

## 電気粘性流体中の回転円板の定常トルク特性に関する研究\*

### (第1報, 回転円筒と回転円板の流動曲線の比較)

西田 均<sup>\*1</sup>, 島田 邦雄<sup>\*2</sup>, 岩瀬 牧男<sup>\*3</sup>  
藤田 豊久<sup>\*4</sup>, 奥井 健一<sup>\*3</sup>

## A Study of Steady Torque Characteristics of a Rotating Disk in ERF

### (1st Report, Comparison of Flow Curve between Rotating Concentric Cylinder and Rotating Disk)

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

The purpose of this paper is to establish the theoretical prediction that the steady torque characteristics of a rotating disk in ERF can be quantitatively and qualitatively explained. At the first step on the basis of this purpose, the ER effects of electric field and shear rate were investigated by comparison of experimental results of the flow curves between the rotating concentric cylinder type device and the rotating disk one. We clarified experimentally the difference of these flow curves influenced by the electrode gaps.

**Key Words:** Fluid Machinery, Non-Newtonian Fluid, Hydraulic Transmission, Electro-Rheological Fluid, Electric Field, Rotating Disk, Rotating Concentric Cylinder, Flow Curve, Torque

## 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, クラッチや回転レギュレータ, ブレーキ<sup>(1)(2)</sup>などの応用機器が考えられる。このデバイスの構造は回転流れの特徴から回転円筒と回転円板に分けられる。

まず, 回転円筒形デバイスについては同心二重円筒形粘度計と同じ構造であり, ERFの見掛けの粘度の測定に一般的に使用されているが<sup>(3)</sup>, ERFを用いて回転円筒に作用するトルクに及ぼす電極間隔の影響についてはあまり調べられていない。次に, 回転円板形デバイスについてはMooneyの粘度計<sup>(4)</sup>と同じ構造であるが, この場合もERFを用いて回転円板に作用するトルクに及ぼす電極間隔の影響についてあまり調べられていない。

また, 回転円筒のすきま(電極間内)はクエット流れに近い単純な流れであるが, 回転円板の円板面(電極間内)は回転方向流れのほかに電極間隔が広がると半径方向の二次流れのある複雑な流れとなる。したがって, 両者の流れ場ではクラスタの形成形態や形が異なることが推察されるので, 回転流れにおけるトルク特性あるいは, 見掛けの粘度が回転円筒と回転円板とで違いが生ずる可能性がある。

一方, 先に著者らはERFの流動曲線を定式化し, 同心二重円筒形粘度計によって定数を定め, ERF中の回転円板のトルク特性を数値解析により予測する手法を示した<sup>(5)</sup>。得られた解析結果は実験結果と定性的に合うものの定量的には一致しないものであった。この原因の一つとして, 同心二重円筒と回転円板の流れの相違を挙げたが, 詳細な検討について残されている。また, この流れの相違以外に, 同心二重円筒形粘度計のERFの流動曲線に対する電極間隔の影響についても考えられる。すなわち, 前研究<sup>(5)</sup>で用いた同心二重円筒形粘度計の場合, 電極間隔と代表半径の比が比較的大きいため, 電場強度が電極間の半径方向で変化していることである。さらに, ERFの見掛けの粘度がクラスタの長さに関係しているとみなされていることから, 電極間隔と代表半径の比が小さい場合にお

\* 原稿受付 1998年6月4日。

<sup>\*1</sup> 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)。

<sup>\*2</sup> 正員, 秋田県立大学システム科学技術学部(☎015-0055 本荘市土谷字海老ノ口84-4)。

<sup>\*3</sup> 正員, 富山大学工学部(☎930-8555 富山市五福3190)。

<sup>\*4</sup> 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: shimada@akita-pu.ac.jp

いても、電極間隔そのものによって変化することが考えられる<sup>(6)</sup>。

以上のことより本研究では、ERF中の回転円板のトルク特性を定量的に理論予測する手法を確立するための第1段階として、回転円筒形デバイスと回転円板形デバイスの各実験結果による流動曲線から流れの状態を比較検討する。すなわち、電極間隔と代表半径の比が小さい(円筒の曲率の影響が小さい)回転円筒形デバイスと回転円板形デバイスにおけるそれぞれの流動曲線に及ぼす電極間隔の影響と流動曲線の相違について実験的に調べる。また、第2段階としての数値解析による理論的予測については第2報で述べる。

## 2. 使用記号一覧

- $D$ : ずり速度  $s^{-1}$   
 $D_R$ : 円板外端における回転面垂直方向のずり速度  
 $= R_a \omega / \delta_d$   $s^{-1}$   
 $E$ : 電場強度  $kV/mm$   
 $l$ : 円筒形デバイスの内筒の長さ  $mm$   
 $n$ : 回転数  $s^{-1}$   
 $R_0$ : 円筒形デバイスの外筒の内側半径  $mm$   
 $R_i$ : 円筒形デバイスの内筒の半径  $mm$   
 $R_a$ : 円板形デバイスの半径  $mm$   
 $R_m$ : 円筒形デバイスの代表半径  $= (R_i + R_0) / 2$   $mm$   
 $T_{cs}$ : 円筒外周面に作用するトルク  $N \cdot m$   
 $T_{ce}$ : 円筒上下面に作用するトルク  $N \cdot m$   
 $T_{as}$ : 円板の円板面に作用するトルク  $N \cdot m$   
 $t$ : ERFの温度  $^{\circ}C$   
 $V$ : 印加電圧  $kV/mm$   
 $\alpha$ : ERFの体積濃度  $vol. \%$   
 $w$ : 回転円板の厚さ  $mm$   
 $\beta$ : 円筒形デバイスの外筒と内筒の半径比  $= R_0 / R_i$   
 $\delta_c$ : 円筒形デバイスの電極間隔  $= R_0 - R_i$   $mm$   
 $\delta_d$ : 円板形デバイスの電極間隔  $mm$   
 $\sigma$ : ずり応力  $Pa$   
 $\sigma_R$ : 円板外端における応力  $Pa$   
 $\phi$ : ERFの質量濃度  $wt. \%$   
 $\omega$ : 回転円板の角速度  $rad/s$

## 3. 実験装置と供試 ERF

回転円筒形デバイスの実験装置を図1に示す。回転する黄銅製の回転円筒(ロータ)を高電圧直流電源のプラス側に、静止している黄銅製の外筒(ステータ)をマイナス側にそれぞれ接続する。外筒の内半径はそれぞ

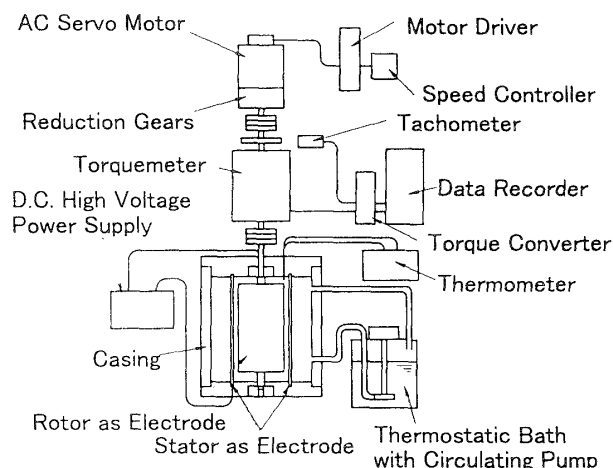


Fig. 1 Schematic diagram of rotating concentric cylinder type device

れ  $R_0 = 45.39, 46.04, 46.92$  mm の3タイプ、回転円筒は半径  $R_i = 43.92$  mm, 長さ  $l = 150.0$  mm の1タイプを使用し、そのときの電極間距離はそれぞれ  $\delta_c = 1.47, 2.12, 3.00$  mm である。このデバイスの寸法測定は三次元測定機を使用したため、 $1/100$  mm まで正確に見積もられる。回転円筒は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させることができ、回転円筒に作用するトルクはACサーボモータと回転円筒の間に直列に接続されたトルク計 [SS 050, (株)小野測器製] で計測する。回転数の範囲は  $n = 0.1 \sim 3.0 s^{-1}$  である。高電圧直流電源装置はMJ 5 P 3000(グラスマン社製)を使用した。また、外筒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、これにより電極間内のERFを一定温度  $t = 20^{\circ}C$  に保つことができる。なお、円筒で扱うトルクは回転円筒の外周面に作用するトルクであり、計測トルクから摩擦損失トルクと回転円筒の上下面に作用するトルク(無電場において回転円筒の上下面に作用するトルク)を差引いたものである。ここで、摩擦損失トルクは、各実験終了後、デバイスからERFを抜き取った後、直ちに空回し実験を行い、接触部にERFが残存する状態で各角速度に対して計測した。また、回転円筒に作用するトルクが回転円筒外周面に作用するトルク  $T_{cs}$  と回転円筒上下面に作用するトルク  $T_{ce}$  に分けて考え、回転円筒上下面に作用するトルク  $T_{ce}$  は無電場時と電場印加時では変化しないとみなして以下の手順で求めた。(1)粘度が既知であるシリコンオイルを使用して、回転円筒に作用するトルクと角速度の関係を求める。(2)粘度が既知であるシリコンオイルが長さ  $l$  の回転円筒外周面に作用した場

合の理論値  $T_{cs}$  と(1)の結果から、回転円筒上下面に作用するトルクと回転円筒に作用するトルクの割合  $T_{ce}/(T_{cs}+T_{ce})$  を求める。(3)ERFは無電場時では、ニュートン流体に近い特性を有するので(図4~6参照)、ERFの無電場時においても(2)の結果と同じ割合のトルクが回転円筒上下面に作用すると考えて、ERFの無電場の場合の回転円筒に作用するトルクと角速度の実験式に、それぞれの電極間隔に対応したシリコンオイルの実験結果による  $T_{ce}/(T_{cs}+T_{ce})$  の値を掛けて求めた。

回転円板形デバイスの実験装置を図2に示す。回転する黄銅製の円板を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ている黄銅製の円板をマイナス側にそれぞれ接続する。回転円板の半径は  $R_d=45.0$  mm、厚さ  $w=8.0$  mm の1タイプを使用し、相対する固定円板の間に3種類のアクリル製のスペーサを用いることで、電極間距離はそれぞれ  $\delta_d=1.5, 2.0, 3.0$  mm とする。このデバイスの寸法測定はダイヤルゲージを使用しているため、1/10 mm まで正確に見積もられる。回転円筒の場合と同じ AC サーボモータで所定の回転数で一定回転させることができ、円板に作用するトルクは AC サーボモータと円板の間に直列に接続されたトルク計 [SS 010, (株)小野測器製] で計測する。回転数の範囲は回転円筒と同様に  $n=0.1\sim 3.0$  s<sup>-1</sup> である。高電圧直流電源装置は MODEL 610-C [トレック・ジャパン(株)製] を使用した。また、固定円板とアクリル製のケーシングの間には恒温槽からの循環水が満たされており、これにより電極間内の ERF を一定温度  $t=20^\circ\text{C}$  に保つことができる。なお、実験で扱うトルクは次の2種類である。一つは円板に作用するトルクで、計測トルクから

摩擦損失トルクを差引いたものである。二つめは円板の円板面だけに作用するトルクで、計測トルクから摩擦損失トルクと円板の外周曲面に作用するトルク(無電場において回転円筒の外周曲面に作用するトルク)を差引いたものである。ここで、摩擦損失トルクは、回転円筒の場合と同様に、各実験終了後、デバイスから ERF を抜き取った後、直ちに空回し実験を行い、主軸に ERF が残存する状態で各角速度に対して計測した。また、回転円板に作用するトルクが回転円板の円板面に作用するトルク  $T_{as}$  と回転円板外周曲面に作用するトルク  $T_{ae}$  に分けて考え、回転円板外周曲面に作用するトルク  $T_{ae}$  は無電場時と電場印加時では変化しないとみなして以下の手順で求めた。(1)粘度が既知であるシリコンオイルを使用して、回転円板に作用するトルクと角速度の関係を求める。(2)粘度が既知であるシリコンオイルが半径  $R_d$  の回転円板に作用した場合の理論値  $T_{as}$  と(1)の結果から、回転円板外周曲面に作用するトルクと回転円板に作用するトルクの割合  $T_{ae}/(T_{as}+T_{ae})$  を求める。(3)ERFは無電場時では、ニュートン流体に近い特性を有するので(図8参照)、ERFの無電場時においても(2)の結果と同じ割合のトルクが回転円板外周曲面に作用すると考えて、ERFの無電場の場合の回転円板に作用するトルクと角速度の実験式に、それぞれの電極間隔に対応したシリコンオイルの実験結果による  $T_{ae}/(T_{as}+T_{ae})$  の値を掛けて求めた。

本研究で使用したスメクタイト ERF [コープケミカル(株)製] の分散粒子は合成スメクタイト [SPN, コープケミカル(株)製] であり、構成元素は主として、Si, Mg, Li である。合成スメクタイト粒子の形状は板状構造であり、直径は 10~100 nm で高さは 2~50 nm 程度である。また、分散媒はシリコンオイル [KF 56, 信越化学工業(株)製] である<sup>(7)</sup>。水分は 1%

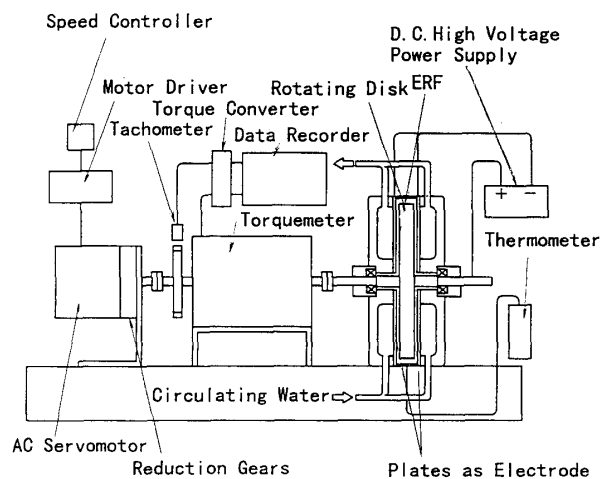


Fig. 2 Schematic diagram of rotating disk type device

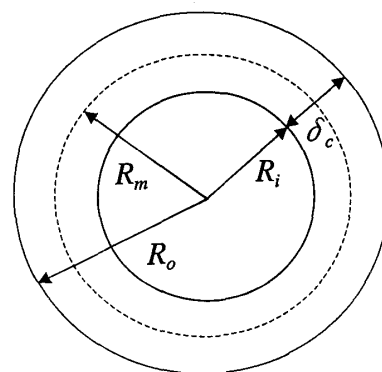


Fig. 3 Sectional diagram of rotating concentric cylinder type device

以下で非水系のERFであり、密度は  $1039 \text{ kg/m}^3$ 、質量濃度  $\phi$  は  $10.5 \text{ wt.}\%$ 、体積濃度  $\alpha$  は  $6.50 \text{ vol.}\%$  である。本研究では、便宜上 SER 15 C と呼ぶ。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  $995, 1680 \text{ kg/m}^3$  である。

4. ERFの回転流れにおける流動曲線に及ぼす電極間隔の影響

4.1 回転円筒形デバイスのERF流動曲線に及ぼす電極間隔の影響 回転円筒形デバイスにおける電場強度は、図3に示すように回転円筒と外筒の中心での値とし、以下の式から求めた<sup>(8)</sup>。

$$E = \frac{V}{\ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)} \frac{1}{R_m} \dots\dots\dots (1)$$

このデバイスの無次元数である電極間隔と代表半径の比は  $\delta_c/R_m = 0.0329 \sim 0.0661$  の範囲である。

まず、流動曲線を求めるに当たり、使用する式の検討を行う。流れをニュートン流体として取扱った場合(ここでは便宜上、ニュートン法と呼ぶ)、内筒面でのずり速度は以下の式で表される<sup>(9)</sup>。

$$D = \frac{2R_0^2\omega}{R_0^2 - R_i^2} \dots\dots\dots (2)$$

一方、非ニュートン流体でのずり速度は式(3)が使用されている。この式はKrieger-Maronによるもので、電極間隔と代表半径の比が大きくなり、内筒に作用するずり応力と外筒に作用するずり応力が等しいとみなすことができない場合に使用するものである<sup>(10)</sup>(ここでは便宜上、非ニュートン法と呼ぶ)。

$$D = \frac{\omega}{\ln\beta} \left\{ 1 + \ln\beta \frac{d\ln\omega}{d\ln\sigma} + \frac{1}{3}(\ln\beta)^2 \left( \frac{d\ln\omega}{d\ln\sigma} \right)^2 + \dots \right\} \dots\dots\dots (3)$$

また、内筒に作用するずり応力  $\sigma$  は次式で表される。

$$\sigma = \frac{T_{cs}}{2\pi R_i^2 l} \dots\dots\dots (4)$$

一定の電場強度における非ニュートン法によるずり速度の算出手順は以下のとおりである。まず、角速度  $\omega$  のときの計測トルク  $T_{cs}$  を式(4)に代入して、それぞれの角速度  $\omega$  に対するずり応力  $\sigma$  を求める。次に、これによって得られた実験データの  $d(\ln\omega)/d(\ln\sigma)$  の値を求め、この値と角速度  $\omega$  を式(3)に代入して、そのときのずり速度を求める。

まず、図4~6に回転円筒形デバイスの電極間隔が  $\delta_c = 1.47, 2.12, 3.00 \text{ mm}$  の各場合のニュートン法と非ニュートン法による流動曲線を示す。ニュートン法と非ニュートン法の結果は定量的にほとんど同じである。これは本実験範囲では電極間隔/代表半径の値が

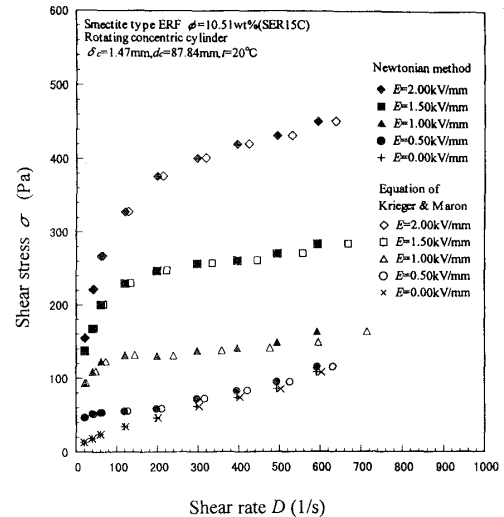


Fig. 4 Flow curve by using Newtonian method and Krieger & Maron method with rotating concentric cylinder ( $\delta_c = 1.47 \text{ mm}$ )

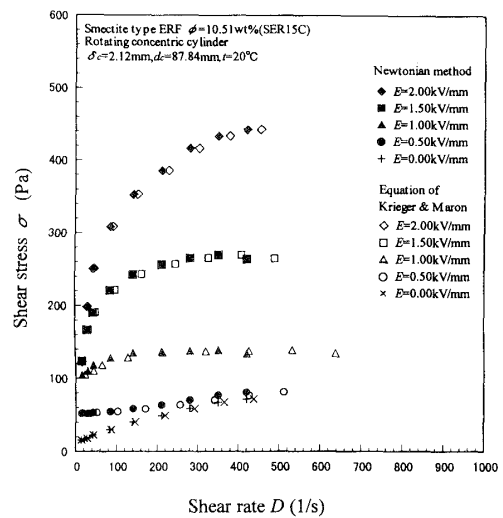


Fig. 5 Flow curve by using Newtonian method and Krieger & Maron method with rotating concentric cylinder ( $\delta_c = 2.12 \text{ mm}$ )

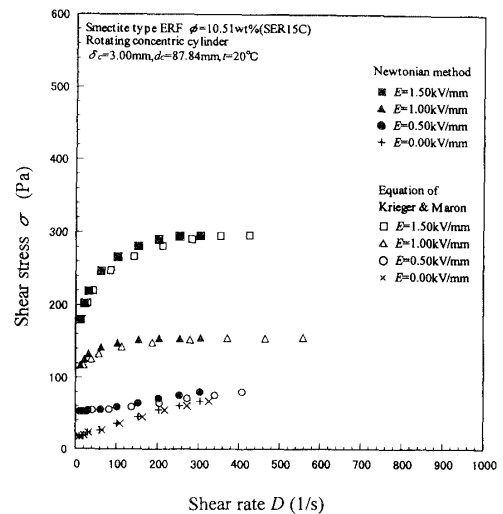


Fig. 6 Flow curve by using Newtonian method and Krieger & Maron method with rotating concentric cylinder ( $\delta_c = 3.00 \text{ mm}$ )

小さいことを表している。すなわち、本実験装置では半径方向においてずり応力の変化が少ないことを意味しており、電極間内の流れは円筒の曲率による影響が小さく、クエット流れに近いと推定できる。

次に、本実験範囲ではニュートン法により流動曲線を得ることができるということがわかったので、回転円筒形デバイスによるニュートン法により求めた流動曲線が電極間隔から受ける影響を調べる。その結果を図7に示す。E=1.00 kV/mm 以上では、同じずり速度において電極間隔の広いほうがずり応力が大きい。また、ずり速度が大きくなるにつれ電極間隔の影響は小さくなる傾向を示している。これは電場強度が大きくなると同じずり速度でも電極間隔が異なるとずり応力は異なることを表しており、電極間内では異なった速度分布であることを意味している。

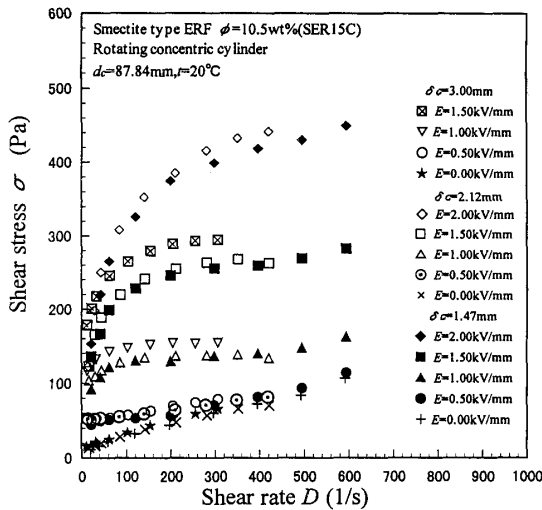


Fig. 7 Flow curve with rotating concentric cylinder with various gaps

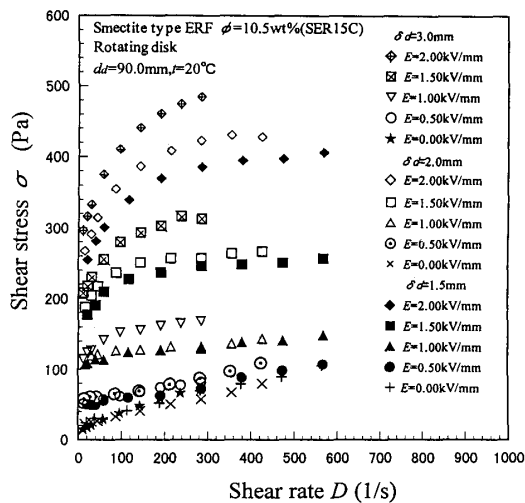


Fig. 8 Flow curve with rotating disk with various gaps

4・2 回転円板形デバイスのERF流動曲線に及ぼす電極間隔の影響 以下の式で定められる印加電圧と電極間隔による電場強度を用いる。

$$E = \frac{V}{\delta_d} \dots\dots\dots (5)$$

このデバイスの無次元数である電極間隔と円板半径の比は  $\delta_d/R_d = 0.0333 \sim 0.0667$  の範囲である。回転円板による粘度は式(6)に示すように Mooney の式<sup>(4)</sup>によって求めることができる。ただし、この式は導出の過程においてすきま内(電極間内)は円板回転方向の軸方向速度分布をクエット流れと仮定している。

$$\sigma_R = \frac{T_{ds}(D_R)}{4\pi R_d^3} \left[ \frac{d\{\ln T_{ds}(D_R)\}}{d(\ln \omega)} + 3 \right] \dots\dots\dots (6)$$

図8は回転円板形デバイスにおける式(6)により得られた流動曲線が電極間隔から受ける影響を調べたものである。E=1.00 kV/mm 以上では、同じずり速度において電極間隔の広いほうがずり応力が大きい。これは回転円筒の場合と同様に、電場強度が大きくなると同じずり速度でも電極間隔が異なるとずり応力は異なることを表しており、電極間内では異なった速度分布であることを意味している。

それぞれのデバイスによる流動曲線が電極間隔の影響を受ける原因は、クラスタの影響で電極間隔が異なると回転面垂直方向のずり速度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、回転面に対して垂直方向のずり速度の平均値がほぼ等しい場合は以下に示すようなモデルを用いて考えることができる。すなわち、図9に電場強度と速度こう配さらにクラスタの断面積が同じ条件で電極間隔が異なる場合の簡略化されたモデルを示す。図9はずり速度が小さい場合、すなわち粘性力と電気力の比を表す Mason 数が小さい場合である。滝本らの誘電球モデルを用いたク

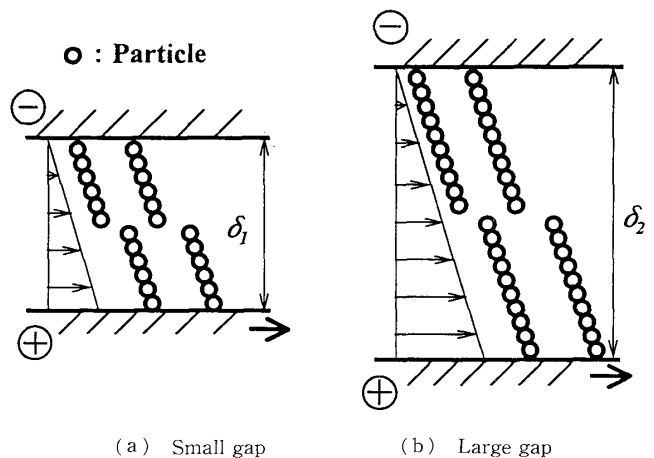


Fig. 9 Physical model of cluster in the gap with different width

ラスタ理論では Mason 数の逆数がクラスタの長さを表す<sup>(6)</sup>。この理論に従えば、電極間隔が異なっても Mason 数が同じならクラスタの長さは同じになる。しかしながら、著者らはずり速度の小さい領域ではこの理論が成立しないことを確認している<sup>(11)</sup>。したがって、この領域では、たとえ Mason 数が同じとなる実験条件であっても電極間隔が違くとクラスタの長さが必ずしも同一とはならない場合である。スメクタイト粒子は弾性をもつ回転円筒とみなす報告もあるが<sup>(12)</sup>、ここでは簡単のため図9に示すような球形粒子に置き換えてみる。図9(a)と図9(b)において、電極間隔が広い図9(b)のほうがクラスタが長いのでクラスタに作用する流体抵抗は大きくなり、移動面に作用するずり応力が大きくなると考えられる。

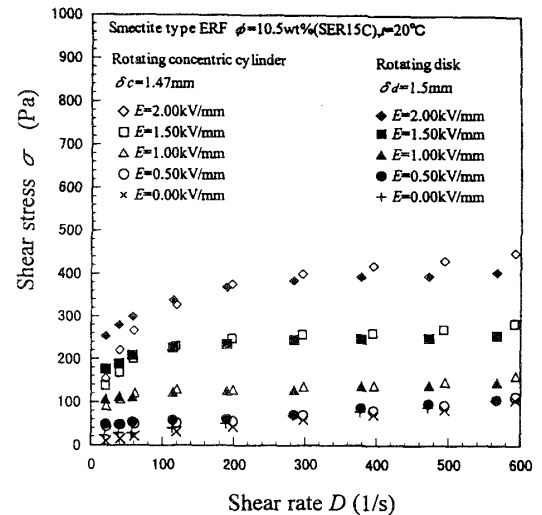
以上の図7,8から、それぞれの回転流れ場において流動曲線が電極間隔の影響を受けることがわかったので、次に電極間隔が等しい場合の回転円筒と回転円板による流動曲線について比較検討する。

### 5. 回転円筒形デバイスと回転円板形デバイスの ERF 流動曲線の比較

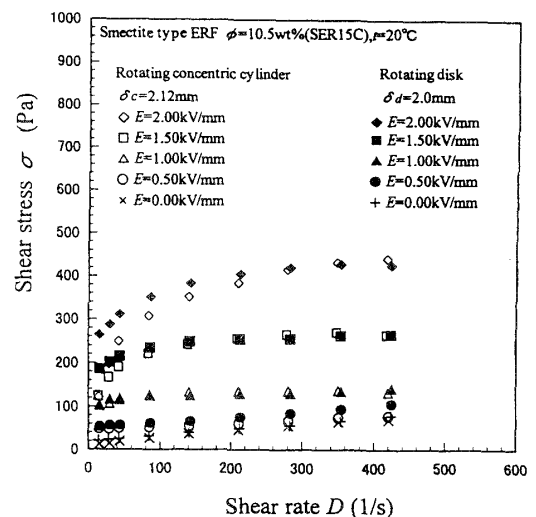
図10(a)~(c)は電極間隔がほぼ等しい場合の回転円筒と回転円板による流動曲線を比較したものである。

各電極間隔の大きさにおいて、電場強度が小さい場合 ( $E=1.00$  kV/mm 以下) はよく一致しているが、電場強度が大きく ( $E=1.50$  kV/mm 以上) になるとずり速度のごく小さい領域では回転円板によるずり応力のほうが回転円筒によるずり応力より大きくなる。これについて、 $E=1.50$  kV/mm の場合を代表にとり、詳細に見てみると以下ようになる。図10(a)では、ずり速度のごく小さい領域でずり応力は回転円板が回転円筒より大きい。ずり速度が大きくなると回転円筒が回転円板より若干大きくなる。図10(b)では、ずり速度の小さい領域ではずり応力は回転円板が回転円筒より大きい。ずり速度がそれより大きい領域では回転円筒と回転円板は等しい。さらに図10(c)では、本実験のずり速度の範囲においてずり応力は回転円板のほうが回転円筒より少し大きいことを示している。

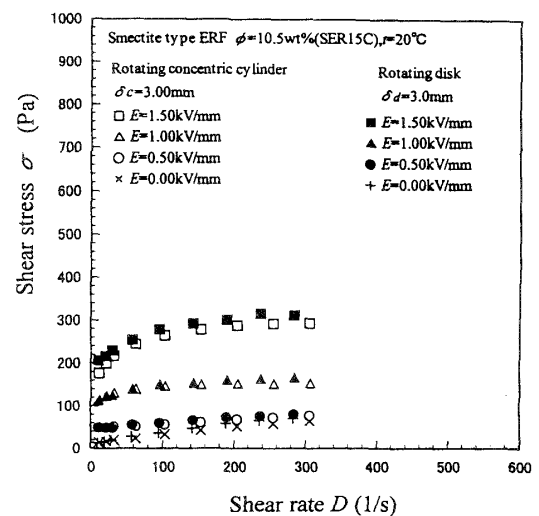
これは電場強度が大きくなると電極間隔とずり速度が同じでも回転円筒と回転円板では流れが異なるので、ずり応力は厳密には一致しないことを意味している。すなわち、回転円板では電極間内の二次流れと ERF の非ニュートン性のためにクラスタの形成形態と形が回転円筒の場合と異なるためと考えられる。しかしながら、回転円板の電極間内の二次流れの大きさ



(a)  $\delta_c=1.47$  mm,  $\delta_d=1.5$  mm



(b)  $\delta_c=2.12$  mm,  $\delta_d=2.0$  mm



(c)  $\delta_c=3.00$  mm,  $\delta_d=3.0$  mm

Fig. 10 Comparison of flow curves between the rotating concentric cylinder and the rotating disk

が小さいため(回転面に垂直方向の速度分布において半径方向速度成分が周方向速度成分に比べて小さい), それぞれのデバイスにおける流動曲線は電極間隔が等しい場合おおよそ一致すると考えられる。したがって, 電極間隔が同じですきまにおける回転面に垂直方向のずり速度の平均値が同じであるそれぞれのデバイスのすきまにおいて, それぞれのクラスタの長さはほぼ同じになり, そのためクラスタに作用する流体抵抗が同じになって, ずり応力がほぼ同じになると考えることができる。

## 6. 結 論

ERF 中の回転円板のトルク特性を定量的に予測する手法を確立するための第1段階として, 回転円筒形デバイスと回転円板形デバイスの実験結果による流動曲線の比較を行い, それにより回転流れの相違を検討した。要約すると以下のようなになる。

(1) 回転円筒形と回転円板形デバイスによる流動曲線は, 電場強度が大きくなるにつれ, 同じずり速度に対して電極間隔の広いほうがずり応力は大きい。

(2) 電極間隔が等しい回転円筒形デバイスと回転円板形デバイスによる流動曲線は, 電場強度が大きいくずり速度のごく小さい領域を除いておおよそ一致する。

最後に ERF を製造・提供していただいたコープケミカル(株)の齊木博氏, 実験やデータ整理に協力していただいた富山大学大学院生 古川健作, 加藤幸秀両君に感謝する。

## 文 献

- (1) 島田邦雄・藤田豊久・岩渕牧男・奥井謙一, 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.
- (2) 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. Thermodyn.*, 3 (1997), 1491-1495.
- (3) 山岸陽一・岩永正裕・島谷謙一, Couette 流れにおけるアルミニウム粉末を含むサスペンションの電気粘性効果, 機論, 63-611, B(1997), 2316-2321.
- (4) 川田裕朗, 粘度, (1969), 120-123, コロナ社.
- (5) Nishida, H., Shimada, K., Iwabuchi, M., Fujita, T. and Okui, K. Dynamic Characteristics of Torque Reacting on a Rotating Disk in Electro-Rheological Fluid of a Suspension-type, *JSME Proc. Int. Conf. Fluid Eng.* 1 (1997), 491-496.
- (6) 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.
- (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, 111-7(1995), 484-488.
- (8) Atkin, R. J., Xiao Shi and Bullough, W. A., Solution of the Constitutive Equations for the Flow of an Electrorheological Fluid in Radial Configurations, *J. Rheol.* 35-7(1991), 1441-1461.
- (9) 川田裕朗, 粘度, (1969), 99-101, コロナ社.
- (10) D. C. ボーグ・J. L. ホワイト著(三石信雄・山中彰宏訳), レオロジーの理論と応用, (1972), 19-20, 工業調査会.
- (11) 西田均・島田邦雄・藤田豊久・岩渕牧男・奥井謙一, 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), 1-9.
- (12) 島田邦雄・藤田豊久・岩渕牧男・奥井謙一, 弾力性のある粒子を含む電気粘性流体の回転流体内における ER 効果, 粉体および粉末冶金, 43-6(1996), 766-770.