

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

「難削材用ハイパー知能研削加工技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 3 月

担当局：中部経済産業局
補助事業者 株式会社名光精機

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1－3 成果概要

1－4 当該研究開発の連絡窓口

1－5 アドバイザー

第2章 本論-1 知能研削加工技術の開発

第3章 本論-2 ハイパー研削最適砥石の開発

第4章 全体総括

うな課題がある。

- ① 月産量が30～50基と少中量生産のため、画期的な工法合理化が遅れている。
- ② 欧米メーカーと国際分業しているが、日本固有技術が育っていない。
- ③ 対材料（Buy Weight）、製品（Fly Weight）重量比率は、1／5～1／10と低く加工体積率が高いため、作業量が多い。

また、これらの部品の精密加工技術において、重要構成要素である砥石に対しても、同様な要求となっている。そこで、研削用知能砥石の開発と難削材高効率ハイパー研削加工技術を研究開発し、その使用のノウハウも占有できれば、海外への生産移管防止が可能となる。この技術は、上記の他の生產品への展開効果も高く、国内での製造・雇用確保をしていくためにも重要となる。品質の確保、信頼性向上、コスト低減、増産化を満たす新技術が求められている。

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

◇研究のサブテーマ

航空機エンジンのタービンプレードは大径化、薄肉化、複雑形状化がますます進行しており、形状がひずみやすく、たわみやすい一方、加工変質層厚さやあらさなど表面品質等に対して厳しい条件が要求される。最終仕上げとして手磨きも残っており、非効率的である。耐熱合金材の複雑形状部品の加工に対して、安定した加工品質の確保、信頼性向上、加工コスト低減、工具費の低減、増産化を満たす、国際競争力を圧倒的に強固にする新加工技術が求められている。そこで、航空機エンジンのタービン、タービンプレード部品の高効率化加工に向けて、以下の研究開発を行う。

①研削知能砥石の開発

研削砥石の内部に各種センサーを複数個埋め込み、加工時の砥石温度、加工力、また砥石の外径の変化を砥石自体から測定し、加工時の砥石状況をリアルタイムで把握し、直ちに加工の最適制御を可能とする。また、収集した砥石の加工履歴データ等を砥石内のICチップに記録できる研削知能砥石を研究開発する。

②砥石内研削液供給（ハイパー研削）最適砥石の開発

一般に研削液を外部ノズルから供給する場合、砥石に連れ回る空気流れに妨げられて効果的に研削点に届かないことが問題となる。一方、砥石内研削液供給式研削（ハイパー研削）方式は、研削液を砥石中心から供給することにより、研削点を確実に冷却・潤滑でき、研削焼けのない高効率加工ができる。現行の砥石では研削液を浸透、通過させるために、多孔質または通路を設けてあるため、難削材の研削能力、形状維持性等の課題に対し問題がある。砥石の気孔質密度を砥石内で変化

させ、サンドイッチ形、バウムクーヘン形等で、難削材の研削に適合したハイパー研削最適砥石を研究開発する。これらにより、難削材である超耐熱合金の研削点の効果的な冷却と切りくず排出を可能とする砥石内研削液供給による新研削方式（ハイパー研削）に適した砥石を開発し、研削焼けの生じやすい薄いタービンプレードにおいても研削焼けを生じず、あらさや加工変質層などの要求品質を確保し、高効率加工、コスト低減、増産化、国際競争力強化等の対応を目指す。

（２）研究目標

（２－１）研削知能砥石の研究開発

研削砥石の内部にセンサーを埋め込み、加工時の砥石温度、砥石外径等を測定し、加工時の砥石状況をリアルタイムで把握し、加工の最適制御をリアルタイムで可能とするおよび砥石の基本データ、加工経過データ等を砥石内のＩＣチップに記録できる知能砥石を開発する。

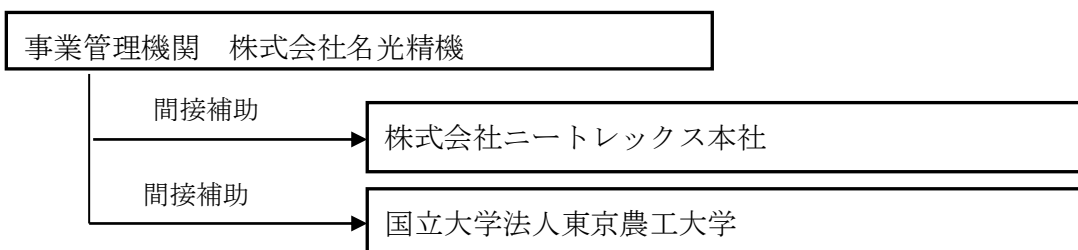
（２－２）ハイパー研削最適砥石の研究開発

国産技術で砥石内研削液供給式（ハイパー研削）の研究が進められている。本件は、砥石内研削液供給式（ハイパー研削）を基本に、クーラントが確実に研削点に届くこと、スラッジ（切粉）が砥石内に堆積することを防止できることの特徴を保持しながら、砥石の難削材研削能力を向上させ、高精度で、高効率加工が可能となるハイパー研削最適砥石を開発する。

➡ 知能砥石＋ハイパー研削併用で・加工作業コストの 1/2、加工品質のアップ、試加工時間 1/10 達成を実現する。

１－２ 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（１）研究組織・管理体制



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】株式会社名光精機

管理員

氏 名	所属・役職
織田 善教	社長直属 技監 P L

研究員

氏 名	所属・役職
松原 光作	代表取締役社長
中島 正俊	専務取締役
林 勝彦	常務取締役
安藤 利勝	取締役製造部 部長
福島 誠	第二技術部 部長 S L
水野 雅也	第二技術部
宇佐美 澄人	第一技術部 次長
井野口 和彦	品質保証部 部長
古田 誠	品質保証部 主任
佐野 直樹	第二製造部 部長

【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
成田 潔	理事取締役
岡田 要司	技術開発室 チームリーダー
大久保洵志	技術開発室 主事
濱中 俊	技術開発室 主事

国立大学法人東京農工大学

氏 名	所属・役職
笹原 弘之	工学研究院先端機械システム部門・教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社名光精機

(経理担当者) 総務部 部長 松本 邦彦

(業務管理者) 技監 織田 善教

(間接補助事業者)

株式会社名光精機

(経理担当者) 総務部 部長 松本 邦彦

(業務管理者) 技監 織田 善教

株式会社ニートレックス本社

(経理担当者) 総務部 経理主任 大橋徹也

(業務管理者) 副社長 武田幸久

国立大学法人東京農工大学

(経理担当者) 研究推進部研究支援課研究支援係 高崎 利世子

(業務管理者) 工学研究院先端機械システム部門・教授 笹原 弘之

1-3 成果概要

(1) 研削知能砥石の開発

研削砥石に熱電対を埋め込み、研削点での温度をリアルタイムに計測して研削状態を常時判別するシステム(温度計測砥石、自己発電機能付き砥石ホルダーと自己モニタリング技術)を構築した。最適加工制御に結び付けるために、研削状態と研削温度推移の関係を調査して研削状態ごとの特性を把握し、熱電対の温度計測データから研削状態の良否をリアルタイムに判別するアルゴリズムを確立した。この開発により、「研削加工状態の見える化」が可能となり、

川下ユーザからも画期的なものと評価された。これらの技術を高価な被加工物のタービンブレードの加工に適用することで今迄以上の品質の安定化が可能となった。

(2) ハイパー研削最適砥石の開発において、

①サンドイッチ砥石とバウムクーヘン砥石の開発は、実施した試験データと砥石の摩耗状態をニートレックスと名光精機が共同して分析、さらに各種ハイパー研削時の砥石別通水性の評価試験結果から、一般的なハイパー研削砥石以上の研削性能を得ることが困難との結論に達し開発を断念した。

②そこで新たに取り組んだ超砥粒砥石であるCBN電着ハイパー研削砥石の開発では、CBN電着砥石の研削比は一般セラミック砥石の100倍以上の性能を有することから被加工物の翼面形状精度公差幅を従来の1/3までの向上と砥石周速を2倍以上UPさせることが可能なことから、加工コスト1/2化は可能であることを確認した。

今回開発の技術は、川下ユーザ殿向けの実ブレード加工に採用される段階まで漕ぎ着けた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

研究等実施機関 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先
株式会社名光精機	代表取締役 松原 光作	①所在地 愛知県津島市鹿伏兔町西清水47 ②連絡先担当者氏名 技監 織田 善教 ③電話番号 0567-33-2311 ④FAX番号 0567-32-0900 ⑤E-mail アドレス z-oda@meikoseiki-ltd.co.jp
株式会社 ニートレックス本社	代表取締役社長 金光 誠一郎	①所在地 愛知県知多郡武豊町小迎184 ②連絡先担当者氏名 副社長 武田 幸久 ③電話番号 0569-72-0551 ④FAX番号 0569-73-3451 ⑤E-mail アドレス takeda@nitolex.co.jp
国立大学法人 東京農工大学	学長 大野 弘幸	①所在地 東京都小金井市中町 2-24-16 ②連絡先担当者氏名 工学研究院 先端機械システム部門 教授 笹原 弘之 ③電話番号 042-388-7240 ④FAX番号 042-388-7417 ⑤E-mail アドレス sasahara@cc.tuat.ac.jp

1-5 アドバイザー

機関名又は氏名	所在地又は住所	①代表者等、②連絡先担当者、③電話番号
三菱重工業(株) 名古屋航空宇宙 システム製作所	愛知県名古屋市港区 大江町10	①代表者 代表取締役社長 宮永 俊一 ②連絡先担当者 顧問 佐々木 崇 ③TEL: 052-611-2121
三菱日立パワー システムズ(株)	兵庫県高砂市荒井町 新浜2丁目1番1号	①代表者 代表取締役 西澤 隆人 ②連絡先担当者 ガスタービン技術本部、生産技術課、 主任チーム統括 福原 義也 ③TEL: 079-445-6125
ヤマザキマザック (株)	愛知県丹羽郡大口町 竹田1-131	①代表者 代表取締役社長 山崎 智久 ②連絡先担当者 技術本部ソリューション開発部 主席 博士 村木 俊之 ③TEL: 0587-95-7796

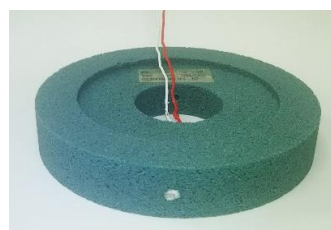
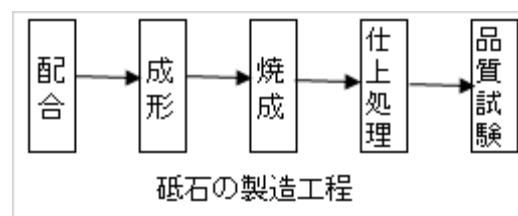
第2章 本論-1 知能研削加工技術の開発

【1-1】温度計測砥石の開発

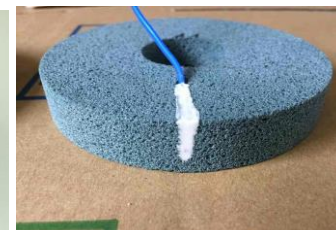
【1-1】熱電対埋め込み型砥石の開発

(1) 熱電対の挿入(埋め込み)時期

熱電対の挿入時期は、当初成形時にすべきと考えていたが、砥石の製造工程には右上の図が示すように焼成後、所定の寸法にするために仕上処理(加工)が入る。熱電対を成形時に挿入しておくと仕上処理時にこの熱電対が邪魔になるため、仕上処理後に挿入すべきとの結論に達した。



穴方式



端面スリット方式

熱電対埋め込み砥石

(2) 熱電対の挿入方法と取り出し口

①開発当初は砥石にφ3の穴を開けておき、その後熱電対を挿入する方式(写真左)を取っていたが、この方式では熱電対線をホルダー内に挿入する際、絶縁エナメルが剥がれてしまい短絡する不具合が発生した。また、熱電対線をホルダー内に挿入するのに時間を要するという欠点があった。

②上記不具合を解消するために、熱電対線結線の容易化策としてホルダー外でコネクタを使用して結線する方式とした。そのために改良型ホルダー(後述)を開発し、この改良型ホルダー対応の砥石は端面にスリットを入れ、このスリット内に熱電対を埋め込む方式とした。(写真右)

このスリットは焼成後加工して入れるのではなく、成形の段階で埋め子を入れておき、焼成の高温で消失させる方式とした。

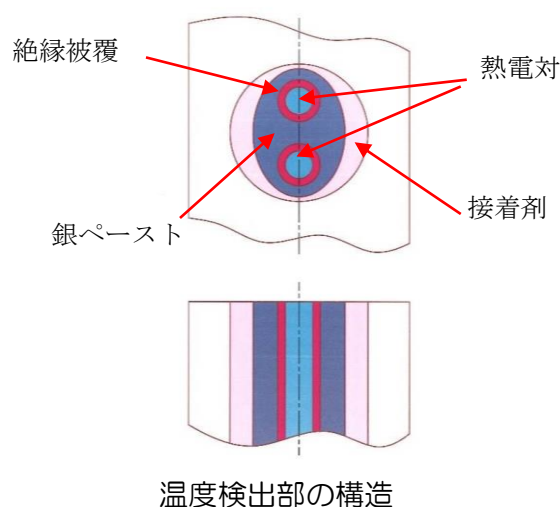
(3) 温度検出部の構造

①正確な温度計測を行うには、研削点＝熱電対接点
とする必要があり、かつ安定した温度計測を行うには
温度計測部の構造は重要である。

②温度計測部の構造を右図に示す。

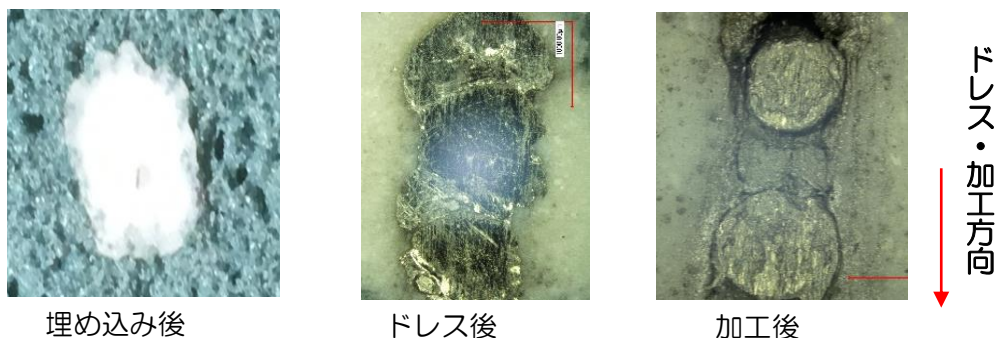
温度計測部は熱電対、絶縁被覆、銀ペーストと接着剤
からなる。

- ・熱電対：アルメルークロメル
- ・銀ペースト：導通材としての役割を果たす。
- ・絶縁被覆：熱電対先端部でのみ接点化するために、
途中での短絡を防止
- ・接着剤：砥石内で熱電対の固定化を図る。



(4) 熱電対の線径

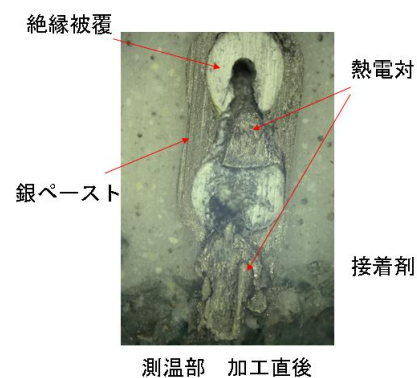
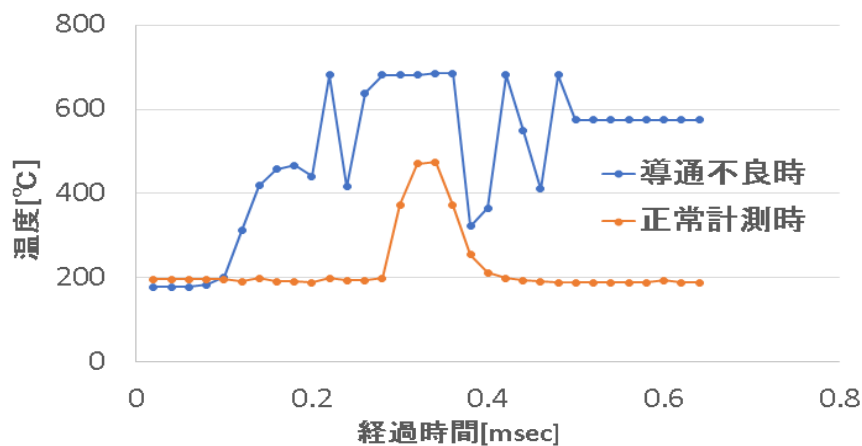
下の写真に熱電対埋め込み部の埋め込み後、ドレス後と加工後の写真を示す。



①線径φ0.32mmの温度計測グラフと加工直後の測温部の写真を下に示す。

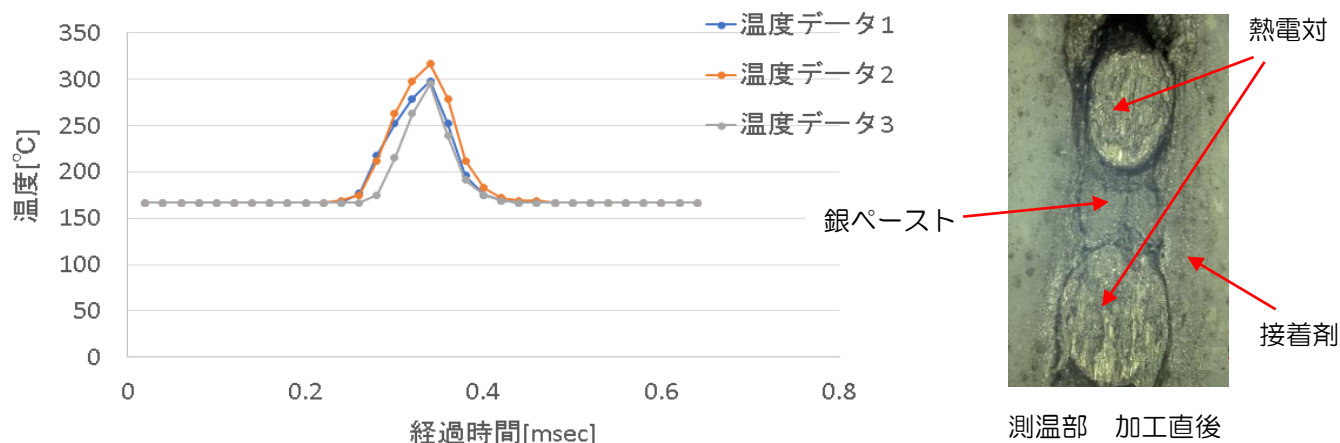
温度計測グラフが示すように時折導通不良による異常値が発生した。

加工時熱電対線が隣の熱電対線の方に倒れ込むが、線径が細く十分な
導通確保出来なかったためと考える。



②一方φ0.65mmの場合には導通不良による異常値の発生もなく安定して計測出来た。

線径が太くなったことにより、銀ペーストを介しての導通範囲が拡大したことから、安定した導通を確保することが出来たと考える。線径が太くなったことによる被加工面への傷の発生を心配したが、問題は発生しなかった。⇒熱電対の線径はφ0.65mmを選定することにした。



(5) 導通材

①当初は導通材としてアルミ箔を巻きつけていたが、時折導通不良が発生することや生産的でないために、銀ペーストを採用し問題のないことを確認した。

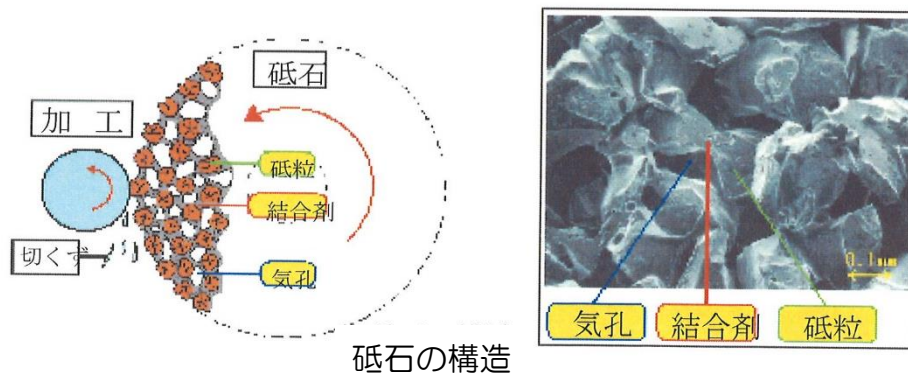


(6) 熱電対線の配列

①熱電対先端部の導通を確保しやすくするために、熱電対線の配列は加工（回転）方向に一行に並びように配し、加工による熱電対線の倒れ込みと銀ペーストの仲介によって導通のしやすさを確保した。（（3）測温検出部の構造図を参照下さい）

【1-2】研削抵抗計測砥石の開発

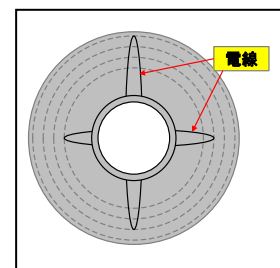
①抵抗線歪みゲージを砥石内もしくは砥石フランジに貼り付ける方式について設計検討を行った。まず、抵抗線歪みゲージを砥石に埋め込む方式は、下図の砥石の構造図が示すように砥石表面は凹凸があり接着性に難点があることから適切でないと判断した。また一方砥石フランジに貼り付けることは可能であるが、研削抵抗を精度よく検出できるかどうか疑問が残った。以上の設計検討を行うとともに研削抵抗の検出方法について、工作機械メーカーとも協議したところ、過去にφ1.6mmのドリルの折損を工作機械の主軸モータの電流値変化で検出して実用化したことがあるとの情報を得て、研削抵抗を主軸モータの電流値変化で検出する方法が一番実用的で確実であるとの結論に達したのでこの方式で工作機械の最適加工制御に繋げることにした。



②しかし、研削状態の良否を判定する機能としての研削抵抗は研削熱に変わることから研削温度計測で代用できるため、川下ユーザとも討議して、温度計測一本に絞って実用化すべきとの結論に達し、温度計測砥石を使用しての最適加工制御に繋げることにした。

【1-3】外径感知砥石の開発

砥石内に電線ループを複数個埋め込み、電線ループの切断により外径を感知する方式である。この方式では、個々の電線ループ間の径は検出できないことになる。(しかし砥石使用限界径に電線ループを設置して、砥石交換を予告するという点では意義がある。)



一方研削加工機械がNC化した現在、被加工物と砥石主軸間の距離は機械側で検出可能であり、この機械側からの情報を利用して砥石径を検出する方が、連続的かつ正確であることからより実用的と考えるに至った。この考え方について実際に研削加工を行っている川下ユーザのアドバイザーとも協議し、工作機械側からの情報を得て最適加工制御に繋げることにした。

【1-4】データ送信機能組込砥石ホルダーの開発

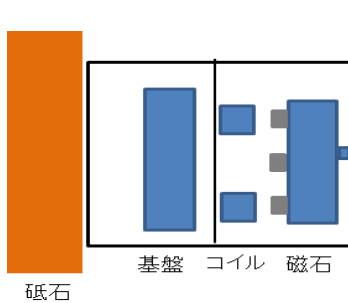
知能研削加工技術に不可欠な技術として、熱電対からの温度データの増幅、送信、受信とモニタリングがある。さらに、ホルダーに要求される機能として「温度データを無線送信するための電力確保」と「安定的な温度データの送信」機能である。この二つの機能を兼ね備えた「自己発電機能付きホルダー」を新たに設計・製作して開発することにした。

【1-4-2】無線送信機組込み+自己発電機能付き砥石ホルダーの開発

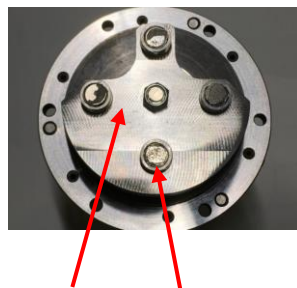
従来温度データ送信用の電源に電池を使用してきたが寿命が問題となり、電池を全く使用しない自己発電機能付きホルダーを新たに開発することにした。

(1) 自己発電機構と製作したホルダー

- ・自己発電原理：自転車のランプ用発電機に使用されている「磁石とコイル」の発電原理を応用
- ・磁石は振り子上に固定し、ホルダーの回転中は静止状態にある。一方コイルはホルダーに固定することでホルダーと一体となって回転する。（下の図と写真に試験に使用したホルダーを示す。）
- ・熱電対の起電力処理とデータ送信に必要な電圧：Min. 3V



磁石とコイルの関係



振り子と磁石（4個）

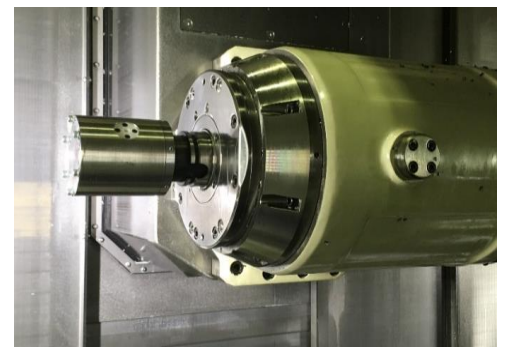


自己発電ホルダー分解写真

(2) 自己発電試験と結果

自己発電試験の写真を右に示す。

振り子が静止し易い主軸の水平位置で試験を行った。主軸の回転数は、実研削加工と同じ3700rpmとした。



自己発電試験写真

(2. 1) 12Vコイル2個、磁石4個 時の発電試験

電圧を増す為、ホルダー内に取り付けてあるコイルを24Vから12Vに変更。

さらにコイルと磁石間の距離を約1.0mmから約0.5mmに近接させて試験した。

その結果を次ページ左下図に示す。回路の関係で今回試験では3.3[V]以上の測定は出来なかった。

①24V コイル 2 個の結果と比較すると最大 2.4[V] 最小 1.2[V]から最大 3.3[V]以上、最小 2.7[V]と約 2 倍の値に改善した。

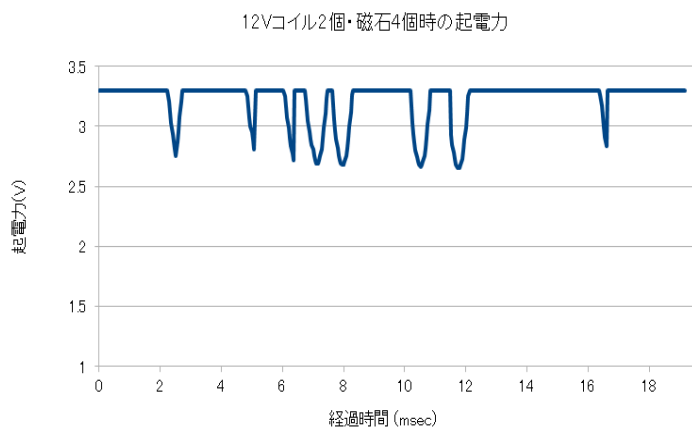
②改善した要因は、12V のコイルが 24V のコイルに比べ抵抗が少ないという事にあると考えるが、6.0[V]のコイルを使った場合の試験では、逆に電圧が減少したことから、真の要因は不明。

③コイルと磁石間の距離の影響を調査するため、その他の条件を同一にして試験を行った結果、コイルと磁石間の距離を 0.5mm 縮めることで約 0.3[V]向上した

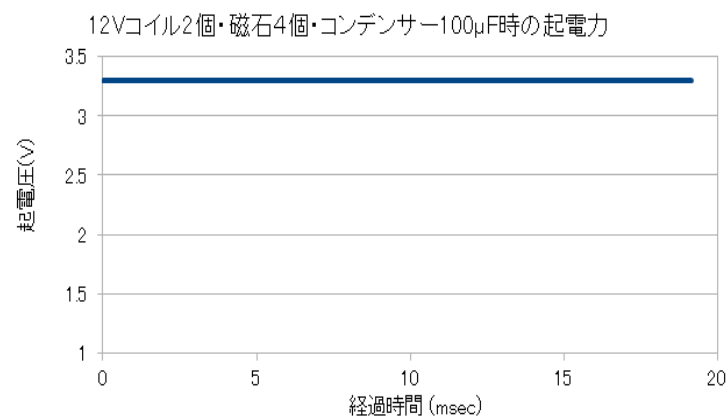
(2. 2) (2. 1) と同条件でコンデンサー容量を $10\mu\text{F}$ → $100\mu\text{F}$ に変更して発電試験
試験結果を下図の右下に示す。

①コンデンサーの蓄電効果によって電圧は最小でも 3.3[V]以上確保することが出来た。

②さらに回転数を変更し試験を行った結果、2000rpm 以上で最低電圧 3.0[V]以上確保出来た。



・ 12Vコイル 2 個、磁石 4 個 時の電圧

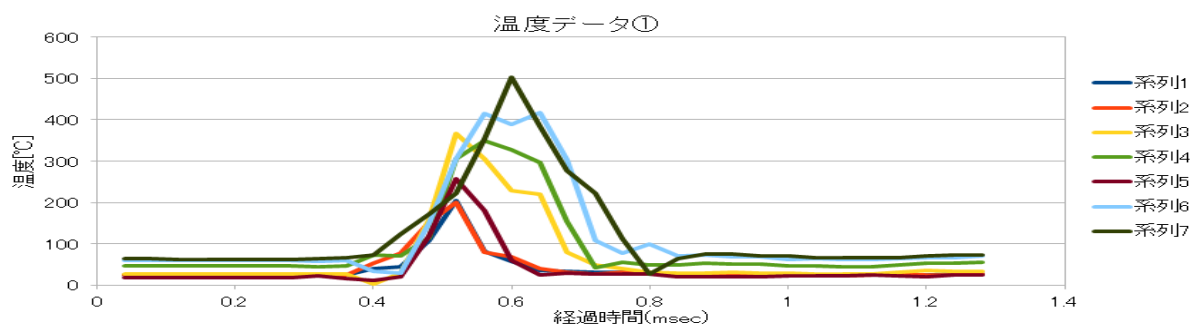


・ 同左で コンデンサー容量を $10\rightarrow 100\mu\text{F}$

(2-3) 熱電対による温度測定の実証試験

自己発電方式によりデータ処理と送信に必要な電圧の確保が可能となったことから、熱電対を埋め込んだ砥石を使用して研削加工を行って、熱起電力データの送受信の実証試験を実施した。

その結果当初の目的通り温度計測可能なことを確認した。(下の温度データグラフ)



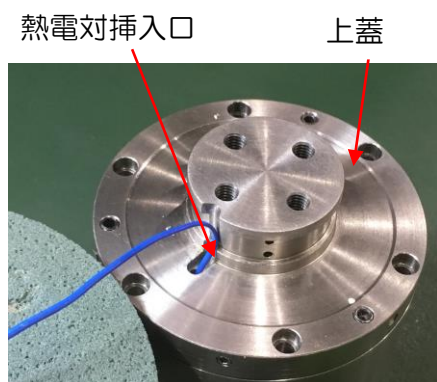
しかし実証試験により、①研削水侵入対策、②安定した自己発電、③砥石交換時の熱電対線の接続の容易化が課題として残った為、これらの課題解決のために改良型のホルダーを開発して対処した。

（３）改良型ホルダーの開発

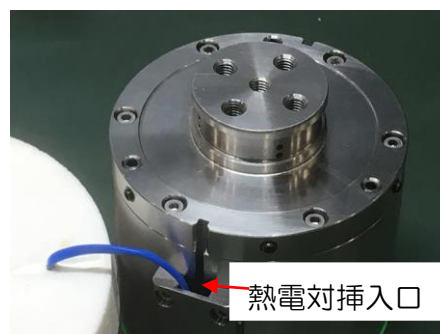
（３－１）水侵入対策

水侵入の原因は熱電対をホルダーに挿入する口が砥石端面と接触していたために、シールドを行っているとは言え、ハイパー研削水の圧でホルダー内に侵入していた。

改良型ホルダーでは、熱電対取り出し口を砥石端面として、ホルダー内への挿入口をホルダー外周へ持ってくることで、シールドの容易化と遠心力で水が飛ばされることから、水の浸入を防止した



従来型ホルダー

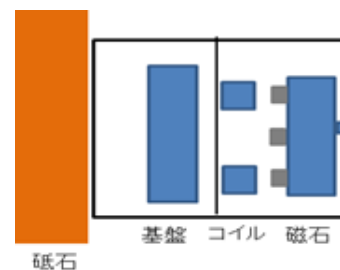


改良型ホルダー

（３－２）安定した自己発電

自己発電が不安定となっていた原因は、磁石とコアの固定方法が弱く、ホルダーの加工中の振動や遠心力によって、徐々に固定が緩み磁石とコアの間隔が広がっていたためである。

改良型の開発と同時に磁石とコアの固定部の剛性アップを図ることで、磁石とコアの間隔が変化するのを防止した。



ホルダー内部構成

（３－３）砥石交換時の熱電対線の接続の容易化

従来型ホルダーでは砥石交換時上蓋を外し熱電対挿入口から熱電対を通し、ホルダー内の基盤に結線した後、再度上蓋を閉める作業が必要で、手間を要するのと熱電対挿入時に絶縁被覆が剥がれて短絡する不具合が度々発生した。



コネクターによる結線

そこで改良型ホルダーでは砥石外周部でコネクタによる結線方式（前ページ右下写真）とすることで、上記不具合の発生しない砥石ホルダーを開発した。

（３－４）ホルダー内臓のマイコンとコネクタの基盤化

従来型ホルダーでは、マイコンやコネクタは固定することなく緩衝剤のプチプチ等で包んでホルダー内に内蔵させていたが、長時間使用すると故障の原因になるため、ホルダー内部のマイコンやコネクタを基盤化して、ホルダーに固定した。コネクタを基盤化してホルダーに固定した。



従来の基盤と配線



改良後の基盤と配線

【１－５】自己モニタリングと最適加工技術の開発

【１－５－１】自己モニタリングの改善

自己モニタリングシステムの開発において、課題として①計測可能な温度範囲、②温度データの送信条件、③温度データの確認にタイムラグの発生などが残っていた。これらの課題解決のためにモニタリングシステムの改善を図った。また、温度計測精度の向上のためにサンプリング周期の短縮などにも取り組んだ。

（１）計測可能な温度範囲の改善

温度測定可能な範囲が500℃までであったため、ドライ状態で試験を行った場合に温度の最大値を測定出来ないという不具合があった。

⇒＜対策＞分解能を低くして測定可能範囲を660℃まで拡大した。

（２）温度データ送信条件の変更

温度データ送信条件は200℃以上の温度感知であった為に、最高温度の時間軸にズレが生じた。

⇒＜対策＞温度データ送信条件を50℃以上の温度変化を感知した場合に変更した。

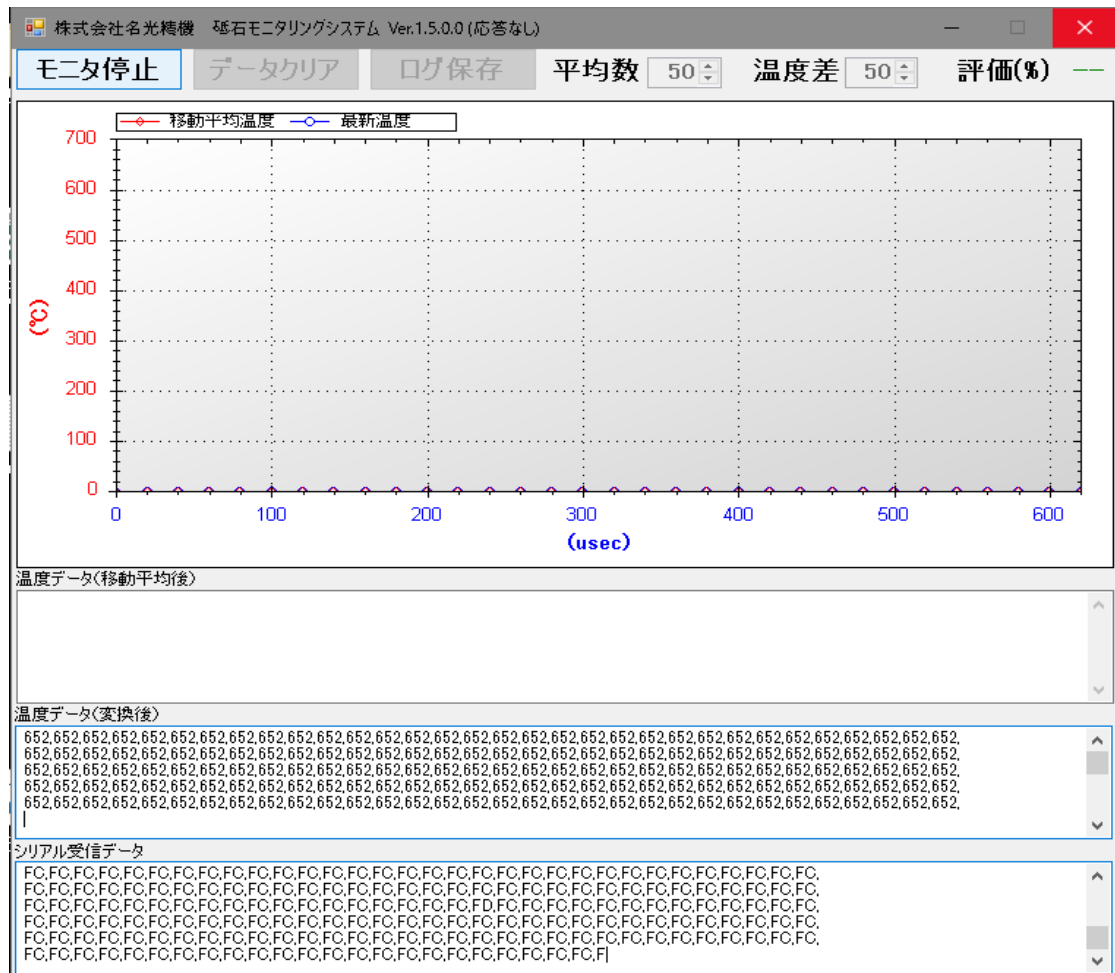
受信機に送られてきたシリアルデータを Excel を使用して温度データに変換していた為、温度確認にタイムラグが発生していた。

⇒＜対策＞砥石モニタリングシステムを製作し温度データをリアルタイムに確認、また表示されるグラフに使用されるデータの平均数を手動で選択可能とした。



モニタリングシステムに多くの機能（シリアルデータから温度データへの変換、同期平均の計算、温度推移グラフの表示）を追加したために、温度データが蓄積していくと動作が極端に遅くなるという現象を生じた。

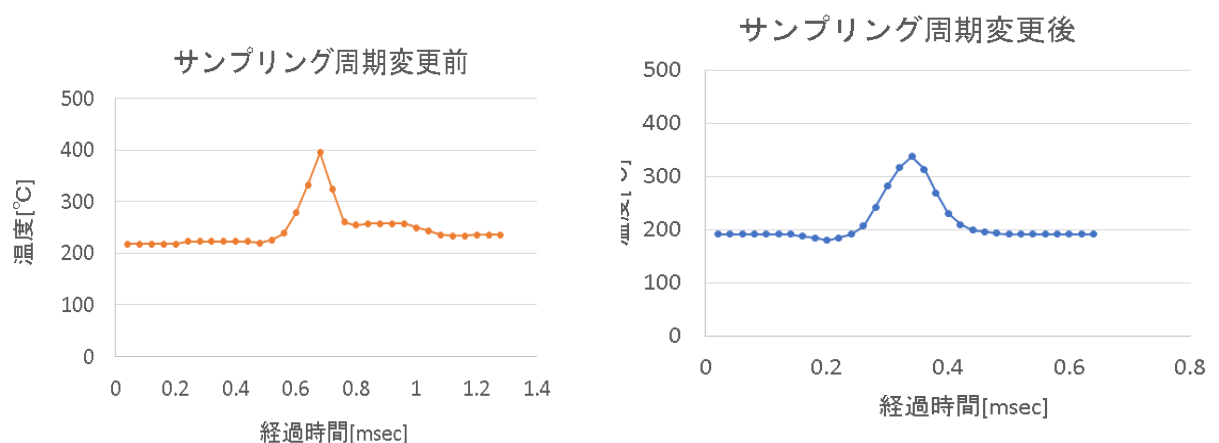
⇒＜対策＞一定数の温度データが蓄積された場合パソコン内に作成したLog フォルダに自動で保存されるようにしてモニタリングシステム内から温度データを削除することで改善した。



(5) 温度推移データの精度向上

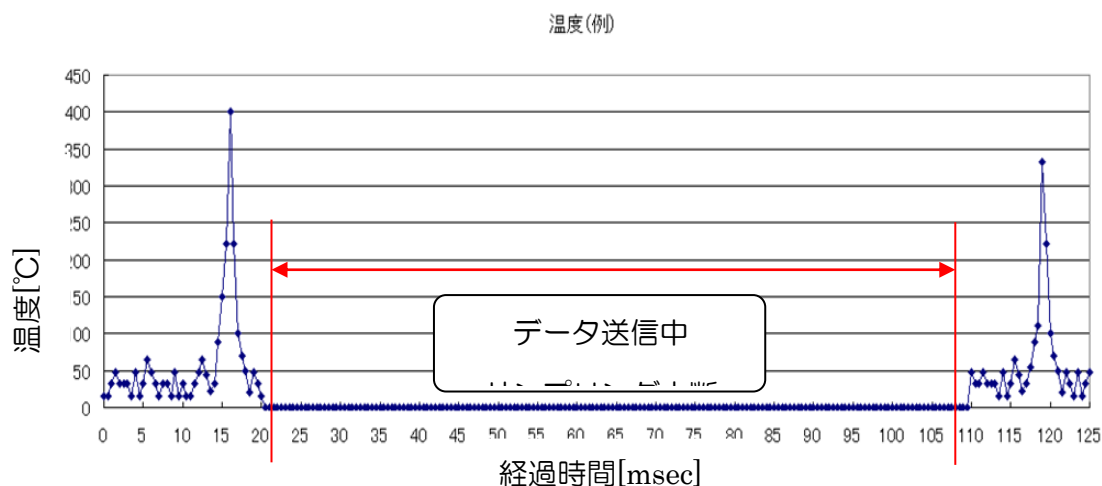
(5. 1) サンプル周期の短縮による温度上昇→下降時の測定ポイントの増加

測定ポイント数は変更せずにサンプル周期を 0.04msec→0.02msec に変更することで温度上昇→下降時の重要測定ポイント数を倍加することで、温度推移の測定精度の向上を図った。



(5. 2) データ送信インターバルの短縮による、温度測定データ数の増加

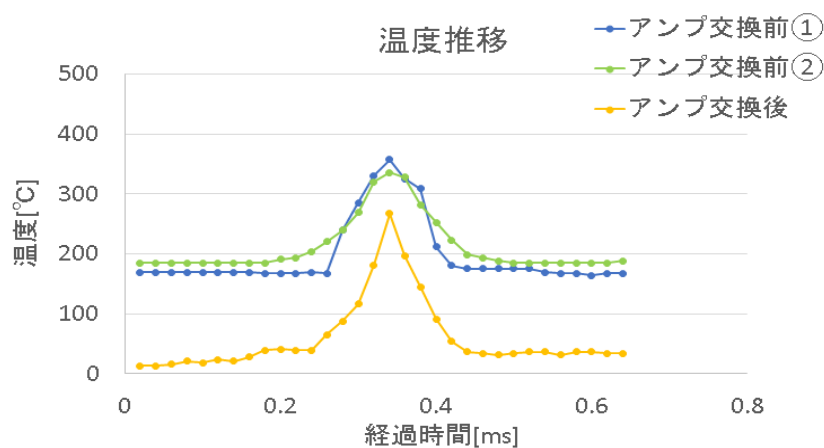
データ送信中は温度測定のサンプリングは中断しなければならない為、このデータ送信インターバルを 200msec から 50msec に短縮することで、温度測定データ数の増加を図った。



(6) 最低温度のドリフトの改善

増幅回路により熱電対の熱起電力を40倍に増幅していたため、最低電圧が0.7V 残ることになっていった。(温度に変換すると約 150°C) そのために最低電圧が増幅回路の影響を受け、最低 温度が上昇するという現象(ドリフト) 生じていた。

⇒<対策>増幅回路を熱電対専用の IC チップに変更することでドリフト現象を抑制した。



【１－５－２】研削状態判別の為のデータ取り試験

（１）研削状態毎の研削温度推移特性

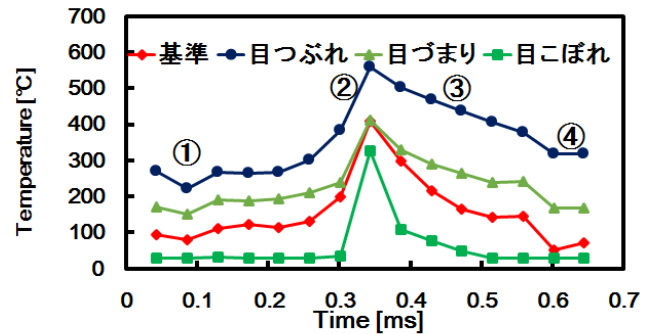
右図に一般鋼材での研削状態ごとの研削温度の推移グラフを示す。

正常な研削状態に比して、

①目つぶれでは最高温度が高い。

②目づまりでは、最高温度が高く、最高温度からの下降勾配が緩やかである。

③目こぼれは全てにおいて温度も低く、最高温度からの下降勾配も急である。



◆評価項目：研削状態ごとに特徴あり
 ①測定開始時の温度 ②最高温度
 ③最高温度からの下降勾配 ④測定終了時の温度
**砥石表面温度の変化から
 リアルタイム二研削状態を判別**

一般鋼材では上記のような特徴を示したが、難削材のハイパー研削での温度推移特性について調査した。

（２）データ取り試験用砥石

下表に試験に使用した砥石の狙いを示す。

- ・正常：過去の試験で一番良い性能を示した砥石
- ・目づまり：砥粒を小さくし、結合度の硬い砥石
- ・目つぶれ：粒度を大きくし、結合度を最も硬くして、砥粒をしっかり保持
- ・目こぼれ：結合度を柔らかくし、砥石の脱落が生じやすい砥石

砥石の種類	正常	目づまり	目つぶれ	目こぼれ
結合剤	VM	VM	V	VM
砥粒	SV	WA	A	WA
粒度	80	120	46	80
結合度	J	N	O	D
組織	14	12	10	14

（３）試験条件と試験方法

①下表に試験を行った条件を東京農工大と比較して示す。

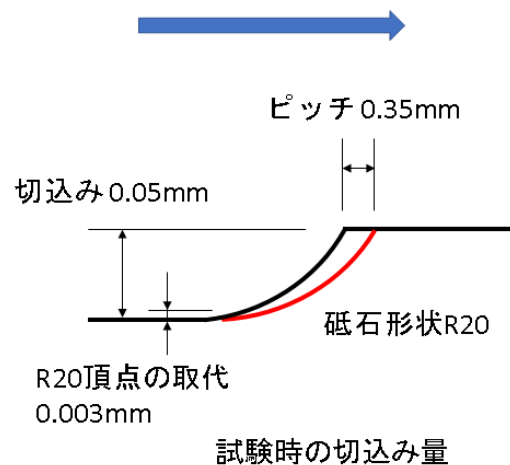
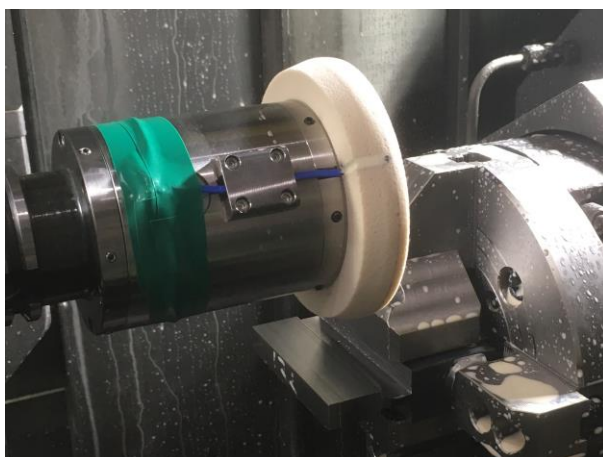
大きな違いは、被研削材、研削速度、研削送り、研削液の供給にある。

	名光精機	東京農工大
研削方法	ダウンカット	アップ、ダウンカット
被研削材	超耐熱鋼合金	S50C
研削速度（周速）m／秒	23.0	7.85
切込み mm／回	0.05（測温部としては 0.02）	0.02
研削送り速度 mm／分	2,000	500
研削液供給方法	内部	ドライ
研削液供給圧	内部 3.5MPa	—
内部研削液吐出量	11.0ℓ /min	—
使用機械	Mazak INTEGREX i-200S T	—

②試験方法

- ・実際のタービンブレードの研削方法に合わせ、砥石の形状もR20とした。

測温部の位置をR20の中心（頂点）に持ってくると、測温部での取代が 0.003mmと少なくなるために、測温部の位置を頂点から先端側に 1 mm寄せた位置とした。



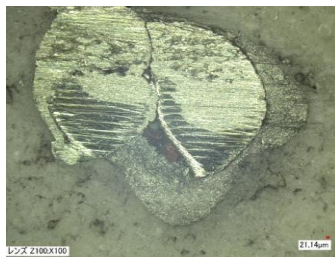
R20砥石使用 温度測定試験

（３）各研削状態砥石の測温部

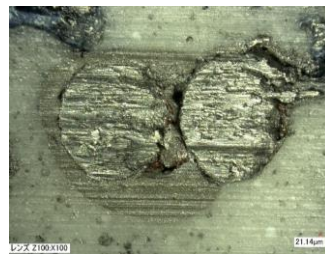
測温部の写真からは正しく測温していると考える。



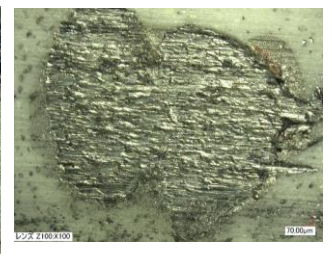
正常研削



目づまり



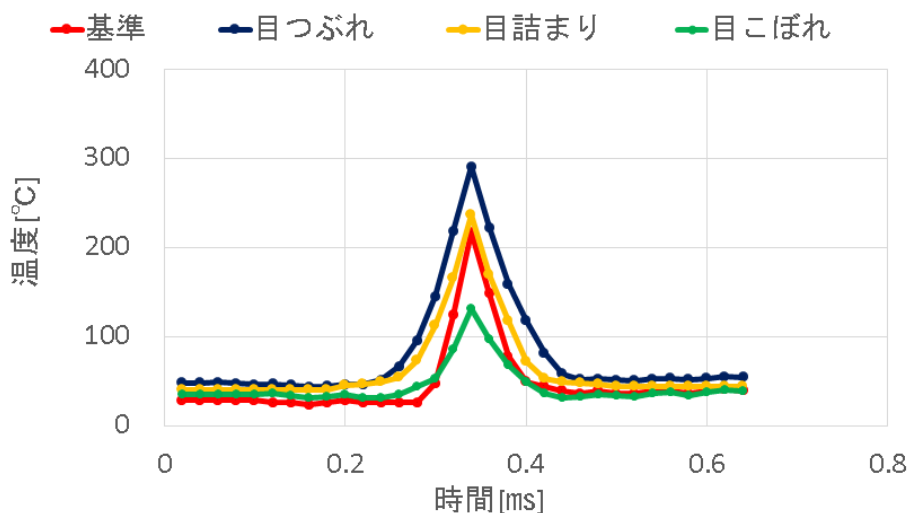
目つぶれ



目こぼれ

(4) 各研削状態の温度推移

東京農工大学の一般鋼材のドライ研削加工と比較すると、最高温度の高低の関係は一致しているが、ハイパー研削では測定開始温度・終了温度において、各研削状態間に顕著な差は見られない。これはハイパー研削で研削液の供給による冷却能力が高いために差が出ていないと考える。



各研削状態での温度推

(5) 各研削状態の砥石表面観察（倍率 100 倍）

(5. 1) 目づまり砥石

①ドライ研削で目づまり状態を作った後ハイパー研削を実施。ハイパー研削にしたことで目づまり状態が解消されている⇒ハイパー研削の研削屑除去効果の高さを示している。



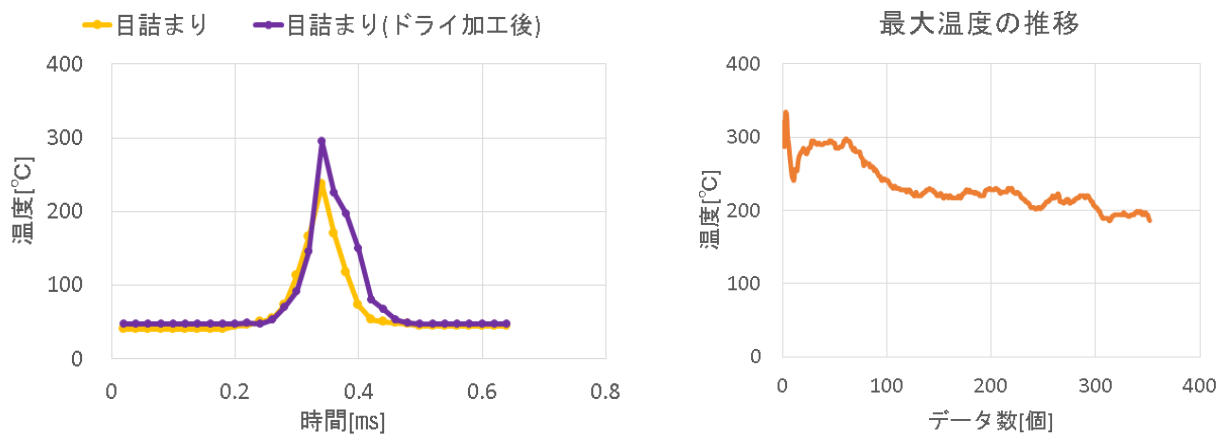
ドレス後

目づまり状態

目づまり状態からハイパー研削

②砥石表面温度

ドライ加工後ハイパー研削に切替た後の最大温度の推移グラフが示すように 300 回転でほぼ
ほぼ正常研削に回復していることが解る。



(5. 2) 目つぶれ砥石

目つぶれと同時に僅かながら目づまりも発生している。



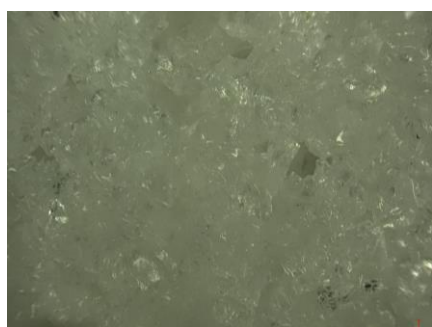
ドレス後



目つぶれ状態

(5. 3) 目こぼれ

砥石の摩耗量が他の研削状態に比べ大きく、表面が粗くなっている。



ドレス後



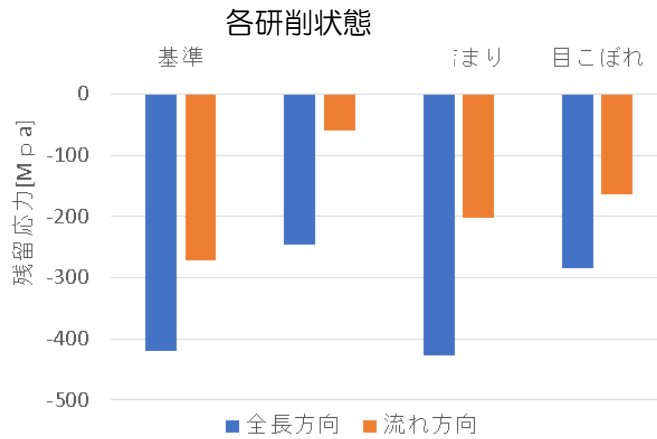
目こぼれ状態

(6) 各研削状態での被研削物の表面性状

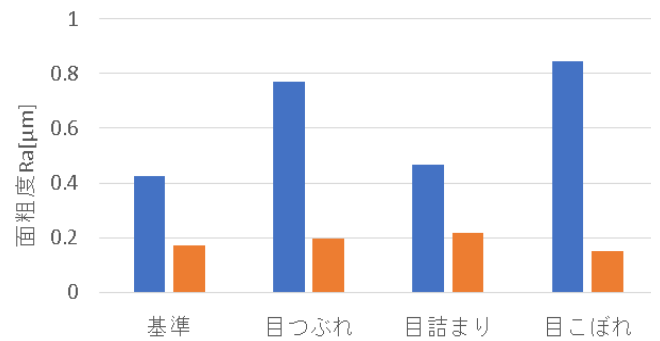
①目詰まりは残量応力と面粗度とも基準（正常）研削状態に類似していて悪影響は出ていない。

これは、目詰まり状態が上手く再現されず、基準（正常）研削状態になっていたと推測する。

一方目こぼれは残留応力と面粗度に悪影響を及ぼしている。



各研削状態の残留応力状態

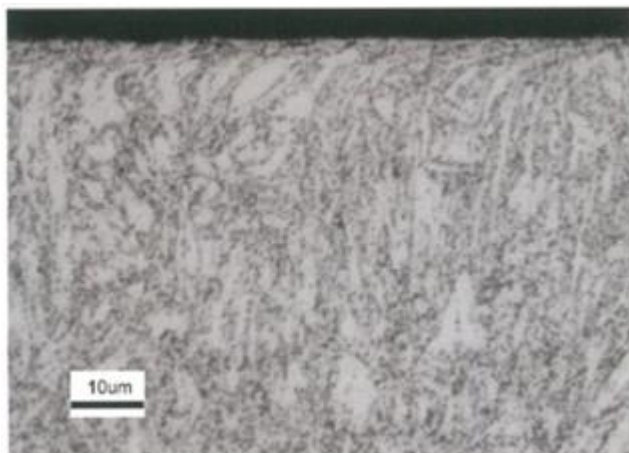


各研削状態

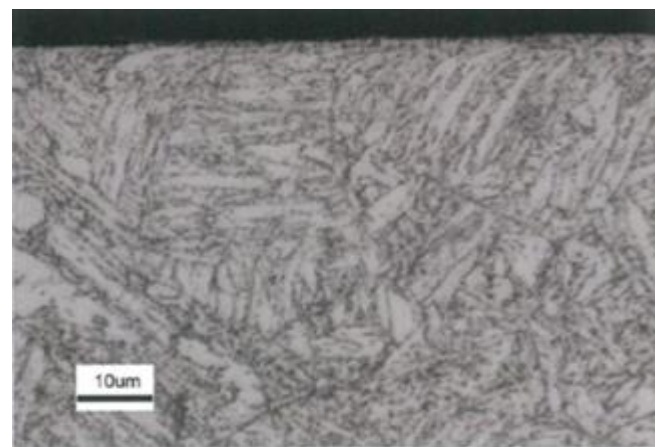
各研削状態の面粗度

(7) 各研削状態での被加工物表層部断面組織観察

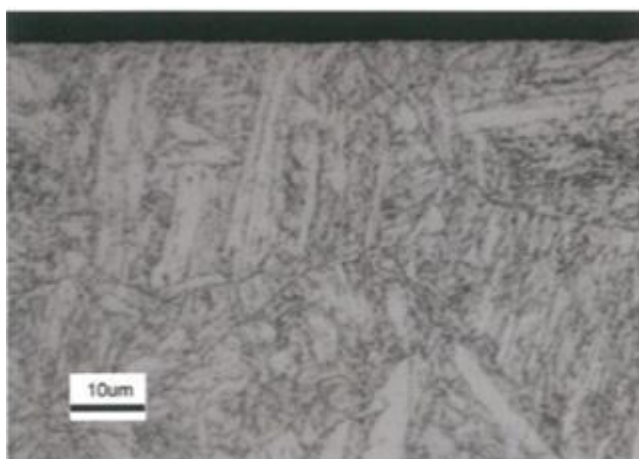
各研削状態の表層部断面組織観察からも、表層部に僅かに塑性流動がみられるものの、各研削状態間での差異は認められない。



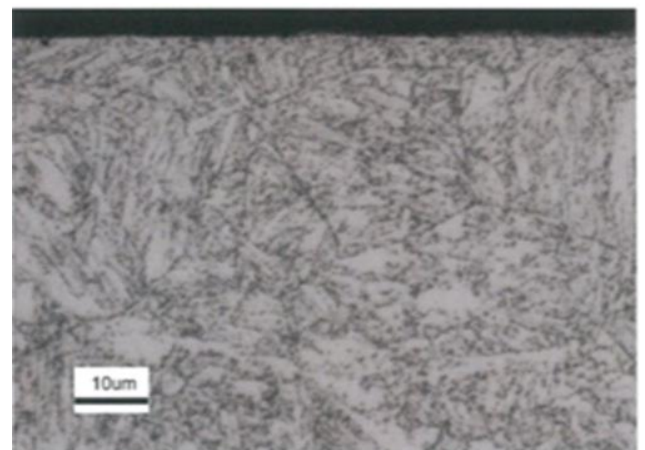
基準（砥石）



目詰まり（砥石）



目つぶれ（砥石）



目こぼれ（砥石）

【1-5-3】研削状態のモニタリングと最適加工制御

・当初提案の異常判別

(1) 研削状態の評価項目

研削状態の特性（特徴）から、
評価項目として

- ①測定開始時の温度
- ②最高温度
- ③最高温度からの下降勾配
- ④測定終了時の温度

を上げ、研削状態判別のアルゴリズム
ムへ展開することとした。

(2) 研削状態判別アルゴリズム

(右の図に示す)

①正常（基準）な状態の温度推移
データを評価項目ごとに分析、判別

式化

②評価項目ごとに研削状態の判別
アルゴリズムを作成した。

(3) 研削状態判別を活用しての

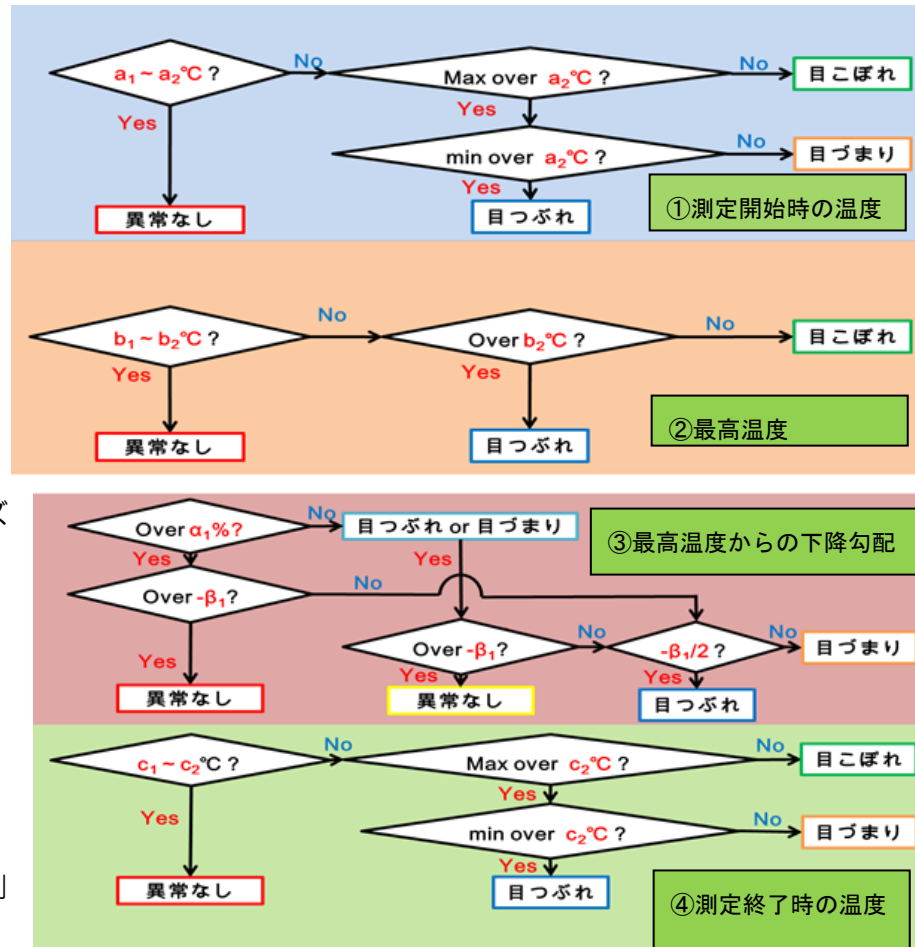
最適加工維持アルゴリズム

①当初、最適制御技術として研削温度から研削条件（周速、切込み送り）を変更することを考えていた。しかし、制御が複雑になり過ぎ、返って使いづらく現場的でないと意見からシンプルにした。

③最適加工制御に結び付けるアルゴリズムは、研削状態を判別して、

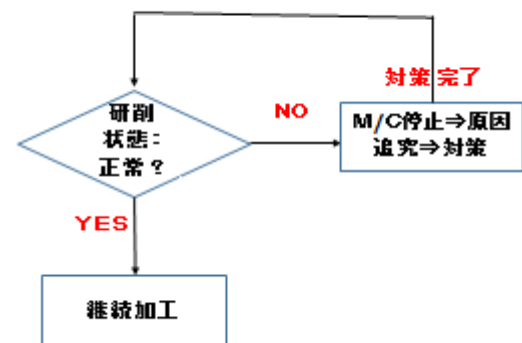
「正常な研削状態にないと判別→「機械を停止」

→「異常状態に至った原因の追究」→「対策実施」→「研削再開」とした。



研削状態判別のアルゴリズム

① 研削加工状態から判別



研削状態判別から最適加工制御へ

(4) 研削状態の正常と異常の判別について

①研削状態の正常と異常の判別には、

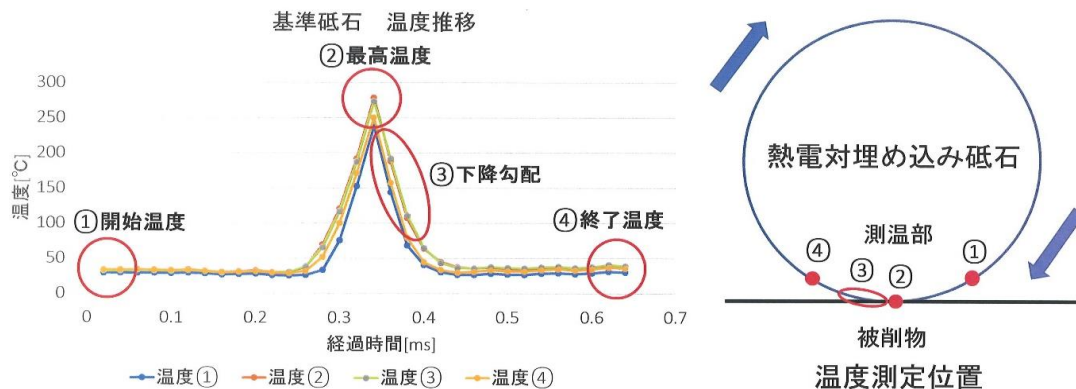
前年度に前項【1-5-3】(2)①にて判別式化、

を提案していたが、各研削状態間で顕著な差を見出すことが出来なかったために、正常な温度領域から逸脱を生じた場合に、異常と判断するのが妥当との考えに至った。

②正常研削状態の温度領域の設定

正常研削状態を呈する砥石のドレス後から温度計測を開始し、タービンブレード翼片面の加工距離を研削して、温度の安定性確認のため、4回同一試験を実施した。その結果4回とも同一傾向を示したことから、安定性には問題のないことを確認した。

そして・最高温度、・下降勾配、・開始温度、終了温度の推移から、正常研削状態の各温度領域を設定した。

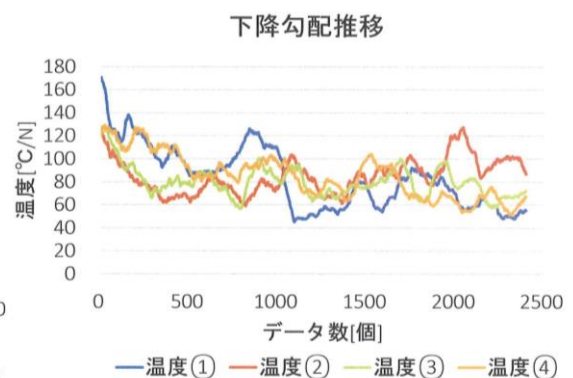
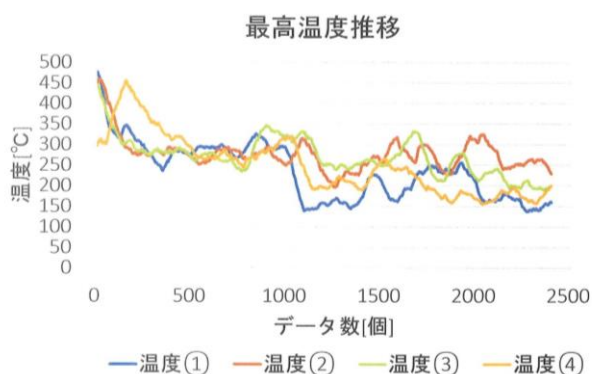


<最高温度の領域>

- ・最低温度:137℃～最高温度:346℃

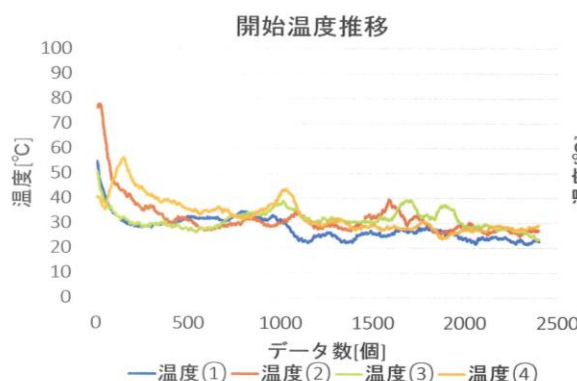
<下降勾配の領域>

- ・最低温度勾配:45℃～最高温度勾配 171℃



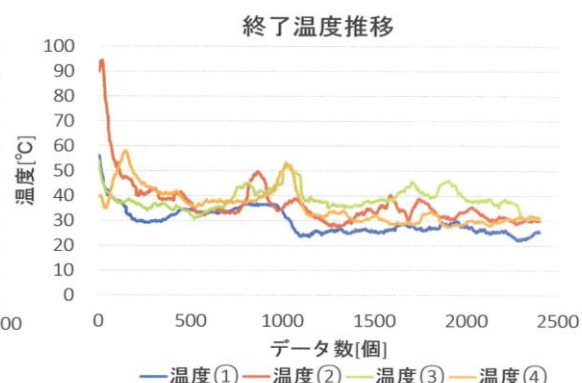
<開始温度の領域>

・最低温度:21℃～最高温度:44℃



<終了温度の領域>

・最低温度:22℃～最高温度:54℃



下表の温度領域から逸脱した場合を、「異常」と判断して、機械を停止することとした。

	開始温度	最高温度	下降勾配	終了温度
正常研削域	10～40℃	150～300℃	-50℃/N	10～40℃

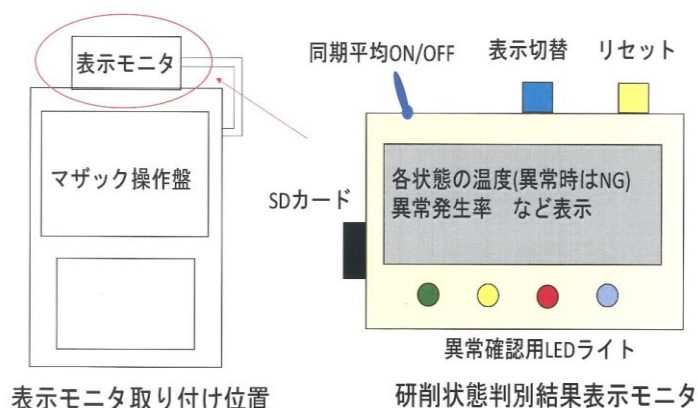
(5) 研削状態判別結果表示モニター

研削状態監視モニターを機械の制御盤上に配置し、各異常状態が発生した場合には、モニター上で点滅するようにした。

異常状態発生時のモニター表示を受け、ブレード加工終了時の機械自動停止を利用して、異常状態の排除と対策を実施する。

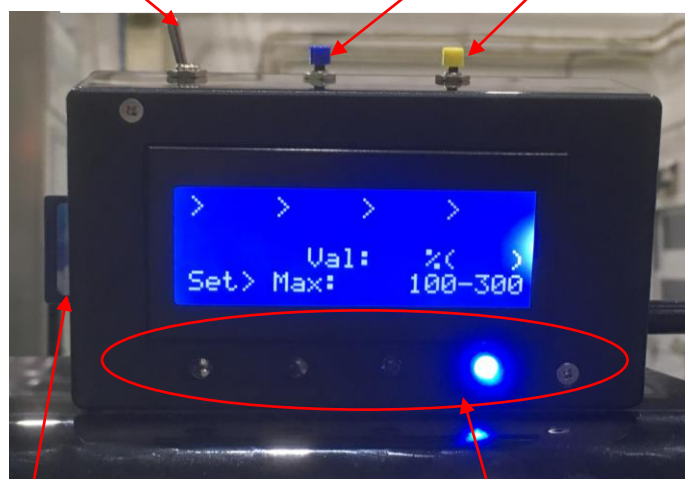
(ブレード一本の加工を終えると作業者が

必ずブレードの取付・取り外しを実施するため、そのタイミングを利用して対策することにした。)



同期平均 ON/OFF 表示切替 リセット

開始温度 最高温度 下降勾配 終了温度



SDカード 研削状態確認LEDランプ

27 異常状態発生時にアラーム表示

【1-5】サンプル加工、【1-6】評価

①以上記した熱電対を埋め込み砥石、自己発電機能付き砥石ホルダーと自己モニタリングシステムを実機に装着してサンプル加工を実施し、研削点での温度をリアルタイムに計測して研削状態を常時判別するシステムが構築できたことを確認した。最適加工制御に結び付けるために、研削状態と研削温度推移の関係を調査して研削状態ごとの特性を把握し、熱電対の温度計測データから研削状態の良否をリアルタイムに判別するアルゴリズムを確立した。この開発により、「研削加工状態の見える化」が可能となり、研削状態が異常と判断された場合は、機械の制御盤上に配置した研削状態監視モニターを上に赤点滅するようにし、機械を停止させることが出来ることを確認した。これらのシステムは川下ユーザからも画期的なものと評価された。

【1】研削知能砥石の開発成果の総括＞ 評価 ◎：優、○：良、△：可、×：不可

・当初の目標に対して、厳しい見方の評価を実施した場合の評価

具体的実施内容		開発成果	評価
【1-1~3】	知能研削砥石の開発	① 知能砥石製作技術確立 ② 焼成時熱電対埋め込み断念 ③ マイクロ波炉で製作工期1/2 ④ 導通材Al箔→銀ペースト安定化	○
【1-4】	データ送信機能組込み砥石ホルダーの開発	① データ送信機能組込ホルダー開発 ② 自己発電機能確立：特許出願 ③ 外部コネクで接続容易化 ④ 研削液浸入防止構造：OK	◎
【1-5】	自己モニタリング技術の開発	① 温度データの送受信技術確立 ② 温度データ送信安定化確保 ③ 送信マイコン・配線類基板化	◎
	加工物表面品質の確保	① 品質評価基準確立 ・ 研削状態別の研削温度、残留 応力、面粗度と断面組織写真	◎
	最適加工制御アルゴリズムの確立	① 加工制御アルゴリズム確立 ・ 研削状態良否判断：OK ② 各種材料に対応した汎用性のある加工状態判別への改善要	○
	最適加工制御技術の開発	① 実用的な加工制御技術確立 ・ 研削状態判別は良否のみ ・ 最適加工制御となっていない ② 研削状態判別モニター開発	○
【1】	ICタグ付き砥石の開発	① ICタグ付き砥石の製法確立 ② 用途：電着砥石等高価な砥石にICタグを付け、加工・電着・台金修正履歴を記録	△

第3章 本論-2 ハイパー研削最適砥石の開発

【2-1】ハイパー研削最適砥石の開発

難削材のハイパー研削加工に最適な①研削条件、②研削液供給方法、③砥石を選定するために、評価項目として研削比と面粗度を用いて比較試験を実施した。

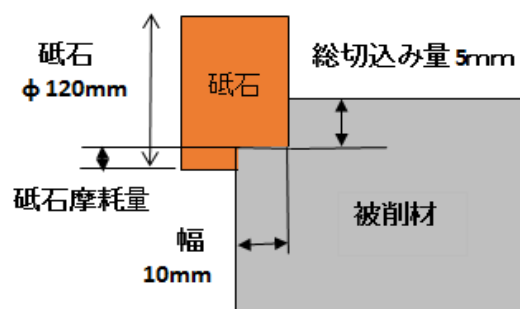
(1) ①研削条件・②研削液供給方法の比較試験と結果

(1. 1) 研削条件と試験方法

- ・下表に試験を行った研削条件とその右の図に試験方法を示す。
- ・試験に使用した砥石 ・砥粒：SV、粒度：80、結合度：J、ボンド：VF、組織：14

研削条件

研削方法	ダウンカット		
被研削材	超耐熱鋼合金		
使用砥石	・砥粒SV・粒度80・結合度J・ボンドVF・組織14		
使用機械	Mazak INTEGREX i-200ST		
研削速度(周速)m/秒	23	33	
研削送り速度 mm/分	2,000	2,500	3,000
切込み mm/回	0.03	0.05	
研削液供給法	内部 3.5MPa	外部 0.3MPa	
総研削長	幅104mm*切込み100回=10,400mm		



試験方法

(1. 2) 試験結果 : 下図に試験結果を示す。

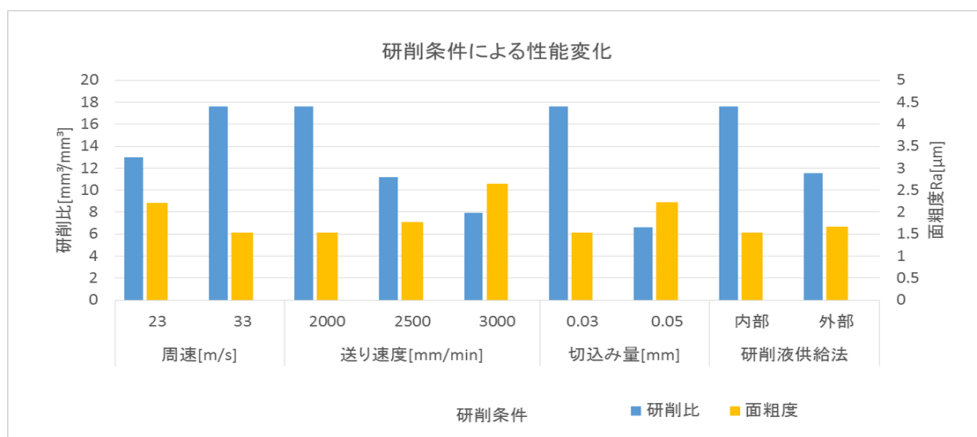
①周速は速い方が、研削比・面粗度とも良くなる。

②送り速度は逆に遅い方が良い。

③切込みも小さい方が良い。

⇒いずれも軽研削となる方が、研削比・面粗度とも良い結果を示している。しかし研削効率の観点からは、周速を上げ、送り速度を上げた加工が必要である。

④研削液供給方法の比較試験結果は、研削比では、ハイパー研削の内部供給が外掛けに比して52%向上した。これはハイパー研削加工法の高い研削性能を示すものである。



研削条件、研削液供給方法の比較試験結果

(2) 砥石種類別比較試験と結果

試験に使用した砥石

(2. 1) 試験に使用した砥石の種類

右の表に試験に使用した砥石を示す。

砥石の5因子を図のように振って比較試験を実施した。

薄い青色の砥石が基準となるベンチマーク砥石である。

なお、試験に使用した研削条件は、前ページ(1. 1)項に記載の研削条件表の色付きの条件で試験した。

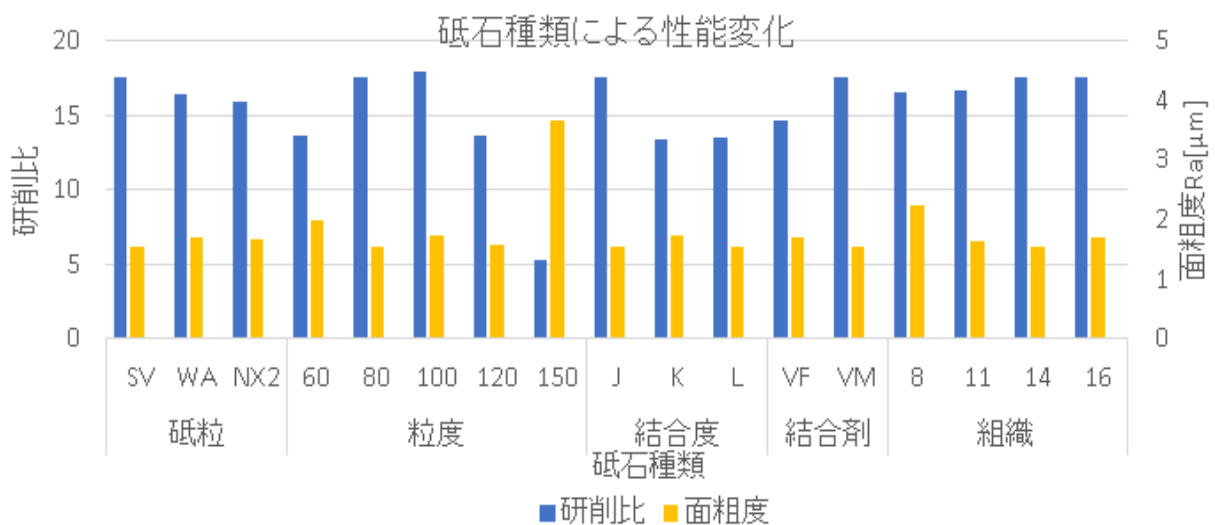
砥粒	SV		WA		NXZ
粒度	60	80	100	120	150
結合度	J		K		L
結合剤	VF			VM	
組織	8		11	14	16

(2. 2) 試験結果

下図に試験結果を示す。

<難削材加工に最適な砥石の組合せ>は

- 砥粒：SV 単結晶タイプで破砕性を改質したものが一番優れている。
- 粒度：#80～100 仕上げ面粗度は粒度が細くなるほど良くなるとは言えず、#80～100が良い結果を示している。これは、砥粒が細くなると、研削液の内部供給能力が低下することから、目詰まりが生じ易くなったためと考える。
- 結合度：Jの柔らかい砥石が適している。
- 結合剤：VM が研削比・面粗度とも良い。
- 組織：研削比では組織14と16が一番優れているが、面粗度で組織16が劣る。内部からの研削液の供給量の多い組織16が良いと考えていたが、組織16は砥粒の数が少なく、砥粒間隔が広がったことで、面粗度が悪くなったと考える。



砥石の5因子別比較試験結果

(2. 3)【2-2】サンプル品加工と川下ユーザ評価

①サンプル加工

実タービンプレードのサンプル加工を実施し、そのサンプル品の写真を右に示す。

②川下ユーザへ納入・評価

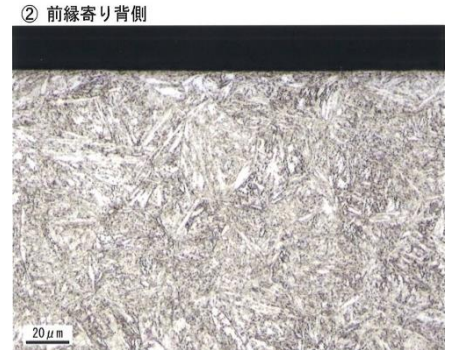
上記のブレードを川下ユーザに納入し 評価を受けた。

<評価>

- ・ミクロ組織：加工変質層なく合格
- ・残留応力：圧縮応力であり合格
- ・精度：従来工法に比し 1/3 に向上



サンプル加工品



加工後ミクロ組織

⇒川下ユーザの評価高く、平成 28 年 11 月から一部量産納入を開始した。

(3) ハイパー研削砥石の回転破壊試験による安全性確認試験

砥石には研削盤等構造規格により「最高使用周速度の 2 倍以上の周速度でも砥石は破壊しないこと」と定められており、今年度導入した回転破壊試験機を使用して、ハイパー研削条件と同じ (3MPa, 10l/min) の研削液を供給して破壊試験を実施した。

(3. 1) 回転破壊試験機と試験方法

①回転破壊試験：下の左端の写真に機械の全景を示す。

- ・(有) キョーシン機械製 TT-16-250

砥石寸法 径 75x 幅 25x 内径 38.1~305x50x38.1

最高回転 25,000min⁻¹

研削液供給条件 水圧 5MPa 水量 20L/min

②試験方法

- ・ハイパー研削加工と同じ条件の水圧で水を供給しながら、砥石の回転数を徐々に上げて行って破壊する回転数=周速を求めた。下の写真の中央と右端に破壊前後の写真を示す。



回転破壊試験機



破壊テスト前



破壊テスト後

③回転破壊試験結果

試験結果を下表に示す。

試験に使用したすべての砥石で、ハイパー研削と同じ条件下でも安全係数2以上（Min.2.2）を確保できた。しかし、ハイパー研削と同条件下では通常の研削条件に比べて85～90%の周速で破損していたが、その後の回転破壊試験からも安全係数2以上を確保でき、安全性に問題のないことを確認した。

砥石回転破壊試験結果

スペック	寸法	ポン	破壊				ハイパー時の安全係数
			1	2	3	4	
			ハイパー無し破壊回転rpm		ハイパー破壊rpm		
WA 46 I 7	5A 120x20x38.1	VM	14870	14820	14920	14990	2.8
WA 46 G 14	5A 120x20x38.1	VM	12490	約12700	12200	11440	2.2
WA 46 P 7	5A 120x20x38.1	VM	14790	14810	14940	14840	2.8
WA 46 L 14	5A 120x20x38.1	VM	14750	14880	12820	13330	2.5
WA 80 J 7	5A 120x20x38.1	VM	14900	14890	-	14770	2.8
WA 80 G 14	5A 120x20x38.1	VM	15030	14890	14840	15020	2.8
WA 80 P 7	5A 120x20x38.1	VM	14890	14970	14880	14780	2.8
WA 80 I 14	5A 120x20x38.1	VM	14880	14760	14810	14800	2.8
WA 220 H 7	5A 120x20x38.1	VM	14930	14900	13270	14830	2.7
WA 220 G 14	5A 120x20x38.1	VM	14980	14980	14930	14890	2.8
WA 220 P 7	5A 120x20x38.1	VM	14960	15020	14980	14830	2.8
WA 220 J 14	5A 120x20x38.1	VM	14960	14970	15000	14930	2.8

【2-1-1】サンドイッチ砥石の開発

サンドイッチ砥石は砥石の幅方向中央部に通水性の良い砥石を配して、ハイパー研削性能の向上を狙いとしている。

（１）試験に使用した砥石

下表に試験に使用した砥石を示す。

その右にサンドイッチ砥石の拡大と全体写真を示す。

試験に使用した砥石

	①	②	③
タイプ	一般ハイパー	サンドイッチA	サンドイッチB
砥粒	SV		
結合剤	VM		
粒度	80	80-60-80	
結合度	J	J-I-J	K-I-K
組織	14		8-14-8



サンドイッチ砥石の拡大と全体写真

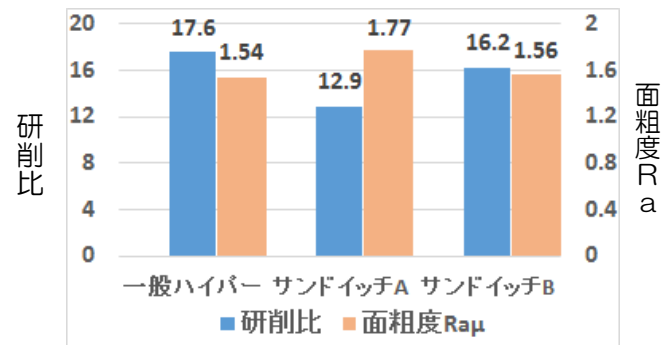
（２）試験（研削）条件

試験に使用した研削条件は、（１．１）項に記載の研削条件表の色付きの条件で試験した。

（３）試験結果

試験結果を右の図に示す。

- ①ベンチマークとした一般ハイパー研削砥石以上の性能（研削比と面粗度）を得ることが出来なかった。
- ②研削水のある量以上に供給しても、性能（研削比と面粗度）が向上しないことからベンチマークとした砥石を超え得なかったと考える。
- ③またサンドイッチ砥石の製作には２倍の工数を要し費用対効果面から課題を残した。



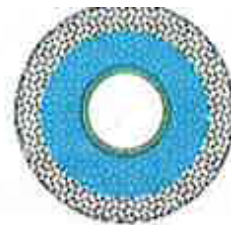
サンドイッチ砥石の試験結果

【２－１－２】バウムクーヘン砥石の開発

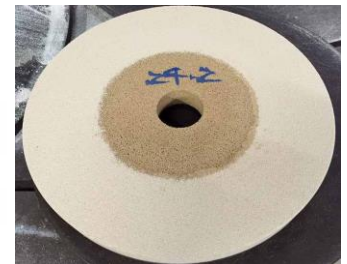
サンドイッチ砥石が砥石の幅方向中央部に通水性の良い砥石を配したのに対して、バウムクーヘン砥石は径中央部に通水性の良い砥石を配して、ハイパー研削性能の向上を狙いとしている。

（１）バウムクーヘン砥石

右図にバウムクーヘン砥石イメージ図と試作したバウムクーヘン砥石写真を示す。



バウムクーヘン砥石イメージ



試作したバウムクーヘン砥石

（２）考察

- ①バウムクーヘン砥石はサンドイッチ

砥石と同じ考えで製作しており、バウム

クーヘン砥石の性能も研削水のある量以上に供給出来ても、性能が向上しないことからベンチマークとした一般のハイパー研削砥石の性能を超えることは出来ないと考える。

- ②バウムクーヘン砥石はサンドイッチ砥石同様に１．５倍の製作工数を要し費用対効果面から課題を残した。

【２－１－１】サンドイッチ砥石と【２－１－２】バウムクーヘン砥石の見極め

上記の両砥石の開発結果では、サンドイッチ砥石の研削性能（研削比、面粗度）はベンチマークとした一般ハイパー研削砥石以上の性能を得ることが出来なかった。そこでニートレックスと名光精機の両者が今までの試験結果の分析と追加試験を実施し、見極めることにした。

(1) 通水性試験結果

①各種組織の砥石を製作し、組織と通水量と関係を調査した。

試験方法は、砥石を 3,700 と 5300 回転／分回転させ、定常となった時点で 20 秒間採水しその重量を測定した。研削液の供給吐出圧 5Mpa、吐出量 20L/min とした。(研削試験条件に近い値を採用)

②試験結果(下表): ⑥の砥石がサンドイッチ砥石

サンドイッチ⑥が通水性で一番多い量を示しているが、砥石間の差はほとんどのなく、この差がハイパー研削効果を左右するものでない。

組織が粗である組織 16 砥石が一番良い通水性を示すと予想していたが、予想に反して砥石間の優位差は認められなかった。

	砥粒	粒度	結合度	組織	結合剤	砥石回転数RPM	
						3,700	5,300
①	A	46	P	10	VM	3,410	3,596
②	WA	80	G	14	VM	3,536	3,534
③	WA	80	K	14	VM	3,488	3,518
④	WA	120	L	14	VM	3,665	3,548
⑤	WA	80	F	16	VM	3,676	3,618
⑥	WA	80-60-80	J-I-J	14	VM	3,686	3,714

(2) 一般ハイパー研削砥石の性能を超えられなかった理由

①期待していた研削水供給量増はなく、より高いハイパー効果が得られなかった。

②砥石全幅に対する有効砥石幅の減少により、研削比が低下した。



(3) 製作コスト(サンドイッチ砥石)

①製作工程: サンドイッチ状に成形→焼成→サンドイッチ部がスパイラル状になるよう成形研削

⇒サンドイッチ部をスパイラル状に成形するには、砥石を斜めにして成形研削が必要となり、製作コストに2倍要する。

(4) 総合評価

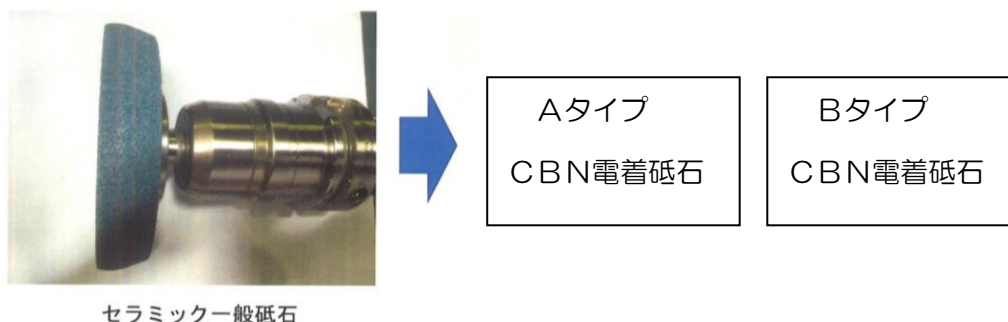
・アイデアとしてユニークで期待していたが、ベンチマークとした一般砥石の性能を超えること出来ず、逆にコスト高となることから開発を断念し、他の新しい超砥粒砥石CBN電着砥石の開発に注力した。

【2-1-3】ハイパー研削最適砥石：CBN電着の開発

- タービンプレードの翼表面を研削する砥石を、一般セラミック砥石からCBN電着砥石に変更することで、「加工サイクルタイムの短縮」と「翼面形状精度公差幅の向上 従来幅の1/3化」を目指す。

(1) 使用砥石

- 量産加工試験に使用したCBN電着砥石はAタイプとBタイプの2種類。



(2) 量産試験条件

- CBN電着砥石をタービンプレードの翼最終仕上げ工程に使用

研削方法	ダウンカット	
被研削材	超耐熱合金	
研削速度（周速）m／秒	50.3	
切込みmm／回	0.03	
研削送り速度 mm／分	2,000	
総研削長 mm	32,000	
研削液供給法	内部＋外部	
研削液供給圧	外部	0.3MPa、 内部 3.5MPa
内部研削液吐出量	11.0ℓ/min	
外部研削液吐出量	38.6ℓ/min	
使用機械	Mazak INTEGREX i-100ST、i-200ST	

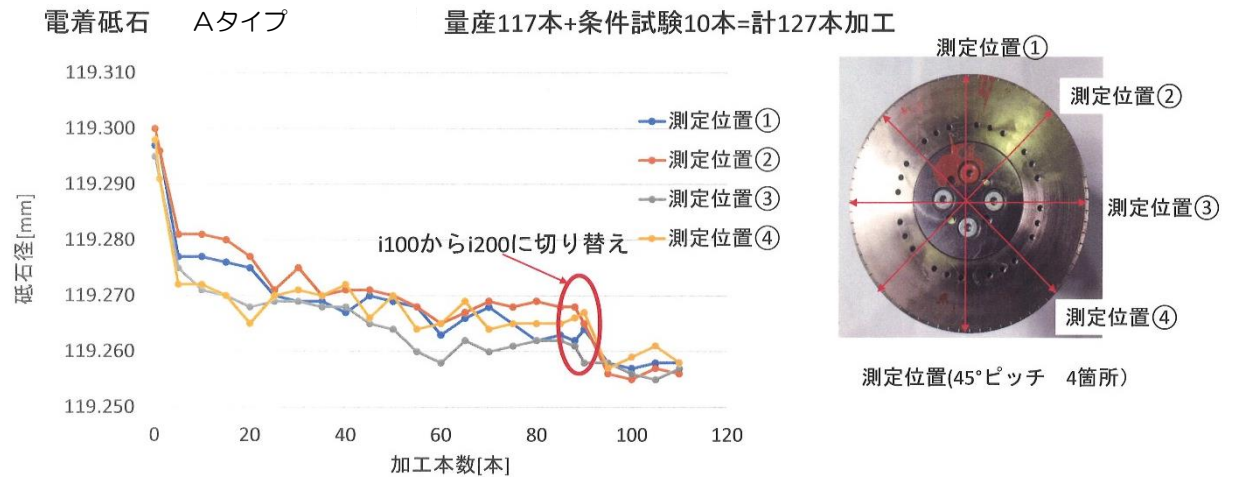
(3) 量産試験結果

(3. 1) 砥石径の摩耗による推移

①砥石を機械に装着直後は砥石の振れの為、初期摩耗として径で20μ強減少するが、その後は定常摩耗となり安定した摩耗となっている。途中で加工する機械を替え装着し直すと、再度初期摩耗を呈する。→砥石寿命を延長するためには、砥石をホルダーに装着した状態で電着後のフレ取り加工を行って、初期摩耗の減少を図る必要がある。

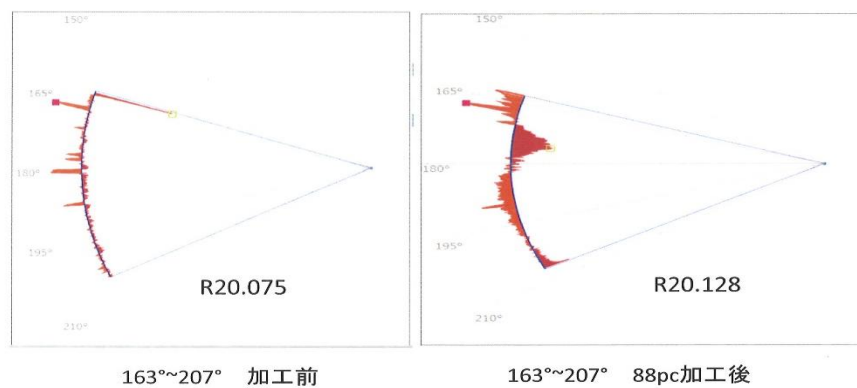
②今回の量産試験では、砥石寿命に達するまでブレード総本数127本加工したことになる。途中で加工する機械を替えなければ、180本以上加工可能と考える。

一般セラミック砥石は砥石摩耗の為ブレード1本加工する毎にドレッシングする必要がある。



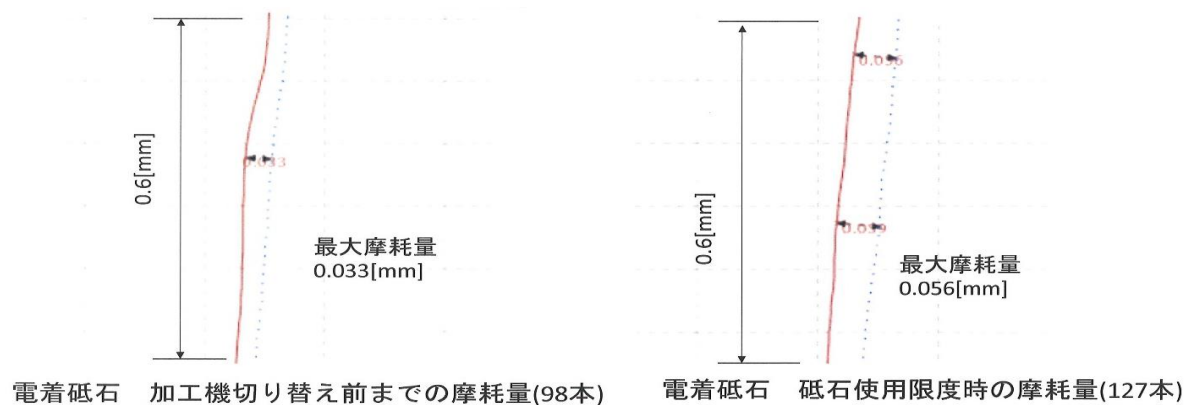
(3. 2) 砥石先端R20形状の変化

①砥石先端はR20の形状になっており、ほとんど同一箇所の点で加工していることになるためある範囲で集中した摩耗となっている→集中摩耗を回避するために、砥石軸を旋回させて摩耗域の分散化を図って改善する。



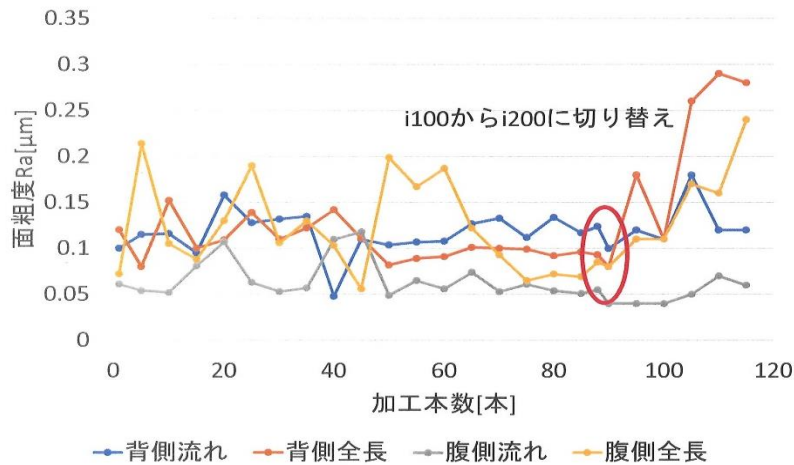
(3. 3) 砥石の摩耗状況 (Zoller ツールプリセッターを用いて形状測定)

①砥石の砥粒突出し量 0.05mmに対して、寿命時の最大摩耗量は 0.056mmに達しており、これは一部電着層が削り取られていることになる。



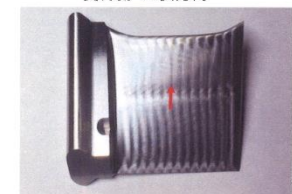
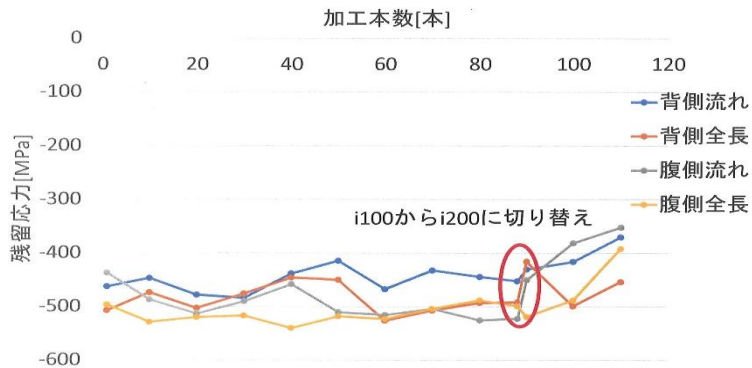
(3. 4) 被加工面粗度の推移

・寿命に達するまで 面粗度規格を満たしているものの、加工本数 100 本以降悪化傾向にある。加工機械を切り替えなければこれほど急激な悪化はなかったと考える。



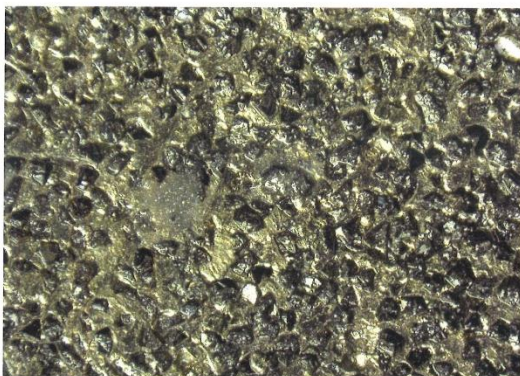
(3. 5) 被加工面表面の残留応力の推移：残留応力測定装置 ハルテック工業製μ-360n

加工機械を切替後、砥石の摩耗が進行したことにより、残留応力は圧縮側 $-450 \sim -500 \text{ Mpa}$ あったものが $-350 \sim -400 \text{ Mpa}$ まで減少した。この程度の減少は疲労強度の低下に繋がるものではない。

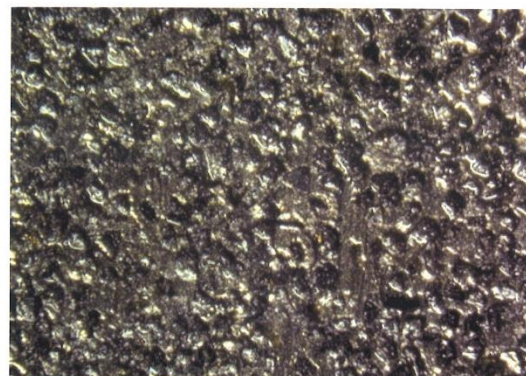


(3. 6) 電着砥石表面観察①

・砥粒の摩耗の進行は観られるものの、寿命（砥石使用限界）時台金の露出は認められない。



加工機切り替え前の砥石表面 倍率100倍

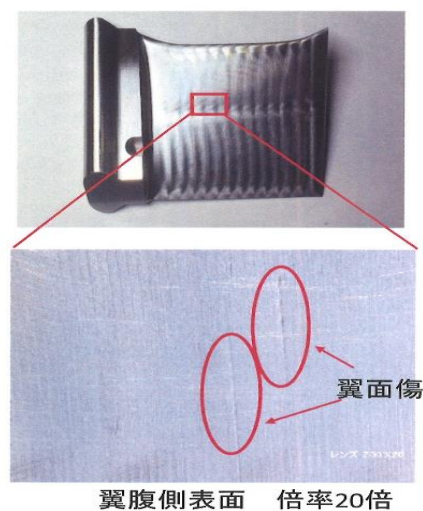


砥石使用限度時の砥石表面 倍率100倍

• 電着砥石表面観察②

Aタイプの電着砥石では、砥石表面に研削屑のカミ込みが認められ、その結果被加工物翼面に傷が発生した。この傷の発生はブレード 88 本加工中 2 本のみである。

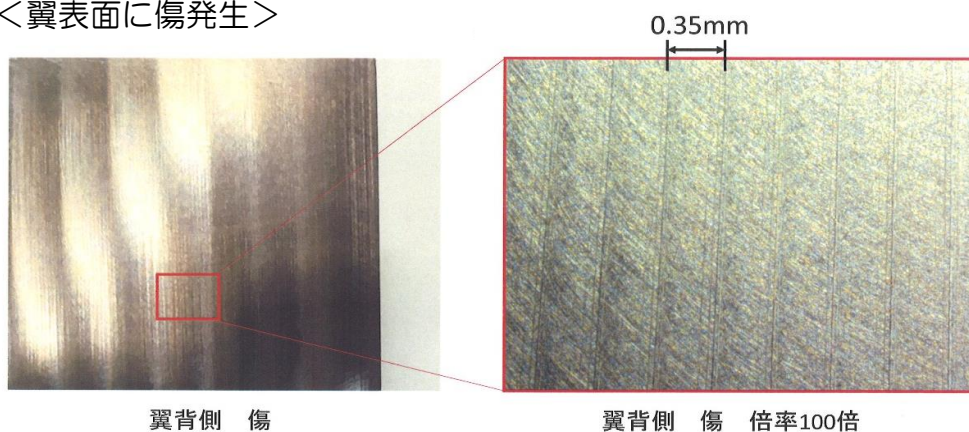
Bタイプの砥石では、研削屑の排出性が良いため発生は認められなかった。



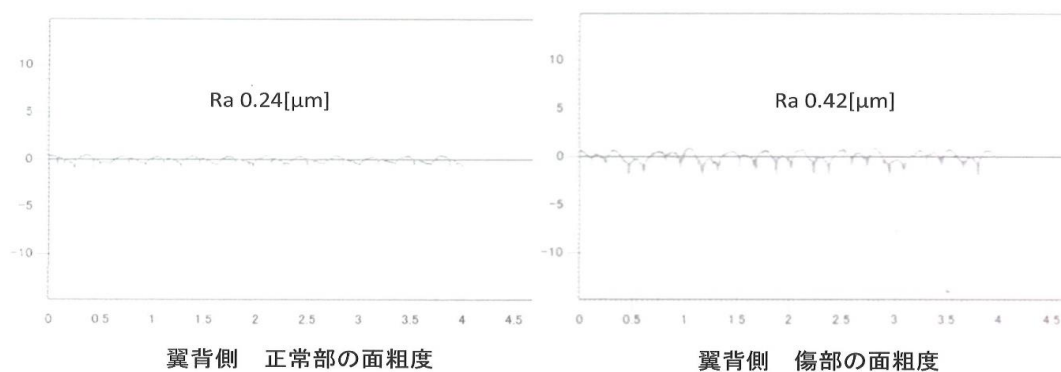
(3. 7) 被加工物表面観察①

砥石の摩耗進行により翼表面に傷が発生したり、仕上げ面粗度の悪化が認められたが、この傷の大きさや面粗度の悪化は、規格内であり問題ではなかった。

<翼表面に傷発生>

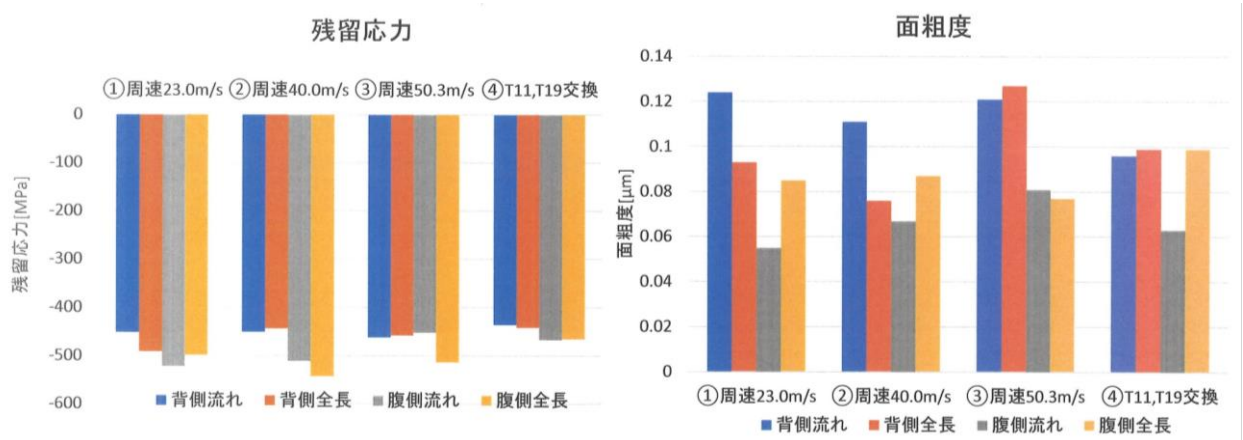


<面粗度悪化の進行>



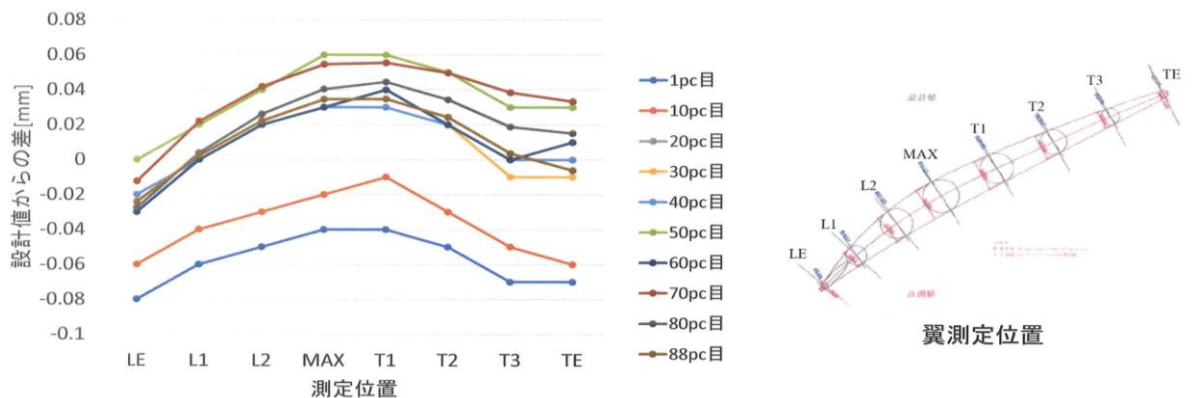
(4) 砥石周速アップ試験（砥石周速：23m/分→40m/分→50.3m/分）

- ・砥石周速アップによる残留応力と面粗度への影響は認められない



(5) 翼AV断面厚みの変化

翼の出入口と中央で 0.04~0.06mm の寸法差が生じており、この寸法差の原因がCAM、機械の追従性、治具の剛性、研削抵抗、粗加工時の形状によるか追求し対策する。



(6) CBN電着砥石のコストメリット検討

CBN電着砥石はセラミック一般砥石に比して非常に高価であるために、トータルコストでどちらにメリットがあるか比較を行った。

・コスト試算条件

①工具費：CBN電着砥石総コストは（台金費＋電着費 5 回＋台金修正費 4 回）から算出

CBN電着加工総個数は寿命までの加工本数は 180 本とし、台金は 25 回使用

②マシンレート：マシンコスト、償却期間 7 年、月間 22 日、1 日 20 時間稼働から算出、

③加工時間：セラミック一般砥石は F 2000 で 30 分/本、CBN砥石は F 3000 で 20 分

③マンレート：健保等級 27 等級と 23 等級単価を足して、2 で割った単価とした。

・コスト比較

CBN電着砥石価格が約5%安価である上、砥石の摩耗が少ないことから、翼面形状精度規格も従来公差幅の1/3まで高めることが可能となった。その結果、川下ユーザからガスタービンの効率も高められると高い評価を得て、量産加工に採用されることが決定した。

		セラミック一般砥石 (円/本)	CBN電着砥石 (円/本)
工具費	砥石総コスト/総加工本数	2500/380=7	1710/4500=380
マシンコスト	マシンレート*加工時間/稼働率	1488*0.5/0.9=817	1488*0.3/0.9=551
マンコスト	マンレート*加工時間/持ち台数/直工率	2875*0.5/3/0.9=533	2875*0.333/3/0.9=355
合計	ブレード1本当たり加工総コスト(円/本)	1357	1286

【2-2】 サンプル加工 【2-3】 評価

ハイパー研削最適砥石の開発は、超砥粒砥石であるCBN電着ハイパー研削砥石の開発に展開し、CBN電着砥石の研削比は一般セラミック砥石の100倍以上の性能を有することから被加工物の翼面形状精度規格の公差幅を従来の1/3までの向上と砥石周速を2倍以上UPさせることが可能なことから、加工コスト1/2化は可能であることを確認した。今回開発の技術は、川下ユーザ殿向けの実ブレード加工に採用される段階まで漕ぎ着けた。

【2】 ハイパー研削最適砥石の開発成果の総括 評価 ◎：優、○：良、△：可、×：不可

具体的実施内容		開発成果	評価
【2-1】	ハイパー研削最適砥石の開発 (砥粒、粒度、結合剤、結合度、組織など)	①最適砥石の組成明確化 SV, J, #80~100, VM, 組織14 ②気孔率大(組織16)砥石は組織14と同等か 面粗度で若干劣る	○
	CBN電着砥石の開発	①CBN砥石研削比は従来砥石の100倍以上 ⇒高精度形状加工可能・実生産加工に適用済 ②研削周速度2倍以上の50m/s 可能、 送り速度も2倍化可能を確認 (現状では機械の追随性からMax1.5倍)	◎
	サンドイッチ砥石の開発 バームクーヘン砥石の開発	①ベンチマークとした一般砥石以上の研削性能 (研削比、面粗度)得られず ②製作工数もサンドイッチ砥石では2倍以上要し、 費用対効果面からもメリットを見出せなかった	△
	砥石の組成と通液性の関係把握	①砥石の組成による通液性の差は、研削加工 と同一条件下では見出すことは出来なかった	—
	通液性と研削比・破壊強度・ 面粗度の関係把握	①通液性に差がなかったことから、相関関係を 把握出来なかった	—

(1) 【1】 【2】 ハイパー知能研削加工技術の開発成果の全体総括

①一番大きな評価は、事業期間中であったが、川下ユーザから開発したハイパー研削加工技術が高く評価され、一部量産納入と言う事業化に漕ぎつけることが出来た。さらに現在も徐々に対象機種が増加していること。

②達成度未達の項目については、事業終了後の補完研究で評価の ○→◎、△→○→◎ に高めるべく、さらに研究を推進する。

(2) 事業化拡大について

(2. 1) 事業化の現状

①原動機用ガスタービンブレードの加工と同加工用ハイパー研削砥石については、一部事業化を実施している。この市場については当初の事業化目標を実現すべく取り組んで行く。

②砥石については、今後一般セラミック砥石からCBN電着砥石に切り替わって行く考える。

（２．２）事業拡大に向けた取り組み

- ①加工時間 1/2化の玉成：ネックは送り速度を上げると翼面精度が悪化することであり、これは機械の追随性の問題と考えており、工作機械メーカーと協業して解決を図る。
- ②電着CBN砥石の寿命延長：砥石のフレ取り加工の改善のため、砥石ホルダーに取り付けた状態でフレ取りを実施し、ムダな砥石の減耗をなくし、現状127本/寿命を2倍の250本/寿命目指す。
- ③適用対象分野を原動機と航空機分野と考えていたが、ハイパー研削加工法は研削屑の排出性に優れていることから、今後各種分野で採用されるCFRPへの適用が有望視されており、調査し、市場の拡大を図る。

（３）主要補完研究

- ・（２．２）項記載の①、②、③項の他

- ①目標試加工時間 1/10化：研削加工状態判別の汎用化（現状対象被加工物：超耐熱鋼）
- ②ICタグ付き砥石の用途開発

以上