

## 磁気浮揚研磨法の新しい展開

New Approach to High Efficiency of Magnetic Float Polishing

谷 泰 弘\*・河 田 研 治\*

Yasuhiro TANI and Kenji KAWATA

現在のポリシング加工は、能率・精度等の点で種々の問題点を有している。作用砥粒数を多くし、高い加工圧で研磨を行えば、加工性能が優れた研磨法を構成することができる。こうした観点から、磁気浮揚研磨法を高効率化を試み、液体ボンド砥石というラップ砥石を開発した。この砥石は、最密充填状態の砥粒を液体の粘着力により結合させたものである。本稿では、この液体ボンド砥石の開発までの経緯を紹介する。

## 1. はじめに

半導体関連分野等において製品の量産化が進められるにしたがい、各部材の最終仕上げ工程である研磨加工技術の高効率・高精度化に対する要求はさらに高まっている。こうした観点よりいえば、現状のポリシング加工は種々の問題点を有している。たとえば、ポリシング加工は比較的柔らかい工具であるポリシャに砥粒を散布して加工を行うために、その加工単位が小さく高精度な研磨が可能となるが、逆に加工能率は小さい。また、その工具の弾性のために、ポリシャに作用する加工圧が接触面内にて一様とならず、加工面に面だれやうねりが生じやすい。そのうえ、ポリシャの減耗速度が作用時間の相違のために位置により異なり、ポリシャに押し付け研磨される加工物の形状精度を低下させている。さらに、工具あるいは加工物の回転速度が増加し遠心力が大きくと作用すると、散布砥粒を加工領域に十分供給することができなくなり、高速度で研磨を行うことが困難となる。

一方、筆者らは磁性流体の磁気浮揚現象を応用した研磨法を開発した<sup>1)</sup>。この研磨法は、加工物のある位置に保持していると、浮揚した砥粒と磁性流体との混合物により形成された粘土層に作用する磁気浮揚力が加工圧となり研磨を行うもので、作用砥粒数が多く達成される精度のわりには高い能率が実現できる。しかし、この研磨法で得られる加工圧は、磁性流体の磁化と加工域の磁場の強さにより決定され、現在入手できる磁性流体や当初考慮した磁場形状ではあまり強いものとならず、この研磨法の加工能率はあまり高い値とならなかった。

そこで、上記の磁気浮揚研磨法の高効率化を達成する

ために、その加工能率を決定づける加工圧に注目し、これを高めることを試みた。すなわち、砥石に近く非常に磁場勾配が大きい領域で研磨を行ってみた。また、定圧切込み方式の磁気浮揚研磨法や、磁気浮揚研磨法で生成される粘土層（液体ボンド砥石）のみを取り出し、これに加工物を一定圧力で押しあてて、磁場の作用のない状態で研磨を試みた。その結果、上記のポリシングの問題点を克服する可能性を有した研磨法が構成できたので、ここに紹介する。

## 2. 磁気浮揚研磨法の概略

## 2.1 磁気浮揚現象

磁性流体（図1(a)参照）中の物体には、磁場作用時にこの物体を浮揚させる力が作用する。たとえば、この物体が砥石の場合には自己浮揚現象が生じる<sup>2)</sup>し、この物体が非磁性体の場合には磁気浮揚現象が現れる<sup>3)</sup>。このうち、研磨加工に利用されているのは後者で、この磁気浮揚現象は図1(b)に示されるように、「磁性流体を磁場勾配中に置くと液体は高磁場側に引きつけられ、この中に非磁性体がある場合には磁場の低い方向に浮力を生じる」と説明されている<sup>4)</sup>。

## 2.2 磁気浮揚研磨法の原理

この磁気浮揚現象を積極的に研磨に応用することを目的として開発したのが、この磁気浮揚研磨法である。この研磨法では、一般に使用されている砥粒が非磁性体であることに着目し、砥粒を図1(b)の低磁場側に排出される非磁性体に見たてている。したがって、本研磨法では図2のように砥粒は磁性流体の上層に浮揚している。

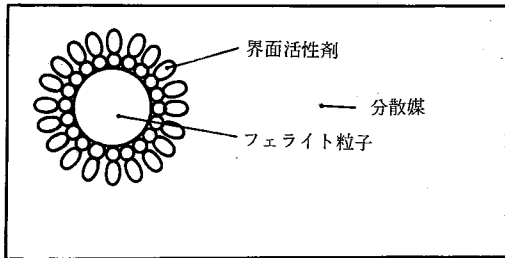
ここで、磁性流体に混入する砥粒の添加率が低い場合

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

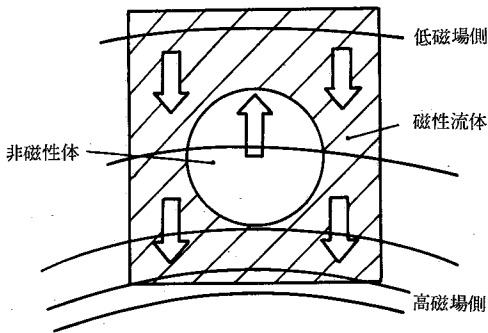
(体積添加率が 20 %以下) には、混合液の粘度が低く、加工物の回転等による攪拌により砥粒は容易に分散状態となる。そこで、この砥粒の添加率を多くすれば(体積添加率が 38 %以上)、磁性流体の上層に浮揚した砥粒と磁性流体による粘土層(厚みは混合液の深さの約 2/3 以上)が形成され、流体支持された砥粒を多量に含んだ柔

らかいポリシャに似た工具ができあがる。この粘土層に加工物を押しあてて、適当な切込みを与えてやると、砥粒に作用している磁気浮揚力が加工圧となる。

しかし、研磨を可能とするためには、加工物に垂直な加工圧のみでなく、加工物の運動方向に抗する砥粒を保持する力が必要となる。そこで、本研磨法では図 3 の装置に示されるように隣り合う磁石の極が互いに異なるように配置し、水平方向にも磁気排出力が作用するようにしている。また、前述の砥粒添加率では、混合液の上層に砥粒が浮揚しその粘度が高くなっており、砥粒の保持力が顕著に現れる。したがって、この浮揚力と保持力が



(a) 磁性流体の構造



(b) 磁気浮揚現象

図 1 磁性流体と磁気浮揚現象

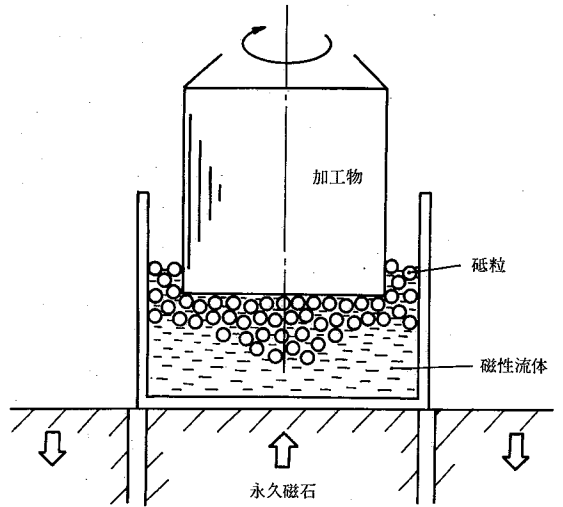


図 2 磁気浮揚研磨法の概念

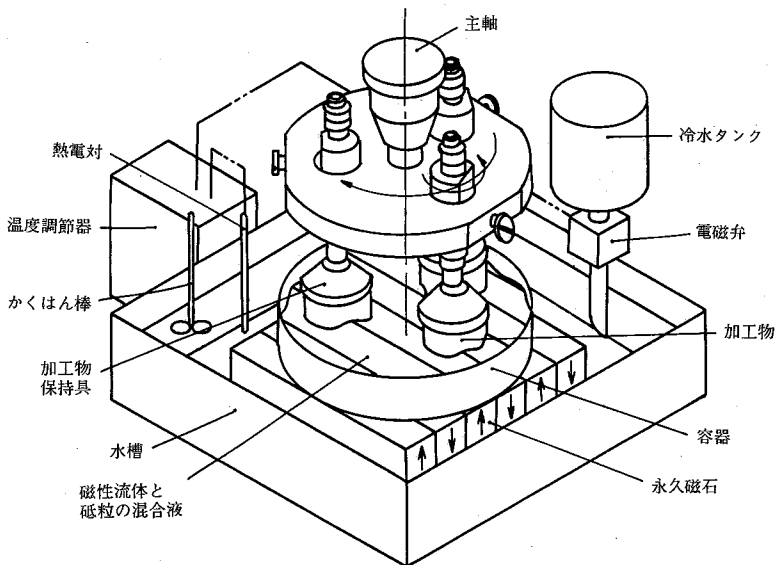


図 3 磁気浮揚研磨法の加工装置

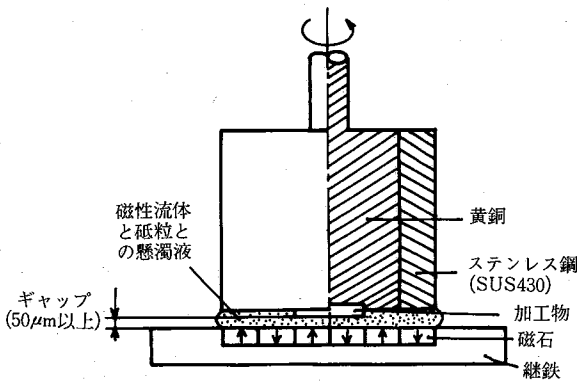


図4 微小ギャップ磁気浮揚研磨法の加工装置

作用している砥粒と加工物を相対運動させれば、加工物底面の研磨が可能となる。

### 2.3 磁気浮揚研磨法の加工特性

この研磨法ではアクリル樹脂を加工物として、図3に示される装置でC #4000の砥粒を用いて、 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ の加工能率と $0.04 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ の加工精度が得られており、次のような特性がある。

- (1) 加工物が磁石に近づき、作用する磁場が強くなるにつれて、加工能率・加工精度共向上する。
- (2) 粘土層の粘度と磁化特性の関係で、加工能率に対しては最適の砥粒添加率が存在する。
- (3) 粒径が小さい砥粒を使用すれば、加工能率・加工精度共向上する。
- (4) 砥粒と磁性流体の親和性は、加工能率に敏感に影響する。

## 3. 微小ギャップ磁気浮揚研磨法への展開

### 3.1 微小ギャップ磁気浮揚研磨法の概念

一般に永久磁石は、磁石表面に近いほど磁場勾配が大きくなる特性を有している。このため、磁石に近い領域にて磁気浮揚研磨を行えば、そのとき作用する磁気浮揚力も増大する。そこで、磁気浮揚研磨法における加工圧を高めるために、加工物と磁石とのギャップを最小 $50 \mu\text{m}$ まで近づけて、磁気浮揚力が大きく作用する領域で研磨を行い、磁気浮揚研磨の高能率化を図った。

しかし、上記の磁気浮揚研磨装置において、単純にギャップを小さくすると、砥粒と磁性流体との混合液が加工物の回転による遠心力を強く受けることになる。そうすると、磁力の作用しない非磁性砥粒は加工物の外側に排除され、磁石に対抗する位置に保持された加工物の研磨は困難となる。そこで、磁性流体の磁氣的シール効果を利用し、新たに砥粒を加工領域に封じ込める機能を持つ装置を製作し、その効果を確認した。

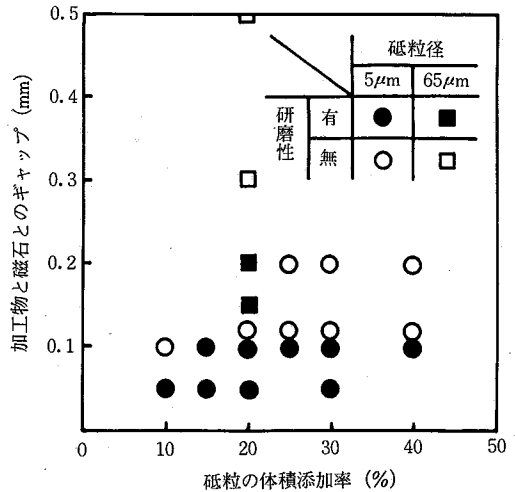


図5 微小ギャップ磁気浮揚研磨法での研磨性

### 3.2 加工方法

新たに製作した加工装置の概略を図4に示す。この装置は図に示すように磁性を持たない黄銅と、強磁性を有するステンレス鋼(SUS 430)から成る回転体の端面の中央に加工物を接着し、これを図4のように構成された磁石に近づけて回転することにより研磨を行う。このとき、SUS 430が強磁性であるため磁場は外周部で最も強くなり、この部分が磁性流体でシールされ、砥粒はここから外に出ることができなくなり、加工領域に封じ込められる。なお、加工装置の本体としてはNC立型フライス盤を使用しており、テーブルを上下することにより最小位置決め精度 $5 \mu\text{m}$ で、磁石と加工物とのギャップを調節した。

### 3.3 加工特性

磁性流体にフェリコロイドLS 40、砥粒に炭化珪素を用いて、回転数を $500 \text{rpm}$ に一定にし、加工物と磁石とのギャップおよび砥粒添加率を変化させて研磨を行った。加工物にアクリル樹脂を使用し、その研磨性(研磨能力の有無)を確認した結果を図5に示す。このように、平均粒径 $5 \mu\text{m}$ の砥粒を使用すれば、砥粒の体積添加率によらずギャップが $0.1 \text{mm}$ 以下にて研磨性が現れている。また、平均粒径が $65 \mu\text{m}$ の砥粒を使用すれば、この研磨性が確認できる境界が $0.2 \text{mm}$ 程度まで増加している。このことは、体積が大きく磁気浮揚力が顕著となる砥粒径が大きい場合に、ギャップが大きくても研磨性が現れることを示しており、今中ら<sup>5)</sup>と似た結果が得られている。

一方、砥粒の封止効果については、砥粒添加率が $10 \sim 30 \%$ と低い場合にはシール部に磁性流体が引きつけられ、砥粒はシール内部に封じされた。しかし、砥粒添加率が $40 \%$ の場合には、混合物の粘度が高くシールは

形成されなかった。

以上のように、加工物と磁石とのギャップを小さくし、さらに磁気シール効果を有する装置を用い砥粒を加工域に封じこめることにより、砥粒の体積添加率が通常の磁気浮揚研磨より小さいときに、磁気浮揚研磨が効果的に実現できることが判明した。

#### 4. 定圧切込み方式による磁気浮揚研磨法の検討

##### 4.1 定圧切込み方式による磁気浮揚研磨法の概念

磁気浮揚研磨法においては加工圧と加工能率は比例関係にあり、また仕上げ面粗さは加工圧の増加に対しても変化しないことがわかった<sup>6)</sup>。したがって、この研磨法で加工性能を向上するためには、加工圧を増加すればよい。しかし、この研磨法で得られる加工圧は磁性流体の磁化と加工域の磁場の強さにより決定されるため、現在入手できる磁性流体や磁石ではあまり大きい加工圧は期待できない。そこで、これまでの加工物を定位置に保持する方式を一般的な定圧切込み方式に変え、磁気浮揚力に加えてさらに垂直方向の荷重を上から作用させ加工圧を増大させ、研磨を試みた。以下にその加工特性および本研磨法における磁場の効果を紹介する。

##### 4.2 加工方法

加工装置本体には NC 立型フライス盤を使用し、そのテーブル上に回転円テーブルを設置して、その回転テーブル上に磁石および砥粒と磁性流体の混合物を入れる容器を固定した。そして、主軸には垂直方向に可動な軸を有する治具を固定した。その治具の可動軸の端面に加工物を接着し、交換式の重りを可動軸に取りつけることにより荷重を作用した。また、フライス盤主軸の回転をピンを介して可動軸に伝達し、加工物に自転運動を与え、さらに下の回転テーブルの軸に対して偏心して設置することにより加工物に公転運動を与え、回転数比を 1 対 1 とした。なお、回転数は 178 rpm で行った。

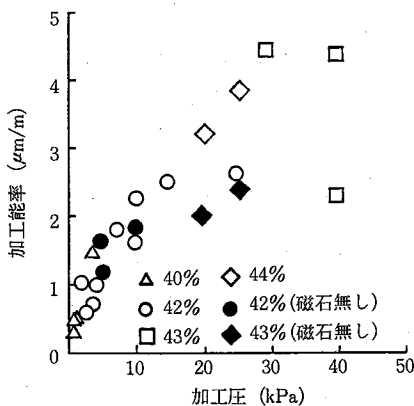


図 6 定圧切込み方式磁気浮揚研磨法での加工圧と加工能率の関係

##### 4.3 加工特性

図 6、図 7 は砥粒添加率および加工圧を変化させたときの、加工能率および仕上げ面粗さの変化を示したものである。研磨は、始め砥粒添加率 40 vol % の混合物を用い加工圧 1.1 kPa で行い、次に、加工能率を向上させるため、その加工圧を順次増大した。しかし、定圧切込み方式では加工物が混合物表面を徐々に切り込んで行くため、ある加工圧以上では加工物が容器の底に到達し研磨が不可能となる。(たとえば、40 vol % では 1.8 kPa で不可能となった。)そこで、砥粒添加率を次第に高くして研磨を行い、砥粒添加率 44 vol %、加工圧 39.6 kPa まで達成した。その結果、図 6 に示すように砥粒添加率を増加すれば高い加工圧での研磨が可能となること、加工圧と加工能率はほぼ比例関係にあること等がわかった。一方、仕上げ面粗さは加工圧の増加により、良くなる傾向を示しており、最高 0.03  $\mu\text{m R}_{\text{max}}$  を得た。

また、磁石がなく磁場の作用がない状態でも同様の実験を行ったが、図から明らかなように実験値のバラツキが大きく、磁石の有無による明確な差は認められず、加工圧に占める磁気浮揚力の割合を考えれば、この定圧切込み方式の磁気浮揚研磨法においては磁場の効果は小さいものと考えられる。

以上のように、定圧切込み方式で磁気浮揚研磨を行い、加工圧 39.6 kPa まで達成したが、加工圧に占める磁気浮揚力の割合を考えると、さらに高い加工圧で行う場合は磁気的な効果は小さく、その場合には加工液として磁性流体を用いる必要もないと考えられる。

#### 5. 液体ボンド砥石による研磨法の開発<sup>7)</sup>

##### 5.1 磁気浮揚研磨法での磁場の効果

磁気浮揚研磨法での磁場の効果を、加工時間に伴う加工圧の変化を見ることで調べた結果を、図 8 に示す。磁

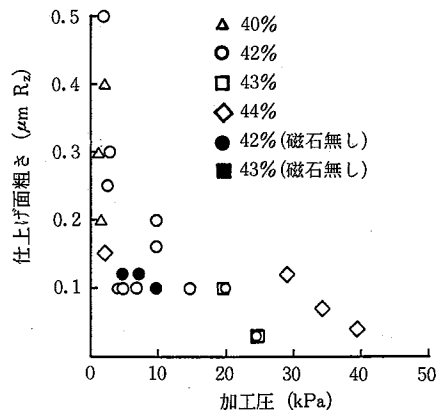


図 7 定圧切込み方式磁気浮揚研磨法での加工圧と仕上げ面粗さの関係

場が作用していると、図 8 (a) のように磁気浮揚力に相当する加工圧が常に加工物に作用し、磁気浮揚現象が生じる。一方、磁場が作用していないと、同図 (b) のように研磨開始当初に切込み量に依存する加工圧が発生するが、加工物が定位置に保持されているために、加工物と研磨剤との次の接触時における切込み量 (前回の接触時における切り残し量に相当する) が減少し、加工圧はしだいに小さくなる。

この加工圧を全研磨時間 (この場合は約 15 分) でならした値とそのときの平均の加工能率を、その混合物中での砥粒の体積添加率で整理したのが、図 9 である。このように、磁場作用時には砥粒添加率 42 % で加工圧・加工能率共に極大値を示すが、磁場の作用がなくなると、ここに示された範囲内では砥粒添加率が多いほど、加工圧・加工能率共高い値を示す。

したがって、加工圧が持続する形態をとることができれば、磁場の作用がなくても作用砥粒数の多い効率のよい研磨法が構成できる。すなわち、磁気浮揚研磨法のように加工物を定位置に保持することをやめ、通常の研磨法のような定圧切込み方式をとればよい。また、このときには砥粒を保持する液体として、磁性流体を使用する必要がない。そうした観点より開発したのが、液体ボンド砥石を用いた研磨法である。

5.2 液体ボンド砥石の製造方法<sup>7)</sup>

ここで液体ボンド砥石と称している工具は、平均粒径が 30 μm 以下の砥粒を最密状態に充填し、その間隙を適当な液体で満たし圧縮成形したものである。この液体ボンド砥石では、砥粒の体積添加率が 50~60 % と多く液体の割合が少ないためにその粘度が高く、液体との均一な混合が困難である。もしその混合が不均一な場合には、

液体ボンド砥石の強度が均一でなくなり、その弱い部分より破壊が生じ安定な研磨を継続することが不可能となる。そこで、結合のために使用する液体を、それよりも揮発性の高い別の液体 (たとえばヘキサン、ヘプタン等の低分子量炭化水素やメタノール、エタノール等のアルコール類) で希釈し、砥粒と均一に混合した後、減圧あるいは加熱により希釈剤を除去することにより、液体ボンド砥石を製造する。

5.3 加工方法

本研磨法は、図 10 に示されるように液体ボンド砥石に加工物を一定圧力で押し付けることにより、加工を行う。しかし、本研磨法は通常の研磨法のような基準面を持たないために、研磨盤テーブルに対して加工物主軸を垂直に保ちながら、加工物にある一定の荷重を作用させねばならない。また、加工物と砥粒面との接触時に急激な力が作用すると、結合力の弱い液体ボンド砥石を破壊する危険が伴う。

そこで、本研究では NC 立型フライス盤の主軸にレットチャックで、上下方向に可動の加工物と加圧のための錘りを保持する治具を取り付けた。このことにより、無負荷時には治具に開けた長方形の穴に通したピンで加工物軸を支え、テーブルを低速で上昇させることにより、加工物と液体ボンド砥石とのスムーズな接触を果たした。

ここで使用している加工物の直径が 2 cm であるため、加工物主軸は、研磨盤主軸に対して半径で 1 cm 偏心して設定し、回転数比 1 対 1 で同方向に回転させることで、加工物を遊星運動させ研磨を行った。

5.4 加工特性

この液体ボンド砥石を用いた研磨法により、シリコン単結晶を加工物として C #3000 の砥粒を用い 100 kPa の加工圧、11.2 m/min の研磨速度で、80 nm/m の加工

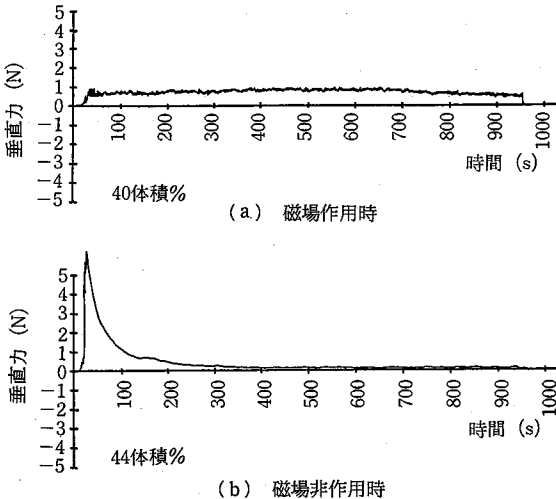


図 8 磁気浮揚研磨法での加工圧の加工時間による変化

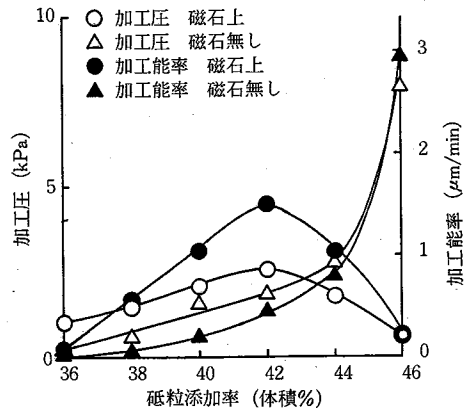


図 9 磁気浮揚研磨法での加工能率・加工圧の砥粒添加率による変化

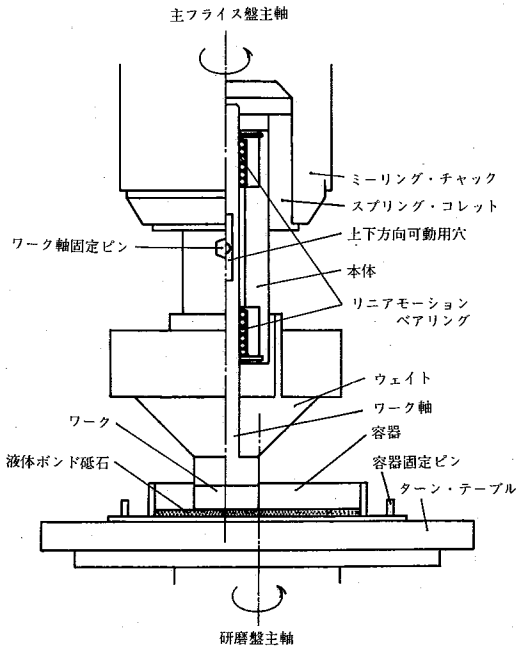


図 10 液体ボンド砥石を用いた研磨装置の概略

能率および  $0.04 \mu\text{mRz}$  の加工精度を得ている<sup>7)</sup>。この研磨法の特性を列記すれば、

- (1) 加工能率・加工精度共に従来のポリシングに卓越する研磨法を得ることができる。また、特に面だれの少ない加工を行うことができる。
- (2) 液体ボンド砥石は砥粒が液体で柔らかく保持されており、セルフドレッシングが生じる。また、液体ボンドに使用している液体を噴霧すれば、このセルフドレッシングを促進させることができる。
- (3) 液体ボンドに使用している液体と加工物との親和性は、その加工特性に大きな影響を与える。

液体ボンド砥石は砥粒で満たされているため、高い加工圧でもその圧力がすべて砥粒に作用し高効率の研磨を行える可能性がある。また、このような固形化した工具を使用すれば、高速度でも遠心力の影響の小さい研磨が行える可能性も有している。さらに、この液体ボンド砥石

は従来のラップ砥石に比較して非常に柔らかいため、成形性に優れており、平面以外の面の加工にも適用しやすいものと思われる。

## 6. おわりに

加工面における作用砥粒数が多いという磁気浮揚研磨法の特徴を生かしたままで、作用する加工圧を高め、高効率な研磨法を構築することを試みた。すなわち、加工物と砥石とのギャップを小さくし磁場勾配の大きな領域にて加工を行う磁気浮揚研磨法や定圧切込み方式の磁気浮揚研磨法を検討した。

この結果、さらに高い加工圧で研磨を行うためには、磁気浮揚研磨法で生成される粘土層（液体ボンド砥石）のみを取り出し、これをラップ砥石として定圧切込み方式の研磨を行えばよいことが判明した。このとき、砥粒を結合させる役割を果たす液体としては、磁性流体のみでなく、あらゆる液体を使用することが可能である。この概念を推し進めれば、一般のビトリファイド砥石やレジノイド砥石の焼成前のものも、液体ボンド砥石とみなすことができる。

この砥石は、PVA 砥石よりもさらに柔らかい砥石であり、成形性に優れ高精度な仕上げ面を得ることができる。また、切れ刃の自性作用を活性化することが容易であり、高い加工能率を維持することができる。このように、液体ボンド砥石は従来にない概念のラップ砥石であり、種々の可能性を有している。

(1985年8月7日受理)

## 参考文献

- 1) Y. Tani and K. Kawata: Annals of the CIRP, 33, 1 (1984) 217
- 2) R. E. Rosensweig: AIAA Journal, 4, 10 (1966) 1751
- 3) 下飯坂潤三・中塚勝人・中鉢良治・佐藤惟陽: 粉体および粉末冶金, 22, 1 (昭50-3) 22
- 4) 下飯坂潤三: 日本金属学会会報, 15, 2 (昭51) 77
- 5) 今中 治・黒部利次・松島一晃: 昭和56年度精機学会春季大会講演論文集, (昭56-3) 777
- 6) 高尾正昭・谷 泰弘・河田研治: 生産研究, 37, 2 (昭60) 76
- 7) 谷 泰弘・河田研治: 生産研究, 37, 7 (昭60) 257