磁性流体の磁化率測定装置に関する試作研究*

松野善之^{*1}, 大嶋和喜^{*2}

Measurement Apparatus of Magnetic Susceptibility of Magnetic Fluid

Yoshiyuki MATSUNO and Kazuki OHSHIMA

This paper describes the research on a measurement apparatus of magnetic susceptibility of a magnetic fluid which is equipped with an electromagnet having very low residual magnetization and an adequate magnetic field gradient. This secures high accuracy for measurement of magnetic susceptibility. Measurement results of magnetic susceptibility with this apparatus are also reported for several kinds of magnetic fluids in various magnetic fields, temperatures and concentrations.

Key Words: Magnetic Susceptibility, Magnetic Fluid, Electromagnet, Residual Magnetization, Magnetic Field Gradient, High Accuracy

1. 結 言

磁性流体の流動特性などその挙動を正確に把握するうえで磁化率はその基本になる。磁化率測定の主な方法は原理の上から次の3種類に分類できる⁽¹⁾。第1は磁化した磁性体に作用する力の測定, 第2は磁性体の磁化によって生じる磁界の測定, 第3は電磁誘導法である。磁性流体の磁化率測定に関連した研究としては従来上述の電磁気的手法によるものが比較的多く発表されている^{(2)~(5)}。本研究では第1の力学的手法の中で代表的な方法として磁気てんびん方式を取り上げ, 磁性流体磁化率測定装置の試作研究を行った。試作装置の設計にあたっては, 特に電磁石の材質選定ならびに磁極ピースの形状決定に留意した。本装置を用いて検討を行った数種類の磁性流体の磁化特性についても合わせて述べている。

2. 主 な 記 号

 a : 任意の変数 B : 磁束密度 D : 磁性体の粒子径 D_v : 磁性体の平均粒子径 F : 磁気力 H : 磁界強さ H_s : 回路に沿った磁界強さ i : 電流 I : 磁性流体の磁化 I_s : 磁性流体の飽和磁化 I_s' : 磁性体の飽和磁化 k : ボルツマン常数 m : 供試体の質量 M : 磁気モーメント n : コイルの巻数 s : 磁気回路長さ t : 温度 $^{\circ}\text{C}$ T : 温度 K v : 供試体の体積 x, y, z : 三次元座標 $\alpha = D/D_v$ β : 単位体積当たりの磁化 δ : 単位質量当たりの磁化 μ : 透磁率 μ_0 : 真空中の透磁率

* 原稿受付 平成4年4月20日。

^{*1} 正員, 熊本大学工学部 (☎860 熊本市黒髪2-39-1)。^{*2} 学生員, 熊本大学大学院。

σ : 標準偏差

χ : 磁化率

3. 装置の概要

磁気モーメント M を不均一磁界 H の中に置くと、次式で表されるような力 F を受ける⁽⁶⁾。

$$F = (M \cdot \nabla) H \cdots \cdots (1)$$

磁界を図1に示すように設けると力 F は次のようになる。

$$F = F_z = M_x \frac{\partial H_x}{\partial Z} \cdots \cdots (2)$$

測定する試料の質量を m , 体積を v , 単位質量および単位体積当たりの磁化をそれぞれ δ および β とし, また質量磁化率を χ_m , 体積磁化率を χ_v とすると磁気モーメント M_x は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} M_x &= m\delta = m\chi_m H_x \\ &= v\beta = v\chi_v H_x \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

式(3)の関係を式(2)に代入することにより, 磁化率 χ_m, χ_v の値が力 F_z を測定することによって求められる。

$$F_z = m\chi_m H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z} = v\chi_v H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z} \cdots \cdots (4)$$

上述の考えを基本として図2に示すような磁化率測定装置を計画した。

図2において, 磁化率を測定する磁性流体試料3が電磁石4によって形成される磁界こう配中で軸方向に力を受けると, その力はアクリル製の測定かん(桿)2を介して電子てんびん1へ伝えられる。ここで測定された力はコンピュータ12によって処理されて試料の磁化率が計算される。試料が受ける力を精度良く測定するためには磁界のこう配が適切なものになっていることが必要とされるが, そのような磁界こう配が得られるように磁極ピース5の形状が定められている。磁化率を求める場合の主な因子は試料の温度と磁界の強さであるが, 試料の温度は, 所定の温度に調節された

図1 不均一磁界中の試料に作用する力

空気が空気供給タンク10より弁11を通り保護管6へ送られてその中の温度を一定に保持することにより, また磁界の強さは直流変換機8より電流計7を通過する電磁石への供給電流を調節することによってそれぞれ必要な値に保持される。

4. 装置の構成要素

図2に示す装置の主な構成要素である電磁石および磁極ピース, 電子てんびん, 空気供給装置について述べる。

4.1 電磁石および磁極ピース

電磁石および磁極ピースの計画, 設計においては特に次の三つの点に留意した。

(1) 必要な磁界強さの確保

(2) ヒステリシスを極力小さくする電磁石材料の選定

(3) 磁界のこう配がなめらかになるような磁極ピース形状の決定

初めに磁界の強さに関しては, 一般の磁性流体の磁化を飽和値近くまであげるためには磁界の強さを少なくとも0.5 MA/m程度とする必要があるが, その状態で電磁石の発熱量が過大とならないように電磁石本体の寸法ならびにコイルの巻き数を定めた。

電流を増大することによって電磁石の磁界をいったん強くしたあと, 電流を零まで下げたとき一般にヒステリシスが残る。ヒステリシスは反対方向に磁界をかけることにより見掛け上消すことはできるが, これは真の意味での消磁にはなっていないからヒステリシスが大きな材料を鉄心に用いると磁界強さが小さな領域における磁性流体の磁化の測定値にばらつきが生じるおそれがある。本装置には, ヒステリシスが小さくか

図2 磁化率測定装置

つ初期透磁率が極力小さな材料としてパーマロイを用いた。初期透磁率を小さくしたのは、この値が大きいと磁界の強さが小さな領域における磁性流体の磁化の増加率が過大となって、求めた磁化率にばらつきを生じるおそれがあるためである。使用したパーマロイの磁気特性を表1に示しそのヒステリシスをSS41と比較して図3に示す。なお磁界に関連する考え方を整理すると次のようになる。

$$\operatorname{div} B=0 \quad \cdots \cdots (5)$$

$$B=\mu H \quad \cdots \cdots (6)$$

$$M=\chi+\mu_0 \quad \cdots \cdots (7)$$

$$ni=\oint H_s ds \quad \cdots \cdots (8)$$

ただし式(8)において $H_s ds$ は回路に沿った磁位降下を示す。

次に磁性流体の磁化率の値は、式(4)の $F_z, v, m, H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z}$ の値を測定することによって求めることになるが、これらの諸因子の中で $H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z}$ の値は磁性流体の供試体設置位置前後で極力一定となるように磁界分布を形成しておくことが、測定精度を高めるために必要である。 $H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z}$ を全く一定とすることは容易

でないため本装置では磁界こう配が一定となるように磁極ピースの形状を定めたが、図4に本装置の磁界分布を磁極ピースの形状を変えた他の場合の磁界分布と比較して示す。

4・2 電子てんびんならびに空気供給装置 式(4)で示される不均一磁界の中で供試磁性流体に作用する力は、容量 430 gr (最少読取り 0.001 gr) の電子てんびんによって測定可能となっているが、測定値はインタフェースを介してパーソナルコンピュータに接続されており、直ちにデータ処理が可能となっている。

供試磁性流体の温度を任意の値を設定するとともに、測定中その温度を一定に保持するために保護管の中に置かれた供試磁性流体を収めたケースの周りに一定温度の空気を供給する装置を試験装置に組み込んでいる。表2に空気供給装置の主な仕様を示している。

5. 試 験 方 法

5・1 装置の校正 試作した磁化率測定装置の校正を行うために磁化特性が既知であるモル塩とニッケルの磁化を試作機によって測定した。それらの結果を図5, 6に示すが、測定範囲の全範囲について校正係数は1と考えてよいことがわかる。

5・2 供試体の温度制御 供試体の磁化率を測定

表 1 パーマロイの主な磁気特性

Initial specific permeability ※1	Max. specific permeability	Coercive force A/m	Magnetic flux density ※2 Wb/m ²
≥3000	≥30000	≤16	≥1.4

※1 at the magnetization of 0.8A/m

※2 at the magnetization of 800A/m

図 3 パーマロイと SS41 のヒステリシス比較

表 2 空気供給装置の主な仕様

Max. current A	Range of air temperature 'C	Flow rate of air m ³ /min
14	-35~+70	1~5

Refrigerating capacity kcal/h	Heating capacity kcal/h
200	1720

図 4 磁界分布

している間その温度を一定に保持すること、および測定条件の変更に際して供試体の温度を変化させることが必要であるが、そのために供試体の温度を常時監視することが必要とされる。供試体の温度計測には熱電対を用いているが、熱電対を直接供試体に取付けた場合熱電対に磁力が作用して供試体に力が働くため供試体に作用する力の測定値に誤差が生じる。そのために熱電対は保護管に固定して保護管内の空気温を常時測定することとし、試験前に供試体と空気の温度の相関を別途求めておくこととした。図7に両者の相関を示す。なお保護管内を流れる空気によって供試体に作用する空気力に起因する測定値の誤差をなくすために測定時には図2に示す弁11を全閉にしている。

5.3 磁界強さの変化および磁化率の測定 磁化率の測定にあたっては電磁石へ入力する電流によって磁界の強さを変化させるが、図8に供試体を設定する位置における電流と $H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z}$ の値との関係を示す。測定時には供試体の温度を一定とした状態で電流を変化させることにより磁界の強さを変化させ、そのときに

図5 モール塩の磁化特性

図6 ニッケルの磁化特性

供試体に作用する磁気力を測定して式(4)を用い磁化率を算定する。

5.4 測定例 以上に述べた磁化率測定装置を用いて数種類の磁性流体の磁化率(磁化)を求めたが、その結果について述べる。

図9には溶媒が、水、ハイドロカーボン、エステルなど、それぞれの場合の常温における磁化特性を示し、表3にはそれぞれの磁性流体の物性(密度、粘度)を示す。また図10には水ベース磁性流体の磁化率を示す。図11にはエステルベースの磁性流体について磁化特性と温度の関係を、また図12には水ベースの磁性流体について磁界の強さと磁化の関係をそれぞれ実測値と計算値を比較して示している。図11に示す磁化特性

図7 供試体と空気の温度

図8 電流と $H_x \frac{\partial H_x}{\partial Z}$ の関係

と温度の関係の計算にはランジュバン関数を用い、図 12 に示す磁化の計算値は磁性体の粒度分布が対数正規分布を取ると考えた Chantrell らの方法⁽⁷⁾ によったものであるが、実測値と計算値は磁界強さが低い領域を除いてはほぼ一致していると言ってよい。図 11, 12 の計算値を求めるために用いた主な計算式を次に示す。

$$I = I_s \int_0^\infty f(a) L\left(\frac{I_s v H}{kT}\right) da$$

表 3 供試磁性流体の物性

Solvent	Viscosity Pa·s (t=20°C)	Density Kg/m ³ (t=20°C)
	$\times 10^{-3}$	
Water	33.0	1398
Water	65.1	1412
Isoparaffin	33.3	1453
Ester	123.1	1254
Hydrocarbon	—	1097

図 9 各種磁性流体の磁化特性

図 10 水ベース磁性流体の磁化率

$$L(a) = \coth a - \frac{1}{a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$f(a) = \frac{1}{a\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(a))^2}{2\sigma^2}\right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\int_0^\infty f(a) da = 1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$a = D/D_v \quad \dots\dots\dots (12)$$

6. 結 言

磁性流体の挙動を正確に把握するためには磁化率が基本になると考えられるところから、磁気てんびん方式の磁化率測定装置の試作を行い、かたがた試作機を用いて数種類の磁性流体についてその磁化特性の検討を行った。主な結果を要約すると次のようになる。

(1) 磁化率測定装置の本体に関しては、ヒステリシスが小さい電磁石材料の選定となめらかな磁界こう配が得られる磁極ピースの形状決定に特に注意を払っ

図 11 エステルベース磁性流体の磁化特性と温度の関係

図 12 水ベース磁性流体の磁化特性

た。前者に関してはパーマロイを用い後者に関しては磁極ピース面をいくつかの折れ線でつなぐことによりほぼ所期の目的を達成した。

(2) 装置の付属装置として測定に供する磁性流体の温度制御装置を本体に組み込むにあたって、磁化率の測定値に誤差を生じないように次のような注意を払った。その一つは供試磁性流体の温度測定に熱電対を使用する場合、熱電対のリード線が磁界によって力を受けるため磁性流体の温度を直接測定することは避け、供試磁性流体を収めた保護管内の空気温を測定し、あらかじめ求めた空気温と供試体温の相関関係を用いて磁性流体の温度を求めた。また供試磁性流体の温度を制御する保護管内の空気流れが供試体に抗力として作用しないように測定法の工夫を行った。

(3) 試作した磁化率測定装置は、磁化率が既知であるモール塩、およびニッケルを用いて校正を行い、校正係数は1とおいてよいことを確認した。

(4) 試作した装置を用いて水ベース、ハイドロカーボンベース、エステルベースなどの各種磁性流体の磁化特性を測定するとともに計算値との比較を行った。磁性流体の温度と粒径分布を考慮した計算値と実

測値はほぼ一致した結果が得られたが、磁性流体の磁化を支配するその他の要因ならびに各因子が磁化を定めるメカニズムなどについてさらに今後検討を進めることが必要であると考えられる。

本研究の実施にあたりご援助いただいた三菱重工業(株)長崎研究所ならびに電磁石材料の手配にご配慮いただいた住友特殊金属(株)にお礼申し上げる。また実験に協力を得た、当時本学学生であった井村和久、大戸勝徳氏、ならびに試験結果の整理に協力を得た本学大学院学生 古賀尚氏に感謝する。

文 献

- (1) 近角, 強磁性体の物理(上), (1987), 47, 裳華房.
- (2) Buhrman, R. A. and Granqvist, C. G. *J. Appl. Phys.*, **47**-5(1976), 2220.
- (3) Söfge, F. and Schmidbauer, E., *J. Magnet. Magnet. Mater.*, **24**(1981), 54.
- (4) Fannin, P. C. and Scaife, B. K. P., *J. Magnet. Magnet. Mater.*, **72**(1988), 95.
- (5) Holms, M., O'Grady, K. and Popplewell, J., *J. Magnet. Magnet. Mater.*, **85**(1990), 47.
- (6) 近角, 磁気, (1986), 263, 共立出版.
- (7) Chantrell, R. W., Popplewell, J. and Charles, S. W., *IEEE Trans. Magnet.*, **14**-5(1978), 975.