

# レアアースの使用を抑えた重希土類フリーモータの開発

## Development of a Heavy Rare Earth Free Motor with Reduced Rare Earth Usage

竹内太規 T. TAKEUCHI 神田尚武 N. KANDA 吉川 浩 H. YOSHIKAWA  
 館 洸史 K. TACHI 津村 駿 S. TSUMURA

We have developed a motor using an anisotropic bonded magnet, which is mainly composed of samarium (Sm), which is not classified as a heavy rare earth element. In regards to the motor, we have achieved the target performances of “improving motor torque” and “reducing torque fluctuation” by optimizing the magnet shape of the rotor and establishing an original mold design. As a result, we have succeeded in developing a motor with both the same size and the same performance as a conventional motor using sintered magnets which is mainly composed of neodymium (Nd). In addition, since this bonded magnet does not contain either neodymium or heavy rare earth elements (dysprosium (Dy), terbium (Tb) etc.), for which concerns exist regarding potential procurement risks, it also contributes to future procurement stability. This report provides an outline of the development and the results of motor performance evaluation.

**Key Words:** motor, IPM, heavy rare earth, sintered magnet, bonded magnet, samarium

### 1. はじめに

近年、自動車産業において、地球温暖化の原因となるCO<sub>2</sub>排出量削減に向けて、脱カーボン燃料への転換のため電動化が一層求められている。そのためモータの需要の急速な拡大に伴い、それに使用される磁石の需要も拡大している。一方、依然として磁石に使用されるネオジムや地殻埋蔵量が少ないと言われている重希土類元素（ジスプロシウム、テルビウムなど）は、採掘できる地域が局在している。あわせて近年ではその採掘国が資源を政治利用しており、各国との貿易摩擦が発生し、価格（図1）や資源の偏在（図2）の影響によって、供給量が不安定になるなど潜在的な調達リスクが懸念されている。また、図3のモータ部品の単価比率に示すように磁石はモータを構成する部品の中で最も高額な部品のため、そのコスト低減も求められている。

本報では、ネオジムと重希土類元素を使用しない異方性ボンド磁石を採用し、高トルク・低トルク変動を達成したモータの開発内容と評価結果について紹介する。

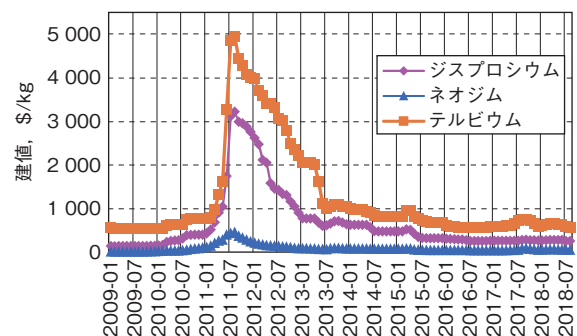


図1 重希土類材料の価格動向  
Heavy rare earth price trends

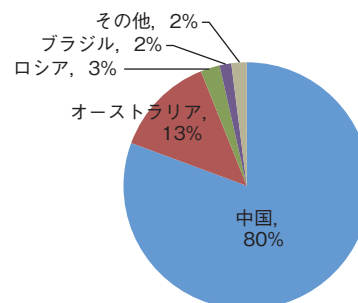


図2 希土類材料の生産量の偏在  
Uneven distribution of rare earth production

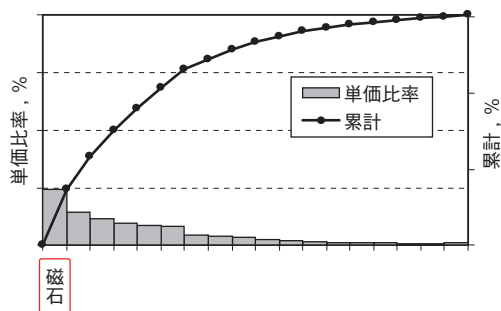


図3 モータ直材費のパレート図  
Pareto chart of motor parts price ratio

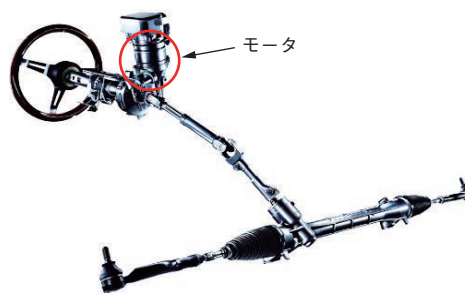


図4 電動パワーステアリング  
Electric power steering

## 2. 開発概要について

### 2.1 使用磁石

一般的にモータに使用される磁石には、「焼結磁石」と「ボンド磁石」がある。焼結磁石は、配合された原料を溶解・合金化し、その磁石合金を微粉碎した後、磁場中で磁化の方向を揃えてプレス成形し、高温で焼き固めること（焼結）により製造されている。その後処理として、用途に合わせて加工や表面処理が施される。この磁石の特長として、残留磁束密度（Br）が大きく、実用化されている磁石の中で最も磁力が強い。さらに、ネオジムの一部をジスプロシウムやテルビウムに置き換えることで保磁力（Hcj）を向上させ、耐熱性を担保したものが広く使用されている。しかしながら、これらの元素は全17種類のレアアースの内、世界的に希少で分布が偏在している重希土類に分類されており、鉱物資源として利用するには軽希土類元素に比べて安定調達・材料コストの観点からリスクを抱えている。当社製品の電動パワーステアリング（図4）のモータもその例外ではなく、焼結磁石を用いたモータが高出力・高耐熱が要求される場合には使用されている。

一方、ボンド磁石は、磁石の粉にゴムやプラスチックなどのバインダ（結着剤）となる樹脂が混合されている。樹脂を含んでいるため、残留磁束密度や保磁力は焼結磁石に比べて低下するが、射出成形による複雑形状・薄肉形状が可能であり、後工程も不要なため工程を削減できる。また、樹脂を練り込んだ柔軟性のある磁石のため、焼結磁石には無い割れにくいという特長も併せ持つ。

今回、以下の①～③を狙いとして、使用磁石を検討した。その検討にあたり、重希土類（ジスプロシウム）を含むネオジウム鉄ボロン（NdFeB）を主原料とする焼結磁石、ネオジウム鉄ボロン（NdFeB）を主原料とするボンド磁石、サマリウム鉄窒素（SmFeN）を主原料とするボンド磁石の3種類を比較した。その結果を表1に示す。

<狙い>

- ①ジスプロシウムなどの原料を重希土類フリー化
- ②調達リスク・価格変動が小さい
- ③コスト低減が可能

表1 磁石の比較  
Comparison of magnet type

	焼結磁石	ボンド磁石	
	ネオジウム鉄ボロン	ネオジウム鉄ボロン	サマリウム鉄窒素
重希土類フリー	×	○	○
残留磁束密度	○	△	△
耐熱性	◎	△	○
コスト (使用量あたり価格)	△	○	○
調達リスク (価格変動)	△	○	◎
形状自由度 (加工性)	△	○	○

その結果、全体的にバランスが良いサマリウム鉄窒素ボンド磁石を採用した。ただし、焼結磁石と比較して、残留磁束密度が低下するため、ボンド磁石の特徴を生かした高トルクモータの開発を進めた。

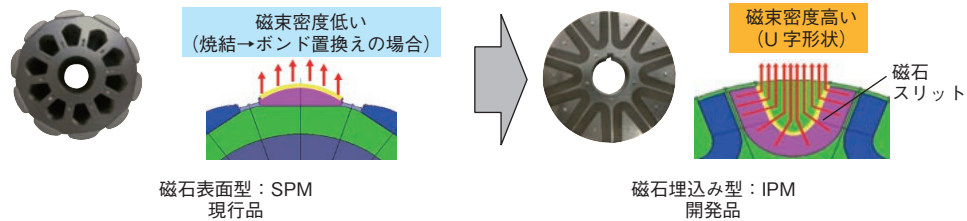


図5 ロータ形状の比較  
Comparison of rotor shape

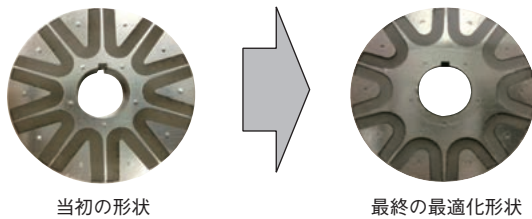


図6 開発ロータ形状の比較  
Comparison of rotor shape development

## 2.2 ロータ形状

ロータ形状については、これまで当社が採用している従来形状の磁石表面型（SPM：Surface Permanent Magnet）にボンド磁石を単純に置き換えた場合、残留磁束密度が低いためトルク不足になる。そこで、ボンド磁石の長所の一つである形状自由度（複雑・薄肉形状可能）を生かし、磁石をロータコアのスリットに埋め込む磁石埋込み型（IPM：Interior Permanent Magnet）を採用した。磁石形状は公知であるが、限られたスペースで磁石表面積を大きくできる U 字形状を採用することでトルク不足を補った（図5）。

開発当初の問題点としては、磁場解析と実機結果の乖離が大きい点であった。これは磁石の着磁率・配向率を一定（100%）としていた点が挙げられる。しかしながら、実機の磁石には着磁率・配向率の分布が存在しており、その分布を考慮できていないことが主要因であった。そこで、分布を考慮できる解析手法の確立を進めた。具体的には、磁石の着磁特性から磁化強度分布を特定する着磁解析、磁化方向を特定する配向解析をそれぞれ実施し、組み合わせることで解析誤差を改善した。その手法を用いてパラメータスタディ\*を実施することで磁石形状を最適化した。この取り組みの結果として、単純に U 字形状の表面積を増やすのではなく、着磁率・配向率を最も効果的に高められる形状にすることができた（図6）。その効果として、コストへの影響度が高い磁石使用量を当初より約 20% 削減できた。

さらに、形状自由度の利点を生かし、磁石形状の一部を独自に工夫することで漏れ磁束を抑制し、トルク向上を図った。また、ロータ表面の磁束密度波形の平滑化により、IPM では課題になっているトルク変動も抑制し、焼結磁石 SPM モータと同等の値に近づけることができた。

※条件や形状をパラメータ（媒介変数）とし、それを段階的に変えて解析する手法

## 2.3 製造工程

製造工程（図7）において、板状の焼結磁石をロータコアの表面に貼り付ける現行工法の SPM は、投入から完成まで 6 工程必要であったが、開発工程の IPM は専用金型（鉄心+永久磁石）を使用し、磁場中に射出成形することによって磁石の固定と着磁が同時にできるため、4 工程削減した 2 工程で製造可能になり、ボンド磁石の特長の一つを生かすことができた。これによってリードタイム短縮だけでなく、設備投資や部品点数も削減でき、生産性の向上が図れた。また、安定して製品を作るために、特性値に磁束量・寸法変化量を選択し、寄与度が高い条件の因子を抽出して実験計画法により、成形条件を最適化した。その成形条件による工程能力の確認では、良好な結果が得られた。

## 2.4 成形金型

磁石の着磁率・配向率を高めるために成形金型では、磁場解析により独自の磁場印加構造を盛り込んだ金型を製作した（図8）。その結果、配向磁場が届きにくく着磁率の向上が難しかったロータコアの U 字形状の底部着磁率を高めることができ、モータトルクの向上に寄与する着磁率・配向率を、限りなく上限まで高めることができた。

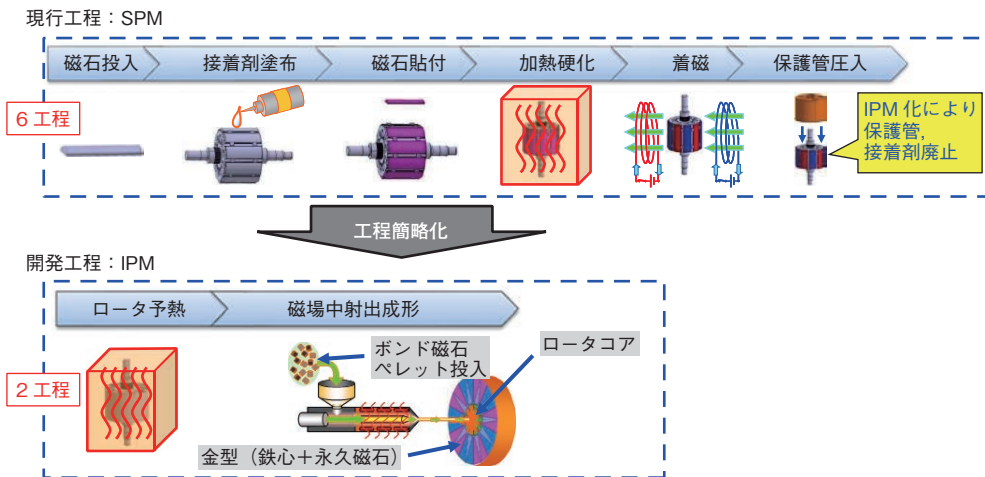


図7 工程フローの比較  
Comparison of process flow

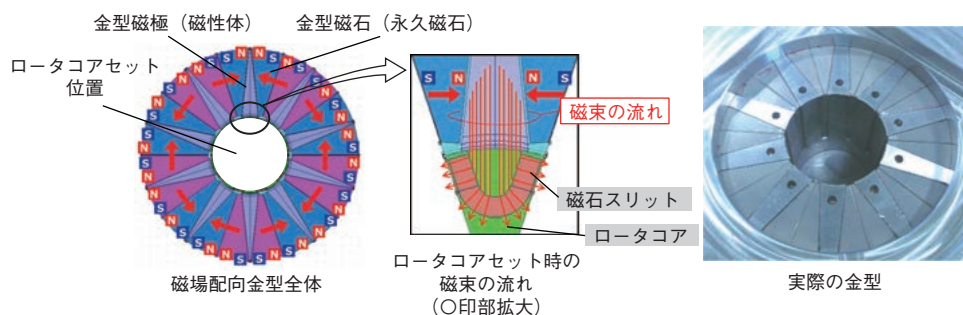


図8 成形金型  
Molding die

### 3. 結果

前述したようにロータ形状の最適化 (図6) と成形金型の設計 (図8) によって、モータトルクは当初より18% 向上し、焼結磁石を使ったSPM モータから置き換え可能になる目標トルクを達成した (図9)。さらに、磁石形状の工夫だけではなく、スキュー角などの一般的な設計手法を組み合わせることで、コギングトルクやトルクリプルの値は当初よりそれぞれ68%、66% 低減でき、焼結磁石を使ったSPM モータから置き換え可能になる目標の低トルク変動を達成した (図10, 図11)。これにより、重希土類フリーボンド磁石を使ったIPM モータとして、焼結磁石を使ったSPM モータと同体格で同等の高トルク・低トルク変動の性能を持つモータを開発でき、あわせてその設計手法・生産技術を確立できた。なお、今回の評価に使用したモータはブラシレスタイプで、コイルにより界磁するステータと磁石を有するロータで構成されている。

また、バインダは熱可塑性樹脂を使用しているため、耐湿性や耐熱性を確認する必要があり、その信頼性試験では、材料メーカーと協力しボンド磁石素材の一部を改良し、劣化を抑えることにより、目標値を達成した (図12)。

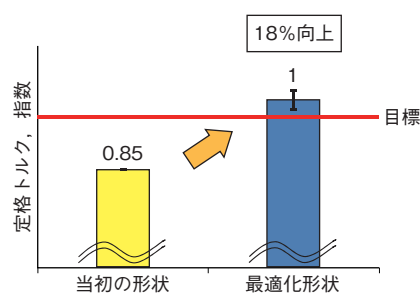


図9 モータ定格トルク結果  
Results of motor rated torque

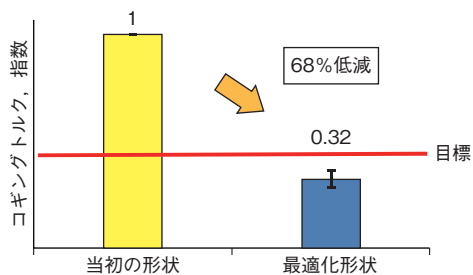


図10 トルク変動結果① (コギングトルク)  
Results of cogging torque

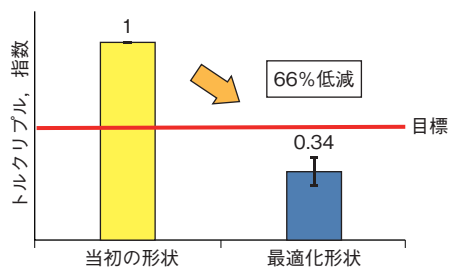


図11 トルク変動結果② (トルクリプル)  
Results of torque ripple

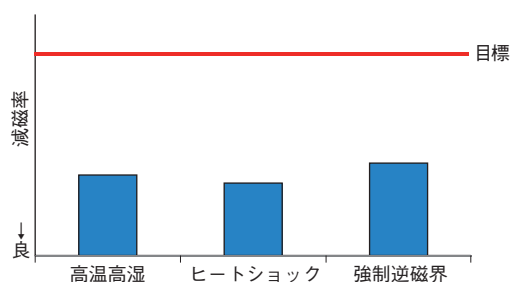


図12 信頼性結果  
Results of a reliability test

#### 4. おわりに

ボンド磁石の形状自由度を生かしたロータの磁石形状の最適化と着磁率・配向率を最大限に高められる独自の金型設計を確立したことにより、「モータトルクの向上」と「トルク変動の低減」を達成し、あわせて「IPM モータはSPM モータと比べてトルク変動が生じやすい」という常識を打ち破り、モータの体格を変えずに、焼結磁石を使ったSPM モータ相当の性能を達成できる重希土類フリーボンド磁石を使ったIPM モータを開発できた。また、ネオジウムや重希土類(ジスプロシウム(Dy)、テルビウム(Tb)など)を使用せずに、サマリウムを主原料とした磁石を採用することにより、潜在的な調達リスクへの対応にも貢献できた。

さらに、今回の開発では、設計部門とモノづくり部門のサイマルテニアスエンジニアリング(SE :

Simultaneous Engineering)により、当社独自の設計手法と生産技術を確立できた。

今後はさまざまなアプリケーションのニーズに対応するため、耐熱性とロバスト性の向上を図り、電動パワーステアリングや電動オイルポンプをはじめとする多くの自動車部品において、さまざまなお客様のニーズに貢献できるように開発を推進していきたい。

#### 筆者



竹内太規\*  
T. TAKEUCHI



神田尚武\*\*  
N. KANDA



吉川 浩\*  
H. YOSHIKAWA



舘 洸史\*  
K. TACHI



津村 駿\*  
S. TSUMURA

\* 生産技術本部 生産技術開発部

\*\* ステアリング事業本部 MCU 開発部