

省エネルギー・省資源を実現する磁性材料

Magnetic Materials for Energy and Resource Saving

國吉 太

Kuniyoshi Futoshi

尾田 悦志

Oda Etsushi

中島 晋

Nakajima Shin

篠原 誠

Shinohara Makoto

榎本 裕治

Enomoto Yuji

植田 隆浩

Ueda Takahiro

日立グループは、省エネルギーおよび省資源化を目的に、Dy（ジスプロシウム）を1.5 mass%（質量パーセント）～2.0 mass%削減しつつ従来材対比で H_{cJ} （保磁力）を0.40 MA/m向上させた省Dy希土類磁石、および従来はラインアップされていなかった $H_{cJ} \geq 430$ kA/mの高 H_{cJ} 領域のフェライト磁石を実用化し、製品化した。また、方向性電磁鋼板に比べて鉄損が大幅に小さく、短所とされていた占積率と磁束密度を改善したアモルファス磁性合金を開発した。これを用いて、低容量、特別高圧および種々の発電システムに対応した高効率変圧器、および11 kW容量のモータにおいて従来の体格以下で93%の高い効率を達成したアキシシャルギャップモータを実現している。

1. はじめに

エネルギー消費量の削減は、あらゆる電力使用者が直面する極めて重要な課題である。そのため、電気機器には一層の効率向上が求められ、省資源の観点から材料中の元素自体についても再考が進められている。

磁性材料の分野では、日立グループは、レアアースの代表的元素の1つであるDy（ジスプロシウム）の使用量を減らしながらも機能を向上させた省Dy希土類磁石を製造している。また、希土類磁石の代替を目的とした高性能フェライト磁石の開発も進めており、これらはいずれも実用化の段階へと至っている。電気機器では、アモルファス金属を用いて効率を向上させた変圧器や、アモルファス金属とフェライト磁石を組み合わせるレアアースを含有した磁石を代替するアキシシャルギャップモータを開発している。

ここでは、省エネルギー・省資源を実現する磁性材料、およびそれを用いた電気機器の開発状況について述べる。

2. 省Dy希土類磁石と高性能フェライト磁石

2.1 省Dy希土類磁石

2.1.1 Dy粒界拡散磁石の開発

Nd（ネオジム）-Fe（鉄）-B（ホウ素）焼結磁石は、世界的な省エネルギーの取り組みの中で、モータの小型化・高効率化を進める材料として注目されている。近年、HEV（Hybrid Electric Vehicle）の発電機や駆動用モータ、エアコンのコンプレッサ用モータなどの省エネルギー・環境適合製品に多く使用されてきており、その需要も年々拡大している。さらなる省エネルギー化を進める中で、Nd-Fe-B磁石の高性能化、すなわち H_{cJ} （保磁力）を維持しながら B_r （残留磁束密度）を向上させる要求が強い。しかし、資源問題を背景にレアアースの採掘や輸出枠の規制が強化され、価格の乱高下や供給問題が生じている。特に高温耐久性を向上させる添加元素であるDyは、大きな調達リスクを抱えており、Nd-Fe-B焼結磁石のDy使用量削減も強く望まれている。日立金属株式会社は、これに対応し、省Dy・高特性化技術であるDy粒界拡散法「DDMagic」を開発した。 H_{cJ} を従来材と同等にした場合、 B_r が向上し、かつDy使用量を大幅に削減できる。

この技術の目的は、 H_{cJ} の発現を担う結晶粒界近傍にDyを偏在化させて B_r の低下を抑制しつつ、より少ないDyで H_{cJ} を効果的に向上させることである。開発材と従来材の H_{cJ} と B_r の関係を図1に示す。 B_r を同等にした場合には、 H_{cJ} は従来材対比で約0.40 MA/m向上する。 H_{cJ} を同等にした場合には、 B_r は約50 mT向上し、省Dy・高性能材がラインアップ可能となった。また、熱性で比較すると、従来材対比で約30°C向上しており、より過酷な環境下での使用が可能である。一方、耐熱性を同等とした場合には、 B_r が向上するため、磁石重量を低減でき、モータの小型化・高効率化に貢献できる。

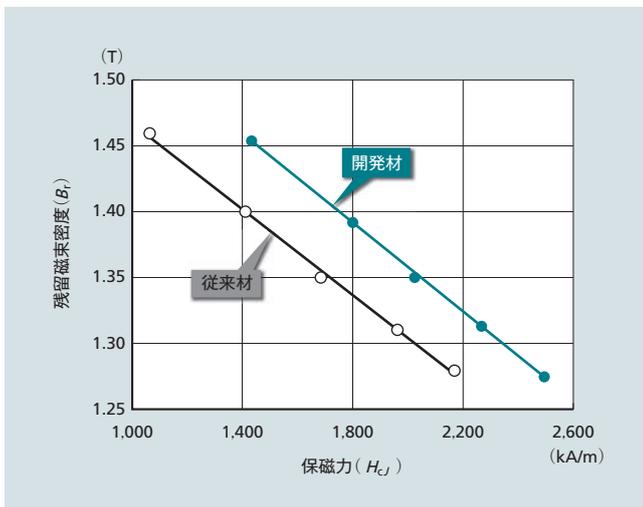


図1 | 開発材と従来材の磁気特性マップ
開発材 (Dy粒界拡散磁石) と従来材の保磁力と残留磁束密度を示す。開発材は省Dyかつ高性能である。

2.1.2 IPMモータへの適用

前述したとおり、開発材を用いて従来材と同等の減磁耐熱性を持つモータを設計する場合、従来材よりも B_r の高い磁石材料を選択することが可能となる。極6スロットのIPM (Interior Permanent Magnet) モータに開発材を適用した設計事例を図2に示す。

ここで、モータ体格、モータ出力トルク、および減磁耐熱性は、従来材と開発材で同等となるように設計した。このモータの減磁仕様を満足するには、従来材では $B_r=1.31$ T, $H_{cj}=1,671$ kA/m の磁石材質を使用する必要がある。しかし、Dy拡散を行う開発材の場合は、 $B_r=1.39$ T, $H_{cj}=1,114$ kA/m の拡散前保磁力 + 拡散後に向上する $+a$ kA/m の保磁力で仕様を満足することができる。つまり、開発材を使用することで磁石に含まれるDy含有量を削減でき、さらに B_r を約6%高くすることができる。モータトルクは、 B_r の増加に比例して大きくなるため、トルク増加量に応じてモータ軸長を短くし、モータを小型化することも可能であるが、今回はモータ軸長を変更せずに電流値を下げることによってモータ効率の向上を図った。

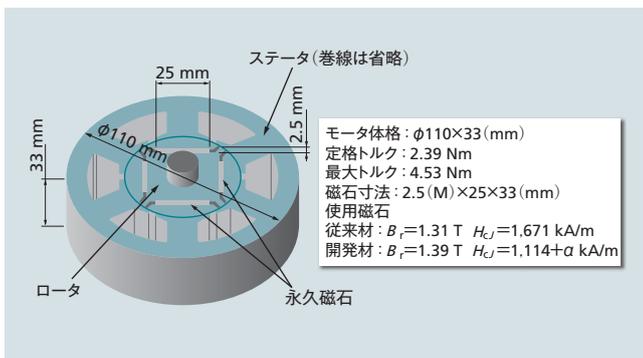


図2 | IPMモータへの適用例
IPM (Interior Permanent Magnet) モータのイメージとIPMモータの諸元を示す。

開発材を使用すると、電流値を従来材使用時の12.7 Aから12.2 Aに下げても同一トルクを得られ、これによって銅損が低減されるため、モータの効率を向上させることができる。特に低速時のモータ効率の向上効果は高く、今回のモータの場合、 1 kmin^{-1} 回転時に約1.4%モータ効率を向上させることができた。

2.2 高性能フェライト磁石

フェライト磁石は、最大エネルギー積が希土類磁石の1/10にすぎないが、主成分が安価な酸化鉄であることからコストパフォーマンスに優れており、化学的に極めて安定であるという特徴を有している^{1), 2)}。そのため、世界的な生産重量は現在でも磁石材料の中で最大である。

モータやスピーカなど、フェライト磁石が用いられているさまざまな用途の中で、高性能材の要望が強いのは自動車電装用モータや家電用モータなどである。近年は、希土類原料の価格高騰や調達リスクの顕在化を背景に、これまで希土類磁石しか用いられていなかった産業用モータ^(3.3参照)やEV (Electric Vehicle) / HEVの駆動用モータ・発電機などにもフェライト磁石の応用が検討されており、さらなる高性能化が求められている。

フェライト磁石の結晶構造はマグネトプランバイト構造であり、基本組成は $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ で表される。1990年代後半に、 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ の Sr^{2+} の一部を La^{3+} で置換し、 Fe^{3+} の一部を Co^{2+} で置換したSr (ストロンチウム) -La (ランタン) -Co (コバルト) 系フェライト磁石「NMF-9シリーズ」が実用化されたことにより、フェライト磁石の磁気特性は大きく向上した³⁾。また、日立金属は2007年に磁気特性をさらに進化させたCa (カルシウム) -La-Co系フェライト磁石を開発

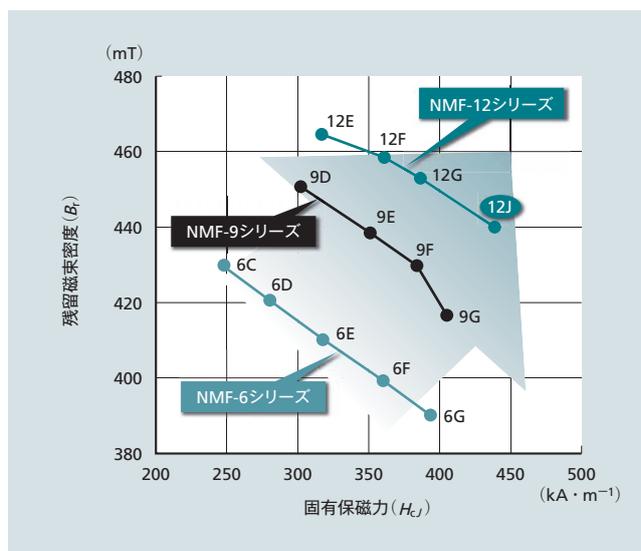


図3 | フェライト磁石の磁気特性マップ
1990年代後半から活発な組成開発が行われており、磁気特性が大幅に向上し続けている。

表1 | フェライト磁石の磁気特性比較

NMF-12シリーズでは、NMF-9シリーズに対しても飽和磁化 (J_s) と異方性磁場 (H_A) の両方を向上できている。

	NMF-6シリーズ	NMF-9シリーズ	NMF-12シリーズ
飽和磁化 J_s (T)	0.47	0.47	0.48
異方性磁場 H_A (MA/m)	1.5	1.8	2.2
B_r の温度係数 (%/K)	-0.20~-0.18	-0.20~-0.18	-0.20~-0.18
H_c の温度係数 (%/K)	0.30~0.40	0.16~0.35	0.06~0.16

し⁴⁾、「NMF-12シリーズ」として実用化に成功した。一連のフェライト磁石の磁気特性を比較して図3に示す。

NMF-12シリーズでは、NMF-9シリーズよりも B_r で 20 mT~30 mT, H_c で約 100 kA/m 向上している。これは、従来の Sr-La-Co 系から Ca-La-Co 系への組成系の転換、ならびに La および Co 置換量の増加により、 B_r の理論的上限である J_s (飽和磁化) で約 2%, H_c の理論的上限である H_A (異方性磁場) で約 22% 向上できたためである(表1参照)。このことから、NMF-12シリーズを用いたモータでは「NMF-6シリーズ」を使用した場合と比較して、モータ質量で約 40% の軽量化が可能であり⁵⁾、自動車などの省エネルギーの実現に寄与できる。

フェライト磁石では H_c の温度係数が正であるため、低温減磁に注意してモータ設計をする必要がある。しかし、同表に示したように、NMF-12シリーズでは H_c の温度係数が NMF-9シリーズの約半分と大幅に改善できているため、低温でも高い H_c を維持することができ、低温減磁耐力が強いフェライト磁石となっている。

日立金属は、NMF-12シリーズの高い H_A のポテンシャルをさらに引き出すために、ミクロ組織を適正化することで、従来のフェライト磁石ではラインアップされていなかった $H_c \geq 430$ kA/m の高 H_c 領域の実用化に成功した。2012年に「NMF-12J」として製造・販売を開始している。NMF-12Jでは、モータ設計の適正化により、「NMF-12G」よりも磁石重量を約 20% 軽量化することが可能である。また、EV/HEVの駆動用モータ・発電機用磁石を希土類磁石からフェライト磁石に転換することで、NdやDyなどの希土類元素の使用量を削減できる。一方、モータの組立コストの低減などに優位性がある異方性リング磁石においても、NMF-12シリーズの組成を用いた極異方性リング磁石「NMF-DM3」の製造・販売を2012年に開始しており、NMF-9シリーズの組成を用いた「NMF-DM2」よりも B_r で約 5% 向上することができた。このような高い磁気特性を有する NMF-12シリーズの適用により、省エネルギー・省資源化が実現される分野は拡大を続けており、今後も高性能フェライト磁石のさらなる発展が期待される。

3. アモルファス材料

3.1 アモルファス軟磁性合金

溶解した金属を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)で急速に凝固させる超急冷法によって得られるアモルファス磁性合金は、鉄を主体とする鉄基アモルファス合金とコバルトを主体とするコバルト基アモルファス合金の2種類に大別される。後者は高価なコバルトを主成分とするため、その用途は特殊用途に限られる。一方、前者は量産技術の進歩によって方向性電磁鋼板に匹敵する価格を実現できるようになり、配電変圧器のほか、各種インバータ用リアクトルなどの高周波用途でも広く使用されている。また、最近では、モータ用としても実用化に向けた検討が進展している。

アモルファス合金の優れた磁気特性をさらに発揮させるためには、製造時に加えられた歪(ひずみ)を緩和するための熱処理が必要となる。また、変圧器のように励磁電流を小さくする必要のある用途では、磁路方向に異方性を加えるため、磁路方向に磁界を加えながら熱処理する磁場中熱処理が行われる。

代表的な鉄基アモルファス合金である「Metglas 2605SA1」と「Metglas 2605HB1M」(以下、HB1Mと記す。)の主な特性を、方向性電磁鋼板(23P090)と比較して表2に示す。同表から分かるように、方向性電磁鋼板に比べて鉄損が大幅に小さい点がアモルファス合金の最大の長所であり、機器の低損失化を図ることができる。一方、アモルファス合金は成分に占める鉄の比率が方向性電磁鋼板に比べて低いため、飽和磁束密度が低い。また、超急冷法で製造されるため、圧延法で製造される方向性電磁鋼板に比べて表面粗さが大きく、見かけの体積に対する実効体積の比率である占積率も低い。そのため、機器が大型化するという短所がある。HB1Mは、この短所を改善するため、その成分に占める鉄の比率を高めつつ他の添加元素量を最適化することで開発した、低鉄損高飽和磁束密度のアモルファス合金である⁶⁾。

表2 | 鉄基アモルファス合金と方向性電磁鋼板の特性比較

Metglas 2605HB1Mは、方向性電磁鋼板対比で大幅な低鉄損の特徴を維持しつつ、Metglas 2605SA1に比べて磁束密度が向上している。

材 質	AM		CRGO
	Metglas 2605SA1	Metglas 2605HB1M	23P090
公称厚さ (μm)	25	25	230
密度 (kg/m^3)	7.18	7.33	7.65
占積率 (%)	84 min	84 min	94.5 min
鉄損 50 Hz 1.4 T (W/kg)	0.10 typ	0.10 typ	0.55 typ
磁束密度 (T)	800 A/m	1.56 typ	1.63 typ
	80 A/m	1.35 min	1.50 min
飽和磁歪 (じわい) 定数 (ppm)	27	27	0.7

注：略語説明 AM (アモルファス合金)、CRGO (方向性電磁鋼板)

単相変圧器用鉄心の鉄損の動作磁束密度依存性を図4に示す⁷⁾。同じ1.4 Tの鉄損で比較すると、アモルファス合金鉄心は方向性電磁鋼板鉄心の $\frac{1}{3}$ 以下であることが分かる。実際の変圧器における動作磁束密度は、多くの場合、アモルファス合金鉄心で1.3 T～1.45 T、方向性電磁鋼板で1.6 T～1.7 T程度に選定されている。この場合、アモルファス合金鉄心の鉄損は約0.2 W/kgであり、方向性電磁鋼板鉄心の鉄損約0.8 W/kgの25%程度となる。

単相変圧器用鉄心の騒音の動作磁束密度依存性を図5に示す。同じ磁束密度における騒音はアモルファス合金鉄心のほうが大きい。しかし、実際の変圧器の動作磁束密度は上述したようにアモルファス合金鉄心で1.3 T～1.45 T、方向性電磁鋼板鉄心で1.6 T～1.7 T程度に選定されているため、その騒音はほぼ同レベルとなる。

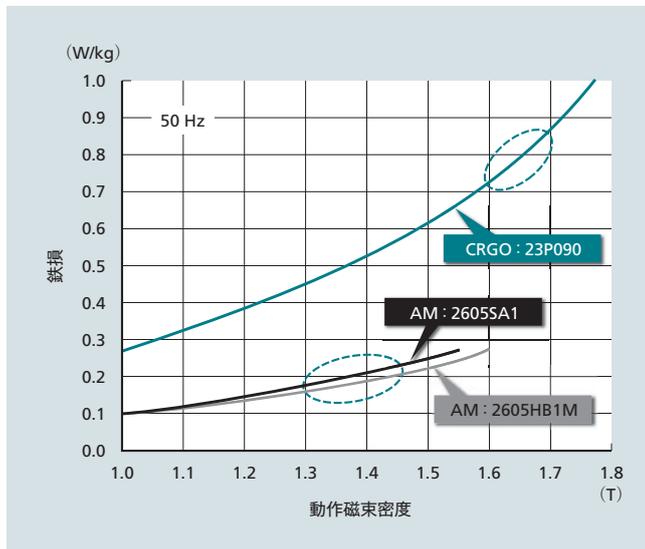


図4 | 鉄損の動作磁束密度依存性
アモルファス合金と方向性電磁鋼板を用いた単相変圧器用鉄心の動作磁束密度依存性を示す。

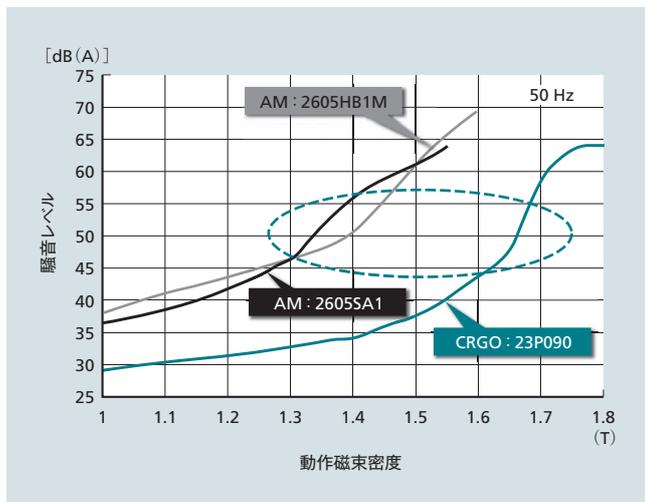


図5 | 騒音の動作磁束密度依存性
アモルファス合金と方向性電磁鋼板を用いた単相変圧器用鉄心の騒音の動作磁束密度依存性を示す。

3.2 アモルファス変圧器

3.2.1 市場背景と営業展開

近年、地球温暖化の抑制に向け、省エネルギー機器への関心が高まっており、また、節電や新エネルギー分野への注目が集まっている。このような市場背景に適した製品展開により、受変電設備の計画段階から変圧器仕様策定に参加する提案型セールスを戦略の1つとして営業活動を展開している。

3.2.2 アモルファス変圧器のラインアップ拡充

2010年に施行された改正省エネ法(エネルギーの使用の合理化に関する法律)により、エネルギー管理義務は工場単位から事業者単位に変更された。チェーン展開するコンビニエンスストアのような小型店舗などでも省エネルギーニーズが高まり、低容量変圧器でも高い省エネルギー性能が求められている。そのため超高効率モデル「SuperアモルファスX SHシリーズ」では、従来容量300 kVA～2,000 kVAのほか、小型店舗や中小工場向けの75 kVA～200 kVAを加えてラインアップ拡充を図った(図6参照)。一方、大型施設向けには、特別高圧需要家も利用できる22 kV級アモルファス変圧器(3 MVA以下)の発売を開始した。また、2012年7月から「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が導入されたことにより、太陽光発電、風力発電といった新エネルギー市場の成長が著しい。これら発電システムでは、夜間発電ができない、気象条件によって発電量が左右されるといった課題がある。この点に着目し、むだな電力損失を抑えてトータルの発電量増が期待できる、それぞれ専用の昇圧アモルファス変圧器を開発してきた。

これらアモルファス変圧器は、その高い省エネルギー性能によって他社製品との差異化が図られている。さらに省エネルギー性能に加えて市場ニーズに即した機種展開により、多岐にわたるユーザーに対して、受変電設備導入・更

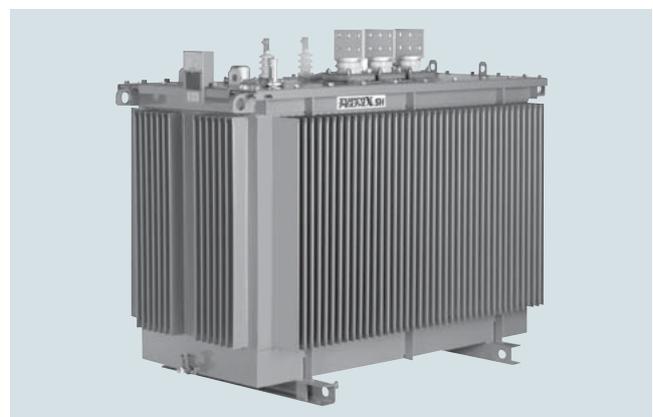


図6 | アモルファス変圧器「SuperアモルファスX SHシリーズ」の外観
高い省エネルギー性能により、第8回エコプロダクツ節電大賞、平成24年度省エネ大賞(製品・ビジネスモデル部門)の資源エネルギー庁長官賞を受賞した。

新の計画段階からの省エネルギー提案が可能となった。今後もアモルファス変圧器をキーデバイスとして営業活動の場を広げていく。

3.2.3 アモルファス変圧器の安定・量産化開発

アモルファス変圧器は優れた省エネルギー性能が得られる一方、その製造工程では高い加工技術が要求される。そのため、機種展開や量産化を図るうえで、損失のばらつきを抑えて素材特性を最大限に引き出すことが求められた。

例えば、鉄心の焼鈍工程では、温度や磁界のわずかな違いで損失、すなわち変圧器の省エネルギー性能が変化する。そこで、製造工程内で鉄心に影響を与えるパラメータを抽出し、それによる損失変化を定量化した。また、鉄心内部の磁界シミュレーションと実験によって異常損失を生じる部位を推定し、適切な鉄心構造の開発に取り組んだ。このように各製造工程において、さまざまなアプローチで損失の最小化と量産での安定化を図り、高い省エネルギー性能を実現している。

株式会社日立産機システムは、従来、アモルファス変圧器の設計・製造・販売における一貫体制により、省エネルギー性能を顧客に訴求し続けてきた。その後、省エネルギー意識の高まりにつれて省エネルギー変圧器へのニーズは増え、求められるフィールドも多様化してきている。これからも、このような変化に対応し、マーケットイン志向での製品展開を図っていく。

3.3 アキシシャルギャップモータ

日立グループは、アモルファス金属箔（はく）帯の優れた磁気特性を活用し、モータの高性能化に取り組んでいる⁸⁾。アモルファス金属箔帯は、厚みが25 μmと極めて薄く、その硬度も約900 Hvと高いため、一般的なモータに使用されている複雑形状の積層鉄心を構成することが困難である。そこで、比較的容易に鉄心を構成できるアキシシャルギャップ型のモータへの適用を検討している。そのコンセプト構造を図7に示す。固定子が二つの回転子に挟まれる構造とすることで、固定子鉄心部を単純構造とすることができ、固定子鉄心を巻鉄心などで構成しやすい。また、アモルファスの磁化特性を考慮すると、フェライト磁石を用いた磁石回転子との組み合わせでバランスのよい設計解を得られることが分かった。さらに、アキシシャルギャップ型モータは、一般的なラジアルギャップ型モータに比べ、軸方向の長さが短くても大きなトルクを出せる利点があり、小型化・高効率化を期待できる（図8参照）。

2010年9月以降、中国の輸出規制などによって希土類材料の価格が急激に高騰した。高効率化のニーズが高い産業用のモータでは、希土類磁石を用いることによる高効率

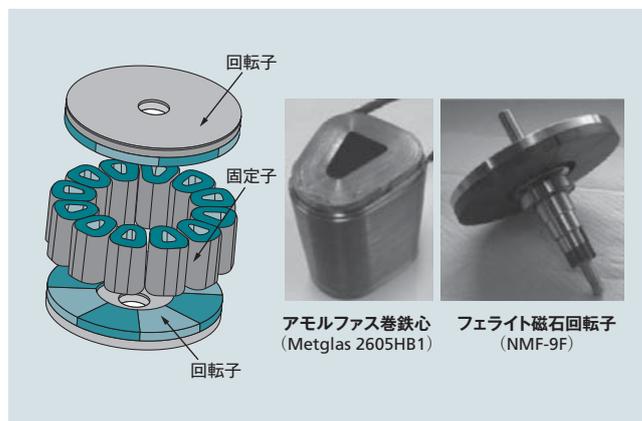


図7 | アキシシャルギャップモータのコンセプト構造

固定子鉄心を単純な構造とすることで、アモルファス材料を利用しやすい構造にできる。

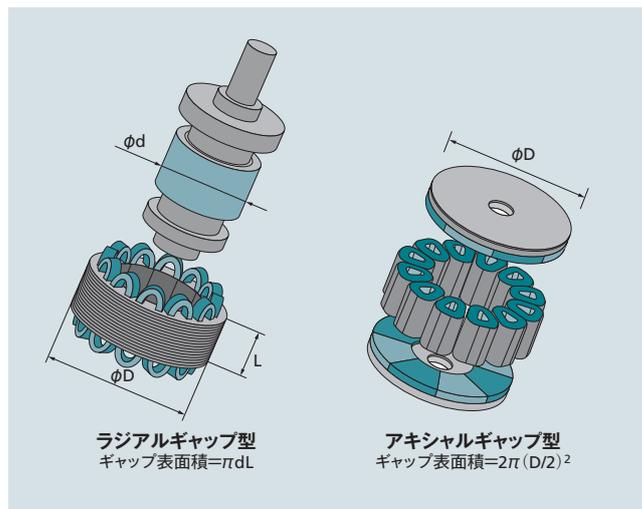
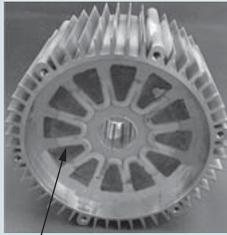


図8 | ラジアルギャップモータとアキシシャルギャップモータの比較

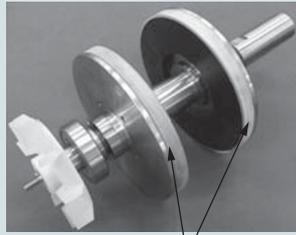
トルク発生に寄与するギャップ表面積は、軸方向長が短い場合、アキシシャル型のほうが大きくすることができる。

化が推進されていたが、磁石価格や供給リスクに左右されないモータの開発が急務となった。そのような中で、前述したアモルファス合金を固定子に採用するフェライト磁石採用のアキシシャルギャップモータを産業用モータに適用する技術開発を進めることにした。

2011年3月から1年間、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受け、11 kW容量のモータを対象に技術開発を行った。開発した技術は、大容量化を実現するためのアキシシャルギャップモータ構造最適設計技術、アモルファス金属箔帯の低損失特性を引き出す積層型鉄心構造などにより、従来モータの体格以下でIEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）の効率ガイドラインであるIE4をクリアする効率（11 kWの場合93%）を達成した。開発モータとその固定子、回転子の外観を図9に示す。このモータは、アモルファス材料と前述の構成によるフェライト磁石材料を併用することで、希土類磁石の供給リスクへの対応と高効率化を両立する特徴ある製品となった。現在、日立グループの



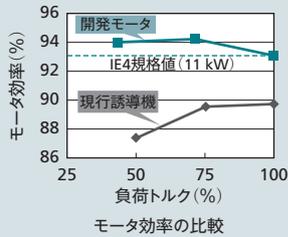
アモルファス箔(はく)帯 (Metglas 2605HB1)を切断積層した固定子の鉄心



高性能フェライト磁石回転子 (NMF-12シリーズ12G+)



現行の11 kW産業用誘導モータ(左)と開発モータ(右)



注: 略語説明 IE4 [国際電気標準会議 (IEC) の IEC 60034-31 で示されているモータの効率ガイドラインで現在最も高いもの]

図9 | 産業用11 kW高効率永久磁石モータ試作機

固定子鉄心部にアモルファスを切断して積層する構造を採用し、従来の産業用モータと同一体格でモータ効率の向上を実現した。

技術を結集し、実用化に向けた取り組みを推進中である。

4. おわりに

ここでは、日立グループで培われてきた省エネルギー・省資源を実現する磁材材料、およびそれを用いて効率を向上させた電気機器について述べた。

日立グループは、ここで述べた磁性材料や電気機器を通じて、一層の省エネルギー・省資源の実現に向けて取り組んでいく。

参考文献

- 1) J. Smit, et al. : "Ferrites" Philips Technical Library, Eindhoven, The Netherlands (1959)
- 2) E.P. Wohlfarth : "Ferromagnetic Materials Vol.3" Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands (1982)
- 3) Y. Ogata, et al. : Improvements of Magnetic Properties of Sr Ferrite Magnets by Substitutions of La and Co, IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp. 3334-3336 (1999.9)
- 4) 小林, 外 : Ca-La-Co系M型フェライトの組成と磁気特性, 粉体および粉末冶金, 第55巻, 第7号, 541~546 (2008.7)
- 5) 日立金属カタログ, Magnet Product Guideなど
- 6) 新製品紹介: 高効率変圧器用高Bsアモルファス金属, 日立金属技報, Vol.28, 56 (2012)
- 7) 東, 外 : 配電変圧器用モデルコアの評価, 日立金属技報, Vol. 24, 50~53 (2008)
- 8) Zhuonan Wang, et al. : Development of a Permanent Magnet Motor Utilizing Amorphous Wound Cores, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 46, No. 2 (2010.2)

執筆者紹介



國吉 太

1997年住友特殊金属株式会社入社, 日立金属株式会社 磁性材料カンパニー 磁性材料研究所 所属
現在, 高性能Nd-Fe-B磁石の開発に従事



尾田 悦志

1998年住友特殊金属株式会社入社, 日立金属株式会社 磁性材料カンパニー 熊谷製作所 フェライトマグネット工場 所属
現在, 高性能フェライト磁石の材料開発に従事



中島 晋

1982年日立金属株式会社入社, 高級金属カンパニー 軟磁性材料統括部 営業企画部 所属
現在, 変圧器用アモルファス合金の研究開発に従事
電気学会会員



篠原 誠

2004年株式会社日立産機システム入社, 事業統括本部 受配電・環境システム事業部 設計統括部 変圧器設計部 所属
現在, 油入変圧器の設計・開発に従事



榎本 裕治

1987年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター 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開発に従事
博士(工学)
電気学会会員, 日本AEM学会会員



植田 隆浩

1993年日立金属株式会社入社, 開発センター 企画部 所属
現在, 新製品・新技術の事業化に従事
日本機械学会会員