

# 難削材の研削現象と 不具合解決の考え方



[著者] 松井 諒

工業機材事業本部 技術本部  
研削ソフト技術部 加工技術グループ

## ■ 難削材研削における課題

工業製品に使用される材料には膨大な種類があります。成分によって分類した場合、金属材料、非金属材料、複合材料などがあり、それらはさらに細分化されています(表1)。

近年、工業製品の高機能化や高精度化の要求が高まる中で、これらの材料の中でも機械的特性に優れた材料が数多く開発、利用されています。例えば、航空機、自動車においては燃費向上を狙って耐熱性を向上させた耐熱合金の利用や、軽量化を狙って鋼材からアルミニウム合金、チタン合金、複合

材料などへの置き換えが進んでいます。また、部品1つひとつをみても耐久性を考慮した高硬度、高強度な新規材料の採用など、機械や、材料の技術は日進月歩です。

一方、これらはその優れた特性ゆえに砥石の切れ味や寿命、研削後のワーク精度などの点で他と比較して研削の難易度が高いものが多く、難削材と呼ばれています。難削材を研削する場合には、さまざまな不具合現象と生産への影響が想定され、どの現象も、短納期対応や工具費低減が求められる生産現場では深刻な問題になりえます(表2)。

そこで本稿では、「難削材の研削が難しい理由」と「不具合解決への糸口」についてご紹介します。また、難削材と一言で言ってもその特性、研削の難しさはさまざまですので、今回は(Ⅰ)硬度が高い、(Ⅱ)熱伝導率が低い、(Ⅲ)伸び(延性)が大きい、という3つについて解説し、加えて(Ⅳ)新規材料に対するノリタケのアプローチについてご紹介します。

表1 材料の分類

大分類	小分類	備考
金属材料	鉄系材料 (純鉄、鋼、鋳鉄など)	・鉄を主成分として炭素などの異種元素を添加した材料 ・比較的高い強度を有する
	非鉄金属材料 (アルミニウム合金、チタン合金など)	・鉄以外の金属を主成分とした材料 ・鉄系材料と比較して軽量で耐食性に優れる
非金属材料	無機材料 (セラミックス、ガラスなど)	・無機物を焼き固めた材料 ・軽量で硬度が高いが脆い
	有機材料 (プラスチック、ゴムなど)	・炭素を主要元素として構成された材料 ・軽量だが耐熱性・強度が低い
複合材料	複合材料 (CFRP、CMCなど)	・強化材料とそれを支持するための母材が複合された材料 ・母材の特性と高い強度をあわせ持つ

表2 難削材研削で想定される不具合現象と生産への影響の一例

不具合現象	生産への影響(一例)
砥石の摩耗が増え、寿命が短くなる	工具費が増加する
ワーク精度を確保できるドレッシング間隔が短くなる(ドレッシングが頻繁に必要となる)	生産性が低下する 工具費が増加する
ワーク精度を確保するために研削時間が長くなる(研削能率を下げる必要が生じる)	生産性が低下する
ワーク品質が低下する(研削焼け、加工変質層が発生する)	生産性が低下する (不良数が増加する)
ワークがまったく研削できない	製品化の計画が遅延する

## ■ 難削材研削の課題と有効な手段(Ⅰ) ～硬度が高い材料～

例：各種焼入れ鋼、工具鋼、超硬合金、PCD、硬質クロムめっき処理材など

高速度工具鋼(SKH57)を例として、炭素鋼と研削性能を比較してみましょう。炭素鋼の硬度がHRC53であるのに対し、高速度工具鋼はHRC68と約1.3倍高い硬度を有しています。このような硬度の高い材料を研削する場合、砥粒の保持力や形状

維持性が不足して、砥粒の脱落や破砕が多く起こる傾向にあります。その結果、砥石摩耗量は高速度工具鋼の方が非常に多くなっています(表3、図1)。

このような場合、不足している砥粒の保持力もしくは砥粒の形状維持性を上げる対策が有効です。砥粒の保持力が不足している場合は、砥石の結合度を上げたり、強度の高い結合剤(ボンド)への変更で過度な砥粒の脱落を抑制することができます。また、砥粒の形状維持性が不足している場合は、一般的なWA砥粒などではなく単結晶砥粒やセラミック砥粒を、ワークの要求精度や目標とするドレッシング間隔によっては超砥粒を選択します。

超砥粒と呼ばれるダイヤモンドおよびCBN\*砥粒の硬度を見てみましょう(図2)。

一般砥粒と呼ばれるWA砥粒(A系砥粒)やGC砥粒(C系砥粒)と比べて、はるかに高い硬度を有していることがわかります。ただし、ダイヤモンド砥粒は炭素鋼をはじめとした鉄系材料との反応性が高く不向きであるため、超砥粒で研削する場合はCBN砥粒を選択します。それ以外の超硬合金やPCDなどにはダイヤモンド砥粒を選択するのが一般的です。しかし、超砥粒は高価であるため、コスト面で選択肢から除外されるようであれば、単結晶砥粒やセラミック砥粒の選択が有効です。

ワーク材質と砥石の組み合わせによっては、砥粒がワークに食い込みにくく上滑りすることもあります。その場合、砥粒が破砕せずに平滑に摩滅して、目つぶれ形に近い状態となります。その結果、切れ味が低下した摩滅砥粒で研削することになり、消費電力値や研削抵抗が上昇し、剛性の低いワークの研削では、ワークのたわみや変形、研削焼けなどの不具合に繋がることもあります。このような場合、ワークへの食い込み力が高い粗な構造(砥石に占める砥粒の体積割合を下げる)を有する砥石などへの変更が有効です。

## ■ ■ 難削材研削の課題と有効な手段(II) ~ 熱伝導率が低い材料 ~

例：チタン合金、ニッケル合金、ステンレス鋼など

ニッケル合金(インコネル738LC)を例として、炭素鋼と研削性能を比較してみましょう。ニッケル合金の熱伝導率は炭素鋼の約1/3程度なので、研削熱が研削点からワーク側へ伝熱されにくく、局所的な温度上昇が懸念されます(図3)。そのため、ニッケル合金を研削すると溶着\*が発生し、切れ味が低下するため、研削時の消費電力値が高く、研削後のワークに研削焼けが発生する場合があります。(表4、図4)。

このような熱伝導率が低い材料を研削する場合、熱の発生が少なく、放熱性の高い砥石が必要となります。従って、ワークとの摩擦

表3 試験条件

[砥石]	
スペック	WA60-V
寸法	φ205×T17×φ76.2mm
[研削条件]	
研削方式	平面研削
ワーク材質	炭素鋼、高速度工具鋼
砥石周速度	33m/s
テーブル速度	0.33m/s
切込み量	10μm/pass
研削能率	3.3mm <sup>3</sup> /mm・s

図1 試験結果

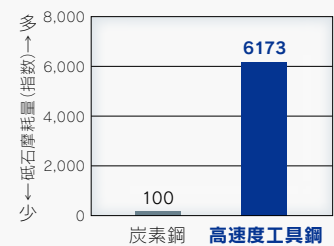


図2 各砥粒の硬度(ヌーブ硬度)<sup>①</sup>

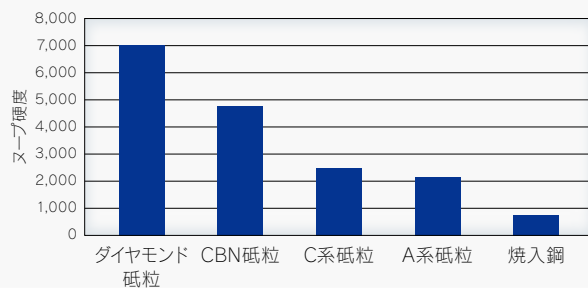


図3 炭素鋼・ニッケル合金の研削熱伝熱モデル

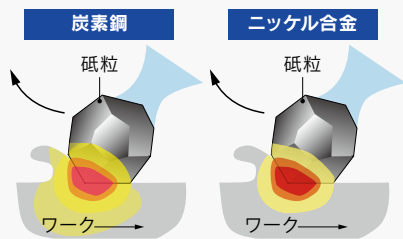
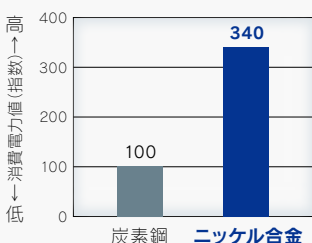


表4 試験条件

【砥石】	
スペック	SH80-V
寸法	φ255×T19×φ76.2mm
【研削条件】	
研削方式	平面研削
ワーク材質	炭素鋼、ニッケル合金
砥石周速度	20m/s
テーブル速度	6.6mm/s(クリープフィード)
切込み量	0.3mm/pass
研削能率	2.0mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ・s

図4 試験結果

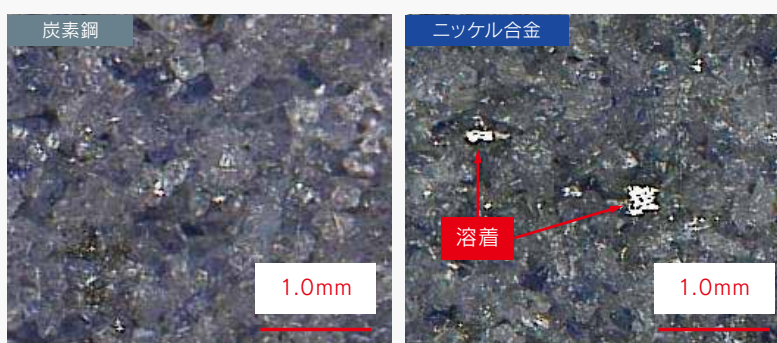
(a) 研削時の消費電力値



(b) 研削後のワーク状態



(c) 研削後の砥石面状態



で熱の発生源となる砥粒を減らし、かつ研削点へ研削油をいきわたらせるため、気孔の多い粗な構造を持った砥石を選択することが有効な手段の1つと考えられます。

砥粒の熱伝導率の観点から超砥粒ホイールを使用するのも有効な手段です。超砥粒(ダイヤモンド・CBN)の熱伝導率はA系砥粒やC系砥粒などの一般砥粒よりも高く、鉄などの一般的なワークを大きく上回ります(図5)。つまり図6に示す伝熱モデルのように、一般砥粒では研削熱が発散されずにワークに蓄積されるのに対し、超砥粒では砥粒側に熱が伝わりワークには蓄積されにくくなるため、特に熱伝導率が低いものの研削には超砥粒が有効ことがわかります。

図5 超砥粒・一般砥粒と鉄の熱伝導率<sup>①</sup>

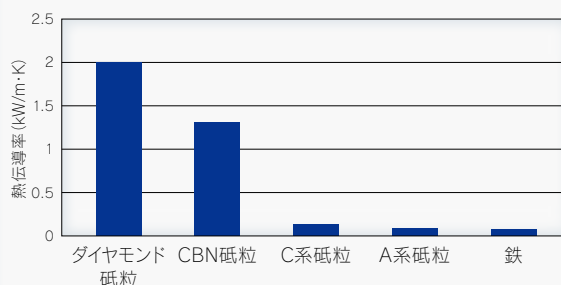
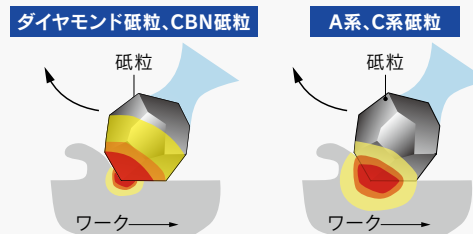


図6 超砥粒・一般砥粒の研削熱伝熱モデル



### ■ 難削材研削の課題と有効な手段(Ⅲ) ～伸び(延性)が大きい材料～

例：ステンレス鋼、生材、銅、アルミニウムなどの純金属、樹脂など

ステンレス鋼(SUS304)と炭素鋼の研削性能を比較してみましょう(表5、図7)。ステンレス鋼の伸びは炭素鋼の約2.5倍なので、研削時に発生する切り屑が伸びやすく砥石に付着しやすい傾向にあると言えます。そのため、ステンレス鋼を研削した砥石面には砥粒間をまたぐほどの大きな溶着が発生し、目詰まり形の状態となってしまう場合があります(図7(a))。このよう

表5 試験条件

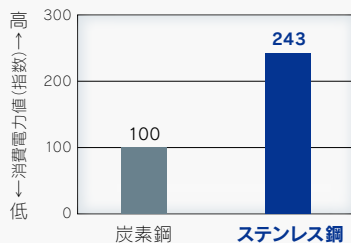
[砥石]	
スペック	SH80-V
寸法	φ255×T19×φ76.2mm
[研削条件]	
研削方式	平面研削
ワーク材質	炭素鋼、ステンレス鋼
砥石周速度	33m/s
テーブル速度	0.17m/s
切込み量	2μm/pass
研削能率	0.34mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ・s

図7 試験結果

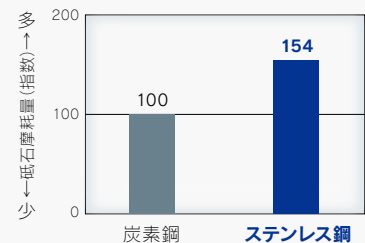
(a) 研削後の砥石面状態



(b) 研削時の消費電力値



(c) 研削後の砥石摩耗量



に砥粒が溶着で覆われてしまった状態では砥石の切れ味が落ちて消費電力値も高くなるほか、溶着箇所が砥粒脱落の起点にもなるため砥石摩耗量が多くなります(図7 (b) (c))。ステンレス鋼のような伸びの大きい材料を研削するには、目詰まり形の状態にならないようにすることが重要です。その場合、適切な砥粒や、切り屑の排出性が高い粗な構造を持った砥石の選択などが有効であると考えられます。適切な砥粒の選択については技術講座で詳しく解説していますのでご参照ください。

## ■ 難削材研削の課題と有効な手段(Ⅳ)～新たな材料への対応～

これまで解説してきた「硬度が高い」、「熱伝導率が低い」、「伸び(延性)が大きい」などの特性をもつものとは別に、2つの材料をご紹介します。

1つ目は、次世代パワー半導体として注目されているシリコンカーバイド「SiC」です。パワー半導体の高効率化・小型化の観点で期待されている材料ですが、従来のシリコン「Si」の2倍以上の硬度を有する「硬度が高い難削材」に該当し、十分な研磨能率が得られないなどの課題があります。これに対してノリタケでは、高強度・低弾性のボンドを採用し、耐摩耗性と切れ味の持続性に優れた粗・仕上げ研削用ビトダイヤホイール<sup>②</sup>や、網目状樹脂に砥粒を挟み込んだ構造により高い研磨能率と高平坦性というメリットを両立させた半固定砥粒研磨パッドLHA/パッド<sup>③④</sup>などを開発しています。

2つ目は、医療・スポーツ分野から航空・宇宙分野まで幅広い分野で注目を集めているカーボン繊維強化プラスチック「CFRP」です。CFRPは軽くて強いことが特長ですが、その高い強度ゆえに工具摩耗が激しいこと、研削時にバリやデラミネーション(層間剥離)が発生することが課題としてあげられます。これに対してノリタケでは、砥粒突出し量と切り屑排出性を高めたグリットエース<sup>⑤</sup>を代表とした砥粒単層固着工具を開発しています。

難削材研削の課題やそれに対する有効な手段の一例を解説してきました。ノリタケでは難削材に対応する製品の開発や最適な使用方法の研究に取り組んでいます(表6)。詳しくは製品特集をご参照ください。本稿が皆様にとって一助となれば幸いです。

表6 難削材に対するノリタケ提案製品

難削材の特徴	ワーク材質の例	想定される研削現象	ノリタケ提案製品
硬度が高い材料	各種焼入れ鋼、工具鋼、 硬質クロムめっき処理材	ワーク精度不良、 砥石の異常摩耗	セラミック砥石(CXE砥石) CBNホイール
	超硬合金	ワーク精度不良、 砥石の異常摩耗	ダイヤモンドホイール (SDメモックス、MDLホイール)
	PCDなど	ワーク精度不良、 砥石の異常摩耗	ダイヤモンドホイール
	サーメット	ワーク精度不良、 砥石の異常摩耗	ダイヤモンドホイール(i-Surface)
熱伝導率が低い材料	チタン合金、ニッケル合金、 ステンレス鋼など	研削焼け、ワークの精度不良、 砥石の異常摩耗など	GC砥石、SH砥石
伸び(延性)が大きい材料	生材、銅、アルミニウム、 樹脂など	研削焼け、ワークの精度不良、 砥石の異常摩耗など	GC砥石

( )は本稿の製品特集で紹介する製品

**[参考] 砥石の4形態について(正常形、目つぶれ形、目こぼれ形、目詰まり形)**

ここでは、本稿の内容の補足として砥石の4形態について解説します。

研削中の砥石の状態を区分すると、①正常形、②目こぼれ形、③目つぶれ形、④目詰まり形の4つに分類できます(表7)。砥石の状態がどれにあたるのかを観察し、より適切な“正常形”に近づけることが工程改善の第一歩です。

**①正常形**

研削が進行し切れ味が落ちると、研削抵抗の増加による砥粒の破砕や脱落で新しい切れ刃が生成されます。この作用を砥石の自生作用と呼び、切れ味を維持する上で重要な役割を担っています。適度な自生が繰り返され、切れ味が持続する状態を正常形といいます。

**②目こぼれ形**

正常形に対して自生作用が強すぎるときに起きる現象で、砥粒を保持しているボンドブリッジが研削抵抗に耐えきれずに折損し、原粒に近い大きさで砥粒が脱落する状態を目こぼれ形といいます。このような状態になると砥粒切れ刃間隔が広がり、常に鋭い切れ刃で研削を行うため切れ味は良くなります。その反面、砥石摩耗量が大幅に増えるため、砥石面は粗くなり、砥石形状も崩れます。その結果、ワークの形状精度や表面粗さに不具合が発生しやすくなります。

正常形へ近づけるためには、強すぎる自生作用を抑える方向へ砥石スペックを変更します。具体的には、研削抵抗に負けないようにボンド強度を上げる(結合度を上げる)、1つの砥粒にかかる研削抵抗が小さくなるよう砥粒数を増やす(組織を下げる)などの対策が挙げられます。

**③目つぶれ形**

目こぼれ形とは反対に、正常形に対して自生作用が弱すぎるときに起きる現象で、砥粒が平滑に摩耗し、新しい切れ刃が生

表7 砥石の4形態

正常形(理想)	目こぼれ形	目つぶれ形	目詰まり形
研削性能	<p>消費電力値(切れ味)</p> <p>表面粗さ</p>	<p>消費電力値(切れ味)</p> <p>表面粗さ</p>	<p>消費電力値(切れ味)</p> <p>表面粗さ</p>
起こりうるトラブル例	形状精度・表面粗さ不良	研削焼け びびり	研削焼け びびり

成せずに砥石の切れ味が低下した状態を目つぶれ形といいます。このような状態では研削抵抗や研削熱が増大し、びびりや研削焼けといった不具合が発生します。

正常形へ近づけるためには、砥粒が平滑にならないように定期的にドレッシングを行うことが大切です<sup>⑥</sup>。その他、砥石スペックを変更して、弱すぎる自生作用を高める方法もあります。具体的には、破碎性の良い砥粒に変更する、適度に砥粒が脱落するようにボンド強度(結合度)を下げるなどの対策が挙げられます。

④目詰まり形

砥石の気孔が切り屑によってふさがれた状態を目詰まり形といいます。アルミニウム、銅、ステンレスなどの軟らかく粘性が

高い材料を研削した時に切り屑が砥粒切れ刃の先端をまたがって付着してしまう場合や、鋳物や石材などを乾式で研削するときに切り屑の排出が悪く気孔の中に詰まってしまう場合などが目詰まり形の例として挙げられます。いずれも研削抵抗や研削熱が増大し、びびりや研削焼けが多く発生します。

正常形へ近づけるためには、切り屑が気孔をふさがないように定期的にドレッシングを行うこと、研削油の種類、かかり方に注意を払うことが大切です。砥石スベックを切り屑の排出性を高める方向へ変更する方法もあります。具体的には、気孔サイズを大きくする、気孔の量を増やすために粗な組織にする（組織を上げる）などの対策が挙げられます。

#### [注釈]

※CBN:立方晶窒化ホウ素(Cubic Boron Nitride)のことで、ダイヤモンドと同様の結晶構造を持つことから高い硬度を有する。  
※溶着:研削したワークが砥粒に付着する現象。

#### [文献]

- ① 横川 和彦・横川宗彦: CBNホイールの研削加工技術ー生産革命の起爆剤ー, 工業調査会, (1988) 19-20.
- ② 岸本 正俊: ウェーハの固定砥粒加工化, NORITAKE TECHNICAL JOURNAL 2019, (2018) 54-57.
- ③ 佐藤 誠: LHAパッド, NORITAKE TECHNICAL JOURNAL 2018, (2017) 62-67.
- ④ 北嶋 将太・佐藤 誠: LHAパッド, NORITAKE TECHNICAL JOURNAL 2019, (2018) 58-63.
- ⑤ 行徳 聡人: グリットエース, NORITAKE TECHNICAL JOURNAL 2018, (2017) 22-27.
- ⑥ 杉野 香奈絵: よくわかるツルレーイング・ドレッシング, NORITAKE TECHNICAL JOURNAL 2019, (2018) 24-31.