



耐熱合金加工用研削工具

Grinding Tools for Heat-Resistant Alloys

千原 健太郎*

Kentaro Chihara

楠田 大介

Daisuke Kusuda

中村 暢秀

Nobuhide Nakamura

湯川 実

Makoto Yukawa

向芝 一広

Kazuhiro Mukoshihira

航空機ジェットエンジンや火力発電用ガスタービンの構造部材であるNi（ニッケル）基耐熱合金は、研削加工において工具の消耗の激しい難削材料である。市場ニーズである工具寿命延長や高能率加工を達成すべく、当社は専用のCBN電着ホイール「CB Master」を開発し、ジェットエンジン用部品加工時の寿命を既存工具比の5倍に、また、ガスタービン部品加工の能率を1.5倍にした。本稿では、その開発経緯と社内の評価部門であるカスタマーソリューションセンターを通じた本工具の拡販活動について報告する。

Nickel-based heat-resistant alloys, widely used for aircraft jet engines and power plant gas turbines, are difficult-to-cut materials causing short tool life in the grinding process. To meet the market needs for extended tool life and increased machining efficiency, we have developed an innovative electroplated cubic boron nitride (CBN) grinding wheel, CB Master. CB Master demonstrated 5 times longer tool life in grinding jet engine parts, and 1.5 times higher efficiency in processing gas turbine parts than conventional wheels.

キーワード：研削工具、電着ホイール、難削材、ガスタービン、高能率加工

1. 緒 言

研削加工は、天然に存在、もしくは、人工合成した硬質な砥粒により加工物の不要部分を微細に削り取る加工方法である。今日の産業界では、目的とする加工物の仕上がり形状に合わせて多数の砥粒を配置した研削工具を回転させて加工する総型研削加工が多用されている。当社が製造する電着研削ホイール（以下、電着ホイール）は、地球上に存在する物質の中でそれぞれ第一位と二位の硬さを有するダイヤモンドやCBN^{*1}砥粒を、ニッケルめっきで鋼製の台金上に固着した研削工具である。台金形状に沿って砥粒層が形成される電着ホイールは、台金を製品形状にすることで、より複雑な総型形状が作製可能という特徴を有する。

近年、旅客機の飛行燃費の改善を指向した新型ジェットエンジンへの転換、また、世界的な火力発電への需要の高まりから、ジェットエンジンや発電用ガスタービンに用いられるNi基合金などの耐熱合金^{*2}の素材を、高能率に研削する加工技術の開発が望まれている。一方で、過酷な熱環境下で使用される耐熱合金は、高温強度が高いために砥粒が消耗しやすい難削材料⁽¹⁾である。

当社は市場ニーズへの対応のため、長寿命かつ高能率加工を実現する耐熱合金加工用電着ホイール「CB Master」を開発した。本稿では、その開発経緯と適用事例について報告する。

2. CB Masterの開発指針

電着ホイールは、鋼材の台金にボンドであるニッケルめ

きで砥粒を固着させたシンプルな構造を有する（図1）。このため、工具寿命や加工能率といった電着ホイールのパフォーマンスは、①アプリケーションに適した砥粒（砥粒種、粒度）を選定すること、②その砥粒を切れ味が持続した状態で使用可能な研削条件を見出すことが重要となっており、これらの選定が電着ホイール開発の妙味といえる。

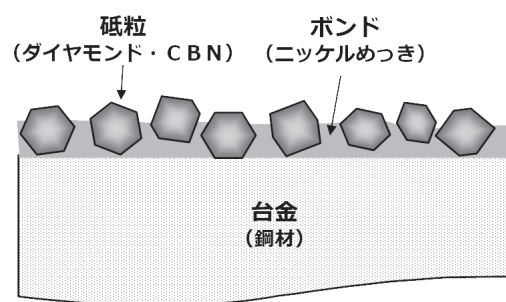


図1 電着ホイールの構造（断面）

耐熱合金の総型研削加工にあたっては、鋭利な結晶形状のため切れ味が優れたCBN砥粒が選択されてきた。CB Masterの開発にあたり、まず代表的なNi基耐熱合金であるインコネル718の研削評価を、一般的なCBN砥粒を固着した電着ホイールにて行った。

工具寿命に相当する研削比（材料除去体積に対する工具の摩耗体積の比）を、数多くのパラメータからなる研削条件を表すのに有意な指数である砥粒切り込み深さ $g^{(2)}$ で整理した。次式によって表される砥粒切り込み深さ g は、砥粒1個あたりの材料への切り込みに相当する（図2）。

$$g = 2a \cdot v / V \sqrt{d/D} \quad \dots\dots\dots (1)$$

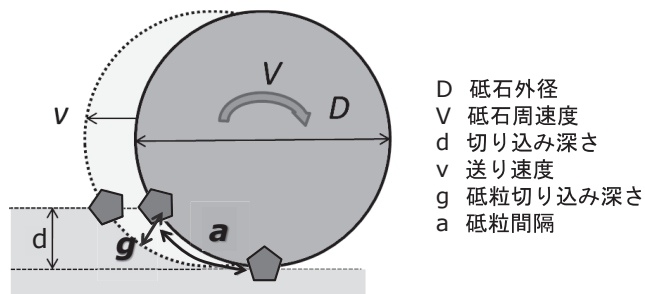


図2 研削加工の模式図

ここで、砥粒間隔 a は砥粒サイズ（粒度）が同じ場合に定数になると仮定し、砥粒切り込み深さ g を砥粒間隔 a で除した最大砥粒切り込み深さ g/a は（2）式で表される。

$$g/a = 2 \cdot v / V \sqrt{d/D} \quad \dots\dots\dots (2)$$

g/a の値が大きいほど、砥粒に加わる加工荷が大きくなることを意味している。また、加工能率（材料除去率） $v \times d$ を向上させるためには、最大砥粒切り込み深さ g/a も大きくなり、砥粒への加工荷も増すことを意味している。

図3に、インコネル718研削時の既存CBN電着ホイールの研削比を示す。Ni基耐熱合金の研削加工において g/a の上昇に伴い負荷が加わり、CBNの破碎により短寿命となることがわかった。筆者は、耐熱合金用のCBN切削工具の開発に携わった経験⁽³⁾より、研削加工においても工具損傷抑制のためCBN砥粒の強度向上が必要と考えた。

このことから、CB Masterの開発にあたって、①破碎しにくい強靱なCBN砥粒の選定、②加工能率を満足しつつ最大砥粒切り込み深さ g/a を抑制できる研削条件の導出を指針とした。

◆ホイール形状：Φ200 ◆被削材 Ni基耐熱合金
◆共通研削条件：砥石周速度 $V=37$ (m/s),
加工能率 $v \times d=3.8$ mm³/mm・sec

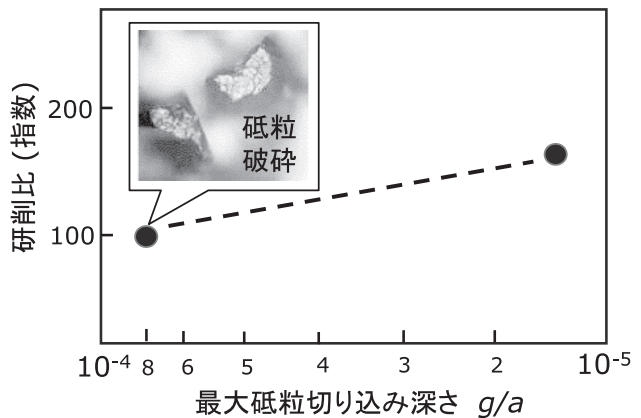


図3 CBN砥粒によるNi基耐熱合金研削加工時の最大砥粒切り込み深さと研削比の相関

3. ジェットエンジン部品加工アプリケーションを通じたCB Masterの仕様確立

航空機用ジェットエンジン部品のタービンブレードの溝入れ加工アプリケーション（図4）において、電着ホイールが短寿命であるというユーザーニーズに基づき、工具寿命の改善を図った。

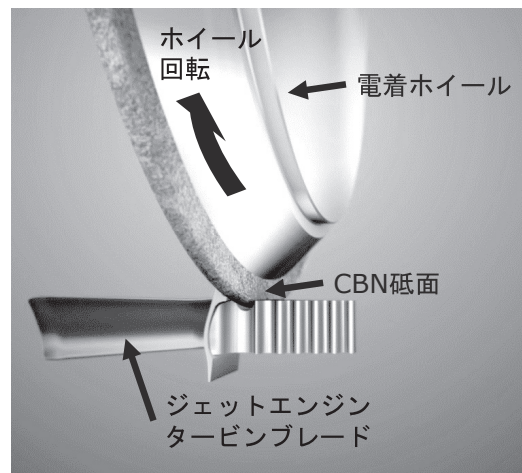


図4 タービンブレードの溝入れ加工

具体的には改善にあたって、①砥粒種の改良、② g/a 低下を目的とした研削条件の導出を行った。

①砥粒種の改良にあたって、より破碎しにくいCBN砥粒の開発にあたった。市販されている各種CBN砥粒の比較評

価を行う中で、強靱な砥粒グレードでNi基耐熱合金研削時の砥粒破碎が抑制されることを見出した。この強靱な砥粒種に、さらに研削に作用しない微粒を省くため粒度分布を狭く制御すること等の砥粒操作を施すことで、耐熱合金加工専用の当社独自のCBN砥粒を開発した。また、開発砥粒の持ち味を生かすべく砥面の砥粒の突出高さを揃えるため(図5)、砥粒を固着するめっき技術の製法革新を行った。これにより、加工時に砥粒に加わる研削抵抗が分散される理想的な砥面を形成することが可能となった。

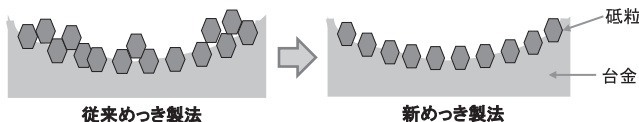


図5 めっき製法革新による砥粒突出の均一化

②研削条件の改善にあたって、(2)式より砥石周速度Vを上昇させることで、g/aを低下させられることが導出される。現状の砥石周速度Vは60 m/sまでの使用上の制約があるが、より高周速度で使用可能な仕様の検討を行った。その結果、台金素材の高強度化、また、ホイール構造の改良により周速度100m/sで使用可能な高周速仕様ホイールを開発した。

表1に、従来の電着ホイールと上記改良を盛り込んだCB Masterの社内評価結果を示す。①砥粒種を改良したCB Masterは従来条件と同一の研削条件下で砥粒の破碎を微小なものとして、工具寿命を2倍とした。加えて、②高周速仕様であるCB Masterは、加工能率1.5倍条件においてもg/aを10%低下することで、最終的に従来条件比で5倍の寿命向上を果たした⁽⁴⁾。この社内評価結果をもとに実機評価に進んだCB Masterは、ジェットエンジン部品加工ユーザーで加工能率の改善と大幅な工具寿命の伸長を実証できた。

表1 CB Masterによる加工能率・寿命の改善

研削条件・研削性能	従来電着ホイール	CB Master	
		【① 砥粒改良】	【② 条件改善】
砥石径 D (mm)	Φ 200		
砥粒	従来CBN	① 強靱CBN	
砥石周速度 V (m/sec)	60	② 100	
最大砥粒切り込深さ g/a (指数)	100	90	
加工能率 v×d (指数)	100	150 (送りv1.5倍)	
寿命 - 研削比 (指数)	100 (砥粒破碎)	200 (微小破碎)	500 (切れ味持続)

4. カスタマーソリューションセンターを通じた用途展開

ジェットエンジン部品加工で確立したCB Masterの用途展開として、同じくNi基耐熱合金より構成される火力発電用のガスタービンブレードの加工能率改善を図った。

ユーザーニーズである従来比1.5倍の加工能率達成のため、まず社内の評価部門であるカスタマーソリューションセンター(以下CSC)にて、研削条件の選定を行った。CSCでは各種の評価用加工機と分析設備を保有し、様々なニーズをユーザーと専属スタッフが共に課題解決することで、当社のカスタマーサービスの一翼を担っている(写真1)。



写真1 CSCでのユーザー立会評価の様様

図6に、加工能率1.5倍条件で性能評価を行った従来電着ホイールと、CB Masterの研削比を示す。能率を1.5倍とするためには、送りvと切り込みdを従来の研削条件よりも上げる必要があるが、従来電着ホイールは加工条件の過

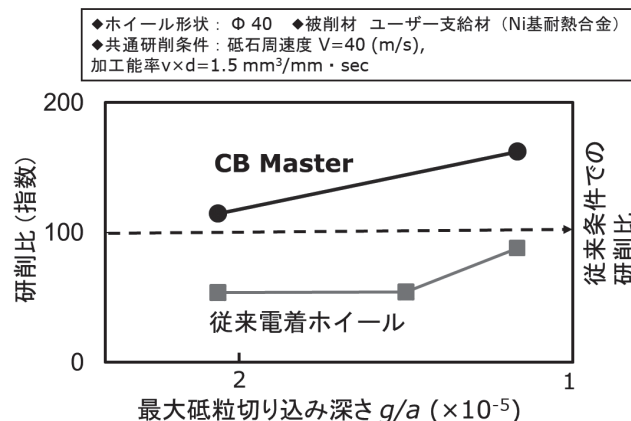


図6 CB Masterの研削性能

酷化によりCBN砥粒の破砕が進行し、従来の使用条件下に比べ研削比は低下する。

一方で、より強靱なCBN砥粒を使用したCB Masterは、従来電着ホイールよりも高い研削比を示した。また、g/aを抑制した研削条件（低送り速度×大切り込み）の選定により、従来の研削条件よりも工具寿命を延長し得ることを見出した。研削加工後のCB Masterの砥面を顕微鏡観察すると、狙い通りCBN砥粒の破砕が抑制され、切れ味を維持していることが確認された。

CB Masterの拡販にあたって、CSCでのテスト加工により導出した研削条件を合わせて提案することで、ユーザーニーズに適合した砥石寿命・加工能率を実証できた。

5. 今後の取り組み

ジェットエンジンやガスタービンの熱効率の向上に向け、冶金分野では耐熱合金の高温強度を上昇させる不断努力がなされている。これは加工対象として耐熱合金の難削化が進むことを意味している。

当社はCB Masterの更なる研削性能の向上に向け、住友電工アドバンストマテリアル研究所との協業により、電着ホイールの性能を左右するCBN砥粒の性能革新に取り組んでいる。新開発のCBN砥粒は耐摩耗性が極めて良好であり、本稿で紹介した強靱なCBN砥粒を組み合わせることで研削比のさらなる向上が見込まれる。次世代の電着ホイールとして、2021年中の新CBNの実用化を目指している。

6. 結 言

航空機ジェットエンジンや火力発電用のガスタービンの構造部材に用いられる耐熱合金の研削加工アプリケーションにおいて、ユーザーニーズである工具寿命延長や高能率加工実現に資する電着ホイールCB Masterを開発した。今後も電着ホイールの性能改善を進め、産業界に貢献していく所存である。

用語集

※1 CBN

立方晶窒化ホウ素（Cubic Boron Nitride）は、ダイヤモンドに次いだ硬度を有し、鉄との反応性が低いため、切削工具素材や研削砥石の砥粒として実用化されている。

※2 Ni基耐熱合金

冶金学の発展により開発された高温強度に優れるニッケルベースの超合金であり、合金組成や製法の違いにより多くのバリエーションが開発されている。インコネルはNi基耐熱合金の一種で、Huntington Alloys Corporationの登録商標。

・CB Masterは(株)アライドマテリアルの登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 狩野勝吉、「難削材・新素材の切削加工ハンドブック」、森北出版（December 2011）
- (2) 奥山繁樹、「研削加工の幾何学」、砥粒加工学会誌、Vol.59、no.6、pp.278-281（May 2015）
- (3) 千原健太郎、原田高志、岡村克己、久木野暁、「Ni基耐熱合金の旋削加工における被削材組織とCBN工具の損傷」、日本機械学会 第11回生産加工・工作機械部門講演会、pp.53-54（October 2016）
- (4) 千原健太郎、「高能率加工及び難削材加工における研削工具の適用事例」、砥粒加工学会 FT専門委員会 第31回研究会、pp. 31-36（December 2018）

執 筆 者

千原健太郎*：(株)アライドマテリアル 主査
博士（工学）



楠田 大介：(株)アライドマテリアル



中村 暢秀：(株)アライドマテリアル 部長補佐



湯川 実：(株)アライドマテリアル 部長



向芝 一広：(株)アライドマテリアル マネージャー



*主執筆者