

## ■ 研究論文 ■

# 磁性流体を用いた直接エネルギー変換の新しい方法

## 第1報；装置構成要素の配置と装置特性

New Approach of Direct Energy Conversion Device Using Magnetic Fluid  
Part I ; Arrangement of Device Components and Its Performance Characteristics

山口 博司\*・小堀 至\*・森田 泰弘\*\*

Hiroshi Yamaguchi Itaru Kobori Yasuhiro Morita

(1995年2月23日原稿受理)

### Abstract

We have conducted a basic study on a newly designed direct heat to power energy conversion device using a temperature sensitive magnetic fluid. The device, which consists of a disk in cell structure where the magnetic fluid is filled in, rotates under the magnetic field imposed by a bar magnet. The disk (rotor) rotates when a high temperature heat source and a low temperature heat sink are applied. In this report (part I), performance characteristics in an experimental device are presented, when arrangement of the device components is altered in a various way. The fundamental results obtained in this study show that the relative positions of heating and cooling parts (relative temperature fields) are important as well as positioning the magnetic field distribution in order to obtain high output power characteristic. It would be thought that the device is feasible for direct energy conversion device when there are heat source and sink with a relatively high temperature difference in a moderate temperature range.

### 1. 緒言

磁性流体は、強磁性の微粒子を溶媒中に多量に安定分散させたコロイド溶液で磁場に感応する特性を持った液体である。磁性流体はその特異な性質を持つことに加えて、通常の磁性体と比較して、残留磁化の残らない超常磁性の性質を持つ。これらの特性を生かした機器の開発研究は各方面で行われ、現在実用化されているものには磁場に対する感応性に注目した回転軸受シール、スピーカーボイスコイルの保持液、磁気インク等があり、さらに磁場による見かけ粘性の変化および比重変化に注目したダンバ、比重分離装置<sup>1,2)</sup>等、新しい工業的応用として研究開発が進められている。

一方、上記の工業応用とは異なった原理に基づく新技術の開発を試みるものとして、温度変化に対し磁化の特性が非常に敏感な感温性磁性流体を使ったものが

ある。感温性磁性流体は、分散粒子にマンガン-亜鉛フェライト等、一般に使用される分散粒子と比較してキュリー温度が低いものを用いることにより、常温域において温度変化に対する磁化の変化率が大きい性質を持っている。この特性を積極的に利用しようとするのがエネルギー変換システムである。

感温性磁性流体を用いたエネルギー変換システムの開発に関する研究はReslerおよびRosensweig<sup>3,4)</sup>らにより提案されて以来、様々な形態の装置における研究<sup>5,6,7)</sup>がなされてきた。その動作原理は磁性流体の磁気熱量効果を基に、磁化の温度依存性を利用し、磁性流体を磁気熱力学的サイクル上において循環させることによって、出力を得るものである。しかし、現在提案されている装置はタービンといった動力発生装置を必要とする他、循環流体の粘性損失、動力発生装置の変換損失などが生じ、また装置全体を大型化しなくてはならない等の問題点が生ずる。一方、磁性体を用いた光熱磁気モータの研究<sup>8)</sup>も進められているものの、磁性体の持つヒステリシス損失、また高温加熱のため

\*同志社大学工学部機械系学科教授

\*\* " 大学院工学研究科

〒610-03 京都府綴喜郡田辺町多々羅都谷1-3

レーザ光線等によるパルス加熱を行わなければならないなど、複雑な装置形態が必要となる。

そこで、本研究に関連し、前報<sup>9,10)</sup>では、感温性磁性流体を封入したセル状構造を持つ円板に対し、外部に高温熱源部と低温ヒートシンク部を設け、さらに永久磁石による磁場を印加することにより比較的低温動作域において熱エネルギーを動力に直接変換できる装置を製作し、動作確認及び基本特性につき報告した。本研究では温度場および磁場の種々の下において、熱源部及び冷却部の相対的配置を考慮した性能実験を行い、詳しい動作特性および性能データを得た。

本報では、これら種々の実験条件下で得られた結果について報告するとともに、今後の設計・改善方針について示唆する。

## 2. 実験装置の設計と概念

### 2.1 装置構造

実験装置は基本的に回転円板、加熱部、冷却部および磁場印加用の永久磁石により構成される。図-1 (a) に実験装置の上面図、および図-1 (b) に側面図を示す。なお本研究において初期的基本性能を得るため、装置を主軸が鉛直方向になるように設置した。図に示すように回転円板①は上下2個のベアリングによって支持され主軸③に取り付けられている。また冷却用熱交換器②を回転円板の上下両面にフィン中心が回転円板より上下18mmを保つように設置し、別に空気冷却用ファンにより強制冷却が可能な形態とした。冷却用熱交換器は回転円板表面の60% ( $\theta = 4\pi/5 \sim 2\pi$ ) をしめこれを本装置の冷却部とする。セラミックヒータ⑥は回転円板表面の25% ( $\theta = 0 \sim \pi/2$ ) を占めるように円板から8mmの間隔をおいて上下両面に取り付け、放射による加熱を行える形態とし、これを本装置の加熱部とする。さらに熱交換器とヒータの間に永久磁石④を図-1 (a) のように回転円板上部に設置し、磁場を外部より印加できる構造とした。

感温性磁性流体は温度が増加するに従い磁化が減少する特性を持っており、本実験装置では冷却部で磁化が増加し、加熱部で磁化は減少する。その結果、冷却部の磁気力が加熱部の磁気力より大きくなり、加熱部の方向へ、つまり本実験装置では図-1 (a) で右回りの駆動力が発生し、円板の回転が維持される。

円板の実験装置に対する位置の表示には、主軸を原点とした極座標 ( $r, \theta$ ) を用い、角度  $\theta$  については図-1 (a) に示すように加熱部と冷却部の中間点を基

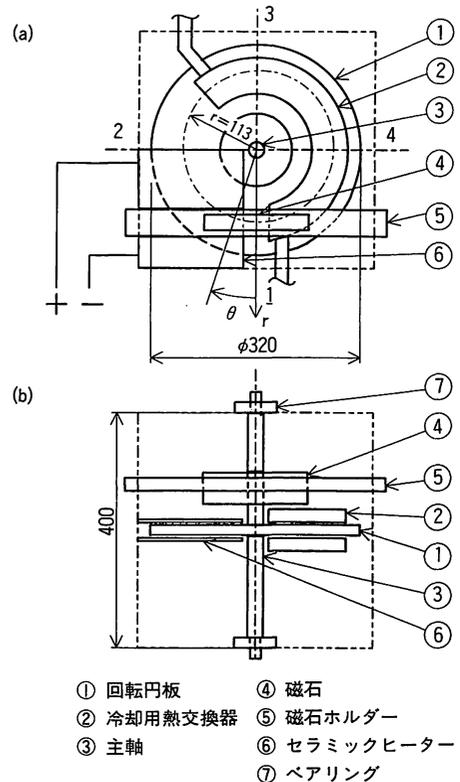


図-1 試作実験装置

準点に取り、加熱部側を+方向とする。また代表点として主軸を原点とした半径  $r = 113\text{mm}$  の円板上における  $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  の4点をとり、図-1 (a) に示すようにそれぞれ点1, 2, 3, 4と呼称する。以下に装置各部の詳細について説明する。

#### (1) 回転円板

回転円板の詳細を図-2に示す。円板の寸法は直径320mm、厚さ約10mmであり、材質は透磁性および熱伝導性の高いアルミニウムを用いた。円板は図-2に示すように  $r_1 = 70, r_2 = 160\text{mm}$  で、円周方向に分割された扇形の容器 (セル) 24個より構成される。また、それぞれのセル間で直接熱伝導による熱移動が起こらないように互いに独立した構造としさらに主軸との取り付け部にはベークライト板によって断熱を行った。各セルは円周方向15°、半径方向の長さ90mm、厚さ10mmの扇形をしており、セル内部の半径方向の長さ74mm ( $r_{1,inner} = 76\text{mm}, r_{2,inner} = 150\text{mm}$ )、厚さ8mmの部分に感温性磁性流体を充填した。温度測定のためセル表面には黒体スプレー (放射率  $\epsilon = 0.95$ ) を塗布し、各セルでの放射率を一定とした。

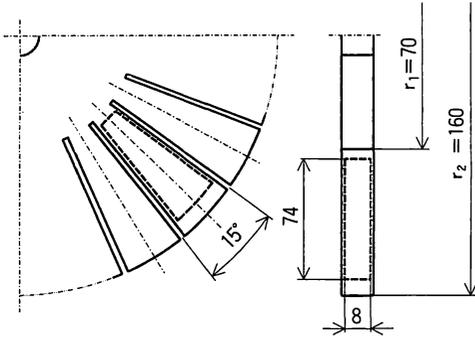


図-2 磁性流体セル

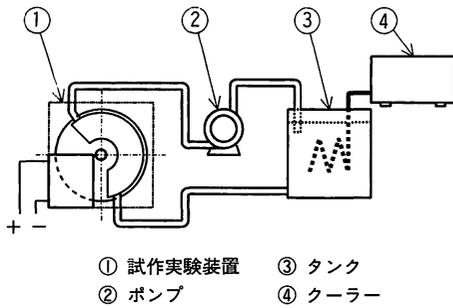


図-3 実験装置概略図

(2) 加熱部

長方形のセラミックヒータ (150mm×200mm, 厚さ 1 mm) により, 図-1(b)に示すように回転円板上面及び下面に対し放射加熱を行った. 上下おのおのセラミックヒータの非加熱側では放熱損失を防ぐため石綿により断熱を行った. またヒータ温度についてはヒータ厚さが薄いことより加熱面と非加熱面の温度を一定とみなし伝熱裏面 (非加熱側) に設置した K 型熱電対よりヒータ温度を測定した. 加熱量の調節はヒータに接続したボルトスライダによって行った.

(3) 冷却部

回転円板上の任意の箇所における冷却を効率的に得るため, 冷却用熱交換器 (フィン型熱交換器) により冷却された空気を回転円板に吹き付ける構造とした. 冷却用熱交換器は厚さ (流路長さ) 20mm のフィンチューブ形熱交換器を用い, さらに熱交換器には図-1(a) の点 3, 4 の位置に温度測定用の小窓を設けた. 冷却用熱交換器に用いた冷媒はエチレングリコール 50% 水溶液である. 冷媒は図-3 に示すように, 冷却用タンクにおいてクーラ (トーマス科学器機社製; TRL-107 AF) によって冷却され, 冷却用熱交換器内を流動した後, ポンプによって冷却用タンクに循環させる構造

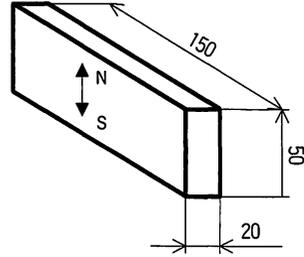


図-4 永久磁石寸法

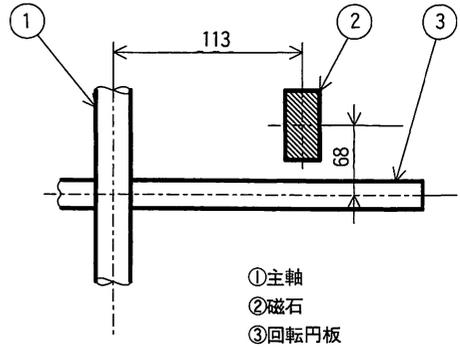


図-5 磁石配置

とした. なお K 型熱電対を熱交換器前後の管内部に設置し, 実験条件毎に冷媒温度が一定になるように設定し, 実験を行った.

(4) 永久磁石

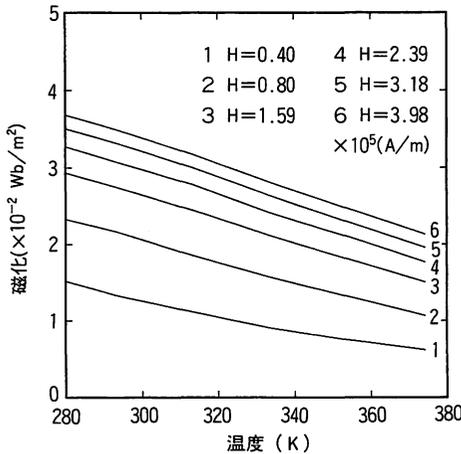
本実験では 20×50×150mm の永久磁石 (SEREM M36H; 信越化学工業製) を使用し, 回転円板の外部より磁場を印加する構造とした. 永久磁石は極付近の最大磁束密度が 4000 Gauss のものを 1 個用いた. 磁石の形状および着磁方向を図-4 に示し, 取り付け位置を図-5 に示す. 磁石の設置はジュラルミン製のホルダーで磁石の両端を挟み, 図-5 に示すように回転円板の上部  $r = 113\text{mm}$  の接線方向に固定し, 磁場分布は円周方向 ( $\theta$  方向) の磁場の強さが磁石の重心を含む  $r$  方向鉛直面 (例えば, 図-1(a) において点 1, 点 3 を結ぶ線分を含む鉛直面) に関して対称となるようにした. 磁石設置の方向は円板に S 極を向け, 磁石重心と円板中心の間隔 68mm とした. (図-5)

2.2 供試磁性流体

本実験に使用した感温性磁性流体は, 一般に磁性流体に使用されるマグネタイト粒子と比較して, 常温域で強い磁化の温度依存性を持つ, ケロシンベース, マンガン-亜鉛フェライト粒子 (タイホー工業製; フェリコロイド TS-50K) のものを用いた. 図-6 に磁性流

表 1 磁性流体の物性値

密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1397
粘度 (Pa·s)	1.68×10 <sup>-2</sup>
比熱 (J/(kg·K))	1387
熱伝導率 (W/(m·K))	0.175
熱拡散率 (mm <sup>2</sup> /s)	9.070×10 <sup>-2</sup>
プラントル数 (-)	133.2
飽和磁化 (gauss)	266



注)マンガン-亜鉛フェライト粒子, ケロシンベース磁性流体

図-6 磁化曲線

体の磁化特性を示す。図-6に示すように、各印加磁場(0.4~3.45×10<sup>5</sup>A/m)に対し、280~380Kの温度範囲で、磁化が強い温度依存性を持つことがわかる。本研究に用いた感温性磁性流体TS-50Kの基準物性値を表1に示す。基準物性値は各ロット生産分に対して測定した値、および既存の文献値<sup>11)</sup>を使用し、温度依存性の物性値に関しては、代表温度25℃における値を示した。

2.3 実験方法

実験では、回転円板の外部より印加された磁場の分布、回転円板の代表温度、および回転数を測定し、得られた計測結果に対して、装置の基本性能を得るためRosensweig<sup>12)</sup>による磁性流体の熱力学的解析を行った。

まず実験に先立ち永久磁石の磁場分布測定を行った。測定は回転円板の各セル鉛直断面の中心を通る水平面において行い、半径方向(図-2参照)ではr<sub>1</sub>~r<sub>2</sub>の範囲で10mm間隔、円周方向(図-1(a)参照例ではθ=π/2~3/2πにおいて磁場の影響は非常に小さいものとし)θ=0~±π/2の区間について10°間隔でガウスメータ(横河電機製; 3251)を用い測定を行った。

計測データはθ=10°毎について半径方向に面積平均を算出し、代表磁場としてθ方向の磁場分布を得た。温度分布測定は、各代表点1, 2, 3, 4について回転中の円板表面温度を非接触で測定して得られたデータを代表温度とした。ここで、回転中の円板内の温度測定は困難であり、セル表面の容器の厚さが薄い(1mm)ことより、主軸を原点とした半径r=113mmにおけるセル表面温度をもってセル中の磁性流体の温度と仮定した。測定は、各実験条件において回転が安定な状態になったことを確認した後、図-1(a)における点1~4を代表点として行った。各点での円板表面温度は放射温度計(堀場製作所製; IT340)により行い、出力された信号をA/D変換した後、1秒毎に100個のデータの平均値をパーソナルコンピュータに取り込み、1回転についての平均温度を代表温度とした。なお、放射温度計については測定誤差の確認のため、予備実験として黒体スプレーを塗布したアルミニウム板の表面温度測定についてK型熱電対との比較を行ったところ、温度差は1%以下であり、放射温度計による温度測定に対する補正の必要性は認められなかった。また、実験において装置の基本特性を調べるために、定常1回転に対する回転速度(角速度)を各実験条件に対し記録した。

本研究では、測定より得られた代表温度および磁場分布を用いて、次式で与えられる磁性流体の熱力学的解析<sup>12)</sup>を行い、装置の基本性能を得た。

$$W_{cyc} = \left[ \int_0^{2\pi} M(H, T, \theta) dH(\theta) \right] \cdot V / t_{cyc}$$

ここで磁性流体の温度Tは代表点間において線形補間して得られた温度を示し、Hは外部印加磁場、Vはセルの総体積、t<sub>cyc</sub>は回転円板1回転あたりの周期を示す。また、本研究で使用した感温性磁性流体の磁化Mは磁気熱量定数K<sup>6)</sup>を用いて以下のように表せることができる。

$$M = KH(T_c - T) \tag{2}$$

式(2)においてT<sub>c</sub>は磁性流体の温度定数である。本研究で用いた感温性磁性流体に対しては、図-6よりK=3.087×10<sup>-8</sup>およびT<sub>c</sub>=431(K)となり、また式(1)において、V=3.19×10<sup>-4</sup>(m<sup>3</sup>)である。なお、本実験装置の効率ηはセル中の磁性流体に対して実際に加えられた熱量Q<sub>add</sub>を直接求めることが困難であることより、加熱量を点1と点2での代表温度T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>を用いて以下の式(4)で仮定を行うことにより見積もりを行った。ここで以下の式(3)で表される磁性流体の磁気熱量効果Q<sub>ME</sub>(強磁場の領域にはいると加熱さ

れ、逆に強磁場の領域から流出する場合には冷却される性質)による温度変化を見積もったところ、最大加熱量に対して0.1%未満となり、値が非常に小さいため本研究の実験値整理に関しては考慮しない。

$$Q_{MS} = T \int_4^2 \left[ \frac{\partial M}{\partial T} \right]_H dH \quad (3)$$

$$Q_{add} = \rho V C_P (T_2 - T_1) / t_{cyc} \quad (4)$$

従って、式(1)と式(4)より効率 $\eta$ は以下の式(5)で求めることができる。

$$\eta = W_{cyc} / Q_{add} \quad (5)$$

## 2.4 実験条件

本研究では実験装置の特性を温度場、磁場それぞれについて検討を行うため、実験条件には加熱条件、冷却条件、印加磁場条件の3種類を用いた。

### 1. 加熱条件

加熱はセラミックヒータに接続したボルトスライダによって調節をおこない、点2と点1における代表温度差を $\Delta T = T_2 - T_1$ とし、 $\Delta T = 20, 25, 30$  (K)の3条件を設定した。

### 2. 冷却条件

冷却は円板に対して、冷却用熱交換器を通して強制通風を行う箇所を変えることによって、強制通風の各箇所における円板表面温度差により生じる冷却効果の差異について検討を行った。強制通風の箇所は図-1(a)中の点4と点1の2箇所に設定し、また強制通風の風量および冷却用熱交換器の熱交換能力はすべての加熱条件に対し一定とした。以下、強制通風の箇所が点4の場合はC4条件、点1の場合はC1条件とする。

### 3. 磁場条件

実験装置に印加する磁場は加熱部、冷却部を固定し磁場の印加形態(印加位置)の影響を調べるため、永久磁石の配置を変えることによって変化させ、検討を行った。永久磁石の配置は、磁石の重心が主軸及び円板の中心を含む水平面から常に113mm, 68mmの距離(図-5参照)となるように、また磁石の重心がおのの円周方向に $\theta = 0, \pi/6$  (rad)に位置するよう、2箇所点を選び永久磁石の設定を行った。以下、磁石の重心位置が $\theta = 0$  (rad)の場合をM1条件、 $\theta = \pi/6$  (rad)の場合をM2条件と呼称する。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 温度分布および磁場分布

各実験条件下より得られた代表温度の温度分布、磁場分布を示す。図-7にM1条件におけるそれぞれC1、

C4各条件を、同様にして図-8にM2条件におけるそれぞれC1、C4各条件に対する温度分布および磁場分布を代表実験条件( $\Delta T = 20, 25, 30$  (K))についてそれぞれ示す。図-7、図-8の左縦軸は代表温度を、また右縦軸は磁場強度を示し、横軸は図-1(a)の $r = 113$ mmの円周上における点1を原点とした $\theta$ 方向の位置を表す。温度については各代表点間で線形補間を行った。各実験条件共、加熱条件 $\Delta T$ が増加するほど温度分布は全体的に上昇している。これは冷却効果がC1、C4各条件において加熱条件が $\Delta T = 20, 25, 30$  (K)となるに従い大きくなることにより、円板全体の温度が上昇することによる。それぞれの温度分布では1回転中の最高温度は点2に位置しており、これは磁性流体セルが加熱部を通過した直後であり、また最低温度は点1において冷却部を通過した直後である。これより回転円板は点1～点2間で加熱、点2～点1間( $\pi/2 < \theta < 2\pi$  (0))で冷却を繰り返していることがわかる。一方磁場分布については、すべての実験条件において同じ永久磁石を用いたことにより分布形状は、それぞれM1、M2条件に対して同じとなる。また、磁場分布形状は図-7および図-8よりわかるように永久磁石中心において最大磁場を計測し、これを原点として対称に分布しており、M1条件では最大磁場(磁石中心)が $\theta = 0$  (rad) (図-7)、M2条件では $\theta = \pi/6$  (rad) (図-8)にそれぞれ存在している。本研究において計測された最大磁場は23700 (A/m)である。ここでM1、M2の磁場印加条件とも、磁場が印加されている領域内に逆向きの駆動力が発生する温度分布が存在する。(回転方向に温度が減少する場合、ケルビン力(磁気力) $M \nabla H$ が+、増加する場合、 $M \nabla H$ -の符号を持つ)すなわち、磁性流体における磁化は式(2)より磁場に比例することから、磁化への影響が強い最大磁場付近について温度分布を見ると、M1条件では $M \nabla H$ が-の符号を持つ温度分布が存在しているのに対し、M2条件では最大磁場付近の領域ではすべて $M \nabla H$ が+符号が得られていることがわかる。

同一の磁場条件で異なる冷却条件における温度分布では、図-7 (M1条件)に示されるようにC1とC4各条件における強制通風を行う箇所(点1と点4)での温度差が小さいことより、温度分布の違いは強制通風による強制冷却よりも加熱部出口(点2)から各強制通風を行う点(点1及び点4)に至る間における自然対流による冷却効果(自然冷却)の影響が大きいと考えられる。また、C4条件の温度分布は点3、点4

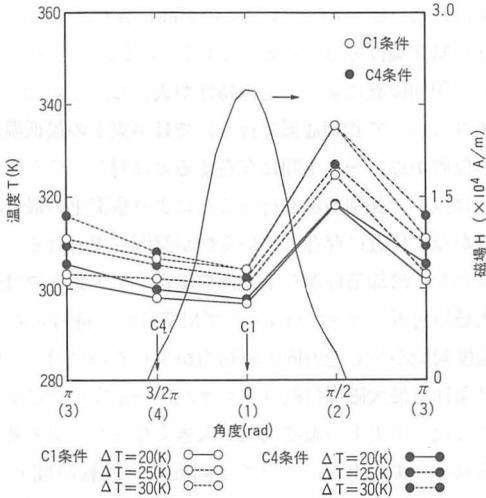


図-7 磁場分布Hと温度分布T (M1分布)

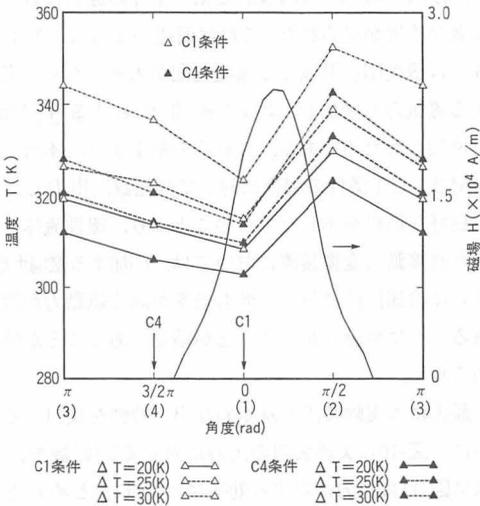


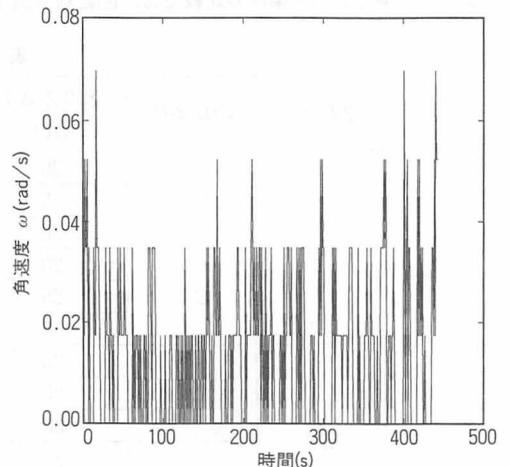
図-8 磁場分布と温度分布T (M2分布)

においてC1条件による冷却条件より高温側に移動し、点4～点1間における温度勾配も増加していることより、加熱の影響が加熱後の温度分布に長く残存していることがわかる。これはC1条件と比較して、強制通風する箇所の違いに起因し回転数が増加（回転時間が短い）することにより（後述）、磁性流体セルに対する自然冷却が十分に行われなかったものと思われる。一方、図-8（M2条件）に示すように、C1、C4各条件共、M1条件（図-7）と比較して、 $\Delta T$ が増加（加熱量が増加）するに従い温度分布が全体的に上昇する傾向が認められる。これはM2条件の回転速度が高回転になったことによりセルへの加熱量が増加し、相対的にセルの冷却に不足が生じたものと思われる。

次にM1条件およびM2条件（図-7、図-8）共、C1条件とC4条件との比較ではC1条件の温度が相対的に高い値を示す。これはC1条件とC4条件の比較においては、回転速度にそれほど差がないことから、C1条件の強制通風によるセルの冷却がC4条件より大きいことによるものである。またC1条件において加熱量が増加（ $\Delta T=25, 30K$ ）するに伴い、点3～点4間よりも点4～点1間での温度勾配が大きくなり、強制冷却を行う箇所（点1）で急激に温度が減少していることがわかる。このようにM2条件では、C1条件とC4条件との冷却箇所の違いが図-8に示されるように温度分布の差異として顕著に表れ、回転速度の低いM1条件においてはC1条件とC4条件でのセルの冷却に差異が認められないものの、M2条件では、C4条件におけるセルの冷却効果が相対的にC4条件よりも大きくなること示された。

3.2 回転特性

図-9に本装置の回転特性の1例として、M1条件、C4条件、 $\Delta T=30(K)$ での1回転間の回転特性を示す。ここで縦軸は角速度、横軸は1回転間の経過時間を示す。図-9に示されるように、円板の回転はほぼ周期的に回転・停止している（各セルに封入された磁性流体が駆動力を得るための磁化に差異を作るのに加熱・冷却時間が必要であるため）ことがわかる。また、同じ実験条件の下ではこの回転状態が定期的に維持されることが求められた。一方、図-9において角速度 $\omega$ の極大値（不規則性を持つピーク値）が記録されるように、不規則的な動きも見られる。これはセル毎に封入された磁性流体の量のばらつき、および円板の



注) M1条件+C4条件下における $\Delta T=30(K)$ での回転特性の例

図-9 1回転における角速度 $\omega$ 変化

回転始動時における加熱・冷却の不均一性の影響が残存し、これらの不規則的なピーク値となり表れるものと考えられる。

### 3.3 性能特性

表2に実験装置の性能特性を各実験条件についてまとめたものを示す。ここで装置の出力 $W_{eye}$ および効率 $\eta$ は各実験条件の実験結果に対して式(1)と式(5)より計算を行ったものである。表1に示されるように、各実験条件とも温度差 $\Delta T$ が大きくなる(加熱最高温度と冷却最低温度の差は増加)に従って、円板の回転数が増加していることがわかる。またその結果、出力 $W_{eye}$ も比例して増加していることがわかる。一方、効率 $\eta$ は各実験条件とも温度差 $\Delta T$ が増加するのとは逆に減少する傾向を示す。これについて、磁性流体を用いたサイクル効率では、式(1)、(2)、(5)より以下の式で表せられることより説明できる。

$$\eta = \frac{\int_1^2 M dH}{\rho C_p (T_2 - T_1)} \quad (6)$$

式(6)より効率 $\eta$ は、磁性流体中に貯えられる磁気エネルギーと熱エネルギーの比で表せられることから、感温性磁性流体の物性値である磁化-温度特性の影響(図-6参照)が表れたものと考えられる。すなわち、磁気力の変化率が磁性流体の加熱量の変化に対して、本研究で用いた装置形態では低く表れることが推察される。このことより、熱力学的効率の改良には、磁性流体の物性についてさらに検討を行う必要があり、また、将来的に常温において急激な磁化変化を持つ磁性流体の開発により、根本的な改善が図られることも考えられる。

またM1条件とM2条件の比較では、回転数はM1

条件に対しC4条件によるものが高く表れ、これとは逆にM2条件ではC1条件によるものが高くなり、磁石の印加位置によって逆の特性が表れる。これはC4条件(点4で強制通風で行う)では事実上の最低温度の位置が点4~点1間に存在するのに対し、C1条件では点1で強制通風を行うことにより事実上の最低温度が点1付近に存在しているのが原因と思われる。すなわち、冷却条件がC1条件の場合、M1条件では最大磁場付近( $\theta = 0$  (rad))で $M \nabla H$ が-符号になる温度勾配が生じ逆方向の駆動力が生じるのに対し、M2条件は最大磁場付近( $\theta = \pi/6$  (rad))でC4条件と比べ事実上の温度勾配が大きくなった結果と考えられる。また出力については回転数(回転時間 $t_{eye}$ の逆数)の影響が大きいため、回転数と同様の結果がそれぞれC1とC4条件において認められる。さらに、効率についてもM1条件とM2条件の違いに対して顕著な差異が見られた。これは前述のように、M2条件では磁場印加領域での温度勾配が大きいため、発生する磁気力も増加し、よって式(6)における $\int_1^2 M dH$ が増加したためである。これらの結果より、本研究ではM2、C1条件の場合に対して回転数、出力とも最も良好な結果を示した。このことより、磁性流体を用いた直接動力変換装置においては、印加する磁場形態、さらに冷却位置に対して最も効率が高く駆動力が得られるように熱設計を行うことが重要であることが確かめられた。

最後に本実験装置の基本的な出力特性を検討するために、図-10に実験装置の出力に対する回転数を、同様に図-11に出力に対する効率についてまとめたものを示す。図-10に示されるように、回転数は出力に対

表2 性能特性

磁石条件	冷却条件	温度差 $\Delta T$ (K)	回転数 (rpm)	出力 $W_{eye}$ ( $\times 10^{-6}$ W)	効率 ( $\times 10^{-1}$ )
M1	C4	20	0.088	2.596	1.420
		25	0.119	4.115	1.374
		30	0.134	5.754	1.328
	C1	20	0.070	2.223	1.482
		25	0.087	3.084	1.446
		30	0.092	4.102	1.396
M2	C4	20	0.139	8.521	2.975
		25	0.174	12.11	2.904
		30	0.199	16.89	2.841
	C1	20	0.147	9.337	2.911
		25	0.191	13.37	2.825
		30	0.231	19.43	2.738

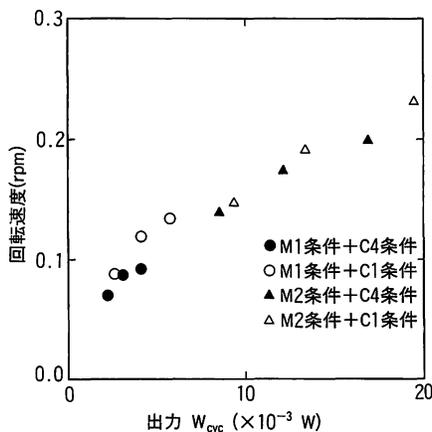


図-10 回転速度-出力特性

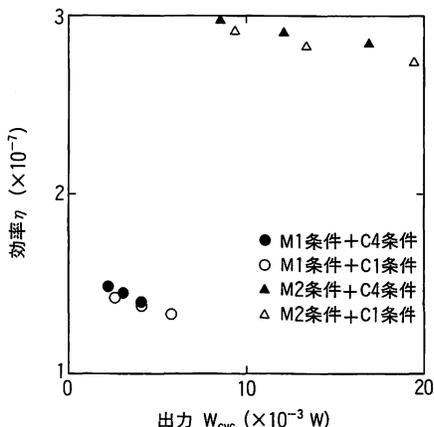


図-11 効率-出力特性

してほぼ1本の曲線上に分布していることが認められる。これより本装置は回転数は出力に対して強い依存性を持ち、出力の増加に対して回転数が増加する傾向を示す。一方、式(1)、(2)から明らかなように、出力を増加させるためには磁性流体の磁場印加領域内での温度勾配を大きくする必要があり、磁性流体セルに対する急速な加熱、冷却が行うことができる構造(ピンフィンの使用等)が必要であることが考えられる。さらに図-11では、M1、M2各条件とも効率が出力の増加に対して減少しているものの、M1条件とM2条件では出力に対する効率の変化率が異なり、今後、磁場印加位置の最適化を行うことにより、出力の上昇に伴い効率が增加する装置特性を持つ直接エネルギー変換装置の実現の可能性が期待できるものと思われる。

以上の結果より、磁性流体を用いたエネルギー変換装置の出力特性には磁性流体の温度依存性の物性に対してさらなる検討が必要であると共に、磁性流体の物性を十分に考慮して、温度場の熱設計および最適な磁場印加形態を求めることが重要である。

4. 結言

本研究において求めた結果より、以下のような結論を得た。

1. 感温性磁性流体を用いたエネルギー変換装置を製作し、加熱条件、冷却条件、磁場印加条件を変化させることにより作動確認および基礎特性データを得た。
2. 実験結果より、装置は温度差 $\Delta T$ が増加するほど、磁気力の増加により回転数、出力とも増加することが確かめられたものの、効率については、逆に減少を示

した。これは磁性流体の比熱と磁気エネルギーの増加率の違いに起因するものと考えられる。

3. 装置の出力特性に対して、印加された磁場と加熱・冷却の温度場の相互関係が重要であり、将来さらに磁気力を有効的に発生させるような磁場・温度場配置設計が必要であることがわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、あらゆる面でご助力いただいた元シャープ(株)高谷芳明氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 神山; 磁性流体入門, 産業図書(1983), 97.
- 2) J. L. Neuringer and R. E. Rosensweig; Ferrohydrodynamics, Phys. of Fluid, vol. 117, (1964), 1927.
- 3) E. L. Resler Jr. and R. E. Rosensweig; AIAA J., 2-8, (1964), 1418.
- 4) E. L. Resler Jr. and R. E. Rosensweig; J. of Eng. Power, Trans. of ASME, (1967), 399.
- 5) J. A. Barclay; J. Appl. Phys., 53-4, (1982), 2887.
- 6) H. Matsuki, K. Yamasawa and K. Murakami; IEEE Trans. Magn. Mag.-13, (1977), 1143.
- 7) H. Matsuki and K. Murakami; J. of Mag. Mag. Mater., 65, (1987), 363.
- 8) 大谷 吉村 畠山; 機械技術研究会論文集, (1994).
- 9) 山口 小堀 森田; 磁性流体連合講演会論文集, (1994), 28.
- 10) H. Yamaguchi, I. Kbori, Y. Morita and Y. takatani; Energe Conversion Device Using Magnestic Fluid, The International Conference on Magnetic Fluid, (1995), 265-266.
- 11) T. Aihara and J. -K. Kim; Heat and Mass Transfer in Material Processing, Hemisphere (1992), 641.
- 12) R. E. Rosensweig; Ferrohydrodynamics, Camb. Univ. Press, (1986), 161.