

平成29年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代自動車部材加工のコスト低減化、高精度化を可能にするハイブリッド砥石の研究開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 一般財団法人ファインセラミックスセンター

第1章 研究開発の概要

排出ガスを低減し、燃費を向上したクリーンディーゼル車の普及を進めるには効率良く燃料を燃焼させるための燃料噴射装置の高性能化および製造コスト低減が必須である。燃料噴射装置の肝となる部品のプランジャーを設計通りの形状精度を得ながら従来の倍以上の高速で加工する研削砥石の開発を目標とする。切れ刃密度の高いレジン砥石と目づまりを抑えたビトリ砥石の特徴を持つ新たなハイブリッド砥石の製造法を確立する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

・川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

（三）精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

（四）川下分野特有の事項

4）その他の川下分野に関する事項

a.自動車分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

エ. 燃費向上

ディーゼル車はガソリン車に比べ燃費が2～3割良く、CO₂排出量が少ないという利点を有している。この利点を保持しながら、ポスト新長期規制に適合するように排出ガスを抑制しさらに燃費を向上するためには、燃料噴射装置とりわけプランジャーを高精度に製造することが重要となる。プランジャー材料となる合金は硬く加工が難しい上、加工精度に対する要求が厳しい。そのため、1本のプランジャー加工に1分かかっている。国内向け出荷量でも年間500万本に及ぶため製造コスト増大の原因となっている。この加工時間を半減するとともに、加工精度をさらに向上する技術の確立が課題である。

オ. ハイブリッド化、EV化、燃料電池化

モーターで車輪を駆動する自動車（ハイブリッド・電気・燃料電池車）において電池に蓄えられた電力を無駄なく使うための次世代パワーデバイスの搭載は必須である。デバイス製造面側の超平坦加工については目途が立ちつつあるが、さらに消費電力を削減するためにウエハの薄化（厚さ350μm→100μm）が必要とされている。脆性かつ劈開性のあるウエハを100μm厚でも高速でかつ破損しない裏面研削の実現が課題である。

②高度化目標

オ．複合加工、部品組み立ておよび工程短縮等を可能とする技術の向上

ディーゼル車の排出ガスを削減し燃費を向上させるための燃料噴射装置部品(合金工具鋼)を低コストで加工する研削砥石の開発を目標とする。研削速度を従来の倍にするとともに、指定の研削面を平坦度・真円度・円筒度を保持、向上させる。レジン砥石の特性を生かして切れ刃密度を上げて1切れ刃あたり研削量を減らして表面を平坦化すると共に砥粒・結合剤・気孔が均一分散したビトリ砥石の特性を生かし目づまりを抑え加工速度の低下を抑制することで目標を達成する。

ウ．難加工材・新材料加工対応

脆い上に劈開性のあるパワーデバイスウエハ(半導体結晶 4H-SiC)をバックグライディングし、高速で厚さ350から100 μ mまで破損することなく薄化する研削砥石の開発を目標とする。加工速度を上げ、深い研削傷や加工変質層を抑制するために、切れ刃密度を上げて1切れ刃あたりの応力を減らして傷を浅くすると共に目づまりを抑え加工速度の低下を抑制することで目標を達成する。

令和2年3月末の目標値と達成値を以下に示す。

項目	目標値	達成値	達成度合い
造粒技術開発	砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石製造条件の策定	砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石製造条件を策定	達成
ビトリ二次粒子サイズ制御法開発	二次粒子の粒度分布設計	二次粒子粒度範囲を決定	達成
	設計粒度分布を再現する二次粒子サイズ制御条件の策定	二次粒子の解砕法と篩分け法を策定	達成
レジン含浸技術開発	ビトリ二次粒子の脱落を抑制したレジン含浸条件の策定	レジン含浸条件を策定 縦弾性係数でハイブリッド化の効果を確認	達成
砥石の試作	結合度の異なる複数砥石の試作	結合度(4水準)、砥粒(粒度(3水準)・種類(2種))、ビトリ二次粒子組成(6水準)、ビトリ二次粒子とレジン比率(2水準)として二十数種類の砥石を試作した。	達成
金属研削	研削速度	4.1mm ² /minを確認	達成

	>2.8mm ² /min (単位長さあたり)	(プランジ研削) SKD11, HAP 材	目標の1.5倍
	表面粗さ Rz≤0.2μm	Rz≤0.2μm (プランジ研削・@ 4.0mm ² /min) SKD11, HAP 材	達成
	真円度 ≤0.25μm	0.21μm (トラバース研削) SKD11	達成 目標の1.2倍
	円筒度 ≤0.25μm	0.4μm (トラバース研削) SKD11	未達成 63%
	硬度劣化 ないこと	変色(焼け)なし 硬度劣化なし(ナノイン デンテーション法・HAP 材)	達成
半導体研削	研削速度 15μm/min 表面粗さ Ra<0.04um そり <40μm TTV <2μm	垂直方向研削抵抗が増加 しない加工条件・砥石構 造が見つからず、本砥石 は半導体研削には不適と 判断した。	未達成

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制

事業管理機関 一般財団法人ファインセラミックスセンター

—— 間接補助 ——▶ 株式会社ニートレックス本社

総括研究代表者(PL) 株式会社ニートレックス本社 技術開発室 室長 柴田剛

副総括研究代表者(SL) 一般財団法人ファインセラミックスセンター 材料技術研究所
機能性材料グループ 主席研究員 石川由加里

【事業管理機関】 一般財団法人ファインセラミックスセンター

管理員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
山本義明	研究企画部・部長	③
松田典子	事務局総務G・総括担当者	③
石川由加里	材料技術研究所機能性材料グループ・グループ長・主席研究員	③

（２）研究者氏名、協力者

【事業管理機関】 一般財団法人ファインセラミックスセンター

研究員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
石川由加里	材料技術研究所機能性材料グループ・グループ長	①、②
佐藤功二	材料技術研究所機能性材料グループ・上級技師	①、②
姚永昭	材料技術研究所機能性材料グループ・上級研究員	②
早川一幸	材料技術研究所材料評価・試作グループ・上級技師補	②
横江大作	ナノ構造研究所微構造・界面解析グループ・上級技師補	①、②

【間接補助事業者】

株式会社ニートレックス本社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
柴田剛	技術開発室・室長	①②の統括責任者
岡田 要司	技術開発室・主任	①
南本 貴司	技術開発室・主任	①
土肥 龍錫	技術開発室・主事	①、②
八代 政志	製造技術室・主事	②

アドバイザー ３名

1-3 成果概要

切れ刃の密度を上げる効果の高いレジン砥石と目づまりのしにくいビトリ砥石の特徴を併せ持つ新たなハイブリッド砥石の開発に成功した。砥粒・結合剤・バインダーを原料とするビトリ砥石化二次粒子を製造し、この二次粒子にレジン含浸、低温の焼成でレジン砥石を製造する新規な方法を採用した。造粒技術開発では、砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石製造条件の策定、ビトリ二次粒子サイズ制御法開発では粒度分布設計、設計粒度分布を再現する制御条件の策定、レジン含浸技術開発ではレジン含浸条件の策定を実施した。

研削性能の実証では、複数砥石を試作し目標を達成した。結合度（4水準）、砥粒（粒度（3水準）・種類（2種））、ビトリ二次粒子組成（6水準）、ビトリ 2 次粒子とレジン比率（2水準）として 二十数種類の砥石を試作した。金属研削性能評価を株式会社ニートレックス本社内だけではなく、アドバイザーの実機にて実施した。その結果、SKD 材、HAP 材ともに研削速度 $4\text{mm}^2/\text{min}$ （目標値 $2.8\text{mm}^2/\text{min}$ ）、表面粗さ $R_z \leq 0.2\ \mu\text{m}$ 、を達成し、研削効率の高い砥石であることが分かった。また、真円度 $\leq 0.21\ \mu\text{m}$ （目標値 $\leq 0.25\ \mu\text{m}$ ）、硬度劣化なし（目標 硬度劣化なし）といった研削品質の面でも目標値を達成した。円筒度は $0.4\ \mu\text{m}$ で目標値 $\leq 0.25\ \mu\text{m}$ を達成していないので今後の課題とする。円筒度は砥石性能だけではなく砥石とワークの平行度が重要なパラメータであるため、改善は容易と考えている。半導体研削においては、7 種類の複数砥石について適切な加工条件を検討したが、加工時間の増大とともに研削抵抗が増大した。研削抵抗が増大すると半導体ウエハが破損するため致命的な性質であることがわかった。従って、半導体研削に関する目標値 $30\ \mu\text{m}/\text{min}$ （6" $\Phi 4\text{H-SiC}$ ）、 $R_a < 0.04\ \mu\text{m}$ 、砥石摩耗率 10%、加工負荷によって SiC が割れないことは未達成である。前述の様に開発砥石は半導体研削に適さないことがわかったので、これ以上の検討は不要と判断し、本目標については今後の課題としない。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人 ファインセラミックスター

材料技術研究所 機能性材料 グループ

主席研究員 石川 由加里

Tel: 052-889-1666（内線 562） Fax: 052-871-3599

E-mail: yukari@jfcc.or.jp

第2章 本論

(1) ハイブリッド砥石の開発

(1-1) 造粒技術開発 【2017年度～2018年度実施】(実施機関：株式会社ニートレックス本社・一般財団法人ファインセラミックスセンター)

(実施内容)

H26-28 年度サポイン事業で開発した細目砥粒(#30000-50000)・結合剤・気孔の超均一分散ビトリ砥石の製造方法を適用・改良することで中目砥粒(#800-2000)・結合剤・気孔が均一分散した二次粒子の造粒方法を開発する。

(目標)

砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石製造条件の策定

(成果)

砥粒 A, B について粒度、集中度を変えて二次粒子の造粒を試み、砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石の製造できる条件を決定した。

砥粒 A

砥粒種 A を用いて、造粒した二次粒子構造の粒度、集中度による差異を調べた。レーザー顕微鏡で観察した二次粒子の外観を図 1 に示す。粒度#2000、集中度 α 、 β ともに焼成前でも球状の粒子が観察され、二次粒子が製造されている。しかし、粒径は揃っておらず大きな分散がある。また、集中度 α の方が粒径が大きい。焼成後は、形状が少し角張るとともに、砥粒が露出した。焼成によって二次粒子同士が結合している様子も確認された。造粒直後と同じく粒径は集中度 α の方が大きい。粒度#5000、集中度 β で製造したものは#2000、集中度 α と同程度のサイズの二次粒子が確認された。表面はなめらかで微細な砥粒が確認される。大きな特徴は球状ではなく一部が凹んでいることである。これは以前の研究で二次粒子の製造条件が不適の場合に発生することがわかっている。

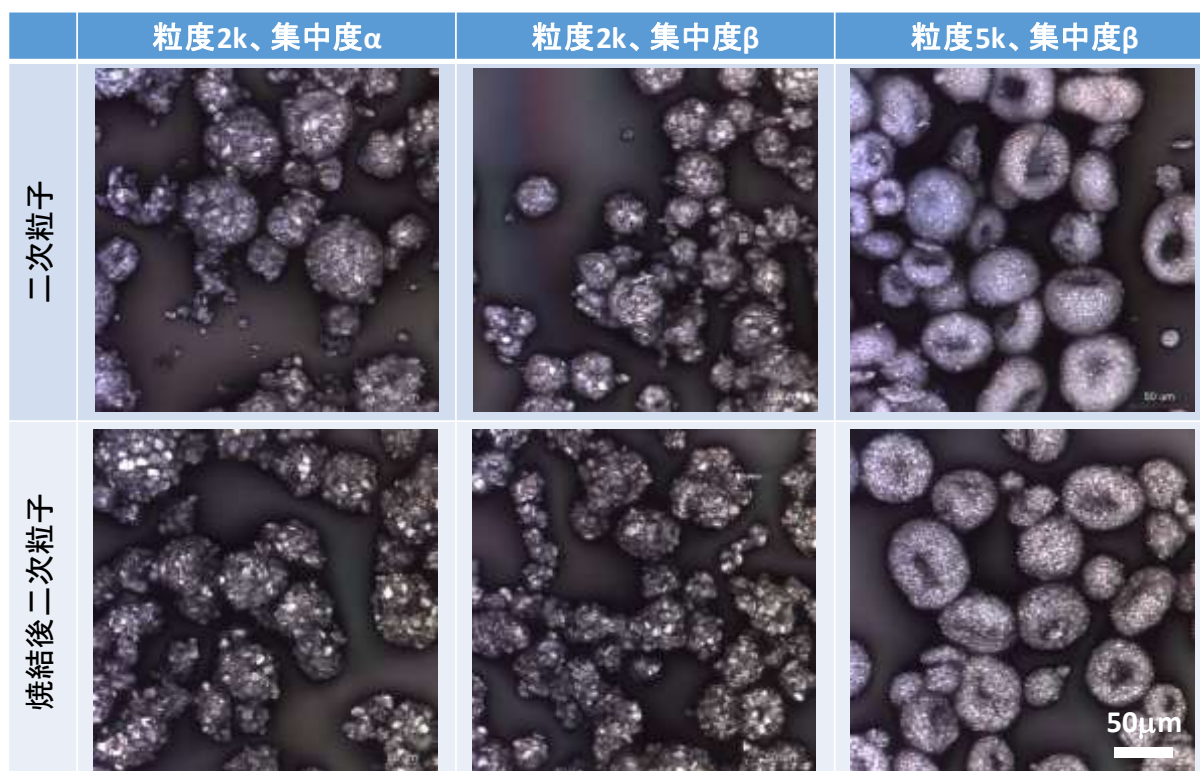


図 1 二次粒子の外観（砥粒 A） $\times 50$

造粒した二次粒子を樹脂埋め後に走査型電子顕微鏡で観察した断面構造を図 2 に示す。#2000、集中度 α 、 β ともに二次粒子が観察される。図 3 の組成像からは二次粒子内部には砥粒 A・結合剤・充填剤・気孔（もしくはバインダー）が分散していることがわかった。焼成後の二次粒子の断面構造を図 4 に示す。二次粒子内部には砥粒 A・溶解焼結後の結合剤・充填剤・気孔が観察された（図 5）。全砥粒量⑦のものは気孔径が砥粒径と近く砥粒・充填剤と良く分散している領域と貫通穴になっている領域があった。一方、全砥粒量①のものの二次粒子内には $10\mu\text{m}$ を超える気孔が 3~4 個あり、他の領域は砥粒径に近い若干の気孔があるが、均一分散はしていなかった。ビトリ砥石の利点を発揮するためには、微小気孔の分散が課題である。粒度#5000 全砥粒量⑦でも図 2 に示す様に二次粒子が観察されるが、レーザー顕微鏡による外観と同じく、ひしゃげた中空のものがある。しかし、球状の二次粒子では砥粒と結合剤の分散性が良い。また、焼結後の砥粒 A・結合剤・充填剤の分散性は#2000 に比べて高い（図 5）。

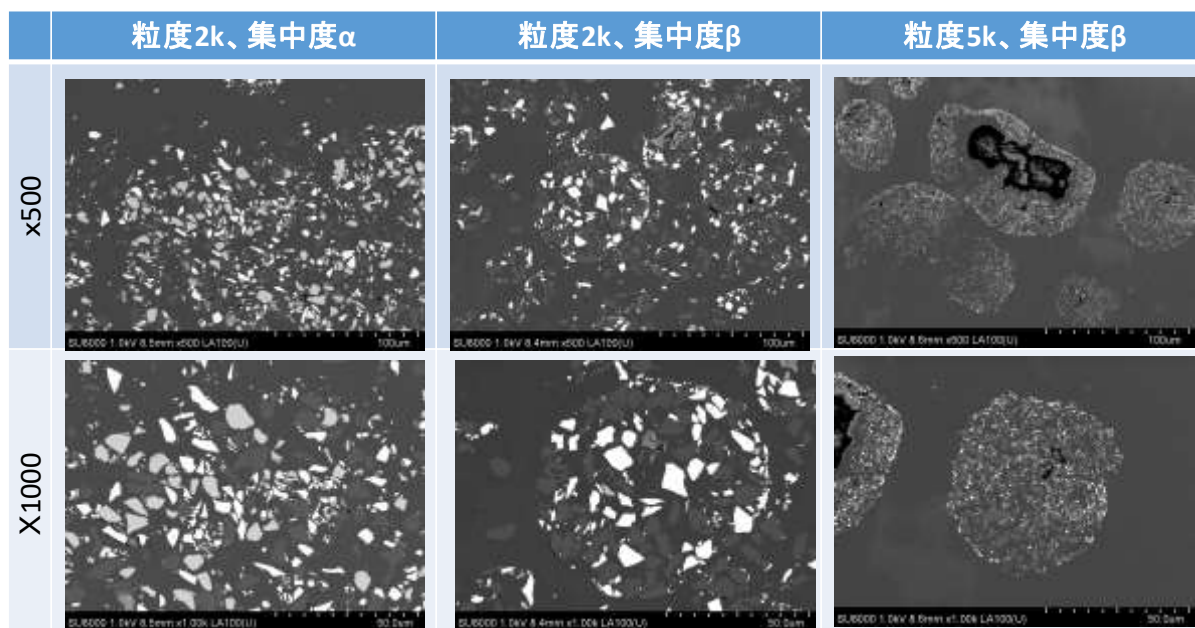
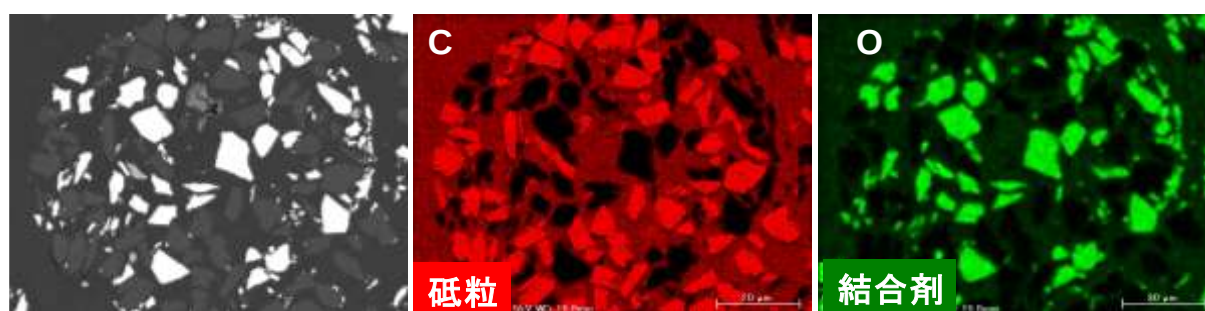


図 2 二次粒子の断面構造



粒径 2k、集中度 β

図 3 二次粒子の組成像

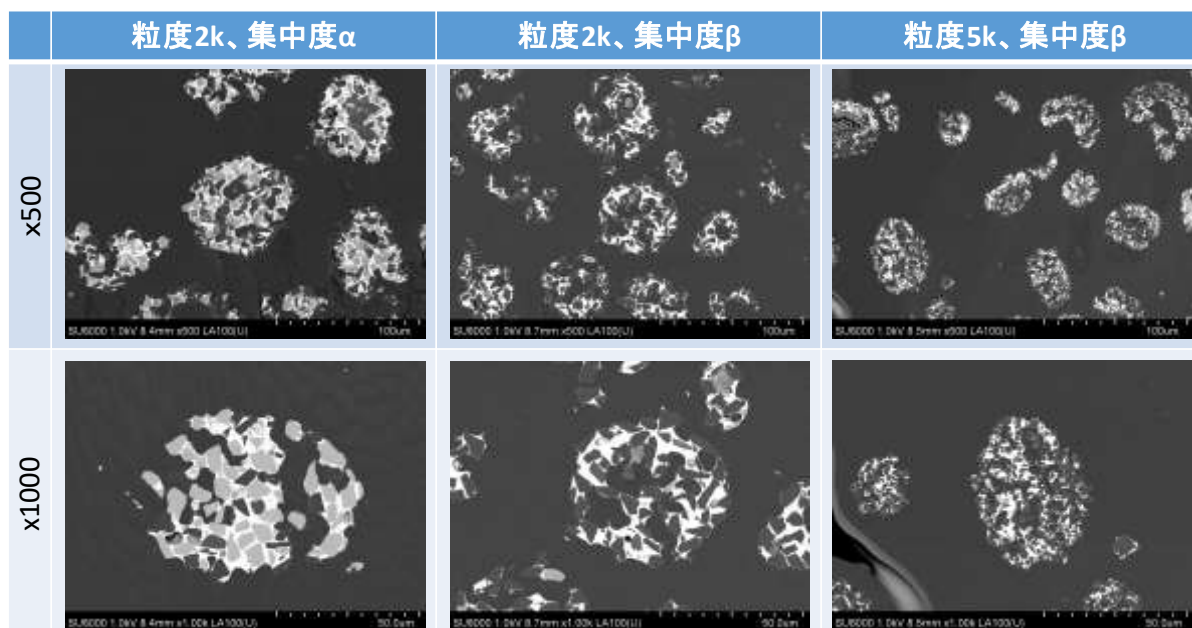
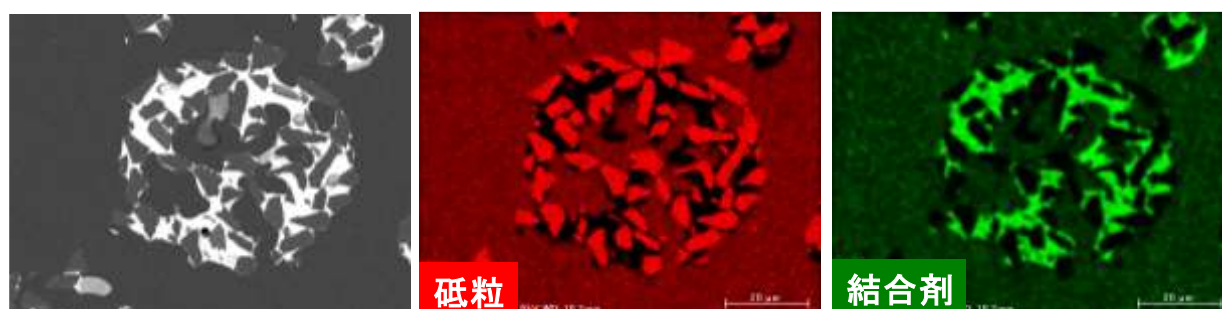


図 4 焼結後の二次粒子の断面構造



粒径 2k、集中度 β

図 5 焼成後の二次粒子の組成像

砥粒 B

レーザー顕微鏡で観察した造粒した二次粒子の外観を図 6 に示す。粒度#800 では、粒内に構造がないことから造粒されていないと思われた。一方、粒度#2000 では、比較的サイズの揃った二次粒子が多く観察された。また、二次粒子は微細粒子から構成されていることがわかり、造粒に成功していると判断した。粒径は焼成後の方が若干小さくまた、二次粒子表面の凹凸も増加している。粒形状は球ではなく様々なものがあり今後の検討を要する。焼成前には、二次粒子の強度が弱いための破壊片と思われる微細粒子が多く観察されたが、焼成後は観察されない。

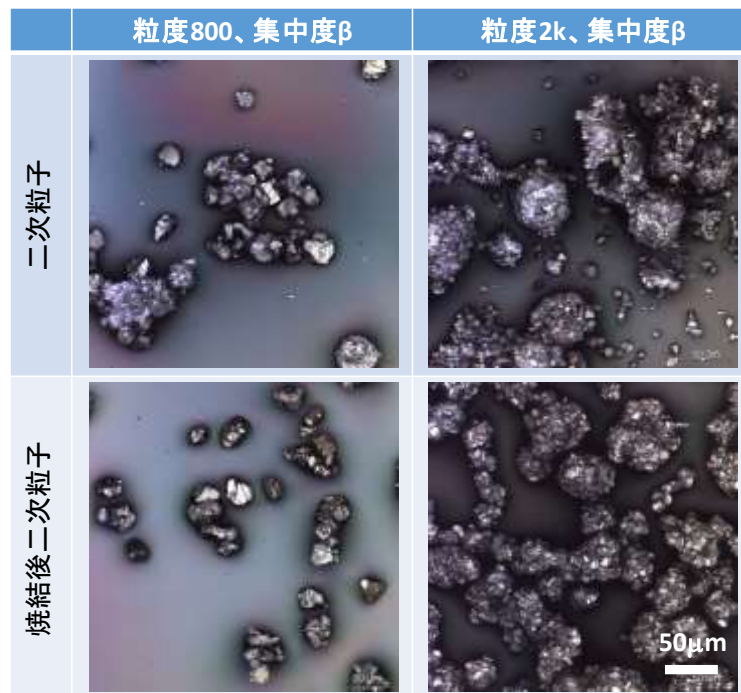


図 6 二次粒子外観（砥粒 B） x50

造粒した二次粒子を樹脂埋めした後に走査型電子顕微鏡で断面観察した結果を図 7 と図 8 に示す。粒度#2000 では二次粒子が明瞭に観察される。焼成前には砥粒 B と結合剤の分散に偏りがあったが、焼成後には結合剤が砥粒 B を一様に覆い保持している。

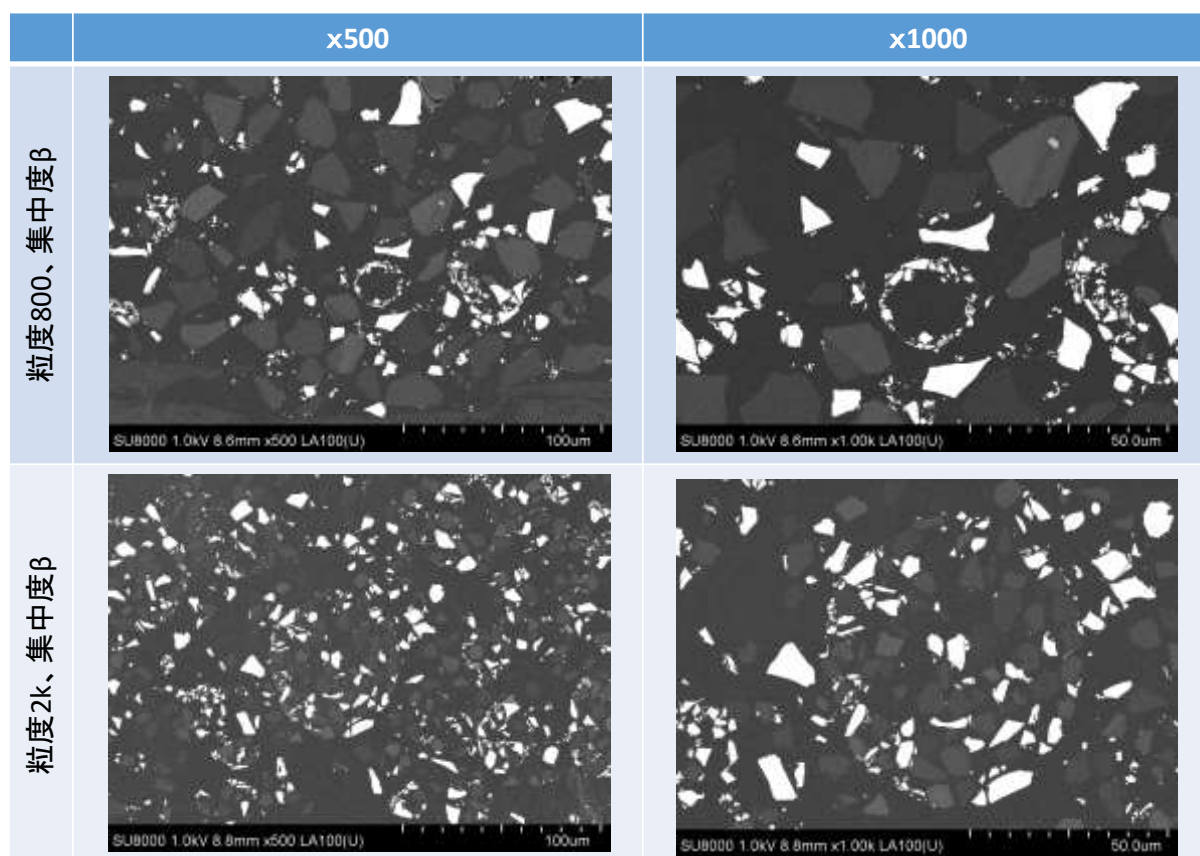


図 7 二次粒子の断面構造

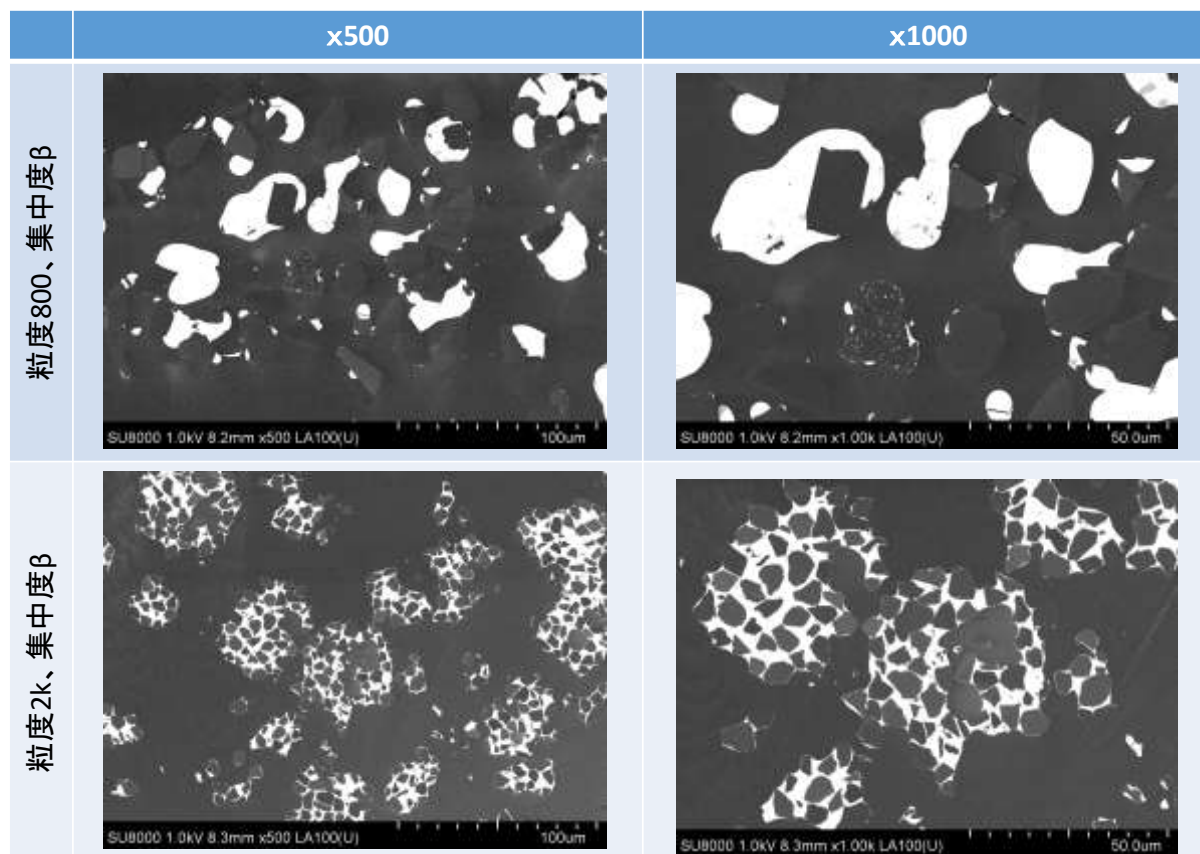


図 8 焼結後の二次粒子の断面構造

金属研削の予備的な研削性能確認試験で、必要な粒径は#2000以下であることがわかったため、番手の小さな砥粒を原料とした造粒技術開発を進めた。造粒条件を検討し直し、#1500の砥粒を原料とした二次粒子の造粒に成功した（図 9）。加えて、造粒技術開発の中で、製造条件を最適化することによって、#2000および#5000砥粒を原料とした造粒物の流動性・形状の向上が得られた（図 9）。これはハイブリッド砥石の品質の安定に寄与する。

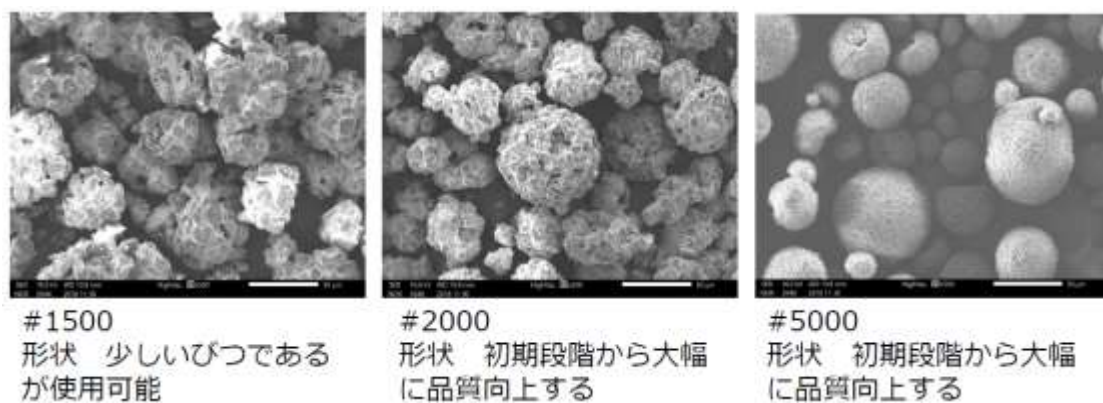


図 9 製造条件の最適化後に造粒した二次粒子の外観

二次粒子の断面構造の観察例を図 10、図 11 に示す。比較的形状の揃った二次粒子内に砥石（黒色）、骨材（グレー）結合剤（白色）が均一に分散していることが確認される。設計に従った二次粒子の造粒が確認された。

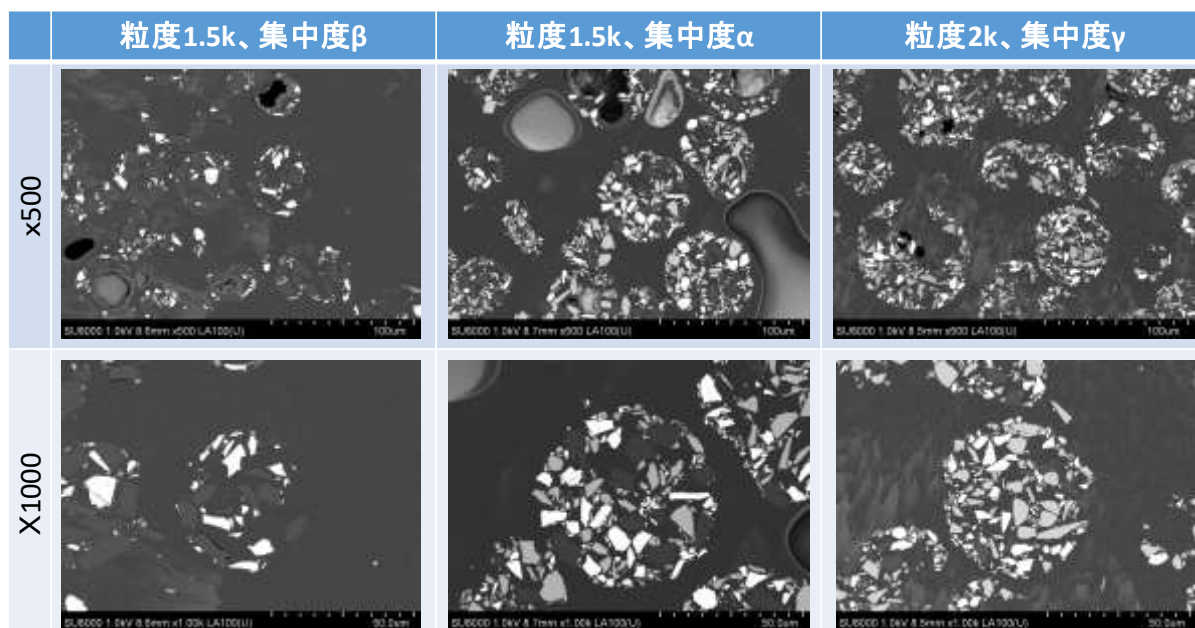


図 10 製造条件の最適化後に造粒した二次粒子の断面構造

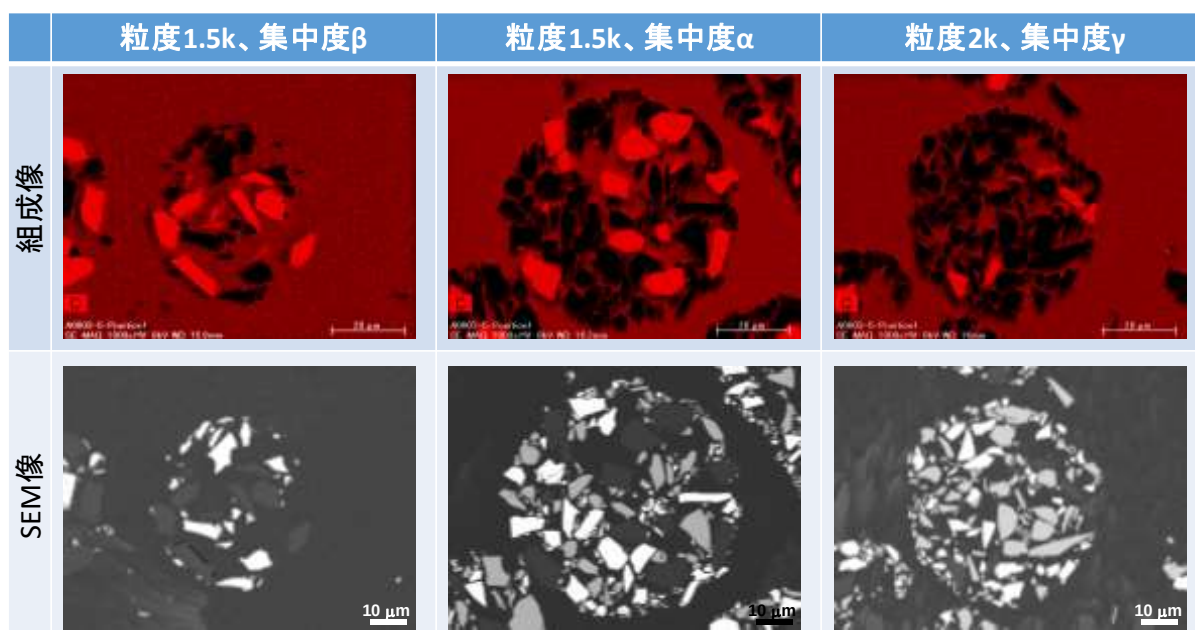


図 11 製造条件の最適化後に造粒した二次粒子断面構造（上：砥粒組成像、下：SEM 像）

二次粒子の強度（生強度）を評価した。微小圧縮試験法（図 12）を用いて#2000、集中度 α で造粒した焼結前後の二次粒子の破壊強度を測定した。二次粒子を分級し、粒径分布を求めた（図 13）。粒径が 53~63 μm のものの重量比率が大きかったのでこのなかから粒形状が球状に近いものを 10 個以上測定し平均値を求めた。焼結前は 0.06MPa、焼成後

は 70MPa であった。造粒した二次粒子が弱いために、ハンドリング中に粒が壊れてしまうので取扱いに注意を要することが分かった。

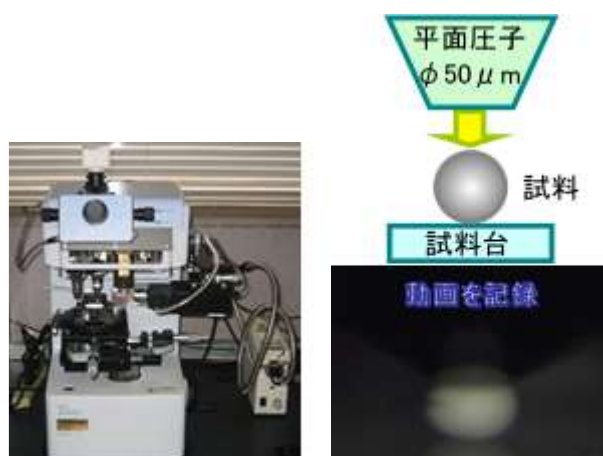


図 12 微小圧縮試験法

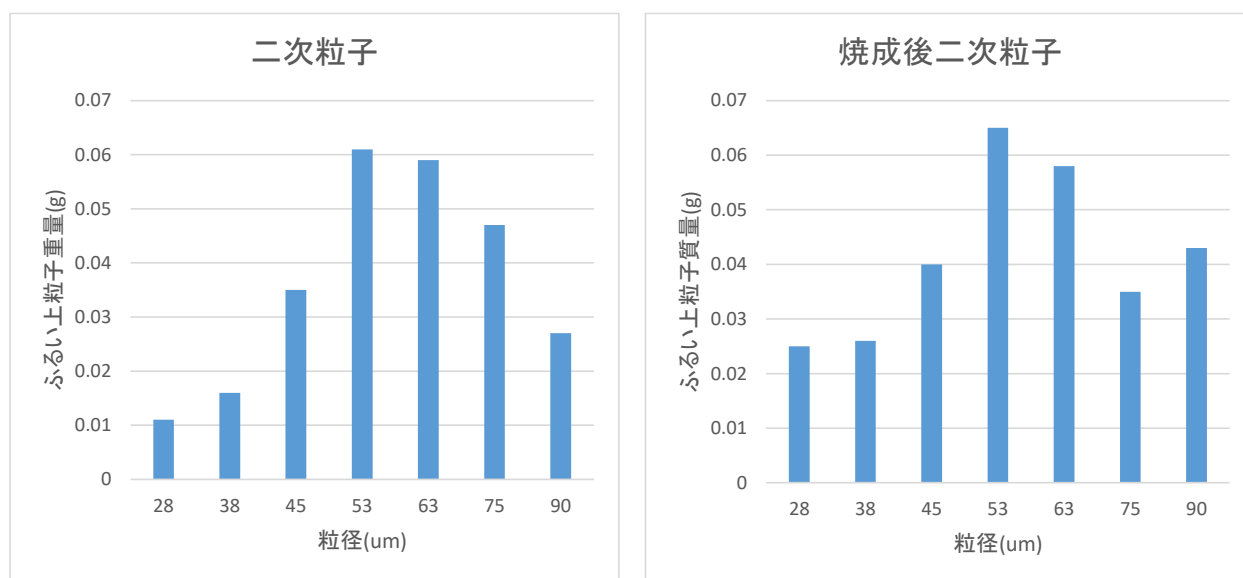


図 13 粒径分布

(1-2) ビトリ二次粒子サイズ制御法開発【2017年度～2019年度実施】(実施機関：株式会社ニートレックス本社)

(実施内容)

切れ刃密度を高くする二次粒子の中心粒径、分散、最大粒径、形状を設計する。解砕・転動・押し出し・噴霧等の粒径制御法の中から適切なものを検討・抽出し、所望の粒度分布となる制御法を開発する。

(目標)

- 二次粒子の粒度分布設計
- 設計粒度分布を再現する二次粒子サイズ制御条件の策定

(成果)

実験室実験から二次粒子の粒度分布を測定したうえで、製造した砥石性能との関連を調べ許容する二次粒子の粒度分布を設計した。また、二次粒子の整粒方法を決定した。

実験室実験として分級後の二次粒子の重量を測定し、造粒二次粒子の粒度分布を得た。砥粒 B#800 を除く二次粒子の粒度分布のピークは $53\text{--}63\ \mu\text{m}$ の粒度範囲にあり、そのピーク粒度は二次粒子造粒直後および焼成後で変化しなかった。

整粒する前の二次粒子は粒度範囲 $53\text{--}63\ \mu\text{m}$ を中心とした正規分布であることを考慮した上で、回収率を高め、コストを抑えるために可能な範囲で広い二次粒子粒度範囲を得ようと $\phi\ \mu\text{m}$ 以上、 $\psi\ \mu\text{m}$ 以下に設定した。粒径 $\phi\ \mu\text{m}$ 以上とすることで、造粒しなかった原料および造粒後破壊した二次粒子を除外できる。また、粒度 $\psi\ \mu\text{m}$ 以下とすることで二次粒子同士が強く付着した粒子を除外できる。サイズ制御した二次粒子を使用して、試作を進め性能確認試験を行った。フィードバック結果から二次粒子粒度範囲 $\phi\ \mu\text{m}$ 以上、 $\psi\ \mu\text{m}$ 以下で問題がないことがわかったため、これに決定した。

さらに、製造工程で二次粒子を分級し二次粒子サイズを得る方法を検討した。二次粒子焼結体の分級の可能性を確認するため、選定した分級器を用いて二次粒子焼結体の分級を試みた。(1-1) で記述した様に焼結前の二次粒子の強度は弱く、焼成前の整粒は避けたいため、整粒は焼結後に行った。

その結果、選定した分級器を用いて $\omega\ \mu\text{m}$ までは分級が可能であった。 $\omega\ \mu\text{m}$ をパスした割合が全体の 35%に達し、残り 65%は $\omega\sim\psi\ \mu\text{m}$ の粒径であった。

(1-3) レジン含浸技術開発【2017年度～2019年度実施】(実施機関：株式会社ニートレックス本社・一般財団法人ファインセラミックスセンター)

(実施内容)

ビトリ二次粒子にレジン樹脂を含浸する技術を開発する。レジン種・粘度・温度・空隙(サイズ・密度)を主パラメータとし適切な条件を見出す。

(目標)

ビトリ二次粒子の脱落を抑制したレジン含浸条件の策定

(成果)

(1-2) で作成した二次粒子焼結体にレジン含浸を行いハイブリッド砥石の作成に成功した。砥粒 A#2000、全砥粒量⑦で作製した二次粒子にレジン含浸してその構造と強度を評価した。

レジン含浸して試作した砥石の構造を走査型電子顕微鏡で断面観察した。試料切断面をイオンミリングした後に観察した。観察例を図 14 に示す。砥粒と骨材が結合剤で保持された二次粒子がレジン結合剤で保持されている様子が観察された。ビトリ二次粒子部分の砥粒・骨材の均一分散、二次粒子の均一分散が確認された。この結果より、砥粒・結合剤・気孔の均一分散した粗目ビトリ砥石製造に成功したことを確認した。これにより、基本となる製造条件が決定した。

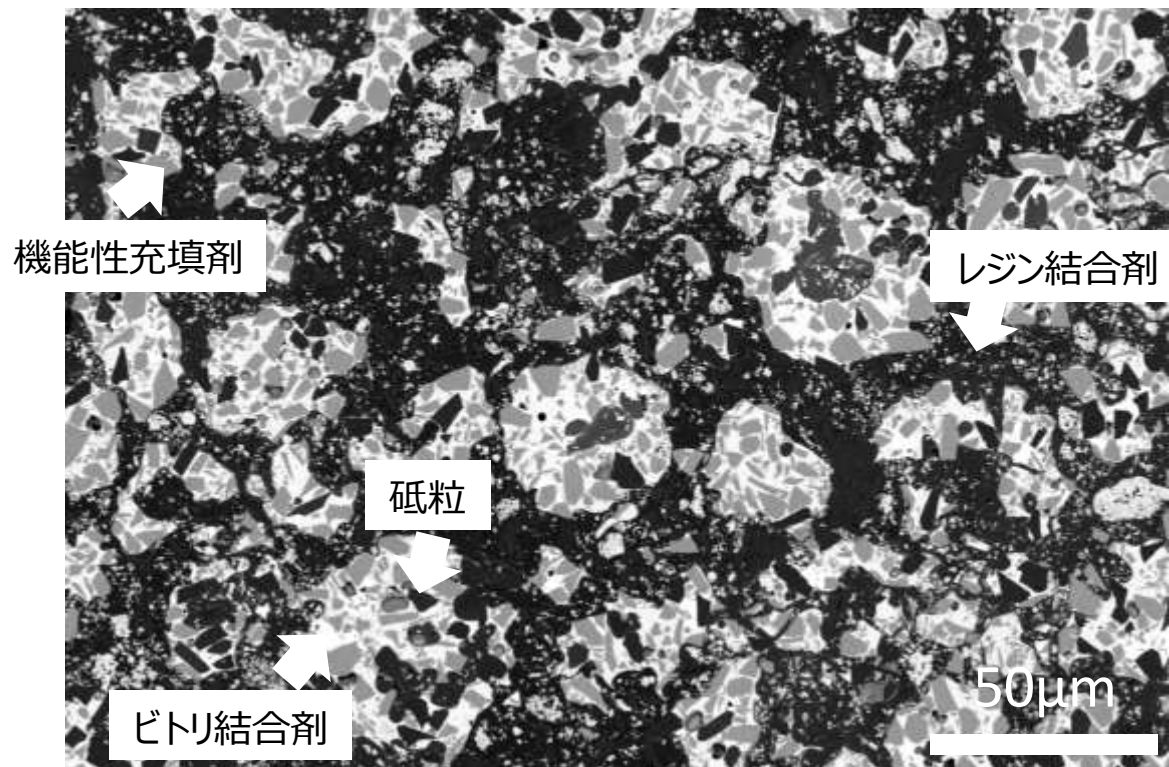


図 14 レジン含浸砥石の断面構造（砥粒 A2000J α HB）

レジン含浸によって製造したハイブリッド砥石の縦弾性係数を評価し、レジン含浸による効果—樹脂変形による切れ刃増加—が可能か否かを検討した。同じ結合度で試作した従来のビトリファイド砥石と、開発ハイブリッド砥石（4種）を比較した。ビトリファイド砥石の縦弾性係数に対し、開発ハイブリッド砥石は約半分で変形しやすくなっていた。すなわち、ハイブリッド化の効果は認められた。

（２）研削性能の実証

（２－１）研削砥石の試作【２０１７年度～２０１９年度実施】（実施機関：株式会社ニートレックス本社）

（実施内容）

項目（１）で開発した要素技術を基に、ハイブリッド砥石を試作する。結合度をパラメータに複数の砥石を試作し、目標（高精度・高加工速度）に適した砥石を抽出する。

（目標）

- ・ 結合度の異なる複数砥石の試作

（成果）

項目【１】で開発した要素技術を基に金属研削用ハイブリッド砥石の試作及び半導体研削用砥石で結合度等をパラメータとした複数砥石の試作を実施した。

2017年度はハイブリッド砥石成形の可能性が確認できたので計画を前倒しし、従来のレジンホイールの配合レシピ、配合方法、焼成条件を用いて砥石を試作した（表1）。

表 1 2017年度に試作した砥石

砥石名	砥粒種	粒度	結合度	集中度
金属研削用－１	A	2000	J	α
金属研削用－２	A	2000	J	β
金属研削用－３	A	5000	N	β
金属研削用－４	B	800	L	β
金属研削用－５	B	2000	N	β
半導体研削用－１	A	30000	F	β
半導体研削用－２	A	30000	G	β
半導体研削用－３	A	30000	H	β
半導体研削用－４	A	2000	J	α

2018年度は砥石の製造条件を検討し、砥石性能を調整した。検討した条件は以下の４項目である。

① ビトリファイト二次粒子を構成する砥粒種類

A、B

② ビトリファイト二次粒子を構成する砥粒の粒度

#1500、#2000、#5000

③ ビトリファイト二次粒子の構成（砥粒と骨材とビトリファイト結合剤の割合）

6 水準

④ ハイブリッド砥石のビトリファイト二次粒子とレジンの比率

2 水準

4つのパラメータの組み合わせは 72 通りになる。砥石の試作と性能確認試験を平行して実施し、結果の見込みのない組み合わせを除くことによって、表 2 に示した 12 種類の試作砥石に絞込み、開発の効率を高めた。また、平成 30 年度の研削性能は金属研削を中心に検討した。重要なパラメータとしてレジンボンドの種類があるが、期間内に可能な性能確認試験の回数に限界があるため、1 種類に固定した。株式会社ニートレックス本社の所有するレジンボンドから選択するにあたって、研削方式から選ぶのと、求められる表面粗さから選ぶのとでは異なる種類になるが、今回は表面粗さを優先したものを選定した。

砥石断面構造の観察は（1－3）で実施したが、本節に記載した方が研究内容の説明が容易なため以下に記載する。図 15 に示す様に試作した砥石の断面構造を観察し、設計と構造の整合性を確認した。砥石 A-1 と A-2 では設計上、二次粒子に含まれる砥粒量のみが異なり、レジンに対する二次粒子比率は共通する。二次粒子やレジン結合剤の分布に差異は見られないが、二次粒子内部に含まれる砥粒量が A-1 では少なく A-2 では多くなっており、設計を反映した構造となっていることが確認された。

表 2 2018年度に試作した砥石

砥石名	砥粒種	粒度	結合度	集中度	レジンに対する 二次粒子比率
A-1	A	1500	J	α	㊦
A-2	A	1500	J	β	㊦
B-1	A	2000	L	γ	㊦
B-2	A	2000	J	α	㊦
B-3	A	2000	J	β	㊦
C-1	B	2000	L	α	㊦
C-2	B	2000	O	β	㊦
C-3	B	2000	L	β	㊦
D-1	B	5000	M	β	㊦
E-1	A	1500	J	β	㊦
E-2	A	2000	J	β	㊦
E-3	B	2000	O	β	㊦

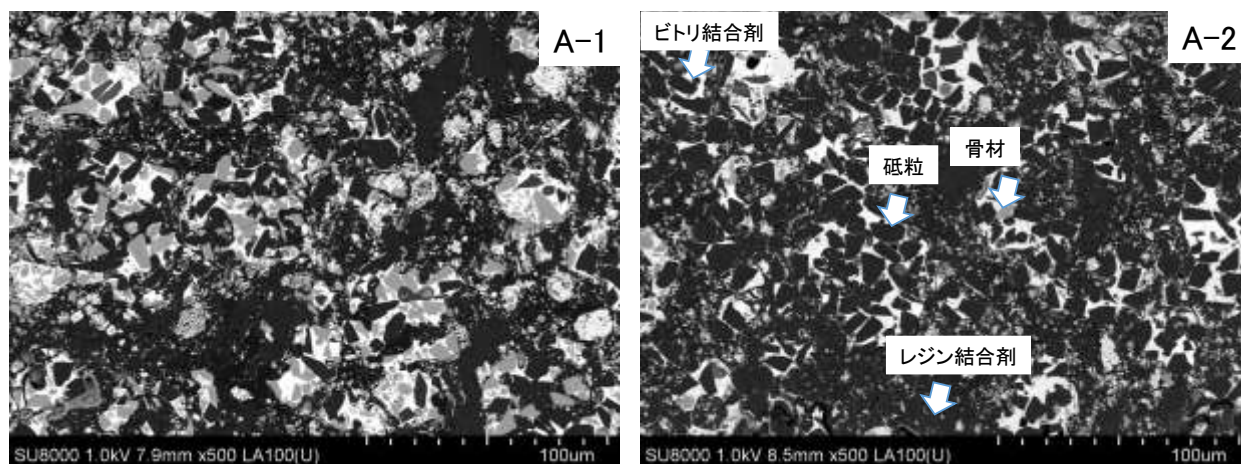


図 15 砥石断面構造（左：A-1、右：A-2）

また、表 2 に加えて、二次粒子を共通にして、レジンに対する二次粒子比率を 3 段階に変化させた砥石の試作も行った。砥石の断面構造を図 16 に示す。各断面写真の右上の数字が大きい程、レジンに対する二次粒子比率様が大きい。二次粒子間の隙間（レジン結合剤の幅）が、数字が大きくなると共に小さくなっており、レジン結合剤の減少とともに、二次粒子間が狭くなる様子が確認された。従って、レジンに対する二次粒子比率に関しても設計を反映した構造となっていることを確認した。

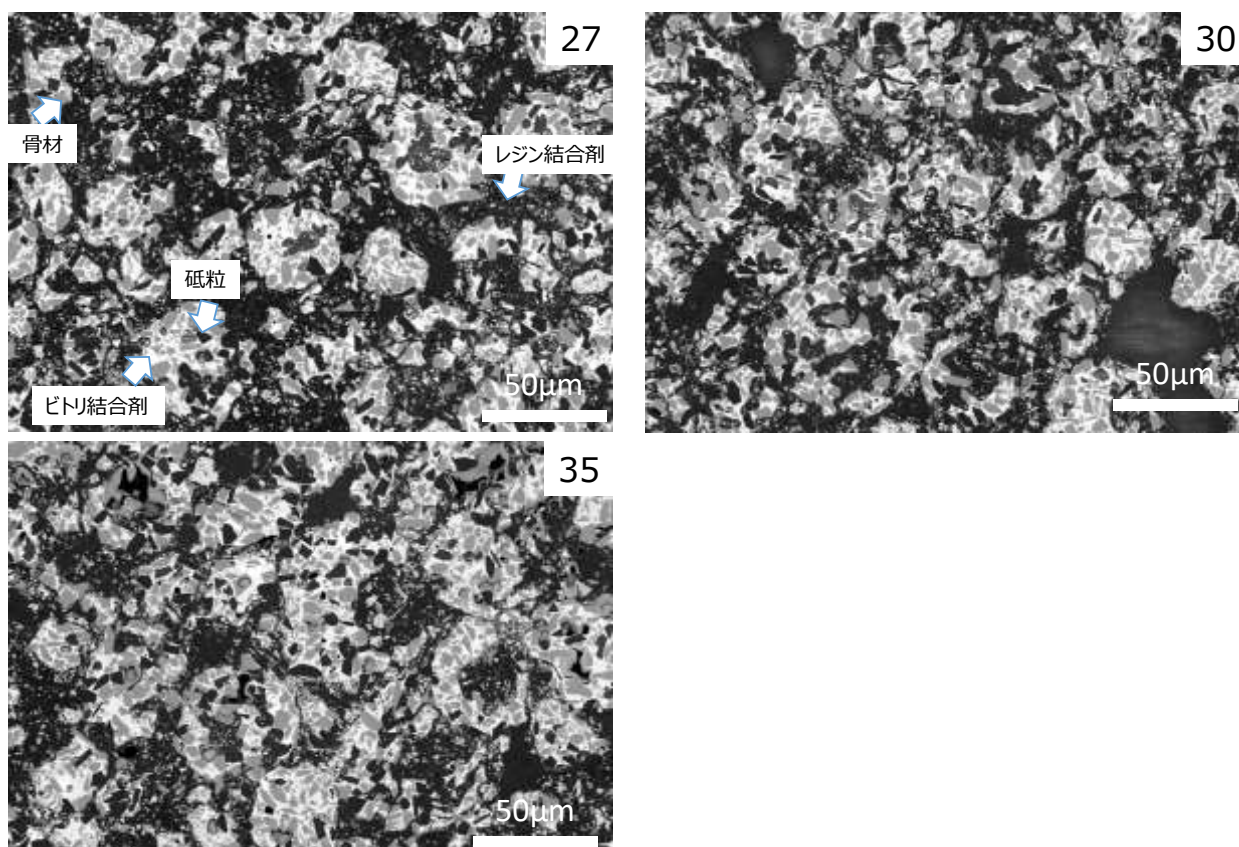


図 16 砥石断面構造（二次粒子は B-1 と共通でレジンに対する二次粒子比率を変化）

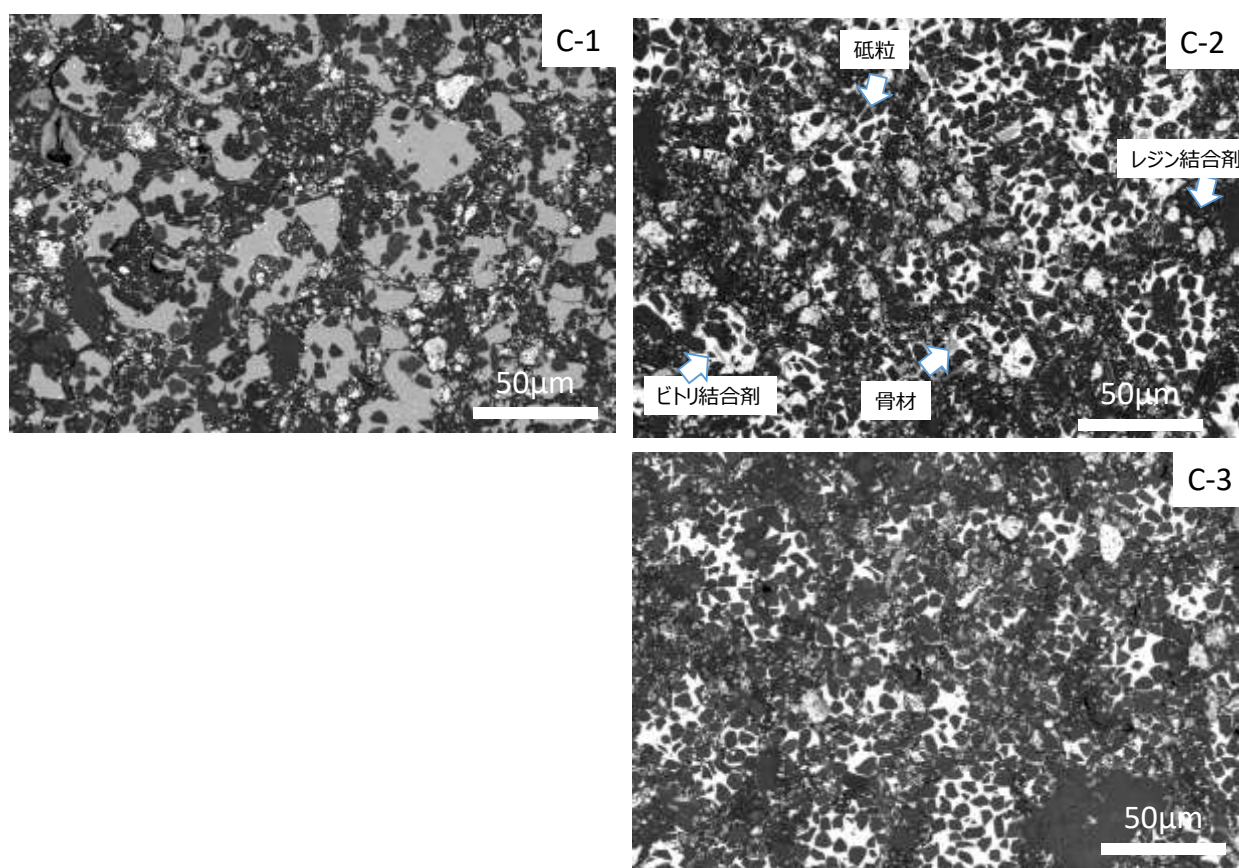


図 17 砥石断面構造（左上：C-1、右上：C-2、左下：C-3）

同様に砥粒 B を原料とした砥石 C-1、C-2、C-3 の断面構造を比較した。C-1 は C-2 および C-3 に比べ二次粒子内の砥粒量を小さく設計した。図 17 に示す様に C-1 の二次粒子内部の砥粒量は少ないが C-2 および C-3 の砥粒量が多い。また、C-2 と C-3 では二次粒子内の砥粒量は共通にしたが、レジンに対する二次粒子の割合が C-3 の方が大きく設計した。実際の構造を比較すると C-2 と C-3 で二次粒子内部の砥粒量に差はないが、二次粒子間の隙間（レジン結合剤の幅）は C-2 の方が大きく、砥粒 B でも設計を反映した構造となっていることを確認した。

2019 年度は 2018 年度に絞りこんだ砥石 E-1 を基準に金属加工用ハイブリッド砥石をアドバイザー（ユーザー）で実機にてテストをするために、ユーザーの研削盤に適した試作品を 1 種類製作した（表 3）。また、SiC 加工用ハイブリッド砥石がどのような性能を発揮するかを広い範囲で検証するため、7 種類の異なった内容・1 種類の形状寸法の試作砥石を製作した（表 4）。

表 3 2019 年度に試作した金属加工用ハイブリッド砥石

形状・寸法	形状 3A1R 寸法 355D × 30T × 127H × 18U × 3X
内容	ビトリファイド砥粒 砥粒 A1500J β 結合度 N 集中度 a

表 4 2019 年度に試作した SiC 加工用ハイブリッド砥石

形状・寸法	形状 6A2T 寸法 200D × 22.5T × 158H × 3W × 5X
No.1	ビトリファイド砥粒 砥粒 A30000G β 結合度 N 集中度 b
No.2	ビトリファイド砥粒 砥粒 A2000J β 結合度 N 集中度 c
No.3	ビトリファイド砥粒 砥粒 A 2000J β 結合度 N 集中度 b
No.4	ビトリファイド砥粒 砥粒 A 2000J β 結合度 N 集中度 d
No.5	ビトリファイド砥粒 砥粒 A 2000J α 結合度 N 集中度 e
No.6	ビトリファイド砥粒 砥粒 A 2000J α 結合度 N 集中度 f
No.7	ビトリファイド砥粒 砥粒 A 2000J α 結合度 N 集中度 g

（２－２）金属研削の検討【２０１７年度～２０１９年度実施】（実施機関：株式会社ニートレックス本社・一般財団法人ファインセラミックスセンター）

（実施内容）

プランジャーの素材である合金工具鋼を実際に研削し、高精度かつ高加工速度で研削する条件を見出す。切れ込み速度・回転数。荷重・送り速度・スパークアウト等を検討パラメータとする。研削面の品質（粗さ・真円度・円筒度・硬度劣化）を評価し、項目（１）（２－１）へフィードバックする。

（目標）

- ・合金工具鋼研削 研削速度 $>2.8\text{mm}^2/\text{min}$ (単位長さあたり)
 $R_z < 0.2\mu\text{m}$ 真円度 $< 0.25\mu\text{m}$ 円筒度 $< 0.25\mu\text{m}$
 硬度劣化なきこと

（成果）

SKD11 および HAP 材の両方の円筒研削で研削速度 $4\text{mm}^2/\text{min}$ 、 $R_z < 0.2\mu\text{m}$ 、硬度劣化なきことを達成し、目標をクリアした。SKD11 の円筒研削で真円度 $< 0.21\mu\text{m}$ を達成し目標をクリアしたが、円筒度は $0.4\mu\text{m}$ のため課題として残った。新たにツルueイングの容易化が課題として生じた。

a) 平面研削による性能試験

性能確認試験を実施するにあたって、試作ホイールのコストを少なくし、研削試験に要する時間の軽減し、効率よく開発を進めるため、（２－１）で試作したハイブリッド砥石を用いて平面研削で研削試験を行い、砥石を絞り込んだ上で円筒研削試験を実施した。まず、試作砥石を正確に評価するために、合金工具鋼（SKD11）に適している研削液の検討、ドレッシング条件、加工条件の検討を実施した。加工条件は加工速度 $2.0\text{mm}^2/\text{min}$ となるように、ホイール速度 28.3m/s 、テーブル速度 $5\text{mm}/\text{min}$ 、切込 $0.4\mu\text{m}$ とした。ドレッシング直後は砥石表面が実研削になじんでいないため、累積加工量 30mm^2 で加工速度が $2.0\text{mm}^2/\text{min}$ になるように切込を $0.1\mu\text{m}/\text{pass}$ から段階的に上げた。図 18 に表面粗さ R_z の累積加工量依存性を示す。累積加工量が増えても表面粗さ R_z が増加しないもの、表面粗さ R_z が小さいものを研削性能が高いと判断する。研削初期の表面粗さは二次粒子の構成砥粒が砥粒 A の方が、砥粒 B に比べ小さい傾向があった。二次粒子の構成砥粒である砥粒 A の粒度は #2000 と #1500 では #1500 の表面粗さが小さくなる傾向があった。二次

粒子の構成は砥粒率が高いもの、レジンに対する二次粒子比率は二次粒子比率も高いものの表面粗さが小さくなる傾向があった。

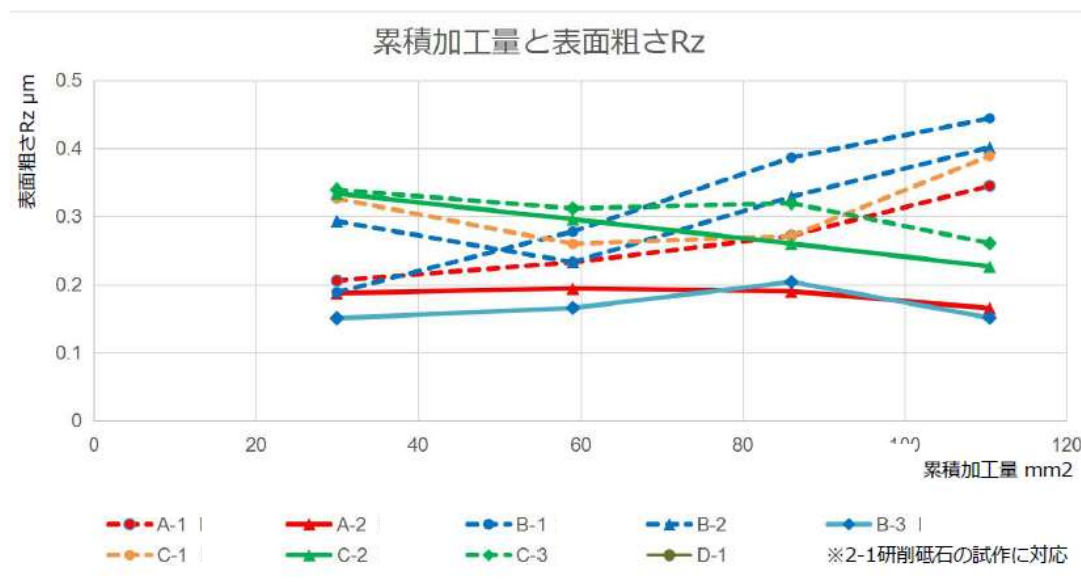


図 18 表面粗さ Rz の累積加工量依存性（平面研削試験）

b) 円筒研削による性能試験

A-2（二次粒子の構成砥粒 A、二次粒子の粒度#1500、二次粒子の構成 Jβ、レジンに対する二次粒子比率 ④VOL%）B-3（二次粒子の構成砥粒 A、二次粒子の粒度#1500、二次粒子の構成 Jβ、レジンに対する二次粒子比率 ②VOL%）C-2（二次粒子の構成砥粒 B、二次粒子の粒度#2000、二次粒子の構成 Oβ、レジンに対する二次粒子比率 ④VOL%）が有望であったため、この 3 点を基に円筒研削用の E-1～E-3 の砥石を試作して円筒研削試験を実施した。E-1 は A-2、E-2 は B-3、E-3 は C-2 に対応する。円筒研削時は平面研削より集中度を下げると研削性能が高くなる傾向があるため E-2 は B-3 より集中度を下げた。E-1、E-3 は平面研削時と同仕様である。

円筒研削試験では平面研削のドレッシング条件を円筒用に適用したものを予備加工で調整して決めた。ドレッシングには、ニートレックス製CDD-R4 ドレッサを使用した。加工条件は加工速度 3.0mm²/min 及び 4.1mm²/min、ホイール速度 28.3m プランジ研削とした。加工量は一般的に想定されるワークの取代を十分に越える量（一回のドレッシングで研削できる加工量）を確保した。

図 19 に示すように、E-1（二次粒子の構成砥粒 A、二次粒子の粒度#1500、二次粒子の構成 J β、レジンに対する二次粒子比率④VOL%）は加工速度 3.0mm²/min で平成 30 年度の目標 Rz 0.2 μm 以下を達成した。さらに加工速度 4.1mm²/min にした加工でも累積加工量 10mm² の一点を除き Rz 0.2μm 以下を維持した。E-1 のハイブリッド砥石を用いてアドバイザーにおける評価（実際の現場での加工データの確認）を実施することを決定した。

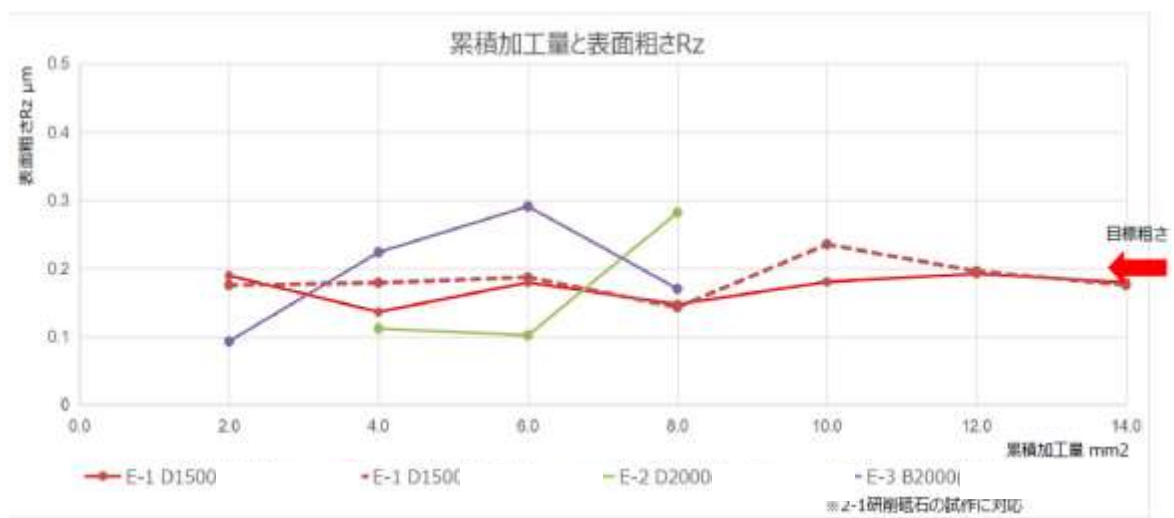


図 19 表面粗さ Rz の累積加工量依存性（円筒研削試験）

c) ユーザーでの金属円筒研削による性能検証

円筒研削には、図 20 に示す様にプランジ研削とトラバース研削がある。プランジ加工で高速に研削した後にトラバース研削で形状を整えることが一般的であるため、プランジ研削で加工能率・硬度劣化、トラバース研削で円筒度・真円度を評価した。

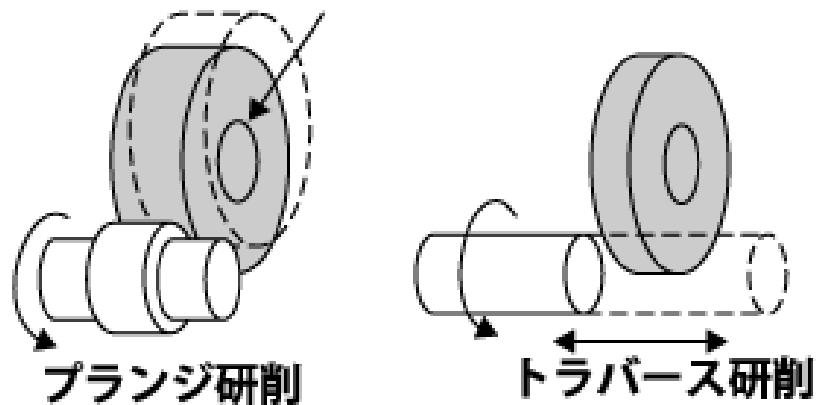


図 20 円筒研削の種類

ユーザーかつアドバイザーである A 社の協力で、実機によるハイブリッド砥石の性能の検証を円筒研削プランジ加工で実施した（表 5）。円筒研削プランジ加工の時の研削性能の確認内容は加工能率、表面粗さ、ワーク材質の硬度劣化とし、円筒度と真円度は参考値として値を測定した。

表 5 検証条件

研削方式 円筒研削（プランジ加工）
試作ハイブリッド砥石 （ビトリファイド砥粒 砥粒 A1500Jβ）Na 3A1R 355D x 30T x 127H x 18U x 3X

ワーク HAP 材 径 9mm
ドレッシング条件
・ツルアー機械：フレデリート(弊社製品)
・ツルアー砥石：CDD ドレッサー(弊社製品 SD 400 N 125 CR 100D x 10T x 10H x 2U x 5X)
加工条件
・ホイール回転数：1630min ⁻¹
・ワーク回転数：187min ⁻¹

表 6 研削加工能力の時間依存性

加工能率 mm ² /min	累積加工量 径 μm	Rz μm	円筒度 μm	真円度 1 μm	真円度 2 μm	真円度 3 μm	真円度 4 μm
手動	100	0.17	1.78	0.39	0.36	0.69	1.06
1.4	100	0.18	1.60	-	-	-	-
2.8	200	0.16	-	-	-	-	-
2.8	400	0.16	-	-	-	-	-
2.8	600	0.18	-	-	-	-	-
2.8	800	0.18	-	-	-	-	-
4.1	300	0.18	-	-	-	-	-
4.1	600	0.18	-	-	-	-	-
4.1	900	0.17	-	-	-	-	-
4.1	1200	0.24	-	-	-	-	-
4.0	1500	0.15	-	-	-	-	-
4.0	1800	-	-	-	-	-	-
4.0	2100	0.17	-	-	-	-	-
4.0	2400	0.19	-	-	-	-	-
3.9	2700	0.19	-	-	-	-	-
3.9	3000	0.21	-	-	-	-	-
3.9	3300	0.18	-	-	-	-	-
3.9	3600	0.20	-	-	-	-	-
3.7	3900	0.24	-	-	-	-	-
3.7	4200	0.23	-	-	-	-	-
3.7	4500	0.27	-	-	-	-	-
3.7	4800	0.21	3.21	3.08	0.89	1.01	0.75

*上段から順に時系列のデータで、最初は様子を見るために、加工能率は手動で操作し、そして徐々に上げていったものである。

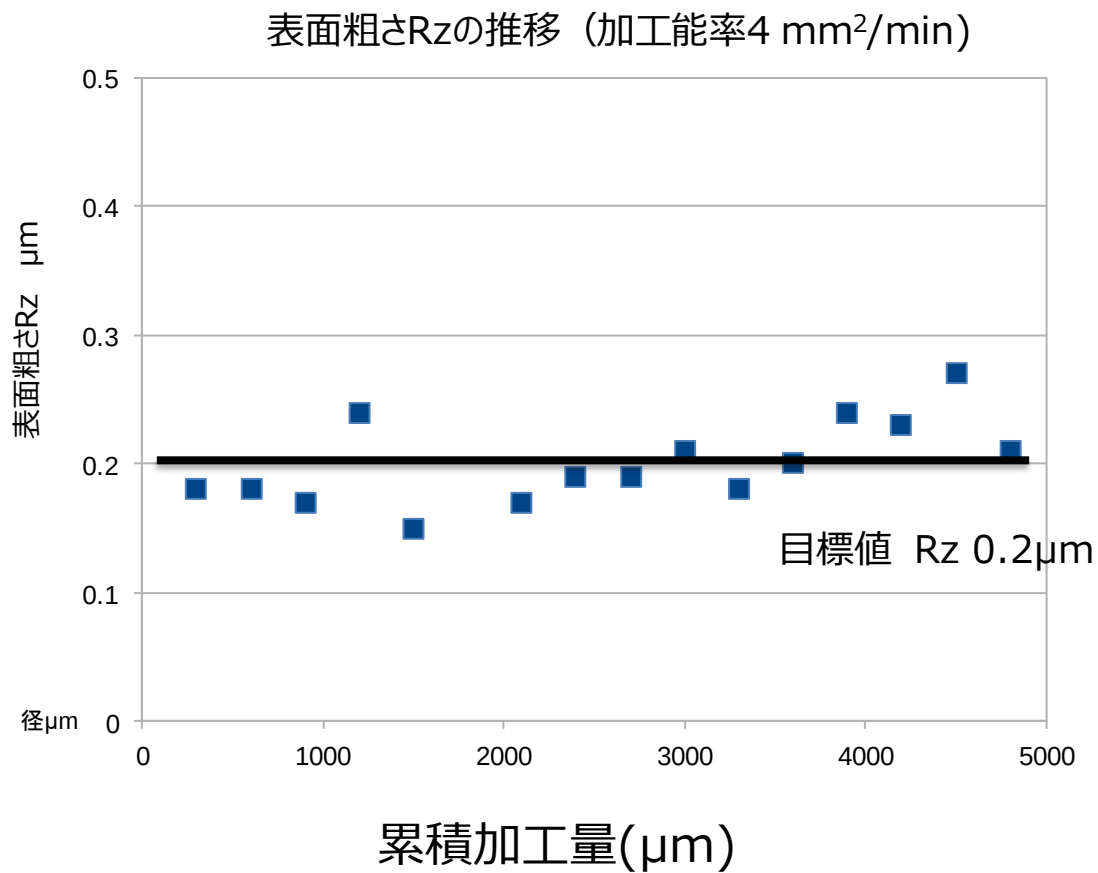


図 21 表面粗さ Rz の累積加工量依存性 （加工能率 4mm²/min）



図 22 加工前後のワーク表面状態

図 21 は加工能率 $4\text{mm}^2/\text{min}$ での、累積加工量に対する表面粗さ R_z である。図 21 が示す通り、目標の $2.8\text{mm}^2/\text{min}$ 以上の加工能率で安定して研削が継続し、 R_z 値は目標の $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 付近で安定しており、研削速度・表面粗さともに目標値を達成した。また、図 22 より、加工前後の表面には変色がなく（焼けの様子がなく）、研削によるワークの硬度劣化はないと判断できた。ダブルチェックとして加工前後の表面硬さ（表面から $1\text{ }\mu\text{m}$ 深さまで）をナノインデンテーションで測定比較した（図 23）。誤差の範囲内で硬さは一致し、目標は達成した。

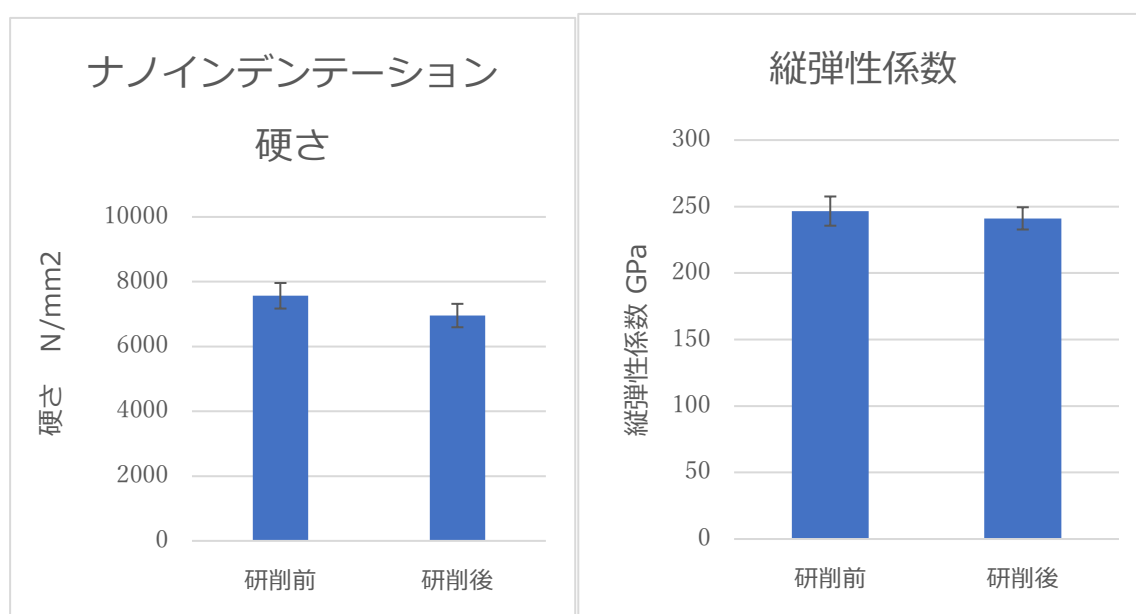


図 23 研削前後の表面～ $1\text{ }\mu\text{m}$ 深さの硬さの比較（ナノインデンテーション法）

表 6 より円筒度は、初品 $1.78\text{ }\mu\text{m}$ のものが終品 $3.21\text{ }\mu\text{m}$ になった。真円度も初品 $0.36\sim 1.06\text{ }\mu\text{m}$ のものが、終品 $0.75\sim 3.08\text{ }\mu\text{m}$ になった。円筒度と真円度については、円筒研削プランジ加工の条件下では未達成であった。前述の様に、プランジ加工では良い円筒度と真円度を得にくいのでトラバース加工で研削性能を検証する。

さらに、図 24 に示す様に、加工終品のワークには 9 か所の花びら形状が見られた。円筒研削で形状が花びらのようになるのは、砥石回転とワーク回転の同期によることが多い。今回の研削条件では砥石回転数 1630 とワーク回転数 187 の比は $8.7:1$ とし、同期を避けたつもりであったが、回転誤差が $2\sim 3\%$ と仮定すると比が $9:1$ となる可能性は十分ある。その時の同期によって、9 個の花びら形状が形成されたと考える。そのため、砥石回転数とワーク回転数の比を変えて、調整することで対応可能である。

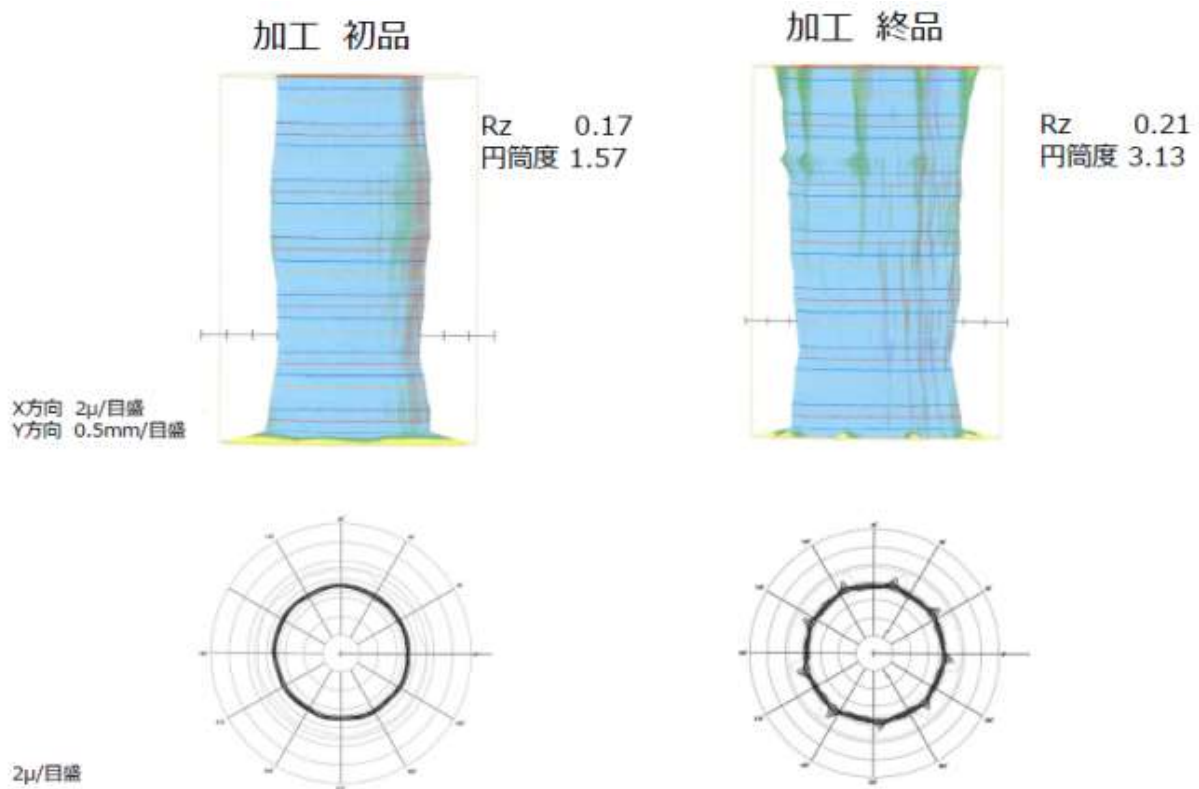


図 24 加工初品と終品の円筒度と真円度の可視化図

d) 金属円筒研削による性能検証

円筒度と真円度の評価をするため、円筒研削トラバース加工で社内テストを実施した（表 7）。また、研削方式による違いをみるため、円筒研削プランジ加工も実施した。

表 7 検討条件

研削方式 円筒研削（トラバース加工およびプランジ加工）
試作ハイブリッド砥石 （ビトリファイド砥粒 砥粒 A1500Jβ）Na 3A1R 355D x 30T x 127H x 18U x 3X
ワーク SKD 材 径 24mm
○トラバース加工
ホイール回転数：1800min ⁻¹
ワーク回転数：77min ⁻¹
単位切込：径 2μm/pass 切込量：径 100μm
送り速度：180mm/min
スパークアウト：4pass
○プランジ加工
ホイール回転数：1800min ⁻¹
ワーク回転数：77min ⁻¹
切込速度：粗加工 径 40μm/min 切込量：径 280μm
切込速度：仕加工 径 20μm/min 切込量：径 20μm
スパークアウト 6 回転

表 8 加工結果

加工方式	円筒度	真円度 1	真円度 2	真円度 3
トラバース	0.40	0.21	0.21	0.23
プランジ	1.02	0.27	0.41	0.22

表 8 より、トラバース加工をすることで真円度 $0.21 \sim 0.23 \mu\text{m}$ を得られ目標 $0.25 \mu\text{m}$ 以下となり達成した。

円筒度はプランジ加工の半分以下の $0.40 \mu\text{m}$ ではあるが、 $0.25 \mu\text{m}$ 以下の目標には未達成である。しかし、円筒度は、軸方向の真直度が重要であるため、砥石性能だけではなく砥石とワークの平行度が重要なパラメータとなる。研削盤に取り付けられているハイブリッド砥石と加工ワークの軸の平行度を調整することによって目標値を達成できると考えられ、今後の課題とする。

e) 課題（ツルーイング・ドレッシング）

金属加工用ハイブリッド砥石をアドバイザー（ユーザー）で実機にてテストを実施した際に新たに課題が表面化した。

一般的に、出荷した新品のハイブリッド砥石を研削盤にセットしたときは、ホイールには $5 \sim 15 \mu\text{m}$ の振れがある。場合によっては、振れ $30 \mu\text{m}$ になる時もある。これはホイールの穴径公差、ユーザーのフランジ公差、ユーザーの機械軸径公差などに起因する。

加工前には機上で $0 \sim 1 \mu\text{m}$ の振れまで砥石を成形すること（ツルーイング作業）が必要である。さらに、ツルーイング後、ホイール表面が研削に適した状態にすること（ドレッシング作業）が必要である。

今回の実機でのテストでは、テスト加工を開始する前の準備作業に時間がかかった。社内のテストではロータリーツールアーと CDD ドレッサー（社内製品）を使用したため、短時間でできたが、ロータリーツールアーという装置がない研削盤の方が多数なため、広く多数のユーザーへの拡販にはこれに代わる方法が必要である。

また、ユーザーの使い方によっては、何らかの理由で、ホイールを一旦取り外し、再度取り付けることもある。このときも、ホイールは $2 \sim 5 \mu\text{m}$ の振れが出る。これを、再度、短時間にツルーイング・ドレッシングを行う必要がある。

つまり、ツルーイング・ドレッシングを短時間かつ容易に行うノウハウを提供することが、

非常に重要になる。現状のように、数時間を要しては、ユーザーにはテストして頂けないと考えるが、実際にユーザーがどの程度の時間の許容していただけるかも課題になる。

ツルueイングとドレッシングにかかる時間短縮の方法の検討を行った。まず、可能性の大枠をつかむため、次の 4 つのツルueイング方法を検討した。(No1) 軟鋼研削によるツルueイング (No2) 一般砥石によるツルueイング (No3) セラダイヤホイール (株式会社ニートレックス製品) によるツルueイング (No4) フレデリート (株式会社ニートレックス製品) と CDD ドレッサーの組合せ (株式会社ニートレックス製品) である。

(No.1) はハイブリッド砥石表面に、軟鋼の溶着が生じやすく、高精度の研削が目的の加工であるため、溶着は表面粗さに大きな影響を与えると判断し不可とした。(No4) は今回のアドバイザー (ユーザー) で実施した方法であり不可であった。

(No.2) 一般砥石によるツルueイングでは一般砥石をハイブリッド砥石で加工することでハイブリッド砥石を成形するテストを実施した (表 9)。

表 9 検討条件

条件	結果
ホイール：ハイブリッド砥石 試作品	ホイールの摩耗：0.015mm
ワーク：C 80 L V 205D x 18T x 50.8H	研削比：14
	加工に要した時間：約 45 分 (実時間 29 分)
	時間当たりのツルueイング量：約 0.5 μ /min
加工条件：トラバース加工	
ホイール回転数：1800 min ⁻¹	
ワーク回転数：94 min ⁻¹	
単位切込量：5 μ m	
トラバース速度：100 mm/min	
縦切込量：約 0.4 mm	

(No3) セラダイヤホイール (株式会社ニートレックス製品) によるツルueイングではダイヤモンドホイールをハイブリッド砥石で加工することでハイブリッド砥石を成形するテストを実施した (表 10)。

表 10 検討条件

条件 ホイール：ハイブリッド砥石 試作品 ワーク：SD 100 N CR 180D x 10T x 50.8H x 5U x 3X 加工条件：トラバース加工 ホイール回転数：1800 min⁻¹ ワーク回転数：94 min⁻¹ 単位切込量：2 μm トラバース速度：20 mm/min 総切込量：約 0.1 mm	結果 ホイールの摩耗：0.035mm 研削比：0.16 加工に要した時間：約 80 分（実時間 58 分） 時間当たりのツルueイング量：約 0.6 μ/min
---	---

（No2）一般砥石によるツルueイングと（No3）とセラダイヤホイール（株式会社ニートレックス製品）によるツルueイングはともに、加工可能なレベルでの高能率条件で行った。結果はワークの消耗度合ではセラダイヤに優位性があるが、単位時間当たりのハイブリッド砥石のツルueイング量はほぼ同じであった。ワークである C 砥石とダイヤモンドホイールのコストと単位時間当たりのハイブリッド砥石のツルueイング量と加工条件の設定のしやすさから検討した場合、この 2 点の試験では優位性の判定はできないと考える。しかしながら、ツルueイング・ドレッシングを短時間かつ容易に行う方法として非常に効果的な方法である目途はついた。今後この 2 つの方法を基軸として、切込量、加工時間、加工回数等をパラメータとし負荷の急激な増大を抑えながら、ハイブリッド砥石をツルueイングする条件を検討する。

（２－３）半導体研削の検討【２０１７年度～２０１９年度実施】（実施機関：株式会社ニートレックス本社・一般財団法人ファインセラミックスセンター）

（実施内容）

SiCウエハの裏面を研削し、加工速度が高く深い傷の入りにくい条件を見出す。切れ込み速度・回転数・荷重・送り速度・スパークアウト等を検討パラメータとする。劈開面を有し脆性材料であるSiCを350→100 μ mまで薄化するため表面粗さの抑制が重要な課題となる。

（目標）

- ・半導体研削 30 μ m/min (6" Φ 4H-SiC)
 Ra <0.04 μ m
 砥石摩耗率 10%
 加工負荷によってSiCが割れないこと

（成果）

（２－１）で試作した砥石表４の７種類についてSiCウエハのバックグライディング加工を想定して、研削性能を検証した。その結果、開発したハイブリッド砥石はSiCの研削に適さないことが分かった。

a) 砥石回転数の検討

本研究開発で導入した難削材対応研削装置での加工において、ハイブリッド砥石の回転数は研削条件の大きな要因である。この砥石回転数の適正値をさぐるため、表４のNo3のハイブリッド砥石バックグライディング粗研削用を使用して試験を行った(表１１)。

表 11 検討条件

研削条件
砥石： No3 (砥粒 A2000J β) N b 6A2T 200D x 22.5T x 158H x 3W x 5X
ドレッシング： WA800 ホイール回転 1000 rev ⁻¹ テーブル回転 101 rev ⁻¹ 切込み 1 μ m/sec
ワーク： SiC 4 インチ
砥石回転数： 3 水準 (1000・1500・2000min ⁻¹)
テーブル回転： 301 min ⁻¹ 切込速度 48 μ m/min

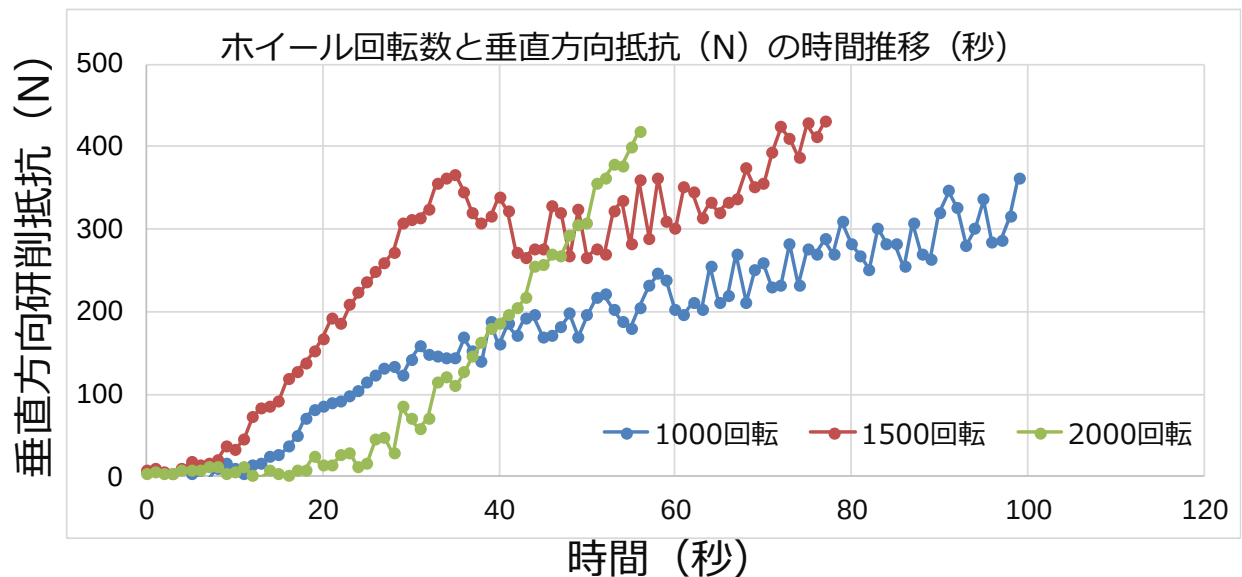


図 25 ホイール回転数と垂直方向研削抵抗の時間推移

図 25 は縦軸が垂直方向の研削抵抗 (N)、横軸が時間 (秒) で、加工負荷の時間推移を表す。3 本の折れ線は砥石の回転数を 1000、1500、2000 min^{-1} と変えたもので、回転数 1000 min^{-1} が最も加工負荷が抑えられた。砥石回転数は 1000 min^{-1} は難削材対応研削装置で設定できる最小値である。砥石回転数は設定可能な最小回転数をもっとも良いことが分かった。しかし、SiC 加工の目標である「加工負荷によって SiC が割れないこと」つまり、垂直負荷荷重が 100~200N で、負荷荷重が上昇しないという条件に関しては未達成であった。

b) ビトリファイド砥粒量・砥粒 A 量の検討

次に、ハイブリッド砥石の重要な要素である砥粒 A 量の研削性能への影響を調べた (表 12)。

使用した砥石は表 4 の No2、No3、No4 である。

表 12 検討条件

	ビトリ砥粒種類	ビトリ砥粒量 Vol%	砥粒量（集中度）	レジシン結合剤種類
No.2	砥粒 A2000J β	㊦	c	N
No.3	砥粒 A 2000J β	㊧	b	N
No.4	砥粒 A 2000J β	㊨	d	N
砥石寸法： 6A2T 200D x 22.5T x 158H x 3W x 5X				
ドレッシング： WA800 ホイール回転 1000 rev ⁻¹ テーブル回転 101 rev ⁻¹ 切込み 1 μ m/sec				
ワーク： SiC 4 インチ				
砥石回転数： 1000min ⁻¹				
テーブル回転： 301 min ⁻¹ 切込速度 48 μ m/min				

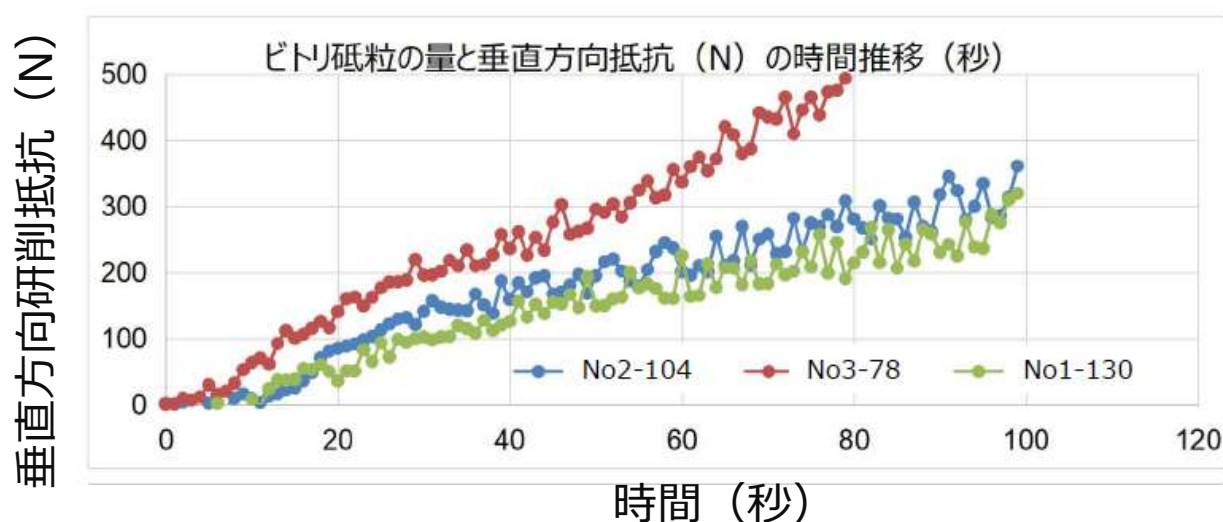


図 26 ビトリ砥粒量と垂直方向研削抵抗の時間推移

図 26 は縦軸が垂直方向の研削抵抗（N）、横軸が時間（秒）で、加工負荷の時間推移を表す。3 本の折れ線は同一組成のビトリ砥粒の量を変えることで砥粒 A 量（集中度）を b、c、dとしたもので、集中度 c が最も加工負荷が抑えられた。

砥粒量 c は、ハイブリッド砥石に対して配合できる砥粒 A 量の最大値である。

使用したビトリ砥粒（砥粒 A2000J β ）を最も多く配合したハイブリッド砥石（集中度 c）が最も加工負荷を抑えることができる。しかし、垂直負荷荷重が 100~200N で、負荷荷重が上昇しないという条件に関して未達成であった。

さらに、ハイブリッド砥石の重要な要素であるビトリ砥粒（砥粒 A2000J β ）に含まれる砥粒 A 量を半減させたビトリ砥粒（砥粒 A2000J α ）を使用したハイブリッド砥石を使って、同様の試験を行った(表 13)。

使用した砥石は表 4 の No.5、No.6、No.7 である。

表 13 検討条件

	ビトリ砥粒種類	ビトリ砥粒量 Vol%	砥粒量（集中度）	レジン結合剤種類
No.5	砥粒 A2000J α	㊦	e	N
No.6	砥粒 A2000J α	㊦	f	N
No.7	砥粒 A2000J α	㊦	g	N
砥石寸法： 6A2T 200D x 22.5T x 158H x 3W x 5X				
ドレッシング： WA800 ホイール回転 1000 rev ⁻¹ テーブル回転 101 rev ⁻¹ 切込み 1 μ m/sec				
ワーク： SiC 4 インチ				
砥石回転数： 1000min ⁻¹				
テーブル回転： 301 min ⁻¹ 切込速度 48 μ m/min				

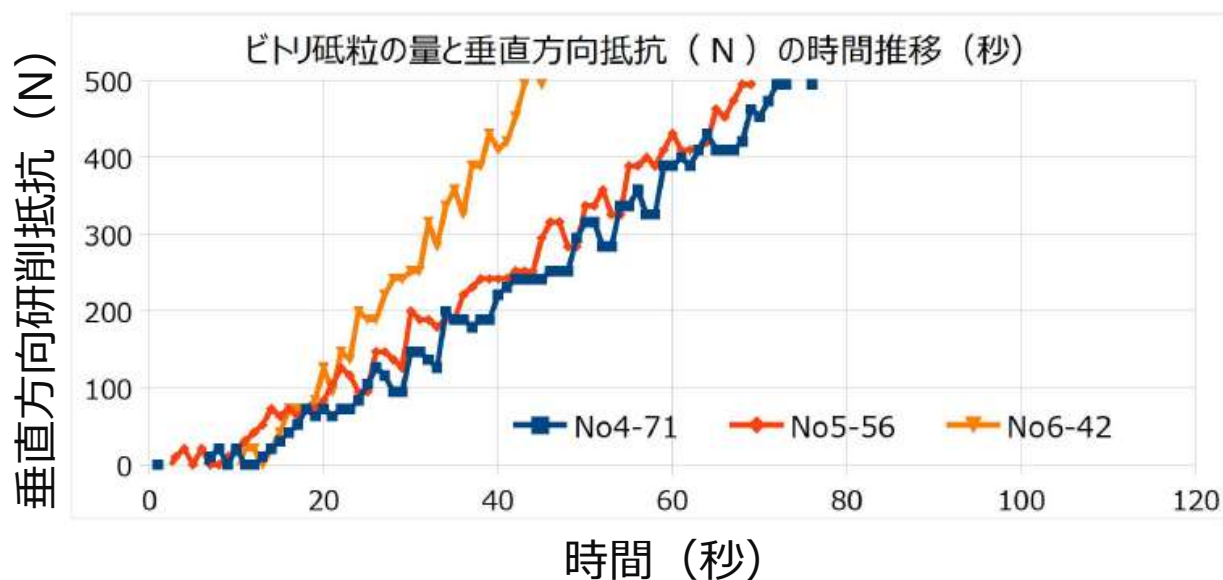


図 27 ビトリ砥粒量と垂直方向研削抵抗の時間推移

図 27 は縦軸が垂直方向の研削抵抗（N）、横軸が時間（秒）で、加工負荷の時間推移を表す。3本の折れ線は同一組成のビトリ砥粒量を変えることで砥粒 A の量（集中度）を e、f、

g としたもので、集中度 e が最も加工負荷が抑えられた。

図 26 および図 27 より、集中度 c が最も加工負荷が抑えられたが、垂直負荷荷重が 100 ~200N で、負荷荷重が上昇しないという条件に関しては未達成であった。

c) 仕上げ研削用砥石の検討

No1 のハイブリッド砥石バックグライディング仕上げ研削用でも同様のテストを行った(表 14)。

表 14 検討条件

	ビトリ砥粒種類	ビトリ砥粒量 Vol%	砥粒量（集中度）	レジン結合剤種類
No.1	砥粒 A30000Gβ	㊦	b	N
砥石寸法： 6A2T 200D x 22.5T x 158H x 3W x 5X				
ドレッシング： WA2000 ホイール回転 1000 rev ⁻¹ テーブル回転 101 rev ⁻¹ 切込み 1 μm/sec				
ワーク： SiC 4 インチ				
砥石回転数： 1000min ⁻¹				
テーブル回転： 301 min ⁻¹ 切込速度 18 μm/min				

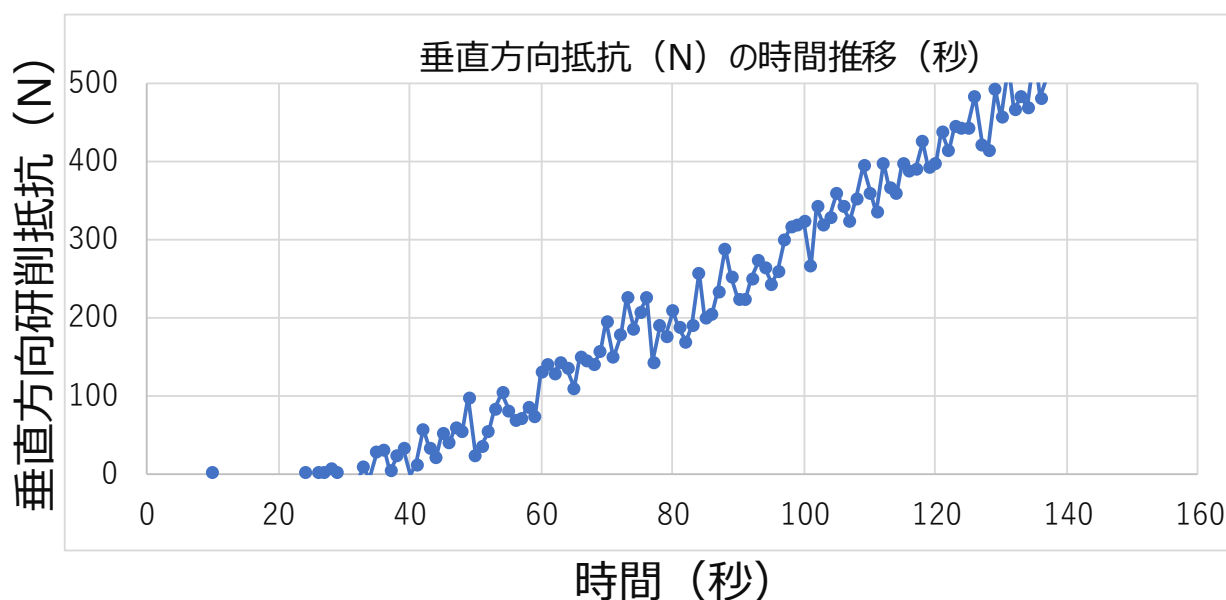


図 28 垂直方向研削抵抗の時間推移

図 28 は縦軸が垂直方向の研削抵抗 (N)、横軸が時間 (秒) で、加工負荷の時間推移を表

す。結果は粗研削と同様に研削負荷は加工時間とともに増加し、垂直負荷荷重が 100～200N で、負荷荷重が上昇しないという条件に関しては未達成であった。

d) 考察

ハイブリッド砥石は金属材料では、高能率研削と優れた表面粗さの両立ができたが、加工条件・砥石構造の検討を行っても垂直方向研削抵抗が増加しない条件がみつからず SiC では高能率な研削は困難であることがわかった。図 29 にハイブリッド砥石 No1 の SiC 加工前後の表面 SEM 像を示す。加工によって砥石表面はフラット化している。これは、加工によるビトリ砥粒の磨耗とレジン結合材の摩耗のバランスが悪く、つまり、レジン結合剤が摩耗しにくいために、図 29 のように砥石表面がフラットな状態となったと考えられる。フラット化により加工に必要な砥粒の突き出しがなく、研削抵抗が加工量の増加に伴い上昇するために SiC の高能率な研削が難しい。

延性の強い材料である金属の研削では比較的大きな研削屑が発生しレジン結合剤を十分に摩耗させるため砥石表面のフラット化は起きにくい、硬脆性材料である SiC の研削屑は粉状になり金属の研削屑にくらべ非常に細かいためレジン結合剤を摩耗させにくく砥石表面のフラット化が起きやすいと考える。

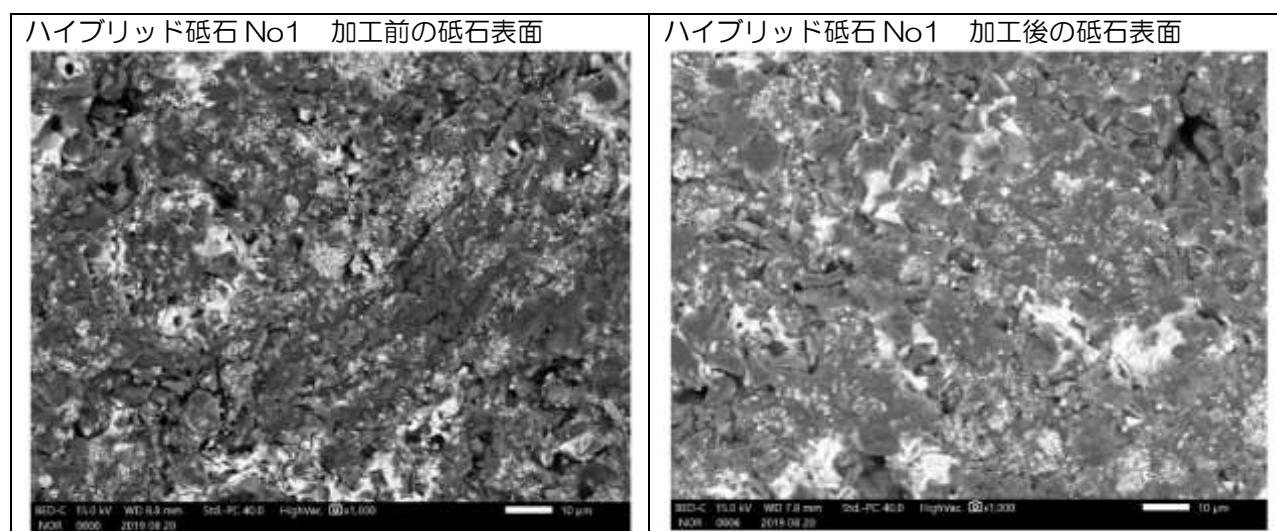


図 29 ハイブリッド砥石 No1 の SiC 加工の前後の表面 SEM 像

（３）事業化の検討

鉄系ワーク加工に関して、幾何学精度と表面あらさを兼ね備えたものを提供する目処ができた。これを推し進めていくために燃料噴射系ユーザへの展開、また、他に必要とされるワークの見極めを行いつつ展開していく。

また、脆性材加工に付いては砥石の性格上厳しい面が確認できたので、砥粒、気孔、ボンドの均一分散技術を更に高度化し進めていく。

（４）進捗管理・物品管理

各年度において中間検査、中間評価ヒアリング（２０１７、２０１８年度）、事前検査、成果報告書納入時の最終報告に加え年２回の研究開発委員会を開催した。

２０１７年度

第１回研究開発委員会 平成 29 年 12 月 8 日

第２回研究開発委員会 平成 30 年 3 月 8 日

２０１８年度

第１回研究開発委員会 平成 30 年 7 月 11 日

第２回研究開発委員会 平成 31 年 2 月 19 日

２０１９年度

第１回研究開発委員会 令和元年 8 月 27 日

第２回研究開発委員会 令和 2 年 2 月 20 日

間接補助機関および事業管理機関に導入された装置について現地にて現物確認を行った。

最終章 全体総括

研究開発成果

- ・ハイブリッド砥石の開発に成功した。
- ・開発した砥石の研削性能は金属研削において、研削速度、表面平坦性、真円度、硬度劣化の面において目標値を達成した。
- ・開発した砥石は、金属研削において切れ味と面粗度維持を両立する優れた性質を持っている。
- ・開発した砥石は半導体研削には適さないことが分かった。

研究開発後の課題・事業展開

技術的課題

- ・金属の円筒研削時の円筒度の目標値の達成
- ・開発したハイブリッド砥石を短時間でかつユーザーで実施可能なツルージング方法の開発
- ・ユーザー設備に取り付け可能なツルージング装置の開発

事業展開

弊社内にあるテクニカルセンターでの加工テストデータを全国 10 か所にある営業拠点の営業技術員に配布し、見込のあるユーザーに直接アプローチし話を進める。場合によっては、実際に加工テストを弊社に来ていただき検証いただき、採用に向けてのきっかけを作り、ユーザーでの本格テストに結びつける。この手法をまず燃料噴射関係ユーザーで行う。同時に、鏡面と幾何学精度を要求されるワークの洗い出しを行い、順次展開を図る。