

電気粘性流体を応用した
回転型デバイスの特性に関する研究

1999年3月

富山大学大学院工学研究科

西田 均

博士論文

西 田 均

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 目次 | I |
| 主要記号 | V |
| 表リスト | IX |
| 図リスト | X |
| 第1章 序論 | |
| 1.1 本研究の目的と背景 | 1 |
| 1.2 本研究に関する従来の研究 | 3 |
| 1.2.1 ER 流体の特性に関する研究 | 3 |
| 1.2.2 回転型デバイスの性能に関する実験的研究 | 15 |
| 1.3 従来の研究の問題点 | 18 |
| 1.4 本研究の構成と内容 | 20 |
| 第2章 回転円筒型デバイスによる流動曲線 | |
| 2.1 緒言 | 23 |
| 2.2 実験装置 | 23 |
| 2.3 供試 ER 流体 | 29 |
| 2.4 実験方法とデータ処理法 | 31 |
| 2.4.1 データ計測法 | 31 |
| 2.4.2 トルクおよびずり応力の算出 | 31 |
| 2.4.3 ずり速度 | 34 |
| 2.4.4 電場強度および電流密度 | 36 |
| 2.5 実験結果 | 36 |
| 2.6 流動曲線の特性と考察 | 38 |
| 2.6.1 流動曲線の基本的特性 | 38 |
| 2.6.2 電場強度の影響 | 40 |
| 2.6.3 電極間隔の影響 | 46 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 2.6.4 濃度と温度の影響 | 53 |
| 2.7 電流密度の特性と考察 | 55 |
| 2.7.1 電流密度の基本的特性 | 55 |
| 2.7.2 電場強度の影響 | 58 |
| 2.7.3 電極間隔の影響 | 60 |
| 2.7.4 濃度と温度の影響 | 60 |
| 2.8 モーメント係数 | 64 |
| 2.9 トルク増加に対する消費電力 | 65 |
| 2.10 結言 | 69 |
| | |
| 第3章 回転円板型デバイスの定常特性の予測手法 | |
| 3.1 緒言 | 71 |
| 3.2 回転円板まわりの流れの基礎方程式と数値解析手法 | 72 |
| 3.3 ER流体に適用する構成方程式 | 78 |
| 3.3.1 力学応答系モデルと構成方程式 | 78 |
| 3.3.2 構成方程式の定式化 | 86 |
| 3.4 数値解析結果 | 90 |
| 3.4.1 流速分布 | 90 |
| 3.4.2 トルク特性 | 98 |
| 3.5 結言 | 101 |
| | |
| 第4章 回転円板型デバイスの定常特性 | |
| 4.1 緒言 | 102 |
| 4.2 実験装置 | 102 |
| 4.3 供試ER流体 | 108 |
| 4.4 実験方法とデータ処理法 | 108 |
| 4.4.1 データ計測法 | 108 |
| 4.4.2 トルクの算出 | 108 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 4.4.3 ずり速度および電場強度, 電流密度 | 110 |
| 4.5 実験結果 | 110 |
| 4.6 トルクの特性と考察 | 110 |
| 4.6.1 トルクの基本的特性 | 110 |
| 4.6.2 電場強度の影響 | 112 |
| 4.6.3 電極間隔の影響 | 117 |
| 4.6.4 濃度と温度の影響 | 120 |
| 4.7 電流密度の特性と考察 | 124 |
| 4.7.1 電流密度の基本的特性 | 124 |
| 4.7.2 電場強度の影響 | 127 |
| 4.7.3 電極間隔の影響 | 127 |
| 4.7.4 濃度と温度の影響 | 130 |
| 4.8 モーメント係数 | 134 |
| 4.9 トルク増加に対する消費電力 | 138 |
| 4.10 トルク特性に関する数値解析との比較 | 138 |
| 4.11 結言 | 148 |
| | |
| 第5章 ER流体の応答特性 | |
| 5.1 緒言 | 150 |
| 5.2 実験条件 | 150 |
| 5.3 回転円筒型デバイスにおける応答特性 | 151 |
| 5.4 回転円板型デバイスにおける応答特性 | 158 |
| 5.5 回転円筒型と回転円板型デバイスにおける応答特性の比較 | 167 |
| 5.6 結言 | 172 |
| | |
| 第6章 結論 | 174 |
| | |
| 参考文献 | 177 |

| | |
|---|-----|
| 謝辞 | 180 |
| 付録 A 計測器の仕様 | 182 |
| 付録 B ER 流体の濃度の計算法 | 184 |
| 付録 C 回転円筒型デバイスの実験データ | 185 |
| 付録 D 回転円筒型デバイスによる流動曲線および電流密度とずり速度 のグラフ | 192 |
| 付録 E ずり応力の誤差解析 | 203 |
| 付録 F 回転円板型デバイスの実験データ | 208 |
| 付録 G 回転円板型デバイスのずり速度に対するトルクと電流密度の グラフ | 215 |
| 付録 H 円板面に作用するトルクの誤差解析 | 230 |

主要記号

| | | |
|------------|---|---|
| b | : | 定数 $[(A/m^2)/(10^6V/m)^c]$ |
| c | : | 定数 [-] |
| d_c | : | 回転円筒の直径 [m (mm)] |
| d_d | : | 回転円板の直径 [m (mm)] |
| $C_{M c}$ | : | 回転円筒のモーメント係数 [-] |
| $C_{M d}$ | : | 回転円板のモーメント係数 [-] |
| D | : | ずり速度 [1/s] |
| D_0 | : | ずり速度の最小値 $= 0.0001(\sigma_c/\mu_2)$ [1/s] |
| D_3 | : | スライダの移動速度に相当するずり速度 [1/s] |
| D_d | : | 円板外端における回転面垂直方向のずり速度 $= R_d \omega / \delta_d$ [1/s] |
| D_s | : | $\sigma = \sigma_s$ におけるずり速度 [1/s] |
| E | : | 電場強度 [V/m (kV/mm)] |
| f | : | ER流体力学モデルにおけるスライダの摩擦係数 [-] |
| f_0 | : | f_s と f_k の差 $= f_s - f_k$ [-] |
| f_k | : | 力学応答系モデルにおけるスライダの動摩擦係数 [-] |
| f_s | : | 力学応答系モデルにおけるスライダの静摩擦係数 [-] |
| F | : | 力学応答系モデルにおけるスライダの摩擦応力 $= fW + F_0$ [Pa] |
| F_0 | : | ER流体の無電場時の降伏応力 [Pa] |
| G_1, G_2 | : | 力学応答系モデルにおけるバネのバネ定数 [Pa/m] |
| i | : | 電流密度 [A/m ²] |
| I | : | 電流 [A] |
| l | : | 回転円筒の長さ [m (mm)] |
| n | : | 回転数 [s ⁻¹] |
| R_i | : | 回転円筒の半径 [m (mm)] |

| | | |
|----------------------|---|--|
| R_m | : | 回転円筒の代表半径 $= (R_o + R_i) / 2$ [m (mm)] |
| R_o | : | 回転円筒型デバイスの外筒の半径 [m (mm)] |
| R_d | : | 回転円板の半径 [m (mm)] |
| $R_{\omega c}$ | : | 回転円筒の回転レイノルズ数 [-] |
| $R_{\omega d}$ | : | 回転円板の回転レイノルズ数 [-] |
| t | : | 温度 [°C] |
| T_c | : | 電場印加後の各時間の回転円筒に作用するトルク [N·m] |
| T_{c0} | : | 無電場時に回転円筒外周面に作用するトルク [N·m] |
| T_{ce} | : | 回転円筒上下面に作用するトルク [N·m] |
| T_{cf} | : | 回転円筒に作用する摩擦トルク [N·m] |
| T_{cm} | : | 回転円筒の計測トルク [N·m] |
| T_{cm0} | : | 無電場時の回転円筒の計測トルク [N·m] |
| T_{cs} | : | 回転円筒の外周面に作用するトルク [N·m] |
| T_d | : | 電場印加後の各時間の回転円板に作用するトルク [N·m] |
| T_{d0} | : | 無電場時に回転円板面に作用するトルク [N·m] |
| T_{de} | : | 回転円板外周面および主軸に作用するトルク [N·m] |
| T_{df} | : | 回転円板に作用する摩擦トルク [N·m] |
| T_{dm} | : | 回転円板の計測トルク [N·m] |
| T_{dm0} | : | 無電場時の回転円板の計測トルク [N·m] |
| T_{ds} | : | 回転円板両面に作用するトルク [N·m] |
| u | : | 流速 [m/s] |
| u_r, u_θ, u_z | : | r, θ, z 方向の各流速 [m/s] |
| v | : | 力学応答系モデルのスライダの移動速度 [m/s] |
| V | : | 印加電圧 [V (kV)] |
| w | : | 回転円板の厚さ [m (mm)] |
| W | : | 力学応答系モデルのスライダの荷重 [Pa] |

| | | |
|-----------------|---|--|
| α | : | 体積濃度 [vol.%] |
| γ_1 | : | 力学応答系モデルのVoigt部に直列に結ばれたバネの歪み [m] |
| γ_2 | : | 力学応答系モデルのVoigt部のバネの歪み [m] |
| γ_3 | : | 力学応答系モデルのダッシュ・ポット部の歪み [m] |
| δ_c | : | 回転円筒型デバイスの電極間距離 $=R_o - R_i$ [m (mm)] |
| δ_d | : | 回転円板型デバイスの電極間距離 [m (mm)] |
| ΔT_{cs} | : | $=T_{cs} - T_{c0}$ [N·m] |
| ΔT_{ds} | : | $=T_{ds} - T_{d0}$ [N·m] |
| ε | : | $f = f_k + f_0/e$ となるスライダの移動速度 ($e=2.718\cdots$) [m/s] |
| μ | : | ER流体の電場印加時の粘度 [Pa·s] |
| μ_0 | : | 無電場時の粘度 [Pa·s] |
| μ_B | : | ER流体の塑性粘度 [Pa·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 [Pa·s] |
| μ_3 | : | ER流体の無電場時の塑性粘度 [Pa·s] |
| μ_t | : | $D \geq D_s$ におけるER流体の電場印加時の塑性粘度 $= (\mu_2 \cdot \mu_3) / (\mu_2 + \mu_3)$ [Pa·s] |
| $\bar{\mu}$ | : | 電場印加時の円板隙間内の代表粘度 [Pa·s] |
| $\bar{\mu}_0$ | : | 無電場時の円板隙間内の代表粘度 [Pa·s] |
| ρ | : | ER流体の密度 [kg/m ³] |
| σ | : | ずり応力 [Pa] |
| σ_c | : | 降伏応力 [Pa] |
| σ_s | : | $D=D_s$ におけるずり応力 [Pa] |
| τ | : | 時間 [s] |
| τ_i | : | 電流密度の応答時間 [s] |
| τ_t | : | トルクの応答時間 [s] |
| τ_{si} | : | 電流密度の整定時間 [s] |

- τ_{st} : トルクの整定時間 [s]
 ϕ : 質量濃度 [wt.%]
 ω : 回転体の角速度= $2\pi n$ [rad/s]
 Ω : 角速度 [rad/s]

表リスト

表 1.1(a)(b) 各研究者が用いた ER 流体の種類と実験条件

表 2.1 スメクタイト型 ER 流体の物理的性質

表 2.2 本研究で使用するスメクタイト型 ER 流体

表 2.3 回転円筒型デバイスの実験条件一覧

表 3.1 ER 流体の構成方程式に対する各種パラメータの値
(SER10B)

表 3.1(a)(b)(c) ER 流体の構成方程式に対する各種パラメータの
値 (SER15C)

表 4.1 回転円板型デバイスの実験条件一覧

表 5.1 回転円筒型デバイスによる ER 流体の応答時間データ

表 5.2 回転円板型デバイスによる ER 流体の応答時間データ

表 5.3 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの応答時間の
比較 ($D, D_d > 100(1/s)$)

図リスト

- 図 1.1(a) シリカゲル型 ER 流体の流動曲線(Klass ら)
- 図 1.1(b) イオン交換樹脂型 ER 流体の流動曲線(Sugimoto)
- 図 1.1(c) スルホン化重合体型 ER 流体の流動曲線(小西ら)
- 図 1.1(d) ポリパラフェニレン型 ER 流体の流動曲線(志賀ら)
- 図 1.1(e) ポリマーコア型 ER 流体の流動曲線(枝村)
- 図 1.1(f) 炭素質型 ER 流体の流動曲線(遠藤)
- 図 1.1(g) スメクタイト型 ER 流体の流動曲線(藤田ら)
- 図 1.2 粒子の配列状態
- 図 1.3 電極間隔が流動曲線に及ぼす影響(Klass らの実験結果)
- 図 1.4 回転円筒型クラッチ(杉本ら)
- 図 1.5 回転円板型クラッチ(Stevens ら)
- 図 1.6 回転円板の予測トルクと実験結果の比較(杉本ら)
- 図 1.7 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの流れ場

- 図 2.1(a) 回転円筒型デバイスの実験装置
- 図 2.1(b) 実験装置の全体写真
- 図 2.2(a) 回転円筒型デバイス本体の詳細図
- 図 2.2(b) 回転円筒の写真
- 図 2.3 実験における電場印加の方法
- 図 2.4 回転円筒型デバイスの電極間内半径方向電場強度分布
- 図 2.5 流動曲線 (SER10A, $\delta_c=2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 2.6 流動曲線 (SER10B, $\delta_c=2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 2.7 流動曲線 (SER15A, $\delta_c=2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 2.8 流動曲線 (SER15C, $\delta_c=2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 2.9 ずり応力の増加分とずり速度の関係 (SER10A, $\delta_c=2.12\text{mm}$)
- 図 2.10 ずり応力の増加分とずり速度の関係 (SER15A, $\delta_c=2.12\text{mm}$)

- 図 2.11 ずり応力の増加分と電気力の関係(SER10A)
 図 2.12 ずり応力の増加分と電気力の関係(SER15A)
 図 2.13 ずり応力の増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER10A)
 図 2.14 ずり応力の増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER15A)
 図 2.15 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B)
 図 2.16 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C)
 図 2.17(a) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E=0.00\text{kV/mm}$)
 図 2.17(b) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E=0.50\text{kV/mm}$)
 図 2.17(c) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E=1.00\text{kV/mm}$)
 図 2.17(d) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E=1.50\text{kV/mm}$)
 図 2.17(e) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E=2.00\text{kV/mm}$)
 図 2.18(a) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E=0.00\text{kV/mm}$)
 図 2.18(b) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E=0.50\text{kV/mm}$)
 図 2.18(c) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E=1.00\text{kV/mm}$)
 図 2.18(d) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E=1.50\text{kV/mm}$)
 図 2.18(e) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E=2.00\text{kV/mm}$)
 図 2.19 ずり応力の増加分と体積濃度の関係
 ($E=1.50, 1.52\text{kV/mm}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
 図 2.20 流動曲線(SER15A, $\delta_c = 2.12\text{mm}$)
 図 2.21 電流密度とずり速度の関係(SER10A, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
 図 2.22 電流密度とずり速度の関係(SER15D, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
 図 2.23 電流密度の特性
 図 2.24 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER10A)
 図 2.25 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER15A)
 図 2.26 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係(SER10B)
 図 2.27 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係(SER15C)
 図 2.28 電流密度と体積濃度の関係
 ($E=1.50, 1.52\text{kV/mm}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)

- 図 2.29(a) 電流密度とずり速度の関係(SER15A, $t=20^{\circ}\text{C}$, $\delta_c=2.12\text{mm}$)
- 図 2.29(b) 電流密度とずり速度の関係(SER15A, $t=40^{\circ}\text{C}$, $\delta_c=2.12\text{mm}$)
- 図 2.30(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10A, $t=20^{\circ}\text{C}$)
- 図 2.30(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10A, $t=40^{\circ}\text{C}$)
- 図 2.31(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15A, $t=20^{\circ}\text{C}$)
- 図 2.31(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15A, $t=40^{\circ}\text{C}$)
- 図 2.32 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER10A)
- 図 2.33 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER15A)

- 図 3.1 解析対象の格子分割図($\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 3.2 解析対象領域ごとの格子の分割数
- 図 3.3 解析のフローチャート
- 図 3.4 力学応答系モデル
- 図 3.5 力学応答系モデルの Voigt 部の応力状態
- 図 3.6 ER 流体構成方程式の流動曲線の各種パターン
- 図 3.7 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較($\delta_c=2.12\text{mm}$, SER10B)
- 図 3.8 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較($\delta_c=1.47\text{mm}$, SER15C)
- 図 3.9 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較($\delta_c=2.12\text{mm}$, SER15C)
- 図 3.10 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較($\delta_c=3.00\text{mm}$, SER15C)
- 図 3.11 円板外周速度に対する流速等高線図
- 図 3.12 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d=1.5\text{mm}$)
- 図 3.13 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 3.14 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d=3.0\text{mm}$)
- 図 3.15 電極間の流速分布と速度勾配(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

- 図 3.16(a) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d=1.5\text{mm}$)
- 図 3.16(b) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 3.16(c) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d=3.0\text{mm}$)
- 図 3.17 数値解析によるトルク特性(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

- 図 4.1(a) 回転円板型デバイスの実験装置
- 図 4.1(b) 実験装置の全体写真
- 図 4.2(a) 回転円板型デバイス本体の詳細図
- 図 4.2(b) 回転円板の写真
- 図 4.3 トルクとずり速度の関係(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.4 トルクとずり速度の関係(SER15B, $\delta_d=1.5\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.5 トルクとずり速度の関係(SER15B, $\delta_d=2.0\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.6 トルクの増加分とずり速度の関係(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.7 トルクの増加分とずり速度の関係(SER15B, $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.8 トルクの増加分と電気力の関係(SER10B)
- 図 4.9 トルクの増加分と電気力の関係(SER15B)
- 図 4.10 トルクの増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER10B)
- 図 4.11 トルクの増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER15B)
- 図 4.12 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER10B $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.13 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.14 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.15 トルクの増加分と体積濃度の関係
($E=2.00\text{kV/mm}, \delta_d=2.0\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.16(a) トルクとずり速度の関係(SER10B, $t=20^\circ\text{C}$ $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.16(b) トルクとずり速度の関係(SER10B, $t=40^\circ\text{C}$ $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.17(a) トルクとずり速度の関係(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$ $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.17(b) トルクとずり速度の関係(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$ $\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.18 電流密度とずり速度の関係(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)

- 図 4.19 電流密度とずり速度の関係(SER15B, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.20 電流密度とずり速度の関係(SER15B, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.21 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER10B)
- 図 4.22 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER15B)
- 図 4.23 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係
(SER10B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.24 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係
(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.25 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係
(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.26 電流密度の濃度による変化(SER10B, SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.27 電流密度の濃度による変化(SER10B, SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.28 電流密度と体積濃度の関係
($E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.29(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.29(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10B, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.30(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)
- 図 4.30(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)
- 図 4.31 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER10B)
- 図 4.32 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER15B)
- 図 4.33(a) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較($\delta_d=1.5\text{mm}$)
- 図 4.33(b) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較($\delta_d=2.0\text{mm}$)
- 図 4.33(c) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較($\delta_d=3.0\text{mm}$)
- 図 4.34 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較(SER15C)
- 図 4.35 円板外周速度に対する半径方向流速等高線図(SER15C)
- 図 4.36 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較
(SER10B, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

- 図 5.1 回転円筒型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の応答特性($E=2.00\text{kV/mm}, n=1.0\text{s}^{-1}$)
- 図 5.2 回転円板型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の応答特性($E=2.00\text{kV/mm}, n=1.0\text{s}^{-1}$)
- 図 5.3 回転円筒型デバイスのトルクの立ち上がり時間と整定時間
- 図 5.4 回転円筒型デバイスの電流密度の立ち上がり時間と整定時間
- 図 5.5 回転円筒型デバイスのトルクの時間的变化
- 図 5.6 回転円筒型デバイスの電流密度の時間的变化
- 図 5.7 回転円板型デバイスのトルクの立ち上がり時間と整定時間
- 図 5.8 回転円板型デバイスの電流密度の立ち上がり時間と整定時間
- 図 5.9 回転円板型デバイスのトルクの時間的变化
- 図 5.10 回転円板型デバイスの電流密度の時間的变化
- 図 5.11(a) 回転円筒型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の応答特性($E=1.50\text{kV/mm}, n=0.1\text{s}^{-1}$)
- 図 5.11(b) 回転円板型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の応答特性($E=1.50\text{kV/mm}, n=0.1\text{s}^{-1}$)

第1章 序論

1.1 本研究の目的と背景

電気粘性流体(Electro-Rheological Fluid, 本研究では以後ER流体またはERFと呼ぶ)は, 外部電場の作用のもとで流体の粘性や弾性などのレオロジー特性が変化する流体である. このような現象をER効果と呼んでいる. ER流体は以下の様な特長を有することが知られている.

- (1)電場の大きさを変えることによって, 粘度を電氣的に制御できる.
- (2)粘度変化は, 比較的短時間に可逆的かつ連続的に行われる.
- (3)高電圧を必要とするが, 電流密度は小さく消費電力が小さい.

ER流体はこのように優れた特長を有するので, 工業的に多くの応用が考えられ, 現在, ER流体の性能向上ならびにER流体応用デバイスの研究開発が活発に進められている.

ER流体の有力な応用分野の一つが, ER流体の中に回転円板あるいは回転円筒を浸漬して, その回転運動を電氣的に制御するブレーキやクラッチあるいは回転数レギュレータへの応用であり, 特にマイクロマシンなどでは構造上の単純さが大きな利点として注目されている. 本研究では, ER流体に印加する電場強度の変化によって回転体に働くトルクを制御することにより, 回転体の回転数や伝達トルクを制御するデバイス(以下では回転型デバイスと呼ぶ)を取り上げる. 回転型デバイスの形式は基本的に二つの形式, すなわち, 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスに分けられる. 実用上の観点から, 多板化によって電極面積を比較的自由に選べる後者の形式が実効性が高いと考えられるが, 従来知られているデータとしては粘度計測に用いられる回転円筒型のデータが圧倒的に多い.

本研究の目的は, このような回転制御デバイス設計の際に必要な, 回転体のまわりの流れの電気粘性効果(ER効果)を明らかにし, 回転型デバイスの運動特性を予測する工学的手法を確立しようとするものである.

回転型デバイスの設計では、電場印加条件下でのER流体のレオロジー特性、すなわち、ずり速度(せん断速度)とずり応力(せん断応力)の関係を表す流動曲線にもとづいて、種々の回転状態の下で回転体まわりの流れによって生じるトルクを予測する必要がある。ER流体は一般に非ニュートン流体としての特性を持つことが知られており、ずり速度とずり応力の関係は非線形となる。このため、回転体のまわりの流れは、ニュートン流体の場合のように単純な流速分布を持つことは期待できず、電場印加時のER流体中での回転体まわりの流れパターン(流速分布の形状)は与えられた回転体の条件ごとに異なるパターンとなることは避けられない。このことから、実際に回転体に作用するトルクを知るには、ER流体のレオロジー特性を用いて回転体まわりの流れのパターンの正確な予測を行い、その結果にもとづいて回転体表面に作用するずり応力を求め、最後にトルクを得るという予測手法が必要になる。

従って、予測のための基本データとして、先ずER流体のレオロジー特性に関係する全てのパラメータの影響を知る必要がある。パラメータとして考えられるのは、ER流体の種類、濃度、温度、圧力、流路形式(主として回転円筒と回転円板)、流路寸法あるいは電極間隔、電場強度、流路の電位分布パターン、電流分布、電場強度の変化に対する応答性、電場の種類である。この他いわゆるレオロジー特性以外にも、ER流体の消費電力、電流-電圧特性、耐電圧限界、ヒステリシス、耐久性(経時性能劣化)に関するデータが、実際の設計にとっては必要である。

さらに、複雑なレオロジー特性を持つER流体中での回転体まわりのフローパターンを求める流動解析手法として、実用上数値解析が唯一の手法であるが、この数値解析では運動方程式の粘性項に非ニュートン流体としてのずり応力を表す構成方程式を組み込む必要がある。

以上のような予測手法に関する分析にもとづいて、本研究では次のような研究手法を採用する。

先ず、直径の大きい回転円筒型デバイスを使用して、ER流体のずり応力や電

流密度がずり速度，電場強度，電極間隔，温度，濃度のパラメータから受ける影響を実験によって明らかにする。

次に得られたER流体の流動曲線を使用して，回転円板型デバイスのトルク特性を数値解析により予測する。従来，数値解析においてER流体の構成方程式はビンガム流体モデルが使用されているが，本研究では実際のER流体の特性をシミュレートできる構成方程式を提案し，この構成方程式を使用して回転円板型デバイスのトルク特性を数値解析によって求める。

そして回転円板型デバイスの数値解析によって求めたトルク特性と実験で得られたトルク特性を比較・検討する。また，回転円板型デバイスの性能を直接表現するのに用いられるモーメント係数について調べ，回転円筒型デバイスとの違いについても比較も行う。

以上はデバイスの定常特性に関するものであるが，実際に回転型デバイスの使用に当たっては応答特性も必要となる。そこで，それぞれの形式のデバイスにおけるER流体のトルクと電流密度に関する応答特性を調べる。

尚，ER流体には大別して，粒子分散系と液晶などの均一系があるが，本研究では，供試ER流体として粒子分散系ER流体の一つであるスメクタイト型ER流体⁽¹⁾を使用する。これについては第2章でも述べるが，分散粒子や溶媒の物性が明確であることと濃度の異なるER流体を用意することができるからであり，さらに分散粒子の粒径がナノメートルオーダーと小さく分散性に優れているためである。

1.2 本研究に関する従来の研究

本節では本研究の背景となっているER流体に関する研究を機能性材料としてのER流体の特性に関する研究とER流体の応用面の研究に分けて述べる。

1.2.1 ER流体の特性に関する研究

まず，ER流体の開発状況をみると1980年代中頃までは分散粒子が水分を含んだ含水系が主流であり，電場印加による粒子の電気分極に水分が関係していた。そのため高温になると水分が蒸発して，粒子の電気分極が起こらなくなり，ER

効果を示さないと言う問題点があり実用化には至らなかった。その後水分を全く含まない非水系が開発されてから、実用化へ一歩近づいた。現在は非水系のER流体の開発が中心に行われているが、水系でありながらある程度の高温まで水分が安定な形で残り、高温でもER効果を持続するものも開発されている。

水系ER流体に用いられる代表的な分散粒子としてはシリカゲル⁽²⁾、イオン交換樹脂⁽³⁾、スルホン化重合体⁽⁴⁾などがある。一方、非水系ER流体に用いられる分散粒子としては、ポリパラフェニレン⁽⁵⁾、ポリマーコア⁽⁶⁾、炭素質⁽⁷⁾、スメクタイト⁽¹⁾などがある。表1.1(a)および表1.1(b)に各研究者が開発したER流体の種類と実験範囲を示す。また、得られた流動曲線を図1.1(a)～(g)に示す。

図1.1(a),(e),(f)の流動曲線はビンガム流体に近い。図1.1(b)の流動曲線は降伏応力を持った擬塑性流体に近い。図1.1(c)(d)は電場強度が大きくなると、ずり速度0での降伏応力が大きく、ずり速度の小さい領域ではずり速度の増加に対して、ずり応力が急激に減少する特性を示している。また、図1.1(g)では、電場強度が大きくなるとずり速度の小さい領域でずり応力が急激に増加する特性を示している。以上のように、ER流体の流動特性を表すのに、種類によってはビンガム流体近似が適切でないものがあることが分かる。なお、流れ場は異なるが、平行平板間の実験と理論計算の比較から、電場強度が大きかずり速度の小さい領域では、分散粒子が一様分散状態と大きく異なるので、ビンガム流体近似が成立しないことが報告されている⁽⁸⁾。

表1.1に示すように、全てのER流体が同心二重円筒型粘度計で計測されているが、実験条件としての外筒の内径、内筒の外径あるいは電極間隔が明記されていないものがある。後で述べるが実験条件が明記されていないため、ER流体応用デバイス設計の基本データとして適切に使用できない場合がある。

ER流体がなぜ粘度の変化を生じるかについては多くの研究がなされているが、従来の電磁気学や電気化学の知識では十分に説明できない現象のため、現在まで定量的に無理のない説明ができる理論は存在しない。しかしながら、少

表 1.1(a) 各研究者が用いた ER 流体の種類と実験条件(含水系)

| 研究者名 と文献番号 | D.L.Klass & T.W.Martinek (2) | Sugimoto (3) | 小西正芳 他 (4) |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 分散粒子 | シリカ | イオン交換樹脂 | スルホン化重合体 |
| 分散媒 | ナフサ油 | トリメックス N-10 | ダイフロイル#1 とシリコーン オイルの混合液 |
| 電場強度 | 0~1.18 kV/mm | 0 ~ 2.6 kV/mm | 0 ~ 2.5 kV/mm |
| ずり速度 | 0~2300 1/s | 400 1/s | 0~1300 1/s |
| 同心二重円 筒型粘土計 の寸法 | 外筒内径 19.51mm 内筒外径変化 高さ 25.63mm | 概略図のみ | 外筒内径 27mm 内筒外径 25mm 高さ 32mm |
| 電極間隔 | 0.254, 0.508mm 0.254, 1.27mm | 不明 | 1mm |

表 1.1(b) 各研究者が用いた ER 流体の種類と実験条件(非含水系)

| 研究者名 と文献番号 | 志賀 亨 他 (5) | 枝村一弥 (6) | 遠藤茂樹 (7) | 藤田豊久 他 (1) |
|-----------------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|
| 分散粒子 | ポリパラフェニレン | ポリマーコア | 炭素質 | スメクタイト |
| 分散媒 | シリコンオイル | シリコンオイル | 絶縁油 | シリコンオイル |
| 電場強度 | 0 ~ 4.0 kV/mm | 0 ~ 2.0 kV/mm | 0 ~ 3.0 kV/mm | 0 ~ 2.5 kV/mm |
| ずり速度 | 0~75 1/s | 0~1000 1/s | 0~1000 1/s | 0~450 1/s |
| 同心二重円 筒型粘土計 の寸法 | 外筒内径 18mm 内筒外径 16mm | 計測装置の説明なし | 不明 | 外筒内径 30mm 内筒外径 27mm 高さ 70mm |
| 電極間隔 | 1mm | 不明 | 不明 | 1.5mm |

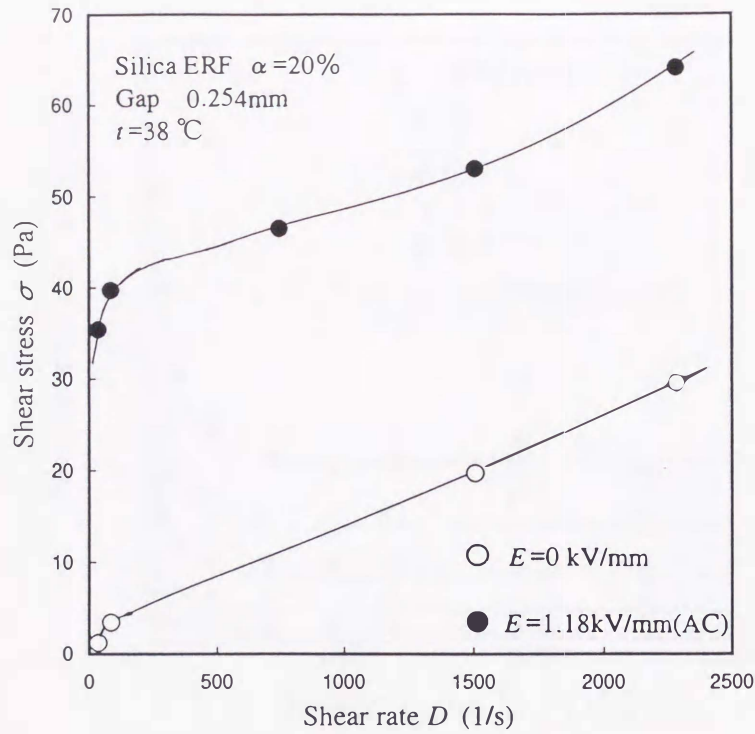


図1.1(a) シリカゲル型ER流体の流動曲線(Klassら)

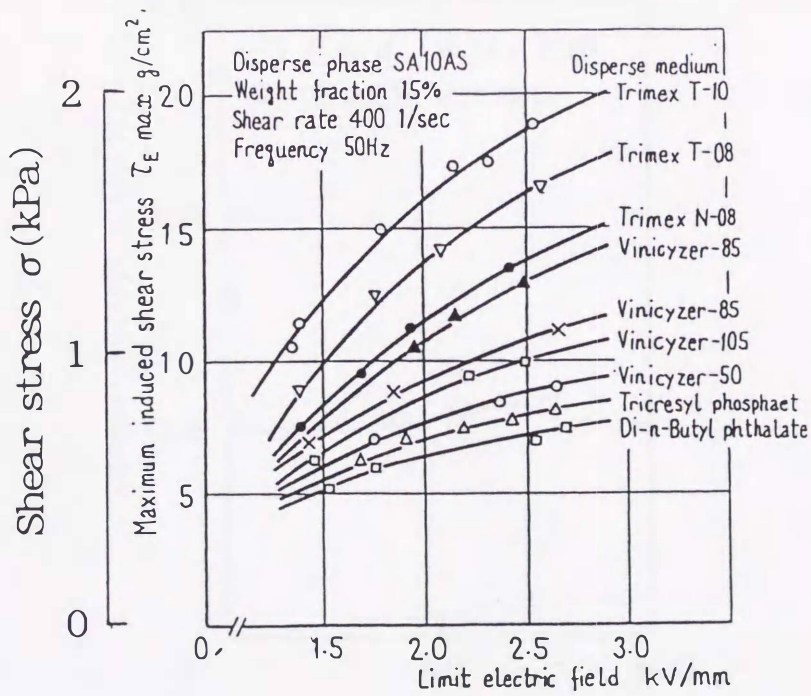


図1.1(b) イオン交換樹脂型ER流体の流動曲線(Sugimoto)

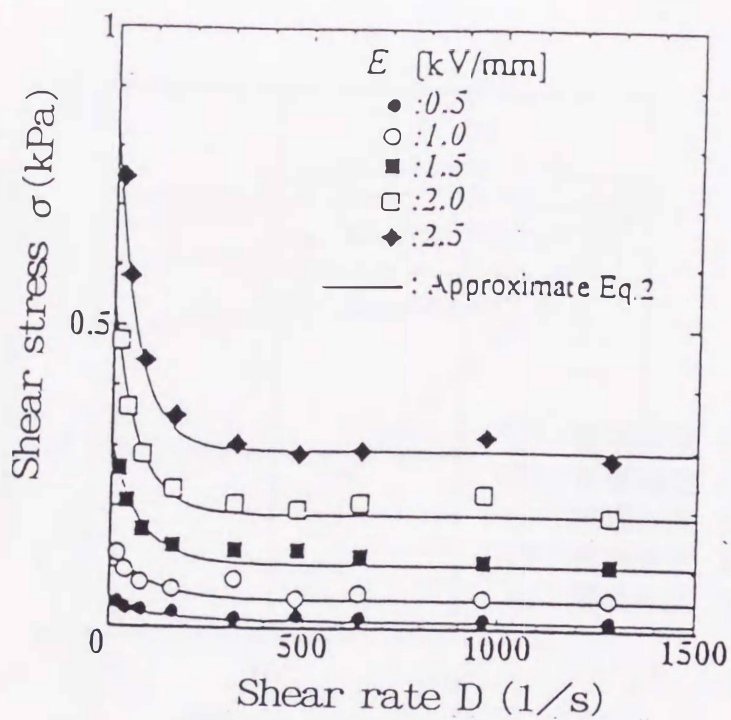


図1.1(c) スルホン化重合体型ER流体の流動曲線(小西ら)

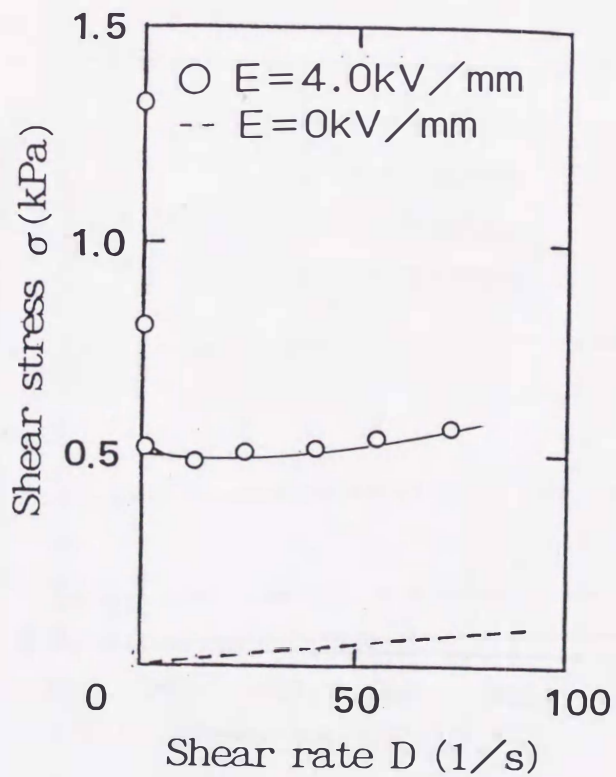


図1.1(d) ポリパラフェニレン型ER流体の流動曲線(志賀ら)

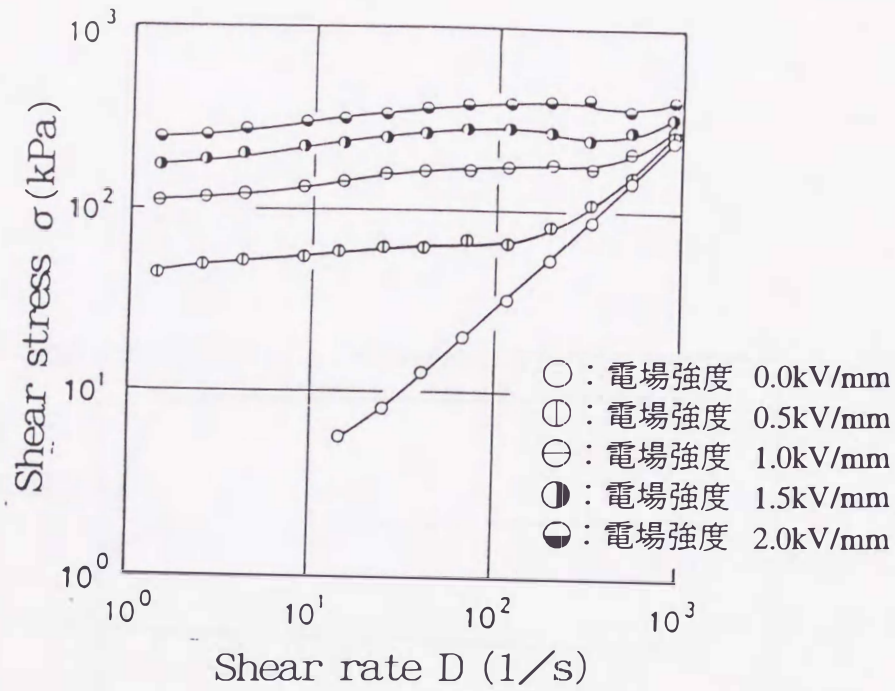


図1.1(e) ポリマーコア型ER流体の流動曲線(枝村)

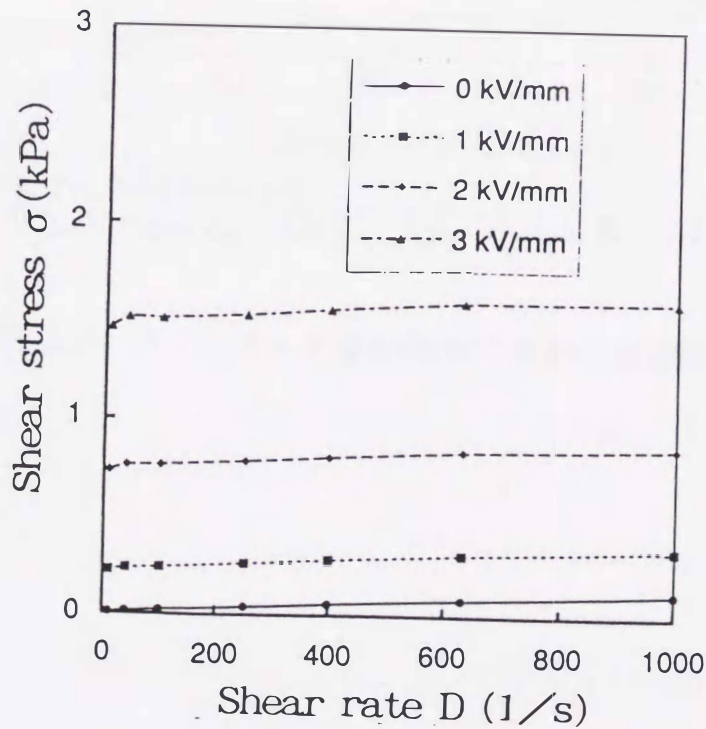
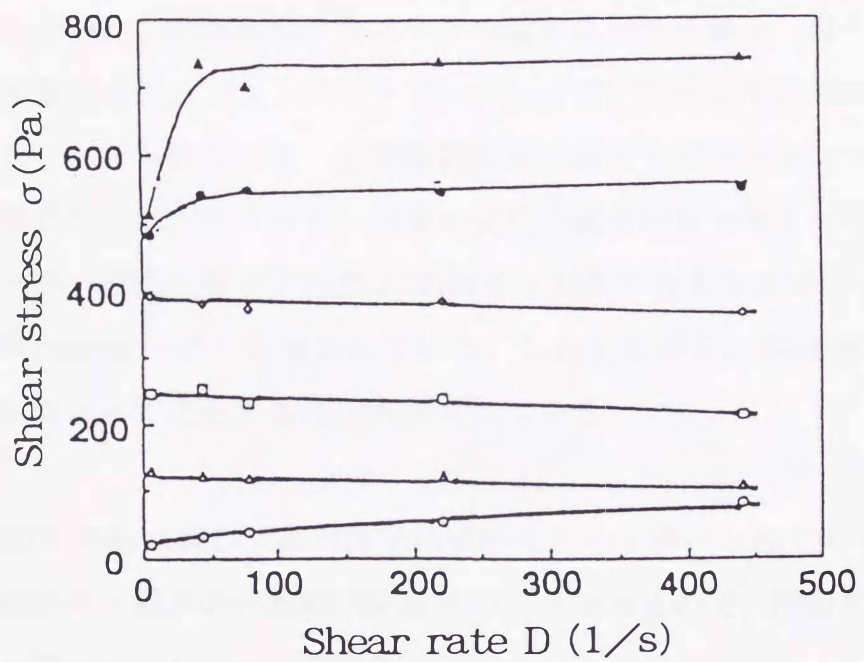


図1.1(f) 炭素質型ER流体の流動曲線(遠藤)



Electric field strength
 ○ : 0 kV/mm, △ : 0.5, □ : 1.0, ◇ : 1.5, ● : 2.0, ▲ : 2.5

図1.1(g) スメクタイト型ER流体の流動曲線(藤田ら)

なくとも粘度増加の一部分は次のようなメカニズムに依存していると考えられている。すなわち、無電場時図1.2(a)に示すように微粒子は絶縁油中に不規則に分散しているが、電場が印加されると絶縁油中に分散された微粒子は、電気分極して双極子を持つ。そして電気分極した微粒子同士はお互いの反対電価による引力により図1.2(b)に示すような数珠状のクラスター（鎖状構造）を形成する。このクラスターが分散媒である絶縁油の流れに対する抵抗となることにより粘度が増加すると考えられている⁽⁹⁾。また、電場を印加するとER流体中に電流が流れるが、この電流がクラスターの粒子に流れる場合、粒子の接触点付近に電荷が蓄積され、ジョンセン・ラーベック力^{(10)*}が作用して粒子間が引きつけられると考えられている。反対電価による引力とジョンセン・ラーベック力は強い電界中では大きくなり、粘度の変化の度合いも大きくなる。

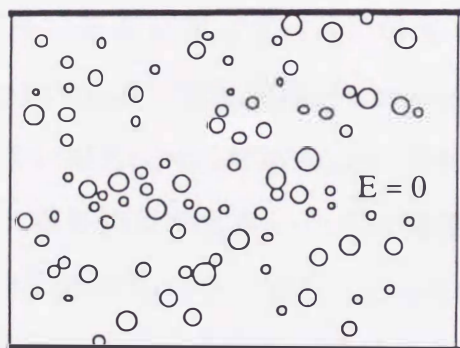
このクラスター形成に要する時間がER効果を発現するまでの時間となる。この応答時間はmsのオーダーと言われている。しかしながら、ER流体の種類や流動場の条件によって変化することが知られている。

ER流体の流動曲線は同心二重円筒型粘度計によって調べられているが、同心二重円筒型粘度計は基本的に回転円筒型デバイスであるので、回転円筒型デバイスの特性を調べていることにもなる。

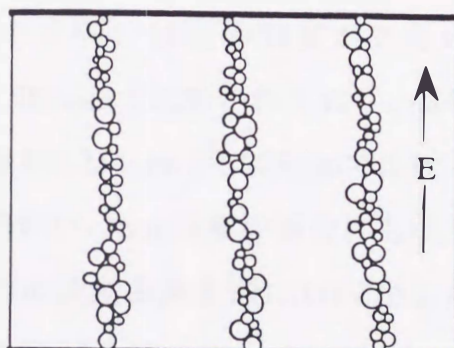
分散系ER流体の一般的特性としては、これまでの研究から以下のことが知られている。

- (1) ずり応力は電場強度の1~2乗に比例する。
- (2) ずり応力は体積濃度が低い場合、体積濃度に比例する。
- (3) ずり応力は温度やずり速度、電場の種類、流れのパターンによって変化する。
- (4) 電流密度は0.1~0.5A/m²程度である。温度が上昇すると電流密度は増大する。

*物体の集合体に電流を流すと接触点をはさんで大きな電位差を生じ、これによって接触点の両側の物体コンデンサ間に電荷が現れ、大きな吸引力を生ずる。これによる一種の分極力をジョンセン・ラーベック力という。



(a) 電界なし



(b) 電界印加

図 1.2 粒子の配列状態

(5)応答時間はER流体の種類やデバイスの種類によって異なり数ms～数sである。

しかしながら、これまでのような同心二重円筒型粘度計による流動曲線がER流体応用デバイスの性能評価に使用できるかについては、次の点から問題がある。

(1)電極間隔の影響

各種のER流体の流動曲線が電極間隔から受ける影響に関する報告はほとんどなされていないが、Klassら⁽²⁾は、ナフサ油にシリカ粒子を分散させたER流体を用いた実験から、電極間隔が流動曲線に影響を与えないことを報告している。その結果を図1.3に示す。この実験では電場強度が大きい場合($E=1.57\text{kV/mm}$)、電極間隔が0.254mmと0.508mmで比較されており、電場強度が小さい場合($E=0.612\text{kV/mm}$)、電極間隔が0.254mmと1.225mmで比較されている。電場強度が大きいときに電極間隔が1～3mm程度の場合にも成立するかどうかわからない。また、このER流体の流動曲線を図1.1(a)に示したが、電場印加によるずり応力の大きさは小さい。

(2)曲率の影響

直径の小さい回転円筒型デバイスの場合、代表半径に対する電極間隔の割合が大きく、第2章で述べるように電場強度は半径方向に非線型に変化する⁽¹¹⁾。従って、ER流体の流動曲線は電極間隔/代表半径の値によって変わる可能性がある。

ER流体の応答特性については、第一にはER流体の種類によって異なると考えられる。一般性のある応答特性は期待できないと思われるが、平行平板型と同心二重円筒型粘度計によるもの⁽¹²⁾⁽¹³⁾と回転円筒型クラッチ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾の報告がある。トルクの立ち上がり時間がいずれの場合もmsのオーダーであることが報告されている。また、回転円板型デバイスでの応答特性も調べられており、回転円筒型デバイスと同程度であることが報告されているが、詳しい考察はなされ

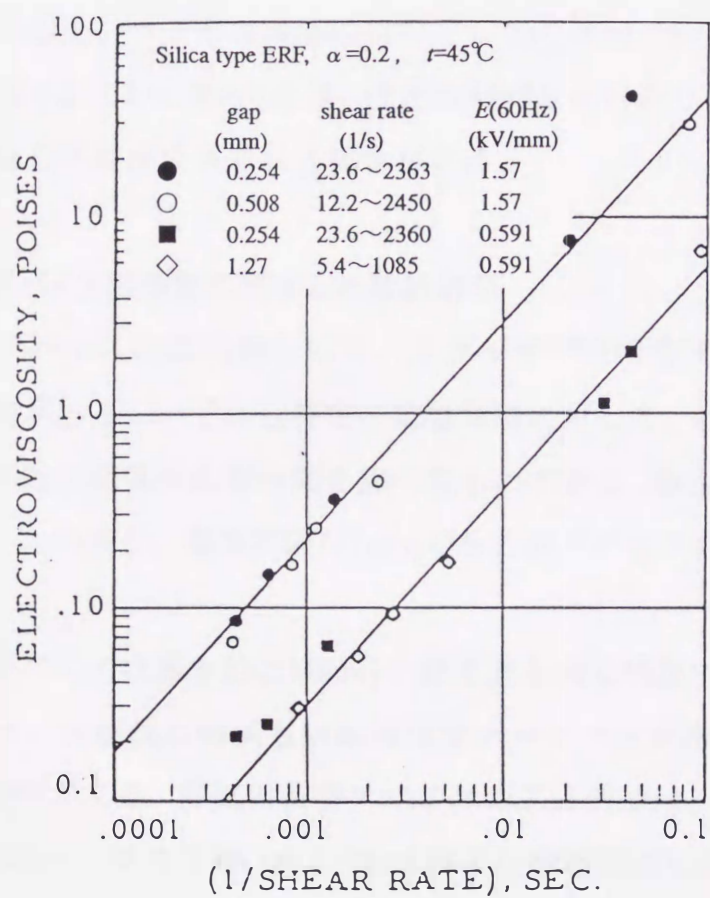


図1.3 電極間隔が流動曲線に及ぼす影響(Klassらの実験結果)

ていない⁽¹⁴⁾。回転型デバイスの性能予測のための基本データとして、トルクの応答特性が回転数によって受ける影響も必要であるが、Tanakaら⁽¹²⁾ および Ginderら⁽¹³⁾は、ずり速度の増加につれ応答が早くなることを報告している。しかしながら、このデータは、それぞれ平行平板型と同心二重円筒型粘度計の場合であり、回転円板型デバイスでも同じであるかどうかについては、分かっていない。

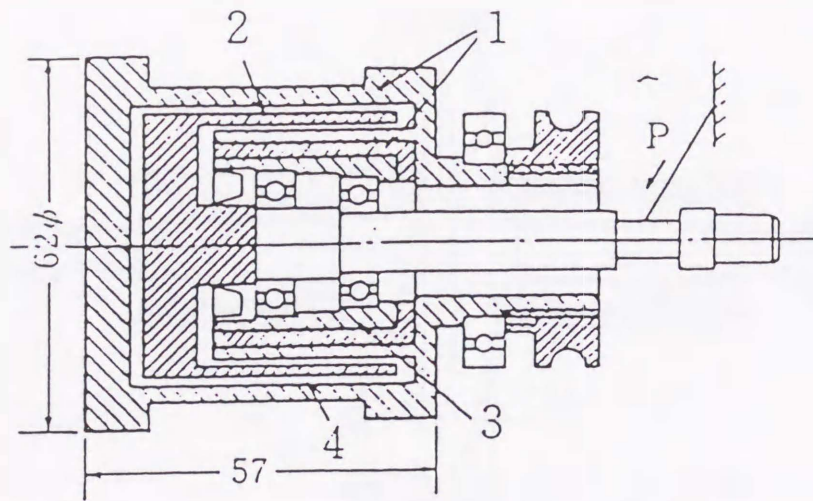
なお、流動特性というよりも機能性材料としての問題であるが、一般的傾向として現在開発されているER流体は、性能の経時変化があり、数時間の使用でレオロジー特性の再現性が失われる場合がある。

1.2.2 回転型デバイスの性能に関する実験的研究

回転円筒型デバイスの応用例として、クラッチ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾やアクチュエータ⁽¹⁷⁾についての報告がある。いずれも特定の電極間隔に対して、各電場強度に対するトルクと回転数の関係や応答時間を調べたものである。図1.4に杉本らのクラッチ⁽¹⁴⁾を示す。この場合、電極間隔は1mmであるがデバイスの詳細寸法は記されていない。

回転円板型デバイスは基本的にMooneyの粘度計と同じ構造であるが、このデバイスのトルクと回転数の関係も回転円筒型デバイスと同様に電極間隔の影響を受ける可能性がある。回転円板型デバイスの応用例では、クラッチ⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾に関する報告がある。参考文献(14)と(18)は特定の電極間隔に対して、各電場強度に対するトルクと回転数の関係を調べたものであり、Stevensら⁽¹⁹⁾は電極間隔と温度の影響も調べている。図1.5にStevensらのクラッチを示す。図に示すように、これらの実験はデバイスの性能について調べているものであるので、これらの結果を流動曲線の形で再整理することは困難である。

本研究が目的とするER流体中の回転円板のトルク特性の予測法については、発表された研究が少ない。発表された唯一のものは杉本ら⁽¹⁴⁾の研究で、杉本ら



1 : electrode (Input), 2 : electrode (Output)
 3 : isolating material, 4 : electro-viscous fluid

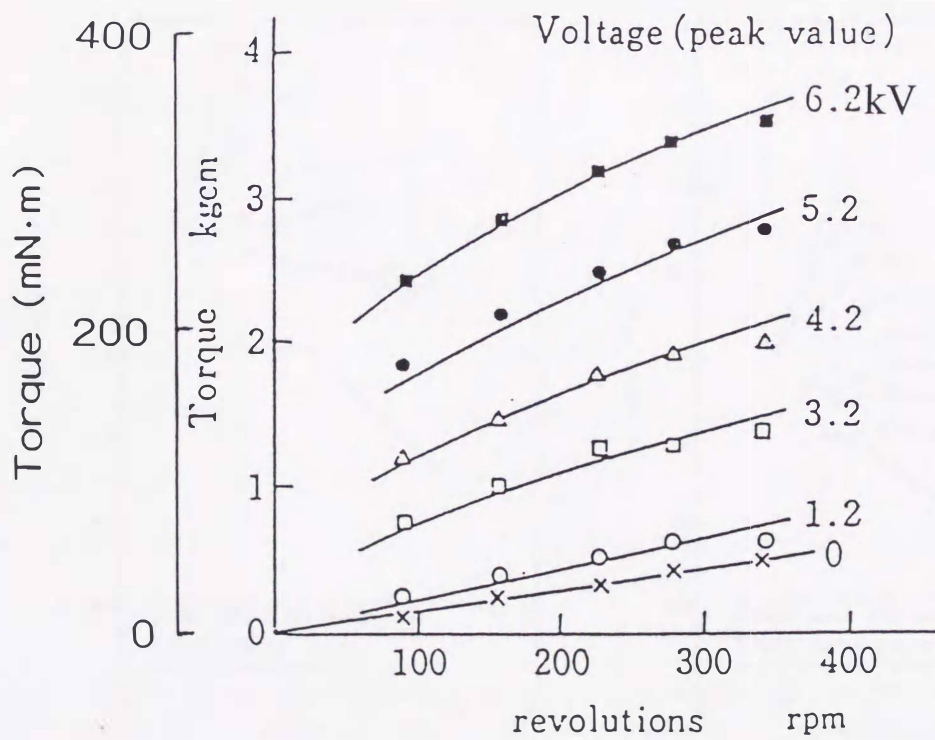


図1.4 回転円筒型クラッチ(杉本ら)

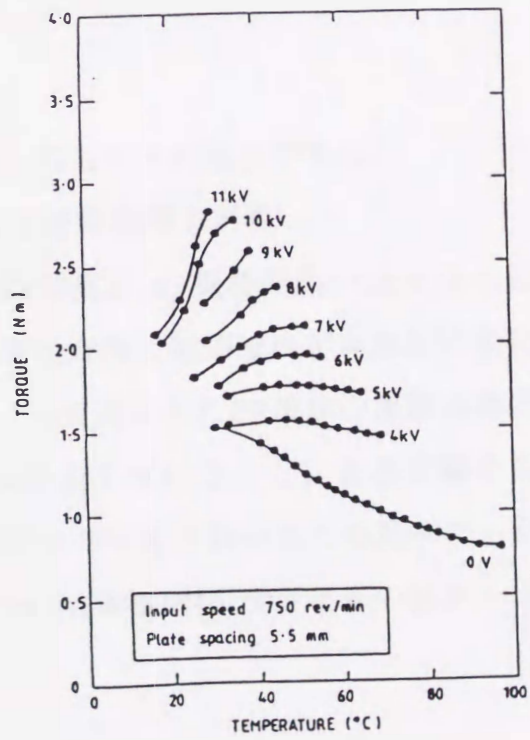
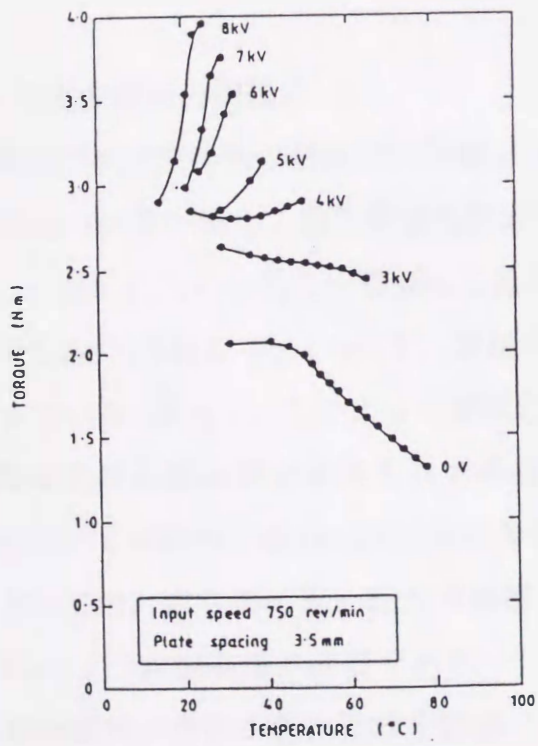
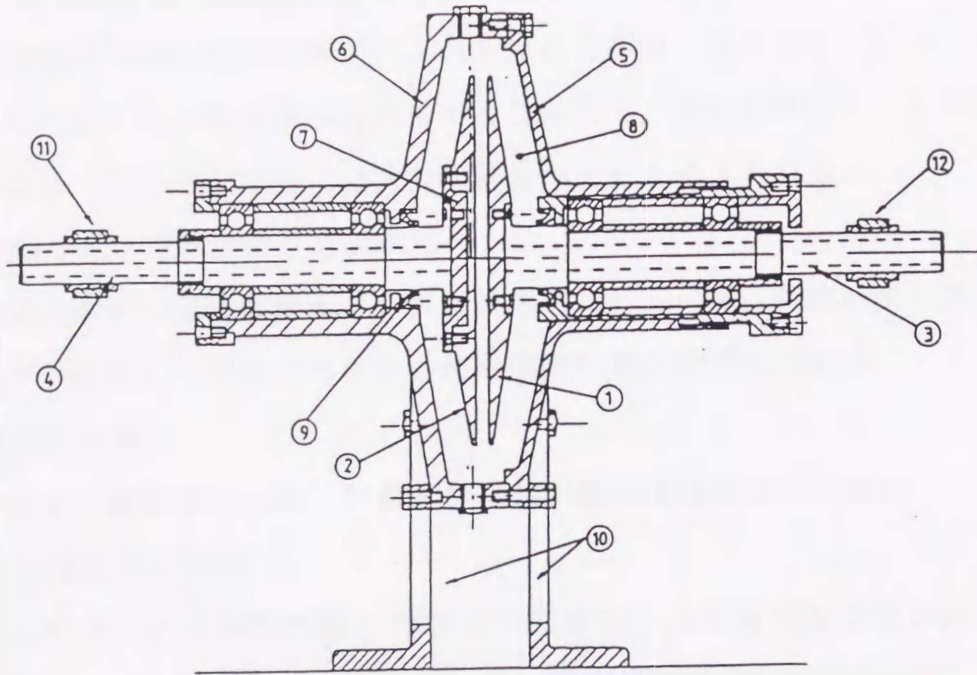


図1.5 回転円板型クラッチ(Stevensら)

は同心二重円筒型粘度計により求めた流動曲線をビンガム流体で近似して、回転円板型デバイスのトルク特性が予測できることを示している。この結果を図1.6に示すが、計算値と実験値は良い一致を示している。この図でトルクは電極間の円板面垂直方向の速度分布がクエット流れであると仮定して、ビンガム流体近似されたずり応力が円板面に作用すると考えて、積分計算によって求めている。しかし、この予測結果には次の問題点があると考えられる。

(1) 流動曲線のビンガム流体への近似法

各電場強度での流動曲線のビンガム流体への近似の際、塑性粘度を無電場での粘度を採用し、降伏応力だけ各電場強度の値を使用している。

(2) ずり速度の計算法

ずり速度の計算において、円筒の曲率の影響が考慮されていない。

(3) 予測と実験結果の比較

予測したトルクと実験結果の比較が回転数の一点のみでおこなわれており、装置として重要な特性である回転数の影響が確認されていない。

1.3 従来の研究の問題点

前節で述べた従来の研究での問題点をまとめると次の通りである。

(1) 直径の小さい同心二重円筒型粘度計による流動曲線の計測

一般的に用いられている同心二重円筒型粘度計は、電極間隔/代表半径の値が大きい(半径が小さい)ので、電極間の半径方向の電場強度が非線形に変化している。従って、このような粘度計によって得られたER流体の流動曲線は、電場強度が電極間で半径方向で非線形に変化していることによる影響を受けている可能性がある。ER流体応用デバイスの性能予測のための基本データとしては、直径の大きい回転円筒型デバイス(電極間隔/代表半径の値が小さい)による流動曲線が必要である。

(2) 電極間隔が流動曲線に及ぼす影響

電極間隔がER流体の流動曲線に及ぼす影響については、ほとんど調べられていない。また、Klassらが電極間隔の影響を調べるのに用いたER流体に比

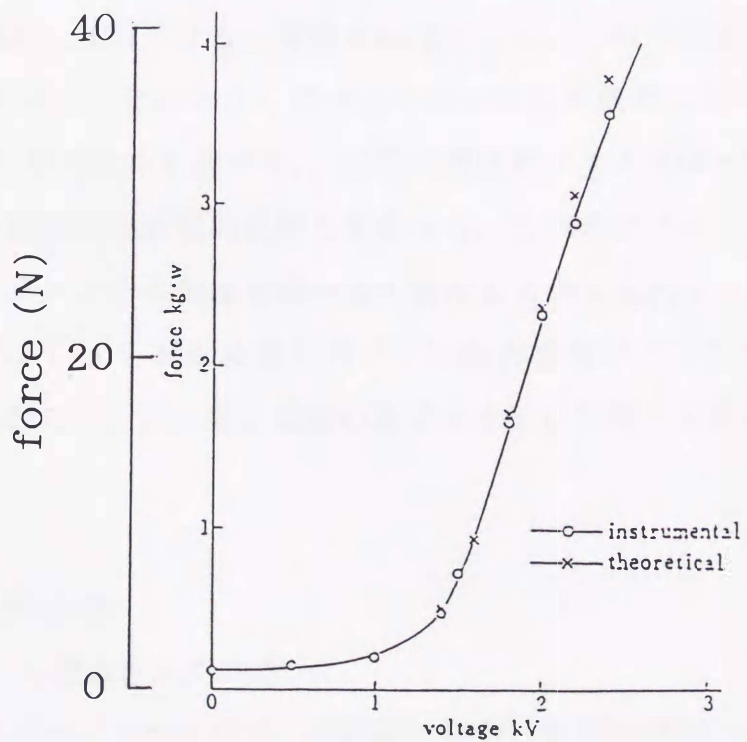
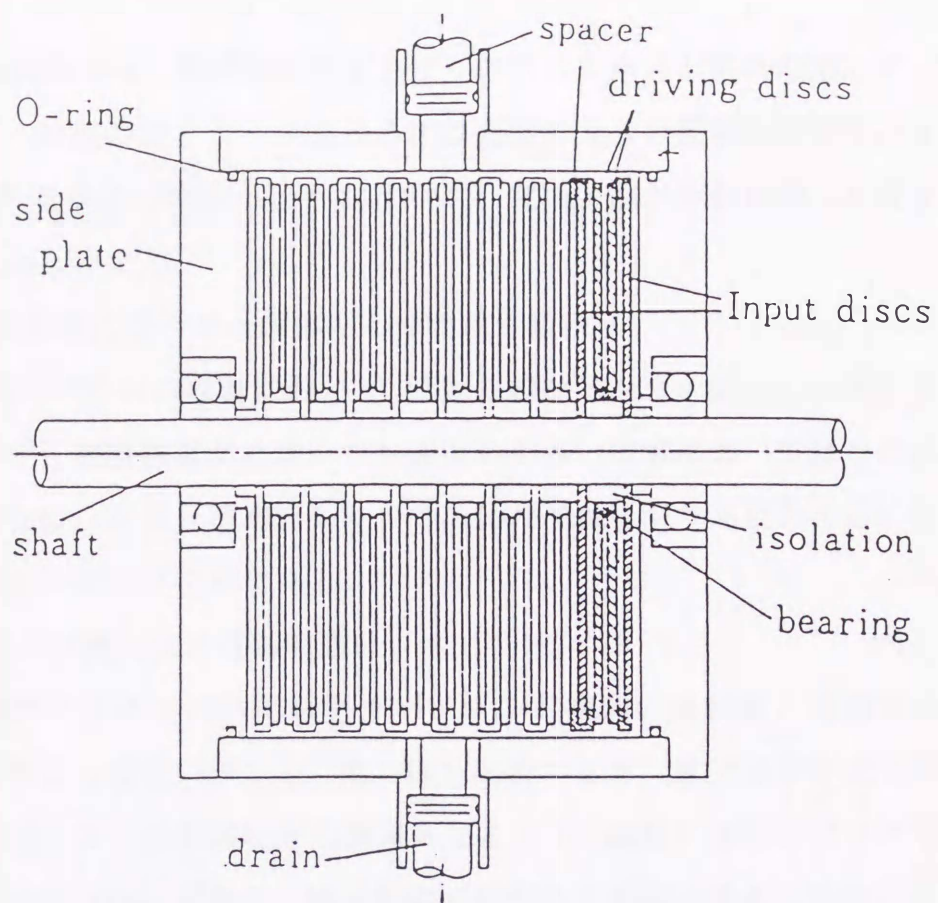


図1.6 回転円板の予測トルクと実験結果の比較(杉本ら)

べ、現在のER流体では、電場印加によるずり応力の大きさが数倍増加している。従って、一般性のあるデータを得るには直径の大きい回転円筒型デバイス(電極間隔/代表半径の値が小さい)において、電極間隔が流動曲線に及ぼす影響を調べる必要がある。

(3)ER流体の流動曲線のビンガム流体としての取り扱い

ER流体応用デバイスの設計において、流動曲線はビンガム流体に近似して扱われているが、電場強度が大きくずり速度の小さい領域においてはこの近似は適切ではない。クラッチやブレーキへの応用では、ずり速度の小さい領域も表現できるモデルが必要である。

(4)回転型デバイスの流れ場と電場の違い

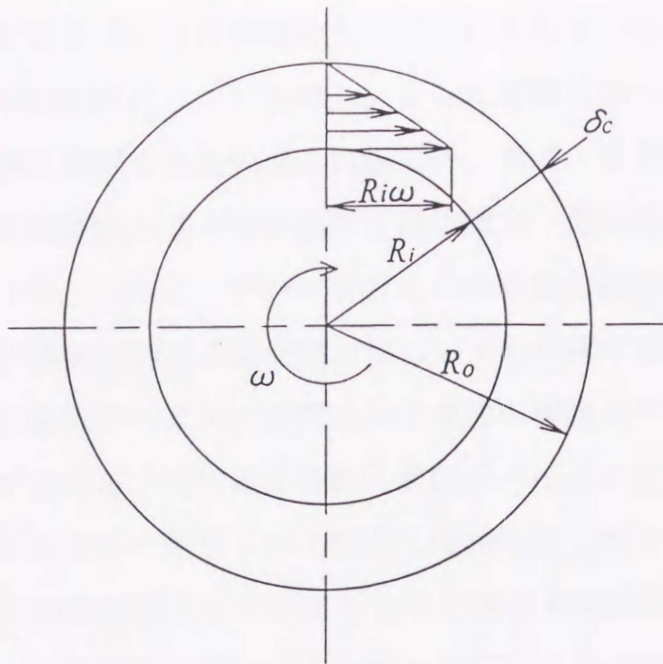
回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの電極間の流れ場と電場を比較すると以下のような違いがある。流れ場を比較すると、図1.7に示すように、回転円筒型デバイスでは単純なせん断流れであるが、回転円板型デバイスではずり速度が半径方向に変化し、電極間隔が広がると半径方向の二次流れを持つ複雑な流れになる。さらに電場を比較すると、回転円筒型デバイスでは電極間隔/代表半径の値が大きくなると半径方向に非線形に変化するが(これについては第2章で改めて述べる)、回転円板型デバイスでは一様である。仮に電極間の電場強度が近似的に同じ場合でも、二つのデバイスでは流れ場が異なるのでクラスターの形成形態や形が異なると考えられる。従って、回転円筒型デバイスによる流動曲線を用いて回転円板型デバイスのトルク特性を予測する場合には、流れ場と電場の違いを十分に吟味して使用する必要がある。

1.4 本研究の構成と内容

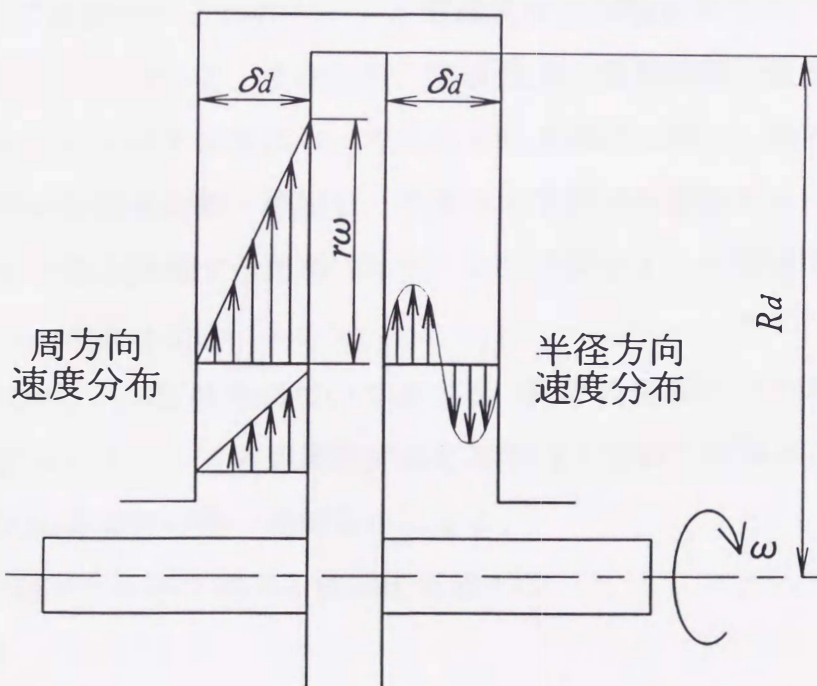
本研究は6章から構成されている。

第1章では、本研究の目的と背景、本研究に関する従来の研究の概要と問題点について述べる。

第2章では、回転円筒型デバイスによる流動曲線に関する実験について述べる。



(a) 回転円筒型デバイス



(b) 回転円板型デバイス

図1.7 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの流れ場

ここでは、回転円筒型デバイスは粘度計として用いられている。実験装置と実験方法、ならびに実験結果について説明し、さらに実験結果について考察する。考察では、流動曲線に及ぼす電場強度と電極間隔、濃度、温度の影響を明らかにする。また、電流密度に及ぼす速度と電場強度、電極間隔、濃度、温度の影響を明らかにする。さらに、デバイスとしての性能を評価するため、モーメント係数とトルク増加に対する消費電力についても考察する。

第3章では、回転円板型デバイスの定常トルク特性の理論的予測手法と数値計算結果を述べる。すなわち、はじめに回転円筒型デバイスによる流動曲線を用いて、回転円板型デバイスの定常トルク特性を理論的に予測する手法を示す。ここでは、ER流体の力学応答系モデルにもとづく構成方程式を導入して、この構成方程式の定数を回転円筒型デバイスの流動曲線から定める。そして、定式化された構成方程式を用いて回転円板型デバイスの定常トルク特性を数値解析によって求め、その結果について考察を行う。

第4章は、回転円板型デバイスのトルクと電流密度の実験結果ならびに予測手法の検証結果について述べる。すなわち、電場強度や電極間隔、濃度、温度がトルクと電流密度に及ぼす影響についてそれぞれ実験的に調べ、得られたトルク特性を数値解析結果と比較・検討し、予測法の有効性を検証する。また、デバイスとしての性能を評価するため、モーメント係数とトルク増加に対する消費電力についても考察する。

第5章では、ER流体の応答特性について述べる。回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおけるトルクと電流密度の応答特性を実験的に調べ、二つのデバイスにおける応答特性の違いを明らかにする。

第6章では、本研究から得た結果を総括的に述べる。

第2章 回転円筒型デバイスによる流動曲線

2.1 緒言

本章では、電場強度の半径方向の変化が少ない直径の大きい回転円筒型デバイスを使用して、流動曲線および電流密度とずり速度の関係に及ぼす電場強度、電極間隔、濃度、温度の影響について、実験データによって明らかにする。また、円筒型デバイスとしての特性を直接的に表す、モーメント係数とトルク増加に対する消費電力について述べる。

2.2 実験装置

回転円筒型デバイスの実験装置の概念図を図 2.1(a)に、実験装置の全体写真を図 2.1(b)に示す。実験装置の主要部は、回転円筒を回転するための AC サーボモータ、回転円筒に作用するトルクを計測するトルクメータ、電極を兼ねる外筒および回転円筒から成る回転円筒型デバイスの本体が直列に接続されている。

回転円筒型デバイスでは、ER 流体は回転円筒と外筒の間の隙間に入っているが、注入時に回転円筒上面 6mm まで入れており、ER 流体の上面は自由表面となっている。また、外筒とその外側のアクリル製のケーシングの間は循環ポンプ付き恒温槽(東京理化工機製, UA-10S)からの循環水で満たされており、これによって電極間内の ER 流体を一定温度に保つことができる。

回転円筒型デバイス本体の詳細図を図 2.2(a)に、回転円筒の写真を図 2.2(b)に示す。黄銅製の回転円筒が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がマイナス側にそれぞれ接続されている。電場を印加すると外筒と回転円筒の隙間内が電場印加領域になる。回転円筒は半径 $R_i=43.92\text{mm}$ 、長さ $l=150.0\text{mm}$ である。外筒は内側半径 R_o がそれぞれ 45.39, 46.04, 46.92mm の 3 種類あり、電極間距離 δ_e はそれぞれ 1.47, 2.12, 3.00mm である。これはデバイス形状の無次元数である電極間隔/代表半径 δ_e/R_m では、それぞれ 0.0329, 0.0471, 0.0661 に相当する。回転円筒の主軸は上下において、ケーシングに

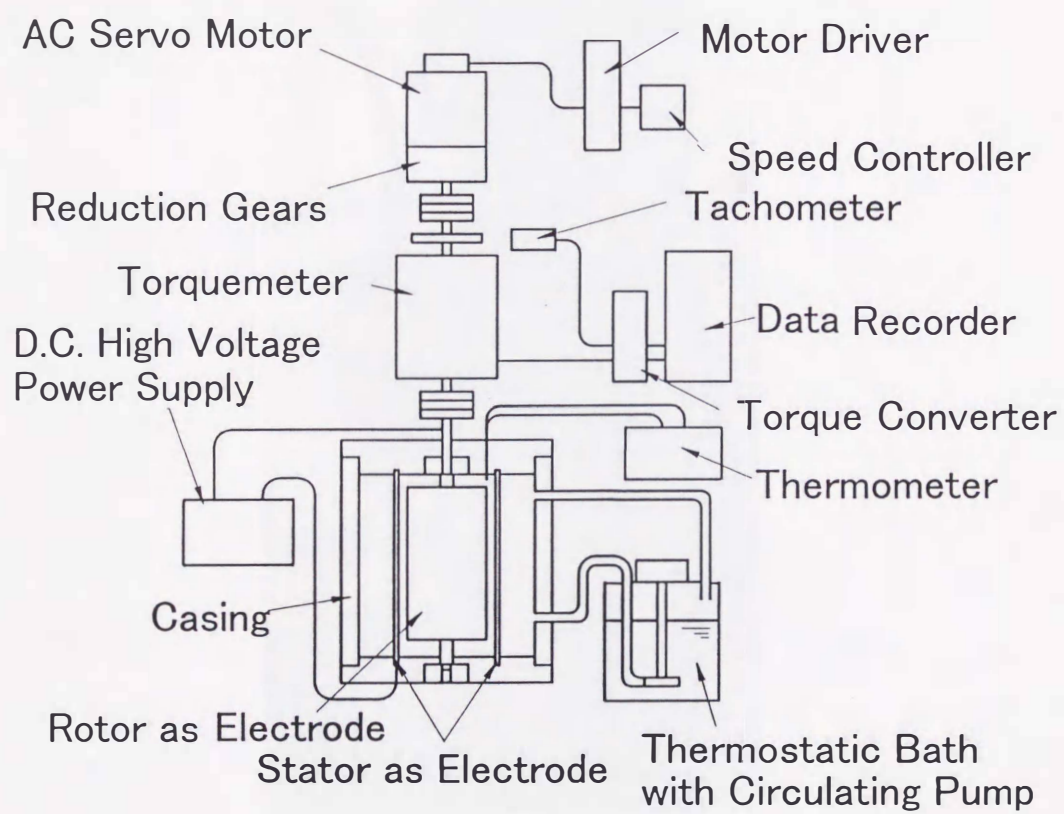


図 2.1(a) 回転円筒型デバイスの実験装置

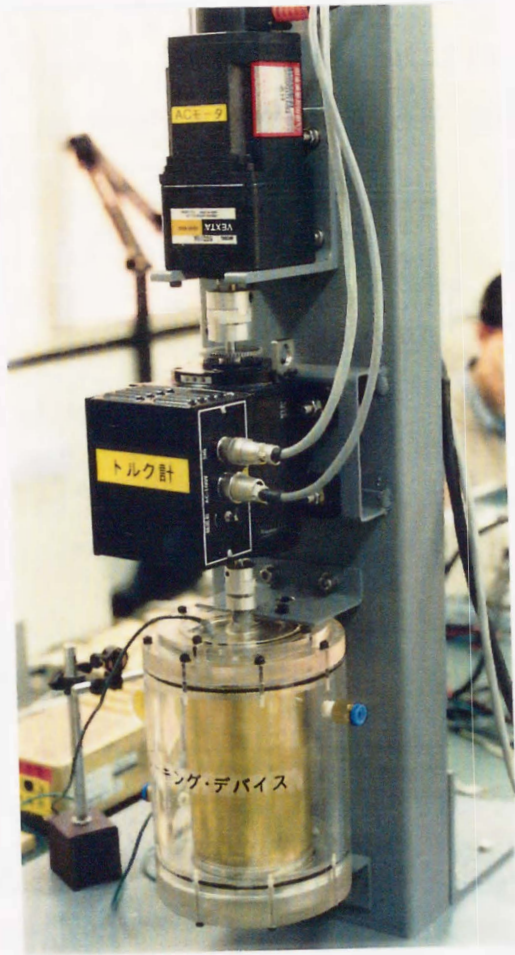


図 2.1(b) 実験装置の全体写真

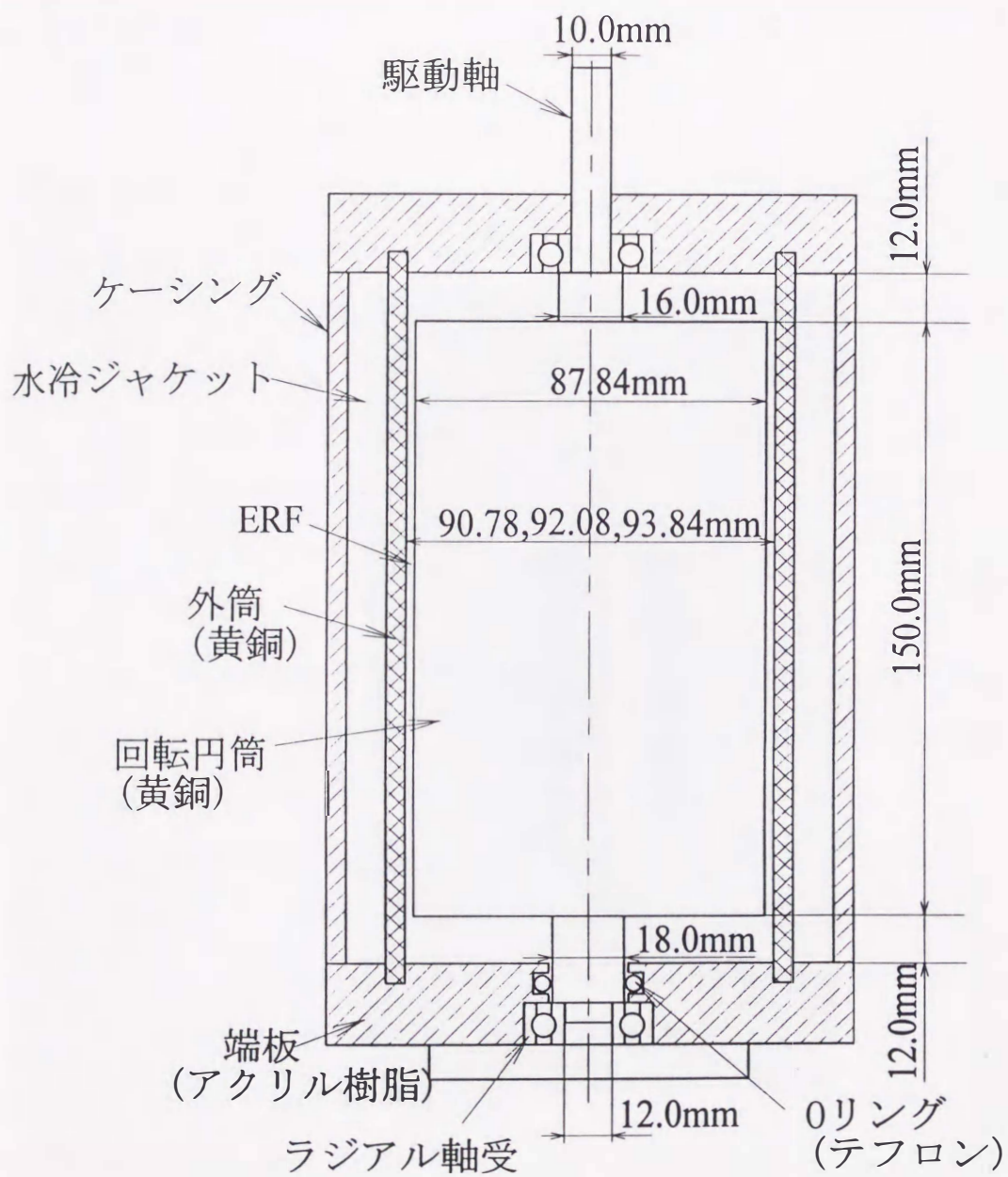


図 2.2(a) 回転円筒型デバイス本体の詳細図



図 2.2(b) 回転円筒の写真

取り付けられたラジアルベアリングで支えられており、下側の軸はシーリングのためにテフロン製のOリングに接触している。回転円筒や外筒の寸法測定は、三次元測定機(ミットヨ製, FN-704)を使用し、寸法測定誤差は±0.005mmである。

回転円筒は、ACサーボモータ(オリエンタルモーター製, KBL5120GD-A2)で、所定の回転数で一定回転させることができる。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メータ(小野測器製, SS050 および TS-2600)で計測する。このトルクメータの仕様を付録A(表A.1)に示す。

ER流体の温度は、ケーシング上面から挿入されたデジタル温度計(佐藤計量器製作所製, SK-2000MC)によって計測する。この温度計の仕様を付録A(表A.2)に示す。

実験を行う回転円筒の回転数の範囲は、 $n=0.01\sim 3.4\text{s}^{-1}$ (0.6~204rpm)である。ACサーボモータの回転数はスピードコントローラで任意に設定することができる。 $n=0.01\sim 0.1\text{s}^{-1}$ の範囲では1/200の減速機、 $n=0.1\sim 3.4\text{s}^{-1}$ の範囲では1/5の減速機を使用する。設定回転数の誤差は±0.5%である。

電場強度 E の実験範囲は $0\sim 2.00\text{kV/mm}$ であり、使用した高電圧直流電源装置(グラスマン社製, MJ5P3000)は、出力電圧 $0\sim 5\text{kV}$ 、出力電流 $0\sim 3\text{mA}$ である。出力電圧と出力電流は、モニタ端子からそれぞれ $0\sim 10\text{V}$ で出力される。出力電圧の測定誤差は±1.0%であり、出力電流の測定誤差は±0.5%である。

本実験の計測項目は以下の通りである。

- (1)高電圧直流電源装置の出力電圧
- (2)高電圧直流電源装置の出力電流
- (3)回転円筒に作用するトルク
- (4)回転円筒の回転数
- (5)ER流体の温度

これらのデータは一部を除き，データレコーダ(日置電機製，8840)で記録した。

2.3 供試 ER 流体

現在，日本でサンプル提供されている ER 流体には，スルホン化重合体粒子を絶縁性オイルに分散した日本触媒製の ER 流体(TX-ER)，ポリマー粒子の表面を特殊無機物の微粒子で被覆した無機有機複合型粒子をシリコンオイルに分散した藤倉化成製の ER 流体(TH-ER)，非水系炭素質粒子を絶縁性オイルに分散したブリジストン製の ER 流体(B-ERF)，スメクタイト粒子をシリコンオイルに分散したコープケミカル製のスメクタイト型 ER 流体(S-ERF)などがある。本実験では次の理由からスメクタイト型 ER 流体を使用する。

- (1)TX-ER や TH-ER， B-ERF の分散粒子のサイズがマイクロオーダーであるのに対して，スメクタイト型 ER 流体は数ないし数 10 ナノメートルオーダーであり，分散性に優れている。
- (2)スメクタイト型 ER 流体は，電流密度が他の ER 流体に比べて小さく，出力電流の大きい高電圧電源装置を必要としない。
- (3)スメクタイト型 ER 流体は，濃度の異なるサンプルの入手が容易である。

本実験で使用するスメクタイト型 ER 流体の物理的性質を表 2.1 に示す。分散粒子は，合成スメクタイト(コープケミカル製，SPN)で，構成元素は，Si，Mg，Li が主要成分である。スメクタイト粒子の形状は，円板状で，直径は 10~100nm，高さは 2~50nm 程度である。また，分散媒はシリコンオイル(信越化学工業製，KF56)である。水分は 1%以下であり，非水系の ER 流体である⁽¹⁾。本研究で使用するスメクタイト型 ER 流体の常温における物理的性質を表 2.2 に示す。この表の質量濃度と体積濃度は，ER 流体の質量を計測して，計算から求めたものである(付録 B 参照)。尚，ER 流体の質量は，比重びん(5ml)に入れた ER 流体を電子天秤(メトラー製，BD202)で計測する操作を 5 回行い，その平均値から求めた。但し，常温でのシリコンオイルとスメク

表 2.1 スメクタイト型 ER 流体の物理的性質(常温)

| | | |
|-------|--------------------------------|--|
| 分散粒子 | 合成スメクタイト | コープケミカル製, SPN |
| | 組成 | $(\text{OH})_4\text{Si}_8(\text{Mg}_{5.2}\text{Li}_{0.8}\text{Na}_{0.8})\text{O}_{20}$ |
| | 粒子形状 | 板状構造(円柱) |
| | 粒径 | 直径:10~100nm, 高さ:2~50nm |
| | 密度(kg/m^3) | 1680 |
| | 導電率(S/m) | 10^{-7} |
| | 比誘電率(-) | 7.4(10kHz), 3.2(100kHz) |
| 分散媒 | シリコンオイル | 信越化学製, KF56 |
| | 密度(kg/m^3) | 995.0 |
| | 粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$) | 0.015(25°C) |
| | 導電率(S/m) | 1.8×10^{-10} |
| | 比誘電率(-) | 2.0(10~100kHz) |
| 表面活性剤 | 使用せず | |

表 2.2 本研究で使用するスメクタイト型 ER 流体

| name | mass concentration ϕ (wt.%) | volume concentration α (vol.%) | density ρ (kg/m^3) | date produced |
|--------|-------------------------------------|--|--|---------------|
| SER10A | 5.57 | 3.38 | 1016 | 1997/07/15 |
| SER10B | 6.57 | 4.00 | 1021 | 1997/09/29 |
| SER15A | 8.13 | 4.98 | 1027 | 1997/07/15 |
| SER15B | 9.04 | 5.56 | 1031 | 1997/09/29 |
| SER15C | 10.5 | 6.50 | 1039 | 1997/09/29 |
| SER15D | 15.4 | 9.70 | 1060 | 1998/01/16 |

タイト粒子の密度はそれぞれ 995.0kg/m^3 , 1680kg/m^3 である.

2.4 実験方法とデータ処理法

2.4.1 データ計測法

一般に粒子分散系の ER 流体では、ヒステリシスの性質を持つことが知られている. そこで、各回転数と各電場強度に対するトルクと電流の計測は、このような影響や継続的な電場印加による性質の変化などの影響を受けないように次の方法で行った.

回転数は、 $n=3.4\sim 0.1\text{s}^{-1}$ の順に変化させ、各回転数に対して電場強度 $E=0\sim 2.00\text{kV/mm}$ を変化させた. 回転数の高い方から開始した理由は、分散粒子の分散性を高めておくためである. 図 2.3 に示すように、各回転数における各電場強度の一条件ごとに電場印加を行い、トルクと電流の計測後に電場を切った. このとき、同一回転数での最初の無電場時の計測トルクと変わらないことを調べた. すなわち、ER 流体の性質が変化していないことを確認した. 次の計測条件の実験は、電場を切って回転円筒を回転させたままの状態ですら 30s 程度経過してから行った. 定常トルクと定常電流の値は、電場印加から 5s 以上経過してから、5s 間のトルクと電流に相当する電圧をデータレコーダに記録して、それぞれの時間平均から求めた.

実際のデバイスの使用ではある程度の温度変化があると考え、本研究では 20°C と 40°C の 2 種類の温度で実験を行った. 実験中の温度変化は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内である.

2.4.2 トルクおよびずり応力の算出

本研究で解析対象として必要なトルクは、回転円筒の外周面に作用するトルク T_c であり、計測トルク T_{cm} から軸受けとシール部分の機械摩擦損失トルク T_f 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) T_{ce} を差し引いたものである.

ここで、 T_f は、各実験終了後、デバイスから ER 流体を抜き取った後、接

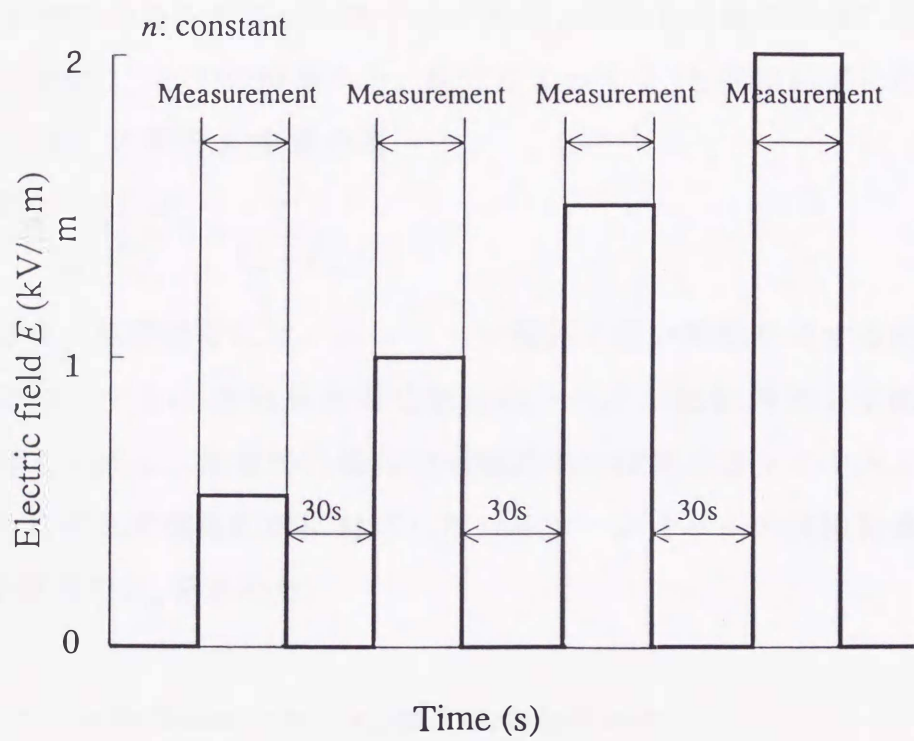


図 2.3 実験における電場印加の方法

触部に ER 流体が残存する状態で空回し実験を行って求めた。すなわち、各角速度 ω に対する T_{cf} を求めた。また、 T_{ce} は、回転円筒に作用するトルクを T_{cs} と T_{ce} に分けて考え、無電場時と電場印加時では T_{ce} 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 ($T'_{cm} - T'_{cf}$) と ω の関係を実験によって求める。ここで、ダッシュ (') はシリコンオイルの場合を示す。

(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、次式によって T'_{ce} と回転円筒に作用するトルク $T'_{cs} + T'_{ce}$ の割合 k を求める。

$$k = \frac{(T'_{cm} - T'_{cf}) - T'_{cs}}{T'_{cm} - T'_{cf}} = \frac{T'_{ce}}{T'_{cs} + T'_{ce}} \quad (2.1)$$

(3) ER 流体は、無電場時には、ニュートン流体に近い特性を有するので、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られる。無電場の場合の回転円筒に作用するトルクと ω 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 k の値を掛けて T_{ce} を求めた。

従って、データ処理において、 T_{cs} は次式から求めた。

$$T_{cs} = T_{cm} - T_{cf} - (T_{cm0} - T_{cf})k \quad (2.2)$$

ここで、 T_{cm} は電場印加時の計測トルクであり、 T_{cm0} は ER 流体の無電場における計測トルクである。本研究ではシリコンオイルを使用した実験結果から、 $\delta_c = 1.47\text{mm}$ では $k = 0.0040$ 、 $\delta_c = 2.12\text{mm}$ では $k = 0.036$ 、 $\delta_c = 3.00\text{mm}$ では $k = 0.020$ とした。

また、回転円筒表面に作用するずり応力 σ は上述の方法で求めた T_{cs} を用い、次式から求めることができる。

$$\sigma = \frac{T_{cs}}{2\pi R_i^2 l} \quad (2.3)$$

2.4.3 ずり速度

回転円筒の角速度 $\omega (=2\pi n)$ に対する、回転円筒表面におけるずり速度 D は以下の方法で求めた。

円筒座標系における外力の作用しない定常状態の θ 方向の運動方程式は次式のように表される。

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

定常層流状態では、流体は円周方向に沿った流線をもつ流れとなり、 θ 、 z 方向の偏微分量および r 方向、 z 方向の流速成分は 0 になる。従って、式(2.4)は次式のように簡単化される。

$$\frac{d}{dr} (r^2 \sigma_{r\theta}) = 0 \quad (2.5)$$

この式を積分して、次式を得ることができる。

$$\sigma_{r\theta} = \frac{C_1}{r^2} \quad (2.6)$$

ここで、 C_1 は積分定数である。

一方、 θ 方向のずり応力は次式のように表される。

$$\sigma_{r\theta} = -\mu \left\{ r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right\} \quad (2.7)$$

θ 方向の偏微分量は 0 なので、式(2.7)は次式のように簡単化される。

$$\sigma_{r\theta} = -\mu r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \quad (2.8)$$

式(2.6)と式(2.8)から次式を得ることができる。

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{u_\theta}{r}\right) = -\frac{C_1}{\mu r^3} \quad (2.9)$$

式(2.9)を積分して、境界条件 $r=R_o$ で $u_\theta=0$ および $r=R_i$ で $u_\theta=R_i\omega$ を用いて、 θ 方向の流速 u_θ を得ることができる。

$$u_\theta = \frac{\kappa^2 \omega R_o}{1-\kappa^2} \left(\frac{R_o}{r} - \frac{r}{R_o} \right) \quad (2.10)$$

ここで、 $\kappa=R_i/R_o (<1)$ である。

従って、回転円筒表面におけるずり速度 D は式(2.10)を r で微分して、次式のように表すことができる。

$$D = \left. \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right|_{r=R_i} = -\frac{1+\kappa^2}{1-\kappa^2} \omega \quad (2.11)$$

ここで、マイナス記号はずり応力の方向を回転方向と逆向きにとる結果を示すものであるから、これを省略すると、 $\kappa \cong 1$ の場合、式(2.11)は式(2.12)のように近似できる。

$$D = \frac{2\omega}{1-\kappa^2} \quad (2.12)$$

本研究では、ずり速度 D の算出に式(2.12)を使用する。

ただし、このずり速度の導出に用いた式(2.7)の構成方程式は、ニュートン流体に対するものであり、粘度 μ は一定でずり速度によって変化しないことを前提にしている。しかし、非ニュートン流体では μ はずり速度 D によって変化する。従って、式(2.12)は厳密には正しくないが、 D が定義できない限りデータ解析は不可能であり、ここでは第一近似として式(2.12)の定義を用いる。従来の他の研究においても、 D の定義はすべてこの方法によっている。

2.4.4 電場強度および電流密度

円筒電極間の電場強度は次式で与えられる⁽²⁰⁾.

$$E = \frac{V}{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \frac{1}{r} \quad (2.13)$$

この式による電極間内の半径方向の電場強度の変化を示したのが図 2.4 である。図 2.4 において、 E_m は $r=R_m$ における電場強度である。電極間内では電場強度が非線形に変化し、回転円筒側では電場強度が大きく、外筒側では電場強度が小さいことが分かる。本研究では、回転円筒と外筒との曲率差のあることを考慮して、回転円筒と外筒の中心 $r=R_m=(R_i+R_o)/2$ での値 E_m を採用した。本実験では、 δ_c/R_m の値は 0.0329~0.0661 であるが、ER 流体の実験で一般に使用されている同心二重円筒型粘度計の多くが $\delta_c/R_m=0.10$ 程度である。この場合、回転円筒と外筒の中心の電場強度に対して、電極間隔の内側と外側で電場強度は 10%程度異なる。

また、電流密度 i は、電極間隔中央面での値で定義し、測定された電流 I を用いて次式から求めた。

$$i = \frac{I}{2\pi R_m l} \quad (2.14)$$

2.5 実験結果

本研究での回転円筒型デバイスにおける実験条件を表 2.3 に示す。また、流動曲線解析の基礎となる、各電場強度における回転数 n と計測トルク T_{cm} の測定値と ER 流体抜き取り後の空運転時の実験データを付録 C に、各実験結果から得られた流動曲線および電流密度とずり速度の関係のグラフを付録 D に示す。なお、付録 E に回転円筒型デバイスのずり応力の誤差解析を示すが、ずり応力の誤差はずり応力の小さい場合が大きく、最大で±5%である。

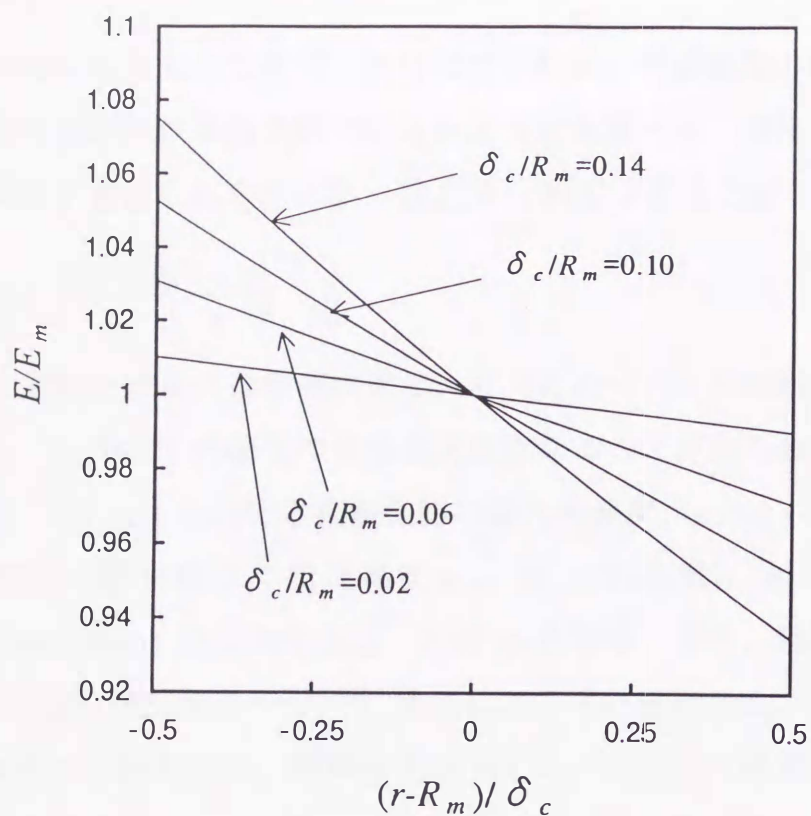


図 2.4 回転円筒型デバイスの電極間内半径方向電場強度分布

表 2.3 回転円筒型デバイスの実験条件

| No. | ERF | δ_c (mm) | t ($^{\circ}\text{C}$) | E (kV/mm) | n (s^{-1}) | date tested |
|------|--------|-----------------|----------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| c-1 | SER10A | 2.12 | 20 | 0~1.52 | 3.4~0.1 | 1997/7/31 |
| c-2 | SER10A | 2.12 | 40 | 0~1.52 | 3.4~0.1 | 1997/7/31 |
| c-3 | SER10B | 1.47 | 20 | 0~2.00 | 3.0~0.1 | 1997/12/09 |
| c-4 | SER10B | 2.12 | 20 | 0~2.00 | 3.0~0.1 | 1997/12/10 |
| c-5 | SER10B | 3.00 | 20 | 0~1.50 | 3.0~0.1 | 1997/12/11 |
| c-6 | SER15A | 2.12 | 20 | 0~1.52 | 3.4~0.1 | 1997/11/20 |
| c-7 | SER15A | 2.12 | 40 | 0~1.01 | 3.4~0.1 | 1997/11/21 |
| c-8 | SER15C | 1.47 | 20 | 0~2.00 | 3.0~0.1 | 1997/12/04 |
| c-9 | SER15C | 2.12 | 20 | 0~2.00 | 3.0~0.1 | 1997/11/27 |
| c-10 | SER15C | 3.00 | 20 | 0~1.50 | 3.0~0.1 | 1997/12/04 |
| c-11 | SER15D | 2.12 | 20 | 0~2.00 | 3.0~0.1 | 1998/2/23 |

データの解析に先立って先ず、本研究での解析、実験範囲の回転数において、電極間内の流れが層流状態であるかどうかを調べる。回転円筒面での流動状態は次式で定義されるテイラー数 T_a から判定することができる。

$$T_a = \frac{\omega \kappa^2 R_o^2 \rho}{\mu} \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)^{3/2} \quad (2.15)$$

$T_a < 41.3$ の範囲では流れは層流状態で、 $41.3 \leq T_a < 400$ の範囲ではテイラー渦が発生し、 $T_a \geq 400$ の範囲では乱流状態になることが知られている。

この式に、 $\omega = 21.4$ rad/s(本実験範囲の最大角速度、 $n = 3.4$ s⁻¹)、 $\mu = 0.143$ Pa·s(ER 流体の無電場時の塑性粘度 μ_3 、表 3.2 参照)、 $R_i = 43.92$ mm、 $\kappa = 0.9361$ ($R_o = 46.92$ mm) を代入すると、 $T_a = 5.35$ となる。また、電場印加時には ER 流体の粘度は増加するので、 T_a はさらに小さい値になる。従って、本研究の実験範囲の回転数では、電極間内でテイラー渦は発生せず、流れは層流状態である。

2.6 流動曲線の特性と考察

2.6.1 流動曲線の基本的特性

図 2.5 および図 2.6 に $\delta_c = 2.12$ mm、 $t = 20^\circ\text{C}$ の場合の SER10A および SER10B(質量濃度が低い)の流動曲線を示す。

無電場時は、小さい降伏応力($D=0$ におけるずり応力)をもったビンガム流体に近い傾向を示す。 $E=0.50$ および 1.00 kV/mm では、ずり速度 D の小さい領域で電場印加によるずり応力 σ の増加が比較的顕著に表れる。特に SER10B の場合、ずり速度の増加に対するずり応力の変化は、ずり速度のごく小さい領域で増加してピークをもち、一旦減少してその後は緩やかに増加する。 $E=1.50$ および 2.00 kV/mm では、ずり速度のごく小さい領域でやや急激に上昇するが、その後は緩やかに増加する降伏応力をもった擬塑性流体に近い傾向を示し、ピークは現れない。

しかし、濃度の差が現れ、SER10A($\phi = 5.57$ wt.%)では、 $D \approx 20$ (1/s)でほぼ一定レベルの σ に達してその後は徐々に D と共に σ が増加する。これに対し

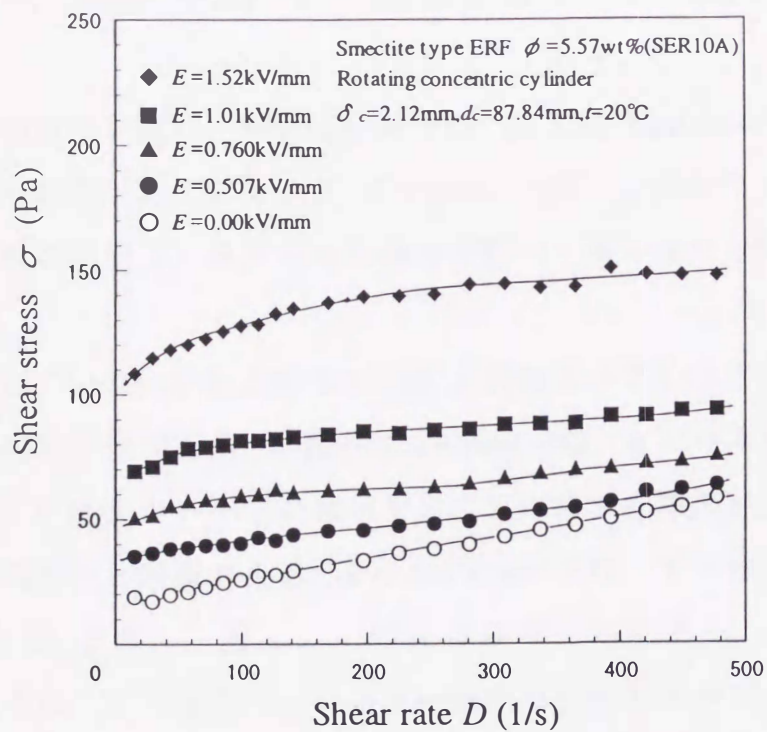


図 2.5 流動曲線 (SER10A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

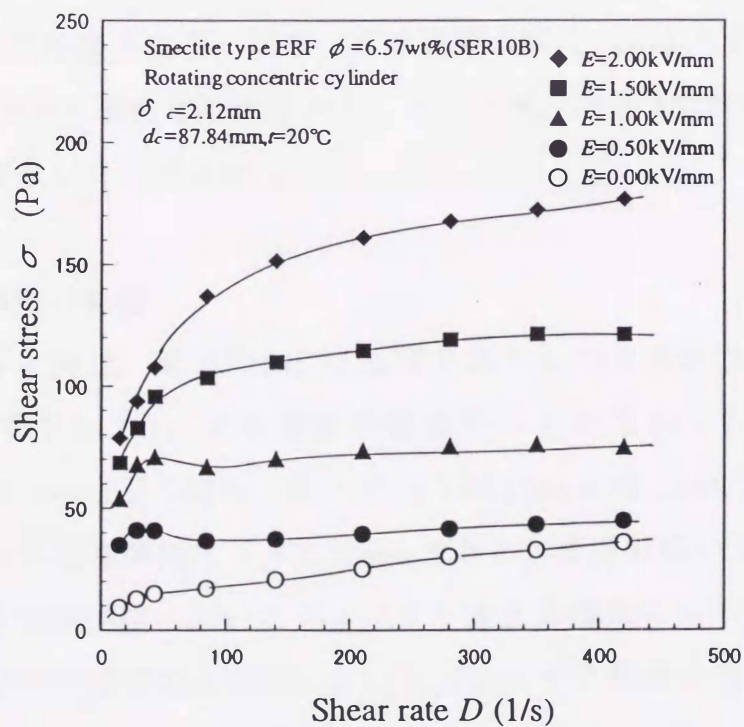


図 2.6 流動曲線 (SER10B, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

SER10B($\phi=6.57\text{wt.}\%$)では、 $D\approx 100(1/\text{s})$ 程度までは σ の著しい増加傾向が観察される。

さらに質量濃度が高い、SER15A, SER15C および SER15D の流動曲線を調べる。図 2.7 および図 2.8 は、 $\delta_c=2.12\text{mm}$ 、 $t=20^\circ\text{C}$ の場合の SER15A および SER15C の流動曲線で、温度の高い場合を除いて次のような傾向のあることが分かる。

無電場時は、SER10A および SER10B と同様に小さい降伏応力をもったビンガム流体に近い傾向を示す。 $E=0.50\text{ kV/mm}$ では、ビンガム流体に近い傾向を示すが、ずり速度 D の小さい領域でのずり応力 σ の増加が比較的大きいのは、低濃度の場合と同様である。 $E=1.00\text{ kV/mm}$ では、ずり速度のごく小さい領域で σ は D と共に上昇し、その後はほぼ一定である。 $E=1.50$ および 2.00 kV/mm では、ずり速度のごく小さい領域で σ は D と共に上昇し、その後は緩やかに増加する降伏応力をもった擬塑性流体に近い傾向を示す。

このように流動曲線は、電場強度と濃度によって傾向が異なることが分かる。また、電場強度が大きい場合、ずり速度の変化に対して微分粘度(ずり応力の勾配)が大きく変化することから、スメクタイト型 ER 流体がビンガム流体に近似できないことが分かる。

2.6.2 電場強度の影響

図 2.9 と図 2.10 は、電場印加によるずり応力 σ の増加分 $\Delta\sigma=\sigma-\sigma_0$ (σ_0 は無電場時のずり応力)とずり速度の関係を示したものである。図 2.9 は SER10A($\phi=5.56\text{wt.}\%$)の場合、図 2.10 は SER15A($\phi=8.13\text{wt.}\%$)の場合を示し、いずれの場合も電極間隔は $\delta_c=2.12\text{mm}$ である。濃度の低い SER10A の場合、 $t=20^\circ\text{C}$ では各電場強度において $\Delta\sigma$ はずり速度の増加に対して減少していく。しかし、 $t=40^\circ\text{C}$ では各電場強度において $\Delta\sigma$ はずり速度の増加に対して変化せずほぼ一定である。濃度の高い SER15A の場合、 $t=20^\circ\text{C}$ では電場強度が大きくなるとずり速度の増加に対する $\Delta\sigma$ は、ずり速度のごく小さい領域で増

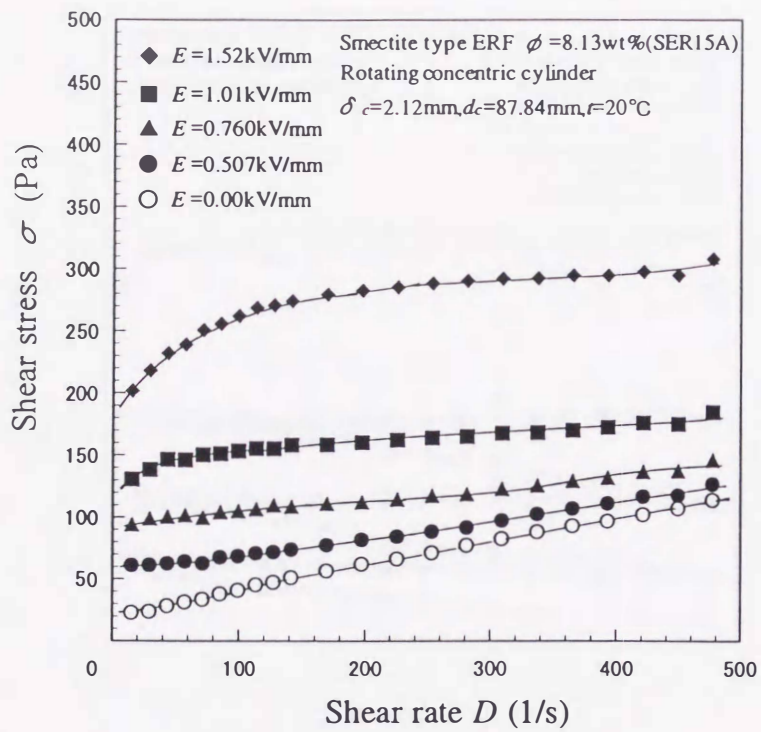


図 2.7 流動曲線(SER15A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

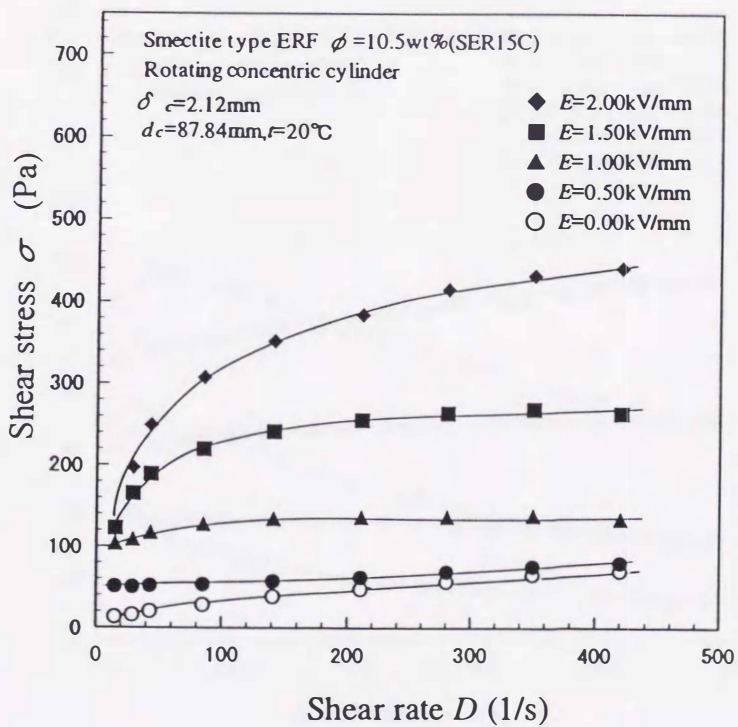


図 2.8 流動曲線(SER15C, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

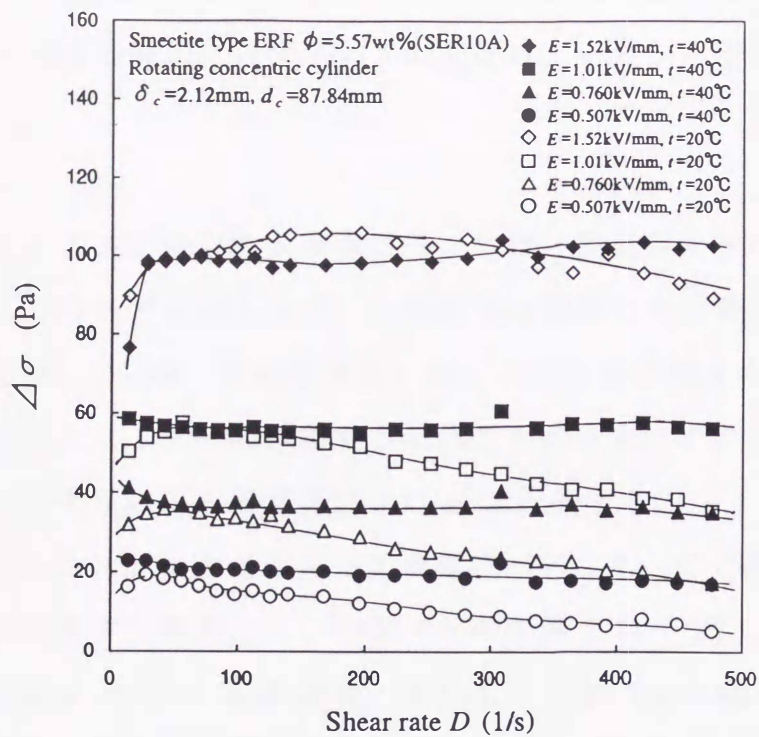


図 2.9 ずり応力の増加分とずり速度の関係(SER10A, $\delta_c=2.12\text{mm}$)

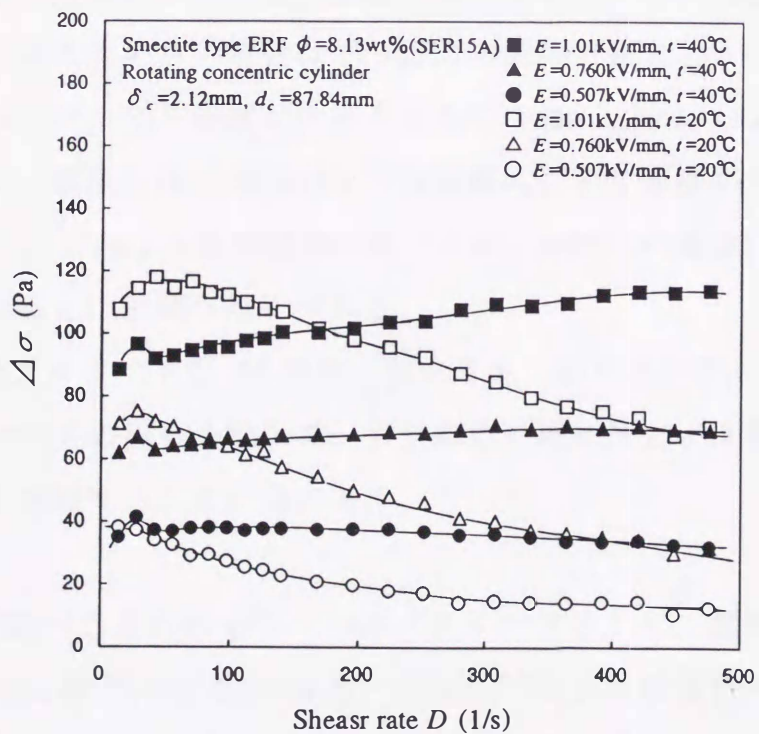


図 2.10 ずり応力の増加分とずり速度の関係(SER15A, $\delta_c=2.12\text{mm}$)

加するが、その後は減少していく。しかし、 $t=40^{\circ}\text{C}$ では電場強度が大きくなるにつれずり速度の増加に対する $\Delta\sigma$ の変化は、一定から増加傾向に変化する。

電場印加による ER 効果の大きさについては、誘電球モデルで説明される場合が多い。このモデルによれば、分散粒子は電場方向に整列した誘電球クラスターを形成し、分極した誘電球間に働く引力は電場強度の 2 乗 E^2 に比例し、この引力はクラスターに作用する流体力と釣り合っている⁽²¹⁾。従って、電場印加によるずり応力の増加分 $\Delta\sigma$ は E^2 に比例する。

本実験に用いたスメクタイト型 ER 流体についても、この関係が成立しているかどうかを各ずり速度について調べたのが図 2.11 と図 2.12 である。図 2.11 は SER10A ($\phi=5.56\text{wt.}\%$) の場合、図 2.12 は SER15A ($\phi=8.13\text{wt.}\%$) の場合を示し、いずれの場合も電極間隔は $\delta_e=2.12\text{mm}$ である。これらの図では縦軸にずり応力の増加分割合 $\Delta\sigma/\sigma_0$ をとり、横軸に電場強度と無電場時のずり応力の比 E^2/σ_0 をとっている。濃度の低い SER10A では、温度の違いに関わらず、ずり速度の小さい場合はずり応力の増加分割合 $\Delta\sigma/\sigma_0$ と E^2/σ_0 は比例関係にないが、ずり速度が大きくなるにつれ、 $\Delta\sigma/\sigma_0$ は E^2/σ_0 と比例関係に近づく。濃度の高い SER15A でも同様に、ずり速度が大きくなるにつれ、 $\Delta\sigma/\sigma_0$ は E^2/σ_0 と比例関係に近づくが、 $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、ずり速度がさらに大きくなると比例関係はくずれる。

従って、スメクタイト型 ER 流体においても、ずり速度の大きい領域では、濃度の高い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合を除いて、ずり応力の増加分 $\Delta\sigma$ は電場強度の 2 乗 E^2 に比例して増加することが分かる。

ER 効果を調べるためのもう一つのパラメータとして、電気力と粘性力の比を表す Mason 数⁽²²⁾ ($\propto E^2/D$) がある。滝本ら⁽²¹⁾による誘電球モデルを用いたクラスター理論では、Mason 数はクラスターの長さを代表している。

図 2.13 と図 2.14 はそれぞれ SER10A, SER15A における $\delta_e=2.12\text{mm}$ の場合

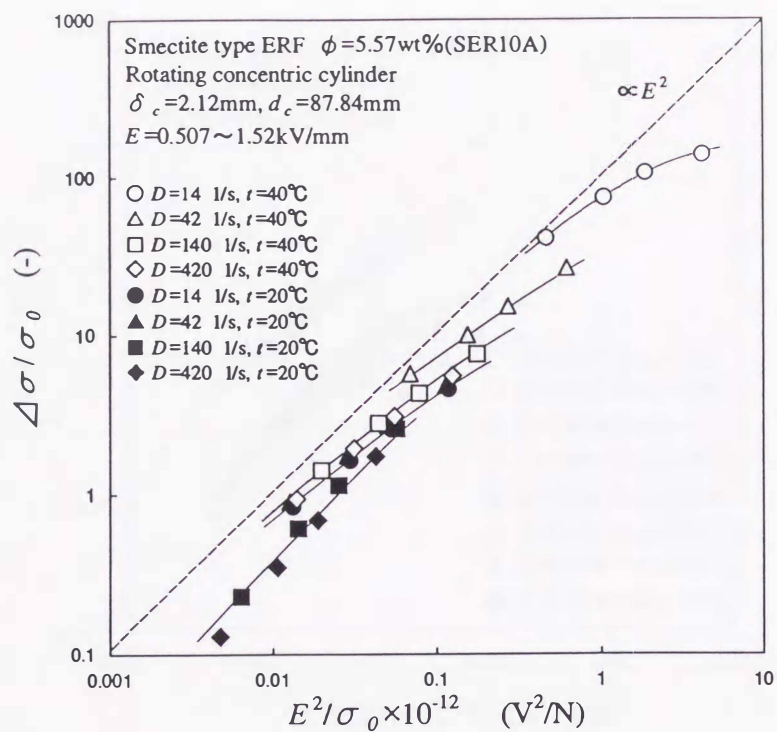


図 2.11 ずり応力の増加分と電気力の関係(SER10A)

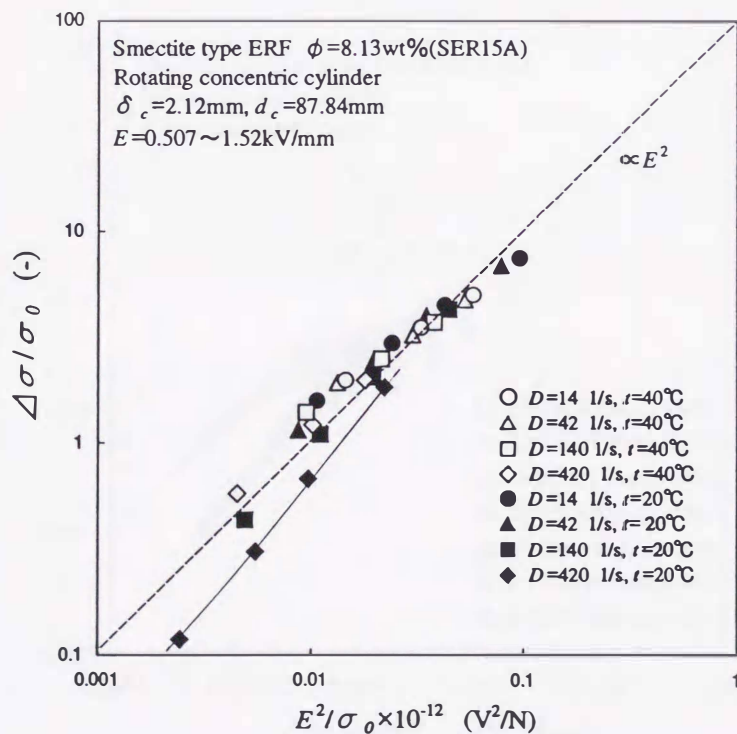


図 2.12 ずり応力の増加分と電気力の関係(SER15A)

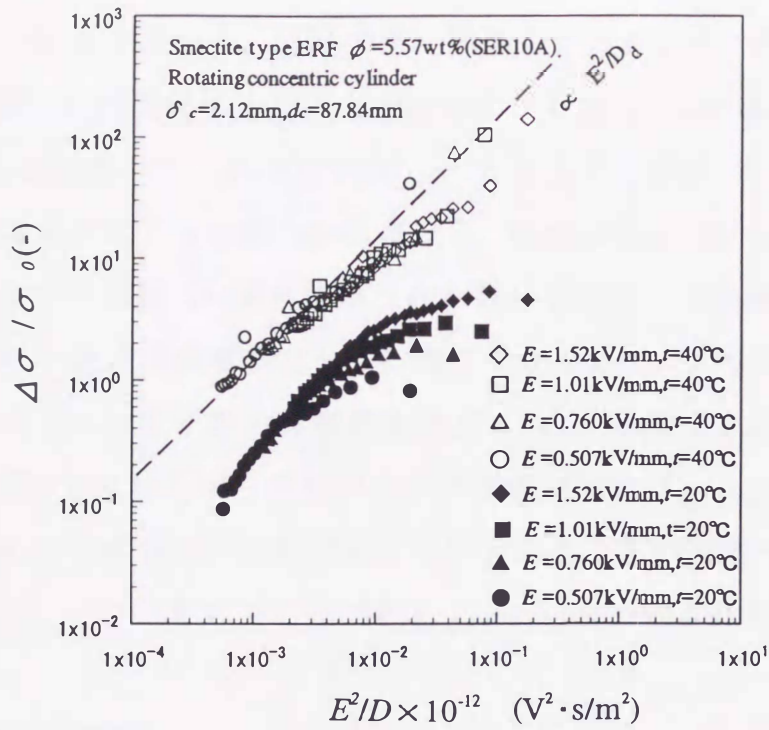


図 2.13 ずり応力の増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER10A)

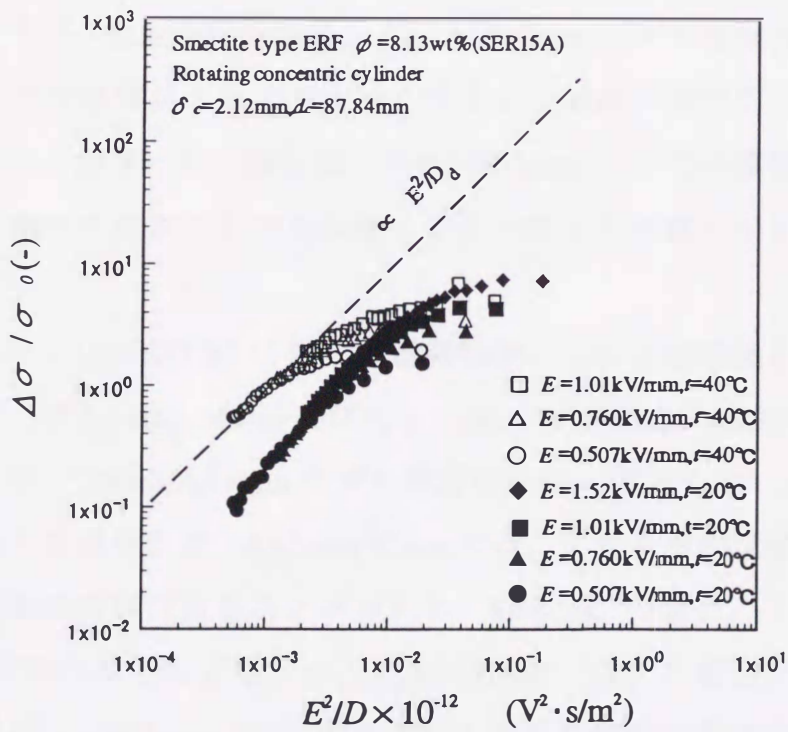


図 2.14 ずり応力の増加分割合と電気力/粘性力の関係(SER15A)

のずり応力の増加割合 $\Delta\sigma/\sigma_0$ と Mason 数に相当する E^2/D の関係を示したものである。これらの図から、 E^2/D の低い領域のデータは単一の線上に集まり、 $\Delta\sigma/\sigma_0 \propto (E^2/D)^n$ の関係にあることが分かる。しかし、 n の値は $t=20^\circ\text{C}$ では、 $n>1$ であるのに対して、 $t=40^\circ\text{C}$ では、 $n<1$ となり、 E^2/D に対する $\Delta\sigma/\sigma_0$ の依存傾向は温度によって明らかに異なる。 E^2/D が低いことは、一定の電場強度においてずり速度 D が大きいことを表している。この領域では、 $\Delta\sigma/\sigma_0$ と E^2/D は一定の関係が成立していることが分かる。すなわち、電気力と粘性力の比によってずり応力の増加割合 $\Delta\sigma/\sigma_0$ が決定される。一方、 E^2/D の大きい領域、すなわちずり速度の小さい領域では、 $\Delta\sigma/\sigma_0$ と E^2/D は一定の関係が見られず電場ごとに異なることが分かる。この領域では、電気力と粘性力の比によってずり応力の増加割合 $\Delta\sigma/\sigma_0$ が決定されない。

2.6.3 電極間隔の影響

図 2.15 および図 2.16 は、それぞれ SER10B(質量濃度が低い)および SER15C(質量濃度が高い)の流動曲線に及ぼす電極間隔の全体的な影響を調べたものである。SER10B の場合、 $E=1.50\text{kV/mm}$ 以下では電極間隔の影響は少ないが、電場強度がこれより大きくなると少し違いがでてくることを示している。また、SER15C の場合は、 $E=0.50\text{kV/mm}$ 以下では電極間隔の影響は少ないが、電場強度がこれより大きくなると明らかに違いがあることを示している。

SER10B および SER15C に対して電場強度ごとに電極間隔の影響を詳しく調べたのが、図 2.17(a)~(e)および図 2.18(a)~(e)である。SER10B の場合、電場強度が大きい $E=1.50\text{kV/mm}$ でずり速度の小さい領域において、電極間隔の影響があることが分かる。 $E=2.00\text{kV/mm}$ では、ずり速度の比較的大きい領域まで電極間隔の影響があることが分かる。SER15C の場合、 $\delta_c=1.47\text{mm}$ と 2.12mm では差はほとんどないが、 $\delta_c=3.00\text{mm}$ ではずり応力が大きくなる。 $E=1.00$ および 1.50kV/mm では、ずり速度の全ての領域で電極間隔の影響があり、ずり応力は電極間隔の広い方が大きいことを示している。また、これら

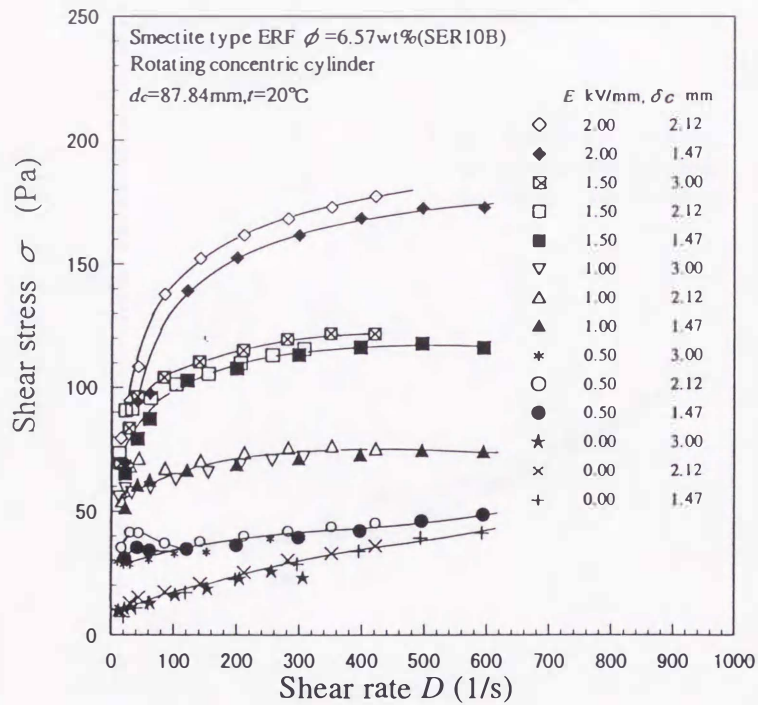


図 2.15 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B)

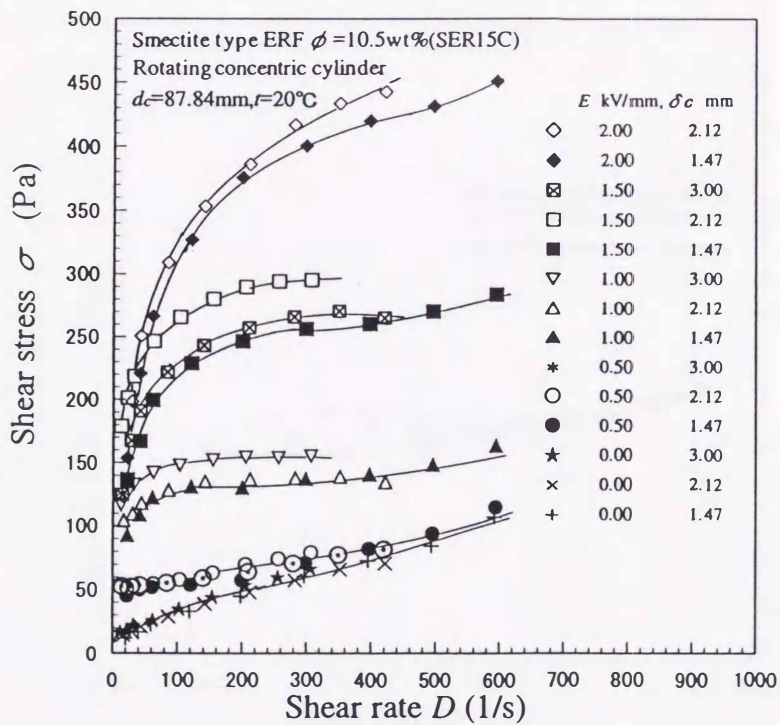


図 2.16 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C)

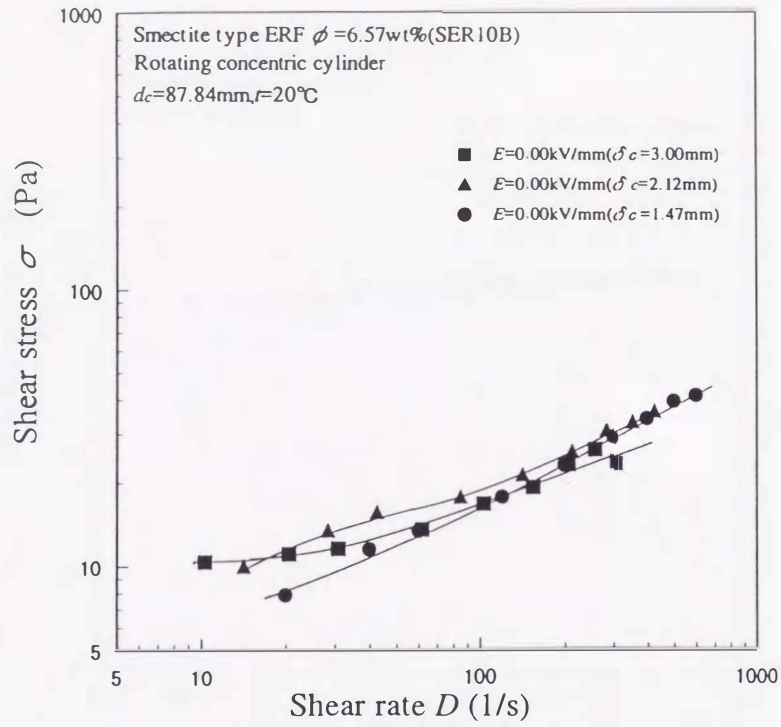


図 2.17(a) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E = 0.00\text{kV/mm}$)

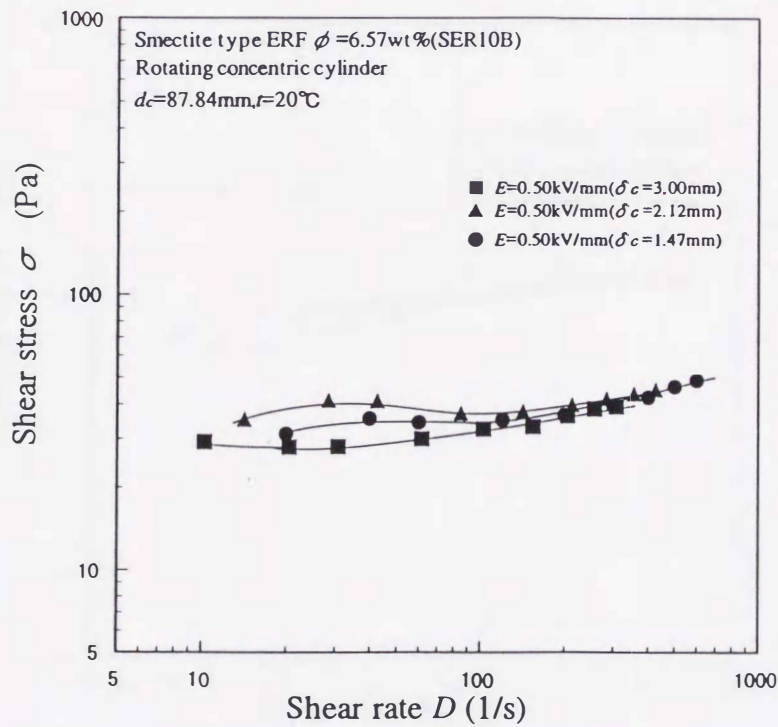


図 2.17(b) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E = 0.50\text{kV/mm}$)

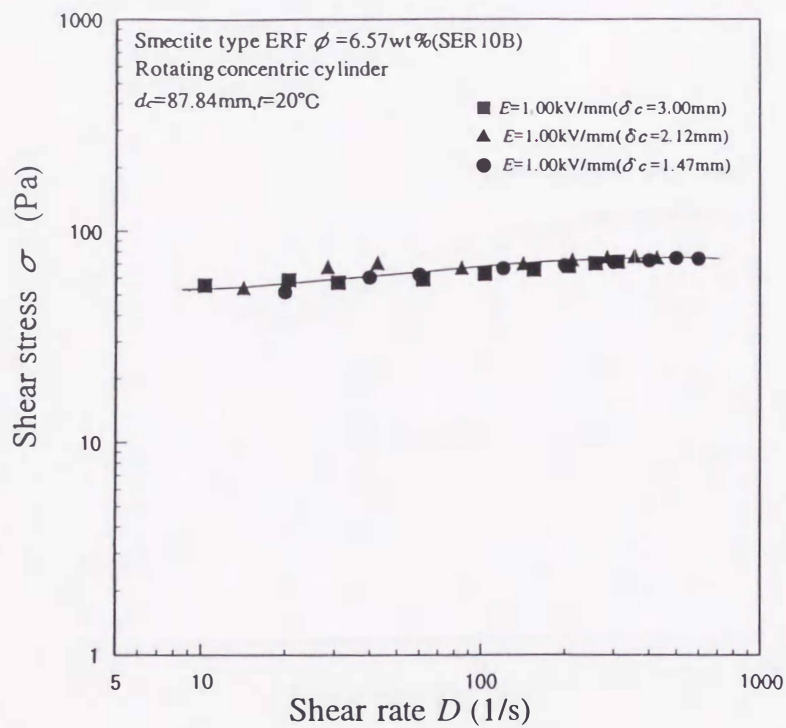


図 2.17(c) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E = 1.00\text{kV/mm}$)

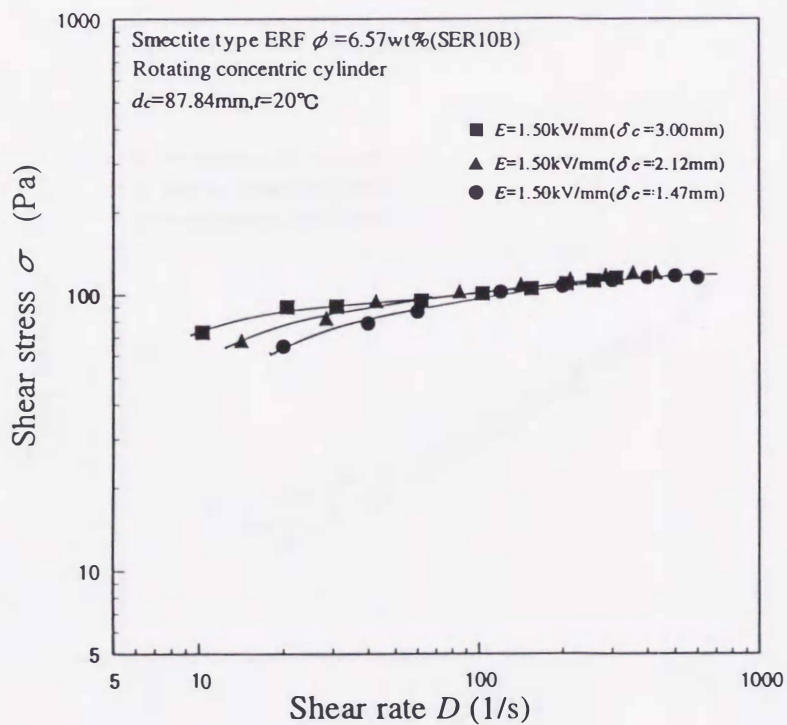


図 2.17(d) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E = 1.50\text{kV/mm}$)

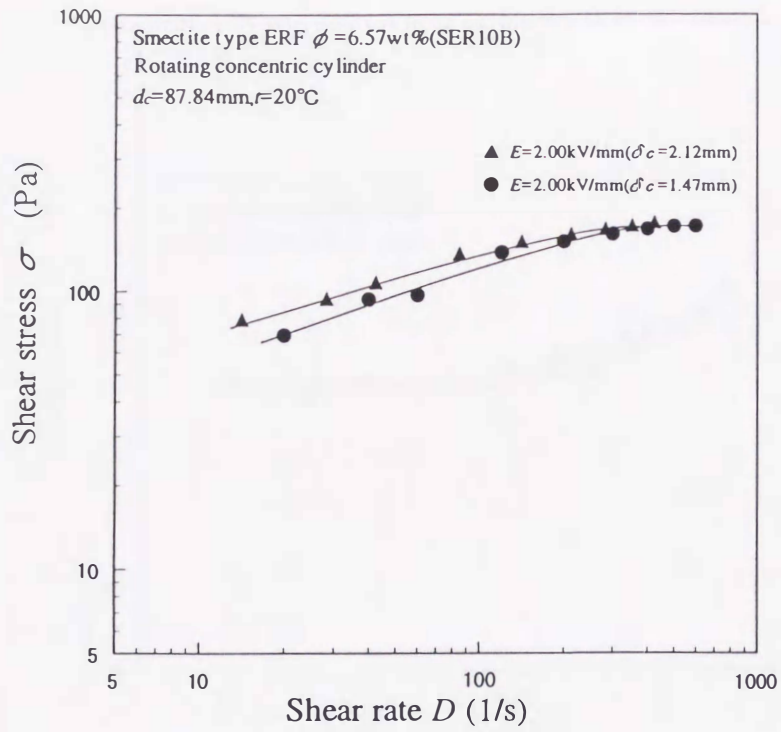


図 2.17(e) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER10B, $E = 2.00\text{kV/mm}$)

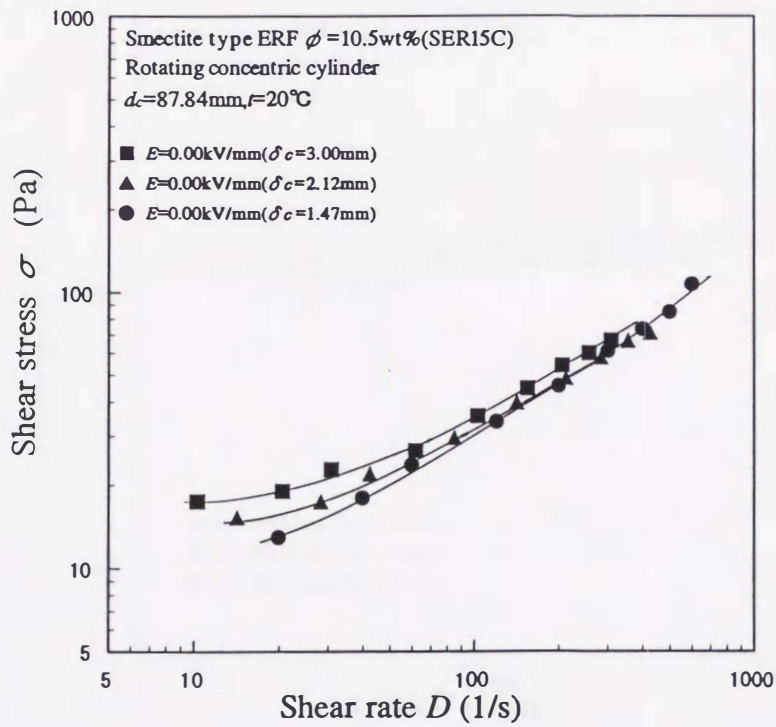


図 2.18(a) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E = 0.00\text{kV/mm}$)

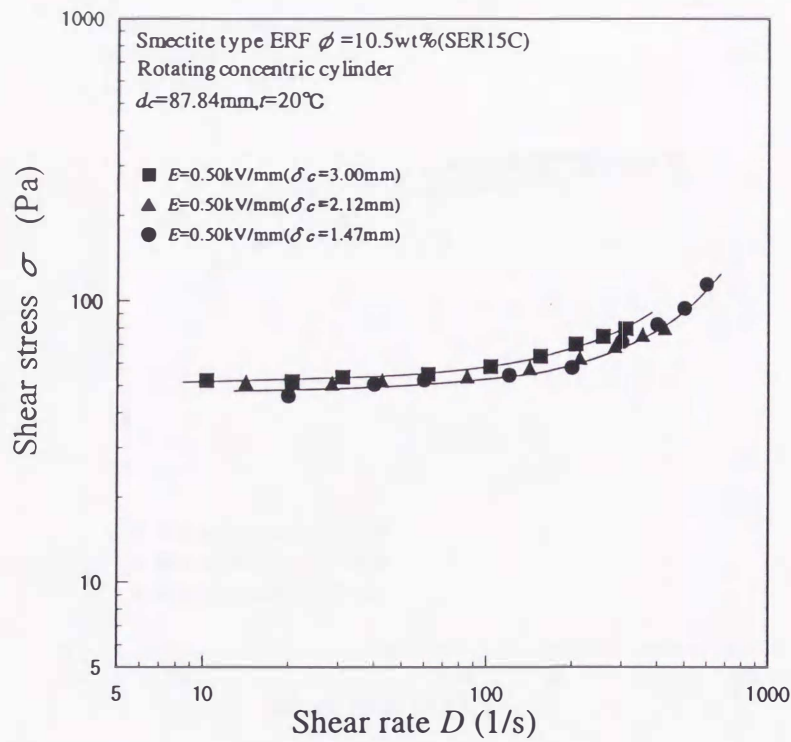


図 2.18(b) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E = 0.50\text{kV/mm}$)

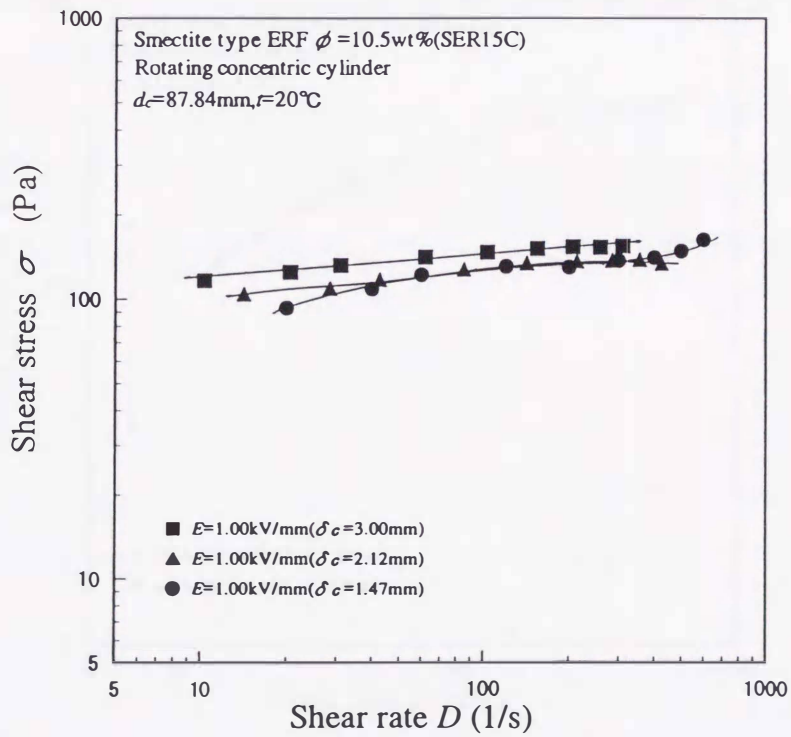


図 2.18(c) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E = 1.00\text{kV/mm}$)

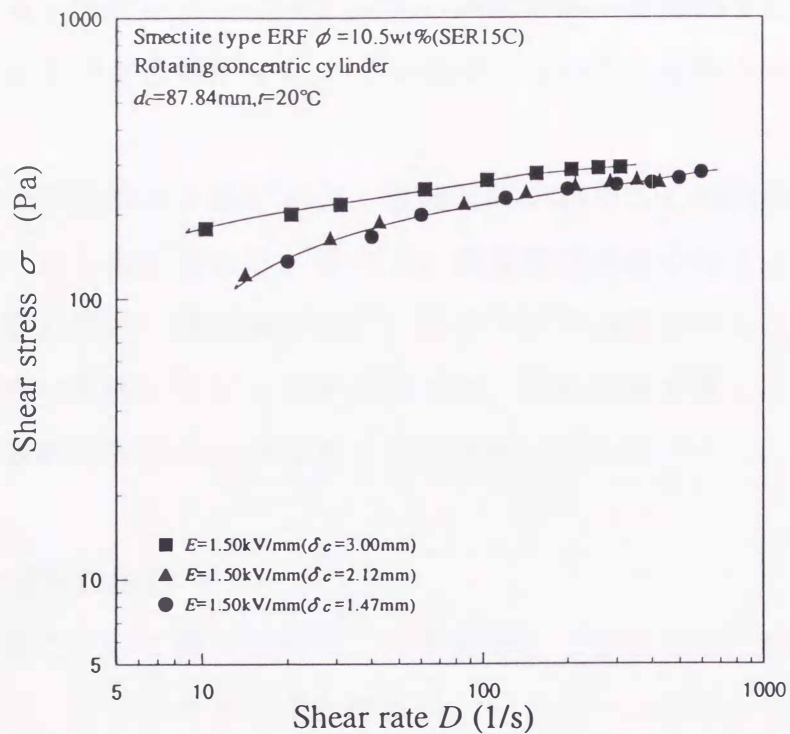


図 2.18(d) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E = 1.50\text{kV/mm}$)

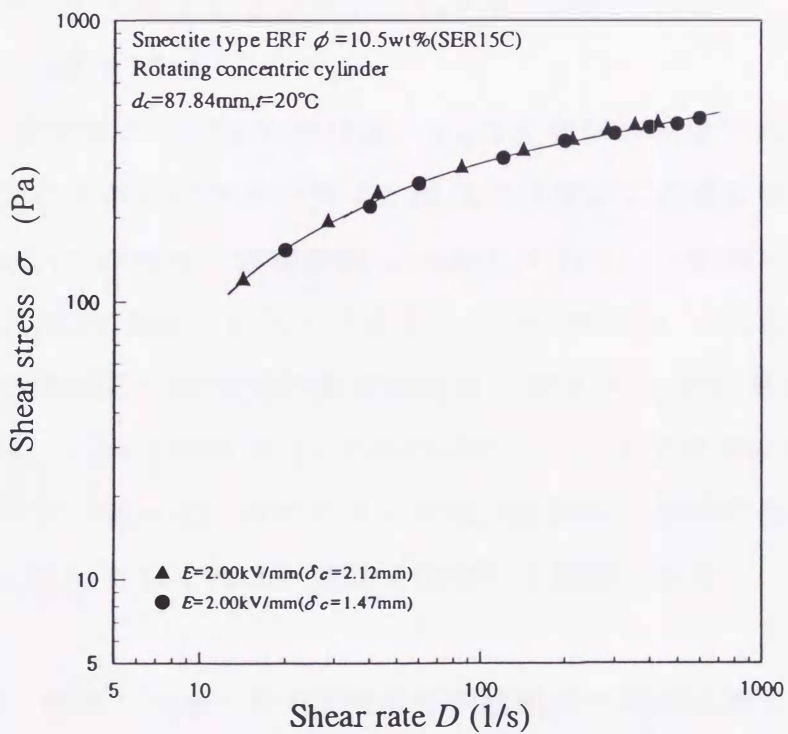


図 2.18(e) 流動曲線に及ぼす電極間隔の影響(SER15C, $E = 2.00\text{kV/mm}$)

の図におけるスメクタイト型 ER 流体の流動曲線が直線的でないことから、この流動曲線をべき乗近似することが適切でないことも分かる。

この結果は質量濃度が高い場合、電極間隔が異なると相似な流れで無いことを示していると考えられる。従って、質量濃度が高くなると流動曲線は電極間隔の影響を受け、電場強度とずり速度だけでは整理できない。これはクラスター形成の影響を受ける ER 流体では、電極間隔が異なると半径方向のずり速度の分布が局所的に異なることを意味している。

2.6.4 濃度と温度の影響

濃度の影響について調べる前に、先ず基準となる無電場における粘度について検討する。スメクタイト ER 流体は、シリコーンオイルに合成スメクタイト粒子を分散させたものであるので、サスペンションであると考えられる。式(2.16)は体積濃度が低い場合($\alpha < 0.01$)のサスペンションの粘度を与える最も一般的な式として知られるアインシュタインの式である。

$$\mu_s = \mu_0(1+2.5\alpha) \quad (2.16)$$

ここで、 μ_s はサスペンションの粘度、 μ_0 は分散媒の粘度である。

無電場におけるスメクタイト型 ER 流体の粘度がこの式に従うかどうかを調べる。SER15C の場合、体積濃度 $\alpha=0.065$ であり、分散媒のシリコーンオイルの粘度 $\mu_0=0.015\text{Pa}\cdot\text{s}$ を代入すると、 $\mu_s=0.017\text{Pa}\cdot\text{s}$ となる。一方、実験で得られた SER15C の無電場の塑性粘度は、表 3.2(μ_3 が無電場の塑性粘度)に示すように、 $\mu_3=0.143\text{Pa}\cdot\text{s}$ で、サスペンションとして求めた計算値の約 10 倍の粘度を示す。従って、スメクタイト型 ER 流体の粘度の発現メカニズムは、無電場においてもそれほど単純ではないと推察される。

図 2.19 は、測定した全ての ER 流体の体積濃度の増加に対するずり応力の増加分を調べたものである。条件は電場強度 $E=1.50, 1.52\text{kV/mm}$ 、電極間隔 $\delta_c=2.12\text{mm}$ 、温度 $t=20^\circ\text{C}$ の場合である。図において体積濃度 α が 4vol.%ま

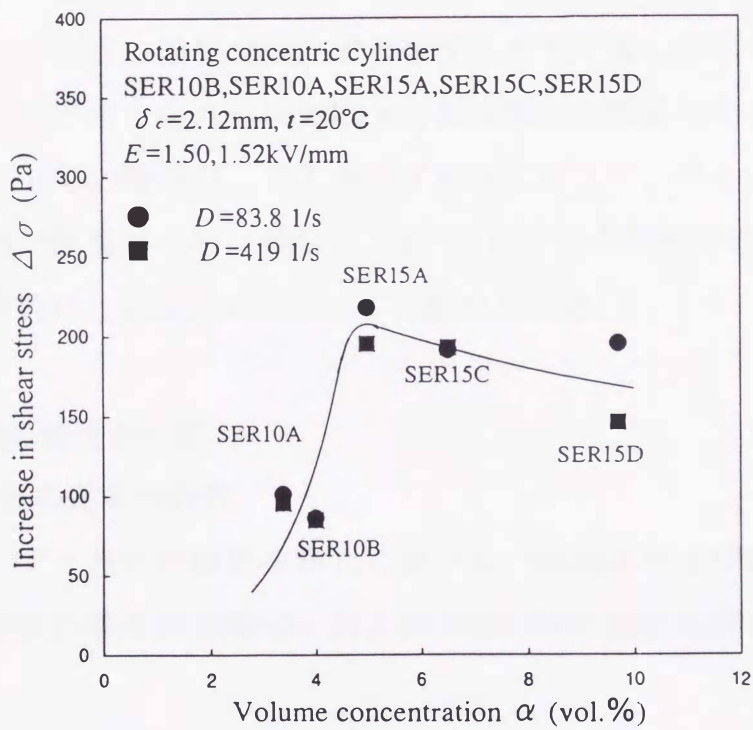


図 2.19 ずり応力の増加分と体積濃度の関係
 ($E = 1.50, 1.52\text{kV/mm}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t = 20^\circ\text{C}$)

ではずり応力が増加しているが、それ以上ではむしろ低下気味の傾向にあり、ずり応力が体積濃度に対して単純な比例関係ではないことが分かる。

次に、温度の影響を調べる。図 2.20 に温度を変えたときの $\delta_c=2.12\text{mm}$ で $t=20^\circ\text{C}$ と 40°C の場合の SER15A の流動曲線を比較して示す。

まず、各電場強度での降伏応力は温度が増加すると減少することが分かる。ずり速度の増加に対する変化についてみると、温度によって大きく異なることが分かる。すなわち、温度が低い $t=20^\circ\text{C}$ の場合は、電場強度が大きい場合にはずり速度の小さい領域では、ずり速度の増加に対してずり応力の増加が見られ、その後のずり応力の増加割合は電場強度に関係なく小さい。一方、温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ の場合は、ずり速度の増加に対して、ずり応力の増加割合はほぼ直線的で無電場の時に類似しており、ビンガム流体に近い特性を示す。このような傾向は、SER10A においても認められた。

2.7 電流密度の特性と考察

2.7.1 電流密度の基本的特性

電流密度とずり速度の関係を詳しく調べる。図 2.21 および図 2.22 は、 $\delta_c=2.12\text{mm}$ 、 $t=20^\circ\text{C}$ の場合の SER10A および SER15D の電流密度とずり速度の関係を示す。

付録に示した図も含めて全体としての傾向をみると、電流密度 i はずり速度 D の増加とともに減少し、その減少傾向は D の大きくなるにつれて緩やかになる。しかし、 i の変化が著しく現れる D の小さい領域では、ER 流体の濃度、電場強度 E 、電極間隔 δ_c によって i の D に対する傾向は一様でない。 i の傾向は図 2.23 に示すように 3 種類に分類することができる。すなわち、 $D=0$ における i の値を i_0 とすると、 D の増加につれて i/i_0 がはじめ急激に減少し、やがて緩やかな減少となる a のような曲線のタイプ、 D の増加に伴ってほぼ直線的に減少する曲線 b のようなタイプ、そして、 $D=0$ における $i/i_0=1$ の値から i/i_0 が一旦上昇して、 $D=100(1/\text{s})$ 付近で最大値に達した後、減少に

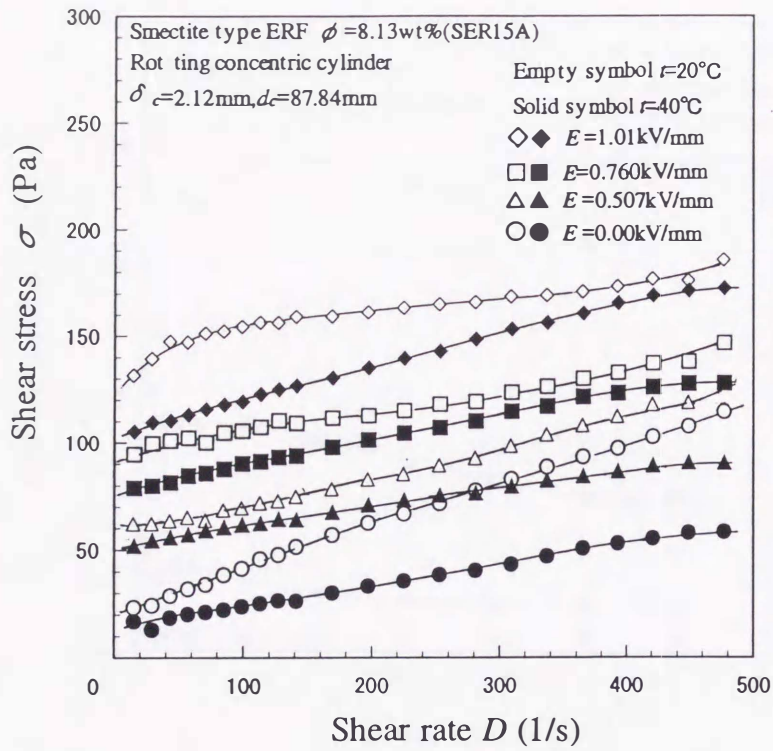


図 2.20 流動曲線(SER15A, $\delta_c=2.12\text{mm}$)

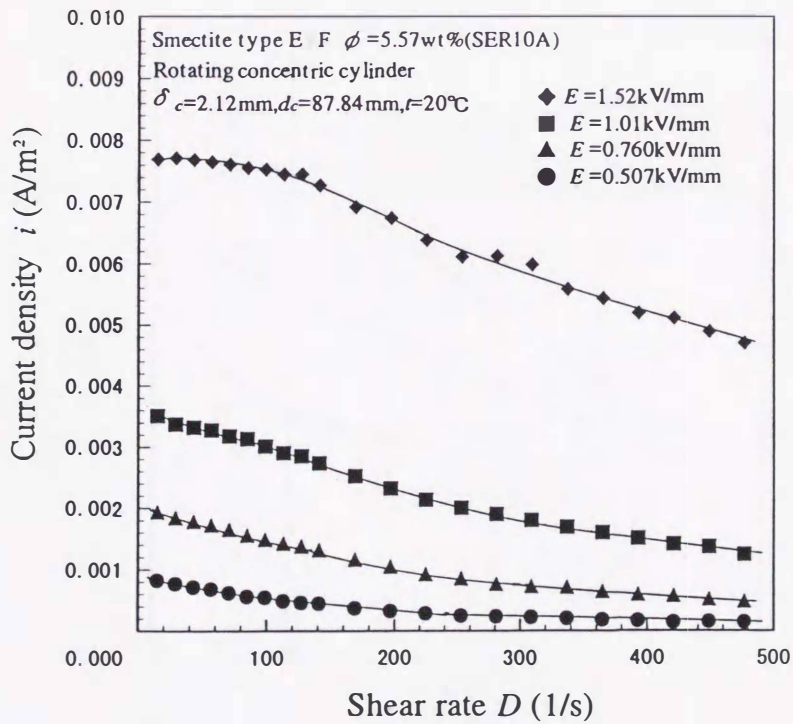


図 2.21 電流密度とずり速度の関係(SER10A, $\delta_c=2.12\text{mm}, t=20^\circ\text{C}$)

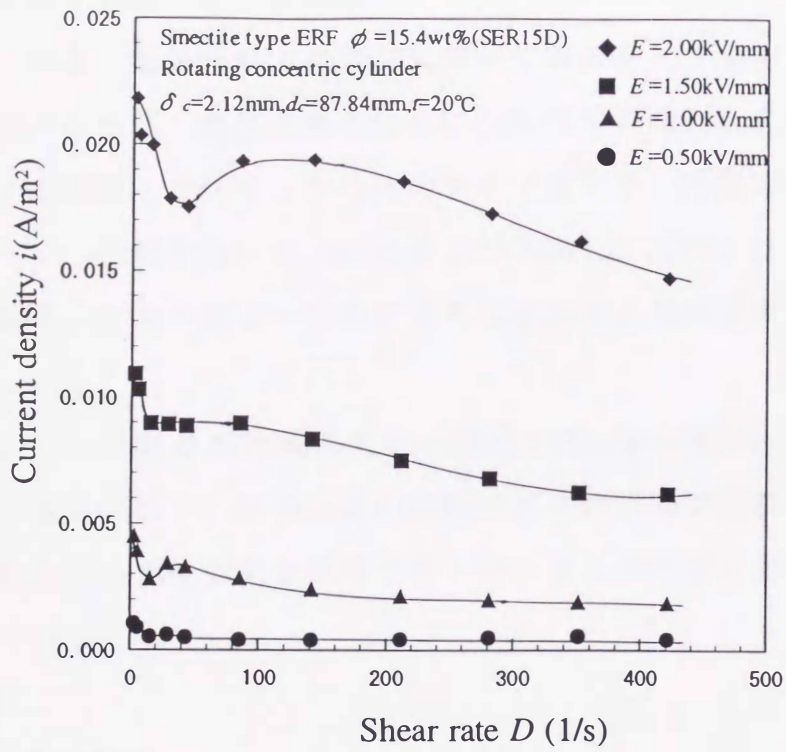


図 2.22 電流密度とずり速度の関係(SER15D, $\delta_c = 2.12 \text{ mm}, t = 20^\circ \text{C}$)

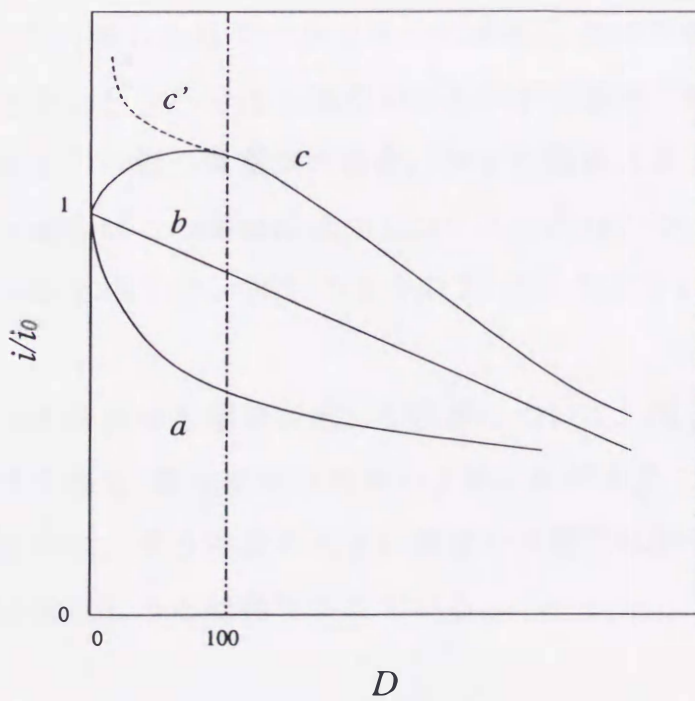


図 2.23 電流密度の特性

変わる曲線 c のようなタイプである。

濃度の低い場合、電場強度 E の増加に伴って b のタイプから c のタイプに移行する傾向がみられ、濃度が高くなるにつれて E の低いときには a のタイプが表れ、 E の増加につれて b から c のタイプまで徐々に移行する傾向がみられる。そして、濃度の高い SER15C および SER15D では、 D の小さい領域で、 i 、 i_0 が曲線 c' のようにピークの値よりも増加する傾向が表れるのが観測された。

このようにずり速度 D が比較的大きい領域では、 D の増加につれて電流密度 i が単調に減少するが、 D の小さい領域での i の挙動は複雑であり、クラスターの挙動を含め ER 効果を発現するメカニズムが大きく変わっていることを示唆している。

2.7.2 電場強度の影響

図 2.24 と図 2.25 はそれぞれ SER10A および SER15A に対する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、 δ_c は 2.12mm である。図中の直線は $i=bE^c$ で近似したものである (b, c は係数)。この近似曲線のべき乗の値 c は、 D の小さいところでは 2 程度であるがずり速度の増加につれ 3 に近づくことが分かる。一般の導電体の場合、 $i \propto E$ の関係にあるが、スメクタイト型 ER 流体の場合はこの関係は成立しないことが分かる。なお、電流密度は温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ の方が $t=20^\circ\text{C}$ の場合の 10 倍程度大きい。

土井ら⁽²²⁾は ER 流体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 3 乗に比例することを導いている。従って、実験結果は、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いう推論が成立しうる根拠を与えている。

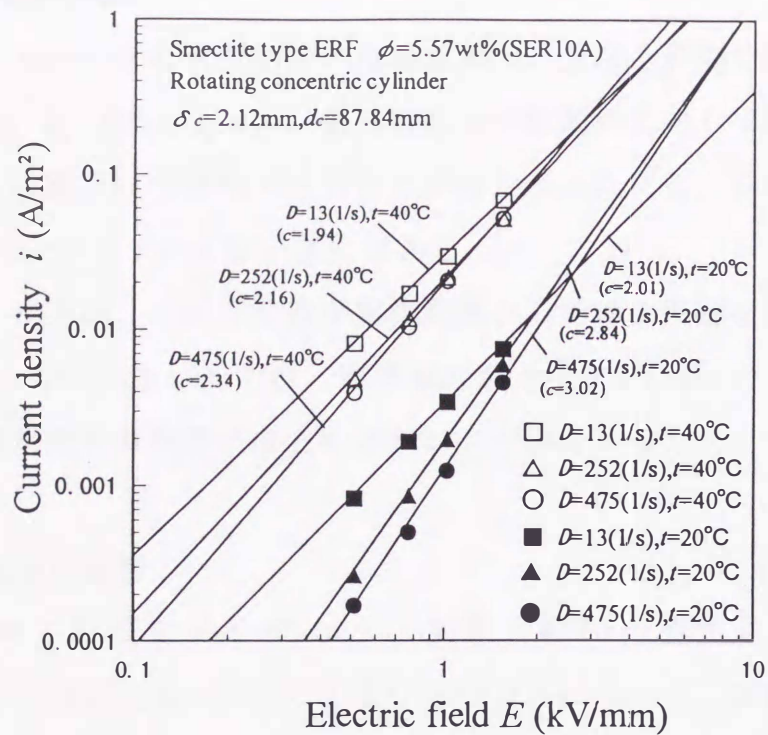


図 2.24 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER10A)

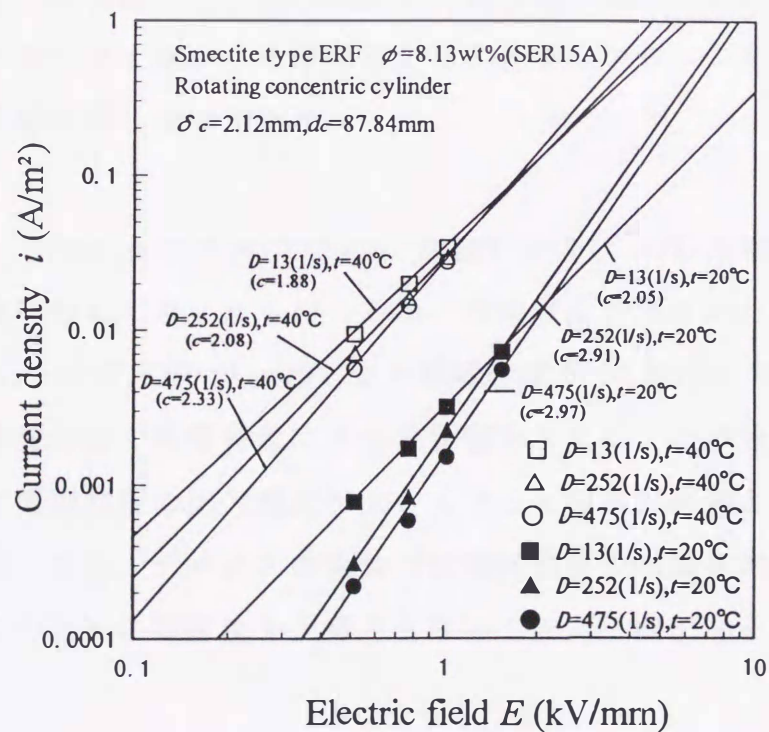


図 2.25 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER15A)

2.7.3 電極間隔の影響

図 2.26 は、SER10B の電流密度が電極間隔から受ける影響を比較して示したものである。 $D > 100(1/s)$ では、電流密度は電極間隔に対して影響は無く電場強度とずり速度だけで整理できることが分かる。ただし、 D の小さい領域では δ_c の小さい方が i が大きい傾向がある。

図 2.27 は、SER15C の電流密度が電極間隔から受ける影響を比較して示したものである。 $D > 100(1/s)$ では、電場強度が $E=2.00kV/mm$ のときを除き、電流密度は電極間隔の影響がほとんど無いことが分かる。

2.7.4 濃度と温度の影響

先ず、濃度の影響についてみる。実験に用いた全ての ER 流体、SER10B, SER10A, SER15A, SER15C および SER15D について、体積濃度の増加に対する電流密度の変化を調べたのが図 2.28 である。比較した条件は電場強度 $E=1.50, 1.52kV/mm$ 、電極間隔 $\delta_c = 2.12mm$ 、温度 $t=20^\circ C$ の場合である。図から体積濃度の変化に対して電流密度は、はじめは増加するが一定以上の濃度ではあまり変化せず減少する傾向のあることが分かる。この傾向は σ に対する濃度の影響と同じ傾向である。

図 2.29 は、SER15A の $\delta_c = 2.12mm$ 、 $t=20^\circ C$ および $40^\circ C$ の電流密度とずり速度の関係を比較して示したものである。電流密度が温度から受ける影響についてみると、 $t=40^\circ C$ の方が $t=20^\circ C$ より電流密度が 10 倍程度大きい。従って、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とが分かる。

一般に高圧電源装置の出力電流が大きくなると装置が高価となり、安全上も好ましくないため、デバイスの設計では電流密度の増加を抑えることが必要である。そのためには温度を上昇させない工夫が必要である。

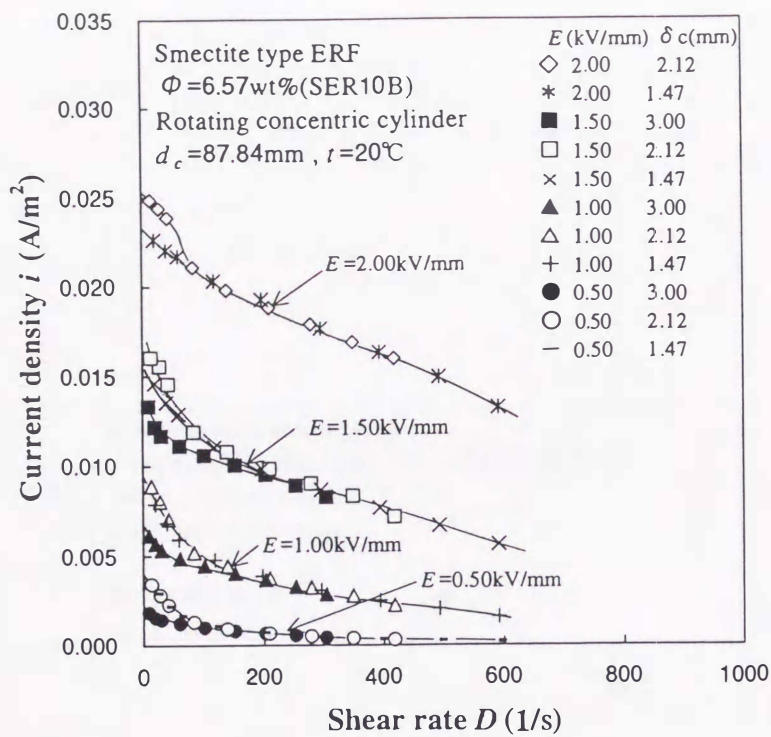


図 2.26 各電極間隔での電流密度とすり速度の関係(SER10B)

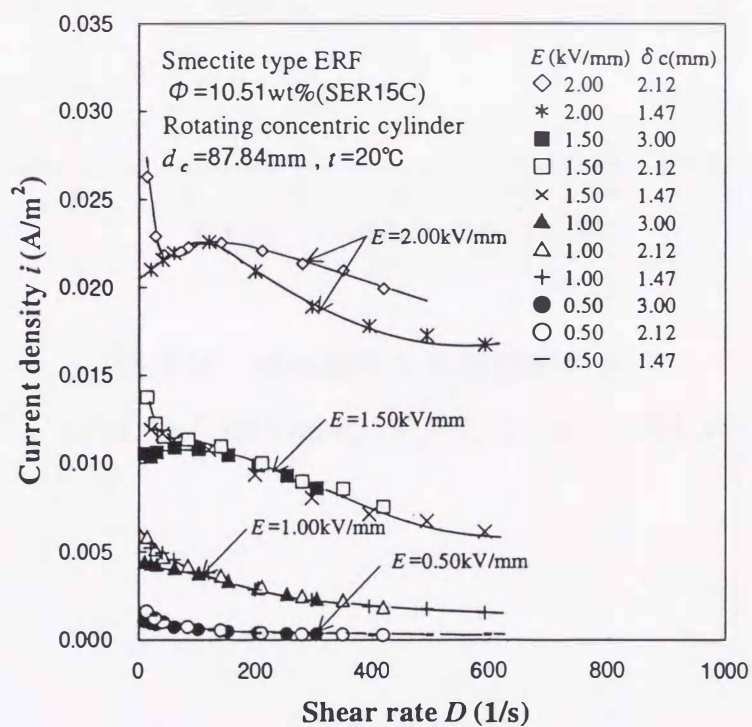


図 2.27 各電極間隔での電流密度とすり速度の関係(SER15C)

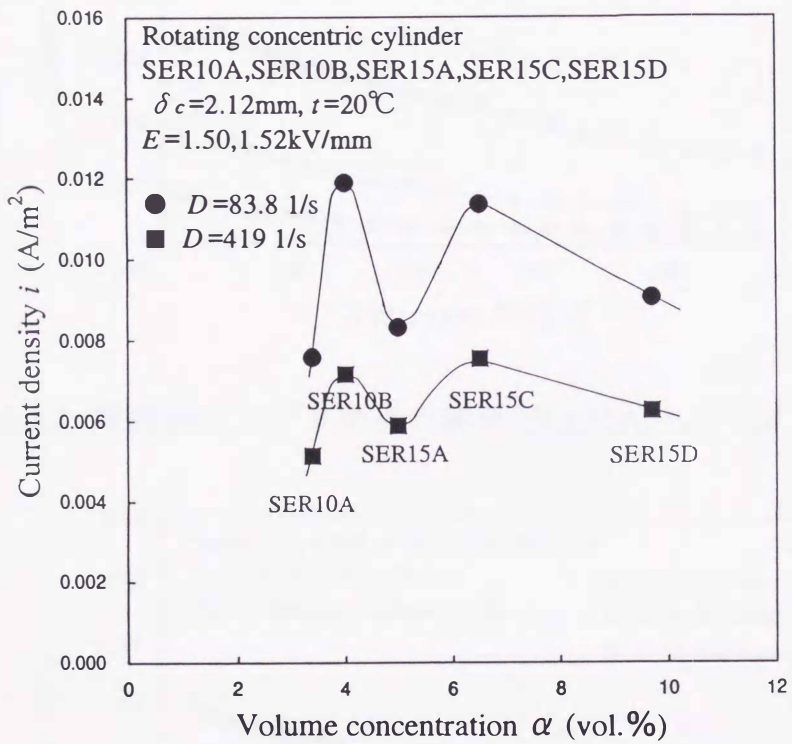


図 2.28 電流密度と体積濃度の関係
 ($E = 1.50, 1.52\text{kV/mm}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$, $t = 20^\circ\text{C}$)

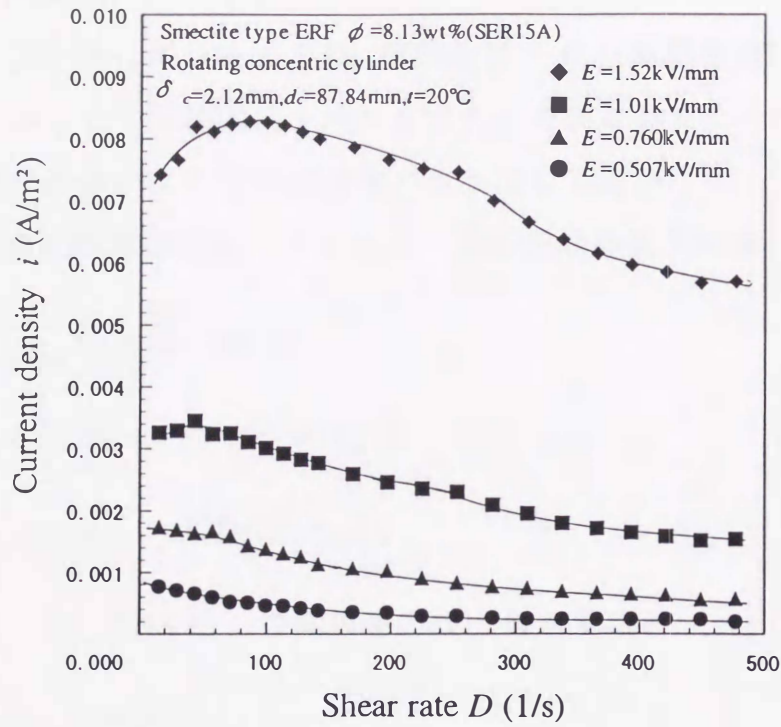


図 2.29(a) 電流密度とずり速度の関係(SER15A, $t=20^\circ\text{C}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$)

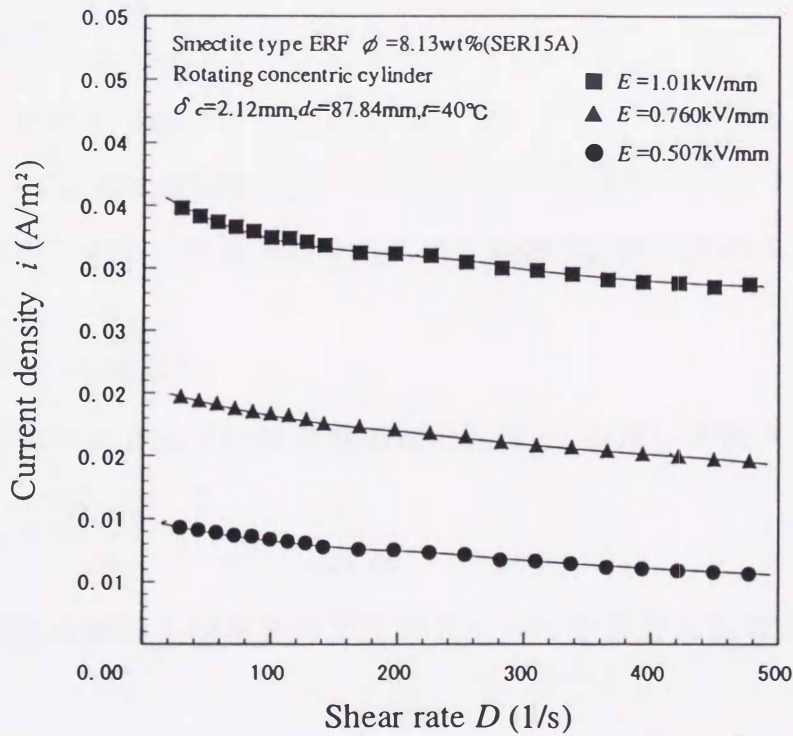


図 2.29(b) 電流密度とずり速度の関係(SER15A, $t=40^\circ\text{C}$, $\delta_c = 2.12\text{mm}$)

2.8 モーメント係数

流体中で回転体に働くトルクは、流動曲線 σ - D の関係を用いて算出することができるが、より直接的にトルクを求める方法としてモーメント係数 C_{Mc} を用いる場合が多い。この方法は次のようにして導かれる。

回転体の表面摩擦係数を c_f とすると、回転円筒の表面に働く力 F_{cs} は、

$$F_{cs} = c_f \frac{\rho(R_m \omega)^2}{2} 2\pi R_i l \quad (2.17)$$

で与えられる。従って、トルク T_{cs} は、

$$T_{cs} = F_{cs} R_i = c_f \frac{\rho(R_m \omega)^2}{2} 2\pi R_i^2 l \quad (2.18)$$

ここで、 $R_i = 2R_m \kappa / (1 + \kappa)$ の関係を上式に代入すると、

$$T_{cs} = c_f \cdot 4\pi \rho R_m^4 \omega^2 l \frac{\kappa^2}{(1 + \kappa)^2} \quad (2.19)$$

を得る。いま、

$$C_{Mc} = c_f \frac{2\kappa^2}{(1 + \kappa)^2} \quad (2.20)$$

とおけば、式(2.19)は、

$$T_{cs} = C_{Mc} \cdot 2\pi \rho R_m^4 \omega^2 l \quad (2.21)$$

と表すことができる。従って、モーメント係数 C_{Mc} は以下のように表される。

$$C_{Mc} = \frac{T_{cs}}{2\pi \rho R_m^4 \omega^2 l} \quad (2.22)$$

また、回転レイノルズ数は無電場時の粘度 μ_0 を用いて次式で定義する。

$$R_{\omega c} = \frac{\rho R_m \omega \delta_c}{\mu_0}, \quad \mu_0 = \frac{T_{c0}}{2\pi R_i^2 D l} \quad (2.23)$$

一方、無電場時および電場印加時のトルクはそれぞれ次のように表すことができる。

$$T_{c0} = \mu_0 D \cdot 2\pi R_i^2 l \quad (2.24)$$

$$T_{cs} = \mu D \cdot 2\pi R_i^2 l = \frac{4\pi\mu\omega R_i^2 l}{1-\kappa^2} \quad (2.25)$$

式(2.22)と式(2.25)から,

$$\begin{aligned} C_{Mc} &= \frac{2\pi\mu R_i^2 l}{2\pi\rho R_m^4 \omega^2 l} \frac{2\omega}{1-\kappa^2} \\ &= \frac{\mu R_i^2 l \delta_c}{\rho R_m \omega \delta_c R_m^3 \omega} \frac{2\omega}{1-\kappa^2} \\ &= \frac{\mu}{\mu_0 R_{\omega c}} \frac{R_o^2 R_i^2}{R_m^4} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$R_o/R_m \cong 1$, $R_i/R_m \cong 1$ のとき, 式(2.26)は次式のように表される.

$$C_{Mc} \cong \frac{\mu}{\mu_0 R_{\omega c}} \quad (2.27)$$

図 2.30 および図 2.31 は, モーメント係数 C_{Mc} と回転レイノルズ数 $R_{\omega c}$ の関係をそれぞれ示したものである. 各図において印加電場強度の増加に伴ってモーメント係数が大きくなることが分かる. これは印加電場強度が大きくなると相対粘度 (μ/μ_0) が大きくなることを示している. 一方, 同じ回転レイノルズ数のとき, モーメント係数は $t=40^\circ\text{C}$ の方が大きい. また, 電場印加時の C_{Mc} の $R_{\omega c}$ に対する勾配は $t=20^\circ\text{C}$ の場合は無電場のときの勾配に近いが, $t=40^\circ\text{C}$ の場合は無電場の勾配より大きい. この原因は $t=40^\circ\text{C}$ の場合, 無電場でのトルクと降伏応力が小さいためである.

2.9 トルク増加に対する消費電力

次にトルク増加に対する消費電力について調べる. 図 2.32 および図 2.33 は, それぞれ SER10A, SER15A を使用した場合の $VII/\Delta T_{cs}$ と角速度の関係を示したものである. 各図において, 温度の低い $t=20^\circ\text{C}$ の場合, 各電場強度において角速度の増加に対して, $VII/\Delta T_{cs}$ は減少傾向にあるが変化は緩やかで, 角速度の大きいところでは一定値に近い. 一方, 温度の高い $t=40^\circ\text{C}$ の場合は, $t=20^\circ\text{C}$ に比べて $VII/\Delta T_{cs}$ の値が大きく, 電場強度が大きくなると角速度の増

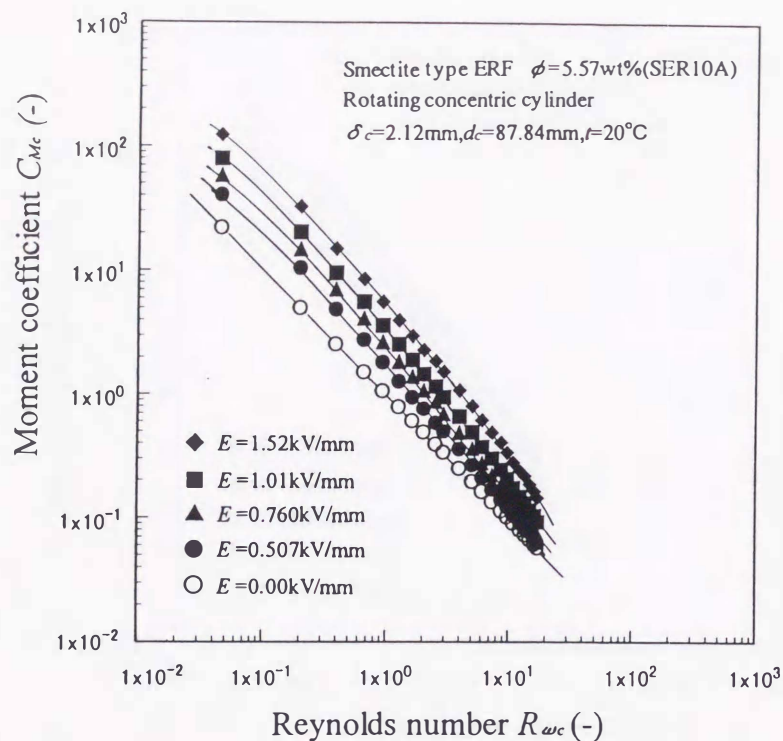


図 2.30(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10A, $t=20^\circ\text{C}$)

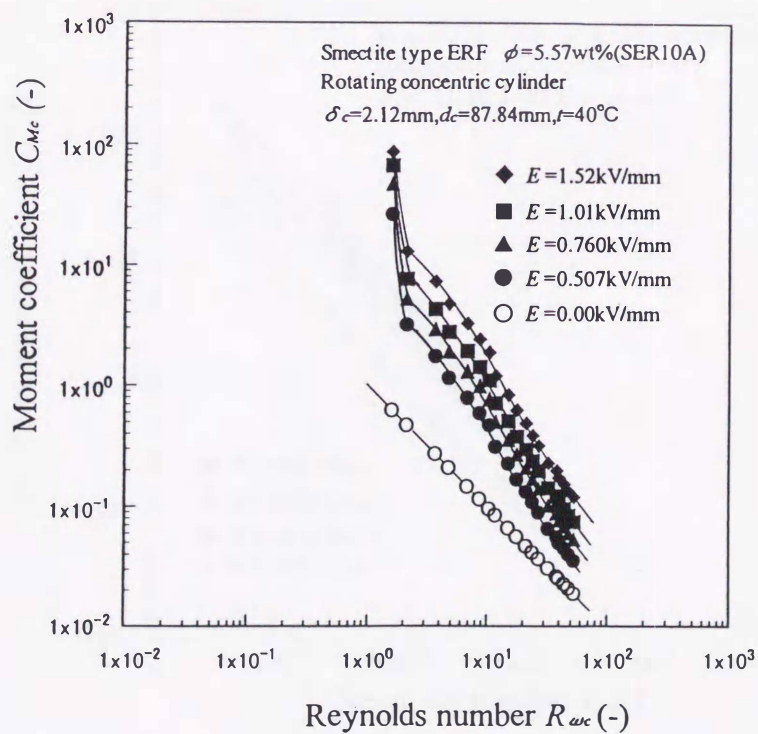


図 2.30(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10A, $t=40^\circ\text{C}$)

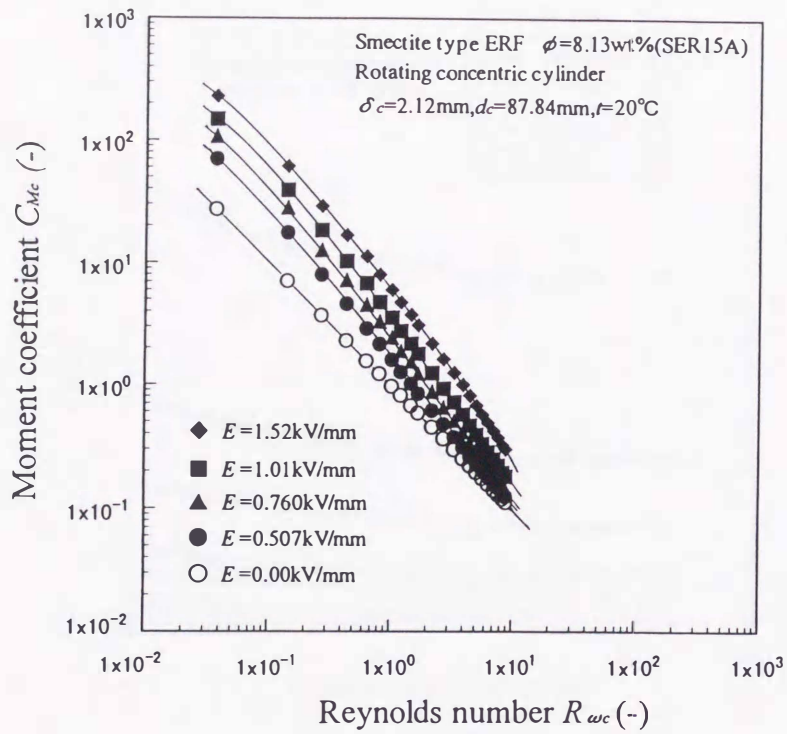


図 2.31(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15A, $t=20^\circ\text{C}$)

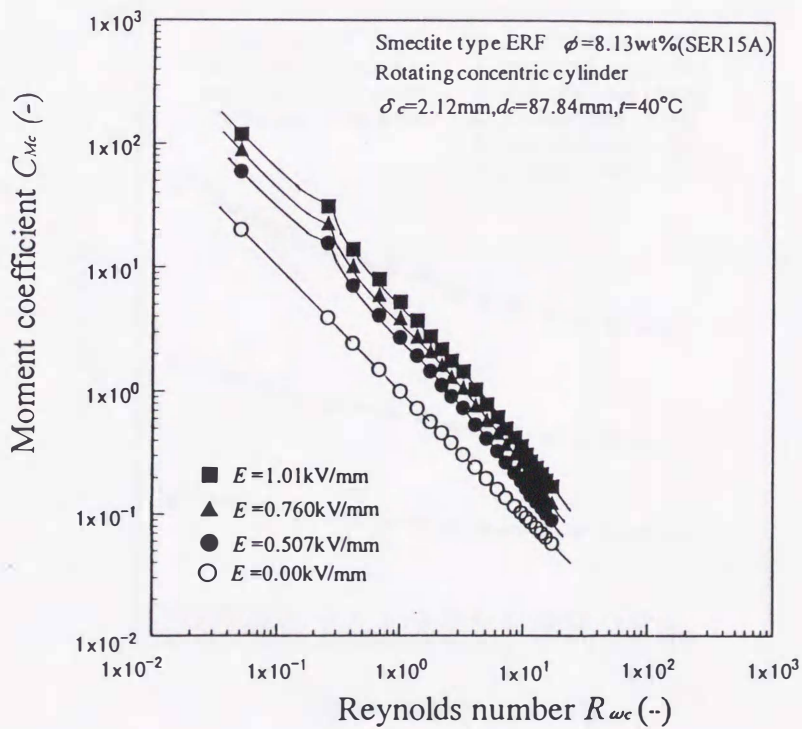


図 2.31(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER15A, $t=40^\circ\text{C}$)

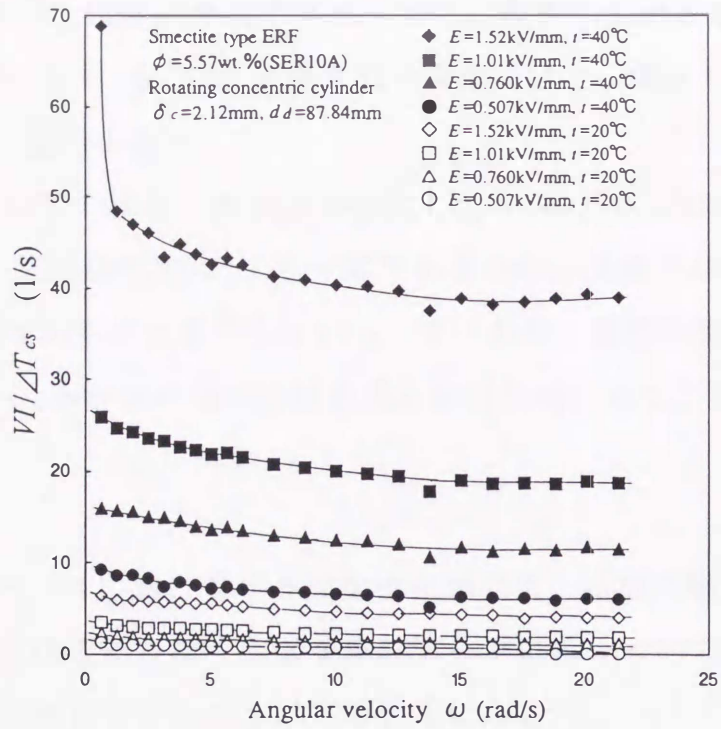


図 2.32 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER10A)

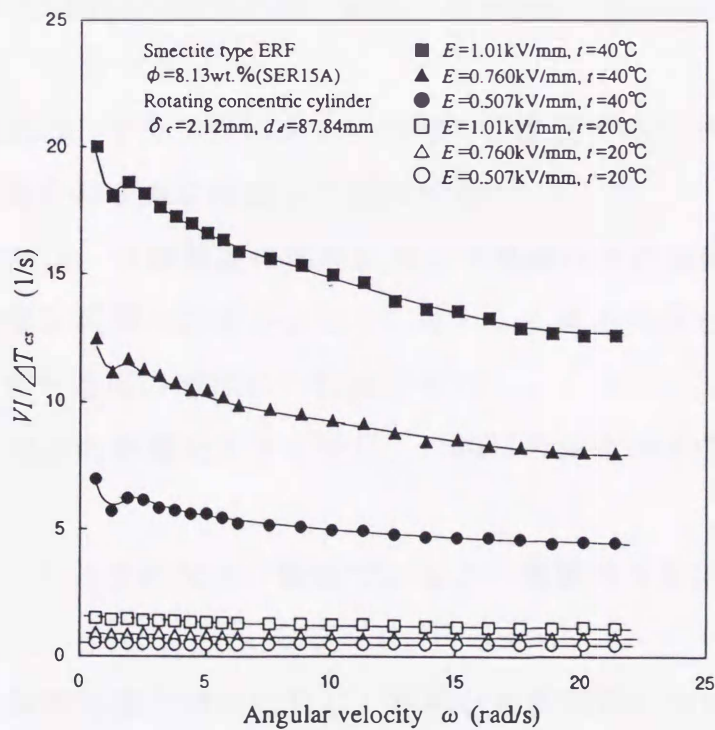


図 2.33 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER15A)

加に対して、 $V/\Delta T_{cs}$ は減少傾向にある。また、電場強度が大きくなると $V/\Delta T_{cs}$ の値は大きくなる。図 2.32 と図 2.33 を比較すると、濃度が高い SER15Aの方が $V/\Delta T_{cs}$ の値が小さい。

温度の低い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、角速度が変化しても $V/\Delta T_{cs}$ がほぼ一定であることは、 E が一定の条件では V も一定であるから、角速度が変化しても $V/\Delta T_{cs}$ が常に一定であることを示している。すなわち、電場強度が一定の場合、角速度に関係なく、トルクの増加分は電流と比例関係にあることを意味する。

2.10 結言

回転円筒型デバイスにおけるずり速度や電場強度、電極間隔、濃度、温度がずり応力と電流密度に及ぼす影響を実験データにもとづいて明らかにした。本章で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 流動曲線は、電場強度が大きくなると降伏応力をもった擬塑性流体に近い特性を示し、ビンガム流体として近似することはできない。
- (2) 流動曲線は、ER 流体の濃度が高い場合、 $E=1.00\text{kV/mm}$ 以上でずり応力は電極間隔が広い方が大きい。
- (3) ずり応力の増加は、ずり速度の大きい領域で、濃度の高い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合を除いて、電場強度の 2 乗に比例して増加する。
- (4) ずり応力の増加は、体積濃度の増加に対して単純な比例関係にない。
- (5) 電流密度は、電極間隔の影響が少なく、主として電場強度とずり速度によって決まり、ずり速度の増加につれ減少する。
- (6) 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。
- (7) 電流密度は、ずり速度の大きい領域でおおよそ電場の 3 乗に比例して増加する。
- (8) 電流密度は、体積濃度の増加に対して単純な比例関係にない。
- (9) モーメント係数は、 $t=40^{\circ}\text{C}$ の方が $t=20^{\circ}\text{C}$ より大きい。
- (10) トルクの増加に対する消費電力は、 $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、角速度の変化に対し

てほぼ一定であるが、 $t=40^{\circ}\text{C}$ では角速度の増加に対して減少する。 $t=20^{\circ}\text{C}$ で電場強度が一定の場合、トルクの増加分は電流とほぼ比例関係にある。

第3章 回転円板型デバイスの定常特性の 予測手法

3.1 緒言

回転円板型デバイスの特性において、基本となるのは定常特性である。本章では、回転円筒型デバイスで得られた流動曲線を用いて、円板まわりの流れの特徴を解析し、回転円板型デバイスの定常トルク特性を理論的に予測する手法を導く。回転円板の場合、円板表面の周方向速度は半径に比例して増加し一様でない。従って、ずり速度によって粘度が異なる非ニュートン流体の場合、円板まわりの流れの状態を調べるには、実質上、数値解析が唯一の方法である。

流動解析における数値解析手法は、差分法と有限要素法に分けられるが、本研究では有限要素法を採用する。同一格子の場合、有限要素法は格子内の流速を補間関数で近似するため、差分法に比べ解析精度が高く、非ニュートン流体のような場所により粘度が異なる場合の解析に有効であるからである。解析コードは多くの分野で採用された実績のある流動解析コードである FIDAP(Ver.7.52)⁽²³⁾を使用する。この解析コードは、物性値や境界条件などにユーザーが各自のサブルーチンを組み込むことができるとともに、非ニュートン流体に対する考慮も払われている。

数値解析コードに用いられている基礎式は連続の式と運動方程式であるが、これを解くのに、ER 流体のずり応力とずり速度の関係を表す構成方程式が必要になるのは解析コードにおいても同じである。これまで ER 流体の構成方程式には、ビンガム流体モデルが使われていたが、より精度の高い数値予測のためには、ずり速度の小さい領域の流動特性も表現できるようなビンガム流体に代わるモデルにもとづく構成方程式が必要である。そこで本章では、ER 流体の流動特性を表すのに、スプリングやダッシュポットなどの力学的特性の組

合せによって表現するマクロレオロジーの考え方にもとづくモデル(以下では力学応答系モデルと呼ぶ)を採用し、解析に必要な構成方程式を導く。この構成方程式中の定数は、すでに求められた回転円筒型デバイスにおける流動曲線によって定める。力学応答系モデルを用いるのは、デバイスの動特性を調べる際に、単なる実験相関式に比べてはるかに利点が多いからである。

3.2 回転円板まわりの流れの基礎方程式と数値解析手法

ER流体の粘度は同心二重円筒型粘度計によって調べられているので、本研究で扱う電極間隔/代表半径の小さい、すなわち、電極間半径方向に電場強度の変化が小さい回転円筒型デバイスで得られた粘度を用いて、ER流体中の回転円板まわりの流動解析を行い、回転円板に作用するトルクを予測する。すなわち、回転円筒型デバイスにおける単純なせん断流れ場から得られたER流体の粘度を用いて、回転円板表面におけるずり速度が半径方向に変化し、半径方向の二次流れを持つ複雑な流れ場への適用を試みる。

回転円板まわりの流動解析に使用する基礎方程式は以下の通りである⁽²³⁾。

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rr}) - \frac{1}{r} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_{r\theta}) + \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rz}) + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0 \quad (3.4)$$

$$\sigma_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -p + 2\mu \frac{u_r}{r} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{r\theta} = \mu r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \quad (3.7)$$

$$\sigma_{zz} = \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{rz} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (3.9)$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (3.10)$$

式(3.5)～式(3.10)のずり応力を表す式は、粘度が一定のニュートン流体の場合と同じものであるが、場所によって粘度が異なる非ニュートン流体においても、微小領域では粘度が一定とみなすことができるので、微小領域に対して、上述の式(3.5)～式(3.10)は適用可能である。

基礎式における粘度 μ は、後述する力学応答系モデルから導かれた粘度の式によって求めるが、このときずり速度 D が必要となる。ずり速度は以下の式から求める⁽²⁴⁾。

$r \neq 0$ のとき

$$D^2 = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2 \quad (3.11)$$

$r = 0$ のとき

$$D^2 = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2 \quad (3.12)$$

ただし、この解析では $r=0$ となる状態は存在しない。

解析対象は第4章で使用する回転円板型デバイス(図4.2参照)である。回転円板の半径は $R_d=45.0\text{mm}$ 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は $\delta_d=1.5, 2.0, 3.0\text{mm}$ の3種類である。格子分割図($\delta_c=2.0\text{mm}$ の場合)を図3.1に示す。格子は長方形要素である。格子分割を行う際に図3.2に示すように①～⑨の領域に分ける。図3.2において③と⑦の領域が電場印加領域であり、その他の領域は無電場である。

この解析で用い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において

$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \quad (3.13)$$

回転円板および主軸表面において

$$u_\theta = r\omega \quad u_r = u_z = 0 \quad (3.14)$$

長方形要素内では、流速は1次の補間関数を使用し、有限要素方程式の解法としては、安定性の良い逐次代入法を採用する。

数値解析は汎用流体解析コード FIDAP に粘度のサブルーチンプログラムを組み込んで行う。図3.3は解析手順を示したフローチャートである。数値解析では、解析の基礎方程式にもとづく各要素に対する有限要素方程式をつくり、これに各節点での流速成分、各要素内の流速成分の勾配および粘度を代入して、収束判定基準を満足するまで繰り返し計算する。収束判定基準は、式(3.15)と式(3.16)である。

$$\left\| \frac{U_i - U_{i-1}}{U_i} \right\| \leq 10^{-2} \quad (3.15)$$

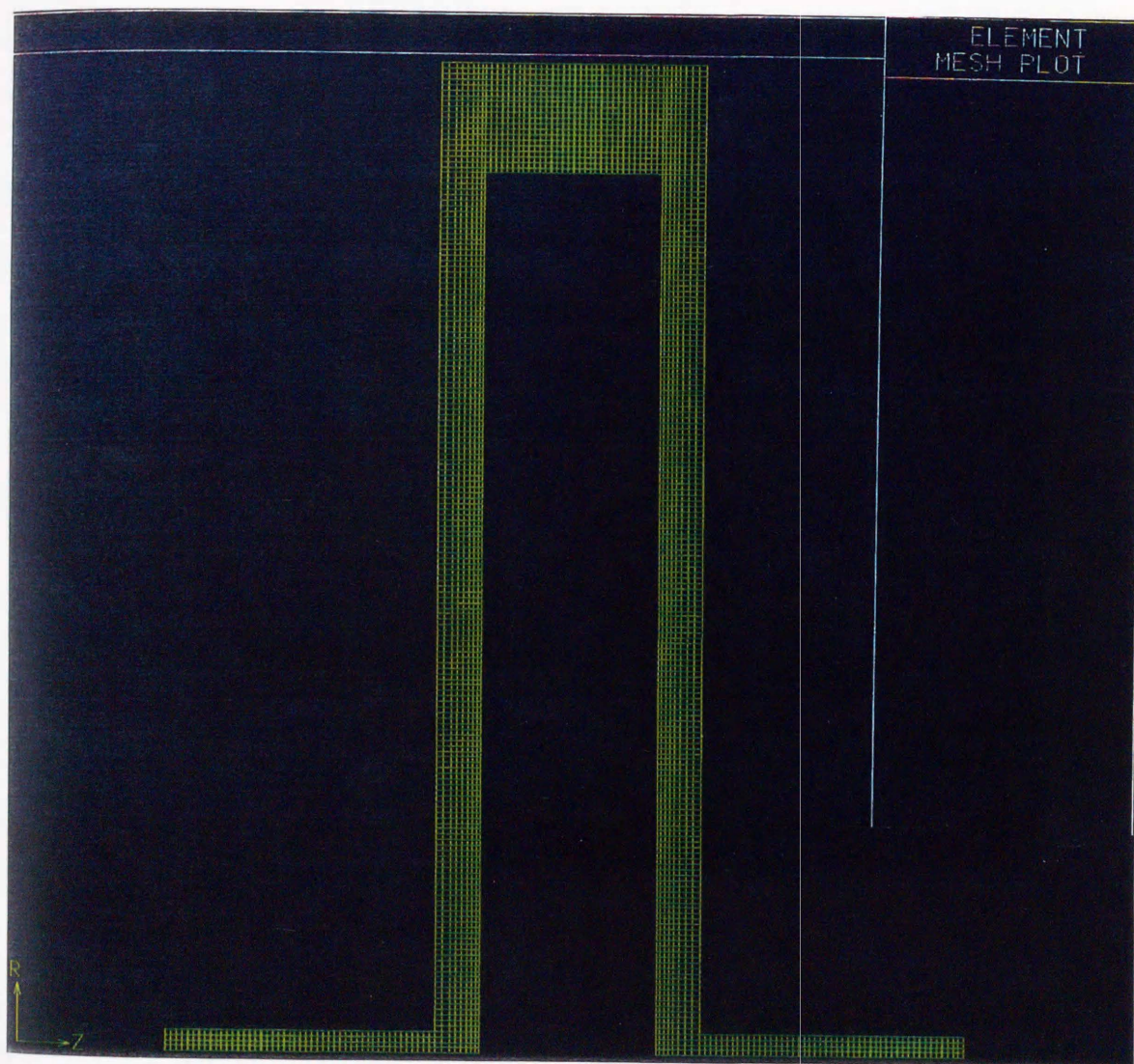
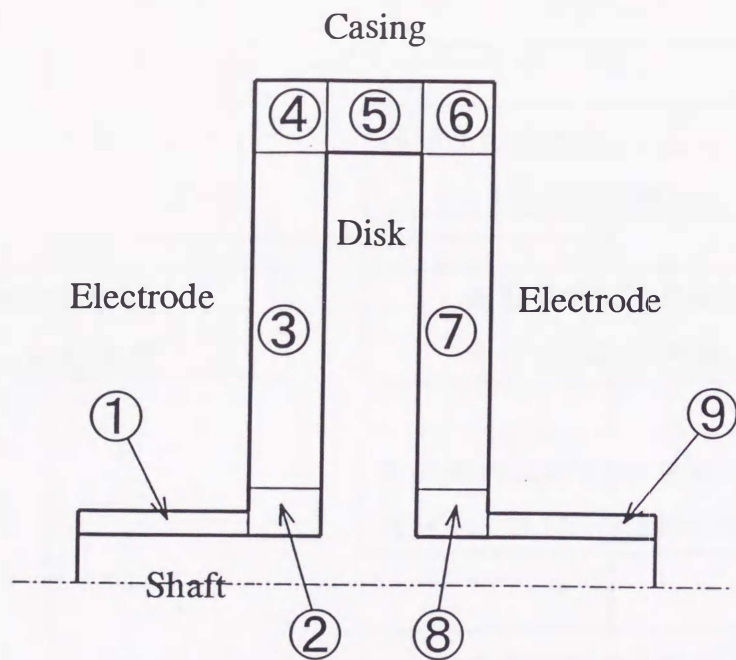


図 3.1 解析対象の格子分割図 ($\delta_d=2.0\text{mm}$)



| Area | $\delta_d=1.5\text{mm}$ | $\delta_d=2.0\text{mm}$ | $\delta_d=3.0\text{mm}$ |
|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ①⑨ | | 48 × 4 | |
| ②⑧ | 6 × 10 | 8 × 10 | 12 × 10 |
| ③⑦ | 6 × 150 | 8 × 150 | 12 × 150 |
| ④⑥ | 6 × 20 | 8 × 20 | 12 × 20 |
| ⑤ | | 32 × 20 | |

z-direction × r-direction

図 3.2 解析対象領域ごとの格子の分割数

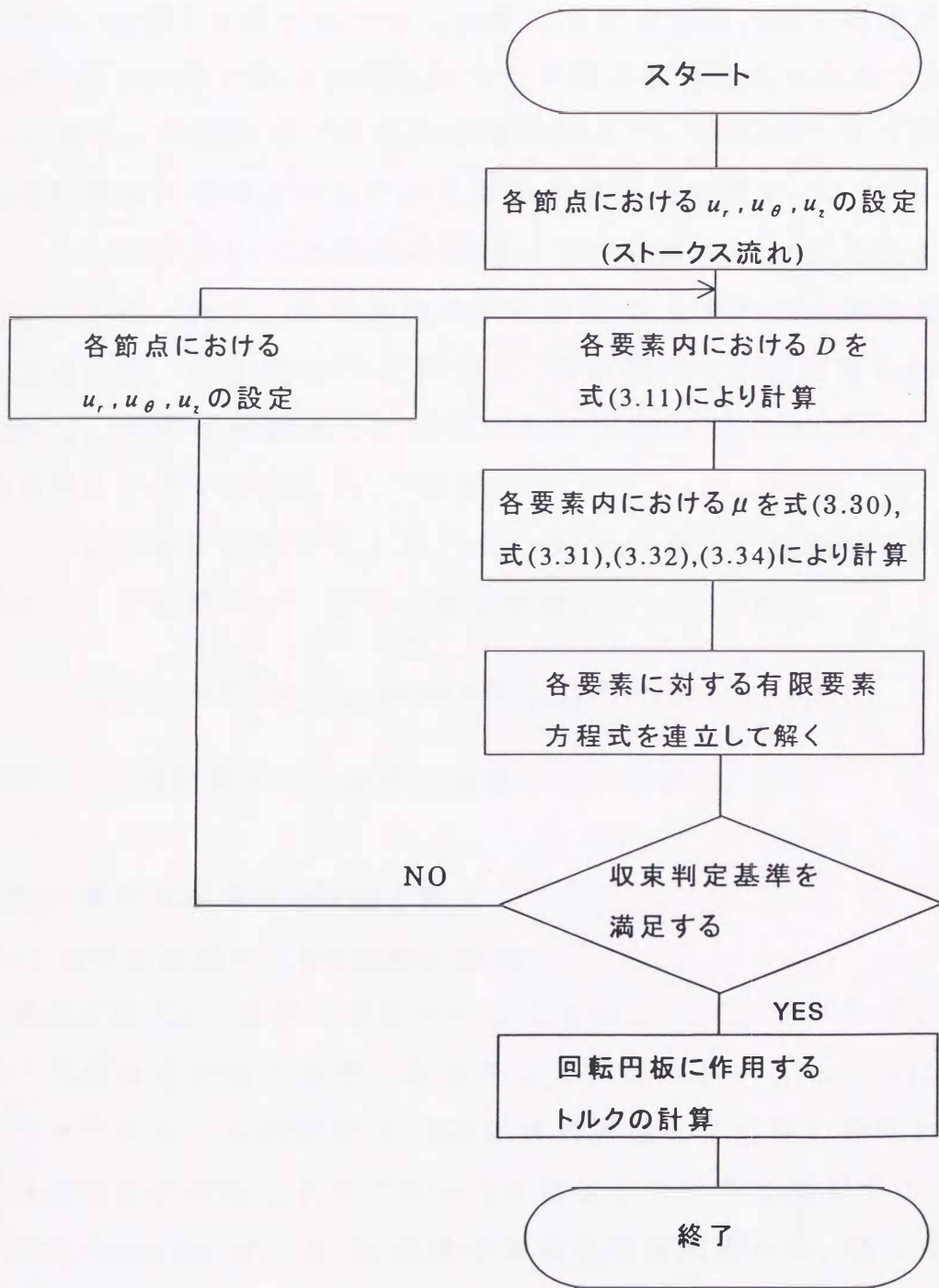


図 3.3 解析のフローチャート

$$\left\| \frac{S_i}{S_0} \right\| \leq 10^{-2} \quad (3.16)$$

ここで、 U_i は i 回目の繰り返し計算における流速あるいは圧力であり、 S_i は i 回目の繰り返し計算における有限要素方程式の残差である。ノルム $\|\bullet\|$ は、流速あるいは圧力では全節点で、残差については全ての有限要素方程式に対しての 2 乗平均平方根を表す。

この計算において必要な各要素内での粘度 μ は、以下のようにして計算する。まず、各要素内のずり速度 D を要素内の流速成分の勾配を用いて、式(3.11)から計算する。各要素内での μ は得られた D を用いて、電場印加領域では後述する式(3.30)～式(3.32)から、無電場領域では後述する式(3.34)で計算する。

さらに円板に作用するトルク $T_{ds} + T_{de}$ は、以上の流速分布の解析結果のデータを用いて、以下の数値計算によって求める。

$$T_{ds} + T_{de} = 2 \int_{R_s}^{R_d} \sigma_{z\theta} \Big|_{z=\delta_d} 2\pi r dr + \sigma_{r\theta} \Big|_{r=R_d} R_d w + 2\sigma_{r\theta} \Big|_{r=R_s} R_s s \quad (3.17)$$

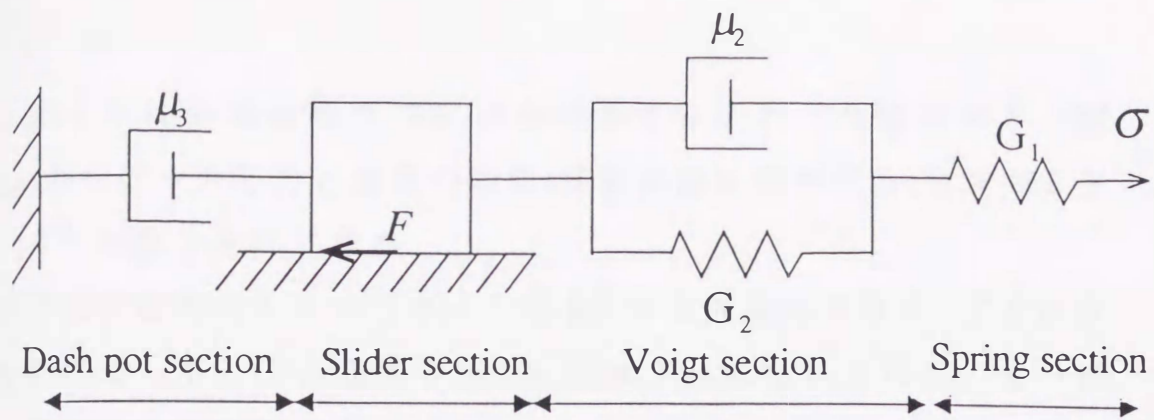
ただし、 s は主軸の ER 流体に接触している長さである。

3.3 ER 流体に適用する構成方程式

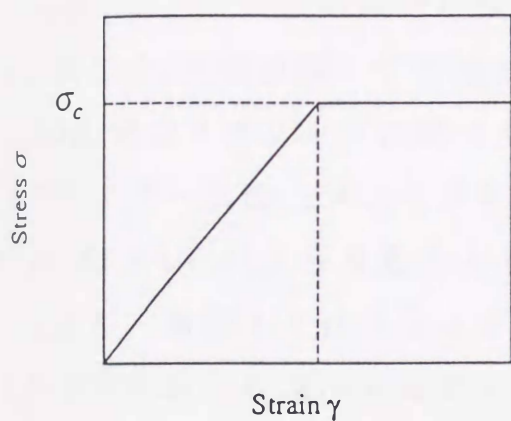
3.3.1 力学応答系モデルと構成方程式

構成方程式は、純粹な実験式によるものとスプリングやダッシュポットを組み合わせた力学応答系をシミュレートするモデルに分けることができる。本研究では、ER 流体の弾性と粘塑性の静的および動的な特性を求めることができる力学応答系モデルを採用する。

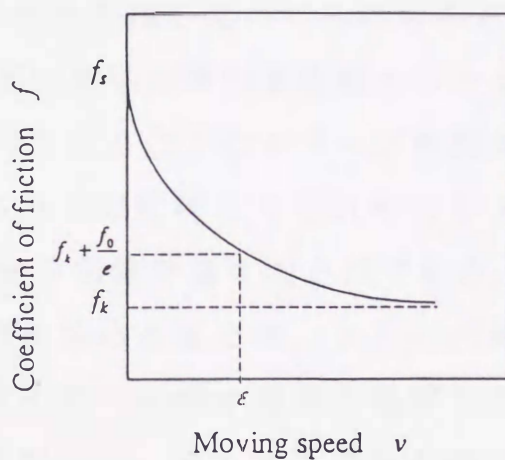
Gamota & Filisko⁽²⁵⁾ は ER 流体の動的な実験結果から、図 3.4(a) のような力学応答系モデルを提案している。このモデルはスプリングが直列につながった Voigt 部、スライダ一部、ダッシュポット部から構成される。Voigt 部は降伏前の ER 流体の粘弾塑性を表し、スライダ一部は電場に依存する降伏応力やクラスターによる流体抵抗、ダッ



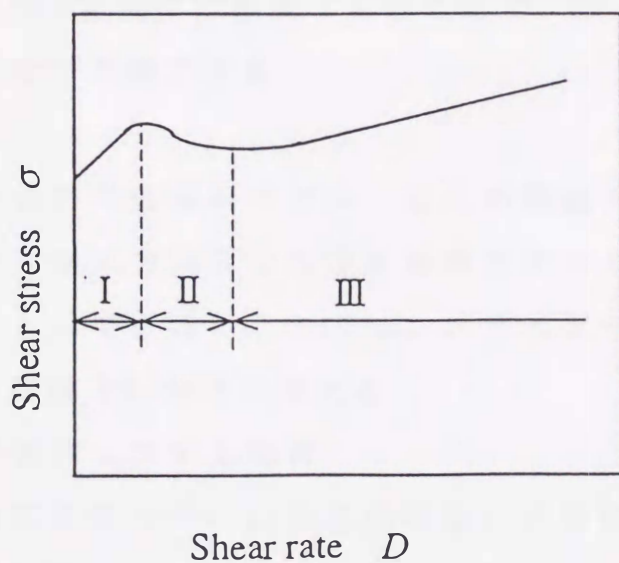
(a) 力学応答系モデル



(b) Voigt 部のバネの特性



(c) スライダーの摩擦特性



(d) 力学応答系モデルの応力と速度の関係

図 3.4 力学応答系モデル

シュポットは無電場時の ER 流体の粘性をそれぞれ模擬する。図 3.4(a)のモデルの応力と速度の関係(流動曲線に相当する)を求めるとビンガム流体のそれになる。

本研究で使用するスメクタイト型 ER 流体の流動曲線は、ずり速度の増加に対して、ずり速度の小さい領域では急激に上昇し、その後は緩やかな一定勾配で増加していく。また、日本触媒の TX-ER などのように、ずり速度の増加に対してずり速度の小さい領域では急激に減少し、その後は緩やかな一定勾配で増加していくものもある。

そこで、流動曲線のずり速度の小さい領域の特性を表現するために、Voigt 部のスプリングに図 3.4(b)に示されるようなクリープ特性を、スライダーに図 3.4(c)に示されるような摩擦特性をそれぞれ与えると、図 3.4(d)のような応力とずり速度の関係を表すことができる。すなわち、領域 I ではスライダーが動き始めるまでは、クリープ特性からずり応力の増加を起し、スライダーが動き始めた領域 II では摩擦特性からずり応力の減少を引き起こす。そしてその後の領域 III では速度の増加とともに応力は増加していく。

スメクタイト型 ER 流体は領域 I と領域 III で、TX-ER は領域 II と領域 III の組み合わせで表現できる。

ここで採用する力学応答系モデルからその構成方程式を求める手順を以下に示す。構成方程式は力学応答系モデルの応力と歪速度の関係から得ることができる。ここでは、スライダーが静止している場合と動いている場合に分けて考える。

(1)スライダーが静止している場合

これは力学応答系モデルの系全体に働く力に相当する応力 σ がスライダーの摩擦応力 F より小さい $\sigma < F$ の場合である。

$\sigma < \sigma_c$ では Voigt 部の速度は 0 である。 $\sigma \geq \sigma_c$ になると Voigt 部

の応力状態は図 3.5 の様になり，応力と歪速度 $\dot{\gamma}$ の関係は以下のようになる。

$$\sigma = \mu_2 \dot{\gamma}_2 + \sigma_c \quad (3.18)$$

(2) スライダーが動いている場合

すなわち $\sigma \geq F$ の場合

全体の歪速度はスプリング部，Voigt 部，ダッシュポット部のそれぞれの歪速度の合計であり，以下の式で表される。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 + \dot{\gamma}_3 \quad (3.19)$$

スプリング部において $\sigma = G_1 \gamma_1$ の関係から次式が成り立つ。

$$\dot{\gamma}_1 = 0 \quad (3.20)$$

Voigt 部では式(3.18)より

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{1}{\mu_2} (\sigma - \sigma_c) \quad (3.21)$$

さらにダッシュポット部では

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{1}{\mu_3} (\sigma - F) \quad (3.22)$$

の関係が成立する。但し， $F = fW + F_0$ とする。ここで f は摩擦係数で， W は電場に相当する荷重， F_0 は無電場時の ER 流体の降伏応力である。式(3.20),(3.21),(3.22)を式(3.19)に代入して次式を得る。

$$\sigma = \mu_1 \left(\dot{\gamma} + \frac{\sigma_c}{\mu_2} + \frac{fW}{\mu_3} + \frac{F_0}{\mu_3} \right) \quad (3.23)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_2 \cdot \mu_3}{\mu_2 + \mu_3} \quad (3.24)$$

ここで摩擦係数の移動速度に対する変化を固体摩擦特性を参考⁽²⁶⁾にして以下のように近似する。

$$f = f_0 \exp\left(-\frac{v}{\varepsilon}\right) + f_k \quad (3.25)$$

$$f_0 = f_s - f_k \quad (3.26)$$

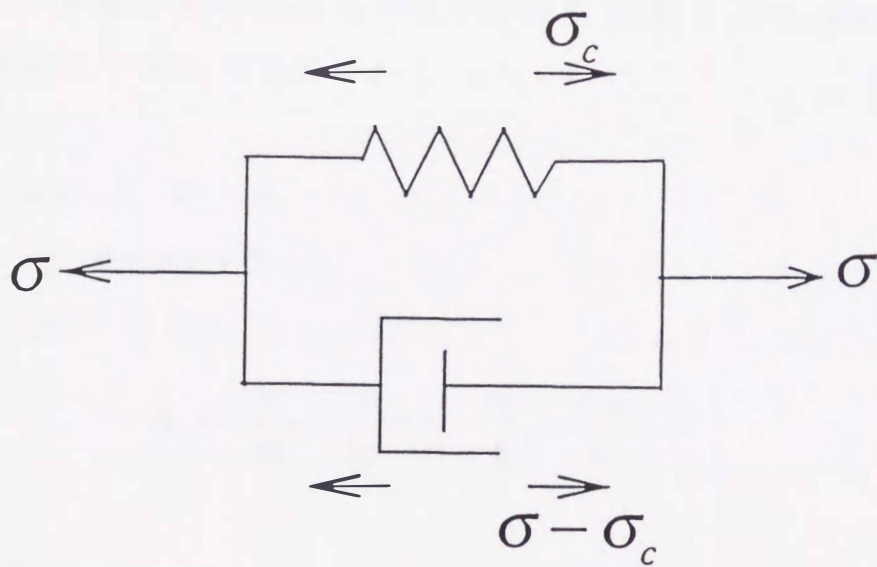


図 3.5 力学応答系モデルの Voigt 部の応力状態

但し, f_s は静止摩擦係数, f_k は運動摩擦係数, v は移動速度, ε は $f = f_k + f_0 / e$ ($e = 2.718 \dots$) となる移動速度を表す. 式(3.25)を式(3.23)に代入して次式を得る.

$$\sigma = \mu_1 \left\{ \dot{\gamma} + \frac{\sigma_c}{\mu_2} + \frac{f_0 W}{\mu_3} \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}_3}{\varepsilon}\right) + \frac{f_k W}{\mu_3} + \frac{F_0}{\mu_3} \right\} \quad (3.27)$$

力学応答系における歪速度は ER 流体におけるずり速度に等しいので, 式(3.18), (3.27)および式(3.22)の $\dot{\gamma}_1$, $\dot{\gamma}_2$, $\dot{\gamma}_3$ をそれぞれずり速度 D_1 , D_2 および D_3 に置き換えたものが ER 流体の構成方程式である. いま, スライダの動き始めに相当するずり速度を D_s として, ER 流体の構成方程式は以下のように表される.

$0 \leq D < D_s$ のとき

$$\sigma = \mu_2 D + \sigma_c \quad (3.28)$$

$D_s \leq D$ のとき

$$\sigma = \mu_1 \left\{ D + \frac{\sigma_c}{\mu_2} + \frac{f_0 W}{\mu_3} \exp\left(-\frac{D_3}{\varepsilon}\right) + \frac{f_k W}{\mu_3} + \frac{F_0}{\mu_3} \right\} \quad (3.29)$$

また, 式(3.28)と式(3.29)より ER 流体の粘度は式(3.30)~(3.32)で表すことができる. 但し, D_0 は D が極小になったときに μ が無限大にならないように導入したずり速度であり, $D_0 = (\sigma_c / \mu_2) \times 10^{-4} (1/s)$ とした.

$0 \leq D \leq D_0$ のとき

$$\mu = \mu_2 + \frac{\sigma_c}{D_0} \quad (3.30)$$

$D_0 < D < D_s$ のとき

$$\mu = \mu_2 + \frac{\sigma_c}{D} \quad (3.31)$$

$D_s \leq D$ のとき

$$\mu = \mu_1 \left\{ 1 + \frac{\sigma_c}{\mu_2 D} + \frac{f_0 W}{\mu_3 D} \exp\left(-\frac{D_s}{\varepsilon}\right) + \frac{f_k W}{\mu_3 D} + \frac{F_0}{\mu_3 D} \right\} \quad (3.32)$$

従って、このモデルは図 3.4(d)の 3つの領域を表現できる。それぞれの領域で起きている物理的現象との対応を考えると、領域 I (ずり速度が 0 より僅かに大きい領域)では比較的長いクラスターが形成されており、クラスターが壁面と滑っている状態あるいは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(ステイク・スリップ現象)⁽²⁷⁾であるとみなせる。この場合、ずり速度に比例してずり応力が増加すると考えられる。また、領域 II はずり速度が増加するためクラスターが切断され再結合を繰り返しながらもだんだんと短くなっていく状態であるとみなせる。ここでは、クラスターが短くなるために流体抵抗が減少してずり応力が減少する。領域 III はクラスターがある程度短くなって一様に分散した状態とみなせる。コロイド溶液に近い場合、ずり速度の増加に比例して流体抵抗が増加して、その結果ずり応力が増加すると考えることができる。

一方、この ER 流体の構成方程式はパラメータ μ_2 , f_0 , D_s の値によって、図 3.6 に示すような 4 種類の流動曲線を表すことができる。すなわち図 3.6(a)はビンガム流体の流動曲線であり、従来、一般的な ER 流体の流動曲線として採用されており、ブリジストンの B-ERF の流動曲線がこのパターンに近い。図 3.6(b)はシリカ粒子を分散した ER 流体の流動曲線に近い。図 3.6(c)は日本触媒の TX-ER の流動曲線に近い。また、図 3.6(d)は珪藻粒子を分散した ER 流体⁽²⁸⁾の流動曲線に近い。このように、ここで導いた構成方程式は各種の ER 流体の流動曲線を表現することができる。なお、図中の記号 μ_B は塑性粘度を表し、流動曲線を直線近似したときの勾配である。

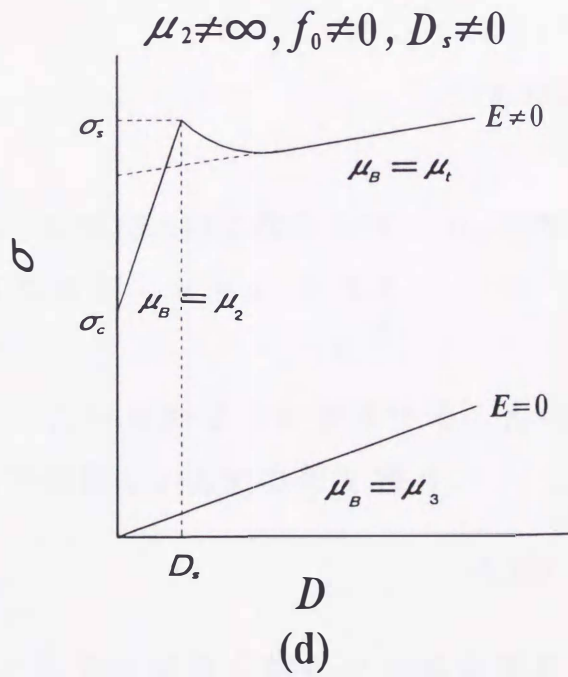
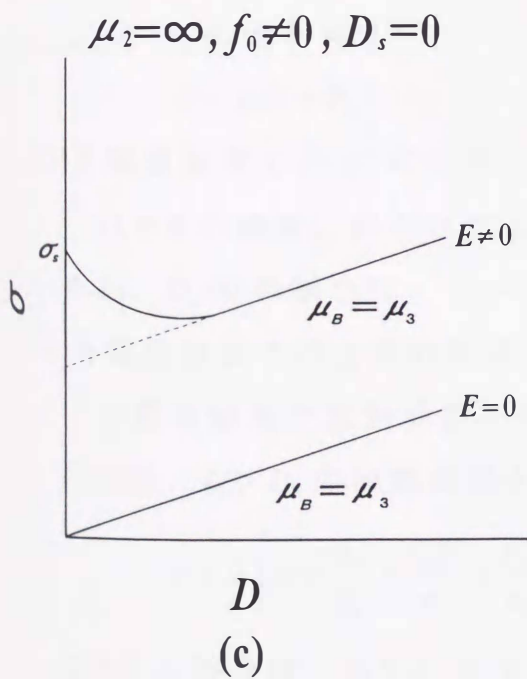
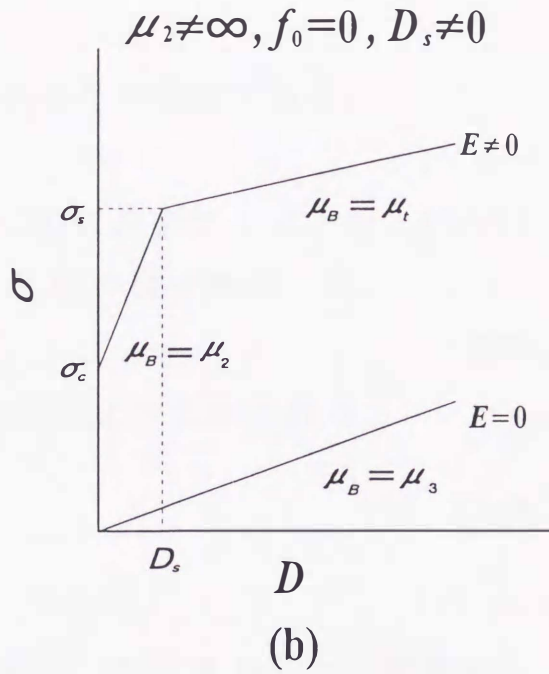
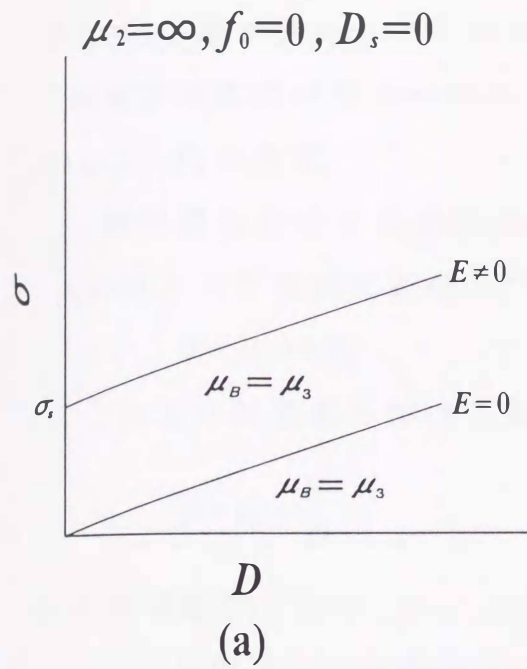


図 3.6 ER 流体構成方程式の流動曲線の各種パターン

3.3.2 構成方程式の定式化

回転円筒型デバイスにおける流動曲線の実験値から、式(3.28)と式(3.29)の各種パラメータを決定する。

構成方程式のパラメータの決定法は以下の通りである。

(1) μ_3 と F_0 の決定

無電場における流動曲線を式(3.29)において、 $\mu_2 = \infty$, $f_0 W = 0$, $f_k W = 0$ とした次式に近似して、 μ_3 と F_0 の値を得る。

$$\sigma = \mu_3 D + F_0 \quad (3.33)$$

これより無電場における粘度は次式のように表される。

$$\mu = \mu_3 + \frac{F_0}{D} \quad (3.34)$$

(2) 各電場強度での μ_2 と σ_c の決定

各電場強度での流動曲線では、先ず、 D_s が 0 かどうか判定する。 $D_s \neq 0$ の場合、式(3.28)と式(3.29)で近似し、 $D_s = 0$ の場合、式(3.29)で近似する。 $D_s \neq 0$ の場合、 $D < D_s$ の流動曲線を次式に近似して、 μ_2 と σ_c の値を得る。

$$\sigma = \mu_2 D + \sigma_c \quad (3.35)$$

(3) 各電場強度での μ_1 の決定

$D_s \neq 0$ の場合、得られた μ_3 と μ_2 を式(3.24)に代入して、 μ_1 を求める。 $D_s = 0$ の場合は、 $\mu_2 = \infty$ であるので、 $\mu_1 = \mu_3$ となる。

(4) 各電場強度での $f_k W$ の決定

各電場強度の流動曲線において、 f_0 が 0 かどうか判定する。 $f_0 = 0$ の場合、 $D > D_s$ の流動曲線を次式で近似し、 $f_k W$ の値を得る。

$$\sigma = \mu_1 \left\{ D + \frac{\sigma_c}{\mu_2} + \frac{f_k W}{\mu_3} + \frac{F_0}{\mu_3} \right\} \quad (3.36)$$

$f_0 \neq 0$ の場合は、 $D > D_s$ における σ の減少領域を除いた流動曲線を式(3.36)で近似し、 $f_k W$ の値を得る。

(5) 各電場強度での $f_0 W$ と ε の決定

$f_0=0$ の場合、式(3.35)と式(3.36)の交点の D の値を D_s とし、このときの σ の値が σ_s になる。

$f_0 \neq 0$ の場合は、以下の方法で D_s と ε を求める。

$D_s=0$ の場合は、適当な f_0W を仮定する。 $D_s \neq 0$ の場合は、式(3.35)上の点に D_s を仮定し、このときの σ の値を σ_s にする。式(3.29)において、 $\sigma = \sigma_s$ 、 $D = D_s$ 、 $D_3=0$ とおいて f_0W を仮定する。

式(3.18)、式(3.19)、式(3.20)および式(3.21)より、歪速度をずり速度に変えて次式を得る。

$$D_3 = D - \frac{1}{\mu_2}(\sigma - \sigma_c) \quad (3.37)$$

この式を用いて、 $D > D_s$ 領域の流動曲線のデータ (σ, D) を (σ, D_3) に変換する。また、式(3.22)に式(3.25)を代入して、歪速度をずり速度に変えて次式を得ることができる。

$$\sigma = \mu_3 D_3 + f_0 W \exp\left(-\frac{D_3}{\varepsilon}\right) + f_k W + F_0 \quad (3.38)$$

データ (σ, D_3) を式(3.38)で近似して、 ε を求める。最適な近似になるまで f_0W を変化させ、 f_0W と ε を決定する。

本研究で使用しているスメクタイト型 ER 流体の流動曲線は、図 3.6(a), (b) および (d) のパターンで表すことができるので、この流動曲線を採用する。ここでは、SER10B(質量濃度が低い)と SER15C(質量濃度が高い)を例にとり、図 3.7~図 3.10 に回転円筒型デバイスにおける流動曲線と定式化された構成方程式との比較を示す。SER10B の場合、流動曲線は電場強度が大きいときは図 3.6(b) のパターンで、電場強度が小さいときは図 3.6(a) および (d) のパターンで近似できることが分かる。SER15C の場合、流動曲線は電場強度が大きいときは図 3.6(b) のパターンで、電場強度が小さいときは図 3.6(a) のパターンでおおよそ近似できることが分かる。このときの構成方程式における

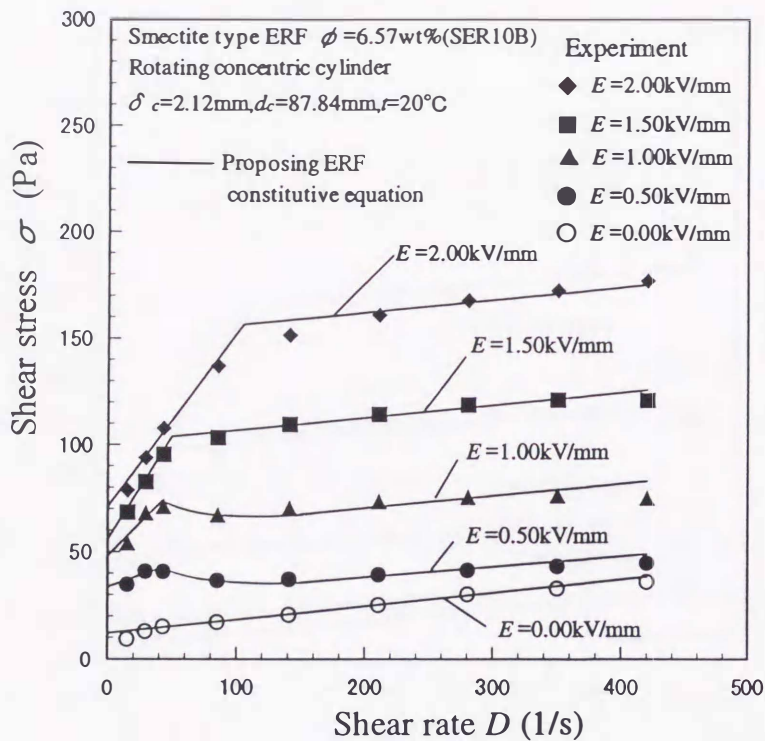


図 3.7 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較 ($\delta_c=2.12\text{mm}$, SER10B)

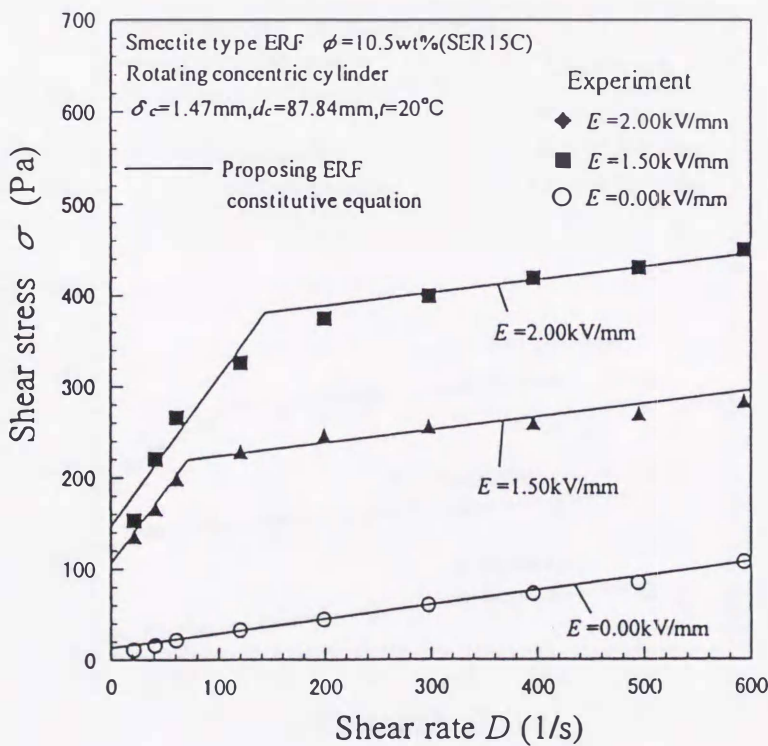


図 3.8 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較 ($\delta_c=1.47\text{mm}$, SER15C)

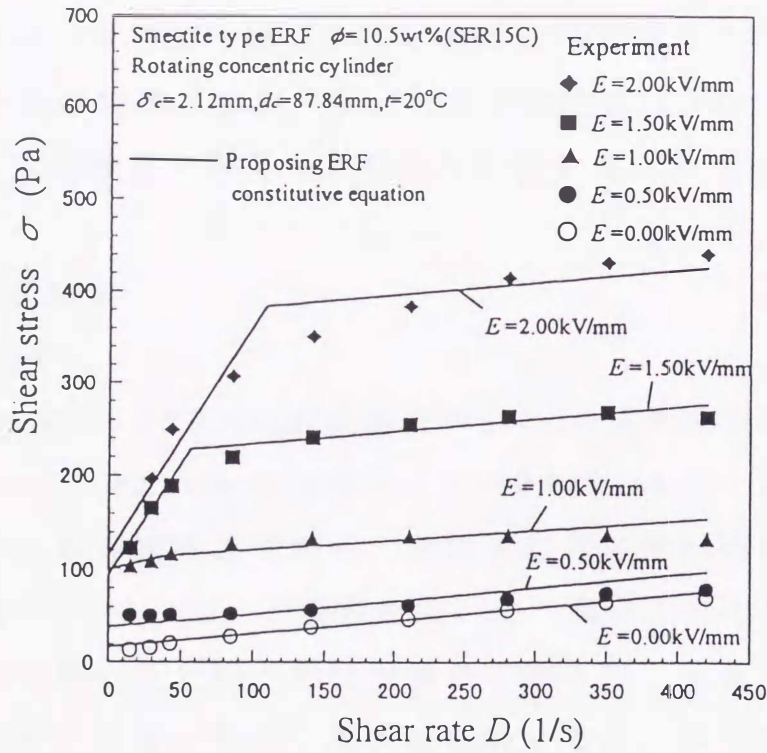


図 3.9 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較 ($\delta_c=2.12\text{mm}$, SER15C)

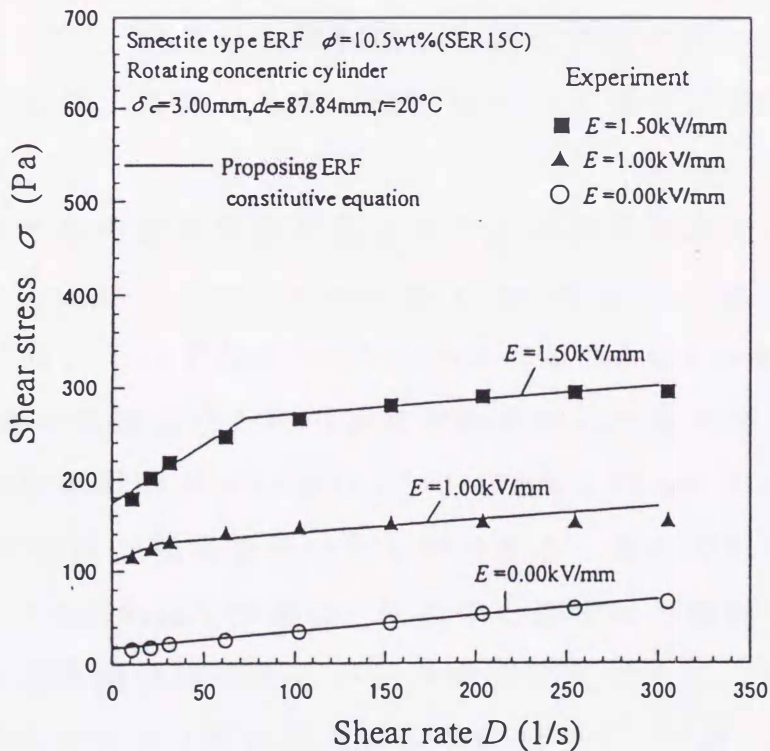


図 3.10 回転円筒型デバイスの実験結果による流動曲線と定式化された ER 流体構成方程式の比較 ($\delta_c=3.00\text{mm}$, SER15C)

各種のパラメータの値を表 3.1 および表 3.2(a)(b)(c)に示す. 各電極間隔における電場強度ごとのパラメータの値を式(3.30)~式(3.32)に代入すると, ずり速度に対応した粘度を計算することができる.

3.4 数値解析結果

3.4.1 流速分布

図 3.11(a)(b)は, SER15C(質量濃度が高い)の構成方程式を使用した $E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$ における, $\omega=0.628\text{ rad/s}$ と $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合の流速の等高線図である. 構成方程式は回転円筒型デバイスの電極間隔が $\delta_c=2.12\text{mm}$ の場合を用いた. 図においてカラーで示す領域の中央の黒い長方形が回転円板の片側上部である. 流速は円板外周速度に対する値である. 両者を比較すると, 無電場である円板外周部において, 角速度の小さい $\omega=0.628\text{rad/s}$ の方が流速の変化する領域が薄い. 回転円板と外側の固定電極間の電場印加領域での流速分布を見ると, 両者とも回転面から固定表面に向かって速度が小さくなり, また, 外周から中心軸に向かって速度が減少していることが分かる.

この領域での円板面垂直方向に対する流速分布とその速度勾配を電極間隔ごとに詳しく示したのが図 3.12~図 3.14 である. 図 3.12 および図 3.13 は, それぞれ $\delta_d=1.5, 2.0\text{mm}$ の $\omega=0.628\text{ rad/s}$ と $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合の流速分布とその速度勾配を示したもので, 回転円筒型デバイスの電極間隔がそれぞれ $\delta_c=1.47\text{mm}, 2.12\text{mm}$ の実験で得られた 2 種類の構成方程式を用いたものである. それぞれの電極間隔において, $\omega=0.628\text{rad/s}$ の場合, 円板中心部では円板面で速度勾配が大きい曲線の流速分布であるが, 外周部に近づくにつれ速度勾配が一定の直線のクエット流れの流速分布に近づく. 一方, $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合, 円板中心部では流速は速度勾配が一定の直線の流速分布に近いが, 外周部に近づくにつれ円板面で速度勾配が大きい曲線の流

表 3.1 ER 流体の構成方程式に対する各種パラメータの値 (SER10B)

$\delta_c = 2.12\text{mm}$

| E (kV/mm) | F_0 (Pa) | σ_c (Pa) | μ_3 (Pa·s) | μ_2 (Pa·s) | μ_1 (Pa·s) | D_s (1/s) | σ_s (Pa) | $f_k W$ (Pa) | $f_0 W$ (Pa) | ϵ (1/s) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 0.00 | 12.1 | — | 0.0627 | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.50 | 12.1 | 33.7 | 0.0627 | 0.215 | 0.0485 | 41.9 | 42.7 | 15.0 | 15.6 | 72.7 |
| 1.00 | 12.1 | 48.2 | 0.0627 | 0.609 | 0.0569 | 41.9 | 73.7 | 48.1 | 13.6 | 47.3 |
| 1.50 | 12.1 | 55.9 | 0.0627 | 0.970 | 0.0589 | 49.4 | 104 | 91.7 | — | — |
| 2.00 | 12.1 | 71.0 | 0.0627 | 0.817 | 0.0582 | 105 | 157 | 145 | — | — |

表 3.2 ER 流体の構成方程式に対する各種パラメータの値 (SER15C)

(a) $\delta_c = 1.47\text{mm}$

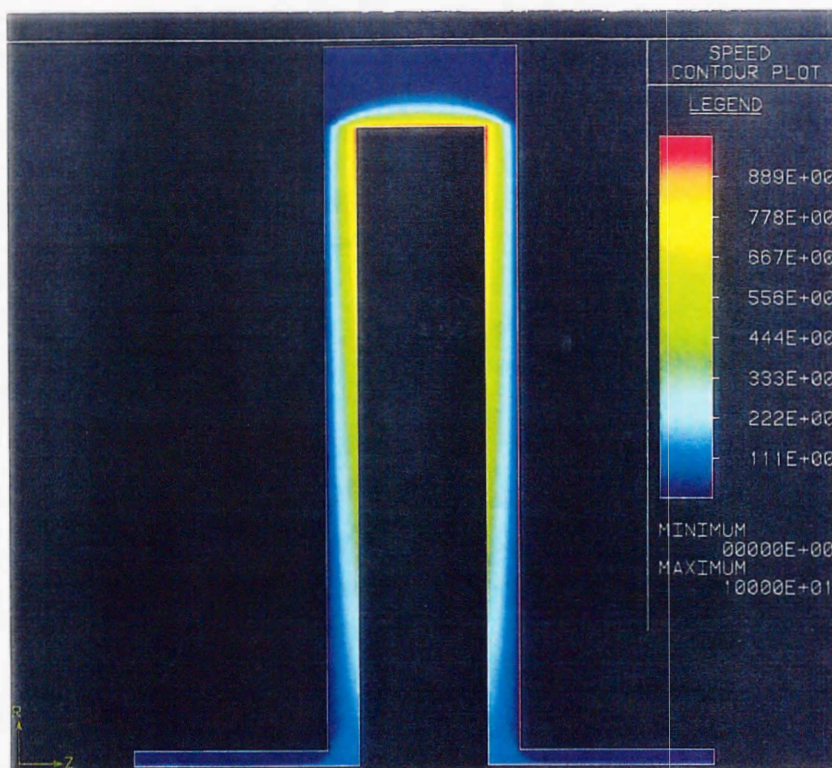
| E (kV/mm) | F_0 (Pa) | σ_c (Pa) | μ_3 (Pa·s) | μ_2 (Pa·s) | μ_1 (Pa·s) | D_s (1/s) | σ_s (Pa) | $f_k W$ (Pa) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 0.00 | 13.4 | — | 0.157 | — | — | — | — | — |
| 1.50 | 13.4 | 106 | 0.157 | 1.60 | 0.143 | 70.8 | 219 | 206 |
| 2.00 | 13.4 | 146 | 0.157 | 1.64 | 0.143 | 143 | 381 | 367 |

(b) $\delta_c = 2.12\text{mm}$

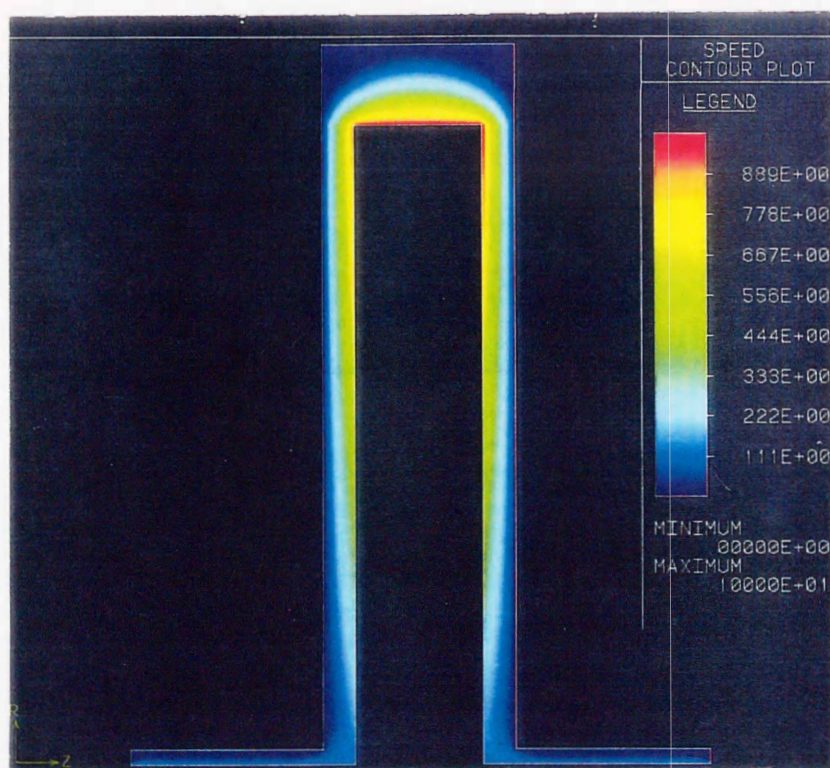
| E (kV/mm) | F_0 (Pa) | σ_c (Pa) | μ_3 (Pa·s) | μ_2 (Pa·s) | μ_1 (Pa·s) | D_s (1/s) | σ_s (Pa) | $f_k W$ (Pa) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 0.00 | 16.5 | — | 0.143 | — | — | — | — | — |
| 0.50 | 16.5 | 37.7 | 0.143 | ∞ | 0.143 | 0.00 | 37.7 | 21.2 |
| 1.00 | 16.5 | 100 | 0.143 | 0.377 | 0.104 | 40.3 | 115 | 97.9 |
| 1.50 | 16.5 | 94.6 | 0.143 | 2.37 | 0.135 | 56.1 | 228 | 211 |
| 2.00 | 16.5 | 117 | 0.143 | 2.46 | 0.135 | 108 | 384 | 368 |

(c) $\delta_c = 3.00\text{mm}$

| E (kV/mm) | F_0 (Pa) | σ_c (Pa) | μ_3 (Pa·s) | μ_2 (Pa·s) | μ_1 (Pa·s) | D_s (1/s) | σ_s (Pa) | $f_k W$ (Pa) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 0.00 | 17.1 | — | 0.174 | — | — | — | — | — |
| 1.00 | 17.1 | 110 | 0.174 | 0.779 | 0.142 | 25.5 | 130 | 113 |
| 1.50 | 17.1 | 174 | 0.174 | 1.27 | 0.153 | 72.7 | 266 | 249 |



(a) $E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $\omega = 0.628\text{rad/s}$



(b) $E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $\omega = 6.28 \text{ rad/s}$

図 3.11 円板外周速度に対する流速等高線図(SER15C)

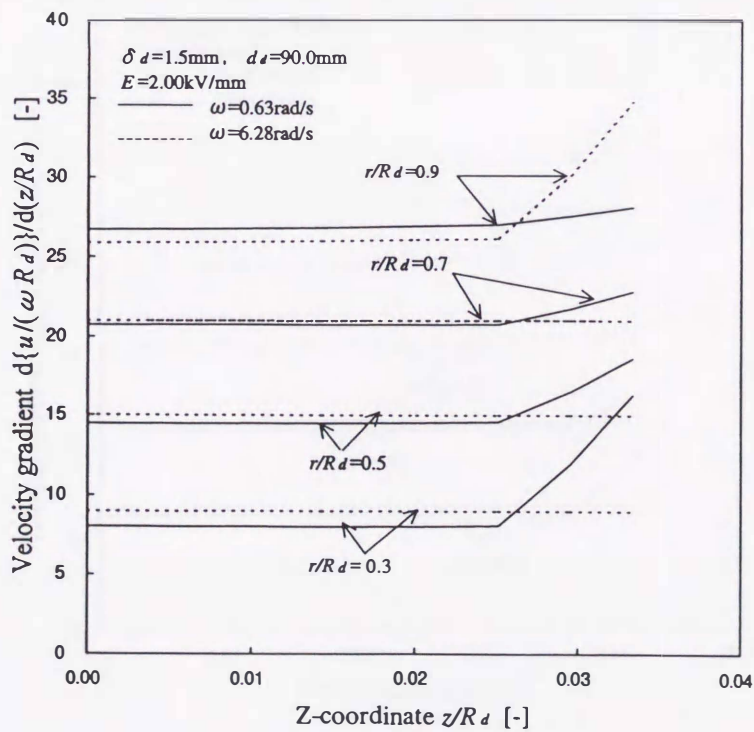
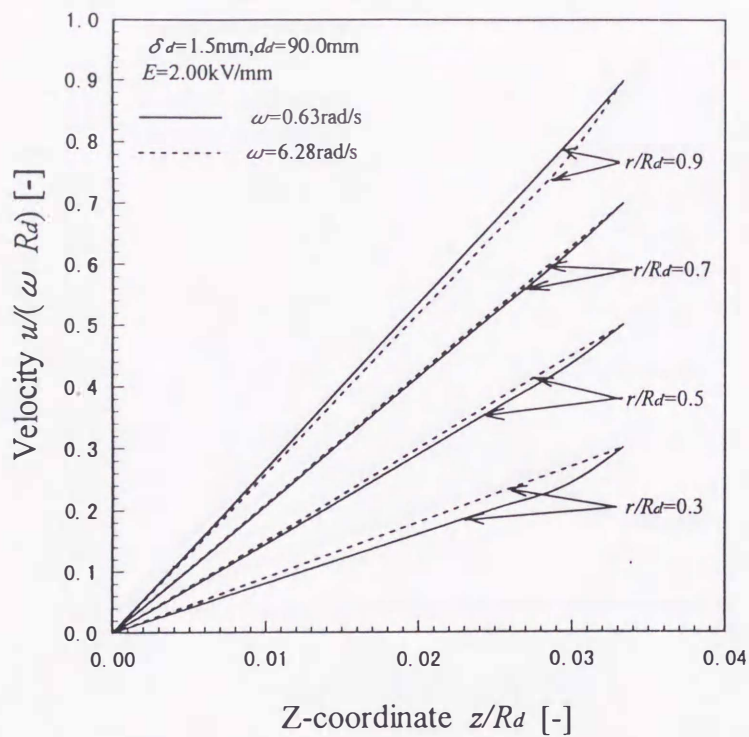


図 3.12 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d = 1.5\text{mm}$)

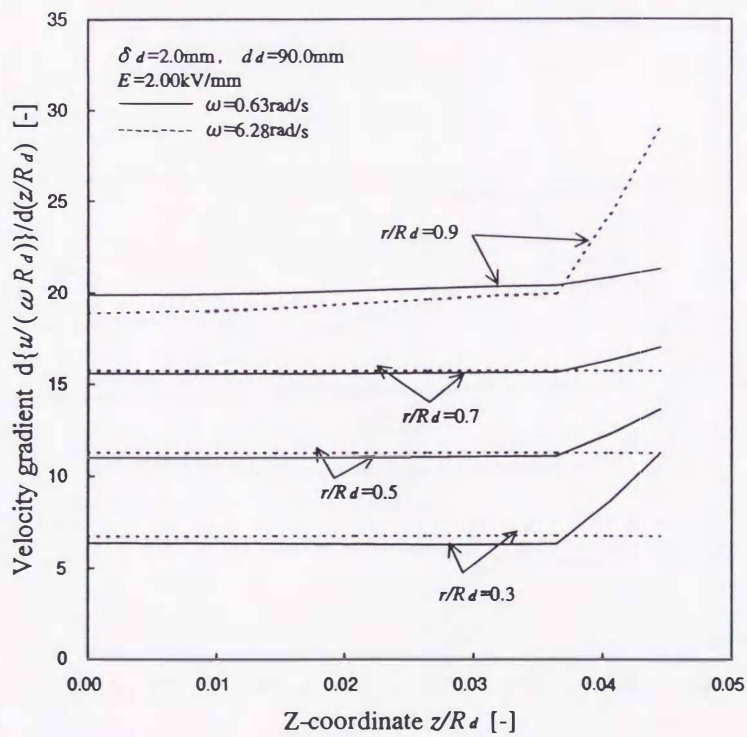
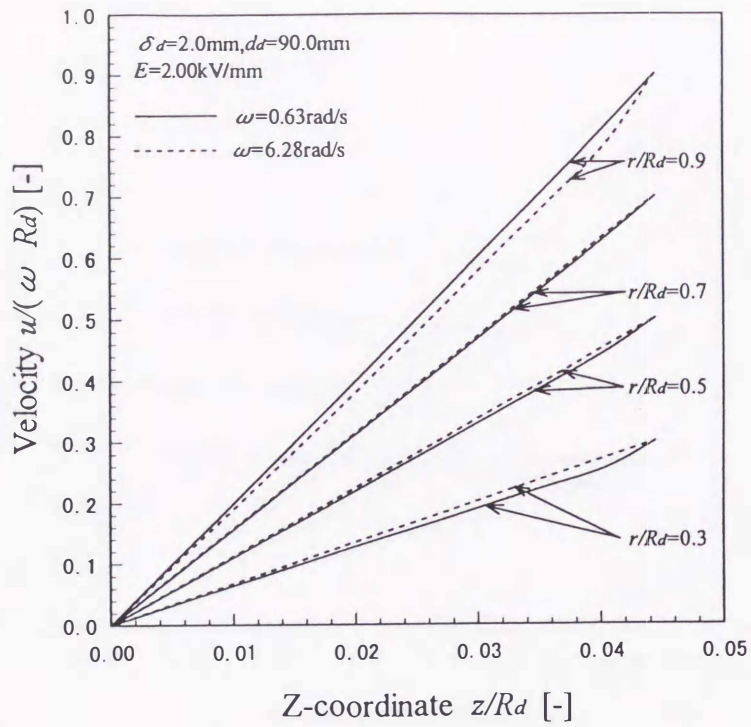


図 3.13 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d = 2.0 \text{ mm}$)

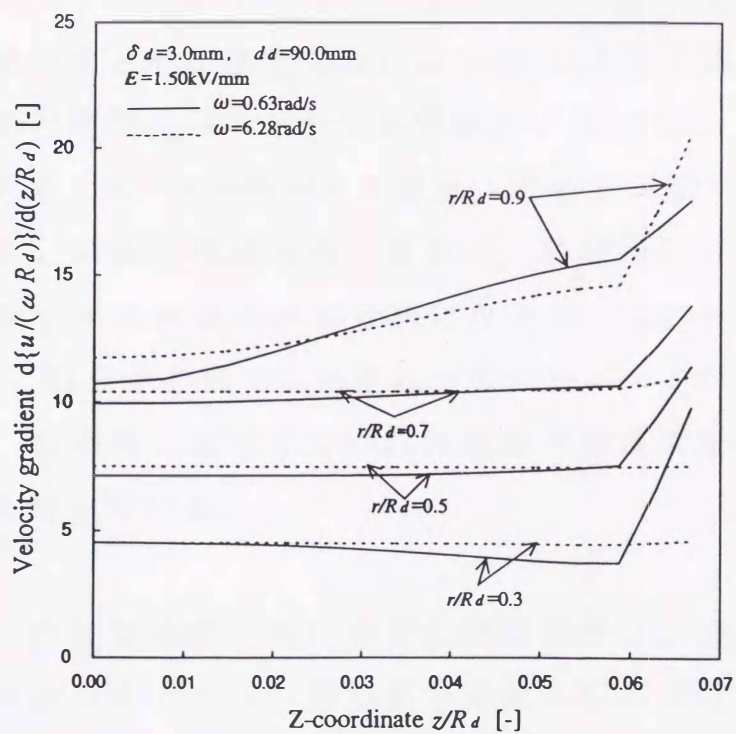
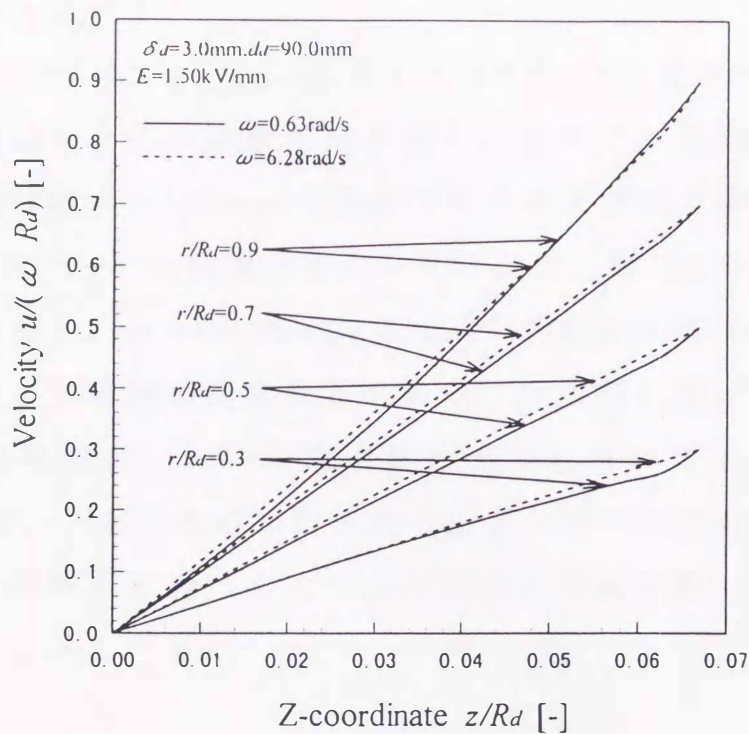


図 3.14 電極間の流速分布と速度勾配(SER15C, $\delta_d = 3.0 \text{ mm}$)

速分布となっている。

一方、図 3.14 は、 $\delta_d=3.0\text{mm}$ の $\omega=0.628\text{ rad/s}$ と $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合の流速分布とその速度勾配を示したもので、回転円筒型デバイスの電極間隔が $\delta_c=3.00\text{mm}$ の実験で得られた構成方程式を用いたものである。図 3.14 の流速分布のパターンは、図 3.12 および図 3.13 の場合と異なる。 $\omega=0.628\text{rad/s}$ の場合、円板中心部では円板面で速度勾配が大きい曲線の速度分布であり、外周部に近いところでも円板面で速度勾配が大きい曲線の速度分布になっている。 $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合、円板中心部では速度勾配がほぼ一定の直線の流速分布であるが、外周部に近づくとつれ円板面で速度勾配が大きい曲線の速度分布となっている。

次に、質量濃度が低い SER10B の構成方程式を使用した $E=2.00\text{kV/mm}$ 、 $\delta_d=2.0\text{mm}$ における、 $\omega=0.628\text{ rad/s}$ と $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合の流速分布とその速度勾配を図 3.15 に示す。使用した構成方程式は、回転円筒型デバイスの電極間隔が $\delta_c=2.12\text{mm}$ の実験で得られたものである。 $\omega=0.628\text{rad/s}$ の場合、円板中心部では円板面で速度勾配が大きい曲線の流速分布であるが、外周部に近いところでも速度勾配が変化する曲線の速度分布になっている。一方、 $\omega=6.28\text{ rad/s}$ の場合、円板中心部では流速は速度勾配が一定の直線の流速分布に近いが、外周部に近づくとつれ円板面で速度勾配が大きい曲線の流速分布となっている。

以上から、円板面垂直方向に対する流速分布は、速度勾配が変化する曲線の流速分布となり、円板面で速度勾配が大きくなるところがあることが分かる。この流速分布のパターンは角速度により異なり、半径方向においても異なる。また、電極間隔が変化すると流速分布のパターンが変化する。さらに、濃度の変化によっても流速パ

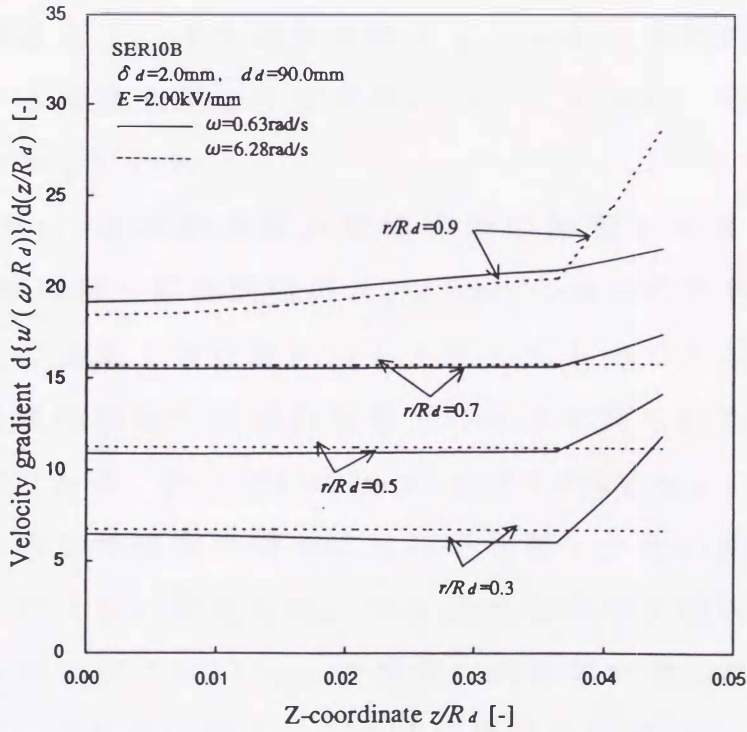
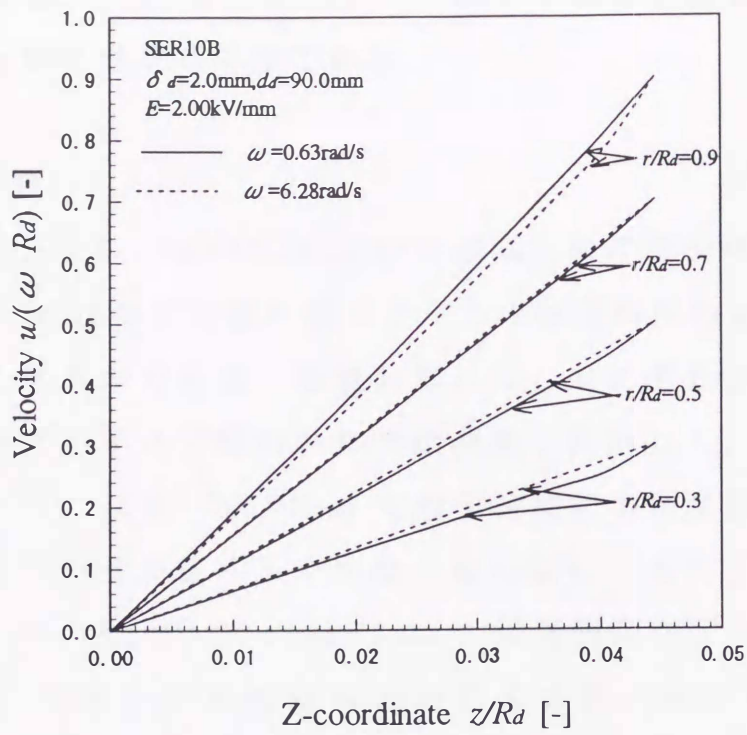


図 3.15 電極間の流速分布と速度勾配(SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

ターンは異なる。これは、ニュートン流体の場合の直線状のクエツト流れと明らかに異なる結果である。

3.4.2 トルク特性

図 3.16(a)(b)(c)は、SER15C における回転円板の電極間隔が $\delta_e = 1.5, 2.0, 3.0\text{mm}$ の場合の円板に働くトルクの数値解析の結果を角速度に対して示したものである。数値計算には、それぞれ同じ電極間隔の回転円筒型デバイスで得られた流動曲線を使用した。各電極間隔の解析結果とも、 $E \geq 1.50\text{kV/mm}$ では角速度の増加に対してトルクが急激に増加してその後ゆるやかな一定勾配になることを示している。図 3.14(a)と(c)には $\delta_e = 2.12\text{mm}$ の回転円筒型デバイスの流動曲線を使用した場合の数値解析の結果も破線で示してある。図 3.14(a)と(c)の結果から、回転円板のトルクは広い電極間隔の流動曲線を使用した場合大きくなることが分かる。これは電極間隔が広い方が流動曲線は大きいはずり応力を与えることから当然の結果であり、解析に使用する流動曲線は電極間隔についても充分、吟味して適用すべきことを示している。

また、図 3.17 は流動曲線が電極間隔の影響をあまり受けない SER10B の回転円板の電極間隔が $\delta_e = 2.0\text{mm}$ の場合の円板に働くトルクの数値解析の結果を角速度に対して示したものである。この数値解析は、同じ電極間隔の回転円筒型デバイスで得られた流動曲線を使用したものである。 $E = 0.50\text{kV/mm}$ および 1.00kV/mm の場合、角速度の小さい領域で角速度の増加に対して増加し、その後僅かに減少する。角速度の大きい領域では、トルクは緩やかに増加していく。 $E = 1.50\text{kV/mm}$ および 2.00kV/mm の場合、角速度の増加に対して角速度の小さい領域で急激に増加しその後は緩やかに増加していく。

この解析結果と実験結果の比較と考察については次章で行う。

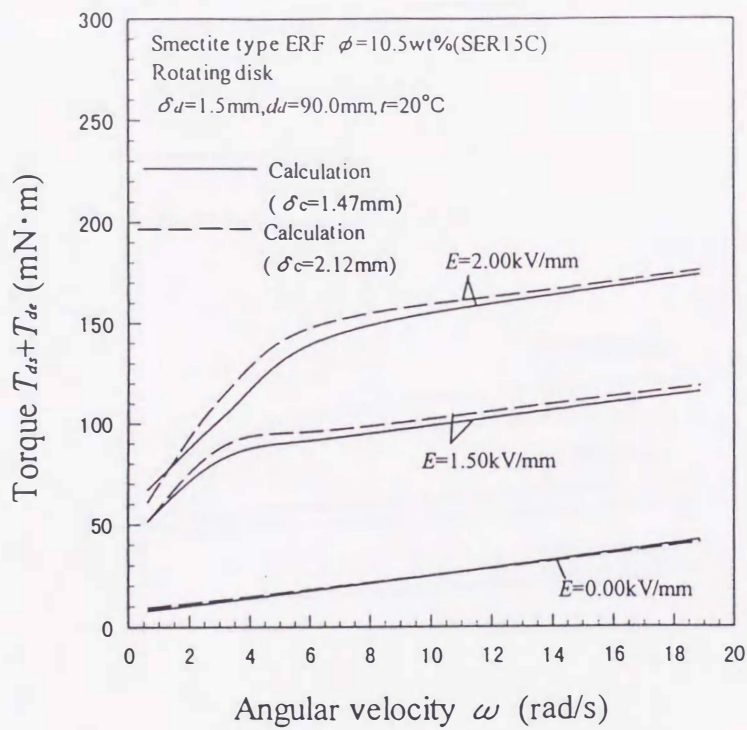


図 3.16(a) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d=1.5\text{mm}$)

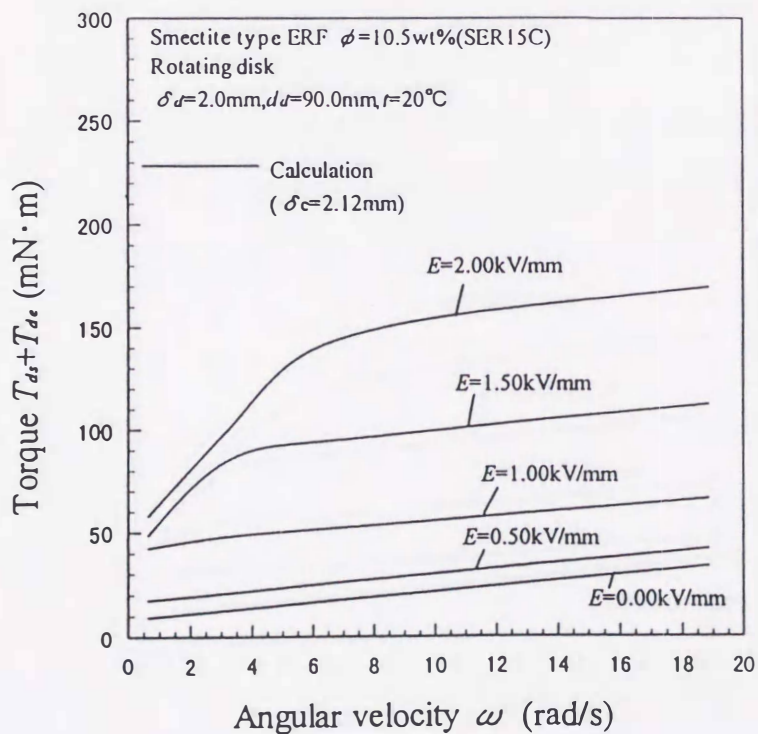


図 3.16 (b) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

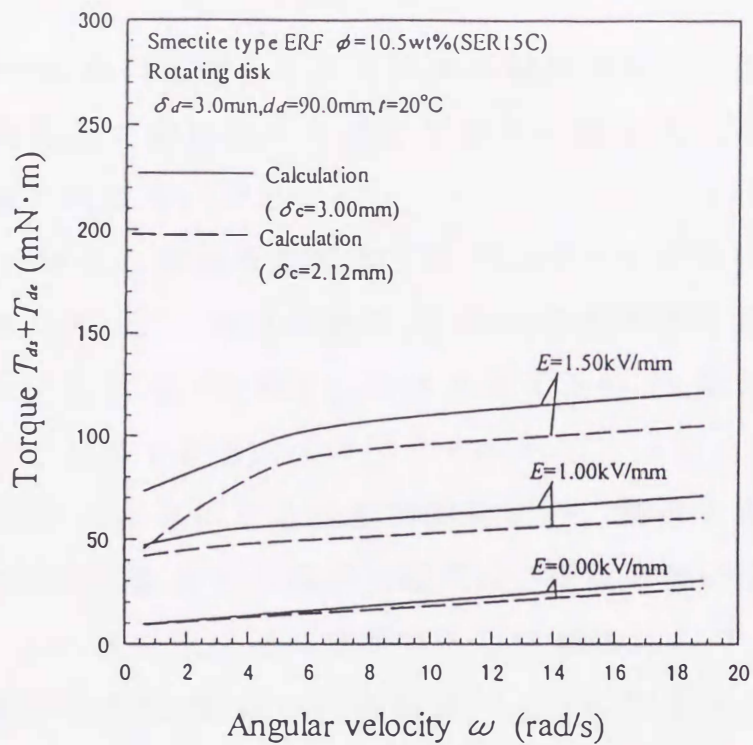


図 3.16(c) 数値解析によるトルク特性(SER15C, $\delta_d = 3.0\text{mm}$)

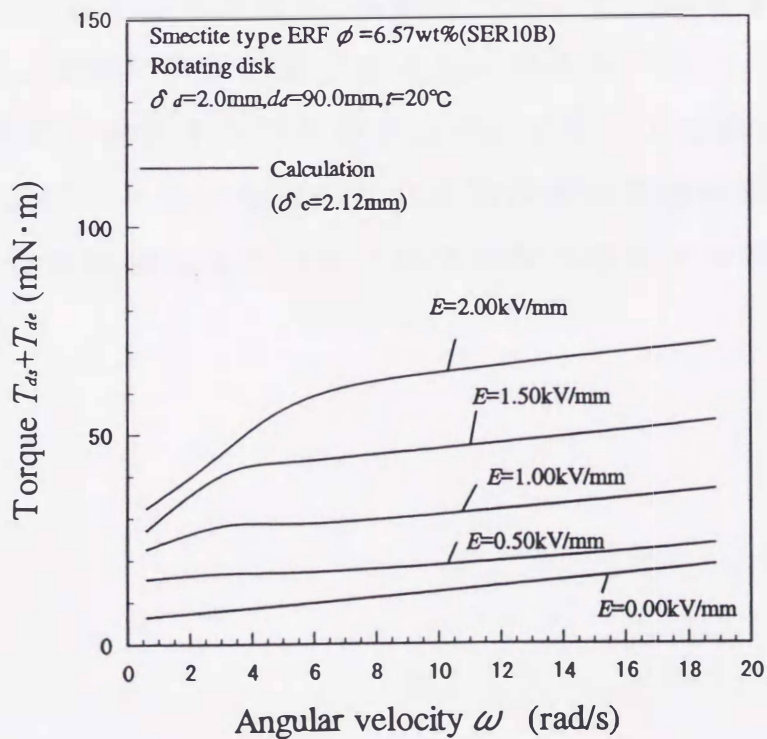


図 3.17 数値解析によるトルク特性(SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

3.5 結言

ER 流体中の回転円板のトルク特性を回転円筒型デバイスで求めた流動曲線を使用して理論的に予測する手法を示した。本章の結論をまとめると以下のようなになる。

- (1) ずり速度の全ての領域を表現できるビンガムモデルに代わる構成方程式を導いた。この構成方程式は、動的特性解析に適した力学応答系モデルにもとづいており、スメクタイト型 ER 流体の流動曲線を近似することができる。
- (2) 回転円筒型デバイスによる流動曲線を使い、構成方程式の定数を定めた。定式化されたこの構成方程式は、電極間隔によって異なる式となる。この式を汎用流体解析コードに組み込んで、数値解析によって流速分布を求め、回転円板型デバイスの定常トルク特性を調べた。
- (3) 電極間内の円板面垂直方向に対する流速分布は、円板面で速度勾配が大きくなる場所があり、流速分布のパターンは半径方向で異なる。また、電極間隔が変化すると流速分布のパターンが変化する。さらに濃度の変化によっても流速分布のパターンは変化する。
- (4) 回転円筒型デバイスから得られた流動曲線は電極間隔によって異なるため、数値解析によるトルクの予測値は使用する流動曲線によって異なる。

第4章 回転円板型デバイスの定常特性

4.1 緒言

本章では，回転円板型デバイスのトルクと電流密度の定常特性に
ずり速度や電場強度，電極間隔，濃度，温度が及ぼす影響を実験デ
ータによって明らかにする．さらに，デバイスの特性評価に用いら
れるモーメント係数とトルク増加に対する消費電力についての解析
結果を述べる．また，トルク特性を数値解析の結果と比較・検討し
て，ER 流体の構成方程式と回転円板の定常トルク特性の数値予測手
法の有効性について検証する．

4.2 実験装置

回転円板型デバイスの実験装置の概念図を図 4.1(a)に，実験装置の
全体写真を図 4.1(b)に示す．実験装置は，回転円板を回転するための
AC サーボモータ，回転円板に作用するトルクを計測するトルクメー
タそして回転円板型デバイス本体が直列で接続されている．

回転円板型デバイスでは，ER 流体は回転円板と固定円板の隙間に
入っている．また，固定円板とアクリル製のケーシングの間は循環
ポンプ付き恒温槽(井内盛栄堂製，HT-10D SERIES-C)からの循環水で
満たされており，これによって電極間内の ER 流体を一定温度に保つ
ことができる．

回転円板型デバイスの詳細図を図 4.2(a)に，回転円板の写真を図
4.2(b)に示す．黄銅製の回転円板が高電圧直流電源のプラス側に，回
転円板の両側にある黄銅製の固定円板がマイナス側にそれぞれ接続
されている．電場を印加すると回転円板と固定円板の隙間が電場印
加領域になる．回転円板は，半径 $R_d=45.0\text{mm}$ ，厚さ $w=8.0\text{mm}$ である．
相対する固定円板の間に 3 種類のアクリル樹脂製のスペーサを用い
ることにより，回転円板と固定円板の電極間距離をそれぞれ $\delta_d=$

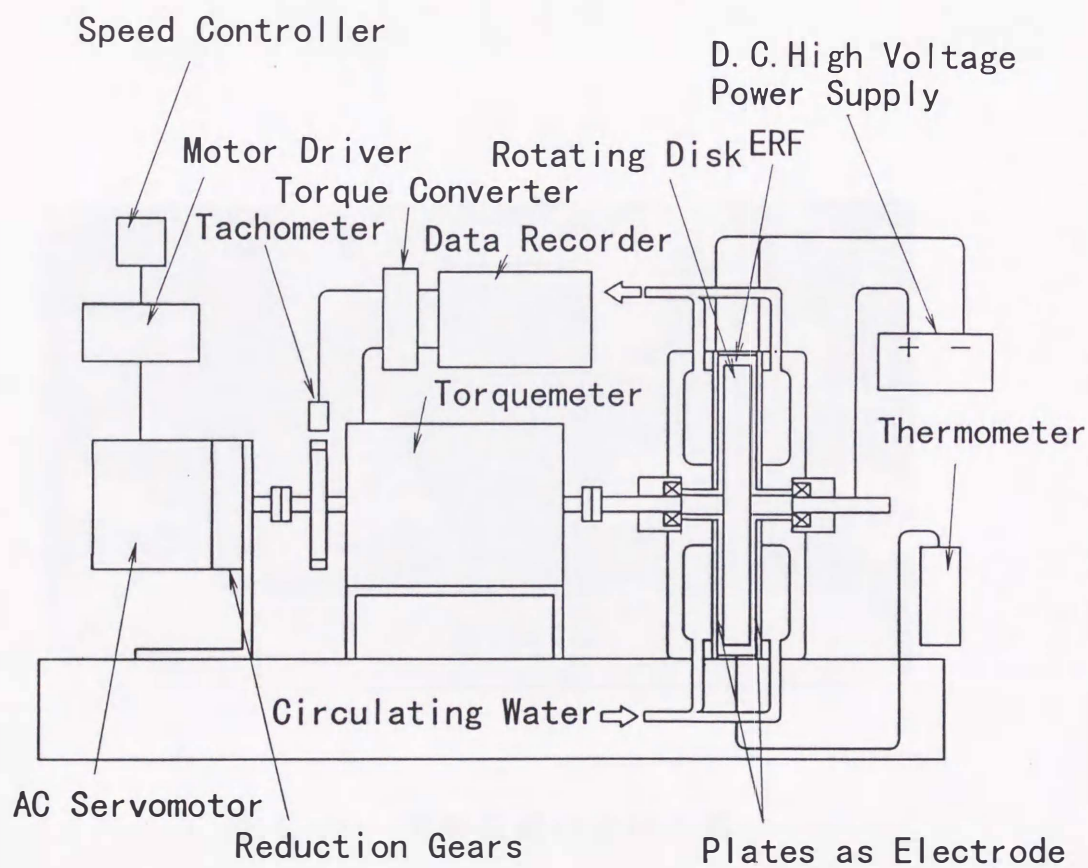


図 4.1(a) 回転円板型デバイスの実験装置

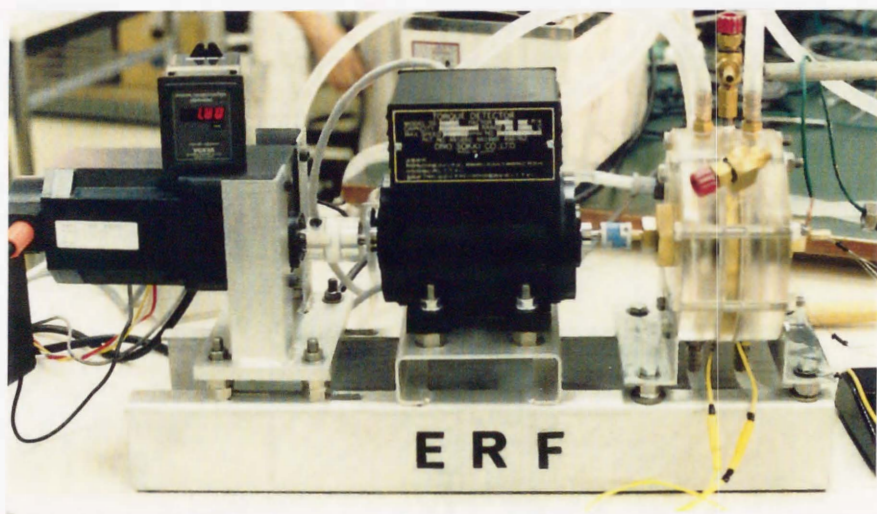


図 4.1(b) 実験装置の全体写真

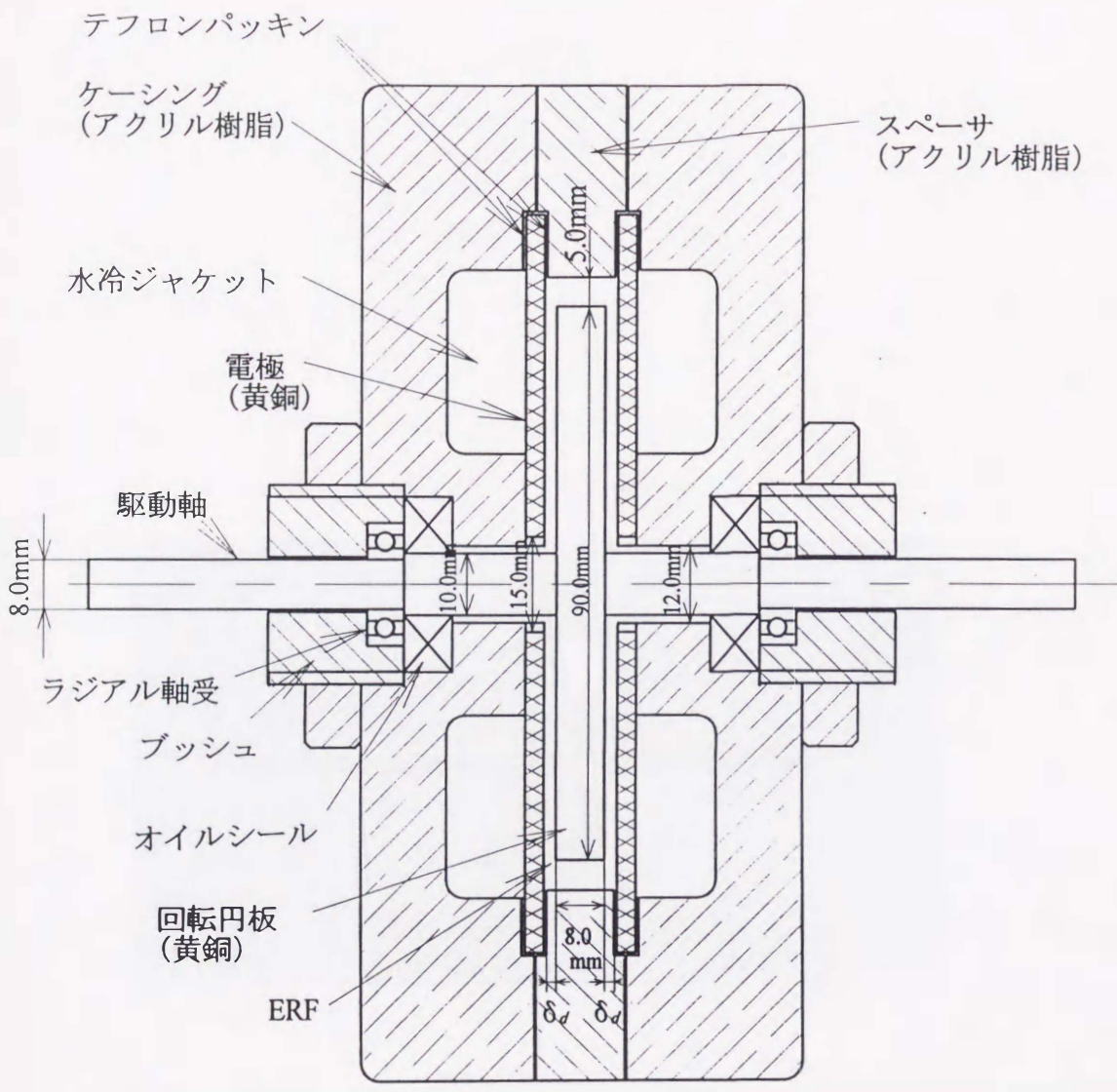


図 4.2(a) 回転円板型デバイス本体の詳細図

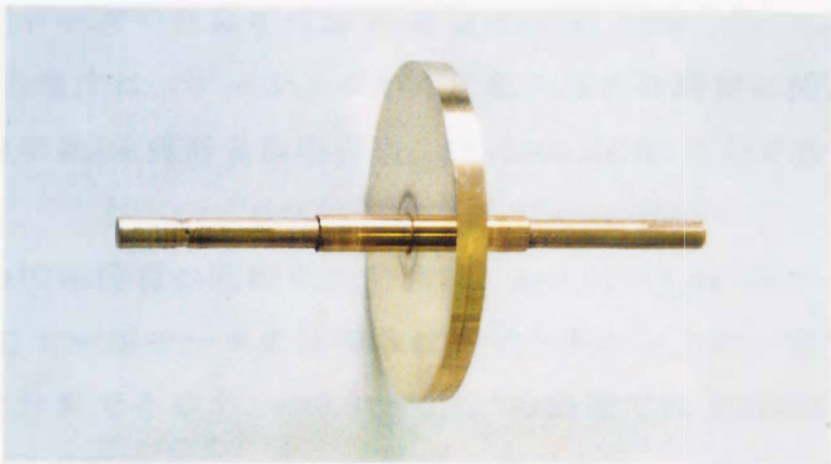


図 4.2(b) 回転円板の写真

1.5, 2.0 および 3.0mm とすることができる。このときの電極間隔／円板の半径比 δ_d/R_d はそれぞれ 0.0333, 0.0444, 0.0667 である。電極間隔の寸法はダイヤルゲージを使用して測定した。寸法測定誤差は $\pm 0.05\text{mm}$ である。回転円板の主軸はケーシングに取り付けられたベアリングとシーリングのためのオイルシールに接触している。尚、オイルシールは摩擦損失を小さくするためにバネが入っていないタイプを使用する。

回転円板は AC サーボモータ(オリエンタルモーター製, KBL5120GD-A2)で所定の回転数で回転させることができる。回転円板に作用するトルクは AC サーボモータと回転円板の間に直列に接続されたトルクメータ(小野測器製, SS010 および TS-200)で計測する。このトルクメータの仕様を付録 A(表 A.3)示す。

ER 流体の温度は、ケーシングから回転円板の外周側に挿入されたデジタル温度計(佐藤計量器製作所, SK-2000MC)によって計測する。

本研究の回転円板の回転数の範囲は、 $n=0.01\sim 3.4\text{s}^{-1}$ (0.6~204rpm) である。AC サーボモータの回転数はスピードコントローラで任意に設定することができるが、 $n=0.01\sim 0.1\text{s}^{-1}$ の範囲では 1/200 の減速機、 $n=0.1\sim 3.4\text{s}^{-1}$ の範囲では 1/5 の減速機を使用する。回転数の誤差は $\pm 0.5\%$ である。

本研究で使用した高電圧直流電源装置(トレック・ジャパン製, MODEL610-C-SERIAL-607)は、出力電圧 0~10kV, 出力電流 0~2mA で、実験での電圧強度 E は 0~2.00kV/mm の範囲である。直流電源装置のモニタ端子から出力電圧は 0~10V, 出力電流は 0~1V で出力される。出力電圧の測定誤差は $\pm 0.5\%$ (フルスケール)であり、出力電流の測定誤差は $\pm 0.5\%$ (フルスケール)である。

4.3 供試 ER 流体

本章で使用するスメクタイト型 ER 流体(表 2.2 参照)は, 主に SER10B と SER15B であり, 一部 SER15C, SER15D を使用する.

4.4 実験方法とデータ処理法

4.4.1 データ計測法

各回転数と各電場強度に対するトルク計測は, 回転円筒型デバイスの場合と同様の方法で行った. 回転数は, $n=3.4\sim 0.1\text{s}^{-1}$ の順に変化させ, 各回転数に対して電場強度 $E=0\sim 2.00\text{kV/mm}$ を変化させたが, 各回転数における各電場強度の一条件ごとに電場印加を行い, 計測終了後に電場を切った. このとき, 同一回転数での最初の無電場時の計測トルクと変わらないことを調べた. すなわち, ER 流体の性質が変化していないことを確認した. 次の計測条件の実験は, 電場を切って回転円板を回転させたままの状態です 30s 程度経過してから行った. 定常トルクと定常電流の値は, 電場印加から 10s 以上経過してから, 5s 間のトルクと電流に相当する電圧をデータレコーダ(8840, 日置電機製)に記録して, それぞれの時間平均から求めた.

実際のデバイスの使用ではある程度の温度変化があると考え, 本研究では $t=20^{\circ}\text{C}$ と 40°C の 2 種類の温度で実験を行った. 設定温度の誤差は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ である.

4.4.2 トルクの算出

回転円板に働く流体力によるトルクは計測トルク T_{dm} から軸受けとシール部分の機械摩擦損失トルク T_{df} を差し引いたものである. この値からさらに円板の外周面と主軸に作用するトルク(無電場において円板の外周面と主軸に作用するトルク) T_{dc} を差し引いたものが回転円板の電極面に働くトルク T_{ds} である. ここで, T_{df} は回転円筒型デバイスの場合と同様に, 各実験終了後, デバイスから ER 流体を抜き

取った後、直ちに空回し実験を行い、主軸に ER 流体が残存する状態で T_{df} と角速度 ω の関係から求めた。また、回転円板に作用するトルク ($T_{dm} - T_{df}$) が回転円板の円板面に作用するトルク T_{ds} と回転円板外周面と主軸に作用するトルク T_{de} に分けて考え、無電場時と電場印加時では T_{de} 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、 $T'_{dm} - T'_{df}$ と ω の関係を求める。ここで、ダッシュ(')はシリコンオイルの場合を示す。
- (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'_{ds} と(1)の結果から、次式によって T'_{de} と回転円板に作用するトルク ($T'_{ds} + T'_{de}$) の割合 k を求める。

$$k = \frac{(T'_{dm} - T'_{df}) - T'_{ds}}{T'_{dm} - T'_{df}} = \frac{T'_{de}}{T'_{ds} + T'_{de}} \quad (4.1)$$

- (3) ER 流体は無電場時では、ニュートン流体に近い特性を有するので、ER 流体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面に作用すると考えて、ER 流体の無電場の場合の回転円板に作用するトルク ($T_{dm0} - T_{df}$) と ω の関係式に、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 k の値を掛けて求めた。

従って、データ処理において円板の電極面に働くトルク T_{ds} は次式から求めた。

$$T_{ds} = T_{dm} - T_{df} - (T_{dm0} - T_{df})k \quad (4.2)$$

ここで、本研究ではシリコンオイルを使用した実験結果から、 $\delta_d = 1.5\text{mm}$ では $k=0.13$ 、 $\delta_d = 2.0\text{mm}$ では $k=0.22$ 、 $\delta_d = 3.0\text{mm}$ では $k=0.36$ とした。また、 T_{dm} は電場印加時の計測トルクであり、 T_{dm0} は ER 流体の無電場における計測トルクである。

4.4.3 ずり速度および電場強度, 電流密度

回転円板では, 円板表面での周速度が半径方向に変わるので, 円板全体を代表するずり速度 D_d として円板外端 $r=R_d$ における値を採用する. すなわち, 以下の式を用いた.

$$D_d = \frac{R_d \omega}{\delta_d} \quad (4.3)$$

また, 電場強度 E は以下のように定義した.

$$E = \frac{V}{\delta_d} \quad (4.4)$$

さらに電流密度 i は次式から求めた.

$$i = \frac{I}{2\pi(R_d^2 - R_l^2)} \quad (4.5)$$

ここで, R_d は回転円板の半径, R_l は固定円板の内径(=7.5mm)である.

4.5 実験結果

回転円板型デバイスにおける実験条件を表 4.1 に示す. また, 基礎となる各電場強度における回転数 n と計測トルク T_{dm} の測定値および ER 流体抜き取り後の空運転時のトルク T_{df} を付録 F に, 各実験結果から求めた円板面に作用するトルク T_{ds} とずり速度および電流密度とずり速度の関係のグラフを付録 G に示す. なお, 付録 H に T_{ds} の誤差解析を示すが, T_{ds} の誤差は T_{ds} の小さい場合が大きく最大で $\pm 9\%$ である.

4.6 トルクの特性と考察

4.6.1 トルクの基本的特性

まず, 質量濃度が低い場合のトルクとずり速度の関係について一般的傾向を調べる. 図 4.3 は, SER10B ($\phi=6.57\text{wt.}\%$) の $\delta_c=2.12\text{mm}$, $t=20^\circ\text{C}$ の場合のトルクとずり速度の関係を示したものである.

表 4.1 回転円板型デバイスの実験条件一覧

| No. | ERF | δ d(mm) | t(°C) | E(kV/mm) | n(s ⁻¹) | Date tested |
|------|--------|----------------|-------|----------|---------------------|-------------|
| d-1 | SER10B | 1.5 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/11/05 |
| d-2 | SER10B | 1.5 | 40 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/11/08 |
| d-3 | SER10B | 2.0 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/30 |
| d-4 | SER10B | 2.0 | 40 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/31 |
| d-5 | SER10B | 3.0 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/11/04 |
| d-6 | SER15B | 1.5 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/23 |
| d-7 | SER15B | 1.5 | 40 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/24 |
| d-8 | SER15B | 2.0 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/21 |
| d-9 | SER15B | 2.0 | 40 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/21 |
| d-10 | SER15B | 3.0 | 20 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/28 |
| d-11 | SER15B | 3.0 | 40 | 0~2.00 | 3.25~0.1 | 1997/10/28 |
| d-12 | SER15C | 1.5 | 20 | 0~2.00 | 3.00~0.1 | 1997/12/05 |
| d-13 | SER15C | 2.0 | 20 | 0~2.00 | 3.00~0.1 | 1997/11/28 |
| d-14 | SER15C | 3.0 | 20 | 0~2.00 | 3.00~0.1 | 1997/12/08 |
| d-15 | SER15D | 2.0 | 20 | 0~2.00 | 3.00~0.1 | 1998/03/24 |

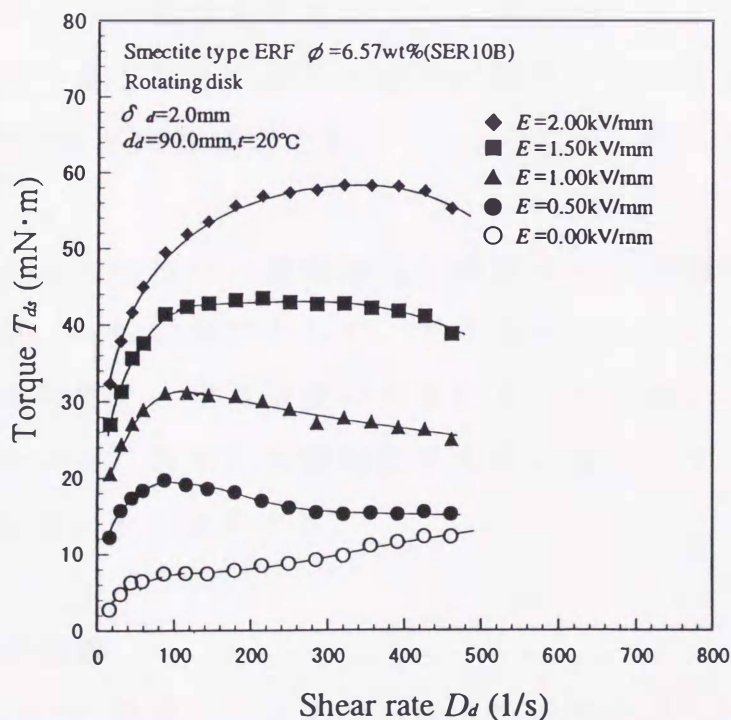


図 4.3 トルクとずり速度の関係(SER10B, δ d=2.0mm, t=20°C)

無電場時は、ずり速度 D_d の小さい領域でトルクの増加が比較的顕著に表れ、その後は緩やかに増加する。 $E=0.50$ kV/mm および 1.00 kV/mm では、ずり速度のごく小さい領域で速度の増加に対してトルクが増加してピークをもち、その後は緩やかに減少する。これより大きい電場強度では、トルクはずり速度の増加に対して急激に増加するが、その後はほぼ一定のトルクとなり、さらにずり速度が大きくなると徐々に減少する傾向にある。

次に、質量濃度が高い場合のトルクとずり速度の関係について調べる。図 4.4 および図 4.5 は、SER15B($\phi=9.04$ wt.%)で $t=20^\circ\text{C}$ の場合の $\delta_d=1.5$ mm および 2.0 mm の場合のトルクとずり速度の関係を示したものである。 $\delta_d=1.5$ mm の場合、各電場強度に対してトルクはずり速度の増加に対して一様に増加し、ピークを持たない。 $\delta_d=2.0$ と 3.0 mm の場合、 $E=0.5$ kV/mm では、トルクは、 $\delta_d=1.5$ mm の場合と同様であるが、 $E\geq 1.0$ kV/mm では、ずり速度の増加に対して、ずり速度小さい領域でトルクは急激に増加して、その後トルクの変化は緩やかでほとんど一定となり、さらに減少の傾向も認められる。この領域では、SER10B と同じ傾向である。

このようにトルク特性は、電場強度と濃度によって傾向が異なることが分かるが、一般的傾向として、ずり速度の小さいところで、トルクの変化が大きく、ずり速度の大きいところでは、一定あるいは緩やかに変化する。また、電場強度が大きい場合、ずり速度の変化に対して勾配が大きく変化する。

4.6.2 電場強度の影響

図 4.6 と図 4.7 は、電場印加によるトルクの増加分 $\Delta T_{ds}=T_{ds}-T_{d0}$ (T_{d0} は無電場時のトルク)とずり速度の関係を示したものである。図 4.6 は SER10B($\phi=6.57$ wt.%) の場合、図 4.7 は SER15B($\phi=9.04$ wt.%) の

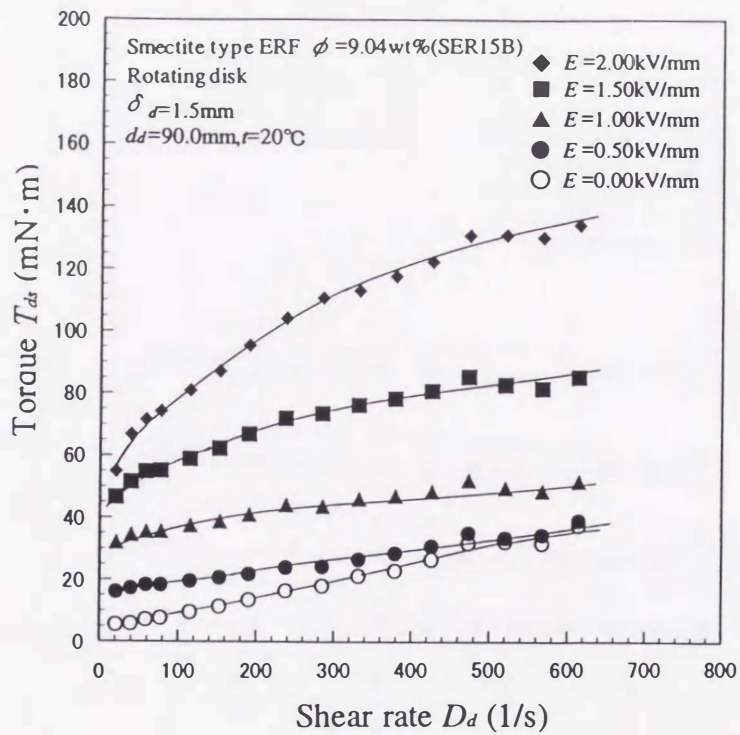


図 4.4 トルクとずり速度の関係(SER15B, $\delta_d = 1.5\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

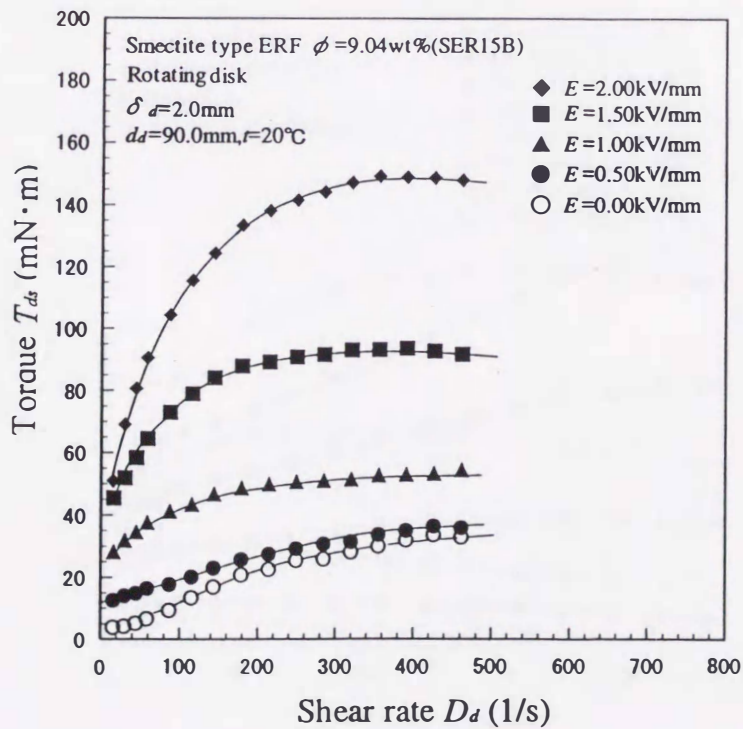


図 4.5 トルクとずり速度の関係(SER15B, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

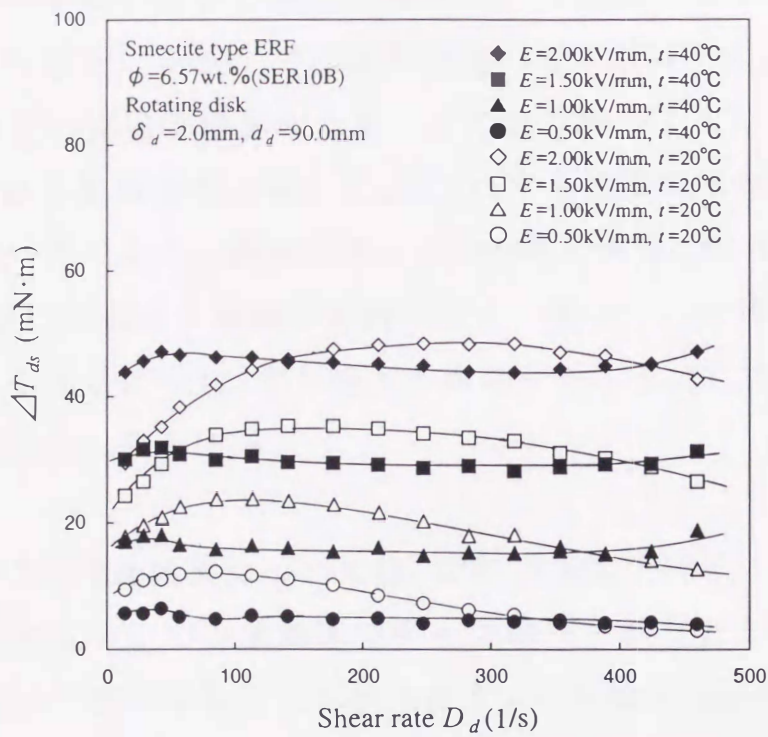


図 4.6 トルクの増加分とずり速度の関係 (SER10B, $\delta_d = 2.0 \text{ mm}$)

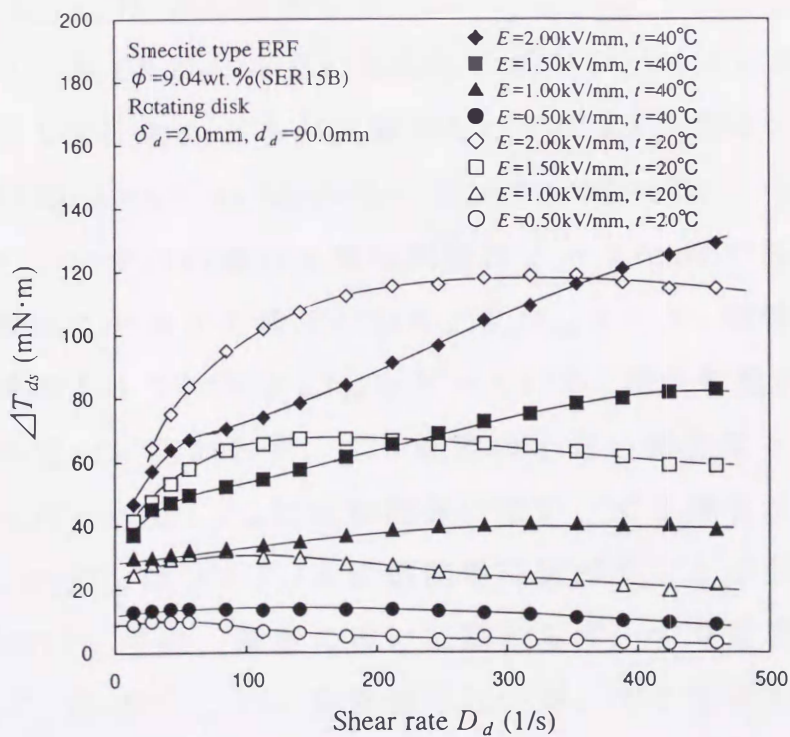


図 4.7 トルクの増加分とずり速度の関係 (SER15B, $\delta_d = 2.0 \text{ mm}$)

場合を示し、いずれの場合も電極間隔は $\delta_d = 2.0\text{mm}$ である。濃度の低い SER10B の場合、 $t=20^\circ\text{C}$ ではずり速度の増加に対する ΔT_{ds} は、ずり速度の小さい領域で増加するが、その後は減少していく。しかし、 $t=40^\circ\text{C}$ では各電場強度において ΔT_{ds} はずり速度の増加に対して変化せずほぼ一定である。濃度の高い SER15B の場合、 $t=20^\circ\text{C}$ では濃度の低い $t=20^\circ\text{C}$ の場合と同様の傾向である。しかし、 $t=40^\circ\text{C}$ では電場強度が大きくなるにつれ、ずり速度の増加に対する ΔT_{ds} の変化は、一定から増加傾向に変化する。

電場印加による ER 効果については、回転円筒型デバイスでの実験結果のある範囲については誘電球モデルで説明されることを述べた。このモデルでは、電場印加によるずり応力 σ の増加分 $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$ (σ_0 は無電場時のずり応力) は E^2 に比例する。従って、回転円板型デバイスにおいても、この説が成り立つならば回転円板に作用するトルクの増加分 ΔT_{ds} は E^2 に比例する。

スメクタイト型 ER 流体を用いた回転円板型デバイスにおいて、この関係が成立しているかどうかを調べたのが図 4.8 と図 4.9 である。図 4.8 は SER10B ($\phi = 6.57\text{wt.}\%$) の場合、図 4.9 は SER15B ($\phi = 9.04\text{wt.}\%$) の場合を示し、いずれの場合も電極間隔は $\delta_d = 2.0\text{mm}$ である。これらの図では縦軸にトルクの増加分割合 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ をとり、横軸に電場強度と無電場時のトルクの比 E^2/T_{d0} をとっている。濃度の低い SER10B では、温度の違いに関わらず、ずり速度の小さい場合はトルクの増加分割合 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と E^2/T_{d0} は比例関係にない。ずり速度が大きくなるにつれ、 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ は E^2/T_{d0} と比例関係に近づくことが分かる。濃度の高い SER15A では、温度の違いに関わらず、ずり速度の小さい場合は $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と E^2/T_{d0} は比例関係にないが、ずり速度が大きくなるにつれ、 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と E^2/T_{d0} は比例関係に近づく、さらにずり速度が大きくなると $t=20^\circ\text{C}$ では比例関係がくずれずれる。

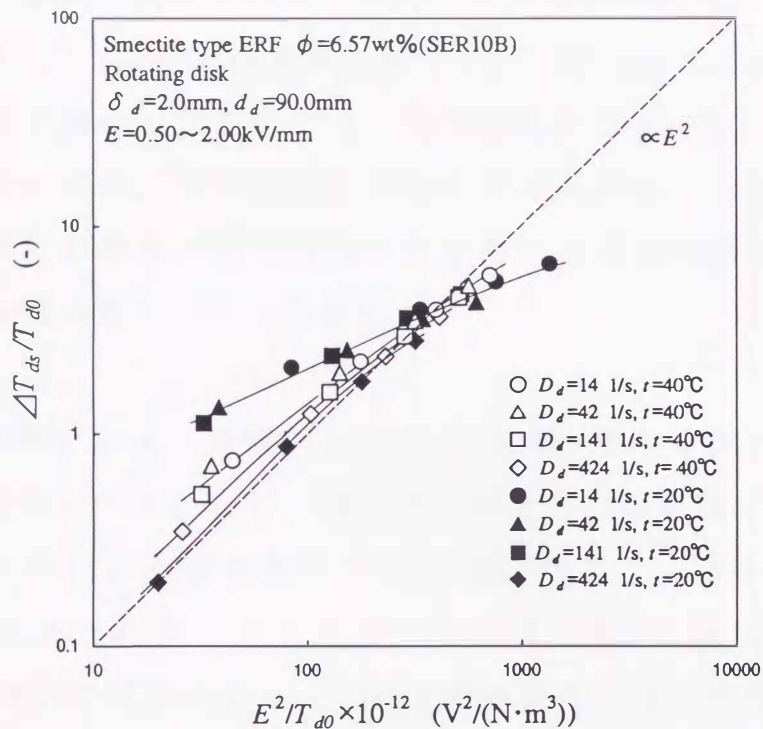


図 4.8 トルクの増加分と電気力の関係(SER10B)

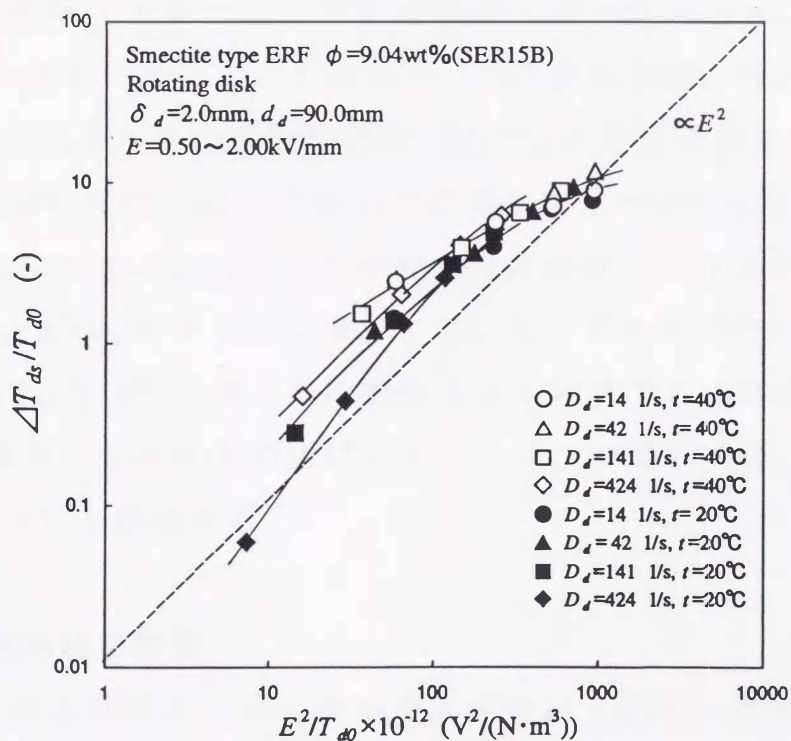


図 4.9 トルクの増加分と電気力の関係(SER15B)

従って、回転円板型デバイスでは、ずり速度が大きくなるにつれ、 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ は E^2/T_{d0} と比例関係に近づくが、ずり速度がさらに大きくなると濃度が高く $t=20^\circ\text{C}$ の場合、比例関係がくずれる。

回転円板の場合、ずり速度が半径方向に異なることから、広い範囲のずり速度の傾向が積分平均された形で表されるため、単純なモデルでの説明は難しいことが分かる。

回転円筒型デバイスで説明したように ER 効果を調べるためのもう一つのパラメータとして、電気力と粘性力の比を表す Mason 数がある。滝本らによる誘電球モデルを用いたクラスター理論では、Mason 数はクラスターの長さを代表する。図 4.10 と図 4.11 は SER10B, SER15B における $\delta_d=2.0\text{mm}$ の場合のトルクの増加分割合 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と Mason 数に相当する E^2/D_d の関係を示したものである。SER10B の $t=40^\circ\text{C}$ の場合を除いて、各濃度、各温度において、 E^2/D_d の小さい領域、すなわち、ずり速度の大きい領域では、 $\Delta T_{ds}/T_{d0} \propto (E^2/D_d)^n$ の関係にあることが分かる。この領域では、電気力と粘性力の比によってトルクの増加分割合 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ が決定される。しかし、 n の値は $t=20^\circ\text{C}$ では、 $n > 1$ であるのに対して、 $t=40^\circ\text{C}$ では、 $n < 1$ となり、 E^2/D_d に対する $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ の依存傾向は温度によって明らかに異なる。一方、 E^2/D_d の大きい領域、すなわち、ずり速度の小さい領域では、 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と E^2/D_d は一定の関係になく電場ごとに異なる。この領域では、電気力と粘性力の比によってトルクの増加割合 $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ が決定されないことが分かる。

4.6.3 電極間隔の影響

図 4.12 および図 4.13 は、質量濃度が低い SER10B および質量濃度が高い SER15B の 20°C におけるトルクにおよぼす電極間隔の影響を調べたのである。SER10B の場合、トルクはほとんど電極間隔の影響

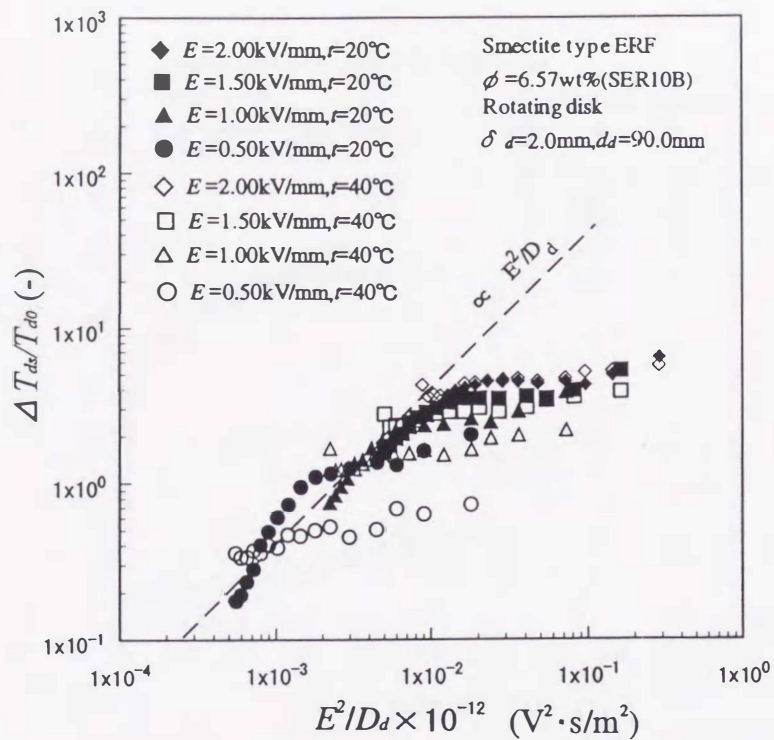


図 4.10 トルクの増加割合と電気力/粘性力の関係(SER10B)

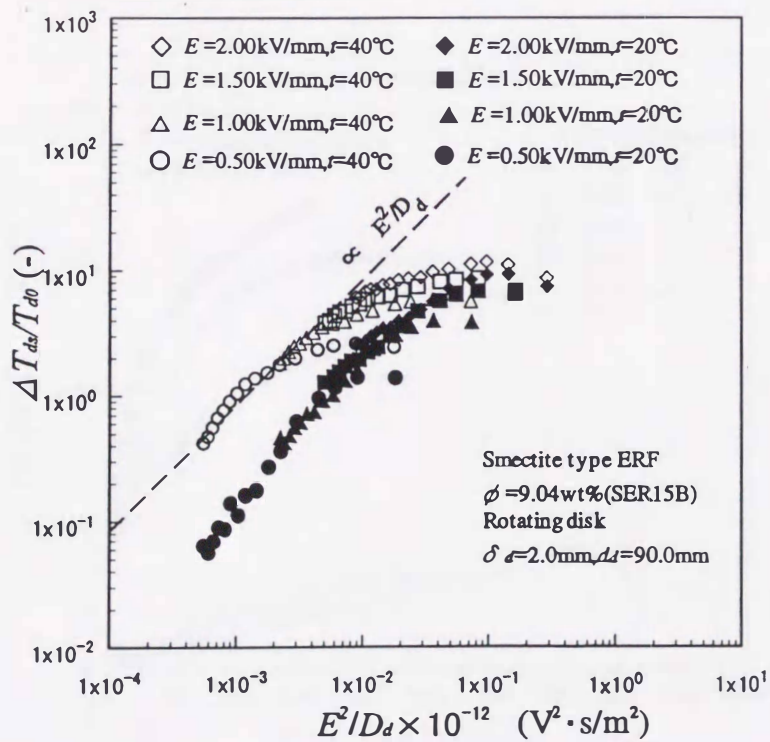


図 4.11 トルクの増加割合と電気力/粘性力の関係(SER15B)

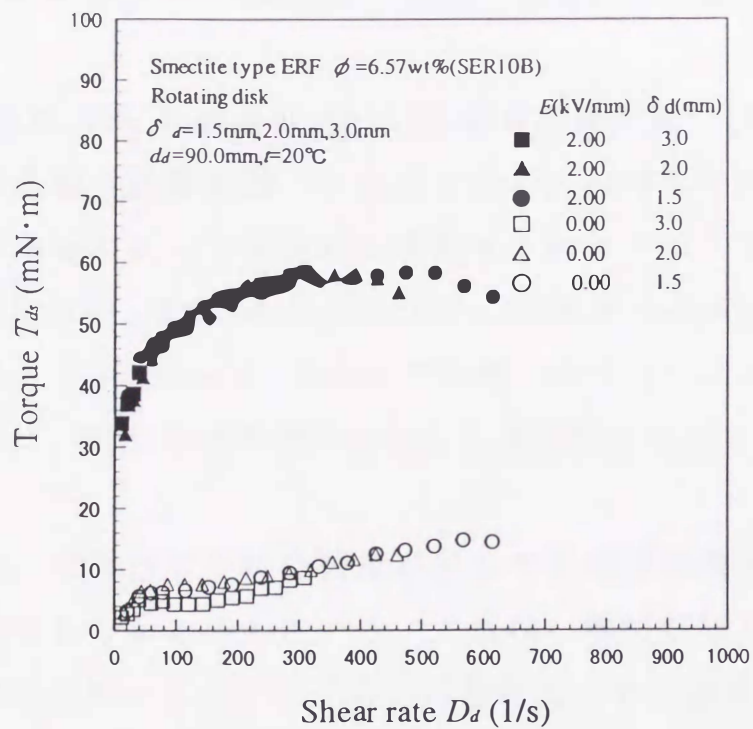


図 4.12 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER10B $t=20^\circ\text{C}$)

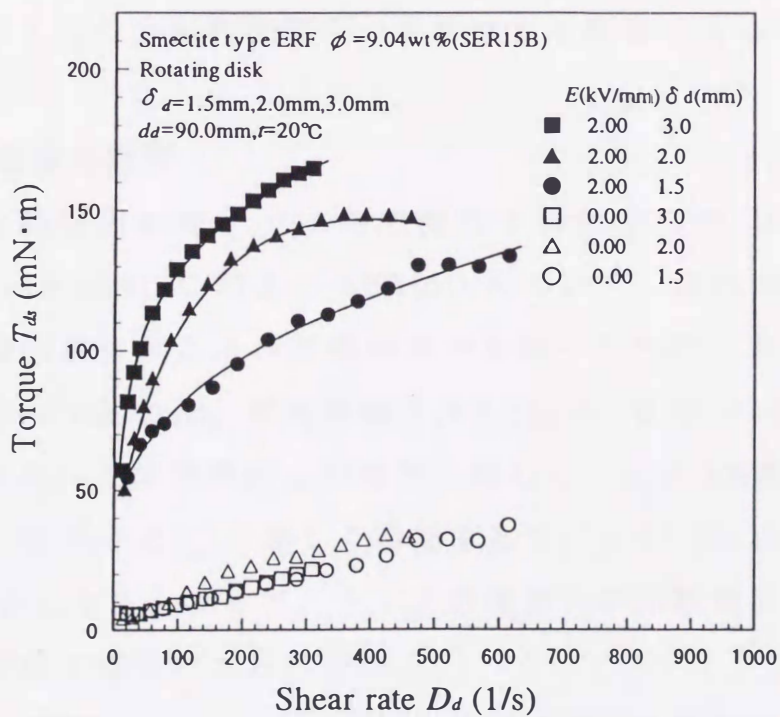


図 4.13 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)

を受けないことが分かる。SER15Bの場合、電極間隔が広い方がトルクが大きい。

図 4.14 は温度 40°C の場合の SER15B(質量濃度が高い)のトルクにおよぼす電極間隔の影響を調べたものである。無電場では、トルクはずり速度の増加に対して直線的に増加する特性を示しており、電極間隔の影響はない。 $E=2.00\text{kV/mm}$ では、電極間隔が広い方がトルクが大きい、 $\delta_d=1.5\text{mm}$ と 2.0mm では違いが少ない。また、それぞれのトルクは、ずり速度の増加に対して直線的に増加している。

この結果は、ずり速度や電場強度が同じでも電極間隔の広さによりトルクが異なることを示している。これは、電場が印加された流れでは電極間隔が異なると少なくとも円板付近のずり速度 $D=\partial u/\partial z$ が異なり、相似な流れになっていないと考えられる。従って、質量濃度が高くなるとトルクは電場強度とずり速度だけでは整理できない。これは回転円筒型デバイスでの実験結果と同様であるが、回転円板型デバイスの方が電極間隔の影響はより顕著である。

4.6.4 濃度と温度の影響

図 4.15 は回転円板型デバイスで測定された全ての ER 流体、SER10B, SER15B, SER15C および SER15D について、体積濃度の増加に対する電場印加によるトルクの増加分を調べたものである。条件は電場強度 $E=2.00\text{kV/mm}$ 、電極間隔 $\delta_d=2.12\text{mm}$ 、温度 $t=20^\circ\text{C}$ の場合である。図において体積濃度 α の増加に対して、 α が 4% から 6% の間でトルクの増加分 ΔT_d が著しく増加するが、 α が 7% 以上では ΔT_d はほぼ一定になる。従って、トルクの増加分が体積濃度に対して単純な比例関係ではないことが分かる。

図 4.16 および図 4.17 は、SER10B および SER15B について温度の影響を比較して示したものである。

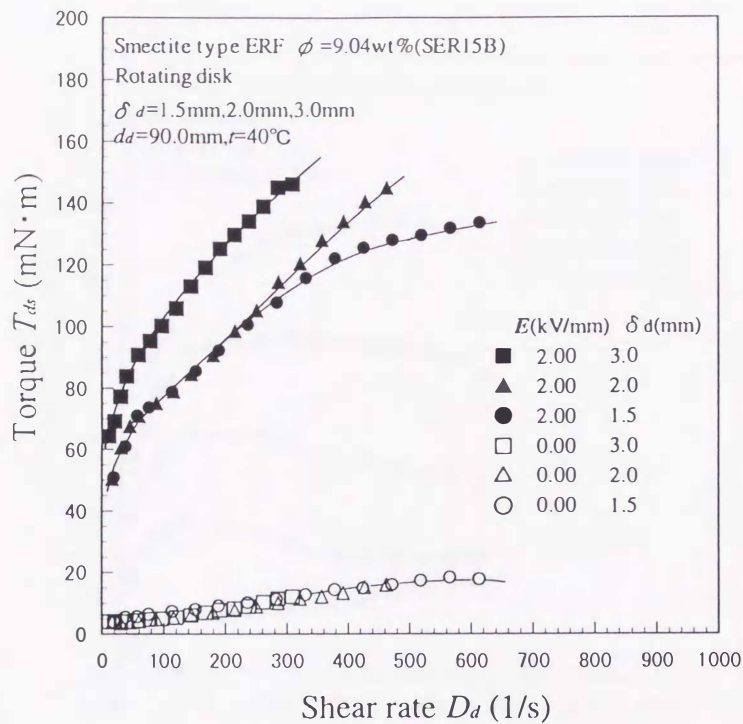


図 4.14 トルク特性に及ぼす電極間隔の影響(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)

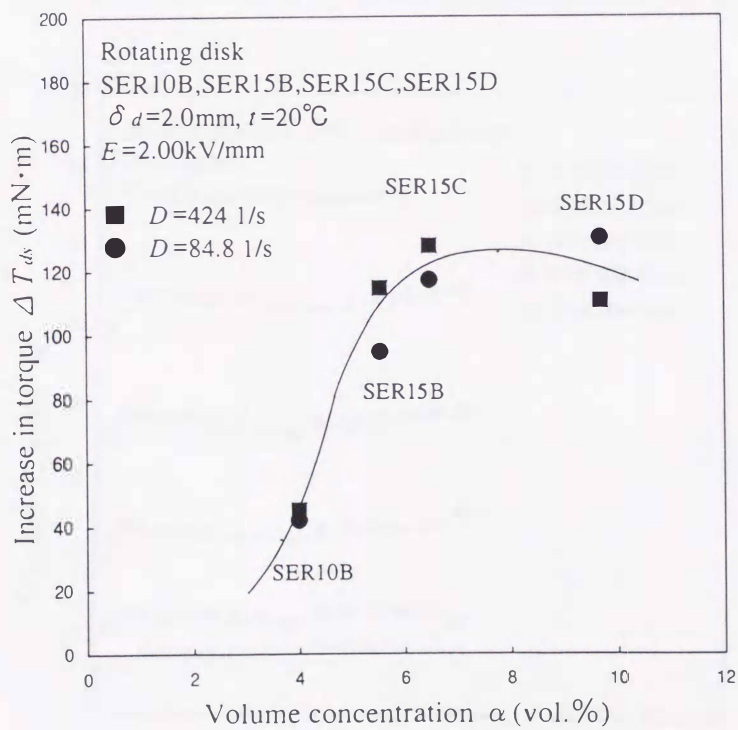


図 4.15 トルクの増加分と体積濃度の関係
 $(E=2.00\text{kV/mm}, \delta d=2.0\text{mm}, t=20^\circ\text{C})$

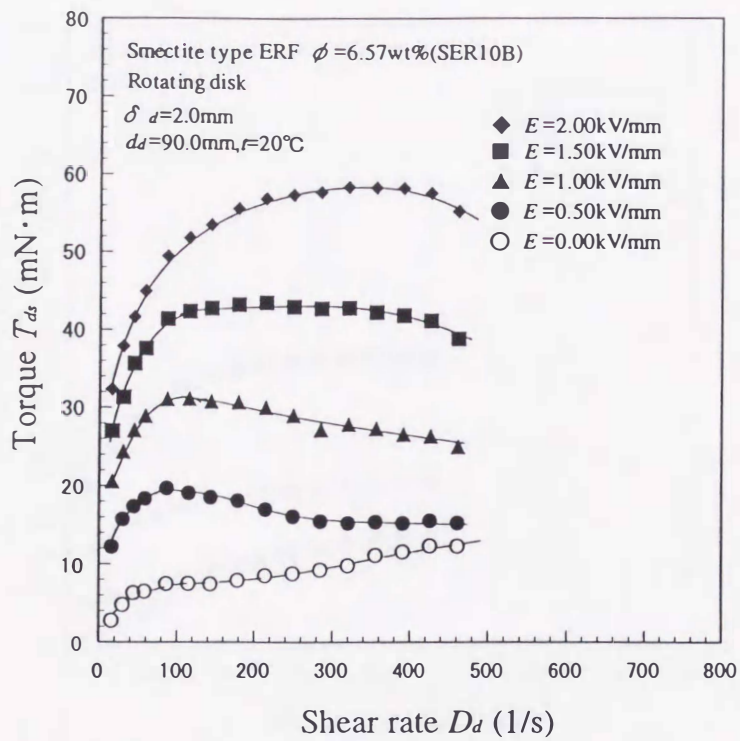


図 4.16(a) トルクとずり速度の関係(SER10B, $t = 20^\circ\text{C}$, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

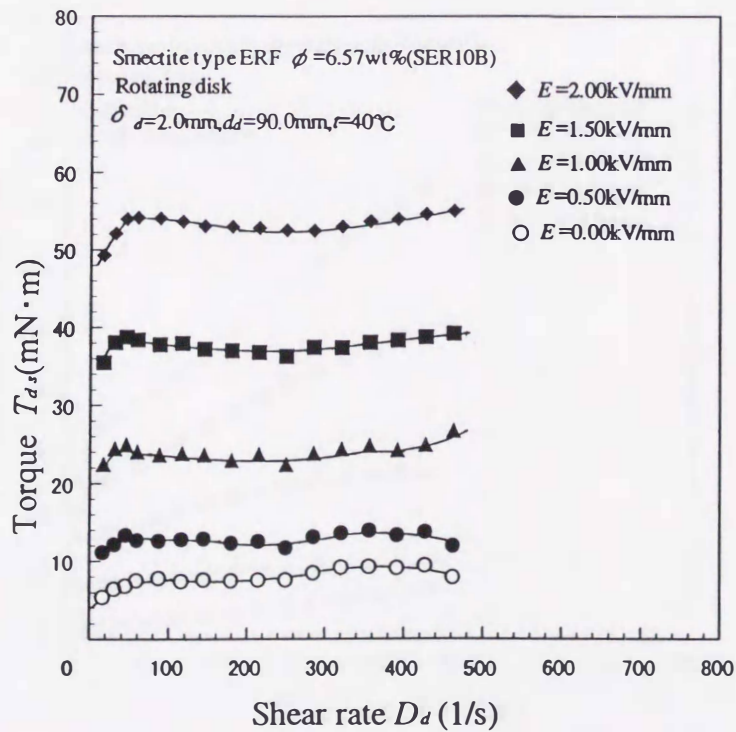


図 4.16(b) トルクとずり速度の関係(SER10B, $t = 40^\circ\text{C}$, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

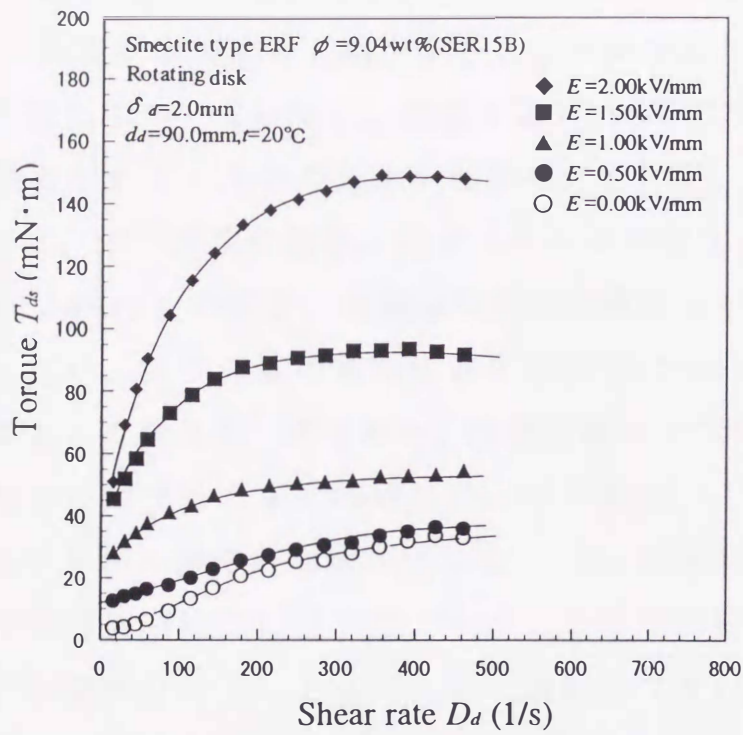


図 4.17(a) トルクとずり速度の関係(SER15B, $t=20^\circ\text{C}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

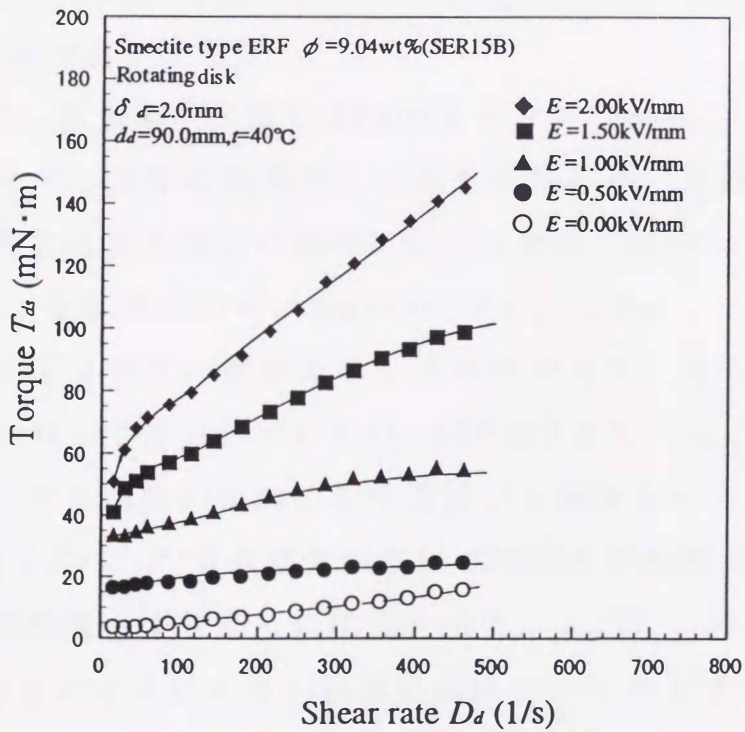


図 4.17(b) トルクとずり速度の関係(SER15B, $t=40^\circ\text{C}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$)

濃度が低い SER10B の場合、各電場強度での降伏トルク ($D_d=0$ におけるトルク) は温度が増加すると減少することが分かる。ずり速度の増加に対する変化についてみると、温度が低い $t=20^\circ\text{C}$ の場合は、ずり速度の増加に対するトルクの変化が比較的大きいが、温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ の場合は、ずり速度の増加に対するトルクの変化が小さい。

濃度が高い SER15B の場合、各電場強度での降伏トルクは温度であまり変化しない。ずり速度の増加に対する変化についてみると、温度によって大きく異なる。すなわち、温度が低い $t=20^\circ\text{C}$ の場合は、ずり速度の増加に対するトルクの増加は、ずり速度の小さい領域では急激であるがやがて緩やかな増加になる。一方、温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ の場合は、ずり速度の増加に対して、トルクの増加割合は比較的緩やかで直線的な傾向を示す。そして、ずり速度の大きい領域でのトルクの温度による差は、それほど大きくない状態となる。

4.7 電流密度の特性と考察

4.7.1 電流密度の基本的特性

図 4.18 は、質量濃度が低い SER10B の $\delta_d=2.0\text{mm}$ 、 $t=20^\circ\text{C}$ における電流密度とずり速度の関係を示したものである。各電場強度において、電流密度はずり速度の増加に対して急激に減少していく。

図 4.19 は、質量濃度が高い SER15B の $\delta_d=2.0\text{mm}$ 、 $t=20^\circ\text{C}$ における電流密度とずり速度の関係を示したものである。電流密度はずり速度の増加に対して減少していくが、SER10B と比べると電流密度の値が小さく、ずり速度の増加に対する減少の割合も小さい。

さらに、図 4.20 には、質量濃度が高い SER15B で温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ における電流密度とずり速度の関係を示す。 δ_d は 2.0mm の場合である。ずり速度の小さいときの電流密度は $t=20^\circ\text{C}$ のときの 10 倍程度大きい。電流密度はずり速度の増加に対して緩やかに減少していく。

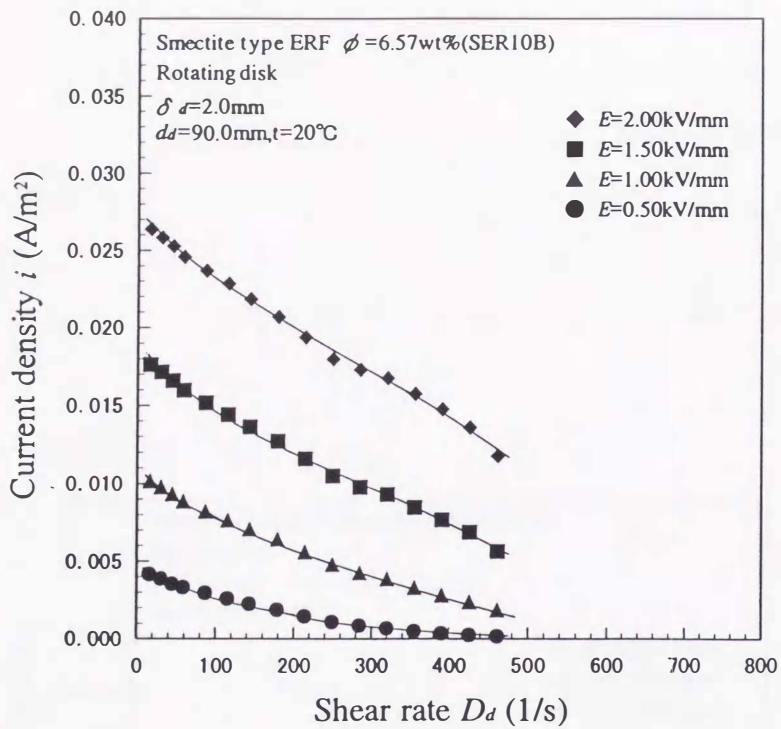


図 4.18 電流密度とずり速度の関係(SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

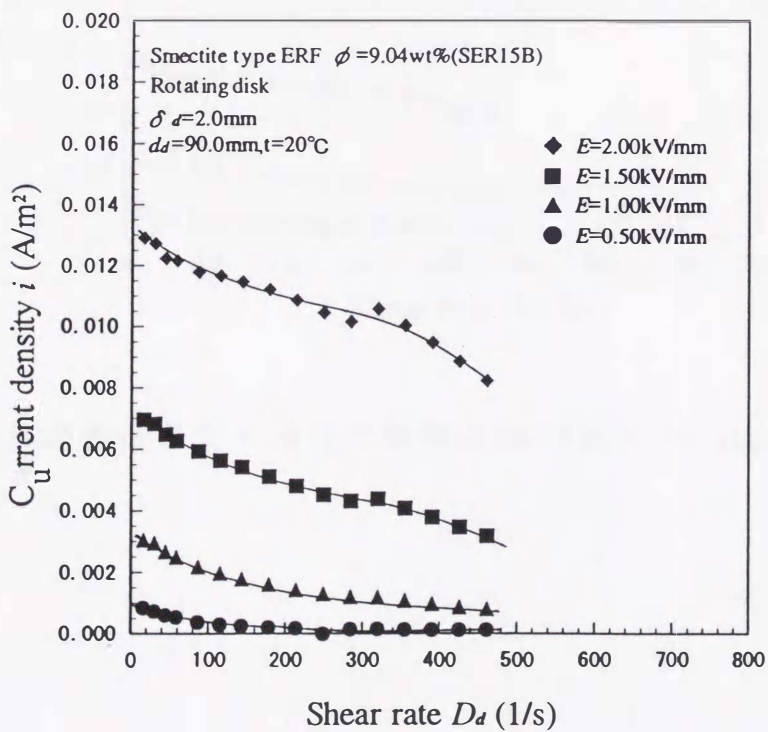


図 4.19 電流密度とずり速度の関係(SER15B, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

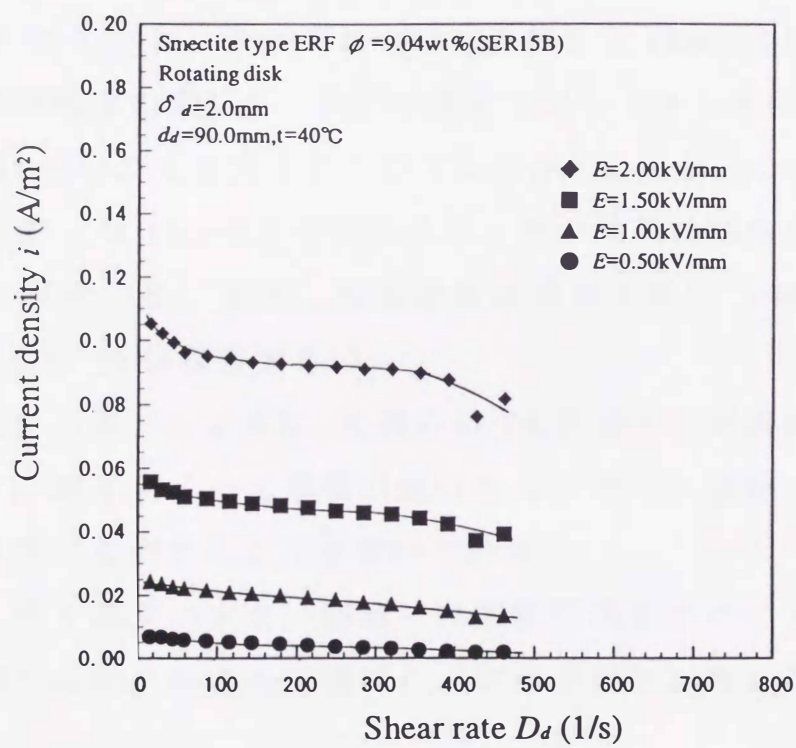


図 4.20 電流密度とずり速度の関係 (SER15B, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

電流密度がずり速度の増加に対して減少していくことから次のことが分かる。すなわち、全体としてみれば、ずり速度が大きくなるにつれてクラスター形状あるいはクラスター配置の影響を受けるER流体の性状が電流を通しやすい形態から、電流を通しにくい形態に変化していることが分かる。なお、これには電流密度の分布が半径方向で変化している可能性も幾分か関係していると考えられる。

4.7.2 電場強度の影響

図 4.21 と図 4.22 は、それぞれ SER10B および SER15B の場合の電流密度と電場強度の関係を、各ずり速度に対して示したものである。図中の直線は $i=bE^c$ で近似したものである (b, c は係数)。この近似曲線のべき乗の値 c は 1.3~2.8 の間にあり、ずり速度の増加につれ大きくなることが分かる。また、電流密度は温度が高い $t=40^\circ\text{C}$ の方が $t=20^\circ\text{C}$ の場合の 10 倍程度大きい。

回転円筒でも述べたように、土井らは ER 流体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 3 乗に比例することを導いている。

従って、ずり速度の大きい領域では回転円筒型デバイスの場合と同様に、電荷は粒子によって運ばれる割合が多いと考えることができる。

4.7.3 電極間隔の影響

図 4.23 は、SER10B の場合の電流密度が電極間隔から受ける影響をまとめて示したものである。電場強度が大きくなると、電極間隔の広い $\delta_e=3.0\text{mm}$ の場合の方が電流密度は大きい。

図 4.24 は、SER15B の場合の電流密度が電極間隔から受ける影響を示したものである。SER10B の場合と同様に電場強度が大きくなると、電極間隔の広い $\delta_e=3.0\text{mm}$ の場合の方が電流密度は大きい。図

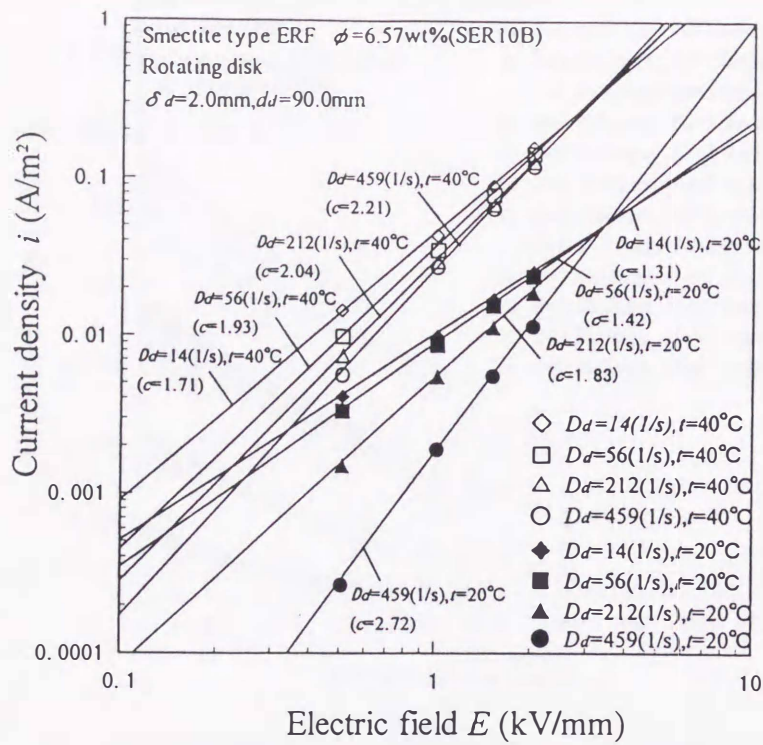


図 4.21 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER10B)

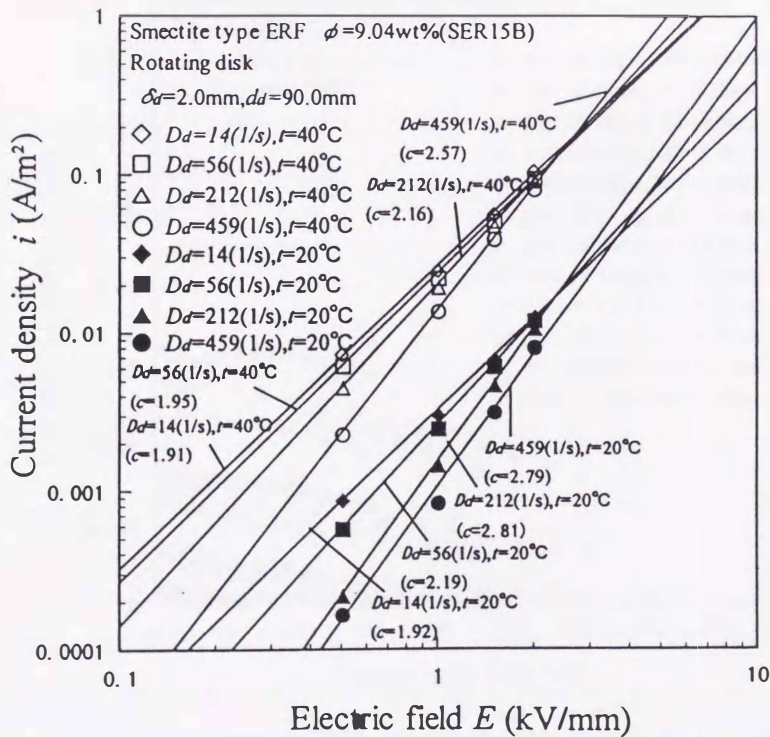


図 4.22 各ずり速度での電流密度と電場強度の関係(SER15B)

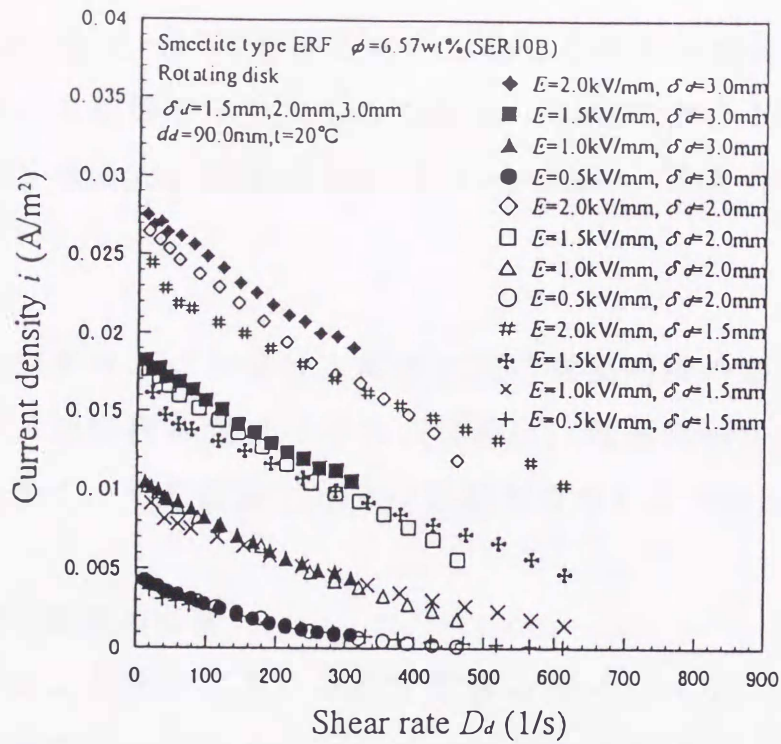


図 4.23 各電極間隔での電流密度とすり速度の関係
(SER10B, $t=20^{\circ}\text{C}$)

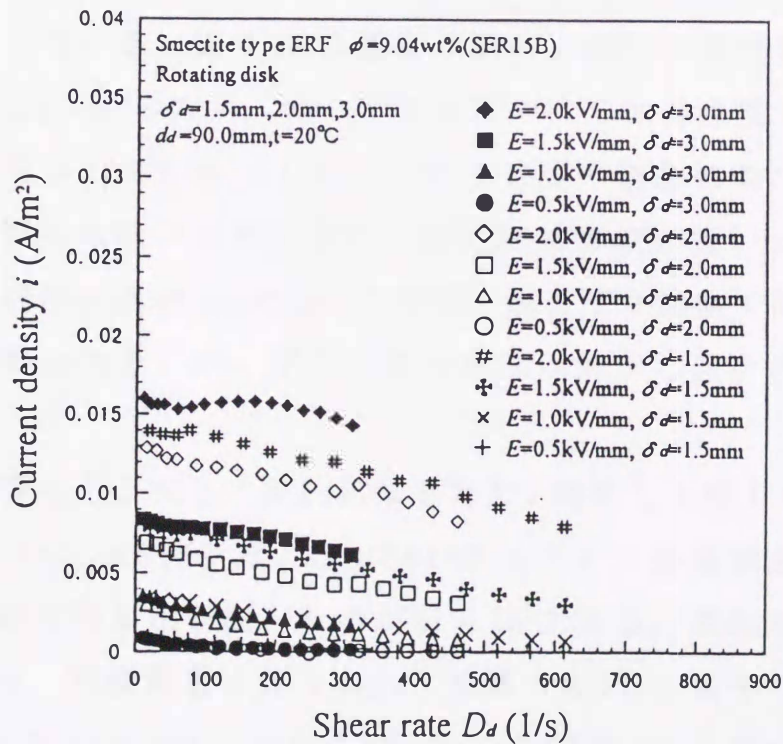


図 4.24 各電極間隔での電流密度とすり速度の関係
(SER15B, $t=20^{\circ}\text{C}$)

4.25 は, SER15B について温度の高い $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合の電流密度が電極間隔から受ける影響を示したものである. $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合と同様に電場強度が大きくなると, 電極間隔の広い $\delta_d=3.0\text{mm}$ の場合の方が電流密度は大きい.

回転円筒型デバイスの場合, 電流密度は電極間隔の影響をあまり受けないが, 回転円板型デバイスの場合には, 電極間隔が広い方が電流密度が大きく, ずり速度だけでは整理できないことが分かる.

4.7.4 濃度と温度の影響

次に濃度による電流密度に及ぼす影響についてみる. すなわち, それぞれ体積濃度 4.00% と 5.56% の SER10B および SER15B の場合の各温度における電流密度とずり速度の関係を図 4.26 と図 4.27 に示す. それぞれの図は, 体積濃度が大きくなると電流密度が小さくなることを示している. 図 4.26 は温度の低い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合を示し, 濃度の低い SER10B の方が, 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. しかし, ずり速度の増加に対して減少する割合は, 濃度の低い方が大きい. 図 4.27 は温度の高い $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合を示し, 濃度の低い SER10B の方が, 同じずり速度で同じ電場強度で電流密度は大きい, ずり速度の増加に対する減少の割合は同程度である.

濃度の影響をもう少し一般的に知るため, 測定した全ての ER 流体, SER10B, SER15B, SER15C および SER15D について体積濃度の増加に対する電流密度の変化を調べたのが図 4.28 である. 条件は電場強度 $E=2.00\text{kV/mm}$, 電極間隔 $\delta_d=2.0\text{mm}$, 温度 $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合である. 濃度 5.56vol.% の SER15B と濃度 6.50vol.% の SER15C の間で逆転はあるが, 全体としてみれば体積濃度の変化に対して電流密度は減少する傾向にあることが分かる.

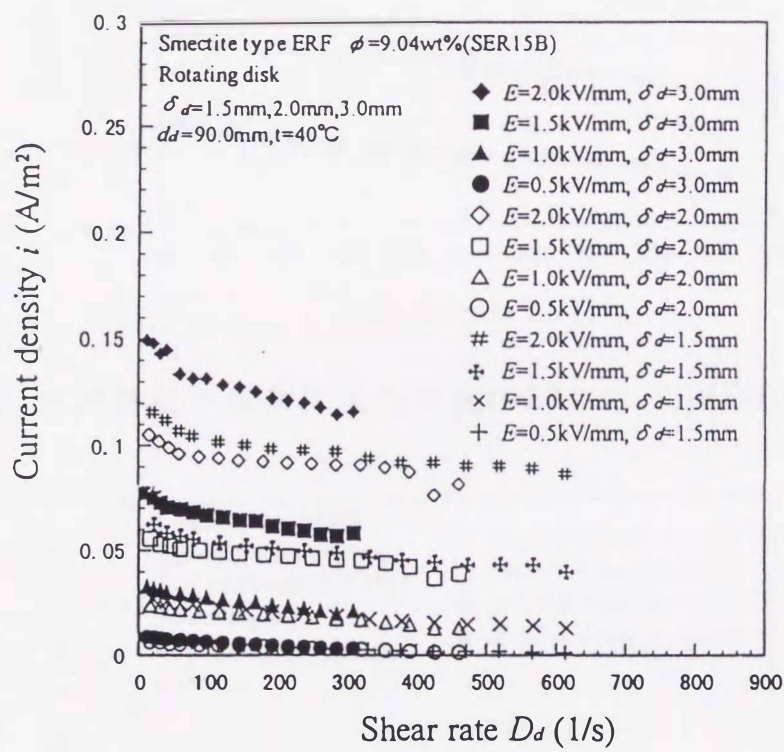


図 4.25 各電極間隔での電流密度とずり速度の関係
 (SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)

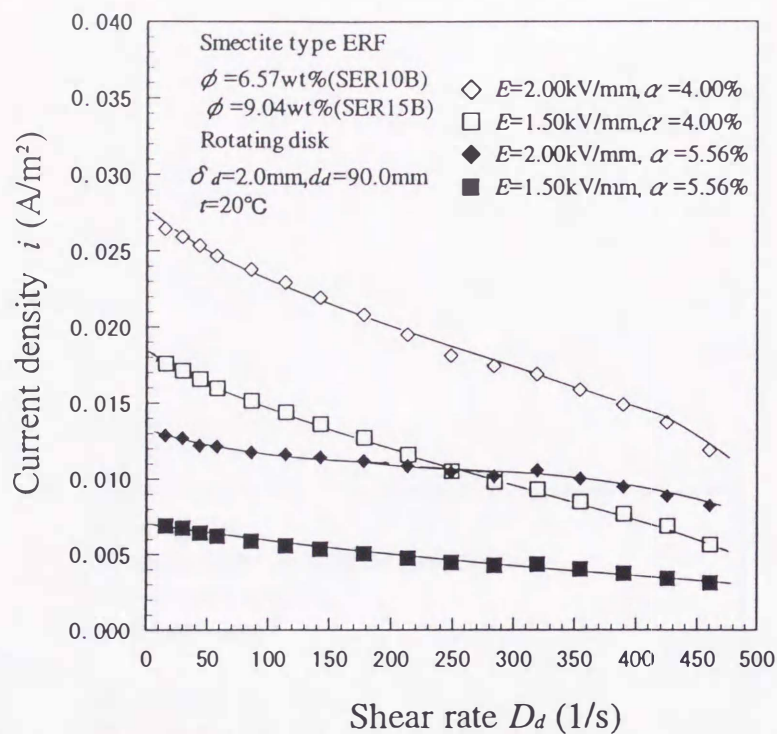


図 4.26 電流密度の濃度による変化(SER10B, SER15B, $t=20^\circ\text{C}$)

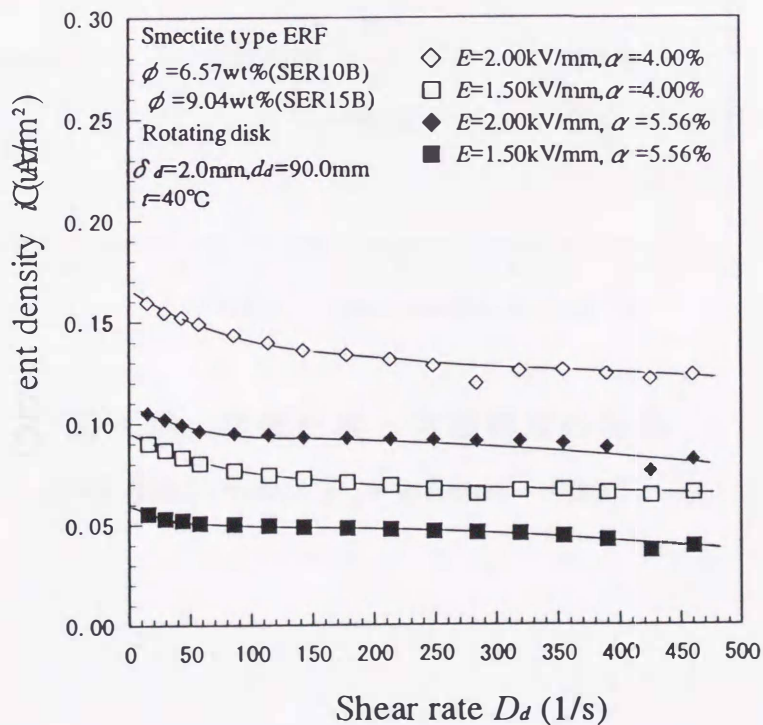


図 4.27 電流密度の濃度による変化(SER10B, SER15B, $t=40^\circ\text{C}$)

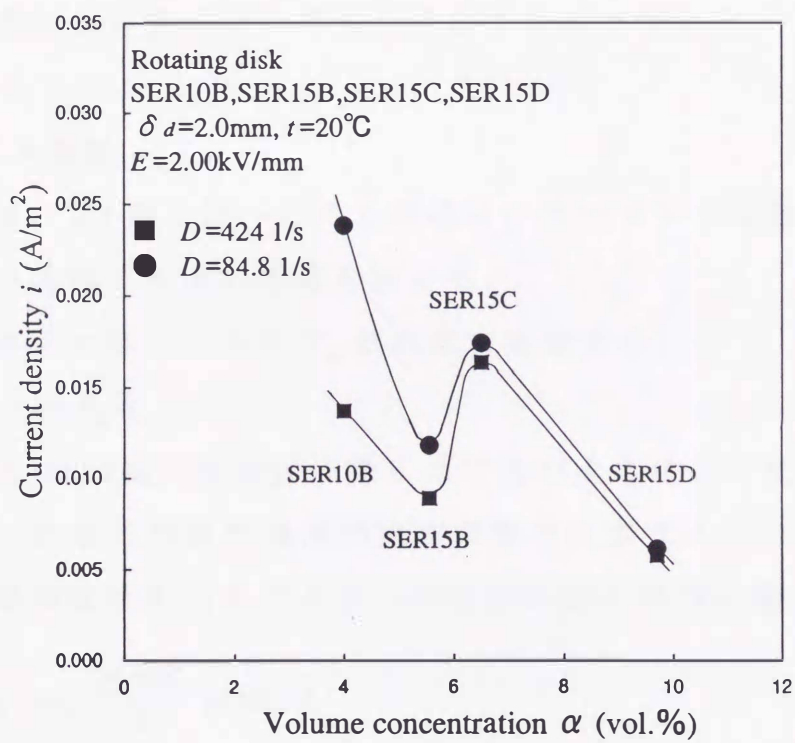


図 4.28 電流密度と体積濃度の関係
($E = 2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d = 2.0\text{mm}$, $t = 20^\circ\text{C}$)

電流密度が温度の高い方が大きいことは、図 4.21 と図 4.22 においても述べたが、図 4.26 と図 4.27 を比較すると、 $t=40^{\circ}\text{C}$ の方が $t=20^{\circ}\text{C}$ より電流密度が 10 倍程度大きくなるが、ずり速度の増加に対して電流密度が減少していく傾向は変わらない。

従って、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とが分かる。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言える。

4.8 モーメント係数

ここでは、2.8 節に述べたのと同様に、モーメント係数 C_{Md} を用いたトルクの実験データの整理を試みる。

円板の両面に働くトルク T_{ds} は次式で定義する。

$$T_{ds} = 2 \cdot F_{ds} R_d \quad (4.6)$$

ここで、 F_{ds} は回転円板表面に働く力で次のようにして求められる。ただし、これには円板外周面の流体摩擦力は含まれていない。円板面の表面摩擦係数を c_f とすると、円板面の微小面積に働く力は、

$$dF_{ds} = c_f \frac{\rho(r\omega)^2}{2} 2\pi r dr \times 2 \quad (4.7)$$

であり、この部分に働くモーメントは、

$$dT_{ds} = dF_{ds} r = c_f \pi \rho \omega^2 r^4 dr \times 2 \quad (4.8)$$

で表される。いま、全円板表面で c_f が一定と仮定して、回転軸半径 R_s から円板外半径 R_d まで積分すると、円板の両面に働くトルクは、

$$\begin{aligned} T_{ds} &= 2c_f \pi \rho \omega^2 \int_{R_s}^{R_d} r^4 dr \\ &= \frac{2\pi}{5} c_f \rho \omega^2 R_d^5 \left\{ 1 - \left(\frac{R_s}{R_d} \right)^5 \right\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

ここで,

$$C_{Md} = \frac{4\pi}{5} c_f \left\{ 1 - \left(\frac{R_s}{R_d} \right)^5 \right\} \quad (4.10)$$

とおく. $(R_s/R_d)^5 \cong 0$ なので, トルクは,

$$T_{ds} = C_{Md} \frac{\rho \omega^2}{2} R_d^5 \quad (4.11)$$

従って, モーメント係数は次式で表される.

$$C_{Md} = \frac{T_{ds}}{\frac{1}{2} \rho R_d^5 \omega^2} \quad (4.12)$$

また, 回転レイノルズ数は以下の式で定義する.

$$R_{\omega d} = \frac{\rho R_d^2 \omega}{\bar{\mu}_0} \quad (4.13)$$

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\delta_d T_{d0}}{\pi \omega R_d^4} \quad (4.14)$$

ただし, $\bar{\mu}_0$ は無電場における円板電極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電極間内の代表粘度を $\bar{\mu}$ とすれば, 式(4.12),式(4.13)および式(4.14)から,

$$C_{Md} = \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_0} \frac{2\pi R_d}{\delta_d} \frac{1}{R_{\omega d}} \quad (4.15)$$

を導くことができる.

図 4.29 と図 4.30 はそれぞれ SER10B および SER15B に対するモーメント係数 C_{Md} と回転レイノルズ数 $R_{\omega d}$ の関係を示したものである. 電極間隔 δ_d はいずれも 2.0mm である. 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ことが分かる. これは印加電場強度が大きくなると相対粘度 ($\bar{\mu}/\bar{\mu}_0$) が大きくなる

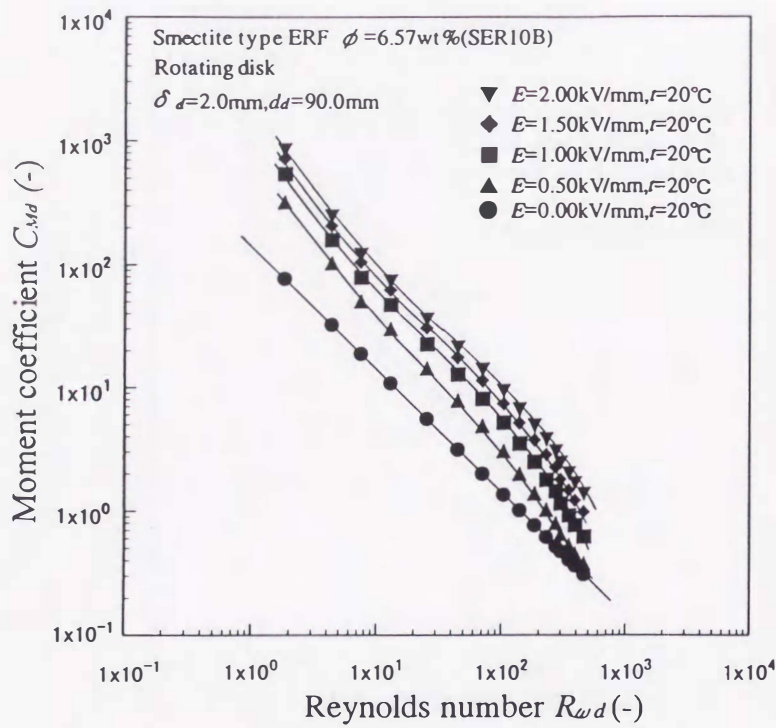


図 4.29(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10B, $t = 20^\circ\text{C}$)

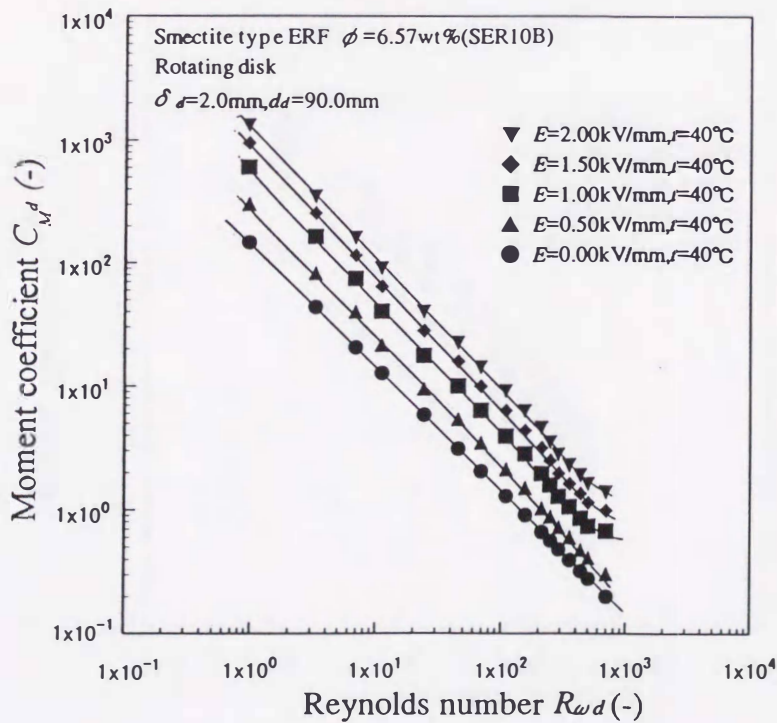


図 4.29(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係(SER10B, $t = 40^\circ\text{C}$)

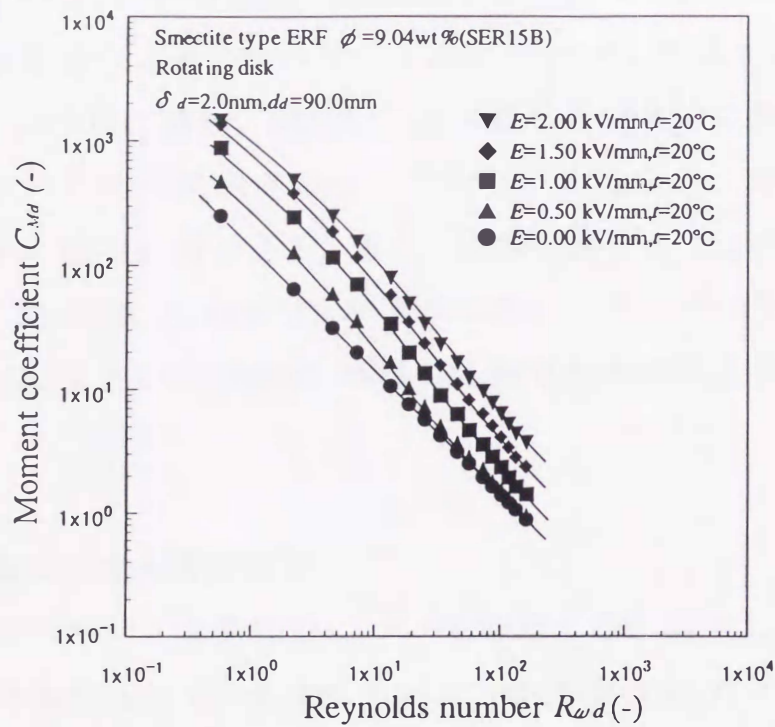


図 4.30(a) モーメント係数とレイノルズ数の関係 (SER15B, $t = 20^\circ\text{C}$)

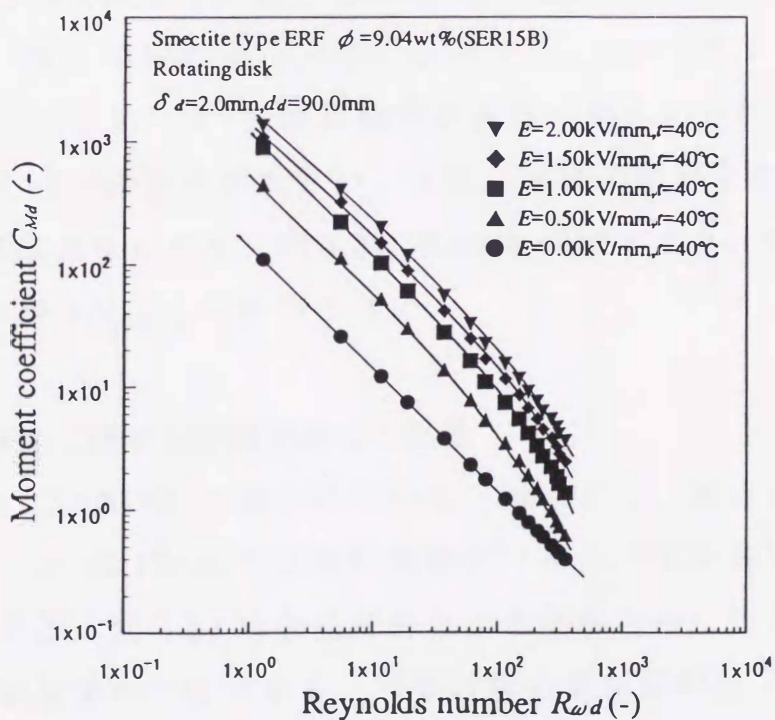


図 4.30(b) モーメント係数とレイノルズ数の関係 (SER15B, $t = 40^\circ\text{C}$)

ことを示している。濃度の高い SER15B 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 $R_{\omega d}$ に対する勾配は、SER10B と SER15B いずれにおいても、 $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合は無電場時の勾配に近いが、 $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合は無電場時の勾配よりやや大きい。

4.9 トルク増加に対する消費電力

トルク増加に対する消費電力について考察する。図 4.31, 4.32 は $\delta_d=2.0\text{mm}$ で各濃度の ER 流体において $t=20^{\circ}\text{C}$ および 40°C での $VII/\Delta T_{ds}$ と角速度の関係を示したものである。各図において温度の低い $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、各電場強度で角速度の増加に対して、 $VII/\Delta T_{ds}$ は角速度の小さい領域で減少し、その後は緩やかに減少するかあるいは一定に近い。一方、温度の高い $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合は、 $t=20^{\circ}\text{C}$ に比べて $VII/\Delta T_{ds}$ の値が大きく、 $VII/\Delta T_{ds}$ は電場強度が大きくなるにつれ、角速度の増加に対して減少の割合が大きい。また、電場強度が大きくなると $VII/\Delta T_{ds}$ の値は大きくなる。図 4.31, 4.32 を比較すると、濃度の高い SER15B の方が $VII/\Delta T_{ds}$ の値が小さい。

4.10 トルク特性に関する数値解析との比較

濃度の高い SER15C の場合について、はじめに、解析に用いる構成方程式に、 $\delta_c=2.12\text{mm}$ の回転円筒型デバイスの流動曲線を用いた場合を検討する。図 4.33 は数値解析による回転円板に作用する定常トルクと実験結果の比較である。回転円板の電極間隔は $\delta_d=1.5, 2.0, 3.0\text{mm}$ で、計算には $\delta_c=2.12\text{mm}$ の回転円筒型デバイスの流動曲線を使用した。

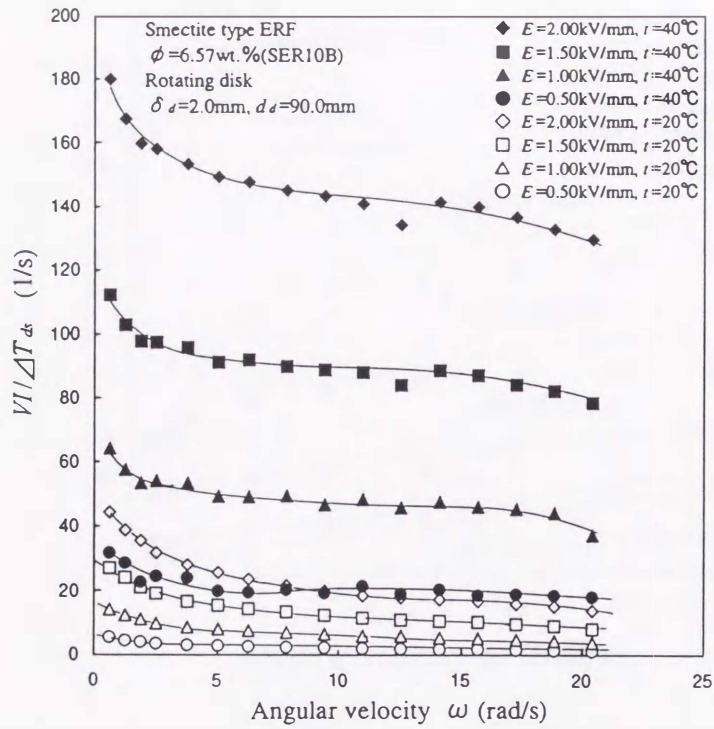


図 4.31 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER10B)

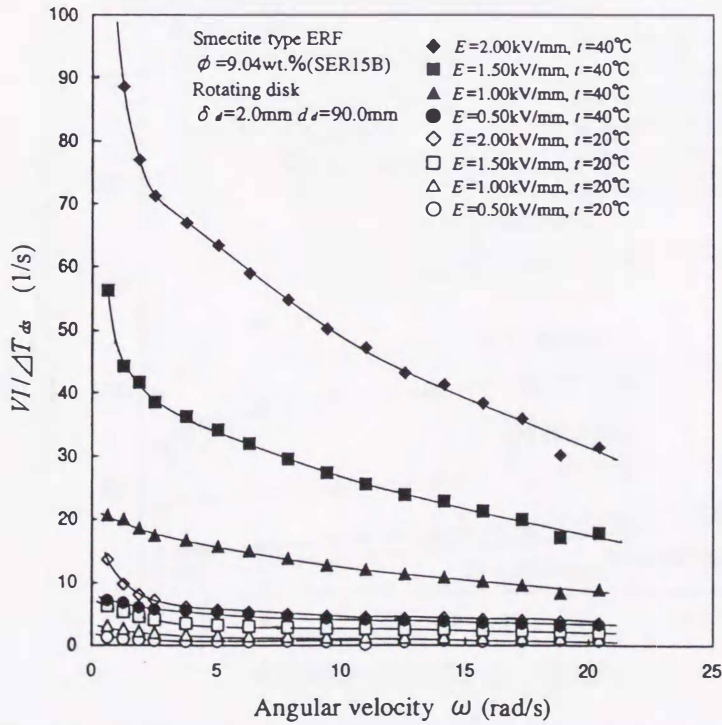


図 4.32 トルク増加に対する消費電力と角速度の関係(SER15B)

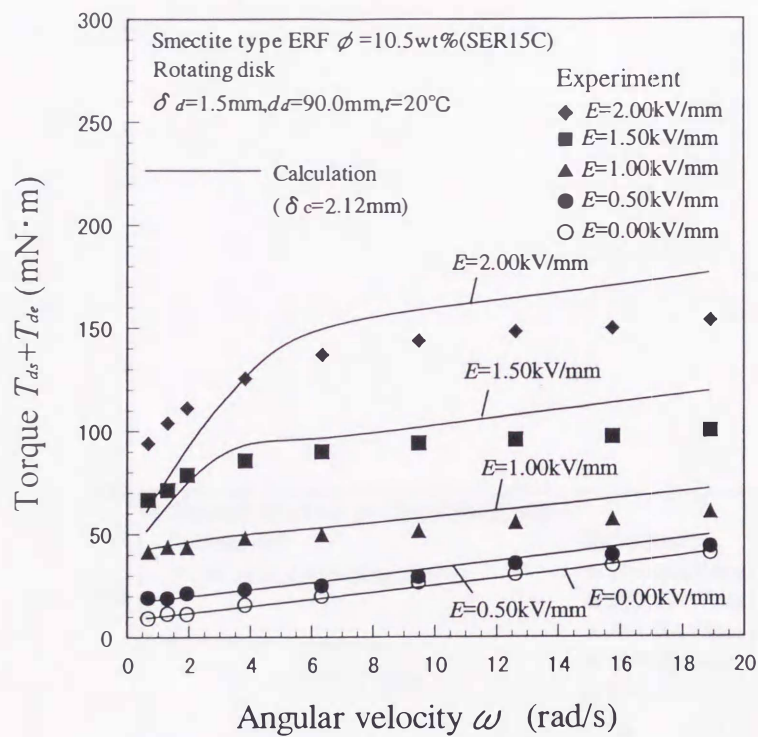


図 4.33(a) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較

(SER15C, $\delta_d = 1.5\text{mm}$)

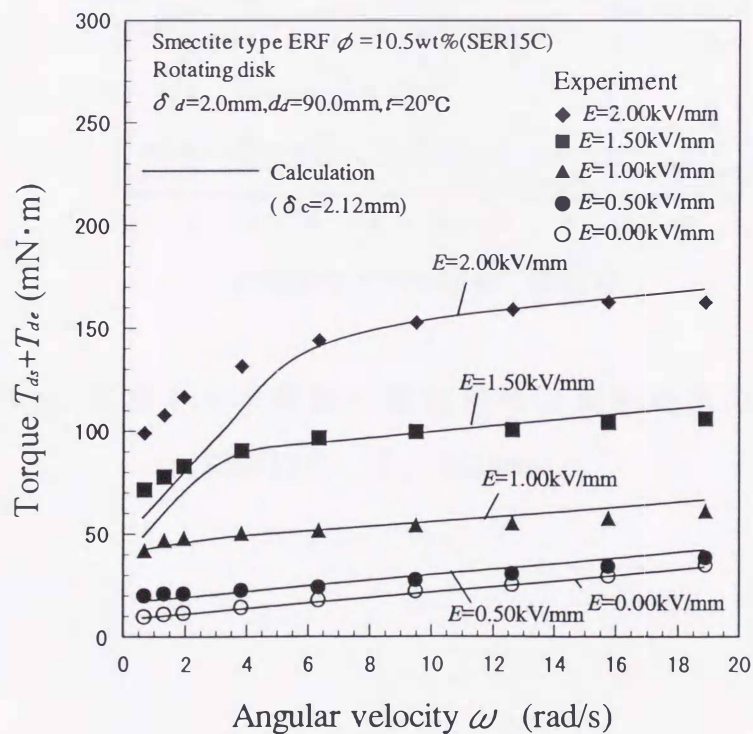


図 4.33(b) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較

(SER15C, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

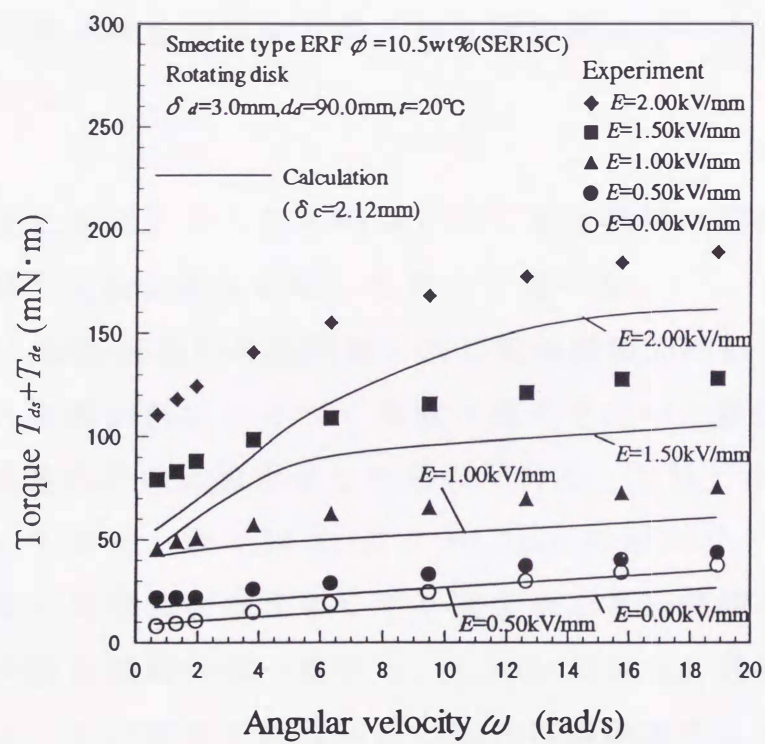


図 4.33(c) 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較
 (SER15C, $\delta_d = 3.0\text{mm}$)

図 4.33(a)の場合、数値解析によるトルクは実験結果と定性的に一致するが、全体としては計算値が高く定量的には一致しない。図 4.33(b)の場合、電場強度が大きくなり速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定量的および定性的にほぼ一致する。図 4.33(c)の場合、数値解析によるトルクは実験結果と定性的に一致するが定量的には一致せず、全ての条件において実験結果より小さくなることを示している。

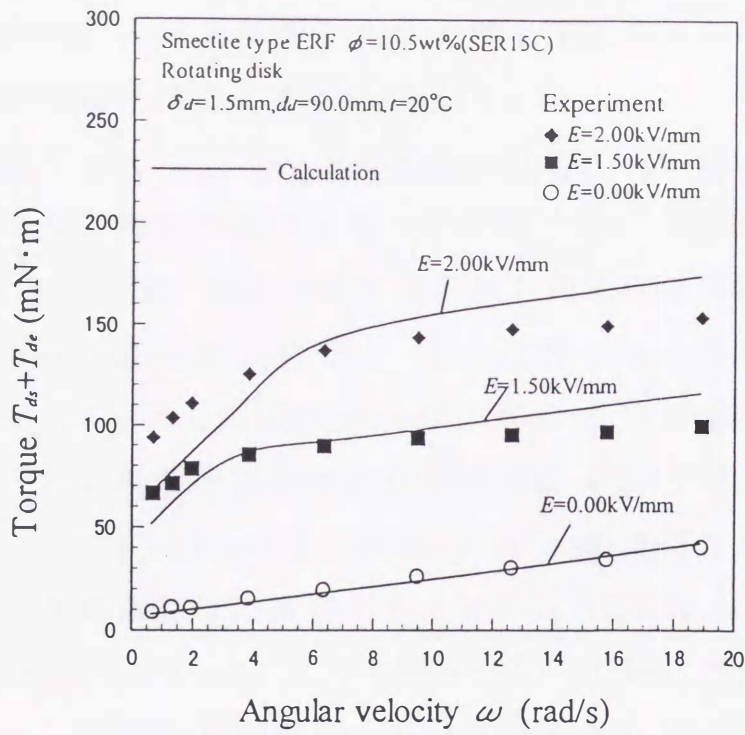
これは、流動曲線を使用する際、同じ電極間隔のものを用いなかったためである。

そこで、次に回転円板の電極間隔と同じ電極間隔の回転円筒型デバイスから得た流動曲線を使用した場合を調べる。

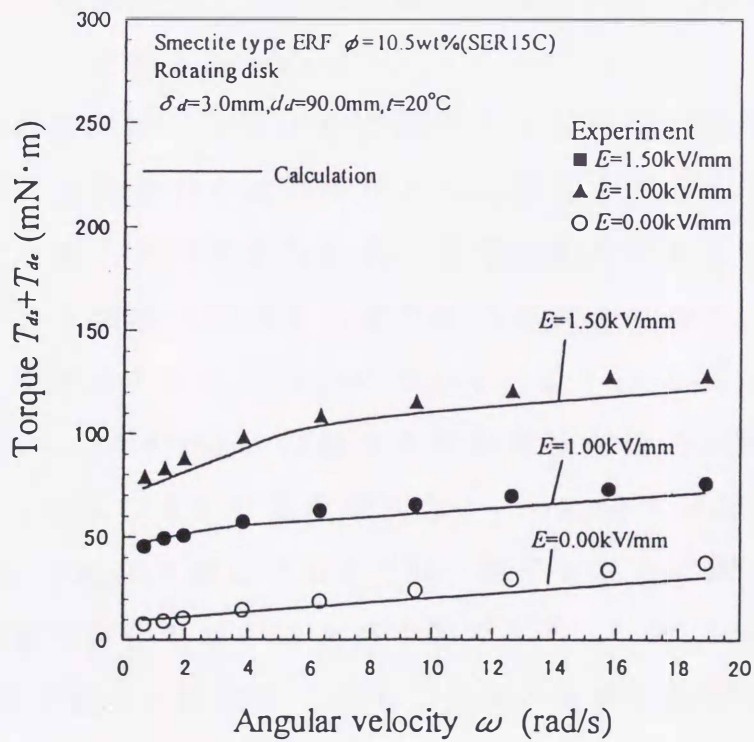
図 4.34 は、回転円板の電極間隔と同じ電極間隔の回転円筒型デバイスから得た流動曲線にもとづく構成方程式を用いた数値解析によるトルクと実験結果の比較を示したものである。それぞれ $\delta_d=1.5$, 3.0mm について示す。図 4.34 (a)は $\delta_d=1.5\text{mm}$ の場合で、 $\delta_d=2.0\text{mm}$ の場合と同様に電場強度が大きくなり速度の小さい領域を除いて、数値解析と実験結果はほぼ一致する。しかしながら、電場強度が大きく角速度が小さい領域で数値解析の結果は実験結果より小さくなる。図 4.34(b)に示す $\delta_d=3.0\text{mm}$ 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。

以上の結果から、回転円板の数値解析では構成方程式を得るために使用する回転円筒型デバイスの流動曲線の電極間隔と回転円板における電極間隔を等しい大きさにしなければならないことを示している。

しかし、数値解析と実験結果との比較から明らかなように、電極



(a) $\delta_d=1.5\text{mm}$



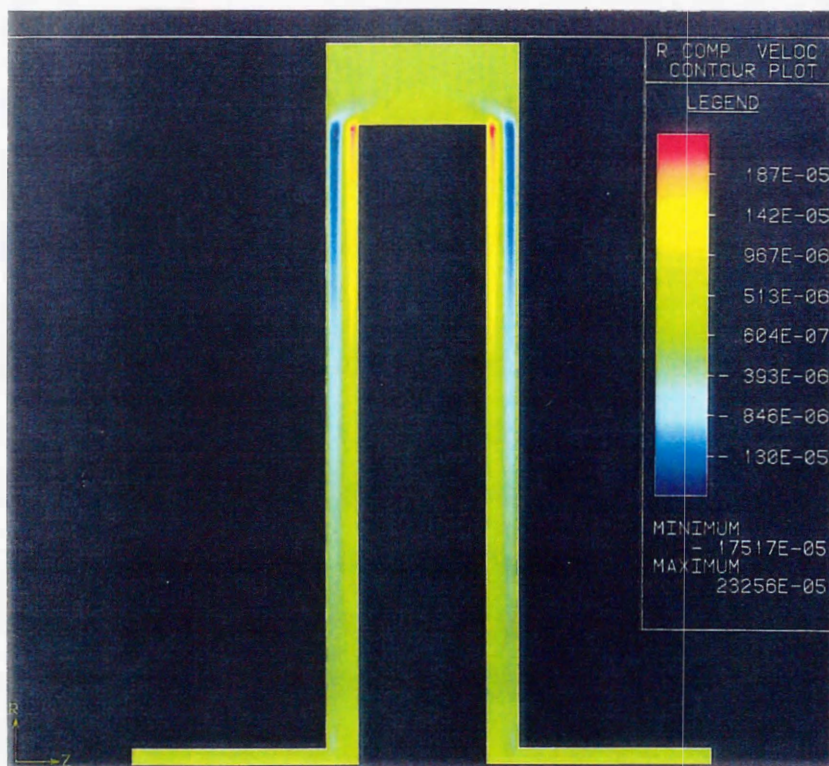
(b) $\delta_d=3.0\text{mm}$

図 4.34 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較(SER15C)

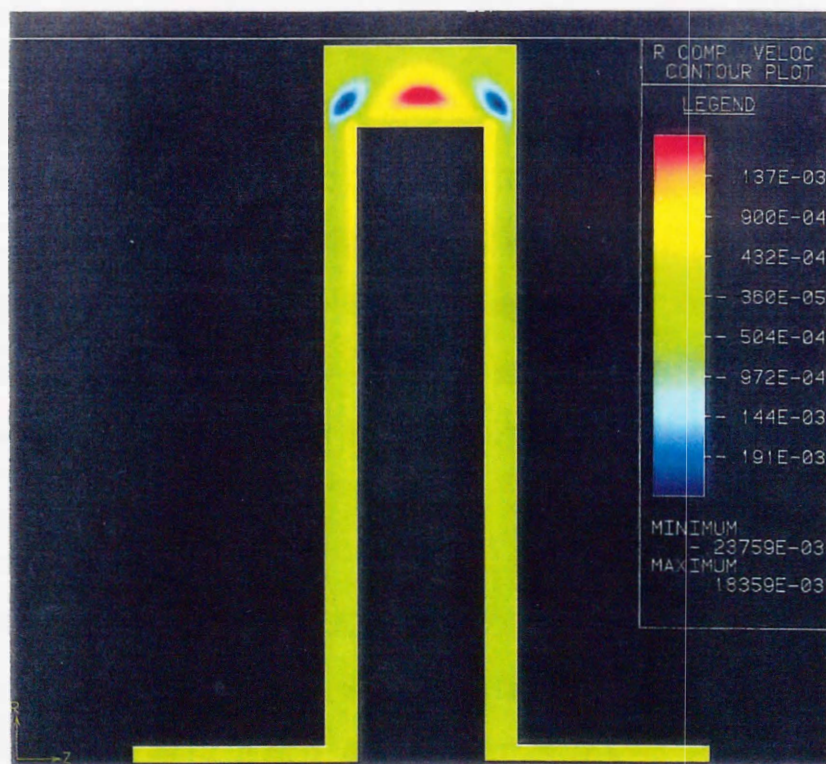
間隔が比較的狭く、電場強度が大きくずり速度が小さい領域で数値解析の結果が実験結果より小さくなる。

この原因についてはいろいろ考えられるが、はじめに二次流れの影響の面から数値解析の結果を用いて検討する。 $E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$ における半径方向流速成分を円板外周速度に対する比で表した流速の等高線図を図 4.35 に示す。これは図 3.11 に示した流速の等高線図に対応している。 $\omega=0.628\text{ rad/s}$ (図 4.35(a)) の場合、回転円板外端近くの円板面側の半径方向の相対流速は 0.2×10^{-5} [-] 程度であり、 $\omega=6.28\text{ rad/s}$ (図 4.35(b)) の場合は 0.1×10^{-3} [-] 程度である。回転円板電極間の半径方向流速は、角速度の小さい $\omega=0.628\text{ rad/s}$ の方が角速度の大きい $\omega=6.28\text{ rad/s}$ より 2 桁小さい。これは角速度の小さい方が電極間の二次流れの影響が小さいことを示している。しかし、半径方向流速成分は流速に対して非常に小さいので、角速度が小さい領域で、実験結果のトルクが数値予測より大きくなる原因が二次流れであることは考えにくい。

もう一つの原因は、回転円板表面での速度勾配の数値の妥当性である。回転円板表面近くの格子をさらに細かくすることで、速度勾配が大きくなることが考えられる。速度勾配が大きくなると、その速度勾配の微小領域に作用するずり応力が大きくなり、回転円板に作用するトルクは大きくなるからである。図 3.12 と図 3.13 において、回転数の低い $\omega=0.63\text{rad/s}$ の場合の回転円板付近の速度勾配をみると、 $r/R_d=0.3$ および 0.5 で変化が大きく、 $r/R_d=0.7$ および 0.9 では変化が小さい。 $r/R_d=0.7$ および 0.9 では、格子をさらに細かくしても速度勾配はあまり変化しないことが予想できる。一方、 $r/R_d=0.3$ および 0.5 では、格子をさらに細かくすることで、速度勾配が少し大きくなることが予想できる。スメクタイト型 ER 流体の流動曲線は、電場強度が大きい場合、ずり速度の小さい領域でずり速度の増加に対して急激に増加するので、格子をさらに細かくすることで、 r/R_d の値の小



(a) $E=2.00\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $\omega = 0.628\text{rad/s}$



(b) $E=2.0\text{kV/mm}$, $\delta_d=2.0\text{mm}$, $\omega = 6.28\text{ rad/s}$

図 4.35 円板外周速度に対する半径方向流速等高線図(SER15C)

さい領域で円板に作用するずり応力が大きくなると考えられる。しかしながら、この領域の半径が小さいので、格子を細かくすることで回転円板に作用するトルクが大幅に増加するとは考えにくい。

次に、濃度の低い SER10B の場合について、 $\delta_c=2.12\text{mm}$ の回転円筒型デバイスの流動曲線を用いた場合を検討する。図 4.36 は数値解析による回転円板に作用する定常トルクと実験結果の比較である。角速度の大きい領域を除いて、定量的・定性的に一致することが分かる。角速度の大きい領域では、数値解析によるトルクは実験結果より大きめに予測する。 $E=0.50\text{kV/mm}$ および 1.00kV/mm の場合、実験結果では角速度の小さい領域で角速度の増加に対してトルクは急激な増加を示すが、数値解析ではその傾向を示すがトルクの増加の割合は小さい。

角速度の大きい領域で数値解析と実験結果が一致しないことは、流動曲線と回転円板の実験結果の比較から分かる。流動曲線におけるずり応力は、ずり速度の大きい領域でずり速度の増加に対して増加していくのに対して(図 3.7 参照)、回転円板のトルク特性は、角速度(ずり速度)の大きい領域で角速度の増加に対して減少していく傾向にあるからである。すなわち、ずり速度の大きい領域において、回転円筒のずり応力と回転円板のトルク特性が異なっていることによる。

以上の結果から、構成方程式は濃度の高い ER 流体の場合は、電場強度が大きくずり速度の小さい領域では、トルクを過小評価し、実際の流動特性を正確に予測することができないことが分かった。ただし、これは安全側の予測値である。一方、濃度の低い ER 流体の場合は、ずり速度の大きい領域でやや過大評価することが分かった。それぞれの濃度に対して、特定の領域を除けば ER 流体中で回転する

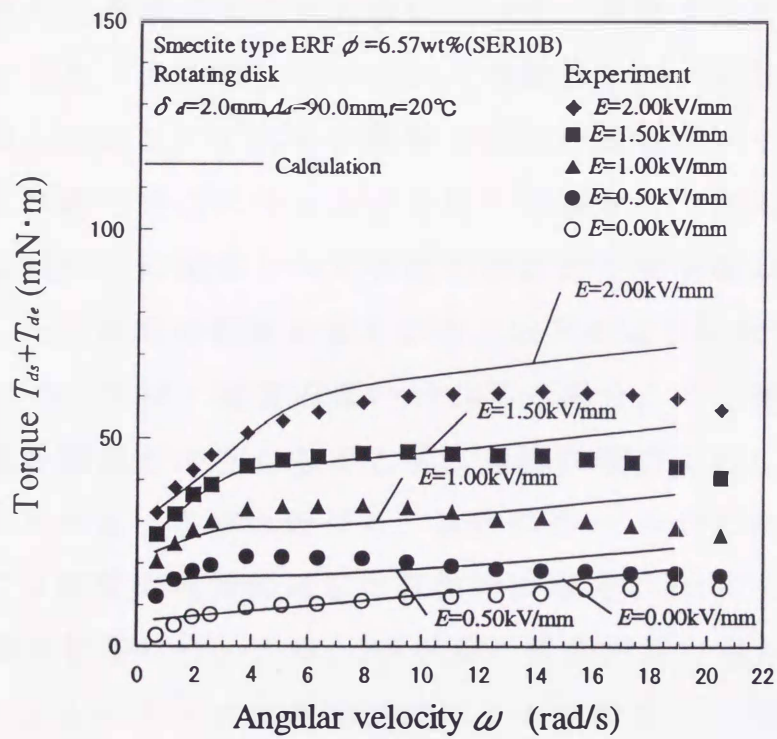


図 4.36 定常トルク特性の数値解析と実験結果の比較
 (SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}$)

円板の定常トルク特性は，回転円板の電極間隔と同じ電極間隔の回転円筒型デバイスによる流動曲線にもとづく ER 流体の構成方程式を用いて，数値解析によって十分な精度で理論的に予測することができることが分かった。

4.11 結言

回転円板型デバイスのトルクと電流密度にずり速度や電場強度，電極間隔，濃度，温度が及ぼす影響について，実験データにもとづいて明らかにした。さらに，モーメント係数とトルク増加に対する消費電力を明らかにし，これらの特性を回転円筒型デバイスと比較した。また，実験で得られたトルク特性を数値解析の結果と比較・検討して，回転円板の定常トルク特性の理論的予測手法の有効性について検証した。本章の結論をまとめると以下のようなになる。

- (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電場強度が大きくなるとずり速度の増加に対して急激に増加して，その後一定値に近づく。温度の高い $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合は，トルクはずり速度の増加に対して直線的に増加する。
- (2)電極間隔の影響については，ER 流体の濃度が高い場合，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，電極間隔が広い方が大きい。しかし，濃度の低い場合は回転円筒型デバイスの場合と同様に電極間隔の影響は無視できる。
- (3)トルクの増加は，ずり速度がおおきくなるにつれ $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ は E^2/T_{d0} と比例関係に近づくが，ずり速度がさらに大きくなると濃度が高く $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合，比例関係がくずれる。また， E^2/D_d の小さい領域では， $\Delta T_{ds}/T_{d0} \propto E^2/D_d$ に近い関係にある。さらに， E^2/D_d の大きい領域では， $\Delta T_{ds}/T_{d0}$ と E^2/D_d は一定関係になく，電場ごとに異なる。
- (4)トルクの増加は，体積濃度の増加に対して比例関係にない。
- (5)電流密度は，電極間隔の影響を受け，電極間隔が広い方が少し大

- 大きく、ずり速度の増加につれ減少する。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。
- (6)電流密度は、ずり速度の大きい領域でおおよそ電場の 3 乗に比例して増加する。
- (7)電流密度は、体積濃度が低い方が電流密度が大きい。
- (8)モーメント係数は、 $t=40^{\circ}\text{C}$ の方が $t=20^{\circ}\text{C}$ より大きい。
- (9)トルク増加に対する消費電力は、 $t=20^{\circ}\text{C}$ の場合、角速度の増加に対して、角速度の小さい領域で減少しその後は緩やかに減少するか一定に近い。濃度が高く $t=40^{\circ}\text{C}$ の場合、トルク増加に対する消費電力は、電場強度が大きくなるにつれ角速度の増加に対して減少の割合が大きい。
- (10)回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスでは、電流密度の特性が異なり、回転円筒型では電極間隔の影響が無視できるが、回転円板型では電極間隔が広い方が少し大きい。
- (11) 濃度の高い ER 流体の場合、力学応答系モデルにもとづく ER の流体構成方程式を回転円板まわりの流れ場に適用するとき、その方程式中の定数を定める流動曲線を求める回転円筒型デバイスの電極間隔は、回転円板の場合と一致させる必要がある。
- (12) 濃度の高い ER 流体中の回転円板の定常トルク特性は、ER 流体の構成方程式を用いた数値解析により、電極間隔が狭く電場強度が大きく角速度が小さい領域を除いて、定量および定性的に予測することができる。
- (13) 濃度の低い ER 流体中の回転円板の定常トルク特性は、ER 流体の構成方程式を用いた数値解析により、ずり速度の大きい領域を除いて、定量および定性的に予測することができる。

第 5 章 ER 流体の応答特性

5.1 緒言

前章までは、定常特性について述べたが、実際に回転型デバイスの使用を考えた場合、定常特性に加えて応答特性も把握しておかねばならない。そのためには、それぞれの回転型デバイスにおける ER 流体の応答特性を知る必要がある。すなわち、デバイスの出力であるトルクの立ち上がり時間や時間的变化などを知る必要がある。また、デバイスの入力である電流密度の特性も同様に調べる必要がある。

これまでの研究は同心二重円筒型粘度計によるものが多いが、回転円板型デバイスによる報告は少なく、回転円筒型デバイスと同様の特性を有するかどうかについては定かでない。二つのデバイスでは ER 流体の応答特性が異なることが予想される。その理由は、応答時間がクラスター形成に要する時間と同等であると見なされていることから⁽²⁹⁾、流れ場が異なるとクラスター形成形態が異なると考えられるからである。

そこで、本章では回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおける ER 流体のトルクと電流の応答特性について実験的に調べる。すなわち、回転数は一定に保持したままの状態でのステップ状電場印加に対する、それぞれのデバイスにおけるトルクと電流密度の応答特性を調べる。また、二つのデバイスにおける ER 流体の応答特性を比較して、デバイス選択のための指針を得る。

5.2 実験条件

実験に使用した回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスは第 2 章と第 4 章で説明したものと同一のものである。使用したスメクタイト型 ER 流体は SER15D(表 2.2 参照)である。印加電場の大きさは $E=0$

~2.00kV/mm とし、回転円筒型デバイスの電極間隔は $\delta_c=2.12\text{mm}$ 、回転円板型デバイスの電極間隔は $\delta_d=2.0\text{mm}$ である。また、それぞれのデバイスの回転円筒と回転円板の回転数は、 $n=0.01\sim 3.00\text{ s}^{-1}$ (0.6~180rpm)の範囲で行った。

回転円筒型デバイスにステップ状電場($E=2.00\text{kV/mm}$)を印加したときの電圧、トルク、電流および回転数(角速度)の時間的変化を図 5.1 に示す。回転数は $n=1.0\text{s}^{-1}$ である。このときの電源装置(トック・ジャパン製, MODEL610-C-SERIAL-970)の出力電圧の印加後定常電圧の 95%になるまでの時間は、24ms であった。また、回転円板型デバイスにステップ状電場を印加したときの($E=2.00\text{kV/mm}$, $n=1.0\text{s}^{-1}$)、電圧、トルク、電流および回転数(角速度)の時間的変化を図 5.2 に示す。このときの電源装置(トック・ジャパン製, MODEL610-C-SERIAL-607)の出力電圧の印加後定常電圧の 95%になるまでの時間は、16ms であった。回転円筒と回転円板はサーボモータにより回転させられているので、電場印加前後で回転数に変化が起こらないことが図 5.1 と図 5.2 から確認できる。

5.3 回転円筒型デバイスにおける応答特性

回転円筒型デバイスにおける ER 流体の応答時間の一覧を表 5.1 に示す。トルクの変化については、 $\Delta T_c/\Delta T_{cs}=0.5, 0.8, 0.95, 1.05$ を、電流変化については、 $i/i_s=0.8, 0.95$ および 1.05 となる時間 τ を示してある。ここで、 $\Delta T_c = T_c - T_{cm0}$ 、 $\Delta T_{cs} = T_{cm} - T_{cm0}$ であり、 T_c は電場印加後の各時間における計測トルク、 T_{cm0} は無電場での計測トルク、 T_{cm} は電場印加時の計測トルクの定常値である。また、 i は電場印加後の各時間における電流密度、 i_s は電流密度の定常値である。

図 5.3 は $E=1.00$ および 2.00kV/mm のときの回転円筒型デバイスのトルクがそれぞれ $\Delta T_c/\Delta T_{cs}=0.5, 0.8$ および 0.95 となるまでの応答

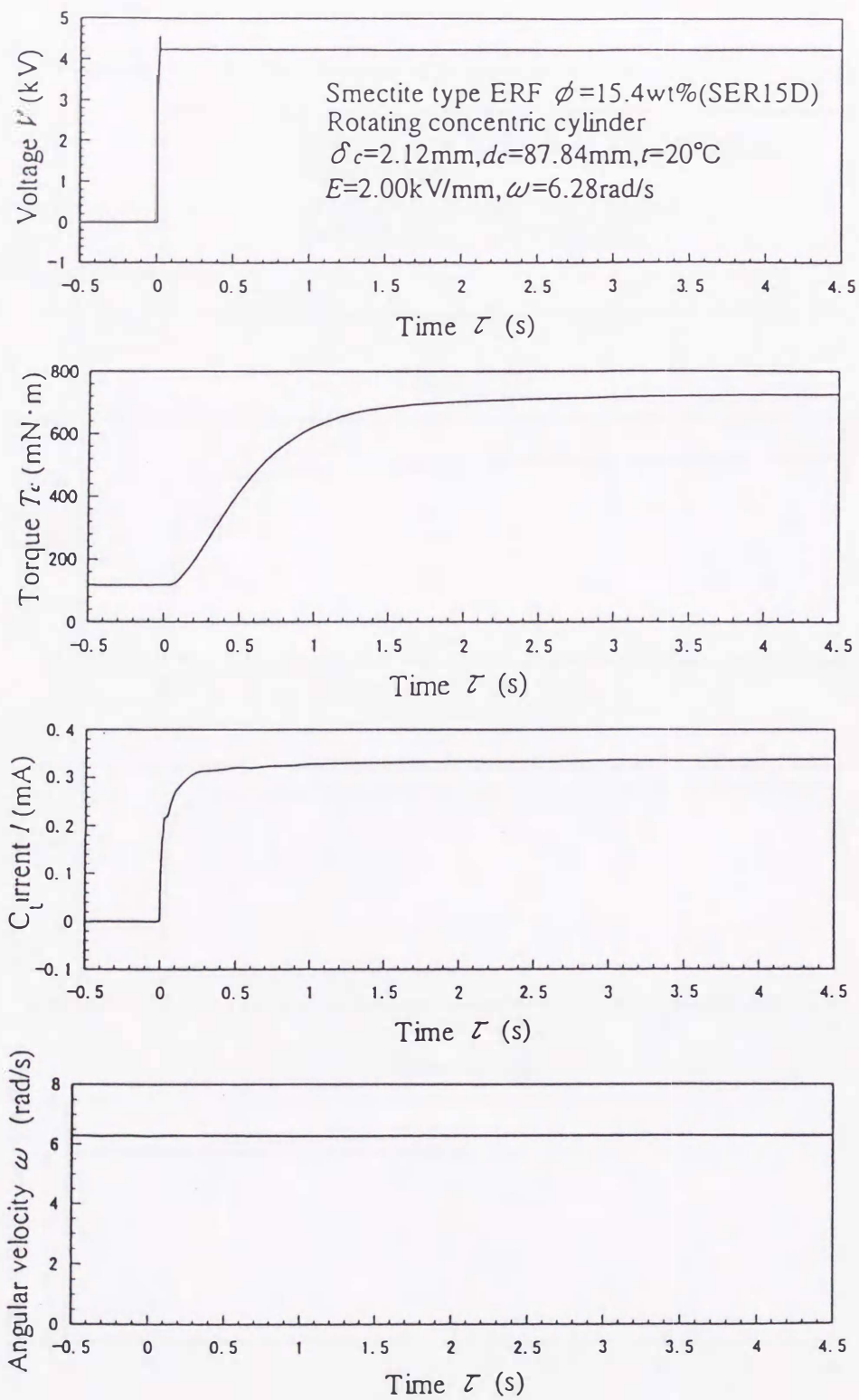


図 5.1 回転円筒型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の応答特性($E=2.00\text{kV/mm}, n=1.0\text{s}^{-1}$)

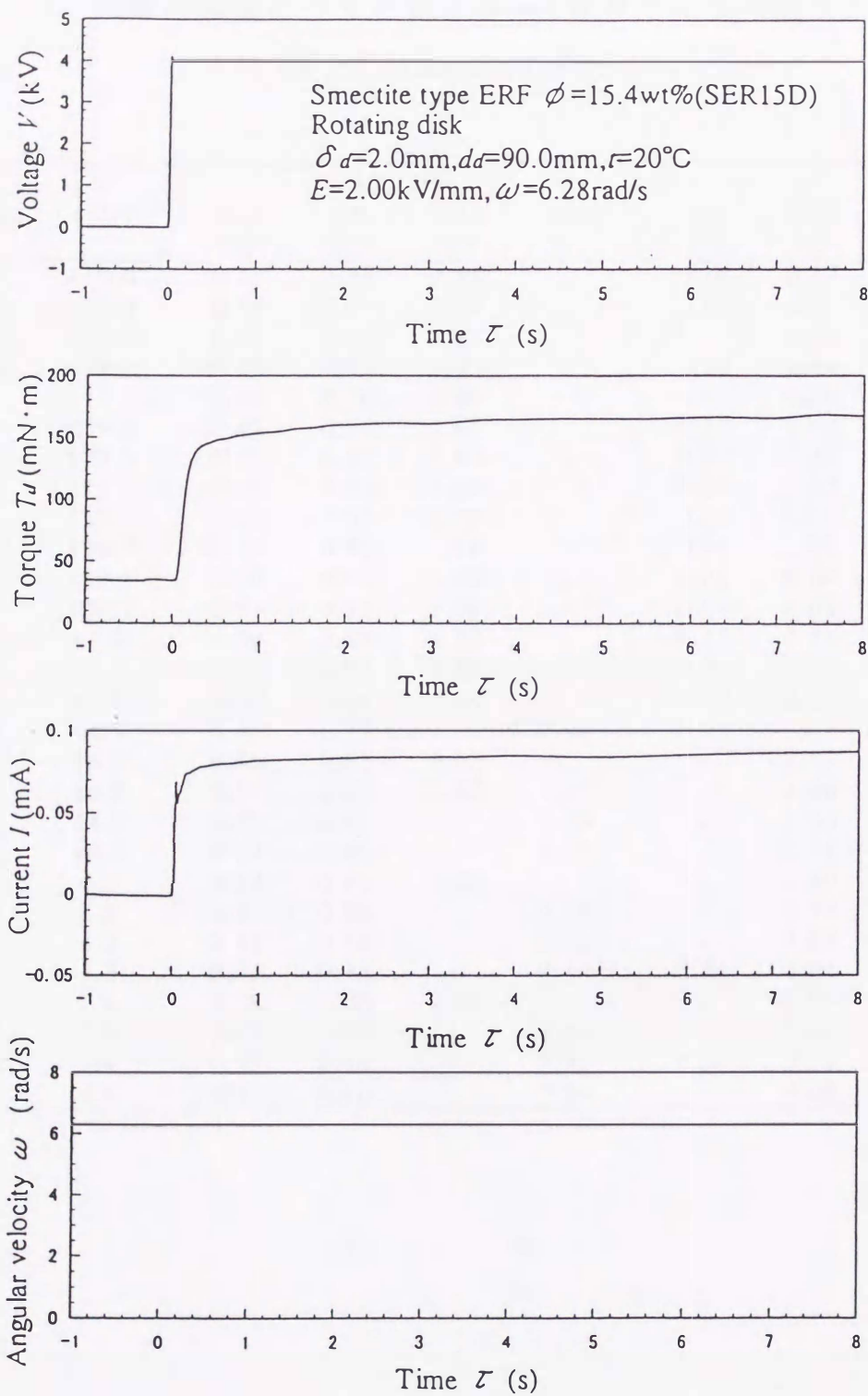
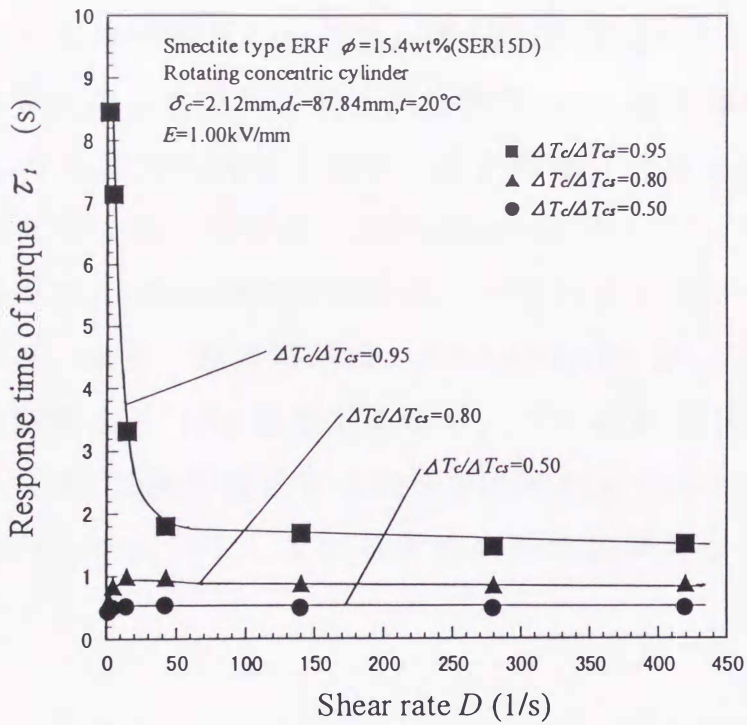


図 5.2 回転円板型デバイスにステップ状電場を印加したときの
 トルクと電流の応答特性($E=2.00\text{kV/mm}, n=1.0\text{s}^{-1}$)

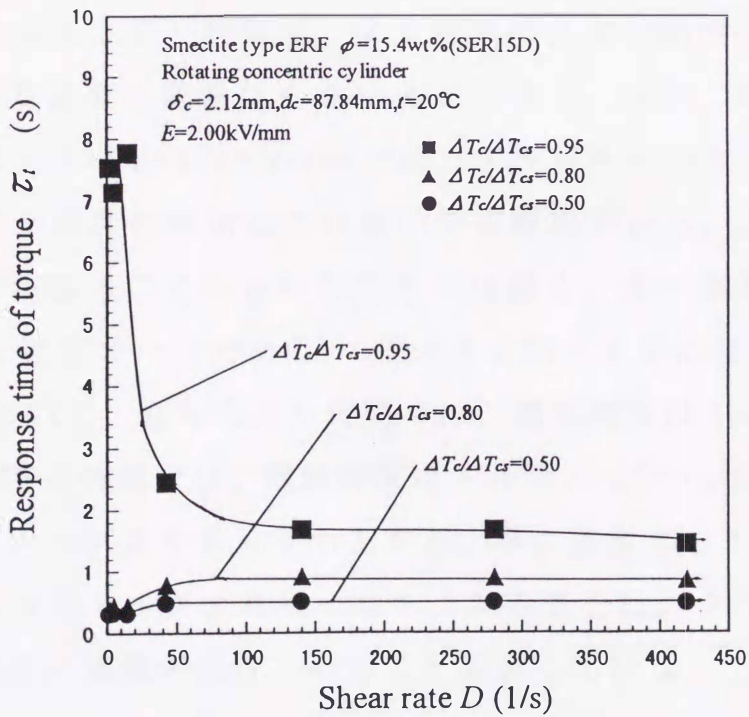
表 5.1 回転円筒型デバイスによる ER 流体の応答時間データ

($\delta_c=2.12\text{mm}$,SER15D)

| E (kV/mm) | D (1/s) | $\Delta T_c / \Delta T_{c_s}$ | | | | i/i_s | | |
|----------------|--------------|-------------------------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| | | 0.5 (s) | 0.8 (s) | 0.95 (s) | 1.05 (s) | 0.8 (s) | 0.95 (s) | 1.05 (s) |
| 0.5 | 419.0 | 0.47 | 0.97 | 2.28 | - | 0.10 | 0.17 | - |
| 1.0 | 419.0 | 0.49 | 0.89 | 1.52 | - | 0.08 | 0.21 | - |
| 1.5 | 419.0 | 0.48 | 0.86 | 1.53 | - | - | 0.43 | - |
| 2.0 | 419.0 | 0.48 | 0.86 | 1.45 | - | 0.09 | 0.64 | - |
| 0.5 | 279.3 | 0.46 | 0.70 | 0.88 | - | 0.11 | 0.20 | - |
| 1.0 | 279.3 | 0.48 | 0.86 | 1.48 | - | 0.10 | 0.43 | - |
| 1.5 | 279.3 | 0.48 | 0.87 | 1.61 | - | 0.07 | 0.49 | - |
| 2.0 | 279.3 | 0.49 | 0.90 | 1.68 | - | 0.09 | 0.65 | - |
| 0.5 | 139.7 | 0.51 | 1.00 | 1.79 | - | 0.13 | 0.31 | - |
| 1.0 | 139.7 | 0.49 | 0.89 | 1.69 | - | 0.11 | 0.62 | - |
| 1.5 | 139.7 | 0.50 | 0.92 | 1.79 | - | 0.09 | 0.64 | - |
| 2.0 | 139.7 | 0.51 | 0.92 | 1.68 | - | 0.09 | 0.64 | - |
| 0.5 | 41.9 | 0.50 | 0.89 | 1.73 | - | 0.15 | 0.56 | - |
| 1.0 | 41.9 | 0.54 | 0.99 | 1.81 | - | 0.14 | 1.01 | - |
| 1.5 | 41.9 | 0.53 | 0.94 | 1.58 | - | 0.12 | 0.70 | - |
| 2.0 | 41.9 | 0.48 | 0.79 | - | 2.46 | 0.09 | - | 1.89 |
| 0.5 | 14.0 | 0.46 | 0.82 | 1.63 | - | - | 1.55 | - |
| 1.0 | 14.0 | 0.51 | 1.01 | 3.33 | - | - | 1.80 | - |
| 1.5 | 14.0 | 0.43 | 0.67 | - | 7.73 | - | 1.16 | - |
| 2.0 | 14.0 | 0.32 | 0.45 | - | 7.77 | - | 3.14 | - |
| 0.5 | 4.2 | 0.52 | 0.95 | 1.66 | - | - | 2.40 | - |
| 1.0 | 4.2 | 0.50 | 0.86 | - | 7.15 | - | 2.54 | - |
| 1.5 | 4.2 | 0.36 | 0.52 | - | 7.73 | - | 4.62 | - |
| 2.0 | 4.2 | 0.33 | 0.45 | - | 7.14 | 0.44 | 4.64 | - |
| 0.5 | 1.4 | 0.58 | 1.05 | 2.58 | - | - | 2.97 | - |
| 1.0 | 1.4 | 0.43 | 0.63 | - | 8.46 | - | 5.47 | - |
| 1.5 | 1.4 | 0.33 | 0.44 | - | 7.95 | 0.31 | 5.15 | - |
| 2.0 | 1.4 | 0.31 | 0.40 | - | 7.54 | - | 4.68 | - |



(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合



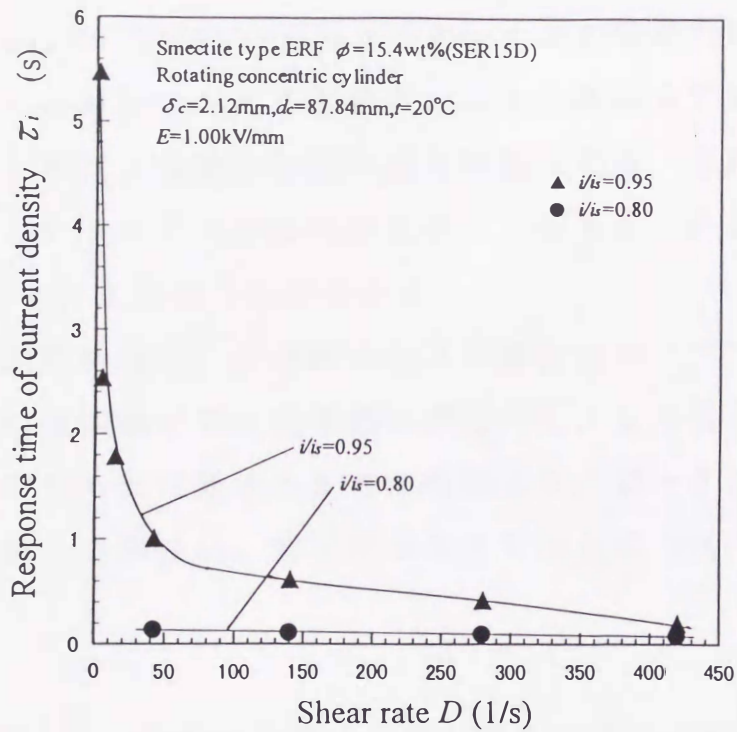
(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.3 回転円筒型デバイスのトルクの立ち上がり時間と安定時間

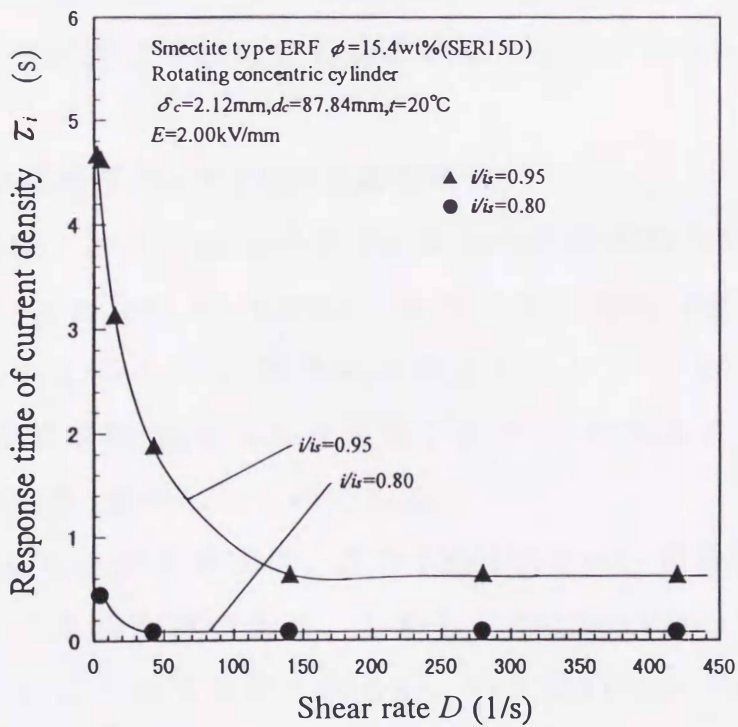
時間を示したものである。ここで、電場印加後定常トルクの 95% あるいは 105% になるまでの時間を整定時間 τ_{st} 、電場印加後定常トルクの 80% になるまでの時間を立ち上がり時間と定義する。

トルクの立ち上がり時間は、 $D > 100(1/s)$ において、電場強度、ずり速度に関係なく 0.9s 程度であるが、小さいずり速度の領域では僅かに早くなる。また、整定時間は、 $D > 100(1/s)$ において、電場強度、ずり速度に関係なく 1.6s 程度であるが、ずり速度の小さい領域では非常に遅くなる。これは後述する図 5.5 に示すようにトルクの時間的変化がオーバーシュートしているために整定に時間がかかるためである。

この場合の電流密度の立ち上がり時間(電場印加後定常電流密度の 80% になるまでの時間)と整定時間(電場印加後定常電流密度の 95% あるいは 105% になるまでの時間) τ_{si} を示したのが、図 5.4 である。電流密度の立ち上がり時間は、ずり速度の小さい領域を除いて、電場強度、ずり速度に関係なく 0.1s 程度である。また、整定時間は、電場強度が小さい $E=1.00kV/mm$ では、ずり速度の小さいところでは遅いが、ずり速度の増加につれ早くなる傾向がある。 $E=2.00kV/mm$ では、ずり速度のごく小さいところでは遅く、ずり速度の大きい領域では 0.6s 程度で一定である。図 5.3 と図 5.4 を比較すると、 $D > 100(1/s)$ において、立ち上がり時間では、電流密度はトルクの 1/9 程度である。整定時間では、電流密度はトルクの 1/7~1/3 程度である。電流密度がトルクより早く立ち上がり、早く整定することが分かる。電流密度の方がトルクより早く立ち上がることは、クラスターが形成される以前に電流が流れていることを表している。このことから、電場印加直後、スメクタイト粒子によって電荷が運ばれていると考えることができる。



(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合



(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.4 回転円筒型デバイスの電流密度の立ち上がり時間と整定時間

図 5.5 は $E=1.00, 2.00\text{kV/mm}$ のときのトルクの時間的変化を示す。縦軸はトルクの増加分を定常状態のトルクの増加分で無次元化したものであり、横軸は電場印加後の経過時間である。また、同図では各角速度ごとのトルクの時間的変化を示してあるが、そのときのずり速度は式(2.12)で求めることができる。

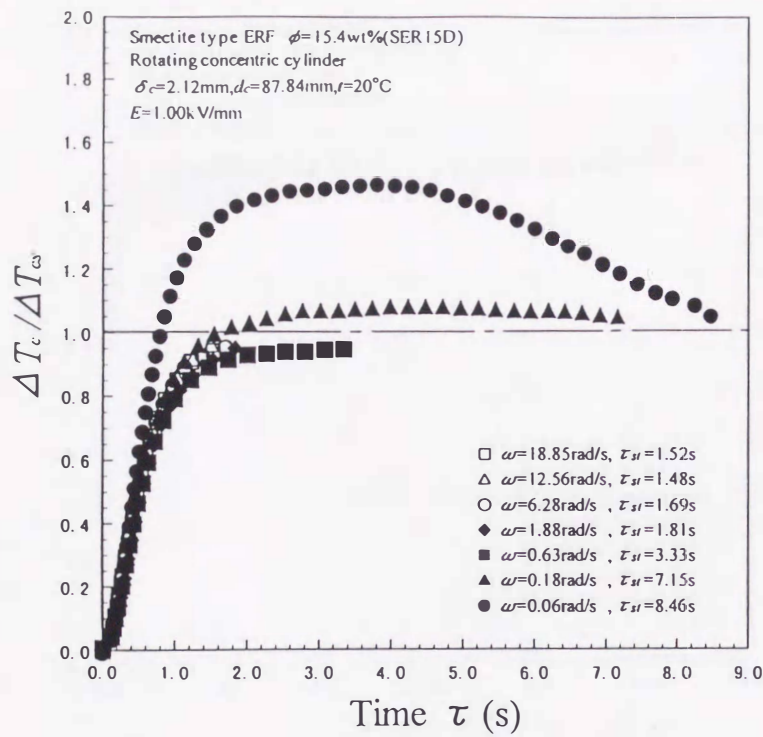
トルクの応答特性は、角速度が小さい場合はオーバーシュートしており、その後振動せずに定常値に漸近する。この場合、電場印加からトルクがピークに達するまでの時間より、ピークから定常になるまでの時間の方が長い。角速度が大きくなるにつれ二次の応答特性に近づく。

また、図 5.6 はこの場合の電流密度の時間的変化を示す。縦軸は電流密度を定常状態の電流密度で無次元化したものであり、横軸は電場印加後の経過時間である。電流密度の時間的変化は、角速度が大きくなるとほぼ同じ形状の応答曲線に近づいていく。

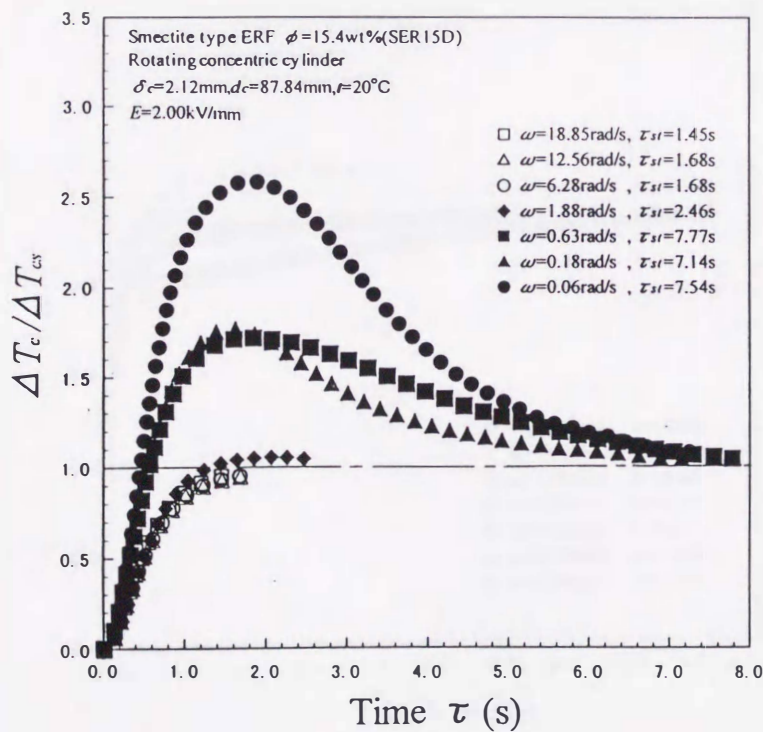
5.4 回転円板型デバイスにおける応答特性

回転円板型デバイスにおける ER 流体の応答時間のデータを表 5.2 に示す。図 5.7 は $E=1.00, 2.00\text{kV/mm}$ のときの回転円板型デバイスのトルクの立ち上がり時間(電場印加後定常トルクの 80%になるまでの時間)と整定時間(電場印加後定常トルクの 95%あるいは 105%になるまでの時間)を示したものである。

トルクの立ち上がり時間は、 $D_d > 100(1/s)$ では、電場強度、ずり速度に関係なく 0.2s 程度である。しかし、 $E=1.00\text{kV/mm}$ ではずり速度のごく小さいところでは遅くなるが、 $E=2.00\text{kV/mm}$ では僅かに早くなる。トルクの整定時間は、 $E=1.00\text{kV/mm}$ では、 $D_d > 100(1/s)$ で 1.5s 程度である。 $E=2.00\text{kV/mm}$ では、ずり速度の増加につれ早くなり、ずり速度の大きいところでは 1.0s 程度になる。逆にずり速度のごく

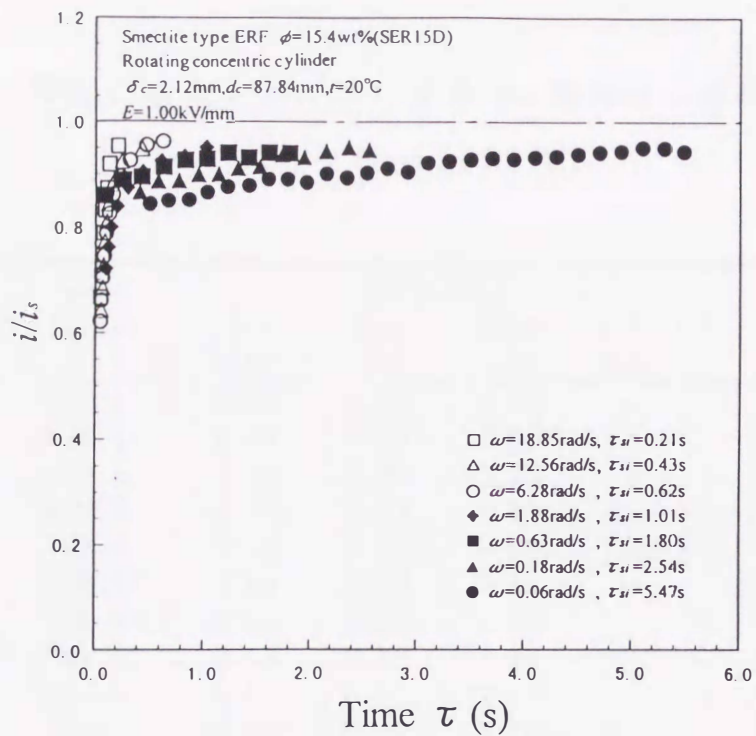


(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合

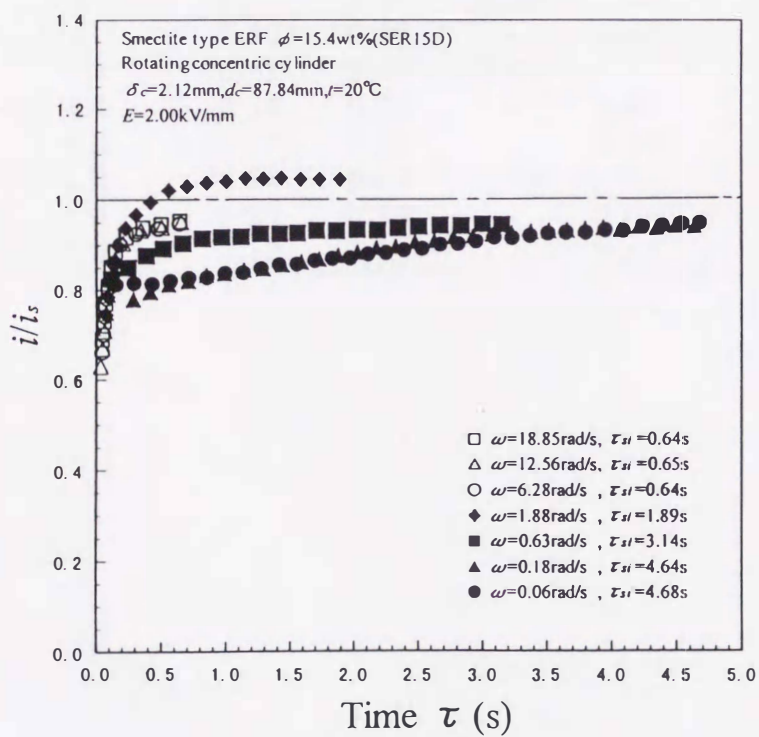


(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.5 回転円筒型デバイスのトルクの時間的变化



(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合



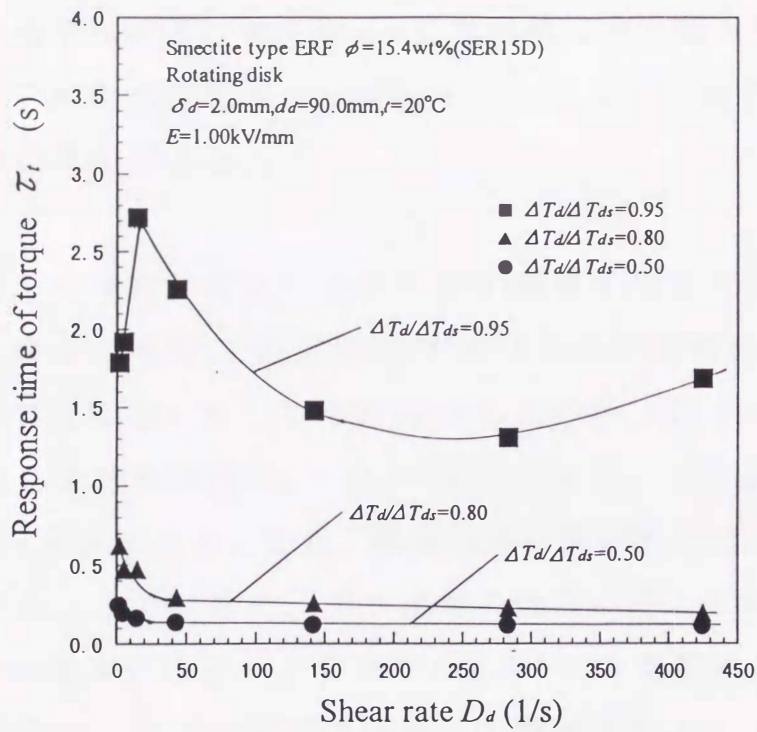
(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.6 回転円筒型デバイスの電流密度の時間的变化

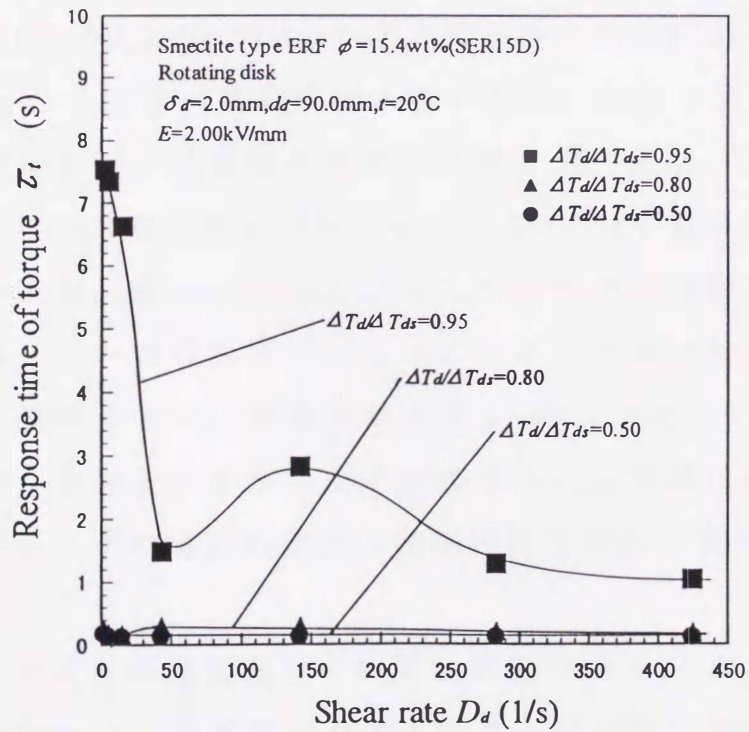
表 5.2 回転円板型デバイスによる ER 流体の応答時間データ

($\delta_d=2.0\text{mm}$,SER15D)

| E (kV/mm) | D_d (1/s) | $\Delta T_d / \Delta T_{ds}$ | | | | i/i_s | |
|----------------|----------------|------------------------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | | 0.5 (s) | 0.8 (s) | 0.95 (s) | 1.05 (s) | 0.8 (s) | 0.95 (s) |
| 1.0 | 424.1 | 0.11 | 0.20 | 1.69 | - | 0.14 | 0.48 |
| 1.5 | 424.1 | 0.12 | 0.19 | 0.96 | - | 0.09 | 0.43 |
| 2.0 | 424.1 | 0.12 | 0.20 | 1.05 | - | 0.10 | 0.62 |
| 1.0 | 282.7 | 0.12 | 0.23 | 1.31 | - | 0.20 | 0.95 |
| 1.5 | 282.7 | 0.12 | 0.22 | 0.99 | - | 0.11 | 0.66 |
| 2.0 | 282.7 | 0.13 | 0.22 | 1.29 | - | 0.11 | 0.80 |
| 1.0 | 141.4 | 0.12 | 0.26 | 1.48 | - | 0.21 | 1.09 |
| 1.5 | 141.4 | 0.13 | 0.29 | 2.27 | - | 0.14 | 1.19 |
| 2.0 | 141.4 | 0.13 | 0.31 | 2.83 | - | 0.13 | 1.67 |
| 1.0 | 42.4 | 0.14 | 0.30 | 2.26 | - | 0.23 | 1.21 |
| 1.5 | 42.4 | 0.14 | 0.31 | 1.03 | - | 0.21 | 1.18 |
| 2.0 | 42.4 | 0.14 | 0.31 | 1.49 | - | 0.19 | 0.94 |
| 1.0 | 14.1 | 0.16 | 0.48 | 2.72 | - | 0.39 | 2.16 |
| 1.5 | 14.1 | 0.15 | 0.45 | 2.38 | - | 0.35 | 1.77 |
| 2.0 | 14.1 | 0.13 | 0.19 | - | 6.63 | 0.95 | 5.53 |
| 1.0 | 4.2 | 0.19 | 0.47 | 1.92 | - | 0.22 | 2.17 |
| 1.5 | 4.2 | 0.18 | 0.34 | - | 6.62 | 1.05 | 5.42 |
| 2.0 | 4.2 | 0.15 | 0.21 | - | 7.35 | 1.66 | 5.55 |
| 1.0 | 1.4 | 0.24 | 0.63 | 1.79 | - | 0.27 | 2.38 |
| 1.5 | 1.4 | 0.21 | 0.34 | - | 7.05 | 0.31 | 5.37 |
| 2.0 | 1.4 | 0.18 | 0.25 | - | 7.53 | 0.34 | 6.13 |



(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合



(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

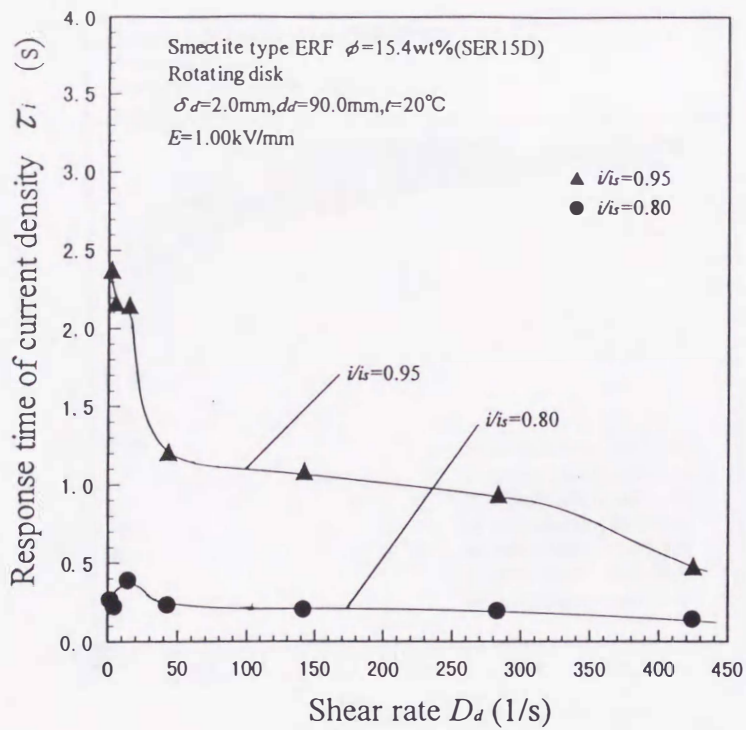
図 5.7 回転円板型デバイスのトルクの立ち上がり時間と整定時間

小さいところでは非常に遅くなる。これは後述する図 5.9 に示すように、トルクの時間的変化がオーバーシュートしているために整定に時間がかかるためである。

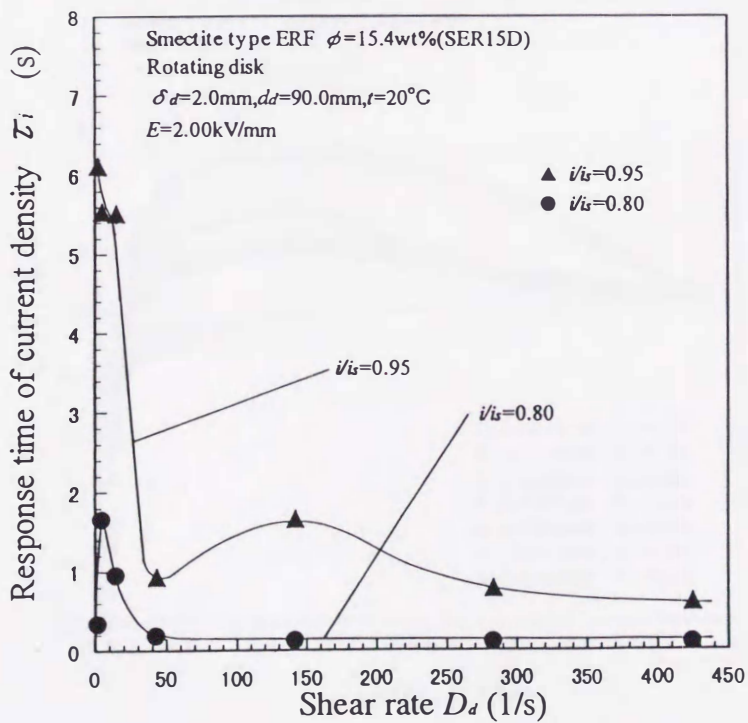
この場合の電流密度の立ち上がり時間(電場印加後定常電流密度の 80%になるまでの時間)と整定時間(電場印加後定常電流密度の 95%あるいは 105%になるまでの時間)を示したのが、図 5.8 である。電流密度の立ち上がり時間は、 $D_d > 100(1/s)$ では、ずり速度に関係せず 0.1~0.2 s 程度である。また、電流密度の整定時間は、ずり速度のごく小さいところでは遅く、ずり速度の増加に対して早くなる傾向があり、ずり速度の大きいところでは 0.4~0.6s 程度になる。トルクと電流密度の立ち上がり時間を比べると同程度である。整定時間を比べると電流密度の方がトルクの 1/2 程度早い。

図 5.9 は $E=1.00, 2.00\text{kV/mm}$ のときのトルクの時間的変化を示す。 $E=1.00\text{kV/mm}$ のとき、角速度が小さい場合、立ち上がりの勾配がやや緩やかであるが、角速度が大きくなると立ち上がり之急になり、ほぼ同じ形状の応答特性を示している。 $E=2.00\text{kV/mm}$ のとき、角速度が小さい場合、オーバーシュートして、その後振動せずに定常値に漸近する。これは円筒型デバイスの場合と同様であるが、オーバーシュート量は小さい。角速度が大きくなるにつれ一定の応答特性に近づくが、立ち上がり之急でその後徐々に定常値に近づく特性を示す。このトルクの時間的変化は回転円筒の場合と異なる。

また、このときの電流密度の時間的変化を図 5.10 に示す。電流密度の時間的変化は、角速度が大きくなるとほぼ同じ形状の応答特性に近づいていく。この電流密度の時間的変化は回転円筒の場合とよく似ている。

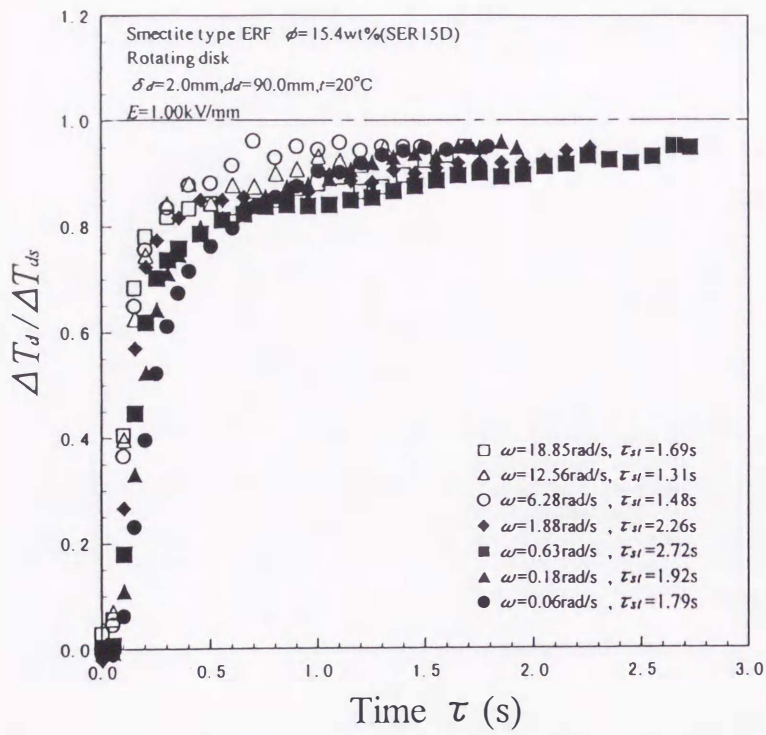


(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合

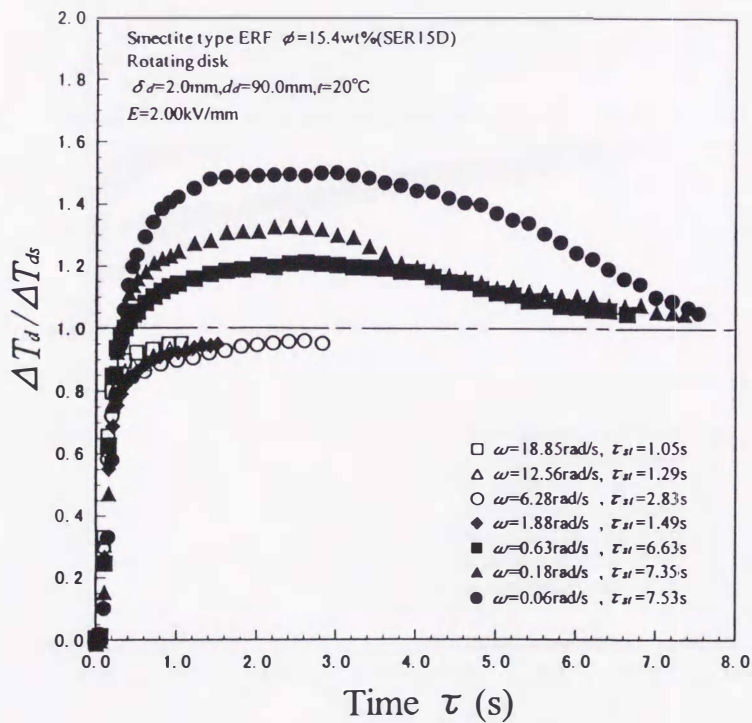


(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.8 回転円板型デバイスの電流密度の立ち上がり時間と整定時間

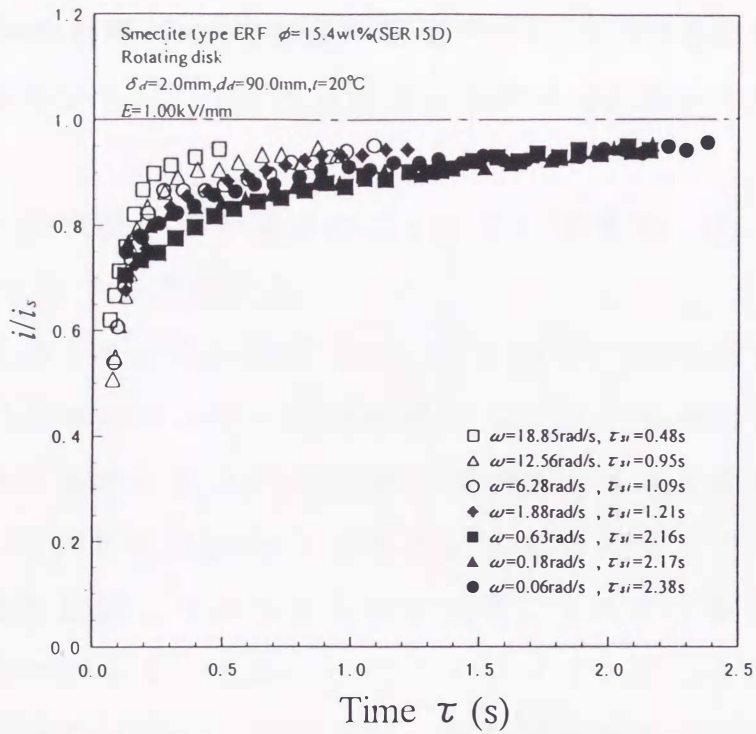


(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合

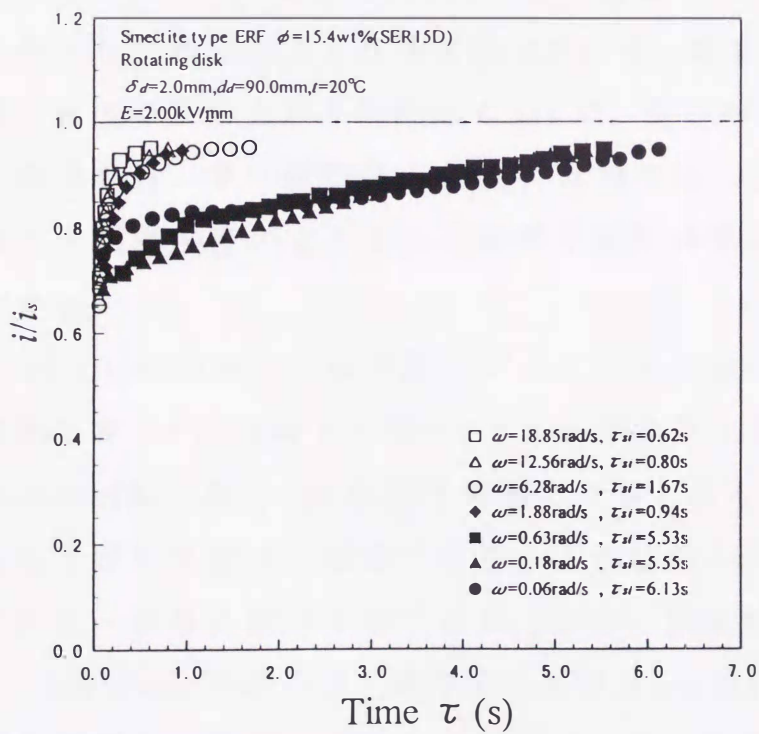


(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.9 回転円板型デバイスのトルクの時間的变化



(a) $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合



(b) $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合

図 5.10 回転円板型デバイスの電流密度の時間的变化

5.5 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおける応答特性の比較

以上の結果から、二つのデバイスにおける ER 流体の応答特性を比較する。

まず、応答時間をずり速度のごく小さい領域($D, D_d \approx 0$)と $D, D_d > 100(1/s)$ に分けて考察する。

ずり速度のごく小さい領域では、ずり速度が 0 に近づくにつれ、二つのデバイスのトルクと電流密度の立ち上がり時間や整定時間が近づく傾向にある。図 5.11 は回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおいて、 $E=1.50\text{kV/mm}$, $n=0.01\text{s}^{-1}$ の場合のトルクと電流密度の時間的変化を比較して示したものである。トルクと電流密度の時間的変化に違いがある。しかし、二つのデバイスにおける立ち上がり時間と整定時間は近い。すなわち、回転円筒型デバイスのトルクの立ち上がり時間は 0.44s で、整定時間は 7.95s である。電流密度の立ち上がり時間は 0.31s で、整定時間は 5.15s である。一方、回転円板型デバイスのトルクの立ち上がり時間は 0.34s で、整定時間は 7.05s である。電流密度の立ち上がり時間は 0.31s で、整定時間は 5.37s である。この結果から、ずり速度が 0 に近い状態では、二つのデバイスでのトルクと電流密度の立ち上がり時間や整定時間が一致することが予想できる。

$D, D_d > 100(1/s)$ の場合の回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの応答時間を表 5.3 に比較して示す。トルクの立ち上がり時間は、回転円板の方が回転円筒の $1/4$ 程度の時間で立ち上がる。しかし、電流密度の立ち上がり時間は同程度である。この結果から、回転円板の方がクラスターが早く形成することが分かる。整定時間では、トルクは、 $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合は、同程度であるが、 $E \geq 1.50\text{kV/mm}$ の場合は、ずり速度の比較的小さいところでは、回転円板が回転円筒より遅いが、ずり速度が大きくなると速くなる。電流密度の方は $E=1.00\text{kV/mm}$ の場合、回転円板の方が 2 倍程度遅く、 $E \geq 1.50\text{kV/mm}$

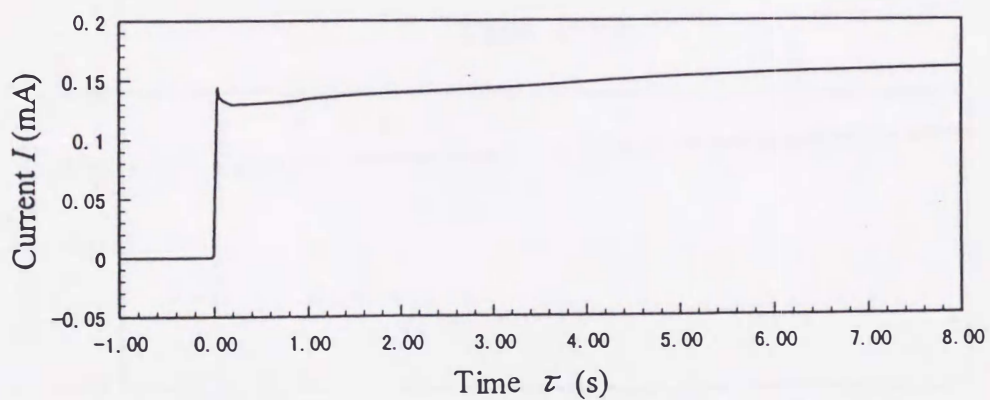
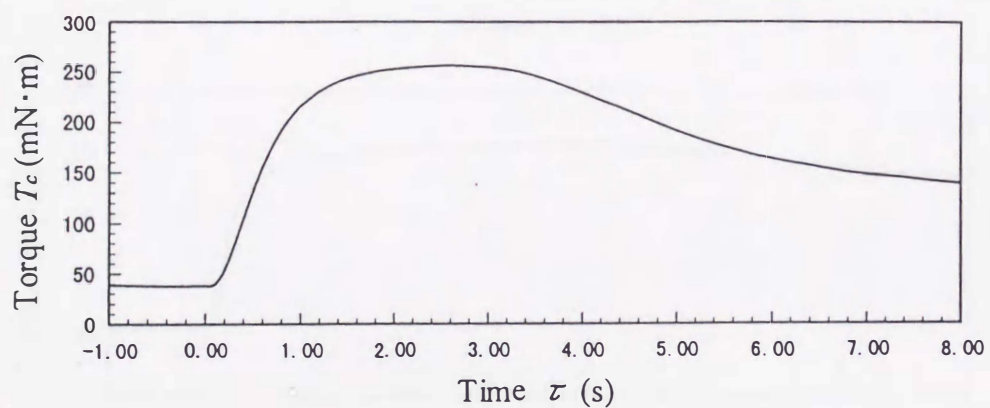
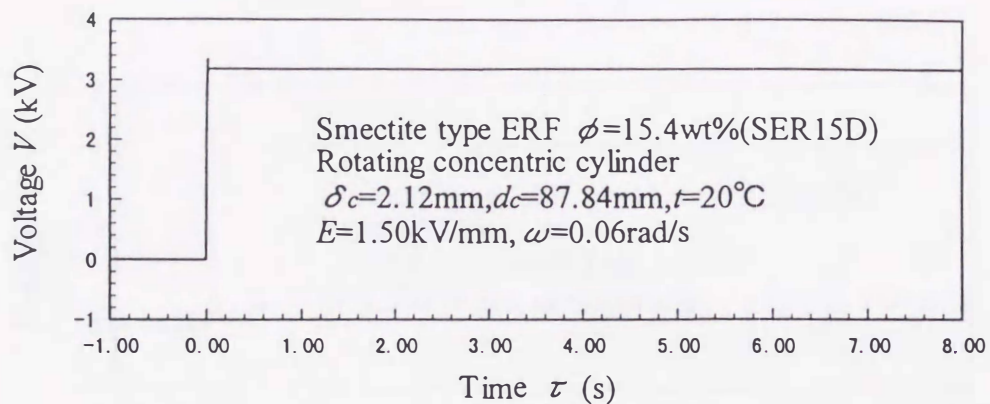


図 5.11(a) 回転円筒型デバイスにステップ状電場を印加したときの
 トルクと電流の時間的变化($E=1.50\text{kV/mm}, n=0.1\text{s}^{-1}$)

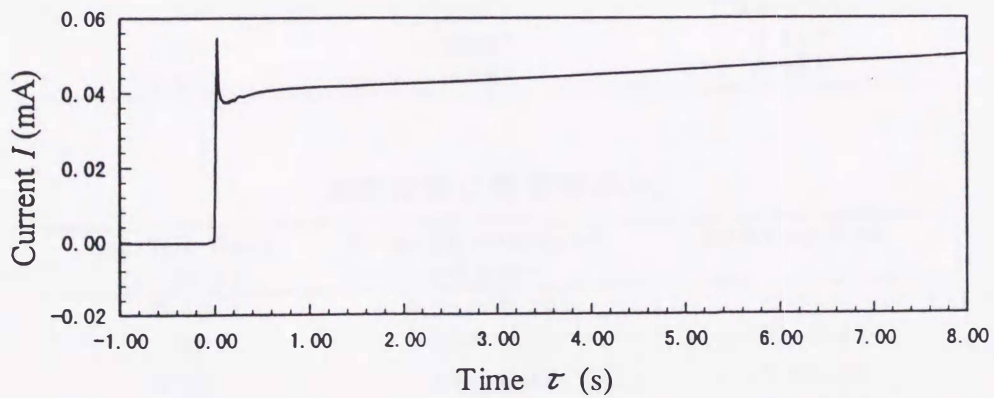
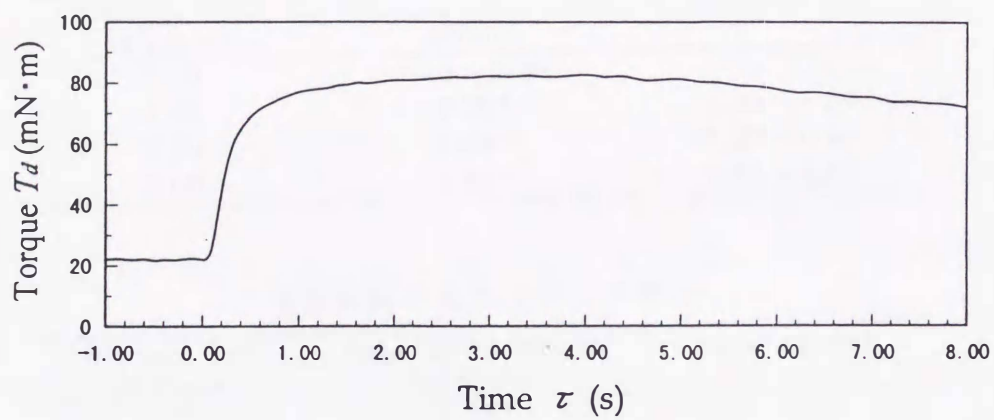
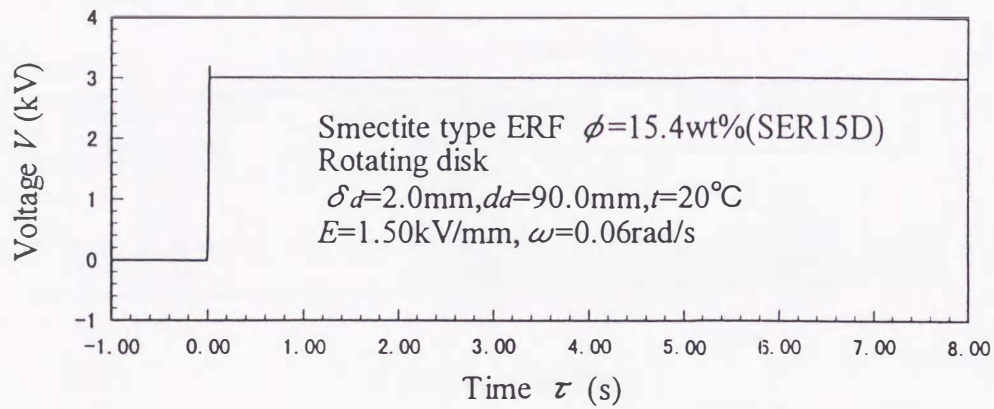


図 5.11(b) 回転円板型デバイスにステップ状電場を印加したときのトルクと電流の時間的变化($E=1.50\text{kV/mm}, n=0.1\text{s}^{-1}$)

表 5.3 回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスの応答時間の比較

($D, D_d > 100(1/s)$)

トルクの立ち上がり時間[s]

| Electric field (kV/mm) | Rotating concentric cylinder | Rotating disk |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|
| 0.50 | 0.89* | — |
| 1.00 | 0.88* | 0.23* |
| 1.50 | 0.88* | 0.23* |
| 2.00 | 0.89* | 0.25* |

トルクの整定時間[s]

| Electric field (kV/mm) | Rotating concentric cylinder | Rotating disk |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|
| 0.50 | 1.73~2.28 | — |
| 1.00 | 1.56* | 1.48~1.69 |
| 1.50 | 1.64* | 2.27~0.96 |
| 2.00 | 1.60* | 2.83~1.05 |

電流密度の立ち上がり時間[s]

| Electric field (kV/mm) | Rotating concentric cylinder | Rotating disk |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|
| 0.50 | 0.11* | — |
| 1.00 | 0.10* | 0.21~0.14 |
| 1.50 | 0.08* | 0.11* |
| 2.00 | 0.09* | 0.11* |

電流密度の整定時間[s]

| Electric field (kV/mm) | Rotating concentric cylinder | Rotating disk |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|
| 0.50 | 0.31~0.17 | — |
| 1.00 | 0.62~0.21 | 1.09~0.48 |
| 1.50 | 0.64~0.43 | 1.19~0.43 |
| 2.00 | 0.64* | 1.67~0.62 |

※ $D, D_d=139\sim 424(1/s)$ において変化が少ない場合、平均値(*)で示し、
変化がある場合は、 $D, D_d=139\sim 424(1/s)$ に対する値を示す。

の場合は比較的ずり速度の小さいところでは、回転円板の方が遅いが、ずり速度の大きいところでは同程度になる。

次に、時間的变化について比較する。トルクの時間的变化では、角速度が小さい場合、回転円筒の方がオーバーシュート量は大きい。また、角速度が大きい場合、明らかに両者には違いがあることが分かる。すなわち、回転円筒は二次の応答特性に近いが、回転円板の場合は立ち上がり時間が急でその後徐々に定常値に近づく特性を示す。電流密度の時間的变化は、両者はほぼ同様の定性的特性を示す。

以上のことから、回転円板型デバイスの方が回転円筒型デバイスよりトルクの応答性すなわち、ER流体の応答性が良いことが分かる。

さて、前章において、回転円板のトルクの定常特性の理論的予測法では、同じ電極間隔の回転円筒の流動曲線が利用できることを示したが、回転円板におけるER流体の応答特性の予測に回転円筒のER流体の応答特性が利用できるかどうかについて検討する。すなわち、回転円板の電極間内がジェット流れとみなし、半径方向に変化するずり速度に対して回転円筒の応答特性を利用する場合について考える。

まず、回転円板の整定時間の予測では、回転円板と回転円筒の整定時間は荒く見るとオーダーがほぼ同じであることから、回転円筒の整定時間が利用できる可能性があることが分かる。

次に、回転円板の立ち上がり時間の予測では、ずり速度のごく小さい領域では、回転円板と回転円筒の立ち上がり時間が近づくことから、回転円筒の立ち上がり時間が利用できる可能性があるが、ほとんどの領域、すなわち、ずり速度が大きい領域では、回転円板のトルクの立ち上がり時間が回転円筒に比べ、1/4程度の時間であることから、回転円筒のトルクの立ち上がり特性が利用できない。

従って、回転円板型デバイスの応答特性は回転円筒型デバイスの応答特性を単純に利用しただけでは予測できないと言える。これは二つのデバイスではクラスター形成の時間的变化が異なることを意味している。

5.6 結言

回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおけるトルクと電流密度の応答特性を実験的に調べ、二つのデバイスにおける ER 流体の応答特性を比較した結果以下のことが分かった。

- (1) 回転円筒のトルクと電流密度の立ち上がり時間は、 $D > 100(1/s)$ において一定で、それぞれ 0.9s, 0.1s 程度である。電流密度の立ち上がり時間は、トルクの立ち上がり時間の 1/9 程度である。整定時間も電流密度の方がトルクより早い。
- (2) 回転円筒のトルクの時間的变化は、電場強度が大きく、角速度が小さい場合、オーバーシュートして、その後定常値に近づいていく。角速度が大きくなるにつれ、二次の応答特性に近づく。
- (3) 回転円板のトルクと電流密度の立ち上がり時間は、 $D_d > 100(1/s)$ において一定で、それぞれ 0.2~0.3s, 0.2~0.1s 程度で、電流密度の方が早く立ち上がる。整定時間は、電流密度の方がトルクの 1/2 程度早い。
- (4) 回転円板のトルクの整定時間は、電場強度が大きい場合、ずり速度が大きくなるにつれ早くなる。また、電流密度の整定時間もずり速度の増加につれ早くなる。
- (5) 回転円板のトルクの時間的变化は、電場強度が大きく角速度が小さい場合、少しオーバーシュートしてその後定常値に近づいていく。角速度が大きくなるにつれ、一定の応答特性に近づく。
- (6) ずり速度が 0 に近づくにつれ、両方のデバイスのトルクと電流密度の立ち上がり時間や整定時間は同程度の値に近づく。

- (7) ずり速度の大きい領域では，トルクの立ち上がり時間は，回転円板の方が回転円筒の $1/4$ 程度の時間で立ち上がる．しかし，電流密度の立ち上がり時間は同程度である．
- (8) 二つのデバイスでは，角速度の大きい場合のトルクの時間的变化は異なる．一方，電流密度の時間的变化はほぼ同様の定性的特性を示す．

第 6 章 結論

本研究の目的は、回転体のまわりの流れの電気粘性効果を明らかにし、回転型デバイスの運動特性を予測する工学的手法を確立することである。そのために、ER 流体の回転円筒型デバイスによる流動曲線と回転円板型デバイスのトルクの予測法、回転円板型デバイスの定常特性そして、ER 流体の応答特性について検討を行った。

ER 流体の特性は、従来、回転円筒型デバイスの基本である同心二重円筒型粘度計によって調べられているが、実験データが流動解析に適用できるような形式で解析されておらず、電極間隔の影響についても不明な点が多かった。同様に、回転円板型デバイスの特性が各種因子から受ける影響についても明らかにされていなかった。また、回転円筒型デバイスによる流動曲線を用いて、流れ場の異なる回転円板型デバイスの特性を予測できるかについても明確ではなかった。さらに、回転円筒型と回転円板型のデバイスによる ER 流体の応答特性の違いについても示されていなかった。

本研究では、これらの問題点を実験データおよび理論解析によって明確にすることを試みた。その結果、これまで不明な点が多かった回転円筒型デバイスによる流動曲線の特性が解明され、回転円筒型デバイスと回転円板型型デバイスの特性の違いも明らかになった。また、回転円筒型デバイスによる流動曲線を用いた回転円板型デバイスのトルクの予測法についてもその妥当性を確認した。

本研究で得られた具体的な成果は以下の通りである。

第 2 章では、回転円筒型デバイスによるずり応力と電流密度の定常特性にずり速度や電場強度、電極間隔などが及ぼす影響について、実験データから明らかにした。回転円筒型デバイスによる流動曲線は、質量濃度が大きい場合、電極間隔により異なり、電極間隔の広

い方が大きくなることが分かった。一方、電流密度は電極間隔の影響を受けず、ずり速度と電場強度で整理できることが分かった。また、デバイスとしての性能をモーメント係数およびトルク増加に対する消費電力から明らかにした。この結果、電場強度が一定で温度が低い場合、電場印加によるトルクの増加分と電流はほぼ比例関係にあることが分かった。

第 3 章では、回転円筒型デバイスによる流動曲線を使って回転円板型デバイスの定常トルク特性を理論的に予測する手法を示した。従来のビンガムモデルでは ER 流体の流動曲線を表現することができないので、力学応答系モデルを導入して、ER 流体に対する構成方程式を導いた。この構成方程式の定数を回転円筒型デバイスの流動曲線により定めて、回転円板型デバイスの定常トルク特性を数値解析によって求めた。その結果、電極間内の円板面垂直方向に対する流速分布は、円板面で速度勾配が大きくなる場所があることを明らかにした。流速分布のパターンは半径方向で異なり、回転数や電極間隔さらに濃度によって変化することを示した。また、トルク特性は ER 流体の構成方程式の定数を規定する回転円筒型デバイスの電極間隔を回転円板型の電極間隔と同じにとるべきことを明らかにした。

第 4 章では、回転円板型デバイスのトルクと電流密度の定常特性にずり速度や電場強度、電極間隔などが及ぼす影響について、実験データから明らかにした。回転円板型デバイスのトルクは、同じずり速度に対して、質量濃度が大きい場合、電極間隔の広い方が大きくなり、電極間隔の影響が回転円筒型よりも大きいことを明らかにした。同様に、電流密度も電極間隔の影響を受けることを明らかにした。また、デバイスとしての性能をモーメント係数およびトルク

増加に対する消費電力から明らかにした。さらに回転円筒型デバイスとの違いも明らかにした。

また、トルク特性を数値解析の結果と比較・検討して、ER流体の構成方程式と回転円板の定常トルク特性の理論的予測手法の有効性について検証した。この予測法は回転円板のトルク特性を定量的に説明することができることから、導入したER流体の構成方程式およびそれを用いた予測法が有効であることを確認した。しかしながら、濃度の高い場合、電極間隔が狭く電場強度が大きく、ずり速度のごく小さい領域においては、実験値を過小評価することも分かった。しかし、この予測値のずれは安全側にある。この原因の一つとして数値解析による二次流れの影響について考察した。

第5章では、回転円筒型デバイスと回転円板型デバイスにおけるER流体の応答特性を実験的に明らかにした。ずり速度の大きい領域では、トルクの立ち上がり時間は、回転円板型デバイスの方が回転円筒型デバイスより早く立ち上がる。これに対して電流密度は、回転円板型デバイスと回転円筒型デバイスは同程度であることが分かった。また、二つのデバイスでは、角速度の大きい場合、トルクの時間的変化のパターンは異なるが、電流密度の時間的変化のパターンはほぼ同様の定性的特性を示すことが分かった。

参考文献

- (1)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, Vol.111, No.7(1995), pp.484-488.
- (2)D.L.Klass and T.W.Matineck, Electroviscous fluids. I. Rheological properties, Journal of applied physics, Vol.38, No.1(1967), pp.67-74.
- (3)N.Sugimoto, Winslow effect in ionic exchange resin dispersion, Bulletin of the JSME, Vol.20, No.149(1977), pp.1476-1483.
- (4)小西正芳, 相澤龍司, 浅子佳延, 中野政身, 分散系ER流体のせん断流れ場と圧力流れ場におけるER効果の比較(第1報、DC電圧印加時), 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集(Ⅲ), No.96-1(1996), pp.203-204.
- (5)志賀亨, 藤本慈, 広瀬美治, 岡田茜, 倉内紀雄, ポリパラフェニレン粒子・シリコン油懸濁液のエレクトロレオロジー効果, 日本レオロジー学会誌, Vol.20, No.2(1992), pp.85-90.
- (6)枝村一弥, ER流体の新展開(1)ER流体の開発, 油圧と空圧, Vol.25, No.7(1994), pp.803-807.
- (7)遠藤茂樹, ER流体の新展開(2)炭素質粒子分散型ER流体の開発, 油圧と空圧, Vol.25, No.7(1994), pp.808-810.
- (8)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.
- (9)浅野和俊, ER流体概論, 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, P-SC237(1996), pp.2-21.
- (10)電気学会編, 静電気ハンドブック, オーム社(1981), pp.263.
- (11)R.J.Atkin, Xiao Shi and W.A.Bullough, Solution of the constitutive equations for the flow of an electrorheological fluid in radial configurations, Journal of Rheology, Vol.35, No.7(1991), pp.1441-1461.
- (12)K.Tanaka, A.Sahashi, R.Akiyama and K.Koyama, Scaling behavior of

- response times of electrorheological suspensions with cation exchange resin particles, *Physical review E*, Vol.52,No.4(1995), pp.3325-3328.
- (13) J.M.Ginder and S.L.Ceccio, The effect of electrical transients on the shear stresses in electrorheological fluids, *Journal of rheology*, Vol.39,No.1 (1995), pp.211-234.
- (14) 杉本旭, 近藤太二, 深谷潔, 電気粘性流体制御形多関節人工指のバイラテラル制御—制御要素としてのウインズロウクラッチの動特性—, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-28-6(1980), pp.1-11.
- (15) 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.
- (16) W.A.Bullough, J.Makin and A.R.Johnson, Requirement and target for ER fluids in electrically high speed power transmission, *Progress in Electrorheology*, Plenum Press(1995), pp.295-302.
- (17) 古荘純二, 坂口正道, ERクラッチおよびその力覚提示装置等への応用, 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, P-SC237(1996), pp.109-113.
- (18) 加藤一郎, 宮本宏尚, 液体形静電クラッチの試作, 電気学会東京支部大会, (1966), pp.66-67.
- (19) N.G.Stevens, J.L.Sproston and R.Stanway, An experimental study of electro-rheological torque transmission, *Transaction of ASME, Journal of Mechanism, Transmissions and Automation in Design*, Vol.110,No.2(1988), pp.182-188.
- (20) 電気学会編, 基礎電磁気学, オーム社(1992), pp.37,50.
- (21) 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.
- (22) 土井正男, 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), pp.219-222.

- (23) FIDAP7.0 Theory manual, Fluid Dynamics International, (1993).
- (24) M.M.Denn, Process fluid Mechanics, Prentice-Hall Inc., (1980), pp.191.
- (25) D.R.Gamota and F.E.Filisco, Dynamic mechanical studies of electro-rheological materials: Moderate frequencies, Journal of Rheology, Vol.35, No.3(1991), pp. 399-425.
- (26) 加藤 仁, 山口勝美, 松林恒雄, 工作機械案内面のしゅう動特性について (第2報, ステックスリップ現象における動摩擦特性), 日本機械学会論文集 (第3部), Vol.35, No.273(1969), pp.1147-1154.
- (27) J.T.Woestman, Stick-slip response in electrorheological fluids, PHYSICAL REVIEW E, Vol.47, No.4(1993), pp.2942-2945.
- (28) Z.P.Shulman, E.V.Korobko, and Y.G.Yanovskii, The mechanism of the viscoelastic behavior of electrorheological suspensions, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol.33(1989), pp.181-196.
- (29) 滝本淳一, ER流体のメカニズム, 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, P-SC237(1996), pp.35-47.

謝辞

本研究を遂行するに当たり、御指導と御教示を終始頂いた富山大学工学部 岩淵牧男 教授に、先ず心から感謝申し上げます。研究結果のグラフをお見せする度に、的確なデータ分析による貴重なお言葉を頂き、文章の草案を見て頂く度に、論理的な組立の重要性についてお教え頂きました。また、本研究のみならず、絶えずバイタリティあふれる行動力、明快な研究の方向性と問題設定、その後の方法、展開など研究者としての模範をお示し頂き、多くのことを学ばせて頂きました。

また、本研究をまとめるにあたり、数々の御教示と御意見を頂きました 工学部 竹越英俊 教授 ならびに 杉本益規 教授 には心から感謝申し上げます。

富山大学工学部機械知能システム工学科流体工学研究室 奥井健一 助教授には、学部在学中から今日に至るまで、一方ならぬ御教授を頂くと共に、御厚情、御激励を賜りました。心からお礼申し上げます。

同研究室 島田邦雄 助手には、一貫して本研究に関するアドバイスを頂き、方向性を示唆して頂きました。「やりましょう！」というお言葉を通して、研究への姿勢と情熱をお教え頂きました。感謝申し上げます。

同研究室 渡辺秀一 技官には、本研究の遂行に協力して頂きました。厚くお礼申し上げます。

さらに、同研究室 大学院生 古川健作 君、加藤幸秀 君 には、実験やデータ整理に直接協力頂きました。その他、同研究室で

研究を共にし、研究の遂行に協力して頂いた学生諸氏と併せて、ここに感謝の意を表します。

秋田大学工学資源学部 藤田豊久 教授には、ER 流体の御提供を下されるとともに、本研究に関する貴重なアドバイスを数多く頂きました。心から厚くお礼申し上げます。

三上房男 富山大学名誉教授 には、学部在学中から今日に至るまで、一方ならぬ御教授を頂きました。この研究がまとめられたのも暖かく見守って頂いたお陰と感謝しております。

また、本研究は、富山大学での研究を快く理解し励まして下さった、石川職業能力開発短期大学校 小林辰滋 元校長 をはじめとする生産技術科の皆様、富山職業能力開発短期大学校 多々静夫 校長 をはじめとする機械システム系の皆様のお陰をもって乗り越えることができたものと改めてお礼申し上げる次第です。

最後に、本研究の成果は決して一人の力で成し遂げられるのではなく、妻 順子 や 両親 をはじめとする、これまで私を支えて頂いた多くの皆様があって、この学位論文がまとめられたものと感謝すると共に、ここに関係の皆様方に厚くお礼申し上げます。

付録 A 計測器の仕様

表 A.1 トルクメータの仕様

| | |
|-------------|---|
| メーカー名 | (株)小野測器 |
| 検出器 | SS-050 |
| 検出原理 | 軸のねじれ角を位相差信号に変換 |
| コンバータ | TS-2600 |
| トルク容量 | 0~5 N・m |
| 出力形式 | アイソレーションされた電圧出力 |
| スケール | 0~±10V/フルスケール |
| 適正負荷 | 10kΩ |
| 時定数 | 63ms/500ms 切替 |
| 精度 (直線性) | 検出器組み合わせ時 ±0.5%/フルスケール 温度ドリフト：±0.05%/フルスケール/℃ |

表 A.2 デジタル温度計の仕様

| | |
|--------|--|
| メーカー名 | (株)佐藤計量器製作所 |
| 型式 | SK-2000MC |
| 入力 | 2プローブタイプ |
| 使用環境条件 | 温度 -5~+45℃ 湿度 85%以下(結露なき事) |
| センサの種類 | K型熱電対 |
| 測定範囲 | -99.9~+1250℃ |
| 分解能 | -99.9~199.9℃ 0.1℃ +200~1250℃ 1℃ |
| 本体精度 | 0.0~+199.9℃ ±(0.1%rdg+0.3℃) -99.9~-0.1℃ ±0.5℃ 上記以外 ±(0.2%rdg+1℃) |
| センサ精度 | JIS 0.4級相当 |

表 A.3 トルクメータの仕様

| | |
|-------|-------------------------|
| メーカー名 | (株)小野測器 |
| 検出器 | SS-010 |
| 検出原理 | 軸のねじれ角を位相差信号に変換 |
| コンバータ | TS-200 |
| トルク容量 | 0~1 N·m |
| 出力形式 | アイソレーションされた電圧出力 |
| スケール | 0~±10V/フルスケール |
| 適正負荷 | 1kΩ以上 |
| 精度 | ±0.2%/フルスケール |
| (直線性) | 温度ドリフト：±0.05%/フルスケール/°C |

付録 B ER 流体の濃度の計算法

(1) 計算式

質量 M (kg), 体積 V (m^3)の ER 流体の質量濃度 ϕ と体積濃度 α は以下の方法で求めることができる。

体積 V 内, 分散粒子の体積が V_1 , 溶媒の体積が V_2 であるとする。分散粒子の密度を ρ_1 , 溶媒の密度を ρ_2 とすると, 次式が成り立つ。

$$V = V_1 + V_2 \quad (\text{B.1})$$

$$M = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (\text{B.2})$$

式(1)(2)から次式を得ることができる。

$$V_1 = \frac{M - \rho_2 V}{\rho_1 - \rho_2} \quad (\text{B.3})$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 V - M}{\rho_1 - \rho_2} \quad (\text{B.4})$$

従って, 質量濃度は以下の式で表される。

$$\phi = \frac{\rho_1 V_1}{M} \quad (\text{B.5})$$

また, 体積濃度は次の式で表される。

$$\alpha = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (\text{B.6})$$

(2) 計算法

ER 流体の M と V を計測して, 式(3)(4)から V_1 , V_2 を求める。この値を用いて, 質量濃度は式(5)によって求める。また, 体積濃度は式(6)によって求める。

なお, ER 流体の質量計測に使用した電子天秤の誤差は, $\pm 9.8 \times 10^{-2} \text{mN}$ である。

付録 C 回転円筒型デバイスの実験データ

No.c-1 ERF:SER10A Electrode Gap: $\delta_c=2.12\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/07/31

| E | 0.507kV/mm | | | 0.760kV/mm | | 1.01kV/mm | | 1.52kV/mm | | Blank Test |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|
| n (s^{-1}) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cf} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) |
| 3.4 | 122.5 | 131.3 | 0.007260 | 152.6 | 0.02052 | 186.2 | 0.04938 | 284.0 | 0.1863 | 7.295 |
| 3.2 | 114.1 | 126.2 | 0.007530 | 148.9 | 0.02277 | 186.7 | 0.05889 | 283.4 | 0.1991 | 6.395 |
| 3.0 | 110.3 | 122.5 | 0.006669 | 146.0 | 0.02563 | 179.4 | 0.06000 | 284.4 | 0.2176 | 7.810 |
| 2.8 | 103.1 | 116.7 | 0.008412 | 143.0 | 0.02670 | 180.6 | 0.06615 | 299.8 | 0.2179 | 7.155 |
| 2.6 | 97.95 | 110.4 | 0.009552 | 141.0 | 0.03003 | 174.2 | 0.07113 | 274.2 | 0.2348 | 7.305 |
| 2.4 | 94.40 | 108.9 | 0.009828 | 138.2 | 0.03327 | 174.4 | 0.07500 | 274.6 | 0.2424 | 7.845 |
| 2.2 | 89.00 | 106.5 | 0.011244 | 133.1 | 0.03381 | 171.5 | 0.07872 | 280.3 | 0.2654 | 6.940 |
| 2.0 | 82.50 | 100.7 | 0.011319 | 129.3 | 0.03384 | 169.1 | 0.08511 | 276.7 | 0.2658 | 7.415 |
| 1.8 | 81.10 | 99.85 | 0.011850 | 126.3 | 0.03756 | 167.3 | 0.08601 | 269.6 | 0.2609 | 7.060 |
| 1.6 | 77.65 | 96.15 | 0.013287 | 122.7 | 0.03975 | 163.9 | 0.08985 | 267.7 | 0.2706 | 7.185 |
| 1.4 | 71.30 | 92.70 | 0.014604 | 123.9 | 0.04449 | 166.4 | 0.09762 | 266.1 | 0.2841 | 7.000 |
| 1.2 | 67.65 | 93.60 | 0.015381 | 123.1 | 0.04869 | 163.0 | 0.10446 | 261.5 | 0.2889 | 7.660 |
| 1.0 | 64.00 | 89.85 | 0.018819 | 120.5 | 0.05415 | 160.7 | 0.10935 | 254.7 | 0.2927 | 6.655 |
| 0.9 | 62.00 | 85.20 | 0.018735 | 119.8 | 0.05610 | 158.2 | 0.11307 | 254.4 | 0.3036 | 7.525 |
| 0.8 | 61.85 | 89.70 | 0.020163 | 119.5 | 0.05661 | 158.9 | 0.11703 | 243.2 | 0.3042 | 7.295 |
| 0.7 | 57.85 | 82.30 | 0.022290 | 116.9 | 0.06045 | 157.9 | 0.12258 | 244.3 | 0.3075 | 7.315 |
| 0.6 | 56.60 | 81.00 | 0.022575 | 114.6 | 0.06366 | 154.4 | 0.12723 | 239.7 | 0.3108 | 7.395 |
| 0.5 | 52.65 | 79.15 | 0.025353 | 115.8 | 0.06768 | 156.4 | 0.13203 | 231.8 | 0.3126 | 7.185 |
| 0.4 | 46.30 | 80.55 | 0.028848 | 112.4 | 0.07140 | 152.6 | 0.13515 | 229.0 | 0.3180 | 7.955 |
| 0.3 | 43.79 | 76.55 | 0.030180 | 112.0 | 0.07483 | 147.9 | 0.13866 | 226.0 | 0.3201 | 7.570 |
| 0.2 | 39.57 | 79.20 | 0.033690 | 104.2 | 0.07854 | 137.9 | 0.14223 | 216.6 | 0.3288 | 7.225 |
| 0.1 | 43.74 | 73.25 | 0.035970 | 101.7 | 0.08328 | 135.3 | 0.14997 | 206.7 | 0.3270 | 6.505 |
| 0.2 | 41.60 | 72.00 | 0.033780 | 103.0 | 0.08019 | 139.2 | 0.14607 | 219.6 | 0.3270 | 7.570 |
| 0.3 | 47.21 | 81.25 | 0.032670 | 109.4 | 0.07884 | 143.9 | 0.14541 | 222.9 | 0.3336 | 7.375 |
| 0.4 | 48.79 | 79.00 | 0.031380 | 115.9 | 0.07755 | 151.8 | 0.14523 | 227.4 | 0.3327 | 6.975 |
| 0.5 | 50.55 | 83.95 | 0.029601 | 114.4 | 0.07512 | 150.1 | 0.13998 | 233.2 | 0.3345 | 6.760 |
| 0.6 | 52.45 | 83.45 | 0.027246 | 115.4 | 0.07125 | 155.3 | 0.14115 | 236.4 | 0.3318 | 7.325 |
| 0.7 | 55.90 | 84.05 | 0.026235 | 119.4 | 0.06840 | 158.4 | 0.13536 | 240.4 | 0.3327 | 8.960 |
| 0.8 | 57.60 | 85.40 | 0.023412 | 119.2 | 0.06714 | 157.5 | 0.13158 | 243.6 | 0.3297 | 8.205 |
| 0.9 | 58.55 | 85.80 | 0.022731 | 125.8 | 0.06369 | 160.3 | 0.13137 | 248.1 | 0.3303 | 6.915 |
| 1.0 | 63.00 | 89.65 | 0.021609 | 121.5 | 0.06057 | 161.2 | 0.12489 | 255.5 | 0.3258 | 7.470 |
| 1.2 | 66.95 | 91.75 | 0.018345 | 122.0 | 0.05274 | 162.8 | 0.11220 | 257.5 | 0.3000 | 6.880 |
| 1.4 | 71.25 | 94.20 | 0.015126 | 123.7 | 0.04707 | 164.4 | 0.10182 | 262.0 | 0.2896 | 8.025 |
| 1.6 | 75.75 | 96.90 | 0.013203 | 125.1 | 0.04128 | 164.0 | 0.09366 | 261.5 | 0.2724 | 6.635 |
| 1.8 | 79.05 | 96.65 | 0.011244 | 124.8 | 0.03747 | 165.5 | 0.08631 | 262.2 | 0.2591 | 6.930 |
| 2.0 | 84.05 | 99.55 | 0.010989 | 127.0 | 0.03375 | 165.0 | 0.07872 | 269.4 | 0.2552 | 7.005 |
| 2.2 | 89.35 | 104.3 | 0.009879 | 131.2 | 0.03042 | 170.1 | 0.07674 | 267.2 | 0.2435 | 7.220 |
| 2.4 | 93.95 | 107.9 | 0.009618 | 133.7 | 0.03006 | 168.1 | 0.07104 | 267.2 | 0.2326 | 7.325 |
| 2.6 | 96.85 | 110.7 | 0.007941 | 136.2 | 0.02728 | 169.1 | 0.06747 | 268.5 | 0.2273 | 8.185 |
| 2.8 | 102.2 | 112.5 | 0.007815 | 136.9 | 0.02621 | 173.5 | 0.06459 | 270.5 | 0.2241 | 7.745 |
| 3.0 | 104.0 | 117.1 | 0.007575 | 140.0 | 0.02546 | 173.7 | 0.06246 | 271.2 | 0.2175 | 7.720 |
| 3.2 | 108.3 | 121.6 | 0.007560 | 141.3 | 0.02394 | 175.4 | 0.06003 | 277.4 | 0.2172 | 7.485 |
| 3.4 | 113.1 | 123.4 | 0.007461 | 146.0 | 0.02305 | 178.0 | 0.05895 | 276.3 | 0.2137 | 7.890 |

No.c-2 ERF:SER10A Electrode Gap: $\delta c=2.12\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/07/31

| E | 0.00kV/mm | | | 0.507kV/mm | | | 0.760kV/mm | | | 1.01kV/mm | | | 1.52kV/mm | | | Blank Test |
|-----|-------------------------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|------------|
| | n (s^{-1}) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cf} (mN·m) | |
| 3.4 | 41.56 | 71.35 | 0.1581 | 104.15 | 0.4221 | 143.6 | 0.8490 | 233.6 | 2.183 | 3.003 | | | | | | |
| 3.2 | 41.95 | 73.20 | 0.1673 | 104.45 | 0.4287 | 143.4 | 0.8457 | 231.6 | 2.148 | 3.381 | | | | | | |
| 3.0 | 40.73 | 72.00 | 0.1570 | 106.25 | 0.4326 | 144.2 | 0.8484 | 234.7 | 2.133 | 3.368 | | | | | | |
| 2.8 | 40.97 | 69.70 | 0.1565 | 103.90 | 0.4182 | 143.8 | 0.8274 | 228.8 | 2.019 | 3.845 | | | | | | |
| 2.6 | 35.03 | 66.45 | 0.1633 | 104.35 | 0.4197 | 140.0 | 0.8061 | 227.7 | 2.013 | 3.601 | | | | | | |
| 2.4 | 36.59 | 68.10 | 0.1637 | 101.65 | 0.4221 | 139.6 | 0.8184 | 222.3 | 1.991 | 4.235 | | | | | | |
| 2.2 | 34.83 | 66.80 | 0.1671 | 99.30 | 0.4287 | 136.7 | 0.8235 | 218.7 | 1.997 | 4.049 | | | | | | |
| 2.0 | 33.79 | 64.85 | 0.1715 | 97.95 | 0.4389 | 133.9 | 0.8322 | 214.8 | 2.015 | 4.051 | | | | | | |
| 1.8 | 30.95 | 63.90 | 0.1811 | 95.30 | 0.4536 | 131.0 | 0.8409 | 210.7 | 2.020 | 3.800 | | | | | | |
| 1.6 | 28.07 | 62.60 | 0.1899 | 93.10 | 0.4581 | 128.8 | 0.8517 | 209.9 | 2.063 | 4.092 | | | | | | |
| 1.4 | 27.33 | 60.70 | 0.1966 | 92.55 | 0.4779 | 126.9 | 0.8763 | 205.6 | 2.071 | 4.385 | | | | | | |
| 1.2 | 24.24 | 60.45 | 0.2091 | 88.60 | 0.4845 | 124.6 | 0.9009 | 200.9 | 2.072 | 4.726 | | | | | | |
| 1.0 | 22.71 | 57.15 | 0.2110 | 88.00 | 0.5091 | 120.8 | 0.9198 | 197.4 | 2.151 | 4.978 | | | | | | |
| 0.9 | 20.77 | 57.85 | 0.2271 | 86.60 | 0.5295 | 121.8 | 0.9726 | 196.5 | 2.222 | 4.096 | | | | | | |
| 0.8 | 18.96 | 56.60 | 0.2392 | 87.05 | 0.5499 | 119.6 | 0.9885 | 200.1 | 2.270 | 4.596 | | | | | | |
| 0.7 | 18.03 | 55.20 | 0.2528 | 85.05 | 0.5607 | 117.9 | 1.0020 | 195.2 | 2.315 | 5.435 | | | | | | |
| 0.6 | 16.95 | 53.90 | 0.2605 | 83.10 | 0.5823 | 117.6 | 1.0398 | 195.5 | 2.429 | 4.837 | | | | | | |
| 0.5 | 17.35 | 54.25 | 0.2190 | 83.15 | 0.6099 | 118.1 | 1.0872 | 199.9 | 2.480 | 4.873 | | | | | | |
| 0.4 | 15.77 | 52.20 | 0.2818 | 83.85 | 0.6234 | 118.5 | 1.1316 | 193.1 | 2.544 | 4.235 | | | | | | |
| 0.3 | 15.20 | 53.90 | 0.3108 | 83.15 | 0.6516 | 117.4 | 1.1481 | 194.0 | 2.592 | 4.712 | | | | | | |
| 0.2 | 13.74 | 55.25 | 0.3315 | 83.55 | 0.6834 | 118.0 | 1.1976 | 190.9 | 2.677 | 5.360 | | | | | | |
| 0.1 | 10.38 | 51.70 | 0.3549 | 85.15 | 0.7410 | 116.8 | 1.2852 | 149.6 | 2.970 | 4.819 | | | | | | |
| 0.2 | 14.03 | 55.00 | 0.3279 | 84.90 | 0.6888 | 118.6 | 1.2066 | 195.4 | 2.704 | 4.992 | | | | | | |
| 0.3 | 17.01 | 56.20 | 0.3171 | 85.65 | 0.6744 | 121.1 | 1.1874 | 199.5 | 2.665 | 5.645 | | | | | | |
| 0.4 | 16.68 | 54.65 | 0.2931 | 83.50 | 0.6357 | 119.3 | 1.1271 | 199.9 | 2.594 | 4.264 | | | | | | |
| 0.5 | 17.84 | 55.70 | 0.2942 | 86.45 | 0.6387 | 120.5 | 1.1226 | 200.3 | 2.419 | 4.321 | | | | | | |
| 0.6 | 18.34 | 55.40 | 0.2816 | 84.70 | 0.6198 | 120.2 | 1.0977 | 199.6 | 2.555 | 3.969 | | | | | | |
| 0.7 | 18.37 | 55.90 | 0.2705 | 87.40 | 0.6189 | 121.2 | 1.1046 | 200.8 | 2.539 | 3.610 | | | | | | |
| 0.8 | 18.92 | 58.15 | 0.2738 | 88.80 | 0.6147 | 123.9 | 1.1049 | 201.5 | 2.512 | 3.323 | | | | | | |
| 0.9 | 23.33 | 59.20 | 0.2716 | 89.35 | 0.6093 | 124.5 | 1.1010 | 202.2 | 2.513 | 4.148 | | | | | | |
| 1.0 | 22.57 | 60.25 | 0.2623 | 89.95 | 0.6042 | 125.7 | 1.0971 | 204.9 | 2.526 | 3.282 | | | | | | |
| 1.2 | 24.30 | 61.55 | 0.2554 | 93.10 | 0.5889 | 127.5 | 1.0674 | 205.7 | 2.471 | 3.568 | | | | | | |
| 1.4 | 25.78 | 61.75 | 0.2401 | 93.25 | 0.5739 | 127.1 | 1.0323 | 208.0 | 2.457 | 4.055 | | | | | | |
| 1.6 | 28.11 | 63.65 | 0.2366 | 95.40 | 0.5643 | 131.3 | 1.0488 | 210.1 | 2.437 | 3.470 | | | | | | |
| 1.8 | 29.80 | 66.30 | 0.2362 | 97.80 | 0.5622 | 133.0 | 1.0269 | 212.3 | 2.438 | 2.993 | | | | | | |
| 2.0 | 31.08 | 67.15 | 0.2254 | 99.25 | 0.5472 | 135.6 | 1.0212 | 216.2 | 2.430 | 3.442 | | | | | | |
| 2.2 | 18.73 | 67.90 | 0.2171 | 101.4 | 0.5394 | 137.8 | 1.0065 | 219.3 | 2.412 | 4.211 | | | | | | |
| 2.4 | 37.40 | 69.45 | 0.2052 | 102.9 | 0.5247 | 139.6 | 0.9960 | 220.6 | 2.379 | 4.723 | | | | | | |
| 2.6 | 38.65 | 72.00 | 0.2072 | 103.9 | 0.5181 | 142.6 | 1.0062 | 224.3 | 2.389 | 5.140 | | | | | | |
| 2.8 | 38.76 | 72.45 | 0.1994 | 105.1 | 0.5064 | 144.0 | 0.9843 | 227.8 | 2.392 | 4.066 | | | | | | |
| 3.0 | 41.56 | 73.90 | 0.1950 | 106.9 | 0.5004 | 144.7 | 0.9693 | 230.3 | 2.399 | 3.835 | | | | | | |
| 3.2 | 43.31 | 75.15 | 0.1875 | 108.6 | 0.4986 | 148.0 | 0.9654 | 231.3 | 2.355 | 4.194 | | | | | | |
| 3.4 | 44.90 | 76.90 | 0.1860 | 109.9 | 0.4839 | 148.0 | 0.9363 | 234.2 | 2.315 | 3.862 | | | | | | |

No.c-3 ERF : SER10B Electrode Gap : $\delta_c=1.47\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/12/09

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|--|------------|
| n (s^{-1}) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cf} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | | |
| 3.00 | 83.60 | 96.95 | 0.008196 | 143.3 | 0.06633 | 219.25 | 0.2363 | 322.55 | 0.5565 | 7.915 | | | | | | |
| 2.50 | 80.25 | 92.70 | 0.010728 | 144.6 | 0.08493 | 222.80 | 0.2804 | 322.55 | 0.6285 | 7.375 | | | | | | |
| 2.00 | 70.80 | 85.80 | 0.013842 | 141.7 | 0.10473 | 220.45 | 0.3225 | 315.80 | 0.6870 | 7.515 | | | | | | |
| 1.50 | 61.70 | 81.20 | 0.019233 | 139.4 | 0.12942 | 215.25 | 0.3651 | 303.45 | 0.7434 | 7.595 | | | | | | |
| 1.00 | 50.80 | 75.85 | 0.029109 | 135.1 | 0.16311 | 205.55 | 0.4140 | 287.10 | 0.8115 | 7.555 | | | | | | |
| 0.60 | 41.28 | 73.30 | 0.045060 | 131.1 | 0.20163 | 196.90 | 0.4650 | 263.10 | 0.8556 | 7.490 | | | | | | |
| 0.30 | 33.66 | 72.20 | 0.069660 | 123.9 | 0.24891 | 168.65 | 0.5421 | 187.60 | 0.9144 | 8.960 | | | | | | |
| 0.20 | 30.27 | 74.40 | 0.092010 | 120.5 | 0.28695 | 154.15 | 0.5697 | 181.55 | 0.9282 | 9.350 | | | | | | |
| 0.10 | 23.68 | 66.55 | 0.123060 | 104.1 | 0.33150 | 128.70 | 0.6147 | 136.90 | 0.9531 | 10.725 | | | | | | |
| 0.30 | 37.87 | 88.45 | 0.115110 | 129.0 | 0.32220 | 159.00 | 0.6066 | 163.20 | 0.9621 | — | | | | | | |
| 1.00 | 62.55 | 98.65 | 0.044790 | 167.5 | 0.20595 | 242.25 | 0.4806 | 317.50 | 0.8523 | — | | | | | | |
| 2.00 | 87.00 | 108.15 | 0.023424 | 168.2 | 0.13884 | 248.55 | 0.3798 | 341.10 | 0.7473 | — | | | | | | |
| 3.00 | 99.55 | 114.05 | 0.013302 | 168.1 | 0.09597 | 248.15 | 0.3066 | 346.50 | 0.6648 | — | | | | | | |

No.c-4 ERF : SER10B Electrode Gap : $\delta_c=2.12\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/12/10

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|--|------------|
| n (s^{-1}) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{mc} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cf} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | | |
| 3.00 | 75.0 | 91.05 | 0.01241 | 146.0 | 0.09414 | 229.25 | 0.3036 | 331.1 | 0.6768 | 6.32 | | | | | | |
| 2.50 | 69.3 | 88.25 | 0.01598 | 148.1 | 0.11715 | 229.55 | 0.3525 | 323.0 | 0.7158 | 5.67 | | | | | | |
| 2.00 | 64.4 | 84.95 | 0.02056 | 146.5 | 0.13674 | 225.25 | 0.3828 | 314.4 | 0.7584 | 5.86 | | | | | | |
| 1.50 | 55.2 | 81.05 | 0.02721 | 143.0 | 0.15912 | 216.95 | 0.4167 | 302.1 | 0.798 | 5.01 | | | | | | |
| 1.00 | 46.86 | 77.05 | 0.03795 | 137.0 | 0.18759 | 208.45 | 0.4572 | 284.8 | 0.8403 | 6.22 | | | | | | |
| 0.60 | 40.35 | 75.85 | 0.05430 | 131.2 | 0.22014 | 196.8 | 0.5037 | 258.4 | 0.8946 | 5.74 | | | | | | |
| 0.30 | 36.48 | 83.35 | 0.09513 | 138.3 | 0.29874 | 182.55 | 0.6165 | 205.0 | 1.0122 | 6.79 | | | | | | |
| 0.20 | 32.48 | 83.55 | 0.11907 | 132.7 | 0.34050 | 159.2 | 0.6585 | 179.9 | 1.0344 | 7.18 | | | | | | |
| 0.10 | 26.06 | 72.40 | 0.14427 | 107.4 | 0.37650 | 133.3 | 0.6789 | 152.3 | 1.0542 | 7.49 | | | | | | |
| 0.30 | 42.76 | 90.15 | 0.09174 | 143.8 | 0.29178 | 195.05 | 0.5889 | 239.6 | 0.9777 | — | | | | | | |
| 1.00 | 58.65 | 101.45 | 0.05760 | 173.5 | 0.23676 | 246.7 | 0.5217 | 319.7 | 0.9054 | — | | | | | | |
| 2.00 | 78.3 | 114.65 | 0.03774 | 187.1 | 0.19245 | 266.8 | 0.4599 | 351.5 | 0.8445 | — | | | | | | |
| 3.00 | 93.7 | 113.90 | 0.02099 | 178.3 | 0.13725 | 263.35 | 0.3879 | 360.2 | 0.7755 | — | | | | | | |

No.c-5 ERF : SER10B Electrode Gap : $\delta_c=3.00\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/12/11

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|--|--|------------|
| n (s^{-1}) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cm} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | T_{cf} ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | | | |
| 3.00 | 51.6 | 79.75 | 0.01789 | 140.05 | 0.1218 | 219.7 | 0.3540 | 7.690 | | | | | |
| 2.50 | 56.3 | 78.60 | 0.02242 | 137.75 | 0.1399 | 215.2 | 0.3810 | 7.485 | | | | | |
| 2.00 | 50.8 | 74.70 | 0.02735 | 134.25 | 0.1564 | 209.4 | 0.4068 | 7.360 | | | | | |
| 1.50 | 43.60 | 69.00 | 0.03333 | 128.90 | 0.1720 | 201.6 | 0.4299 | 7.710 | | | | | |
| 1.00 | 39.21 | 67.90 | 0.04146 | 123.75 | 0.1904 | 194.0 | 0.4530 | 7.775 | | | | | |
| 0.60 | 33.45 | 63.30 | 0.05100 | 117.60 | 0.2082 | 183.8 | 0.4749 | 7.615 | | | | | |
| 0.30 | 29.97 | 59.95 | 0.06027 | 113.90 | 0.2284 | 175.8 | 0.4998 | 7.995 | | | | | |
| 0.20 | 29.07 | 59.70 | 0.06522 | 116.85 | 0.2432 | 174.6 | 0.5202 | 8.445 | | | | | |
| 0.10 | 27.77 | 61.95 | 0.07740 | 110.90 | 0.2624 | 143.2 | 0.5697 | 8.940 | | | | | |
| 0.30 | 30.91 | 66.35 | 0.07368 | 120.00 | 0.2535 | 176.8 | 0.5295 | — | | | | | |
| 1.00 | 42.73 | 83.00 | 0.06126 | 140.90 | 0.2276 | 204.5 | 0.4872 | — | | | | | |
| 2.00 | 59.2 | 89.25 | 0.03756 | 146.20 | 0.1744 | 217.6 | 0.4314 | — | | | | | |
| 3.00 | 64.3 | 85.20 | 0.02051 | 145.00 | 0.1365 | 226.3 | 0.3927 | — | | | | | |

No.c-6 ERF:SER15A Electrode Gap: $\delta_e=2.12\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/11/20

| E | 0.00kV/mm | | | 0.507kV/mm | | | 0.760kV/mm | | | 1.01kV/mm | | | 1.52kV/mm | | | Blank Test |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|
| n (s^{-1}) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cf} (mN·m) |
| 3.4 | 238.6 | 260.8 | 0.01166 | 300.7 | 0.02806 | 377.8 | 0.06525 | 640.5 | 0.2475 | 7.840 | | | | | | |
| 3.2 | 219.1 | 233.0 | 0.01112 | 271.1 | 0.02619 | 344.3 | 0.06159 | 592.5 | 0.2415 | 5.690 | | | | | | |
| 3.0 | 207.5 | 228.8 | 0.01123 | 267.7 | 0.02645 | 346.1 | 0.06396 | 601.5 | 0.2514 | 5.280 | | | | | | |
| 2.8 | 196.1 | 221.8 | 0.01123 | 260.6 | 0.02751 | 337.1 | 0.06657 | 593.5 | 0.2558 | 5.925 | | | | | | |
| 2.6 | 187.5 | 213.0 | 0.01124 | 254.4 | 0.02911 | 334.7 | 0.06873 | 591.5 | 0.2624 | 6.230 | | | | | | |
| 2.4 | 182.8 | 204.1 | 0.01126 | 245.5 | 0.02998 | 330.0 | 0.07440 | 589.5 | 0.2777 | 5.290 | | | | | | |
| 2.2 | 171.2 | 193.2 | 0.01130 | 241.3 | 0.03180 | 330.0 | 0.08127 | 588.5 | 0.2884 | 4.737 | | | | | | |
| 2.0 | 161.0 | 185.6 | 0.01145 | 235.4 | 0.03372 | 328.1 | 0.08505 | 587.5 | 0.2998 | 5.015 | | | | | | |
| 1.8 | 150.9 | 176.8 | 0.01166 | 228.5 | 0.03534 | 319.8 | 0.08811 | 585.0 | 0.3102 | 4.215 | | | | | | |
| 1.6 | 139.4 | 165.9 | 0.01176 | 224.9 | 0.03807 | 318.3 | 0.09366 | 579.5 | 0.3180 | 5.150 | | | | | | |
| 1.4 | 131.5 | 160.8 | 0.01363 | 219.6 | 0.04110 | 316.7 | 0.09969 | 576.0 | 0.3282 | 5.145 | | | | | | |
| 1.2 | 121.1 | 152.8 | 0.01433 | 217.3 | 0.04476 | 312.5 | 0.10530 | 570.0 | 0.3393 | 4.298 | | | | | | |
| 1.0 | 111.1 | 146.1 | 0.01511 | 213.4 | 0.04887 | 314.9 | 0.11541 | 558.0 | 0.3468 | 4.239 | | | | | | |
| 0.9 | 101.8 | 143.0 | 0.01718 | 218.2 | 0.05610 | 308.3 | 0.11862 | 546.5 | 0.3510 | 3.941 | | | | | | |
| 0.8 | 99.9 | 140.1 | 0.01871 | 211.1 | 0.05610 | 308.5 | 0.12411 | 545.5 | 0.3609 | 3.267 | | | | | | |
| 0.7 | 89.3 | 134.3 | 0.01889 | 205.8 | 0.05988 | 303.0 | 0.12876 | 526.0 | 0.3645 | 2.857 | | | | | | |
| 0.6 | 83.1 | 134.2 | 0.02236 | 203.5 | 0.06387 | 297.9 | 0.13518 | 508.0 | 0.3675 | 2.813 | | | | | | |
| 0.5 | 78.6 | 128.0 | 0.02347 | 200.9 | 0.07338 | 296.8 | 0.14466 | 488.8 | 0.3720 | 3.036 | | | | | | |
| 0.4 | 69.8 | 127.7 | 0.02662 | 198.9 | 0.07953 | 284.0 | 0.14517 | 461.9 | 0.3660 | 3.807 | | | | | | |
| 0.3 | 62.1 | 122.2 | 0.03015 | 195.2 | 0.07863 | 281.7 | 0.15579 | 444.8 | 0.3705 | 3.453 | | | | | | |
| 0.2 | 48.6 | 116.6 | 0.03207 | 192.3 | 0.07809 | 262.1 | 0.14253 | 407.7 | 0.3294 | 4.189 | | | | | | |
| 0.1 | 48.8 | 118.2 | 0.03378 | 178.4 | 0.07485 | 244.5 | 0.13920 | 374.0 | 0.3159 | 4.423 | | | | | | |
| 0.2 | 53.2 | 120.3 | 0.03030 | 183.0 | 0.06786 | 255.5 | 0.13869 | 399.8 | 0.3222 | 4.335 | | | | | | |
| 0.3 | 56.5 | 119.9 | 0.02752 | 185.5 | 0.06276 | 265.8 | 0.13881 | 414.1 | 0.3261 | 3.781 | | | | | | |
| 0.4 | 60.6 | 120.7 | 0.02617 | 187.3 | 0.06444 | 262.9 | 0.13152 | 423.5 | 0.3243 | 4.351 | | | | | | |
| 0.5 | 60.2 | 115.6 | 0.02279 | 178.4 | 0.06366 | 265.9 | 0.13299 | 439.6 | 0.3282 | 4.107 | | | | | | |
| 0.6 | 72.3 | 127.6 | 0.02309 | 192.9 | 0.06042 | 269.0 | 0.13050 | 439.1 | 0.3366 | 3.335 | | | | | | |
| 0.7 | 77.5 | 131.3 | 0.02251 | 194.4 | 0.05961 | 272.5 | 0.12885 | 444.5 | 0.3381 | 3.600 | | | | | | |
| 0.8 | 83.3 | 134.3 | 0.02226 | 195.7 | 0.05730 | 274.7 | 0.12570 | 449.6 | 0.3378 | 3.994 | | | | | | |
| 0.9 | 89.0 | 135.4 | 0.02067 | 200.5 | 0.05298 | 274.8 | 0.12330 | 456.7 | 0.3390 | 4.240 | | | | | | |
| 1.0 | 94.1 | 140.1 | 0.01949 | 201.3 | 0.04977 | 279.2 | 0.12177 | 457.7 | 0.3336 | 4.052 | | | | | | |
| 1.2 | 105.0 | 146.8 | 0.01802 | 207.3 | 0.04827 | 283.1 | 0.11652 | 466.2 | 0.3294 | 3.447 | | | | | | |
| 1.4 | 115.8 | 155.8 | 0.01792 | 209.9 | 0.04842 | 287.1 | 0.11100 | 472.6 | 0.3234 | 3.565 | | | | | | |
| 1.6 | 124.5 | 160.5 | 0.01531 | 214.3 | 0.04131 | 294.0 | 0.10839 | 479.5 | 0.3216 | 5.150 | | | | | | |
| 1.8 | 131.5 | 164.7 | 0.01540 | 222.5 | 0.03747 | 299.4 | 0.10896 | 486.7 | 0.3246 | 4.755 | | | | | | |
| 2.0 | 144.7 | 168.8 | 0.01316 | 221.0 | 0.03405 | 295.7 | 0.09426 | 492.4 | 0.2957 | 4.776 | | | | | | |
| 2.2 | 154.6 | 182.6 | 0.01194 | 231.6 | 0.03342 | 304.4 | 0.08622 | 497.9 | 0.2777 | 6.765 | | | | | | |
| 2.4 | 164.6 | 191.5 | 0.01164 | 238.4 | 0.03126 | 307.7 | 0.08022 | 499.7 | 0.2651 | 7.225 | | | | | | |
| 2.6 | 178.3 | 199.4 | 0.01133 | 244.0 | 0.03015 | 310.2 | 0.07857 | 506.5 | 0.2608 | 6.215 | | | | | | |
| 2.8 | 184.6 | 206.1 | 0.01142 | 248.5 | 0.02994 | 317.4 | 0.07497 | 505.5 | 0.2517 | 4.652 | | | | | | |
| 3.0 | 193.5 | 213.9 | 0.01131 | 253.8 | 0.02964 | 320.5 | 0.07233 | 508.0 | 0.2465 | 6.445 | | | | | | |
| 3.2 | 200.9 | 219.8 | 0.01124 | 258.7 | 0.02394 | 322.1 | 0.06906 | 509.0 | 0.2417 | 7.610 | | | | | | |
| 3.4 | 207.5 | 225.7 | 0.00746 | 262.2 | 0.02305 | 324.5 | 0.06738 | 509.5 | 0.2378 | 5.980 | | | | | | |

No.c-7 ERF:SER15A Electrode Gap: $\delta_c=2.12\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/11/21

| E | 0.00kV/mm | | 0.507kV/mm | | 0.760kV/mm | | 1.01kV/mm | | Blank Test |
|-------------------------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-----------|-----------------|------------|
| n (s^{-1}) | T_{cm} (mN·m) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cm} (mN·m) | I (mA) | T_{cf} (mN·m) | |
| 3.4 | 114.8 | 172.0 | 0.2376 | 245.5 | 0.6222 | 337.5 | 1.244 | 0.842 | |
| 3.2 | 116.8 | 176.5 | 0.2426 | 248.9 | 0.6186 | 337.5 | 1.205 | 0.761 | |
| 3.0 | 110.4 | 170.9 | 0.2477 | 242.3 | 0.6255 | 328.8 | 1.221 | 0.339 | |
| 2.8 | 106.8 | 168.2 | 0.2530 | 238.6 | 0.6363 | 327.2 | 1.229 | 0.063 | |
| 2.6 | 103.2 | 162.4 | 0.2543 | 233.7 | 0.6441 | 314.1 | 1.230 | 0.280 | |
| 2.4 | 97.05 | 161.5 | 0.2647 | 227.9 | 0.6567 | 306.4 | 1.249 | 0.662 | |
| 2.2 | 88.65 | 154.7 | 0.2759 | 223.4 | 0.6600 | 300.6 | 1.262 | 0.775 | |
| 2.0 | 85.50 | 151.0 | 0.2784 | 216.6 | 0.6705 | 296.0 | 1.277 | 0.426 | |
| 1.8 | 80.25 | 147.7 | 0.2846 | 213.7 | 0.6855 | 287.1 | 1.279 | 0.191 | |
| 1.6 | 73.90 | 143.6 | 0.3009 | 205.7 | 0.6999 | 278.2 | 1.311 | 0.603 | |
| 1.4 | 69.80 | 139.2 | 0.3090 | 200.1 | 0.7116 | 269.7 | 1.315 | 0.998 | |
| 1.2 | 63.95 | 133.8 | 0.3141 | 192.6 | 0.7233 | 261.1 | 1.327 | 0.389 | |
| 1.0 | 54.95 | 124.4 | 0.3165 | 184.7 | 0.7371 | 251.3 | 1.347 | 0.204 | |
| 0.9 | 56.20 | 127.0 | 0.3336 | 182.5 | 0.7539 | 247.5 | 1.365 | 0.691 | |
| 0.8 | 53.60 | 120.9 | 0.3372 | 177.8 | 0.7689 | 245.5 | 1.393 | 1.697 | |
| 0.7 | 48.76 | 119.5 | 0.3504 | 175.6 | 0.7809 | 233.9 | 1.397 | 0.150 | |
| 0.6 | 45.44 | 115.9 | 0.3639 | 167.9 | 0.7857 | 225.9 | 1.404 | 0.000 | |
| 0.5 | 42.10 | 112.5 | 0.3624 | 163.5 | 0.7962 | 217.5 | 1.404 | 0.000 | |
| 0.4 | 40.14 | 108.7 | 0.3771 | 159.2 | 0.8070 | 213.5 | 1.425 | 0.519 | |
| 0.3 | 37.54 | 107.4 | 0.3930 | 154.3 | 0.8223 | 209.2 | 1.454 | 0.355 | |
| 0.2 | 34.78 | 104.7 | 0.3975 | 151.4 | 0.8394 | 205.9 | 1.487 | 0.107 | |
| 0.1 | 33.67 | 97.4 | 0.4119 | 146.5 | 0.8733 | 194.4 | 1.502 | 0.333 | |
| 0.2 | 18.67 | 99.5 | 0.4017 | 145.3 | 0.8439 | 198.4 | 1.472 | 0.368 | |
| 0.3 | 36.21 | 102.2 | 0.3903 | 148.1 | 0.8343 | 198.7 | 1.450 | 0.556 | |
| 0.4 | 39.95 | 105.8 | 0.3894 | 154.8 | 0.8289 | 204.3 | 1.440 | 0.116 | |
| 0.5 | 41.81 | 109.4 | 0.3843 | 155.3 | 0.8094 | 210.4 | 1.427 | 0.413 | |
| 0.6 | 42.60 | 111.2 | 0.3765 | 157.7 | 0.7974 | 209.7 | 1.397 | 0.823 | |
| 0.7 | 44.72 | 112.4 | 0.3699 | 159.8 | 0.7887 | 207.3 | 1.362 | 0.161 | |
| 0.8 | 45.29 | 113.5 | 0.3690 | 161.3 | 0.7896 | 208.6 | 1.362 | 0.152 | |
| 0.9 | 47.97 | 114.8 | 0.3621 | 163.9 | 0.7755 | 214.7 | 1.366 | 0.588 | |
| 1.0 | 48.17 | 116.5 | 0.3516 | 164.2 | 0.7644 | 217.3 | 1.361 | 0.018 | |
| 1.2 | 53.55 | 120.3 | 0.3390 | 171.3 | 0.7587 | 221.2 | 1.330 | 0.903 | |
| 1.4 | 59.70 | 127.5 | 0.3399 | 176.6 | 0.7488 | 229.8 | 1.336 | 0.153 | |
| 1.6 | 64.55 | 132.1 | 0.3318 | 182.8 | 0.7392 | 237.8 | 1.327 | 0.348 | |
| 1.8 | 69.10 | 136.2 | 0.3327 | 184.3 | 0.7272 | 240.9 | 1.316 | 0.291 | |
| 2.0 | 71.25 | 136.6 | 0.3033 | 192.9 | 0.7059 | 253.3 | 1.277 | 0.522 | |
| 2.2 | 79.00 | 144.8 | 0.2976 | 202.7 | 0.6933 | 266.0 | 1.275 | 0.434 | |
| 2.4 | 84.30 | 148.4 | 0.2922 | 207.4 | 0.6849 | 272.0 | 1.262 | 1.150 | |
| 2.6 | 91.90 | 155.3 | 0.2763 | 218.3 | 0.6729 | 280.4 | 1.243 | 0.973 | |
| 2.8 | 96.50 | 157.5 | 0.2697 | 219.2 | 0.6600 | 285.2 | 1.230 | 0.096 | |
| 3.0 | 101.3 | 161.4 | 0.2620 | 222.1 | 0.6558 | 290.8 | 1.231 | 0.269 | |
| 3.2 | 105.1 | 164.7 | 0.2572 | 226.1 | 0.6417 | 296.5 | 1.220 | 0.523 | |
| 3.4 | 109.0 | 169.3 | 0.2518 | 230.9 | 0.6297 | 301.1 | 1.198 | 0.154 | |

No.c-8 ERF : SER15C Electrode Gap : $\delta_c=1.47\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/12/04

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $n(\text{s}^{-1})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cf}(\text{mN}\cdot\text{m})$ |
| 3.00 | 207.7 | 221.1 | 0.01273 | 309.65 | 0.06462 | 527.5 | 0.2580 | 831.5 | 0.7038 | 9.695 | |
| 2.50 | 166.2 | 183.4 | 0.01216 | 282.65 | 0.07419 | 503.5 | 0.2833 | 796.5 | 0.7266 | 9.655 | |
| 2.00 | 145.3 | 161.9 | 0.01181 | 268.45 | 0.08007 | 485.5 | 0.3000 | 775.5 | 0.7491 | 9.460 | |
| 1.50 | 122.5 | 141.8 | 0.01272 | 262.25 | 0.09600 | 478.2 | 0.3393 | 740.0 | 0.7947 | 9.375 | |
| 1.00 | 94.05 | 116.8 | 0.01571 | 249.25 | 0.12030 | 460.1 | 0.3939 | 695.0 | 0.8793 | 7.985 | |
| 0.60 | 72.40 | 110.3 | 0.02449 | 250.80 | 0.16056 | 428.2 | 0.4536 | 606.5 | 0.9501 | 8.160 | |
| 0.30 | 53.40 | 106.7 | 0.03810 | 235.05 | 0.19194 | 375.0 | 0.4758 | 496.5 | 0.9237 | 10.160 | |
| 0.20 | 43.00 | 103.4 | 0.04881 | 210.40 | 0.20787 | 315.8 | 0.4923 | 413.6 | 0.9075 | 9.690 | |
| 0.10 | 33.69 | 94.7 | 0.05880 | 181.15 | 0.22014 | 260.3 | 0.5019 | 291.8 | 0.8844 | 11.385 | |
| 0.30 | 51.50 | 95.9 | 0.03162 | 219.95 | 0.16722 | 363.7 | 0.4272 | 484.5 | 0.8433 | — | |
| 1.00 | 93.60 | 133.0 | 0.02600 | 266.50 | 0.15999 | 439.8 | 0.4533 | 616.5 | 0.9504 | — | |
| 2.00 | 141.4 | 168.5 | 0.01803 | 279.80 | 0.11589 | 467.0 | 0.3744 | 697.0 | 0.8613 | — | |
| 3.00 | 185.6 | 200.0 | 0.01443 | 296.30 | 0.08811 | 491.2 | 0.3186 | 746.0 | 0.7776 | — | |

No.c-9 ERF : SER15C Electrode Gap : $\delta_c=2.12\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/11/27

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $n(\text{s}^{-1})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cf}(\text{mN}\cdot\text{m})$ |
| 3.00 | 146.7 | 163.65 | 0.01123 | 262.5 | 0.07845 | 497.2 | 0.3198 | 820.5 | 0.8445 | 11.11 | |
| 2.50 | 137.9 | 155.35 | 0.01275 | 270.0 | 0.09585 | 506.5 | 0.3624 | 803.5 | 0.8886 | 10.86 | |
| 2.00 | 121.6 | 142.55 | 0.01360 | 267.3 | 0.10590 | 497.4 | 0.3801 | 772.5 | 0.9045 | 11.60 | |
| 1.50 | 103.7 | 130.00 | 0.01652 | 265.6 | 0.12807 | 481.3 | 0.4242 | 716.0 | 0.9357 | 11.38 | |
| 1.00 | 86.60 | 120.30 | 0.02251 | 261.4 | 0.15513 | 455.1 | 0.4647 | 656.0 | 0.9549 | 10.14 | |
| 0.60 | 67.60 | 112.85 | 0.03105 | 248.5 | 0.17847 | 415.7 | 0.4809 | 575.0 | 0.9444 | 10.47 | |
| 0.30 | 53.10 | 109.30 | 0.04257 | 229.3 | 0.19944 | 359.4 | 0.4884 | 469.1 | 0.9258 | 11.12 | |
| 0.20 | 44.67 | 106.90 | 0.05217 | 214.0 | 0.21822 | 316.5 | 0.5199 | 373.8 | 0.9714 | 11.66 | |
| 0.10 | 40.55 | 107.70 | 0.06822 | 204.3 | 0.24843 | 238.8 | 0.5832 | 236.8 | 1.1136 | 11.86 | |
| 0.30 | 49.87 | 118.95 | 0.06294 | 232.7 | 0.24078 | 346.5 | 0.5493 | 405.6 | 1.0239 | — | |
| 1.00 | 86.95 | 145.40 | 0.04164 | 277.4 | 0.20337 | 430.0 | 0.5193 | 564.5 | 1.0239 | — | |
| 2.00 | 130.8 | 166.95 | 0.02634 | 297.9 | 0.16050 | 476.2 | 0.4680 | 662.0 | 1.0077 | — | |
| 3.00 | 162.9 | 188.20 | 0.01875 | 309.8 | 0.12378 | 506.0 | 0.4032 | 739.5 | 0.9228 | — | |

No.c-10 ERF : SER15C Electrode Gap : $\delta_c=3.00\text{mm}$ Temperature : $t=20^\circ\text{C}$ Date : 97/12/04

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | Blank Test |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $n(\text{s}^{-1})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $T_{cm}(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $T_{cf}(\text{mN}\cdot\text{m})$ |
| 3.00 | 135.6 | 159.1 | 0.01354 | 296.8 | 0.1003 | 551 | 0.3678 | 10.26 | |
| 2.50 | 123.2 | 150.0 | 0.01460 | 294.0 | 0.1121 | 549 | 0.3978 | 10.90 | |
| 2.00 | 112.0 | 141.6 | 0.01649 | 294.6 | 0.1265 | 541 | 0.4230 | 9.965 | |
| 1.50 | 94.40 | 129.4 | 0.01926 | 290.7 | 0.1432 | 524 | 0.4476 | 9.750 | |
| 1.00 | 77.40 | 119.7 | 0.02417 | 282.8 | 0.1612 | 497.2 | 0.4617 | 9.380 | |
| 0.60 | 60.75 | 113.3 | 0.03000 | 272.3 | 0.1744 | 462.3 | 0.4662 | 9.550 | |
| 0.30 | 53.65 | 110.8 | 0.03675 | 255.1 | 0.1829 | 411.1 | 0.4545 | 11.20 | |
| 0.20 | 46.74 | 107.3 | 0.04029 | 241.5 | 0.1852 | 380.1 | 0.4437 | 11.21 | |
| 0.10 | 43.86 | 108.0 | 0.04437 | 226.3 | 0.1892 | 339.3 | 0.4515 | 12.44 | |
| 0.30 | 47.23 | 110.2 | 0.04098 | 245.1 | 0.1896 | 392.5 | 0.4617 | — | |
| 1.00 | 67.45 | 116.5 | 0.02886 | 269.5 | 0.1706 | 462.0 | 0.4659 | — | |
| 2.00 | 100.00 | 137.6 | 0.02086 | 281.7 | 0.1417 | 489.6 | 0.4368 | — | |
| 3.00 | 127.20 | 155.3 | 0.01634 | 287.8 | 0.1157 | 515 | 0.3996 | — | |

No.c-11 ERF:SER15D Electrode Gap: $\delta_c=2.12\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 98/02/23

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| $n(S^{-1})$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $I(mA)$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $I(mA)$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $I(mA)$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $I(mA)$ | $T_{cm}(mN\cdot m)$ | $T_{cf}(mN\cdot m)$ |
| 3.00 | 439.6 | 469.6 | 0.02096 | 619.3 | 0.08255 | 970.4 | 0.2646 | 1513 | 0.6265 | | 32.71 |
| 2.50 | 397.8 | 419.1 | 0.02637 | 573.0 | 0.08435 | 941.0 | 0.2670 | 1498 | 0.6880 | | 30.51 |
| 2.00 | 349.3 | 381.5 | 0.02416 | 557.4 | 0.08805 | 951.1 | 0.2909 | 1500 | 0.7355 | | 28.45 |
| 1.50 | 296.7 | 332.5 | 0.02118 | 531.0 | 0.09425 | 944.1 | 0.3210 | 1467 | 0.7895 | | 28.19 |
| 1.00 | 238.4 | 282.2 | 0.01995 | 512.5 | 0.10575 | 935.7 | 0.3570 | 1398 | 0.8255 | | 25.53 |
| 0.60 | 187.6 | 246.2 | 0.02023 | 504.7 | 0.12415 | 897.2 | 0.3833 | 1282 | 0.8230 | | 23.69 |
| 0.30 | 145.3 | 226.9 | 0.02474 | 495.6 | 0.14320 | 786.9 | 0.3788 | 1016 | 0.7465 | | 23.35 |
| 0.20 | 123.4 | 221.3 | 0.02864 | 477.2 | 0.14895 | 738.0 | 0.3812 | 757.3 | 0.7600 | | 22.27 |
| 0.20 | 92.1 | 209.8 | 0.04120 | 272.0 | 0.16955 | 299.3 | 0.4398 | 386.5 | 0.8655 | | 24.52 |
| 0.10 | 107.5 | 187.7 | 0.02200 | 412.8 | 0.11720 | 691.3 | 0.3758 | 586.6 | 0.7970 | | 22.00 |
| 0.03 | 93.1 | 183.3 | 0.02582 | 391.1 | 0.12270 | 363.3 | 0.3828 | 521.0 | 0.8495 | | 22.67 |
| 0.01 | 88.2 | 204.4 | 0.04800 | 197.9 | 0.19410 | 230.5 | 0.4656 | 318.2 | 0.9280 | | 23.62 |

付録 D 回転円筒型デバイスによる流動曲線および
電流密度とずり速度のグラフ

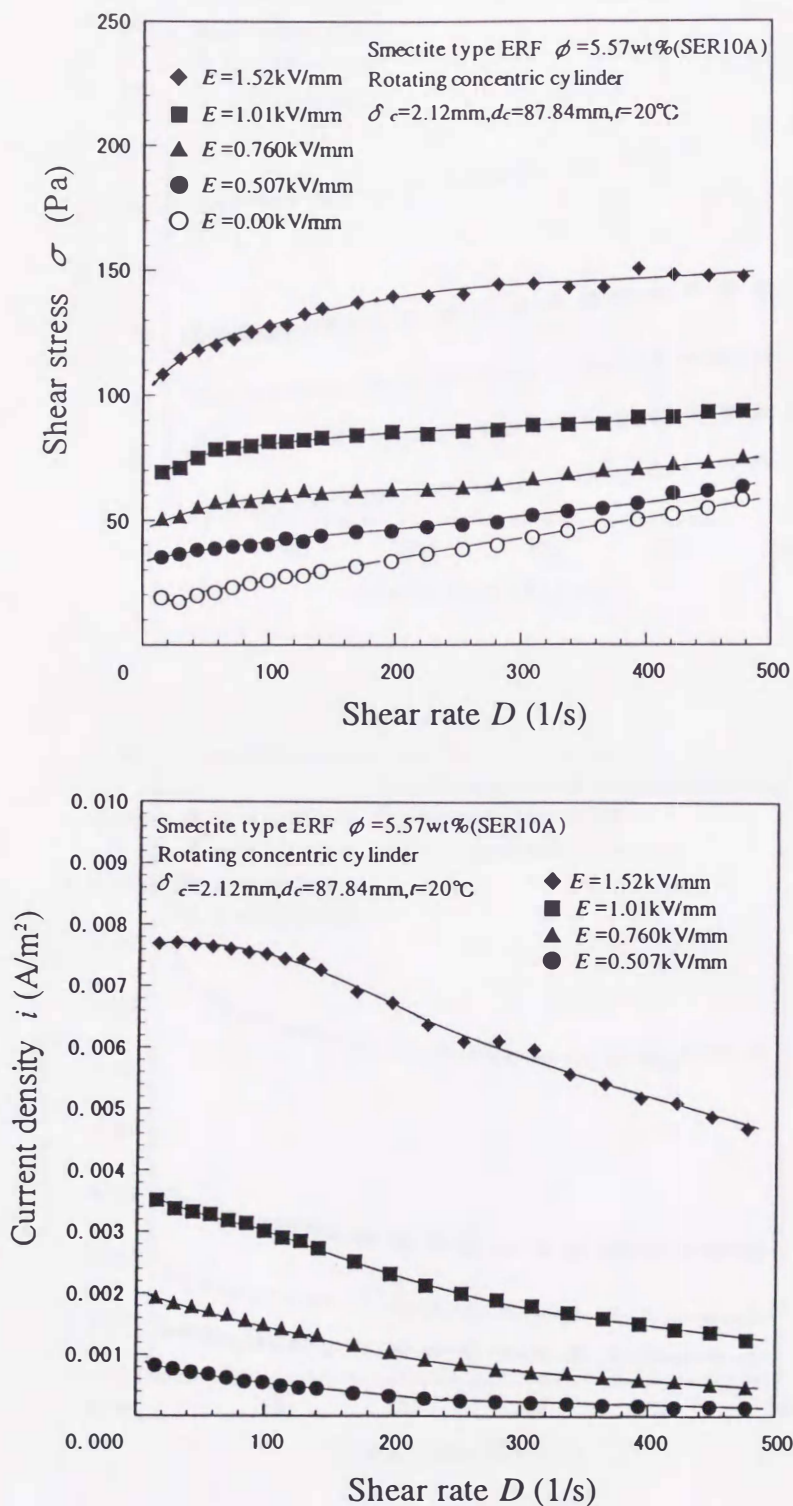


図 D.1 流動曲線と電流密度の特性(SER10A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

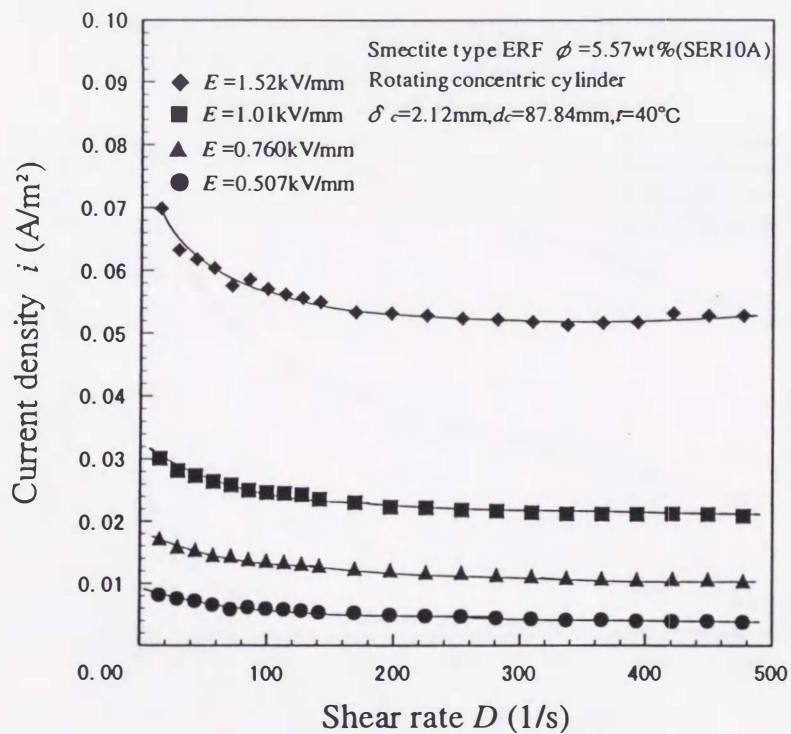
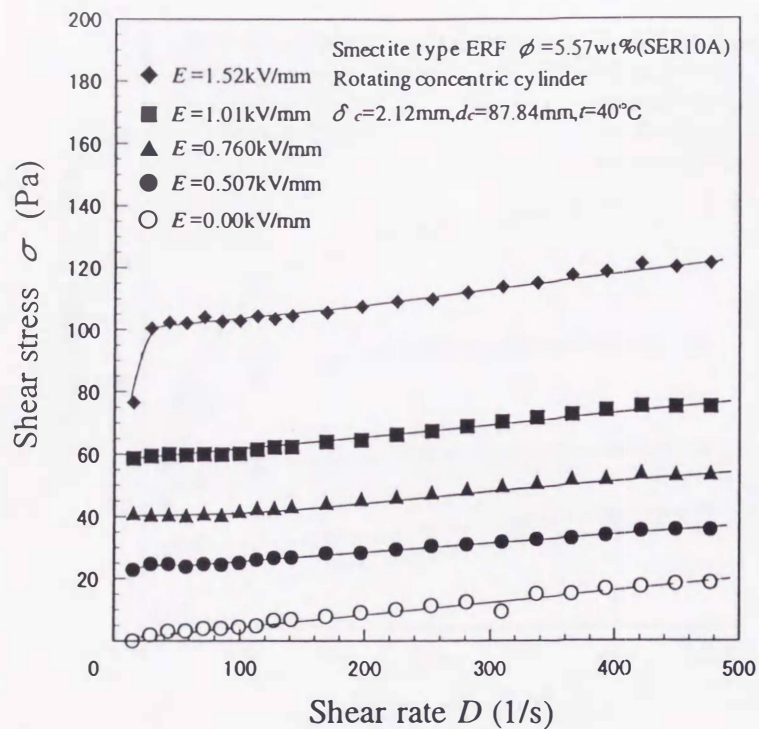


図 D.2 流動曲線と電流密度の特性(SER10A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

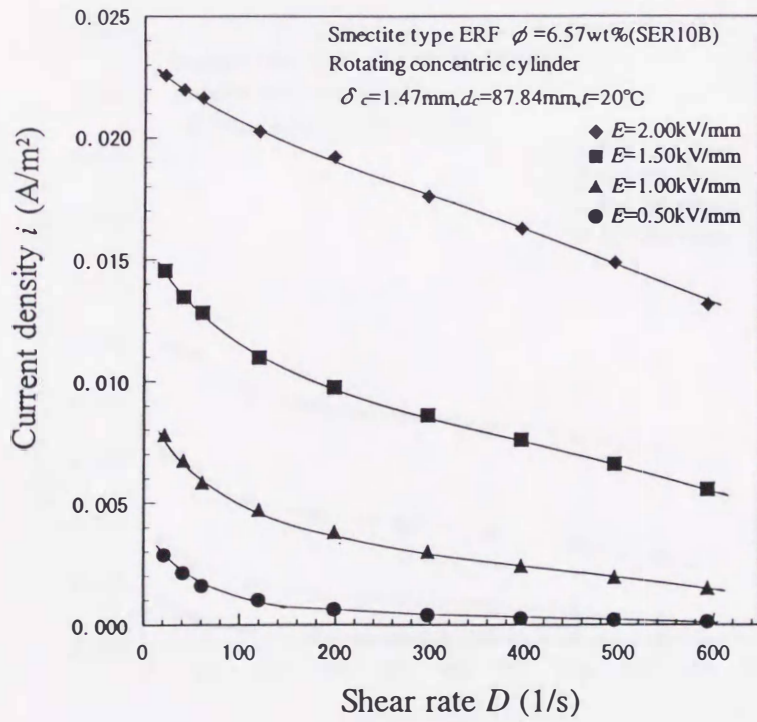
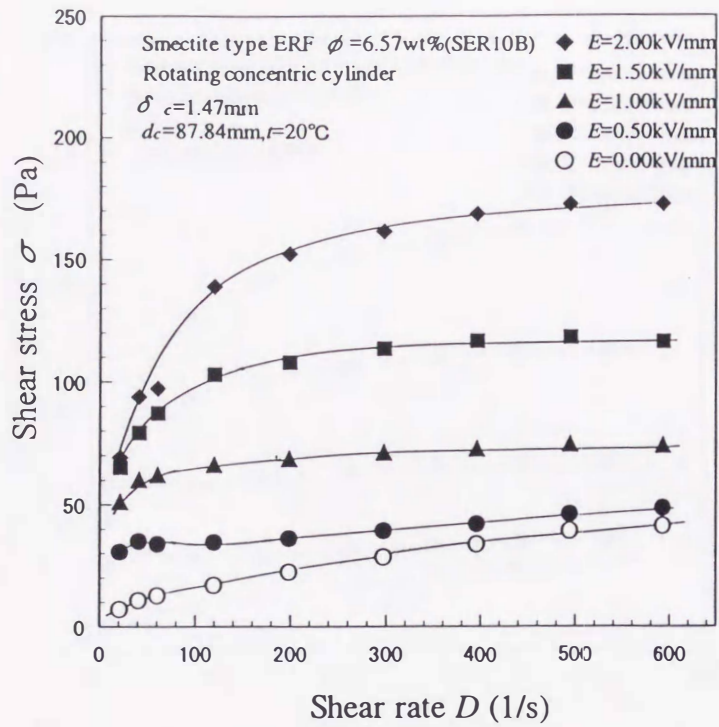


図 D.3 流動曲線と電流密度の特性(SER10B, $\delta_c = 1.47\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

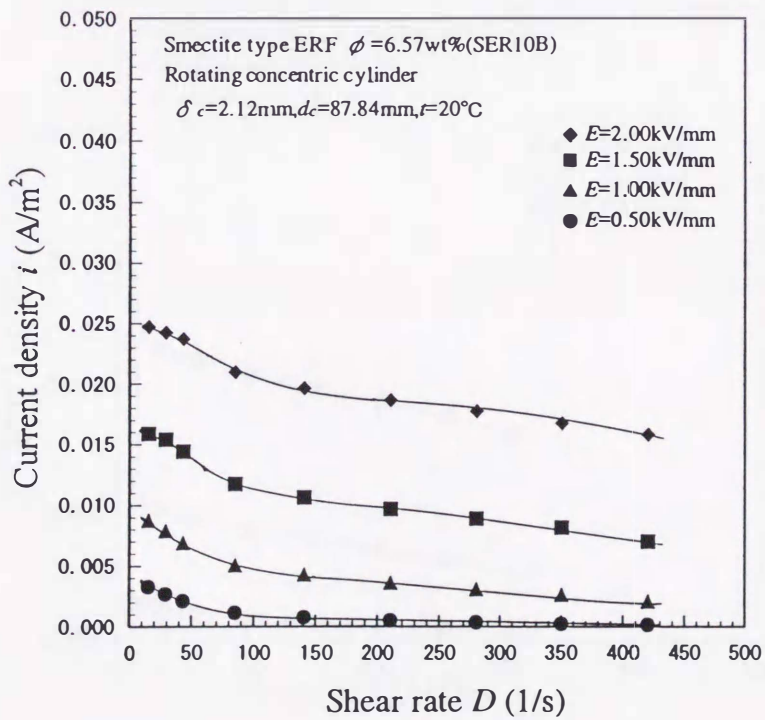
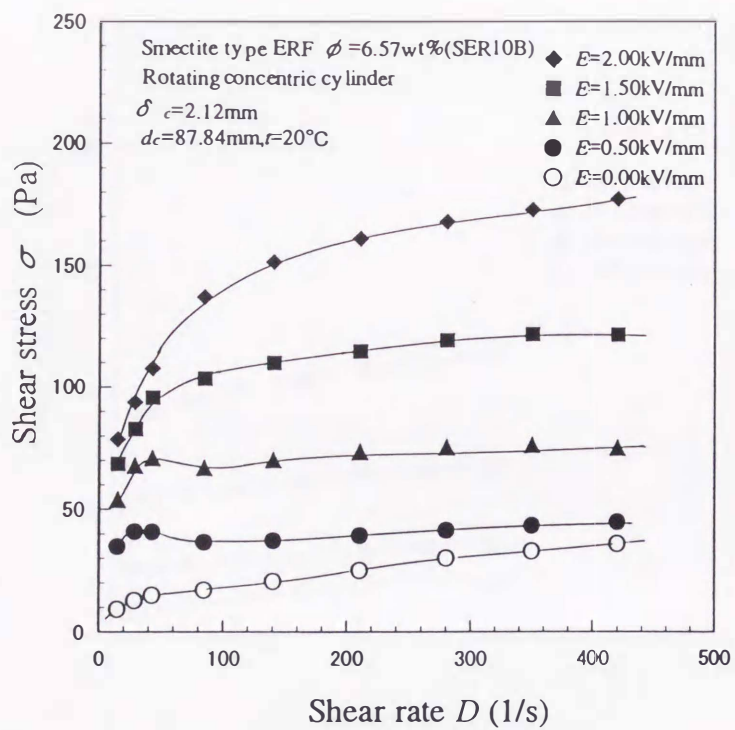


図 D.4 流動曲線と電流密度の特性 (SER10B, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

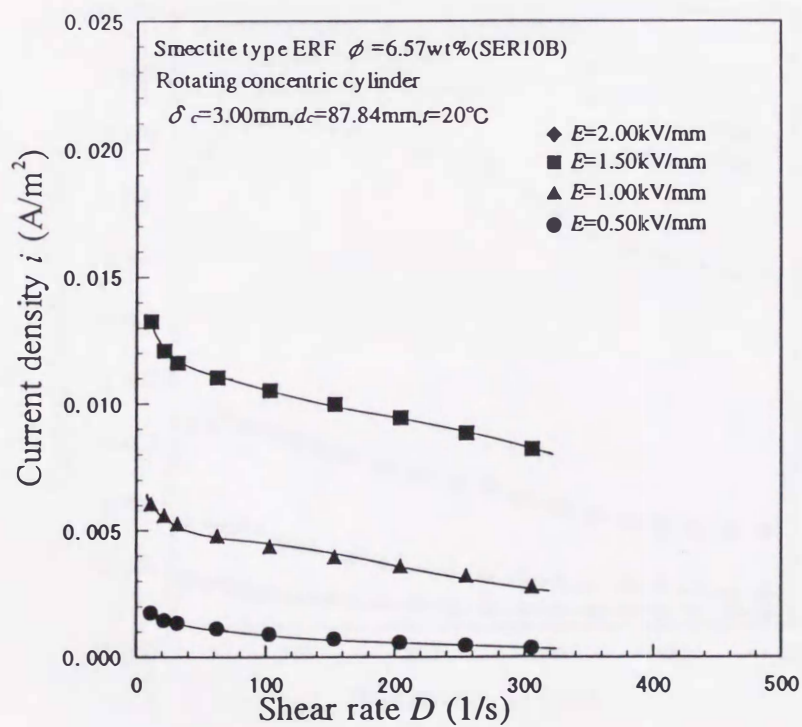
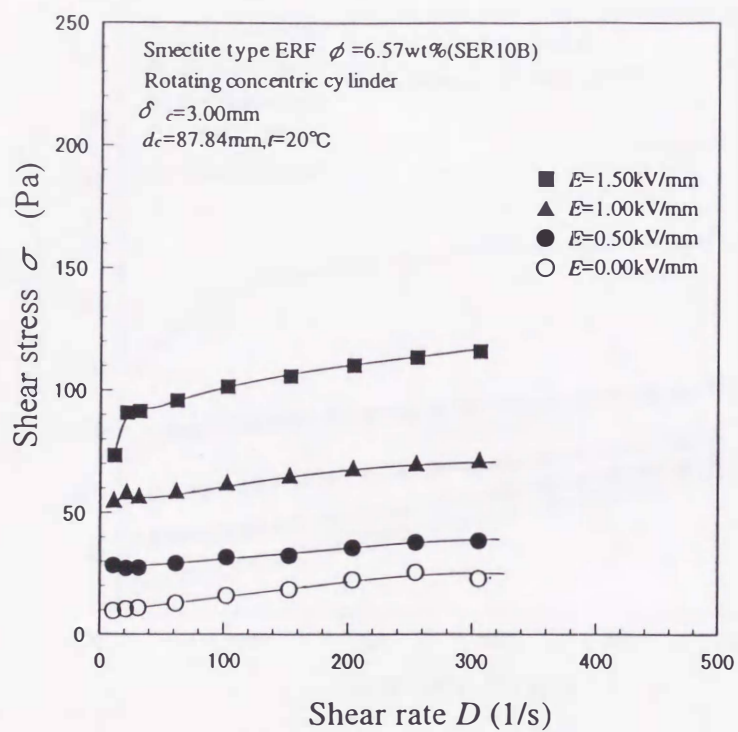


図 D.5 流動曲線と電流密度の特性(SER10B, $\delta_c = 3.00\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

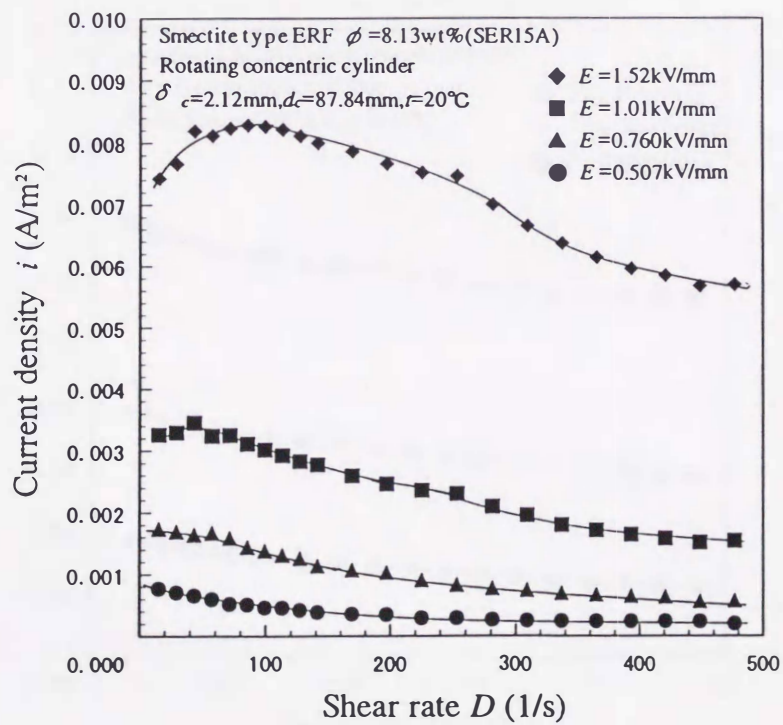
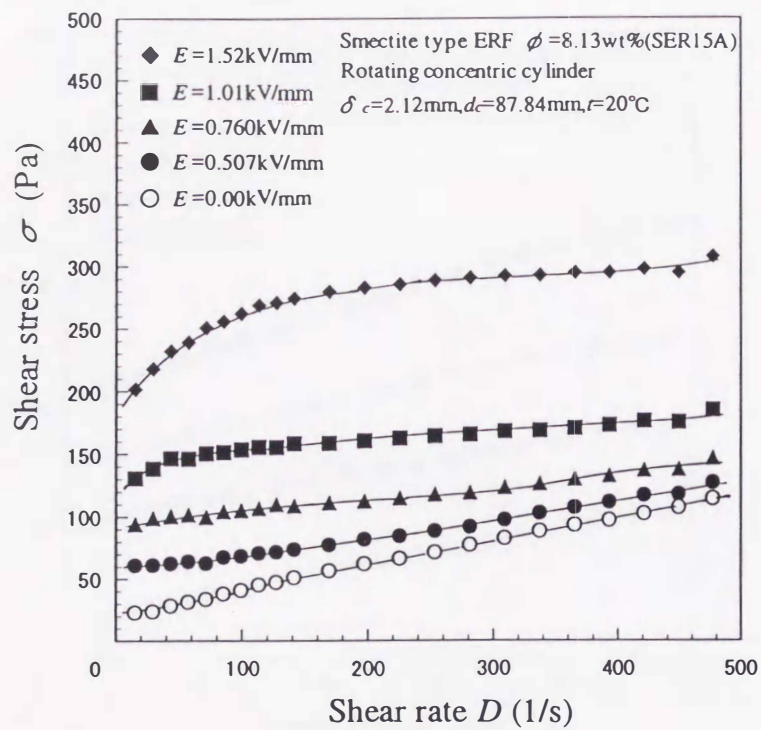


図 D.6 流動曲線と電流密度の特性(SER15A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

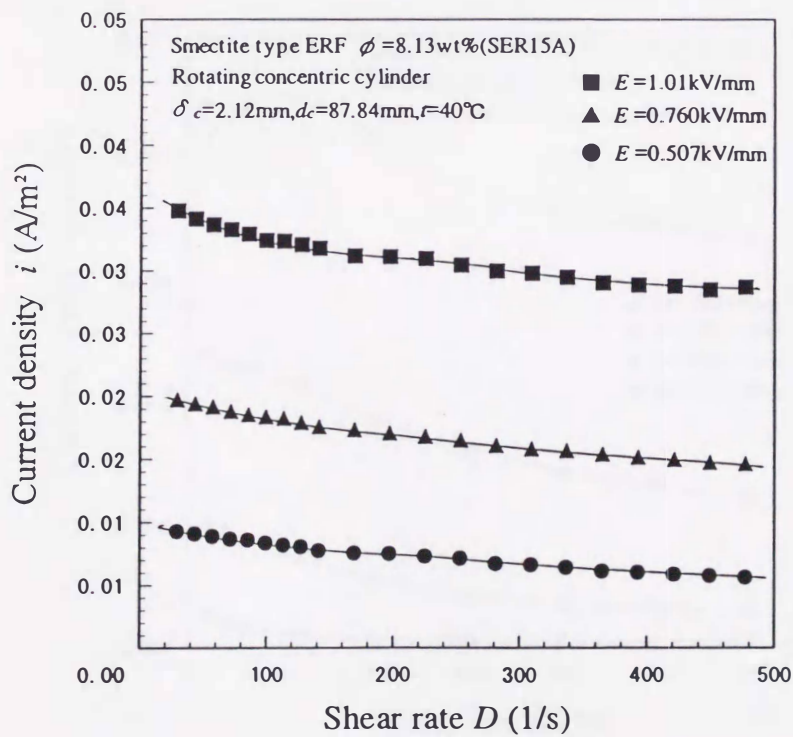
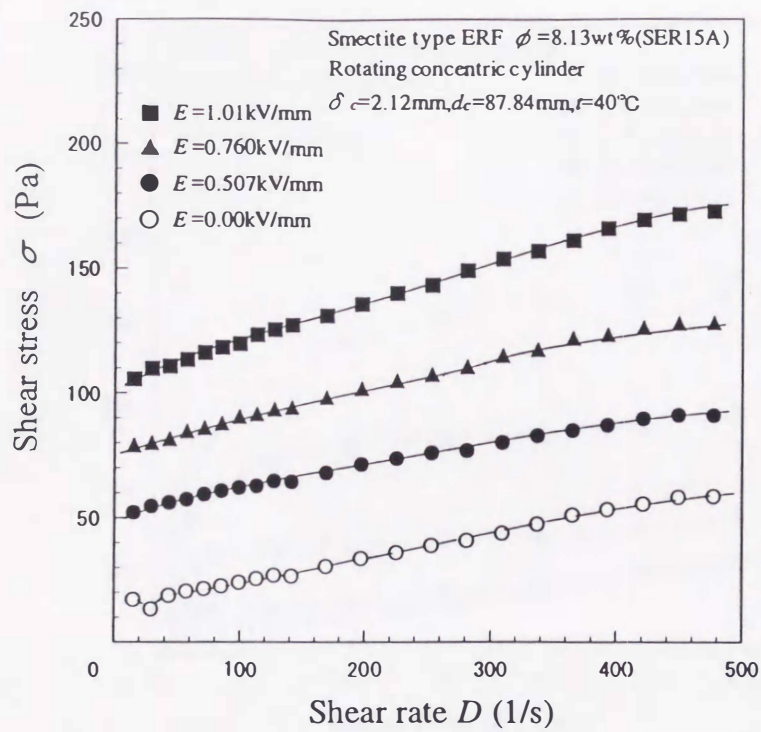


図 D.7 流動曲線と電流密度の特性(SER15A, $\delta_c = 2.12\text{mm}, r = 40^\circ\text{C}$)

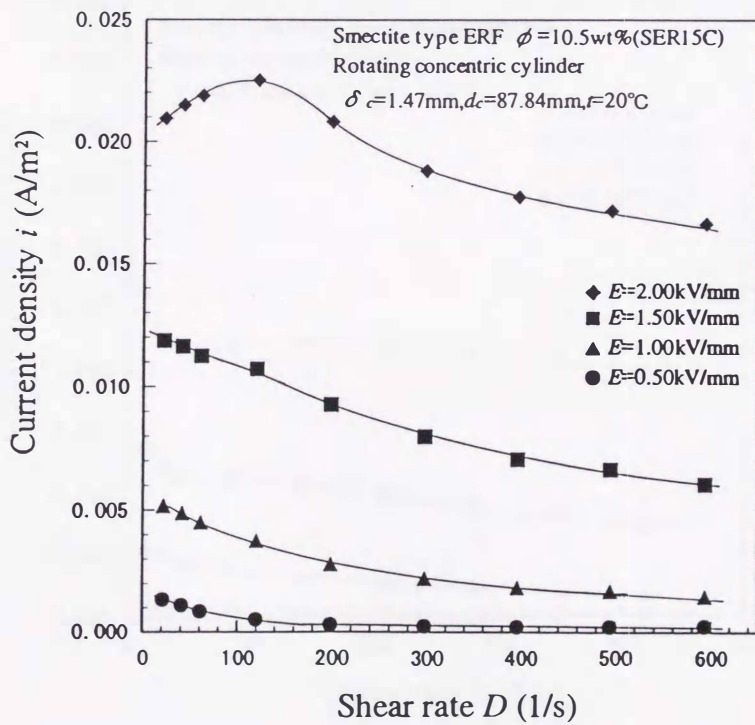
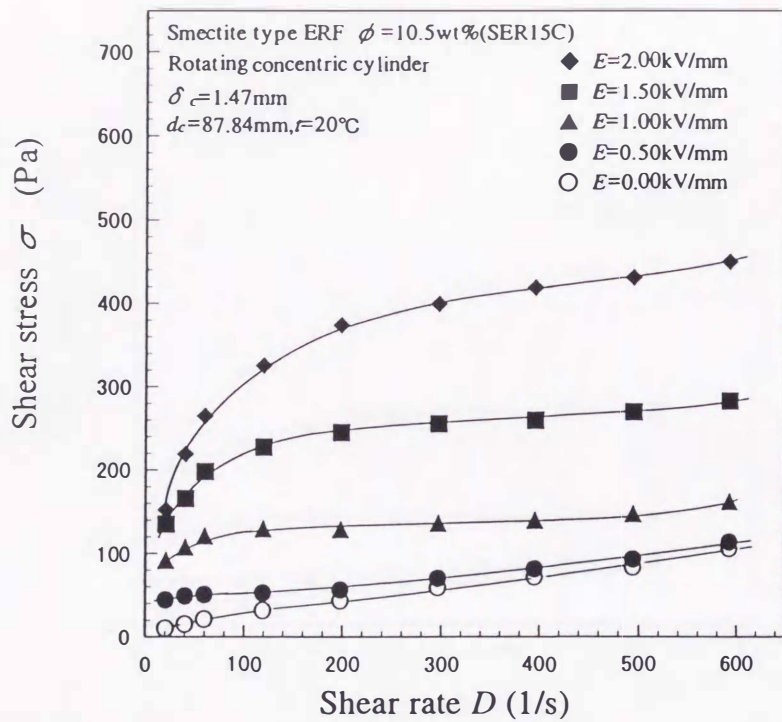


図 D.8 流動曲線と電流密度の特性 (SER15C, $\delta_c = 1.47\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

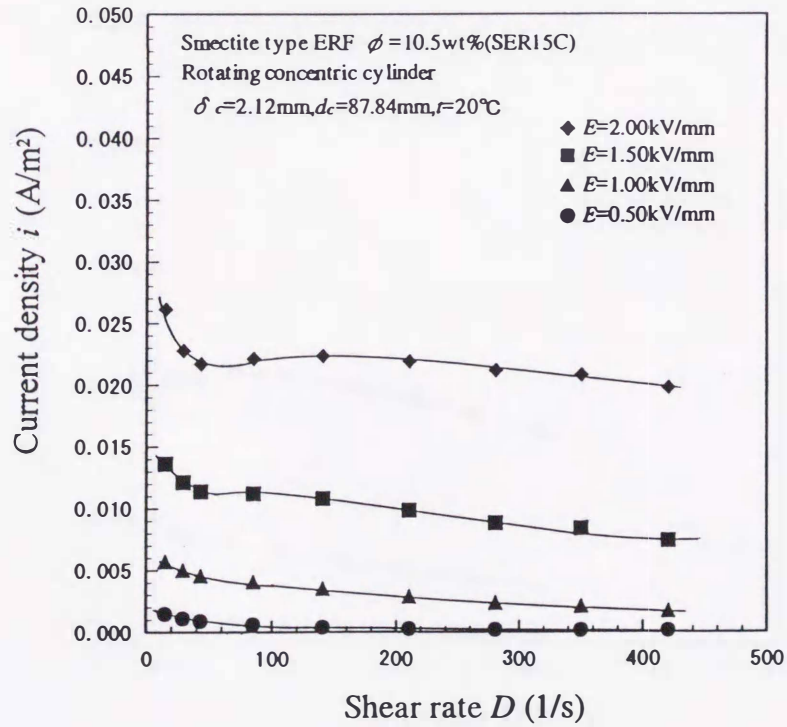
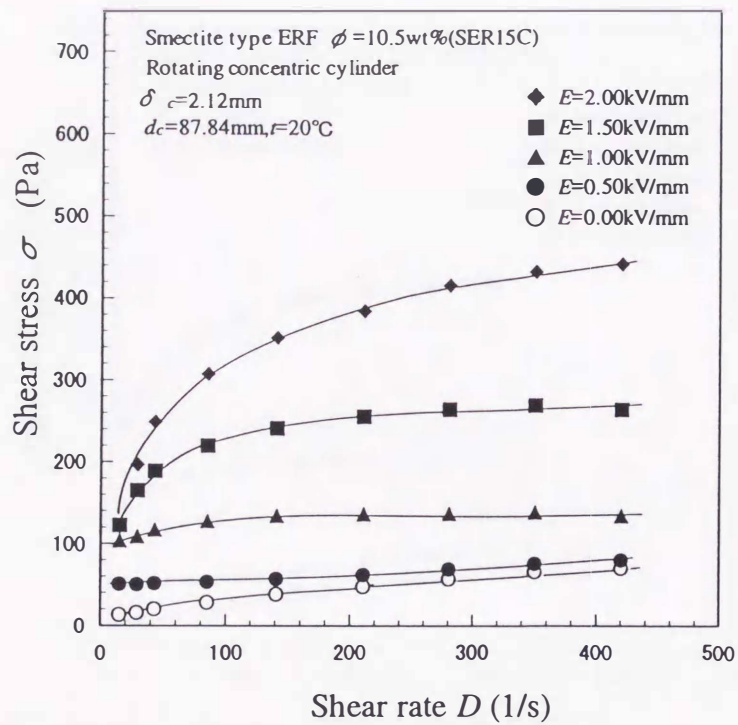


図 D.9 流動曲線と電流密度の特性(SER15C, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

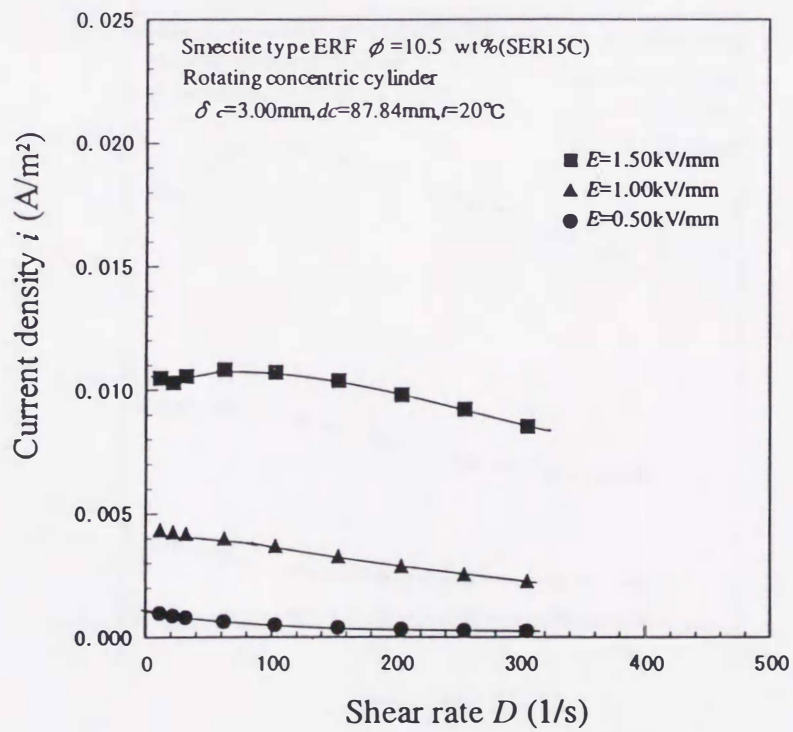
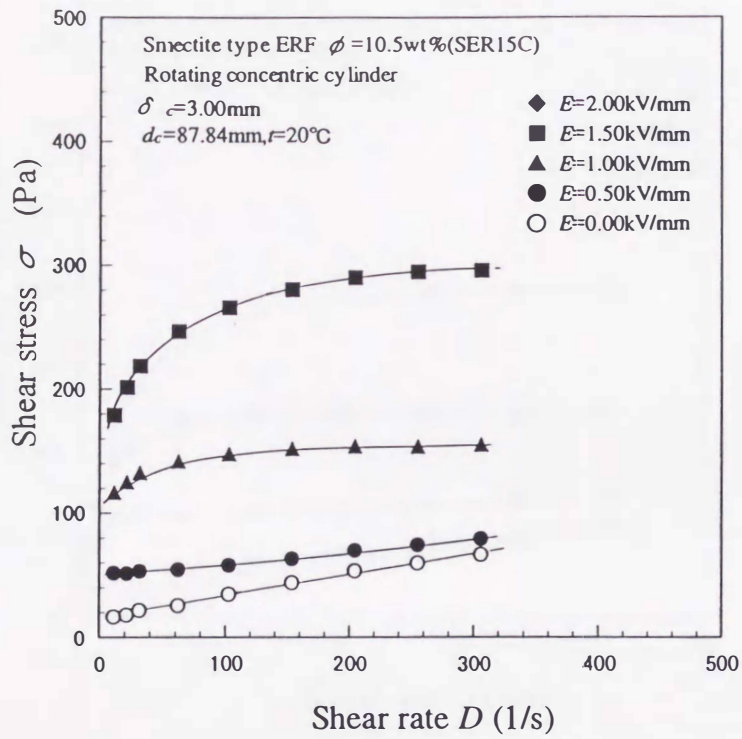


図 D.10 流動曲線と電流密度の特性(SER15C, $\delta = 3.00\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

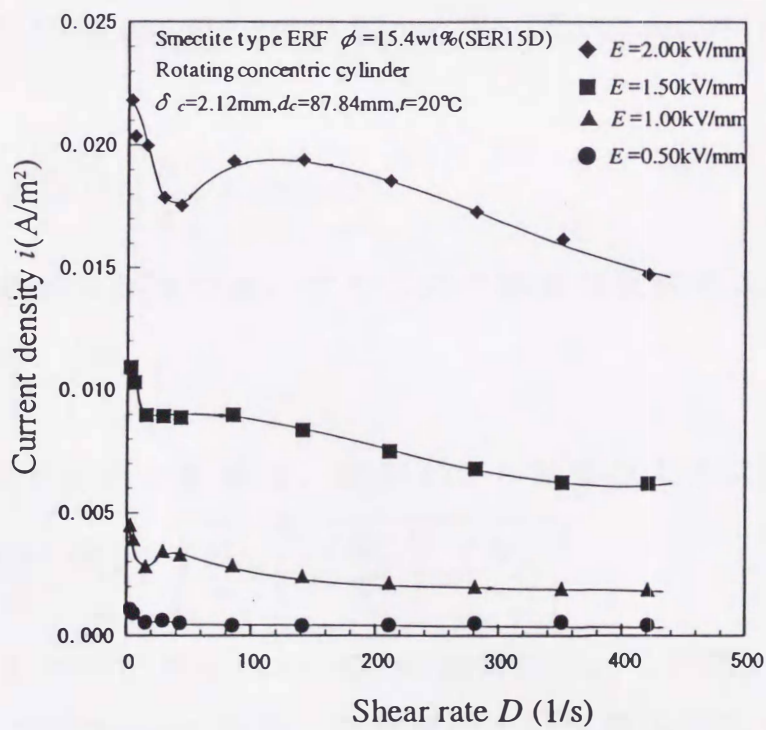
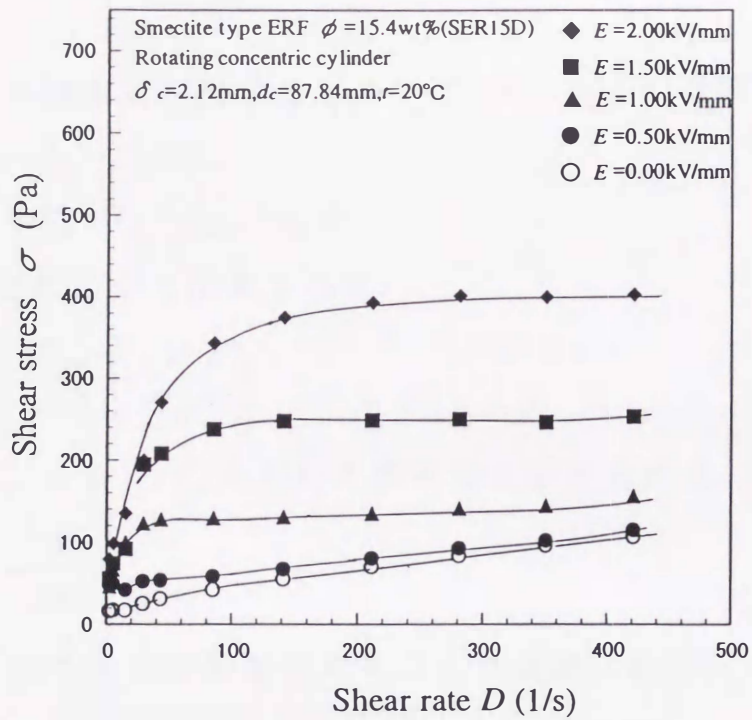


図 D.11 流動曲線と電流密度の特性(SER15D, $\delta_c = 2.12\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

付録 E ずり応力の誤差解析

回転円筒の外周面に作用するトルク T_{cs} は、次式で計算される。

$$\begin{aligned} T_{cs} &= T_{cm} - T_{cf} - T_{ce} \\ &= T_{cm} - T_{cf} - (T_{cm0} - T_{cf})k \end{aligned} \quad (\text{E.1})$$

ただし、 k は次式のように表される。

$$k = \frac{(T'_{cm} - T'_{cf}) - T'_{cs}}{T'_{cm} - T'_{cf}} \quad (\text{E.2})$$

ずり応力 σ は、トルク T_{cs} を用いて次式から求められる。

$$\sigma = \frac{T_{cs}}{2\pi R_i^2 l} \quad (\text{E.3})$$

式(E.3)から、ずり応力の誤差は次式のように表される。

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{cs}}{T_{cs}}\right)^2 + \left(2\frac{\delta R_i}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2} \quad (\text{E.4})$$

ここで、 $\delta R_i = \pm 0.005\text{mm}$, $R_i = 43.92\text{mm}$, $\delta l = \pm 0.005\text{mm}$, $l = 150.0\text{mm}$ であるので

$$\left(2\frac{\delta R_i}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 = 5.30 \times 10^{-8} \quad (\text{E.5})$$

となり寸法誤差は無視でき、ずり応力の誤差は次式のようになる。

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma} = \left(\frac{\delta T_{cs}}{T_{cs}}\right) \quad (\text{E.6})$$

従って、ずり応力の誤差は、式(E.1)から次式のように表される。

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma} = \frac{\delta T_{cs}}{T_{cs}} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{cm}}{T_{cs}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{cf}}{T_{cs}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{ce}}{T_{cs}}\right)^2} \quad (\text{E.7})$$

一方、シリコンオイルの KF96-1000CS ($\mu = 0.972\text{Pa}\cdot\text{s}$) と KF96-100CS ($\mu = 0.0964\text{Pa}\cdot\text{s}$) を使用した実験によって得られた k の計測器による誤差は、式(E.2)から次式のように表される。

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\frac{T'_{cs}{}^2 (\delta T'_{cm}{}^2 + \delta T'_{cf}{}^2)}{(T'_{cm} - T'_{cf} - T'_{cs})^2 (T'_{cm} - T'_{cf})^2}} \quad (\text{E.8})$$

ここで、トルク計の計測誤差である $\delta T'_{cm}, \delta T'_{cf}$ は、それぞれ ± 0.01 (mN·m) である。

$\delta_c = 2.12$ mm の場合の KF96-1000CS と KF96-100CS を使用した場合の実験結果と式(E.2)による k および式(E.8)による $\delta k/k$ の値を表 E.1 および表 E.2 に示す。なお、本研究では回転数に対してこれの 2 倍以上の実験点を取っており、式(E.2)による k を求めるとき機械摩擦損失トルクは実験式を使用している。ここではおおよその誤差を知るために表に示す回転数に対して調べ、機械摩擦損失トルクは計測値を用いる。

表 E.1 KF96-1000CS による実験結果

| n (1/s) | T'_{cm} (mN·m) | T'_{cs} (mN·m) | T'_{cf} (mN·m) | k | $\delta k/k$ (-) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| 3.0 | 781.25 | 740.4 | 21.88 | 0.0250 | 0.000726 |
| 2.5 | 656.3 | 641.7 | 19.38 | -0.0075 | 0.002975 |
| 2.0 | 525.0 | 493.6 | 16.88 | 0.0286 | 0.000945 |
| 1.5 | 397.5 | 394.9 | 13.75 | -0.0290 | 0.001309 |
| 1.0 | 270.0 | 246.8 | 10.63 | 0.0485 | 0.001070 |
| 0.6 | 165.0 | 148.1 | 9.38 | 0.0485 | 0.001783 |
| 0.3 | 87.5 | 74.0 | 6.88 | 0.0817 | 0.001972 |
| 0.1 | 33.8 | 24.7 | 4.38 | 0.1598 | 0.002530 |

表 E.2 KF96-100CS による実験結果

| n (1/s) | T_{cm}' (mN·m) | T_{cs}' (mN·m) | T_{cf}' (mN·m) | k | $\delta k/k$ (-) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| 3.0 | 90.0 | 73.4 | 13.75 | 0.0370 | 0.004828 |
| 2.6 | 80.0 | 63.6 | 13.75 | 0.0394 | 0.005202 |
| 2.0 | 65.0 | 49.0 | 12.50 | 0.0676 | 0.003717 |
| 1.6 | 52.5 | 39.2 | 12.50 | 0.0209 | 0.016524 |
| 1.0 | 35.0 | 24.5 | 11.25 | -0.0306 | 0.020067 |
| 0.6 | 25.0 | 14.7 | 10.00 | 0.0209 | 0.044064 |
| 0.3 | 17.5 | 7.3 | 10.00 | 0.0209 | 0.088128 |
| 0.1 | 12.5 | 2.4 | 11.25 | -0.9581 | 0.023122 |

表 E.1 および表 E.2 から、それぞれの場合の式(E.2)による k の平均値 (k_{1000CS} , k_{100CS}) と標準偏差 (δk_{1000CS} , δk_{100CS}) の計算から以下の結果を得る。ただし、KF96-100CS の $n=0.1$ (1/s) の場合は除外している。

$$\frac{\delta k_{1000CS}}{k_{1000CS}} = 1.218 \quad \frac{\delta k_{100CS}}{k_{100CS}} = 1.064 \quad (E.9)$$

この値に比べ、表 E.1 および表 E.2 における式(E.7)による $\delta k/k$ の値ははるかに小さいので、 k の誤差として式(E.9)の値を採用する。このときの k の値はそれぞれ $k_{1000CS} = 0.04446$, $k_{100CS} = 0.02588$ である。

従って、電極間隔 $\delta_c = 2.12\text{mm}$ のときの k は、

$$k = \frac{k_{100CS} + k_{1000CS}}{2} \quad (E.10)$$

として求めているので、 k の計測誤差は以下の式となる。

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta k_{100CS}}{2k}\right)^2 + \left(\frac{\delta k_{1000CS}}{2k}\right)^2} \quad (E.11)$$

よって、

$$\frac{\delta k}{k} = 0.8636 \quad (E.12)$$

を得る。

続いて，式(E.1)より円筒の上下両端部に作用するトルク T_{ce} の誤差は，次式で表すことができる。

$$\frac{\delta T_{ce}}{T_{ce}} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{cm0}}{T_{cm0} - T_{cf}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{cf}}{T_{cm0} - T_{cf}}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2} \quad (\text{E.13})$$

式(E.13)を用いて，SER10B の $E=0.00\text{kV/mm}$ および SER15C の $E=0.00\text{kV/mm}$ の場合の実験結果から， $\delta T_{ce}/T_{ce}$ と δT_{ce} を計算した結果を表 E.3 および表 E.4 に示す。

表 E.3 SER10B の場合の $\delta T_{ce}/T_{ce}$ と δT_{ce}

| n (1/s) | T_{cm} (mN·m) | T_{cs} (mN·m) | T_{cf} (mN·m) | T_{ce} (mN·m) | $\delta T_{ce}/T_{ce}$ (-) | δT_{ce} |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| 3.0 | 75.0 | 66.9 | 6.32 | 1.80 | 0.8636 | 1.5572 |
| 2.5 | 69.3 | 61.3 | 5.67 | 2.36 | 0.8636 | 2.0416 |
| 2.0 | 64.4 | 56.5 | 5.86 | 2.09 | 0.8636 | 1.8007 |
| 1.5 | 55.2 | 47.3 | 5.01 | 2.85 | 0.8636 | 2.4579 |
| 1.0 | 46.9 | 39.1 | 6.22 | 1.55 | 0.8636 | 1.3404 |
| 0.6 | 40.3 | 32.6 | 5.74 | 1.96 | 0.8636 | 1.6934 |
| 0.3 | 36.5 | 28.8 | 6.79 | 0.85 | 0.8636 | 0.7362 |
| 0.2 | 32.5 | 24.9 | 7.18 | 0.44 | 0.8636 | 0.3840 |
| 0.1 | 26.1 | 18.4 | 7.49 | 0.12 | 0.8636 | 0.1053 |

表 E.4 SER15C の場合の $\delta T_{ce}/T_{ce}$ と δT_{ce}

| n (1/s) | T_{cm} (mN·m) | T_{cs} (mN·m) | T_{cf} (mN·m) | T_{ce} (mN·m) | $\delta T_{ce}/T_{ce}$ (-) | δT_{ce} |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| 3.0 | 146.7 | 130.5 | 11.11 | 5.08 | 0.8636 | 4.3907 |
| 2.5 | 137.9 | 122.4 | 10.86 | 4.69 | 0.8636 | 4.0528 |
| 2.0 | 121.6 | 106.6 | 11.60 | 3.31 | 0.8636 | 2.8600 |
| 1.5 | 103.7 | 89.4 | 11.38 | 2.89 | 0.8636 | 2.4962 |
| 1.0 | 86.6 | 73.0 | 10.14 | 3.48 | 0.8636 | 3.0090 |
| 0.6 | 67.6 | 54.5 | 10.47 | 2.64 | 0.8636 | 2.2810 |
| 0.3 | 53.1 | 40.4 | 11.12 | 1.61 | 0.8636 | 1.3917 |
| 0.2 | 44.7 | 32.1 | 11.66 | 0.94 | 0.8636 | 0.8103 |
| 0.1 | 40.6 | 28.1 | 11.86 | 0.62 | 0.8636 | 0.5312 |

以上の結果から，式(E.7)を用いて回転円筒型デバイスによるずり応力の誤差を求めることができる．ここでは最も小さいトルクと最も大きいトルクとなる場合の誤差解析の結果を表 E.5 および表 E.6 に示す．

表 E.5 SER10B, $E=0.00\text{kV/mm}$
の場合のずり応力の誤差

| $n(1/s)$ | $T_{cs} \text{ (mN}\cdot\text{m)}$ | $\delta \sigma / \sigma \text{ (-)}$ |
|----------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 3.0 | 75.0 | 0.0208 |
| 2.5 | 69.3 | 0.0295 |
| 2.0 | 64.4 | 0.0280 |
| 1.5 | 55.2 | 0.0446 |
| 1.0 | 46.9 | 0.0286 |
| 0.6 | 40.3 | 0.0420 |
| 0.3 | 36.5 | 0.0202 |
| 0.2 | 32.5 | 0.0118 |
| 0.1 | 26.1 | 0.0041 |

表 E.6 SER15C, $E=2.00\text{kV/mm}$
の場合のずり応力の誤差

| $n(1/s)$ | $T_{cs} \text{ (mN}\cdot\text{m)}$ | $\delta \sigma / \sigma \text{ (-)}$ |
|----------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 3.0 | 804.3 | 0.0055 |
| 2.5 | 788.0 | 0.0051 |
| 2.0 | 757.6 | 0.0038 |
| 1.5 | 701.7 | 0.0036 |
| 1.0 | 642.4 | 0.0047 |
| 0.6 | 561.9 | 0.0041 |
| 0.3 | 456.3 | 0.0031 |
| 0.2 | 361.2 | 0.0022 |
| 0.1 | 224.3 | 0.0024 |

これより，ずり応力の誤差は濃度の低い SER10B の無電場の場合で， $\pm 5\%$ 以内であり，濃度の高い SER15C の電場強度が $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合で， $\pm 0.6\%$ 以内であることが分かる．従って，本研究におけるずり応力の誤差は，ずり応力の大きい場合はおおよそ $\pm 0.6\%$ 以内であり，ずり応力の小さい場合は最大でおおよそ $\pm 5\%$ 以内である．

付録 F 回転円板型デバイスの実験データ

No.d-1 ERF:SER10B Electrode Gap: $\delta = 1.5\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/11/15

| n (s^{-1}) | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test Tdf (mN·m) |
|-------------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|----------------------------|
| | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | |
| 3.25 | 23.76 | 0.00281 | 26.23 | 0.01952 | 34.82 | 0.05958 | 48.02 | 0.1259 | 63.74 | 0.1456 | 8.058 |
| 3.00 | 24.36 | 0.00357 | 26.61 | 0.02400 | 35.82 | 0.07150 | 49.79 | 0.08372 | 65.80 | 0.1631 | 7.950 |
| 2.75 | 23.65 | 0.00475 | 26.46 | 0.03434 | 36.90 | 0.09052 | 51.71 | 0.09782 | 67.93 | 0.1720 | 7.974 |
| 2.50 | 23.30 | 0.00587 | 26.74 | 0.03890 | 37.57 | 0.10588 | 52.24 | 0.11506 | 68.30 | 0.2006 | 7.907 |
| 2.25 | 22.93 | 0.00716 | 26.31 | 0.04472 | 37.98 | 0.12474 | 52.55 | 0.13438 | 68.18 | 0.2226 | 7.961 |
| 2.00 | 21.79 | 0.00903 | 26.70 | 0.05106 | 38.52 | 0.14528 | 52.77 | 0.16008 | 67.97 | 0.2544 | 7.958 |
| 1.75 | 21.47 | 0.01136 | 26.97 | 0.17190 | 39.40 | 0.18314 | 53.56 | 0.20060 | 68.07 | 0.2826 | 8.118 |
| 1.50 | 20.68 | 0.01426 | 27.59 | 0.20060 | 40.17 | 0.22060 | 53.77 | 0.2544 | 67.76 | 0.3026 | 8.290 |
| 1.25 | 20.20 | 0.01739 | 28.00 | 0.2544 | 40.59 | 0.2826 | 53.41 | 0.3026 | 66.68 | 0.3226 | 8.645 |
| 1.00 | 19.29 | 0.02178 | 28.23 | 0.3026 | 40.61 | 0.3226 | 52.80 | 0.3544 | 65.03 | 0.3544 | 9.029 |
| 0.80 | 19.11 | 0.02646 | 29.06 | 0.3544 | 40.70 | 0.3544 | 52.08 | 0.4062 | 63.32 | 0.3862 | 9.425 |
| 0.60 | 18.78 | 0.03038 | 29.59 | 0.4062 | 41.04 | 0.4062 | 51.79 | 0.4580 | 61.80 | 0.4180 | 10.44 |
| 0.40 | 18.67 | 0.03480 | 30.34 | 0.4580 | 41.09 | 0.4580 | 50.75 | 0.5100 | 59.20 | 0.4500 | 11.47 |
| 0.30 | 18.69 | 0.03750 | 31.15 | 0.5100 | 41.97 | 0.5100 | 51.85 | 0.5620 | 59.86 | 0.4820 | 12.55 |
| 0.20 | 18.24 | 0.03968 | 30.98 | 0.5620 | 41.50 | 0.5620 | 50.77 | 0.6140 | 57.61 | 0.5140 | 13.09 |
| 0.10 | 15.93 | 0.04680 | 27.75 | 0.6140 | 36.10 | 0.6140 | 44.11 | 0.6660 | 51.08 | 0.5460 | 13.21 |
| 0.30 | 23.23 | 0.03238 | 35.25 | 0.6660 | 47.19 | 0.6660 | 58.97 | 0.7180 | 70.62 | 0.5780 | 12.82 |
| 1.00 | 26.00 | 0.02438 | 35.77 | 0.7180 | 47.44 | 0.7180 | 60.77 | 0.7700 | 74.33 | 0.6100 | 8.699 |
| 2.00 | 26.71 | 0.01797 | 35.37 | 0.7700 | 48.41 | 0.7700 | 62.02 | 0.8220 | 76.61 | 0.6420 | 7.586 |
| 3.00 | 29.21 | 0.01081 | 33.60 | 0.8220 | 43.34 | 0.8220 | 57.12 | 0.8740 | 72.54 | 0.6740 | 7.846 |

No.d-2 ERF:SER10B Electrode Gap: $\delta = 1.5\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/11/08

| n (s^{-1}) | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test Tdf (mN·m) |
|-------------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|----------------------------|
| | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | Tdm (mN·m) | I (mA) | |
| 3.25 | 20.12 | 0.06410 | 25.44 | 0.2718 | 35.57 | 0.6444 | 49.03 | 1.193 | 63.83 | 1.193 | 6.517 |
| 3.00 | 19.02 | 0.06018 | 22.85 | 0.2652 | 33.59 | 0.7320 | 47.21 | 1.183 | 62.89 | 1.183 | 6.514 |
| 2.75 | 18.09 | 0.06288 | 22.51 | 0.2774 | 32.26 | 0.6602 | 45.27 | 1.229 | 60.01 | 1.229 | 6.613 |
| 2.50 | 17.68 | 0.06664 | 22.20 | 0.2830 | 32.75 | 0.6414 | 41.08 | 1.242 | 59.54 | 1.242 | 6.624 |
| 2.25 | 17.49 | 0.06822 | 21.82 | 0.2898 | 31.79 | 0.6784 | 44.65 | 1.257 | 59.28 | 1.257 | 6.626 |
| 2.00 | 17.18 | 0.06972 | 21.02 | 0.2926 | 30.94 | 0.6904 | 44.41 | 1.268 | 58.71 | 1.268 | 6.877 |
| 1.75 | 16.93 | 0.07264 | 20.97 | 0.2988 | 30.93 | 0.6996 | 43.99 | 1.285 | 58.12 | 1.285 | 6.917 |
| 1.50 | 16.36 | 0.07514 | 20.56 | 0.3040 | 30.22 | 0.7056 | 43.19 | 1.300 | 57.51 | 1.300 | 7.198 |
| 1.25 | 16.46 | 0.07774 | 20.28 | 0.3128 | 30.20 | 0.7222 | 42.96 | 1.329 | 57.42 | 1.329 | 7.577 |
| 1.00 | 16.44 | 0.08440 | 20.79 | 0.3252 | 30.29 | 0.7468 | 43.04 | 1.367 | 57.43 | 1.367 | 8.204 |
| 0.80 | 15.64 | 0.08514 | 20.26 | 0.3298 | 29.64 | 0.7662 | 43.34 | 1.409 | 57.61 | 1.409 | 8.561 |
| 0.60 | 16.31 | 0.09022 | 20.57 | 0.3436 | 29.84 | 0.7890 | 43.76 | 1.446 | 58.21 | 1.446 | 9.096 |
| 0.40 | 16.43 | 0.09746 | 21.24 | 0.3600 | 31.06 | 0.8168 | 44.00 | 1.490 | 58.85 | 1.490 | 9.671 |
| 0.30 | 16.62 | 0.10364 | 21.21 | 0.3754 | 31.56 | 0.8404 | 44.13 | 1.525 | 58.90 | 1.525 | 9.531 |
| 0.20 | 15.22 | 0.10986 | 20.18 | 0.3898 | 30.91 | 0.8650 | 43.75 | 1.578 | 57.97 | 1.578 | 9.612 |
| 0.10 | 14.15 | 0.12338 | 19.08 | 0.4158 | 29.31 | 0.9028 | 42.91 | 1.628 | 56.14 | 1.628 | 8.590 |
| 0.30 | 16.33 | 0.11192 | 21.34 | 0.3846 | 31.39 | 0.8474 | 44.28 | 1.542 | 58.83 | 1.542 | 10.14 |
| 1.00 | 16.45 | 0.09192 | 20.87 | 0.3460 | 30.31 | 0.7718 | 42.42 | 1.409 | 56.74 | 1.409 | 8.128 |
| 2.00 | 16.83 | 0.07546 | 21.10 | 0.3108 | 30.90 | 0.7216 | 43.23 | 1.333 | 57.56 | 1.333 | 6.635 |
| 3.00 | 18.80 | 0.06704 | 22.64 | 0.2924 | 32.70 | 0.6910 | 45.48 | 1.271 | 59.11 | 1.271 | 6.278 |

No.d-3 ERF:SER10B Electrode Gap: δ $\sigma=2.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^{\circ}\text{C}$ Date: 97/10/30

| <i>E</i> | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|--|------------|
| <i>n</i> (s^{-1}) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdf</i> (mN·m) | | |
| 3.25 | 20.89 | 23.85 | 0.003398 | 33.60 | 0.02434 | 47.40 | 0.0710 | 63.66 | 0.1469 | 5.881 | | | | | | |
| 3.00 | 21.09 | 24.30 | 0.004498 | 35.12 | 0.03084 | 49.88 | 0.0864 | 66.19 | 0.1695 | 5.757 | | | | | | |
| 2.75 | 20.51 | 24.17 | 0.005790 | 35.53 | 0.03606 | 50.71 | 0.0962 | 67.00 | 0.1840 | 5.700 | | | | | | |
| 2.50 | 20.26 | 24.50 | 0.007544 | 36.47 | 0.04228 | 51.31 | 0.1062 | 67.27 | 0.1963 | 5.812 | | | | | | |
| 2.25 | 19.12 | 24.55 | 0.009716 | 37.22 | 0.04908 | 52.07 | 0.1164 | 67.55 | 0.2088 | 5.827 | | | | | | |
| 2.00 | 18.73 | 24.97 | 0.011848 | 36.67 | 0.05394 | 52.19 | 0.1223 | 67.08 | 0.2154 | 5.932 | | | | | | |
| 1.75 | 18.45 | 25.76 | 0.014730 | 38.69 | 0.06066 | 52.59 | 0.1312 | 66.92 | 0.2240 | 5.911 | | | | | | |
| 1.50 | 18.37 | 26.85 | 0.019232 | 39.92 | 0.07054 | 53.30 | 0.1448 | 66.61 | 0.2412 | 5.911 | | | | | | |
| 1.25 | 17.92 | 28.13 | 0.024560 | 40.75 | 0.08078 | 53.23 | 0.1587 | 65.50 | 0.2576 | 6.336 | | | | | | |
| 1.00 | 17.65 | 28.74 | 0.029260 | 41.02 | 0.08882 | 52.98 | 0.1699 | 63.60 | 0.2716 | 6.731 | | | | | | |
| 0.80 | 17.85 | 29.45 | 0.033440 | 41.52 | 0.09600 | 52.69 | 0.1796 | 62.05 | 0.2840 | 7.352 | | | | | | |
| 0.60 | 17.96 | 30.21 | 0.037860 | 41.60 | 0.10290 | 51.88 | 0.1889 | 59.83 | 0.2944 | 8.269 | | | | | | |
| 0.40 | 17.12 | 28.96 | 0.042480 | 39.58 | 0.11090 | 48.22 | 0.1989 | 55.45 | 0.3054 | 9.268 | | | | | | |
| 0.30 | 17.02 | 28.06 | 0.045160 | 37.82 | 0.11666 | 46.33 | 0.2064 | 52.20 | 0.3138 | 10.20 | | | | | | |
| 0.20 | 15.56 | 26.49 | 0.049280 | 35.16 | 0.12226 | 42.08 | 0.2132 | 48.54 | 0.3208 | 10.08 | | | | | | |
| 0.10 | 13.61 | 23.04 | 0.052720 | 31.41 | 0.12698 | 37.84 | 0.2190 | 43.05 | 0.3274 | 9.745 | | | | | | |
| 0.30 | 18.41 | 32.30 | 0.048420 | 43.91 | 0.12104 | 54.46 | 0.2120 | 62.22 | 0.3214 | 10.20 | | | | | | |
| 1.00 | 25.72 | 35.23 | 0.031720 | 49.58 | 0.09242 | 63.71 | 0.1743 | 76.25 | 0.2766 | 6.898 | | | | | | |
| 2.00 | 27.90 | 38.66 | 0.026060 | 51.22 | 0.08066 | 64.75 | 0.1566 | 78.95 | 0.2546 | 5.686 | | | | | | |
| 3.00 | 29.23 | 36.33 | 0.016360 | 46.38 | 0.05796 | 58.91 | 0.1192 | 74.13 | 0.2086 | 5.722 | | | | | | |

No.d-4 ERF:SER10B Electrode Gap: δ $\sigma=2.0\text{mm}$ Temperature: $t=40^{\circ}\text{C}$ Date: 97/10/31

| <i>E</i> | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|--|------------|
| <i>n</i> (s^{-1}) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdf</i> (mN·m) | | |
| 3.25 | 15.14 | 19.16 | 0.07206 | 33.93 | 0.3494 | 46.45 | 0.8190 | 62.26 | 1.526 | 4.760 | | | | | | |
| 3.00 | 16.83 | 21.11 | 0.07896 | 32.29 | 0.3414 | 46.14 | 0.8036 | 62.04 | 1.502 | 4.738 | | | | | | |
| 2.75 | 16.68 | 20.85 | 0.07842 | 31.79 | 0.3432 | 45.89 | 0.8198 | 61.52 | 1.533 | 4.731 | | | | | | |
| 2.50 | 16.98 | 21.61 | 0.08566 | 32.52 | 0.3576 | 45.77 | 0.8366 | 61.41 | 1.555 | 4.837 | | | | | | |
| 2.25 | 17.06 | 21.45 | 0.08928 | 32.23 | 0.3612 | 45.25 | 0.8332 | 60.89 | 1.552 | 4.960 | | | | | | |
| 2.00 | 16.51 | 21.12 | 0.08764 | 31.84 | 0.3514 | 45.47 | 0.8124 | 60.50 | 1.478 | 5.073 | | | | | | |
| 1.75 | 15.79 | 19.87 | 0.08726 | 30.58 | 0.3584 | 44.44 | 0.8422 | 60.73 | 1.585 | 5.209 | | | | | | |
| 1.50 | 15.96 | 20.87 | 0.09470 | 32.05 | 0.3764 | 45.14 | 0.8652 | 61.20 | 1.624 | 5.392 | | | | | | |
| 1.25 | 16.04 | 20.80 | 0.09644 | 31.46 | 0.3820 | 45.52 | 0.8848 | 61.50 | 1.652 | 5.652 | | | | | | |
| 1.00 | 16.32 | 21.53 | 0.10168 | 32.34 | 0.3946 | 45.89 | 0.9076 | 61.77 | 1.681 | 6.049 | | | | | | |
| 0.80 | 16.23 | 21.58 | 0.10634 | 32.62 | 0.4050 | 46.76 | 0.9294 | 62.46 | 1.729 | 6.357 | | | | | | |
| 0.60 | 16.78 | 21.53 | 0.11436 | 32.59 | 0.4232 | 46.71 | 0.9564 | 63.01 | 1.774 | 6.914 | | | | | | |
| 0.40 | 16.62 | 21.75 | 0.12594 | 33.12 | 0.4474 | 47.47 | 1.0022 | 63.25 | 1.844 | 7.329 | | | | | | |
| 0.30 | 16.00 | 22.45 | 0.14682 | 34.08 | 0.4842 | 47.88 | 1.0390 | 63.13 | 1.884 | 7.458 | | | | | | |
| 0.20 | 15.65 | 21.31 | 0.16208 | 33.64 | 0.5192 | 47.27 | 1.0842 | 61.31 | 1.913 | 7.409 | | | | | | |
| 0.10 | 14.68 | 20.39 | 0.18166 | 31.71 | 0.5476 | 44.74 | 1.1244 | 58.57 | 1.975 | 6.429 | | | | | | |
| 0.30 | 16.69 | 23.46 | 0.16490 | 34.41 | 0.4948 | 47.43 | 1.0452 | 62.65 | 1.862 | 8.132 | | | | | | |
| 1.00 | 17.16 | 21.62 | 0.12756 | 31.82 | 0.4318 | 45.56 | 0.9440 | 61.26 | 1.723 | 6.276 | | | | | | |
| 2.00 | 16.01 | 20.67 | 0.09910 | 31.54 | 0.3860 | 44.58 | 0.8760 | 59.95 | 1.620 | 4.806 | | | | | | |
| 3.00 | 16.29 | 20.70 | 0.08254 | 61.89 | 0.3564 | 45.50 | 0.8398 | 60.92 | 1.572 | 4.626 | | | | | | |

No.d-5 ERF:SER10B Electrode Gap: δ $\sigma=3.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/11/04

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|------------|
| | n (s^{-1}) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdf ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | |
| 3.25 | 17.64 | 23.25 | 0.01194 | 35.95 | 0.05616 | 51.53 | 0.1320 | 67.36 | 0.2378 | 4.968 | | | | | | |
| 3.00 | 17.43 | 22.97 | 0.01319 | 36.16 | 0.06084 | 51.17 | 0.1397 | 67.09 | 0.2466 | 8.059 | | | | | | |
| 2.75 | 16.45 | 22.64 | 0.01389 | 35.48 | 0.06206 | 50.64 | 0.1417 | 66.28 | 0.2490 | 4.885 | | | | | | |
| 2.50 | 16.52 | 22.96 | 0.01611 | 36.25 | 0.06784 | 50.74 | 0.1491 | 66.08 | 0.2580 | 4.863 | | | | | | |
| 2.25 | 15.45 | 22.86 | 0.01806 | 36.08 | 0.07184 | 50.53 | 0.1542 | 65.41 | 0.2634 | 4.646 | | | | | | |
| 2.00 | 15.39 | 23.31 | 0.02086 | 36.31 | 0.07742 | 50.51 | 0.1615 | 64.78 | 0.2712 | 5.081 | | | | | | |
| 1.75 | 15.20 | 23.91 | 0.02424 | 36.98 | 0.08406 | 50.37 | 0.1699 | 64.28 | 0.2808 | 5.037 | | | | | | |
| 1.50 | 14.78 | 24.19 | 0.02714 | 36.97 | 0.08888 | 50.16 | 0.1762 | 63.31 | 0.2884 | 8.317 | | | | | | |
| 1.25 | 14.97 | 25.34 | 0.03216 | 37.52 | 0.09750 | 50.04 | 0.1879 | 61.93 | 0.3004 | 5.527 | | | | | | |
| 1.00 | 15.18 | 25.99 | 0.03592 | 37.85 | 0.10374 | 49.47 | 0.1953 | 60.37 | 0.3094 | 6.016 | | | | | | |
| 0.80 | 15.82 | 26.92 | 0.04004 | 38.43 | 0.11010 | 49.33 | 0.2034 | 58.98 | 0.3186 | 6.303 | | | | | | |
| 0.60 | 15.65 | 27.53 | 0.04326 | 38.32 | 0.11550 | 48.21 | 0.2098 | 56.87 | 0.3252 | 8.080 | | | | | | |
| 0.40 | 16.36 | 26.88 | 0.04572 | 36.83 | 0.11860 | 45.63 | 0.2134 | 53.27 | 0.3284 | 10.10 | | | | | | |
| 0.30 | 14.88 | 25.78 | 0.04958 | 34.76 | 0.12484 | 42.70 | 0.2208 | 49.90 | 0.3362 | 10.66 | | | | | | |
| 0.20 | 14.22 | 24.61 | 0.05074 | 33.01 | 0.12686 | 41.80 | 0.2196 | 48.31 | 0.3344 | 11.42 | | | | | | |
| 0.10 | 13.78 | 23.12 | 0.05432 | 31.79 | 0.13080 | 36.84 | 0.2270 | 45.26 | 0.3416 | 10.78 | | | | | | |
| 0.30 | 15.79 | 27.97 | 0.05344 | 37.81 | 0.12968 | 47.06 | 0.2258 | 55.02 | 0.3404 | 11.11 | | | | | | |
| 1.00 | 20.51 | 30.64 | 0.03552 | 41.95 | 0.09652 | 53.88 | 0.1962 | 64.85 | 0.2852 | 5.902 | | | | | | |
| 2.00 | 19.65 | 27.68 | 0.02336 | 39.30 | 0.07554 | 52.73 | 0.1930 | 67.15 | 0.2570 | 4.270 | | | | | | |
| 3.00 | 21.35 | 29.16 | 0.05832 | 41.59 | 0.06966 | 55.11 | 0.1444 | 70.48 | 0.2468 | 4.260 | | | | | | |

No.d-6 ERF:SER15B Electrode Gap: δ $\sigma=1.5\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/10/23

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------------------|------------|
| | n (s^{-1}) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdm ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | I (mA) | Tdf ($\text{mN}\cdot\text{m}$) | |
| 3.25 | 50.91 | 52.47 | 0.001931 | 65.14 | 0.01019 | 98.31 | 0.03820 | 147.30 | 0.09778 | 7.819 | | | | | | |
| 3.00 | 44.98 | 47.58 | 0.001984 | 61.86 | 0.01158 | 94.51 | 0.04366 | 143.20 | 0.10498 | 7.881 | | | | | | |
| 2.75 | 45.29 | 46.42 | 0.002370 | 62.67 | 0.01306 | 95.45 | 0.04622 | 143.70 | 0.11300 | 7.752 | | | | | | |
| 2.50 | 44.66 | 47.84 | 0.002468 | 64.89 | 0.01531 | 97.85 | 0.05084 | 143.30 | 0.12100 | 8.103 | | | | | | |
| 2.25 | 39.08 | 43.39 | 0.003026 | 61.12 | 0.01833 | 93.09 | 0.05826 | 134.70 | 0.13216 | 7.921 | | | | | | |
| 2.00 | 35.28 | 40.86 | 0.001338 | 59.51 | 0.01994 | 90.40 | 0.06050 | 129.90 | 0.13346 | 7.878 | | | | | | |
| 1.75 | 33.37 | 38.67 | 0.003930 | 58.29 | 0.02288 | 88.08 | 0.06540 | 125.00 | 0.14008 | 7.524 | | | | | | |
| 1.50 | 29.94 | 36.14 | 0.004580 | 55.66 | 0.02506 | 85.15 | 0.06996 | 122.40 | 0.14826 | 7.681 | | | | | | |
| 1.25 | 28.11 | 35.62 | 0.005640 | 55.91 | 0.02848 | 83.38 | 0.07362 | 115.60 | 0.14946 | 7.681 | | | | | | |
| 1.00 | 24.86 | 33.23 | 0.006402 | 52.44 | 0.0305 | 78.01 | 0.07974 | 106.60 | 0.15590 | 7.758 | | | | | | |
| 0.80 | 22.62 | 31.88 | 0.007856 | 50.03 | 0.03436 | 73.21 | 0.08420 | 98.02 | 0.16224 | 7.836 | | | | | | |
| 0.60 | 20.62 | 30.61 | 0.009284 | 48.56 | 0.03768 | 69.65 | 0.08918 | 91.66 | 0.16816 | 8.553 | | | | | | |
| 0.40 | 18.51 | 29.17 | 0.010752 | 46.46 | 0.0407 | 65.65 | 0.09344 | 84.76 | 0.17314 | 8.553 | | | | | | |
| 0.30 | 17.96 | 29.10 | 0.011838 | 46.25 | 0.04136 | 65.28 | 0.09284 | 82.01 | 0.16906 | 9.382 | | | | | | |
| 0.20 | 16.53 | 27.88 | 0.012206 | 45.18 | 0.04228 | 61.88 | 0.09422 | 77.11 | 0.16974 | 9.886 | | | | | | |
| 0.10 | 16.15 | 26.68 | 0.013374 | 42.65 | 0.04442 | 56.85 | 0.09640 | 65.19 | 0.17260 | 11.696 | | | | | | |
| 0.30 | 18.61 | 30.85 | 0.012342 | 48.87 | 0.04336 | 69.42 | 0.09700 | 87.01 | 0.17886 | 9.007 | | | | | | |
| 1.00 | 27.70 | 37.04 | 0.009836 | 57.60 | 0.03886 | 83.26 | 0.09180 | 112.10 | 0.17576 | 7.407 | | | | | | |
| 2.00 | 38.80 | 45.75 | 0.006632 | 61.11 | 0.02732 | 89.87 | 0.07330 | 125.70 | 0.15120 | 7.089 | | | | | | |
| 3.00 | 45.22 | 49.67 | 0.005372 | 67.45 | 0.02416 | 96.58 | 0.06734 | 133.80 | 0.14292 | 7.578 | | | | | | |

No.d-7 ERF:SER15B Electrode Gap: $\delta = 1.5\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/10/24

| <i>E</i> | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|----------|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|------------|
| | <i>n</i> (s ⁻¹) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdf</i> (mN·m) | |
| 3.25 | 26.61 | 32.82 | 0.02900 | 55.22 | 0.1705 | 94.20 | 0.5008 | 142.37 | 1.072 | 6.417 | | | | | | |
| 3.00 | 27.12 | 34.01 | 0.03196 | 58.67 | 0.1868 | 99.06 | 0.5430 | 140.57 | 1.106 | 6.219 | | | | | | |
| 2.75 | 26.05 | 33.65 | 0.03548 | 58.86 | 0.1965 | 96.39 | 0.5462 | 138.17 | 1.120 | 6.135 | | | | | | |
| 2.50 | 24.61 | 32.19 | 0.03592 | 56.97 | 0.1954 | 94.70 | 0.5444 | 136.57 | 1.120 | 6.119 | | | | | | |
| 2.25 | 23.48 | 31.15 | 0.03784 | 56.91 | 0.2064 | 93.79 | 0.5608 | 133.97 | 1.138 | 6.273 | | | | | | |
| 2.00 | 22.86 | 30.86 | 0.04050 | 57.01 | 0.2138 | 93.10 | 0.5734 | 130.57 | 1.137 | 6.198 | | | | | | |
| 1.75 | 21.15 | 29.78 | 0.04404 | 55.71 | 0.2250 | 89.79 | 0.5878 | 124.07 | 1.164 | 6.428 | | | | | | |
| 1.50 | 19.57 | 29.36 | 0.05168 | 54.48 | 0.2436 | 85.37 | 0.6162 | 116.07 | 1.204 | 6.373 | | | | | | |
| 1.25 | 18.42 | 28.84 | 0.05734 | 53.09 | 0.2562 | 80.85 | 0.6294 | 108.87 | 1.211 | 6.475 | | | | | | |
| 1.00 | 17.35 | 27.96 | 0.06358 | 51.01 | 0.2688 | 76.27 | 0.6422 | 100.47 | 1.220 | 6.650 | | | | | | |
| 0.80 | 16.08 | 27.71 | 0.07218 | 48.76 | 0.2824 | 71.42 | 0.6586 | 93.62 | 1.243 | 6.993 | | | | | | |
| 0.60 | 15.35 | 26.72 | 0.07866 | 45.73 | 0.2946 | 66.43 | 0.6732 | 86.79 | 1.260 | 7.216 | | | | | | |
| 0.40 | 14.43 | 25.95 | 0.08656 | 44.07 | 0.3100 | 62.34 | 0.6966 | 81.60 | 1.294 | 7.668 | | | | | | |
| 0.30 | 13.62 | 25.81 | 0.09194 | 43.30 | 0.3186 | 60.76 | 0.7122 | 78.81 | 1.323 | 7.272 | | | | | | |
| 0.20 | 13.34 | 25.70 | 0.09630 | 42.15 | 0.3282 | 59.13 | 0.7304 | 68.75 | 1.385 | 7.241 | | | | | | |
| 0.10 | 11.91 | 24.90 | 0.10158 | 41.73 | 0.3418 | 51.29 | 0.7798 | 58.63 | 1.431 | 6.860 | | | | | | |
| 0.30 | 15.66 | 28.74 | 0.09492 | 47.96 | 0.3262 | 66.25 | 0.7294 | 84.13 | 1.358 | 7.503 | | | | | | |
| 1.00 | 18.40 | 31.45 | 0.08154 | 54.60 | 0.3084 | 78.36 | 0.7066 | 101.57 | 1.318 | 6.616 | | | | | | |
| 2.00 | 22.96 | 34.60 | 0.06910 | 60.02 | 0.2868 | 90.01 | 0.6854 | 121.27 | 1.314 | 6.103 | | | | | | |
| 3.00 | 27.06 | 36.36 | 0.05250 | 62.41 | 0.2488 | 97.46 | 0.6370 | 137.07 | 1.260 | 6.003 | | | | | | |

No.d-8 ERF:SER15B Electrode Gap: $\delta = 2.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/10/21

| <i>E</i> | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|----------|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|------------|
| | <i>n</i> (s ⁻¹) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdm</i> (mN·m) | <i>I</i> (mA) | <i>Tdf</i> (mN·m) | |
| 3.25 | 50.35 | 53.32 | 0.002100 | 71.88 | 0.01060 | 109.1 | 0.03996 | 165.1 | 0.1021 | 2.917 | | | | | | |
| 3.00 | 50.57 | 53.22 | 0.002102 | 70.15 | 0.01136 | 109.6 | 0.04350 | 165.3 | 0.1098 | 2.770 | | | | | | |
| 2.75 | 48.24 | 51.27 | 0.002130 | 69.29 | 0.01261 | 109.9 | 0.04746 | 164.9 | 0.1174 | 2.635 | | | | | | |
| 2.50 | 45.74 | 49.38 | 0.002276 | 68.53 | 0.01401 | 108.9 | 0.05110 | 164.7 | 0.1243 | 2.484 | | | | | | |
| 2.25 | 43.27 | 46.57 | 0.002496 | 66.68 | 0.01530 | 108.2 | 0.05494 | 162.0 | 0.1311 | 2.311 | | | | | | |
| 2.00 | 40.47 | 45.31 | 0.002450 | 65.64 | 0.01556 | 106.2 | 0.05402 | 158.5 | 0.1259 | 2.178 | | | | | | |
| 1.75 | 39.48 | 43.24 | 0.000488 | 64.74 | 0.01663 | 104.9 | 0.05650 | 155.3 | 0.1295 | 2.044 | | | | | | |
| 1.50 | 35.99 | 40.88 | 0.002768 | 63.40 | 0.01832 | 102.6 | 0.05998 | 151.3 | 0.1345 | 1.924 | | | | | | |
| 1.25 | 33.74 | 38.62 | 0.003178 | 61.63 | 0.02046 | 100.8 | 0.06386 | 146.0 | 0.1388 | 1.809 | | | | | | |
| 1.00 | 29.27 | 35.36 | 0.003736 | 59.16 | 0.02270 | 96.42 | 0.06756 | 136.4 | 0.1420 | 1.723 | | | | | | |
| 0.80 | 25.45 | 32.07 | 0.004300 | 55.42 | 0.02496 | 90.91 | 0.07028 | 127.2 | 0.1444 | 1.667 | | | | | | |
| 0.60 | 20.87 | 29.24 | 0.005206 | 52.83 | 0.02758 | 84.51 | 0.07392 | 115.6 | 0.1459 | 1.629 | | | | | | |
| 0.40 | 17.78 | 27.48 | 0.007254 | 48.77 | 0.03140 | 75.60 | 0.07818 | 101.3 | 0.1506 | 1.636 | | | | | | |
| 0.30 | 16.10 | 25.69 | 0.008100 | 45.48 | 0.03362 | 69.23 | 0.08076 | 91.24 | 0.1515 | 1.554 | | | | | | |
| 0.20 | 14.88 | 24.66 | 0.009674 | 42.61 | 0.03706 | 62.53 | 0.08496 | 79.44 | 0.1575 | 1.526 | | | | | | |
| 0.10 | 14.31 | 23.02 | 0.011000 | 38.69 | 0.03830 | 55.85 | 0.08660 | 61.07 | 0.1598 | 1.351 | | | | | | |

No.d-9 ERF:SER15B Electrode Gap: δ $\sigma=2.0\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/10/21

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|------------|
| | $n(\text{s}^{-1})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | |
| 3.25 | 24.65 | 33.41 | 0.02876 | 63.52 | 0.1726 | 107.53 | 0.4914 | 153.73 | 1.0132 | 3.961 | |
| 3.00 | 23.80 | 33.20 | 0.02888 | 64.12 | 0.1682 | 105.73 | 0.4664 | 149.13 | 0.9448 | 4.281 | |
| 2.75 | 21.68 | 31.55 | 0.03404 | 61.91 | 0.1928 | 101.73 | 0.5314 | 142.63 | 1.0868 | 4.239 | |
| 2.50 | 20.37 | 31.15 | 0.03878 | 60.97 | 0.2068 | 98.73 | 0.5540 | 136.43 | 1.1134 | 4.153 | |
| 2.25 | 19.58 | 31.35 | 0.04454 | 60.23 | 0.2194 | 94.65 | 0.5694 | 128.73 | 1.1272 | 3.930 | |
| 2.00 | 17.99 | 30.27 | 0.04796 | 58.10 | 0.2260 | 90.63 | 0.5754 | 122.53 | 1.1272 | 4.216 | |
| 1.75 | 16.80 | 29.66 | 0.05220 | 56.39 | 0.2380 | 85.57 | 0.5832 | 113.23 | 1.1354 | 4.246 | |
| 1.50 | 15.42 | 28.75 | 0.05712 | 53.96 | 0.2448 | 80.85 | 0.5952 | 106.43 | 1.1398 | 4.341 | |
| 1.25 | 14.45 | 27.72 | 0.06258 | 51.19 | 0.2536 | 75.91 | 0.6038 | 98.43 | 1.1478 | 4.311 | |
| 1.00 | 13.74 | 27.19 | 0.06744 | 48.54 | 0.2606 | 71.14 | 0.6112 | 92.07 | 1.1536 | 4.486 | |
| 0.80 | 12.54 | 25.77 | 0.07020 | 46.35 | 0.2654 | 66.98 | 0.6198 | 86.36 | 1.1692 | 4.688 | |
| 0.60 | 11.95 | 25.45 | 0.07504 | 44.72 | 0.2732 | 64.04 | 0.6298 | 82.30 | 1.1770 | 4.972 | |
| 0.40 | 11.17 | 24.91 | 0.07870 | 43.40 | 0.2808 | 60.73 | 0.6372 | 78.10 | 1.1920 | 5.347 | |
| 0.30 | 10.73 | 24.36 | 0.08244 | 41.64 | 0.2870 | 57.87 | 0.6552 | 74.63 | 1.2306 | 5.867 | |
| 0.20 | 10.42 | 23.60 | 0.08930 | 40.29 | 0.2990 | 55.53 | 0.6654 | 67.55 | 1.2654 | 5.644 | |
| 0.10 | 10.63 | 23.32 | 0.09050 | 40.43 | 0.3078 | 47.73 | 0.6954 | 57.29 | 1.3030 | 5.948 | |
| 0.30 | 11.54 | 25.60 | 0.08854 | 42.65 | 0.3064 | 58.12 | 0.6848 | 75.81 | 1.2938 | 5.586 | |
| 1.00 | 14.80 | 29.62 | 0.07838 | 52.02 | 0.2872 | 73.59 | 0.6558 | 92.80 | 1.2186 | 4.103 | |
| 2.00 | 18.02 | 32.24 | 0.06464 | 56.69 | 0.2656 | 82.44 | 0.6368 | 106.43 | 1.2190 | 3.239 | |
| 3.00 | 22.34 | 35.44 | 0.05740 | 61.74 | 0.2484 | 91.04 | 0.6092 | 118.03 | 1.1844 | 3.135 | |

No.d-10 ERF:SER15B Electrode Gap: δ $\sigma=3.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/10/28

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|------------|
| | $n(\text{s}^{-1})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | |
| 3.25 | 38.59 | 43.77 | 0.003088 | 69.15 | 0.02176 | 119.51 | 0.07656 | 181.41 | 0.1774 | 5.409 | |
| 3.00 | 36.30 | 41.00 | 0.003166 | 68.15 | 0.02308 | 118.71 | 0.08026 | 179.21 | 0.1827 | 5.369 | |
| 2.75 | 34.16 | 39.50 | 0.003304 | 66.96 | 0.02422 | 117.71 | 0.08310 | 176.31 | 0.1874 | 5.195 | |
| 2.50 | 32.44 | 37.99 | 0.003504 | 66.49 | 0.02568 | 115.21 | 0.08514 | 172.21 | 0.1887 | 5.434 | |
| 2.25 | 30.08 | 35.99 | 0.003724 | 64.96 | 0.02736 | 113.51 | 0.08834 | 167.91 | 0.1927 | 5.400 | |
| 2.00 | 28.38 | 34.74 | 0.003996 | 64.32 | 0.02904 | 111.21 | 0.09104 | 162.71 | 0.1949 | 5.189 | |
| 1.75 | 25.75 | 33.10 | 0.004360 | 62.91 | 0.03018 | 109.01 | 0.09326 | 158.61 | 0.1959 | 5.259 | |
| 1.50 | 24.62 | 32.66 | 0.004904 | 62.89 | 0.03220 | 107.11 | 0.09474 | 154.11 | 0.1959 | 5.203 | |
| 1.25 | 23.14 | 31.75 | 0.005296 | 62.19 | 0.03376 | 104.91 | 0.09664 | 148.01 | 0.1953 | 5.192 | |
| 1.00 | 21.44 | 30.98 | 0.006192 | 61.00 | 0.03554 | 100.81 | 0.09736 | 141.01 | 0.1939 | 5.144 | |
| 0.80 | 20.07 | 30.76 | 0.006678 | 59.59 | 0.03704 | 97.08 | 0.09828 | 133.51 | 0.1917 | 5.473 | |
| 0.60 | 18.53 | 29.51 | 0.007500 | 57.67 | 0.03852 | 91.86 | 0.09876 | 124.81 | 0.1902 | 5.998 | |
| 0.40 | 16.96 | 28.92 | 0.008600 | 55.93 | 0.04030 | 86.10 | 0.09942 | 111.71 | 0.1937 | 6.866 | |
| 0.30 | 16.44 | 28.85 | 0.009760 | 53.48 | 0.04238 | 80.48 | 0.10166 | 102.91 | 0.1937 | 7.782 | |
| 0.20 | 16.59 | 29.26 | 0.011068 | 50.85 | 0.04418 | 73.62 | 0.10314 | 92.17 | 0.1938 | 7.950 | |
| 0.10 | 16.81 | 27.53 | 0.012152 | 47.11 | 0.04574 | 63.02 | 0.10490 | 67.39 | 0.1986 | 9.689 | |
| 0.30 | 16.60 | 29.65 | 0.011374 | 52.90 | 0.04534 | 77.87 | 0.10644 | 99.01 | 0.1983 | 7.214 | |
| 1.00 | 20.79 | 32.26 | 0.008454 | 58.45 | 0.04052 | 92.06 | 0.10424 | 125.51 | 0.2038 | 5.037 | |
| 2.00 | 27.59 | 36.28 | 0.006276 | 64.17 | 0.03516 | 103.61 | 0.09936 | 146.81 | 0.2066 | 5.118 | |
| 3.00 | 33.29 | 39.67 | 0.004948 | 66.49 | 0.03020 | 109.21 | 0.09250 | 158.51 | 0.2014 | 5.374 | |

No.d-11 ERF:SER15B Electrode Gap: $\delta = 3.0\text{mm}$ Temperature: $t=40^\circ\text{C}$ Date: 97/10/28

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $n(\text{s}^{-1})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdf(\text{mN}\cdot\text{m})$ |
| 3.25 | 23.20 | 36.18 | 0.05164 | 70.74 | 0.2738 | 113.81 | 0.7306 | 156.91 | 1.439 | 5.085 | |
| 3.00 | 22.46 | 34.70 | 0.04818 | 69.35 | 0.2562 | 113.51 | 0.7144 | 155.71 | 1.422 | 5.051 | |
| 2.75 | 21.19 | 34.19 | 0.05336 | 67.29 | 0.2730 | 108.21 | 0.7216 | 149.41 | 1.465 | 4.695 | |
| 2.50 | 19.69 | 34.50 | 0.05964 | 66.83 | 0.2900 | 105.91 | 0.7456 | 144.51 | 1.490 | 4.650 | |
| 2.25 | 18.87 | 33.00 | 0.06264 | 65.17 | 0.2982 | 102.71 | 0.7568 | 140.01 | 1.502 | 4.672 | |
| 2.00 | 18.30 | 32.68 | 0.06770 | 63.84 | 0.3078 | 99.91 | 0.7698 | 135.41 | 1.517 | 4.852 | |
| 1.75 | 17.28 | 32.07 | 0.07222 | 62.92 | 0.3252 | 96.14 | 0.8008 | 129.21 | 1.555 | 4.675 | |
| 1.50 | 16.28 | 31.23 | 0.07854 | 60.31 | 0.3334 | 92.02 | 0.8062 | 123.01 | 1.582 | 4.873 | |
| 1.25 | 15.52 | 30.79 | 0.08442 | 58.04 | 0.3426 | 87.10 | 0.8220 | 115.71 | 1.594 | 4.934 | |
| 1.00 | 14.94 | 30.15 | 0.09104 | 55.44 | 0.3534 | 82.43 | 0.8340 | 109.91 | 1.631 | 5.264 | |
| 0.80 | 14.60 | 29.85 | 0.09710 | 53.22 | 0.3658 | 78.11 | 0.8518 | 104.91 | 1.630 | 5.792 | |
| 0.60 | 14.14 | 29.14 | 0.10184 | 51.41 | 0.3742 | 74.70 | 0.8684 | 100.21 | 1.657 | 6.069 | |
| 0.40 | 13.68 | 28.72 | 0.10552 | 50.26 | 0.3826 | 73.02 | 0.8794 | 93.16 | 1.794 | 6.684 | |
| 0.30 | 13.65 | 29.15 | 0.10990 | 51.35 | 0.3944 | 71.85 | 0.9096 | 86.47 | 1.775 | 7.160 | |
| 0.20 | 13.73 | 29.37 | 0.11512 | 49.72 | 0.4036 | 66.71 | 0.9352 | 78.34 | 1.833 | 7.574 | |
| 0.10 | 13.58 | 29.27 | 0.11704 | 47.51 | 0.4170 | 61.88 | 0.9664 | 73.47 | 1.850 | 8.639 | |
| 0.30 | 13.76 | 30.21 | 0.11682 | 51.75 | 0.4090 | 71.75 | 0.9424 | 90.07 | 1.802 | 6.831 | |
| 1.00 | 15.14 | 32.89 | 0.10754 | 58.21 | 0.3964 | 84.76 | 0.9196 | 107.11 | 1.843 | 4.771 | |
| 2.00 | 18.31 | 35.00 | 0.10076 | 62.84 | 0.3898 | 92.90 | 0.9368 | 120.31 | 1.758 | 4.450 | |
| 3.00 | 20.61 | 35.20 | 0.08114 | 65.54 | 0.3518 | 102.51 | 0.8728 | 139.11 | 1.715 | 4.658 | |

No.d-12 ERF:SER15C Electrode Gap: $\delta = 1.5\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/12/05

| E | 0.00kV/mm | | 0.50kV/mm | | 1.00kV/mm | | 1.50kV/mm | | 2.00kV/mm | | Blank Test |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $n(\text{s}^{-1})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $I(\text{mA})$ | $Tdm(\text{mN}\cdot\text{m})$ | $Tdf(\text{mN}\cdot\text{m})$ |
| 3.00 | 54.50 | 57.50 | 0.0030 | 74.50 | 0.0200 | 114.00 | 0.0680 | 167.5 | 0.163 | 13.375 | |
| 2.50 | 47.50 | 52.50 | 0.0025 | 70.00 | 0.0225 | 110.00 | 0.0750 | 162.5 | 0.173 | 11.875 | |
| 2.00 | 42.50 | 47.50 | 0.0025 | 67.50 | 0.0250 | 107.50 | 0.0800 | 160.0 | 0.183 | 11.000 | |
| 1.50 | 37.50 | 40.00 | 0.0025 | 62.50 | 0.0275 | 105.00 | 0.0875 | 155.0 | 0.193 | 10.250 | |
| 1.00 | 30.00 | 35.00 | 0.0050 | 60.00 | 0.0325 | 100.00 | 0.0950 | 147.5 | 0.200 | 8.875 | |
| 0.60 | 25.00 | 32.50 | 0.0050 | 57.50 | 0.0375 | 95.00 | 0.1025 | 135.0 | 0.203 | 8.125 | |
| 0.30 | 20.00 | 30.00 | 0.0075 | 52.50 | 0.0400 | 87.50 | 0.1050 | 120.0 | 0.198 | 7.875 | |
| 0.20 | 20.00 | 27.50 | 0.0075 | 52.50 | 0.0425 | 80.00 | 0.1025 | 112.5 | 0.195 | 7.750 | |
| 0.10 | 17.50 | 27.50 | 0.0100 | 50.00 | 0.0425 | 75.00 | 0.1025 | 102.5 | 0.193 | 7.875 | |
| 0.30 | 20.00 | 30.00 | 0.0075 | 52.50 | 0.0425 | 82.50 | 0.1050 | 117.5 | 0.198 | 7.500 | |
| 1.00 | 30.00 | 37.50 | 0.0050 | 60.00 | 0.0350 | 100.00 | 0.1000 | 145.0 | 0.205 | 9.375 | |
| 2.00 | 42.50 | 47.50 | 0.0050 | 67.50 | 0.0275 | 107.50 | 0.0850 | 157.5 | 0.190 | 12.375 | |
| 3.00 | 52.50 | 55.00 | 0.0025 | 70.00 | 0.0200 | 107.50 | 0.0725 | 162.5 | 0.173 | 14.125 | |

No.d-13 ERF:SER15C Electrode Gap: δ $d=2.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/11/28

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|
| n (s^{-1}) | T_{dm} (mN·m) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{df} (mN·m) |
| 3.00 | 43.25 | 46.75 | 0.004000 | 69.50 | 0.02600 | 114.50 | 0.08800 | 171.3 | 0.2020 | 8.000 | | | | | | |
| 2.50 | 38.00 | 42.50 | 0.004000 | 66.00 | 0.02800 | 112.50 | 0.09500 | 171.3 | 0.2110 | 7.750 | | | | | | |
| 2.00 | 33.75 | 39.00 | 0.004000 | 63.50 | 0.02900 | 109.00 | 0.09500 | 167.5 | 0.2090 | 7.000 | | | | | | |
| 1.50 | 30.50 | 36.00 | 0.005000 | 62.50 | 0.03300 | 108.00 | 0.10300 | 161.3 | 0.2150 | 6.875 | | | | | | |
| 1.00 | 26.25 | 32.50 | 0.006000 | 60.00 | 0.03800 | 105.00 | 0.10900 | 152.5 | 0.2170 | 7.000 | | | | | | |
| 0.60 | 22.75 | 31.00 | 0.007000 | 58.75 | 0.04200 | 98.75 | 0.11200 | 140.0 | 0.2150 | 7.125 | | | | | | |
| 0.30 | 20.00 | 29.50 | 0.009000 | 56.50 | 0.04500 | 91.25 | 0.11100 | 125.0 | 0.2060 | 7.500 | | | | | | |
| 0.20 | 19.50 | 29.50 | 0.010000 | 55.50 | 0.04600 | 86.25 | 0.11000 | 116.3 | 0.2040 | 7.750 | | | | | | |
| 0.10 | 18.25 | 28.50 | 0.010000 | 50.50 | 0.04500 | 80.00 | 0.10700 | 107.5 | 0.2030 | 8.750 | | | | | | |
| 0.30 | 19.25 | 29.25 | 0.010000 | 55.50 | 0.04600 | 87.00 | 0.11100 | 121.3 | 0.2060 | 7.375 | | | | | | |
| 1.00 | 26.75 | 33.25 | 0.007000 | 62.50 | 0.04100 | 102.50 | 0.11100 | 147.5 | 0.2200 | 7.250 | | | | | | |
| 2.00 | 33.75 | 40.00 | 0.005000 | 63.75 | 0.03200 | 107.50 | 0.09900 | 162.5 | 0.2130 | 7.625 | | | | | | |
| 3.00 | 41.25 | 45.00 | 0.004000 | 66.25 | 0.02600 | 110.00 | 0.08900 | 167.5 | 0.2020 | 8.250 | | | | | | |

No.d-14 ERF:SER15C Electrode Gap: δ $d=3.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 97/12/08

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|
| n (s^{-1}) | T_{dm} (mN·m) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{df} (mN·m) |
| 3.00 | 43.00 | 49.25 | 0.005000 | 81.25 | 0.04000 | 133.75 | 0.1275 | 195.00 | 0.2725 | 5.50 | | | | | | |
| 2.50 | 40.00 | 46.25 | 0.005000 | 78.75 | 0.04500 | 133.75 | 0.1350 | 190.00 | 0.2825 | 5.10 | | | | | | |
| 2.00 | 36.25 | 43.75 | 0.007500 | 76.25 | 0.04750 | 127.50 | 0.1400 | 183.75 | 0.2850 | 5.05 | | | | | | |
| 1.50 | 31.25 | 40.00 | 0.007500 | 72.50 | 0.05250 | 122.50 | 0.1425 | 175.00 | 0.2850 | 4.90 | | | | | | |
| 1.00 | 26.25 | 36.25 | 0.010000 | 70.00 | 0.05500 | 116.25 | 0.1450 | 162.50 | 0.2800 | 5.25 | | | | | | |
| 0.60 | 22.50 | 33.75 | 0.010000 | 65.00 | 0.05750 | 106.25 | 0.1450 | 148.75 | 0.2700 | 6.30 | | | | | | |
| 0.30 | 18.75 | 30.00 | 0.012500 | 58.75 | 0.06000 | 96.25 | 0.1425 | 132.50 | 0.2675 | 6.70 | | | | | | |
| 0.20 | 17.50 | 30.00 | 0.012500 | 57.50 | 0.06000 | 91.25 | 0.1450 | 126.25 | 0.2675 | 8.10 | | | | | | |
| 0.10 | 16.25 | 30.00 | 0.012500 | 53.75 | 0.06000 | 87.50 | 0.1450 | 118.75 | 0.2775 | 9.00 | | | | | | |
| 0.30 | 18.75 | 31.25 | 0.012500 | 58.75 | 0.06000 | 93.75 | 0.1450 | 128.75 | 0.2700 | 7.60 | | | | | | |
| 1.00 | 27.50 | 37.50 | 0.010000 | 68.75 | 0.05750 | 113.75 | 0.1500 | 157.50 | 0.2850 | 5.65 | | | | | | |
| 2.00 | 36.25 | 43.75 | 0.005000 | 76.25 | 0.05000 | 122.50 | 0.1450 | 177.50 | 0.2900 | 5.30 | | | | | | |
| 3.00 | 41.25 | 47.50 | 0.005000 | 77.50 | 0.04500 | 128.75 | 0.1350 | 188.75 | 0.2900 | 5.60 | | | | | | |

No.d-15 ERF:SER15D Electrode Gap: δ $d=2.0\text{mm}$ Temperature: $t=20^\circ\text{C}$ Date: 98/03/24

| E | 0.00kV/mm | | | 0.50kV/mm | | | 1.00kV/mm | | | 1.50kV/mm | | | 2.00kV/mm | | | Blank Test |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|
| n (s^{-1}) | T_{dm} (mN·m) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{dm} (mN·m) | I (mA) | T_{df} (mN·m) |
| 3.00 | 63.90 | 60.28 | 0.003932 | 83.97 | 0.012494 | 127.7 | 0.03804 | 174.7 | 0.07136 | 5.543 | | | | | | |
| 2.50 | 55.90 | 59.14 | 0.002358 | 76.11 | 0.009174 | 116.1 | 0.02996 | 177.8 | 0.07348 | 5.480 | | | | | | |
| 2.00 | 50.18 | 53.64 | 0.002194 | 72.48 | 0.009344 | 114.5 | 0.03082 | 177.1 | 0.07474 | 5.589 | | | | | | |
| 1.50 | 44.68 | 48.71 | 0.001893 | 69.33 | 0.009472 | 114.1 | 0.03230 | 173.8 | 0.07570 | 5.379 | | | | | | |
| 1.00 | 37.87 | 42.64 | 0.001690 | 66.66 | 0.010354 | 113.2 | 0.03448 | 171.8 | 0.07818 | 5.780 | | | | | | |
| 0.60 | 31.90 | 37.88 | 0.001640 | 64.69 | 0.011336 | 111.4 | 0.03566 | 162.6 | 0.07558 | 6.203 | | | | | | |
| 0.30 | 25.11 | 33.23 | 0.002534 | 64.03 | 0.016536 | 106.9 | 0.04770 | 145.5 | 0.09474 | 7.245 | | | | | | |
| 0.20 | 23.94 | 33.31 | 0.002716 | 63.26 | 0.016216 | 101.3 | 0.04344 | 133.8 | 0.08460 | 7.386 | | | | | | |
| 0.20 | 22.06 | 31.30 | 0.002750 | 60.77 | 0.016982 | 98.20 | 0.04522 | 107.6 | 0.09468 | 7.645 | | | | | | |
| 0.10 | 22.26 | 33.12 | 0.003298 | 61.47 | 0.016784 | 89.84 | 0.04232 | 74.51 | 0.09612 | 7.768 | | | | | | |
| 0.03 | 21.63 | 32.93 | 0.003346 | 57.17 | 0.016406 | 58.25 | 0.04796 | 73.36 | 0.09190 | 8.098 | | | | | | |
| 0.01 | 20.61 | 34.79 | 0.004154 | 39.50 | 0.019474 | 45.92 | 0.05176 | 55.98 | 0.09366 | 8.391 | | | | | | |

付録 G 回転円板型デバイスのずり速度に対するトルクと電流密度のグラフ

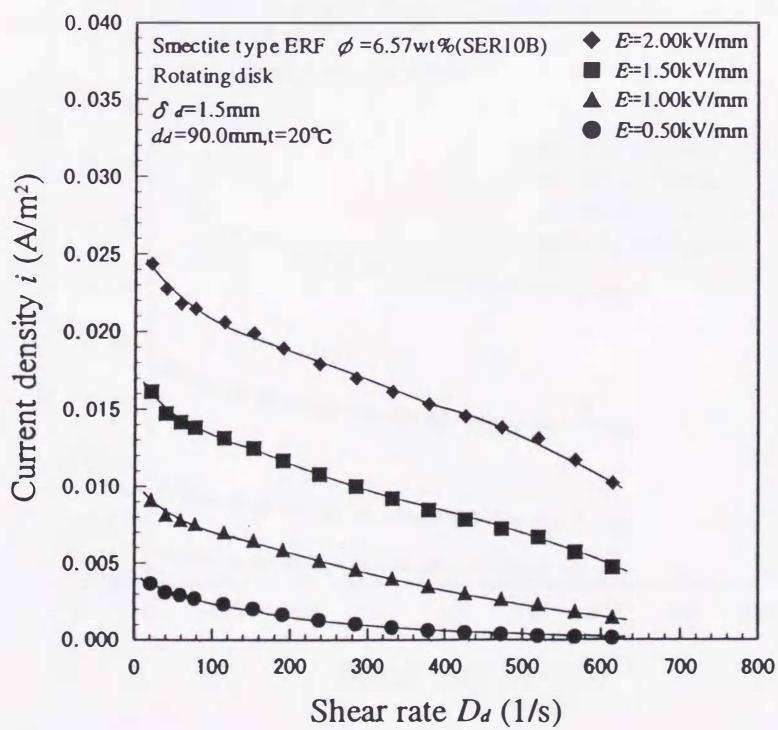
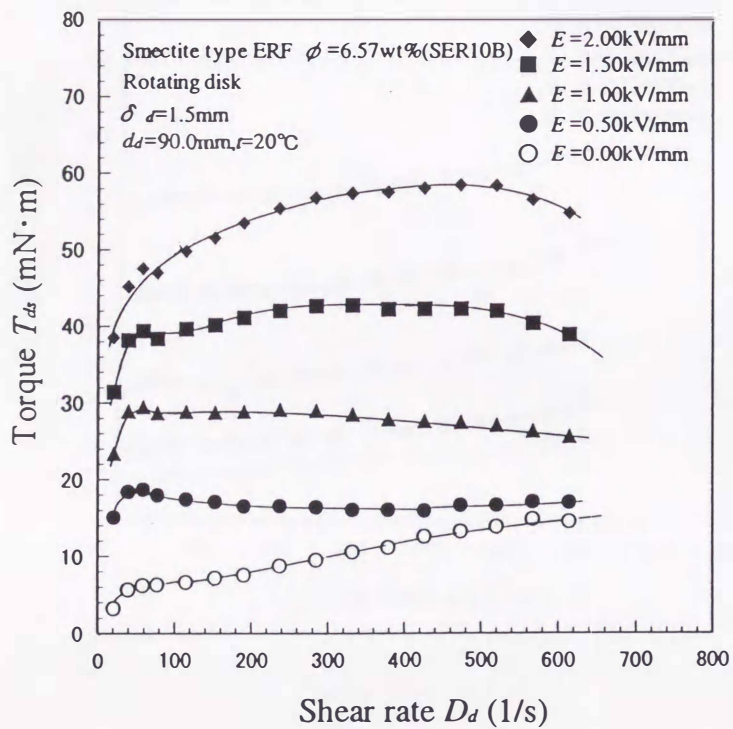


図 G.1 トルク特性と電流密度の特性(SER10B, $\delta = 1.5\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

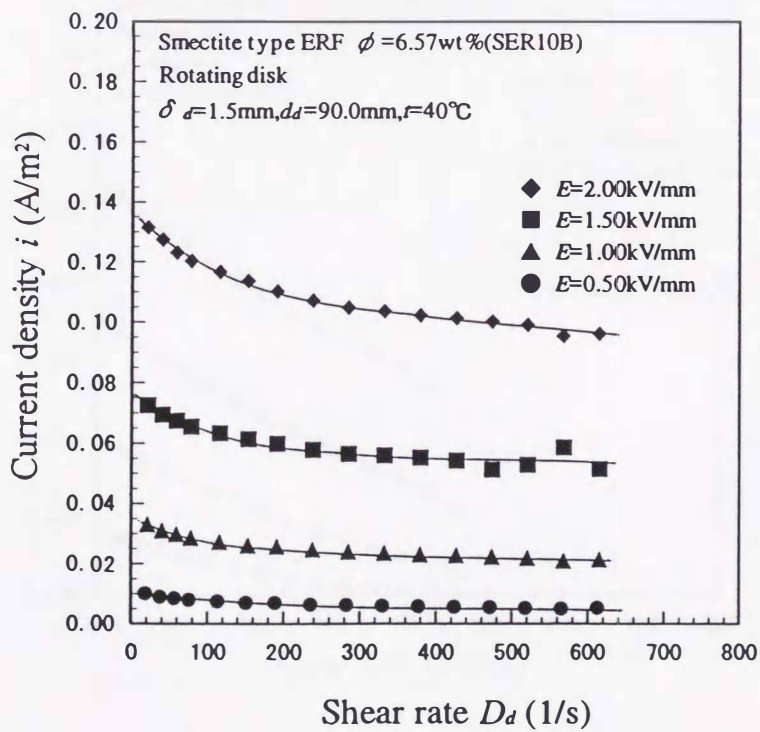
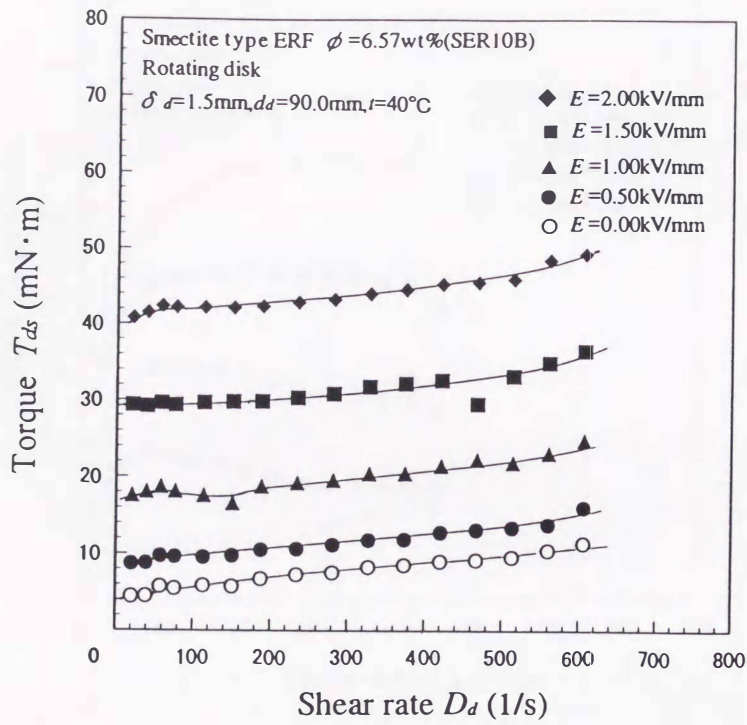


図 G.2 トルク特性と電流密度の特性(SER10B, $\delta_d = 1.5\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

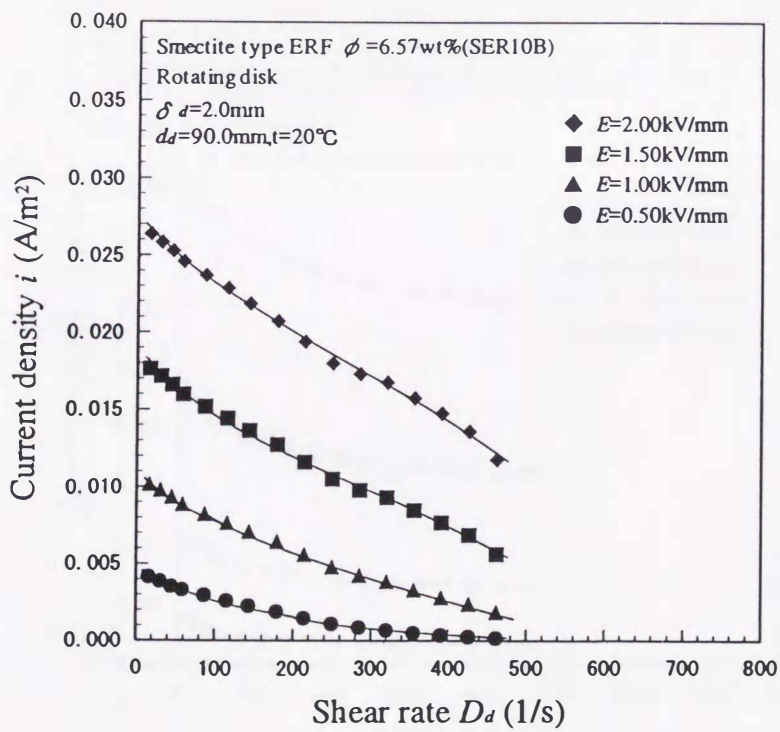
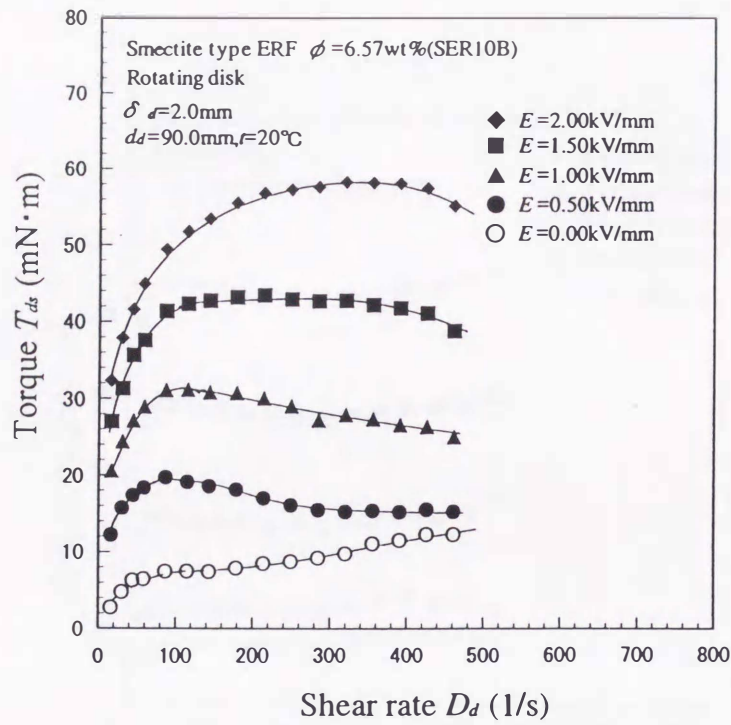


図 G.3 トルク特性と電流密度の特性(SER10B, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

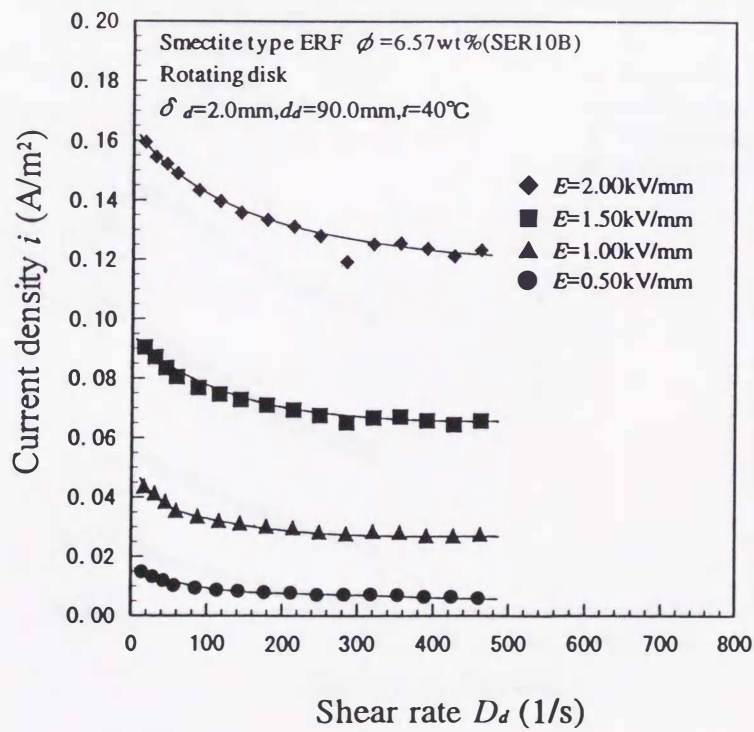
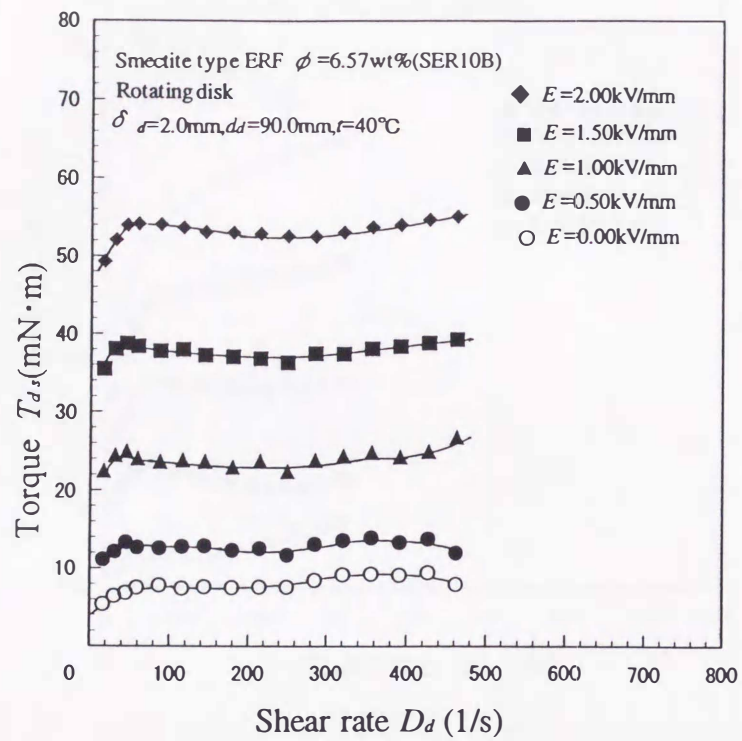


図 G.4 トルク特性と電流密度の特性(SER10B, $\delta = 2.0\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

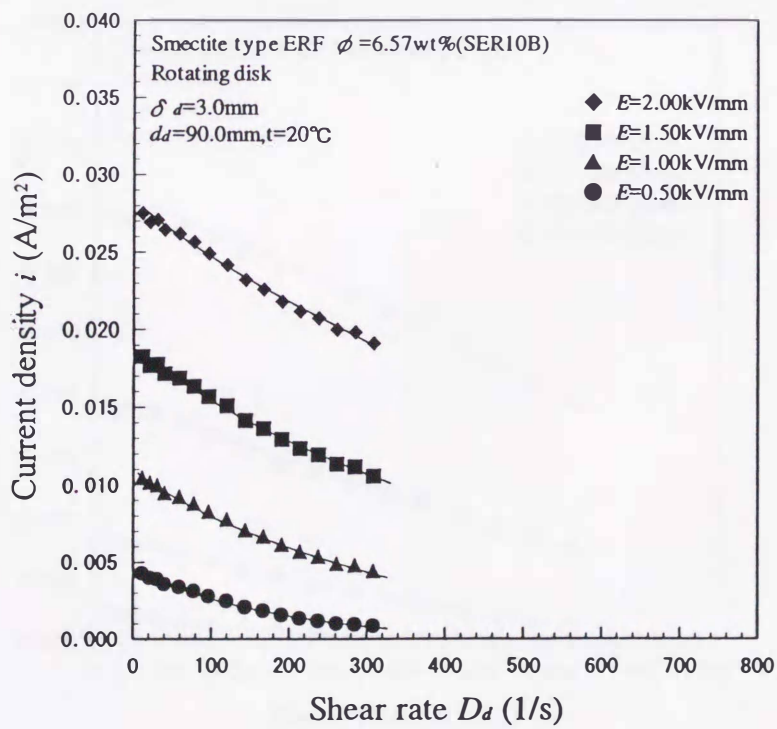
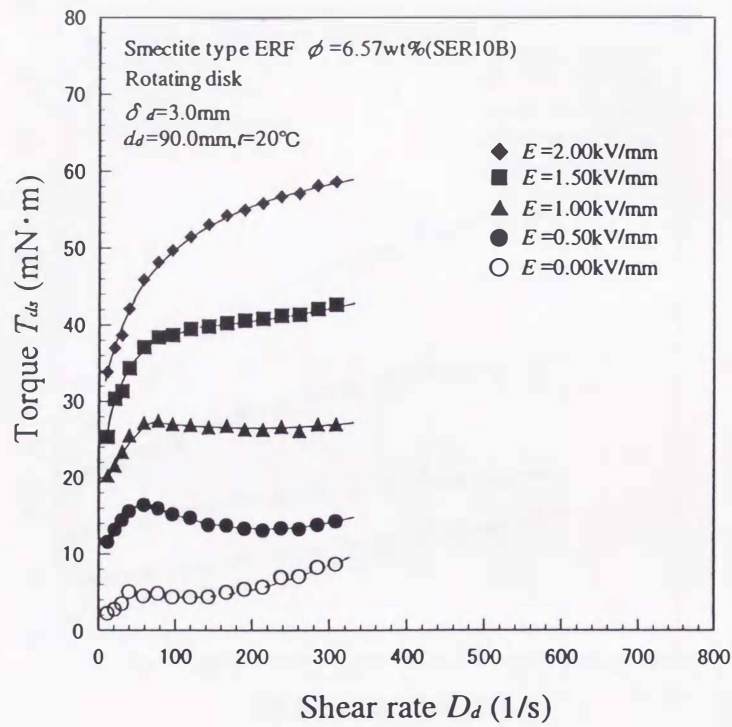


図 G.5 トルク特性と電流密度の特性(SER10B, $\delta_d = 3.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

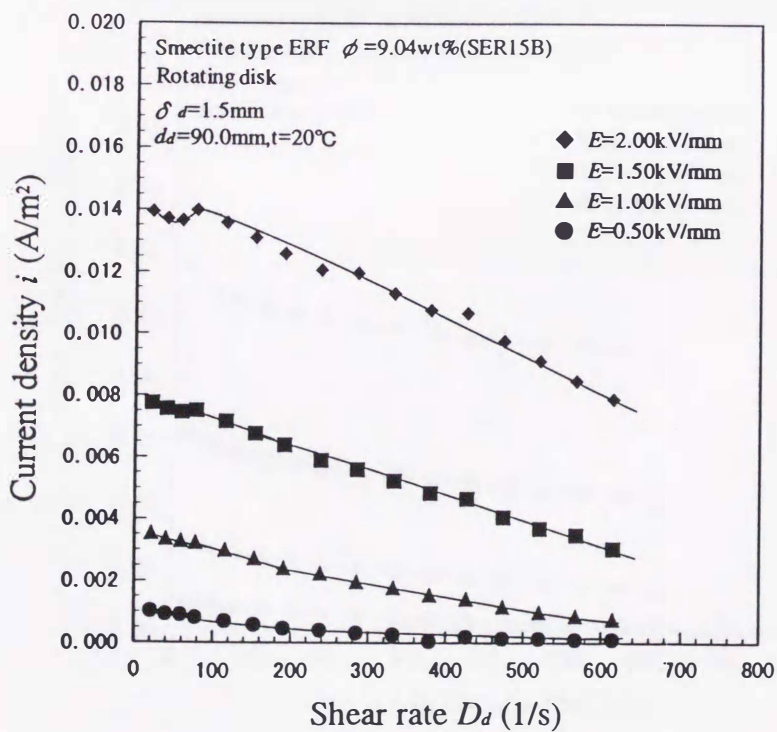
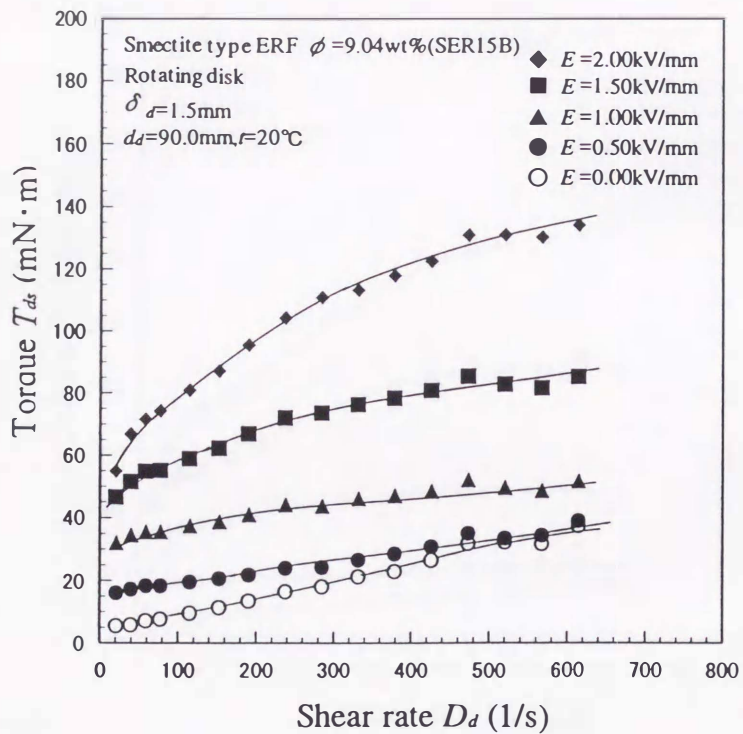


図 G.6 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta = 1.5\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

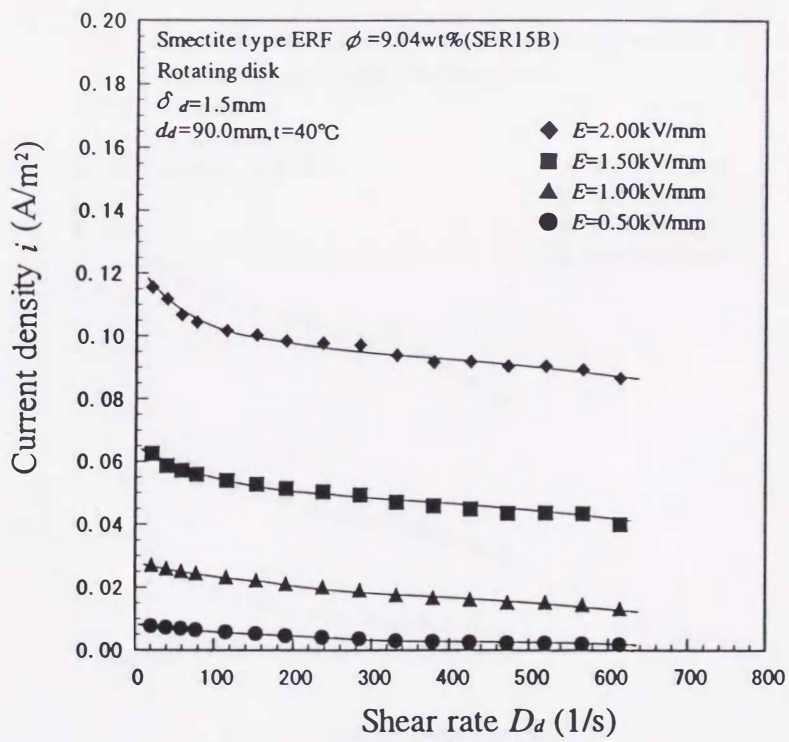
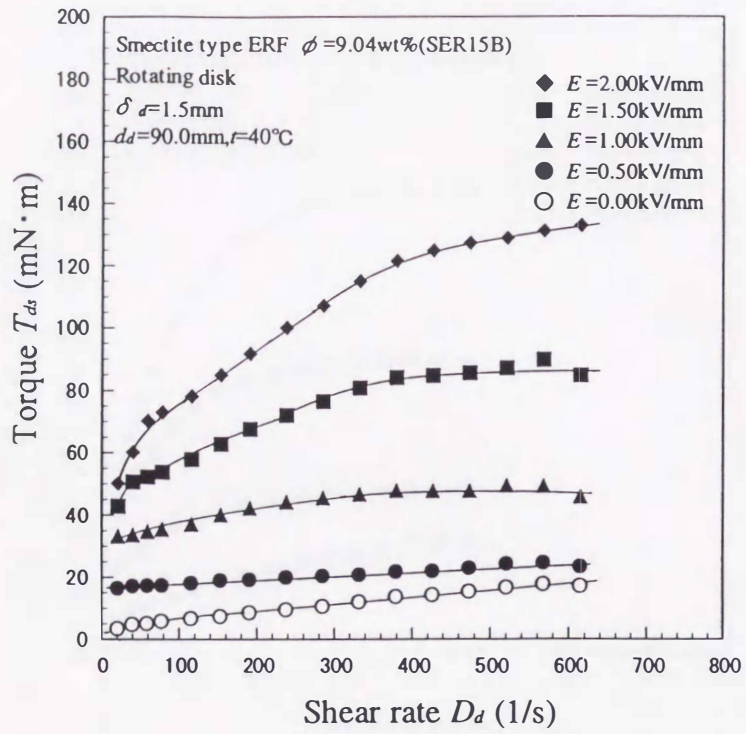


図 G.7 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta_d = 1.5\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

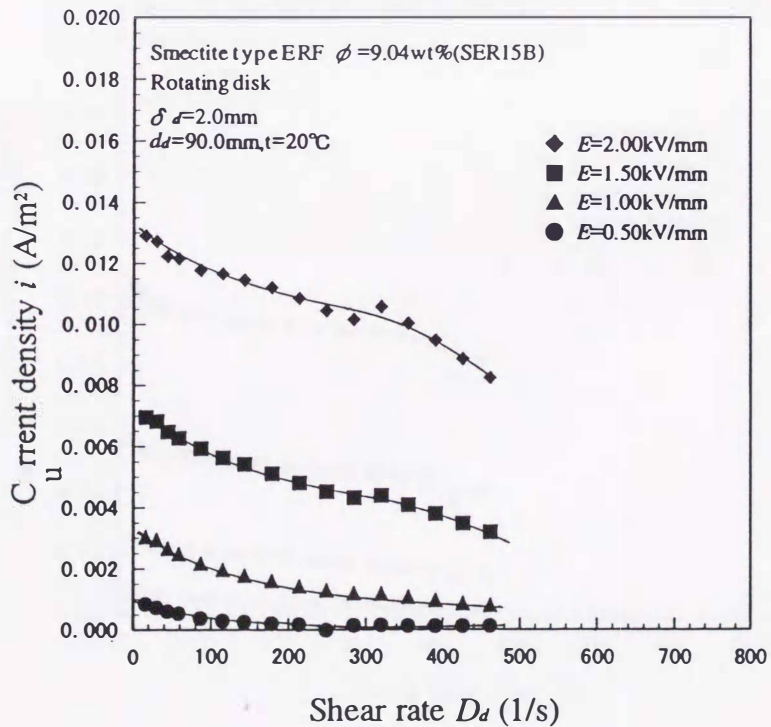
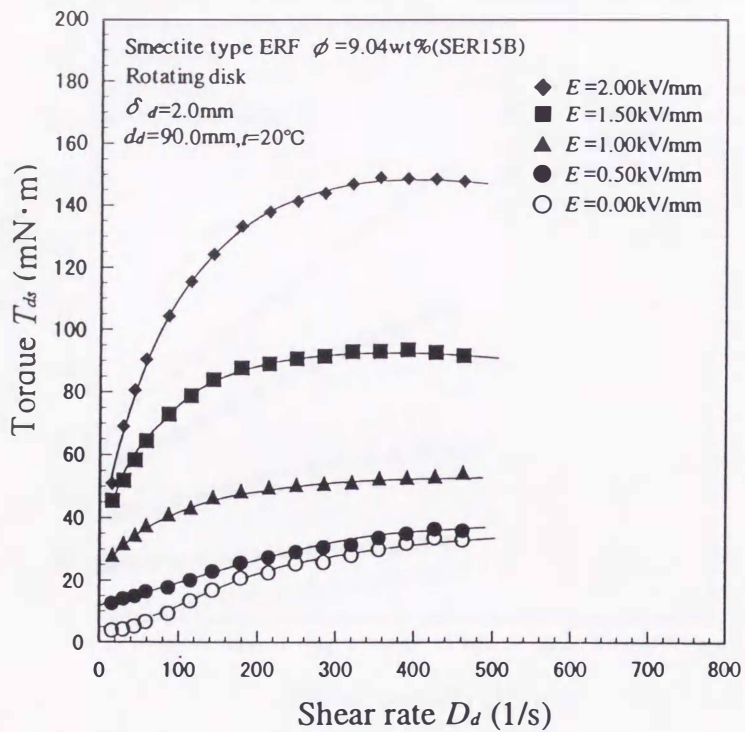


図 G.8 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

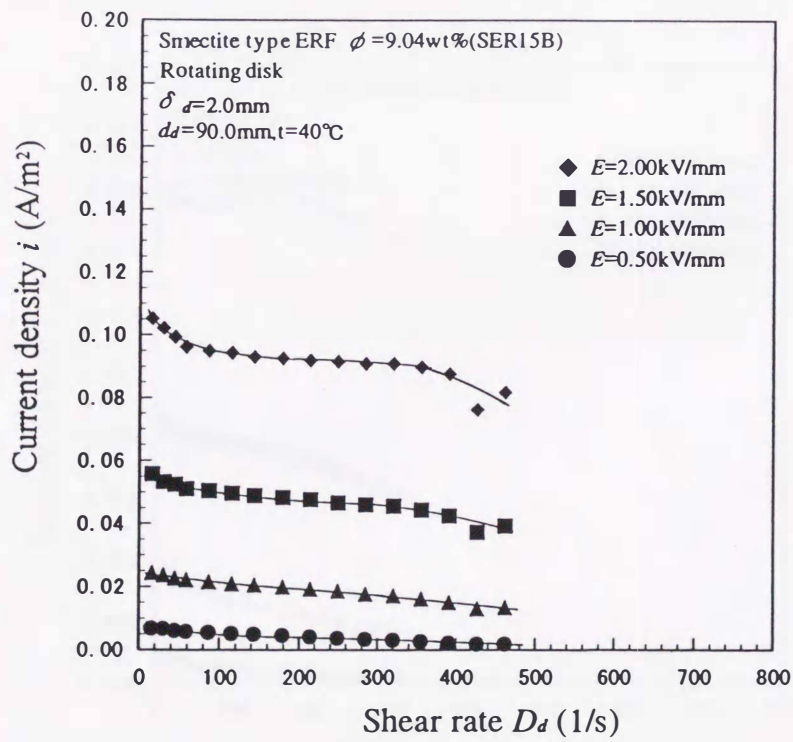
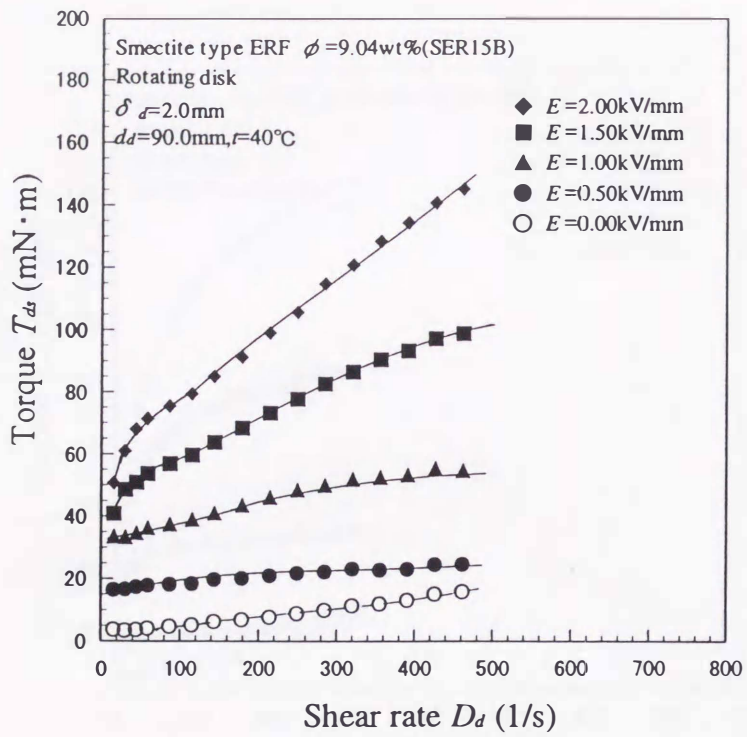


図 G.9 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta = 2.0\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

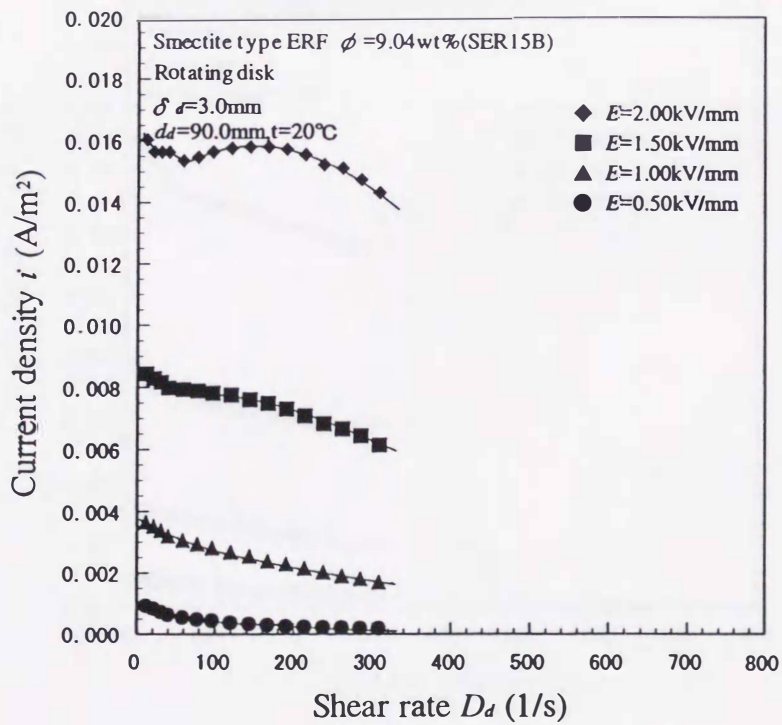
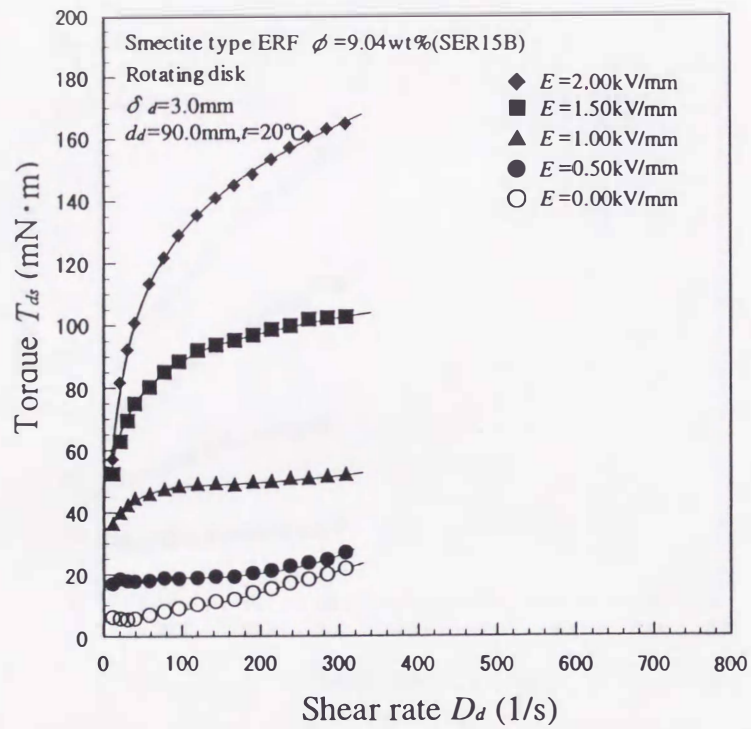


図 G.10 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta_d = 3.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

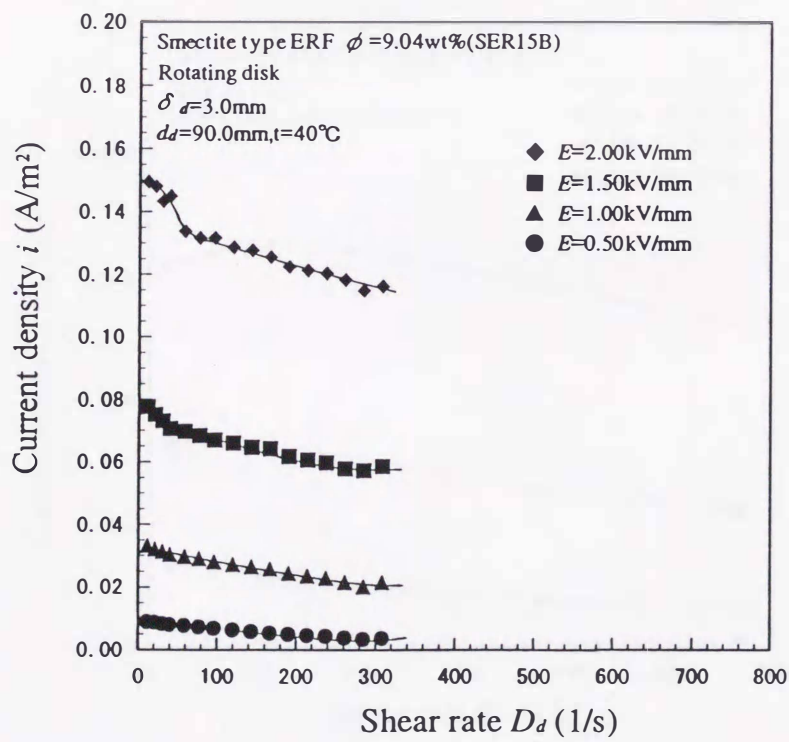
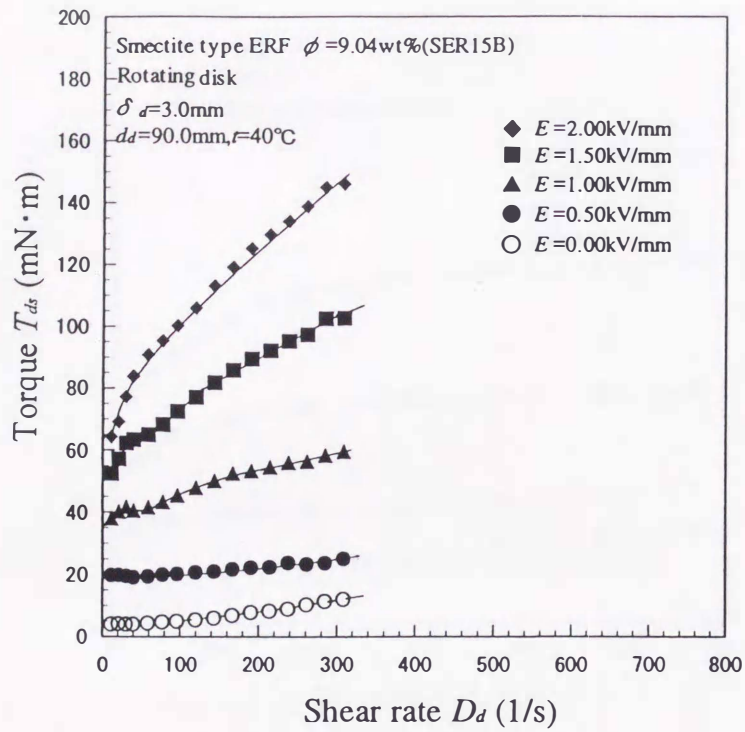


図 G.11 トルク特性と電流密度の特性(SER15B, $\delta_d = 3.0\text{mm}, t = 40^\circ\text{C}$)

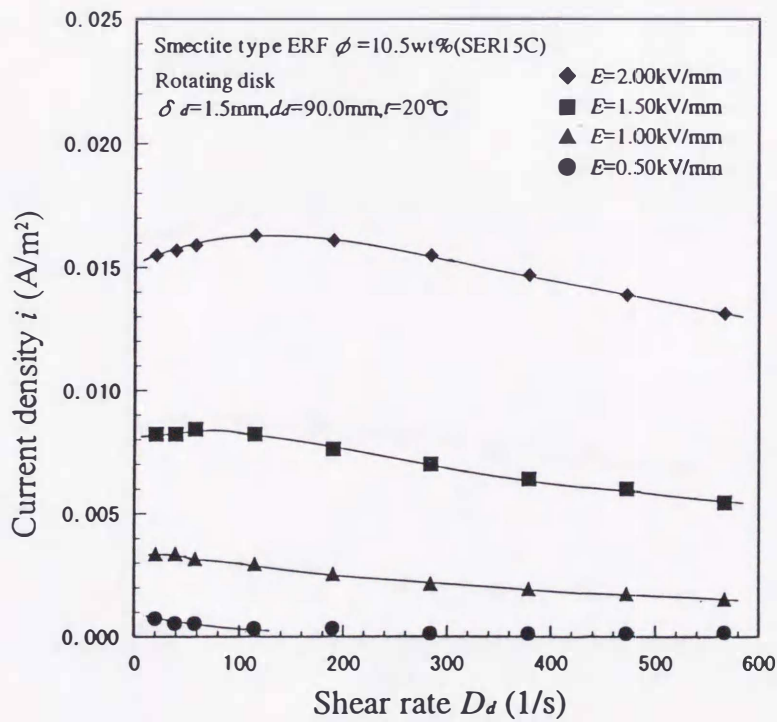
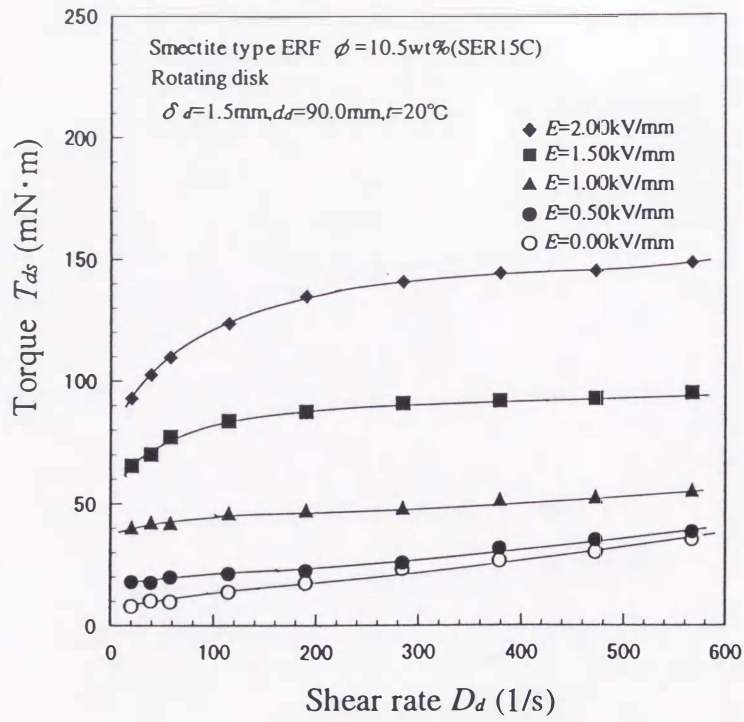


図 G.12 トルク特性と電流密度の特性(SER15C, $\delta_d = 1.5\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

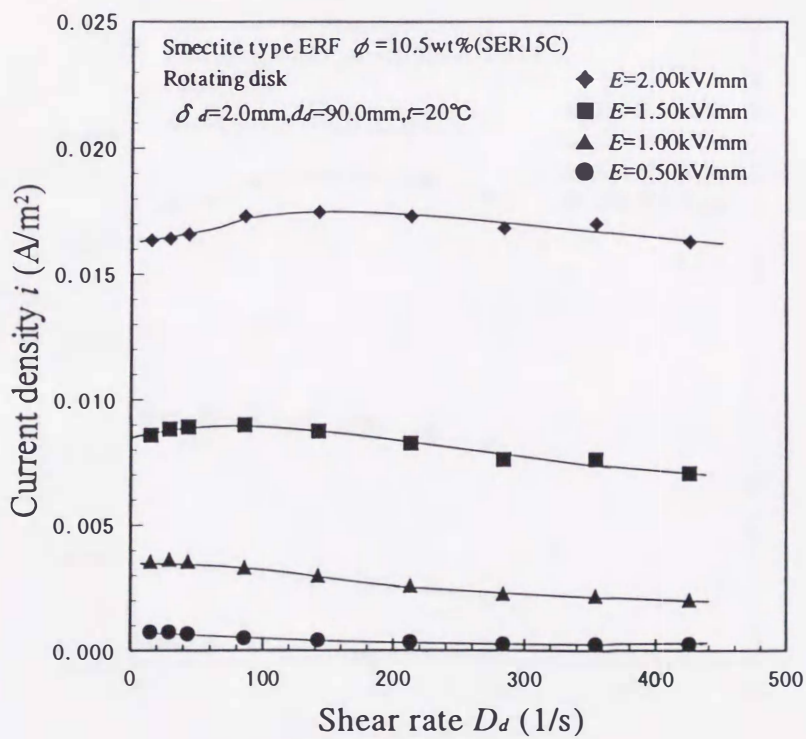
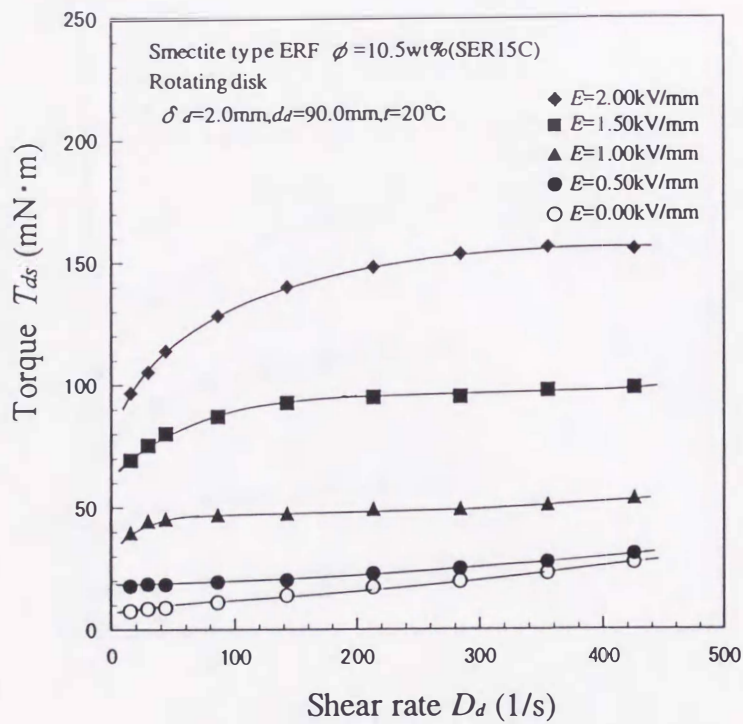


図 G.13 トルク特性と電流密度の特性(SER15C, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

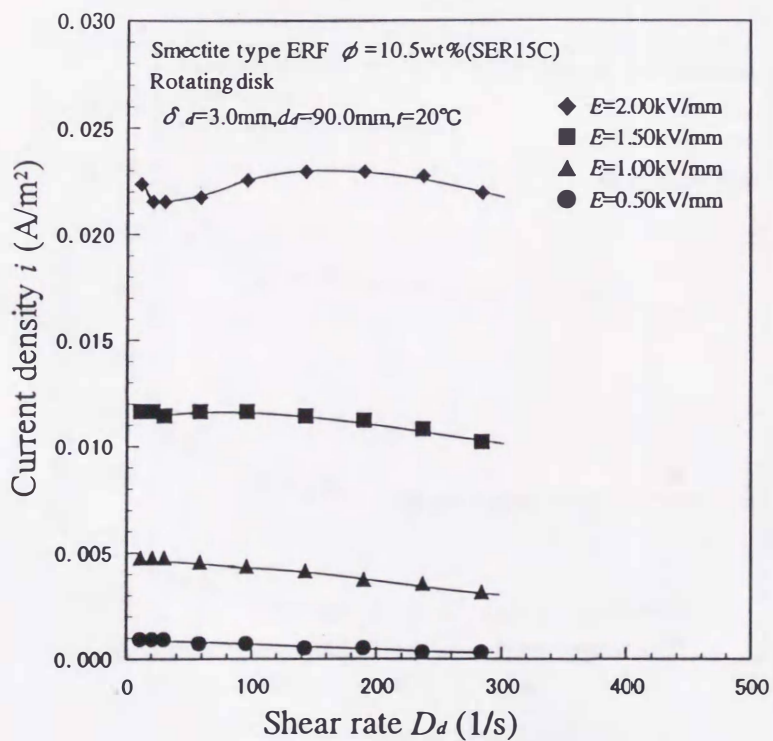
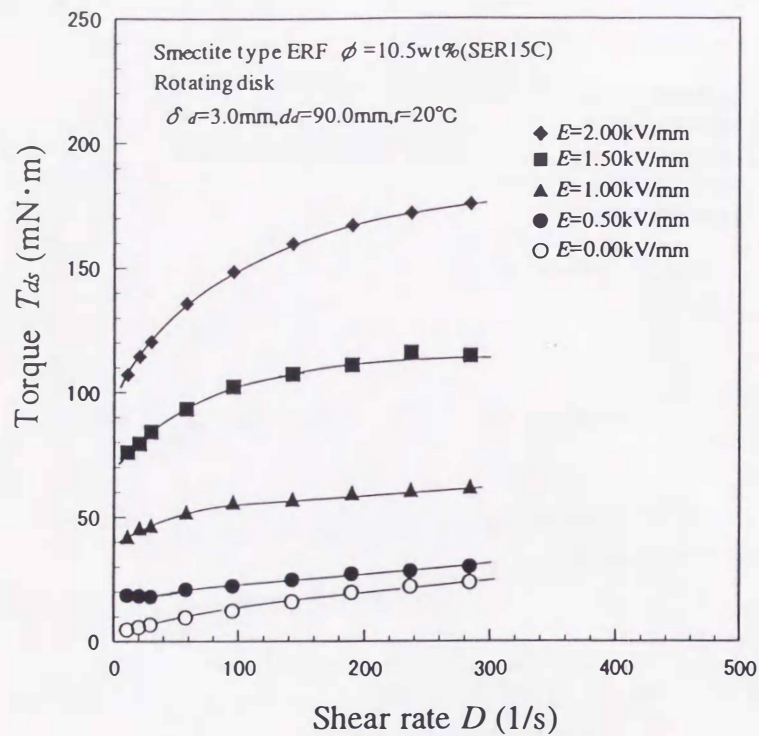


図 G.14 トルク特性と電流密度の特性(SER15C, $\delta_d = 3.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

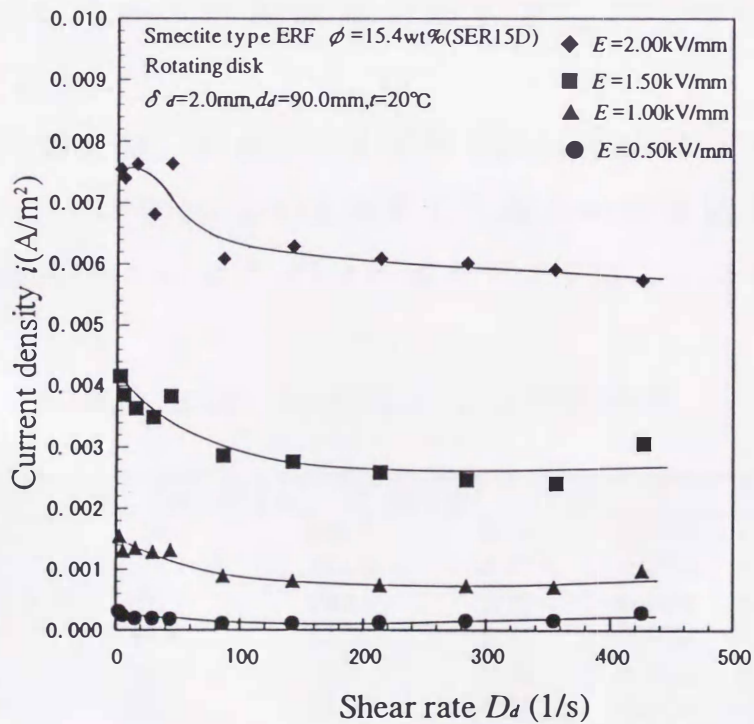
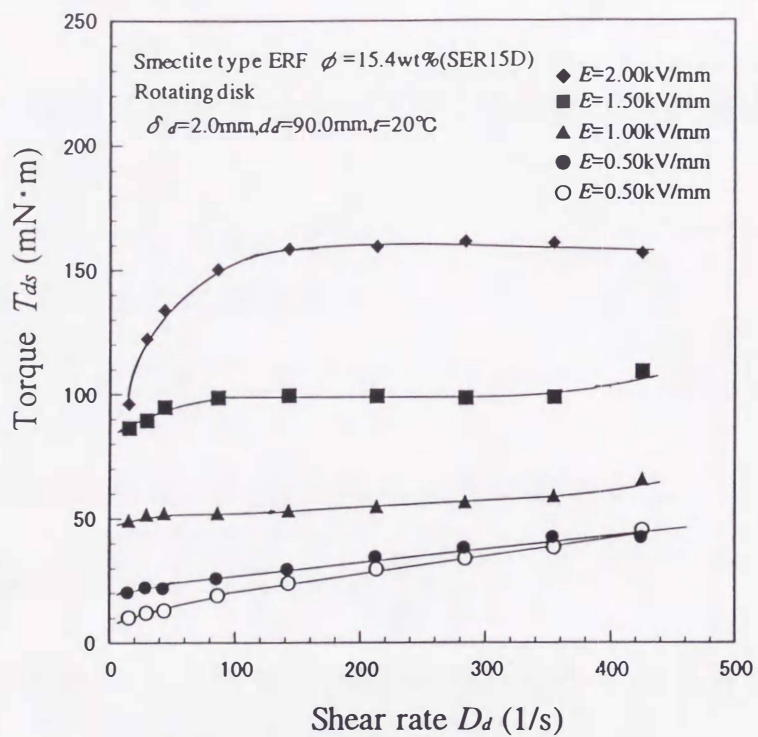


図 G.15 トルク特性と電流密度の特性(SER15D, $\delta_d = 2.0\text{mm}, t = 20^\circ\text{C}$)

付録 H 円板面に作用するトルクの誤差解析

回転円板の円板面に作用するトルク T_{ds} は、次式で計算される。

$$\begin{aligned} T_{ds} &= T_{dm} - T_{df} - T_{de} \\ &= T_{dm} - T_{df} - (T_{dm0} - T_{df})k \end{aligned} \quad (\text{H.1})$$

ただし、 k は次式のように表される。

$$k = \frac{(T'_{dm} - T'_{df}) - T'_{ds}}{T'_{dm} - T'_{df}} \quad (\text{H.2})$$

トルク T_{ds} の誤差は式(H.1)から次式のように表される。

$$\frac{\delta T_{ds}}{T_{ds}} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{dm}}{T_{ds}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{df}}{T_{ds}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{de}}{T_{ds}}\right)^2} \quad (\text{H.3})$$

一方、 k の計測器による誤差は、式(H.2)から次式のように表される。

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\frac{T'_{ds}{}^2 (\delta T'_{dm}{}^2 + \delta T'_{df}{}^2)}{(T'_{dm} - T'_{df} - T'_{ds})^2 (T'_{dm} - T'_{df})^2}} \quad (\text{H.4})$$

ここで、トルク計の計測誤差である $\delta T'_{dm}, \delta T'_{df}$ はそれぞれ $\pm 0.01(\text{mN}\cdot\text{m})$ である。

$\delta_d = 2.0\text{mm}$ の場合のシリコンオイル KF96-1000CS ($\mu = 0.978\text{Pa}\cdot\text{s}$) と KF96-100CS ($\mu = 0.0961\text{Pa}\cdot\text{s}$) を使用した場合の実験結果と式(H.2) による k および式(H.4)による $\delta k/k$ の値を表 E.1 および表 E.2 に示す。

表 H.1 KF96-1000CS による実験結果

| n (1/s) | T_{dm}' (mN·m) | T_{ds}' (mN·m) | T_{df}' (mN·m) | k | $\delta k/k$ (-) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|----------|------------------|
| 3.0 | 154.1 | 118.6 | 8.75 | 0.1835 | 0.000433 |
| 2.6 | 134.1 | 102.8 | 8.75 | 0.1794 | 0.000516 |
| 2.0 | 105.3 | 79.1 | 8.75 | 0.1808 | 0.000664 |
| 1.6 | 82.8 | 63.3 | 8.75 | 0.1455 | 0.001122 |
| 1.0 | 51.6 | 39.5 | 7.50 | 0.1022 | 0.002820 |
| 0.6 | 31.6 | 23.7 | 7.50 | 0.0134 | 0.043440 |
| 0.3 | 15.3 | 11.9 | 6.25 | -0.3110 | 0.006588 |
| 0.1 | 5.3 | 4.0 | 5.00 | -12.1827 | 0.051010 |

表 H.2 KF96-100CS による実験結果

| n (1/s) | T_{dm} (mN·m) | T_{ds} (mN·m) | T_{df} (mN·m) | k | $\delta k/k$ (-) |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------------|
| 3.0 | 20.6 | 11.7 | 5.05 | 0.2514 | 0.002704 |
| 2.5 | 17.8 | 9.7 | 4.85 | 0.2468 | 0.003346 |
| 2.0 | 15.0 | 7.8 | 4.70 | 0.2453 | 0.004224 |
| 1.5 | 12.3 | 5.8 | 4.45 | 0.2526 | 0.005365 |
| 1.0 | 9.9 | 3.9 | 4.30 | 0.3029 | 0.005839 |
| 0.6 | 7.9 | 2.3 | 4.40 | 0.3289 | 0.008303 |
| 0.3 | 6.6 | 1.2 | 5.20 | 0.1818 | 0.044673 |
| 0.1 | 7.8 | 0.4 | 8.60 | 1.4572 | 0.005221 |

表 H.1 および表 H.2 から、それぞれの場合の式(H.2)による k の平均値 (k_{1000cs} , k_{100cs}) と標準偏差 (δk_{1000cs} , δk_{100cs}) の計算から以下の結果を得る。ただし、KF96-1000CS の $n=0.3$, 0.1 (1/s) は除外している。

$$\frac{\delta k_{1000cs}}{k_{1000cs}} = 1.323 \quad \frac{\delta k_{100cs}}{k_{100cs}} = 0.1681 \quad (\text{H.5})$$

この値に比べ、表 H.1 および表 H.2 における式(H.4)による $\delta k/k$ の値ははるかに小さいので、 k の誤差として式(E.5)の値を採用する。このときの k の値はそれぞれ $k_{1000cs}=0.1341$, $k_{100cs}=0.2585$ である。

従って、電極間隔 $\delta_d=2.0$ mm のときの k は、

$$k = \frac{k_{100cs} + k_{1000cs}}{2} \quad (\text{H.6})$$

として求めているので、 k の計測誤差は以下の式となる。

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta k_{100cs}}{2k}\right)^2 + \left(\frac{\delta k_{1000cs}}{2k}\right)^2} \quad (\text{H.7})$$

よって、

$$\frac{\delta k}{k} = 0.4654 \quad (\text{H.8})$$

を得る。

続いて、式(E.3)より回転円板の外周面に作用するトルク T_{de} の誤差は以下の式で表すことができる。

$$\frac{\delta T_{de}}{T_{de}} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{dm0}}{T_{dm0} - T_{df}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{df}}{T_{dm0} - T_{df}}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2} \quad (\text{H.9})$$

式(H.9)を用いて、SER10B の $E=0.00\text{kV/mm}$ および SER15C の $E=0.00\text{kV/mm}$ の場合の実験結果から、 $\delta T_{de}/T_{de}$ と δT_{de} を計算した結果を表 H.3 および表 H.4 に示す。なお、本研究では回転数に対してこれの2倍以上の実験点を取っており、式(E.2)による k を求めるとき機械摩擦損失トルクは実験式を使用している。ここではおおよその誤差を知るために表に示す回転数に対して調べ、機械摩擦損失トルクは計測値を用いる。

表 H.3 SER10B の場合の $\delta T_{de}/T_{de}$ と δT_{de}

| n (1/s) | T_{dm} (mN·m) | T_{ds} (mN·m) | T_{df} (mN·m) | T_{de} (mN·m) | $\delta T_{de}/T_{de}$ (-) | δT_{de} |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| 3.0 | 21.1 | 12.5 | 5.76 | 2.81 | 0.4654 | 1.3072 |
| 2.5 | 20.3 | 11.3 | 5.81 | 3.11 | 0.4654 | 1.4481 |
| 2.0 | 18.7 | 9.4 | 5.93 | 3.35 | 0.4654 | 1.5587 |
| 1.5 | 18.4 | 8.7 | 5.91 | 3.73 | 0.4654 | 1.7349 |
| 1.0 | 17.7 | 7.7 | 6.73 | 3.27 | 0.4654 | 1.5198 |
| 0.6 | 18.0 | 7.7 | 8.27 | 2.01 | 0.4654 | 0.9372 |
| 0.3 | 17.0 | 6.5 | 10.20 | 0.30 | 0.4654 | 0.1384 |
| 0.2 | 15.6 | 5.0 | 10.08 | 0.49 | 0.4654 | 0.2276 |
| 0.1 | 13.6 | 3.0 | 9.75 | 0.90 | 0.4654 | 0.4168 |

表 H.4 SER15C の場合の $\delta T_{de}/T_{de}$ と δT_{de}

| n (1/s) | T_{dm} (mN·m) | T_{ds} (mN·m) | T_{df} (mN·m) | T_{de} (mN·m) | $\delta T_{de}/T_{de}$ (-) | δT_{de} |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| 3.0 | 50.6 | 34.3 | 6.62 | 9.67 | 0.4654 | 4.4980 |
| 2.5 | 45.7 | 30.5 | 6.77 | 8.43 | 0.4654 | 3.9225 |
| 2.0 | 40.5 | 26.4 | 6.53 | 7.57 | 0.4654 | 3.5232 |
| 1.5 | 36.0 | 23.0 | 6.44 | 6.57 | 0.4654 | 3.0571 |
| 1.0 | 29.3 | 17.4 | 6.45 | 5.47 | 0.4654 | 2.5442 |
| 0.6 | 20.9 | 9.8 | 7.28 | 3.77 | 0.4654 | 1.7536 |
| 0.3 | 16.1 | 5.7 | 8.58 | 1.81 | 0.4654 | 0.8404 |
| 0.2 | 14.9 | 4.7 | 8.92 | 1.25 | 0.4654 | 0.5823 |
| 0.1 | 14.3 | 4.4 | 10.69 | -0.74 | 0.4654 | -0.3453 |

以上の結果から，式(H.3)を用いて回転円板型デバイスによるトルクの誤差を求めることができる．ここでは最も小さいトルクと最も大きいトルクとなる場合の誤差解析の結果を表H.5および表H.6に示す．

表 H.5 SER10B, $E=0.00\text{kV/mm}$

の場合のトルクの誤差

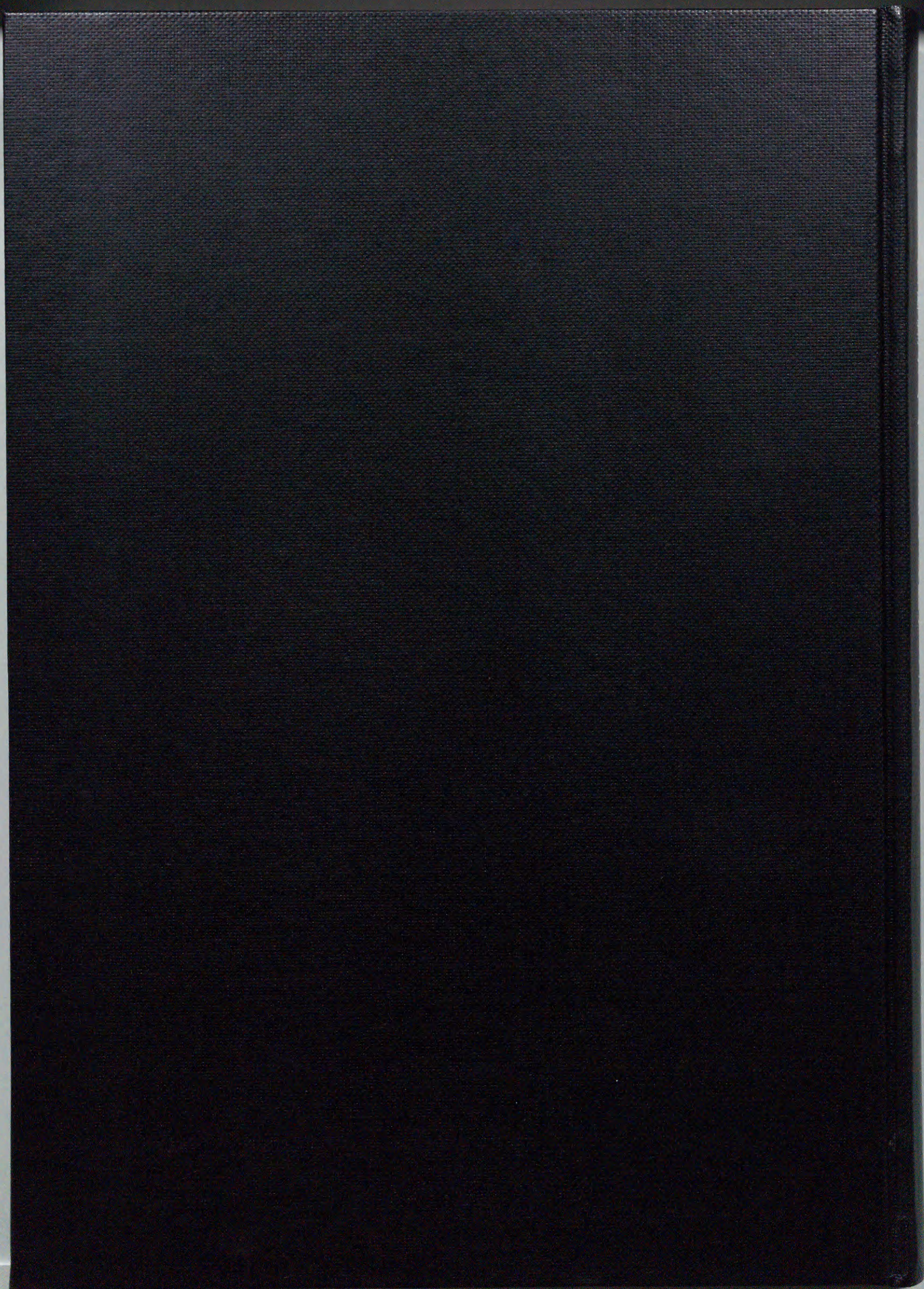
| n (1/s) | T_{ds} (mN·m) | $\delta T_{ds}/T_{ds}$ (-) |
|-----------|-----------------|----------------------------|
| 3.0 | 21.1 | 0.0620 |
| 2.5 | 20.3 | 0.0715 |
| 2.0 | 18.7 | 0.0832 |
| 1.5 | 18.4 | 0.0944 |
| 1.0 | 17.7 | 0.0861 |
| 0.6 | 18.0 | 0.0522 |
| 0.3 | 17.0 | 0.0082 |
| 0.2 | 15.6 | 0.0147 |
| 0.1 | 13.6 | 0.0306 |

表 H.6 SER15C, $E=2.00\text{kV/mm}$

の場合のトルクの誤差

| n (1/s) | T_{ds} (mN·m) | $\delta T_{ds}/T_{ds}$ (-) |
|-----------|-----------------|----------------------------|
| 3.0 | 149.0 | 0.0302 |
| 2.5 | 149.5 | 0.0262 |
| 2.0 | 144.4 | 0.0244 |
| 1.5 | 138.3 | 0.0221 |
| 1.0 | 124.5 | 0.0204 |
| 0.6 | 104.6 | 0.0168 |
| 0.3 | 80.9 | 0.0104 |
| 0.2 | 69.3 | 0.0084 |
| 0.1 | 51.1 | 0.0068 |

これより，トルクの誤差は濃度の低い SER10B の無電場の場合で， $\pm 9\%$ 以内であり，濃度の高い SER15C の電場強度が $E=2.00\text{kV/mm}$ の場合で， $\pm 3\%$ 以内であることが分かる．従って，本研究における円板面に作用するトルクの誤差は，トルクの大きい場合はおおよそ $\pm 3\%$ 以内であり，トルクの小さい場合は最大でおおよそ $\pm 9\%$ 以内である．

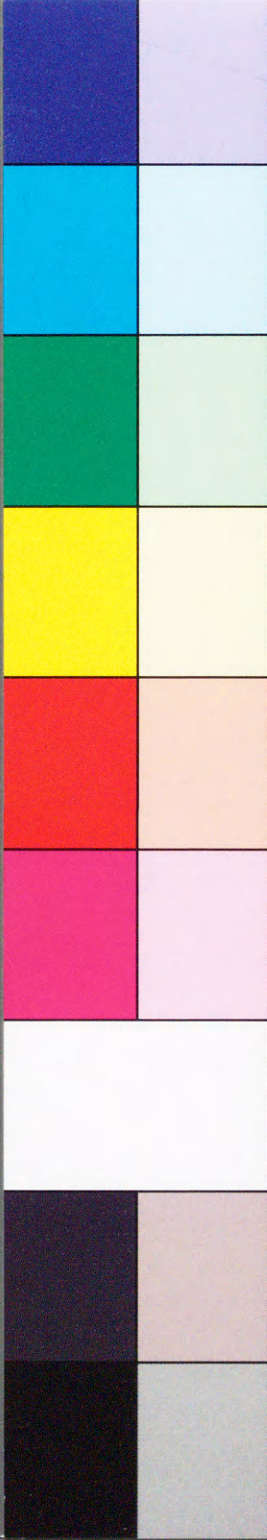


Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

