

常温付近の磁気冷却に関する研究

金井 靖* , 中嶋 新一**

(平成 17 年 10 月 31 日受理)

Magnetic Refrigeration at Near-Room Temperature

Yasushi KANAI* , Shin-ichi NAKAJIMA**

This paper describes the magnetic refrigeration at near-room temperature. First, sphere of Gadolinium (Gd), 0.6 mm in diameter, was prepared as a magneto-caloric medium and the temperature change of Gd versus applied field was investigated. It was found that the linear temperature rise/fall was found for applied field. Then, magnetic circuit was designed by the finite-element magnetic field analysis. The magnetic circuit consisted of NdFeB permanent magnet, iron yoke stator, and vessel for Gd sphere, with moving stage was made as a trial. A heat-exchanger circuit using coolant was constructed with water pump and solenoid and the system was tested with regard to heat-exchanging ability. The obtained temperature change was very small due to low magnetic field applied to the Gd sphere and small Gd volume. The future work was also noted.

Key words: Magnetic refrigeration, magneto-caloric effect, magnetic circuit, finite element analysis

1. はじめに

磁気冷却法とは，磁気熱量効果を利用して冷却する方法で，通常は極低温を実現するために利用される[1]．すなわち，磁性体に等温的に磁場を加えると，熱運動していた磁気モーメントを秩序配列に近づけようとして，熱を放出してエントロピーを下げるような変化が生ずるという原理を利用して，ガドリニウム(Gd)のような常磁性の物質を高磁場中で冷却し，断熱状態にして磁場を減少させて冷却する方法である．近年，常温付近の磁気冷却が可能であることが示され[2]，以来，さかんな研究が行われている．たとえば，2000年10月に，中部電力と東芝が磁性体としてガドリニウムを利用した大型冷蔵庫用冷却装置を試作している[3]．

ここでは，常温付近の冷却を実現するための磁気冷却技術に関し装置の実現にあたっての調査を行い，磁界シミュレーションなどにより磁界印加機構を最適化，装置を試作して基礎的な研究を行ったので報告する．

* 情報電子工学科 教授

** 機械制御システム工学科 教授

2. 磁気回路の設計

磁気冷却法により大きな熱を取り出すためには、大量の熱作用物質（例えばガドリニウム：Gd）を使う必要がある。詳細は付録に示すが、磁気回路の設計のために磁界解析シミュレーションを行った結果、大量のGdを収納する容器に大きな磁界の変化を加えることが重要であることが分かった。しかし、このためには大面積で厚い、希土類系の強力な磁石を使うことが必須となる。また、大量の微粒子状のGdを収納する（圧力を加えた水を通し、微粒子が流れ出ない）容器を作成することも必要になる。これらはいずれも価格の面から基礎実験にそぐわない。ここでは、現実的な（価格の）希土類磁石と容器を使用することを前提として、次節のように磁気回路を構成した。

3. 装置の構成

本研究では、実験的に磁気冷凍現象を検証するため簡単な磁気冷凍システムを構築した。システムは1) 磁界を変化させるための装置と2) 磁気作業物質の温度変化を取り出す熱交換装置により構成される。以下に各構成要素の概略を述べる。

3.1 永久磁石移動テーブルと磁気回路

磁気作業物質に対し、繰り返し大きな磁界変化を与えるために、Fig.1に示す磁石移動テーブルと磁気回路を構成した。

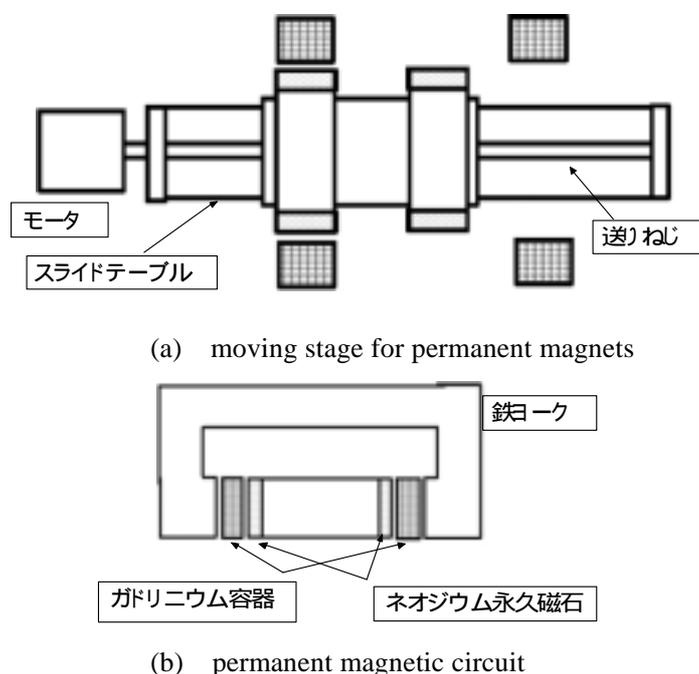


Fig.1 Mechanism of the reciprocal magnetic refrigerator.

以下に動作を説明する。

両端に永久磁石を取り付けた可動磁石2対をモータ駆動の並進テーブルで左右に移動する。

各可動磁石は(b)に示すように，U字型の固定ヨークに出し入れされる．固定ヨークの両端には磁気作業物質を充填した容器が取り付けられている．

磁石が固定ヨークの間にある場合には，可動磁石，容器，固定ヨークで閉じた磁気回路が構成され，容器内の磁気作業物質が磁化される．磁石を固定ヨークから出すことにより，磁気作業物質の磁界は取り除かれる．

2対の固定ヨークの中で可動磁石を左右に移動して2組の磁気作業物質の磁界を交互に大きく変化させることができる．

使用した永久磁石の仕様は以下の通りである．

材料名 ネオジウム永久磁石(NdFeB)

表面積 46mm×30mm，厚さ 10mm

表面磁束密度（カタログ値） 0.41 Tである．

並進駆動装置には速度制御モータ（オリエンタルモータ製 FBL-575AW-5 1/5 減速機付）とピッチ 10mm のボールねじ付スライドパックを用いて構成した．装置の推力は 785N であり，速度は 10mm/s から 100mm/s の範囲で任意に設定できる．試作した磁石駆動機構と磁気回路の外観を Fig.2 に示す．

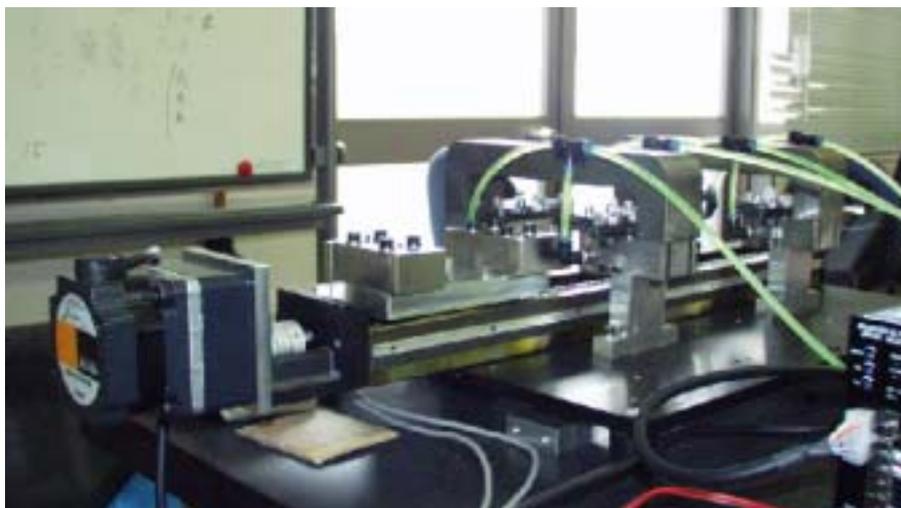


Fig.2 Overview of the reciprocal magnetic refrigerator.

3.2 磁気作業物質および容器

磁気作業物質としては常温での磁気熱量効果が大きく，かつ入手の容易なガドリニウム（Gd）を用いた．ガドリニウムはインゴットで購入（信越化学）し，0.6mmの微粒子状に特注加工（福田金属箔粉工業）した．

粒子状ガドリニウムに発生した（吸収された）熱は水により熱交換を行うため，専用の密閉容器（Gd容器）に充填している．容器は磁界に影響を与えず，かつ十分な水圧に耐えられるよう，厚さ 2mm のステンレス（SUS304）を溶接加工して作成した．

Gd 容器は二重構造にし、内部容器には幅約 0.3mm のスリットを多数切ること外部に Gd を流出させず、かつ十分な水流を確保できるようにしている。

内部容器は磁石の表面積とほぼ同じ大きさの 45mm × 30mm としている。容器の厚さは磁気回路のギャップ挿入するため 22mm としている。各容器に充填される Gd の質量は約 100 g である。Fig.3 に試作した Gd 容器を示す。Gd 容器は固定ヨークに密着して取り付け、可動磁石とのギャップは 0.5mm 以内に調整している。



Fig.3 Gd vessel.

3.3 熱交換用冷却水循環装置

2 組の Gd 容器は可動磁石により交互に磁化される。Fig.4 に示すように、常に低温側に給水し、高温側から排水するために電磁弁を用いた流体回路を構成した。

以下に動作を説明する。

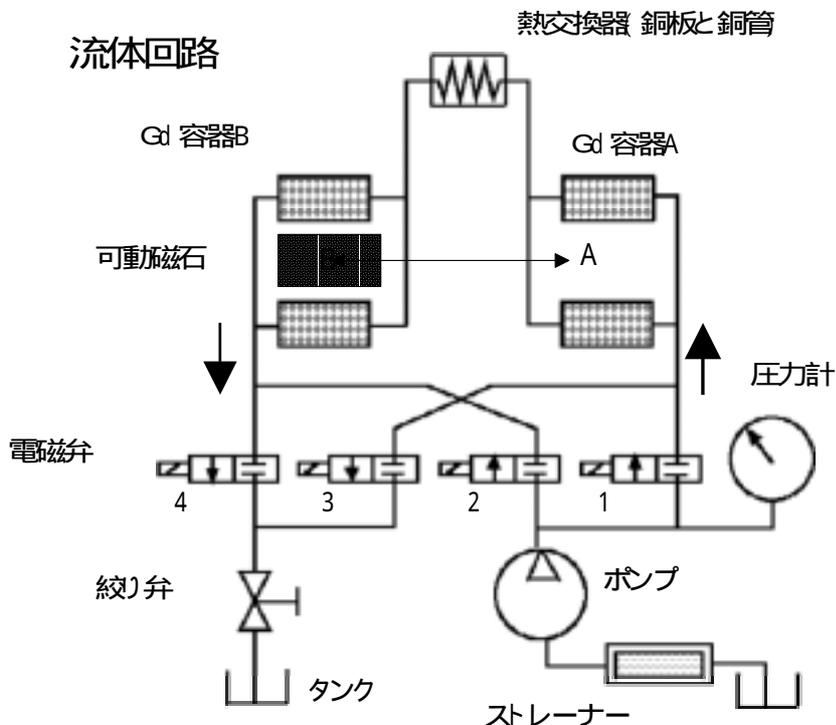


Fig.4 Heat-exchanger circuit for the magnetic refrigerator.

可動磁石が位置 A から B に移動すると容器 A の Gd の温度が下がり、容器 B の温度が上がる。この状態で電磁弁 1 と 4 を開けばポンプで加圧された冷却水は矢印方向に流れる。この結果、容器 A で冷やされた冷却水は熱交換器で外部の熱を奪い、さらに容器 B の Gd を冷やしてタンクに戻る。磁石を位置 B から A に動かしたあとは、電磁弁 2 と 3 を開き、逆方向に冷却水を流すことで同様に熱交換ができる。

装置で使用したポンプの仕様は以下の通りである。

日本オイルポンプ製ダイヤフラム水ポンプ Model7860

吐出圧力 0.5 Mpa

最大流量 2.55 l/min

管路の流量はドレイン側の絞り弁で調節できる。給水装置の外観を Fig.5 に示す。

試作装置の配管にはナイロンチューブ（ニッタ製 N 2-6-4.5 外径 6mm 内径 4mm）を用いている。また、熱交換器には銅管を半田付けした銅板（120mm × 120mm × 5mm）を用いた。



Fig. 5 Water-supply system (feed pump and solenoid valves).

3.4 制御装置

テーブルの往復駆動制御、電磁弁の制御にはシーケンサ(三菱電機 FX2N-32EX)を用いた。スライドテーブルには二つのフォト・リミットスイッチを取り付けてあり、この信号により駆動モータの正転、停止、逆転を切り替えることで決められたストロークの往復動作を実現している。また、電磁弁の開閉タイミングはシーケンサのタイマーにより実現される。

制御の流れは以下ようになる。

テーブル駆動 リミットスイッチ位置でテーブルを停止 Gd 容器内での熱交換（時間待ち） 冷却水を流す 冷却水を止める。その後、逆方向動作を から繰り返す。これらの一連の動作はシーケンサーコマンドとしてプログラムされている。

4. 実験および考察

4.1 基礎実験

まず Fig.6 の磁気回路を用い、以下の4つの条件で磁気回路の磁束密度を測定した。磁束密度の測定にはガウスメータ（カネテック製 TESLA METER TM-501）を用いた。

(条件1) 開放磁気回路（磁石単体）での磁束密度

磁石表面：0.42 T これは購入した磁石のカatalog値とほぼ同じである。

(条件2) 開放磁気回路（U型鉄ヨークを除いた状態）

磁石表面：0.46 T ギャップ中央部：0.25 T 鉄ヨーク側：0.19 T

(条件3) 閉磁気回路 両側 22mm ギャップ

磁石表面：0.46 T ギャップ中央：0.27 T 鉄ヨーク側：0.22 T

(条件4) 閉磁気回路 片側ギャップにはダミー鉄ヨークを取り付け、ギャップを1mm程度に減少させた場合

磁石表面：0.52 T ギャップ中央：0.30T 鉄ヨーク側：0.24 T

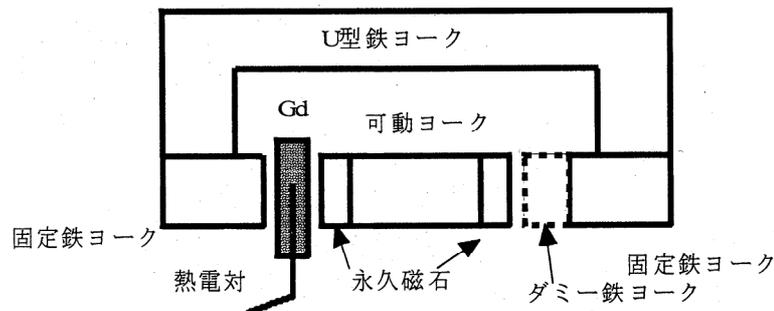


Fig.6 Magnetic circuit for measuring magnetic field.

次に、(条件2)から(条件4)の磁気回路で、ギャップ中に Gd を充填したアクリルパイプ（外径 11mm 内径 6.5mm）出し入れして温度変化を測定した。これを Fig.7 に示す。磁気回路のギャップを小さくし、磁束密度を大きくすれば温度変化はやや大きくなるが、それでも変化は 0.5°C 程度である。

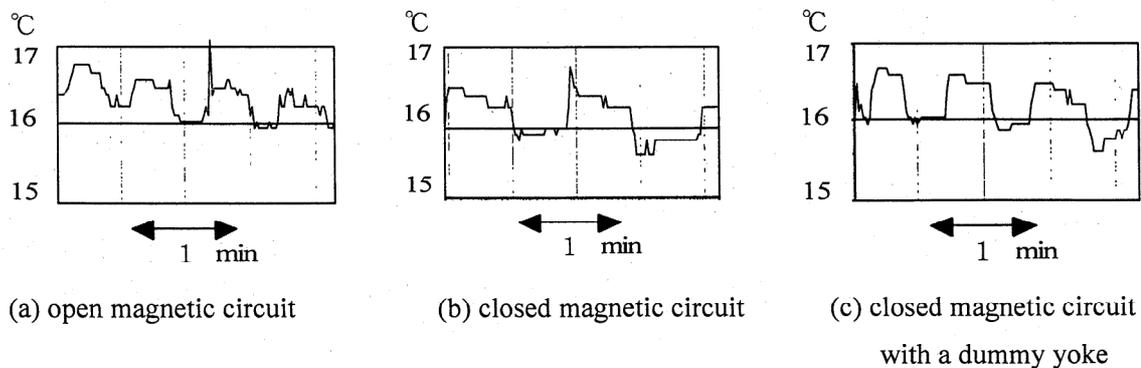


Fig.7 Temperature change of Gd for various magnetic circuits.

なお、温度測定プローブには T 型熱電対（銅 - コンスタンタン熱電対）を用いた。また、データ収録には PC カード型データ収録システム（キーエンス製 NR-250 16ch）を用いた。このセンサシステムの絶対温度測定精度は ± 1 （保障値）、分解能は約 0.1 である。

4.2 Gd 容器での温度変化

実際の磁気回路で Gd 容器に熱電対を挿入し冷却水を流さずに温度変化を測定した。結果を Fig.8 に示す。この実験でも Gd の温度変化は 0.5 程度である。

以上の基礎実験によりガドリニウムの磁気熱量効果を確認することができた。ただし、本装置で実現できる 0.5T 程度の磁界では温度変化はたかだか 1 までである。

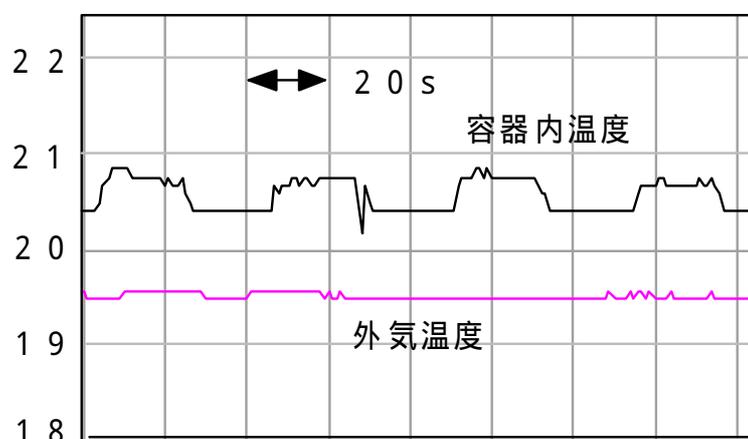


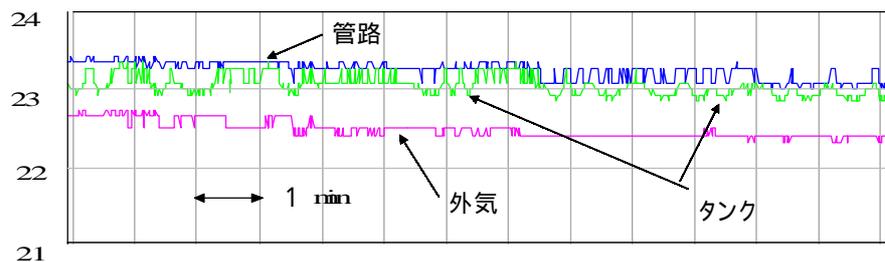
Fig.8 Temperature change of Gd for step-like change of magnetic field.

4.3 冷却サイクル実験

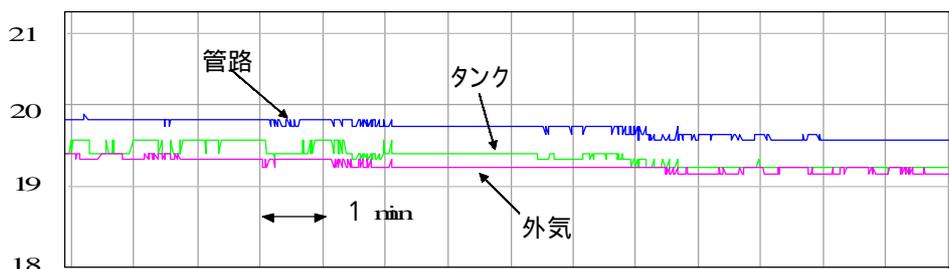
実際に冷却システムを駆動し各部の温度変化を測定した。測定点は熱交換器の前後の管路内、管路の外側およびタンクである。管路内の冷却水の温度測定にはアクリル製のジョイントに熱電対を挿入接着した専用プローブを試作した。

Fig.9 に実験結果を示す。T1 は磁石を移動したあと電磁弁を開くまでの時間である。また T2 は冷却水を流している時間である。また、流量は磁界を切り替えて 1 回あたりに流す冷却水の量である。

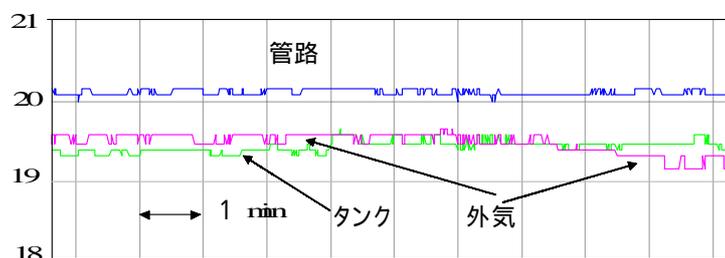
管路の冷却水にわずかな温度変化が認められる場合もあったが、変化は極めて小さく、これが冷却システムの効果であるのか外部温度変化等の外部要因によるものなのかは明確でない。現状の実験装置では磁気冷却システムの効果を結論付けるには至らなかった。



(a) $T1=3$ [s], $T2=2$ [s], flow rate = 10cc/cycle



(b) $T1=10$ [s], $T2=1$ [s], flow rate = 20cc/cycle



(c) $T1=1$ [s], $T2=5$ [s], flow rate = 20cc/cycle

Fig.9 Experimental results of the magnetic refrigerator .

5 . 考察および今後の課題

基礎実験では磁界の変化により磁気作業物質である Gd の温度が変化することは確認できた . しかし , この温度変化を外部に取り出すには至らなかった . 大きな問題点としては以下の点が挙げられる .

- (1) 容器に封入した Gd の量が 100 g と少ないために , 十分な熱量変化が得られない .
- (2) 磁気作業物質である Gd の温度変化が 0.5 程度と極めて小さい .
- (3) 配管や Gd 容器の熱シールドが十分でないため , 磁気熱量効果により得た熱が散逸してしまう .

これらの問題点に対し、以下のような検討を行っている。

- (1) 今回の実験では磁気冷凍の原理の検証を目的として、小規模の実験装置を構成したが、装置からの熱発散以上の熱量変化を得るためには大きさが不十分であった。少なくとも Gd 容器は現在の 5 倍以上の大きさが必要である。容器を大きくした場合、有効に磁気変化を与えるためには磁石も数倍の大きさにしなければならない。
- (2) 0.5T 程度の磁気変化ではガドリニウムの温度変化はたかだか 1 程度にしかない。このままでは、効率の良い熱交換システムを作っても実現できる冷却温度は数 K にしかできない。磁気転移点温度（磁気熱量効果が最も大きくなる温度）が僅かに異なる磁気作業物質をカスケード接続して用いれば大きな温度変化を実現できる。このことより、ガドリニウム単体より磁気転移点温度の低いガドリニウム - ディスプロシウム(Gd-Dy)合金を用い、Gd 単体とのカスケード接続により大きな温度変化を実現する方法を検討している。
- (3) 熱が散逸しないような容器や配管（テフロン製など）を検討している。

6. まとめ

本研究では、常温付近の冷却を実現するための磁気冷却技術に関する基礎研究を行った。すなわち、実験装置の実現にあたっての調査を行い、磁界解析シミュレーションにより磁界印加機構を最適化し、装置を試作し、計測を行った。その結果、得られた温度変化はわずかであり、熱として取り出すには至らなかった。今後は 1) 用いる Gd の質量を増やすこと、2) Gd および Gd-Dy 合金をカスケードに接続した装置を作成すること、3) 強い磁界変化を得るために大面積で厚い強力な磁石を使うこと、4) 得られた温度変化を確実に伝える配管を用いること、などが重要であることを述べた。

今後、本技術の進展により、オゾン層破壊や地球温暖化をもたらすフロン / 代替フロンなどの有害な冷媒を用いない「環境負荷の小さい」冷蔵庫やエアコンなどの実現につながることを期待される。なお、印加磁界に対して温度変化が大きい磁性材料（磁気冷凍作業物質）の研究・進展が俟たれることは言うまでもない[4]。

謝辞

本研究の一部は平成 16 年度学内共同研究費により行われた。研究の機会を与えてくださった本学の皆様に深謝いたします。また、いろいろとご指導いただいた中部電力株式会社技術開発本部平野直樹博士に御礼を申し上げます。

文献

- [1] C. Zimm, A. Jastrab, A. Sternberg, V. Pecharsky, K. Gschneidner, Jr., M. Osborne, I. Anderson: Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator; in *Advances in Cryogenic Engineering*, **43**; P. Kittel: Ed., Plenum Press: New York, pp. 1759-1766, 1998.

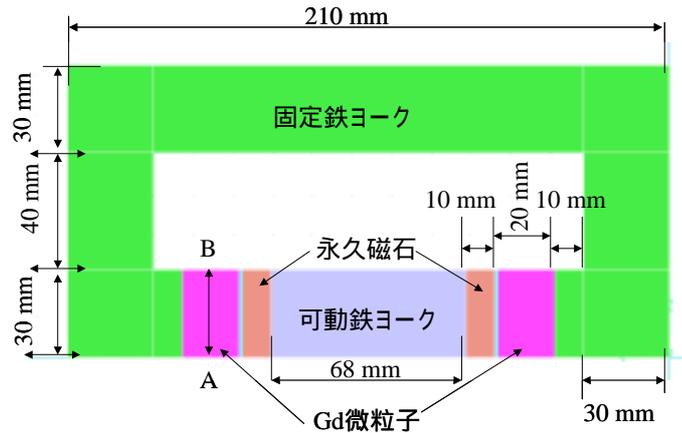
- [2] N. Hirano, S. Nagaya, M. Takahashi, T. Kuriyama, K. Ito, S. Nomura: Development of Magnetic Refrigerator for Room Temperature Application; in Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, 47; S. Beron et al.: Eds., American Institute of Physics, pp. 1027-1034, 2002.
- [3] 産経新聞：磁気冷凍システムを開発，p. 9，平成 15 年 3 月 4 日
- [4] 和田裕文：高温磁気冷凍材料の最近の進展；低温工学, 37(8), pp. 397-408, 2002.

付録 磁界解析シミュレーションによる磁気回路の最適化

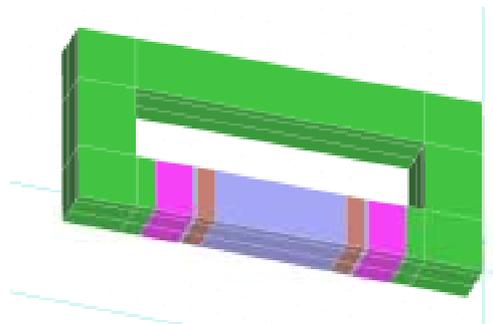
一定の強さの線形永久磁石 (NdFeB) を仮定し，磁気回路の寸法を変化させ，Gd 微粒子に加わる磁界の強さを 3 次元空間で計算した．計算に用いたソフトは JMAG-Studio (日本総合研究所製) である．ヨーク，永久磁石，Gd 微粒子収納ケースの厚さは全て 50 mm とし，対称性から 1/2 領域を考慮した．ここでは簡単のため，線形計算を行った．Gd 微粒子の透磁率は計測不可能であるから，いろいろな透磁率を仮定して計算を行っている．

1. モデル 1

本モデルは実験装置に採用したモデルである．

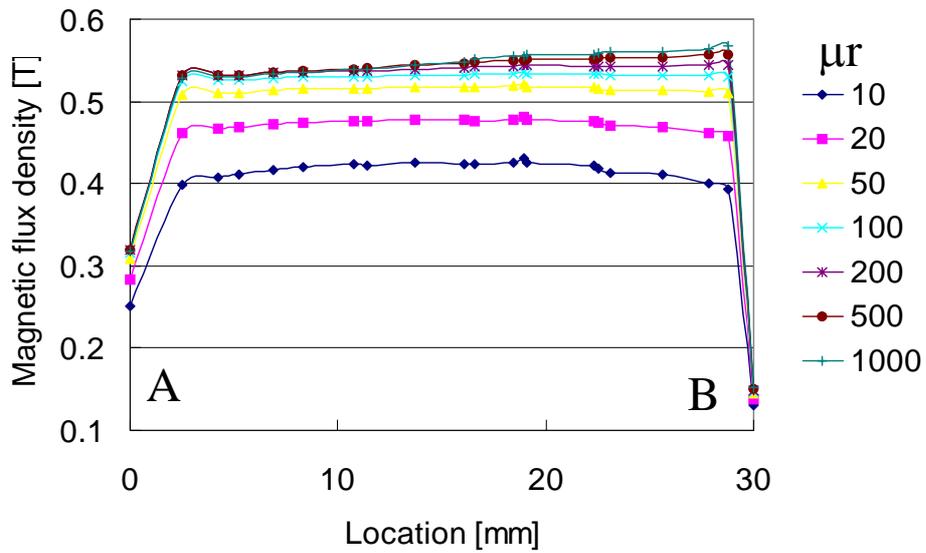


(a) plan view

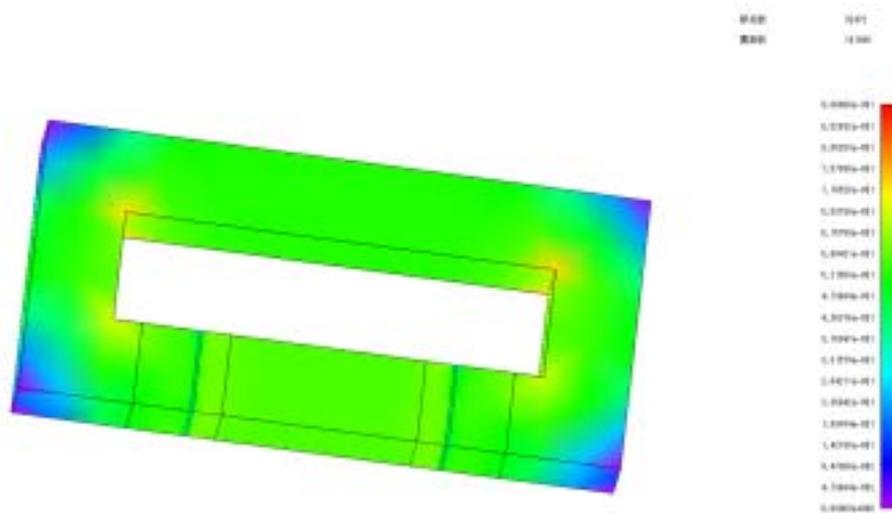


(b) 3D view

Fig. Appendix 1 Model1: Gd-permanent magnet gap = 1 mm, yoke thickness = 50 mm



(a) Flux distribution along line A-B for various assumed Gd permeabilities



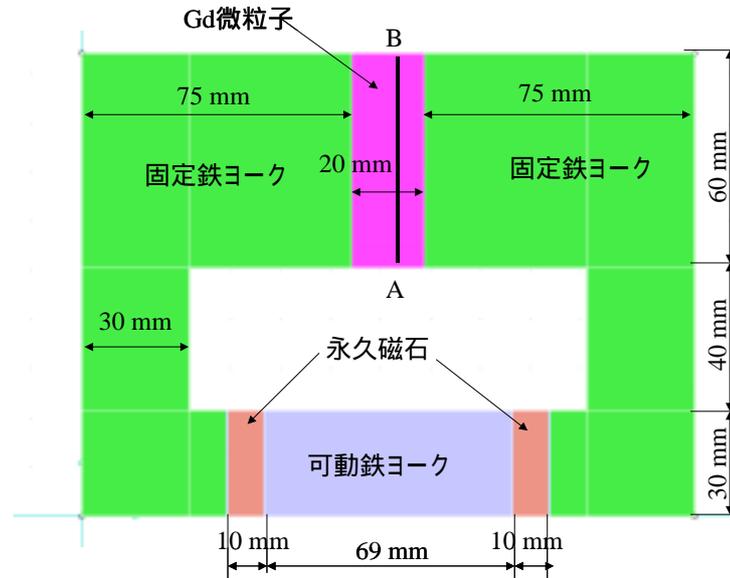
(b) Flux contour ($\mu_r=1000$)

Fig. Appendix 2 Calculated results of model1

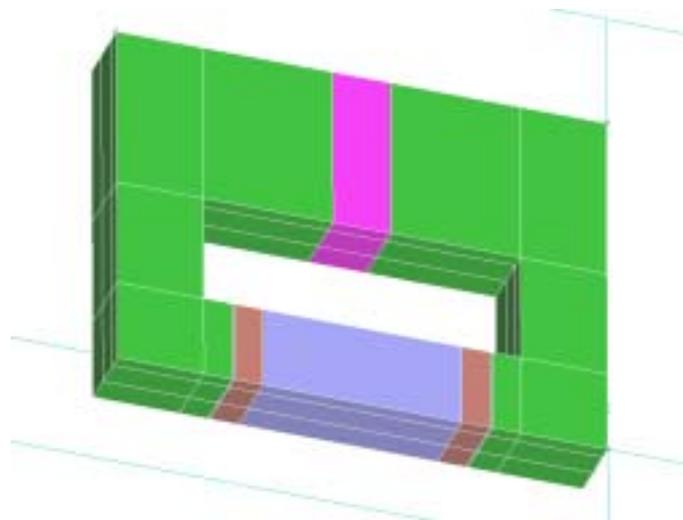
これから分かるように，ヨークの幅が一定であることから磁気回路全体の磁束密度がほぼ一定になっている．これは磁気回路として漏れ磁界が少ない閉磁路構造であることを示している．

(2) モデル2

本モデルでは可動部を単純化する目的でケースを磁気回路固定鉄ヨークの中央部に配置した。Gdの収納ケースの体積をモデル1と同じにするため、固定鉄ヨークの幅をモデル1の2倍にしている。

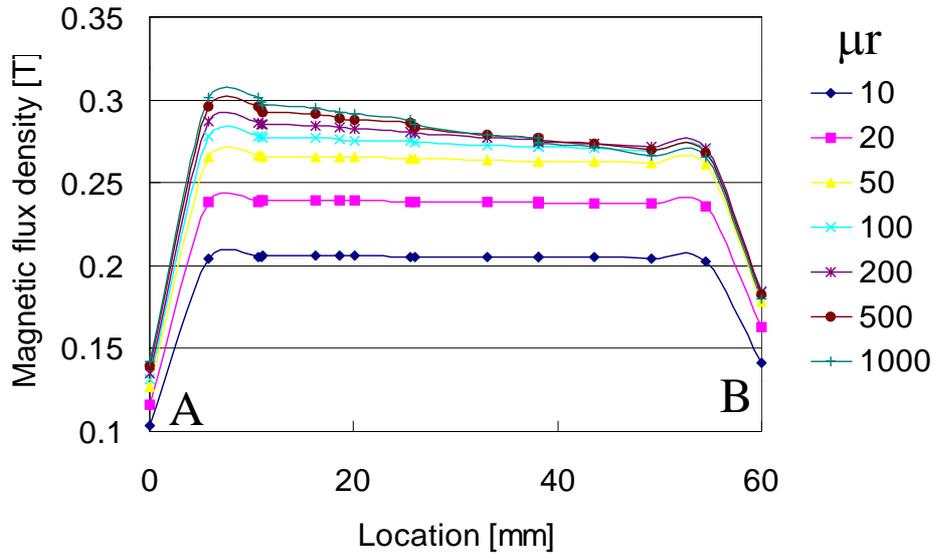


(a) plan view

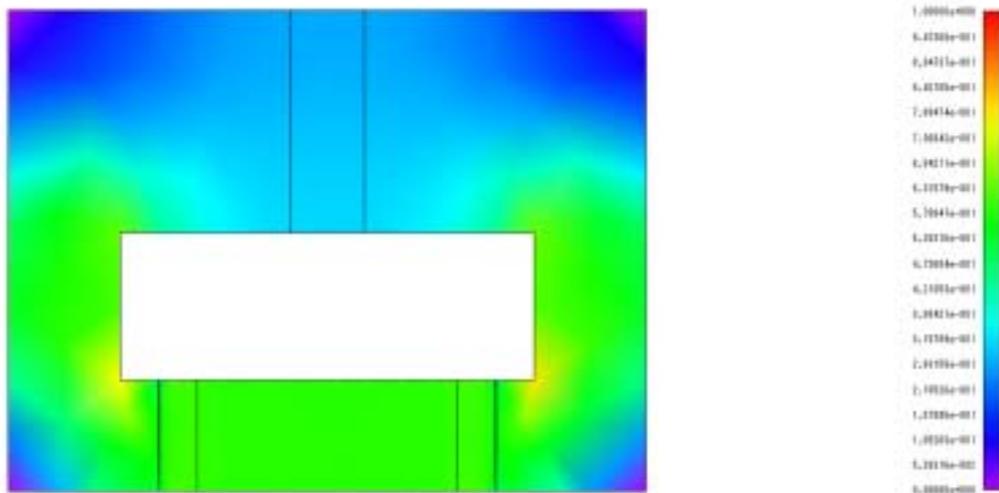


(b) 3D view

Fig. Appendix 3 Model2: Fe rotor yoke-permanent magnet gap = 0.5 mm, yoke thickness = 50 mm



(a) Flux distribution along line A-B for various Gd permeabilities



(b) Flux contour ($\mu_r = 1000$)

Fig. Appendix 4 Calculated results of model2

これから分かるように、ヨークの幅が2倍になると磁束密度は1/2となる。トータル磁束は一定であるから、理論的にも納得できるであろう。また、ケースが1個(1/2)に減ったので、加わる磁界も大きくなると予想されたが、その影響よりもヨークの幅が2倍になった影響の方が大きいことが分かる。つまり、Gdの比透磁率が100以上であれば、磁気回路の磁気抵抗にはほとんど影響を与えないことが分かる。

(2) モデル2 - 2

モデル2で固定鉄ヨークの幅を30mmとし,他の寸法はモデル2に同じとしたモデルである.本モデルでは収納できるGd微粒子の質量はモデル1の1/2である.

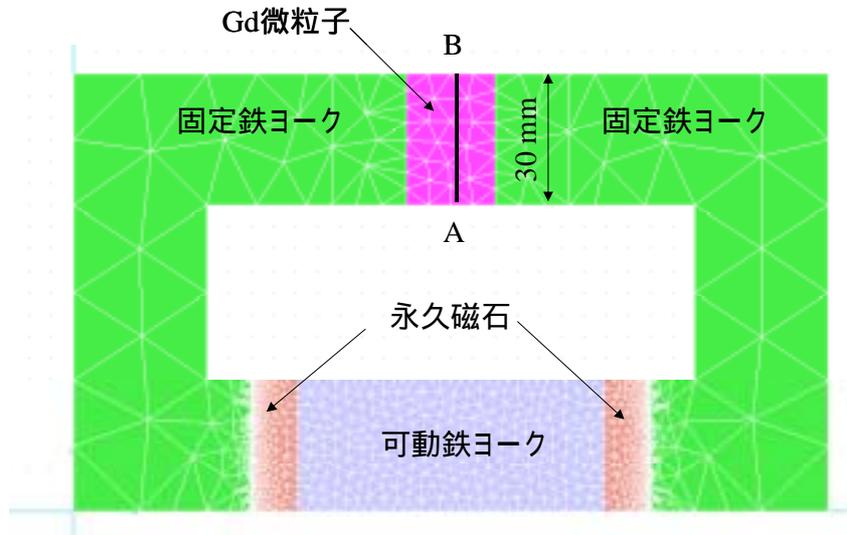
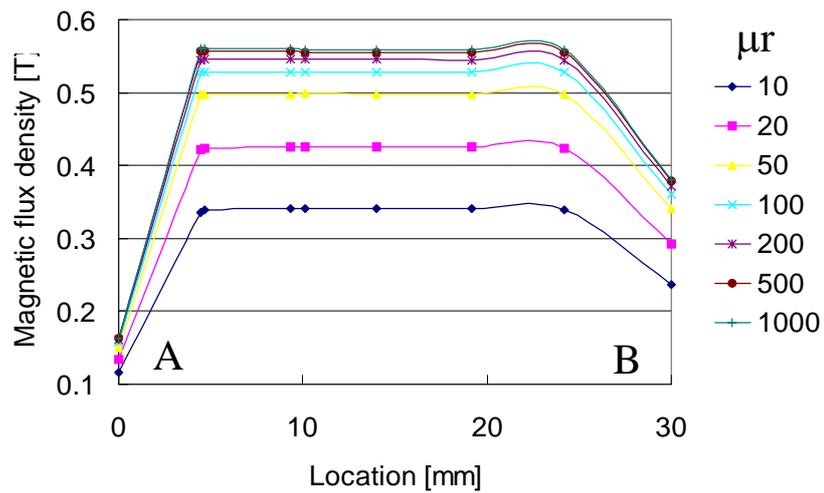
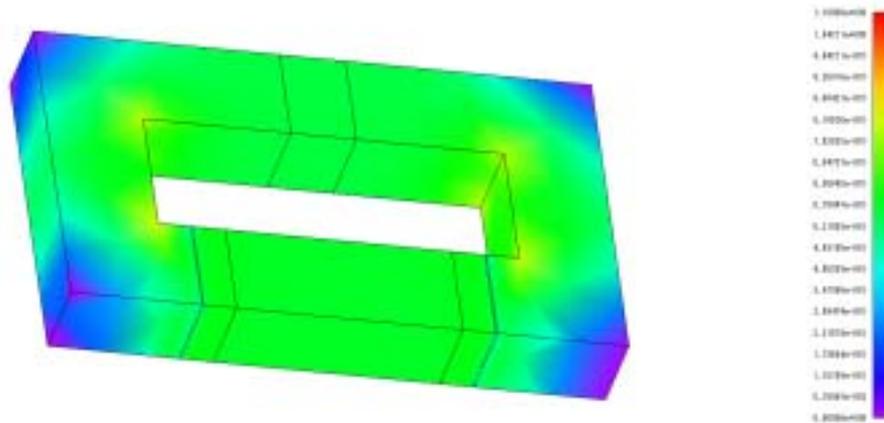


Fig. Appendix 5 Model2-2 Fe stator width = 50 mm, see model2 for other dimensions Fe yoke-permanent magnet gap = 0.5 mm, yoke thickness = 50 mm



(a) Flux distribution along line A-B for various Gd permeabilities



(b) Flux contour ($\mu_r=1000$)

Fig. Appendix 6 Calculated results of model2-2

これから分かるように、ヨークの幅をモデル1と同じとしたので Gd に加わる磁界強度も同じとなる。また、Gd の比透磁率が 100 程度であれば、ケースが 1 個 (1/2) に減った影響はほとんど見られない。以上の 3 モデルを比較すると、Gd と永久磁石の距離が離れていても磁気回路の損失が少ないことが分かる。

2) モデル 2 - 3

モデル 2 で固定鉄ヨークの幅を 10 mm とし、他の寸法はモデル 2 に同じとしたモデルである。本モデルでは収納できる Gd 微粒子の質量はモデル 1 の 1/6 になる。

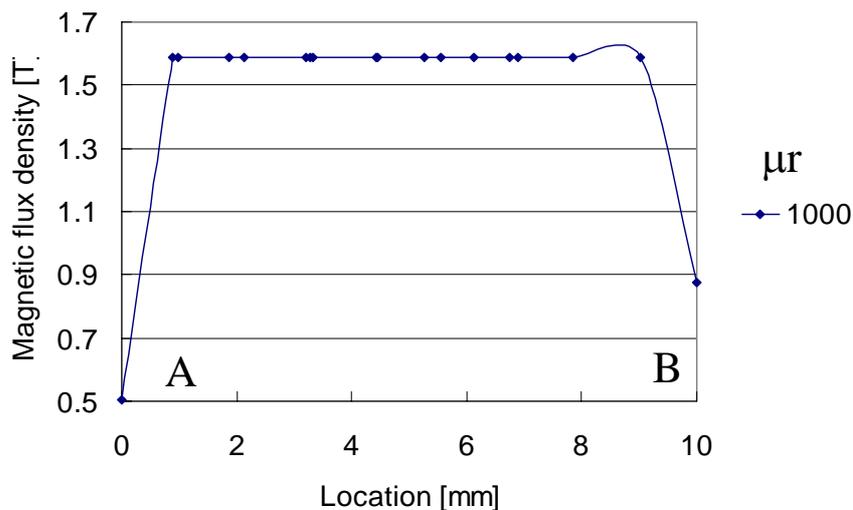


Fig. Appendix 7 Flux distribution along line A-B for Gd permeability $\mu_r=1000$

Stator Fe yoke width = 10 mm, other dimensions see model2

これから分かるように Gd に加わる磁界はモデル 1 の 3 倍となり , トータルの磁束は同じである .

以上 , 4 モデルの計算結果から Gd の量を多くすれば (収納ケースの体積を大きくすれば) 加わる磁界は弱くなることを避けられない . 今後は Gd の収納ケースの体積を多くする必要があるが , 収納ケースは面積を大きくするよりも厚くするべきであろう . さらに , Gd に加わる磁界を大きくするために最良の手法は大面積で (厚く) 強力な磁石を用いることである .