

## 学術論文

## 熱磁気モータの磁気回路形状の最適設計 (磁化過程を考慮した吸引力特性の解析とヨーク形状の最適化)

Optimum Yoke Shape Design for Magnetic Circuits of Thermo-Magnetic Motor  
(Analysis of attracting force characteristics and optimization of the yoke shape in consideration of the magnetization process)

中村 正行\*<sup>1</sup> (正員), 小山 美佳\*<sup>2</sup>, 桐田 陽子\*<sup>1</sup>

Masayuki NAKAMURA (Mem.), Mika KOYAMA, Yoko KIRITA

A thermo-magnetic motor is able to transform heat energy and magnetic energy into kinetic energy by combining permanent magnets and temperature-sensitive magnetic components. This motor is driven by heat energy and magnetic energy such as hot spring water and waste heat from power plants instead of the electric power from the outside. In this study, a shape of magnetic circuit is optimized to increase the attracting force for the temperature sensitive magnetic material and to decrease the reverse attracting force of rotation. We report some results from the analysis of three-dimensional model based on the finite element method. The result of the attracting force in the magnetization process and the optimized yoke shape design for magnetic circuits are shown.

**Keywords:** optimum design, shape optimization, magnetic circuit, thermo-magnetic motor.

### 1 緒言

熱磁気モータは磁性体の磁気特性の温度依存性を利用し、永久磁石の磁気回路と組み合わせることにより、熱エネルギーと磁気エネルギーを運動エネルギーに変換することができる。このモータは永久磁石と熱エネルギーのみを利用するので駆動に外部電源は必要なく、運転時にCO<sub>2</sub>を排出しない。したがって、温泉熱や発電所、工場からの排熱などの既存のエネルギーを有効利用する環境調和型の装置として働く可能性を有する。

これまでに著者らが開発した試作3号機は0℃～10℃程度の冷水と50℃～100℃程度の温水のみを用いた連続回転に成功している[1]。本装置の場合、磁性体の加熱部に関する熱サイクルは磁性体と大きく関係し、使用する冷水と温水の温度に依存して最適化する必要がある。同時に永久磁石による磁場が効率良くローターの回転トルクとなるように磁気回路を設計する必要がある。

そこで本研究では、熱磁気モータの永久磁石磁気回路のヨーク形状を最適化することにより磁性体に働く吸引力を増大させ、モータの駆動トルクを向上させる

ことを目的とする。磁性体に働く電磁力など磁気回路に関する磁場解析には有限要素法による磁場解析ソフトウェアANSYSを用いた。

### 2 熱磁気モータの概要

#### 2.1 熱磁気モータの動作原理[2]

熱磁気モータの動作原理をFig. 1に、概略図をFig. 2に示す。ローターの円周上に等間隔に感温磁性体(Temperature Sensitive Magnetic Material: TSMM)が配置されている。図中の加熱・冷却点を通る磁性体は、Fig. 3に示すような熱サイクルをうけ磁性が変化する。冷却点部分の磁性体が永久磁石(Permanent Magnet: PM)に

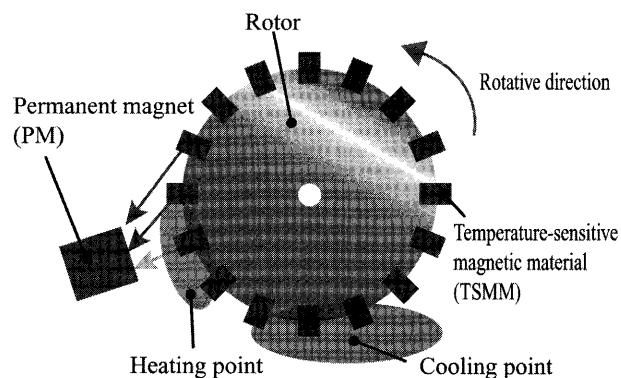


Fig. 1 Mechanism of a thermo-magnetic motor.

連絡先: 中村 正行, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部環境機能工学科,  
e-mail: maxnaka@shinshu-u.ac.jp  
\*<sup>1</sup>信州大学 \*<sup>2</sup>信州大学大学院

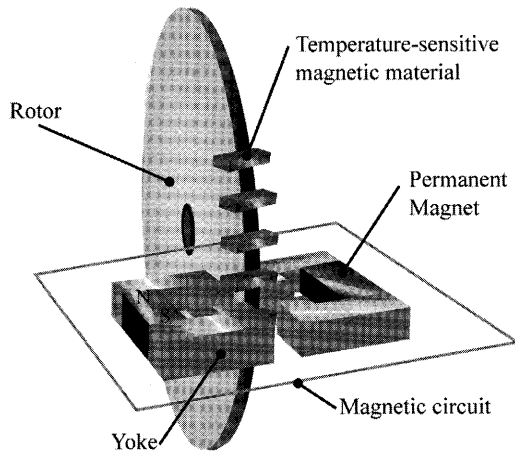


Fig. 2 Schematic diagram of a thermo-magnetic motor.

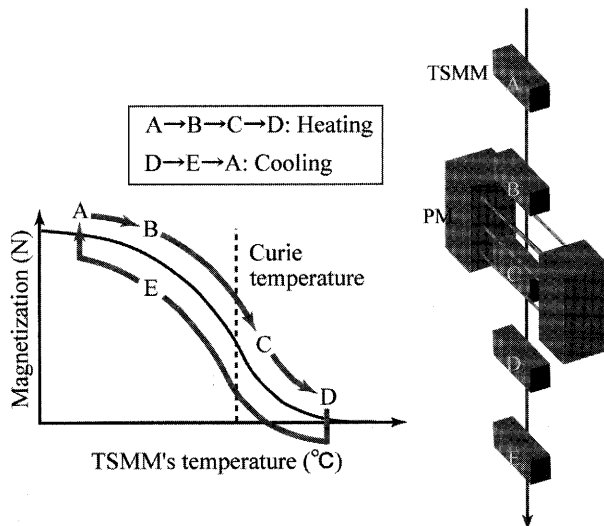


Fig. 3 Heat-cycle and TSMM locations.

引き付けられることによりローターが回転する。感温磁性体は加熱され、キュリー温度より高温領域で強磁性を失い常磁性となる。このため高温領域においては外部磁界に対して磁氣的性質を示さなくなり、永久磁石の磁場から脱出する。一度常磁性となった磁性体は低温領域にて再び強磁性となり、永久磁石の磁場に引き付けられていく。

このように感温磁性体の性質を利用し、加熱と冷却の熱サイクルにより回転を継続する。

## 2.2 試作3号機概要[1]

回転子の寸法は直径500 mm、厚さ10 mmで、部材にはジュラルミンA2017材が用いられている。回転子外周部には60個のGd片が非磁性材料でできた金具により取り付けられている。磁気回路に使用されている永

久磁石はNd-Fe-B磁石で、ヨーク鋼材にはSS400が使用されている。Fig.4に概観写真を、Table1に寸法概要を示す。

## 2.3 試作機による回転実験[1][3]

開発した3号機の動作を確認するための実験を実験室で行った。その様子をFig.5に示す。加熱用の温水の温度は90℃、冷水の温度は12℃とした。この実験では磁性体に温水をかける場所として、A、B、Cの3ヶ所について調べた。反時計回りの方向を順回転方向とする。

温水温度を90℃として行った結果をTable2に示す。自発的に始動し、定常回転を行うことができたのは加熱場所がAで、順方向回転のときだけであった。また温水温度を冷水と同じ温度にしたところ、A、B、Cすべてにおいてモータは回転しないことが確認された。

試作3号機が回転することが確認されたので、次に熱源、冷却水容量の制約を受けない積雪地の温泉（長野県高山村）において駆動実験を行った。65℃の温泉の元湯を高低差を利用してホースで供給して温水とし、冷水には4℃の雪解け水（冷水）を利用し実験を行ったところ、外部駆動電源を全く必要とせずにモータを自発始動および定常回転させることに成功した。

この実験の様子をFig.4とFig.6に示す。実験の結果、モータは自動的に始動し、毎分2.65ℓのお湯を供給した場合に21 rpmとなった。しかしながら、このときの最大出力は0.7 W程度と小さく実用化は望めないのが現状である。

## 3 磁気回路の3次元磁場解析

### 3.1 磁場解析

本研究では動作実験を行い自発回転に成功した熱磁気モータ試作3号機の出力向上を目指して、磁気回路形状の最適化を行う。このための磁場解析には有限要素法解析ソフトウェアANSYSを用いた。Fig.2に示す熱磁気モータの概略図の中で、四角で囲まれた部分が永久磁石磁気回路である。この形状を元に作成した解析モデルの概要をFig.7に示す。ローター周囲に多数の磁性体が配置されているが、磁気回路に近いもの5個を取り扱い、他の磁性体の影響は考えないものとする。モデルサイズを低減させるため、Fig.7に破線で示す1/4部分の3次元モデルを作成した。

磁性体が永久磁石の磁場を通過するときの吸引力の変化を見るために、まず温度変化に伴う磁性変化を



Fig. 4 The 3rd experimental thermo-magnetic motor that has been developed by Kobayashi and Nakamura lab, Shinshu University.

Table 1 Dimensions and materials of the 3rd experimental machine.

Rotor, Frame	Duralumin (A2017)
Diameter of rotor	500 mm
Permanent magnet: Nd-Fe-B	20mm × 50mm × 40mm
TSMM piece: Gd (60 pieces)	10mm × 10mm × 60mm

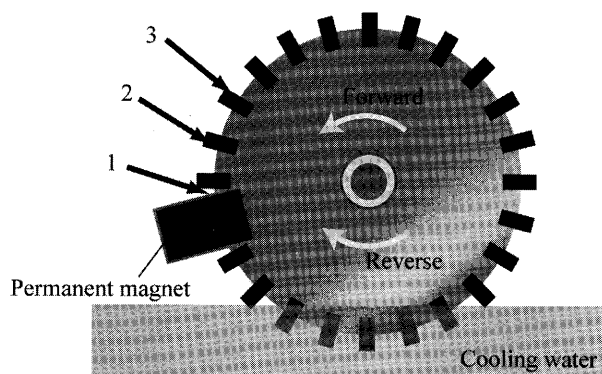


Fig. 5 Heating positions and rotative directions.

Table 2 Experimental results of heating positions[1].

Position	Rotating direction	Number of revolutions (rpm)	Ability of self-starting
1	Forward	16	○
1	Reverse	10	×
2	Forward	16	×
3	—	—	×

考慮せずに、Fig. 8に示すように磁性体の位置を変えて解析を行った。Fig. 8において、直径500mmのローター上の磁性体は磁気回路付近ではほぼ直線状に位置していると考え、z軸に平行な配置となっている。横軸に磁性体の位置、縦軸に吸引力をとったときのグラフをFig. 9に示す。磁性体が永久磁石の磁場へひきつけられる時の力と、離脱していく際に磁場へ引き戻される力の大きさが等しいため、最終的に得られる仕事は零である。

熱磁気モータは、永久磁石磁界に感温磁性体片が吸引される時の吸引力の大きさと、加熱による強制減磁による吸引力の低減によって回転駆動力を得る。このため、磁性体の吸引・離脱を考える場合、冷却・加熱の熱サイクルによる磁性変化を考慮する必要がある。本研究では、はじめに磁気回路の形状だけに注目して、磁気回路のヨーク形状を吸着側と離脱側で異なる形にし、吸引力は大きい、引き戻される逆吸引力は小さくなるような形状へと最適化する。



Fig. 6 Experiment in a spa using hot spring water and meltwater.

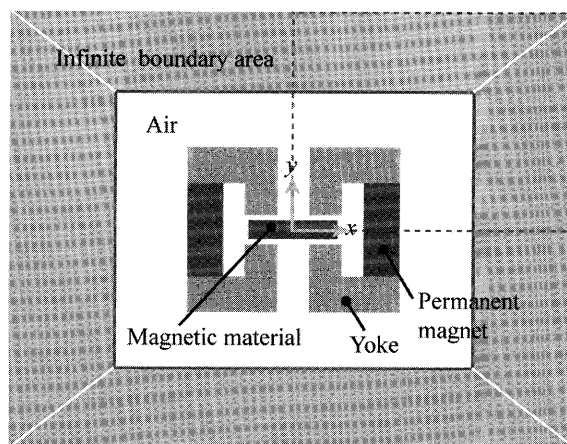


Fig. 7 The FEM model to analyze the magnetic circuits.

### 3.2 磁性体に働く電磁力[4]

ANSYSは磁性体に働く電磁力をMaxwellの応力法もしくは仮想仕事の原理を用いて求めることができる。Maxwellの応力法は磁界内のある領域に作用する力を、領域を囲む閉曲面 $S$ に働くMaxwellの応力の総和として求める計算法であり、電磁力 $F$ は次式で表される。

$$\mathbf{F} = \iint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} ds \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{T}$ はMaxwellの応力テンソルであり式(2)で表される。また、 $\mathbf{n}$ は閉曲面 $S$ の外向き法線ベクトルである。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2\mu} \begin{bmatrix} B_x^2 - B_y^2 - B_z^2 & 2B_x B_y & 2B_x B_z \\ 2B_y B_x & B_y^2 - B_z^2 - B_x^2 & 2B_y B_z \\ 2B_z B_x & 2B_z B_y & B_z^2 - B_x^2 - B_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

次に仮想仕事の原理について述べる。仮想仕事の原理では、仮想変位 $\delta \mathbf{u}$ に対する磁性体のエネルギー変分は体積力のなす仕事増分と表面力のなす仕事増分の和に等しいと考える。磁界による体積力 $f_V$ および表面力 $f_S$ は次式で表される。

$$f_V = \text{div } \mathbf{T} \quad (3)$$

$$f_S = (\mathbf{T}|_2 - \mathbf{T}|_1) \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

ここで $\mathbf{n}$ は面の媒質1側から2側に向かう法線ベクトルである。

式(3)、式(4)より仮想変位 $\delta \mathbf{u}$ に対するエネルギー変分 $\delta W$ は次式で与えられる。

$$\delta W = \iiint_V (\text{div } \mathbf{T}) \cdot \delta \mathbf{u} dV + \iint_S \{(\mathbf{T}|_2 - \mathbf{T}|_1) \cdot \mathbf{n}\} \cdot \delta \mathbf{u} dS \quad (5)$$

式(5)に公式(6)を用いると式(7)が得られる。

$$\text{div}(\phi \mathbf{A}) = (\text{grad } \phi) \cdot \mathbf{A} + \phi \text{div } \mathbf{A} \quad (6)$$

$$\delta W = - \iiint_V \text{grad } \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{T} dV \quad (7)$$

一般的に、Maxwellの応力法では閉曲面 $S$ の選び方によって解析に誤差が生じやすいので、本研究では電磁力の計算に仮想仕事の原理に基づく方法を採用した。

### 3.3 最適化パラメーター

磁気回路部分を2次元問題として取り扱った場合のヨーク形状の最適化結果[5]をFig. 10に示す。磁性体に働く電磁力は式(1)、式(2)、式(7)より磁性体表面に作用する磁束密度に大きく依存するため、Fig. 10の線で囲んだ部分のヨークの面積を小さくすることで磁性体に磁束を集中させることを考える。2次元解析の結果ではFig. 10の形状に対して電磁力の向上が見られたが、

3次元解析では磁気回路の $z$ 方向長さに対して磁性体の大きさが小さいため、ヨークの形状を変えたことによる影響はごく小さいものとなった。

そこで、3次元解析では初期形状から最適化を行った。最適化パラメーターをFig. 11に示す2点の $y$ 座標の値とし、その制約条件を $y$ の取りうる範囲から7~25 mmとした。また、評価関数 $W$ を式(7)から導出される磁性体に働く電磁力 $F$ の絶対値とした。

### 3.4 磁気回路のヨーク形状の最適化

Fig. 12に磁性体の磁性の温度依存性がない場合の $y$ と、吸引力と逆吸引力の差を示す。Fig. 12より、トータルの吸引力は $y$ の値が0.015 m付近で最大となっている。これはヨークの形状がFig. 13のように離脱側に向かって徐々に磁性体から離れるような形になっており、吸着側にも吸引力が小さくなる影響が現れるためである。

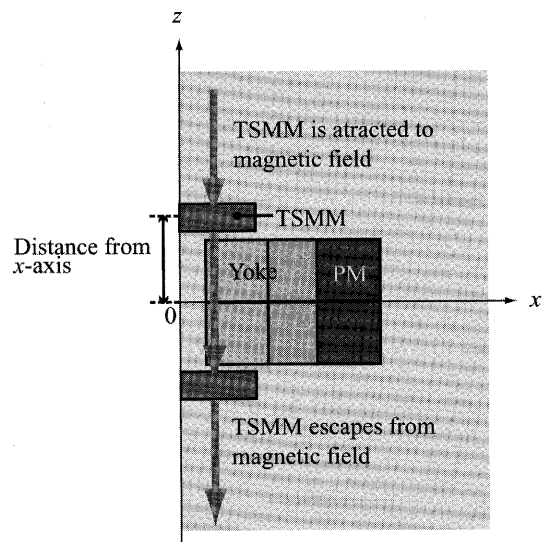


Fig. 8 Three-dimensional analytical model (x-z plane).

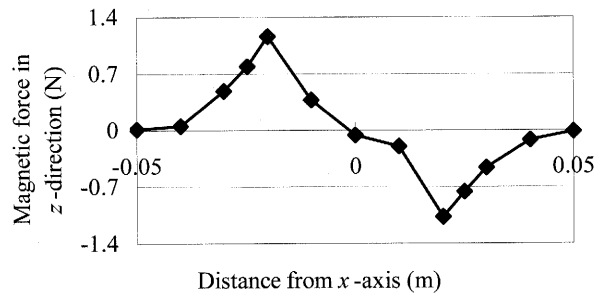


Fig. 9 Relation between the TSMM locations and magnetic force.

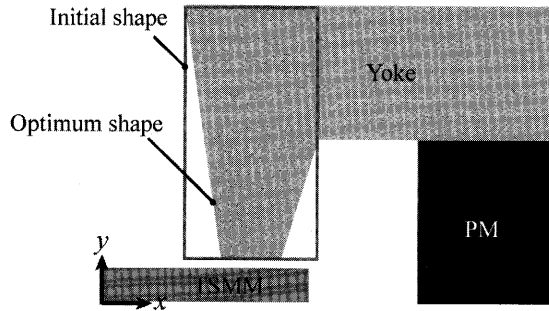


Fig. 10 The optimum yoke shape for the two-dimensional model.

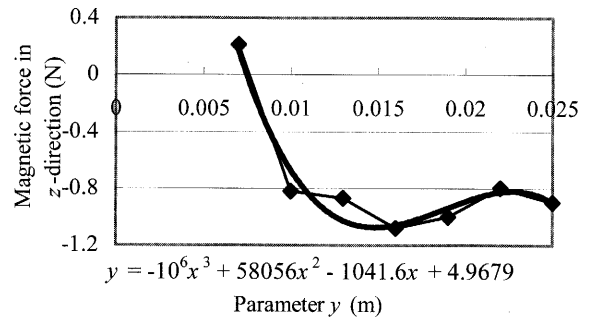


Fig. 12 Difference between attracting force and repelling force.

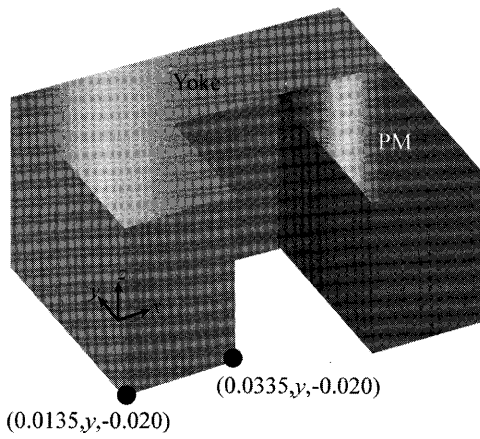


Fig. 11 Optimization parameters.

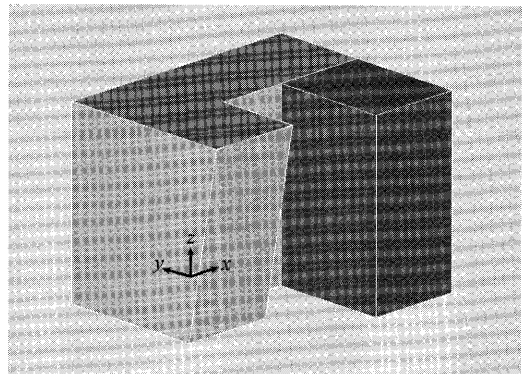


Fig. 13 The optimum shape for three-dimensional model.

る。近似曲線を用いて内挿した結果、 $y=0.014127$  mのとき吸引力  $F_z = -0.97978$  Nで最大となった。Fig. 13にこのときの最適形状を示す。

### 3.5 磁性体の温度依存性を考慮した解析

次に感温磁性体の磁化の温度依存性を考慮した解析を行う。Fig. 14に試作3号機で感温磁性体として用いたガドリニウム (Gd) の各温度での磁化の測定結果を示す。Gdのキュリー点は $20^\circ\text{C}$ である。この図からGdはキュリー点に近づくにつれ徐々に磁化が弱くなり、グラフ中の最高温度の $45^\circ\text{C}$ と最低温度の $0^\circ\text{C}$ を比べるとその磁化特性は大きく異なることが分かる。このことからGdを温水と冷水で加熱、冷却する場合は、Gd自体の温度を低温からキュリー点以上の温度域へ速やかに加熱する必要がある。

Fig. 15に示すような5つのTSMm (Gd片) を25 mm間隔でz軸上に配置したモデルを作成し、Fig. 14のデータを用いて解析を行う。磁性体の位置による温度変化については、試作3号機の回転数から加熱時間は0.15 sec,

加熱領域はFig. 5の加熱ポイントに関する実験より0.085 mと算出した。これらの数値とFig. 16に示すようにTSMmを $60^\circ\text{C}$ に加熱する非定常温度場解析の結果を用い電磁力の解析を行った。初期形状と最適形状に対する解析結果をFig. 17に示す。Fig. 17の横軸はTSMmの配置、縦軸は電磁力である。また各ポイントにおけるTSMmの温度も示す。この図から初期形状ではGdのキュリー点を越える加熱によって逆吸引力の減少が見られるが、十分とはいえないことが分かる。

次にFig. 13に示した最適形状においてGdの温度依存性を考慮した電磁力の解析結果を見ると、離脱側の逆吸引力が大きく減少している。各形状のトータルの吸引力を比較すると、初期形状では $F_z = -2.154$  N、最適形状では $F_z = -2.701$  Nとなり、磁気回路形状を最適化したことによりトルクに寄与する吸引力が増大したことが分かる。以上より、試作3号機においては加熱冷却により磁性体の磁気特性をキュリー点の前後でうまく変えてはいるが、加熱が十分ではなく離脱側での減磁がスムーズに行われていない。加熱による減磁が不十分な分を、ヨークの形状を最適化することにより補うことができると考えられる。

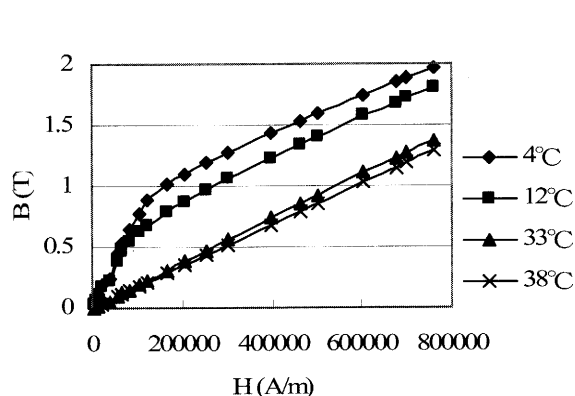


Fig. 14 B-H curves of Gadolinium in each temperature.

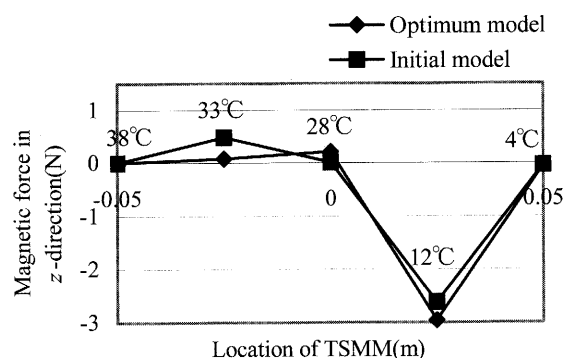


Fig. 17 Relation between the TSMC locations and magnetic force in consideration of Gd's temperature dependency.

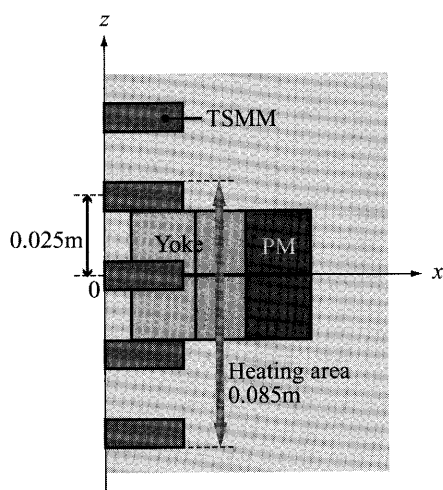


Fig. 15 Location of TSMCs and heating area.

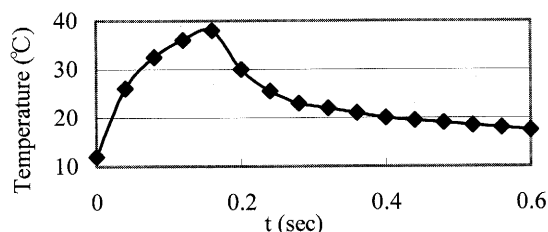


Fig. 16 Calculated value of surface temperature of Gd piece.

#### 4 結言

本研究では熱磁気モータの出力向上のため、磁性体に働く磁石の電磁力（吸引力）を増大させることを目標とし、3次元での永久磁石磁気回路形状の最適化を行った。熱磁気モータにおける感温磁性体の磁気特性

はモータの熱サイクルに依存している。そのため磁化過程には磁性体の温度変化に伴う磁性変化をも考慮した。

磁性体に働くトータルの吸引力は最適化を行うことで約25%向上する結果が得られた。このことから出力向上のためには最適化が有効であることが分かった。また、加熱による減磁が不十分な分を、ヨークの形状を最適化することにより補うことができると考えられる。

本研究では磁気回路形状の最適化による電磁力の増大を主として考え、磁性体の温度変化は非定常温度場解析の結果データを用いたが、今後は温度場の解析も同時に考慮した最適化を行い、さらなるトルク向上のための検討を行う。

(2005年5月2日受付, 2005年12月18日再受付)

#### 参考文献

- [1] 中村, 小林, 牛, 大井川, 山下, 感温磁性体を用いた熱磁気モータの設計製作, 第12回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.259-260, 2000.
- [2] K. Murakami and M. Nemoto, Some Experiments and Considerations of the Behavior of Thermomagnetic Motors, IEEE Trans. MAG-8, pp.387-389, 1972.
- [3] 筒井, 中村, 小林, 牛, 大井川, 熱磁気モータにおける感温磁性体の形状と配置に関する検討, 第12回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.263-266, 2000.
- [4] 高橋, 磁界系有限要素法を用いた最適化, 森北出版, pp.70-77, 2001.
- [5] M. Nakamura, M. Koyama and M. Kobayashi, Optimal Yoke Shape Design for Magnetic Circuits of Thermomagnetic Motor, The 3rd Magneto Electronic International Symposium, Vol.2, pp.48, 2004.