

博士論文

砥粒挙動を重視した  
高性能複合ラッピング定盤の開発  
(Development of a high-performance composite lapping  
tool by considering abrasive flow)

2019年3月

立命館大学大学院理工学部研究科  
機械システム専攻博士課程後期課程

川波多 裕司

立命館大学審査博士論文

砥粒挙動を重視した  
高性能複合ラッピング定盤の開発  
(Development of a high-performance composite lapping  
tool by considering abrasive flow)

2019年3月

March 2019

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering  
and Robotics

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

川波多 裕司

KAWAHATA Yuji

研究指導教員：谷 泰弘 教授

Supervisor : Professor TANI Yasuhiro

## 目次

第1章 緒論	
1.1 研究の背景	1
1.2 研磨加工の基本的なメカニズム	4
1.2.1 ラッピングとポリシング	4
1.2.2 湿式ラッピングと乾式ラッピングの定盤との関係	5
1.3 現状のラッピング定盤	7
1.4 既往の研究	9
1.5 本研究の目的と構成	9
1.5.1 本研究の目的	9
1.5.2 本論文の構成	10
第1章 参考文献	11
第2章 鋳鉄定盤の問題点の明確化	
2.1 緒言	14
2.2 鋳鉄定盤の性能	14
2.2.1 鋳鉄定盤の特徴	14
2.2.2 鋳鉄定盤上の砥粒の挙動	16
2.3 鋳鉄定盤の研磨性能	18
2.3.1 目切り溝の有無による影響	18
2.3.2 難削材に対する研磨性能	24
2.3.3 研磨性能と定盤粗さの経時変化	25
2.4 結言	26
第2章 参考文献	27
第3章 表面微細凹凸形状が維持可能な複合定盤の開発	
3.1 緒言	29
3.2 ステンレス鋼定盤の研磨性能	29
3.3 複合定盤の製造方法	33
3.4 マトリックス材の選定	34
3.5 粉体定盤の研磨性能	37
3.6 繊維定盤の研磨性能	38
3.6.1 粉体定盤と繊維定盤の比較	38
3.6.2 粉体定盤と繊維定盤上の砥粒の挙動	40
3.6.3 繊維の表面処理による耐摩耗性の向上	42
3.6.4 繊維含有量の増加による耐摩耗性の改善	43

3.6.5 目切り溝による影響	45
3.6.6 研磨能率と定盤表面粗さの関係	46
3.7 結言	49
第3章 参考文献	50
第4章 メッシュ定盤を用いた複合定盤の定盤仕様の検討	
4.1 緒言	51
4.2 メッシュ定盤の概要	51
4.3 メッシュ定盤の特異性	52
4.3.1 メッシュ定盤の研磨能率の経時変化	52
4.3.2 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較	55
4.3.3 メッシュ定盤の織り方の差異による研磨性能への影響	56
4.4 メッシュ定盤の研磨メカニズムの解明	57
4.4.1 凹部の連続性が研磨性能に与える影響	57
4.4.2 ワイヤ径とピッチ間隔の異なるメッシュ定盤の研磨性能	58
4.4.3 メッシュ定盤上の砥粒の挙動	60
4.5 ワイヤ径とピッチ間隔の研磨性能との相関関係	67
4.6 結言	69
4章 参考文献	69
第5章 複合定盤の研磨性能の向上	
5.1 緒言	71
5.2 メッシュ定盤のワイヤ径と繊維定盤の繊維径との関係	71
5.2.1 使用砥粒 GC#2000 に対するメッシュ定盤の研磨性能	71
5.2.2 使用砥粒 GC#2000 に対する繊維定盤の研磨性能	74
5.2.3 メッシュ定盤と繊維定盤における最適値の比較	76
5.3 使用砥粒 GC#600 に対する複合定盤の研磨性能の向上	79
5.3.1 ワイヤ径および繊維径の差異による研磨能率の変化	79
5.3.2 繊維定盤の仕上げ面粗さの悪化の原因	82
5.4 鋳鉄定盤と複合定盤の研磨性能の比較	83
5.5 結言	86
5章 参考文献	87
第6章 結論	
6.1 研究成果の概要	89
6.2 今後の課題と展望	92



# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

研磨は古来より用いられている加工手法の一つであり，研磨と人類社会のかかわりは，深くそして広い．新石器時代に開発された磨製石器の研磨技術は，農業社会の確立に大きく貢献し，食生活にも深くかかわるようになった．また研磨が必要不可欠な部品を有する眼鏡・顕微鏡・望遠鏡の出現により物理的だけでなく心理的にもわれわれの視界を拡大したといえる．このように研磨と人類のかかわりは深く，人類の進化と共に発展してきた分野である．

河西<sup>1-1)</sup>がまとめた研磨技術の発展過程を表 1.1 に示す．第1世代は，研磨によって光沢のない梨地面の磨製石器を作った頃である．第1世代は旧石器時代から新石器時代の梨地面の磨製石器を研磨加工を行っていた頃であり，第2世代は勾玉や青銅鏡などを鏡面に仕上げるようになった頃から水晶やガラスなどの単一レンズを製作するようになった頃までを示す．第3世代では，望遠鏡や顕微鏡が開発されたことで，組み合わせたレンズの収差の問題を解決するなどの目的から形状精度を伴う研磨技術が求められるようになり，この頃から幾何光学を基本とする光学部品の製作に向けて研磨加工技術が飛躍的に発展した．さらに20世紀後半以降では，電子部品や機械装置の製造にも研磨が必須となり，その中でも半導体の基板のシリコンウェーハでは，超平滑で加工変質層や汚れのない仕上げ面が求められるようになり，この要求を満たす必要性から第4世代としての超精密研磨技術が発展した．

半導体の製造技術は，「半導体の集積密度は，18ヶ月で倍増する」とした Moore の法則<sup>1-2)</sup>にしたがい，急速に微細化や高集積化が進められ，基板となるシリコンウェーハには超平滑・超平坦な表面と高い形状精度が求められたため，これに伴い研磨技術も発展した．シリコンウェーハなどの半導体材料における超平滑化は，物理的な表面の凹凸を滑らかにすることだけでなく，加工による加工変質層を無くすことを目的とした開発が進められた．当初は酸化クロム砥粒や酸化アルミニウム砥粒を用いて平滑化<sup>1-3), 1.4)</sup>を行っていたが，これらの機械的な研磨だ

表 1.1 研磨加工技術の発展<sup>1-1)</sup>

世代	特徴	適用対象
第1世代	梨地面	無光沢磨製石器
第2世代	光沢面, 鏡面	光沢磨製石器, 玉, 勾玉, 管玉, 青銅鏡
第3世代	鏡面, 形状精度, 寸法精度	一般レンズ, プリズム類, 金属反射鏡, ブロックゲージ, 定盤類
第4世代	-1 超精密研磨加工 加工変質層の僅少化	水晶発振子基板, 磁気ヘッド, シリコンや GaAs ウェーハ, レーザロッド, 各種標準器
	-2 研磨加工の自動化	各種量産用レンズ類, シリコンウェーハ, フォトマスク用ガラス基板, 磁気ディスク用基板
	-3 電算機制御	レーザ核融合用大口径レンズ, X線光学用非球面反射鏡, 超精密光学用金型

けでは加工変質層を  $1\mu\text{m}$  以下に抑制することができなかった。その後、シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) 微粒子を pH10~11 の水酸化ナトリウム ( $\text{NaOH}$ ) 水溶液と混合した研磨剤を用いて機械的研磨と化学的研磨を同時に行う複合研磨方式として、CMP (Chemical Mechanical Polishing) 研磨法が確立され、加工変質層を  $1\mu\text{m}$  以下とした。

半導体の基板材料としては、長らく Si (シリコン) が主役を務めてきたが、その電力変換損失削減の限界が近づき、さらに小型化、高周波数化、大電力化などで、今以上の特性を出すことが困難になってきている<sup>1-5)</sup>。一方で、世の中の電力機器は増加の一途を辿っており、Si に変わる新たな次世代パワー半導体の基板材料として材料特性に優れた SiC や GaN が検討されて

いる。表 1.2 に各半導体材料の物性値を示す<sup>1-6)</sup>。SiC や GaN は Si に比べて、電子移動度はほぼ同等でバンドギャップは約 3 倍、絶縁破壊電界は 5 倍以上であり、さらに SiC は熱伝導率も高く、材料特性が非常に高い。これらの特性により電力損失を抑えることができ、省エネルギー効果が期待できる。

省エネルギーの観点から、LED(Light Emitting Diode)も注目を集めている。LED は低消費電力で長寿命という特徴を持ち、新光源として期待されている。液晶テレビのバックライト用などで採用されていたが、製造技術の進歩により LED の明度が向上したため、照明器具や自動車のヘッドライトへ採用されるようになり、需要は拡大し続けている。LED の基板材料には機械的特性、熱的特性、化学的安定性、光透過性に優れたサファイアが用いられている<sup>1-7)</sup>。

これまでに紹介した SiC や GaN、サファイアの基板の製造工程には、研磨工程が不可欠である。しかしながらこれらの基板材料は、高硬度でかつ化学的にも非常に安定した難削材であるため、その研磨工程では多くの工数が必要となり、これが価格上昇に繋がり、それらの材料の普及の妨げとなっている。

以上のようにサファイアなどの高機能な基板材料の普及は、省エネルギー化と低炭素社会を実現するために解決しなければならない重要な課題であり、これらの問題を解決する研磨性能の高い研磨定盤の開発は、半導体産業などの大きな市場ニーズに応える研究開発である。

表 1.2 半導体材料の物性値<sup>1-6)</sup>

材料	バンドギャップ [eV]	電子移動度 [cm <sup>2</sup> /Vs]	絶縁破壊電界 [MV/cm]	熱伝導率 [W/cmK]
Si	1.1	11.8	0.3	1.5
GaN	3.39	9.0	3.3	1.3
4H-SiC	3.26	10	2.0	4.5

## 1.2 研磨加工の基本的なメカニズム

### 1.2.1 ラッピングとポリシング

研磨工程には、大きく分けてラッピングとポリシングの2種類の加工方式があるが、両者とも図 1.1 に示すように砥粒を介して一定の圧力下で工具と工作物を相対運動させることにより、工具形状を工作物表面に転写する加工方法であるが、その境界は明確に区分することは困難である。基本的な特徴で区分すると表 1.3<sup>1-8)</sup> のようになり、加工要因の観点から区分した場合は表 1.4<sup>1-9)</sup> となる。つまりラッピングとは、数  $\mu\text{m}$  以上の粗い砥粒と金属やセラミックなどの硬質工具(以下、ラッピング定盤と呼ぶ)を用いて、主に機械的な除去作用に基づき高能率に所定の形状・寸法に近づける工程である。

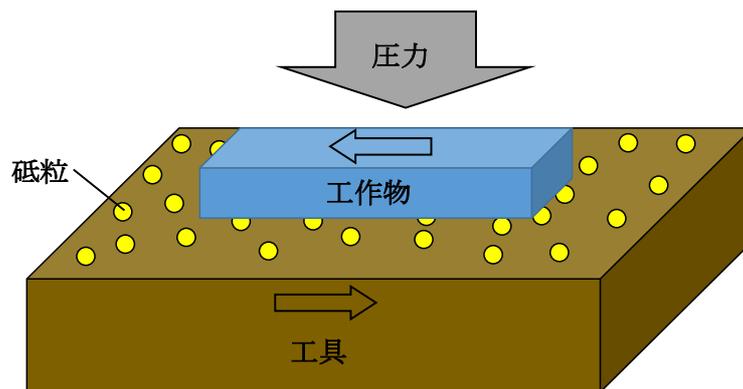


図 1.1 研磨加工の概略図

表 1.3 ラッピングとポリシングの基本的特徴<sup>1-8)</sup>

加工法	使用砥粒	使用工具	加工目的
ラッピング	粗砥粒(数 $\mu\text{m}$ 以上)	硬質工具	高能率加工 寸法精度・形状精度の確保
ポリシング	微細砥粒(数 $\mu\text{m}$ 以下)	軟質工具	表面粗さ低減・鏡面化 加工変質層僅少化・除去

表 1.4 ラッピングとポリシングの加工要因<sup>1-9)</sup>

加工法		ラッピング	ポリシング
砥粒	種類	酸化物, 炭化物, ホウ化物, ダイヤモンド	
	粒径	1~30 $\mu\text{m}$	<3 $\mu\text{m}$
工具	材質	硬質材料	軟質材料
	形状	平面, 球面, 非球面, 小片, 大口径, 溝の有無(碁盤目状, 渦巻状, 亀甲状など)	
研磨液		水性/不水溶性添加剤(酸, アルカリ, 界面活性剤)	
研磨装置		片面研磨/両面研磨, 修正輪形/非修正輪形	
運動様式		回転/往復, 強制駆動/従動	
研磨速度		5~50m/min	
研磨圧力		5~100kPa	
研磨時間		(加工精度, 加工品質の要求に従う)	

ラッピングでは, 砥粒が工作物に対して①押し込み, ②転動, ③引っ掻きの動作を複合的に  
行いながら工作物の一部を除去する. しかしながら工作物の材質や加工条件によって加工メカ  
ニズムは異なり, 金属材料では, 主に砥粒の引っ掻きによって工作物が除去される. 一方, ガ  
ラスのような脆性材料の場合は, 砥粒の転動や引っ掻きなどによって工作物表面から内部に向  
かう微細な割れが発生し, 切り屑はその割れの交差によって形成される.

### 1.2.2 湿式ラッピングと乾式ラッピングの定盤との関係

ラッピングは, 工作液の使用の有無によって湿式ラッピングと乾式ラッピングの2種類の研  
磨に分けられる. 表 1.5 に湿式ラッピングと乾式ラッピングを比較した表を, 金属材料と脆性  
材料の基本的な加工メカニズムを図 1.3 に示す<sup>1-10), 1-11)</sup>. 湿式ラッピングの場合は, 主に砥粒  
はラッピング定盤と工作物の間を転動しながら作用する. 工作物が金属材料の場合は, 同図(a)  
のように転動している砥粒の先端切れ刃が微少量ずつ表面を削るために仕上げ面は梨地面とな

る。また研磨能率が高い場合は、砥粒の転動速度が高速になり、その速度に堪えられなくなった砥粒が砥粒よりも軟らかいラッピング定盤へ付着して工作物との間の滑り運動を行う。あるいは砥粒がラッピング定盤に喰い込んだときにも滑り運動を行う。

表 1.5 湿式ラッピングと乾式ラッピングの比較<sup>1-10)</sup>

研磨法	湿式ラッピング	乾式ラッピング
機構	主として遊離砥粒の転動による除去が行われる	主として埋め込み砥粒との間の滑りによる引っ掻きが行われる
工作液	使用する	使用しない
研磨量	大きい	小さい, 湿式法の 1/10 以下
仕上げ面	無光沢梨地の粗面	光沢のある滑面
適用範囲	一般の作業, 特殊精密部品の粗及び中仕上げ	特殊精密部品の精密仕上げ

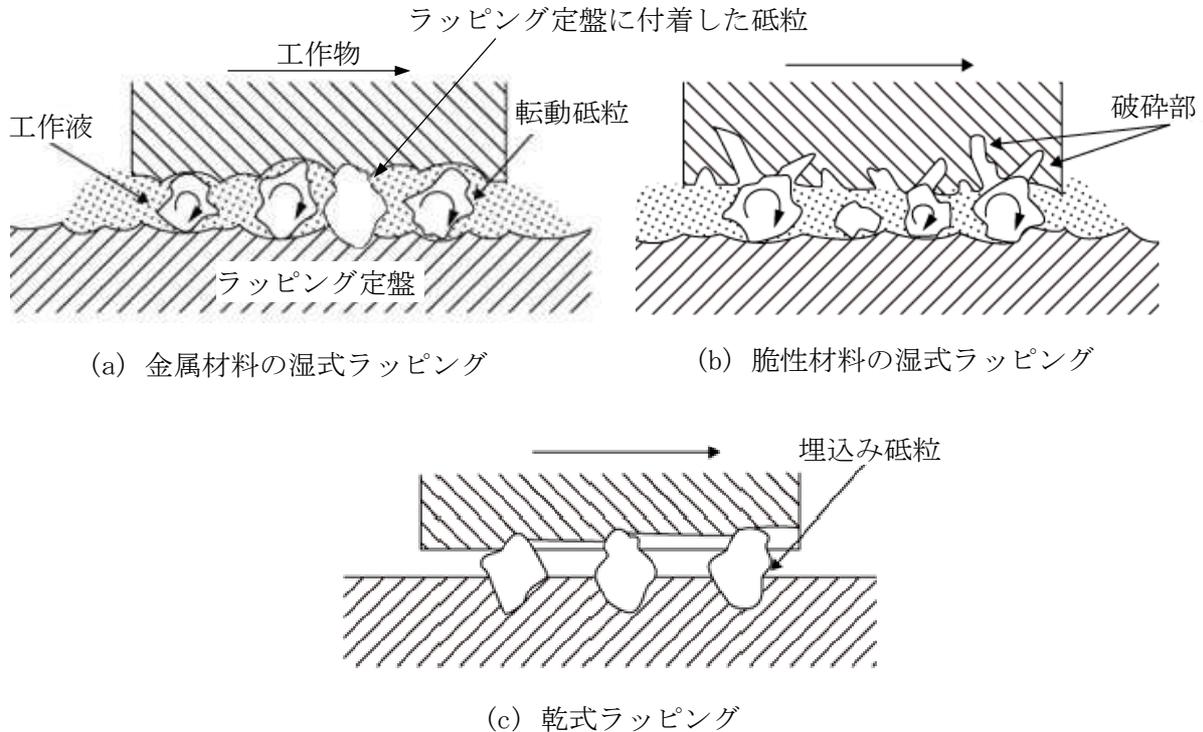


図 1.3 湿式ラッピングと乾式ラッピングの概略図<sup>1-11)</sup>

一方、脆性材料の場合は、同図(b)のように砥粒先端が押し込まれることによるクラック発生とクラック同士の交差による微小な破壊により研磨は進行する。乾式ラッピングでは、一般的に仕上げ工程に適用され、同図(c)のように砥粒はラッピング定盤に埋め込まれ半固定化された砥粒が作用し、長い引っ掻き痕による切削によって研磨は進行する。

### 1.3 現状のラッピング定盤

ラッピング工程で用いられるラッピング定盤の目的は、効果的に除去作用が行われるように砥粒を保持し、ラッピング定盤の形状を工作物に転写させることである。そのためには、①ある程度砥粒が沈み込むような軟らかさをもつ、②砥粒または工作物と反応しない、③形状を保持するための耐摩耗性と靱性をもつ、④形状修正が容易である、などの特性を持つことが望ましい。これらの条件を満たすものとして、鋳鉄が一般的に用いられている。また焼入れ鋼も用いられることもある。GaAs(ガリウム砒素)やInP(インジウムリン)などの結晶に対してはガラスのラッピング定盤が用いられる。また砥粒にダイヤモンドを用いる場合は、錫あるいは銅定盤が使用されている。表 1.6 にラッピング定盤の種類と用途の関係、表 1.7 に各ラッピング定盤の特徴を示す<sup>1-12)</sup>。

鋳鉄は靱性のあるフェライトと耐摩耗性のあるパーライトの組織からなっており、比較的安価でラッピング定盤としては好適な材料である。ガラス定盤は摩耗が大きく高価であるという欠点がある。軟質金属を用いたラッピング定盤の銅定盤や錫定盤などは、ダイヤモンド砥粒との相性が良くダイヤモンドを定盤表面に埋め込んだ状態で研磨を行う。そのため使用前にはダイヤモンドを埋め込ませるチャージングと呼ばれる作業を行う必要がある。また軟質金属やセラミックスの粉体を樹脂に混合させたケメット定盤もあり、混合した樹脂によりダイヤモンドと工作物の接触時にショックを吸収して加工面に損傷を与えるのを防止することができる。

このようにラッピング定盤には多くの種類があるが、表 1.6 からわかるように鋳鉄定盤はどの工作物に対しても研磨に用いることができ、現在ラッピング工程で最も一般的に使用されているラッピング定盤である。

表 1.6 ラッピングに適用される砥粒とラッピング定盤<sup>1-12)</sup>

工作物		適用砥粒						適用工具		
		ダイヤモンド	GC	C	板状 アルミナ	A	WA	鋳鉄	軟質 金属	ガラス
単結晶	Si		●		●			●		
	GaAs, GaP						●	●		●
	InP						●	●		●
	LiNbO <sub>3</sub> , LiTaO <sub>3</sub>		●					●		
	水晶	●	●		●		●	●	●	
	サファイア	●	●					●	●	
	フェライト	●	●					●	●	
ガラス	硬質ガラス			●	●	●		●		
	青板ガラス					●		●		
セラミックス	アルミナ系	●	●					●	●	
	炭化ケイ素系	●						●	●	
金属	ブロックケージ	●	●	●			●	●		
	機械部品		●	●			●	●		
	超硬合金	●	●					●		

表 1.7 各ラッピング定盤の種類と特徴

材質	用途	特徴
ねずみ鋳鉄 (FC300, 350)	金属, 非金属の粗仕上げ	ゲージ、油圧シールなど比較的軟質の工作物をラッピングするのにてきしており、安価だが脆く摩耗が早い
球状黒鉛鋳鉄 (FCD450, 700, 900)	金属, 非金属, 水晶, セラミック, ガラス, シリコンの粗・精密仕上げ	最も一般的に使われているラッピング定盤で、ほとんどの工作物に適している。研磨能率, 仕上げ面粗さ, スクラッチ対策などの違いでF450, 700, 900を選択する
アルミニウム, 錫, 銅, 銅合金	へき開性材料, 化合物半導体, 硬質材料の精密仕上げ	軟らかく、摩耗が大きい。砥粒の埋め込み, チャージングが容易で滑らかな仕上げ面を得るのに適しており、ダイヤモンド砥粒と一緒に用いることが多い
石英ガラス	化合物半導体の精密仕上げ	GaAsなどスクラッチを非常に嫌う工作物に対して転動砥粒ラッピングを行うために用いられるが、高価なため化合物半導体に限られる
ケメット定盤	軟質金属, 非金属, 硬質材料の精密仕上げ	金属やセラミックスの硬質粒子をエポキシ樹脂で固めたもので、ポリシングに近い精密仕上げラッピングに用いられる

## 1.4 既往の研究

1939年にWerkstattstechn. u. Werksl<sup>1-13)</sup>がラッピングの目的や方法、装置の基礎についてまとめた論文が発表された。しかし当時は、ラッピングのメカニズムについてまでは述べられていない。その後1940年から1960年代に佐藤健児が「ラップ剤の切削作用について<sup>1-14)</sup>」で、湿式ラッピングにおける砥粒切込み深さについての研究を行い、松永正久は「ラッピングに関する研究<sup>1-15)</sup>」で鋳鉄定盤を用いて金属を湿式ラッピング方式で研磨を行いラッピングのメカニズムについての研究を行った。また津和秀夫の「ラップ仕上げの研究<sup>1-16)</sup>」では、砥粒を循環方式で用いた場合の砥粒径の経時変化と仕上げ面粗さとの関係についての研究がなされ、この時期にラッピングに関する多くの研究が行われたことで、ラッピングの研磨機構が解明され、研磨条件の最適化が行いやすくなった。

その後は、ラッピングの新たな加工方法の確立が行われた。西村源六郎が「振動ラッピングの研究<sup>1-17)</sup>」で、ラッピング定盤と工作物の相互間に適度な振動を加えてラッピング加工を行なう振動ラッピング方法の開発を行い、久保田護は「電解砥粒加工の研究<sup>1-18)</sup>」で電解液に砥粒を混入させたスラリーに電流を流しながらラッピングを行う電解ラッピングの研究を行った。また1960年の後半からトランジスタやICといった電子デバイスの製造が増加したことにより、半導体基板の材料のシリコンウエーハのラッピングの研究が行われようになった<sup>1-19), 1-20)</sup>。この結果、シリコンウエーハにおけるラッピング工程が確立された。

1980年以降もラッピングに関する研究は行われていたが、ラッピング工程が確立されたことで工作物を安定して研磨が行えるようになったため、研究数は減少した。またラッピング定盤に関する研究はほとんどなく、未だに鋳鉄定盤に代わる新たなラッピング定盤は開発されていないのが現状である。しかし近年では、高硬度で化学的にも安定した難削材を研磨するようになり、この難削材に対する新たなラッピング定盤の開発が求められている。

## 1.5 本研究の目的と構成

### 1.5.1 本研究の目的

以上、本章で説明してきたように、近年、電子機器の高機能化と省エネルギー化の観点からパワー半導体の普及が期待されているが、その製造工程のラッピング工程で用いられている鋳鉄定盤には、利点もあるがいくつかの欠点もある。

ラッピング工程で一般的に使用されている鑄鉄定盤の利点と欠点についてまとめる。はじめにラッピング定盤に求められる性質について述べる。①目的形状の保持：ラッピング定盤は工作物にその形状を転写することが主目的であるため、目的の形状を常に維持することが望ましい。そのためラッピング定盤は耐摩耗性と共に適度な靱性と硬度が必要である。②砥粒の埋込み：ラッピングは砥粒によって工作物を除去するため、砥粒はできるだけラッピング定盤に埋込まれている状態が理想である。このためラッピング定盤はできるだけ軟質部がある方が望ましい。鑄鉄はこれら2つの条件を満たした材料である。すなわちフェライトの部分は、適度な硬度と靱性を有し目的形状の維持に役立ち、黒鉛部分が砥粒の保持作用を担う。さらに大粒径の砥粒が介在しても黒鉛部分に圧入されて傷の発生を抑制することができる<sup>1-21)</sup>。

しかしながら鑄鉄定盤にも欠点があり、①サファイアやSiC, GaNといった次世代パワー半導体の基板材料などに用いられる難削材に対する研磨性能が低い、②耐食性が低く錆びやすいため定盤の管理が面倒である。使用時にはスラリーに防錆剤を添加するため消耗品であるスラリーのコストが上がり、さらに防錆剤により砥粒が定盤上を滑りやすくなることで研磨能率が低下する要因にもなる。③定盤表面の凹凸形状が経時変化するため研磨能率が低下する。④高速領域で砥粒が保持できず、研磨能率が向上しないといった4つの欠点がある。

そこで本論文では、鑄鉄定盤の欠点を克服する新たなラッピング定盤の開発を目的とする。具体的には、耐食性に優れるステンレス鋼の粉体や繊維(以下、フィラーと称する)を親水性に優れるエポキシ樹脂と混合したものを圧縮して製作した新しいラッピング定盤(以下、複合定盤と称する)の開発を行った。複合定盤は、靱性と耐食性に優れるステンレス鋼のフィラーを用いることで、砥粒の保持性が確保され研磨性能と耐食性の向上が期待される。また耐摩耗性が異なるステンレス鋼のフィラーとエポキシ樹脂の2つの材料を用いることで、研磨によって定盤が摩耗しても定盤表面に適度な凹凸形状が維持され、研磨能率の経時変化が抑制されると予想される。

### 1.5.2 本論文の構成

本論文は、6つの章により構成される。以下に各章の目的と概要を示す。

第1章は序章であり、本研究の背景と鑄鉄定盤の利点と欠点、そして本研究の目的について述べた。

第2章では、難削材であるサファイアの基板を用いて鑄鉄定盤の研磨性能を調べ、鑄鉄定盤

の欠点である難削材に対する研磨性能，耐食性，研磨能率の経時変化について検討し，鋳鉄定盤の欠点を明確化した。

第3章では，まずフィラーの材料である SUS316L ステンレス鋼の研磨性能を確認し，もう一つの複合定盤の構成要素であるエポキシ樹脂の選定を行った。次にステンレス鋼のフィラーとエポキシ樹脂を用いて製作した複合定盤の性能を把握し，鋳鉄定盤の欠点を解決するラッピング定盤であるかを検討した。まずフィラーの種類による研磨性能への影響を定盤上の砥粒の挙動を観察し検討した。次に製作時に含有する気泡の抑制を試み，繊維の含有量の変化が研磨性能と耐摩耗性に与える影響について調べた。最後に定盤表面と研磨能率の経時変化について検討した結果を示す。

第4章では，研磨性能が高くなる微細凹凸形状を把握する目的で用いたメッシュ定盤が非常に高い研磨性能を示すことが判明したため，その研磨メカニズムの解明を試みた。まずメッシュ定盤の摩耗による定盤表面の変化が研磨性能に与える影響を調べた。次にワイヤ径やピッチ間隔の差異が研磨性能に与える影響を調べ，その研磨性能の違いを定盤上の砥粒の挙動を観察することで検討した。最後にメッシュ定盤の構成要素であるワイヤ径とピッチ間隔の研磨性能に対する相関関係について調べた。

第5章では，メッシュ定盤の実験結果からワイヤ径とピッチ間隔が研磨性能と強い相関関係があることがわかり，複合定盤においても繊維径を変更させて，その傾向がメッシュ定盤のワイヤ径を変化させた場合の傾向と合致するかを調べた。またメッシュ定盤のピッチ間隔と繊維定盤の繊維同士の間隔の関係についても把握した。その後メッシュ定盤で最も研磨能率が高くなったワイヤ径を繊維定盤の繊維径に反映させて研磨能率向上を試みた。

第6章では，結論として各章で得られた知見をまとめ，開発したラッピング定盤の研磨性能について考察する。最後に開発したラッピング定盤の今後の課題と展望について述べた。

## 第1章 参考文献

- 1-1) 河西敏雄，超精密生産技術体系 第1巻基本技術 第4編超精密研磨加工法 第1章概要，フジ・テクノシステムズ，(1995)，p. 267.
- 1-2) Moore. G. E. , “Cramming more Components onto Integrated Circuits” , Electronics, Vol.38, No.8, (1965), pp.114-117.

- 1-3) 井田一郎, 新井桶三, 半導体結晶のポリシ加工に関する研究(第1報), 精密機械, Vol. 28, No. 11, (1962), pp. 651-659.
- 1-4) 井田一郎, 新井桶三, 鈴木誠, 半導体結晶のポリシ加工に関する研究(第2報), 精密機械, Vol. 28, No. 12, (1962), pp. 719-727.
- 1-5) 奥西拓馬, 久田賢一, 次世代パワー半導体 SiC の現状と信頼性, REAJ 誌, Vo. 137, No. 1, (2015), pp. 3-9.
- 1-6) 吉田隆, 次世代パワー半導体 省エネルギー社会に向けたデバイス開発の最前線, エヌ・ティー・エス, (2009), p. 94.
- 1-7) 一ノ瀬昇, 中西洋一郎, 次世代照明のための白色 LED 材料, 日刊工業新聞社, Vo. 17, No. 8, (2010), p. 70.
- 1-8) 安永暢男, はじめての研磨加工, 東京電機大学出版局, (2011), p. 44.
- 1-9) 河西敏雄, ラッピング・ポリシングの基礎と応用-1 ラッピング・ポリシングの特徴と展望, 機械と工具, Vol. 36, No. 4, (1992), p. 133.
- 1-10) 津和秀夫, ラップ仕上げ面の粗さ, 精密機械, Vol. 28, No. 3, (1962), p. 163.
- 1-11) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰, 加工学基礎 2 研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984), p. 169.
- 1-12) 滝澤義三郎, 超精密生産技術大系 第2巻実用技術 第3章超精密ラッピング・ポリシング資材, (1994), p. 763.
- 1-13) Wolff C, ラッピング, 精密機械, Vol. 5, No. 54, (1937), pp. 156-163.
- 1-14) 佐藤健児, ラップ剤の切削作用について(第1報), 精密機械, Vol. 14, No. 9, (1948), pp. 139-146.
- 1-15) 松永正久, ラッピングに関する研究(第1報), 精密機械, Vol. 19, No. 12, (1953), pp. 450-455.
- 1-16) 津和秀夫, ラップ仕上の研究(第2報), 精密機械, Vol. 17, No. 3, (1951), pp. 285-289.

- 1-17) 西村源六郎, 横山恭男, 振動ラッピングの研究(第 1 報), 精密機械, Vol. 31, No. 4, (1965), pp. 327-334.
- 1-18) 久保田護, 電解砥粒加工の研究(第 1 報), 精密機械, Vol. 31, No. 3, (1965), pp. 234-239.
- 1-19) 津和秀夫, 肥田満, 各種ラップによる Si 単結晶の鏡面仕上, 精密機械, Vol. 34, No. 405, (1968), pp. 666-673.
- 1-20) 池田正幸, ラッピングにおける砥粒分担荷重の評価, 精密機械, Vol. 35, No. 419, (1969), pp. 787-793.
- 1-21) 松永正久, ラッピング, 誠文堂新光社, (1964), p. 129.

## 第2章 鑄鉄定盤の問題点の明確化

### 2.1 緒言

ラッピング工程のなかでも比較的大きな砥粒を使用する粗のラッピング工程では、一般的に鑄鉄定盤が用いられている。鑄鉄定盤がラッピング工程で用いられる主な理由は、①砥粒の保持性が高い、②幾何学的な形状を保持し、その形状を工作物に移す、の2つの条件を満たしており、さらに鑄物であるため大型定盤の製作が可能のためである<sup>2-1)</sup>。しかしながらラッピング工程で用いられる鑄鉄定盤についての研究はほとんどないため、①砥粒の保持性が高いといわれているが、どのように砥粒が保持されることで保持性に優れるのかなどを調べた論文はない。そこで本章では、鑄鉄定盤の研磨メカニズムを砥粒の挙動を観察して解明を行い、鑄鉄定盤の研磨性能を把握し、鑄鉄定盤の問題点を明確化した。

### 2.2 鑄鉄定盤の性能

#### 2.2.1 鑄鉄定盤の特徴

鑄鉄は鉄(Fe)を主成分とし、それ以外の主な成分としては炭素(C)や珪素(Si)を含む合金であり、炭素を1.7~4.5%含有する<sup>2-2)</sup>。これらの成分を含有する割合によってねずみ鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄、白鑄鉄などに分類され、これらを総称して鑄鉄と呼ぶ。ラッピング定盤としては、ねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄が用いられている。ねずみ鑄鉄に含有する黒鉛は花片が集合したような形をしているため、これを片状黒鉛といい、このため片状黒鉛鑄鉄とも呼ばれる。片状黒鉛鑄鉄は減衰能が優れ、熱伝導が良く摩擦熱を逃がしやすく、比較的安価である。これに対して球状黒鉛鑄鉄は、球状の黒鉛が含有しており、引張り強さや伸びなどに優れ、片状黒鉛鑄鉄よりも数倍の強度を持ち、靱性に優れるため、定盤の安定性や耐摩耗性の観点から現在では球状黒鉛鑄鉄ほうがラッピング定盤として主に用いられている。このため本研究でも、鑄鉄定盤においては球状黒鉛鑄鉄定盤を用いて実験を行った。球状黒鉛鑄鉄定盤は、 $\phi 1600\text{mm}$ 以上の大径の定盤になると定盤の変形を抑制するためFCD700などの高硬度で引張り強さに優れる材料が用

いられるが、本研究で用いた定盤の直径は300mmと小径であるため、一般的に使用されているFCD450を用いた<sup>2-3)</sup>。

図2.1に球状黒鉛鑄鉄の概略図を示す。球状黒鉛鑄鉄定盤は、含有した黒鉛が定盤表面に出てくると軟らかい黒鉛で砥粒が保持される。しかし黒鉛は砥粒の擦過により気孔となるが、この気孔でも砥粒を保持することができるため研磨性能が高められていると考えられている。実際の使用後の球状黒鉛鑄鉄定盤の表面状態をマイクロSCOPEで観察した結果を図2.2に示す。定盤表面に気孔を有することが確認された。

本研究では、鑄鉄定盤に球状黒鉛鑄鉄定盤(FCD450)のみを用いているため、球状黒鉛鑄鉄定盤を鑄鉄定盤と呼ぶことにする。

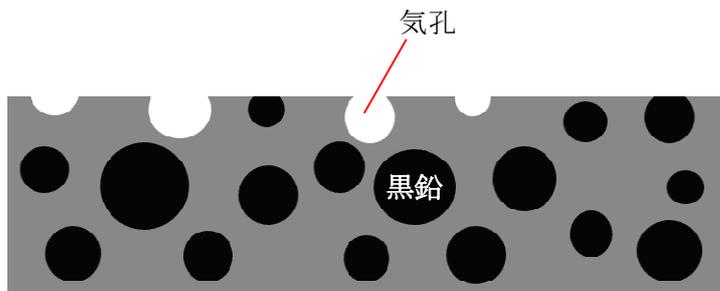


図 2.1 球状黒鉛鑄鉄定盤の概略図

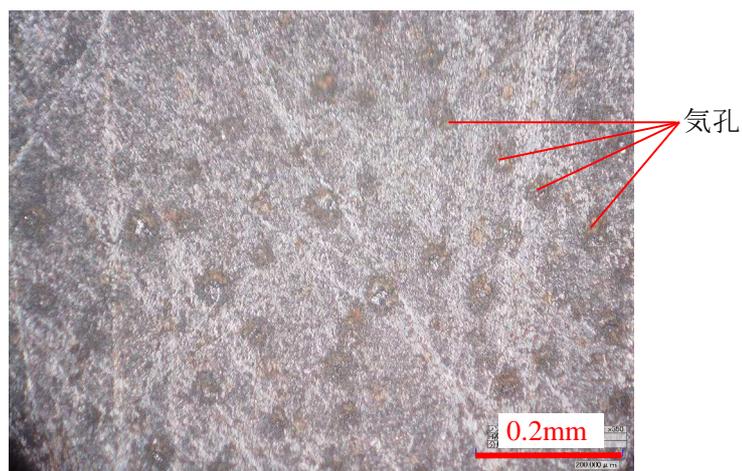


図 2.2 球状黒鉛鑄鉄定盤の表面状態

## 2.2.2 鋳鉄定盤上の砥粒の挙動

鋳鉄定盤は、黒鉛を有することで研磨性能が向上すると考えられている。しかしながら実際に研磨中に黒鉛で砥粒が保持されている様子を確認した論文はない。そこで鋳鉄定盤上の砥粒の挙動を観察することで鋳鉄定盤の研磨メカニズムの解明を試みた。

図 2.3 に示す観察装置を用いて鋳鉄定盤上の砥粒の挙動の観察を行った<sup>2-4)</sup>。直径 160mm で厚さ 20mm のステンレス鋼の円盤の中心に直径 20mm の穴加工を行った治具を用いて、その中心に両面が鏡面の 2 インチのサファイア板をワックスで貼り付け、その裏面からサファイアを通してラッピング定盤上の砥粒の挙動を高速カメラ(フォトロン社製 FASTCAM AX200)を用いて観察した。観察条件は、定盤回転数を 30rpm、研磨圧力を 15kPa、スラリー濃度を 1wt%で供給量を 5mL/min として、工作物を回転させずに観察を行った。本来であれば、後述する表 2.1 の実験条件で観察を行うべきだが、鮮明な画像を得ることができなかつたため、観察条件を変更した。図 2.4 に撮影した動画の 0.2ms ごとのスナップショットを示す。図 2.4 の (b) に示すように鋳鉄定盤上に気孔があることが確認でき、同図 (c) から気孔内に保持された砥粒も確認することができる。破線の赤丸で囲んだ砥粒の挙動に着目すると、(a) の 0ms から (e) 0.8ms までは、砥

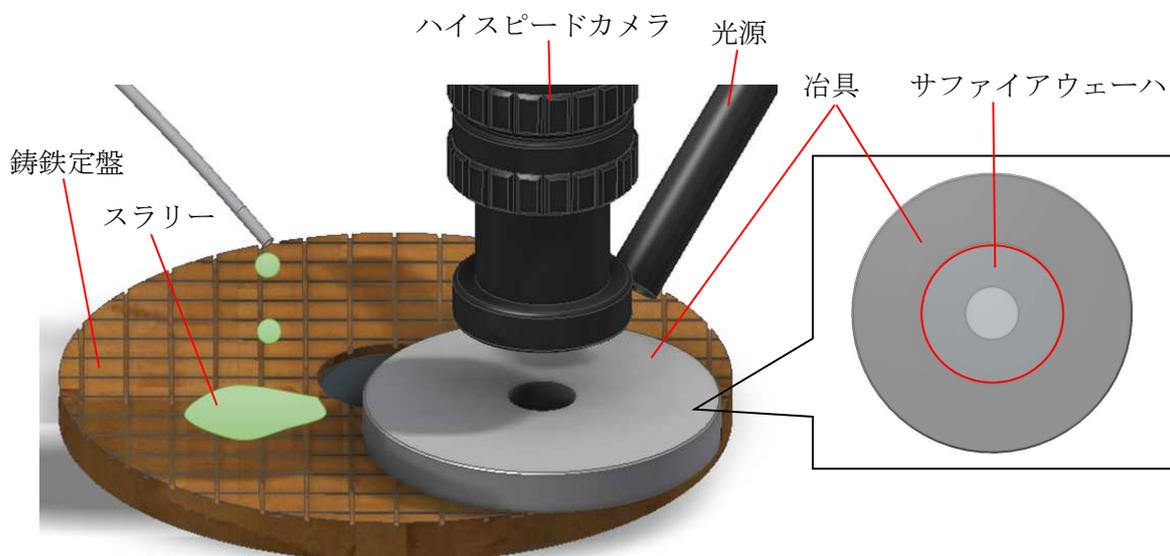


図 2.3 砥粒の挙動の観察装置の概略図

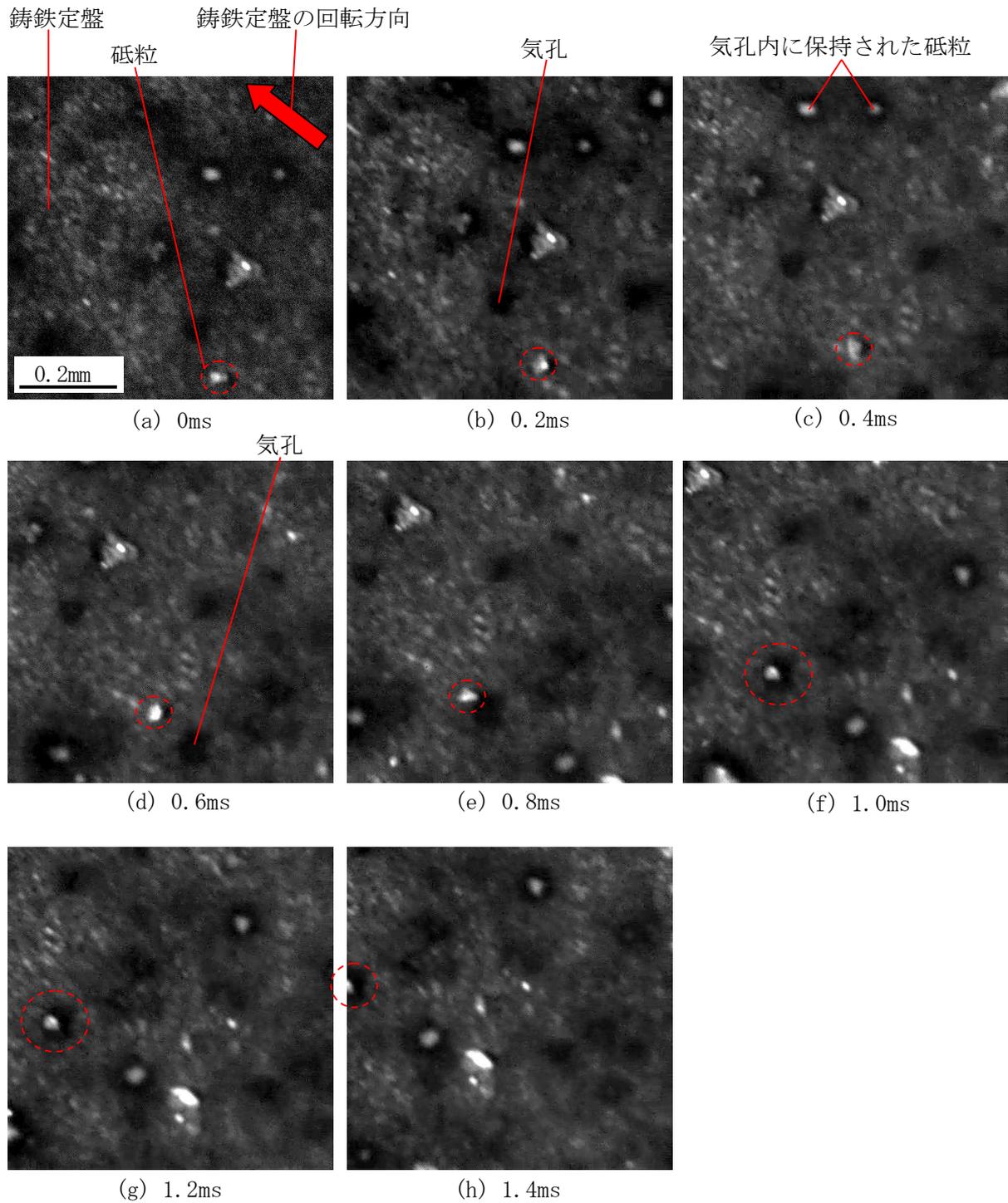


図 2.4 鋳鉄定盤上の砥粒の挙動(1)

粒が鋳鉄定盤上を転動しながらラッピング定盤の回転方向に移動していることがわかる。(f)の1.0msで砥粒が気孔内に保持され、その後はラッピング定盤と同じ速度で移動していることがわかった。また別の動画では、気孔内から砥粒が脱落する様子も確認された。これらの結果から鋳鉄定盤は予想されていた通り黒鉛または気孔で砥粒を保持することがわかった。

次に図2.5に特異的な砥粒の挙動を観察した動画の0.2msごとのスナップショットを示す。破線の赤丸内の砥粒は、(a)の0msから(b)の0.2msまでは鋳鉄定盤上を転動しながら移動しているが、(c)の0.4msで気孔内に保持された別の砥粒と衝突していることがわかった。その後定盤上を転動していた砥粒は、気孔内に保持された砥粒によって動きを妨げられ保持された砥粒を迂回しながら移動することが確認された。つまり気孔内に保持された砥粒は、定盤上を転動する砥粒の動きを妨げる作用があり、この妨げられた砥粒は工作物との相対速度が大きくなる。研磨加工には、「研磨能率 $\propto$ 砥粒切込み深さ $\times$ 作用砥粒数 $\times$ 砥粒と工作物の相対速度」の関係があるため、砥粒と工作物の相対速度が大きくなると研磨能率が向上する。

以上の結果から鋳鉄定盤は、黒鉛が含有することで砥粒を定盤上で保持しやすくなり、これにより研磨能率を高める作用があると考えられる。

## 2.3 鋳鉄定盤の研磨性能

### 2.3.1 目切り溝の有無による影響

一般的に鋳鉄定盤では、定盤表面に目切り溝加工が行われたものが用いられる。目切り溝加工無しの定盤と比較すると、①砥粒が定盤面に均一に供給されやすくなる<sup>2-5)</sup>、②工作物の定盤への吸着が防止され取出しが容易に行える、③スクラッチの要因となる工作物の欠けたチップが排出されやすくなるなどの利点がある。しかし欠点もあり、i)目切り溝加工の費用が高額になる、ii)定盤の掃除が難しくなり砥粒または切屑の凝集したものが目切り溝に停滞しやすくなるため、これらが定盤表面にでてくるとスクラッチの原因となる、iii)目切り溝部にもスラリーが供給されるため、スラリーを多量に要し経済的ではない、iv)小さい工作物を加工する際には、目切り溝部で工作物が傾斜して目切り溝にひっかかってしまい、定盤または工作物に傷をつける。以上のことから、本来であれば目切り溝加工を行わずに利点のみを実現させることのできるラッピング定盤が理想である。

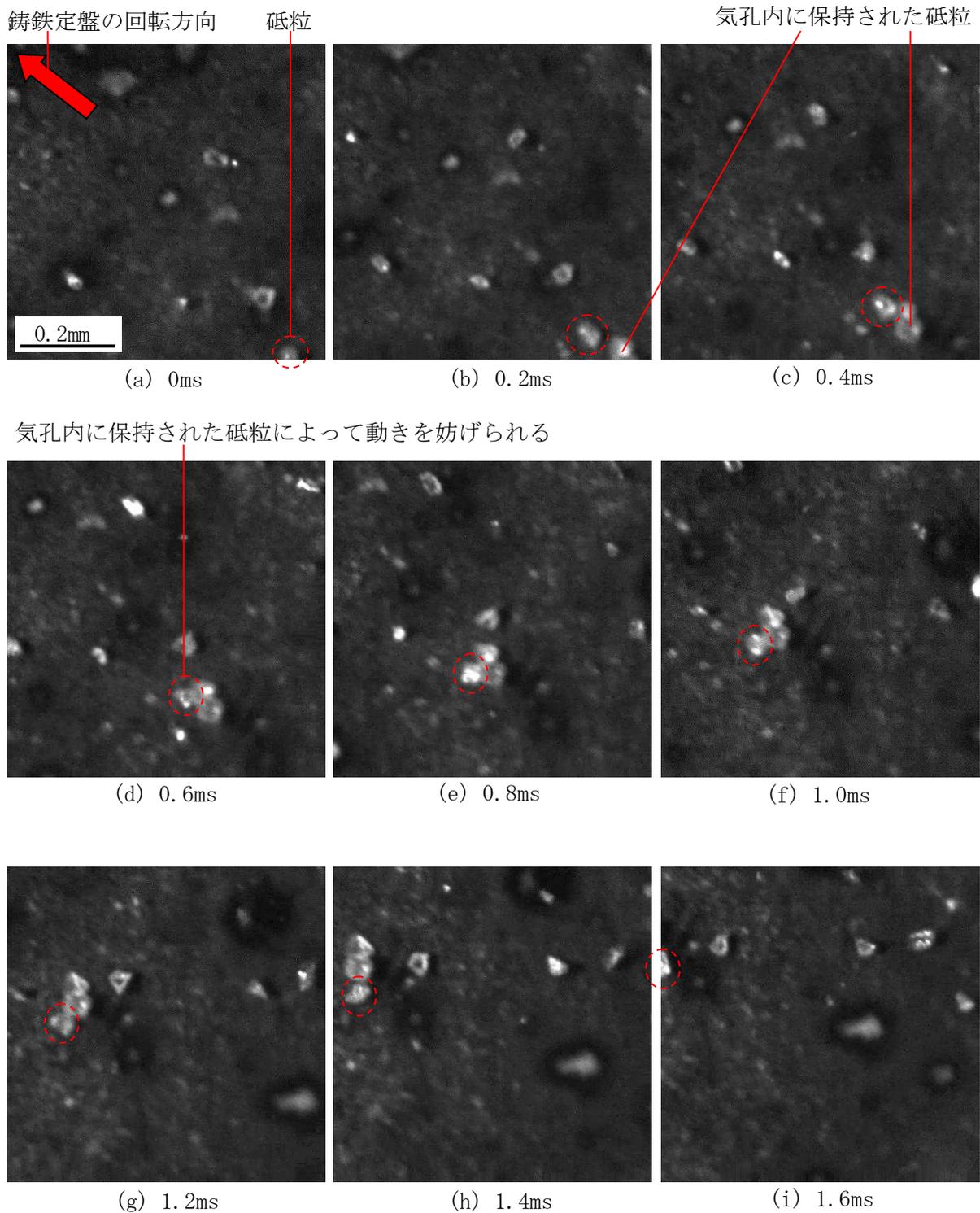


図 2.5 鑄鉄定盤上の砥粒の挙動(2)

ここでは定盤の目切り溝の必要性を検討するため、目切り溝の有無が研磨性能に与える影響について調べた。図 2.6 に(a)目切り溝無しと(b)目切り溝有りの各鋳鉄定盤を示す。同図(b)の目切り溝有り定盤には、幅 2mm、深さ 5mm の目切り溝を 20mm 間隔で格子状に目切り溝加工を行った。

図 2.7 および表 2.1 に研磨実験の様子と研磨条件を示す。鋳鉄定盤の難削材に対する研磨性能を把握するため、工作物には 2 インチの厚み 1mm のサファイア基板(C 面)を 1 枚用い、図 2.7 に示すように自転 0 の影響を取り除くために治具は中心から 5mm ずらしたところに直径 2 インチ(+0.3mm)の深さ 0.6mm の穴を加工し、その穴の中にスピンを許容するために工作物を水貼りで固定した。前加工面の凹凸形状が研磨性能に与える影響を抑制するため、工作物は片面研磨機でダイヤモンド砥粒(ダイヤモンド社製、平均粒径  $1\mu\text{m}$ )を用いて、前加工面を 2nmRa の鏡面に調整した。スラリーにはサファイア基板の粗加工に多用されている GC#600 砥粒を、3wt% の濃度で純水に加えたものを 25mL/min の流量でかけ流しで実験を行った。スラリーを循環方式で用いた場合、砥粒が研磨により破碎し小さくなることで研磨能率が低下する。このような研磨性能に与える因子を減らすためにかけ流し方式を採用した。スラリーの濃度や流量は予備実験で研磨性能が安定することを確認した領域のものである。実験は 3 回行い、研磨能率と定盤摩耗速度の平均値を実験値とした。研磨による除去量は研磨前後の工作物の重量を電子天秤により測定し、工作物の比重を用いて厚み変化量としての研磨能率を算出した。仕上げ面粗さは光学式表面形状計測装置(AMETEK 社製 NewView 8300)を用いて  $0.83\text{mm} \times 0.83\text{mm}$  の領域に対してロバストガウシアンフィルタをかけ、カットオフ値を 0.2mm として、工作物のエッジから

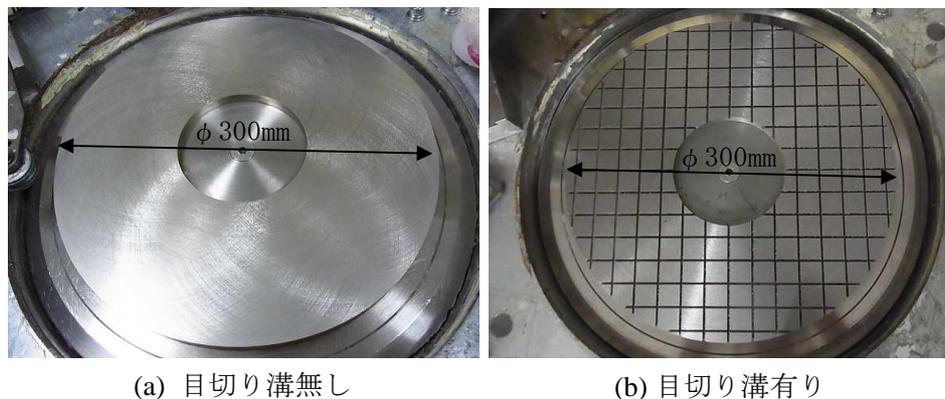


図 2.6 鋳鉄定盤の外観図

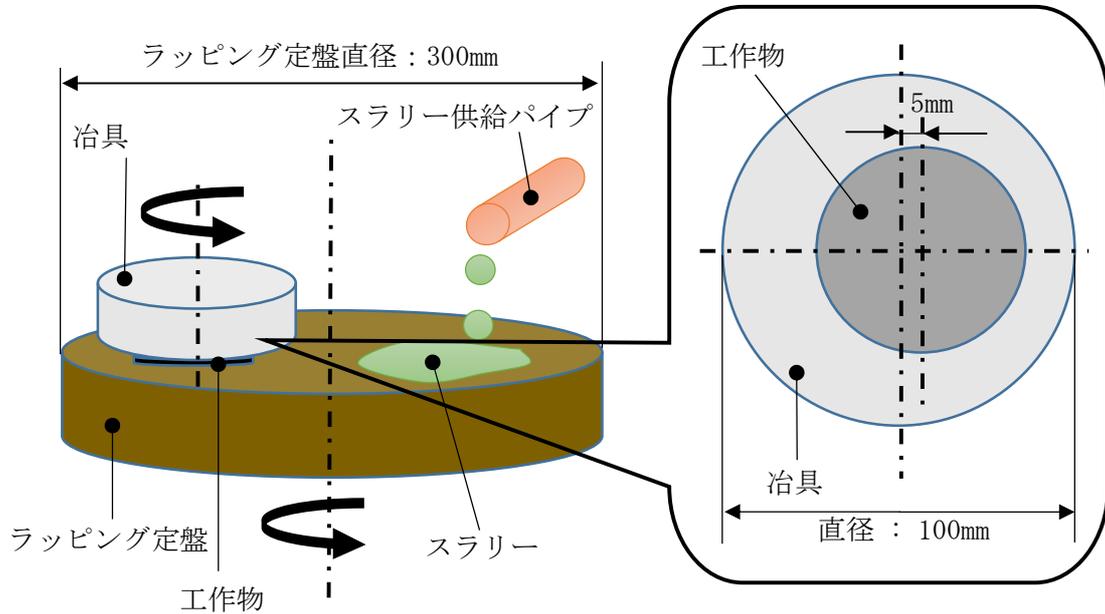


図 2.7 研磨実験の概略図

表 2.1 実験条件

装置	片面研磨機 (日本エンギス株, EJW-400IFN)
ラッピング定盤	鋳鉄定盤(目切り溝有り, 目切り溝無し)
ラッピング定盤の直径	300mm
工作物	サファイアウェーハ(C面) φ 50.8mm(2インチ)×1mm×1枚 前加工面: 2nmSa
研磨圧力	20kPa
定盤速度	70m/min(75rpm)
工作物速度	19m/min(60rpm)
研磨時間	240min
スラリー	GC#600(20 μm) 3wt%+純水
スラリー供給量	25mL/min(かけ流し)

5mm 内側の 90 度毎の 4 箇所と工作物の中心部の計 5 箇所測定し、その平均値を算術平均高さ Sa とした。研磨定盤の表面は、ノーズ半径 0.4mm の超硬合金の切削工具を用いて、切込み 15  $\mu\text{m}$ 、工具送り速度 13mm/min、定盤回転数を 60rpm の条件でまず切削(フェーシング)を行った。その後粒度#100 のダイヤモンド電着ドレッサを用いて、加工圧 15kPa、定盤回転数 60rpm、電着ドレッサ回転数 60rpm の条件で、純水を 25mL/min で供給しながらドレッシングを 10 分間行い、研磨性能が向上するといわれる使用する砥粒径(平均粒径: 20  $\mu\text{m}$ )の 4 分の 1 付近となる 5.6~5.8  $\mu\text{mRa}$  に定盤表面粗さを調整した。

図 2.8 に目切り溝有無の鋳鉄定盤を用いて表 2.1 の条件で実験を行った結果を示す。目切り溝無し研磨能率は、目切り溝有りに比べて大幅に低下することがわかった。さらに仕上げ面粗さは、研磨能率の低い目切り溝無しよりも研磨能率の高い目切り溝有りのほうが良好になっている。研磨加工において、仕上げ面粗さは砥粒切込み深さが大きいほど粗くなり、砥粒切込み深さと加工圧力を作用砥粒数で割ったものとは正の相関関係がある。一定の加工圧力で作用砥粒数が増えれば砥粒 1 つ当たりにかかる加工圧力は低くなり、砥粒の切込みは浅くなる。このため仕上げ面粗さは作用砥粒数に反比例する。このことから目切り溝有りの鋳鉄定盤は、砥粒の供給の役割を担う目切り溝が有ることで砥粒が工作物と定盤の隙間に進入しやすくなり作用砥粒数が増えたため、仕上げ面粗さが良好になったと考えられる。一方、目切り溝無し鋳鉄定盤では、目切り溝が無いと砥粒が工作物と定盤の隙間にうまく入り込むことができず、作用砥粒数が減少し、ほとんど研磨が行われなかったと考えられる。また作用砥粒数が非常に少ないため、砥粒一つ当たりにかかる圧力が増加したことで仕上げ面粗さは悪化したと考えられる。この結果から鋳鉄定盤は、表面に目切り溝が無ければその研磨性能を発揮することができず、目切り溝が必要不可欠なものであることがわかった。

実験終了後の目切り溝無し鋳鉄定盤を図 2.9 に示す。図 2.6 の(a)の使用前に比べて明らかに錆が発生していることがわかる。このように鋳鉄定盤では耐食性が低く簡単に錆びてしまうため、定盤の取り扱いが面倒であり、錆びを防止する対策が必要となる。通常の研磨においてはこの対策として防錆剤が使用されるが、研磨に影響を与える因子を減らすためと本研究では錆が生じることが問題であることを明確にするため、あえて防錆剤は使用しなかった。

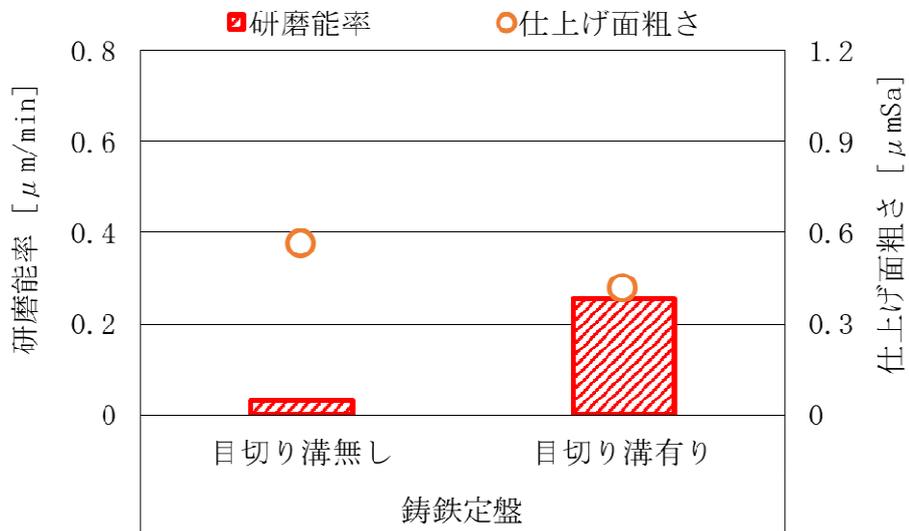


図 2.8 定盤表面の目切り溝有無による研磨性能への影響

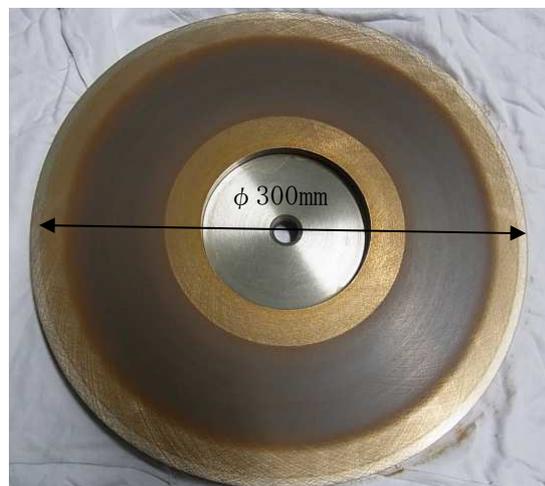


図 2.9 使用後の目切り溝無し鑄鉄定盤

### 2.3.2 難削材に対する研磨性能

鋳鉄定盤の難削材に対する研磨性能を確認するために、ソーダガラスと難削材であるサファイアの研磨特性の比較を行った。表 2.1 の条件でソーダガラスの研磨能率を考慮して研磨時間を 40 分間とし、ソーダガラスにはサファイアウェーハと同じ  $\phi 50.4\text{mm}$  で厚み  $3\text{mm}$  の前加工面が  $2\text{nmSa}$  のものを 1 枚用いて実験を行った。実験結果を図 2.10 に示す。サファイアの研磨能率は、ソーダガラスの約 160 分の 1 であることがわかった。ソーダガラスとサファイアのビッカース硬度は  $5.37 \times 10^3\text{N/mm}^2$  と  $10.4 \times 10^3\text{N/mm}^2$  と約 2 倍の硬度差があるが、これを考慮しても研磨能率の差は非常に大きい。単純に研磨工程に置き換えると約 160 倍の時間がかかることになり、鋳鉄定盤の難削材に対する研磨能率の低さが明確となった。仕上げ面粗さにおいてはサファイアのほうが良好になっているが、これは工作物の硬度の違いにより、サファイアよりも軟質なソーダガラスでは、砥粒の切込み量が大きくなるためと考えられる。本研究の目的の 1 つは、難削材に対する研磨性能の向上であるため、工作物にはサファイアを用いてラッピング定盤の研磨性能を評価した。

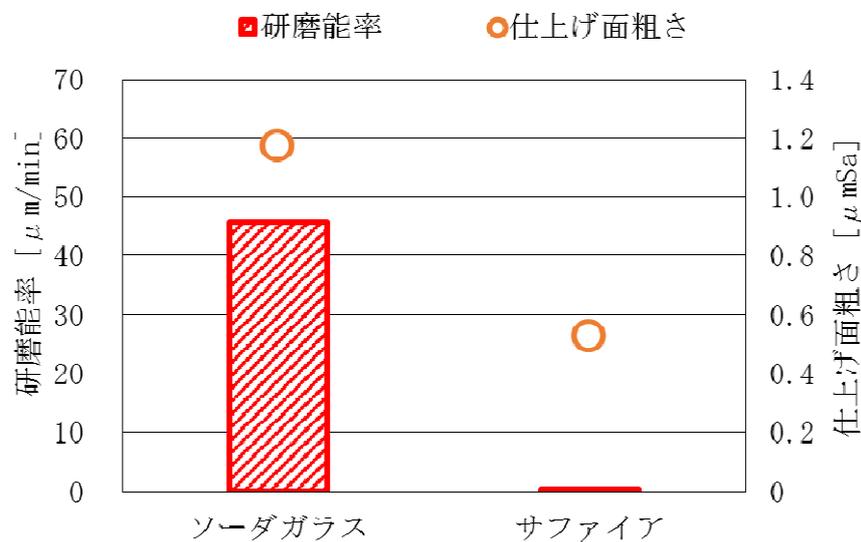


図 2.10 ソーダガラスとサファイアに対する研磨性能の比較

### 2.3.3 研磨性能と定盤粗さの経時変化

次に鋳鉄定盤の研磨性能の経時変化について調べるために、工作物にサファイアを用いて表2.1の条件で実験を行い、研磨時間10分、30分、65分、135分、210分の各研磨能率と研磨後20分、40分、90分、180分、240分の各仕上げ面粗さを調べた。研磨能率の算出方法は、研磨時間10分であれば、実験開始から20分間の平均研磨能率であり、65分であれば研磨時間40分から90分までの50分間の平均研磨能率として各研磨時間の平均研磨能率を算出した。実験結果を図2.11に示す。研磨性能の経時変化をわかりやすくするために、研磨開始から研磨時間20分間の平均研磨能率を1とし、各研磨時間の研磨能率を正規化したものを示す。仕上げ面粗さにおいても同様に正規化を行い、研磨前の工作物の表面は鏡面であるため、研磨後20分の仕上げ面粗さを1として、各研磨時間の仕上げ面粗さを示す。

図2.11から研磨能率と仕上げ面粗さが研磨時間の経過に伴い低下していることがわかった。研磨能率の変化においては定盤表面粗さが影響を与えていると考えたため、鋳鉄定盤表面の粗さの経時変化を研磨能率と同様に鋳鉄定盤の使用前の定盤表面粗さを1として正規化したものを同図に付記する。また使用前後の鋳鉄定盤の表面をマイクロスコプで観察した結果を図2.12に示す。定盤表面粗さはハンディ式表面粗さ計(東京精密社製：SUERFCOM FLEX)を用いて研磨定盤に対して目切り溝の箇所を除いた定盤表面を半径方向に5ヶ所の測定を行い、評価長さを4mm、ハイパスフィルタのカットオフ値を0.8mmとして算術平均粗さRaを測定した。

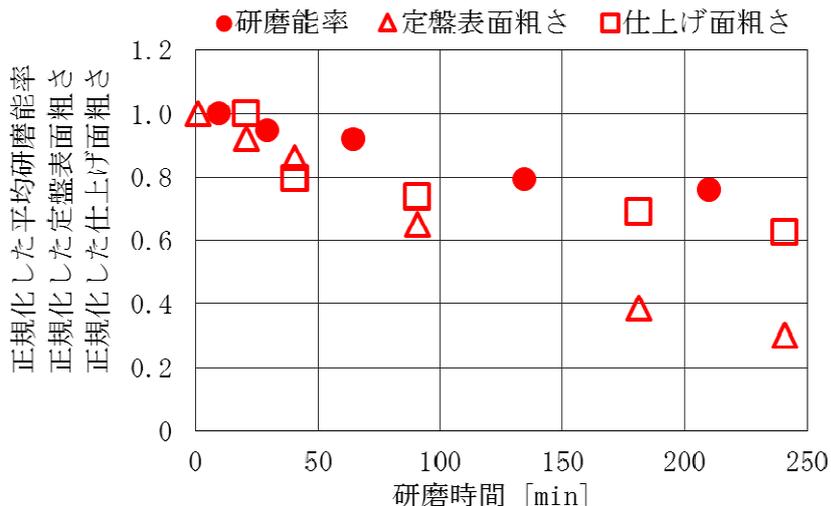


図 2.11 研磨性能と定盤表面粗さの経時変化



- 1) 鋳鉄定盤では含有する黒鉛が砥粒の擦過によって気孔となり、その気孔に砥粒が保持され、その保持された砥粒が鋳鉄定盤上を転動する他の砥粒の動きを妨げることがわかった。
- 2) 防錆剤を添加しない純水と GC 砥粒を混合させたスラリーを用いて実験を行った結果、使用後の鋳鉄定盤の全体に錆びが発生することが確認された。
- 3) 鋳鉄定盤は、目切り溝が無い場合は研磨性能が低下することがわかり、鋳鉄定盤の研磨性能を十分に発揮させるためには目切り溝加工が不可欠であることがわかった。
- 4) ソーダガラスと難削材であるサファイアに対する研磨性能の比較を行った結果、サファイアに対する研磨能率はソーダガラスの約 160 分の 1 となり、鋳鉄定盤は難削材に対して低い研磨能率を示すことが確認された。
- 5) 鋳鉄定盤は定盤表面のフェーシング溝やドレッシング溝が定盤摩耗により浅くなることで、研磨能率が低下することがわかった。

以上の結果から鋳鉄定盤の性能と①耐食性が低い、②難削材に対する研磨能率が低い、③研磨能率が経時的に変化する、3つの問題点が明らかとなった。そこで次章では、これらの問題点を解決できる新しいラッピング定盤について検討する。

## 第2章 参考文献

- 2-1) 加山延太郎, 鋳鉄の材質 第4章鋳鉄の性質 4.7 耐食性, コロナ社, (1962), p. 125.
- 2-2) 高橋清, 新居和嘉, 宮田清蔵, 柳田博明, 工業材料大辞典, 工業調査会, (1997), p. 796.
- 2-3) 井川克也, 球状黒鉛鋳鉄の基礎と応用 第4章球状黒鉛鋳鉄の組織と性質, 丸善, (1992), p. 59.
- 2-4) 諏訪部仁, 四田一高, 石川憲一, マルチワイヤーソーの加工溝底部における砥粒挙動に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 58, No. 11, (2014), pp. 710-715.

- 2-5) 諏訪部仁, 福澤秀昭, 石川憲一, ラッピング加工における定盤溝とスラリー挙動の関係に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 57, No. 3, (2013), pp. 168-173.

## 第3章 表面微細凹凸形状が維持可能な複合定盤の開発

### 3.1 緒言

前章で、鋳鉄定盤の3つの問題点が明らかになったが、ラッピング定盤の研究がほとんどされていないこともあり、現在でもこの問題点を解決する鋳鉄定盤に代わる新たなラッピング定盤は開発されていない。そこで、鋳鉄定盤の問題点である①難削材に対する研磨能率が低い、②耐食性が低く錆びやすい、③研磨能率が経時変化する、といった問題点を解決する新しいラッピング定盤である複合定盤の開発を行った。複合定盤とは、SUS316Lのステンレス鋼のフィラーとエポキシ樹脂を混合したものを、金型に入れ圧縮して製作したラッピング定盤である。複合定盤に含有される繊維と粉体をフィラーと呼ぶ。

本章では、まず新しく開発した複合定盤の性能を確認し、その後複合定盤が鋳鉄定盤の問題点を解決するラッピング定盤であるか検証した。

### 3.2 ステンレス鋼定盤の研磨性能

フィラーの材料として耐食性に優れることと後述するびびり振動切削による加工性も考慮してSUS316Lのステンレス鋼を用いたが、研磨性能においても鋳鉄よりも高いものが望ましい。そこで鋳鉄定盤とSUS316Lのステンレス鋼で製作したステンレス鋼定盤の研磨性能の比較を行った。ステンレス鋼のSUS316Lは、ステンレス鋼の中でも耐食性を高めた材質であるため、鋳鉄定盤に比べて耐食性に優れることで定盤の管理が容易であるといった利点がある。図3.1の(a)に鋳鉄定盤、(b)にステンレス鋼定盤の使用前の表面状態を示す。SUS316は耐食性に優れるオーステナイト系ステンレス鋼で、SUS316LはそのSUS316の炭素の量を減らして加工性を高めた鋼種でもある。工作物として2インチのサファイア基板を使用し、前章の図2.8の結果から工作物中央まで砥粒が供給されるように、定盤には幅2mm、深さ5mmの目切り溝を20mm間隔で格子状に掘った定盤を用いた。研磨定盤の表面は、鋳鉄定盤と同様にノーズ半径0.4mmの超硬合金の切削工具を用いて、切込み15 $\mu$ m、工具送り速度13mm/min、定盤回転数を60rpmの条件

### 第3章 表面微細凹凸形状が維持可能な複合定盤の開発

でまず切削(フェーシング)を行った。その後粒度#100のダイヤモンド電着ドレスサを用いて、加工圧15kPa、定盤回転数60rpm、電着ドレスサ回転数60rpmの条件で、純水を25mL/minで供給しながらドレッシングを10分間行い、定盤の表面状態を約 $5.6\sim 5.8\mu\text{mRa}$ の粗さに調整した。図3.1を見れば、フェーシングとドレッシングにより大小の溝が成形されていることがわかる。ステンレス鋼定盤のほうが铸铁定盤よりも被削性が悪く加工マークが判然としないのではないかと予測したが、実際には铸铁定盤よりも明瞭な加工マークが残留した。これは加工性に優れたSUS316Lを用いた効果だと思われる。一方、铸铁は析出している球状黒鉛のために被削性が悪化したものと思われる。

表3.1の条件で铸铁定盤とステンレス鋼定盤を用いた実験を行い、定盤の摩耗量は使用前後の定盤の厚みを円周方向に30度毎に合計12箇所、三次元測定機(カールツァイス社製: PRISM07JV VAST)で測定し、その厚み差の平均値を算出することで求めた。定盤の厚みを測定する際は、定盤表面の凹凸の影響を考慮し、定盤上の測定箇所に厚み10mmで幅9mm、長さ30mmのブロックゲージを置き、そのブロックゲージ上を測定した。

図3.2に铸铁定盤とステンレス鋼定盤を用いた際の実験結果の比較を示す。铸铁定盤よりもステンレス鋼定盤のほうが研磨性能と耐摩耗性に優れる結果を示した。ステンレス鋼定盤を用

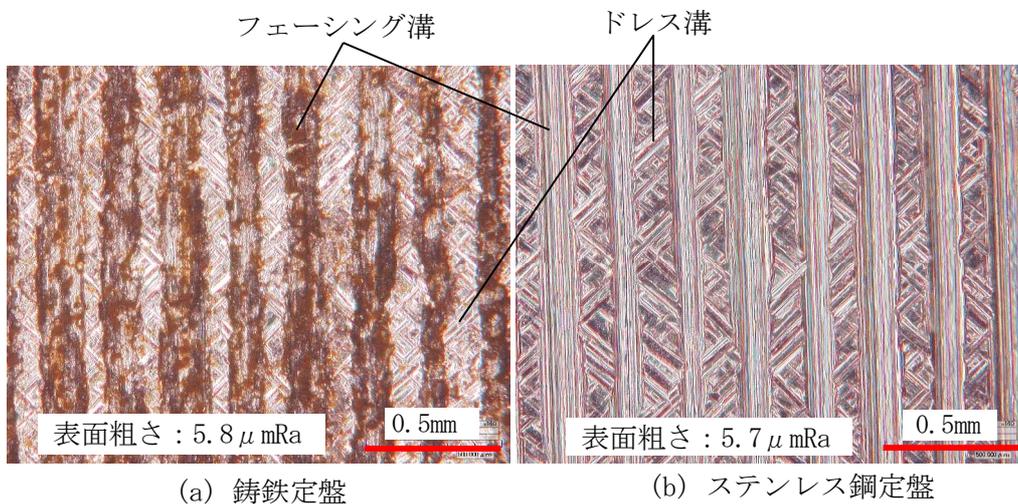


図3.1 使用前の各種ラッピング定盤の表面

表 3.1 実験条件

装置	片面研磨機 (日本エンギス株, EJW-400IFN)
ラッピング定盤	铸铁定盤, SUS316L ステンレス鋼定盤
ラッピング定盤の直径	300mm
工作物	サファイア基板(C面) φ50.8mm(2インチ)×1mmt ×1枚 表面粗さ: 2nmRa
研磨圧力	20kPa
定盤速度	70m/min(75rpm)
工作物速度	19m/min(60rpm)
研磨時間	240min
スラリー	GC#600(20 μm) 3wt% + 純水
スラリー供給量	25mL/min(かけ流し)

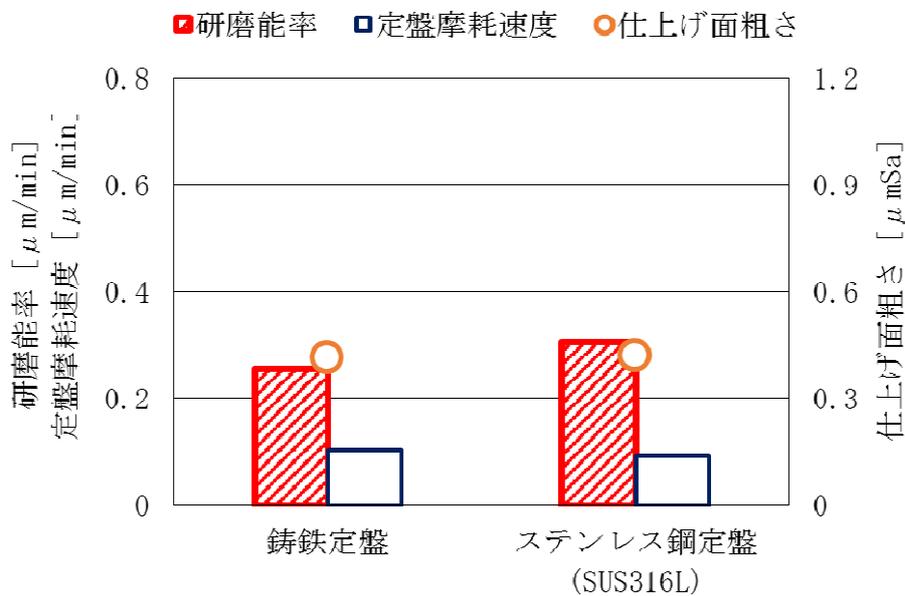


図 3.2 铸铁定盤とステンレス鋼定盤の研磨性能と定盤摩耗速度の比較

いることで仕上げ面粗さはほぼ同等で、研磨能率は約 20%向上し、定盤摩耗速度においては約 11%改善された。これはステンレス鋼の靱性の高さが砥粒の保持強度を高めた結果と考えられる。ただしステンレス鋼定盤は鋳鉄定盤と比較すると価格が数倍高く、この程度の差であればコストパフォーマンスを考えると鋳鉄定盤のほうが優れるため、一般には鋳鉄定盤が多用される結果となっていると思われる。

参考のため、表 3.2 に各定盤の材料特性を示す。ビッカース硬度は、ビッカース硬さ試験機(松沢精機社製：VK-E)を用いて任意の 3 ヶ所の測定を行い、ヤング率は JIS Z2241 に規定されている標準試験片を製作し、精密万能試験機(株島津製作所社製：AG-10NX)にて測定したものである。またシャルピー衝撃試験値は JIS Z2242 に規定されている U ノッチ試験片を製作し、シャルピー式衝撃試験機(島津製作所社製：30kgf・m 形)を用いて測定したものである。鋳鉄定盤においてはビッカース硬さの測定値の範囲が広がっているが、これは鋳鉄に含有している黒鉛によるものと考えられる。ステンレス鋼定盤は、鋳鉄定盤よりも平均硬さが若干高く、ヤング率も 14%程度高く変形しにくい特性がある。さらに靱性が約 10 倍高いことで、砥粒の保持がよくなり定盤と砥粒とのすべりが減少することで、鋳鉄定盤よりも耐摩耗性に優れる結果になったと考えられる。

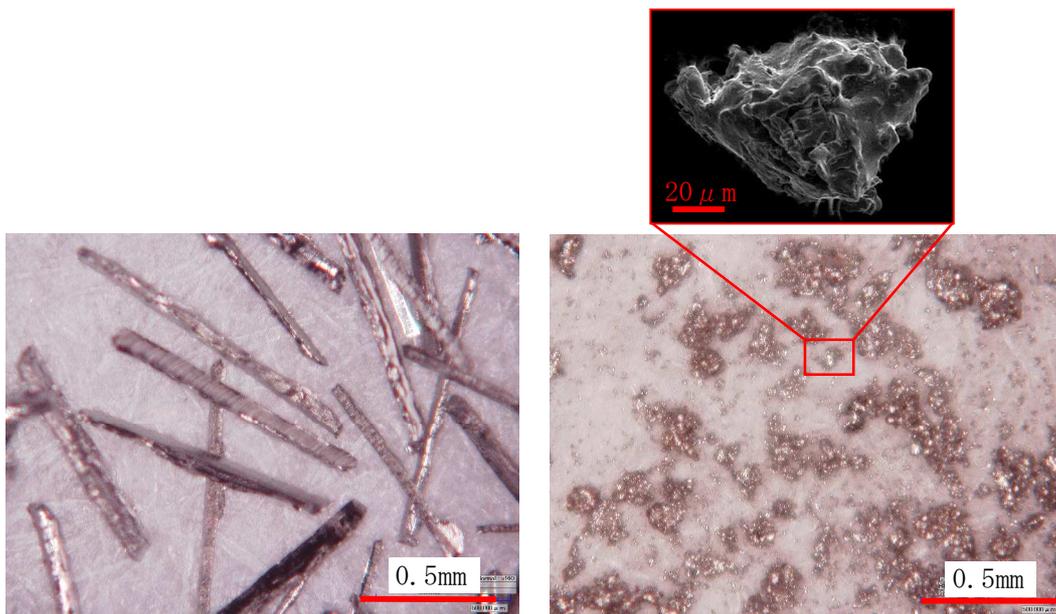
以上の結果からステンレス鋼の SUS316L は、研磨性能と耐摩耗性が鋳鉄定盤よりも優れており、フィラーの材質としても好適である。

表 3.2 ラッピング定盤の材料の機械的特性

	ビッカース硬度 [HV]	ヤング率 [GPa]	シャルピー衝撃強さ [J/cm <sup>2</sup> ]
鋳鉄定盤 (FCD450)	156-200	171	5.3
ステンレス鋼定盤 (SUS316L)	187-196	193	52.5

### 3.3 複合定盤の製造方法

図 3.3 の(a)に使用したステンレス鋼(SUS316L)の繊維, (b)に粉体を示す. 繊維の製作には, いくつかの方法があるが, びびり振動切削法で製作された繊維の断面形状は微細な凹凸があるため, これを用いることでマトリックス材との密着性と砥粒の保持特性が向上するのではないかと考えられた. そこで, びびり振動切削法により製作した入手しやすい直径  $50\ \mu\text{m}$ , 長さ  $1\text{mm}$  のステンレス鋼の繊維を用いることにした<sup>3-1)</sup>. 粉体の粒径としては, 繊維と同じ  $50\ \mu\text{m}$  のものを入手することが困難であったため, 入手が可能な平均粒径が  $80\ \mu\text{m}$  程度のものを用いた. 図 3.3 の(b)から粉体表面にも微細な凹凸があるため, マトリックス材との密着性と砥粒の保持特性の向上が期待される. 複合定盤のマトリックス材としては, 接着性と砥粒の保持特性に優れたエポキシ樹脂を用いた<sup>3-2)</sup>. エポキシ樹脂の主剤には, エポキシ当量が  $170\text{g/eq}$  のビスフェノールFタイプの液状樹脂(ADEKA社製: EP4901,  $3.5\text{P}/25^\circ\text{C}$ )を用いた. エポキシ当量とは,  $1\text{g}$  当量のエポキシ基を含む樹脂のグラム数を表す. ビスフェノールFタイプのエポキシ樹脂は最も汎用のエポキシ樹脂で種類が多く, 特にビスフェノールFタイプは低粘度で扱いやすい. エポキシ当量の小さい主剤は親水性のエポキシ基の割合が多く, 水溶性スラリーに対して濡れが良



(a) ステンレス鋼の繊維 ( $50\ \mu\text{m} \times 1\text{mm}$ )

(b) ステンレス鋼の粉体 ( $\phi 80\ \mu\text{m}$ )

図 3.3 ステンレス鋼の繊維と粉体

い。硬化剤にはアミン系の活性水素当量が 39g/eq (ADEKA 社製：EH-6007) のものを用いた。活性水素当量とは、分子量を活性水素数で割った値である。活性水素当量の小さい硬化剤は硬化速度が大きく硬質で耐摩耗性に優れると判断した。複合定盤は金属の成分割合が増えるほど耐摩耗性は向上すると考えたが、30vol%を超えると混合時に巻き込まれる気泡が増え混合が難しくなったため、SUS316L フィラーの含有量は体積比率で 30vol%になるように配合した。複合定盤の製作方法は、ステンレス鋼のフィラーとエポキシ樹脂を混合したものをステンレス鋼製の金型に入れ、0.5MPa の圧力で片押し法で成形を行い、厚さ 5mm の圧粉体を製造し、これを熱処理炉にて 60℃で 3 時間乾燥硬化を行い成形した。冷却後マシニングセンタを用いて形状を修正した。エポキシ樹脂とステンレス鋼の繊維を圧縮して製作した定盤を繊維定盤、エポキシ樹脂とステンレス鋼の粉体を圧縮して製作した定盤を粉体定盤と称する。図 3.4 (a) に繊維定盤、(b) に粉体定盤の表面の状態をマイクロスコップで観察した画像を示す。気泡の含有もなくステンレス鋼の繊維や粉体がエポキシ樹脂マトリックス中に均質に分散していることがわかる。

### 3.4 マトリックス材の選定

複合定盤の構成要素の 1 つであるマトリックス材となるエポキシ樹脂の選定を行った。マトリックス材にエポキシ樹脂を選定した理由は、エポキシ樹脂が硬化収縮性が小さく寸法安定性に優れることやスラリーに対する親和性に優れるため、砥粒が工作物とラッピング定盤との隙間に進入しやすくなることを期待しての選定である<sup>3-3)</sup>。使用しているビスフェノール F タイプ

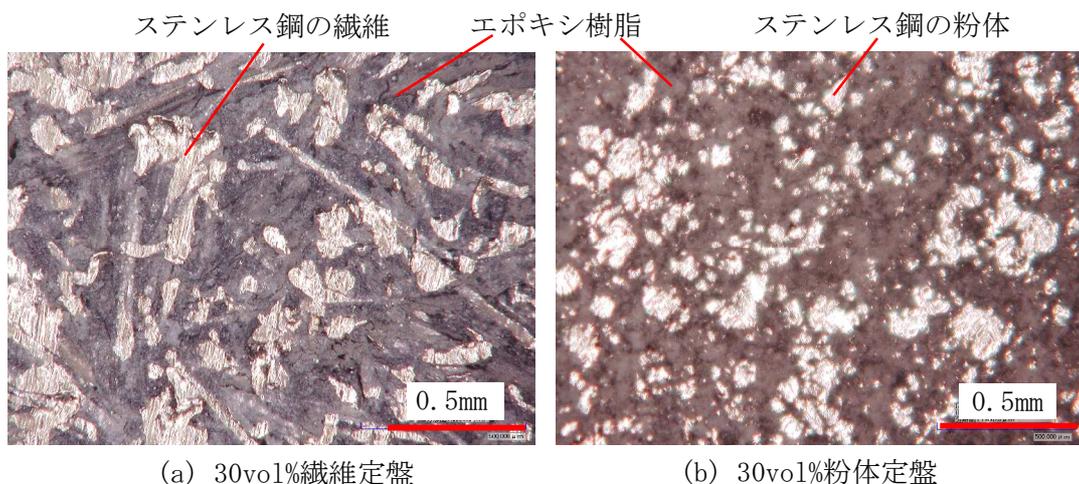


図 3.4 各複合定盤の表面状態

### 第3章 表面微細凹凸形状が維持可能な複合定盤の開発

の液状樹脂(ADEKA社製:EP4901, 3.5P/25°C)に硬化剤アミン系(ADEKA社製:EH-6007)を用いたエポキシ樹脂(以下, エポキシ樹脂Aと称する)を基準として, 同等の粘度を有する2つのエポキシ樹脂を用いて検討を行った. 粘度を変更するとフィラーとの混合具合が変化し, 製作した複合定盤の品質に差異が生じるため粘度が同等のものから選定した. 2つ目のエポキシ樹脂としては, 建設や土木関係で一般的に使用されているサンユレック株式会社のサンユボンドA-541(以下, エポキシ樹脂Bと称する)を用いた. 建設や土木関係で用いられていることから耐久性や機械強度に優れると考えたための選定である. 3つ目のエポキシ樹脂としては, エポキシ当量の影響を確認するためエポキシ当量が320g/eqとエポキシ樹脂Aよりも高い数値のものを主剤とし, 硬化剤としてはエポキシ樹脂Aと同じものを用いたエポキシ樹脂(以下, エポキシ樹脂Cと称する)である. これら3つのエポキシ樹脂と繊維長1mmの繊維径50 $\mu$ mのステンレス鋼の繊維を用いて, 30vol%繊維定盤を製作し表3.1の条件で実験を行った結果を図3.5に示す.

研磨能率は, どのエポキシ樹脂を使用してもほぼ同じ値となった. 仕上げ面粗さは, エポキシ樹脂Cを用いたものが最も悪くなり, エポキシ樹脂Bを用いたものがエポキシ樹脂Aを用い

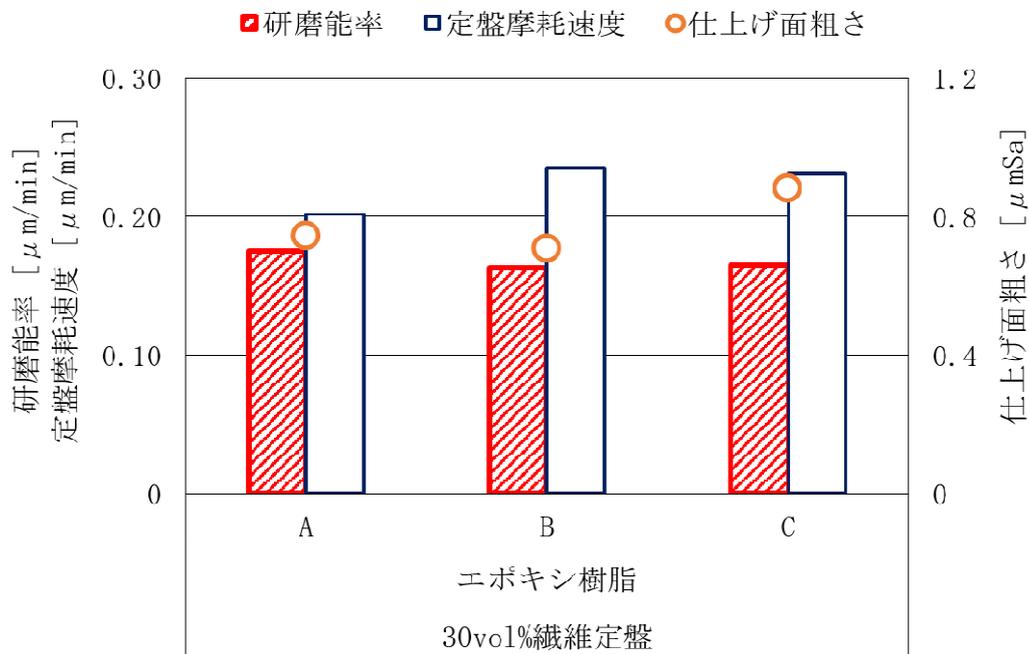


図 3.5 エポキシ樹脂の異なる繊維定盤の研磨性能と定盤摩耗速度

たものより若干良好となった。繊維定盤では主にステンレス鋼の凸部(繊維)で研磨に寄与すると考えられるため、マトリックス材であるエポキシ樹脂が変化しても研磨能率に影響をほとんど与えなかったと考えられる。

各エポキシ樹脂を用いてφ30mm、長さ20mmの試験片を制作し、各エポキシ樹脂のアスカーD硬度をアスカーゴム硬度計(高分子計器株式会社：型式D)を用いて測定を行った結果を表3.3に示す。高硬度なエポキシ樹脂のほうが工作物に対する砥粒の切込み量が増えて研磨能率も増加すると予想したが、そうはならなかった。この程度の硬度差であれば砥粒の切込み量にほとんど影響を与えなかったと考えられる。

次に各エポキシ樹脂で10mm×80mm×t5mmの試験片を作成し、自動接触角計(協和界面化学株式会社：DMo-601)を用いて10箇所接触角の測定を行い、その平均値を表3.3に付記する。図3.5によれば接触角が小さいほど仕上げ面粗さが良好になっていることから、接触角が小さいほど水溶性スラリーに対して濡れが良くなるため、研磨に作用する箇所に砥粒が供給されやすくなり作用砥粒数が増加し仕上げ面粗さが良好になったと考えられる。またエポキシ当量の小さいエポキシ樹脂Aのほうがエポキシ樹脂Cよりも接触角が小さくなることが確認された。

これまでの結果から研磨性能は、エポキシ樹脂Aとエポキシ樹脂Bとはほぼ同等であるが、定盤摩耗速度においてはエポキシ樹脂Aのほうが小さくなっている。これはエポキシ樹脂Aを用いた繊維定盤が耐摩耗性に優れることを表している。このことは、複合定盤はステンレス鋼とエポキシ樹脂の混合材であるため、鋳鉄定盤よりも耐摩耗性に劣ることが懸念される。そのため耐摩耗性に優れたエポキシ樹脂Aを複合定盤のマトリックス材として採用することにした。

表 3.3 各エポキシ樹脂のアスカーD硬度と接触角

	アスカーD 硬度	接触角 [度]
エポキシ樹脂 A	86	73
エポキシ樹脂 B	81	67
エポキシ樹脂 C	78	88

### 3.5 粉体定盤の研磨性能

フィラーの種類による研磨性能の影響を把握するために、まず粉体定盤を用いて実験を行った。市販品にも金属粉体と樹脂を混合させて製作したケメット定盤があるが、主にダイヤモンド砥粒を定盤に埋め込んで使用するため、粗のラッピング工程で使用されるGC#600砥粒では砥粒の切れ刃がダイヤモンドのように鋭利ではないため、定盤に埋め込まれにくくなり研磨性能が低くなることを確認している。またステンレス鋼の粉体を含有したケメット定盤がないことやマトリックス材となる樹脂がどのようなものが使用されているかがわからないため、ラッピング定盤の材質の条件を合わせることができず研磨性能に影響を与える因子が増えるため、本研究ではケメット定盤を用いなかった。

製作した30vol%粉体定盤と鋳鉄定盤の研磨性能の比較を行った。粉体定盤において、マトリックス材として用いているエポキシ樹脂が研磨に寄与しているかを確認するために、ステンレス鋼の定盤にエポキシ樹脂のみを5mm厚塗布してエポキシ樹脂定盤を製作した。これら3つのラッピング定盤を用いて表3.1の条件で実験を行った結果を、図3.6に示す。30vol%粉体定盤は鋳鉄定盤と比較して仕上げ面粗さはほぼ同等であるが、研磨能率は大幅に減少する結果となった。またエポキシ樹脂定盤では、ほとんど研磨が行われなかったことがわかった。これは軟質な

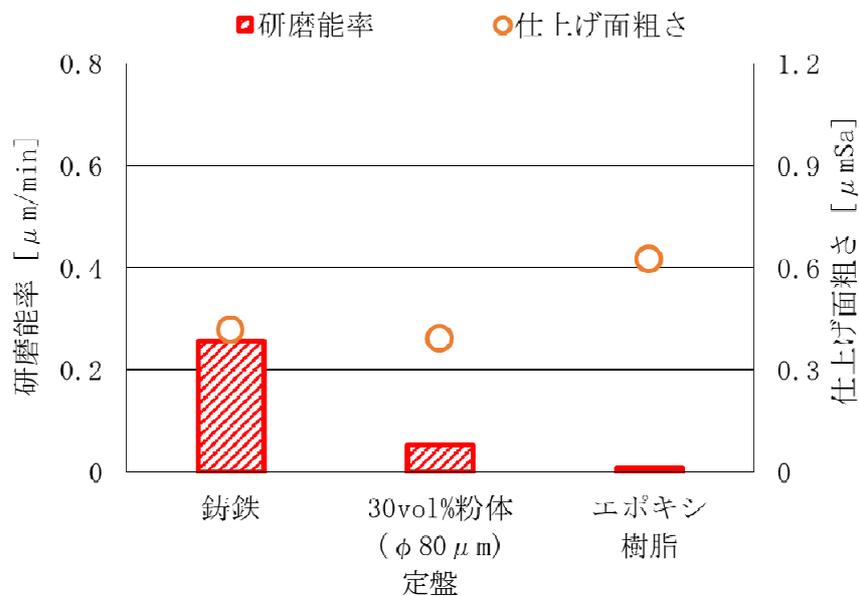


図3.6 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較

エポキシ樹脂に砥粒が埋め込まれてしまうため、砥粒切込み深さが微小となったと考えられる。このことから粉体定盤では、エポキシ樹脂ではなく主にステンレス鋼の粉体が研磨に寄与していることがわかった。つまり研磨能率が鋳鉄定盤よりも低下した原因が研磨に寄与していると考えられる粉体にあるのではないかと考え、種類の異なるフィラーを含有させた複合定盤を製作し粉体定盤と比較することで、研磨性能が低くなった原因を検討することにした。

### 3.6 繊維定盤の研磨性能

#### 3.6.1 粉体定盤と繊維定盤の比較

前節で粉体定盤の研磨性能が低くなった原因を調べるために、フィラーの種類の異なる繊維を用いて繊維定盤を製作し、その研磨性能を粉体定盤と比較することでその原因について検討を行うことにした。繊維定盤に含有させる繊維は、繊維長 1mm で繊維径  $50\mu\text{m}$  であるためアスペクト比 20:1 と高くなり、粉体と比べて繊維は細長くなる。そのため含有する繊維を揃えるのではなくランダムに配置することで、粉体よりも砥粒の動きを妨げやすくなると期待される。実際に図 3.4 の(a)から繊維をランダムに含有していることがわかる。この繊維定盤を用いて表 3.1 の条件で実験を行い、鋳鉄定盤と粉体定盤と比較した結果を、図 3.7 に示す。

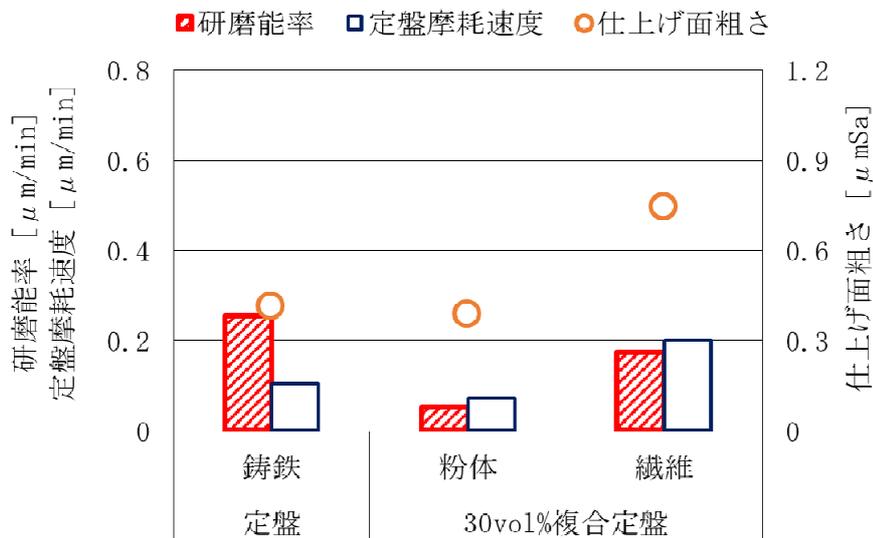


図 3.7 30vol%複合定盤と鋳鉄定盤の研磨性能と定盤摩耗速度の比較

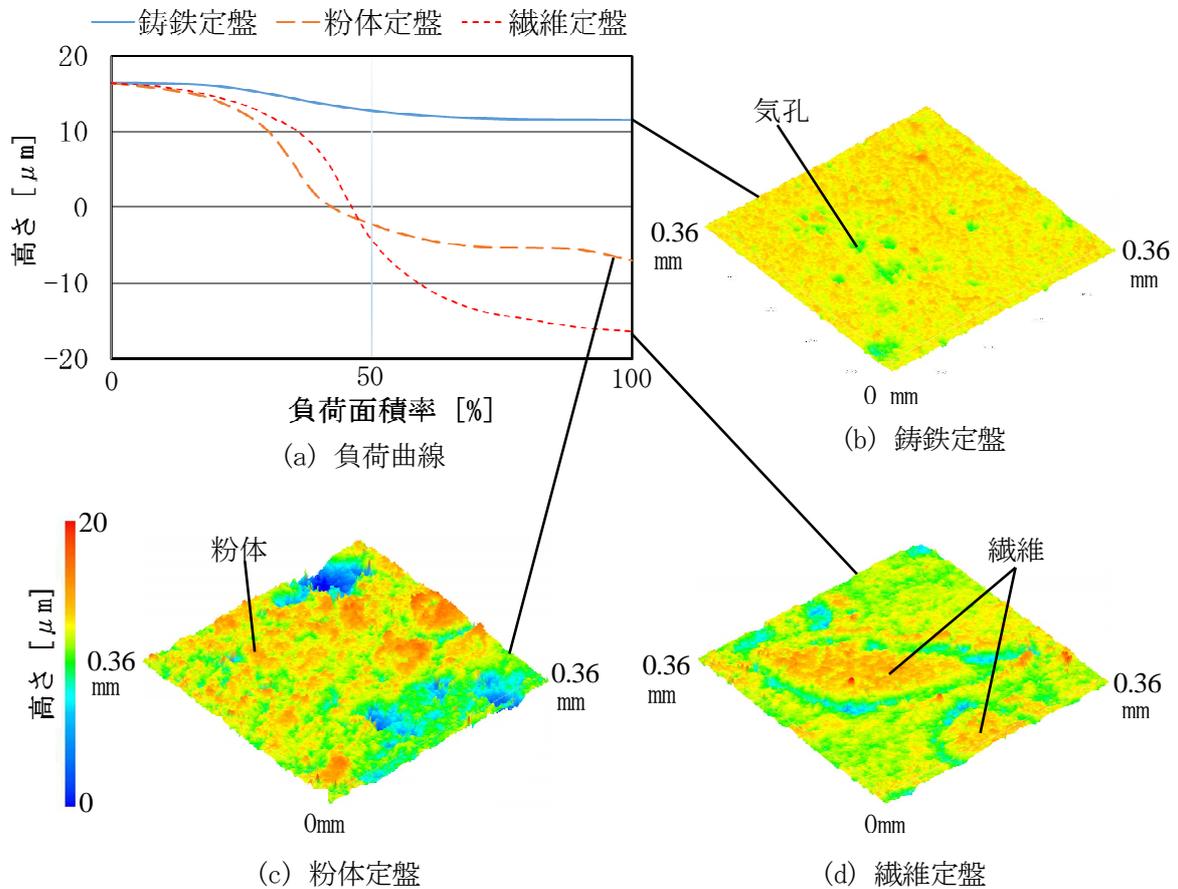


図 3.8 使用後の各ラッピング定盤の定盤表面の共焦点顕微鏡による測定結果

粉体定盤と比較すると、研磨能率が 3.4 倍に向上した。これはアスペクト比の高い繊維を用いることにより工作物と砥粒の相対速度が大きくなったためと考えられる。そこで各研磨定盤の表面状態を共焦点顕微鏡を用いて測定し、研磨性能の違いについて考察を行った。铸铁定盤での球状黒鉛の形状が確認できるように測定範囲を  $0.36\text{mm} \times 0.36\text{mm}$  として測定した各定盤の負荷曲線と 3 次元画像を図 3.8 に示す。

铸铁定盤では、負荷曲線の曲がり方が緩やかであることから突起部が少なく平坦部が多く存在し、気孔が凹部となっていると考えられる。同図(b)の 3 次元画像からもこのことは明らかである。粉体定盤では、急激に変化する負荷曲線となっており、小さな突起があることを示している。このことは(c)の 3 次元画像からも凸部が  $20\mu\text{m}$  から  $80\mu\text{m}$  の大きさであることがわかる。

この $20\mu\text{m}$ から $80\mu\text{m}$ の凸部では砥粒の動きを妨げることがほとんどできていないと考えられる。一方、繊維定盤の負荷曲線は、出だしはなだらかで粉体定盤よりも急傾斜になっていることから、大きな凸部を有していることを表している。(d)の3次元画像からもわかるようにアスペクト比の高い繊維が含有しているため、幅約 $50\mu\text{m}$ で約 $0.35\text{mm}$ の長さを有した凸部があることが確認された。このようにアスペクト比の高い凸部があることで、砥粒の動きを妨げやすくなり研磨能率が向上したと考えられる。

仕上げ面粗さにおいては図3.8の(c)で示すように粉体定盤は繊維定盤に比べて、1つの定盤表面で確認できる研磨に寄与する粉体は $20\mu\text{m}$ から $80\mu\text{m}$ と小さいが均一に分散していることから、繊維定盤に比べて研磨に作用する箇所は多くなり作用砥粒数も繊維定盤よりも増加するため、仕上げ面粗さは良好となると考えられる。一方、繊維定盤では図3.8の(d)で示すように研磨に寄与する凸部同士の間隔が広がることで、作用砥粒数が減少し仕上げ面粗さは悪化したと考えられる。また定盤摩耗速度においては、鋳鉄定盤の約2倍と悪い値となった。これは繊維定盤では、作用砥粒数が減少したことで、砥粒1つあたりかかる圧力が増加し繊維定盤に対する砥粒切込み深さも増加したことが原因であると考えられる。

#### 3.6.2 粉体定盤と繊維定盤上の砥粒の挙動

ファイラーの種類による研磨性能への影響を確認するために、粉体定盤と繊維定盤の定盤上の砥粒の挙動の観察を行った。観察装置は、第2章の鋳鉄定盤の砥粒の挙動の観察に使用したものをを用いた。観察条件においても定盤回転数を $30\text{rpm}$ 、研磨圧力を $15\text{kPa}$ 、スラリー濃度を $1\text{wt}\%$ で供給量を $5\text{mL}/\text{min}$ として、工作物を回転させずに鋳鉄定盤と同じ条件で観察を行った。図3.9に粉体定盤上の砥粒の挙動を撮影した動画の $0.5\text{ms}$ ごとのスナップショットを示す。

砥粒は、粉体定盤よりも相対的に移動しており、粉体定盤上を滑っていることがわかる。そこで回転している粉体定盤を基準とし、粉体定盤に対して滑りながら移動する砥粒の軌跡を観察することで砥粒の挙動を把握した。同図(a)の赤丸内の砥粒の挙動に着目し、各図の矢印は $0.5\text{ms}$ 前の画像を現在の画像と重ね合わせて $0.5\text{ms}$ 前の移動系での砥粒の位置を把握し、その位置から現在の砥粒の位置までの移動量を表している。砥粒の挙動においては確認できるほぼ全ての砥粒が定盤の回転方向にほぼ一様に移動していることがわかった。これは砥粒の定盤上の滑り量を表す矢印の長さが変化していないことから明らかである。またその砥粒の流れが妨げられるような様子を確認することはできなかった。

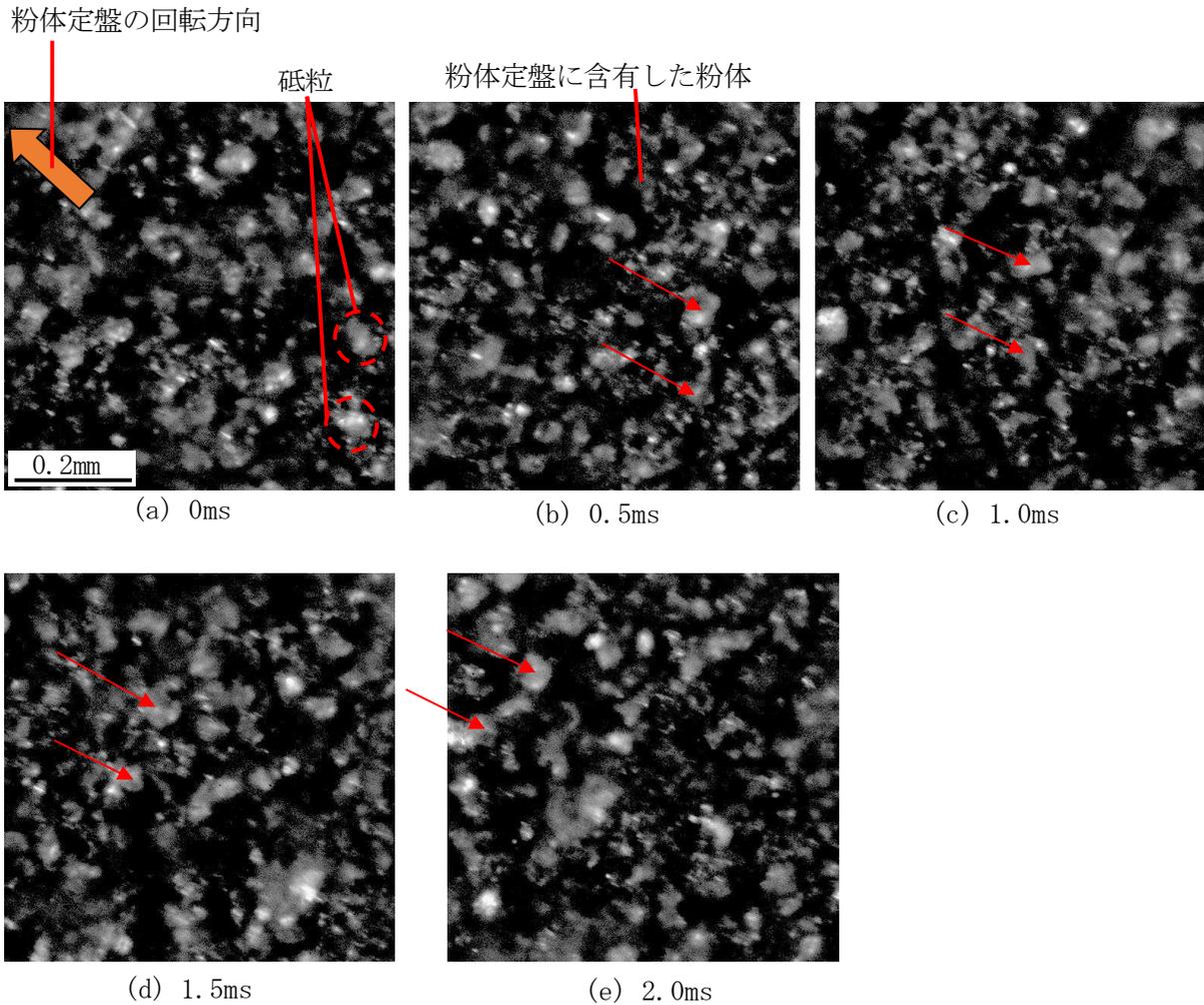


図 3.9 粉体定盤上の砥粒の挙動

次に繊維定盤上の砥粒の挙動の動画のスナップショットを図 3.10 に示す。赤い丸内の砥粒は、(b)の 0.5ms まで繊維定盤上を粉体定盤上の砥粒と同様に定盤上を滑りながら移動していたが、(c)1.0ms 以降で繊維定盤とほぼ同じ速度移動することが確認された。このことは矢印の長さが(c)1.0ms 以降では短くなっていることから明らかである。このスナップショットでは繊維定盤に含有した繊維を確認することは難しいが、粉体定盤では観察することができなかった砥粒の動きを妨げる挙動がいくつも確認されており、粉体定盤よりも繊維定盤のほうが砥粒の動きを妨げることができることが確認された。このことから複合定盤に含有させるフィラーは、粉体よりも繊維のほうが工作物と砥粒との相対速度が大きくなることで研磨能率が高くなることがわかった。

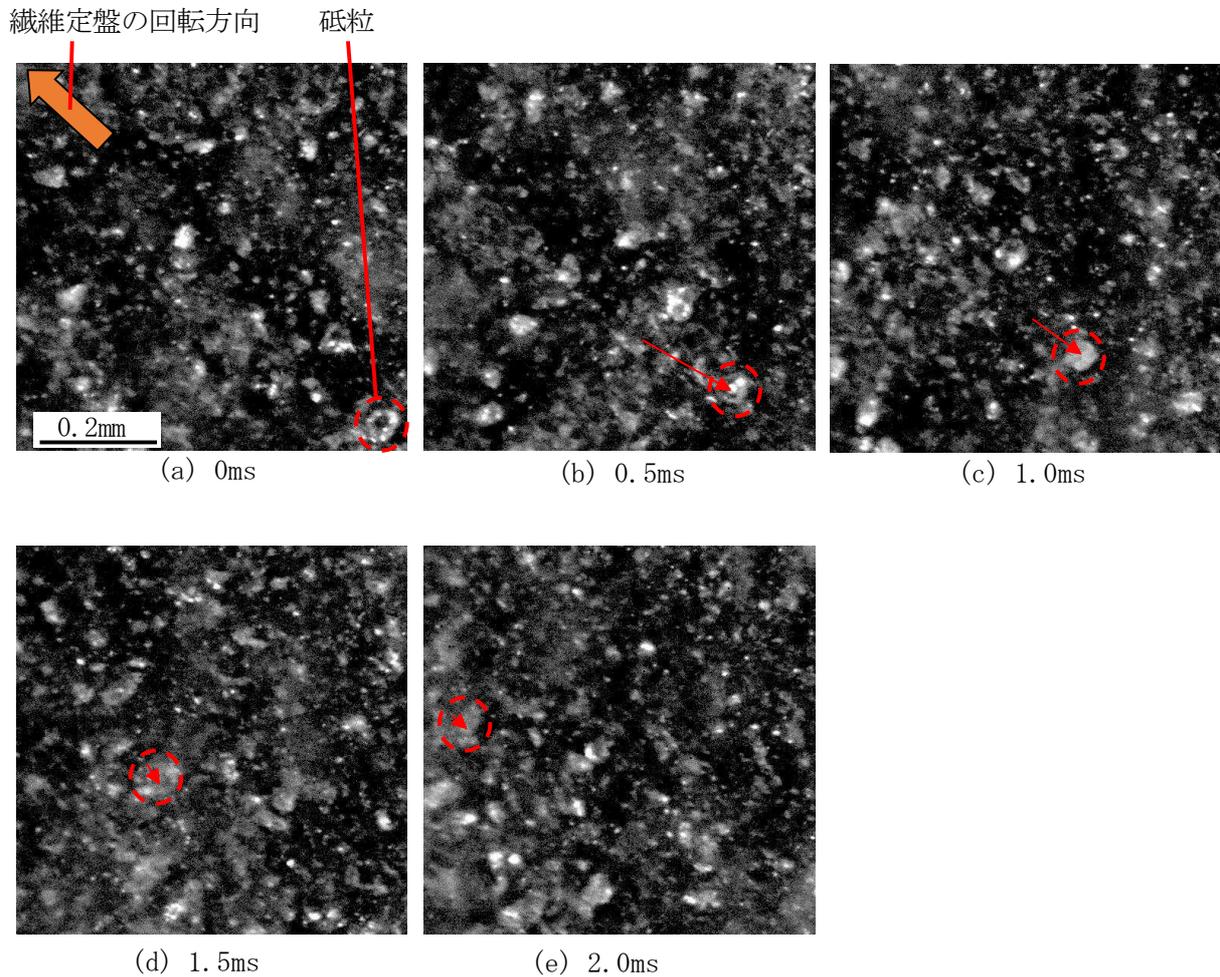


図 3.10 繊維定盤上の砥粒の挙動

### 3.6.3 繊維の表面処理による耐摩耗性の向上

図 3.7 の結果から繊維定盤は粉体定盤よりも研磨能率は高くなるが、鋳鉄定盤よりも定盤摩耗速度が大きくなっていることがわかる。このため繊維定盤は耐摩耗性を高める必要がある。図 3.11 の(a)に、実験後の繊維含有率 30vol%の繊維定盤の表面を観察した画像を示す。定盤内部に気泡が含有していることがわかる。このため気泡がマトリックス材による繊維の保持性を低下させ、耐摩耗性を劣化させていたのではないかと考えた。そこで、ステンレス鋼の繊維とエポキシ樹脂の密着性をカップリング剤によって向上させ、気泡の残留を抑制することを試み

た。

ステンレス鋼の繊維を純水にカップリング剤(信越化学工業社製：KBN-430)を1wt%加えた液に入れ3分間攪拌を行い、その後繊維を液から取り出し40℃の電気炉の中で48時間乾燥させた。このステンレス鋼の繊維を用いて製作した繊維含有率30vol%の繊維定盤の使用後の定盤表面を、図3.11(b)に示す。同図(a)と比較すると気泡の含有が抑制されていることがわかる。図3.12にこの定盤を用いて表3.1の条件で実験を行った結果を示す。カップリング剤を用いていない繊維定盤と比較すると、定盤摩耗速度が32%減少し、さらに研磨能率は25%向上し、仕上げ面粗さは27%改善した。これは含有する気泡が減少したため、研磨に寄与する凸部が増加したことで研磨能率が向上し、作用砥粒数も増加したことで仕上げ面粗さも良好になったと考えられる。しかし、まだ鋳鉄定盤と比較すると定盤摩耗速度が大きい結果となった。

### 3.6.4 繊維含有量の増加による耐摩耗性の改善

次に、さらに耐摩耗性を向上させるためにステンレス鋼の繊維の含有量を増加させることを試みた。前項でステンレス鋼の繊維に表面処理を行ったことで、繊維とエポキシ樹脂の混合が行い易くなり、表面処理を施さない場合は繊維含有率30vol%の製造が限界であったが、繊維の表面処理を行うことで繊維含有率40vol%の定盤まで製造できるようになった。製作した40vol%

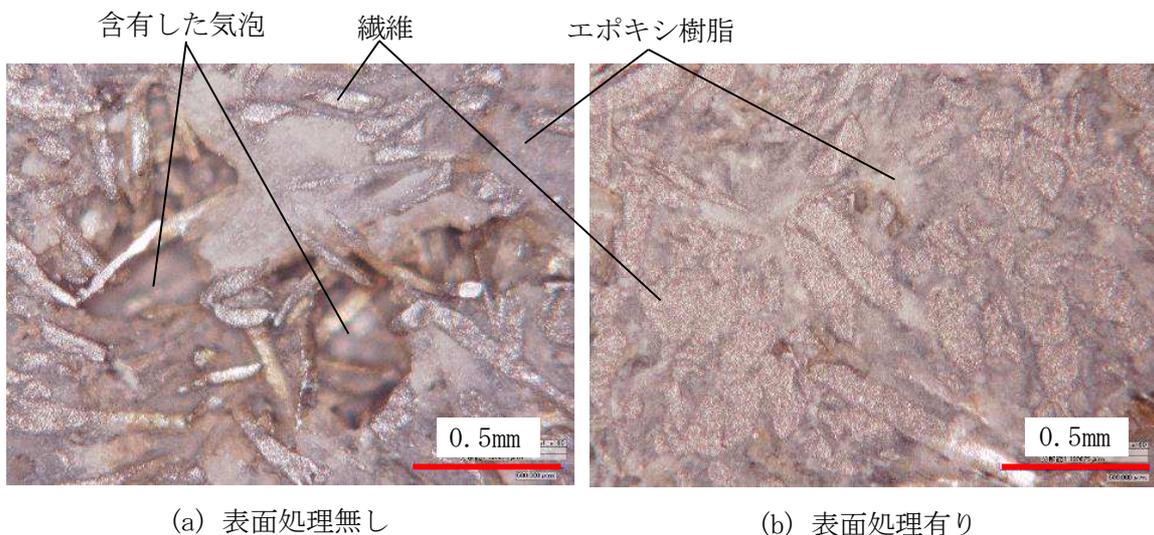


図 3.11 繊維の表面処理の有無による各 30vol%繊維定盤の使用後の表面状態の比較

繊維定盤の表面を観察した結果を、図 3.13 に示す。小さな気泡が残留しているが、大きな気泡は確認されなかった。

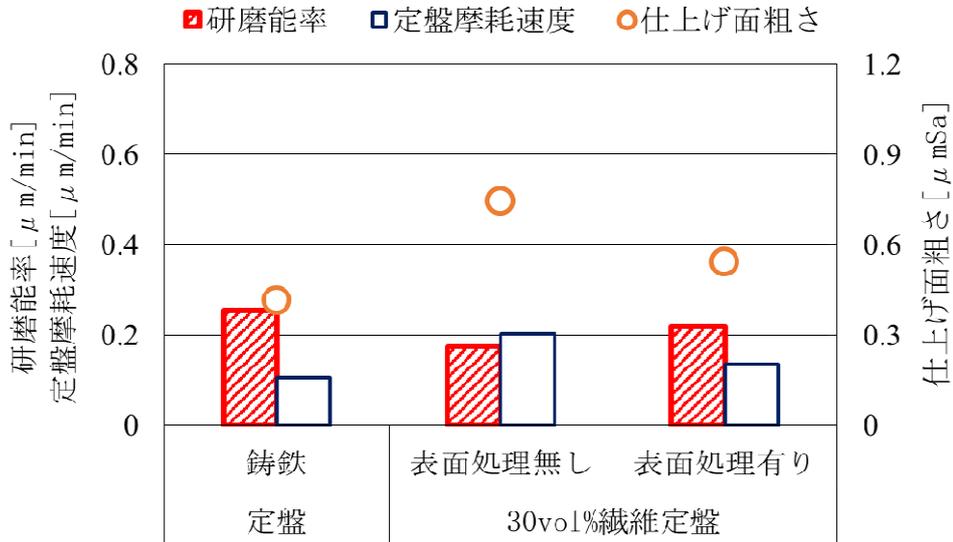


図 3.12 繊維の表面処理による研磨性能の影響

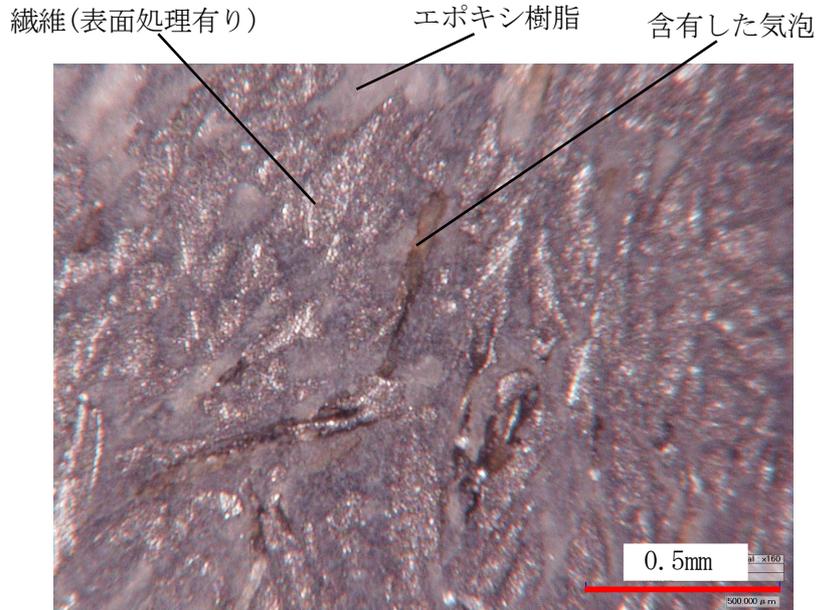


図 3.13 40vol%繊維定盤の表面状態

この定盤を用いて表 3.1 の条件で実験を行った結果を、図 3.14 に示す。繊維含有率 30vol% の繊維定盤と比較すると仕上げ面粗さはほぼ同等で、研磨能率が 57%向上し定盤摩耗速度は 23%改善した。仕上げ面粗さがほぼ同等であることから作用砥粒数もほぼ同じであると考えられ、作用砥粒数がほぼ同じで研磨能率が向上していることから、砥粒と工作物との相対速度が大きくなったと考えられる。このことから繊維の含有量が増加したことで、砥粒の動きを妨げる凸部が増加し、砥粒の動きを妨げる効果が高くなったと考えられる。また耐摩耗性の向上においては、エポキシ樹脂よりも耐摩耗性に優れたステンレス鋼の含有量が増加したためと考えられる。鋳鉄定盤と比較しても研磨能率は 35%向上し、定盤摩耗速度においては、鋳鉄定盤とほぼ同等の耐摩耗性を示すことがわかった。

### 3.6.5 目切り溝による影響

これまでの繊維定盤を用いた実験では、定盤表面に目切り溝加工を行わずに実験を行ってきた。ここでは砥粒の定盤と工作物との隙間への進入のしやすさや切り屑の排出性をさらに向上させるために、定盤表面に目切り溝加工を行い繊維定盤の研磨性能がどのように変化するか調べた。40vol%繊維定盤の表面に鋳鉄定盤と同様に幅 2mm、深さ 5mm の溝を 20mm 間隔で格子状に

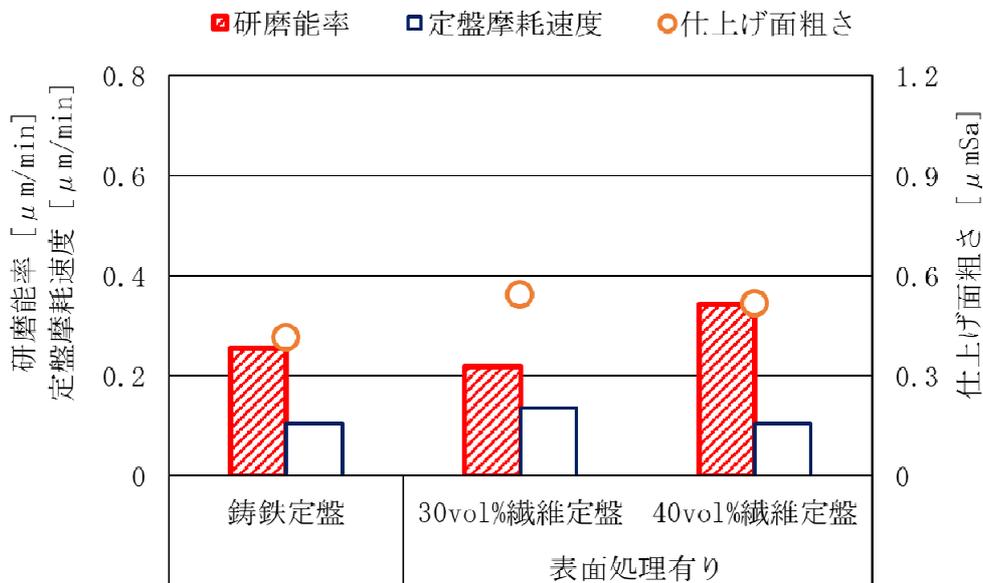


図 3.14 繊維含有率の変化が繊維定盤の研磨性能と定盤摩耗速度に与える影響

目切り溝加工を行った。40vol%繊維定盤の目切り溝の有無による研磨性能の変化を鋳鉄定盤の結果と比較したものを図 3.15 に示す。

繊維定盤は目切り溝加工を行うことで研磨能率が 24%減少し、仕上げ面粗さも 82%も悪化することがわかった。繊維定盤ではステンレス鋼とエポキシ樹脂を用いることで、定盤表面に微細凹凸形状が形成される。この微細凹凸形状の凹部が砥粒を供給する目切り溝の役割を担っていると考えられ、さらに目切り溝を増やしたことで定盤上を移動していた砥粒が目切り溝部に排出されやすくなり、作用砥粒数が減少したと考えられる。このため作用砥粒間隔が広くなり工作物を除去する絶対量が減少し、研磨能率が低下したと考えられる。仕上げ面粗さにおいても作用砥粒数の減少と作用砥粒間隔が広がったことで悪化したと考えられる。これらの結果から繊維定盤では、目切り溝加工が不要であることがわかった。次に定盤表面の微細凹凸形状が研磨に影響を与えていると考えられるため、研磨能率と定盤表面粗さの関係について調べた。

### 3.6.6 研磨能率と定盤表面粗さの関係

鋳鉄定盤と 40vol%繊維定盤の定盤表面粗さの経時変化を図 3.16 に示す。定盤表面の粗さの変化をわかりやすくするために、各定盤の実験開始時の定盤表面粗さを 1 として各研磨時間の

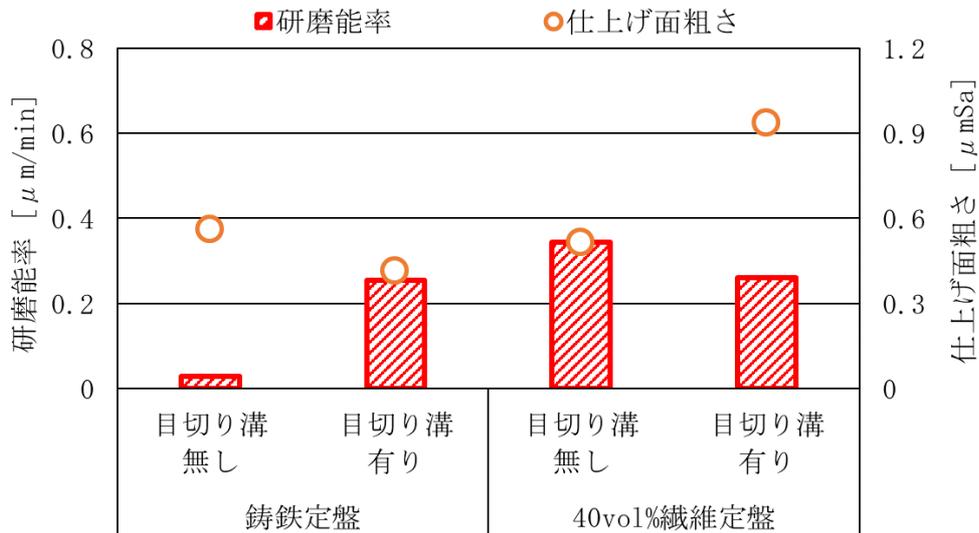


図 3.15 鋳鉄定盤と 40vol%繊維定盤の目切り溝の有無による研磨性能への影響の比較

定盤表面粗さを正規化した。 鋳鉄定盤と 40vol%繊維定盤はともに定盤粗さが研磨時間の経過に伴い減少していることがわかる。 鋳鉄定盤は 2.3.3 項で確認したように定盤表面粗さが実験開始時から低下し続けるのに対し、繊維定盤は定盤の粗さを維持する傾向にある。 これは図 3.17 (a)に示すように鋳鉄定盤では、実験開始時はフェーシングとドレッシングによって定盤表面に溝が形成されているが、研磨が進むと定盤表面の凹凸が摩耗し、図 2.12 (b)に示されたようにこの溝が浅くなるため砥粒の動きを妨げる効果が低くなる。 一方、図 3.17 (b)に示す繊維定盤は、たとえ定盤が摩耗したとしてもステンレス鋼の繊維とマトリックス材のエポキシ樹脂では耐摩耗性が異なるため、定盤表面に常に微細な凹凸形状を維持することができる。 この微細凹凸形状によって砥粒の動きを妨げる効果が高くなり、さらに砥粒は定盤と工作物との隙間に進入しやすくなることで、高い研磨能率を長時間にわたって維持できると考えられる。 実際に、図 3.18 に、鋳鉄定盤と 40vol%繊維定盤の研磨時間 10 分、30 分、65 分、135 分、210 分の正規化した研磨能率の経時変化を示す。 鋳鉄定盤よりも繊維定盤のほうが研磨能率の低下が抑制されていることから、40vol%繊維定盤は定盤表面の微細凹凸形状が維持できるため、高い研磨能率が維持される考察が妥当であると結論付けられる。

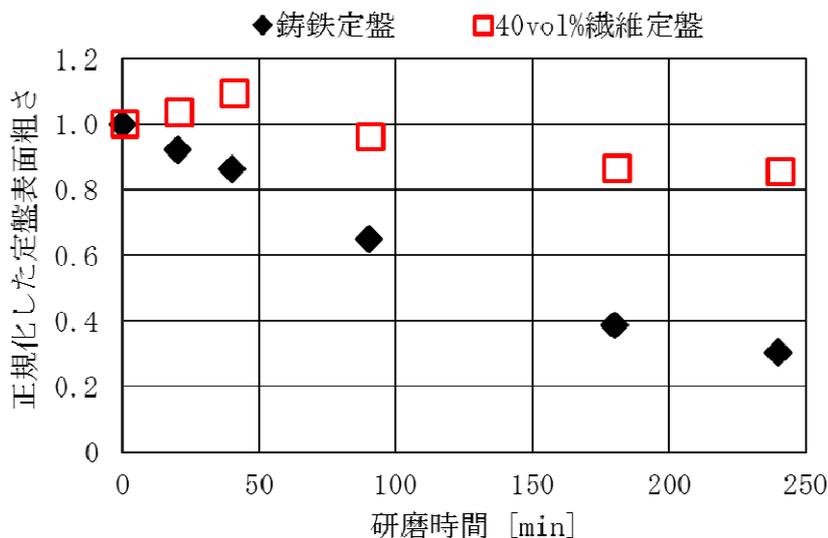


図 3.16 鋳鉄定盤と 40vol%繊維定盤の定盤表面粗さの経時変化の比較

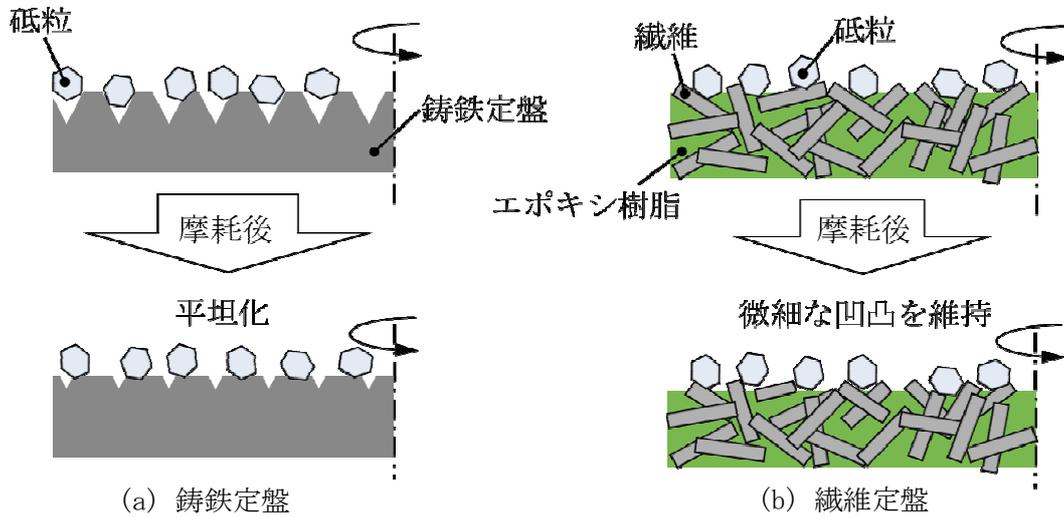


図 3.17 铸铁定盤と纖維定盤の定盤表面の変化

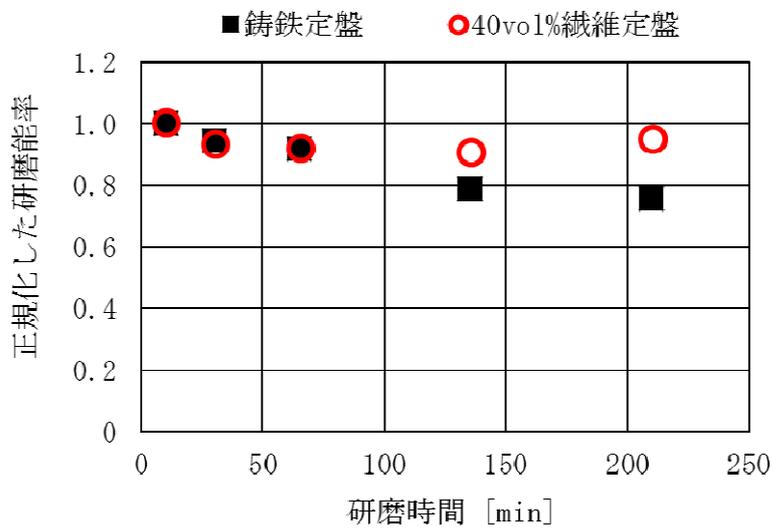


図 3.18 铸铁定盤と 40vol%纖維定盤の研磨能率の経時変化

### 3.7 結言

本章では、鋳鉄定盤の問題点を解決するために開発した複合定盤の性能を把握し、その性能を鋳鉄定盤と比較することで鋳鉄定盤の問題点を解決する性能を有するかを検証した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) フィラーの材質である SUS316L のステンレス鋼定盤と鋳鉄定盤の研磨性能を比較した結果、鋳鉄定盤よりも SUS316L のステンレス鋼定盤のほうが靱性や硬度などの材料特性が優れることで研磨性能が高くなることがわかった。
- 2) 粉体定盤では表面の微細凹凸形状の凸部(ステンレス鋼部)が  $20\mu\text{m}$  から  $80\mu\text{m}$  と小さく、一方、繊維定盤では凸部が幅約  $50\mu\text{m}$  で長さが約  $0.35\text{mm}$  とアスペクト比が大きくなることで、粉体定盤よりも研磨性能が向上することがわかった。
- 3) 繊維定盤に目切り溝を加工することで研磨性能が低下することから、繊維定盤には目切り溝が不要であり、鋳鉄定盤よりも加工コストや再加工によるメンテナンスコストも低減できることがわかった。
- 4) ステンレス鋼繊維の含有量を 40vol% に高めることで、鋳鉄定盤よりも研磨能率が 35% 向上し、定盤摩耗速度は同等になることがわかった。
- 5) 繊維定盤は材料に耐摩耗性の異なるエポキシ樹脂とステンレス鋼の繊維を用いることで、定盤が摩耗しても定盤表面の微細凹凸形状を維持されることで長時間にわたって、研磨能率の低下が抑制されることがわかった。

以上のように、複合定盤は鋳鉄定盤よりも難削材に対する研磨能率が高くなり、研磨能率の経時変化も抑制されることもわかったが、まだ複合定盤の研磨性能が高くなる微細凹凸形状について十分に検討が行えていない。そこで次章では、研磨性能が高くなる微細凹

凸形状を把握するために簡易的に凹凸形状を変化させることが可能な金属金網をラッピング定盤として用いて実験を行う。

### 第3 参考文献

- 3-1) 鈴木清, 植松哲太郎, 中川威雄, びびり振動切削における繊維製造領域, 精密工学会誌, Vol. 53, No. 6, (1987), pp. 921-927.
- 3-2) 野村信幸, 望月隆弘, 澤島智也, 広川良一, 若杉博雄, 砥粒の保持特性を大幅に向上させた多孔質エポキシ樹脂研磨パッドの開発, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 2, (2015), pp. 108-112.
- 3-3) 村田順二, 稲澤求, 谷泰弘, 張宇, エポキシ樹脂研磨パッドの粘弾性と研磨性能, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 817, (2014), SMM0253.

## 第4章 メッシュ定盤を用いた複合定盤の定盤仕様の検討

### 4.1 緒言

前章から繊維定盤の表面の微細凹凸が研磨性能に影響を与えることがわかった。そこでどのような微細凹凸形状であれば、高い研磨性能が得られるのかについて検討することにした。ポリシング工程においては、橋本洋平らの「研磨パッドの微細凹凸接触を考慮したCMPプロセスのEHL解析<sup>4-1)</sup>」などで研磨パッド上の凹凸形状についての研究がなされているが、ラッピング定盤表面の微細凹凸形状と研磨性能についての研究はほとんどない。そのため、微細凹凸形状の凸部の大きさや凸部同士の間隔の変化がどのように研磨性能に影響を与えるのかわかっていない。そこで微細凹凸形状を定量的に変更させることのできる金属金網をラッピング定盤として用いることで、微細凹凸形状を変化させて研磨性能に与える影響を把握することにした。金属金網を定盤にエポキシ樹脂接着剤によって貼り付けたラッピング定盤を、メッシュ定盤と呼ぶ。

本章では、このメッシュ定盤を用いてメッシュ定盤のワイヤ径やピッチ間隔を変化させることで、高い研磨性能を示す微細凹凸形状について検討した。

### 4.2 メッシュ定盤の概要

メッシュ定盤には、これまで用いた SUS316L のステンレス鋼の金網の入手が困難であったことと、本章ではメッシュ定盤を用いての高い研磨性能を示す微細凹凸形状の把握が目的であるため、材質の差異による影響少ないと考え、入手可能であった SUS304 のステンレス鋼の金網を用いることにした。金網は金属のワイヤを織り込んで網状にしたものであり、産業分野等で一般的に使用されている。金網の網目の大きさはメッシュ番号によって表記され、メッシュ番号は、1インチ(25.4mm)あたりのワイヤの本数を表す。たとえば40メッシュであれば1インチに40本のワイヤがあり、ワイヤのピッチ間隔は1インチを40で割った0.635mmとなる。図4.1にワイヤ径0.29mmの40メッシュの平織のメッシュ定盤を示す。平織とは、縦線と横線が一定

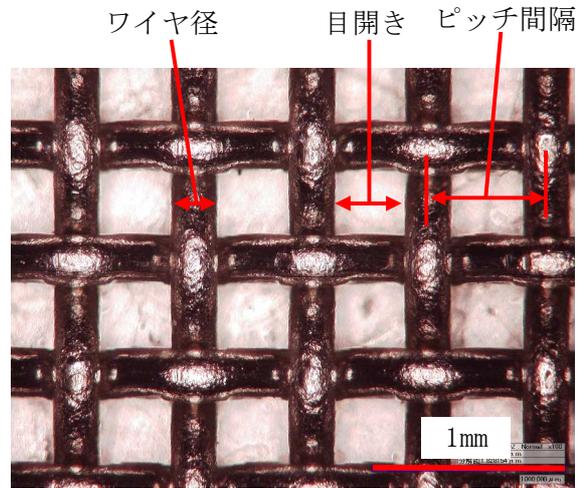


図 4.1 メッシュ定盤(ワイヤ径 0.29mm, 40 メッシュ)

の間隔を保ち1本ずつ交互に縫い合わせた織り方である。縦線と横線が交差して形成された正方形の空間を目開きと呼び、目開きの大きさはピッチ間隔からワイヤ径を引いた値となる。

はじめにメッシュ定盤の基本的な研磨性能について把握し、その後メッシュ定盤の微細凹凸形状を変化させて実験を行うことにした。

## 4.3 メッシュ定盤の特異性

### 4.3.1 メッシュ定盤の研磨能率の経時変化

はじめにメッシュ定盤の基本的な特性を把握する。メッシュ定盤は縦と横のワイヤを交互に縫い合わせた構造になっているため、定盤の摩耗により研磨に寄与する面積が変化すると考えられる。そこでメッシュ定盤の接触面積の変化が研磨性能に与える影響について調べた。比較対象として铸铁定盤と40vol%繊維定盤を用いた。ワイヤ径が小さいメッシュ定盤では、工作物との接触面積の変化が早く、その変化の割合がわかりにくいと予想したため、ワイヤ径0.29mmの40メッシュ定盤を用いて表4.1の条件で実験を行った。研磨時間が240分までの累積研磨量の経時変化を図4.2に示す。铸铁定盤と繊維定盤では研磨開始から研磨終了まで研磨量はほぼ一定の割合で増加している。一方、40メッシュ定盤では実験開始から40分までと40分から240分までの1分あたりの研磨能率を比較すると $1.17\mu\text{m}/\text{min}$ と $0.95\mu\text{m}/\text{min}$ となり、40分以

表 4.1 実験条件

装置	片面研磨機 (日本エンギス株, EJW-400IFN)
ラッピング定盤	铸铁定盤, 40vol%繊維定盤, ワイヤ径 0.29mm 40 メッシュ定盤
ラッピング定盤の直径	300mm
工作物	サファイア基板 (C 面) φ 50.8mm (2 インチ) × 1mmt × 1 枚 表面粗さ : 2nmRa
研磨圧力	20kPa
定盤速度	70m/min (75rpm)
工作物速度	19m/min (60rpm)
研磨時間	240min
スラリー	GC#600 (20 μm) 3wt% + 純水
スラリー供給量	25mL/min (かけ流し)

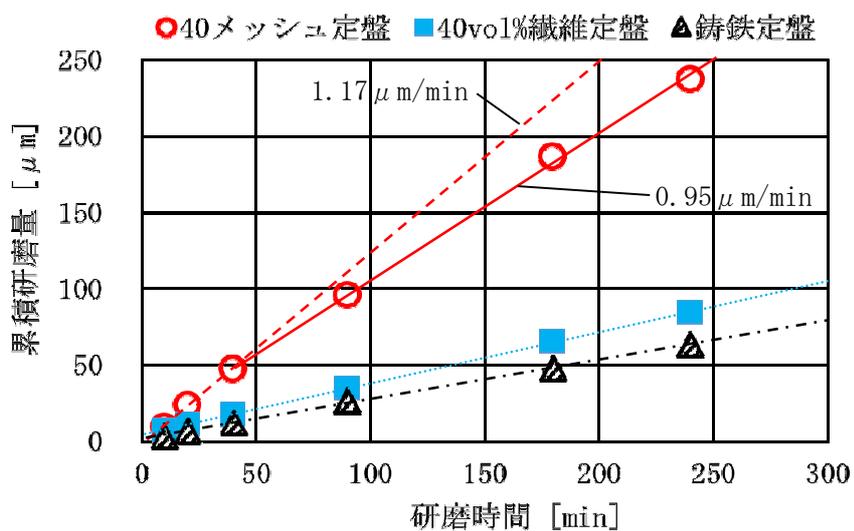


図 4.2 各種ラッピング定盤の累積研磨量の経時変化

降では約20%減少することがわかった。この原因が40メッシュ定盤の接触面積の変化にあると考え、マイクロスコープを用いて接触面積の測定を行い、その経時変化について検討を行った。

図4.3に40メッシュ定盤の接触面積にあたるワイヤ摩耗部の面積の経時変化と研磨時間が0分、10分、40分、90分、240分経過した直後の表面状態を観察した結果を示す。ワイヤ摩耗部の測定にはマイクロスコープを用いて、各研磨時間の40メッシュ定盤のワイヤ摩耗部の面積を測定した。同図のワイヤ摩耗部には、転動痕と引っ掻き痕が確認できることからメッシュ定盤のワイヤ摩耗部は、研磨に寄与していると考えられる。□1.0mm×1.0mmの領域で確認できる全

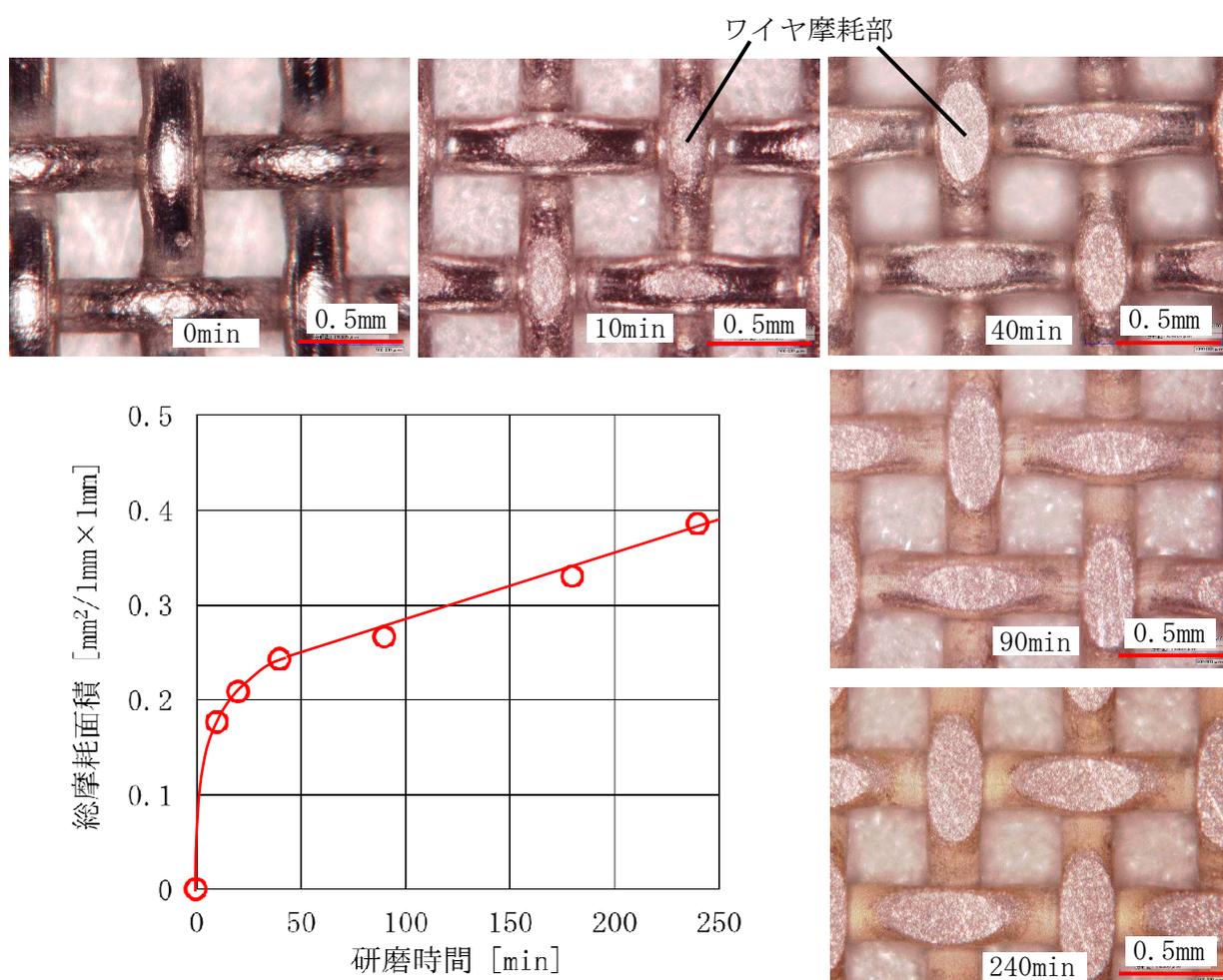


図 4.3 総摩耗面積の経時変化と40メッシュ定盤の表面画像

てのワイヤ摩耗部の面積を測定し、その総和を総摩耗部面積とした。同図のグラフの実験開始から40分までの近似曲線と40分から240分の近似直線の変化量から実験開始から40分までのほうが総摩耗部面積の増加率が大きいことがわかる。そこで研磨能率としては、接触面積が安定した40分から240分の平均値を用いて以下のメッシュ定盤の評価を行うことにした。

### 4.3.2 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較

次に、メッシュ定盤の凹凸形状を変化させて実験を行った。メッシュ定盤の凹凸形状を変化させるために、目開きを約0.10mmずつ変化させた、ワイヤ径0.29mmの40メッシュ定盤(目開き0.345mm)、ワイヤ径0.18mmの60メッシュ定盤(目開き0.243mm)、ワイヤ径0.10mmの100メッシュ定盤(目開き0.154mm)の3種類を実験に用いて、メッシュ定盤の研磨性能を鋳鉄定盤や繊維定盤の研磨性能と比較を行った。表4.1の条件で実験を行った結果を図4.4に示す。同図よりメッシュ定盤の場合は、鋳鉄定盤よりも仕上げ面粗さは悪化しているものもあるが、研磨能率は全て向上していることがわかる。このようにメッシュ定盤ではピッチ間隔やワイヤ径を変化させることで容易に研磨性能を変化させることができる。また図4.4によれば100メッシュ定盤が鋳鉄定盤と仕上げ面粗さが同等で、研磨能率が約31%向上している。鋳鉄定盤と仕上

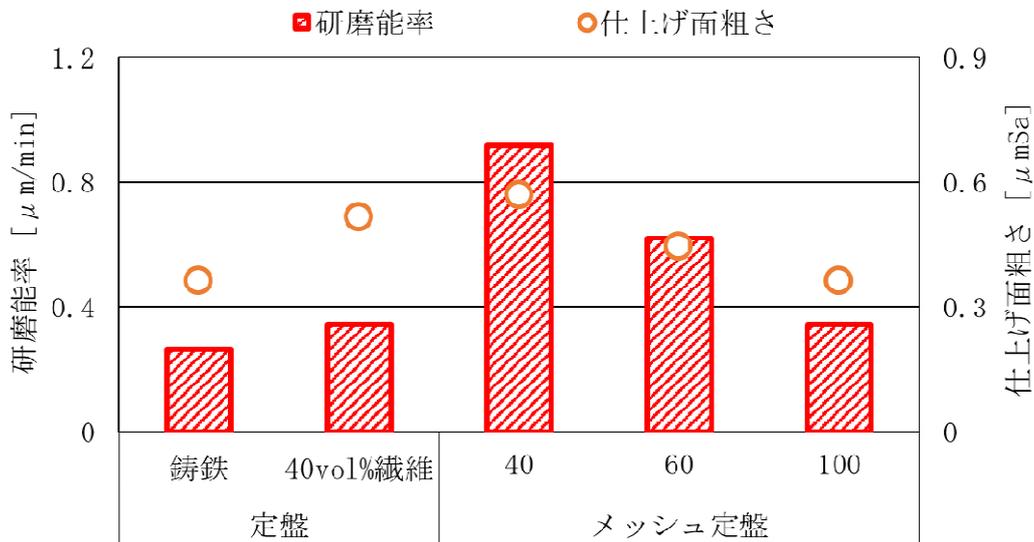


図 4.4 各種ラッピング定盤の研磨性能

げ面粗さが同等であることから 100 メッシュ定盤を基準にピッチ間隔を 0.254mm から 0.318mm の範囲で変更させて実験を行ったが、鋳鉄定盤よりも仕上げ面粗さが良好で研磨能率がこれ以上向上するメッシュ定盤を見つけることができなかった。そこで鋳鉄定盤の問題点の1つである難削材に対する研磨時間の短縮に重きをおき、研磨能率が鋳鉄定盤の約3倍となった40メッシュ定盤を中心に実験を行うことにした。

メッシュ定盤は、1層しかメッシュ構造を有していないため、摩耗によりワイヤが断線すると研磨性能が大幅に減少することを実験で確認している。つまりメッシュ定盤は高い研磨性能を示すが定盤寿命が短いため、量産工程等の製造現場で使用することは難しい。

以上の結果からメッシュ定盤は定盤の寿命は短いが高研磨性能を示すため、次節でその優れた性能が得られる研磨メカニズムの解明を行った。

### 4.3.3 メッシュ定盤の織り方の差異による研磨性能への影響

金網の織り方には平織、綾織、豊織の3種類があり、織り方により研磨性能が変化すると考えられる。そこでメッシュ定盤の織り方の差異による研磨性能の変化について調べた。豊織には目開きが無く表面状態が大きく異なるため除外した。図4.4で最も研磨能率に優れたワイヤ

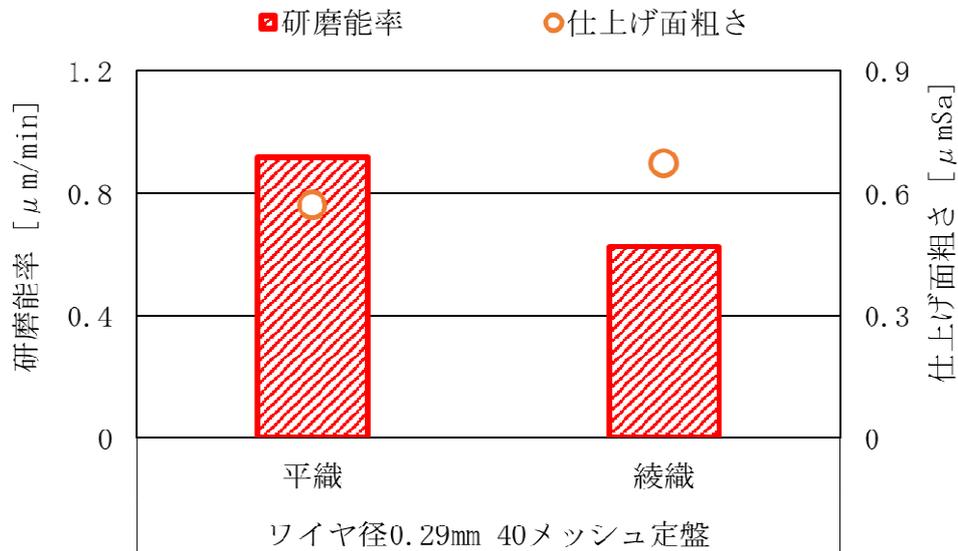


図4.5 織り方の異なる40メッシュ定盤の研磨性能の比較

径 0.29mm の 40 メッシュ定盤の織り方のみが異なる，綾織のメッシュ定盤を用いて表 4.1 の条件で実験を行った結果を図 4.5 に示す．綾織とは，ワイヤの上を 2 本通過した後 2 本のワイヤの下を通過させることを繰り返した織り方である．図 4.5 の結果から研磨能率は平織のほうが 52% 高く，仕上げ面粗さも約 17% 優れている．この結果から研磨性能に優れる平織のメッシュ定盤を引き続き用いて評価を行うことにした．

## 4.4 メッシュ定盤の研磨メカニズムの解明

### 4.4.1 凹部の連続性が研磨性能に与える影響

メッシュ定盤は図 4.3 の使用後の表面状態からわかるようにワイヤ摩耗部が凸部となり，それ以外の部分が凹部となる．そのため凸部の周辺を凹部が囲むような構造になっており，この凹部の構造も研磨性能に影響を与えていると考えられる．そこでステンレス鋼の円板に穴を空けたパンチングメタルを用いて比較実験を行うことで，凹部の連続性の研磨性能への影響を調べた．パンチングメタルは，予備実験で穴が緻密に配列されているほうが研磨性能が向上することを確認したため，容易に入手可能なもので最も穴のピッチ間隔が狭いパンチングメタルを用いた．図 4.6 に実験で用いた，チドリに 60 度の角度で 0.25mm の貫通穴を 0.43mm 間隔で穴加

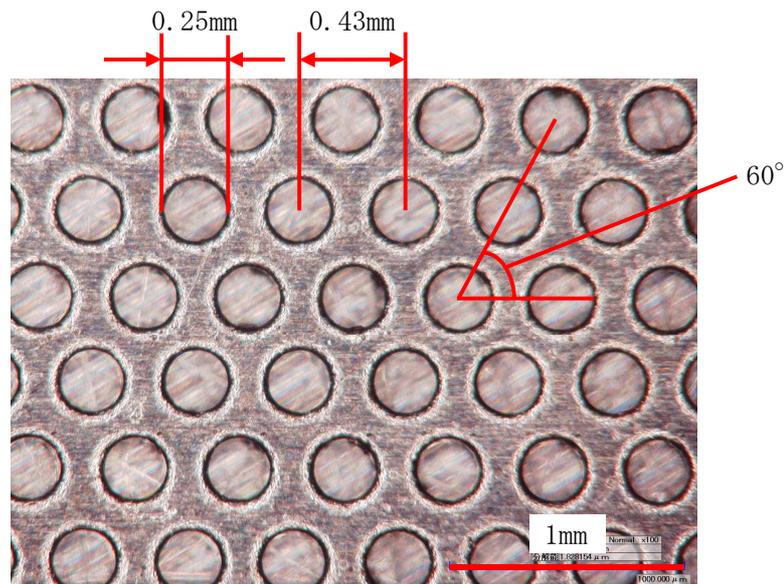


図 4.6 パンチングメタル定盤(穴径:0.25mm, ピッチ間隔:0.43mm)

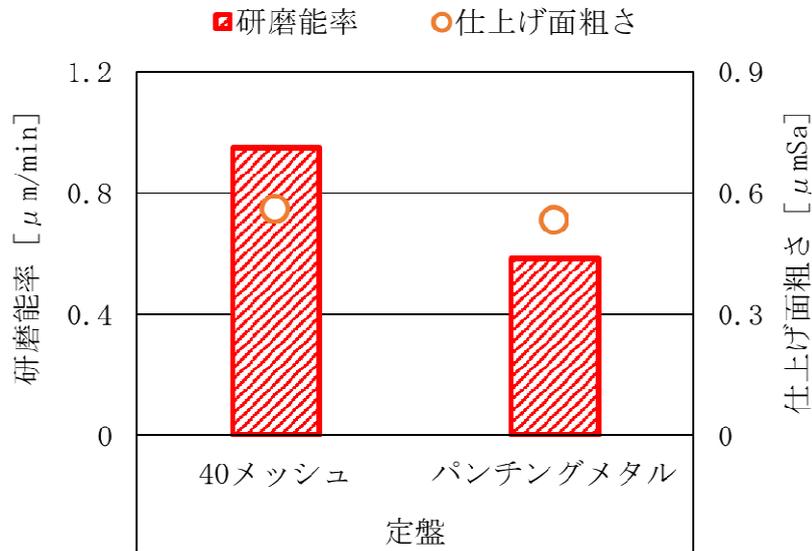


図 4.7 40 メッシュ定盤とパンチメタル定盤の研磨性能の比較

工を行ったパンチングメタルの外観を示し、図 4.7 に表 4.1 の条件で実験を行い、ワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤と比較した結果を示す。パンチングメタルをステンレス鋼の定盤にエポキシ樹脂接着剤によって貼り付けたラッピング定盤をパンチングメタル定盤と呼ぶ。

図 4.7 から仕上げ面粗さはほぼ同等であるが、研磨能率は 40 メッシュ定盤のほうが 63% も高くなっている。仕上げ面粗さが同等であることから作用砥粒数は同等であると考えられる。同等の作用砥粒数で研磨能率が大きく異なっていることから、工作物と砥粒の相対速度に差があるのではないかと考えられる。つまり凹部の形状がパンチングメタルのように単独の穴であるよりも、メッシュ定盤のように凸部の周辺を凹部が囲む構造のほうが砥粒と工作物の相対速度を向上させることができるのではないかと予想された。

#### 4.4.2 ワイヤ径とピッチ間隔の異なるメッシュ定盤の研磨性能

次にメッシュ定盤の研磨性能の傾向を把握するために表 4.2 に示す 14 種類のワイヤ径とピッチ間隔を変化させたメッシュ定盤を用いて表 4.1 の条件で実験を行った。各メッシュ定盤、鋳鉄定盤、繊維定盤、パンチングメタル定盤の研磨能率と仕上げ面粗さの関係を図 4.8 に示す。仕上げ面粗さは、砥粒の平均切込み深さが深いほど粗くなり、砥粒切込み深さと加工圧力を作

用砥粒数で割ったものとは正の相関関係がある。一定の加工圧力で作用砥粒数が多ければ砥粒1つ当たりにかかる加工圧力は低くなり、砥粒の切込みは浅くなる。このため仕上げ面粗さは作用砥粒数に反比例する。

表 4.2 各メッシュ定盤のワイヤ径とピッチ間隔

表記	ピッチ間隔[mm] (メッシュ番号)	ワイヤ径 [mm]	表記	ピッチ間隔[mm] (メッシュ番号)	ワイヤ径 [mm]
①	0.635 (40)	0.29	⑧	0.423 (60)	0.15
②		0.26	⑨		0.14
③		0.22	⑩	0.363(70)	0.14
④	0.508 (50)	0.22	⑪	0.318 (80)	0.12
⑤		0.18	⑫		0.10
⑥	0.423 (60)	0.19	⑬	0.282(90)	0.10
⑦		0.18	⑭	0.254(100)	0.10

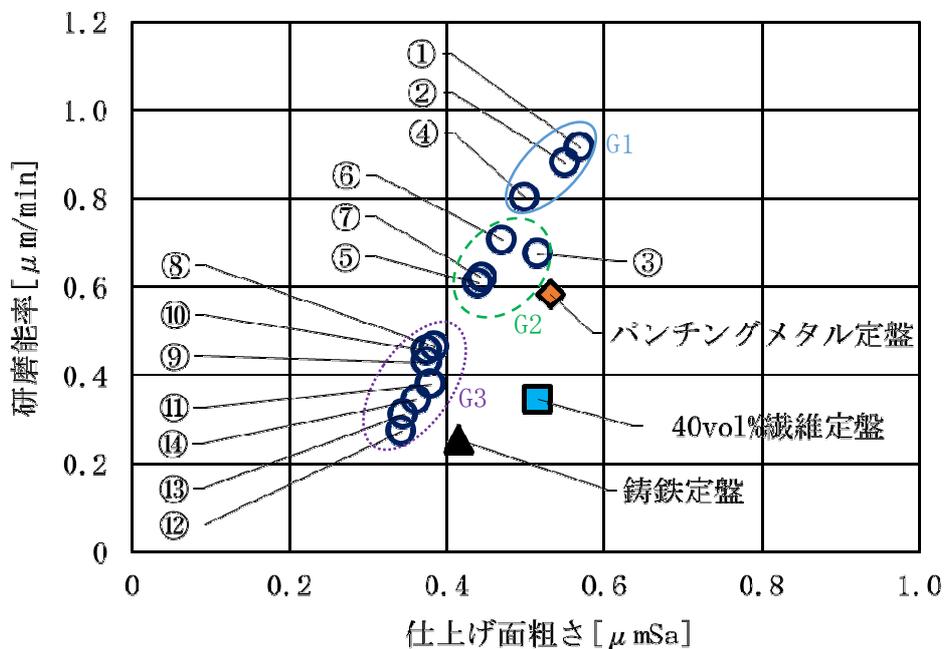


図 4.8 各種ラッピング定盤の研磨能率と仕上げ面粗さの関係

一方、研磨能率は砥粒切込み深さと作用砥粒数と砥粒と工作物の相対速度の積に比例する。砥粒切込み深さは加工圧力を作用砥粒数で割ったものと正の相関関係があるため、加工圧力が同じ条件下で横軸を仕上げ面粗さとし縦軸を研磨能率とすると、同じ仕上げ面粗さで研磨能率が高い場合、砥粒と工作物との相対速度が大きいということになる。通常の研磨では、研磨能率が向上すると砥粒の平均切込み深さが深くなり仕上げ面粗さは悪化するが、図 4.8 から仕上げ面粗さが同等で研磨能率が異なるメッシュ定盤が存在することがわかる。このことからワイヤ径やピッチ間隔の差異により研磨メカニズムが変化していると考えられた。図 4.8 の傾向から研磨メカニズムが異なっていると予想した3つの領域を図のようにG1, G2, G3にグループ分けした。各グループでの研磨メカニズムを詳しく調べるために、各メッシュ定盤上の砥粒の挙動を調べることにした。

#### 4.4.3 メッシュ定盤上の砥粒の挙動

メッシュ定盤上の砥粒の挙動の観察には、鋳鉄定盤の砥粒の観察で使用した図 2.3 の観察装置を用いた<sup>4-2)</sup>。観察には、各グループに属するG1のワイヤ径0.29mmの40メッシュ定盤①、G2のワイヤ径0.18mmの60メッシュ定盤⑦、G3のワイヤ径0.1mmの100メッシュ定盤⑭の3種類のメッシュ定盤を用いた。観察条件は、鋳鉄定盤の時と同様に定盤回転数を30rpm、研磨圧力を15kPa、スラリー濃度を1wt%で供給量を5mL/minとして、工作物を回転させずに観察を行った。観察条件下でもメッシュ定盤の研磨性能の傾向に変化がないことを確認するため、観察条件下で240分間実験を行った結果を図 4.9 示す。図 4.9 と図 4.4 では定性的に同じ研磨性能の傾向が得られていることから、この観察条件下でも基本的な研磨メカニズムに変化はなく、観察された砥粒の挙動は図 4.4 の結果に反映されると考えられる。

図 4.10 に最も高い研磨能率を示した図 4.8 でG1に属するワイヤ径0.29mmの40メッシュ定盤①上の砥粒を観察した動画の0.5ms経過ごとのスナップショットを示す。同図から砥粒は、メッシュ定盤①よりも遅れながら相対的に移動しており、メッシュ定盤①上を滑っていることがわかる。そこで回転しているメッシュ定盤①を基準とし、メッシュ定盤①に対して滑りながら移動する砥粒の軌跡を観察することで砥粒の挙動を把握した。同図(a)の赤丸内の砥粒の挙動に着目し、各図の矢印は0.5ms前の画像を現在の画像と重ね合わせて0.5ms前の移動系での砥粒の位置を把握し、その位置から現在の砥粒の位置までの移動量を表している。同図から砥粒はメッシュ定盤①上のワイヤ摩耗部を避け、蛇行しながら移動していることがわかる。また蛇

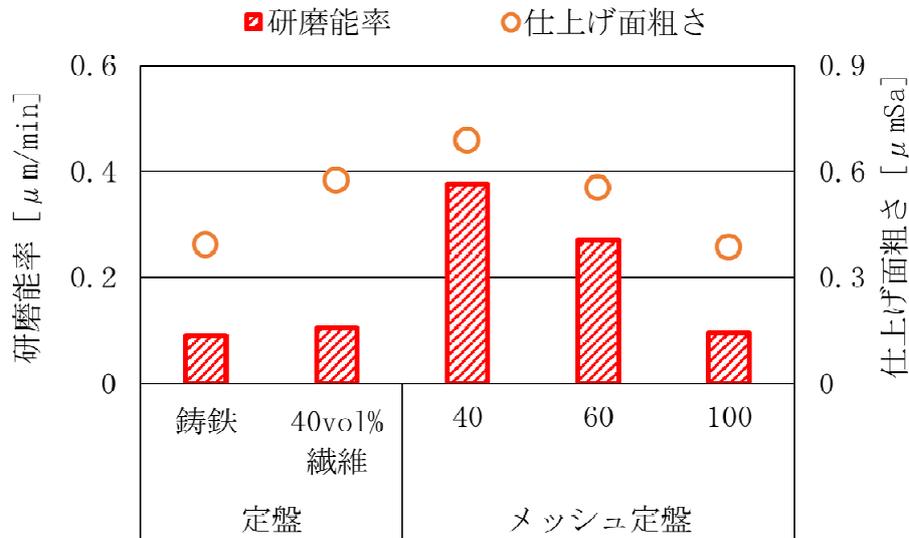


図 4.9 砥粒の挙動の観察条件における各種ラッピング定盤の研磨性能の比較

行する砥粒には凸部(ワイヤ摩耗部)のエッジ部に沿いながらエッジ部で一時的に保持され、また蛇行移動を開始する挙動を繰り返す砥粒も観察された。ワイヤ摩耗部の表面には定盤の回転方向と同じ方向に傷があり、直線的に移動する砥粒も多少は存在すると考えられる。しかし撮影した動画ではほとんどの砥粒が蛇行しながら移動しており、直線的に移動する砥粒は非常に少なかった。

次に多くの砥粒は凹部を蛇行しているが、その中で砥粒がワイヤ摩耗部に乗り上げる様子を観察した動画のスナップショットを図 4.11 に示す。0ms から 1.0ms までは他の砥粒と同様に凹部を蛇行していたが 1.5ms でワイヤの摩耗部に乗り上げ、その後ワイヤ摩耗部上を転動しながら移動することが確認された。ワイヤ摩耗部に乗り上げた後の 2.0ms と 2.5ms では矢印長さが短くなっていることから砥粒が転動しながらメッシュ定盤と近い速度で移動していることがわかる。また他にも観察された、いくつかのワイヤ摩耗部に乗り上げる砥粒のほとんどが転動していることを確認した。このことから砥粒はメッシュ定盤の凹部となる目開き部を移動し、凸部となるワイヤ摩耗部で流れを妨げられることで砥粒がワイヤ摩耗部に乗り上げ研磨に寄与すると考えられる。次に铸铁定盤との砥粒の挙動の差異について検討した。铸铁定盤上で最も多く観察された砥粒の挙動の動画のスナップショットを図 4.12 に示す。矢印が示すように定盤上を転動する砥粒は定盤回転方向に直線的に移動しており、気孔内に保持された砥粒によって多少はその動きを妨げられるがメッシュ定盤①のような大きく蛇行する砥粒は観察されなかった。

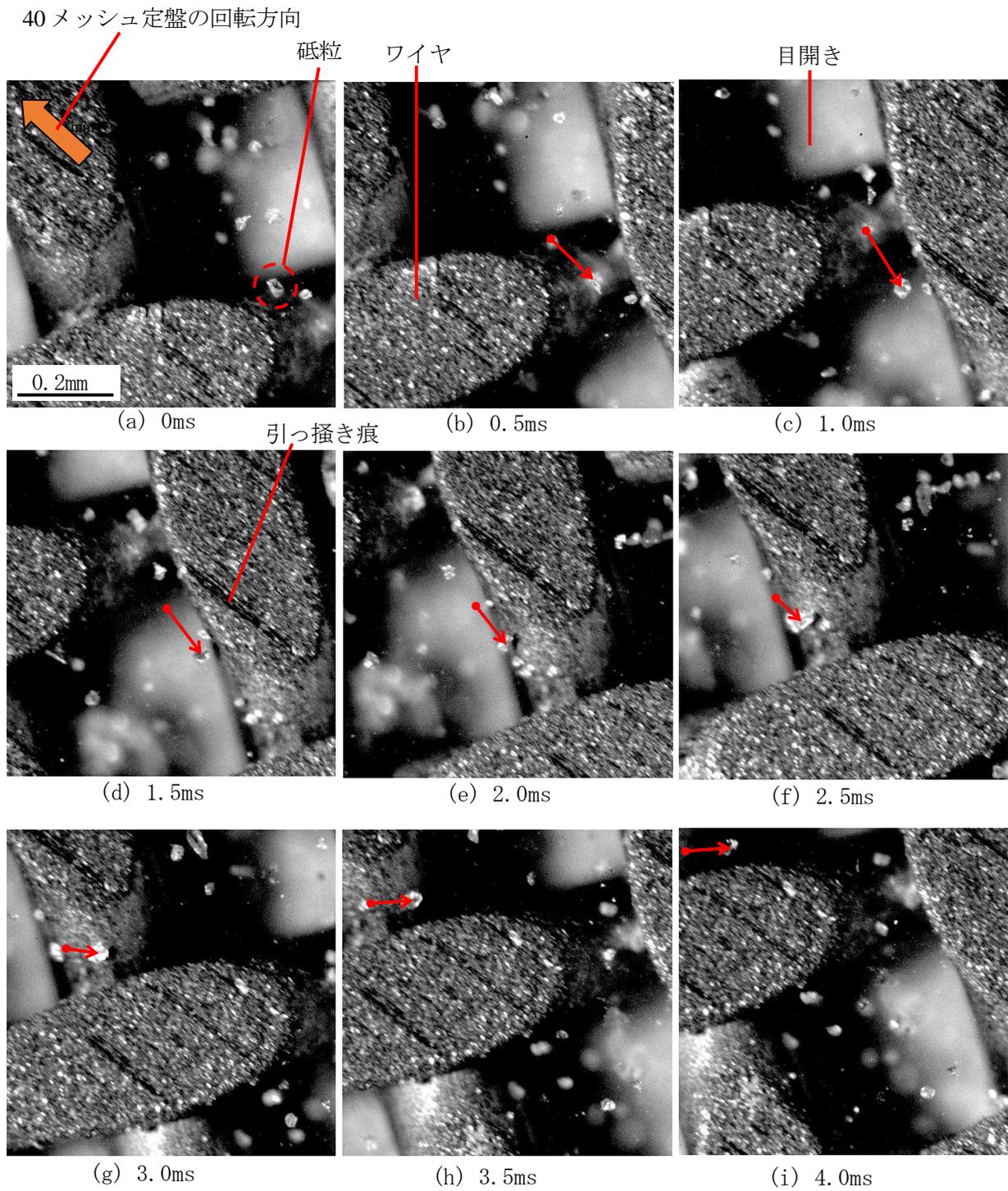


図 4.10 40メッシュ定盤上の砥粒の挙動(1)

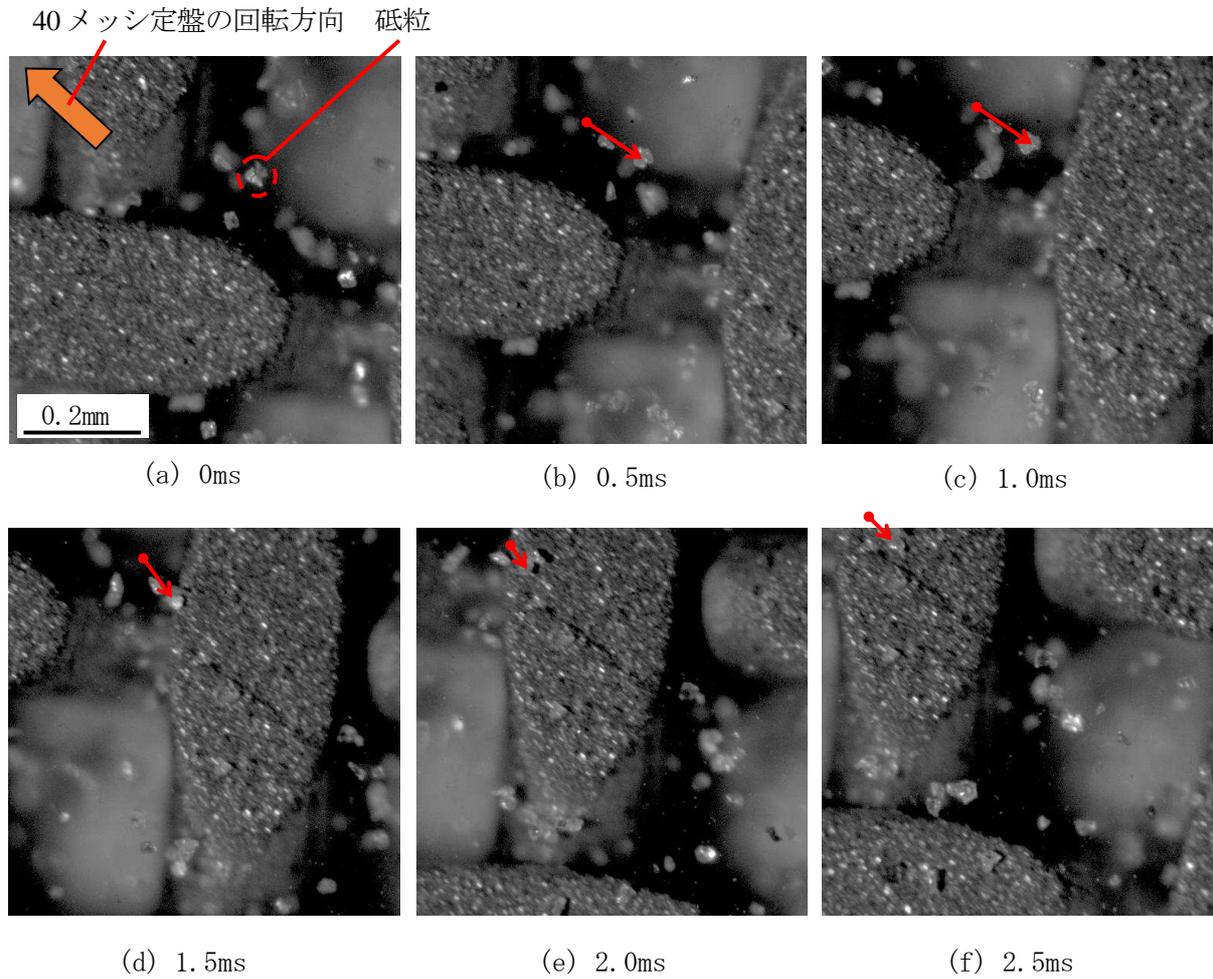


図 4.11 40メッシュ定盤上の砥粒の挙動(2)

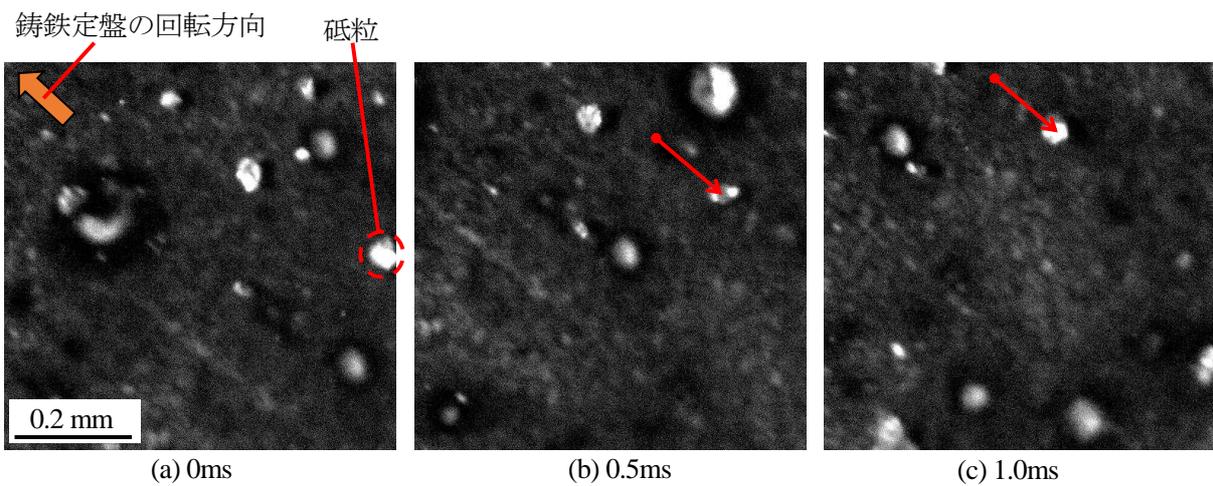
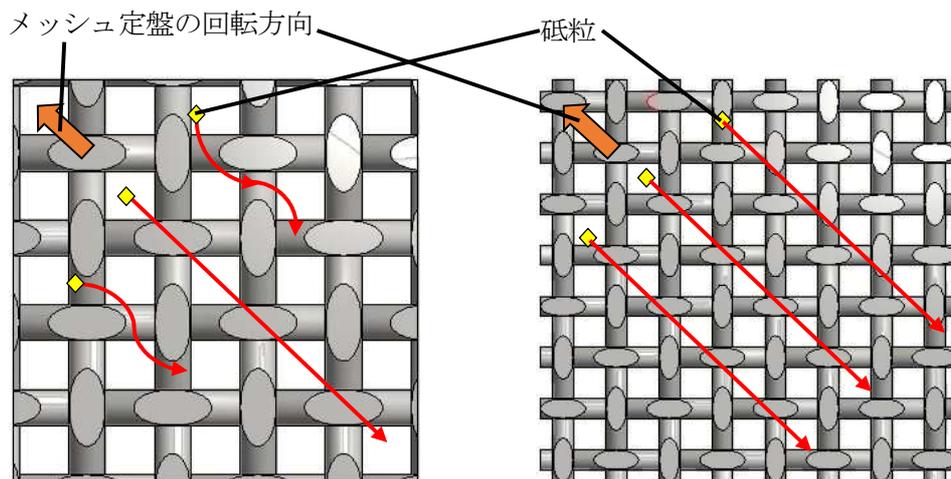


図 4.12 鋳鉄定盤上の砥粒の挙動(3)

これらの結果から鋳鉄定盤とワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤①では砥粒の挙動が異なり、これが研磨性能に大きな影響を与えたと考えられる。

図 4.13 に G2 のグループに属するワイヤ径 0.18mm の 60 メッシュ定盤⑦と G3 のグループに属するワイヤ径 0.1mm の 100 メッシュ定盤⑭の砥粒の挙動の概略図を示す。同図(a)の 60 メッシュ定盤⑦では、40 メッシュ定盤①と同様にワイヤ摩耗部を避けながら蛇行する砥粒と鋳鉄定盤のように定盤回転方向に直線的にワイヤ部に乗り上げながら移動する砥粒の 2 種類が観察された。同図(b)の 100 メッシュ定盤⑭では蛇行する砥粒は無く、直線的に移動する砥粒のみが観察され、その中には転動せずに浮遊している砥粒も多く観察された。浮遊している砥粒とは、回転方向に対して直線的に移動し、ワイヤ摩耗部の上にも乗り上げても砥粒は転動せず、また砥粒が動きを妨げられるような挙動が全くない砥粒のことである。この砥粒は、研磨に寄与せずにメッシュ定盤と工作物の間をすり抜けていると考えられる。蛇行する砥粒がなく直線的に移動している砥粒が多く観察されたことから、この挙動は鋳鉄定盤に類似している。さらに図 4.8 から鋳鉄定盤は G3 のグループの近くにプロットされていることから、砥粒の挙動が類似すると研磨性能もほぼ同じになると考えられる。このことから G1 では砥粒は主に蛇行しながら移動し、G2 では蛇行する砥粒と G1 よりも多くの直線的に移動する砥粒が混在し、G3 では砥粒は主に直線的に移動していると考えられる。



(a) ワイヤ径 0.18mm の 60 メッシュ定盤場合 (b) ワイヤ径 0.10mm の 100 メッシュ定盤場合

図 4.13 60 メッシュ定盤と 100 メッシュ定盤上の砥粒の挙動の概略

このような砥粒の挙動の差は、ラッピング定盤上を直線的に滑る砥粒の動きを妨げる効果の差異であると考えられる。ワイヤ部が砥粒の動きを妨げる効果が高いほど砥粒は蛇行しながら移動し、砥粒の動きを妨げる効果が低いほど直線的に移動すると考えられる。つまり多くの砥粒を蛇行させることができる構造を有したメッシュ定盤は、実際に研磨に作用する砥粒も移動抑制されるため、砥粒と工作物との相対速度が大きくなることで研磨能率が向上すると考えられる。そこで砥粒の定盤上を滑る移動速度を測定することにした。砥粒の測定においては定盤の回転方向の速度成分で比較を行うために、定盤上を滑る砥粒の定盤回転方向の滑り速度成分(以下、滑り速度と称する)を調べた。滑り速度は、静止状態の工作物に対する定盤回転方向の砥粒の速度成分をラッピング定盤の測定箇所の理論回転速度から差し引いた値を表す。

フォトロン社製の解析ソフト Photron FASTCAM を用いて、撮影した動画からラッピング定盤上を滑る砥粒を無作為に 30 個選定し、定盤回転方向の砥粒の速度成分を測定した。ラッピング定盤の回転速度は、高速度カメラを定盤の中心から半径方向に 90mm の位置に設置したため、その点の理論定盤速度は 283mm/s となる。これに対して同じ解析ソフトを用いて定盤回転方向の速度成分を測定した結果、平均値が 281mm/s となったことから正確な測定が行えていると判断された。各ラッピング定盤上の砥粒の滑り速度の平均値と標準偏差を図 4.14 に示す。同図から

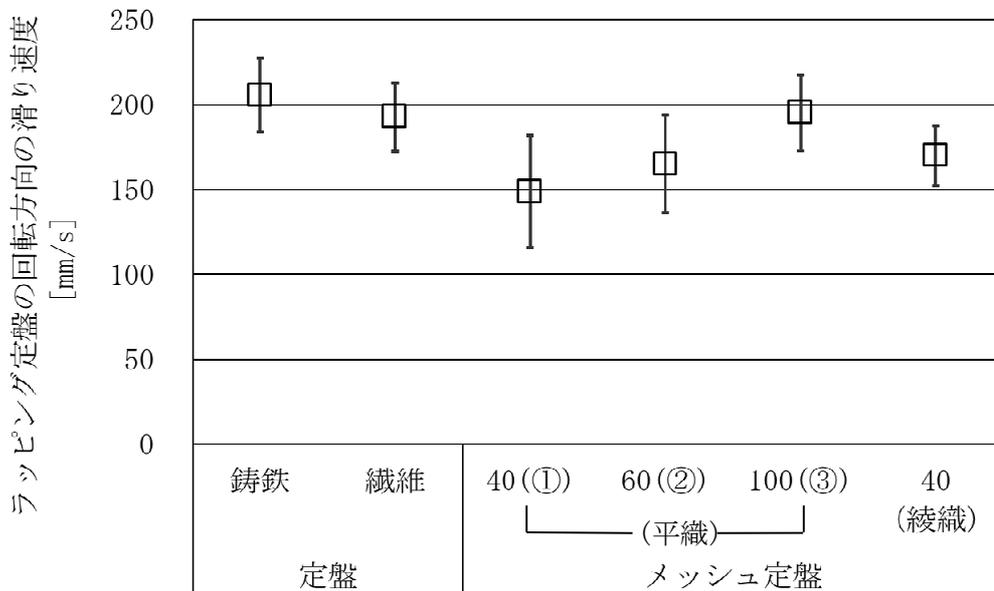


図 4.14 各ラッピング定盤上の砥粒の滑り速度

蛇行する砥粒が多いほど砥粒の滑り速度が遅くなることがわかった。また同図と図 4.9 の結果を比較すると砥粒の滑り速度が遅いほど研磨能率が向上していることから、砥粒の動きを妨げる効果が高いほど蛇行する砥粒が増加し、滑り速度が遅くなると考えられる。

また 4.3.3 項の平織と綾織の 40 メッシュ定盤の砥粒の挙動の概略図を図 4.15 に示す。同図 (b) の綾織はワイヤを 2 本ずつ通して編み込まれているため、同図 (a) の平織に比べて砥粒が方向を変えるまでの距離が長くなっている。このことから平織に比べて砥粒の動きを妨げる効果が低くなり、図 4.14 に示されるように砥粒の滑り速度も速くなるため、図 4.5 のように研磨能率が減少したと考えられる。

メッシュ定盤では、凸部のワイヤ摩耗部に乗り上げて転動する砥粒が確認されているため凸部で研磨が行われると考えられる。凸部の表面状態から砥粒の転動または引っ掻きにより研磨が進行していると考えられるが、凸部のエッジ部で保持される砥粒も研磨に寄与していると考えられる。実際に凸部のエッジ部を沿いながらエッジ部で一時的に保持され、また蛇行移動を開始する挙動を繰り返す砥粒も観察されている。この砥粒は蛇行する砥粒が多いほど多く観察されており、エッジ部に保持された砥粒は定盤回転速度に近い速度で移動するため、滑り速度が遅くなり砥粒と工作物との相対速度が速くなるため研磨能率が向上すると考えられる。

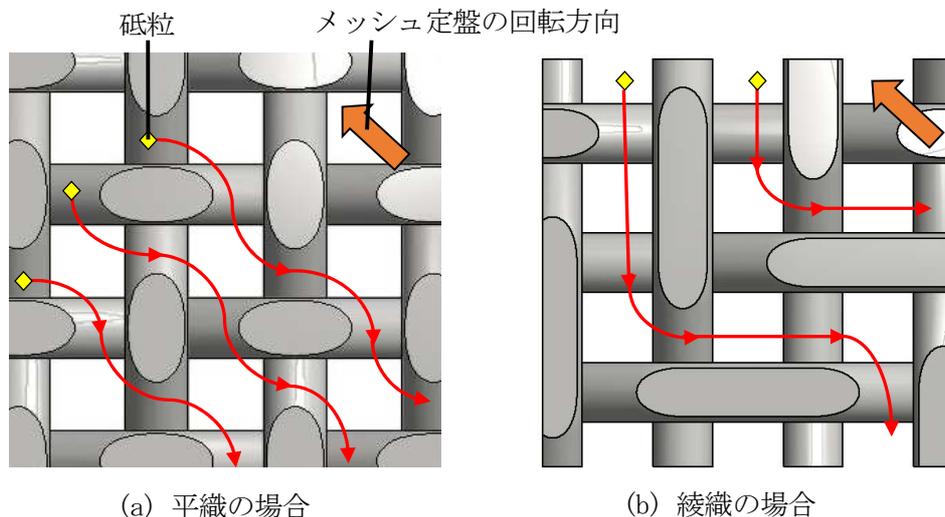


図 4.15 織り方の異なる 40 メッシュ定盤上の砥粒の挙動の概略

## 4.5 ワイヤ径とピッチ間隔の研磨能率との相関関係

これまでの実験結果からメッシュ定盤は、ワイヤ径とピッチ間隔によって砥粒の挙動が変化し、この2つのメッシュ定盤の構成要素が研磨能率に大きな影響を与えていると考えられる。そこでワイヤ径とピッチ間隔の研磨能率に対する相関関係を調べ、その傾向を把握した。表4.2の14種類のメッシュ定盤におけるワイヤ径と研磨能率の関係を図4.16に示し、ピッチ間隔と研磨能率の関係を図4.17に示す。

図4.16からワイヤ径が大きくなるほど研磨能率が線形的に向上していることからワイヤ径と研磨能率の相関係数を求めた結果、0.981となり相関性が強いことがわかった。ワイヤ径が大きくなることで、ワイヤ摩耗部も大きくなり砥粒の動きを妨げる効果が高くなることや、ワイヤ摩耗部に乗り上げた砥粒の動きも妨げられやすくなるためと考えられる。次に図4.17からピッチ間隔が広いほど研磨能率が向上しているが、図4.16よりもプロットが直線的に並んでいないことがわかり、相関係数も0.887であったためワイヤ径よりも相関関係が弱いことがわかった。ただし相関係数が0.8以上であることから、ある程度研磨能率とピッチ間隔には相関性があるといえる。実際に前節ではピッチ間隔が狭くなると砥粒の蛇行がしにくくなっていることからピッチ間隔は、研磨能率に影響を与えると考えられる。図4.17から同じピッチ間隔であっても、ワイヤ径が大きいほうが研磨能率が高くなっていることがわかる。これはワイヤ径と研磨能率には強い相関関係があるためこの影響を受けていると考えられる。

そこで同じワイヤ径でピッチ間隔が違うメッシュ定盤に着目して検討を行う。ワイヤ径が0.22mmの40メッシュ定盤③と50メッシュ定盤④、ワイヤ径が0.18mmの50メッシュ定盤⑤と60メッシュ定盤⑦、ワイヤ径が0.14mmの60メッシュ定盤⑨と70メッシュ定盤⑩、ワイヤ径0.1mmの80メッシュ定盤⑫と90メッシュ定盤⑬と100メッシュ定盤⑭、の9種類において、それぞれ同じワイヤ径のもの同士を比較すると、ピッチ間隔が狭いほうが研磨能率が向上することがわかった。これはワイヤのピッチ間隔が狭くなるほど砥粒の動きを妨げる凸部が増加することで、砥粒の動きが妨げられやすくなり研磨能率が向上すると考えられる。

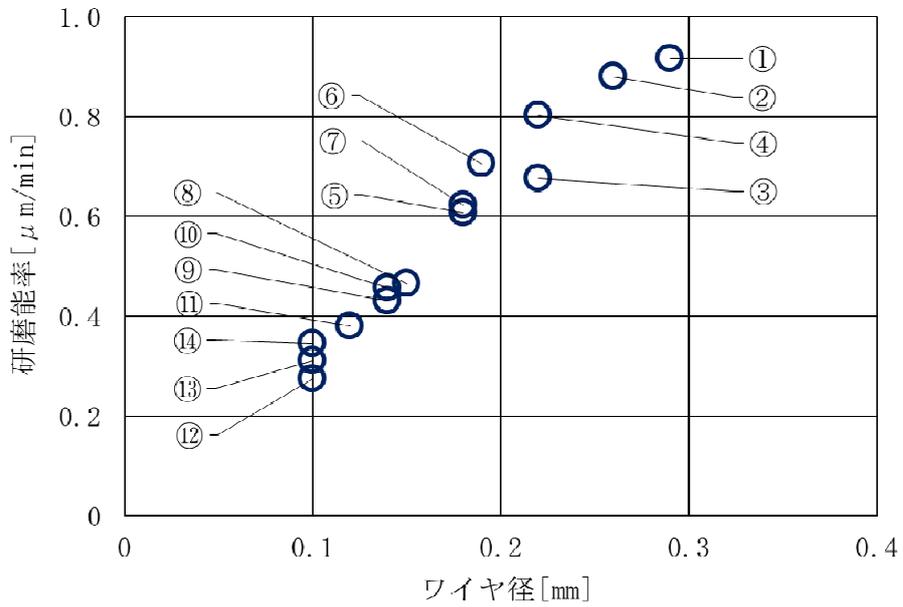


図 4.16 各メッシュ定盤のワイヤ径と研磨能率の関係

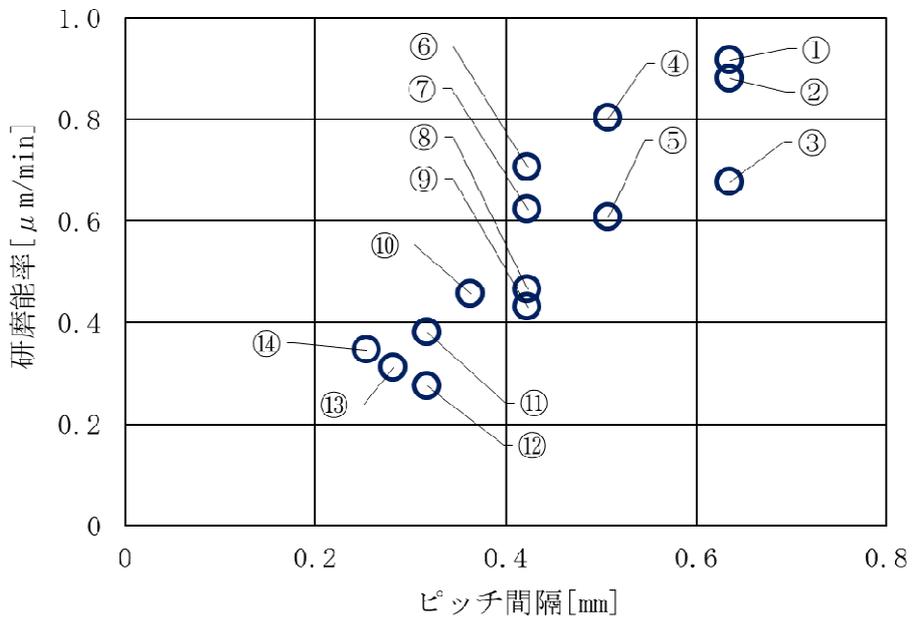


図 4.17 各メッシュ定盤のピッチ間隔と研磨能率の関係

## 4.6 結言

本章では、複合定盤の研磨性能を向上させるための用いたメッシュ定盤が高い研磨性能を示すことがわかり、その研磨メカニズムを解明することで、複合定盤の構成要素をどのように変化させれば、研磨性能を向上させることができるかを検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) メッシュ定盤はワイヤ径とピッチ間隔を変化させることで凹凸形状が変化し、研磨性能が大きく変化することがわかった。
- 2) メッシュ定盤のワイヤ径とピッチ間隔を変化させることで砥粒の挙動も変化し、蛇行する砥粒と直線的に移動する砥粒の2種類の砥粒の挙動があることがわかった。
- 3) メッシュ定盤では、蛇行する砥粒が多いと砥粒と工作物との相対速度が大きくなり研磨能率は向上する。一方、直線的に移動する砥粒が多いメッシュ定盤は、砥粒と工作物との相対速度が小さくなり研磨能率が減少することがわかった。
- 4) メッシュ定盤は、ワイヤ径と研磨能率の相関係数が0.981となり、ピッチ間隔と研磨能率の相関係数が0.887となったことから両方の共に相関関係は強いが、ピッチ間隔よりもワイヤ径のほうが研磨能率に対する相関関係が強いことがわかった。

以上の結果から次章では、メッシュ定盤のワイヤ径とピッチ間隔の変化による研磨性能の変化の知見をもとに、複合定盤の微細凹凸形状を変化させて研磨性能の向上を試みる。

## 第4章 参考文献

- 4-1) 橋本洋平, 鈴木教和, 浅羽正和, 樋野励, 社本英二, 研磨パッドの微細凹凸接触を考慮したCMPプロセスEHL解析, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 1, (2013), pp. 73-80.

#### 第4章 メッシュ定盤を用いた複合定盤の定盤仕様の検討

- 4-2) 諏訪部仁, 廣川健悟, 石川憲一, ミリバブルを含有したスラリーのラップ定盤上でのスラリー挙動, 砥粒加工学会誌, Vol. 62, No. 5, (2018), pp. 258-263.

## 第5章 複合定盤の研磨性能の向上

### 5.1 緒言

これまで複合定盤では、フィラーの種類や繊維の含有量などを変更することで鋳鉄定盤に比べて研磨能率を35%向上させた。しかし含有させる繊維の繊維径や繊維同士の間隔が変更することで、研磨性能にどのような影響を与えるか把握できていない。そこで4章のメッシュ定盤のワイヤ径およびピッチ間隔の差異による研磨性能の変化の傾向をもとに複合定盤の繊維径を変化させて、複合定盤の研磨性能の向上を試みた。

本章では、まず繊維定盤の繊維径の差異による研磨能率の変化の傾向が、メッシュ定盤のワイヤ径の差異による研磨能率の変化の傾向と合致するかを確認した。またメッシュ定盤のピッチ間隔と繊維定盤の繊維同士の間隔による各研磨能率の変化についても、その傾向が合致するかどうかを確認した。最後にメッシュ定盤で高い研磨能率を示したワイヤ径を繊維定盤の繊維径に反映させて、複合定盤の研磨能率の向上を試みた。また複合定盤の含有する繊維同士の間隔においても、メッシュ定盤で高い研磨能率を示したピッチ間隔との関係を調べた<sup>5-1), 5-2)</sup>。

### 5.2 メッシュ定盤のワイヤ径と繊維定盤の繊維径との関係

#### 5.2.1 使用砥粒 GC#2000 に対するメッシュ定盤の研磨性能

メッシュ定盤においては、ワイヤ径が研磨能率に対して強い相関関係を示した。そこで繊維定盤に対しても同様の傾向が得られるかを調べるために繊維径を変更させて、メッシュ定盤のワイヤ径を変化させた場合の研磨能率の変化の傾向と合致するかを調べた。図4.16の結果からメッシュ定盤では、ワイヤ径が0.29mmで研磨能率が最も高くなった。そこで繊維径が0.29mmの繊維を用いることを考えたが、びびり振動切削では繊維径が0.13mm以下の繊維しか製作できない。仮に繊維径0.13mm以下の繊維を用いて実験を行ったとしても、メッシュ定盤で高い研磨能率を示したワイヤ径0.13mm以上の領域について検討ができないため、メッシュ定盤の傾向と合致することを示すことは難しい。そこで、メッシュ定盤に対して小粒径の砥粒を用いること

で、研磨能率が最も高くなるワイヤ径が小さくなると考えた。ワイヤ径がびびり振動切削で製作可能な繊維径の範囲内であれば、メッシュ定盤と繊維定盤のワイヤ径および繊維径の差異による研磨能率の変化の傾向を比較することができる。小粒径の砥粒としては、平均粒径が  $6.5 \mu\text{m}$  の GC#2000 を用いた。4.4.2 項で用いた 14 種類のメッシュ定盤では、GC#2000 に対してワイヤ径が大きすぎると考え、新たに表 5.1 に示す 12 種類のメッシュ定盤を用いることにした。これらのメッシュ定盤を用いて GC#2000 を使用して表 5.2 の条件で実験を行った結果を図 5.1 に示す。実験は 3 回行い、その平均値を実験結果とした。

図 4.8 の GC#600 (平均粒径:  $20 \mu\text{m}$ ) を用いた場合とは、明らかに傾向が異なることがわかった。GC#600 を用いた場合に最も研磨性能が高かったワイヤ径  $0.29\text{mm}$  の 40 メッシュ定盤も用いて実験を行ったが、研磨面が GC#2000 を用いた場合に得られる梨地面にならず、研磨前の鏡面のままで、いくつかの傷が研磨によって発生した程度であり、ほとんど研磨が行われなことを確認している。このことから砥粒径の差異によって高い研磨性能を示すワイヤ径とピッチ間隔が異なることがわかった。

図 5.1 からワイヤ径  $0.1\text{mm}$  のメッシュ定盤⑨の研磨能率が最も高くなっていることから、予想した通り小粒径の砥粒を用いることで、研磨能率が高くなるワイヤ径が小さくなった。研磨能率が最も高くなったワイヤ径  $0.1\text{mm}$  のメッシュ定盤⑨と同じワイヤ径のメッシュ定盤⑦とメッシュ定盤⑧では、ピッチ間隔が狭くなるほど研磨能率が向上する結果となった。この傾向は GC#600 を用いた場合と同様であり、使用する砥粒径を小さくしてもワイヤ径とピッチ間隔が研磨能率に影響を与えていることが確認された。

表 5.1 各メッシュ定盤のワイヤ径とピッチ間隔 (GC#2000 を用いた場合)

表記	ピッチ間隔 [mm] (メッシュ番号)	ワイヤ径 [mm]	表記	ピッチ間隔 [mm] (メッシュ番号)	ワイヤ径 [mm]
①	0.508	0.22	⑦	0.318(80)	0.10
②	(50)	0.18	⑧	0.282(90)	0.10
③	0.423	0.18	⑨	0.254(100)	0.10
④	(60)	0.14	⑩	0.154(165)	0.05
⑤	0.363(70)	0.14	⑪	0.141(180)	0.05
⑥	0.318(80)	0.12	⑫	0.110(230)	0.035

表 5.2 実験条件

装置	片面研磨機 (日本エンギス株, EJW-400IFN)
ラッピング定盤	鋳鉄定盤, 各種メッシュ定盤(表 5.1 参照)
ラッピング定盤の直径	300mm
工作物	サファイア基板(C面) φ50.8mm(2インチ)×1mmt ×1枚 表面粗さ: 2nmRa
研磨圧力	20kPa
定盤速度	70m/min(75rpm)
工作物速度	19m/min(60rpm)
研磨時間	240min
スラリー	GC#2000(6.5 μm) 3wt% + 純水
スラリー供給量	25mL/min(かけ流し)

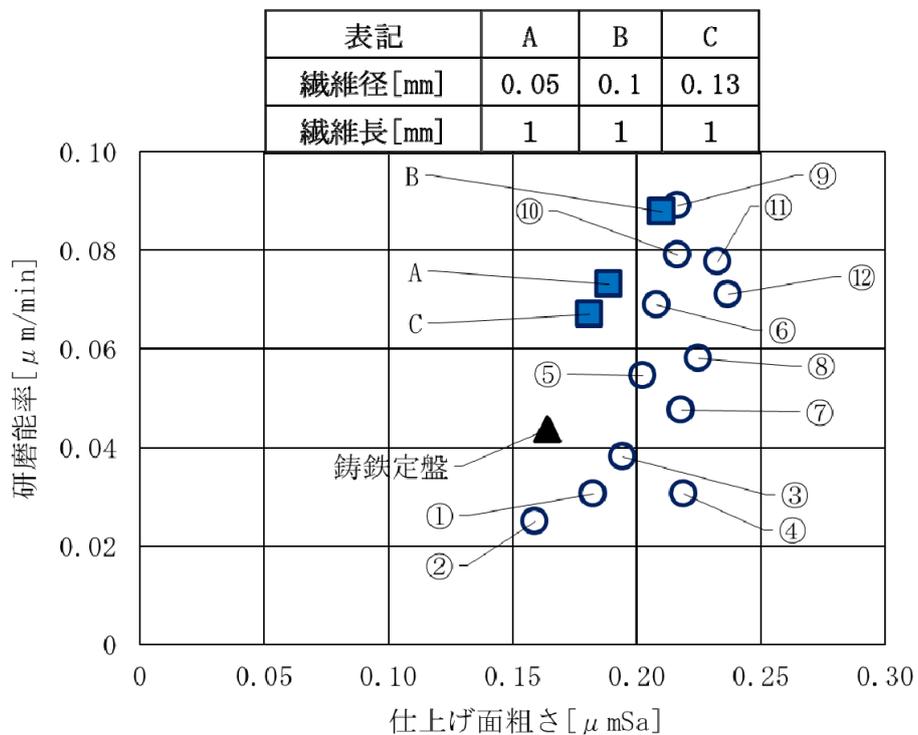


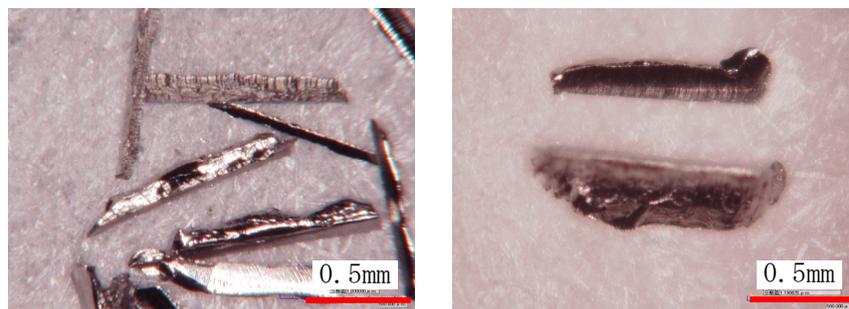
図 5.1 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較 1 (GC#2000 を用いた場合)

GC#2000 を用いた場合、最も研磨能率が高くなったワイヤ径は 0.1mm であることから、繊維径 0.1mm 付近の繊維はびびり振動切削で製作が可能であるため、繊維径の差異による研磨能率の変化を明確に把握できると考えた。そこで繊維定盤においても GC#2000 を用いて実験を行った。

### 5.2.2 使用砥粒 GC#2000 に対する繊維定盤の研磨性能

前項の結果からワイヤ径 0.1mm のメッシュ定盤が研磨能率が最も高くなったことから、繊維定盤においても繊維径 0.1mm 付近の繊維を用いて繊維定盤を製作し実験を行った。含有させる繊維は、これまで用いてきた繊維長 1mm の繊維径 0.05mm 以外にびびり振動切削で製作が可能であった図 5.2 に示す、繊維長が 1mm で繊維径 0.1mm, 0.13mm の 2 種類の繊維を用いて、各々 40vol%繊維定盤を製作した。図 5.2 からわかるようにびびり振動切削により製作したことで、断面の表面は粗くなっており、マトリックス材との密着性の向上が期待される。この 3 種類の 40vol%繊維定盤を用いて、表 5.1 の条件で実験を行った結果を図 5.1 に付記する。繊維長が 1mm で繊維径 0.05mm の繊維を含有させた 40vol%繊維定盤を A、繊維長が 1mm で繊維径 0.1mm の繊維を含有させた 40vol%繊維定盤を B、繊維長が 1mm で繊維径 0.13mm の繊維を含有させた 40vol%繊維定盤を C と表記した。

図 5.1 から繊維定盤の研磨能率は、繊維径 0.1mm の繊維定盤 B が最も高くなり、次に繊維径 0.05mm の繊維定盤 A、そして繊維径 0.13mm の繊維定盤 C の順となることがわかった。このことから繊維定盤においてもメッシュ定盤のワイヤ径と同様に繊維径が研磨能率に影響を与えるこ



(a) 繊維径 0.1mm, 繊維長 1mm (b) 繊維径 0.13mm, 繊維長 1mm

図 5.2 各種ファイラー

とがわかった。また繊維径 0.1mm の繊維定盤 B においては、ワイヤ径 0.1mm のメッシュ定盤⑨とほぼ同じ箇所にプロットされることがわかった。繊維定盤 B の繊維径とメッシュ定盤⑨のワイヤ径は、両方共に 0.1mm であり GC#2000 を用いたい場合の研磨能率が最も高くなる繊維径とワイヤ径が一致することがわかった。

次に繊維定盤の表面状態を比較するために、使用後の定盤表面を光学式表面形状計測装置で観察した表面画像の高さ方向の情報をもとに 2 値化処理を行った。図 5.3 の(a)に繊維径

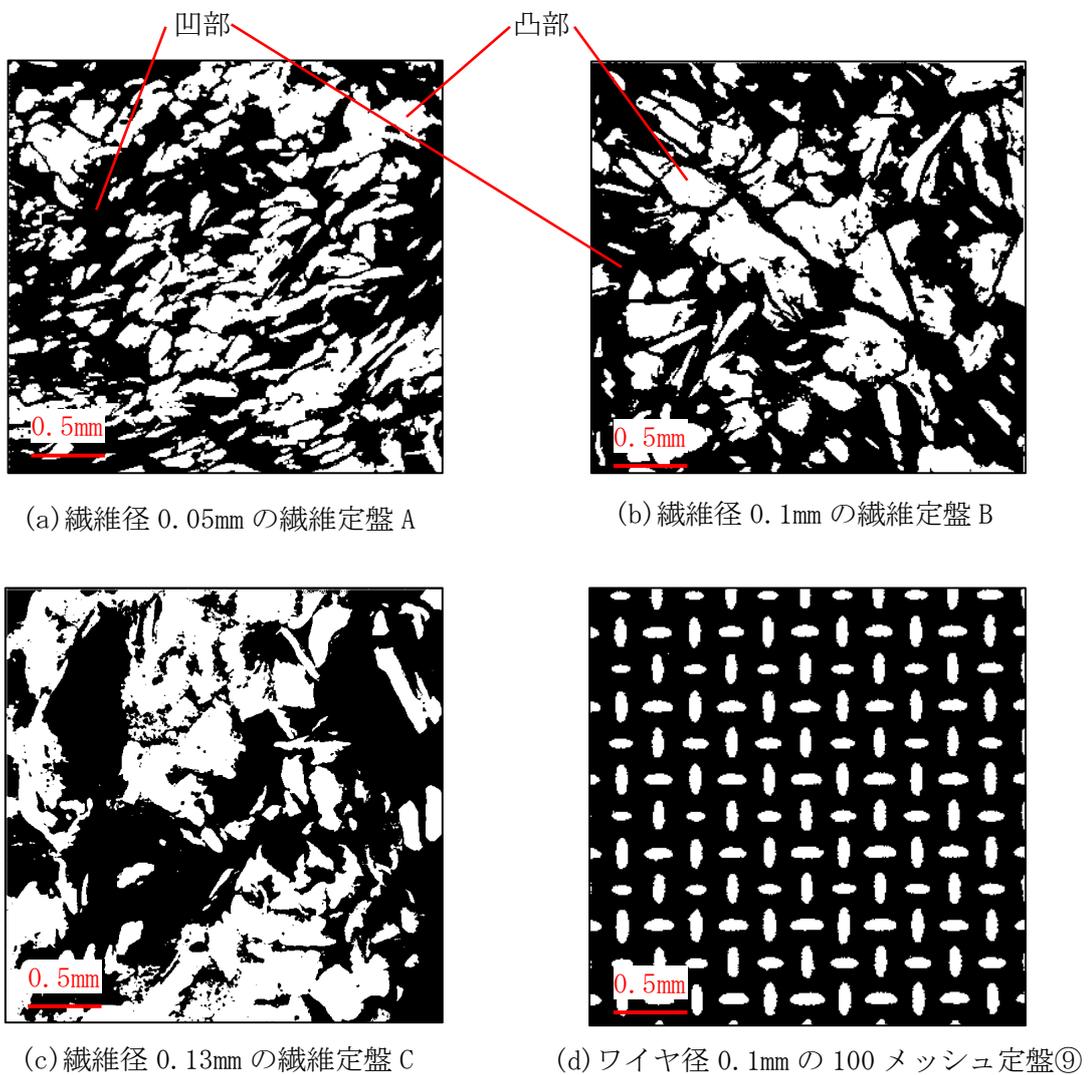


図 5.3 使用後の各種ラッピング定盤の表面を 2 値化処理した画像

0.05mmの繊維定盤A, (b)に繊維径0.1mmの繊維定盤B, (c)に繊維径0.13mmの繊維定盤Cの表面を2値化したものを示す。また比較対象として、メッシュ定盤に対してGC#2000を用いた場合の研磨能率が最も高くなった、ワイヤ径0.1mmの100メッシュ定盤⑨の使用後の表面を2値化処理を行ったものを同図(d)に示す。使用した砥粒の平均粒径が $6.5\mu\text{m}$ であったため定盤の上面から $6.5\mu\text{m}$ の深さまでの浅い領域を白色で示し、 $6.5\mu\text{m}$ よりも深い領域を黒色で示した。

図5.3(a)の繊維径0.05mmの繊維定盤Aでは凸部(白色部)が小さい島状になっており、その周りを凹部(黒色部)が囲んでいる。また凸部同士の間隔も狭いことがわかった。(b)の繊維径0.1mmの繊維定盤Bでは、繊維径0.05mmの繊維定盤Aと同様に凸部が島状に存在しているが、繊維径0.05mmの繊維定盤Aに比べて凸部が大きくなり、凸部同士の間隔も広がっていることがわかった。(c)の繊維径0.13mmの繊維定盤Cでも凸部が島状に存在しているが、凸部同士が繋がっており凸部が大きくなっている。また凹部においても島状の大きな凹部があり、繊維径0.1mmの繊維定盤Bよりも凸部同士の間隔も広がっていることがわかった。一方、(d)のワイヤ径0.1mmの100メッシュ定盤⑨では、凸部が島状に存在し均一に配置されていることがわかった。このことから、(a)の繊維径0.05mmの繊維定盤Aでは、凸部が島状に存在するが凸部同士の間隔が狭いため、砥粒の蛇行が起こりにくくなっていると考えられる。また(c)の繊維径0.13mmの繊維定盤Cでは、凸部の周りを凹部が囲むように存在している箇所が少なく、凸部同士の間隔が広いため砥粒の動きを妨げる効果が低くなっていると考えられる。これらに対して(b)の繊維径0.1mmの繊維定盤Bでは、(d)のワイヤ径0.1mmの100メッシュ定盤⑨のように定盤の表面の微細凹凸形状が砥粒の蛇行が起こりやすい構造となっており、高い研磨能率が得られたと考えられる。これらの結果から繊維定盤においても繊維径と繊維同士の間隔が研磨能率に大きな影響を与えると考えられる。

メッシュ定盤と繊維定盤で最も研磨能率が高くなったワイヤ径と繊維径は一致したが、次にワイヤ径および繊維径の差異による研磨能率の変化の傾向が合致するかを検討する。

### 5.2.3 メッシュ定盤と繊維定盤における最適値の比較

メッシュ定盤のワイヤ径およびピッチ間隔の差異による研磨能率の変化の傾向が、繊維定盤の繊維径および繊維同士の間隔の差異による研磨能率の変化の傾向に合致するかを調べた。まずワイヤ径および繊維径の差異による研磨能率の変化をわかりやすくするために、横軸をワイヤ径と繊維径とし、縦軸を研磨能率としたグラフを図5.4に示す。同図からGC#600を用いた場

合では、判別することができなかったワイヤ径に対する研磨能率の最適値があることが予想される。同図からワイヤ径と繊維径がほぼ同じであれば、メッシュ定盤と繊維定盤の研磨能率もほぼ同じになることがわかった。このことからメッシュ定盤のワイヤ径の差異による研磨能率の変化の傾向が、繊維定盤の繊維径の差異による研磨能率の変化の傾向と合致することがわかった。またGC#2000を用いた場合の研磨能率に対するワイヤ径および繊維径の最適値は、0.1mm付近にあると予想される。しかしメッシュ定盤の⑦と⑧と⑨のようにワイヤ径が同じでもあっても、ピッチ間隔が狭いほうが研磨能率は高くなっている。このことからたとえワイヤ径が最適値であったとしても、高い研磨性能を示すためにはピッチ間隔も重要な因子であることがわかった。そこでGC#2000を用いた場合の高い研磨性能を示すピッチ間隔についても検討した。

図5.5にメッシュ定盤のピッチ間隔および繊維定盤のRS<sub>m</sub>に対する研磨能率の関係を示す。RS<sub>m</sub>とは、粗さ曲線要素の平均長さである。つまり繊維定盤の表面の凸部同士の間隔を表すものである。測定には、ハンディ式表面粗さ計(東京精密社製：SUERFCOM FLEX)を用いて繊維定盤

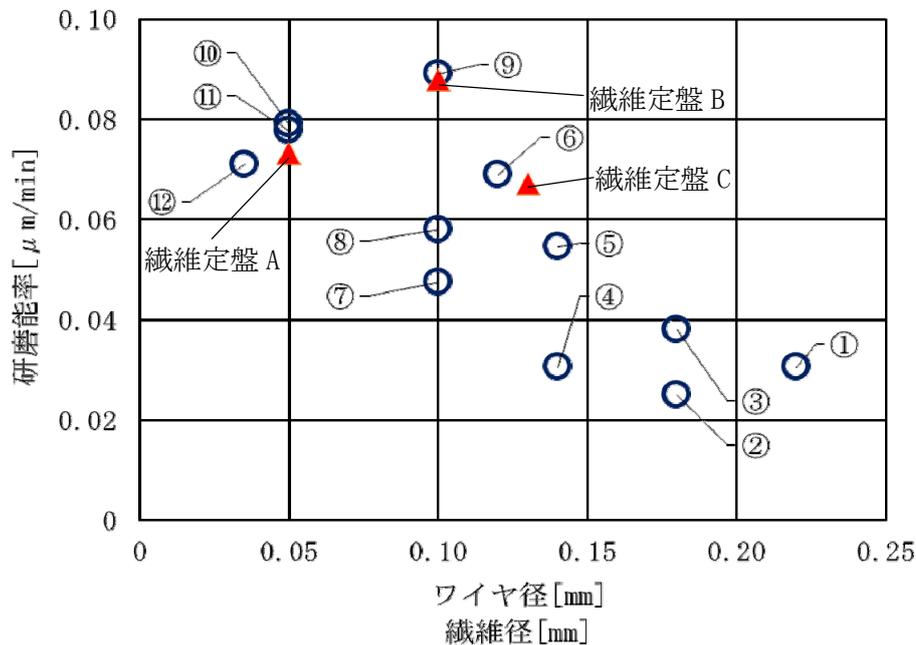


図 5.4 各種ラッピング定盤のワイヤ径あるいは繊維径と研磨能率の関係 (GC#2000 を用いた場合)

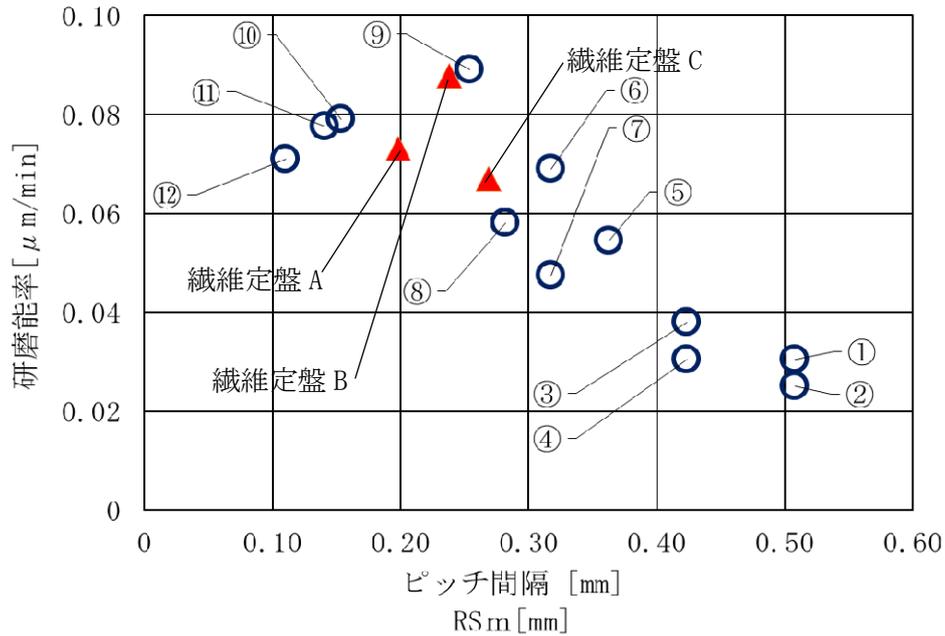


図 5.5 各種ラッピング定盤のピッチ間隔あるいは RSm と研磨能率の関係 (GC#2000 を用いた場合)

に対して半径方向に 10ヶ所の測定を行い、評価長さを 4mm、ハイパスフィルターのカットオフ値を 0.8mm として、粗さ曲線要素の平均長さ RSm を測定した。図 5.5 からメッシュ定盤のピッチ間隔に対する研磨能率の最大値と繊維定盤の RSm に対する研磨能率の最大値がほぼ同じ箇所にプロットされることがわかった。このことからメッシュ定盤のピッチ間隔の差異による研磨能率の変化の傾向と繊維定盤の RSm の差異による研磨能率の変化の傾向が合致することが確認された。図 5.5 からピッチ間隔および RSm の最適値は 0.254mm 付近にあると予想される。ただし図 5.5 においても、同じピッチ間隔であればワイヤ径が大きいほうが研磨能率は向上していることがわかる。このことからワイヤ径とピッチ間隔の両方が研磨能率に大きな影響を与えることがわかった。

以上の結果からメッシュ定盤で高い研磨性能を示したワイヤ径とピッチ間隔を繊維径と繊維同士の間隔に反映させることで、繊維定盤の研磨性能が向上することが確認された。

## 5.3 使用砥粒 GC#600 に対する複合定盤の研磨性能の向上

### 5.3.1 ワイヤ径および繊維径の差異による研磨能率の変化

前節の結果からメッシュ定盤のワイヤ径の最適値を繊維定盤に反映させることで、研磨能率が向上することがわかった。そこで GC#600 を用いた場合においてもメッシュ定盤ではワイヤ径 0.29mm が研磨能率が高くなったことから、繊維径 0.29mm の繊維を繊維定盤に含有させれば研磨能率は向上すると予想される。しかしびびり振動切削で繊維径 0.29mm の繊維を加工することができないため、繊維ではないフィラーでも直径が 0.29mm 付近であれば研磨能率が向上すると考えた。そこでショットピーニングで用いられている、図 5.6 に示す直径が 0.3mm のワイヤを 0.3mm の長さで切断したワイヤ (IKK ショット社製) をフィラーに用いることにした。このフィラーはアスペクト比が 1 であるが、繊維と呼ぶことにする。本来であれば、他の繊維と条件を合わせるために繊維長 1mm のものを用いるべきだが、入手できなかったため断念した。図 5.6 からわかるようにワイヤの表面は、滑らかではなく表面粗さが粗いことがわかる。このことからこれまで用いたフィラーと同様にマトリックス材との密着性の向上が期待できる。

繊維長 0.3mm で繊維径 0.3mm の繊維を用いて製作した、40vol%繊維定盤を使用して表 5.1 の条件で実験を行った。GC#600 を用いた場合の繊維径の差異による研磨性能の変化の傾向を調べるために、前節で用いた繊維定盤 A, B, C の 3 種類でも実験を行った。繊維径 0.3mm の繊維定盤を繊維定盤 D と表記し、実験結果を図 5.7 に示す。繊維径が大きくなるほど研磨能率が向上

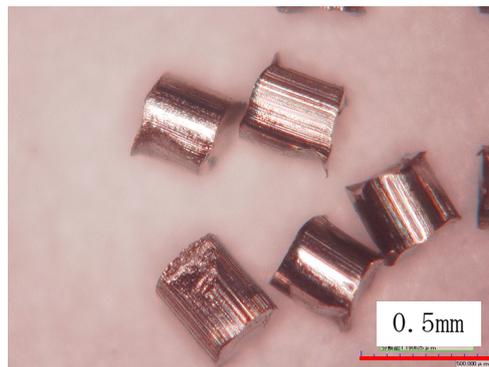


図 5.6 ショットピーニング用のワイヤ (繊維径 0.3mm, 繊維長 0.3mm)

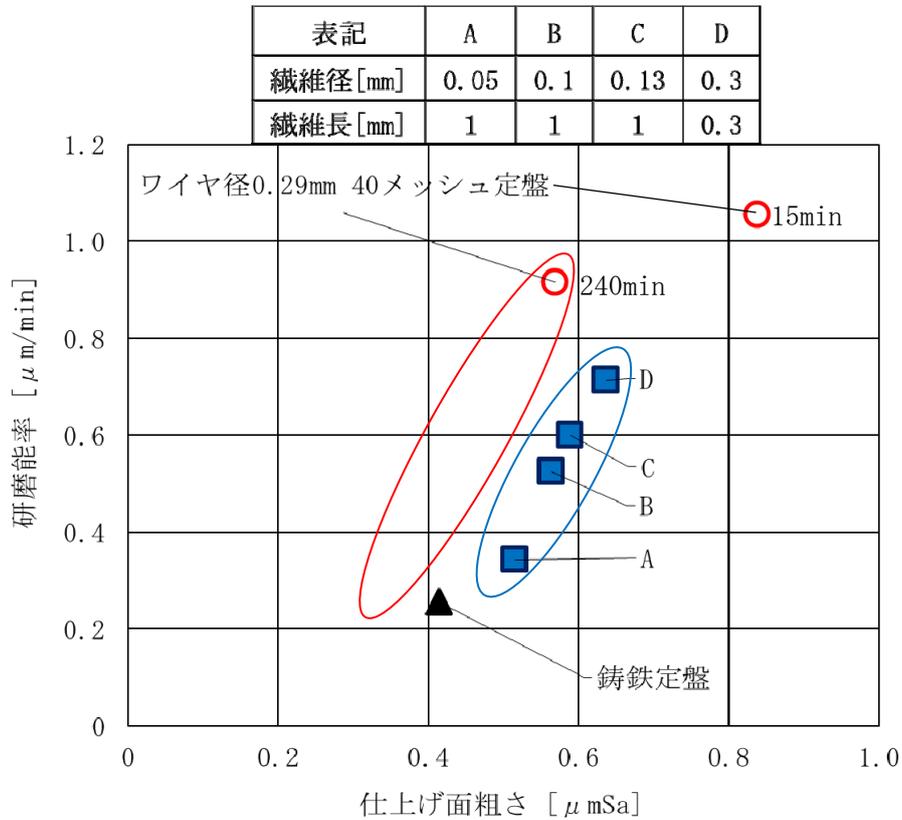


図 5.7 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較 2(C#600 を用いた場合)

することがわかった．これは繊維径が大きくなったことで，砥粒の動きを妨げる効果が高められたためと考えられる．この傾向は，4.4.2 項の図 4.8 の GC#600 を用いたメッシュ定盤のワイヤ径が大きいほど研磨能率が向上する傾向と同じである．繊維径を 0.29mm 以上の繊維を用いて実験は行えていないため研磨能率の最適値を判断することはできないが，繊維径が 0.29mm 以下においては，繊維径の差異により研磨能率の変化の傾向がメッシュ定盤と同じであることが確認された．

次に繊維定盤の表面状態を比較するために，使用後の定盤表面を光学式表面形状計測装置で観察した表面画像の高さ方向の情報をもとに 2 値化処理を行った．図 5.8(a) に繊維径 0.05mm の繊維定盤 A，同図 (b) に繊維径 0.3mm の繊維定盤 D の表面を 2 値化したものを示す．また比較対象として，GC#600 を用いた場合，メッシュ定盤で最も研磨性能に優れたワイヤ径 0.29mm の

40メッシュ定盤の15分使用後と240分使用後の表面画像から2値化処理を行ったものを同図の(c)と(d)に示す。使用した砥粒の平均粒径が $20\mu\text{m}$ であったため、定盤の上面から $20\mu\text{m}$ の深さまでの浅い領域を白色で示し、 $20\mu\text{m}$ よりも深い領域を黒色で示した。同図(a)の繊維径 $0.05\text{mm}$ の繊維定盤Aでは、白色部の割合が多く黒色部が島状に存在している。一方、同図(b)

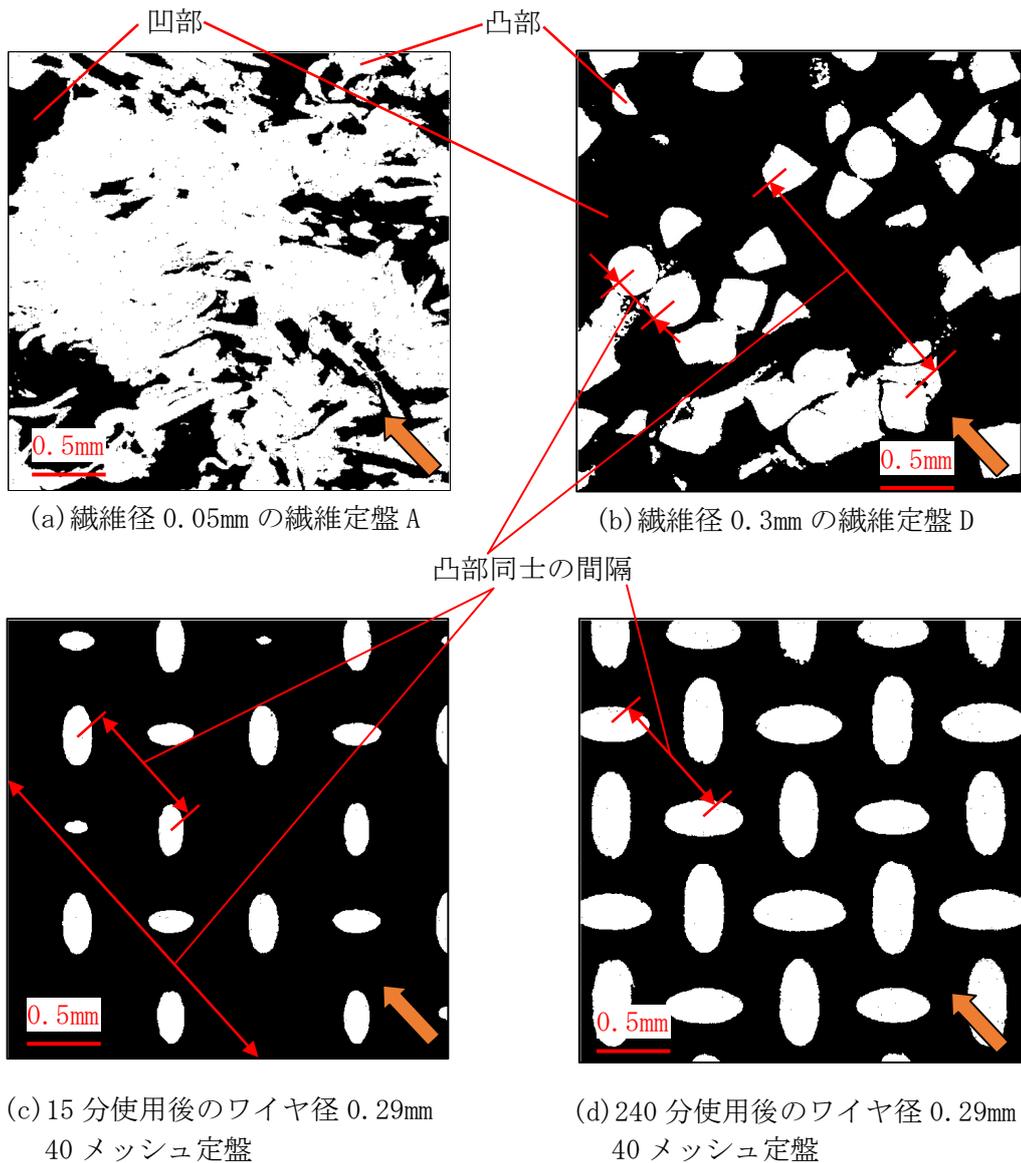


図 5.8 繊維径  $0.05\text{mm}$ ,  $0.3\text{mm}$  の使用後の繊維定盤と使用後15分と240分のワイヤ径  $0.29\text{mm}$  の40メッシュ定盤を2値化した画像

の繊維径 0.3mm の繊維定盤 D では、黒色部が多く白色部が島状に存在している。この結果から繊維径 0.05mm の繊維定盤 A は、パンチングメタルのように凹部が離れて存在する表面構造となったために研磨性能が低くなったと考えられる。一方、繊維径 0.3mm の繊維定盤 D は島状の凸部の周りに凹部が存在していることから、同図(d)の 240 分使用後のワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤と同じような表面構造を有することで砥粒の動きを妨げる効果が高められ、研磨能率が向上したと考えられる。

### 5.3.2 繊維定盤の仕上げ面粗さの悪化の原因

仕上げ面粗さを比較すると、図 5.7 に示されたメッシュ定盤のプロット領域(図 4.8 参照)から繊維定盤のほうが仕上げ面粗さは悪化しているおり、この原因について検討した。図 5.8 で 2 値化処理を行った(c)15 分使用後と(d)240 分使用後の各 40 メッシュ定盤の仕上げ面粗さと研磨能率を図 5.7 に付記した。15 分使用後の研磨能率は研磨時間 10 分から 15 分までの 5 分間の平均値であり、240 分使用後の研磨能率は研磨時間 40 分から 240 分までの 200 分間の平均値である。図 5.8 にラッピング定盤の回転方向のワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤と繊維径 0.3mm の 40vol%繊維定盤 D の凸部の間隔を示す。同図(d)の 240 分使用後のワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤では、ワイヤ摩耗部が規則的に配列し凸部の間隔も一定になっているが、同図(b)の繊維径 0.3mm の繊維定盤 D では繊維が密になっている箇所と疎になっている箇所があり、繊維間隔が大きく異なっている。このように繊維径 0.3mm の繊維定盤 D では、繊維の間隔が広くなる箇所があることで作用砥粒間隔も広くなり、仕上げ面粗さがメッシュ定盤よりも悪化したと考えられる。

このことから繊維定盤でも、繊維をより均一に配列することができれば仕上げ面粗さを改善させることが可能であると予想される。またワイヤ径 0.29mm の 40 メッシュ定盤でも図 5.8(c)の 15 分使用後ではワイヤ摩耗部が小さく、ラッピング定盤の回転方向の凸部の間隔が広くなる箇所があるため、図 5.7 に示されるように 15 分使用後は、240 分使用後に比べて仕上げ面粗さが悪化することが確認された。

以上の結果から繊維長 0.3mm で繊維径 0.3mm の繊維であっても GC#600 においては研磨性能を向上させることができたが、もしワイヤ径 0.3mm で繊維長が 1mm の繊維を含有させることができれば、さらに砥粒の動きを妨げる効果が高くなるため研磨性能の向上が期待される。

## 5.4 鋳鉄定盤と複合定盤の研磨性能の比較

メッシュ定盤の知見をもとに複合定盤の研磨性能の向上を試みた結果、GC#2000を用いた場合は、繊維長1mmの繊維径0.1mmの40vol%繊維定盤が最も研磨能率が高くなり、GC#600を用いた場合は繊維長0.3mmの繊維径0.3mmの40vol%繊維定盤が最も研磨能率が高くなることがわかった。この2つの繊維定盤と鋳鉄定盤の研磨性能の比較を行うことで、各砥粒径における複合定盤の優位性を明確にする。まずソーダガラスと難削材であるサファイアに対する研磨性能の比較を行う。工作物のソーダガラスとサファイアには、これまで使用してきた工作物と同様に2インチサイズで厚み3mmの、前加工面が2nm以下のものを用いた。表5.1の条件で実験を行い、砥粒にはGC#2000とGC#600を用いた。またソーダガラスの研磨能率を考慮にいれ、研磨時間を40分とした。図5.9にGC#2000を用いた場合の鋳鉄定盤と繊維長1mmの繊維径0.1mmの40vol%繊維定盤、図5.10にGC#600を用いた場合の鋳鉄定盤と繊維長0.3mmの繊維径0.3mmの40vol%繊維定盤の各実験結果を示す。ソーダガラスとサファイアの研磨能率を比較しやすくするために、サファイアの研磨能率の単位を $[\times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{min}]$ として表記した。

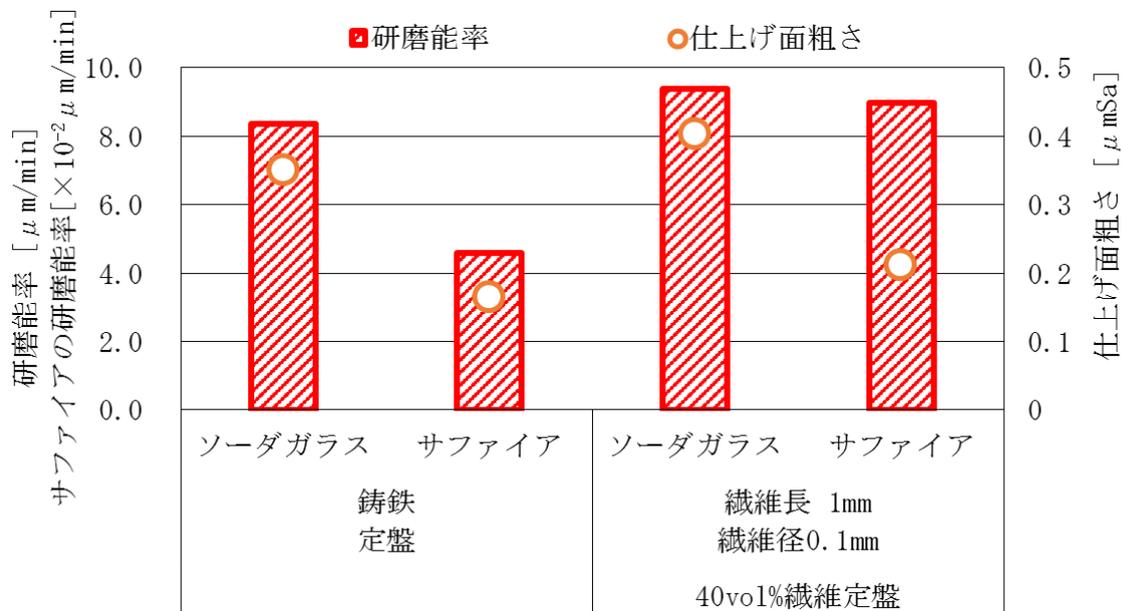


図 5.9 異なる工作物を用いた鋳鉄定盤と繊維定盤の研磨性能の比較 (GC#2000 を用いた場合)

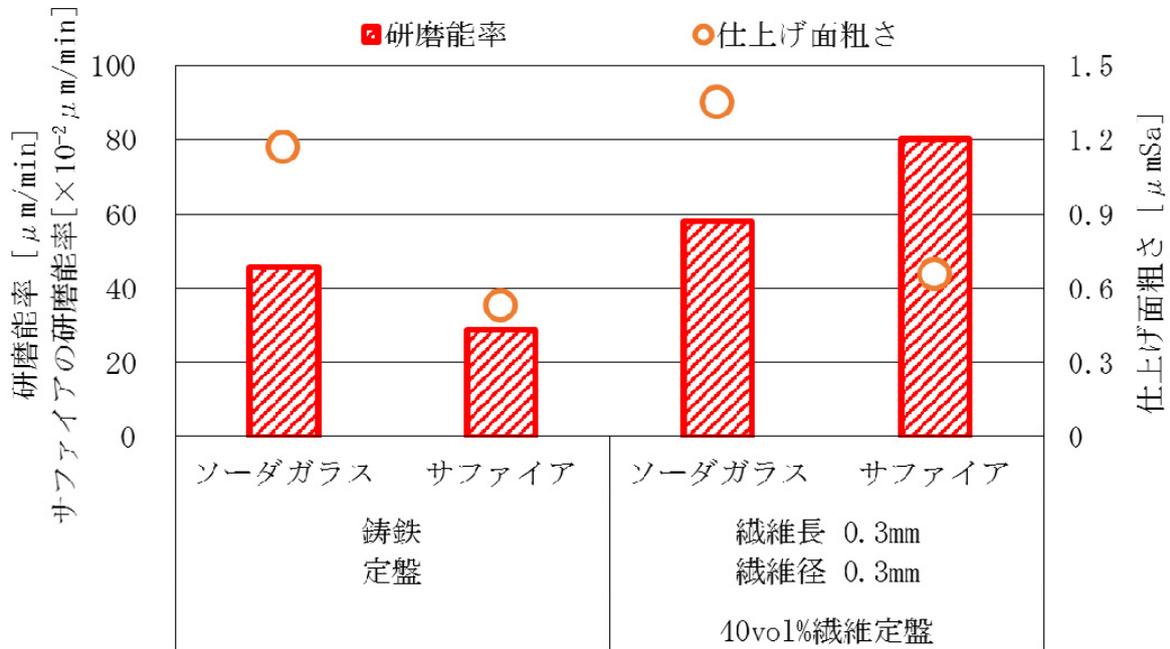


図 5.10 異なる工作物を用いた鋳鉄定盤と繊維定盤の研磨性能の比較 (GC#600 を用いた場合)

図 5.9 の GC#2000 を用いた場合では、鋳鉄定盤のサファイアに対する研磨能率は、ソーダガラスの約 182 分の 1 である。これに対して繊維長 1mm の繊維径 0.1mm の 40vol%繊維定盤では、サファイアに対する研磨能率がソーダガラスの約 104 分の 1 であることがわかった。このことから砥粒に GC#2000 を用いた場合、繊維定盤ではソーダガラスの研磨能率に対してサファイアの研磨能率は減少するが、鋳鉄定盤に比べてその減少する割合は、約 43%抑制されることがわかった。

次に GC#600 を用いた場合では、鋳鉄定盤は 2.3.2 項で示したようにサファイアの研磨能率は、ソーダガラスの約 160 分の 1 である。これに対して繊維長 0.3mm の繊維径 0.3mm の 40vol%繊維定盤のサファイアの研磨能率は、ソーダガラスの約 70 分の 1 であることがわかった。この結果から GC#600 を用いた場合、繊維定盤ではソーダガラスの研磨能率に対するサファイアの研磨能率の減少する割合を鋳鉄定盤に比べて、約 56%抑制されることがわかった。GC#2000 よりも GC#600 のほうが難削材に対する研磨能率の減少する割合が抑制された理由としては、砥粒径が

大きいほど工作物とラッピング定盤の隙間に砥粒は進入しにくくなるが、複合定盤には定盤表面に微細凹凸形状があることで大きな砥粒でも工作物とラッピング定盤の隙間に進入しやすいため、この砥粒の進入のしやすさの差が顕著に表れたと考えられる。

以上の結果から GC#2000 と GC#600 を用いた場合、複合定盤は工作物が難削材であっても研磨能率の減少する割合を鋳鉄定盤に比べて低減することが確認された。

最後にこれまで製作した複合定盤と鋳鉄定盤の研磨性能の比較を行うため、図 5.11 に GC#2000 を用いた場合、図 5.12 に GC#600 を用いた場合の各複合定盤と鋳鉄定盤の実験結果を示す。グラフに原点と鋳鉄定盤のプロットを結ぶ赤色の点線をひき、研磨能率と仕上げ面粗さを総合的に評価した。この点線よりも上側にプロットされれば鋳鉄定盤よりも研磨性能が優れるといえる。図 5.11 の GC#2000 を用いた結果では、全ての繊維定盤において赤色の点線よりも上側にプロットされていることがわかる。この結果から研磨能率と仕上げ面粗さを総合的に評価しても繊維定盤のほうが鋳鉄定盤よりも優れることがわかった。

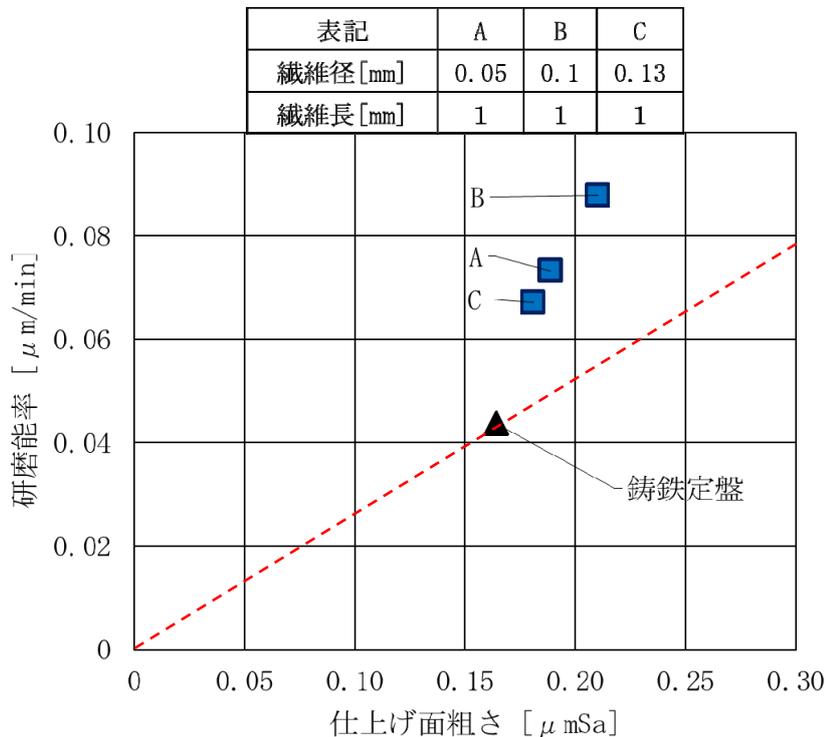


図 5.11 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較 3(GC#2000 を用いた場合)

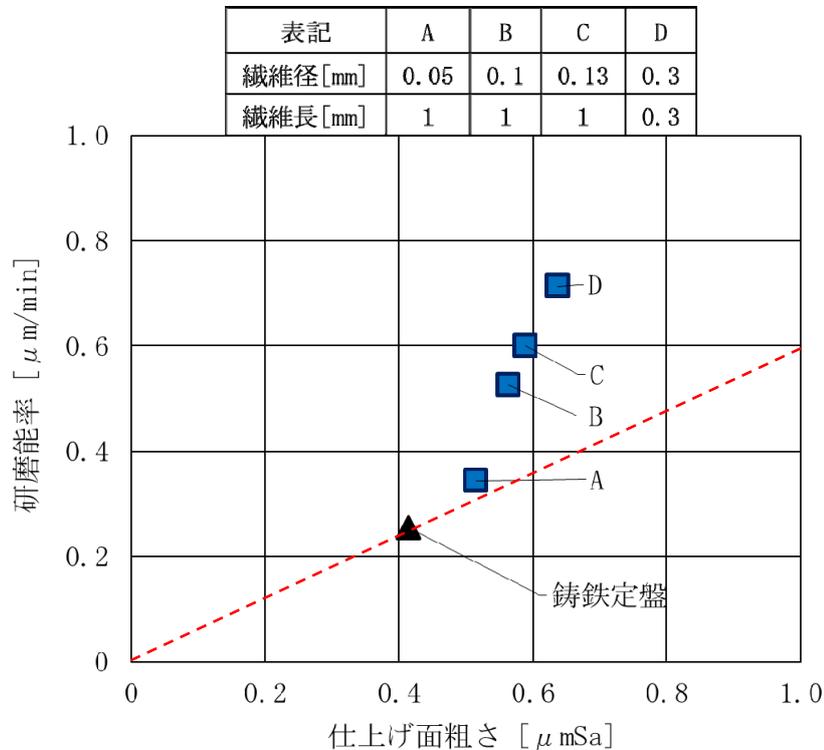


図 5.12 各種ラッピング定盤の研磨性能の比較 4(GC#600 を用いた場合)

次に図 5.12 の GC#600 を用いた結果からワイヤ径 0.05mm の繊維定盤 A においては、赤い点線の近くにプロットされているが、それ以外の繊維定盤 B と C と D は、赤色の点線よりも上側にプロットされていることから GC#600 を用いた場合でも、繊維定盤 B, C, D は铸铁定盤よりも研磨性能に優れるラッピング定盤であることがわかった。

## 5.5 結言

本章では、GC#2000 と GC#600 の砥粒を用いて、メッシュ定盤のワイヤ径およびピッチ間隔の差異による研磨性能の変化の傾向が、繊維定盤の繊維径および繊維同士の間隔の差異による研磨能率の変化の傾向に合致するかを調べた。そしてメッシュ定盤で高い研磨性能を示したワイ

ワイヤ径を繊維定盤の繊維径に反映させて、複合定盤の研磨性能の向上を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- 1) メッシュ定盤に対して GC#2000 を用いて実験を行った結果、ワイヤ径には最適値があることがわかり、その最適値付近のワイヤ径を繊維定盤の繊維径に反映させることで繊維定盤の研磨能率が向上することがわかった。
- 2) GC#2000 を用いてメッシュ定盤と繊維定盤に対して実験を行った結果、メッシュ定盤のピッチ間隔の差異による研磨性能の変化の傾向が、繊維定盤の繊維同士の間隔の差異による研磨能率の変化の傾向とに合致することがわかった。
- 3) GC#600 を用いた場合において、ワイヤ径および繊維径 0.3mm 以下の領域に対してメッシュ定盤のワイヤ径およびピッチ間隔の差異による研磨性能の変化の傾向が、繊維定盤の繊維径および繊維同士の間隔の差異による研磨能率の変化の傾向と合致することがわかり、砥粒径が異なってもメッシュ定盤と繊維定盤は同じ傾向を示すことがわかった。
- 4) 繊維定盤は凹部が離れて存在する表面状態を示すよりも凸部が島状に存在し、凹部が連続している場合に研磨能率が向上することがわかった。
- 5) メッシュ定盤で高い研磨能率を示したワイヤ径とピッチ間隔をメッシュ定盤に反映させることで、難削材に対する研磨能率の減少の割合を鋳鉄定盤に比べて GC#2000 では 47%、GC#600 では 56%抑制することがわかった。

以上の結果から鋳鉄定盤よりも研磨性能に優れた複合定盤の開発に成功した。

## 第5章 参考文献

- 5-1) 林偉民, 河西敏雄, 堀尾健一郎, 土肥俊郎, 鏡面研磨過程におけるポリウレタンポリシヤの表面状態の変化, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 8, (1999), pp. 1147-1152.
- 5-2) 畝田道雄, 菅野祐也, 石川憲一, ダイヤモンドペレットを用いた固定砥粒研磨のペレット配置最適化とその加工特性に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 55, No. 6, (2011), pp. 354-359.

## 第6章 結論

### 6.1 研究成果の概要

省エネルギー化が期待されている次世代パワー半導体やLEDの基板のラッピング工程では、一般的に鋳鉄定盤が用いられている。しかし鋳鉄定盤には難削材に対する研磨能率が低い、耐食性が低い、研磨能率が経時的に変化する、といった問題点がある。本論文では、鋳鉄定盤の問題点を克服する新たなラッピング定盤の開発を行った。

ラッピングの研究は、1960年ごろに盛んに行われていたが、それ以降は研究の数も減少し、またラッピング定盤に関する研究においてはほとんど行われていないのが現状である。そのため鋳鉄定盤の問題点は今尚解決されておらず、その問題点を解決する新たなラッピング定盤を開発することで、難削材に対する加工コストを低減させ、省エネルギー化かつ低炭素社会の実現に繋がると期待される。各章で得られた概要を以下のように要約する。

第1章「緒論」では、ラッピングの基本的な研磨メカニズムに触れ、湿式ラッピングと乾式ラッピング法における研磨メカニズムの違いや現在使用されているラッピング定盤や既往の研究について紹介した。その結果、鋳鉄定盤は各種砥粒との相性も良く種々の材料に対して使用することが可能であるため、ラッピング工程で一般的に用いられていることを述べている。しかし鋳鉄定盤にもいくつかの問題点を有している。その問題点を解決するような研究ほとんど行われていないことを述べている。

第2章「鋳鉄定盤の問題点の明確化」では、本研究に用いた球状黒鉛鋳鉄定盤に含有する黒鉛がどのように研磨に寄与しているのかを定盤上の砥粒の挙動を観察することで解明した。次に鋳鉄定盤の目切り溝の有無による研磨性能の違いについて把握した結果、鋳鉄定盤は目切り

溝が無い場合はその研磨性能を發揮できないことを明らかにした。また鑄鉄定盤の問題点である難削材に対する研磨能率の低さ、低い耐食性、研磨能率の経時的な変化について実験を行うことで明確化した。

第3章「表面微細凹凸形状が維持可能な複合定盤の開発」では、2章で明確となった鑄鉄定盤の問題点が新たに開発した複合定盤で解決することができるかを検証した。複合定盤とは、ステンレス鋼のフィラーとマトリックス材となるエポキシ樹脂を混合し、圧縮して製作したラッピング定盤である。複合定盤の材料に耐摩耗性の異なるステンレス鋼とエポキシ樹脂を用いることで、定盤表面に微細凹凸形状が維持できると考えて選定した。

まず複合定盤の研磨性能を把握するために、含有させるフィラーの種類を変えた複合定盤を製作し実験を行った結果、フィラーには粉体よりもアスペクト比が高い繊維のほうが研磨性能が向上することを示した。次に粉体定盤と繊維定盤上の砥粒の挙動を観察した結果、粉体定盤では凸部が $20\mu\text{m}$ から $80\mu\text{m}$ と小さいため砥粒の流れを妨げることができないが、繊維定盤では凸部の幅が約 $50\mu\text{m}$ で長さが約 $0.35\text{mm}$ あり、アスペクト比が高いことで砥粒の流れを妨げることができることを明らかにした。

また繊維定盤に目切り溝加工を行うと、研磨性能が低下することを判明した。これは複合定盤は表面の微細凹凸形状によって砥粒が十分に供給されているため、さらに目切り溝加工を行うことで、研磨に寄与する砥粒が目切り溝によって排出されたためと考えられた。このことから複合定盤には目切り溝加工が不要であり、鑄鉄定盤よりも加工コストや再加工によるメンテナンスコストが低減できることを明らかにした。

最後に、繊維径 $50\mu\text{m}$ で繊維長さ $1\text{mm}$ の40vol%繊維定盤を製作し実験を行った結果、繊維定盤では定盤表面に微細凹凸形状が維持されることで研磨能率の経時変化が抑制され、鑄鉄定盤に比べて研磨能率が35%向上し、定盤摩耗速度もほぼ同等になることを示した。

第4章「メッシュ定盤を用いた複合定盤の定盤仕様の検討」では、3章で開発した繊維定盤の表面の微細凹凸形状が研磨性能に影響を与えることがわかり、この微細凹凸形状を定量的に変更することが可能なメッシュ定盤(ステンレス鋼金網)を用いて、高い研磨性能が得られる微

細凹凸形状について検討した。

メッシュ定盤上の砥粒の挙動を高速カメラを用いて観察することで、メッシュ定盤のワイヤ径やピッチ間隔によって砥粒の挙動が変化することがわかり、蛇行しながら移動する砥粒と定盤回転方向に直線的に移動する砥粒の2つの砥粒の挙動があることを明らかにしている。蛇行する砥粒が多いメッシュ定盤は砥粒の動きを妨げる効果が高くなり研磨性能は高くなる。一方、直線的に移動する砥粒が多いメッシュ定盤は砥粒の動きを妨げる効果が低いため研磨性能が低くなることを判明した。このことからワイヤ径とピッチ間隔は研磨性能に大きな影響を与えることがわかり、研磨能率に対するそれぞれの相関係数はワイヤ径が0.981、ピッチ間隔が0.887となり、相関関係が強いことを示している。

第5章「複合定盤の研磨性能の向上」では、びびり振動切削で加工可能な繊維径の範囲内で繊維径の差異による複合定盤の研磨性能の変化を把握するために、GC#2000を用いてメッシュ定盤と繊維定盤で実験を行った。その結果、メッシュ定盤のワイヤ径およびピッチ間隔の差異による研磨能率の変化の傾向が、複合定盤の繊維径および繊維同士の間隔の差異による研磨性能の変化の傾向と合致することを明らかにしている。GC#600においても同様に比較を行い、使用する砥粒径が異なってもメッシュ定盤と複合定盤の研磨能率の変化の傾向が合致することを確認している。

各砥粒径で最も研磨能率が高くなったメッシュ定盤のワイヤ径を複合定盤の繊維径に反映させることで、研磨能率を向上させることに成功している。この高い研磨能率を示した複合定盤の表面の凹凸に対して2値化処理を行うことで、凸部が島状に存在し、凹部が連続している場合に研磨性能が高くなることを判明した。

最後にソーダガラスと難削材であるサファイアの研磨能率を比較した結果、難削材に対する研磨能率が減少する割合を鋳鉄定盤と比較して、GC#2000を用いた場合は47%、GC#600を用いた場合は、56%低減させることのできる複合定盤の開発に成功している。

以上のように本論文は、鋳鉄定盤の問題点を解決することを目的に新しいラッピング定盤の開発に取り組んだ結果、鋳鉄定盤の問題点である、難削材に対する低い研磨能率、低い耐食性、研磨能率の経時的な変化を克服する複合定盤の開発に成功している。

## 6.2 今後の課題と展望

複合定盤には、まだ乗り越えるべき3つの課題が存在する。

その1つ目は、複合定盤に含有させる繊維径の大きい繊維の製作方法の確立である。GC#2000とGC#600において複合定盤が高い研磨性能を示すフィラーのサイズを把握したが、GC#600では、繊維長1mmで繊維径0.29mmの繊維を用いた実験を行えておらず、もしこの繊維で複合定盤の製作ができれば更なる研磨性能の向上が期待される。またGC#600よりも砥粒径の大きいものを使用するラッピング工程では、含有させる繊維の繊維径は0.29mmよりも大きなものが必要になると考えられ、これらの大粒径の砥粒に対しても高い研磨性能を示す複合定盤の開発を行う必要がある。

2つ目の課題としては、マトリックス材の選定である。本研究ではエポキシ樹脂を用いたが他の樹脂や軟質の金属などをマトリックス材に用いることで、耐摩耗性の向上や定盤表面の微細凹凸形状の変化についてまだまだ検討を行う必要がある。

最後の課題としては汎用性の向上である。開発した複合定盤は、使用する砥粒径に合った複合定盤を選定する必要がある。理想は、大粒径や小粒径の砥粒においても1つの複合定盤で効率良く研磨が行えることである。このように広い領域で使用可能な複合定盤の開発することも今後の課題である。

複合定盤の今後の展望としては、ラッピング定盤の研究は数が少なく、この研究が今後のラッピング定盤の研究開発の発展に繋がることを望んでいる。工業的な分野では、複合定盤の販売を考えている。大型の定盤を製作する際も鋳鉄定盤のような大型電気炉や鋳型などは不要であり、低コストで半導体のラッピング工程で一般的に使用されている9Bサイズ(φ600mm)から16Bサイズ(φ1200mm)の製造が行えると考えている。ただし研磨業界は非常に保守的であるため研磨条件の変更は難しく、新しいラッピング定盤を使用してもらうためには、定盤の安定性と高い研磨性能を示すデータが必要不可欠となるため、今後はそのデータの採取を行っていく。そして将来、複合定盤が現在の鋳鉄定盤と置き換わることを期待する。

以上、本論文で開発した複合定盤、およびその得られた知見等が、本分野および関連技術の進歩に貢献できることを信じて、本論文の締めとする。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり多大なる御教授を頂くとともに、本論文の作成にあたり御指導を賜った立命館大学理工学部機械工学科 谷 泰弘 教授に謹んで感謝の意を表します。

また本研究をまとめるにあたり、貴重なご助言とご教授を賜った立命館大学 総合化学技術研究室機構 張 宇 准教授、株式会社クリスタル光学 常務取締役 桐野 宙治 氏，並びに副査の立命館大学 機械工学科 飴山 恵 教授，立命館大学 機械工学科 伊藤 隆基 教授に感謝の意を表します。

本研究の一部について、滋賀県中小企業新技術開発プロジェクト補助金の援助を受けて行われました。関係各位にここに深く謝意を表します。

最後に本研究を遂行する機会を与えてくださった株式会社クリスタル光学 代表取締役 桐野 茂 氏をはじめ全ての役員と従業員に深謝いたします。加えて、様々な面で最大限の理解と協力をしてくれた家族に心より感謝いたします。

2018年12月

川波多 裕司