連載講座「ブレークスルーの原点」(第9回)

省エネと省資源を両立するアモルファスモータの開発

Development of the Amorphous Motor Balancing both Resource Saving and Energy Saving

榎本 裕治

Yuji ENOMOTO

◎ 1987 年 (株) 日立製作所入社, 生産技術研究所にて電機機器の生産技術の研究に従事。2001 年より同社日立研究所に異動, 中小型モータに関する研究に従事。現在, 同所主任研究員, 2006 年東北大学大学院工学研究科博士課程修了, 工学博士

◎ 研究・専門テーマは, モータ設計技術, 生産技術, 磁性材料応用

◎ (株) 日立製作所 日立研究所モータシステム研究部 主任研究員
(〒319-1292 日立市大みか町 7-1-1 /
E-mail : yuji.enomoto.tf@hitachi.com)

相馬 憲一

Kenichi SOMA

◎ 1981 年東北大学大学院工学研究科博士前期課程 (材料化学) 修了, 同年 (株) 日立製作所日立研究所入社, 環境・エネルギーの研究に従事。2011 年より (株) 日立産機システム CTO, 工学博士

◎ 研究・専門テーマは, 環境・エネルギー, 電機品の材料開発とその応用

◎ 正員, (株) 日立産機システム CTO 兼 研究開発センター センター長

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, われわれ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。(株) 日立製作所 (以下, 当社) においても, 1910 年に製造された創業製品は, 鉱山で使用するための 5 馬力 (3.7 kW) モータであった。この産業用モータにおいては, 現在までの 100 年の間に継続してさまざまなブレークスルー技術が開発され, 当初 150 kg 程度あったモータ重量は, 約 1/5 にまで軽量化が実現されている (図 1)⁽¹⁾。ここで開発されたモータの技術は, 時代

図 1 日立製作所における 5 馬力モータの質量変遷

図 2 国内の電力消費状況 (2009 年)

とともに必要とされた電動化製品に適用され, 高効率化や小形化, 高速化など, それぞれの用途に向けた仕様ごとに進化を続けている。

産業用モータの分野に話を戻すと, 2000 年以降は高効率化の開発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。図 2 に国内の電力使用量の割合を示す⁽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, 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が 1%改善すると 100 万 kW クラスの発電所 1 基分の電力を低減できることになる計算であるから, モータの高効率化が, いかに重要かわかりいただけると思う。

項目	電磁鋼板	鉄基アモルファス金属
材料名	35A300 (JIS)	2605SA1 (日立金属)
材料外観	圧延鋼板	リボン状箔帯
密度	7.7 g/cm ³	7.2 g/cm ³
厚さ	0.35 mm	0.025 mm
B ₁ (100A/m)	0.95 T	1.26 T
固有抵抗	0.52 μΩ・m	1.3 μΩ・m
損失 W _{10/400}	18 W/kg	1.5 W/kg
硬度 (HV)	100~200	900

図3 鉄基アモルファス金属の特徴

このような背景をもとに、モータの効率に関する法規制が進められている。IEC（国際電気標準会議：International Electrotechnical Commission）では、産業用モータの効率クラス（IEコード）が規定されており、現在では、各国ともIE3クラスの義務化を始めようとしているところである⁽³⁾。当社では、これに先立ちIE4、IE5の効率クラスに対応できるモータの開発を行った。本稿では、この高効率モータ開発におけるブレイクスルー技術について紹介したい。

2. アモルファス金属とは

アモルファス金属とは、結晶構造のない金属の総称であり、溶けた金属を急冷することで、この非晶質構造が実現される。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3）。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1/10と小さく、電気機器の省エネルギー化に期待されている材料である⁽⁴⁾。

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であることを示唆している。

3. 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

図4 モータの原理、損失内訳とモータ効率の定義

図5 モータ構造の比較

モデルとして図4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することで鉄心部分の磁極がN極、S極に切り換わることによって、回転子側の永久磁石との間に吸引、反発の力が働く。この時に発生する損失は、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、出力と入力の比で表される。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須であることがわかる。

アモルファス金属は、図3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、トルク出力を増加して、かつ、電流値低減による銅損の低減ができる。また、高周波での損失が低い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と言える。

4. アキシアルギャップモータ構造によるアモルファス金属の適用

アモルファス金属をモータの鉄心に利用するためには、プレス加工などで複雑な形状に加工しないで鉄心を構成する必要があった。このため、二つの回転子を有するアキシアルギャップ型モータに着目して、その固定子鉄心をアモルファスで構成する手法の開発を行った。図5に一般的なモータとアキシアルギャップ型モータの構造の違いを示す。アキシアルギャップ型モータの固定子鉄心は、軸方向が同一断面形状の柱体であり、この形状であれば巻き鉄心としてアモルファス金属で構造できる。さらにアキシア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

(a) 短冊切断積層の実験装置 (b) 固定子鉄心外観

図6 アモルファス短冊切断積層

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わかった。これは、ラジアルギャップ型の回転子は、固定子の内側に配置されるため、回転子外径が小さくなり、また、固定子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、回転子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と比較すると、同一体積でのラジアル型とアキシアル型のトルク差（回転子表面積の差）は、約3倍程度となることがわかった。

回転子の磁石表面積が3倍にできることは裏返せば、磁石の磁力を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、中国にしか偏在しない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、安定して供給し省エネ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1/3で非常に安価なフェライト磁石を用いてアキシア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、モータの体積を同じにしてアモルファス金属で固定子鉄心を構成したモータは、希土類磁石を用いたモータと同等級以上の効率を有する結果が得られた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

5. 産業用高効率アモルファスモータの開発

2010年8月、レアアースの輸出枠の縮小などを背景に、希土類の急騰が始まった。それから数箇月でディスプロシウムの価格はそれまでの10倍以上も値上がりし、1kg当たり3000ドルを超え、入手も困難な状況になることになった。そのような状況において、政府は補正予算による対策を打ち出した。2010年12月に（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より、「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業」の募集が開始された。これを受けて当社では、産業用途で使用される高効率モータを、前述のアモルファス適用技術で希土類を不使用化する開発を開始することにした。NEDOに対し、約1年間の開発計画を提出し、採択通知が届いたのは日立市にも大きな被害をもたらした東日本大震災で休業中の2011年3月17日であった。震災からの復興中で特定部品の入手などに制約のある中、設備導入や試作品の開発を行うことになった。

産業用途で使用されるモータのボリュームゾーンは、数kW～数十kWである。このため、主力機種である11kW

(a) 固定子 (b) 回転子

図7 アモルファスモータの固定子、回転子構造

機を対象として開発を行うことにした。現在、産業用モータは、その取り付け寸法がJISによって枠番で規定されている。開発目標は、11kWで体格が枠番160M以内とし、効率はIECのIEコードIE4以上を目標とすることにした。前述したアモルファス金属でのモータ性能試作は、外径がφ100mm程度の200W容量であったが、産業用11kWとなると課題はたくさんあった。代表的なものとしては、外径がφ250mm以上となる固定子の保持構造や、低損失な鉄心の構造、φ200mm以上の回転子円盤の構造や、それらを踏まえたIE4クラス効率を達成するモータ電気設計と熱設計が挙げられる。それに加え、製品として製造可能な設備や製造技術、製品の信頼性確保も必要である。開発プロジェクトは、産業用モータを製造販売する（株）日立産機システムや、当社の中央研究所、横浜研究所も巻き込んでそれぞれの課題に対応した開発が行われた。

本章では、ブレイクスルー技術としてアモルファス金属鉄心の構造と製造技術について紹介したい。アモルファス金属を加工なしで固定子鉄心に利用する方法が巻き鉄心構造であったが、大容量化すると二つの問題点が明らかになった。一つは、中央部分に巻き始めのスペースが空いてしまうことで、もう一つは、任意の形状が製造しにくいことであった。アキシアルギャップ型モータの固定子鉄心断面は、扇形状であり、モータ設計によって、コイルの充てん量を変えるために、その開き幅が変わるという構造になる。この形状を量産可能で、かつ、アモルファス金属の特徴である低損失特性を保ったまま実現する方法としてアモルファス金属の短冊切断積層方式が考案された。この方式は、図6に示すようにアモルファス金属を短冊状に切断していく方法である。幅の細い短冊から切り始め、徐々に短冊の幅を広げていき、最終的に扇形状の鉄心構造とする。これにより任意の形状の作り替えは、搬送ローラでアモルファス金属の送り量を制御することによって変更が可能であり、複雑な金型を使用することもなく、鉄心として磁束が通る箇所を切断面としないために低損失な状態が保たれることもわかった。

鉄心の形状自由度が高められることによって、目標とした効率と体格が達成可能な設計を確立しそれを試作によって実証した。図7に固定子と回転子の構造を示す。固定子は、アモルファス金属鉄心の周囲に導体を巻き回したコイルを構成し、それらがハウジングと一体となる構造を開発した。回転子は、希土類を用いないフェライト磁石で構成し、耐遠心力強度などを満足する。図8には、モータの外観と効率の比較を示す。モータの体格は、従来誘導機

図8 アモルファスモータの体格と効率

と同一枠番としたまま、従来誘導機より軸方向長が短くなる結果が得られた。また、定格点での効率は従来誘導機に比べて4%以上の高効率となり、目標としたIE4を達成できた⁷⁾。

6. 世界最高レベルの高効率化への挑戦と製品化

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クラスは、IE4に対してさらに損失を20%低減したレベルとして照準を定めようとしている。これに対し、アモルファスモータもさらなる効率向上を目指して検討を行った。損失を低減するためには、損失把握精度の向上が不可欠である。アモルファス鉄心がモータの内部に組み立てられ保持された状態での損失状態を高精度に測定する超小型磁気センサを開発し、その損失発生状態を明らかにする検討を行った。その結果、アモルファス金属は、応力などの影響によって損失が増加する性質を持っていることがわかった。これに対して、アモルファス金属に応力を付与しない積層構造、保持構造を採用することで効率が向上できることを確認した。図9に効率を改善したモータの外観と効率比較を示す。先に示したIE4試作機よりも扁平構造になっており、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を確認できた。効率は、ファンの機械損もなくなった効果も含んでIE5を大きく超える結果が得られた⁸⁾。

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、ユーザーが満足する価格や幅広いシリーズ化、安全性、信頼性の確保などが要求される。製品を製造販売する(株)日立産機システムの設計部を中心とする開発プロジェクトメンバーは、何度も試作検証を繰り返し必要とされる仕様の確認を行った。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の発表が行われた(図10)⁹⁾。本モータは、省エネと貴重資源の維持を両立できるモータであり、環境に優しい製品として普及拡大することを期待している。

7. おわりに

ブレークスルーという連載テーマにそって本稿を執筆させていただく機会をいただき、本開発の経緯を振り返ることができた。もとは、非常にユニークな磁気特性を有するアモルファス金属をいかにモータに適用するかというところから検討が始まったのだが、高効率化による温暖化防止、

図9 高効率試作機の外観と効率

図10 アモルファスモータ製品

定格出力 (kW)	3.7	5.5	7.5	11
回転数 (min ⁻¹)	1 500/1 800			
モータ効率	IE4			
保護構造	全閉外扇形 (IP44)			
耐熱クラス	B 種			
インバータ	WJ200 シリーズ			

希土類に対しての資源セキュリティなど、新たな付加価値を追加することができた。一般的なモータの形式を踏襲していたのでは出せなかったアイデアが、アキシシャルギャップ型という特殊構造に挑戦することで道が開け、その時々ニーズに合わせてさらなる改善のアイデアが追加されていったということが率直な感想である。開発プロジェクトを通じて、関連事業部や多くの研究者と課題を分かち合い、協力しながら取り組んだことも本成果に結びついたりと考えている。最後に本技術開発に初期段階から支援をいただいた(株)日立産機システム、日立金属(株)の関係者各位、当社各研究所の関係者各位に、心より感謝の意を述べ、本稿の結びとしたい。

本技術の一部は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)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。

(原稿受付 2014年9月16日)

●文 献

- (1) 三上浩幸・井出一正・清水幸昭・妹尾正治・関 秀明, 進化するモータ, 日立評論, 92-12 (2010), 46-51.
- (2) 資源エネルギー庁, 2009年エネルギー消費機器実態等調査報告書, IAE-0919107.
- (3) 経済産業省, 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー基準部会 三相誘導電動機判断基準小委員会 最終取りまとめ報告書 (2013-6).
- (4) 天野寿人・板橋弘光, 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資料, (2009-4), D4-3.
- (5) Wang, Z. and Enomoto, Y., Development of a Permanent Magnet Motor Utilizing Amorphous Wound Cores, IEEE Trans on Magnetics, 46-2 (2010), 570-573.
- (6) 日立製作所ニュースリリース, レアメタルを用いない高効率の小型モータ技術を開発, (2008-11)
<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2008/11/1110.html>
- (7) 日立製作所ニュースリリース, レアメタルを用いない産業用11kW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>
- (8) 日立製作所ニュースリリース, 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>
- (9) (株)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>