

ダイヤモンド切削工具

その精密切削工具としての適性

大阪大学工学部助教授 井 川 直 哉

1. はじめに

ダイヤモンドは、その卓越した硬さをはじめとするいろいろな特徴の故に、これまで長い間、最良の工具材料の一つとして賞用されてきているが、近代工業の中で特に重要になったのは1930年頃からとされており、世界的にも1930年代後半から産出量が急増し、その後、超硬合金工具の生産と併行して、特に最近になって急激に需要が増加している。

ところで、従来ダイヤモンドといえば無条件に天然品をさしていたが、1955年米国の G. E. 社が人造ダイヤモンドの合成法を発表してからは、工業用ダイヤモンドの大きい部分を占めるダイヤモンド砥粒においては、人造、天然の区別をして呼ばれるようになり、この分野では各種の人造ダイヤモンドの使用が常識化しつつあるといってもよいほどである。ただ、砥粒以外では、いまのところ天然品だけが用いられている。いずれにせよ、各種の硬質材料、難加工材料の出現にともないダイヤモンド工具は一つの新しい時期に入ったといえよう。

しかし、ダイヤモンド工具の使用が、ともすれば経験的になりがちで、必ずしも十分な特性把握がなされていない感があり、これがあるいは更に有効な活用をさまたげているかも知れないのである。これは一つにはダイヤモンドの基礎的性質さえ十分に解明あるいは認識されていないことにもよると思われるので、ここでは最近の研究によって明らかにされつつあるそれら諸性質のうち、特に精密切削工具に関連の深い事項にふれてみたいと思う。

なお、ここでは精密工具としてもう一つの重要な地位をしめるダイヤモンド砥石については

紙面の都合でふれないが、本稿の各所にみられるダイヤモンドの性質についての基本事項は砥石の場合にも当然あてはまるものである。

2. ダイヤモンドの物理的性質

ダイヤモンドの結晶学的構造は、炭素が図1のように配列したもので、一般に各種の性質に明瞭な異方性を示す。工具などで問題となる破壊に関し、最もよく観察されるのは八面体面 $\{111\}$ のへき開で、このほか少なくとも6種のへき開面があり、これらの頻度の順序は理論的に計算されるへき開エネルギーの大小、もしくは単位面積当りの結合の数と密接な関係にあるとされている。また、摩耗についても著しい異方性を示す。ダイヤモンドの摩耗特性は、しばしばすりへり硬さとして表現されるが、試験の方法によって定量的にはかなり大幅に異なる。しかし結晶方位の影響の定性的傾向は図2のよ

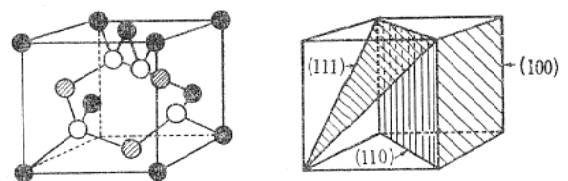


図1 ダイヤモンドの結晶構造

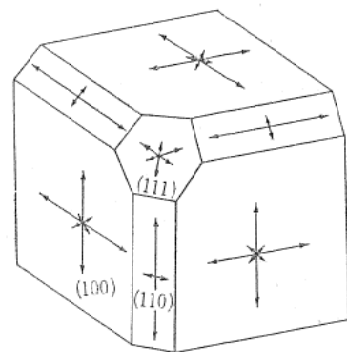


図2 ダイヤモンド各面の耐摩耗性

うになることは大体一致している。図2で長い矢印は研摩しやすい方向を示し、短いのは非常に研摩しにくい方向を示している。ダイヤモンドの摩耗機構については、摩擦係数の異方性、へき開に関する仕事の異方性などの関連性からいろいろと研究が行なわれているが、あらかし次のように要約できよう。摩擦速度が比較的低く、良い潤滑状態で、ダイヤモンドの相手試片がダイヤモンド粒子を含む場合（すりへり硬さ測定など）には、微小へき開の集積が重要な機構となるが、潤滑剤がなく、高速になると摩擦熱によってダイヤモンドが黒鉛化、または炭化し、摩耗が進行する。これらの事柄は摩耗粉の注意深い観察から結論づけられたことであるが、それぞれへき開ならびに摩擦の異方性とよく合致する結果である。工具材料としての摩耗を考える場合、特に後者の機構は重要な意味をもってくるのである。

さて、ダイヤモンドのその他の物理的性質については、一般金属ほどには資料がなく、また出典によって値が異なることも少なくないが、表1は他の二、三の工具材料の性質と比較したのものである。このうちでは高い硬さ、大きいヤング率、高い熱伝導率などが注目される。

しかしながら、以上のようなすぐれた特長のほかに、工具として使用する場合注意すべき事柄は耐熱性あるいは熱損傷という点に関する問題である。そしてこれらがある意味では工具材料としての適応性の一つの限界を与えているの

ではないだろうか。それは酸化と黒鉛化という問題である。これまでダイヤモンドの顕著な酸化は約700°Cから発生するといわれてきた。これに関する最近の研究によれば700°C常圧空気中では、ダイヤモンドが酸化によって0.2~1 μ /minの速度で消耗することが示されている。この機構としてダイヤモンドの直接酸化と、吸着ガスの影響のもとにおこる炭化層の形成とその酸化という2種の過程が推論されているが、いずれにしても熱損傷の定量的資料として注目される。

3. 精密切削工具としての基本的特性

3.1 精密切削工具の条件

ここでいう精密とは数 μ あるいはそれ以上の加工精度を対象とし、切削工具とは幾何学的に定義された形状をもった、たとえばバイトなどをさすことにする。さて、いわゆる切削加工において、工作機械の位置決め機構、運動機構が動的、静的に極めて高精度に作られていて、切削工具と工作物が切削のための相対運動を理想的に行なっても、工作機械の精度に相当するだけの加工を行なえない場合がある。その原因は、第一に、工作機械各部の巨視的な弾性変形、熱変形であり、第二に、工具——工作物の接触部とその近傍の微視的変形や、加工過程そのものにふくまれる不安定現象によるものが考えられる。このうち前者は、何等かの方法によって制御できる可能性があるが、後者は一般に予知

表1 各種工具材料の性質

性 質	ダイヤモンド	酸化アルミニウム (アルミナ)	炭化珪素	超硬合金	セラミック
密 度 g/cm ³	3.52	2.95	3.2	8~15	3.9
押込硬さ kg/mm ²	約6,000~10,000 (ヌープ)	2,050 (ヌープ)	2,480 (ヌープ)	1,300~1,800 (ビッカース)	1,300~1,800 (ビッカース)
ヤング率 $\times 10^4$ kg/mm ²	9.5	—	—	4.5~6	3~4
引張り強さ kg/mm ²	400~1,000	—	—	90~220 (曲げ)	30~50 (曲げ)
融 点 °C	約 3,700	2,050	2,700	—	—
軟化温度 °C	—	—	—	1,100~1,200	1,500
酸化開始温度 °C	600~700	—	—	600~1,000	600~800
比 熱 cal/°C gr	0.12	0.24(500°C)	0.162	0.05~0.06	0.25
熱伝導率 cal/cm,°C,sec.	0.35	0.017(500°C)	0.0445(600°C)	0.05~0.18	約0.07~(0~100°C)
熱膨脹係数 $\times 10^{-6}$ /°C	0.9~1.18(常温) 3.5 (500°C)	5.52(集晶500°C)	—	5~7	0.017 (800°C) 約 8

または制御が困難である。これは具体的には、理想的な形状の工具が理想的に工作物に対して相対運動を行なっても、その仕上面にはあるあらさが形成されたり、仕上面の位置が設定位置から微視的にはずれたりすることである。特にあらさについては、加工物の寸法形状精度は偶然による以外、このあらさ以上になり得ないという意味で注意すべきことといえる。ある調査によれば実用面で採られている公差 A とあらさ R の間には $A=4R^{0.8}$ という近似関係を見出すことができるという。

いま、切削仕上面形成の基本過程を、工具逃げ面のパニッシ作用と考える。理想的な工作機械で加工される切削仕上面でも理想的な仕上面（たとえば直線プロフィルの単一切刃ならば平面）とは一般に異なり、その程度は次の諸要因によって左右される。

- a) 切刃稜のあらさ——直接仕上面あらさと関係。
- b) 切刃稜の鋭さ——刃先直前の被削材の挙動を支配し、弾性回復量、加工変質層など関係。
- c) 切刃稜プロフィルの転写性——複雑な界面現象により支配され、仕上面の不規則なみだれに関係。a) b)とも関係する。
- d) 耐久性——a) b)と直接関係。

そこで、これらの諸点についての若干の考察から望ましいパラメータを示し、ダイヤモンド工具においてそれらがどのように実現されているかを示すことにしたい。

3.2 切刃稜のあらさ

第一近似的には切刃稜のあらさ（稜線の凹凸の高さをさす）は、切削仕上面の微視的あらさ（送りによって形成されるあらさではなく、切削面そのもののあらさの意味）を決定すると考えてよいもので、精密切削工具の主要な因子として挙げることができる。

切刃稜のあらさ R_k はあるあらさをもったすくい面と逃げ面の交差として作られ、幾何学的には、工具のすくい面あらさ R_s 、逃げ面あらさ R_f 、それにくさび角 β によって次のようにあらわされる。

$$R_k = 1/\sin \beta \sqrt{R_s^2 + 2R_s \cdot R_f \cos \beta + R_f^2} \quad (1)$$

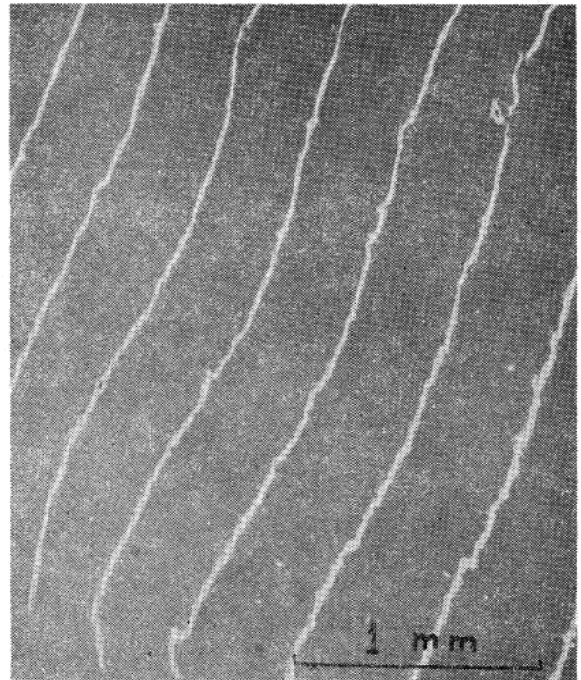


図3 ダイヤモンドポリッシュ面の多重干渉縞写真 (Tolansky)



図4 ダイヤモンドナイフのレプリカ電顕写真

ダイヤモンドのポリッシュ面は注意すれば図3の多量干渉縞写真に示されるように、 H_{max} で 100 \AA 、平坦度で 500 \AA 程度には仕上げることができるので、(1)式によれば 150 \AA 程度の切刃稜あらさが期待できる。図4は特殊ダイヤモンドナイフのレプリカ電顕写真で、極めてなめらかなことがうかがえる。ダイヤモンドナイフの切刃稜あらさは、一説には 10 \AA 程度にまで仕上げることができるという主張がある。実際には測定法の問題もあって、これは十分な信頼性を必ずしも期待できないが、最近のマイクロームによれば、ダイヤモンドナイフを用いて厚さ 50 \AA 程度の薄片の製作が可能であることを考

えると、少なくとも部分的にはあらか数 十Å 程度の極めて精密な切刃稜が形成されていることはほぼ間違いないと思われる。しかし、一般のダイヤモンドバイトとして製作されるものの切刃稜あらかは、特別でないかぎり、 $0.1 \sim 0.2 \mu$ と考えてもさしつかえない。このあらかはかなり長時間使用後も、一部をのぞきそれほど大きくなる。

問題は、かかる切刃稜あらかの精密な測定法が未だ確立されていないことで、今後、各種の電顕などの利用による方法を期待したい。

一方、現在もっともよく用いられている超硬合金工具の切刃稜あらかを参考のために挙げると、たとえば #800 程度のダイヤモンド砥石でいねいに仕上げられたものでは未使用状態で $0.2 \sim 0.3 \mu$ 程度である。使用すると、本来の粒子構造のためは微小な凹凸がふえるものであるが、溶着物はよってみかけ上凹凸が小さくなることも経験される。

3.3 切刃稜の鋭さ

微視的には切刃稜は完全に鋭利な形状をもつものではなく、くずれている。この形状は等価的にはある曲率半径をもつものとみなせるが、一般工具ではそれを数 μ 以下にすることは困難である。

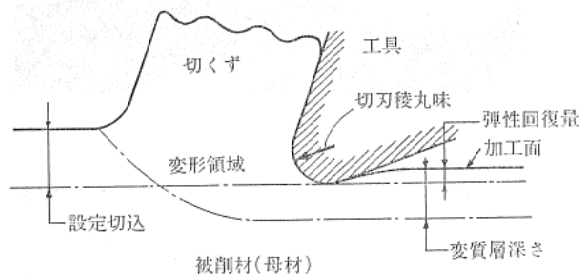


図5 切刃先端近傍での被削材の変形

切刃稜丸味は図5に示すような変質層深さ、弾性回復量（これは寸法精度の不安定要因の一つである）と深い関係にあり、この意味で鋭利な切刃稜の実現は高精度切削に欠かせないものである。たとえば仕上面の塑性変形層の深さは丸味の約10倍、弾性回復量は丸味の35%にも達するという計算結果も示されている。

さて切刃稜丸味は一般工具では数 μ 以下にすることは困難であるが、ダイヤモンド工具のそ

れは普通行なわれる Arnoulf 法、投影法、光切断法、触針法では測定不能なほど鋭利である。わずかに図4に示したような電顕写真（ともに分解能は高々数百Åと思われる）で、 0.1μ 以下と推定できるにすぎない。しかしマイクローム用ダイヤモンドナイフでは切刃稜丸味は $0.1 \mu \text{in}$ 程度であり、これによる超微量切削での加工層深さは数 μin であったという報告（測定法は明らかでない）などを考えると、少なくとも部分的には 100Å かあるいはそれ以下の値をもつものと解される。普通に製作されるダイヤモンドバイトでは、特殊な触針法で測定して約 1μ という値が得られている。

なお一般工場における高速度鋼、超硬合金切削工具では平均 26μ の切刃稜丸味をもっているという調査結果があるが、これらと比較してダイヤモンド工具がいかにすぐれているかが理解できる。

3.4 転写性

工具が通過することによって形成される仕上面のプロファイルが、どの程度前者のそれと一致するかどうかは到達可能な仕上面形状を推定する上に非常に重要なことである。たとえ理想形状の工具を用いる場合でも、この転写の完全性の度合が、形成される仕上面あらかの到達限界をきめるものであり、一方、寸法、形状精度はそのあらかより微小な程度を期待するのは無意味であるから、この転写性が切削加工の精度限界をきめる可能性もあるわけである。しかし、これを支配する因子はあまり明確にされておらず、また現象すら十分に把握されていないようである。転写性のみだれは、もっとも素朴には、切刃稜が切削を行ない一種のバニッシ作用によって仕上面が形成される過程で、被削材を余分にほりおこしたり、あるいは切刃に一時凝着した硬質または硬化粒子が切削作用を行なうことが原因と考えられる。このような現象はある種の凝着摩耗過程と似ており、その場合の凝着または摩耗粒子の大きさに関する取扱いが定性的にあてはまりそうに思える。凝着のおこりやすさは工学的には摩擦係数と対応するものと考えてよく、これが小さい組合せほど転写性をみだす粒子生成の可能性が小さい。

さて定性的には、ダイヤモンドはその不活性からみていろいろな材料の組合せにおける疑着性が小さいことが想像される。快削黄銅との組合せ、150 m/min のすべり速度、おしつけ荷重 7~8 kg での摩擦係数は、ダイヤモンド 0.18, セラミック 0.25, 高速度鋼 0.28, 超硬合金 0.29 という測定結果からみれば、ダイヤモンドの良好な転写性が期待できる。図 6 はダイヤモンドバイトの切削方向からみたプロフィールと、それによってできたアルミニウム仕上面レプリカのプロフィールの比較で、極めてよい一致が得られている。図 7 は超硬工具による場合で、かなり良い転写が行なわれているが、ダイヤモンドにはおよばないことが知れる。

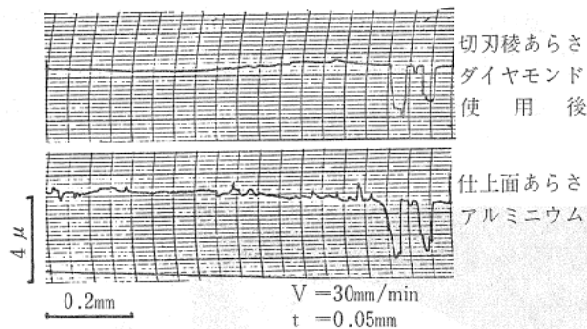


図 6 ダイヤモンド工具の転写性

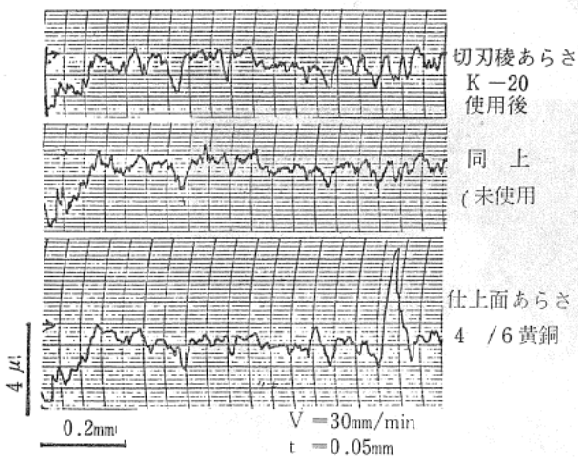


図 7 超硬工具の転写性

3.5 耐久性

一般に切削工具の耐久性は、比較的安定な切削における耐すりへり摩耗性、高温をともなう切削における耐熱軟化（塑性変形）性、欠損などが問題になる場合には強度特性などによって比較される。ところがダイヤモンド切削工具の

耐久性は漸進的あるいはすりへり摩耗によって決定されることはむしろ少ない。みかけ上、すりへり摩耗を呈することはまれにあるが、詳しくしらべると微小なへき開であることが多い。よく行なわれる黄銅などの切削では、数万m切削後でも光学的顕微鏡では十分観察できないほどのすりへり摩耗しか起こらない。

次に、塑性変形により切削工具切刃の機能が失なわれる場合は、ダイヤモンド工具についてはほとんど考える必要はない。このことはダイヤモンドが塑性変形しないということではなく、切削において経験される程度の温度ではそれが起こらないのである。ダイヤモンドの塑性変形についてはいくつかの報告があるが、定量的には、 $1,800^{\circ}\text{C} <110>$ 分解剪断応力 ($4\sim 10$) $\times 10^9$ dyne/cm² で塑性変形するといわれ、また変形、破壊の脆性——塑性挙動の遷移温度は $1,400\sim 1,600^{\circ}\text{C}$ と推定されている。

ダイヤモンド工具の耐久性を考える上で、一番重要と思われる因子は微小かけである。一般にダイヤモンドバイトの寿命判定基準は、その使用分野が機能よりは商品価値としての外観を問題にする場合が多いこともあって、仕上面に生じる何らかの異常である。たとえば、いわゆる虹面に仕上げられないとか、光沢がにぶいとか、ある種のスクラッチが生ずるなどである。これらの多くは、ダイヤモンド切刃後における微小なかけが原因である。この微小なかけは、被削材からうける機械的負荷により工具内部の応力が、ダイヤモンドの強度をこえたときに発生すると考えられ、ダイヤモンドの熱伝導度が極めて高いことなどを考慮すると、超硬工具で経験される熱亀裂が主因であるとは必ずしも考えられない。

ダイヤモンドの破壊は一般にへき開によるもので、もっともよくあらわれるへき開面は {111} である。強度については当然のことながら、かなりの異方性がある。ポリッシュした {110} 面に球状圧子をおしつけてクラックを発生させた場合、ヘルツ理論にもとづき $400\sim 1,000$ kg/mm² という引張り強度が計算されている。しかしながら、工具内の切刃後近傍での応力分布を被削材の材料特性、切削条件と関連づけて推定する

方法は今のところ発表されておらず、望ましい工具設計法、使用法の指導指針が確立されていないのが現状である。

工具寿命の点からは、上に述べた微小かけがいつ起こるかが問題であるが、理論的経験的予測については今のところ十分な資料がない。筆者の所属する研究室での黄銅切削実験によれば、数 μ オーダーの極く微小な部分的かけは、切削のかなり初期（たとえば1,000m 切削等）にすでに境界摩耗領域に発生するが、進行はおそく、このような状態で切削距離数万mは、さしたる仕上面状態の変化なく切削できる。そして、何らかの原因で切削状態が悪化すると5/100 mm 程度のかけが急激に生じて工具寿命となる。しかし、この時期を予測するのは今のところ困難である。図8はその経過の一例を示す。ここで述べた意味での寿命予測のためには、切削状態（たとえば振動）と工具内応力分布の関

係、それに、たとえば振動にもとづくくりかえし荷重のような荷重履歴とダイヤモンドの強度変化の関係などについて更に詳しい資料が要求される。ダイヤモンドは、クラックの発生しない程度の衝撃でも数千回くりかえし与えると強度が $\frac{1}{4}$ に低下したという報告もある。

4. ダイヤモンドバイトとその切削の特長

4.1 ダイヤモンドバイト

ダイヤモンドの性質には各種の異方性が知られている。特にダイヤモンドを研磨する場合、結晶面によって1000倍にも達する研磨能率の差異がみられる。このことはダイヤモンドバイトを製作、ならびに使用するに際し、その方位の決定が非常に重要であることを意味する。

このようなことを検討して、よく採られる方

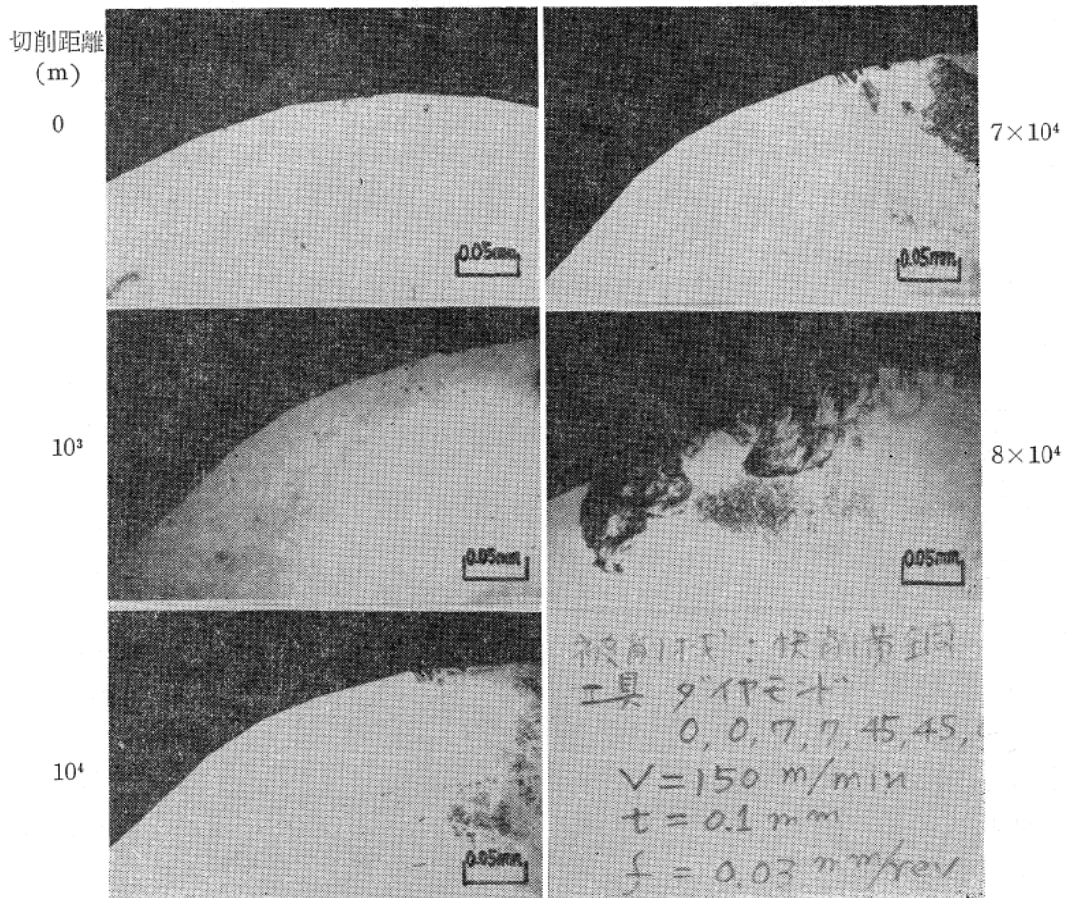


図8 ダイヤモンドバイトの損傷経過
(田中, 大森)

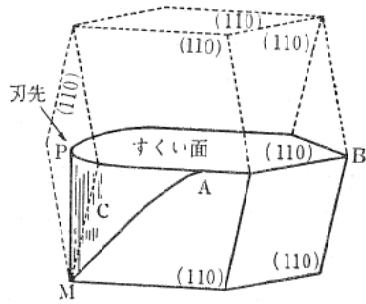


図9

位の一例が図9のようなものである。すなわち{110}面の一つをすくい面にとり、被削材の摩擦方向が摩耗しにくい方向と近くなるようにしたもので、正しい方位にダイヤモンドをセットすることで200~1000%もの寿命向上を得たダイヤモンドバイトの例も報告されている。

4.2 仕上面

ダイヤモンド工具による切削の特徴は、まず極めてすぐれた仕上面がえられることである。

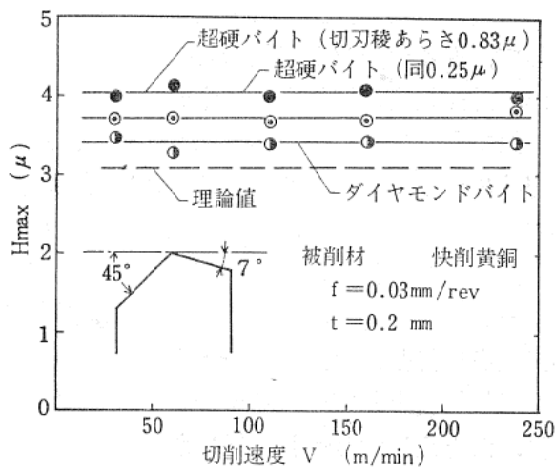


図10 各種工具による仕上面あらしの比較 (田中ほか)

図10は見かけ上同一の形状にした超硬工具とダイヤモンドバイトによって、それぞれ旋削した面のあらし H_{max} を比較した一例であるが、極めていい仕上がり仕上げられた超硬合金工具でもダイヤモンド工具による場合は H_{max} のみでなく、プロフィールは極めて規則正しく形成されており、反射率のよい仕上面を得ることができる。また図11は被削材表層の変形模様の顕微鏡写真であるが、a)のダイヤモンドバイトによる場合の表面層の「流れ」はほとんど検出でき

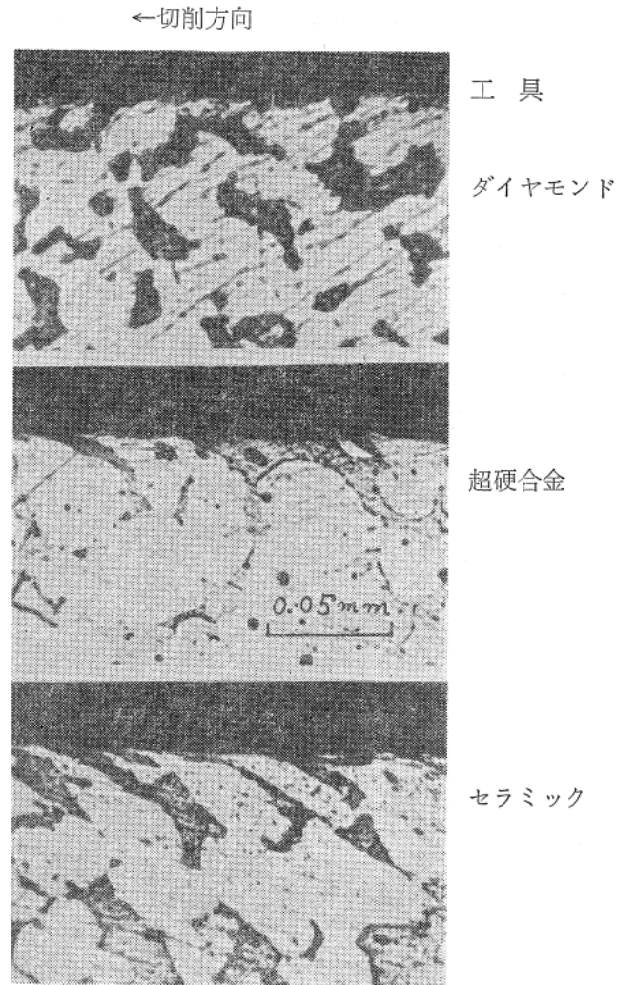


図11 各種工具による仕上面表層部の比較 (田中, 大森)

(被削材: 快削黄銅, 工具: 0, 0, 7, 7, 35, 35, 0,)
($v=150\text{m/min}$, $t=0.1\text{mm}$, $f=0.5\text{mm/rev}$)

ない。一方b)c)はそれぞれ超硬工具、セラミック工具による場合であるが、明瞭な流れが観察される。

4.3 切削抵抗

ダイヤモンドバイトによれば加工層を小さくできることは、図12に示すような切削抵抗の比較からも裏付けられる。同じ切削条件にあっても、ダイヤモンドバイトの切削抵抗は他に比べると大幅に小さいことが知れる。この原因は、ダイヤモンドバイトの切刃の鋭利さと、小さな摩擦係数から推定されるように被削材との親和性が少ないことによると思われる。

4.4 各種金属に対する適性

黄銅以外の材料に対しても、少なくとも仕上面を問題にするかぎり、ダイヤモンド工具がす

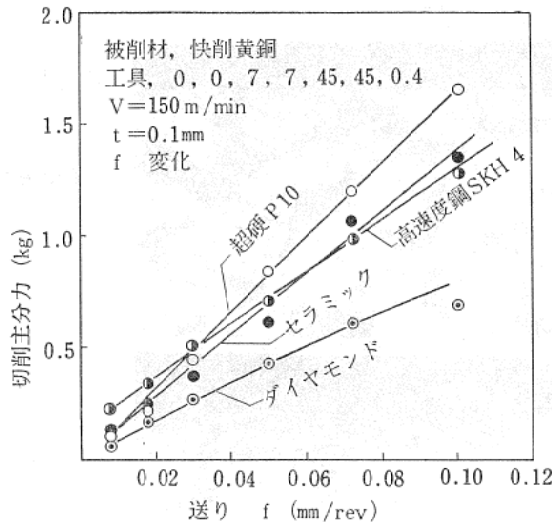


図12 各種工具による切削抵抗の比較
(田中ほか)

表2 ダイヤモンドナイフによる微小切削の結果
(Broom ほか)

材 料	被 削 性	結 果
銅 鉛 アルミニウム	極めて良 極めて良 極めて良	鏡面仕上, 平たいリボン状切屑, 極めて長い工具寿命
ニ ッ ケ ル	極めて良	鏡面仕上, 小さなら線状切屑, 普通の工具寿命
黄 銅	極めて良	鏡面仕上, 短い針状切屑, 長い工具寿命
鋼	良	鏡面仕上, 雑多な切屑, 工具は注意しないと欠損
ウ ラ ニ ウ ム	不 良	工具破損, 表面酸化物が ないときはうまく削れる
ベ リ リ ウ ム	不 良	工具破損, いかなる場合 もうまく削れない
タ ン タ ル	不 良	削れるが, 鏡面になら ない, 小さな針状切屑, 短 い工具寿命
タ ン グ ス テ ン	不 良	切削不能

ぐれた性能を示すことは、実用的にすでにアルミニウム合金などで経験することであるが、その他の材料に対しても適性を示すことが、マイクローム用ダイヤモンドナイフによる微小切削実験で認められている。表2に結果の一部を示す。

しかしながら、このようなダイヤモンド工具も、鉄系金属の切削には問題がありそうであ

る。たとえば純鉄の切削においては、わずか数十μmの切削で、刃先のかげのために良好な切削は不能となる。これは純鉄の強度、変形特性がダイヤモンドにとって苛酷すぎる可能性があること、鉄とダイヤモンド間の親和性が大で一種の凝着が起りやすいのではないかと考えられる。後者については、各種金属とダイヤモンドを真空中で接触加熱した実験で、特に純鉄との組合せにおいて、鉄中へ炭素が激しく拡散するという現象が一つの示唆を与えよう。

いずれにせよ、ダイヤモンド工具による切削加工は、これまでほとんどの場合、単に加工面、特にその外観や仕上面あらさという観点からとらえられてきたが、今後出現を予想されるものも含めて、各種材料に対する精密工具としての適性を明確にして行く上に、より詳細な切削現象、特に刃先近傍での現象解析がのぞまれる。

5. あとがき

以上、精密切削工具の具備すべき条件にてらして、ダイヤモンド工具の特徴について述べたが、計測技術の困難さから十分に性能、性質を把握できない点が多々あるように思う。特に切刃稜については、簡便で精度のよい測定法が確立していない。また、現在、工業レベルで一番問題となる耐久性についてはほとんど定量的データはないので、今後この方面の技術資料の集積を期待したい。

工具材料としてのダイヤモンドの一般的性質、たとえばすりへり摩耗においてみられる著しい結晶方位依存性、それにもとづく工具のぞましい方位、熱的特性などは別の文献にかなりくわしく整理されているので御参照されたい。また広い意味での精密工具とみなせるダイヤモンド砥粒の興味ある性質、性能についても紙面の都合で割愛したことをおことわりしておく。

参 考 文 献

- 田中義信：工具材料としてのダイヤモンド，機械の研究 Vol. 18, No. 10 (1966) p. 1195.
- Berman (ed.): Physical Properties of Diamond, Clarendon Press, Oxford (1965).