



# ELID鏡面研削加工技術の研究

*Study on mirror surface grinding with electrolytic inprocess dressing*



キーワード

電解インプロドレッシング(ELID), 鏡面研削加工, 不働態被膜, 超砥粒, メタルボンド砥石, ドレッシング, 鑄鉄ボンド砥石



技術開発部  
加工技術部  
高尾佳宏

## 摘要

メタルボンド砥石に対し、電解作用を利用してインプロセスでドレッシングを行う“電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法”の各種研削盤への適用例が多く報告されている。ELID研削は、加工の種類としては高能率研削から高精度鏡面研削まで、被削材ではセラミックス、ガラスなどの硬脆性材料や鉄鋼材料、非鉄材料など広い範囲に適用されている。本稿では、ELID研削の原理、ELID研削(特に高精度鏡面研削)を実現するための要因、加工例について詳細に報告する。

## Abstract

The Electrolytic Inprocess Dressing (ELID grinding method) uses electrolysis to dress metal bond grindstones. It is reported the ELID grinding method has been used on many grinders to grind various materials, such as ceramic and glass (hard, brittle materials), steels, and non-steels. These were highly-effective grinding operations and produced super-precision mirror-like finishes. This report describes the principles of ELID, requirements for ELID grinding (especially for precision mirror-like finishing), and grinding examples.

## 1. はじめに

研削加工では、より高精度な加工面を得るためにより細かい砥粒が使用される。一般には、目立て作業が簡単で自生発刃作用のあるレジンボンドやビトリファイドボンド砥石を用いるが、微粒砥石になると目つぶれや目づまりが激しくなり、研削抵抗の増大や研削焼けの発生などにより加工が困難となる。これらの砥石に対して、加工中にドレッシングを行う方法が検討されているが実用には至っていない。

メタルボンド砥石は目立て作業が困難で、自生発刃もほとんどないため使用されていなかった。しかし、最近、電気的現象を利用して加工中にドレッシングを行う方法が開発された。この方法は“電解インプロセスドレッシング

(ELID: Electrolytic Inprocess Dressing) 研削法”と呼ばれ、高能率研削から高精度鏡面研削まで広い範囲にわたっての研究成果が報告されている。<sup>1)~4)</sup>

また、各種研削盤への適用例も多く発表され、電解電源や研削液などELID専用商品が市販されている。

本研究は、開発者である東京大学生産技術研究所・中川

教授および理化学研究所・大森研究员のご指導を得て行っているものであり、実用化への一步としてELID専用研削盤を開発・商品化している。まだまだ改善すべき問題点が残されているが、本技術の原理および今までの成果についてここで報告する。

## 2. ELID研削の現象

電解ドレッシングは、電気分解による陽極金属の溶出現象を利用したドレッシング方法で、各種メタルボンド砥石に対して有効である。図1にELID研削の概略図を示す。

砥石とわずかな隙間(約0.1mm)を開けて、砥石作業面と平行になるように電極を設置する。砥石を⊕極、電極を⊖極とし、弱導電性の研削液を介して通電することにより、砥石ボンド部のメタルがイオンとなって溶け出す。メタル部分のみが溶出するため、砥粒が突出し、ドレッシング効果が得られる。加工作業域と干渉しない部分に電極を取り付けることで、インプロセスでのドレッシングが可能になる。ELID研削法は、砥石のドレッシングのみに電解作用を利用するのであって、電解と研削を合わせた複合加工ではない。

図2に鉄系ボンド砥石での電解ドレッシングにおける電解電流値の変化と砥石表面の変化を示す。ツルーイングされた砥石の表面は、砥粒が埋もれた状態となっている。電解ドレッシングを行うことでメタルがイオンとなって溶出し、適度な砥粒突出しが得られる。電解の進行にともない

砥石表面に不動態被膜が生成されるため電流値は低下し、メタルの溶出が抑止される。この状態を、初期ドレッシングの終了としている。

研削加工中は、被削材や研削切くずとの擦過により不動態被膜が部分的に除去されるが、その部分で再び電解が進行してさらに被膜が生成される。ELID研削は、この現象の繰り返しにより加工が進行するが、加工の安定性は砥石ボンド剤種類や加工条件、研削液、電解電源、被削材の種類や形状などに影響される。<sup>3)~5)</sup>

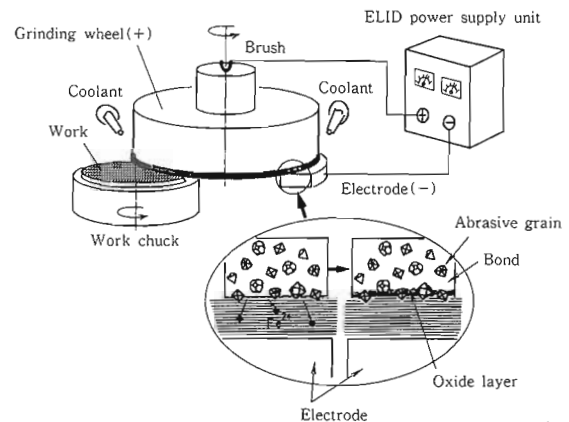


図1. ELID研削の概略

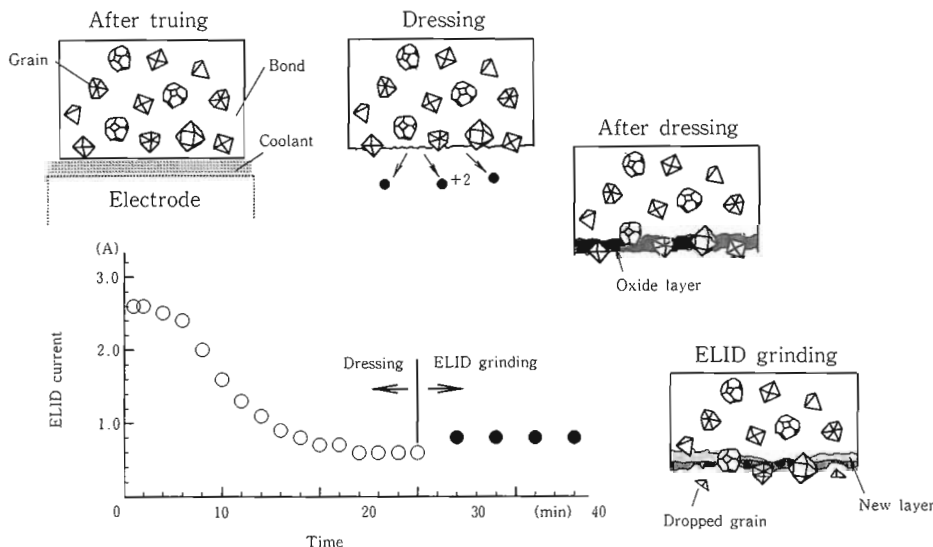


図2. 電解ドレッシングにおける電解電流値と砥石表面の変化

### 3. ELID研削のためのシステム

ELID研削を行うためには、研削盤本体以外に

- ・砥石………メタルボンドなど導電性のある砥石
- ・電極………砥石表面の6分の1以上をカバー、研削液の入りやすい構造
- ・電解電源…電解加工用電源、電極・砥石への配線
- ・研削液……水溶性研削油剤

が必要である。電極を取り付けられるスペースがあれば、各種研削盤への適用が可能である。最近では、ラップ盤やホーニング盤への適用例もでてきている。

本研究では、高精度鏡面研削を実現するために開発したELID専用研削盤”RGS20NE”で実験を行っている。加工方式は、面粗さや形状精度（平面度）に有利なカップ形砥石

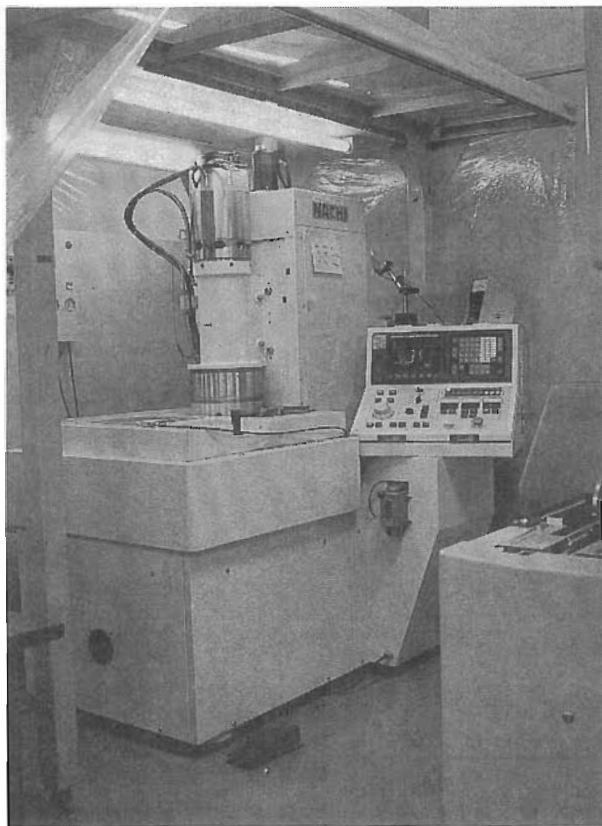


図3. 超微細研削盤 RGS20N-E

を用いたインフィード方式である。本研削盤は振動、熱変位を充分考慮した構造とし、さらに砥石軸およびワーク軸に高精度、高剛性エアスピンドルを採用している。また、精密切込スライドにより1μm/minの微細送りを安定して得ることができる。機械の詳細は別稿に譲る。本研削盤の全景を図3に、電極部を図4に、ELID研削を行うために必要なシステムを表1に示す。電極は銅製とし、砥石表面積の5分の1を覆っている。電極自体にスライド機構を持たせ、簡単に隙間調整ができる構造としている。砥石や研削液については特に注意すべき点があるため後節で詳しく述べる。

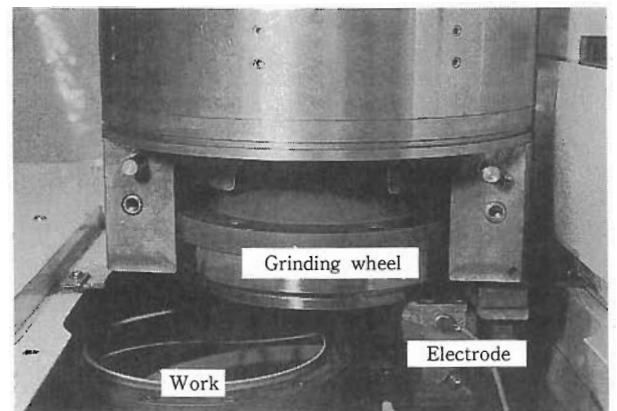


図4. 電極の取付例

表1. ELID研削システム

加工機械	超微細研削盤 RGS20N-E
砥石	メタルボンドダイヤモンド砥石 外径φ250×幅3 カップ形砥石
電解電源	直流パルス電源 電圧60V, ピーク電流10A, パルス幅2μsec
研削液	ノリタケクール AFG-M 希釈液：地下水 50倍

Grinding machine	Rotary surface grinder RGS20N-E
Grinding wheel	Metal bond diamond grinding wheel Cup wheel φ250×3
Power supply	DC-pulse 60V, 10A max, ton. off 2μsec
Fluid	NORITAKE-COOL AFG-M groundwater ×50

### 4. ELIDの効果

高精度鏡面研削におけるELIDの効果を確認するために、SD2000鑄鉄ボンド砥石によるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC(アルティック)の加工を行った。図5にφ75mmアルティックの研削におけるELIDの有無による砥石軸負荷電流値(研削抵抗の代用特性)の変化を示す。それぞれツルーイングと初期電

解ドレッシングを行ってから、同一加工条件で1時間連続で加工している。

ELID付加の場合は、初期ドレッシング後は砥石の切れ味が良く研削抵抗は若干小さいが、ほぼ安定な加工が行われている。ELIDなしの場合、加工初期に不動態被膜が被削

材との擦過により除去され、被削材と砥石の接触面積が減少して研削抵抗が一時的に小さくなっている。しかし、次第に砥石磨耗にともない被削材との接触面積が増え、研削抵抗も増大する。

図6にそれぞれの加工面の顕微鏡写真と面粗さを示す。また、図7に加工テスト後の砥石表面の顕微鏡写真を示す。ELID付加では塑性流動域における加工を行った面となっているが、ELIDなしの場合は破砕面となっている。微粒砥石では砥粒の突出量が小さく、被削材と砥石ボンド部が接触して加工が進行するため、メタルボンドなど硬い砥石では加工面を荒らしてしまう。ELIDで生成される不動態被膜はボンドに比べると弾性があるため、砥粒が柔らかく作用して加工面が良くなっているか、あるいは不動態被膜自体が固体潤滑剤のような動きをして被削材との摩擦を低減しているのではないかと考えられる。また、電解により砥

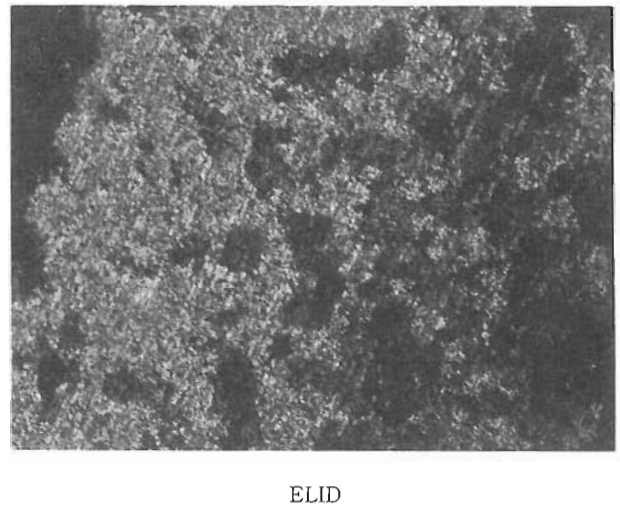
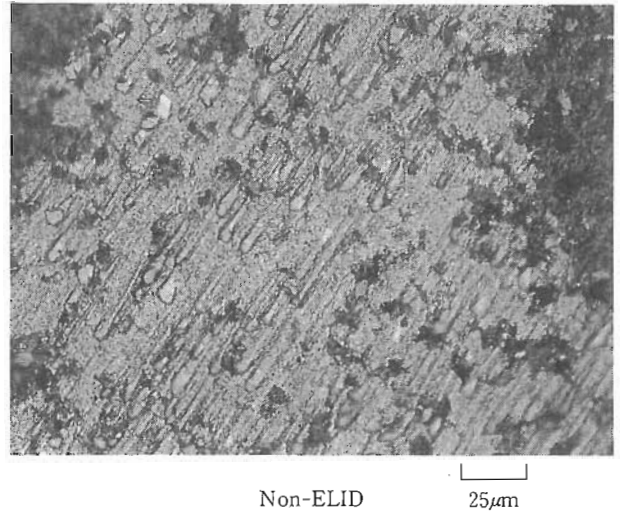


図7. 加工後の砥石表面 (#2000) (×400)

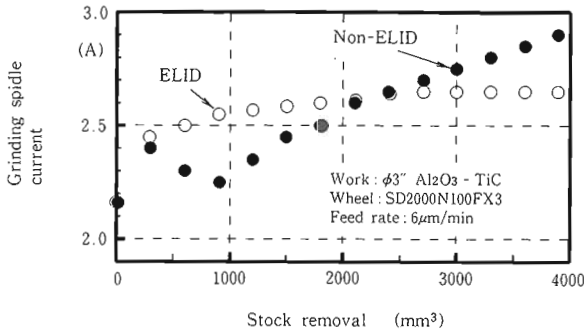
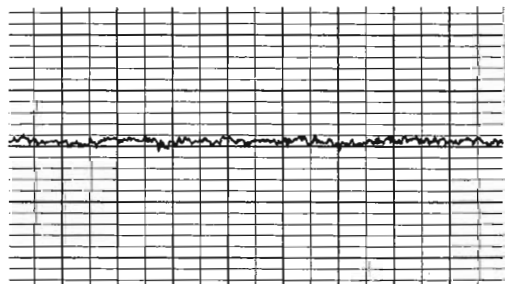
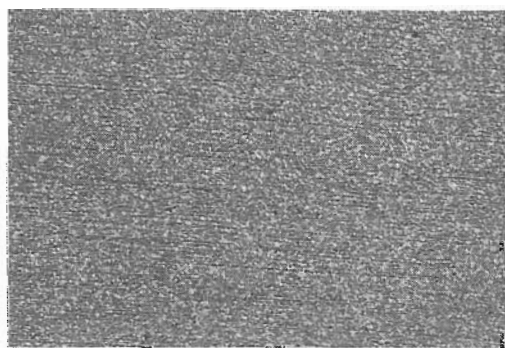
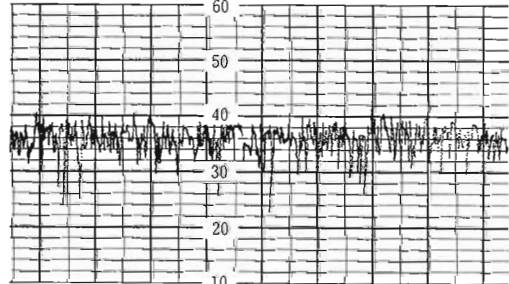
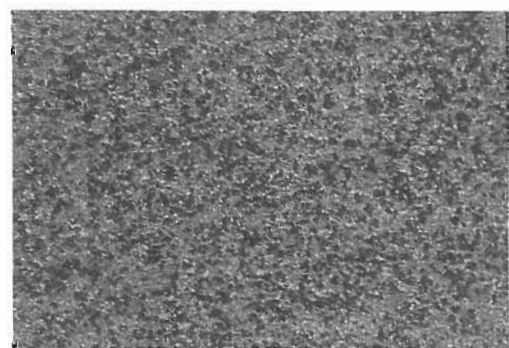


図5. ELIDの効果



Roughness 0.05μm Ry  
ELID



Roughness 0.19μm Ry  
Non-ELID

図6. #2000砥石によるアルティックの加工結果

石表面はかなり荒れる（微視的な凸凹が多い）が、これが切りくず排出のためのチップポケットとなって有効に作用していると思われる。

ELID研削、特に鏡面研削などの仕上げ研削では不動態被膜が非常に重要な存在となる。さらに不動態被膜の重要性を示す例として、図8にφ150mmシリコン（研削品）をSD4000鑄鉄ボンド砥石でELID研削した場合の電解電流値と面粗さの関係を示す。前述したように、電解により不動態被膜が生成されると、時間の経過（被膜が厚くなる）とともに、電解電流は流れ難くなる。そこで電解電流値から被膜の厚みや分布状態が判断できる。電解電流値が小さいほど、つまり不動態被膜が厚いほど面粗さは向上する。安

定なELID研削を行うためには、電解電流値を小さい値で一定にできる加工条件を見出すことが重要となる。

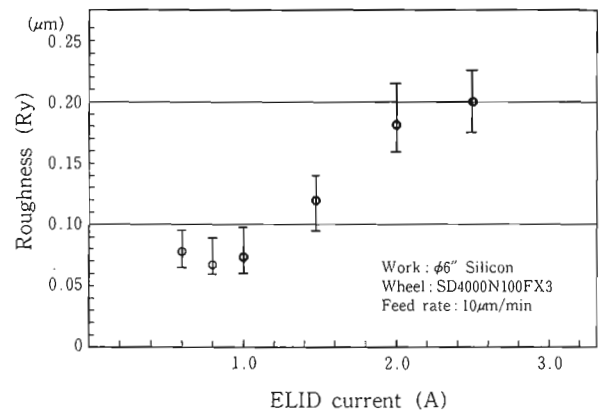


図8. 電解電流値と面粗さの関係

## 5. ELID研削の安定化

ELID研削を行う（特に鏡面研削を狙う）場合、砥石表面の不動態被膜の挙動が重要となる。不動態被膜の生成状態は、ほとんどが初期ドレッシングで決定される。初期ドレッシングで適切な不動態被膜を生成させることが、ELID研削を実現するための第一歩となる。

不動態被膜の生成に影響を与える要因として、初期ドレッシング段階では砥石や研削液（希釈水を含む）、電解電源などが、ELID研削では他に加工条件や被削材材質・形状などが考えられる。ここでは、特に重要な要因について説明する。

### 5.1 砥石

現在、多品種のメタルボンド砥石がELID研削用として開発・製作されている。主な例を挙げると、

- ・ 鑄鉄ボンド砥石
- ・ 鉄系ボンド砥石
- ・ コバルトボンド砥石
- ・ ブロンズボンド砥石

などがある。列挙した上位の砥石ほど不動態被膜が生成されやすい砥石である。鏡面研削には鑄鉄や鉄系のボンドが適している。ブロンズボンドは被膜が付かず、電解電流値に比例してボンドが溶出するためドレッシング効果が大きく、高能率研削に適している。被削材や加工精度によって砥石を使い分ける必要があるため、最近では鉄-コバルト、鉄-ブロンズボンド砥石など用途の広い砥石もでてい

### 5.2 砥石周速

図9に砥石軸回転数を変えた場合の初期ドレッシングにおける電解電流値の変化を示す。実験にはSD2000鑄鉄ボンド砥石を使用している。ツルイーグはSD800ブロンズボンド砥石で、電解による侵食部分がなくなるまで行っている。電解条件は、ピーク電流10A、電圧60V、パルス幅on/off=2/2μsecで統一している。

砥石軸回転数1800min<sup>-1</sup>以上では、電解電流値が約15分で1A弱となり、20分で初期ドレッシングが完了する。この状態で以後のELID研削が安定するため、各種テストでの初期ドレッシング状態の目安としている。

砥石軸回転数1500min<sup>-1</sup>以下では、ドレッシング開始後10分くらいまでは順調に電解電流値は下がるが、途中から逆に上昇してしまう。電気分解により発生する気泡が砥石と電極の隙間に入って、不動態化を阻害しているのではないかとと思われるが、はっきりした原因は不明である。

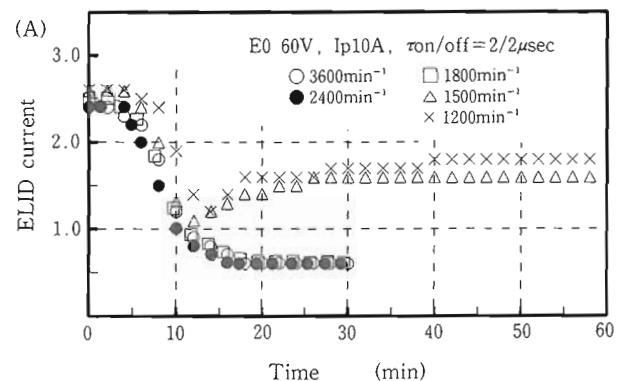


図9. 砥石軸回転数による電解電流値の変化

### 5.3 研削液

ELID研削では、電解加工に用いられるような特殊な加工液は必要なく、研削加工で一般的な水溶性研削油剤（ケミカルソリューション）を使用する。ただし、電解効率を考えると、希釈した研削液の電気伝導度が $1500\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上になるものが望ましい。実験で使用しているAFG-Mは50倍希釈で $2000\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度である。

不動態被膜の生成に最も重要な位置を占めるのは研削液である。研削液原液はもちろんだが、それを希釈する“水”の成分にも問題がある。図10に研削液（AFG-M）を数種の“水”で希釈した場合の初期ドレッシングにおける電解電流値の変化を、図11にそれぞれの希釈水で初期ドレッシング後 $\phi 150\text{mm}$ シリコン（研削品）を加工した結果を示す。砥石はSD6000鑄鉄ボンド砥石を使用し、ツルーイングと電解条件は前節と同じ設定である。

研削液を希釈する水の種類により、初期ドレッシングの状態に大きな差がでてくる。地下水ではELID研削が安定して行えるため、これを初期ドレッシング状態の目安としている。シリコンのELID研削では面粗さ $0.06\mu\text{mRy}$ が得られる。

水道水の場合、電解ドレッシング開始後2分で電流値が極端に下がってしまう。ボンドの溶出がほとんどない状態で砥石表面に被膜が付いてしまうため、砥粒の突出はしない。このため、加工はボンド部分で擦る状態となり、研削抵抗が大きく研削不能である。

純水（あるいは脱イオン水）の場合、電解電流値は下がらず、被膜は付かない。ボンドは溶出しているため砥粒突出はあり、加工可能であるが加工面粗さは非常に悪く、 $0.23\mu\text{mRy}$ となっている。

以上の結果から、地下水や水道水の中には不動態被膜を生成させる成分が含まれていると考えられる。そこで地下水の成分分析を行い（表2）、不動態被膜の生成に効果のある成分を実験計画法によるテストから割り出した。それらの成分を純水に地下水と同濃度となるように添加した希釈水をつくって確認実験を行った。結果は図10および図11に併記しているが、地下水と同等の初期ドレッシング状態が得られ、ELID研削も安定することが確認できた。

最近では、純水を希釈液とするELID専用の研削液原液が開発・市販されている。<sup>5)~6)</sup>

### 5.4 加工条件

実際にELID研削を行う場合、不動態被膜の脱落と再生のサイクルを崩さない、つまり被削材あるいはその切りくずとの擦過による被膜の除去量と電解による被膜の再生の量が等しくなる加工条件を設定する必要がある。前述のように不動態被膜（厚み）と電解電流値は密接な関係があるため、被膜の安定性の代用として電解電流値を考えればよい。つまり、電解電流値が小さい値で一定となるように条件を定めなければならない。

図12にシリコンを加工速度を変えて加工した場合の電解電流値の変化を示す。被削材は $\phi 150\text{mm}$ シリコン（研削品）で、砥石はSD6000鑄鉄ボンド砥石を使用している。加工速

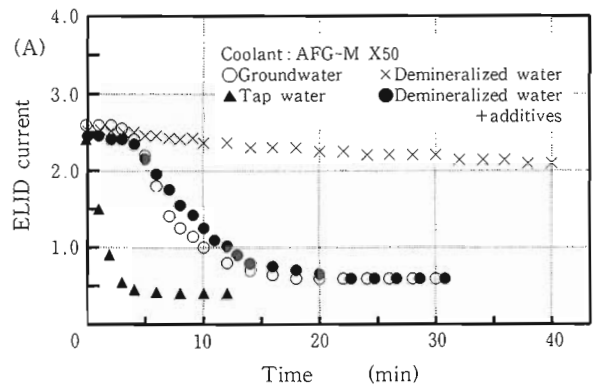


図10. 希釈水による電解電流値の変化

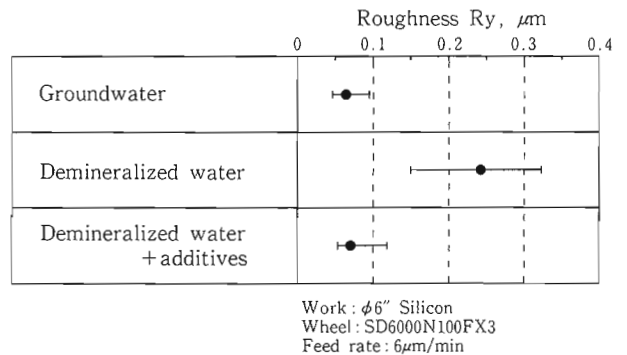


図11. 希釈水による加工精度の差

表2. 水質分析結果 (ppm)

	Tap water	groundwater
Na	3.0	25
K	0.6	3.0
Fe	< 0.1	< 0.1
Ca	14	12
Mg	1.2	44
Cu	< 0.1	< 0.1
SiO <sub>2</sub>	13	-
Cl <sup>-</sup>	3.5	23
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.9	6.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6.7	32
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 1	< 1

度 $f=10\mu\text{m}/\text{min}$ 以上では被膜の除去量の割合が多いため、加工回数とともに電解電流値は大きくなっている。 $f=20\mu\text{m}/\text{min}$ では10回、 $f=10\mu\text{m}/\text{min}$ では25回の加工で砥石表面の被膜はほとんどなくなっている。 $f=6\mu\text{m}/\text{min}$ では、若干の変化は見られるが電解電流値はほぼ安定しており、加工面状態も安定している。 $f=3\mu\text{m}/\text{min}$ では、電解電流値は低く安定しているが、数回加工すると研削抵抗が急増して研削焼けが発生した。被膜が厚く堆積して、目づまりを起こしたと思われる。

砥石ボンド剤や砥粒サイズ、被削材材質・形状にもよるが、ELID研削に適した加工速度範囲があり、それを見出さなければならない。

### 5.5 被削材（前加工状態の影響）

同じ被削材でも加工される面の性状によってELID研削の状態はかなり変わってくる。図13に前加工状態の異なるシリコンを繰り返し加工した場合の電解電流値の変化を示す。使用した砥石はSD6000铸铁ボンド砥石、被削材は $\phi 150\text{mm}$ シリコンで、面粗さは8.0S（スライス品）、2.0S（ラッ

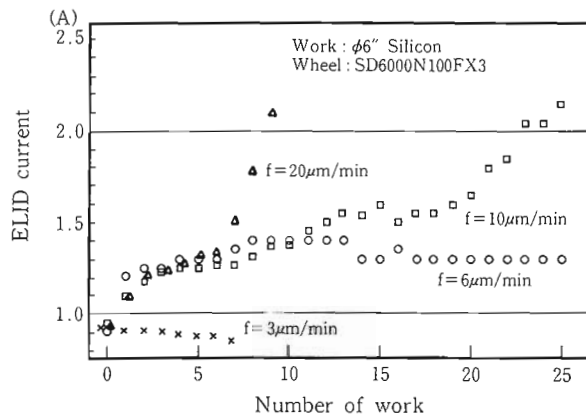


図12. 加工速度による電解電流値の変化

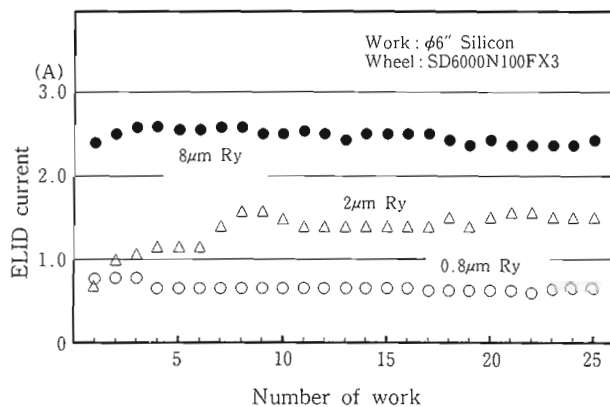


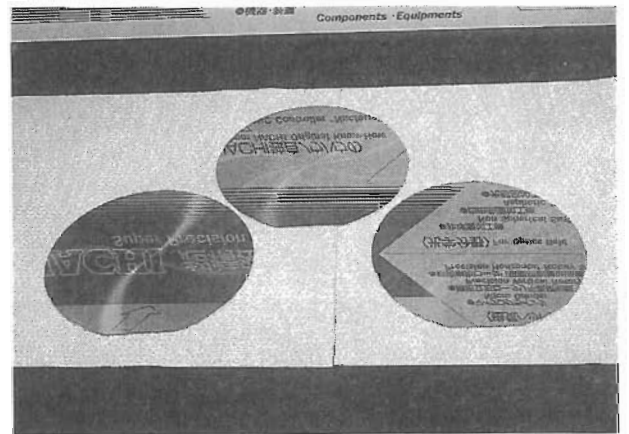
図13. 前加工状態による電解電流値の変化

プ品)、0.8S（研削品）である。加工する面粗さが荒いほど電解電流値は大きくなる。

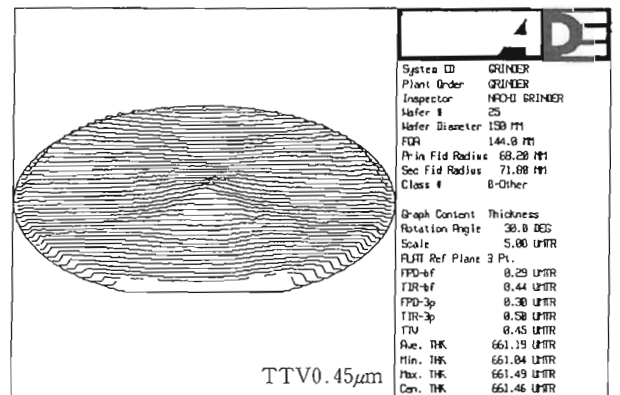
前加工面粗さが荒いと内部クラックもそれだけ深くなっており、加工の際は荒い切りくずが発生する。この切りくずにより不働態被膜が削り取られるため、電解電流値は上昇してしまう。ELID研削で仕上げを行う場合は、前工程の検討も必要になる。

## 6. ELID鏡面研削加工例

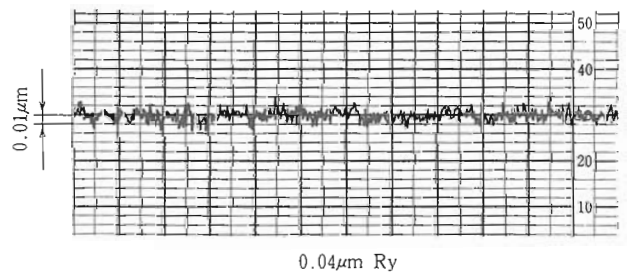
ELID研削法を用いて鏡面研削を行った加工例をいくつか紹介する。



(a) 加工例（左から #4000, #6000, #8000）



(b) 形状精度（#6000）



(c) 面粗さ（#8000）

図14. シリコンの加工例

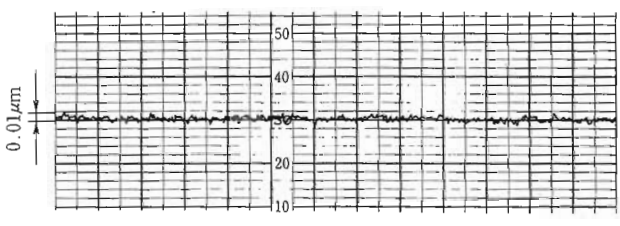
6.1 シリコン

ICチップの素材であるが、加工の大半は遊離砥粒を用いたラップやポリシングで占められている。ラップの代替として、レジンボンド微粒砥石による研削加工の研究が以前

から行われているが、加工変質層がネックとなっている。砥粒が微細になれば加工変質層も小さくなるため、超微粒砥石が使えるELID研削が注目されている。図14にφ150mmシリコンを鑄鉄ボンド砥石で加工した例を示す。

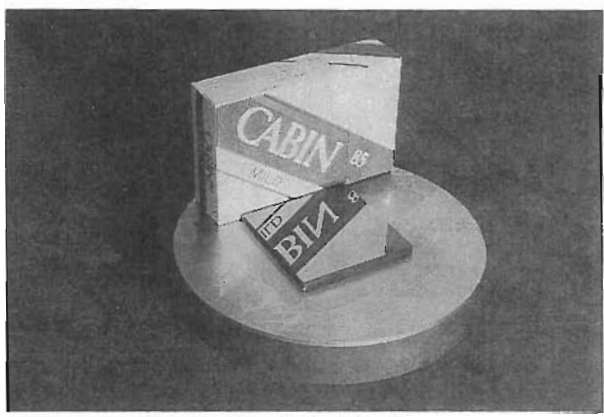


(a) 加工例 (#6000)

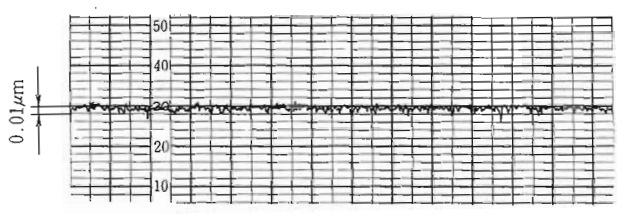


0.02μm Ry  
(b) 面粗さ

図15. フェライトの加工例

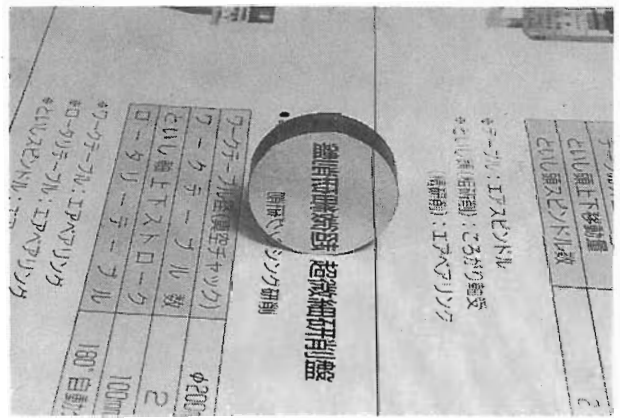


(a) 加工例 (#4000)

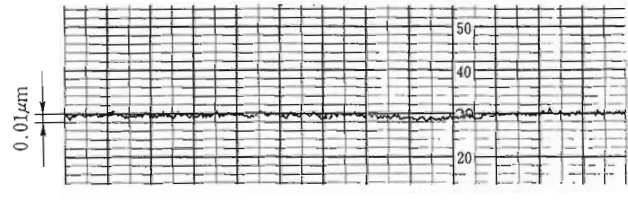


0.02μm Ry  
(b) 面粗さ

図17. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCの加工例



(a) 加工例 (#4000)

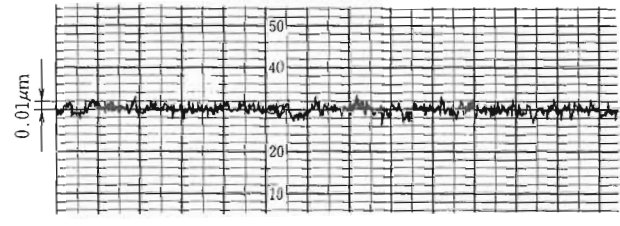


0.015μm Ry  
(b) 面粗さ

図16. 超硬合金の加工例



(a) 加工例 (#2000)



0.06μm Ry  
(b) 面粗さ

図18. ニオブ酸リチウムの加工例



## 6.2 フェライト

フェライトは、VTRやコンピュータの記録装置（フロッピー、ハードディスク）部品である磁気ヘッドに使用される材料である。磁気ヘッド製造には鏡面研削が必要な工程も多く、ELID研削にも積極的な業界である。図15にφ75mmフェライト単結晶ウェハをSD6000鑄鉄ボンド砥石で加工した例を示す。

## 6.3 超硬合金

金型材に使用されるCo系超硬合金は、SD1500ピトリフアイドボンド砥石による通常研削でも0.03μmRy程度の加工面が得られる。これをSD4000鑄鉄ボンド砥石でELID研削すると、面粗さ0.01μmRyが得られ、加工面には目視では研削条痕は見られない。図16に加工例を示す。

## 6.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC（アルティック）

アルティックはハードディスクの薄膜ヘッドの基板材として用いられる。図17に□50mm板材をSD4000鑄鉄ボンド砥石で加工した例を示す。

## 6.5 ニオブ酸リチウム

ニオブ酸リチウムは、光導波路や弾性表面波フィルタに用いられる酸化物単結晶で、研削加工が非常に困難とされている。図18にφ75mmウェハ材をSD2000鑄鉄ボンド砥石で加工した例を示す。

# 7. おわりに

ELID研削法により、超微粒砥石での加工が可能になり、通常研削では実現できないような加工精度を得ることができた。また、ELID安定性の要因も絞り込み、実用化への道は開けたと考えているが、解決すべき課題も多く、また新素材への適用も含め、さらに研究を続けていきたいと考えている。

## 文 献

- (1) 大森, 中川. 鑄鉄ファイバダイヤモンド砥石によるシリコンの研削加工(第3報:電解研削による複合加工). 昭和62年度精密工学会秋期講演集. P687 (1987)
- (2) 大森, 外山, 中川. 鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石によるシリコンの研削(第5報:インフィード鏡面研削の試み). 昭和63年度精密工学会秋期講演集. P715 (1988)
- (3) 大森, 高尾, 中川. 各種硬脆材の電解ドレッシング研削特性. 90年度精密工学会春季大会講演集. P959 (1990)
- (4) 大森, 高尾, 中川. 電解ドレッシング鏡面研削用超精密加工機. 90年度精密工学会秋季大会講演集. P145 (1990)
- (5) 大森, 中川. 電解ドレッシング用研削液要因の考察(第6報). 93年度精密工学会春期講演集. P145 (1993)
- (6) 黒崎, 落合, 伊澤ほか. 電解ドレッシング用研削液の開発(第4報). 92年度精密工学会秋季大会. P853 (1992)



高尾佳宏