

難削材料の電解、放電複合研削加工法

© 1989 ISIJ
技術トピックス
∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞

黒 松 彰 雄*

Electrolysis-discharge Composite Grinding of Hard-machinable Materials

Akio KUROMATSU

1. 緒 言

近年、ファインセラミックス、アモルファス材料、形状記憶合金、繊維強化複合材料などの新素材が、今後の技術革新に決定的な役割を担うものとして、実用化が急がれている。しかし、新素材の多くは極めて硬いもの、脆いもの、粘いもの、熱的性質の特異なものなど、これまでの材料の限界を越えた超難削材料が多くを占める。さらに加工による材料の特性劣化が、品質に対して極めて重要な問題となるため、従来の機械加工では通用し難く、製品の安価な製造及び安定した品質の保証が困難となる。従つて、これら超難削材の実用化は材料に関する十分な知識に基づいた新しい加工技術の開発にかかっていると云つても過言ではない。

電解、放電複合研削加工技術は（以下複合研削加工という）このような背景により開発された新しい複合加工技術で、従来の単一作用による加工技術には期待できない高能率、高精度、低コストで、しかも材料特性を損わない加工を可能とした。しかし、複数の作用を独自の方法で組み合わせた前例のない複合加工技術であるために、そこから十分な効果を引き出すためには、材料の諸特性と加工の諸条件の関連を追求し、材料にマッチした加工条件に結びつけることが重要である。

本稿では、複合研削加工原理について述べ、さらに本システムを採用した新しい切断機による加工実施例などについて紹介する。

2. 複合研削加工法

複合研削加工法[†]とは、機械研削加工（Mechanical grinding）、電解加工（Electrolysis）、放電加工（Electrical discharge）の三つの加工法を組み合わせたもの（Combine）である。すなわち、機械的加工法、電気化学的加工法、熱的加工法で、おのおの加工法の長所を最大限に活かし、被加工物（ワーク）に最適加工エネルギー

ギーを与え、かつ最適加工条件を求めた複合研削加工法である。

2.1 加工の基本メカニズム

本原理は図1に示すように、特殊導電性砥石（複合研削砥石）とワークに電圧を印加し、電解放電加工液を加えることにより、砥石の回転でパルスが発生して放電、電解が生じ、かつ機械研削が加わる。すなわち、複合研削砥石の非導電部がワークと接している場合、機械研削作用が生じ、砥石の導電部がワークに垂直に接したとき、砥石とワークの間に複合研削加工液が注水されて電解作用が起こる。次に砥石の導電部がワークから離れる瞬間に放電が発生する。

つまり、砥石の導電部がワークに接触、離脱を繰り返すことにより、電解、放電が生じ、同時に機械研削作用が重畳して、これら三つの作用による相乗効果で研削能率が大きくなる¹⁾。

2.2 加工装置の概要

加工法の主な装置の構成は、主軸絶縁を施した研削加工機、電解放電加工電源装置、複合研削砥石および加工液から成る。

複合研削砥石は図1に示したようにセグメント構造で、導電部が放射状に存在することを特徴とする。非導

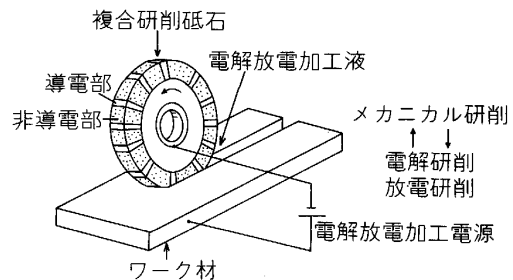


図1 電解放電複合研削加工原理

† MEEC 加工法

昭和63年9月5日受付 (Received Sep. 5, 1988) (依頼技術トピックス)

* (株)応用磁気研究所 (Applied Magnetic Lab. Co., Ltd., 602 Komaoka-cho Tsurumi-ku Yokohama 230)

Key words: composite grinding; machinable material; cutting; discharge; sendust; ceramics.

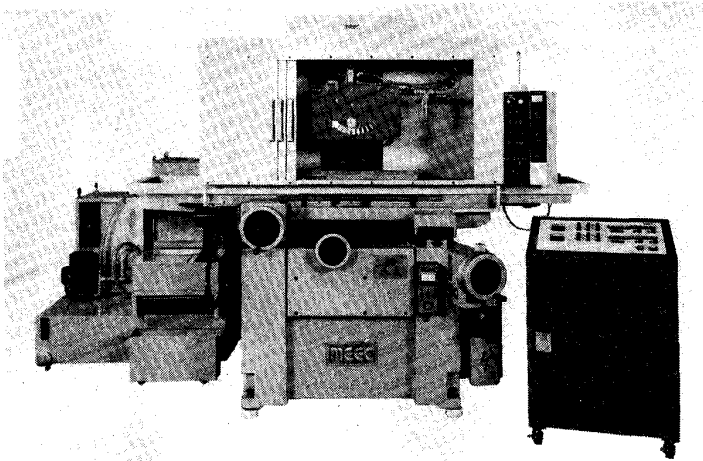


写真 1 複合研削加工機

電部は市販砥石と同じ構造を呈し、砥粒やボンド剤なども全く同等品である。

電解放電加工電源は、ワークにより二つの加工モード (AC または DC) から選択する。各モードはワークに適した加工条件を設定し、主軸モーター負荷動力をモニターしながら最適条件を選択することができる。

電解放電加工液は電解質濃度 1% 以下の特殊電解液で、電解、放電作用と機械研削効果を十分発揮させて、かつ機械の腐食を抑えた専用研削液である。

複合研削加工は、このような複合研削砥石、加工電源、加工液を用いて装着した研削装置を複合研削加工機 (写真1) といい、この装置を用いて加工を行うことを複合研削加工という。

2.3 加工の特徴

(1) 従来の機械研削加工に電氣的、電気化学的作用を利用した複合加工方式で、ワークに適した加工エネルギーを重畳させて最適加工条件を見出したものである。

(2) とくに硬脆、難削材料の加工に対して、高速・高精度研削加工の効果が高く、表面処理や熱処理を施したワークにも適用できる。

(3) 複合研削加工で得られた加工面は、従来の電解または放電加工面と異なり機械研削面を有し、加工後の特性劣化、加工変質層、そのほか機械的損傷は少ない。

(4) 従来の放電および電解加工で不可能な非導電材料に対しても加工効果が認められる。

3. 複合研削加工システムへの展開

複合研削加工基本法に対して、新たに新加工電源と電解放電ドレスを導入した複合研削加工システムを開発した。

複合研削加工基本法は前述したように、ワークと砥石間に電圧を印加してワークに電氣的な作用を与えて研削効果を高めたものであつたが、本加工システムは新たに砥石ドレス用電極を設置して、新加工電源により砥石と

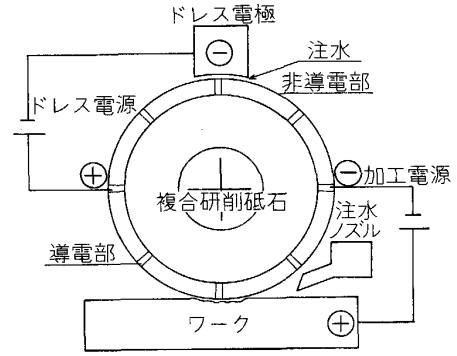


図 2 導電材の電解放電複合研削加工システム

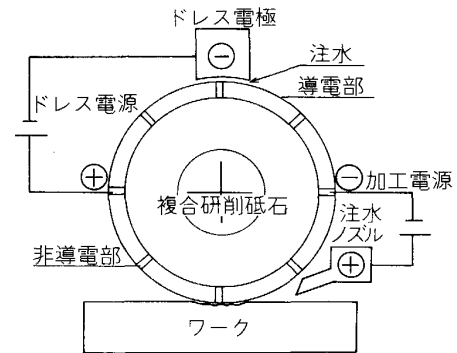
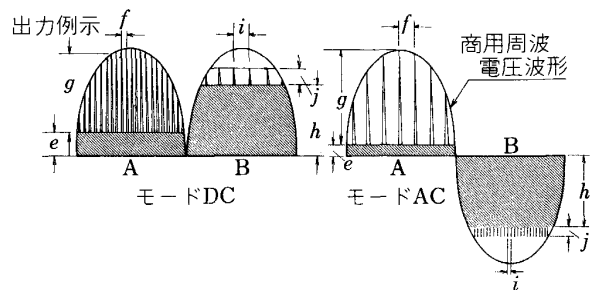


図 3 非導電材の電解放電複合研削加工システム



ツマミ e, h は主たる電流の大きさ (平滑分), f, i はパルス間かく (パルス本数/s), g, j はパルス電流の大きさ (最大尖頭値) を調整する。

図 4 電解放電複合研削加工電源出力波形

ドレス電極およびワークと砥石間に電圧を印加通電して、常に砥石をドレスしながら複合研削加工を行うものである。本方式はワークが金属などの導電材と、セラミックスなどの非導電材の二つに分けられる。

前者は従来の複合研削加工にドレスを付加したもので、常に砥粒が突き出した状態が維持でき、従来の基本法をさらに向上させることが可能となる (図2)。

後者は、ワークが絶縁体であるために、ワーク近傍または注水ノズル内に電極を設置し、砥石と電極間に加工液を介して電解液中放電を発生させて、ワーク表面にダメージを与えつつ、かつ砥石のドレス効果によって研削効果を高める²⁾(図3)。

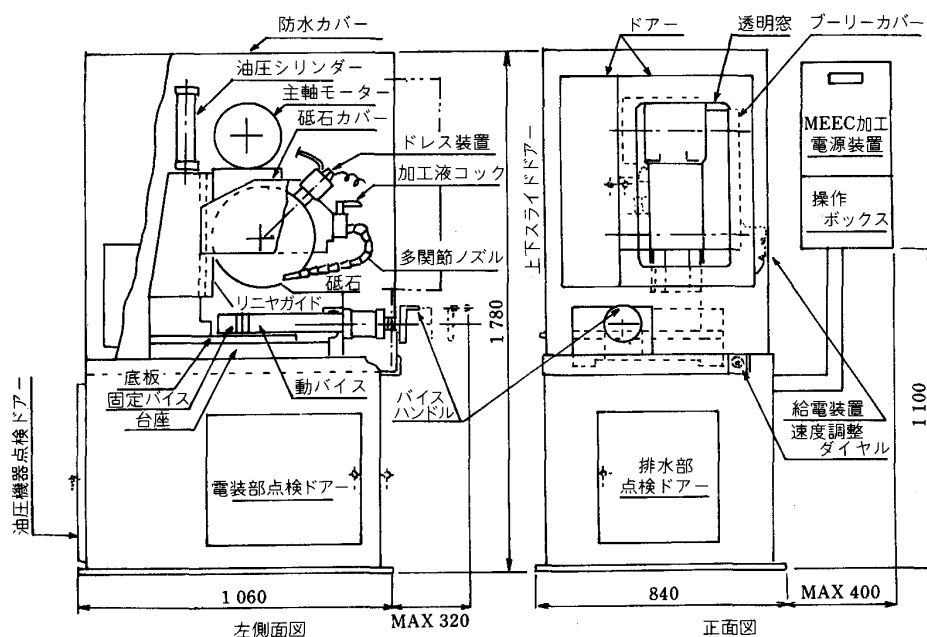


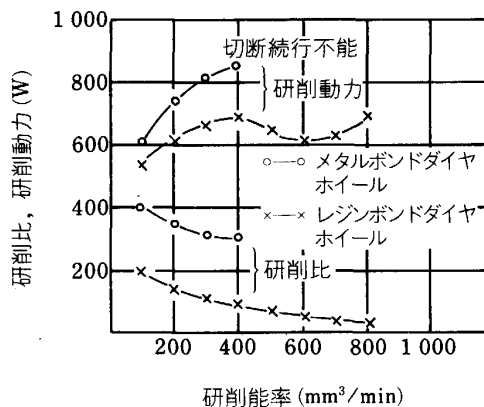
図5 複合研削切断機の構造

新電解放電加工電源は、基本波形（商用周波交流）の半周期ごとに、交互に別の出力波形が出させるような制御を可能とした。従つて、個々の調整機能を持った出力波形，出力電流，直流パルスを合成させることができる（図4）。

ワークと砥石間に基本波形の交流を印加した場合、半周期（半波）をワークの複合研削加工に適した波形出力とし、ほかの半周期を砥石の電解放電ドレスに適した波形出力とし、おのおのの複合研削加工に適した出力合成の調整制御を行う。従つて、新電解放電加工電源はワークと砥石間に給電するための第1電源と、砥石とドレス電極間に給電するための第2電源で成り立ち、両電源とも出力調整のほか出力合成も可能となり、広い範囲で加工条件が選定できる。この結果複合研削加工システムは砥石の目詰まり防止と同時に切断，研削加工調整機能も一断と高められる。さらに改良された電解放電加工液（特殊導電性エマルジョン）を用いることにより、ファインセラミックス，アモルファス，複合材料などの新素材や超硬合金，焼入鋼，センダストなどの難削材の加工に、これまでの複合研削加工基本法を上回る効果が期待される。

4. 複合研削加工システムを採用した切断機

本切断機は、複合研削加工システムをベースに完成された新しい切断機で、一般難削材から新素材まで広範囲な材料の高効率，高精度，低コストの加工が可能である。本機は油圧シリンダーによる砥石軸の上下運動によつて材料を垂直に切断することを特徴とする構造である。これに加えて複合研削砥石と加工電源およびドレス電源か



切断機：MSG-K630AHC
 ワーク：Si₃N₄（ホットプレス）
 ホイール：SD100R-100M, SDC100R-100B
 切込み：5mm
 速度：20～160mm/min
 周速：1500m/min

図6 窒化珪素の一般機械切断加工（研削抵抗と研削比の関係）

ら構成されている（図5）。

4.1 切断機の特徴

現在、切断機に多く用いられているレジンボンド超砥粒砥石（ダイヤモンドまたは立方晶窒化ほう素 CBN 砥粒を用いたレジンボンド砥石）は、加工中砥粒の脱落により、自生作用が目立てがなされるために切れ味が良いが反面磨耗が早く、加工コストが著しく高くなるという問題がある。しかるに、図6に示したようなレジンボンド砥石は、研削能率が増すに従つて研削動力がアップ、ダウンを繰り返すことにより、砥粒が脱落している様子

がわかる。すなわち、レジンボンドは結合力が弱い
 である。一方、メタルボンド砥石は、磨耗しにくい
 という長所の反面、極めて目詰まりしやすい。すな
 わち、図6に示したように、研削能率が増すこと
 により、研削動力も増し切断能力が低下して遂
 には切断不可能となる。

複合切断機においては、電解、放電作用を用いた
 独自のドレス機構を備え、砥石を常に目立てし
 ながらワークに複合研削加工を施すために、上
 記のメタルボンド砥石の問題が解決され、こ
 の結果メタルボンド砥石を広範囲な材料の切
 断に使用することが可能となることを図7に示
 す。

さらに本機においては、加工条件と独立にドレ
 ス条件を自由に設定できるために、ドレスによ
 る砥石の消耗を必要最小限に抑えることが可
 能である。この結果、従来のレジンボンド砥
 石による切断に比べて、トータル加工コストの
 大幅な低減が可能となる。この点が従来の切
 断機に対して、本機が基本的に優れていると
 ころである。

4.2 切断機による基本加工特性

一般切断機において図6に示したごとく、メ
 タルボンド砥石を使用することにより、短時間
 の加工で切れ味が低下し遂に続行不可能とな
 る。そこで、複合研削加工システムを装着し
 た切断機を用いて、加工電流とドレス電流を
 変化させて、主軸モーター負荷電流、研削比
 の関係をアルニコ磁石材料について求めた。

図8に示したように、研削除去量が増すに従
 つてモーター負荷電流が定常状態になる傾向
 を示すが、これもドレス電流、加工電流とも
 に大きいほど、短時間の研削除

去量で定常状態に達する。すなわち、ドレス
 電流によるメタルボンド砥石の目詰まり除去
 効果、あるいはボンド材溶解による砥粒の脱
 落のいずれかを決定づけることにより、ワー
 クと砥石間の電解、放電作用が極めて大き
 な影響を与える。

一方、砥石の寿命に関しては、主軸モーター
 負荷電流、(研削抵抗)が低いと研削比が小
 さく、研削抵抗が増すに従って大きくなる。
 すなわち、低研削抵抗領域は、ドレス電流
 および加工電流の値が大きく、その結果オ
 ーバドレスとなつて砥石寿命が短くなる。ま
 た、ワーク加工電流が大きくなることによ
 り砥石の消耗を加速する。

反面、高研削抵抗領域では、ドレス電流
 および加工電流の不足により、機械研削割
 合が大きく定常研削が困難となる。従つて
 、本ワークでは砥石寿命が長く、かつ定常
 研削可能な領域は、ドレス電流 2.0 A、加
 工電流 2.0 A で、モーター負荷電流 12 A
 が適正条件となる。

4.3 切断機による難削材の加工例

4.3.1 難削金属 (センダスト)

センダストは、Fe-Si-Al 系三元合金で代
 表的な難削材料である。Si 9.5%、Al 5.5%
 、Fe 残部から成る組成で、結晶磁気異方
 性および磁歪み定数がほぼゼロとなり、最
 高透磁率が得られる。

最近、高密度記録に適した媒体としてメ
 タルテープが導入され、オーディオテープレ
 コーダー、VTR などに使用されてきた。し
 かし、メタルテープでは従来の酸化物テー
 プに使用されているソフトフェライトやパー
 マロイ磁気ヘッドでは対応が困難となり、
 磁束密度の大きいセンダストが最適とな
 る。

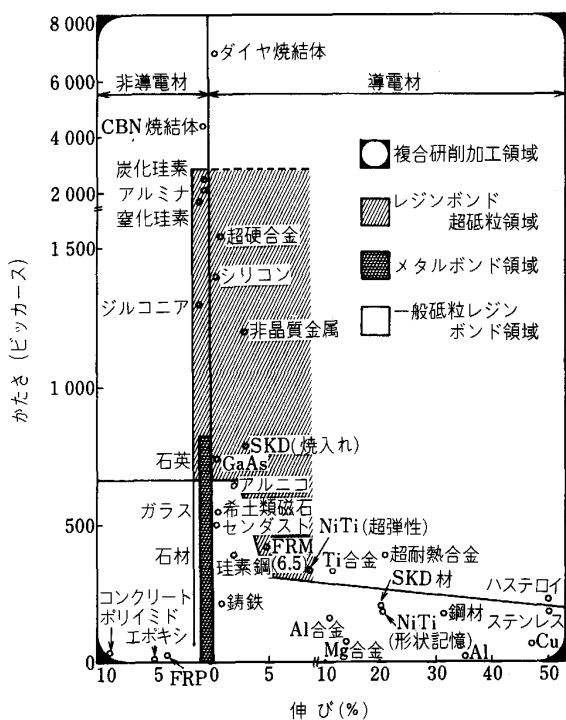
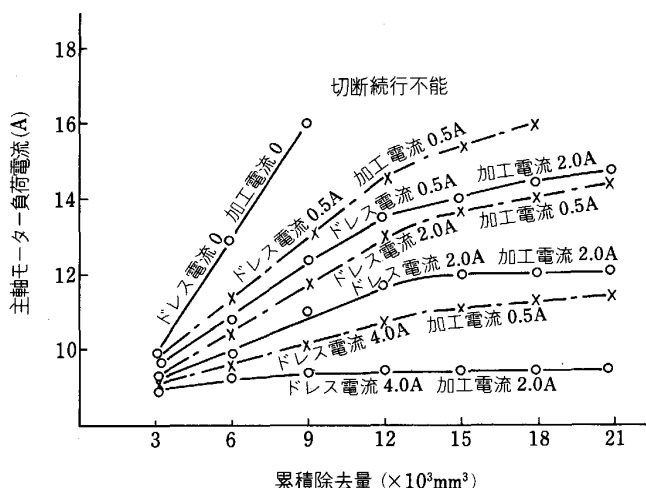


図 7 各種砥石の有効範囲



ワーク: アルニコ
 使用機械: MCM-100ER
 加工法: クリブ切断
 使用砥石: B100R-100M 300×1×5_r×76
 砥石周速: 1500 m/min
 切込み深さ: 40 mm
 加工速度: 18 mm/min

図 8 研削抵抗と研削比の関係 (アルニコ 8)

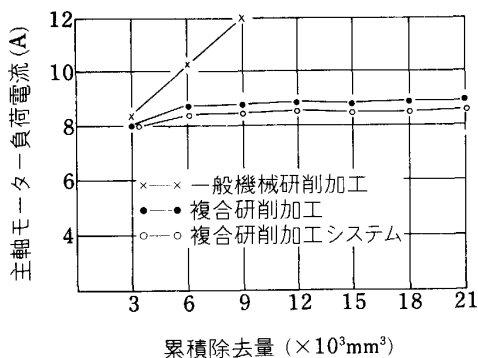
本合金は磁気特性が優れているものの、硬くて脆い性質を有するため、磁気ヘッド用コア材加工には一般研削加工により、極めて非効率に行われているために、加工コストが高くなり広範囲に普及されていないのが現状である。一方、機械加工によつて磁気ヘッド特性が劣化し、製品歩留りが悪くなるなどの問題も残されている。このような背景から複合研削加工を試み、その効果を検討した(図9, 10, 写真2)。

〈センダストの複合研削加工結果〉

(1) 図9に示した切込量とモーター負荷電力における加工データより、複合研削加工効果は、一般機械加工と比較して顕著であるが、さらに電解放電ドレスを併用することにより、いつそうの効果が確認できた。

(2) 写真2は、複合研削と一般機械による溝加工を施した例であるが、バリの発生状況が明らかに異なり、複合研削加工による電解、放電が効果的に作用していることが判明できた。

(3) 軟磁性材料は一般機械加工によつて熱および加



ワーク: センダスト
 使用機械: MCM-100ER
 加工法: クリープ切断
 使用砥石: SD100R-100M 300×1×5x76
 砥石周速: 1500 m/min
 切込み深さ: 40 mm
 加工速度: 18 mm/min
 複合加工: ドレス電流 2A, 加工電流 2A

図9 除去量と研削比の関係 (センダスト)

工ひずみを生じて、磁気特性が劣化することはよく知られている。図10は、加工後熱処理したもの、熱処理後一般加工したもの、熱処理後複合研削加工を行ったそれぞれの周波数と透磁率の関係を示したものである。実効透磁率の劣化は、一般加工で約40%、複合研削加工で約5%であり、複合研削加工の特性劣化が極めて少ないことが判明した。

4.3.2 非金属材料 (ファインセラミックス)

ファインセラミックスは硬度や強度が大きく、優れた耐熱性に加え、熱、電気の絶縁性を示し、加工が極めて困難である。

代表的なものとして、窒化けい素 (Si₃N₄)、炭化けい素 (SiC) などがあり、主に自動車部品、機械、工具材料の構造材として用いられている。これらの材料は従来の機械研削では極めて加工が困難であり、しかも加工欠陥が生じやすく、単なる力学的加工法では解決できなくなってきた。

ファインセラミックスのような絶縁体の電気加工例が少なく、本加工は興味ある実験として試みた(図11, 写真3)。

〈窒化けい素の複合研削加工結果〉

(1) 非導電材の場合も基本的に複合研削加工効果は認められるが、さらに電解放電ドレスを併用することに

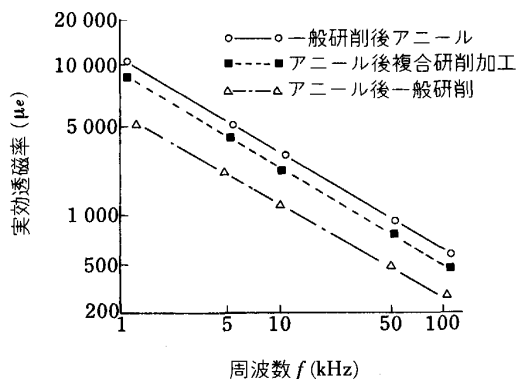
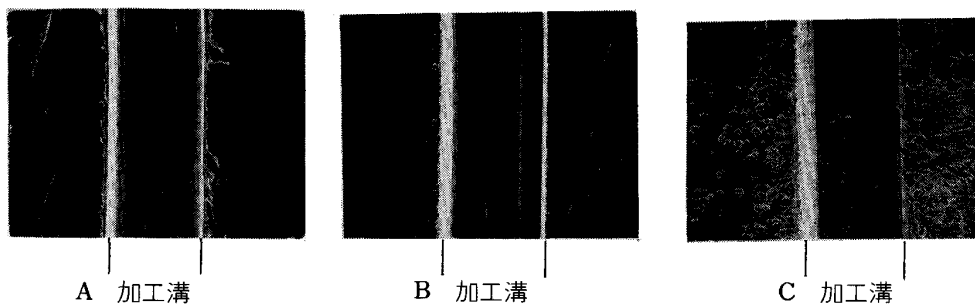
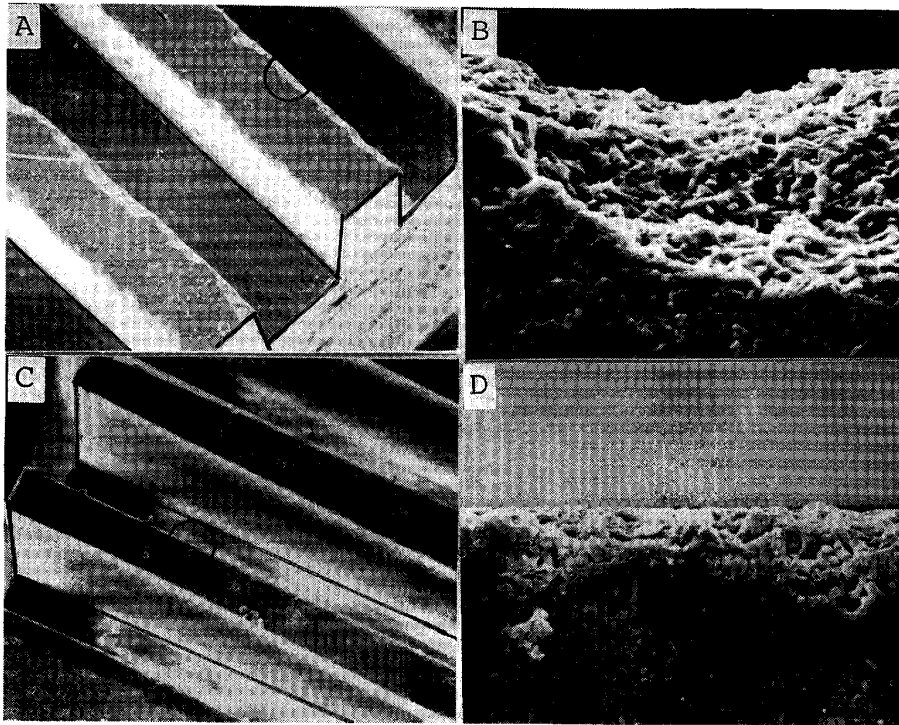


図10 周波数と透磁率の関係 (センダスト)



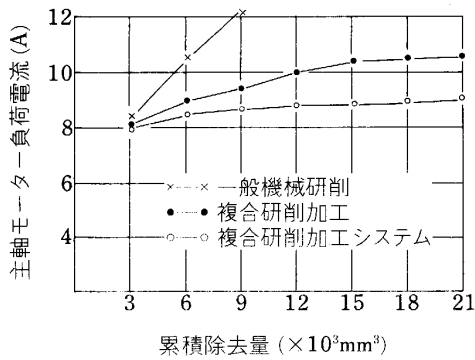
A: 一般機械加工 (×90)
 B: 電解放電複合研削加工 ドレス電流 2A, 加工電流 2A (×90)
 C: 電解放電複合研削加工 ドレス電流 2A, 加工電流 4A (×90)

写真2 センダストの溝加工例



A : 一般機械加工 (×100)
 B : 一般機械加工 (×1000)
 C : 電解放電複合研削加工 ドレス電流 3A, 加工電流 2A (×100)
 D : 電解放電複合研削加工 ドレス電流 3A, 加工電流 2A (×1000)

写真 3 Si₃N₄ 溝加工例



ワーク: Si₃N₄
 使用機械: MCM-100ER
 加工法: クリープ切断
 使用砥石: SD100R-100M 300×1×5x×76
 砥石周速: 1500 m/min
 切込み深さ: 30 mm
 加工速度: 26 mm/min
 複合加工: ドレス電流: 3A, 加工電流: 2A

図 11 除去量と研削比の関係 (Si₃N₄)

より顕著な効果が認められる。すなわち、複合研削システムを用いることが最大に効果が発揮され、前述したアルニコ材よりも差は大きい (図 11)。

(2) 一方、加工面の SEM 写真より (写真 3), ワーク表面のカケ, クラックの発生が一般加工面に多く発生し、複合研削加工面はほとんど存在しないことが判明し

た。

5. 複合研削加工効果および考察

5.1 難削金属の場合

一般機械研削加工では、研削量が増すに従い研削抵抗も増大する。すなわち、機械研削除去作用が主体であるため砥石の目詰まりが進行し、研削抵抗が増大して研削が不可能な領域に達する。一方、複合研削加工では研削量が増しても研削抵抗はほとんど変化しない。すなわち、機械研削に電解、放電加工が同時に作用しているため、これら三つの相乗効果により研削能率が高められるものと考えられる。また、さらに複合研削システムによるドレス効果が定常研削を継続させ、常に安定した研削加工を行うことができる。また、定常研削領域で加工が可能となるため、ワークに与える加工熱の発生および機械的損傷が少ないため、材質変化および特性劣化が極めて小さい。

5.2 非金属 (セラミックス) の場合

一般にセラミックスは電気的には絶縁体で、熱的には不良導体であるため、電気加工への適用は少ない。しかし、ガラス、アルミナセラミックス、ダイヤモンドの穴あけ加工に高周波、高電圧を用い大気中または電解液中での放電加工法がすでに研究されてきた³⁾。

最近では Si_3N_4 , SiC , Al_2O_3 などのファインセラミックスの電解液中放電加工の基礎実験データ、及びワイヤを利用した切断加工法などの報告がある⁴⁾⁵⁾。複合研削加工では、前述したように複合研削砥石を用いて、砥石の回転数と電極間隔でパルス幅が決定され、加工液と砥石間で電解液中放電を発生して加工する。つまり、放電(熱エネルギー)によりワークにダメージを与え、かつ加工液と化学的または熱化学的に分解し、結合助剤が弱化し、ここに機械研削が加わって除去加工が容易となり、研削能率が高くなるものと考えられる。複合研削加工システムでは図 11 に示したように、電解放電ドレスがさらに、機械的除去と電解放電効果を高めるが、ドレス条件の選定を行って適正化を計ることも重要である。

6. 結 言

難削金属材料およびセラミックスなどの非金属材料について複合研削加工を試み、次のような効果的な結果を得ることができた。

(1) これら難削材のすべては、メタルボンド超砥粒砥石の定常研削が可能で、ドレス電流(加工電流)の適正条件を選定することにより、高い能率と経済性が得られた。

(2) 加工後の金属組織、硬度変化はほとんど認められず、また、カケ、ソリ、バリなどの発生が極めて少な

く、高能率、高精度加工が実現可能となった。

(3) 複合研削加工システム採用により、難削金属、難削非金属材料に対して、加工電流、ドレス電流の適正条件を求めることにより、長時間安定した定常研削が可能となり、低コストの加工が実現できる。

(4) さらに、ワークの特性劣化に対しても効果を得ることができた。

新素材、難削材の開発が最近急激に多くなってきたが、これは産業界の多様なニーズによる材料の多様化のためである。このような背景の下で、すでに難削材の加工技術は数多く研究され、実用に供されているものがあるが、加工条件などの点で不明確な部分の多いのが現状であろう。

このような中で難削材に対して、複合研削加工法が高く評価されつつあり、さらに複合研削システムの開発により、その効果も一段と高められつつある。

文 献

- 1) 黒松彰雄: 学振136委 - No. 11 (昭和60年6月)
- 2) 黒松彰雄: 学振136委 - No. 11 (昭和62年2月)
- 3) 齊藤進六, 片桐政行, 遊 隆宏, 長谷川誠之: 窯業協会, 70 (1962), p. 195
- 4) 高橋武則: セラミックス表面加工に関する研究, 東京大学工学部金属材料科修士論文 (1988)
- 5) 宮崎真, 井上友一, 土屋八郎: 昭和58年度精機学会秋季大会講演論文集 (1983), p. 375