感温磁性流体を用いた小型熱輸送機器に関する研究*

麓 耕二^{*1}, 池川 昌弘^{*2}, 山岸 英明^{*1}Study on Mini-Heat Transfer Device Using
Temperature-Sensitive Magnetic FluidKoji FUMOTO^{*3}, Masahiro Ikegawa and Hideaki Yamagishi^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kushiro National College of Technology,
W 2-32-1 Otanoshike, Kushiro-shi, Hokkaido, 084-0916 Japan

In the present paper, experimental studies were performed on a mini-heat transport device incorporating a thermosensitive magnetic fluid. Heat transport systems using magnetic fluids have already been proposed by several researchers, but micro-sized devices of this type have not yet been developed. The device under discussion is made of a Teflon tube of 2 mm inner diameter and is formed in the shape of a loop. The operation of the device is based on the thermo-magnetic characteristics of the fluid, a suspension of Mn-Zn ferrite particles in kerosene, the magnetization of which is known to decrease with increasing temperature. The experimental parameters were magnetic force, the position of the magnet, and the temperature of the magnetic fluid. It was found that the velocity of the thermosensitive fluid could be controlled by changing the magnetic force and the position of the magnet. When there is a temperature difference in the magnetic fluid, the fluid flows automatically in the direction that reduces the non-equilibrium of the magnetic force. Furthermore, it was found that the maximum velocity of the thermosensitive magnetic fluid, without the use of a pump, was about 20 mm/s.

Key Words: Magnetic Fluid, Heat Transfer Device, Temperature Sensitive, Single Phase

1. 緒 言

近年、電子機器の小型化、高性能化が進み、発熱密度の増大により、高密度発熱体に対する効率的な熱制御技術の確立が重要な課題⁽¹⁾となっている。従来のサーモサイフォン型を始めとする熱輸送デバイス(HTD)は使用姿勢の制限や管内壁に特殊構造を必要とするため小型化への応用限界を有している。そのためヒートパイプに代わる小温度差で大量の熱を輸送するHTDの研究開発が盛んに行われている。特に振動励起熱輸送を原理とする振動制御型熱輸送デバイスが注目を集めている⁽²⁾。さらに熱輸送流路をループ状に接

続することにより、飛躍的な熱輸送量を得ている⁽³⁾。

一方、作動流体に感温磁性流体を用いた熱輸送装置の基礎的研究も古くから進められている⁽⁴⁾。感温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あり、特に分散粒子にマンガニー亜鉛フェライト等のキュリー点温度が低いものを混濁することにより、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のが特徴である。この原理を応用した熱輸送システムは、磁化の温度依存効果により高温熱源側では磁化の低減が生じ、低温熱源側では磁化の差に起因する駆動力が発生するため、ループ状に構成することによりポンプ等の駆動装置を必要としない無電源熱輸送デバイスを形成することが可能となる。従来、感温磁性流体を用いたHTDに関する研究としては、松木ら⁽⁵⁾による流路断面直径が比較的大きい場合($D=7\text{mm}$)の基礎的実験に対する報告がある。さらに山口⁽⁶⁾らは、管路に同心二重円管を

* 原稿受付 2006年1月16日。

^{*1} 正員、釧路工業高等専門学校機械工学科(〒084-0916 釧路市大楽毛西2-32-1)。^{*2} 正員、北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。

E-mail: fumoto@mech.kushiro-ct.ac.jp

用い、ヒートパイプ形式に類似した熱輸送装置の開発を目的として実験的ならびに理論的な解明を行っている。しかしながら熱輸送特性におよぼす各種パラメータの影響、および装置の小型化へ向けた応用研究は行われていない。

これらの状況を踏まえて、本研究は感温磁性流体を用いた小型熱輸送デバイスの熱輸送特性を把握し、小型化限界の探索、および性能評価を目的とする基礎的研究を行うものである。特に本論文では、装置の小型化へ向けた知見の蓄積を目的として、小径流路断面を有する楕円ループ状流路を形成し、温度と磁束密度をパラメータとする流動特性の把握、および熱輸送量に関する実験的検討を行う。

主 記 号

C	: 磁性流体の比熱	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
B	: 磁束密度	mT
D	: 直径	mm
H	: 磁界強さ	A/m
L	: 長さ	mm
M	: 磁化	Wb/m^2
ΔP	: 圧力差	kPa
Q	: 熱量	W
q	: 熱流束	W/m^2
T	: 温度	$^{\circ}\text{C}$
ΔT	: 温度差	$^{\circ}\text{C}$
t	: 時間	sec
U	: 速度	mm/s
V	: 質量流量	kg/s
X	: 距離	mm

添 字

1,2	: 内径, 外径
a	: 空気
H	: 高温部
L	: 低温部

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置

図1に装置系統図を示す。本実験装置は加熱部、冷却部を有する感温磁性流体封入パイプ、磁場供給部、および各種測定機器より構成されている。

磁性流体封入パイプは、内径 $D_1=2\text{mm}$ 、外径 $D_2=3\text{mm}$ のテフロンチューブをループ状に接続している。流路は全長 $L=835\text{mm}$ であり、直線部 300mm および曲率半径 35mm を有する湾曲部 ($117.8\text{mm}\times 2$) で構成されており、水平設置している。各部はテフロン製の小型チューブ継手を用いて接続している。なお流路

チューブおよび継手部は、断熱材によって周囲空気への熱損失を少なくしている。加熱部はテフロンチューブ外側にニクロム線 ($D=0.2\text{mm}$) と断熱材を交互に巻き付けてあり、加熱区間は流路軸方向長さ 50mm である。図2にヒータ部断面の模式図を示す。中央から表面に熱電対を取り付けたテフロンチューブ、断熱材 (外径 $D_2=8\text{mm}$)、熱電対を挟んでニクロム線ヒータ (inner heater)、および断熱材 (外径 $D_2=14\text{mm}$) の外側に補助ヒータ (outer heater) と断熱材 (外径 $D_2=20\text{mm}$) を配置している。実験ではヒータの供給電力制御により加熱量を設定している。供給熱量は、半径方向に設置した2本のK型熱電対 ($D=0.1\text{mm}$) の温度勾配より算出している。また加熱部におけるチューブ外表面温度 (以下、加熱部温度という) は、チューブ表面に軸方向に取り付けた2本のK型熱電対 ($D=0.1\text{mm}$) の平均値としている。高温側の磁性流体温度 (以下、高温側温度という) は、加熱部出口のチューブ内に挿入したK型熱電対 ($D=0.1\text{mm}$ 、図1における⑧) によって測定している。一方、冷却部は片側の湾曲部に $3\sim 15^{\circ}\text{C}$ に設定された冷却水を循環し、並流型熱交換によってチューブ内磁性流体を冷却している。低温側の磁性流体温度 (以下、低温側温度という) は、冷却部出口のチューブ内に挿入したK型

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Heater section

熱電対(D=0.1mm, 図1における①)によって測定している。各所に設置した熱電対は、A/Dコンバータを介したコンピュータにより500μsec毎に計測している。磁性流体の流速は、小型超音波流速計(KAIJO, μLF-100, 内径D₁=2mm, 外径D₂=3mm, 長さL=80mm)より計測している。

磁場付与は、コの字形ガイド(鋼製)の両内側に同じ磁束密度を持つ2個の磁石を付着させた磁気回路により行っている。実験では異なる3組の永久磁石を用いて、磁気回路を作製し、各因子におよぼす磁束密度の影響を調べている。磁気回路は、磁石の中心位置と流路チューブの軸心が一致するように配置されている。表1に本実験でを使用した永久磁石の仕様および磁気回路を配置したときの磁石表面と流路軸心位置における最大磁束密度を示す。また図3に各磁気回路によるチューブ軸心位置での磁力強さ分布(H)を示す。各磁気回路による磁力強さは、事前にテスラメータ(KANETEC製)を用いて測定している。以降、本論文において磁束密度は、表1に示す軸心位置での最大磁束密度(B=146, 301, 406mT)を用いて表す。

供試磁性流体は、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)を用いている。本実験でを使用した感温磁性流体の磁化(M)の温度依存性は、図4のように表される。なお磁化曲線は外部印加磁場(H)と磁性流体温度(T)を用いて以下のように表すことができる。

$$M = KH(T_c - T) \quad (1)$$

ここでT_c、Kは、それぞれ磁性流体の温度定数と磁気熱量定数を表しており、既存の文献値⁽⁷⁾より引用している。その他の基準物性値は、表2に示す通りである。なお温度依存性を有する物性値に関しては、代表温度25℃における値を示している。また実験では、使用する感温磁性流体の粘度低下を目的として溶媒のケロシンを増量混合しており、用いた試験流体の主要な熱物性値は、各々の物性値を混合比計算⁽⁸⁾すると表3のように示

Table 1 Property of magnet and magnetic force

Size [mm]	Magnetic flux density B [mT]	
	Magnet surface	Axial center
20×20×10	502	146
25×25×13	582	301
30×30×15	607	406

Fig.3 Distribution of magnetic force

Fig.4 Relationships magnetic force and magnetizing

Table 2 Physical property of magnetic fluid (TS-50K)

Solvent	kerosene
Density [kg/m³]	1397
Viscosity [Pa·s]	1.68 × 10 ⁻²
Specific heat [J/(kg·K)]	1387
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.175
Thermal diffusivity [m²/s]	9.07 × 10 ⁻²
Prandtl number [-]	133.2

Table 3 Physical property of testing magnetic fluid

Density [kg/m³]	1106
Specific heat [J/(kg·K)]	1706.3
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.144

される。なお本実験装置の流路内に封入されている磁性流体の全量は約25.1mlである。

2・2 実験方法

実験は以下に示す二つの方法を採用している。流動特性におよぼす印加磁場の影響を把握する目的として(実験方法Ⅰ)、流路に設置してあるヒータの加熱量および冷却用の循環水温度を制御し、磁性流体に所定の温度差を与え、温度場が定常状態になったのを確認したのち、所定の位置に磁気回路を設置する方法。もう一つは、初期流動特性と温度差の関係を把握する目的として(実験方法Ⅱ)、温度差を有しない温度条件下において、予め磁気回路を配置したのち、ヒータの加熱量を一定割合で増加させる方法である。なおヒータの加熱量は、直流定電流電源からの供給電流をプログラム制御することにより行っている。さらに定常流の実験では設定温度差を得るため、ヒータ加熱量および冷却水の流量と温度に対してフィードバック制御を行っている。

本実験の温度範囲は、高温側磁性流体温度が25～50℃、低温側磁性流体温度が5～25℃であり、得られる温度差の範囲は5℃～45℃である。本装置の測定精度は、使用した熱電対の校正結果を踏まえて、温度測定の不確かさは0.54℃、さらに流量計の測定精度は±2%以内(仕様より)である。

2・3 磁性流体の流動原理と磁気回路の位置

図5に磁性流体を満たしたチューブに高温部、低温部を形成し、その境界近傍へ磁石を設置したときに生じる磁性流体の駆動力を模式的に示す。磁性流体は低温側に比べてキュリー一点に近い高温側において磁化が弱くなり、磁化の非平衡状態が生じる。そのため低温側の磁性流体が引き付けられることにより、高温側への流動力が生じる。なお本流動原理において高温部、低温部は必ずしも隣接する必要は無く、磁力の影響する範囲内において磁性流体に温度差が生じた場合、磁化の非平衡状態により流動力が生じる。

Fig.5 Sketch of flow principle

一方、磁石設置位置は磁化の非平衡状態を引き起こす重要なパラメータ因子となる。著者らは、中央部に高温部と低温部を隣接配置したガラス製U字管に本実験と同種類の感温磁性流体(シグマハイケミカル製; T-334, キュリー温度170℃)を封入し、磁石設置位置と磁性流体の液柱差に関する予備的試験を行い、図6に示す結果を得ている⁹⁾。図の横軸は、高温部(一侧)と低温部(+側)の境界位置を原点とする磁石設置位置の座標系を示しており、縦軸は磁性流体の液柱高さから算出される流動圧力を示している。供給磁束密度は $B=301\text{mT}$ 、温度差は高温側をキュリー一点温度とし、低温側の温度を変化させた場合の両者の温度差を表している。図より、磁石位置を高温部の端部に付与することにより最大流動圧力が得られることが分かる。これらの結果を踏まえて、本実験においても、磁気回路の配置位置を冷却側に近い高温部の端を原点(図1参照)としている。

Fig.6 Relationships flow force and magnet position

3. 実験結果および考察

3・1 磁性流体の流動特性

先に示したとおりチューブ内の感温磁性流体は、付与される磁場と温度差に起因して流動する。ここでは実験で得られる代表的な結果を示し、本装置の基本的な流動特性について説明する。

図7に実験方法Ⅰより、磁場付与によって流動を開始する磁性流体の温度と速度を示す。図7下は横軸に経過時間、縦軸に温度を表しており、図中の上から加熱部温度、加熱部出口の高温側磁性流体温度、および冷却部出口の低温側磁性流体温度である。さらに図7

Fig.7 Typical data (TEST I)

上は同時時間スケールによる磁性流体速度を示している。実験は磁気回路を流路に配置した瞬間を開始時間 ($t=0\text{sec}$) としており、供給磁束密度 $B=301\text{mT}$ 、磁石位置 $X=0\text{mm}$ 、供給熱量 $q=974\text{W/m}^2$ の等熱流束条件である。磁性流体の初期温度条件は、加熱部を 40°C 、それ以外を 20°C としている。なお冷却部は 8°C の冷却ラインを流量一定で流している。図より、磁場を付与した直後から磁性流体の流速は、定常流に達し、速度範囲 $U=12\pm 3\text{mm/s}$ で推移することが分かる。一方、流速が定常状態で推移しているにもかかわらず、磁性流体の高温側温度、および低温側温度は緩やかに変化し、350 秒後に定常状態に達することが分かる。これは高プラントル数流体による温度境界層の緩慢な形成過程、および磁化の不均一状態によって生じる旋回流を伴う流動様相など、複合的な伝熱挙動が要因として考えられる。なお非定常状態における局所的な温度変動を含めた流動特性に関しては、次報において報告する予定である。

図 8 に実験方法 II より、温度差を徐々に大きくした場合に流動を開始する磁性流体の各種特性を示す。図の縦軸と横軸は、図 7 と同様である。実験条件は磁束密度 $B=301\text{mT}$ 、磁性流体の初期温度が高温側、低温側ともに 17.5°C ($T_H=T_L$) である。実験開始とともにヒータへの供給電力を一定の割合 ($\Delta Q=0.02\text{W/s}$) で増加させているため、加熱部温度は単調に上昇する。また実験開始とともに冷却部に 2°C の冷却ラインを流量一定で流し冷却を始めるが、実験開始 500 秒後付近までは、磁性流体の流動が起らないため、高温側温度と低温側温度による温度差が生じないことが分かる。その後、

Fig.8 Typical data (TEST II)

図 8 上の磁性流体速度が 10mm/s の流速を示すとともに、高温側と低温側の両温度に差が生じる。それ以降、温度差の増大にともない、速度が緩やかに増加する。なお初動時に見られる流速のばらつきは、流速計に起因するものと思われるが、現時点において詳細は不明である。しかしながら供給電力の上昇率を変化させて同様の実験を行った結果をまとめると、加熱部温度と低温側温度の差 (ΔT) が $5\sim 10^\circ\text{C}$ 程度で流動を開始することが分かった。このように本装置は、感温磁性流体が自らの温度差を感知し、その磁化の非平衡状態を是正する方向に流動力を発生し、熱輸送を行うことが大きな特徴といえる。

3・2 磁束密度の強さと設置位置による流速の変化

本実験では、永久磁石を用いた磁気回路によって磁場を付与しているが、強力な磁石を使用することによる周囲への磁場の影響を考慮すると、極力小さな磁場を利用することが望ましい。図 9 にパラメータを磁束密度として、定常状態での磁性流体速度におよぼす磁石設置位置と磁力強さの関係を示す。温度条件は高温側温度 $T_H=38^\circ\text{C}$ 、低温側温度 $T_L=8^\circ\text{C}$ 、温度差 $\Delta T=30^\circ\text{C}$ である。なお磁石設置位置の座標は、冷却側に位置する高温部端部を原点とし、加熱部側を正側 (+)、冷却部側を負側 (-) としている。図より流路をループ状に接続し、さらに高温部と低温部が隣接していない状態においても、原点に磁気回路を配置した場合が最も流速が早くなることが分かる。一方、磁束密度の変化は、磁化が非平衡状態の磁性流体に対する引力として直接

Fig.9 Effect of magnet position on fluid velocity

影響を与える。そのため流速は磁束密度の増大とともに増加する。また本装置で得られる最大流速と磁束密度の関係は、直線的な比例関係となることも分かった。

3・3 温度差による流速の変化

図 10 に定常状態における磁性流体の流速におよぼす温度差の影響を示す。図の縦軸、横軸はそれぞれ磁性流体の流速と温度差である。なお温度差は、高温側温度を 50℃に保持し、低温側温度のみを変化させた場合を表している。図より温度差の増大に伴い、著しい磁化の非平衡状態が形成されるため、結果として流速が大きくなることが分かる。またその傾向は磁束密度を変えても大きな変化は見られない。本実験装置では、磁束密度 $B=406\text{mT}$ 、最大温度差 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 、すなわち低温側温度が $T_L=10^\circ\text{C}$ において、最大流速 $U=21\text{mm/sec}$ を得ることが出来た。一方、最低流速(定常状態)は、磁束密度 $B=146\text{mT}$ 、温度差が $\Delta T=15^\circ\text{C}$ において、 10mm/sec となることが分かった。なお温度差が $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 未満では、磁性流体の一時的な流動は見られるが、定常流は確認できていない。これはビンガム流体の一種である感温磁性流体の降伏値と温度差に起因する磁化の非平衡状態の不均一化が関係しているものと考えられるが、今後解析的検討を含めて明らかにしたい。

3・4 最大熱輸送量の条件

図 11 に磁性流体の比熱等を考慮して得られる熱輸

Fig.10 Effect of temperature difference on fluid velocity

Fig.11 Relationship between heat transport and temperature difference

送量を示す。図の縦軸、横軸はそれぞれ熱輸送量と無次元温度差である。なお熱輸送量には磁性流体の高温側温度(T_H)、低温側温度(T_L)を用いて以下の式により算出している。

$$Q = V \cdot C \cdot (T_H - T_L) \quad (2)$$

ここで、 C は比熱であり、 V は流路断面積、磁性流体の流速、および密度より算出される質量流量である。一方、無次元温度差は以下の式を用いている。

$$T^* = (T_H - T_L) / T_H \quad (3)$$

図より熱輸送量は、無次元温度差の増加とともに指数関数的に増大することが分かる。これらの結果は、HTDに関する他の研究結果と比較して、大きな熱輸送量が得られているとは言えないが、供給磁束密度と温度差により熱輸送量を制御でき、かつ設置姿勢の影響を受けにくい特性を有するループ状小型熱輸送機器の可能性が示されたといえる。

4. 結 言

感温磁性流体を用いた小型熱輸送デバイスの開発を目的として、内径 2mm のテフロンチューブを楕円ループ状に形成し、封入した磁性流体の流速におよぼす温度差と磁束密度の関係を検討した結果、本実験範囲内で以下の結論を得た。

- (1) 冷却側に近い加熱部端に磁気回路を設置することにより、磁性流体は最大流速が得られる。
- (2) 磁束密度、および温度差の増大によって、磁性流体の流速を増加させることができ、かつ流速の制御が可能であることを明らかにした。
- (3) 本装置の最大熱輸送量は、約 5.1W になることを示した。

今後、更なる小型化限界の検討を行うとともに、熱輸送量の向上を目的とした最適条件の探索、および流

路内における感温磁性流体の流動様相の可視化を行う予定である。

終わりに、本研究テーマの基礎データ採取に携わった釧路工業高等専門学校 建設・生産システム工学専攻 千家将秀 君および機械工学科 伝熱研究室の卒業生一同に対して深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) M. Ishizuka, An Overview on development of electronic equipment cooling technologies in this decade, *J. of Heat Trans. Society of Japan*, Vol. 41, No.167 (2002), pp.1-9. (written by Japanese)
- (2) Kurzweg, U. H. and Zhao, L., Heat transfer by high-frequency oscillations: A new hydrodynamic technique for achieving large effective thermal conductivities, *Phys. Fluid*, Vol.27, No.11, (1984), pp.2624-2627.
- (3) S. Nishio, Shi, X.-H., and Zang, W.-M., Oscillation-induced heat transport: heat transport characteristics along liquid-columns of oscillation-controlled heat transport tubes, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 38, (1995), pp.2457-2470.
- (4) E. L. Resler Jr. and R. E. Rosensweig, Magnetocaloric Power, *AIChE Journal*, Vol. 2, No.8, (1964), pp.1418-1422.
- (5) H. Matsuki, et. al, Experimental Considerations on a New Automatic Cooling Device Using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-13, No.5, (1977), pp.1143-1145.
- (6) H. Yamaguchi, et. al, Study for heat transport device using magnetic fluid, *Proceedings of the 72th Regular Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No.974-1, (1997), pp.411-412. (written by Japanese)
- (7) H. Yamaguchi, et. al, New Approach of Direct Energy Conversion Device Using Magnetic Fluid Part I ; Arrangement of Device Components and Its Performance Characteristics, *Energy and Shigen*, Vol.7, No.1, (1996), pp.88-95. (written by Japanese)
- (8) JSME Data Book : Heat Transfer 4th Edition, (1986). (written by Japanese)
- (9) K. Fumoto, H. Yamagishi, M. Ikegawa, Effect of temperature on fluid force of temperature-sensitive magnetic fluid, *Proceedings of the 25th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, (2005-10), pp.153-155. (written by Japanese)