

## 高強度超砥粒砥石による高能率、高精度研削

Highly Efficient and Precise Grinding Using Strongly Bonded Super Abrasives Wheel

中川 威雄\*

Takeo NAKAGAWA

高結合強度をもつ超砥粒砥石に振動加工、放電加工、電解インプロセスドレッシングを組み合わせるにより、難加工材の高能率研削、硬脆材の高能率鏡面研削を実現できた。この方法は研削加工における新しい応用分野を開拓するものとして、将来の発展が期待できる。

## 1. はじめに

筆者らは最近数年間高強度超砥粒砥石によるセラミックス等難加工材の研削加工の研究を行っている。まず萩生田、苅込らと共に鑄鉄ボンダイヤモンド砥石(図1、図2)を開発したが<sup>1)</sup>、その後鈴木、埴らと共にこの砥石を鑄鉄短繊維<sup>2)</sup>(図3)で補強した鑄鉄ファイバーボン砥石(図4)を開発した。さらに、鈴木、植松らと共にこの砥石を使ったセラミックスの高能率研削(図5~8)

を実現した<sup>3)</sup>。すでにこれらの研究成果を利用したマシニングセンタ(M/C)やターニングセンタ(T/C)をベースとしたグラインディングセンタ(G/C)加工機、ラッピング加工機が使用されており、またその間に生まれたメタルボン砥石の放電ツルーイング法<sup>4)</sup>(図9、図10)も一般化しつつある。

しかしこれらの研究成果もさることながら、昨年以來提案されている振動研削、振動放電研削、電解ドレス研

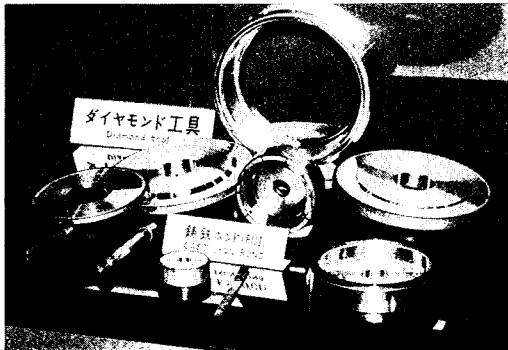


図1 鑄鉄ボンダイヤモンド砥石  
(富士ダイス, 新東工業)



図2 鑄鉄ボンダイヤモンド砥石の表面

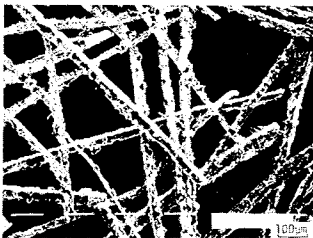


図3 びびり振動切削による鑄鉄繊維

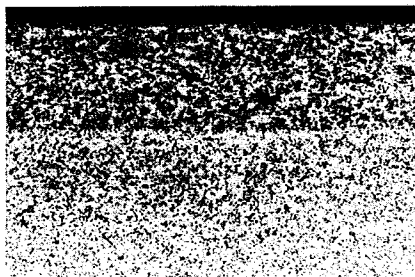


図4 鑄鉄ファイバーボン砥石の表面  
(下, ドレッシング直後)(新東工業)

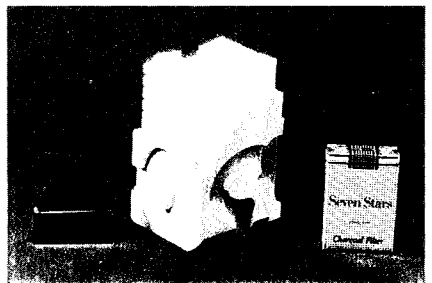


図5 M/Cによる研削品(左:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )  
(鈴木, 植松, 中川)

\*東京大学生産技術研究所 第2部

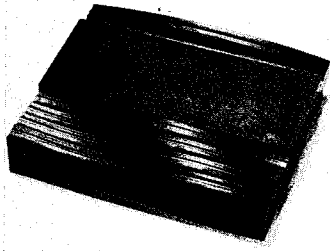


図 6 M/Cによる $\text{Si}_3\text{N}_4$ 研削品  
(鈴木, 植松, 中川)

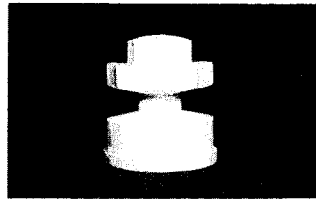


図 7 T/Cによる研削品 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
(中川, 鈴木, 高田)

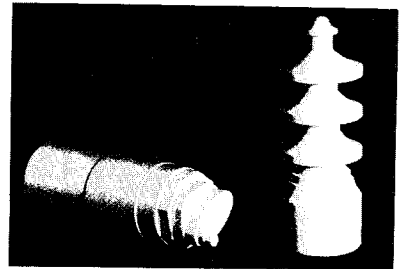


図 8 T/Cによる研削品 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
(中川, 鈴木, 木村)



図 9 メタルボンド砥石のワイヤー  
電極による機上ツルーイング  
(鈴木, 植松, 中川)

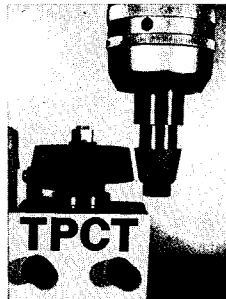


図 10 メタルボンド砥石のカーボン  
電極による機上ツルーイング  
(鈴木, 植松, 中川)



図 11  $\text{Si}_3\text{N}_4$ (常圧焼結)のM/Cによる高効率  
重研削(切り込み0.2mm, 幅10mm, 送  
り15mm/min)(植松, 鈴木, 中川)

削<sup>9)</sup>等の研究は、待望されてきた高強度超砥粒メタルボンド砥石の高効率、高精度、長寿命研削への道を拓くものとして研削加工全体に大きな影響力を持つように思われる。本報ではこれまでの研究成果を踏まえ高強度超砥粒砥石による研削について最近の筆者らの考え方をまとめてみた。

## 2. 高強度超砥粒砥石とその問題点

ダイヤモンドやCBNなどを使った超砥粒砥石は、難加工材の研削を可能とし、長寿命が実現できるため多方面で使用されるようになってきている。しかし、これらの超砥粒砥石は高価であり、一般材料に適用した場合、研削条件の選択の幅が狭く使いにくい等の問題点が指摘されている。

結合力の強化を図った高強度砥石は、自生発刃の作用が弱いので切れ味は悪く、従来の常識では一部の石材加工等を除いて適用できる材料も使用できる加工機も存在しないものとされていた。この高強度砥石も鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石とM/Cによるセラミックスの高効率研削の成功により改めて見直され、多くのセラミック用の研削砥石が高強度化されることとなっている。これらの砥石は単純に高強度化しただけでは切れ味が悪くなるので、自生発刃作用を残しつつ結合力の強化を図っており、その間のバランスに苦慮している。しかし鑄鉄ボ

ンド砥石のように高圧縮高温焼結により、ち密化された極端な高結合強度砥石では、自生発刃作用が劣ることに変わりではなく、研削を続けていくことにより研削抵抗の大幅な上昇が認められ、その度にドレッシングを必要としていた。しかも、ドレッシングにはかなりの長時間を要していた。この間に深切込早送り研削で砥石の母地と被削材を接触させ、後述する図11のような火花を発生させて目立てを行いながら研削する(Spark Dressingとよんでいる)ような荒っぽい研削法も試みられ好結果を得ることがわかっている。

以上のように高強度超砥粒砥石の欠点は、自生発刃作用が少ないため切れ味が悪く、したがって焼き付きが生じやすく使いにくいということに集約されよう。しかし、もし仮に、加工中のドレッシング作用を、切り刃の自生発刃の作用に代わって何らかの方法で可能とするならば話は別である。切れ味の問題は消滅し焼き付きの問題も大半は解決するはずである。さらにこのドレッシング法が砥石の過度の消耗を促すことがなければ、砥石は大幅に長寿命化するので砥石の経済性も評価されることになるであろう。

## 3. インプロセス電解ドレッシング法

高強度超砥粒砥石の切れ味を保つために、何らかの人為的なインプロセスドレッシングが必要とあれば、パワ

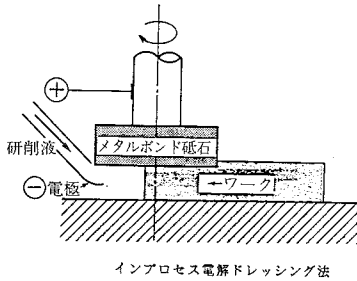


図12 インプロセス電解ドレッシング法  
(大森, 中川)

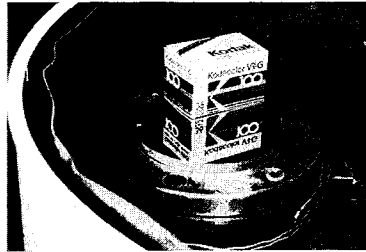


図13 インプロセス電解ドレッシング法  
によるSiウエハの鏡面研削  
(大森, 中川)

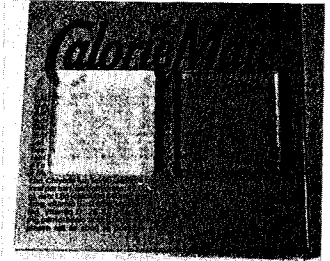


図14 ガラスの鏡面研削  
右：鏡面研削  
左：通常研削 (大森, 中川)

ダドレッシング, 放電ドレッシング, 電解ドレッシングなどが考えられる。パウダドレッシングはかなり効果的であり筆者としては便利な方法と考えているが, 研削液に混入した砥粒が加工機に害を与える危険性のためか, 積極的な利用に踏みきれないようである。放電ツールイグは金属ボンド砥石のツールイグ法としていまや確立した技術となった感があるものの, 放電インプロセスドレッシング法はワークが放電加工の可能な導電材に限られる。

電解ドレッシングは図12のように砥石側を+電極とし, 砥石の母地のみを選択的に落とすもので, 一極との間に研削液を介しているため, ワークはすべての材料に適用できる。この方法はワークを+電極とするいわゆる電解研削とは逆の極性を与えており, ワーク側は電解による加工は行われない。

これまでの実験結果により, 筆者らはこの電解ドレッシング法こそ高強度超砥粒砥石のインプロセスドレッシング研削の本命をなすものと確信している。これまでの研究結果よりこの方法の特徴を以下にまとめてみよう。

- ① 砥石の母地のみ選択的に落とすことができる。金属ボンド砥石に適用でき母地強度に関係なくドレッシングできる。
- ② 流す電流の制御により母地の取り量を自由に変えることができ, 研削抵抗をモニターしてドレッシング量と砥粒突き出し量を適応制御できる。
- ③ 母地に不導体被膜ができ切り屑の付着を防止すると共に, 付着した切り屑を切り放す効果があり, 目づまりが生じにくい。さらに金属切削では, 付着した切り屑を電解で溶かす効果もある。
- ④ 砥粒突き出し量のコントロールが正確に出来, 切り屑の目づまりを避けることができるので, 超微細砥粒を用いた砥石による研削が可能になる。
- ⑤ 超砥粒の摩耗は少ないので, 母地の電解加工量は極めて少なくてよい。そのため特別な電解液を必要とせず, 通常の研削液の使用が可能である。したがって加工機にさび発生する心配もない。また電流量も少ない

ので, 電解電源も簡単かつ安価であり, スラッジの発生の問題も生じない。

- ⑥ 砥石のツールイグは放電を利用する必要があるが, この放電ツールイグの電源を電解に共用することも可能である。
- ⑦ 砥石寿命短縮の原因となる砥石によるドレッシングを避けることができ, 砥粒を摩耗するまで使いきるので, 砥石の大幅な高寿命化が図れる。

このインプロセス電解ドレッシング研削が砥粒突き出し量をいかに精密にコントロールでき目づまりを防止できるかを証明する例として, 図13のシリコンウエハの研削の例をあげよう。これは4000番のダイヤモンド砥粒を用いたカップ砥粒で, 切り込み  $2\mu\text{m}$  送り毎分50~100mmで研削したものであり, 表面粗さは  $R_{\text{max}}$  で  $0.04\mu\text{m}$  である。

シリコンの研削は目づまりを起こしやすいものであるが, 写真のように鏡面研削が可能となっている<sup>6)</sup>。さらにこれまでに最小  $1\mu\text{m}$  オーダーの砥粒を使った鏡面研削の可能性もでている。このほかフェライト, セラミックス, ガラス (図14), 超硬なども同様な結果を得ており, CBN砥石の場合は焼き入れ鋼やステンレス鋼にも適用できる。なおこのように極めて有力な手段と予想されるインプロセス電解研削の考え方はすでにかかなり以前より提案されている。20年以上前に出された通常の電解研削において加工中に極性を変えると目立て作用が行えるとの特許が最初のものであり, 数年前にも機械技研ではここで述べたインプロセス電解ドレッシングの試みがなされている<sup>7)</sup>。残念ながらその時点では実用化の動きが見られなかったようであるが, それは本格的な電解加工を組み合わせたため装置の腐蝕や研削比の低下の欠点, さらに高強度砥石を使用しなかったこと, 研削条件選択の不適切が原因であったようである。要するに電解加工は高速加工は可能ではあるが, 精度は劣り, 電解液によりサビが発生し, スラッジの処理に困るとされていたが, このような微量ドレッシング加工においてはこれらの問題点がすべて解決されることとなる。また複合加工とい



図15 超音波振動ツールホルダー (黒田精工, 超音波工業)

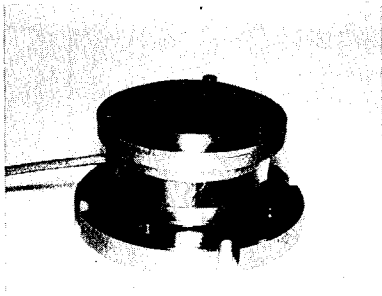


図17 圧電素子を組み込んだ振動テーブル (大森, 高橋, 中川)

う意味では類似の電解放電研削加工があるが、元来この技術はインプロセス電解ドレッシング研削と極性は逆であり、通常の電解研削と同じ考え方に立つものであったといわれている。しかし放電を重畳していることもあり、インプロセスドレッシングが付加的に行われている効果が大きいとみるのが妥当であると考えられ、最近では電解ドレッシング研削と同じ極性のものも現れている。

4. 振動研削および超音波放電研削<sup>9)</sup>

セラミックスなどの硬脆材料の研削時、砥石に超音波振動を重畳させると、研削抵抗が大幅に減少することが知られていた。この超音波研削は砥石消耗が大きいことが欠点とされていたが、高強度超砥粒砥石の出現で実際に活用出来る段階となった。超音波研削における研削抵抗の減少の理由は、振動付加によるハンマリング効果や実質研削速度の増大も考えられるが、研削屑が遊離砥粒

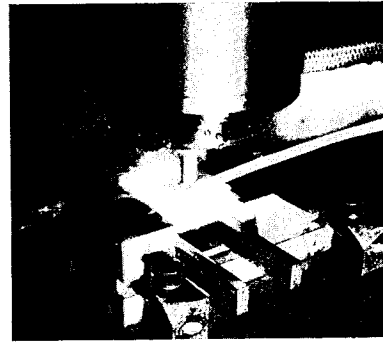


図16 M/Cによる超音波振動研削 (鈴木, 植松, 中川)

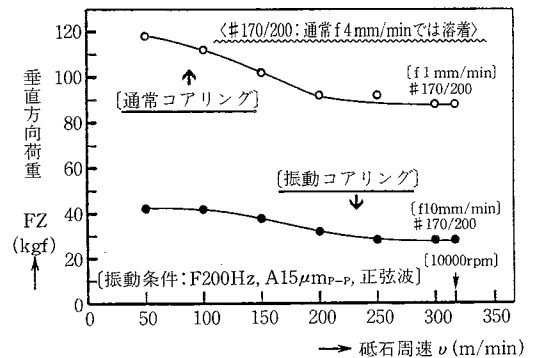


図18 低周波 (200Hz) 振動研削の効果 (アルミナセラミックのコアリング) (大森, 高橋, 中川)

の働きをし、この砥粒が砥石母地に衝突してパウグドレッシングと同様な効果を生みだしているものと解釈できよう。

マシニングセンタのツールホルダに組み込める超音波振動ユニット (図15, 16) の開発は超音波振動研削を一層使いやすいものにした。更に、積層圧電素子をワークを固定するテーブルに組み込む (図17) ことにより、テーブルを上下振動させるだけでアルミナ等の加工性の良いセラミックスに対しては同様の効果が期待できることがわかった<sup>10)</sup>。この振動テーブルは回転部分を持たず、大きな研削抵抗に耐える特徴を持っているので、振動研削の普及には大きな役割を果たすことが予想される。この研究結果で特に興味深いのは、図18のようにテーブルの振動数が200Hz程度でも十分研削抵抗低減の効果が認められる点である。どうもわれわれは“超”の文字を過信していたようである。

超硬合金や導電性セラミックスは放電加工が適用出来る特徴をもつ。しかし放電加工では電極の製作が必要であり、これらの材料に表面粗さや形状的制約より研削加工を加えたい場合は多い。これらの材料は一般に靱性が高いためか焼きつきを生じやすく、研削加工自体も通常

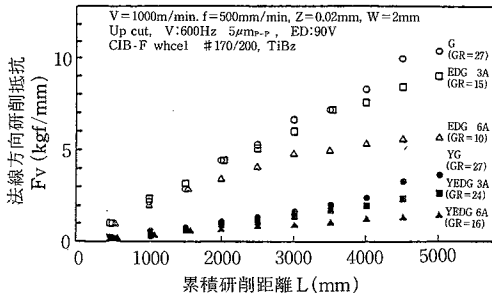
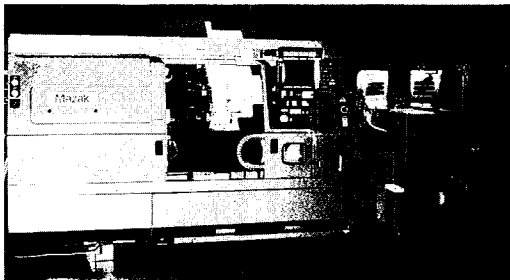


図19 2 ホウ化チタンの振動放電研削 (鈴木, 植松, 中川)

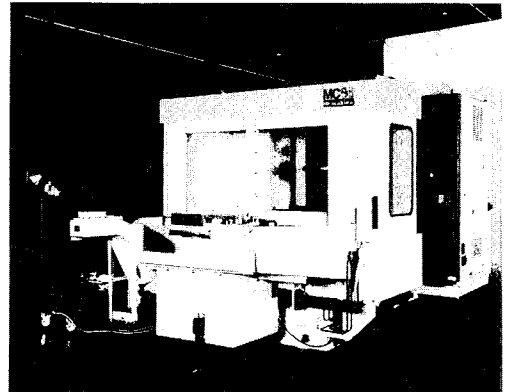
図21 T/Cをベースとしたハイブリッド・  
グラインディングセンター(ヤマザキマザック)

のセラミックス以上に困難である。そのため超音波振動を砥石に重畳しただけでは研削抵抗の十分な低下が得られない。振動研削にさらに放電加工を複合化させれば、放電加工自体による加工に加えて砥石側の電極に相当する母地の消耗もあるので一層の自動目立て効果が期待出来る。図19に結果の一例を示すが、研削抵抗の上昇はほぼ完全におさえられている。その後の研究により、上記振動テーブルを使った低周波振動放電研削でもほぼ同様の効果が得られることが明らかとなった<sup>11)</sup>。

超音波振動が切削作用自体に効果があるものとするれば、同様の目立て効果は電解ドレッシングを重畳させても期待できるので、インプロセス電解ドレッシング振動研削といった方法も有りうると思われる。

### 5. ハイブリッドG/Cによる三次元加工

高強度超砥粒砥石は砥石寿命が長いので砥石の損耗による寸法変化をあまり気にすることなく、あたかも多刃の切削工具を使用すると同様にセラミックス等の難加工材を加工することができる。特に研削抵抗の大きい難加工材を高効率で加工するには、従来からの研削盤を使用するよりも、むしろ切削加工で使用されているM/CやT/Cを改造した研削盤(図20, 21)を使用したほうが便利である。これらは砥石の自動交換装置を備えているので、いわばG/Cすなわちグラインディングセンタともいうべきものであろう。さらにこのG/Cには放電ツルーイ

図20 M/Cをベースとしたハイブリッド・  
グラインディングセンター(牧野フライス)

ングの装置は是非とも必要のようで、インプロセスドレッシングと合わせてハイブリッドG/Cともよぶべきものであろう。以下にハイブリッドG/C加工の特徴をまとめてみよう。

- ① 3次元加工が可能：これらの工作機械はATCを備えており、NC加工が出来るので切削と同様な3次元加工が出来る。3次元加工は砥石の消耗が少ない場合に初めて実現出来るものである。切削加工用にかんがりの量が生産されているので、G/Cは機能のわりに高価とはならない。
  - ② 高能率研削：最近のM/Cでは主軸回転数が20,000rpmに達するものも現れている。筆者は先に山田と共に150mmのストレート砥石を15,000rpmで回転させ、砥石周速7,000m/minで研削した経験をもつ<sup>12)</sup>。これほどでなくとも高強度砥石は高速研削を可能とする。さらに機械自体が高馬力、高強度、高剛性であるため、高能率重研削が可能である。
  - ③ 放電ツルーイング：メタルボンド砥石のツルーイングには放電加工が適しているがNC装置を利用すればG/C内でツルーイングを行うことができる。従来超砥粒砥石のツルーイングは砥石メーカーに依頼した場合が多かったがこの必要なくなるばかりか、オンザマシンで行うことができるため、砥石の振れはなくなり、高バランス精度の砥石を使うことができる。
- さらに電極を使った放電ツルーイングを行う場合には電極自体の加工も同じ機械で行え、簡便なばかりでなく放電加工の精度向上に寄与することとなる。
- ④ ハイブリッド加工：先に述べたインプロセス電解ドレッシング法を問題なく取り入れることができる。この際放電ツルーイングに用いた電源をそのまま使用すればよい。砥石に超音波振動を与える場合は砥石ホルダーを兼ねた超音波振動ユニットを使用することもでき、さらにより簡便には振動テーブルを用いてもよい。

これらの組み合わせにより超音波放電研削も可能となる。

- ⑤ 切削—研削複合加工機：G/C本体は高圧研削液の供給装置，切り屑や砥粒のシールとフィルタを備えているものの基本的には切削加工機と同じであり，当然切削加工も可能である。両加工供用に使用できることはもちろんであるが，金属系の材料では粗加工を切削で行った後，同じ機械で工具を砥石に換え仕上げ研削を行うことができる利点は大きいと考えられる。

## 6. お わ り に

高強度超砥粒砥石は長い間切れ味の持続がはかられないため，砥石として使用されることは少なかった。しかし，インプロセスのドレッシング技術が出現した現在，長寿命，高能率，高精度と高強度超砥粒砥石の利点がフルに生かされる可能性が出てきた。これまでの自生発刃作用の砥石のように相手材や研削条件をきびしく規定することもなく，ダイヤモンドかCBN砥石で，研削速度をあまり気にすることもなく，表面粗さに応じて砥粒径を変えるだけで研削を行える可能性が出てきた。すでに鏡面研削のみならず，高能率研削でも研削抵抗の大幅な低下とそれを長時間持続できることが確かめられている。研削のほか固定砥粒のラッピングにも応用できることはもちろんである。一般研削で高能率メタルボンド砥石の時代が到来する可能性が出てきたように思われる。

本研究は本文中にも触れた筆者と共に行ってきた多くの共同研究者らの成果である。またそのほかにも多くの企業の協力を得て行ったものであり，心からの謝意を表し，今後更に努力を続け研削加工の面でいささかでも貢献したいと考えている。

(1988年7月25日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 萩生田，刈込，中川：鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石の製作，精密工学会法，Vol. 1. 53. 10. p. 1562 (1987.10)
- 2) 中川，鈴木，植松，小山：びびり振動切削による金属短繊維の製造，精密機械，47，11，1399-1405，1981.11
- 3) 中川，鈴木，植松：高強度の鑄造ボンド砥石を使用従来研削法の10倍に高能率化，日経メカニカル別冊エンジニアリング・セラミックス98 (1987)
- 4) 鈴木，植松，中川：On-machine Trueing/Dressing of Metal Bond Grinding Wheels with Electro-Discharge Machining, Annals of the CIRP Vol. 36/1/1987
- 5) 大森，中川：鑄造ボンドダイヤモンド砥石によるシリコンの研削加工，昭62精密工学会秋期大会論文集p. 687 (1987.10)
- 6) 大森，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加工，(第4報) 昭63精密工学会春期大会論文集p. 521 (1988.3)
- 7) 村田，岡野，堤：Grinding of Structural Ceramics, Proc. of the Milton C/Show Grinding Symposium, ASME, PED-Vol. 16, p. 261
- 8) 植松，鈴木，石渡，中川：マシニングセンタによる硬脆材料の研削加工，昭62精密工学会春期大会論文集，p. 587
- 9) 鈴木，植松，水川，呂，浅野，中川：マシニングセンタによる硬脆材料の研削加工，昭62精密工学会秋期大会論文集，p. 439
- 10) 大森，高橋，中川：積層形圧電素子を利用した砥粒加工用振動テーブル，昭62精密工学会秋期大会論文集，p. 425
- 11) 鈴木，植松，水川，浅野，大上，大森，中川：マシニングセンタによる硬脆材料の研削加工 (第20報) 昭63精密工学会春期大会論文集p. 513
- 12) 山田，中川：マシニングセンタによる鉄鋼材の研削加工，昭62精密工学会春期大会論文集，p. 617