

# CBN砥石を用いたオーステンパ球状黒鉛鑄鉄の被研削特性に関する研究

機械金属室 羽地 龍志 國吉 和男  
宮城 寿\* 糸村 昌祐\*\*

## 1. 緒言

オーステンパ処理球状黒鉛鑄鉄 (Austempered Ductile Iron : 以下ADI) は球状黒鉛鑄鉄を約1170Kでオーステナイト (以下 $\gamma$ ) 化し、523Kから723K付近でオーステンパ処理することで、従来のフェライトとパーライトを主体とした基地組織を高強度なベイナイトと延性に富む $\gamma$ の混合組織に改善したものである。

ADIは強度特性が高い反面、精度を要求される部品に適用しようとする場合、被削性が極めて悪いため工具寿命が短くなり、精度が保てないといわれる。したがってADIの被削性に関する研究は早くから数多く見られるもの<sup>5)~9)</sup>、より加工精度が要求される研削加工に関する研究は少ない<sup>10)</sup>。

一方、新材料の開発に伴い加工工具の機能向上が要求され、近年、立方晶窒化硼素 (Cubic Boron Nitride-CBN) がダイヤモンドに次ぐ硬度を有する人工結晶体として注目されている。CBNは高温下においても硬度が高く、耐摩耗性に優れ、長寿命であるなど、難削材の高速加工に適しているといわれている<sup>11)</sup>。

本研究は、CBN砥石を中心に、WA砥石およびGC砥石を用いて、黒鉛粒数およびオーステンパ処理温度の異なるADIの被研削特性を調べた。すなわち、研削抵抗、研削直後の表面硬さを測定し、研削条件との関係を整理してADIの被研削特性について評価検討を行った。

## 2. 実験材料および実験方法

### 2.1 供試材

図1に示すように肉厚20mm部を呈する鑄型Aと、両側にチル板を配置した鑄型Bをそれぞれ用意する。鑄型Aには通常の球状化処理を行った溶湯を、鑄型BにはBi入り球化剤 (KCアロイ-5Bi) をとりべ添加し黒鉛粒数を増加させた溶湯をそれぞれ鑄込み、黒鉛粒数の異なる2種類の供試材を作製した。得られた2種類の球状黒鉛鑄鉄の化学成分と組織写真、球化率などの特徴量を表1および図2にそれぞれ示す。2種類の供試材から、図3に示す研削試験片をそれぞれ切り出した。

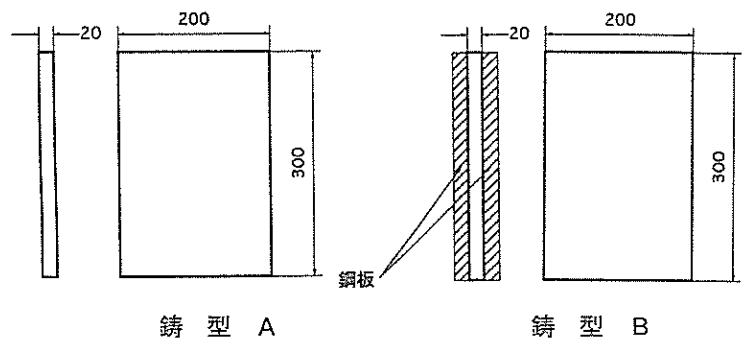


図1 供試材形状

表1 供試材の化学成分

粒数	C	Si	Mn	P	S	Mg
339個/mm <sup>2</sup>	3.53	2.33	0.57	0.03	0.02	0.04
162個/mm <sup>2</sup>	3.65	2.41	0.58	0.03	0.01	0.04

\* 琉球大学工学部エネルギー機械工学科

\*\* 琉球大学工学部機械システム工学科

## 2.2 研削試験片及び熱処理方法

研削試験片のオーステンパ処理に使用した装置はポット式塩浴熱処理炉（高温部:MSE20-30 低温部:LSE20-30 (株)サーマル製）で、塩浴剤は高温側でBaCl<sub>2</sub>:KCl:NaCl=4:3:3、低温側でKNO<sub>3</sub>:NaNO<sub>3</sub>=1:1をそれぞれ使用した。

図4に熱処理条件を示す。均一オーステナイト化後、保持温度690Kおよび600Kにおいて60min保持し、氷水中に急冷した。また、熱処理前の素材と、1173Kにおいて60min保持後氷水中に急冷した焼入れ材を比較材とした。

熱処理の一条件につき黒鉛粒数の異なる2本の研削試験片を設定し、計8種類の試験片を製作した。また供試材から、JIS Z 2201の4号試験片を製作して引張試験を行った結果、600Kおよび690Kにおいて熱処理を行った材料はそれぞれJIS G 5503に示されているFCD 1200AおよびFCD 900Aに相当した。表2に本実験に用いた各試験片の種類と本文中における試験片の表示方法を示す。

平面研削盤（岡本工作製 PSG63JA）と4成分動力計（日本キスラー社製 Type9272-5019A）を用い、4種類の砥石（CBN170N75BD4、CBN170N75BW4、WA180L7V75R、GC180H8V81R）を用いて研削実験を行った。図5に4成分動力計に治具を取り付けた様子を示す。研削条件は表3のとおりである。

## 2.3 研削パラメータ

研削実験のパラメータとして、砥石周速度V、テーブル送り速度S、切り込み深さaなどがある。それぞれの研削条件を変化させて実験を行うため、新たなパラメータとして式1に示す相当切り屑厚さ Heq を用いて整理した。また、垂直方向の研削抵抗Fと相当切り屑厚さ Heq の関係を式2に示す<sup>10)</sup>。

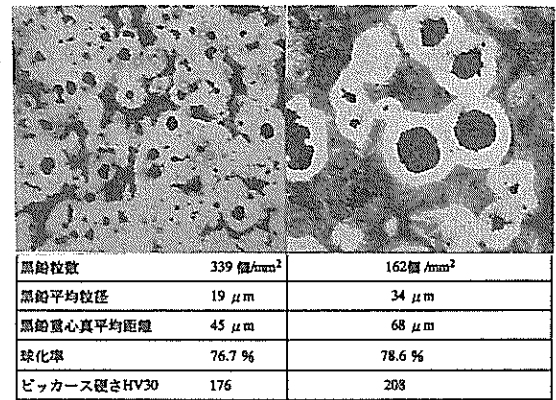


図2 供試材の組織写真

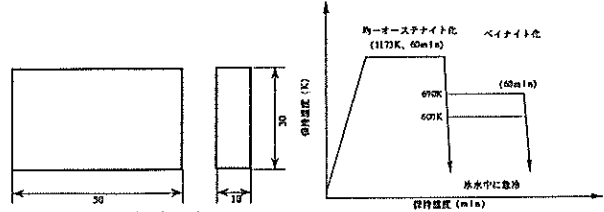


図3 研削試験片形状

図4 オーステンパ熱処理条件

表2 研削試験片および表示方法

材料名	表示方法	使用砥石名	研削方法	表示方法
素材(339個/mm <sup>2</sup> )	素材-多	CBN砥石	乾式	CBN-乾
素材(162個/mm <sup>2</sup> )	素材-少		湿式	CBN-湿
焼入れ材(339個/mm <sup>2</sup> )	焼入れ材-多	WA砥石	乾式	WA-乾
焼入れ材(162個/mm <sup>2</sup> )	焼入れ材-少		湿式	WA-湿
ADI(600K, 339個/mm <sup>2</sup> )	600K-多	GC砥石	乾式	GC-乾
ADI(600K, 162個/mm <sup>2</sup> )	600K-少		湿式	GC-湿
ADI(690K, 339個/mm <sup>2</sup> )	690K-多		乾式	GC-乾
ADI(690K, 162個/mm <sup>2</sup> )	690K-少		湿式	GC-湿

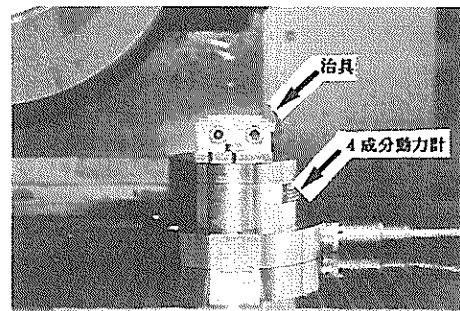


図5 4成分動力計および治具

表3 諸実験条件

項目	実験条件
使用砥石	WA180L7V75R GC180H8V81R CBN170N75BD4 CBN170N75BW4
研削方法	ブラッシュ研削(乾式及び湿式)
砥石寸法	WA砥石及びFGC砥石: φ300.0×φ127×38mm CBN砥石: φ300.0×φ76.2×10mm
砥石周速度: V	1700m/min
テーブル送り速度: S	3, 6, 15m/min
研削液	ノリタケクール AF-3
ドレッシング	WA砥石及びFGC砥石: 10μm×0.5m/min CBN砥石: ホワイトストーン
研削盤	Okamoto PSG-63JA
試験片寸法	幅10×高さ30×長さ50mm
切り込み深さ: a	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40μm
相当切り屑厚さ: Heq	=aS/V (μm)

$$Heq = a S / V \quad - (1)$$

$a$  : 切り込み量 ( $\mu\text{m}$ )

$S$  : テーブル送り速度 ( $\text{m}/\text{min}$ )

$V$  : 砥石の周速度 ( $\text{m}/\text{min}$ )

$$F = F_1 \times Heq^f \quad - (2)$$

$F_1$  :  $Heq = 1 \mu\text{m}$ における研削抵抗

$f$  : 研削性を示す指数

式2における $f$ 値は研削性を示す指数であり、 $f$ 値が大きいほど研削しやすい。難削材の場合、 $f = 0.4 \sim 0.5$ である。また、一般鋼の場合は $f = 0.7 \sim 0.9$ である<sup>(10)</sup>。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 研削抵抗

オーステンパ処理温度600Kおよび690KのADIに対して、CBN砥石(乾式)を用いて研削実験を行い、試験片幅1mmあたりの垂直方向の研削抵抗( $\text{N}/\text{mm}$ )を両側対数グラフに整理した例を図6および図7、また同試験片に対してWA砥石(乾式)およびGC砥石(乾式)を用いた測定結果の例を図8~図11に示す。図中のデータ群はテーブル送り速度毎に整理して、回帰線を求めた。

熱処理条件の異なるADIをCBN砥石を用いて研削した場合の研削抵抗は、黒鉛粒数による差も、熱処理温度による影響も見られない。WA砥石を用いて研削すると、テーブル送り速度の増加に伴って黒鉛粒数の影響が少なくなる傾向は見られるものの、熱処理温度の相違による明確な影響は見られない。GC砥石を用いた研削においても同様の傾向が確認された。

試験片および砥石の2元配置による分散分析の結果を表4に示す。この表から砥石間の有意性が確認され、試験片間の有意性は見られなかった。すなわち、3種類の砥石の研削抵抗値はそ

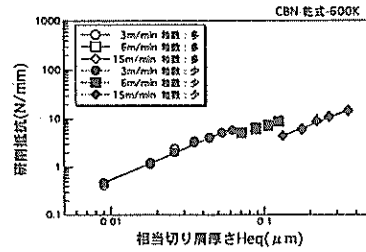


図6 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(CBN-乾-600K)

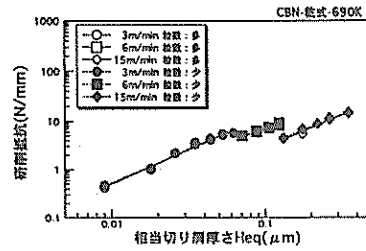


図7 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(CBN-乾-690K)

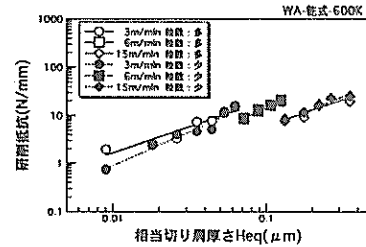


図8 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(WA-乾-600K)

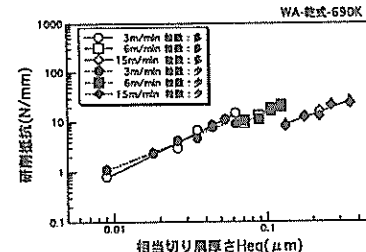


図9 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(WA-乾-690K)

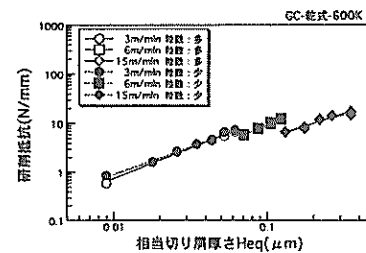


図10 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(GC-乾-600K)

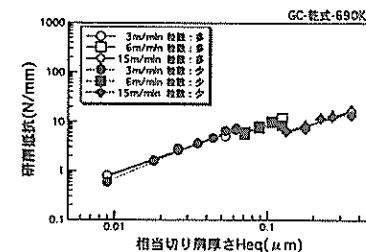


図11 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係(GC-乾-690K)

れぞれWA砥石、GC砥石、CBN砥石の順で小さかった。CBN砥石を用いた場合の研削抵抗を他の砥石の場合と比較するとWA砥石より5.2~6.0N/mm、GC砥石より1.1~1.6N/mmも低いことから、CBN砥石がこれら3種類のなかで研削性がよい砥石といえる。

また、湿式の研削条件においても同様な結果が得られた。

図12および図13は相当切り屑厚さと研削抵抗の関係性を回帰して得られた式の指数(式2のfに相当)に着目し、横軸を研削条件で整理したものである。各研削条件において、乾式研削および湿式研削におけるそれぞれの研削抵抗の差を表5に示す。これらの差の検定から、危険率1%で有意となり、また、湿式研削よりも乾式研削の方が研削抵抗が低い傾向であることがわかった。しかし黒鉛粒数の影響や試験片間の被研削特性の差に有意性はなかった。

式2の説明において難削材の場合のf値は0.4~0.5、一般鋼の場合は0.7~0.9とされているにもかかわらず、本実験で得られたf値はほとんどが1を超えており、一概に比較できる範囲ではない。その一因として、テーブル送り速度の測定方法が考えられる。本実験で用いたテーブル送り速度Sはいずれも平面研削盤の可動範囲における平均の送り速度であり、試験片が砥石を通過する瞬間の速度ではないため真の送り速度は設定値よりも大きかった可能性が高く、得られたf値はやや大きめになったと考えられる。したがって、本実験の材料が難削材であるか否かについて、f値による評価は行わず、f値の相対的な大小による材料および砥石間の研削特性の差について検討した。

テーブル送り速度毎のデータ群から3本の回帰線を求めたが、テーブル送り速度を区別せず相当切り屑厚さ全域に対して1本の回帰線を求めた例を図14に示す。得られたf値を研削条件で整理した例を図15に示す。同一砥石を用いた

表4 分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散
砥石の種類	1.85953	5	30.8189**
供試材の種類	0.06955	7	0.8233
誤差	0.42236	35	
合計	2.35144	47	

F(5,35;0.05)=2.48 F(7,35;0.05)=2.08

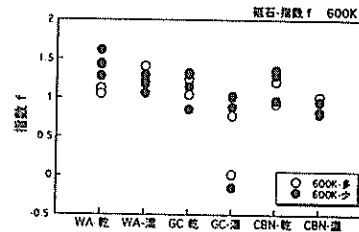


図12 研削条件と指数 f の関係 (600K)

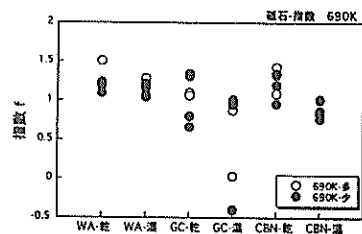


図13 研削条件と指数 f の関係 (690K)

表5 研削抵抗の差

研削条件	(乾式研削における研削抵抗値 - 湿式研削における研削抵抗値)			
	600K 粒数:多	690K 粒数:多	600K 粒数:少	690K 粒数:少
CBN-3m/min	0.532	0.591	-0.008	0.147
CBN-6m/min	0.111	0.262	0.013	0.116
CBN-15m/min	0.194	0.317	0.091	-0.148
WA-3m/min	-0.080	0.351	0.250	-0.059
WA-6m/min	0.019	0.221	0.382	0.246
WA-15m/min	-0.009	0.035	0.181	0.041
GC-3m/min	0.213	0.095	-0.161	0.035
GC-6m/min	1.305	1.305	0.642	-0.035
GC-15m/min	0.263	0.187	0.058	-0.051

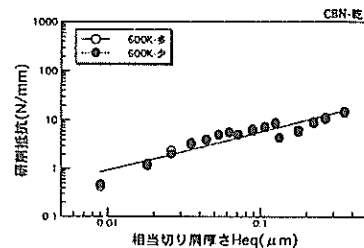


図14 相当切り屑厚さと研削抵抗の関係

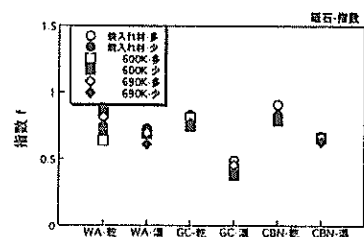


図15 研削条件と指数 f の関係

研削の場合、乾式研削において  $f$  値が大きい傾向にあり、研削性が良いことがわかる。ここでも図12および図13について述べたのと同様に試験片間の差は見られない。

### 3.2 硬さ試験

図16～図19は、研削によって形成された加工変質層の状態を確認するために各条件における研削直後の被研削材の表面硬さを測定したものである。砥石間の差による表面硬さの差は危険率1%で有意であるが、ADIの黒鉛粒数の差による有意性はなかった。

図中において湿式研削に比べて乾式研削後の表面硬さが高いのは、研削時に発生する熱影響が湿式研削時よりも大きく、表面が硬化したためと考えられる。得られたデータ群のばらつきの原因として、研削痕により精密な測定ができなかったことや、形成された加工変質層が薄層であると仮定すると、マイクロビッカース硬さ試験機のダイヤモンド圧子が変質層より深い母材部にまで到達してしまったと考えられる。

### 4. 結 言

CBN砥石、WA砥石およびGC砥石を用いてADIの被研削性について検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 研削抵抗を相当切り屑厚さで整理すると砥石間、材料間の比較が容易に行える。しかし、グラフから求めた回帰線の  $f$  値がほとんどの条件において1を超えており、一概に比較できる範囲になかった。
- 2) 実験に用いた材料（黒鉛粒数339個/mm<sup>2</sup>および162個/mm<sup>2</sup>）程度の黒鉛粒数の差およびこれらをオーステンパ処理したADI（JIS G 5503 FCD1200A、FCD900A相当）における被研削特性の差は認められなかった。
- 3) 研削抵抗を砥石別に見ると、WA砥石 > GC砥石 > CBN砥石となっておりCBN砥石はWA砥石およびGC砥石に対してそれぞれ5.2～6.0N/mm、1.1～1.6N/mmも研削抵抗が低く、切れ味がよいといえる。また、湿式研削よりも乾式研削の方が研削抵抗が低かった。

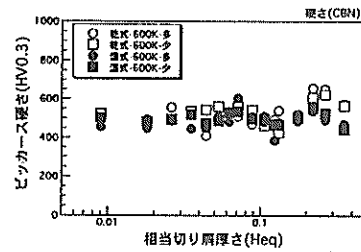


図16 相当切り屑厚さと表面硬さの関係 (CBN砥石：600K)

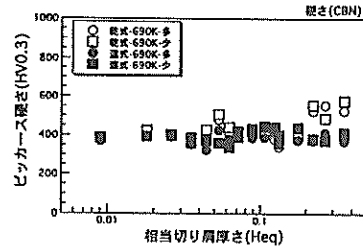


図17 相当切り屑厚さと表面硬さの関係 (CBN砥石：690K)

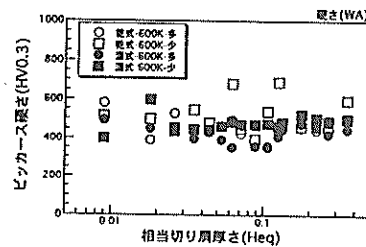


図18 相当切り屑厚さと表面硬さの関係 (WA砥石：600K)

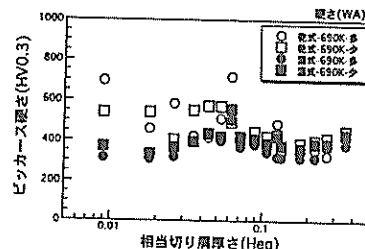


図19 相当切り屑厚さと表面硬さの関係 (WA砥石：690K)

## 謝 辞

本実験に用いた球状黒鉛鑄鉄は沖繩鑄鉄工業(株)から、また乾式用および湿式用C B N砥石はノリタケダイヤ(株)からそれぞれ提供していただいた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 三井ミーハーナイト・メタル(株)技術開発部:素形材,92,1,P3
- 2) 塩川忠:鑄物,Vol.56-6(1984),P362-P369
- 3) 龍華文隆、鳥居良久、上田倣完、滝田光晴:鑄物,Vol.60-10(1988),P615-P618
- 4) 張 博:「A D I (オーステンパ球状黒鉛鑄鉄)製造技術の動向」素形材技術講習会テキスト,平成元年
- 5) 石原安興:鑄物,Vol.58-12(1986),P823-P830
- 6) 新谷一博、加藤秀治、塩谷外司、藤村善雄:鑄物,Vol.63-6(1991),P523-P527
- 7) 木曾弘隆、小山満晴、田口富雄:鑄物,Vol.61-9(1989),P615-P619
- 8) 田中雄一、清水章裕、横内弘宇:鑄物,Vol.65-2(1993),P93-P98
- 9) 藤田武男、関口克彦、北川亮三、小池範法、大城桂作:「A D I のドリル被削性(第1報~2報)」1993,精密工学会秋季大会学術講演会論文集,P361-P364
- 10) 中満清博、清水一道:日本機械学会北海道支部第34回講演会講演論文集,No932-1('93-8-20,21.札幌),P85-P87
- 11) 機械技術研究所:昭和58年度新工具材研究会報告、C B N工具の摩耗機構の解析,P5

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。