大容量永久磁石式磁気カップリングのトルク解析

正 員 堺 和 人 (東 芝)
非会員 大 石 高 志 (東 芝)
正 員 徳 増 正 (東 芝)

Torque Analysis of Large Permanent Magnet Coupling

Kazuto Sakai, Member, Takashi Oishi, Non-member, Tadashi Tokumasu, Member (Toshiba Corporation)

Conventional magnet couplings which have been applied to productive machines of medicine and food-stuff are small power ($10\text{ N}\cdot\text{m}$ - $1,200\text{ rpm}$). Recently, the magnet couplings of large power (high speed and large torque) are required for a fluid pump for oil and an apparatus of laser. Rare-earth permanent magnets (Sm-Co, Nd-Fe-B) with high energy products allow us to develop the large permanent magnet coupling.

The small magnet coupling was developed by the way of trial and error or the macroscopic torque analysis. But it is difficult to design the large magnet coupling without the analysis of high accuracy. A finite element method makes it possible to analyze magnetic field with accuracy.

This paper presents the torque analysis of the large permanent magnet coupling. The analysis is composed of two dimensional magnetostatic finite element method and the calculation, which compensates the decrease of torque by leakage flux at axial ends. We analyzed the large permanent magnet coupling with the rated power of $100\text{ N}\cdot\text{m}$ - $8,000\text{ rpm}$. Then, we measured the torque of the magnet coupling which was made of Sm-Co permanent magnet.

The analysis shows good agreements with test results within the error of few percent.

キーワード：磁気カップリング、永久磁石、有限要素法、磁界解析

1. ま え が き

磁気カップリングは駆動側軸と負荷側軸を機械的な結合なしに磁気力により力を伝達するため、駆動側と負荷側を構造物である隔壁で分離できる特徴をもつ。

従って、気体、流体が満たされた容器を負荷側とする磁気カップリングは、回転軸から容器内物質が漏れることなく完全シールが可能となる（負荷側を真空容器としても同様な効果が得られる）。

従来の磁気カップリングは、薬品・食品の製造機に使用されており、低速（ $1,200\text{ rpm}$ ）・小トルク（ $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 以下）である。

最近では、石油類の流体ポンプ、レーザー発振器の送風機などで高速（ $5,000\sim 10,000\text{ rpm}$ ）・大トルク（ 100

$\text{N}\cdot\text{m}$ ）の大容量の磁気カップリングが要求されている。

このような大容量の磁気カップリングは、近年の高磁気エネルギー積の希土類永久磁石（SmCo, Nd-Fe-B）の出現により実現が可能となった。

従来の磁気カップリングは小容量のため、巨視的なトルク解析^{(1)~(3)}を用いたカットアンドトライによる開発であった。

しかし、大容量機の場合は精度の高い設計が要求される。更に高速回転機の場合、隔壁内での渦電流発生防止のため隔壁には非導電性・非磁性材が使用される。隔壁により磁気的空隙長は非常に大きくなり、各伝達トルク発生状態における磁束の漏れ・磁束の隣極への回り込みなどの空隙磁束分布を詳細に把握する必要がある。

ある。また、偏平型、大空隙長の磁気カップリングは端部の軸方向磁束の漏れを考慮する必要がある⁽⁴⁾。

本論文では、高速・高トルク磁気カップリングに関するエネルギー変位法によるトルク解析を行い、二次元有限要素法と軸端部の磁束漏れの補正を用いた擬似的な三次元磁界解析を行うことにより、精度の良いトルク算出方法を提案する。

初めに、磁気エネルギーからの伝達トルクの算出方法について述べ、有限要素法による磁界解析と端部磁束漏れのトルク補正法について述べる。また、空隙磁束密度分布測定と伝達トルク特性実験結果について述べ、解析値と実験値の比較・検討を行い、解析精度が十分にあることを明らかにしている。

2. 磁気カップリング概要

〈2・1〉 磁気カップリングの基本構成 磁気カップリングは、駆動側軸と負荷側軸を機械的な結合なしに磁気力により力を伝達する。図1に機器に組込んだ円筒形の磁気カップリングを示す。カップリングの基本構成は、空隙を介して内転ロータと外転ロータが対向し、各ロータの空隙面に永久磁石が固定されている。空隙部には内転側と外転側を完全に隔離・シールするため隔壁が設けられている。

〈2・2〉 伝達力発生原理 磁気カップリングの伝

図1 磁気カップリング基本構成
Fig. 1. Structure of magnet coupling.

図2 磁気エネルギー
Fig. 2. Magnetic energy.

達力は内転永久磁石と外転永久磁石間に作用する磁気の吸引力および反発力により生じる。

一方、回転電機として考えると永久磁石により形成される磁極の中心軸は回転電機の直軸とみなすことができる。対向する内転ロータの磁極軸と外転ロータの磁極軸の位相差は同期機におけるトルク角となり、内転ロータと外転ロータは同期して回転する。伝達トルクが大きくなるにつれて、位相角であるトルク角は大きくなり $\pi/2$ のときに最大トルクとなる。これ以上のトルクがかかるとカップリングは脱出する。

$$T = k \sin \delta_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 T :トルク値、 k :係数、 δ_e :トルク角(電気角)

〈2・3〉 磁気エネルギーとトルク算出方法 エネルギー保存則に基づくエネルギー変位法では、エネルギーの変化分は外部に仕事をすることになる。これより、位置の変化前後の総磁気エネルギーの変化率により力を計算する。

図2の磁石の減磁曲線を用いて磁気エネルギーとトルクを検討する。磁気カップリングにおける減磁曲線と磁気エネルギーは次のようになる。外転ロータと内転ロータが対向するトルク角0度の状態では磁石は増磁となっており、減磁曲線上で動作点は右上に移動する。外転ロータの磁極に対して内転ロータの磁極が $\pi/2$ ずれると、磁石は片側で増磁、残りの部分は減磁となるので動作点は左下がり移動する。従って、トルク角が $0 \sim \pi$ 範囲において、トルク角が増加することはパーミアンス係数が小となることに等価である。

本等価的な考え方では、伝達トルクとなる磁気エネルギーの変化分は $0, a, b$ で囲まれた面積となる。上記の集中定数的な考え方から、以下に分布定数的にとらえる解析による磁気エネルギー変位から精度良くトルク計算を行う。

3. トルク特性解析^{(5)~(8)}

磁気カップリングの空隙長が約10mm以上となる場合や、軸方向長さ対空隙径が著しく小である場合は、二次元磁界解析によるトルク値は軸端部の磁束漏れが考慮されない結果、得られるトルク値は実際よりも大きくなり誤差が生じる。

本解析では、二次元磁界解析と軸方向の端部磁束漏れによるトルク低下の補正計算を組合せることにより、擬似的な三次元解析を行う。

〈3・1〉 二次元磁界解析 磁界解析は二次元の有限要素法を用いて行う。解析範囲は1極分とし、内転

ロータを固定して外転ロータを設定したトルク角分回転移動させる。解析値は一極の単位長さ当たりの磁気エネルギーとなる。

伝達トルクは各トルク角における磁気エネルギーを求めて、トルク角の変化量にて微分した値となる。トルク角の変化量を大きくすると、トルク値は平均化されて値が実測値よりも小となる。従って、トルク角の変化分となる解析1回当たりの内・外転ロータの相対的移動量は、ある程度小さくとる必要がある。本解析では、解析1回当たりの移動量は $\pi/16$ としている。最大伝達トルクはトルク角が $\pi/2$ の状態では生じるので、最大トルクの解析はトルク角が $\pi/2-\pi/16$, $\pi/2$, $\pi/2+\pi/16$ の三つの状態で行う。

永久磁石は $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 系の希土類磁石を使用しており、減磁曲線は直線であり、(2)式として取扱う。

$$B = \mu_r H + B_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 B : 磁束密度, B_r : 残留磁束密度,
 μ_r : リコイル透磁率, H : 磁界の強さ

マクスウェルの方程式より

$$\text{rot } H = J \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 J : 強制電流密度

(2), (3)式より

$$\text{rot}(B/\mu_r) = J + J_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 J_m は等価磁化電流密度であり、(5)式で表される。

$$J_m = \text{rot}(B_r/\mu_r) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ベクトルポテンシャル A は $B = \text{rot } A$ であり、(4)に代入すると、

$$\text{rot}(\text{rot } A/\mu_r) = J + \text{rot}(B_r/\mu_r) \quad \dots\dots\dots (6)$$

が得られ、解析の基本式となる。

解析対象機 (A 機) の断面図を図3に諸元を表1に示す。また、一極分の解析領域を図4に示す。

(条件)

(i) 境界条件: ab , cd は周期境界

ad , bc はポテンシャルは0

(ii) 磁性ヨーク: 比透磁率は500, 線形

トルク角 $\delta_e = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ における解析結果である磁束線図, 空隙磁束密度分布図と磁気エネルギー W_m を表2に示す。

また、最大トルクが発生する近傍の磁束線図と磁気エネルギーを図5に示す。FEM 解析による最大トルク T_a は次式となる。

$$T_a = -[W(\pi/2) - W(\pi/2 - \pi/16)]/(\pi/16) \times P(2P)L \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $W(\delta_e)$: トルク角 (電気角) δ_e 時の

磁気エネルギー, P : 極対数, L : 磁石長

(7)式に解析で得られた磁気エネルギーを代入すると最大トルクは、120.5 N・m となる。

〈3・2〉 端部磁束漏れの補正 本磁気カップリングでは力が作用する方向が周方向であるので、周方向断面における磁束分布状態はトルクに大きく影響する。従って、トルクの解析精度を向上するには隣極への磁束の漏れおよび自極自身への磁束の回り込みなどの分布状態が詳細に得られるように、二次元有限要素法を適用する。一方、軸端部の磁束の漏れの量はトルクに影響するが、漏れの分布状態はトルクにあまり影響しないため巨視的な簡易計算でも値の精度は十分と思われる。

端部磁束漏れによるトルク低下量を直接に得ることは困難なため、端部磁束漏れなしとしたときの簡易ト

図3 大容量磁気カップリング
 Fig. 3. Large magnet coupling.

図4 解析領域
 Fig. 4. Region of analysis.

表1 磁気カップリング諸元 (A 機)
 Table 1. Specifications of magnet coupling.

極 数	8 極
伝達トルク	100 N・m
回転数	8,000 rpm
外転ロータ外径	216 mm
磁石軸方向長	55 mm
磁気的空隙長	12.5 mm
永久磁石	$\text{Sm}_2 \text{Co}_{17}$
磁気エネルギー積 207 kJ/m ³	

表 2 磁界解析結果
Table 2. Results of magnetic field analysis.

トルク角 δ_e (rad)	磁束線図	空隙磁束密度分布 B (T)	W_m (J/m)
0			216.4
$\pi/2$			144.7
π			69.6
$3\pi/2$			144.7

図 5 最大トルク近傍の磁束線図
Fig. 5. Magnetic flux near maximum torque point.

ルク計算値と端部磁束漏れありの簡易トルク計算値の差が端部漏れのトルク低下量になることを利用する。

また、トルク低下量は同一の簡易計算法で求められたトルク値の差とするため、簡易計算の巨視的周方向断面の磁束分布に基づく誤差は対称性により相殺される。

今回のトルク補正方法は以下の手順で行う。

空隙磁束密度は内転または外転ロータの磁石のみがあるときの空隙磁束密度を求めた後、二つの磁束密度分布を重ね合わせる。この重ね合わされた有効磁束密度より空隙の磁気エネルギーを計算する。エネルギー変位法による磁気エネルギーからトルクが得られる。

この計算手順で、下記のように端部磁束漏れのあり、なしの条件でトルクを求める。

(1) 簡易トルク計算式⁽³⁾ 空隙磁束密度 B_g は次式となる。

$$\begin{aligned} B_g &= B_i(P, \theta_m) + B_o(P, \theta_m - \delta_m) \\ &= B_i \sin(P\theta_m) + B_o \sin\{P(\theta_m - \delta_m)\} \\ &\dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

図 6 磁石周囲の漏れ磁束
Fig. 6. Leakage flux around magnet.

図 7 空隙部の漏れ磁束 (内転磁石のみ)
Fig. 7. Leakage flux around air-gap.

ここに、 B_i : 内転ロータのみの磁束密度、 B_o : 外転ロータのみの磁束密度、 θ_m : 空間角、 δ_m : トルク角 (機械角)

空隙の磁気エネルギー W_g は

$$\begin{aligned} W_g &= \int dW_g \\ &= \frac{L}{2\mu_0} \int_{rr}^{rs} r dr \int_0^{2\pi} B_g^2 d\theta_m \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここに、 $\mu_0: 4\pi \times 10^{-7}$, r : 半径, rs : 外転ロータ内径, rr : 内転ロータ外径

伝達トルク T は次式となる。

$$\begin{aligned} T &= -\partial W_g / \partial \delta_m \\ &= P \cdot V_g / (2\mu_0) B_i B_o \sin(P\delta_m) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 V_g : 空隙部体積

磁束の漏れ磁路を図 6、図 7 のように仮定して、以下に軸端部磁束漏れのあり、なしのトルクを計算する (仮定磁路のパーミアンスは付録 1 を参照)。

(a) 軸方向断面 (■: ホール素子)

(b) 周方向断面 (●: ホール素子)

図 9 ホール素子取付位置
Fig. 9. Positions of hall sensor.

図 8 実験装置
Fig. 8. Experimental apparatus.

(2) 端部磁束漏れを考慮しないときトルク T_0 周方向の磁束の漏れのためのパーミアンス PL は

$$PL = 2P_m3 + 2P_gL_3 \quad \dots\dots\dots(11)$$

となり、パーミアンス係数 P_c は次式となる。

$$P_c = (P_g + PL) / P_m \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 P_g : 磁極部の空隙パーミアンス、

P_m : 永久磁石のパーミアンス

空隙磁束密度 B_d は

$$B_d = B_r / (1 + \mu_r / P_c) \quad \dots\dots\dots(13)$$

であり、有効磁束密度 B_{de} は次式となる。

$$B_{de} = B_d \cdot P_g / (P_g + PL) \quad \dots\dots\dots(14)$$

B_{de} はほぼ方形波となり、フーリエ級数展開を行うと

B_{de} の基本波成分である B_i は次式となる。

$$B_i = 4 / \pi \cdot B_{de} \quad \dots\dots\dots(15)$$

同様にして外転ロータの空隙磁束密度 B_o を計算する。 B_i 、 B_o を (10) 式に代入し、トルク T_0 が得られる。

(3) 端部磁束漏れを考慮したトルク T_e 端部の漏れを含む磁束の漏れパーミアンス PL_e は

$$PL_e = 2P_{m1} + 4P_{m2} + 2P_{m3} + 2P_gL_1 + 4P_gL_2 + 2P_gL_3 \quad \dots\dots\dots(16)$$

となり、(12)、(14) 式の PL に PL_e を代入し、前記と同様にして磁束密度 B_i 、 B_o とトルク T_e が得られる。

表 3 空隙磁束密度分布 (測定値)
Table 3. Distribution of air-gap magnetic flux density (measured values).

トルク角 δ_e (rad)	磁束密度分布 B (T)		
	磁極中心 (a 点)	磁極端部 (b 点)	漏れ磁束部 (c 点)
0			
$\pi/2$			
π			
$3\pi/2$			

以上の T_0 と T_e より端部磁束漏れによるトルク低下量 TL は、次式となる。

$$TL = T_0 - T_e \quad \dots\dots\dots (17)$$

従って、補正された解析トルク値 T_c は

$$T_c = T_a - TL \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$= 105.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4. 実 験

〈4・1〉 実験装置 実験装置を図8に示す。磁気カップリングの内転ロータは、トルク変換器と直結され、トルク変換器の一方の軸は固定されている。外転ロータは減速機を介して外部からトルクを与える機構であり、軸端に直結されたポテンショメータにて固定された内転ロータと外部より回転させられる外転ロータのトルク角（位相角）を測定する。

このときの空隙磁束密度分布と伝達トルクを測定する。

〈4・2〉 磁束密度分布測定 図9に示すように、隔壁表面に1mm角のホール素子を軸方向と周方向に分布させて27個張り付ける。図の実験装置で外部より力を与え任意のトルク角度における空隙磁束密度分布を各ホール素子の出力により測定する。

実験結果を表3に示す。表2の磁界解析による空隙

磁束密度分布と表3の実験による磁極中心（a点）分布はほぼ一致している。端部近傍（b点）の分布も中心部分布と同様な分布波形の変化であり、値は20～30%低下している。端部磁束漏れ部分（c点）の磁束密度分布はトルク角に依存せず、分布波形の変化はほとんどないことがわかる。従って、端部の磁束は漏れ量となり有効なトルクとして作用せず、〈3・2〉節の簡易計算の仮定が妥当であることが確認された。

〈4・3〉 伝達トルク特性実験 図10に伝達トルク特性を示す。トルク曲線はほぼ正弦波であり、1回転当たり生じる4個の最大トルク値は同一である。

表4に解析値と実験値の比較を示す。また、同時に機種異なるB機の解析値・実験値も示す（B機諸元は付録2を参照）。

A機において、トルクの実験値は103.8 N・mである。補正なし解析値は120.5 N・mであり、実験値に対する誤差は16%である。補正あり解析値は105.8 N・mであり、実験値に対する誤差は1.9%である。

B機も同様な結果が得られ、補正あり解析値の実験値に対する誤差は1.0%が確認されている。

以上の解析値と実験値との比較により、軸端部の磁束の漏れを考慮する必要がある、本解析方法は十分な精度があることが確認された。

5. む す び

本論文では、永久磁石式磁気カップリングの伝達トルクの解析方法を検討した。特に、従来の巨視的トルク解析では、精度の良いトルク解析が困難であった高速・大トルクの大容量磁気カップリングを対象にして述べた。

本トルク解析は、端部磁束漏れを考慮した二次元磁界解析により擬似的な三次元解析を行っている。本解析結果と実験により次のことが明らかになった。

- （1） 軸端部の磁束の漏れを考慮する必要がある。
- （2） 本解析方法は十分な精度がある。

最後に、御指導、御鞭撻をいただいた当研究所沢田技監、山口部長、伊藤主幹、浜島課長に感謝の意を表す。また、協力いただいた本研究所森野 勇氏、井上浩一氏ほか、本研究の関係各位に感謝の意を表す。なお、本論文は、通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発制度に基づき実施されている「超先端加工システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から超先端加工システム技術研究組合への委託事業により得られた成果の内容を含むものである。 （平成4年8月12日受付）

図10 伝達トルク特性
Fig. 10. Torque characteristics.

表4 解析精度
Table 4. Accuracy of analysis.

機種	解析値 補正無 (N・m)	解析値 補正有 (N・m)	実験値 (N・m)
A	120.5 (16%)	105.8 (1.9%)	103.8
B	149.7 (10%)	137.5 (1.0%)	136.2

* ()値は、実験値に対する誤差

文 献

- (1) 飯田・岩崎, 他: 硬質磁性材料 (磁気工学講座 3), p.242, 丸善
- (2) 本島: 「二相分離型希土類永久磁石のトルクカップリングへの応用」, 電気学会磁性材料研究, MAG-76-15 (昭 51)
- (3) 山川・大川: 永久磁石磁気回路の設計と応用, p.168 (昭 60) 総合電子出版
- (4) Caio Ferreira & Jayant Vaidya: "TORQUE ANALYSIS OF PERMANENT MAGNET COUPLING USING 2D AND 3D FINITE ELEMENTS METHODS", *IEEE Trans. Magnetics*, 25, No. 4 (1989)
- (5) 井上・堺, 他: 「AC サーボモータの磁束分布」, 昭 58 電気学会東京支部大, No.266
- (6) 井上・徳増, 他: 「永久磁石式磁気カップリングの解析」, 昭 63 電気学会全大, No.1653
- (7) 森野・堺, 他: 「高速・高トルク永久磁石式磁気カップリングの開発」, 昭 63 同上, No.1654
- (8) 森野・堺, 他: 「大容量永久磁石式磁気カップリングの開発」, 平 3 同上, No.1716
- (9) 大川: 永久磁石回転機, p.79 (昭 57) 総合電子出版

付 録

1. 仮定磁路の漏れパーミアンス式

仮定した漏れ磁束の磁路におけるパーミアンス値は Roters のパーミアンス計算式に基づき求める⁽⁹⁾。

パーミアンス値 P_v は, 平均磁路長 L_v , 磁路空間の体積 V_v , 磁路断面積 A_v により算出する。

$$A_v = V_v / L_v \dots\dots\dots (付 1)$$

$$P_v = \mu_0 A_v / L_v \dots\dots\dots (付 2)$$

この考えに基づき導出した各仮定磁路におけるパーミアンスの最終式を以下に示す。

$$P_{m1} = 0.4147 \mu_0 (D_{om} + D_{im}) / (2P) \times (\text{Arc} / \pi) \dots\dots\dots (付 3)$$

$$P_{m2} = 0.03873 \mu_0 (D_{om} - D_{im}) \dots\dots\dots (付 4)$$

$$P_{m3} = 0.5277 \mu_0 L \dots\dots\dots (付 5)$$

$$P_{g1} = 0.4147 \mu_0 (D_{iro} + D_{om}) / (2P) \times (\text{Arc} / \pi) \dots\dots\dots (付 6)$$

$$P_{g2} = 0.03873 \mu_0 (D_{iro} - D_{im}) \dots\dots\dots (付 7)$$

$$P_{g3} = 0.2639 \mu_0 L \dots\dots\dots (付 8)$$

ここに, D_{om} : 内転永久磁石外径, D_{im} : 内転永久磁石内径, P : 極対数, Arc : 内転永久磁石ポールアーク, D_{iro} : 外転ロータ内径, L : 内転永久磁石長

2. B 機諸元

付表 1 磁気カップリング諸元 (B 機)
app. Table 1. Specifications of magnet coupling (B).

極 数	8 極
伝達トルク	137.2 N・m
回転数	8,000 rpm
外転ロータ外径	198 mm
磁石軸方向長	80 mm
磁気的空隙長	11 mm
永久磁石	Sm ₂ Co ₁₇
磁気エネルギー積 207 kJ/m ³

堺 和 人 (正員)

昭和 34 年 1 月 6 日生。58 年 3 月山口大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 重電技術研究所電磁応用装置技術開発担当所属。主として, 制御用モータ・センサ, 永久磁石応用機器の研究開発に従事。平成 3 年電気学会論文発表賞受賞。

大 石 高 志 (非会員)

昭和 23 年 10 月 8 日生。48 年 3 月名古屋大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 重電技術研究所企画・管理担当課長。電気機械の通風冷却および流体機器の研究開発に従事。日本機械学会会員。可視化情報学会会員。

徳 増 正 (正員)

昭和 26 年 5 月 8 日生。49 年 3 月東京大学工学部物理工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 重電技術研究所電磁応用装置技術開発担当主査。主として, 回転機の電磁解析の業務に従事。