

博士論文

すくい角の概念を導入した
単石ダイヤモンドドレッサの開発

2012 年 9 月

餅田恭志

目 次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 研究の背景	2
1.3 研究の目的	3
1.4 本論文の構成	4
参考文献	7
第2章 新しい概念によるダイヤモンドドレッサの提案	10
2.1 緒言	10
2.2 小径内面研削加工における従来ドレッサの課題	12
2.3 単石ダイヤモンドドレッサの形状特性	16
2.4 新しいダイヤモンドドレッサの提案	19
2.5 結言	21
参考文献	22
第3章 超硬合金切削におけるダイヤモンドバイトの摩耗特性	23
3.1 緒言	23
3.2 実験方法	26
3.2.1 正面切削	28
3.2.2 単刃フライカット	31
3.3 実験結果	35
3.3.1 すくい角の影響	35
3.3.2 正面切削における工具摩耗	39
3.3.2.1 単結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗	39
3.3.2.2 多結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗	44
3.3.3 単刃フライカットにおける工具摩耗	47
3.3.3.1 単結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗	47
3.3.3.2 多結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗	52

3.4 結言	55
参考文献	56
第4章 ドレッシング抵抗の測定方法の開発	59
4.1 緒言	59
4.2 実験方法	61
4.2.1 ドレッシング抵抗測定装置	61
4.2.2 実験方法	64
4.3 実験結果	68
4.3.1 単石ダイヤモンドドレッサのドレッシング抵抗と研削性能 の関係	68
4.3.1.1 ドレッシング抵抗測定波形	68
4.3.1.2 ドレッサ先端形状とドレッシング特性との関係	69
4.3.2 多石ダイヤモンドロータリドレッサのドレッシング抵抗と研削性 能の関係	75
4.3.2.1 ドレッシング抵抗測定波形例とドレッシングモデル	75
4.3.2.2 ドレッシング抵抗と研削抵抗および研削仕上げ面粗さの関係	79
4.4 考察	83
4.5 結言	85
参考文献	86
第5章 切れ刃すくい角に注目して開発した単刃ダイヤモンドドレッサ の性能	88
5.1 緒言	88
5.2 実験方法	91
5.3 実験結果	94
5.3.1 切削バイト型ドレッサの性能	94
5.3.2 従来ドレッサとの比較	102
5.4 結言	110
参考文献	112

第 6 章 総括	114
本研究に関連する論文および口頭発表	120
謝辞	122

記号表

a : ドレッサ傾き角 $^{\circ}$

A : 切れ刃摩耗面積 mm^2

A_d : 理論的砥石削除面積 μm^2

B : 砥石幅 mm

b : ドレッサ先端幅(接触幅) μm

D : 切れ刃回転直径 mm

d_c : 延性・脆性遷移臨界切取り厚さ μm

D_d : ロータリドレッサ直径 mm

D_s : 砥石直径 mm

d_w : 工作物内径 mm

D_w : 工作物直径 mm

f : 工作物 1 回転あたりの送り量 $\mu\text{m/rev.}$

f_d : ドレッサ送り速度 m/min

F : 摩擦力 N/mm

F_c : 切削抵抗主分力 N/mm

F_d : 法線(方向)ドレッシング抵抗 N

F_f : 切削抵抗送り分力 N/mm

F_n : 法線(方向)研削抵抗 N , N/mm

F_t : 切削抵抗背分力 N/mm

f_w : プランジ研削速度 $\mu\text{m/rev.}$

h : 切取り厚さ μm

g : 最大切込み深さ μm

K_0 : 理論的砥石削除面積が $1\mu\text{m}^2$ の時の比ドレッシング抵抗 $\text{N}/\mu\text{m}^2$

K_d : 比ドレッシング抵抗 $\text{N}/\mu\text{m}^2$

l : 切れ刃 1 回転あたりの切削距離 m

L : 切削距離 m

L_d : ドレスリード $\mu\text{m/rev.}$

l_i : i 回転後の切削距離 m

L_i : i 回転後の累積切削距離 m

N : ダイヤモンド粒の数

n_d : ロータリドレッサ回転速度 rpm

N_w : 工作物回転速度 rpm

N_s : 砥石回転速度 rpm

P : ロータリドレッサの円周方向ダイヤモンド粒の配置間隔 mm

P_r : ダイヤモンド粒先端摩耗部の円周方向長さ mm

R_a : 研削仕上げ面粗さ μm

R_{al} : 切削表面粗さ μm

t : 設定切込み量 μm

t_a : 実質切込み量 μm

t_i : 切れ刃 i 回転後の実質切込み量 μm

v : 工作物送り速度 m/min

V : 切れ刃切削速度 m/min

W : 切れ刃摩耗量 μm

Z_d : ドレッシング抵抗パルス数

α : すくい角 $^\circ$

α_b : 上すくい角 $^\circ$

α_s : 横すくい角 $^\circ$

β : 逃げ角 $^\circ$

ε : 寸法効果指数

κ : 横切れ刃角 $^\circ$

τ : パルス状ドレッシング抵抗の発生間隔 msec

Δ_d : ドレッサ切込み量 μm

ΔF_d : 法線(方向)ドレッシング抵抗の変動幅 N

ΔF_n : 法線(方向)研削抵抗の変動幅 N/mm

ΔR_a : 研削仕上げ面粗さの変動幅 μm

Δ_w : 砥石累積切込み量 μm

第 1 章

序論

1.1 緒言

研削加工は、高速回転する砥石を工具として工作物の表面を機械的に除去する加工方法である。機械的除去加工としてよく知られている切削加工と比較した場合、加工能率は低いが切削加工より平滑な面、すなわち高品位な加工表面を得ることができる加工方法である。研削加工工具である砥石は、実際に材料除去を行う砥粒と砥粒を保持する結合剤により構成されている。

近年、研削加工の利点である高品位加工に加え高速化、高能率化が求められている。高速、高能率加工を行うためには、砥石の剛性が高いことが必要であることから、従来の研削砥石に対して破壊強度および切りくず排出性に優れた電着砥石^{*1}の製造現場での使用が増加してきている。中でも cBN^{*2} やダイヤモンド^{*3} を砥粒とした超砥粒電着砥石は、とくに破壊強度および切りくず排出性に優れているため超高速・高能率研削への適用が期待されている¹⁾。これらの電着砥石を使用するうえで、基材（台金）に固定された単層砥粒部^{*4}で構成される包絡面プロファイルを所望の加工精度などの要求通りの形状に成形できれば、再電着によるリサイクル利用が可能となり、生産コストを大幅に低減化できる利点がある。これらの要求を

満足するためには、高能率かつ高精度な砥石成形（ツルーイング^{*5}，ドレッシング^{*6}）を行わなければいけないため、高剛性，高強度であるとともに硬脆性を有する超砥粒電着砥石に対して延性モード加工を適用する必要がある²⁾．その場合には，所望の砥石形状自身のツルーイングに加え，ダイヤモンド砥粒先端を平坦化して砥石作業面として揃えるための切れ刃自身のツルーイング，ドレッシングも併せて行う必要がある²⁾．

1.2 研究の背景

このように超砥粒電着砥石を工業的に用いる大きな課題は形状の高精度化であるため，反転電着法^{*7}など砥石そのものの製造技術に関する研究開発が活発に行われている³⁻⁴⁾．それに加え砥石スピンドルの装着時の砥石作業面の振れ量の除去も解決すべき課題である．したがって，ツルーイングまたはドレッシング用の工具としてロータリドレッサ^{*8}を用いる方法もあるが，小径内面研削に用いられる cBN やダイヤモンド電着クイル^{*9}に対しては，クイルの剛性不足による弾性変形が砥石作業面の形状精度劣化の原因となるため，適切なドレッサ形状やツルーイングまたはドレッシング条件が必要となる．

クイル剛性が低くなる原因としては，クイルのアスペクト比^{*10}が高いうえに，機上ではクイルを片持ちで保持するため，ドレッシングを行う際の加工抵抗によりクイルの逃げ（弾性変形）が発生することであり，その結果，実際の切込み深さが変化してしまうことによる加工特性への影響が非常に大きい．ドレッシングを行う際の加工抵抗，すなわちドレッシング抵抗がクイルのドレッシングの加工精度に影響を及ぼすことから，ドレッシング抵抗の定量化に関する様々な研究が行われている．たとえば，単石ダイヤモンドドレッサ^{*11}を用いてドレッシングの法線方向ドレッシング抵

抗の測定による加工特性の評価に関するもの⁵⁾，ドレッシング抵抗の3分力測定によるドレッサ摩耗に関するもの⁶⁾，単石ダイヤモンドドレッサについてのドレッシング抵抗と研削仕上げ面粗さの相関に関するもの⁷⁾，など工具と加工条件の両者から高精度なドレッシング方法の検討がなされている。

このようにドレッシング抵抗に関する研究成果は数多く報告されているが，ドレッサの種類に注目してドレッシング抵抗と研削性能（研削抵抗，研削仕上げ面粗さ）の関係を論じた研究報告はそれほど多くなく，包括的な検討を行うことは現在においても工学的意義がある。

1.3 研究の目的

上述した加工物の内径が数 mm 程度の内面研削に使用される小径研削クイルに関するドレッシング時の問題点として，小径研削クイルの回転数が汎用研削盤の回転数の十数倍であることが挙げられる。これは，砥石1回転あたりのドレッサ送り量を「同一ドレッシング回数」の概念に基づいて推奨値とされている値⁸⁾に設定するためには，汎用研削盤で用いられる十数倍のドレッサ送り速度を必要とするが，内面研削盤の作業空間は狭域であるため実現可能なドレッサ送り速度には限界がある。加えて小径研削クイルが低剛性であり過大なドレッシング抵抗が加わることはツルージング精度の劣化につながる。

一方，通常ドレッシングで用いられる単石ダイヤモンドドレッサは旋削加工用切削バイトと同一の運動機能を有するドレッサであるにも関わらず，その先端形状はすくい面という観点で成形されていない。しかしながら，多用されている研削砥石は硬脆性を持つものが大半であり，このツルージング，ドレッシングでは，砥石の硬脆性を考慮したすくい角が重要なパラ

メータであると考えられる。したがって、ドレッサにすくい角を持たせることができれば、ドレッシング時の延性モードおよび脆性モードでの加工を選択でき、ドレッシングにより得られる砥石表面状態を制御できる機能性ドレッサが得られると考えられる。

1.4 本論文の構成

本論文では、小径内面研削クイルの高精度ドレッシング技術を向上させるために適した機能性ドレッサの追究を目的とし、従来のダイヤモンドドレッサでの課題を整理し、高耐摩耗性を有するダイヤモンドを素材とし、ドレッサにすくい角の概念を導入することを提案した。

次に、高耐摩耗性を有するダイヤモンドを選定するにあたり、実際のドレッシング時に発生するドレッサ摩耗による形状変化がドレッシング性能に影響を及ぼすが、実際のドレッサでは摩耗特性が評価しにくいことから、各種ダイヤモンドを用いて超硬材料の連続切削、断続切削を想定した正面切削、フライカット切削に適用した場合の摩耗特性を定量的に評価した。

次に、ドレッシング特性を定量的に評価するために、内面研削クイルとして多用されているビトリファイドWA砥石を対象とするドレッシング抵抗評価装置を構築し、ドレッシング抵抗と研削性能の関係を定量的に評価した。また、加工条件の追究に関しては、硬脆材料の切削加工での重要なパラメータであるすくい角を制御することが可能な切削バイト型単石ダイヤモンドドレッサを開発し、小径内面研削加工で使用する砥石を対象として、すくい角がドレッシング抵抗、研削性能に及ぼす影響について定量的に追究した。

本論文は全6章で構成されており、以下にその構成と内容に関して簡略に説明する。

第1章は、「序論」でありこの章である。

第2章は、小径内面砥石のドレッシングに関し、従来の単石ダイヤモンドドレッサでは加工時の形状精度が維持できないこと、また、従来切削加工での重要条件因子であるすくい角の概念が未適用であることが問題点であることを示し、従来の単石ダイヤモンドドレッサのすくい角を評価した結果、切削力が高くなるすくい角⁹⁾を有することを見出した。これらの問題点に対し、耐摩耗性の高いダイヤモンドを用い、すくい角を制御できるドレッサの適用を提案している。

第3章は、ドレッサの耐摩耗性を単結晶および多結晶ダイヤモンドなどの各種ダイヤモンドバイトにより超硬合金を切削することによって評価した。その結果、グラファイトを出発原料とし、超高压、高温雰囲気下でグラファイトを直接変換させることにより、異方性が無く、かつナノメートルサイズまで結晶を微粒化させることができるナノ多結晶ダイヤモンド¹⁰⁾が単結晶、多結晶ダイヤモンドの中で最も耐摩耗性に優れることを明らかにした。

第4章は、ドレッシング抵抗の測定装置を提案し従来から用いられている単石ダイヤモンドドレッサおよび多石ダイヤモンドロータリドレッサのドレッシング抵抗、研削特性の測定結果にもとづき、測定装置の性能を検討した。また、ドレッサの先端形状が鋭利であることがドレッシング抵抗を低減できること、また低ドレッシング抵抗を維持するための耐摩耗性が重要な特性であることを見出した。

第5章は、より高機能なドレッサを追究するために、ナノ多結晶ダイヤモンドを素材として、従来の単石ダイヤモンドドレッサとは異なる一定の負のすくい角を有する単刃ダイヤモンドドレッサ、すなわち「切削バイト型ドレッサ」と称するドレッサを開発し、小径内面研削用砥石へのドレッ

シング性能を評価した。その結果、ドレッシング条件の選択範囲が同一の場合、切削バイト型ドレッサが提供する研削仕上げ面粗さの変動幅は従来のダイヤモンドドレッサが提供する変動幅よりも小さく、ドレッシング条件の変化に大きく左右されない研削仕上げ面粗さを提供するという意味でロバスト性に優れていることを見出した。

第 6 章は、「結言」であり本研究の全体的な総括を行い、得られた結果をまとめて要約している。

参考文献

- 1) M. Touge, H. Sakamoto and T. Matsuo: Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 60, 576(1994)2845.
- 2) T. Tamura, H. Yamakura and M. Masuda: Precision truing of bond diamond wheels by lapping their cutting edges, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 59, 12(1993)1979.
- 3) J. Tamaki and T. Sugino: Nd:YAG laser-aided truing of electroplated CBN quill, J. J. Soc. Abrasive Technology, 40, 2(1996)81.
- 4) K. Kadomura, T. Fukunishi, H. Oshita, Y. Mitsui and T. Hara: JSPE Spring Meeting, (1997)245.
- 5) S. Moritomo: Tool Engineer, 24, 2(1980)73.
- 6) T. Nakajima, Y. Uno and T. Tachibana: Some problems in single point diamond dressing-Effects of dresser wear and dressing condition on grinding results-, J. J. Soc. Abrasive Technology, 34, 1(1990)21.
- 7) M. Matsui, O. Saitou and Y. Konno: Studies on the Evaluation of wheel surface topography, J. J. Soc. Abrasive Technology, 42, 8(1998)332.
- 8) H. Shintani: Mechanical Engineering, 45, 12(1997)43.
- 9) J. Yan, K. Syoji and T. Kuriyagawa: Ductile-Brittle Transition at Large Negative Tool Rake Angles, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 66, 7(2000)1130.
- 10) H. Sumiya and T. Irifune: SEI Technology Review, 165(2004)68.

用語解説

*1 電着砥石

砥粒を工具の表面に保持しながら、ニッケルめっきを施し砥粒を機械的に固定したもの。輪郭加工工具のような複雑な形状にも砥粒を固定させることができ、工具再生コストが安い。

*2 cBN

立方晶窒化ホウ素を示しており、窒化ホウ素の分子構造の一つで、窒素とホウ素からなる固形の化合物である。立方晶窒化ホウ素は、ダイヤモンドの静的高温高压法に似た方法で合成される。ダイヤモンドに次ぐ硬さを持つ物質で、またダイヤモンドに比べて熱に強く鉄との反応性が低いという性質を持つため、その粒子を超高压下で焼結したものは硬質材料の切削に留まらず鋼や鋳鉄の超高速切削といった分野でも用いられる。

*3 ダイヤモンド

炭素の同素体の1つであり、実験で確かめられている中では天然で最も硬い物質。結晶構造は多くが8面体であるが、12面体や6面体のものもある。導電性は無い。

*4 単層砥粒部

電着砥石はニッケルめっきを施した基材に砥粒を機械的に固定したものであるため、砥粒層が単層となる。それに対し、従来の砥石は、砥粒と結合剤を混合、成形を行うため、砥石の深さ方向に複数の砥粒が存在するため単層ではない。

*5,*6 ツルーイングとドレッシング

研削工具を上手に使うために欠かせない作業である。ツルーイング（形直し）とは取り付けられた砥石の使用面の振れを取り除くたり、加工物の形状に合わせて所定の形状に仕上げる作業をいう。また、ドレッシング（目直し）とは形直し後に砥粒の突き出し量を調整したり、鈍化した砥粒の切れ刃を創生する作業をいう。

*7 反転電着法

めっき層の上に砥粒を固定させる電着砥石の作製法の1種。*1で示したように通常の電着では、基材（電着砥層をつける台金）へ固着して完成するが、反転電着の場合、1層のみ電着した後、上から別の台金を固着してあたかも電着層自体を転写するようにして行う製法。砥粒には粒度分布が存在するため、単に砥粒を固定しただけの砥石では砥粒の切れ刃高さは一定にならない。特に精度が必要となるダイヤモンドロータリドレッサや総形ホイールで適用される製法。

*8 ロータリドレッサ

回転式のホイールのような形状をしたドレッサで、加工対象となる砥石

を複雑かつ精度の高い形状にツルーイング・ドレッシングすることのできる工具。ダイヤモンドの砥粒が円周上に一つ一つ埋め込まれており、ロータリドレッサの形状がそのまま砥石にも転写されることになる。(第2章図2.2(b)参照)

***9 クイル**

円筒形の軸の先端に砥石部分を持つ研削工具。高速回転を行い、円筒内面研削を行う際の工具として用いられる。(第4章図4.5参照)

***10 アスペクト比**

2次元形状の物の長辺と短辺の比率を指す。小径内面研削用のクイルは円筒形状をしているが、直径に対し軸長が長い形状となる。加工時には直径部の根元を固定し、軸長先端部の砥石部分が仕事をするため、加工時には砥石部分にかかるモーメントが大きくなる。

***11 単石ダイヤモンドドレッサ**

ロータリドレッサ(*8)同様にドレッシング、ツルーイングのための工具の1つであり、単体のダイヤモンドを軸の先端に1つだけ取り付けたものである。(第2章図2.2(a)参照)

第 2 章

新しい概念によるダイヤモンドドレッサ の提案

2.1 緒言

研削加工は、高速回転する砥石を工具として工作物の表面を機械的に除去する加工方法である。研削加工において砥石を使用する場合には、図 2.1 に示すような砥石成形（ツルーイング、ドレッシング）を行う必要がある。ツルーイングとは形直しとも呼ばれ、砥石を回転させるための主軸にセットした場合の振れや砥石の偏摩耗による回転振れを抑制するために成形する作業である。一方、ドレッシングとは目立て、目直しとも呼ばれ、ツルーイングを施した砥石作業面に存在する砥粒を切れ刃として作用させるための作業であるため、砥石の切れ味はドレッシング状態により決定される。

したがって、ドレッシングは研削砥石の性能を左右する重要な作業であるため、工作物の種類、加工精度、砥石作業面を構成する砥粒と結合剤の種類に応じて多種多様のドレッサが開発され、ドレッシング条件の最適化に関する研究が行われていることは序論で述べたとおりである。そのなかで、機械的除去加工を原理とするダイヤモンドドレッサはそのツルーイング効果を含めるならばほとんどの研削砥石に対して適用できるため、超砥

粒ホイールの普及が目覚ましい現在においても、主要なドレッサとして重用されている。

本章では、小径内面研削に対する従来のドレッサの問題点を整理し、ドレッシング精度を向上するための新しい概念の提案について述べる。

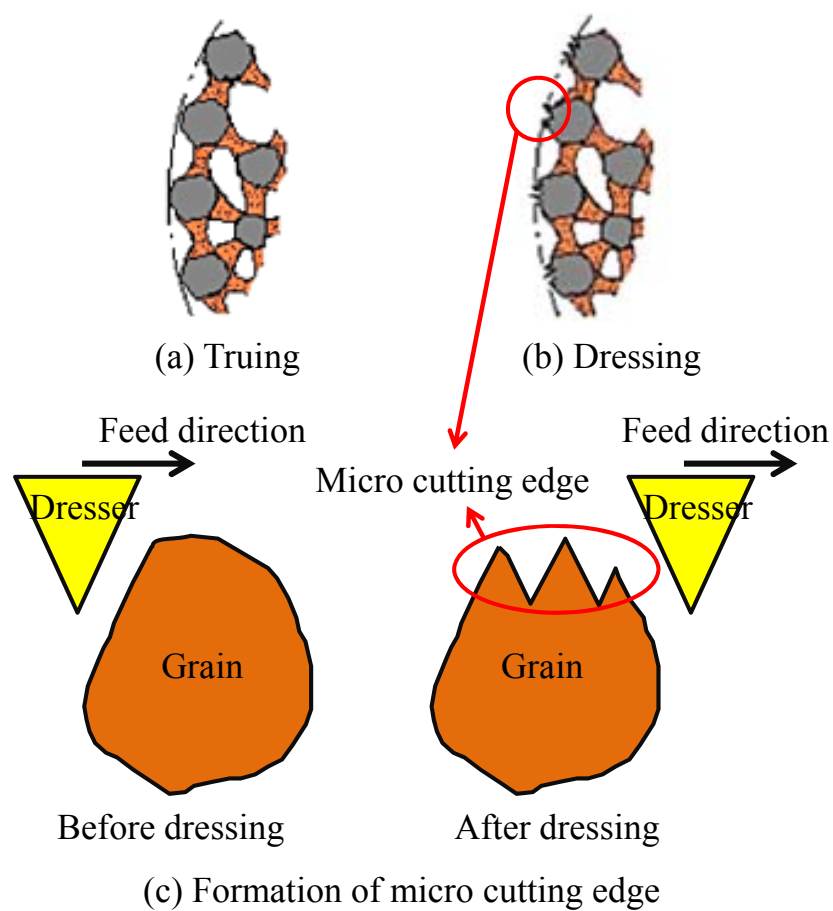


Fig. 2.1 Truing and Dressing

2.2 小径内面研削加工における従来ドレッサの課題

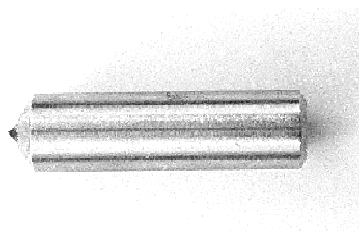
円筒内面研削を必要とする部品は軸受のように摺り合わせの箇所も多く、摺り合わせ部では使用時の摩擦抵抗の低減が求められるため高精度仕上げが求められるが、切削加工は適用しがたく研削加工が主に用いられる。その研削加工に求められる特性としては、研削抵抗、研削仕上げ面粗さが安定して得られることが挙げられる。すなわち、加工初期の変動が少なく、かつ性能を持続することが求められるため、形状（ツルーイング）精度に優れ、切れ味（ドレッシング）性能に優れた砥石の提供が求められる。

また、内面研削の中でも小径内面研削を考えた場合、加工には小径軸付き砥石を用いる必要があるが、そのアスペクト比は高くなるため、外力、すなわち研削抵抗に対して弾性変形しやすくなる。そのため小径軸付き砥石のドレッシングを高精度で行う場合には、弾性変形を抑制、すなわち切削抵抗に相当するドレッシング抵抗をできる限り小さくすることも重要である。

小径軸付き砥石をドレッシングするダイヤモンドドレッサは、旋削工具に相当する静止型ドレッサとフライス工具に相当する回転型ドレッサの 2 種類に大別される。

図 2.2 に静止型、回転型の代表的なダイヤモンドドレッサである単石ダイヤモンドドレッサと多石ダイヤモンドロータリドレッサの外観写真を示す。単石ダイヤモンドドレッサは、軸の先端にダイヤモンドが 1 つ接合された構造を持っている。軸を固定するためドレッサの駆動部分は必要なく、砥石が往復運動をすることにより材料除去を行う。そのためドレッサを設置するスペースはほとんど必要がない。しかしながら、先端のダイヤモンド 1 点でドレッシングを実施するため、ダイヤモンドの摩耗により先端形状の維持が難しく、ドレッシング条件が安定しないことが問題である。

一方、多石ダイヤモンドロータリドレッサは、円周上にダイヤモンドが一定間隔で設置されている構造を持っている。円周上の多数のダイヤモンドにより材料除去を行うため、1つ1つのダイヤモンドの仕事量は単石ダイヤモンドドレッサと比較すると小さくなるため、耐摩耗性が高く安定したドレッシング条件が得られることが特長である。しかしながら、円周上のダイヤモンドに仕事をさせるためには、ドレッサを回転させる必要があるため、回転駆動装置を研削機とは別に準備する必要があるため、結果として加工コストが高くなる短所が挙げられる。



(a) Single-point diamond dresser



(b) Multipoint diamond dresser

Fig. 2.2 Conventional diamond dresser

ここで上述した単石ダイヤモンドドレッサにおけるドレッシングの不安定性について説明する。図 2.3 に単石ダイヤモンドドレッサを用いたドレッシングのモデルを示す。左側の図には単石ダイヤモンドドレッサと小径加工用クイルの位置関係を示しており、右側の図にはドレッシング部分の拡大図を示している。単石ダイヤモンドドレッサの場合、軸先端にダイヤモンド粒が1個接合されているため、すくい面が摩耗し切れ刃後方に逃げ面が形成される。単石ダイヤモンドドレッサによるドレッシング時の制御要因を考えると、ドレッサの形状パラメータとして、ドレッサ幅によって決まる逃げ面幅 b 、ドレッサの設置方法によって決まる傾き角 a が挙げ

られ、ドレッシング条件としては、逃げ面幅およびドレッサ送り係数を考慮した送り速度 f_d 、切込み深さ A_d が挙げられる。単石ダイヤモンドドレッサによる砥石のドレッシングにおいて、切れ刃に着目すると、ダイヤモンドによる複合硬脆材料（砥粒と結合剤の複合材料）の切削加工というようにみなすことが可能と考えられるが、従来の単石ダイヤモンドドレッサは、先端形状が不定であるため、切削加工における重要因子であるすくい角（図中 α にて表現）が制御されていないためワークである砥石と工具であるダイヤモンドとの接触状態が一定にならない。また、逃げ面摩耗の進行によって加工状態が不安定になる。

以上を整理すると、研削加工の中でも小径内面研削加工に対し、安定した高精度な研削表面の提供、また加工コストを低減できる砥石をドレッシングするためのダイヤモンドドレッサの要件として、駆動装置が不要な固定式のドレッサであって、ダイヤモンドの摩耗が少ないことが挙げられる。

また、従来の単石ダイヤモンドドレッサでは、切れ刃であるダイヤモンドの形状が不定、すなわちドレッシングを硬脆材料の切削加工とみなした場合にすくい角の概念が導入されていないため加工状態が安定しないことが課題であることがわかる。

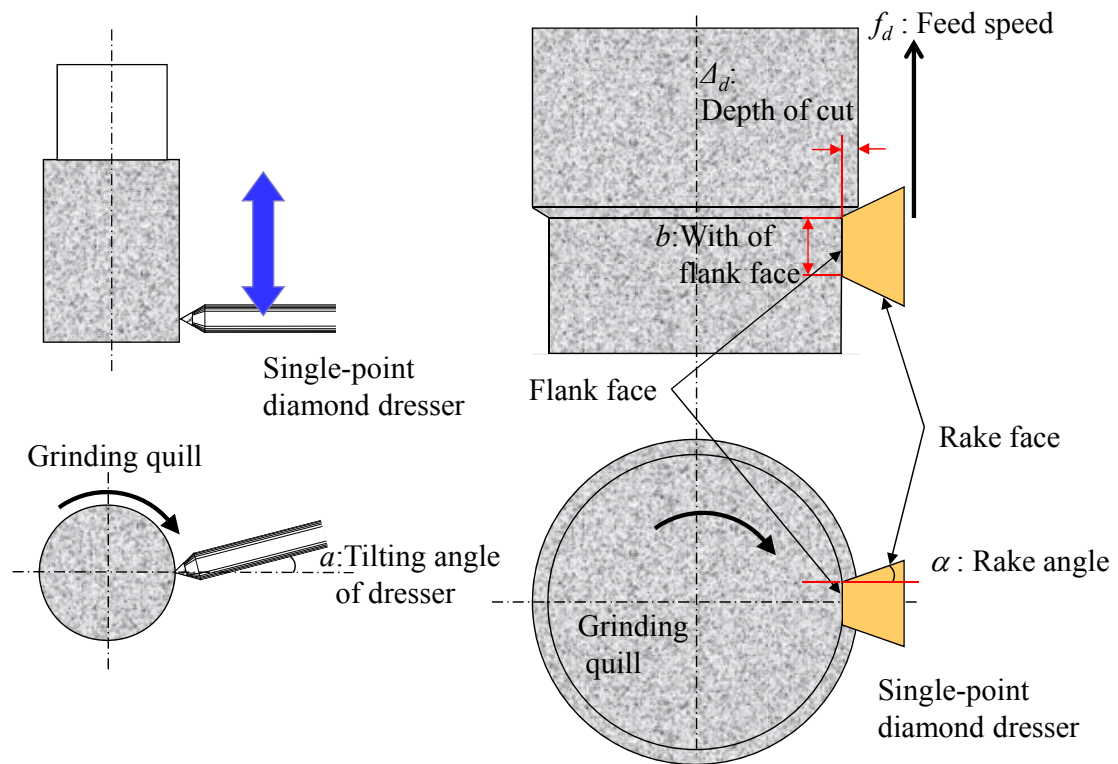


Fig. 2.3 Dressing model of single-point diamond dresser

2.3 単石ダイヤモンドドレッサの形状特性

2.2 項にて従来の単石ダイヤモンドドレッサの課題として、「すくい角の概念が導入されていない」ことを挙げた。本項では従来のダイヤモンドドレッサの形状特性評価を行った結果について述べる。

図 2.4 は、成形しないダイヤモンド原石を埋め込んだ一般的に使用されている単石ダイヤモンドドレッサの先端形状をレーザ顕微鏡（形状測定レーザマイクロスコープ，KEYENCE 社製 VK-9700）で測定した例を示す。ダイヤモンドの先端は図 2.4(a)に示すような四面体や円錐などの形状を有しているが¹⁾，ドレッシング作業においてはダイヤモンドドレッサの先端形状あるいは結晶面の研削砥石作業面に対する姿勢角を考慮しないため，ダイヤモンドドレッサはドレッサシャンク径の中心を回転軸とする任意の姿勢角で研削砥石作業面と干渉することになる。

図 2.5 は，図 2.4 に示す単石ダイヤモンドドレッサの場合について，ドレッサと研削砥石作業面の干渉状態をモデル化した図である。切削バイトの場合，すくい面を基準としてすくい角を含む切れ刃形状パラメータが定義されるが，不定形状を有するダイヤモンドドレッサの場合，すくい面の定義が不可能であるため，図 2.5 に示すように，ドレッサ先端を含み砥石

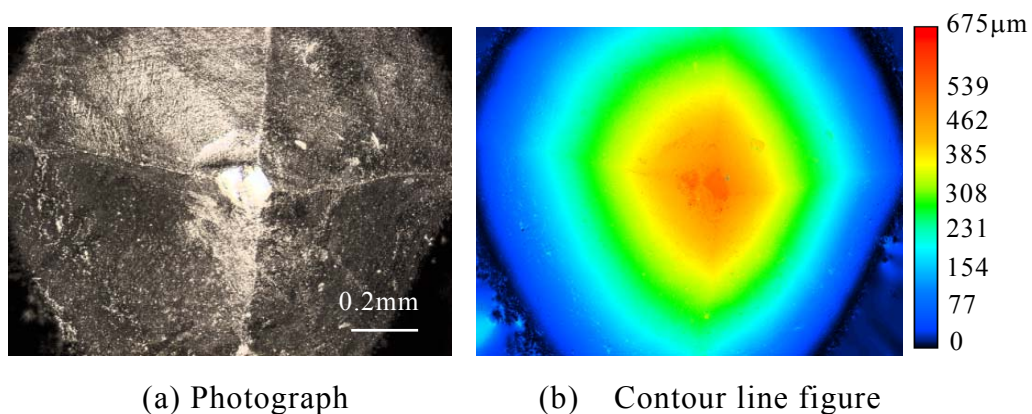


Fig. 2.4 Edge shape of single-point diamond dresser

周速度方向 V に平行な断面 AA 上で上すくい角 α_b を定義し、ドレッサ送り速度方向 f_d に平行な断面 BB 上で横すくい角 α_s を定義した。なお、単石ダイヤモンドドレッサの場合、ダイヤモンド先端位置とドレッサシャンク径の中心は一般的には一致しないため、B-B 断面に示すようなドレッサ断面形状が得られる。

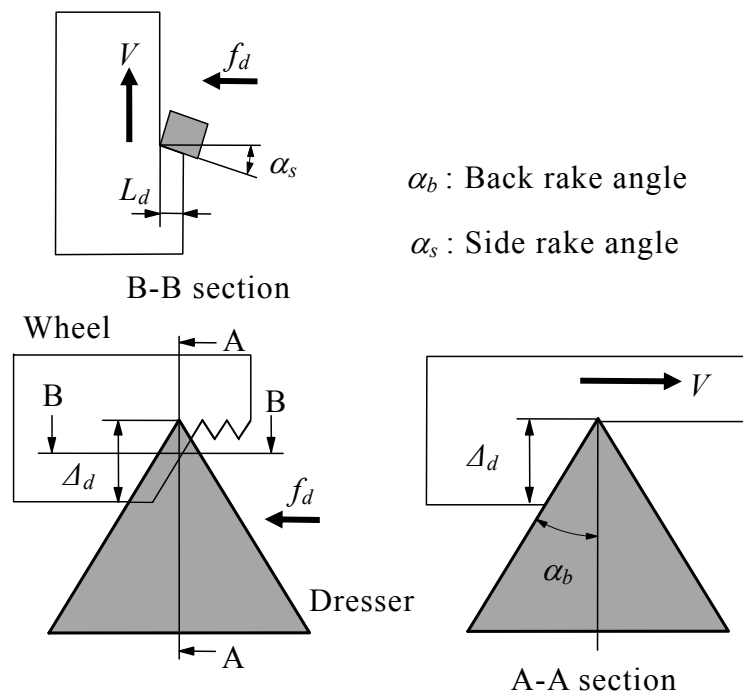


Fig. 2.5 Definition of rake angle of single-point diamond dresser

図 2.6 は、図 2.4 (b) に示した単石ダイヤモンドドレッサの等高線図を用いてすくい角の分布を測定した結果である。なお、横すくい角を定義する BB 断面をドレッサ先端から $20\mu\text{m}$ の位置に設定した。上すくい角 α_b は -40° ～ -70° の範囲に分布しており、その平均値は -58.5° である。

ところで、単石ダイヤモンドドレッサを使用する場合、図 2.3 で示した

ようにドレッサの研削砥石作業面への食い込みを避けるためドレッサシャンク（軸）を研削砥石作業面の法線方向に対して $-5^{\circ}\sim-15^{\circ}$ 傾けて設置することが推奨されている²⁾。この場合、実質上すくい角は測定値に設置傾き角を加えた値となる。一方、横すくい角 α_s は $+30^{\circ}\sim-80^{\circ}$ の広範囲に分布し、 $-20^{\circ}\sim-80^{\circ}$ の領域ではほぼ一様に分布していることがわかる。

以上の測定結果に基づいて単石ダイヤモンドドレッサの先端形状を切削工具の切れ刃としてモデル化すると、上すくい角がほぼ $-40^{\circ}\sim-70^{\circ}$ に分布しており、横すくい角が任意の負の値を有する切れ刃とみなすことができる。切削加工で用いる切削バイトと比較すると、従来の単石ダイヤモンドドレッサでは非常に大きなすくい角の分布を取ることが明らかとなった。

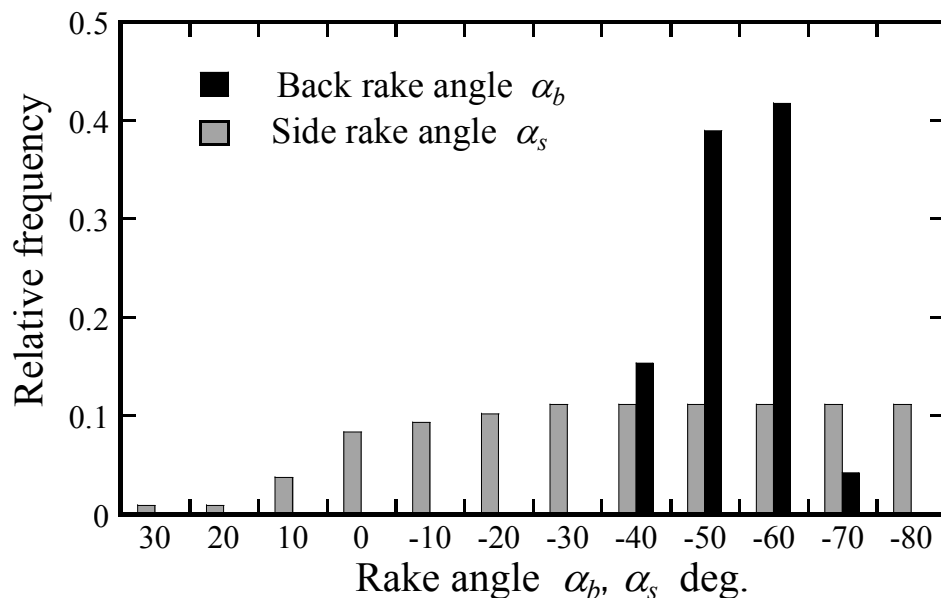


Fig. 2.6 Rake angle of single-point diamond dresser

2.4 新しいダイヤモンドドレッサの提案

2.3 項にて得られた従来の単石ダイヤモンドドレッサのすくい角（上すくい角： $-40^{\circ}\sim-70^{\circ}$ ，横すくい角： $+30^{\circ}\sim-80^{\circ}$ の広範囲に分布）に対し，加工特性に及ぼす影響について検討する．

図 2.7 は，閻ら³⁾が実施した大きな負のすくい角を有するダイヤモンド工具を用いて単結晶 Si の正面切削実験を行った結果である．単結晶 Si は脆性材料であるが，切削切込み深さが小さい場合には延性モードの材料除去を示し，切削切込み深さを大きくすると脆性モードの材料除去に移行する．図 2.7 の左軸は脆性モードの材料除去に移行する切削切込み深さを示しており，図よりすくい角を 0° から負の方向に大きくすることによって延性モードの材料除去が実現するが，すくい角 -40° 付近を境界としてそれ以上大きな負のすくい角にすると脆性モードの材料除去に移行することを報告している．切削抵抗は，すくい角を 0° から負の方向に大きくすることにより増加することを示している．ここで従来のダイヤモンドドレッサのすくい角について考えた場合，ドレッサ単体の上すくい角は平均で -58.5° になっていることに加え，ドレッシング実施時には工作物（研削砥石）の回転方向に対し $-5^{\circ}\sim-15^{\circ}$ 程度の傾き角を与えることから，従来のダイヤモンドドレッサによるドレッシングにおいては $-63.5^{\circ}\sim-73.5^{\circ}$ 程度のすくい角を与えていることとなる．図 2.7 は単結晶 Si のデータであるため参考値ではあるが，ドレッサのすくい角を負の小さい方向に取ることができれば，ドレッサに求められる要件である小さなドレッシング抵抗が得られる可能性が考えられる．さらに言えば，従来の単石ダイヤモンドドレッサではすくい角の概念が導入されていないが，ドレッサのすくい角を制御することができれば，延性，脆性の加工モードを制御できる可能性を示唆している．

以上の結果から，(1) 高い耐摩耗性を持つダイヤモンドを素材とし，(2)

従来の単石ダイヤモンドドレッサでは導入されていない「すくい角」の概念をドレッサに導入することにより小径内面研削用クイルのドレッシング技術の向上が可能であると考えられる。

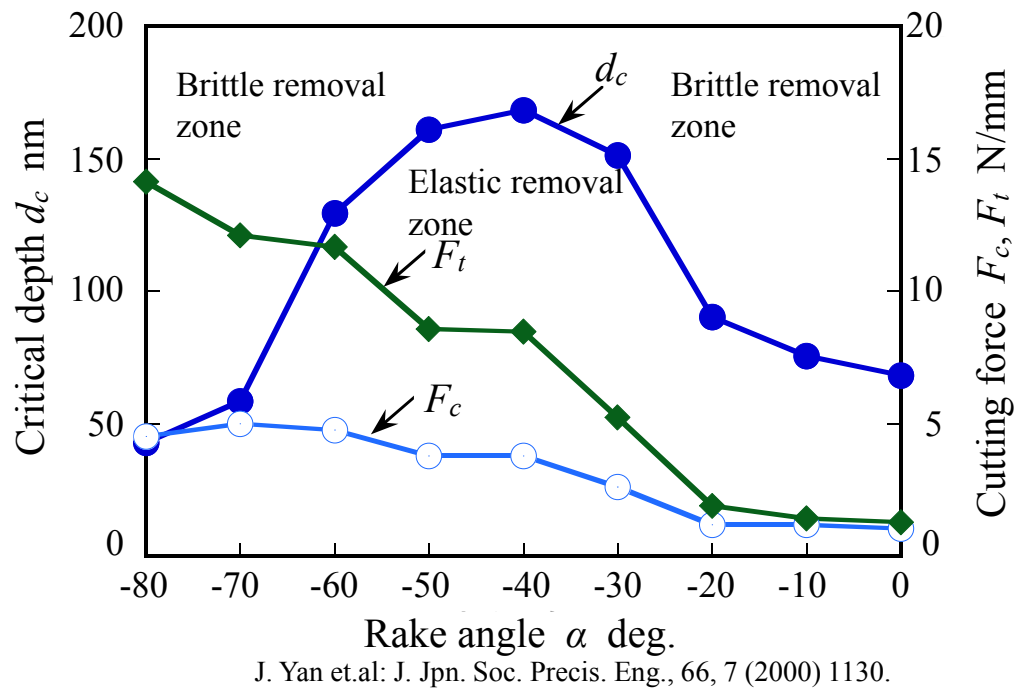


Fig. 2.7 Relationship critical depth, cutting force and rake angle

2.5 結言

軸受のように摺り合わせの箇所も多く部品使用時の摩擦抵抗の低減が求められる円筒形状部品の加工では研削加工が主に行われている．その中でも高精度仕上げが求められる小径内面研削用砥石（クイル）のドレッシングについて課題を抽出し，課題を解決するために必要な技術の整理を行った．その結果，ドレッサ摩耗進行の抑制が可能な高耐摩耗性を有する素材を用い，切削加工条件の重要因子である「すくい角」の概念をドレッシングに導入することにより，硬脆複合材料である砥石の加工モードを制御できる可能性を提案した．得られた結果を以下に示す．

- (1) 従来の単石ダイヤモンドドレッサの切れ刃すくい角を評価した結果，上すくい角（砥石の回転方向に対するすくい角）は $-40^{\circ}\sim-70^{\circ}$ に分布しており，平均は -58.5° である．
- (2) 従来の単石ダイヤモンドドレッサの横すくい角（ドレッサ送り方向に対するすくい角）は $+30^{\circ}\sim-80^{\circ}$ の広範囲に分布している．
- (3) 従来の単石ダイヤモンドドレッサではすくい角の概念が導入されていないが，すくい角の概念をドレッサに導入することにより，低ドレッシング抵抗，かつ加工モード制御できる可能性がある．

参考文献

- 1) H.S. Lee, T. Hori, K. Fuchi and T. Wakabayashi: On a dressing performance of single point diamond dressers -1st Report: Measurement of 3-dimensional geometries of diamonds-, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 44, 2 (2000) 89.
- 2) 海野邦明：絵とき研削加工，基礎のきそ，日刊工業新聞社，(2006) 126.
- 3) J. Yan, K. Syoji and T. Kuriyagawa: Ductile-Brittle Transition at Large Negative Tool Rake Angles, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 66, 7 (2000) 1130.

第 3 章

超硬合金切削におけるダイヤモンドバイ トの摩耗特性

3.1 緒言

前章までに、高精度ドレッシングを実現するためには耐摩耗性に優れたダイヤモンドドレッサを用いることが重要であることを述べた。本章では、各種ダイヤモンドの耐摩耗性を明らかにすることを目的として評価を行った結果について述べる。

近年の電子・光学機器の急速な発展にともない、微細形状を有する部品の高精度・高能率加工に対する要求が高まっている。とくに、超硬合金金型のマイクロ加工は、導光板、フレネルレンズ、非球面レンズに代表される光学部品の生産を支える基盤技術として期待されている。超硬合金は高温下において高強度と耐摩耗性を有するため金型材料として最適な素材であるが、その機械加工にはダイヤモンドホイールを用いた研削加工が多用されている。たとえば、レンズ金型の研削加工には先端を成形したダイヤモンド小径研削クイルが使用されるが、そのツルーイングとドレッシングには少なからぬ時間を要し、研削性能が劣化する度にこの作業を反復しなければならない。また、アスペクト比が大きい溝のように研削加工が不可

能な形状も存在する。

そこで、超硬合金の機械加工を旋削加工あるいはエンドミル加工で代替しようとする研究がなされている。許ら¹⁾は焼結多結晶ダイヤモンド（以降、「PCD」と略称：(Polycrystalline diamond)）バイトを用いて超硬合金の乾式切削を行い、工具寿命の観点から切削速度と送り速度の適正値を提案している。木村ら²⁾は PCD を素材とするマイクロフライス工具を開発し、超硬合金の延性モード加工が可能であることを報告している。CVD（Chemical Vapor Deposition:化学気相成長法）法による厚膜ダイヤモンドが市場に供給され切削工具としての応用事例³⁾が紹介されるとともに、Belmonte ら⁴⁾は超硬合金の乾式切削における CVD ダイヤモンドバイトの摩耗特性を PCD バイトと比較し、その優れた耐摩耗性を報告している。最近では、角谷ら⁵⁻⁶⁾がグラファイト直接変換法により生成したナノ多結晶ダイヤモンド（以降、「NPD」と略称：(Nano-polycrystalline diamond)）を素材とするバイトで超硬合金を切削し、単結晶ダイヤモンドの特徴である劈開^{*1}や摩耗の異方性^{*2}がない優れた材料であることを報告している。切削加工法の観点からは、社本ら⁷⁾が超音波楕円振動を利用した単結晶ダイヤモンドバイトによる正面切削を行い、超硬合金の延性モード加工が可能であることを報告している。由井ら⁸⁾はバインダレス超硬合金切削時における単結晶ダイヤモンドバイトの摩耗特性を切削油剤の観点から詳細に検討している。

これらの報告が示すように、現在では多種多様のダイヤモンドが市場に供給され、それぞれについて超硬合金の切削加工用工具としての性能評価が行われているが、ダイヤモンドの組成や結晶構造の違いに注目して総合的に検討を行っている研究は少ない。

そこで、本章では単結晶ダイヤモンドと多結晶ダイヤモンドの違い、多

結晶ダイヤモンドについてはバインダの有無に注目して超硬合金切削用バイトとしての摩耗特性を明らかにしている．なお，切削工具の摩耗特性を議論する場合，由井ら⁸⁾が報告しているように，切削油剤の種類と供給方法が大きな影響因子となるが，本研究ではダイヤモンド組成の影響を解明することを優先している．

また，切削工具の摩耗特性を評価するための視点として，切れ刃と工作物の接触状態に注目し切れ刃と工作物の接触が連続的に行われる旋削加工法として正面切削を，一方，切れ刃と工作物が断続的に接触するエンドミル加工に相等する加工法として単刃フライカット（SPFC：Single Point Fly Cutting）の2つを採用した．

3.2 実験方法

ダイヤモンドバイトの素材として、すくい面の結晶面^{*3}と結晶方位^{*4}を変えた2種類の単結晶ダイヤモンドとダイヤモンドの結合状態が異なる3種類の多結晶ダイヤモンドの計5種類を使用した。表 3.1 にその仕様を示す。単結晶ダイヤモンドバイトの場合、たとえば SCD(100)<100>という記号はすくい面として(100)面を使用し<100>方向が切込み方向と一致するようにバイトを成形したことを意味する。今後 SCD(100), SCD(110)バイトと略称する。多結晶ダイヤモンドとして、平均粒径 4 μ m のダイヤモンド粒を Co 結合相（バインダ）で焼結した PCD ダイヤモンド、バインダレスダイヤモンドとして、CVD 法によりダイヤモンド結晶粒を相互成長させた CVD ダイヤモンド（以降、「CVD」と略称）とグラファイトを出発物質とした直接変換焼結により生成した数十 nm の微細なダイヤモンド粒子からなる NPD の2種類を用いた。実験で用いたバイトの外観を図 3.1 に示す。

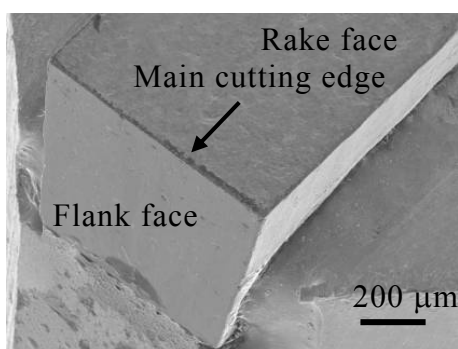
Table 3.1 Cutting tool and workpiece

Cutting tool	<p>Monocrystalline diamond cutting tool (Synthetic diamond, Ibtype, Sumitomo Electric Industries Ltd.) SCD(100)<100>, SCD(110)<110> *():Crystal plane of rake face *< >:Crystal orientation in the direction of infeed</p> <p>Polycrystalline diamond cutting tool Sintered polycrystalline diamond(PCD) (GE1600, particle size 4μm) Chemical vapor deposition diamond(CVD) (Element Six Ltd. CVDRESS CVD) Binderless nano-polycrystalline diamond(NPD) (Sumitomo Electric Industries Ltd.)</p>
Workpiece	<p>Tungsten carbide(K10) WC particle size 2μm, Co 7~10 wt% Diameter d_w = 6mm, D_w = 50mm, Thickness 5mm Length 80mm, Width 20mm, Thickness 6mm</p>

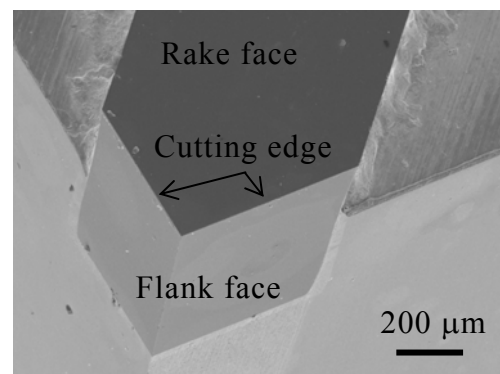
ここでは、0.8mm の正方形断面を有する角柱に切り出した後に工具ホルダーにろう付けし、すくい角 0° 、逃げ角 3° を有するダイヤモンドバイトを製作した。図 3.1(b) は平型ダイヤモンドバイトの場合であり、図 3.1(c) は刃先角 90° を有する V 字形ダイヤモンドバイトの場合である。いずれの場合にもダイヤモンドバイトのすくい角は一定値 (0°) とし、実質すくい角を与える場合には、実質すくい角と同一の傾斜角を有する傾斜台にダイヤモンドバイトを固定し工作物に対するバイトの姿勢角を変えることによって実現した。工作物として超硬合金 K10 種を用いた。



(a) Tool appearance



(b) Prismatic wedge-shaped



(c) V-shaped

Fig. 3.1 Diamond cutting tool

3.2.1 正面切削

実験装置には、図 3.2 に示す汎用 CNC 旋盤（オークマ社製 LB-10T-V8）と図 3.3 に示す超精密 CNC 正面旋盤（豊田工機社製 AHP20-25N）の 2 つを使用し、外径 50mm、内径 6mm の超硬合金円板の端面を中心から外周に向かって切削した．図 3.4 に超精密 CNC 正面旋盤を使用した加工部分の外観装置を、図 3.5 にその切削モデルを示す．横切れ刃角 κ のバイトを用いて工作物 1 回転あたり f の送り量で正面切削した場合，2 次元切削における切込み量に相当する切取り厚さ h は式 (3.1) で与えられる．また，実験における切削距離は式 (3.2) で与えられる．

$$h = f \cos \kappa \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\pi(D_w^2 - d_w^2)}{4 \cdot f} \quad (3.2)$$

ここで， L は切削距離， D_w は工作物直径， d_w は工作物内径である．



Fig. 3.2 CNC lathe

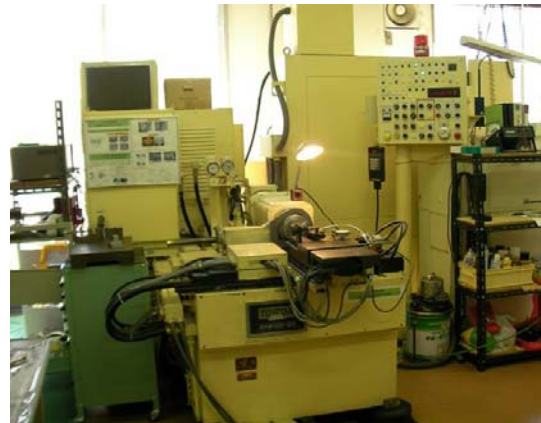


Fig. 3.3 CNC ultraprecision face lathe

表 3.2 に正面切削実験条件を示す．すくい角の影響を検討する場合には，結晶面および結晶方位に依存するダイヤモンド摩耗の異方性を実験結果から排除するために，CVD 多結晶ダイヤモンドで作製した平型バイトを用いた．切削条件を表 3.2 の実験 1 に示す．この実験条件の場合，横切れ刃角は $\kappa = 88^\circ$ ，送り量は $f = 10\mu\text{m}/\text{rev}$ なので，切取り厚さの計算値は(3.1)式より $h = 350\text{nm}$ となる．ダイヤモンドバイトの摩耗挙動を検討する場合には，刃先角 90° の V 型バイトを使用し，表 3.2 の実験 2 に示す切削条件を用いた．この実験条件の場合，横切れ刃角は $\kappa = 45^\circ$ ，送り量は $f = 0.45\mu\text{m}/\text{rev}$ なので，切取り厚さの計算値は(3.1)式より，実験 1 の場合とほぼ同じ値の $h = 318\text{nm}$ となる．なお，切削状態をモニタリングするために，圧電素子で構成した動力計を用いて切削抵抗の 3 分力を測定した．

Table 3.2 Face cutting conditions

Experiment No.1	Machine tool	CNC lathe
	Cutting tool	Prismatic wedge-shaped diamond cutting tool Side cutting edge angle $\kappa = 88\text{deg.}$ Back rake angle $\alpha = 0 \sim -40\text{deg.}$ Side relief angle $\beta = 3\text{deg.}$
	Cutting conditions	Rotational speed $N_w = 200\text{rpm}$ Feed rate $f = 10\mu\text{m}/\text{rev.}$ Depth of cut $t = 2\mu\text{m}$ ($h = 350\text{nm}$)
	Coolant	Chemical solution (Yushiro chemical industry Co. Ltd. WS90)
Experiment No.2	Machine tool	CNC ultraprecision face lathe
	Cutting tool	V-shaped diamond cutting tool Included angle: 90deg. , Nose radius: $0.1\mu\text{m}$ Side cutting edge angle $\kappa = 45\text{deg.}$ Back rake angle $\alpha = -30\text{deg.}$ Side relief angle $\beta = 3\text{deg.}$
	Cutting conditions	Rotational speed $N_w = 3000\text{rpm}$ Feed rate $f = 0.45\mu\text{m}/\text{rev.}$ Depth of cut $t = 20\mu\text{m}$ ($h = 318\text{nm}$)
	Coolant	Chemical solution (Yushiro chemical industry Co. Ltd. WS90)

切削油剤はダイヤモンドバイトの摩耗特性に大きな影響を及ぼす．由井ら⁸⁾は単結晶ダイヤモンドバイトを用いてコバルトレス超硬合金を切削加工する際の切削油剤として，ジアルキルジオリン酸亜鉛溶剤が刃先の摩耗とチッピング抑制に有効であることを報告しているが，本実験では，久保

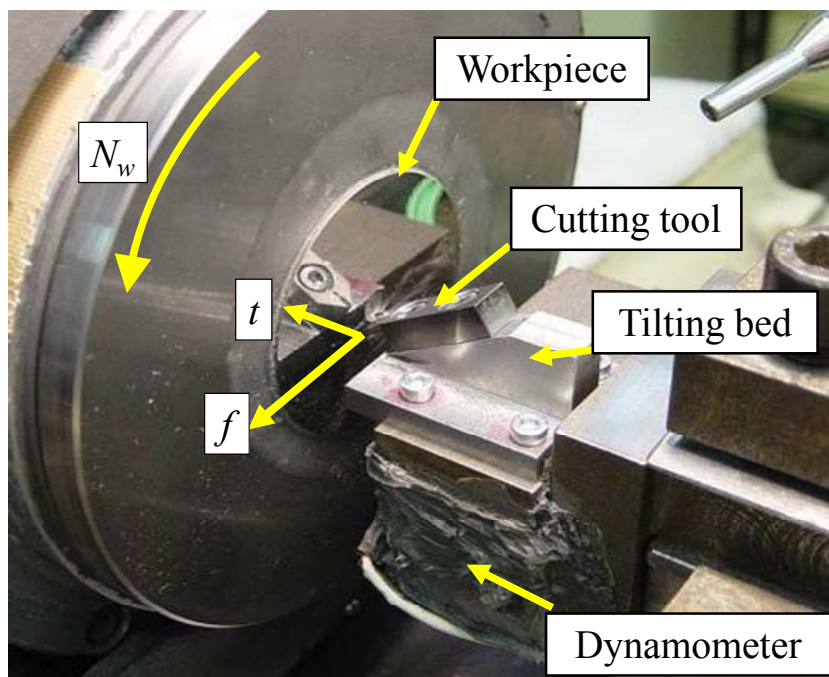


Fig. 3.4 Setup of face cutting

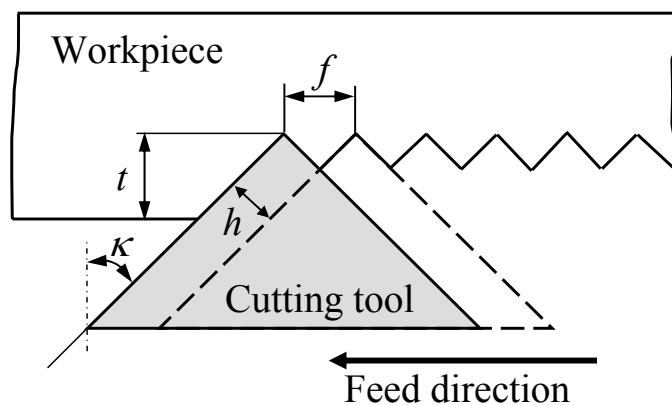


Fig. 3.5 Model of face cutting

ら⁹⁾が CVD ダイヤモンドバイトを用いて行った予備実験の際に最も良好な切削面粗さが得られ，切削距離の増加にともなう切削面粗さの変動も小さかった水溶性切削油剤を後述する単刃フライカット実験とともに使用した．

3.2.2 単刃フライカット

実験装置には図 3.6 に示す空気静圧軸受で支持されたスピンドルを有する精密平面研削盤（岡本工作機械社製 PSG-52DX）を使用し，スピンドルに搭載したアルミニウム円板に正面切削で使用したバイトと同一形状のバイトを取り付けた．

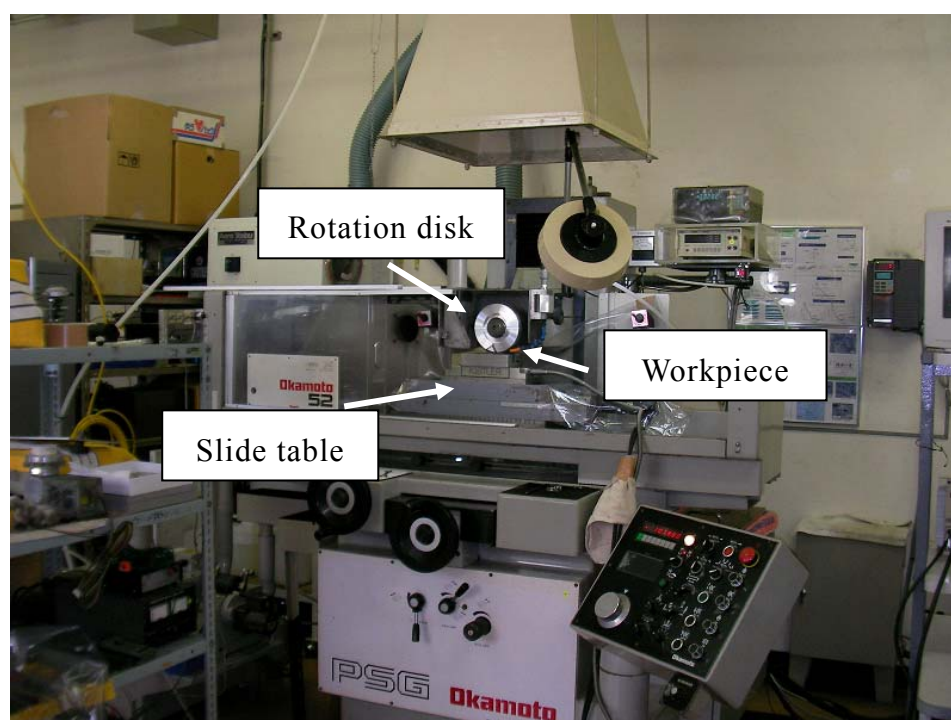


Fig. 3.6 Ultraprecision surface grinding machine

図 3.7 に実験装置の写真を示す．工作物の右側に配置したグラファイトは設定切込み量を一定に保つための検証用のものであり，超硬合金とともに研削加工を行って同一の高さにしたグラファイトを予備切削することによって切込み量が設定値になるように調整した．なお，切削工具が工作物との接触開始点において設定切込み量で干渉することによって初期破損することを避けるため，工作物端部に 5°の勾配を付けた．

図 3.8 に単刃フライカットモデルを示す．回転直径 D （切削速度 V ）を有する単一切れ刃に切込み量 t が与えられ，単一切れ刃は速度 v で進入する工作物を断続切削する．単一切れ刃の最大切込み深さ g と単一切れ刃 1 回転あたりの切削距離 l はそれぞれ式 (3.3)，(3.4) で与えられる．

$$g = 2\pi D \frac{v}{V} \sqrt{\frac{t}{D}} \quad (3.3)$$

$$l = \sqrt{Dt} \quad (3.4)$$

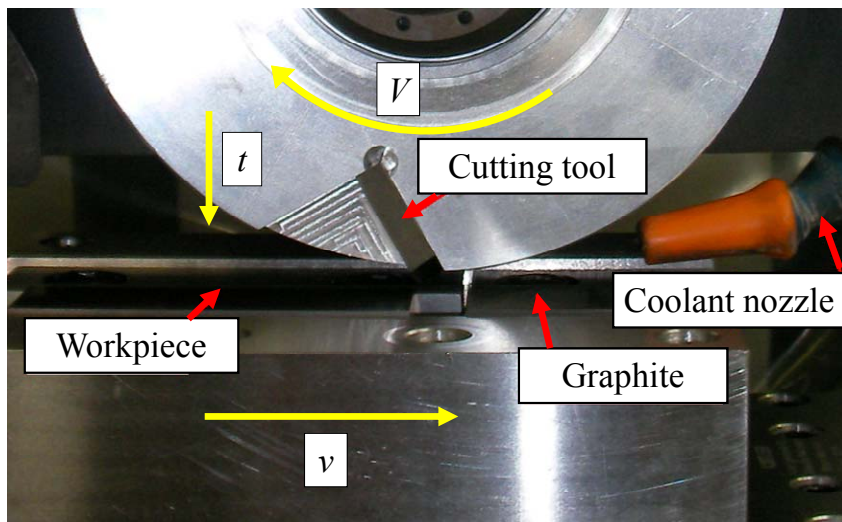


Fig. 3.7 Setup of single-point fly cutting (SPFC)

単刃フライカット実験の進行にともなう切れ刃の摩耗によって切れ刃回転直径 D と切込み量 t が減少するため，式(3.3)，(3.4)に示す g ， l の値も減少するが，切れ刃回転直径 D に及ぼす切れ刃摩耗の影響は無視できるので，切れ刃が工作物と接触を開始してから i 回転後の累積切削距離 L_i は式(3.5)で与えられる．

$$L_i = \sum_{i=1}^{i=i} l_i = \sum_{i=1}^{i=i} \sqrt{Dt_i} \quad (3.5)$$

ここで， t_i は切れ刃 i 回転後における実質切込み量，すなわち，切削痕溝深さである．

単刃フライカット条件を表 3.3 に示す．スピンドルに搭載した直径 150mm のアルミニウム円板に正面切削実験と同一仕様の V 型バイトを取り付けることにより，長さ 80mm，幅 20mm，厚さ 6mm の超硬合金をフライカットした．実験条件の設定にあたっては，最大切込み深さ g が正面切

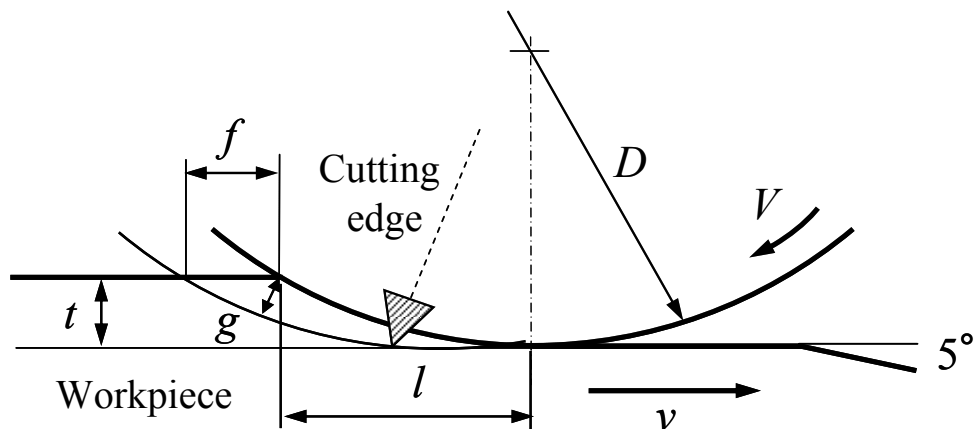


Fig. 3.8 Model of single-point fly cutting (SPFC)

削における切取り厚さ h とほぼ同一になるようにした．表 3.3 に示した実験条件を式 (3.3) に代入することにより最大切込み深さ $g = 344\text{nm}$ が得られる．

Table 3.3 Single-point fly cutting condition

Machine tool	Ultraprecision surface grinding machine
Cutting tool	V-shaped diamond cutting tool Included angle: 90deg. Nose radius: 100nm Back rake angle $\alpha = -30\text{deg.}$ Side relief angle: $\beta = 3\text{deg.}$
Cutting conditions	Rotational speed $V = 1413\text{m/min}$ Feed speed $v = 0.02\text{m/min}$ Depth of cut $t = 100\mu\text{m}, (g = 344\text{nm})$
Coolant	Chemical solution (Yushiro Chemical Industry Co., Ltd. WS90)

3.3 実験結果

3.3.1 すくい角の影響

超硬合金は硬脆材料であるため，良好な切削面を得るためにはすくい角を負にすることによって工作物に静水圧を与え脆性クラックの生成と進展を抑える，いわゆる延性モードで切削することが必要である．一方，延性モード切削を実現するための延性・脆性遷移臨界切取り厚さ（ d_c 値）はすくい角に対して極大値をとることが知られており，延性モード切削を高能率に行うためには d_c 値が最大となるようなすくい角を選定すべきである． d_c 値が最大となるすくい角は材料によって異なり，田牧ら¹⁰⁾は，硼珪酸ガラスに対して -25° という値を報告し，閻ら¹¹⁾は単結晶シリコンに対して -40° という値を報告している．

すくい角はダイヤモンドバイトの摩耗にも大きな影響を与える．すなわち，切込み量を一定にしてすくい角を負にした場合，工作物とすくい面の接触面積が増加するため，切削抵抗が集中荷重として作用することを抑制することが期待される．社本ら⁷⁾は超硬合金の超音波楕円振動切削を行い，すくい角を負にすることによって単結晶ダイヤモンドバイトのチップングが減少することを見出し，すくい角として -15° を採用している．以上の報告を考慮するならば，すくい角の選定にあたっては延性モード切削の実現とダイヤモンド工具の摩耗抑制の 2 つの観点からの検討が必要である．

図 3.9 は，CVD ダイヤモンドで作成した平型バイトを用いて表 3.2 に示す実験 1 の条件で超硬合金の正面切削を行い，切削距離 $L=3870\text{m}$ 後のすくい面摩耗と逃げ面摩耗を観察した結果である．すくい角を $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=-30^\circ$ に変えることによって幾何学的に得られるすくい面と工作物の接触面積は 15%増加するにもかかわらず，白線で囲まれたすくい面摩耗領域の

面積は 0.15mm^2 から 0.02mm^2 まで 13%に減少している．本実験の場合，工具傾斜台を用いてすくい角を変えているため，すくい角を負方向に増加することは逃げ角を増加することを意味する．したがって，すくい面摩耗とともに逃げ面摩耗も減少している．

図 3.10 は，図 3.9 に示した摩耗領域の面積を切れ刃摩耗面積 A と定義し，すくい角に対してプロットした結果である．すくい面摩耗面積，逃げ面摩耗面積ともすくい角の負方向への増加とともに減少し，すくい角 $\alpha=-30^\circ$ 付近で最小値に達した後，わずかに増加する傾向を示す．切れ刃摩耗面積がすくい角 $\alpha=-30^\circ$ を超えた点で増加傾向に転じる理由は，負のすくい角を増加することによって逃げ角も増加するため，刃先の機械的強度が劣化することによるものと考えられる．チャンファリング（切れ刃の刃先加工）

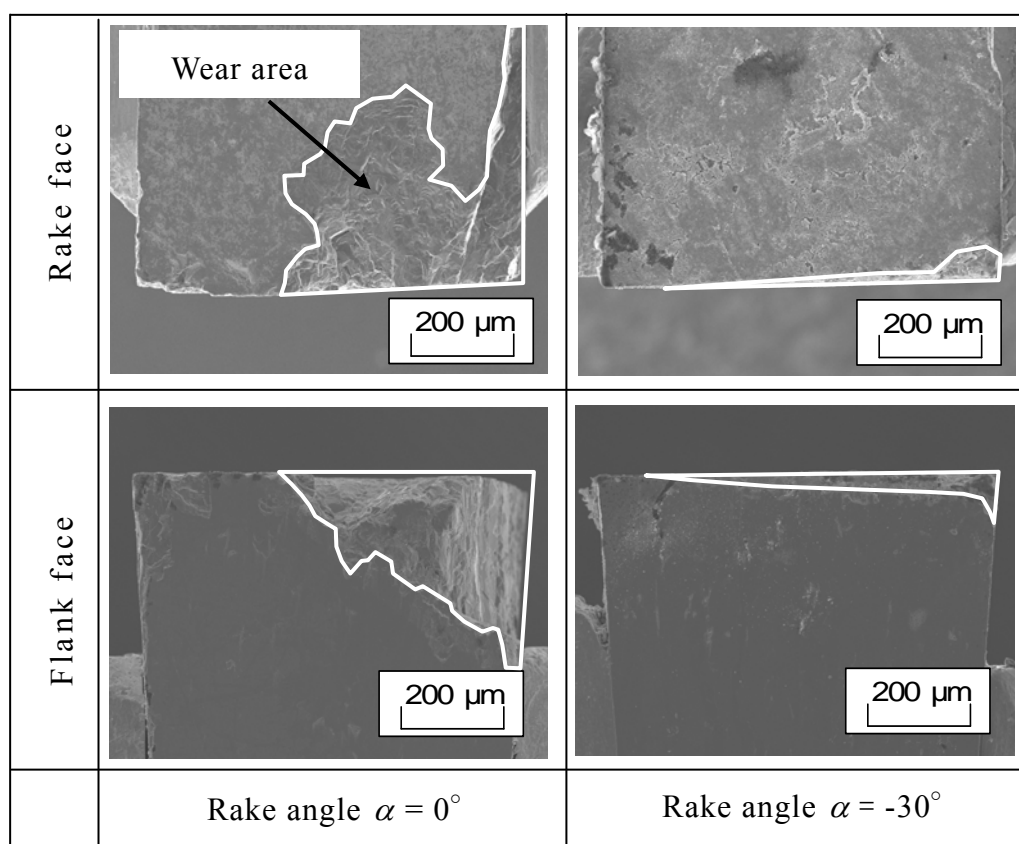


Fig. 3.9 SEM image of tool wear after $L = 3870\text{m}$

によって切れ刃に負のすくい角を与えることにより刃先強度を確保することもできるが、延性モード切削を実現する負のすくい角には極大値が存在するので、必要以上に大きな負のすくい角の設定は避けるべきである。

図 3.11 は、切削表面粗さ(中心線平均粗さ) R_{al} をすくい角に対してプロットした結果である。切削表面粗さはすくい角の負方向への増加とともに減少し、すくい角 $\alpha=-30^\circ$ 付近で最小値に達した後、 $\alpha=-40^\circ$ になるとわずかに増加する傾向を示す。

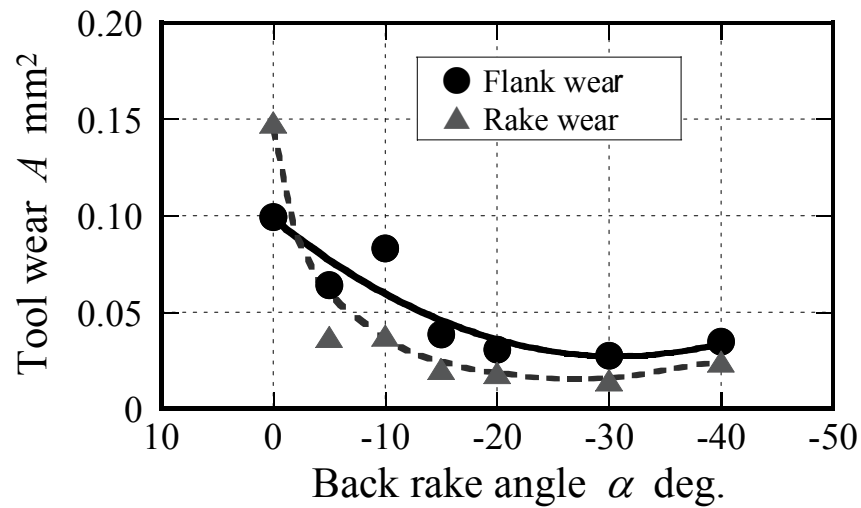


Fig. 3.10 Influence of rake angle on tool wear

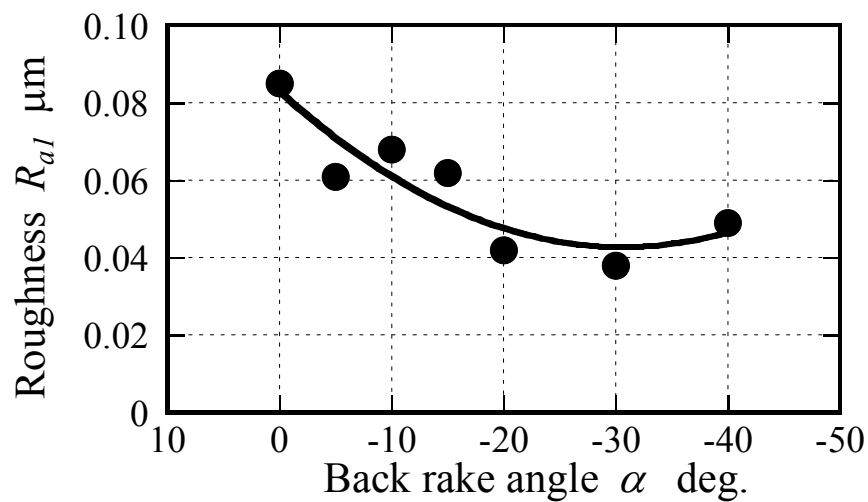
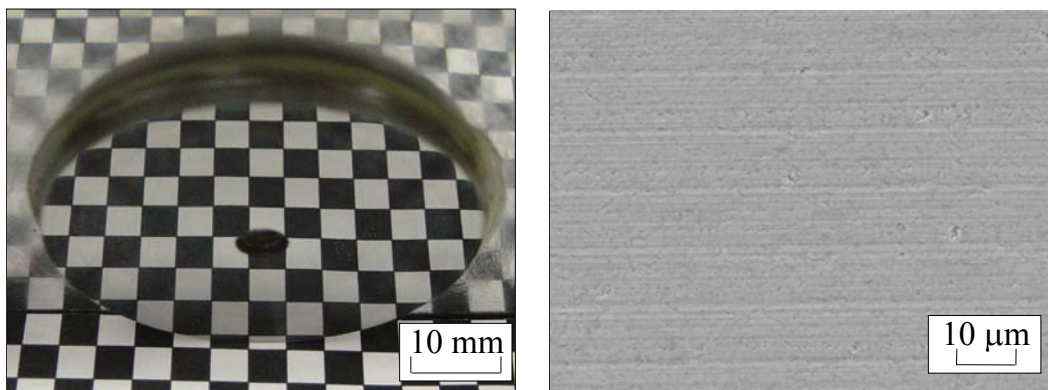


Fig. 3.11 Influence of rake angle on surface roughness

図 3.12 は，すくい角 $\alpha = -30^\circ$ の場合について切削面の表面状態を観察した光学写真と SEM 写真である．切削表面の粗さとして中心線平均粗さ $R_{al} = 38\text{nm}$ が得られており，SEM 写真にはバイトの送り量 $f = 10\mu\text{m/rev}$ に一致するピッチの切削条痕群が明瞭に観察されるので，超硬合金の延性モード切削が実現されていることを確認できる．

以上の結果より，工具摩耗を最小限とし延性モード切削を実現するすくい角として $\alpha = -30^\circ$ を選定した．



(a) Overall view

(b) SEM image ($R_a = 38\text{nm}$)

Fig. 3.12 Photographs of machined surface at $\alpha = -30\text{deg}$.

3.3.2 正面切削における工具摩耗

3.3.2.1 単結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗

図 3.13 に正面切削において切れ刃に作用する切削抵抗の 3 分力をモデル化した図を示す．バイトの実質すくい角が $\alpha = -30^\circ$ であるため，切れ刃すくい面に対して主分力 F_c が 60° の角度で作用し，背分力 F_t が 30° の角度で作用する．また，逃げ面に対しては，逃げ角の存在を無視するならば送り分力 F_f が 45° の角度で作用する．SCD(100)バイトの場合，すくい面の結晶面は(100)，逃げ面の結晶面は(110)となり，SCD(110)バイトの場合，すくい面の結晶面は(110)，逃げ面の結晶面は $(11\sqrt{2})^{*4}$ となる．図 3.14 には実際の切削におけるモデル図を示しており，図 3.13 に示した主分力 F_c ，背分力 F_t ，送り分力 F_f のバイトに作用する方向を示している．

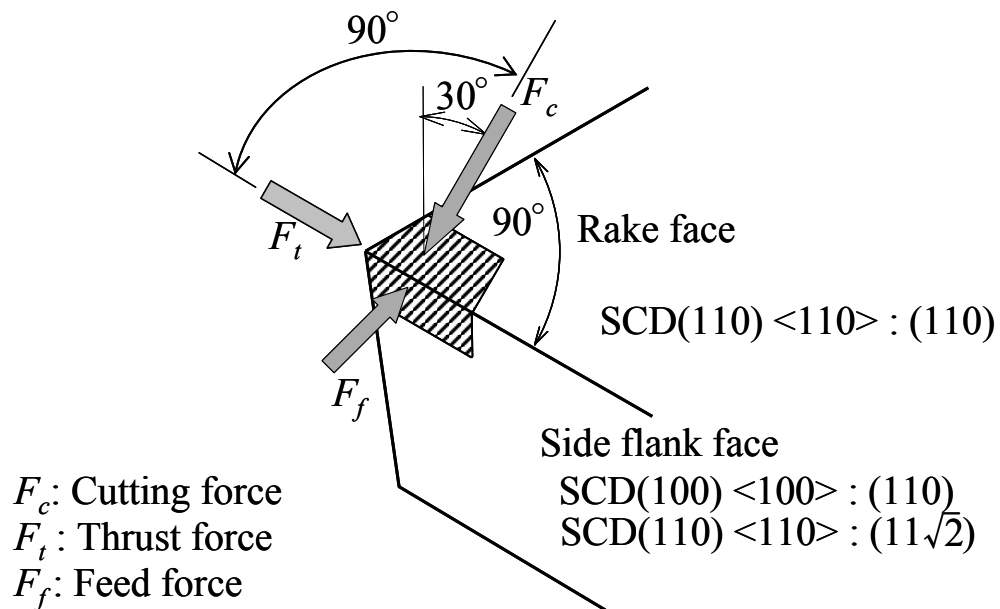


Fig. 3.13 Forces acting on cutting tool in face cutting

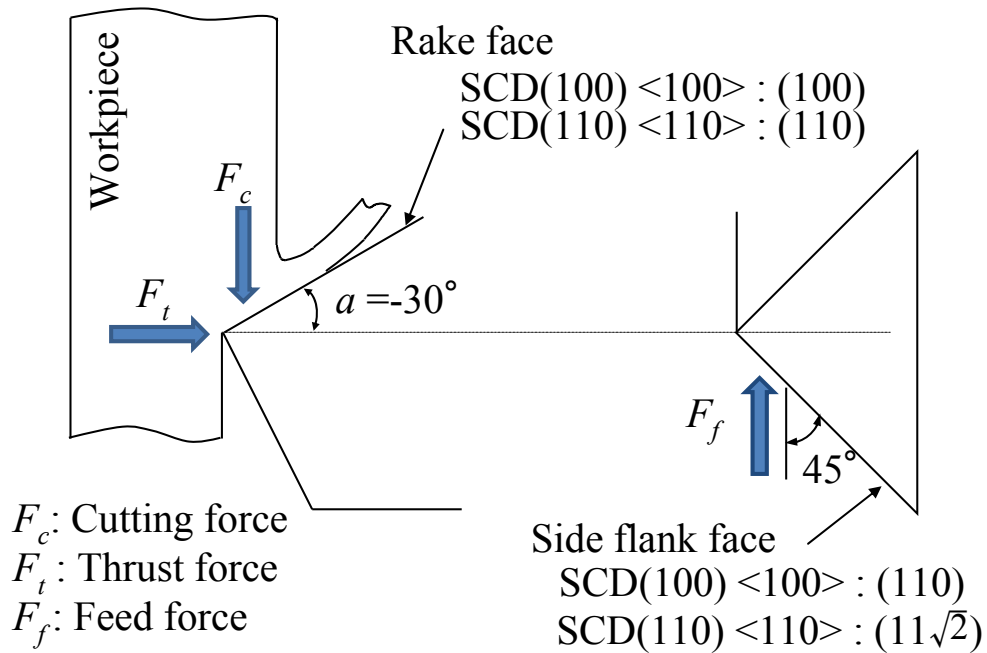


Fig. 3.14 Forces acting on cutting tool in face cutting

図 3.15 は、2 種類の単結晶ダイヤモンドバイトについて切削痕溝深さの測定値から算出した刃先後退量を切れ刃摩耗量 W と定義し、切削距離 L に対してプロットした結果である。

表 3.2 の実験 2 に示すように切込み量 $t=20\mu\text{m}$ で 1 パス切削を行っているため、切れ刃摩耗量は切削距離の増加とともに $20\mu\text{m}$ に収束する。SCD(100) バイトの場合、 $W=0.5\sim 7.5\mu\text{m}$ の高さを有する階段状の刃先後退が断続的に発生しており、切れ刃摩耗の支配的要因が亀裂の発生と進展による破壊であることを示唆している。それに対し、SCD(110) バイトの場合、切削開始直後における $W=5.7\mu\text{m}$ 程度の欠損の後、切削距離に対して一定の勾配で増加する摩滅的摩耗の様相を示している。

図 3.16 は、切削距離 $L=600\text{m}$ における単結晶ダイヤモンドバイトの切れ刃を SEM で観察した写真であり、切れ刃右側面（逃げ面）が超硬合金と接触する。図 3.16(a) に示す SCD(100) バイトの場合、A 部拡大図に示すように、すくい面 (100) には微細な脆性破壊の痕跡が観察される。一方、切削抵抗の送り分力が作用する逃げ面 (110) の後方（切れ刃の左側側面）には貝殻状の表面と階段状の破壊痕跡¹²⁾が観察され、(111)面の劈開が発生したことを示している。

図 3.16(b) に示す SCD(110) バイトの場合、B 部拡大図に示すように、切削後のすくい面 (110) は平滑であり、摩滅的摩耗が支配的であることがわかる。逃げ面 ($11\sqrt{2}$) の後方には劈開の発生が見られるが、SCD(100) バイトに観察されるような (111) 面の大規模な劈開には至っていない。図 3.15 に示した切れ刃摩耗量の結果と図 3.16 に示した SEM 観察結果より、SCD(100) バイトの摩耗は (111) 面の劈開が主体であり、SCD(110) バイト

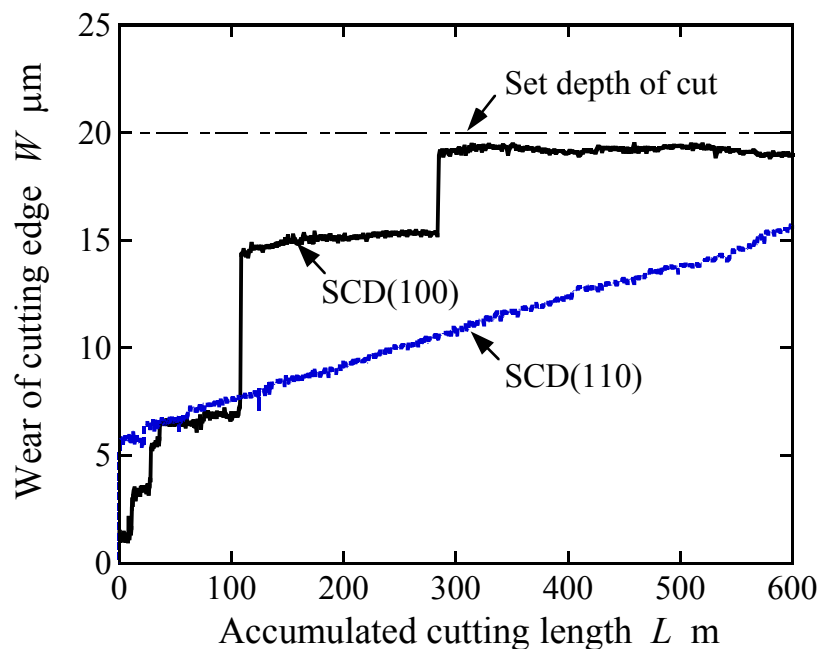
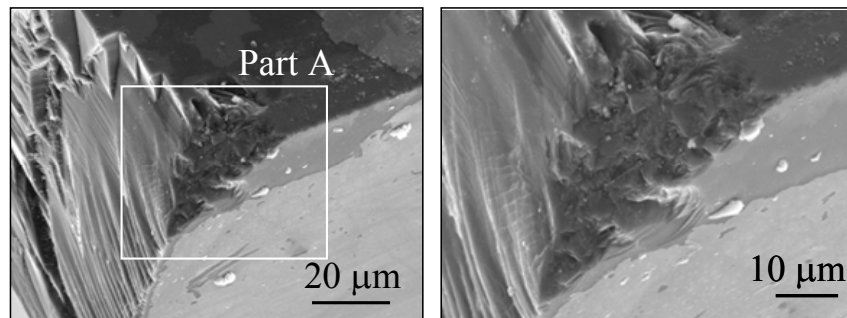


Fig. 3.15 Wear of cutting tools in face cutting
(Monocrystalline diamond cutting tools)

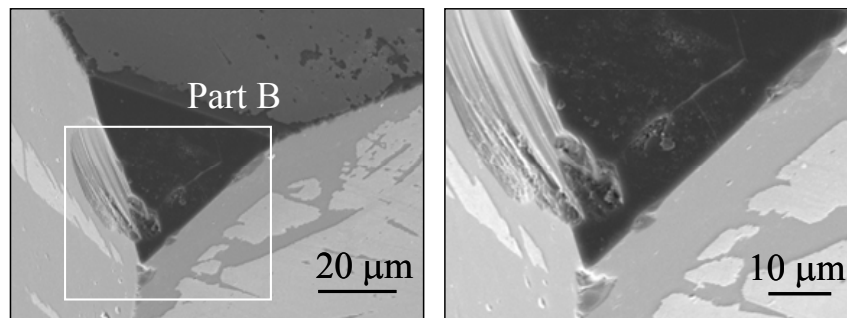
の摩耗は(110)面の摩滅的摩耗が主体であることがわかる．単結晶ダイヤモンドの摩耗特性を調査した張ら¹³⁾は，最も摩耗しやすい結晶面と結晶方位は(110)<100>であることを報告しており，SCD(110)バイトのすくい面(110)が優先的に摩耗することをよく説明している結果と言える．

次に，SCD(100)バイトの場合，図 3.16(a)に示した(111)面の大規模な劈開が発生する理由を考察する．(111)面は耐摩耗性に優れているが劈開エネルギーが最も小さく容易に劈開することが知られており，この劈開は(111)面にせん断力が作用することによって発生する．



Enlargement of part A

(a) SCD(100)



Enlargement of part B

(b) SCD(110)

Fig. 3.16 SEM image of cutting edge after face cutting after $L = 600\text{m}$

(Monocrystalline diamond cutting tools)

ここで、図 3.13 に示すように切削抵抗送り分力 F_f は逃げ面に対して 45° の角度で作用する。SCD(100)バイトの場合、逃げ面を構成する(110)面と(111)面のなす角度の最小値は $\pm 35.3^\circ$ であるから、送り分力は(111)面に対してほぼ平行に近い 9.7° の角度で作用することになる。一方、SCD(110)バイトの場合、逃げ面を構成する(11 $\sqrt{2}$)面と(111)面のなす角度は 9.7° であるから、送り分力は(111)面に対して 35.3° の角度で作用することになる。このように、送り分力が同一であっても(111)面に作用するせん断力成分は SCD(100)バイトのほうがはるかに大きくなるため、(111)面の劈開が促進するものと考えられる。

図 3.15、図 3.16 に示した結果より、SCD バイトの摩耗形態はバイトのすくい面および逃げ面を構成する結晶面に大きく依存し異方性を有すること、(111)面にせん断力が発生するような切削条件の場合、(111)面の劈開が誘発されることがわかる。

3.3.2.2 多結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗

図 3.17 は、表 3.1 に示す 3 種類の多結晶ダイヤモンドバイトについて切れ刃摩耗量 W を切削距離 L に対してプロットした結果である。PCD バイトの場合、切れ刃は切削開始直後 $W=18\mu\text{m}$ まで摩耗し、その後切削距離に対して一定の変化率で推移するが、その領域は狭く、切削距離 $L=50\text{m}$ に達した時点で設定切込み量に達している。CVD バイトの場合、PCD バイトと同様、切れ刃は切削開始直後に $W=14\mu\text{m}$ まで摩耗した後、切削距離に対して一定の勾配で摩耗する領域に移行するが、切削距離 $L=370\text{m}$ の時点で不連続的に摩耗する事象が発生し、切削距離 $L=480\text{m}$ の時点で設定切込み量に達している。一方、NPD バイトの場合、刃先は切削距離 $L=30\text{m}$ の時点で $W=2.5\mu\text{m}$ ほど不連続的に摩耗するもののその後はその状態を維持し切削距離 $L=600\text{m}$ に至っても切れ刃摩耗は認められない。

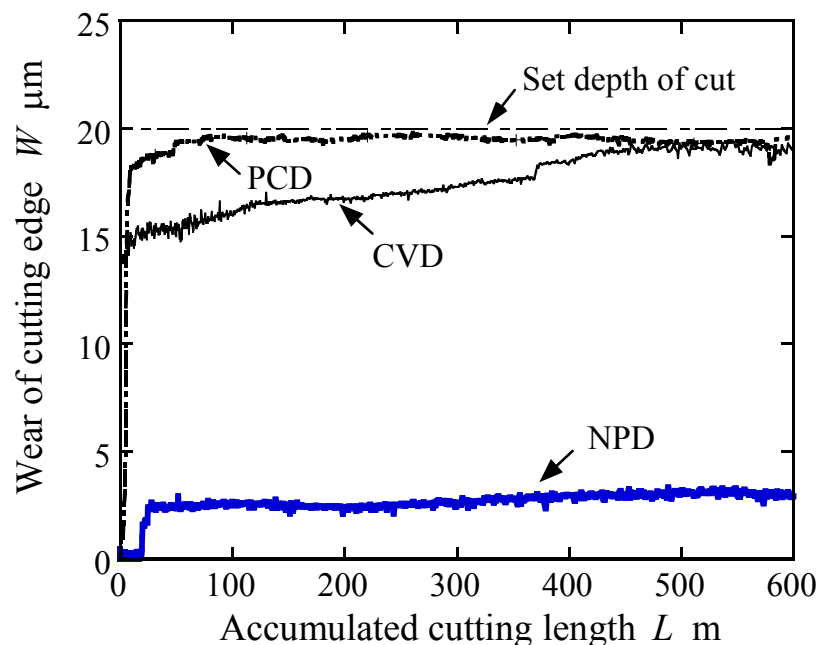


Fig. 3.17 Wear of cutting tools in face cutting

(Polycrystalline diamond cutting tools)

図 3.18 に切削距離 $L=600\text{m}$ におけるここで用いた 3 種類の多結晶ダイヤモンドバイトの切れ刃を SEM 観察した写真を示す。図 3.18(a) に示す PCD バイトの場合、PCD の一部が剥離した半月状の痕跡が逃げ面の後方（切れ刃の左側面）に観察される。これは、Co 結合相内に発生した亀裂が進展することによって PCD の一部が剥離したと考えられる。さらに、剥離後の表面には粒径 $4\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド粒子が露出している。一方、すくい面に観察される摩耗面は平滑である。これらの結果より、ダイヤモンド粒と Co 結合相が摩滅的摩耗を受けていると考えられる。これらの観察結果を切削抵抗の波形と参照すると、PCD の剥離、すなわち切れ刃の欠損は切削開始直後に発生し、その後摩滅的摩耗に移行したものと推測される。

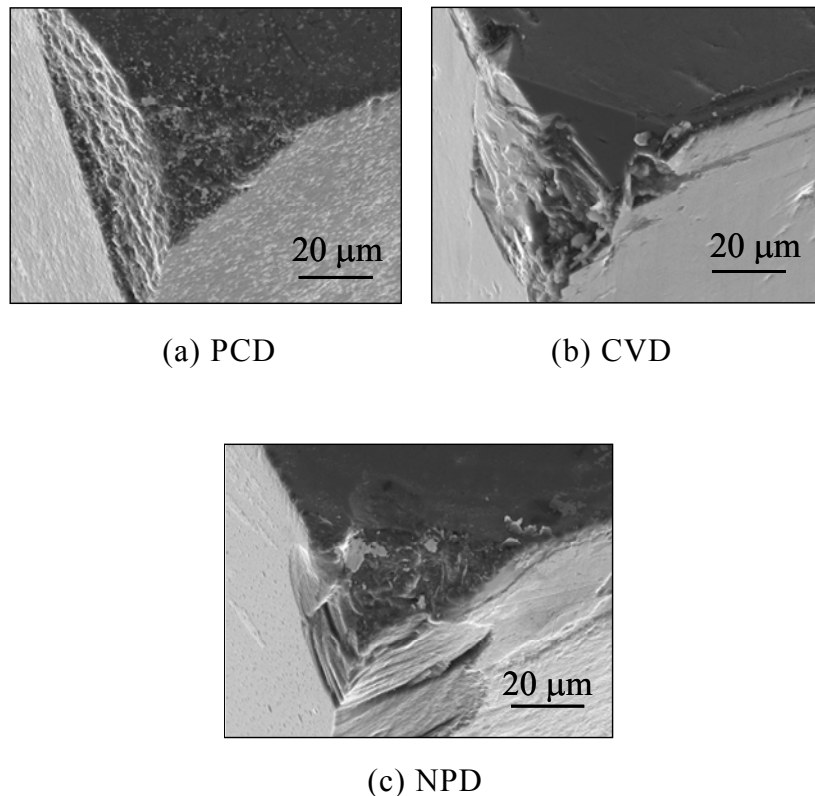


Fig. 3.18 SEM image of cutting edge after face cutting after $L = 600\text{m}$
(Polycrystalline diamond cutting tools)

図 3.18(b)に示す CVD バイトの場合、切れ刃摩耗領域の大きさは PCD バイトの場合と同一であるが、表面トポグラフィは異なっていることがわかる。すなわち、Co 等の結合相を含まないバインダレスである CVD ダイヤモンドの場合、バインダによる結合力が無いため、破壊はダイヤモンド粒界で発生する。したがって、逃げ面はそのダイヤモンド粒界に沿って発生した微小亀裂が連結した微細破壊面で構成されており、すくい面は非常に平滑な摩滅的摩耗面で構成されている。図 3.18(c)に示す NPD バイトの場合、逃げ面には脆性破壊によって表層部が数 μm の深さだけ剥離した痕跡が観察されるが、すくい面は切れ刃としての機能を維持するための形状を維持している。同じバインダレス多結晶体でありながら NPD バイトが CVD バイトよりも卓越した耐摩耗性を発揮するのは、CVD ダイヤモンドの場合、核結晶が相互に成長して柱状構造の比較的粗大なダイヤモンド粒よりなる多結晶体を構成しているのに対して、NPD の場合には、数十 nm サイズのダイヤモンド結晶粒がそれぞれ強固に直接結合した緻密な組織を構成しており^{14)~15)}、材料単体の強度が高く、粒子の脱落が抑制されるためと考えられる。

図 3.17, 図 3.18 に示した結果より、多結晶ダイヤモンドバイトの中では、NPD バイトが PCD バイトおよび CVD バイトを凌駕する耐摩耗性を有することがわかる。また、図 3.15 に示した SCD バイトと比較しても切削距離 $L=600\text{m}$ における切れ刃摩耗量は SCD バイトのほぼ 17%である。したがって、ナノ多結晶ダイヤモンドは単結晶ダイヤモンドバイトよりも優れた耐摩耗性を示していることがわかる。

3.3.3 単刃フライカットにおける工具摩耗

3.3.3.1 単結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗

図 3.19 は，単刃フライカット（SPFC）において切れ刃に作用する切削抵抗の 2 分力と摩擦力をモデル化した図である．すくい面に対して主分力 F_c が 60° の角度で作用し背分力 F_t が 30° の角度で作用することは正面切削の場合と同様であるが，単刃フライカットの場合，V 型切れ刃の 2 つの逃げ面（切れ刃の両側面）が工作物と接触するため，摩擦力 F が逃げ面に作用する．

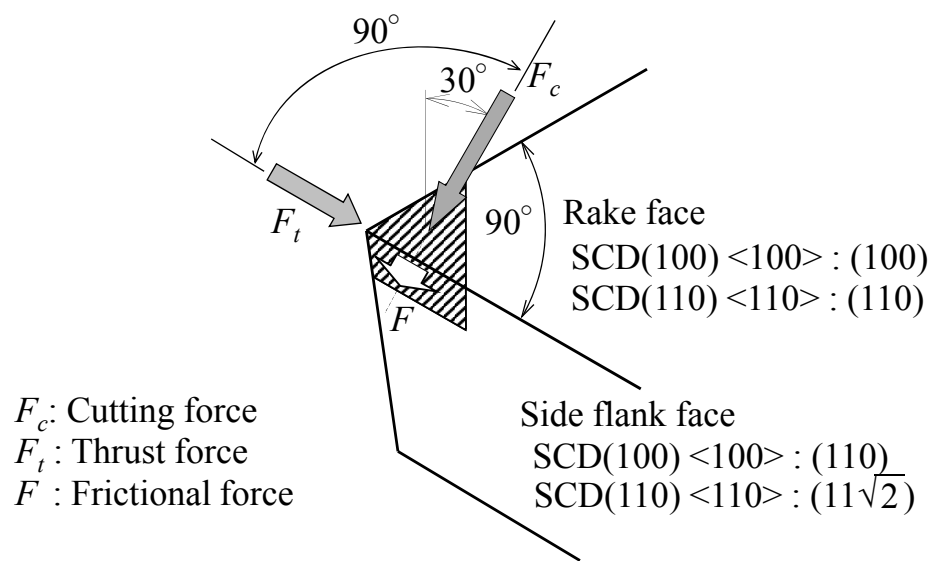


Fig. 3.19 Forces acting on cutting tool in SPFC

図 3.20 に単刃フライカット（SPFC）で実際に加工した切削溝断面の一例を示す．ここで設定切込み量 t に対し，切削加工によるバイト摩耗により刃先が後退するために実質切込み量 t_a が実測できる．これらの値からバイトの切れ刃摩耗量 W を算出した．

図 3.21 は，表 3.1 に示す 2 種類の単結晶ダイヤモンドバイトについて切れ刃摩耗量 W を切削距離 L に対してプロットした結果である．単刃フライカットの場合，20ms の間隔で断続的な切削が行われるため，切れ刃には衝撃力が作用する．したがって，切削距離 $L=600\text{m}$ における切れ刃摩耗量（ $W=65\sim 82\mu\text{m}$ ）を図 3.15 に示した正面切削（連続切削）の場合と比較すると約 5 倍であり，単刃フライカット（断続切削）の場合，ダイヤモンドに作用する衝撃力による脆性破壊が切れ刃摩耗を支配していることが推察される．さて，図 3.21 に示すように，切削距離に対する切れ刃摩耗量の挙動は両者のバイトとも同一であり，切れ刃摩耗量は非線形的に増加する過渡状態の後，一定勾配で増加する定常状態に移行している．定常状態に移行する切削距離は SCD(100)バイトの場合 $L=200\text{m}$ ，SCD(110)バイトの

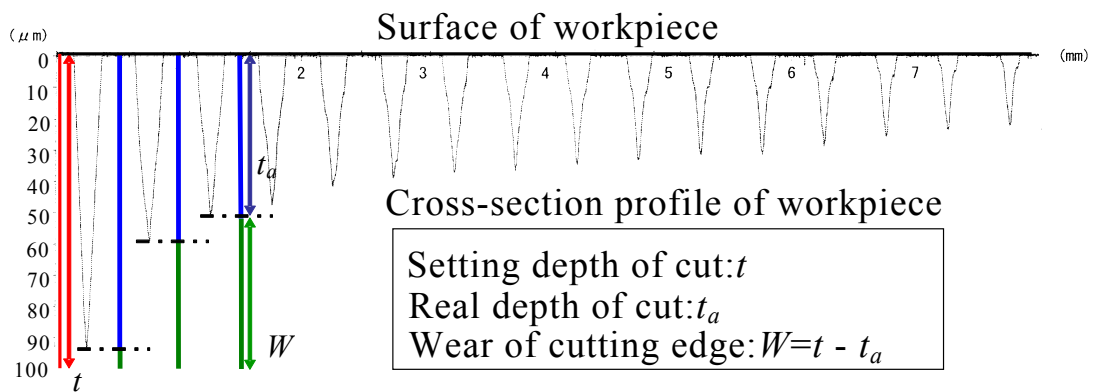


Fig. 3.20 Measurement of wear of cutting edge

場合 $L=350\text{m}$ であるが、切れ刃摩耗量は SCD(110)バイトのほうが大きい。

図 3.22 に切削距離 $L=600\text{m}$ におけるここで用いた 2 種類の単結晶ダイヤモンドバイトの切れ刃を SEM 観察した写真を示す。図中に観察される白い部分は切れ刃に付着した WC 切りくずである。図 3.22(a) に示す SCD(100)バイトの場合、すくい面には単結晶ダイヤモンドの表層部にクラックが発生することによって微小破壊が頻繁に発生した痕跡とともに WC 切りくず流出方向に平行な摩耗条痕が観察される。さらに、超硬合金粒子（おもに WC）によるアブレシブ摩耗^{*5}の存在も認められる。逃げ面には顕著な摩耗痕跡が認められない。これらの観察結果より SCD(100)バイトの場合、すくい面摩耗が切れ刃摩耗の支配的要因であることがわかる。

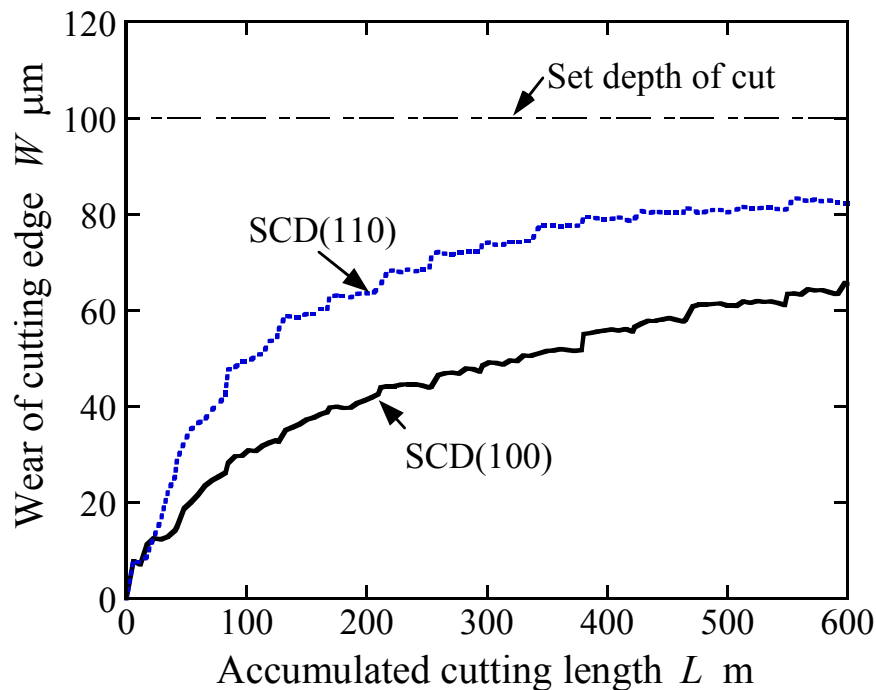
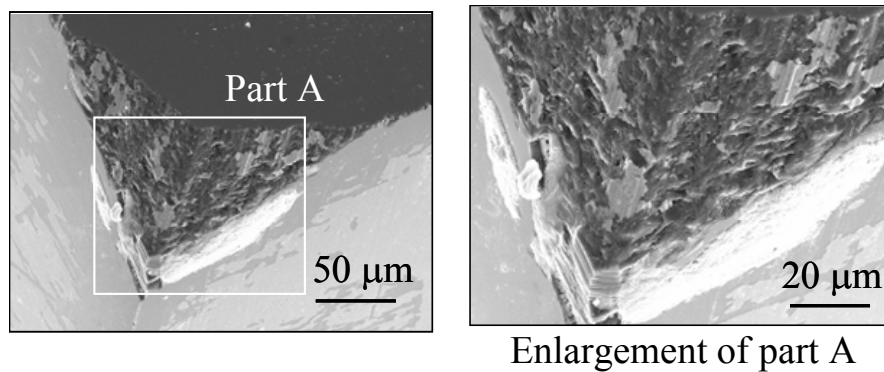


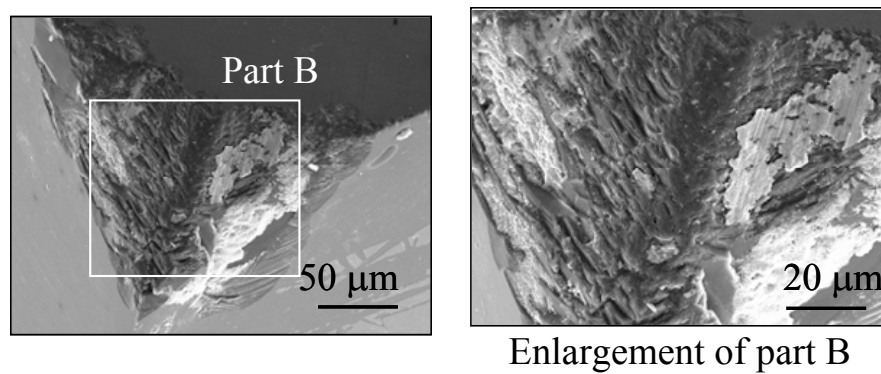
Fig. 3.21 Wear of cutting tools in SPFC

(Monocrystalline diamond cutting tools)

一方，図 3.22(b)に示す SCD(110)バイトの場合，切れ刃の両側面（逃げ面）が大きく崩壊し，すくい面は中央部にほぼ $14\mu\text{m}$ の幅で残存しているだけである．残存したすくい面を観察すると，全体的には摩滅的に摩耗しており，一部に微細破碎の痕跡が認められる．また，崩壊した逃げ面に注目すると，摩擦力が作用する方向に直交する層状の劈開が断続的に発生したような破壊痕跡が認められる．



(a) SCD(100)



(b) SCD(110)

Fig. 3.22 SEM images of cutting edge after SPFC after $L = 600\text{m}$
(Monocrystalline diamond cutting tools)

このように，正面切削において SCD(100)バイトの逃げ面に発生した劈開が，単刃フライカットにおいては SCD(110)バイトの逃げ面に発生する理由を正面切削の場合と同様に，結晶学的に考察する．図 3.19 に示したように，SCD(100)バイトの場合，摩擦力 F は逃げ面である(110)面に対して平行に作用するため，摩擦力 F は(111)面に対しては $\pm 35.3^\circ$ の角度で作用する．一方，SCD(110)バイトの場合，逃げ面は $(11\sqrt{2})$ であるから摩擦力は(111)面に対して 9.7° の角度で作用する．このように，摩擦力が同一であっても(111)面に作用するせん断力成分としては SCD(110)バイトのほうがはるかに大きくなるため，正面切削の場合とは逆に SCD(110)バイトにおいて逃げ面の劈開が促進したものと考えられる．

3.3.3.2 多結晶ダイヤモンドバイトを用いた場合の工具摩耗

図 3.23 は、表 3.1 に示す 3 種類の多結晶ダイヤモンドバイトについて切れ刃摩耗量 W を切削距離 L に対してプロットした結果である。切れ刃摩耗の測定は図 3.20 に示した方法で算出している。いずれのバイトの場合にも切れ刃摩耗には単結晶ダイヤモンドの場合と同様、過渡領域と定常領域が存在しており、定常領域に移行する切削距離はいずれのバイトともほぼ $L=130\text{m}$ である。また、定常状態における摩耗勾配もほぼ同一である。ダイヤモンドバイトの摩耗量を比較すると、NPD バイトの切れ刃摩耗量は最も小さく、PCD バイトおよび CVD バイトよりも耐摩耗性に優れていることを示している。

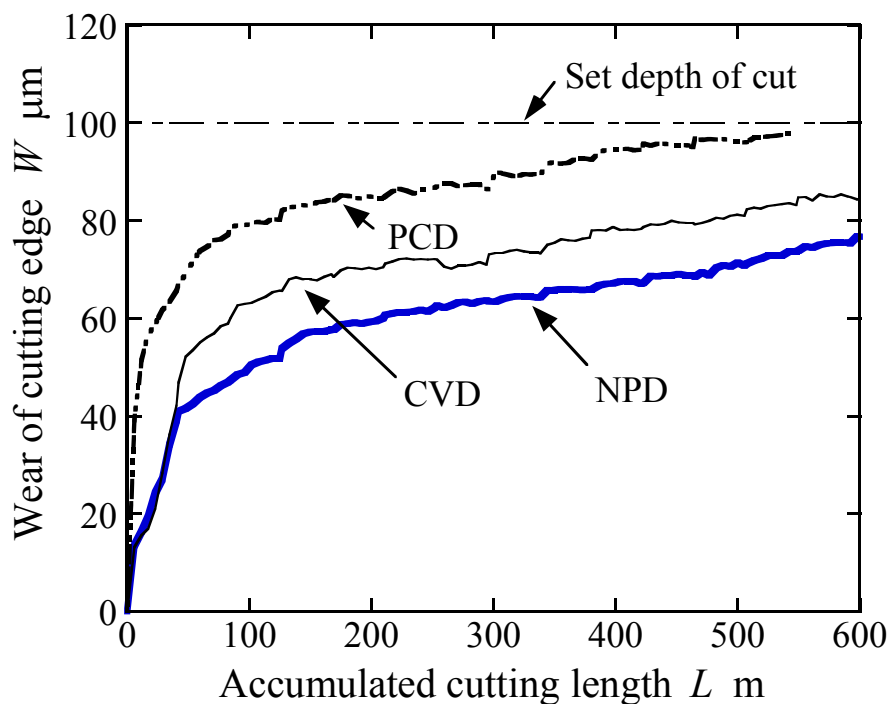


Fig. 3.23 Wear of cutting tools in SPFC
(Polycrystalline diamond cutting tools)

図 3.24 に切削距離 $L=600\text{m}$ における多結晶ダイヤモンドバイトの切れ刃を SEM 観察した写真を示す．図 3.24 (a) に示す PCD バイトと図 3.24 (b) に示す CVD バイトを比較すると，摩耗形態は外観的には同一であるが，摩耗面を詳細に観察すると PCD バイトの場合には Co 結合相に沿って破壊した表面にダイヤモンド粒子が露出している．それに対し CVD バイトの場合には CVD ダイヤモンドの成長面（すくい面に平行な面）に沿って亀

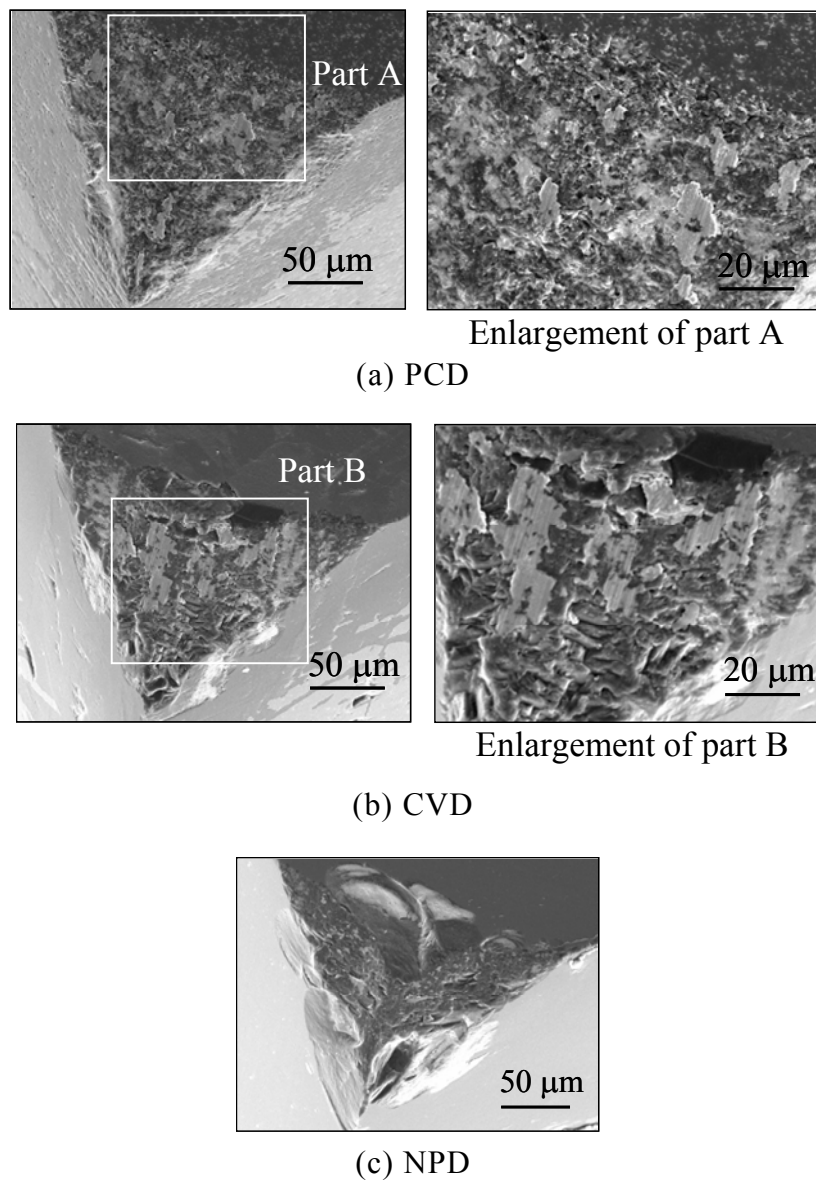


Fig. 3.24 SEM images of cutting edge after SPFC after $L = 600\text{m}$
 (Polycrystalline diamond cutting tools)

裂が発生し微細破壊することによって生じたと考えられるクレバス状の表面が観察される。いずれのバイトの場合にも摩耗面には超硬合金の切りくずが付着している。一方、図 3.24(c)に示す NPD バイトの摩耗形態は PCD バイトあるいは CVD バイトに観察されるものと異なっており、摩耗面には劈開によって欠損した部分と摩滅的に摩耗した部分の 2 つが観察される。劈開破壊による欠損は図 3.23 に示した NPD バイトの切れ刃摩耗が急激に進行する切削距離 $L=130\text{m}$ までの過渡領域において発生したものと思われる。

図 3.23, 図 3.24 に示した結果より、NPD バイトの摩耗形態は PCD バイトあるいは CVD バイトと異なり、単刃フライカット開始直後の刃先欠損とその後の摩滅的摩耗を特徴としており、両者よりも耐摩耗性に優れていることがわかる。また、図 3.21 に示した単結晶ダイヤモンドバイトにおいて最も優れた耐摩耗性を示した SCD(100)バイトと比較すると、定常摩耗領域における摩耗勾配は SCD(100)バイトの場合 $55\mu\text{m}/\text{km}$ 、NPD バイトの場合 $42\mu\text{m}/\text{km}$ であり、定常摩耗領域における耐摩耗性は NPD バイトのほうが 1.3 倍ほど優れている。したがって、NPD バイトは、その刃先を切削開始直後の刃先欠損が発生しにくい形状に成形することにより、正面切削の場合と同様に SCD バイトよりも優れた耐摩耗性を示す可能性を有すると考えられる。

3.4 結言

ダイヤモンドバイトを用いて超合金の切削加工を行う場合について、切れ刃の摩耗形態に及ぼすすくい角およびダイヤモンド組成の影響を実験的に検討した。なお、切削方法として切れ刃と工作物の接触状態に注目し、切れ刃と工作物の接触が連続的に行われる加工法として正面切削、切れ刃と工作物が断続的に接触するエンドミル加工に相等する加工法として単刃フライカットの2つを採用した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 切れ刃すくい角を -30° にすることによって超合金の延性モード切削を実現するとともに切れ刃すくい面の摩耗面積を最小にすることができる。
- (2) 単結晶ダイヤモンドバイトの場合、切れ刃の摩耗形態はすくい面および逃げ面を構成する結晶面に大きく依存し異方性を有する。たとえば(111)面にせん断力が発生するような切れ刃形状あるいは切削条件の場合、(111)面に劈開が誘発される。
- (3) PCD ダイヤモンド(PCD)、CVD ダイヤモンド(CVD)、グラファイトの直接変換焼結により生成したナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)の3種類の多結晶ダイヤモンドバイトを比較した場合、NPD バイトが連続切削、断続切削いずれの加工法においても最も優れた耐摩耗性を示す。
- (4) 連続切削の場合、NPD バイトはすくい面に(100)面あるいは(110)面を配置した単結晶ダイヤモンドバイトよりも優れた耐摩耗性を有する。

以上の結果から、耐摩耗性に優れ先端が鋭利な状態を最も維持できると考えられるダイヤモンドの材質として、本実験結果からはナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)が最も適していると考えられる。

参考文献

- 1) S. J. Heo, T. Miyamoto, S. Hanasaki and J. Fujiwara: Study on Cutting of Cemented Carbides, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 69, 12 (2003) 1724.
- 2) T. Kimura, H. Suzuki, Y. Yamamoto, T. Okino, Y. Hizikata, T. Moriwaki et al.: Micro Milling of Hard Material with Micro Milling Tool (2nd Report), Proc. Autumn Meeting of J. Jpn. Soc. Precis. Eng., (2005) 437.
- 3) E. Uhlmann, J. Friemel and M. Brucher: Adhesive wear on CVD diamond, Industrial Diamond Review, 4 (2002) 236.
- 4) M. Belmonte, P. Ferro, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, J. Sacramento and R. F. Silva: Wear resistant CVD diamond tools for turning of sintered hardmetals, Diamond and Related Materials, 12 (2003) 738.
- 5) H. Sumiya and K. Harano: Diamond & Related Materials, 24(2012) 44.
- 6) H. Sumiya and T. Irifune: SEI Technical Review, 165 (2004) 68.
- 7) E. Shamoto, K. Ienaga and T. Moriwaki: Ductile mode machining of sintered carbide by applying ultrasonic elliptical vibration cutting, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 47, 2 (2003) 83.
- 8) A. Yui, H. Matsuoka, S. Okuyama, T. Kitajima and G. Okahata: Cutting of cobalt-free tungsten carbide using a monocrystalline diamond tool, 3rd Rept., J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 54, 11, (2010) 654.
- 9) A. Kubo, J. Tamaki, J. Yan, K. Narita and Y. Shirafuji: Precision Cutting of Cemented Carbide using a Thick-Film CVD Diamond Tool, Proc. Annual Meeting of Jpn. Soc. Abras. Technol., (2004) 419.
- 10) J. Tamaki, G. Sato, K. Maekawa, J. Yan and A. Kubo: Effect of cutting edge shape of diamond abrasive grain on ductile mode grinding, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 49, 6, (2005) 335.

- 11) J. Yan, K. Syoji and T. Kuriyagawa: Ductile-Brittle Transition at Large Negative Tool Rake Angles, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 66, 7 (2000) 1130.
- 12) 吉川昌範編：ダイヤモンドツール，日経技術図書株式会社, (1987) 136.
- 13) B. Zhang, H. Tokura and M. Yoshikawa: Study on Adhesion and Wear of Single-point Diamond in Scratching Ceramics, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 53, 12 (1987) 1931.
- 14) H. Sumiya, T. Irifune, A. Kurio S. Sakamoto and T. Inoue: Microstructure features of polycrystalline diamond synthesized directly from graphite under static high pressure, J. Mater. Sci., 39 (2004) 445.
- 15) H. Sumiya and T. Irifune: Indentation hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion, Diamond Relat. Mater., 13 (2004) 1771.
- 16) A. Kubo, Y. Mochida, J. Tamaki, K. Harano, H. Sumiya and A.M.M. Sharif Ullah: Wear characteristics of various diamond tools in cutting of tungsten carbide, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 55, 10(2011)593.

用語説明

*1 劈開

劈開（へきかい, cleavage）とは結晶や岩石の特定方向への割れやすさを表す鉱物学，結晶学，岩石学用語である．結晶構造においては，原子間の結合力の弱い面がある方向で存在するときにおこる．劈開によってできた結晶面を劈開面という．劈開はモース硬度とは関係がない．例えばダイヤモンドは最高の硬度をもっているが，劈開は「完全」であり正八面体の面に対して平行に簡単に割れる．ハンマーなどで衝撃を加えると，ある一定の方向で割れたり，板のように薄くはがれたりする場合がある．

*2 異方性

ある対象の性質や分布が方向に依存しないときそれは等方的（isotropic）であるという．また，方向に依存するとき異方的（anisotropic）であるという．

*3 結晶面

結晶面（crystal face, crystal plane）とは結晶の表面を形成する面のことである．結晶は結晶格子を構成単位としているので結晶面も結晶格子の幾何学的規則性を反映しているが，結晶格子の面と一対一で対応するものではなく，結晶格子内の原子（分子）を含む任意の平面になっている．

*4 結晶方位

結晶方位とは原子が規則的に並ぶ方向を示しており， $[100]$ のように3つの整数で示される．結晶面(*3)に対しては垂直となる．単結晶ダイヤモンドは結晶面によって材料特性が異なる．本研究では，単結晶ダイヤモンドの結晶面の違いに対しての特性評価をしている．本研究で適用した(100)面と(110)面とでは， 45° の角度を有している．本来，上述したように結晶方位に関しては整数値で示すべきところであるが，位置関係の認識を容易とするため $\sqrt{2}$ という数値を採用した．

*5 アブレシブ摩耗

アブレシブ摩耗（Abrasive wear）とは摩耗形態の一つで，摩擦面間に介在する異物によりその表面が削り取られる摩耗現象のことであり，輝面摩耗，引っかき摩耗，ざらつき摩耗，凹凸摩耗，研削材摩耗ともいう．摩擦する二面の硬さの差が大きく，硬い方の表面に粗い突起が存在する場合や摩擦面間

第 4 章

ドレッシング抵抗の測定方法の開発

4.1 緒言

研削砥石のドレッシングはダイヤモンド工具（ドレッサ）による砥粒と結合剤で構成される複合硬脆材料の切削加工とみなすことができるので，切削性能の評価に切削抵抗が用いられるように，ドレッシング抵抗を測定することによってドレッシングプロセスをモニタリングすることができる．そこで，本章ではドレッシング抵抗の測定方法の開発に関して述べる．

守友ら¹⁾は，単石ダイヤモンドドレッサの法線方向ドレッシング抵抗を測定し，cBN ホイールのドレッシング抵抗が WA 砥石の 3 倍以上であることを報告している．また，ドレッシングプロセスには過渡状態とその後に続く定常状態が存在し，研削性能を最適化するためには過渡状態の終了時点でドレッシングを終了すべきであることを述べている．中島ら²⁾はドレッシング抵抗の 3 分力を測定し，法線方向ドレッシング抵抗が単石ダイヤモンドドレッサの摩耗にともない増加すること，および単石ダイヤモンドドレッサを使用する場合にはドレッサ形状に対する配慮が必要であることを報告している．一方，松井ら³⁾は単石ダイヤモンドドレッサについて，法線方向ドレッシング抵抗と研削後の工作物仕上げ面粗さを測定し，ドレッシング抵抗と研削仕上げ面粗さの間には強い相関関係が存在すること，したがって，ドレッシング抵抗をモニタ

リングすることによって研削砥石作業面トポグラフィのインプロセス評価が可能であることを述べている。

ダイヤモンドロータリドレッサについてもドレッシング抵抗を測定した多くの報告がある。たとえば、中島ら⁴⁾は WA 砥石のドレッシングにダイヤモンドロータリバーを用いた場合について法線方向ドレッシング抵抗を測定し、水谷ら⁵⁾はメタルボンドダイヤモンドホイールのツルーイング抵抗を測定している。また、山内ら⁶⁾は cBN 小径ビトリファイドクイルに角柱ダイヤモンドロータリドレッサを用いた場合のドレッシング抵抗を測定している。

一方、内径が数 mm 程度の内面研削に使用される小径研削クイルは依然としてドレッシングにおける問題点を抱えている。一つの問題点として、小径研削クイルの回転数が汎用研削盤の回転数の十数倍であることが挙げられる。すなわち、砥石 1 回転あたりのドレッサ送り量を「同一点ドレッシング回数」の概念に基づいて推奨値とされている値に設定するためには汎用研削盤の十数倍のドレッサ送り速度を必要とするが、内面研削盤の作業空間は狭域であるため実現可能なドレッサ送り速度には限界がある。もう一つの問題点は小径研削クイルの低剛性に起因するものであり、大きなドレッシング抵抗はツルーイング精度劣化の原因となる⁷⁻⁸⁾。

本章では、小径内面研削クイルのドレッシングに適したドレッサおよびドレッシング条件の最適化を目的とし、その第 1 段階として、各種ドレッサを内面研削用小径 WA クイルに適用した場合について、ドレッシング抵抗と研削性能の関係を検討し、ダイヤモンドドレッサの評価を行った結果について述べる。

4.2 実験方法

4.2.1 ドレッシング抵抗測定装置

図 4.1 に法線方向ドレッシング抵抗（単にドレッシング抵抗と記述する）を測定するために作成した動力計の構造を示す．本動力計は研削盤のテーブルに固定する基礎台 (A) とクロスローラーウェイ方式の可動部 (B)，基礎台と可動部の間に挿入されたリング状ロードワッシャ（Kistler 社製 9021A）で構成されており，ロードワッシャへのプリロードは可動部と基礎台をボルトで締め付けることによって与えられる．本動力計では，可動部に単石ダイヤモンドドレッサあるいは多石ダイヤモンドロータリドレッサを搭載することにより，同一の動力計を用いてドレッシング抵抗を測定することができる．

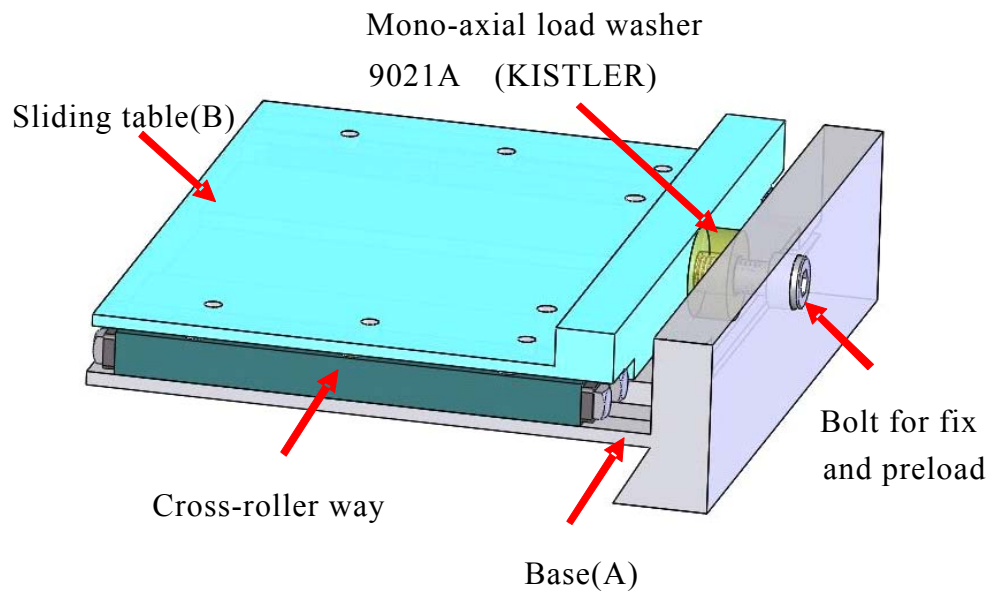


Fig. 4.1 Schematic drawing of dynamometer

図 4.2 に実験で使用した単石ダイヤモンドドレスサおよび多石ダイヤモンドロータリドレスサの搭載例を示す．図に示すように，ドレスサの近傍に加速度センサを取り付け，ドレスサが研削クイルと接触する際に発生する振動をモニタリングすることによって，ドレッシング開始点，終了点を明確に検出することができる．図 4.3 に動力計の周波数特性を評価した結

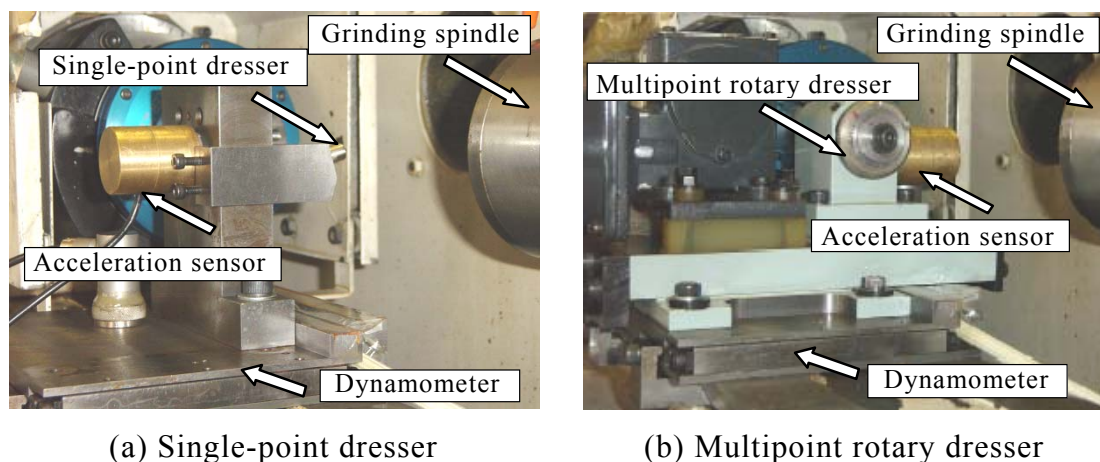


Fig. 4.2 Dressing equipment

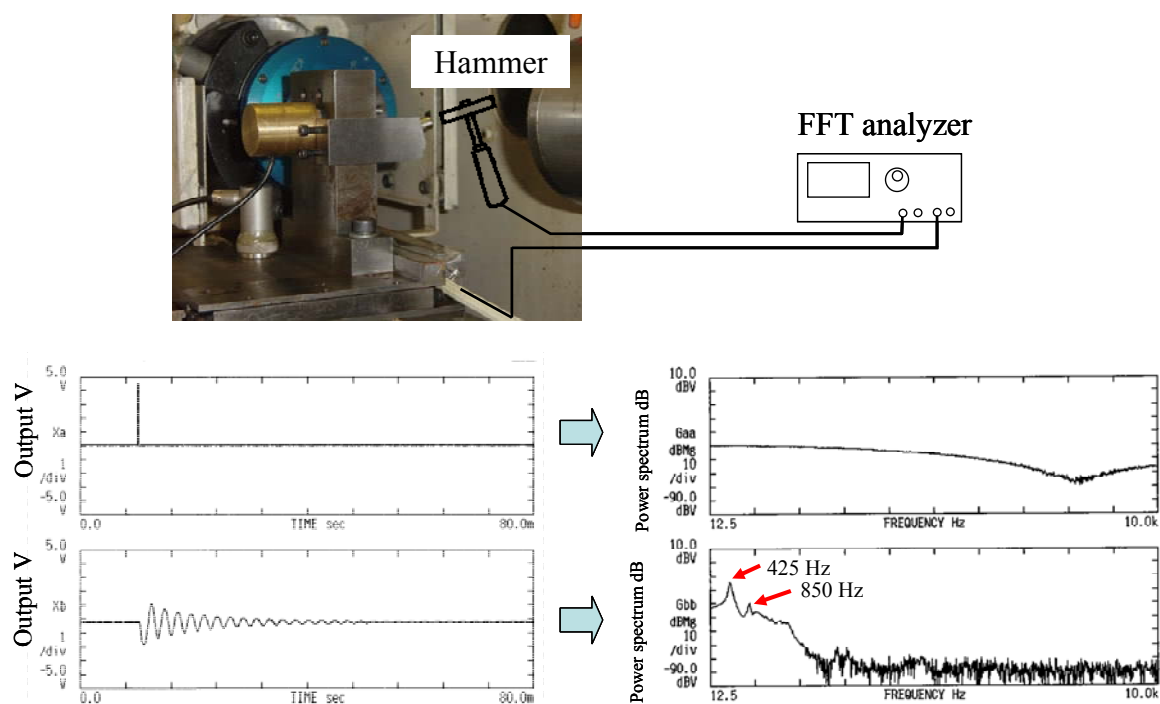


Fig. 4.3 Frequency response of dynamometer

果を示す。インパルスハンマで打撃し、動力計の応答波形を測定することで評価した結果、測定動力計の固有振動数測定値は425Hzであったため、ドレッシング抵抗の出力信号を300HzのLPF (Low Pass Filter) で処理した後に0.1msecのサンプリング間隔でA/D変換した。図4.4にドレッシング抵抗の測定系を示す。ここでは、振動センサおよび振動センサアンプにはKEYENCE社製GH-313A, GA245を、動力計アンプにはKISTLER社製5011を用いた。

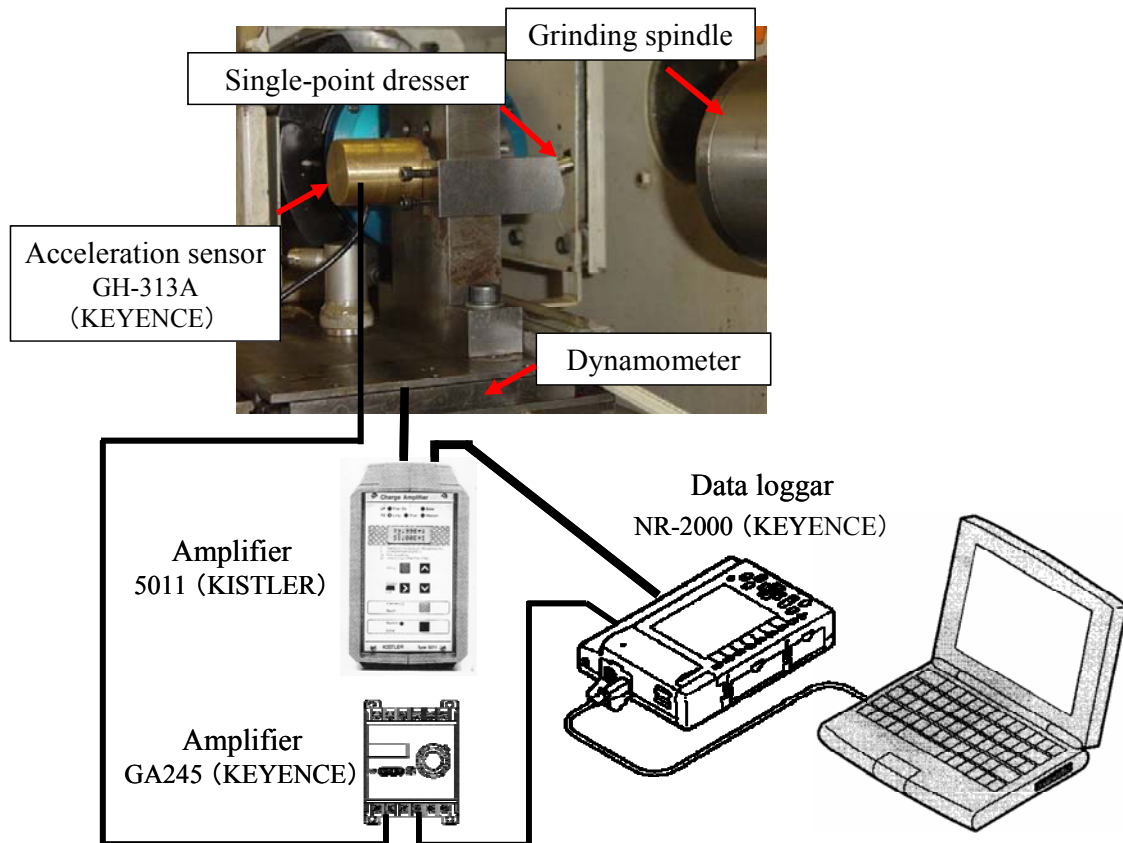


Fig. 4.4 Data processing system

4.2.2 実験方法

表 4.1 に実験方法とドレッシング・研削条件を示す．実験装置としては図 4.5 に示したオイルミスト潤滑方式の超高速スピンドル（最高回転数：150,000rpm）を搭載したセイコー精機社製 CNC 内面研削盤 SG-25 を用いた．研削砥石には内面研削クイルとして多用されているビトリファイド WA 砥石を使用し，図 4.6 に外観を示すように外径 5.7mm，砥石長 6mm，WA120M8V の組成^{*1}を有する．ドレッサには 2 種類のダイヤモンドドレッサ，すなわち，単石ダイヤモンドドレッサ（0.5 カラット）と多石ダイヤモンドロータリドレッサを用いた．とくに，単石ダイヤモンドドレッサでは先端形状が異なる 2 種類のダイヤモンドドレッサを用いた．

Table 4.1 Dressing and grinding conditions

Grinding machine	Internal grinding machine with oil-mist lubrication spindle (SG-25)
Grinding wheel	WA120M8V, Diameter $D_s = 5.7\text{mm}$, Width $B = 6\text{mm}$ Rotational speed of grinding wheel $N_s = 150,000\text{rpm}$
Dresser	Single-point diamond dresser, Diamond grit size 0.5cts. Sharp-edged dresser, Worn-edged dresser Multipoint diamond rotary dresser Number of diamond grits $N = 60$ Diameter of rotary disc $D_d = 40\text{mm}$ Rotational speed of rotary dresser $n_d = 120\text{rpm}$
Dressing	Dressing depth of cut $\Delta_d = 2.5 \sim 20\mu\text{m}$ Dresser feed speed $f_d = 0.4 \sim 6\text{m/min}$ (Dressing lead $L_d = 2.7 \sim 40\mu\text{m}$)
Grinding	Internal plunge grinding(Down cut) Workpiece SUJ2 ($H_{rc} = 58 \sim 63$), Diameter $D_w = 20\text{mm}$ Rotational speed of workpiece $N_w = 1500\text{rpm}$ Plunge rate $f_w = 0.2\mu\text{m/rev.}$ Total depth of cut at one grinding cycle $\Delta_w = 50\mu\text{m}$ Number of grinding cycles, 10 times
Coolant	Soluble type, Dilution ratio 80%

図 4.7 に単石ダイヤモンドドレッサ先端部の外観写真と研削クイル作業面にドレッサ形状を転写して測定したドレッサ先端部の断面形状を示す．たとえばドレッサ切込み量が $\Delta_d = 5\mu\text{m}$ の場合，図 4.7(a)に示す鋭利な先端を有する単石ダイヤモンドドレッサ(以後，鋭利単石ダイヤモンドドレッサと記述する)の研削砥石との接触幅は $b = 90\mu\text{m}$ となり，図 4.7(b)に示す先端が摩耗した単石ダイヤモンドドレッサ(以後，摩耗単石ダイヤモンドドレッサと記述する)の研削砥石との接触幅は $b = 190\mu\text{m}$ となる．

図 4.8 に多石ダイヤモンドロータリドレッサの外観写真とドレッサ先端部の断面形状を示す．ダイヤモンド粒は直径 $D_d = 40\mu\text{m}$ のロータリドレッサの外周に $P = 2.1\text{mm}$ の間隔で配置されており，それぞれのダイヤモンド粒先端摩耗部の円周方向長さは $P_r = 1.5\text{mm}$ となっている．ダイヤモンド粒先端の断面形状は，図 4.7(b)に示した摩耗単石ダイヤモンドドレッサの形状とほぼ同一である．すなわち，ドレッサ切込み量 $\Delta_d = 5\mu\text{m}$ における多石ダイヤモンドロータリドレッサと研削砥石の接触幅は $b = 200\mu\text{m}$ であり，摩耗単石ダイヤモンドドレッサの接触幅 $b = 190\mu\text{m}$ とほぼ一致している．

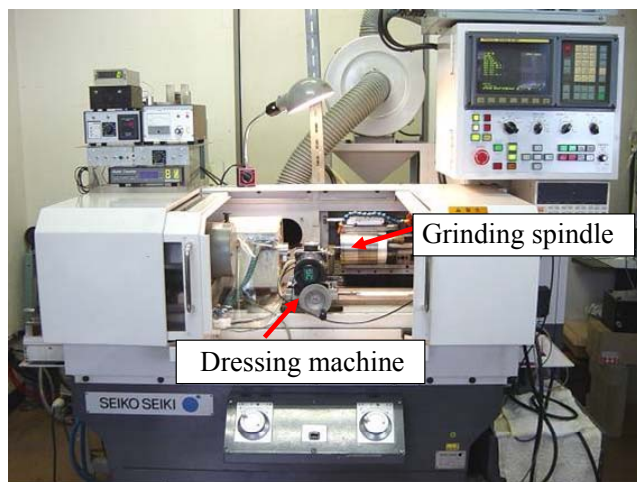


Fig. 4.5 Internal grinding machine

Tool:WA120M8V
Diameter:5.7 mm, Width:6 mm

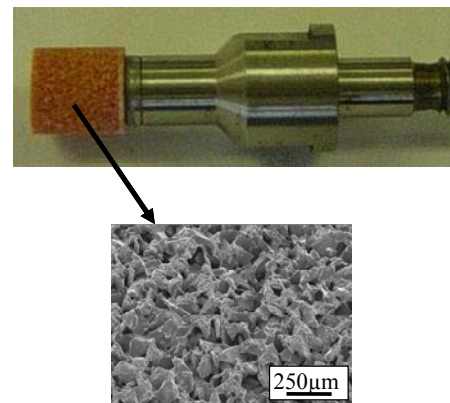


Fig. 4.6 Grinding quill

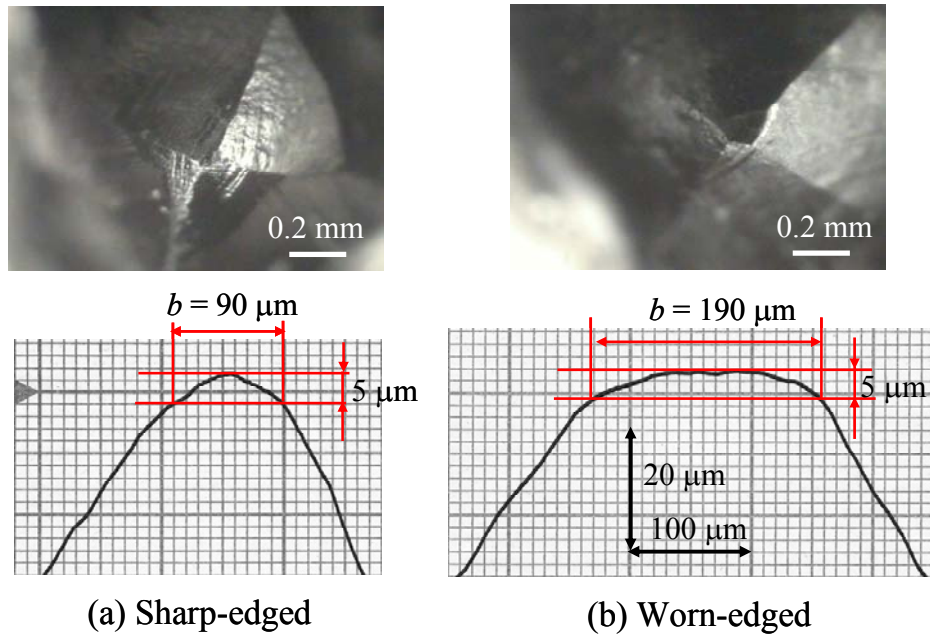


Fig. 4.7 Single-point dresser

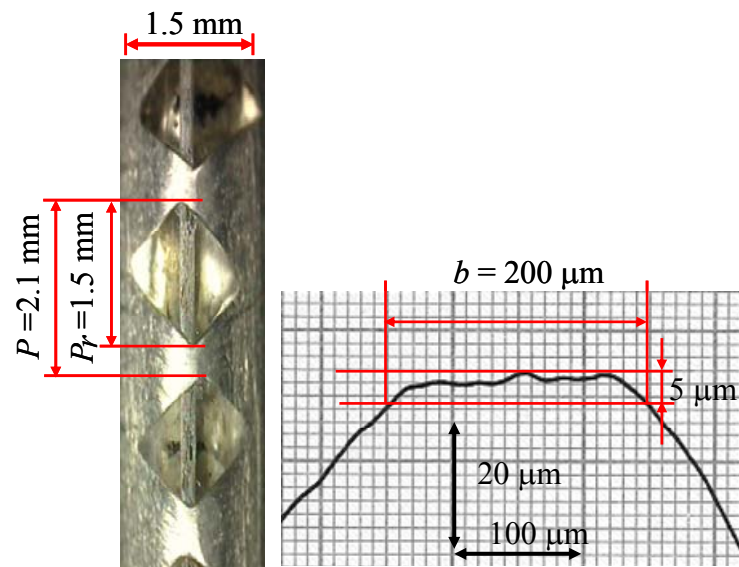


Fig. 4.8 Multipoint rotary dresser

一方，研削性能は SUJ2 軸受鋼の内面プランジ研削実験によって評価し，法線方向研削抵抗（単に法線研削抵抗と記述する）と研削仕上げ面粗さを測定した．研削実験は累積切込み量 $\Delta_w=50\mu\text{m}$ を1サイクルとし，10サイクルすなわち，累積切込み量が 0.5mm に達した時点で研削を終了した．研削抵抗は，図 4.9 に示すように工作物主軸に挿入した水晶圧電式回転動力計（Kistler 社製 9123B）を用いて測定した．なお，回転動力計の回転軸を水平に設置した場合，回転動力計の自重に起因する正弦波力が発生し研削抵抗と重複するので，工作物主軸の後端にロータリエンコーダを取り付け，正弦波力がゼロクロスとなる回転角における出力を検出することによって研削抵抗成分だけを抽出した⁹⁾．この場合，研削時の工作物回転数は 1500rpm なので研削抵抗のサンプリング間隔は 40ms となる．

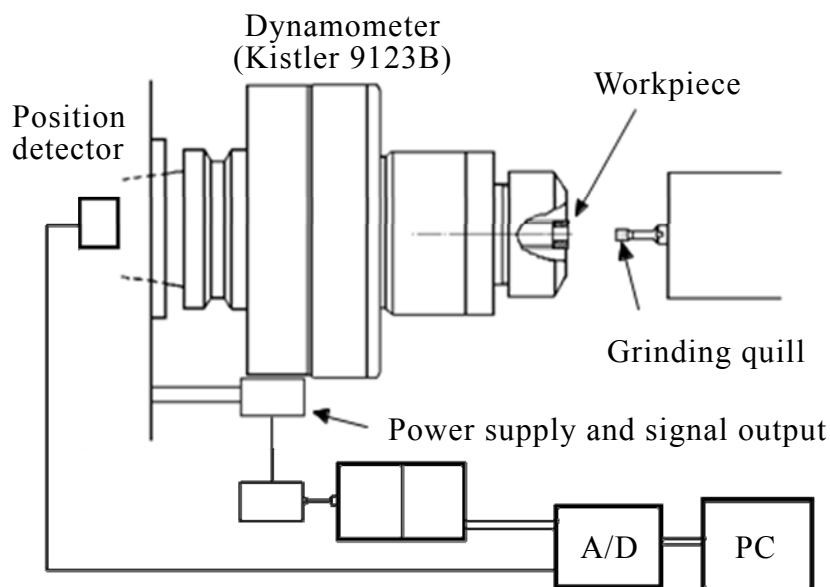


Fig. 4.9 Grinding system

4.3 実験結果

4.3.1 単石ダイヤモンドドレッサのドレッシング抵抗と研削性能の関係

4.3.1.1 ドレッシング抵抗測定波形

図 4.10 は、鋭利単石ダイヤモンドドレッサを用い、ドレッサ切込み量 $\Delta_d = 10\mu\text{m}$ 、ドレッサ送り速度 $f_d = 1.2\text{m/min}$ でドレッシングした場合について、法線方向ドレッシング抵抗とドレッシング振動を記録した例である。ドレッシング前後に発現するノイズとドリフトはドレッサを搭載した動力計の前後・往復運動によるものであるが、これらの信号は、図中下方に示すドレッシング振動をモニタリングすることによって測定データから排除することができる。ドレッシング時において単石ダイヤモンドドレッサは研削砥石と連続的に接触するため、ほぼ一定のドレッシング抵抗が得られている。なお、研削クイルの根元部に現れているパルス状の高い抵抗値の発生要因は、研削クイル製造過程において研削砥石部にねじ付き軸を挿入し固定する際に使用した接着剤がはみ出ている場合、接着剤とドレッサが接触することによって生ずる抵抗である。

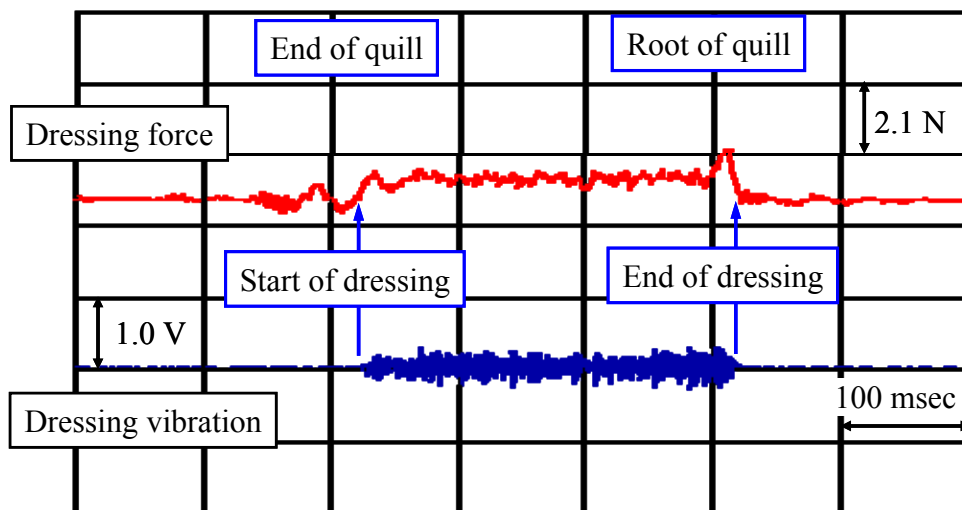
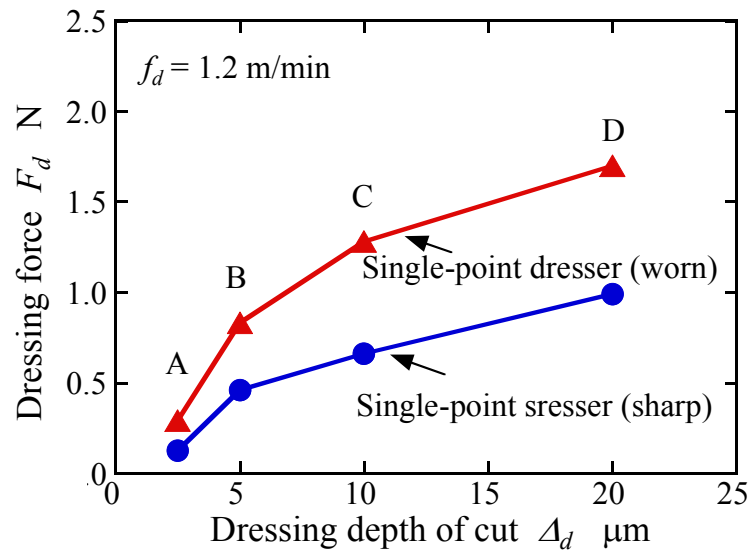


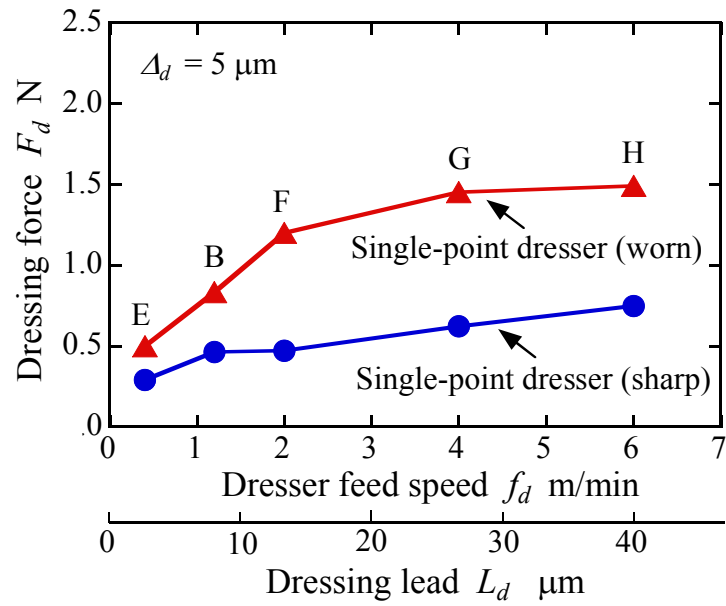
Fig. 4.10 Traces of dressing force and vibration
(Sharp-edged single-point dresser)

4.3.1.2 ドレッサ先端形状とドレッシング特性との関係

図 4.11 は、単石ダイヤモンドドレッサを用いた場合のドレッシング抵抗を、ドレッサ切込み量 Δ_d およびドレッサ送り速度 f_d に対してプロットした結果である。図 4.11 (b)の横軸に示すように、ドレッサ送り速度の最大値は $f_d = 6\text{m/min}$ であるが、研削クイル 1 回転あたりのドレッサ送り量に換算すると $L_d = 40\mu\text{m/rev}$ という値になる。なお、プロット点の近傍に示した記号は実験条件の違いを表しており、図 4.11 (a)の場合、ABCD の順にドレッサ切込み量が大きくなり、図 4.11 (b)の場合、EBFGH の順にドレッサ送り速度が大きくなる。図 4.11 より、ドレッサ切込み量が増加し、ドレッサ送り速度が増加するにともなってドレッシング抵抗が増加することがわかる。また、摩耗単石ダイヤモンドドレッサのドレッシング抵抗は鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合のほぼ 2 倍の値を示していることがわかる。



(a) Dressing depth of cut



(b) Dresser feed speed

Fig. 4.11 Dressing force in terms of dressing depth of cut and dresser feed speed

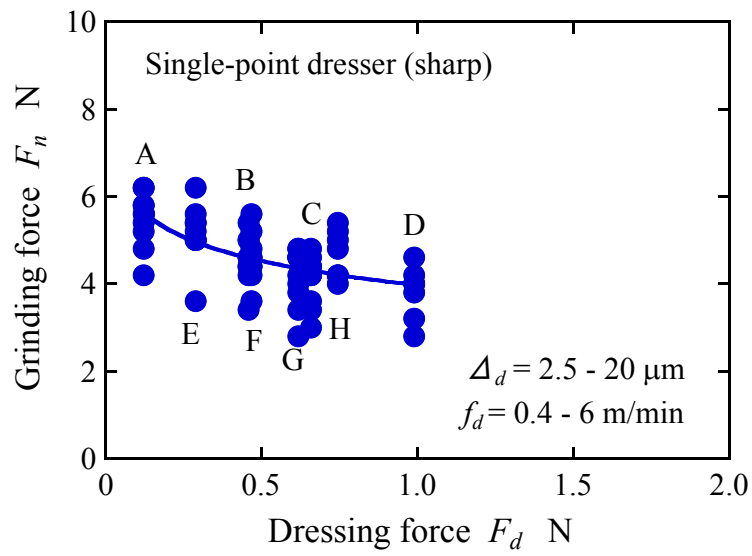
図 4.12 は、鋭利単石ダイヤモンドドレッサを用いた場合について、研削性能をドレッシング抵抗に対してプロットした結果であり、図 4.12(a) は法線研削抵抗 F_n との関係、図 4.12(b) には研削仕上げ面の中心線平均粗さ R_a (10 サイクル研削終了時) との関係を示す。なお、法線研削抵抗については、いずれの場合にも研削サイクルの進行とともに徐々に増加していく傾向が得られたので、それぞれの研削サイクルで測定した法線研削抵抗値をプロットしている。たとえば、記号 A で示すドレッサ切込み量 $\Delta_d = 2.5\mu\text{m}$ 、ドレッサ送り速度 $f_d = 1.2\text{m/min}$ の場合、法線研削抵抗 F_n は 4.2N から 6.2N まで増加したことを示している。ここで、研削性能に及ぼすドレッシング条件の影響に注目すると、これまで報告されている多くの研究結果が示すように、ドレッサ切込み量が増加(ABCD の順)するとともに法線研削抵抗が減少し研削仕上げ面粗さが増加している。また、ドレッサ送り速度が増加(EBFGH の順)するとともに法線研削抵抗が減少し研削仕上げ面粗さが増加している。

次に、ドレッシング抵抗と研削性能の関係に注目すると、両者には明確な相関関係が存在しており、ドレッシング抵抗の増加にともなって法線研削抵抗が減少し研削仕上げ面粗さが増加している。また、図 4.12 中に示した近似曲線を用いて鋭利単石ダイヤモンドドレッサの性能を評価すると、 $F_d = 0.1 \sim 1.0\text{N}$ のドレッシング抵抗で $F_n = 4.0 \sim 5.6\text{N}$ の法線研削抵抗と $R_a = 0.7 \sim 1.4\mu\text{m}$ の研削仕上げ面粗さが得られていることがわかる。

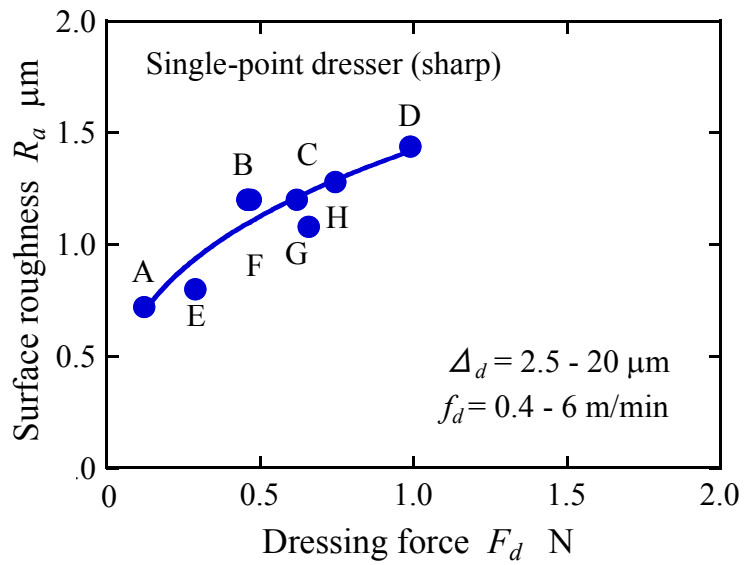
図 4.13 は、摩耗単石ダイヤモンドドレッサを用いた場合のドレッシング抵抗と研削性能の関係をプロットした結果である。研削性能に及ぼすドレッシング条件の影響については、図 4.12 に示した鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合と同様の結果が得られている。すなわち、ドレッサ切込み量が大きい粗ドレッシングになるほど法線研削抵抗が減少し、研削仕上

げ面粗さが増加している．図 4.13 中のドレッシング抵抗と研削性能の相関を近似した曲線で摩耗単石ダイヤモンドドレッサの性能を評価すると， $F_d = 0.3 \sim 1.7\text{N}$ のドレッシング抵抗で $F_n = 3.8 \sim 5.0\text{N}$ の法線研削抵抗と $R_a = 1.0 \sim 1.3\mu\text{m}$ の研削仕上げ面粗さが得られていることがわかる．

以上，図 4.12，図 4.13 の結果より，鋭利単石ダイヤモンドドレッサは摩耗単石ダイヤモンドドレッサが提供する研削性能とほぼ同等レベル範囲の研削性能を示し，また摩耗単石ダイヤモンドドレッサのおよそ半分のドレッシング抵抗を示していることがわかる．

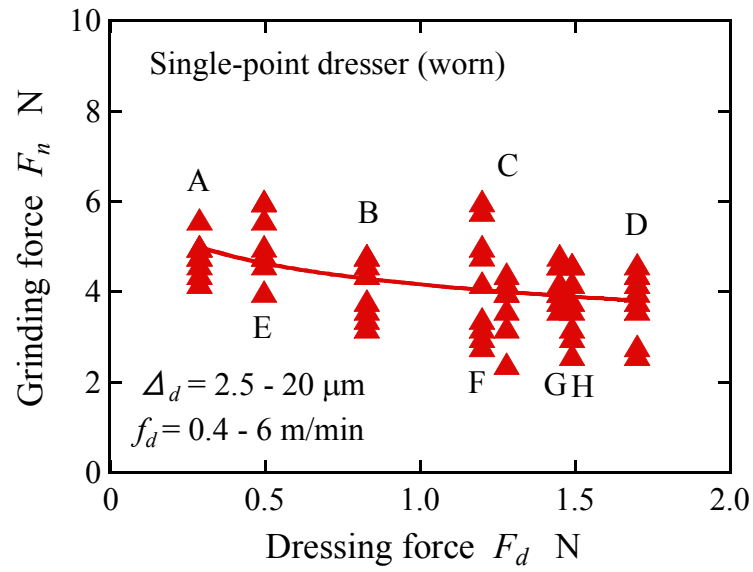


(a) Grinding force

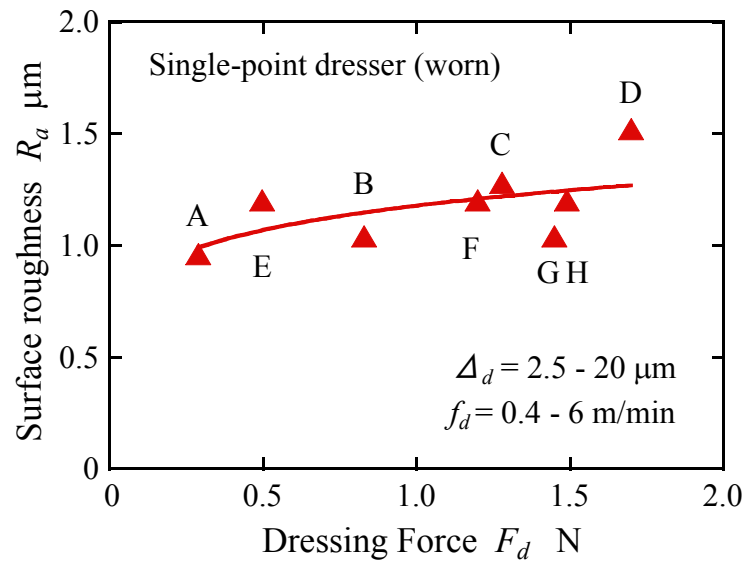


(b) Ground surface roughness

Fig. 4.12 Relationship between dressing force and grinding performance
 (Sharp-edged single-point dresser)



(a) Grinding force



(b) Ground surface roughness

Fig. 4.13 Relationship between dressing force and grinding performance
(Worn-edged single-point dresser)

4.3.2 多石ダイヤモンドロータリドレッサのドレッシング抵抗と研削性能の関係

4.3.2.1 ドレッシング抵抗測定波形例とドレッシングモデル

図4.14は、多石ダイヤモンドロータリドレッサを用い、ドレッサ切込み量 $\Delta_d = 10\mu\text{m}$ 、ドレッサ送り速度 $f_d = 1.2\text{m/min}$ でドレッシングした場合について法線方向ドレッシング抵抗とドレッシング振動を記録した例である。多石ダイヤモンドロータリドレッサの場合、ダイヤモンド粒が研削クイル作業面と断続的に接触するので、パルス状のドレッシング抵抗波形が得られている。

図4.15は、多石ダイヤモンドロータリドレッサを使用した場合に発生するドレッシング抵抗をモデル化した図である。パルス状ドレッシング抵抗の発生間隔 τ および1パスドレッシングにおいて発現するパルス数 Z_d は幾何学的考察によりそれぞれ式(4.1)、(4.2)で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{n_d N} \quad (4.1)$$

$$Z_d = \frac{\pi n_d D_d B}{f_d P} \quad (4.2)$$

ここで、 n_d はロータリドレッサの回転速度、 N はロータリドレッサの円周上に配列されたダイヤモンド粒の個数、 D_d はロータリドレッサの外径、 B は研削クイルの幅、 f_d はロータリドレッサ送り速度、 P はダイヤモンド粒の配置間隔である。

表4.1および図4.8中に示した値を式(4.1)、(4.2)に代入することにより、 $\tau = 8.3\text{msec}$ 、 $Z_d = 36$ という値が得られる。

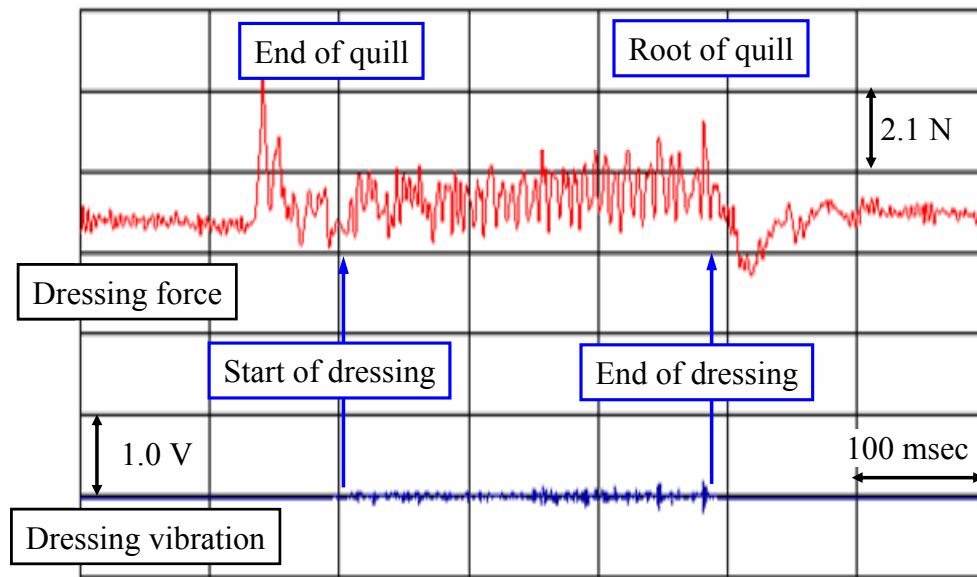


Fig. 4.14 Traces of dressing force and vibration
(Multipoint rotary dresser)

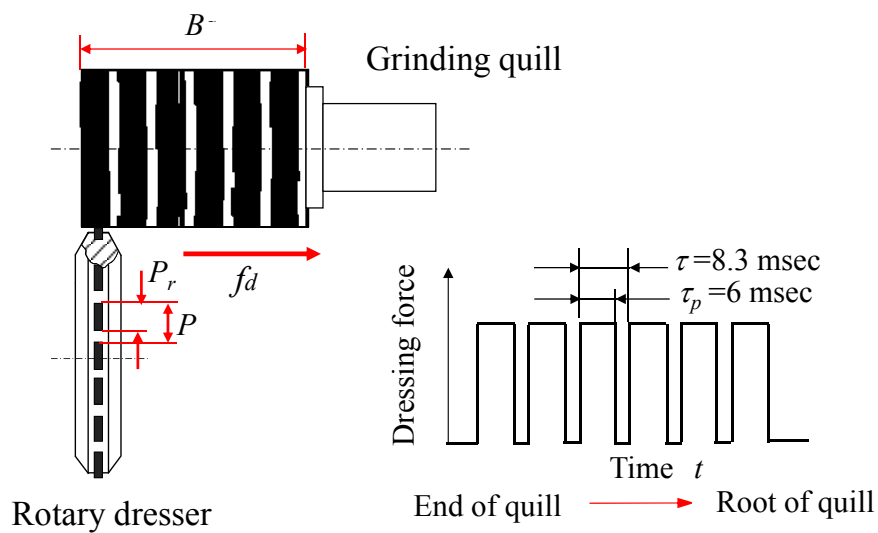


Fig. 4.15 Analysis of dressing force of multipoint rotary dresser

図4.16に多石ダイヤモンドロータリドレッサを用いた場合のドレッシング抵抗波形の周波数解析を行った結果を示す．図中の破線は図4.15に示す幾何学的に作成したパルス状ドレッシング波形のパワースペクトル（計算値）であり，実線は図4.14に示したドレッシング抵抗測定値から求めたパワースペクトル（実測値）である．パワースペクトルの計算値には主要周波数として117Hz，2次周波数として239Hzが存在している．一方，実測したパワースペクトルにおいてもほぼ117Hzに主要周波数が存在しており，2次周波数（239Hz）付近にも有意なピークが認められる．

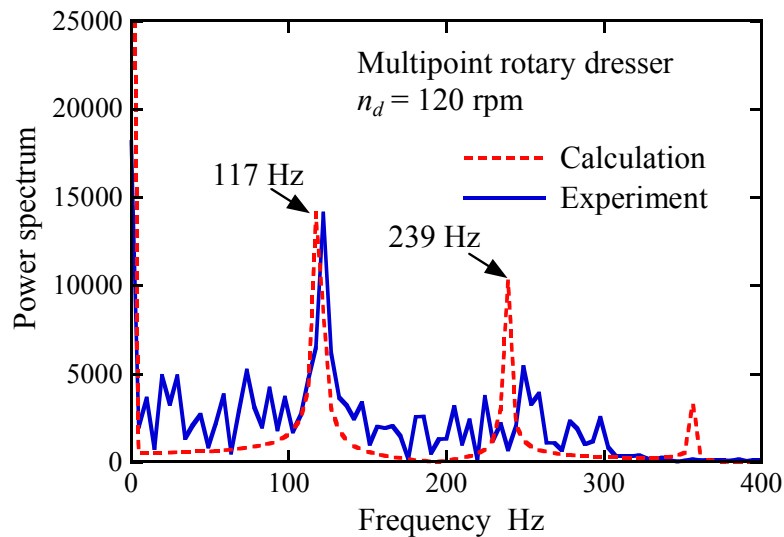


Fig. 4.16 Power spectrum analysis of dressing force
of multipoint rotary dresser

さて、式(4.2)で与えられるドレッシング抵抗パルス数 Z_d は、ドレッサの通過軌跡が存在しない平坦な研削クイル作業面をドレッシングする際に発生するドレッシング抵抗パルス数である。ドレッサ切込み量を与えて1パスドレッシングを行った後、ドレッサ切込み量を与えずに引き続きドレッサを移動させるドレスアウト(ドレッシングアウトともいう)を行うと、2回目以降のドレッシングでは、研削クイル作業面とドレッサの干渉領域はドレッサが切り残した部分に限定されるので、ドレッシング抵抗パルス数は徐々に減少し、研削クイル作業面の全面がドレッサによって除去された時点でドレッシング抵抗パルスは消滅する。すなわち、 $Z_d = 0$ となる点ではドレッサが研削クイルと接触しないドレスアウトの状態となることを示している。

図4.17は、多石ダイヤモンドロータリドレッサの回転速度が $n_d = 60, 120$ rpmの場合について、ドレッサ切込み量 $\Delta_d = 5\mu\text{m}$ 、ドレッサ送り速度 $f_d = 1.2\text{m/min}$ の条件でドレッシングを行い、ドレッシング抵抗パルス数をドレッシング回数に対してプロットした結果である。なお、ドレッサ切込み量

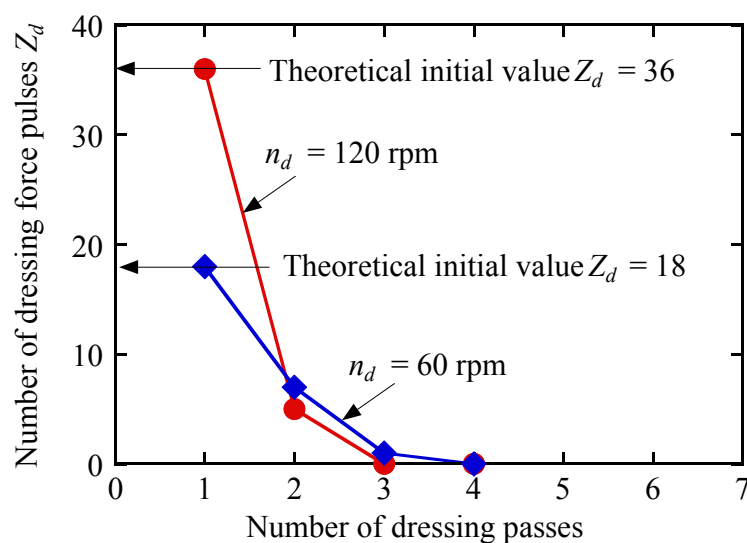
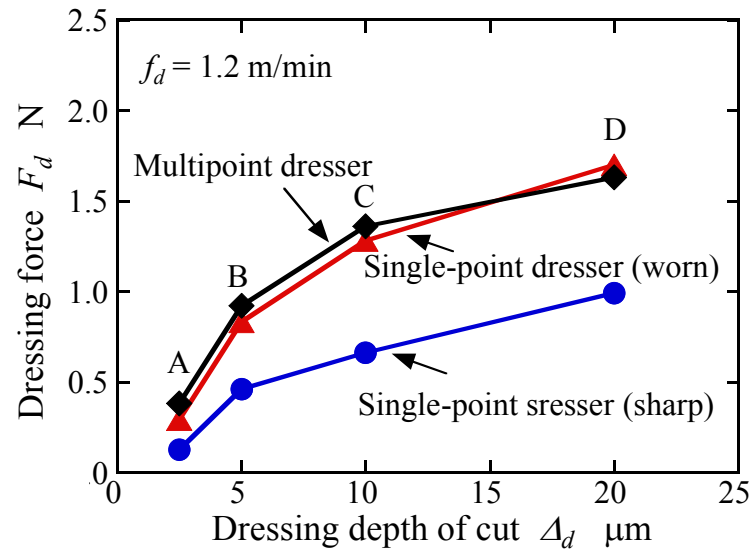


Fig. 4.17 Number of dressing force pulses of multipoint rotary dresser

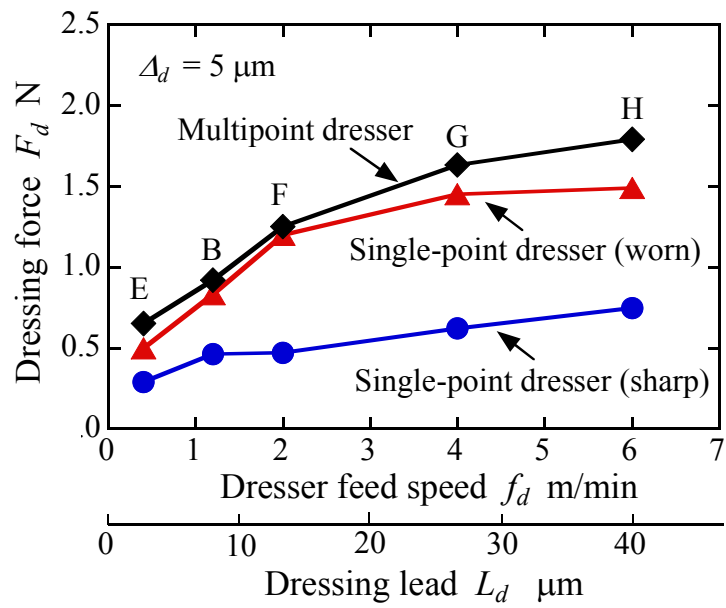
は第1回目のドレッシング時にだけ与えている．すなわち，2回目以降のドレッシングでは，研削クイル作業面とドレッサの干渉領域はドレッサが切り残し部分に限定され，ドレッシング抵抗パルス数は徐々に減少することとなる．第1回目のドレッシング時に発生するドレッシング抵抗パルス数はいずれのドレッサ回転速度の場合にも理論値と一致している．また，ドレッシングの経過とともにドレッシング抵抗パルス数は減少し，3回目あるいは4回目のドレッシングでパルス数は消滅している．この結果は，この実験条件の場合，研削クイル作業面に生成される砥粒切れ刃先端の過度な摩滅を避けるためにはドレスアウトを2～3回で終了することが望ましいことを示唆している．実験条件が異なる場合にも，ドレッシング抵抗パルス数をモニタリングすることによって最適ドレスアウト数を推定できると考えられる．

4.3.2.2 ドレッシング抵抗と研削抵抗および研削仕上げ面粗さの関係

多石ダイヤモンドロータリドレッサのドレッシング抵抗を評価するために，ドレッシング抵抗のパルスピーク値の平均値をドレッシング条件に対してプロットした結果を図4.11で示した単石ダイヤモンドドレッサの実験結果とともに図4.18に示す．多石ダイヤモンドロータリドレッサのドレッシング抵抗は摩耗単石ダイヤモンドドレッサとほぼ一致している．これは，多石ダイヤモンドロータリドレッサを構成しているダイヤモンド粒先端の接触幅 $b = 0.2\text{mm}$ が，摩耗単石ダイヤモンドドレッサの接触幅 $b = 0.19\text{mm}$ とほぼ同一であるため，同一のドレッシング作用が発生したためであると考えられる．すなわち，単石あるいは多石に関わらず個々のダイヤモンド粒の先端形状がドレッシング力学を決定していると考えられる．



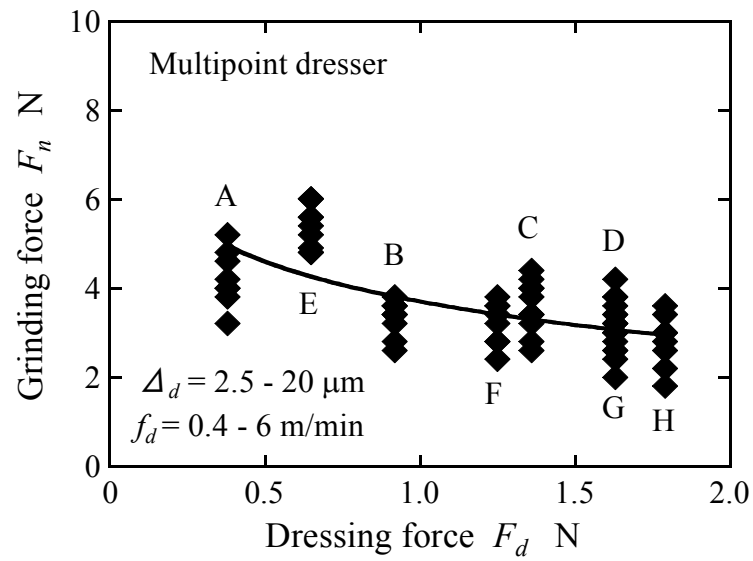
(a) Dressing depth of cut



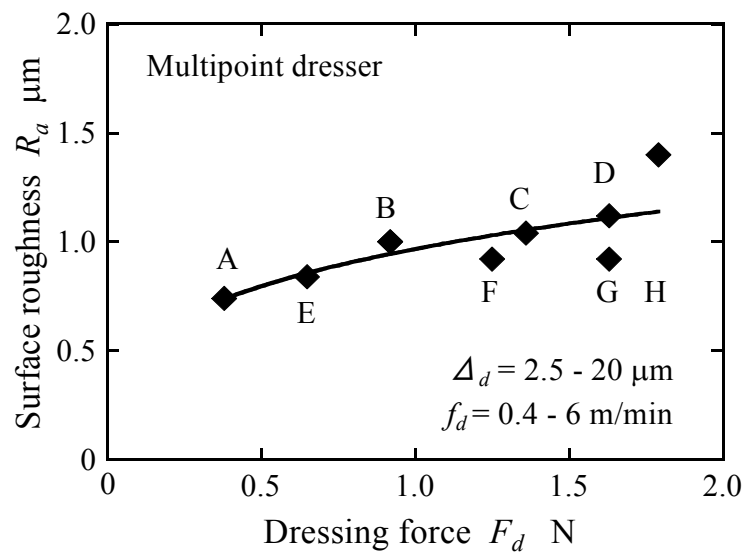
(b) Dresser feed speed

Fig. 4.18 Dressing force in terms of dressing depth of cut and dresser feed speed

図 4.19 は、最適ドレスアウト後の研削クイルを用いて研削実験を行い、ドレッシング抵抗と研削性能の関係をプロットした結果を示している。研削性能に及ぼすドレッシング条件の影響については、単石ダイヤモンドドレッサの場合と同様の結果が得られている。すなわち、ドレッシング抵抗の増加にともなって法線研削抵抗は減少し研削仕上げ面粗さは増加している。ドレッシング抵抗と研削性能の相関を近似した曲線から多石ダイヤモンドロータリドレッサの性能を評価すると、 $F_d = 0.4 \sim 1.8 \text{ N}$ のドレッシング抵抗で $F_n = 2.9 \sim 5.0 \text{ N}$ の法線研削抵抗と $R_a = 0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ の研削仕上げ面粗さを提供していることがわかる。研削仕上げ面粗さの範囲が摩耗単石ダイヤモンドドレッサの場合よりも下方に位置するのは、ドレスアウトによる研削クイル作業面の平坦化によるものと考えられる。



(a) Grinding force



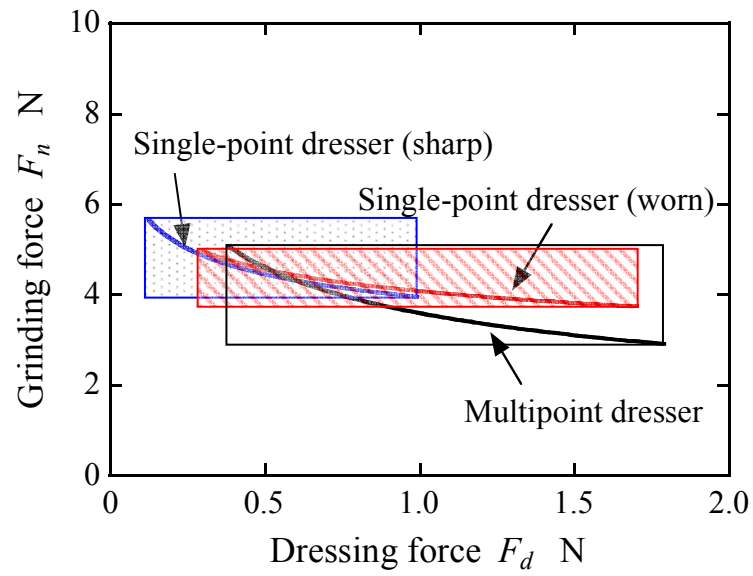
(b) Ground surface roughness

Fig. 4.19 Relationship between dressing force and grinding performance
(Multipoint rotary dresser)

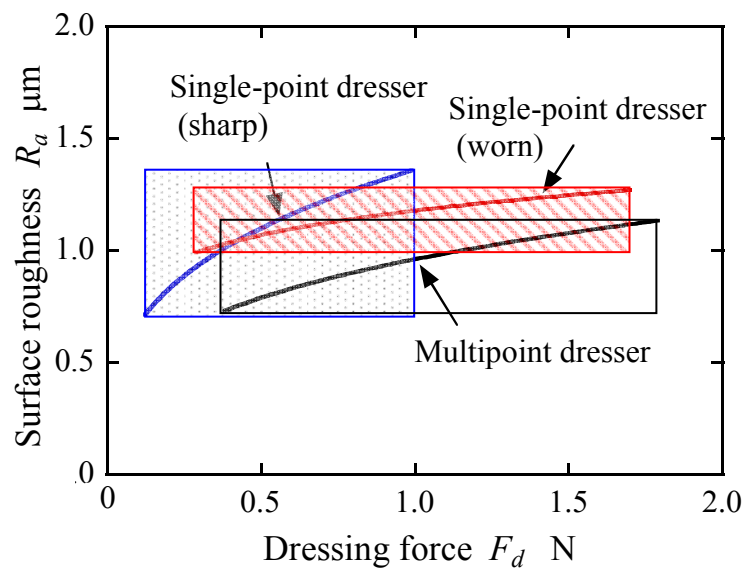
4.4 考察

図 4.20 は、図 4.12, 図 4.13, 図 4.19 に示した単石ダイヤモンドドレッサ 2 種類（鋭利および摩耗したもの）と多石ダイヤモンドロータリドレッサの計 3 種類のドレッサについて、制御可能な研削性能の範囲（近似曲線の変化領域）をドレッシング抵抗に対して示した結果である。図より、鋭利単石ダイヤモンドドレッサは 3 種類のドレッサの中で最も低いドレッシング抵抗を示すとともに他のドレッサと同等の研削性能を示すことがわかる。

ドレッシング抵抗を小さくすることによって剛性の低い研削クイルのツルージング精度も向上するので、上述の結果は先端の鋭利なダイヤモンドドレッサを使用することが重要であることをあらためて示唆している。



(a) Grinding force



(b) Ground surface roughness

Fig. 4.20 Relationship between dressing force and grinding performance

4.5 結言

研削砥石のドレッシングをダイヤモンド工具（ドレッサ）による複合硬脆材料の切削加工とみなし，切削抵抗に相当するドレッシング抵抗を用いて各種ダイヤモンドドレッサの性能を評価した．得られた結果を以下に示す．

- (1) 法線方向ドレッシング抵抗と研削性能の間には明確な相関関係が存在する．すなわち，ドレッシング抵抗が大きくなると法線研削抵抗は減少し，研削仕上げ面粗さは増加する．
- (2) 単石ダイヤモンドドレッサを用いた場合，先端の鋭利なドレッサのドレッシング抵抗は先端の摩耗したドレッサを用いた場合のほぼ半分の値を示すが，先端の摩耗したドレッサと同範囲の研削性能を示す．
- (3) 多石ダイヤモンドロータリドレッサを用いた場合，ドレッシング抵抗パルス数をモニタリングすることによって最適ドレスアウト回数，すなわち，ドレッシング終了点を判断することができる．
- (4) 単石ダイヤモンドドレッサ，多石ダイヤモンドロータリドレッサのいずれともその力学的ドレッシング作用はドレッサを構成しているダイヤモンド粒先端の形状によって決定される．したがって，ダイヤモンド粒先端の摩耗幅が同一であるならばほぼ同一の研削性能が得られる．

以上の結果より，先端の鋭利なダイヤモンドドレッサを使用することが重要であることをあらためて示唆されており，先端の鋭利さを維持できる耐摩耗性に優れたダイヤモンドドレッサの開発が重要であると考えられる．

参考文献

- 1) S. Moritomo: Tool Engineer, 24, 2 (1980) 73.
- 2) T. Nakajima, Y. Uno and T. Tachibana: Some problems in single point diamond dressing-Effect of dresser wear and dressing condition on grinding results-, J. J. Soc. Abrasive Technology, 34, 4 (1990) 21.
- 3) S. Matsui, O. Saito and Y. Konno: Studies on the evaluation of wheel surface topography, Proc, Annual Meeting of J. Soc. Abrasive Technology, (1997) 129.
- 4) T. Nakajima, Y. Uno, Y. Yanase and T. Tachibana: Study on dressing of grinding wheel(3rd report)-Grinding performance of wheels with rotary dressing-, J. J. Soc. Prec. Eng., 52, 10 (1986) 1788.
- 5) H. Mizutani: Proc. Annual Meeting of J. Soc. Abrasive Technology, (2001) 35.
- 6) K. Yamauchi, J. Takagi, H. Ohzeki and H. Ishigami : Study on internal grinding of small bore-2nd report, Influence of dressing conditions on grinding performance-, J. J. Soc. Abrasive Technology, 45, 9 (2001) 437.
- 7) Y. Yamamoto, H. Suzuki, T. Moriwaki, T. Okino and T. Higuchi: Precision grinding of micro fresnel lens molding die(2nd report)-Precision truing of micro grinding wheel with sharp edge by molybdenum truer and accuracy improvement in fresnel surface grinding-, J. J. Soc. Prec. Eng., 73, 6 (2007) 688.
- 8) S. Yokoyama, Y. Wu, T. Sato, W. Lin, M. Nomura and M. Take: Proc. Autumn Meeting of J. Soc. Prec. Eng., (2008) 951.
- 9) J. Tamaki: Grinding force Measurement in Internal Grinding, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 44, 11 (2000) 486 (in Japanese).

- 10) Y. Mochida, A. Kubo, H. Sumiya and J. Tamaki: Evaluation of dressing performance of diamond dressers by means of dressing force measurement, Proc. Annual Meeting of Jpn. Soc. Abrasive Technology, (2009)131.
- 11) Y. Mochida, T. Nishioka, A. Kubo and J. Tamaki: Evaluation of diamond dressers and estimation of grinding performance by dressing force measurement, Int. J. Abrasive Technology, 3, 1(2010)37.

用語説明

*1 WA120M8V の組成

WA : 白色アルミナ質砥粒, 120 : 粒度 (砥粒の大きさを示し, 粒径は 130 ~ 150 μ m), M : 結合度 (砥粒と砥粒の結びつきの強さ), 8 : 組織番号 (砥石中の砥粒の占める体積分率を砥粒率とし, 0 ~ 14 に分類), V : 結合剤の種類 (ビトリファイドボンド, 長石や可溶性粘土を主要成分).

第 5 章

切れ刃すくい角に注目して開発した単刃 ダイヤモンドドレッサの性能

5.1 緒言

前章までに、研削砥石のドレッシングをダイヤモンド工具（ドレッサ）による複合硬脆材料の切削加工とみなし、切削加工での切削抵抗に相当するドレッシング時の法線方向ドレッシング抵抗を低減するためには、ドレッサ先端の鋭利さを維持すること、耐摩耗性を維持することが重要であることを示した。またドレッサ材料の耐摩耗、チッピング性能を評価し、グラファイトを出発物質とした超高压高温下での直接変換法により作製したバインダレスナノ多結晶ダイヤモンドが従来のダイヤモンドと比較し良好な特性を示すことを明らかにした。

ダイヤモンドドレッサは、旋削工具に相当する単刃ドレッサとフライス工具に相当する多刃ドレッサの 2 種類に大別されるが、その切れ刃形状は切削工具のすくい角に相当する概念を有していない。単刃ドレッサとしてダイヤモンドドレッサの先端を円錐型やくさび型などに成形したフォーミングドレッサが存在するが、その目的はツルーイングにおける砥石との不必要な幾何学的干渉の回避にある。ドレッシングを研削砥石の機械加工と

いう観点から見直すならば、切削バイトのすくい角が切削性能を支配するようにダイヤモンドドレッサのすくい角もまたドレッシング性能，すなわち、砥石作業面トポグラフィの生成プロセスを支配することが容易に予想される．本章では、一定のすくい角を有する単刃ダイヤモンドドレッサを「切削バイト型ドレッサ」と称することにする．

さて、切削バイト型ドレッサの有用性が期待される研削加工分野として小径内面研削加工が挙げられる．その理由の一つは、ドレッシング時に除去される砥石体積が少量である点にある．小径内面研削用砥石の場合、砥石直径と砥石幅の積で与えられる砥石作業面面積は平面研削用砥石あるいは円筒外面研削用砥石に比べて圧倒的に小さく、ドレッシングによって除去される砥石体積は非常に少量であるため、切削バイト型ドレッサの機能、すなわち、切れ刃形状を確保するうえで障害となるドレッサ摩耗を極力小さくすることができるという利点を有している．

もう一つの理由は、新谷¹⁾が指摘している「自生発刃^{*1} 効果よりも砥石形状精度の維持と良好な研削仕上げ面粗さを提供することが要求される小径内面研削用砥石」を実現するドレッサとしての可能性である．

小径内面研削に関する最近の研究成果を展望すると、山内ら²⁾はメタルボンドダイヤモンドロータリドレッサと角柱ダイヤモンドロータリドレッサの性能比較を行い、ドレッシング条件の最適化を検討している．塚本ら³⁾は内面オシレーション研削における形状創成機構を実験的に解析し、オシレーション方式と位相差が形状誤差に大きな影響を与えることを明らかにしている．長谷川ら⁴⁾は小径内面研削クイルのツルーイングにおいて砥石軸をシューで支持する方法を提案し、ツルーイング精度の向上と砥石の欠損防止に対して有効であることを報告している．呉ら⁵⁾は小径内面研削加工技術の開発を目的として超音波振動援用スピンドルを試作し、超音波

の付加によって法線研削抵抗と研削仕上げ面粗さが大幅に減少することを報告している。

このように、小径内面研削装置を構成する機器の開発やドレッシング・研削性能の観点からの研究は精力的に行われているが、自生発刃効果よりも砥石形状精度の維持と良好な研削仕上げ面粗さを提供することが要求される小径内面研削用砥石の特性を考慮したドレッサあるいはドレッシング技術についての研究はあまり進展していないように思われる。

本章では、前章までに従来のダイヤモンドと比較して高耐摩耗性を示したバインダレスナノ多結晶ダイヤモンドを使用し、小径内面研削用砥石のダイヤモンドドレッサとして「切削バイト型ドレッサ」を開発し、ドレッシング性能に及ぼすすくい角の影響を解明するとともに、提供する研削性能を従来のダイヤモンドドレッサと比較することによってその特徴を明らかにする。

5.2 実験方法

実験装置としては、第 4 章の図 4.5 に示したオイルミスト潤滑方式の超高速スピンドル (150,000rpm) を搭載したセイコー精機社製 CNC 内面研削盤 SG-25 を用い、研削砥石には同じく図 4.6 に外観を示した WA120M8V の組成を有する外径 5.7mm、幅 6mm の研削クイルを用いた。

ドレッシング性能を評価するために切削抵抗の背分力に相当する法線方向ドレッシング抵抗（単にドレッシング抵抗と記述する）を測定し、研削性能を評価するために法線研削抵抗と研削仕上げ面粗さを測定した。ドレッシング抵抗は、第 4 章の図 4.1 に示す研削盤のテーブルに固定した基礎台とクロスローラーウェイ方式の可動台との間に挿入したロードワッシャ（Kistler 社製 9021A）に予圧を与えた動力計を用いて測定した。法線研削抵抗は工作物主軸に挿入した水晶圧電式回転動力計（Kistler 社製 9123B）を用いて測定した。

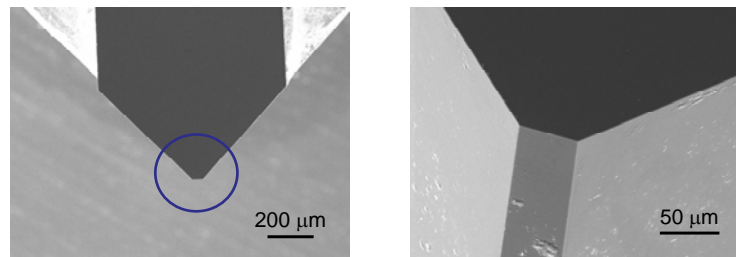
図 5.1 に試作した切削バイト型ドレッサの全体図と刃先先端の光学写真を示す。ドレッサシャンクの先端には厚み、幅がそれぞれ 0.8mm、長さが 4mm のダイヤモンドがろう付けされており、ダイヤモンドの素材にはバインドレスナノ多結晶ダイヤモンドを使用した。なお、第 3 章にて各種ダイヤモンドバイトの切削性能を調査するために超硬合金の切削実験を行い、バインドレスナノ多結晶ダイヤモンドが従来のダイヤモンドよりも優れた耐摩耗性と耐チップング性を有することを確認している。図 5.1 に示す切削バイト型ドレッサの先端は刃先幅が 50 μ m の台形状であり、横すくい角、上すくい角とも 0°に成形しているが、ドレッシング実験においては、上すくい角あるいは横すくい角の設定値を有する傾斜台に切削バイト型ドレッサを固定することによって実質すくい角を与えた。図 5.1(c)に切削バイト型ドレッサを上すくい角-15°、横すくい角-30°の傾斜台に設置した状態

の写真を示す.

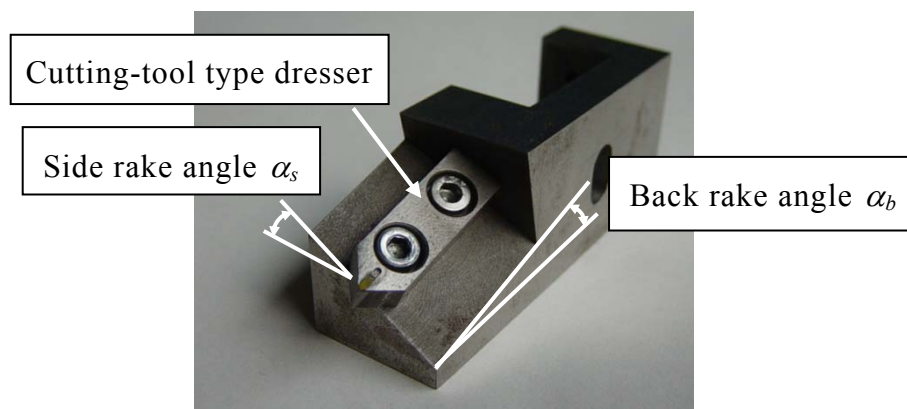
表 5.1 に実験条件, 研削条件を示す. 切削バイト型ドレッサの性能を評価するためのベンチマークドレッサとして単石ダイヤモンドドレッサと多石ダイヤモンドロータリドレッサの2種類を選定した. なお, 単石ダイヤ



(a) Whole image



(b) Edge shape



(c) Setup dresser on tilting tables
($\alpha_s = -15\text{deg.}$, $\alpha_b = -30\text{deg.}$)

Fig. 5.1 Cutting-tool type dresser

モンドドレッサについては、第4章でも用いたダイヤモンド原石を埋め込んだ未使用状態の鋭利単石ダイヤモンドドレッサとドレッシング作業に伴う摩耗によって先端が平坦になった摩耗単石ダイヤモンドドレッサの2種類を用いた。

研削性能は SUJ2 軸受鋼の内面プランジ研削実験によって評価した。研削実験は累積切込み量 $\Delta_w=50\mu\text{m}$ を1サイクルとし、10サイクルすなわち、累積切込み量が 0.5mm に達した時点で研削を終了した。

Table 5.1 Dressing and grinding conditions

Grinding machine	Internal grinding machine with oil-mist lubrication spindle (SG-25)
Grinding wheel	WA120M8V, Diameter $D_s=5.7\text{mm}$, Width $B=6\text{mm}$ Rotational speed of grinding wheel $N_s=150,000\text{rpm}$
Dresser	Cutting-tool type dresser Dresser width $b=50\mu\text{m}$ Back (side) rake angle $\alpha=0 \sim -60\text{deg.}$ Single-point diamond dresser, Diamond grit size 0.5cts. Sharp-edged dresser, Worn-edged dresser Multipoint diamond rotary dresser Number of diamond grits $N=60$ Diamond of rotary disc $D_d=40\text{mm}$ Rotational speed of rotary dresser $n_d=120\text{rpm}$
Dressing	Dressing depth of cut $\Delta_d=2.5 \sim 20\mu\text{m}$ Dresser feed speed $f_d=0.4 \sim 6\text{mm/min}$ (Dressing lead $L_d=2.7 \sim 40\mu\text{m}$)
Grinding	Internal plunge grinding(Down cut) Workpiece SUJ2($H_{rc}=58 \sim 63$), Diameter $D_w=20\text{mm}$ Rotational speed of workpiece $N_w=1500\text{rpm}$ Plunge rate $f_w=0.2\mu\text{m/rev.}$ Total depth of cut at one grinding cycle $\Delta_w=50\mu\text{m}$ Number of grinding cycles, 10 times
Coolant	Soluble type, Dilution ratio 80%

5.3 実験結果

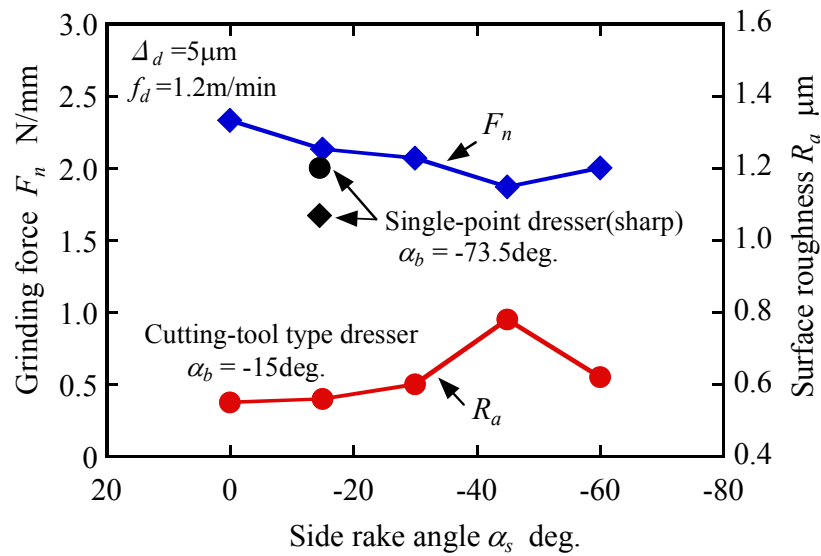
5.3.1 切削バイト型ドレッサの性能

ドレッシング性能を評価する直接的な手法は砥石作業面トポグラフィ特性値（砥粒切れ刃形状，砥粒切れ刃密度）の測定であるが，研削性能を評価することによっても推定が可能である．

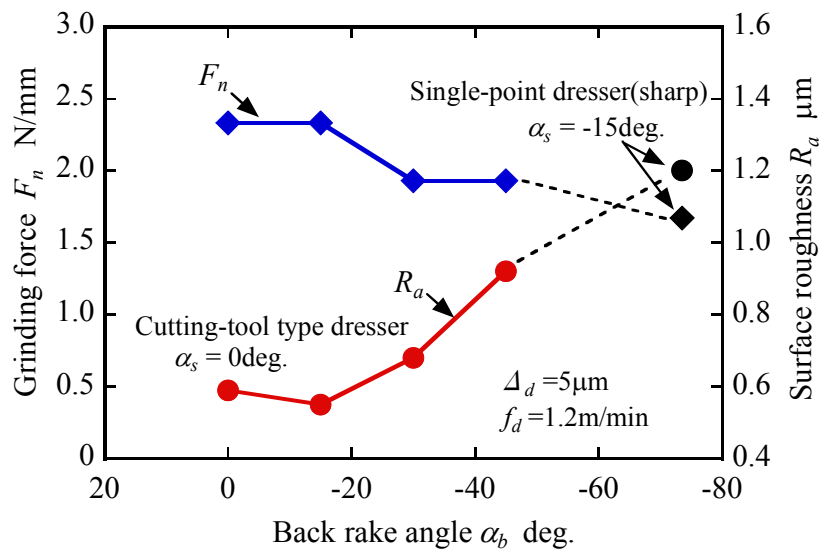
図 5.2 は，切削バイト型ドレッサを用いて切込み量 $\Delta_d=5\mu\text{m}$ ，ドレッサ送り速度 $f_d=1.2\text{m/min}$ でドレッシング後に研削加工を行い，累積切込み量 0.5mm 後における法線研削抵抗 F_n と研削仕上げ面粗さ R_a を横すくい角および上すくい角に対してプロットした結果である．図中には同一ドレッシング条件で行った鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合の結果をプロットしている．なお，鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合，設置角を -15° に設定したため，実質上すくい角は -73.5° となる．一方，横すくい角は -15° であるため，たとえば図 5.2(a)の場合，横すくい角 -15° の点に単石ダイヤモンドドレッサの測定値をプロットしている．図 5.2(a)では，切削バイト型ドレッサの上すくい角を一定（ $\alpha_b = -15^\circ$ ）にして横すくい角 α_s を変えており，図 5.2(b)では切削バイト型ドレッサの横すくい角を一定（ $\alpha_s = 0^\circ$ ）にして上すくい角 α_b を変化させている．

図 5.2(a)に注目すると，横すくい角が負の方向に大きくなるとともに法線研削抵抗が減少する傾向が認められるが，研削仕上げ面粗さについては横すくい角に対する明確な関係を見出すことができない．また，横すくい角を変えただけでは図 5.2(a)に示した鋭利単石ダイヤモンドドレッサの研削性能を実現できないことがわかる．図 5.2(b)に注目すると，横すくい角を変化させた図 5.2(a)と同様に上すくい角の負の方向への増加にともなって法線研削抵抗が減少する．研削仕上げ面粗さについては，上すくい角 0° の場合を除けば，上すくい角が負の方向に大きくなるとともに増加する

傾向が認められる．また，切削バイト型ドレッサの場合の測定値と鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合の測定値を統合すると，法線研削抵抗および研削仕上げ面粗さに対する上すくい角の影響を明確に認めることができる．以上の結果より，ドレッシング性能を決定する支配的因子は上すくい角であると判断し，上すくい角に注目して砥石作業面トポグラフィを観察することとした．



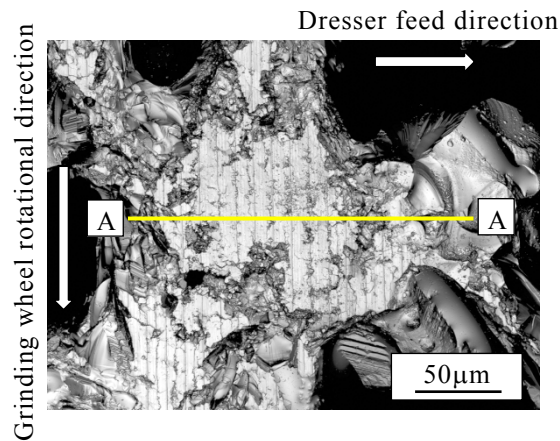
(a) Side rake angle



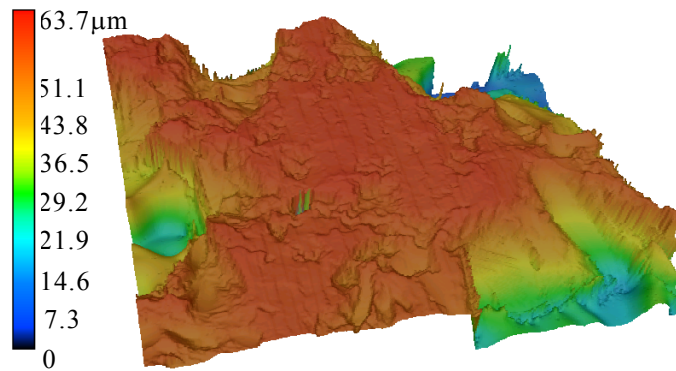
(b) Back rake angle

Fig. 5.2 Relational between rake angle and grinding performance

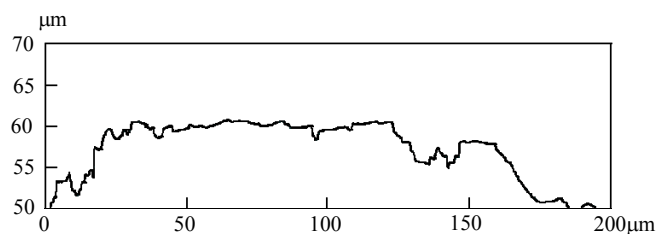
図 5.3 は、上すくい角 $\alpha_b = -15^\circ$ 、横すくい角 $\alpha_s = -15^\circ$ の切削バイト型ドレッサにより生成された砥石作業面トポグラフィをレーザ顕微鏡で測定した結果であり、図 5.4 は、横すくい角 ($\alpha_s = -15^\circ$) を変化させずに上すくい角だけを $\alpha_b = -45^\circ$ に変えた切削バイト型ドレッサにより生成された砥石作業面トポグラフィである。図 5.5 には、切削バイト型ドレッサと比較す



(a) Optical image



(b) Contour line figure



(c) Profile curve at A-A section

Fig. 5.3 Topography of dresser surface (cutting-tool type dresser, $\alpha_b = -15^\circ$)

るため、図 5.2 に付記した鋭利単石ダイヤモンドドレッサにより生成された研削作業面トポグラフィの測定結果を示している。

いずれの場合にも、研削クイルは図の上方から下方に研削速度 44.7m/sec で移動し、ドレッサは図の左から右にドレッシングリード 8 $\mu\text{m}/\text{rev}$ で移動する。

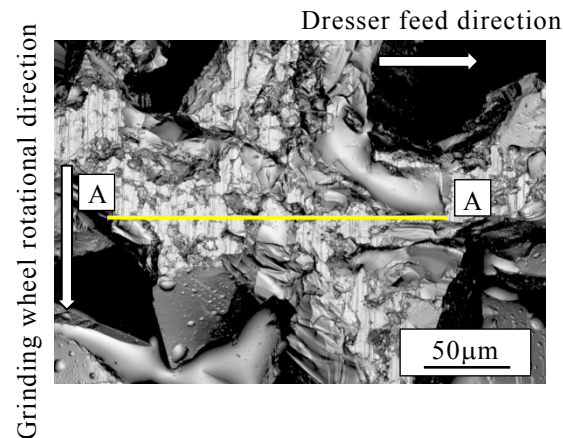
図 5.3 に示す上すくい角 $\alpha_b = -15^\circ$ の切削バイト型ドレッサの場合、WA 砥粒切れ刃のほぼ全面にドレッシングリードに相当する送りマークが認められ WA 砥粒が塑性流動、すなわち、延性モードで除去加工された痕跡を示している。しかし、その断面プロファイルは平坦ではなく、1 μm 程度の高さの凹凸で構成されていることがわかる。また、WA 砥粒の一部には 10~20 μm の大きさの脆性破壊痕跡が観察される。

市田ら⁶⁾は cBN120V ホイールにマイクロドレッシングを適用することによって平滑な延性モード加工面と深さ 0.5 μm 以下のマイクロチップングで構成される砥粒切れ刃が生成されること、砥粒切れ刃は微粒ダイヤモンド切れ刃（ドレッサ）による cBN 砥粒の微小脆性破壊と塑性流動によって形成されることを報告している。図 5.3 (a) に示す砥石表面トポグラフィは、切削バイト型ドレッサのマイクロドレッシング作用によって生成されたものと考えることができる。

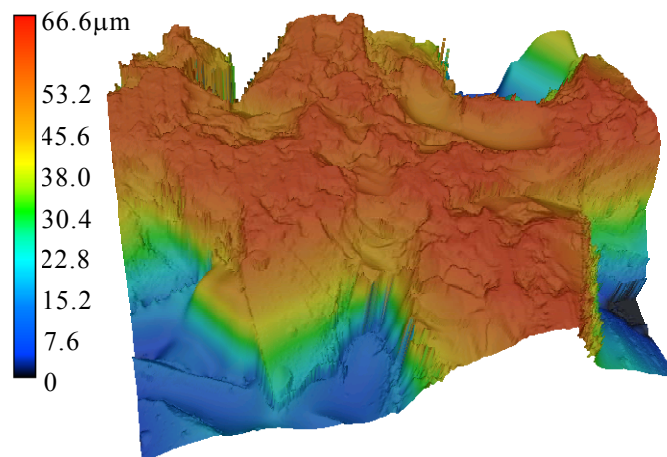
図 5.4 に示す上すくい角 $\alpha_b = -45^\circ$ の切削バイト型ドレッサの場合、WA 砥粒のエッジが脆性破壊によって大きく破砕する現象が発生し、その結果、ドレッシングリードの痕跡が存在する領域、すなわち、延性モード除去加工の領域が減少している。一方、図 5.5 に示す鋭利単石ダイヤモンドドレッサの場合、WA 砥粒切れ刃の全面が脆性破砕面で構成されている。

以上の観察結果より、上すくい角を負の方向に大きくすることによってドレッシングは延性モード除去を主体とするプロセスから脆性破壊を主体

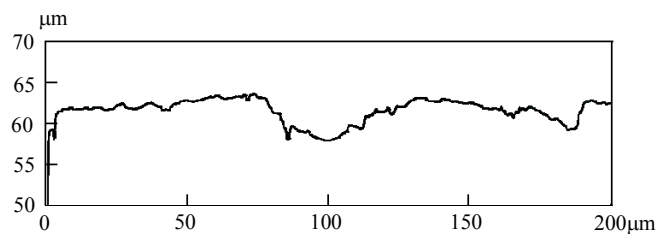
とするプロセスに移行し、砥粒切れ刃の形状は平坦な切れ刃から鋭利な切れ刃に変化すること、その結果、図 5.2 (b) に示した研削性能が得られることがわかる。この現象を切削機構の観点から考察する。



(a) Optical image



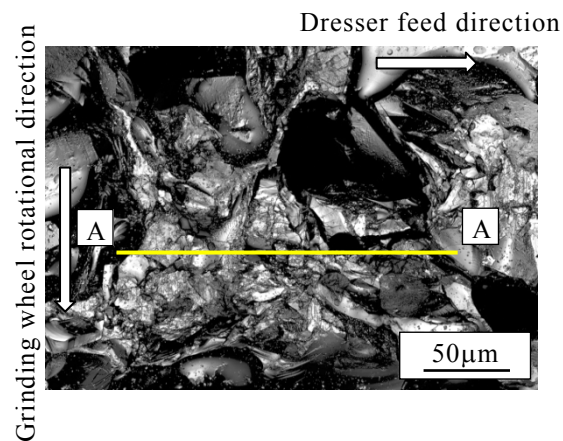
(b) Contour line figure



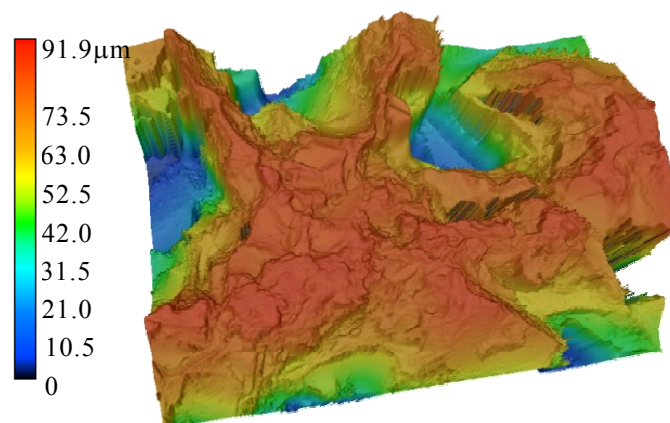
(c) Profile curve at A-A section

Fig. 5.4 Topography of dresser surface (Cutting-tool type dresser, $\alpha_b = -45^\circ$)

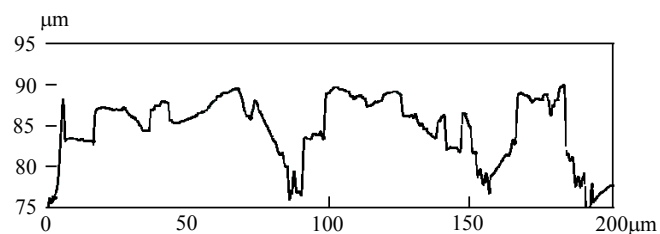
大きな負のすくい角を有する切削工具の材料除去機構については、SKH3 工具を用いて Pb の 2 次元切削実験を行った喜田ら⁷⁾の報告と cBN 砥粒およびダイヤモンド砥粒を成形した切削工具を用いて S50C の単刃フライカット (SPFC) 実験を行った大淵⁸⁾らの報告がある。これらの報告に



(a) Optical image



(b) Contour line figure



(c) Profile curve at A-A section

Fig. 5.5 Topography of dresser surface (Single-point diamond dresser)

よれば、すくい角を負の方向に大きくすることによって、切削抵抗背分力が大きくなるとともに工具すくい面と工作物材料の間のみかけの摩擦係数が減少すること、その結果、工作物材料を切れ刃前面に排出する能力が低下するとともに工作物材料が流動しない滞留層がすくい面下部に形成されることを明らかにしている。閻ら⁹⁾は大きな負のすくい角を有するダイヤモンド工具を用いて単結晶 Si の正面切削実験を行い、すくい角を 0°から負の方向に大きくすることによって延性モード切削が実現するが、すくい角 -40°付近を境界としてそれ以上大きな負のすくい角にすると脆性モードの加工に移行することを報告している。また、硬脆材料である Si の場合、負のすくい角が小さい領域では延性モード切りくずが生成されるが、負のすくい角が非常に大きい領域では Si 滞留層の工具切れ刃直下への移動によって Si が大きな弾性変形を受け、工具が通過した後に弾性・塑性変形境界にラテラルクラックが発生し、その結果、脆性破壊モードの切りくずが生成されることを報告している。

図 5.6 は、図 5.2(b)に示した実験条件のもとで測定したドレッシング抵抗を上すくい角に対してプロットした結果であり、上述の文献^{7~9)}で報告されている結果と同じく、上すくい角が負の方向に大きくなるとともにドレッシング抵抗が増加している。ドレッシングはダイヤモンド工具を用いた硬脆材料（WA 砥粒）の切削加工であり、ドレッシング抵抗は切削抵抗背分力に相当する。したがって、閤ら⁹⁾が報告している「負のすくい角を有する工具で硬脆材料を切削加工する際に発生する工作物除去作用」が研削砥石のドレッシングの場合にも発生していると考えられる。

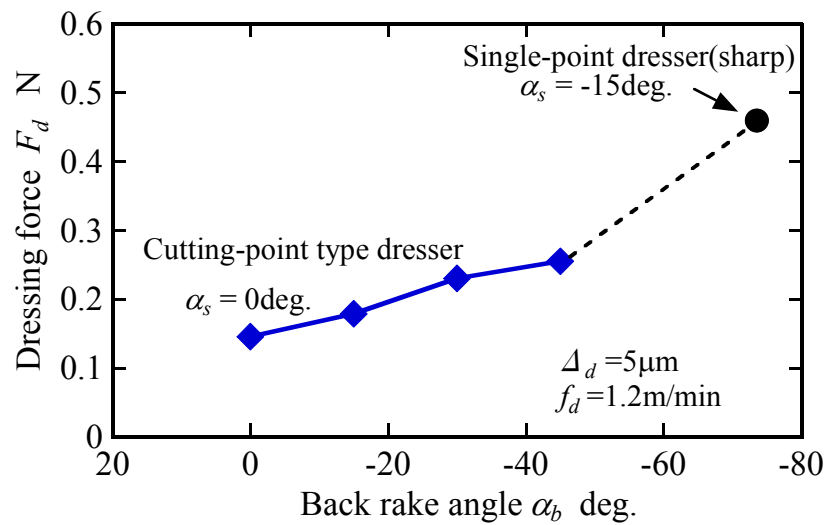


Fig. 5.6 Relationship between back rake angle and dressing force

5.3.2 従来ドレッサとの比較

切削バイト型ドレッサの性能を従来ドレッサと比較するため，5.3.1 項において顕著なマイクロドレッシング効果を示した上すくい角 $\alpha_b = -15^\circ$ ，横すくい角 $\alpha_s = -15^\circ$ （図 5.3）の切削バイト型ドレッサに注目し，ドレッシング抵抗，法線研削抵抗，研削仕上げ面粗さを測定した．

図 5.7 は，式 (5.1) で与えられる理論的砥石削除面積 A_d に対してドレッシング抵抗 F_d をプロットした結果である．円錐形単石ダイヤモンドドレッサを用いて WA 砥石のドレッシング実験を行った中島らが報告¹⁰⁾しているように，ドレッシング抵抗（ドレッシング背分力）は理論的砥石削除面積 A_d に対して単調に増加しているが，比例関係は成立しない．このことは，比ドレッシング抵抗に寸法効果が存在することを意味している．そこで，比研削抵抗の場合について報告されている実験式¹¹⁾と同一の概念を用いて式 (5.2) に示す比ドレッシング抵抗 K_d を導入した．ここで， K_0 は理論的砥石削除面積が $1\mu\text{m}^2$ の時の比ドレッシング抵抗， ε は寸法効果指数である．

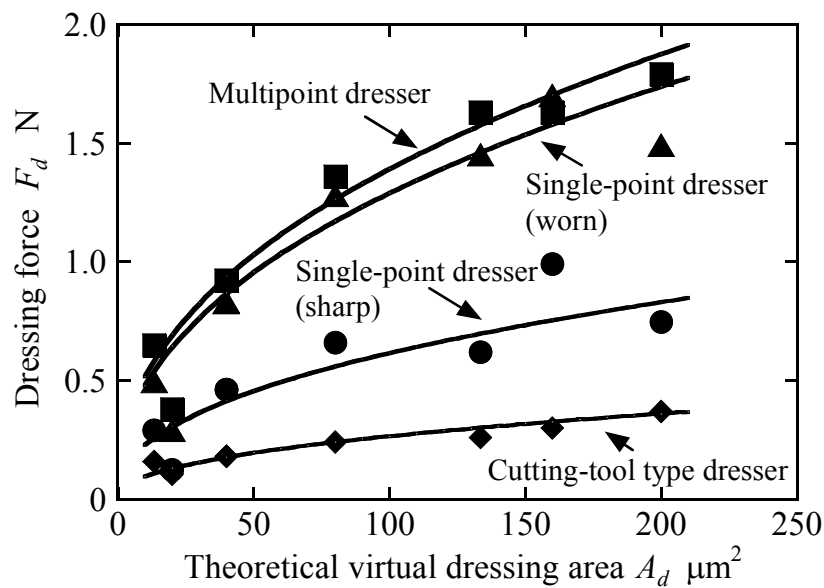


Fig. 5.7 Relationship between theoretical virtual dressing area and dressing force

$$A_d = \Delta_d f_d \quad (5.1)$$

$$K_d = \frac{F_d}{A_d} = K_0 A_d^{-\varepsilon} \quad (5.2)$$

図中の曲線は、式(5.2)を用いてドレッシング抵抗の実験データを理論的砥石削除面積 A_d の関数として近似した曲線である。表 5.2 にそれぞれのドレッサに対する K_0 、 ε の計算結果を示す。いずれのドレッサの場合にも、寸法効果指数として $\varepsilon=0.57$ 程度の値が得られる。ここで、寸法効果指数 ε はドレッサの種類に関わらずほぼ一定であり、工作物である砥石によって決定される値と考えられる。

近似曲線に注目してドレッシング抵抗を比較すると、切削バイト型ドレッサが最も低い値を示し、鋭利単石ダイヤモンドドレッサのほぼ半分の値である。続いて、摩耗単石ダイヤモンドドレッサ、多石ダイヤモンドロータリドレッサの順に大きくなっている。理論的砥石削除面積に対するドレッシング抵抗の変化率についても切削バイト型ドレッサが最小値を示している。

Table 5.2 Specific dressing force

Dresser	K_0 (N μm)	ε
Single-point dresser(sharp)	0.085	0.57
Single-point dresser(worn)	0.178	0.57
Cutting-tool type dresser	0.035	0.56
Multipoint dresser	0.192	0.57

さて、鋭利単石ダイヤモンドドレスサの先端は砥石作業面と点接触している．切削バイト型ドレスサの先端は図 5.1 に示すように $50\mu\text{m}$ の幅を有しているが、実質横すくい角 -15° を与えているため、やはり砥石作業面と点接触している．このように砥石作業面に対する接触状態と理論的砥石削除面積が同一であってもドレッシング抵抗に違いが生ずるのは、図 5.7 に示したように比ドレッシング抵抗が上すくい角の値によって異なるためであると考えられる．

一方、摩耗単石ダイヤモンドドレスサと多石ダイヤモンドロータリドレスサは、図 5.8 に示すように先端に逃げ面を有しており、小径内面研削砥石のドレッシングにおいては、砥石軸の弾性変位による切り残しが発生するため、逃げ面においても接触抵抗が発生する．したがって、ドレッシング抵抗の測定値 F_d は鋭利単石ダイヤモンドドレスサの場合よりも大きくなる．なお、図 5.8 に示した 2 種類のドレスサの逃げ面幅は両者ともほぼ同一の値 ($190\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$) であり、その結果、ほぼ同一のドレッシング抵抗を示したものと考えられる．

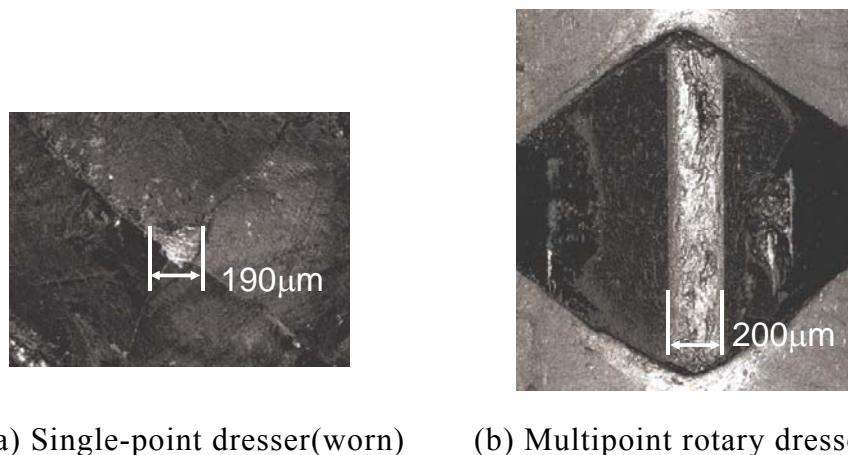
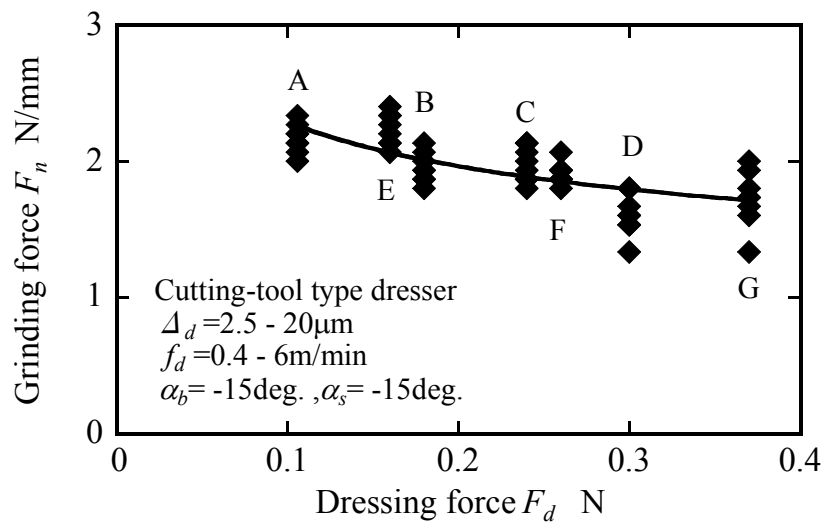
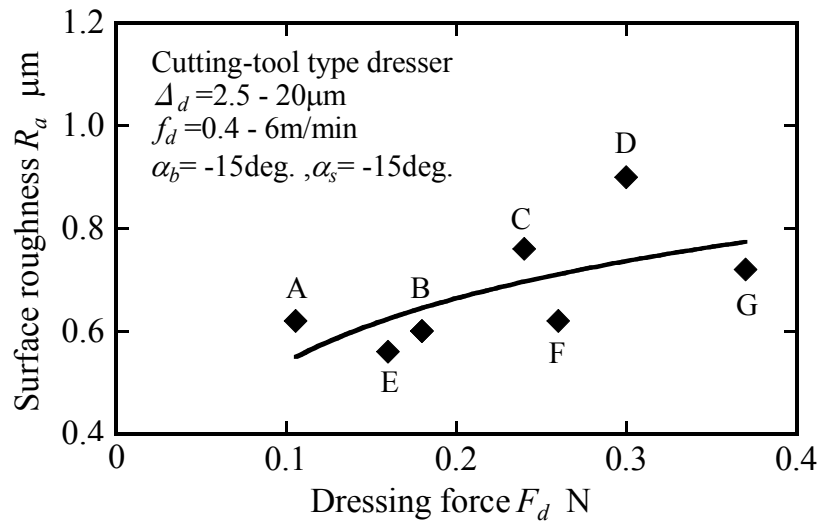


Fig. 5.8 Edge shape of diamond dresser

図 5.9 は、表 5.1 に示す条件で内面プランジ研削を行い、法線研削抵抗 F_n の推移および累積切込み量 0.5mm の時点における研削仕上げ面粗さ R_a をドレッシング抵抗 F_d に対してプロットした結果である。なお、図中に示すアルファベットは、表 5.3 に示す条件でドレッシングを行ったことを意味している。A～D ではドレッサ送り速度を一定 ($f_d = 1.2\text{m/min}$) にしてドレッサ切込み量を変えており、ドレッサ切込み量は A, B, C, D の順に



(a) Grinding force



(b) Grinding surface roughness

Fig. 5.9 Relationship between dressing force and grinding performance

Table 5.3 Dressing conditions

	A	B	C	D	E	F	G
$\Delta_d \text{ } \mu\text{m}$	2.5	5	10	20	5	5	5
$f_d \text{ m/min}$	1.2	1.2	1.2	1.2	0.4	4	6
$A_d \text{ } \mu\text{m}^2$	20	40	80	160	13	133	200

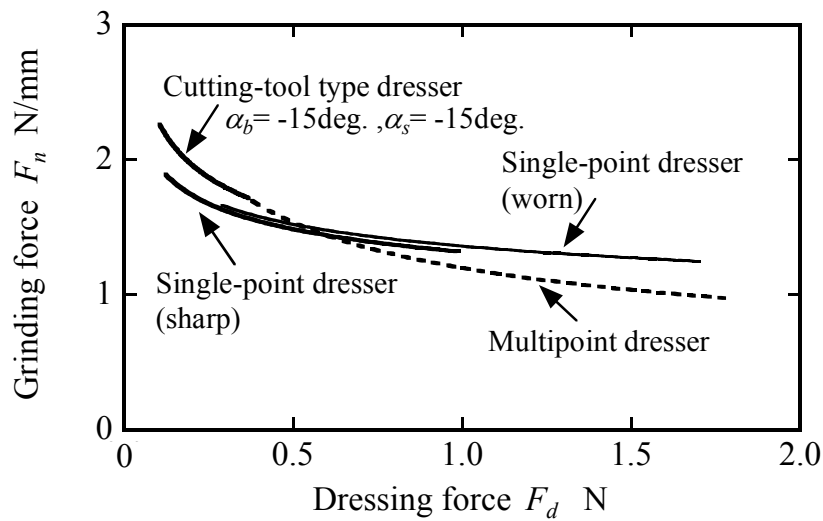
大きくなる．B および E～G ではドレッサ切込み量を一定 ($\Delta_d = 5 \text{ } \mu\text{m}$) にしてドレッサ送り速度を変えており，ドレッサ送り速度は E, B, F, G の順に大きくなる．いずれのドレッシング条件の場合にも法線研削抵抗は累積切込み量の増加にともない単調に増加した．たとえば，図 5.9(a) に示す法線研削抵抗においてドレッシング条件 A の場合，法線研削抵抗は研削開始時の 2.0N/mm から終了時の 2.3N/mm まで増加したことを意味する．

さて，図 5.9 の縦軸に示す研削性能に注目すると，粗いドレッシング条件，すなわち，ドレッサ送り速度が大きいほど，また，ドレッサ切込み量が大きいほど，法線研削抵抗が減少するとともに研削仕上げ面粗さが増加しており，切削バイト型ドレッサは従来のドレッサと同様のドレッシング特性を有していることがわかる．

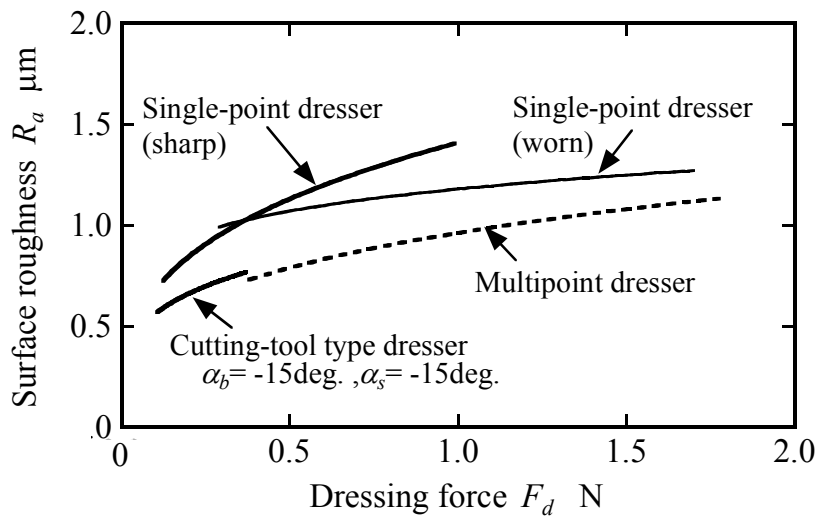
また，図 5.9 の横軸に示すドレッシング抵抗に注目すると，粗いドレッシング条件になるほどドレッシング抵抗が大きくなっている．第 4 章にて，単石ダイヤモンドドレッサ，多石ダイヤモンドロータリドレッサを用いて同様の実験を行い，図 5.9 に示す結果と同様の結果を得ている．そこで，図 5.9 に示すプロット点を図中に示す曲線で近似することにより，従来のドレッサとその研削性能を比較した．

図 5.10 は，切削バイト型ドレッサを含めた 4 種類のドレッサについて表 5.1 に示す条件でドレッシングを行い，その後の研削実験によって得ら

れた研削性能とドレッシング抵抗の関係を曲線で近似した結果である．切削バイト型ドレッサの特徴は，図 5.7 に示したように，従来のドレッサに比べてドレッシング抵抗が小さく，理論的砥石削除面積の変化，すなわちドレッシング条件の変化に対するドレッシング抵抗の変動も小さいことであり，この特徴は図 5.10 にも顕著に現れている．図 5.10 から得られるドレッシング抵抗の変動幅 ΔF_d を 4 種類のドレッサについて求めた結果を表



(a) Grinding force



(b) Grinding surface roughness

Fig. 5.10 Relationship between dressing force and grinding performance

5.4 に示す．切削バイト型ドレッサのドレッシング抵抗の変動幅が最も小さく，従来ドレッサの中で最もドレッシング抵抗が小さい鋭利単石ダイヤモンドドレッサのほぼ 30%であることがわかる．

研削性能に注目すると，切削バイト型ドレッサ ($\alpha_b = -15^\circ$, $\alpha_s = -15^\circ$) が提供する研削性能は多石ダイヤモンドロータリドレッサの延長線上に位置しているが，この位置関係は切削バイト型ドレッサの上すくい角を変えることによって変化するものと考えられる．ここで，図 5.2(b)の結果を参考にするならば，切削バイト型ドレッサの上すくい角を -15° から負の方向に大きくすることによって，研削性能は鋭利単石ダイヤモンドドレッサが提供する領域に近づくことが予想される．すなわち，法線研削抵抗の曲線は右下方に移動し，研削仕上げ面粗さの曲線は右上方に移動することが予想される．

ところで，各種ドレッサに与えたドレッシング条件，すなわち，ドレッサ切込み量とドレッサ送り速度の組み合わせはいずれのドレッサの場合にも同一であるから，図 5.10 に示す研削性能の変動範囲はドレッサの種類によって決定されると考えてよい．たとえば，鋭利単石ダイヤモンドドレッサが提供する法線研削抵抗 F_n は $1.89 \sim 1.32 \text{ N/mm}$ の範囲であるからその

Table 5.4 The range of fluctuation of the grinding performance

Dresser	Δf_d N	Surface roughness ΔR_a μm	Grinding force ΔF_n N/mm
Single-point dresser(sharp)	0.87	0.68	0.57
Single-point dresser(worn)	1.41	0.28	0.40
Cutting-tool type dresser	0.26	0.19	0.53
Multipoint dresser	1.41	0.40	0.72

変動幅 ΔF_n は 0.57N/mm となり, 研削仕上げ面粗さ R_a は 0.72~1.40 μm の範囲であるから変動幅 ΔR_a は 0.68 μm となる. 図 5.10 から得られる研削性能の変動幅を 4 種類のドレッサについて求めた結果を表 5.4 に示す. 研削仕上げ面粗さに注目すると, 変動幅の最も大きいドレッサは鋭利単石ダイヤモンドドレッサであり, 変動幅の最も小さいドレッサは切削バイト型ドレッサであることがわかる. 法線研削抵抗については, 多石ダイヤモンドロータリドレッサの変動幅が最も大きく, 切削バイト型ドレッサの変動幅は鋭利単石ダイヤモンドドレッサとともに中間に位置している.

さて, 従来のドレッシングでは, 作業者がドレッシング条件, すなわち, ドレッサ切込み量とドレッサ送り速度を変化させることによって要求する砥石作業面トポグラフィを生成し, 所定の研削性能を獲得するという概念のもとに行われている. この概念は, ドレッサが提供する研削性能の変動幅を活用することによって作業者が砥石作業面トポグラフィを制御できるという柔軟性を有しているが, 適切なドレッシング条件を選定するためには作業者の知見と経験が必要となる. 一方, 安定した砥石作業面トポグラフィと研削性能を提供するというロバスト性の観点からドレッシングを考えるならば, ドレッシング条件によって砥石作業面トポグラフィが敏感に変化するドレッサは望ましくない. ドレッシング条件の最適化に対する知見や経験を必要としないドレッサはロバスト性に優れたドレッサとみなすこともできる. このような観点から 4 種類のドレッサを比較すると, 変動幅の最も少ない研削仕上げ面粗さを提供するという点では, 切削バイト型ドレッサが優れたロバスト性を有していることがわかる.

5.4 結言

優れた耐摩耗性と耐チップング性を有するバインダレスナノ多結晶ダイヤモンドを素材として，従来の単石ダイヤモンドドレッサの概念とは異なる一定の負のすくい角を有する単刃ダイヤモンドドレッサ，すなわち，切削バイト型ドレッサを試作し，小径内面研削用砥石のドレッシングに適用した．また，横すくい角 -15° ，上すくい角 -15° を有する切削バイト型ドレッサの研削性能を2種類の単石ダイヤモンドドレッサ（鋭利，摩耗）および多石ダイヤモンドロータリドレッサと比較した．得られた結果を以下に示す．

- (1) 単刃ダイヤモンドドレッサの上すくい角を大きな負の値にすることによりドレッシングは延性モードから脆性モードに移行し，延性モードでドレッシングされた砥石作業面にはマイクロドレッシングされた切れ刃が生成される．すなわち，切削バイト型ドレッサの上すくい角を変えることによって砥石作業面トポグラフィを制御することができる．
- (2) 切削バイト型ドレッサのドレッシング抵抗は，従来のダイヤモンドドレッサの中で最も小さい抵抗を示し，鋭利単石ダイヤモンドドレッサのほぼ半分の値である．
- (3) 切削バイト型ドレッサは従来のダイヤモンドドレッサと同様の特性を有しており，ドレッサ切込み量およびドレッサ送り速度を小さくすることによって高い法線研削抵抗と小さな研削仕上げ面粗さを提供する．
- (4) ドレッシング条件の選択範囲が同一の場合，切削バイト型ドレッサが提供する研削仕上げ面粗さの変動幅は従来のダイヤモンドドレッサが提供する変動幅よりも小さく，ドレッシング条件の変化に大きく左

右されない研削仕上げ面粗さを提供するという意味でロバスト性に優れている.

参考文献

- 1) H. Niiya: Truing and dressing in internal grinding, Mechanical Engineering, 45, 12 (1997) 43.
- 2) K. Yamauchi, J. Takagi, H. Ohzeki and H. Ishigami: Study on Internal Grinding of Small Bore -2nd Report: Influence of dressing conditions on grinding performance-, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 45, 9 (2001) 437.
- 3) S. Tsukamoto, T. Teraoka and T. Nakajima: Generation mechanism of ground surface profile in oscillation internal grinding and optimizing oscillation under considering profile errors, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 46, 8 (2002) 407.
- 4) H. Hasegawa, Y. Koyama, R. Miyake, K. Ohashi, S. Tsukamoto, F. Kano, H. Morita and T. Kuroe: Fundamental study of high accuracy truing of a small-diameter quill with shoe support 1st report: Deflection behavior of the quill, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 53, 9 (2009) 566.
- 5) Y. Wu, M. Nomura, M. Kato and T. Tachibana: Study of internal ultrasonic vibration assisted grinding of small holes, -Construction of ultrasonic vibration spindle and its fundamental performances-, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 47, 10 (2003) 550.
- 6) Y. Ichida, R. Sato and J. Akbari: Formation mechanism of cutting edges in micro dressing of cBN vitrified bonded wheels, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 53, 4 (2009) 236.
- 7) Y. Kita, M. Ido and N. Kawasaki: A study on the cutting mechanism with large negative rake angle, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 44, 9 (1978) 1099.
- 8) Y. Ohbuchi, T. Matsuo and T. Okamura: Single-grit orthogonal cutting with shaped superabrasive grains -1st Report Force and friction angle-, J. Jpn. Soc.

Precis. Eng., 59, 7 (1993) 1175.

- 9) J. Yan, K. Syoji and T. Kuriyagawa: Ductile-Brittle Transition at Large Negative Tool Rake Angles, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 66, 7 (2000) 1130.
- 10) T. Nakajima, Y. Uno and T. Tachibana: Some problems in single point diamond dressing – Effect of dresser wear and dressing condition on grinding results -, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 34, 1 (1990) 21.
- 11) 小野浩二：研削仕上一理論とその応用一，槇書店, (1962)21.

用語説明

*1 自生発刃

砥粒が砥石から少々突き出しているとしても高速回転させて工作物を研削していると磨耗していく。このとき、砥粒と加工対象との間では砥粒の一部が微小破砕を引き起こして、より鋭い面が先端に出てくる現象とともに切りくずによって砥粒を固定しているボンドが少しずつ削られていく。砥粒は理論上満遍なく砥石のなかにまぶしてあるが完全に均等に並んでいるわけではない。上の砥粒が破砕し、磨耗すると同時に役目を終えると、砥粒やその周辺のボンドが削られて下から新しい砥粒が頭を出してくる。これが自生作用で、砥石で物が削れるのは研削点では常にこうした現象が起きているからである。

第 6 章

総括

小径内面研削加工を必要とする機械要素は、ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズルやハードディスクドライブのミニチュア玉軸受に代表されるように、広範囲の製造業において使用されている。これらの機械要素を高能率・高精度に製造することは工業製品の性能の高精度化と高機能化を促進し、結果として製造コストや消費エネルギーの低減をもたらす。たとえば玉軸受の場合、高精度な寸法とともに摺り合わせ部における低い摩擦抵抗が要求されており、これらの性能が玉軸受の耐摩耗性と使用寿命を決定する。

さて、研削加工においては、研削性能、特に、研削抵抗と研削仕上げ面粗さが、加工初期および加工中において変動せず安定した値を維持することが重要であり、そのような要求を満たす砥石作業面をドレッシングによって生成しなければならない。

また、小径内面研削用軸付き砥石（研削クイル）を深穴内面研削に適用する場合には研削クイルをアスペクト比の大きな形状にせざるをえないため、研削クイルの先端に作用するドレッシング抵抗あるいは研削抵抗によって研削クイルが弾性変形し、工作物の形状精度の劣化をもたらすことになる。したがって、研削クイルの弾性変形を抑制するためにドレッシング抵抗を小さくすることも重要である。

このような観点から、研削クイルのドレッシングに従来使用されている

単石ダイヤモンドドレッサの特徴に注目すると、1) 切削工具の切れ刃に相当するドレッサ先端の形状が不定であるとともに、ダイヤモンドの摩耗によるドレッサ先端形状の変化が大きいため、安定した研削性能を提供できていないこと、2) 切削加工においてその性能（切削抵抗、切削面粗さ）を決定する重要なパラメータであるすくい角の概念が存在しないため、ドレッシング性能を制御あるいは最適化することが困難である、という問題点が浮上してくる。

本研究の目的は、小径内面研削加工において、低いドレッシング抵抗および安定した研削性能（研削抵抗、研削仕上げ面粗さ）を提供する単石ダイヤモンドドレッサを開発することにある。得られた成果を以下に示す。

はじめに、ドレッサの材質に関してドレッサ形状を維持するための耐摩耗、耐チッピング性に優れることが必要であることから、各種ドレッサ材料の摩耗特性評価を行い、グラファイトを出発物質とした超高压高温下での直接変換法により作製したナノ多結晶ダイヤモンドが最も優れていることを示した。

次に、研削砥石のドレッシングプロセスをモニタリングするため、ドレッシング抵抗の測定方法を開発した。開発したドレッシング抵抗測定方法により従来から用いられる単石ダイヤモンドドレッサ、多石ダイヤモンドロータリドレッサを使用してドレッシング特性を評価した結果、ドレッサ先端形状を鋭利に維持することが重要であることを明らかにした。

一方、従来のダイヤモンドドレッサの切れ刃形状は切削工具のすくい角に相当する概念を有していない。ドレッシングを研削砥石の機械加工と考えると、切削バイトのすくい角が切削性能を支配するようにダイヤモンドドレッサのすくい角もまたドレッシング性能を支配すると考え、一定のすくい角を有する切削バイト型の単刃ダイヤモンドドレッサを開発し、すく

い角に対するドレッシング性能評価を実施した。切削バイト型の単刃ダイヤモンドドレッサの上すくい角を負の方向に大きくすることによりドレッシングは延性モードから脆性モードに移行すること、延性モードでドレッシングされた砥石作業面にはマイクロドレッシングされた切れ刃が生成されることを明らかにした。また、切削バイト型のドレッサは従来のダイヤモンドドレッサと同様の特性を有していること、ドレッシング条件の選択範囲が同一の場合、ドレッシング条件の変化に大きく左右されない研削面粗さを提供するという意味でロバスト性に優れていることを明らかにした。

以上の結果より、耐摩耗性の高いナノ多結晶ダイヤモンドを用い、従来のドレッシングには無かったすくい角の概念が適用できる切削バイト型ドレッサを小径内面加工用研削砥石に適用することにより、安定したドレッシング条件、および研削砥石での研削性能が得られることを見出した。

本研究で得られた結果を以下に要約する。

第2章では、小径内面研削用砥石のドレッシングにおける課題を抽出し、課題を解決するために必要な技術の整理を行った。その結果、ドレッサ摩耗進行の抑制が可能な高耐摩耗性を有する素材を用い、切削加工条件の重要因子である「すくい角」の概念をドレッシングに導入することにより、硬脆複合材料である砥石の加工モードを制御できる可能性を提案した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 従来の単石ダイヤモンドドレッサの上すくい角（砥石の回転方向に対するすくい角）は $-40^{\circ} \sim -70^{\circ}$ に分布しており、平均は -58.5° である。
- (2) 従来の単石ダイヤモンドドレッサの横すくい角（ドレッサ送り方向に対するすくい角）は $+30^{\circ} \sim -80^{\circ}$ の広範囲に分布している。

第3章では、ドレッサ先端の形状を維持するために必要な各種ダイヤモンドドレッサの摩耗特性を超硬合金への切削加工を行うことにより評価した。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 切れ刃すくい角を -30° にすることによって超硬合金の延性モード切削を実現するとともに切れ刃すくい面の摩耗面積を最小にすることができる。
- (2) 単結晶ダイヤモンドバイトの場合、切れ刃の摩耗形態はすくい面および逃げ面を構成する結晶面に大きく依存し異方性を有する。たとえば(111)面にせん断力が発生するような切れ刃形状あるいは切削条件の場合、(111)面に劈開が誘発される。
- (3) 多結晶ダイヤモンドでは、グラファイトの直接変換焼結により生成したナノ多結晶ダイヤモンドがPCDダイヤモンド、CVDダイヤモンドと比較して優れた耐摩耗性を示す。また、連続切削においては、ナノ多結晶ダイヤモンドバイトはすくい面に(100)面あるいは(110)面を配置した単結晶ダイヤモンドバイトよりも優れた耐摩耗性を有する。

第4章では、切削加工の切削抵抗に相当するドレッシングでのドレッシング抵抗の評価方法を確立し、従来の単石ダイヤモンドドレッサ、多石ダイヤモンドロータリドレッサを用いてドレッシング特性評価を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 法線方向ドレッシング抵抗と研削性能の間には明確な相関関係が存在する。すなわち、ドレッシング抵抗が大きくなると法線方向研削抵抗は減少し、研削仕上げ面粗さは増加する。
- (2) 単石ダイヤモンドドレッサを用いた場合、先端の鋭利なドレッサのドレッシング抵抗は先端の摩耗したドレッサを用いた場合のほぼ半分の

値を示すが、先端の摩耗したドレッサと同範囲の研削性能を示す。

- (3) 単石ダイヤモンドドレッサ，多石ダイヤモンドロータリドレッサのいずれともその力学的ドレッシング作用はドレッサを構成しているダイヤモンド粒先端の形状によって決定される．したがって，ダイヤモンド粒先端の摩耗幅が同一であるならばほぼ同一の研削性能が得られる．

第5章では，小径内面研削用砥石のダイヤモンドドレッサとして「切削バイト型ドレッサ」を開発，試作し，ドレッシング性能に及ぼすすくい角の影響を解明するとともに，提供する研削性能を評価した．その結果，以下のことが明らかとなった．

- (1) 単刃ダイヤモンドドレッサの上すくい角を大きな負の値にすることによりドレッシングは延性モードから脆性モードに移行し，延性モードでドレッシングされた砥石作業面にはマイクロドレッシングされた切れ刃が生成される．すなわち，切削バイト型ドレッサの上すくい角を変えることによって砥石作業面トポグラフィを制御することができる．
- (2) 切削バイト型ドレッサのドレッシング抵抗は，従来のダイヤモンドドレッサの中で最も小さい抵抗を示し，鋭利な単石ダイヤモンドドレッサのほぼ半分の値である．また，ドレッサ切込み量およびドレッサ送り速度を小さくすることによって高い法線研削抵抗と小さな研削仕上げ面粗さを提供する．
- (3) ドレッシング条件の選択範囲が同一の場合，切削バイト型ドレッサが提供する研削仕上げ面粗さの変動幅は従来のダイヤモンドドレッサが提供する変動幅よりも小さく，ドレッシング条件の変化に大きく左

右されない研削仕上げ面粗さを提供するという意味でロバスト性に優れている。

以上のように、耐摩耗性の高いナノ多結晶ダイヤモンドドレッサを用いることにより、低ドレッシング抵抗を維持し刃先形状を維持できることが明らかにされた。また、研削砥石へのドレッシングに従来のダイヤモンドドレッサでは提供できないすくい角の概念を導入可能な切削バイト型ドレッサを開発し、上すくい角の変化に対してドレッシング時の延性、脆性モードへの遷移すること、すなわちすくい角を選択することにより砥石作業面のトポグラフィが制御でき、ロバスト性の高い研削砥石が得られることが提案された。本研究では、WA 砥石に対しての検討を進めてきたが、本手法は超砥粒電着砥石にも横展開が可能な手法であると考えられ、高能率かつ高精度ドレッシング実現のための重要な部分が解明されたものと考えられる。

本研究の工学的意義は、単石ダイヤモンドドレッサの形状評価パラメータとしてすくい角という概念を導入し、単石ダイヤモンドドレッサによる研削砥石のドレッシングを「一定の切れ刃すくい角を有する切削バイトによる硬脆材料の機械加工」とみなすことによって、砥石作業面に形成される砥粒切れ刃の形態に及ぼす切れ刃すくい角の影響を明らかにした点にある。また、本研究の工業的意義は、1) 耐摩耗性に優れたナノ多結晶ダイヤモンドを素材とすることによって一定のすくい角を有する単石ダイヤモンドドレッサ、すなわち、切削バイト型ドレッサを開発した点、2) 切削バイト型ドレッサは従来の単石ダイヤモンドドレッサの約半分のドレッシング抵抗を提供するとともにロバスト性に優れた研削性能（研削抵抗・研削仕上げ面粗さ）を提供することを明らかにした点にある。

本研究に関する論文および口頭発表

1. 論文

- (1) Yasushi Mochida, Akihiko Kubo, Jun'ichi Tamaki and Takao Nishioka :
Estimation of grinding wheel performance by dressing force measurement,
Advanced Materials Research, 76-78, (2009)155-160 (2009 年 9 月)
- (2) Yasushi Mochida, Takao Nishioka, Akihiko Kubo and Jun'ichi Tamaki :
Evaluation of diamond dresser and estimation of grinding performance by
means of dressing measurement, Int. J. Abrasive Technology, 3, 1
(2010)37-50 (2010 年 3 月)
- (3) Akihiko Kubo, Yasushi Mochida, Jun'ichi Tamaki, Katsuko Harano, Hitoshi
Sumiya and A.M.M. Sharif Ullah : Wear characteristics of various diamond
tools in cutting of tungsten carbide, Advanced Materials Research, 325,
(2011)153-158 (2011 年 9 月)
- (4) 久保明彦, 餅田恭志, 田牧純一, 原野佳津子, 角谷均, シャリフ ウ
ラ : 超硬合金切削における各種ダイヤモンドバイトの摩耗特性, 砥粒
加工学会誌, 55, 10 (2011)593-600 (2011 年 10 月)
- (5) 餅田恭志, 久保明彦, 田牧純一, 原野佳津子, 角谷均, シャリフ ウ
ラ : 切れ刃すくい角に注目して開発した単刃ダイヤモンドドレッサの
性能, 砥粒加工学会誌, (校閲終了, 掲載待ち)

2. 口頭発表

- (1) 餅田恭志, 久保明彦, 角谷均, 田牧純一 : ドレッシング抵抗の測定による各種ダイヤモンドドレッサの性能評価, 2009 年度砥粒加工学会学術講演会 (2009 年 9 月)
- (2) 久保明彦, 田牧純一, シャリフ ウラ, 餅田恭志, 原野佳津子, 角谷均 : 超硬合金切削における各種ダイヤモンド工具の摩耗特性の評価 2010 年度砥粒加工学会学術講演会 (2010 年 8 月)
- (3) 久保明彦, 餅田恭志, 田牧純一, 原野佳津子, 角谷均, シャリフ ウラ : 切削バイトの概念に基づく単石ダイヤモンドドレッサの開発, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会 (2011 年 9 月)
- (4) Yasushi Mochida, Akihiko Kubo, Jun'ichi Tamaki and Takao Nishioka : Estimation of grinding wheel performance by dressing force measurement, 12th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Australia, 2009 (2009 年 9 月)
- (5) Akihiko Kubo, Yasushi Mochida, Jun'ichi Tamaki, Katsuko Harano, Hitoshi Sumiya and A.M.M. Sharif Ullah : Wear characteristics of various diamond tools in cutting of tungsten carbide, 14th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Germany, 2011 (2011 年 9 月)

謝辞

本論文は，国立大学法人北見工業大学機械工学科田牧純一教授の懇情な
るご指導のもと完成させたものであります．ここに心より厚く感謝の意を
表します．本論文を審査いただくにあたり，北見工業大学機械工学科尾崎
義治教授，大橋鉄也教授，ウラシャリフ准教授，北見工業大学マテリアル
工学科阿部良夫教授，平賀啓二郎教授には適切なご助言とご教示をいただ
きました．心より御礼申し上げます．また，機械工学科マイクロ・ナノ加
工学研究室久保明彦助教の多大なご協力があり誠に感謝しております．

本研究を行うにあたり，研究のきっかけを作ってくださり，有益なご助
言を賜りました住友電気工業(株)アドバンストマテリアル研究所西岡隆夫
博士に感謝申し上げます．本研究を進めるにあたり，材料等の便宜に加え，
ご指導を賜りました同研究所角谷均博士をはじめ，同研究所無機材料研究
部の皆様に御礼申し上げます．

また，職場において研究の環境を整えていただいた同社エレクトロニク
ス・材料研究所の皆様には多大なるご協力とご理解をいただき厚く御礼申
し上げます．

2012 年 9 月