

## 大森素形材工学研究室

Materials Fabrication Laboratory

主任研究員 大森 整 (工博)

OHMORI, Hitoshi (Dr. Eng.)



### キーセンテンス：

1. マイクロ構造 / 機能素子のためのナノメカニカルファブリケーション研究
2. ELID (電解インプロセスドレッシング) 研削法の研究
3. 超平滑加工の研究
4. ナノプレシジョン・マイクロメカニカルファブリケーションの研究
5. 超精緻成形加工の応用とコンピュータシミュレーション研究
6. マイクロファブリケーションの応用研究
7. トライボファブリケーション研究

### キーワード：

ELID (電解インプロセスドレッシング) 研削, ナノプレシジョン・マイクロメカニカルファブリケーション技術, 環境調和 ELID 加工技術, 超平滑加工, トライボファブリケーション, デスクトップ加工システム, 表面改質加工, 先端光学素子加工, 超精緻成形加工, コンピュータ援用加工, フィードバック加工プロセス, スーパーアナライザーテクノロジー

### 研究概要

素材に機能と形状を付与することは、"物づくり"の基本である。工業材料の主役である金属材料やプラスチック材料はもとより、電子材料、光学材料、セラミックス、複合材料などの分野で、加工困難な新素材が次々と登場し、また先進の高機能デバイスの開発においては、加工精度の超精密化、サイズの超微細化、形状の多自由度化、加工表面の高機能化等に対する要求が高まり、素形材工学の重要性は増大の一途をたどっている。当研究室では、素形材工学にブレークスルーをもたらす革新的な新加工技術の研究開発を行うとともに、その応用研究と実用システムの開発を進めている。当研究室で開発した ELID(電解インプロセスドレッシング)研削法は、ELID 研究会および工業界を通じて広く普及してきており、新しい生産分野で多くの成果を挙げている。また、ナノプレシジョン加工システムの研究開発、表面改質加工法およびナノレベルの超平滑加工法の研究開発を通して、微細表面構造および表面機能を創成するマイクロメカニカルファブリケーションの研究領域へと展開を進め、次世代の微細光学素子や電子デバイス、マイクロツール開発など、基礎科学研究から産業界への応用までブレークスルーをもたらしつつある。

#### 1. マイクロ構造/機能素子のためのナノメカニカルファブリケーション研究

(1) ELID加工法の研究(大森,片平,小野\*1,八須\*2,春日\*2,水谷\*3,高橋\*4,成瀬\*5,上原\*5,林\*5,亀山\*2,梅津\*5,小茂鳥\*5,粟木\*5,丸山\*5,山本\*5,小川\*5,貝瀬\*5,出口\*5,小松\*5,康\*5,吉川\*5,大森(宮)\*5,松澤\*5,宮澤\*5,三好\*5,中川\*5,野口\*5,鈴木(和)\*5,高田\*5,横山\*5,上野\*5,清水\*5,進藤\*5,島崎\*5,小谷\*6,米山\*6,吉田\*6,根本\*7,陳\*8,金\*9,三島\*10)

ELID法の制御, および同手法の適用範囲の拡充, ナノプレシジョンELID研削のためのシステム開発などについて系統的な研究を進めた. 具体的研究成果として, CVD-SiCミラー, 宇宙X線用大型ミラー, シュミットレンズ, 中性子物質レンズ(長尺楕円ミラー, フレネル形状, プリズム), ニオブ酸リチウムなど様々な難削・脆性材料に対して, 微細な表面加工を延性モードで実現するための諸条件を検討し, 良好な高精度鏡面加工を実現した. また, レーザー光学系用集光ミラーやガラスレンズ成形用材料として期待されるバルクCVD-SiCの高品位超精密加工も行った. 次世代高出力マイクロチップレーザーの高精度加工法として, ELID研削の適用が検討されており, ヒートシンクに接合されたYb:YAG薄片チップの高精度凹面加工にも成功している. このアクティビティは, エクストリームフォトンクス研究と連携を取りながら進めている. 一方, 富士重工(株)と合同で開発したELIDホーニング工法のさらなる改善も進めている. 研削によるツールマークの除去と超平滑化を目指し, 弾性砥石にELID研削法を適用した導電性ラバーボンド砥石の開発を行なった. この砥石よりツールマークの無い, ナノメートルオーダーの平滑面を実現し, またフリー

ダムとの融合により自動加工による自由曲面金型の鏡面化を創製した。一方、ELID法の応用展開として、加工と同時に被加工物表面に微細な非晶質酸化膜を形成、および物質置換現象に基づく改質効果を付加する複合プロセスを実現している。超硬合金や成形用ステンレス鋼といった金型用素材に対し、種々の金属元素を浸透拡散させることに成功しており、その物質置換現象をより一層促進させるため、砥粒成分元素を種々調整することにより、表面電位や濡れ性等の表面機能が大きく変化するという全く新しい知見を得ており、離型性との関係まで掘り下げて検討を試みている。金属系生体材料であるNi基合金やCo-Cr合金へ適用した場合も、生体親和性が向上する結果が得られている。特に、Co-Cr合金からなるMOM(Metal on Metal)式人工股関節の開発にも着手し、一定の成果が得られている。さらに、ELID研削の最適条件探索手法の研究についても着手している。一連のELIDプロセスの研究活動は、ELID研究会を中心とした体制により推進されている。第2回国際ELID会議を独国ブラウンフォーファー研究所およびアーヘン工科大学と合同企画開催するなど、ELID技術情報発信と議論を目的としたセミナーやシンポジウム、見学会などを積極的に主催するとともに、ELIDシステムの標準化に向けた事例構築に取り組んでいる。さらに、中国や独国、米国の研究機関から研究者を招くなど研究交流の強化を図ると共に、独国や米国との国際シンポジウムの開催を通じて、コア技術の積極的アピールに努めるなど、ELID研究コミュニティの一層のグローバル化を推し進めた。

(2) 超平滑加工の研究(大森,片平,小野\*1,春日\*2,上原\*5,河西\*5,池野\*5,土肥\*5,長谷川\*5,堀尾\*5,伊藤(伸)\*5,小仲\*5,増田\*5,松澤\*5,水谷\*2,村上\*5,八須\*2,永倉\*5,大前\*5,林\*5,根本\*7) 超平滑加工を必要とする半導体材料,光学素子材料,生体材料,機構部品に対して,ナノレベルからサブナノレベルの極限平滑面を創成するメカニカル/ケミカル加工法の継続研究とこれに高い形状精度を付加させるスーパーポリシング手法の検討を行った。ELID法を援用した半導体デバイス加工を目指し,カーボンボンド砥石の開発に端発した砥石ボンド材の検討が盛んになり,環境を配慮した砥石,ラバーボンド砥石の開発などを多岐にわたって新しい加工ツールの開発が進めている。また,開発した導電性ラバーボンド砥石による実証試験を行い,さらなる高品位化手法の検討を進めた。一方,ナノダイヤモンドコロイドによる高品位ポリシング実験から,トライボファブ리케이션という新しい研究分野を開拓して独立したテーマで砥石ボンド材の特性調査を含めて研究が進めている。また,ELID/研磨の連携加工プロセスに関して,前年度に引き続きELID研削法と遊離砥粒による研磨や磁性流体研磨(MRF)法を連携させた加工プロセス技術の研究を行い,ガラス成形用非球面レンズ金型や非球面レンズなどの加工検証を行い,高精度化,高効率化を進め,加工材料も超硬合金からCVD-SiCなど多方面からアプローチしている。これらのアクティビティは,ナノプレジジョン研究委員会およびエクストリームフォトンクス研究と連携を取りながら業界へのアピールを行っている。また,シンガポールの研究者を招聘することにより,ELIDと電気泳動研磨との連携についても調査を行っている。さらに連携加工プロセスの応用として,ELID/研磨/EEM加工プロセス構築を進め,国家基幹研究であるX線自由電子レーザー(XFEL)建設に長尺高精度なXFELミラーの開発に成功し,このプロセスによる単結晶シリコンや石英製の長尺XFELミラーの製作を行った。このアクティビティは,スーパー・アナライザー開発テクノロジー研究推進グループと一定の連携を保ちながら研究を進めている。そのほかに次世代パワーデバイス用単結晶SiCの高精度・高能率加工にも引き続き基礎研究として検討を進めている。

(3) 超微細加工の研究(大森,和田,片平,亀山\*1,八須\*2,春日\*2,高橋\*4,上原\*5,成瀬\*5,林\*5,武安\*5,安藤\*5,藤井\*5,部谷\*5,吹春\*5,船田\*5,古林\*5,後藤\*5,石井\*5,石坂\*5,伊藤\*5,Jabri\*5,上村\*5,加藤\*5,近藤\*5,松下\*5,増田(忠)\*5,三浦\*5,白滝\*5,鳥居\*5,常木\*5,袁\*5,鈴木\*6,安藤(文)\*6,北村\*6,渡辺\*6,吉田\*6) マイクロメカニカルファブ리케이션の加工手法の研究において,微細な形状創成加工には,ツール先端を数ミクロン以下のシャープネスに創成するツルーイング手法が不可欠となる。プラズマ放電とELID研削を複合した手法と,画像処理方法を採用したオンラインモニタリングシステムによりシャープエッジと鏡面的な表面性状を持ち,高精度な寸法精度でY字や+字などの3次元形状を有する超精密ツールの創成を目指し,加工特性の検証を引き続き行った。また,ツール材料としてPCD(Polycrystalline Diamond)の検討を行い,ツルーイング手法にマイクロ放電加工を採用し,ツール形状を創成することを実現した。そして,赤外域の回折や中性子ビーム集光,リフレクター,レーザー結晶としての光学機能を持つものや,

細胞セル，マイクロ鉗子，微細ノズルなどのマイクロプレス法を含む各種材料に対する微細加工プロセスの構築を継続して進めた．また，SiCを素材とするマイクロメス刃先の加工試験に取り組んだ．さらに，ナノオーダーの超微細溝加工を効率的に実現することを目的として，全空気静圧型非接触駆動装置により超微細溝加工を実現し，Ni-P材質においてRa0.5ナノメートルの表面粗さを実現している．また，デスクトップマシン開発として，ELID機能を搭載し，必要な加工自由度，軸構成，ソフトウェア技術により，非球面凸型石英レンズやマイクロアクチュエータ，インクジェットノズル，マイクロレンズ，レンズアレイ，そして，人工股関節骨頭等の微細加工に対応できるシステム構築を進めた．また，微細な形状に対する研削加工に適したクーラントノズル部に電極を内蔵し，ノズル内で電解した研削液を供給することによりELIDと同様の効果を得ることのできる新しいイオンショット法によりマイクロ加工システムの開発を進め，その手法の実用化を目指し研究を進めている．また，アクリル材やガラスモールド用ガラス材を対象に，レンズ加工を行い，デスクトップ加工機においてもサブミクロンレベルの形状精度および，ナノレベルの表面粗さを実現し，照明系光学素子や眼内レンズ評価装置に使用される集光素子の超精密加工の検討を行った．一方，全空気静圧型非接触駆動装置にリニアモータ駆動方式を採用した装置を開発し，超高精度なマイクロ加工システムの構築を行い，このシステムを運用して，微量のナノカーボンとELID加工液を用いたイオンショットクーラントシステムを新たに開発し，それにより鉄系素材のダイヤモンド切削加工を行い，ツール摩耗が極端に抑えられるという世界初の新規の知見を得た．このアクティビティは，スーパー・アナライザー開発テクノロジー研究推進グループと一定の連携を保ちながら研究を進めている．さらに，超微細加工のためのインプロセス計測の研究を進め，微細形状の測定を可能とする計測手法の研究を進めた．一連の研究ニーズの意見交換を含め，マイクロ加工研究会およびMIRAI Instituteとともに交流を推進し，第3回国際MIRAI会議（第9回国際マイクロファブリケーション会議）を合同開催している．そして，マイクロ加工におけるデータ収集・体系化手法の研究，およびこれらの統合化に必要なプラットフォームシステムの構築を引き続き進めており，技能継承支援機構の活動を通じて，業界とのインタラクションを開始した．

## 2．超精緻成形加工の応用とコンピュータシミュレーション研究（大森，鈴木\*5，上原\*5，斉藤\*5，杉本\*5，高橋\*5，城寶\*5，浅原\*5，小野(徳)\*5，長谷川(太)\*5，金井\*5，殷\*5，青野\*5，藤本\*5，吉川\*5）

材料成形加工に関するシミュレーションプロセスの実用化，および精緻成形プロセス，成形に関わる技能・技術の継承のためのデータ収集手法の開発を目指して研究を進めている．多くの実験データの取得や現場のノウハウを集約すると共に，これまでの成果・ノウハウを統合した高精度・高速なシミュレーションソフトウェアを具現化するべく，計算時間が非常に長い板材成形やハイドロフォーミング・シミュレーションソフトの開発・改良を行った．計算時間の短縮やスプリングバック現象の解析精度向上，微細加工プロセス開発において一定の成果を得ている．また，マイクロコンポーネントの量産化を想定して開発したマイクロ金型を用いたマイクロ射出成形手法により，微細溝形状を有する高精度成形品の研究開発を進めた．そして，細密光学素子等を対象とした新しい熱圧縮成形手法の研究にも着手した．これらのプロセスシミュレーション手法の検討とともに実証研究を進めている．また，射出成形システムのためのインテグラルシステムの構築を進めた．さらに，マイクロ成形研究委員会とも交流を図り，研究の推進・ニーズ収集に努めた．

## 3．マイクロファブリケーションの応用研究（大森，和田，片平，亀山\*1，八須\*2，前川\*2，水谷\*3，梅津\*5，林\*5，上原\*5）

先進光学素子開発などを狙い，測定データによるフィードバックシステムの検証を行い，システムの高度化を図った．構築したモジュール・システムをベースとしてX-FELミラーの加工プロセスの検討を行い，ELID/MRF/EEM(Elastic Emission Machining)との連携にかかる基礎試験を大阪大学と進め，400mmの長尺集光ミラーをナノオーダーの精度で加工に成功し，硬X線による集光試験で，400mm長尺かつ長焦点距離（550mm）において，世界的にも類を見ない回折限界集光に成功した．さらに，切削加工に関わる技能継承のために必要なデータ収集手法の検討を進めた．また，宇宙望遠鏡JEM-EUSOのための1.5m級の両面湾曲型フレネルレンズのマイクロ加工に世界で初めて成功した．このアクティビティは，極限宇宙研究推進グループと連携を取り進めている．また，韓国マイクロファクトリープロジェクトと連携を取り，微細計測標準試験片のマイクロ加工にも成功した．一方，静電インジェクションを利用したマイクロファブリ

ケーションにも取り組み、キャピラリーより微小な液滴を吐出可能なM-ELID

(Micro-Electrostatically-Injected Droplet)法を開発し、伊藤ナノ医工学研究室と共同で三次元の生体組織の作製に関する研究を行い、バイオマテリアルを数 $\mu\text{m}$ の太さでパターンニング可能なことを実証した。一連の研究ニーズの意見交換を含め、マイクロ加工研究会とともに交流を推進しており、Printed Electronicsに関する第1回JNU-MFL合同ワークショップの開催に至った。また、微粒子ピーニングを利用した機能性表面創製手法についても研究に取り組んだ。微細な凹凸形状を有し、粒子成分が残存拡散した改質層を同手法により作製し、機械的・化学的にDLC膜との親和性に優れた金属表面の作製プロセスを提案するとともに、その効果の検証を行った。一方、デスクトップ加工システムにレーザー加工ヘッドを搭載して、レーザー加工と研削加工などの複合加工の検討を行った。レーザー加工では、薄板のピーニング効果についても検討を行った。これらの一連の研究成果は、スーパー・アナライザー開発テクノロジー研究推進グループと一定の連携を保ちながら研究を進めている。また、精密加工に関して、超短パルスレーザーを利用した非熱加工による精密加工を実用化するために、炭酸ガスレーザーと同等の効率を得られるYb:YAGセラミックレーザーの開発を推進した。その結果、Yb:YAGセラミックを利用して、世界初のフェムト秒パルスの発振に成功した。今後、本レーザーを用いた精密加工の成果が期待される。

#### 4. トライボファブリケーション研究 (大森, 小野\*1, 佐々木\*1, 高橋\*4, 伊藤(伸)\*5, 林\*5, 長谷川\*5, 金澤\*5, 小林\*5, 井川\*5, 松澤\*5, 根本\*7)

トライボロジーと加工および製造プロセスを繋ぐ融合領域を“トライボファブリケーション”として、ツール加工面の摩擦・摩耗特性と加工現象を学術的に取り扱う研究を遂行している。その結果、砥石ボンダ材料及び要素技術と加工技術のマッチングが容易になり、新たな加工技術のブレークスルーを生むという成果に繋がった。具体的には、高効率加工ツール開発システムにおいて、マイクロバブルを利用したラバー砥石による電極レスドレッシング特性試験、トライボロジー試験及びマイクロバブル援用Ti合金の加工実証試験(#1000)を行った結果、マイクロバブルドレッシング援用下では、ラバーボンダ砥石表面が硬化し砥石の耐摩耗性が向上する一方、ドレッシング表面の高摩擦化により、Ti合金の除去能率が約2倍に向上し目詰まりの無い高効率加工が実現した。また、ELID研削用砥石製造プロセスにおいても、トライボファブリケーションの観点から、被加工物、加工目的に応じた砥石製造法及び砥石ボンダ材料の開発を行った。具体的には、高硬度材料の加工に関しては、微粒鑄鉄粉(約 $4\mu\text{m}$ )を用いて放電プラマ焼結(SPS)法により微粒鑄鉄ボンダダイヤモンド砥石の製造が可能となり、サファイアに対する高効率・高品位加工が実現した。さらに、これらの研究成果は、ツール表面にチップポケット機能を有する多機能ポーラス砥石の開発へと繋がった。なお、一連の情報発信については、トライボコーティング技術研究会との連携による交流を通じて活発に行っている。

\*1 協力研究員, \*2 協力技術員, \*3 基礎科学特別研究員, \*4 研究嘱託, \*5 客員研究員, \*6 研修生, \*7 ジュニア・リサーチ・アソシエイト, \*8 IPA, \*9 訪問研究員, \*10 客員主管研究員

#### Key Sentence :

1. Nanoprecision mechanical fabrication processes for micro-structural/functional devices
2. R&D on ELID(Electrolytic In-process Dressing) grinding technology
3. R&D on super smooth surface finishing technology
4. R&D on nanoprecision micro-mechanical fabrication technology
5. Ultrafine transcription and computational mechanics assisted processes
6. Applications on micro-fabrication processes
7. Research on tribo-fabrication technology

#### Key Word :

Surface/Interface Control, Decision of Precise Position/ Fabrication and Measurement, Nano/Precision Fabrication, Simulation Engineering, Nanoprecision/Micro Mechanical Fabrication, Desk-top Fabrication, Ultra Micro Fabrication/Fabrication Ultra Smooth Surface, Surface Modification Machining, ELID,

#### Outline

The main objective of our research is the development of revolutionary and new material processing technologies in grinding, lapping, polishing, cutting and forming for an extensive range of materials. Through advanced research activities on ultraprecision, ultrafine, nanoprecision and ultra-smooth machining processes, required for the fabrication of advanced functional devices such as optical and electronic components, we launched the research of a new field of micro-mechanical fabrication technologies in addition to surface functional modification, transcription process, feedback fabrication techniques, aiming at a wide variety of materials, precision, qualities, and scales ranging from micrometer to nanometer level, to meet advanced scientific, practical and applied industrial needs.

#### Research Subjects and Members of Materials Fabrication Laboratory

- 1 . Nanoprecision mechanical fabrication processes for micro-structural/functional devices
- 2 . Ultrafine transcription and computational mechanics assisted processes
- 3 . Applications on micro-fabrication processes
- 4 . Research on tribofabrication processes

### ***Principal Investigator***

大森 整           Hitoshi Ohmori

### ***Research Staff***

和田 智之       Satoshi Wada  
片平 和俊       Kazutoshi Katahira  
水谷 正義       Masayoshi Mizutani  
亀山 裕高       Yutaka Kameyama  
佐々木 道子     Michiko Sasaki  
斎藤 徳人       Norihito Saitou  
八須 洋輔       Yosuke Hachisu  
春日 博         Hiroshi Kasuga  
小川 貴代       Takayo Ogawa  
小野 照子       Teruko Ono  
佐々木 慶子     Chikako Sasaki

### ***Students***

根本 昭彦       Akihiko Nemoto  
前田 康大       Yasuhiro Maeda  
利根 直樹       Naoki Tone  
吉田 香織       Kaori Yoshida

### ***Assistant and Part-timer***

土屋 都紀子     Tokiko Tuchiya  
中田 統子       Noriko Nakata  
下田平 尚美     Naomi Shimodaira  
湯沢 由弥子     Yuyako Yuzawa

### ***Visiting Members***

Min Sangkee  
梅津 信二郎     Shinjiro Umezu  
林 偉民         Weimin Lin  
山内 和人       Kazuhito Yamauchi