

液体ボンド砥石を用いた高能率研磨法

High-Efficiency Fine Finishing Using 'Liquid-Bonded Wheel'

谷 泰弘*・河田 研治*

Yasuhiro TANI and Kenji KAWATA

液体ボンド砥石は、微細な砥粒を液体の表面張力により結合したもので、硬脆材料の鏡面研磨を目的として開発した非常に柔らかいラッピング砥石である。本報告では、この液体ボンド砥石の構造や特徴について解説するとともに、その特徴を生かして高加工圧にて研磨を行う方法について述べ、さらに高加工圧領域での硬脆材料であるシリコンウエハやセラミックスに対する研磨特性について解説する。

1. はじめに

電子機器、光学機器関連の先端技術産業の発展に伴い、各部材の最終仕上げ工程である研磨加工技術の高能率・高精度化に対する要求は、さらに高まっている。これに対して、現在の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研磨を行うために、その加工単位は小さく高精度な研磨が可能となるが、研磨能率は決して高いとは言えない。しかも、その高能率化のために高加工圧にて研磨を行っても、加工物が研磨能力を持たないポリシャに直接接触するために加工圧に比例して能率が向上せず、むしろポリシャを損傷するなどの悪影響が目立ってくることになる。また、高能率化のために高速領域で加工を行っても、強い遠心力のために加工域に砥粒が十分供給できなくなり、かえって加工能率を低下させることになる。

このような観点から、高能率という研削加工の特徴と高精度というラッピングの特徴とを兼ね備えたラッピング砥石を用いた研磨法が最近見直されてきている。しかし、現状のラッピング砥石では、 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 以下の高精度で傷のない仕上げ面を得ることがなかなか困難である。

以上のような問題点を克服するために、砥粒と液体との混合物を圧縮成形した、非常に柔らかいラッピング砥石(液体ボンド砥石)を開発した^{1,2)}。確かに、この砥石を使用して研磨を行えば、ほぼ同一の精度を実現できるポリシング加工に比較して、高能率を達成することが可能となったり、また、より高い加工圧の領域において、この研磨能率はさらに向上することが予想された²⁾。そこで、本報告においては、まず液体ボンド砥石の構造や特徴について解説するとともに、その特徴を生かして高加工圧にて研磨を行う方法について述べ、さらに高加工圧

領域での硬脆材料であるシリコンウエハやセラミックスに対する研磨特性について解説する。

2. 液体ボンド砥石の概念

液体ボンド砥石と称しているのは、微細な砥粒と適当な液体とを均一に混合し、これを $30\sim 50\text{MPa}$ の圧力で乾式にて圧縮成形したものである²⁾。砥石の製造工程としては、焼成工程がないのみで、その他の工程については従来の砥石の工程となんら変わらない。したがって、この液体ボンド砥石の構造も、図1に示されるように通常の研削砥石とほとんど同様である。すなわち、砥粒、気孔、結合剤の三要素から構成されており、それらの体積比は約5:3:2となっている。ただ、この砥石の場合に異なる点は、その結合剤が、水、各種アルカリ性あるいは酸性溶液、各種油のような液体となっていることである。このように、この砥石においては従来の固体の接着力にかわって、液体の表面張力あるいは粘着力により砥粒が結合されている。

このように、結合剤が液体であるために、 $0.1\mu\text{m}$ 前後の微細な砥粒であっても、容易にその成形体を製作する

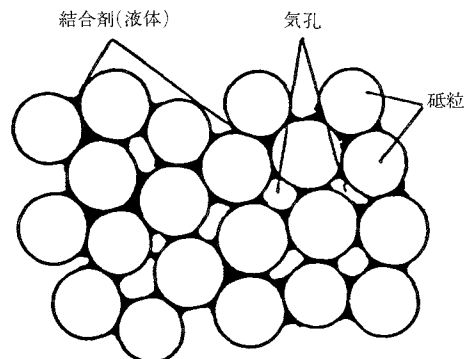


図1 液体ボンド砥石の構造

*東京大学生産技術研究所 第2部

ことができる。また、その結合力は固体の接着強度と比較してはるかに弱いために、研磨加工時に容易に砥粒が脱落し、常に新しい切れ刃を加工面に供給することが可能である²⁾。その結果、切れ味のよい状態が長く継続されることになる。

このように砥粒が常に脱落するという点で、液体ボンド砥石は、従来の砥石の結合度を使用に耐えうる極限まで弱くした砥石と考えることもできる。その結合剤としての液体の量が多すぎて液化限界をこえると、砥粒と液体との混合物はどろどろの状態となり、砥石を形造ることは困難となる。逆に少なすぎると、砥粒の結合力が弱くなり、砥石の減耗速度が非常に早いものとなり、砥石の寿命を極端に短くしてしまう。以上のことから、通常の研削砥石と似た上記の混合率のときに最も強い結合が得られる。こうして作られた液体ボンド砥石の外観を図2に示す。

液体ボンド砥石は、上記のように非常に脆い砥石であるためその周縁を強化するために、図2に示されるように通常は容器を伴った形で使用される。しかし、この容器が加工の障害となるような場合には、適当な樹脂で周縁のみ強化することができる。

以上のような液体ボンド砥石を用いれば、次のような特徴のある研磨を行うことが可能となる。

- (1)加工精度(粗さ)はポリシングと同程度であっても、加工能率が数倍の研磨が可能となる。
- (2)切れ刃の自生作用が活発であり、長時間の研磨であっても高能率を維持することができる。
- (3)砥石の成形が非常に容易であり、球面などの複雑形状の研磨にも適用できる。
- (4)加工性能に対して、非常に幅の広い砥石を製作することができる。
- (5)砥粒とある適当な液体のみの砥石を製作することができるため、加工面の品質を管理することが容易になる。
- (6)結合剤として酸性溶液やアルカリ性溶液を使用する

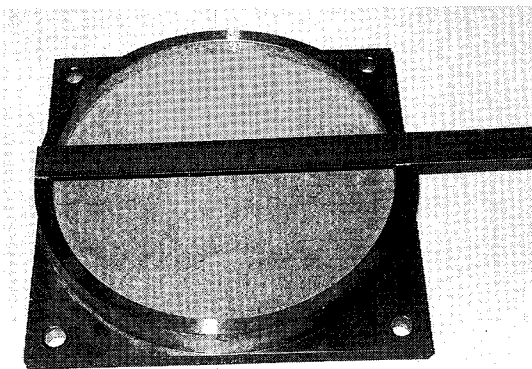


図2 液体ボンド砥石の外観

こともできるため、化学的作用の期待できる研磨や潮解性のあるような特殊な加工物の研磨が可能となる。

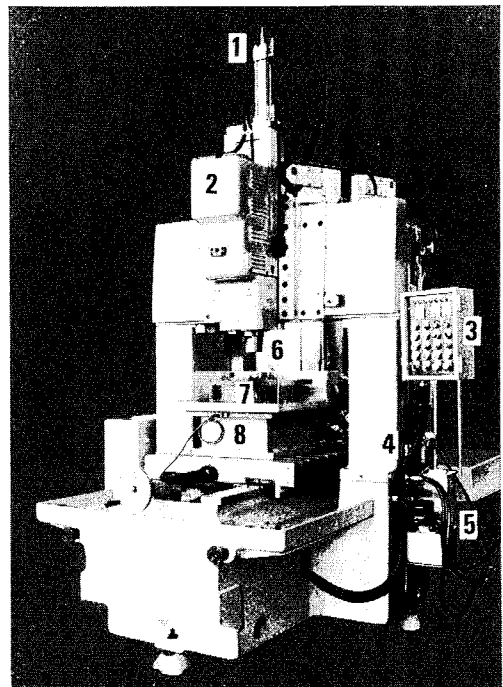
- (7)液体ボンド砥石は、通常のポリシャのような連続的な弾性を有していないために、縁ダレのない研磨を行うことができる。

この液体ボンド砥石を従来のラッピング砥石と比較して考えれば、この液体ボンド砥石の最大の特徴は、結合度が軟らかいこと・発刃性や成形性が優れていることである。こうした砥粒の脱落の容易さという点では、固形状の結合剤であっても、研磨時に発生する熱や衝撃、適当な研磨液によりその結合剤が溶融する場合には、この液体ボンド砥石と同様の効果が得られる。

3. 高加工圧における研磨方法

0.3MPaのような高加工圧でこの砥石を用いて研磨を行おうとすると、現状の研磨機械や加工方法、液体ボンド砥石では種々の問題点がある。すなわち、

- (1)研磨機械の剛性が不足しているために加工時に主軸が変形し、砥石の寿命を早めるとともに加工物の形状精度を劣化させる。
- (2)液体ボンド砥石の均一性および耐圧性が悪いために、砥石の使用可能時間が短くなる。



1: 油圧シリンダ, 2: 主軸, 3: 制御盤, 4: 真空ユニット, 5: 油圧ポンプ, 6: 真空チャック, 7: 回転テーブル, 8: 往復テーブル

図3 研磨装置の外観

表 1 加工条件

液体ボンド 砥石	結合剤	水
	砥粒 粒径	SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ 平均粒径 0.05~5 μm
加工物	シリコンウエハ (3インチ)	
研磨圧 P	0.1~0.6MPa	
研磨速度 v	6.3~31.4m/min	
研磨時間 t	5~10min	

(3) 大きな加工圧力が作用し多大の加工熱が発生するために、加工物の保持が不可能となる。

第1の問題点に関しては、加工機械の基本構造として門型マシニングセンタのコラムを使用することにより、加工機械の剛性を高めた²⁾。このことにより、砥石面と加工物軸との垂直度が高められ、液体ボンド砥石の使用限界圧力を向上させることにつながった。第2の点に関しては、砥石の製造方法について検討を加え、成形方法を改良することにより砥石の均一性および耐圧性を向上した。また、液体ボンド砥石の概念を拡大し、成形時に固体であっても、研磨時には結合剤が液体状態となる砥石を開発した。第3の点に関しては、加工物の保持方法について検討を行い、現状においては高融点のワックスを使用することにより、長時間の保持も可能とした。

以上のような考察の結果、図3のような研磨装置を製作した²⁾。この装置において、図2に示される円形の容器に入れた液体ボンド砥石を回転テーブル上に固定し、一方加工物であるシリコンウエハやセラミックス等は加工物治具に高融点ワックスで貼りつけたうえ主軸に取り付けた。この主軸と回転テーブル軸とは、ほぼ加工物の半径以上偏心させ、同方向に回転させることにより、加工物面内の各点における研磨速度を等しくした。この状態で、加工物を油圧シリンダにより設定圧力で砥石面に押しつけて研磨を行った。砥石の性能を明確に把握するため、研磨はほとんど乾式にて行ったが、酸化珪素砥粒の場合には化学的作用が重要であるため、適当な研磨液を噴霧した。主な研磨条件を表1に示す。

4. シリコンウエハの研磨特性

4.1 加工圧による研磨特性

本研磨法で研磨特性に最も大きな影響を与えと思われる加工条件は、加工圧である。そこで、図4に、炭化珪素の平均粒径 5 μm の砥粒を水で結合した液体ボンド砥石を用いた場合の加工圧と研磨能率および仕上げ面粗さの関係を示す。図に示されるように、加工圧0.4MPaまでの範囲では研磨能率は加工圧にほぼ比例して増大している。この傾向は本研磨法のようなラッピング砥石を用いた加工法に特徴的なものであり、ポリシング加工等には

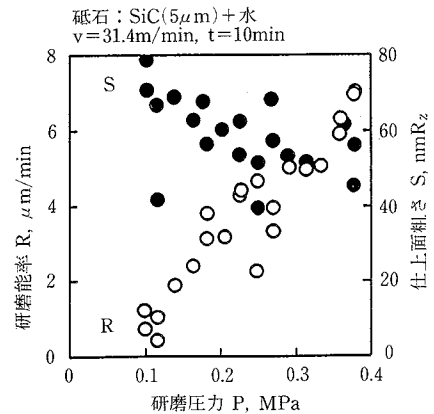


図4 シリコンウエハの加工圧による研磨特性

見られないものである。これは、本研磨法のような場合にはポリシング法におけるポリシャのような研磨能力を持たない工具を使用していないために、加工圧が砥粒に対してすべて有効に作用することによるものと考えられる。そのため、シリコンウエハに対して加工圧0.4MPaにおいて炭化珪素砥粒を用いた場合約 7 μm/min という高い能率が得られている。

この研磨能率の増加が加工圧力の増加に起因していることは当然であるが、その他の要因も含まれているものと思われる。すなわち、加工圧力が増大して砥粒切込み深さが大きくなっても、砥粒切削面積はそれに追従して増大しないために、一般に研磨能率が加工圧力に比例して大きくなることはありえない。そこで、他の要因として考えられることは、一つは作用砥粒数の増加であり、もう一つは砥石のセルフドレッシング作用による切れ味の向上である。

既報²⁾に示したように、この砥石の場合には0.1MPa以上の範囲で加工圧力の増加に伴い砥石の減耗速度は増加している。このことが、加工面に常に新しい切れ刃を供給することにつながり、液体ボンド砥石の切れ味の維持に重要な役割を果たしていることは確かなことと思われる。また、加工圧力とともに作用砥粒数が増加していることは、加工圧力の増加にもかかわらず仕上げ面粗さが向上していることから予想される。一般に加工圧力が高くなると砥粒切込み深さも増加し、仕上げ面粗さは悪くなる。したがって、上記の仕上げ面粗さの現象は、作用砥粒数が増加し砥粒切込み深さの増加を抑制しているために生じているものと考えられる。

4.2 研磨速度による研磨特性

加工圧とともに研磨特性に影響を与えられる加工条件が研磨速度である。そこで、図5には研磨速度と研磨能率、仕上げ面粗さ、砥石の減耗速度の関係を示す。前述のように通常の散布砥粒方式の研磨法においては、

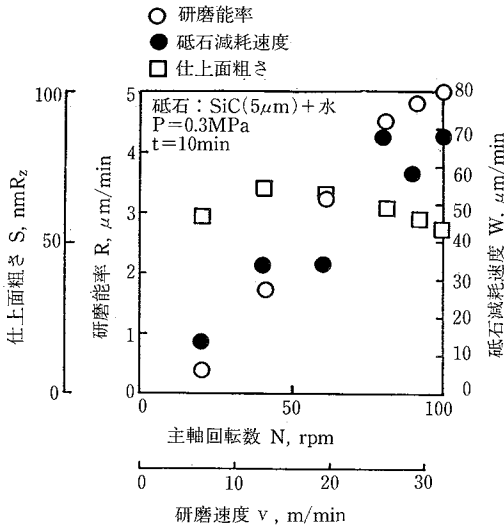


図5 シリコンウエハの研磨速度による研磨特性

研磨速度が増大し遠心力が大きくなりすぎると、砥粒を加工領域に十分供給することが困難になり、研磨能率は一般に減少する。しかし、本研磨法の場合は、結合砥粒の形態で加工域に常に砥粒を供給しているために、研磨能率は減少せず、研磨速度30m/minまでの領域ではほぼ比例して増大している。前節の場合と同様に、この研磨速度による傾向には、研磨速度の増加に伴う砥石の減耗速度の増加が、新しい切れ刃の供給の点で寄与しているものと思われる。

一方、仕上げ面粗さは研磨速度によりあまり大きな変化はない。このことは、研磨速度の変化により砥粒切入み深さ（加工単位）が変化していないことを示唆しており、したがって作用砥粒数の変化も少ないものと考えられる。

4.3 研磨液による研磨特性

以上の結果はすべて乾式にて行われたものである。乾式研磨は能率が高く、洗浄性にも優れており、研磨熱による変質が問題とならないような場合には有効である。しかし、酸化珪素のような化学的作用が期待できる砥粒を使用する場合には、その科学的な活性度が高くなる状態で研磨を行ったほうが研磨特性は向上する。そこで、5 μm の酸化珪素砥粒を水で結合した液体ボンド砥石を用いて、研磨液に水、pH13.8の水酸化カリウム溶液、水酸化カリウム溶液を添加してpH13.0に調整したコロイダルシリカの3種類を使用した研磨実験を行った。研磨液が噴霧されると、砥石の強度が著しく低下し、砥石の減耗が大きくなる。そこで、強度の低下を抑えしかも液体ボンド砥石の特徴を損なわないために、ここで使用した液体ボンド砥石にはその結合剤に水溶性の樹脂を添加した。その結果得られた研磨能率および仕上げ面粗さが、

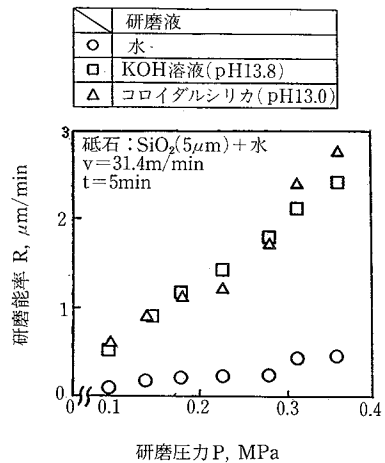


図6 シリコンウエハの研磨液による研磨能率

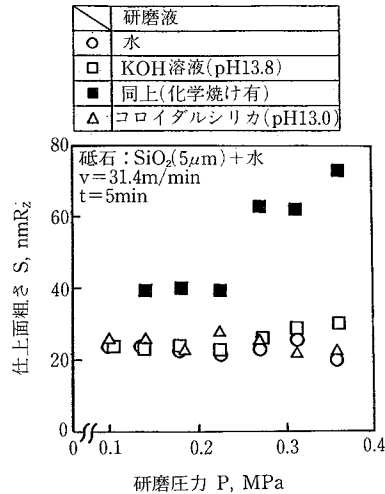


図7 シリコンウエハの研磨液による仕上げ面粗さ

図6と図7である。

水酸化カリウム溶液およびコロイダルシリカを研磨液としたものは、水を研磨液としたものに比較して研磨能率がかなり向上しており、化学的作用の効果が明白である。水酸化カリウム溶液を研磨液としたものとコロイダルシリカを研磨液としたものでは、研磨能率および仕上げ面粗さはほとんど同一であるが、水酸化カリウム溶液の場合には加工物表面に一部化学焼けが観察された。一方、コロイダルシリカを研磨液としたものでは全く化学焼けが観察されなかった。

4.4 砥粒の種類による研磨特性

液体ボンド砥石が研磨特性に影響を与える要因としては、結合剤である液体と砥粒が考えられる。結合剤による影響については、既報^{1),2)}においてふれ表面張力の大きい水が耐圧性や研磨特性の点で優れていることが判明している。一方、使用する砥粒については、砥粒の種類と

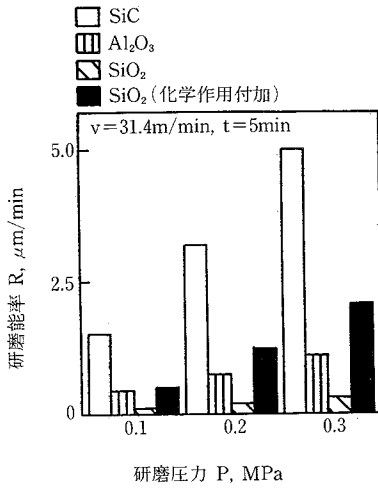


図8 シリコンウエハの砥粒の種類による研磨能率

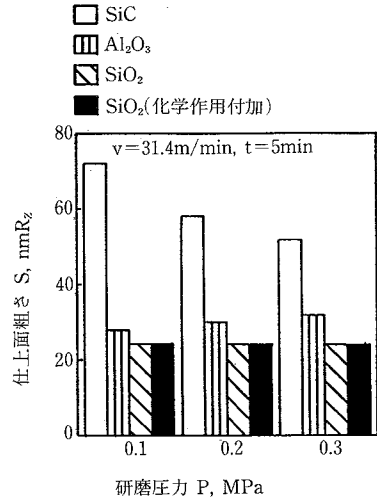


図9 シリコンウエハの砥粒の種類による仕上げ面粗さ

砥粒径が研磨特性に影響を与えるものと思われる。そこで、まず砥粒の種類を炭化珪素、酸化アルミニウム、酸化珪素と変え、これらを水で結合した液体ボンド砥石の研磨特性を図8、図9に示す。酸化珪素については前節に述べたように化学的作用を付加したものとそうでないものを示した。これによれば、機械的な除去においては研磨能率は炭化珪素、酸化アルミニウム、酸化珪素の順になっているが、化学的作用が付加されると酸化珪素の研磨能率は酸化アルミニウムをしのぐまでになっている。一方、仕上げ面粗さは研磨能率とは逆に炭化珪素、酸化アルミニウム、酸化珪素の順に悪くなっている。これらの傾向は砥粒の硬度等に関連しているものと思われる。

4.5 砥粒径による研磨特性

次に酸化アルミニウムの砥粒を水で結合した液体ボンド砥石において、その砥粒径を0.05μm、0.5μm、1μm、5μmと変えたときの研磨特性を図10に示す。この結果は5分間加工を行ったときのものであり、この範囲においては5μmの砥粒の場合に研磨能率、仕上げ面粗さとも最も良い値を示している。これは細粒になるほど、作用砥粒数が増加し一砥粒あたりの加工圧が減少するためと考えられるが、砥粒径の変化ほどは大きな変化となっていない。

4.6 複合砥石による研磨特性

砥粒径の異なる砥粒を複合した液体ボンド砥石を製作すると、その耐圧性は向上する。そこで、5μmの砥粒と1μmの砥粒を混合して製作した複合砥石の研磨特性について調査を行った。その結果が図11、図12である。5μmのみの砥粒を使用した場合には0.3MPaしか耐圧性のなかった砥石が、複合することにより0.6MPaまで研磨ができるようになってきている。しかも、その研磨能率、仕上げ面粗さとも5μm単独の場合よりわずかによくなっている。この複合砥石の場合、加工圧の増加に伴って

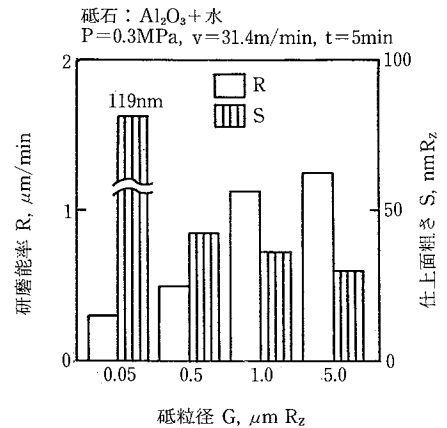


図10 シリコンウエハの砥粒径による研磨特性

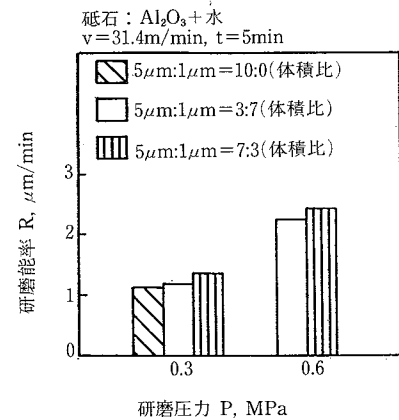


図11 シリコンウエハの複合砥石による研磨能率

研磨能率は向上しているが、仕上げ面粗さはわずかに悪くなっている。この仕上げ面粗さの傾向は微粒の多い砥石のほうが顕著である。

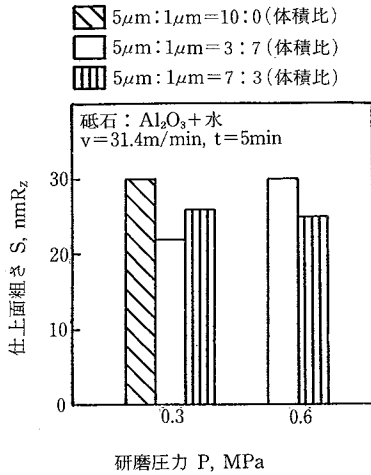


図12 シリコンウエハの複合砥石による仕上面粗さ

5. セラミックスの研磨特性

シリコンウエハ以外の硬脆材料として、炭化珪素、窒化珪素、酸化アルミニウム、酸化ジルコニウムの4種類のセラミックスの研磨特性を調べた。これらのセラミックスに10Nの荷重を作用したときのピッカース硬度は、図13の上の表に示されている。これらのセラミックスを5μmの炭化珪素砥粒を水溶性の樹脂で結合した液体ボンド砥石で研磨したときの加工量を図13に、仕上面粗さを図14に示す。セラミックスの種類により研磨特性は大きく異なっている。特に硬度では低い酸化アルミニウムの加工能率が、炭化珪素よりも低くなっていることは特徴的である。また、炭化珪素の砥粒で炭化珪素のセラミックスが目づまりすることなく研磨されていることは、この加工法の特徴である。

6. おわりに

硬脆材料の鏡面研磨を目的として開発した、砥粒の結

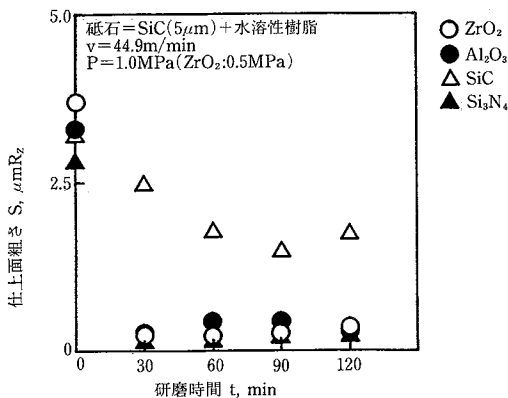


図14 セラミックスの仕上面粗さ

加工物	H _{V1.0}
SiC	4500
Si ₃ N ₄	1344
Al ₂ O ₃	1713
ZrO ₂	1150

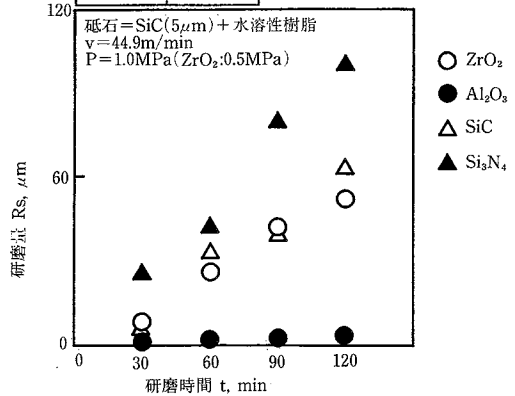


図13 セラミックスの研磨能率

合剤として液体を用いた砥石の特徴と高加工でシリコン単結晶およびセラミックスを研磨した際の加工特性について解説した。この液体ボンド砥石を用いた研磨法は、高加工において以下の特徴を有する。

- (1) 高加工で行うことにより高能率かつ高精度な研磨が可能となり、加工圧0.4MPaにおいて平均粒径5μmのSiC砥粒を用いた場合、約7μm/minの能率と0.05μmRzの仕上面粗さを得た。
- (2) 本研磨法は、結合砥粒方式であるために、研磨能率は研磨速度にほぼ比例して増大する。
- (3) 酸化珪素の砥粒を使用した場合、pHの高い化学的作用のある研磨液を付加することにより、研磨能率を大きく向上させることができる。
- (4) 研磨特性は砥粒の種類や砥粒径によっても大きく変化する。
- (5) 粗粒と微粒を混合した複合砥石では研磨特性には大きな変化がないが、さらに高加工で使用することが可能となる。
- (6) セラミックスの研磨においても、液体ボンド砥石のセルフドレッシング作用は効果がある。

(1987年3月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 谷 泰弘, 河田研治: 液体ボンド砥石を用いた高能率研磨法の開発, 日本機械学会論文集(C編), 51, 471(1985) 3145
- 2) Y. TANI and K. KAWATA: Development of a High-Efficiency Finishing Process Using 'Liquid-Bonded Wheel', Annals of the CIRP, 35, 1 (1986) 215