

スメクタイト ERF を用いた回転円板形デバイスの定常特性に及ぼす 諸因子の影響*

西田 均^{*1}, 島田 邦雄^{*2}, 岩 渕 牧 男^{*2}
藤 田 豊 久^{*3}, 奥 井 健 一^{*2}

Effects of Experimental Factors on Steady Characteristics on Devices of Rotating Disk Type Using ERF with Smectite Particles

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

In this paper, steady characteristics of the torque and the current density of rotating disk type devices using ERF with smectite particles were investigated experimentally in detail for the purpose of engineering designing. We measured them under the various experimental conditions of the dimension of the device, the electric field strength, the temperature, and etc.. In addition, power of the device was estimated from the data of the rotating moment and the input electric power to the device. As a result, we clarified the effect of the experimental factors on their steady characteristics. On the other hand, we clarified the difference between the disk type devices and the concentric cylinder as another type of device.

Key Words: Hydraulic Power Transmission, Fluid Machinery, Rotary Machinery, Electro-rheological Fluid, Rotating Disk, Electric Field, Torque, Current Density, Shear Rate, Moment Coefficient, Power

1. 序 論

電極間隔における電気粘性流体(ERF)の流れ場が回転流れであるとき、クラッチ、回転レギュレータやブレーキなどの応用機器が考えられる。このデバイスの構造は単純であるが、回転流れの特徴から回転円筒と回転円板に分けられる。

回転円筒形デバイスの応用の一例であるクラッチについては、杉本⁽¹⁾や Bullough ら⁽²⁾による研究報告が挙げられる。また、著者らは最近回転円筒形デバイスにおいて電極間隔や電場強度などがトルクと電流密度に及ぼす影響を調べた⁽³⁾。また、実験データを従来からある工学的に整理する手法によりどこまで整理可能か検討した。

一方、回転円板形デバイスでは杉本⁽¹⁾や Stevens ら⁽⁴⁾による研究報告が挙げられる。また、著者らもこれまでブレーキングデバイスとしての基本特性につい

て実験的に調べてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これに対して、円板形デバイスを設計する際には、回転円板形デバイスの寸法などのトルクや電流特性に及ぼす影響について統一的に実験的に調べる必要があるが、こうした研究は数少ない。また、円板形デバイスの実験データを従来からある工学的に整理する手法によりどこまで整理可能かについても実験的に検討する必要がある。

さらに、回転円板形デバイスと回転円筒形デバイスの定常特性の違いについても検討する必要がある。

そこで本研究では、デバイスの基本特性を得ることを目的として、スメクタイトの粒子をもつ粒子分散系 ERF を用いた回転円板形 ERF デバイスについて取上げる。具体的には電極間隔と電場強度の変化によって、トルクと電極密度がどのような定常特性を有するか実験的に調べ、実験データを従来からある工学的に整理する手法を用いてどこまで整理可能か検討する。また、デバイスにおけるモーメント係数と、入力電力から得られるデバイスの動力増加についても評価する。さらに、回転円筒形デバイスの定常特性⁽³⁾と比較検討する。

2. 使用記号一覧

a : 定数 (mm/kV)²(N·m)/m

* 原稿受付 1998年5月15日。

^{*1} 正員, 富山職業能力開発短期大学校機械システム系 (☎937-0856 魚津市川縁1289-1)。

^{*2} 正員, 富山大学工学部 (☎930-8555 富山市五福3190)。

^{*3} 正員, 秋田大学工学資源学部 (☎010-0852 秋田市手形学園町1-1)。

E-mail: hnishida@toyama-pc.ac.jp

- b : 定数 $(\text{A}/\text{m}^2)(\text{mm}/\text{kV})^2$
 C_{Md} : モーメント係数
 d_a : 円板の直径 $=2R_d$ mm
 D_a : 円板外端におけるずり速度 1/s
 E : 電場強度 kV/mm
 I : 電流 A
 i : 電流密度 A/m^2
 n : 回転数 s^{-1}
 R_d : 円板の半径 mm
 R_{wd} : 回転レイノルズ数
 T_{d0} : 無電場での円板両面に作用する定常トルク $\text{N}\cdot\text{m}$
 T_{ds} : 電場印加時の円板両面に作用する定常トルク $\text{N}\cdot\text{m}$
 t : ERF の温度 $^{\circ}\text{C}$
 V : 印加電圧 kV
 w : 円板の厚さ mm
 $\Delta T_{ds} = T_{ds} - T_{d0}$ $\text{N}\cdot\text{m}$
 α : 体積濃度 vol. %
 δ_a : 電極間距離 mm
 $\bar{\mu}$: 電場印加時の円板すき間内の代表粘度 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 $\bar{\mu}_0$: 無電場時の円板すき間内の代表粘度 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 ρ : ERF の密度 kg/m^3
 ϕ : 質量濃度 wt. %
 ω : 内筒の角速度 $=2\pi n$ rad/s

3. 実験装置と供試 ERF

製作した実験装置を図1に示す。回転する黄銅製の円板が高電圧直流電源のプラス側に、アクリル製のケーシング内に固定された黄銅製の円板がマイナス側にそれぞれ接続されている。回転円板の半径は $R_d=45.0$ mm で、厚さ $w=8.0$ mm である。相対する固定

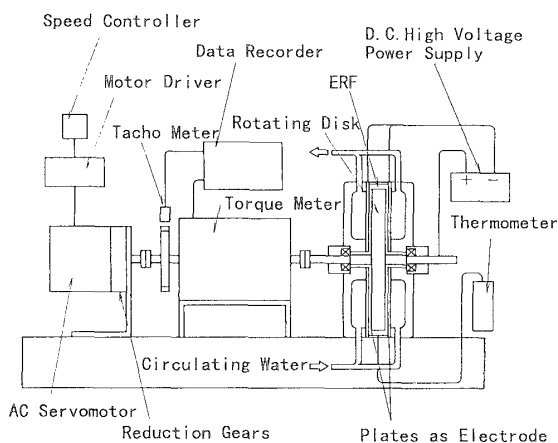


Fig. 1 Schematic diagram of rotating disk

円板の間に3種類のアクリル製のスペーサを用いて、回転円板と固定円板の電極間距離はそれぞれ $\delta_a=1.5, 2.0, 3.0$ mm とする。これはデバイス形状の無次元数である電極間隔/円板の半径ではそれぞれ $\delta_a/R_d=0.0333, 0.0444, 0.0667$ に相当する。円板はACサーボモータ [KBL 5120 GD-A 2/5 GD 15 K, オリエンタルモーター(株)製] で所定の回転数で一定回転することができ、円板に作用するトルクはACサーボモータとロータの間に直列に接続されたトルク計 [SS 010, (株)小野測器製] で計測される。すなわち、トルクおよびトルク計に付けられた回転計の出力電圧はデジタルデータレコーダ [8840, 日置電機(株)製] に記憶される。本実験で扱う回転数は $n=0.1\sim 3.4$ s^{-1} である。また、高電圧直流電源装置 [MODEL 610-C, トレック・ジャパン(株)製] のモニター端子から出力される電源装置の出力電圧 V と出力電流 I も同時に記憶される。電源装置の性能から印加される電場強度は、 $E=0.0\sim 3.5$ kV/mm である。一方、固定円板とアクリル製のケーシングの間は恒温槽からの循環水で満たされており、これにより電極間のERFを一定温度 t に保つことができる。実際のデバイスの使用ではある程度の温度管理が行われると考え、 $t=20^{\circ}\text{C}$ と 40°C の2種類の温度で実験を行った。なお、本研究で扱うトルクは計測トルクから摩擦損失トルクを差し引いたものと計測トルクから摩擦損失トルクと円板の外周面に作用するトルク(無電場において円板の外周面に作用するトルク)を差し引いた二つのトルクを扱う。

本研究で使用したスメクタイト ERF [コープケミカル(株)製] はシリコンオイル [KF 56 信越化学工業(株)製] に nm オーダのスメクタイト粒子 [コープケミカル(株)製] を分散させたものである⁽⁷⁾。本研究では表1に示す濃度の異なる2種類のスメクタイト ERF を使用した。表1は常温でのデータである。この表の質量濃度や体積濃度は ERF の密度を計測して、計算によって求めたものである。ただし、常温でのシリコンオイルとスメクタイト粒子の密度はそれぞれ 995 kg/m^3 , 1680 kg/m^3 である。

4. トルクと電流密度の定常特性

4.1 トルクとずり速度の関係 電極間隔 δ_a の

Table 1 Concentration and density of using ERFs

Name	Mass concentration ϕ [wt.%]	Volume concentration α [vol.%]	Density ρ [kg/m^3]
SER10B	6.57	4.00	1021
SER15B	9.04	5.56	1031

影響を調べるために円板に作用するトルクとERFの電流密度をずり速度 D_d で整理する。本研究で用いた δ_d については、 $\delta_d/R_d=0.0333\sim 0.0667$ であり、ずり速度は円板外端における値とし、以下の式を用いた。

$$D_d = \frac{R_d \omega}{\delta_d} \dots\dots\dots (1)$$

また、電場強度は以下のように定義した。

$$E = \frac{V}{\delta_d} \dots\dots\dots (2)$$

トルクとずり速度の関係における濃度と温度を変化させたときの結果を図2~4に示す。これらの図は流動曲線に相当する。図2と3の比較から電場強度とずり速度が等しい場合、濃度の高いSER15Bのほうがトルクは大きい。 $t=20^\circ\text{C}$ では質量濃度の低い

SER10Bの場合 $E=0.5\text{ kV/mm}$ 以上で、質量濃度の高いSER15Bの場合 $E=1.0\text{ kV/mm}$ 以上でトルクはずり速度の増加に対して急激に上昇してその後一定値に付づく。これはずり速度に対して微分粘度が変化することを示しており、ビンガム流体と近似できないことがわかる。一方、濃度の高いSER15Bの $t=40^\circ\text{C}$ の場合はずり速度の増加に対して微分粘度がほとんど変化しないことから、本実験の範囲ではビンガム流体に近いことがわかる。このように、流体の濃度や温度によってずり速度に対する微分粘度が変化する。

次に、トルクに及ぼす電極間隔の影響についてみると、質量濃度の低いSER10Bの場合はほとんど電極間隔の影響を受けないことがわかる。これに対して質量濃度の高いSER15Bの場合は温度に関係なく、 $E=0.5\text{ kV/mm}$ 以下の場合にはすき間の影響は非常に小さいが、電場強度がこれ以上ではすき間が広いほうがトルクが大きい。これは質量濃度がより高いほど、ずり速度や電場強度が同じでもすき間の広さによりトルクが異なることを示しており、すき間が異なると相似な流れでないことを示している。したがって、質量濃度の高いSER15Bのほうがトルクは電場強度とずり速度だけでは整理できない。これは回転円筒形デバイスでの実験結果⁽³⁾と同様であるが、回転円板形デバイスのほうがより顕著である。この原因は、クラスタの影響が電極間隔が異なると円板回転方向ずり速度の軸方向の変化が局所的に異なるためと単純に考えることもできるが、ずり速度の軸方向の変化がほぼ等しい場合、すき間が広いほうがクラスタの長さが大きくなり、クラスタの流体抵抗が大きくなるためと考えることもできる。

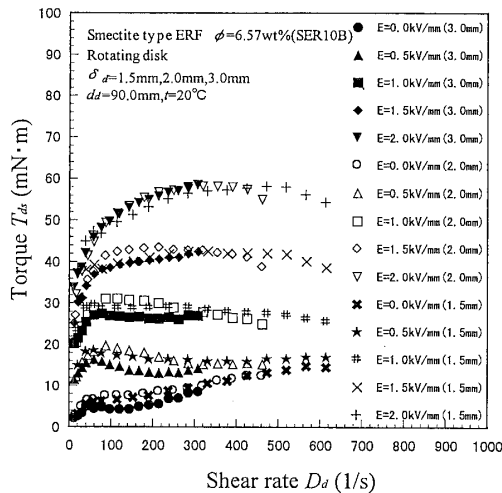


Fig. 2 Relationship between torque and shear rate with various gaps (SER 10 B, $t=20^\circ\text{C}$)

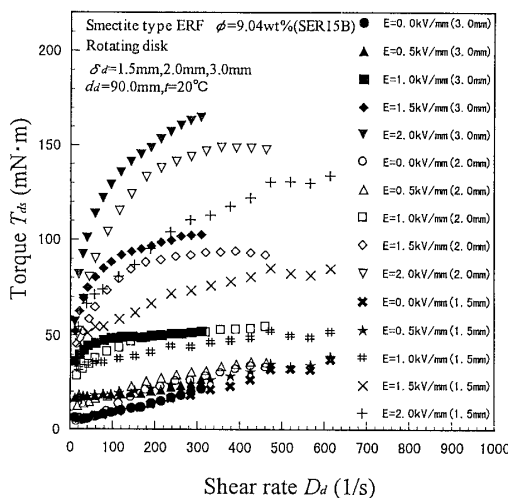


Fig. 3 Relationship between torque and shear rate with various gaps (SER 15 B, $t=20^\circ\text{C}$)

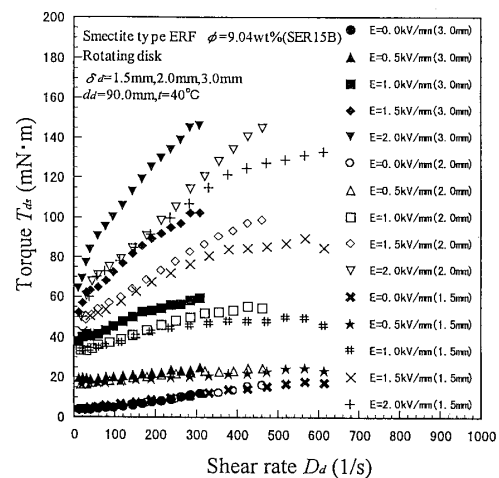


Fig. 4 Relationship between torque and shear rate with various gaps (SER 15 B, $t=40^\circ\text{C}$)

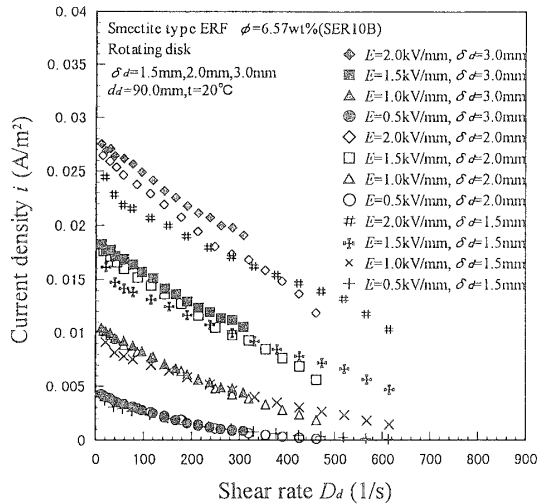


Fig. 5 Relationship between current density and shear rate with various gaps (SER 10 B, $t=20^\circ\text{C}$)

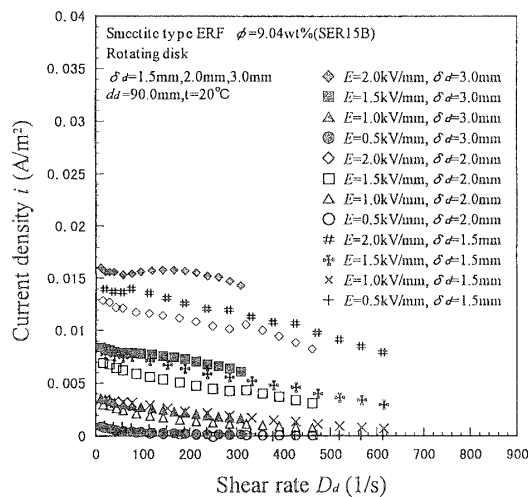


Fig. 6 Relationship between current density and shear rate with various gaps (SER 15 B, $t=20^\circ\text{C}$)

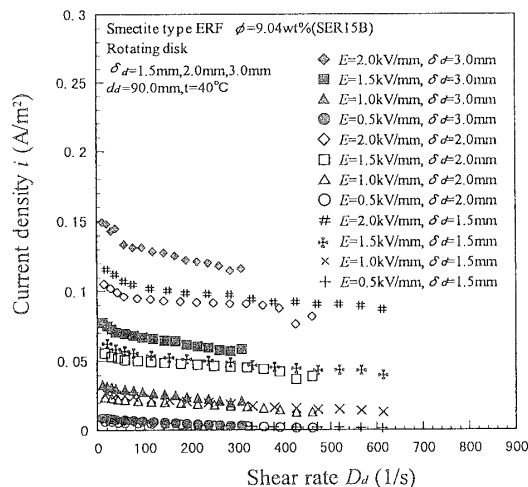


Fig. 7 Relationship between current density and shear rate with various gaps (SER 15 B, $t=40^\circ\text{C}$)

4・2 電流密度とずり速度の関係 次に、電流密度とずり速度の関係における濃度と温度を変化させたときの結果を図5～7に示す。ずり速度の影響についてみると、各質量濃度、各温度において同じ電場のとき、電流密度はずり速度の増加に対して減少する傾向にある。この理由はずり速度の小さい領域では電荷がクラスター表面を移動するのが支配的であるとすれば、電気抵抗が小さくなり、その結果電流密度が大きくなる。一方、ずり速度の大きい領域ではクラスターや粒子の移動により電荷が運ばれることが頻繁に行われるとすれば、電気抵抗が大きくなり、その結果、電流密度が小さくなると思われることができる。

一方、電極間隔の影響についてみると、SER 10 B, SER 15 Bともに、電場強度が大きくなると、電極間隔の広い $\delta_d=3.0\text{mm}$ の場合のほうが電流密度は大きい。また、濃度の影響についてみると、ずり速度の小さい領域では濃度の低い SER 10 B のほうが同じずり速度で同じ電場強度で電流密度は大きい値を示しているが、ずり速度の増加に対して減少する割合が大きく、ずり速度が大きくなると、濃度に関係なく、ほぼ同程度の大きくなる。この理由の一つとして以下のことが考えられる。円板面のすき間内の流れが複雑なために、ずり速度が大きくなると粒子間の衝突の機会が多くなるとすれば、断面積の大きいクラスターが形成されにくいためと考えることができる。一方、ずり速度が小さい場合、濃度が低いほうが粒子間の衝突の機会が少ないとすれば、断面積の大きいクラスターが形成されやすく、その結果電流密度が大きくなると思われることができる。この実験結果は回転円筒形デバイスにおける実験結果³⁾と大きく異なる。回転円筒形デバイスの場合、 $t=20^\circ\text{C}$ では濃度の変化にかかわらず電流密度のずり速度に対する大きさと変化は、ほぼ同じであった。

また、温度の影響についてみると、温度の高い $t=40^\circ\text{C}$ の場合は $t=20^\circ\text{C}$ のときより電流密度が10倍程大きくなっている。すなわち温度変化は電流密度の定常特性に大きな影響を与える。このことからデバイスの設計においてデバイスの効率を考えた場合、電流密度の増加を抑えることが必要であり、そのためには温度を上昇させない工夫が必要であるといえる。

4・3 電場の影響 図8と9は、 $\delta_d=2.0\text{mm}$ の条件でSER 10 B, SER 15 Bを使用して、 $t=20, 40^\circ\text{C}$ での $\Delta T_{as}/T_{d0}$ と E^2/T_{d0} の関係を示したものである。縦軸は電場印加によるトルクの増加を縦軸は電気を表す。両方の図において温度の影響はなく、濃度の高いSER 15 Bの場合、横軸に対する縦軸のこう配は

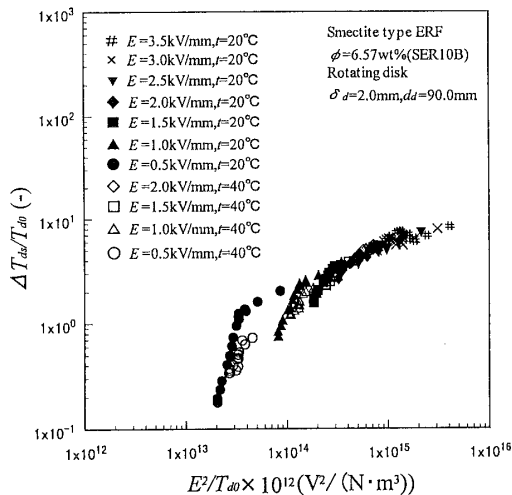


Fig. 8 Relationship between increment of torque and electric force (SER 10 B)

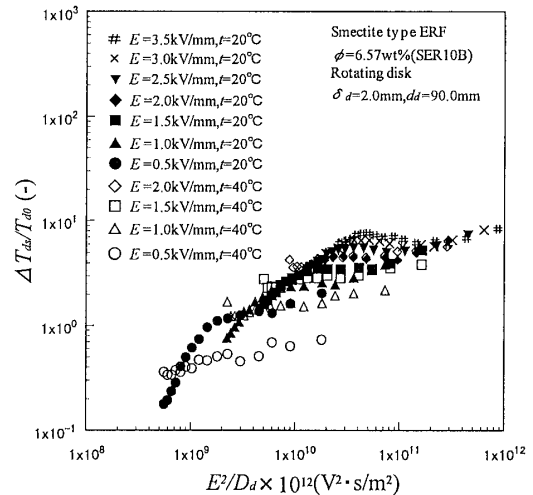


Fig. 10 Relationship between specific torque and ratio of electric force and viscous force (SER 10 B)

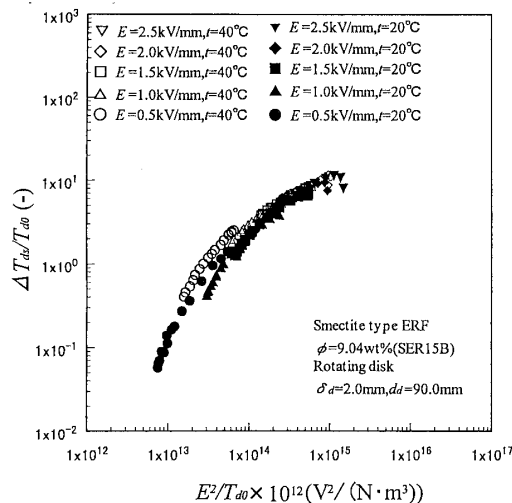


Fig. 9 Relationship between increment of torque and electric force (SER 15 B)

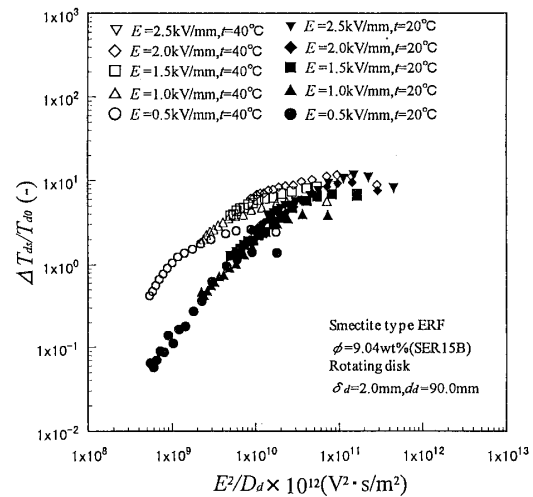


Fig. 11 Relationship between specific torque and ratio of electric force and viscous force (SER 15 B)

E^2/T_{a0} の増加に対して変化しているものの、ほぼ1本の曲線に近く、また、この配が1に近い領域 ($20 \leq E^2/T_{a0} \leq 300$) があることがわかる。一方、濃度の低いSER 10 B の場合はこの配が E^2/T_{a0} の増加に対して変化するが、 E^2/T_{a0} が大きくなると、すなわちトルクに対して電気力が大きくなるとこの配が1より少し小さい一定値に近づくことがわかる。

ここで、直線のこの配が1に近いときは $\Delta T_{as} \simeq aE^2$ であることを示す (a は係数)。これは誘電球モデルの場合、電場方向に整列した誘電球分極間に働く引力は E^2 に比例し、またこの引力はクラスタに作用する流体力と釣合っていることを意味する⁽⁸⁾。したがってSER 15 B の場合、おおよそ $20 \leq E^2/T_{a0} \leq 300$ の範囲でクラスタに作用する流体力と誘電分極間引力が釣合っていると解釈することもできる。また、SER 10

B の場合、 E^2/T_{a0} が大きくなると流体力と誘電分極間引力の釣合いがくずれていると推察できる。

図 10 と 11 は $\delta_a = 2.0$ mm の条件でSER 10 B, SER 15 B を使用して、 $t = 20, 40^\circ\text{C}$ での $\Delta T_{as}/T_{a0}$ と E^2/D_a の関係を示したものである。縦軸は比トルクを横軸は電気力と粘性力の比を表す。 E^2/D_a は Mason 数に相当し、誘電球モデルにおいて Mason 数はクラスタの長さを表す。各濃度、各温度において (ただし、SER 10 B, $t = 40^\circ\text{C}$ は除く)、 E^2/D_a の小さい領域すなわち電気力に対して粘性力が支配的な領域では、 $\Delta T_{as}/T_{a0} \propto E^2/D_a$ に近い関係にある。したがって、この領域ではクラスタの長さの増加が比トルクの増加に関係しているとみなすことができる。一方、 E^2/D_a の大きい領域すなわち粘性力に対して電気力が支配的な領域では、 $\Delta T_{as}/T_{a0}$ と E^2/D_a は線形関係

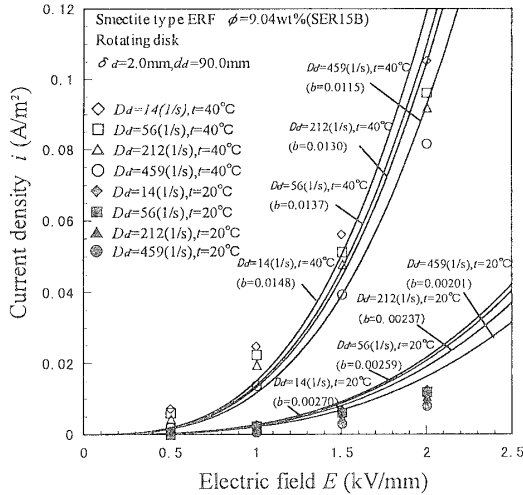


Fig. 12 Relationship between current density and shear rate at various electric field strengths (SER 15 B)

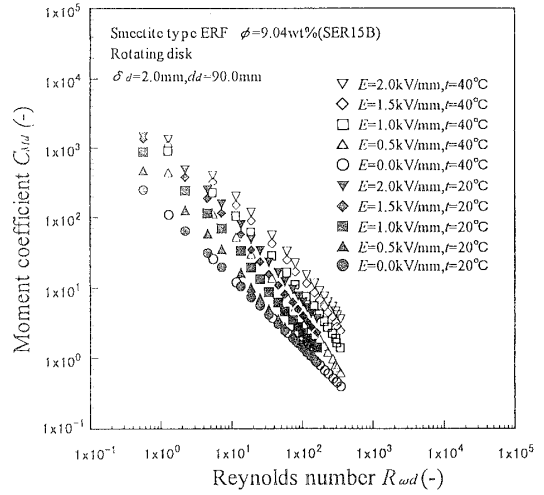


Fig. 14 Relationship between moment coefficient and Reynolds number (SER 15 B)

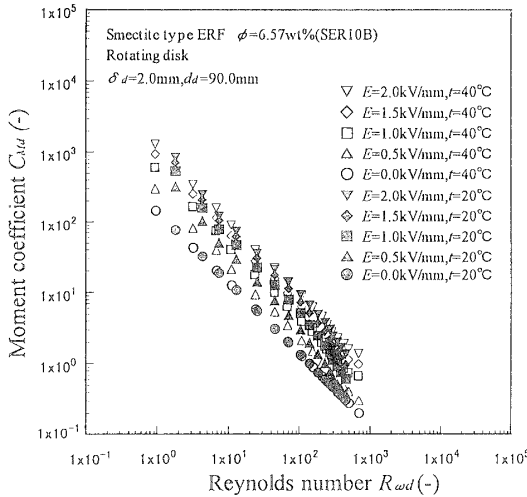


Fig. 13 Relationship between moment coefficient and Reynolds number (SER 10 B)

になく電場ごとに異なる。これは無電場のとき、降伏トルク(回転数零でのトルク)があることとずり速度の小さい領域で ΔT_{ds} の値が小さいためである。すなわち、この領域ではクラスタの長さの増加が比トルクの増加に直接関与しないとみなすことができる。また図 11 において、温度の高い $t=40^\circ\text{C}$ のほうが同じ E^2/D_d について $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ は大きい、これは T_{d0} が $t=20^\circ\text{C}$ のときより小さいためである。

図 12 は $\delta_d=2.0\text{ mm}$, SER 15 B の条件で、 $t=20, 40^\circ\text{C}$ での各ずり速度での電流密度と電場強度の関係を示したものである。図 12 中の曲線は $i=bE^3$ で近似したものである (b は係数)。まず温度によらず、ずり速度が小さい場合はこの近似曲線により実験値はフィットできにくい、ずり速度が大きくなると三次曲線に近づく。この結果は $\delta_d=2.0\text{ mm}$, SER 10 B の条

件でもほとんど同じであった。この実験結果に対して、ERF 中を電流が流れる機構について粒子によって電荷が運ばれると考えた場合、電流密度は電場の三乗に比例することが知られている⁽⁹⁾。このことからずり速度の大きい領域では電荷は粒子によって運ばれると考えることができる。

以上の図 8~12 における結果は $\delta_d=1.5, 3.0\text{ mm}$ の場合も同様の結果を得ている。また、この回転円板形デバイスにおける定常特性の実験結果は、回転円筒形デバイスの場合⁽³⁾ とほぼ同じ定性的傾向である。

5. デバイスのモーメント係数と入力電力に対する動力増加の割合

図 13, 14 は $\delta_d=2.0\text{ mm}$ で SER 10 B, SER 15 B を使用して、 $t=20, 40^\circ\text{C}$ でのモーメント係数 C_{Md} と回転レイノルズ数 $R_{\omega d}$ の関係をそれぞれ示したものである。ここでモーメント係数と回転レイノルズ数は以下の式で表される。

$$C_{Md} = \frac{T_{ds}}{\frac{1}{2} \rho R_d^5 \omega^2} \times 10^{15} \dots \dots \dots (3)$$

$$R_{\omega d} = \frac{\rho R_d^2 \omega}{\bar{\mu}_0} \times 10^{-6}, \quad \bar{\mu}_0 = \frac{\delta_d T_{d0}}{\pi \omega R_d^4} \times 10^9 \dots \dots (4)$$

ただし、 $\bar{\mu}_0$ は無電場における円板すき間内の代表粘度を表し、トルクが T_{d0} を示すニュートン流体の場合の粘度に相当するものである。同様に電場印加時のトルク T_{ds} を示すニュートン流体の場合の円板すき間内の代表粘度を $\bar{\mu}$ とすれば、式(3)、(4)から

$$C_{Md} = \left(\frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_0} \frac{2\pi R_d}{\delta_d} \right) / R_{\omega d} \dots \dots \dots (5)$$

を導くことができる。

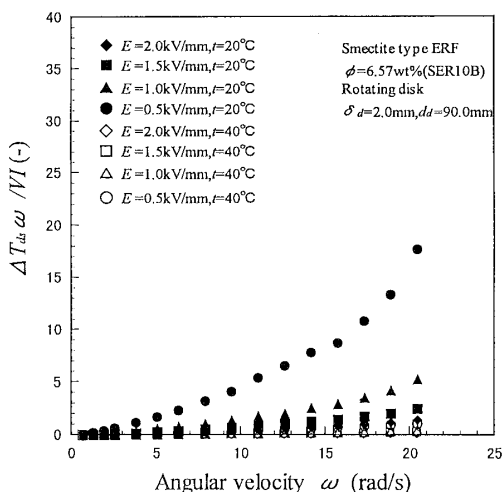


Fig. 15 Ratio of power increment and input power versus angular velocity (SER 10 B)

各図において印加電場強度の増加に伴って同じ $R_{\omega d}$ でモーメント係数が大きくなるのがわかる。これは印加電場強度が大きくなると相対粘度 ($\bar{\mu}/\mu_0$) が大きくなることを示している。一方、濃度の高い SER 15 B では、同じ回転レイノルズ数で同じ電場強度のとき、モーメント係数は $t=40^\circ\text{C}$ のほうが大きい。この原因は $t=40^\circ\text{C}$ の場合、 $t=20^\circ\text{C}$ に比べ同じ角速度での無電場時のトルクが小さいため代表粘度が小さくなり、その結果回転レイノルズ数が大きくなるためである。また電場印加時の C_{Md} の $R_{\omega d}$ に対するこう配は、SER 10 B, SER 15 B いずれにおいても $t=40^\circ\text{C}$ の場合は無電場時のこう配に近いが、 $t=20^\circ\text{C}$ の場合は無電場時のこう配より大きい。

ところで4章の関係式 $\Delta T_{ds} \doteq aE^2$ から、 $\Delta T_{ds}/T_{a0}$ は以下のように変形できる。

$$\frac{\Delta T_{ds}}{T_{a0}} = \frac{\bar{\mu} - \bar{\mu}_0}{\bar{\mu}_0} = \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_0} - 1 = \frac{\delta_d}{2\pi R_d} C_{Md} R_{\omega d} - 1 = a \frac{E^2}{T_{a0}} \times 10^{12} \dots \dots (6)$$

したがってモーメント係数は以下のように表される。

$$C_{Md} = \frac{2\pi R_d}{\delta_d} \left(a \frac{E^2}{T_{a0}} \times 10^{12} + 1 \right) / R_{\omega d} \dots \dots (7)$$

式(7)からある回転数における回転円板形デバイスのモーメント係数は電場強度によって一義的に決定されることになる。この式は回転円筒形デバイスの場合⁽⁹⁾の整理式と同じ形式である。

次に、入力電力から得られる動力増加について考察する。図 15, 16 は $\delta_d=2.0 \text{ mm}$ で各濃度の ERF において $t=20, 40^\circ\text{C}$ での $\Delta T_{ds}\omega/VI$ と角速度の関係を示

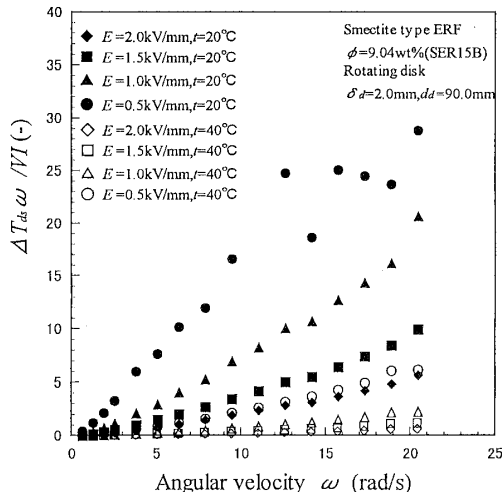


Fig. 16 Ratio of power increment and input power versus angular velocity (SER 15 B)

したものである。ここで、縦軸の $\Delta T_{ds}\omega/VI$ は一般の機械効率とは異なる。角速度が大きいところを除いて $\Delta T_{ds}\omega/VI$ は角速度と比例関係に近く、電場強度が大きくなると ω に対する $\Delta T_{ds}\omega/VI$ のこう配は小さくなるのがわかる。また、温度が高いほうがそのこう配は小さくなる。なお、SER 15 B, $t=20^\circ\text{C}$, $E=0.5 \text{ kV/mm}$ の場合、角速度が大きくなるとデータにばらつきがあるが、これは角速度の増加に対する ΔT_{ds} の若干の変動が電流値 I が非常に小さいために大きく増幅されたためである。

$\Delta T_{ds}\omega/VI$ について、これまでの結果を使って考察すると以下ようになる。電流は $i=bE^3$ 、電圧は $V=\delta_d E$ と近似的に表されるので、 $\Delta T_{ds}\omega/VI$ は以下のように変形できる。

$$\frac{\Delta T_{ds}\omega}{VI} = \frac{aE^2\omega}{\delta_d E b E^3 2\pi R_d^2} = A \frac{a\omega}{bE^2}, \quad A = \frac{1}{2\pi\delta_d R_d^2} \dots \dots (8)$$

式(8)から $\Delta T_{ds}\omega/VI$ は角速度に比例することは自明である。ここで、 $\Delta T_{ds}/VI$ の値は角速度が変化しても常に一定であり、 E が一定の場合 V も一定であるから、角速度が変化しても $\Delta T_{ds}/I$ が常に一定である。また、電場の二乗に反比例するが、これは電場強度を大きくするとトルクは増加するが入力電力に対する動力増加の割合は小さくなることを示している。一方、温度が高くなると図 12 の結果から b が大きくなるので、式(8)より $\Delta T_{ds}\omega/VI$ は急激に小さくなることもわかる。このように式(8)により図 15, 16 をおおよそ説明できることがわかる。以上の結果は、 $\delta_d=1.5, 3.0 \text{ mm}$ の場合も同様の定性的傾向を示す実験結果を得ている。また、この特性は回転円筒形デバイ

スの場合⁽³⁾とほぼ同じ定性的傾向である。

6. 結 論

クラッチ、回転レギュレータなどの応用機器として、スメクタイト粒子をもつ粒子分散系 ERF を用いた回転円板形 ERF デバイスについて取上げ、電極間隔と電場強度の変化によって、トルクと電流密度がどのような定常特性を有するか実験的に調べ、実験データを従来からある工学的に整理する手法を用いてどこまで整理可能かについて検討した。また、回転円筒形デバイスの場合と比較した。回転円板形デバイスの定常特性をまとめると以下ようになる。

(1) トルクについては、温度の低い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、ずり速度の小さい領域ではビンガム流体として近似することはできないが、温度の高い $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合はビンガム流体に近い。また、電極間隔の影響については、ERF の濃度が高い場合、電場強度が大きくなるとトルクは電極間隔によって異なり、電極間隔が広いほうが大きい。しかしながら、濃度の低い場合は電極間隔の影響を受けない。

(2) 電流密度については、電極間隔が広いほうが少し大きく、ずり速度の増加につれ減少する。また、電流密度はずり速度の小さい領域では濃度の低いほうが大きい。しかし、ずり速度が大きくなると濃度による違いが少なくなり同程度の大きさになる。さらに、電流密度は温度の影響を大きく受け、 $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合 $t=20^{\circ}\text{C}$ より 10 倍程大きくなる。

(3) 電場の影響については、濃度が高い SER 15 B の場合、おおよそ $20 \leq E^2/T_{a0} \leq 300$ の範囲で $\Delta T_{as}/T_{a0} \propto E^2/T_{a0}$ の関係がある。また、 E^2/D_a の小さい領域では、 $\Delta T_{as}/T_{a0} \propto E^2/D_a$ に近い関係にある。さらに、 E^2/D_a の大きい領域では、 $\Delta T_{as}/T_{a0}$ と E^2/D_a は線形関係になく、電場ごとに異なる。一方、電流密度はずり速度の大きい領域で温度、濃度に関係なくおおよそ電場の三乗に比例して増加する。

(4) モーメント係数は $t=40^{\circ}\text{C}$ のほうが $t=20^{\circ}\text{C}$

より大きい。さらに入力電力に対する動力増加の割合は回転数に比例し電場の二乗に反比例するが、 $t=40^{\circ}\text{C}$ では $t=20^{\circ}\text{C}$ に比べ非常に小さくなる。

(5) デバイスの設計において必要なモーメント係数と入力電力から得られる動力増加はデバイスの寸法と電場強度のみでおおよそあらかじめ定量的に予測することができる。

最後に ERF を製造・提供して頂いたコープケミカル(株)の斉木博氏、実験やデータ整理に協力して頂いた富山大学大学院生古川健作君、4年生加藤幸秀、渡辺憲也両君に感謝する。

文 献

- (1) 杉本 旭・深谷 潔, 多関節人工指制御のための静電型クラッチ, パイオメカニズム, 6(1992), 214-222.
- (2) Bullough, W. A., Makin, J. and Johnson, A. R., Requirement and target for ER fluids in electrically high speed power transmission, *Progress in Electrorheology*, (1995), 295-302, Plenum Press.
- (3) 西田 均・島田邦雄・岩渕牧男・藤田豊久・奥井健一, スメクタイト ERF を用いた回転円筒型デバイスの基本特性, 日本油空圧学会論文集, 30-1(1999), 印刷中.
- (4) Stevens, N. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., An experimental study of electro-rheological torque transmission, *Trans. ASME, J. Mech. Transmissions Autom. Design*, 110-2(1988), 182-188.
- (5) 島田邦雄・藤田豊久・岩渕牧男・奥井健一, 電気制御による流体摩擦を用いた制動装置, 自動車技術会論文集, 28-1(1997), 121-126.
- (6) Shimada, K., Fujita, T., Iwabuchi, M., Okui, K. and Kamiyama, S., Experimental research on rotating regulator as braking device with electrorheological fluid, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mech. Thermodynamics*, 3(1997), 1491-1495.
- (7) 藤田豊久・小木田浩樹・吉野健司・斉木 博・大日方五郎, スメクタイト粒子をシリコン油中に分散させた流体のエレクトロレオロジー特性, 資源と素材, III-7(1995), 484-488.
- (8) 滝本淳一, エレクトロレオロジー流体におけるクラスター形成, 理論と計算機シミュレーション, 日本レオロジー学会誌, 20(1992), 95-100.
- (9) 上井正男, 電場応答性流体, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 940-53(1994), 219-222.