

エアコンのコンプレッサ用 IPMモータの開発

佐藤 光彦^{※1} 金子 清一^{※1}
Mitsuhiko Satoh Seiichi Kaneko
富田 睦雄^{※2} 道木 慎二^{※3}
Mutuwo Tomita Shinji Doki
大熊 繁^{※4}
Shigeru Okuma

Development of IPM motors for compressors of air-conditioners

1. はじめに

近年、オフィス、住宅、工場等に設置されるエアコンは、国内では、毎年、新たに約800万台が設置され、世界では、約7,500万台が設置されている。エアコンの設置台数は、年々、増加しており、エネルギー消費量低減から更なる高効率化が求められている。また、電動カーエアコンの搭載台数も増加しており、こちらも省エネルギー化が求められている。

エアコンに搭載されるコンプレッサ用モータには、エアコンの効率性能を示すCOP (Coefficient of Performance) の向上を目的として、高いモータ効率が要求されている。そのため、永久磁石を回転子に埋め込んだIPM (Interior Permanent Magnet) モータの採用、単位断面あたりに多くの銅線を配置する高占積率化による銅損の減少、電磁鋼板の性能向上による鉄損の減少に加え、コンピュータを利用した磁界解析の活用により、高効率化と小形・高出力化が進められている。

このようにモータ自体の高効率化は進んできたが、モータをコンプレッサに搭載してエアコンの効率として評価したとき、モータ単体の効率向上がエアコンの効率向上に反映されないという問題が起ってきた。

本稿では、エネルギー消費量の低減に貢献するエアコンのコンプレッサ用IPMモータ開発について述べる。その中で、エアコンのコンプレッサ用IPMモータを取り巻く状況を踏まえ、高効率化したモータの更なる改良には、モータ単体の高効率化のみではなく、エアコンの一構成要素としての評価・開発が不可欠であることを示す。

2. エアコンの動作原理

エアコンは、圧力や温度によって容易に液体から気体に、あるいは気体から液体に相変化する物質 (以後、冷媒と記す) を利用して、室内の熱を室外に運搬したり、室外の熱を室内に運搬したりして冷暖房運転をしている。

図1に冷房運転中のエアコンの冷媒の流れを示す。まず、コンプレッサ内に搭載されているモータは回転運動を圧縮部に伝達し、圧縮部で冷媒を圧縮する。圧縮されて圧力と温度が共に高くなり、液化した冷媒は、エアコンの室外機の熱交換器に送られて、熱を外気に放熱する。

冷媒が、例えば圧縮されて80℃になっていれば、エアコンの室外機の設置されている付近の気温が40℃であっても、冷媒は外気に熱を放熱することが可能になる。

高い圧力を維持して外気に熱を放熱した冷媒は、次に膨

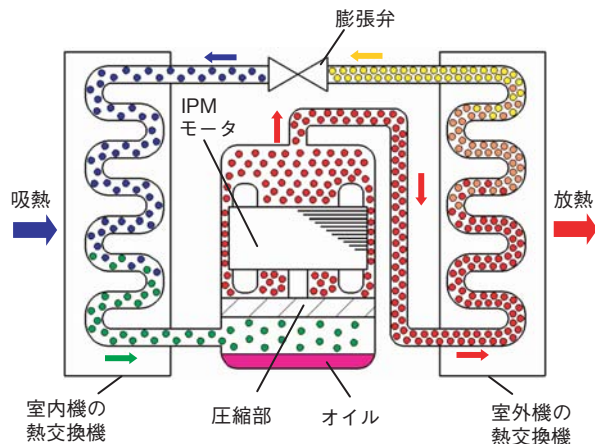


図1 エアコンの冷媒の流れ

張弁から低压状態となっているエアコンの室内機の熱交換器側に噴射されて膨張する。冷媒は、膨張する際に気化熱によって温度が低くなる。温度が低くなった冷媒は、熱交換器を介して室内の熱を吸収してコンプレッサに戻る。

このようにエアコンは、冷媒を圧縮・膨張させ、熱を放熱・吸熱する熱交換器を連続して循環させて、冷媒が相変化する際の大きな潜熱を利用している。

3. IPMモータの構造と原理

IPMモータは、図2で示すようにロータの電磁鋼板に孔を設けて、孔に永久磁石を挿入している。このモータは、ロータ外周側にN極が2箇所、S極が2箇所配置されており、極対数2のIPMモータである。IPMモータでは、ステータ巻線から測定するインダクタンスがロータの位置によって変化する。図2(a)で示すようにd軸方向では磁気抵抗の大きな磁石が磁路を妨げるが、図2(b)で示すようにq軸方向では磁気抵抗の小さい電磁鋼板が磁路を形成する。

IPMモータは、このd軸インダクタンス L_d とq軸インダクタンス L_q の差により発生するリラクタンストルクを利用する。リラクタンストルクと磁石トルクを加えたモータトルクを式(1)に示す。式(1)を変形すると式(2)になる。

$$T = P (\phi_a I_a \cos\beta + (L_d - L_q) I_a \cos\beta I_a \sin\beta) \dots (1)$$

但し、 T : モータトルク、 ϕ_a : 電機子鎖交磁束

I_a : 電機子電流、 L_q : q軸インダクタンス

※1 アイチエック(株) 技術部 設計課
※2 岐阜工業高等専門学校 電気情報工学科 准教授
※3 名古屋大学大学院 工学研究科 准教授
※4 名古屋大学大学院 工学研究科 教授

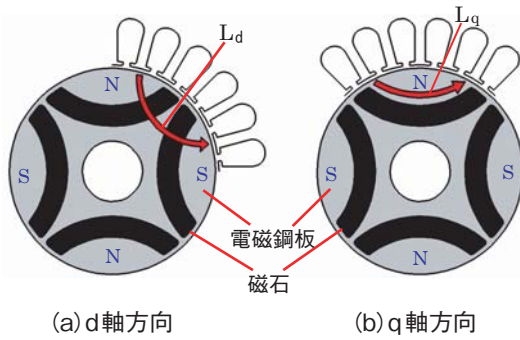


図2 IPMロータの磁気抵抗 ($L_q > L_d$)

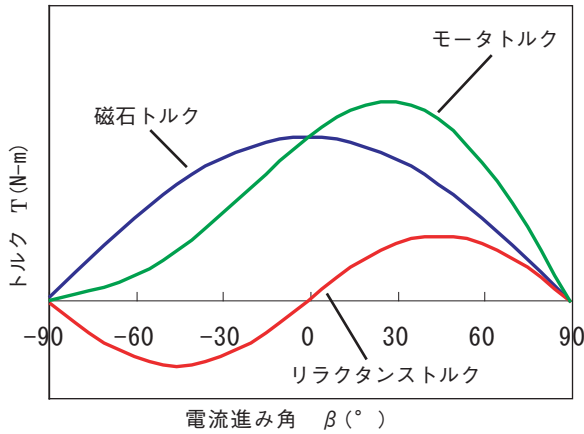


図3 電流進み角 β とモータトルク

L_d : d軸インダクタンス、 β : 電流進み角
P: 極対数

$$T = P (\phi_a I_a \cos \beta + 1/2 (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta) \dots (2)$$

図3に、式(2)の電流進み角 β を変化させたときのモータトルク T を示す。モータトルク T は、 β を変化させると変化する。また、電機子電流が増減すると、モータトルクが最大となる β も変化する。

4. IPMモータを取り巻く環境

4.1 インバータの損失

磁石トルクに加えてリラクタンストルクも利用するIPMモータの登場により、モータ効率は著しく向上し、高効率IPMモータのコンプレッサ用モータへの採用が進んでいる。この結果、モータ単体の効率は向上したが、その効率向上がインバータを含めた全体の効率に反映されないという問題が発生するようになった。

IPMモータは、式(2)の第2項からわかるようにq軸インダクタンス L_q とd軸インダクタンス L_d の差を大きく設定してリラクタンストルクを得るように設計する。その結果、IPMモータは、インダクタンス成分が大きくなって力率が低下する傾向にある。力率の低下によってIPMモータは、

モータ入力電力の低減を実現しているにも拘らず、モータ入力電流が多くなり、インバータのパワー半導体を流れる電流が増大し、パワー半導体での損失増大を招く。IPMモータ導入直後は、モータ自体の効率向上分が、インバータでの損失による効率低下を上まわっていた。しかし、モータの効率改善が積み重ねられてきた現在、モータ効率向上分に対して、力率低下によるインバータのパワー半導体部での損失増大によるインバータ効率低下分が無視できないレベルになっている。

従って、モータ効率のみではなく、インバータ入力部にもパワーメータを配置して電圧、電流、電力の測定を行い、インバータ損失を含んだ評価が必要になる。単にリラクタンストルクを追求してモータ効率向上を追求するだけでなく、インバータ損失も考慮したモータ設計が重要になる⁽¹⁾。

4.2 モータ雰囲気温度

モータは、コンプレッサ構造によって図4(a)のように低温部側に設置される場合と図4(b)のように高温部側に設置される場合がある。設置場所に応じたモータ設計が求められている。

IPMモータに埋め込む磁石は、酸化鉄を主成分としたフェライト磁石が用いられる場合と、ネオジウムと鉄とボロンを主成分とした希土類磁石を用いる場合が多い。

雰囲気温度が高くなる時の図3の磁石トルクに寄与する電機子鎖交磁束 ϕ の低下は、フェライト磁石をロータに埋め込んだIPMモータ(以下、フェライトIPMと記す)では、希土類磁石をロータに埋め込んだIPMモータ(以下、希土類IPMと記す)より大きくなる。その結果、フェライトIPMでは、同一トルクを維持するためのモータ電流の増加分が希土類IPMより大きくなり、モータ効率の低下が希土類IPMより大きくなる。これは、磁石による負の温度係数の影響によるものである。フェライト磁石の温度係数が約 -0.19 (%/°C)であるのに対して、希土類磁石の温度係数が約 -0.11 (%/°C)と小さいからである。

モータ雰囲気温度を 20°C 、 60°C 、 100°C と設定して、表1で示す希土類IPMとフェライトIPMの効率を比較した結果を図5、図6、図7に示す。モータ負荷は、 1300rpm 、 $1.4\text{N}\cdot\text{m}$ である。総合効率はインバータ効率とモータ効率を乗じて算出している。

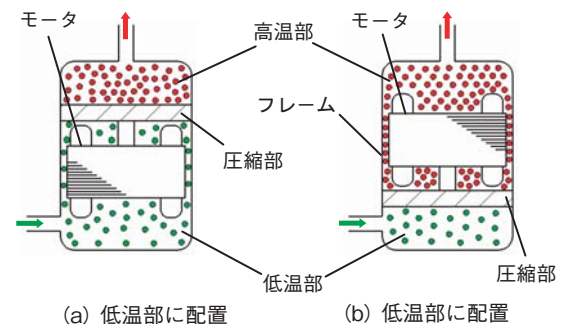


図4 モータの配置される位置

表1 モータ仕様 (20℃)

	希土類IPM	フェライトIPM
ステータ外径 (mm)	105	105
ステータ内径 (mm)	56.0	56.0
ステータスロット数	24	24
ロータ外径 (mm)	54.8	54.8
磁石	希土類	フェライト
積厚 (mm)	40	80
コア厚さ (mm)	0.35	0.35
極対数	2	2
起電力定数 (V/rpm)	0.028	0.022
d軸インダクタンス (mH)	4.1	4.1
q軸インダクタンス (mH)	9.4	15.5
突極比	2.3	3.8
端子間抵抗 (Ω)	1.020	0.813

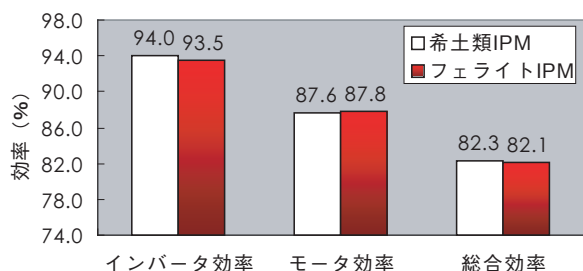


図5 効率の比較 (20℃)

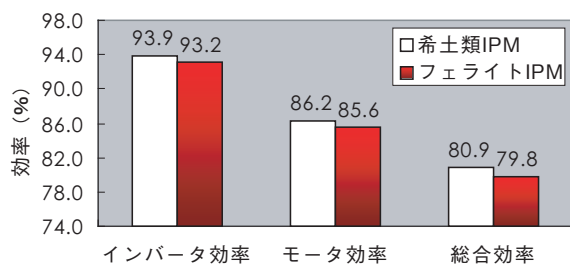


図6 効率の比較 (60℃)

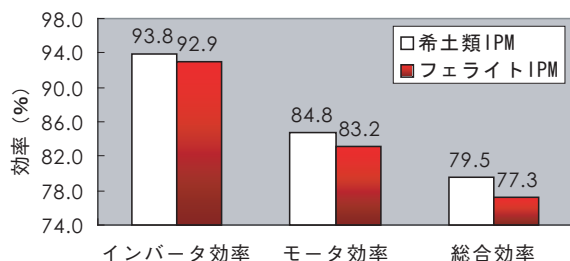


図7 効率の比較 (100℃)

図5、図6、図7からわかるように、高温部側にモータを設置する場合は希土類磁石を採用することが望ましい。逆に、低温部側にモータを設置する場合においては安価なフェライト磁石の採用も検討に値する⁽²⁾。

4.3 磁石の着磁方法

エアコンのコンプレッサ用IPMモータは、着磁されてい

ない磁石をロータに挿入して製造する。完成したロータは、ステータ巻線に大きな電流を流すことにより、ロータに埋め込まれた磁石の着磁を行う場合が多い。故に、IPMモータ設計において、着磁工程に対する配慮も重要である。

この着磁工程において、前記ステータに大きな電流を流すことによって過大な力が巻線に加わり、ステータ巻線の変形が発生する。また、集中巻モータでは、1回の通電による着磁が不十分であり、2回の通電による着磁が必要になるものもある⁽³⁾。当然、ステータ巻線の変形量が大きくなることに加え、絶縁を含めたモータの耐久性の点からも好ましくない。コンプレッサ製造時の着磁に伴う電力消費量も軽視することができない。このため、モータ設計段階から1回の通電で着磁できるようにモータを構成することが好ましい⁽⁴⁾。

4.4 分布巻と集中巻

エアコンのコンプレッサ用IPMモータのステータ巻線は、図8のような分布巻ステータと集中巻ステータが用いられる。分布巻ステータで構成されたIPMモータ(以後、分布巻モータと記す)は、集中巻ステータで構成されたIPMモータ(以後、集中巻モータと記す)と比較すると、銅線の巻線部のコイルエンドが大きい。

一方、図8(b)の集中巻ステータは、銅線の巻線部のコイルエンドが小さい。故に、分布巻モータは、銅線の巻線抵抗が高くなって銅損が多くなる傾向にあるのに対して、集中巻モータは、巻線抵抗が小さくなって銅損が小さくなる傾向にある。

図9は、有限要素法を用いて、モータ運転時の磁束密度を計算した磁界解析結果である。図9(a)の分布巻モータは、ステータの磁束が等配に分布するので電磁鋼板を有効利用できる結果、鉄損が少なく、モータ電磁騒音が小さいという長所がある。図9(b)の集中巻モータは、ステータ磁束が不均一な状態で分布するので電磁鋼板を有効に利用できない結果、鉄損が多く、モータ電磁騒音が大きいという短所がある。故に、モータ直径に対して電磁鋼板の積厚寸法が小さいモータでは、モータ全体のコイルエンドの占める割合が大きくなるので、分布巻モータより集中巻モータを選択した方が、銅損の大幅な低減が実現できる。一方、モータ直径に対して電磁鋼板の積厚寸法が大きいモータでは、モータ全体のコイルエンドの占める割合が小さくなるので、集中巻モータの銅損が少ないという優位性が小さくなる。このような場合、集中巻モータより分布巻モータの方が、鉄損が少なく高効率なモータ運転が実現できる。

特に、近年は、分布巻モータの巻線挿入技術が、年々、向上し、巻線を高占積率化してコイルエンドを小さく設定できるようになっているので、分布巻モータの銅損の低減が可能となっている。近年の分布巻モータでは、モータ体格を限定すれば、低中速域においても集中巻モータと効率が同等程度に達している。実際、高占積率化された分布巻モータを搭載したエアコンは、集中巻モータを搭載したエ

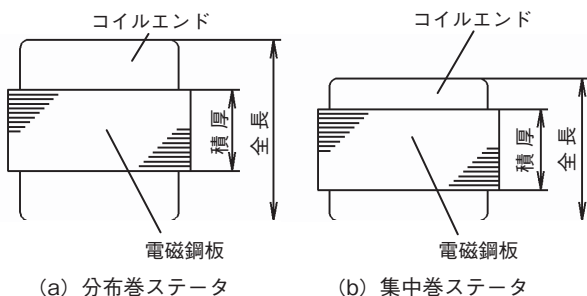


図8 分布巻ステータと集中巻ステータ

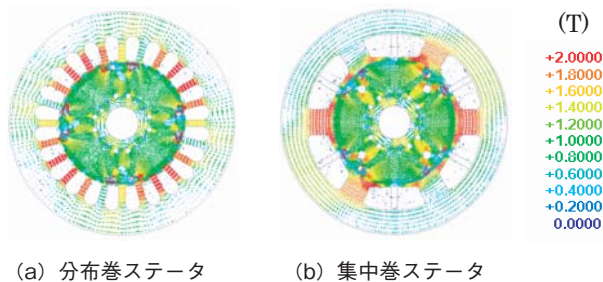


図9 分布巻と集中巻の磁界解析結果

アコンと同等の極めて高い効率を示している⁽⁵⁾。

4.5 冷媒通路の配置

エアコンのコンプレッサ用モータが汎用モータと大きく異なる点として、冷媒通路を配置する点が挙げられる。冷媒通路は、ステータやロータの電磁鋼板に孔を設けたり、ステータ外周部に切り欠きを設けてフレームとの間に通路を確保したりして配置している。

磁束を通すステータの外周のヨーク部の電磁鋼板の断面積は、冷媒通路の配置によって小さくなる結果、ステータのヨーク部の磁束密度が高くなってモータ鉄損が増加する。故に、ステータのヨーク部の磁束密度に配慮して冷媒通路を配置しなければならない。図10(a)は従来ステータを表し、図10(b)はステータのヨーク部の磁束密度を低減したステータを表す。それぞれのステータのヨーク部の平均磁束密度を磁界解析で求めた結果を図11に示す。

図10(a)の従来ステータより図10(b)の鉄損を低減したステータの方が、磁束密度が低く、鉄損の低減が実現されている。

4.6 冷媒と焼嵌め代

現在、エアコンの冷媒問題は、地球環境に大きな影響を与えることから世界的な取り組みが行なわれている。図12にHCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン)冷媒とHCF(ハイドロフルオロカーボン)冷媒の化学式を示す。1987年にモントリオール議定書が採択されて、分子中に塩素を含んでオゾン層を破壊するHCFC冷媒は、2020年までに廃止することが決定され、現在、オゾン層を破壊しないHCF冷媒への移行が進められている。HCF冷媒は、HCFC冷媒よ

り気体が液体に相変化する圧力が高いので、エアコンを運転する際はコンプレッサ内部の圧力が数十パーセント高くなる。その結果、モータのステータの外周に金属製のフレーム(以下、フレームと記す)を焼嵌めして構成するコンプレッサはフレームが圧力によって大きく膨らみ、従来の焼嵌め代ではステータが固定できなくなった。そこで、フレームの焼嵌め代を大きくしてステータを固定するようになった。

しかし、HCFC冷媒からHCF冷媒になって、モータ単体効率の向上分が、コンプレッサ効率に反映されない問題が生じるようになった。焼嵌めによる電磁鋼板の圧縮応力の増加によって、他の損失に比べて相対的に小さく問題とされなかった電磁鋼板における鉄損の増加が原因である⁽⁶⁾。

図13では、直径が112mmの集中巻ステータに、内径が111.8mmの鉄製のフレームを約350℃~380℃に加熱して熱膨張させて被せている。鉄製のフレームが冷却すると収縮してステータの電磁鋼板に応力が発生する。

図14に、有限要素法を用いて応力に対して未対策のステータの応力分布を求めた結果を示す。応力が正になっている箇所は引張を示し、負になっている箇所は圧縮を示す。

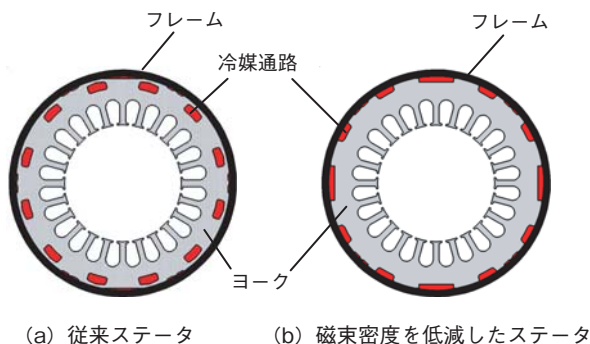


図10 冷媒通路を配置したステータ

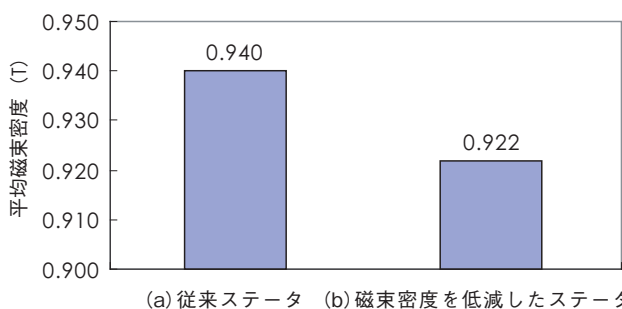
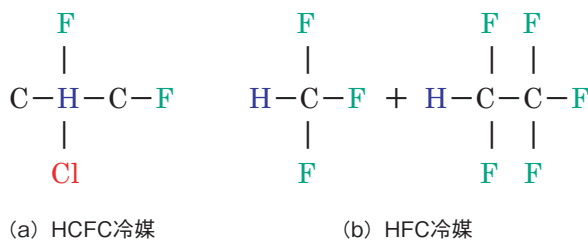


図11 ステータヨークの平均磁束密度



(a) HCFC冷媒 (b) HFC冷媒

図12 HCFC冷媒とHFC冷媒

焼嵌め条件の寸法は、図13と同様である。

図14(a)は、焼嵌め前である。図14(b)は、焼嵌め後である。焼嵌め後には、ステータの外周のヨーク全体が圧縮されていることがわかる。

この問題を解決するために磁界解析のみならず、応力解析も併用することにより、焼嵌めしてもヨーク全体が圧縮されず、ヨークの一部を引っ張るステータを提案した。提案したステータを図15に示す。電磁鋼板は、圧縮すると損失が著しく増加するが、引張ると損失の増加が少ない。この提案によって、焼嵌めによる損失増加を低減することが可能になった⁽⁷⁾。

5. 開発したIPMモータ

図16に、取り巻く環境を踏まえた上で提案した技術を用いたIPMモータの一実施例と、モータ体格の比較用として誘導モータを示す。図16は、共に、2.2kWクラスの家庭用小型エアコンのコンプレッサに搭載されているモータである。図16(a)の誘導モータは、ステータ直径105mm、電磁鋼板の積厚方向の全長が80mmである。それに対して図16(b)のIPMモータはステータ直径80mm、電磁鋼板の積厚方向の全長が55mmである⁽⁸⁾。IPMモータの体積は、誘導モータの体積に対して、直径と積厚方向を小さくすることにより、約60%の体積低減を実現している。

モータの小形化は、モータ製造に要する電磁鋼板や銅線等の材料の削減を可能とし、コスト低減だけでなく、資源保護の観点からも地球環境に貢献する。図16(b)のIPMモータは、現在、量産されているコンプレッサ用モータにおいて、世界でNo.1の小形化(当社調査、2008年12月10日現在)を実現している。

6. まとめ

本稿では、エアコンのコンプレッサ用IPMモータを取巻く状況を踏まえた上で、高効率化したモータの更なる改良においてはモータ単体の高効率化の追求のみでは不十分であり、エアコンの一構成要素として評価・開発が不可欠であることを示した。

現在、HCF冷媒は、オゾン層の保護に貢献しているが、温暖化ガスであるCO₂(二酸化炭素)の約100倍の地球温暖化係数があるために問題が生じている。そこで、エアコンの冷媒は、HCF冷媒からCO₂冷媒等の自然界に存在する地球温暖化係数の低い気体に移行する研究が進められている。地球規模で、より一層地球に優しく、高効率なエアコンの研究開発が進められる必要がある。

筆者らは、今後もエアコンのコンプレッサに搭載するモータにおいて世界でトップレベルの技術に挑戦し、エネルギー消費量の低減とモータ構成材料の低減を実現し、地球環境に優しいモータの研究開発に従事していく所存である。

最後に、執筆にあたり、長年に亘ってモータ研究開発に



図13 ステータの焼嵌め

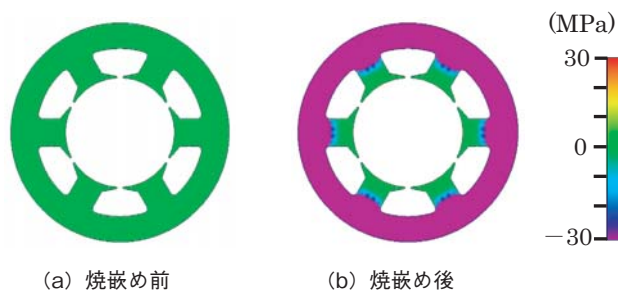


図14 ステータの応力分布

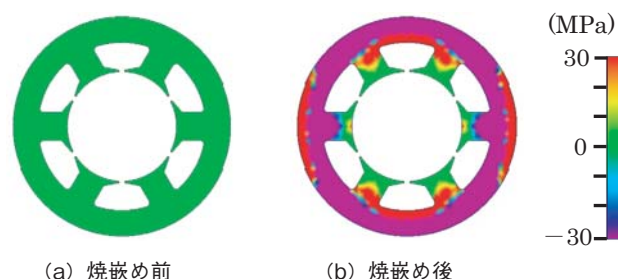


図15 応力対策済みの提案ステータ

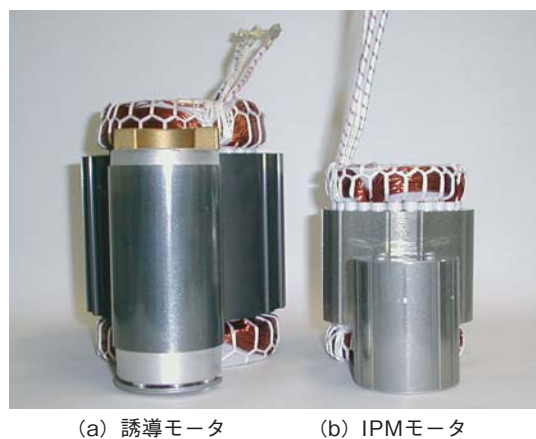


図16 誘導モータとIPMモータ

多大なご協力とご助言をいただきましたコンプレッサメーカー、モータ材料メーカー、測定器メーカー、生産設備メーカーの各位に深謝致します。

参考文献

- (1) 佐藤、金子、鈴木、富田、道木、大熊：「インバータ効率を考慮したコンプレッサ用IPMモータの効率比較」電気学会全国大会 No.5-30 (2000)
- (2) 佐藤、金子、鈴木、富田、道木、大熊：「希土類磁石を用いたエアコンのコンプレッサ用IPMモータの検討」電気学会産業応用部門全国大会 No.1-51 (2000)
- (3) 佐々木、小原木、高橋、佐藤：「集中巻ブラシレスDCモータの巻線着磁の実験検討」電気学会全国大会No.5-27 (2000)
- (4) 佐藤、金子、鈴木、富田、道木、大熊：「コンプレッサ用集中巻IPMモータにおける組込着磁についての検討」電気学会全国大会 No.5-38 (2001)
- (5) 佐藤、金子、鈴木、富田、道木、大熊：「高占積率分布巻固定子を用いたエアコンコンプレッサ用IPMモータの検討」電気学会産業応用部門全国大会No.1-1 (2001)
- (6) 山本、霜村、山田、佐々木：「電動機鉄心の磁気特性に及ぼす外部応力の効果」電気学会論文誌A、**Vol.117** No.3 (1997)
- (7) 佐藤、金子、富田、道木、大熊：「焼嵌めによる損失を低減するための電磁鋼板の特性を用いた固定子形状の改善」電気学会論文誌D、**Vol.127** No.1 (2007)
- (8) 佐藤、金子、富田、道木、大熊：「冷媒通路に着目したエアコンのコンプレッサ用モータの小型化の検討」電気学会全国大会 No.5-125 (2006)