

国際高効率規格IE5レベルを達成した アモルファスモータ

榎本 裕治
Enomoto Yuji

床井 博洋
Tokoi Hirooki

今川 尊雄
Imagawa Takao

鈴木 利文
Suzuki Toshifumi

小俣 剛
Obata Takeshi

相馬 憲一
Souma Kenichi

世界規模で省エネルギー化への関心が高まる中、モータの高効率化が注目されている。産業分野のモータは、各国で法規制による高効率化が進められており、その基準となる効率数値は、国際規格が制定されている。日立グループは、この効率基準値の最高レベルであるIE5効率クラスを実現するモータとして、みずからが有するモータ設

計・製造技術とアモルファス金属を活用するアキシシャルギャップ型モータの開発を行った。IE4効率クラスからさらに損失を低減するための技術として、モータ内部の磁気特性評価技術と高精度解析設計技術を開発し、アモルファス金属鉄心の損失を大幅に削減する構造を見出してIE5の効率クラスを達成した。

1. はじめに

モータは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する機械要素としてさまざまな製品に応用され、人々の生活に不可欠なものとなって久しい。その原理は発明されてから200年以上となるが、近年でも自動車や航空機の駆動源などへの広がりを見せており、さらなる高性能化の技術開発が進められている¹⁾。産業用モータの分野では、2000年以降は高効率化が急務となっている。昨今の国際的な地球温暖化防止の動きを背景に、モータの消費電力削減に注目が集まっている。国内の電力使用量の割合を図1に示す²⁾。国内の年間電力使用量は、約1兆kWhであり、そのうちの半分以上がモータで消費されている。また、工場などで

使用される産業部門に限っては、約75%がモータでの電力使用量となっている。これより、産業用で使用されるモータの効率改善が重要であることが理解できる。

このような背景を基に、モータの効率に関する法規制化が各国で進められている。IEC(International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議)では、産業用モータの国際高効率規格(IEコード)を規定している。現在、各国がIE3効率クラスまでの義務化を開始しており、日本でも2015年4月から、産業用モータの効率値のトップランナー方式による規制が開始された。これにより、産業用モーターメーカーには、IE3効率クラス以上の効率を満足するモータの販売が義務づけられることになった。

日立グループは、アモルファス金属を鉄心に採用し、モータの効率を高めることができるアキシシャルギャップ型モータの基礎技術を2008年に開発し、大容量化やさらなる高効率化とシリーズ化に向けた製品化を推進している。2012年には、IE4効率クラスに適合するモータ効率約93%を達成する11kWアモルファスモータの試作に成功した。

本稿では、さらに高い効率規格値となるIE5の効率クラスに対応できる高効率化技術の開発について述べる。

2. アモルファス金属の適用によるモータの高効率化

アモルファス金属は、溶解した金属の結晶化に要する時間よりも短時間(例えば、1,000°Cを0.001秒以下の時間)

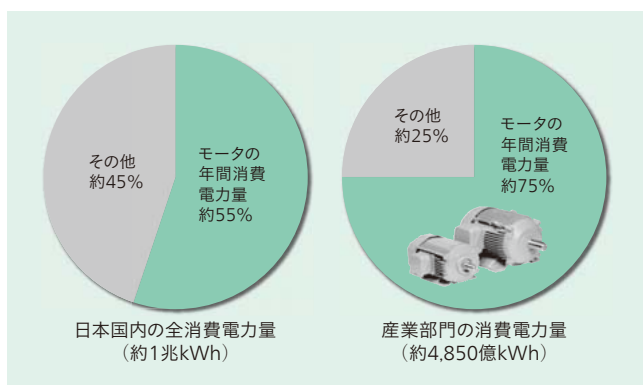


図1 | 日本国内の電力消費状況(2009年)

産業部門でのモータの電力消費量は大きく、この分野でのモータ効率が1%改善されると100万kWクラスの大型発電所1基分の電力を削減できる。

で急速に凝固させる超急冷法によって得られる磁性合金である。アモルファス金属は、非常に優れた磁気特性を有するため、リアクトルや変圧器などの用途で幅広く使用されており、日立グループはそれらの機器の設計・製造技術を蓄積してきている。日立グループの持つ優位技術を活用することにより、モータの分野でも省エネルギーニーズに対応できる高効率化をめざした。

2.1 アモルファス金属の特徴

アモルファス金属とは、結晶構造のない金属の総称であるが、ここで紹介するのは鉄を主成分とする鉄基のアモルファス金属であり、非晶質構造によって高透磁率、低損失などの優れた軟磁気特性を示す(図2参照)。一般的にモータの鉄心に使用されている電磁鋼板に比べて鉄損と呼ばれる損失が約 $\frac{1}{10}$ と小さく、電気機器の省エネルギー化が期待されている材料である³⁾。

1960年に、金属にもアモルファス状態が存在することが発見され、1970年代後半から軟磁性材料としてのアモルファス金属の市販が開始された。アモルファスは、主に配電用変圧器の鉄心材料として採用され、各種の高効率機種が開発された。現在では中国やインドでの需要が多く、アモルファス金属の生産量も増加している状況にある。一方、同様に磁気を応用する製品であるモータでは、アモルファス金属の適用は一向に進んでいない。これは、モータの鉄心は複雑な形状であるために、薄くて硬いアモルファス金属で鉄心を構成することが困難なためである。

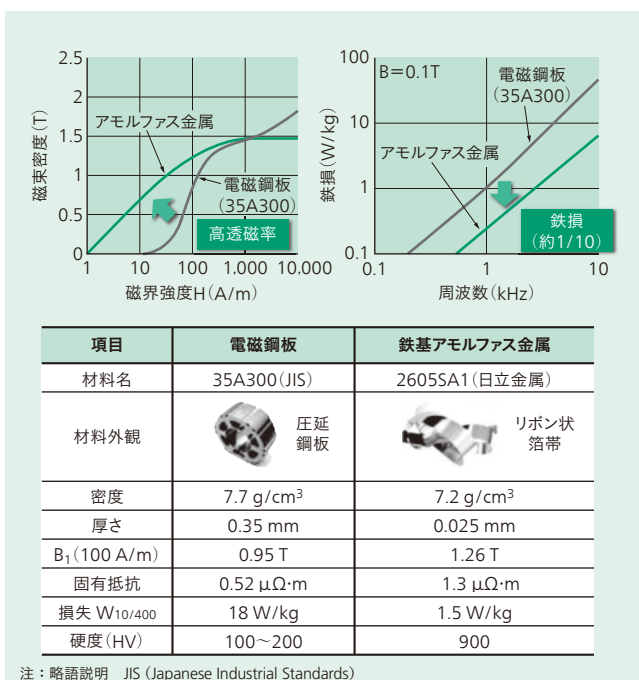


図2 | 鉄基アモルファス金属の特徴

一般的にモータに使用される電磁鋼板に比べて透磁率や鉄損特性が大幅に優れているが、薄くて硬いためにモータでは利用されてこなかった。

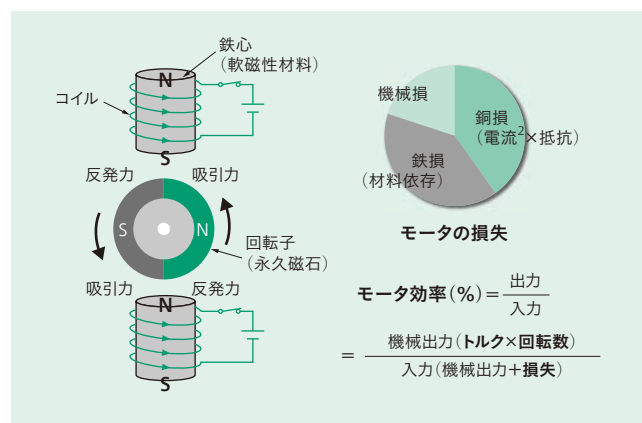


図3 | 永久磁石モータの原理、損失の内訳とモータ効率の定義

モータの効率を高めるためには、機械出力を高めるか、損失を低く抑える必要がある。アモルファス金属は出力増加と損失低減の両方に寄与できる。

2.2 モータの高効率化手法

モータ効率の定義と効率を決定する損失の内訳を簡単なモデルとして図3に示す。モータの回転原理は、鉄心に巻かれたコイルに電流を通電して鉄心部分の磁極をN極、S極に切り換えることにより、回転子側の永久磁石との間に吸引、反発の力が働くというものである。このときに発生する損失には、コイル電流によって発生する銅損(ジュール損)、軟磁性材料を磁化させることで発生する鉄損、および機械的な摩擦損失などがある。モータの効率は、出力と入力との比で表わされる。このため、モータの効率を大きくするためには、トルクや回転数を増加して出力を大きくするか、損失を小さくすることが必要である。

アモルファス金属は、図2のグラフに示したとおり、高透磁率特性によって小さな電流値でも高い磁束密度を実現できるため、トルク出力を増加することができ、かつ、電流値低減によって銅損も低減できる。また、高周波での損失が少ないため高速化しても鉄損を低く抑えることができ、モータの高効率化には効果的である。

2.3 アクシシャルギャップ型モータ構造

アモルファス金属をモータの鉄心に利用するためには、複雑な形状加工をしないで鉄心を構成する必要がある。このため、2つのロータを有するアクシシャルギャップ型モータに着目し、そのステータ鉄心をアモルファスで構成する構造の検討を行った。一般的なラジアルギャップ型モータとアクシシャルギャップ型モータの構造の違いを図4に示す。アクシシャルギャップ型モータのステータ鉄心は、軸方向が同一断面形状の柱体であり、この形状であれば比較的容易にアモルファス金属で構成することができる。さらに、アクシシャルギャップ型モータの特徴を調査していくうちに、軸方向の長さが短い場合には、ラジアル型のモータに比べて大きなトルクを得られる構造であることが分かった。

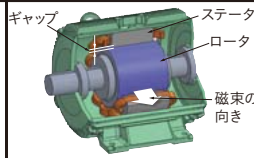
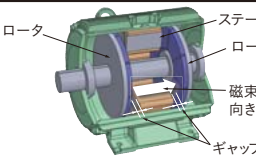
出力∝磁束×電流		磁束∝磁石の強さ×ギャップ面積	
	現行構造(ラジアルギャップ)	開発構造(アキシシャルギャップ)	
構造			
概念	$\text{ギャップ面積} = \pi dL$ 体格増が必須	$\text{ギャップ面積} = (1/4)\pi D^2 \times 2$ 同一体格で面積拡大	

図4 | モータ構造の比較

ラジアルギャップ構造に比べて、アキシシャルギャップ構造はロータの外径が大きくなる分、同一体格内でのギャップ面積(ロータとステータが対向するギャップ部の表面積)を大きくすることができる。

た。これは、ラジアルギャップ型のロータは、ステータの内側に配置されるため、ロータ外径が小さくなり、また、ステータコイルの軸方向にコイルエンドと呼ばれる渡り線部分が軸方向領域を占めるために、ロータの軸方向長も短くなって、トルクに寄与できる領域が少なくなってしまうためである。産業用の一般的なモータで比較すると、同一体格でのラジアル型とアキシシャル型のトルク差(ロータとステータが対向するギャップ部の表面積差)は、約3倍程度となることが分かった。

ロータ磁石表面積が約3倍にできることを裏返せば、磁石の磁力を約 $\frac{1}{3}$ にできることと等価である。モータに使用される磁石は、希土類元素を多く含む高価な磁石であり、その原材料の元素のうちディスプロシウムなどの重希土は、中国に偏在する入手リスクの高いものである。産業用で使用されるモータは、安定的に供給して省エネルギーに貢献する必要があるため、安価で安定供給可能な材料で構成する必要がある。このため、希土類磁石に比べて磁力がちょうど $\frac{1}{3}$ で非常に安価なフェライト磁石を用いてアキシシャルギャップ型モータを構成し、その性能を評価した。その結果、モータの体積を現行モータと同じに設定してアモルファス金属でステータ鉄心を構成したモータは、IE4レベルの効率クラスを満足する結果が得られることが分かった(図5参照)⁴⁾。

そこで、さらに高い効率クラスを実現するために、アモルファスの特性を最大限に引き出す技術の開発を行った。詳細技術を次章で述べる。

3. IE5を達成する低損失化技術

3.1 アモルファス金属鉄心の磁気特性評価技術

IE5効率クラスを実現するためには、モータ損失をIE4効率クラスの損失に比べて20%低減する必要がある。さらなる損失低減項目として、アモルファス金属鉄心の磁気

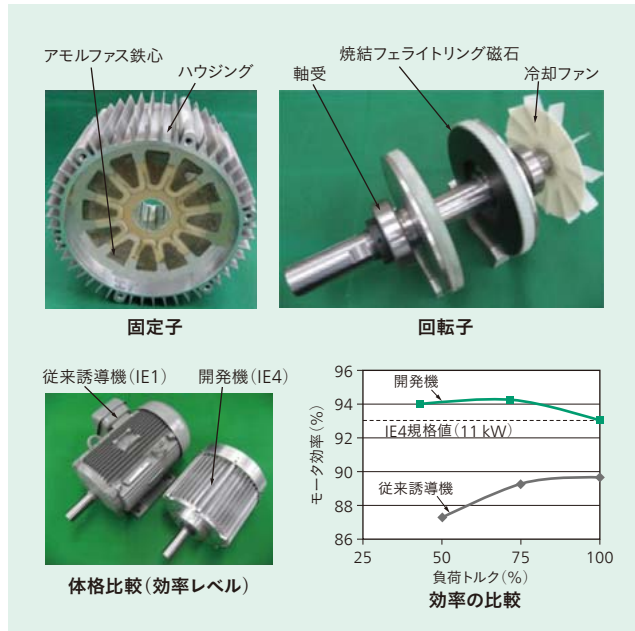


図5 | アモルファスモータ(11 kW)の構造、体積と効率の比較

鉄心にアモルファスを使用し、磁石には安価なフェライト磁石を用いた開発機は、従来型のモータと同等以下の体積でIE4効率クラスを満足した。

特性劣化に着目して検討を行った。アモルファス金属は、図2に示したとおり、非常に良好な低損失特性を有するが、その特性は、応力印加などの外乱によって特性劣化を示すことが知られている。本モータに使用されるアモルファス金属鉄心も、その保持構造によって応力の影響を受けると予測した。しかし、これまでモータの状態として組み立てられたあとに、アモルファス鉄心部の磁気特性を正確に把握することができないため、鉄心部の劣化状態は経験係数として設計を行っていた。したがって、実際の劣化状態が把握でき、係数を小さくして設計することによってモータの効率向上が可能となる。そこで、モータとして組み立てられた状態での鉄心磁気特性を高精度に把握する評価技術の開発を行った。

磁化を正確に測定するために、Hコイルと呼ばれる正確な寸法関係を有するコイルを2つのペアとした超小型センサーを開発した。その構造を図6に示す。フレキシブル

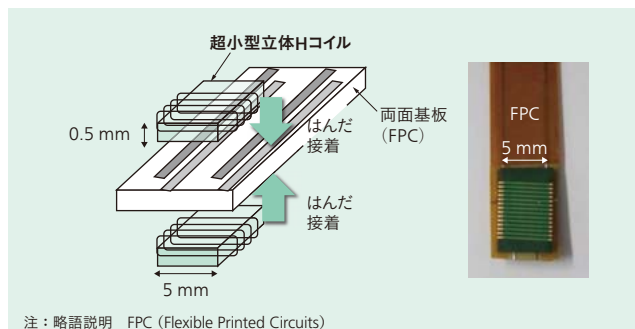


図6 | 超小型立体Hコイルを用いた超小型磁気センサー

2つのHコイルの寸法と位置精度を高めており、磁性体近傍の狭い部分に配置することで高い精度で実際の磁気特性を計測可能とした。

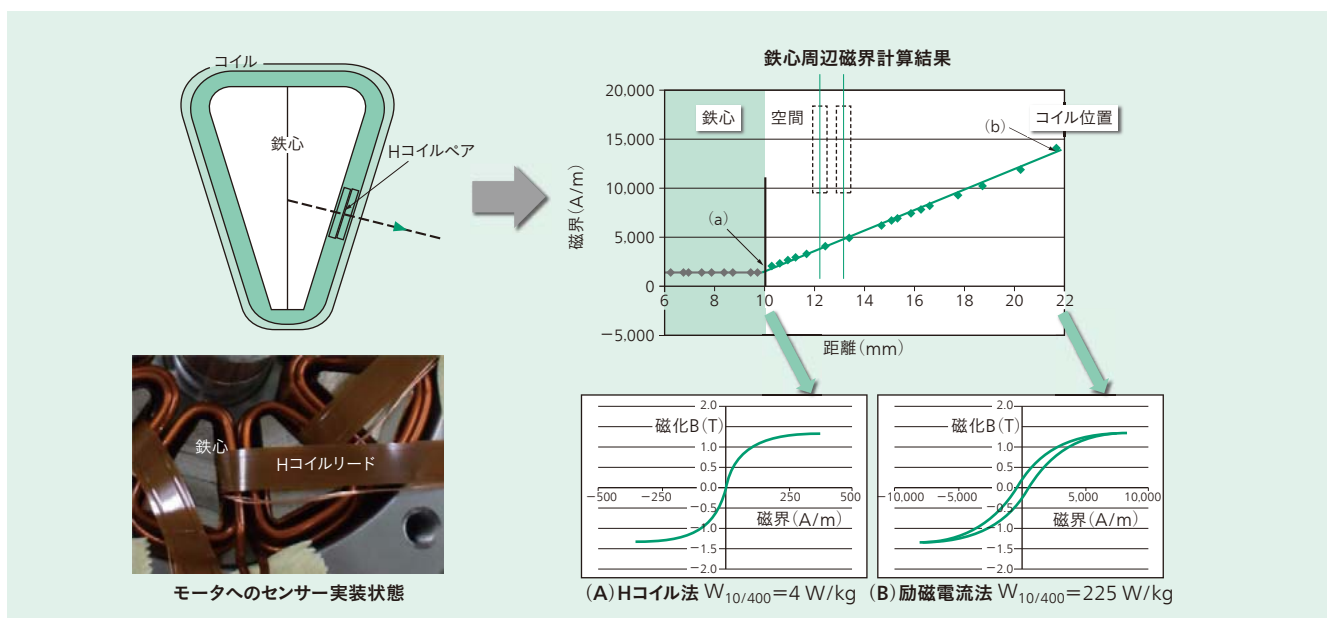


図7 鉄心に印加される磁界測定法の概要

Hコイルをモータ鉄心の表面(コイルとの隙間)に設置することにより、鉄心に印加される真の磁界値を高精度に推定することができ、正しい磁気特性が得られる。

シート (FPC: Flexible Printed Circuits) 上に、両面基板に正確な寸法関係で印刷された超小型立体コイルを両面配置して2つのコイルペアを構成した。この超小型センサーを用いた磁気特性測定法の概要を図7に示す。

鉄心の磁気特性測定のためには磁界を印加する必要があるが、印加した磁界はコイル周辺磁界 (b) であり、これは磁心の反磁界のため鉄心周辺では弱められて磁界 (a) となる。もし、強い磁界 (b) を印加していると仮定すると、Bコイルから測定されたB信号とで描いた磁化曲線は図(A)と(B)のように差が生じる。(A)は飽和する磁界は小さく、保磁力も小さい。しかし、素材の磁気特性に比べれば飽和する磁界が大きく、加工応力を受けている。一方、(B)は飽和する磁界、保磁力とも大きくなる。印加する電流値から容易に求められるのは磁界値 (b) であり、この場合、磁気特性は (B) となって鉄心損失がモータ損失の主要部を占めると解析される。一方、鉄心に印加された真の磁界値 (a) と磁気特性 (A) を把握できれば、損失配分を適正化でき、モータ設計を高精度化できる。

3.2 高精度解析設計技術

モータ設計のフローを図8に示す。このフローは、ダブルロータ型アキシヤルギャップモータの三次元的な磁場分布、温度分布、応力分布を正確に予測するため、三次元の磁場解析、伝熱解析、応力解析から成る。初めに、磁場解析により、モータの損失や出力トルク、固定子、回転子にかかる電磁力を算出する。次いで、磁場解析によって算出した損失を入力とした伝熱解析により、温度分布を算出する。伝熱解析によって算出した磁石および巻線温度は、磁

場解析に用いる物性値にフィードバックする。両解析から、モータ効率および巻線の温度上昇を算出する。算出値が目標を満足する場合には、電磁力や温度分布を入力条件とした応力解析により、樹脂部応力を算出する。応力値が所定値以下であれば設計を終了する。この所定値は、樹脂強度の温度特性や長期間の使用による劣化を考慮して決定する。

アモルファス鉄心の損失 W_i は、次式を用いて算出する。

$$W_i = K_b f B^{1.6} + K_c f^2 B^2$$

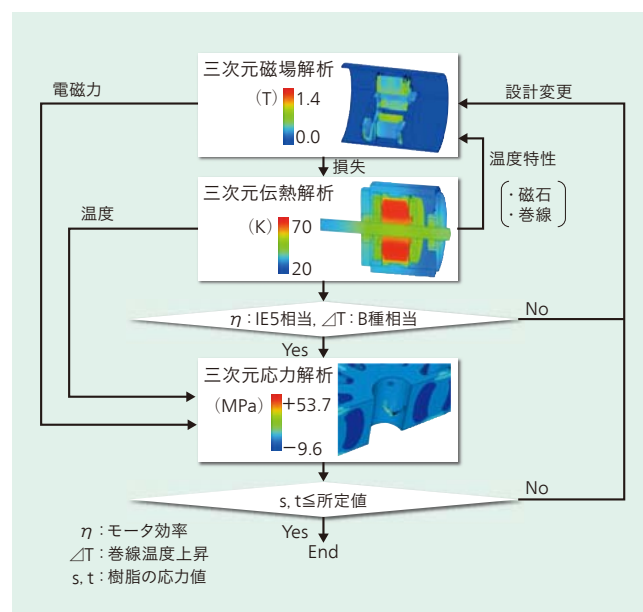


図8 モータの高精度解析設計フロー

三次元磁場解析結果を基に実機状態の損失を適用して、モータの損失を高精度に計算し、熱解析によって温度上昇などを把握した。実機状態の高精度な見積もりにより、設計マージンを縮小して高効率化を実現した。

ここで、 f は周波数、 B は磁束密度の最大値、 K_b はヒステリシス損失係数、 K_e は渦電流損失係数である。前節で述べたHコイルでの磁気特性測定法により、実際の鉄心の各損失を測定することで、アモルファス鉄心の損失をより高精度に予測できるため、設計時に見込むべきマージンを少なくしてモータの損失を抑える設計が可能となる。

4. IE5効率アモルファスモータ

4.1 低損失アモルファス鉄心構造

現在、IECではIE4よりもさらに高い効率クラスの検討が進められている。IE5クラスの効率は、IE4に対して、さらに損失を20%低減したレベルとして効率を規定しようとしている。これを満足するために、前述した低損失化技術を適用してアモルファスモータのさらなる効率化に取り組んだ。アモルファス金属鉄心の実機での性能把握を基に、損失が低減可能な鉄心構造、および、組み立てプロセスを検討した。その結果、鉄心の形状とその保持方法により、モータとして組み立てられた状態での鉄心の損失が大きく異なることが判明した。アモルファス金属に過大な応力を与えない保持方法、組み立て方法を用いることで、大幅に低損失化が図れることが分かった。アモルファス金属鉄心構造を図9に示す。アモルファス金属箔帯は、切断積層されたあとに、樹脂製の鉄心保持部材に挿入することで鉄心形状を保つように構成した。これにより、アモルファス金属鉄心自体が応力などの外乱を受けにくくなり、低損失化が図れる。

4.2 IE5効率アモルファスモータ

鉄心の損失が低減できたことで、損失から発生する熱量低減が可能となる。温度による電気抵抗や磁石性能などへの影響が変化したことなども勘案し、最適設計を行うことで高効率化設計が可能となる。効率を改善したモータの外観と効率の比較を図10に示す。先に示したIE4効率を達

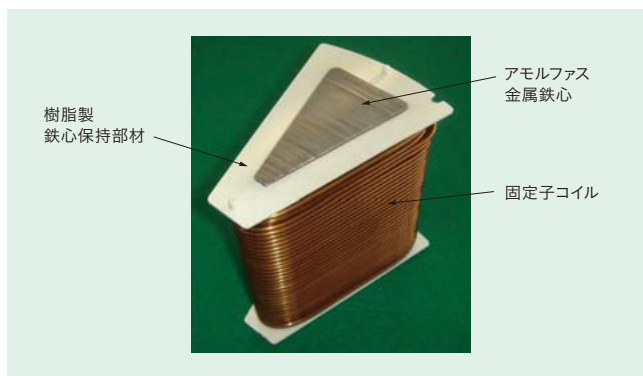


図9 | アモルファス金属鉄心構造

アモルファス金属箔帯は、切断積層されたあとに、樹脂製の鉄心保持部材に挿入することで鉄心形状を保つように構成した。

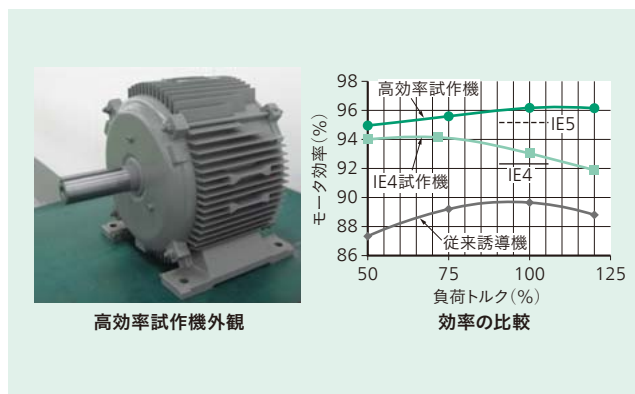


図10 | IE5の効率クラスを達成したアモルファスモータ試作機

損失が低減できたことで、温度上昇が抑えられたため、冷却ファンがなくても温度上昇は規格値以内に抑えられた。モータ体格も従来に比べて大幅に薄型へん平な形状となっている。

成した試作機に対してへん平な構造になっており、効率の向上によって冷却ファンがない状態でも温度上昇が仕様以内に収まることが確認できた。効率は、ファンの機械損を低減できた効果も含んでIE5の基準を大きく超える結果が得られた⁵⁾。

4.3 アモルファスモータの製品化

世界最高レベルの高効率化と並行して、アモルファスモータの製品化に取り組んだ。製品化では、顧客が満足する価格や幅広い容量帯でのシリーズ化、安全性・信頼性の確保などが要求される。開発したモータは、構造や製造プロセスの面で従来のモータと大きく異なるものであり、市場での実績がないために多方面からの試作検証を繰り返し、必要とされる要求仕様や信頼性の確認を行った。2014年7月、国内最大のモータ展示会においてIE4準拠の製品として製品化発表を行った(図11参照)⁶⁾。

モータ高効率化の効果を図12に示す。モータを従来の誘導モータから、高効率のモータに置き換えた場合の試算を、渦巻きポンプを対象に行った結果として、誘導モータを一定速度で駆動してバルブ開閉によって水量を調節する制御では、電力量を調整することが困難であるのに対し、アモルファスモータでは水量を必要としない場合の電力使用量を大幅に削減することができると分かった。年間の運



図11 | アモルファスモータ製品

出荷台数の多い3.7~11 kW容量帯を製品化した。IE3誘導モータと同一寸法枠として従来製品からの置き換え需要にも対応可能とした。

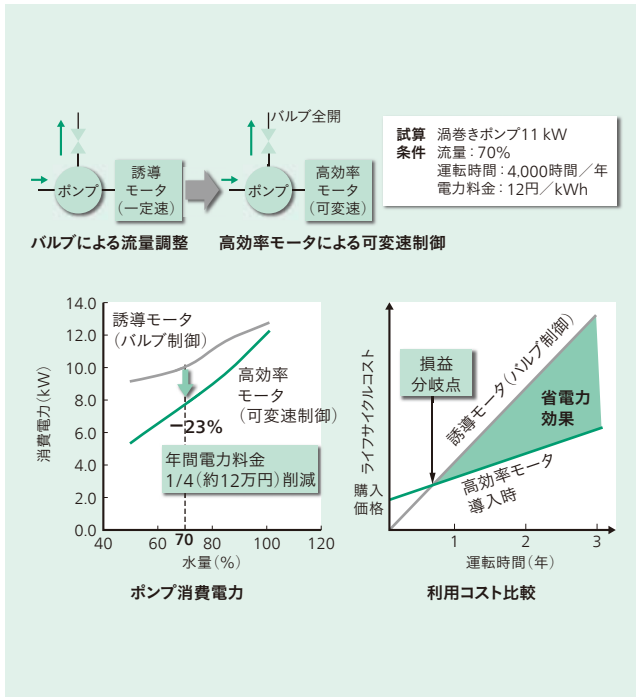


図12 | 高効率モータの置き換えによる効果

可変速を行うこととモータの高効率化により、電力使用量が大幅に低減できる。高効率モータの導入により、省電力効果でランニングコストを抑えることが可能となる。

転時間を4,000時間とし、平均水量を70%、電力料金を12円/kWhとして試算すると、従来のモータと比べて約1/4の電力使用料が削減できることが分かる。この省電力効果は、新規に高効率モータを導入するコストに比べても大きいいため、導入後の早い時期に損益分岐点を迎えられることが容易に理解できる。

5. おわりに

ここでは、低損失なアモルファス金属をモータに適用することで、高効率化規制が進む産業用モータの高効率化を実現するアモルファスモータ技術について述べた。

このモータは、界磁源としてフェライト磁石を用いていることから、価格を安くすることが期待できる。また、供給リスクのあるレアアースを使用しないモータに仕上がっていることも特徴の一つである。省エネルギーと貴重資源の維持を両立できるモータであり、環境に配慮した製品として普及拡大することを期待している。

なお、本技術の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業」を受けて開発したものである。

参考文献など

- 1) 三上, 外: 進化するモータ, 日立評論, 92, 12, 928~933 (2010.12)
- 2) 資源エネルギー庁: 平成21年度省エネルギー設備導入促進指導事業 (エネルギー消費機器実態等調査事業) 報告書, IAE-0919107 (2010.3)
- 3) 天野, 外: アモルファス磁性材料の応用と新展開, 磁気応用技術シンポジウム, 日本能率協会 (2009.4)
- 4) 日立ニュースリリース, レアアースを用いない産業用11 kW高効率永久磁石同期モータを開発 (2012.4), <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/04/0411.html>
- 5) 日立ニュースリリース, 国際高効率規格IE5レベルを達成したアモルファスモータを開発 (2014.7), <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/07/0709.html>
- 6) 株式会社日立産機システムニュースリリース, 超高効率IE4レベルを達成した「アモルファスPMモータ」を発売 (2014.7), <http://www.hitachi-ies.co.jp/information/release/2014/0717.htm>

執筆者紹介



榎本 裕治

日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンター
 モータシステム研究部 所属
 現在、産業用、自動車用などの中小型モータシステムの高性能化研究に従事
 博士 (工学)
 電気学会会員, 日本AEM学会会員



床井 博洋

日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンター
 モータシステム研究部 所属
 現在、産業用モータシステムの高性能化研究に従事
 博士 (工学)
 電気学会会員



今川 尊雄

日立製作所 研究開発グループ
 エレクトロニクスイノベーションセンター ナノプロセス研究部 所属
 現在、電力機器用軟磁性材料評価・解析に従事
 電気学会会員, 日本AEM学会会員



鈴木 利文

株式会社日立産機システム 事業統括本部
 ドライブシステム事業部 モータ設計部 所属
 現在、産業用永久磁石モータの開発・設計に従事



小俣 剛

株式会社日立産機システム 事業統括本部
 ドライブシステム事業部 所属
 現在、モータ・ドライブ製品の開発全般の統括に従事



相馬 憲一

株式会社日立産機システム 研究開発センター 所属
 現在、モータや変圧器材料研究, 日立産機システムの研究開発総括に従事
 博士 (工学)
 機械学会会員, 日本化学会会員, 日本AEM学会会員