

平成29年度
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

「難削材の複雑形状加工を可能とする
CNT複合長寿命レジンボンド砥石の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 公益財団法人山形県産業技術振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 レジンボンド砥石の砥粒保持力の改善
 - 2-1-1 砥粒保持力評価法の確立
 - 2-1-2 CNT (CNT), 砥粒の界面設計
 - 2-1-3 CNT 被覆砥粒の製造方法の確立
 - 2-1-4 CNT 被覆砥粒/フェノール樹脂複合化
- 2-2 レジンボンド砥石の強度・高温耐摩耗性改善
 - 2-2-1 CNT/ポリイミド樹脂複合化
 - 2-2-2 強度・高温耐摩耗性の改善
 - 2-2-3 改質剤のポリイミド樹脂への応用
- 2-3 ハイレシプロ研削による難削材加工への対応
 - 2-3-1 研削メカニズムの解明
 - 2-3-2 超硬合金の加工
 - 2-3-3 耐熱合金 (ワスパロイ) の加工
- 2-4 クリープフィード研削による高能率・高精度加工への対応
 - 2-4-1 超硬合金の加工
 - 2-4-2 砥石成形

第3章 全体総括

- 3-1 複数年の研究開発成果
- 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

航空・宇宙産業や石油精製，石油化学プラントなどのタービン関連の産業においては，耐熱合金の生産性向上のために，近年，ハイレシプロ研削が用いられ始めている．ハイレシプロ研削は研削熱の発生が抑制されるため，工作物の反りやたわみを抑えることが可能である．しかし，ハイレシプロ研削の問題点は，砥粒の最大切込み深さが大きいいため，砥粒に大きな力が加わり砥粒の脱落（目こぼれ）が発生することにより工具寿命が短くなり，加工精度，加工能率が低下することである．したがって，砥石の摩耗，形状崩れの原因となっている砥粒脱落を防ぐことが重要である．今後，耐熱合金に対するハイレシプロ研削による高能率加工を加速させるためには，砥粒保持力を改善した砥石の開発が必要不可欠である．

一方で切削工具，特にタップやダイスなどの工具は，ネジ形状や R 溝などを，たとえば円柱形状の側面および端面に，3次元的で複雑な形状を高能率に加工しなければならない．上記，超硬合金，高速度鋼の生産性向上のために，クリープフィード研削が用いられる．クリープフィード研削は，被削材に大きな切込みを与えることで高能率な加工が可能である．しかし，クリープフィード研削の問題点は，砥粒上滑り領域が広くなり摩擦熱の発生が増加され，研削熱が大きくなることである．このため，砥石結合剤の熱劣化に伴う砥粒の後退が起こり，被削材と結合剤の接触による研削抵抗の上昇，研削焼けが発生する．他のボンドに比べて，耐熱性，放熱性の低いレジンボンド砥石において，このような課題を解決するためには，耐熱性，放熱性，高温耐摩耗性を改善したレジンボンドを用いた高性能な砥石が必要不可欠である．

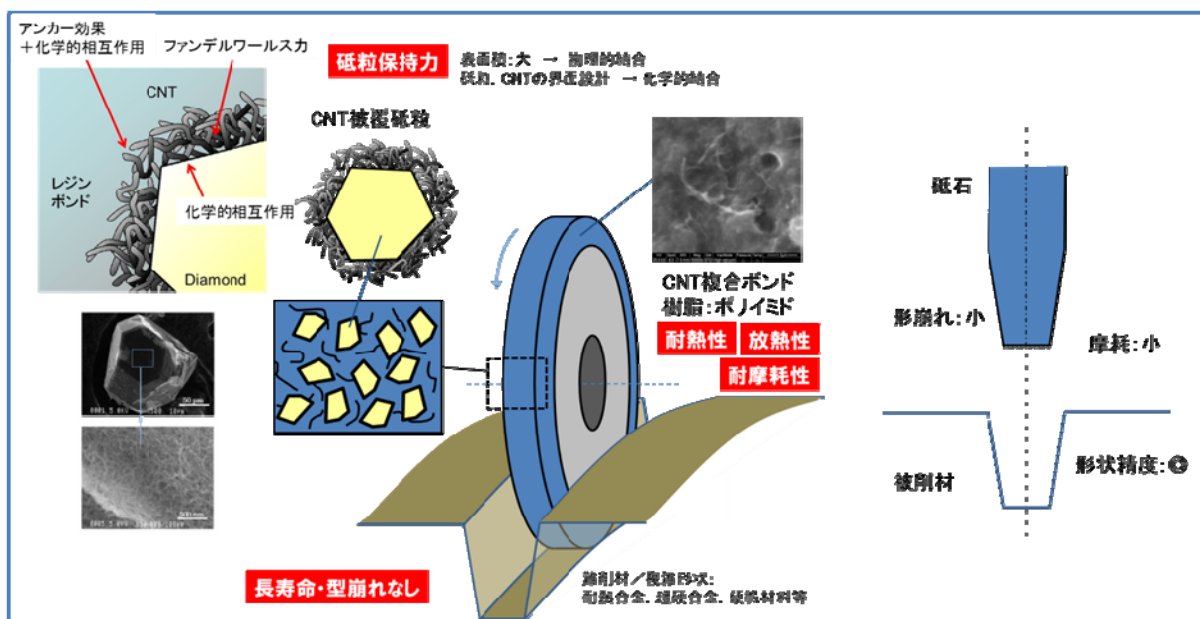
ハイレシプロ研削あるいはクリープフィード研削において，砥石消耗が少なく，型くずれがない砥石が開発されれば，加工精度の課題はクリアされ，また砥石成形インターバルも長くなることで，生産効率も改善が見込める．しかし，ボンドの耐熱性・耐摩耗性が改善されるため，砥石成形性が悪くなる可能性がある．この産業分野では，機上で砥石の成形が行われることが多いため，砥石成形時間が長くなると生産性が著しく落ちてしまう．したがって，新しい砥石に対しては，常に，砥石成形方法を確立し，その砥石成形時間を短縮することが求められている．

本研究開発では，超硬合金や耐熱合金のハイレシプロ研削において，砥石の摩耗，形状崩れの原因となっている砥粒脱落を抑制するために，CNT（カーボンナノチューブ）被覆砥粒（特許第 5261687 号「砥粒加工用具及び被覆砥粒」（山形県工業技術センター））のレ

ジンボンド砥石への応用，フェノール樹脂とCNTの複合ボンドを開発し，砥粒保持力の高いレジンボンド砥石を開発した。CNT，砥粒，樹脂との反応性を持つ分子を材料表面の官能基と反応させ，それぞれを化学結合で強固に結びつけることにより砥粒保持力の改善を図る。このため，物理的アンカー効果だけでなく，砥粒，CNTの官能基を用いた化学的な相互作用を用いて，砥粒保持力を改善した。

一方，耐熱性と機械的特性を向上させたレジンボンド砥石製造方法として，本研究開発では，熱分解温度400度以上のガラス転移点を持たない高強度・高耐熱ポリイミド樹脂と高熱伝導率のCNTとの複合技術の確立と焼成技術の確立により強度，耐熱性・放熱性の改善されたレジンボンド砥石を開発した。また，前述の反応性を有する分散剤の技術をポリイミド樹脂に応用することで，さらなる強度の向上を目指した。

また，新規レジンボンド砥石に付与される電気伝導性を用い，従来型レジンボンド砥石では不可能であった電氣的・化学的作用を用いた砥石成形方法を確立し，砥石成形時間を短縮した。



1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発は，耐熱合金，超硬合金，硬脆材料などの難削材の複雑形状部品（タップ，ダイス等）を高効率・高精度で加工でき，型崩れが少なく，長寿命なレジンボンド砥石とその砥石成形技術の開発を行うものである。CNTおよび砥粒の界面設計を行い，物理的・化学的作用を発現させ，耐熱レジンとの組み合わせにより，砥粒保持力，耐熱性・放熱性，高温耐摩耗性を改善した砥石を実現する。

1) ハイレシプロ加工用に砥粒保持力の高いレジンボンド砥石を開発することにより、砥粒の脱落を抑制し、砥粒保持力を2倍とし、超硬合金、耐熱合金の高精度・高能率加工を達成する。

2) 工具研削用レジンボンド砥石の曲げ強度 150%に向上、放熱性 200%に向上、高温耐摩耗性 200%に向上を達成し、超硬合金、高速度鋼の高精度・高能率加工を実現する。

以上の揮発を達成することで、「難削材の複雑形状加工を可能とするCNT複合長寿命（従来砥石の2倍）レジンボンド砥石の開発」を達成する。

3) 電氣的・化学的作用を用いた新たな砥石成形方法を確立し、砥石成形時間を30%以上短縮する

より具体的に掲題のテーマを実現するために以下のサブテーマに分けてそれぞれ高度化を図る。

サブテーマ 1. レジンボンド砥石の砥粒保持力の改善

砥粒保持力の定量的な評価方法の確立と CNT 被覆砥粒/フェノール樹脂複合化技術の確立により、従来砥石との比較で砥粒保持力 2 倍となるレジンボンド砥石の開発する。CNT 被覆砥粒の量産プロセスを確立する。

サブテーマ 2. レジンボンド砥石の強度・高温耐摩耗性改善

高耐熱ポリイミド樹脂中への CNT の均一分散技術と焼成技術の確立により、曲げ強度 150%に向上、放熱性 200%に向上、高温耐摩耗 200%に向上させたレジンボンド砥石の開発をする。

サブテーマ 3. ハイレシプロ研削による難削材加工への対応

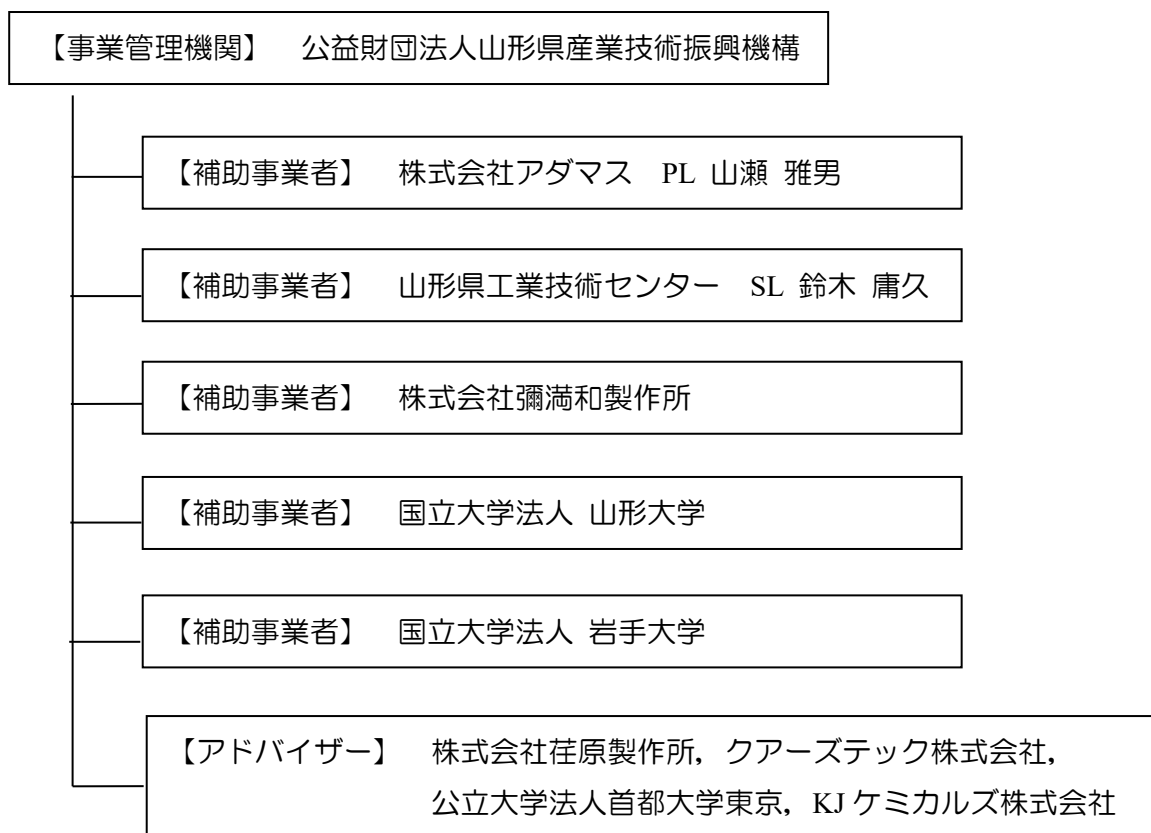
研削メカニズムの解明と開発砥石での加工条件最適化により、耐熱合金（ワスパロイ）の加工において砥石寿命が2倍以上になることを確認する。

サブテーマ 4. クリープフィード研削による高能率・高精度加工への対応

研削メカニズムの解明と開発砥石での加工条件最適化により、超硬合金の加工において砥石寿命が2倍以上になることを確認する。電氣的・化学的作用を用いた新たな砥石成形方法を確立し、砥石成形時間を30%以上短縮する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制



(2) 事業管理機関

公益財団法人 山形県産業技術振興機構

所属・役職	氏名
プロジェクト推進課 課長代理	五十嵐 直子

(3) 研究者名

株式会社アダマス

所属・役職	氏名
取締役 開発部部长	山瀬 雅男 【PL】

開発部	川内 哲也
開発部 部長格	神田 修一
開発部	剣持 匡昭

株式会社彌満和製作所

所属・役職	氏名
技術研究所 所長	赤木 貞之
工機・バイススペシャリスト	山口 勇史
技術研究所	須藤 篤司
技術研究所	田澤 正人

山形県工業技術センター

所属・役職	氏名
主任専門研究員	鈴木 庸久【S L】
開発研究専門員	佐竹 康史
主任専門研究員	大津加 慎教
専門研究員	村岡 潤一
研究員	泉妻 孝迪
研究員	村上 周平

国立大学法人 山形大学

所属・役職	氏名
大学院有機材料システム研究科 教授	高橋 辰宏
大学院有機材料システム研究科 プロジェクト教員（助教）	後藤 晃哉

国立大学大学法人 岩手大学

所属・役職	氏名
理工学部 准教授	吉原 信人

(4) アドバイザー

所属・役職	氏名
株式会社荏原製作所 生産プロセス革新統括部	山川 貴士
クアーズテック株式会社 参事	重野 能徳
KJケミカルズ株式会社 代表取締役社長	丸山 学士
公立大学法人首都大学東京 教授	小林 訓史

注)：所属及び役職は平成 30年3月31日現在のもの

1-3 成果概要

研究項目	本年度の研究開発目標値	成果	達成度
1. レジンボンド砥石の砥粒保持力の改善	砥粒保持力 従来比 2 倍	単粒荷重 1,000mN の場合： 砥粒保持力 5 倍	100%
2. レジンボンド砥石の強度・高温耐摩耗性向上	曲げ強度 150%に向上 放熱性 200%に向上 高温耐摩耗性 200%に向上	曲げ強度 402%に向上 放熱性 192%に向上 高温耐摩耗性 550%に向上	100%
3. ハイレスプロ研削による難削材への加工	耐熱・超硬合金研削加工における砥石寿命従来比：2 倍	砥石寿命：2.07 倍	100%
4. クリープフィード研削による高能率・高精度加工への対応	砥石寿命従来比2倍 砥石成形時間を 30%以上短縮	砥石寿命：3.6 倍 砥石成形時間：約 31%短縮	100%

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 アダマス

技術顧問 山瀬 雅男 (PL)

Tel. 0254-33-2211

Fax.0254-33-3756

Email: yamase@adamas-japan.co.jp

公益財団法人山形県産業技術振興機構 (事業管理機関)

振興部 プロジェクト推進課

課長代理 五十嵐 直子

Tel. 023-647-3163 Fax.023 - 647 - 3139

Email: info@ypoint.jp

第2章 本論

2-1 レジンボンド砥石の砥粒保持力の改善

耐熱合金の生産性向上のために、近年、ハイレシプロ研削が用いられ始めている。ハイレシプロ研削は、研削熱の発生が抑制されるため、工作物の反りやたわみを抑えることが可能である。しかし、ハイレシプロ研削の問題点は、砥粒の最大切込み深さが大きいいため、砥粒に大きな力が加わり砥粒の脱落（目こぼれ）が発生し、工具寿命が短くなり、加工精度、加工能率が低下することである。したがって、砥石の摩耗、形状崩れの原因となっている砥粒脱落を防ぐことが重要である。今後、耐熱合金に対するハイレシプロ研削による高能率加工を加速させるためには、砥粒保持力を改善した砥石の開発が必要不可欠である。

そこで、砥粒保持力の定量的な評価方法の確立と CNT 被覆砥粒／フェノール樹脂複合化技術の確立により、従来砥石との比較で砥粒保持力 2 倍となるレジンボンド砥石を開発した。CNT 被覆砥粒の量産プロセスを確立した。

2-1-1 砥粒保持力評価法の確立（山形大学，山形県工業技術センター）

砥粒保持力をラボレベルで簡単に定量評価できる方法として、はんだの接合強度等を測定するボンドテスターを用いたシェア試験による砥粒脱落時の破壊強度、およびハイレシプロ研削を想定した摩擦摩耗試験による砥粒脱落率を測定して砥粒保持力を算出する方法を確立した。確立した砥粒保持力評価方法により、従来砥石および開発砥石の砥粒保持力を比較するとともに、単粒保持力と砥粒脱落率の相関を調べ、単粒保持力のわずかな改善も砥粒脱落率を大きく改善することがわかった。

2-1-2 カーボンナノチューブ（CNT），砥粒の界面設計（山形大学）

CNT，ダイヤモンド砥粒の表面官能基を定量評価し、それに基づいて最適な化学組成，分子量を有する改質剤を合成した。CNT や炭素材料，変性ポリマー中の酸性官能基と反応するオキサゾリン基を有するポリマーを軸に，分散性と化学的結合力の両面から研究を進めた。

ダイヤモンド砥粒の表面官能基の定量評価方法を確立し，本プロジェクトで使用する CNT，ダイヤモンド砥粒の表面官能基量を算出した。さらに，CNT，ダイヤモンド，樹脂（フェノール樹脂，ポリイミド樹脂）の表面官能基量以上の反応性官能基（オキサゾリン基）を導入した改質剤の合成方法を確立した。

水やエタノールなど従来 CNT を分散させることが困難な溶媒に対して分散安定性を付与し、CNT やダイヤモンド、樹脂の酸性官能基に対して十分な量の反応性官能基を有する改質剤の合成及び添加量の最適化を実施し、方法を確立した。

2-1-3 CNT 被覆砥粒の製造方法の確立（山形大学，株式会社アダマス，山形県工業技術センター）

ダイヤモンド砥粒に任意の膜厚で均一に CNT 分散液を塗布・乾燥させる方法，条件を検討した。独自に合成した改質剤を分散剤として利用し，超音波ホモジナイザーによる CNT 分散液の作製方法を確立した。さらに，CNT 分散液をダイヤモンド表面に均一に任意の厚さで塗布する方法について検討および条件最適化を行い，CNT 被覆層の厚みや被覆形態を変えた砥粒を安定的に，かつ量産できるプロセスを確立した。図1-1に，CNT 被覆ダイヤモンド砥粒表面の電子顕微鏡写真を示す。

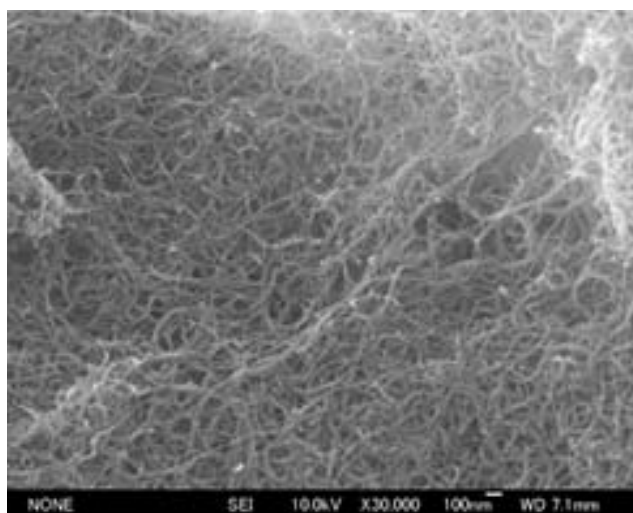


図1-1 CNT/反応性高分子被覆ダイヤモンド砥粒表面の電子顕微鏡写真

2-1-4 CNT被覆砥粒/フェノール樹脂複合化

CNT，ダイヤモンド，フェノール樹脂の反応性官能基の反応制御方法について研究し，また，反応割合と砥粒保持力との相関性を解明した。さらに開発した CNT 被覆砥粒の砥粒保持力に及ぼす物理的アンカー効果と化学的結合力の作用を見積った。

CNT/改質剤/ダイヤモンドの加熱処理条件による結合反応の評価，溶媒洗浄後の SEM 観察による結合状態の評価を行い，改質剤がダイヤモンド砥粒および CNT を化学結合によって接着できることを確認した。

ダイヤモンド表面に被覆した改質剤とフェノール樹脂との溶媒中での反応を確認するとともに、反応性について評価し処理条件の最適化を検討した。

CNT 被覆層の被覆形態を変えた砥粒をフェノール樹脂と混合し、砥粒保持力を評価し、CNT 被覆が砥粒保持力に及ぼす影響を明らかにした。改質剤による化学結合とアンカー効果を発揮させる CNT 間の空隙を制御することによって、砥粒保持力を向上させることができた。図1-2に示すシエア試験による砥粒累積脱落率から、単粒への荷重1000mNの場合、未処理ダイヤモンド砥粒に比べて、CNT/反応性高分子被覆ダイヤモンド砥粒の砥粒保持力が5倍以上となることが分かった。この成果により、特願 2017-124108 「カーボンナノチューブ被覆砥粒」の特許出願を行った。

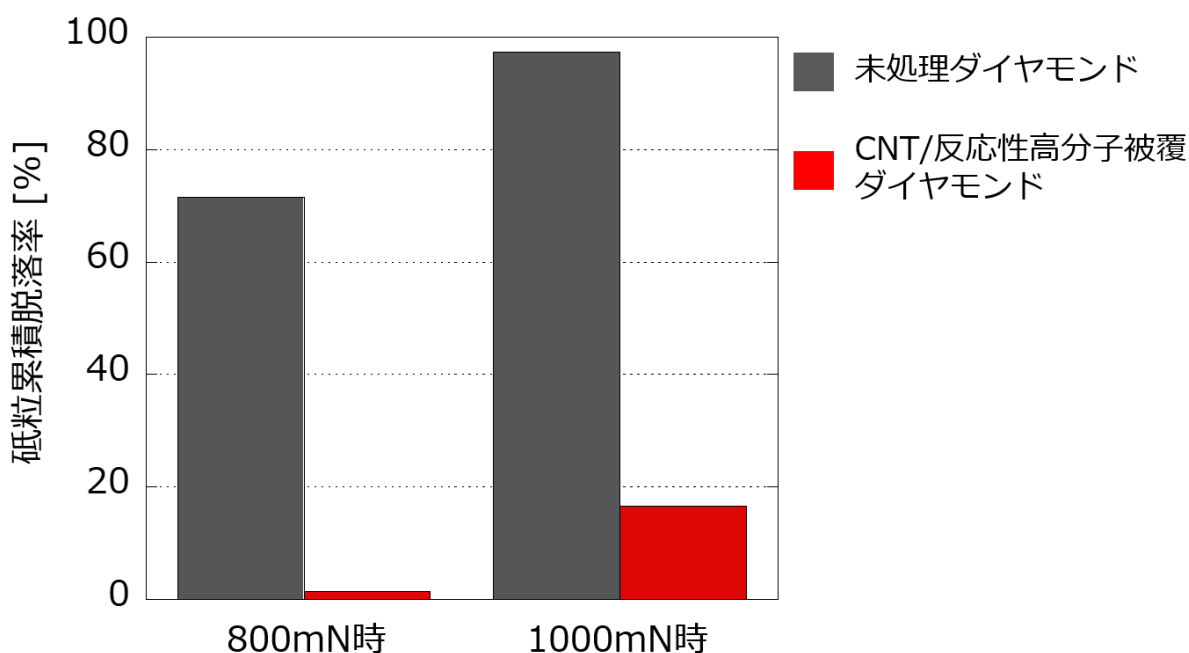


図2-2 シエア試験による砥粒累積脱落率

2-2 レジンボンド砥石の強度・高温耐摩耗性改善

超硬合金、高速度鋼の生産性向上のために、クリープフィード研削が用いられる。クリープフィード研削は、被削材に大きな切込みを与えることで高能率な加工が可能である。しかし、クリープフィード研削の問題点は、砥粒上滑り領域が広くなり摩擦熱の発生が増加され、研削熱が大きくなることである。このため、砥石結合剤の熱劣化に伴う砥粒の後退が起こり、被削材と結合剤の接触による研削抵抗の上昇、研削焼けが発生する。他のボンドに比べて、耐熱性、放熱性の低いレジンボンド砥石において、このような課題を解決するためには、耐

熱性，放熱性，高温耐摩耗性を改善したレジンボンドを用いた高性能な砥石が必要不可欠である。

そこで，高耐熱ポリイミド樹脂中への CNT の均一分散技術と焼成技術の確立により，曲げ強度 150%に向上，放熱性 200%に向上，高温耐摩耗 200%に向上させたレジンボンド砥石の開発を目指した。

2-2-1 CNT/ポリイミド樹脂複合化（山形県工業技術センター）

ポリイミド樹脂中に CNT を良分散させるために，ポリイミドの前駆体であるポリアミックス酸を CNT に被覆した「ポリアミック酸被覆 CNT」の製造プロセスを検討した。図2-1に，その SEM 写真を示す。直径約10nmの多層 CNT（Nanocyl 社製 NC7000）に，樹脂が被覆されている様子が確認できる。この樹脂層の厚みをコントロールすることで，CNT 含有量を制御することが可能となる。

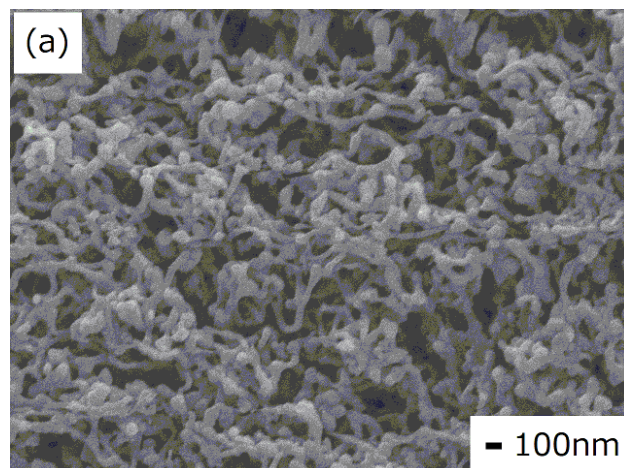


図 2-1. ポリアミック酸被覆 CNT の SEM 写真

2-2-2 強度・高温耐摩耗性の改善（山形県工業技術センター）

ポリアミック酸被覆 CNT の作製に成功し，それを反応成形法によって成形することで，高濃度でかつ良分散状態の CNT 複合ポリイミド樹脂の成形に成功した。これは従来技術である固相混合で，ポリイミド粉と CNT を混合した場合には得られない，15%以上の高濃度 CNT 複合化の場合においても良分散状態の CNT 複合ポリイミド樹脂の成形することができる。その結果，曲げ強度が 402%に向上，放熱性が 192%に向上した。図2-2に，CNT を 20%含有したポリイミド成形体の断面 TEM 写真を示す。CNT が非常に均一に分散していることがわかる。

図2-3に，(a)ポリイミド粒子と CNT の固相混合から通常成形，(b)イミド化率 100%のポリアミック酸被覆カーボンナノチューブを用いた通常成形，(c)イミド化率 30%以下の

ポリアミック酸被覆カーボンナノチューブを用いた反応成形で作製した CNT3wt%の試験片の最大曲げ応力および曲げ弾性率の試験結果を示す。曲げ強度の向上において反応成形によるマトリクス強化が有効であることが確認された。

また、CNT 量が増加するに従い最大曲げ応力、曲げ弾性率ともに向上することが確認された。CNT を高濃度化することにより、曲げ強度 402%に向上することが分かった。また、反応成形で作製した 20wt%の CNT 複合ポリイミド樹脂の熱拡散率は 192%に向上することが分かった。

この成果より、特願 2018-68180「樹脂被覆カーボンナノチューブ」、特願 2018-68181「カーボンナノチューブ複合樹脂成形体及びその製造方法」の2件の特許出願を行った。

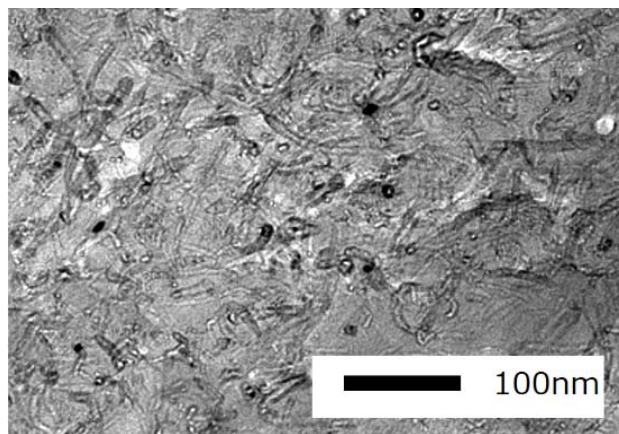


図2-2 高濃度 CNT 複合ポリイミド樹脂の TEM 写真 (CNT 20%)

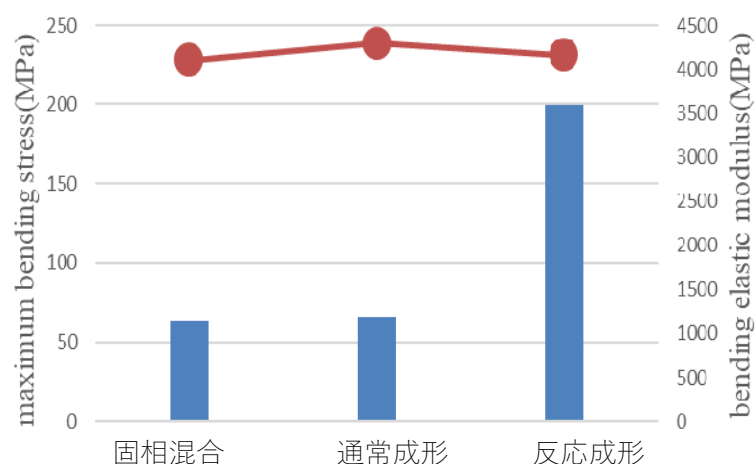


図 2-3. CNT 複合ポリイミド樹脂成形体の最大曲げ応力と曲げ弾性率 (CNT3wt%)

2-2-3 改質剤のポリイミド樹脂への応用 (株式会社アダマス, 山形大学)

前記のとおり, ポリアミック酸の反応性を用いた反応成形によって, CNT が単一分散状態で, しかもポリイミド樹脂同士の強固な結合が実現した。

2-3 ハイレシプロ研削による難削材加工への対応

低い熱伝導率など特殊な物性を有する耐熱合金が砥石摩耗に及ぼす影響に関して検討し, 砥石に求められる特性をフィードバックした。砥石摩耗と, 砥石の熱物性, 摩擦摩耗特性との関係, 砥粒保持力との関係をあわせて検証した。

耐熱合金(ワスパロイ)の研削に必要とされる砥石の砥粒集中度, 砥粒サイズ, 添加フィラー, ボンドなどの指針を検討した。耐熱合金(ワスパロイ)の研削に最適な砥石の選定指針を検討した。また CNT 複合砥石を用いることにより脱落型摩耗が抑制され, 研削熱による砥石摩耗の影響が相対的に大きくなると考えられる。そこで, CNT 複合砥石の組成と研削特性の関係を明らかにした。

2-3-1 研削メカニズムの解明 (岩手大学)

ハイレシプロ研削における砥石摩耗メカニズムを解明し, 砥石に求められる特性について明らかにした。また, 砥石寿命を延ばす研削条件選定指針を明らかにした。

岩手大学において保有するハイレシプロ研削盤を用いて, 超硬合金, 耐熱合金に対する予備実験を行い, 加工抵抗や摩耗形態から, 理論的な研削メカニズムの解明を行った。また, 研削条件と摩耗の進行の関係を明らかにすることを目的とした, 粒度・ボンド材を変えた砥石を用いたハイレシプロ研削実験の研削条件の選定を進めた。

これらの知見, 基礎実験の結果を基に, 砥石の摩耗に及ぼす影響が大きいと判断されるパラメータを変化させて実験を行った。これによりハイレシプロ研削における砥石摩耗モデルを確定させ, 砥石摩耗を少なくするための研削条件選定指針, 砥粒保持力強化の重要性を明らかにした。

開発した CNT 被覆砥粒を用いた砥粒保持力に優れる CNT 複合砥石を用いることにより, 砥粒保持力の向上がハイレシプロ研削の研削特性に与える影響, 砥石摩耗に与える影響について明らかにした。その結果, 超硬合金の場合, CNT 被覆砥粒の砥粒保持力の効果は, 耐熱合金の場合に比べて小さいことが分かった。CNT 被覆砥粒の効果がある被加工物, 加工領域が明らかとなった。

2-3-3 耐熱合金（ワスパロイ）の加工（岩手大学）

開発した CNT 被覆砥粒を用いた砥石の評価を行った。また砥粒集中度の検討を行った。砥粒保持力を2倍以上を達成した改良型 CNT 被覆砥粒（タイプ2）を用いることと、砥粒集中度を最適化することで、ハイレシプロ研削における砥石寿命を向上させることに成功した。

表 3-1 に、ワスパロイのハイレシプロ研削加工条件を示す、図 2-3-2 に未被覆砥粒と CNT 被覆砥粒（タイプ1、タイプ2）を用いた砥石の摩耗量を示す。CNT 被覆砥粒タイプ2は、化学結合を強化したタイプである。改良前の CNT 被覆砥粒タイプ1で砥石寿命が1.81 倍に延び、さらなる改良版である CNT 被覆砥粒タイプ2により 2.07 倍 (=0.58/0.28)に延びることが確認できた。

表 3-1 実験条件

工作物	ワスパロイ
砥石直径 mm	115
砥石周速 m/sec	30
テーブルストローク mm	8
工作物往復周波数 rev/min	100, 300, 500
切込み速度 mm/min	0.1

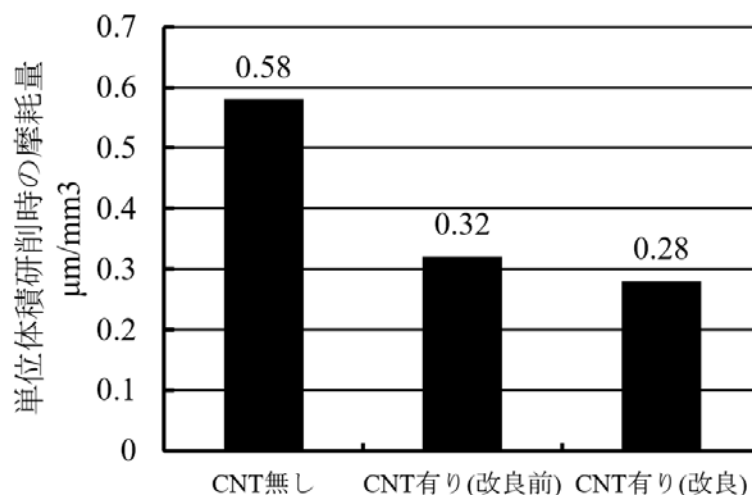


図 3-1 砥石摩耗量の比較

この成果より、特願 2017-124333 「カーボンナノチューブ複合レジンボンド砥石」の特許出願を行った。

2-4 クリープフィード研削による高能率・高精度加工への対応

近年、国内の製造業界では高付加価値の製品開発が求められており、高機能材料への対応など、工作機械やツールングシステムメーカーでは高性能化が進んでいる。これに伴い、切削工具にも高能率・高精度加工への要求が高まっており、特にタップによる雌ネジ加工では、工具形状が工作物に転写されるという特性上、高精度な工具形状が必要とされている。また、工具材料には超硬合金や高速度工具鋼などの高硬度材が用いられ、それらを高能率に加工することが求められている。

このような要求を満足するためにクリープフィード研削が用いられる。クリープフィード研削は被削材に大きな切込を与えることで高能率な加工が可能であり、砥粒保持力が高いレジンボンドが用いられる。しかし、クリープフィード研削の問題点は、砥石と工作物の干渉域において砥粒の接触弧長さが長くなり摩擦熱の発生が増加され研削熱が大きくなることである。このため、砥石結合剤の熱劣化に伴う砥粒の後退が起これ、十分な砥粒突き出し量が得られないことにより研削抵抗の上昇や研削焼けが発生する。このような課題を解決するためには、本事業で開発する耐熱性、放熱性、高温耐摩耗性を改善したレジンボンドを用いた高性能な砥石が必要不可欠である。

本研究の成果として、超硬合金の加工におけるクリープフィード研削のメカニズムを解明し、開発砥石を用いて加工条件を最適化することにより、砥石寿命が 2 倍以上になることを確認した。また、電気的・化学的作用を用いた新たな砥石成形方法確立し、砥石成形時間を 30%以上短縮した。

3-4-1 超硬合金の加工（株式会社彌満和製作所，山形県工業技術センター）

予備試験として、超硬合金のクリープフィード研削における砥石摩耗メカニズムを解明し、砥石に求められる特性について明らかにした。研削メカニズムの解明結果を基にして、研削条件の選定により砥石寿命が延びることを実証した。研削温度を測定することによって、耐熱性・放熱性の改善が、砥石摩耗に及ぼす影響を明らかにした。

開発した CNT 複合ポリイミド砥石を用いて超硬合金のクリープフィード研削における砥石摩耗メカニズムを解明し、砥石のボンド材に求められる特性を明らかにした。

最終的に、クリープフィード研削の最適な条件の選定と、開発した高濃度かつ均一なポリイミド樹脂を用いることで、超硬合金の加工において開発砥石の寿命が 3.6 倍になることを

実証した。その成果より、特願 2018-68182「カーボンナノチューブ複合レジジンボンド砥石及びその製造方法」の特許出願を行った。

表4-1 実験条件（被加工物：超硬合金）

項目	条件
砥石周速 (m/s)	38
ワーク回転数 (rpm)	10
切込量 (mm)	0.5
ダイヤモンドホイール	①SD400-N125-B-2 (CNTなし) ②SD400-N125-BC-2 (CNTあり) ③SD400-N125-BR06 (CNTあり)

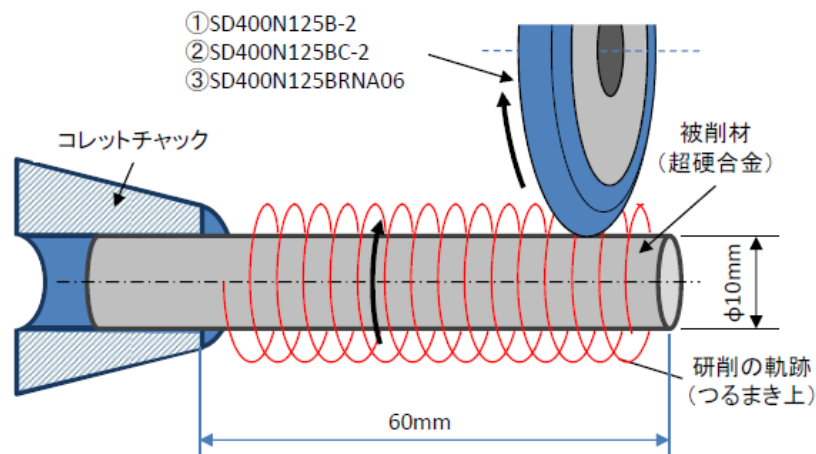


図4-1 加工試験の概要

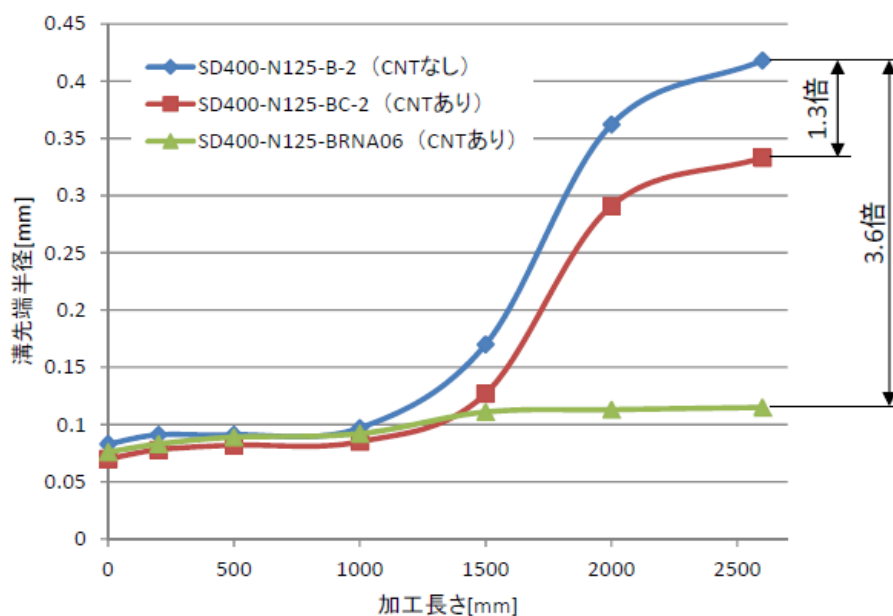


図4-2 砥石摩耗量の比較（通常ポリイミド砥石 vs. CNT 複合ポリイミド砥石）

通常ポリイミド砥石（従来砥石）と CNT 複合ポリイミド砥石（開発砥石）の砥石摩耗量を比較するために、表 4-1 に示す実験条件で、図 4-1 に示すような超硬合金の加工を行った。開発砥石はボンド材の仕様が異なる 2 種類の砥石を用いた。実験では先端を 60 度に成形した V フェイス形状の砥石を用いて円筒状の工作物外周をつるまき状に研削加工した後、溝先端半径を工具測定システムで測定し、その変化量から砥石寿命を評価した。総形の砥石を用いた加工では、砥石の形状が工作物に転写されるため加工初期と加工後の溝先端半径を測定することで砥石の摩耗状態が確認できる。

実験結果を図 4-2 に示す。3 種類の砥石とも加工長さ 1,000mm 付近までは摩耗状態が安定しているが、従来砥石はそれ以降、急激に摩耗が進む傾向にある。開発砥石（BC-2 ボンド）は従来砥石よりも摩耗の進行が僅かに遅いが、1,500mm 付近から急激に摩耗する傾向にあり、グラフの傾きは従来砥石と同等である。開発砥石（BRNA06 ボンド）は、加工長さ 1,000mm 付近から摩耗が徐々に進行するが、従来砥石や開発砥石（BC-2 ボンド）に見られるような急激な摩耗はなく、加工長さ 1,500mm 付近から安定領域となることが分かる。本試験の結果を基に各砥石における加工後の溝先端半径を砥石寿命に置き換えて従来砥石と比較すると、開発砥石（BC-2 ボンド）では 1.3 倍、開発砥石（BRNA06 ボンド）では 3.6 倍となり、ポリイミド砥石に CNT を複合することで砥石寿命が従来比で 2 倍以上に改善されることを確認した。

2-4-2 砥石成形（株式会社彌満和製作所，株式会社アダマス，山形県工業技術センター）

開発砥石の成形・ドレス効率の検証を行い、検証結果と開発砥石の特性から、高電気伝導性を有する開発砥石の利点を活かし、電氣的・化学的援用による効率のよい成形方法を確立した。砥石成形のためのツルアー材、具体的には、機械的研磨を受け持つ硬質粒子の他に、ダイヤモンド砥粒と化学的に反応性を示す金属粒子の複合したツルアー材の開発を行った。

さらに、開発砥石の高速成形を目的とした放電ツルーイングユニットの開発を行った。図 4-3 に、開発した放電ツルーイングユニットの外観を示す。

放電加工電源と開発したスピンドルユニットと組み合わせて、CNC 精密円筒研削盤上での放電ツルーイングの評価を行った。ツルアー材を製作し、開発スピンドルを用いた機上での放電ツルーイング試験を行った結果、砥石成形速度が 31%短縮できることが分かった。

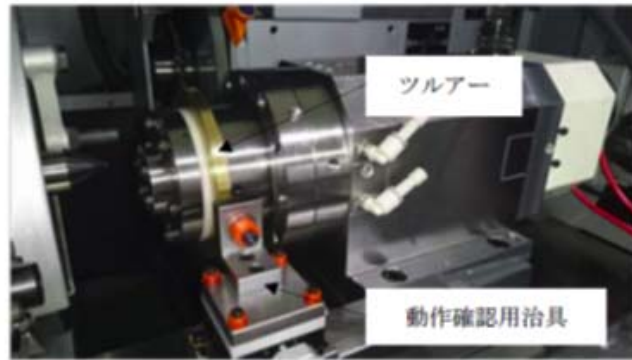


図4-3 開発した放電ツルアーユニットの外観

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

【1. レジンボンド砥石の砥粒保持力の改善】CNT 被覆量および CNT 被覆形態の異なる CNT 被覆砥粒の製造プロセスを確立し、ボンド材との化学結合を付与することにより、砥粒保持力は目標値（従来比2倍）を上回る結果を得た。

【2. レジンボンド砥石の強度・高温耐摩耗性改善】ポリアミック酸被覆 CNT の製造方法を確立し、それを用いた反応成形により、高濃度で良分散状態の CNT 複合ポリイミド樹脂を成形できるようになった。これにより、強度、放熱性、耐摩耗性は目標値を達成した。

【3. ハイレシプロ研削による難削材加工への対応】耐熱合金（ワスパロイ）の研削加工において、ボンドとの化学反応性を有する CNT 被覆砥粒を用いた開発砥石の砥石寿命が、通常砥石に比べて、目標値の2倍を超える結果を得た。一方、超硬合金に対しては、明らかな効果は見られなかった。

【4. クリープフィード研削による高能率・高精度加工への対応】超硬合金の研削加工において、CNT 複合ポリイミド樹脂を用いた開発砥石の砥石寿命が、通常砥石に比べて、目標値の2倍を超える結果を得た。さらに、ツルアー材の開発、放電ツルアーユニットの試作を行い、機上での放電ツルアーを実現し、成形速度が向上することを確認した。

以上のように、テーマ毎に、計画通りの研究を実施し、目標値に到達した。また、以下の5件の特許出願を行った。

- 1) 特願 2017-124108「カーボンナノチューブ被覆砥石」
- 2) 特願 2017-124333「カーボンナノチューブ複合レジンボンド砥石」
- 3) 特願 2018-68180「樹脂被覆カーボンナノチューブ」
- 4) 特願 2018-68181「カーボンナノチューブ複合樹脂成形体及びその製造方法」

5) 特願 2018-68182「カーボンナノチューブ複合レジンボンド砥石及びその製造方法」

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

本事業では、製造現場で要求されている、耐熱合金や、その他難削材の複雑形状加工を可能とする特長のある2種類のCNT複合長寿命レジンボンド砥石を開発した。これにより、従来は不可能であった高品質の加工が可能となるほか、加工品質の高さを保ちながら、長寿命による加工コストの低減が可能となる。先端産業のみならず幅広い産業の分野における生産性の向上に大きく寄与するものである。

市場には新しい材料が続々と導入され、砥石に対する顧客の要求する性能や特性も年々高度になってきている。今後は、様々な成長産業への用途拡大のためにユーザー評価用砥石の継続提供と、開発砥石の販促資料用評価データの積み上げを推進しながら、生産コスト及び量産性の改善も進めていく。また、各種媒体を活用しながら、開発した製品の情報発信を行い、販売促進活動を実施していく。