

# ゲル構造 ER 流体の開発と機械要素への応用

2005 年度

柿沼 康弘

## 目次

第1章 緒論	1
1-1 序言	1
1-2 機能性流体とその応用事例	1
1-2-1 磁気粘性流体(MR 流体)	1
1-2-2 磁性流体	2
1-2-3 EHD 流体および電界共役流体(ECF)	2
1-2-4 電気粘性流体(ER 流体)	3
1-3 電気粘性流体(ER 流体)の種類と特性	4
1-3-1 ER 流体の種類	4
1-3-2 ER 流体の特性	5
1-3-3 ER 流体の応用例	10
1-3-4 応用デバイスが抱える問題	11
1-4 本論文の目的	12
1-5 本論文の構成	12
1-6 結言	13
第2章 ゲル構造 ER 流体(ERG)の開発	14
2-1 序言	14
2-2 ERG の特徴	14
2-3 ERG の製造方法	16
2-3-1 使用した ER 流体・ER 粒子の構造および特性	16
2-3-2 製造方法	18
2-4 ERG の構造	19
2-5 ERG の組成と性能	20
2-5-1 ERG シートの製造	20
2-5-2 実験方法	22
2-5-3 ERG の組成とせん断特性の関係	24
2-6 結言	26
第3章 ERG の基本特性解析	28
3-1 序言	28
3-2 静特性解析	28
3-2-1 静的特性測定方法	28

3-2-2	電界強度とせん断応力の関係	29
3-2-3	ERG 厚さとせん断応力の関係	30
3-2-4	せん断速度とせん断応力の関係	32
3-2-5	ER 効果の再現性	33
3-2-6	温度の影響	34
3-2-7	電界強度と電流密度の関係	35
3-2-8	電極の表面粗さの影響	35
3-2-9	電極の接触面圧による影響	37
3-2-10	電極コーティングの影響	37
3-2-11	ER 流体との性能比較	38
3-3	動特性解析	39
3-3-1	動的特性測定方法	39
3-3-2	加振実験結果	41
3-3-3	動コンプライアンス測定装置	44
3-3-4	電界強度と動コンプライアンスの関係	44
3-4	耐久性試験	45
3-4-1	耐久性試験装置	45
3-4-2	耐久性試験に用いた ERG	46
3-4-3	耐久性試験結果	46
3-5	結言	48
第4章	ERG における ER 効果発生メカニズムの解明	50
4-1	序言	50
4-2	せん断応力発生メカニズムの推定	50
4-3	推定メカニズムの検証	52
4-4	異なる接触条件下での ER 効果	62
4-5	結言	65
第5章	ERG の精密位置固定機構への応用	67
5-1	序言	67
5-2	精密位置固定機構の現状	67
5-3	ER 効果(ERG 効果)を応用した可変固定力発生機構の考案	68
5-4	エアスライド用位置固定機構の構造	69
5-5	スライド固定力の測定	70
5-5-1	固定力測定装置の概要および測定方法	70
5-5-2	電界強度とスライダ固定力の関係	72

5-6 防振ダンパとしての応用 .....	73
5-6-1 動コンプライアンス測定装置の概要および測定方法 .....	73
5-6-2 電界強度と動コンプライアンスの関係 .....	75
5-7 電場印加に伴うスライダの微小変位 .....	76
5-7-1 変位測定実験装置の概要と測定方法 .....	76
5-7-2 電場印加と微小スライダ変位の関係 .....	77
5-8 結言 .....	78
第6章 ERG の金型用マイクロ研磨パッドへの応用 .....	79
6-1 序言 .....	79
6-2 精密研磨技術の研究事例 .....	79
6-3 精密研磨技術の現状と問題 .....	81
6-4 ERG を用いた研磨加工法 .....	82
6-5 ERG 研磨のメカニズム .....	84
6-6 供試材および使用した砥粒 .....	86
6-7 ERG 研磨パッドの特性 .....	86
6-7-1 研磨実験装置 .....	86
6-7-2 電界強度と研磨効率の関係 .....	89
6-7-3 電界強度と発生トルクの関係 .....	90
6-7-4 電界強度変化の影響 .....	94
6-7-5 回転速度の影響 .....	94
6-8 ERG マイクロ研磨法による樹脂レンズ用金型の研磨 .....	97
6-8-1 実験方法 .....	97
6-8-2 砥粒と研磨性能の関係 .....	97
6-9 結言 .....	122
第7章 片側電極における ERG の基本特性解析 .....	124
7-1 序言 .....	124
7-2 片側電極における ER 効果発生の概念 .....	124
7-3 試作した片側構造電極 .....	125
7-4 片側構造電極における ERG の基本特性解析 .....	125
7-4-1 基本特性測定装置 .....	125
7-4-2 電界強度と発生せん断応力の関係 .....	128
7-4-3 動特性測定装置 .....	132
7-4-4 加振実験結果 .....	133
7-5 対向材料の違いによる電場の構成 .....	135

7-5-1 片側パターン電極	135
7-5-2 電極構成と発生電場の関係	137
7-5-3 電場解析	137
7-6 対向材料の違いによる ERG の基本特性解析	138
7-6-1 基本特性測定法	138
7-6-2 対向導電体型片側電極における ERG の基本特性解析	142
7-6-3 対向絶縁体型片側電極における ERG の基本特性解析	148
7-7 結言	154
<b>第8章 片側電極を適用した ERG のトルク伝達装置への応用</b>	<b>156</b>
8-1 序言	156
8-2 トルク伝達装置の構造	156
8-2-1 片側電極を用いた ERG クラッチ	156
8-2-2 ERG クラッチによるトルク伝達機構	157
8-3 トルク伝達装置の静的特性評価	159
8-3-1 実験方法	159
8-3-2 静的特性測定結果	161
8-4 トルク伝達装置の動的特性評価	163
8-4-1 実験方法	163
8-4-2 動的特性測定結果	164
8-5 結言	167
<b>第9章 結論</b>	<b>169</b>
謝辞	176
参考文献	177
関連論文	183

# 第1章 緒論

## 1-1 序言

機能性流体の一つに、外部から電場を印加することで、見かけの粘弾性が変化する電気粘性流体 (Electro-rheological Fluids, 以後 ER 流体) がある<sup>1-4)</sup>。ER 流体は、その特性変化の割合が大きいことや電気的信号によって特性の制御が可能で機械システムに導入することが比較的容易なことから、これまで自動車分野等を中心に様々な機器に対する応用研究がなされてきた<sup>5,6)</sup>。

1990 年代にはアメリカ、日本、イギリスの自動車業界を中心に盛んに開発競争が繰り広げられたが、ER 流体には応力特性・電流特性が経時変化するといった様々な性能不安定要素が存在することや耐久性に欠けることから、機械要素への適用は難しいとされ、応用開発よりも流体自体の研究が中心に行われている。

本研究はこのような現状に対して、ER 流体を改良し、安定した性能を示す新機能性材料、ゲル構造 ER 流体を開発するとともに、開発したゲル構造 ER 流体の機械要素への応用を試みたものである。

本章では、各種機能性流体を紹介し、従来の ER 流体の性能および応用開発が抱えている問題点を指摘した上で、本研究の目的を明らかにする。

## 1-2 機能性流体とその応用事例

### 1-2-1 磁気粘性流体 (MR 流体)

磁気粘性流体 (Magneto-rheological Fluids, 以後 MR 流体) は、ミクロンサイズの磁気分極する強磁性体微粒子をオイルなどに分散させた高濃度懸濁液 (サスペンション) で、磁場を印加することにより粘性が変化する流体の総称である。粘性変化は図 1-1 に示すように磁場を印加することにより磁性を帯びた粒子が強固な粒子鎖を形成することにより生じる。粘性変化に伴い誘起されるせん断応力は 50～100kPa と後述する ER 流体に比較して格段に大きい。近年、MR 流体の発展は目覚ましく、米国 Load 社を中心に商業ベースでの市場展開が行われ、年間 100t 才

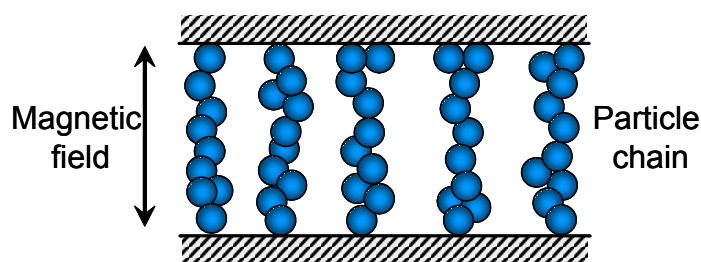


Fig. 1-1 Behavior of MR Suspension

ーダーの MR 流体が生産販売されるまでに至っている<sup>7, 8)</sup>。

MR 流体に関する研究は流体自身よりも実用化を目指した応用デバイスの開発研究が広く行われており、高性能な MR ブレーキ、クラッチ、ダンパ、ショックアブソーバなどが開発されている<sup>8-14)</sup>。特に MR ブレーキ、MR ショックアブソーバは、トラックなどのシートダンパ、乗用車のサスペンション、つり橋のワイヤ振動制御装置、建築構造物の免震装置などに実用化されている<sup>15)</sup>。

国内での研究開発も活発で、山形大学の中野らによりスポンジに MR 流体を含浸させたコンポジットブレーキの有効性が示され、これをコイル巻線用張力制御装置に応用して張力変動の低減を実現している<sup>16)</sup>。その他にも、MR 流体の高圧シールの応用開発や MR 流体が磁石に吸引される特性を活かし、MR 流体自体を弁体としたバルブを用いたマイクロ流体システムへの応用など数多くの研究が報告されている<sup>17)</sup>。MR 流体における粘弾性変化は温度依存性が小さいことから、広い分野での応用可能性が期待される。しかしながら、依然として分散媒との比重差から生じる粒子沈降の問題が解決されていない。そのため、MR 流体は粒子沈降が回避でき、さらに粒子の再分散性が保証できる場所への応用に限られている。

### 1-2-2 磁性流体

磁性流体は、きわめて微細な強磁性体が液体中に均一に分散している複合材料で、強磁場下でも粒子の凝集や固液の分離が起こらず、あたかも液体全体が強磁性を持っているかのような挙動を示す。磁性流体はそのユニークな性質ゆえに様々な分野から注目を集めてきた。応用デバイスとしては、従来から回転軸のシール、振動系のダンパ、傾斜センサー・角度センサーなどが提案され、実用実績がある<sup>18, 19)</sup>。現在は無重力環境の創出、磁性液滴の活用、磁性流体熱交換ポンプ、磁性流体マイクロマシンなどの基礎的研究が進められている<sup>20-22)</sup>。

### 1-2-3 EHD 流体および電界共役流体 (ECF)

EHD 流体や電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid 以降 ECF) は高電場を印加することにより対流が生じる流体である。その理論は確立されてはいないが、代表的な説には、図 1-2 に示すように高電場を印加することにより電極から誘電液体中に電荷が注入され、それがキャリアとしてながれが生じるとするイオンドラッグ現象説と電極部に電荷の偏りが生じ、それがヘテロチャージ層を形成することにより電極付近で誘電液体が対流する純伝導ポンピング説などがある<sup>23)</sup>。EHD 流体や ECF は機械的な駆動源を用いず流体を流すことができるため、これをポンプや冷却装置に応用することで装置の小型化、省エネ化が期待されている。近年では高出力の誘電液体が開発され、一層活発な研究開発が日本国内で行われている。東京工業大学の横田らは、ECF を用いたマイクロモータや ECF ジェットを活用したマイクロ人工筋の開発などを行っている<sup>24)</sup>。東京電機大学の中田らは、ECF リニアアクチュエータを提案し、それを利用した搬送システムの開発に着手している<sup>25)</sup>。また、東京電機大学の三井らは、EHD を揮発させた EHD ガスにおいて対流現象が生じることを発見し、それを利用した EHD ガスモータを開発している<sup>26)</sup>。

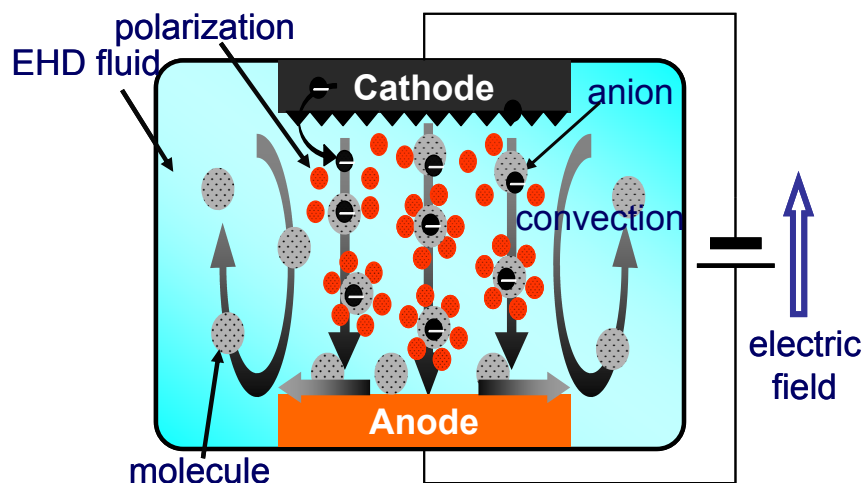


Fig. 1-2 EHD phenomena

#### 1-2-4 電気粘性流体 (ER 流体)

ER 流体はこれに電場を印加することにより、見かけの粘弾性が高速かつ可逆的に変化する流体の総称で、この効果を ER 効果 (Electro-rheological 効果) と呼ぶ。電場に反応して見かけの粘弾性が変化する流体は 19 世紀の終頃に初めて報告され<sup>3)</sup>、多くの学者によって精力的な研究が行われた。世間の関心を集めたのは、1948 年にアメリカの科学者 Winslow によって電界を印加すると著しく粘性の変化するコロイド溶液として正式に特許申請されてからである。特許申請の中で、既に機械的可動部のない流体バルブ、クラッチやブレーキへの応用が期待されることを提唱している<sup>4)</sup>。

Winslow は絶縁性のオイルに誘電体粒子を分散させた流体が大きな ER 効果を示すことを発見した。このような流体のことを粒子分散系 ER 流体と言う。これまでの ER 流体の開発は、このタイプが中心で、主に誘電体粒子の開発が盛んに行われてきた。

1990 年代には技術の進歩に伴い粒子分散系 ER 流体の特性が飛躍的に向上し、各分野で実用化の動きが高まり、特に自動車分野で活発な開発競争が行われ、米国自動車業界の試算では 9 兆円規模の産業になると期待された<sup>5)</sup>。しかし、粒子分散系 ER 流体には性能面でいくつかの不安定要素が存在することが明らかとなり、また機械要素に組み込む際のコスト的な問題が残った。この二つの問題を解決する手段が見つからないまま、多くの企業は粒子分散系 ER 流体の開発に見切りをつけ始めた。つまりこの二つの問題を解決しない限り、粒子分散系 ER 流体の実用化は難しいと言える。そのような中、2004 年 9 月に北京で開催された機能性流体に関する国際会議 9th International Conference of Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspension にて、ホンコン科学技術大学の Ping Sheng らがナノ粒子を分質に使用したナノ粒子分散系 ER 流体の開発に成功したという報告があり注目を集めている<sup>27, 28)</sup>。粒子をナノオーダーにすることで、粒子の沈降が生じにくく、分散安定性が高い。さらには最大降伏応力が 100kPa 程度と従来の ER 流体に



比べ約30倍も高く、今後の展開が期待されている。

一方、粒子を用いない均一系 ER 流体の開発に関する報告も多くなされている<sup>29)</sup>。均一系 ER 流体は、液晶物質が配向性による特性の異方性を示し、電界印加により配向することで粘性が変化する流体である。均一系 ER 流体の開発は 1960 年代から行われてきたが、粒子分散系に比べ粘性変化が低いことからあまり注目されなかった。しかし、近年、均一系の ER 流体も開発が進み性能が飛躍的に向上し、福祉・介護機器用途で実用化されたものがある<sup>30,31)</sup>。大阪大学の古荘らは電動モータと ER クラッチからなる ER アクチュエータを活用した力覚提示装置を応用した 3 次元上肢リハビリ訓練システムを開発し、臨床応用の結果からリハビリの有効性が示された<sup>32-34)</sup>。また、同氏は電極構造を従来の平行平板型ではなく陽極と陰極を片側にのみ配置した片側電極構造を提案し、均一系 ER 流体において片側電極を適用した場合に ER 効果が発現することを明らかとした<sup>35-37)</sup>。片側電極構造を用いることで、応用デバイスを簡単に構成できるようになるため、今後の展開が期待されている。

## 1-3 電気粘性流体 (ER 流体) の種類と特性

### 1-3-1 ER 流体の種類

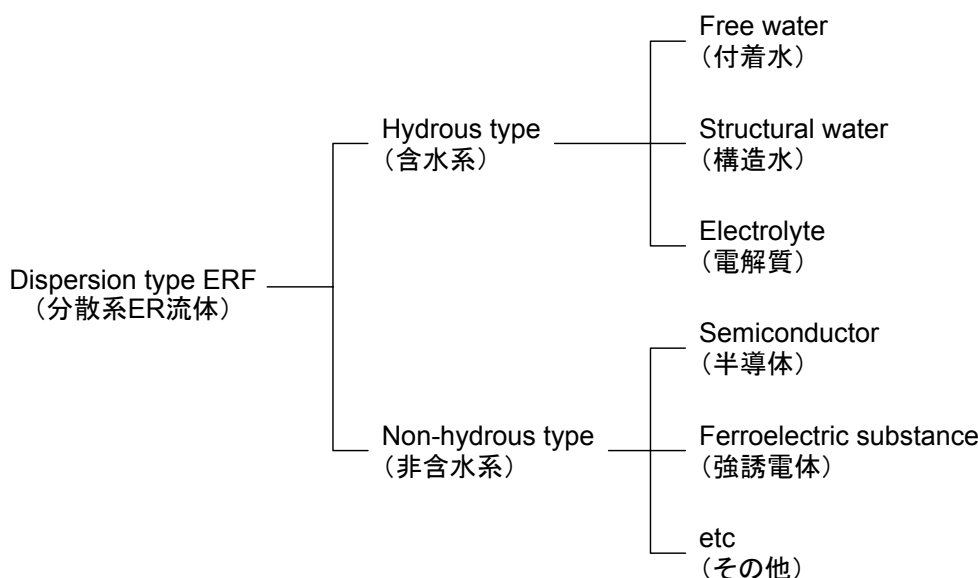
ER 流体は大きく分けて粒子分散系と均一系の 2 種類がある。粒子分散系 ER 流体は絶縁性のシリコンオイルなどに誘電微粒子を分散させたコロイド溶液であり、これに電場を加えると、ランダムに分散していた粒子が電場方向に配列し電極間に鎖状構造を形成する。ER 流体の見かけの粘弾性変化はこの鎖状構造形成に起因する。しかしながら前述したように、微粒子を分散させた ER 流体は、微粒子と分散媒との比重差が原因で時間経過に伴い粒子の沈降や浮上、また凝集が生じ、電場を印加しても粒子鎖形成が生じなくなるという問題がある。この問題を解決するために、微粒子や分散媒といった材料面に関する多くの研究が行われてきた。特に、誘電体である微粒子は ER 効果の大きさや安定性に影響することから多くの種類が提案されている。微粒子の違いにより、粒子分散系 ER 流体は表 1-1 に示すように、分散粒子の性質から含水系と非含水系の 2 種類に大別することができる。

含水系はさらにシリカやイオン交換樹脂などのような自由水の付着を利用した付着水粒子、結晶水や層間水といった構造水を利用したセルロース、ゼオライトなどの構造水粒子、ポリメタクリル酸リチウムなどの電解質粒子に分類される。非含水系は電子伝導による界面分極を利用したカーボンやポリアニリンなどのような電導度  $10^{-10} \sim 10^{-3} \text{ S/cm}$  の半導体粒子、粒子内部に導電性を持たせ、表面を絶縁性の薄膜でコートした導電性粒子、その他に分類される。

一般的に含水系は、非含水系に比べ ER 効果は大きく、 $1 \sim 3 \text{ kV/mm}$  の電界で  $0.1 \sim 2 \text{ kPa}$  程度の降伏応力を示す。しかしながら、電界印加により  $1 \sim 100 \mu \text{ A/cm}^2$  程度の電流が流れるため発熱が生じ含水量が減少し、ER 効果が経時変化を起こす。また、ER 効果発現のために水が必要であるため、 $0^\circ \text{C}$  以下および  $100^\circ \text{C}$  以上での使用はできず、使用できる温度範囲が狭いといった問題があるため、現在は非含水系粒子の開発が中心に行われている。

一方、均一系 ER 流体における ER 効果についても、古くから研究が行われてきた。

Table.1-1 Variety of ER fluids



均一系 ER 流体は、微粒子を含まない極性流体や液晶であり、これに電場を加えると、ER 効果が生ずる。極性流体は、ニトロベンゼンなどの極性低分子液体、ジメチルホルムミドなどの極性高分子液体に、また液晶は低分子液晶、液晶高分子に分けることができる。極性流体における ER 効果は極めて小さく、機械要素への応用が見込めるほど粘度増加率は高くない。現在、均一系 ER 流体として注目されているのが、液晶性物質である。液晶は電場の印加により棒状の液晶分子が配向し、粘度の異方性が生じる。特に井上らにより開発された側鎖型液晶ポリシロキサン (LCP) は高せん断速度域で 5kPa を超えるせん断応力が発生し、医療分野における機械要素への応用が期待されている。

### 1-3-2 ER 流体の特性

#### 粒子分散系 ER 流体の特性

粒子分散系 ER 流体は粒子径が十数  $\mu\text{m}$  の ER 粒子を絶縁性のシリコンオイルなどに分散させたコロイド溶液である。流体の粘弾性変化のメカニズムは微粒子の種類によって複数あるとされるが、最も一般的なのは、図 1-3 に示すように 2 枚の電極間に流体を満たして電場を印加すると粒子が鎖状構造を形成<sup>38-43)</sup>し、これが流動抵抗となり粘弾性が変化するという粒子鎖形成論である。

含水系 ER 流体における粒子鎖形成は電気二重層説<sup>44,45)</sup>により説明される。図 1-4(a) に示すように、含水系粒子表面には吸着水が存在するため、粒子の持つイオン解離基が解離して電気二重層を形成している。この電気二重層が外部電場の影響により解離イオンが移動して電氣的に歪みが生じ、分極状態となるため、粒子間に静電引力が生じるため、粒子が電界方向に結合してクラスター (cluster) と呼ばれる粒子鎖を形成する。

一方、非含水系 ER 流体における粒子鎖形成は誘電分極説<sup>45)</sup>により説明される。図 1-4(b) に示すように、ER 流体に電界を印加すると、各粒子が誘導分極により双

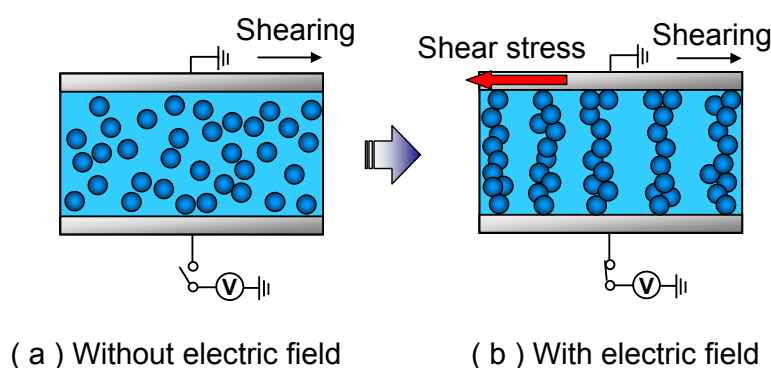


Fig. 1-3 Occurrence mechanism of ER effect

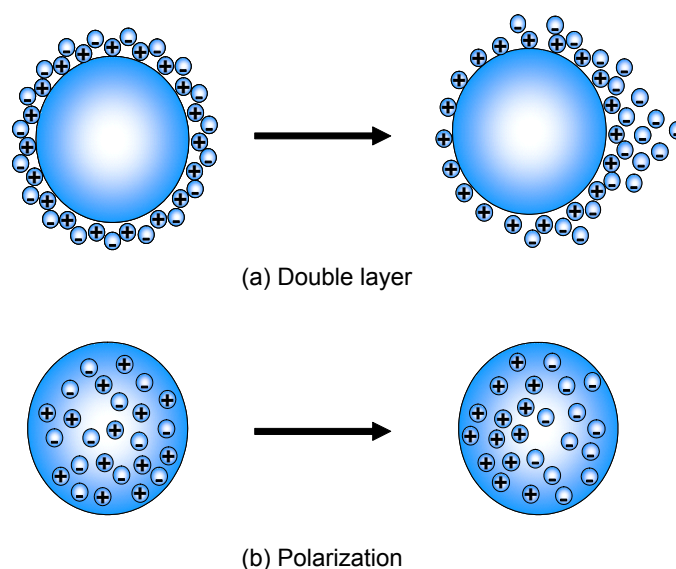


Fig. 1-4 Behavior of ER particles under electric filed

極子を生じる。2つの粒子が接近すると双極子-双極子相互作用により、電界方向に並んだ粒子には引力が働き、電界垂直方向に並んだ粒子には斥力が生じる(図1-5)。この粒子間力により、電極間で粒子が電界方向に結合して鎖状構造(クラスター)を形成する。

電界内にあるER流体をせん断するためには、基底の粘性抵抗の他に、この粒子鎖を塑性変形させるための降伏力が必要となる。ER流体内の粒子濃度が高くなるとこの粒子鎖は一本で存在するのではなく、複数の粒子鎖が絡み合っカラム(column)と呼ばれる構造体を形成していることが知られている。また、粒子鎖は完全に塑性変形されなくても、せん断によって僅かでも傾くと元の状態に戻る方向に復元力が働き、これが弾性の性質を示すことになる。

前述の粒子鎖形成論からも理解できるように、ER流体は電界を印加することにより、図1-6(a)に示すようにNewton流体的挙動から降伏応力を示すBingham流体的挙動に推移する。一定の電場下でのせん断応力は式1-1で表される。

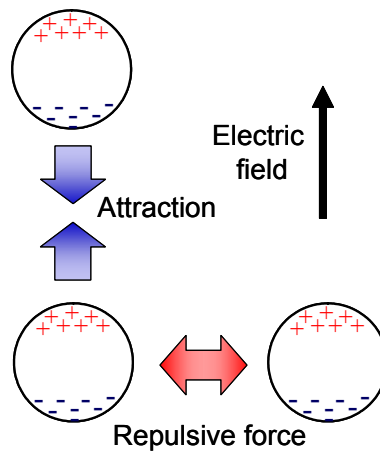


Fig. 1-5 Interaction between ER particles

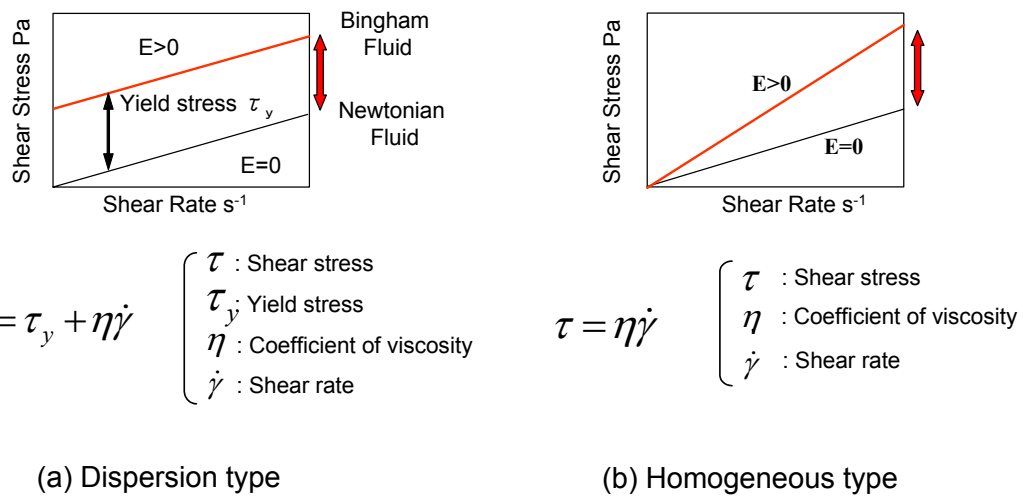


Fig. 1-6 Shear characteristics of ER fluids

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

ここで  $\tau$  はせん断応力,  $\tau_0$  は降伏応力,  $\eta$  は粘性係数,  $\dot{\gamma}$  はせん断速度である。  
 一般的に ER 効果は ER 流体の降伏応力から見積もられ, ER 流体の粒子と分散媒との界面効果を見積もることができるものとする, ER 流体に電界が印加された時の降伏応力  $\tau_0$  は次式で表される<sup>2)</sup>。

$$\tau_0 \propto \phi E^2 \epsilon_c \left( \frac{\epsilon_p - \epsilon_c}{\epsilon_p + 2\epsilon_c} \right) \quad (1-2)$$

ここで,  $\phi$  は粒子体積分率,  $E$  は電界強度, また  $\epsilon_c$  は分散媒の比誘電率,  $\epsilon_p$  は分散粒子の比誘電率である。ER 効果を降伏応力  $\tau_0$  で判断するものならば, 式 1-2 から以下のことがわかる。

- (1) ER 効果は粒子の体積分率, つまり粒子濃度に比例する.
- (2) ER 効果は印加電界の 2 乗に比例する.
- (3) 分散粒子の誘電率が大きいほど高い ER 効果が得られる.

また, ER 効果とせん断速度の関係について, せん断場にある ER 流体のせん断応力の増分  $\tau_e$  は, 降伏応力  $\tau_0$  よりも小さくなることが知られている. これは ER 流体が電界により粒子が配列しようとする力とこの配列を壊そうとする流れによる力学的なバランスによって決まるという考えによって説明される. つまり, 粒子が配列しようとする力は電界強度が変わらなければ一定であるが, 粒子の配列を壊そうとする力はせん断速度が増すに従い大きくなり, ER 効果が減少するわけである<sup>46)</sup>. すなわち,

- (4) 低せん断速度下において強い ER 効果が得られる.  
 と言うことになる. また, ER 効果は粒子鎖形成論から考えると, 粒子鎖の存在によって起こるものであるから可逆的であり, 電界を印加すると粒子鎖形成が瞬時に行われることから応答性も良い. 更に,

- (5) ER 効果は可逆的であり, 応答性に優れている.

と言うことを付け加えておく. 以上 5 つの特性が注目すべき特性である. 参考までに, 表 1-2 に具体的な特性について記した<sup>30)</sup>.

### 均一系 ER 流体の特性

均一系 ER 流体は, 純液体および粒子または分子等の分散質が沈殿しない程度に十分小さいサイズで分散する系で, 極性流体と液晶がある. 均一系 ER 流体における ER 効果を説明する統一的なメカニズムの理論は確立されていないが, ここでは一般的に考えられているメカニズムの理論について説明する.

Table. 1-2 Performance of dispersion type ER fluids

Characteristics	Dispersion type ERF
Behavior of shearing (during applied electric field)	Bingham
Electric field intensity ( V/mm )	$\sim 10^3 \sim$
Generated yield stress ( Pa )*	$10^2 \sim 10^3$
Responsiveness ( sec )	$10^{-3}$
Electricity ( W/cm <sup>2</sup> )	$10^{-3} \sim 10^{-2}$

\* Electric field intensity: 1kV/mm  
 Shear rate: 300s<sup>-1</sup>

極性流体におけるER効果は、電気流体力学の観点から報告されており、流体中の電解質不純物が解離して生ずるイオンが、せん断流れに対して直角方向、すなわち電極面に向かって泳動することに起因して二次的な流れが生じ、乱流が引き起こされることで流動抵抗が増加するというメカニズムで生じると考えられる<sup>29,47)</sup>。しかしながら、これらの液体における粘度変化はたかだか数倍であり、その効果は非常に小さい。

液晶は液体と結晶性固体との両方の性質を有する流動性を持つ棒状の有機化合物であり、中間相とも呼ばれる。ベンゼン環を二個つなぎ、上下や中間に何かがついている、といった形が多く、いずれもパラ化合物である。図 1-7 に液晶性基の代表例を示す。分子配列の違いにより、図 1-8 にしめすようにネマティック液晶とスメクティック液晶に分けることができる。ネマティック液晶は有機分子の長軸のみが

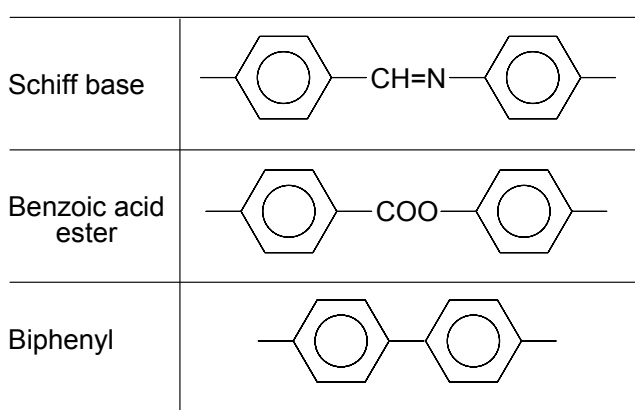
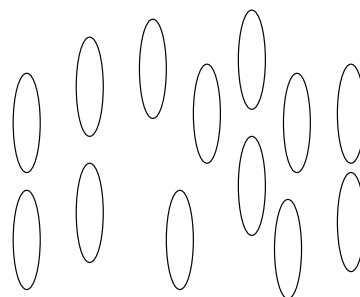
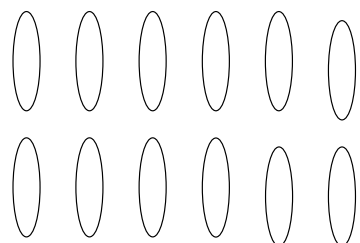


Fig. 1-7 Liquid crystal group



(a) Nematic LC



(b) Smectic LC

Fig. 1-8 Nematic LC and Smectic LC

そろっているものであり、スネマティック液晶は長軸がそろう上に分子が二次元的に並び層構造をもつ。

誘電異方性が正である液晶分子(p型液晶)<sup>47)</sup>におけるER効果は、せん断方向に対して垂直に電場を印加すると、図1-9に示す方向に誘電モーメントが働き、これにより分子が流れ場に対して垂直に配向しようとすることに起因する。このためせん断時の流動抵抗が増加し、見かけ上の粘度が増加する。

均一系ER流体の流体的挙動はNewton流体的挙動であり、電場を印加することにより、図1-6(b)に示すようにせん断応力-せん断速度グラフにおける傾きが変化する。

### 1-3-3 ER流体の応用例

ER流体は、性能面とコスト面で問題が残っていることから応用に関しては現在までに実用に至ったものは極めて少ない。しかし、その具体的な応用については振動制御系を中心に多くの分野に渡って提案されている。表1-3に応用例<sup>48-61)</sup>、及び作動機構について示す。応用例の代表的なモデルを図1-10に示す。

ダンパは多層の円形電極を交互に正負に帯電することで、電極と電極の隙間を通るER流体の粘度を変化させて、ダンピング特性を制御しようとするものである。

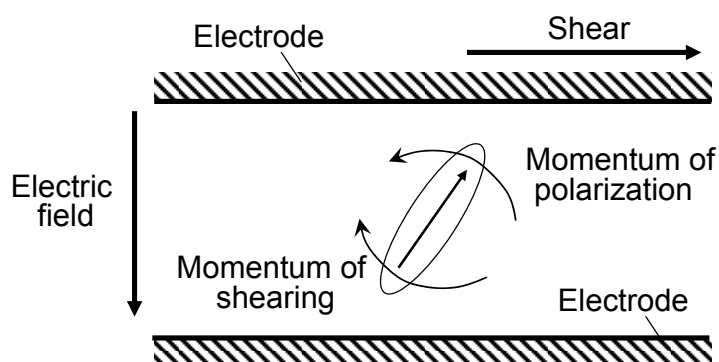


Fig. 1-9 Occurrence mechanism of homogeneous type ER fluids

Table. 1-3 Examples of application

Mechanism	Examples of application
Clutch	Transmission, Clutch, Tension control, Brake, Torque converter
Damper	Damper, Friction damper, shock absorber, Seismic base isolator, Bearing, Mount
Positioning	Control of robot, precise positioning device, Cylinder,
Valve	Liquid valve, Servo valve, Release valve, Vibrator, Cylinder

流体バルブは電極間を流れる ER 流体の粘性変化で流量を制御しようとするものである。また、クラッチは動力側、伝達側の両円盤が正負の電極になっており、電界を印加することで円盤間の ER 流体に降伏応力を発生させ、動力を伝達しようとするものである。

このように、様々な応用が期待されながらも、残念ながら粒子分散系 ER 流体で実用化に至ったものは未だない。一方、均一系 ER 流体については、流体の性能向上や使用面の工夫もあり、福祉・介護機器分野で歩行器の車輪ブレーキ、リハビリ装置のクラッチなどに実用化されている<sup>62,63)</sup>。しかし、依然として性能安定性不足といった問題が残っているのが現状であり、汎用性のあるものにするためには ER 流体の応用に関してまだ多くの課題が残されている。

### 1-3-4 応用デバイスが抱える問題

粒子分散系 ER 流体が実用化されにくい理由として、大きくわけて二つの問題がある。第一に、分散系 ER 流体の性能に関する問題である。ここで特に問題となるのは ER 効果の再現性が低いことである。ER 効果の再現性が低い原因は、図 1-11 に示すように、ER 粒子と分散媒の間に比重差があるため、時間経過に伴い粒子の沈降が生じ電界印加しても粒子鎖（cluster）の形成が困難になることにある。この問題を解決するためには、流体自体になんらかの工夫を施し、粒子の沈降を起こさないようにするか、機械要素に組み込む際に流体を攪拌する機構を施さなくてはならない。

第二に、ER 流体を機械要素に組み込む際、流体であるがゆえシール構造が必

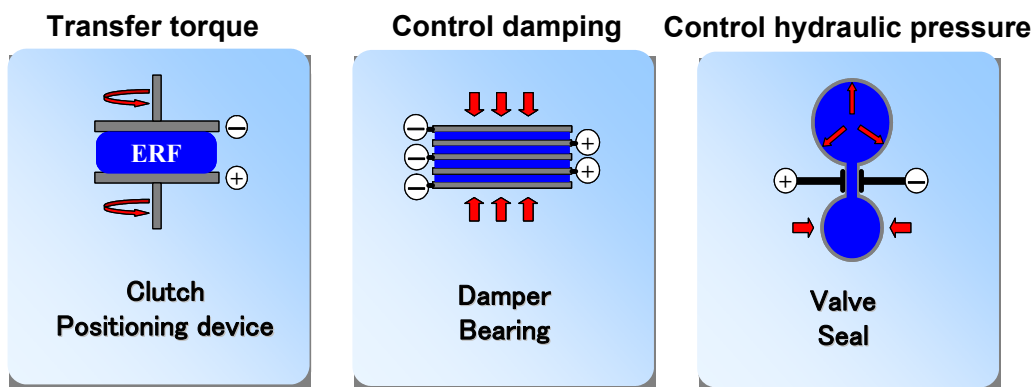


Fig. 1-10 Typical application models of ER fluid

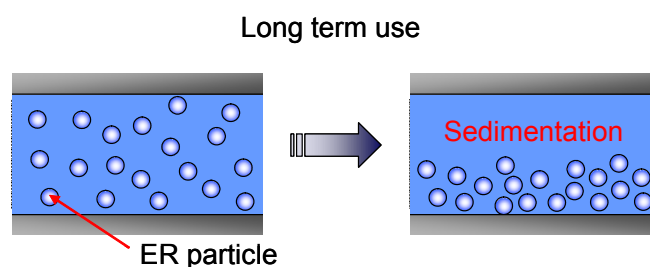


Fig. 1-11 Sedimentation and separation of ER particles



要になることや、前述したように粒子の沈降を防ぐための流体攪拌機構が必要になり、機械システムが複雑になるという問題がある。機構が複雑になるということは、機械システムが大きくなるばかりでなく、コスト面でも問題が生ずる。

このように ER 流体は性能に関しても応用に関しても大きな問題を抱えており、これを用いたデバイスの動作信頼性やコストなどの面で解決すべき技術的課題が多く残されている。

#### 1-4 本論文の目的

ER 流体は電界によって見かけの粘弾性を高速かつ可逆的に変化させることができる特殊な流体である。しかし、時間経過に伴う粒子の沈降による ER 効果の再現性の低下や機械要素に組み込む際にシール構造が必要になり機械システムが複雑化するといった問題が高い障害となり、今に至るまで実用化することが非常に困難であった。

そこで本研究では、従来の粒子分散系 ER 流体で実用上問題とされる、粒子沈降やシール構造の必要性などを解決する新しい機能性材料を開発し、これを機械要素へ応用することを目的とした。具体的には、分散系 ER 流体をゲル化した、ゲル構造 ER 流体 (Electro-rheological Gel, 以後 ERG) を開発し、その基本特性を実験的に解析した。得られた結果をもとに、これを機械要素や研磨加工技術へ応用し、実験的解析を通して、その実用可能性を検討した。さらに、ERG の応用範囲を広げるため、従来の両側電極構造ではなく電極を片側にのみ配置した片側電極構造を適用した場合における ERG の基本特性を解析するとともに、メカトロニクス分野への応用可能性を検討した。

#### 1-5 本論文の構成

本論文は、本章を含め9章から構成される。本章は、第1章であり、本研究の背景と各種機能性流体の紹介および研究事例、ER 流体の特性、ER 流体の応用例、応用デバイスが抱える問題について言及し、本研究でのゲル構造 ER 流体 (ERG) の開発目的について述べている。

第2章では、ERG の製造方法を概説し、その基本構造およびその特徴について述べる。また ERG の組成と性能の関係を実験的に明らかにし、高性能な ERG を製造するための指針を示す。

第3章では、第2章の結果をもとに製造した高性能 ERG の基本特性を明らかにするために、電界強度とせん断応力の関係を中心に静特性および動特性を実験的に解析し、得られた結果について述べる。また、ERG の耐久性を調べ、実用可能性についても言及する。

第4章では、第3章で示された ERG の基本特性解析の結果をもとに、ERG における ER 効果のメカニズムを推定し、推定メカニズムを実験的に検証してその妥当性を示す。

第5章、第6章では、ERG の応用デバイス・また応用技術について述べる。ERG はこれに電界を印加することにより表面の摩擦特性が大きく変化する材料であることが第3章、第4章の結果より明らかとなった。そこで、電界により表面の摩擦特性

が変化する特性をブレーキ機構へと応用することを考えた。第5章では、ERG を固定支援素子としてエアスライダの精密位置固定装置に応用し、固定力特性、固定時の位置変動、減衰特性などについて明らかとし、ERG 固定支援素子としての有効性について述べる。

次に、ERG の表面摩擦特性変化を加工力変化として捉え、第6章では、ERG を研磨パッドに応用した新しい研磨加工法を提案する。また電界強度により加工特性を可変に調整できることを示し、熟練技能者の経験、技能に依存している研磨技術の自動化に貢献できる加工法であることを述べる。

第2章から第6章までは、ERG に両側電極構造を適用した場合における基本特性や応用開発について述べた。しかし、この電極構造を適用して、ERG を、回転部を持つデバイスへと応用する際には配線構造の複雑化といった問題が生じる。そこで、第7章では、従来の両側電極を発展させた、片側電極構造を ERG に適用することを提案する。実験的手法と電場解析を用いて、片側電極における ERG の基本特性を調べ、電極形状や材料特性が ERG 効果に与える影響などについて述べる。

第8章では、片側電極を適用した ERG の応用可能性を検討するために、これを機械要素の一つであるクラッチへと応用し、その性能について述べる。具体的には、ERG を、クラッチ機構を持つトルク伝達装置へと応用し、入力電圧に対する出力伝達トルクの静的および動的特性を示す。また、片側電極を適用することで ERG を、回転部を持つデバイスにも容易に応用可能であることを述べる。

第9章では、本論文の結論を述べる。また、ERG をデバイスに応用する場合の設計指針を示す。

## 1-6 結言

本章では、まず電気粘性流体 (ER 流体) を含む機能性流体の紹介および研究事例について述べ、次に ER 流体に関する研究の位置づけを明らかとした。さらに、ER 流体の特性および応用例に関して言及し、ER 流体が抱える粒子沈降・ER 効果の安定性に関する問題を指摘した上で、本研究におけるゲル構造 ER 流体の開発目的を述べた。

## 第2章 ゲル構造 ER 流体 (ERG) の開発

### 2-1 序言

本研究では, ER 流体の粒子沈降・凝集に伴う ER 効果の劣化の問題を解決するために, ER 流体をゲル化したゲル構造 ER 流体 (ERG) を開発した. 本章では, 開発した ERG の基本構造とその特徴について述べる. また ERG の製造方法に関して概説する.

また, 開発した ERG は2種類のゲル化剤と ER 流体を混合して製造するが, この組成比率を変えることで異なる特性を示す ERG を製造することが可能であると考えられる. ERG の性能に大きく影響を与える主な組成のパラメータとしてゲル硬度, 粒子濃度がある. 本章では, この二つのパラメータが ERG の性能にどのような影響を与えるかについて述べる.

### 2-2 ERG の特徴

ERG は, ER 流体をゲル化したもので, ゲルの種類としてはシリコーンゲルに分類される. シリコーンゲルの特徴として, 無毒性, 耐熱性, 耐寒性, 温度安定性, 電気絶縁性, 撥水性, ガス透過性, 低表面張力などが挙げられる.

まず始めにシリコーンの特徴について述べる. シリコーンは図 2-1 に示すように無機質の Si-O 結合とメチル基等の有機基が結合した単位からなり, 一般の有機高分子とはかなり異なる性質を持つ. 表 2-1 に示すように Si-O 結合は C-O 結合と比較すると, 原子間距離が理論値より短いものの有機骨格結合より長く, 結合角も 160 度と広い. このため, ジメチルシロキサン鎖は他の高分子鎖と比べて分子鎖の広がりが大きく, 回転の自由度も高いことが理解される<sup>64)</sup>. こうしたシリコーンの化学的, 物理的構造の特徴がそのままシリコーンゲルについてもあてはまるため, 上述した特徴が示されるのである.

シリコーンゲルは直鎖状ポリマー上に架橋性官能基を導入したオイル状シリコーンを主成分として, それを二次的に架橋することによりゲル構造化したものである. 架橋反応事態は二次元的であるが, 空間的には3次元の網目構造が形成される. この網目構造のことを特にゲル骨格と呼ぶ. ERG はシリコーンゲル中に ER 粒子を

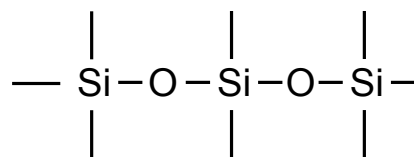


Fig.2-1 Structure of silicone

Table.2-1 Comparison of Si-O and C-O connection

Dissociation energy of bond (kcal/mol)							
	C	Si	H	O	N	Cl	F
C	82.6	76	98.7	85.5	72.8	81	116
Si	76	46.4	76.5	106.3	76.4	97.2	142

Interatomic distance (Å)		Bond angle (°)	
Si-O	1.64	Si-O-Si	130~160
Si-C	1.93	C-O-C	110
C-C	1.54		
C-O	1.43		

Table.2-2 Performance of ER fluid and ER Gel

評価項目	応力特性	消費電力	耐久性	初期流動性	分散安定性	温度特性
ERF	△	○	△	○	×	△
ERG	○	○	△	△	◎	△

分散させた構造をもち、このゲル骨格により形成されたセル内に粒子が留まるため、ER 流体の最大の欠点であった粒子の沈降や凝集が生ずることはない。またゲル状であることから機械要素へ用いる際、シール構造を必要としない。

シリコンオイルを多量に含み、粒子濃度が低い、柔らかい ERG において、つまり架橋点が少なく、ゲル骨格があまり形成されていない ERG においては電界を印加することによって ER 流体同様、クラスターを形成することが確認されている<sup>65)</sup>。セル内にある ER 粒子は、その中で自由に運動することができるので、ER 流体同様、ERG もクラスターを形成して降伏応力を発生するようになると考えられていた。しかしながら、架橋点が多い高硬度の ERG において、ER 粒子がクラスターを形成しなくとも、降伏応力が発生することが確認された。ゲルは流体とは異なり、半固体状である。流体に関して、力の発生メカニズムを考える際、ER 流体と電極との界面現象は無視することができるが、ゲルとしたことで電極と ERG との界面でせん断時に摩擦現象が生じるため、界面現象は無視することができなくなる。つまり、ERG については、従来の ER 流体に対するクラスター形成論とは異なる力の発生メカニズムが存在する可能性が指摘される。このことについては、本論文における第3章「ERG の基本特性解析」を通して検討が加えられており、その詳細は4章「ER 効果の発生メカニズム」で述べる。

次に、ERG の構造を踏まえた上で従来の ER 流体と ERG の特徴を比較し、表 2-2 にまとめた。以下にそれぞれの評価項目について説明する。

- ① 応力特性  
電場を印加した際に誘起されるせん断力が大きいこと。
- ② 電流特性  
電場印加時に流れる電流密度が小さいこと。
- ③ 耐久性  
せん断特性と電流特性が経時変化を起こさないこと。
- ④ 初期流動性  
無電場時における抵抗が小さいこと。
- ⑤ 分散安定性  
粒子が沈降せずに、長期にわたり均一に分散していること。
- ⑥ 温度特性  
安定した ER 効果を発揮するために必要な温度範囲が広範囲であること。

デバイス実用化の指標になるのは最低でも応力特性、電流特性、耐久性を有することである。ERG はゲル状であることから界面での摩擦現象が生じるので初期流動性に関して ER 流体には劣ると考えられる。しかしその他の点では、ER 流体より優れていると考えられ、応用デバイスの実用化も期待される。

このように ERG は ER 流体の良い面を残したまま、その欠点を改善した新しい機能性材料である。また ERG を機械要素に組み込むことで、電界により制御可能なクラッチやブレーキを ER 流体のそれより簡単かつ小型に構成することが可能であると考えられる。

## 2-3 ERG の製造方法

### 2-3-1 使用した ER 流体・ER 粒子の構造および特性

第1章で紹介したように粒子分散系 ER 流体の粒子には、含水系と非含水系の2種類があり、それぞれの粒子を使用した ER 流体を含水系 ER 流体、非含水系 ER 流体とよぶ。本節ではそれらの特性について述べた後、本研究で使用した ER 粒子の構造および特性について述べる。

粒子分散系 ER 流体の種類について、その詳細を表 2-3 に示す。含水系とは少量の水を添加することで ER 効果が著しく改善される ER 流体である。現在でも、ER 効果の改善のために極めて有効な方法と考えられている。基本的には粒子と分散媒の界面近傍に存在する水が ER 効果を改善する直接の原因となっているが、粘度増加率と水分量の間には一義的な関係が存在するとは言いがたい。ER 効果は両者の界面の性質に大きく依存するようであり、詳しい発現機構についてはまだ解明されていないのが現状である。

また、ER 流体の機械要素への応用を考えたときに、ER 流体が広い温度範囲で安定に作動することが要求される。しかし、含水系 ER 流体においては、100℃近くの高熱になると ER 効果に不可欠な水の蒸発が避けられなくなる。しかも、水の存在は系の電流密度を高くするという致命的な欠点もある。含水粒子分散系 ER 流体においてこの2つの問題を解決するにはかなりの困難が伴うと予想されている。したが

Table.2-3 Variety of dispersion type ER fluids

分類		具体例	
粒子分散系	含水系	吸着水	シリカ, デンブロン, セラチン, セロース, キチン, イオン交換樹脂, アクリル酸樹脂, シリコン樹脂, フェノールホルムアルデヒド樹脂, スルホン化ポリスチレン, キレート樹脂, 有機染料
		構造水	$H_2AlP_3O_{10} \cdot 2H_2O$ , アルミ珪酸塩, ハイポトリスイト
		マイクロカプセル	LiCl, $H_2O$ , ethylene glycol/ポリウレタンシェル, 含水粒子/電気絶縁薄膜層, マイカ/金属水溶液
	非含水系	半導体	$TiO_2$ , ZnO, $La_2O_3$ , ホリ (アセチン), ホリアニリン, ホリアラフェニリン, 炭素質
		導電体	Ag, Ni, コロイド, 表面絶縁化導電性粒子, 導電体/ポリマーブレンド
		強誘電体	チタン酸カルシウム, チタン酸バリウム, 酒石酸リチウム
		異方導電体	$LiN_2H_5SO_4$
		電解質	無水シリカ/有機酸+アミン, 多孔質粒子/多価アルコール, ホリエーテル/電解質塩, クラウンエーテル/4級アンモニウム塩, シリコンモノマー

って最近の材料開発の主眼は、水を含まない非含水系 ER 流体の開発へと移行されつつある。

非含水粒子系 ER 流体は名前の通り水を用いない ER 流体である。表 2-3 に示すように、非含水粒子系 ER 流体に関しても多くの提案がなされている。非含水粒子系 ER 流体は材料開発の時点から実用化を視野に入れて開発されているので、水を含んでいないため電流密度ははるかに小さく、作動温度範囲も広い。本研究で開発した ERG も非含水系 ER 流体をもとに製造したものである。

次に使用した ER 粒子の構造および特性について述べる。使用した ER 粒子は非含水系で、図 2-2 に示すように、有機高分子化合物である芯体と電気半導体性無機物粒子からなる表層で形成されている。この無機・有機複合型粒子は、その構造から低い印加電圧下でも大きなせん断抵抗が得られ、電気伝導度の大きい電気半導体性無機物を用いた場合でも過電流が流れる心配がなく(数  $\mu A/cm^2$  以下)、ER 効果を発現させるための消費電力も小さいという特徴を有する。これは、表面被覆層を形成する無機質微粒子が高分子の薄膜により絶縁されているためだと考えられている。また、有機高分子化合物と複合化することによって複合粒子自体の比重を相対的に小さくすることができるため、電気絶縁性媒体との比重差を小さくし、沈降凝集を抑えることが可能となっている<sup>66)</sup>。さらに、軟質であるため電極摩擦を抑制し、電界印加時からの粘度増加までの応答性が良好で数 msec とされている<sup>67)</sup>。無機・有機複合型粒子の組合せは多数あるが、本研究では芯体にアクリル系ポリマー、電気半導体性無機物粒子に酸化錫を用い、平均粒子径  $16 \mu m$ 、比重 1.17 のものを使用した。

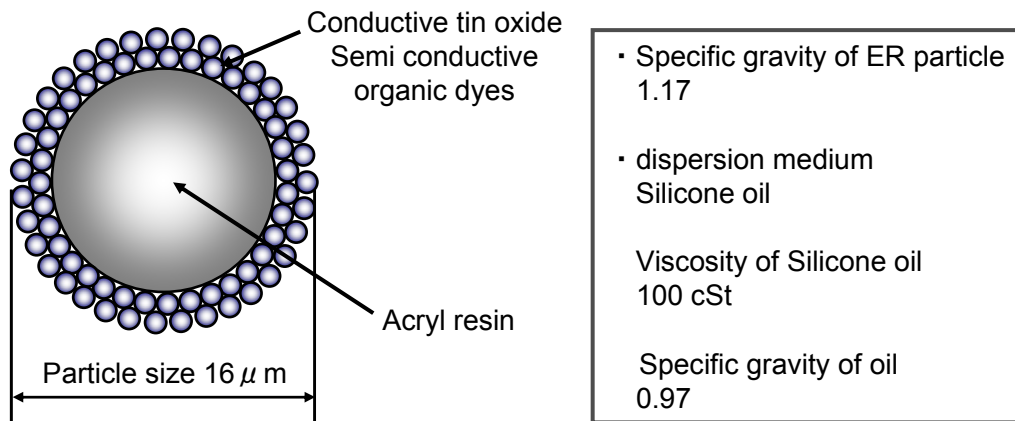


Fig.2-2 Structure of ER particle

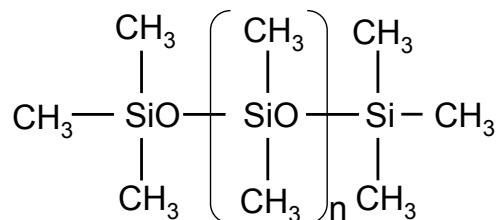
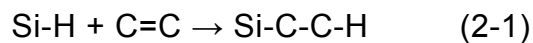


Fig.2-3 Dimethylsilicone oil

### 2-3-2 製造方法

ERG は水素シリコンと不飽和基を有する架橋剤をゲル化剤として、ER 流体をヒドロシリル化することにより製造する。ヒドロシリル化とは、式 2-1 に示すように、シリコーンゲルのような化学ゲルを製造する時に利用する付加反応であり、白金触媒のもとで室温でも反応が進行する。一対一の反応であるため、制御された構造のゲル骨格が生成可能である。



ER 流体の分散媒であるジメチルシリコーンオイルは図 2-3 に示すように主鎖がシロキサン結合からなり側鎖にメチル基を持つポリマーであり、重合度 n によって粘度を調整可能である。本研究では、動粘度が 100cSt のジメチルシリコーンオイルを使用した。ER 粒子は前述したように、非含水系で無機・有機複合型を使用している。

具体的な製造工程を以下に示す。

#### ERG 製造手順

- ① ハイドロゲンシリコン、架橋剤(不飽和化合物)、ジメチルシリコーンオイル、ER 流体を規定の割合で配合し、よく攪拌する。
- ② 白金触媒を加え、適度に攪拌する。

- ③ 反応促進のため、約 100°C で 1 時間程過熱処理を行う。
- ④ 加熱処理後、約 1 日、自然放置する。

## 2-4 ERG の構造

製造した ERG を図 2-4 に示す。ゲルの種類として、ERG はシリコーンゲルに分類される。シリコーンゲルはジメチルシロキサンポリマーを化学結合(共有結合)によって相互架橋させた基本構造を持ち、固体であるシリコーンゴムと流体であるシリコーンオイルとの中間に位置し、別の見方をすると流動性を無くしたオイルとも言える性質がある。ヒドロゲルに比べ、シリコーンゲルは水分子と極性基間の水素結合がない事、およびポリマー骨格が熱的に安定であることからゲル状態を広い温度条件の中で維持することができる。シリコーンゲルの特異的な性質として柔らかさ(低弾性率)と粘着性が挙げられる。一般的にシリコーンゴムの弾性率が  $0.1 \sim 0.3 \text{ kg/mm}^2$  であるのに対し、ゲルの弾性率はシリコーンゴムの 100 分の 1 程度である<sup>64)</sup>。なおかつ性状がゴムとオイルの中間的なところを占め、動的粘弾性からみると弾性項に比較して粘性項が大きい。シリコーンゲルの粘着性は、感圧接着剤などの場合と同じく材料表面に対する濡れ性と材料自身の粘弾性挙動によって発現する機構であり、多材料との密着性、封止性に重要な因子である。

光学顕微鏡で撮影した ERG 表面の拡大写真を図 2-5 に示す。開発した ERG はシリコーンゲルに ER 粒子が分散した構造であることがわかる。ERG は、シリコーンゲ

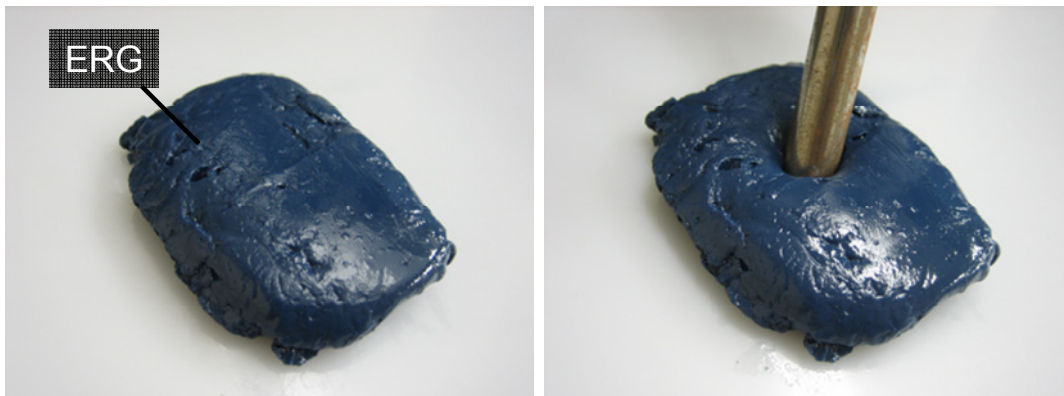


Fig.2-4 Appearance of ER Gel

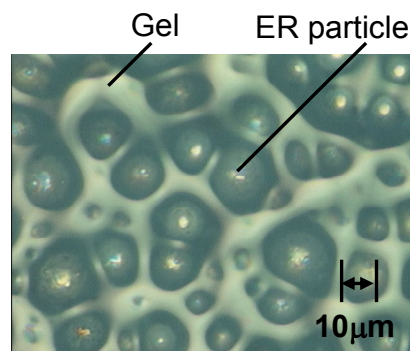


Fig.2-5 Surface of ER Gel



ル単体に比べて、ER 粒子が分散しているため、見かけ上は高硬度でゲル状というよりはゴム状に近い。

また、図 2-5 より、ER 粒子はシリコーンゲルにより物理的に拘束されていることが確認できる。このため、ERG 内の ER 粒子は、電場印加に伴い粒子間に誘電分極による引力が働いたとしても、シリコーンゲルによる物理的拘束があるためクラスターを形成するような大きな変位が生じることはないと考えられる。粒子間引力により ER 粒子が移動するとしてもシリコーンゲルの弾性変形に伴う微小変位であると考えられる。

ERG の構造から、ERG における ER 効果は、分質である ER 粒子間の相互作用と分散媒であるシリコーンゲルの硬度に強く影響を受けると推測される。そこで、本節以降では、この二つの因子が ERG の性能に与える影響について述べる。

## 2-5 ERG の組成と性能

開発した ERG は ER 粒子とシリコーンゲルから構成されており、ER 効果は分質である ER 粒子間の相互作用および分散媒であるシリコーンゲルの特性に強く影響を受けると考えられる。つまり、ERG の組成を変えることで異なる性能を示すと考えられる。シリコーンゲルの特性はゲル硬度に、また粒子間の相互作用は粒子濃度に依存する。そこで、本章では、ゲル硬度と粒子濃度を ERG の組成に関する主なパラメータとして、この二つのパラメータが ERG の性能にどのような影響を与えるかについて述べる。

### 2-5-1 ERG シートの製造

ERG の性能評価を行うにあたり、均一な寸法かつ同一の表面精度を持つ ERG を製造する必要がある。また、ERG における ER 効果を測定する場合、2枚の電極で ERG を挟み込み上部スライド電極と ERG との界面でのみせん断が生じるよう、ERG は下側の固定電極に固定される必要がある。そこで図 2-6 に示す、高精度の封入装置を製作することで、均一な寸法の ERG を製造することを可能にした。封入装置の写真を図 2-7 に示す。封入装置に組み込むことの可能な下部電極は、寸法縦 70mm×横 50mm×高さ 14mm と、寸法縦 70mm×横 50mm×高さ 14.5mm の 2 種類あり、どちらもネジ止めでベースに取りつけることが可能である。また下部電極には、その全面にわたりせん断方向に対して直角な方向に高さ 125 $\mu$ m の微細な三角溝をピッチ 250 $\mu$ m で加工してある。これにより成形された ERG シートは下部電極に完全に固定されるため、印加する電界強度に関わらず、この部分で ERG シートが滑ることは無い。封入装置は、下部電極と、下部電極の 4 辺を囲う奥行き 10mm×高さ 15mm の口型の枠と、縦 90mm×横 70mm×高さ 10mm の上蓋から構成されている。上蓋には、4ヶ所に液体を逃がす貫通穴があけてある。ERG の封入手順について以下に説明する。

<封入手順>

- ① 下部電極に口型の枠を取りつける。
- ② 液体状の ERG を下部電極(口型の枠によりできた窪み部分)に十分に満たす。

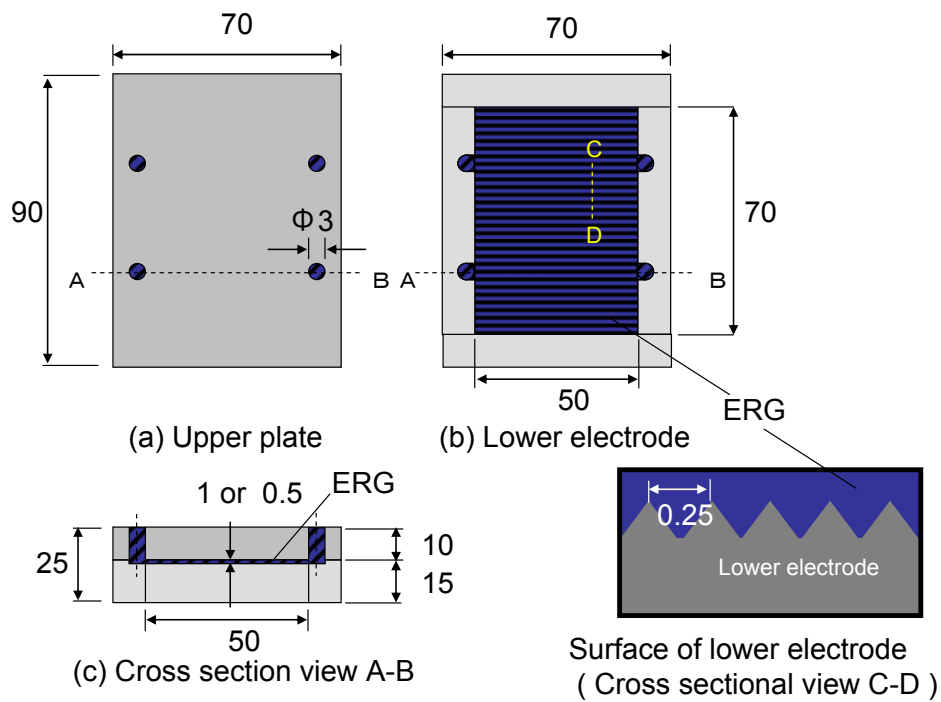


Fig.2-6 Structure of the metal mold for ERG

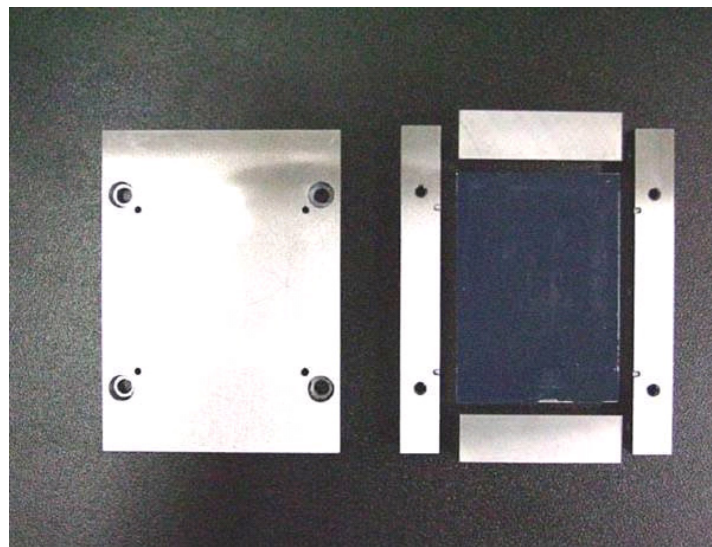


Fig.2-7 Appearance of the metal mold for ERG

- ③ 逃がし穴のついた上蓋をすることで、余分な ERG を逃がし穴から除去する。
- ④ 封入し終わったら、過熱処理を施しゲル化する。

この封入装置によって製造できる ERG シートの寸法はせん断方向 70mm, せん断垂直方向 50mm で, 厚さは 0.5mm と 1mm の 2 種類である. この装置に封入し製造した ERG シートの写真を図 2-8 に示す. アルミ合金製の下部電極上面に成形された青いシートが ERG である.

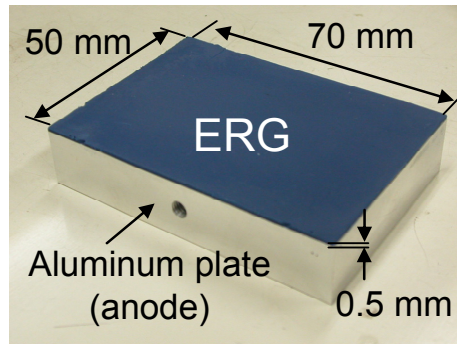


Fig.2-8 The formed ERG sheet

### 2-5-2 実験方法

まず、ゲル硬度が ERG の性能に与える影響について調べるために粒子濃度を一定にし、ゲル硬度を変えた3種類の ERG を製造した。次に粒子濃度が ERG の性能に与える影響について調べるために、ゲル硬度を一定にし、粒子濃度を変えた3種類の ERG を製造し、それぞれ性能評価を行った。

ERG の性能評価は、ER 効果に関する最も基本的な特性である電界強度とせん断応力の関係を実験的に調べることで行った。せん断応力測定装置の概略図を図 2-9 に、装置の外観を図 2-10 に示す。製造した ERG シートを2枚の平行平板電極で挟み、下部電極をベースプレートに固定し上部電極を自由にスライドできるようにしておく。ERG シートは下部電極に固定されているため、上部電極と ERG シートの界面でのみせん断が生じる。この平行平板電極に挟まれた ERG シートをせん断応力測定装置に取り付け、ERG シートに電界を印加した状態で上部電極をスライドさせ、この時のせん断力を測定した。

本測定装置では上部電極を低速回転モータを用いて一定速度で送ることができる。上部電極の変位量を渦電流式変位計(分解能:0.4 $\mu\text{m}$ )により、せん断力を、ロードセル(分解能:10gf)を介し動歪み計により測定した。せん断応力は、測定したせん断力を ERG シートの表面積で除することによって求めた。本実験で使用する ERG の厚さは全て 0.5mm とした。

本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

#### <実験装置>

- |            |   |
|------------|---|
| • ERG      | 粒子径:約 16 $\mu\text{m}$<br>粒子濃度:50wt%<br>分散溶媒:L-45(100cSt)<br>藤倉化成(株)<br>日本ユニカー(株)提供 |
| • 上下電極     | 東芝機械(株)提供   |
| • 可変速回転モータ | オリエンタルモータ(株)<br>MODEL 5GN25K  |
| • 高圧電源     | 松定プレシジョン(株)<br>MODEL HJPW-5P0.6   |

- ロードセル  
KYOWA(株)  
MODEL LU-20KSB34D
  - A/D インタフェース  
(株)KEYENCE  
MODEL NR-110
- <測定機器>
- 渦電流式変位計  
(電源) (株)KEYENCE  
MODEL KZ-U3  
(コントロールユニット) MODEL EX-201  
(ヘッド) MODEL EX-305
  - 動歪み計  
KYOWA(株)  
MODEL DPM-613A

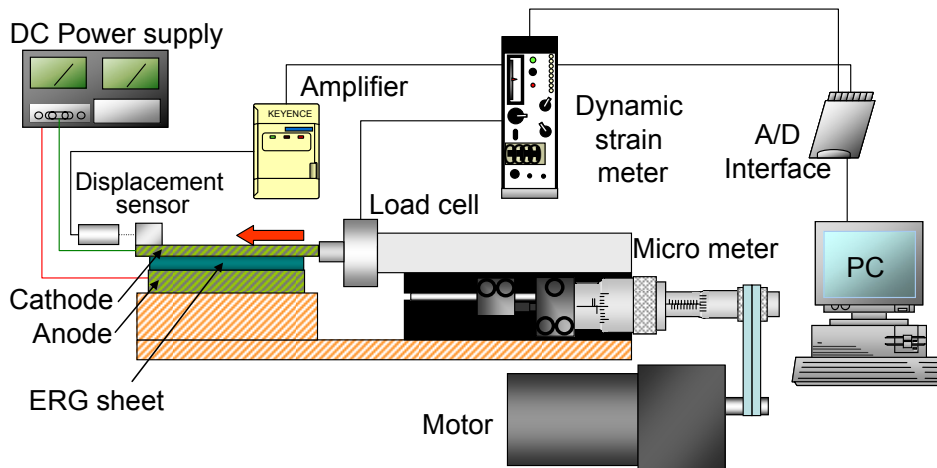


Fig.2-9 Test stand for measuring ERG basic properties

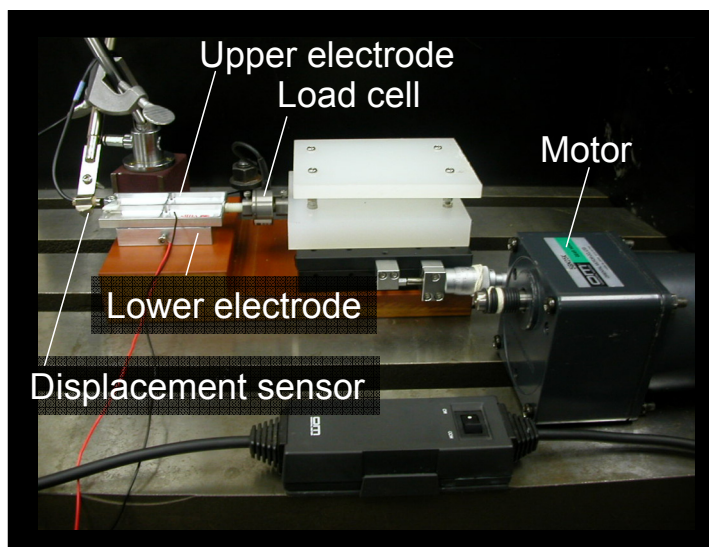


Fig.2-10 Appearance of device for measuring ERG basic properties

### 2-5-3 ERG の組成とせん断特性の関係

ERG に含まれるシリコーンゲルの硬度を変化させることにより, ERG の特性がどのように変化するかを調べるために, ER 粒子の濃度を 50wt%と一定にして, ゲル硬度を変えた3種類を製造した. ゲル硬度は, ERG に含まれるゲル化剤(ハイドロゲンシリコンと架橋剤)の重量パーセントで決まり, ゲル化剤の重量パーセントを高くすると高硬度のゲルになる. 3種類の ERG は, ゲル化剤 14wt%を含むゲル硬度が低い 5A01ERG, ゲル化剤 16wt%を含む 5A02ERG, ゲル化剤 25wt%を含むゲル硬度の高い 5A03ERG である. ゲル硬度を定量的に示すために, マイクロビッカース法を用いて各 ERG の弾性率を求めた. ERG における処方比率および弾性率, 誘電率を表 2-4 に示す.

図 2-11 に 5A03 タイプの ERG における電場印加時のせん断応力の挙動を示す. 横軸は上部スライド電極の変位量, 縦軸は変位に対して発生するせん断応力である. ERG に印加する電界強度を変化させることにより発生するせん断応力が変化していることが確認できる. また, 上部電極の変位量がある値(ここでは  $20\mu\text{m}$  付近)を超えるとせん断応力は降伏点に達し, かつ印加する電界強度が高くなるにつれ発生する降伏応力が高くなる. ただし, 本論文で言う降伏応力とは, 引っ張り試験

Table.2-4 Proportion of constituents

Type	Elastic modulus of gel (N/mm <sup>2</sup> )	Relative permittivity	Proportion of constituents (wt %)		
			gel agent (Hydrogensilicone and Unsaturated compounds)	ER particle	Silicone oil
5A01	0.021	18.6	12	50	38
5A02	0.034	21.9	14	50	36
5A03	0.043	23.2	16	50	34

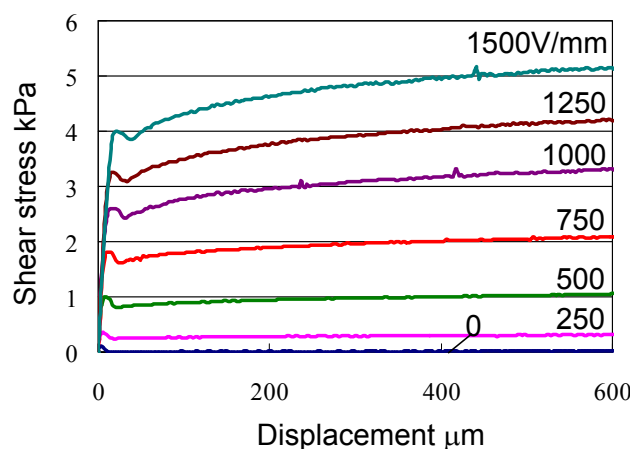


Fig.2-11 Behavior of shear stress (5A03 ERG)

により材料が弾性領域から塑性領域へと遷移する点を示す降伏応力とは異なり、上部電極をスライドさせた際に ERG と電極との界面で滑りが生じる直前の降伏点における応力のことである。

機能性流体の性能を評価する一つの指標として、磁場電場下で発生する降伏応力値はよく使われる。そこで、組成比率の違いにおける ERG の性能を評価するにあたり、印加電界強度と発生する降伏応力の関係を調べた。ERG のゲル硬度と発生する降伏応力の関係を図 2-12 に示す。ゲル化剤の含有率にかかわらず、ERG は印加する電界強度に応じて概ね線形的に降伏応力が増加していることが確認できる。ゲル化剤の含有率の影響をみてみると、ゲル化剤を多く含む ERG ほど同一電場下で発生する降伏応力が高くなることがわかる。ゲル化剤の比率が高くなることで、ERG の硬度は高くなり、固体に近くなる。ゲル自身は自己粘着作用を持ち、その粘着力は硬度が高くなることにより大きくなる。ERG の ER 効果発生のメカニズムについては第4章で述べるが、ゲル自身の粘着作用の増加が電場印加時の発生せん断応力の増加に大きく寄与している。また、ゲル化剤の重量比率が高くなることで、シリコーンオイルの重量比率は少なくなる。シリコーンオイルが多量に含まれている場合、表面にシリコーンオイルの染み出しが生じる。シリコーンオイルは潤滑作用を有するため、染み出しが生じることで電極と ERG 界面の摩擦抵抗が小さくなり発生するせん断応力も低下すると考えられる。無電場において発生する降伏応力を比較すると、シリコーンオイルが多量に含まれている 5A01 の ERG は他の2つの ERG に比べ初期降伏応力が低いことからオイルの潤滑作用が影響していることがわかる。以上のことから、ゲル化剤の重量比が高くなることでシリコーンオイルの重量比が低くなり、オイルの染み出しによる潤滑作用が抑制されることから、発生するせん断応力が高くなると考えられる。

次に ER 粒子濃度が ERG の特性にどのように影響するかを調べるために、ゲル硬度を一定とし、粒子濃度を变化させた3種類の ERG について性能評価を行った。具体的には、ERG のゲル化剤の重量比を 14wt% と一定にして、粒子濃度を 30wt%、40wt%、50wt% と変えて製造した 3A03、4A03、5A03 の ERG についてせん断試験を行った。各タイプの ERG における処方比率および弾性率・誘電率を表 2-5 に示す。

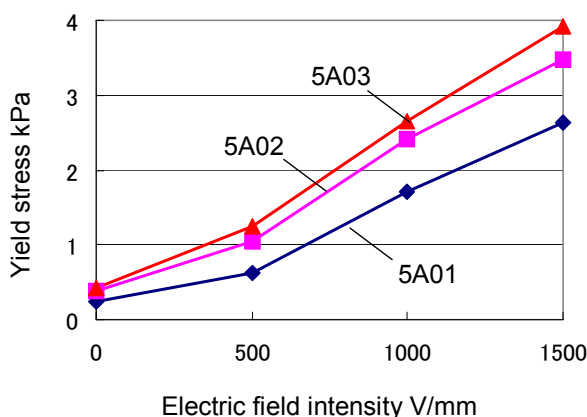


Fig.2-12 Influence of gel hardness on yield stress

Table.2-5 Proportion of constituents

Type	Elastic modulus of gel (N/mm <sup>2</sup> )	Relative permittivity	Proportion of constituents (wt %)		
			gel agent (Hydrogensilicone and Unsaturated compounds)	ER particle	Silicone oil
3A03	0.043	10.4	16	30	54
4A03	0.043	14.5	16	40	44
5A03	0.043	23.2	16	50	34

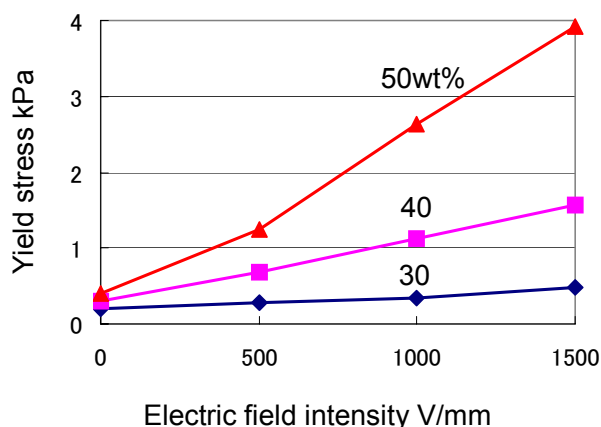


Fig.2-13 Influence of gel hardness on yield stress

ERGの粒子濃度と発生する降伏応力の関係を図2-13に示す。粒子濃度の変化に関わらず、いずれのERGにおいても発生する降伏応力は電界強度にほぼ比例していることがわかる。また、無電場時における初期降伏応力値はほぼ同等の値を示している。粒子濃度の影響について見てみると、30wt%~50wt%の範囲では粒子濃度が高くなるにつれ発生する降伏応力は大きくなることわかる(なお、ER粒子の最密充填は約60wt%で生ずる)。電場印加時に誘電分極した粒子間で働く引力は粒子間距離に依存し、その距離が近ければ近いほど粒子間引力は大きくなる。粒子濃度が高くなるにつれ、平均の粒子間距離は近くなるため、粒子間引力は大きくなる。詳しくは第4章で述べるが、ERGは電場印加により、表面状態の変化が生じる。粒子が引き合う作用が高くなることで、この表面の状態変化が大きくなり、その結果、発生するせん断応力が大きくなると考えられる。

## 2-6 結言

本章では、開発したゲル構造ER流体(ERG)の特徴を基本構造に基づいて述べた。ER流体のゲル化の発想に至ったきっかけは、ER流体の最大の欠点であった粒子の沈降・凝集を極限まで抑制することができる考えたためである。また流体からゲルにすることで機械要素に用いる際、シール構造を必要とせず、極めて簡単な機構で機械システムを構成可能であると考えたためである。開発したERGを機械

要素に用いることで、電界により制御可能なクラッチ機構やブレーキ機構の簡便化・小型化が期待できる。本章では、ERG の製造方法についても言及し、組成と性能の関係も明らかにした。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ゲル硬度を高くすることで、無電界時の初期せん断力は若干高くなるが、電界印加時の ERG のせん断特性は大きく向上する。
- (2) ER 粒子濃度を高くすることで、無電界時の初期せん断力に変化はないが、電界印加時の ERG のせん断特性は格段に向上する。粒子濃度の上限は最密充填である。

以上の結果から、性能が優れた ERG を製造するためには、ゲル硬度、粒子濃度をともに高くする必要がある。最密充填(粒子濃度約 60wt%)では ERG 内の粒子が自由に運動できなくなるため、本研究では粒子濃度の最大値を 50wt%と設定した。この結果より粒子濃度 50wt%でゲル硬度が高いタイプ 5A03ERG(表 2-4)が最も優れた性質を示すと考えられる。



## 第3章 ERGの基本特性解析

### 3-1 序言

第2章において、ゲル硬度が高くかつ粒子濃度が高い ERG ほど高い ER 効果を示すことを明らかにした。そこで本章では製造できる最もゲル硬度が高く、粒子濃度も高い 5A03ERG ( ER 粒子濃度 50wt%, 弾性率 0.043N/mm) を用いて、その基本的な静特性と動特性を実験的に解析した結果について述べる。

### 3-2 静特性解析

#### 3-2-1 静的特性測定方法

電気粘性効果に関する最も基本的な特性である電界強度とせん断応力の関係を調べた。2-5-2 節で使用した測定方法と同様、ERG シートを 2 枚の平行平板電極で挟み、下部電極をベースプレートに固定し上部電極を自由にスライドできるようにしておく。上部電極と ERG シート上面とのせん断特性を調べる際に、ERG シート下面で滑りが生じないようにするために、下部電極には、その全面にわたりせん断方向に対して直角な方向に高さ  $125\mu\text{m}$  の微細な三角溝をピッチ  $250\mu\text{m}$  で加工してある。これにより ERG シートは下部電極に完全に固定されるため、印加する電界強度に関わらず、この部分で ERG シートが滑ることは無い。この平行平板電極に挟まれた ERG シートを図 2-11 に示すせん断応力測定装置に取り付け、ERG シートに電界を印加した状態で上部電極をスライドさせ、この時のせん断力を測定した。

上部電極は、縦  $90\text{mm}$  × 横  $50\text{mm}$  × 高さ  $10\text{mm}$  とし、更に軽量化・高剛性化を

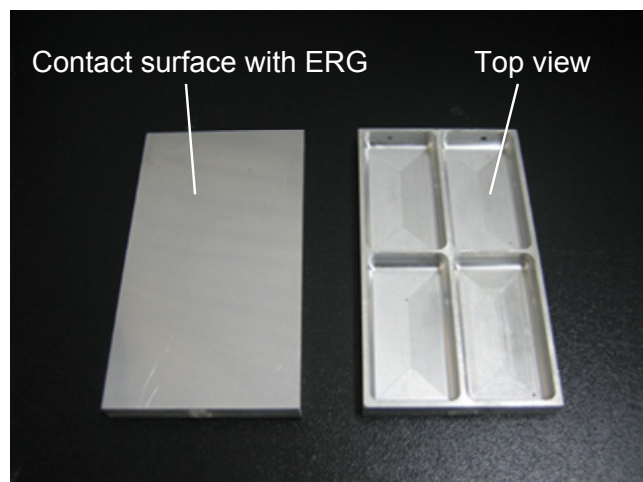


Fig.3-1 Structure of Upper electrode

図るためリブ構造を適用した。作製した上部電極を図 3-1 に示す。また、上部電極は面粗さの影響を調べるため、粗さの異なる2種類を製作した。2種類の電極とは、通常の加工を施し製作した電極(以後、普通電極:表面粗さ  $Ra=0.25\mu m$ )と、その電極の面精度を高めるため精密加工を施した高精度の電極(以後、高精度電極:表面粗さ  $Ra=0.04\mu m$ )である。

本測定装置では上部電極を低速回転モータを用いて一定速度で送ることができる。上部電極の変位量を渦電流式変位計(分解能: $0.4\mu m$ )により、せん断力を、ロードセル(分解能: $10gf$ )を介し動歪み計により測定した。せん断応力は、測定したせん断力をERGシートの表面積で除することによって求めた。

本実験で使用した実験装置及び測定機器は、第2章(2-5-2)で記述したものと同一ものを使用した。以下には、第2章と異なる部分のみを記す。

<実験装置>

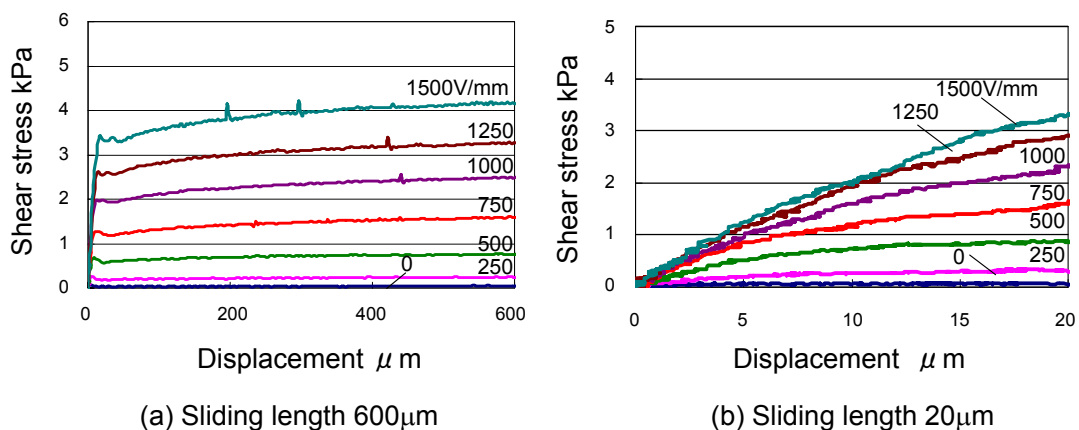
- ・ 普通電極 東芝機械(株)提供
- ・ 高精度電極 東芝機械(株)提供
- ・ DLC コート高精度電極 東芝機械(株)提供

<測定機器>

- ・ T型熱電対 横河電機(株)
- ・ 直流電流計 横河電機(株)

### 3-2-2 電界強度とせん断応力の関係

電界強度を  $250V/mm$  毎に  $0V/mm$  から  $1500V/mm$  まで変化させ、各電界強度において  $600\mu m$  せん断させた時のせん断応力測定結果を図 3-2(a)に示す。上部電極には普通電極を使用し、ERGは厚さ  $0.5mm$  のものを用いている。ERGはこれに電界を印加することにより従来のER流体同様に降伏応力を示す材料へと変化することが確認できる。また、電界強度に応じて降伏応力が



ERG thickness:  $0.5mm$ , Upper electrode: Normal, Shear rate:  $20\mu m/s$ , Temperature:  $23^\circ C$

Fig.3-2 Behavior of shear stress of ERG using normal electrode

大きく変化する。電界強度 1500V/mm 時には、約 3.5kPa と高い降伏応力を発生している。更に電界強度 1000V/mm 時において従来の粒子分散型 ER 流体の降伏応力<sup>30)</sup>と比較すると、開発した ERG の降伏応力は ER 流体より約 20 倍高い。

次に変位に対するせん断応力の挙動について見てみると、降伏点を超える前の微小変位（約 10 $\mu$ m）では応力が上部電極の変位に対しほぼ線形的に変化し、降伏点を超えると応力が概ね一定となる。これは降伏点までは ERG が上部電極に密着してせん断変形を生じ、降伏点を越えると ERG と上部電極面の間で滑りが発生するためである。ここで図 3-2(b)に示した変位量 20 $\mu$ m までの応力の挙動を見ると、微小変位においては上部電極のせん断変位量に対して応力がほぼ線形的に変化することに加え、電界強度が高くなるに連れその傾きが大きくなることがわかる。微小変位では ERG シートが電極に密着し弾性変形を生じることで力を発生することから、電界強度による傾きの変化は ERG のみかけの剛性変化を示している。

以上より、開発した ERG は電界強度に応じて降伏応力が大きく変化するばかりでなく、ERG 自体の剛性が変化する材料であることがわかった。

### 3-2-3 ERG 厚さとせん断応力の関係

ERG の厚さを変えることでせん断応力特性がどのように変化するかを調べるために厚さ 0.5mm の ERG と厚さ 1mm の ERG の 2 種類を用いて、せん断応力測定実験を行った。上部電極は普通電極を用いている。変位量 600 $\mu$ m まで測定結果を図 3-3 に変位量 20 $\mu$ m までの測定結果を図 3-4 に示す。

ERG の厚さに関して比較してみると、電界強度 750V/mm までのせん断応力は ERG 厚さ 0.5mm より 1mm の方が高い。しかし、電界強度 1000V/mm～1500V/mm までは 0.5mm の方が高くなっている。ここで電極間隔の違いによる各電界強度と降伏応力の関係をまとめた結果を図 3-5 に示す。電極間隔が 1mm の場合は、

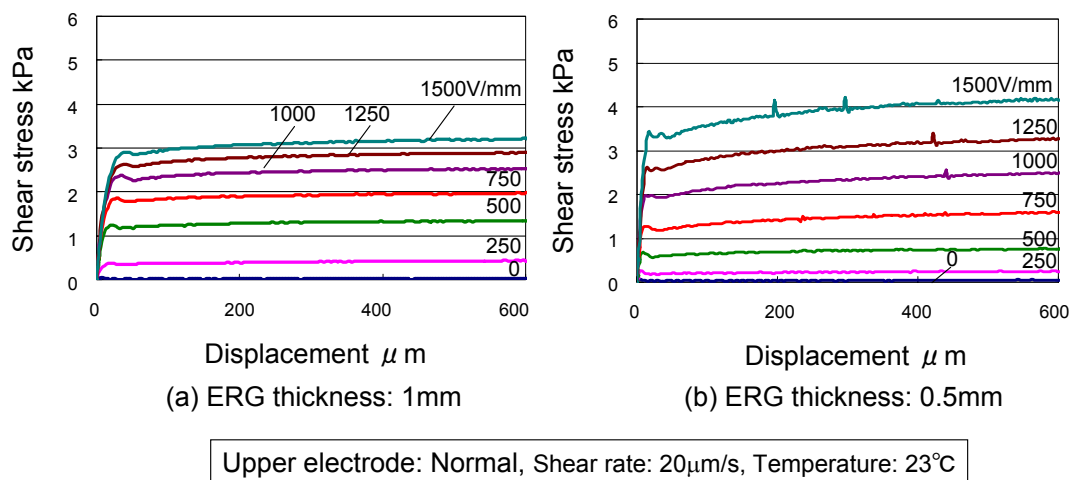
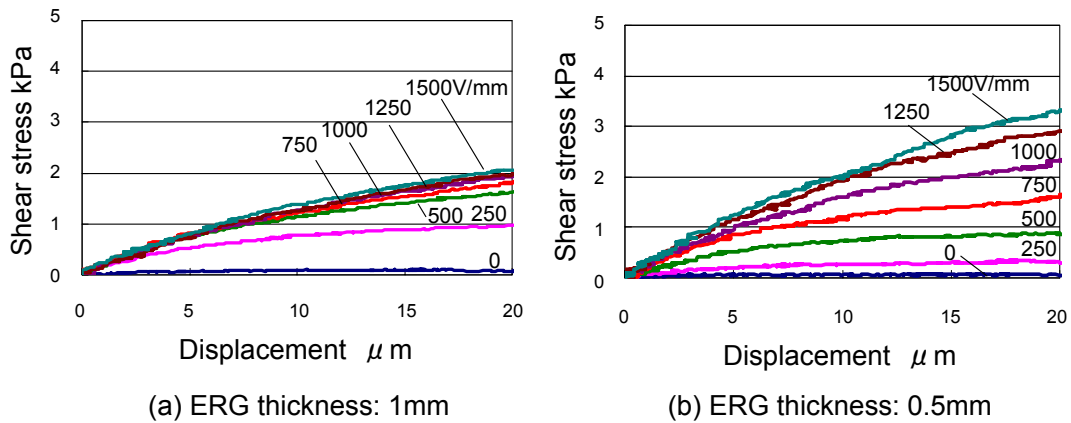
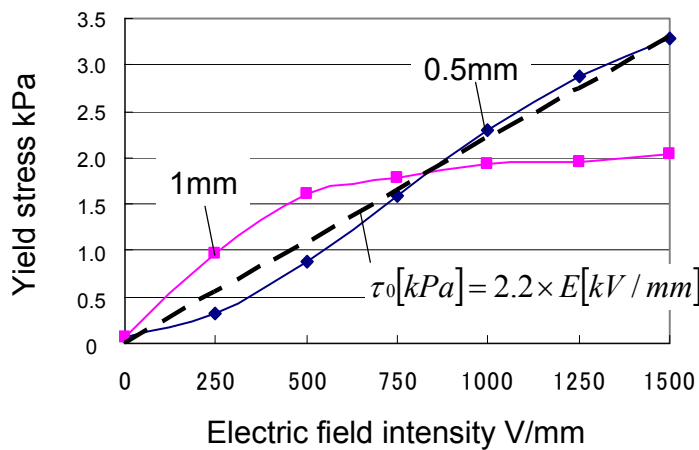


Fig.3-3 Influence of ERG thickness on generated shear stress  
(Max. shear displacement: 600 $\mu$ m)



Upper electrode: Normal, Shear rate: 20μm/s, Temperature: 23°C

Fig.3-4 Influence of ERG thickness of ERG on generated shear stress (Max. shear displacement: 20μm)



Upper electrode: Normal, Shear rate: 20μm/s, Temperature: 23°C

Fig.3-5 Relation between yield stress and electric field intensity

500V/mm まで降伏応力が大きく変化するが、それ以降電界強度に対する降伏応力の増加率が小さくなり対数的な曲線を描いている。電極間隔が 0.5mm の場合は、電界強度に対して降伏応力がほぼ一定の増大傾向にあることがわかる。

次に弾性領域について比較すると、ERG 厚さ 0.5mm より 1mm の方が領域は約 2 倍広いことが確認できる。二つの ERG は組成が同じであるため弾性変形で生じる歪み量は変わらないと考えられる。そのため厚みを 0.5mm から 1mm にすることで弾性領域は 2 倍になる。また弾性領域において 0.5mm の結果は 1mm の結果よりグラフの傾き大きく、さらに線形性が強くなっている。つまり ERG の厚さを薄くすることで剛性を増し、線形性を高めることが可能である。

ER 流体の降伏応力  $\tau_0$  は電界強度の2乗に比例することを(1-2)式に示したが、ERG のそれは電界強度にほぼ線形関係にある。そこで、図 3-5 より 0.5mm の ERG シートにおける電界強度と降伏応力の関係式を最小二乗法により求めた。以下に関係式を示す。

$$\tau_0[kPa] = 2.2 \times E[kV/mm] \quad (3-1)$$

また、近似直線を図 3-5 に破線で示す。厚さを薄くすることでERGの降伏応力は電界強度に対して線形近似できるため、デバイスへ応用する際の設計も容易になる。

### 3-2-4 せん断速度とせん断応力の関係

ER 流体ではせん断速度がせん断応力に強く影響することが知られている<sup>46)</sup>。そこで、電界強度を 1.5kV/mm で一定とし、上部電極のせん断速度を変化させてせん断応力を測定した。上部電極には普通電極を使用し、ERG は厚さ 0.5mm のものを用いている。測定結果を図 3-6 に示す。まず、図 3-6(b)に

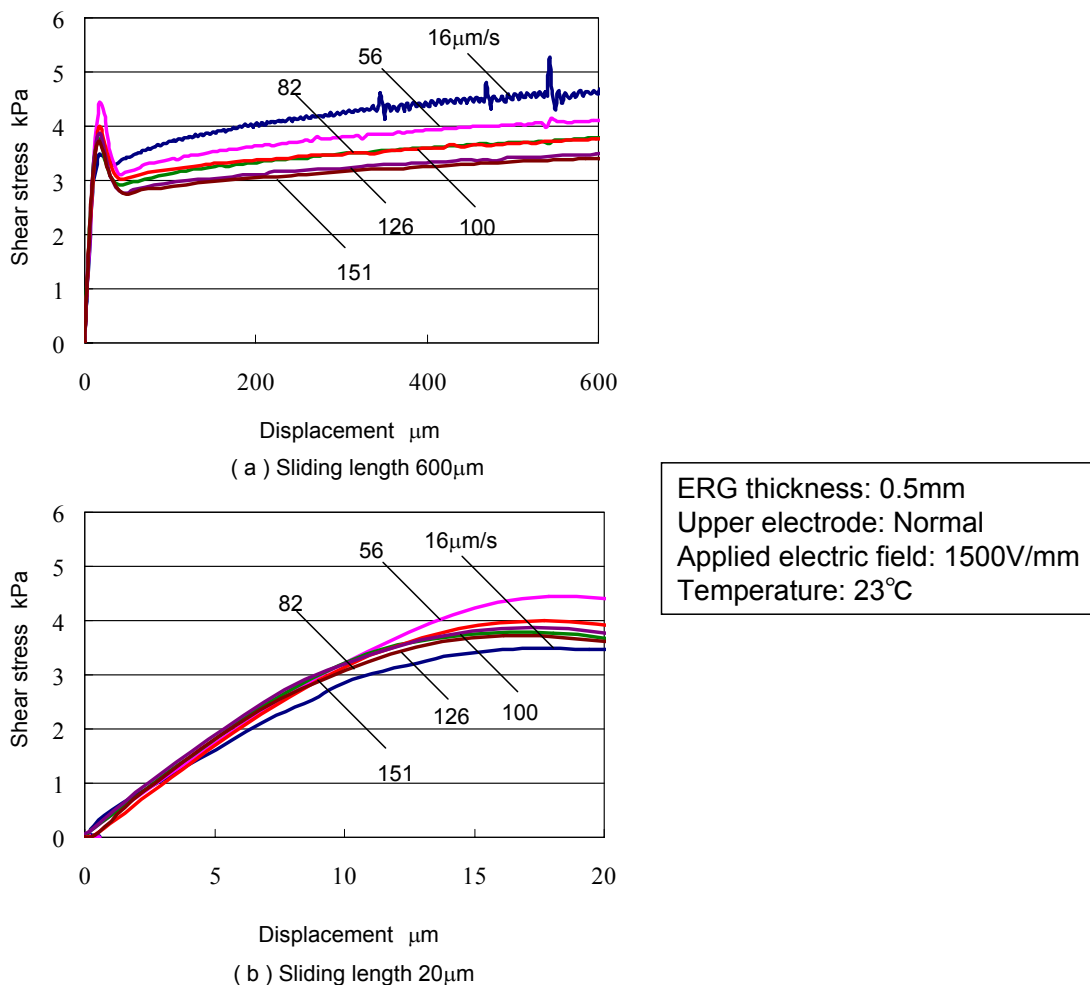


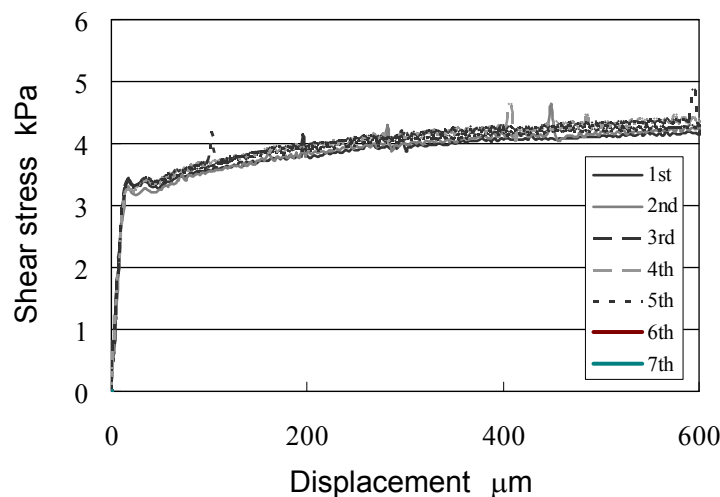
Fig.3-6 Influence of Shear rate on generated shear stress

示す降伏点を越える前の微小変位(10 $\mu\text{m}$ )でのせん断応力に注目してみると、電極は ERG の弾性変形により力を受けているため、せん断速度にほとんど依存していないことがわかる。弾性力は  $F=kx$  ( $F$ : 弾性力,  $k$ : 弾性係数,  $x$ : 変位) で表され、弾性係数  $k$  が一定ならば変位に比例する。つまり、電界強度が一定であることは ERG の弾性係数が一定であるため、応力は変位のみ依存する。つまり、微小変位での応力はせん断速度に依存しないと考えられる。

しかし、降伏点を越え、ERG と電極の間で滑りが発生する領域では、図 3-6(a)に示すように、せん断速度が増加するに連れ、応力が低下することがわかる。これは ERG と電極面の上に部分的に非常に薄いシリコン油膜が介在しているため、滑り速度が速くなるに従い油膜の潤滑作用によって動摩擦係数が低下して、その結果せん断応力が低下するものと考えられる。

### 3-2-5 ER 効果の再現性

ER 流体は、時間経過に伴い粒子の沈降や凝集を生ずることから、安定した ER 効果を得ることができなかつた。これに対し、ERG は粒子の沈降を起こさないことから、安定した ER 効果を得ることができると予想される。そこで、ERG に対し、時間経過に伴い発生するせん断応力の変化を調べるため、24 時間おきに 7 回、電界強度 1.5kV/mm を印加した状態でのせん断応力を測定した。測定結果を図 3-7 に示す。上部電極には普通電極を使用し、ERG は厚さ 0.5mm のものを用いている。7 回の測定を通してせん断応力特性が大きく変化することなく、弾性変形領域においてもまた滑り領域においても応力特性の再現性が高いことが確認できる。このよう



ERG thickness: 0.5mm  
 Upper electrode: Normal  
 Shear rate 20 $\mu\text{m/s}$   
 Applied electric field: 1500V/mm  
 Temperature: 23 $^{\circ}\text{C}$

Fig.3-7 Repeatability of ER effect

に、ERG は時間経過に伴う粒子の沈降や凝集が起こらないため、ER 効果の低下はほとんど生じない。つまり、ERG は ER 流体の最大の欠点であった ER 効果の再現性の問題を解決した素材であると言える。

### 3-2-6 温度の影響

周囲温度が ERG の性能に及ぼす影響について調べた。2枚の電極に挟まれた ERG に小型の加熱器を用いて熱風を送ることで、電極部および ERG の温度を変化させ、その時に発生するせん断応力を測定した。上部電極はアルミ合金製であることから熱伝導がよいため、ERG の温度と電極の温度にほとんど差がないと考えられる。そこで、上部高精度電極の上面に T 型熱電対を取り付け、それから読み取った温度を ERG の温度とした。図 3-8 に ERG の温度と 1500V/mm 印加時に発生する降伏応力の関係を示す。上部電極には普通電極を使用し、ERG は厚さ 0.5mm のものを用いている。温度が上昇するにつれて、発生する降伏応力は低下していくことが確認できる。温度が上昇することで、ER 粒子の引き合う作用およびゲルの粘着性が低下するため、発生する降伏応力もまた低下するものと考えられる。常温(20~25℃)における降伏応力の温度影響は 10%未満であり、性能の変化はほとんどない。温度上昇による性能の劣化は避けられないが、70℃で測定した後に再度 23℃での測定を行なったところ、応力値は初期の測定値と同等の値を示した。高温下において ER 粒子の引き合う作用およびゲルの粘着性は低下するが、温度を下げることによりその性能は回復することがわかる。

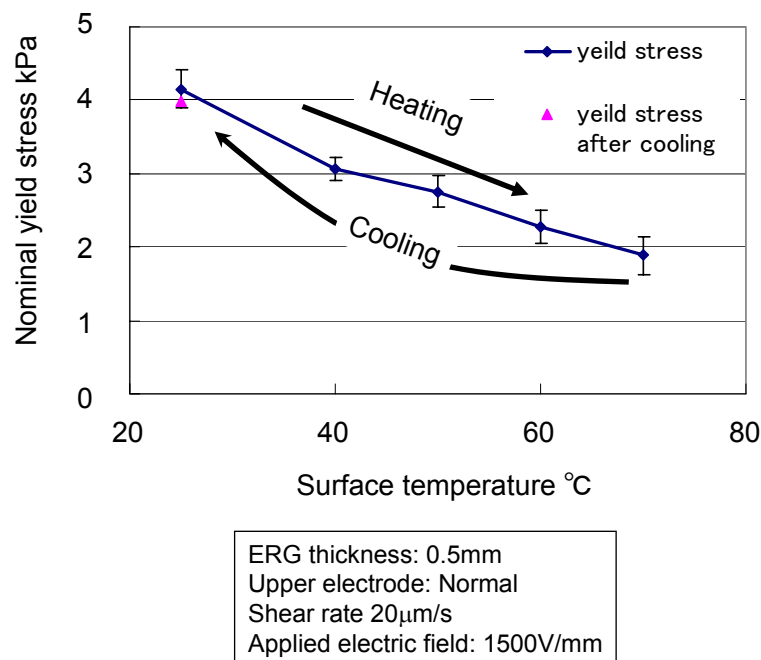


Fig.3-8 Influence of temperature on yield stress

### 3-2-7 電界強度と電流密度の関係

ERGに電界を印加した際に発生する電流を調べた。図3-9に電界強度と電流密度の関係を示す。上部電極には普通電極を使用し、ERGは厚さ0.5mmのものを用いている。印加する電界強度が上昇するに伴い、電流密度が徐々に増加することが確認できる。ERGに1500V/mmを印加した時に発生する電流密度は $8.6\mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。これを消費電力に換算すると、ERG厚さが0.5mmであることから $750\text{V}\times 8.6\mu\text{A}/\text{cm}^2=6.45\text{mW}/\text{cm}^2$ となる。粒子分散系ER流体では、 $10^{-2}\text{W}/\text{cm}^2$ オーダーの消費電力であることから数分の一から約一桁程度消費電力が小さいことが確認された。ERGはER流体に比べ一桁小さい消費電力で数倍大きいせん断応力を発生することが明らかとなった。

### 3-2-8 電極の表面粗さの影響

ゲル部分の電極への密着性がせん断応力の変化に関係しているとするれば、電極表面の表面粗さや電極とゲルの接触面圧の影響を受けるはずである。そこで、ERGと電極との接触状態の変化がせん断応力特性にどのような影響を及ぼすかを調べるため、上部電極の表面粗さおよび次節で接触面圧を変化させ、せん断応力の測定を行った。

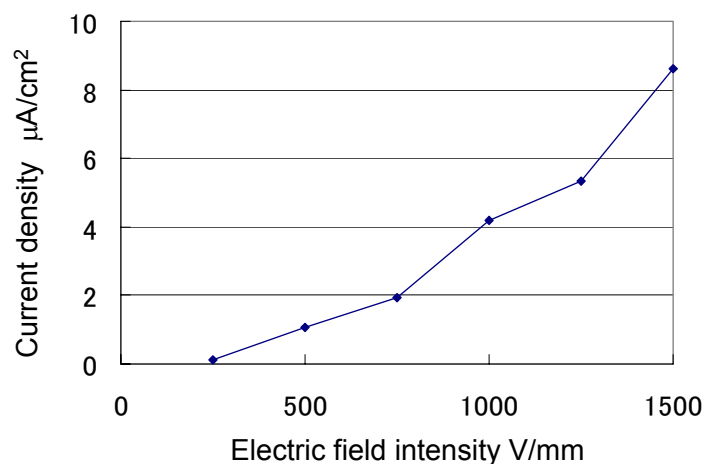
ERGに接する上部電極の表面粗さの影響を調べるため、表面粗さの異なる2種類の上部電極を用いて測定を行った。電極の表面粗さ測定に使用した機器を以下に示す。

<測定機器>

接触式表面粗さ測定器

株式会社ミットヨ

MODEL SURFTEST401

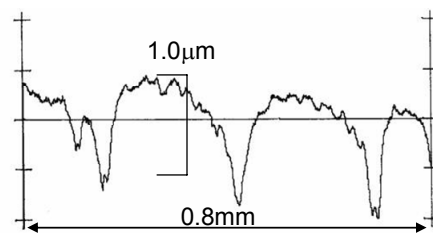


Upper electrode: Normal, ERG thickness: 0.5mm, Temperature: 23°C

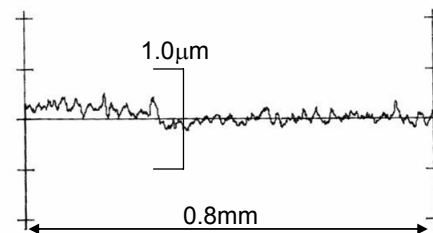
Fig.3-9 Relation between current density and applied electric field



電極の一つは 2.3 節で使用したもので、これは通常の機械加工で製作した普通電極(表面粗さ  $Ra=0.25\mu\text{m}$ )である。他の一つはその電極の面精度を高めるため表面を研磨した高精度電極(表面粗さ  $Ra=0.04\mu\text{m}$ )である。用いた2種類の電極の表面粗さを測定した結果を図 3-10 に示す。高精度電極を用いて変位量  $600\mu\text{m}$  まで上部電極をスライドさせた時の測定結果を図 3-11 に示す。普通電極(図 3-2(a))と高精度電極を比較すると、より良好な表面粗さを持つ高精度電極の方が全ての電界強度において  $500\text{Pa}\sim 1000\text{Pa}$  高いせん断応力が発生していることがわかる。これは表面粗さを良好にすることで電界印加時に上部電極と ERG シートのゲル部分との接触面積が増大して、大きな ERG 効果が得られたためと考えられる。また無電界時においては、電極表面の粗さに関係なく応力は  $100\text{Pa}$  程度で、応力値に大きな違いはみられなかった。

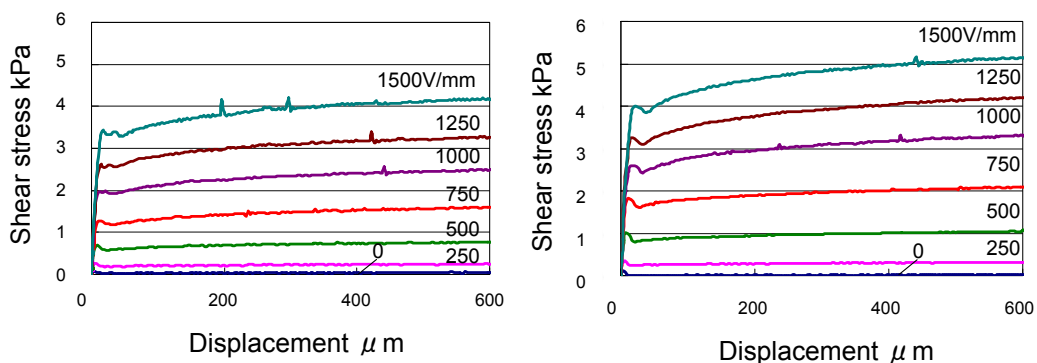


(a) Electrode surface by cutting



(b) Electrode surface by fine polishing

Fig.3-10 Surface roughness of upper electrodes



(a) Normal upper electrode

(b) Upper electrode after fine polishing

ERG thickness:  $0.5\text{mm}$ , Shear rate  $20\mu\text{m/s}$ , Temperature:  $23^\circ\text{C}$

Fig.3-11 Influence of surface roughness of upper electrode on ER effect

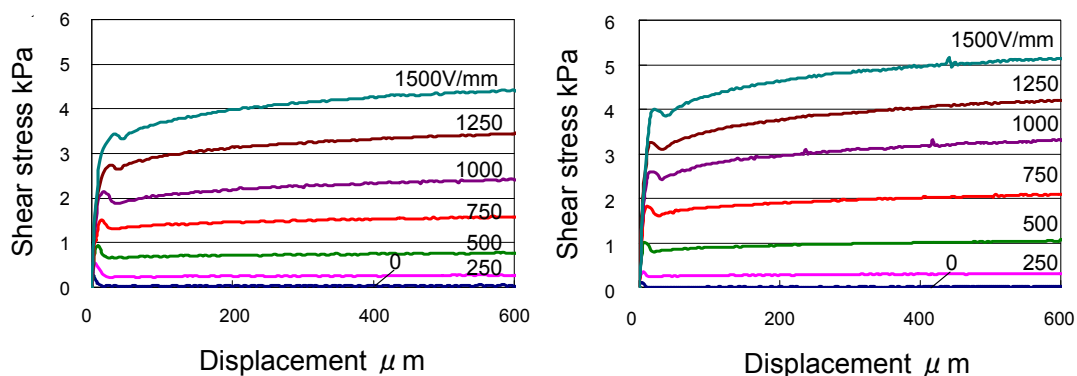
### 3-2-9 電極の接触面圧による影響

電極とERGとの接触面圧の影響を調べるため、高精度電極に200gfの付加荷重(分銅)を加えてせん断応力の測定を行った。この時の平均面圧は770Paである。また、付加加重なしの場合の平均面圧は70Paである。平均面圧770Paで上部電極を変位量600 $\mu\text{m}$ までせん断した時の測定結果を図3-12に示す。ERGと電極の接触面圧を高くすると、無電界時の応力は200Pa程高くなり、電界印加時の応力は電界強度1500V/mmで400Pa程低下する。この現象を従来のER流体と同様な視点のみから考えると説明がつかず、ERGを固体という視点から捉える必要があると考えられる。つまり、この現象をERGと電極面間での固体間摩擦状態の変化として捉えてみる必要がある。これに関する議論は第4章で詳しく述べる。

以上のことからERGと電極との接触状態の違いがせん断応力の変化に大きく影響することが確認された。つまりERGのER効果は、主としてERG表面の摩擦特性変化に起因すると予想される。

### 3-2-10 電極コーティングの影響

電極表面の摩擦係数を低レベルに維持して、無電場時のせん断応力を限りなく0に近づけるため、滑り特性のよいDLCコーティングを上部電極に施した。この電極を用いて変位量600 $\mu\text{m}$ までのせん断応力を測定した結果を図3-13に示す。DLCコーティングされた電極の表面粗さは高精度電極の表面粗さに相当することから、図3-13には比較のために高精度電極での実験結果も合わせて示した。実験に用いたERGは厚さ0.5mmを使用している。図3-13の結果よりDLCコーティングすることで無電場時の応力は非常に低く抑えられているものの、電場印加時の応力も、図3-11で使用した普通・高精度電極に比べ小さくなってしまった。これは、DLCが絶縁性であるためERGに効率よく電場が印加されていないためと考えられる。図3-13の結果に着目すると、DLCコーティングすることで降伏点がなくなっている。つまり弾性領域から滑り領域に移る際、DLCコーティングしていない電極を



(a) With load : Contact pressure 770Pa (b) Without load : Contact pressure 70Pa

ERG thickness: 0.5mm, Upper electrode: Fine, Shear rate 20 $\mu\text{m/s}$ , Temperature: 23 $^{\circ}\text{C}$

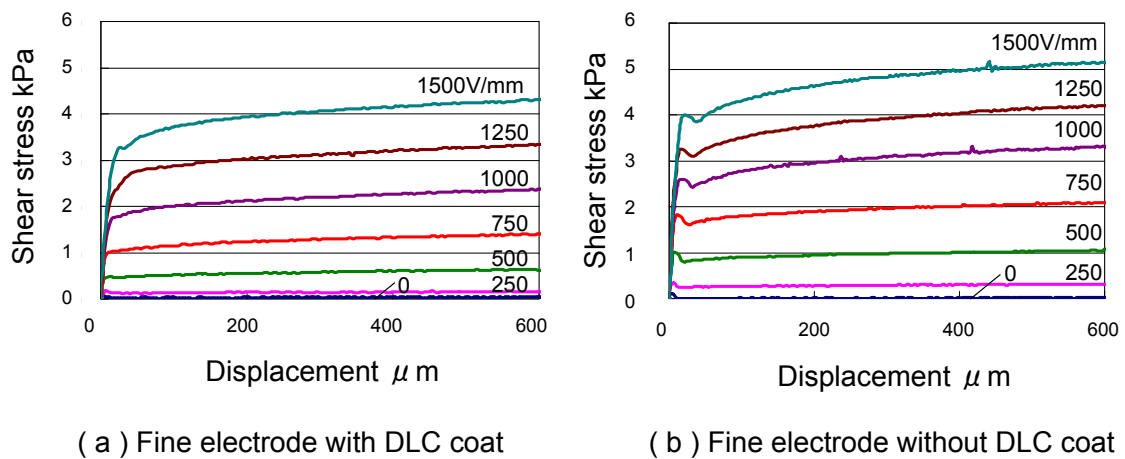
Fig.3-12 Influence of contact pressure to upper electrode on ER effect

用いた場合、二つの領域は降伏点を境に別々に存在していたのだが、DLC コーティングすることで弾性領域と滑り領域が共存する領域が存在すると考えられる。無電場時の応力に着目するとその値は約 50Pa 程度で、これは ER 流体の低せん断応力特性と同等のレベルである。

以上のように、電極表面に DLC コーティングを施すことで電場印加時の発生応力は低くなるものの、同時に無電場時の応力も低く抑制できることから、無電場時の応力発生を嫌うような部分には有効な電極処理手法であると言える。

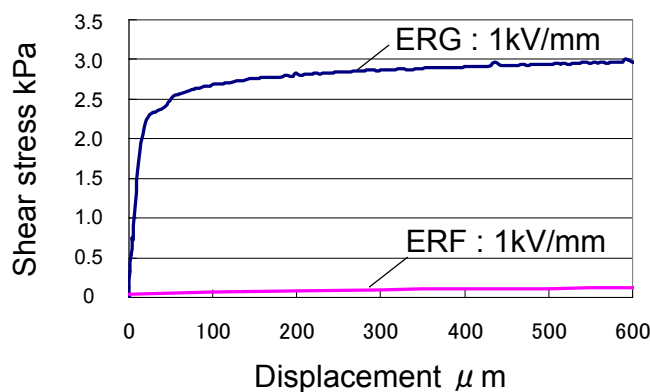
### 3-2-11 ER 流体との性能比較

せん断特性に関して ER 流体との性能比較を行った。比較に用いた ER 流体の特性は、ER 流体に関する過去の研究データを引用した<sup>68)</sup>。なお、引用した ER 流体



ERG thickness: 0.5mm, Shear rate 20 $\mu$ m/s, Temperature: 23 $^{\circ}$ C

Fig.3-13 Influence of DLC coat



ERG thickness: 0.5mm, Electrode gap for ERF analysis:0.5mm,  
Applied electric field: 1kV/mm, Shear rate 20 $\mu$ m/s, Temperature: 23 $^{\circ}$ C

Fig.3-14 Comparison of ER gel and ER fluid

の性能は、現在 ERG の製造時に用いている ER 流体のそれと同等のものである。

ER 流体、ERG とともに  $1\text{kV}/\text{mm}$  の電界強度におけるせん断応力を測定した結果を図 3-14 に示す。上部電極には高精度電極を用いている。

電界強度  $1\text{kV}/\text{mm}$  印加時における降伏応力値のオーダーは、ERG と ER 流体では1桁違う。ER 流体は  $1\text{kV}/\text{mm}$  印加時で、約  $100\text{Pa}$  の応力しか発生しない。様々な粒子分散系 ER 流体でも、 $1\text{kV}/\text{mm}$  印加時での、降伏応力は  $100\text{Pa}\sim 500\text{Pa}$  くらいであり、ERG に匹敵する応力は発生しない。ERG のせん断応力の発現機構が粒子鎖形成論だけであると考えたと ERG と ER 流体の応力の大きさはそこまで変わらないはずである。ゲル硬度の低い ERG において粒子鎖が形成することは確認されており、粒子鎖形成は応力発生の一つの要因であるとは考えられる。しかし、ERG は ER 流体に比べ ER 効果により発生する応力値が桁違いに大きいことから粒子鎖形成論以外にも ERG と電極の界面でなんらかの現象が起きていると考えられる。この現象の推定に関してはこの章の最後に述べる。

### 3-3 動特性解析

#### 3-3-1 動的特性測定方法

基本静特性解析の結果、機械要素に組み込む条件を整えることで、ERG は電界強度に応じて非常に高いせん断応力を示すことが明らかとなった。そこで ERG の応用分野の一つと考えられる制振装置等への応用可能性を検討するため ERG シートの基本的動特性の評価を行った。測定装置の概略図を図 3-15 に、外観を図 3-16 に示す。上部電極には高精度電極を使用し、ERG は  $0.5\text{mm}$  厚のものを使用した。動電型加振器によりスライダに振動を加えることで、上部電極を加振した。加振条件は、無電界時の振幅  $100\mu\text{m}$  で加振周波数  $10\text{Hz}$  および振幅  $1\mu\text{m}$  で周波

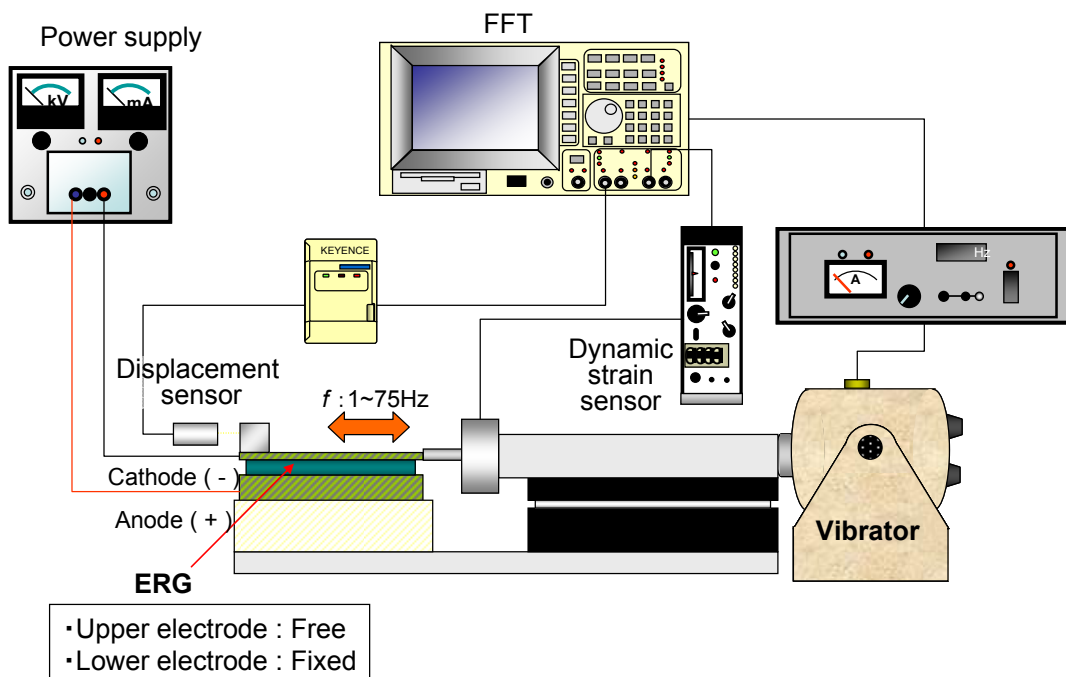


Fig.3-15 Schematic diagram of dynamic test stand

数10Hzとした。また各条件において加振器への入力振幅は一定として実験を行った。加振状態でERGシートに電界を印加し、その時の振幅変化を測定した。またその測定結果より電界に対する振幅変化の応答性を求めた。

本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

<実験装置>

- |               |  |
|---------------|--|
| ・ ERG         | 平均粒子径:約 16 $\mu$ m<br>粒子濃度:50wt%<br>分散溶媒:L-45 (100cSt)<br>藤倉化成(株)<br>日本ユニカー(株)提供 |
| ・ 上下電極        | 東芝機械(株)提供  |
| ・ 高圧電源        | KENWOOD(株)<br>MODEL HJPW-5P0.6<br>松定プレシジョン(株)                                    |
| ・ 昇圧装置        |  |
| ・ 動電型加振器      |  |
| ・ ロードセル       | KYOWA(株)<br>MODEL LU-20KSB34D  |
| ・ A/D インタフェース | (株)KEYENCE<br>MODEL NR-110   |

<測定機器>

- |              |              |
|--------------|--------------|
| ・ 渦電流式変位計    | (株)KEYENCE   |
| (電源)         | MODEL KZ-U3  |
| (コントロールユニット) | MODEL EX-201 |

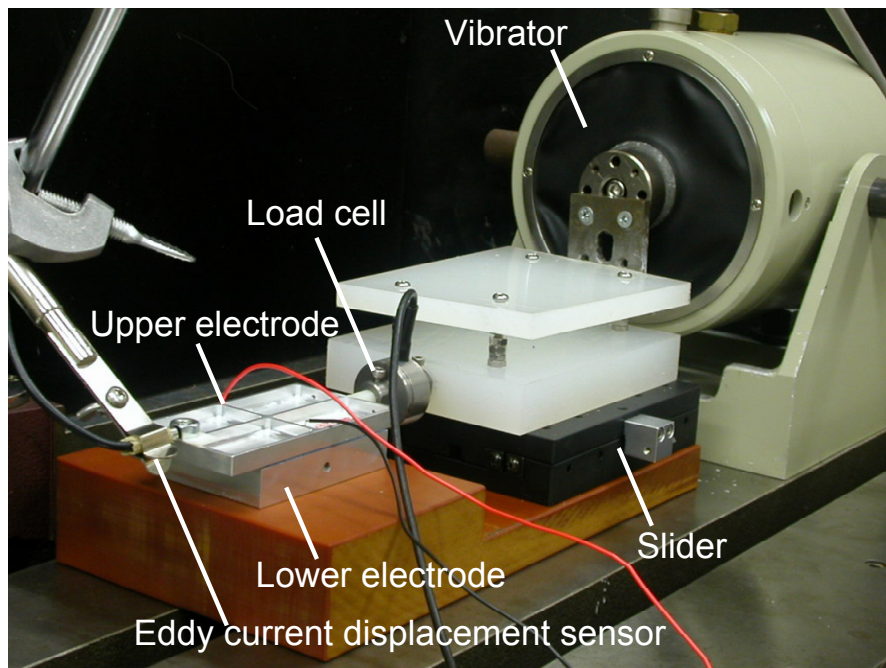


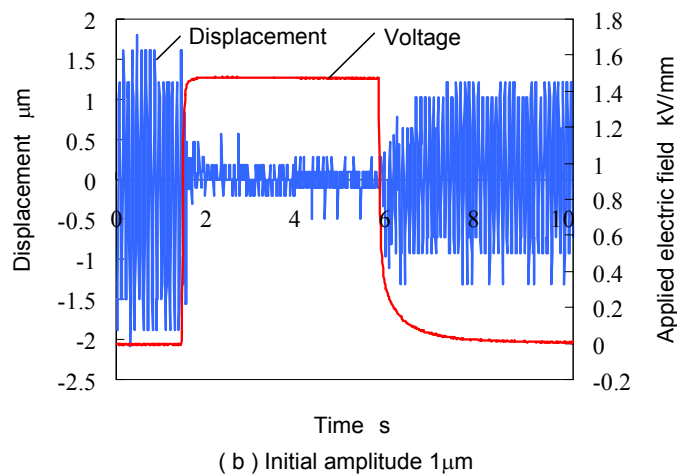
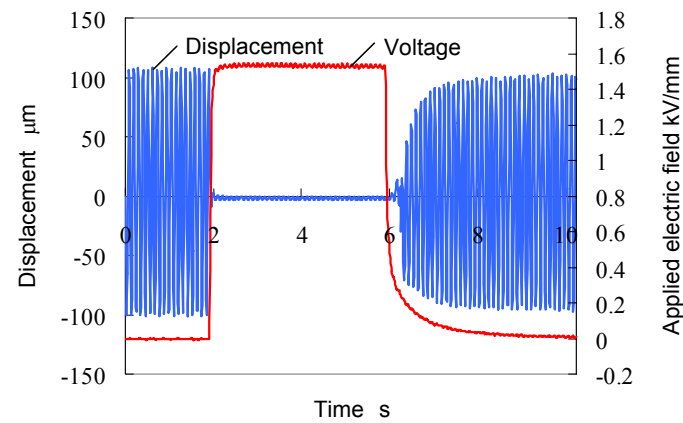
Fig.3-16 Appearance of experimental setup for dynamic test

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 動歪み計 (ヘッド)</li> <li>・ FFT アナライザ</li> </ul> | <p>MODEL EX-305<br/>KYOWA(株)</p> <p>MODEL DPM-613A<br/>ADVANTEST(株)</p> <p>MODEL R9211B</p> |
|---|---|

### 3-3-2 加振実験結果

図 3-17(a)に振幅 100 $\mu\text{m}$  で加振周波数 10Hz の測定結果を, 図 3-17(b)に振幅 1 $\mu\text{m}$  で加振周波数 10Hz の測定結果をそれぞれ示す.

図 3-17 (a)より 100 $\mu\text{m}$  の初期振動振幅が, 電界を印加することで, 10 $\mu\text{m}$  以下の振動振幅に抑制されていることがわかる. 同様に, 図 3-17 (b)より 1 $\mu\text{m}$  の初期振動



ERG thickness: 0.5mm,  
Frequency of vibration: 10Hz,  
Initial amplitude of displacement:  
100 $\mu\text{m}$  and 1 $\mu\text{m}$   
Temperature: 23 $^{\circ}\text{C}$

Fig.3-17 Results of dynamic test

振幅が約250nmの振幅に抑制されていることが確認できる。この結果よりERGが制振要素として十分応用が可能であることがわかる。電場印加に伴い振動振幅が、急激に抑制されることから、ERGがブレーキ的な役割を果たしていると考えられる。

次にERG厚0.5mm、加振周波数10Hzで入力電圧を三角波として加振実験を行った時の変位測定結果を図3-18に、せん断応力測定結果を図3-19に示す。電圧をランプ関数的に上げていくと振動振幅は徐々に小さくなり、電圧がある値以上(本実験では0.6kV/mm以上)になると、振幅抑制の効果はなくなりそれ以上振幅は小さくならない。また印加する電界強度を徐々に下げていくと0.3kV/mm付近でステップ的に振動振幅が変化する。発生するせん断応力も印加電界に対して同

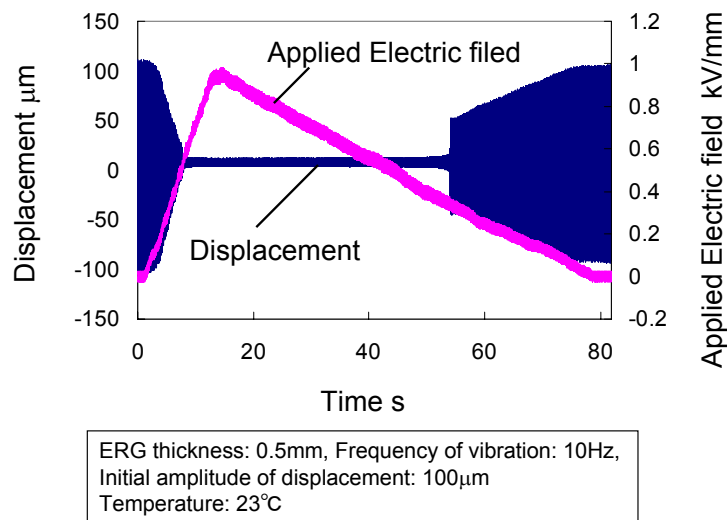


Fig.3-18 Relation between displacement amplitude and applied electric field

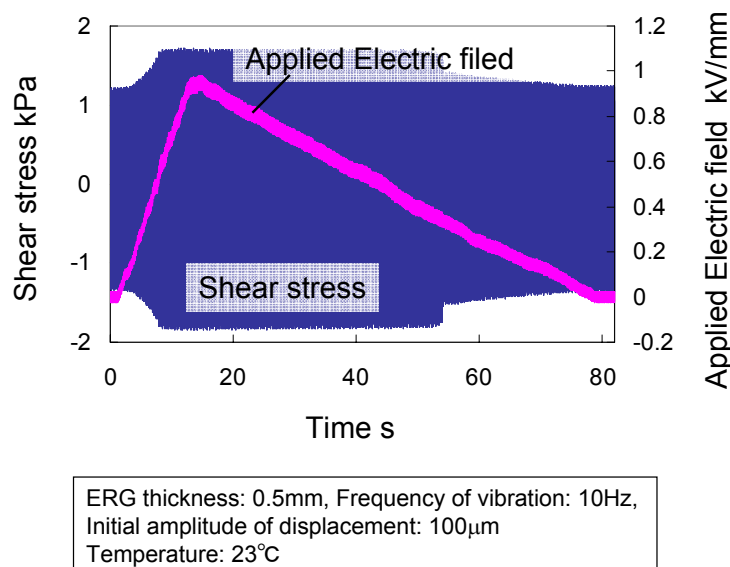


Fig.3-19 Relation between generated shear stress and applied electric field

様の傾向を示している。この結果より得られた、加振周波数 10Hz での加振一周期における電極変位とせん断応力の関係を図 3-20 に示す。電界強度 500V/mm までは減衰力が働いているが、電界強度 750V/mm を超えると減衰力はほとんど働かず、振動エネルギーが弾性エネルギーへと変化していることがわかる。つまり、ERG を用いて振動を抑制する方法として、低い電界強度を印加することで減衰力により振動を抑制することができ、高い電界強度を印加することで防振ゴムのように弾性エネルギーにより振動振幅を抑制することができるものと推定される。

表 3-1 に図 3-17(a)の結果より算出した ERG の電界に対する応答性を時定数で示す。応答性を算出するにあたって、測定結果より電源立ち上り時の時定数及び振幅変化の時定数を算出し、(ERG の応答性) = (振幅変化の時定数) - (電源立ち上り時の時定数)としている。立ち下り時の応答性も同様に算出している。この結果を従来の ER 流体の応答性<sup>3) 9)</sup>と比較すると、ER 流体の時定数が数ミリ秒～十数ミリ秒なのに対し、ERG の時定数は十ミリ秒～百ミリ秒オーダーとなっている。ERG はゲル部分によって粒子が保持されているため、ER 流体のように粒子は広い範囲を自由に運動することができない。つまり、ゲル部分が粒子の動きを阻害しているため応答性が約 1/2 低下すると考えられる。

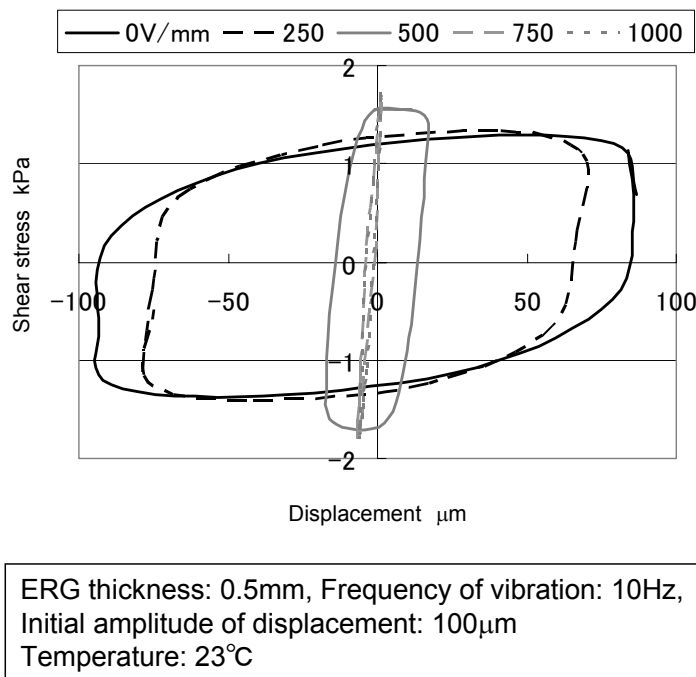


Fig.3-20 Relation between generated shear stress and displacement for one cycle of vibration

Table.3-1 Response of ERG

	ON-response ( ms )	OFF-response ( ms )
ERG	20~30	100~200



### 3-3-3 動コンプライアンス測定装置

高精度電極を使用して0.5mm厚のERGに対する動コンプライアンスの測定を行った。動コンプライアンス測定に用いた装置構成は図3-15と同様である。加振実験装置と同様に、上部電極から動電型加振器までを一体化することで上部電極を加振する。この時、FFTのサーボアナライザ機能により、0~50Hzまでを2Hz毎に連続的に加振するようにした。また、渦電流式変位計、動歪み計それぞれの出力信号をFFTに入力するように接続した。

測定方法は上部電極を0~50Hzまで連続的に加振して、その時の上部電極振幅を渦電流式変位計により、せん断力をロードセルを介して動歪み計により読み取り、それぞれの出力信号をFFTに取りこみ周波数解析を行った。電界強度は250V/mm毎に0V/mm~1500V/mmまで変化させた。

### 3-3-4 電界強度と動コンプライアンスの関係

厚さ0.5mmのERGを用いて動コンプライアンスを測定した結果を図3-21に示す。この実験結果から無電場時には1550 $\mu\text{m}/\text{N}$ あったコンプライアンス値が、電場強度を500V/mm以上にするとほぼ値が0 $\mu\text{m}/\text{N}$ になる。つまり電界強度に応じてコンプライアンス値を大きく変化させることができ、また電場強度をあげることでコンプライアンス値を非常に低く抑えていることが確認できる。電界強度500V/mmを超えるとコンプライアンス値はほとんど測定不可能なほど小さくなる。

つまり、ERGシートを制振デバイスに組み込むことにより、電場に応じて振動振幅を抑制する可変ダンパシステムを構成することや、固定装置に組み込むことにより、電場に応じて固定力を変化させるブレーキシステムを構成することが可能である。

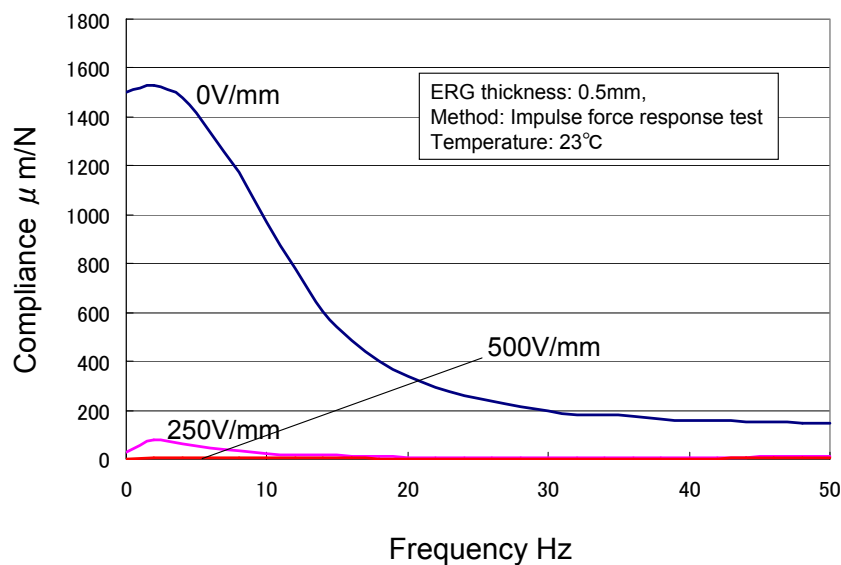


Fig.3-21 Influence of ER effect on dynamic compliance

### 3-4 耐久性試験

#### 3-4-1 耐久性試験装置

ERGにおけるER効果が時間経過に対して影響を受けるかを調べるために、1000時間の耐久性試験を行った。実験装置を図3-22に実験装置の外観を図3-23に示す。ERGシートが成形された下部電極をベースに固定し、ERGに電界強度 $1.5\text{kV}/\text{mm}$ を印加した状態で上部電極を低速かつせん断変位を大きくし、往復摺動させる。低速モータの主軸に偏心カムを取りつけモータの回転を上部電極の往復摺動へ変換している。上部電極の往復摺動周期は3sとし、摺動振幅が5mmとした。連続往復摺動の状態で24時間毎に電圧を印加し、時間経過に伴う表面磨耗により応力がどのように変化するかを調べることで、耐久性を評価した。

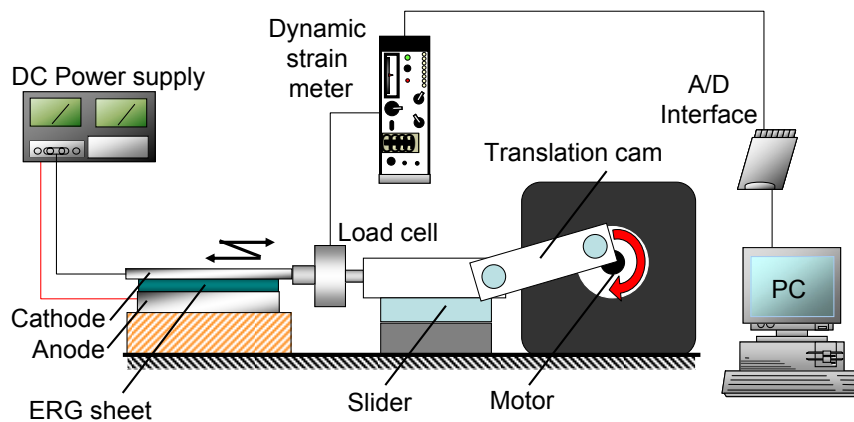


Fig.3-22 Experimental setup for durability test

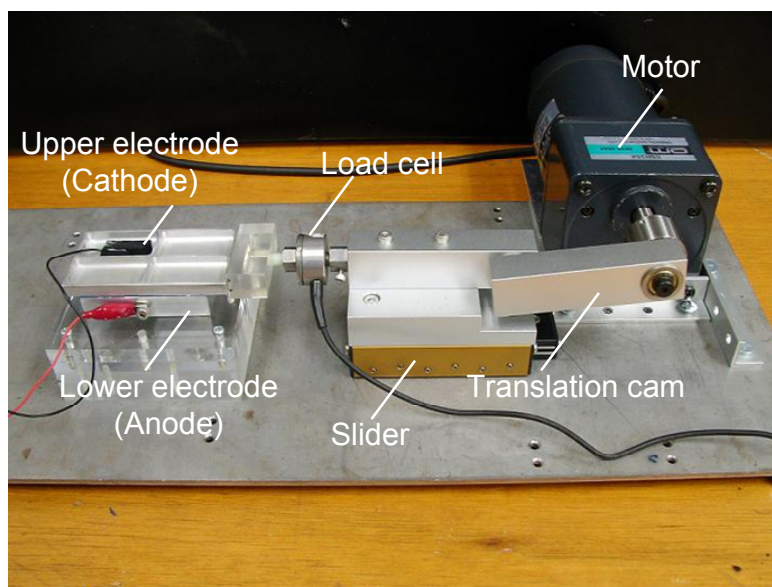


Fig.3-23 Appearance of experimental setup for durability test

### 3-4-2 耐久性試験に用いた ERG

ERG に対し試験的にせん断応力測定実験を行った後、上部電極の ERG との接触面を見てみると、オイルが付着していた。これは ERG に含まれるシリコンオイルが表面からにじみ出たためである。オイルがにじみ出て電極に付着するということは、ERG 内のオイル量が減少しているということになり、これが ERG のせん断特性に何らかの影響を与えると考えられる。そこで、5A03ERG を製造後、表面に何も処理を施さないタイプと、オイル吸収フィルムを用いて表面のオイルを除去したタイプの ERG を用いて、せん断応力測定を行うことで表面のオイルの影響を調べた。オイルの除去量は ERG に含まれるシリコンオイルの約 50wt% である。この 2 タイプの ERG に対し、上部電極には精密電極を用いて、変位量 600  $\mu\text{m}$  までのせん断応力を測定した結果を図 3-24 に示す。

この結果より、オイル除去処理を施すことで ERG は、製造時の ERG より降伏応力が約 2 倍も大きくなることが明らかとなった。オイル除去処理を行うことにより、オイルの潤滑効果を低減させ粘着作用が大きくなったためと考えられる。この理由に関しては次章の「ERG における ER 効果発生メカニズム」で詳しく述べる。耐久性試験にはオイル除去処理を施した 5A03ERG を使用した。

### 3-4-3 耐久性試験結果

時間経過に対する降伏応力測定の結果を図 3-25 に示す。上部電極には精密電極を用いて、また ERG シートは 0.5mm 厚のものを使用した。試験開始 300 時間後までは発生する降伏応力に変動があるが、その後は降伏応力が安定して発生し、その値は約 8kPa である。試験開始後の変動の原因として、ERG 表面と電極面の接触状態の変化が考えられる。ERG における ER 効果は ERG と電極界面の接触面積に依存する。時間経過に伴い、ERG の表面が電極面に慣れてくるため徐々に発生

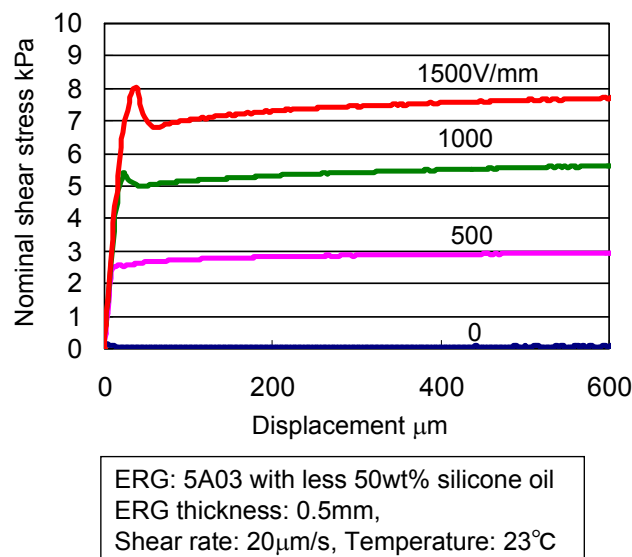
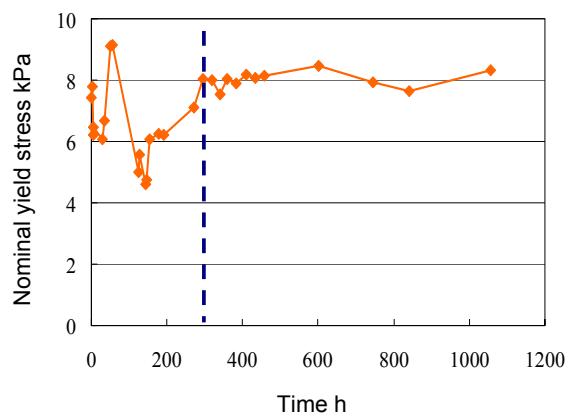


Fig.3-24 Performance of the ERG with extremely low oil contamination

するせん断応力は安定する。

耐久性試験の結果、ERGは長時間使用しても安定したER効果を示すことが明らかとなった。これは、ER流体の問題点であったER粒子の沈降がゲル構造化することにより抑制されたためである。耐久性試験の後、ERGの表面を観察すると図3-26に示すように表面が灰色になっていた。ERG表面を拡大して観察したところ、図3-27に示すようにアルミ粉がERG表面に大量に付着していることが確認された。これはERGの発生するせん断応力が非常に大きいため、ERGとアルミ電極の間で摩擦が生じ、ERGがアルミ電極を削ったために生じたものである。この結果より、ERGに電場を印加した状態で高せん断応力が作用するような激しい条件下で使用することは避けたほうがよいと考えられる。



ERG: 5A03 with less 50wt% silicone oil, ERG thickness: 0.5mm  
 Time cycle of shearing: 3s, Amplitude of displacement: 5mm  
 Temperature: 23°C

Fig.3-25 Result of durability test

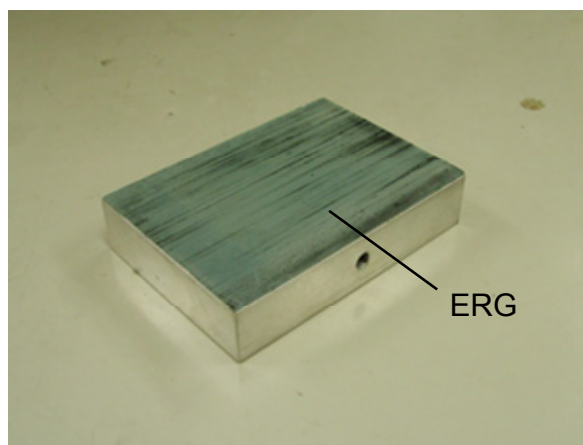


Fig.3-26 Surface of ERG after durability test (1000h)

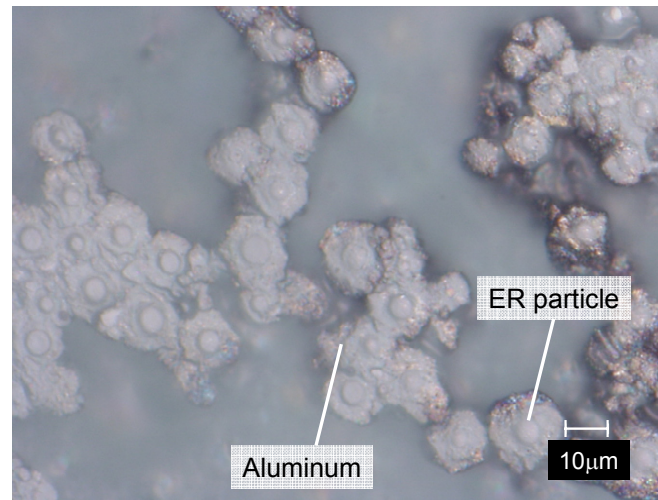


Fig.3-27 ERG surface after durability test

### 3-5 結言

ERGの基本特性を実験的に解析するために、シート型のERGを製造しこれにせん断変形を与えた際の発生応力について、その静的ならびに動的な応答を測定した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) ERGは電界強度に応じて、せん断応力が大きく変化する。この時、微小変位においては弾性的特性を、降伏点を超えると電極とERGの間で滑り特性を示す。
- (2) ERGシート厚を薄くすることにより同電界強度により発生するせん断応力が上昇する。
- (3) ERGの発生降伏応力は電界強度にほぼ線形関係にあり、試作した0.5mmのERGシートにおける発生降伏応力は $\tau_0[kPa] = 2.3 \times E[kV/mm] - 0.1$ によって与えられる。
- (4) 20～160  $\mu m/s$ の低せん断速度域において、せん断速度が上昇することで、発生するせん断応力が減少する。
- (5) ERGは時間経過に伴う粒子の沈降凝集が生じないため、安定したER効果を得ることができる。そのため、ER効果により発生するせん断応力変化の再現性がある。
- (6) 外部から熱が与えられ、ERGの温度が上昇すると同電界強において発生するせん断応力が低下するが、温度を下げることでその性能は元に戻る。
- (7) 印加する電界強度に応じて電流密度は指数関数的に上昇する。
- (8) 電極の表面粗さを向上させることで、また接触面圧を低く抑えることで電界印加に対するせん断応力の変化幅を広くとることが可能で、高いERG効果を得ることができる。また、電極表面にDLCコーティングを施すことで電場印加時の発生応力は低くなるものの、同時に無電場時の応力も低く抑制できる。
- (9) 開発したERGは従来のER流体に比べER効果により発生するせん断応力

値が20～30倍高い。

- (10) 本研究で開発したERGにおけるせん断応力発生メカニズムは、従来のER流体に関するものとは異なり、ERGと電極面の接触部分における摩擦特性が電界強度に応じて変化することに基因するものと考えられる。
- (11) ERGに電界を印加することにより、せん断方向における電極の動変位を抑制することが可能で、制振要素への応用が期待される。
- (12) ERGは、電気粘性特性を示す粒子の運動をゲル構造で拘束しているため、電界印加に対するせん断応力発生への応答速度は従来のER流体に比較して遅く約1/2となる。
- (13) ERGは、ER効果に対する高い耐久性を有する。ER効果によるせん断力は、1000時間経過しても、安定して生じる。

以上より、開発したERGは従来のER流体に比べ、高い性能を示すことが明らかとなった。また、ERGにおけるER効果発生メカニズムが従来の粒子鎖形成論とは異なり、ERG表面と電極界面の摩擦現象が影響していることが推測される。そこで、ERGにおけるER効果発生メカニズムについてさらに詳細な解析を行った。次章では、その結果について述べる。

## 第4章 ERGにおけるER効果発生のメカニズムの解明

### 4-1 序言

ERGの開発当初, ERGにおけるER効果は従来のER流体と同様, 電場印加に伴うクラスタ形成論から説明できると考えていた. しかしながら, 基本特性解析の結果からゲル硬度が低い液体状のERGではER効果が十分発揮されないこと, ゲル硬度を高くし固体状にすることで高い効果が得られることから, ERGにおけるER効果はERG表面と電極との界面摩擦現象の変化に起因していると推測される. 本章では, ER効果の発生メカニズムを推定し, 推定したメカニズムの妥当性を界面の観察および実験的アプローチから検証する.

### 4-2 せん断応力発生メカニズムの推定

ERGはその表面写真(図4-1)を見るとゲル部分により粒子が物理的に拘束されており, 流体の場合とは異なり, 粒子が自由に運動することが困難であることがわかる. そのため電界を印加したとしても, ER粒子の双極子相互作用によりお互いが引き合う力よりゲルによる拘束力のほうがはるかに大きいため, この物理的拘束を解いて粒子鎖(クラスタ)を形成することは無いと考えられる. また, ERGは電界印加時に非常に大きな降伏応力を示すことや, せん断変位量に応じて弾性的特性から滑り特性へと変化することから, ERG表面と電極の界面における摩擦特性の変化がせん断力発生の原因ではないかと考えた.

このような観点から, 推定されるERGのせん断応力発生メカニズムを図4-2に示す. 図4-1の表面写真よりERG表面には, シリコーンゲル部分より球面が突起している粒子が多数存在することが確認できる. 本研究で使用しているER粒子は非

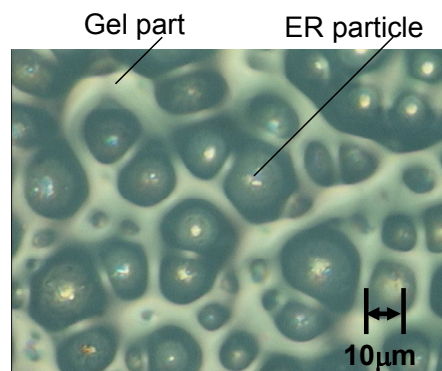


Fig.4-1 Surface of ERG

常に滑り特性がよく、無電界時にはこの突起したER粒子の球面を電極が滑るため、せん断応力が非常に低い値を示す。ERGに含まれる粒子は、ゲル部分に拘束されていることにより、大きく動くことはできない。しかし、電界印加により多軸構造を持つて分極を生じた粒子(図4-2(b))は、互いに引き合うことで、ゲルシート中心方向に微小変位を生ずると考えられる。この結果、図4-3に示すように表面から突起していた粒子球面は沈み込み、その作用によって粒子周囲のシリコンゲルが押し出され盛り上がることで、ERGのゲル部分が電極面と接触するようになる。シリコンゲルは、非常に高いぬれ性を示し粘着質な材料であることから、電極とゲル部分が接触することで粘着現象が生じ大きなせん断応力を示すようになり、かつ粘着しているゲル部分が滑りを生ずる直前に、応力の降伏現象を示すものと考えられる。さらに電界強度の変化に応じて、表面に突起した粒子の沈み込み量が増減し、同時に電極に対するゲルの粘着面積が増減してせん断応力も変化するものと考えられる。なお、シリコンオイルを含むシリコンゲルはぬれ性による粘着性を持つ一方、粘着部分に滑りが生じる場合、低せん断速度域では、シリコンオイルによる潤滑性が作用しせん断速度の増加に応じて動摩擦係数が低下する。その結果、低せん断速度域で、せん断速度を増加させた場合せん断応力は図3-6に示したように低下する傾向にある。その一方、高せん断速度域では、粘性抵抗が速度に比例して大きくなるため、動摩擦係数が増加していくと考えられる。

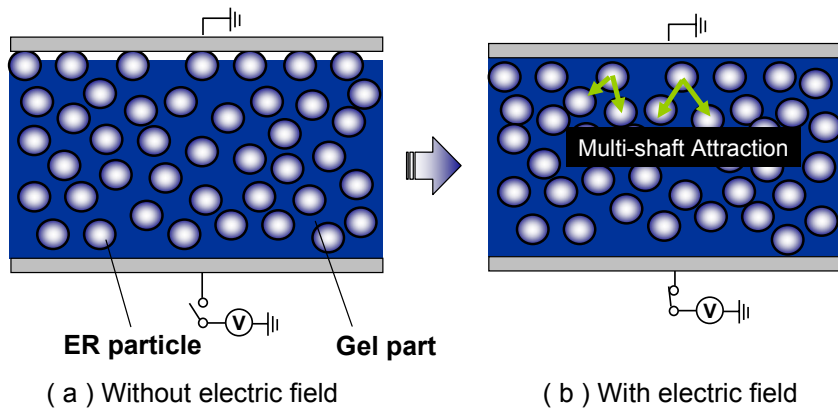


Fig.4-2 Occurrence mechanism of ER effect in ERG

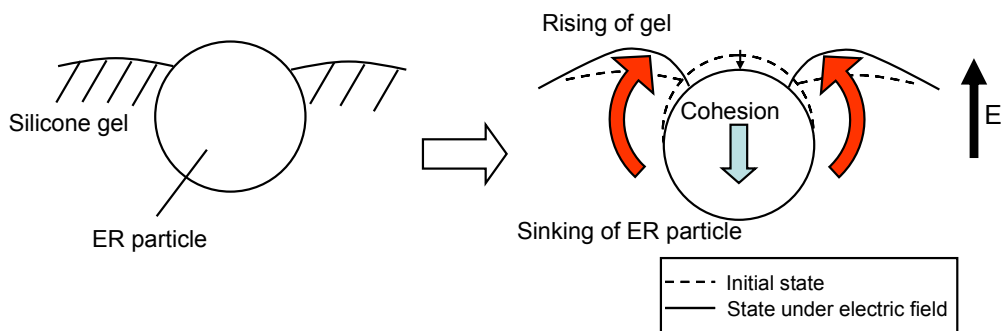


Fig.4-3 Sinking phenomena of ER particle from surface



### 4-3 推定メカニズムの検証

推定したせん断応力発生メカニズムを検証するために、ERG と電極面間の接触状態の変化を詳細に観察した。測定装置の外観を図 4-4 に示す。基本特性測定で使用した 0.5mm 厚の ERG シートを、導電性膜である ITO 膜を塗布したガラス電極(上部電極)と金属電極(下部電極)で挟み、下部電極をベースに固定する。ガラス電極の上側にマイクروسコープを設置し、電界の有無による ERG 表面とガラス電極の接触面における状態変化を観察した。

本実験で使用した実験装置及び測定機器を以下に記す。

#### <実験装置>

- ERG  
粒子径:約 16  $\mu$  m  
粒子濃度:50wt%  
分散溶媒:L-45(100cSt)  
藤倉化成(株)  
日本ユニカー(株)提供
- ITO ガラス電極  
東芝機械(株)提供
- 下電極

#### <測定機器>

- CCD マイクロスコープ (株)KEYENCE

各電界強度における ERG 表面の観察結果を図 4-5 に示す。電界を印加することにより ERG と電極との界面でぬれによる粘着現象が生じていることが確認できる。ぬれ性はシリコンゲルに見られる粘着現象<sup>15)</sup>であり、電界強度の増加とともにガラス電極とゲル部分の接触面積が増加する傾向が認められる。つまり ERG におけるせん断力の変化は表面の ER 粒子、ゲル部分、空孔部の比率に依存しており、特にゲル部分との接触面積の変化が大きく寄与していると考えられる。

そこで、ゲル部分の電極への真の接触面積を求め、その値と測定されたせん断

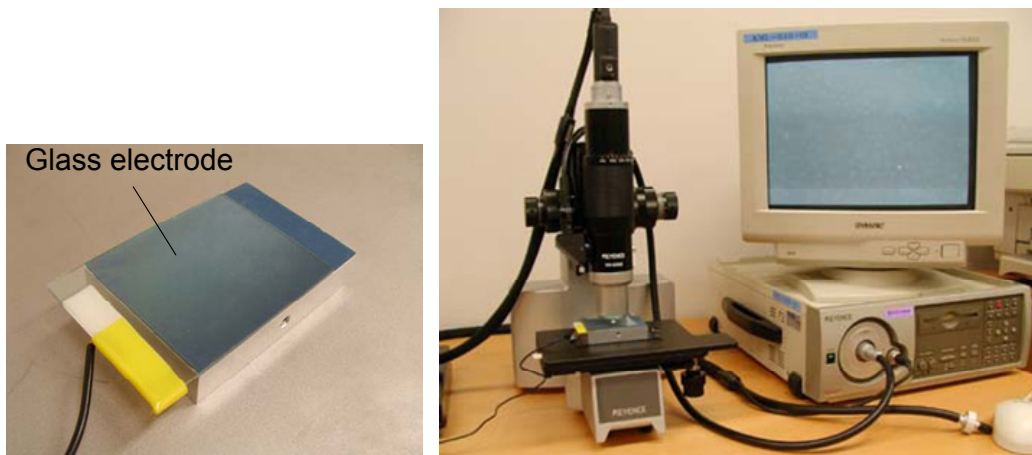


Fig.4-4 Method of surface observation

力の関係を調べてみた。マイクロスコープで撮影した表面画像を画像処理により二値化<sup>16)</sup>することでゲル部分との接触面積を求め、これで測定したせん断力を除することにより、ゲル粘着部分での真のせん断応力を求めた。各電界強度における表面の二値化画像を図 4-6 に示す。各電界強度において、異なる10点の画像を撮影し、各画像を二値化処理して各位置における接触面積の割合を求めた後、その平均値を全電極に対するゲル部分の接触面積の割合とした。各電界強度のゲル部分の接触面積の全電極面積に対する割合を算出した結果を表 4-1 に、またゲル粘着部分の真のせん断応力の変化を図 4-7 に示す。ゲル粘着部分の真のせん断応力は印加電界強度に関係無くほぼ一定となる。このことから ERG におけるせん断力の変化はゲル部分の接触面積の変化に起因することが明らかとなった。

次に、電界印加により表面の ER 粒子がどのような動きをするか調べるため ERG と電極の界面をその側面からマイクロスコープにより観察した。測定装置の概略図を図 4-8 に示す。電界強度 0V/mm と 1500V/mm 印加時における ER 粒子及びその周囲の様子を撮影した結果を図 4-9 に示す。電界を印加することによって、粒子が微小変位ながらゲル内部へ移動していることが確認できる。また、微小移動に伴い、粒子周囲にあるゲル部分が隆起している。粒子球面に接触しているゲルは粒子の沈みこみ作用により、押し付け力を受ける。ゲル自身は粘着性が高く弾性変形しやすい材料であるため、粒子球面と粘着した状態で変形し、そのため図 4-10 に示すように粒子を包み込むような変形が生じ、ゲルが表面に隆起するものと考えられる。

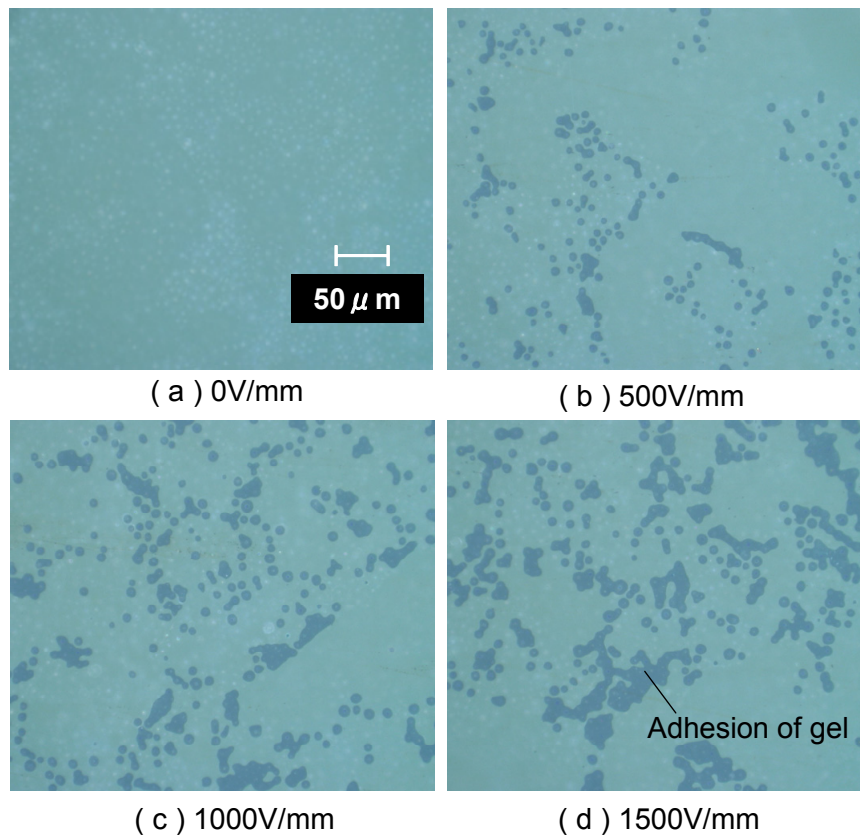


Fig.4-5 Observation at boundary between ERG and the glass surface

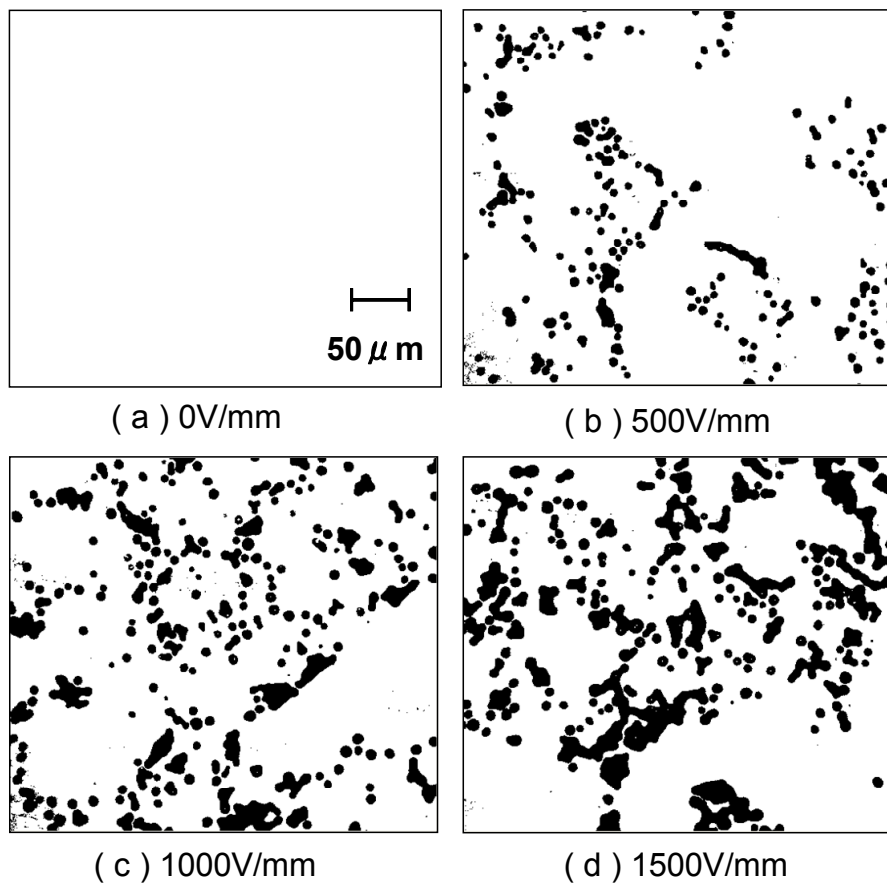


Fig.4-6 Binarization by image processing

Table 4-1. Increase of adhesive gel area on the glass electrode according to the increase of applied electric field

Applied electric field intensity ( V/mm)	Ratio of gel contact area ( % )
500	6.5
1000	12.6
1500	17.3

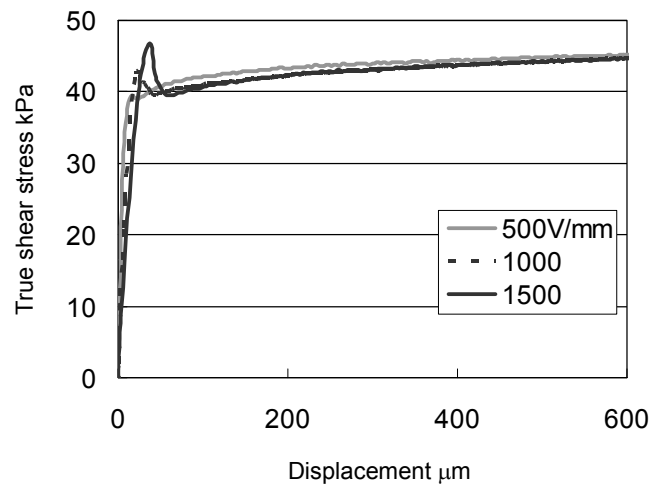


Fig.4-7 The shear stress related to gel adhesion

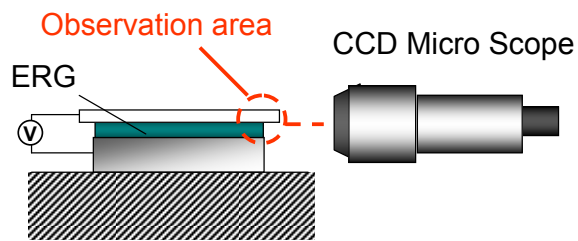


Fig.4-8 Schematic diagram of surface observation

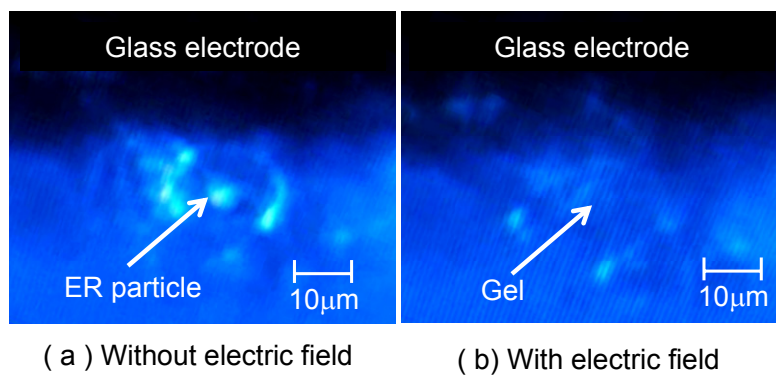


Fig.4-9 Behavior of ER particle

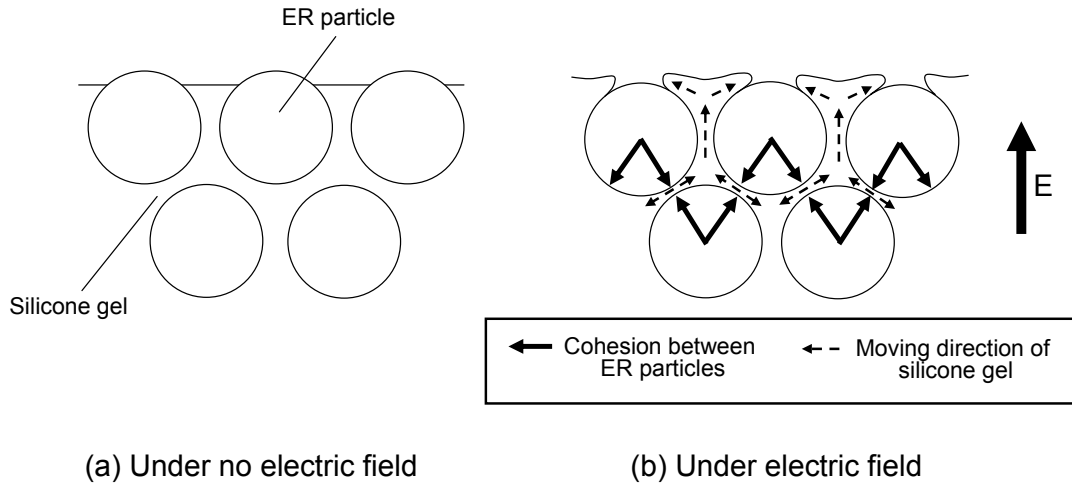


Fig.4-10 Equilibrium between cohesion of ER particle and elastic force of gel

ここで、ERG表面のER粒子が電界印加により受ける力について考える。図4-11に示すように、誘電率 $\epsilon_L$ のシリコンゲル中に誘電率 $\epsilon_p$  ( $\epsilon_p > \epsilon_L$ )で半径 $a$ の二つのER粒子が電界 $E_0$ 中に配向し、それぞれ分極しているものとする。分極効果により受ける粒子間引力 $F(r, \theta)$ の $r$ 方向成分 $F_r$ と $\theta$ 方向成分 $F_\theta$ は、

$$F_r = -\frac{3}{2} \pi \epsilon_L \beta^2 a^2 E_0^2 \quad (4-1)$$

$$F_\theta = 0$$

と表される。複数個の粒子が電界方向に配向した場合、注目する粒子に影響を及ぼす力の上昇率は数%であり、ER粒子に働く引力が粒子の分極によると見なすなら、粒子二つの場合の粒子間引力を採用して大きな誤差は生じない。

ER粒子には分極のみによる力だけではなく、電気伝導効果による引力も生ずることが花岡らの研究により明らかにされている<sup>41)</sup>。図4-12に電界 $E_0$ 方向に並んだ二つの接触球粒子の理想的配置を示す。電気伝導効果により受ける力 $F_c$ は、

$$F_c = \pi \epsilon_L a^2 E_0^2 \int_0^{\pi/2} \left[ \ln \left( \frac{2a}{\Delta r} \tan \frac{\theta}{2} \right)^2 \right] / \left[ (1 - \cos \theta) \ln \left( \frac{2a}{\Delta r} \right)^2 \right] d\theta \quad (4-2)$$

と表される。ここで、粒子間の電界強度 $E(\theta) = V(\theta) / Z(\theta)$ を考えると、 $E(\theta)$ は接触面に隣接するギャップで無限に大きくなる( $\theta = 0$ で $E(\theta) = \infty$ )。ただし、 $V(\theta)$ は任意の角度 $\theta$ における表面電位、 $Z(\theta)$ は角 $\theta$ での $z$ 方向における粒子間距離とする。これは、粒子表面間の微小な領域の電界強度がある程度上昇すると、部分放電の発生や球表面の電荷移動などの現象により電界の上昇が妨げられることを示唆している。そのため、球の接触点から $\theta_c$ の角度内の電界は、シリコンゲルの保持

できる最大電界強度  $E_{\max}$  (約 30kV/mm) で一定になると仮定され、接触面において電界により受ける力も一定になると考えられる. この仮定に基づいて算出される粒子間の全引力  $F$  は,

$$F = F_r + F_c = K(\Delta r, \theta_c) E_0^2 \quad (4-3)$$

と表される.  $F$  は  $F_r$  の 100 倍以上となることが確認されており, 電気伝導が粒子間引力に支配的な効果を持つことが示されている.

次に ERG 表面の粒子が内部に沈み込む作用について検討する. ERG 内の粒子濃度はほぼ最密充填であるが, 図 4-1 を見てもわかるように, 表面の ER 粒子は不規則に並んでいる. そのため表面の ER 粒子の突出量にはばらつきがあることがわかる. ここで, 電極表面の ER 粒子の状態別に沈み込む作用について考える. 図 4-13 に示すように, ER 粒子が無電場の状態で電極に接触し, 垂直方向に隣り合う

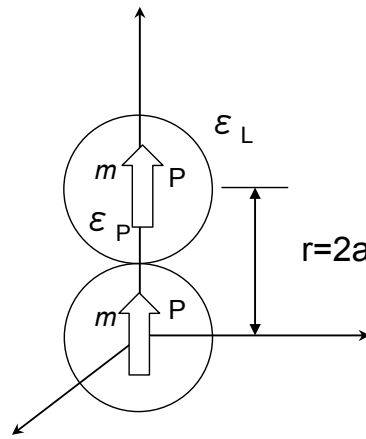


Fig.4-11 Interaction model of two particles

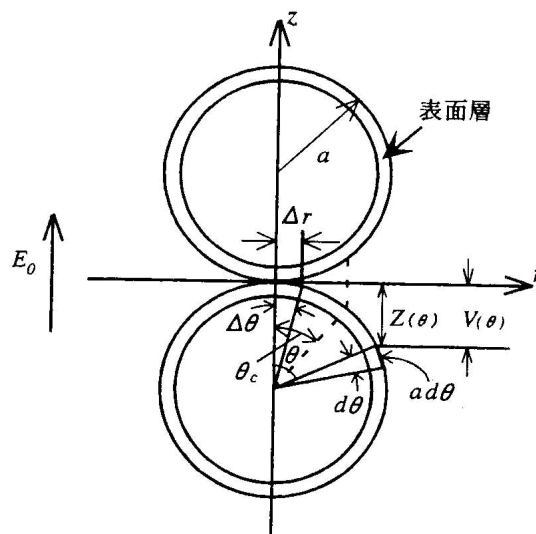


Fig.4-12 Ideal arrangement of two spherical particles in contact <sup>41)</sup>

別のER粒子と微小間隔  $d$  だけ離れて存在していると仮定する。これに電界を印加することにより、ER粒子間および電極-ER粒子間では上述した引力  $F$  が生じる。電極とこれに接するER粒子を一体と見なすと、ER粒子間のみで力が作用することになり、この粒子間引力  $F$  がゲルの弾性力と釣り合うまで電極とともに粒子が  $\Delta d$  だけ沈み込むと考えられる。次に、図 4-14(a)に示すように、表面のER粒子が電極と間隔  $d'$  だけ離れた状態で、更に、垂直方向に隣り合う別の粒子が間隔  $d$  だけ離れて存在していると仮定する。 $d' > d$  の場合、ER粒子間の電界強度は電極-ER粒子間のそれよりも強くなる。このため、電極-ER粒子間の引力  $F'$  よりER粒子間での引力  $F$  が大きくなるため、沈み込む方向に作用する(図 4-14(b))。一方  $d' < d$  の場合には、粒子は沈み込むことなく、電極側に引きつけられると考えられる。また、 $d' = d$  の場合には、表面のER粒子に働く力は釣り合うため変位は生じない。このように、粒子-粒子間と粒子-電極間の関係により沈み込む作用が生じるか生じないかが決定されると考えられる。図 4-5 で、粘着が生じる部分と生じない部分があることの意味も、上述した考えにより説明することが可能である。

次に粒子の移動量とゲルの隆起量の関係について考える。粒子の移動量は電

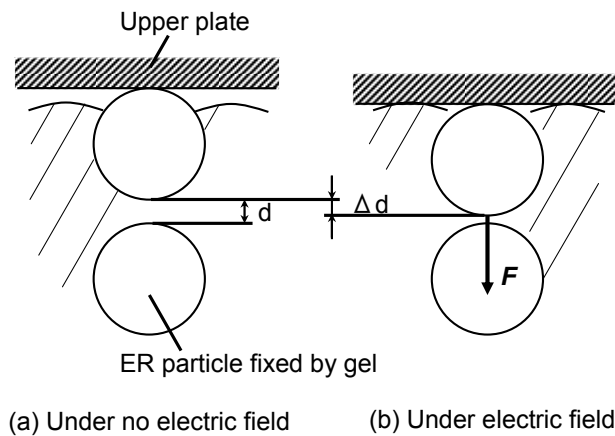


Fig.4-13 Applied force to ER particle in contact with upper plate

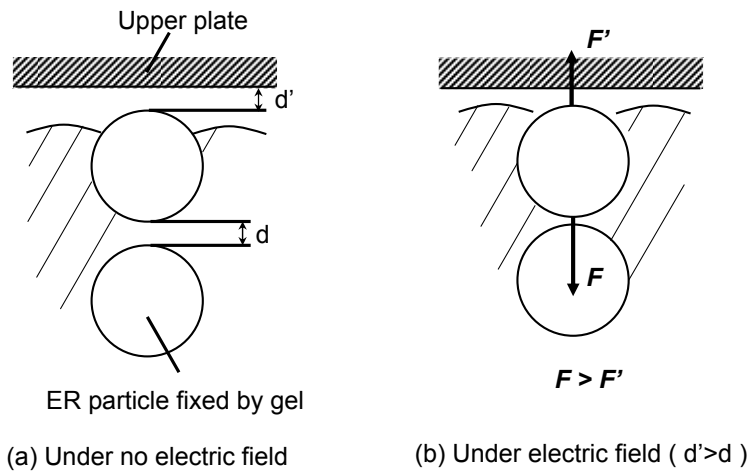


Fig.4-14 Applied force to ER particle in no contact with upper plate

界印加時に生じる粒子同士が相互に引き合う力とゲル部分の弾性力の釣り合いによって決まると考えられる。つまり電界強度に応じて、粒子の移動量は変化し、それによりゲルの隆起する量も変化する。これによりゲル部分と電極が接触する面積が変化すると考えられる。また、応力変化が粒子の沈みこみ作用によるゲル部分との接触面積の増加だとすると、ゲルの接触面積には上限値が存在するため、表面にある粒子がゲル内部に完全に沈み込めば接触面積は飽和し、せん断応力は一定値に収束すると推測されるが、3章の測定結果ではせん断応力は電界強度にほぼ比例して増加している。試作した ERG シートは電極間に 2kV/mm 以上の電界強度を印加すると絶縁破壊を起こすため、粒子はある値以上を超えて沈む込むことはできない。つまり本実験の範囲では、粒子の沈み込み量はそれほど大きくないため、粒子の沈み込み作用に対するゲルの接触面積の変化はほぼ比例的に増加する。そのため、ゲルの接触面積に依存すると考えられるせん断応力も一定値に収束することなくほぼ比例的に増加するものと考えられる。

電界の印加によって、粒子がゲル内部に微小変位するならば、これにともなって電極にも同方向の変位が生じるはずである。そこで、ERG シートを平行平板金属電極で挟み下部電極をベースに固定し上部電極の電界方向への変位を測定した。測定装置の概略図を図 4-15 に示す。上部変位測定には、2.2 節で使用した渦電流式変位計(分解能 0.4 $\mu\text{m}$ )を使用した。電界強度 1500V/mm を 2 秒毎に印加した結果を図 4-16 に示す。電界の印加に応じて電極は応答性良く約 2  $\mu\text{m}$  の変位

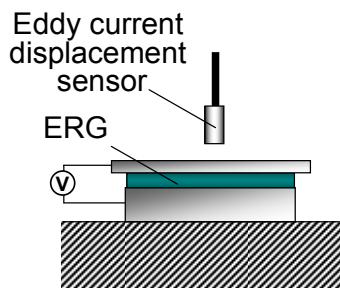


Fig.4-15 Schematic diagram of measuring vertical displacement

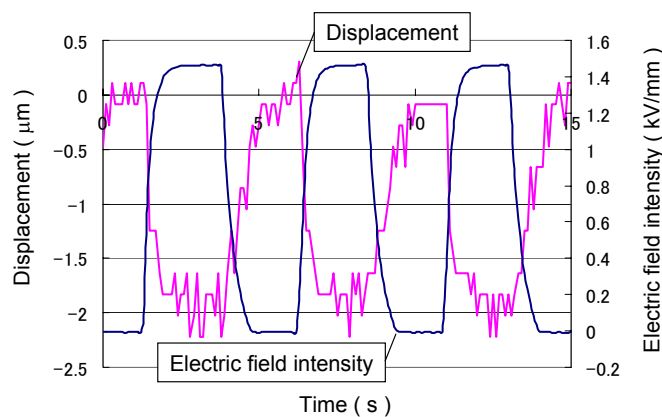


Fig.4-16 The small displacement in direction of electric field due to ER effect



を生じていることが確認された。

しかしながら、変位が生じる原因が、電極間のクーロン力による ERG の弾性変形である可能性やシリコンゲル自体が ER 効果を持つ可能性も考えられる。そこで、クーロン力による ERG の弾性変形であるかを調べるため、ERG の弾性率と誘電率からクーロン力による歪み量を計算した。ERG の弾性率および比誘電率は表 2-2 に示したように、 $E = 0.043 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、 $\epsilon_\gamma = 23.2$  である。図 4-17 に示すように2枚の電極で挟み込んだ ERG を、誘電体を挟み込んだコンデンサーと捉え、電界を印加した場合に生じる上部電極の電界方向の力を考える。電極に加わる力を  $F[\text{N}]$  とすると、

$$F = \frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon_\gamma S} = \frac{1}{2\epsilon_0\epsilon_\gamma S} \left( \frac{\epsilon_0\epsilon_\gamma S}{d} \right)^2 V^2 \quad (4-6)$$

ここで、 $Q[\text{C}]$  はコンデンサーに蓄えられる電荷、 $\epsilon_0[\text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2]$  は真空の誘電率、 $S[\text{m}^2]$  は電極面積、 $V[\text{V}]$  は電極間に印加する電位差である。ERG に加わる電界方向の応力  $\sigma[\text{N/m}^2]$  は  $F$  を電極面積で除した値であるので、

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{\epsilon_0\epsilon_\gamma}{2d^2} V^2 \quad (4-7)$$

と書ける。歪み  $\epsilon$  は応力  $\sigma$  を弾性率  $E$  で除した値であるので、

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E} = \frac{\epsilon_0\epsilon_\gamma}{2Ed^2} V^2 \\ &= \frac{8.8 \times 10^{-12} \times 23.2}{2 \times 0.043 \times 10^6 \times (0.5)^2} \times (750)^2 \\ &= 5.3 \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (4-8)$$

と、算出され歪み量は非常に小さいことがわかる。つまり、ERG の収縮は電極間のクーロン力であるとは考えにくい。

次にシリコンゲル自身が ER 効果を持つかを調べるために、同一寸法の ER 粒

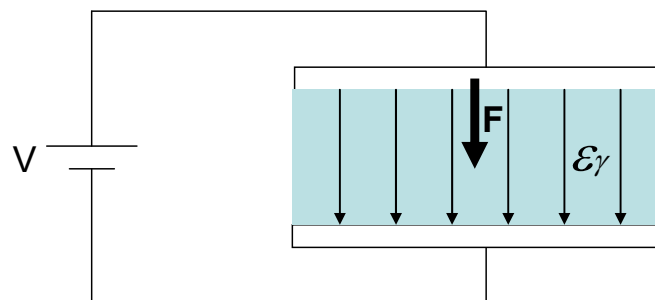


Fig.4-17 Electric force applied to each electrode

子を含まないゲルシートを製造し、その特性を調べた。製造したシリコーンゲルシートの組成比率を表 4-2 に、外観を図 4-18 に示す。電界強度を 1kV/mm 毎に 0V/mm から 2kV/mm まで変化させ、各電界強度における公称のせん断応力を測定した結果を図 4-19 に、電極の電界方向変位の測定結果を図 4-20 に示す。ここで公称せん断応力とは、測定したせん断力をシートの表面積で除した値である。前章に示した ERG の公称せん断応力測定結果と同様に、シリコーンゲルシートは降

Table.4-2 Proportion of constituents in silicone gel

	Proportion of constituents (wt %)		
	Gel agent (Hydrogensilicone and Unsaturated compounds)	ER particle	Silicone oil
Silicon Gel	66.4	0	33.6

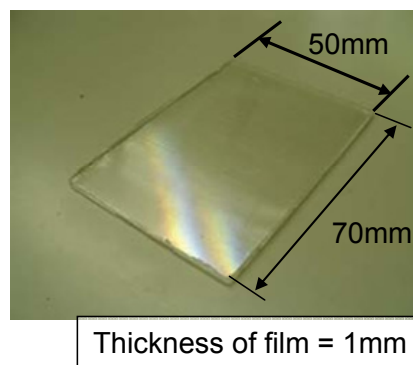


Fig.4-18 Appearance of silicone gel sheet

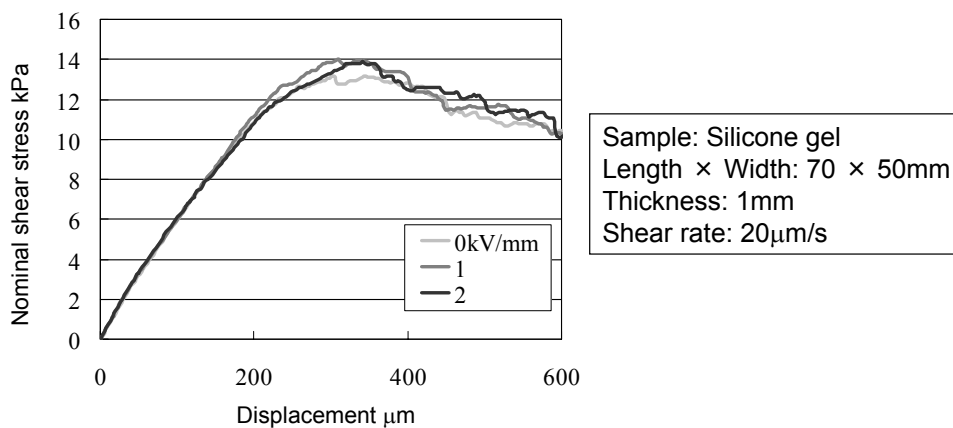


Fig.4-19 Behavior of shear stress in silicone gel

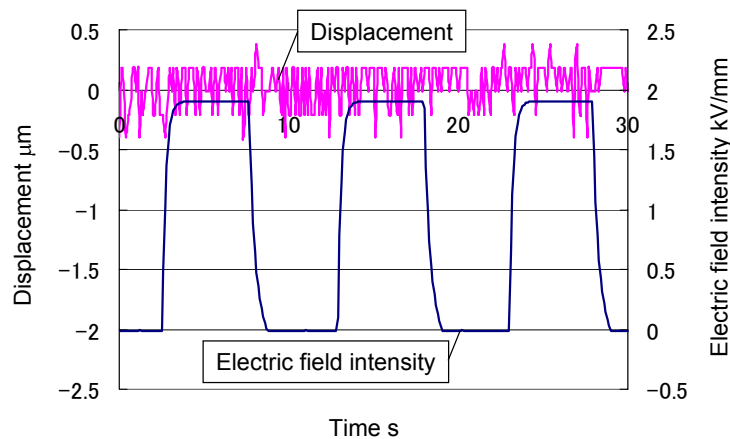


Fig.4-20 Relation between displacement in direction of electric field and applied electric field (silicone gel)

伏応力を示す。しかしながら、その大きさは印加電界の強度に関係なくほぼ一定である。また、電界方向変位について見てみると、電界強度 2kV/mm を印加しても、電極に変位は生じないことがわかる。以上の結果から、電界強度に応じてせん断力が変化する ERG の特性は、ER 粒子の作用によるものであり、ERG 特有の現象であることが明らかとなった。

#### 4-4 異なる接触条件下での ER 効果

ERG の特性は、先にも述べたように表面の ER 粒子、ゲル部分、空孔部の比率に依存していると考えられる。また、シリコンゲルはシリコンオイルを初めとして有機溶媒によって膨潤等による構造変化を受けやすい。そのため、ERG の表面状態はシリコンオイルの含有量に大きく影響を受けると考えられる。そこで、ERG の製造時に含有するシリコンオイルおよびゲル化剤の含有比率を変えて同様の特性測定を行った。

まず、処方するシリコンオイル量を変え表面状態の異なる ERG シートを 5 種類製造しせん断応力測定及び電界方向変位測定を行った。それぞれの表面状態を図 4-21 に示す。オイルを多量に含む ERG の表面はゲル部分が多く、オイルの含有割合が少なくなるにつれ粒子が占める割合が多くなっている。含有するオイルの割合と降伏応力の関係を図 4-22 に示す。オイル含有量が増えると、降伏応力は小さくなることがわかる。これはオイルがゲル表面に染み出し電極面間の潤滑性が向上するためであり、高い降伏応力を得るためには含有するオイル量をなるべく少なくすることが望ましいと言える。実際 34wt%シリコンオイルを含む ERG は表面にオイルが染み出しており、ERG と接触していた上部電極面にはオイルが多量に付着していることを実験後に確認している。

ERG は、電界を与えることによりせん断力が増大する一方で、逆に電界を除去することによってせん断力が減少する可逆的な特性を示すことが実用上望ましい。そのためには、ゲル内に含まれる ER 粒子の微小変位が可逆的でなくてはならない。図 4-23 は、電界を 10 秒間印加して、その後電界を取り除いた状態で公称せん断応力を測定した結果である。ゲルの粘着による公称せん断応力はオイル量が

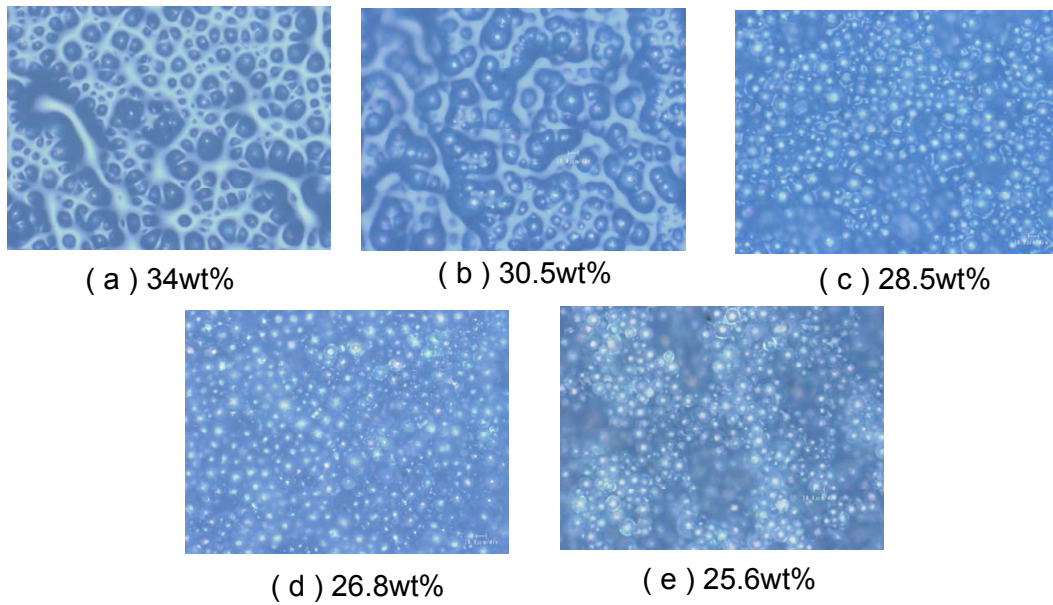


Fig.4-21 Surfaces of ERGs in different oil content

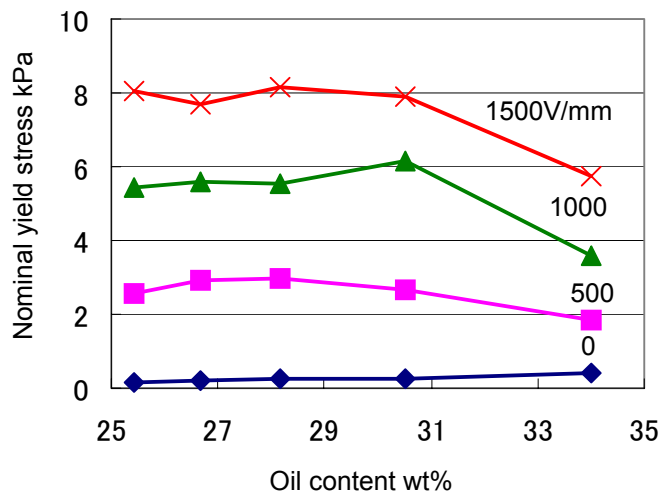


Fig.4-22 Relation between oil content and nominal yield stress

30wt%付近で最大値を取ることが確認できる。ERG はオイル量が少ない場合、その内部に空孔が多く存在するため粒子は運動しやすくなる。また、無電界時の表面状態をみても、粒子の占める割合が多いためゲルによる粘着は起きにくい。その一方でオイル量が多い場合は染み出すオイルの潤滑性により、ゲルの粘着性が低下する。電界強度の変化に対してせん断力の変化を可逆的に応答良く実現するためには、ERG が含有するオイルを低量とし表面に占める粒子の割合を多くする必要がある。次にオイル含有量と電極の電界方向変位の関係を図 4-24 に示す。含有オイル量が 28wt%以上になると、オイル量が増えるに連れ電界方向の変位は小さくなることわかる。オイル含有量が多いと、ゲル部分が膨張し ERG 内にある気孔が塞がれ、そのため粒子は粘着性の高いゲル部分に拘束される状態となり、変位が

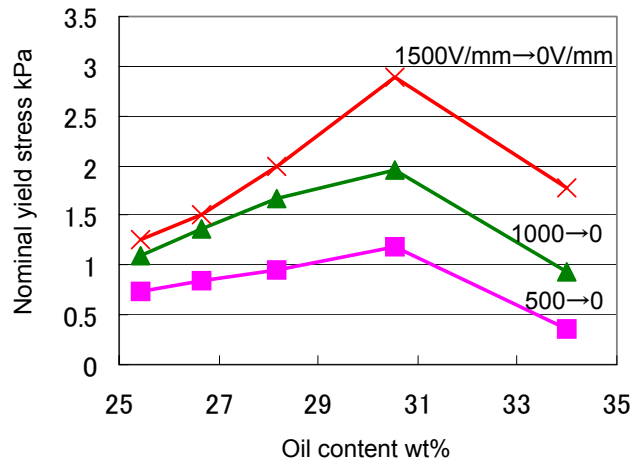


Fig.4-23 Relation between oil content and nominal yield stress

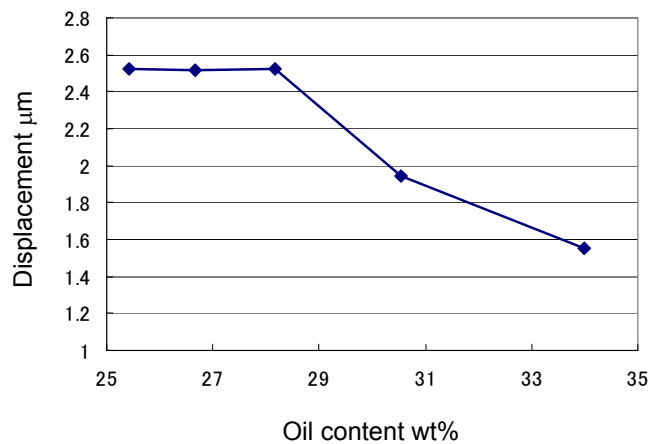


Fig.4-24 Relation between displacement of electrode in direction of electric field and oil content

生じにくくなるものと考えられる。

次に接触面圧の影響を調べるために、上部電極の重量を変えて実験を行った。公称せん断応力測定および電界方向変位測定の結果をそれぞれ図 4-25, 図 4-26 に示す。接触面圧が 70Pa~600Pa と変化しても発生する降伏応力にほとんど変化が生じない。ERG における ER 効果はゲル部分との接触面積に依存し、その接触面積は印加する電界強度に大きく依存する。つまり、この範囲での接触面圧の変化では、ゲル部分との接触面積変化にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。しかしながら、接触面圧が高くなることで極僅かではあるが、公称せん断応力が減少する傾向にある。ERG 表面に高い接触面圧が加わると、電極と粒子が接触したままの状態でも ERG が圧縮される。そのため ERG 内部に密に存在する粒子間の距離がさらに狭まる。この状態で電界を印加しても粒子の沈みこむ量は小さく、またそれに対するゲルの盛り上がり作用も小さくなる。つまり面圧を上げることで電界印加時には、面圧の低い状態に比べ、電極がゲル部分と接する割合が減少するため、

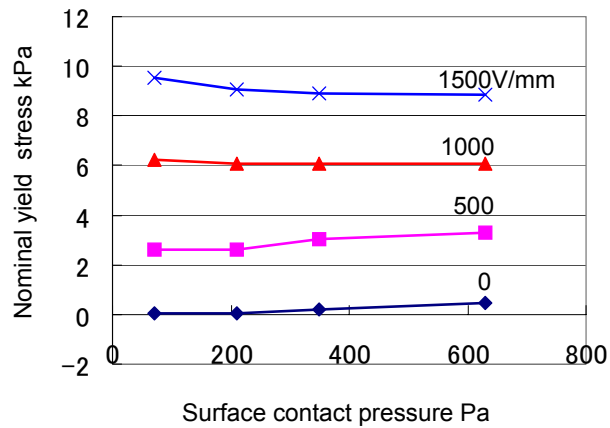


Fig.4-25 Relation between contact pressure and nominal yield stress

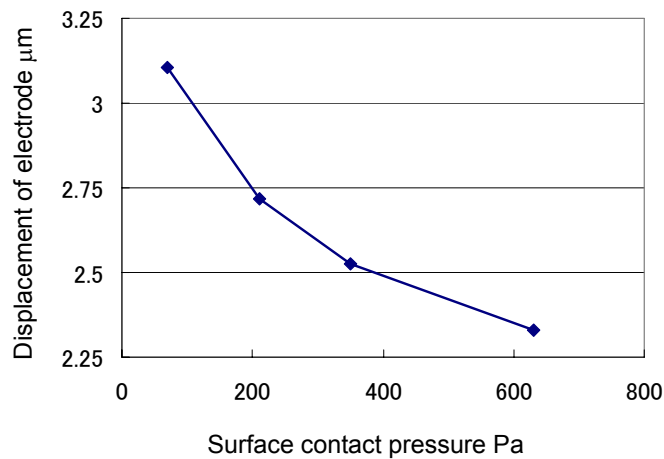


Fig.4-26 Relation between displacement of electrode in direction of electric field and contact pressure

応力が低下するのではないかと考えられる。無電場時に発生する降伏応力値が接触面圧を高くすることで若干上昇しているが、これは垂直抗力が増えたことにより最大静止摩擦力が大きくなったためと考えられる。次に電界方向変位に関してみると、面圧を高くすることで収縮量が約 $1\ \mu\text{m}$ 減少していることが確認される。これは、面圧を高くすることで初期歪みが大きくなったためであると考えられる。

#### 4-5 結言

ERG における印加電界強度とせん断力の関係は、従来の ER 効果による粒子鎖形成論では説明が困難であることがわかった。そこで本章では、ERG の応力発生のメカニズムを解明するために、シート状の ERG における基本特性を実験的に解析し、ERG 表面と電極の接触面における現象を観察した。得られた結果を以下に

要約する.

- (1) ERG は電界強度に応じて, せん断力が著しく変化する. この時, 微小せん断変位においては弾性的特性を示し, 変位が大きくなると電極と ERG の間で滑りが生じてせん断応力に降伏現象が認められる.
- (2) ERG におけるせん断力発生メカニズムは, 従来の ER 流体における粒子鎖形成論に基づくものとは異なり, ERG と電極面の接触部分における摩擦特性が電界強度に応じて変化することに起因する.
- (3) 電界印加時の摩擦特性の変化は, 電極に対するゲル部分の接触面積の変化に関係する. ゲル部分の接触面積の変化は電界印加により ER 粒子がゲル内部へ沈み込む現象により生ずる.
- (4) シリコーンゲル自体には電界を印加による公称せん断応力変化は生じず, 電界印加による公称せん断応力変化は ERG 特有の現象である.
- (5) ERG の表面状態は含有するオイル量により異なり, オイル量を少なくすることでゲル表面に ER 粒子が占める割合が大きくなる. 含有オイル量を少なくすることで電界によるせん断力の変化を可逆的にかつ高い応答性をもって得ることができる.

以上より, 第3章および本章から, ERG におけるせん断応力の発生メカニズムが実験的に明らかとなった.

## 第5章 ERGの精密位置固定機構への応用

### 5-1 序言

3章で述べた基本特性解析の結果、ERGは電界に応じて発生するせん断力の変化幅が大きく、また再現性、高い耐久性を示すことから、メカトロニクスデバイスへの応用可能性が高いことが明らかとなった。そこで応用分野の一つである精密位置決めに焦点をあて、ERGが示す降伏応力を固定力として捉え、その特性を応用したエアスライド位置固定機構を考案・試作しその基本性能を評価した。

### 5-2 精密位置固定機構の現状

空気静圧案内であるエアスライドは、移動体が周囲圧よりも高い圧力をもつ気体の膜によって保持され、非接触状態で軌道上を移動するのが大きな特徴である。空気静圧案内が接触型の直動転がり案内やすべり案内に比べ高い精度を実現できる理由は、第一に移動体が圧縮空気の膜を介し案内面上を非接触で移動することから案内面のある程度の不整や誤差は空気膜によって平均化されてしまい、移動体の運動精度に直接影響しないことである。第二に非接触であるから、スティックスリップは生じない、摺動摩擦抵抗もほぼゼロに等しい。したがって駆動側からの移動命令に忠実にしかもすばやく応答することができる。さらに潤滑油を全く用いないことから、周囲環境を汚す恐れもない。空気静圧案内にももちろん、欠点はある。空気摩擦抵抗および剛性が絶対的に低いため、振動減衰性能が低く、このため位置決め位置でテーブルが不安定な微小変位を起こしやすい。また具合の悪いことに剛性を高めようとしてあまり欲張った設計をするとニューマチックハンマと呼ばれる自励振動を発生する。さらに、空気供給経路の曲がり部分や軸受すきま内のすきま変化部分で乱流が発生すると、テーブルにナノオーダの微小振動が発生して、これが例えば、エアスライドを用いた超精密加工機による加工部品の表面に縞模様ができるなど問題になる。

このような微小変位や微小振動を防止するために、従来はメカニカルなクランプ機構が導入されている。メカニカルクランプは、通常、ソレノイド(電磁石)による駆動が主で、ブレーキシューを押しつけて移動体を固定する構造となっている。また、サーボモータによるサーボロックをかけて位置を固定する方式もあるが、この場合サーボ系の振動が影響して、サブミクロンオーダで微小振動はさけられない。位置決めフィードバックにより一定の位置に静止させようとするわけだが、電気的なノイズやセンサの位置決め分解能などの影響で、サブミクロンオーダの微小振動は避けられない。超精密位置決めでは、静止時に、サーボによらず、テーブルを固定したい。しかしメカニカルクランプを用いると、大きなクランプ力をテーブルに与えることになり、その結果テーブルをクランプした瞬間に微小変位が生じてしまう。その他にも、クランプ装置を用いることで装置系が大型化してしまうといった欠点もある。この



ような問題から、従来のメカニカルクランプ機構に代わる、小型、高精度で低固定力な特性を有する新たなクランプ機構の開発が求められている。

ERG は、これに電界を印加することでせん断方向にのみ大きな抵抗力を発生する性質を有している。本研究では、このようなERGの特性をテーブルの固定機構に適用することにより、クランプ時のテーブル変位が少ない高精度なクランプ機構を実現できるものと考えた。また ERG は 2 枚の電極に挟みこむだけの非常に簡単な機構でせん断応力を発生できるためクランプ装置の小型化も可能である。

### 5-3 ER 効果(ERG 効果)を応用した可変固定力発生機構の考案

ERG は、これに電界を印加することにより降伏力およびせん断力が発生し、印加電界を変化させることにより発生する降伏力が大きく変化することは、3 章および 4 章で述べた。この特性を応用し、電界により固定力が制御可能な可変固定力発生機構を考案した。ERG を応用した可変固定力発生機構を図 5-1 に示す。以後、この可変固定力発生機構を「ERG 固定機構」と呼ぶことにする。ERG 固定機構は、これを取り付けるテーブルが直線運動することと、可能な限り簡単な機構にしたいことから、平行平板の構造を適用したもので、2枚の平板固定電極で、ERG シートを電極表面に成形した移動電極を挟む形で構成される。移動電極は ERG シートを介し平板固定電極と接触しながらスライド可能な構造になっている。移動電極を陽極、平板固定電極を陰極として、ERG シートに電界を印加することによって固定電極と ERG シート界面でせん断力が発生する。これにより直動する移動電極は ERG シートを介して平板固定電極に固定され、降伏力を超えない範囲で衝撃的な外力が作用してもスライダの案内方向に滑りは生じない。ERG 固定機構の特徴はメカニカルクランプのように圧縮力を作用させ固定する機構とは異なり、ER 効果により生じる粘着作用による固定なので固定対象に作用する力は非常に小さい。つまり、固定時に力が作用しないゼロクランプであるため、固定対象の微小変位はほとんど生じないと考えられる。また、固定時に瞬間的に外力が作用した場合、ERG の弾性変

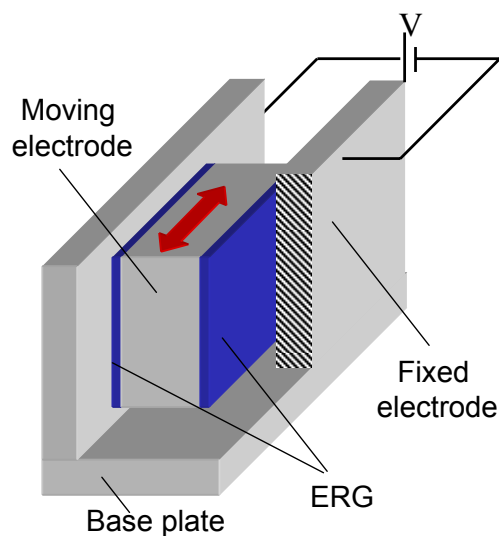


Fig.5-1 Basic structure of ERG clasper

形による反発力が生じ、素早く元の位置に戻る。ただし、連続的な外力が移動電極に常に作用するような場合は ERG の弾性変形分の位置移動がもちろん生じる。しかしながら、これはどのようなクランプを用いた場合でも起こる問題であり、そのような環境下でエアスライドの精密位置固定が行われることはない。

#### 5-4 エアスライド用位置固定機構の構造

試作したエアスライドの構造を図 5-2 及び写真を図 5-3 に示す。エアスライドは両端支持型のガイド部と口型のスライダ部からなる。スライダ部は空気静圧軸受となっておりガイドに沿って直線運動できる構造になっている。ERG 固定機構を構成する移動電極は、スライダ部の下面にねじ止めされている。移動電極の案内方向対

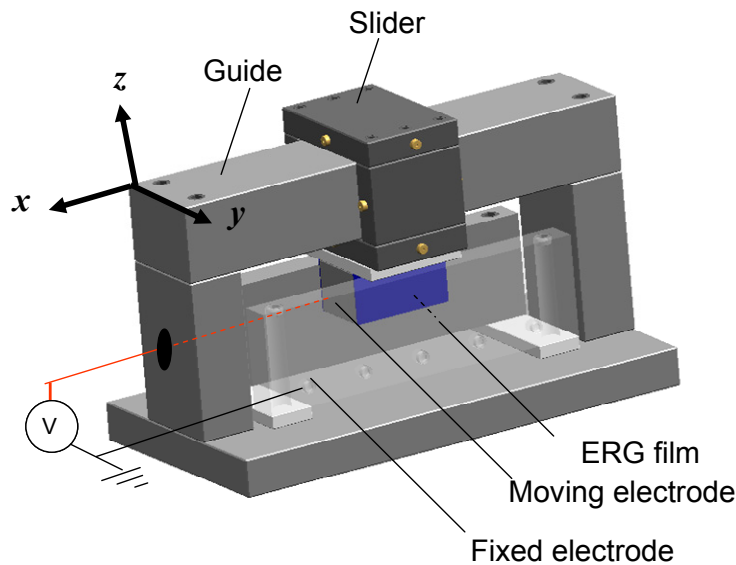


Fig.5-2 Aero static slider with ERG clasper

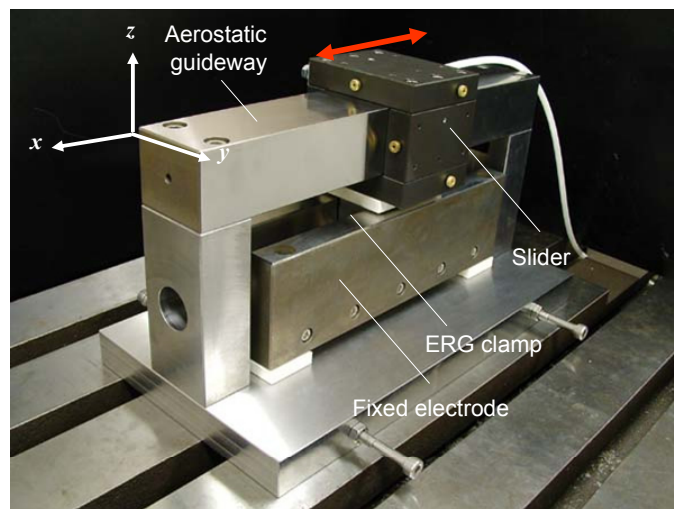


Fig.5-3 Appearance of Air-slider with ERG clasper

して直角方向の両面に ERG シートが成形されており、その ERG シートと接するように、平板固定電極がベースに取り付けられている。特に、スライダ部の可動全域において、移動電極に成形された ERG シートは固定電極と接触するようにアライメントを調整してある。

ERG シートが移動電極表面から剥離およびスリップすることを防ぐために、移動電極の ERG 成形面には、その移動方向と直角方向にあらかじめ溝加工が施してある。これにより、成形された ERG シートが移動電極より剥離やスリップを生じることはない。ERG シートは、別に準備した ERG 封入用のジグを用いて、移動電極面上に均等膜厚で成形することができる。ここで使用した ERG は、第3章でその特性を述べた 5A03 タイプを用いている。

スライダ下部に取り付けられた移動電極を陽極、ベースに取り付けられた2枚の平板固定電極を陰極に帯電することで、ERG に降伏応力が発生し移動電極とこれに結合されたスライダ部を固定することができる。

両電極間は非導電性のセラミックスで絶縁されている。ERG に効果的に電界を加えることのできる電極の面積は、移動電極の両面合わせて 7000mm<sup>2</sup> (高さ 50mm × 奥行き 70mm × 2 面) である。また電極間隔 (移動電極と固定電極の隙間) すなわち ERG シート厚は 0.5mm とした。

## 5-5 スライダ固定力の測定

### 5-5-1 固定力測定装置の概要および測定方法

固定力測定装置を図 5-4 に、その外観を図 5-5 に示す。スライダ上部にアクリル製のテーブルを固定し、これに駆動ステージをロードセルを介して接続した。ここで、ロードセルはいもネジにより駆動ステージに結合し、ロードセルとアクリル製テーブルは測定値を安定させる目的で接着してある。駆動ステージは、これに取り付けたマイクロメータによって位置決めされる。本測定では、マイクロメータの送りネジ部分に低速回転モータと糸によって一定速度の回転を与えることにより、駆動ステージとこれに接続されたアクリル製テーブルを一定速度で移動させた。この時の送り速度は 20  $\mu$  m/s とした。

高圧電源より ERG 固定機構に電場を印加した状態で、モータのスイッチを入れアクリル製テーブルを一定速度でスライドさせる。この時のアクリルテーブルの変位量を渦電流式変位計から PC へ入力し、せん断力を、ロードセルを介し動ひずみ計から PC へ入力し読み取っている。電場強度は 250V/mm 毎に 0V/mm から 1500V/mm まで変化させ測定を行った。

本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

< 実験装置 >

- ERG
  - 粒子径: 約 16  $\mu$  m
  - 粒子濃度: 50wt%
  - 分散溶媒: L-45 (100cSt)
  - 藤倉化成 (株)
  - 日本ユニカー (株) 提供
- エアスライド
  - 東芝機械 (株) 提供

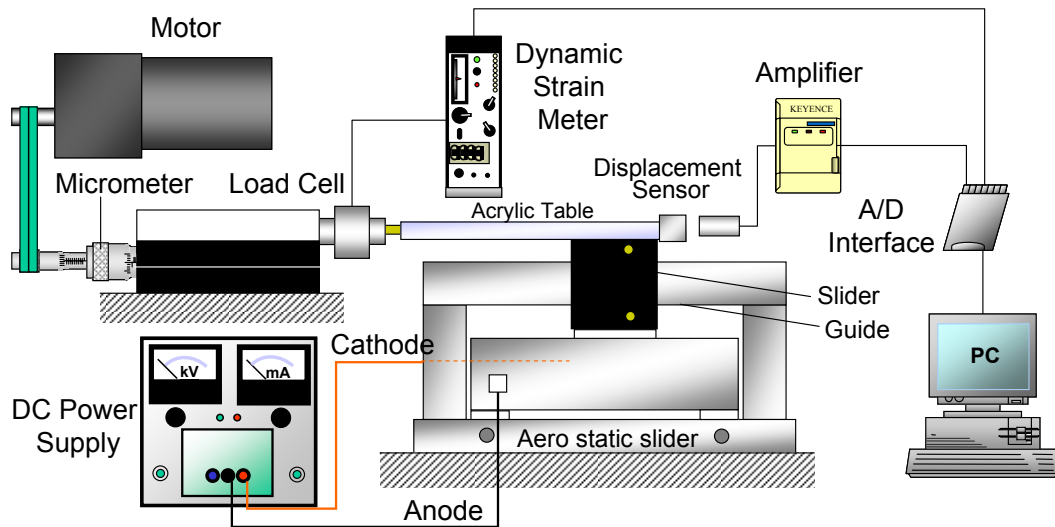


Fig.5-4 Schematic diagram of clamp test stand

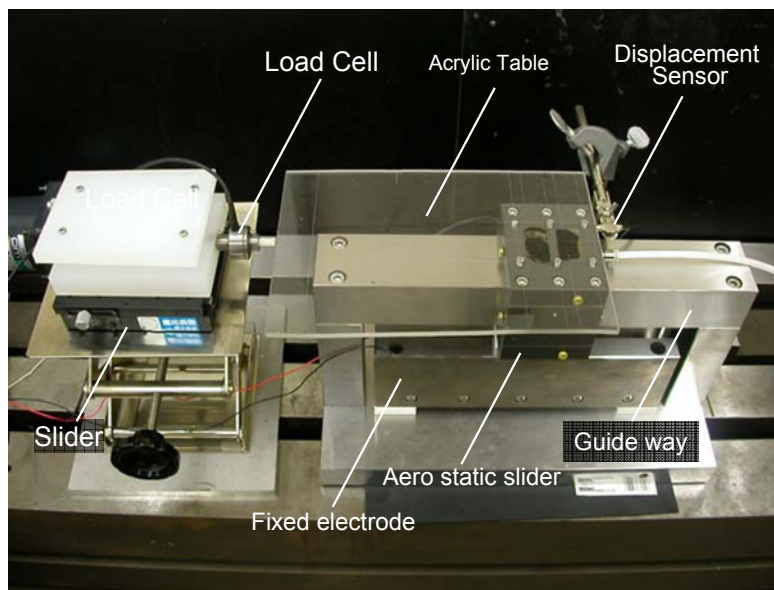


Fig.5-5 Appearance of experimental setup for clamp test

- |               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| ・ 低速回転モータ     | オリエンタルモータ(株)<br>MODEL 5GN25K   |
| ・ 高圧電源        | 松定プレシジョン(株)<br>MODEL HJPW-5P06 |
| ・ ロードセル       | KYOWA(株)<br>MODEL LU-20KSB34D  |
| ・ A/D インタフェース | (株)KEYENCE<br>MODEL NR-110     |
| <測定機器>        |                                |
| ・ 渦電流式変位計     | (株)KEYENCE                     |
| (電源)          | MODEL KZ-U3                    |
| (コントロールユニット)  | MODEL EX-201                   |
| (ヘッド)         | MODEL EX-305                   |
| ・ 動歪み計        | KYOWA(株)<br>MODEL DPM-613A     |

### 5-5-2 電界強度とスライダ固定力の関係

ERG シートに電界を印加した状態で、テーブルに作用するスライド方向の固定力を測定した。ここでいう固定力とは、スライダに外力が作用し、スライダに変位が生じた場合に発生する ERG の抵抗力のことである。測定結果を図 5-6 に示す。

電界強度が高まるに従いテーブルに作用する固定力は大きくなることを確認できる。電界強度 1500V/mm では最大 15N を超える固定力が得られている。つまり、電界の調節によりスライダの固定力を変化させることが可能である。なお、無電場時に約 0.3N の固定力が測定されているが、これは、ERG シートと平板固定電極間の接触に起因する滑り摩擦力によるものである。

図 5-6 で、降伏点まではスライダの移動量に対して固定力が線形的に変化して

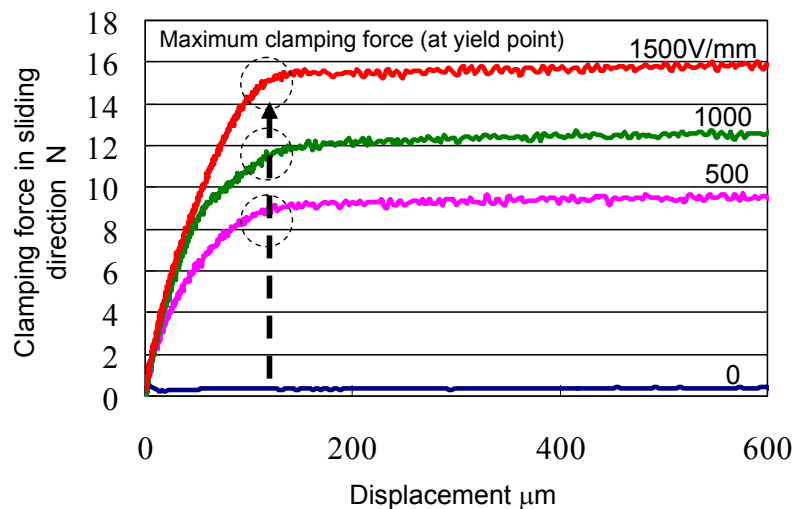


Fig.5-6 Clamping force of the ERG clasper

いる。ここで、スライダの移動量に対する発生固定力の傾きをクランプ剛性と定義すると、ERGに印加する電界強度を高くすることで、クランプ剛性が高くなることが確認できる。ERGに1.5kV/mmの電界を印加することにより、約0.13N/ $\mu\text{m}$ のクランプ剛性を得ることができる。つまり、スライド方向のクランプ剛性は印加する電界強度により調整可能であることが明らかとなった。

3章では厚さ0.5mmのERGで、高精度電極を用いた場合、電界強度1500V/mm時には4000Paを超える応力発生が確認された。この値にもとづいて試作装置の最大固定力を見積ると、その値は約28Nとなる。しかしながら、試作装置で得られる最大固定力はその約1/2であり、期待された固定力が得られていない。その理由として、ERG固定装置部分の組み立て精度の問題が挙げられる。良好なERG効果を得るためには、移動電極に貼り付けられたERGシート面と平板固定電極面は、移動電極の全ストロークに渡って一定の接触状態が保たれる必要がある。すなわち、移動電極と平板固定電極の平行度誤差と、両者のスライダ移動軸中心に対するアライメント誤差が生ずると、ERGシートと平板固定電極面間の接触状態が不良となり、得られるERG効果も減少することが予想される。本装置は試作機であるが、実用化設計を行う際には移動側と固定側両電極部のアライメントがとりやすい構造とする必要がある。

以上のように、試作機によって得られた最大固定力は設計値の約1/2の値となったが、エアスライドの不安定な揺動や微小振動を抑制するには十分な値であると考えられ、開発したERG固定装置の有効性が確認できた。

## 5-6 防振ダンパとしての応用

### 5-6-1 動コンプライアンス測定装置の概要および測定方法

テーブルシステムにサーボからの振動や設置床振動などの動的外力や動的変位が作用すると、テーブルにはこれに応じて動的な変位が生じ、これがテーブルを組み込んでいる加工機や測定機の加工誤差や測定誤差の原因となる。油潤滑方式の滑り案内においては、油膜の摩擦減衰効果によってテーブルの動的変位はかなり抑制されるが、空気潤滑の場合はこれが期待できない。ERG固定装置が発生するテーブル移動方向の可変抵抗力は、上記のような動的外力や動的変位に起因するテーブルの振動抑制に対しても効果的に作用するものと考えられる。そこで本研究では、以下に述べるような方法で、ERG固定機構がテーブルの動コンプライアンスに及ぼす効果について測定した。

位置決め装置の送りには一般的にボールネジが使われるが、今回試作したエアスライドには送り機構がついていない。そこでボールネジに代えて仮想的にテーブル送り方向の剛性を与えるため、スライダ部とガイド部を板バネによって連結した。動コンプライアンス測定装置を図5-7に、その外観を図5-8に示す。本測定では、インパルス応答法により、テーブルの動特性を測定した。まずインパルスハンマによりスライダ移動方向に打撃を加え、そのときの振動振幅を渦電流式変位計により測定し、FFTアナライザによって、伝達関数を求めた。

測定したデータについては、入力と出力の相関関数であるコヒーレンス値が0.9以

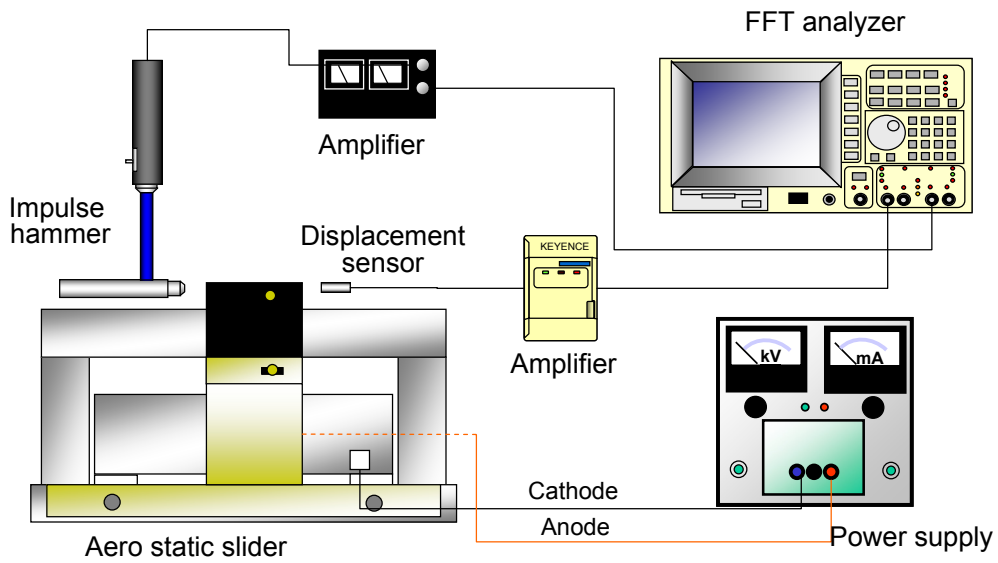


Fig.5-7 Schematic diagram of measurement for dynamic compliance

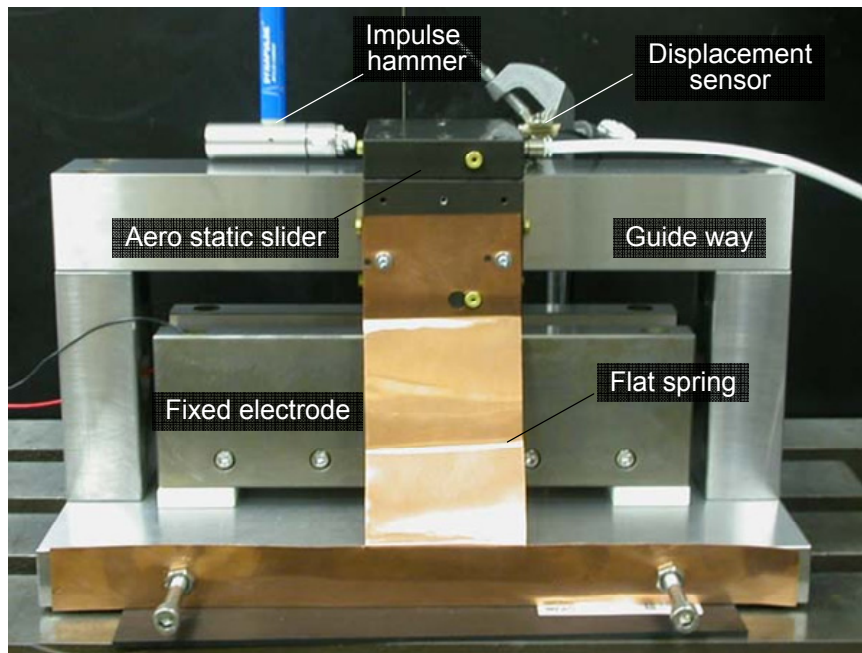


Fig.5-8 Appearance of experimental setup for dynamic test

上のものを用い、値が0.9以下となった場合はこれが0.9以上になるまで再度測定をなおした。

本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

<実験装置>

- |            |  |
|------------|--|
| ・ ERG      | 粒子径:約 16 $\mu$ m<br>粒子濃度:50wt%<br>分散溶媒:L-45 (100cSt)<br>藤倉化成(株)<br>日本ユニカー(株) |
| ・ エアスライダ   | 東芝機械(株)  |
| ・ 高圧電源     | 松定プレジジョン(株)<br>MODEL HJPW-5P06   |
| ・ ロードセル    | KYOWA(株)<br>MODEL LU-20KSB34D  |
| ・ インパルスハンマ |  |
| ・ AD カード   | (株)KEYENCE<br>MODEL NR-110   |

<測定機器>

- |                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| ・ 渦電流式変位計<br>(電源) | (株)KEYENCE<br>MODEL KZ-U3    |
| (コントロールユニット)      | MODEL EX-201                 |
| (ヘッド)             | MODEL EX-305                 |
| ・ 動歪み計            | KYOWA(株)<br>MODEL DPM-613A   |
| ・ 記録装置            | ADVANTEST(株)<br>MODEL R9211B |
| (FFT)             |                              |

### 5-6-2 電界強度と動コンプライアンスの関係

各電界強度に対する動コンプライアンスの測定結果を図 5-9 に示す。無電場時には共振点で 23  $\mu$  m/N あったコンプライアンス値が電界強度を増すことにより徐々に小さくなることを確認できる。電界強度 1500V/mm を印加することによりコンプライアンス値は 10  $\mu$  m/N 以下に抑えられる。つまり、印加する電界強度を高くすることにより、減衰係数比  $\zeta$  が大きくなり、共振点におけるコンプライアンス値を下げるのが可能である。電界強度を高めるに従い、若干ではあるが共振点が右にずれる傾向が認められる。これは、電界強度を高めるとクランプ剛性が大きくなり、見かけ上のスライダ部の剛性が大きくなることにより、共振周波数が高くなったと考えられる。ERG は電界を印加することによりクランプ剛性が高くなることは前節の結果より確認されている。また無電場時において 60Hz に2次の共振モードが存在することが確認できる。これは、スライダ部ではなくガイド部における共振モードであると考えられる。次に周波数に対する動コンプライアンスについて見てみると、55Hz までは電界を印加することにより動コンプライアンスを下げるのが可能であるが、55Hz~75Hz



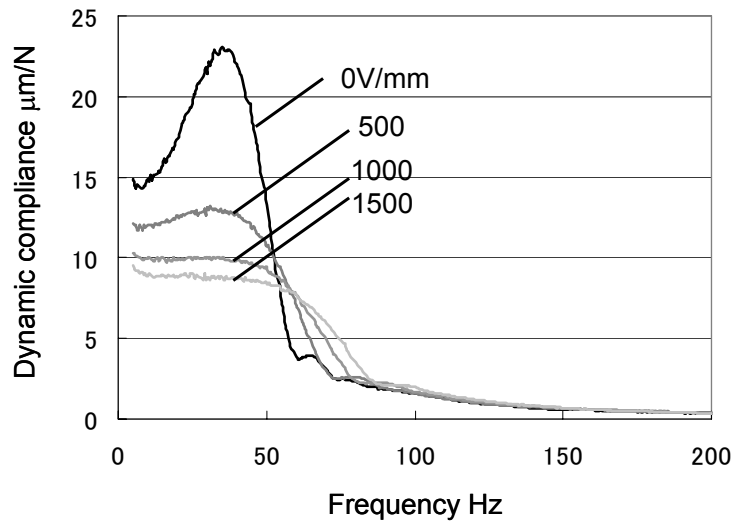


Fig. 5-9 Dynamic characteristics of slider

までは逆に電界を印加することで動コンプライアンス値が大きくなることが確認できる。75Hz以上ではほとんど電界印加による影響は見られないことが確認できる。

以上述べたように、ERG固定機構に印加する電界強度を調節することによりこれを取り付けたエアスライドの送り方向の動コンプライアンスを必要に応じて調整することが可能であって、開発したERG固定機構は、テーブルシステムの防振ダンパ要素としても有効であることが明らかとなった。

## 5-7 電場印加に伴うスライダの微小変位

### 5-7-1 変位測定実験装置の概要と測定方法

ERGは電界を印加することによって、電界方向に $1\sim 3\mu\text{m}$ の収縮を起こすことは4章で述べた。そこでERG固定装置を組み込んだエアスライドが電界を印加することにより、3軸方向にどのような変位を生ずるか調べてみた。測定する3軸を図5-2に示すように定義した。すなわち $x$ 軸は案内方向、 $y$ 軸は電界方向、 $z$ 軸はエアスライドの垂直方向とした。 $x$ 軸方向の変位測定実験装置を図5-10に示す。

ERGに印加する電界強度を $0\text{V}/\text{mm}\sim 1500\text{V}/\text{mm}$ まで $500\text{V}/\text{mm}$ 単位でステップ状に上げていき、それに応じて発生するスライダ部の $xyz$ 軸方向の変位を測定した。変位測定には静電容量型変位計(分解能: $1\text{nm}$ )を用いた。

測定に用いた静電容量型変位計について以下に示す。

#### <測定機器>

- |                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| ・ 静電容量型非接触微小変位計 | 日本 ADE(株)              |
| (センサヘッド)        | MODEL ADE-2805         |
| (コントロールユニット)    | MODEL Micro Sense 4830 |

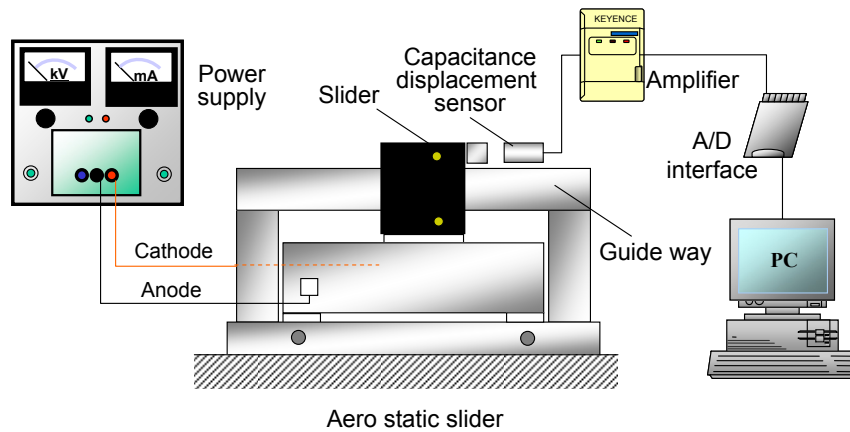


Fig.5-10 Schematic diagram of measurement for error movement due to clamping

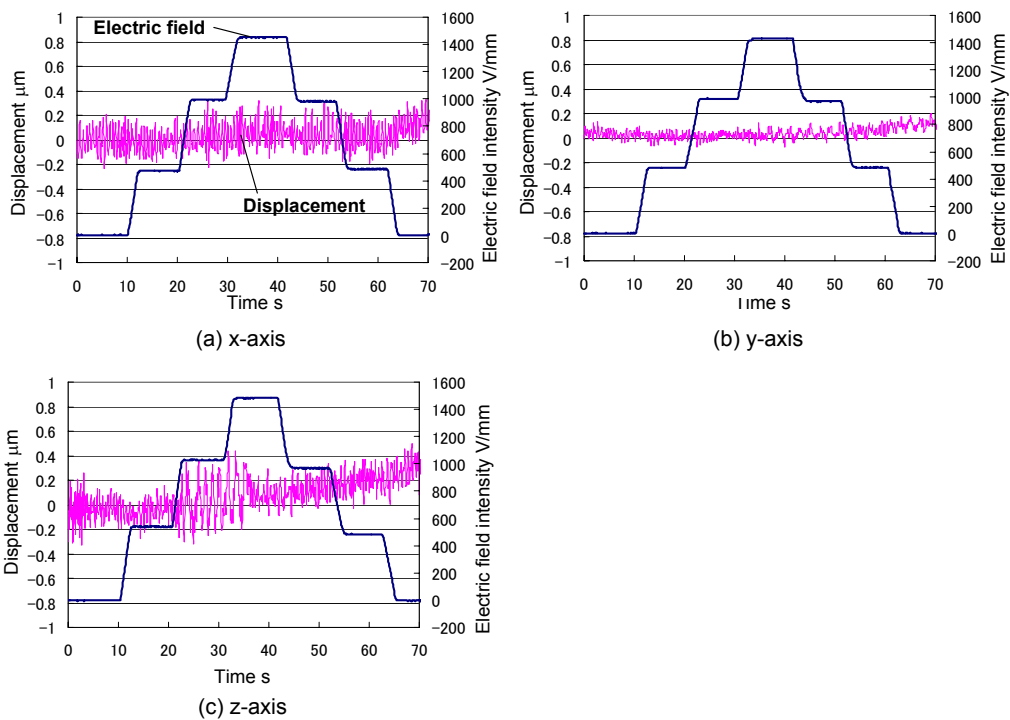


Fig. 5-11 Error movement of slider in clamping

### 5-7-2 電場印加と微小スライダ変位の関係

印加電圧に対するスライダ部の微小変位を測定した結果を図 5-11 に示す. xyz 軸, 全ての方向に対して, ステップ状の電圧印加に応じた変位が生じていないことがわかる. つまり, ERG 固定機構に電界印加しスライダの固定を行う際に, スライダには  $0.2\mu\text{m}$  以上の変位は生じないことが明らかとなった. 電界を印加することにより ERG による収縮現象が生じるため, 電界方向であるy軸では  $\mu$  オーダーの変動が生じると考えていたが, その変動も起きていない. 電界方向で変動が生じなかつ

た理由として、ERG 固定装置の移動電極には、左右対称に ERG シートが取り付けられているため、電界に対する収缩量は左右でキャンセルされ、スライダ部に変位が生じなかったと考えられる。

図 5-11 で、全軸方向において  $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$  程度の振幅で小さな振動が絶えず生じていることが確認できる。この振動はクランプに伴い生じた現象ではなく、床振動などの外的影響が原因である。また z 軸において顕著に見られるが、センサーのドリフトや、実験中の温度影響による変位上昇が起きていることも確認できる。

## 5-8 結言

ERG をメカトロニクスデバイスに応用することを考え、応用分野の一つである精密位置決めに焦点をあて、ERG が示す降伏力を固定力として捉え、その特性を応用したエアスライド用位置固定機構を考案・試作しその基本性能を評価した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 試作した ERG 固定機構は印加する電界強度に応じて発生する固定力およびクランプ剛性が変化し、印加する電界を調整することにより、固定特性を調節可能であることが確認された。
- (2) ERG 固定機構に印加する電界強度を調節することにより送り方向の動コンプライアンスを必要に応じて調整することが可能であり、ERG 固定機構は、テーブルシステムの防振ダンパ要素としても有効である。
- (3) ERG 固定機構に電界印加しスライダの固定を行う際に、スライダには  $0.2\ \mu\text{m}$  以上の変位は生じないことが明らかとなった。

以上から、試作した ERG 固定機構は従来のメカニカルクランプの問題であったクランプ時の微小変位が生じず、電界により固定力を調整できる固定機構であることが実験的に確認され、エアスライダなどの精密位置固定機構として有効であることが示された。

## 第6章 ERG の金型用マイクロ研磨パッドへの応用

### 6-1 序言

製品の小型化，高性能化が進むにつれ光学部品に対する品質要求はますます厳しくなり，コスト競争力も強く求められている．そのため，レンズ製造時に用いられる成形金型の加工技術はナノレベルの鏡面加工とともに，加工効率の向上が一層望まれている．超精密金型を製作する際の最終工程である研磨加工は熟練技能者の経験に依存しており，技能に依存することなく，切削・研削加工で得た形状精度を損なわず面粗さを向上させる方法が模索されている．

近年，新しい研磨加工法として電場磁場を利用した加工法が注目されている<sup>69-75)</sup>．これらの場を援用した研磨加工法は FFF (Field-assisted Fine Finishing) と呼ばれており，特に機能性流体を援用した研磨加工法は機械化が容易であることから実用化が期待されている．本研究では，機能性流体の一つである ER 流体をゲル化したゲル構造 ER 流体 (ERG) を用いた新しい研磨加工法を提案した．ERG は電界を印加することにより表面の組織構成が変化して，これにより摩擦特性が変化する機能性材料である．ERG に砥粒を塗布した ERG 研磨パッドを試作し，その加工性能を実験的に解析した．

### 6-2 精密研磨技術の研究事例

精密機器の小型化に伴い，それを構成する部品に対する品質や精度に対する要求は高まっている．特に製造される各部品表面の加工精度は，加工の最終工程である研磨加工に依存する．自動化が難しく，熟練技能者の経験に依存していた研磨加工であるが，近年研磨効率や研磨精度向上を目指して様々な研磨加工技術が開発されている．以下に最近，注目を集めている研磨加工技術を紹介する．

#### メカノケミカル研磨<sup>76)</sup>

メカノケミカル研磨法は砥粒と加工物表面との真実接触面における直接的な固相反応を利用する研磨法で加工物よりも力学的に軟質な砥粒を使用する．軟質な砥粒を利用することで，砥粒の押し込みや引っ掻き作用が生じず，加工変質層の残留が起こらない研磨法である．

メカノケミカル研磨は当初，SiO<sub>2</sub> 砥粒によるサファイヤの無擾乱研磨法として開発され，既に青色 LED 基盤などに使用されるサファイヤウエハの高精度最終研磨プロセスとして定着している．その後，水晶，シリコン，炭化ケイ素，フェライトなどの硬質単結晶や，アルミナ，窒化ケイ素，ジルコニアなどの多結晶セラミックスにも適用され，高機能材料の超平滑・超平坦・無擾乱表面の創成に適した超精密研磨法の一つと言える．

**磁気研磨** <sup>77,78)</sup>

精密加工を行う現場では衛生面に対する要求も高い。そのため、配管内壁に対しても不純物が混入・滞留しないように高精度研磨が必要とされる。磁気研磨法は磁力線が持つ物体透過現象を利用して、研磨を行う技術である。磁力線の透過現象によって、従来技術では加工困難とされる、狭く入り組んだ場所、通常の工具が使用できない箇所などの精密加工を可能にする。

磁性流体は、低表面張力を有する磁気感性機能性流体であり、磁場を利用することにより精密毛細管内を容易に流動できる特徴を持つ。磁気研磨技術は、細長い曲がり細管内面の鏡面仕上げや、コンピュータのアクセスアームの精密エッジ仕上げ加工、航空、宇宙産業の配管系内面や半導体製造用のクリーンパイプ内面の精密仕上げなどに実用されている。

**電解砥粒研磨** <sup>79)</sup>

電解砥粒研磨とは、硝酸ナトリウム水溶液中における  $100\text{mA}/\text{cm}^2$  オーダーの電流密度の電解で生じる不働態膜を利用して研磨を行う。このレベルの電流密度における電流効率はゼロに近く、砥粒の擦過しない凹部はほとんど除去されず凸部だけが選択的に加工される。マイクロな凹部でも加工が進行してしまう電解研磨に比べて、一桁小さい取りしろで済むことから、高能率で高精度の研磨加工が可能となる。電解砥粒研磨では研磨面が算術平均粗さRaで1nm前後まで効率的に研磨可能である。

一般的に砥粒が凸部を選択的に通過する特性は、研磨剤の粘弾性と砥粒の速度に依存する。研磨剤が硬いほど、また砥粒速度が速いほど凸部選択特性は向上する。また、電解砥粒研磨はステンレス、チタン、アルミニウム、タングステンなどの金属材料に適用できることが確認されている。

**複合粒子研磨** <sup>80)</sup>

一般的に、遊離砥粒で加工対象面を鏡面に仕上げる場合、研磨パッドが不可欠となる。しかし、シリコンウェハや液晶ガラスなどの加工対象の大型化に伴い研磨パッドが大型化すると、研磨パッドに起因する多くの問題が生じるようになる。

大型の研磨パッドの高精度な貼り付けや表面管理を行うことは、熟練技能者であっても難しい作業となる。また、研磨パッドは連続使用により目詰まりや切れ味などに劣化が生じ、樹脂のクリープ特性に起因する硬度変化のため、長期の安定性が得られないという問題も生じている。現在ではこの問題を解決する方法として、コンデショニングと呼ばれるダイヤモンド砥石などによるパッド表面の目直しが行われるが、この作業ではパッドの硬度変化は抑えることが出来ない。さらに、工作物の形状精度においても、柔らかい研磨パッドの沈み込みによってエッジ部のダレが大きくなるなども問題も生じている。

複合粒子研磨法は工作物と工具プレートとの間にキャリア粒子と呼ばれる真球状のポリマー微粒子を介在させ、そのキャリア粒子に付着保持された砥粒によって研磨を行う方法である。複合粒子研磨法では研磨パッドを使用せず硬質の工具プレートを使用するため、目詰まりなど研磨パッドに起因する諸問題が解決され、優れた形状精度が実現可能となる。

### 電気泳動砥石研磨<sup>81)</sup>

電気泳動砥石とは、超精密仕上げ用の砥石として開発された人工の砥石である。電気泳動砥石はその製造法に特徴がある。まず、砥粒となる微粒子と、結合材になる高分子を混合する。この砥粒と結合材を混合した溶液に陽極と陰極を繋ぎ電流を流す。この時、高分子は個々の砥粒表面に電気力もしくは水素結合によって保護コロイドを形成する。この一対の砥粒と結合材は、それ自身が電荷を有しており、電場内で個々に電氣的引力が作用して陽極に引き寄せられる。この現象は電気泳動現象と呼ばれる。電極に引き寄せられたものは、単純立方格子を形成するように幾重にも吸着し、電極表面には凝集層が形成される。この凝集層をペレット状に切断し、乾燥させれば電気泳動砥石の完成である。電気泳動現象を利用することにより、均一で密な砥石の作成が可能となる上、電気泳動砥石は砥粒径が数十 $\mu\text{m}$ から数十 $\text{nm}$ の超微粒子まで幅広く選択することが可能となる。

電気泳動砥石では、被加工物にメカノケミカル反応を起こす砥粒が用いられることが多い。そのため、天然砥石よりも効率よく研磨することが可能となる。また、電気泳動砥石はホーニング加工と異なり、鏡面が創生された後でも一定の能率で研磨が可能で、砥石は自生発刃によって目詰まりを防止するので、ドレッシング作業を必要としないという利点もある。

### 6-3 精密研磨技術の現状と問題

精密研磨加工には、研磨液の潤滑効果や粘弾性効果を得られるという理由から遊離砥粒を用いた研磨法が広く利用されている。しかし、遊離砥粒による研磨加工法は、研磨液の濃度や使用回数、温度、pH、分散性、および盤形状、コンディショニングなどの多くの要因が研磨能率や加工精度に影響してくるため、熟練技能者の経験や技能に依存している部分が多い。このような理由から、研磨加工は製造現場において自動化やシステム化が最も遅れている分野だと言われている。また、遊離砥粒を用いた研磨では、パッドやスラリーなどの消耗材負担が大部分を占める<sup>82)</sup>という試算があり、消耗材コストや大量の廃液による環境負荷などの問題も抱えている。遊離砥粒研磨に代わる研磨技術として、最近では固定砥粒による研磨技術が多くの研究開発者の注目を集めている。一般的に、固定砥粒研磨加工の特徴として以下のような利点が挙げられる<sup>83)</sup>。

- ① 平坦性の向上と加工段差の低減
- ② 工程集約と工程管理の簡素化
- ③ 枚葉加工による生産柔軟性の向上
- ④ 環境負荷の低減

このように、固定砥粒研磨技術は研削加工と遊離砥粒による研磨技術を繋ぎ、研磨の自動化や高精度化・高能率化を促進するための有効な技術として位置付けられている。

本研究では、表面に砥粒を分散させた ERG を研磨パッドに使用することで、ERG に印加する電界によって砥粒の把持性を変化させ研磨効率を調整できる新しい固定砥粒研磨加工法を提案した。この研磨加工法が確立することで、印加電界によ

り加工力、研磨効率を調整できることから研磨加工の自動化が期待できる。

#### 6-4 ERG を用いた研磨加工法

ERG は粘着性を持つシリコーンゲルと誘電分極しやすい ER 粒子で構成されており、電場の印加により表面の摩擦特性が変化する材料である。表面の摩擦特性変化を研磨加工に応用することで、研磨加工状態を電界により調整できる ERG 研磨加工法を考案した。ERG 研磨の機構を図 6-1 に示す。ERG 研磨パッドが取り付けられた研磨工具を、ワークピースの加工面に設置する。研磨工具を陽極、ワークピースを陰極として ERG 研磨パッドに電界を印加できる構成としてある。ERG 研磨パッドに印加する電界強度に応じて、ERG 研磨パッドとワークピース表面の摩擦特性が変化するため加工特性も変化すると考えられる。

ERG 表面に適量の砥粒を塗布した研磨パッドを試作した。ERG 研磨パッドの製造方法を以下に述べる。回転研磨ツールの上面部に ERG パッドを成形するために、金属材料で直径 20mm の研磨ツールと ERG パッド成型用の封入装置を用意した。封入装置の断面図および研磨ツールと封入装置の写真を図 6-2、図 6-3 に示す。ERG シートが成形される研磨ツール上面は微細な溝加工が施されており、研磨ツールから成形された ERG シートが剥離しないように工夫してある。封入装置はスペーサ、ケース、カバーから構成されている。まず、研磨ツールにスペーサを取り付け、スペーサの上に金属のケースを取り付ける。研磨ヘッド面よりケース上面は 0.5mm 高いため、凹型の受け部ができる。この受け部に加熱処理前の液体状 ERG を流し込み、受け部が液体状 ERG で満たされたら上からカバーを乗せ、その状態で加熱処理して液体状 ERG をゲル化する。受け部に入れすぎた液状の ERG はケースに施された排液溝を通り、金属カバーの穴から排出される。こうすることで、研磨ツールの上面に平らで均一な 0.5mm 厚の ERG シートを成形することが可能となる。成形された ERG シート上に研磨粒子を適量塗布することで、ERG 研磨パッドができあがる。ERG 表面に GC#600 の砥粒を塗布した際の ERG 研磨パッドの外観と ERG

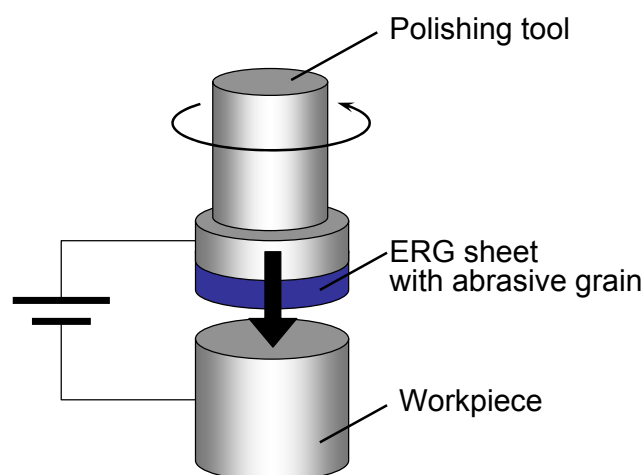


Fig. 6-1 Principle of ERG polishing

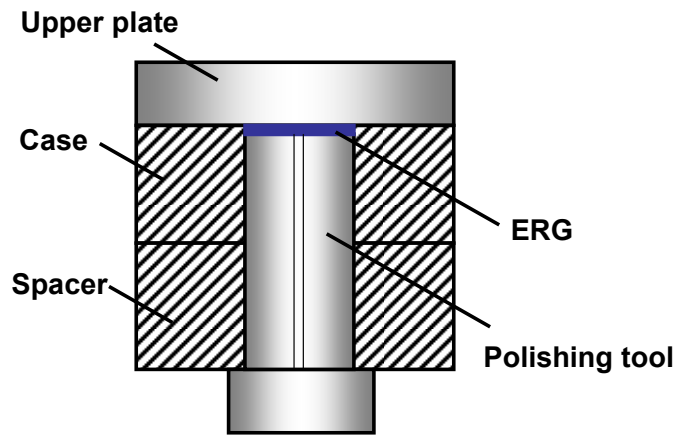


Fig. 6-2 Mold for ERG polishing pad

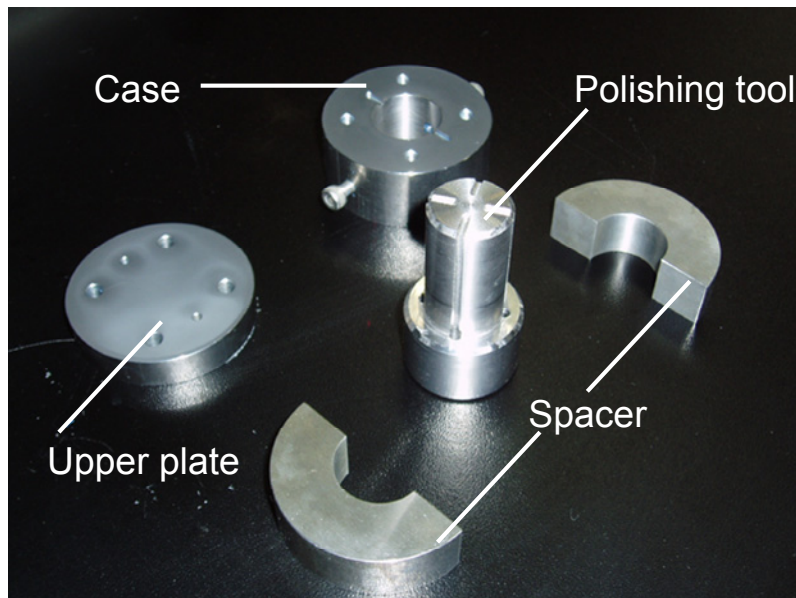


Fig. 6-3 Polishing tool and ERG mold



研磨パッド表面の拡大写真を図 6-4 に示す. 図 6-4 の拡大写真より, ERG 表面に研磨砥粒が適度に分散している状態が確認できる.

ERG 研磨パッドによる研磨加工の特徴として, 無電場時には, ERG 表面の摩擦抵抗が低いために砥粒はワーク面および ERG 表面を滑りながら運動することで遊離砥粒を用いた研磨加工になると考えられる. 一方, ERG 研磨パッドに電場を印加することによって, ERG 表面が粘着質に変化するため砥粒の把持性を高めると考えられるので, 固定砥粒に近い研磨になると予想される.

### 6-5 ERG 研磨のメカニズム

ERG 研磨パッドの電場の有無による変化を調べるために, ERG 研磨パッドの上面に導電性の ITO 膜を塗布したガラス電極をのせ表面観察を行った. ERG 研磨パッドに使用した砥粒は GC#600 である. 図 6-5 に ERG 研磨パッドの電場印加に伴う表面状態変化を示す. ERG 研磨パッドに電場を印加することで, ERG 単体の時と同様 ER 効果が発生し, ERG 研磨パッドとガラス電極が粘着する様子が確認できる. また, 粘着面積は電界強度に比例して大きくなることが確認された. 砥粒が ERG 表面に適度に分散している箇所では, 電場の印加により砥粒がゲル部分に囲まれていることが確認できる. しかしながら, 砥粒が密集して存在している箇所では, 電場印加によるガラス電極への粘着現象は生じない. ただし, ERG 表面では ER 効果が生じているはずであるので, 砥粒と ERG 表面で粘着現象が生じていると考えられる. つまり, ゲルの粘着作用により砥粒が ERG シートに固定されると考えられる.

ERG 研磨パッド表面の観察結果より, 推定される ERG 研磨のメカニズムを図 6-6 に示す. 電場を印加していない場合, 表面には滑り特性のよい ER 粒子が多く存在するため, 砥粒は固定されることなく工作物と ERG の隙間で滑りながら動く. そのため, 遊離砥粒による研磨加工のように, 砥粒が自由に運動する研磨加工となり, 研磨効率は低いと考えられる. 電場を印加することで, 誘電分極した ER 粒子は互いに引き合い ERG 内部に凝集する動きが起こる. そのため, 表面に突出していた粒子は内部に沈みこみ, その一方で粘着質のゲルが表面に出現する現象が生じる. 砥粒とゲル表面が粘着することで砥粒はゲルにやわらかく保持され, 固定砥粒によ

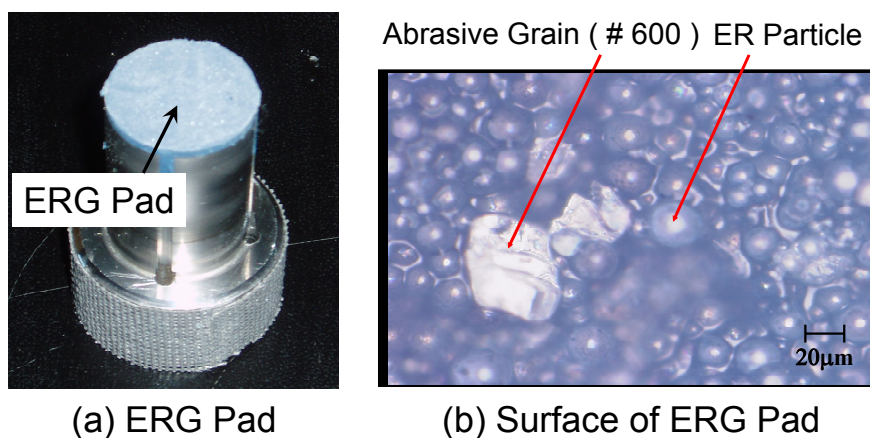


Fig.6-4 Structure of ERG Pad

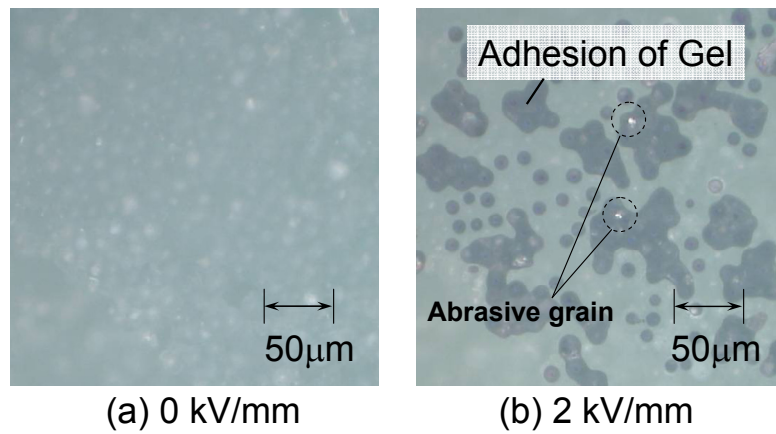


Fig. 6-5 Observation at boundary between the ERG pad and the glass electrode

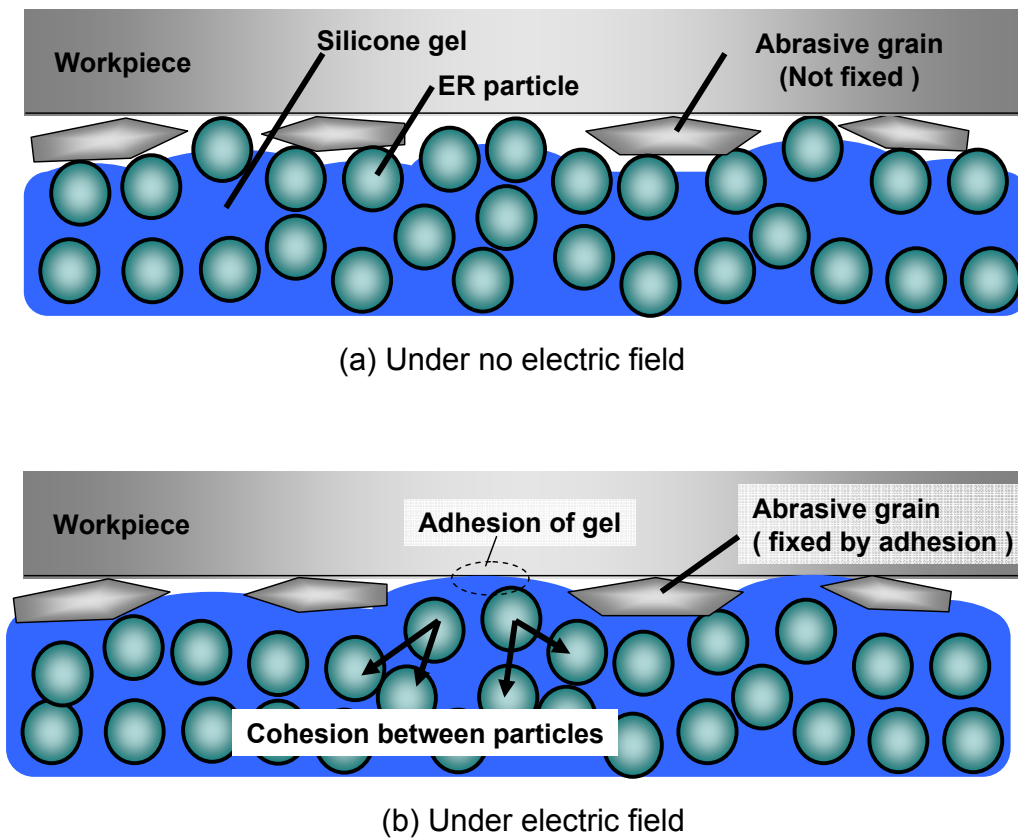


Fig. 6-6 Estimated mechanism of ERG polishing

る研磨加工法になるため研磨効率が向上すると考えられる。また、ゲルによる保持であるため、研磨回転動作の状況に応じて砥粒はある程度回転・移動が可能であると推測される。

## 6-6 供試材および使用した砥粒

本研究では、樹脂レンズ用の金型表面の高精度研磨を行うことを目的とする。一般的に樹脂レンズ用金型には SUS420 のステンレス鋼が用いられる。SUS420 はマルテンサイト系のステンレス鋼で、焼入れ硬化されている。特徴として、強度、硬度、耐食性、対磨耗性に優れる素材で、シャフト、ベアリング、刃物などにも使用されている。そこで、本研究で使用する研磨ワークピースは SUS420 ステンレス鋼とした。ワークピースの形状は直径 20mm の円柱で、研磨前の初期粗さが算術平均粗さ Ra で約 50nm まで研削されているものを使用する。

使用する研磨砥粒は GC (緑色炭化ケイ素) 砥粒、ダイヤモンド砥粒、WA (白色アルミナ) 砥粒の 3 種類とした。GC やダイヤモンド砥粒は砥粒の硬度が高く、一般的に超硬質金属を研磨する際に使用される。WA は CG やダイヤモンド砥粒に比べ硬度が低いため、深い研磨傷を付け難いという特徴を持つので、最終的な研磨を行う際に使用される。そこで、本研究における研磨プロセスとして、始めに硬度の高い GC やダイヤモンド砥粒で研磨を行い、仕上げとして WA を使用することにする。

まず、ダイヤモンド砥粒に比べて安価に手に入る GC でワークピースを研磨した後、最も硬い砥粒であるダイヤモンド砥粒をスラリーとして用い、遊離砥粒研磨を行う。そして、柔らかい WA のスラリーを用いた遊離砥粒研磨によって強い研磨傷を付けずにワークピースを仕上げる。

砥粒の番手は GC の #600, #1200, #2000, ダイヤモンド砥粒の #4000, WA の #8000 を用意した。表 6-1 に JIS 微粉粒度分布表を示す。表 6-1 より、番手が #800 以降の D50 以上にある研磨粒子は ER 粒子よりも平均の粒子径が小さくなることがわかる。

## 6-7 ERG 研磨パッドの特性

### 6-7-1 研磨実験装置

ERG 研磨パッドによる研磨実験装置を図 6-7 に外観を図 6-8 に示す。ワークピースを絶縁性の円筒ケースに入れ、ケース内でワークピースが動かないように側面からねじで固定する。ワークピースは高さ 20mm, 直径 20mm の円柱形のステンレス鋼 (SUS420) で、表面の平均粗さは Ra50nm である。GC#600 が塗布された 0.5mm 厚の ERG 研磨パッド (φ20mm) が取り付けられた研磨工具を円筒ケースに入れ、ワークピースの上に乗せる。この研磨工具を、ベルトを介しモータ駆動により回転させることでワークピース表面の研磨を行う。なお、回転速度は  $50\text{min}^{-1}$  とした。ワークピースを陽極、研磨ヘッドを陰極とし ERG 研磨パッドに電界を印加することが可能である。研磨時間は 180min とし、20min 毎にレーザー顕微鏡でワークの中央部と外周部の表面粗さを計測した。

また、研磨装置の下面にはトルク測定器が設置されており、ERG 研磨パッドから伝達される回転トルクを測定することができる。

Table 6-1 Grain size distribution

Grain number	Grain size $\phi$ $\mu\text{m}$		
	Cumulative height 3% (D3 finer)	Cumulative height 50% (D50)	Cumulative height 94% (D94 coarser)
#240	103.0	57.0 $\pm$ 3.0	40.0
#280	87.0	48.0 $\pm$ 3.0	33.0
#320	74.0	40.0 $\pm$ 2.5	27.0
#360	66.0	35.0 $\pm$ 2.0	23.0
#400	58.0	30.0 $\pm$ 2.0	20.0
#500	50.0	25.0 $\pm$ 2.0	16.0
#600	43.0	20.0 $\pm$ 1.5	13.0
#700	37.0	17.0 $\pm$ 1.3	11.0
#800	31.0	14.0 $\pm$ 1.0	9.0
#1000	27.0	11.5 $\pm$ 1.0	7.0
#1200	23.0	9.5 $\pm$ 0.8	5.5
#1500	20.0	8.0 $\pm$ 0.6	4.5
#2000	17.0	6.7 $\pm$ 0.6	4.0
#2500	14.0	5.5 $\pm$ 0.5	3.0
#3000	11.0	4.0 $\pm$ 0.5	2.0
#4000	8.0	3.0 $\pm$ 0.4	1.3
#6000	5.0	2.0 $\pm$ 0.4	0.8
#8000	3.5	1.2 $\pm$ 0.3	0.6

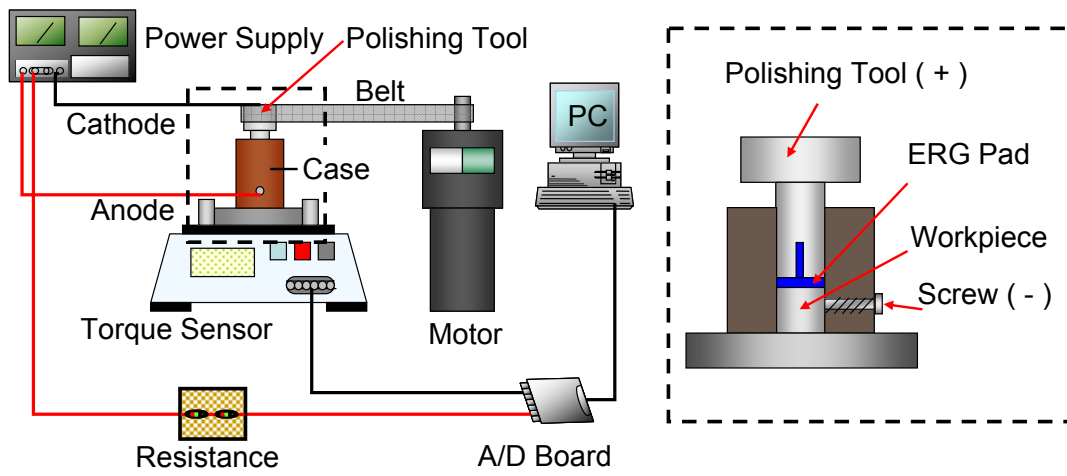


Fig. 6-7 Schematic diagram of experimental setup for ERG polishing

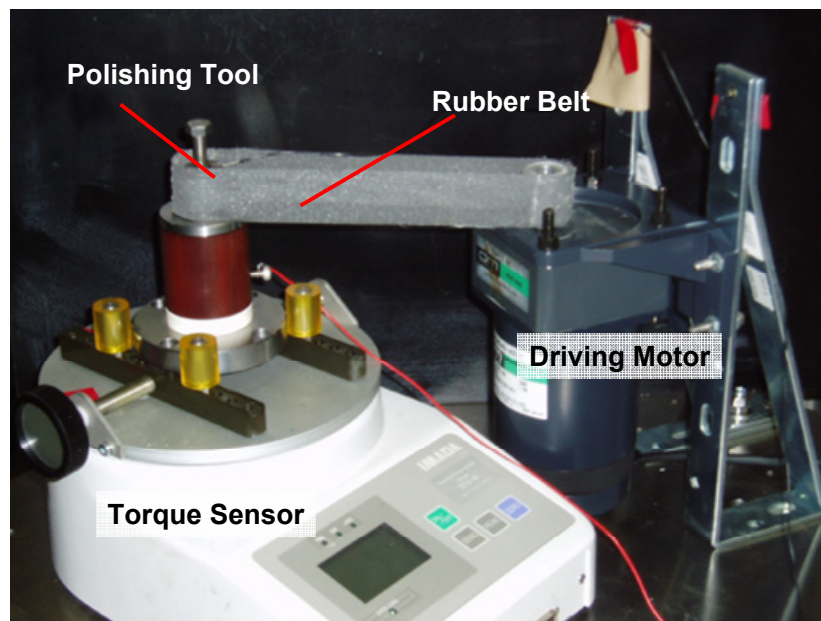


Fig. 6-8 Experimental setup for ERG polishing

使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す.

<実験装置>

・ 研磨装置	東芝機械(株) 提供
(ヘッド)	S45C 製
(ライナ)	S45C 製
(ケース)	ベークライト製
(ケース下部)	マコール製
(ベース)	S45C 製
・ 研磨砥粒	GC#600
・ ワークピース	SUS420 製
・ ERG	粒子径:約 16 $\mu$ m 粒子濃度:50wt% 分散溶媒:L-45 (100cSt) 藤倉化成(株)
・ ファンクションジェネレーター	日本ユニカー(株) 提供 NF CORPORATION MODEL           WF 1945 1CH
・ 昇圧装置	松定プレジジョン(株) MODEL           RV-5PN(A)
・ モーター	オリエンタルモーター(株)
(モーター)	MODEL           PSH540-401
(ギアヘッド)	MODEL           5GN5K
・ AD ボード	(株)KEYENCE MODEL           NR-110
<測定機器>	
・ レーザー顕微鏡	(株)KEYENCE MODEL           VK-8500
・ トルク測定器	IMADA(株) MODEL           DTX-10

### 6-7-2 電界強度と研磨効率の関係

ERG 研磨のメカニズムから、電場の印加によって研磨効率が変化することが考えられる。また、電場印加の方法は直流や交流、及び周波数など様々な条件が存在し、各条件に応じて研磨効率は異なると考えられる。そこで、電場印加の条件として、無電場、DC2kV/mm、AC2kV/mm でその周波数を0.1Hz、1Hz、10Hzとした5パターンを選択し、印加電界と研磨効率の関係を調べた。交流電界印加は、ファンクションジェネレーターからの AC 出力を昇圧モジュールにより増幅することで行った。さらに、ER 効果による研磨と接触面圧の変化による研磨を比較するため、研磨工具に垂直荷重をかけて研磨を行った。垂直荷重は、DC2kV/mm を印加時に発生する回転トルクと同等のトルクが発生するように、500gとした。

5パターンの電界印加方法で ERG 研磨パッドに電界を印加した時のワーク中央

部及び外周部の算術平均粗さ Ra の推移を図 6-9, 6-10 に示す. どの条件下においても時間経過とともに算術平均粗さ Ra の値が小さくなり, 表面研磨されていることが確認できる. 最も研磨効率が良い条件は, DC2kV/mm の電場を印加した場合であり, 逆に最も研磨効率が悪い条件は無電場で研磨した場合であることがわかる. 無電場時で研磨を行った場合に比べ, 電場を印加する全ての条件下において研磨効率が向上していることが確認できる. このことから, ERG は研磨パッドとして使用可能であり, その研磨効率は電界を印加することで向上することが明らかとなった.

砥粒の移動半径が大きいワーク外周部よりも砥粒の移動半径が小さいワーク中央部の方が電場を印加した際の研磨効率が高いことが確認できる. ここで電場印加によりワーク中央部の研磨効率が高くなる理由について考える. 無電場時では, 砥粒の移動半径が大きいワーク外周部では周速が速いため, 砥粒の運動エネルギーが高く, 研磨可能であるが, 砥粒の移動半径が小さいワーク中央部では, 周速がほぼゼロであるため運動エネルギーは小さく, 研磨することが困難になる. 一方電場を印加すると, ER 効果によりせん断抵抗が生じる. 発生するせん断抵抗はせん断速度が遅ければ遅いほど高くなることが確認されている. そのため, 周速が遅いワーク中央部では発生するせん断力が大きくなり, 一般的には研磨加工が困難であるワーク中央部においても研磨加工が可能になると考えられる.

### 6-7-3 電界強度と発生トルクの関係

前節と同様に5パターンの電界印加方法で ERG 研磨パッドに電界を印加し, その時に発生する回転トルクを測定した結果を図 6-11 に示す. どの電界印加条件においても電界を印加することによってトルクが変化していることが確認できる. 表面に砥粒が分散していても ER 効果により, 発生するトルクが変化することが確認された. DC2kV/mm で電界をステップ状に印加した際には, 電界の変化に追従してトルク変化が生じている. 無電場時において約 0.05Nm のトルクが 2kV/mm の電界印加時には 0.07Nm 発生している. 一方, AC2kV/mm で電場を印加すると, 電界の変化に応じて発生するトルクが変化するが, そのトルクの変化率は直流電界を印加した場合に比べ小さい. 交流電場の値が 0kV/mm の点におけるトルク値は, 無電場時のトルク値まで下がらないことが確認できる. 更に, 周波数が高くなるにつれ交流電場 0kV/mm の点におけるトルク値は大きくなることが確認できる. ERG の ER 効果は, 電界印加時の応答は数 msec と早いですが電界除去時の応答性が低いため, 電界を除去しても ER 効果が完全には消えず, 無電場時のトルク状態まで戻らないと考えられる.

各条件において発生するトルクの平均値を比較すると直流 2kV/mm 印加時が一番大きい. 回転トルクの増加は, ERG 研磨パッドとワークピース表面の摩擦抵抗の増加と考えることができる. つまり, 発生する回転トルクが大きいほどワークを研磨する際の研磨効率が高くなると考えられ, 前節において DC2kV/mm の研磨効率が最も高いことの説明にもなる. しかし, 研磨効率の増加が発生するトルクの増加だけによって起こるものならば, 図 6-9, 6-10 に示す 5N の荷重をかけて研磨を行った結果が DC2kV/mm のそれと同等になると予想されるが, 実際には 5N の荷重をかけた研磨は研磨効率が低い. このことから, ERG の ER 効果は発生トルクの増加以外にも,

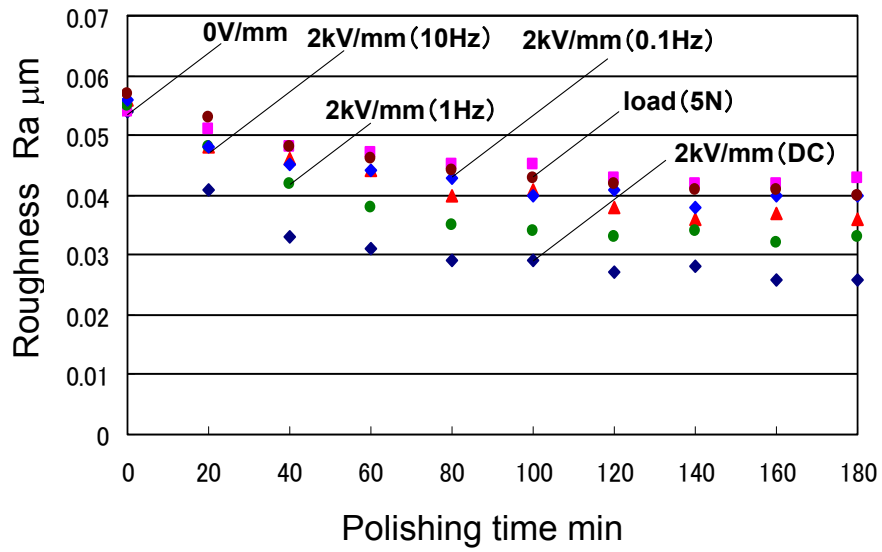


Fig. 6-9 Surface average roughness at the center part of workpiece

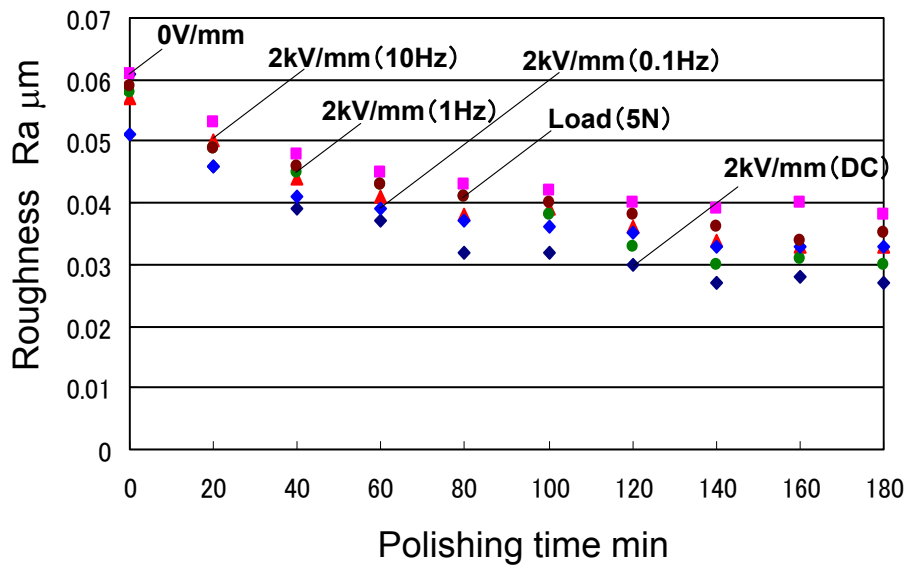
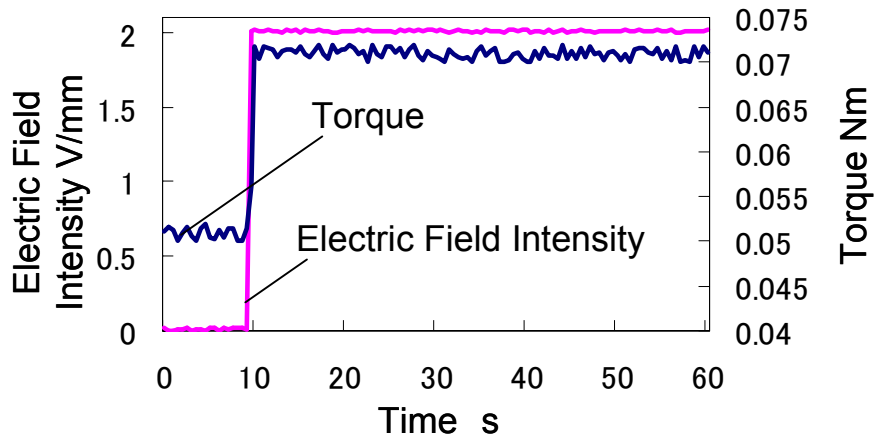
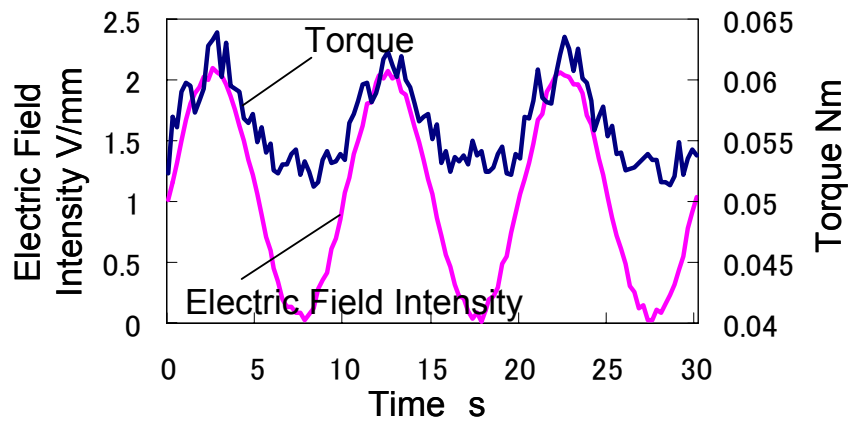


Fig. 6-10 Surface average roughness at the peripheral part of workpiece



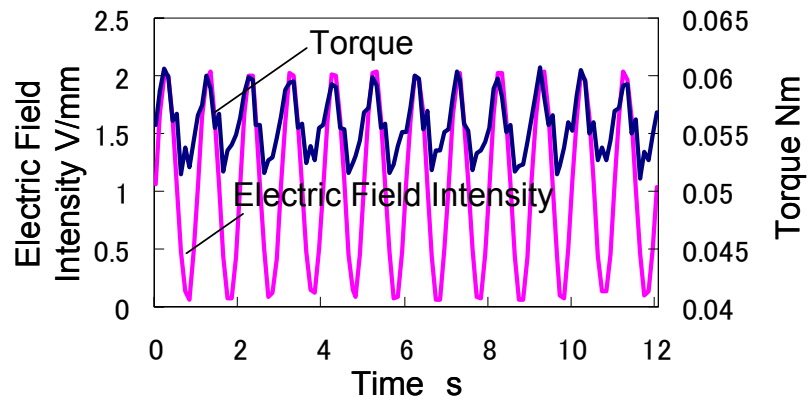


(a) 2kV/mm (DC)

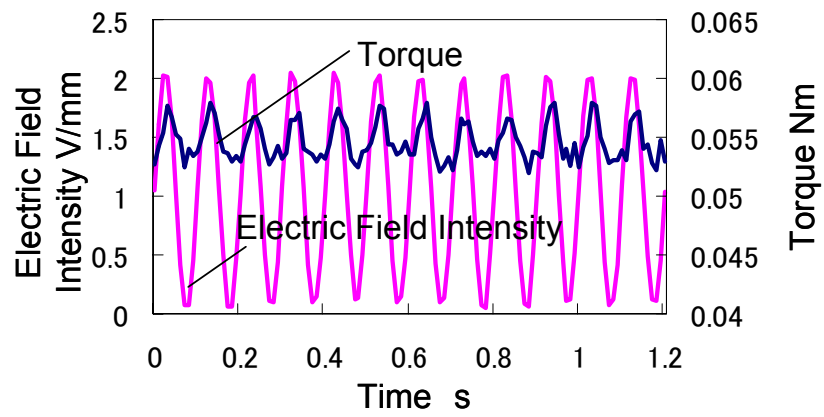


(b) 2kV/mm (AC0.1Hz)

Fig. 6-11-1 Polishing torque under various electric field



(c) 2kV/mm (AC1Hz)



(d) 2kV/mm (AC10Hz)

Fig. 6-11-2 Polishing torque under various electric field

ワーク表面への粘着や砥粒の把持性の変化などによって研磨効率を高める効果があると推測される。

#### 6-7-4 電界強度変化の影響

大きな加工力のみで研磨を行うと研磨効率は高いが、過度に研磨をしすぎてしまうため表面精度が損なわれる。熟練技能者による研磨加工プロセスに習うところでは、同じ砥粒を使用したとしても始めは強い加工力で研磨を行い、徐々に加工力を低下させ研磨精度の向上を図る必要がある。

ERG 研磨パッドは印加する電界強度に応じて発生するトルクが変化することから、電界を調整することで加工力が調整可能である。そこで、高電場を印加した状態で効率良く研磨を行い、ワークの表面粗さが定常になった後に電界強度を変化させることで、ワークの表面精度がどのように推移するかを調べた。前節で述べた実験と同様に、ERG 研磨パッドは厚さ 0.5mm, GC#600 を使用した。また回転速度は  $50 \text{ min}^{-1}$  とした。電界印加条件は前節で最も効率よく研磨が行われた DC2kV/mm からスタートし、DC1kV/mm, 無電場と変化させた。

ワーク中央部及び外周部の表面粗さの推移を図 6-12, 6-13 に示す。まず、2kV/mm 印加時において、100min までは効率よくワーク中央部及びワーク外周部が研磨されていることが確認できる。しかし、100min 以降は研磨を行ってもワークの表面精度が向上していないことが確認できる。このことから、電界強度 2kV/mm で研磨した場合、ERG 研磨によりワークの表面精度が  $Ra0.03 \sim 0.025 \mu\text{m}$  に達するまでは効率よく研磨を行うことが可能となるが、それ以上の研磨精度は見込めない。この状態から電界強度を 1kV/mm, 無電場と下げて研磨することによって、2kV/mm で研磨した時よりもワークの表面精度が向上していることが確認できる。これは、電界強度が弱まることによって ER 効果が弱まり、トルクの減少や砥粒の把持力の低下が起こること、研磨粒子がワーク表面を削る力が弱まるからだと考えられる。また、電界強度を下げることでワークの表面精度を向上させる効果は、ワーク中央部よりも外周部で顕著に見られる。

本実験によって、ワーク中央部でもワーク外周部でも、電界強度 2kV/mm で研磨した後に電界強度を下げて研磨することによって、ワークの表面精度が向上することが確認された。このことから、ERG 研磨法は電界により効率が向上するばかりでなく、電界強度の強弱により研磨精度を調整可能であることが明らかとなった。

#### 6-7-5 回転速度の影響

一般的に、研磨工具の回転速度はこれが速いほど研磨効率が向上することが予想される。しかし、ERG の ER 効果はせん断速度が速くなることで低下する傾向にあるため、ER 効果による研磨作用が低下する可能性が考えられる。そこで、本節では、研磨工具の回転速度を変化させることで、研磨効率がどのように変化するかを調べた結果について述べる。ERG 研磨パッドは厚さ 0.5mm, GC#600 を使用した。電界印加条件は ER 効果が最も顕著に現れる DC2kV/mm とする。回転速度は前節まで行っていた  $50 \text{ min}^{-1}$  を中心に、 $10 \text{ min}^{-1}$ ,  $25 \text{ min}^{-1}$ ,  $50 \text{ min}^{-1}$ ,  $100 \text{ min}^{-1}$ ,

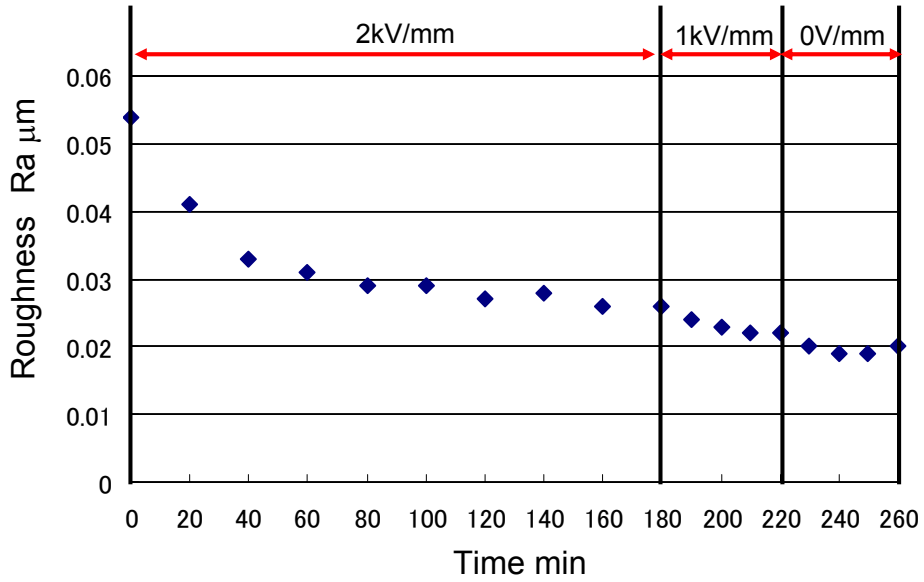


Fig. 6-12 Improvement of surface roughness at the center part

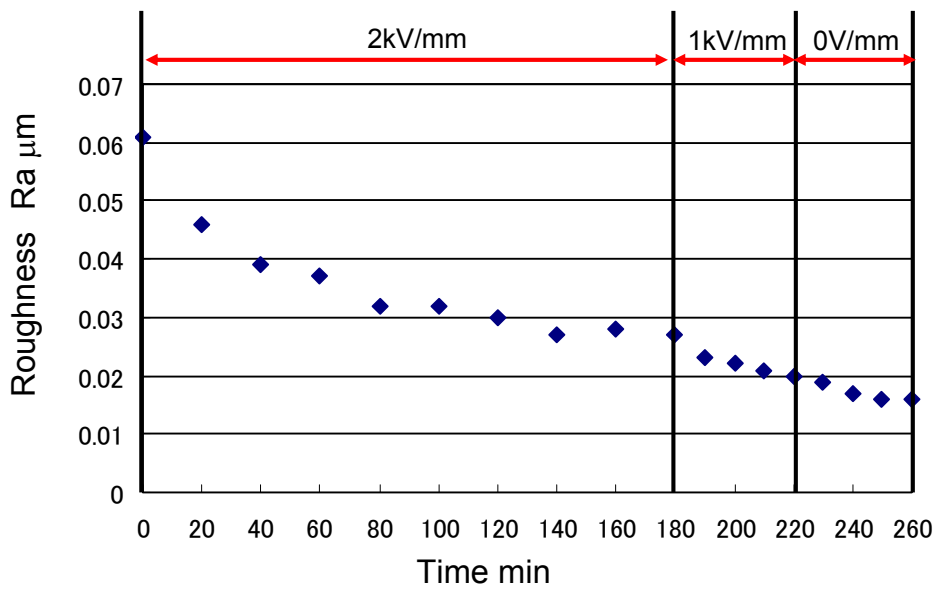


Fig. 6-13 Improvement of surface roughness at the peripheral part

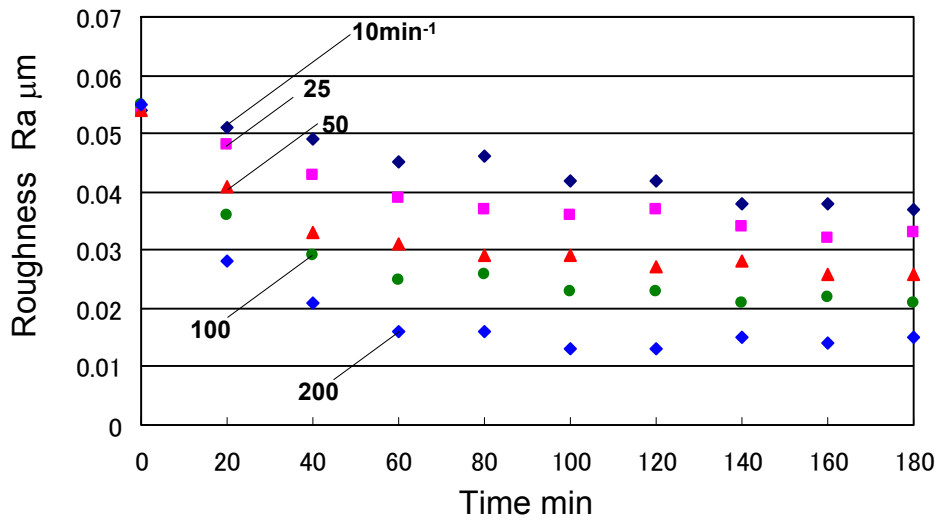


Fig. 6-14 Influence of rotating speed on polishing efficiency at the center part

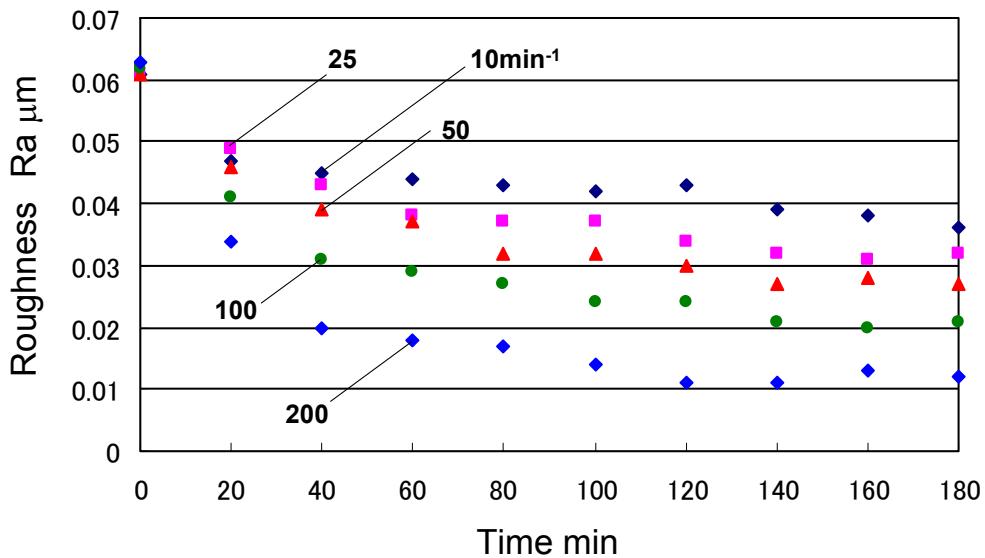


Fig. 6-15 Influence of rotating speed on polishing efficiency at the peripheral part

200min<sup>-1</sup>, と変化させ, 研磨実験を行った.

各回転速度でのワーク中央部及び外周部の Ra の推移を図 6-14, 6-15 に示す. ワーク中央部, 外周部ともに回転速度が速いほど研磨効率が高くなる. 周速の速いワーク外周部だけでなく, ER 効果の依存度が高いと考えられるワーク中央部の研磨効率も向上していることから, 回転速度が上昇しても ER 効果が発生していることが確認できる.

また、同じ ERG 研磨パッドを使用しているにもかかわらず、回転速度  $200 \text{ min}^{-1}$  時ではワーク中央部及び外周部において  $Ra0.020 \mu\text{m}$  以下の精度を 60min で達成している。他の回転速度では 180min 研磨しても  $Ra0.020 \mu\text{m}$  以下の精度まで研磨ができていない。本実験で選択した回転速度の範囲では、回転速度が速くなることで研磨精度が悪化するという弊害が起こらないことが確認された。

以上、本節までの実験結果から、回転速度を  $200 \text{ min}^{-1}$  とし、電界強度  $2\text{kV/mm}$  で研磨を行った後に、徐々に電界強度を下げながらワーク表面を仕上げていくことで、効率よく良好な研磨加工が可能であることがわかった。

## 6-8 ERG マイクロ研磨法による樹脂レンズ用金型の研磨

### 6-8-1 実験方法

ERG 研磨パッドの特性評価実験から確立された研磨方法を用い、ERG 研磨パッドに用いる砥粒を GC#600 から徐々に細かくしていくことで、本研究の目的である樹脂レンズ用金型として使用できるワークの表面精度 ( $Ra0.005 \mu\text{m}$  以下) を目標に研磨を行った。

使用する研磨実験装置は図 6-5 と同じ構成とした。使用した ERG 研磨パッド厚さは  $0.5\text{mm}$  とした。研磨方法は、回転速度  $200 \text{ min}^{-1}$ 、電場印加条件は ER 効果が最も顕著に現れる  $DC2\text{kV/mm}$  で研磨した後に  $DC1\text{kV/mm}$ 、無電場と電界強度を下げた状態で研磨を行った。研磨面評価は、レーザー顕微鏡でワークの中央部と外周部の表面粗さを計測することで行った。本実験では、ERG 研磨パッドに使用する研磨砥粒を、GC#600 から順に GC#1200, GC#2000, ダイヤモンドスラリー #4000, WA#8000 と小さくしていき、一つのワークを繰り返し研磨した。

使用した実験装置及び測定機器は前節と同様であるので、割愛する。

### 6-8-2 砥粒と研磨性能の関係

初期粗さ  $Ra0.055 \mu\text{m}$  のステンレス鋼 SUS420 をワークピースとして、GC#600 から順に GC#1200, GC#2000, ダイヤモンドスラリー #4000, WA#8000 と砥粒径を小さくし、一つのワークピースを繰り返し研磨した。砥粒別の ERG 研磨パッドへの電界印加条件は、まず  $DC2\text{kV/mm}$  として研磨を行い、算術平均粗さ  $Ra$  が研磨時間に対してほぼ定常になった後、電界強度を  $DC1\text{kV/mm}$  として同様に算術平均粗さ  $Ra$  が定常になるまで研磨を行い、さらに無電場として、研磨を行った。

砥粒径を徐々に小さくしながら研磨を行った場合の、ワーク中央部及び外周部の研磨時間に対する算術平均粗さ  $Ra$  の推移を図 6-16, 図 6-17 に示す。砥粒別の ERG 研磨パッドへの電界印加条件を表 6-2 に示す。

GC#600 の砥粒を塗布した ERG 研磨パッドを使用して、研磨を行った場合、ワーク中央部及び外周部ともに  $2\text{kV/mm}$  印加時 60min までは効率よく研磨されていることが確認できる。100min 以降、ワークの表面粗さにほとんど変化が見られない。ワーク中央部では  $Ra0.015 \mu\text{m}$  付近、ワーク外周部では  $Ra0.012 \mu\text{m}$  付近で数値にばらつきが生じていることが確認できる。 $2\text{kV/mm}$  で 180min 研磨後に、 $1\text{kV/mm}$ 、無電場と電界強度を弱めて研磨を行った場合の表面粗さの推移を見てみると、ワ

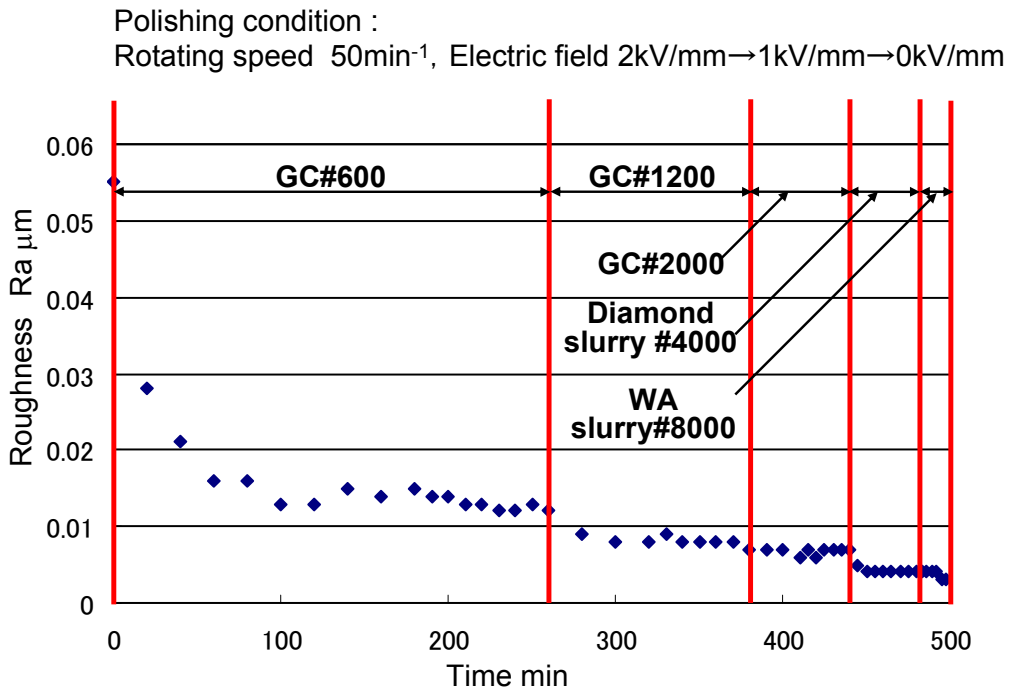


Fig. 6-16 Influence of granularity on polishing efficiency at the center part

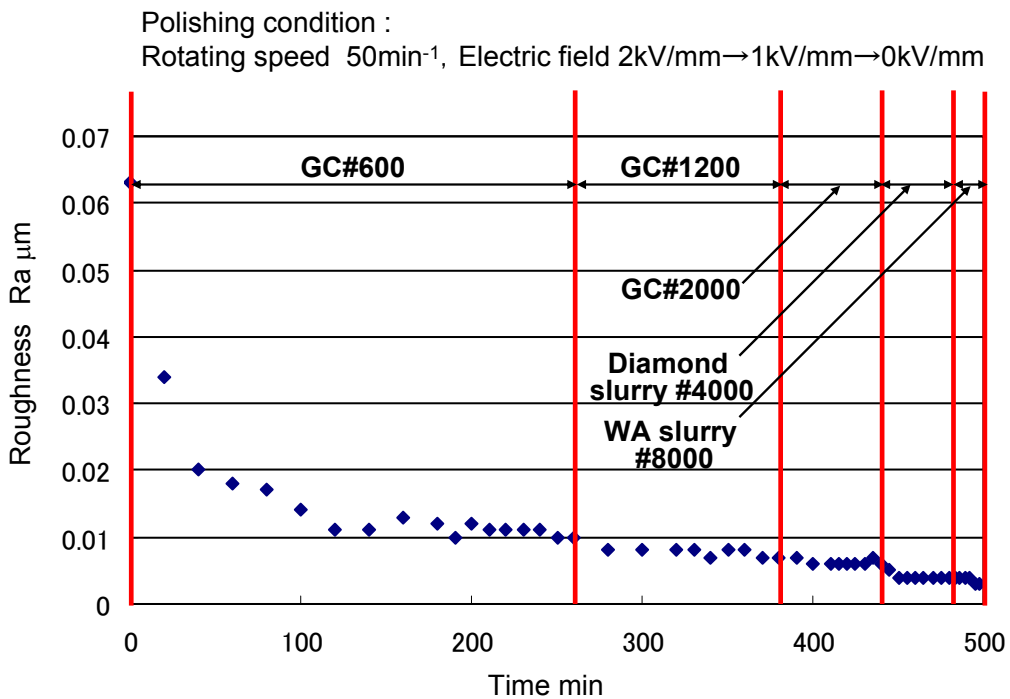


Fig. 6-17 Influence of granularity on polishing efficiency at the peripheral part

Table 6-2 Polishing time

Grain number	Polishing Time min		
	2kV/mm	1kV/mm	0kV/mm
#600	180	40	40
#1200	60	30	30
#2000	30	15	15
#4000	20	10	10
#8000	12	6	6

ーク中央部、ワーク外周部ともに緩やかな表面粗さの改善が確認できる。これらの結果から、電界強度変化による表面粗さの向上は期待できるが、顕著に表面粗さが向上するものではない。電界強度を変化させる方法は高電場で研磨した後に補助的に使用すると良いことが分かる。

ワーク中央部における研磨前、180min 後、220min 後、260min 後のワーク表面写真を図 6-18、高低図を図 6-19、粗さ曲線を図 6-20 に示す。表面写真を見てみると、幾何学的な模様の研削痕が 180min 研磨を行うことにより除去されていることが確認できる。ワークの中央部右下に見える幾つかの黒い斑点は研削時についた欠けであり、研磨加工では除去できないほどの深い穴である。表面写真で注目すべき点は、ワークの研磨痕が同心円状ではなくランダムなことである。固定砥粒の研磨パッドを回転工具に使用すると、砥粒はパッドに固定されているため、同心円状の傷がワーク表面につく。しかしながら、ERG 研磨パッドは砥粒がゲルという柔らかい素材に把持されているためある程度自由に運動ができ、ランダムな研磨痕が生じたと考えられる。

電界強度の変化による効果は補助的なものであるため、180min 後のワーク表面写真と、220min 後のワークや 260min 後のワークの表面写真を見比べてもその差を確認することは困難であるが、図 6-19 の高低図および図 6-20 の粗さ曲線をみると表面粗さの向上が視覚的に確認できる。特に高低図をみると、電界強度を弱めて研磨を行うことで、粗さが小さいことを示す黒色部分の占める割合が高くなっていくことが確認できる。同様にワーク外周部における研磨前、180min 後、220min 後、260min 後のワーク表面写真を図 6-21、高低図を図 6-22、粗さ曲線を図 6-23 に示す。ワーク外周部でも ERG 研磨によって研削痕が薄くなり、ランダムな研磨痕がついていることが確認できる。また、ワーク中央部に比べ、表面写真、高低図、粗さ曲線から電界強度の変化によるワーク表面粗さの向上がはっきりと確認できる。

GC#600を用いて研磨したワークピースをGC#1200を塗布したERG研磨パッドで研磨を行ったところ、電界強度 2kV/mm 印加時にワーク中央部および外周部で算術平均粗さ Ra が小さくなり表面精度が向上していることが確認できる。ワーク中央部で Ra0.012  $\mu$ m、ワーク外周部で Ra0.010  $\mu$ m である初期粗さが、2kV/mm 印加し研磨を行うことで中央部外周部ともに Ra0.007  $\mu$ m となり面粗さが向上している。



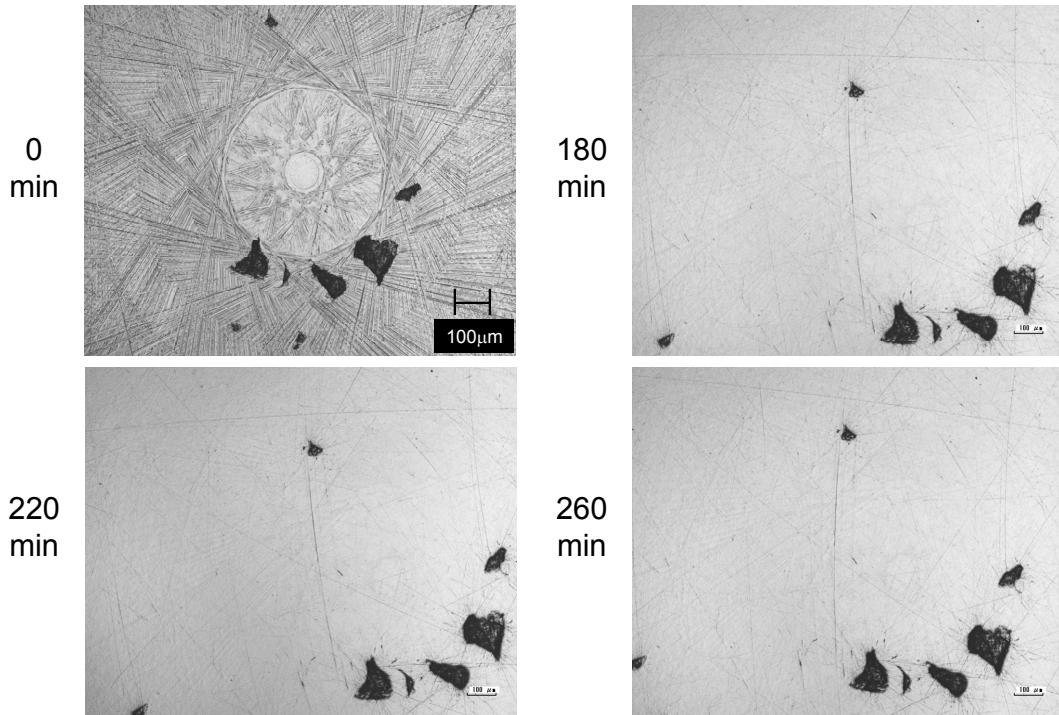


Fig. 6-18 Surface of workpiece at the center part ( # 600 )

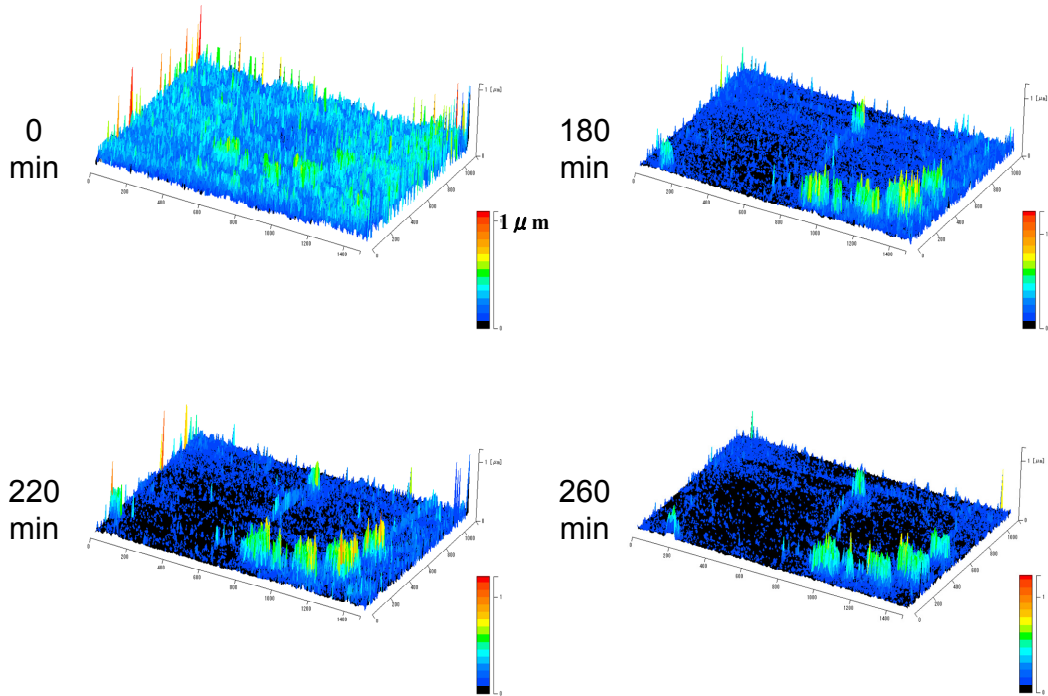
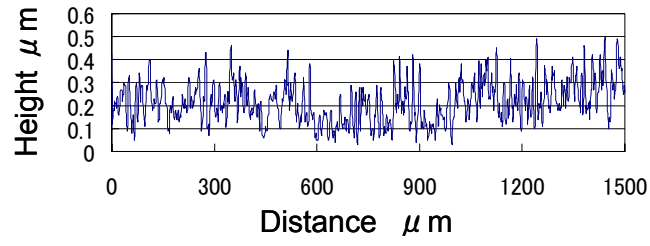
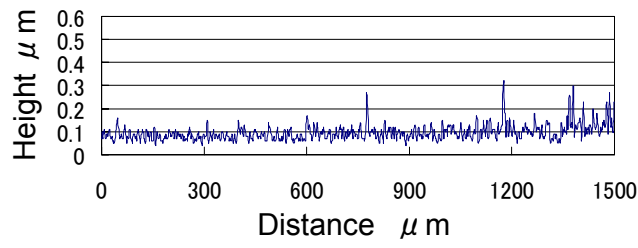


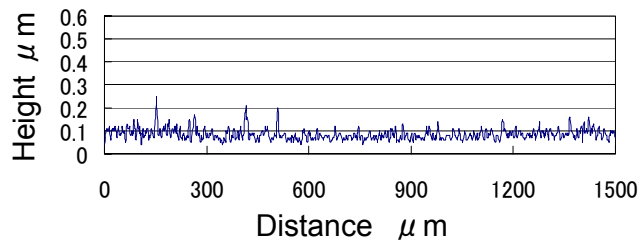
Fig. 6-19 3D surface profile of the center part ( # 600 )



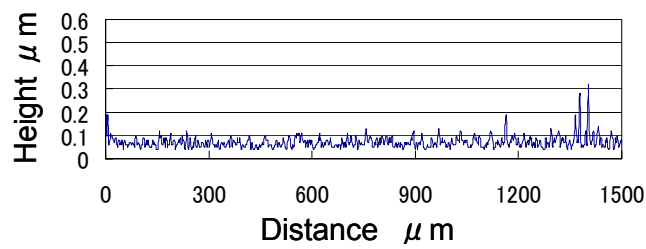
(a) 0min



(b) 180min



(c) 220min



(d) 260min

Fig. 6-20 Surface roughness of workpiece at the center part ( # 600 )

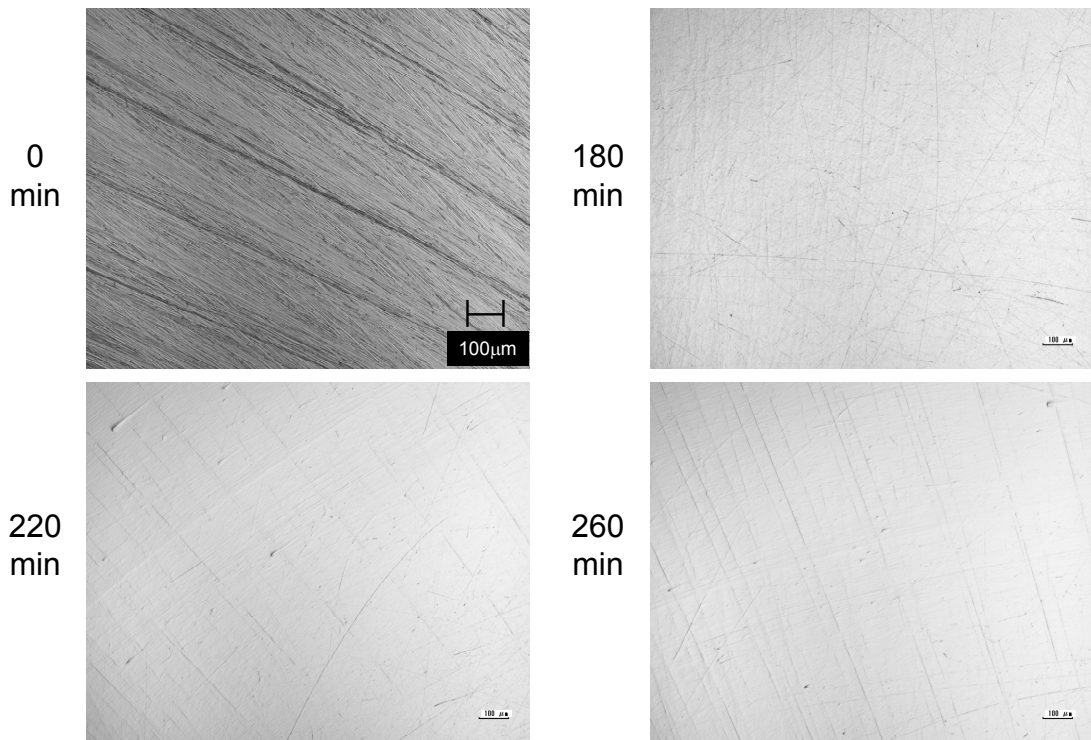


Fig. 6-21 Surface of workpiece at the peripheral part ( # 600 )

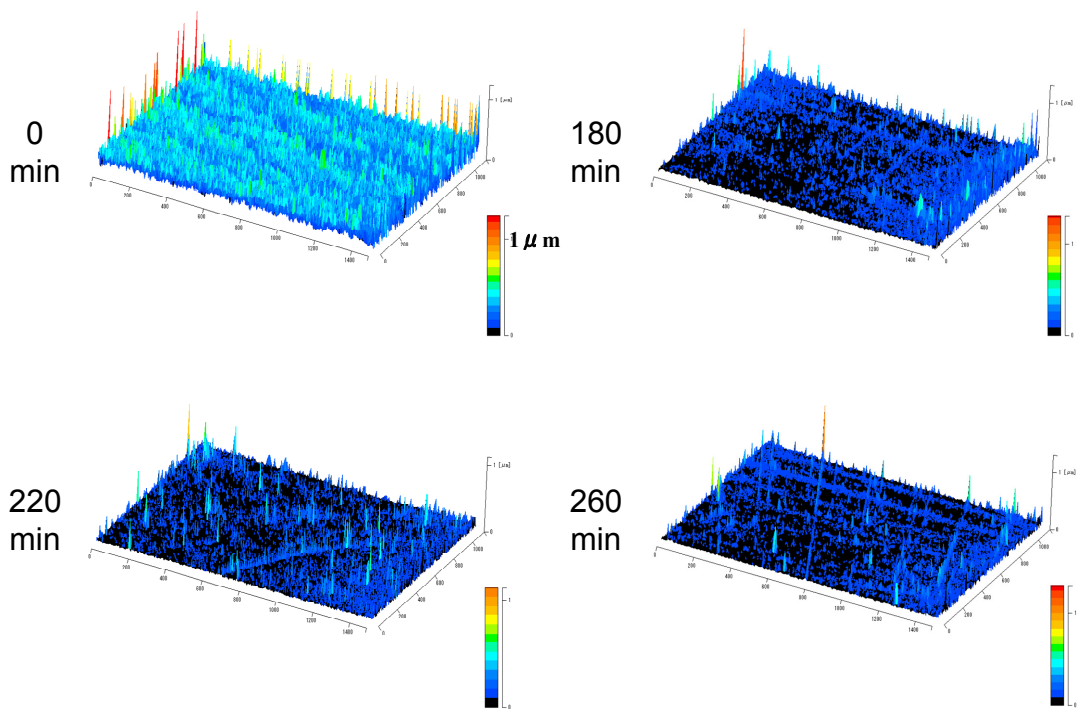
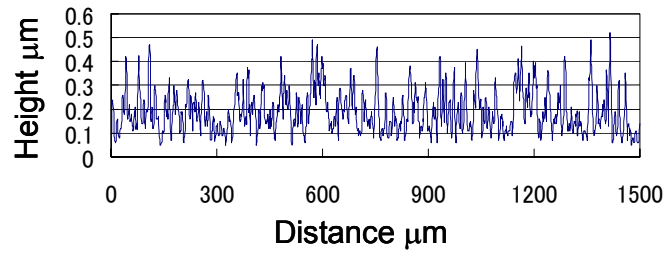
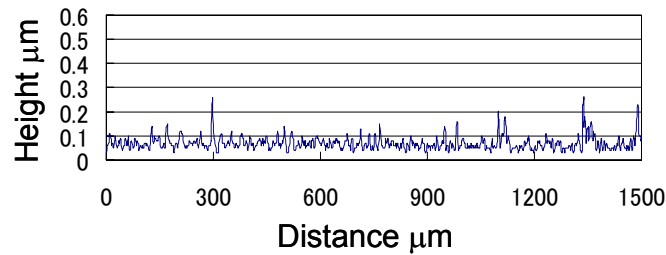


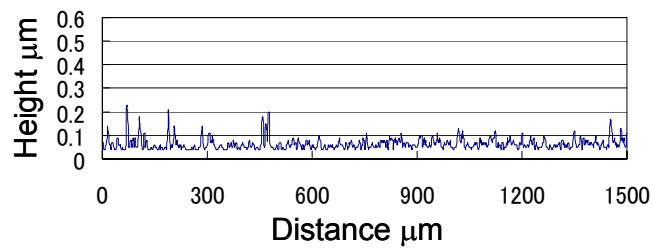
Fig. 6-22 3D surface profile of the peripheral part ( # 600 )



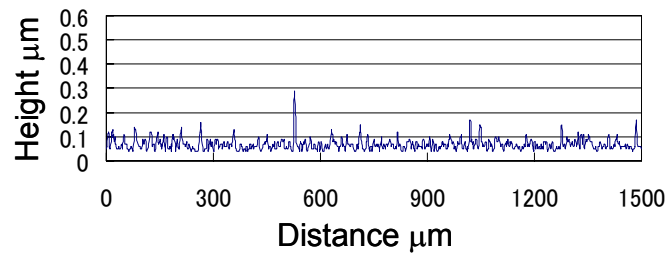
(a) 0min



(b) 180min



(c) 220min



(d) 260min

Fig. 6-23 Surface roughness of workpiece at the peripheral part ( # 600 )

しかしながら、印加電界強度を  $2\text{kV}/\text{mm}$  から  $1\text{kV}/\text{mm}$ 、無電場と変化させ研磨を行うことによる  $R_a$  向上効果はほとんど見られない。ワーク中央部における研磨前、60min 後、90min 後、120min 後のワーク表面写真を図 6-24、高低図を図 6-25、粗さ曲線を図 6-26 に、ワーク外周部における研磨前、60min 後、90min 後、120min 後のワーク表面写真を図 6-27、高低図を図 6-28、粗さ曲線を図 6-29 に示す。60min 以降は、ワーク中央部および外周部において  $R_a$  の変化はほとんど見られなかったが、60min と 90min、120min の高低図、粗さ曲線の結果を比較すると、90min と 120min において最大高さ  $R_{\text{max}}$  が低い値を示していることが確認できる。また、表面写真からも 60min、90min、120min と経過するにつれ、研磨痕が薄くなっていることが確認できる。つまり、電界強度を弱めることにより  $R_{\text{max}}$  を低くする効果があると考えられる。

次に、GC#1200 を用いて研磨したワークピースを GC#2000 を塗布した ERG 研磨パッドで研磨を行った。電界強度の変化に関わらず、算術平均粗さ  $R_a$  の推移に変化が見られず、表面粗さが向上していないことが確認できる。ワーク中央部における研磨前、30min 後、45min 後、60min 後のワーク表面写真を図 6-30、高低図を図 6-31、粗さ曲線を図 6-32 に、ワーク外周部における研磨前、30min 後、45min 後、60min 後のワーク表面写真を図 6-33、高低図を図 6-34、粗さ曲線を図 6-35 に示す。ワーク中央部、外周部とも電界強度を変化させ研磨を行った場合でも、面精度に変化が見られない。GC#2000 を用いた場合に ERG 研磨による効果が得られない理由として、固定砥粒による研磨では加工力が強いため、除去量が多く深い研磨痕が残ってしまうため、 $R_a 0.007\ \mu\text{m}$  の以上の精度が出せないことや、砥粒径が ER 粒子径に比べ小さくなるため、図 6-36 に示すように砥粒が ER 粒子間やゲル部分につまり ER 効果による粘着効果や砥粒の把持力変化が生じなくなると考えられる。更なる表面粗さの向上を目指すには、砥粒の目詰まりを防ぐことや、ワーク表面と ERG 研磨パッドの界面にある程度自由度を持たせて砥粒を介在させる必要がある。そこで、研磨液に砥粒を混ぜそれを ERG 研磨パッドに塗布することにした。研磨液はオイルであるために、それが ERG 表面にあると ER 効果が低減することが確認されているが、図 6-37 に示すように砥粒が界面で運動しやすくなる効果や、ER 粒子間に入り込んだ砥粒を掃き出す効果が期待できる。以降の実験ではダイヤモンド砥粒と WA を植物性の研磨液と混合し、スラリーとして用いることにした。

GC#2000 を用いて研磨したワークピースをダイヤモンドスラリー#4000 を用いた ERG 研磨パッドで研磨を行った。スラリーを用いるため、ERG には砥粒を塗布せず、研磨前とワーク表面を計測するごとに、ワーク表面にスラリーを供給した。電界強度  $2\text{kV}/\text{mm}$  印加し研磨を行うことで、ワーク中央部および外周部で算術平均粗さ  $R_a$  が小さくなり、最終的に  $R_a 0.004\ \mu\text{m}$  を示し、目標値である  $R_a 0.005\ \mu\text{m}$  以下を達成していることが確認できる。ワーク中央部における研磨前、20min 後、30min 後、40min 後のワーク表面写真を図 6-38、高低図を図 6-39、粗さ曲線を図 6-40 に、ワーク外周部における研磨前、20min 後、30min 後、40min 後のワーク表面写真を図 6-41、高低図を図 6-42、粗さ曲線を図 6-43 に示す。ワーク表面写真より、研磨前に存在していた細かい研磨痕が、ダイヤモンドスラリーを用いた研磨によって除去され、ワーク表面粗さが向上していることが確認できる。高低図および粗さ曲線からも研磨後の最大高さ  $R_{\text{max}}$  が低くなることがわかり、研磨による面精度向上効果が確認できる。しかし、電界強度を変化させても  $R_a$  の変化が確認されないことから

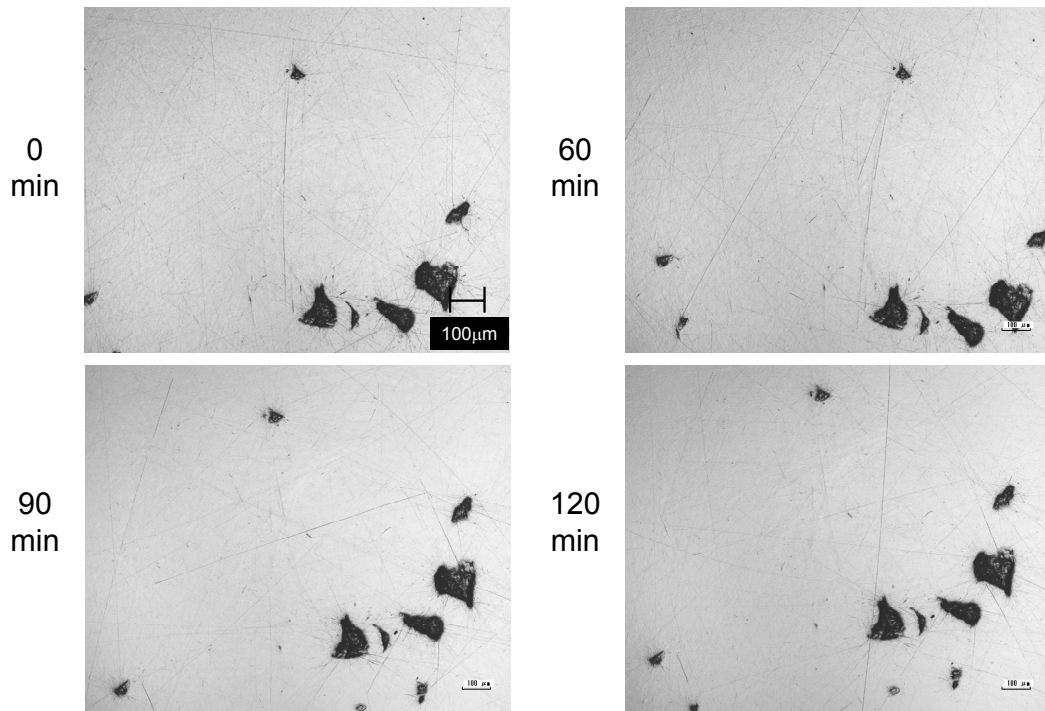


Fig. 6-24 Surface of workpiece at the center part ( # 1200 )

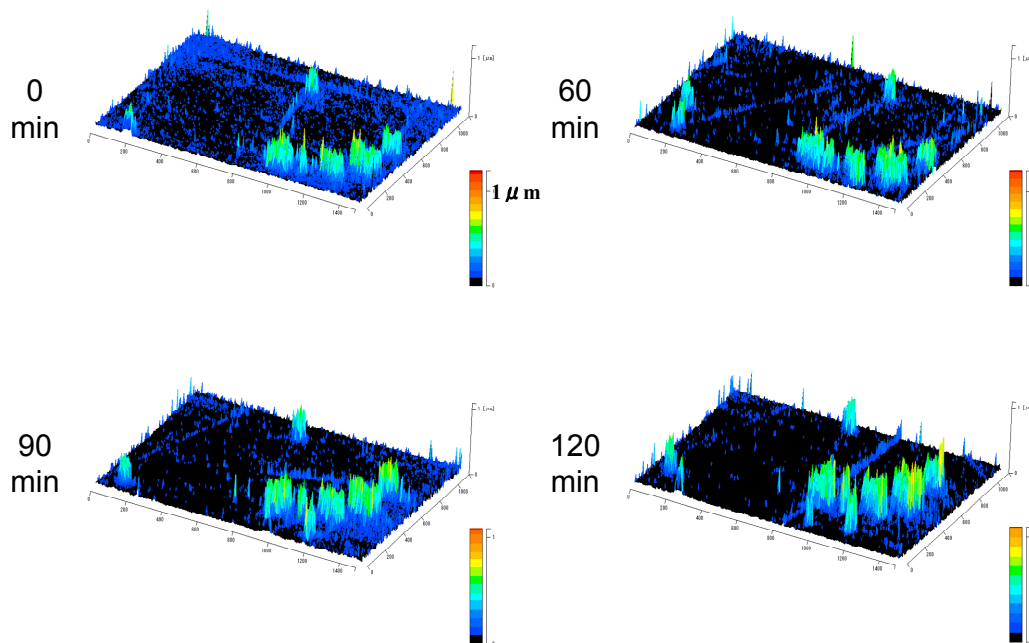
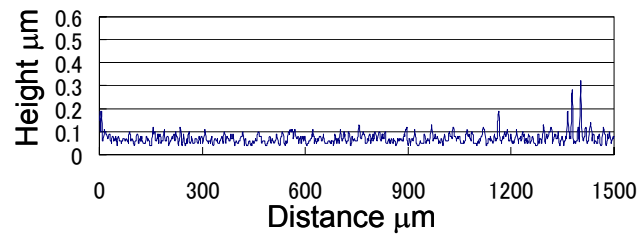
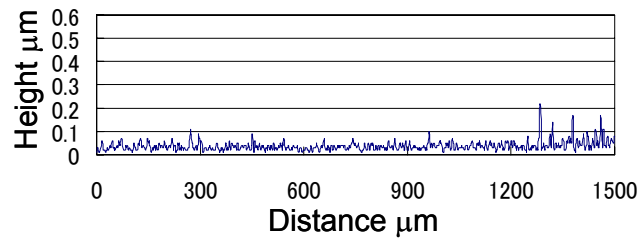


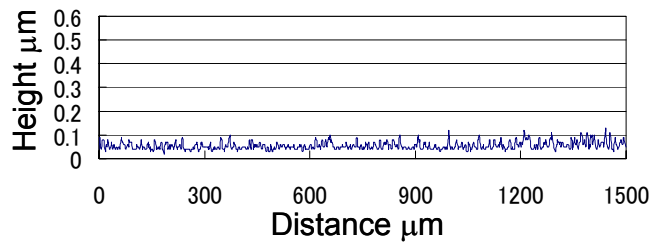
Fig. 6-25 3D surface profile of the center part ( # 1200 )



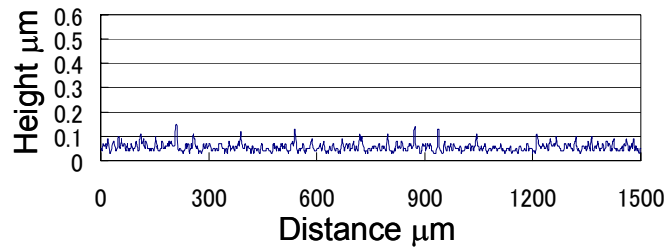
(a) 0min



(b) 60min



(c) 90min



(d) 120min

Fig. 6-26 Surface roughness of workpiece at the center part ( # 1200 )

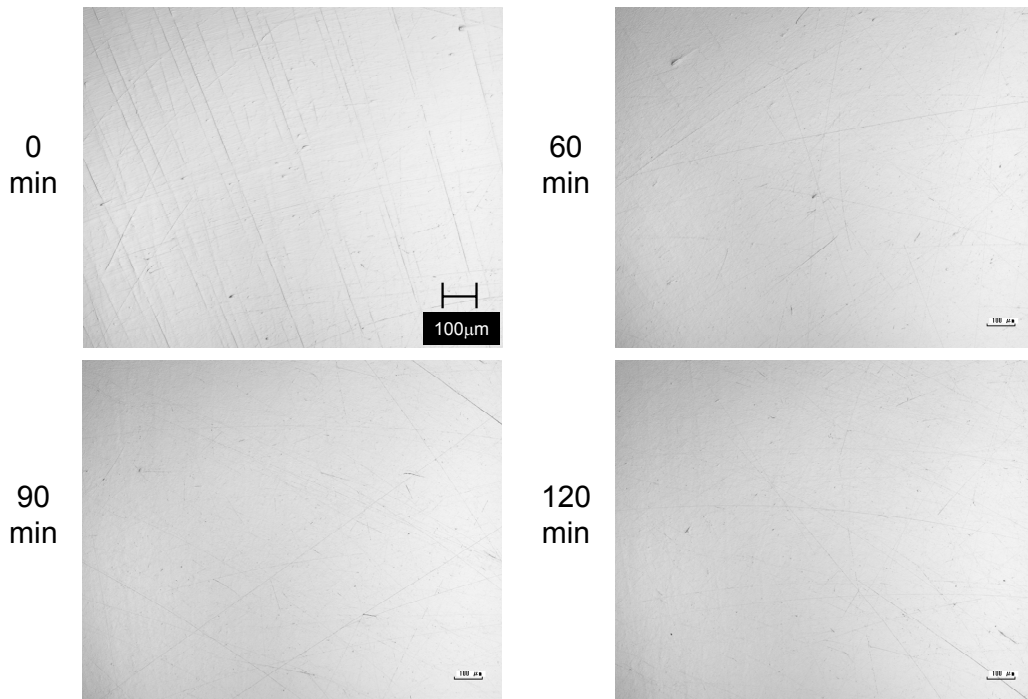


Fig. 6-27 Surface of workpiece at the peripheral part ( # 1200 )

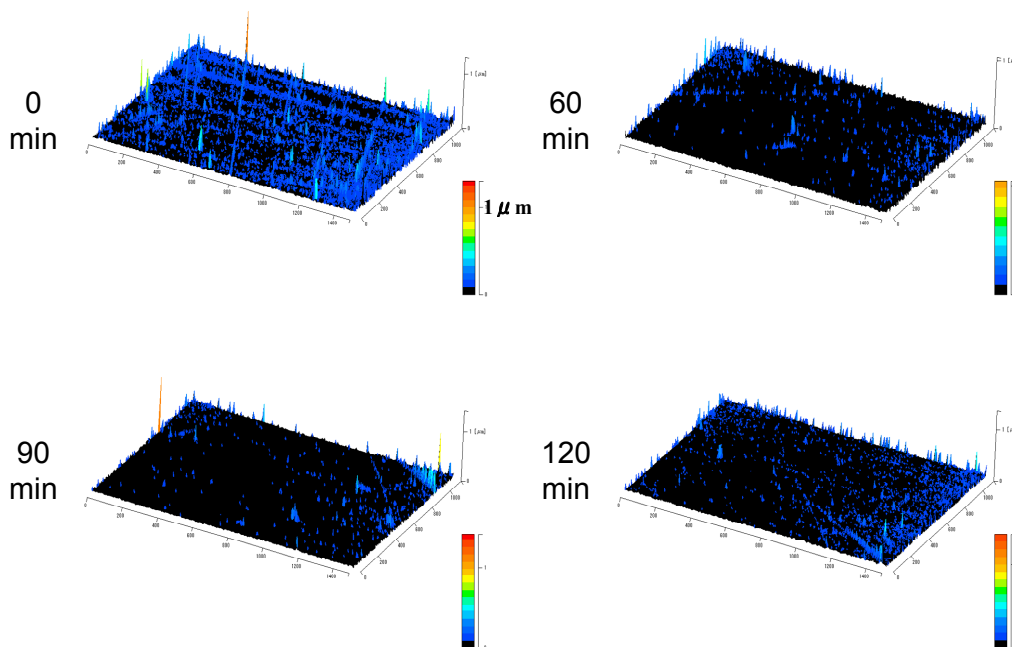
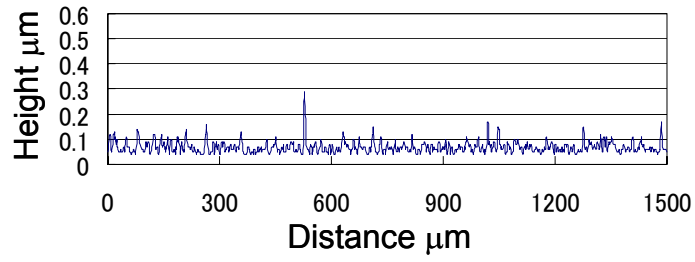
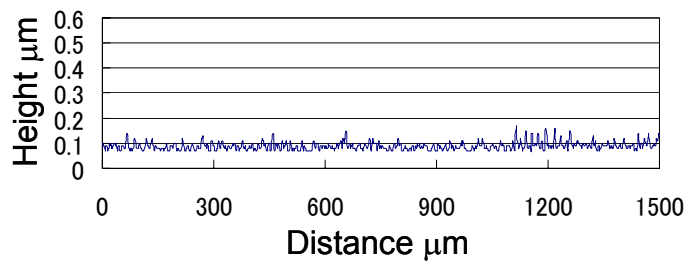


Fig. 6-28 3D surface profile of the peripheral part ( # 1200 )

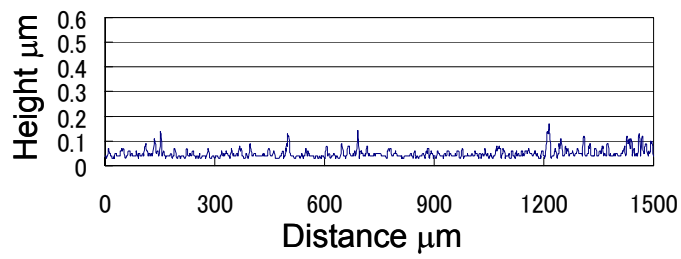




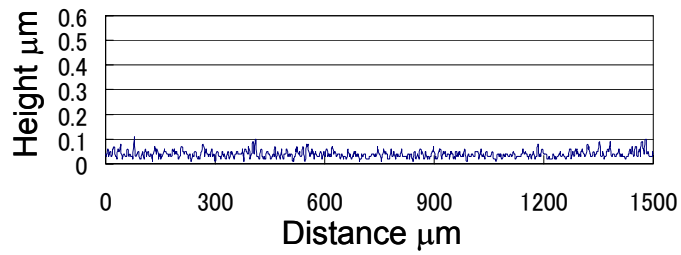
(a) 0min



(b) 60min



(c) 90min



(d) 120min

Fig. 6-29 Surface roughness of workpiece at the peripheral part ( # 1200 )

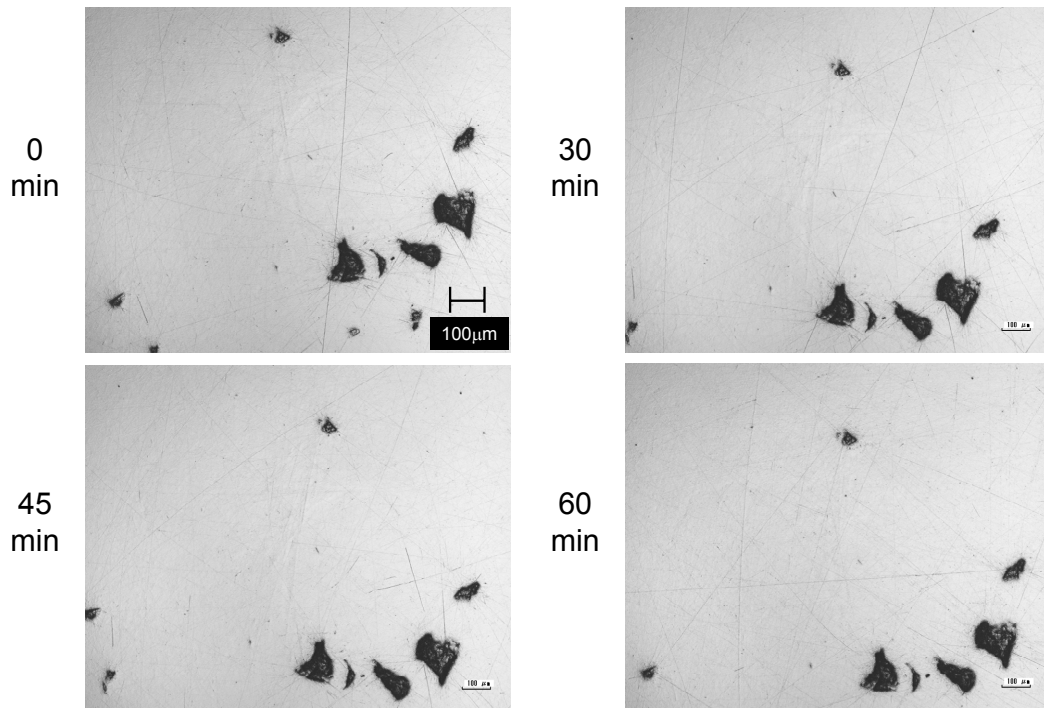


Fig. 6-30 Surface of workpiece at the center part ( # 2000 )

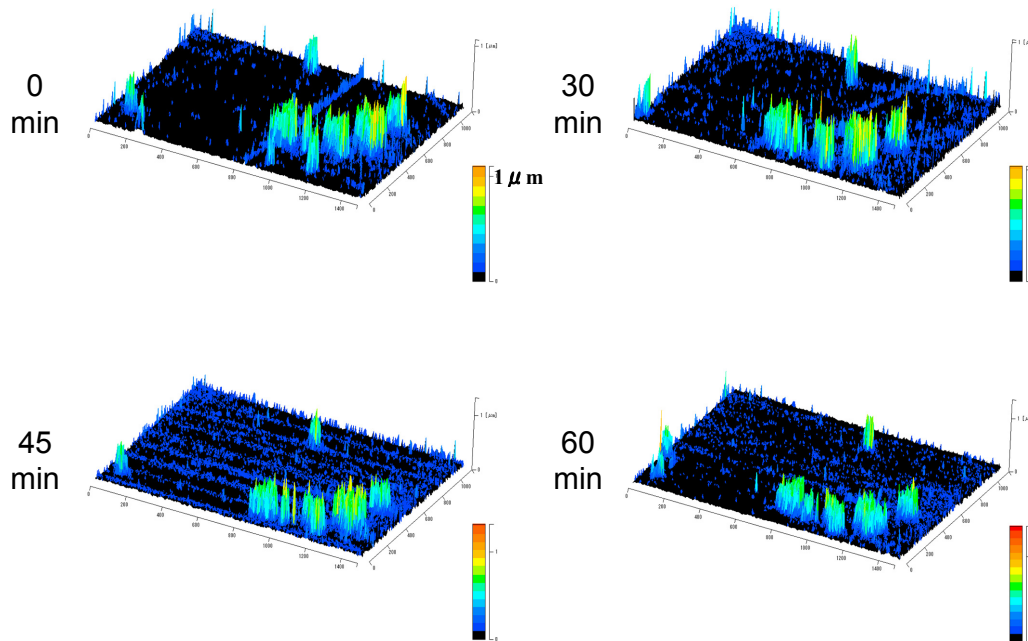
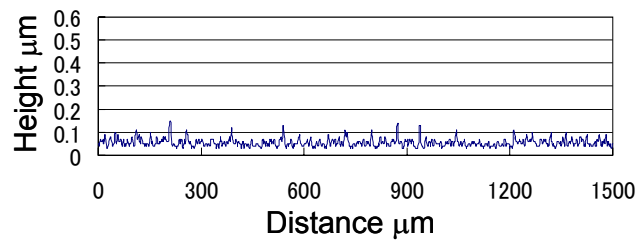
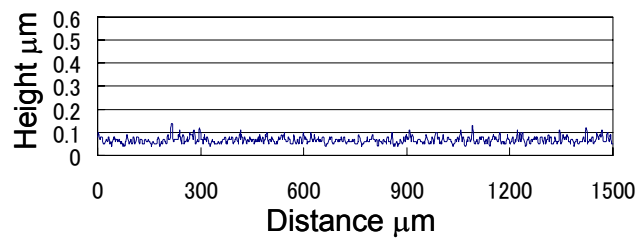


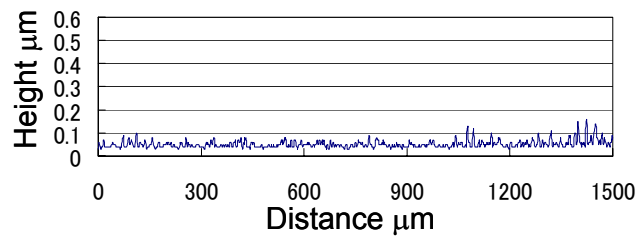
Fig. 6-31 3D surface profile of the center part ( # 2000 )



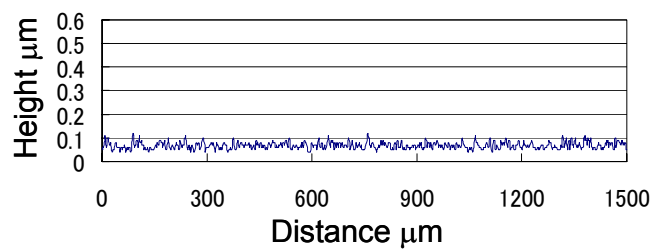
(a) 0min



(b) 30min



(c) 45min



(d) 60min

Fig. 6-32 Surface roughness of workpiece at the center part ( # 2000 )

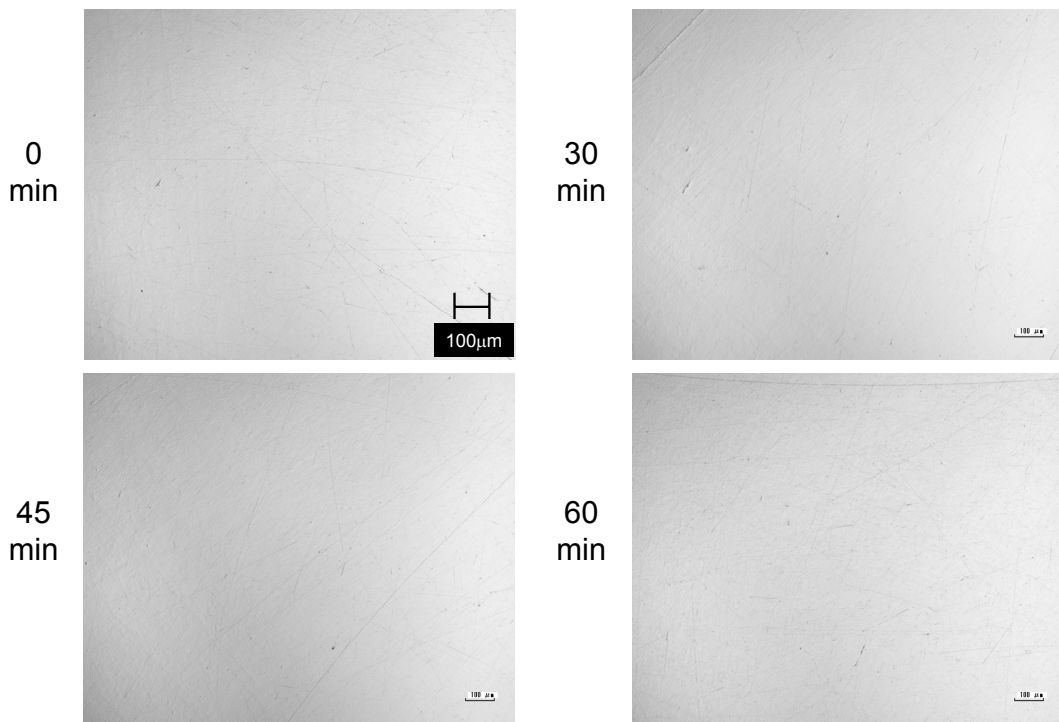


Fig. 6-33 Surface of workpiece at the peripheral part ( # 2000 )

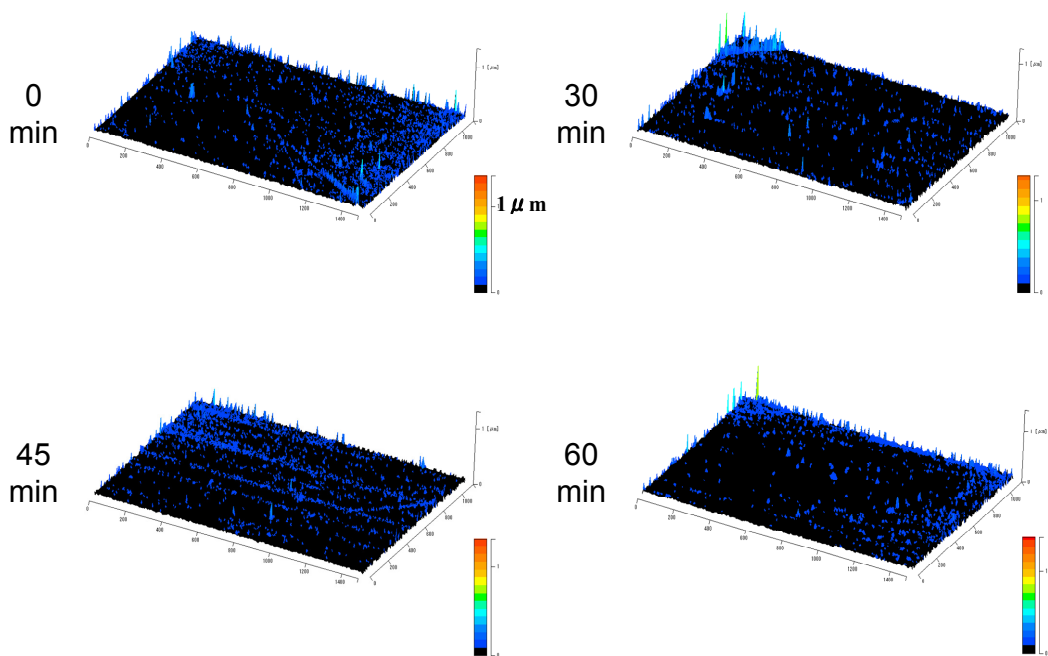
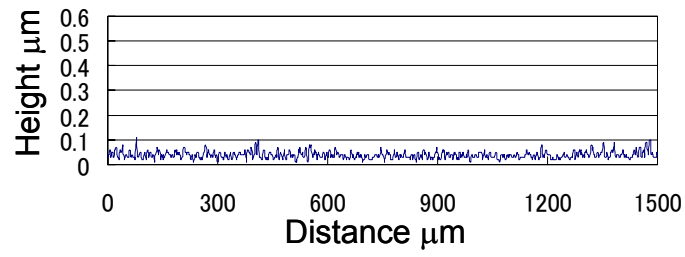
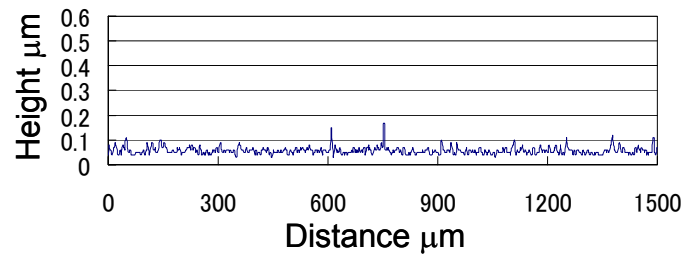


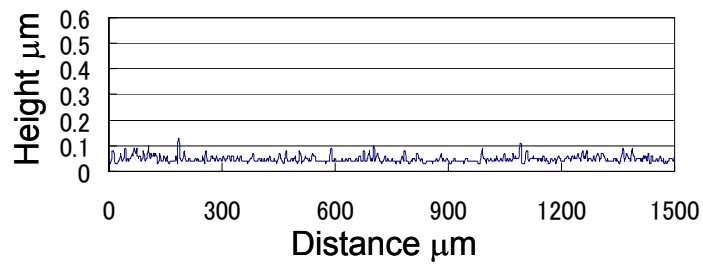
Fig. 6-34 3D surface profile of the peripheral part ( # 2000 )



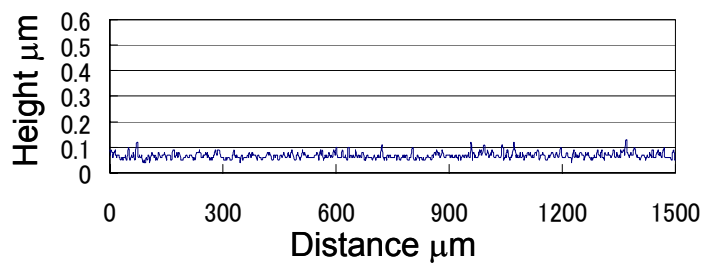
(a) 0min



(b) 30min



(c) 45min



(d) 60min

Fig. 6-35 Surface roughness of workpiece at the peripheral part ( # 2000 )

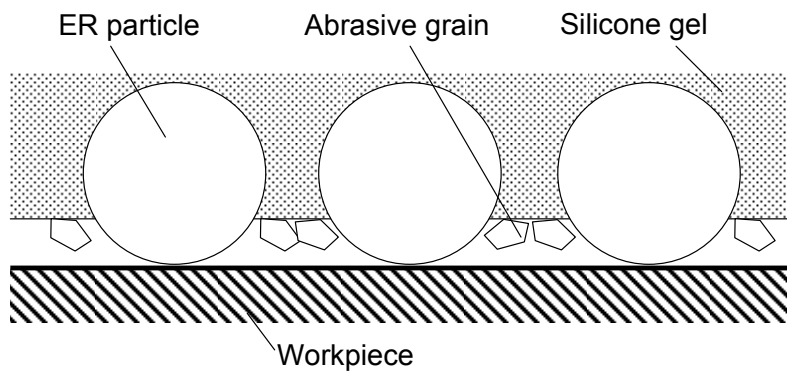


Fig. 6-36 Influence of diameter of abrasive grain

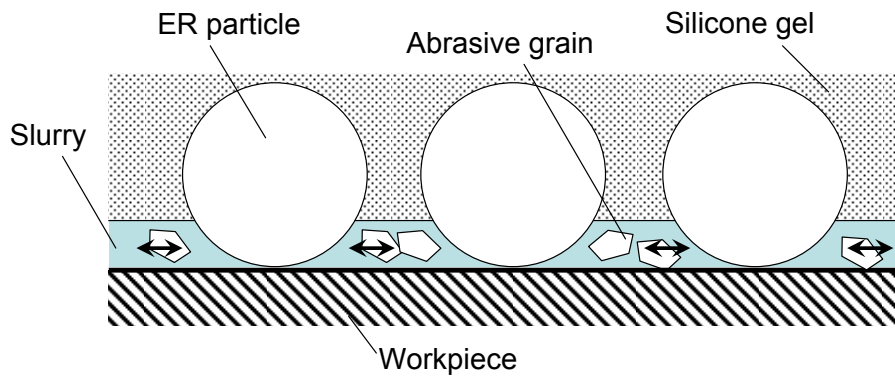


Fig. 6-37 Effect of slurry for moving abrasive grain

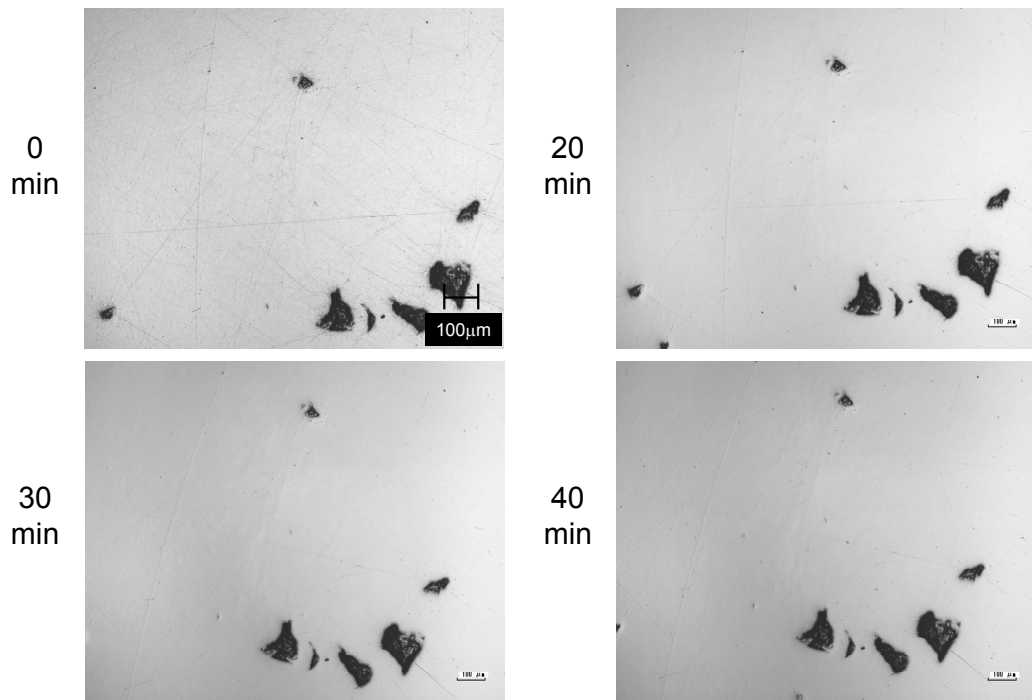


Fig. 6-38 Surface of workpiece at the center part ( # 4000 )

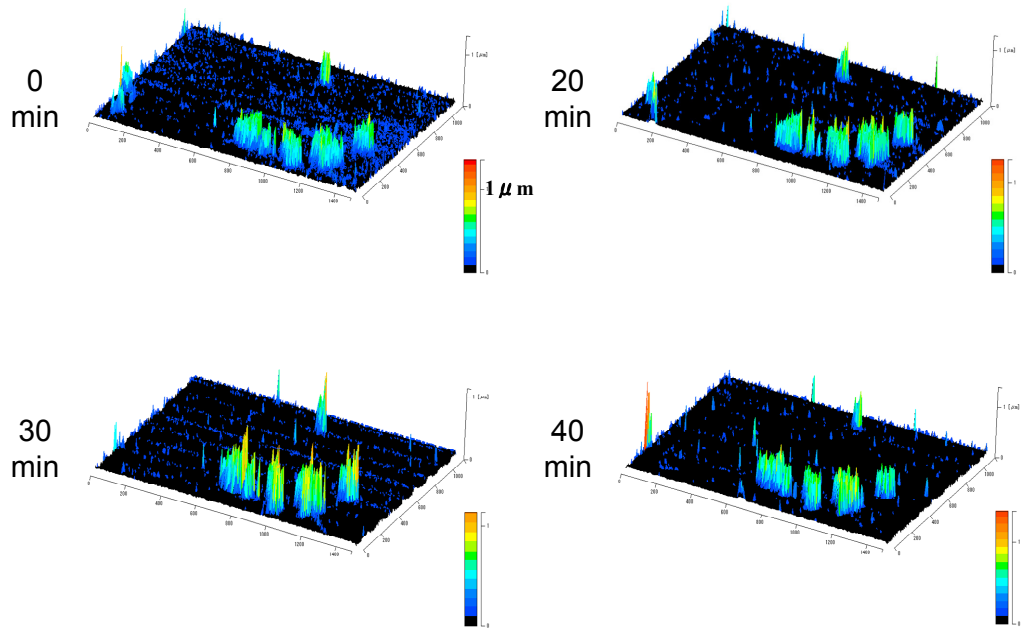
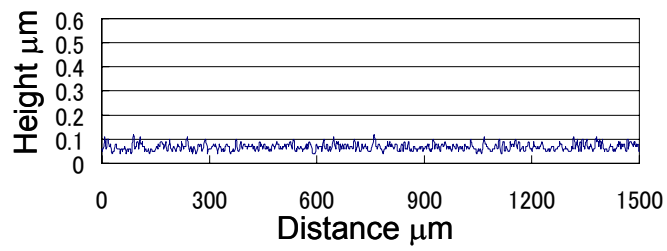
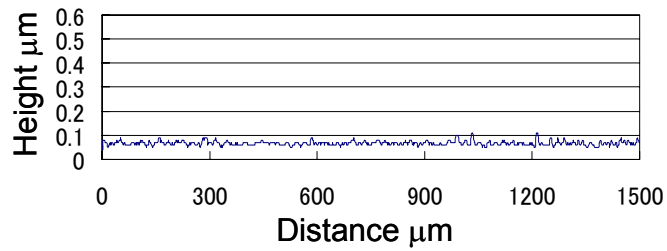


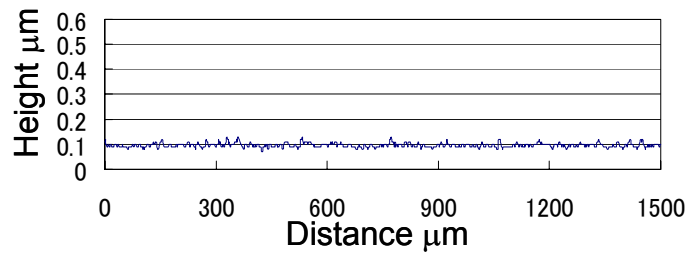
Fig. 6-39 3D surface profile of the center part ( # 4000 )



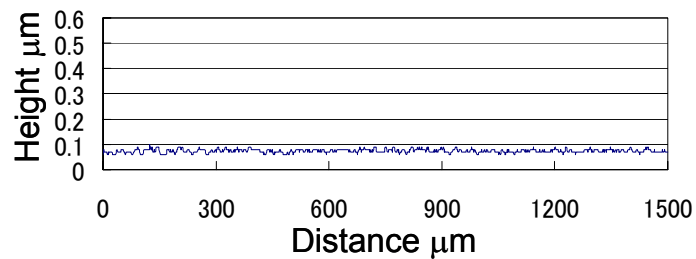
(a) 0min



(b) 20min



(c) 30min



(d) 40min

Fig. 6-40 Surface roughness of workpiece at the center part ( # 4000 )



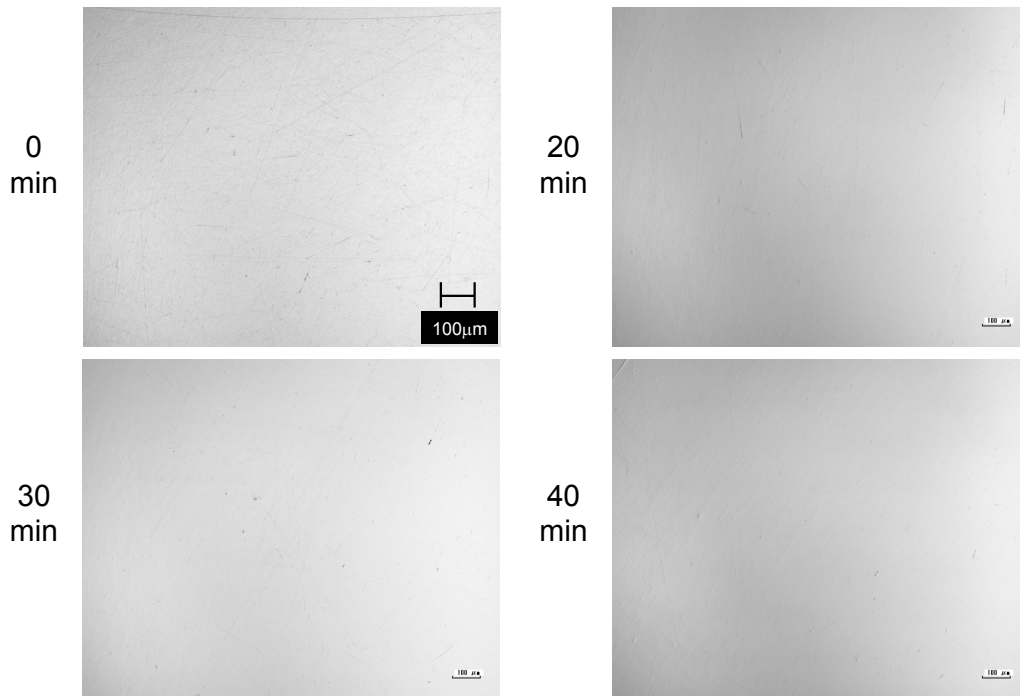


Fig. 6-41 Surface of workpiece at the peripheral part ( # 4000 )

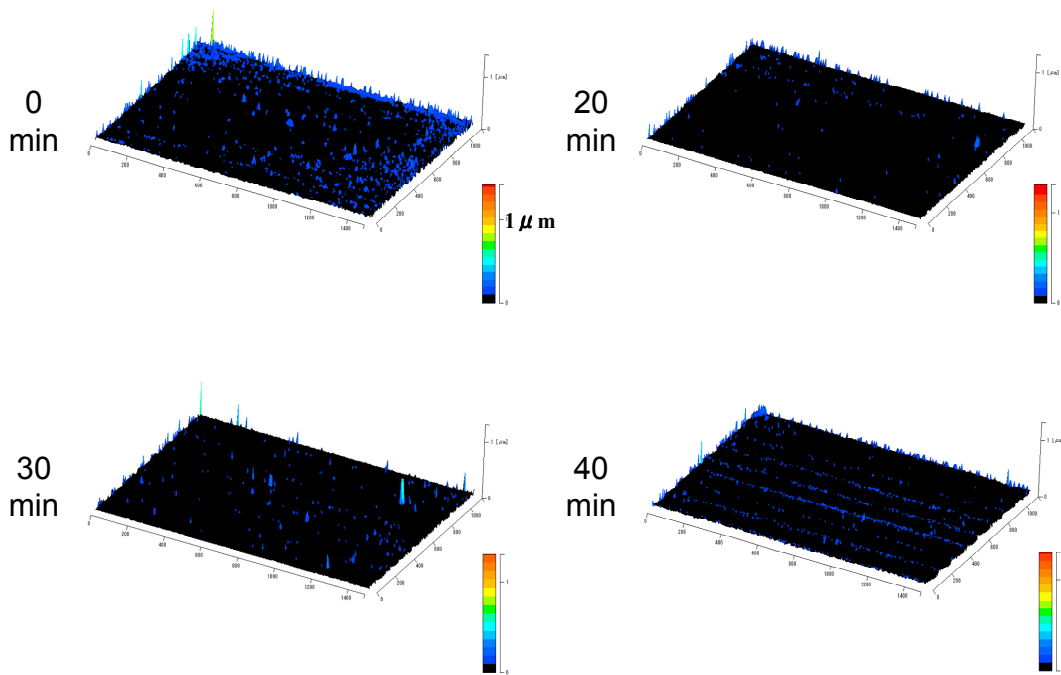
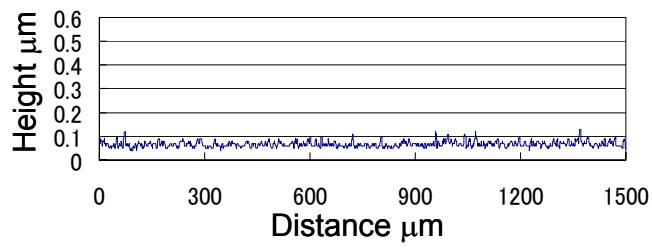
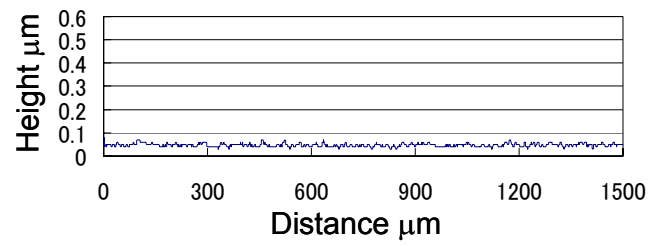


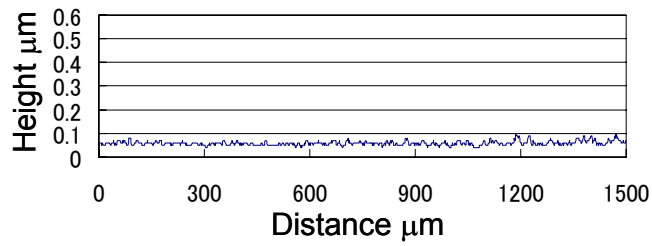
Fig. 6-42 3D surface profile of the peripheral part ( # 4000 )



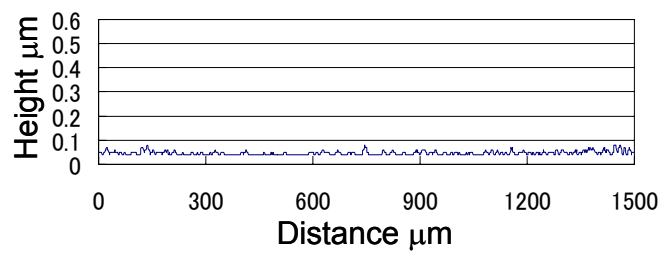
(a) 0min



(b) 20min



(c) 30min



(d) 40min

Fig. 6-43 Surface roughness of workpiece at the peripheral part ( # 4000 )

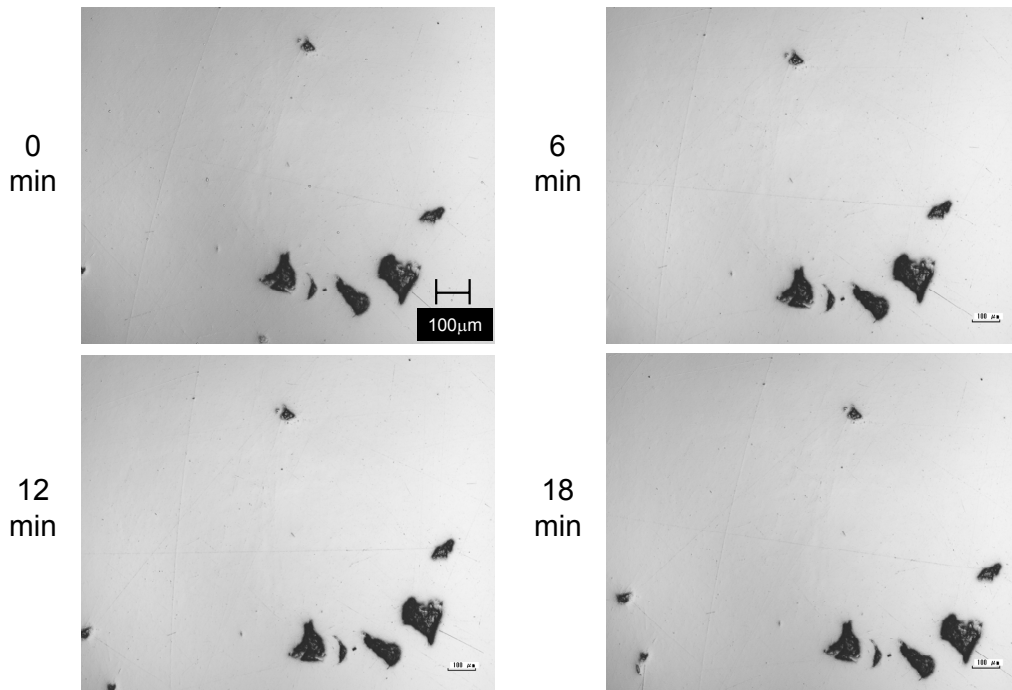


Fig. 6-44 Surface of workpiece at the center part ( # 8000 )

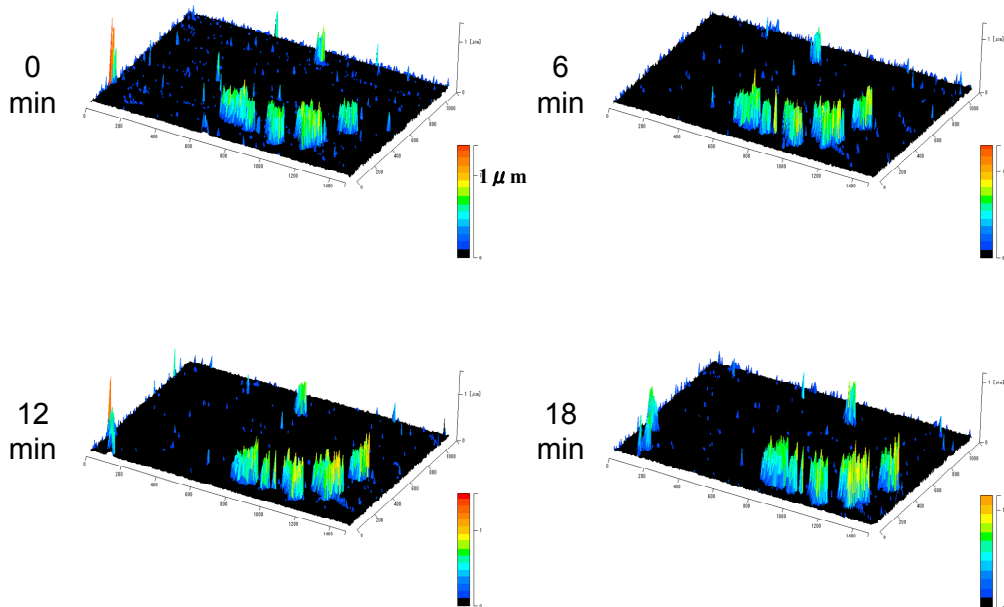
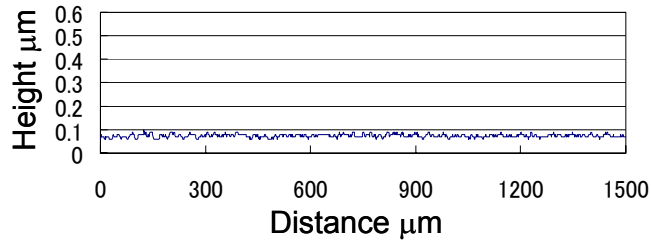
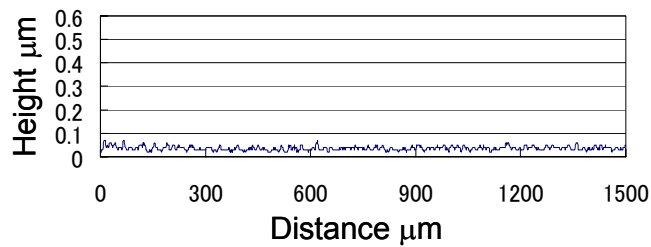


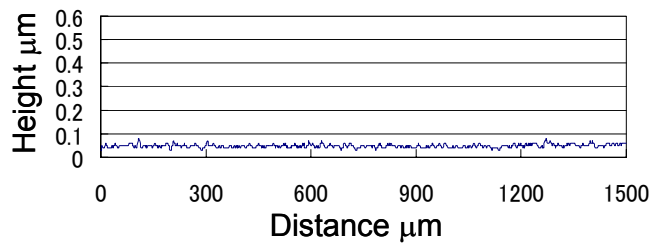
Fig. 6-45 3D surface profile of the center part ( # 8000 )



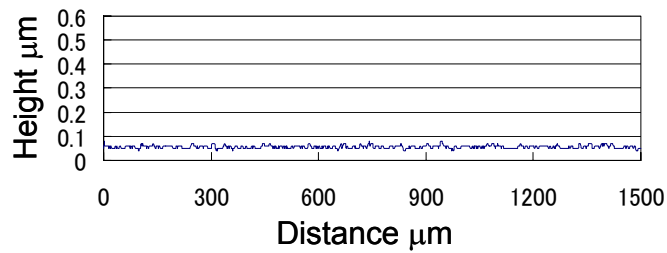
(a) 0min



(b) 6min



(c) 12min



(d) 18min

Fig. 6-46 Surface roughness of workpiece at the center part ( # 8000 )

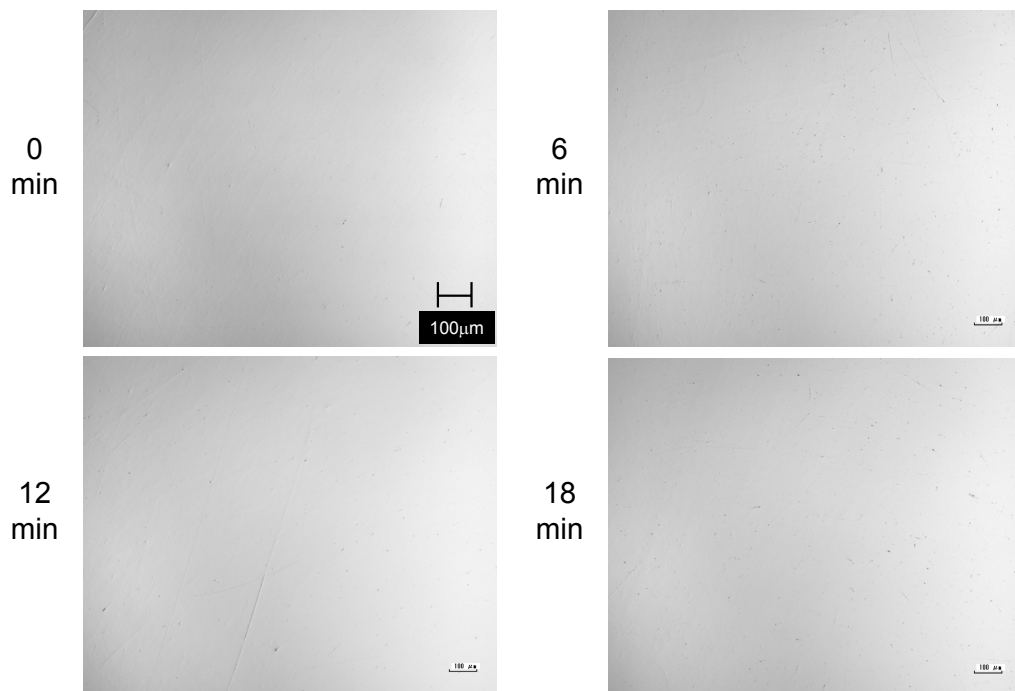


Fig. 6-47 Surface of workpiece at the peripheral part ( # 8000 )

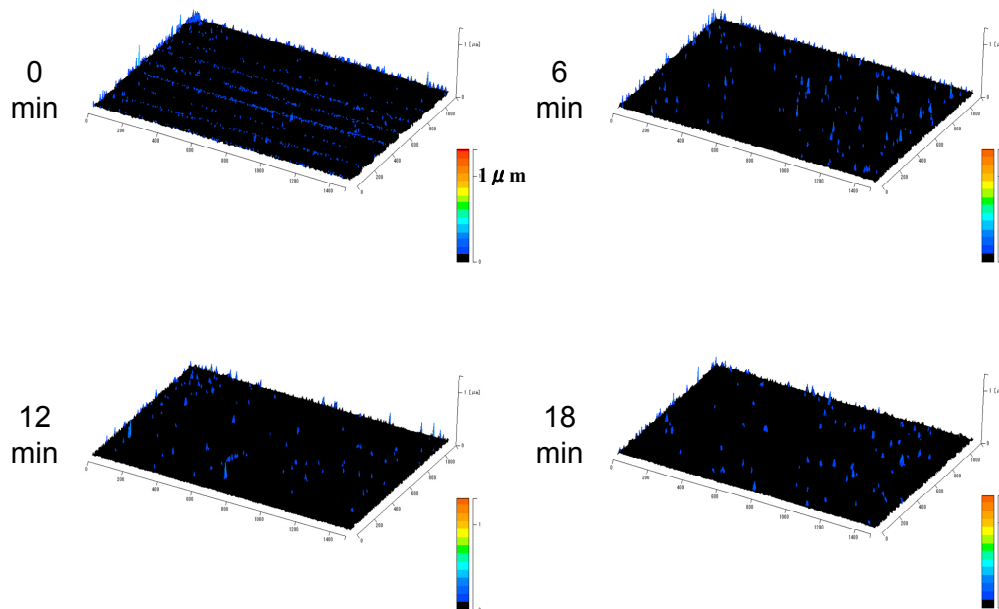
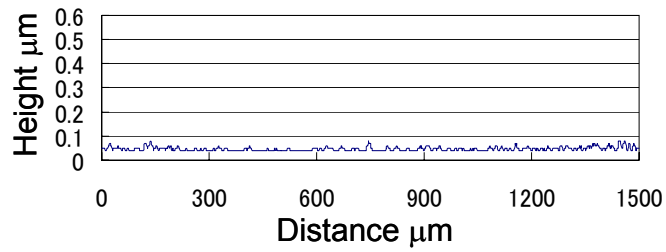
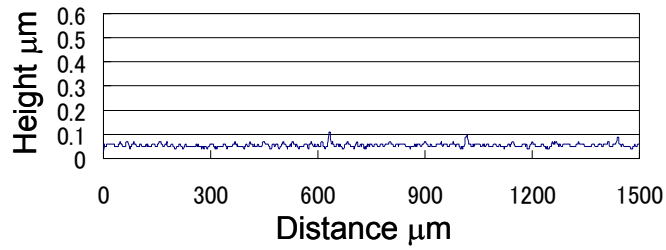


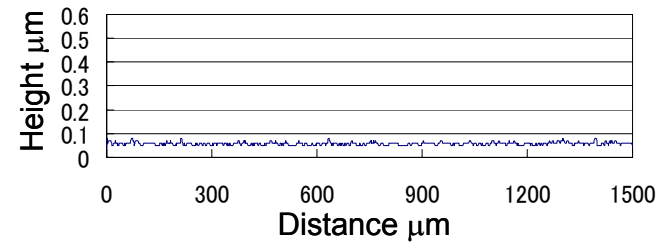
Fig. 6-48 3D surface profile of the peripheral part ( # 8000 )



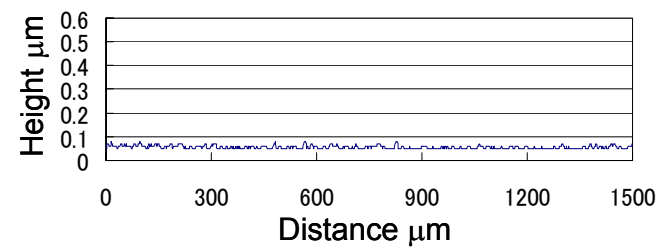
(a) 0min



(b) 6min



(c) 12min



(d) 18min

Fig. 6-49 Surface roughness of workpiece at the peripheral part ( # 8000 )

分かる通り、ワーク表面、高低図、粗さ曲線から、20min 後、30min 後、40min 後のワークの変化は確認できない。

仕上げに、ダイヤモンドスラリー#4000 を用いて研磨したワークピースを WA#8000 を用いて研磨を行った。ERG に砥粒を塗布せず、研磨前とワーク表面を計測するごとに、ワーク表面にスラリーを供給した。ワーク中央部及び外周部の Ra の推移をみると、無電場で研磨することでワークの Ra が  $0.003 \mu\text{m}$  を示し、更にワークの面粗さが向上したことが確認できる。ワーク中央部における研磨前、12min 後、18min 後、24min 後のワーク表面写真を図 6-44、高低図を図 6-45、粗さ曲線を図 6-46 に、ワーク外周部における研磨前、12min 後、18min 後、24min 後のワーク表面写真を図 6-47、高低図を図 6-48、粗さ曲線を図 6-49 に示す。ワーク表面写真や粗さ曲線では研磨による効果が確認できないが、高低図から僅かながら研磨によるワークの面粗さの向上が確認できる。

以上の結果から、砥粒径が ER 粒子径以上の場合、ERG 研磨パッドに砥粒を塗布して研磨を行うことで ER 効果による研磨効率向上や電界強度の変化による面精度向上が確認された。一方砥粒径が ER 粒子径より小さい場合、スラリーとしてワークに塗布することで ER 効果による研磨が可能となり高精度の研磨加工が行えることが確認された。

## 6-9 結言

本章では ERG を研磨パッドとして応用し、その加工特性を明らかにした。得られた加工特性に基づき、樹脂レンズ用金型として使用される表面精度の実現を目指して、ERG 研磨法によりステンレス鋼 SUS420 のワークピースの研磨を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ERG 研磨パッドに電界を印加しない場合、砥粒は滑り特性のよい ER 粒子に支持されているため、ワークピースと ERG の界面を滑りながら運動すると推測される。一方、電場を印加すると、ER 効果により粘着現象が生じ、砥粒はゲル部分により軟らかく保持される。これにより加工力が変化すると考えられる。
- (2) ERG 研磨パッドに電界を印加することで研磨トルクが変化する。交流電界よりも直流電界を印加する方が、発生するトルクが大きく、研磨効率が高くなることが確認された。
- (3) 砥粒の移動半径が小さいワーク中央部では、周速が遅いため無電場で研磨することは困難だが、ERG 研磨パッドに電場を印加することでワーク中央部を研磨することが可能となる。
- (4) ワーク中央部ではワーク外周部よりも ERG 研磨パッドとワークピースのせん断速度が遅くなる。ER 効果はせん断速度が遅くなることで強くなるため、ワーク中央部ではワーク外周部よりも電場を印加した際の研磨効率が向上すると考えられる。
- (5) ワーク中央部でもワーク外周部でも、電界強度  $2\text{kV}/\text{mm}$  で研磨した後に電界強度を下げて研磨することによって、ワークの表面精度が向上する。
- (6) 回転速度が上昇しても ER 効果が発生することが確認でき、 $50\sim 200 \text{ min}^{-1}$  の

範囲では回転速度を速くすることで研磨効率が向上することが確認された。

- (7) 砥粒径が ER 粒子径より大きい場合、砥粒を ERG 研磨パッドに塗布する方法で、砥粒の番手を細かくしていき研磨することで、初期粗さ  $Ra0.050 \mu m$  のワークを、ワーク中央部、外周部ともに表面粗さ  $Ra0.007 \mu m$  まで研磨できた。
- (8) 砥粒径が ER 粒子径より小さくなった場合、砥粒と研磨液を混合したスラリーをワークに供給し研磨することで、 $Ra0.003 \mu m$  を達成した。



## 第7章 片側電極における ERG の基本特性解析

### 7-1 序言

ER 効果を得るには，ERG に電界を印加する必要があるため，平行平板電極でそれをはさみ込むような構造をとる必要があった．しかし，回転部を持つデバイスに应用する際には，回転電極側にもスリップリングなどを介して配線を施す必要があるため構造が複雑化するという問題が生じる．また，平行平板構造を用いた場合，ER 効果を得ることができる対象は導電体に限られる．そこでこれらの問題を解決するために，電極を片側にのみ配置した片側構造電極の適用を試みた．本章では機械加工により片側構造電極を試作し，これを用いて ER 効果を確認した後，片側電極における ERG の基本特性を電場解析および実験的解析により明らかにした．

### 7-2 片側電極における ER 効果発生 の概念

ERG における ER 効果を得るためには，ERG に電界を印加する必要があるため電極構造は，図 7-1(a)に示すように2枚の電極でERGを挟み込むような対向型にしなければならないと考えていた．しかしながら，対向電極構造を有する ERG を，トルク伝達装置など回転部をもつデバイスに应用する際には，回転電極側の配線構造が複雑化するという問題や，ER 効果を得ることができる材質は導電体に限られるといった問題が生じる．そこで，ER 効果を得るためには ERG 内を電気力線が通過すればよいという考えから，電極を片側にのみ配置した片側電極構造を適用することを試みた．大阪大学の古荘らの研究成果として，均一系 ER 流体において片側電極を適用した場合に ER 効果を示すということが既に報告されており<sup>35-37)</sup>，ERG においてもこの原理が適用可能であり，ER 効果が発生すると予想した．対向材料が絶縁性で片側電極構造を適用した場合の ER 効果発生の様子を図 7-1(b)に示す．アーチ状に発生した電界が ERG 内を通過することで，ER 効果が発生する．次

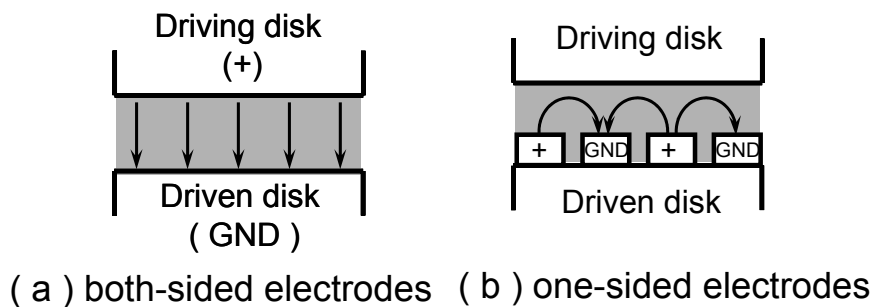


Fig. 7-1 Concept of both-sided electrodes and one-sided electrodes

節以降で、ERG において片側電極の適用可能性をせん断実験および電場解析を通して検討する。

### 7-3 試作した片側構造電極

片側電極を適用した場合において、ERG の ER 効果が発生するかを試験するために、機械加工により電極本数の異なる2種類の片側構造電極を試作した。作製した片側電極の構造を図 7-2 に外観を図 7-3 に示す。試作した片側電極は絶縁性であるベークライト製の基盤上に、四角柱のアルミ合金製電極を等間隔に数本配置した構造である。2種類の片側電極は、各電極寸法が  $50 \times 6.1 \times 6 \text{mm}$  (L×W×H) で電極総数が 10 としたタイプと、各電極の寸法が  $50 \times 3.7 \times 6 \text{mm}$  (L×W×H) で電極総数を 15 としたタイプを製作した。2種類の片側電極とも電極間の隙間は 1mm で、片側構造電極全体のスケールは  $70 \times 50 \text{mm}$  (L×W) とした。ERG シートは専用のモールド装置を用いることで、表面状態が常に同等の ERG シートを片側電極に成形することが可能である。また ERG シートの厚さは 0.2mm, 0.5mm, 1mm と変え成形することができる。また、試作した片側電極は電極と電極の隙間に ERG が入る構造とした。この部分を設けることで ERG シートは片側電極に固定され、水平方向の力が作用したとしても電極から ERG シートが剥離することはない。

片側電極における ER 効果は、電気力線が電極と導電体である上部アルミ平板の間に存在する ERG の中を通過することで生じると考えられる。そこで上部アルミ平板の代わりに導電作用を示す ITO 膜を施したガラス平板を用いて、電界印加時の ERG とガラス平板の境界面の現象を観察した。無電界時および電極間電位差を 750V とした時の観察結果を図 7-4 に示す。電極間電位差を与えることによって、黒い斑点が生じることが確認できる。この斑点は良好なぬれ性を示す ERG のゲル部分とガラスとの粘着部分である。つまり、片側構造電極の場合も、平行平板型の電極を使用した場合と同様、ERG と平板との境界面近傍に電界が作用し、ER 粒子がゲル内部に沈み込み周囲のゲルが隆起する現象が生じ、粘着性の高いゲルと上部プレートが接触することによりせん断応力が生じるものと考えられる。

## 7-4 片側構造電極における ERG の基本特性解析

### 7-4-1 基本特性測定装置

片側構造電極における ERG の特性を調べるために、ER 効果に関する最も基本的な特性である電極間電位差とせん断応力の関係を調べた。電界強度ではなく電極間電位差により評価する理由は、片側電極を適用した場合 ERG 内部における電界強度は一定値ではなくある分布を示すことにある。図 7-5 に示すように、片側電極上に成形された ERG シートの上部にアルミ合金製の平板を乗せ、片側電極部をベースプレートに固定する。ERG シートの上に乗せるアルミ平板は電荷の供給が起こらないように外部とは絶縁されている。また、上部アルミ平板は、これに接続したモータ駆動テーブルによって一定速度でスライドさせることができ、本実験ではその滑り速度を  $20 \mu \text{m/s}$  に設定した。電極間に電位差を与えた状態で上部アルミ平板をスライドさせた時に発生するアルミ平板と ERG 間のせん断応力を測定した。上部平板にアルミ材料を使用した理由として、対象が導電体である場合の ER 効果

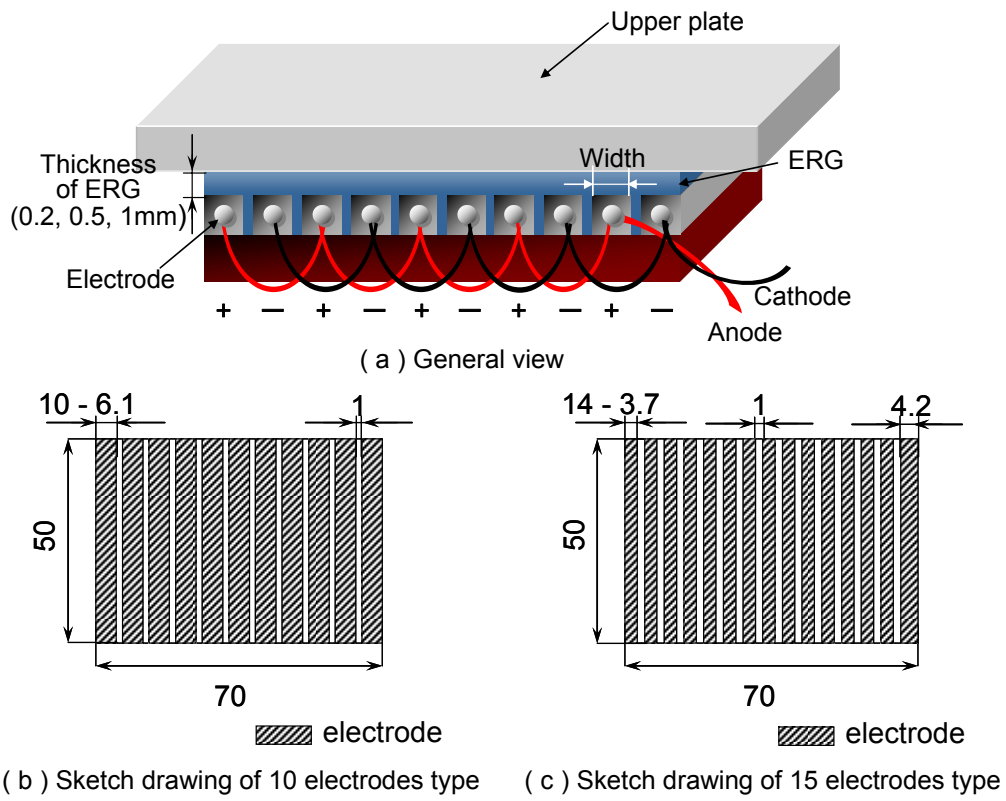


Fig. 7-2 Structure of one-sided electrodes

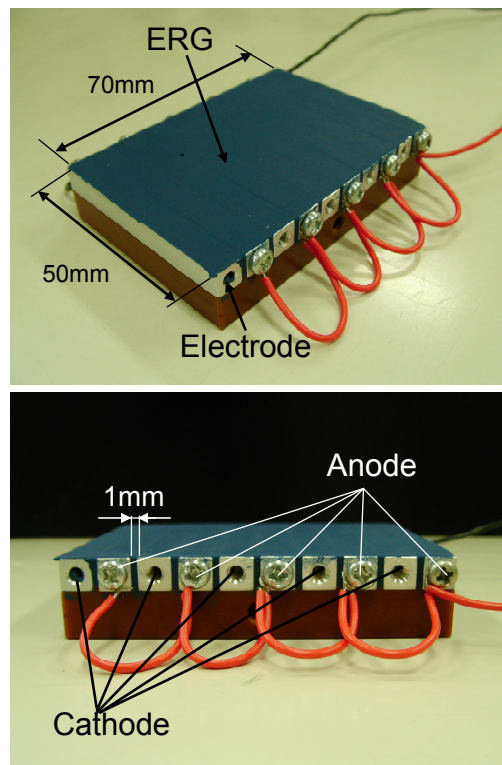


Fig. 7-3 ERG sheet on one-sided electrode

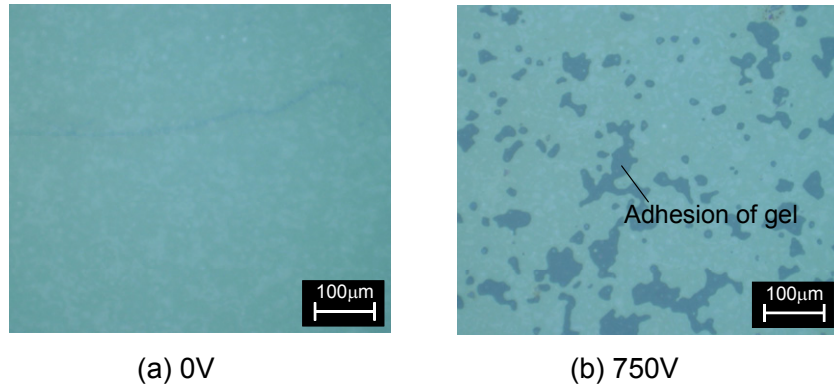


Fig. 7-4 Observation at boundary between ERG and the glass  
( One-sided electrodes)

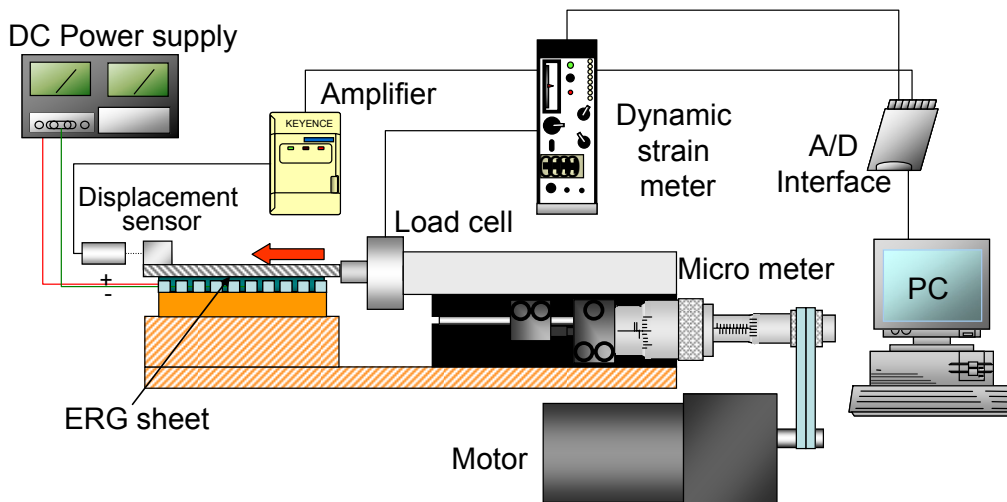
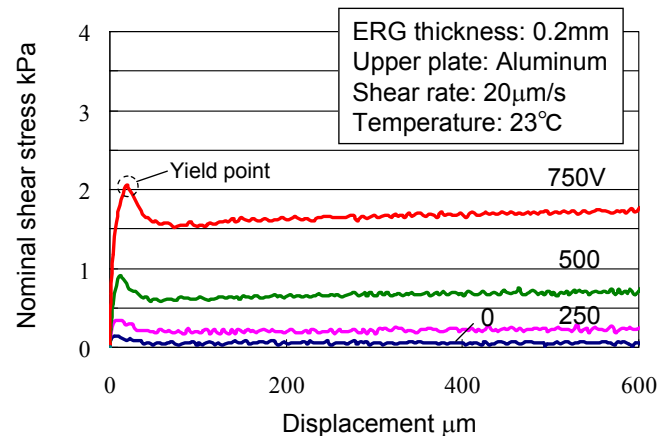


Fig. 7-5 Schematic diagram of shear test stand

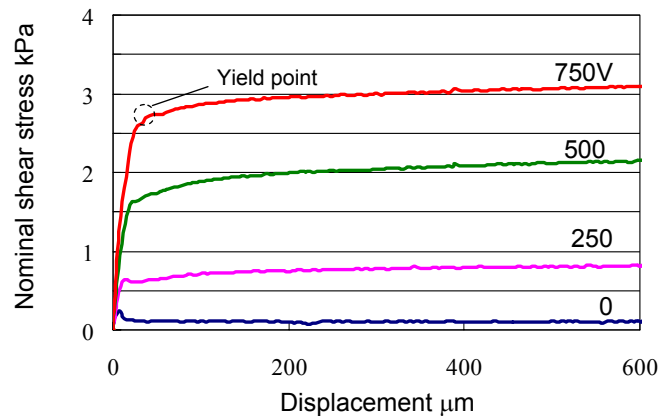
を調べるとともに、両側電極の場合との比較を行うためである。導電体を用いることで電気力線は全て導電体表面に垂直に入るため、緒言で述べたERGにおけるER効果が得られると推測される。上部平板をスライドさせた際の変位量を渦電流式変位計(分解能:0.4 $\mu\text{m}$ )により、せん断力をロードセル(分解能:10gf)を介し動歪み計により測定した。この測定は室温 23 $^{\circ}\text{C}$ の条件下で行った。

### 7-4-2 電界強度と発生せん断応力の関係

電極間に印加される電位差を 250V 毎に 0V から 750V まで変化させ、各電位差において 600 $\mu\text{m}$  せん断させた時の公称せん断応力測定を行った。ここで言う公称せん断応力とは、測定したせん断力を ERG シートの面積( 3500 $\text{mm}^2$ )で除した値である。ERG 厚さが 0.2mm、電極間隔が 1mm で、電極総数 10 本と 15 本における測定結果をそれぞれ図 7-6(a)、図 7-6(b)に示す。片側電極を適用した場合も、両側電極を用いた場合と同様に、ERG が、これに電界が作用することにより降伏応力を示す材料へと変化することが確認できる。また、印加する電極間電位差に応じて降伏応力が大きく変化する。変位に対するせん断応力の挙動について見てみると、降伏点を超える前の微小変位(約 15 $\mu\text{m}$  以内)では応力が上部平板の変位に対し



( a ) the total number of electrode: 10



( b ) the total number of electrode: 15

Fig. 7-6 Relation between shear stress and displacement (One-sided electrodes)

ほぼ線形的に変化し、降伏点を超えると応力が概ね一定となる。第3章でも述べたが、この理由は降伏点まではERGが上部平板に密着してせん断変形を生じ、降伏点を越えるとERGと上部平板の間で滑りが発生するためである。各電位差において片側電極を適用した場合に発生するERGのせん断応力は従来の平行平板電極を使用した場合<sup>7)9)</sup>に比べて、その値は半分以下になるが、片側電極においても平行平板電極を使用した場合同様、ER効果が発生することが明らかとなった。

電極総数10本の片側電極においてERGの厚さを変化させた場合に発生する降伏応力を測定した。測定結果を図7-7に示す。ERGの厚さを薄くすることで、発生する降伏応力は大きくなることを確認できる。電極間電位差が250V、500VではERG厚さによる影響があまりみられない。電位差が750V時、ERG厚さを0.2mmとすると大幅に発生する降伏応力が増す。電極近傍の電界は非常に強く、ERG厚さをある値(本研究では0.2mm~0.5mmの間)以下とすることで、より多くの電気力線がERGを通過し、大きなER効果を得ることができると考えられる。

また、図7-6より電極本数の違いにおける公称せん断応力の挙動を見てみると、電極総数が多いほど発生する公称せん断応力は大きくなる傾向があることがわかる。電極構造の違いによるせん断応力の変化について考察するために、電極総数10本と15本の片側電極に対して電場解析を行った。電極本数10本と15本に対応したモデルとして、ERG厚さ0.2mm、電極間隔1mmに固定し、電極幅は6.1mm、3.7mmと変化させた2種類を作製した。正電極表面に750V、負電極表表面に0Vの電位を与え、ERGと上部導電体の境界面は一定電位になるよう条件を与え解析を行った。電極総数10本(電極幅6.1mm)のモデルにおいて、電極間に生じる電界の様子を図7-8に示す。電極と上部導電体の間に存在するERGの中を電気力線が通過している様子が確認できる。解析結果より上部導電体の電位は370Vであり、これは実験値と同等の値であった。ここで正電極、負電極中心からの垂線と上部電極とERGの境界線とが交わる点をそれぞれA点、B点と定める。線分AB上における電界分布を調べるため、線分AB上の点を等間隔に20点とり、各点における電界強度を求めた。図7-9に電極総数10本と電極総数15本における上部

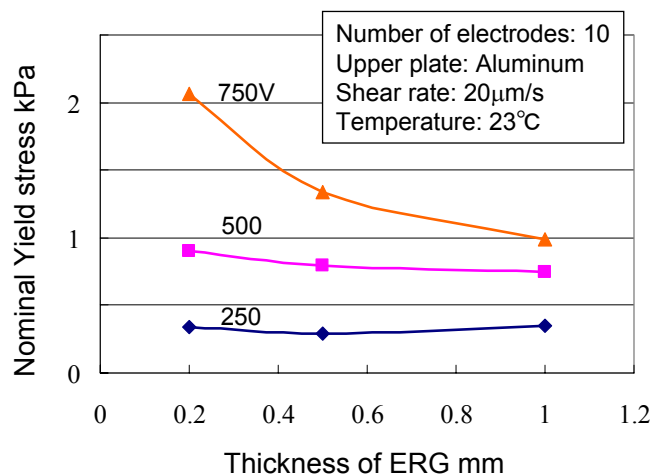


Fig. 7-7 Relation between yield stress and thickness of ERG  
( One-sided electrodes )

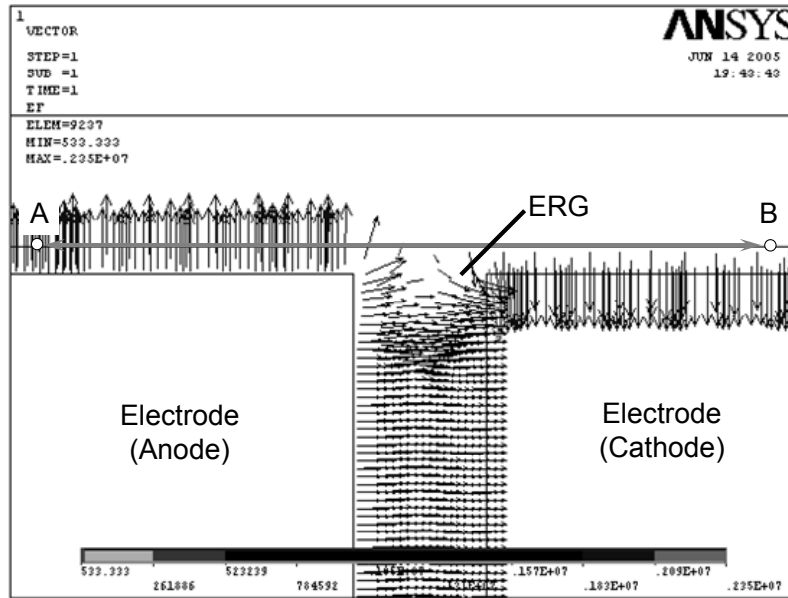


Fig.7-8 Distribution of electric lines

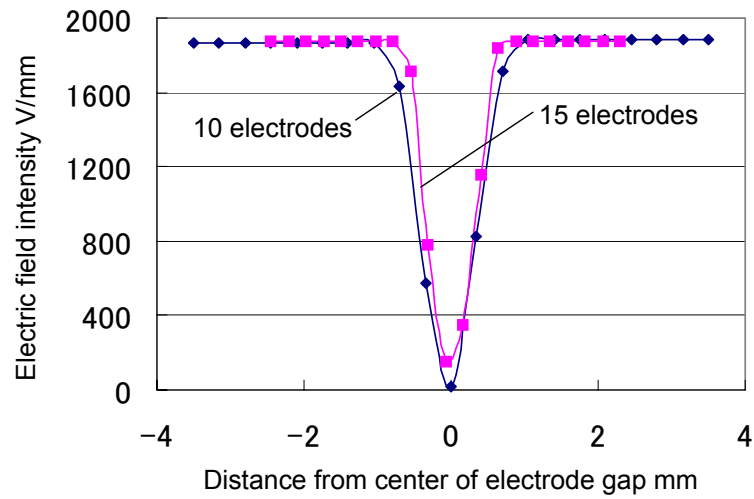


Fig. 7-9 Distribution of electric field between ERG and the upper plate

平板とERGの境界面(線分AB上)の電界分布を示す。線分AB上に印加される電界強度の平均を求めることで、上部平板とERGの境界全体に印加される平均の電界強度を求めることができる。電極総数10本ではその平均電界強度は1655V/mm, 電極総数15本では1624V/mmとなる。つまり、電極間隔が一定である場合、電極幅を変化させても上部平板とERG表面の境界面に印加される電界強度はほぼ一定であり、発生するせん断応力に変化はないと考えられる。ここで、平均電界強度と発生するせん断応力の関係について考える。発生する降伏応力はERGに印加される電界強度におおよそ比例することが確認されている(第3章, 図3-2,3-24参照)。今回使用したERGを平行平板電極で挟み、せん断応力測定を行った結果を図7-10に示す。電界強度1500V/mmを印加した場合、約9kPaの降伏応力が発生することが確認された。そこで、この結果と電場解析結果から片側電極におけるERGの推定される降伏応力は以下の式により求めることができると考えられる。

$$\tau_{est} = \frac{9.0}{1500} \times E_{ave} \quad (7-1)$$

ここで $\tau_{est}$ は推定される降伏応力,  $E_{ave}$ は上部平板とERGの境界に印加される平均電界強度である。(7-1)式より電極総数10本と15本において、推定される発生降伏応力は各々9.9kPa, 9.7kPaとなり、これは図7-6に示した実験結果とは大幅に異なる。この原因としてERGの収縮作用が考えられる(第4章, 図4-12参照)。ERGは電界強度に応じて微小な収縮が生じるため、電界強度の高い部分と低い部分があることによりその表面に凹凸が生じ、上部平板とERGの接触する面積が減少してしまうと考えられる。すなわちERGにおけるER効果はERGと上部平板との境界面の接触状態に依存するため、接触面積が小さくなることで十分な効果が得られず

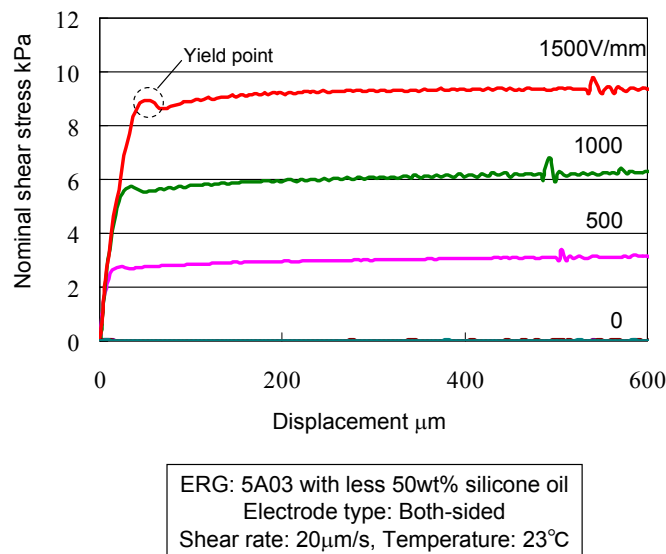


Fig.7-10 Result of shear stress measurement with both-sided electrodes



発生せん断力が低下したと考えられる。実際に導電体膜 (ITO 膜) を塗布したガラス平板を用いて ERG の表面状態変化を観察したところ、電極間電位差を与えても粘着現象が生じない部分が大半を占めていた。つぎに図 7-6 に示したように、電極本数が多い場合、発生するせん断応力が高くなった原因を考える。電極間に成形された ERG に対して、その表面に印加される電界強度は電極部のそれにくらべ低い。このため電極間に成形された ERG の収缩量は、電極部分のそれに比べて小さくなるから、この部分は上部平板に対して強く接触することになる。ここで電極本数が多いほど電極間面積は増加するので、ERG の上部平板に対する接触割合も大きくなり、発生するせん断応力が高くなるものと考えられる。

この問題を解決するために、7-5 節以降で、電極幅をさらに小さくし、収縮の影響を極力無視できるような片側パターン電極を考案し、これを用いて特性解析を行う。

### 7-4-3 動特性測定装置

片側構造電極における ERG の静的特性解析の結果、移動する上部平板に配線することなく ER 効果を得ることが可能であることが明らかとなった。そこで、クラッチ・トルク伝達装置・制振装置などへの応用可能性を検討するため、動的特性を実験的に解析した。測定装置の外観を図 7-11 に示す。前節で最も効率よく ER 効果を得ることができた電極総数 15 本の片側電極、ERG 厚さ 0.2mm を用いて測定を行った。動電型加振器によりスライダに振動を加えることで、上部平板を加振した。加振条件は、入力加振振幅を 100 $\mu\text{m}$  として、加振周波数を 1Hz から 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100Hz まで変化させた。ここで言う入力加振振幅とは、無電場時に動電型加振器から与えられる振動振幅のことであり、駆動電流を変化させることで振幅が調整可能である。スライダを振動させた状態で ERG シートに電界を印加し、その時の上部平板の変位とせん断応力の振幅変化を測定した。またその測定結果より電

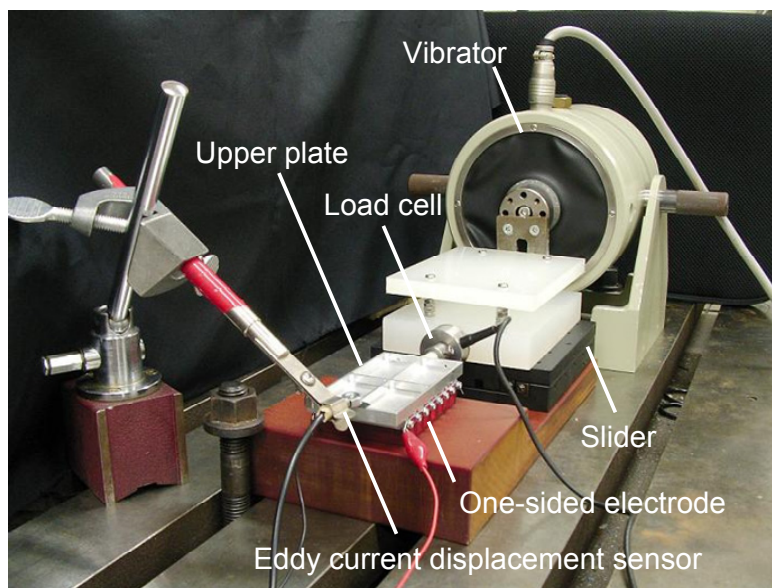


Fig. 7-11 Experimental setup for the vibration test

界に対する振幅変化の応答性を求めた。

#### 7-4-4 加振実験結果

振幅  $100\mu\text{m}$  で加振周波数 25Hz, 50Hz における測定結果をそれぞれ図 7-12, 図 7-13 に示す. 図 7-12(a)より  $100\mu\text{m}$  の入力加振振幅が電極間に電圧を印加することで, 約  $5\mu\text{m}$  の振幅に抑制されていることがわかる. また, 図 7-12(b)より電位差 0V 時は 1kPa のせん断応力が, 電極間電位差 750V を印加することで約 2.8kPa に増大していることが確認できる. また, 図 7-12(a)より電圧の変化に対する振幅変化の時定数を算出した. 電圧の立ち上がりに対する時定数は約 20msec で, 立ち下りに対する時定数は約 100msec であった. 片側電極構造を用いた場合も平行平板電極を用いた場合(第3章, 表 3-1 参照)と同様, 応答性が高いことが確認された. 加振周波数 50Hz においては, 図 7-13(a)より振動振幅はほとんど抑制できず, 図 7-13(b)より発生するせん断応力も 2kPa 程度と小さく, 振動抑制効果は小さい.

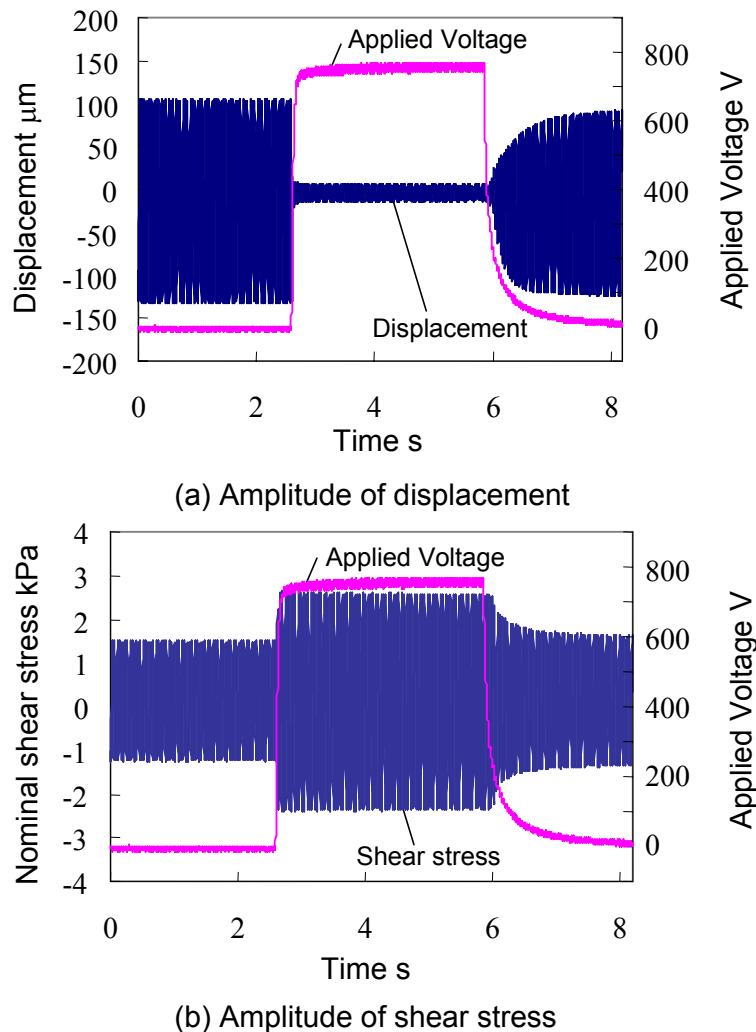
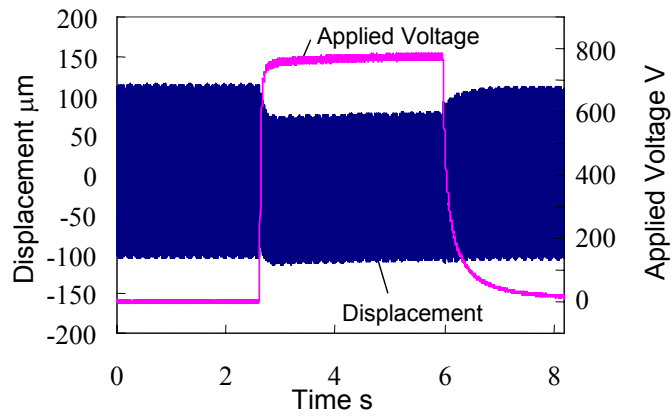
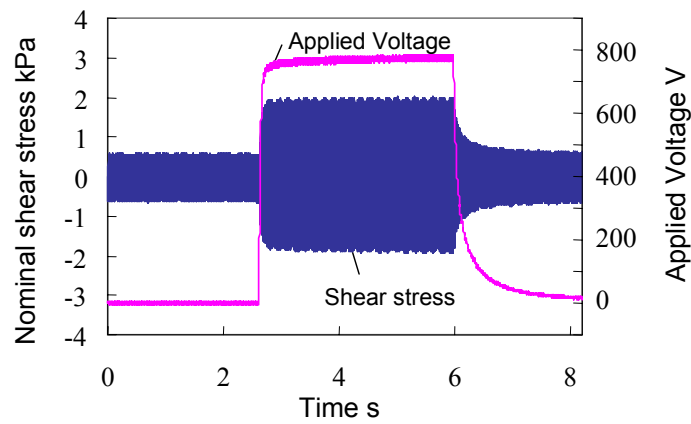


Fig. 7-12 Result of vibration test ( 25Hz )



(a) Amplitude of displacement



(b) Amplitude of shear stress

Fig. 7-13 Result of vibration test ( 50Hz )

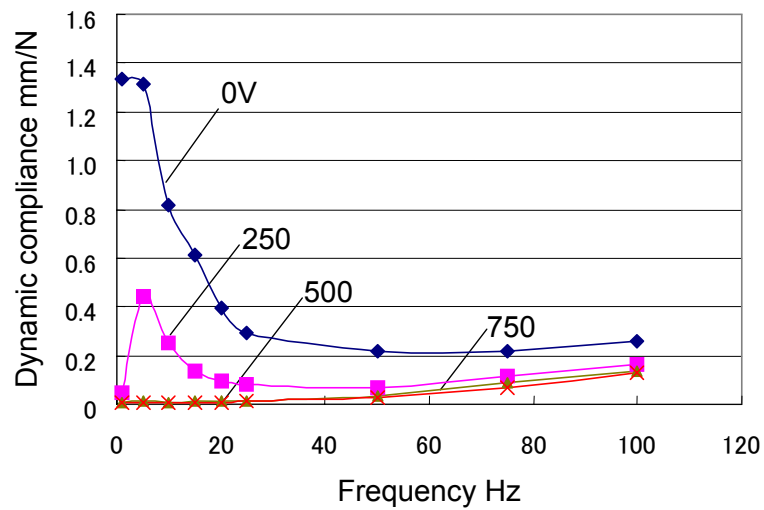


Fig. 7-14 Dynamic characteristics of ERG sheet on one-sided electrodes

ERG は、微小せん断変位では弾性的特性を示し、せん断変位が大きくなると滑り特性を示す。低周波数においては加振エネルギーが小さいため、電界を印加することで、振動エネルギーを弾性エネルギーへと変化させ振動抑制を行っている。高周波数においては、加振エネルギーが高くERGのもつ降伏力を超える加振力が与えられるため、滑り領域で発生するせん断力により減衰効果を得る。つまり、入力加振振幅が ERG の弾性変位域より大きい場合、加振周波数によって特性が変化することが明らかとなった。ここで言う弾性変位域とは、静的特性実験結果(図 7-6)より約  $15\mu\text{m}$  以内のせん断変位のことである。

そこで、加振器からの入力加振振幅を  $10\mu\text{m}$  として、弾性領域における動的特性を調べた。動的特性を評価するために動コンプライアンスを測定した。結果を図 7-14 に示す。電界を印加していないとき、5Hz 近傍で動コンプライアンスがピークを示す。電極間電位差 250V を印加することで、5Hz 近傍でピークは存在するものの動コンプライアンス値を小さく抑えることができ、500V 以上を印加した場合、ほとんど認められなくなる。入力振幅が ERG の弾性変位内である場合、電極間に印加する電圧を調整することによって、共振を抑制することが可能であることを確認した。片側構造電極を適用した ERG は、精密機械用の制振装置や可変防振マウントなどへの応用が期待できる。

## 7-5 対向材料の違いによる電場の構成

### 7-5-1 片側パターン電極

機械加工により製作した片側電極は、電極一本ずつに配線を施しているため、配線構造が複雑であることや、四角柱の各電極は基盤にねじ固定するためのねじ穴が施されているため、電極幅はねじ穴の直径以下にすることは不可能であった。片側電極における ERG の基本特性を解析する上で、電極形状が ER 効果に及ぼす影響を実験的に調べる必要があるため、電極幅や電極間隔をより小さくした片側電極の製作が望まれる。そこで、微細な電極形状をもつ片側電極を作製するために、電子回路基盤に広く利用されているプリント基盤(Printed Wiring Board, 以後 PWB)により、片側電極を製作することを試みた。PWB を利用して作製した片側電極を特に片側パターン電極と呼ぶことにする。PWB の構造を図 7-15 に示す。片側パターン電極の作製方法を以下に述べる。

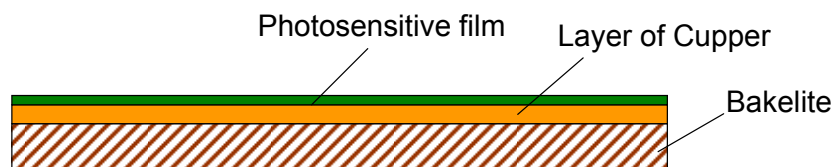


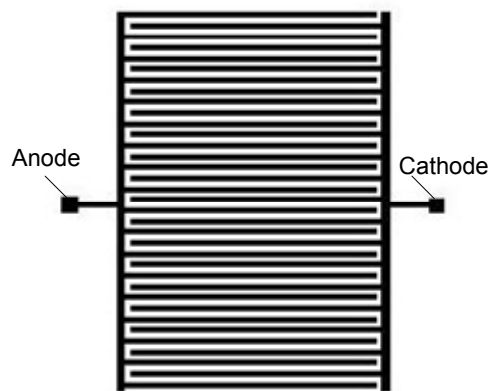
Fig. 7-15 Structure of Printed Wiring Board

<片側パターン電極の作製方法>

- ①電極パターンを施した透明なマスクシートを PCB の感光膜面にセットし、これに紫外線を数分照射することで電極パターン部分を除いた感光膜部分が感光される
- ②紫外線を照射した後、PCB を現像すると感光された部分の感光膜が除去され、銅薄膜がむき出しになり、電極パターンが浮かび上がる。
- ③現像し終えた PCB を第二塩化鉄のエッチング溶液に浸すことで、むき出しとなった銅薄膜が除去され、電極パターンが形成される。以下に第二塩化鉄溶液を使用した場合のエッチング反応式を示す。

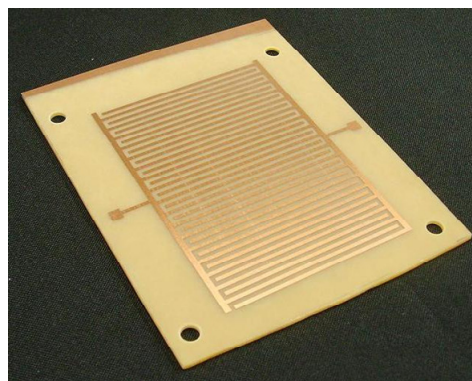


片側パターン電極を用いることで、微細な電極パターンを作製することが可能となるばかりでなく、図 7-16 のような電極パターンを施すことで陽極と陰極への配線が非常に簡単になる。図 7-17 の電極パターンをもとに製造した片側パターン電極を図 7-17 に示す。



Electrode width 1mm, Electrode gap 1mm

Fig. 7-16 An electrode design



Electrode width 1mm, Electrode gap 1mm

Fig. 7-17 One-sided patterned electrodes

### 7-5-2 電極構成と発生電場の関係

片側パターン電極上に成形した ERG シートの上面に配置する対象物が導電体か絶縁体かによって、電場の発生の仕方は大きく異なる。図 7-18 に3パターンの電極-対象物の構成と発生電場の概略を示す。

図 7-18(a)に示す対向接地導電体型は、上部対象物を導電体として、それを接地させた状態で、片側電極に電極間電位差を与えた場合に発生する電場の様子である。対象物が導電体である場合、電界集中が起こる電極の角では片側電極の陽極から陰極に向かってアーチ状の電気力線が発生しているが、陽極から発生する電気力線の大半は接地された対象物表面に向かって垂直に入る様子が確認できる。導電体に垂直に電気力線が入る理由は、導電体対象物表面に水平方向成分の電気力線が生じたとしても導電体表面ではクーロン力(  $F=qE$  )により電子の移動が瞬間的に起こり、水平方向成分は全て打ち消されるためである。また、導電体内でも同様に電界が発生したとしても、クーロン力により導体内の自由電子が移動し、それによって生じる誘導電荷が反電界を作るため導電体内を通過しようとする電界は一瞬で相殺されてしまう。このため、静電場では電気力線が導電体内を通過することは決してない。

図 7-18(b)に示す対向自由導電体型は、上部対象物である導電体を接地しない場合である。対象物の導電体を接地していないことから、片側電極に電極間電位差を与えると、陽極から対象物に向かって、また対象物から陰極にむかって電気力線が発生する。これにより理論上、対象物は印加する電極間電位差の 1/2 の電位を持つと考えられる。

図 7-18(c)に示す対向絶縁体型は、上部対象物を絶縁体として、片側電極に電極間電位差を与えた場合に発生する電場の様子である。対象物が絶縁体となることで、電気力線は対象物内を通過することが可能となり、片側電極の陽極から陰極へアーチ上に発生する。絶縁体におけるERGのER効果は、ERGと絶縁体の界面を電気力線が通ることで、発生すると考えられる。

つまり、片側電極を適用した場合には、上部対象物の違いにより電界の発生仕方が異なるため、得られるER効果も異なると考えられる。

### 7-5-3 電場解析

図 7-18 に示した3種類の電極構成において有限要素法により電場解析を行った。解析ソフトは磁場電場解析に特化した ANSYS Emag を使用した。片側パターン電

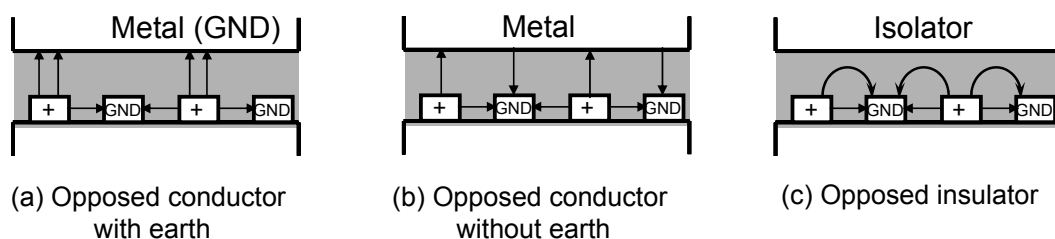


Fig. 7-18 Relation between constitution and electric field

極は隣り合う陰極と陽極の繰り返し構造を取るため、解析には陽極、陰極の一对のモデルとすれば十分である。使用した解析モデルを図7-19に示す。電極構成の寸法は表7-1のように設定した。ERGのER効果はERG表面と上部対象物の界面における電界強度に依存すると考え、その界面の電界強度が最大1500V/mmとなるように、片側電極に与える電位を設定した。具体的には、対向接地導電体型を適用した場合は、陰極を0V、陽極を450Vと設定し、対向フリー導電体型を適用した場合は、陰極を0V、陽極を900Vと設定し、対向絶縁体型を適用した場合は、陰極0V、陽極を1500Vと設定し解析を行った。

各電極構成における電界ベクトル線図を図7-20～22に示す。図7-20を見ると、対向接地導電体型では、電気力線が陽極表面から垂直に発生し接地導電体に垂直に入ることが確認できる。また、陰極では電極の角部分で電界ベクトルが存在するものの、それ以外の領域では電気力線が全く確認できない。図7-21をみると、対向フリー導電体型では、電気力線が陽極から導電体に、導電体から陰極に発生していることが確認できる。また、陽極から陰極に向かう電気力線も存在する。解析の結果から導電体対象物に電荷の供給が起こらないように外部と絶縁することで、導電体は電極間電位差のおおよそ半分の値の電位を持つことが確認された。次に図7-22をみると、対向絶縁体型では、陽極から陰極に向かって電界がアーチ状に発生しており、さらに絶縁体の対象物内をアーチ状の電気力線が通過していることが確認できる。絶縁体に与えた誘電率はベークライトを想定して $\epsilon = 3$ であり、ERGの誘電率 $\epsilon = 30$ に比べて十分に小さい。そのため絶縁体対象物の中を通過する電気力線は少なく表面付近を密集して通る電気力線が多いことがわかる。また絶縁体対象物表面におおよそ一様に電界ベクトルが存在していることが確認できる。

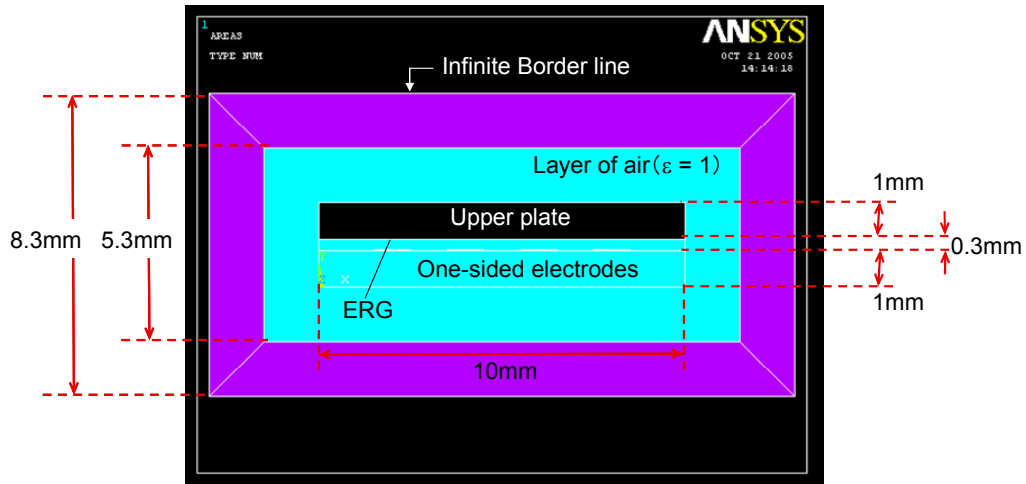
電場解析の結果から、電極－対象物の構成の違いによりERG内に発生する電場が大きく異なることが明らかとなった。ERGにおけるER効果は発生電界に大きく依存する。そこで、次節以降では上部対象物が導電体の場合と絶縁体の場合におけるERGの基本特性解析を行う。

## 7-6 対向材料の違いによるERGの基本特性解析

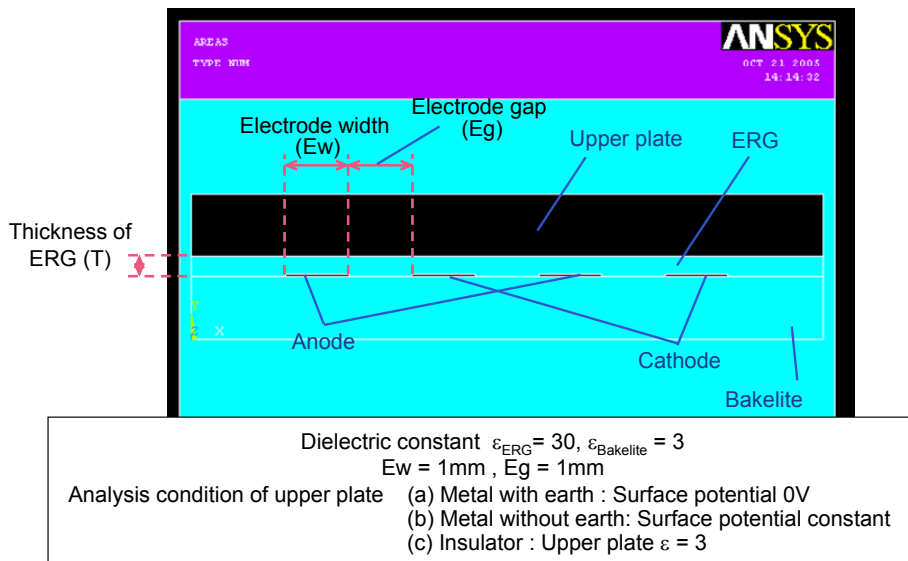
### 7-6-1 基本特性測定法

上部対象物の特性の違いによるERGのER効果を調べるために、ER効果に関する最も基本的な特性である電極間電位差とせん断応力の関係を実験的に調べた。せん断応力測定は図7-5に示したものと同様の装置を用いて行った。また、実験で得られたせん断応力と電場分布の関係を調べるために、有限要素法による電場解析を行った。

上部対象物が導電体の場合におけるERGの基本特性を調べるため、上部対象物として7-4節で述べたアルミ平板を使用した。ERGシートの上に乗せるアルミ平板を接地した条件と、電荷の供給が起こらないように外部とは絶縁した条件で、それぞれ特性解析を行った。また、各条件において片側パターン電極の形状がER効果にどのように影響するかを調べるために、電極幅と電極間隔がER効果に及ぼす影響について調べた。片側パターン電極に与える電極間電位差はERGと対象物との界面における最大電界強度が1500V/mmとなるように、対象物を接地した条



(a) Entire Model



(b) Model of one-sided electrodes part

Fig. 7-19 Model for electric filed analysis



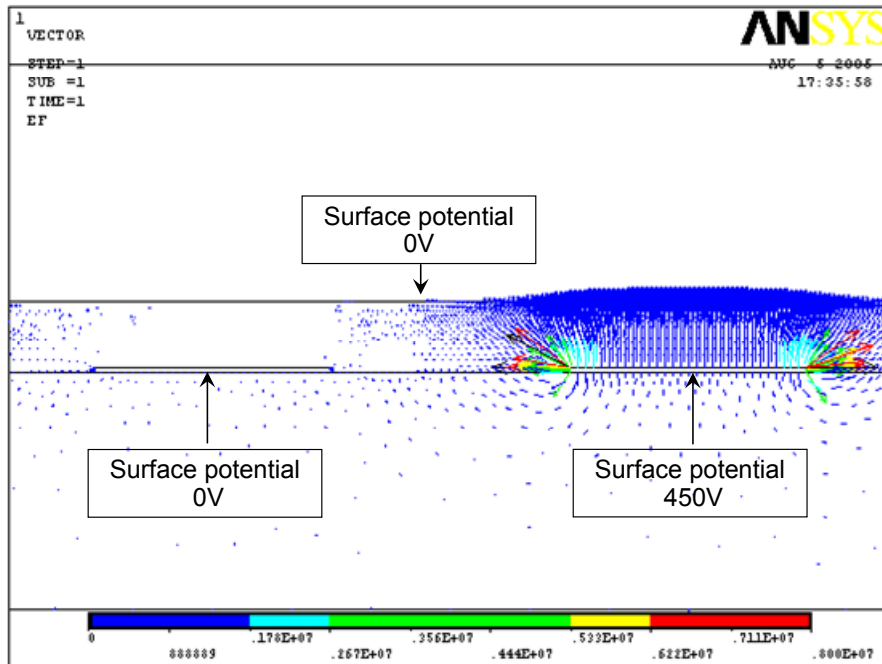


Fig. 7-20 Electric vector in case of metal model with earthing

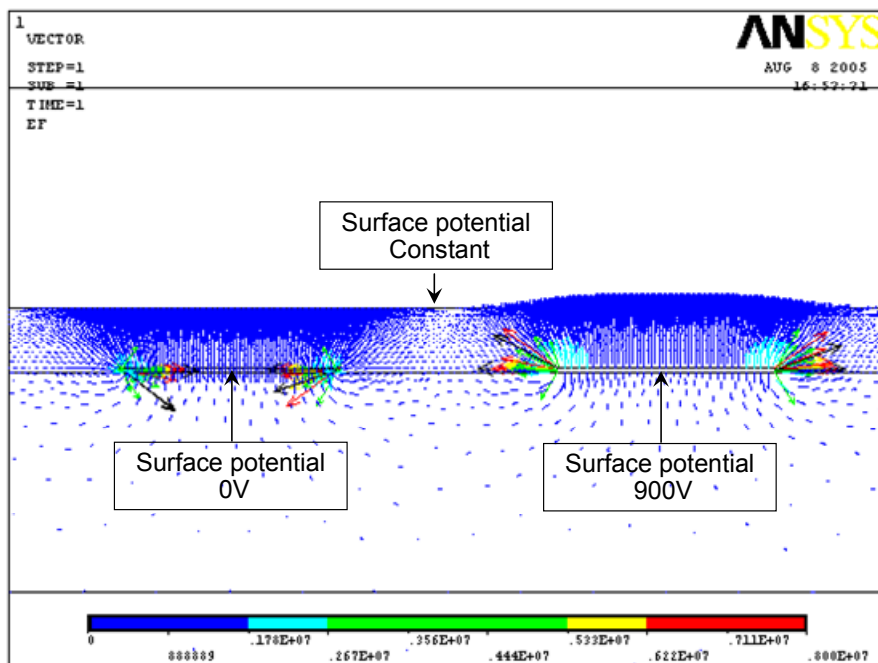


Fig. 7-21 Electric vector in case of metal model without earthing

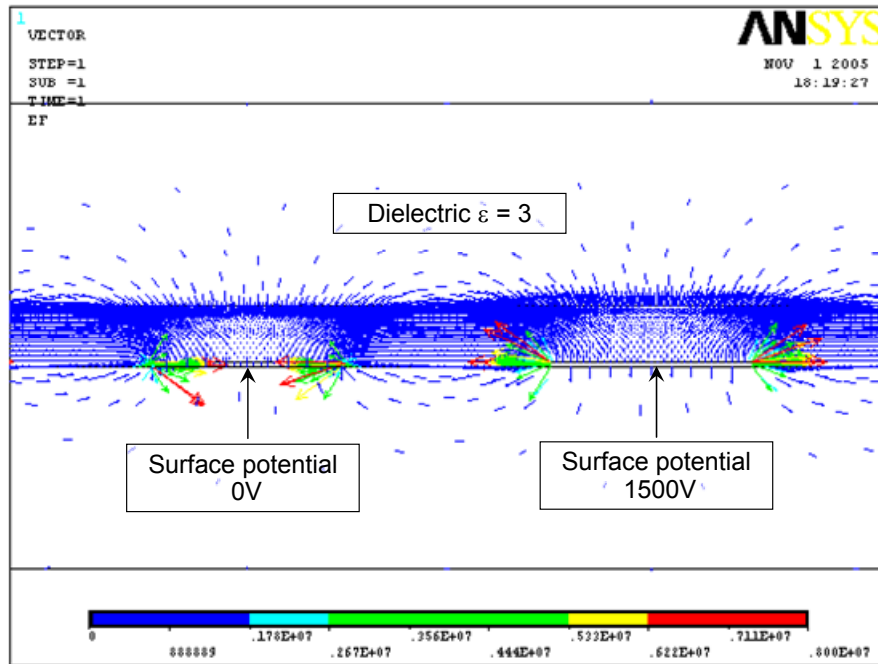


Fig. 7-22 Electric vector in case of insulator model

件では、電極間電位差を450Vとし、対象物を外部から絶縁した条件では、電極間電位差を900Vとした。同時に図7-19のモデルを用いて電場解析を行い、発生するせん断応力との関係を調べた。

上部対象物が絶縁体の場合におけるERGの基本特性を調べるにあたって、上部対象物に誘電率の異なる数種類の材料を用意した。絶縁体対象物の場合、片側パターン電極の形状・電極間電位差を一定として、材料の誘電率とER効果の関係を解析した。

## 7-6-2 対向導電体型片側電極におけるERGの基本特性解析

### 対向接地導電体型と対向フリー導電体型の比較

上部対象物に導電体を使用して、導電体を接地した場合と外部と絶縁した場合におけるせん断応力の挙動を図7-23に示す。使用した片側パターン電極は電極幅、電極間隔ともに1mmで、片側電極上に成形したERGシートの厚さは0.3mmとした。図7-23(a)は対象物を接地した場合における結果で、片側電極に印加した電極間電位差は450Vである。図7-23(b)は絶縁した場合における結果で、印加した電極間電位差は900Vである。また、比較のために電極間電位差450Vの結果も示した。

ERGと導電体との界面の最大電界強度を1500V/mmとした条件下において、対象物を外部と絶縁した場合に発生するせん断応力は、接地した場合に発生するそれよりも200Pa程度大きいことが確認できる。この理由として発生電場の違いが考えられる。7-5-3で示した電場解析の結果より対象物を接地することで陰極部分では電界が全く生じないが、対象物を外部と絶縁することで対象物が電位を持ち陰極部分にも電界が発生する。このため、外部と絶縁することで発生するせん断応力が大きくなったと考えられる。ここでERGのER効果はERGと対象物との界面で生ずるため、この部分における電界強度、特に粒子の沈み込み作用を誘起するy方向成分の電界強度に影響を受けると考えた。そこで陽極と陰極の中心間で、ERGと

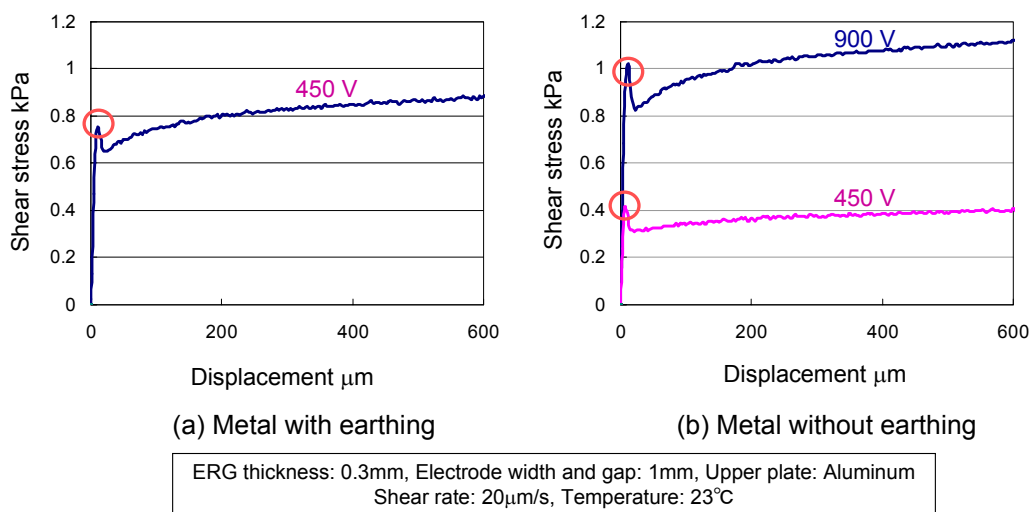


Fig. 7-23 Influence of earthing on behavior of shear stress

対象物との界面に発生する電界ベクトルのy成分の分布を電場解析により求めた。図7-24に接地条件と絶縁条件における電界ベクトルのy成分分布を示す。この結果より、電極中心間のERG表面の電界ベクトルのy成分の平均値を求めると、対象物を接地した条件では535V/mmで、絶縁した条件では1007V/mmとなり、明らかに絶縁した場合の方が電界強度は大きくなるため、発生するせん断応力も大きくなると考えることができる。次に、印加する電極間電位差を450V一定として比較すると、対象物を接地することで発生するせん断応力は外部と絶縁した場合のそれよりも約2倍大きくなることを確認できる。これは絶縁した条件下で電極間電位差を450VとすることでERGと対象物界面の最大電界強度が675V/mmと極端に小さくなるためである。

以上より、上部対象物に導電体を用いる場合においても、それを接地するか絶縁するかによって、発生するせん断応力が大きく異なることが明らかとなった。発生するせん断応力はERGと対象物との界面に生ずる電界強度に大きく影響することが確認された。

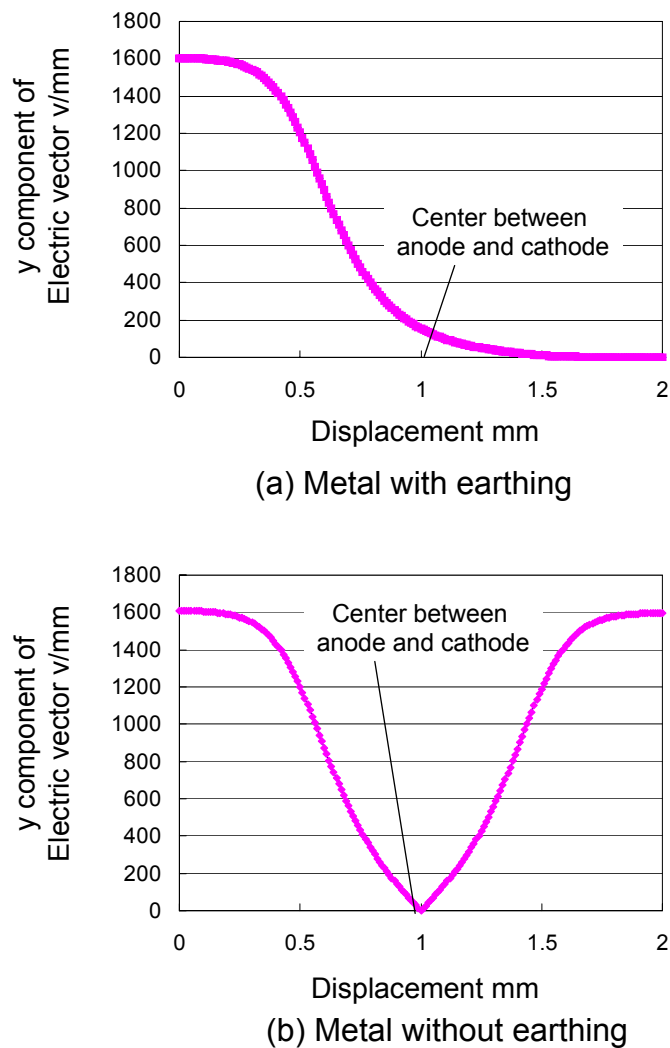


Fig. 7-24 Distribution of y component of electric vector

### 電極形状とER効果の関係

片側電極におけるER効果が、ERGと対象物界面の電界強度に依存するならば、片側電極の形状により得られるER効果が異なると考えられる。そこで、図7-25に示すように電極幅と電極間隔の異なる5パターンの片側電極を用意し、実験および電場解析を行った。電極幅の影響を調べるために、電極間隔を1mm一定として、電極幅を0.5mm, 1mm, 2mmと変えた場合に発生する降伏応力を測定した。片側電極に印加した電極間電位差は対象物を接地した条件では450V、外部と絶縁した条件では900Vとした。結果を図7-26に示す。対向接地導電体型、対向フリー導電体型ともに電極幅を広くすることにより、発生する降伏応力が大きくなることを確認できる。この理由を考察するために、各電極形状において電極中心間で、ERG表面に発生する電界強度(y成分)分布を電場解析により求め、電界強度分布から、電極中心間の平均電界強度を求めた。対向フリー導電体型のモデルにお

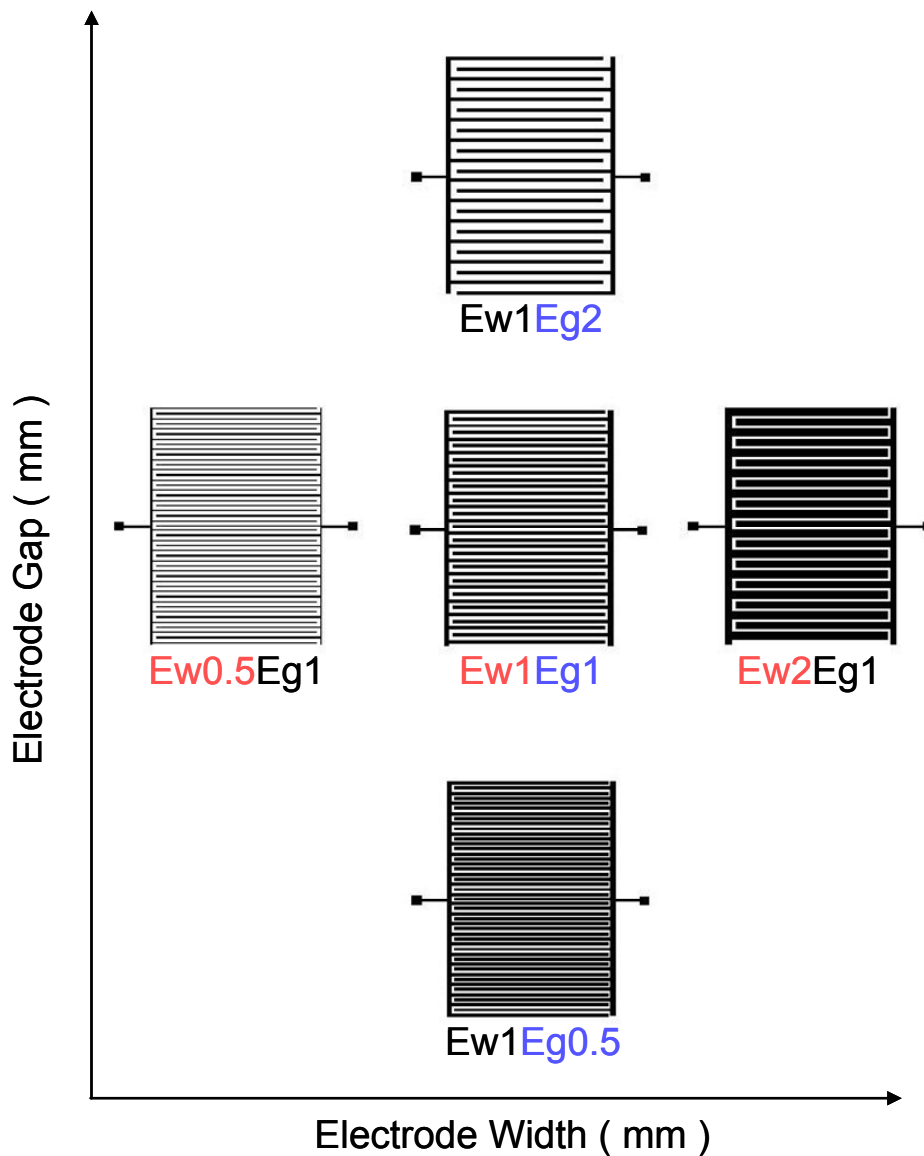


Fig. 7-25 5 patterns of one-sided electrodes

ける結果を図 7-27 に示す. また平均電界強度と電極幅の関係を図 7-28 に示す. 対向接地導電体型, 対向フリー導電体型ともに電極幅を広くすることで, ERG 表面の平均電界強度が大きくなることが確認できる. つまり, 電極幅を広くすることで, ERG 表面の電界強度が高くなるため, 発生する降伏力が大きくなると考えることができる.

次に電極間隔の影響を調べるために, 電極幅を 1mm 一定として, 電極間隔を 0.5mm, 1mm, 2mm と変化させた場合に発生する降伏応力を測定した. 片側電極に印加した電極間電位差は対象物を接地した条件では 450V, 外部と絶縁した条件では 900V とした. 結果を図 7-29 に示す. 対向接地導電体型では, 電極間隔を狭めることにより発生する降伏応力の値が大きくなることが確認できる. 対向フリー

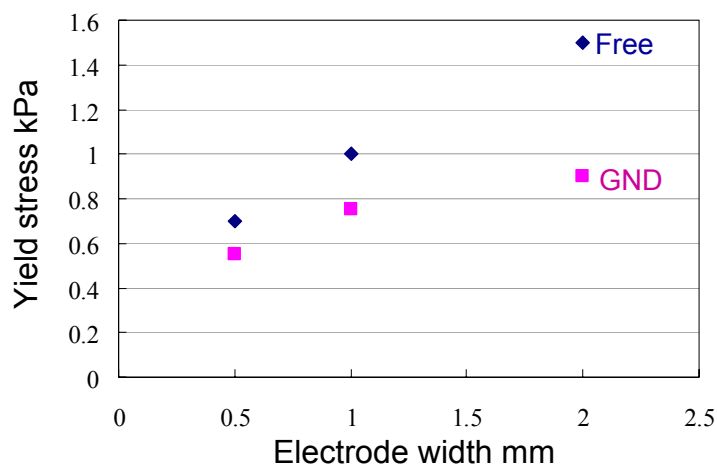


Fig. 7-26 Relation between yield stress and electrode width of one-sided electrodes

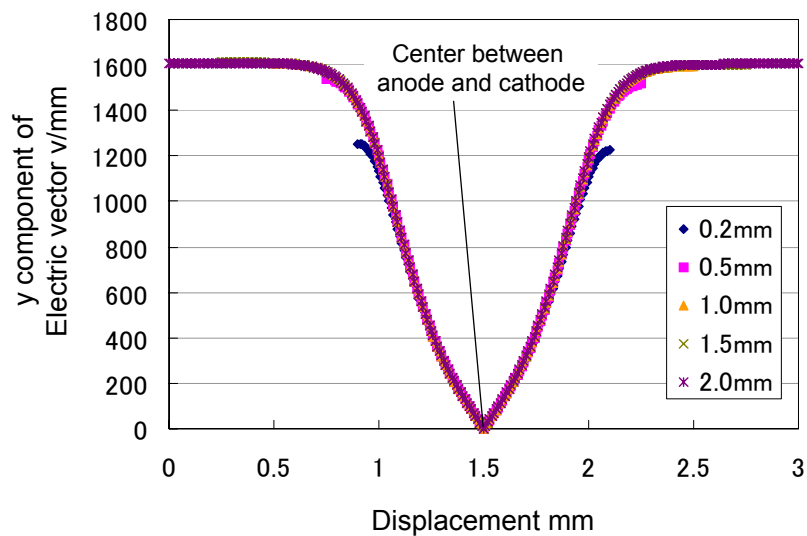


Fig. 7-27 Distribution of y component of electric vector in case of various electrode width (one-sided electrodes)

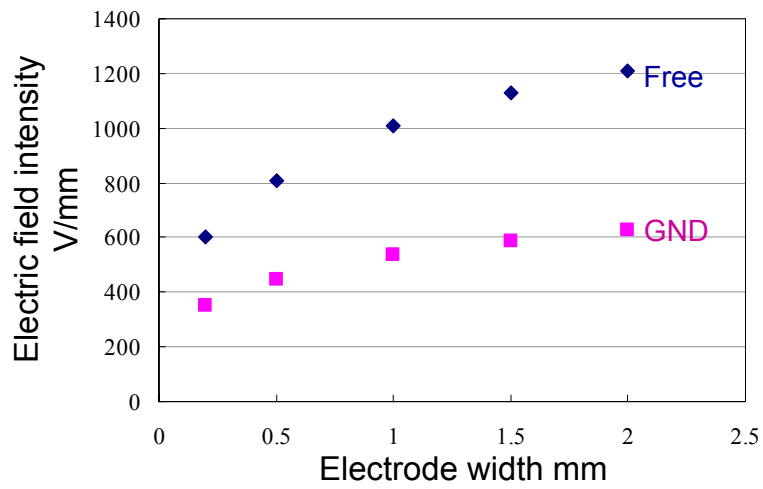


Fig. 7-28 Relation between Electric field at the surface of ERG and electrode width (one-sided electrodes)

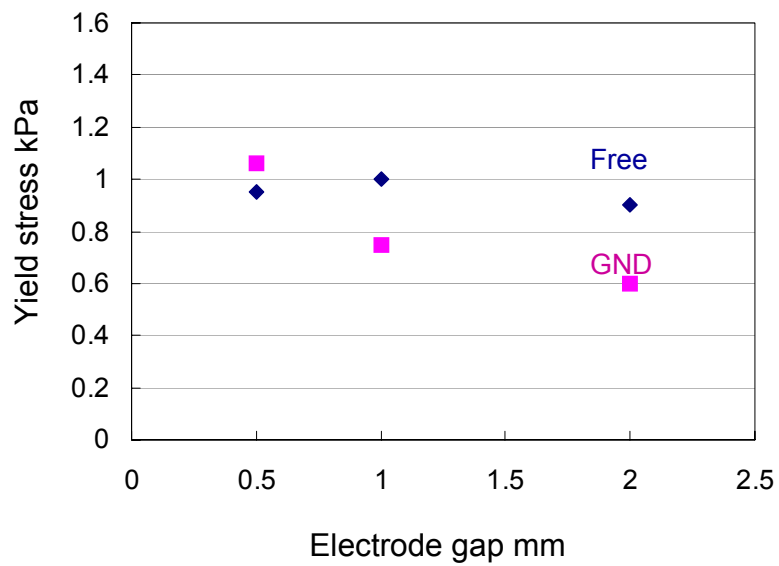


Fig. 7-29 Relation between yield stress and electrode gap of one-sided electrodes

導電体型でも、電極間隔を狭めることにより発生する降伏応力が大きくなる傾向にあるようだが、電極間隔 0.5mm と 1mm において差が生じなかった。電極間隔が狭くなると降伏応力が高くなる理由を考察するために、電場解析により ERG 表面の平均電界強度を求めた。電界強度 (y成分) 分布を図 7-30 に、電極間隔と ERG 表面の平均電界強度の関係を図 7-31 に示す。対向接地導電体型でも対向フリー導電体型でも電極間隔が狭くなることで平均電界強度は大きくなることを確認できる。

以上の結果より、片側パターン電極における ERG の ER 効果は ERG 表面に生ずる平均電界強度に依存することが示唆され、電場解析を用いてこれを調べることで、発生する降伏応力の傾向を把握することが可能である。

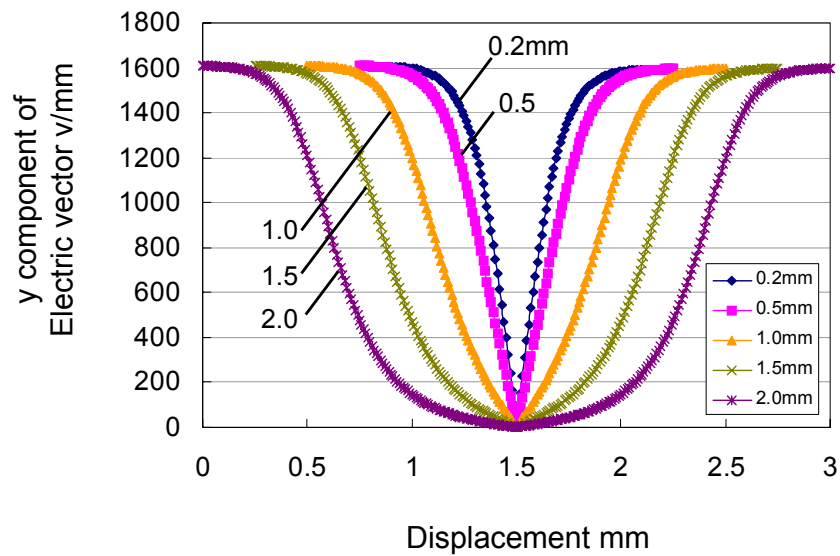


Fig. 7-30 Distribution of y component of electric vector in case of various electrode gap of one-sided electrodes

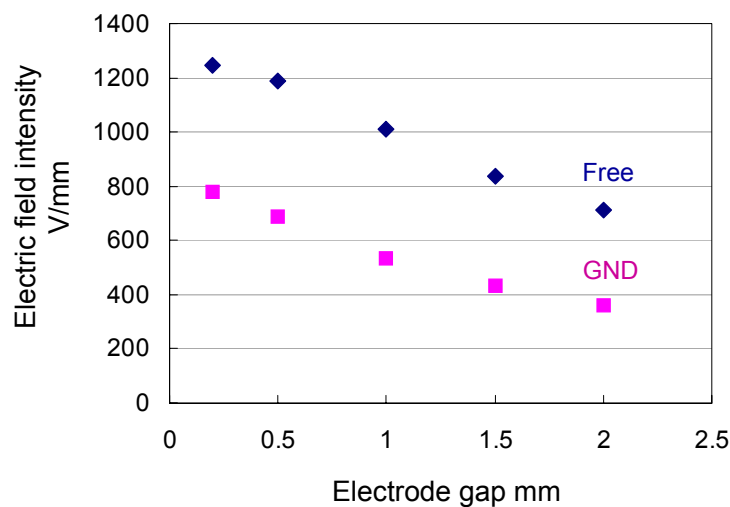


Fig. 7-31 Relation between Electric field at the surface of ERG and electrode gap of one-sided electrodes



### 7-6-3 対向絶縁体型片側電極における ERG の基本特性解析

#### 絶縁体対象物における ER 効果

絶縁材料における ER 効果を調べるために、上部対象物としてベークライト板・BK7 ガラス板・PE 板を用いてせん断応力測定実験を行った。片側パターン電極は電極幅、電極間隔が 1mm のタイプを使用し、ERG シートの厚さは 0.3mm を使用した。ベークライト板を使用した場合の結果を図 7-32 に、BK7 を使用した場合の結果を図 7-33 に、PE 板を使用した場合の結果を図 7-34 に示す。ベークライト板および BK7 の場合において、印加する電極間電位差を高くすることで発生するせん断応力が大きくなることが確認できる。しかしながら、発生するせん断応力は上部対象物が導電体の場合に比べ、極端に小さくなることがわかる。また、発生するせん断応力は上部対象物により大きく異なる。特に PE 板を使用した場合にはほとんど ER 効果が発生していないことがわかる。

ここで、各種材料を用いて発生する ER 効果をせん断応力測定装置により試験し ER 効果が得られた材料と得られない材料に分類した結果を図 7-35 に示す。この結果、各種ガラス材、フェノール樹脂であるベークライト、ブチルゴム、アルミナを原料としたセラミックスが ER 効果を示すことが確認された。また NR ゴムやフッ素ゴムも若干ではあるが ER 効果を示した。

#### 誘電率と ER 効果の関係

ER 効果を示すか示さないかは材料の特性により大きく依存することが、先の実験から確認された。ER 効果は ERG 表面に電界が作用することにより生じるため、絶縁材料において ER 効果が得られるかは、材料特性の中でも電界分布を決定する誘電率が影響していると予想される。そこで、電場解析により、上部対象物の誘電率を変化させた場合に発生する電界分布および、ERG 表面の平均電界強度を調べた。図 7-36(a)に上部対象物の誘電率  $\epsilon = 0.1$  の場合、図 7-36(b)に上部対象物の誘電率  $\epsilon = 100$  の場合における電界分布を示す。ERG の誘電率より極端に材料の誘電率が小さい場合、電気力線は上部材料側へはほとんど抜けず、ERG 内部において陽極から陰極へとアーチ状に発生する。一方で、材料の誘電率が大きくなると、電気力線は誘電率の大きい場へ向かう傾向があるため、陽極から上部材料へ、また上部材料から陰極へと発生する。図 7-37 に上部対象物の誘電率  $\epsilon = 0.1$ 、100 の場合において電極中心間の ERG 表面の電界強度を示す。誘電率  $\epsilon = 0.1$  の場合、電界強度の絶対値に比べ、y 成分は電極中心間でほぼ 0 であることから、電気力線は対象材料表面を水平に進んでいることがわかる。誘電率  $\epsilon = 100$  の場合は電界強度の絶対値と y 成分の絶対値とがほぼ等しい。つまり、発生した電気力線がほぼ垂直に対象材料表面に向かい、また出ていることがわかる。次に図 7-38 に ERG 表面の平均電界強度 (y 成分) と誘電率の関係を示す。誘電率が大きくなるにつれ、ERG 表面の平均電界強度 (y 成分) は大きくなる。つまり、誘電率が大きい材料に対しては ER 効果が発生しやすいと予想される。

そこで、各種材料の誘電率と発生する降伏応力の関係を実験的に調べた。各種材料の写真を図 7-39 に、それら材料の誘電率を測定した結果を表 7-3 に示す。これらの材料に対してせん断応力測定実験を行い、降伏応力を測定した。用いた片側パターン電極は電極間隔、電極幅ともに 1mm のものを使用し、ERG の厚さは

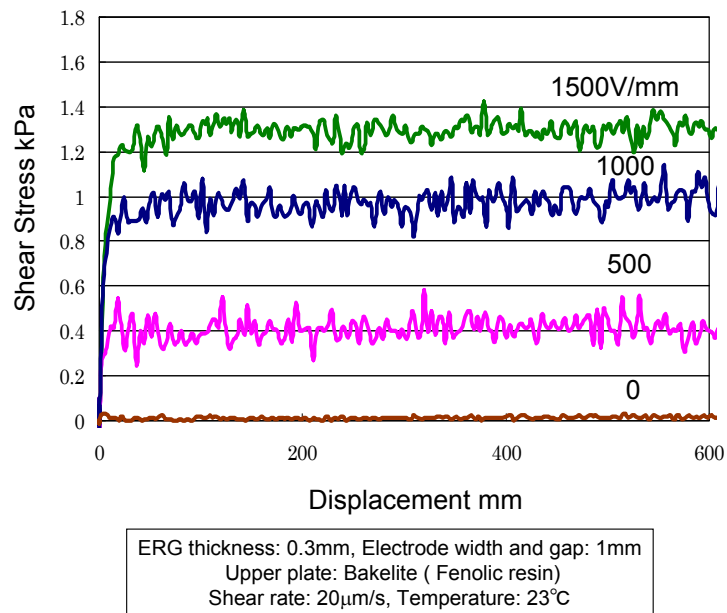


Fig. 7-32 Behavior of shear stress in Bakelite

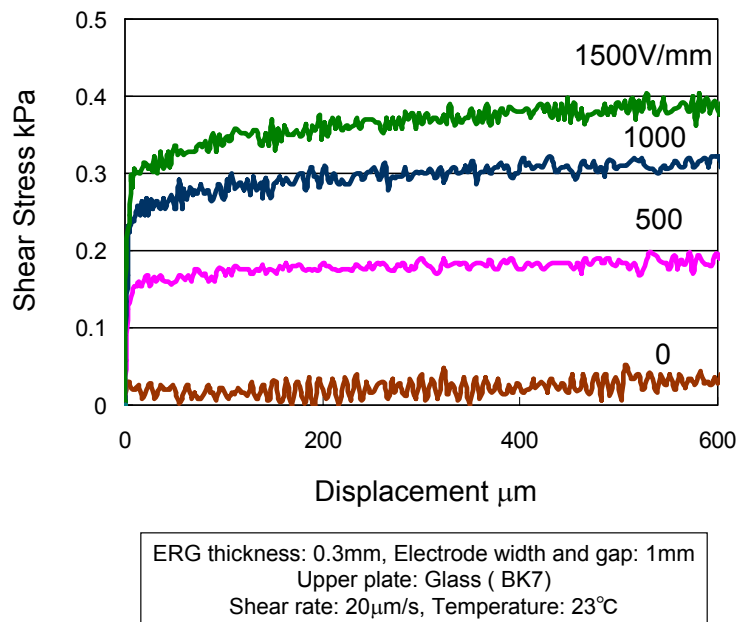


Fig. 7-33 Behavior of shear stress in BK7

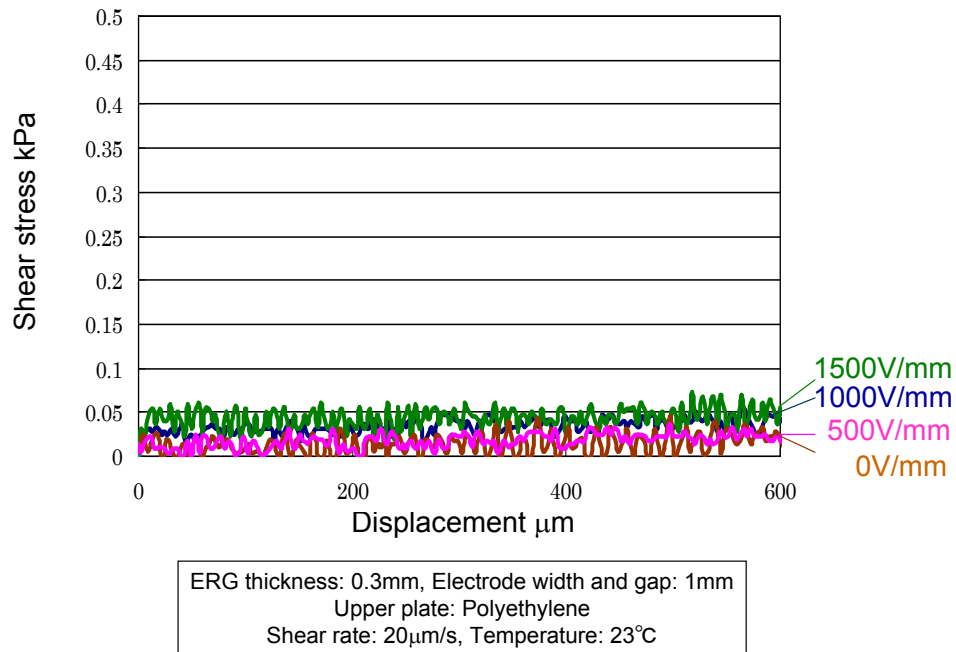


Fig. 7-34 Behavior of shear stress in PE

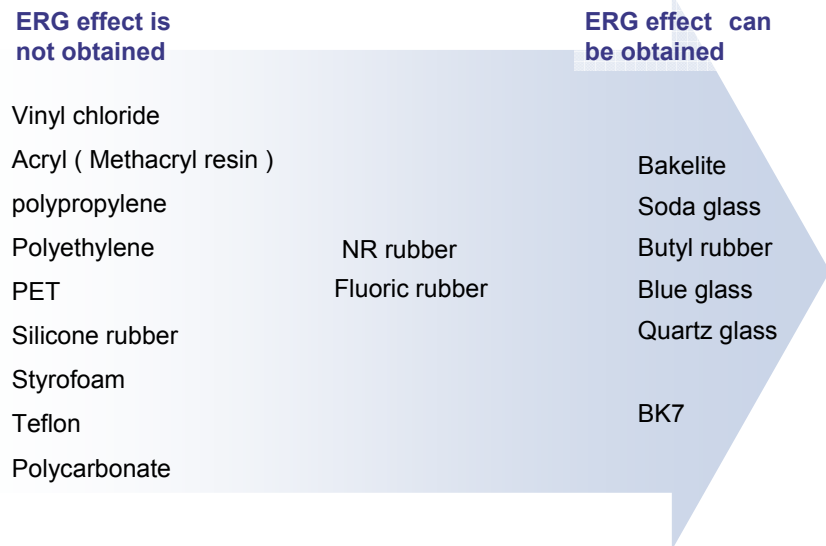
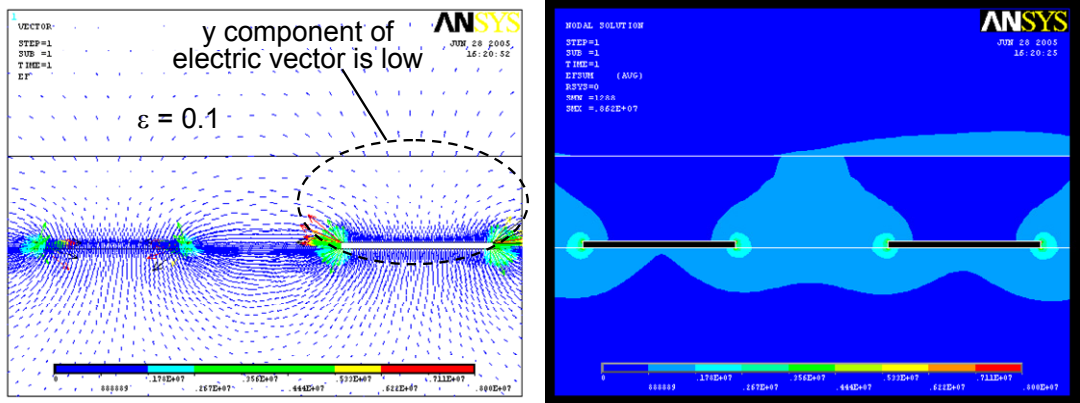
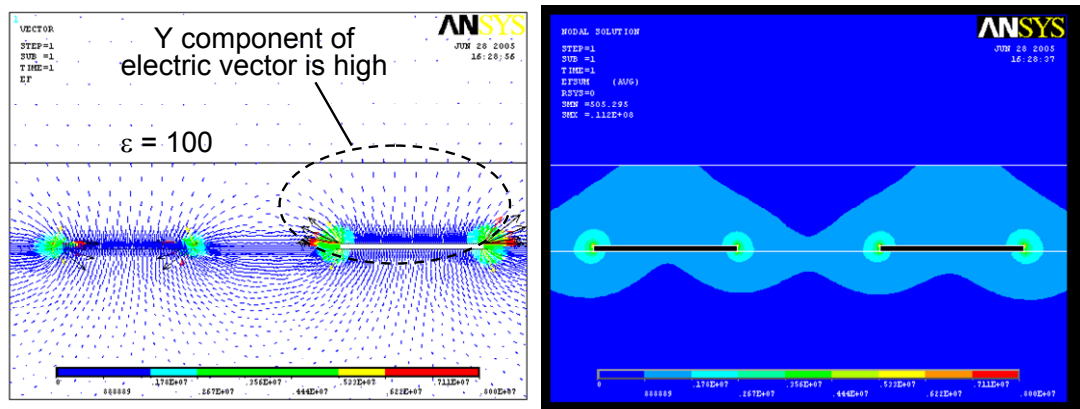


Fig. 7-35 Materials which can obtain ERG effect



(a)  $\epsilon = 0.1$



(b)  $\epsilon = 100$

Fig. 7-36 Distribution of electric vector in using upper insulators with high and low permittivity

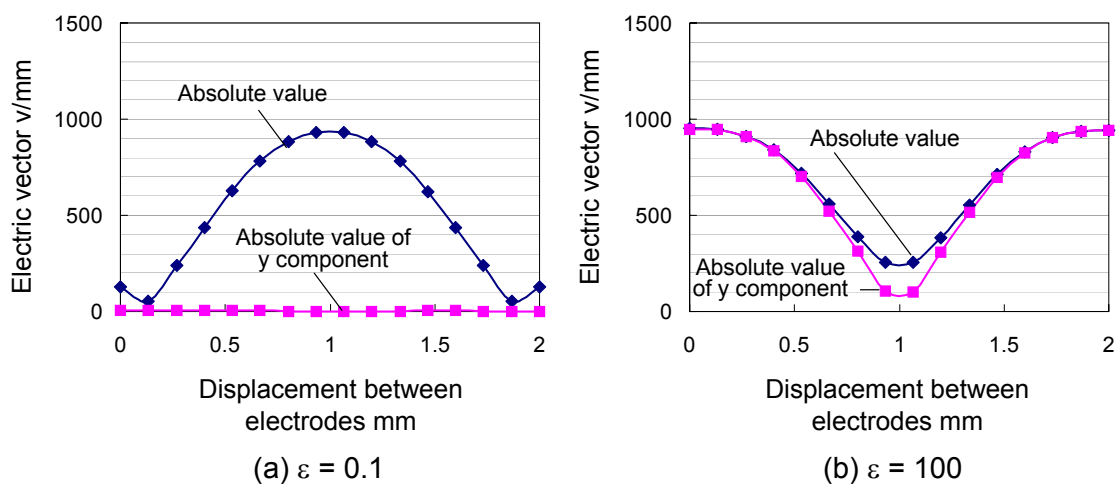


Fig. 7-37 Distribution of y component of electric vector in using upper insulators with high and low permittivity

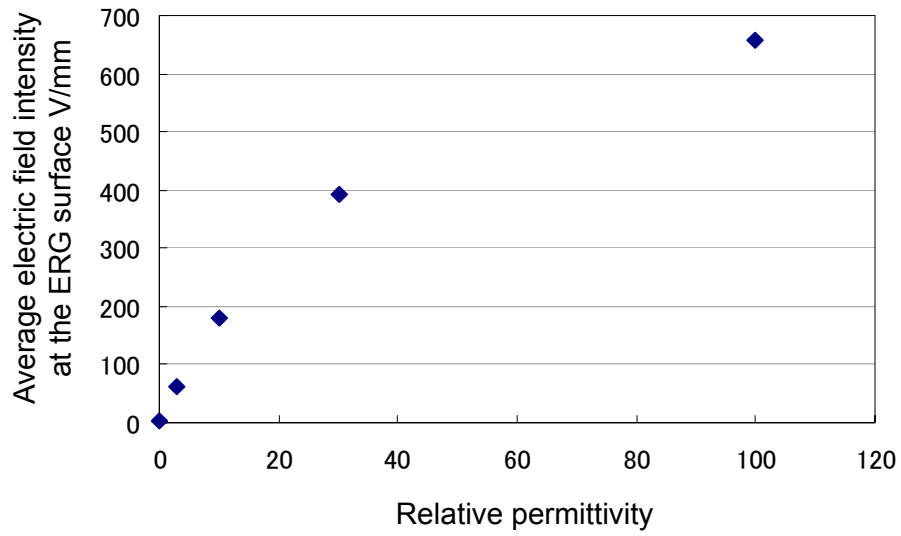


Fig. 7-38 Relation between relative permittivity and average y component electric field intensity at the ERG surface

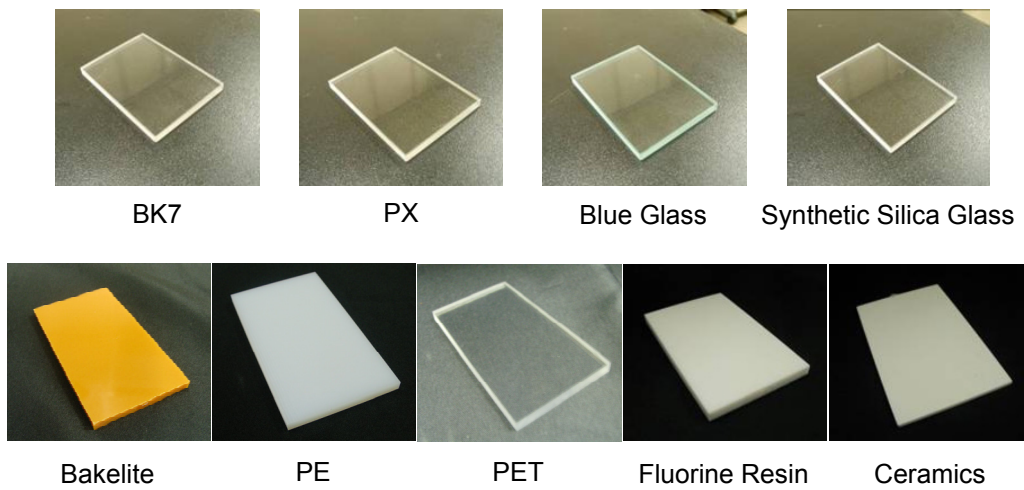


Fig. 7-39 Sample materials

0.3mmとした。また、印加する電極間電位差は1500Vとした。材料の誘電率と発生する降伏応力の関係を図7-40に示す。絶縁材料における誘電率の値が4前後においてER効果が生じるか否かの境界となっていることが確認できる。

ERGのER効果はせん断応力の発生ばかりでなく、垂直変位を誘起する。そこで各材料において電極間電位差を与えた場合に発生する垂直変位を調べた。一例として、ベークライトとPEにおける変位測定結果を図7-41、図7-42にそれぞれ示す。誘電率の高いベークライトは片側パターン電極に電極間電位差を与えることで大きな変位が生じていることが確認できるが、誘電率の低いPEはほとんど変位が生じないことがわかる。図7-41に誘電率と電極間電位差1500Vを与えた時に発生する変位量との関係を示す。この結果より、降伏応力の関係と同様、誘電率の値が約4を境に変位量が大きく異なることがわかる。

以上のことから、絶縁材料におけるER効果は材料の誘電率に大きく依存しており、電極幅および電極間隔1mmの片側パターン電極を使用し、ERG厚が0.3mmの条件下で、ER効果が発生する誘電率の境界条件は約4であることが明らかとなった。

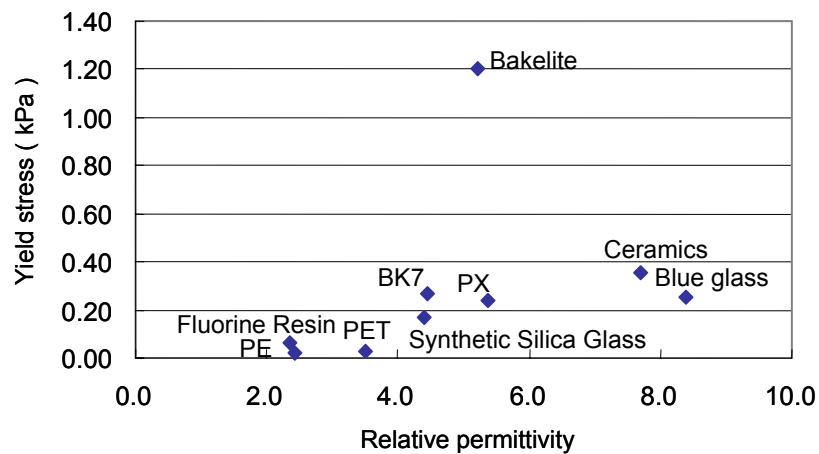


Fig. 7-40 Relation between yield stress and relative permittivity in sample materials

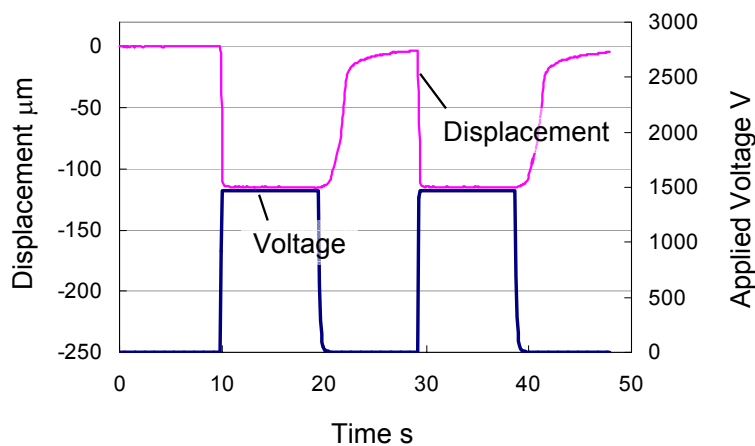


Fig. 7-41 Relation between perpendicular displacement and applied voltage in Bakelite

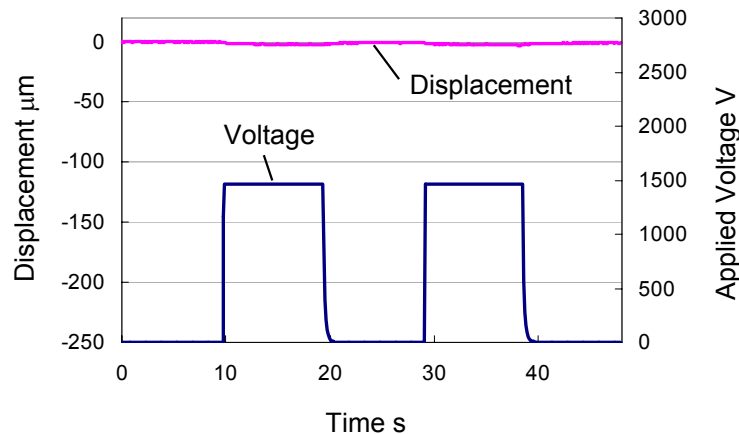


Fig. 7-42 Relation between perpendicular displacement and applied voltage in PE

## 7-7 結言

開発したゲル構造 ER 流体 (ERG) を、回転機構を持つデバイスに应用する際、電極への配線構造が問題となる。そこで、配線構造の複雑化をさけるために電極を片側のみに配置した片側電極構造を適用し、ERG の基本特性を実験および電場解析を通して明らかにした。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 片側構造電極においても平行平板型電極同様、ERG は電極間に印加する電圧に応じて、せん断応力が大きく変化する。微小変位においては弾性的特性を、降伏点を超えると電極と ERG の間で滑り特性を示す。
- (2) ERG 厚さを薄くすることによって、発生する降伏応力は増加する。特に ERG 厚さが 0.2mm の時、発生する降伏応力は急激に増加する。
- (3) 片側構造電極の電極数が増加することで、発生する公称せん断応力は大きくなる。
- (4) 片側電極に印加する電極間電位差を変化させることで、ERG 表面をスライドする上部平板のせん断方向の動的特性を変化させることができる。
- (5) 入力加振振幅が ERG の弾性変位以上である場合、せん断方向の振動を低加振周波数域では弾性力により、高周波数域では滑り摩擦により抑制することができる。
- (6) 上部対象物が導電体である場合、対象物を外部と絶縁するか接地するかで、発生する ER 効果が異なる。対象物を外部と絶縁した場合に発生するせん断応力は、接地した場合に発生するそれよりも大きくなる。
- (7) 上部対象物が導電体である場合、片側電極の電極幅を広く、電極間隔を狭くすることで高い ER 効果を得ることができる。
- (8) 上部対象物に絶縁体を用いた場合においても、片側電極を適用することで ER 効果を得ることができる。しかしながら、対象材料の誘電率の大きさにより発生する ER 効果は異なる。
- (9) 上部電極が絶縁体で、電極幅・電極間隔が 1mm の片側電極、ERG 厚さ 0.3mm を使用した場合、絶縁体の誘電率が 4 以上で ER 効果が発生する。

片側電極におけるERGの基本特性の結果をもとに、次章ではこれをトルク伝達装置のクラッチ機構へと応用を試みた結果について述べる。



## 第8章 片側電極を適用した ERG のトルク伝達装置への応用

### 8-1 序言

ERG における応用デバイスの一つとしてトルク伝達を行うクラッチ要素がある。クラッチは原動側から従動側へ回転力の伝達と遮断を切り替える機能を持つ機械要素である。クラッチには、噛み合いクラッチのように入力軸からの回転動力を全て出力軸へ伝達するか、完全に遮断するかのものである。また、摩擦クラッチのように回転動力を可変に伝達することができる機構がある。動力を可変に伝達するクラッチ機構は、異なる速度を持つ2つのシャフトを連結するために重要な機械要素であり、摩擦クラッチの他にも、電磁クラッチ・粉体クラッチ・流体クラッチなど様々なものが利用されている。

機械システムの自動化が進む中、クラッチにおいても伝達トルクを電氣的に制御することが望まれている。ERG は印加する電界強度に応じて、表面の摩擦特性が変化する機能性材料である。つまり、電氣的に表面の摩擦力を調整することが可能であり、これをトルク伝達媒体として使用することで、電氣的に伝達トルクをコントロールすることができると考えられる。この機構は、通常の摩擦クラッチのように押しつけ力を発生させるカムレバーなどの可動部がなく、また電磁クラッチに使用されるコイル等も必要としないことから、簡単かつ小型な構造のクラッチ機構が実現できる。そこで、本研究では、ERG を可変摩擦クラッチ機構に応用することを試みた。ERG クラッチ機構を組み込んだトルク伝達装置を試作し、静的および動的特性の評価を行った。

### 8-2 トルク伝達装置の構造

#### 8-2-1 片側電極を用いた ERG クラッチ

クラッチ機構は、一般的に両軸回転する部位に使用されるが、ブレーキや力覚提示装置などに応用する場合、伝達側の軸は非回転もしくは回転量が小さい機構となる。ERG を力覚提示装置用のクラッチ機構に応用する場合、従来の電極構造ではマスターとなる回転側とスレーブとなる伝達側をそれぞれ陰極、陽極として ERG に電界を印加する必要がある。伝達側の電極に関しては、回転量が小さいことから、配線構造を単純化できるが、回転側の電極に関しては、これにスリップリングなどを介して配線を施す必要があり、配線構造が複雑化するという問題が生じる。この問題を解決するために、片側電極を適用した ERG クラッチ機構を考案した。図

8-1 に考案した ERG クラッチ機構を示す。伝達側と回転側は独立に回転運動することができ、伝達側のディスクには ERG シートが成形された片側電極を設置する。力覚提示を目的としたトルク伝達装置では、スレーブである伝達側では 360° 回転するような大きな回転動作を必要としないため、伝達側への配線は容易である。このような構造にすることで、モータなどにより連続的な回転動作が強制される回転側には、配線を施す必要が全くなり構造が簡単化する。第7章で述べたように、片側電極を適用した場合、ERG の ER 効果は、対向材料が金属材料か絶縁材料かでその特性が大きく異なる。つまり、ERG クラッチの性能は回転側のディスクの材料に大きく依存する。ERG をトルク伝達装置のクラッチ機構に応用する場合、電界印加により発生するトルクがなるべく大きいことが望ましい。そのため、本研究では電界印加により発生するせん断力が大きく変化する金属材料を対向材料としてクラッチ機構を構成することにした。

ERG クラッチの性能を決めるもう一つの因子は片側電極の形状である。特に7章の結果から電極幅と電極間隔に大きく依存すると考えられる。そこで、電極形状がクラッチ性能に与える影響を調べるため、本研究では電極幅と電極間隔が異なる2種類の片側パターン電極を用意した。2種類の電極形状を図 8-2 に示す。図 8-2(a)に示した Wide タイプは電極幅、電極間隔がともに 1mm で、図 8-2(b)に示した Narrow タイプは電極幅、電極間隔ともに 0.5mm である。片側パターン電極はデザインしたパターンをもとにマスクを作成し、PWB(Printed Wiring Board)に紫外線による感光・塩化鉄によるエッチング処理を施すことで製造できる。図 8-3 に製造した片側パターン電極部とそれに成型された ERG シートの外観を示す。用意した2種類の片側パターン電極の外径は 30mm で、成型した ERG シートの外径は 34mm とした。また、ERG シートの厚さは 0.3mm にした。

### 8-2-2 ERG クラッチによるトルク伝達機構

力覚提示要素として ERG クラッチ機構を持つトルク伝達装置を試作した。図 8-4 にトルク伝達装置の構成図を示す。試作したトルク伝達装置は、2つのディスク付きシャフトから構成されており、各シャフトはハウジングに取り付けられた軸受けにより支持されている。シャフトの軸径は 12mm、シャフトの一端に取り付けられたディスクの直径は 50mm、長さは 80mm である。マスター側のシャフトはカップリングによりモータと直結されており、モータの駆動力で回転する。スレーブ側シャフトのディスク

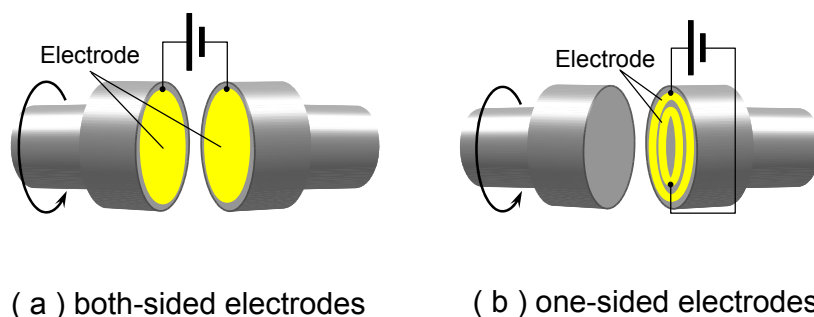


Fig. 8-1 Both-sided electrodes and one-sided electrodes for ERG clutch

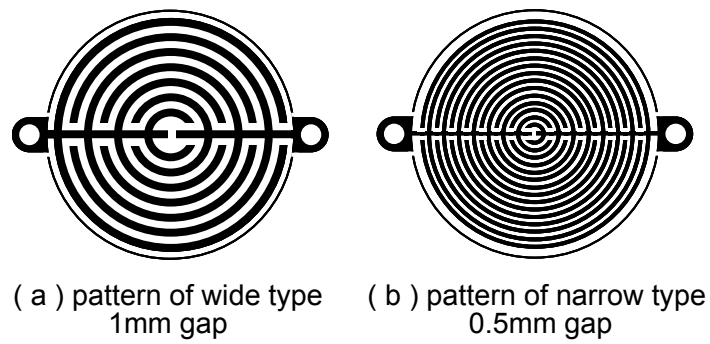


Fig. 8-2 Electrode design for PCB

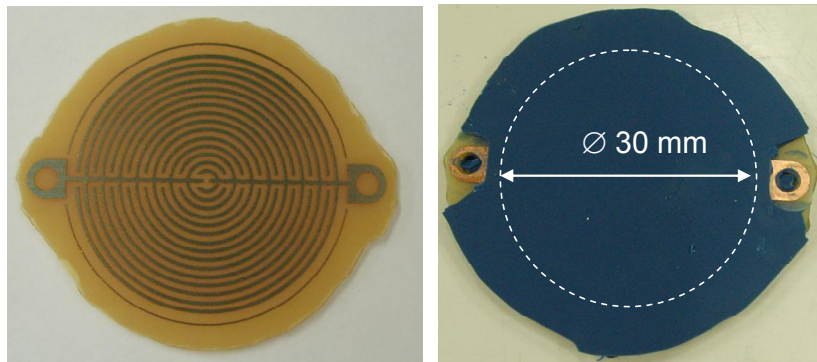


Fig. 8-3 ERG on one-sided circular electrode

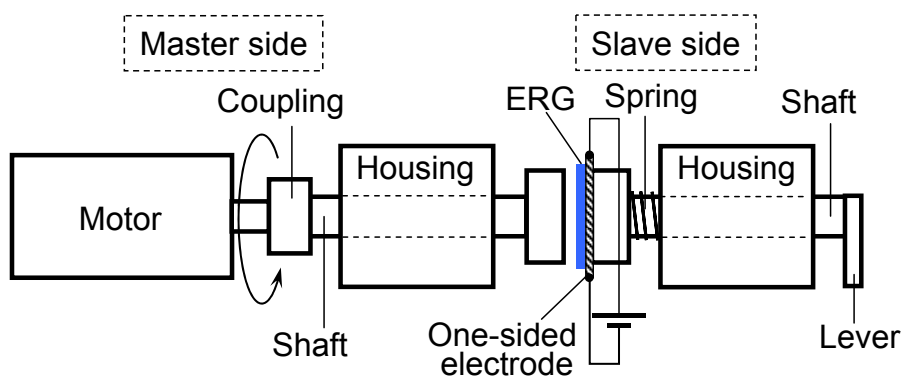


Fig. 8-4 Schematic diagram of ERG torque transfer device

部に、ERG シートが成形された片側パターン電極を取り付け、シャフトの他端には力センサに接続するためのレバーが取り付けられている。マスター側のディスクはスレーブ側に取り付けられた ERG シートと接触しており、ER 効果によりトルクを伝達することができる。ERG の ER 効果を安定して得るためには、ERG 表面とマスター側ディスクの接触状態をなるべく一定にする必要がある。そこで、スレーブ側のディスクとハウジングの間に柔らかいコイルスプリングを挿入し、ERG が容易にマスター側のディスクと接触するとともに、接触圧が一定になるよう工夫してある。バネの伸縮に伴って ERG 表面に加わる垂直抗力が変化し、摩擦変化が生じると考えられるが、バネ定数が小さいため、ER 効果による摩擦抵抗変化に比べバネの伸縮に伴う摩擦力変化は小さくトルク伝達性能にはほとんど影響を与えない。

トルク伝達装置は、モータ駆動によりマスター側のシャフトを回転させ、スレーブ側に取り付けられた片側電極に印加する電圧を変化させることにより、伝達トルクの大きさを変化させることが可能である。

### 8-3 トルク伝達装置の静的特性評価

#### 8-3-1 実験方法

試作した ERG クラッチ機構を用いたトルク伝達装置の性能を評価するために、一定電場のもとで伝達される回転トルクを測定した。図 8-5 に実験装置の構成図を、図 8-6 に実際の実験装置を示す。マスター側シャフトは低速高トルクモータと直結し、スレーブ側のシャフトに取り付けられたレバーはロードセルと接続する。また、ディスクの回転に伴って ERG とマスター側ディスクの接触状態が極力変化しないように、マスター側のディスク表面とスレーブ側のディスクに設置された ERG 表面のアライメントを調整した。

マスター側シャフトを定速回転させた状態で、スレーブ側ディスクに設置された片側電極に電圧を印加する。片側電極に電圧を印加することにより ER 効果が発生し、マスター側ディスク表面とスレーブ側の ERG 表面の界面で摩擦抵抗が増加する。これにより、マスター側の回転トルクがスレーブ側へと伝達される。伝達されたトルクはレバーに働く接線方向の力をロードセルにより検出し、その力にレバーの長さを

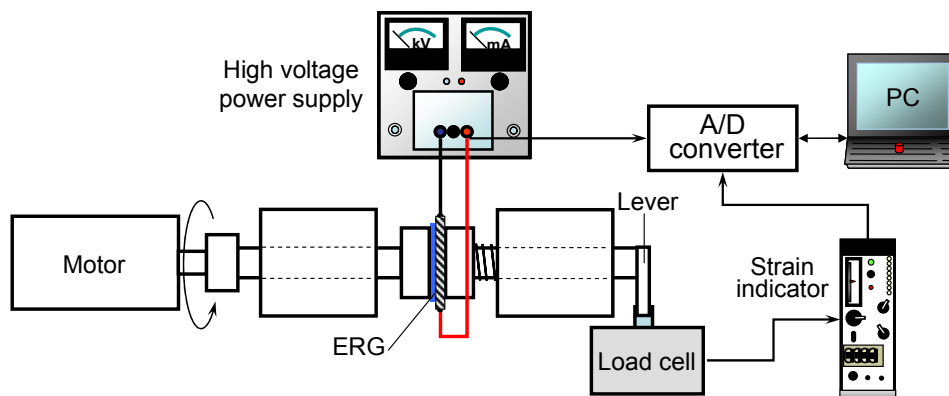


Fig .8-5 Experimental setup for transfer torque measurement

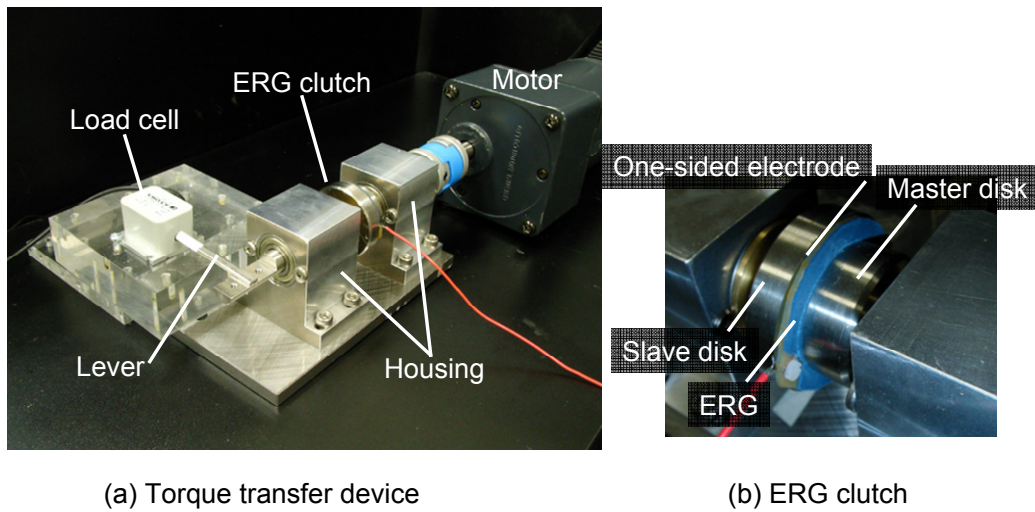


Fig. 8-6 Experimental setup of measurement for transferred torque

乗ずることによって求めている。レバーの長さは 46.5mm である。1mm の電極間隔を持つ Wide タイプの片側電極について、印加する電極間電位差は、0V から 1500V まで 250V 毎に変化させ、トルク測定を行った。また、0.5mm の電極間隔を持つ Narrow タイプにおいて、Wide タイプの電極間電界強度と一定になるように、電極間電位差を 0V から 750V まで 125V 毎に変化させ、測定を行った。測定手順は測定開始5秒後にモータを回転させ、10秒後に片側電極の電極間に電位差を与えることにした。

次に、マスター側のディスクの回転速度の影響を調べる実験を行った。マスター側ディスクの回転速度はモータにより調整可能であり  $10\text{min}^{-1}$  から  $50\text{min}^{-1}$  まで  $10\text{min}^{-1}$  毎に変化させトルクの測定を行った。

本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

<実験装置>

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• ERG</li> <br/> <li>• トルク伝達装置</li> <li>• 可変速回転モータ</li> <br/> <li>• 高圧電源モジュール</li> <br/> <li>• ロードセル</li> <br/> <li>• A/D インタフェース</li> </ul> | <p>粒子径:約 <math>16\mu\text{m}</math><br/>         粒子濃度:50wt%<br/>         分散溶媒:L-45 (100cSt)<br/>         藤倉化成(株)<br/>         日本ユニカー(株)提供<br/>         水越計器(株)製作<br/>         オリエンタルモータ(株)<br/>         MODEL 5GN25K<br/>         松定プレジジョン(株)<br/>         MODEL HJPW-5P0.6<br/>         KYOWA(株)<br/>         MODEL LU-20KSB34D<br/>         (株)KEYENCE<br/>         MODEL NR-110</p> |
|---|--|

<測定機器>

・ 動歪み計

KYOWA(株)

MODEL DPM-613A

### 8-3-2 静的特性測定結果

Wide タイプと Narrow タイプの二つの片側パターン電極を用いて、ERG トルク伝達装置の静的試験を行った。図 8-7(a)に電極幅および電極間隔が 1mm の Wide タイプの片側パターン電極を使用して静的試験を行った結果を示す。この時のマスターディスクの回転速度は  $10\text{min}^{-1}$  とした。電極間電位差をステップ状に与えることにより伝達トルクが電位差に追従してステップ状に変化していることがわかる。また、電極間電位差が大きくなるにつれ伝達されるトルクが大きくなることを確認できる。ここで、理論的に推定される伝達トルクを考える。ERG クラッチにより伝達されるトルクは以下の式で表すことができる。

$$T = \int_0^R \tau_y \times 2\pi r \times r dr \quad (8-1)$$

$\tau_y$  および  $R$  はそれぞれ ERG の降伏応力とディスク半径である。1500V の電極間電位差を与えた時に発生する降伏応力は基本特性解析の結果から  $\tau_y \approx 6\text{kPa}$  で、また  $R=15\text{mm}$  であることから、8-1 式より電極間電位差 1500V 印加時に得られる推定伝達トルクの値はおおよそ  $0.04\text{Nm}$  である。この値は測定値に比べて大幅に小さいことがわかる。この違いが発生した原因として、ディスクの回転速度が伝達トルクに大きく影響を与えていると考えられる。基本特性解析におけるせん断試験ではせん断速度が  $20\mu\text{m/s}$  と非常に低速であるため、発生するせん断力が小さくなったと考えられる。そこで、ディスクの回転速度を  $50\text{min}^{-1}$  として同様に静的試験を行った。結果を図 8-7(b)に示す。回転速度が  $10\text{min}^{-1}$  の場合に比べ、伝達されるトルクの値が全体的に大きくなっていることがわかる。つまり、回転速度が高くなるにつれ、伝達トルクも大きくなることを確認された。低せん断速度域 ( $20\mu\text{m/s} \sim 160\mu\text{m/s}$ ) では、ER 効果により発生するせん断力はせん断速度が増加するにつれ小さくなるが、高せん断速度域においては速度増加に対し大きくなる。以上の結果より、伝達トルクは印加する電極間電位差のみならずディスクの滑り速度にも依存することが明らかとなった。

次に電極幅および電極間隔が  $0.5\text{mm}$  である Narrow タイプの片側パターン電極を使用して静的試験を行った結果を図 8-8 に示す。Wide タイプと同様、電極間電位差が増すにつれ、またディスクの回転速度が増加するにつれ、伝達トルクが大きくなることを確認できるが、Wide タイプに比べ全体的に伝達されるトルクの値が小さい。この結果は片側電極における ERG の基本特性解析の章で述べた、対向材料に導電体を用いた場合、電極幅を小さくすることで ER 効果が減少するという結果に等しい。

次に、マスター側のディスクの回転速度の影響を調べた。図 8-9 に電極間の電界

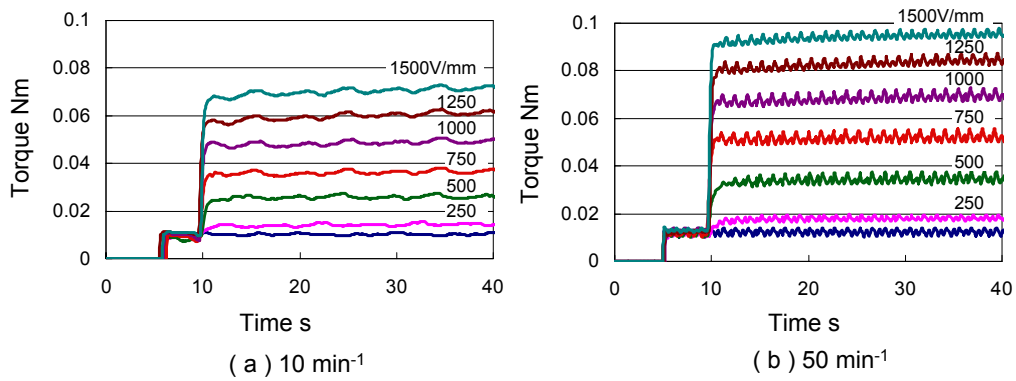


Fig .8-7 Relation between transferred torque and electric field intensity in wide type

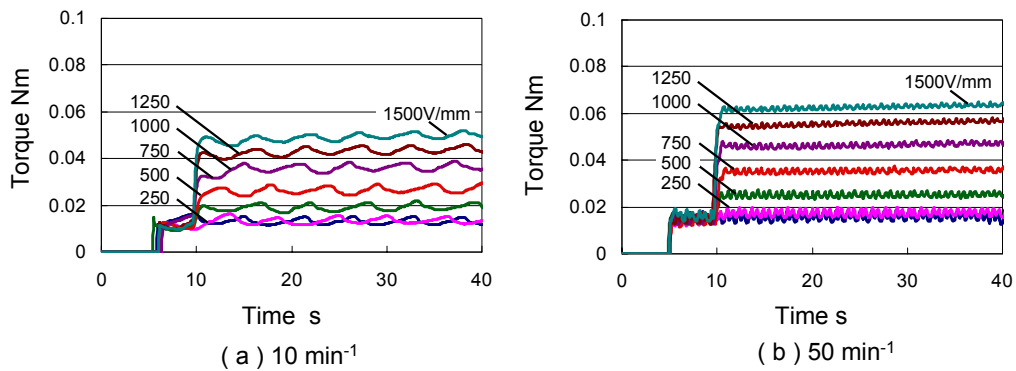


Fig .8-8 Relation between transferred torque and electric field intensity in narrow type

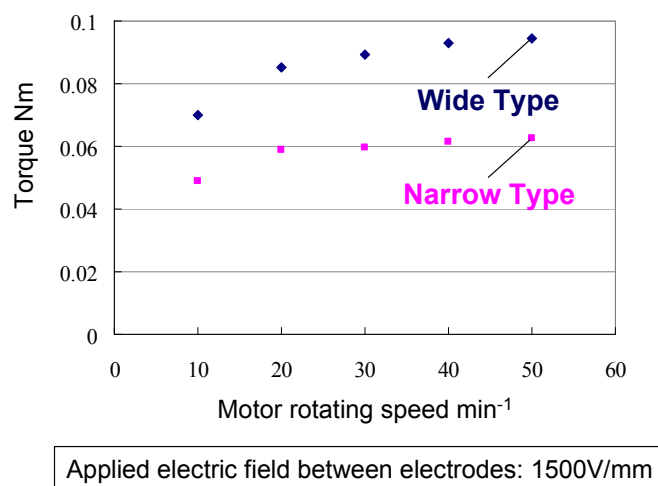


Fig .8-9 Relation between transferred torque and rotating speed

強度を 1500V/mm とした時の伝達トルクと回転速度の関係を示す。回転速度が増加するに従い、伝達トルクが大きくなることがわかる。また、伝達トルクの増加率は速度の増加に対して小さくなることを確認できる。

## 8-4 トルク伝達装置の動的特性評価

### 8-4-1 実験方法

ERG トルク伝達装置の動的性能を評価するために、正弦波および矩形波の入力電圧を印加し、これに対する出力伝達トルクの動的な応答に関する測定を行った。動特性測定実験装置の構成図を図 8-10 に示す。正弦波や矩形波の高電圧を出力するために、静的試験に使用した直流高圧電源の代わりに、高圧電源モジュールが接続されたファンクションジェネレータを使用した。ファンクションジェネレータからの出力を高圧電源モジュールにより増幅し片側電極に電圧を印加した。高圧電源モジュールより出力された電圧波形をモニタリングするためにデジタルオシロスコープを使用した。伝達トルクは静的試験同様、接線方向の力をロードセルを介し動歪み計によって測定し、レバー長を乗じることにより求めた。伝達トルクの動的挙動を調べるために、指令電圧に対する伝達トルクのステップ応答試験と周波数応答試験を行った。

準備した動的試験装置の性能はステップ応答試験、低周波数応答試験には十分であるが、高周波数応答試験においては実験機器の応答性が問題になる。ファンクションジェネレータから高圧電源モジュールに入力される電圧の振幅が大きく、周波数が高くなると、電圧増幅における応答性が低いため、高圧電源モジュールの出力電圧は入力電圧に追従しきれなくなる。そのため、出力電圧の振幅は小さくなり、波形は正弦波形状を維持できなくなる。そこで本実験では高周波時に高圧電源モジュールの出力が正弦波形を維持するように、ピーク電圧を一定とし出力が正弦波形になるまで入力振幅を小さくしながらノッチがなくなるまで調整を行った。

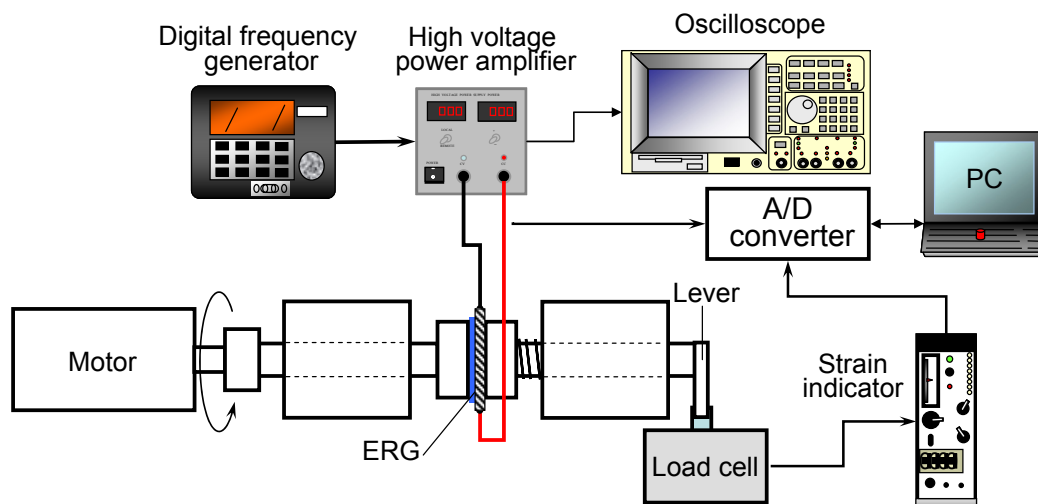


Fig .8-10 Experimental setup for measurement of dynamic characteristics



本実験で使用した主な実験装置及び測定機器を以下に記す。

<実験装置>

- ・ ERG 粒子径:約 16  $\mu$  m  
粒子濃度:50wt%  
分散溶媒:L-45 (100cSt)  
藤倉化成(株)  
日本ユニカー(株)提供
- ・ トルク伝達装置 水越計器(株)製作
- ・ 可変速回転モータ オリエンタルモータ(株)  
MODEL 5GN25K  
NF CORPORATION
- ・ ファンクションジェネレータ MODEL WF 1945 1CH  
松定プレジジョン(株)
- ・ 高圧電源モジュール MODEL HJPW-5P0. 6  
KYOWA(株)
- ・ ロードセル MODEL LU-20KSB34D  
(株)KEYENCE
- ・ A/D インタフェース MODEL NR-110

<測定機器>

- ・ 動歪み計 KYOWA(株)  
MODEL DPM-613A
- ・ デジタルオシロスコープ ADVANTEST(株)  
MODEL R9211B

### 8-4-2 動的特性測定結果

静的試験の結果、電極幅および電極間隔が 1mm である Wide タイプの片側パターン電極は Narrow タイプに比べ高い ER 効果が発生することが明らかとなった。そこで、動的試験には Wide タイプの片側パターン電極を用いることにした。印加電圧に対する伝達トルクの追従性および応答性を評価するために、ファンクションジェネレータから矩形波を出力し、ステップ応答試験を行った。ステップ応答試験の結果から印加電圧と伝達トルクの時定数を算出し、伝達トルクの時定数と印加電圧の時定数の差を印加電圧に対する伝達トルクの応答性として評価した。図 8-11 にステップ応答試験の結果を示す。矩形波の周期は 2.5 秒とし、出力電圧は 1.5kV とした。図 8-11(a)は電圧がステップ状に印加された時に発生する伝達トルクの追従性を示している。印加電圧に対して、伝達トルクが一次遅れをもって追従していくことがわかる。この図より各時定数を算出したところ、印加電圧の時定数は 0.05 秒、伝達トルクの時定数は 0.06 秒であった。また、印加電圧に対する伝達トルクの応答時間は  $0.06-0.05=0.01$  秒と概算される。図 8-11(b)は印加電圧が除去される時に解放される伝達トルクの追従性を示した結果である。電圧が除去されるに従い、それに追従して伝達トルクが解放されていく様子が確認できる。図 8-11 より各時定数を算出したところ、電圧が除去されるまでの時定数は 0.22s、伝達トルクが解放されるまで

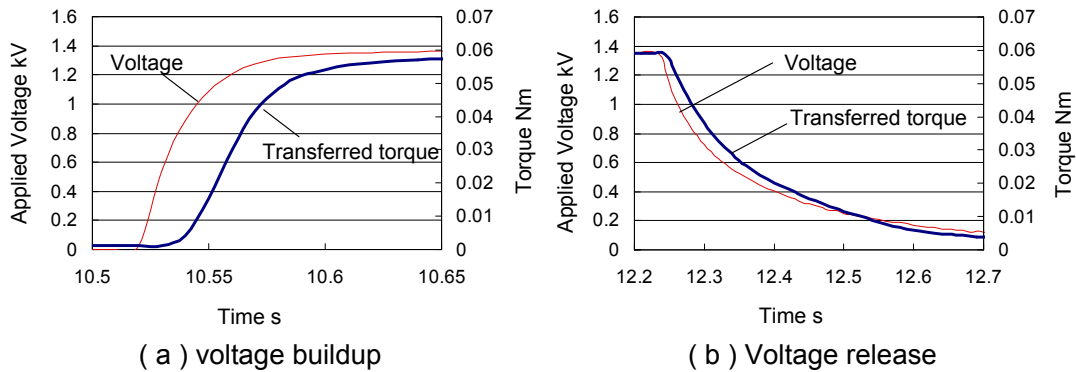


Fig .8-11 Result of step response test

の時定数は  $0.26\text{s}$  であった. また, 電圧除去に対して伝達トルクが解放されるまでの応答時間は  $0.26-0.22=0.04\text{s}$  と概算される. 電界を作用させた時に生じる ER 効果の応答に比べ, 電界を除去する時の応答は数倍遅いことがわかった. 系全体で考えると一矩形波あたり  $0.01+0.04=0.05\text{s}$  の遅れが生じていると考えることができる. つまり, 交流電界を印加した場合, ERG の ER 効果を効率よく得られる周波数域はおおよそ  $20\text{Hz}$  までと考えることができる.

次に印加される電界に対する伝達トルクの周波数特性を調べるために, ファンクションジェネレータにより正弦波電圧を片側電極に印加することで, 周波数応答試験を行った. 印加する電圧は周波数が変化してもピーク電圧  $V_{\text{max}}$  は  $1.5\text{kV}$  一定とした. また, マスター側ディスクの回転速度は  $30\text{min}^{-1}$  とした. 図 8-12 に電圧周波数を  $0.1, 1, 10\text{Hz}$  と変化させた際に伝達されるトルクの応答を示す. 正弦波電圧に対して, 伝達トルクが追従し, 正弦波形状を保って連続的に変化していることが確認できる.  $1.5\text{kV}$  を印加した時に伝達されるトルクの値は約  $0.08\text{Nm}$  であり, この値は静的試験の結果から得られた値とほぼ等しい. また, 図 8-12(a)より初期摩擦抵抗により伝達される初期トルクが約  $0.01\text{Nm}$  であることがわかり, 本測定において伝達トルクはこの値以上に小さくはならない. 初期トルクは ERG 表面とマスター側ディスクの接触圧や接触状態に依存するので, 接触圧を小さくし ERG の表面摩擦をさらに低減できればこの値は更に小さくできる. 初期摩擦トルクがあるために, 片側電極に印加する電圧が  $0\sim 200\text{V}$  の間で伝達トルクに変化が生じていないことがわかる. そのため, ERG クラッチにより伝達トルクを変化させるためには  $200\text{V}$  以上の印加電圧が必要であることがわかる.

図 8-12(b)に周波数  $1\text{Hz}$  の電圧を印加した時の結果を示す. ノッチのない正弦波形にするために, 振幅は  $1.1\text{kV}$  に設定した. 伝達されるトルクは入力電圧同様, きれいな正弦波形を描き, 入力電圧に対して追従していることが確認できる. 図 8-12(c)に周波数  $10\text{Hz}$  の電圧を印加した時の結果を示す.  $1\text{Hz}$  の時同様, ノッチのない正弦波形にするために, 振幅を  $500\text{V}$  に設定した. 印加される電圧に応じて伝達トルクが変化しているが, 伝達トルクは正弦波形を維持できず, 鋸形に近づいている. これは電圧が除去される時の伝達トルクの応答性が低いことが原因である.

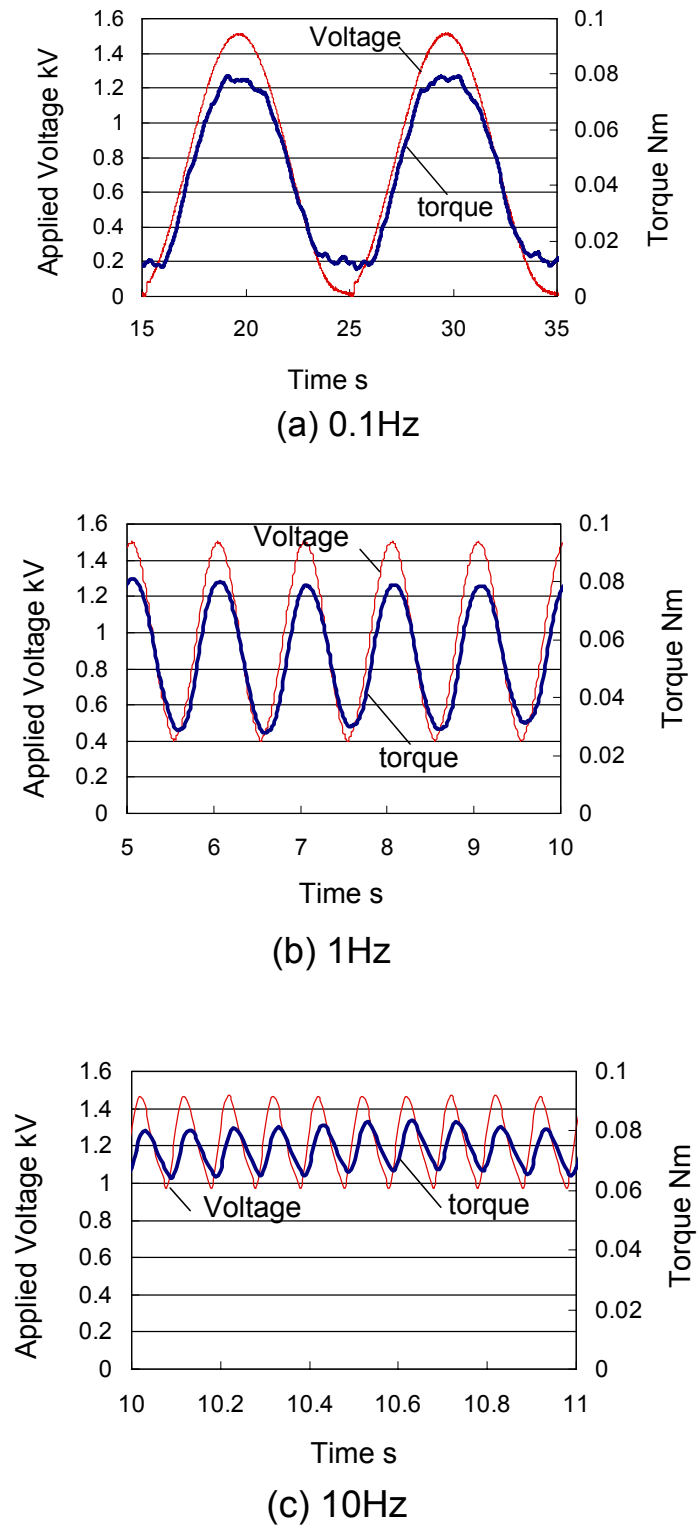


Fig .8-12 Result of frequency response test

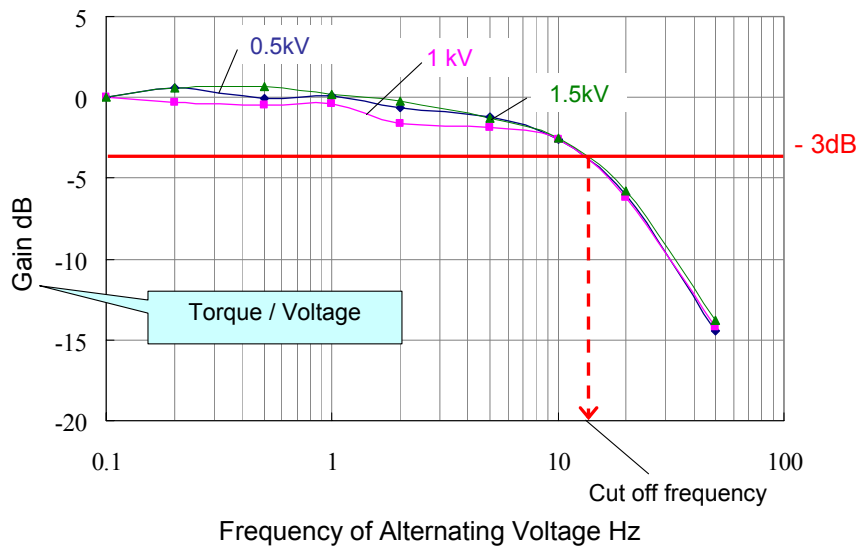


Fig .8-13 Bode graph

図 8-13 に周波数対する印加電圧と伝達トルクの振幅比率の関係を示す. 周波数 0.1Hz における振幅比率を 1, つまり 0dB と定義した. 振幅比率は 10Hz 付近まではほぼ定常であり, 10Hz を超すと急激に減少する. この結果から ERG トルク伝達装置のカットオフ周波数は約 14Hz 付近に存在することが明らかとなった. この結果はステップ応答試験から算出された周波数帯域とほぼ一致している.

## 8-5 結言

片側電極を適用した ERG を, 回転部を持つクラッチ機構に応用した. ERG クラッチ機構を組み込んだ力覚提示用のトルク伝達装置を試作し, その性能評価を行った. 以下に得られた結果を示す.

- (1) 片側電極に電極間電位差を印加することにより伝達トルクが変化する. また電極間電位差の変化させることにより, 伝達されるトルクを調整可能である.
- (2) 電極間隔および電極幅が 0.5mm の片側電極より, それらが 1mm の片側電極を用いることで効率よく ER 効果を得ることができる.
- (3) マスター側ディスクの回転数が  $10 \sim 50 \text{min}^{-1}$  の範囲では, 回転速度が上昇するに従って伝達されるトルクが大きくなる.
- (4) 電極間電位差に対する伝達トルクの応答時間は 0.01s で, 電極間電位差除去に対する伝達トルクの応答時間は 0.04s である.
- (5) 正弦波形の電極間電位差を印加した場合, 伝達トルクは電位差に追従し, 連続的に変化する.
- (6) 電極間電位差を入力として伝達トルクを出力とした場合, 試作したトルク伝達装置のカットオフ周波数は約 10Hz である.

以上より, ERG クラッチ機構を有するトルク伝達装置は電氣的に伝達トルクを調整

することが可能であることが実験的に明らかとなった。片側電極を適用した ERG クラッチ機構は配線構造が簡単になることから、メカトロニクス分野において様々な用途に応用が期待される。

## 第9章 結論

機能性流体は、電場や磁場を印加すると、これに応答して力学的特性が変化する流体の総称であり、産業界でその応用が大きく期待されている。電界を印加することで見かけの粘弾性が高速かつ可逆的に変化する電気粘性流体 (ER 流体) も機能性流体の一つであり、電氣的にその特性を制御可能であることから、特に可変ダンパ・クラッチ・バルブ機構など制御要素への応用が期待されてきた。しかしながら、ER 流体は粒子沈降による ER 効果の再現性の低下が生じ、応用デバイスにはシール構造が必要になることなどから、広く実用化されるに至っていない。本研究ではこのような ER 流体の実用上の問題を解決するために、ER 流体をゲル化したゲル構造 ER 流体 (ERG) を開発し、その基本特性・ER 効果のメカニズムを解析した。さらに基本特性解析の結果に基づいて、ERG の精密位置決め機構や加工技術への応用可能性を検討した。具体的には、空気静圧案内テーブルの精密位置固定機構と、光学部品金型用の研磨パッドへの応用を考え、それぞれについて ERG を組み込んだ装置を試作してその性能を評価した。さらに、ERG の応用の幅を広げるため、電極構造を従来の対向型平行平板構造から陽極と陰極を片面にのみ配置した片側構造を適用することを試みた。片側構造電極を適用した場合の ERG の基本特性を明らかにした上で、これをトルク伝達装置のクラッチ機構へと応用し、その性能評価をおこなった。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

### ER 流体に関する研究動向と問題点

第1章では、各種機能性流体の開発動向や実用事例について紹介し、機能性流体に関する研究分野における ER 流体の位置づけを述べた。さらに ER 流体の開発やその応用デバイスが抱える現状の問題について明らかにし、本研究の目的を述べた。

### ERG の開発とその性能評価

第2章では、開発したゲル構造 ER 流体 (ERG) の特徴を基本構造に基づいて言及した。ER 流体をゲル化することに着想したのは、ER 流体の最大の欠点であった粒子の沈降・凝集を極限まで抑制することができ ER 効果の安定化が図れると考えたためである。開発した ERG を機械要素に用いることで、電界により制御可能なクラッチ機構やブレーキ機構の単純化・小型化が期待できる。本章では、ERG の製造方法についても言及し、組成と性能の関係も明らかにした。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ゲル硬度を高くすることで、無電界時の初期せん断力は若干高くなるが、電界印加時の ERG のせん断特性は大きく向上する。

- (2) ER 粒子濃度を高くすることで、無電界時の初期せん断力に変化はないが、電界印加時の ERG のせん断特性は格段に向上する。粒子濃度の上限は最密充填である。

以上の結果から、ゲル硬度、粒子濃度をともに高くすることで ERG の高性能化が図れることが明らかとなった。

### ERG の基本特性解析

第3章では製造可能な ERG として最もゲル硬度が高く、粒子濃度も高い 5A03ERG ( ER 粒子濃度 50wt%, 弾性率 0.043N/mm) を用いて、静特性と動特性を実験的に解析した。得られた結果を以下に要約する。

#### -ERG の基本特性-

- (1) ERG は電界強度に応じて、せん断応力が大きく変化する。この時、微小変位においては弾性的特性を、降伏点を超えると電極と ERG の間で滑り特性を示す。
- (2) ERG シート厚を薄くすることにより同一電界強度により発生するせん断応力が上昇する。
- (3) 20~160  $\mu\text{m/s}$  の低せん断速度域においては、せん断速度が上昇することで、発生するせん断応力が減少する。

#### -ERG の優位的な特性-

- (4) ERG は時間経過に伴う粒子の沈降凝集が生じないため、安定した ER 効果を得ることができる。そのため、ER 効果により発生するせん断応力変化の再現性がある。
- (5) 電極の表面粗さを向上させることで、また接触面圧を低く抑えることで電界印加に対するせん断応力の変化幅を広くとることが可能で、高い ERG 効果を得ることができる。また、電極表面に DLC コーティングを施すことで電場印加時の発生応力は低くなるものの、同時に無電場時の応力も低く抑制できる。
- (6) 開発した ERG は従来の ER 流体に比べ ER 効果により発生するせん断応力値が 20~30 倍大きい。

#### -ERG を使用する際の注意点-

- (7) 外部から熱が与えられ、ERG の温度が上昇すると同電界強度において発生するせん断応力が低下するが、温度を下げることでその性能は元に戻る。
- (8) ERG は、電気粘性特性を示す粒子の運動をゲル構造で拘束しているため、電界印加に対するせん断応力発生への応答速度は従来の ER 流体に比較して遅く約 1/2 となる。

### ERG における ER 効果発生メカニズムの解明

開発した ERG は従来の ER 流体に比べ、高い性能を示すことが明らかとなったが、ERG における ER 効果発生メカニズムが従来の粒子鎖形成論とは異なり、ERG 表面と電極界面の摩擦現象が影響していることが推測された。そこで4章では、3章の基本特性解析の結果を踏まえて、ERG における ER 効果発生メカニズムについて解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ERG におけるせん断力発生メカニズムは、従来の ER 流体に関するものとは

異なり、ERG と電極面の接触部分における摩擦特性が電界強度に応じて変化することに起因する。

- (2) 電界印加時の摩擦特性の変化は、電極に対するゲル部分の接触面積の変化に係る。ゲル部分の接触面積の変化は電界印加により ER 粒子がゲル内部へ沈み込む現象により生ずる。
- (3) シリコンゲル自体には電界を印加によるせん断応力変化は生じず、電界印加によるせん断応力変化は ERG 特有の現象である。
- (4) ERG の表面状態は含有するオイル量により異なり、オイル量を少なくすることでゲル表面に ER 粒子が占める割合が大きくなる。含有オイル量を少なくすることで電界によるせん断力の変化を可逆的にかつ高い応答性をもって得ることができる。

### ERG の精密位置固定機構への応用

第5章および第6章では、基本特性解析の結果に基づいて ERG の応用について検討した。第5章では、ERG のメカトロニクスデバイスへの応用を提案した。応用分野の一つである精密位置決めに焦点をあて、ERG が示す降伏力を固定力として捉え、その特性を応用したエアスライド用位置固定機構を考案・試作しその基本性能を評価した。その結果、従来のメカニカルクランプの問題であったクランプ時の微小変位が生じず、電界により固定力を調整できる固定機構としての性能が実験的に確認され、エアスライダなどの精密位置固定機構として有効であることが示された。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 試作した ERG 固定機構は印加する電界強度に応じて発生する固定力およびクランプ剛性が変化し、印加する電界を調整することにより、固定特性を調節可能である。
- (2) 試作した ERG 固定機構では、その固定動作に起因するスライダの微小変位を  $0.1 \mu\text{m}$  以下に抑制可能で、ゼロフォースクランピング機構が実現できることが示された。
- (3) ERG 固定機構に印加する電界強度を調節することにより送り方向の動コンプライアンスを必要に応じて可変調整することが可能であり、ERG 固定機構は、テーブルシステムの防振ダンパ要素としても有効である。

### ⑥ ERG の精密加工への応用

第6章では、ERG の金型用研磨パッドへの応用を提案した。具体的には、光学部品の金型用研磨パッドとして応用し、その加工特性を実験的に解析した。その結果、ERG 研磨パッドを用いた研磨加工は、これの形状精度をそのまま転写でき、電界により加工特性を調節できることが確認された。電氣的に研磨特性を変化させることのできる ERG 研磨法は、熟練技術者の経験に依存している研磨工程の自動化に貢献できると考えられる。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ERG 研磨パッドに電界を印加しない場合、砥粒は滑り特性のよい ER 粒子に支持されているため、ワークピースと ERG の界面を滑りながら運動する。一方、電場を印加すると、ER 効果により粘着現象が生じ、砥粒はゲル部分により軟らかく保持される。これにより加工力が変化する。
- (2) ERG 研磨パッドに電界を印加することで回転トルクが変化する。交流電界より



も直流電界を印加する方が、発生するトルクが大きく、研磨効率が高くなることが確認された。

- (3) 砥粒の移動半径が小さいワーク中央部では、周速が遅いため無電場で研磨することは困難だが、ERG 研磨パッドに電場を印加することでワーク中央部を研磨することが可能となる。
- (4) ワーク中央部ではワーク外周部よりも ERG 研磨パッドとワークピースのせん断速度が遅くなる。ER 効果はせん断速度が遅くなることで強くなるため、ワーク中央部ではワーク外周部よりも電場を印加した際の研磨効率が向上する。
- (5) ワーク中央部でもワーク外周部でも、電界強度 2kV/mm で研磨した後に電界強度を下げて研磨することによって、ワークの表面精度が向上する。
- (6) 回転速度が上昇しても ER 効果が発生することが確認でき、50~200min<sup>-1</sup> の範囲では回転速度を速くすることで研磨効率が向上することが確認された。
- (7) 砥粒径が ER 粒子径より大きい場合、砥粒を ERG 研磨パッドに塗布する方法で、砥粒の番手を細かくしていき研磨することで、初期粗さ Ra0.050  $\mu\text{m}$  のワークを、ワーク中央部、外周部ともに表面粗さ Ra0.007  $\mu\text{m}$  まで研磨できた。
- (8) 砥粒径が ER 粒子径より小さくなった場合、砥粒と研磨液を混合したスラリーをワークに供給し研磨することで、Ra=3nm を実現した。

### 片側電極における ERG の基本特性解析

第7章では、配線構造の複雑化をさけるために電極を片側のみに配置した片側電極構造を適用し、ERG の基本特性を実験および電場解析を通して明らかにした。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 片側構造電極においても平行平板型電極同様、ERG は電極間に印加する電圧に応じて、せん断応力が大きく変化する。微小変位においては弾性的特性を、降伏点を超えると電極と ERG の間で滑り特性を示す。
- (2) ERG 厚さを薄くすることによって、発生する降伏応力は増加する。特に ERG 厚さを 0.2mm の時、発生する降伏応力は急激に増加する。
- (3) 片側構造電極の電極数が増加することで、発生する公称せん断応力は大きくなる。
- (4) 片側電極に印加する電極間電位差を変化させることで、ERG 表面をスライドする上部平板のせん断方向の動的特性を変化させることができる。
- (5) 上部対象物が導電体である場合、対象物を外部と絶縁するか接地するかで、発生する ER 効果が異なる。対象物を外部と絶縁した場合に発生するせん断応力は、接地した場合に発生するそれよりも大きくなる。
- (6) 上部対象物が導電体である場合、片側電極の電極幅を広く、電極間隔を狭くすることで高い ER 効果をえることができる。
- (7) 上部対象物に絶縁体を用いた場合においても、片側電極を適用することで ER 効果を得ることができる。しかしながら、対象材料の誘電率の大きさにより発生する ER 効果はことなる。
- (8) 上部電極が絶縁体で、電極幅・電極間隔が 1mm の片側電極、ERG 厚さ 0.3mm を使用した場合、絶縁体の誘電率が4以上で ER 効果が認められる。

## ERG の力覚提示用トルク伝達装置への応用

第8章では、片側電極における ERG の基本特性の結果をもとに、片側電極を適用した ERG を、回転部を持つクラッチ機構へ応用することを提案した。ERG クラッチ機構を組み込んだ力覚提示用のトルク伝達装置を試作し、性能評価を行った。その結果、ERG クラッチ機構を有するトルク伝達装置は電氣的に伝達トルクを調整することが可能であることが実験的に示された。片側電極を適用した ERG クラッチ機構は配線構造が簡単になることから、メカトロニクス分野において様々な用途に応用が期待される。以下に得られた結果をまとめる。

### -ERG クラッチの基本特性-

- (1) 片側電極に電極間電位差を印加することにより伝達トルクが変化する。また電極間電位差の変化させることにより、伝達されるトルクを調整可能である。
- (2) 正弦波形の電極間電位差を印加した場合、伝達トルクは電位差に追従し、連続的に変化する。

### -試作したトルク伝達装置の性能-

- (3) マスター側ディスクの回転数が  $10\sim 50\text{min}^{-1}$  の範囲では、回転速度が上昇するに従って伝達されるトルクが大きくなる。
- (4) 電極間電位差に対する伝達トルクの応答時間は  $0.01\text{s}$  で、電極間電位差除去に対する伝達トルクの応答時間は  $0.04\text{s}$  である。
- (5) 電極間電位差を入力として伝達トルクを出力とした場合、試作したトルク伝達装置のカットオフ周波数は約  $10\text{Hz}$  である。

## ERG の応用デバイスに関する設計指針

最後に、ERG を応用デバイスに組み込む際の設計指針について述べる。ERG の ER 効果は表面の摩擦特性変化に起因するため、ERG 表面と電極・対象材料の接触状態が ER 効果を決定づける一つのパラメータとなる。そのため、ERG の性能を十分に引き出すには、ERG 表面を高精度に仕上げることで、それと同時に ERG と接触する電極や対象材料の表面も高精度な表面を有することが望ましい。また ERG の厚さも重要なパラメータとなる。低電圧で使用を可能とするためには、ERG を極力薄く製造することが重要となる。本研究では両側電極で  $0.5\text{mm}$ 、片側電極で  $0.2\text{mm}$  の厚さを実現しているが、ER 粒子径が  $16\mu\text{m}$  であることから、更に薄くしてもその効果が得られると考えられる。もし、平均  $0.05\text{mm}$  厚程度の ERG を製造することが可能であれば、 $100\text{V}$  以下で十分な ER 効果を得ることが可能となる。

また、ERG は応用デバイスに応じて電極構造を選定する必要がある。電極構造は、①高せん断力が必要か否か、②せん断領域の広さ、③回転部の有無、④対象材料が導電体か絶縁体か、の4つのパラメータをもとに決定する必要がある。

リニアブレーキや積層ダンパのように、高せん断応力が必要な場合は両側電極を使用することが好ましい。また、高せん断応力を得るためには、ERG シートの厚さを極力薄くし、さらに高精度な表面を持つ電極を使用する。これにより、ERG のせん断特性を最大限に活用することができる。ロータリダンパのように回転デバイスではあるが、せん断領域が狭い場合には両側電極を採用する方が好ましい。両側電極は片側電極に比べ、低電界強度で高せん断力が得られるばかりでなく、印加電界に対して発生するせん断力が線形であるため、電氣的に制御しやすいからであ

る。

次にクラッチなどのように回転機構を有し、さらにせん断領域が広いデバイスにおいては、電極構造に片側電極を適用することが望ましい。片側電極を適用することで配線構造が簡単になるとともに、片側パターン電極を利用することで絶縁構造なども簡単になるからである。回転研磨パッドなど加工技術に応用する場合は、片側電極構造を利用することが好ましい。回転機構を含むことから片側電極が望ましいという理由ばかりでなく、絶縁材料の研磨も要求されるからである。特にレンズなどの光学部品の研磨に対する需要が増してきており、今後は絶縁材料に対して片側電極を適用した ERG 研磨法に関する研究を行う必要がある。ただし、絶縁材料を用いる場合は、事前に誘電率と ER 効果の関係を把握しておく必要がある。レンズなどに使用されるガラス材料は比較的誘電率が高いことから ER 効果をえることが可能であり、片側電極を適用した研磨パッドにより、研磨加工を行えると考えられる。ここで、ERG をデバイスに応用する場合に最も重要な性能である発生降伏応力についてまとめる。

-両側電極を適用する場合-

両側電極を適用した場合に発生する降伏応力は、

$$\tau = f(t, Ra) \quad (9-1)$$

t: ERG シートの厚さ, Ra: 上部電極の平均表面粗さ

と表され、ERG シートの厚さ、上部電極の平均表面粗さの関数として考えることができる。実験的解析から平均表面粗さを6倍向上 (Ra=0.25  $\mu\text{m}$  から 0.04  $\mu\text{m}$ ) させた場合、その発生する降伏応力の上昇率は10~15%であり、ERG シート厚さが与える影響に比べ小さい。そのため、簡単には、

$$\tau = f(t) \quad (9-2)$$

として、発生降伏応力を考えることができる。

-片側電極を適用する場合-

片側電極を適用した場合に発生する降伏応力は、

$$\tau = f(t, Ra, mat, \epsilon) \quad (9-3)$$

t: ERG シートの厚さ, Ra: 上部電極の平均表面粗さ,  
mat: 対向面に用いる材料,  $\epsilon$ : 対向絶縁材料の誘電率

と表され、両側電極の場合に用いたパラメータに加え、対向面に用いる材料、対向絶縁材料を用いた場合にその材料が持つ誘電率をパラメータとした関数として考えることができる。

以上のように、応用するデバイスに応じて、ERG と対象物の接触条件、ERG の厚さ、電極構造を適切に選択することで ERG の ER 効果を効率よく得ることのできるデバイスを設計することが可能となる。

## 今後の展望

本研究では, ER 流体の粒子沈降による ER 効果の劣化および応用デバイスにおいて複雑なシール構造を必要とするといった問題を解決した新機能性材料であるゲル構造 ER 流体の開発に成功した. 電界により発生するせん断力は, ER 流体におけるそれよりも数十倍大きく, その際に消費する電力は数  $\text{mW}/\text{cm}^2$  と非常に低い. また, 耐久性にも長けていることから多くの分野で応用が期待できる. ER 流体は磁気粘性流体 (MR 流体) に比べ, 発生するせん断力が小さいという理由から, 高せん断力を必要とするダンパなどへの応用には向かないとされていたが, 開発した ERG は発生せん断力が MR 流体のそれと匹敵する程であり, また MR 流体のように磁場発生用の大型コイルを必要とせず小型かつ簡単な構造で応用デバイスを構成できることから, 従来 MR 流体が適すると考えられている分野にも ERG は応用可能である.

## 謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に在学中、同研究科青山藤詞郎教授の御指導のもとで行われたものであり、同教授より賜った御指導と御鞭撻とに心から厚く御礼申し上げます。

御多忙中の貴重な時間を割かれて本論文を御査読下され、有益なご助言を賜れた慶應義塾大学理工学部三井公之教授、大西公平教授、野口裕久教授に心から厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、材料の提供並びに有益な御助言を賜れた藤倉化成(株)安齊秀伸氏、櫻井宏治氏並びに東レ・ダウコーニング(株)磯部和之氏、機械要素の製作とそれに関する有益な御助言を賜れた東芝機械(株)田中克敏氏、相良誠氏、材料特性に関してご教授頂いた防衛大学校阿部洋助教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、日頃より細部にわたり御指導頂いた慶應義塾大学理工学部稲崎一郎教授、青山英樹教授に心から御礼申し上げます。また日頃より公私に渡って御世話になった慶應義塾大学理工学部稲崎一郎研究室、青山藤詞郎研究室、青山英樹研究室の学生、卒業生の皆様に心から感謝致します。

最後に著者に研究の機会を与えて下さり、学生生活を御支援頂いた両親に心より感謝致します。

2006年3月

## 参 考 文 献

- (1) 三田達也：“スマート流体に関する調査報告書”，スマート流体研究会，(1990)。
- (2) 滝本純一，小山清人：“電気粘性(ER)流体の開発－ER 効果とそのメカニズム－”，シーエムシー，(1994) pp.3-10.
- (3) Buonstahl. Y. and Snellman. K. O., Kolloid Zeitschrift, Vol.78, No.3, (1937) pp.258.
- (4) W. M. Winslow: "Induced Vibration of Suspension", J. Applied Physics, Vol.20, No.12, (1949) pp.1137-1140.
- (5) 杉本旭，小山清人：“電気粘性(ER)流体の開発－ER 流体の応用－”，シーエムシー，(1994) pp.163.
- (6) 中野政身：“電気粘性(ER)流体の開発－ER アクティブダンパーと振動制御・ER Fダンパとその応用－”，シーエムシー，(1994) pp.175-203.
- (7) J. David Carlson: "What makes a good MR Fluid", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.63-69.
- (8) J. David Carlson: MR Fluids and Devices in the Real World, Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.531-538.
- (9) W. Hu, M.M. Wereley : "Magnetorheological Fluid and Elastomeric Lag Damper for Helicopter Stability Augmentation", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.539-545.
- (10) S. Lee, K. Min, R. Lee, H. Lee, K. Sung, D. Kim: "Preliminary Design Procedure of MR Dampers for Controlling Seismic response of Building Structures", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.574-580.
- (11) 西山秀哉，片桐一成，濱田雄久，規矩地和人，畑克彦，Park Sang-kyu，中野政身：“MR 流体のクラスター構造解析と磁気機能性評価”，日本流体力学会年会 2002，(2002) pp.464-465.
- (12) X. Wang, F. Gordaninejad: "Lyapunov-based Control of a Bridge Using Magneto-Rheological Fluid Dampers", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.30-36.
- (13) A. Satou, M. Nakano, Y. Sugamata, E. Ohashi, H.Nishiyama: "Visualization of Dynamic Behavior of MR Fluids between Two Rotating Parallel Disks", The 5th JSME-KSME Fluids Engineering Conference, (2002) pp.1-6.
- (14) C. Park, D. Jean: "Semi active Vibration Control of a Smart Seat with an MR Fluid Damper Considering its Time Delay", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.243-248.
- (15) J. David Carlson: “Smart Magnetorheological Fluids and Devices”，平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集，(2004) pp.1-8.
- (16) 中野政身，土屋嘉久，熊坂利治，工藤亮介：“新規なMR 流体ブレーキを用いた

- コイル巻線用テンション制御装置”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, (2001) pp.508-509.
- (17) T. Saito, H. Ikeda, M. Oguro: "An Application of Magneto-Rheological Suspension Seal to Pressure Relief Device", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.553-559.
- (18) 升田雅博, 大山啓, 石川嘉晃, 米延仁志, 坂田興亜: “磁性流体を利用したダイナミックダンパー内蔵ボーリングバーの開発(第一報)ダイナミックダンパーの形状と振動剛性”, 精密工学会誌, Vol.71, No.2, (2005) pp.242-246.
- (19) 山口ひとみ, 進村武男: “磁性流体を利用した微細加工技術の開発研究”, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集(IV), (2001) pp.41-42.
- (20) 須藤誠一, 岡部雅良, 小松高嶺: “交流磁場を用いたメトロノーム型磁性流体アクチュエータ”, 日本実験力学学会講演論文集, No.5, (2005) pp.316-320.
- (21) 東謙治: “磁性対流を応用したマグネチックヒートポンプ”, 未来材料, Vol.5, No.10, (2005) pp.32-36.
- (22) 須藤誠一, 高木雄二, 橋口泰斉: “磁性流体マイクロモータ”, 日本流体力学会年会講演論文集, (2004) pp.580-581.
- (23) 花岡良一, 中道裕之, 高田新三, 深見正: “EHD ポンプと円錐ノズルによる液体ジェットの特徴的な流動特性”, 電学論 A, Vol.124, No.5, (2004) pp.399-406.
- (24) 横田眞一, 吉田和弘: “マイクロ流体アクチュエータ”, フルードパワーシステム学会誌, Vol.33, No.3, (2002) pp.29-34.
- (25) 賀集頭太郎, 中田毅: “ECF ポンプの開発とそのアクチュエータへの応用”, 平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2004) pp.35-37.
- (26) 小宮山晃浩, 寺阪澄孝, 稲田慎, 三井和幸, 黒田真一, 阿部洋, 新妻淳子, 池田博康, 齋藤剛, “EHD 現象を駆動源とする回転型アクチュエータの開発”, 平成15 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2003) pp.63-65.
- (27) X. Wang, R. Shen, W. Wen, K. Lu: "High Performance Calcium Titanate Nanopartical ER Fluids", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.48-51.
- (28) P. Sheng: "Mechanism of the Giant Electrorheological Effect", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.143-148.
- (29) 井上昭夫: “均一系 ER 流体の開発動向”, J. SICE, Vol. 34-9, (1995) pp.698.
- (30) 井上昭夫: “エレクトロレオロジー (ER) 流体-福祉・介護機器用途での実用化までの道程-”, 未来材料, Vol.2, No.8, (2002) pp.27-34.
- (31) A. Inoue, U. Ryu, S. Nishimura: "Caster-walker with intelligent brakes employing ER fluid composed of liquid crystalline polysiloxane", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.23-29.
- (32) 古荘純次, 小柳健一: “機能性流体を用いたウェアラブルパワーアシストシステム”, フルードパワーシステム学会誌, Vol.34, No.5, (2003) pp.45-51.
- (33) J. Furusho, K. Koyanagi, K. Nakanishi, U.Ryu, S. Takenaka, A. Inoue, K. Domen, K. Miyakashi: "Development of a 3-D Rehabilitation System for Upper Limbs

- Using ER Actuators in a NEDO Project", Proceedings of the 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2004) pp.735-741.
- (34) 森田智子, 小柳健一, 古荘純次: “パッシブ型力覚提示による任意仮想物体の提示”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集, 1P1-N-040, (2005).
- (35) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 井上昭夫: “片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果(第一報, その概念と基礎特性)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No. 653, (2001) pp.73-78.
- (36) 武居直行, 古荘純次, 井上昭夫, 吉村一郎: “片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果(第二報, 電極構成による ER 効果の比較考察と均一系 ER 流体の種類による特性比較)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.69, No.684, (2003) pp.71-77.
- (37) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 井上昭夫: “片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果(第三報, 粘性概算法の提案)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.69, No.684, (2003) pp.78-85.
- (38) Klass. D. L. and Matonek. T. W. : "Electroviscous fluids. I. Rheological Properties", J. Applied Physics, Vol.38, No.1, (1967) pp.67-74.
- (39) 枝村一弥: “ER 流体の新展開(1)ER 流体の開発”, 油圧と空気圧, Vol.25, No.7, (1994) pp.803-807.
- (40) 中野政身, 加藤輝雄: “分散系 ER 流体のマイクロスリット流れと ER 効果”, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集 (IV), (2000) pp.287-288.
- (41) 花岡良一, 高田新三, 村雲正敏, 櫻井宏治, 安齊秀伸: “分散系 ER 流体の粒子凝集力に関する電気伝導の役割”, 電学論 A, Vol.121-A, No.2, (2001) pp.136-141.
- (42) Tomas C. Halsey: "Electrorheological Fluids", Science, Vol.258, (1992) pp.761-766.
- (43) D.J. Klingenberg, C.F. Zukoshi IV: "Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions", Langmuir, Vol.6, (1990) pp.15-24.
- (44) 浅子佳延, 小山清人: “電気粘性(ER)流体の開発—高分子微粒子分散型—”, シーエムシー, (1994) pp.56-66.
- (45) 石野裕一, 小山清人: “電気粘性(ER)流体の開発—非含水系粒子分散型 ER 流体の開発例—”, シーエムシー, (1994) pp. 100-106.
- (46) 大坪泰文, 枝村一弥: “無機・有機複合粒子—シリコーンオイル分散系のエレクトロレオロジー”, 第 31 回レオロジー討論会公演要旨集, (1993) pp.21.
- (47) 吉田一雄, 井上昭夫, 小山清人: “電気粘性(ER)流体の開発—均一系 ER 流体の開発例—”, シーエムシー, (1994) pp.126-151.
- (48) 三ツ木勇人, 矢向高弘, 青山藤詞郎, 櫻井宏治: “電気粘性流体のクラッチ機構への応用に関する研究”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.67, No.657, (2001) pp.409-414.
- (49) Taro Nakamura and Norihiko Saga: "Impedance of A One Shaft-type Clutch Using Homogeneous Electro-rheological Fluid", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological



- Suspensions, (2001) pp.153-159.
- (50) Lionel Bitman, Young-Tai-Choi, and Norman M. Werley: "Electrorheological Damper Analysis Using An Eyeing Constitutive Relationship", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.77-82.
  - (51) 石山誠, 青山藤詞郎, 枝村一弥, 都築良彦: “ER 流体を応用した工作機械テーブルシステムの動特性向上”, 日本機械学会第 72 回通常総会講演会講演論文集, Vol.95-1, (1995) pp.417-418.
  - (52) 富澤元一, 青山藤詞郎, 田中克敏, 櫻井宏治: “ER 流体ダンパによる工作機械工具系の振動抑制”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.64, No.622, (1998) pp.421-428.
  - (53) T. Aoyama, I. Inasaki: "Application of Electrorheological Fluid Dampers to Machine Tool Elements", Annals of the CIRP, Vol.46, No.1, (1997) pp.309-312.
  - (54) A. Fisch, J. Nikitzuk, B. Weinberg, J. Melli-Huver, C. Mavroidis: "Development of an Electro-rheological Fluidic Actuator and Haptic Systems for Vehicular Instrument Control", Proceedings of IMECE'03 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress,(2003) pp.759-768.
  - (55) M. Nakano, T. Nagata: "ER Properties and Flow-induced Microstructures of an ER Fluid between Two Parallel Disk Electrodes in Squeeze Flow Mode", International Journal of Modern Physics B, Vol.16, Nos.17&18, (2002) pp.2555-2561.
  - (56) M. R. Jolly, M. Nakano: "Properties and Applications of Commercial Controllable Fluids", ACTUATOR 98, 6th International Conference on New Actuators, (1998) pp.411-416.
  - (57) 橋詰等, 新野秀憲: “ER 流体応用ナノメートル位置決めテーブルシステムに関する研究”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.65, No.630, (1999) pp.354-360.
  - (58) H. Hashizume, H. Shinno: "A Study on Nanometer Positioning Table System Equipped with Electrorheological Fluid Units", JSME International Journal Series C, Vol.43, No.1, (2000) pp.183-189.
  - (59) G. Georgiades, S.O. Oyadiji: "Experimental Investigations of the Effects of Electrode Geometry on the Performance of Electrorheological Fluid Valves", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2002) pp.125-131.
  - (60) M. Nakano, K. Katou, K.Miyata, K. Matsushita: "Three-Ports Micro ER Valve for ER Suspension Fabricated by Photolithography", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2002) pp.222-228.
  - (61) 圓崎諭, 青山藤詞郎, 櫻井宏治, 都築良彦, 田中克敏: “電気粘性流体の性質を応用した柔軟部品用低ひずみ固定装置の開発”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.64, No. 622, (1998) pp.413-420.
  - (62) Akio Inoue: "Caster-walker with Intelligent Brakes Employing ER fluid Composed of Liquid Crystalline Polysiloxane", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.23-29.
  - (63) J. Furusho, M. Sakaguchi, N. Takesue, Kenichi Koyanagi : "Development of ER

- Brake and Its Application to Passive Force Display", Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2001) pp.57-62.
- (64) 入江正浩: 機能性高分子ゲルの製造と応用, シーエムシー, (1987) pp.52-65.
- (65) 花岡良一, 高田新三, 中澤優一, 深見正, 櫻井宏治: “分散系シリコーンゲルの粘弾性特性に関する電界の効果”, 電学論 A, Vol.122-A, No.2, (2002) pp.157-163.
- (66) 枝村一弥: “ER 流体用無機・有機複合粒子の表面改質”, 藤倉化成株式会社資料.
- (67) 櫻井宏治, 成田光一, 斉藤利春, 安齋秀伸(藤倉化成株式会社): “電気レオロジー流体用複合粒子および電気レオロジー流体”, 公開特許広報(A), 特開平10-121084.
- (68) 沖野礼知: “電気粘性ゲルを用いた力覚提示マウスの開発”, 慶應義塾大学大学院修士論文, (2001).
- (69) 赤上陽一, 加藤勝: “電界砥粒制御技術を用いた加工法の開発 III”, 2005 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005) pp.263-264.
- (70) T. Kikuchi, J. Fujiwara, J. Furusyo, A. Inoue: "Polishing using ER Slurry on One-sided Patterned electrodes", International Journal of Modern Physics B, Vol.19, Nos.7,8 & 9, (2005) pp.1682-1688.
- (71) 村上敏貴, 黒部利次: “ぜい性材料の電気泳動援用研磨(FFF)”, 精密工学会誌, Vol.70, No.5, (2004) pp.640-644.
- (72) 末松和宏, 厨川常元, 吉原信人: “電気粘性流体援用マイクロ超音波砥粒加工に関する研究”, 2005 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005) pp.627-628.
- (73) T. Kuriyagawa, M. Saeki, K. Syoji: "Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts", Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol.26, (2002) pp.370-380.
- (74) 福山誠樹, 川勝歩, 田中武司: “片側パターン電極を用いた電気粘性流体援用研磨法に関する研究(第2法) 粒子径電気粘性流体を用いた場合の研磨性能”, 2004 年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004) pp.127-128.
- (75) 郭泰洙, 李龍哲, 安齋正博, 大森整: “ELID 研削法と磁気研磨法を組み合わせたナノレベル鏡面加工法の開発, 第一報: 超硬合金の鏡面仕上げにおける加工効率と表面品位の向上”, 砥粒加工学会誌, Vol.49, No.2, (2005) pp.95-98.
- (76) 安永暢男: “メカノケミカル研磨”, 機械技術, Vol.50, No.9, (2002) pp.30-34.
- (77) 山口ひとみ, 進村武男: “磁性流体を利用した微細加工技術の開発研究”, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集(IV), (2001) pp.41-42.
- (78) 神山新一: “磁性流体入門”, 産業図書, (1998).
- (79) 清宮紘一: “電解砥粒鏡面仕上げ方法および装置”, 砥粒加工学会誌, Vo.37, No.4, (1993) pp.219-224.
- (80) 河田研治: “複合粒子研磨法-研磨パッドを用いない鏡面研磨技術-”,

MATERIAL STAGE, Vol.3, No.2, (2003) pp.63-67.

- (81) 池野順一, 矢野克行, 不和徳人, 渋谷秀雄, 深澤隆, 堀内幸, 河西敏雄:“環境に優しい鏡面研削砥石の作製に関する一考察-加工メカニズムに基づく開発指針-”, 精密工学会誌, Vol.67, No.3, (2001) pp.461-465.
- (82) 武野泰彦:“CMP 関連装置・材料の市場動向”, 電子材料, No.5, (2000) pp.15-17.
- (83) 渡邊公寿:“固定砥粒研磨工具とコンディショニング”, 機械技術, Vol.50, No.9, (2002) pp.67-74.

## 関連論文

### 1. 原著論文

- (1) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 日野賢一, 田中克敏: “ゲル構造電気粘性流体の開発とその基本特性”, 精密工学会誌, Vol.70, No.12, pp.1538-1543, (2004).
- (2) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “ERゲルにおけるせん断応力発生メカニズム”, フルードパワーシステム学会誌, Vol.36, No.1, pp.15-21, (2004).
- (3) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai, K. Isobe, K. Tanaka : “Basic Properties of Gel-structured Electro-rheological Fluids”, International Journal of Modern Physics B, Vol. 19, Nos.7-9, pp.1339-1345, (2005).
- (4) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “ERゲルに対する片側構造電極の適用とその性能評価(第一報)”, 精密工学会誌, Vol.71, No.12, pp.1607-1612, (2005).
- (5) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai, H. Sakurai, K. Isobe, K. Tanaka : “Application of ER gel with Variable Friction Surface to the Clamp System of Aerostatic Slider”, Precision Engineering, ( in press ).

### 2. 国際会議

- (1) Y. Kakinuma, T. Yakoh, T. Aoyama, H. Anzai, K. Isobe : “Development of Gel-structured Electro-rheological Fluids and their Application to Mechanical Damper Elements”, the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04), Kwasaki, Japan, March 25-28, pp.541-545, (2004).
- (2) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai, K. Isobe, K. Tanaka : “Basic Properties of Gel-structured Electro-rheological Fluids”, Proceedings of the Ninth International Conference Electrorheological (ER) Fluids and Magneto-rheological (MR) Suspensions [ERMR 2004], Beijing, China, August 29 – September 3, pp.356-362, (2004).
- (3) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai, H. Sakurai, K. Isobe, T. Hino, K. Tanaka : “Development of Gel-Structured Electro-rheological Fluids and their Applications to the Control of Positioning”, 8th International Research/Expert Conference (TMT 2004), Neum, Bosnia and Herzegovina, September 15-19, pp.459-462, (2004).

- (4) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai : “A Study on the Application of Electro-rheological Gel to Torque Transfer Device”, The 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, Nagoya, Japan, October 19-22, pp.459-464 ,(2005).
- (5) Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai : “Basic Performance of ER gel on One-sided Structured Electrodes”, The Sixth JFPS International Symposium on Fluid Power, Tsukuba, Japan, November 7-10, pp.584-589, (2005).

### 3. 国内学会

- (1) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 鶴泉隆太郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 日野賢一, 田中克敏: “電気粘性ゲルの基本特性解析”, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.558, (2003).
- (2) 柿沼康弘, 鶴泉隆太郎, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 日野賢一, 田中克敏: “ゲル構造電気粘性流体の基本特性”, 平成 15 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.69-71, (2003).
- (3) 佐藤博之, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “ERゲルの基礎的性能評価”, 日本航空宇宙学会第36回流体力学講演会論文集, pp.17-20, (2004).
- (4) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “ERゲルにおける ER 効果発生メカニズムの解析”, 平成 16 年秋季フルードパワーシステム講演会論文集, pp.20-22, (2004).
- (5) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “ERゲルを用いたエアスライダ用クランプ機構の開発”, 日本機械学会第5回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp.69-70, (2004).
- (6) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 櫻井宏治, 磯部和之, 田中克敏: “片側構造電極における ER ゲルの基礎特性”, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1223-1224, (2005).
- (7) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 田中克敏: “片側パターン電極を適用した ERG 微小位置調整機構とフィクスチャに関する基礎的研究”, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.23-24, (2005).
- (8) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 田中克敏, 安齊秀伸: “ER ゲルを用いた金型のマイクロ研磨加工に関する基礎的研究”, 2005 年砥粒加工学会学術講演会講演論文集, pp.119-120, (2005).
- (9) 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸: “片側パターン電極を適用した ERG 微小位置調整機構とフィクスチャに関する基礎的研究”, 機能性流体を用いたスマートフルードシステムに関する研究委員会公開研究会, pp. 13-14, (2005).
- (10) 佐藤博之, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸: “片側パターン電極を適用した ER ゲルの基本特性評価”, 機能性流体を用いたスマートフルードシステムに関する研究委員会公開研究会, pp.43-44, (2005).
- (11) 中村直太, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 田中克敏: “ER ゲルを用いたマイクロ研磨加工に関する基礎的研究”, 機能性流体を用いたスマートフルードシステ

ムに関する研究委員会公開研究会, pp.61-62, (2005).

以上