光ファイバ・レーザを用いた磁性流体の流速測定法

東京工業大学大学院 大久保雅章

トヨタ自動車(株) 尾崎 宏

東京工業大学工学部 石橋 幸男, 大島 修造, 山根隆一郎

Masaaki Okubo, Hiroshi Ozaki, Yukio Ishibashi, Shuzo Oshima and Ryuichiro Yamane : Measurement of Magnetic Fluid Flows Using Laser Optical Fibers.

A new method to measure the velocity distribution of magnetic fluid flows using optical fibers and laser beam was developed. In this method, the local velocity of the magnetic fluid was obtained by measuring the time taken for a tracer particle to pass between two sets of fibers. After this method was adjusted with the rotational flow in a rotating channel, it was applied to the flow of a magnetic fluid in a circulation channel excited by a travelling magnetic field made by a stator of a single-sided linear induction motor. From the measurements, the induced velocity was found to be proportional to the frequency and the strength of the applied current to the inductor. It was important to choose the size of tracer particles, the wavelength of the light source and the sensitive optical detector for better results.

(Received July 6, 1989)

1. 緒言

進行磁場あるいは回転磁場作用下における磁性流体の流動, 特に誘起される流れの性質や圧力損失等について, 筆者らは実験的あるいは解析的に調べてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. しかし, 磁性流体は黒色不透明な液体であるため, 流体力学上最も重要な内部流動の速度計測が非常に行ないにくく, 流速測定のためによく使用されるレーザ流速計(LDV)は使用できない⁽⁵⁾. そのため, これらの研究に限らず従来の研究では, 磁性流体の内部流れの速度分布を精密に計測した例は皆無である. 定性的な計測例としてはピトー管や熱膜流速計を用いたもの⁽⁶⁾⁽⁷⁾が報告されているが, 磁場作用下でのこれらの流速計の検定は, 本来なら慎重な検討を要する困難な問題である. 一方, 光ファイバを用いたLDVは通常方式のLDVに比べ, 血液などの半透明流体の計測⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾に適しているが, 透明度の非常に低い磁性流体の流速測定に用いることは, 困難であろうと考えられる.

そこで本研究では, 直接光の強度は散乱光の強度に比べ数段強いことに着目し, レーザ光を光ファイバで導き, 磁性流体の局所流速を計るレーザ2焦点流速計を参考にした新たな方法を考案した. この方法の校正と進行磁場によって誘起される磁性流体の流れを計測した結果について報告する.

2. 流速計と光ファイバプローブ

流速測定装置の概略を図1に示す. He-Neレーザ光源(波長 632.8nm, 垂直偏向, 出力50mW, 型式 GLG57 30, NEC(株)製)から射出されるレーザ光を, 光学系を通して出力比1:1で2本の光ファイバ(外径1mm, コア径0.5mmのプラスチック製, 三菱レイヨン(株)製)に入射させる. プローブは2組の光ファイバを間隔0.80mmで対向させたものであり, トレーサがプローブ間に流入すると, 2組のファイバ間で順に光が通過する. その光をフォトトランジスタ(型式TPS601, 東芝(株)製)を用いた2チャンネルO/E変換器により電気信号に変換し, マイコンによりGP-IBインタフェースを介して制御されるウェーブメモリ(サンプル総数 32000点, サンプルタイム4μs~50ms, 型式8M37, NEC三栄(株)製)に取り込み, パルス信号の時間間隔を計測することにより局所流速が得られる. さらに, これらのシステムを連続運転するための制御, および信号処理ならびに統計処理用のプログラムを作成し実験に用いた.

使用した磁性流体は, 水ベース磁性流体フェリコロイドW-35(タイホー工業(株)製)を, 蒸留水で密度1050 kg/m³, 動粘度 1.57×10^{-6} m²/s(温度10°C)に希釈したものである. なお, 本システムによるこの磁性流体のレーザ光の透過距離は, 約0.48mmである. またトレーサとしては, 希釈された磁性流体と同じ平均密度をもつ, 直径0.4~0.5mmの透明なポリスチレン球をおよそ0.77個/mm³の割合で磁性流体に混入し用いた. ただし4章に述べる進行磁場下での実験では, トレーサを含む磁性流体を磁場印加部に置いた場合, 磁性流体の見かけの密度が

増加することにより、トレーサが表面に浮上し測定が困難になる。そのためこの場合、磁性流体の密度をトレーサの密度よりわずかに低く（ 1047kg/m^3 程度に）低くした。密度の調整を行なっても磁場印加部での流速測定は困難であったので、測定は磁場印加部とは反対側の直線部分で行った。なお測定時における磁性流体の温度は、 9°C から 12°C の範囲であった。

3. 回転流路による流速計の校正実験

3.1 実験装置と方法

まず初めに流速計の校正法について述べる。モータによってアクリル製円環状開流路（直径400mm、深さ15mm）を速度可変モータ、ギヤ、ベアリングなどを用いて回転させることにより一定流速の磁性流体の流れが得られるようになっている。希釈された磁性流体をこの流路に入れプローブを設置し、流路を回転数0.1～1.6rpmの範囲で回転させ流速が定常状態になった後、流速測定を行った。なお測定中に磁性流体からの水分の蒸発が起るため、密度差により流体表面にトレーサ粒子が浮上するのを目安にして、蒸留水を補給した。

3.2 実験結果および検討

前述した流速計により測定された信号例を、図2に示す。横軸が時間、縦軸が光の透過量に対応した出力電圧である。この例では、両方のチャンネル（ch. 1, 2）でパルス信号が得られているが、実際には信号が片側のch. において得られない場合がある。次に、図の点線をしきい値として2値化したものを図3に示す。図で各ch. でのパルス信号の立ち上がり時間、立ち下がり時間をそれぞれ T_1, T_2, T_3, T_4 とすると、二つのパルス信号が同一粒子によるものかどうかを、経験的に次式により判定する。

$$T_2 - (T_2 - T_1) \times 0.2 < T_3 \quad (1)$$

$$T_3 < T_2 + (T_2 - T_1) \quad (2)$$

図4に測定時間を連続に長時間として得られたパルス波形の例を示す。図で、丸で囲まれたデータが式(1), (2)を満たしているものであり、個々のトレーサの流速値として統計処理のために採用される。採用される割合は、約70%程度であった。

式(1), (2)を満たした場合、個々のトレーサの速度 V_T を次式により計算する。

$$V_T = L / [(T_3 + T_4) / 2 - (T_1 + T_2) / 2] \quad (3)$$

ここで、 L ($=0.57\text{mm}$) はch. 1とch. 2のファイバの間隔である。以上のようにして得られるトレーサの速度を多数測定し、それを統計処理することによりトレーサの平均速度を求める。

図5に磁性流体の流速 V を2～30mm/sまで変化させ、トレーサの速度のサンプル数 n を平均130点、最低100点とし、大小10%を除いたサンプルから算出される平均速度 V_{TM} を測定した結果を点で示す。 V_{TM} は磁性流体の流速 V と一致しておらず小さくなっている。

Fig.1 Laser optical fiber velocimeter.

Fig.2 Detected electric signals.

Fig.3 Digitalized electric signals.

この原因として、トレーサがプローブに衝突し一旦停止した様な状態でファイバ間に流入する、あるいはファイバ間の中央部分がファイバによる境界層の低速部分に覆われていることなどが考えられる。

次に、流速 $V=9.68\text{ mm/s}$ において、サンプル数 n を十分大きく取った場合のトレーサ速度のヒストグラムの例を図6に示す。ここで、 V_T の平均値 V_{T0} と分散 σ^2 を計算し、それから求められる正規分布曲線を実線で示した。図より、 V_T の分布はほぼ正規分布に従っている。低流速から高流速の広い範囲にわたり多数のヒストグラムを描いた結果、どの場合も大体正規分布に従っていることがわかった。そこで測定されるトレーサの平均速度と実際の流体の流速の関係式は、重み付き最小2乗法によって近似した。結果を図5に実線で校正式と共に示す。この校正式より磁性流体の正確な流速が得られる。

4. 進行磁場によって誘起される磁性流体の流れの計測

4.1 実験装置と方法

次に校正結果に基づき、進行磁場によって誘起される磁性流体の流れを計測した。装置は既報⁽⁴⁾で報告したものと同一のものである。磁性流体が入った流路（幅30mm、深さ30mm、全流路長1997mmの亚克力製回流式オープンチャンネル）の片側直線部分に、流体底面から下方向に20mm離れた位置から片側式三相リアモータのステータ（全長385mm、鉄心幅64mm、波長150mm、位相速度7.5m/s（50Hz）、神鋼電気（株）製）が置かれている。200Vの三相交流電源から供給される電流をステータのコイルに流し、進行磁場を印加して回流を誘起させている。ステータは水冷され実験時の液温は、ほぼ一定に保たれる。発生する磁場の空気中での磁束密度の半周期平均値は印加電流 I に比例し、流体底面位置で $I=5\text{ A}$ のとき15mTである。希釈磁性流体を試験流路に液深10mmで入れ、プローブを、磁場印加部とは逆の流路の中心位置に設置する。この状態で進行磁場を印加し、定常状態の後、速度の垂直方向の分布を磁場の周波数と強さを変えながら測定する。

4.2 実験結果および検討

初めに表面にアルミ粉末を浮かべた目視観察によれば、進行磁場を印加すると磁性流体は、磁場の進行方向とは逆向きに流れが誘起され、さらに磁場印加部では磁性流体の盛り上がりが生じ、表面流速は逆側のそれよりも大きくなっておりS字形の速度分布の存在が推測された。逆向きの流れが誘起される現象は、回転磁場における磁性流体の旋回流に関する報告⁽³⁾において、主として中央付近に逆方向に流れが生ずる現象に対応していると考えられる。つまり逆に流れる原因は、進行磁場による磁性流体への磁気体積力よりも磁性粒子のスピンの逆方向に流れようとする力が

Fig.4 Examples of the pulse signals.

Fig.5 Relation between velocity of magnetic fluid and that of tracers.

Fig.6 Example of velocity histogram of tracers.

勝っているためと考えられる。

図7(a), (b)に、速度分布の測定結果を示す。これらの図では横軸に流速 V 、縦軸に流路底面からの距離 y がとってある。流速分布の形状は、どの結果もほとんど放物線状であり、流速は各測定点においていずれも磁場の周波数 f または電流 I にほぼ比例している。

4. 3 本測定法の改良について

本実験では、従来の方法に比べ比較的高い濃度の磁性流体の流速を比較的良好な精度で測定することができたが、光透過性や検出感度の問題から、プローブの間隔は狭くせざるをえず、そのためトレーサの平均速度と流体の速度が一致しなかったため、校正を別流路で行う必要が生じた。レーザ光の波長を1000nm程度にすると透過距離がかなり増すことが報告⁽¹¹⁾されており、半導体レーザなどにより、この程度の波長の光を用い、受光素子に光電子増倍管などの感度の良いものを使用すれば、プローブの間隔を広げることができると思われる。また、トレーサ粒子が浮上するという問題のため、最も興味深い磁場印加部での流れの測定は行えなかったが、これについては、トレーサとしてさらに微小径の粒子を使用する、あるいは気泡などを用いることで可能となるであろう。また一点での測定に要する時間が1時間程度かかる点も、改良すべき今後の検討課題である。

5. 結言

レーザ光を光ファイバで導き磁性流体中のトレーサの速度を測定することにより局所流速を計る新しい方法を考案し、その校正と進行磁場により誘起される磁性流体に誘起される流れへの適用を行った。その結果、誘起される流れは、進行磁場の進行方向とは逆向きであり、実験範囲内で流速は周波数、磁場の強さに対して比例していることがわかった。測定においてさらに精度のよい結果を得るためには、プローブ付近の流れの検討やトレーサ粒子、光線の波長や受光素子の選択が重要である。

終わりに、本実験に協力して頂いた広瀬栄氏（当時卒研学生）に感謝する。また本研究は昭和62年度文部省科学研究費一般研究Cの援助を受けて行なわれた。

引用文献

- (1) R.Yamane, Y.Ishibashi and A.Inagaki: J. Mag. Mag. Mat., 65, 2&3 (1987), 324.
- (2) 大久保, 石橋, 大島, 山根: 日本機械学会論文集, 53, 493, B (1987), 2720.
- (3) 大久保, 石橋, 大島, 山根: 日本機械学会論文集, 54, 505, B (1988), 2383.
- (4) 尾崎, 大久保, 石橋, 大島, 山根: 磁性流体連合講演会論文集, (1988), 25.
- (5) 山根: 特殊流量計と流量計測に関する調査研究報告書, 日本機械学会 (1988), 74.
- (6) M.M.Maiorov and A.O.Tsebers: Mag. Gidro., 15, 2 (1979), 13.
- (7) I.Anton, L.Vekas, I.Potencz and E.Suciu: IEEE Trans. Mag., MAG-16, 2 (1980), 283.
- (8) 大場, 松野: 日本機械学会論文集, 49, 447, B (1983), 2380.
- (9) H.Nishihara, J.Koyama, N.Hoki, F.Kajiya, M.Hironaga and M.Kano: Appl. Optics, 21, 10 (1982), 1785.
- (10) D.Kilpatrick, J.V.Tyberg and W.W.Parmley: IEEE Trans. BME, BME-29, 2 (1982), 142.
- (11) 稲葉, 宮島, 武富, 高橋, 近角: 日本物理学会予稿 (1988).

(a) Effect of applied current to the inductor.

(b) Effect of the frequency of the current.

Fig.7 Measured velocity distributions.