や永久磁石形状などの基本設計面での高効率化技術に加え、当社独自の製造技術“ポキポキモータ”による巻線の占積率向上・銅線長削減でモータの銅損低減を実現している。一方、高速・大型回転機では、鉄心に発生する鉄損や端部構造部材・回転子表面などに発生する漂遊損の割合も大きく、各損失のバランス設計が重要となる。本稿では、当社におけるモータ高効率化のための要素技術である、解析技術の高度化を中心とした設計技術について述べた後、各種製品における高効率化事例、モータ適用拡大事例について概説する。



## 回転機の損失低減事例及び損失低減のための要素技術

回転機の損失は、銅損、鉄損、漂遊損、機械損に分類される。損失低減には、これら損失のバランス設計が必要であり、発生損失の高精度予測技術が重要となる。当社では、独自の分割鉄心構造であるポキポキモータなどの生産技術とともに、三次元解析技術、駆動回路との連成解析技術、応力を考慮した解析技術などの要素技術開発を行い、多くの回転機の損失低減を実現し、環境負荷低減に貢献している。

\*先端技術総合研究所(工博)

## 1. ま え が き

我が国の全電力消費量の50%以上がモータで消費されると言われており、環境負荷低減の観点からは、モータの高効率化によるエネルギー消費削減への期待は非常に大きい。モータの応用範囲は広く、電気で動くもののほとんどにモータが搭載されていると言っても過言ではないが、その適用範囲は更に拡大しており、自動車や産業機器などの分野で高応答・高効率で駆動時に温暖化ガスを排出しないモータ駆動方式が、従来の内燃機関や油圧駆動方式に代わって広がりを見せている。この置き換えをさらに進めていくには、従来の駆動方式に負けない高性能モータの開発を行う必要がある。一方、消費される電力のほとんどは、発電所で回転型の発電機によって生み出される。発電時の損失低減も合わせて重要となる。

当社では現在、多くのモータ製品・モータ搭載製品を販売しており、また発電機も製造している。本稿では、当社のモータ製品とそれに適用されている高効率化技術について述べ、代表的な数機種について具体的な取り組みを述べる。

## 2. モータ・発電機の高効率化の動向

### 2.1 モータ・発電機の高効率化の取り組み

モータの損失は次の式で表現される。

$$W = Wc + Wi + Ws + Wm \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $Wc$ ：銅損、 $Wi$ ：鉄損、 $Ws$ ：漂遊損、 $Wm$ ：機械損である。モータの効率を向上させるには、これらの損失を低減する必要がある。このうち銅損とは、巻線で発生するジュール損のことであり、鉄損とは、鉄心内部の磁束が変化することで生じるヒステリシス損と渦電流損の和を指す。また漂遊損とは端部構造部材で発生する渦電流などが原因で生じる損失のことである。

銅損低減には、巻線の占積率を高めたり、トルクに寄与しないコイル端部の銅線をできるだけ減らしたりすることで抵抗を下げるのが有効である。当社独自の製造技術であるポキポキモータは、銅損を低減する技術の代表であり、それ以外の様々な高密度巻線技術もこの銅損を低減するのに有効である。一方、銅損は巻線を通る電流を低減することでも低減できる。モータのトルクは鎖交磁束と電流の積で表されるため、鎖交磁束を増加させることで銅損を減らすことができる。磁束を増やすには、従来の誘導モータに代えて永久磁石モータを採用したり、永久磁石の高グレード化を行うほか、巻線の配置を工夫し、磁束の利用率を高める(巻線係数を高める)ことでも実現できる。

鉄損を低減するには、鉄心に使用する電磁鋼板の高グレード化、又は薄板化が有効であるほか、鉄心の磁束密度を低減するのが有効である。しかし、一般に寸法制約のある

中でモータを設計した場合、銅損と鉄損とはトレードオフの関係になる場合が多く、それらのバランスをとった設計を行うことが必要である。

漂遊損については、従来は発生部位の特定やその定量化ができなかったが、近年、三次元解析をはじめとする解析技術の進展によって、漂遊損の発生部位と発生量を予測可能となり、有効な対策を講じることが可能となった。

永久磁石モータ(ブラシレスDCモータ)は、一般に広く用いられている誘導モータと比較して、回転子での二次銅損がないために一般に高効率とされる。しかし永久磁石による界磁磁束が常に存在するため、高速駆動時間が長い場合には界磁磁束の制御が容易な誘導モータなどが有利な場合もある。このように、適用する製品の特性に応じてモータの種類を適宜選択する必要がある。

### 2.2 高効率化のための磁気設計要素技術の開発

2.1節で述べたように、近年における損失低減の実現には、高度磁界解析を用いた磁気設計が不可欠となっている。当社の解析技術の高度化事例として、高度三次元磁界解析技術を用いた磁気設計のほか、インバータ駆動時の高周波損失を高精度に算出する統合開発環境の開発(図1)、あるいは焼きばめによる応力や打ち抜き歪みなど製造時の加工劣化の影響を定量化し、これを考慮した設計技術(図2)を独自開発し、製品設計に生かしている。

### 2.3 モータ駆動システムの高効率化の取り組み

これまでモータ自身を高効率化するための取り組みについて述べたが、インバータ駆動モータについては、駆動技術の高度化による効率向上も同時に行っている。

商用電源駆動のモータと比べて、インバータ駆動のモータでは、モータの負荷状況に応じて最適な運転ポイントで駆動できるため、一般に効率改善が可能である。またモー

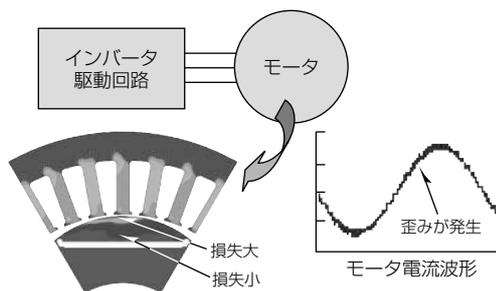


図1. インバータ駆動時の損失を定量化する連成解析技術

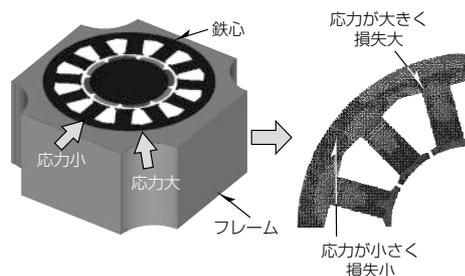


図2. 応力の影響を考慮した解析技術

タ高効率化のための制御技術として、PWM(Pulse Width Modulation)の高周波化などが行われているが、インバータ回路損失とトレードオフの関係にあり、両者のバランス設計が行われる。また、駆動システム全体としての高効率化には、駆動時(力行時)の効率だけではなく、電力回生が有効である。一例として、電車の主電動機ではブレーキ力を電源に回生することでシステム効率を高めているほか、エレベーターシステムでは、減速時のエネルギーをバッテリーに蓄え、次回加速時に再利用することで効率を高めるエレセーブシステムがオプションとして用意されている。産業用のインバータモータシステムでも同様に回生オプションが用意されている。

### 3. 高効率化・環境負荷低減の具体例

#### 3.1 当社のモータ・発電機応用製品

当社が発売しているモータ・発電機とその応用製品の代表例を表1に示す。FA(Factory Automation)、車載、家電、社会インフラなど幅広い分野に製品を送り出している。

以下に、モータ・発電機の高効率化事例、及びモータの適用拡大による環境負荷低減事例を述べる。

#### 3.2 エアコン圧縮機

住環境機器では、環境意識の高まりの中、主に省エネルギーの観点からインバータ駆動化、誘導モータに代わる高効率なブラシレスDCモータ化が行われてきた。特にルームエアコンは家庭用電力の約1/4を占めるとされ、省エネルギー化が急速に進展した。図3に当社のエアコン圧縮機用モータを、図4に設計と効率向上の変遷を示す。量産としてのコストを維持しつつ、PM化、集中巻モータの採用、希土類磁石の採用などによって、効率を向上させてきた。

#### 3.3 主軸モータ

工作機の工具駆動などに用いられる主軸モータに対して

表1. 当社の主なモータ・発電機適用製品

分野	適用製品
FA	汎用三相モータ、サーボモータ、リニアモータ、主軸モータ、ギヤードモータ
車載	電動パワーステアリング用モータ、スタータ、燃料ポンプ用モータ、オルタネータ
家電、業務用電気品	エアコン、換気扇、掃除機、ジェットタオル
社会インフラ	電車用主電動機、エレベーター巻上機モータ、タービン発電機、水車発電機

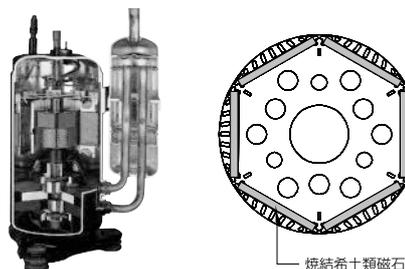


図3. エアコン圧縮機用モータ

も、省エネルギー、省資源、軽量、高信頼性を実現できる製品が求められるようになってきた。主軸モータは8,000～数万rpmの高速駆動が求められる一方、実際の加工時には低速までの幅広い回転数で駆動することが求められる。そのため、銅損と鉄損のバランス設計が非常に重要となる。これに対し、当社では普及タイプの工作機械に向けた枠付主軸モータの新シリーズ“SJ-D”を開発し、発売を開始した。図5に外観とその効率改善結果を、図6に損失分布比較を示す。

これ以外にも、例えば40,000rpm以上の高速駆動を行う掃除機用モータにおいても、鉄心材料の薄板化による鉄損低減を行い、銅損/鉄損のバランス設計を行うことで、高効率化を実現している。

#### 3.4 産業用モータ

工場のファンやポンプを駆動する用途には、堅牢(けんろう)で安価な商用電源駆動の汎用(はんよう)三相誘導モータが一般に用いられる。この誘導モータをインバータ駆動することで、通常の商用電源駆動に比べて大幅な効率向上ができる。しかし誘導モータは回転子に磁石を持たないため、モータを運転するには、回転子の磁束を作るための励磁電流を流す必要がある。これに対し磁石を回転子に埋め込んだIPM(Interior Permanent Magnet)モータは、こ

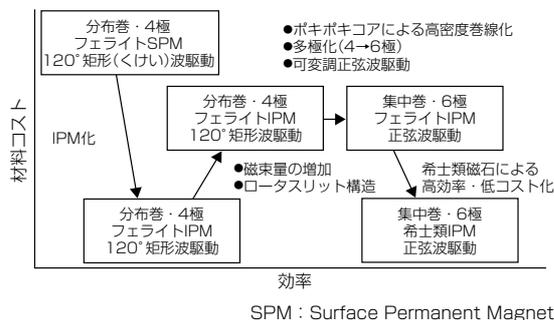


図4. エアコン圧縮機用モータの変遷

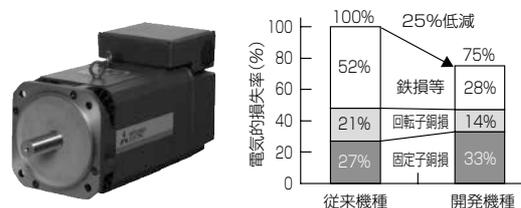


図5. 主軸用モータとその効率改善

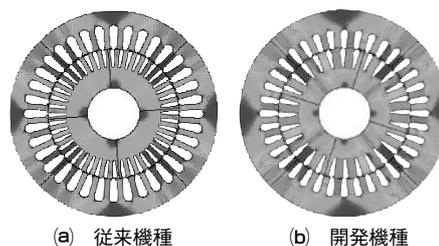


図6. 主軸用モータの鉄損分布の比較

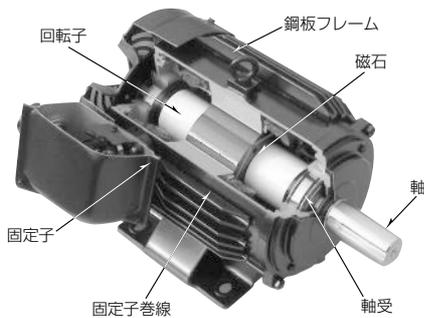


図7. 汎用IPMモータ

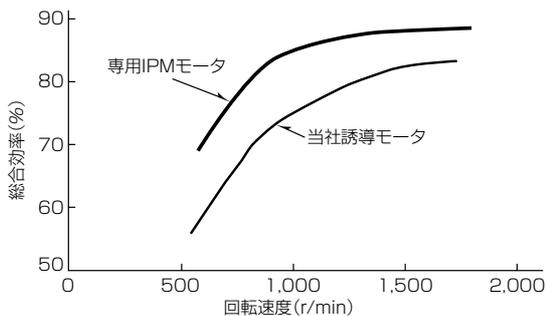


図8. 汎用IPMモータの効率

の励磁電流を流す必要がなく回転子の損失がないため、誘導モータよりも高効率化が実現できる。当社のIPMモータを図7に、誘導モータとの効率比較を図8に示す。

### 3.5 タービン発電機

タービン発電機の損失のうち漂遊負荷損は、銅損試験時に発電機内部で発生する渦電流損、ヒステリシス損の合計値に対応しており、低損失化には各部位の損失分布と損失低減策の効果を定量的に把握する必要がある。近年の三次元電磁界数値解析技術の向上によって、構造や起磁力分布を正確に考慮した高精度解析が可能となっており、損失をほぼ正確に予測できるようになった。タービン発電機の外観と内部構造、端部での損失分布解析結果を図9に示す。

### 3.6 電動パワーステアリング

モータの適用拡大による環境負荷低減の代表例として、電動パワーステアリングを採り上げる。自動車のパワーステアリング装置は、操舵(そうだ)のアシスト力を発生させる方式によって油圧方式と電動式に大別される。油圧式はポンプをエンジンで駆動するため、常にエンジンの出力を消費する。一方、電動式はアシスト力をモータで発生させるため、必要なときだけ駆動させることが可能であり、自動車の燃料消費を大幅に低減できる。当社は1988年に世界で初めて電動パワーステアリング用モータ・コントローラを量産化して以来、その普及に努めてきた。普通車向けのブラシレスタイプのモータの外観を図10に示す。設計のポイントは油圧式に匹敵する操舵フィーリングをモータで実現することであり、コギングトルク・トルク脈動及び騒音・振動の低減が重要となる。

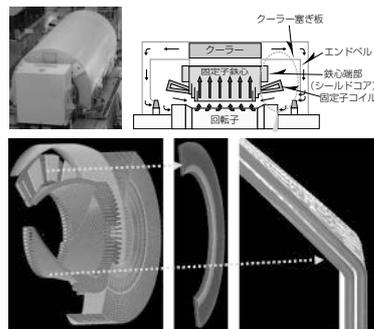


図9. タービン発電機と端部漂遊損失の分布



図10. 電動パワーステアリング用モータ

## 4. む す び

当社の回転機の高性能化による環境負荷低減への取り組み、それを実現するための要素技術開発と具体的事例について述べた。今後も引き続きモータの高効率化と適用拡大、発電機の低損失化に努め、更なる環境負荷低減に努めていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 秋田裕之：ポキポキモータによる省エネルギー・省資源，三菱電機技報，79，No.5，329～332（2005）
- (2) 大穀晃裕，ほか：鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術，三菱電機技報，79，No.11，703～706（2005）
- (3) 寺田 啓，ほか：駆動制御機器の連成シミュレーション，三菱電機技報，79，No.11，715～718（2005）
- (4) 馬場和彦，ほか：ルームエアコン用ブラシレスDCモータの高性能化，三菱電機技報，79，No.11，727～730（2005）
- (5) 小川 徹，ほか：新枠付主軸モータ“SJ-Dシリーズ”，三菱電機技報，83，No.4，263～266（2009）
- (6) 谷本政則，ほか：省エネルギードライブ“FREQROL-FP500J+IPMモータ”，三菱電機技報，79，No.11，739～742（2005）
- (7) 前田 進，ほか：タービン発電機への最新電磁界解析技術の適用，三菱電機技報，81，No.10，704～707（2007）
- (8) 田中俊則：電動パワーステアリング用モータ，三菱電機技報，76，No.6，387～390（2002）