

Title	ゲル構造電気粘性流体を用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工システムの開発
Sub Title	Development of nano-polishing system for molds of micro lenses applying gel-structured electro-rheological fluids
Author	青山, 藤詞郎(AOYAMA, TOJIRO)
Publisher	
Publication year	2009
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2008. )
JaLC DOI	
Abstract	本研究は、新機能性材料であるゲル構造電気粘性流体 ( ERG ) の性質を金型研磨加工に応用することを考え、これを用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工装置を開発することを目的として行われた.ERG研磨パッドを新たに開発し、これに静的および動的電場を付与することで、金型材料を高効率・高精度に研磨することに成功した.さらに、片側電極構造の研磨パッドを開発し、ガラスなどの非導電材料の研磨加工も可能であることを明らかにした.
Notes	研究種目：基盤研究(B) 研究期間：2006～2008 課題番号：18360071 研究分野：工学 科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18360071seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18360071seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360071  
 研究課題名(和文) ゲル構造電気粘性流体を用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工システムの開発  
 研究課題名(英文) Development of nano-polishing system for molds of micro lenses applying gel-structured electro-rheological fluids  
 研究代表者  
 青山 藤詞郎(AOYAMA TOJIRO)  
 慶應義塾大学・理工学部・教授  
 研究者番号：70129302

## 研究成果の概要：

本研究は、新機能性材料であるゲル構造電気粘性流体(ERG)の性質を金型研磨加工に応用することを考え、これを用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工装置を開発することを目的として行われた。ERG研磨パッドを新たに開発し、これに静的および動的電場を付与することで、金型材料を高効率・高精度に研磨することに成功した。さらに、片側電極構造の研磨パッドを開発し、ガラスなどの非導電材料の研磨加工も可能であることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2007年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削・研削加工，研磨加工，機能性材料，電気粘性流体

## 1. 研究開始当初の背景

デジタルカメラやカメラ付き携帯電話など各種電子デバイス用部品の高精度化・高密度化にともない、これらに使用される光学部品に対する品質要求はますます高度化する傾向にある。高性能小型レンズの製造に用いられる成形金型についてもナノメータオーダーの鏡面加工が要求されている。光学レンズ等の製造に使用される超精密金型の仕上げ工程には、研磨加工が適用されるのが一般的であるが、目標とするナノメータオーダーの加工面精度を達成するために長時間を要し、また最終研磨プロセスにおいて熟練技能者

の手作業による研磨仕上げ加工が行われているのが現状であって、機械加工プロセスによる超精密金型の安定した製造方法の開発が強く望まれており、本研究は、これらの技術的課題に応じて、新しい高精度・高効率な研磨加工法を提案するために計画された。

## 2. 研究の目的

本研究においては、研究代表者らがこれまでに開発したゲル構造電気粘性流体の性質を金型研磨加工に応用することを考え、これを用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工装置を開発することを目的として3年間の

計画で実施された。ゲル構造電気粘性流体は、これに電場を印加することにより、ゲル状パッド表面の構造が変化して、対向する固体面との摩擦特性が変化する新しい機能性材料である。本研究では、ゲル構造電気粘性流体に研磨砥粒を混入した新しい研磨材料を開発し、これを用いた研磨装置を開発し、小型レンズ用金型のナノ研磨加工プロセスの高能率化と自動化を実現することを目標とした。

### 3. 研究の方法

レンズ製造時に用いられる成形金型の加工技術については、ナノオーダ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。このようなニーズに応じた新しい研磨加工法として電場や磁場を利用した加工法が最近注目を集めている。本研究は、新しい研磨加工法の実現にあたり、これまでに申請者が開発を進めてきた新しい機能性材料であるゲル構造電気粘性流体 (ERG) に注目した。

ERG は、粒子分散系の電気粘性流体 (ERF) に特殊な処理を施すことによってゲル化したものである。図 1 に示すように、フィルム状の ERG を板状の電極で挟み、これに電場を印加すると、表面にある ER 粒子に微小変位が生じ、これによって ERG と電極板間の接触状態が変化して両者の間の摩擦特性が変化する。またこれと同時に、ERG フィルムの粘弾性が微小に変化する。本研究では、このような ERG の特殊な性質に注目し、これを研磨材料に応用することを考えた。ERG の製造段階で、これに研磨砥粒を混入することによって、特殊な ERG 研磨パッドを製造し、これを用いた研磨装置を開発した。研磨砥粒を含んだ ERG パッドに対して印加する電場の強度を変化させることにより、図 2 に示すように砥粒の研磨面に対する接触力や研磨パッドの粘弾性が調整可能であると考えられることから、これに電場を付与することで研磨特性を制御可能な研磨装置を開発した。

具体的には、

- (1) 研磨加工用 ERG の試作とその性能評価
  - (2) 研磨加工装置の設計と試作
  - (3) 研磨加工時の電場付与条件等の研磨条件と研磨特性の解析
  - (4) 片側電極構造の ERG 研磨加工プロセスへの適用による否導電材料の研磨加工
- の主に 4 つの研究開発課題を設定し、それぞれについて、電場解析による効果の推定と、実験的解析による性能評価ならびに検証を行った。研究の遂行にあたっては、ERG の製造プロセスにおいて必要となる、電気粘性流体とそのゲル化剤ならびにゲル化プロセスに関する基本技術について化学メーカーである藤倉化成 (株) の協力を得た。また、研磨加工装置の設計と試作に関しては、当該分野

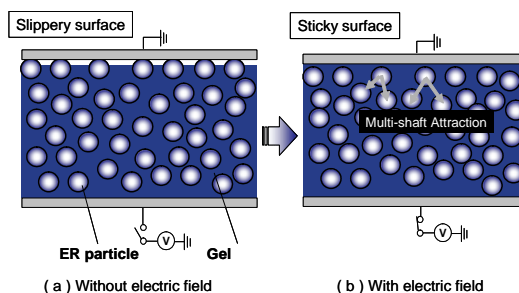


図 1 ERG の基本的な性質

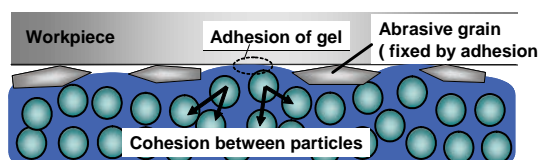


図 2 ERG 研磨パッドの基本構造

において豊富な経験を有する東芝機械 (株) の協力を得て実施した。

### 4. 研究成果

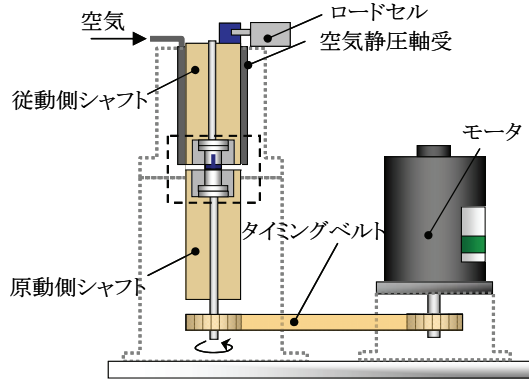
本研究は、当初に計画した 3 年間の研究期間に実施され、以下に示すような具体的な成果を得ることができた。

#### (1) 研磨加工用 ERG の試作とその性能評価

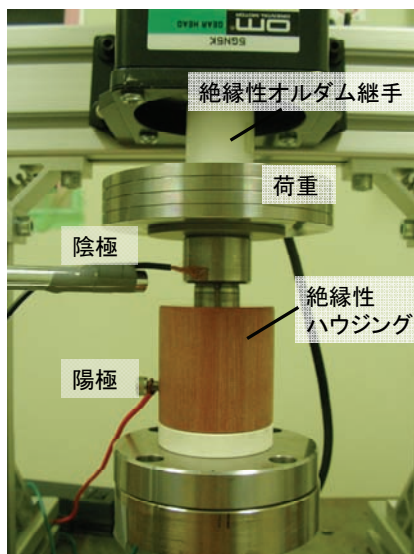
研磨加工に最適な ERG の製造方法について検討を行った。まず各種の条件において研磨用 ERG パッドを試作し、ゲル構造と ER 粒子ならびに砥粒の分散状況を観察した。その結果、研磨用 ERG の製造方法を明らかにすることができた。さらに、試作した研磨用 ERG パッドの基本的な研磨特性を評価した。研磨面における ER 粒子と研磨砥粒の挙動を観察し、ER 効果が研磨砥粒の挙動にどのような影響を与えるのかを実験的に解析した。また平面研磨実験を行い、ER 効果が研磨後の仕上げ面性状に与える影響を解析した。

#### (2) 研磨加工装置の設計と試作

ERG 研磨加工試験を行うための加工装置を試作した。ERG 研磨加工装置の構成および主要部の外観を図 3 に示す。ERG 研磨パッドが端面に取り付けられた回転工具はオルダム継手を介して駆動モータと接続されている。回転工具を陰極、絶縁ケースにねじ止めされた工作物を陽極とすることで、ERG 研磨パッドに電界を印加することができる。工作物は、金型に使用されるステンレス綱 (STAVAX) で、直径 20mm、高さ 20mm の円柱形状とした。ERG 研磨パッドを用いた電場援用研磨の効果を評価するために、静的および動的電場を印加し、研磨試験を行った。



(a) 基本構造



(b) 主要部外観

図3 ERG 研磨装置

(3) 研磨加工時の電場付与条件等の研磨条件と研磨特性の解析

① 静的電場における研磨特性

砥粒混合タイプの ERG 研磨パッドを用いて、電場援用研磨試験を行った。図4に静的電界を作用させ研磨した場合の研磨時間に対する加工面粗さの推移を示す。工作物外周部では、電場援用研磨により加工面粗さが向上する。さらに、印加する電界強度を高くすることで、研磨効率が向上し、短時間で良好な加工面を得ることができた。

② 動的電場付与の効果

電場を時間的に変化させることにより、ERG 研磨パッドの砥粒が断続的に研磨効果を発揮し、より研磨性能の向上が期待される。動的電場における ERG 研磨パッドの特性を評価するために、0V/mm~2kV/mm の矩形波電界を印加し、その周波数を、0 (一定電界 1kV/mm), 10, 100, 200Hz と変化させ、研磨

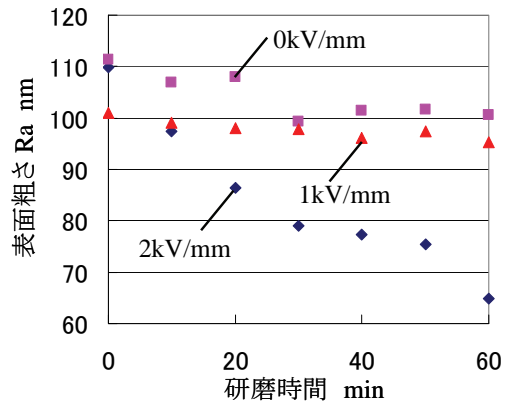


図4 静的電界と研磨性能の関係

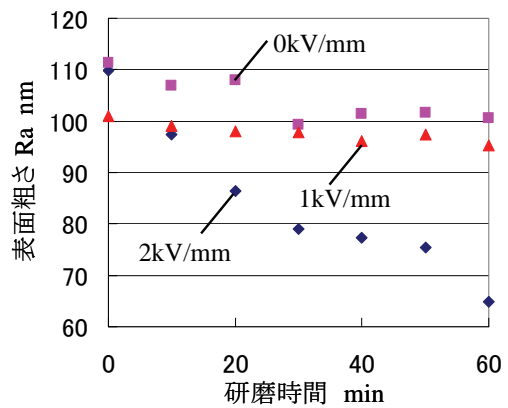


図5 矩形波電界周波数と研磨性能の関係

試験を行った。図5に各電界周波数における研磨時間と加工表面の関係を示す。0, 10, 200Hz において研磨性能にほとんど差はないが、100Hz において、研磨効率が向上し、外周部ばかりでなく回転中心部においても研磨が進行することを確認した。電界が時間に対して変動することで生じる誘電泳動力や電気歪み力を能動的に砥粒に作用させ、砥粒に動きを積極的に与えることができ、ERG パッド表面の砥粒が遊離砥粒のように振る舞うことで、中心付近でも研磨が進行したと考えられる。基礎特性試験の結果より ERG 研磨パッドの回転方向における共振周波数が 100Hz 付近に存在することが確認された。

動的電界周波数を研磨工具の機械的共振点に一致させることで、電場援用研磨の性能が著しく向上すると考えられる。つまり、ERG 研磨パッドにおいて、絶縁破壊が生じない範囲で、最大限の電界を印加し、静的電界援用研磨を行うことで、最も高い研磨効率を得ることができる。一方、動的電界周波数を機械的共振周波数に合わせた矩形波電界援用研磨は、ERG 効果により砥粒が移動と固定を繰り返すため、間欠的に研磨力が作用するため、静的電界援用研磨で得られる加工面より精

密な加工面を実現できる可能性があり、仕上げ研磨に適すと考えた。そこで、両研磨法の特長を活かし、静的および動的電界を併用した電場援用研磨プロセスを試行した。はじめに静的電場援用研磨を適用し、加工面粗さが研磨時間に対して変化しなくなった後、動的電場援用研磨を適用する。図6に試行した研磨プロセスを適用した場合における表面粗さの推移曲線を示す。静的電場援用研磨を適用することで、初期表面粗さ Ra50nm から Ra20nm までは研磨時間に対して一定の割合で表面粗さが向上するが、その後研磨効率が低下し、Ra15nm 以下にはならない。ここで矩形波電界援用研磨を適用したところ、研磨効率は低いが、Ra12nm 程度まで研磨可能であることがわかった。

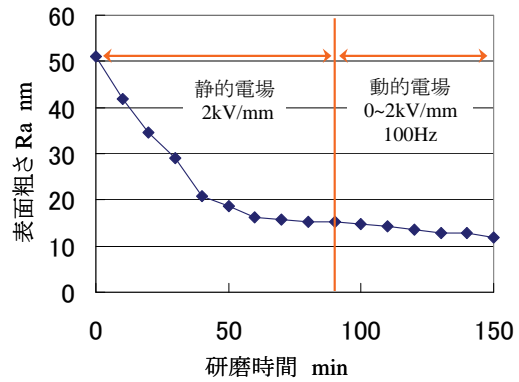


図6 静的・動的電界複合研磨の効果

(4)片側電極構造のERG研磨加工プロセスへの適用による非導電材料の研磨加工

ERGパッドを陽極と陰極が交互に櫛歯状に配置された片側電極上に成型することにより、ガラスなどの非導電材料への適用も可能と考えられる。

片側電極構造を適用したERG研磨パッドを図7に示す。陽極と陰極を櫛歯状に配置した片側電極に電位差を与えることで、ERGにアーチ状の電場分布が形成される。ERG電場援用研磨の有効性を検証するため、ERGと電気粘着効果を示さないシリコンゲルの研磨パッドを用いて、それぞれ研磨加工を行った。工作物には青板ガラスを用いた。図8に加工試験結果を示す。電場援用研磨加工10分間でシリコンゲル研磨パッドでは加工の進行が見られないが、ERG研磨パッドでは表面粗さの著しい向上が確認できる。電気粘着効果により、砥粒の把持と着脱を繰り返すことで高い研磨作用を誘起したものと考えられる。以上よりERG電場援用研磨はガラスなどの絶縁材料の研磨に適用可能であることがわかった。

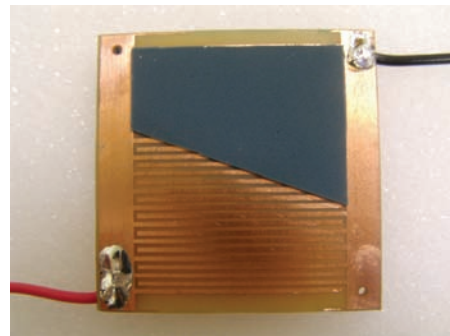


図7 片側電極構造のERG研磨パッド

(5)まとめ

本研究では、新機能性材料であるゲル構造電気粘性流体(ERG)の性質を金型研磨加工に応用することを考え、これを用いた小型レンズ用金型のナノ研磨加工装置を開発し、ERこれに静的および動的電場を付与することで、金型材料を高効率・高精度に研磨することに成功した。さらに、片側電極構造の研磨パッドを開発し、ガラスなどの非導電材料の研磨加工も可能であることを明らかにした。本研究で得られた成果は、研磨加工プロセスをERGパッドに付与する電場強度の調節によって制御し、従来の研磨プロセスより高効率な研磨加工を実現する新たな手法を提案し、これを実験的に確認してその有効性を明ら

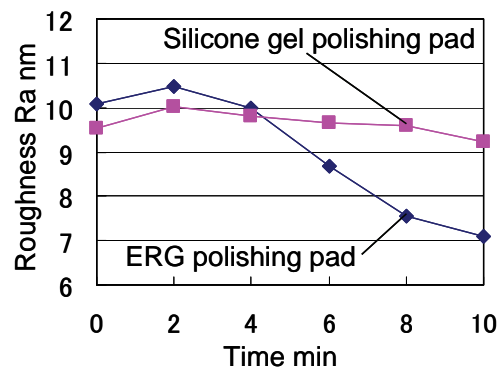


図8 片側電極構造 ERG 研磨パッドによる青板ガラスの研磨結果

かにしたもので、小型レンズ用金型などの高精度金型の研磨加工プロセスの高効率・高精度化に有効な手段を提供するものとして、期待されるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (主要6件、他9件 計15件)

1. H.Tanaka, Y.Kakinuma, T.Aoyama, H.Anzai: A Study on Fixing Force Generation Mechanism of ER Gel,

- Proceedings of 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Journal of Physics, Conference Series 149 (2009) 012029, 査読有.
2. Y.Kakinuma, T.Aoyama, H.Anzai: Development of High-performance ER Gel Produced by Electric-field assisted Molding, Proceedings of 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Journal of Physics, Conference Series 149 (2009) 012013, 査読有.
  3. 柿沼康弘, 竹澤慎吾, 青山藤詞郎, 相良誠, 田中克敏, 安齋秀伸: ERゲルを用いた電場援用研磨法の開発, 砥粒加工学会誌, Vol.52, No.12 (2008), 712-717, 査読有.
  4. Y.Kakinuma, S.Takezawa, T.Aoyama, M.Sagara, K. Tanaka, H. Anzai: Development of Electric Field Assisted Polishing Technology Using ERG Abrasive Pad, Proceedings of Precision Grinding and Abrasive Technology at SME International Grinding Conference ISAAT 2007, Dearborn (2007), 443-449, 査読有.
  5. Y.Kakinuma, T.Aoyama, H.Anzai: Application of the Electro-rheological Gel to Fixture Devices for Micro Milling Processes, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol.1, No.3 (2007), 387-398, 査読有.
  6. 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 30 (2006), 280-287. 査読有

[学会発表] (主要7件、他6件 計13件)

1. 竹澤慎吾, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 田中克敏, 安齋秀伸: ERゲルによる絶縁材料の電場援用研磨, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2009年3月12日), 中央大学理工学部(東京), 1137-1138.
2. 田中英孝, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齋秀伸: ERエラストマを用いた多板ディスクブレーキの開発, 第51回自動制御連合講演会, (2008年11月22日), 山形大学工学部, 24-25.
3. 柿沼康弘, 田中英孝, 青山藤詞郎, 安齋秀伸: ERゲルの電気粘着効果, 日本フルードパワーシステム学会, 機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する公開シンポジウム講演論文集,

(2008年11月7日), 東北大学(仙台), 41-42.

4. 青山藤詞郎, 柿沼康弘: ERゲルの開発とその応用, 日本フルードパワーシステム学会, 機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する公開シンポジウム講演論文集, (2008年11月6日), 東北大学(仙台), 11-14.
5. 竹澤慎吾, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 田中克敏, 安齋秀伸: 電気粘性ゲルを用いたマイクロ研磨法の開発, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2007年9月13日), 旭川市労働福祉会館, 199-200.
6. 柿沼康弘, 中村直太, 青山藤詞郎, 田中克敏, 安齋秀伸: 微細砥粒混合ERG研磨パッドによる研磨加工法の開発, 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会, (2006年11月25日), 生産性国際交流センター(葉山), 227-228.
7. 渡邊拓昭, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齋秀伸: ERGを適用した直動型力伝達素子における最適電極設計, 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会, (2006年11月24日), 生産性国際交流センター(葉山), 67-68.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

青山 藤詞郎 (AOYAMA TOJIRO)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70129302

##### (2) 研究分担者

該当なし

##### (3) 連携研究者

該当なし