研究論文

ER流体中の回転円板のトルク特性に及ぼす濃度と電極間隔の影響*

西田 均**, 島田 邦雄***, 岩渕 牧男****, 奥井 健一****

Effects of Mass Concentration and Electrode Gap on Torque Characteristics of a Rotating Disk in ERF

Hitoshi NISHIDA, Kunio SHIMADA, Makio Iwabuchi and Kenichi OKUI

We clarified by numerical analysis with the effect of mass concentration and electrode gap on the steady torque characteristics and the velocity distribution of a rotating disk in ERF under D.C. electric field. The analysis is based on mechanical dynamic model. By comparison with experimental results of torque characteristics, the efficacy of prediction by this numerical analysis was also investigated.

Key words: Torque Control, Hydraulic Power Transmission, Electrorheological Fluid, Rotating Disk, Numerical Analysis, Mechanical Dynamic Model, Electric Field, Mass Concentration, Electrode Gap, Flow Curve

1. 序 論

現在の粒子分散系ER流体（以降、単にER流体と呼ぶ）を応用したデバイスについての流れ解析や性能予測法は、円筒形粘度計による電場強度に対応した流動曲線をビンガム流体に近似して数値解析する方法が一般的である¹⁾。しかし、この方法には、①流動曲線をビンガム流体に近似すること②流動曲線が電極間隔から受ける影響が考慮されていないこと③円筒形粘度計で得られた流動曲線を異なる流れ場に適用することなどに問題が残る。①については、すでに著者らが各種の流動曲線に対応できるER流体力学モデルを提案しており²⁾、②についても、流動曲線が電極間隔の影響を受けることを明らかにした³⁾。しかし、③については、検討事例が少なく、実験との比較も検討されていない状況である。

ER流体の降伏応力は電場強度の2乗に比例し、質量濃度（以降、単に濃度と呼ぶ）に比例関係にあると言われている。これらに対しては当然のことながら制約が存在する。特に、比較的濃度の低い場合と高い場合とでは降伏応力のみならず、ずり速度に対するずり応力の流動曲線（以降、単に流動曲線と呼ぶ）の特性も異なると考えられる。また、

流動曲線は流路によって変化すると考えられる。従って、数値解析に使用される流動曲線は電場強度や濃度に対して、同様の流れ場で得られた流動曲線を使用すべきである。しかしながら、多くのER流体の流動曲線が円筒形粘度計によって得られていることから、この流動曲線を使用して異なる流れ場を解析する場合、この有効性の有無や予測精度を知っておく必要がある。

そこで本研究では、ER流体の代表的な応用例であるクラッチやブレーキ⁴⁾の基礎となるER流体中の回転円板まわりの流れ場を取り上げる。そして、円筒形粘度計によって得られた流動曲線をER流体中の回転円板まわりの数値解析に適用し、流れとトルク特性を求め、実験結果と比較・検討を行う。

具体的には、先ず濃度の異なるER流体の流動曲線が電極間隔から受ける影響について実験的に調べ、この流動曲線を著者らが提案している構成方程式で近似する。得られた構成方程式のパラメータから電極間隔がER流体の流動特性に及ぼす影響について調べる。次にこの構成方程式を有限要素法の解析コードに組み込み、回転円板まわりの流れ場を数値解析する。解析によって得られた流速分布と回転円板に作用するトルクが電極間隔や濃度から受ける影響を調べ、トルク特性に関して実験結果と比較・検討する。以上の結果から、流れとトルク特性を考察するとともに円筒形粘度計による流動曲線を使用した場合の回転円板まわりの数値解析の有効性と精度を明らかにする。

2. 使用記号一覧

d_c	円筒形粘度計の回転円筒の直径 [m (mm)]
d_d	回転円板の直径 [m (mm)]
D	ずり速度 [1/s]

*平成12年10月30日 原稿受付

**北陸職業能力開発大学校生産機械システム技術科

E-mailアドレス：nishida@hokuriku-pc.ac.jp

(所在地 〒937-0856 富山県魚津市川縁1289-1)

***秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

(所在地 〒015-0055 秋田県本荘市土谷海老ノ口48-4)

****富山大学工学部機械知能システム工学科

(所在地 〒930-8555 富山県富山市五福3190)

- D_0 : ずり速度の最小値 $= 0.0001 \text{ } (\sigma_c / \mu_2) \text{ [1/s]}$
 D_3 : スライダーの移動速度に相当するずり速度 $[1/s]$
 D_s : スライダーの動き始めに相当するずり速度 $[1/s]$
 E : 電場強度 $[\text{kV/mm}]$
 f : 力学モデルにおけるスライダーの摩擦係数 $[-]$
 f_0 : f_s と f_k の差 $= f_s - f_k \text{ } [-]$
 f_k : 力学モデルにおけるスライダーの動摩擦係数 $[-]$
 f_s : 力学モデルにおけるスライダーの静摩擦係数 $[-]$
 F_0 : ER流体の無電場時の降伏応力 $[\text{Pa}]$
 G_1, G_2 : 力学モデルにおけるばねのばね定数 $[\text{Pa/m}]$
 R_s : 固定電極板の内側半径 $[\text{m (mm)}]$
 R_d : 回転円板の半径 $[\text{m (mm)}]$
 s : 主軸のER流体に接触している長さ $[\text{m (mm)}]$
 T_{de} : 回転円板外周面および主軸に作用するトルク $[\text{N} \cdot \text{m}]$
 T_{ds} : 回転円板両面に作用するトルク $[\text{N} \cdot \text{m}]$
 u : 流速 $[\text{m/s}]$
 u_r, u_θ, u_z : r, θ, z 方向の各流速 $[\text{m/s}]$
 w : 回転円板の厚さ $[\text{m (mm)}]$
 W : 力学モデルのスライダーの荷重 $[\text{Pa}]$
 δ_c : 円筒粘度計の電極間距離 $[\text{m (mm)}]$
 δ_d : 回転円板の電極間距離 $[\text{m (mm)}]$
 ε : $f = f_k + f_s / \varepsilon$ となるスライダーの移動速度 ($\varepsilon = 2.718 \dots$) $[\text{m/s}]$
 μ_2 : $D \leq D_s$ におけるER流体の電場印加時の塑性粘度 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 μ_3 : ER流体の無電場時の塑性粘度 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 μ_B : 塑性粘度 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 μ_1 : $D \geq D_s$ におけるER流体の電場印加時の塑性粘度 $= (\mu_2 \cdot \mu_3) / (\mu_2 + \mu_3) \text{ } [\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 σ : ずり応力 $[\text{Pa}]$
 σ_c : 降伏応力 $[\text{Pa}]$
 σ_s : $D = D_s$ におけるずり応力 $[\text{Pa}]$
 ϕ : 質量濃度 $[\text{wt}\%]$
 ω : 回転円板の角速度 $[\text{rad/s}]$

3. 流動曲線が濃度と電極間隔から受ける影響

本研究で使用したER流体（コープケミカル製）は、シリコンオイル（KF56（信越化学工業製））にnmオーダーのスメクタイト粒子（コープケミカル製）を分散させたもので、濃度は $\phi = 10.5\text{wt}\%$ （以降、SER15Cと呼ぶ）と $\phi = 6.57\text{wt}\%$ （以降、SER10Bと呼ぶ）の2種類である。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 995kg/m^3 , 1680kg/m^3 である。

使用した円筒粘度計は先に報告した回転円筒形デバイス³⁾であり、円筒の曲率の影響が小さいため（電極間隔と代表半径の比が小さい）電極間の半径方向で電場強度の変化が小さいものである。回転円筒の直径 d_c は 87.84mm で高

さは 150.0mm 、電極間隔 δ_c は $1.47, 2.12, 3.00\text{mm}$ の3種類である。

図1と図2は濃度の高いSER15Cおよび濃度の低いSER10Bの流動曲線に及ぼす電極間隔の影響を示したものである。まず、SER15CがSER10Bに比べ、同じ電場強度、同じずり速度に対してずり応力は濃度の増加割合以上に大きいことが分る。SER15Cの場合、流動曲線は $E = 1.00\text{kV/mm}$ 以上で電極間隔によって明らかに異なり、電極間隔が広いほうがずり応力が大きくなることが分る。一方、濃度の低いSER10Bの場合は、電極間隔から受ける影響が $E = 2.00\text{kV/mm}$ で僅かに見られるものの、本実験範囲では小さいことが分る。すなわち、流動曲線は濃度が高い場合、電極間隔の影響を受け、濃度が低い場合は電極間隔の影響が小さい

Fig. 1 Flow curve with various electrode gaps (SER 15C)

Fig. 2 Flow curve with various electrode gaps (SER 10B)

これは、濃度が高い場合、数値解析に使用する構成方程式は電極間隔ごとに作成しなければならないことを示している。

4. 構成方程式のパラメータに及ぼす濃度と電極間隔の影響

図3は著者らが提案しているER流体の力学モデル²⁾である。また、図4はこのモデルの流動曲線であり、パラメータによって代表的な4種類のER流体の流動曲線を表現することができる。式(1)はこのモデルから得られる構成方程式である。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq D < D_c \text{ のとき} \\ \sigma = \mu_2 D + \sigma_c \\ D_c \leq D \text{ のとき} \\ \sigma = \mu_1 \left\{ D + \frac{\sigma_c}{\mu_2} + \frac{f_0 W}{\mu_3} \exp\left(-\frac{D_3}{\varepsilon}\right) + \frac{f_k W}{\mu_3} + \frac{F_0}{\mu_3} \right\} \end{aligned} \right\} (1)$$

図5および図6は電極間隔 $\delta_c = 2.12\text{mm}$ の場合のSER15CとSER10Bの流動曲線をこの構成方程式で近似したものである。この近似で得られた構成方程式のパラメータからスメクタイトER流体の特性を以下のように考察すること

Fig. 3 Dynamic model of ERF

Fig. 4 Various patterns of flow curve derived from ERF constitutive equation

ができる。まず、濃度の変化に対する無電場における粘度 μ_3 の変化を図7に示す。粘度は濃度に対して非線形に増加していることが分る。濃度が低い場合は、電極間隔の影響はほとんど無いのでパラメータは電場強度に対してのみ変化する。次に、濃度が高い場合、電極間隔の変化に対して σ_c と μ_3 、 μ_2 、 μ_1 がどのように変化するかを示したのが図8と図9である。 σ_c は $\delta_c = 1.47, 2.12\text{mm}$ より $\delta_c = 3.00\text{mm}$ の場合が大きい。これは、電極間隔が広いと本モデルではVoigt部のばねの降伏応力が高いことを意味しており、電極間隔が広い場合ずり速度が0近傍ではクラスターは弾性限界が高い形態になっていると考えられる。

Fig. 5 Comparison between flow curve and the ERF constitutive equation with formulated constants (SER15C, $\delta_c = 2.12\text{mm}$)

Fig. 6 Comparison between flow curve and the ERF constitutive equation with formulated constants (SER10B, $\delta_c = 2.12\text{mm}$)

Fig. 7 Relationship between mass concentration and viscosity without electric field

Fig. 9 Relationship between electrode gap and viscosity

Fig. 8 Relationship between electrode gap and yield stress

μ_3 と μ_1 は電極間隔の増加に対して変化は小さいが、 μ_2 はピークを持つ。 μ_2 は本モデルではVoigt部の塑性を表すパラメータである。実際には、図4(b), (d)の $0 < D < D_s$ ではずり速度に比例してずり応力が増加しているの、比較的長いクラスターが形成され、クラスターは壁面近傍に対して滑っているかクラスターが伸びて切断されてもすぐに他のクラスターと結合する状態であると考えられる。従って、この領域のクラスターの形態は電極間隔によって異なっていると考えられる。また、図8に $f_k W$ と F_0 の電極間隔に対する変化を示す。電極間隔の増加に対して F_0 は僅かに変化するが、 $f_k W$ は $\delta_c=3.00\text{mm}$ でかなり大きくなる。すなわち、 $\delta_c=3.00\text{mm}$ の場合クラスターの流体抵抗がかなり大きく、クラスターの形態は小さい電極間隔の場合と異

なると推察できる。

以上の結果から、濃度の高い場合、電極間隔によって流動曲線の特性が複雑に変化することが分る。

5. 数値解析手法

解析モデルを図10に示す。回転円板の直径は $d_a=90.0\text{mm}$ で、厚さ $w=8.0\text{mm}$ であり、回転円板と固定円板の電極間隔 δ_d は1.5, 2.0, 3.0mmの3種類である。

数値解析は有限要素法による汎用流体解析コードFI-DAP (株式会社計算力学センター販売・サポート)⁵⁾に構成方程式から求めた式(2)を粘度のサブルーチンに組み込んで行った。なお、無電場の領域での粘度は式(3)を使用した。

$0 \leq D \leq D_0$ のとき

$$\mu = \mu_2 + \frac{\sigma_c}{D_0}$$

$D_0 < D < D_s$ のとき

$$\mu = \mu_2 + \frac{\sigma_c}{D}$$

$D_s \leq D$ のとき

$$\mu = \mu_1 \left\{ 1 + \frac{\sigma_c}{\mu_2 D} + \frac{f_0 W}{\mu_3 D} \exp\left(-\frac{D_s}{\varepsilon}\right) + \frac{f_k W}{\mu_3 D} + \frac{F_0}{\mu_3 D} \right\}$$

$$\mu = \mu_3 + \frac{F_0}{D} \quad (2)$$

ここで、 D_0 は D が極小になったときに μ が計算上無限大にならないように導入したずり速度である。

また、ずり速度は以下の式から求めた。

$$D^2 = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2 \quad (4)$$

Fig. 10 Geometry for rotating disk

解析の基礎式は円筒座標系であり、格子は長方形要素で、流速は1次の補間関数を使用した。また、有限要素方程式の解法は、安定性の良い逐次代入法を採用した。

解析における境界条件は以下の通りである。

固定電極板およびケーシング表面：

$$u_r = u_\theta = u_z = 0$$

回転円板および主軸の表面

$$u_\theta = r\omega, \quad u_r = u_z = 0$$

回転円板に作用するトルク $T_{ds} + T_{de}$ は、解析結果のデータを用いて以下の数値計算式から求めた。

$$T_{ds} + T_{de} = 2 \int_{R_s}^{R_d} \sigma_{z\theta} \bigg|_{z=\delta_d} 2\pi r dr + \sigma_{r\theta} \bigg|_{r=R_d} R_d W + 2\sigma_{r\theta} \bigg|_{r=R_s} R_s \delta \quad (5)$$

6. 流速分布が濃度と電極間隔から受ける影響

図11と図12は電極間隔が比較的狭い $\delta_d = 2.0\text{mm}$ のSER 15CとSER10Bの場合の $E = 2.00\text{kV/mm}$ における固定円板面垂直方向に対する流速分布とずり速度を示したものである。ここで、 z は固定電極板から回転円板軸方向の距離である。両図はほぼ同じ傾向を示しているものの、回転円板の外周部でずり速度の分布に違いがある。 $r/R_d = 0.9$ 、すなわち回転円板の外周に近いところでは、 $\omega = 0.63\text{rad/s}$ の場合、SER15Cでは一定で変化がなく回転円板近くで僅かに増加する。しかし、SER10Bでは固定円板から回転円板にかけての全領域で緩やかに増加している。これより、流速分布が異なっていることが分り、濃度によって流速分布が変化することが分る。両図において、低回転数の $\omega = 0.63\text{rad/s}$ ではずり速度の変化の割合は回転円板の中心に近いほど回転円板近傍で大きくなる。分散粒子が鎖状に繋がったクラスターにおいて、粒子間には電場起因する引力とファン・デル・ワールス力による引力が作用していると考えられる。流れ場ではこの粒子間引力とクラスターに作用する流体力が釣り合っていると考えられるので、クラ

Fig. 11 Distributions of velocity and shear rate (SER 15C, $\delta_d = 2.0\text{mm}$, $E = 2.00\text{kV/mm}$)

スターは流速分布においてずり速度が一番大きいところで崩れやすい⁶⁾。低回転数では中心に近い領域の流速分布のずり速度は回転円板面で最大である。低回転数の中心に近い領域ではクラスターは回転円板面で崩れやすいことを示している。ずり速度が回転円板近傍で急変する理由は、クラスターの崩れが回転円板近傍で生じているためと考えられる。この領域では比較的ずり応力が大きくなるが、半径が小さいので回転円板のトルクに及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、比較的回転数の高い $\omega = 6.28\text{rad/s}$ の時は回転円板外周に近い領域でずり速度は回転円板面で最大で、その他の領域では各半径で一樣であることが分る。これは、回転数の高い時、外周部の回転円板面でクラスターの崩れる割合が高いことを示しており、この領域は半径が大きいので回転円板のトルクに及ぼす影響が大きいと考えられる。その他の領域では各半径でずり速度がほぼ一樣であることから、ランダムに崩れる可能性があると考えられる。

Fig. 12 Distributions of velocity and shear rate (SER 10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}$, $E = 2.00\text{kV/mm}$)

Fig. 13 Distributions of velocity and shear rate (SER 15C, $\delta_d = 3.0\text{mm}$, $E = 1.50\text{kV/mm}$)

る。

図13は電極間隔が広い $\delta_d = 3.0\text{mm}$ のSER15C, $E = 1.50\text{kV/mm}$ の場合の流速分布とずり速度の分布である。電極間隔が広い場合は、低回転数では回転円板の全領域においてずり速度は回転円板面で最大である。すなわち、全領域でクラスタの崩れる割合が回転円板面で高いことを示している。一方、回転数の高い時は電極間隔が狭い場合と同様の傾向を示しているので、回転円板外周部で回転円板のトルクに及ぼす影響が大きくなっていると考えられる。

7. トルク特性が濃度と電極間隔から受ける影響

図14は実験装置であり、寸法形状は解析モデルと同じである⁷⁾。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。電極間隔は相対する円板の間に3種類のアクリル製のスペーサを用

Fig. 14 Schematic diagram of rotating disk device

Fig. 15 Comparison of torque characteristics between numerical and experimental results (SER15C, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

Fig. 16 Comparison of torque characteristics between numerical and experimental results (SER15C, $\delta_d = 3.0\text{mm}$)

いて、 $\delta_d = 1.5, 2.0, 3.0\text{mm}$ にする。回転円板はACサーボモータ（オリエンタルモーター株式会社製、KBL5120GD-A2/5GD15K）で所定の回転数で一定回転することができ、ロータ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（株式会社小野測器製、SS010）で計測される。また、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ER流体を一定温度の20℃に保つことができる。

図15と図16は濃度の高いSER15Cの $\delta_d = 2.0, 3.0\text{mm}$ における数値解析による回転円板に作用するトルクと実験結果の比較である。電極間隔が狭い $\delta_d = 2.0\text{mm}$ の場合、角速

Fig. 17 Comparison of torque characteristics between numerical and experimental results (SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

度の小さい領域を除いて数値解析によるトルクは実験結果とよく一致する。これより、数値解析には同じ電極間隔の流動曲線から得られた構成方程式を使用しなければならないことが確認できる。しかし、角速度が小さく電場強度が大きい領域で数値解析の結果は実験結果より小さくなるのが分かる。この領域では、回転円筒まわりとの流れ場の違いが影響していると考えられ、電場強度が大きく角速度が小さいため、粒子の凝集がより起こりやすくなっているためと推察できる。一方、電極間隔が広い $\delta_d = 3.0\text{mm}$ の場合は、ずり速度の全領域で数値解析と実験結果は良く一致するので、本モデルで十分に表現できることが分る。

図17は濃度の低いSER10Bの $\delta_d = 2.0\text{mm}$ における数値解析による回転円板に作用するトルクと実験結果の比較である。数値解析によるトルクは実験結果とおおよそ一致するが、角速度の大きい領域で数値解析によるトルクが実験結果より大きくなる傾向にある。この原因は円筒形粘度計によるずり応力がずり速度の増加に対して増加していくのに対して、同図から明らかのように回転円板のトルク特性は、角速度の増加に対して角速度の大きい領域で減少傾向にあるからである。これは、濃度の低い場合、角速度の大きい領域で回転円筒まわりとの流れ場の違いが影響していると考えられ、半径方向の二次流れのためにクラスターが短くなり回転円板面に作用するずり応力が小さくなるためと推察できる。

8. 結 言

濃度の異なるER流体中の回転円板まわりの流れとトルク特性の数値解析を行い、実験結果と比較・検討して濃度と電極間隔による影響について以下のことが分った。

(1) 濃度の高い場合、円筒形粘度計による流動曲線は電極

間隔によって異なり，クラスターの形態も異なると考えられる．濃度の低い場合，流動曲線は電極間隔の影響は小さい．

- (2) 円筒形粘度計で得られた流動曲線を使用した数値解析による流速分布は，半径方向で異なり，ずり速度は回転円板面で大きくなる場所がある．この流速分布のパターンは，回転数で変化し，電極間隔，濃度の変化によって異なり，クラスターの形態も異なると考えられる．
- (3) 数値解析による回転円板のトルクは，濃度の高い場合，電極間隔が狭く電場強度が大きく角速度がごく小さい領域で実験結果より小さくなるものの，それ以外の領域ではよく一致する．
- (4) 濃度の低い場合は，電場強度が大きくずり速度が大きい領域で数値解析によるトルクは実験結果よりやや大きくなる．これは半径方向の二次流れのためにクラスターが短くなり回転円板に作用するずり応力が小さくなるためと考えられる．

参 考 文 献

- 1) 築地徹浩，高橋淳，杉本旭，池田博康，平行二平板電極間のERFの流れ特性，油圧と空気圧，Vol. 25, No. 4 (1994)，pp. 556-561.
- 2) H. Nishida, K. Shimada, M. Iwabuchi, T. Fujita and K. Okui, Dynamic Characteristics of Torque Reacting on a Rotating Disk in Electro-Rheological Fluid of a Suspension-type, JSME Proceedings of International Conference on Fluid Engineering, I (1997), pp. 491-496.
- 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，Vol. 30, No. 1 (1999)，pp. 1-9.
- 4) A.R. Johnson, W.A. Bullough, R. Firoozian, A. Hosseini-sianaki, J. Makin and S. Xiao, Testing on a high speed electro-rheological clutch, International journal of modern physics B, Vol. 6, No. 15 & 16 (1992), pp. 2731-2747.
- 5) FIDAP 7.0 Theory manual, Fluid Dynamics International, (1993).
- 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，Vol. 20 (1992)，pp. 95-100.
- 7) 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を用いた回転円板型デバイスの定常特性に及ぼす諸因子の影響，日本機械学会論文集 (C編)，Vol. 65, No. 629 (1999)，pp. 269-276.