

磁性流体の熱伝導率に関する研究

竹越 栄俊, 柴田 豊広*, 平澤 良男, 小坂 暁夫

A Study on Thermal Conductivity of Magnetic Fluid
Eisyun Takegoshi, Toyohiro Shibata, Yoshio Hirasawa, Akio Kosaka

In this study, the thermal conductivity of magnetic fluids of kerosene base and water base was investigated in the change in volume fraction of dispersed phase consisting of magnetite and surfactant. The thermal conductivity was measured by the transient hot wire method in the range of 5-55°C. On the other hand, the three theoretical equations for the thermal conductivity of a mixture were calculated for the magnetic fluids and were compared with the experimental values. Consequently, the equation by the coating model of Kerner was nearest to the experimental values.

Key words: Magnetic fluid, Thermal conductivity, Transient hot wire method, Thermal conductivity model

1. はしがき

強磁性体の微粉を液体中に分散させた磁性流体は磁気に反応する流体として注目され、回転軸シール、ブレーキやクラッチ、あるいは回転レギュレータ等への応用が考えられ、特にマイクロマシン等への応用が構造上有利であると考えられている。磁性流体の物理・化学的性質についてはかなり解明されているが、熱伝導率については系統的研究がなされていない。

本研究では、ケロシンベース及び水ベースのマグネタイト系磁性流体について、温度及びマグネタイト微粉等の濃度を変化させて熱伝導率の実験を行い、混合物の代表的な熱伝導率推算式であるKernerの式、Euckenの式との比較を行った。

記号

- v : 分散相の体積率
- λ : 熱伝導率
- k_1 : 熱伝導率比 (λ_1 / λ_c)
- k_2 : 熱伝導率比 (λ_2 / λ_c)

添字

- 1 : 分散相 1 (もしくはマグネタイト)

- 2 : 分散相 2 (もしくは界面活性剤)
- c : 連続相 (もしくはベース流体)
- m : 混合物 (もしくは磁性流体)

2. 実験装置及び方法

図1は本研究における実験装置の概略図である。大きなデュワー瓶⑧(内径120mm)の中に、上部の気密フランジ④からステンレス管⑥(外径25mm, 肉厚1mm)によって黄銅製の真空容器⑩(外径102mm, 高さ285mm)が吊り下げられている。デュワー瓶の中には氷水が入れられ、真空容器の表面温度を0°Cに保持できる。一方、真空容器の中心部には、銅製の試料容器⑪(内径33mm, 肉厚2.5mm, 高さ110mm)が断熱台⑭の上に置かれている。試料容器の外周にはヒータ線⑬が巻かれ、直流PID制御により約0°Cから数十°Cまで任意に温度設定(変動値0.02°C以内)できる。

実験方法は真空容器を排気し、試料容器の周りのヒータに通電して目的とする温度を得る。次いで非定常熱線法を用い、試料容器の中に設置された白金線(直径50 μ m)に通電して行った。その装置の詳

* 愛知機械

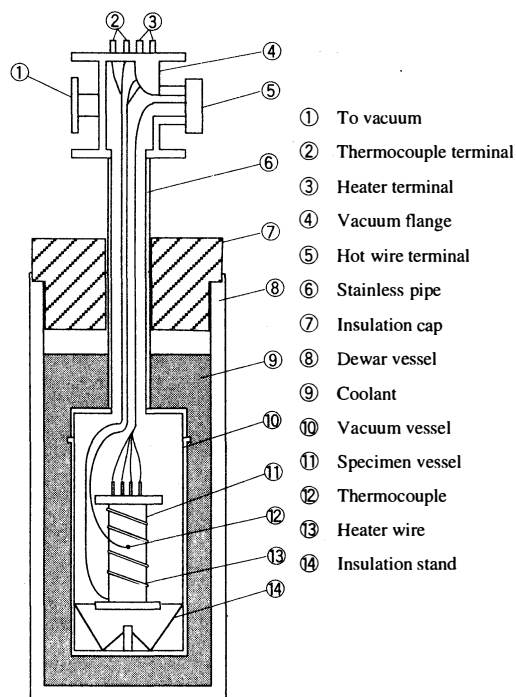


Fig. 1 Outline of measurement apparatus

細は既に発表^[1]しているなのでここでは省略する。
 なお、水ベース磁性流体では少し導電性があったので、電極及び白金線をエナメル系のラッカーで薄く塗装した。

3. 実験試料

本研究では、実験試料としてケロシンベース磁性流体（タイホー工業製，フェロコロイドHC-50）及び水ベース磁性流体（同W-40）を用いた。これはケロシン又は水中に、分散質として数十nmのマグネタイト（ Fe_3O_4 ）微粉を分散させたものである。それぞれの密度はHC-50では $\rho = 1.39g/cm^3$ ，W-40では $\rho = 1.42g/cm^3$ である。この磁性流体の成分質量割合(%)を表1に示す。ここで、オレイン酸及びドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム（以下SDBSと命名）は、マグネタイトをベース流体中に分散させるための界面活性剤である。本実験では表1の成分の磁性流体原液，並びにこれらをベース流体で希釈した試料を用いた。希釈するとき，ホモジナイザーを用いて攪拌した。表2にこれらの試料のマグネタイトと界面活性剤の体積割合(%)を示す。No. 5及びNo. 9の試料は原液で，その他が希釈した試料である。表2の体積割合は成分の真密度から計算によって求めた。そのとき，水，マグネタイト及びオレイ

Table 1 Composition of magnetic fluid (mass %)

	Base fluid	Magnetite	Surfactant	
			Oleic acid	Sodium dodecylbenzen-sulfonate
Kerosene base (HC-50)	42	50	8	-
Water base (W-40)	46	40	8	6

Table 2 Volume fraction of magnetite and surfactant in magnetic fluid

Specimen	Base fluid	Magnetite v_1 (%)	Surfactant v_2 (%)
No. 1	Kerosene	1.7	1.5
No. 2		3.7	3.4
No. 3		6.2	5.7
No. 4		9.3	8.6
No. 5		13.5	12.4
No. 6	Water	2.1	4.4
No. 7		4.5	9.6
No. 8		7.4	15.8
No. 9		11.0	23.5

ン酸の密度は文献よりそれぞれ1.00, 5.18, 0.90g/cm³とし，またケロシンはメーカーのデータより0.79g/cm³とし，SDBSは不明であったので推測により0.79g/cm³とした。なお，水ベース磁性流体では2種の界面活性剤が使用されているが，表2の値はこれらの和を示している。

4. 実験結果及び考察

この装置の精度を調べるために，純水を用いて5-55℃の範囲で予備実験をして文献値と比較したところ， $\pm 2\%$ の誤差内に入った。図2に磁性流体の構成液体であるベース流体及び界面活性剤の熱伝導率の温度による変化を示す。水は正確な文献値があるのでそれを示した。ケロシン及びオレイン酸は測定値を示すが，温度上昇とともに僅かに減少する。もう一つの界面活性剤であるSDBSは試料が入手できなかったので，測定していない。なお，マグネタイトの熱伝導率は文献より5.3 W/(m·K)で温度によらず一定とした。図3はNo. 5とNo. 9の試料の熱伝導率と温度との関係を示す。ケロシンベースの磁性流体は温度上昇とともに λ_m は減少し，また水ベースの場合は逆に増大するが，いずれもベース流体の熱伝導率の影響を強く受けている。

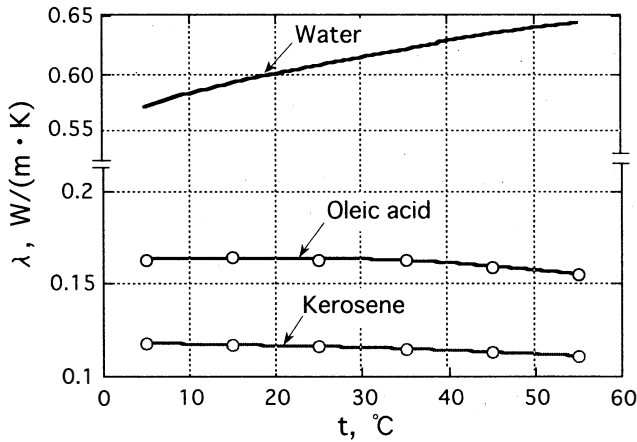


Fig. 2 Thermal conductivity of base fluid and surfactant composing magnetic fluid

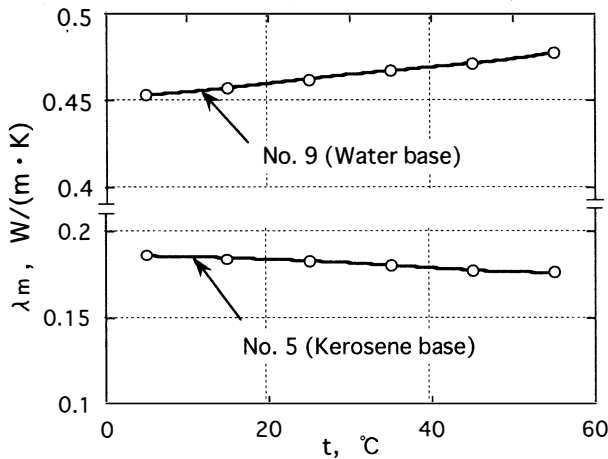


Fig. 3 Change in thermal conductivity of magnetic fluids with temperature

図4及び図5は分散質（マグネタイトと界面活性剤の和）の体積率と熱伝導率比との関係を示している。図の○印は実験値、実線はKerner^[2]またはEucken^[3]の理論式から計算した値である。理論式は、いずれも連続相の中に球状の分散質が分散した混合物の電気伝導率推算式を、熱伝導にアナログしたものである。彼らはn相の分散質の場合について理論式を求めているが、ここでは簡単のために分散質が2相の場合を考え、図6(a)に示すように一つの分散質の表面にもう一つの分散質がコーティングされた状態で分散している場合と、同図(b)のように二種の分散質が別々に分散している場合を考える。Kerner（コーティング）の式が図6(a)に対応し、それを以下に示す。この場合、分散相2がコーティング相である。

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_c} = \frac{(1 - v_1 - v_2) + k_1 \cdot v_1 \cdot E_1 + k_2 \cdot v_2 \cdot E_2}{(1 - v_1 - v_2) + v_1 \cdot E_1 + v_2 \cdot E_2} \quad (1)$$

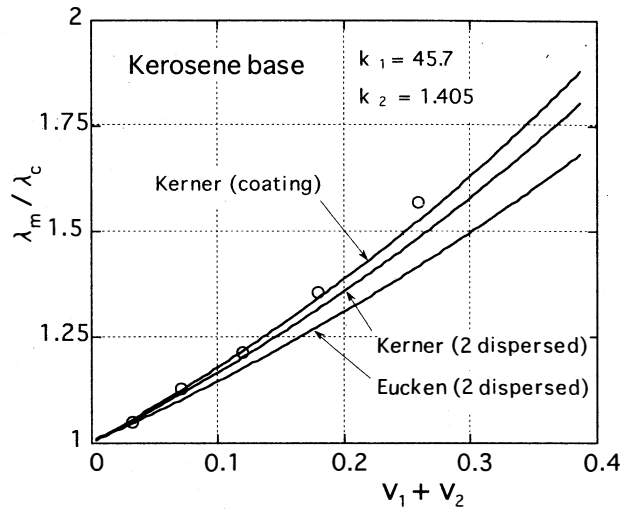


Fig. 4 Relation between thermal conductivity ratio of kerosene base magnetic fluid and volume fraction of dispersed phase

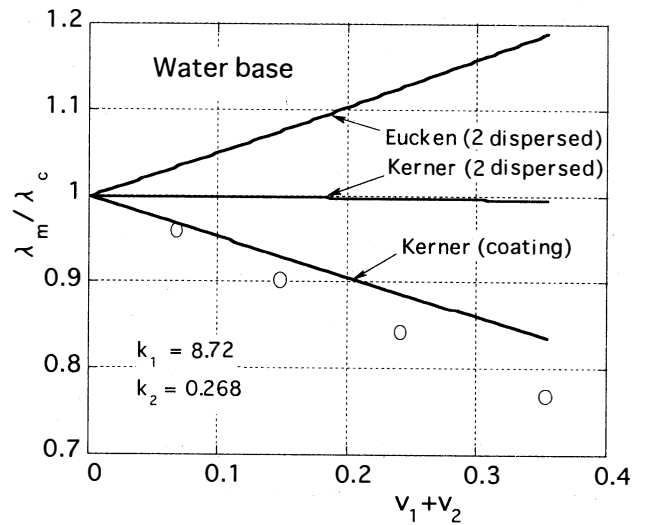
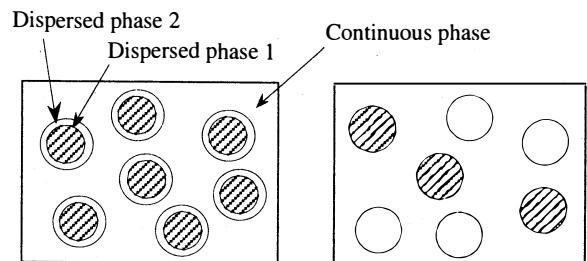


Fig. 5 Relation between thermal conductivity ratio of water base magnetic fluid and volume fraction of dispersed phase



(a) Coating model (b) Two dispersed model

Fig. 6 Mixed model of continuous phase and dispersed phase

$$E_1 = \frac{9k_2}{(k_1+2k_2)(k_2+2)+2\left\{v_1/(v_1+v_2)\right\}(1-k_2)(k_2-k_1)}$$

$$E_2 = \frac{3(k_1+2k_2)}{(1+2k_2)(k_2+2)+2\left\{v_1/(v_1+v_2)\right\}(1-k_2)(k_2-k_1)}$$

また、Kerner (2分散質) の式とEucken (2分散質) の式は図6 (b)に対応し、それぞれ以下に示す。

Kerner (2分散質)

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_c} = \frac{(1-v_1-v_2)+3k_1v_1/(k_1+2)+3k_2v_2/(k_2+2)}{(1-v_1-v_2)+3v_1/(k_1+2)+3v_2/(k_2+2)} \quad (2)$$

Eucken (2分散質)

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_c} = \frac{2(1-v_1-v_2)+k_1(1+2v_1)+k_2(1+2v_2)}{(2+v_1+v_2)+k_1(1-v_1)+k_2(1-v_2)} \quad (3)$$

本研究では、分散質1としてマグネタイトを、分散質として界面活性剤を想定して計算した。表1に示したように水ベース磁性流体では界面活性剤として2種類の混合物を使用しているが、このうちSDBSの熱伝導率が不明であるので、計算ではこの2種の混合した界面活性剤の熱伝導率としてオレイン酸の値を用いた。

ケロシンベース磁性流体の場合、図4に示したように分散質の体積率の増加とともに λ_m/λ_c の実験値は増大する。各理論式の計算値も同様に体積率の増加で増大するが、Kerner (コーティング) の式が実験値に近く、Euckenの式がいちばん離れている。水ベースの場合では、図5からわかるように実験値は分散質の体積率の増加とともに減少する。一方、理論式を見ると3式の値は大きく異なり、Kerner (コーティング) の式が減少するのに対し、Euckenの式は増大し、Kerner (2分散質) の式はほとんど変化しない。このうち、Kerner (コーティング) の式が実験値にいちばん近い値を示すが、それでも実験値よりもかなり大きい。これは計算において界面活性剤の熱伝導率としてオレイン酸の熱伝導率を用いたことと、もう一つはKerner (コーティング) の式がかなり薄いコーティング相を想定した式であるのに対し、本実験のコーティング相とした界面活性剤が相当厚い層であることが原因と考えられる。

5. あとがき

マグネタイト系磁性流体の熱伝導率を測定したところ、ケロシンベースの場合は分散質の体積率の増加とともに増大し、また水ベースの場合は分散質の

体積率の増加で逆に減少し、両者ともKerner (コーティング) の理論式が実験値と比較的良く一致した。

REFERENCES

- [1] E. Takegoshi, U. Watanabe, A. Kosaka, T. Yamamoto, 非定常熱線法による水-油系エマルションの熱伝導率測定, 16th Japan Symp. Thermophysical Properties, (1995),.
- [2] E. H. Kerner, The electrical conductivity of composite media Proc. Phys. Soc. London, Sec. B, 69(1956), 802.
- [3] A. Eucken, Wärmeleitfähigkeit keamlscher feuerfester Stoffe, VDI Forsch.-h., 3-353 (1932), 1