

磁性流体を用いたエネルギー変換装置における 流動特性と効率に及ぼす粒子の凝集の影響*

島田 邦雄^{*1}, 岩渕 牧男^{*1}
神山 新一^{*2}, 奥井 健一^{*1}

The Effect of Particle Aggregation on Flow Characteristics and Efficiency of an Energy Conversion Device with a Magnetic Fluid

Kunio SHIMADA, Makio IWABUCHI,
Shinichi KAMIYAMA and Kenichi OKUI

Using an energy conversion device with a magnetic fluid susceptible to temperature in a nonuniform magnetic field, the effects of particle aggregation in the magnetic fluid on the flow characteristics and efficiency of the device are investigated experimentally and theoretically. The experimental data showing the effects of the strength and direction of the magnetic field and temperature difference on pressure difference and efficiency are compared. These experimental data are compared with the theoretical results by taking into account the particle aggregation, assuming one-dimensional flow. By estimating not only the magnetic pressure but also the hydrodynamic drag due to the increment of apparent viscosity by applying the magnetic fields to the device, the effects of the aggregation on the flow characteristics and efficiency are elucidated.

Key Words: Magnetic Fluid, Energy Conversion, Aggregation, Magnetic Field, Pipe Flow, Apparent Viscosity, Efficiency

1. 緒 言

磁性流体は、外部から非一様磁場を印加すると磁気圧力差が発生し、それにより磁場こう配に対して流動するという特異な性質をもつ⁽¹⁾。これを利用して、さまざまな応用機器が提案されてきている⁽²⁾⁽³⁾。エネルギー変換装置はその一例であるが、このときに使用される磁性流体は、温度により磁化が大きく感温磁性流体であり、また、磁場のみならず温度場をも印加する。その結果、磁化の温度依存性により、流動方向にさらに大きな磁気圧力差が生じ、磁性流体自身が駆動する。いわば、この応用機器は一種のエネルギーサイクルである。

このエネルギー変換装置は Resler-Rosensweig⁽⁴⁾⁽⁵⁾により初めて考案されて後、多くの研究者らにより研究されてきた^{(6)~(12)}。例えば、松木ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は、磁気圧力差に支配されるとして、エネルギー変換装置の流動特性について一次元的に解釈した。また、山口らは、磁性流体を磁性体として見立て、固定された領域内に封入した装置⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や、鉛直方向に配置した場合での装

置⁽¹¹⁾を考案している。

しかしながら、磁場を印加することにより生ずる粒子の凝集の影響が、磁性流体のあらゆる場での流動特性には無視し得ないという研究報告⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾がある。このことからすれば、エネルギー変換装置の流動特性に及ぼす凝集の影響について、詳細な検討が必要である。それにもかかわらず、その検討が行われていない。また、印加する磁場の方向の依存性についても、磁性流体のあらゆる場の流動特性において無視し得ないという研究報告⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾から、印加する磁場の方向の依存性についても考察されなければならない。さらに、エネルギー変換装置内における磁場と温度場が作用している場内に位置する管を鉛直に配置した場合には、水平に配置した場合と違って、磁気圧力差や凝集による見掛け粘度を含む粘性抵抗力のほかに浮力による影響が関与してくる。これについても評価する必要がある。

本研究では、まず、エネルギー変換装置の流動特性と効率に及ぼす粒子の凝集の影響についてのみ考察することを目的とする。そこで、水平に装置を配置した場合でのエネルギー変換装置における流動特性と効率の実験結果に関して、凝集の流動特性や効率に及ぼす影響について理論的に考察する。そのとき、磁気圧力

* 原稿受付 1997年1月9日。

^{*1} 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。

^{*2} 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区2-1-1)。

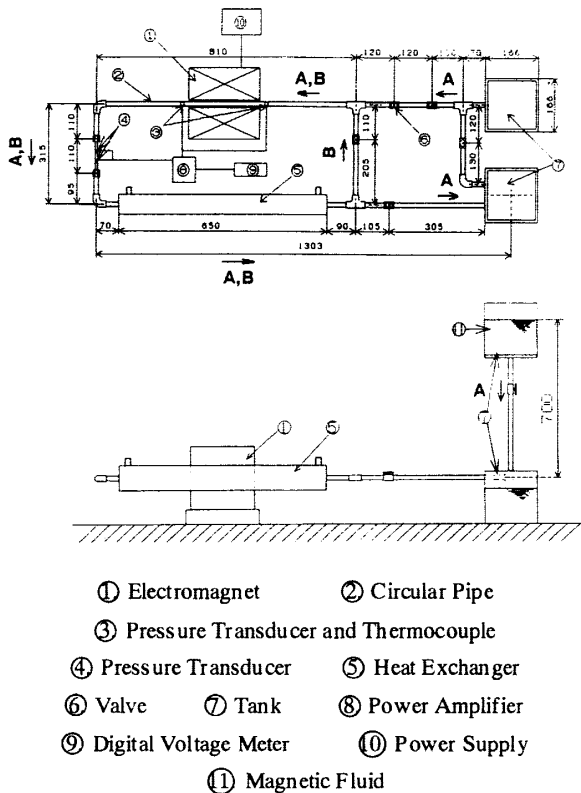


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

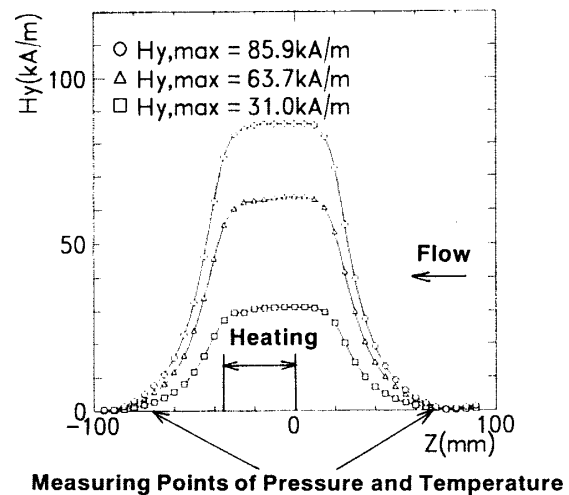
差のほかに、凝集による見掛け粘度の増加を含む粘性抵抗力を考慮に入れる。また、印加する磁場の方向の依存性についても検討するため、装置内の管軸方向に対して垂直、および平行に磁場を印加した場合についても比較検討を行う。

2. 実験装置と方法

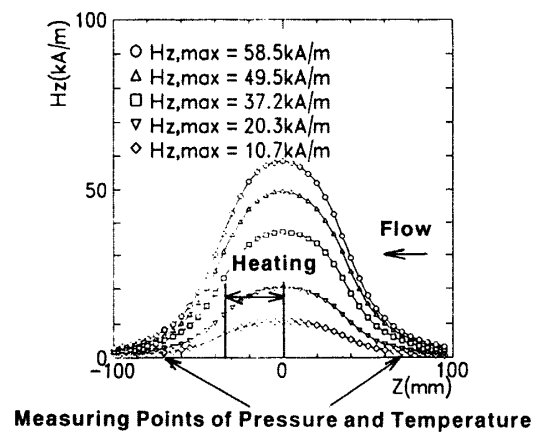
感温磁性流体を用い、水平に配置した場合のエネルギー変換装置の実験装置の概略図を図1に示す。

上部に配置したタンク⑦より磁性流体は半径 $r_0=5$ mmの黄銅製の円管②内を静圧力により流動し、下部に配置したタンク⑦に流出する。この場合には、円管内を一定の流速で磁性流体が、図1中のループA内を流動する。そこで、各ストップバルブ⑥をそれぞれ開閉することにより、磁性流体をループB内に密閉する状態を作ることができる。このループBにおいて、実験装置はエネルギー変換装置として働く。

ループの円管流路の一部に電磁石①およびヒータにより、それぞれ非一様磁場、温度場を印加し、また、その非一様磁場の領域内で圧力差を圧力変換器③により、また、温度差を熱電対③により計測する。測定する圧力、温度と磁場の位置関係を図2(a)、(b)に示す。ここで、図2(a)、および(b)は、管軸に対して垂直、あるいは平行に印加する非一様磁場分布である。



(a) Case of transverse magnetic field



(b) Case of longitudinal magnetic field

Fig. 2 Magnetic field

磁場の測定には、ガウスメータを用い、円管を設置しない状態で、円管の置かれる空間的位置の管軸上に対して測定する。今、管軸方向を z とすると、非一様磁場の中心を原点として $z=70$ mm ($=l/2$)、および -70 mm の位置での圧力、および温度を計測する。ここで、磁場、および温度場印加時から一定に達したときの測定値を採用する。また、ヒータは、直径が1 mmであり、図3に示すように円管②の内壁にらせん状に、 $z=0 \sim -35$ mm ($l_h=35$ mm) の位置に配置する。ここで、このヒータ⑩の存在による圧力損失は、測定された圧力差に比べて最大1%であり、無視し得ることを確認している。

磁性流体は、図1中のループB内を半時計方向に流動する。流路内における磁性流体の流速は、流路内に設けた圧力変換器④による圧力差から計測する。このときの測定精度は、6%であった。ここで、磁場、および温度場印加時から一定に達したときの測定値を採用する。また、円管流路上に水道水より冷却水が供給、

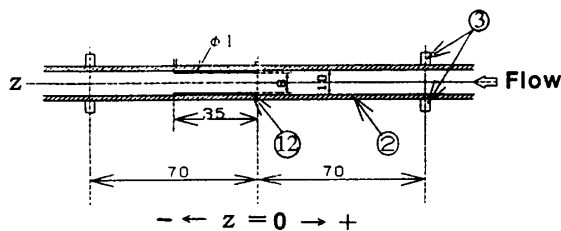


Fig. 3 Schematic sectional diagram of pipe in the field of applying magnetic and thermal fields

排出されるチューブに連結された熱交換器⑤を配置し、ヒータにより加熱された磁性流体を冷却する。

使用した感温磁性流体は、マンガン亜鉛フェライト粒子が一樣分散している原液のケロシンベースのタイホー工業製の TS-50 K であり、25°C において密度 $\rho = 1.390 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度 $\nu = 1.68 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ である。この感温磁性流体の磁化 M の絶対温度 T に対する変化を図 4 (データ値はタイホー工業より提供) に示す。計算に当たっては、図 4 より求まる M と T の関係式を使用する。

3. 理 論 式

エネルギー変換装置、すなわち、本実験における閉ループの場合の流路上において、磁場、および温度場を印加した後、磁気圧力差と粘性に基づく抵抗力とが平衡に達したとき、磁性流体は一定流速 v_0 に達する。このとき、区間 l における圧力差 Δp は、流れを一次元として扱うと次式のように表される。

$$\Delta p = \mu_0 \int_{-l/2}^{l/2} M \nabla H dz - \frac{8\nu_0}{r_0^2} \int_{-l/2}^{l/2} (\eta + \Delta\eta) dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

μ_0 : 真空の透磁率

∇H : 磁場こう配

η : 無磁場下での磁性流体の粘度

であり、また、 $\Delta\eta$ は、磁場印加による見掛け粘度の増加量である。今、この $\Delta\eta$ については、著者らが先に提案した⁽¹⁶⁾、 N 個の粒子が凝集したときの形状を回転だ円体粒子として近似したときの理論式を用いる。すなわち、管軸に対して垂直に磁場を印加した場合には、管断面内において平均した $\Delta\eta$ について考えると、一次元的に次式で表される。

$$\Delta\eta = \frac{\alpha}{4} \left[\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\xi - \tanh \xi}{\xi + \tanh \xi} \right) + \lambda (3L_2 - L_3) \right\} + \frac{\lambda}{\xi} \left(2L_1 - \frac{L_2}{\xi} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、管軸に平行に磁場を印加した場合には、次式

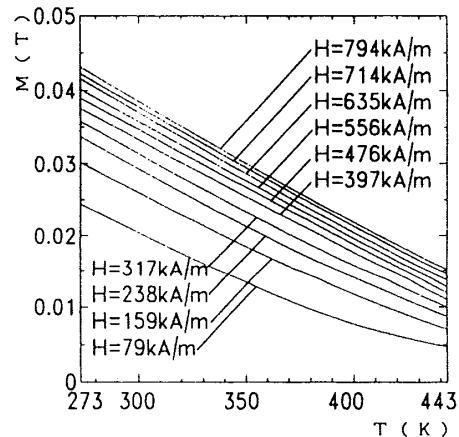


Fig. 4 Relation between magnetization of magnetic fluid and temperature

で表される。

$$\Delta\eta = \frac{\alpha}{4} \left[\frac{\xi - \tanh \xi}{\xi + \tanh \xi} + \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2} \times \left(\frac{L_1}{\xi} - 1 + \frac{\xi}{3} - \frac{4}{3\xi} + \frac{3}{\xi^2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$L_1 = \coth \xi - \frac{1}{\xi}, \quad L_2 = 1 - \frac{3}{\xi}, \quad L_3 = L_1 - \frac{5L_2}{\xi},$$

$$\lambda = \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2}, \quad \xi = \frac{\mu_0 m H}{k T}, \quad m = \frac{10^7 M N}{4 \pi n},$$

$$\gamma = \frac{1}{N} \quad (N \geq 1), \quad \alpha = 6 \phi \eta_0 \quad (N = 1),$$

$$\alpha = 4 \phi \eta_0 \frac{1 - \gamma^4}{(2 - \gamma^2) \frac{\gamma^2}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \log \left(\frac{1 + \sqrt{1 - \gamma^2}}{\gamma} \right) - \gamma^2} \quad (N \geq 2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

α : 回転だ円体粒子の回転粘度 Pa·s

γ : 回転だ円体粒子の軸比

m : 磁気モーメント A·m²

H : 磁場強度 A/m, 式(2)の場合 $H = H_y$, 式

(3)の場合 $H = H_z$

k : ボルツマン定数 J/K

n : 単位体積あたりの球形の粒子数 m⁻³

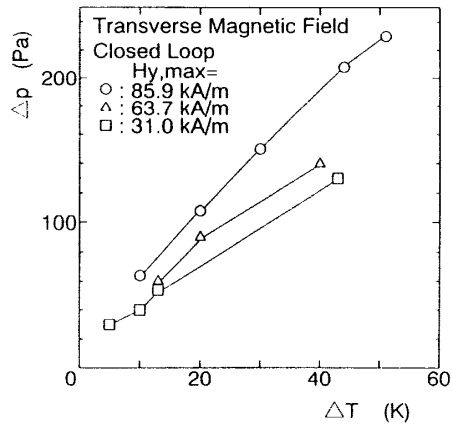
N : 球形粒子の凝集数

ϕ : 体積濃度 = 0.314

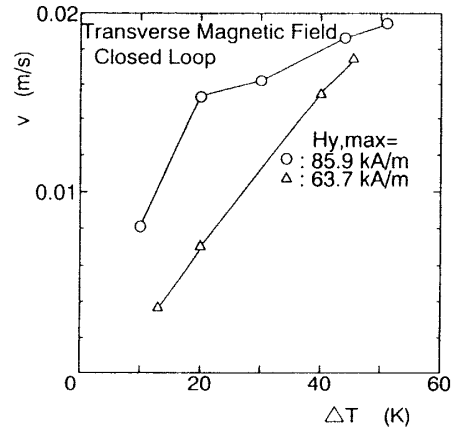
η_0 : 溶媒の粘度 Pa·s

である。

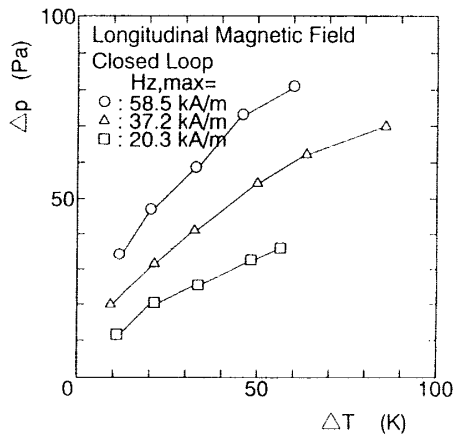
ここで、計算に当たっては、区間 l_h で温度こう配をもつものと仮定し、さらに、この区間を微小区間内に分割したとき、この微小区間内において温度等一定であると仮定して、式(1)の積分を近似して行う。また、式(4)における m の計算は、図 4 の M による値を使用して行う。



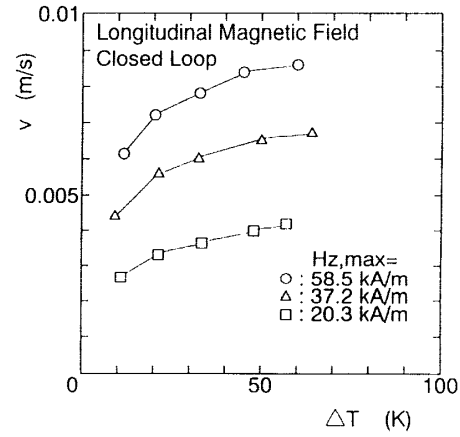
(a) In the case of transverse magnetic field



(a) In the case of transverse magnetic field



(b) In the case of longitudinal magnetic field



(b) In the case of longitudinal magnetic field

Fig. 5 Relation of pressure difference to temperature difference in the case of closed loop

Fig. 6 Relation of velocity to temperature difference in the case of closed loop

また、エネルギー変換装置における動力 W_e 、効率 μ は、次式で表される。

$$W_e = \pi r_o^2 \Delta p v_o, \quad \mu = \frac{W_e}{2\pi r_o l_h W_h} \times 100 [\%] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

l_h : ヒータによる加熱区間

W_h : ヒータによる単位面積あたりの流入熱量(熱流束) = 23, 34, 46, 57, 68 kW/m²

である。

4. 結果および考察

4.1 エネルギー変換装置における流動特性 図 5(a), (b)に、閉ループにおける圧力差 Δp の実験値の温度差 ΔT の実験値による変化を垂直方向磁場、および軸方向磁場を印加した場合についてそれぞれ示す。

温度差の増加に従い、圧力差が増加するが、これは、温度差の増加に従って、区間 l での磁化の変化が大き

くなり、磁気圧力差が増加するためである。

図 6(a), (b)に、閉ループにおける磁場、および温度差を印加してから磁性流体が一定流速に達したときの流速 v_o の実験値の温度差 ΔT の実験値による変化を垂直方向磁場、および軸方向磁場を印加した場合についてそれぞれ示す。

全体的な傾向として、温度差の増加に従い、磁気圧力差が増加するため流速も増加するが、その増加する割合がそれぞれの条件により異なる。すなわち、垂直方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときには、温度差の増加に伴う流速の増加が急激であるのに対して、最大磁場強度が大きくなると、温度差の増加に伴う流速の急激な増加率が小さくなる。一方、軸方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときでも大きいときでも、温度差の増加に伴う流速増加の変化率は垂直方向磁場より緩慢である。

この理由として、粒子の凝集が考えられるが、それについては、温度差と流速の関係が、凝集の影響を受ける圧力差と温度差の関係と対応しているため、以下

で述べる圧力差と温度差の関係における考察に含めて記述する。

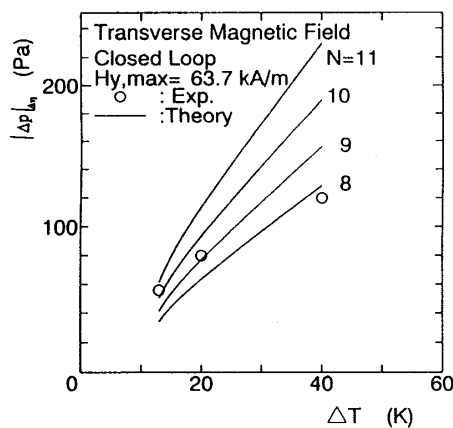
図5における圧力差の実験値は、式(1)に示すように、磁気圧力差や無磁場下での粘度に基づく圧力差を含んでいるため、磁場印加による粒子の凝集による影響をみるためには、磁場印加による粒子の凝集による見掛け粘度の増加に基づく圧力差をこれらの実験値から抽出して考察する必要がある。そこで、磁場印加による見掛け粘度の増加に基づく圧力差の実験値を、磁気圧力差[式(1)の左辺第1項]および無磁場下での粘性抵抗を図5の Δp から差引くことにより算出し、抽出する。また、それより得られた実験値と、次式に示す磁場印加による見掛け粘度の増加に基づく、圧力差のみの理論値とを比較する。

$$|\Delta p|_{\Delta\eta} = \frac{8v_o}{r_o^2} \int_{-l/2}^{l/2} \Delta\eta dz \dots\dots\dots (6)$$

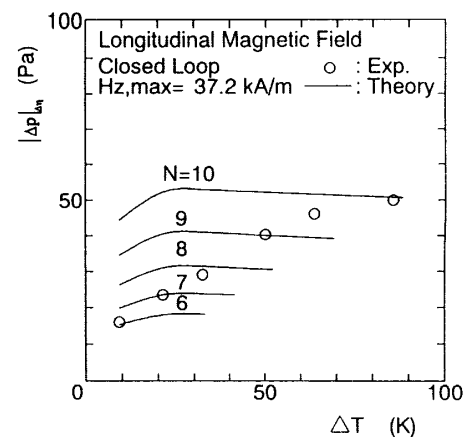
その結果を垂直方向磁場、および軸方向磁場を印加した場合について、図7(a)~(d)にそれぞれ示す。

まず、理論曲線について、垂直方向磁場を印加した

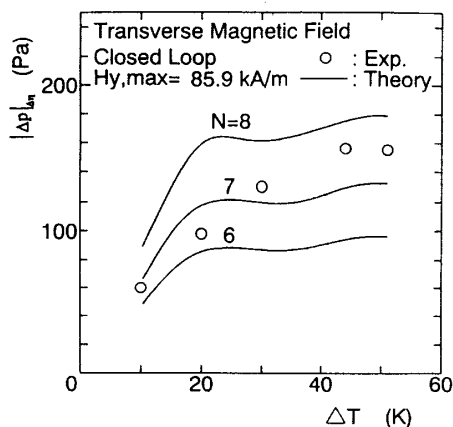
場合、最大磁場強度が小さいときには、同じ凝集数 N について、温度差の増加に伴う圧力差の増加が急激であるのに対して、最大磁場強度が大きくなると、温度差の増加に伴う圧力差の増加率が小さくなる。一方、軸方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときでも大きいときでも、同じ凝集数 N について、温度差の増加に伴う圧力差増加の変化率は垂直方向磁場を印加した場合よりも緩慢である。これらの理由として、以下のことが考えられる。まず、最大磁場強度が小さく垂直方向磁場を印加した場合には、 ξ の減少による $\Delta\eta$ 減少の効果が打ち消され、その効果がより大きく表れる。このとき、同じ凝集数 N について、温度差の増加に伴う圧力差の増加率が急激となるのは、温度差の増加に伴い流速が増加したためである。一方、他の条件下において、同じ凝集数 N について、温度差の増加に伴う圧力差の増加率が緩慢となるのは、温度差の増加に伴う流速の増加が緩慢となり $\Delta\eta$ への温度変化の効果が現れるためである。



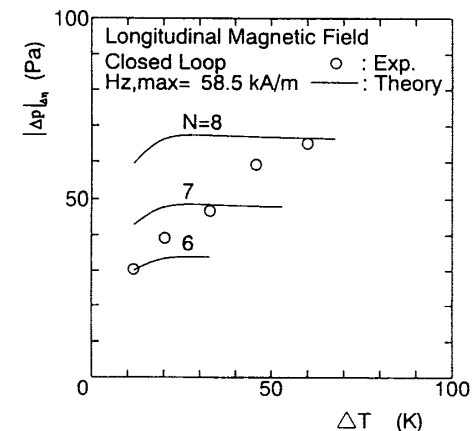
(a) In the case of transverse magnetic field



(c) In the case of longitudinal magnetic field



(b) In the case of transverse magnetic field



(d) In the case of longitudinal magnetic field

Fig. 7 Relation between pressure difference due to enhanced viscous force and temperature difference in the case of closed loop

次に、実験値と理論値の比較により決定される凝集数 N について、垂直方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときには、温度差の増加に伴う凝集数 N は減少する傾向にある。これは、流速の増加により粒子の凝集が壊れやすくなることが原因と考えられる。また、最大磁場強度が大きくなると、温度差の増加に伴って、凝集数 N が増加した後、一定に達する。一方、軸方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときでも大きいときでも、温度差の増加に伴って凝集数 N が増加する。このとき、垂直方向磁場を印加した場合と比べて軸方向磁場を印加した場合には、粒子の凝集する配向が流れと平行なため、粒子が凝集しやすいことが考えられる。

ここで、温度差の増大に伴う凝集数 N が増加するのは、ブラウン運動による粒子の分散に基づく粒子の磁場方向への吸引力の減少が支配的になるため、高温領域において凝集数が減少し、その粒子がループを一巡した後、 z がプラスの低温領域において再び凝集するため、式(2)、(3)において、区間 l 内について位

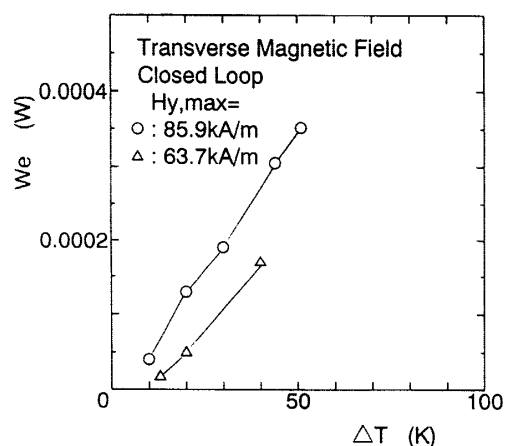
置的に平均した凝集数を考えると、 N が増加したとみられるからである。

このように、軸方向磁場を印加した場合とは対照的に、垂直方向磁場を印加した場合には、最大磁場強度の大小により圧力差や流速に及ぼす凝集の影響が変化する。

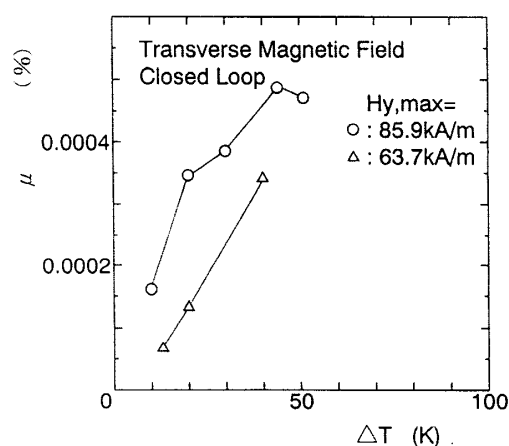
また、上記した温度差の増加に伴う圧力差の定性的変化は、図6でみたような温度差の増加に伴う流速の変化と同様の傾向を示す。

次に、ほぼ同じ最大磁場強度の垂直方向磁場を印加した場合の図7(a)と軸方向磁場を印加した場合の図7(d)とを比較すると、軸方向磁場のほうが垂直方向磁場よりも凝集数 N が減少し、圧力差が小さくなる。この理由として、軸方向磁場を印加した場合、凝集した粒子について、垂直方向磁場を印加した場合と比べて軸方向に対する微小な温度差により、ブラウン運動による粒子の分散力が軸方向において変化するため、粒子が分散しやすくなることが考えられる。

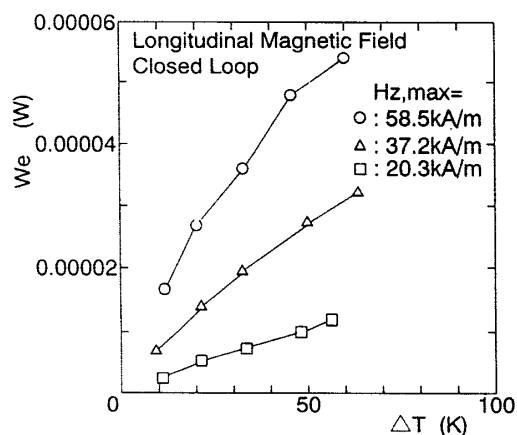
4.2 エネルギー変換装置における効率 閉ループ



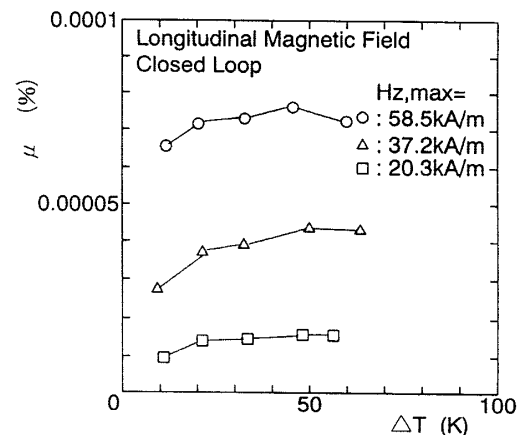
(a) Power in the case of transverse magnetic field



(c) Efficiency in the case of transverse magnetic field



(b) Power in the case of longitudinal magnetic field



(d) Efficiency in the case of longitudinal magnetic field

Fig. 8 Relation of power and efficiency to temperature difference in the case of closed loop

プのエネルギー変換装置の式(5)による動力 W_e と効率 μ の実験結果の温度差による変化を、垂直方向磁場を印加した場合と軸方向磁場を印加した場合についてそれぞれ図 8(a)～(d)に示す。

温度差による動力の変化は、4・1 節における温度差と流速の関係と同様の定性的変化を示す。すなわち、動力の変化は、流速の変化に支配される。

一方、垂直方向磁場を印加した場合、最大磁場強度が小さいときには、温度差の増加に従って、動力は急激な増加を示す。このとき、4・1 節における温度差と圧力差の関係における物理的考察を導入すると、最大磁場強度が小さい垂直方向磁場を印加したときには、温度差の増加に従い、 ξ の減少による $\Delta\eta$ 減少の効果が打ち消され、その効果がより大きく表れる一方、磁気圧力差が大きくなるため流速が増加する。その結果、動力は温度差の増加に従い急激に増加する。一方、温度差の増加に従って与える熱量は増加するが、その増加率は、動力の増加率よりも小さいため、温度差の増加に従い効率は依然として増加したままである。

また、最大磁場強度が大きい垂直方向磁場を印加したときには、温度差の増加に従って、動力の急激な増加率は小さくなる。このとき、温度差の増加に伴う流速の増加が緩慢となり $\Delta\eta$ への温度変化の効果が現れるため、4・1 節における温度差と圧力差の関係に対する物理的考察で述べたような理由から、凝集数 N が増加し、流速の増加率が減少する。その結果、温度差の増加に従って動力の増加率が減少する。一方、温度差の増加に従って与える熱量は増加するが、その増加率は、動力の増加率よりも大きくなるため、温度差の増加に従い効率の増加率が減少する。

これに対して、軸方向磁場を印加した場合には、最大磁場強度の大小に関係なく、温度差の増加に従って、動力の増加率が小さくなる。このとき、4・1 節における温度差と圧力差の関係に対する物理的考察で述べたような理由から、最大磁場強度が大きい垂直方向磁場を印加したときと同様に、温度差の増加に伴う流速の増加が緩慢となり $\Delta\eta$ への温度変化の効果が現れるため、凝集数 N が増加し、流速の増加率が減少する。その結果、温度差の増加に従い、動力の増加率が減少する。一方、温度差の増加に従って与える熱量は増加するが、その増加率は、動力の増加率よりも大きくなるため、温度差の変化に対して効率はほぼ一定となる。

この結果は、垂直方向磁場とは大きく異なる点であり、温度変化による効率の変化を大きくとるには、垂直方向磁場を印加したほうがよいことがわかる。また、垂直方向磁場のほうが軸方向磁場よりも温度差が

ごく小さいとき以外は、エネルギー変換装置の効率が大きい。

以上の結果より、動力が効率に及ぼす凝集の影響が、印加する磁場の方向により変化することがわかる。

5. 結 言

エネルギー変換装置における粒子の凝集の影響について理論的に考察することを目的とし、水平に配置した場合でのエネルギー変換装置における流動特性の実験結果に関して、磁気圧力差のほかに凝集による見掛け粘度の増加を含む粘性抵抗力をも考慮することにより、凝集の及ぼす影響について理論的考察を行った。また、印加する磁場の方向の依存性についても考察を行った。その結果、凝集は、温度差に対する圧力差、および流速、動力、効率に影響を及ぼすが、そのときの圧力差、および流速、動力、効率に及ぼす凝集の影響による定性的変化の傾向は、それぞれお互いに密接な関係をもつことが判明し、また、印加する磁場の方向の依存性をもつことが半明した。要約すると、次のようになる。

- (1) 温度差に対する圧力差と動力の定性的変化は、温度差に対する流速の定性的変化と同様である。
- (2) 温度差に対する圧力差、および流速、動力、効率に及ぼす凝集の影響は、 ξ および流速の $\Delta\eta$ に及ぼす影響としてとらえることができる。
- (3) 流速の $\Delta\eta$ に及ぼす影響が支配的である場合、印加する磁場の方向や磁場強度に対して依存性をもつ傾向が強くなる。
- (4) 軸方向磁場を印加した場合とは対照的に、垂直方向磁場を印加した場合には、最大磁場強度の大小により、 $\Delta\eta$ に及ぼす ξ および流速の両方の影響が現れる。その結果、温度差の変化による効率の変化が大きくなる。
- (5) 最大磁場強度が大きい垂直方向磁場を印加した場合や最大磁場強度の大小にかかわらず軸方向磁場を印加した場合には、 $\Delta\eta$ に及ぼす流速の影響が支配的となる。その結果、温度差の変化による効率の変化はほぼ一定となる。

文 献

- (1) 神山新一, 磁性流体入門, (1989), 58, 産業図書。
- (2) 武富荒・近角聡信, 磁性流体, (1988), 57, 日刊工業。
- (3) 神山新一, 機誌, **96**(1993), 896-899。
- (4) Resler, E. L. Jr., and Rosensweig, R. E., *AIAA J.*, **2** 8 (1964), 1418-1422。
- (5) Resler, E. L. Jr., and Rosensweig, R. E., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **A3**-89(1967), 399-406。
- (6) Barclay, J. A., *J. Appl. Phys.*, **53**-4(1982), 2887-2894。

- (7) Matsuki, H., ほか 2 名, *IEEE Trans. Magn. Mag.*, **13** (1977), 1143-1145.
 - (8) Matsuki, H. and Murakami, K., *J. Magn. Magn. Mat.*, **65**(1987), 363-365.
 - (9) 山口博司・ほか 2 名, エネルギー資源, **17**-1(1996), 88-95.
 - (10) 山口博司・ほか 2 名, 機講論, No. 96-15(1996), 107-108.
 - (11) 山口博司・ほか 2 名, 機講論, No. 96-15(1996), 109-110.
 - (12) 中谷功・高橋務, 機講論, No. 96-15(1996), 105-106.
 - (13) Kamiyama, S. *Trends Chem. Eng.*, **1**(1993), 393-399.
 - (14) Shimada, K. and Kamiyama, S., *JSME Int. J.*, **37** 1 (1994), 71-76.
 - (15) McTague, J. P., *J. Chem. Phys.*, **51**-1(1969), 133-136.
 - (16) Shimada, K. and Kamiyama, S., *J. Magn. Magn. Mat.*, **122**(1993), 214-216.
-