

ERF 回転レギュレータの静特性と設計*

島田 邦雄^{*1}, 藤田 豊久^{*2}, 岩渕 牧男^{*1}
西田 均^{*3}, 奥井 健一^{*1}

Static Characteristics and Design of Rotating Regulator with ERF

Kunio SHIMADA, Toyohisa FUJITA, Makio IWABUCHI,
Hitoshi NISHIDA and Kenichi OKUI

As a new type of engineering applications with using ER fluid, we propose rotating regulator that has also a role of braking device. Experimental study of static characteristics is conducted on. Experimental data of torque at a given angular velocity are arranged with taking into account the apparent viscosity for the purpose of convenient engineering designing. The static characteristics of current density and electric power as well as the apparent viscosity depend on the electric field strength and the gap of electrodes in the device. Time response of these characteristics to the applying electric field are also clarified.

Key Words: ER Fluid, Rotating Regulator, Braking Device, Electric Field, Non-Newtonian Fluid, Shear Flow, Rotating Reynolds Number, Moment Coefficient, Apparent Viscosity, Current Density, Torque, Static Characteristics, Transient Respons, Colloidal Suspension, Rotary Machinery

1. 緒 言

電場に反応する機能性流体として、電気粘性流体(通称, ERF)がある⁽¹⁾が、最近、流体としての不安定性などの多くの問題点が解決されてきており⁽²⁾、応用開発における研究も活発化してきている。例えば、自動車などへの応用として、ダンパやクラッチが挙げられる⁽³⁾。しかしながら、これらの応用を含めて、一般にまだまだ実用化に至っていないのが現状である⁽⁴⁾。

著者らは、これまで提案された ERF を用いたさまざまな応用機器以外の応用例として、制動装置を提案してきた⁽⁵⁾。これは、電場を印加することによって生ずる ERF の見掛け上の粘度増加を利用し、すなわち、回転体との間に生ずる流体の円板に作用する摩擦を電場により変化させることにより、回転体の運動を制御しようとするものである。この制動装置は、広範囲な回転数にわたって回転レギュレータとしての役目も併せもつ。

本研究では、この回転レギュレータの基本特性について、実験的に研究を行う。すなわち、コロイド系 ERF を用いて、電場強度や装置内の電極間距離によるトルクや電流密度の静特性の変化、および、これらの測定値の時間的応答性について実験的に検討する。また、工学的実用性としての設計を目的として、見掛け粘度をデバイスにおける代表ずり速度により整理することによって、無次元化した実験式を導く手法についても提案する。

2. おもな記号

a : 定数
 C_m : 回転モーメント係数
 D_0 : ずり速度 s^{-1}
 E : 電場強度 kV/mm
 G : 電極間距離 mm
 I : 電流密度 A/m^2
 N : 回転数 rpm
 n : 定数
 Re : 回転レイノルズ数
 r_0 : 回転円板の軸半径 mm
 r_1 : 回転円板の半径 mm
 T : トルク $mN \cdot m$

* 原稿受付 1997年9月4日.

*¹ 正員, 富山大学工学部(☎930-8555 富山市五3190).*² 正員, 秋田大学工学資源学部(☎010-8502 秋田市手形学園町1-1).*³ 正員, 富山職業能力開発短期大学校(☎937-0856 魚津市川縁1289-1).

- V : 電圧 kV
 W : 回転円板の厚さ mm
 μ_e : 見掛け粘度 Pa·s
 ρ : ERF の密度 kg/m³
 ω : 回転角速度 = $2\pi N$ s⁻¹

3. 試験装置および実験方法

著者らが提案する回転レギュレータの試験装置の特性を調べる実験における全体概略図を図1に、また、回転レギュレータ本体の概略図を図2に示す。

回転レギュレータ本体は、ERFの中に浸された半径 $r_1=45$ mm の黄銅製の回転円板とその ERF が封入されたアクリル製のケーシングよりなる。そのケーシング内に取付けられた黄銅製の電極板としての回転円板と流体中の回転円板との間に、外部から高電圧が印加される。また、回転円板は、半径 $r_0=5$ mm の軸と回転円板の厚さ $W=8$ mm をもつ。

ケーシングは、外部から一定に温度が制御された冷却水が入出する出入口をもち、熱交換器としての役割をもつ。また、ケーシングに取付けられた熱電対により、そのときの ERF の温度が計測され、本実験では、

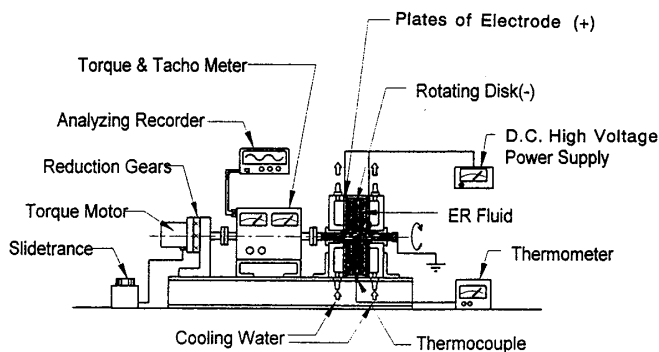


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus of rotating regulator

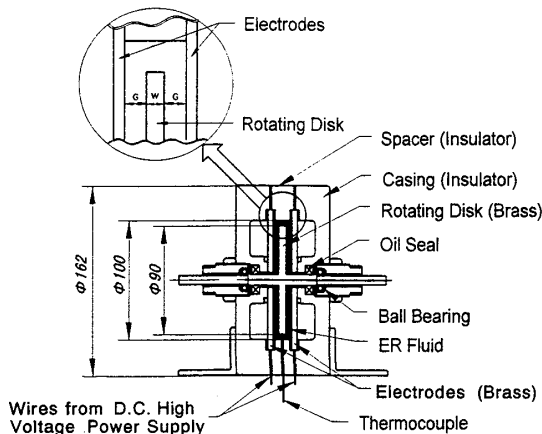


Fig. 2 Schematic diagram of rotating regulator

20°C に設定する。

電極間距離 G は、1.0, 1.5, 2.0, 3.0 mm の 4 種類である。

この装置は、実用の際には、動力源(例えば、エンジンやモータなど)と回転数が伝達される回転物体(例えば、ホイールなど)との間に設置されて使われる。そのとき、装置内の回転円板のもつ流体摩擦の電場印加による付加の変化が動力源に掛かるのを防ぐために、この装置と動力源の間にはクラッチを設けて、電場印加の際のクラッチの制御を行う必要がある。また、回転数が伝達される回転物体の慣性モーメントが回転レギュレータの特性に及ぼす影響についても検討する必要がある。しかしながら、本実験では、まず第1段階の研究として、回転レギュレータの特性に及ぼす電場の影響について検討することを目的とするため、クラッチや回転数が伝達される回転物体は取付けずに、図1に示すような試験装置を用いる。

すなわち、動力源としてのトルクモータに、この装置を連結させる。また、これらにトルクメータと回転計を挿入させ、電場印加時の回転円板に作用するトルクと回転数が時間的に測定される。本実験における実験範囲は、回転数 $N=30\sim 260$ rpm (回転角速度 $\omega=2\pi N=3.0\sim 27.2$ s⁻¹) である。また、印加する電圧 V は、0.5~3 kV の直流である。このときの ERF 内における電流も同時に時間計測する。

使用する ERF は、nm オーダのス멕タイトの粒子をシリコンオイル中に、質量濃度 6.93% で一様に分散させた一種のコロイド溶液である。また、密度 $\rho=1043.7$ kg/m³ である。

4. 実験結果および考察

4.1 性能特性

まず、図3に、本試験装置にお

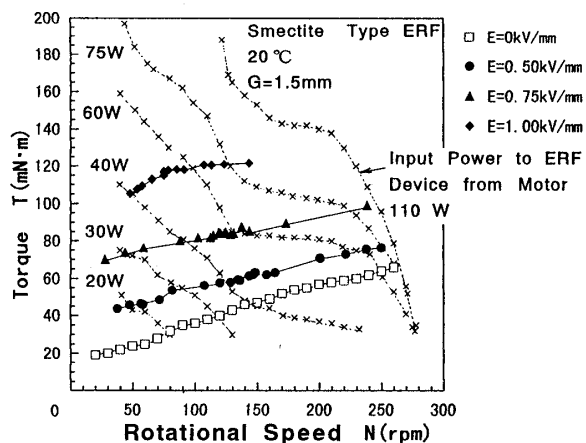


Fig. 3 Relation between rotational speed N and torque T

る回転レギュレータの回転数 N に対するトルク T の変化を示す。

実験値は、電場を印加してから定常の値に達したときのものである。図3中の罫印上の曲線に沿って、本実験で使用したトルクモータの性能が変化する。この曲線に沿って、電場印加により回転数 N およびトルク T が変化する。このように、電場を印加することにより、回転数 N を変化させることができる。すなわち、図3は、回転レギュレータの性能曲線を表す。ここで、電場強度 E の大きさによって、回転数 N が零になるとき、この装置は、ブレーキングデバイスとして働くことになる。

4.2 設計のための実験式 次に、本試験装置の回転レギュレータにより得られた回転数 N とトルク T の実験値を用いて、実際に設計を行う際に必要となる実験式について検討する。

図3で考察したように、回転数 N によりトルク T が変化するから、ERFの見掛け粘度 μ_e はずり速度の関数になることがわかる。そこで、まず、式(1)に示すような回転円板の外周部におけるずり速度を代表値 D_0 にとり、この D_0 を用いて実験値を整理する。図4に、その一例を示す。

$$D_0 = \frac{r_1 \omega}{G} \dots\dots\dots (1)$$

ずり速度の代表値 D_0 の増加に伴い、トルク T が増加する。

回転円板とケーシングの電極間と、円板の側面において、ずり速度に式(1)のような近似を用いるとすれば、見掛け粘度 μ_e が、トルク T と回転角速度 ω を用いて次式(2)のように表される。

$$\mu_e = \frac{TG \times 10^6}{\pi \omega (r_1^4 - r_0^4 + 2Wr_1^3)} [\text{Pa}\cdot\text{s}] \dots\dots\dots (2)$$

今、図4より、この見掛け粘度 μ_e が、代表のずり速度 D_0 の関数であると考えられるので、見掛け粘度 μ_e が、代表のずり速度 D_0 のべき乗則で次式(3)のように表されるとする。

$$\mu_e = aD_0^{n-1} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a, n は、定数であり、実際には、実験値から、電場強度 E を用いて、本実験条件の範囲内において次式(4)のように表される。

$$\begin{aligned} a &= 1.14 \times 10^2 E^2 - 3.27E + 2.96 \\ n &= -1.63 \times 10^2 E^3 + 6.30 \times 10^{-1} E^2 \\ &\quad - 9.14 \times 10^{-1} E + 6.47 \times 10^{-1} \\ &(0 \leq E [\text{kV/mm}] \leq 1.00, 3.0 \leq \omega [\text{s}^{-1}] \leq 27.2) \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

見掛け粘度 μ_e を用いて、回転レイノルズ数 Re が

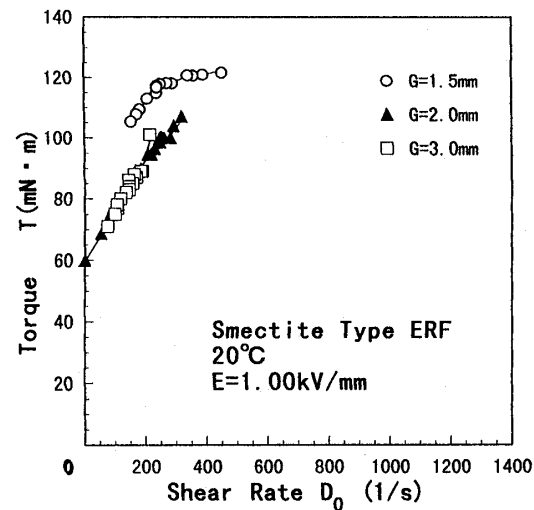
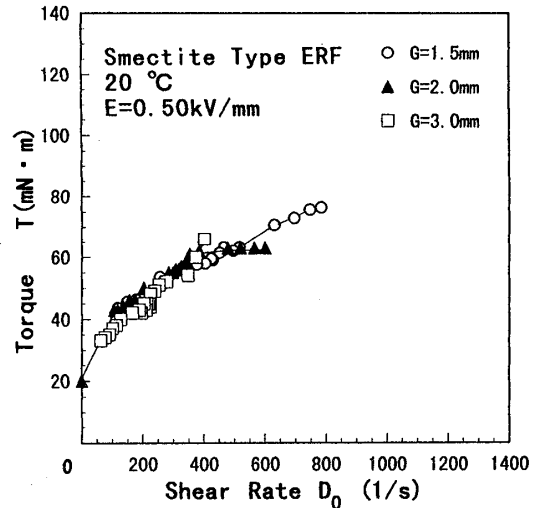


Fig. 4 Relation between shear rate D_0 and torque T

次式(5)のように定義される。一方、回転モーメント係数 C_m も次式(6)のように定義される。

$$Re = \frac{\rho r_1^2 \omega}{\mu_e} \times 10^{-6} \dots\dots\dots (5)$$

$$C_m = \frac{2T}{\rho r_1^5 \omega^2} \times 10^{12} \dots\dots\dots (6)$$

また、式(5)、(6)から次式(7)が得られる。

$$C_m = \frac{2\pi(r_1^4 - r_0^4 + 2Wr_1^3)}{GRe r_1^3} \dots\dots\dots (7)$$

図3に示すようなトルク T と回転数 N の静特性変化を表す実験値について、式(5)、(6)を用いて無次元表示したときの一例を図5に示す。図5中の直線は、式(7)で表される値である。

同じ Re 数に対する C_m の実験値は、電場強度 E の大きさによっては式(7)による値より多少定量的差がみられる場合がある。これは、ERFの降伏応力の存在や、せん断応力とずり速度の非線形性に起因するも

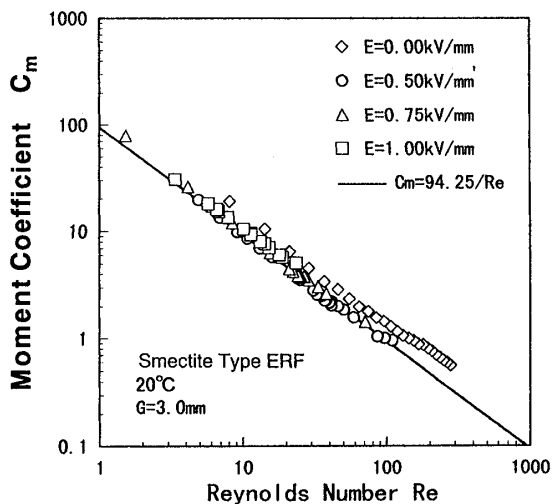


Fig. 5 Relation between rotating Reynolds number Re and moment coefficient C_m

のと考えられる。しかしながら、式(2)~(7)により、電場強度 E やデバイスの寸法である電極間距離 G 等が決まると、本供試 ERF の場合には、回転数 N に対するトルク T の値が一義的に決定され、図1に示すような回転レギュレータの性能特性曲線が得られることになる。

4・3 電気的特性 図6に、代表ずり速度 D_0 に対する電流密度 I の静特性の変化の一例を示す。

同じ大きさの電圧で、しかも同じ大きさのずり速度 D_0 で、電極間距離 G が小さいと電流密度 I が大きくなる。この理由は、電極間距離 G が小さくなると、電場印加により凝集した粒子のクラスタの長さが小さくなり、また、クラスタの断面積が大きくなるため、見掛け上、ERF の抵抗が小さくなり、したがって、電流密度 I が大きくなることによる。

また、図4と比較すると、代表ずり速度 D_0 に対するトルク T の変化と電流密度 I の変化には特に対応性のみられる傾向は見いだせない。

一方、代表ずり速度 D_0 に対する装置に投入した電力 W の静特性の変化については、図6の場合の結果と同様に、得ることができて、代表ずり速度 D_0 に対する電流密度 I の静特性の変化と同じ定性的な結果が得られる。すなわち、同じ大きさの電圧で、しかも同じ大きさのずり速度 D_0 で、電極間距離 G が小さいと電力 W が大きくなる。この理由は、電極間距離 G が小さくなると、ERF の抵抗が小さくなり、電流密度 I が大きくなって過剰に電流が流れやすくなることによる。したがって、図4に示すように、同じ大きさの電圧で、しかも同じ大きさのずり速度 D_0 において、電極間距離 G が小さいとより大きなトルク T が得ら

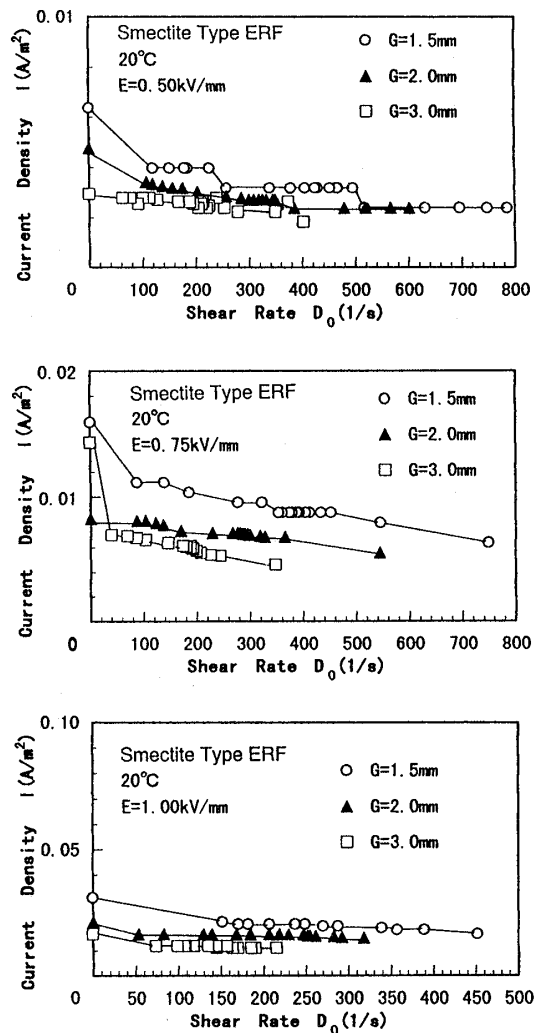


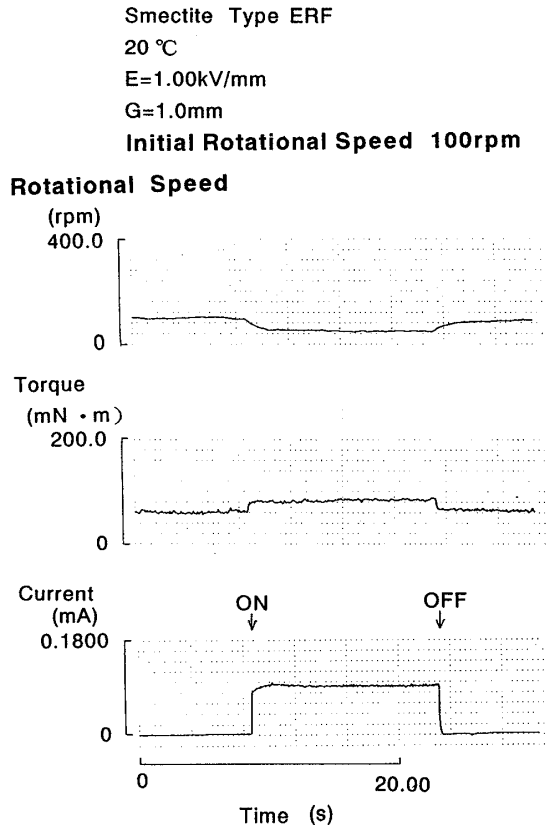
Fig. 6 Relation between shear rate D_0 and current density I

れる。

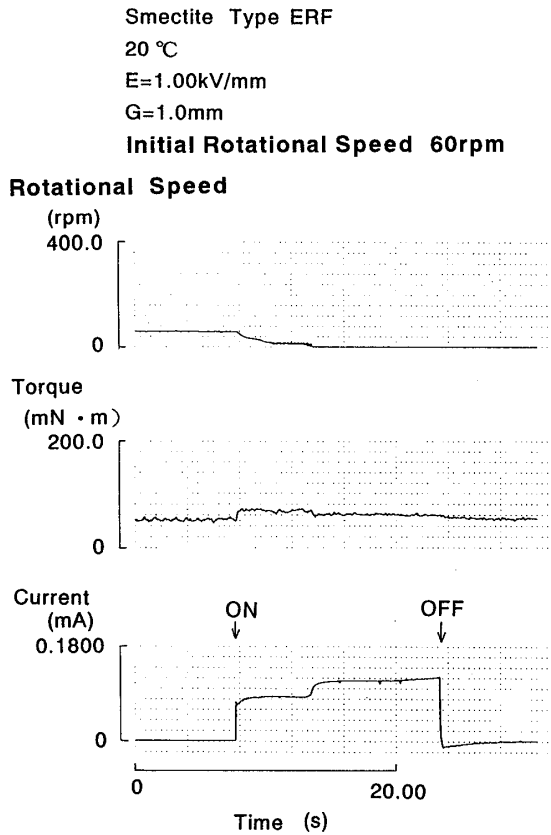
4・4 時間的応答特性 図7に、回転数 N 、トルク T 、電流についての、電場印加時からの時間的変化と電場印加除去の時間的変化の一例を示す。図7(a)は、回転が止まらないときの、(b)は、回転が止まったときの一例である。

電場を印加してから回転数 N は、数sのオーダーで応答するが、トルク T のほうがさらに早く応答する。さらに、電流のほうがそれよりも早く応答する。すなわち、電気的な時間の応答性は早いですが、流体的な時間の応答性は、流れの状態やモータの種類により異なるが、電気的応答より遅い。

また、図7(b)の回転が止まる場合について、回転数 N が零になる前に、回転数 N が多少振動し、その後、回転数 N が零になると電流が多少増加する。これは、回転しているときに流体中の粒子が凝集構造を形成しており、流れの速度が零に近づくと、粒子に働



(a) I case of non-stopping by applying an electric field



(b) In case of stopping by applying an electric field

Fig. 7 Variation of rotational speed N , torque T and current at time

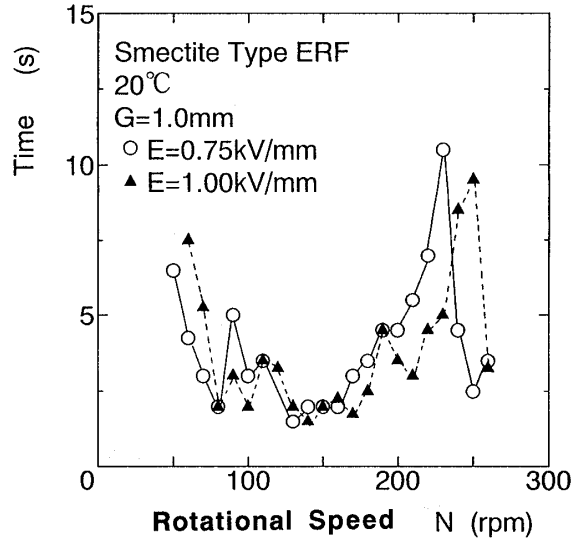


Fig. 8 Relation between time response and initial rotational speed

く流体からの抵抗力と電場からの引力と凝集した粒子群のもつ慣性力のバランスが崩れるためであると考えられる。また、流れが零になると粒子に働く流体からの抵抗力がなくなるため、粒子は流れがあるときよりも多く凝集し、見掛け上電流が多く流れやすくなるためと考えられる。

したがって、実用の際には、静止させるとき、余計な振動が本装置から生じないように、回転数が伝達される回転物体の慣性モーメントの大きさを最適に選ぶなどの方法をとるように注意する必要があると思われる。

次に、回転レギュレータは、回転数制御を目的としているので、回転数 N の電場印加時から時間的に一定に達するまでの立上りの応答時間が問題となる。そこで、初期の回転数 N が電圧を印加してから時間的に変化しその後一定に達するまでの時間と、初期の回転数 N との関係を図 8 に示す。

初期の回転数 N の大きさが、無限に大きくなると、時間的な応答性は零に近づくが、初期の回転数 N の大きさにより、時間的な応答性が早い領域が存在する。

また、オーダ的には、時間的な応答性は、数 s の大きさなので、多板式の装置にして、より早い時間の応答性を得るように設計する必要がある。

しかしながら、この定性的傾向は、ERF の種類やモータの種類により異なるものと考えなければならない。

5. 結 言

コロイド系 ERF を用いて、電場強度やデバイス内の電極間距離による回転レギュレータの静特性、すなわち、トルクや電流密度の静的変化、および、時間的応答の特性について実験的に検討した。また、工学的実用性としての設計を目的として、見掛け粘度をデバイスにおける代表ずり速度により整理することによって、無次元化した実験式を導くという手法も提案した。実験結果について、得たおもな結果は、次のとおりである。

(1) 流体力学的静特性として、トルクに及ぼす電極間距離や電圧、ずり速度の影響がある。すなわち、同じ大きさの電圧で、しかも同じ大きさのずり速度においては、電極間距離が小さいとより大きなトルクが得られる。また、同じ大きさの電圧、電極間距離においては、ずり速度が大きいとトルクが減少する。

(2) 電氣的静特性として、電流密度や電力に及ぼす電極間距離や電圧、ずり速度の影響がある。すなわち、同じ大きさの電圧で、しかも同じ大きさのずり速度においては、電極間距離が小さいと電流密度や電力が大きくなる。また、同じ大きさの電圧、電極間距離においては、ずり速度が大きいと電流密度や電力が小さくなる。

(3) 電場印加による時間の応答性については、電流にみられるように電氣的な時間の応答性は早い、これに対して、トルクや回転数にみられるように流体的な時間の応答性は遅い。特に、回転数が電場印加時より定常値に達するまでの時間は、数 s のオーダーである。

今後は、この装置の特性に及ぼす、装置に付加する回転物体の慣性モーメントによる影響や、制御による実用化への可能性などについて検討を行う必要がある。

最後に、実験にあたっては、当時、富山大学大学院生 阿部健 [現：トヨタ自動車工業(株)] の助力を得ている。ここに付記し、謝意を表す。

文 献

- (1) Gast, A. P. and Zukoski, C. F., *Adv. Coll Interface Sci.*, **30** (1989), 153-202.
- (2) 福政充睦, 電気粘性流体とその応用に関する研究分科会成果報告書, 日本機械学会, (1992), 42-55.
- (3) 古荘純次, 計測と制御, **34-6** (1995), 687-691.
- (4) 中野政身, メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科会成果報告書, 日本機械学会, (1996), 48-57.
- (5) 島田邦雄・ほか 3 名, 自動車技術会論文集, **28-1** (1997), 121-126.