

ブラスト研磨法による超硬合金の
研磨機構に関する研究

2014年6月

博士（工学）

高井 一輝

豊橋技術科学大学

ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する研究

論文要旨

金型や産業部品の高効率加工を実現するために、耐熱性、耐摩耗性に優れる超硬合金を母材とした切削工具が普及している。そして、これら工具を生産する CNC 工具研削盤は急速に発達しており、近年では複雑形状した切削工具が容易に生産可能になりつつある。したがって、工具開発の現場では工具形状以外の手法によって切削工具に低抵抗化や長寿命化などの付加価値を付与する表面改質技術について研究が行われ始めている。

本研究で着目したブラスト研磨法は、これら表面改質技術の一つに挙げられ、粘弾性を示す核体の内部および外部に微小な研磨砥粒を担持させた研磨メディアを被加工物へ高速投射する研磨法である。この研磨法は、これまで熟練技能を必要とした曲面の研磨加工を容易に行える利点を有しているが、研磨機構について理論的に解明した知見が少ない。そのため、研磨に関与する因子と研磨面性状の関係性が明確化されておらず、目的の表面性状を得るための条件選定時に多くの時間を費やすことが問題となっている。そこで、本研究では超硬合金の研磨加工にブラスト研磨法を用い、本研磨法に関与する因子と加工面性状の関係を系統把握し、本研磨法のプロセス制御指針を確立するとともに、本研磨法による超硬合金の研磨機構を明らかにする。

本論文では、最初に本研究で使用したブラスト研磨装置の設定値と投射速度、および投射量の関係を明らかにし、両因子の定量制御を可能にした。また、研磨された加工面全域の形状や表面粗さの分布を調べ、最も表面粗さが低くなる箇所は研磨領域中の最深部であることを明らかにした。

次に、投射条件として投射速度、研磨時間、投射角を挙げ、これら因子と加工面性状の関係を明らかにした。そして、投射速度は 21.4m/s 以上とし、かつ投射速度をさらに高速度化することによって短時間に平滑な表面が得られることを明らかにした。また、投射角は加工面に対して 45° とすることで表面粗さ低下速度および加工面の研磨速度が高くなった。そして、加工面性状の経時変化を定点観察した結果では、表面の凸部のみが優先的に研磨されるのではなく、凹部も同時に研磨されることを明らかにした。

最後に、研磨メディアの含水率(質量および粘弾性)と加工面性状の関係を明らか

にした。そして、研磨メディアの含水率が減少するほど研磨開始直後の表面粗さ低下速度は高くなるが、最終的な表面粗さも高くなることを明らかにした。また、研磨メディアの含水率を変えた場合は、研磨メディアの弾性率や加工面への衝撃力、そして加工面に生じる加工硬化が研磨面性状に影響を及ぼすことを明らかにした。

したがって、本研磨法では含水率 30% の研磨メディアを加工面に対して 45° の方向から高速度投射することで簡易的に、かつ短時間で平滑な表面が得られることを明らかにした。

Polishing mechanism of cemented carbide using blast polishing process

Abstract

Carbide cutting tools with good heat and wear resistant characteristics are widely used for achieving high efficiency in the machining of parts and molds. Following the trend of the current marketplace, new CNC grinding machines are also being developed, which enables manufacturers to produce cutting tools that are more complex and sophisticated. Cutting tool developers are greatly attracted by this new technology, which could ultimately improve machining performance from viewpoints other than tool geometry. Research on surface modification technology in particular is beginning to gain in the field of cutting tools.

The blast polishing process focused in this study is one of the surface modification technologies. This process emits media composed of abrasive grains and viscoelastic body to the workpiece surface at high speed. The blast polishing process has the advantage of being able to easily polish a curve surface, which is known to be a difficult processing. However, there is limited information that explains about this process theoretically. Moreover, relationships individual factors and the polished surface condition are also unclear. Hence operators running this process often are forced to spend a great deal of time to determine the appropriate setting in order to achieve an ideal surface condition. Therefore, this thesis clarify the polishing mechanism of cemented carbide using the blast polishing process by investigating the relationship of the factors related to this polishing and the polished surface condition.

To begin, the relationship between the setting value of equipment and injection quantity, and injection speed of the polishing media were investigated. In this study, both factors have been successfully controlled quantitatively. Further, it has been clarified that the deepest area was where surface roughness was the lowest value.

Regarding the relationship between injection condition and the polished surface, it has been clarified that surface roughness was improved by increasing the injection speed at over 21.4 m/s, and at injection angle of 45° . Further, observations over time suggest that during the polishing process, the convex portion of the surface does not have priority. Rather, both the concave and convex surfaces are polished.

Lastly, the relationship between the water content (mass and viscoelasticity) of the polishing media and surface roughness has been clarified. At the initial stage of the polishing process, the reduction speed of surface roughness got faster by using the polishing media with lower water content. However, the surface roughness value showed the highest value by using the polishing media with the lowest water content at the end of process. It was proven that by adjusting the water content of the polishing media, the rigidity and impact force against the workpiece surface would differ, which illustrates its effects on work hardening.

Furthermore, it has been clarified that a smooth surface finish can be achieved easily and quickly by emitting the polishing media at injection speed 21.4 m/s or more, at injection angle 45° , and with 30% water content.

目次

第1章 序論	…1
1.1 本研究の背景	…1
1.1.1 超硬合金製切削工具の現状および表面改質技術の動向	…1
1.1.2 ブラスト研磨法の有効性	…2
1.1.3 ブラスト研磨法の概要	…4
1.2 本研究の目的	…6
1.3 本論文の構成	…7
第2章 実験方法および実験装置	…8
2.1 供試材	
2.1.1 供試材	…8
2.1.2 試験片およびブラスト研磨実験面の前処理方法	…8
2.2 研磨材	…10
2.2.1 含水性研磨材マルチコーンおよびマルチパウダ	…10
2.2.2 研磨メディアの配合装置および配合分量	…11
2.2.2.1 研磨メディアの質量測定方法	…12
2.2.2.2 研磨メディアの弾性率測定方法	…12
2.3 ブラスト研磨実験装置	…13
2.3.1 ブラスト研磨装置	…13
2.3.2 供試材固定ステージ	…14
2.4 投射された研磨材の投射量測定方法	…15
2.5 投射された研磨材の観察装置および測定方法	…16
2.5.1 高速度ビデオカメラ	…16
2.5.2 二次元流体解析ソフト	…17
2.5.2.1 投射速度の測定方法	…17
2.5.2.2 研磨メディアが加工面に加える衝撃力測定方法	…18
2.5.2.3 圧力感知フィルムを用いた圧力分布測定方法	…19
2.6 加工面の評価装置および評価方法	…20
2.6.1 三次元表面形状測定装置	…20

2.6.1.1 加工面全域の形状測定方法	…20
2.6.2 レーザ顕微鏡	…21
2.6.2.1 加工面の観察および表面粗さの測定方法	…21
2.6.2.2 輪郭形状の定点観察方法	…21
2.6.3 走査型電子顕微鏡	…22
2.6.4 マイクロビッカース硬さ試験機	…22
2.6.4.1 加工面の硬さ測定方法	…22
第3章 投射条件の定量的制御法の確立と加工面観察領域の特定	…23
3.1 緒言	…23
3.2 投射条件	…24
3.2.1 投射量および投射速度測定時の投射条件	…24
3.2.2 加工面形状測定時の投射条件	…25
3.3 結果と考察	…25
3.3.1 研磨メディアの投射量	…25
3.3.2 研磨メディアの投射速度	…27
3.3.3 加工面の形状および表面粗さ測定結果	…27
3.4 小括	…30
第4章 投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響	…31
4.1 緒言	…31
4.2 投射条件	…31
4.3 結果と考察	…32
4.3.1 投射速度および研磨時間が加工面粗さに及ぼす影響	…32
4.3.2 走査型顕微鏡による加工面の定点観察結果	…33
4.3.3 加工面輪郭形状の定点観察結果	…35
4.4 小括	…39
第5章 投射角が加工面性状に及ぼす影響	…40
5.1 緒言	…40
5.2 投射条件	…40

5.3 結果と考察	…42
5.3.1 投射角が加工面粗さに及ぼす影響	…42
5.3.2 加工面輪郭形状の定点観察結果	…43
5.4 小括	…45
第6章 研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響	…46
6.1 緒言	…46
6.2 投射条件	…46
6.3 結果と考察	…48
6.3.1 研磨メディアの含水率が質量と運動エネルギーに及ぼす影響	…48
6.3.2 研磨メディアの質量が加工面粗さに及ぼす影響	…50
6.3.3 研磨メディアの剛性が加工面粗さに及ぼす影響	…51
6.4 小括	…53
第7章 ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する考察	…55
7.1 緒言	…55
7.2 研磨メディアの投射速度が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響	…55
7.2.1 投射速度が研磨機構に及ぼす影響	…55
7.2.2 研磨メディアの投射速度に関する提言	…57
7.3 研磨メディアの含水率が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響	…58
7.3.1 含水率が研磨メディアの剛性に及ぼす影響	…58
7.3.2 含水率が加工面への衝撃力に及ぼす影響	…60
7.3.3 含水率が加工面の硬さに及ぼす影響	…63
7.3.4 含水率が研磨機構に及ぼす影響	…64
7.3.5 研磨メディアの含水率に関する提言	…67
7.4 小括	…67
第8章 結論	…69
8.1 総括	…69
8.1.1 工学的意義	…69
8.1.2 工業的意義	…72

8.2 結論	…73
第9章 ブラスト研磨法および研磨メディアにおける今後の展望	…78
参考文献	…80
論文目録	…84
謝辞	…85

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 超硬合金製切削工具の現状および表面改質技術の動向

近年、ユーザニーズの多様化により、要求される製品種類の増加と生産個数の変動により、フレキシブル生産セルによる変種変量生産が主流になりつつある¹⁾。しかし、このシステムは柔軟な生産体制へ対応できる反面、高い生産性を維持できない欠点を持っている。そこで、これを改善するために切削速度を高速度化させる手法が用いられており、仕上げ面精度の向上や、難削材に対しての被削性向上などの利点が挙げられている²⁾。しかし、高速度切削は切削点の温度が高温となるため、耐熱性・耐摩耗性に優れた工具材種を用いる必要があり、近年では超硬合金を母材とした切削工具が広く普及している。

このような背景をうけて、切削工具を生産するCNC工具研削盤の発展は目覚ましく、近年では作業者の技能レベルを問わずに複雑な形状をした切削工具が容易に生産可能になりつつある³⁾。また、高速度鋼を母材とした切削工具を生産する際は、高価な熱処理設備を必要とするが、超硬合金を母材とした切削工具はそのような設備を要せず、上述の工具研削盤と超硬合金材料などが揃えば誰でも製造可能になりつつある^{4), 5)}。したがって、近年では小規模な工具メーカーが世界各地で台頭し、超硬合金製切削工具は激しい価格競争にさらされている。このような価格競争から脱するために、切削工具を開発する現場では安価な工具に対して圧倒的な性能差を示す工具の開発が求められている。しかし、優れた工具研削盤の登場により工具形状にて差別化を図るのが難しくなりつつあるため、近年では工具形状以外の視点から長寿命化や低抵抗化などの付加価値を付与する表面改質技術について研究・検討が行われ始めている^{6)~10)}。特に、古野ら^{11), 12)}は工具母材の表面粗さがコーティング膜の密着特性に及ぼす影響について検討し、表面粗さが小さくなるほど密着強度は増大することを明らかにした。また、井上ら¹³⁾はアルミニウム合金のドリル加工において超硬ドリルの溝面を鏡面に仕上げることで加工中のスラスト力が減少し、穴位置精度が向上することを明らかにしている。

Table 1-1 Properties of several polishing process.

	研磨原理	被加工物の 形状対応性	作業性	品位	環境面
バフ研磨法	研削	○	×	○, △	○
ブラシ研磨法	研削	○	△	△	△ (粉塵)
バレル研磨法	研削	△	○	△	△ (廃液処理)
電解研磨法	化学的 電氣的	○	○	△	×
磁気研磨法	研削 電氣的	△	○	△	△ (廃液処理)
ショットブラスト法	研削	△	○	×	△ (粉塵)
ウェットブラスト法	研削	△	○	×	×
電子ビーム加工法	電氣的	○	△	○	○
粘弾性流動研磨法	研削	○	△	○	○
ブラスト研磨法	研削	○	○	○	○

1.1.2 ブラスト研磨法の有効性

前述のとおり、切削工具の最終仕上げ加工品位は、切削性能に大きな影響を及ぼすことが明らかにされている。しかし、工具材種は高硬度材が適用されており、かつ切削工具のほとんどは複雑な曲面を有していることから、最終仕上げ工程における時間短縮は難しく、製品の原価低減化が困難となっている。したがって、このような現場では複雑な曲面の研磨加工を容易に、かつ短時間で行える加工技術が求められている。Table 1-1 に各種研磨方法の現状を示した。複雑な形状をした被加工物に対応できる研磨法として、バフ研磨法、ブラシ研磨法、電解研磨法、磁気研磨法、粘弾性流動研磨法、電子ビーム加工法、ブラスト研磨法が挙げられる。

バフ研磨法はバフの仕様や形状を変更することで様々な形状の被加工物へ対応することが可能であるが¹⁴⁾、旧来の方式であり、加工品位は作業者の技能に依存するため、作業効率の向上および低コスト化は難しい。

ブラシ研磨法は硬質砥粒を金属・非金属性の毛先に担持させた特殊ブラシにて研磨加工を行う手法であり、全自動化しやすいメリットがあるが、毛先の動きによっては目

的とした研磨領域以外に影響を及ぼすことがある¹⁵⁾。

磁気研磨法は電解鉄粉などの強磁性体と砥粒を構成要素とした研磨メディアを用いて、従来の機械的研磨の加工力に磁力を付与した研磨技術であり、超硬合金の鏡面研磨に適用した報告がされている^{16), 17)}。しかし、被加工物が磁性を帯びるため、切削工具においては脱磁処理する必要があるため低コスト化が難しい。

電解研磨法は、金属研磨物を陽極として電解液中に浸漬し、電気化学的な溶解により平滑な光沢面を得る手法であり、被加工物を与えるダメージが少ないことや、物理的研磨法では研磨加工が難しいチタン合金などの研磨加工に有効であることが報告されている¹⁸⁾。しかし、電解液に浸漬した箇所全てが研磨されるため、鋭利なエッジなどを残したい部分などに影響を及ぼすことが懸念されるほか、廃液処理が必要となるため環境への影響を防ぐための維持管理コストが必要となる。

電子ビーム加工法は電子ビーム照射装置を用いて、高エネルギー密度の電子ビームを被加工物表面に照射し、その表層が熔融して微細な表面の凹凸をならすことで平滑な表面を得る方法である。近年では、ビームの最大有効直径が約 60mmまで拡大し、比較的大きな面積を一度に加工できる装置も開発されていることから、小型の金型などの表面処理に活用されている¹⁹⁾。しかし、表層を熔融する加工技術であることから被加工物表面に熱的ダメージを残すことや、超硬合金に適応した場合は、バインダ成分であるコバルトの偏析が生じることが懸念される²⁰⁾。また、ビーム径より大きな切削工具を処理する際は真空装置内で工具を走査する装置が必要となることから装置のインシヤルコストが高価になる。

粘弾性流動研磨法は粘土のような半固体状の粘弾性体に砥粒を混練した研磨材を用い、これに圧力を加えて被加工物の周りを往復運動させることで研磨加工を行う手法である。研磨材には様々な粘弾性体や、これに混練する砥粒の種類があり、被加工物の形状や目的の表面精度に合わせて調整が可能である。また研磨材に加える圧力によっても表面性状を変化させることが可能である^{21), 22)}。しかし、油穴付の切削工具に適用した場合は、加工後に油穴内に研磨材が残り、これを除去する作業が発生するため人件費などのコストが高くなる。

上述のように様々な研磨技術があるが、切削工具の最終仕上げ工程に望まれている複雑な曲面の研磨加工を容易に、かつ短時間で行える加工技術としては、ブラスト研磨法が有効な手法があると考えられる。したがって、本研究では切削工具の最終仕上げ加工法に活用できるブラスト研磨法に着目した。

1.1.3 ブラスト研磨法の概要

ブラスト研磨法とは、ショットブラスト装置に類似した装置と粘弾性を有した核体から成る研磨材(以後研磨メディアと表記する)を用いた研磨処理の総称である²³⁾。Fig.1-1は装置の模式図であり、Fig.1-2は従来のブラスト加工法とブラスト研磨法における研磨材の挙動を比較した模式図である。粘弾性を有した研磨材は、装置のインペラーの遠心力と共に圧縮空気によって加速して被加工物へ衝突する。その際、粘弾性体である研磨メディアは被加工物との衝突後に弾性変形を生じ、衝突エネルギーを緩和・吸収するとともに、加工面から反発作用を抑制して被加工物表面を滑走することで研磨処理を施すとされている。この効果によって、従来のブラスト加工で得られる梨地状の表面とは明らかに異なる鏡面が得られるだけでなく、加工面に倣って加工する特性から複雑な表面形状への磨き加工も容易に実現可能としている²⁴⁾。また、この研磨メディアが粘弾性を有している付随効果として、研磨時に発生した研磨粉が研磨材に付着するため、粉塵等の飛散が比較的少なく、作業環境を悪化させないクリーンな加工が実現可能となっている。さらに、市販されている研磨材では、核体に食品素材を用いているものもあり、使用後の研磨材は水溶液に溶解させて研磨砥粒と研磨粉を分離回収することができるため、リサイクル・リユースすることが可能であることから、環境負

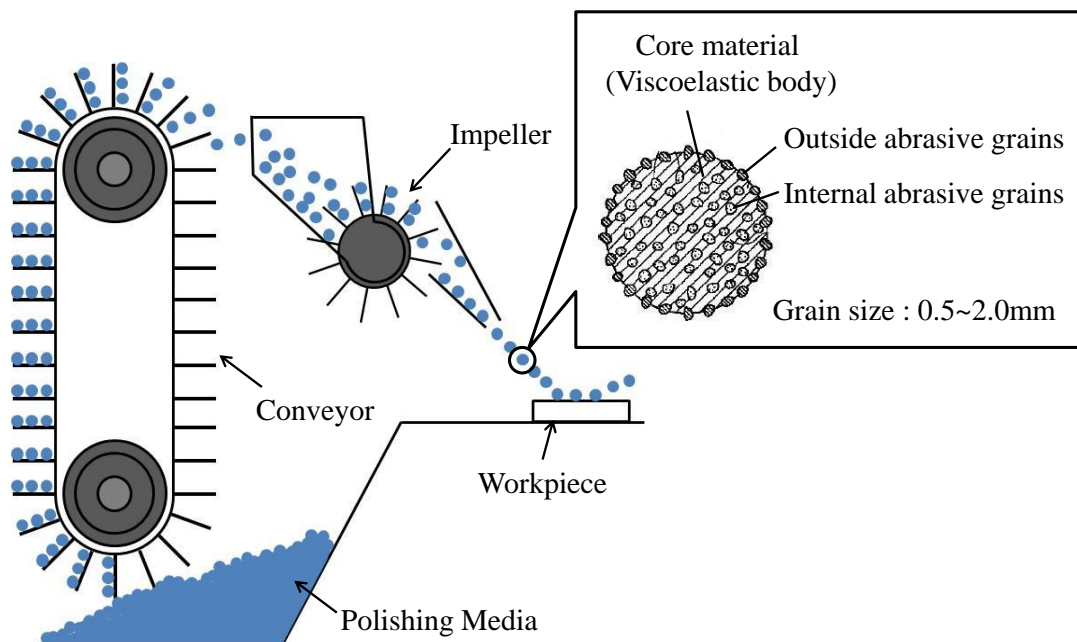


Fig.1-1 Schematic of blast polishing process.

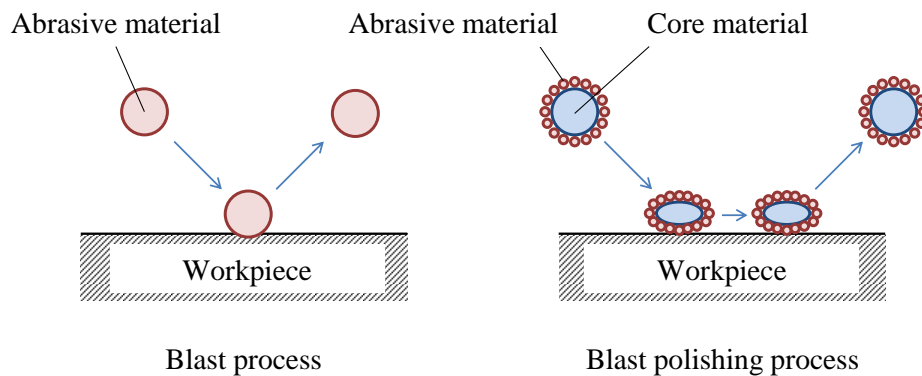


Fig.1-2 Comparison of blast process and blast polishing process.

荷を大幅に低減できるなどの利点を持っている。このような利点を持つブラスト研磨法を切削工具へ適応した場合は、微細なエッジ処理やコーティング表層に生成されるドロップレットの除去加工に有効であることが報告されている²⁴⁾⁻²⁵⁾。また、K.Rameshら²⁶⁾は、ブラスト研磨法を適用した PCD 工具をアルミニウム合金のミリング加工に使用し、未処理品に比べて工具寿命が約 1.4 倍になったことを報告している。

このように優れた特徴をもつブラスト研磨法であるが問題点も抱えている。Table1-2 にブラスト研磨法に関与する因子を示す。本研磨法を取り巻く因子は、研磨メディアの投射条件や、研磨材および被加工物の機械的特性および熱的特性も含むため、非常に多くの因子が存在する。しかし、本研磨法では、これら因子と加工面の関係性を系統立てて述べられた知見が少なく^{27), 28)}、条件の最適化や高能率化のための指針が明らかにされていない。したがって、目的の表面状態を作り出す条件選定時に多くの時間を必要とする点が問題視されている。

Table1-2 Several factors which participate in the blast polishing process.

投射条件	被加工物	研磨メディア	
投射速度	材質	硬質粒子	材質
投射量	硬さ		粒径
投射角	材料組成		重量
投射距離	比熱		比熱
研磨時間	熱伝導率		熱伝導率
	研磨前の表面粗さ		
		核体 (粘弾性体)	材質
			粒径
			粘弾性(水分含水率)
			重量(水分含水率)
			冷却性能(水分含水率)
			比熱
			熱伝導率

1.2 本研究の目的

本研究では超硬合金の研磨加工にブラスト研磨加工を用い、研磨加工に關与する因子と得られる加工面性状の關係を系統把握する。そして、それら結果より本研磨法のプロセス制御指針を確立するとともに、本研磨法による超硬合金の研磨機構を明らかにする。

特に本研究では、本研磨法に従事する実業者が操作できる因子に焦点を絞り、これら因子と得られる加工面の關係を明らかにすることで、本研磨法の利便性向上の早期実現を目指す。また、被加工物においては切削工具を研磨する基礎的知見とするため、研磨前の表面粗さや材料組成は超硬ドリルと同等になるようにした。したがって本研究では、研磨メディアの投射条件として、投射速度、研磨時間、投射角、投射量を操作因子とし、さらに研磨メディアにおいてはこれの含水率を操作因子として、これらが加工面に及ぼす影響を調べる。

1.3 本論文の構成

第1章「序論」では、超硬合金製切削工具が置かれている現状を例に挙げて表面

改質技術の必要性について述べるとともに、各種研磨法と比較してブラスト研磨法の有用性と特徴を概説し、本研究の構成を明らかにする。

第2章「実験方法および実験装置」では、本研究にて用いた供試材、研磨材および配合方法、実験装置や加工面の評価装置について述べる。

第3章「投射条件の定量的制御法の確立と加工面観察領域の特定」では、ブラスト研磨装置の設定値を変化させて投射される研磨メディアの投射量、および投射速度の測定を行い、装置の設定値と両因子の関係を明らかにする。また、ブラスト研磨にて得られる研磨領域から最も表面粗さ低くなる箇所の特定制法を明らかにする。

第4章「投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響」では、研磨メディアの投射速度を変化させて加工面を観察し、投射速度が加工面性状に及ぼす影響について明らかにする。

第5章「投射角が加工面性状に及ぼす影響」では、研磨メディアの投射方向と供試材表面が成す角度を変化させた際の加工面を観察し、投射角度が加工面性状に及ぼす影響について明らかにする。

第6章「研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響」では、研磨メディアの含水率(換言すれば質量と剛性)変化が加工面粗さに及ぼす影響について明らかにする。

第7章「ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する考察」では、第4章、第6章で得られた結果に対する考察を通じて、本研磨法の研磨機構について検討するとともに、本研磨法のプロセス制御指針を示す。

第8章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、本研究の工学的意義、工業的意義について述べる。

第9章「ブラスト研磨法および研磨メディアにおける今後の展望」では本研究で得られた成果から今後の展望について述べる。

第 2 章 実験方法および実験装置

2.1 供試材

2.1.1 供試材

Table2-1 に本研究に用いた供試材の機械的特性と化学的組成を示す. 本研究では目的に応じて表中に示す超硬合金を使用した. なお表中の各値は材料メーカーの公開値であり, 本材質は市販されている超硬ドリルに適用されている材種である. Fig.2-1 に組織写真を示す. 白く角状に見えるものが WC 粒子であり, WC 粒子間を埋めている黒い部分が Co による結合相である.

Table 2-1 Mechanical properties and chemical composition of carbide material.

Grain size of WC [μm]	Hardness [HV]	Bending Strength [GPa]	Composition [wt%]	
			WC	Co
0.8	1640	3.8	Bal.	10.0

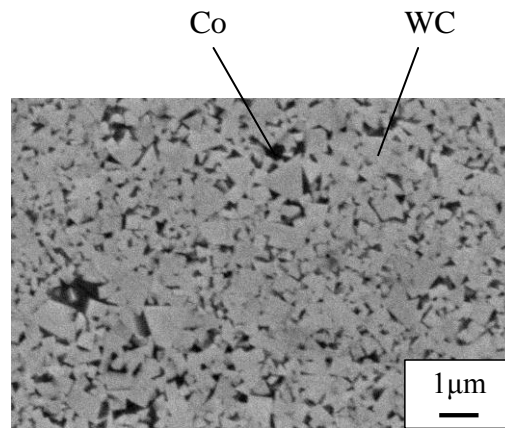
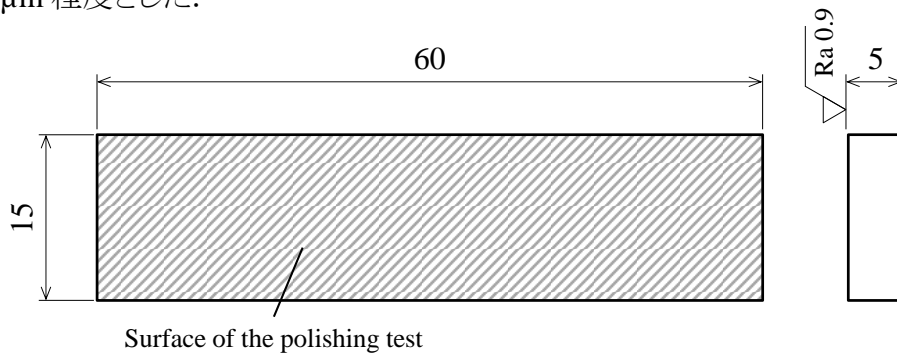


Fig.2-1 Micro structure of carbide material.

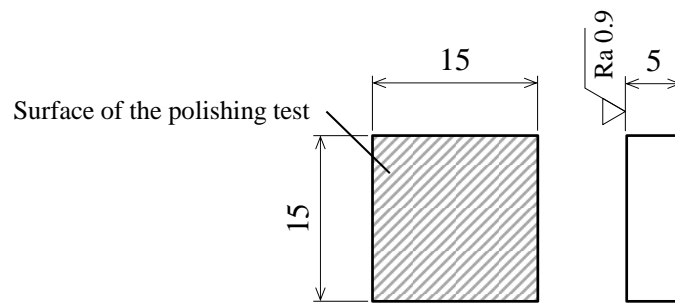
2.1.2 試験片およびブラスト研磨実験面の前処理方法

Fig.2-2 に本研究の研磨実験に用いた試験片形状を示す. ブラスト研磨処理が成された領域を巨視的観察・測定する実験には, $60\text{mm} \times 15\text{mm} \times 5\text{mm}$ の基材を用いた. また, それ以外の研磨実験には $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 5\text{mm}$ の基材を用いた.

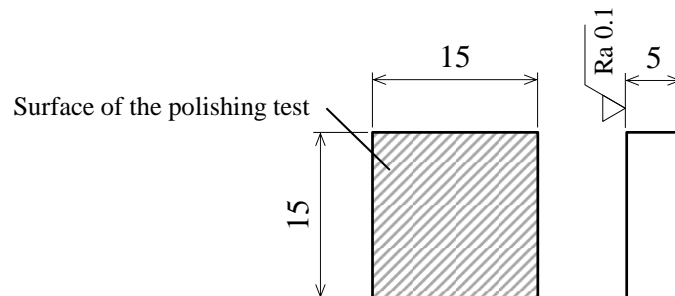
研磨実験に用いる面には新東工業(株)製ショットブラスト装置:MY-30 とスチール製研磨材:GH-10 を用いて、表面粗さが $Ra0.9\mu\text{m}$ 程度となるよう調整した。これは市販されている汎用超硬ドリルの溝部における表面粗さであり、実際の工具表面を研磨する基礎的知見とするために設定した。また、加工面の硬さを測定する供試材は、ブラスト研磨時に生じる加工硬化のみを評価するため、実験に用いる面をバフ研磨にて仕上げた。この時の表面粗さは後述するブラスト研磨実験で得られた表面粗さ収束値に近い $Ra0.1\mu\text{m}$ 程度とした。



(a) For using observation of all polishing surface



(b) For using the normal polishing test



(c) For using measurement of hardness on polished surface

Fig.2-2 Shape of carbide substrate.

2.2 研磨材

2.2.1 含水性研磨材マルチコーンおよびマルチパウダ

使用した研磨材は、(株)ヤマシタワークス社製:マルチコーンおよびマルチパウダ #3000 からなるマルチコーン研磨メディア(以後研磨メディアと表記する)である。Fig2-3に研磨メディアの模式図を示す。マルチコーンは粒径0.5~2.0mmからなるゼラチンを主体とした食品素材の粒子にダイヤモンドや SiC からなる砥粒を担持させたもので、水分を含有させると適度な重量を持つ粘弾性体の研磨担体となる。また、水分含水率の変化によって粘弾性度が変化する²⁴⁾。マルチパウダは粒径5 μ m程度のダイヤモンドや SiC からなる砥粒であり、マルチコーンの外周および内部に担持され、研磨メディアにおける切れ刃の役割を果たす。Fig.2-3 に研磨メディアの光学顕微鏡による観察結果と SEM による観察結果を示す。光学顕微鏡による観察結果より、水分を含水させることでマルチコーンが膨張しており、SEM 像からも核体の存在が確認できる。

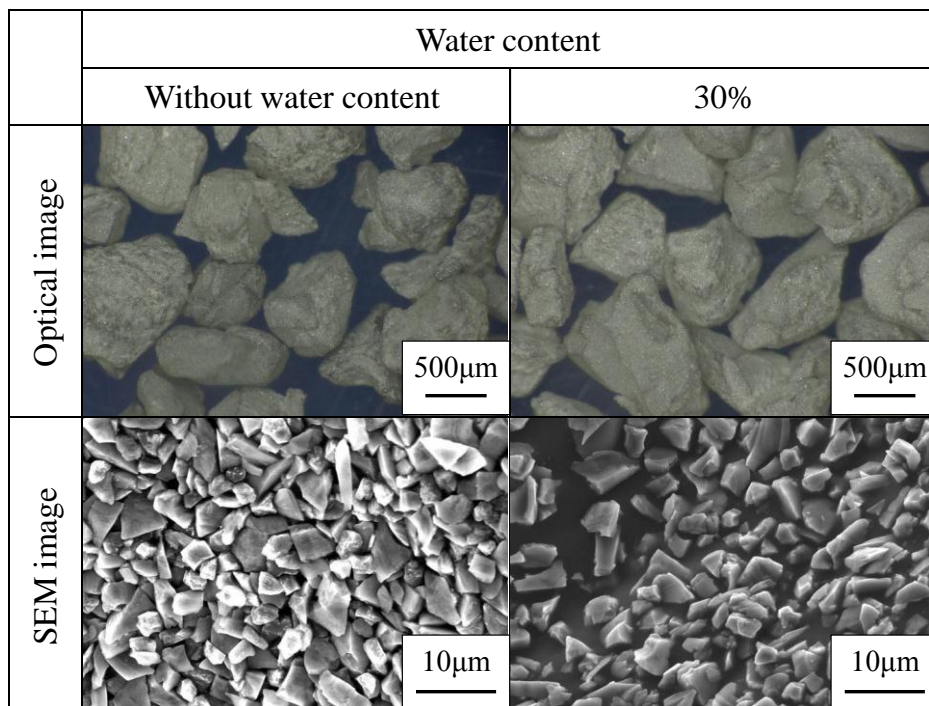


Fig.2-3 Observation of the surface on polishing media.

2.2.2 研磨メディアの配合装置および配合分量

本研究でも用いた研磨メディアの配合装置はオーエスジー(株)製であり, その外観を Fig.2-4 に示す. 本装置はドラム部と水分供給部から構成されている. ドラム部はマルチコーンとマルチパウダの攪拌を担っており, 48.3min^{-1} で回転する. また水分供給部は 2.5MPa の圧縮空気とともに $4\text{cc}/\text{min}$ の速度で水分を供給する. 本研究ではマルチコーン, マルチパウダ, 水分量を Table2-2 に示す配合にて作成し, 実験目的に応じて適当な含水率の研磨メディアを使用した. なお, 水分含水率のメーカー推奨値はマルチコーンの重量に対して 30%である. そして, 本研究では含水率を変えた研磨メディアの諸特性を以下の方法によって調べた.

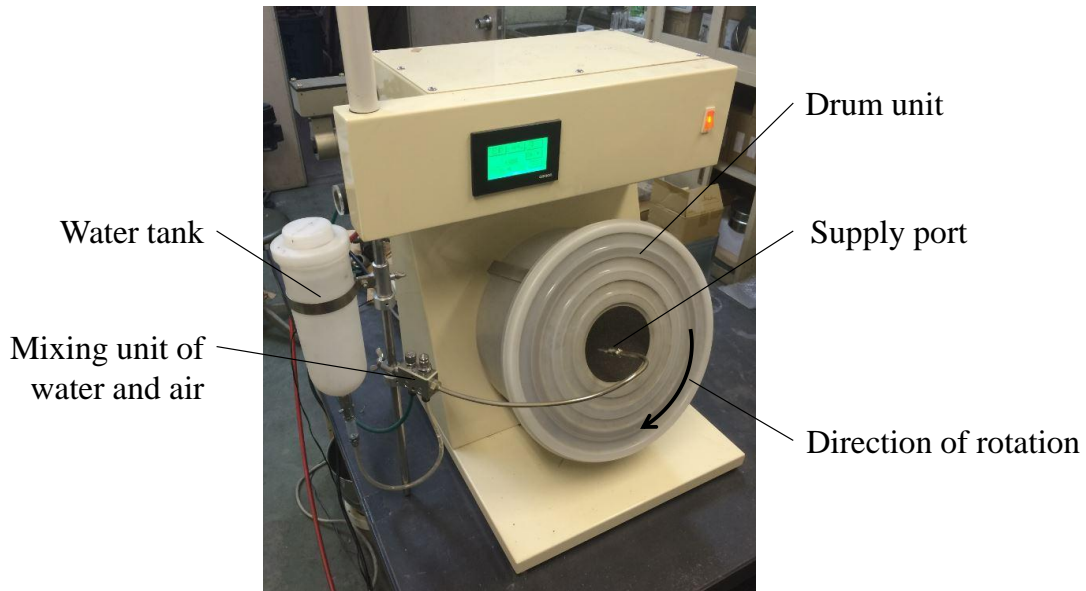


Fig.2-4 Blending machine of the polishing media.

Table 2-2 Mixing ratio of the polishing media.

Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content (%)	10
		30
50		

2.2.2.1 研磨メディアの質量測定方法

研磨メディア一粒あたりの質量は、粒径 0.5mm～2.0mm の研磨メディアの中から任意で選び出した 30 粒の質量を電子天秤((株)エー・アンド・デイ製, GR200)で測定し、1 粒あたりの質量を算出し、これを 5 回繰り返したときの平均値として求めた。

2.2.2.2 研磨メディアの弾性率測定方法

2.2.2 で述べたように本研究で使用する研磨メディアは水分含水率の変化によって粘性が変化する。そこで、含水率が研磨メディアの剛性に及ぼす影響を調べるために、研磨メディアの弾性率を測定した。測定実験はオートグラフ(島津製作所(株)製, EZ-SX 100N)を用いて圧縮試験を行った。測定時は粒径 0.5～2.0mm の研磨メディアから任意で 1 粒を選び、Fig2.5 に示すように装置のステージ上に研磨メディアを設置して研磨メディア上部から直径 $\phi 10$ の円筒状圧子によって圧縮荷重を加えた。この時の圧縮試験速度は 0.5mm/min である。また、圧縮試験は試験力が 20N に至った際に終了させた。そして、全て含水率条件の研磨メディアにおいて圧縮荷重にともなう研磨メディアの変形が確認できた試験開始から変形量が 0.3mm に至るまでの研磨メディアの変形量と試験力の結果を抽出し、近似直線を作成してその傾きを研磨メディアの弾性率として評価した。なお、上述実験は 10 回行い、弾性率はその平均値である。

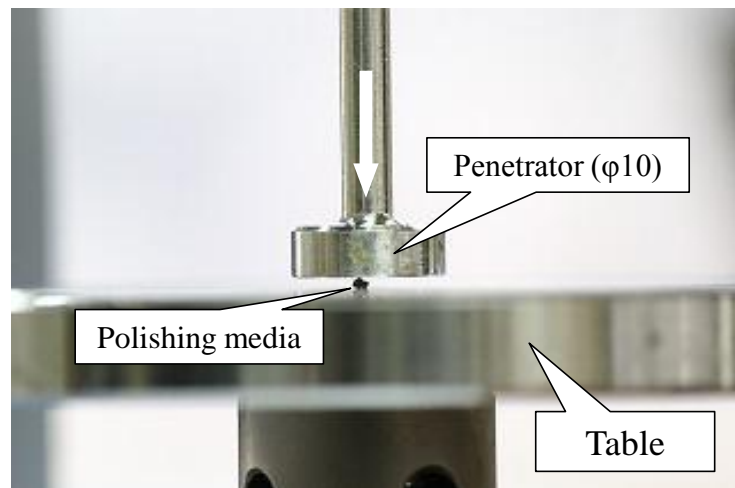


Fig.2-5 Photo of the compression test.

2.3 ブラスト研磨実験装置

2.3.1 ブラスト研磨装置

本研究で用いたブラスト研磨装置は東洋研磨材工業(株)製:SMAP-II型である. 装置の外観と内部機構の模式図を Fig.2-6 に示す. 研磨メディアは装置下部に格納されており, ベルトコンベアで装置上部まで搬送され, インペラーの遠心力を利用して噴射される仕組みとなっている^{29), 30)}. 本装置には, 投射量調整ペダルが付属しており, ペダル値(1~5の5段階)の変更により, ベルトコンベアの搬送速度を操作でき, 単位時間当たりの研磨メディア投射量を変更することができる. さらに, インペラーを回転させるモータにはインバータが付属しており, インバータ値(設定周波数:0~60Hz)の変更により, インペラーの回転速度を操作でき, 研磨メディアの投射速度が変更できる.

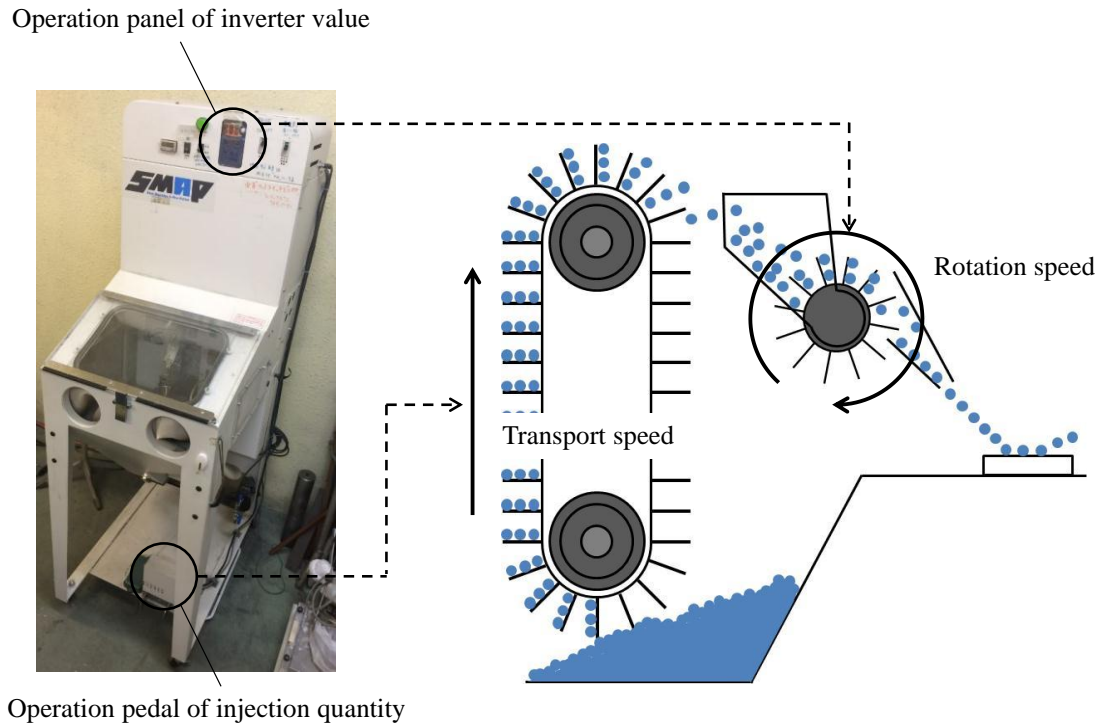


Fig.2-6 Detail of operating device on the blast polishing machine.

2.3.2 供試材固定ステージ

装置内部には供試材を固定でき、投射角および投射距離を変更できるステージを設けた。ステージの模式図および写真を Fig.2-7 に示す。ステージは前後(図中(a)), 左右(図中(b)), そして上下(図中(c))に動き、さらに供試材を固定するステージおよびそれを支える支柱は回転する(図中(d), (e))ため、加工面に対して 3 次元的に研磨メディアを投射することができるよう設計した。そして噴射ノズルと供試材の位置関係を Fig. 2-8 に示す。供試材とノズル間の距離は、図中(a)と(c)を調整することで変更することができ、さらに図中(e)を調整することで投射角が変更できる。また、本装置のノズルはノズルの幅を調整することが可能であり、ノズル幅は用意した供試材の幅を超えることなく、かつ研磨された箇所が容易に判断できるように全ての実験において 5mm と設定した。また、被加工物と投射口との距離(以後投射距離と表記する)は加工能率に及ぼす影響度が明らかであったため³¹⁾、本研究ではいずれの実験においても加工面と投射口の距離を 20mm とした。この値は金型や切削工具の研磨加工において、できるかぎり被加工物を研磨メディアの投射口に近づけ、かつ被加工物が投射口周りの部品と干渉しない値として設定した。

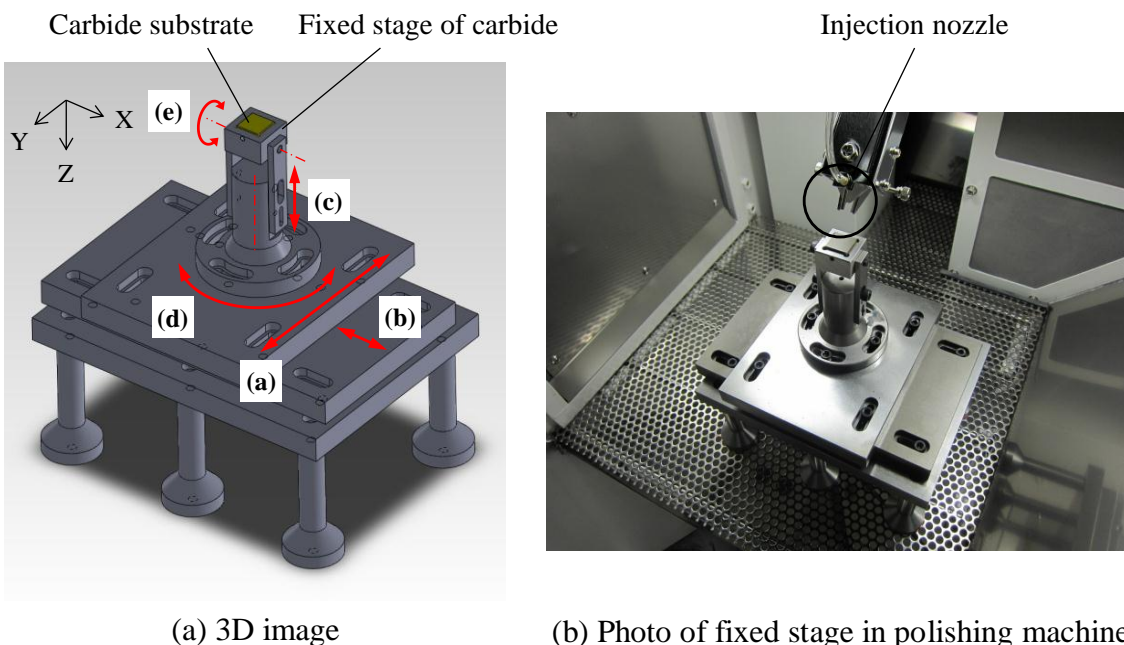


Fig.2-7 3D-image and photo of fixed stage of carbide substrate.

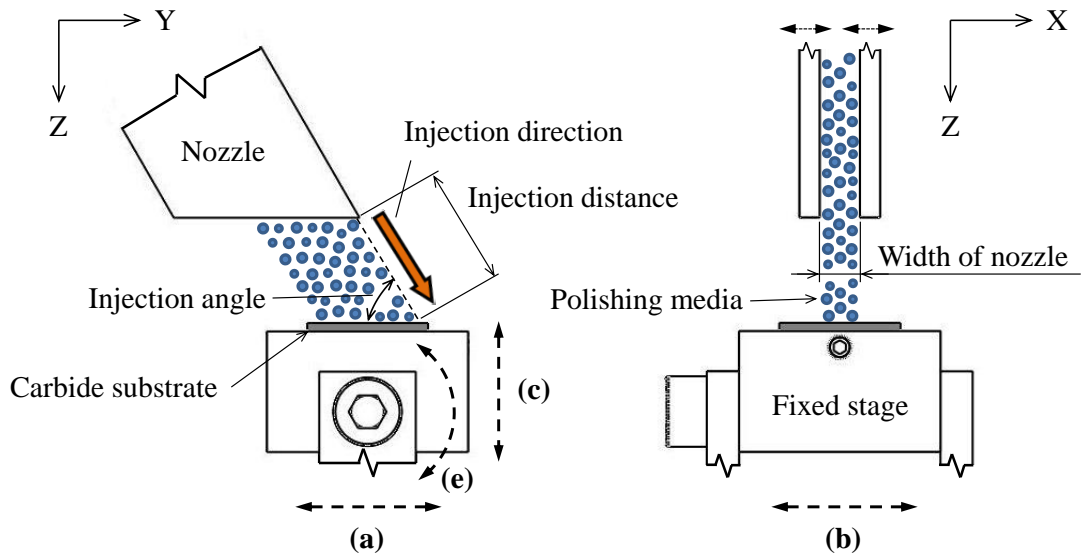


Fig.2-8 Positional relationship of nozzle and carbide substrate.

2.4 投射された研磨材の投射量測定方法

本装置における単位時間あたりの研磨材投射量は、ノズルより投射される研磨メディアを 5s 間回収して質量を測定し、これを 10 回繰り返した際の平均値である。

2.5 投射された研磨材の観察装置および測定方法

2.5.1 高速度ビデオカメラ

研磨メディアが供試材へ衝突する際の速度測定や、衝突時の変形挙動を観察する実験では高速度ビデオカメラ((株)フォトロン製, FASTCAM SA1.1)を用いた. 観察時の写真と模式図を Fig.2-9 に示す. 観察時は, 研磨メディアの投射方向に対して直行する方向に高速度ビデオカメラを配置し, 投射状況を撮影した. なお, 衝突時の変形挙動を観察する実験では Fig2-9 で示すファイバー型のライトでは光量が不足したため, 照明機材として 2 台のメタルハライドランプを用いた. 撮影条件は, 撮影の目的に応じて, Table2-3 に示す条件にて撮影を行った.

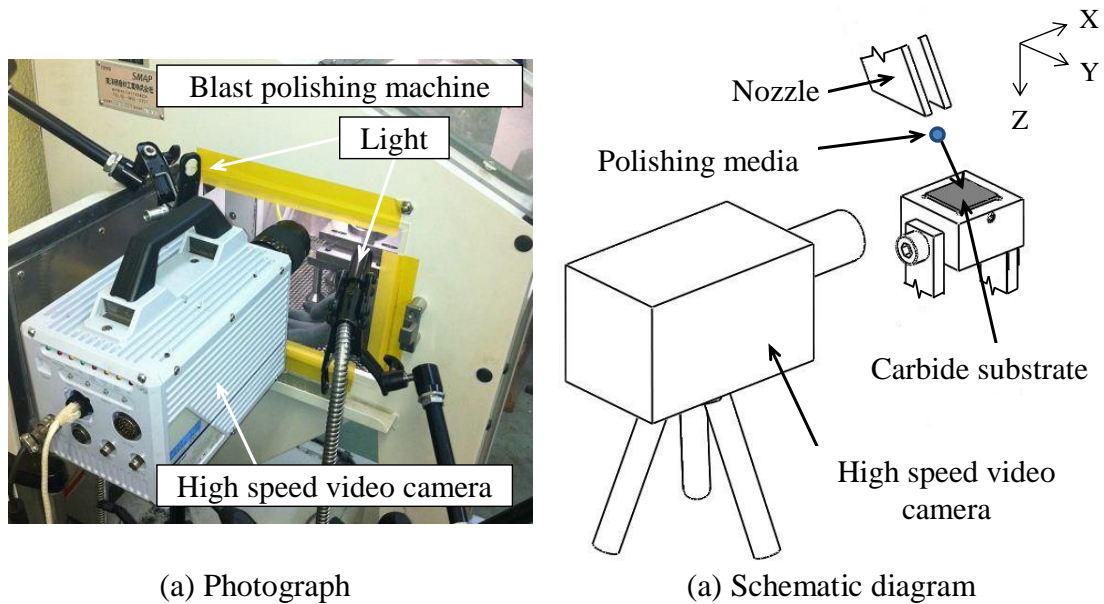


Fig.2-9 The situation of an experiment using a high speed video camera.

Table 2-3 Shooting condition of high speed video camera.

Measurement of injection speed	Frame rate (frames/s)	50,000
	Frame size (pixel)	512 × 208
Deformation observation	Frame rate (frames/s)	250,000
	Frame size (pixel)	128 × 80

2.5.2 二次元流体解析ソフト

高速度ビデオカメラにて撮影した映像から、研磨メディアが供試材へ衝突する際の速度、衝突後の速度、そして研磨メディアが機材と接触していた時間などを調べる際は、二次元流体解析ソフト(カトウ光研(株)製, **Dipp-flow**)における二値化相関法(PTV: Particle Tracking Velocimetry)を用いた。本方法は、連続したビデオ画像内の各粒子を自動的に同定し、各粒子の速度を計算する粒子追跡速度測定法である³²⁾、³³⁾。解析条件は Table2-4 に示すとおりであり、高速度カメラによる撮影条件、およびフレームサイズに応じて条件を選定して解析を行った。なお、本ソフトウェアによる研磨メディアの投射速度測定方法および衝撃力の測定方法の詳細は次項で述べる。

Table 2-4 Analysis condition of PTV software.

Measurement of injection speed	Analysis image number (frames)	400
	Interval of analysis image (μ s)	20
	Scanning area (mm)	17 \times 6
Deformation observation	Analysis image number (frames)	400
	Interval of analysis image (μ s)	4
	Scanning area (mm)	3.5 \times 2

2.5.2.1 投射速度の測定方法

本実験装置から投射された研磨メディアの投射速度の測定時は Fig.2-10 に示す領域に飛来し、かつ焦点の一致する研磨メディアを任意に 10 個選択し、これらの速度の平均値を研磨メディアの投射速度とした。速度解析領域は、供試材表面の全域に飛来する研磨メディアの速度を調査するとともに、供試材表面に衝突した後の跳ね返る研磨メディアを除外するために図に示す領域として設定した。

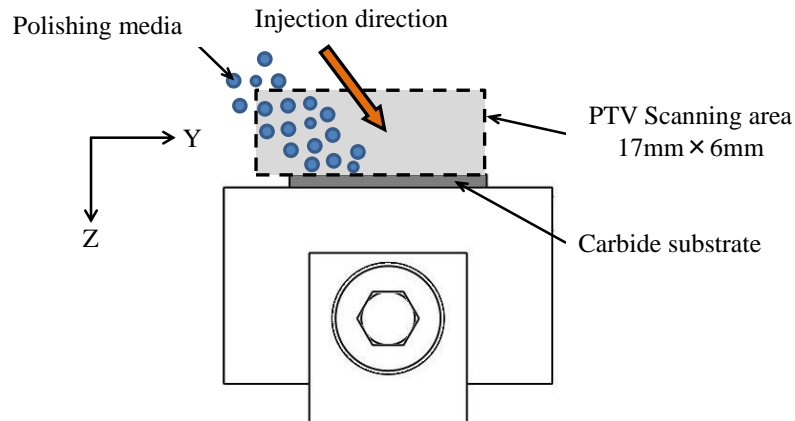


Fig.2-10 Schematic of scanning area on PTV software.

2.5.2.2 研磨メディアが加工面に加える衝撃力測定方法

研磨メディアが加工面に加える衝撃力は、2.5.1の方法にて研磨メディアが加工面に衝突した際の変形挙動を観察した動画から、二次元流体解析ソフトを用いて衝突後の速度 v' を解析し、(2-1)式で示す力積と運動量の関係式から研磨メディアが加工面に加えた衝撃力 F を算出した。

$$F = \frac{mv' - mv}{\Delta t} \quad (2-1)$$

衝突後の速度 v' は、Fig.2-11に示す領域に飛来し、かつ焦点の一致した10個の研磨メディアの速度をもとめ、これらの速度を平均化した値である。なお、衝突前の速度 v は2.5.2.1の方法で調べた速度であり、力が作用した時間 Δt は、研磨メディアが加工面に触れてから、完全に離れるまでの時間である。また、研磨メディアの質量 m は2.2.2.1の方法による測定値を用いた。

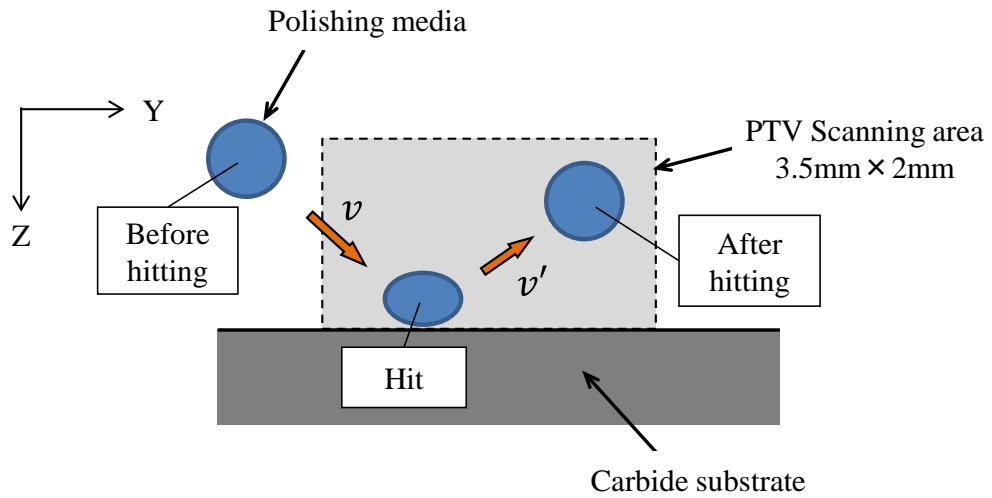


Fig.2-11 Schematic of scanning area on PTV software.

2.5.2.3 圧力感知フィルムを用いた圧力分布測定方法

Fig2-12 に実験時の模式図を示す. 使用した圧力感知フィルム(富士フィルム(株)製, プレスケール MS 型)は 10~50MPa までの圧力を感知でき, 10MPa 以上の圧力が加わると赤く発色し, 発色の濃淡で圧力の大きさを定性評価できる. 実験時は圧力感知フィルムを保護するため, 厚さ 0.5mm の保護フィルムの下に圧力感知フィルムを設置した. 実験時は研磨メディアを 60s 間投射した.

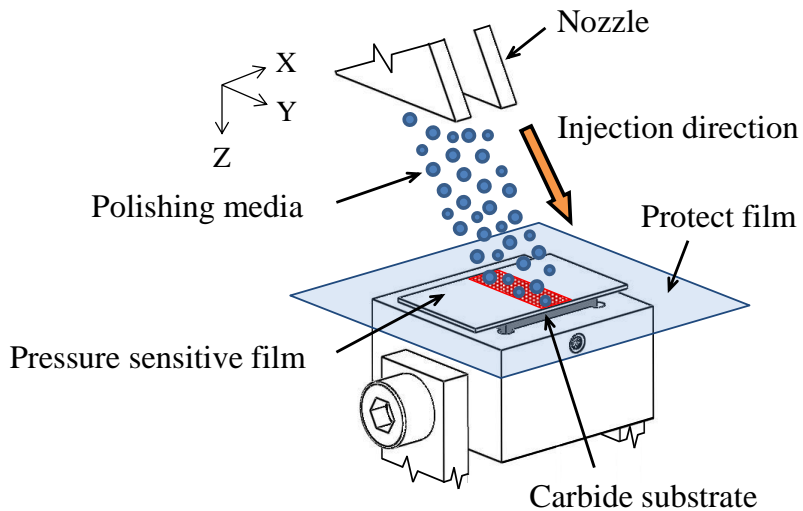


Fig.2-12 Schematic of experimental with pressure sensitive film.

2.6 加工面の評価装置および評価方法

2.6.1 三次元表面形状測定装置

ブラスト研磨法の研磨機構を解明するにあたり、加工面全域の中において最も研磨される領域を特定する必要がある。そこで、本研究では加工面全体の形状を調べるために全焦点三次元表面形状測定器 (alicona 社製, Infinite Focus) を用いた。本装置の外観を Fig.2-13 に示す。本装置は光学系の Z 軸を操作しながら、イメージセンサで連続して画像を取り込み、ピクセル毎の焦点が合った像を合成して 3 次元像を作成する非接触型の形状測定器である。また、取込画像の連結機能とともに、試料ステージに X, Y 方向の制御軸を有しているため、広範囲の表面形状を全自動で測定することが可能である。本研究では Fig.2-2(a) で示した供試材の研磨面全域の形状測定時に本装置を用いた。形状測定時の詳細は次項に示す。

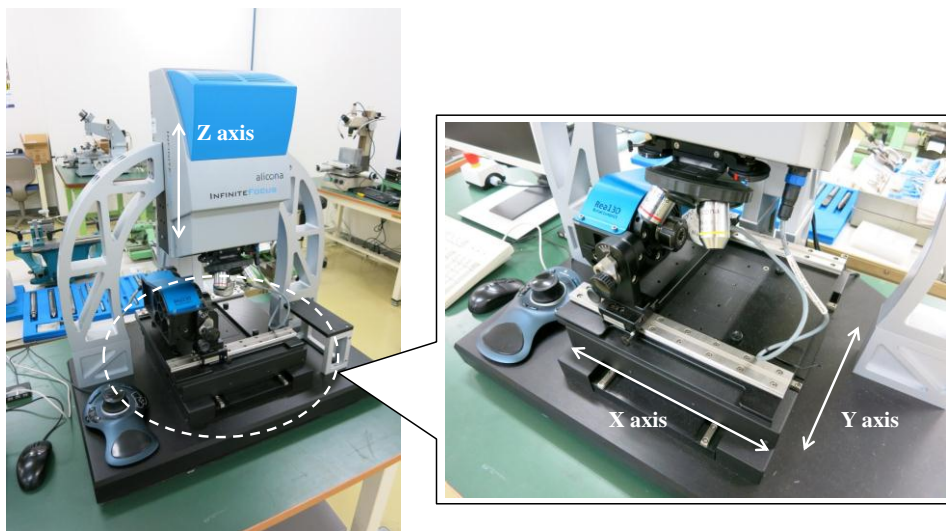


Fig.2-13 Appearance of 3D surface shape measurement device.

2.6.1.1 加工面全域の形状測定方法

研磨面全域の形状測定時は縦 2.2mm × 横 2.9mm の領域を観察できる 5 倍のレンズを用い、供試材を固定したテーブルを X 軸, Y 軸方向に操作して加工面全域の表面情報を採取した。そして付属のソフトウェアで採取した表面情報を連結して表面形状を測定した。

2.6.2 レーザ顕微鏡

加工面の観察、形状測定および表面粗さの測定には走査型共焦点レーザ顕微鏡(オリンパス(株)製, LEXT OLS3100)を用いた. 本研究ではブラスト研磨法の研磨機構を解明するため, 加工面に存在する凹凸の変化を細かく観察する必要があり, 接触式と比べて凹部の谷底部まで詳細に観察が可能なレーザ顕微鏡を用いた. 加工面の観察, 形状測定および表面粗さの測定の詳細は次項に示す.

2.6.2.1 加工面の観察および表面粗さの測定方法

加工面の観察および表面粗さの測定には50倍のレンズを用い, $250\mu\text{m} \times 180\mu\text{m}$ の領域の3次元データを採取して行った. 表面粗さ測定値は3回測定した平均値である. なお, 第4章以降の表面粗さ測定箇所は研磨領域中の最深部である.

2.6.2.2 輪郭形状の定点観察方法

Fig.2-14 に加工面の輪郭形状を定点観察した位置を示す. 観察箇所は研磨領域中の最深部である. 輪郭形状の測定位置はレーザ顕微鏡による観察面中央部 **AB** であり, 測定方向は図中の矢印で示したように, 研磨メディアの投射方向に沿う方向である. なお, 輪郭形状測定時はレーザ顕微鏡の対物レンズを高さ方向に移動させながら加工面の表面情報を連続的に採取して三次元情報を得ているが, その際の対物レンズを移動させる高さ領域はいずれの観察条件においても同じ領域を用いた.

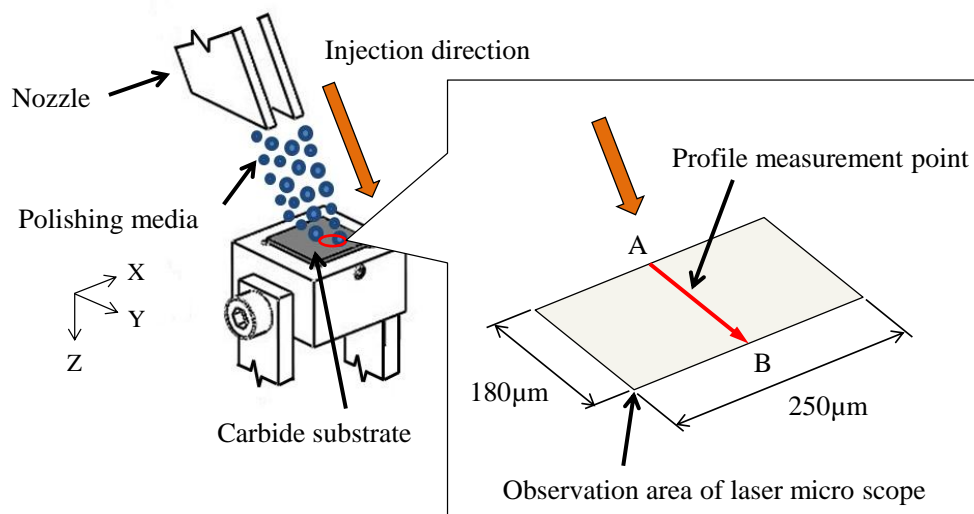


Fig.2-14 Profile measurement point by using laser micro scope.

2.6.3 走査型電子顕微鏡

レーザ顕微鏡では観察できない微視的観察には、走査型電子顕微鏡(日本電子(株)製, JSM-6390TY)を用いた. 本研究では主に供試材の組織観察, 研磨メディアの表面観察, および研磨面の微視的観察を行うために用いた.

2.6.4 マイクロビッカース硬さ試験機

供試材の硬さ測定, およびブラスト研磨を実施した加工面の硬度測定にはマイクロビッカース硬さ試験機(島津製作所(株)製, HMV-1)を用いた. 加工面の硬さ測定方法に関する詳細は次項に示す.

2.6.4.1 加工面の硬さ測定方法

加工面の硬さ測定実験には, Fig.2-2 の(c)で示した供試材を用いた. 硬さ測定時の条件は最も表面粗さが低くなる領域の大きさと測定器が保証するばらつきの範囲を考慮して, 圧縮荷重は 4.9N とし, 保持時間は 30s とした. 硬さ測定位置は研磨領域中の最深部であり, 本論文における硬さ測定値は最深部において 10 箇所を測定した際の平均値である. また, 硬さ測定は研磨実験にて得られる表面粗さの推移において, 全ての実験条件において研磨開始から急激な変化が終了した後に測定を開始した.

第3章

投射条件の定量的制御法の確立と加工面観察領域の特定

3.1 諸言

本研究ではブラスト研磨法に關与する因子と加工面性状の關係を明らかにすることを目的としていることから、著者らが因子を定量的に制御できる必要がある。本研究で扱う因子の中で、研磨メディアの投射量と投射速度は、本研究で用いるブラスト研磨装置において操作が可能であるが、両因子を定量的に操作することはできない。そこで、本装置における設定値と両因子の定量化を図るため、本装置における設定値と両因子の關係について調べる。

また、Fig.3-1 はインバータ値:60Hz, 投射量調整ペダル:1 にて 270s 間研磨した際の加工面を觀察した写真である。本実験装置ではインペラーから投射された研磨メディアが帯状に投射されるため、加工面には図に示すような領域にて研磨加工がなされる。また、研磨領域中には図中矢印で示す箇所において顕著な鏡面状態の形成が確認された。実際の現場では、この最も表面粗さが低くなる箇所を基準に、被加工物を走査して研磨加工が行われる。したがって、この箇所を評価領域とするために、本章では研磨領域の巨視的觀察を行い、この箇所の特定方法を検討する。

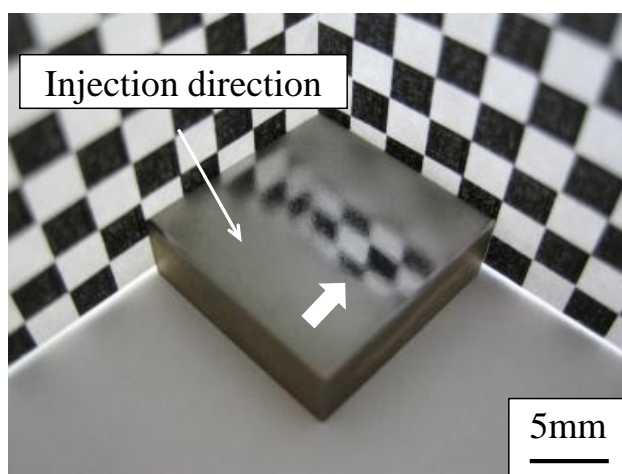


Fig.3-1 Observation result of the polishing surface on carbide substrate by inverter value 60Hz and polishing time 270s.

3.2 投射条件

3.2.1 投射量および投射速度測定時の投射条件

研磨メディアの投射量測定時における投射条件を Table3-1 に示す. 本実験では, 研磨メディアを装置下部より装置上部に配置されたインペラーまで搬送するコンベア の速度を制御する投射量調整ペダルの値を表中に示す値にして実験を行った. また, インペラーの回転数が投射量に及ぼす影響についても調べるため, 各投射量ペダル においてインバータ値を変更して実験を行った. なお, 本実験では含水率 30%の研 磨メディアを用いた.

研磨メディアの投射速度測定時における投射条件を Table3-2 に示す. 本実験では, インペラーを回転させるモータのインバータ値を表中に示す値にして研磨メディアの 投射速度を調べた. なお, 本実験では後述する理由により投射量調整ペダルは 1 に 固定して実験を行った. また, 本実験では投射量を調べた実験と同様に含水率 30% の研磨メディアを用いた.

Table 3-1 Condition for researching the relationship operating value and real value on injection quantity.

Injection condition	Pedal value for operating injection quantity	1, 3, 5
	Inverter value of Impeller (Hz)	10~60
Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content (%)	30

Table 3-2 Condition for researching the relationship operating value and real value on injection speed.

Injection condition	Inverter value of impeller (Hz)	10~60
	Pedal value for operating injection quantity	1
	Injection angle (deg.)	45
	Width of Nozzle (mm)	5
	Injection distance (mm)	20

3.2.2 加工面形状測定時の投射条件

研磨領域において最も表面粗さが低くなる箇所を特定するため、2.1.2 で示した供試材に対して研磨メディアを Table3-3 に示す投射条件にて投射した。なお、表中の投射速度および投射量にある数値は、本章の実験結果よりもとめた投射速度と投射量を示したものである。

Table 3-3 Injection condition for researching the all polished area.

Injection condition	Injection speed (m/s)	59.5
	Injection quantity (g/s)	36
	Injection angle (deg.)	45
	Width of Nozzle (mm)	5
	Injection distance (mm)	20
Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content rate (%)	30

3.3 結果と考察

3.3.1 研磨メディアの投射量

単位時間当たりの投射量を調べた結果を Fig.3-2 に示す。図より投射量ペダルの数値を上昇させていくと単位時間あたりの投射量は増加するが、投射量のばらつきが大きくなった。これは、ベルトコンベアの速度上昇により、コンベアが装置下部から研磨メディアを掻き取る量が不安定になったことが原因であると考えられる。また、各流量ペダル設定値においてインバータ値を変えても投射量がほとんど変化しないことから、研磨メディアの投射速度が投射量に影響を及ぼさないことが明らかとなった。研磨メディアの供給を増やすことが短時間に平滑な表面得る手法として有効であると考えられたが、研磨メディアの供給量のばらつきが大きくなるため、本研究では最も供給量が安定していた条件(投射量調整ペダル:1)の研磨メディア平均投射量であった 36g/s を研磨メディアの投射量設定値とした。

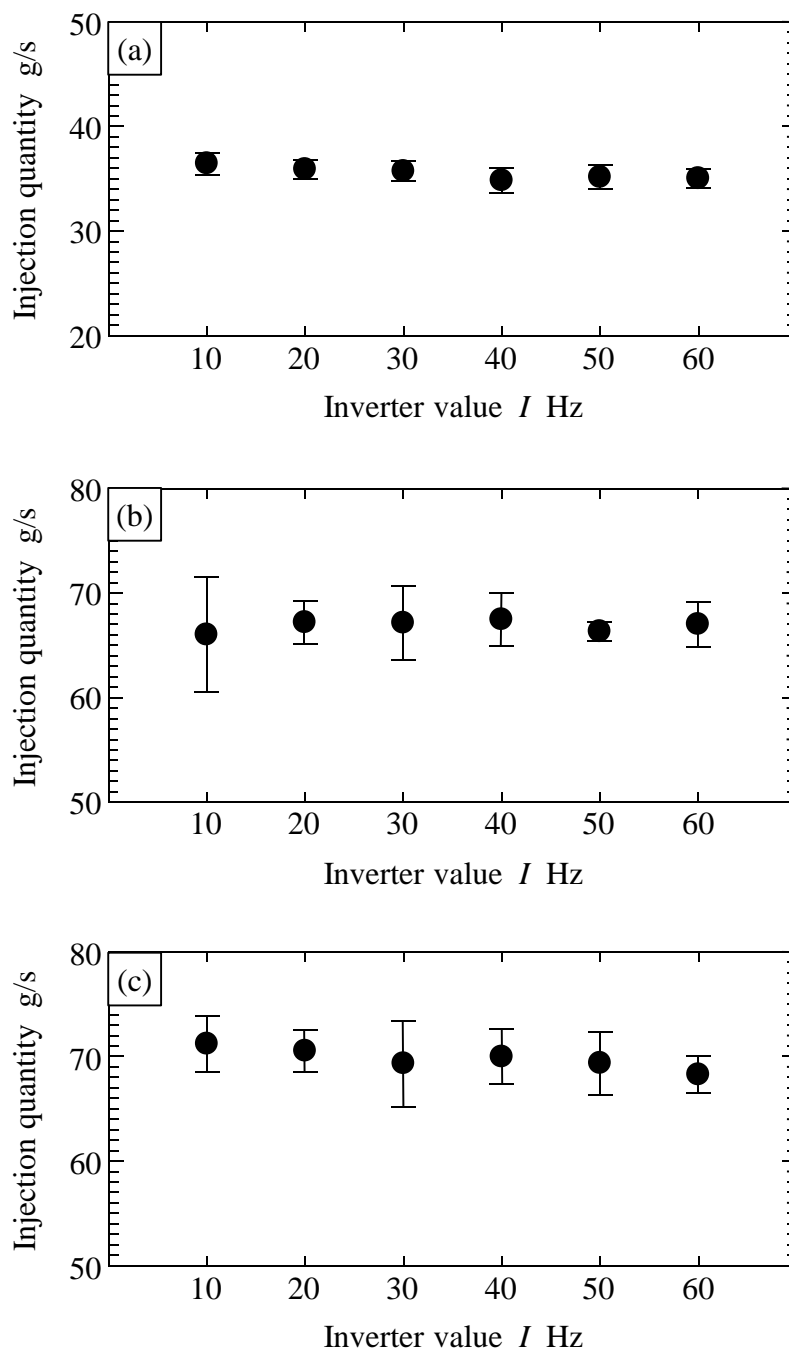


Fig.3-2 Relationship of inverter value and injection quantity in each pedal value for operating injection quantity;(a) Pedal value:1, (b)Pedal value:3, (c)Pedal value:5.

3.3.2 研磨メディアの投射速度

Fig3-3 はインペラーを回転させるモータのインバータ値: I と研磨メディアの投射速度: V (m/s)の関係を示したものである。

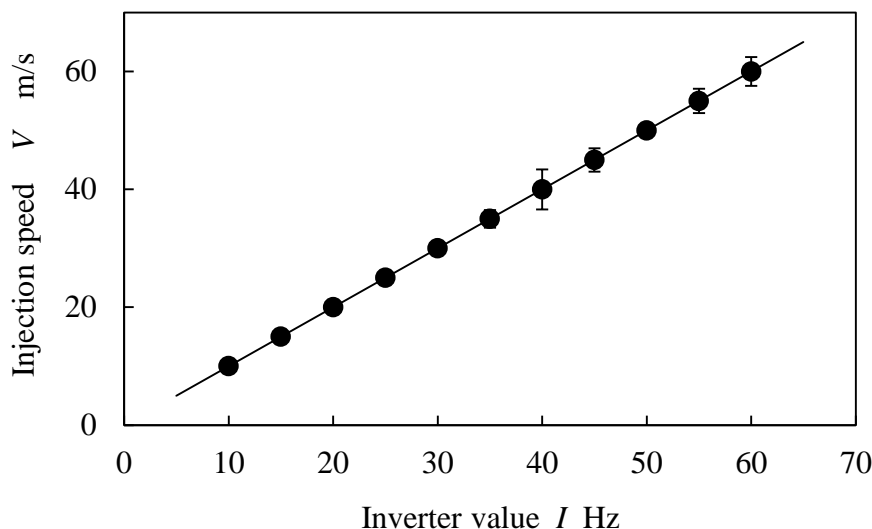


Fig.3-3 Relationship of inverter value and injection speed.

図より、インバータ値と研磨メディアの投射速度は直線関係となり、この関係は式 3-1 にて表すことができた。

$$V = 0.96I + 2.53 \quad (3-1)$$

3.3.3 加工面の形状および表面粗さの測定結果

Fig.3-4 に含水率 30%の研磨メディアを用いて、投射速度 59.5m/s にて 270s 間研磨した巨視的観察用供試材の観察結果を示す。図より、投射方向に沿う方向に 30mm、投射方向に直交する方向に 6mm の範囲で研磨された箇所が確認できた。この供試材の形状測定結果を Fig3-5 に示す。なお、図中測定値の細かな変動は表面粗さではなく、計測時のノイズである。同図(a)に形状測定および表面粗さの測定箇所を示す。図中 1, 2, 3 は研磨メディア投射方向に対して直交する方向の形状測定を行った箇所であり、4 は投射方向に対して水平方向の形状測定を行った箇所を示している。まず、投射方向に対して沿う方向の形状測定結果を同図(b)に示す。図より、投射方向に対して沿う方向の計測結果では最も深く研磨される箇所が存在したことから、最深部を 2

に、その両側の任意の位置を1, 3とした。同図(c)はこれらの位置における形状測定結果を示しており、いずれも測定位置 X の原点を中心に左右対称な研磨状態が認められる。同図(d)は、投射方向に対して沿う方向の表面粗さの分布を測定した結果であり、表面粗さ値は研磨される深さが深くなるほど小さくなる傾向を示した。すなわち、研磨深さと表面粗さには強い相関性があり、最深部の表面性状を調べることで本研磨法の研磨機構を明らかにできるものと考えられる。そこで本研究では、ブラスト研磨法によって得られる超硬合金の表面性状を評価するにあたり、この最深部における表面粗さ測定値を評価することにした。

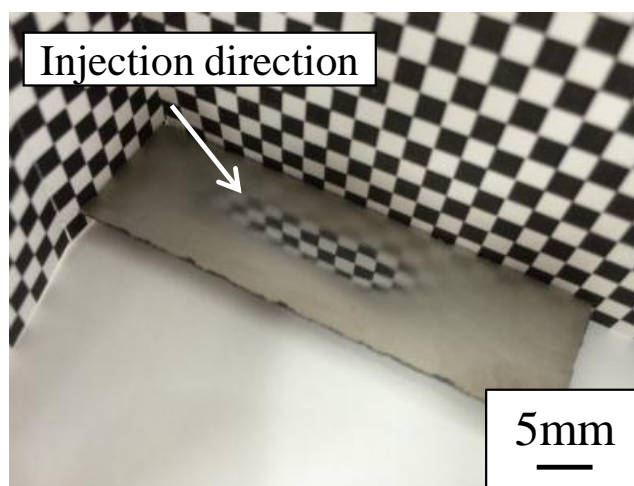


Fig.3-4 Observation result of the polishing surface on a big carbide substrate by injection speed 59.5m/s and polishing time 270s.

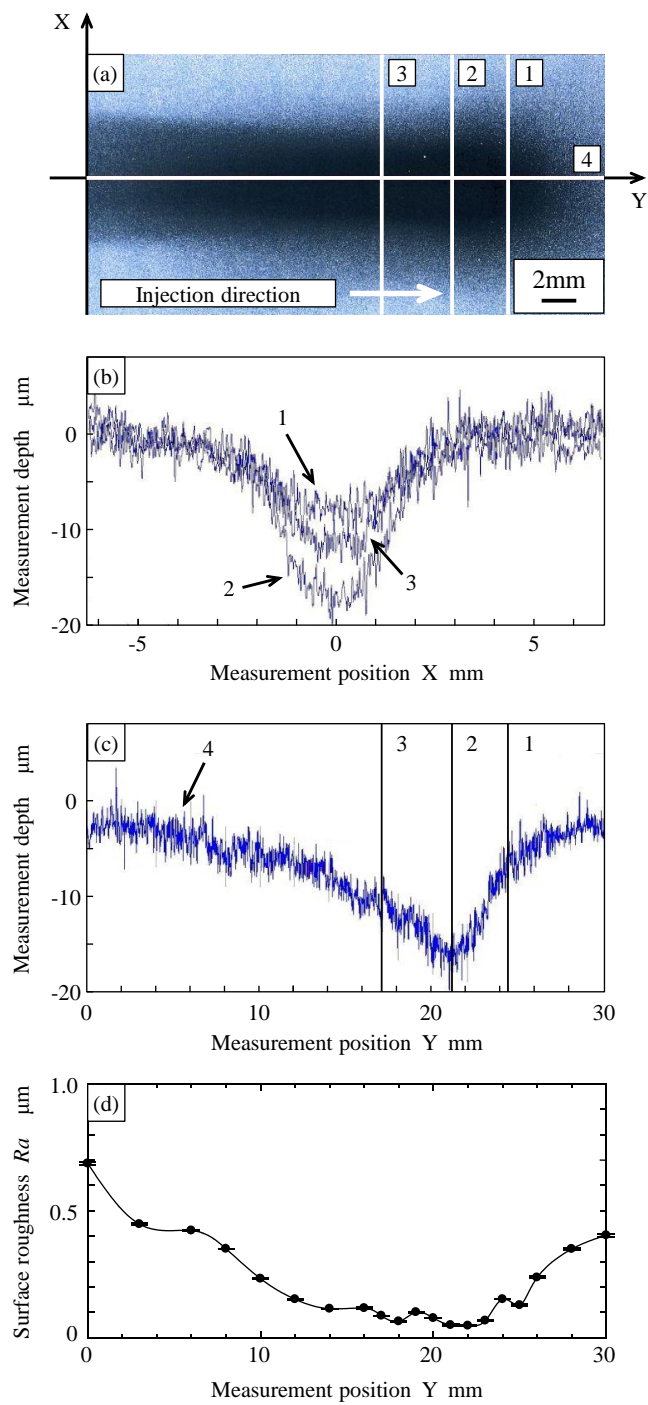


Fig.3-5 Measurement result of surface profile and surface roughness on polishing surface by injection speed 59.5m/s and polishing time 270s; (a) observation result of all polishing surface, (b) measurement result of the direct direction, (c) measurement result of horizontal direction, (d) surface roughness on horizontal direction.

3.4 小括

本章では、本研究にて使用するブラスト研磨装置の設定値と単位時間当たりの投射量、および投射速度の定量化を図るため、本装置における設定値と両因子の関係について調べた。以下に得られた結果を記す。

1. 投射量ペダルの数値を上昇させると単位時間あたりの投射量は増加するが、投射量のばらつきが大きくなった。
2. インペラーを回転させるモータのインバータ値： I と研磨メディアの投射速度： V の関係は直線関係となった。
3. 本研究に用いたブラスト研磨装置では研磨メディアが帯状に投射されるため、本実験条件によって加工面には投射方向に沿う方向に 30mm、投射方向に直交する方向に 6mm の範囲で研磨された箇所が確認できた。
4. 研磨領域における形状測定結果において、研磨メディアの投射方向に対して沿う方向の測定結果では最も深く研磨される箇所が存在した。
5. 研磨メディアの投射方向に対して直交する方向の測定結果では、測定位置 X の原点を中心に左右対称の研磨状態が認められた。
6. 研磨メディアの投射方向に対して沿う方向の表面粗さの分布を調べた結果、表面粗さ測定値は研磨される深さが深くなるほど小さくなる傾向を示した。

第4章

投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響

4.1 諸言

これまでにブラスト研磨法の投射条件と加工表面の関係について、北嶋ら^{23), 24), 25)}は、ある一定投射速度における研磨時間と表面粗さの関係を明らかにしているが、投射速度を変化させた場合の結果に関しては未だ明らかにされていない。そこで本章では、投射速度を変化させた場合の表面粗さと研磨時間の関係を調べるとともに、加工面の表面性状を観察して投射速度が加工面性状に及ぼす影響について検討する。

4.2 投射条件

本章における実験では Table4-1 に示す投射条件にて実験を行った。使用した研磨メディアは含水率 30%のものである。なお、研磨時間は SEM による加工面変化の観察時には、加工面の経時変化を観察しやすい研磨開始より 60s までとし、輪郭形状の変化を観察する実験では輪郭形状の推移を観察しやすい研磨開始から 270s までとした。

Table 4-1 Injection condition for researching the relationship of polishing time and surface roughness in several injection speeds.

Injection condition	Injection speed (m/s)	12.3~59.5
	Polishing time (s)	0~510
	Injection quantity (g/s)	36
	Injection angle (deg.)	45
	Width of Nozzle (mm)	5
	Injection distance (mm)	20
Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content (%)	30

4.3 結果と考察

4.3.1 投射速度および研磨時間が加工面粗さに及ぼす影響

Fig.4-1 に各投射速度条件における研磨時間と表面粗さの関係を示す。図より、本実験で設定した研磨時間内において、研磨メディアの投射速度が 12.3m/s 以下の条件では、表面粗さの測定値が収束せずに時間経過にともない単調減少する傾向を示した。一方、投射速度が 21.4m/s 以上の条件では、研磨開始時より表面粗さは急激な減少を示し、ある研磨時間まで研磨を継続すると、この急激な変化は収束する傾向が認められた。また、特筆すべき点として投射速度が高くなるほど、収束値に至るまでの時間は短くなり、表面粗さはより低い値で収束することが明らかとなった。従来のドライブラスト加工では、加工面の仕上げ加工を行う際は、研磨材の投射エネルギーを小さくし、加工面に影響を及ぼす負荷を極力低くすることが一般的であるが、本研磨法はこれと相反する手法にて平滑な表面を得た。したがって、本研磨法の研磨機構は従来工法とは異なることが示唆された。そして、研磨メディアの投射速度はブラスト研磨法の研磨機構に影響を及ぼす支配的因子の一つとして考えられ、研磨メディアの高速度投射はブラスト研磨加工の高能率化に対して有効な手法であるといえる。

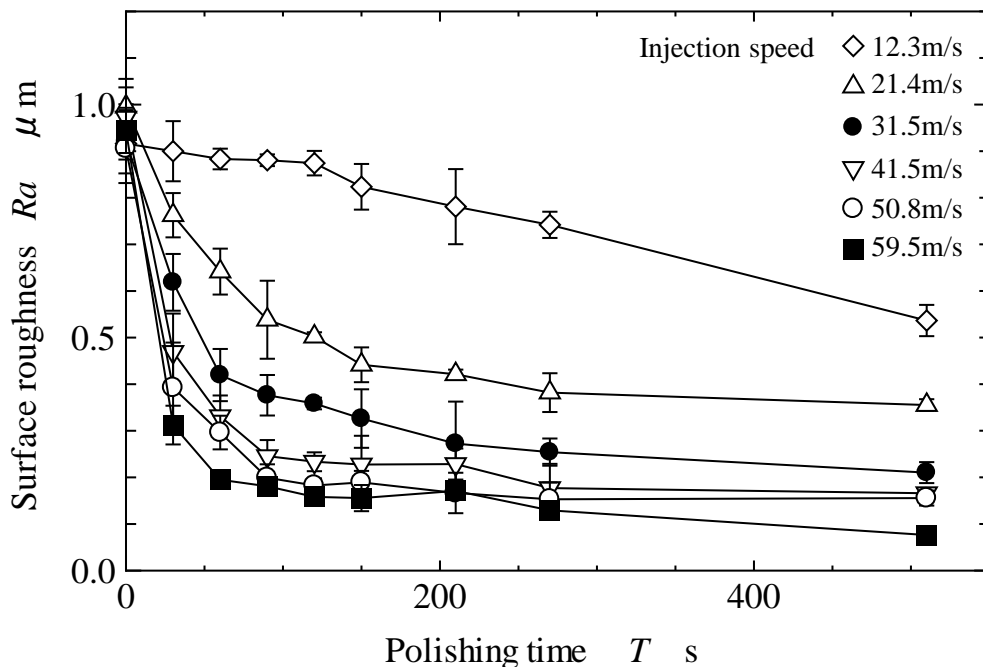


Fig.4-1 Relationship of polishing time and surface roughness at each average injection speed.

4.3.2 走査型顕微鏡による加工面の定点観察結果

本研磨法では研磨メディアの投射速度が高くなるほど、表面粗さはより短時間に、より低い値へ収束することを明らかにした。そこで研磨加工が行われる加工面の経時変化をSEMにより定点観察した。結果をFig.4-2に示す。投射速度31.5m/sの結果より、表面凸部の山頂近傍より研磨の進行が認められたが、表面凸部の消失速度は59.5m/sの方が高く、表面凸部の除去量は研磨メディアの運動エネルギーに依存していると言える。

このように本実験では加工面直上からの定点観察を行うことに成功したが、前章のFig.3-5に示した加工面の形状測定結果より、研磨開始から270s間において研磨領域の最深部は基材表層から15 μm 程度研磨除去されたことを述べた。すなわち、本研磨法では研磨前の加工面は素早く研磨除去されてしまい、定点観察を行うことは極めて困難であったと考えられた。しかし、本実験では定点観察に成功していることから、この原因を調べるために加工面の輪郭形状を測定し、その変化の推移を観察した。その結果については4.3.3にて述べる。

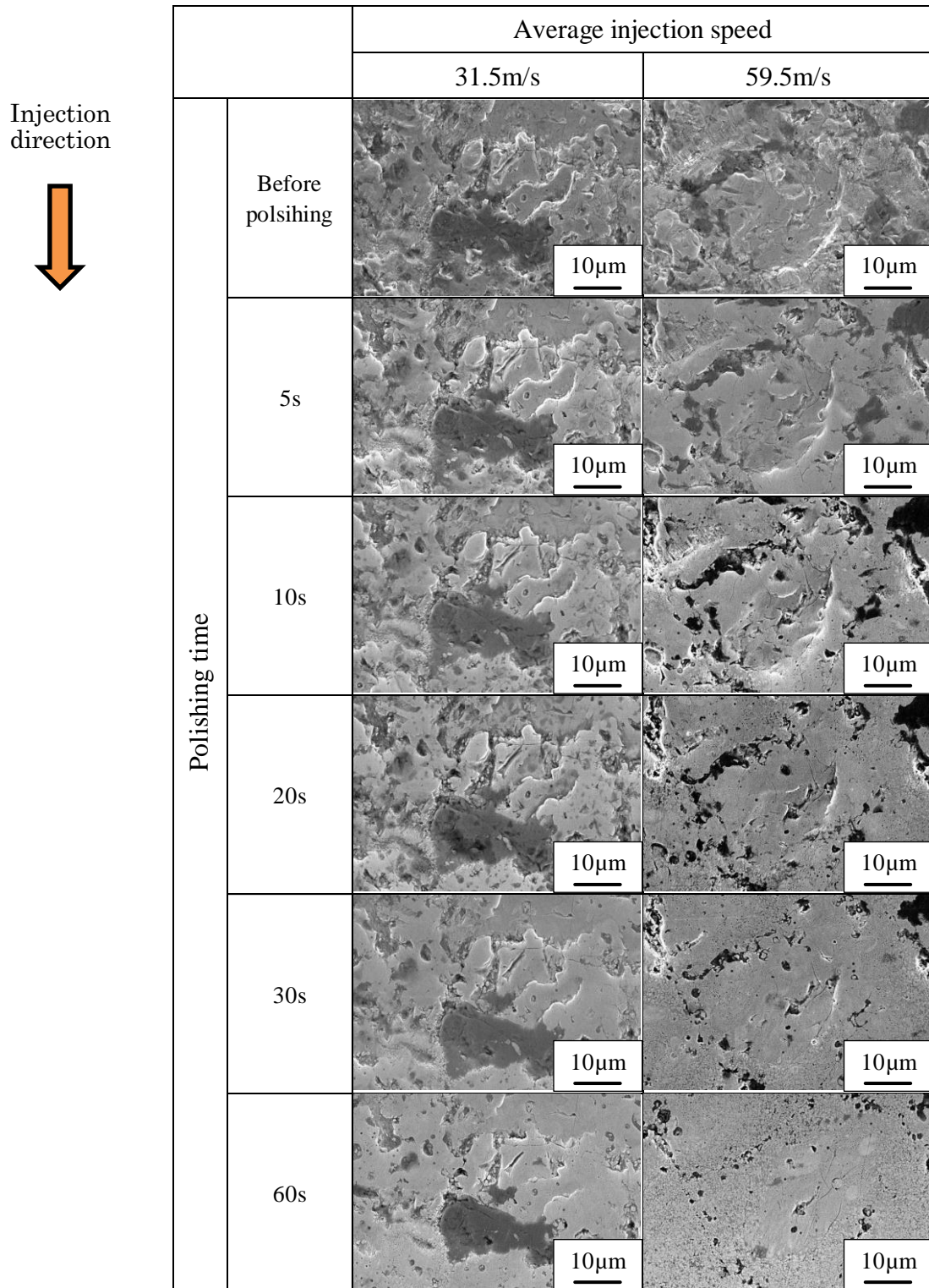


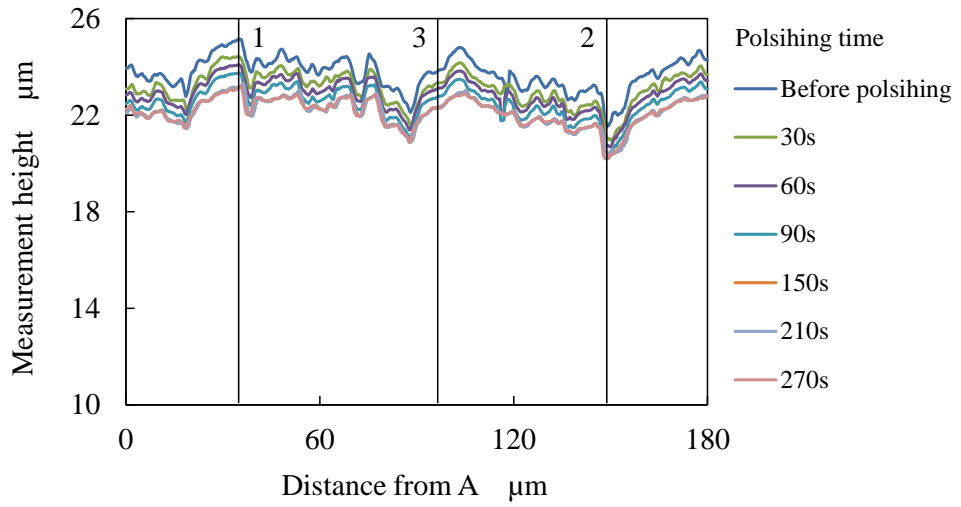
Fig.4-2 SEM images of the carbide surface after polished with injection speed 31.5m/s and 59.5m/s.

4.3.3 加工面輪郭形状の定点観察結果

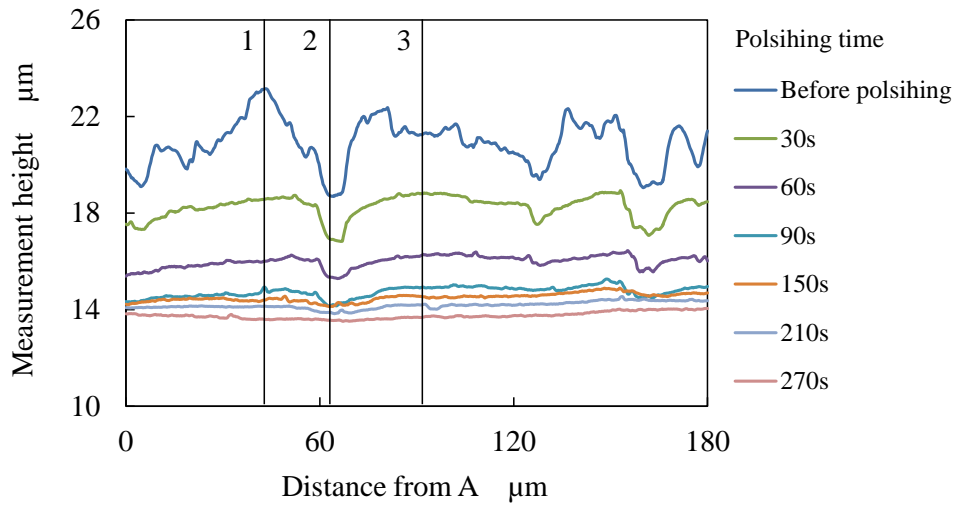
Fig.4-3 に投射速度を変えた場合の加工面輪郭形状の定点観察結果を示す。Fig4-3(a)は投射速度 12.3m/s の場合であり、研磨加工はほとんど進行していない。一方、Fig4-3 (b), (c)より研磨メディアの投射速度が 31.5m/s 以上の条件では研磨加工が明らかに進行しており、本研磨法は研磨前の輪郭形状を残しながら研磨が進む特徴を有することが明らかとなった。したがって、この研磨過程が前項で示した SEM による定点観察を可能にした原因であると考えられる。

また、Fig4-3 (a), (b), (c)に示した 3 箇所における単位時間当たりの研磨除去深さ（以後研磨速度と称す）を測定した。図中の位置 1 は研磨前において最も高い山頂であり、位置 2 は最も低い谷底、そして位置 3 は比較的平坦な平地である。結果を Fig4-4 に示す。Fig4-4 (a)に示す投射速度 12.3m/s の研磨速度は他の条件より低速であったため、Fig4-4 (b), (c)より縦軸を 5 倍拡大した。いずれの投射速度条件においても研磨開始後 30s 間に輪郭形状が大きく変化するとともに、研磨速度は 1 (山頂) が最も高く、3 (平地)、2 (谷底) の順で低くなり、2 (谷底) の研磨速度は 3 (平地) の約 75%であった。このように谷底も比較的高い速度で研磨されていることは、砥粒が谷底まで到達していることを示している。Fig.4-5 は幾何学的に検討した結果で、加工面の形状は Fig4-3 (b)における 2 (谷底) の研磨前の輪郭形状を縦横倍率 1/1 で示したものである。図中の直径 5 μ m の円は砥粒の平均粒径を表している。円が矢印で示した谷底へ到達していることから、幾何学的にも砥粒表面の切れ刃が谷底を加工できるといえる。Fig.4-6 は研磨メディアが加工面に衝突する過程の模式図である。加工面は Fig.4-5 に示したもので、研磨メディアは前述のように厚い砥粒層を粘弾性体が支える構造となっている。また、加工面と砥粒の倍率は同じである。研磨メディアは最初に加工面の高い位置に衝突するが、核体が粘弾性体であるため、ほとんど減速されることなく谷底に到達することができると考えられる。そのため、谷底を加工する砥粒にも十分な食込み力が作用したため、2 (谷底) の研磨速度が 3 (平地) の 75%程度と比較的高かったものと考えられる。

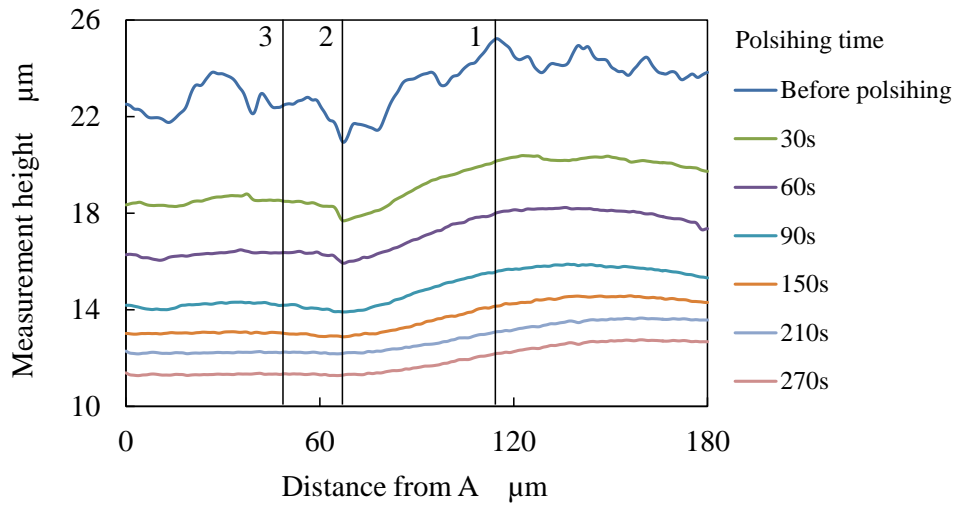
第4章 投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響



(a) Injection speed 12.3m/s

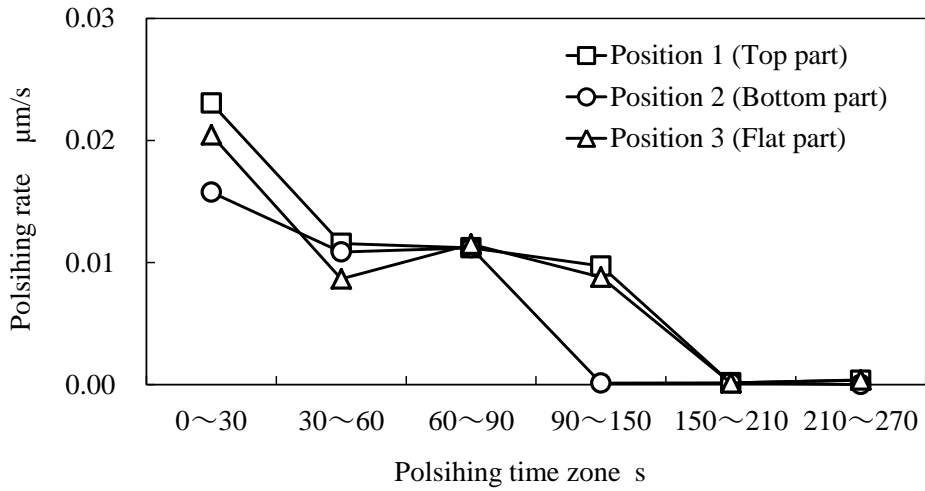


(b) Injection speed 31.5m/s

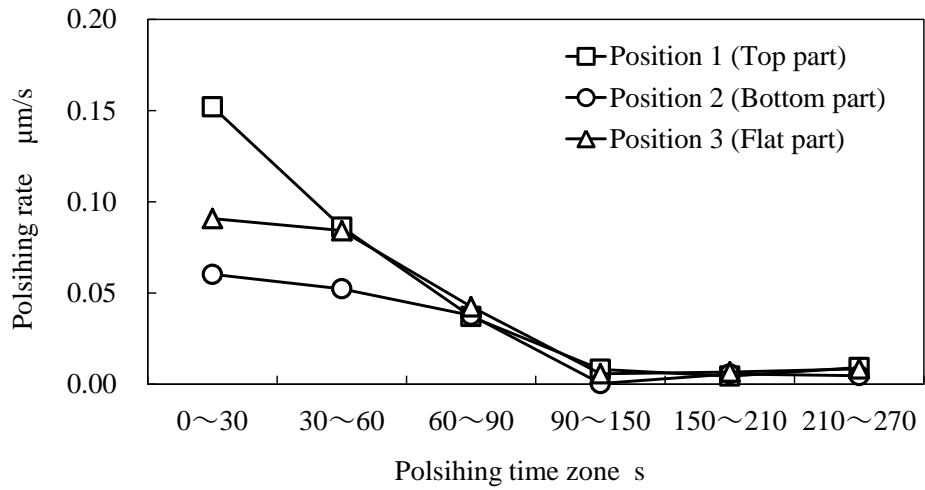


(c) Injection speed 59.5m/s

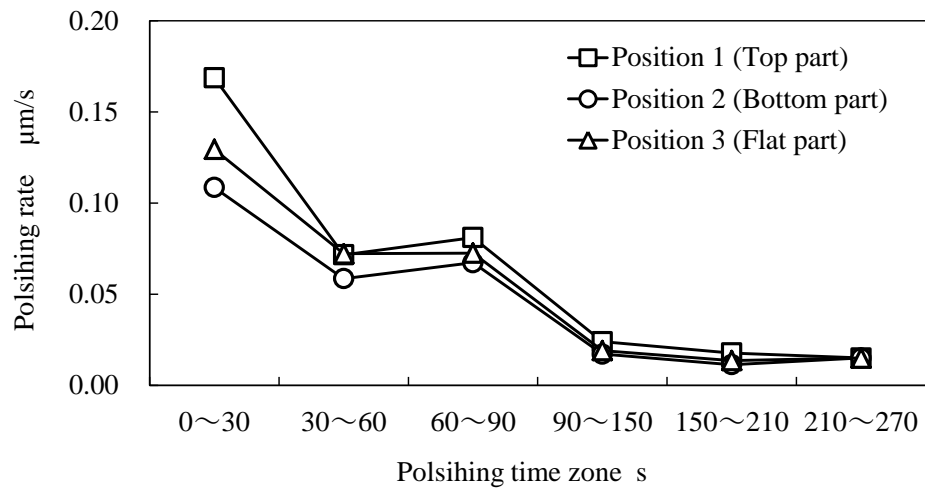
Fig.4-3 Profile shape of the polished surface in each injection speed.



(a) Injection speed 12.3m/s



(b) Injection speed 31.5m/s



(c) Injection speed 59.5m/s

Fig.4-4 Polishing rate of each polished position in each injection speed.

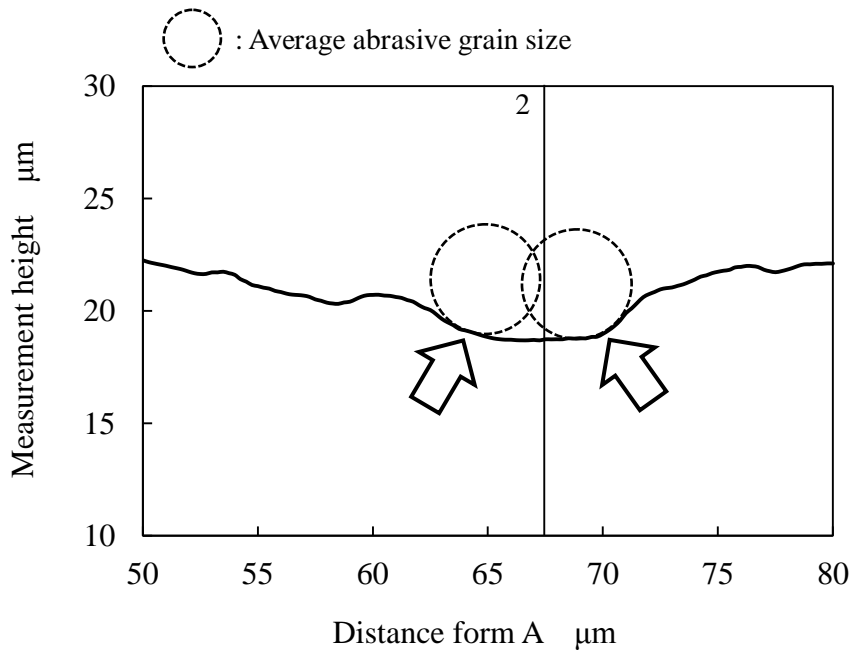


Fig.4-5 Relationship of the abrasive grain size and the surface shape before polishing.

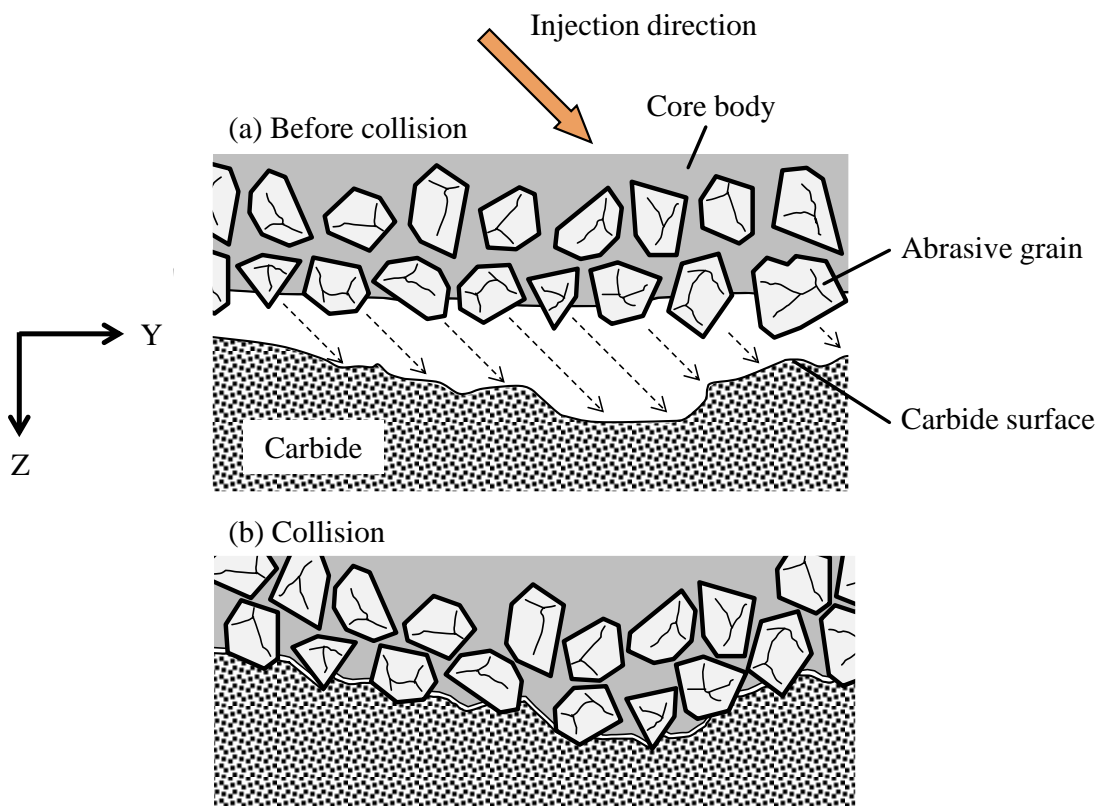


Fig.4-6 Schematic of when the polishing media collides with the carbide surface.

4.4 小括

本章ではブラスト研磨加工における投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響を調べ、下記の結論を得た。

1. 研磨メディアの平均投射速度が 12.3m/s 以下の条件において、得られる表面粗さ測定値は収束せずに時間経過に伴い、単調減少する傾向を示した。
2. 平均投射速度が 21.4m/s 以上の条件では、研磨開始時より表面粗さ測定値が急激な減少を示し、ある研磨時間まで研磨を継続すると、この急激な変化は収束する傾向が認められた。
3. この収束値に至るまでの時間は各投射速度において異なり、投射速度が高速度化するほど短時間に収束することが明らかとなった。
4. SEM による加工面直上からの定点観察結果より、投射速度 31.5m/s では表面凸部の山頂近傍より研磨の進行が認められた。また、表面凸部の消失速度は明らかに 59.5m/s の方が高かった。
5. レーザ顕微鏡による輪郭形状の定点観察を行った結果、投射速度 12.3m/s では輪郭形状に大きな変化はみられなかったが、投射速度 31.5m/s 以上の条件では研磨前の輪郭形状を残しながら研磨が進む特徴を示した。
6. いずれの投射速度条件においても研磨開始後 30s 間に輪郭形状が大きく変化し、研磨速度は 1(山頂)が最も高く、3(平地)、2(谷底)の順で低くなり、2(谷底)の研磨速度は 3(平地)の約 75%であった。
7. 加工面の輪郭形状と砥粒の大きさから幾何学的に検討した結果、狭隘な表面凹部の谷底部まで本実験で使用した研磨砥粒は到達することが可能であった。

第 5 章 投射角が加工面性状に及ぼす影響

5.1 諸言

第 4 章では研磨メディアの投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響について検討し、研磨メディアの投射速度を高速度化すると表面粗さは短時間により低い値へ収束することを明らかにした。この結果より研磨メディアの運動エネルギーが本研磨法に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。そこで、本章では研磨メディアの運動エネルギーが加工面へ伝達される際の角度に着目し、研磨メディアの投射角が加工面性状に及ぼす影響について検討した。

5.2. 投射条件

本章における実験では、投射角が 15° 、 45° 、 75° 、 90° となるよう、Fig.5-1 で示すように超硬基材を固定するステージの傾きを変えて実験を行った。また、いずれの投射角条件においても投射距離が 20mm となるように図中の(a)軸と(c)軸を調整した。その他の投射条件は Table5-1 に示すとおりであり、使用した研磨メディアは含水率 30%のものである。なお、研磨時間は研磨メディアの投射角が加工面の輪郭形状に及ぼす影響を調べるために、輪郭形状の変化が観察しやすい研磨開始から 270s までとした。また、投射角の変更により単位面積あたりに衝突する研磨メディアの数が変わることが懸念されたが、加工面には約 5 万個/s という非常に多数の研磨メディアが衝突する。したがって、投射角の変更が単位面積あたりに衝突する研磨メディアの数に及ぼす影響は少ないと判断した。なお、単位時間あたりに投射される研磨メディアの個数は、後述する含水率 30%の研磨メディアの質量と Table-5-1 に示した単位時間あたりの投射量より求めた結果である。

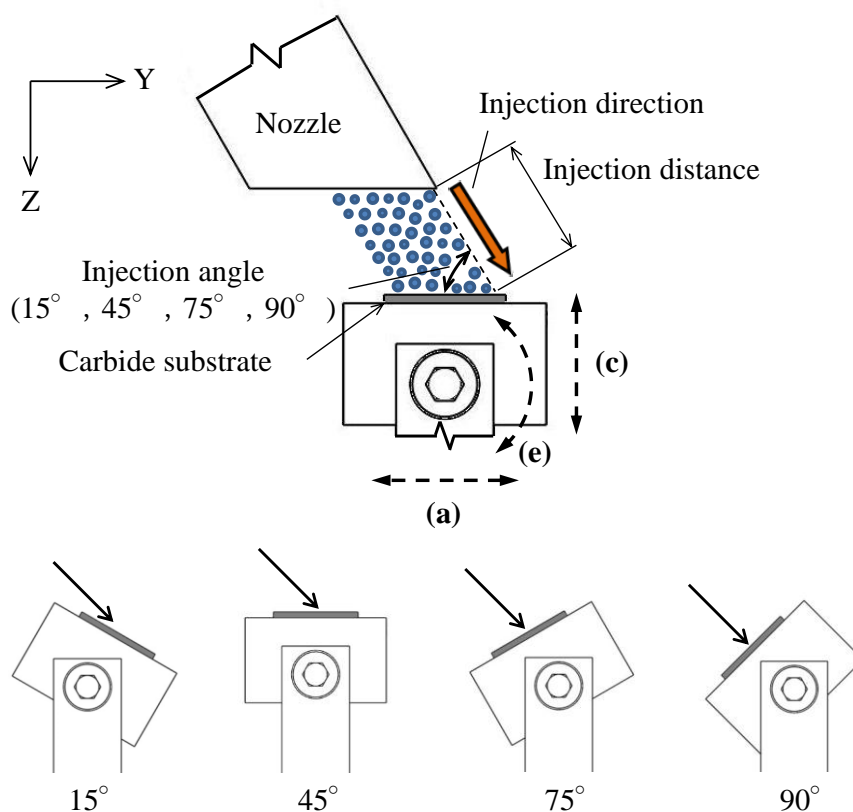


Fig.5-1 Positional relationship between the fixed stage and the nozzle at the time of changing the injection angle.

Table 5-1 Injection condition for researching the relationship of polishing time and surface roughness in several injection angles.

Injection condition	Injection speed (m/s)	59.5
	Polishing time (s)	0~270
	Injection quantity (g/s)	36
	Injection angle (deg.)	15, 45, 75, 90
	Width of Nozzle (mm)	5
	Injection distance (mm)	20
Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content (%)	30

5.3 結果と考察

5.3.1 投射角が加工面粗さに及ぼす影響

Fig.5-2 に各投射角条件における研磨時間と表面粗さの関係を示す. 図より 45° の条件が最も表面粗さの低下速度が高く, 次いで 15° , 75° , 90° の順となった. また, 15° と 75° を比較すると, 15° の方が表面粗さの低下速度が高くなった. この結果は表面粗さの低下には衝撃力の水平分力である加工面の除去力が垂直分力である砥粒の食込み力より大きく寄与することを示している. ただし, 45° にて最大の表面粗さ低下速度を示したことは, 加工面の除去力と砥粒の食込み力のバランスが重要であることを示している.

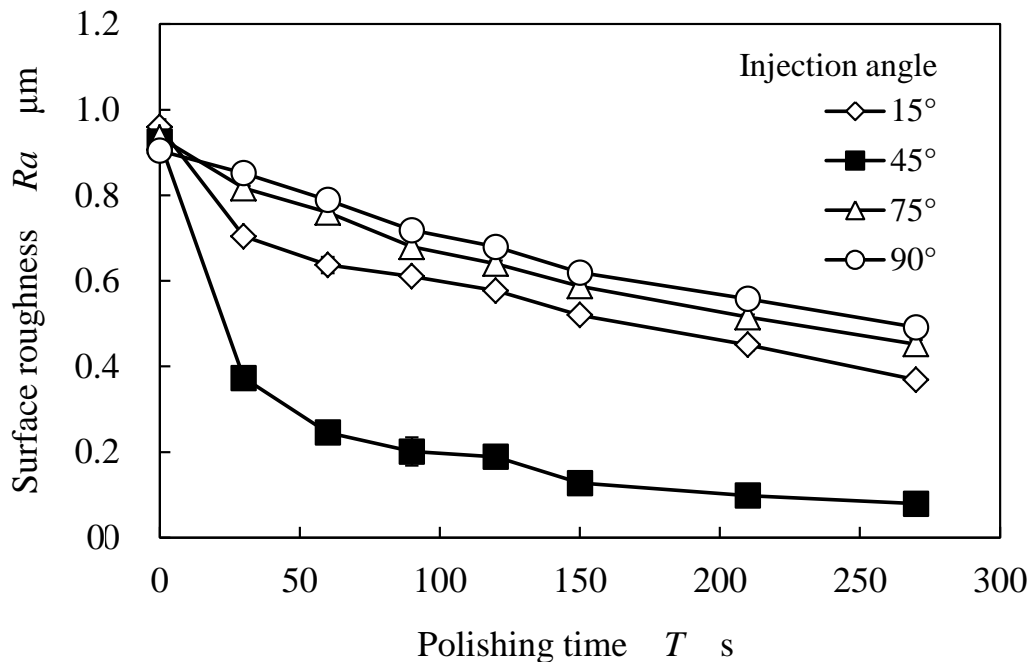


Fig.5-2 Relationship of polishing time and surface roughness at each injection angle.

5.3.2 加工面輪郭形状の定点観察結果

Fig.5-3 に加工面における輪郭形状の定点観察結果を示す. 加工面の高さ低下速度は投射角 15° が最も低く, 75° , 90° の順で高くなっていることから, 加工量に対しては加工面の除去力より砥粒食込み力の寄与が高いことが明らかである. ただし, Fig.4-4(c)で示した投射角 45° の結果と 90° の結果を比較すると, 45° の方が加工量は多い. したがって, 加工量についても加工面の除去力と砥粒の食込み力のバランスが重要であることが明らかとなった. また, Fig-6-3(c)のように投射角 90° では加工面が平坦化しない. このことは加工面の平坦化には加工面の除去力が不可欠であることを示している.

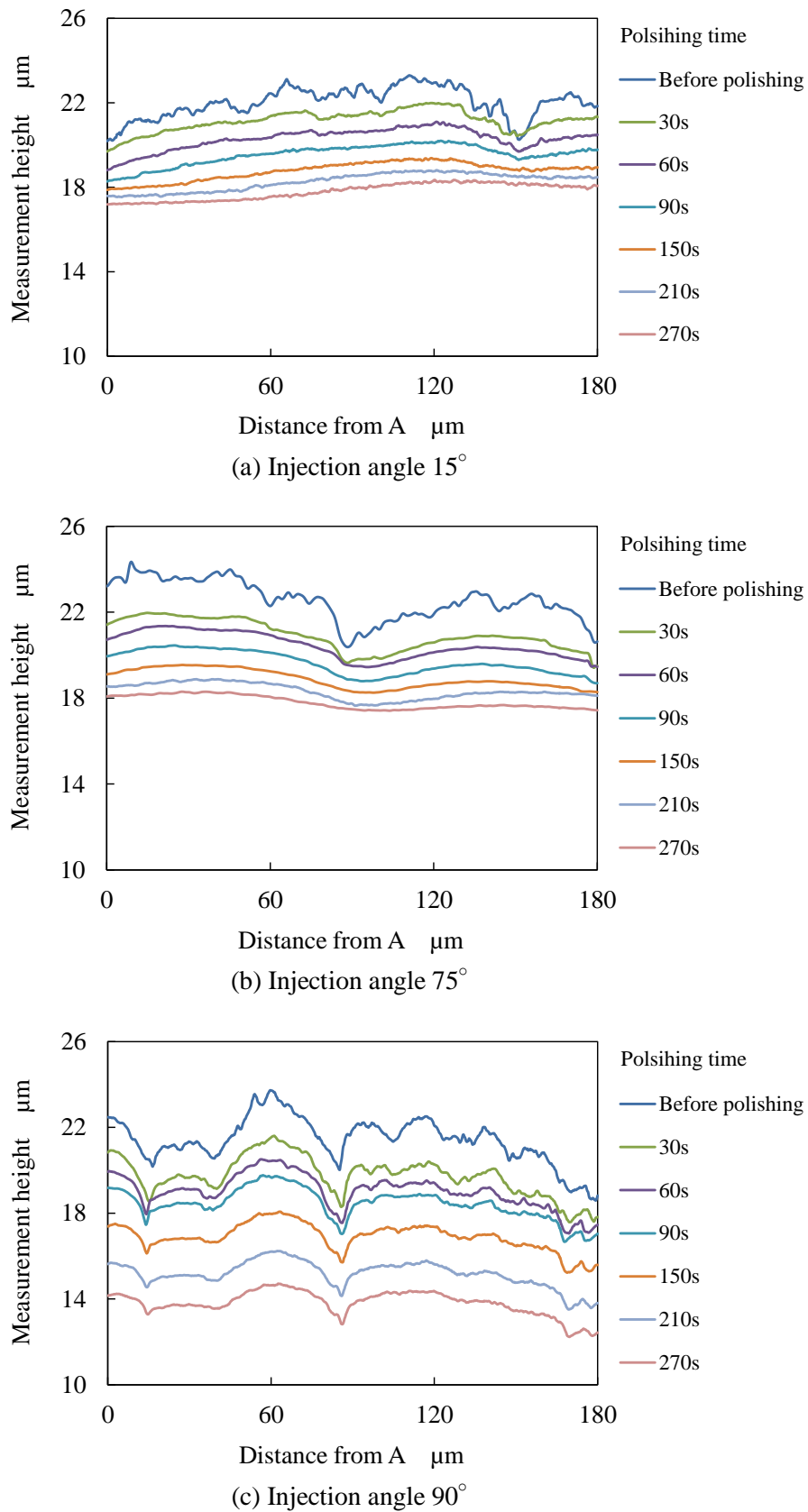


Fig.5-3 Profile shape of the polished surface in each injection angle.

5.4 小括

本章ではブラスト研磨加工における研磨メディアの投射角が加工面性状に及ぼす影響を調べ、下記の結論を得た。

1. 研磨メディアの投射角を変化させた実験より、表面粗さの低下速度は 45° が最も高く、次いで 15° , 75° , 90° の順であった。したがって、表面粗さの低下には衝撃力の水平分力である加工面の除去力が垂直分力である砥粒の食込み力より大きく寄与しているといえる。ただし、表面粗さの低下速度は 45° にて最大となったことから、高い表面粗さ低下速度を得るには、衝撃力の水平分力と垂直分力のバランスが重要であるといえる。
2. 加工面の高さ低下速度は 45° が最大となり、次いで 90° , 75° , 15° の順に低下した。したがって、加工量に対しては垂直分力が水平分力より大きく寄与している。ただし、加工面の高さ低下速度は 45° にて最大値を示したことから、加工量についても水平分力と垂直分力のバランスが重要であるといえる。
3. 投射角 90° の条件では加工面が平坦化しないことから、加工面の平坦化には衝撃力の水平分力が不可欠である。

第6章

研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響

6.1 諸言

前章までに、研磨メディアの運動エネルギーの大きさや供給方向が加工面に及ぼす影響を明らかにした。ただし、運動エネルギーをもとめる項には、研磨メディアの投射速度のほかに、研磨メディアの質量が挙げられる。研磨メディアの質量を変えるためには、研磨メディアに含水させる水分量を変化させることで可能となるが、含水率の変化にともない研磨メディアの材料特性として粘弾性特性(換言すれば剛性)が変化し、加工特性として加工面の冷却性能が変化する。そこで本章では、最初に研磨メディアの含水率を変えた場合の質量および運動エネルギーの関係を明らかにする。そして、研磨メディアの含水率を変えて運動エネルギーを変化させた実験を行い、第4章で示した投射速度を変化させて運動エネルギーを変化させた実験結果と比較する。さらに、調べた質量や運動エネルギーの関係をを用いて、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで投射し、研磨メディアの含水率が加工面に及ぼす影響について検討する。

6.2 投射条件

研磨メディアの質量を変えて運動エネルギーを変化させる実験は Table6-1 に示す投射条件にて行った。研磨時間は4.3.1で示した投射速度を変えて運動エネルギーを変えた実験結果と比較するために510sとした。また、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで投射する実験では Table6-2 に示す投射条件にて行った。この実験では、各含水率研磨メディアの運動エネルギーが $0.8 \times 10^{-3} \text{J}$ となるよう投射速度を操作して実験を行った。また、本実験では異なる含水率の研磨メディアによって形成される表面粗さの収束値を明らかにするために、研磨時間は1560sまで延長して実験を行った。その他の条件は Table6-1 と同様である。

Table 6-1 Injection condition for researching the relationship of polishing time and surface roughness in several water content rate.

Injection condition	Injection speed (m/s)	59.5
	Polishing time (s)	0~510
	Injection quantity (g/s)	36
	Injection angle (deg.)	45
	Width of Nozzle (mm)	5
	Injection distance (mm)	20
Polishing media	Multi-Cone (g)	1000
	Multi-Powder #3000 (g)	30
	Water content (%)	10
		30
50		

Table 6-2 Injection condition for researching the effect of water content rate in the polishing media in the same kinetic energy.

Injection condition	Kinetic energy (J)		0.8×10^{-3}	
	Polishing time (s)		0~1560	
	Water content (%)	Injection speed (m/s)	10	55.8
			30	48.7
			50	41.0

6.3 結果と考察

6.3.1 研磨メディアの含水率が質量と運動エネルギーに及ぼす影響

研磨メディアの含水率と質量の関係を Fig.6-1 に示す. 図より含水率の増加によって質量は増加し, 最も含水率が高い 50% は 10% の約 2 倍であった. したがって, 3 種類の含水率研磨メディアを同じインバータ値で投射した場合, 同じ投射速度が得られない可能性が考えられた. そこで, 各含水率研磨メディアの投射速度を測定した. その結果を Fig.6-2 に示す.

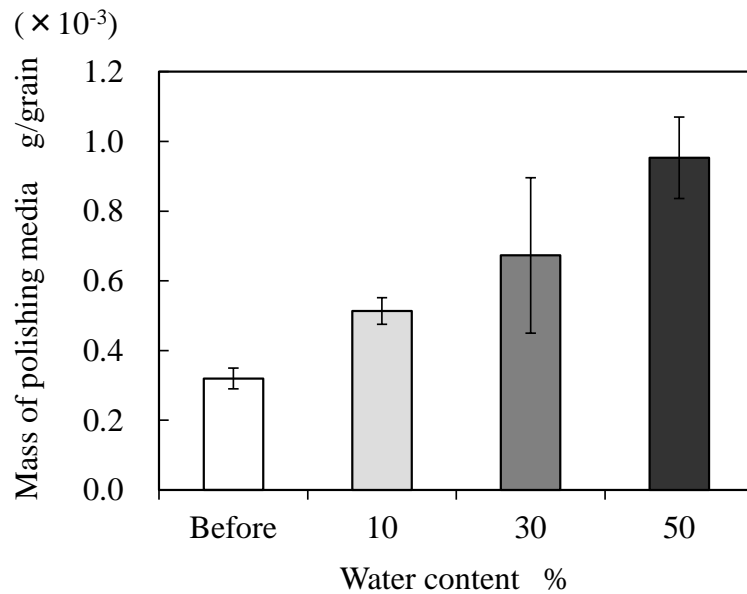


Fig.6-1 Comparison of the weight of polishing media in each water content.

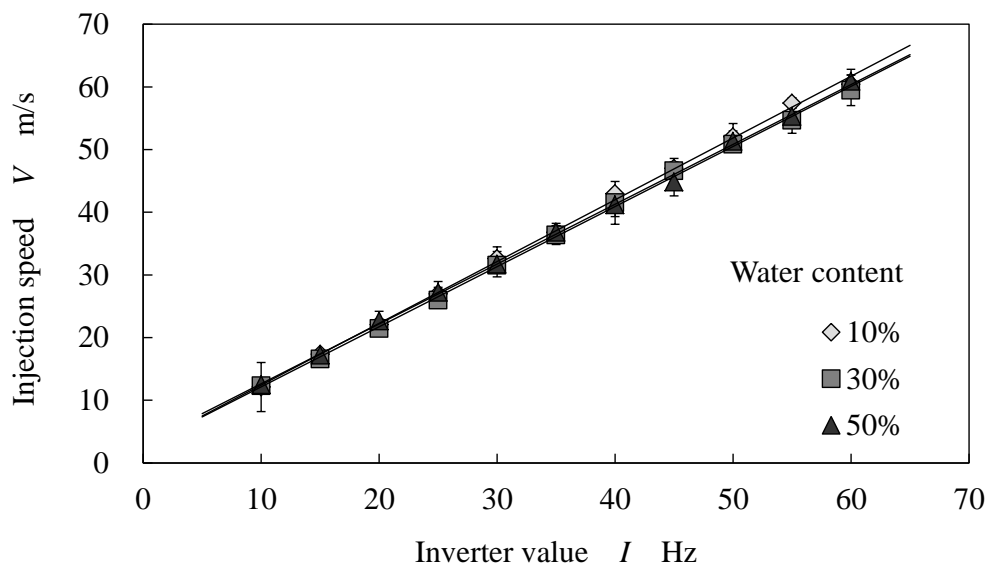


Fig.6-2 Relationship of inverter value and injection speed in each water content.

図より装置インバータ値： I と研磨メディアの投射速度： V の関係はいずれの条件においてもほぼ同じ勾配の直線関係となり、次式で表すことができた。なお、(6-2)式は第3章で示した(3-1)式である。

$$V_{10\%} = 0.99I + 2.56 \quad (6-1)$$

$$V_{30\%} = 0.96I + 2.53 \quad (6-2)$$

$$V_{50\%} = 0.95I + 3.10 \quad (6-3)$$

これらの結果より求めた運動エネルギーの算出結果を Fig.6-3 に示す。

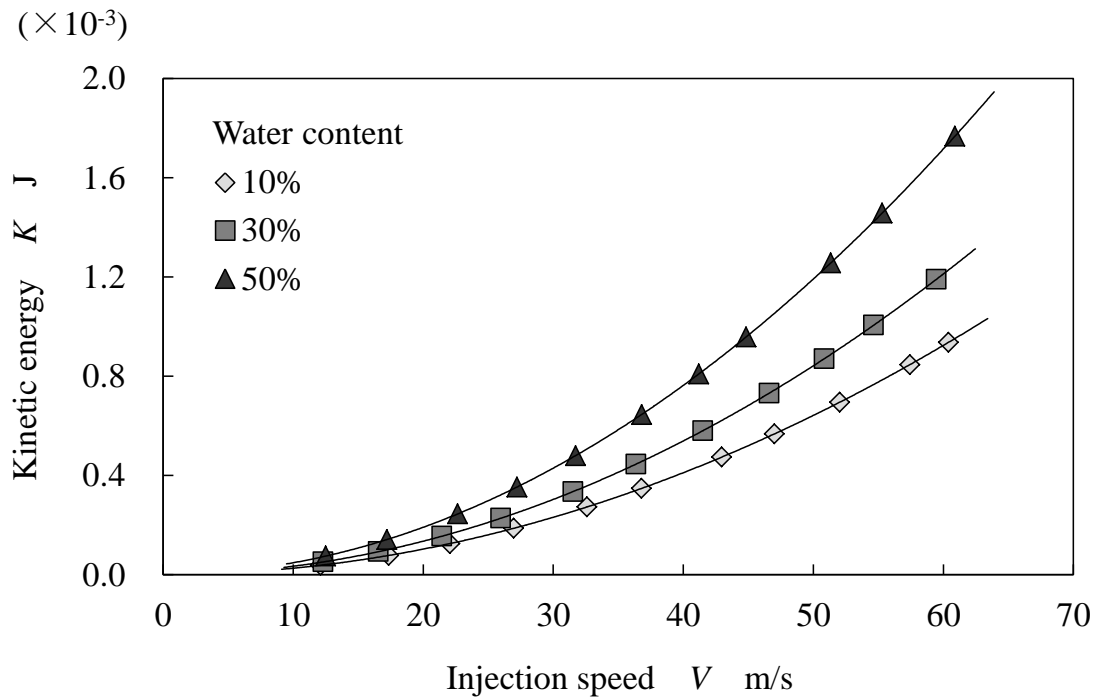


Fig.6-3 Comparison of kinetic energy in each water content.

図より研磨メディアの投射速度 V と運動エネルギー： K の関係は次式で表すことができる。

$$K_{10\%} = 0.257 \times 10^{-6} V^2 \quad (6-4)$$

$$K_{30\%} = 0.337 \times 10^{-6} V^2 \quad (6-5)$$

$$K_{50\%} = 0.477 \times 10^{-6} V^2 \quad (6-6)$$

6.3.2 研磨メディアの質量が加工面粗さに及ぼす影響

投射速度を 59.5m/s 一定とし、研磨メディアの含水率を変えることで運動エネルギーを変化させた場合の研磨時間と表面粗さの関係を Fig.6-4 に示す。図より最も運動エネルギーの低い含水率 10%では研磨開始後の表面粗さ低下速度が最も高くなったが、最終的な表面粗さの収束値も最も高い値を示した。そこで、加工面の経時変化をレーザ顕微鏡にて観察した。結果を Fig.6-5 に示す。研磨開始後 30s 時の結果より、30%と50%では図中矢印で示す箇所に研磨前の表面に存在した凹部の谷底部が確認されたが 10%では確認されなかった。この結果から、含水率 10%の条件では砥粒の食込み力と除去力が他の含水率条件より高くなり、最も高い速度で研磨加工が行われたため、研磨開始後の表面粗さ低下速度が最も高くなったと考えられる。ただし、砥粒食込み力が最も大きくなることから、図に示すように含水率 10%においては加工面に多数の研磨痕が生じるため、最終的な表面粗さの収束値が最も高くなったと考えられる。したがって、第 4 章で述べた投射速度を変化させて運動エネルギーを変化させた場合と、本章で得た結果は明らかに異なることが判明した。

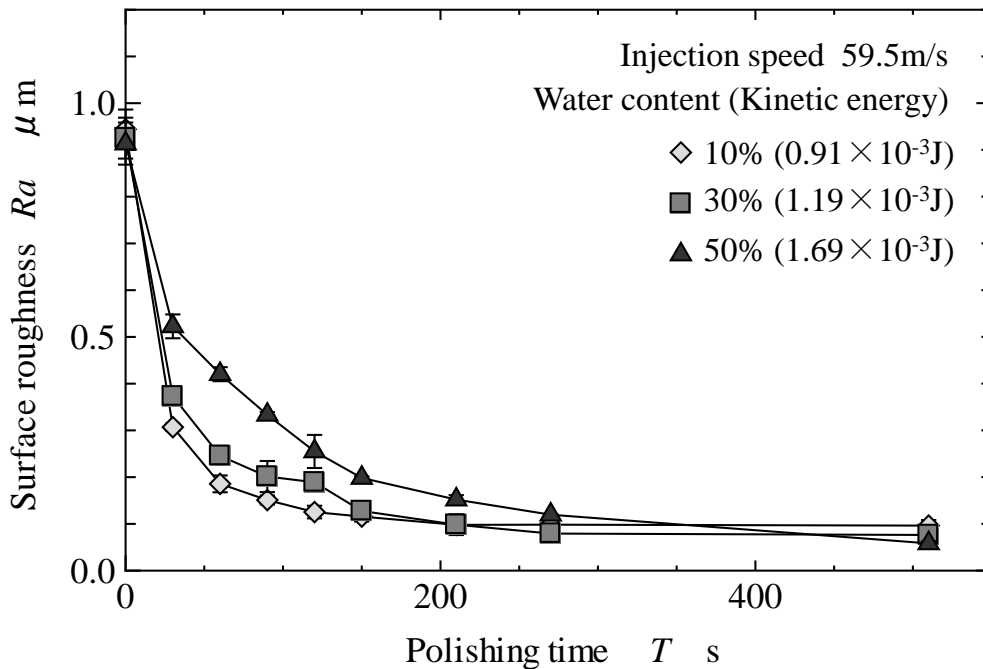


Fig.6-4 Relationship of polishing time and surface roughness in each water content.

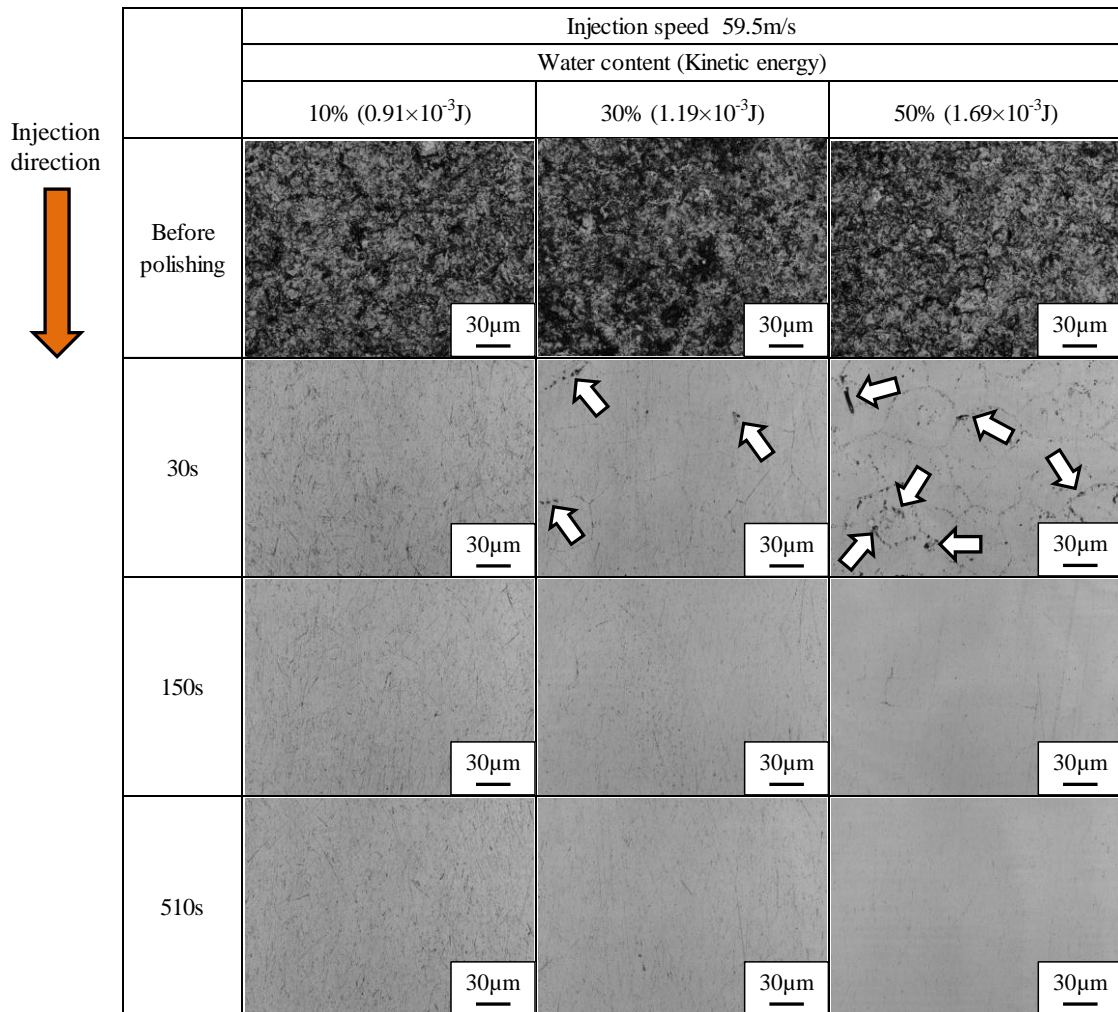


Fig.6-5 Observation result of polished surface in each water content rate.

6.3.3 研磨メディアの剛性が加工面粗さに及ぼす影響

前項では研磨メディアの運動エネルギーを変化させる手段として、研磨メディアの含水率を変えることで質量を変化させた場合と、投射速度を変化させた場合とでは得られる表面性状が異なることを明らかにした。したがって、含水率を変えることによって変化する研磨メディアの材料特性および加工特性が研磨機構に何らかの影響を及ぼしたものと考えられる。そこで、本項では研磨メディアの剛性が研磨機構に及ぼす影響をより理解するため、異なる含水率研磨メディアを同一運動エネルギーで投射する実験を行った。いずれの含水率研磨メディアにおいても高い速度で超硬合金を研磨できる投射速度に設定するため、本実験では研磨メディアの運動エネルギーを $0.8 \times 10^{-3} \text{J}$ と設定し、6.3.1 で示した(6-4)式、(6-5)式、(6-6)式から投射速度を算出した。Fig.6-6 に異なる含

水率の研磨メディアを同一運動エネルギーにて投射した際の研磨時間と表面粗さの関係を示す。図より、研磨開始直後における表面粗さ低下速度は前項で示した結果と同様に含水率の最も少ない10%にて最も高くなり、次いで30%、50%の順に低くなった。また、表面粗さの収束値は10%が最も高くなった。Fig.6-7は各含水量条件における加工面の経時変化をレーザ顕微鏡にて観察した結果である。図より研磨開始から30s後の加工面において、含水率10%の研磨メディアで研磨した加工面は、30%、50%と比べて研磨前の表面に存在した凹部の谷底部の存在が明らかに少ない。しかし、30%、50%と比べて10%では研磨痕の存在が明瞭に確認できた。これら結果より、含水率10%では砥粒食込み力、および加工面を除去する力が他の含水率条件よりも高くなっていることが推察される。また、この要因には含水率変化により研磨メディアの特性変化が起因していると考えられる。特に、研磨メディアの剛性変化は砥粒の食込み力および加工面を除去する力に関与すると考えられ、加工面の冷却性能は加工面の硬さに影響を及ぼすと考えられる。

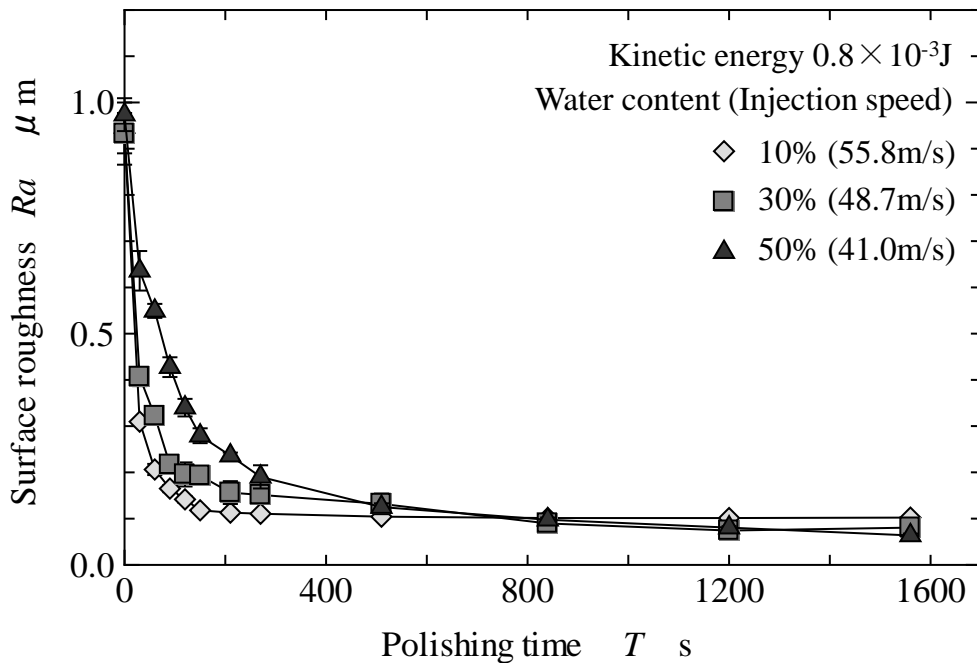


Fig.6-6 Relationship of polishing time and surface roughness in each water content rate with same kinetic energy condition.

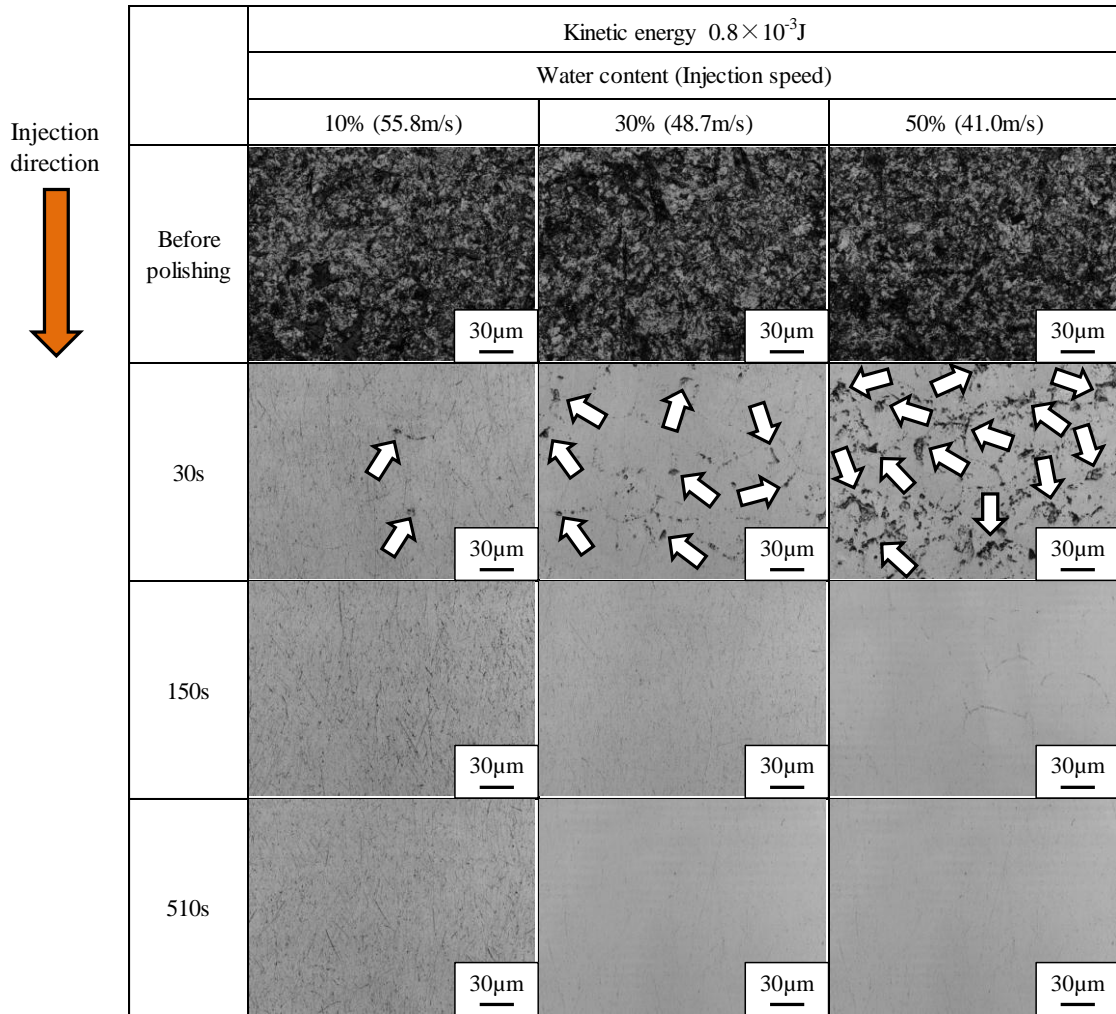


Fig.6-7 Observation result of polished surface in each water content with same kinetic energy condition.

6.4 小括

本章では、研磨メディアの含水率を変えて運動エネルギーを変化させた実験や、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで投射した実験を行い、研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響を調べ、下記の結論を得た。

1. 研磨メディアの含水率を増加させると質量も増加し、含水率 50%の質量は 10%の約 2 倍であった。
2. 含水率が異なる条件でも、装置インバータ値と投射速度の関係はほぼ直線関係となった。

3. 研磨メディアの含水率を変えて運動エネルギーを変化させた実験より、研磨開始からも表面粗さの低下速度は最も高くなったが、表面粗さの収束値も最も高くなった。また、含水率 10%では加工面に多数の研磨痕が確認されたが、含水率の増加により研磨痕の存在は減少する傾向を示した。
4. 異なる研磨メディアを同一運動エネルギーで投射した実験より、研磨開始直後における表面粗さ低下速度は含水率 10%にて最も高くなったが、表面粗さの収束値は 10%が最も高くなった。加工面の観察結果では研磨開始から 30s 後の加工面において、含水率 10%の研磨メディアで研磨した加工面は、30%、50%と比べて研磨前の表面に存在した凹部の谷底部の存在が明らかに少なかった。しかし、30%、50%と比べて 10%では研磨痕の存在が明瞭に確認できた。

第7章

ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する考察

7.1 諸言

前章までに、研磨メディアの投射条件(投射速度、研磨時間、投射角、投射量)と研磨メディアの含水率が加工面性状に及ぼす影響について調べた。特に第4章では、投射速度と研磨時間の関係を調べ、研磨メディアの投射速度を高速度化することによって短時間に平滑な表面を得ることができる興味深い結果を得た。また、第6章では、研磨メディアの運動エネルギーを変える手段として、研磨メディアの含水率(換言すれば質量)を変更する場合と、投射速度を変える場合では得られる加工面性状が明らかに異なる結果を得た。また、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで投射した場合、含水率が少ない研磨メディアにて砥粒食込み力、および加工面の除去力が高くなる傾向が確認された。そこで本章では、これら興味深い結果が生じた要因考察を通じ、本研磨法による超硬合金の研磨機構を検討する。さらに、本研磨法における投射速度および研磨メディアの含水率についてのプロセス制御指針を示す。

7.2 研磨メディアの投射速度が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響

7.2.1 投射速度が研磨機構に及ぼす影響

本研磨法に類似するドライブラスト加工法の場合、運動エネルギーが高い条件では加工面に対する衝撃力が高くなるため、加工面へ砥粒が食込む力(垂直方向の力)、および表面を除去する力(水平方向の力)が高くなる。そのため、砥粒の運動エネルギーが高くなるほど研磨初期の表面粗さ低下速度は高くなるが、砥粒が加工面に深く食い込むことから、運動エネルギーが低い条件と比べて表面粗さの収束値は高くなることが知られている³⁴⁾。しかし、本研磨法では研磨初期の表面粗さの推移は合致するものの、表面粗さの収束値はこの結果と反し、運動エネルギーが高い条件ほど低い値に収束した。したがって、本研磨法では投射速度が高い条件ほど砥粒が加工面に食込みにくくなる現象が生じていると考えられる。また、この現象は加工面の硬さが関与していると推察され、グリットブラスト加工やショットピーニング加工のような噴射加工法では、研磨材の投射速度が高くなるほど被加工物表面の硬さは高くなることが報告されている^{35)~38)}。したがって、本研磨法においても投射速度が高くなるほど加工面の硬さが増加して砥粒が深く食込みにくくなるものと考えられる。そこで、投射速度と加工面における

硬さの関係を調べた。結果を Fig.7-1 に示す。図より加工面の硬さはいずれの投射条件においても研磨前より高くなり、投射速度が高い条件ほど硬さが高くなることが判明した。したがって、投射速度が高い条件では砥粒が加工面に食込みにくくなるものの、加工面を除去する力は投射速度が低い条件より高いことから広い面積を研磨除去することができ、研磨開始からの表面粗さ低下速度は投射速度の増加にしたがって高くなり、表面粗さは短時間により低い値へ収束したと考えられる。また、本研磨法で用いた研磨メディアは水分含有型であるため、水分の気化熱を利用して研磨熱が抑えられる特徴を有している²⁴⁾。したがって、従来のドライブラスト加工と比べて研磨温度は低くなり、本研磨法では加工面に加工硬化が生じやすい環境が生まれたと考えられる。さらに、加工硬化は熱処理などの硬化法に比べて被削性に及ぼす影響が少ないことが報告されているため⁴⁰⁾、加工面の硬さが加工面の除去面積に及ぼす影響は少ないと考えられる。

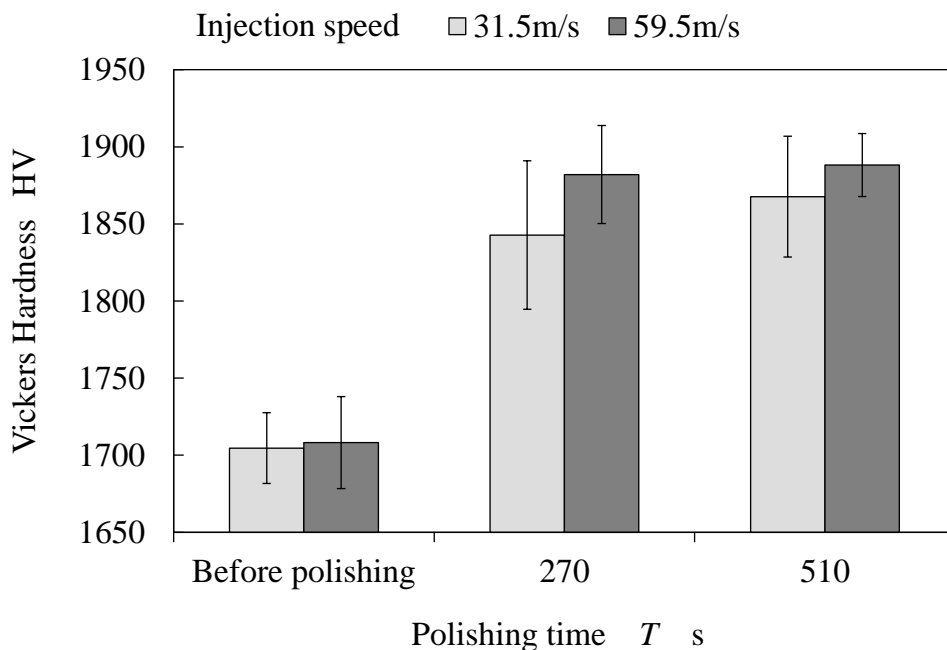


Fig.7-1 Relationship of polishing time and hardness in each injection speed.

また、加工面の加工硬化に関しては、WC粒子の結合相であるコバルトが加工硬化を生じさせた要因として考えられる³⁹⁾。本実験で使用した超硬合金のコバルト含有率は約10%であり、WC粒子と比べると超硬合金中に存在する割合は低い、コバルト

は超硬合金の結合相であることから WC 粒子同士が結合している部分以外の箇所に存在する。そして、本実験で使用した研磨メディアが担持する砥粒は平均粒径が約 $5\mu\text{m}$ であり、WC 粒子は約 $0.8\mu\text{m}$ であることから、砥粒が加工面に衝突する際は加工面表層に存在する WC 粒子とともに、コバルト相にも接触することが考えられ、衝突時にコバルト相に塑性変形を生じさせると考えられる。さらに、加工面表層での研磨加工に関与した WC 粒子を介してその周りに存在するコバルト相にも塑性変形が生じると考えられる。したがって、わずか 10%の含有率ではあるがコバルトの加工硬化が砥粒の食込み量に影響を及ぼしたと考えられる。

7.2.2 研磨メディアの投射速度に関する提言

前項までに加工面の硬さが表面粗さに及ぼす影響について考察したが、本質的に投射速度が低い条件の砥粒食込み量は投射速度が高い条件と比べて小さいものと考えられる。したがって、第4章で実施した研磨実験をさらに継続して行くと投射速度が低い条件でも投射速度が高い条件の収束値に到達すると考えた。そこで、本実験での最高速度である 59.5m/s で得られた表面粗さ収束値に対して、投射速度が低い条件はどれ位の研磨時間を必要とするのか調べた。なお、本実験の研磨時間は 1560s までとした。結果を Fig.7-2 に示す。本実験の最大投射速度である 59.5m/s の表面粗さ推移をみると、研磨時間 510s あたりで表面粗さは収束している。一方、投射速度 50.8m/s の条件ではこの収束値とほぼ同じ値になるまで約3倍の研磨時間を必要とした。したがって、研磨メディアの高速度投射は、短時間に表面粗さを低下させる有効な手段といえる。

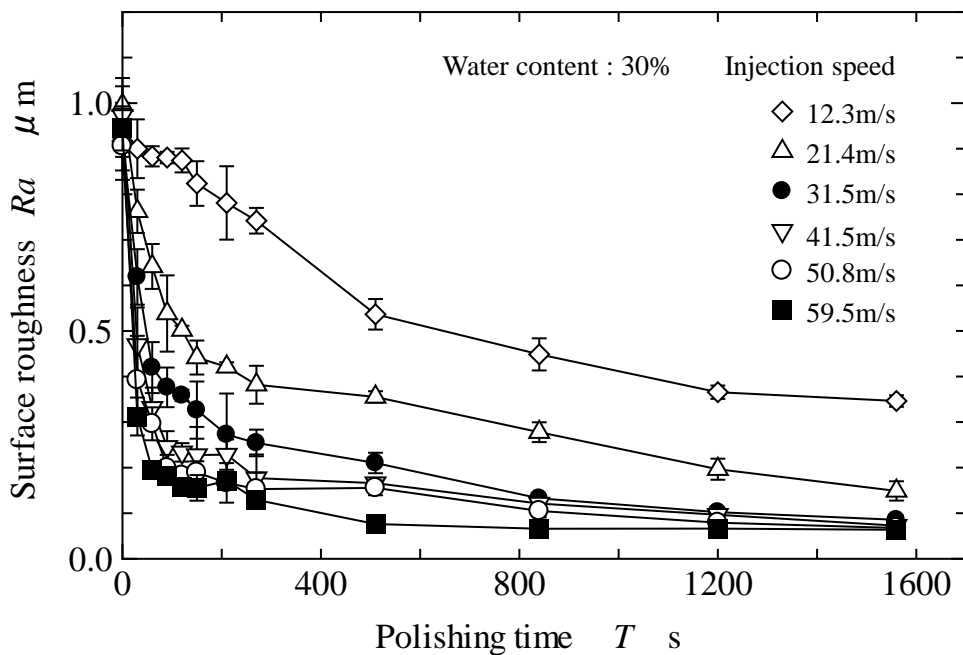


Fig.7-2 Relationship of polishing time and surface roughness until 1560s.

7.3 研磨メディアの含水率が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響

7.3.1 含水率が研磨メディアの剛性に及ぼす影響

第6章では研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響について調べ、含水率10%は他の含水率条件よりも加工面に対する砥粒の食込み力、および加工面を除去する力が高くなっていることが示唆された。そこで、本項ではこの要因について検討する。含水率の変化によって生じる研磨メディアの特性変化として、材料特性では質量と剛性が挙げられ、加工特性としては加工面の冷却性能が挙げられる。また、第6章の結果から、加工面に影響を及ぼした因子は研磨メディアの剛性と冷却効果であると推察した。そこで、最初に研磨メディアにおける含水率と剛性の関係を明らかにするため、各含水率条件における研磨メディアの弾性率を調べた。結果をFig.7-3に示す。図より含水率が増加するにしたがい、弾性率は低下する傾向を示した。また、含水率10%の弾性率は他の含水率条件と比べて高く、含水率30%と比べて約10倍、含水率50%と比べて約15倍であった。したがって含水率の高い50%の研磨メディアではFig.7-4で示すように、研磨メディアが加工面に衝突した際に、研磨メディアの砥粒が研磨メディア内部へ押し込まれ、砥粒食込み量の差 ΔH が生じると考えられる。さらに、

研磨メディアの剛性が低い場合、衝突後の研削加工時においても砥粒は研削抵抗の影響を受け研磨メディア内部に押し込まれることが推察される。したがって、剛性が高い含水率 10%の研磨メディアでは高い砥粒支持力を確保することができ、砥粒を加工面に深く食い込ませることができたと考えられる。

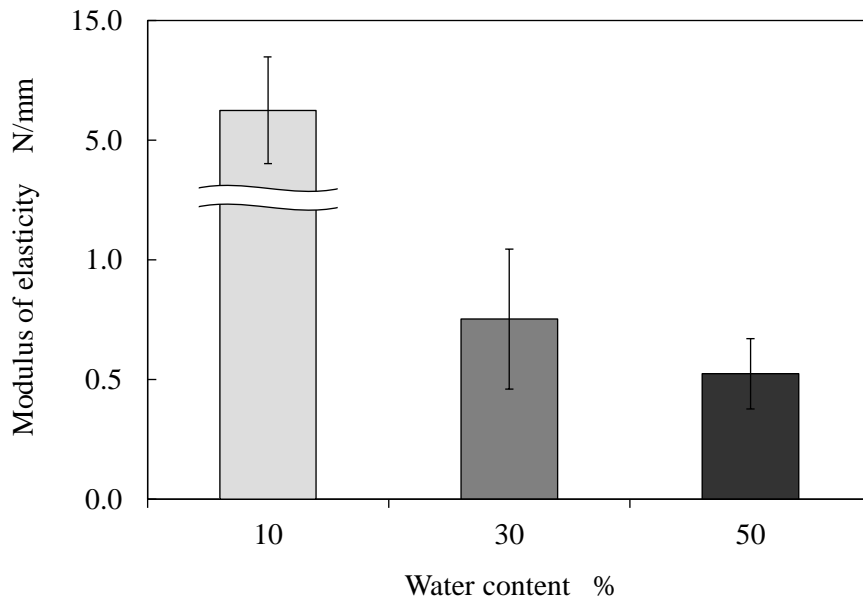


Fig.7-3 Comparison of elastic property in each water content.

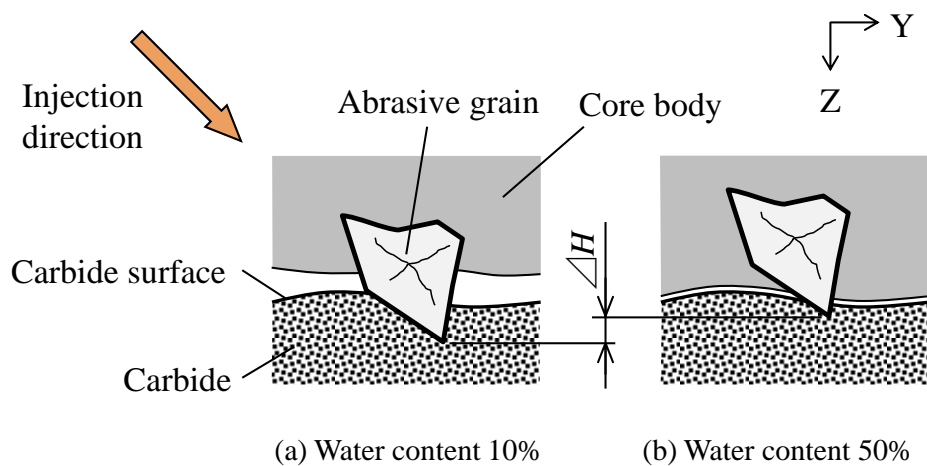


Fig.7-4 Schematic of amount bite in each water content.

7.3.2 含水率が加工面への衝撃力に及ぼす影響

前項で述べたように、含水率 10%は他の含水率条件と比べて明らかに弾性率が高い。そこで弾性率の異なる研磨メディアが加工面に衝突する際の変形挙動を観察するとともに、各含水率研磨メディアが加工面に加える衝撃力を調べた。Fig.7-5 は研磨メディアが加工面に衝突する際の変形挙動観察結果である。図より含水率 10%の研磨メディアにおいては衝突時にほとんど変形が確認されなかった。一方、30%、50%の研磨メディアでは変形が確認され、特に 50%では大きな変形が確認された。

また、Fig7-6 は観察時に撮影した動画より、研磨メディアが加工面に加えた衝撃力を算出した結果である。図より、含水率 10%の衝撃力は他の含水率条件と比べて明らかに高く、その衝撃力は含水率 30%、50%の約 3.5 倍であった。したがって、含水率 10%では、他の含水率条件より砥粒食込み力と加工面を除去する力が高くなったと考えられる。

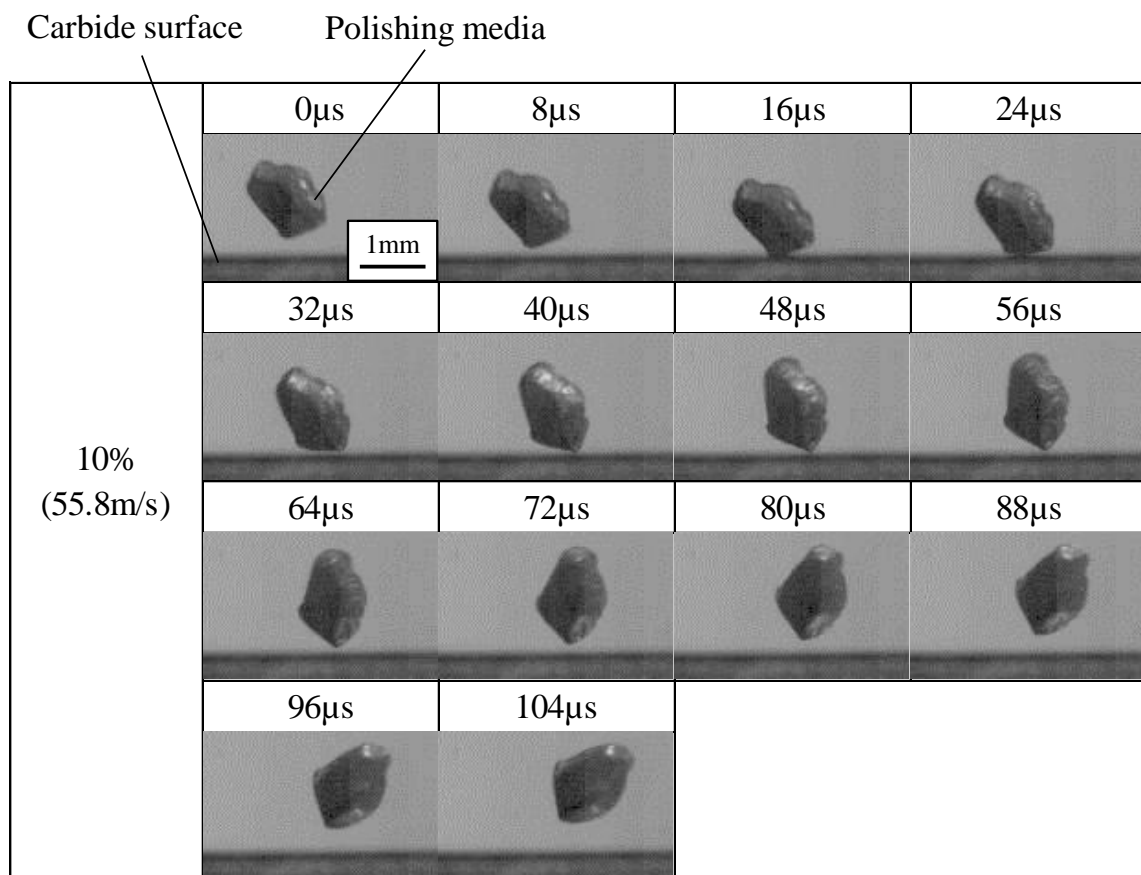


Fig.7-5 Deformation observation of polishing media in each water content.

(Part1 : Water content 10%)

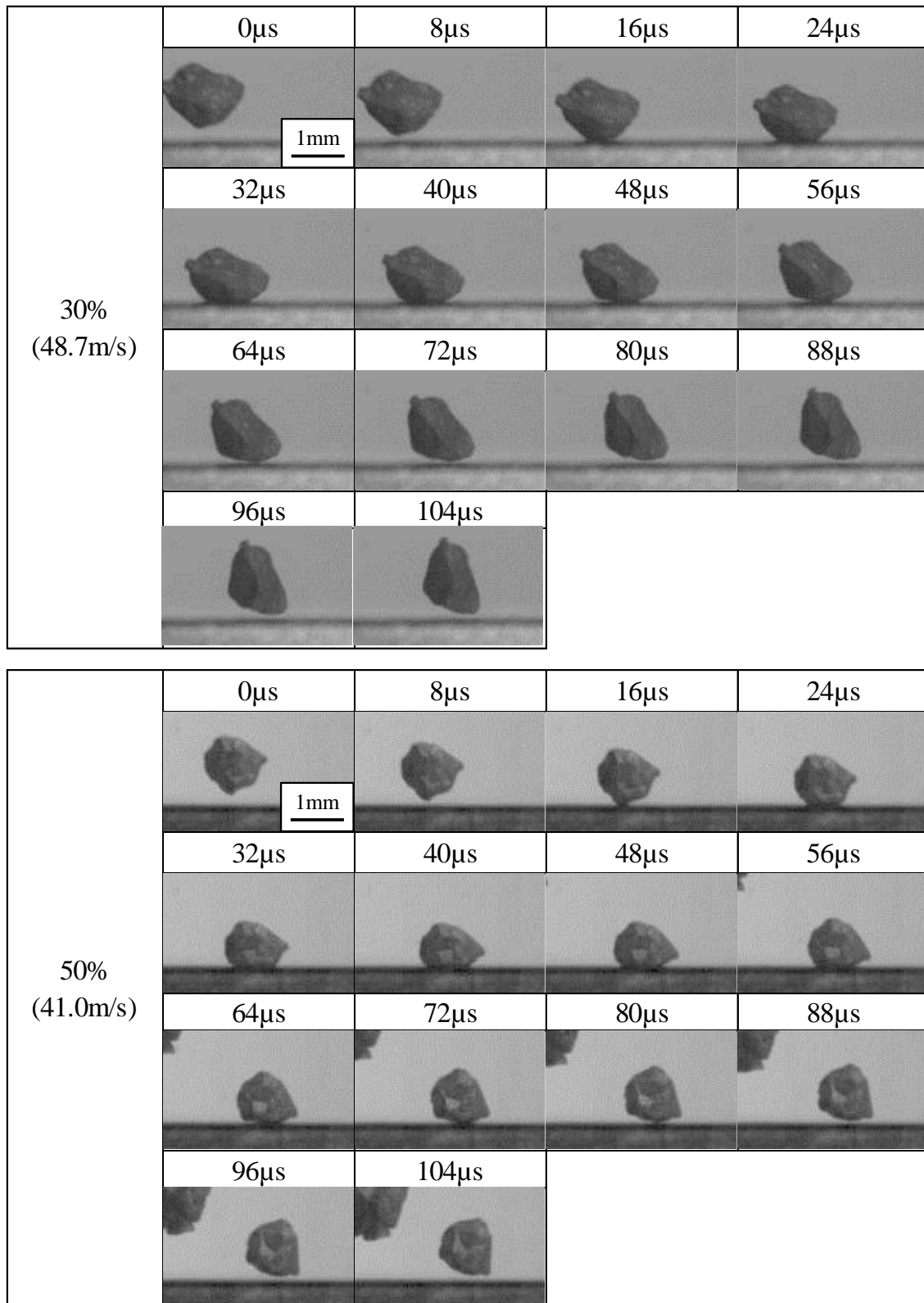


Fig.7-5 Deformation observation of polishing media in each water content.

(Part2 : Water content 30% and 50%)

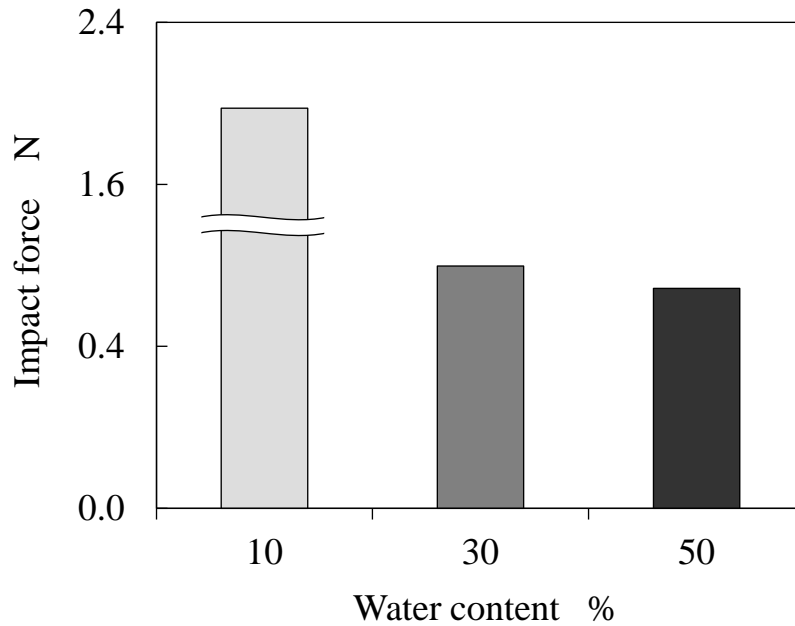


Fig.7-6 Comparison of impact force in each water content.

さらに、Fig.7-6 で示した衝撃力の比率について確認するため、圧力感知フィルムを用いて研磨メディアが加工面に加えた最大圧力の分布を調べた。結果を Fig.7-7 に示す。図より、研磨メディアの剛性が最も高い含水率 10%は他の含水率条件と比べて最も強く発色しており、研磨領域全域に高い圧力が加えられていたことが明らかである。これは前述した高い衝撃力とともに、Fig.7-5 にあるように加工面に衝突した際にほとんど研磨メディアは変形せず、加工面との接触面積が他の含水率条件よりも小さかったことが要因として考えられる。また、含水率 30%と 50%を比較すると、含水率 30%の方が強い発色を示した。含水率 30%と 50%では衝撃力に大きな差はみられなかったが、衝突時の変形挙動をみると 50%の方が大きな変形を示すことから、加工面との接触面積が 50%の方が大きくなり、圧力は 50%の方が低くなったと考えられる。

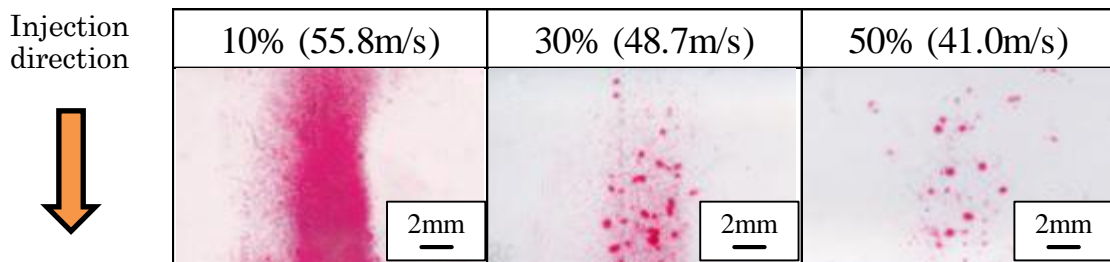


Fig.7-7 Comparison of coloring image in each water content.

7.3.3 含水率が加工面の硬さに及ぼす影響

本研究で用いた含水型研磨メディアは研磨加工時に発生する研磨熱を抑制できる利点を持つが²⁴⁾、その効果は研磨メディアの含水率に依存すると考えられる。したがって、第6章の実験では含水率10%の研磨温度が最も高くなっていたことが予想され、加工面が軟化して他の含水率条件よりも加工面を研磨除去しやすくなり、研磨開始直後の表面粗さ低下速度や表面粗さの収束値に影響を及ぼしたと推察した。そこで、各含水率条件における研磨時間と加工面硬さの関係を調べた。結果をFig.7-8に示す。図より、加工面の硬さはいずれの含水率条件においても研磨前より高くなった。また、硬さを調べた全ての研磨時間において含水率10%の測定値が最大となり、次いで30%、50%の順で低くなった。また、含水率10%の加工面硬さの推移は硬さ測定開始時から研磨時間1560sまで安定した推移を示した。これら結果より、7.2.1と同様にブラスト研磨法を超硬合金の研磨加工に適用した場合、加工面には加工硬化が生じることが明らかとなった。そして、研磨された加工面における含水率と硬さの関係から、加工硬化には前項で述べた研磨メディアによる衝撃力が寄与していると考えられる。ただし、衝撃力の比率を考慮すると含水率10%の硬さは明らかに低い。したがって、含水率10%では研磨熱の影響を受け、加工硬化が生じにくく、衝撃力相当の加工面硬さに至らなかったと考えられ、加工面の硬さと7.3.1で示した砥粒支持力、そして7.3.2で示した加工面に対する衝撃力の関係から、他の含水率条件より砥粒が食込みやすい環境が生じたと考えられる。また、加工面硬さの推移から、含水率10%の研磨メディアを用いた際に生ずる研磨熱は、研磨時間1560sまで硬さに影響を及ぼすほどの変化は生じていなかったと考えられる。

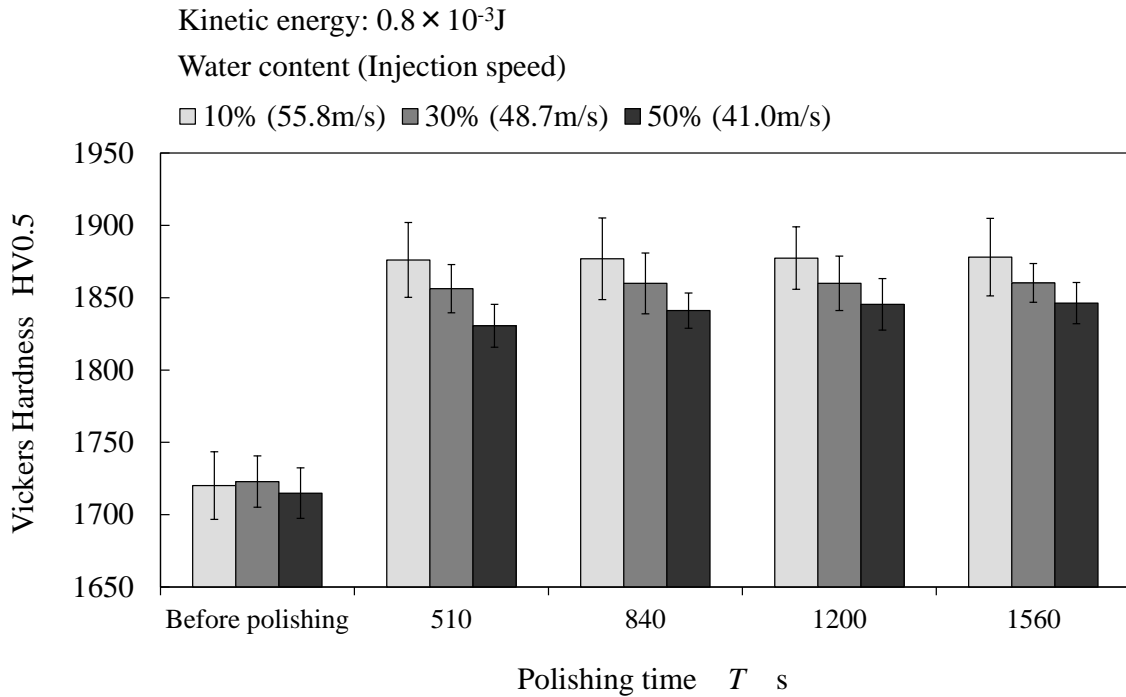


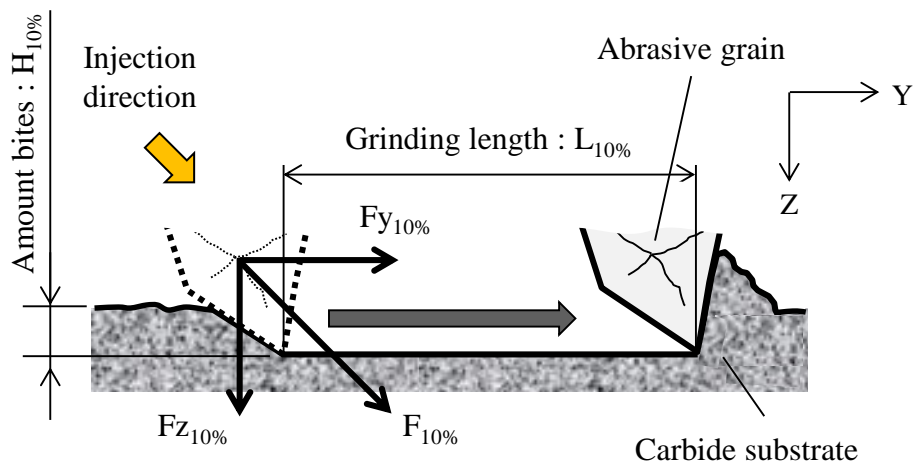
Fig.7-8 Relationship of polishing time and hardness in each water content with same kinetic energy.

7.3.4 含水率が研磨機構に及ぼす影響

前項まで行った確認実験および考察を総括する。Fig.7-9 は異なる含水率研磨メディアを同一運動エネルギーで加工面へ投射し、その際に砥粒が加工面を研磨する様子を模式図にしたものである。破線で示した砥粒は研磨メディアが加工面に衝突した際の砥粒の位置である。最初に研磨メディアが加工面へ衝突すると、研磨メディアが担持する砥粒は加工面に食込む。その際、剛性が低い含水率 50% では加工面から受ける反力によって砥粒が研磨メディア内部に押し戻されるため砥粒食込み量は小さくなる。一方、剛性の高い含水率 10% では砥粒が研磨メディア内部に押し戻される量は少なく、さらに含水率 50% と比べて加工面に加える衝撃力が高いことから、砥粒食込み力が高くなり砥粒は加工面に深く食い込むと考えられる。さらに、含水率 10% では加工面温度の上昇により、他の含水率条件に比べて加工硬化が生じにくく、加工面硬さと加工面への衝撃力の関係から最も砥粒が加工面に食込みやすい環境にあったと考えられる。次に衝突後の研磨加工に関して、含水率 10% では加工面に加える衝撃力が高いため加工面を除去する力が高くなり、含水率 50% よりも広い面積を研磨除去できると考えられる。したがって、本研磨法にて含水率を変更すると、①研磨メディアの砥粒支

持力, ②加工面に加える衝撃力, ③加工面の硬さが変わり, 含水率 10%の研磨メディアでは表面粗さの低下速度が他の含水率条件よりも高くなるが, 表面粗さの収束値も高くなったと考えられる.

(a) Water content : 10%



(b) Water content : 50%

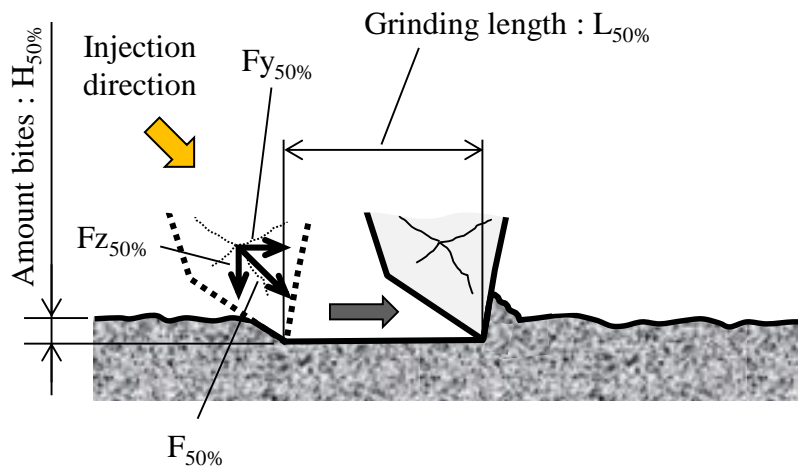


Fig.7-9 Schematic of relationship between grinding length and amount bites in each water content with same kinetic energy.

また、超硬合金の組織的構造を考慮した研磨機構の考察については、第4章、および第6章で得られた表面粗さの測定値より、研磨加工の途中に WC 粒子が加工面から脱落するなどの組織構造を乱す現象は発生していないと考えられる⁴¹⁾。また Fig.7-10 は異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで 1560s 間研磨した後の加工面を SEM にて観察した結果である。観察結果より、研磨条痕は WC 粒子および結合相に渡って形成されていたことから、研磨メディアが加工面に衝突した後、砥粒は WC 粒子および結合相を連続的に研磨除去していくものと考えられる。

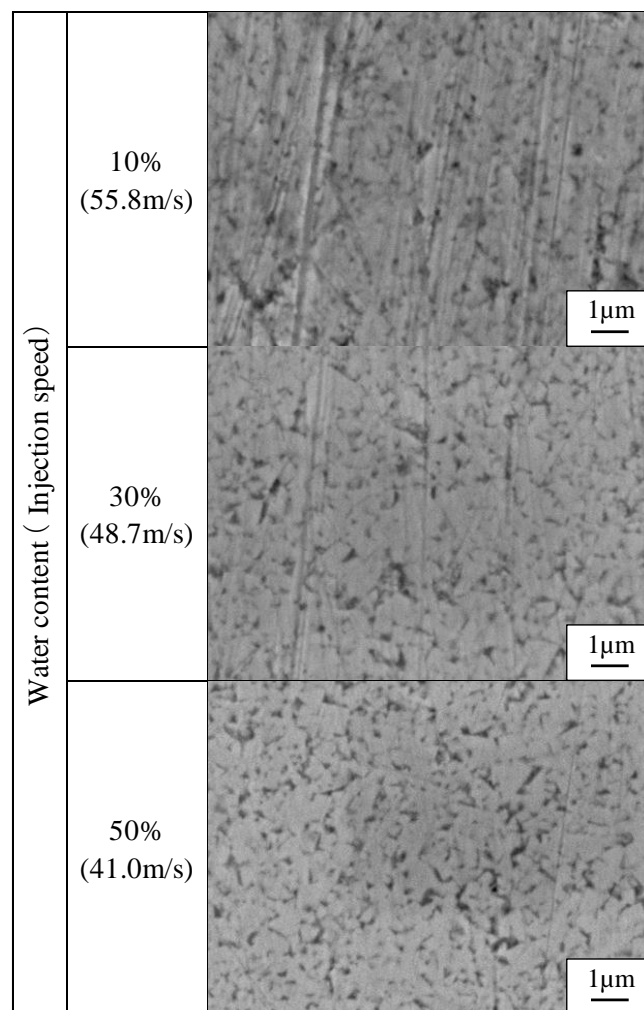


Fig.7-10 SEM images of polished surface in each water content with same kinetic energy.

7.3.5 研磨メディアの含水率に関する提言

前項までに含水率が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響について調べた。その結果、加工面を研磨する砥粒の粒径は同じであっても、含水率が異なることであたかも全く異なる砥粒サイズで研磨したような加工面を得た。したがって、加工目的と本実験で設定した含水率条件を整理すると、荒加工用目的として使用する場合は含水率 10%、中仕上げ用目的としては含水率 30%、最終仕上げ用目的としては含水率 50%を使用することが望ましいと考えられる。ただし、異なる研磨メディアを併用して使用することは作業効率の悪化につながり、現場の要望である「簡易的」という目的とは合致しない。また、作業時に異なる含水率研磨メディアが混入する恐れもある。したがって、現場が要望する簡易的で、かつ短時間に平滑な表面が仕上げられる研磨法を実現するには中仕上げ用である含水率 30%を基本研磨材として使用することが望ましいと考えられる。ただし、被加工物の初期表面状態と目的の表面状態に乖離がある場合は、含水率 10%の研磨メディアを粗加工用として使用し、作業時間の短縮化を図ることが望ましいと考えられる。

7.4 小括

本章では、投射速度および研磨メディアの含水率を変えた研磨実験結果から、超硬合金の研磨機構について考察を行い、考察の確認実験を行った。また、実験結果および考察から本研磨法のプロセス制御指針について検討し、下記結論を得た。

1. 含水率 30%の研磨メディアにて超硬合金を研磨した際、投射速度が高くなるにしたがい加工面の硬さは高くなった。したがって、投射速度が高くなるにしたがい加工面表層を除去する力は高くなるものの、加工面硬さが高くなるため砥粒食込み量が減少し、研磨メディアを高速度投射すると短時間に平滑な表面が得られたと考察した。
2. 投射速度 59.5m/s で含水率 30%の研磨メディアを投射した際、約 510s 間研磨を行うことにより表面粗さは最終的な収束値に到達したのに対し、投射速度 50.8m/s はこの表面粗さに到達するのに約 3 倍の研磨時間を必要とした。したがって、研磨メディアの高速度投射は短時間に表面粗さを減少させる有効な手段である。
3. 研磨メディアの弾性率は含水率の低下にともない増加し、含水率 10%の弾性率は含水率 30%と比べると約 10 倍であり、含水率 50%と比べると約 15 倍であった。

したがって、研磨メディアの剛性は砥粒支持力に影響をおぼすと考察し、含水率が低い条件では加工面からの反力に対し、砥粒が研磨メディア内に押し戻されていくため、砥粒は加工面に深く食い込んだと考察した。

4. 衝突時における変形挙動を撮影した動画より、衝突後における研磨速度 v' と研磨メディアが加工面に接触した時間 t を解析し、研磨メディアが加工面に加えた衝撃力を算出した結果、含水率 10%の衝撃力が他の含水率条件と比べて明らかに高く、その衝撃力は 30%、50%の約 3.5 倍であった。
5. 同一運動エネルギーで異なる含水率研磨メディアを加工面へ投射すると、研磨前より加工面硬さは高くなり、含水率が低い条件ほど硬さは高くなったが、衝撃力の割合と加工面硬さが対応しなかった。これは含水率 10%が他の含水率条件よりも冷却性能が劣るため、研磨熱の上昇により加工硬化が他の含水率条件よりも生じにくく、衝撃力と加工面硬さの関係から、砥粒が加工面に深く食い込みやすくなったと考察した。
6. 本研磨法にて含水率を変更すると、①研磨メディアの砥粒支持力、②加工面に加える衝撃力、③加工面の硬さが変わり、含水率 10%の研磨メディアでは表面粗さの低下速度が他の含水率条件よりも高くなるが、表面粗さの収束値も高くなったと考えられる。
7. 異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで超硬合金に投射し、1560s 間研磨した加工面を SEM で観察した結果、含水率が低い条件ほど明瞭に研磨条痕が確認でき、いずれの研削条痕も WC 粒子および結合相に渡って形成されていた。
8. 現場が要望する簡易的で、かつ短時間に平滑な表面が仕上げられる研磨法を実現するには含水率 30%を基本研磨材として使用することが望ましいと考えられる。ただし、被加工物の初期表面状態と目的の表面状態に乖離がある場合は、含水率 10%の研磨メディアを粗加工用として使用し、作業時間の短縮化を図ることが望ましい。

第 8 章 結論

本研究では超硬合金の研磨加工にブラスト研磨法を用い、本研磨法に関与する因子と加工面性状の関係を系統把握し、本研磨法のプロセス制御指針を確立するとともに、本研磨法による超硬合金の研磨機構を明らかにした。特に本研磨法に関与する因子として投射量、投射速度、研磨時間、投射角、研磨メディアの含水率(換言すると質量および剛性)を挙げ、これら因子と加工面性状の関係を調べた。以下に明らかにしたことを示す。

8.1 総括

第 3 章から第 7 章で得られたブラスト研磨法の研磨機構に関する結果とその要因に対する考察を「工学的意義」にまとめた。そして、本研究を通じて得た本研磨法のプロセス制御指針については「工業的意義」にまとめた。

8.1.1 工学的意義

『研磨領域中から最も表面粗さの低い箇所を特定する手法』

本ブラスト研磨装置では帯状に研磨メディアが投射されるため、加工面に対して 45° の方向から研磨メディアを投射した場合、加工面にはある領域にて研磨された箇所が形成された。また、この領域中には顕著な鏡面状態が得られる箇所が確認された。実際の研磨処理においては、最も表面粗さが低くなる箇所を基準とし、被加工物表面を走査することにより研磨加工を行う。したがって、第 3 章ではブラスト研磨加工を実施した加工面全域の巨視的な表面形状測定、および表面粗さの分布を調べ、研磨領域中にて最も高い表面粗さが低くなる箇所の特定を行った。その結果、大型基材の加工面には投射方向に沿う方向に 30mm、投射方向に直交する方向に 6mm の範囲で研磨領域が形成され、研磨領域中の最深部にて、最も表面粗さが低くなることを明らかにした。したがって、研磨領域中の最深部を特定することで、最も表面粗さが低くなる箇所を特定することが可能になった。

『粘弾性研磨メディアによる研磨加工プロセス』

第 5 章では投射速度が加工面性状に及ぼす影響を調べるために、加工面の輪郭形

状を観察した。その結果、本研磨法では加工面表層部に存在する凸部のみが優先的に研磨されるだけでなく、凹部も同時に研磨されることを明らかにした。換言すれば研磨前の輪郭形状を残しながら研磨加工が進行することを明らかにした。そして、輪郭形状の推移から単位時間あたりの研磨除去深さを調べた結果、谷底部は比較的平坦な箇所の約 75%であり、比較的高い速度で研磨加工が行われていたことを明らかにした。

『投射角が加工面に及ぼす影響』

第 5 章では、研磨メディアの運動エネルギーが加工面に伝達される際の角度に着目し、投射角が加工面性状に及ぼす影響を調べた。その結果、表面粗さの低下速度には衝撃力の水平成分が寄与し、単位時間あたりの研磨除去深さは衝撃力の垂直成分が寄与していることを明らかにした。また、投射角が 90° の結果より表面を平滑化させるためには衝撃力の水平成分が不可欠であることを明らかにした。

『研磨メディアの投射速度が超合金の研磨機構に及ぼす影響』

これまでに本研磨法に関する知見では、投射速度を変化させた場合の研磨時間と表面粗さの関係が明らかにされていなかった。そこで第 4 章では、含水率 30% の研磨メディアを用いて投射速度を変化させた場合の表面粗さと研磨時間の関係を調べた。その結果、投射速度が 21.4m/s 以上の条件で、かつ投射速度が高い条件ほど表面粗さは短時間で収束し、その収束値は本実験時間内において最も低い値を示すことを明らかにした。本研磨法に類似するドライブラスト法においては、研磨材の運動エネルギーを高くすると加工面に対する砥粒食込み力が高くなり、表面粗さの収束値は高くなる傾向にある。したがって、本実験で得られた結果はこれら結果とは相反する結果を得た。

第 7 章では本現象の考察を行い、考察に対する確認実験を実施した。その結果、本研磨法を超合金の研磨加工に適用すると、加工面には加工硬化が生じ、研磨メディアの投射速度が高い条件ほど加工面硬さが高くなることが明らかになった。したがって投射速度が高い条件では砥粒が加工面に食込みにくくなるものの、加工面を除去する力は投射速度が低い条件より高いことから広い面積を研磨除去することができ、投射速度が高い条件では表面粗さが短時間に、かつより低い値へ収束したと考察した。また、本研究で使用した研磨メディアは含水型であることから、ドライブラスト加工と

比べて加工面で生じる研磨温度が低く抑えられるため²⁴⁾、加工面に加工硬化が生じやすい環境が生まれたと考えられる。さらに、加工硬化は熱処理などの硬化法に比べて被削性に及ぼす影響が少ないことが知られているため⁴⁴⁾、加工面の除去面積に及ぼす影響は少ないと考えられる。

『研磨メディアの含水率が超硬合金の研磨機構に及ぼす影響』

第 6 章では、初めに含水率(換言すれば質量)を変化させて運動エネルギーを変化させたブラスト研磨実験を行い、第 4 章で得られた投射速度を変えて運動エネルギーを変化させた実験結果と比較した。その結果、最も運動エネルギーが低い含水率 10%の研磨メディアにて研磨開始直後の表面粗さ低下速度は最大となり、表面粗さの収束値も最大値を示した。したがって、第 4 章で得られた結果と異なることを明らかにした。また、加工面の観察結果から他の含水率に比べて砥粒の食込み力および加工面の除去力が高くなっていたことが示唆され、研磨メディアの剛性がこれら結果に起因したと推察した。次に、研磨メディアの剛性が本研磨機構に及ぼす影響をより理解するために異なる含水率研磨メディアを同一運動エネルギーで投射する実験を行った。その結果、先ほどと同様に研磨時間と表面粗さの関係は含水率 10%において表面粗さ低下速度が最大となり、表面粗さ収束値も最大値を示した。

第 7 章では本現象に関する考察を行い、含水率 10%の研磨メディアが高い研磨力を示した要因を明らかにするため確認実験を行った。最初に、研磨メディアの含水率と剛性(換言すれば弾性率)の関係を調べた結果、含水率の減少にともない弾性率が上昇し、含水率 10%の弾性率は他の含水率条件よりも明らかに高く、含水率 30%の約 10 倍で、含水率 50%の約 15 倍であった。次に、これら弾性率の異なる研磨メディアが加工面に衝突する際の変形挙動を観察した。その結果、含水率 10%の研磨メディアにおいてほぼ変形は認められなかったが、30%、50%では変形が認められた。また、この観察動画より各含水率の衝撃力を調べたところ、含水率 10%が最も高く、次いで 30%、50%の順に低くなり、含水率 10%は他の含水率条件と比べて約 3.5 倍の衝撃力を加工面に加えていたことが明らかとなった。さらに、研磨メディアの加工面冷却機能は含水率に依存すると考えられ、研磨温度が加工面硬さに影響を及ぼすと推察し、加工面の硬さを測定した。その結果、加工面の硬さは加工面に加える衝撃力の順番と対応していたが、硬さの増加した割合と衝撃力の大きさの割合は対応していないことが明らかとなった。これは研磨熱が上昇しやすい含水率 10%において加工硬化が生じにくく、衝

撃力相当の加工面硬さに至らなかったと考えられる。したがって、本研磨法にて含水率を変更すると、①研磨メディアの砥粒支持力、②加工面に加える衝撃力、③加工面の硬さが変わり、ブラスト研磨の研磨機構に影響を及ぼすと考察した。そして、含水率 10%の研磨メディアは他の含水率条件よりも砥粒支持力および加工面に加える衝撃力が高く、さらに研磨する加工面の硬さは衝撃力に相当した加工面硬さに至っていないことから砥粒は加工面に深く食込みやすくなり、表面粗さの収束値は他の含水率条件と比べて高くなったと考察した。さらに衝突後の研磨加工において、含水率 10%の条件では衝撃力の高さより加工面を除去する力が高いため、他の含水率条件より広い面積を研磨除去できることから、研磨開始からの表面粗さ低下速度が他の含水率条件よりも高くなったと考察した。

さらに、同章では超硬合金の組織的構造を考慮した研磨機構に関する考察も行い、第 4 章、第 6 章で得られた表面粗さの測定値より、砥粒が研磨加工する際に加工面から WC 粒子が脱落するなどの組織構造を乱す現象は発生していないと考察した。また、異なる含水率研磨メディアを同一運動エネルギーで 1560s 間研磨した加工面を SEM 観察した結果、研磨条痕は WC 粒子および結合相に渡って形成されていたことから、研磨メディアが加工面に衝突した後、砥粒は WC 粒子および結合層を連続的に研磨除去していくものと考察した。

8.1.2 工業的意義

『研磨メディアの投射量に関する提言』

本研究を行うにあたり、研磨メディアの投射量増加は短時間に表面粗さを減少させる手法として有効であると推察し、第 3 章では本研究で使用したブラスト研磨装置の装置設定値と投射量の関係を調べた。その結果、設定値上昇にともない投射量は増加したが、投射量のばらつきも大きくなることが明らかとなった。これは本研磨装置の投射量を増加させる手法に要因があると考察した。したがって、本研究と同仕様の装置では投射量を増加させる手法は品質の安定性を損ねる危険性があると判断した。

『研磨メディアの投射速度に関する提言』

第 4 章では、投射速度が高速度化させるほど表面粗さは短時間で収束し、その収束値は実験時間内において最も低い値を示すことを明らかにした。そして、第 7 章では、投射速度 50.8m/s の表面粗さが投射速度 59.5m/s の表面粗さ収束値に到達するまで

に、約3倍の研磨時間を必要としたことを明らかにした。したがって、研磨メディアの高速度投射は、短時間に表面粗さを小さくする有効な手法であると判断した。

『研磨角に関する提言』

第5章では、表面粗さの低下速度には衝撃力の水平成分が寄与し、単位時間あたりの研磨除去深さは衝撃力の垂直成分が寄与していることを明らかにした。したがって、投射角は45°を基準値とし、研磨加工で許容される研磨除去量から投射角を検討すべきである。特に許容される研磨除去量が小さい場合は、投射角を45°未満に設定することが望ましいといえる。

『研磨メディアの含水率に関する提言』

第6章、第7章の結果および考察より、加工面を研磨する砥粒の粒径は同じであっても、含水率が異なることであたかも全く異なる砥粒サイズで研磨したような加工面を得た。したがって、加工目的と本研究で設定した含水率条件を整理すると、荒加工用目的として使用する場合は含水率10%、中仕上げ用目的としては含水率30%、最終仕上げ用目的として含水率50%を使用することが望ましいと考えられる。ただし、異なる研磨メディアを併用して使用することは作業効率の悪化につながるだけでなく、異なる含水率研磨メディアが混入する恐れもある。したがって、現場が要望する簡易的で、かつ短時間に平滑な表面が仕上げられる研磨法を実現するには中仕上げ用である含水率30%を基本研磨材として使用することが望ましいと判断した。ただし、被加工物の初期表面状態と目的の表面状態に乖離がある場合は、含水率10%の研磨メディアを粗加工用として使用し、作業時間の短縮化を図ることが望ましい。

また、含水率30%の研磨メディアにおいても連続使用し続けると含水率が変動することが考えられるため、連続使用時は適宜含水率を必ず確認する必要がある。

8.2 結論

ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する研究を行い、以下に得られた成果の詳細を示す。

第3章では、「投射条件の定量的制御法の確立と加工面観察領域の特定」と題して、初めに本研究で用いたブラスト研磨装置の設定値と単位時間あたりの投射量、および

投射速度の定量化を図るために、本装置の設定値と両因子の関係について調べた。その結果、投射量ペダルの数値を上昇させていくと単位時間あたりの投射量は増加するが、投射量のばらつきが大きくなることを明らかにした。また、インペラーを回転させるモータのインバータ値： I と研磨メディアの平均投射速度： V の関係は直線関係となることを明らかにした。次に、加工面全域の巨視的な形状測定、および表面粗さを調べ、最も表面粗さの低くなる箇所を調べた。そして研磨領域を形状測定した結果から、研磨メディアの投射方向に対して沿う方向の測定結果では最も深く研磨される箇所が存在し、この箇所は研磨メディアの投射方向に対して垂直方向の測定結果でも最も深く研磨されていた。そして、研磨メディアの投射方向に対して沿う方向の表面粗さの分布を調べた結果、最深部にて表面粗さ測定値は最小値を示した。したがって、研磨領域において最も表面粗さが低くなる箇所は、研磨領域中の最深部であることを明らかにした。

第 4 章では、「投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響」と題して、ブラスト研磨加工における投射速度および研磨時間が加工面性状に及ぼす影響を調べた。その結果、研磨メディアの投射速度が 12.3m/s 以下の条件において、得られる表面粗さ測定値は収束せずに時間経過にともない単調減少する傾向を示すことを明らかにし、投射速度が 21.4m/s 以上の条件では、研磨開始時より表面粗さ測定値が急激な減少を示すことを明らかにした。また、ある研磨時間まで研磨を継続すると、この急激な変化は収束し、収束値に至るまでの時間は各投射速度において異なり、投射速度が高速度化するほど短時間に収束することを明らかにした。SEM による加工面直上からの定点観察では、投射速度 31.5m/s では表面凸部の山頂近傍より研磨の進行が認められ、表面凸部の消失速度は明らかに 59.5m/s の方が高いことを明らかにした。レーザー顕微鏡による輪郭形状の定点観察では、投射速度 12.3m/s では輪郭形状に大きな変化はみられなかったが、投射速度 31.5m/s 以上の条件では研磨前の輪郭形状を残しながら研磨が進む特徴を示した。さらに、輪郭形状における山頂部、谷底部、平地部の研磨速度を調べた結果、いずれの投射速度条件においても研磨開始後 30s 間に輪郭形状が大きく変化し、研磨速度は山頂部が最も高く、平地部、谷底部の順で低くなり、谷底部の研磨速度は平地部の約 75%であることを明らかにした。また、加工面の輪郭形状と砥粒の大きさから幾何学的に検討した結果、狭隘な表面凹部の谷底部まで本実験で使用した研磨砥粒は到達することが可能であることを明らかにした。

第 5 章では、「投射角が加工面性状に及ぼす影響」と題して、ブラスト研磨加工における研磨メディアの投射角が加工面性状に及ぼす影響を調べた。その結果、研磨メディアの投射角を変化させた実験より、表面粗さの低下速度は 45° が最も高く、次いで 15° 、 75° 、 90° の順に低くなった。したがって、表面粗さの低下には衝撃力の水平分力である加工面の除去力が垂直分力である砥粒の食込み力より大きく寄与していることを明らかにした。加工面の高さ低下速度は 45° が最大となり、次いで 90° 、 75° 、 15° の順に低下した。したがって、加工量に対しては垂直分力が水平分力より大きく寄与していることを明らかにした。ただし、表面粗さの低下速度と加工面の高さ低下速度は 45° の条件にて最大値を示したことから、高い表面高さ低下速度および加工面の高さ低下速度を得るためには水辺分力と垂直分力のバランスが重要であるといえる。そして、投射角 90° の条件では加工面が平坦化しないことから、加工面の平滑化には衝撃力の水平分力が不可欠であることを明らかにした。

第 6 章では、「研磨メディアの含水率が加工面粗さに及ぼす影響」と題して、初めに研磨メディアの含水率(換言すれば質量)を変化させて運動エネルギーを変化させた場合の実験を行い、第 4 章で得られた投射速度を変化させて運動エネルギーを変えた実験結果と比較した。その結果、研磨開始からの表面粗さの低下速度は最も高くなったが、表面粗さの収束値も最も高い値を示すことを明らかにした。また、含水率 10% では加工面に多数の研磨痕が確認されたが、含水率の増加により研磨痕の存在は減少することを明らかにした。

さらに、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで投射し、研磨メディアの材料特性および加工特性が加工面粗さに及ぼす影響を調べた。その結果、研磨開始直後における表面粗さ低下速度は含水率 10% にて最も高くなり、次いで 30%、50% の順に低くなり、表面粗さの収束値は 10% が最も高くなることを明らかにした。

第 7 章では「ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する考察」と題し、第 4 章、第 6 章にて得られた興味深い結果に対する要因考察を通じて本研磨法の超硬合金研磨機構を検討した。最初に、研磨メディアの投射速度を高速度化することによって短時間に平滑な表面を得ることができた要因について考察し、表面粗さの大きさを司る砥粒食込み量には加工面の硬さが影響を及ぼす推察した、そして、加工面の硬さを測定する確認実験を行ったところ、投射速度が高くなるにしたがい加工面の硬さ

は高くなることが明らかとなった。したがって、投射速度が高くなるほど砥粒が食込みにくい環境となるが、加工面を除去する力も高くなるため、研磨メディアを高速度投射すると短時間に平滑な表面を得ることができると考察した。また、投射速度 59.5m/s の場合、最終表面粗さ収束値に到達した研磨時間は約 510s であったのに対し、投射速度 50.8m/s はこの表面粗さに到達するのに約 3 倍の研磨時間を必要とした。したがって、研磨メディアの高速度投射は短時間に表面粗さを減少させる有効な手段であることを明らかにした。

次に、研磨メディアの含水率が変化した場合に、得られる加工面性状が明らかに異なる点について検討した。特に研磨メディアの含水率が変わる場合、材料特性としては質量以外に剛性が変わり、加工特性としては加工面の冷却作用が変わる。そこで最初に、研磨メディアの含水率と剛性を調べるため、含水率と研磨メディアの弾性率を調べた。その結果、弾性率は含水率の低下にともない増加し、含水率 10%の弾性率は含水率 30%と比べると約 10 倍であり、含水率 50%と比べると約 15 倍であることを明らかにした。次に、弾性率の異なる研磨メディアが加工面に衝突する際の変形挙動を観察した結果、含水率 10%ではほとんど変形が確認できなかったのに対し、含水率 30%、50%では変形が確認できた。さらに撮影した動画より、衝突後における研磨速度 v と研磨メディアが加工面に接触した時間 t を解析し、研磨メディアが加工面に加えた衝撃力を算出した結果、含水率 10%の衝撃力が他の含水率条件と比べて明らかに高く、その衝撃力は 30%、50%の約 3.5 倍であった。さらに、加工面への冷却作用と加工面硬さの関係を調べた。その結果、研磨前より加工面硬さは高くなり、含水率が低い条件ほど硬さは高くなったが、加工面に加えた衝撃力の割合と硬さの上昇割合が合致しないことが明らかとなり、これは研磨熱が上昇しやすい含水率 10%において加工硬化が生じにくく、衝撃力相当の加工面硬さに至らなかったと考察した。したがって、含水率 10%は本研磨法にて含水率を変更すると、①研磨メディアの砥粒支持力、②加工面に加える衝撃力、③加工面の硬さが変わり、含水率 10%の研磨メディアでは表面粗さの低下速度が他の含水率条件よりも高くなるが、表面粗さの収束値も高くなったと考察した。

また、超硬合金の組織的構造を考慮した研磨機構を検討するため、異なる含水率の研磨メディアを同一運動エネルギーで超硬合金に投射し、1560s 間研磨した加工面を SEM で観察した結果、含水率が低い条件ほど明瞭に研磨条痕が確認でき、いずれの研削条痕も WC 粒子および結合相に渡って形成されていることを明らかにした。

最後に本章に関する総括として、加工目的と研磨メディアの含水率条件を整理した。そして、荒加工用目的として使用する場合は含水率 10%、中仕上げ用目的としては含水率 30%、最終仕上げ用目的として含水率 50%を使用することが望ましいとするが、現場が要望する簡易的で、かつ短時間に平滑な表面が仕上げられる研磨法を実現するには中仕上げ用である含水率 30%を基本研磨材として使用することが望ましいと提言した。ただし、被加工物の初期表面状態と目的の表面状態に乖離がある場合は、含水率 10%の研磨メディアを粗加工用として使用し、作業時間の短縮化を図ることが望ましいとも提言した。

第9章

ブラスト研磨法および研磨メディアにおける今後の展望

本研究では、研磨メディアを高速度投射することにより、短時間に平滑な表面が得られることを明らかにした。ただし、本研究では市販装置にて実現できる投射速度領域を調べたに過ぎず、さらなる高速度投射を行った際の加工面性状について研究する余地がある。また、本研究では加工面の初期表面性状を安定して製作するためにショットブラストを用いたが、実際の切削工具表面は研削砥石によって生成された研削条痕が規則正しく並んでいる。このような場合、最も効率良く研磨するためには研削条痕に対してどの方向から研磨メディアを投射すべきか検討することによって、さらに本研磨法の利便性向上が図れると考える。

また、本研究では研磨メディアの含水率（換言すれば剛性）は加工面に大きな影響を及ぼす因子であることを明らかにした。しかし、含水型の研磨メディアにおいては加工面を冷却できる優れた利点を有するが、水分の蒸発などが発生するため、長時間にわたり連続使用することが難しい。そこで、さらなる高速度投射が実現でき、かつ研磨メディアの含水率をモニタして含水率を一定に保つ機能を有したブラスト研磨装置を開発し、既存装置では実現できなかった高能率加工、安定加工が実現できるブラスト研磨装置の開発に本研究成果を生かしたいと考えている。

さらに、本研究では研磨メディアの運動エネルギー、研磨メディアの剛性が超硬合金の加工面性状に及ぼす影響を明らかにしたことから、これら成果を応用し、既存品よりも小径でありながら研磨力が低下しない新型研磨メディアの開発を行いたいと考えている。ブラスト研磨法は複雑な曲面を容易に研磨できるため、切削工具の表面仕上げ処理方法として非常に有効な手法であるが、市販品の粒子径は約0.5～2.0mmであるため、これよりも狭隘な箇所には研磨メディアは侵入できない。切削工具では呼びがφ3未満であるドリルの溝部や、タップのねじ山における谷底部などが上述部分に該当する。そこで、本研究成果はこのような箇所を研磨できる新開発研磨メディアの応用に利用できると考えている。

最後に、近年の切削工具表面における表面改質技術については、フェムト秒レーザー加工技術を利用して、工具表層に微細な縞状のパターンニングを形成する技術が注目されている。この手法によって工具と被削材との接触面積が低減し、さらに縞状の凹部が油溜りとなることから切削抵抗が減少する事例や、耐溶着性が向上する事例が

報告されている^{4)~8)}。しかし、この手法は多額のイニシャルコストが必要となることや、製造工程が増えるため、1.1.2 で述べた現場の要求を満たす手法として利用することは難しい。著者はこの縞状パターンニングの形成について、レーザ加工技術を使用せずとも、工具製作時に工具表面へ形成される研削条痕が利用できると推察している。研削条痕は、工具製作時における研削加工時の条件を操作することで、縞の方向、ピッチや深さを制御することが可能である。また、第5章で述べたように、ブラスト研磨法は被加工物が持つ初期の表面性状を残しながら研磨が進行する特徴を有する。したがって、既存の研削条件を再検討して、切削工具の各部位にとって良好な研削条痕を製作し、最終工程でブラスト研磨法により表面を最適化する手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 中小企業事業団, FMC 入門 –フレキシブル生産セルの設計・導入・運用–, 日刊工業新聞社, (1983), 13
- 2) 帯川 利之, 切削加工の高速化, 超高速化, 生産研究, 59, 6(2007), 471-476
- 3) 中村 祐司, 次世代 CNC 工具研削盤にみる新技術(特集 1 分野別にみる最新研削盤の新技術), 機械と工具, 48, 6(2004), 25-29
- 4) 吉田 透, 工作機械 これから使う高精度 CNC 工具研削盤の基礎のきそ: 牧野フライス精機(株)編(第 1 回)高精度 CNC 工具研削盤とは, 機械技術, 61, 8(2013), 68-71
- 5) 吉田 透, 工作機械 これから使う高精度 CNC 工具研削盤の基礎のきそ: 牧野フライス精機(株)編(第 3 回)工具研削を支える周辺機器とソフトウェア:, 機械技術, 61, 10(2013), 69-73
- 6) Noritaka KAWASEGI, Hiroshi SUGIMORI, Hideki MORIMOTO, Noboru MORITA, Isao HORI: Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior, Precision Engineering, 33, 3(2009), 248
- 7) Tatsuya SUGIHARA, Toshiyuki ENOMOTO: Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface – Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns, Precision Engineering, 33, 4(2009), 425
- 8) Tatsuya SUGIHARA, Toshiyuki ENOMOTO: Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture, Precision Engineering, 36, 2(2012), 229
- 9) T.ENOMOTO, T.SUGIHARA: Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 59, 1(2010), 597
- 10) Toshiyuki ENOMOTO, Tatsuya SUGIHARA, Satoshi YUKINAGA, Kenji HIROSE, Urara SATAKE: Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 61, 1(2012), 571
- 11) 古野 真弘, 北嶋 弘一, 佃 陽介, 工具母材表面粗さが PVD コーティングの密着特性に及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 54, 11(2010), 666-671

- 12) 古野 真弘, 北嶋 弘一, 佃 陽介, 工具母材表面粗さが PVD コーティングの密着特性に及ぼす影響(第 2 報) コーティング被膜とすくい面粗さが切削特性に及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 55, 1(2011), 48-53
- 13) 井上 陽介, 劉 猛, 高木 純一郎, 田中 雄幸, 塚崎 高広, アルミニウム合金のドリル加工のドライ化に関する研究(第 4 報) ドリル溝の鏡面仕上げの効果について, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2004), 387
- 14) 吉田 弘美, 絵とき「みがき加工」基礎のきそ, (2012), 143-144
- 15) 北篠正浩, ブラシ工具を用いたバリ取り・エッジ仕上げ技術, 砥粒加工学会誌, 55, 10(2011), 579-582
- 16) 山本 親慶, 中田 勲, 福田 雅秀, 進村 武男, 二次元自由運動機構を適用した磁気援用研磨装置による超硬合金の鏡面仕上げに関する研究: 第 1 報 熟練工の研磨技術の機械化について, 砥粒加工学会誌, 47, 5(2003), 253-258
- 17) 山本 親慶, 中田 勲, 福田 雅秀, 進村 武男, 二次元自由運動機構を適用した磁気援用研磨装置による超硬合金の鏡面仕上げに関する研究: 第 2 報 溝形状を有する金型の 3 面同時研磨へ, 砥粒加工学会誌, 47, 5(2003), 259-262
- 18) 出口 貴久, 電解研磨による平準化, 砥粒加工学会誌, 54, 5(2010), 260-263
- 19) 宇野 義幸, 岡田 晃, 大面積電子ビーム照射による表面平滑化と表面改質, 砥粒加工学会誌, 54, 5(2010), 268-271
- 20) 北田 良二, 岡田 晃, 宇野 義幸, 大面積電子ビーム照射による超微粒子超硬合金の表面処理, 精密工学会, 76, 12(2010), 1393-1397
- 21) 北嶋 弘一, 新しい研磨メディアと仕上げ技術の最新動向, 砥粒加工学会誌, 48, 11(2004), 597-600
- 22) 渡辺 俊明, 細孔用マイクロ砥粒流動加工について, 砥粒加工学会誌, 48, 11(2004), 609-612
- 23) 山下 健治, 北嶋 弘一, 浜田 賢治, 倉谷 吾郎, エアロラップ法による鏡面仕上げおよび微細バリ取り技術, 砥粒加工学会誌, 52, 2(2008), 66-69
- 24) 北嶋 弘一, 山下 健治, マルチコーンメディアによるブラスト研磨, 砥粒加工学会誌, 50, 9(2006), 505-508
- 25) 山下 健治, 鏡面ショット研磨「エアロラップ」によるバリ処理・エッジ仕上げ, 機械技術, 58, 13(2010), 34-36
- 26) K. Ramesh, Serdar Ozbayraktar, Habib Saridikmen, Aero-lap polishing of poly

- crystalline diamond inserts using Multicon media, *Journal of Manufacturing Processes*, 14, 2(2012), 167-173
- 27) 藤 哲也, 北嶋 弘一, 加納 健太, 山下 健治, 動物性複合蛋白質研磨メディアによるブラスト研磨法に関する研究, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005), 1115
- 28) 北嶋 弘一, 山根 絵里, 山下 健治, 動物性複合蛋白質研磨メディアによるブラスト研磨法に関する研究(第 2 報), 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2007), 1129
- 29) 波田野 栄十, 次世代型鏡面ショット技術, 砥粒加工学会誌, 48, 11(2004), 605-608
- 30) 波田野 栄十, 鏡面ショット研磨技術, 機械技術, 54, 10(2006), 29-31
- 31) 大橋 一仁, 曾我部 英介, 魯 楠, 藤原 政宏, 大西 孝, 塚本 真也, 円筒ブラスト加工に関する基礎的研究, 砥粒加工学会誌, 56, 9(2012), 626-631
- 32) 山本 富士夫, 植村 知正, 小川 邦康, 近江 和生, 二値化相関法 PTV の正対応率と測定精度の向上, 日本機械学会論文(B 編), 57, 543(1991), 186-191
- 33) 山本 富士夫, 植村 知正, 幸川 光雄, 井口 学, 酒井 善秀, 2 値化相関法 2D-PTV とその 2 円柱干渉流への応用, 福井大学 工学部 研究報告, 40, 1(1992), 31-38
- 34) 北嶋 弘一, 皆木 一志, 皆木 和範, 伊澤 守康, ドライブラスト加工によるステンレス鋼表面性状の改善に関する研究 第 1 報: 噴射条件が表面性状に及ぼす影響, 49, 1(2005), 30-35
- 35) 当舎 勝次, 飯田 喜介, グリッドブラスト加工面の特性, 精密工学会誌, 53, 2(1987), 269-274
- 36) 当舎 勝次, 飯田 喜介, グリッドブラストの削食特性, 精密工学会誌, 54, 6(1988), 1132-1137
- 37) 当舎 勝次, 飯田 喜介, グリッドブラストの削食機構, 精密工学会誌, 58, 12(1992), 2025-2030
- 38) 飯田 喜介, 当舎 勝次, ショットピーニングの加工条件と疲れ強さ, 精密機械, 51, 8(1975), 1569-1574
- 39) 鈴木 寿, 超硬合金の最新の研究動向, 日本金属学会会報, 11, 2(1972), 125-134

- 40) 竹内 栄一, 機械部品の摩耗とその対策(その1) 摩耗機構, 金属表面技術, 22, 11(1971)602
- 41) 玉置 元久, 超硬工具の研削に関する研究(第2法) 超硬合金の研削条痕の観察, 精密機械, 319, 27(1961), 557-564

論文目録

発表論文

査読付学術論文

- 1) 高井一輝, Mohd NIZAR, 上村正雄, 福本昌宏, ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する研究(第 1 報) 研磨材投射速度と研磨時間が表面粗さに及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 57 巻 4 号(2013) pp.253-258
- 2) 高井一輝, Mohd NIZAR, 上村正雄, 福本昌宏, ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する研究(第 2 報) 研磨メディアの運動エネルギーと投射角が加工面性状に及ぼす影響. 砥粒加工学会誌, 58 巻 6 号(2014) pp.386-391

査読付国際会議論文

- 1) Kazuteru TAKAI, Mohd NIZAR, Masao UEMURA and Masahiro FUKUMOTO, Improvement of surface properties of cemented carbide by using blast polishing process, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials, pp.133, 2012

学会発表

- 1) Kazuteru TAKAI, Mohd NIZAR, Masao UEMURA and Masahiro FUKUMOTO, Improvement of surface properties of cemented carbide by using blast polishing process, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials, pp.133, 2012
- 2) 高井一輝, Mohd NIZAR, 上村正雄, 福本昌宏, ブラスト研磨法の諸因子が超硬合金表面性状に及ぼす影響, 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012)CD-ROM 論文集, 1012(2012)

謝辞

本研究の機会を与えていただいた、オーエスジー株式会社石川則男代表取締役社長、大沢二郎常務取締役様に深く感謝いたします。

本研究を遂行および論文をまとめるにあたり、終始懇切丁寧にご指導を賜りました豊橋技術科学大学 福本昌宏教授、上村正雄名誉教授、安井利明准教授、山田基宏助教に対し厚く御礼申し上げます。また、本論文を御査読ならびに適切なご指導を賜りました豊橋技術科学大学 伊崎昌伸教授、竹市嘉紀准教授に心から御礼申し上げます。

更に、本実験の実施にあたり、ブラスト研磨装置をご提供いただきましたオーエスジー株式会社様、超硬合金をご提供いただきました日本ハードメタル株式会社様、超硬合金試料の加工にご協力いただきました中野ハガネ株式会社様、高速度ビデオカメラに関するご助言、ならびに照明器具をご提供いただきました株式会社フoton様に深く感謝致します。

研究遂行に際して、多大なるご協力を頂きました豊橋技術科学大学大学院 界面・表面創製研究室の皆様には心から御礼申し上げます。特に、共同研究者である Mohd Nizar 君、有松直弥君、川光裕士君には絶大なるご協力をいただきましたことを深く感謝致します。

最後に、本研究の遂行に全面的な理解を示し、経済的および精神的支えとなってくれた著者の家族に心から感謝致します。