



超砥粒による単粒二次元切削 (第2報)*

—金属切削時における超砥粒の摩擦特性—

大 淵 慶 史** 松 尾 哲 夫***

Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped Superabrasive Grains (2nd Report)
-Friction Behavior of Superabrasive Tools in Metal Cutting-
Yoshifumi OHBUCHI and Tetsuo MATSUO

There are great differences in ground surface integrity and residual stress between CBN and diamond wheels. In our single-grit cutting, the measured cutting forces with CBN and diamond grains were largely different. For further understanding of the difference, friction behavior in cutting is most important characteristic to be solved. So, orthogonal cutting test has been performed to measure friction angle on a carbon steel with CBN, diamond compax, and grain tools. And, the cutting test in SEM was also performed to observe chip formation. There are no differences between friction angles of CBN and diamond tools in ordinary cutting test. However, there is great difference in slow and short distance cutting test. Diamond tools showed significantly small friction angle at about first cutting of 1mm. In the cutting in SEM, the diamond compax and grain tool show a large shear angle and flow type chip, while CBN compax and grain tool show small shear angle with shear type chip. Therefore, diamond tool keeps a small friction coefficient during short cutting distance, and the phenomenon was shown in high speed single grit cutting test.

Key words : friction behavior, CBN, diamond, orthogonal cutting

1. 緒 言

現在、超砥粒ホイールは強い関心が持たれており、超砥粒によって加工された材料表面に発生する圧縮残留応力が注目されその発生機構についても明らかにされてきている¹⁾。また、ダイヤモンドは鉄系材料に対しては化学反応をおこし異常摩耗するために不向きであるとされてきたが^{2,3)}、高強度でも炭素含有量の多い材料に対してはダイヤモンドの摩耗は少ないことも明らかにされており⁴⁾、最近では軸受鋼や工具鋼の研削にダイヤモンドホイールを使用し、高い圧縮残留応力を積極的に得ようとする試みもなされている⁵⁾。

これまでに著者らは、砥粒による複雑な切りくず生成状態を単純化して現象を把握するために成形単粒を用いた大きな負のすくい角による二次元切削実験を行い、鋼材の研削加工におけるCBNとダイヤモンド砥粒の研削機構の違いについて明らかにしてきた^{6,7)}。その結果CBNとダイヤモンド砥粒による切削抵抗や切りくず生成状態が大きく異なることが明らかになり、それは両砥粒の摩擦係数の大きな違いに起因すると考えられた。

摩擦試験の結果⁸⁾によればダイヤモンドの摩擦係数はCBNに比べて非常に小さいことが分かっており、例えばアルミニウム等の軟質非鉄金属の超精密切削における単結晶ダイヤモンド切削工具では非常に小さな摩擦角と大きなせん断角での切削が可能であることは広く知られている。しかし一方ではダイヤモンド工具による金属材料の切削において大きな摩擦角が測定されたという報告⁹⁾も多くあるため、これらの違いの生じる原因を明らかにすると共に、研削現象の解明に対して適用することが可能な信頼性のある摩擦特性値を求めておく必要がある。しかし鋼材に対してのダイヤモンド工具の摩耗に関する報告は多いが、研削加工における超砥粒の摩擦特性はいまだ明らかでない。

そこで本報では実際に超砥粒工具で金属材料を切削した場合

のすくい面の摩擦特性を調べるため、滞留層の発生しない範囲の通常すくい角による二次元切削での摩擦角を測定した。また切りくず生成過程を詳細に観察し、ダイヤモンドとCBNによる切削加工時のすくい面の摩擦特性の違いを明らかにした。

2. ダイヤモンドの摩擦特性

ダイヤモンドは高い強度と耐摩耗性によりセラミックス、ガラス材料の切削・研削に広く使用されているが、それらの材料は加工現象としてぜい性破壊が主な対象となるため加工時の摩擦特性について論じられることは少なく、ダイヤモンドの摩擦特性に関しての数多くの報告は¹⁰⁾ほとんどが摩擦試験の範囲にとどまっている。これまでに明らかにされているダイヤモンドの摩擦特性を以下に簡単にまとめておく。

ダイヤモンド同士の摩擦係数は非常に小さく、0.05~0.1程度であることが数多くの実験データより明らかにされている¹⁰⁾。また、pin-on-disk方式の摩擦試験では鋼材に対する摩擦係数はCBNでは他の砥粒材料と同程度の値(0.4程度)であるが、ダイヤモンドは摩擦開始時の0.3程度から摩擦距離の増加と共に急激に低下し、0.08程度に落ちつくことがわかっている⁹⁾。

ダイヤモンドの摩擦特性を変化させる要因として、(a) 荷重、(b) 繰返し回数、(c) 雰囲気挙げられる。ダイヤモンド同士の摩擦係数は荷重に依存し高荷重の下では摩擦係数は増加する。また、空気中での摩擦係数は0.1程度であるが、真空中では1に近い値を示し、空気中で放置した試料は初期の摩擦係数は小さいが、繰返し回数を増すごとに1に近づく¹⁰⁾。これは表面の不純物の層が摩擦に影響しているためであると言われている。森ら⁹⁾は超精密加工における工具と被削材の固体表面原子間の結合力に注目し、表面の吸着層や酸化層の影響がない超高真空中での表面原子間力に基づく相互作用力と切削における摩擦係数と比較しているが、真空中でのダイヤモンドによる金属切削ではFeで0.30、Alで0.36の摩擦係数が得られている。

3. 実験方法

* 原稿受付 平成8年4月1日

** 正会員 熊本大学大学院自然科学研究科(熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 熊本大学工学部

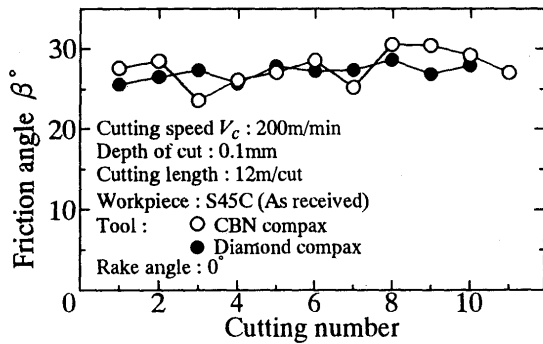


Fig.1 Friction angle in cutting S45C steel with CBN and diamond

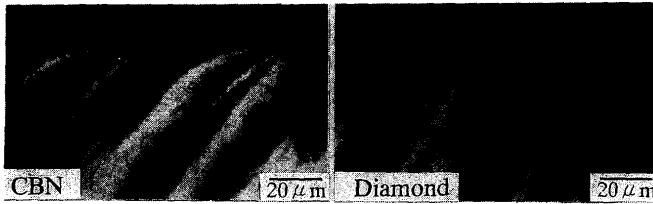


Fig.2 Cross section of S45C steel chip

今回使用した工具は、前報と同様のCBNとダイヤモンド(MSD)砥粒のほかCBNとダイヤモンドのコンパクス工具で、すくい角 γ を $0 \sim -10^\circ$ に成形したものである。被削材はS45C生材と比較のために純アルミニウムも一部使用した。実験は、①旋盤による二次元切削、②フライス盤による低速二次元切削、③SEM内二次元切削、および④高速単粒二次元切削の4種である。測定は①、②、④については切削抵抗を測定し摩擦角を求めた。また③では切りくず生成状態を観察することにより摩擦状態を推測した。実験①、②については切りくずの回収を行い樹脂で固め、断面を腐食し光学顕微鏡で観察した。

4. 実験結果と考察

4.1 旋盤による二次元切削

図1に旋盤における結果を示す。これによると摩擦試験の報告⁹⁾とは大きく異なり、CBNとダイヤモンドはほとんど同じ摩擦角を示し、切削距離や回数の増加に対してほとんど変化しない。また切削抵抗やせん断角も同程度の値で切りくず形状にも差はみられなかった。なお、得られた摩擦角の値は摩擦係数換算で0.5程度であり、CBNでも摩擦試験の結果より若干大きい値を示したが、使用した工具は欠け防止のため $10 \mu\text{m}$ 程度の刃先丸味が付けられており、この部分での上滑りが背分力を増大させたと考えられる。この結果より鋼材切削時のダイヤモンドの摩擦は決して小さいものではなく、むしろ真空中での切削実験結果⁹⁾に近い値となり、摩擦試験の結果から予想される低摩擦によるせん断角の増加や切削抵抗の低下は期待できないことが分かった。この時の切りくずの断面写真を図2に示す。切りくず内部の変形状態を見ても両工具間に明確な差は見られず、いずれもすくい面付近での大きなせん断変形が観察され切りくず流出の際に大きな摩擦力が作用していることが明らかである。

次に、ダイヤモンドによる切削が非常に有利とされている純アルミニウムの切削実験結果を図3に、同切りくず断面を図4に示す。使用した工具は鋼材に使用したものと同一である。この場合は両工具による β, ϕ の差は明らかであり、CBNでは超硬等の他の工具による切削におけるものと同程度の値を示している。ダイヤモンドでは真空中での切削の結果⁹⁾とは異なり切削開始直後から非常に小さな摩擦角の値を示した。また、測

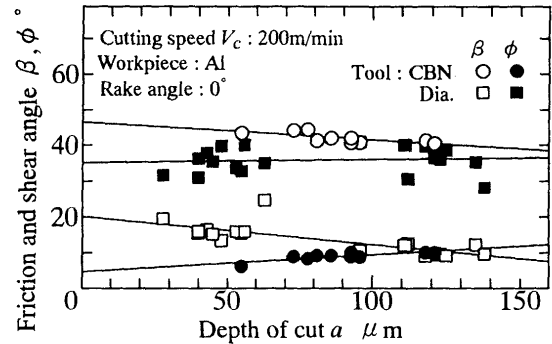


Fig.3 Friction and shear angle in cutting aluminum

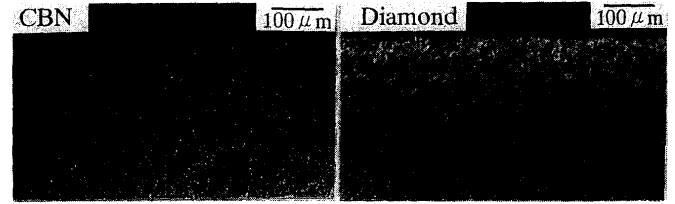


Fig.4 Cross section of aluminum chip

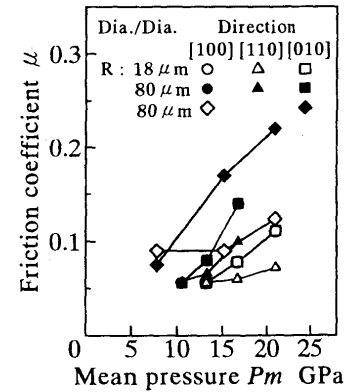
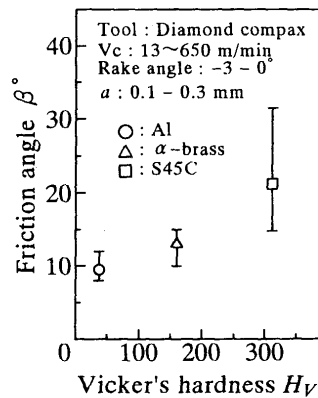


Fig.5 Hardness vs. friction angle Fig.6 Friction coefficient vs. pressure

定されたせん断角や切削抵抗に関してもダイヤモンド工具が有利であることが分かった。切りくず断面は腐食が困難な材料であるために分かりにくいだが、CBN工具による切削ではすくい面近傍での大きなせん断変形が観察される。これに対しダイヤモンド工具による切削ではこの変形は見られず、切りくずの流出時に二次変形をほとんど起こさずにすくい面上を滑っていることが分かる。以上の結果より、切削時のダイヤモンドの摩擦特性は対する材料によって大きく変化することが明らかである。

ここで炭素鋼と純アルミニウムの最も顕著な違いの一つとして材料強度が挙げられる。例えばビッカース硬さが10倍程度の違いがある。図5は本実験およびはUedaら¹¹⁾の切削実験結果より摩擦角を硬さに対してプロットしたものであるが、明らかに硬さが増加するにつれて摩擦角も増加している。このことに関連すると考えられるのは2節 (a) の荷重についてであるが、この点についてはEnomotoら¹²⁾が摩擦試験において針形状と荷重を変化させて実験している。この結果を基にHertzの接触応力の式¹³⁾から求めた平均面圧と摩擦係数の関係を図6に示す。荷重が増加すると明らかに摩擦係数は増大し異方性が顕著に現れてくるが、その値は極めて高圧においてであり、ダイヤモンドの理論強度の10%程度に相当する。実際の切削において、すくい面の面圧を試算すると炭素鋼切削時でさえも数GPa程度であるため、その領域でダイヤモンドの摩擦特性が荷重に対して依存性を示すとは考えにくい。

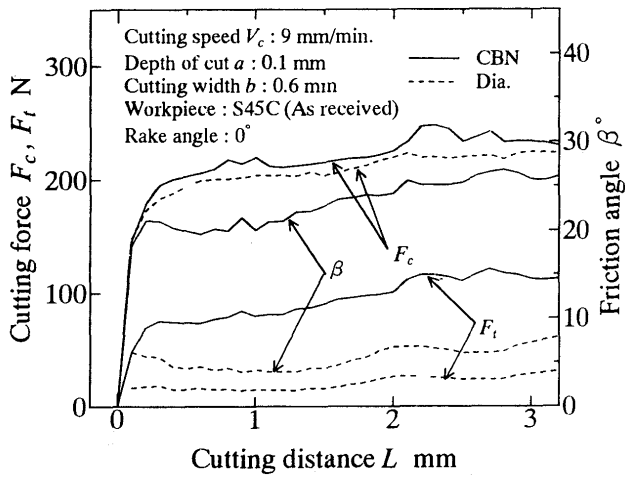


Fig.7 Cutting forces and friction angle with CBN and diamond compax

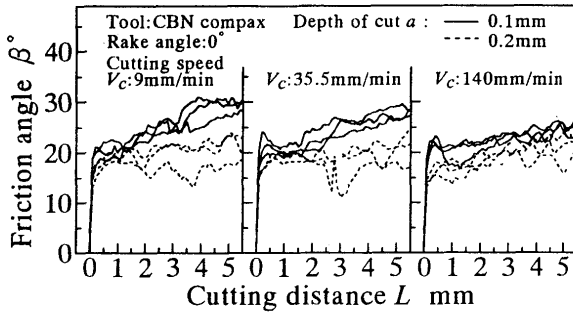


Fig.8 Cutting distance vs. friction angle with CBN compax

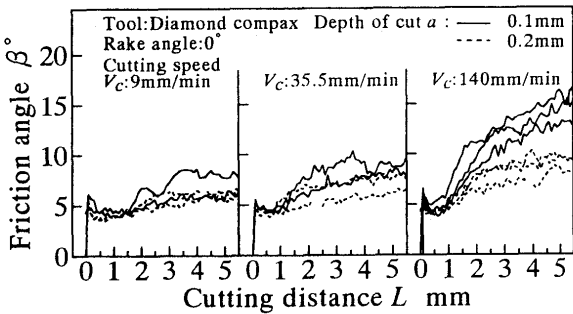


Fig.9 Cutting distance vs. friction angle with diamond compax

4.2 低速二次元切削実験

次に、2節 (b),(c) で挙げたダイヤモンドの摩擦の繰返し回数と雰囲気による摩擦係数の変化に注目する。空気中で放置した試料は初期の摩擦係数は小さいが、真空中で繰返し回数を増すごとに1に近づく。切削時においてはすくい面は切りくずにより空気と隔離された状態にあるため、切削距離が長くなると摩擦係数が変化する可能性がある。そこで、フライス盤の主軸上下送りを利用し低速二次元切削実験を行った。動力計に取り付けた工具をテーブル上に水平に固定しテーブル送りにより切込みを設定、主軸に取り付けたジグに被削材をセットし主軸ヘッドの下方送りで行う。より正確に摩擦角を評価するために先端を特に鋭利に成形（先端丸味 $3\mu\text{m}$ 以下）したコンパクス工具を使用した。また実際の砥粒による確認のため、前報⁷⁾と同じ方法で成形した単粒も使用した。図7にコンパクス工具による結果を示す。ここで F_c は主分力、 F_t は背分力を示す。図から明らかなように、CBN工具においては切削開始からわずかの距離で摩擦角は一定になり、その後の切削中は切削距離の増加と共にわずかに増大するのみである。一方、本実験におけるダイヤモンド工具による切削では、摩擦角は非常に

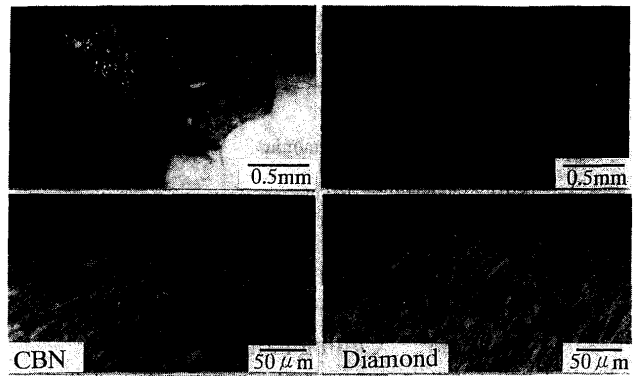


Fig.10 Chip shape and cross section

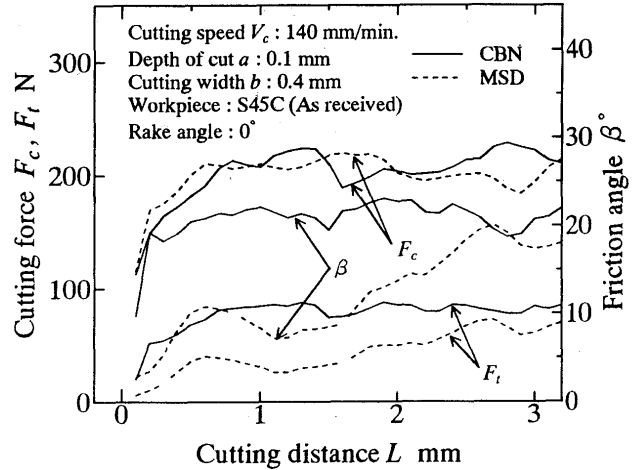


Fig.11 Cutting forces and friction angle with CBN and diamond grains

小さい値を示した。

図8,9にはコンパクス工具により異なる3種類の切削速度で切削を繰返し5回程度行ったときの摩擦角の変化を示している。CBNの場合は切削速度、切込みによらずほぼ切削開始直後より 20° 前後の値を保持している。また切削速度の影響もほとんど見られない。切込みが大きい場合の方が、摩擦角の値がわずかに小さいのは刃先丸味の背分力に及ぼす影響であろう。一方ダイヤモンドの場合は、いずれの切削速度においても切削開始から1mm程度のところまでは 5° （摩擦係数換算0.08）程度の値を保持し、その後切削距離の増加と共に増大していく傾向を示している。1mm程度の切削後の摩擦角の増大は切削速度が大きいほど増加の割合が大きい。一旦切削を終了し再び次の切削を行っても同じ傾向を繰返していることから、工具が空气中にさらされた後に低摩擦が回復していることが明らかである。また切込みが大きいほど増加の割合は小さいが、これは先端丸味にも関係するものと思われる。なお摩擦角の増大する変化の状態のばらつきは大きい、これは切削終了時から次の切削にはいるまでの工具すくい面のさらされる環境や履歴を再現性を持ってコントロールできなかったためと理解される。

図10に典型的な切りくずおよびその断面写真を示す。CBN工具による切削では、切りくず形状はせん断型ですくい面近傍では非常に大きなせん断変形が観察される。一方、ダイヤモンドによる切削の場合は流れ型切りくずであり、すくい面付近のせん断による二次変形は非常に小さいことが分かり、実際に切削時の摩擦が小さく作用していることが明らかである。

図11には成形した単粒工具による結果を示す。この場合も摩擦角の変化の状態はコンパクス工具と同様の傾向を示しているが、ダイヤモンド砥粒では値としては大きなものになってい

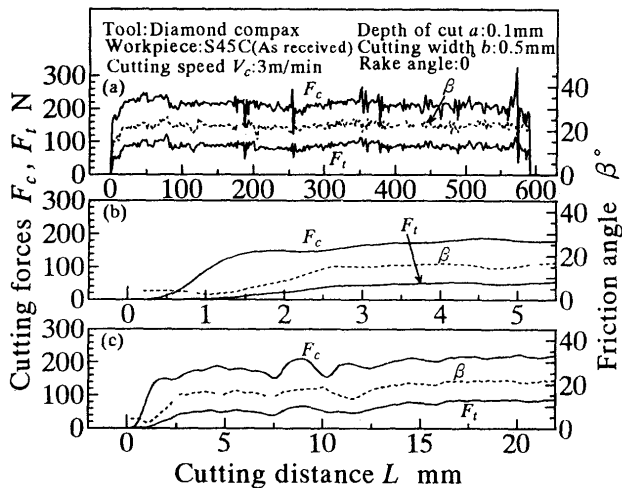


Fig.12 Change of friction angle with cutting distance

る。すくい角 0° の切削を可能にするためには、頂角を 90° 以下に成形する必要がある。今回、単粒の成形には#200のレジソボンドダイヤモンドホイールを使用した。ダイヤモンド砥粒の成形の場合は同じ材料同士での加工となるためCBNに比べ刃先を鋭利に仕上げることが非常に難しく、 $10\mu\text{m}$ 程度のチップングの発生が避けられなかった。また使用した#12の単粒では成形されたすくい面長さは $300\sim 500\mu\text{m}$ 程度であり、切込みは $100\mu\text{m}$ 程度に抑える必要があったため、切込みに対して無視できない規模の刃先のチップングが背分力を増大させたと考えられ、その点を考慮に入ればコンパクス工具と同様の現象が起こっているといえる。

図12はダイヤモンドコンパクス工具を用い、旋削により更に大きな切削速度と切削距離を与えた場合のデータである。(a)では切削距離600mm全体にわたって摩擦角は 22° 程度を保っているように見えるが、実際は(b)に見られるように、前述の実験結果と同じく切削開始から約1mmは非常に小さい値($3\sim 4^\circ$)を示し、その後から徐々に増加し始め、(c)のように切削距離20mm程度まで上昇を続けた後に定常値になる。

以上の結果より、ダイヤモンド工具による鋼材の切削では切削開始時には非常に小さい摩擦係数を示すが、切削距離の増加と共に摩擦係数が増大することが分かった。その原因は低摩擦を実現させるすくい面の不純物等による層が切削時の高い面圧での摩擦によって取り去られるためと考えられる。切削抵抗が小さい純アルミニウム等の軟質材料ではすくい面の面圧が非常に低いため、切削距離の増加にかかわらず不純物層が取り去られず低摩擦状態が持続し、良好な切削状態が続くものと推測される。また、pin-on-disk摩擦試験の結果でダイヤモンドが金属材料に対してごく小さい摩擦係数値を示したものが⁸⁾あるが、その実験条件から試算した平均面圧は数百MPa程度であり炭素鋼の切削時に比べると $1/10$ 程度とはるかに小さく、純アルミニウム切削時の面圧と同程度であるために低摩擦を持続できたものと考えられる。

4.3 SEM内切削実験

これまでの過程を確認し、また雰囲気による影響を明らかにするために真空中であるSEM内で切削実験を行い切りくず生成状態の観察を行った。実験条件は、切削速度 $20\mu\text{m/s}$ 、切削幅 0.6mm 、切込み $20\sim 100\mu\text{m}$ 、すくい角 0° である。図13にダイヤモンドコンパクスおよび成形した単粒工具による切りくず生成状態の観察結果を示す。写真より明らかなように、大きな

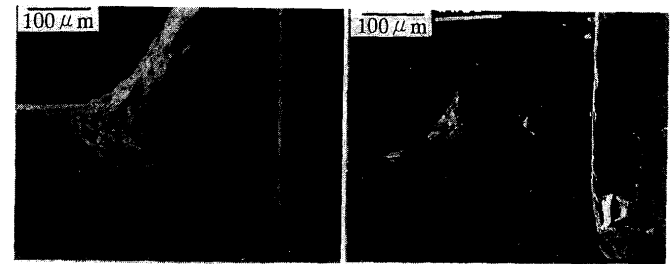


Fig.13 SEM observation of chip formation in cutting with diamond tools

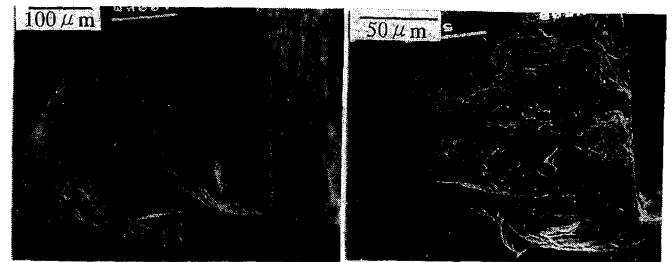


Fig.14 SEM observation of chip formation in cutting with CBN tools

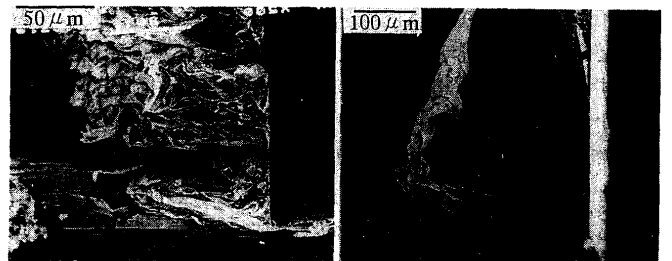


Fig.15 Variation of chip formation in cutting with diamond tool

せん断角で流れ型切りくずが生成され、良好な切削状態であることが分かる。またコンパクス工具と成形した単粒工具では大きな違いは見られない。実際の観察では工具の食付きと同時に被削材はすくい面上方に滑り始め、非常に摩擦が小さいことが分かった。一方、図14に示すようにCBN工具ではコンパクス、単粒いずれの場合もダイヤモンドの場合と大きく異なり、食付き時から被削材はすくい面上にとどまったままで、せん断型切りくずを生じるまではすくい面を上方に滑らなかった。

図15(a)に示すのはダイヤモンドコンパクス工具で $500\mu\text{m}$ 程度の切削を繰り返し、総切削距離 1.5mm 程度に達したときの写真である。前述のフライス盤による低速切削実験では、切削終了後に次の切削に移行するとダイヤモンド工具による摩擦角は再び小さくなったが、SEM内切削では繰返し切削によるこの切りくず形態の回復現象は観察されず、総切削距離が増えるに従いせん断角は減少し、切りくずは流れ型からせん断型へ移行していった。さらに、チャンバを一旦開けて内部を真空中にさらした後に再びSEM内での切削を開始した時の写真が図15(b)であるが、ここでは切りくず形態から見て再び低摩擦の状態が回復していると考えられる。

以上の結果より、ダイヤモンドによる切削初期の時点での小さい摩擦係数は、やはり真空中にさらされる時にすくい面に付着する吸着や酸化による不純物の層によるものと推測され、真空中の繰返し摩擦試験による結果¹⁰⁾と非常に良い一致を見た。

4.4 単粒による高速二次元切削

実際の研削加工は、これまでに行った実験とは比較にならないほど高速での切削現象であるため、この領域においても

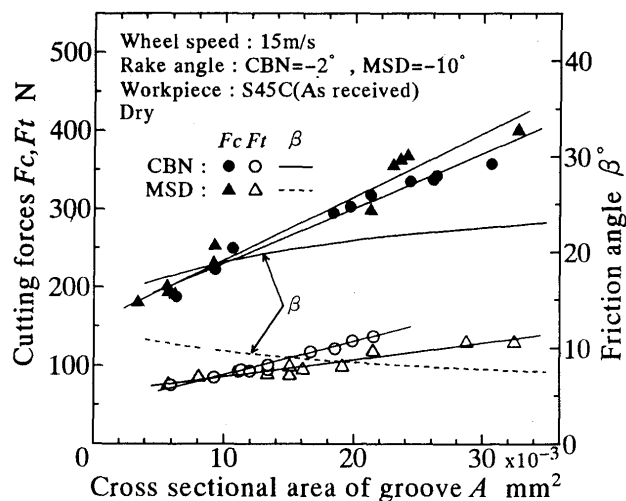


Fig.16 Forces and friction angle in single-grit orthogonal cutting

CBNとダイヤモンドの摩擦特性が大きく異なるものであるかを確認する必要がある。そこで前報と同様の実験装置により高速単粒二次元切削を行い摩擦角を測定した。なお、前述のようにダイヤモンド単粒では頂角を小さく成形すると刃先に多くのチッピングを生じること、また成形時のホイールの摩耗による形くずれや測定用圧電素子への取り付けの形状的制約などにより、すくい角 0° で切削可能な状態に刃先を鋭利に成形することが非常に困難であったため、切削抵抗測定時は負のすくい角を持つように砥粒を成形することにした。しかし前報¹⁾の実験における大きな負のすくい角の範囲($-45^\circ \sim -75^\circ$)の切削においては、すくい面前方に滞留層が発生し切りくずの流れが通常の切削と大きく異なってくるため、摩擦角は実際のすくい面の摩擦状態を表すものではなくなる。従って、すくい面の摩擦状態を推測するためには滞留層の発生しない範囲で実験を行う必要がある。滞留層の発生については次報で詳しく述べるが、すくい角が -20° 付近から発生することを確かめている。そこで成形した砥粒の実際のすくい角をSEM観察により測定し、CBN砥粒では -2° 、ダイヤモンド砥粒では -10° のものを使用した。

図16に実験結果を示す。なお、実験装置の幾何学的形状から計算される切削長さは条痕断面積最大のところで約1.7mmである。図よりダイヤモンド砥粒の方がすくい角が負に大きいにもかかわらず、小さな背分力 F_t を示しているのが分かる。また、この二分力とすくい角より求めた摩擦角が同時に図中に示してあるが、CBNとダイヤモンドでは条痕断面積によらず大きく違っているのが明らかであり、条痕断面積の測定誤差や刃先形状の影響が小さい範囲($20 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ 以上)においては摩擦試験の結果²⁾に近い値が得られている。また、条痕断面積が0のところ抵抗値は0にはなっておらず、切りくずが発生しない領域でも先端丸味の影響でかなりの抵抗が発生していると考えられるため、抵抗値から条痕断面積0のところの値を差し引き、原点を通過する抵抗値から摩擦角を算出すると、CBNで 29° 、ダイヤモンドで 4.6° となり、すくい角の違いが摩擦角に与える影響を差し引いて考えてもダイヤモンドとCBNの摩擦特性が大きく異なっていることは明らかである。また、これらの事実より、研削加工の解析において旋削などの通常切削方式による実験データの適用は妥当でなく、短距離切削や高速二次元切削実験により求めたデータの適用が有効と考えられる。

実際の研削加工においては特殊な研削方法を除けば接触弧長さは1mm程度以下であり、砥粒切れ刃は通常の切削加工に比

べ非常に短い切削距離で材料を除去した後再び空气中にさらされる。また湿式研削では研削液中にもさらされるために、ダイヤモンド砥粒表面の不純物の層は回復しやすい環境にあり、小さい摩擦係数を維持することが可能である。そのため鋼材の研削加工において、これまで明らかにされてきたCBNとダイヤモンドホイールの作用形態の大きな違い³⁾は、砥粒切削過程における摩擦特性の違いによる影響が大きいと考えられる。

5. 結論

- (1) 炭素鋼の旋盤による二次元切削実験においては、CBNとダイヤモンド工具間の摩擦角、切削抵抗、せん断角および切りくず内部の変形状態にはほとんど差はない。
- (2) 低速切削実験によると切削開始から切削距離1mm程度までの範囲においてはダイヤモンド工具は非常に小さい摩擦角を示し、その後切削距離の増加と共に摩擦角は上昇する。CBN工具でも摩擦角の上昇はみられるが、ごく小さい。
- (3) 一旦大きく上昇したダイヤモンド工具の摩擦角は、すくい面が被削材と離れ空气中にさらされることにより、再び非常に小さい値を示すようになる。CBN工具においても切削初期の摩擦角の上昇分が回復するが、変化は極端に小さい。
- (4) ダイヤモンド工具による真空中の切削では、切りくず形態は流れ型からせん断型へ移行し、切削終了し次の切削に移っても回復せず、空气中にさらされると回復する。一方CBN工具では真空中、空气中にかかわらずせん断型を示し、切削進行による変化も現れない。
- (5) 成形した単粒による高速二次元切削においてもCBNとダイヤモンドで摩擦角は大きく異なるため、この影響により実際の研削加工においてCBNとダイヤモンドホイールの作用形態の違いが現れるものと考えられる。

最後に、本研究を行うに当たり工具および砥粒を御提供頂いたノリタケダイヤ^(株)、SEM内切削装置を使用させて頂きました大阪大学工学部機械工学科花崎伸作氏、宮本猛氏、および実験に協力頂いた当時本学院生の井手秀樹君、学部学生の野口周平君に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大淵慶史, 松尾哲夫: 超砥粒砥石による生材の研削加工面性状, 砥粒加工学会誌, 33, 1 (1989) 17.
- 2) 井川直哉, 田中武司: 純鉄の研削におけるダイヤモンド砥粒の摩耗, 精密機械, 37, 11 (1971) 56.
- 3) 田中武司, 井川直哉: 軟鋼の研削におけるダイヤモンド砥粒摩耗の熱的考察, 精密機械, 39, 6 (1973) 58.
- 4) 井川直哉, 島田尚一: 超精密切削加工用ダイヤモンド工具, 日本機械学会論文集 (C編), 50, 8 (1984) 1321.
- 5) 熊谷信男ほか: 軸受鋼精密研削仕上面の品位に及ぼす研削油剤の影響, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994) 87.
- 6) Y. Ohbuchi and T. Matsuo: Force and Chip Formation in Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped CBN and Diamond Grains, Ann. CIRP, 40, 1 (1991) 327.
- 7) 大淵慶史, 松尾哲夫, 岡村達生: 超砥粒による単粒二次元切削 (第1報), 精密工学会誌, 59, 7 (1993) 123.
- 8) 松尾哲夫ほか: 超砥粒の摩擦特性, 潤滑, 31, 10 (1986) 691.
- 9) 森 勇蔵ほか: ダイヤモンドと金属の表面原子間の結合力に関する研究, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 137.
- 10) 木下直治監修, 編集委員会編: ダイヤモンドツール, 日経技術図書 (1987) 151.
- 11) N. Ueda and T. Matsuo: An Investigation of Some Shear Angle Theories, Ann. CIRP, 35, 1 (1986) 27.
- 12) Y. Enomoto and D. Tabor: The Frictional Anisotropy of Diamond, Proc. Roy. Soc. Lond. A, 373 (1981) 405.
- 13) S. Timoshenko and J. Goodier (金多 潔監訳): 弾性論, コロナ社 (1973) 423.