

超硬チップソーの摩耗に関する研究

1983

奥村正悟

超硬チップソーの摩耗に関する研究

1983

奥村正悟

目 次

緒 言	1
第 1 章 木材切削工具の摩耗	3
1.1 切削工具の摩耗	3
1.2 木材切削工具とその摩耗	4
1.3 工具寿命延長の方策	6
1.4 木材切削工具の摩耗に関する研究動向	7
第 2 章 超硬チップソーの摩耗とそれに及ぼすWC粒子の大きさの影響.....	11
2.1 実 験	12
2.2 鋸の寿命と超硬チップの摩耗形状	15
2.3 超硬チップの摩耗経過	20
2.4 チップソーの寿命と摩耗機構	27
2.5 要 約	29
第 3 章 単一鋸歯による刃先摩耗のシミュレーション	30
3.1 刃先の摩耗経過と切削方法の評価	31
3.1.1 実 験	31
3.1.2 刃先の摩耗形態	33
3.1.3 摩耗量と切削力	37
3.1.4 切削方法の評価	40
3.2 断続切削と連続切削時の刃先摩耗	41
3.2.1 実 験	41
3.2.2 刃先の摩耗形態	43
3.2.3 刃先の摩耗量	48

3.2.4	切 削 力	50
3.3	要 約	55
第4章	切削時の刃先温度	57
4.1	刃先における過渡的温度変化	59
4.2	逃げ面摩擦時の刃先温度	66
4.2.1	実 験	66
4.2.2	刃先温度の時間変化	69
4.2.3	刃先温度に及ぼす摩擦速度と刃先にかかる力の影響	71
4.3	断続切削中の単一鋸歯側面の温度分布	75
4.3.1	実 験	75
4.3.2	二次元切削における刃先温度	87
4.3.3	みぞ切りにおける刃先温度	93
4.3.4	刃先摩耗に及ぼす温度の影響	99
4.4	要 約	100
総 括	102
結 言	106
引用文献	107

緒

言

木材の加工における主要なものは切削加工であるが、この切削加工の中で最も広く用いられ、木材切削を代表する加工法ともいえるのが鋸挽きである。現在我が国で機械加工用工具として鋸挽きに使用されているのは主として帯鋸と丸鋸であるが、製材工場から家具・木工工場に至るまで大量かつ広範に使用されているのは丸鋸である。

丸鋸はもともと炭素工具鋼の鋸身に刻んだ鋸歯に刃付けをし、歯振加工等を施したものを使っていたが、能率向上のため機械が高速化されるに伴い刃先の摩耗が問題となってきた。また刃先を著しく摩耗させるシリカ含有材や木質材料等の難削材を能率よく挽材するためには、刃先摩耗をできるだけ低減させる必要が生じてきた。そのためには刃先をできるだけ硬くする必要があり、この目的のために種々の方法が試みられてきたが、丸鋸では超硬合金を付け歯する方法が最も成功をおさめ一般化した。この超硬合金を歯部にろう接した「超硬合金付け歯丸鋸」を超硬チップソー、あるいは単にチップソーと称する。

ところで木材切削工具の摩耗に関しては数十年来既に多くの研究がなされ、それらを取りまとめたいくつかの総説^{1,2,3)}も発表されている。またチップソーの摩耗や寿命についても比較的早くから研究対象とされ、種々の観点から検討が加えられている^{4~8)}。しかしながらそれらの知見の整理や相互の関連付けにはほとんど手が付けられておらず、摩耗現象を体系化するに至っていないのが現状である。これは、木材切削工具の摩耗が考慮すべき多くの因子を含んだ複雑な現象であることに一因があると考えられる。したがって木材切削工具の摩耗についてはまだまだ実験の積み重ねと、多方面からの検討が必要とされる。それによって工具の摩耗機構の解明と体系化が達成され、最適な工具材料の選択、最適な切削条件の選定、作業の能率向上が可能となる。また被削材である木材に比べて問題にならないほど硬い刃物が、なぜ摩耗するかという素朴な最

も基本的な疑問に対しても，明解な答が得られるはずである。

そこで本論文では，上記の認識の上にならって，木材・木質材料切削用工具として現在最も汎用化している超硬チップソーを取り上げ，その刃先の摩耗現象を摩耗量，摩耗形態，切削性能の点から把握するのを第一の目的とした。さらに，刃先の摩耗と関連させてしばしば言及されるにもかかわらず，実験的知見に乏しい切削時の刃先温度を明らかにしようとした。

まず第1章では木材切削工具とその摩耗の特徴について，既往の研究をもとにして概括的に述べ，木材切削工具の摩耗に関する内外の研究動向を紹介する。

第2章では，チップソーでパーティクルボードを鋸断した場合の工具寿命，刃先の摩耗量と摩耗形態を，超硬合金の材種（主成分である炭化物粒子の大きさが異なる材種）間で比較検討し，チップソーの摩耗経過とそれに及ぼす超硬合金材種の影響について考察する。

第3章では，チップソーの刃先摩耗をより詳細に検討するため，超硬合金を付け歯した単一鋸歯で回転している被削材ブロックを切削する方法を採用し，刃先の摩耗量，摩耗形態，切削力の測定または観察結果から，刃先に加わる衝撃力と摩耗との関係を，超硬合金材種との関連で検討する。

最後に第4章では，超硬合金を付け歯した単一鋸歯の，切削時における刃先側面温度を赤外線放射顕微鏡で測定し，刃先の温度変化，温度分布に及ぼす切削速度と刃先の角度の影響について検討する。さらに刃先の温度と摩耗との関係についても考察する。

第 1 章 木材切削工具の摩耗

摩耗とは、例えば「こすれ面よりの固体物質の望ましくない除去」と定義⁹⁾されるように、一見わかりきった現象のようであるが、そこには多くの現象が複雑に入り交じっているのが通例である。摩耗はまた、固体間の摩擦と潤滑に深くかかわっており、最近ではそれらを包括的に取り扱う科学と技術であるトライボロジーの学問分野に含まれる現象である^{10,11)}。

摩耗は通常次のように分類される^{9,11)}。すなわち、(1)固体間の真の接触部における凝着とそのせん断破壊による凝着摩耗 (adhesive wear) , (2)より硬い表面や介在する異物によって表面が削り取られるアブレイブ摩耗 (ひっかき摩耗 abrasive wear, abrasion) , (3)表面に働く周期的荷重による疲労破壊である疲労摩耗 (surface fatigue wear), (4)腐食による反応生成物がすべり運動によって除去される腐食摩耗 (corrosive wear) である。その他に高速度の流体による erosion , 衝撃によって表面から微細な chip がたたき出される impact chipping 等がある。

本章では、切削工具の摩耗現象を概観し、特に木材切削工具の摩耗についてその特質を述べ、さらに木材切削工具の摩耗に関する研究動向の概略を記す。

1.1 切削工具の摩耗

切削工具は鋭いくさびとして被削材中に押し入り、その一部を分離、変形し、切屑として排除するための工具である。そのため工具の刃先部分には常に強大な荷重が作用し、切屑や被削母材との接触面は高温にさらされる。さらに、フライス切削のような断続切削の場合には、刃先部は繰り返し衝撃力を受ける。したがって切削工具の摩耗は通常の機械部品の摩耗に比べて、きわめて厳しい条件下にあることが特徴である。

切削工具が摩耗すると、刃先の幾何学的形状が変化して鋭利な刃先が失わ

れるのみでなく，それに伴って切削抵抗の増大，仕上面の悪化，加工精度の低下等が招来される。そしてそれ以上正常な加工を続けることが物理的に不可能になった時点，あるいは目的とする仕上面や精度が得られなくなった時点をもって，その工具は寿命に達したと判断される。そうなれば工具を交換するか再研磨しなければならないが，その頻度が高い場合にはこれらに必要な経費や時間は無視できず，生産能率にも大きく影響する。ところで工具の摩耗と寿命は，使用する工具材料とその形状，被削材，切削条件等によって当然変化する。そこで，加工速度を低下させずに工具寿命をいかに延長するか，すなわち工具摩耗をいかに低減するかという問題が生じる。切削工具の摩耗を研究する大きな意義の一つはここにある。

工具寿命を改善するための抜本的な方策は，より硬い，特に高温でも硬さが低下しない，耐摩耗性が大きい工具材料の採用である。現在，切削工具材料として一般に使用されているものは炭素工具鋼，合金工具鋼，高速度鋼，鋳造合金（ステライト），超硬合金，セラミックであるが，ここにあげた順序は工具材料の歴史的発達にも対応しており，今世紀初頭に開発された高速度鋼以後のこれらの工具材料の発達によって，切削加工の高速化，生産性の向上が達せられた。ところが，材料の硬さが増せば一般にもろくなり，衝撃を受けやすい切削工具では欠損を伴う。また鋭利な刃先や複雑な形状の刃物に加工することが困難となる。そのため，靱性を損なわずにいかに硬さを付与するか，硬い材料に工具材料としての適性をいかに付与するか等々の観点から，既存工具材料の改良と新しい工具材料の開発がさらに進められている¹²⁾。

1.2 木材切削工具とその摩耗

木材・木質材料の切削加工には，被削材である木材・木質材料の特性に基づいて，いくつかの特徴^{13,14,15)}があるが，工具側からみた場合の最大の特徴は被削材の変形性が大きいことである。このことは，被削材から分離された切屑を変形して排除するのに必要な力（切削抵抗）が小さくてよいことを意味すると同時に，切屑を分離するために加えられた力や切屑を変形させるための力に

よって、加工面となるべき被削母材側も容易に変形してしまうことをも意味する。この不必要な変形を最小限にとどめて良好な切削加工をするためには、切屑を分離するための力の作用域を極在化させること、すなわち工具の切刃をできるだけ鋭利にし、刃物剛性を損なわない範囲内で刃先角を小さくすることが必要になる。ここに木材切削工具の大きな特徴がある。

このように木材切削工具では鋭利な切刃を有することが絶対的に要求されるため、工具摩耗においても切刃の鋭利さの喪失が最も重要となる。すなわち肉眼では不可視の顕微鏡オーダでの刃先摩耗が問題となり、金属切削工具でみられる、切刃部の強度低下をもたらすような摩耗はほとんど問題とならない。実際、木材切削では工具摩耗そのものよりも、切削性能の低下を問題にすることが多く、切味の低下¹⁶⁾、工具の鈍化 (blunting, Abstumpfung) という言葉でしばしば表現されるが、これらはまさしく切刃の鋭利さに関係するものである。

木材切削工具の摩耗機構として杉原^{13,14)} は次の四つを挙げている。すなわち、(1)切屑および被削材との摩擦による摩滅、(2)切削力による切刃の微小な欠損、(3)切削および摩擦の結果生じた熱による切刃部の温度上昇による材質の変化、(4)摩擦による帯電や樹液による電気化学的腐食である。また工具の摩耗過程は一般に、比較的急速に摩耗が進行する初期摩耗とその後のゆるやかに摩耗が進行する過程からなる¹⁾。初期摩耗は鋭利な切刃が切削力によって微小な欠損を受けるためと考えられ、その後のゆるやかな摩耗は摩滅 (abrasion, Abnutzung) が主原因であり、場合によっては電気化学的腐食が加わるものと考えられている^{1,2,13,14)}。このように、木材切削工具の摩耗機構として主体をなすものは摩滅 (アブレッシブ摩耗) であり、金属切削工具では常に問題となる凝着摩耗についてはほとんど考慮されることはない。また摩耗の原因として被削材に含まれる樹液の腐食作用があることは特異な点である。なお切削時の熱による刃先部の軟化等の材質変化は、当然摩滅を促進するものと考えられるが、実証的研究はほとんどない。

1.3 工具寿命延長の方策

鋭利な切刃が容易に得られ、切刃部が欠損し難い、すなわち靱性が高いことが本来要求される木材切削工具には、これらの条件を具備してしかも安価な炭素工具鋼、またはこれに特殊元素を添加して歯振加工等に耐えるようにした合金工具鋼が主として用いられてきた。しかしながら、強力な機械加工や切削の高速化が進んでくると、工具の寿命延長と耐摩耗性の向上が大きな要件となってきた。さらに、硬い接着剤を含む木質材料やシリカを含有する熱帯材を加工することが多くなるにしたがって、この要求が強まってきた。そのため、刃先の鋭利さは多少犠牲にしても、より硬い耐摩耗性の大きい工具材料が追求され、金属切削用として開発された高速度鋼、超硬合金も木材切削工具として早くから採用されてきている。

寿命改善の方策を鋸の場合について、すなわち鋸歯の耐摩耗性の改善からみると、主要なものとして次の五つがあげられる^{17,18)}。すなわち、(1)超硬合金チップの付け歯、(2)鑄造合金であるステライトの歯先への溶着、(3)歯先の高周波焼入れ、(4)硬質クロムメッキ、(5)超硬合金の被覆加工である。この中で(1)と(2)は鋸歯をより硬い材料で置き換えたものであり、(3)は刃先部の硬化処理、(4)と(5)は鋸歯の表面を硬質の薄膜で覆う処理であり、(4)では摩擦の低減効果もある。これら各種の方策のうち、現在広範に採用されているものは、帯鋸ではステライトの溶着であり、シリカ含有材などの難削材の製材に威力を発揮している。一方丸鋸では超硬チップの付け歯(チップソー)が一般化し、製材から木質材料の切削まで広く使われている。ちなみにステライトを溶着した刃先の摩耗量は通常の鋸歯の5～8分の1に、超硬チップのそれは6～20分の1になるとされている¹⁸⁾。またチップソーの寿命は鋼製鋸の20～50倍あるいはそれ以上に向上するといわれる^{5,19)}。

ここでチップソーと超硬合金について少し述べておこう。超硬合金はもともとWC(炭化タングステン)の粉末をCoを結合材として成形、焼結した粉末冶金製品であり、第1次世界大戦末期にドイツで開発され、1920年代にドイツとアメリカで商品化されたものである。超硬合金の最大の特徴は硬さが

大きいこと、特に高温になっても硬さが低下しないことである。反面靱性が低くもろいことが切削工具材料としての大きな問題点となっている。超硬合金の性質は、WC 粒子の大きさ、Co 含量、添加する TiC や TaC の量と割合で変化するが²⁰⁾、木材切削工具に使用されているのは TiC や TaC をほとんど含まない WC-Co 系と呼ばれる材種であり、JIS²¹⁾ の選択基準では K に分類されるものが一般に使用される。

超硬合金が木材切削に用いられたのは古く、第 2 次世界大戦の前までさかのぼれるが、広く普及したのは戦後である^{22~28)}。また当初はカッター、ルータ類や鉋刃に限られており、チップソーとして用いられるようになったのは、ドイツでも戦後、我が国では 1958 年以降である^{26,28)}。チップソーは硬い超硬チップを薄い円板の周縁にろう接したものであり、従来の鋸のように歯振加工やアサリ出しはできない。そのためろう接した超硬チップを、用途に応じて必要な形に整形研削して各種の歯型を得、その歯型を組み合わせることによって目的を達している²⁹⁾。

1.4 木材切削工具の摩耗に関する研究動向

ここで切削工具の摩耗と鈍化の過程を整理しておく。切削工具は被削材に食い込むことによって切屑を分離、変形、排除していくものであるが、その過程で工具の刃先は摩耗していく。この摩耗によって刃先の幾何学的形状の変化がもたらされるが、木材切削ではまず第一に刃先の鋭利さの喪失として特徴づけられる。刃先の形状変化によって切屑の生成のされ方、被削材と工具の接触状態等が変化すると、それは切削力の増大、加工面の荒れ、加工精度の低下、すなわち工具性能の低下（鈍化）として現れてくる。ところで木材切削工具では、この刃先摩耗は 0.01 ~ 0.1 mm オーダの微小量であるため、その測定には特別の工夫が必要となる。また刃先の鋭利さというきわめてとらえ難い概念が常につきまってくる。そのため木材切削工具の摩耗や鈍化を研究する場合、切削性能の指標である切削力や加工面の性状に着目し、それらの変化として工具摩耗をとらえることが多い。しかしながら、工具の摩耗機構の解明や適格な寿

命延長の方策を講ずるためには、刃先の摩耗形状の把握、摩耗形状と切削性能の関係の解明等が不可欠であり、被削材、工具、切削条件等を因子としてこれらの観点からも多くの研究が進められてきている。なお前述した刃先形状の変化は、工具材料のゆるやかな除去のみでなく、切刃の比較的大きな突然の欠損としても生起する。しかし後者は適切な工具と切削条件の選択によって比較的容易に解決されるものであり、工具摩耗としては考慮されないことが多い²⁾。

工具摩耗を考えるうえで重要なこととして寿命がある。工具の寿命には、刃先が摩耗することによってはやそれ以上正常な切削が続けられない、あるいは目的とする加工面が得られなくなる物理的寿命と、再研磨や工具交換の経費、工具の価格等から決定される経済的寿命がある。この観点から、個々の切削における工具の寿命点の決定、最適切削条件の選定についての研究も行われている。

我が国においては、関口ら³⁰⁾が一連の木材切削に関する先駆的研究の中で、1936年に手鉋の耐久度に触れたのが工具摩耗に関する研究の端緒であろう。彼ら³¹⁾はさらに翌年には、回転鉋の寿命を工具材種、被削材の樹種、切削速度、切削角、刃先角等を因子にして検討している。戦後は、1949年に田中ら³²⁾が木材切削における切屑の分離力の重要性を明らかにし、工具切刃の鋭利さが分離力に大きく影響することを指摘した。1950年代になると枝松ら^{33~35)}の丸鋸の寿命に関する研究が発表され、木下⁴⁾のチップソーの摩耗に関する報告へと続く。1960年代以降は工具摩耗について種々の観点からの研究が発展し、丸鋸^{5,7,8,36~38)}をはじめ、帯鋸^{39~44)}、縦鋸⁴⁵⁾、さらに回転鉋^{46~53)}についての報告がある。その他、周刃フライス^{54~56)}、錐もみ^{57~61)}についても詳細な検討が加えられている。また二次元切削や三次元切削などによる刃先の摩耗と鈍化に関する基礎的研究^{62~65)}や、刃先摩耗と騒音の関係に言及した報告⁶⁶⁾もある。

国外では、1940年にイギリスのHarris⁶⁷⁾が回転鉋の刃先摩耗を取りあげ、摩耗機構にまで言及しているが、木材切削工具の摩耗に関する本格的な研究としては、世界的にみてもこれが最初のものであろう。翌1941年にはド

イツの Fessel⁶⁸⁾ が、硬質クロームメッキによる鋸とフライス工具の寿命改善について報告している。戦後は 1950 年代になって、スウェーデンの Skoglund⁶⁹⁾ による回転鉋の刃先摩耗に関する研究、木材切削における工具の電気化学的摩耗の存在をはじめて実証したフィンランドの Kivimaa⁷⁰⁾ の著名な研究、イギリスの Endersby⁷¹⁾ と西ドイツの Mang⁷²⁾ によるフライス工具の刃先摩耗に関する詳細かつ包括的な研究がある。さらに同年代に、フランスの Chardin⁷³⁾ が帯鋸歯のステライト溶着による耐摩耗性の向上について、西ドイツの Pahlitzsch⁷⁴⁾ が回転鉋の切削力に及ぼす刃先摩耗の影響について報告し、東ドイツの Knospe⁷⁵⁾ が刃先摩耗に関する総括的論文を発表している。なおアメリカでもこの種の研究が進められていたと思われるが、ステライトや超硬合金の木材切削への導入に関する解説^{23~25,106)} 以外、特記すべき研究はこの年代では見当たらない。またソ連でも、Alekseev の電気化学的摩耗の研究をはじめとして多くの研究がその後も行われているようであるが^{1,2,75)}、詳細は不明である。

1960 年代以降は、各国においてこの分野の研究が活発に進められているが、特に木質材料のフライス加工における工具摩耗^{76~92)} と、鋸歯の摩耗やその寿命延長策^{93~111)} についての研究が多い。また刃先の丸味と切削力の関係の解析¹¹²⁾、旋削による摩耗と鈍化過程の詳細な検討^{113~115)} も行われている。

木材切削工具の摩耗機構に関しては、電気化学的摩耗について詳細な検討が加えられており、原因物質の追求、摩耗機構の解明、摩耗を低減させる対策、さらに他の摩耗機構との関連について研究されている^{103,116~124)}。機械的な摩耗^{36,55)} については、木材中のシリカが摩耗を促進させることは周知の事実であるが、木質材料における接着剤と、ファイバーボードやパーティクルボードに含まれる無機物(シリカ、砂粒等)が刃先の機械的摩耗を著しく促進させることがしばしば指摘されている^{77,79,80,84,85,87,89)}。また断続切削時の衝撃が摩耗に大きく影響するという報告¹²⁰⁾ もある。

チップソーも含めた超硬合金工具の摩耗については、杉原ら¹⁵³⁾ と Kröppelin¹²⁵⁾ が走査型電子顕微鏡(SEM)を刃先観察に用いて以後、微細な炭化物粒子の

挙動まで考慮して論ずることが可能となった。林ら⁵⁵⁾は各種工具材料の摩耗した刃先を SEM で観察することにより，超硬工具が硬い粒子（シリカ）のひっかき作用に著しい抵抗性を示すことを明らかにしている。さらに Kirbach¹¹⁹⁾らはベイスギ抽出物によって結合剤の Co が溶出することを観察した。

切削時の工具温度については，帯鋸¹²⁶⁾と丸鋸^{127~130)}の鋸身温度が測定されているが，切削に関与する刃先部分の温度については測定例^{102,113,131,132)}がきわめて少なく，刃先温度の解析¹³³⁾もほとんどない。したがって，刃先温度と摩耗の関係についても，工具の寿命方程式との関連で検討⁶¹⁾されてはいるものの，ほとんど解明されていないのが現状である。

第2章 超硬チップソーの摩耗とそれに及ぼすWC粒子の大きさの影響¹³⁴⁾

超硬チップソーは、その最大の特徴である高度の耐摩耗性の故に、特に硬質の木質材料や難削材の切削でその真価を発揮し、現在では木材工業で広く用いられている。ところで木材切削工具の要件としては、既に第1章で指摘したように、硬さが大きいことのみでなく、木材切削の特性から、靱性が大きいこともその一つにあげられる。そのためチップソー用の超硬合金として通常用いられるのは、WCを主成分とし、Coを結合材としたWC-Co系と呼ばれるものである。しかし超硬合金にも種々の材種があり、チップソーあるいは木材切削用として最適な材種をこの中から選択せねばならないが、この点については従来からほとんど検討が加えられていない。

切削工具用の最適材料を選択する場合や、選択した工具材料の性能を最大限に発揮させるための切削条件の選定にあたっては、工具の摩耗現象を的確に把握することと、さらには摩耗機構を解明することが一つの方法である。木材切削工具の摩耗機構として考えられるものは、第1章で概説したとおり、機械的作用による切刃の微小な欠損と摩滅、切削温度による刃先の材質劣化、電気化学的な摩耗であるが、この中で電気化学的摩耗以外については摩耗機構の解明まで進んでいない。しかし機械的摩耗については、走査型電子顕微鏡(SEM)による工具の観察等から微細なオーダでの解明が進みつつあり^{55,63,125)}、従来の鋼製工具とは組成や構造の異なる超硬工具の摩耗機構もいずれは明らかになるであろう。しかしそのための情報が著しく不足している。

チップソーの摩耗や寿命に関しては、早くから関心はもたれているものの、研究例^{4~8)}は比較的少ない。その中で、チップソーの摩耗に及ぼす因子としては、被削材の種類その他に、超硬チップの硬さ^{4,5,7)}と切削速度^{6,8)}が指摘されている。すなわち、チップの硬さが低いほど、また切削速度が高いほど摩耗量が

大きく，寿命は短くなる。しかし，硬さを高くすれば，一般に靱性が低下して欠損しやすくなること²⁰⁾，また経済性の観点からは切削速度をむやみに低下できないこと⁸⁾は，既に指摘されているとおりである。

以上のように，超硬チップソーの摩耗に関しては，更に検討あるいは解明すべき点が多々ある。そこで，超硬チップソーの摩耗機構を解明する糸口を得るための一つの試みとして，ここでは超硬合金の主成分である WC 粒子に注目し，その大きさがパーティクルボード鋸断時の鋸の寿命，摩耗量，摩耗形態等に及ぼす影響について検討する。そのために以下の二つの実験をした。まず，WC 粒子の大きさが異なる 3 種の超硬チップをそれぞれ付け歯した 3 枚の鋸でパーティクルボードを鋸断し，各鋸の寿命を挽肌の良い否から決定した。さらに各鋸の超硬チップの摩耗形状を顕微鏡と SEM で観察した（実験 1）。次に，各超硬チップの切削条件を等しくするため，上記 3 種の超硬チップを同一の丸鋸に付け歯し，この鋸で切削したときの摩耗量と摩耗形態を一定の切削長さごとに測定または観察した（実験 2）。

2.1 実験

2.1.1 超硬チップの性質と鋸の形状

使用した超硬チップの化学的および物理的性質を表 2-1 に示す。表 2-1

表 2-1 超硬チップの性質

超硬チップ	WC 粒子の 大きさ a) (μm)	Co 含 量 (%)	硬 さ b) (Hv)	抗 折 力 (kg/mm^2)
F	0.5	13	2008	260
G	1.5	6	1811	210
H	5.0	6	1501	200

a) 概略値

b) 実測値（島津 M，1000 g，30 sec）

における硬さ以外の数値はメーカーが提示したものである。3種の超硬チップには、WC粒子の細かいものから順にF、G、Hの記号を便宜上付けた。この中でチップFは、超硬合金の最大の欠点であるもろさを改善するために、WC粒子を1 μm 以下の大きさにすることにより、靱性付与のためCoを増量しても硬さが低下しない、すなわち硬さを低下させずに靱性を向上させることをねらった、いわゆる超微粒超硬合金^{12,20)}に属するものである。またチップGはJIS²¹⁾のK10相当材種である。実験1では3種のチップF、G、Hをそれぞれ付け歯した丸鋸〔F〕、〔G〕、〔H〕を用い、実験2では3種のチップをFGHFGH……のように順に付け歯した鋸〔FGH〕を用いた。それらの形状は表2-2に示す。なお、すべてのチップはダイヤモンド砥石(#400)で研削仕上げした。

表2-2 チップソーの形状

鋸	超硬チップ ^{a)}	直径 (mm)	鋸身の平均厚さ (mm)	歯数 (個)	逃げ角 (°)	刃先角 (°)	すくい角 (°)	平均アサリ幅 (mm)	側面の逃げ角 (°)
〔F〕	F	305	1.9	8	15	60	15	2.9	1~2
〔G〕	G		1.9					2.8	
〔H〕	H		2.1					3.0	
〔FGH〕	F,G,H	304	2.0	60	3.0				

a) top bevel, face bevel は付けてない

2.1.2 装置，切削条件，被削材

装置は、自動送り装置(池谷HI-7)を取り付けた昇降丸鋸盤(庄田HS-121)である(図2-1)。実験1と2の切削条件は表2-3に示す。

供試した被削材は3層パーティクルボード(平均気乾比重0.68, 平均含水率11.6%)で、表層は針葉樹、内層には広葉樹(南洋材)が使われている。寸法は厚さ16~18mm, 長さ1820mm, 幅910mmであり、定規を使って幅

方向に 30 mm ずつ挽き落とした (図 2 - 1) 。

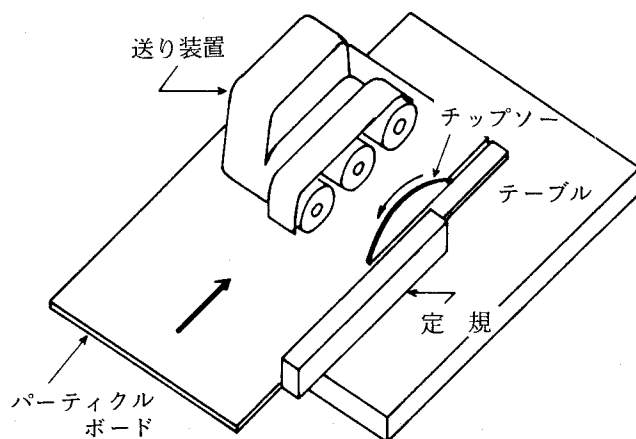


図 2 - 1 装置と切削方法

表 2 - 3 切 削 条 件

実 験	テーブル面か らの鋸の出 (mm)	鋸軸回転数 (rpm)	送 り 速 度 (m / min)	1 歯 当 り の 送 り (mm)
1	20	3670	9.78	0.33
2			18.75	0.085

2.1.3 丸鋸の精度

切削前における丸鋸の精度を検査するために、鋸を鋸軸に取り付け静かに手で回したときの、鋸歯と鋸身の切削円および切削面からの振れを丸鋸盤テーブル面に固定したダイヤルゲージで測定した (表 2 - 4)。これらの測定は切削途中にも数回行った。

2.1.4 刃先の観察と摩耗量の測定

実験 1 における鋸の寿命は、挽材面に焼けが認められることをもって判定した。超硬チップは、一定切削材長毎に金属顕微鏡 (ユニオン RMM) で観察し、写真撮影した。撮影方向は、逃げ面と側面にそれぞれ垂直な方向と、刃先角の

二等分線の方向とした。また超硬チップの摩耗形状をより詳細に検討するため、寿命に達した後で鋸身から歯部を切り取り、SEM（JSM-U3）と万能投影器（ニコン6C）で観察した。

実験2における刃先の摩耗量は、図2-2に示した諸量を写真上で測定した。ここで刃先の丸味幅（ W_e ）は、逃げ面側とすくい面側から刃先を照明し、刃先の二等分線方向から観察したときの暗黒部の幅として定義される。摩耗量の測定は、鋸の円周上で等分の位置にある4群（各群はF、G、Hの3個のチップから成る）計12個の超硬チップについて行い、各チップの摩耗量は4個の測定値の平均として表した。なお各チップの逃げ面上には、刃先線から約0.8mm離れた位置に、微小硬度計（島津M）で圧痕を付け、摩耗測定の基準点とした。

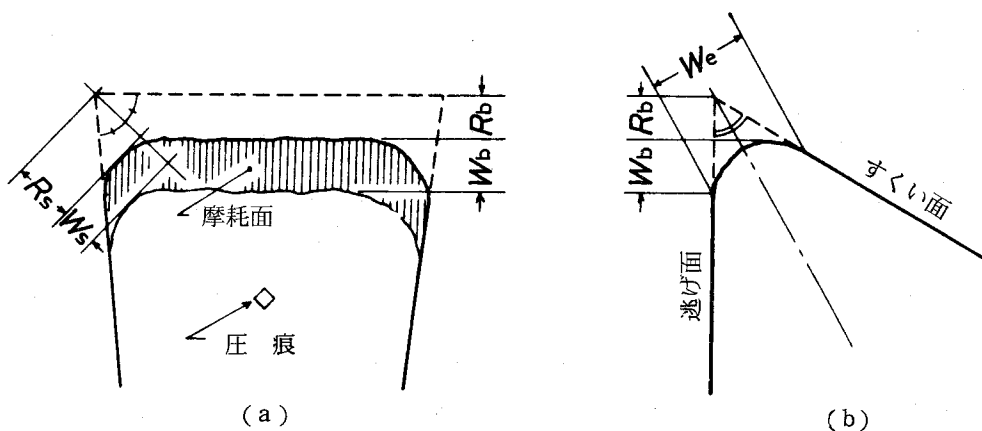


図2-2 摩耗量の定義
(a) 逃げ面, (b) 側面

2.2 鋸の寿命と超硬チップの摩耗形状

ここでは前節の実験1の結果から、各鋸の寿命と摩耗した超硬チップの形状について述べる。なお切削前における各鋸の精度は表2-4に示すように、3枚の鋸で大差なく、精度の点では各鋸を同等に扱える。また振れの値は、切削中もほとんど変化しなかった。

表2-4 鋸の精度

鋸	(μm)	[F]	[G]	[H]
外周の振れ ^{a)}	(μm)	113	125	75
隣接鋸歯間の最大外周振れ ^{b)}	(μm)	60	71	65
鋸歯の角の横方向の振れ ^{a)}	(μm)	171	173	155
隣接鋸歯間の最大横振れ ^{b)}	(μm)	135	129	110
鋸身の横振れ ^{a),c)}	(μm)	129	131	125

- a) 鋸を1回転させたときのダイヤルゲージの読みの最大値と最小値の差
- b) 隣接した鋸歯間におけるダイヤルゲージの読みの差の最大値
- c) 歯室底部において測定

2.2.1 鋸の寿命

寿命に達したと判定したときの切削材長と切削長（1個の歯が被削材中を通過した長さの総和）を、各鋸について表2-5に示す。ここで鋸〔H〕の場合は、切削材長4000mでも挽材面に明確な焼けが認められず、まだ切削可能であった。しかし3000m付近から、木材チップのボード表面からの剥離が認められ、挽材面の毛羽立ちも生じてきた。したがって、焼けはまだ生じていないが、製品の商品価値から判断して、鋸〔H〕の寿命は切削材長4000mとした。3種の超硬チップの中で硬さ、抗折力とも最も劣る（表2-1）チップHを付け歯した鋸〔H〕は、3枚の鋸の中では最も長い寿命を示した。一方、硬さ、抗折力とも最高の値を示し、工具性能としては最良と考えられるチップFを用いた鋸〔F〕は、予期に反して最も短い切削材長で寿命となった。

表 2-5 寿命点までの切削材長と切削長

鋸	切削材長 (m)	切削長 (m)
[F]	239	3960
[G]	980	16600
[H]	4000	69700

2.2.2 超硬チップの摩耗形状

鋸〔F〕,〔G〕,〔H〕の寿命点における各超硬チップの写真を図2-3に示す。写真から明らかなように、超硬チップの刃先はすくい面と逃げ面から顕著に摩耗し、さらに側面切刃も全長にわたって摩耗が進行している。この側面切刃の、チップ側面側の摩耗帯幅は、3種のチップともに挽材時の定規側(図2-1)が送り装置側よりも大きい。砥石による研磨条痕が認められる研磨面と、写真で暗くみえる摩耗面との境界、すなわち摩耗境界線は、3種のチップとも逃げ面側ではきわめて明瞭であるが、チップFの場合には微細な凹凸が認められる。この境界線は側面でも明瞭であるが、チップHではFやGほどはっきりしない。一方すくい面側では、研磨面から摩耗面に向かって、研磨条痕が次第に不明瞭になる傾向を呈し、摩耗境界線が判然としない。このことはチップHで最も顕著である。

図2-3の側面の写真から寿命点における刃先の後退量(R_b)を概算してみると、チップHが約 $160 \mu\text{m}$ 、チップFとGは約 $90 \mu\text{m}$ である。ここで寿命点までの切削材長から平均刃先後退速度を算出すると、チップFが最も大きく、チップHが最小である。すなわち最も耐摩耗性が高いのはチップHであることがわかる。

超硬チップの摩耗形状をより詳細に検討するため、これらのチップをSEMにより観察した。図2-4は参考のために示した未使用チップの写真である。未使用の超硬チップの刃先線は、低倍の写真では1本の直線としてみえるが、高倍では刃先線がある幅をもち、ここに示したチップHではWC粒子が大きい

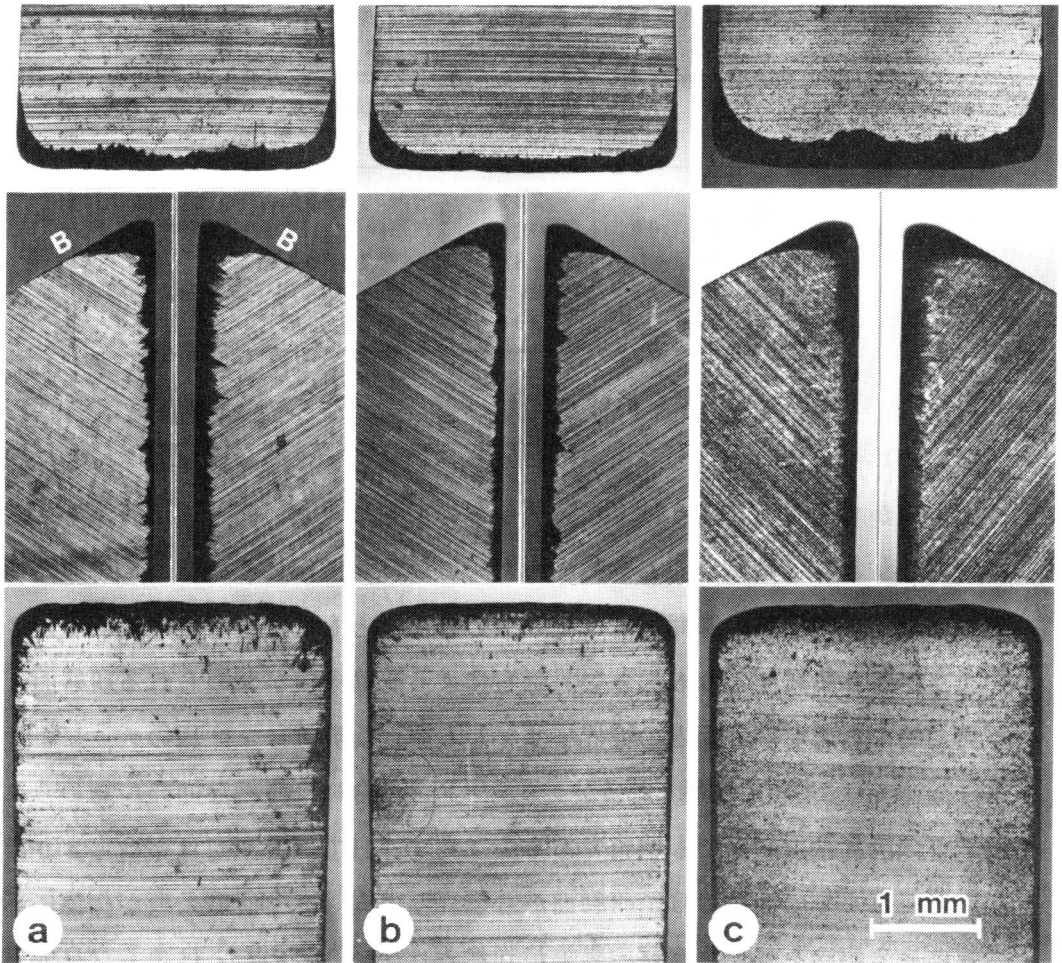


図2-3 鋸〔F〕(a), 〔G〕(b), 〔H〕(c)の寿命点における超硬チップの形状
 上：逃げ面(B), 中：側面(左：送り装置側, 右：定規側),
 下：すくい面

こともあって、 $5\ \mu\text{m}$ もの幅をもつ粗い刃先線を有していることがわかる。図2-5は寿命点における各超硬チップの刃先の角(コーナ)の状態を示すSEM写真である。図2-3で指摘したように、各チップの摩耗境界線が逃げ面側では画然としているが、すくい面側では不明瞭であることがこの写真からもわかる。摩耗面の状態は、チップGとHでは比較的平滑であるが、チップFの場合にはひっかいたような条痕が発達し、深いみぞとなっている場合もある。このような摩耗面の条痕はチップGとHの側面でも若干認められるが、チップFの

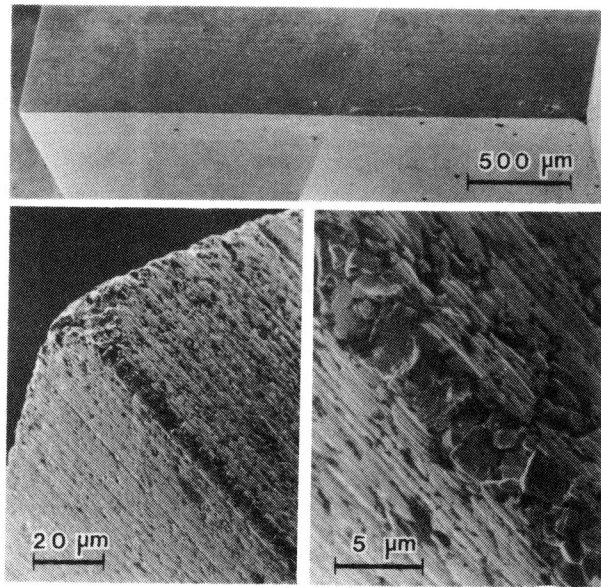


図2-4 未使用の超硬チップ (H) のSEM写真

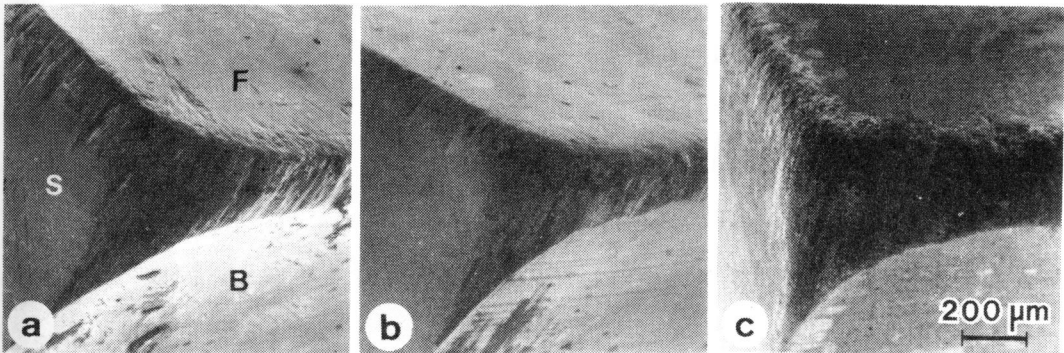


図2-5 鋸 [F] (a), [G] (b), [H] (c) の寿命点における超硬チップのSEM写真

B : 逃げ面, **F** : すくい面, **S** : 側面

場合のように明瞭ではない。

図2-6は各超硬チップの研磨面と摩耗面の高倍率の写真である。研磨面では、WC粒子が基材のCoに埋め込まれ、個々の粒子を区別できないが、摩耗面では個々の粒子が明確に区別され、各チップの粒子の大きさの差異が明瞭である。このことは、超硬チップの摩耗が進行する際には、WC粒子の脱落に先立ってCoの優先的な除去が生起すること¹²⁵⁾を示唆するものと考えられる。

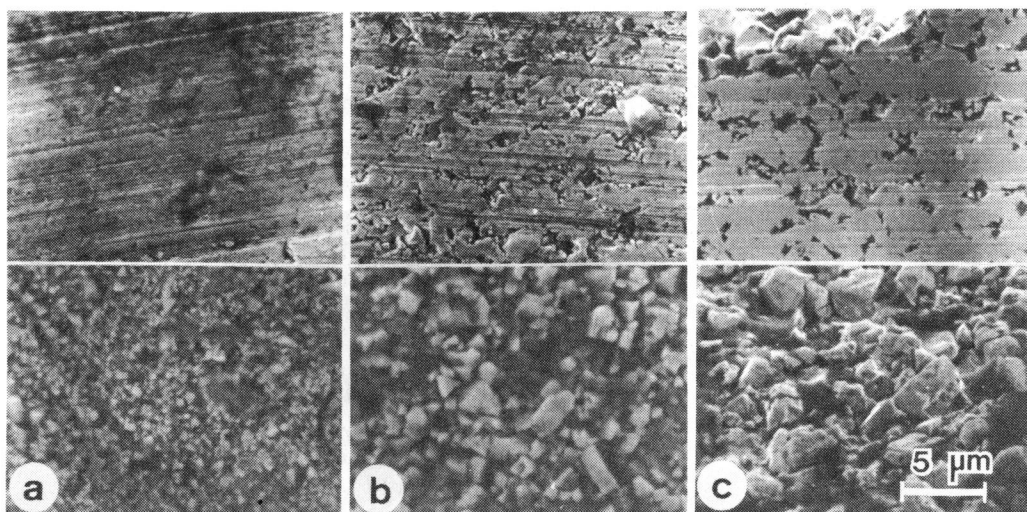


図2-6 チップF(a), G(b), H(c)の研磨面(上)と
摩耗面(下)のSEM写真

2.3 超硬チップの摩耗経過

2.1節に示した実験2では、3種の超硬チップを付け歯した鋸〔FGH〕で、パーティクルボードを1000mの長さまで切削した。なおこの実験では、切削材長1000mまで挽肌の変化はほとんど認められず、最後の段階でボード表面の木材チップがわずかに剥離したのみである。また実験1と同様に鋸〔FGH〕の精度も測定したが、各測定値は表2-4に示したものと同程度であった。本節ではこの実験2の結果について述べる。

2.3.1 刃先形状の変化

鋸〔FGH〕に付け歯した超硬チップの、1000m切削する間の刃先の形状変化の例を3種のチップについて図2-7に示す。図2-7の各チップの写真は、逃げ面、側面、刃先角の二等分線方向のものである。切削開始直後では、刃先の状態にチップ間の差はほとんどないが、切削材長(L)が100m以上になると、チップFの逃げ面と側面の摩耗帯が他の二つのチップに比べて著しく広がっている。このときのチップFにおける逃げ面と側面の摩耗境界線は、不規則な細かい凹凸を示している。ちなみに、チップGの摩耗境界線は、図2

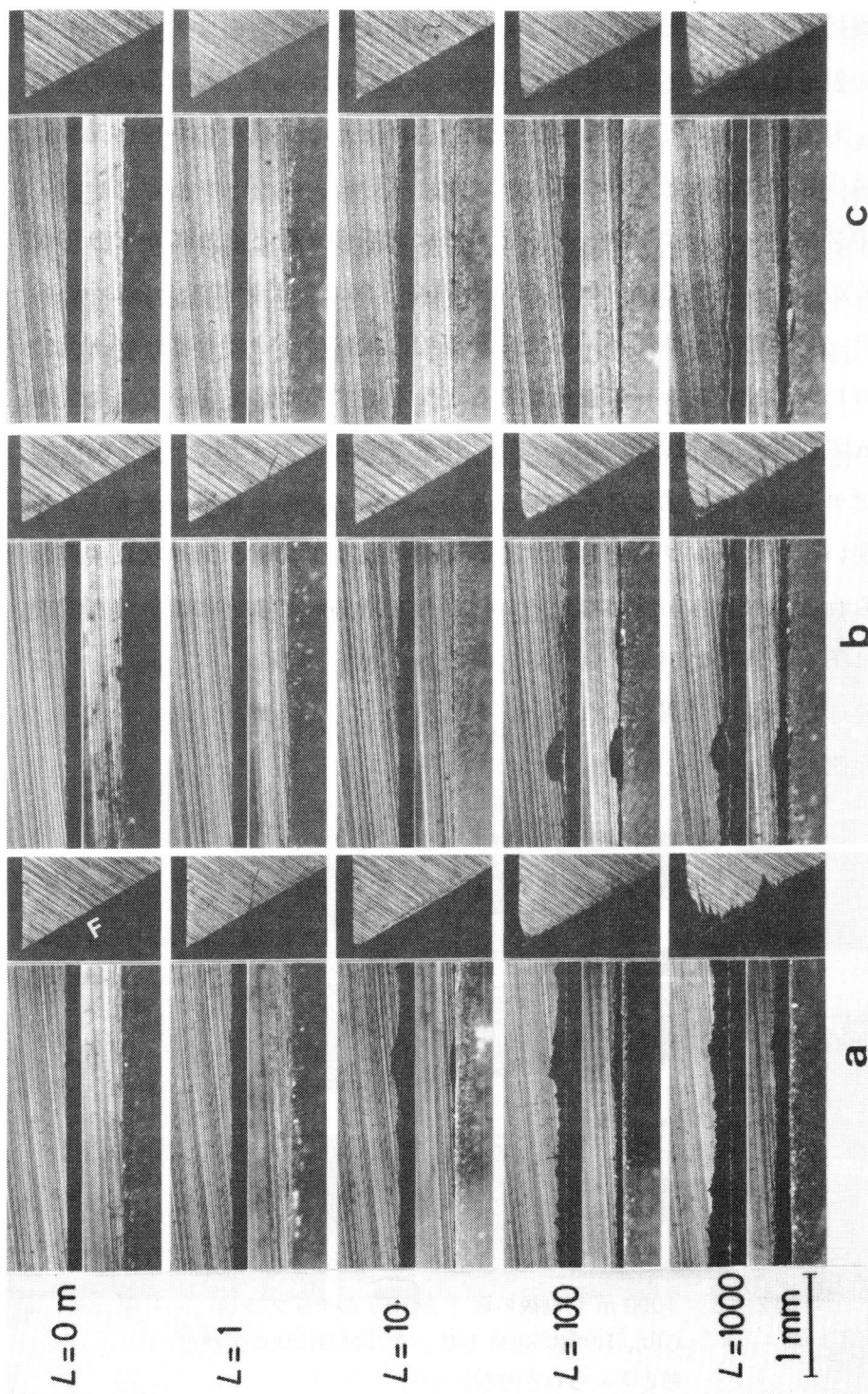


図2-7 鋸〔FGH〕のチップF(a), G(b), H(c)の摩耗経過

左上：逃げ面，左下：刃先角の二等分線方向，右：側面（定規側）

F：すくい面，L：切削材長

-7の写真にもみられるように、しばしば部分的に大きく後退する。しかしその部分の刃先線はほとんど後退せず、直線的である。したがってこの境界線の部分的後退は、刃先の欠損ではなく、刃先に近い逃げ面から工具材の一部が薄片状になって脱落したためと考えられる。

刃先線のプロフィールは、チップGとHでは切削の進行とともにかなりの凹凸を呈するが、チップFでは1000mの切削終了時まで直線状である。このことは、チップFの刃先摩耗が、刃先の局所的な欠けなどを伴わずに、刃先の幅全体にわたって比較的均一に進行することを示唆するものであろう。

1000m切削後、3種の超硬チップをSEMで観察した(図2-8,9)。図2-8はチップ全体を示したものであるが、チップFの摩耗帯が最も広く、Hは最も狭い。またチップGとHのすくい面側には、工具材が薄片状に脱落したと考えられる浅い凹みが認められる。前節でも指摘したように、チップFの摩耗面には条痕が著しいが、チップGとHでみられるようなすくい面における工具材の薄片状の脱落は認められない。ところで、刃先の摩耗はすくい面側よりも逃げ面側でより優勢であるが、特にチップFで最も明瞭に現れている。

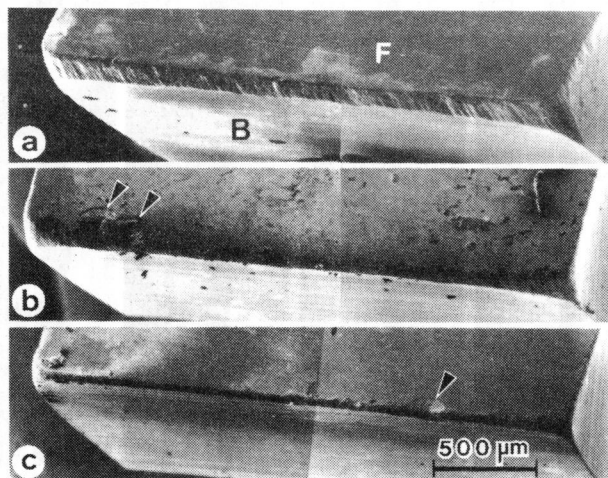


図2-8 1000m切削後の鋸〔FGH〕のチップF(a)、G(b)、H(c)のSEM写真(矢印は薄片状に欠けた跡と考えられる凹みを示す)

B, F: 図2-5に同じ

このことは、逃げ面側における被削材との摩擦が刃先摩耗にとってより重要であることを示唆していると考えられる。そしてこの種の摩耗に対する抵抗性の点からは、チップFが最も劣り、Hが最もすぐれていることになる。

図2-9はすくい面と逃げ面の摩耗境界線付近を高倍率に拡大した写真である。ここで各写真上側の条痕があるところが研磨面である。逃げ面側とすくい面側の摩耗面を比較すると、逃げ面側ではWC粒子の間により微小な粒子や未知の物質が介在し、比較的平滑にみえる。一方すくい面側では、個々のWC粒子が明確に浮きあがり、全体として粗く、荒れた状態にみえる。このような摩耗面の差は、刃先の逃げ面側とすくい面側で異なった摩耗機構が働いていることを示すものと考えられる。

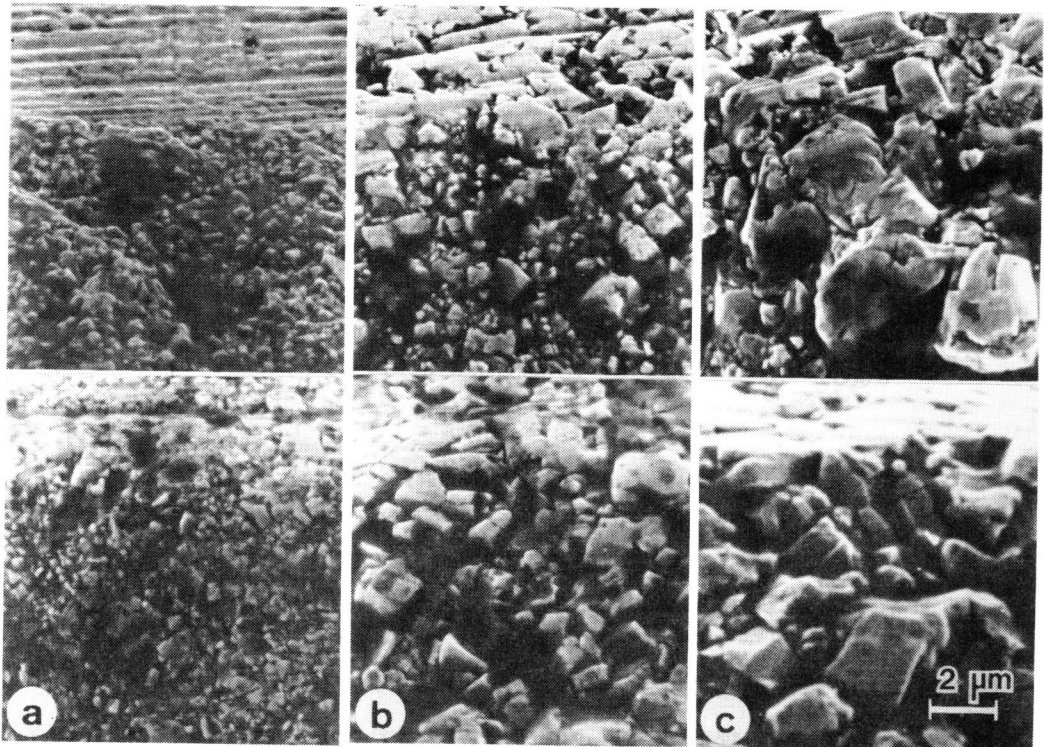


図2-9 チップF(a), G(b), H(c)の逃げ面(上)とすくい面(下)の摩耗境界線付近のSEM写真

2.3.2 刃先の摩耗量

(a) 刃先後退量 (R_b)

切削材長 (L) 10, 100, 1000 mにおける刃先後退量 (R_b , 図2-2) を両対数グラフにプロットした(図2-10)。刃先後退量はチップFが常に最も大きく, チップHが最小である。1000 m切削後のチップF, G, Hの刃先後退量の比はおよそ2 : 1.5 : 1である。このことは, 後退量の大きいチップを付け歯した鋸ほど寿命が短いことを証明している(表2-5)。

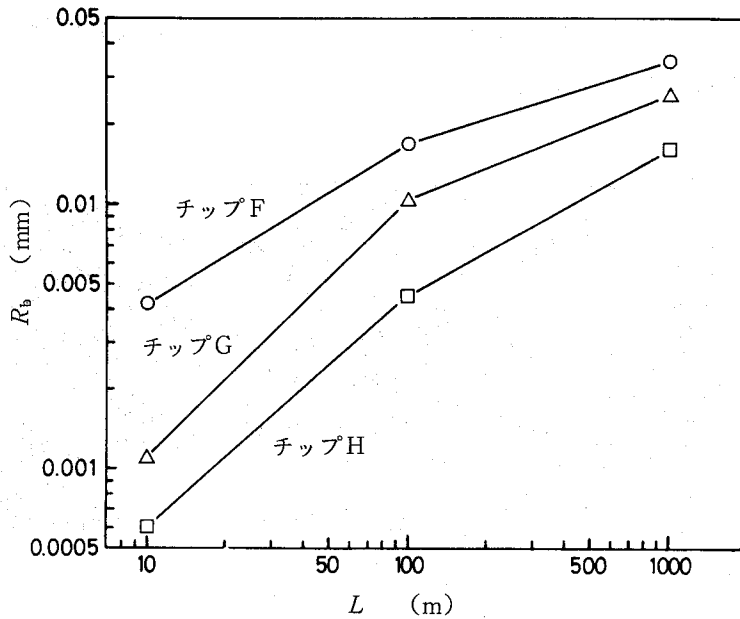


図2-10 鋸〔FGH〕における切削材長 (L) と刃先後退量 (R_b) の関係

(b) 逃げ面摩耗帯幅 (W_b)

切削材長との関係を図2-11に示す。図にみられるように, 両者の関係は両対数グラフで大略直線的である。この摩耗帯幅でもチップFが常に最も大きく, Hが最小である。1000 m切削後のチップF, G, Hの摩耗帯幅の比は3.6 : 1.7 : 1であり, 刃先後退量と同じ順序であるが, チップ間の差異はより拡大されている。すなわち, チップFについてみれば, 刃先後退量の割には

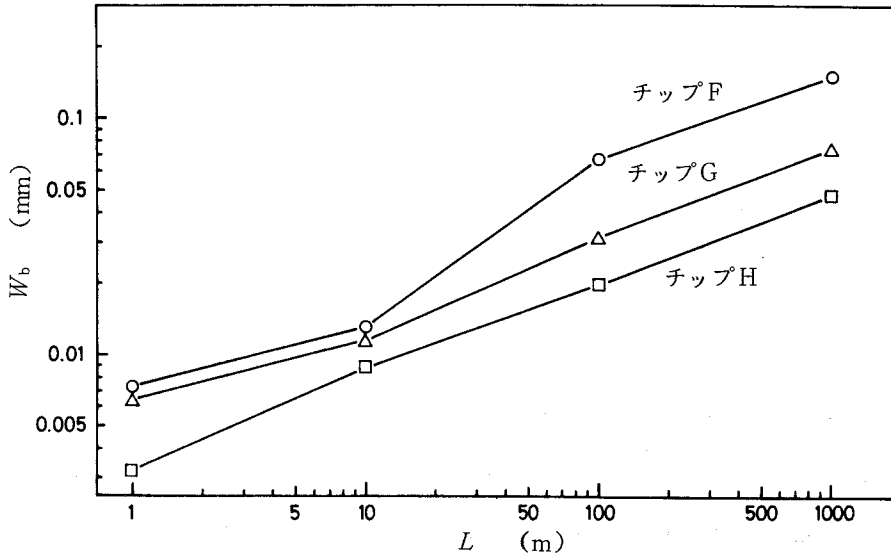


図2-11 鋸〔FGH〕における切削材長(L)と逃げ面摩耗帯幅(W_b)の関係

逃げ面での摩耗が大きくなる。

(c) 歯の角(アサリ切先)の摩耗量(R_s, W_s)

1000 m切削後の各超硬チップの歯の両側の角の摩耗量を表2-6に示す。後退量(R_s)、摩耗帯幅(W_s)ともチップFが最も大きく、次いでG、Hの順であった。また各チップにおける角の後退量は、定規側と送り装置側でほとんど異ならないが、摩耗帯は定規側の方がやや広がっている。

表2-6 切削終了後の鋸〔FGH〕における刃先の角の摩耗量

超硬チップ	R_s		W_s	
	送り装置側 (mm)	定規側 (mm)	送り装置側 (mm)	定規側 (mm)
F	0.093	0.093	0.189	0.152
G	0.071	0.071	0.162	0.118
H	0.056	0.054	0.084	0.072

(d) 刃先の丸味幅 (W_e)

切削材長との関係を両対数グラフで図2-12に示す。なお各超硬チップは、切削前に既に2~4 μm の刃先の丸味幅を有していた。図2-12で明らかなように、刃先の丸味幅は他の摩耗量と同様、切削とともに略直線的に増加している。ここで注目すべきは、切削開始直後では3種のチップの丸味幅に大差がないものの、チップFが最も小さく、G、Hと大きくなっていることである。このことは、WC粒子が細かいチップほど研磨時により鋭利な刃先が得られることと、その鋭利な刃先が切削初期の間保たれることを示唆する。100 m切削後は、刃先の丸味幅も $F > G > H$ の順となり、他の摩耗量と同一傾向を示す。チップFの大きな丸味幅はその広い逃げ面によるものと考えられる(図2-8、図2-11)。実験当初は、刃先の丸味幅 (W_e) は刃先の「丸味」の指標として考えたが、実際には、例えばチップFのように比較的鋭利な刃先を有していても(図2-8)、摩耗帯が広ければ丸味幅の値は大きくなり、この値から刃先の丸味を推定するには少し無理があるようである。ちなみに、1000 m切削後の丸味幅の比は、チップF、G、Hで3 : 1.5 : 1であった。

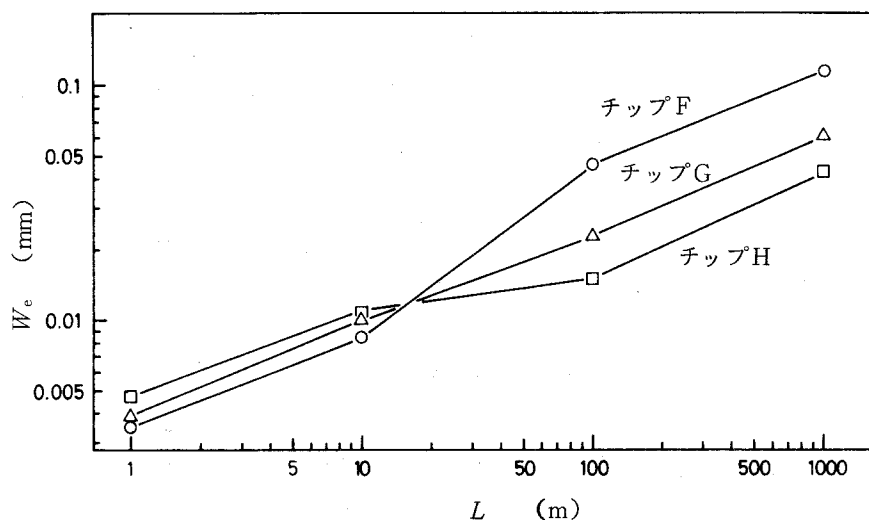


図2-12 鋸〔FGH〕における切削材長 (L) と刃先の丸味幅 (W_e) の関係

2.4 チップソーの寿命と摩耗機構

2.4.1 超硬チップの硬さと摩耗

木材切削工具では，一般に硬い工具材料ほど摩耗が少なく，寿命も長いといわれている^{47,49,50,53}。事実工具の寿命延長策の一つの大きな流れは，刃先をいかに硬くするか，硬い工具材料をいかに木材切削に導入するかである。チップソーについても，硬い材種を付け歯した鋸ほど耐摩耗性が大きいことが報告されている^{4,5,7}。しかし硬さと摩耗量が必ずしも一致しないという報告^{54,55}もあり，また金属切削¹³⁵や岩石の穴あけ¹³⁶でも，超硬工具の硬さが耐摩耗性の指標にならないとする指摘がある。本章に示した実験では，硬さと靱性の点で最も高い切削性能が期待されたチップFを付け歯した鋸が，3種の鋸のなかでは最も寿命が短く，刃先の摩耗も大きかった。また逆に，最も硬さの低いチップHが，寿命，耐摩耗性の点で最高の性能を示した。この結果は，超硬チップの硬さが耐摩性の指標になるとする既往の結果^{4,5,7}とは一致せず，むしろ逆の結論を導くことになる。しかし本実験では，硬さと同時にWC粒子の大きさも広範囲に変化しており，硬さと摩耗の関係を一概に論じることはできない。

2.4.2 チップソーの寿命と摩耗機構

チップソーの摩耗は，切削開始直後を除き，通常はゆるやかに進行するため，その寿命判定には，挽肌の良い否（毛羽立ち，焼け，欠けなど）や再研磨の経済性が考慮される^{4,5}。本章の実験（実験1）では焼けの発生をもってチップソーの寿命を判定したが，この寿命と摩耗量の間には一定の関係，すなわち耐摩耗性の低い超硬チップを付け歯した鋸ほど寿命が短いという関係があった。しかし本実験で採用した摩耗量（図2-2）から，寿命の長短をどこまで推定できるかについては，摩耗量ごとに超硬チップ間の比が微妙に異なることもあり，一概に結論できない。一方刃先の摩耗量，特に刃先の後退量は，切削性能の低下すなわち鈍化の指標となり得ず，それよりも摩耗した刃先の幾何学的形状が重要であるとする報告^{83,114,115}もある。また本実験のように工具材料を構成するWC粒子の大きさが著しく異なる場合には，刃先の摩耗面の性状も考

慮すべきであろう。一つの可能性として、チップHの摩耗面に現われた粗大なWC粒子は被削材に対して一種の研削粒として良好に働くが、一方超微粒のWCから成るチップFの摩耗面は微視的にも平滑であり、この研削作用に乏しいことが考えられる。このことが正しいとすれば、鋸〔H〕は刃先摩耗がかなり進行しても被削材に焼けが生じず、鋸〔F〕では比較的小さな刃先摩耗で焼けが生じたことの一つの説明になり得る。

林ら⁵⁵⁾は、種々の被削材を異なった工具材料を用いてフライス切削したときの摩耗刃先をSEMで観察し、摩耗の著しい刃先逃げ面側では、工具材料が激しくまたはゆるやかに削りとられていく、いわゆる研削タイプ(アブレッシブ)の摩耗が進行し、すくい面側では、切屑がすくい面をたたくようにして摩耗が進行すると結論している。特に鋼製工具でシリカ含有材やパーティクルボードを切削した場合には、逃げ面側の摩耗面に条痕が著しく発達し、硬い粒子によるひっかき作用が明瞭に認められる。一方超硬工具の場合には摩耗面の条痕はほとんどみられず、上記の研削タイプの摩耗に対して高い耐性があることを示している。本章における摩耗した超硬チップの観察においても、摩耗面の条痕は逃げ面と側面にのみ認められ、すくい面では工具材料の薄片状の脱落をうかがわせる特徴的な凹みが認められた(図2-5, 2-8)。この観察結果は、林ら⁵⁵⁾の結果とも一致し、チップソーにおいても逃げ面と側面の主な摩耗機構はアブレッシブ(研削タイプ)摩耗であり、すくい面においては切屑との衝突が一つの摩耗因子になっていることを示唆している。すくい面における切屑との衝突については、図2-3のチップHのすくい面の写真が一つの証拠になるであろう。すなわちこの写真では、側面切刃と主切刃に沿った領域で、研磨痕が不明瞭になっていることがよくわかる。

超微粒超硬合金の一種であるチップFは、刃先の欠けやすくい面での薄片状の欠けに対しては他の2種のチップよりも良好な性能を発揮したが、逃げ面の摩耗に対しては抵抗性が低く、鋼製工具と同様の摩耗面⁵⁵⁾を呈した。このようにチップFは、鋭利な刃先が得られ、欠けにも強いという、木材切削工具としての一つの適性を有していることから、適切な使用条件が確立すれば、有用

な工具材種になり得る可能性がある。

2.5 要 約

WC 粒子の大きさの異なる 3 種の超硬チップを付け歯したチップソーで、パーティクルボードを切削し、その時の寿命、摩耗量、摩耗形態を調べた結果、次のことが明らかになった。

(1) 最も粗い(約 $5\ \mu\text{m}$) WC 粒子から成る超硬チップ(H)を付け歯した鋸の寿命が最も長く、硬さと抗折力で最もすぐれていた、超微粒(約 $0.5\ \mu\text{m}$)の WC 粒子から成る超硬チップ(F)を付け歯した鋸の寿命はきわめて短かった。その中間に普通粒度(約 $1.5\ \mu\text{m}$)の超硬チップ(G)を用いた鋸が入る。各超硬チップの耐摩耗性と寿命の関係は一致し、チップ F の耐摩耗性が劣る一つの原因は、逃げ面における被削材との摩擦による摩耗に対して抵抗性が低いことであると考えられる。

(2) 超硬チップの摩耗面は、すくい面と逃げ面で様相が異なり、すくい面では WC 粒子が個々に識別でき粗く見えるが、逃げ面側では微細な粒子や不定形の物質が WC 粒子間に介在し、比較的滑らかに見える。また逃げ面側では工具材料が削りとられたような条痕が認められ、特にチップ F で顕著であった。一方すくい面側には、工具材料が薄片状に脱落したと考えられる凹みがしばしば認められた。研磨面と摩耗面の境界は、逃げ面側では明瞭であるが、すくい面側では移行帯的な領域が存在する。

(3) 超硬チップの摩耗機構としては、逃げ面と側面ではアブレッシブ摩耗、すくい面では切屑との衝突による摩耗が主要なものと考えられるが、刃先は逃げ面側でより強く摩耗した。

第 3 章 単一鋸歯による刃先摩耗のシミュレーション

木材切削工具の摩耗は、刃先からの工具材料の単なる喪失としてではなく、切味の低下や刃先の鈍化 (blunting, dulling, Abstumpfung) という言葉で表現されるように、切削性能の低下をもたらす刃先の幾何学的形状の変化として認識されることが多い。その場合は、切削性能の低下をもたらす刃先の形状変化をとらえることが重要な問題となる。工具の切削性能の低下は、送り力や切削所要動力の増加、仕上面の悪化、加工精度の低下として現れるが、通常は切削所要動力または切削抵抗から判断されることが多い。チップソーも含めた丸鋸切削においても、上記の観点から工具摩耗を評価する試みがなされ、刃先摩耗にともなう挽材所要時間^{33,35)} や所要動力^{4,5,34,37,38)} の増大、被削材にかかる力としての切削抵抗^{101,103,104)} の増加や各分力間の比の変化について検討されている。

ところで、超硬チップソーの摩耗について検討する場合、チップソーをそのまま用いた切削方法では、切削速度や送り速度等の切削条件、刃先の形状等の条件以外に、鋸の仕上精度^{5,6,7)} や鋸身の振動⁶⁾ の影響についても考慮せねばならない。また、挽材所要動力や鋸軸のトルクの測定は別にして、切削抵抗の各分力を測定するには特別の工夫が必要となる。特に、鋸切削では側面切刃による挽肌形成が重要であるが、これを切削抵抗の横方向の分力としてとらえることは不可能である。さらに、付け歯した超硬チップの摩耗形状を観察する場合には、チップソーそのままでは一定の制約が伴い、同一超硬チップの摩耗経過を SEM で追跡することもできない。

これらの実験上の難点を克服し、個々の鋸歯の切削性能や摩耗経過を詳細に^{113,114,115,137,138)} 検討するための一つの方法として、単一の鋸歯を用いた切削試験がある。Pahlitzsch ら¹¹³⁾ は、回転している直方体状の被削材を単一鋸歯で切削することによって、丸鋸切削類似の切削条件下における刃先の摩耗経過を、

切削力，摩耗量，刃先温度の変化から検討し，刃先角や鋸歯の仕上げ状態と摩耗の関係についても考察している。また McKenzie ら^{114,115)} は，円板状の被削材を旋削（連続切削）したときの切削力の直交3分力と種々の刃先摩耗量を追跡し，切削性能に最も関係する摩耗量について検討している。単一鋸歯を用いた切削では，被削材の形状を工夫することにより，丸鋸切削を含めて木材切削では普通にみられる断続切削を再現することができるが，この断続切削時に刃先に作用する衝撃力も摩耗を促進させる一つの因子と考えられる。¹²⁰⁾ Klamecki は，化学摩耗に関する研究の中でこのことにも触れ，超硬合金のような比較的にもろい工具材料の摩耗は，切削長よりもむしろ被削材との衝突回数に密接に関係していることを指摘している。

そこで本章では，既に第2章で述べたチップソーの摩耗を，摩耗刃先のより詳細な観察，さらに切削性能の低下の面から引き続き検討するため，単一鋸歯による摩耗試験を試みた。すなわち，まずチップソーから切り取った単一鋸歯で，パーティクルボードの積層ブロックを断続切削し，刃先摩耗量と切削力の測定，摩耗段階の異なる刃先の観察等から，単一鋸歯による摩耗試験について検討を加えた。次いで，第2章に示した3種の超硬チップを用い，被削材ブロックを断続的および連続的に旋削することにより，各超硬チップの摩耗経過を明らかにするとともに，摩耗に及ぼす衝撃の影響についても検討した。

3.1 刃先の摩耗経過と切削方法の評価¹³⁹⁾

3.1.1 実 験

切削はすべて金属用旋盤（安藤AKS-45DG-M₂）で行った。主軸に被削材を固定して回転させ，刃物台に鋸歯をバイトホルダと工具動力計（共和TD-300KA）を介して固定し，送り運動を与えた。

切削工具は，表2-2に示した鋸〔G〕と同じ種類のチップソーから歯部を切り取って作成した単一鋸歯である（図3-1）。ただし，切り取るときの誤差により，すくい角が17°，逃げ角が13°となっている。また硬さの実測値はHv 1800であった。鋸歯の寸法は，SEM（JSM-U3）の試料室に

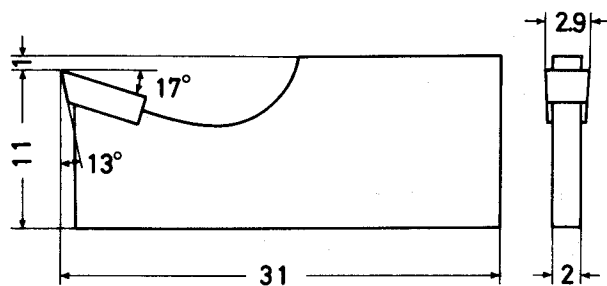


図3-1 単一鋸歯 (単位, mm)

納まるように設計した。

被削材は，2.1.2項で示したと同種の3層パーティクルボード(厚さ15 mm)を酢酸ビニル樹脂で接着して6枚積層し，接着完了後直方体(約220×80×90 mm)に整形したものをを用いた。この被削材ブロックは，旋盤で回転径218 mmに削った後に，切削に供試した(図3-2)。積層後の被削材の比重は0.67～0.70，含水率は10.9～12.1%であった。

鋸歯は，その刃先線が旋盤主軸に平行かつ同一高さになるようにし，旋盤主

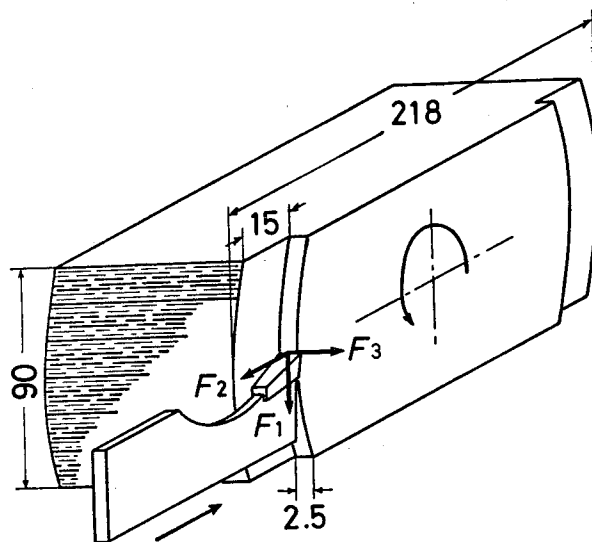


図3-2 断続切削の模式図 (単位, mm)

F_1 , F_2 , F_3 : 切削力の主分力, 背分力, 横分力

軸に向かって水平に送った(図3-2)。主軸回転数は1240 rpm, 切削幅2.5 mm, 設定切屑厚さ(1回転当りの送り)0.042 mmとした。ただし, 切屑厚さは, 切削途中の一部区間で0.087 mmとしたところがある。なお鋸歯の送り込み深さは15 mmとしたので, 平均切削速度は12.2 m/secとなる。切削は切削長(切削弧長の和, L')18.5 kmまで行った。切削力は, 主分力(F_1), 背分力(F_2), 横分力(F_3)を工具動力計によって測定し, 電磁オシログラフに記録したが, 横分力を測定するため, 図3-2に示すように, 歯の片側は被削材と接触させずに切削した。

超硬チップの刃先摩耗量としては, すくい面と逃げ面における, 元の刃先からの後退量(R_f, R_b)と摩耗帯幅(W_f, W_b)を測定した(図3-8)。超硬チップのすくい面と逃げ面の, 刃先線から約0.5 mm離れた位置に, 微小硬度計の圧痕を印して摩耗量測定の基準点とした。一定切削長毎にホルダから鋸歯を取り外し, すくい面, 逃げ面, 側面に垂直な方向から金属顕微鏡で刃先を撮影した。この写真上で刃先線の5点(図3-4の1~5の点)で測定を行い, その平均値を各切削長におけるそれぞれの摩耗量とした。刃先の摩耗状態は, 光学顕微鏡の外にSEMも用いて, 摩耗面の性状やWC粒子の形状を観察した。なお切削終了後, 刃先線に沿った約10カ所の点における刃先の断面形状を, 表面粗さ計(小坂SE-3C)の触針を刃先線に垂直な方向に駆動することによって求めた。

3.1.2 刃先の摩耗形態

この実験では切削長18.5 kmまで切削を続けたが, その間に工具の異常振動や送りの困難さ, また被削材の焼けや切削面の顕著な荒れ等は認められなかった。ちなみに, 第2章で示したように, この実験と同種の超硬チップを付け歯した鋸〔G〕でパーティクルボードを切削した場合には, 約17 kmの切削長で切削面に焼けが生じ寿命に達した。

切削の進行に伴う刃先の形状変化を明らかにするため, 切削長の5段階で撮影した顕微鏡写真を図3-3に示す。切削開始後800 mで既に刃先の顕著な摩耗がみられ, 刃先線と摩耗境界線の部分的後退が認められる。その後は逃げ

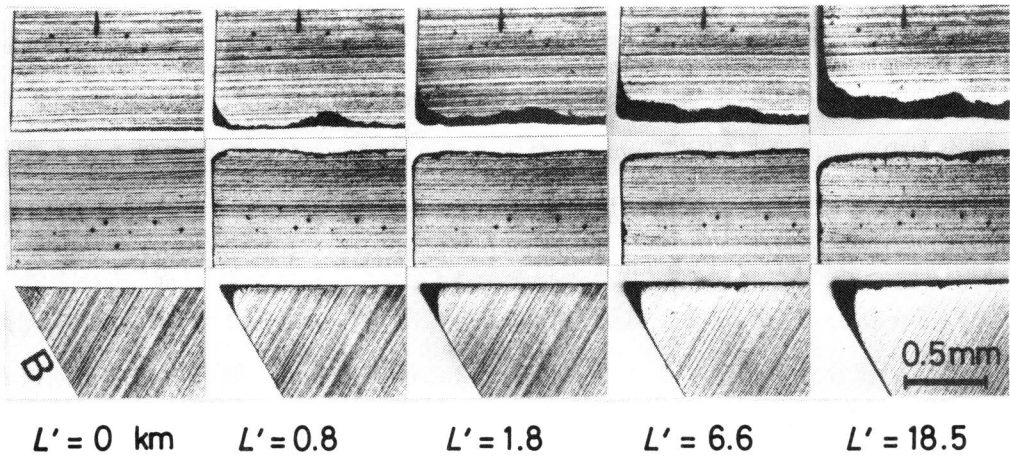


図 3 - 3 刃先摩耗の進行を示す顕微鏡写真
 上：逃げ面（B），中：すくい面，下：側面
 L' ：切削長

面と側面の摩耗帯が顕著に大きくなり，歯の角（コーナ）の摩耗も著しくなる。一方すくい面側の摩耗帯は，切削が進行してもそれほど大きくなるない。

ところで切削終了時の刃先の後退量と摩耗帯幅は，この実験の場合には，刃先線全体にわたって一様ではなく，被削材に接触する側面に近いほど摩耗が著しかった。そこで刃先線の 11 カ所における刃先断面を表面粗さ計を使って再構成してみた（図 3 - 4）。図 3 - 4 をみると，摩耗量の小さいところでは，刃先は単に丸味を帯びているのみであるが，摩耗がある程度以上進行したところでは，明らかに逃げ面側の摩耗がすくい面側よりも著しくなっている。その結果，摩耗した刃先の先端は，刃先角の二等分線からすくい面側にやや偏った位置をとっている。ここで図 3 - 4 に示した刃先の断面形状は，同図の刃先の写真からわかるように，連続的に摩耗量が変化している刃先の各位置で求めたものである。したがって番号 11 から 1 までの断面の変化は，超硬チップが摩耗していくときの刃先の形態変化を表していると考えられる。

図 3 - 3 と 3 - 4 に示した刃先の摩耗形態や摩耗の進行過程は，実際にチップソーでパーティクルボードを切削した第 2 章での実験結果や，チップソーの刃先摩耗に関する他の結果^{4,5)}と一致している。また図 3 - 4 に示した摩耗刃

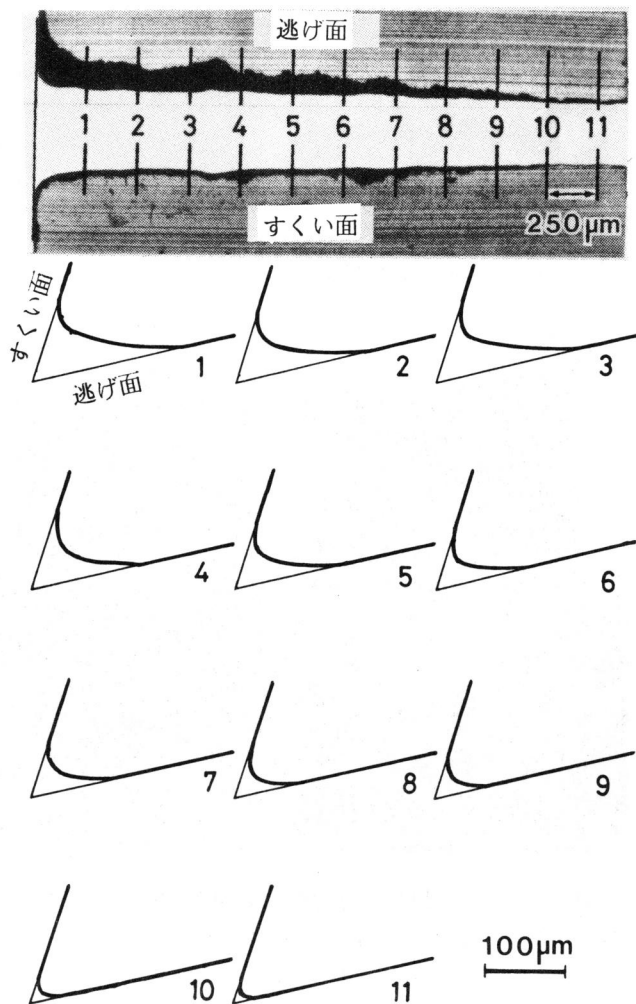


図3-4 摩耗刃先の断面形態（1～11は上の写真の位置に対応する）

先の形は，鋸切削にかぎらずフライス切削などの場合にも，しかも種々の工具材料を通じて一般的に観察される刃先の摩耗形態^{54,74,83,99,140}と，なんら矛盾するところはない。

図3-5は，歯の角を中心にして，摩耗の進行と摩耗面の性状を示す SEM 写真である。切削前（ $L' = 0$ km）には，超硬チップ歯の3面とも研磨条痕が明瞭で，約 $5 \mu\text{m}$ 幅の刃先線がみえる(a)。しかし，わずかに 150 m 切削したのみで，歯の角や刃先線には既にかなり摩耗が認められ，WC 粒子が浮き出ているのがわかる（b，c）。さらに切削が進むと，摩耗帯が広がると同時に，

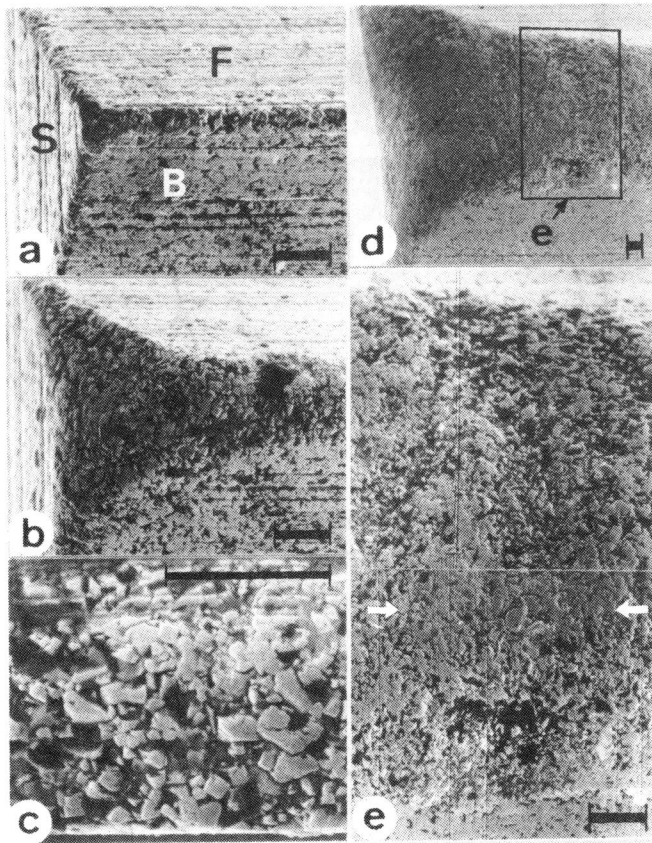


図3-5 刃先摩耗の進行を示すSEM写真（スケールは $10\mu\text{m}$ ）(a) $L' = 0\text{km}$; (b), (c) $L' = 0.15\text{km}$; (d), (e) $L' = 44\text{km}$
 矢印は刃先先端の位置を示す
 B：逃げ面，F：すくい面，S：側面

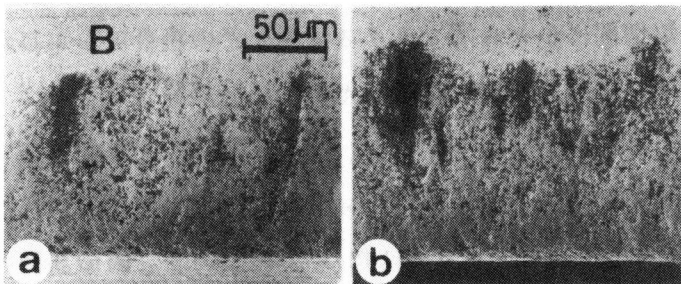


図3-6 逃げ面摩耗帯のSEM写真
 (a) $L' = 10.9\text{km}$ ，(b) $L' = 18.9\text{km}$

B：図3-5に同じ

刃先線ないしは刃先の先端（最も突出したところ）付近では WC 粒子が比較的密となり，この付近の摩耗面は摩耗境界線に近いところよりも滑らかにみえる（d，e）。また，第 2 章でも指摘したように，逃げ面側の摩耗帯には摩耗条痕が切削方向に発達するが（図 3 - 6），すくい面側ではこのような条痕は認められず，図 3 - 7a にみられるような摩耗境界線の局部的後退がしばしば観察される。この部分には，工具材が薄片状に脱落した跡と考えられる凹みが存在している（図 3 - 7b）。この凹みの部分は，生じた初期には通常の摩耗面と異なり粗い破壊面であるが，その後の切削により次第に平滑な面となり，他の摩耗面と区別できなくなってしまう（図 3 - 7b，c，d）。

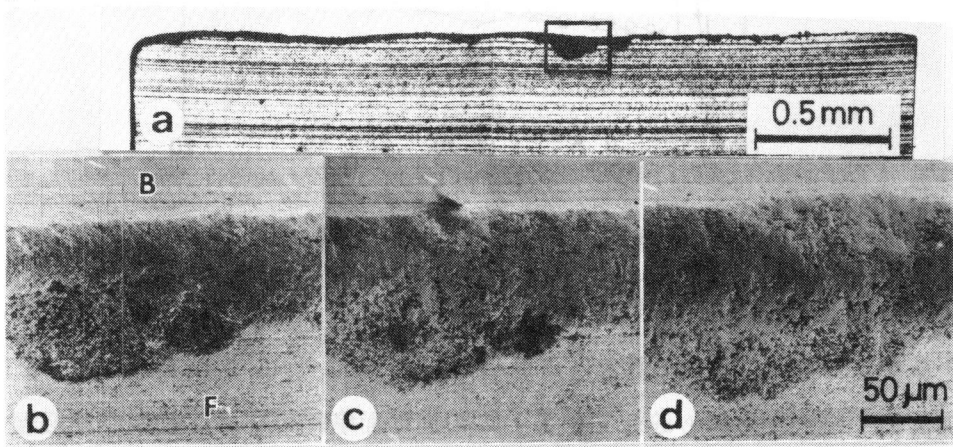


図 3 - 7 すくい面摩耗帯の SEM 写真

(a), (b) $L' = 4.4 \text{ km}$; (c) $L' = 10.9 \text{ km}$; (d) $L' = 18.5 \text{ km}$

(b), (c), (d) は同一部位である

B, F : 図 3 - 5 に同じ

3.1.3 摩耗量と切削力

切削長と摩耗量の関係を図 3 - 8 に，切削長と切削力の関係を図 3 - 9 に示す。刃先は切削初期に急激に後退し，その後はゆるやかな後退を続けるが，初期摩耗を経過した後では，逃げ面側での後退量 (R_b) がすくい面側 (R_f) の約 % の値を常に示している。これは，図 3 - 4 の刃先断面の変化からもわかるように，摩耗した刃先の先端が刃先角の二等分線上になく，常にすくい面側に偏

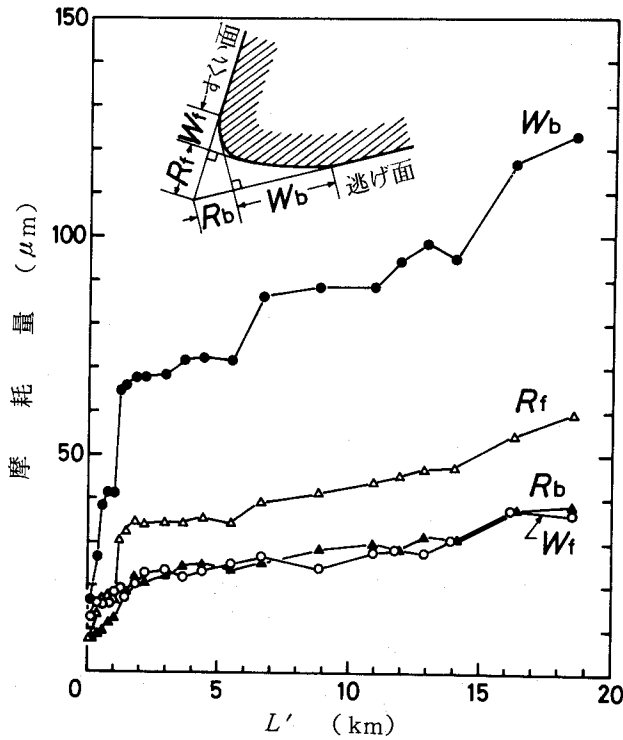


図3-8 切削長 (L') と摩耗量の関係

っていることに起因する。摩耗帯の幅 (W_b , W_f) も初期摩耗によって顕著に広がるが、特に逃げ面摩耗帯幅 (W_b) の増大が著しく、切削長 150 m で既に切削終了時の半分にも達している。この逃げ面摩耗帯幅は、初期摩耗経過後も顕著に増大を続け、四つの摩耗量のなかでは最も広範囲に変化した。一方すくい面側の摩耗帯は、初期摩耗で 20 ~ 30 μm の幅になった後、ゆるやかに幅を広げているのみである。なお、各摩耗量と切削長の関係を両対数グラフでみた場合、ほとんど直線となった。

切削開始時の切削力は、横分力 (F_3) と背分力 (F_2) が比較的小さく、主分力 (F_1) が前二者の 3 ~ 5 倍の値で最も大きい (図 3-9)。しかし背分力は、切削初期の著しい増大によって主分力と並び、その後もかなりの幅で変動しながら上昇を続けている。一方主分力は、背分量と同様、初期に急増するが、その増加幅は背分力よりも小さい。その後は背分力と同様の増大を続けるが、その傾きは全体的にみて背分力よりもやや小さい。横分力は常に最も低い値を

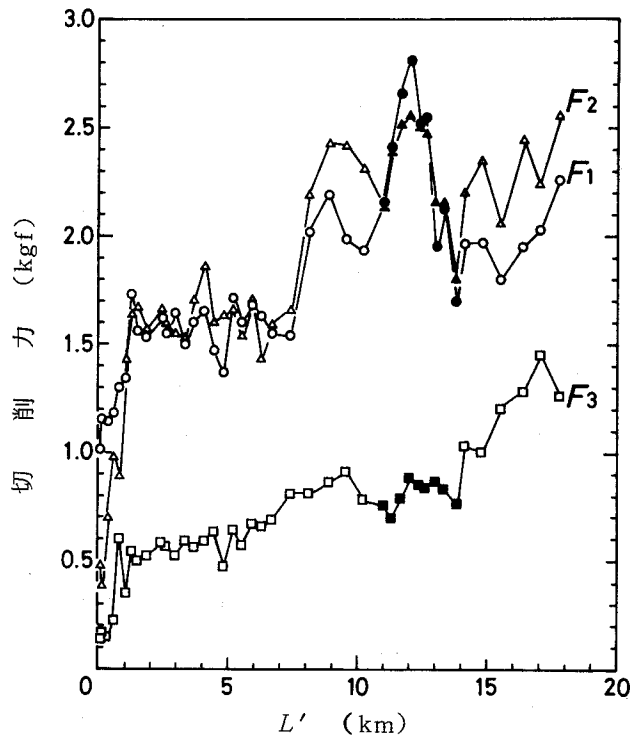


図 3-9 切削長 (L') と切削力の関係
 F_1, F_2, F_3 : 図 3-2 に同じ

とり，切削長の増加に対してゆるやかなしかし着実な上昇を示している。なお切削長の一部区間で切屑厚さを約 2 倍にしたが（図 3-9 の黒のプロット），この場合主分力は顕著に大きな値をとったが，背分力と横分力では明瞭な変化が認められなかった。

ところで，単一鋸歯による同様の切削実験を行った Pahlitzsch ら¹¹³⁾ は，切削長とともに横分力が最も広範囲に変化して大きな値を示し，それによって刃先温度の上昇がもたらされるとしているが，本節の実験では図 3-9 に示したように，それほど大きな値になっていない。しかし，横分力は切削開始時と終了時の比が 3 分力中最も大きく，また鋸切削における被削材面の焼けや挽肌に密接に関係すると考えられることから，鋸歯の寿命を検討する場合には無視できない力であることにはかわりない。

3.1.4 切削方法の評価

前項までに述べたように、単一鋸歯を用いた断続切削によっても、実際の超硬チップソーによる切削時と同様の摩耗経過、摩耗刃先の形状が得られることが明らかとなった。単一鋸歯を用いたこの切削実験では、刃物の着脱が容易なため、任意の切削距離で刃先の詳細な観察が行えること、また鋸歯の切削性能を評価する上では不可欠でありながら、通常は測定することが困難な切削力の直交3分力を、容易に測定できること、さらに鋸の精度や鋸身の振動を考慮する必要がなく、比較的短時間で摩耗試験ができること等が、この方法の特徴となり得るであろう。

なお、刃先摩耗の進行ともなう切削力の変化については、^{74,83,140)} フライス切削や鋸切削¹⁰¹⁾ で、主分力が初期に急激に大きくなりその後は漸増するかレベルオフすることが指摘されているが、単一鋸歯を用いた本節の実験でも同様の結果が得られている。また Pahlitzsch ら⁸³⁾ は、フライス切削において主分力と背分力を測定し、刃先摩耗の指標としては背分力がより適切であるとしてい

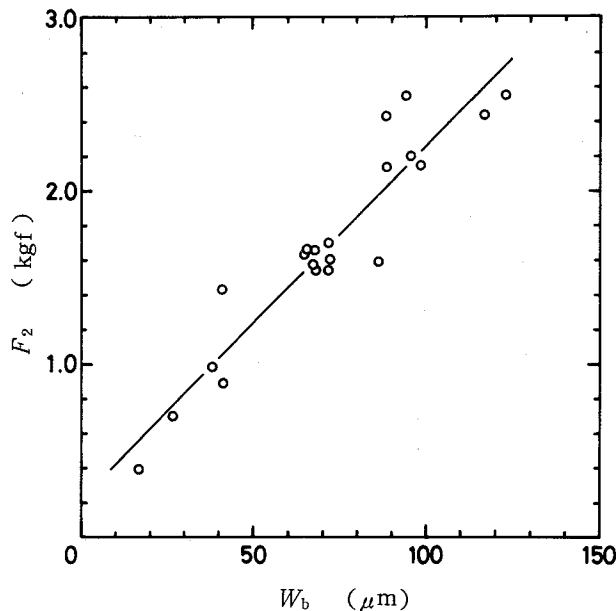


図3-10 逃げ面摩耗帯幅 (W_b) と背分力 (F_2) の関係

る。さらに McKenzie ら^{114,115)} は、旋削による実験で、低い値から始まって大きな値にまで上昇する背分力が工具鈍化の鋭敏な指標であることを明らかにし、この背分力は逃げ面の摩耗帯幅とはほぼ直線関係を有していることを示している。ここで本節の実験についても、最も広範囲に変化した逃げ面摩耗帯幅 (W_b) と背分力 (F_2) の関係を見てみると、両者の間には強い相関が認められた (図 3-10)。これらの結果から、単一鋸歯による切削実験でも、既に得られている切削力に関する知見と同様の結論が得られることが理解される。さらに、得られた結果を総合すると、超硬チップの摩耗や鈍化は鋼製工具の場合と基本的には一致することが推察される。

3.2 断続切削と連続切削時の刃先摩耗¹⁴¹⁾

前節の結果に基づき、チップソーの摩耗についての知見をさらに得るため、実験因子として、被削材と鋸歯のかかわり方をここでは取り上げる。すなわち、通常の鋸切削のように、常に断続的に被削材を切削していく場合と、一定の切削長にわたって連続的に切屑を生成していく場合の刃先摩耗を、WC 粒子の大きさの異なる 3 種類の超硬チップについて、比較検討した。

3.2.1 実 験

用いた装置、切削方法は 3.1.1 項と同様である (図 3-2, 図 3-11)。

被削材は、単層パーティクルボード (厚さ 17 mm, 主要樹種ラワン, 接着剤含量 8%) を、酸酢ビニル樹脂接着剤を用いて積層したものである。積層枚数は断続切削用が 6 枚, 連続切削用が 13 枚である。積層したものを幅 80 mm に鋸断した後、断続切削用 (図 3-2) は回転径が約 230 mm, 連続切削用 (図 3-11) は直径が約 215 mm になるように削って被削材ブロックとした。積層後のブロックの比重は平均 0.74, 含水率は平均 8.9% であった。

工具は、表 2-2 に示した鋸〔F〕, 〔G〕, 〔H〕と同種の試験用チップソーから歯部を切り取って作成した、前節と同一形状の単一鋸歯である (図 3-1)。3 種類の超硬チップをそれぞれ付け歯してある単一鋸歯で断続と連続切削をしたので、計 6 個の鋸歯を用いた。超硬チップの性質は表 2-1 に示したとおり

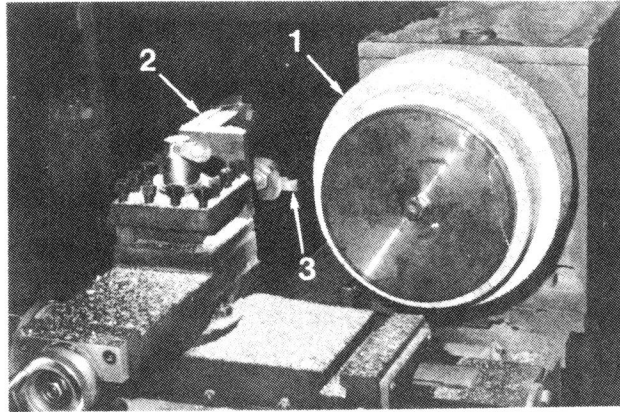


図3-11 実験装置
 1:被削材(連続切削用),
 2:工具動力計, 3:鋸歯

表3-1 超硬チップの性質

超硬チップ	WC 粒子の 大きさ ^{a)} (μm)	Co 含 量 (%)	硬 さ ^{b)} (Hv)	抗 折 力 (kg/mm^2)
F	0.5	13	2000 1860	260
G	1.5	6	1790 1780	210
H	5.0	6	1590 1390	200

a) 概略値

b) 上段は断続切削用, 下段は連続切削用チップの値

であるが, 硬さの実測値とともに, 表3-1に再度示しておく。なお, 鋸歯の側面逃げ角は $1.9 \sim 2.7^\circ$, 半径方向逃げ角は $0.4 \sim 1.3^\circ$ であり, 切削時のすくい角は $15 \sim 18^\circ$ である。

図 3 - 11 は連続切削時の装置の写真であるが、断続切削の場合も被削材以外は同様であり、切削条件も同一である。切削力(図 3 - 2)は円板型の 3 成分工具動力計^{142,143)}によって測定し、電磁オシログラフに記録した。測定した刃先の摩耗量とその測定方法は 3.1.1 項に述べたとおりである。また切削前と切削終了後に SEM によって刃先を観察した。

切削条件は、主軸回転数 1240 rpm、切削幅 2.5mm、切屑厚さ 0.087mm、鋸歯の送り込み深さ 15mm である(図 3 - 2)。平均切削速度は、断続切削では 13.0m/sec、連続切削では 12.0 m/sec である。また鋸歯の片面は被削材に接触していない。なお、切削は約 10 km の切削長まで行った。

3.2.2 刃先の摩耗形態

図 3 - 12 にチップ F の切削前と切削終了後、およびチップ G と H の切削終了後の刃先の顕微鏡写真を、断続と連続切削の場合について示す。切削終了後はどのチップも、切削方法を問わず、主切刃と歯の角が摩耗し、摩耗帯が発達している。摩耗帯の幅は各チップとも逃げ面側がすくい面側よりも広く、3 種のチップのなかでは G が最も狭い。またチップ F と H の逃げ面の摩耗帯は、連続切削の場合により広がっている。

摩耗境界線は、逃げ面と側面ではどのチップについても非常に明確であるが、すくい面ではやや不鮮明である。また逃げ面での境界線は、チップ F では凹凸が著しいが、G の場合は直線的であり、H はその中間である。図 3 - 12 の切削後の写真は、アセトンで刃先を清浄してから撮影したものであるが、連続切削した超硬チップの場合には、アセトンで取り除けない付着物が、逃げ面側の摩耗境界線に隣接した研磨面に常に認められた。

用いた 3 種の超硬チップの、切削前における刃先の SEM 写真を図 3 - 13 に示す。チップ F は WC 粒子が非常に細かく、刃先は最も鋭利に仕上がっている。一方チップ H は粒子が粗大であるため、刃先の部分では個々の粒子が区別できる。

図 3 - 14 は切削終了後の刃先逃げ面の摩耗状態を、6 個の超硬チップについて示した SEM 写真である。チップ F の摩耗面には、第 2 章で指摘したのと

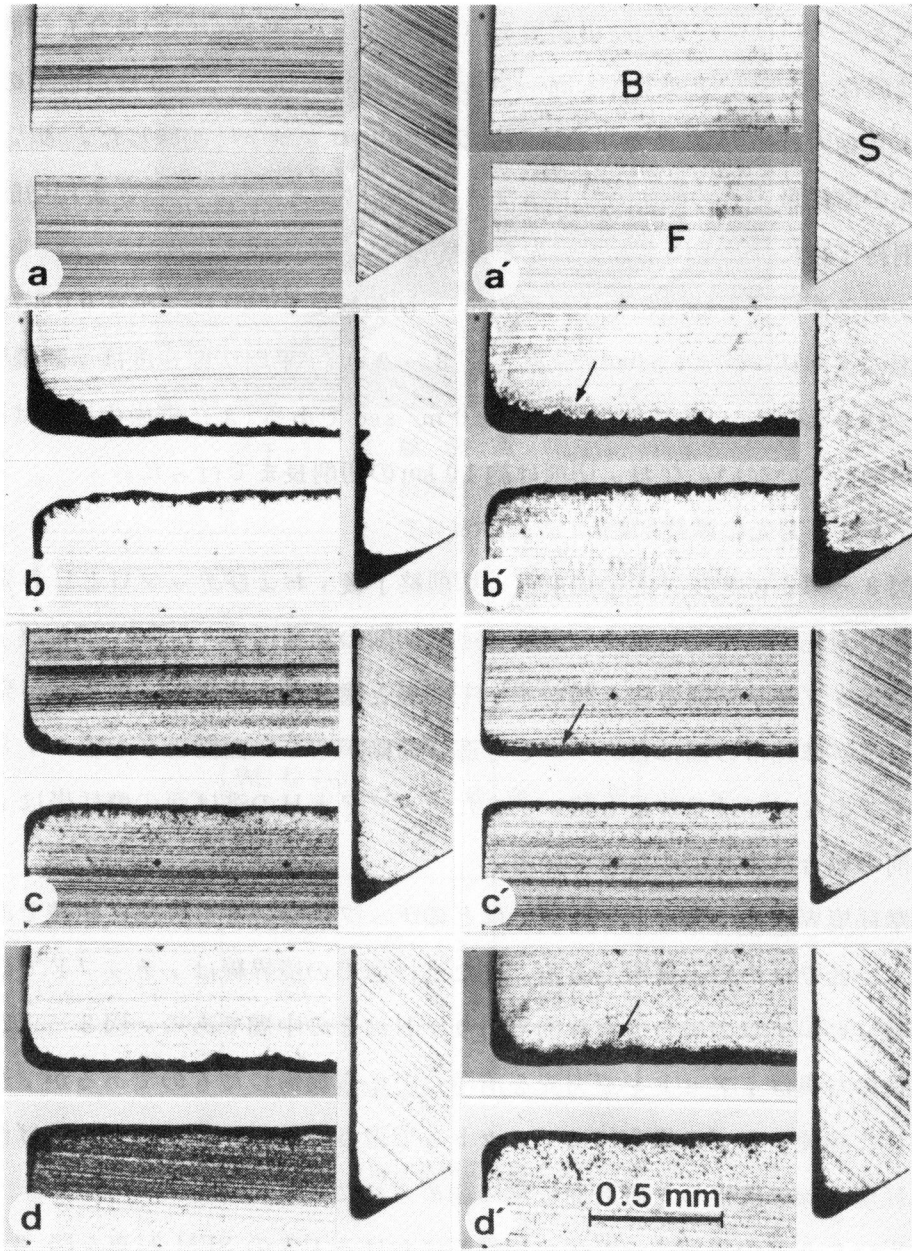


図3-12 チップFの切削前(a, a')と切削後(b, b'), チップG(c, c')とH(d, d')の切削後における刃先の顕微鏡写真

(a)~(d) : 断続切削, (a')~(d') : 連続切削

矢印は付着物を示す

B, F, S : 図3-5に同じ

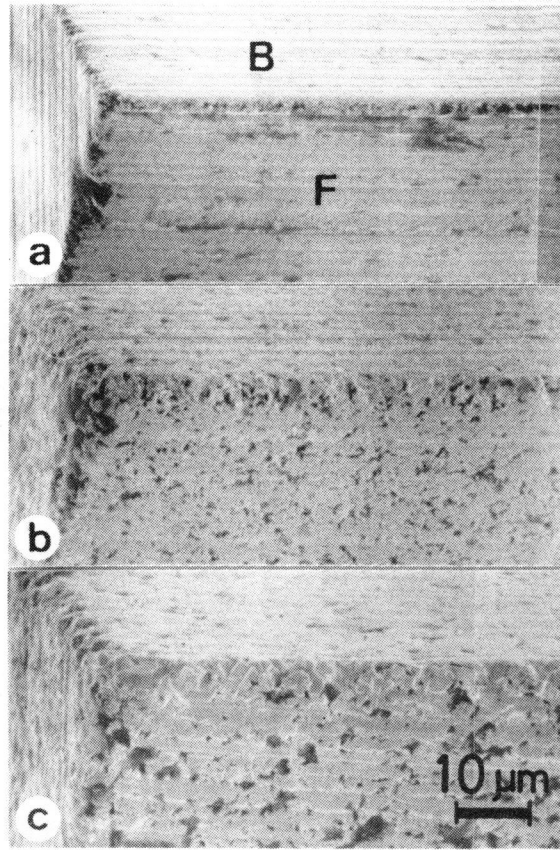


図3-13 チップF(a), G(b), H(c)の
切削前における刃先のSEM写真
B, F: 図3-5に同じ

同様な、工具材料が局部的にかき取られたような条痕がどの場合も認められるが、GやHではほとんど認められない。また、逃げ面の研磨条痕は摩耗境界線まではっきりと存在し、摩耗面と研磨面の境界が画然としている。断続と連続切削との明確な差は、摩耗面の状態からは認められなかったが、連続切削した超硬チップの摩耗境界線付近の研磨面には、前述の付着物(図3-12)が例外なく認められた。断続切削した超硬チップについて、すくい面と逃げ面側の摩耗面を比較したSEM写真を図3-15に示す。逃げ面側の摩耗面は、チップFとGでは前述の摩耗条痕らしいものが認められるものの比較的平滑であり、GやHではWC粒子の表面も平らに見える。一方すくい面側では摩耗面が粗く、

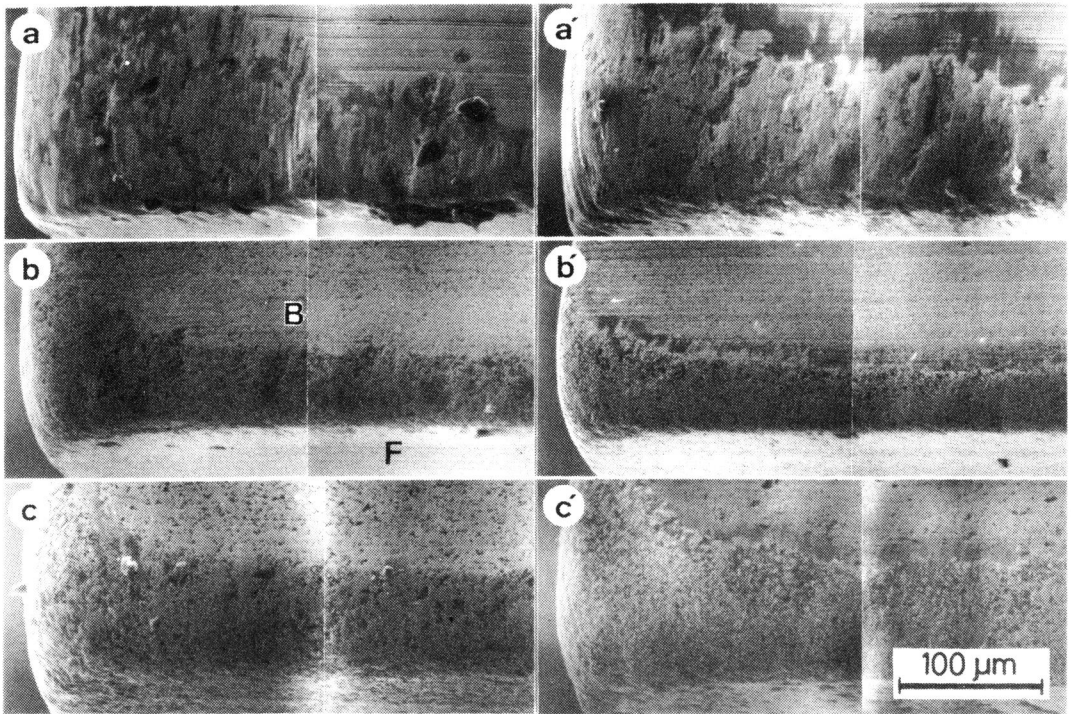


図3-14 チップF (a, a'), G (b, b'), H (c, c')の逃げ面摩耗帯のSEM写真
 (a)~(c) : 断続切削, (a')~(c') : 連続切削
 B, F : 図3-5に同じ

特にチップHで明らかなように、鋭い角をもったWC粒子が浮き出たように見える。またどのチップについても、すくい面側の摩耗境界線は判然としない。

以上の観察で得られた各チップの摩耗の特徴、逃げ面とすくい面における摩耗面性状の差は、第2章や前節の結果と一致し、フライス切削した超硬工具の観察結果⁵⁵⁾とも矛盾しない。断続切削と連続切削の比較では、チップFとHの逃げ面摩耗帯幅、逃げ面の付着物で両者の差が認められたものの、SEMで観察した摩耗面の状態には大きな差がなかった。

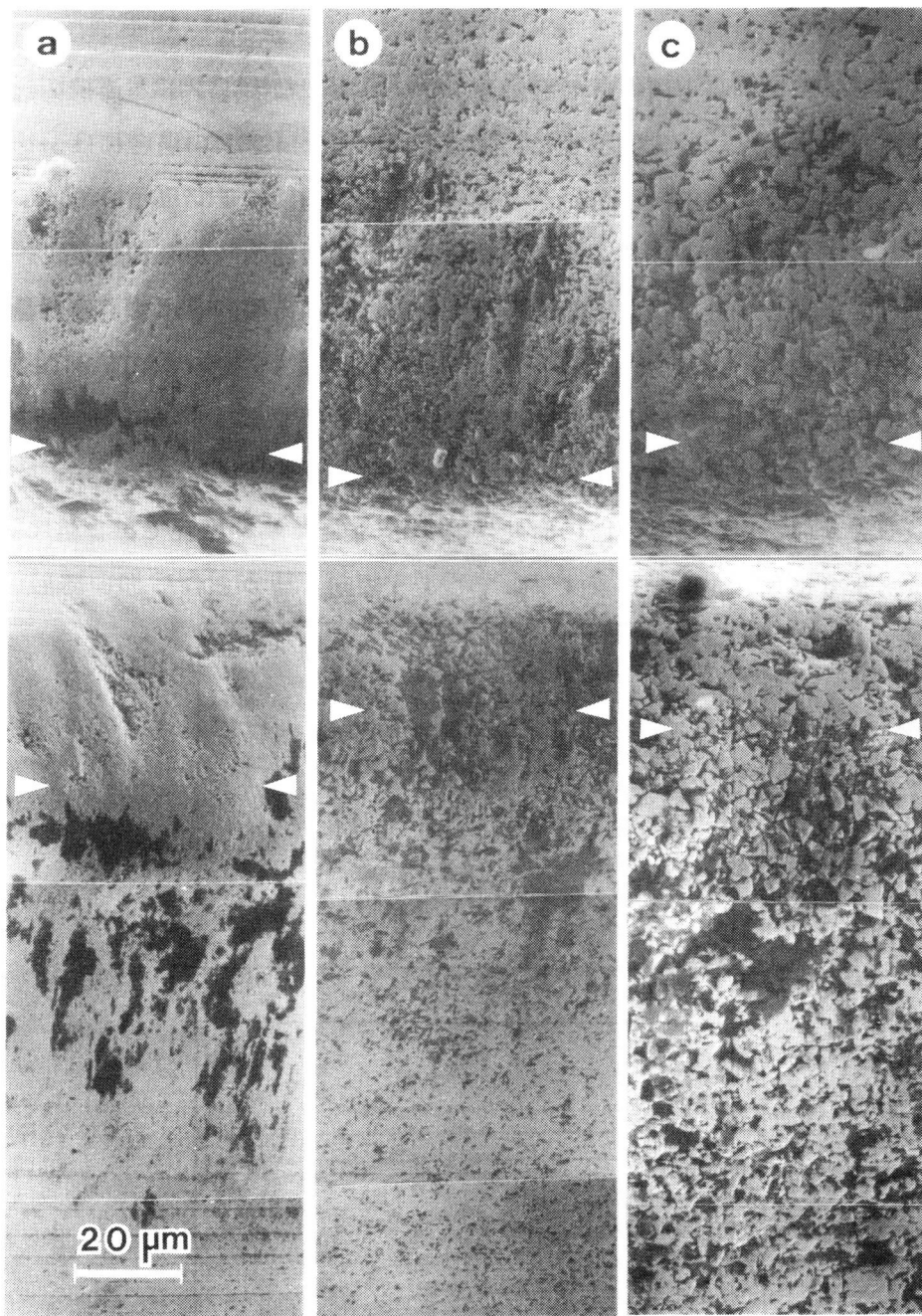


図3-15 チップF(a), G(b), H(c)の逃げ面(上)とすくい面(下)の摩耗帯のSEM写真(断続切削)
 対の矢印は刃先先端の位置を示す

3.2.3 刃先の摩耗量

図3-16に切削長と摩耗量の関係を、断続切削したチップFと連続切削したチップHの場合について例示した。図3-16のチップFの場合には、切削初期の各摩耗量が例外的に小さいが、残りの5個の超硬チップについては、同図に示したチップHのように、四つの摩耗量とも切削開始時から切削長1~2kmにかけて急増し、その後は比較的ゆるやかに増加する傾向を示す。摩耗量の中では逃げ面の摩耗帯幅(W_b)が各チップとも常に最も大きな値で、初期摩耗経過後の増加割合も大きい。他の摩耗量は同程度の値であるが、刃先の後退量は、ある程度摩耗が進行した後では、すくい面側(R_f)が逃げ面側(R_b)よりもやや大きい。またすくい面の摩耗帯幅(W_f)は、初期摩耗である値に達した後はあまり増加せず、レベルオフしてしまう傾向も認められた。

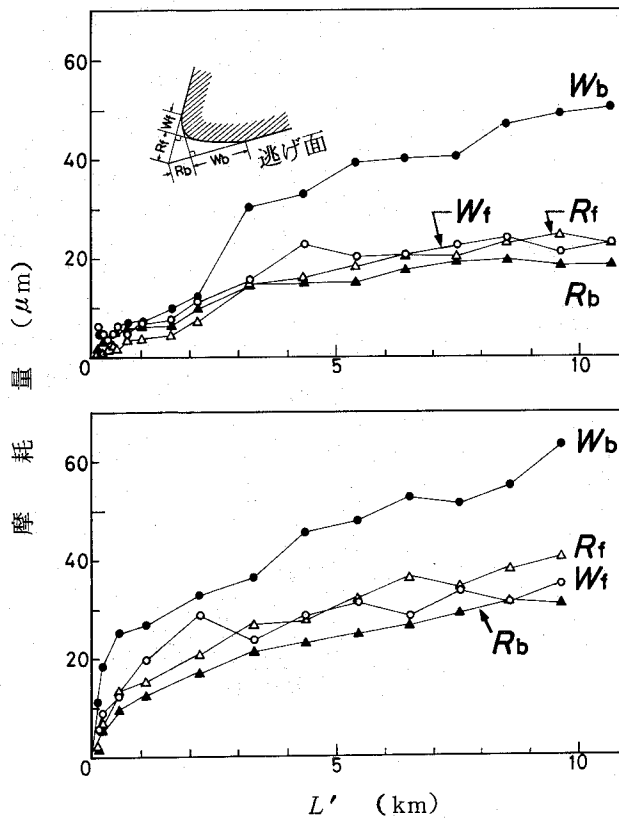


図3-16 切削長 (L') と摩耗量の関係
 上: チップF (断続切削)
 下: チップH (連続切削)

4種の摩耗量の中で最も大きな値となる W_b と、比較的大きい刃先後退量 R_f の測定値を、6個の超硬チップについて図3-17に示す。刃先後退量の大きいチップは逃げ面の摩耗帯幅も概して大きいですが、チップFの場合には後退量の割には摩耗帯幅 (W_b) が大きい。断続切削した各超硬チップの値を比較すると、 W_b 、 R_f とも切削長のほぼ全域にわたってチップHが最も大きい値を示している。チップFとGについては、初期摩耗の区間を除いて、 W_b ではFがGよりもかなり大きく、切削長10 km付近ではチップHと並ぶ値にまで達しているが、 R_f ではFとGがほぼ同一の値を示している。一方連続切削の場合には、 W_b 、 R_f の値ともほぼ全切削長範囲でチップGが最も低く、 W_b ではF、 R_f ではHが最も大きい。また断続切削の場合は3種のチップ間での差が比較的小さいが、連続切削の場合にはチップGの摩耗量が他の二つよりもきわだって小さい。

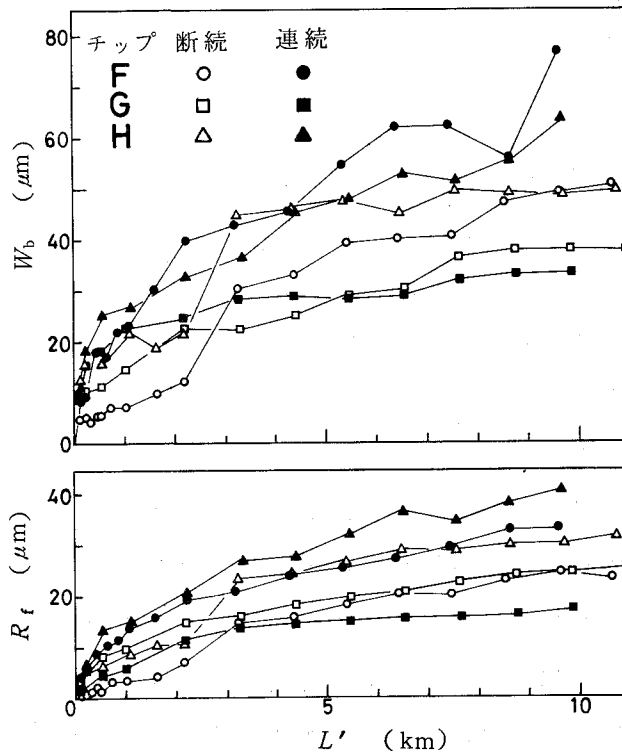


図3-17 切削長 (L') と逃げ面摩耗帯幅 (W_b)、すくい面側刃先後退量 (R_f) の関係

同一チップ材種について切削方法で比較すると、チップGの場合は W_b ではその差がはっきりしないが、 R_f ではほぼ全切削長にわたって断続切削の方がやや大きな値を示している。チップFとHの場合は、Hの W_b でその差が判然としなが、他の場合には明らかに連続切削の方が大きな値を示している。特にチップFの W_b では両切削方法で大きな差が生じている。

以上の刃先摩耗量の測定結果から得られた超硬チップの一般的な刃先摩耗の特徴、すなわち逃げ面摩耗帯幅の広範囲にわたる増大、刃先後退量はすくい面側から測定した方が大きいこと等については、前項の摩耗刃先の観察結果から期待されるとおりであり、第2章と前節の結果とも一致する。しかし、各チップ間の摩耗量の大小関係については、図3-17の断続切削の場合の結果と第2章で示した結果(図2-10, 2-11)とは必ずしも一致しない。特に第2章の実験では最も耐摩耗性にすぐれていたチップHが、単一鋸歯の切削では比較的大きな摩耗量を示した点が注目される。このことについては、二つの実験での切削形態が本質的に異なることと切削速度が異なることによるためか、本節では比較的小さい摩耗量までしか測定しなかったためか、さらにチップソ-で3種の超硬チップを順に付け歯したことの影響が出たためか、等々の種々の議論が可能ではあるが、ここで結論を下すことはできない。

二つの切削方法(断続と連続)の比較では、チップ材種ごとに結果が異なるため、全般的な結論を引き出すことができず、衝撃が刃先摩耗を特に促進する効果¹²⁰⁾は認められなかった。

3.2.4 切削力

切削力の3分力と切削長の関係を各超硬チップの各切削方法について図3-18に示す。なお連続切削の場合には、被削材の積層構造のため、 F_1 と F_2 の値は周期的に変動したが、ここでは被削材半回転ごとに現われる極大値の平均として求めた。この場合、 F_1 の極大値は切削方向が積層面と垂直なときに現われるが、 F_2 の極大値は切削方向が積層面に平行から垂直に移行する途中で現われる。したがって、 F_1 の測定値は断続切削時の値と対応できるが、 F_2 の値は断続切削時よりもやや大きい値になる可能性がある。

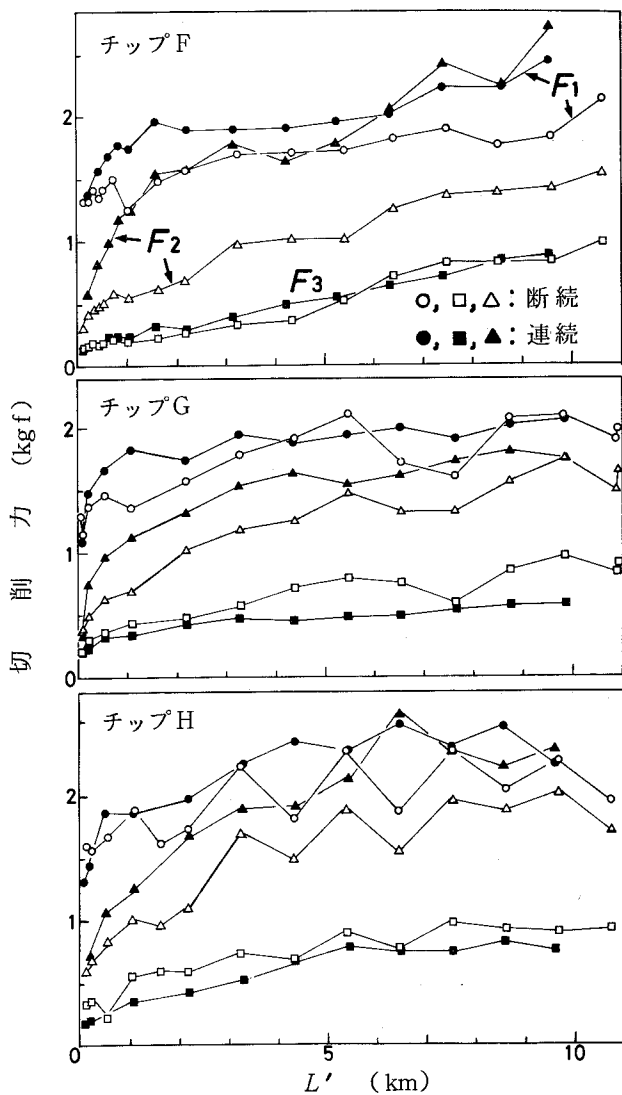


図3-18 切削長 (L') と切削力の関係
 F_1, F_2, F_3 : 図3-2に同じ

図3-18に示したように、主分力 (F_1) は、どの超硬チップについても、切削開始時から3分力中最も大きく、切削初期に急増またはゆるやかに増大した後、切削長5 km以後はレベルオフしてしまう傾向がある。また横分力 (F_3) は切削長全域で最も小さく、切削初期の急増も示さずに、切削長とともに直線的にゆるやかに上昇する。一方背分力 (F_2) は、切削開始時の小さな値から切削長1~3 kmまでの間に急上昇し、その後大きく増大して10 km切削後には F_1

と同程度，場合によってはそれ以上の値に達している。各超硬チップで切削方法による差を比較すると， F_3 では両切削方法の差が明確ではなく，ほとんど同じ場合（チップF）と断続切削の方がやや大きい値をとる場合（チップGとH）がある。 F_1 と F_2 にみられる切削初期の急増は，各チップとも連続切削時の方が著しく，その後の値も断続切削よりは大きい傾向がみられる。特にチップFの F_2 では，連続切削時の値が断続切削の場合よりもはるかに大きい。

図3-18の主分力と背分力をまとめて図3-19に示す。主分力の値を6個の超硬チップ間で比較した場合，チップHの値が両切削方法でやや大きい外は，チップ間の明確な差は認めがたい。一方背分力では，断続切削した超硬チップの場合には，切削長のほぼ全域でチップHが最も大きな値をとり，G，Fと続く。また連続切削の場合にも全体的にはチップHが最も大きく，Gが最小であるが，チップFは両者の中間ないしは切削終期にはHよりも大となっている。

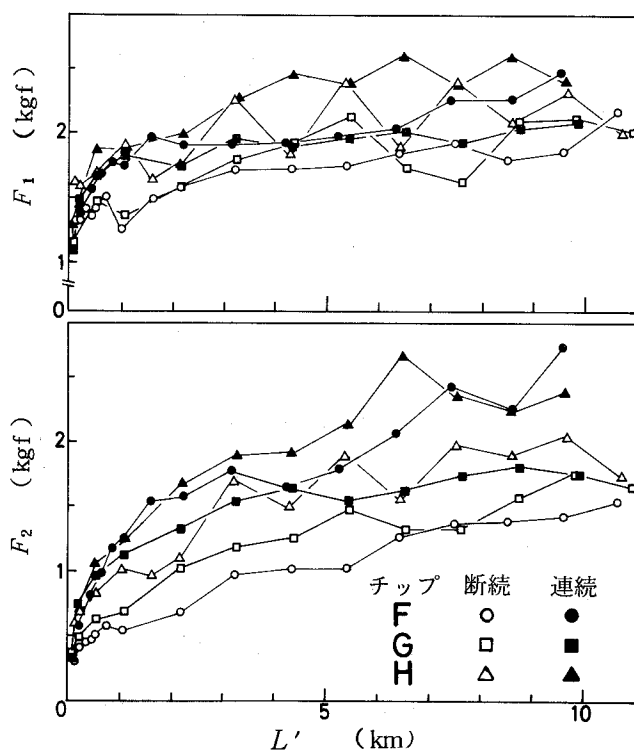


図3-19 切削長 (L') と主分力 (F_1)，背分力 (F_2) の関係

図3-19に示した二つの切削分力を比較すると、主分力は切削長1~2kmまでの切削初期に急増した後は、ゆるやかに上昇するか、ほとんど変化しない。この急増の区間は、図3-16と3-17に示した刃先摩耗量では、初期摩耗の区間に相当する。初期摩耗の後も、ゆるやかではあるが、刃先は摩耗していくが、主分力の変化は少ない。この事実から、主分力は、刃先の鋭利さが失われる初期摩耗に対しては敏感であるが、一度安定した摩耗刃先が形成されると、その後の摩耗に対してはそれほど影響されないことが推定される。一方背分力は、切削初期に急増した後も主分力よりは急傾斜で、着実に値が大きくなることが図3-19からわかる。したがって切削力の変化から刃先摩耗あるいは鈍

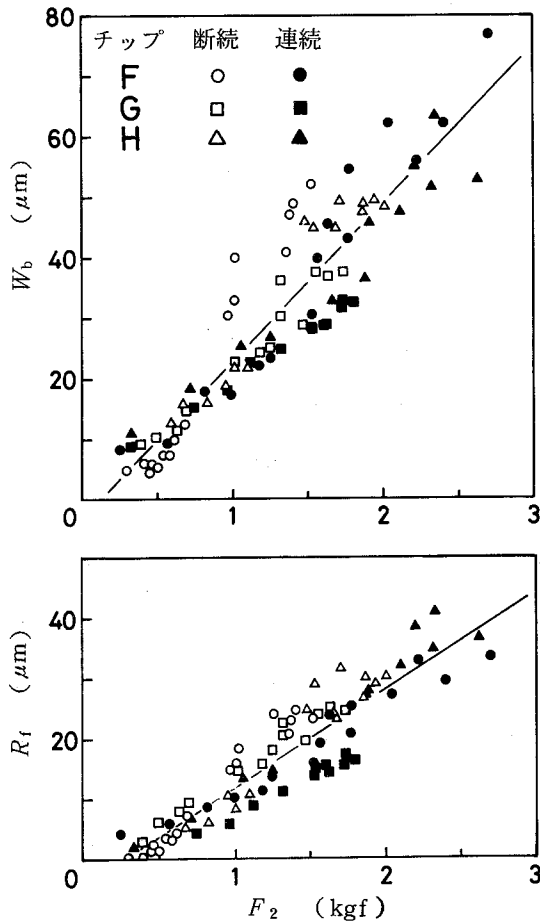


図3-20 背分力 (F_2)と逃げ面摩耗帯幅 (W_b) ,
すくい面側刃先後退量 (R_f) の関係

化を推定する場合、背分力がより適しているとする結果^{62,83,114,115)} に対しては、ここでもそれを肯定できる。このことを再度確かめるため、二つの摩耗量 (W_b と R_f) と背分力の関係を図 3 - 20 に示した。図 3 - 20 からわかるように、摩耗量と背分力は、多少のばらつきはあるものの、直線関係を示している。このばらつきは摩耗量と背分力が必ずしも対応しない場合があることを示すが、例えばチップ F の逃げ面摩耗帯幅は、断続でも連続切削でもかなり大きい、刃先後退量はそれほどでなく、背分力でも比較的小さい。特に断続切削した 3 種のチップのなかでは最も小さい背分力を示した。以上の切削力と摩耗の関係は、既往の研究結果^{62,74,83,114,115,140)} によく対応し、前節の結果とも一致する。さらに鋸切削において、測定できないような小さな初期摩耗も切削力(トルク)の増大として検出できるとする Barz ら¹⁰¹⁾ の結果とも一致し、刃先の鈍化の指標として水平分力と垂直分力の比、またはこれらと接線方向分力の比が使用でき、動力は指標として鋭敏でないとする Kirbach ら¹⁰⁴⁾ の結果を裏付けるものである。

なお、当初予期した断続切削時の衝撃の影響については、刃先の摩耗量と切削力の両方について、特に摩耗や鈍化を促進させる効果が認められなかった。逆に連続切削した場合の方が、逃げ面摩耗帯の拡大、刃先の後退量の増大、切削力の増大などにみられるように、刃先摩耗を促進させる傾向が認められた。ただし、連続切削においても被削材の積層構造のため、定常的な切削を行い得ず、ある範囲で切削力は常に変動している。そのため衝撃の影響を純粋に議論することには無理があるかもしれないが、もし Klamecki¹²⁰⁾ のいうように、衝撃の影響が断続切削時にあるとすると、ここでの結果を説明するためには、連続切削時には衝撃以外の他の因子、例えば連続的に切削を続けることによる刃先の温度上昇が強く作用したためと考えねばならない。連続切削時に刃先温度がより高くなっているであろうことは、逃げ面に強固な付着物が観察されたことによっても推定できるであろう。

3.3 要 約

単一鋸歯で、パーティクルボードの積層ブロックを断続的または連続的に旋削する摩耗試験によって、以下の結果が得られた。

(1) 被削材を直方体状とした断続切削の実験では、超硬チップの刃先摩耗は、切削開始初期に急激に進行し、その後はゆるやかに進行するが、摩耗が進行するにつれて逃げ面側と刃先側面の摩耗帯が特に大きくなる。逃げ面側での摩耗が優勢な結果、摩耗刃先の先端は刃先角の二等分線からすくい面側に偏った位置をとる。摩耗面を SEM で観察した結果によると、逃げ面では工具材料が吹き取られたような条痕がみられるが、すくい面では工具材料の薄片状の脱落がみられる。また逃げ面から刃先線にかけての摩耗面では、WC 粒子の表面が平滑で、全体的に滑らかな状態であるが、すくい面では角の鋭い WC 粒子が多く、面が荒れた状態である。これらの結果は、実際にチップソーで切削した場合の、超硬チップの摩耗と一致し、単一鋸歯による断続切削によって、超硬チップの刃先摩耗を再現できることが確認できた。

(2) 形の異なる2種類の被削材を用いて、断続と連続切削を比較した結果、超硬チップの摩耗形態、摩耗経過、摩耗面の性状に両切削方法の差はほとんど認められなかった。しかし連続切削の場合には、逃げ面摩耗帯幅、刃先後退量、切削力が、断続切削の場合よりも大きくなる傾向が認められた。したがって断続切削時の衝撃が、特に摩耗を促進する効果は認められなかった。

(3) 両切削方法を通じて最も安定した刃先の耐摩耗性を示したのはチップ G であった。一方最も大きな摩耗を示したのはチップ H であり、チップ F は前二者の中位を占めた。しかしチップ F は切削方法による差が著しく、断続切削では逃げ面の強度の摩耗にかかわらず、切削性能は最も良好であった。

(4) 切削力の3分力のなかで、超硬チップの種類や切削方法を問わず、摩耗量との相関が最も高いのは背分力で、逃げ面摩耗帯幅とすくい面側刃先後退量との間に直線関係が認められた。特に背分力と逃げ面摩耗帯幅は、最も広範囲に変化する量であり、刃先摩耗と切削性能の最適指標であると考えられる。

(5) 超硬チップの摩耗経過，摩耗刃先の形態，摩耗にともなう切削力の増大等は，鋼製工具について既に得られている知見と一致した。ただ，超硬チップの高度の耐摩耗性のため，摩耗の進行，測定量の変化が鋼製工具に比較してはるかに遅いことが相違する点である。

第 4 章 切削時の刃先温度

切削加工における工具温度は、既に第 1 章でも述べたように、工具の摩耗機構に關与する重要な因子の一つである。すなわち工具の温度上昇によって、工具材料の軟化がもたらされるのをはじめとして、凝着や拡散による摩耗も促進され、場合によっては刃先を溶断してしまう。さらにフライス切削などの断続切削では、周期的な温度変化が繰り返されることによる、熱疲労や熱龜裂による工具の損傷が起り得る。そのため金属切削では早くから工具温度（被削材も含めた系における）の測定や解析、さらに工具摩耗や寿命との關係について種々の角度から研究されている¹⁴⁴⁾。一方木材切削では、工具温度の測定例^{102,113,126~132)}そのものが少なく、さらに実際に切削に關与し、摩耗が問題となる刃先近くの温度を測定したものとしては二、三を数えるのみである。したがって工具摩耗との關連についてもほとんど未解決である。これは、木材切削工具は通常高速度で運動し、かつ刃先の測温部位が極めて小さいため、熱電対等を使用した一般的な温度測定が困難なこと、さらに乾燥した木材が電氣的な絶縁体であるため、金属切削でよく用いられる工具-被削材熱電対法が使えないことなどの実験上の困難さにも一因がある。

青山^{127,128)}は、白金線ゲージを用いて丸鋸鋸齒の温度を測定し、各種挽材条件との關係を明らかにしている。しかし、ゲージを貼布した位置が齒端から 14~15mm 離れた位置であるため、温度上昇はわずかであり、これをもって鋸齒の温度とするには問題がある。Pahlitzsch ら¹¹³⁾は、単一鋸齒を用いた摩耗試験（切削速度 10m/sec）で、鋸齒側面の刃先から約 0.5mm 離れた位置にコンスタンタン線を押しあて、鋸齒との間に熱電対を形成することによって温度を測定した。その結果、切削開始直後は 130℃ 前後であった温度が、摩耗が進行した段階では約 300℃ にまで上昇するとしている。また Chardin^{102,132)}

は、振子式の切削試験器による切削（ $25.3\sim 32.4\text{ m/sec}$ ）で、刃先から $0.5\sim 0.6\text{ mm}$ のすくい面下に、極細線の熱電対を溶接することにより、溶接点上のすくい面を切屑が擦過するような切削条件で、 500°C 近い温度を測定した。彼はまた、この温度上昇は、実際の鋸切削の場合のような数 msec の切削時間では、熱源（例えば刃先）から 1 mm 以内の微小部にのみ生起することを指摘している。

Okushima ら¹³¹⁾は、熱電対のような接触法によらず、高性能の赤外線放射顕微鏡¹⁴⁹⁾で非接触の温度測定を試みた。その結果、カッターの刃先温度が約 300°C まで上昇すること（切削速度 57.8 m/sec ）、この温度は刃先からの距離とともに急激に低下すること、刃先の温度は切削速度や送り速度の増大によってより高くなることなどを明らかにした。以上のような直接的な温度測定以外に、工具の硬さ低下と焼鈍温度の関係から切削時の温度を推定すること¹⁴⁵⁾や、工具内の数か所の温度の外挿から刃先温度を推定すること¹⁴⁶⁾も試みられている。

これらの実験結果から、木材切削工具の刃先近くは、実用切削速度では $300\sim 500^\circ\text{C}$ の温度まで上昇し得ることが推察される。すなわち、焼入れした鋼製工具の硬さを低下させるのに十分な温度まで上昇し得ること¹³¹⁾がわかる。しかし、今までに測定されているのは、刃先近くの点の温度または刃物側面の一次元的な温度分布であり、刃先近傍の二次元的温度分布については、奥島ら¹³³⁾の差分法による解析結果があるのみである。

ところで、金属切削で工具の温度上昇をもたらすのは、よく知られているように、主に被削材の塑性変形による発熱である。それに切屑と工具すくい面との摩擦による発熱、場合によっては逃げ面と母材（仕上面）との摩擦熱が加わる。その結果、刃先から少し離れたすくい面上に最高温度が現れ、いわゆるクレータ摩耗の重要な原因となる¹⁴⁴⁾。一方木材切削では、木材の変形性が大きいこと、高速切削であること、さらに木材の断熱性のため工具との界面で発生した熱が被削材側へ逃げ難いことなどから、塑性変形による発熱よりも、工具表面での摩擦熱が一層重要であると考えられる。前章までにも示したように、

ある程度刃先摩耗が進行した後は、逃げ面側でより多く摩耗することが木材切削における工具摩耗の一つの特徴である。このことは、切刃通過後に弾性回復した母材と逃げ面との摩擦が刃先摩耗に大きな役割を演じていることを示し、同時にこの摩擦によって大きな温度上昇が生じていることが推定される。

そこで以上のことを念頭におき、木材切削工具の刃先温度について基礎的知見を得るため、まず半無限固体表面近傍の過渡的温度変化と、刃先線を円柱の中心と仮定して刃先から熱が連続的および断続的に供給されたときの刃先近傍の温度変化について若干の理論的考察を加えた。その後で、超硬チップを付け歯した単一鋸歯側面の温度を赤外線放射顕微鏡によって測定し、木材による逃げ面摩擦時の温度上昇に及ぼす摩擦速度と摩擦力の影響を検討した。さらに断続切削時の単一鋸歯側面の温度分布を、二次元切削とみぞ切りの場合について求め、切削速度と刃先の角度の影響について検討した。本章ではこれらの結果について述べる。

4.1 刃先における過渡的温度変化

切削が一定の状態と連続的に進行している場合には、工具と切屑または被削母材との接触面から供給される熱によって工具温度は時間とともに上昇していく。工具温度が上昇すると、当然熱伝導、熱伝達、熱放射によって失われる熱量も増大する。そして供給される熱量と失われる熱量が平衡したところで定常状態に達することになる。切削工具の温度分布を考える場合は、この定常状態を仮定して検討されることが多い。ところが、鋸切削のような断続切削の場合には、非常に短い周期で切削が繰り返されるため、鋸身の温度分布のように巨視的にみれば定常に達し得るが^{128~130)}、切削に直接関与している刃先部分では過渡的な温度変化を考慮せねばならない。

そこでまず、半無限固体の表面が瞬間的にある一定温度に保たれた場合の、微小時間内の過渡温度応答、すなわち一次元非定常熱伝導について考える。直交座標系一次元熱伝導の基礎式は、

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{A}{\lambda} \quad (4-1)$$

である¹⁴⁷⁾。ここで、 a ：温度伝導率， θ ：温度， t ：時間， x ：座標， A ：単位体積当りの発熱量， λ ：熱伝導率。

(4-1)式をラプラス変換し，初期温度一定(θ_0)，内部発熱なし($A=0$)の条件を考慮し，表面温度を瞬時的に θ_s とするとして逆変換すれば，次式が得られる¹⁴⁷⁾。

$$\theta = \theta_s - (\theta_s - \theta_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad (4-2)$$

ここで，超硬合金を想定し， $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ， $\theta_s = 100^\circ\text{C}$ ，比重量 $\gamma = 14800 \text{ kg/m}^3$ ，比熱 $c = 0.1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ ， $\lambda = 68 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ の値を用いて， $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 \text{ mm}$ における温度変化を(4-2)式によって求めると図4-1が得られる。

Chardin¹⁰²⁾が既に指摘しているように，木材切削でみられる1 msec オーダの加熱時間では，温度応答が顕著に現われるのは表面から1 mm以内の領域であることが図4-1からわかる。例えば加熱開始から5 msec 経過後では，表面から0.1 mmの部分では既に 80°C 近くまで温度が上昇しているが，1 mmの点ではほとんど変化がみられない。その結果，加熱開始直後の表面近くには，図4-2に示したような著しい温度傾斜が発生する。図4-2には参考のため，5秒経過後の温度分布も示した。このように，木材切削では 普通にみられる1 msec オーダの切削の繰り返しの際には，工具表面の微小な領域で特異な温度応答がみられることは，注目されるべきである。

ところで，一般の木材切削では，鋭利な工具刃先で微小な厚さの切屑を除去していく。その場合の側面からみた二次元の温度応答を考える場合には，上記の半無限固体の一次元の熱伝導では問題がある。この場合には，厳密な解を得るためには，表面からの熱伝達をも考慮した，二次元非定常熱伝導を扱わねばならない。しかし，工具表面(すくい面と逃げ面)を断熱境界と仮定し，熱源を刃先に限定すると，円筒座標系の一次元熱伝導として扱うことができる。円

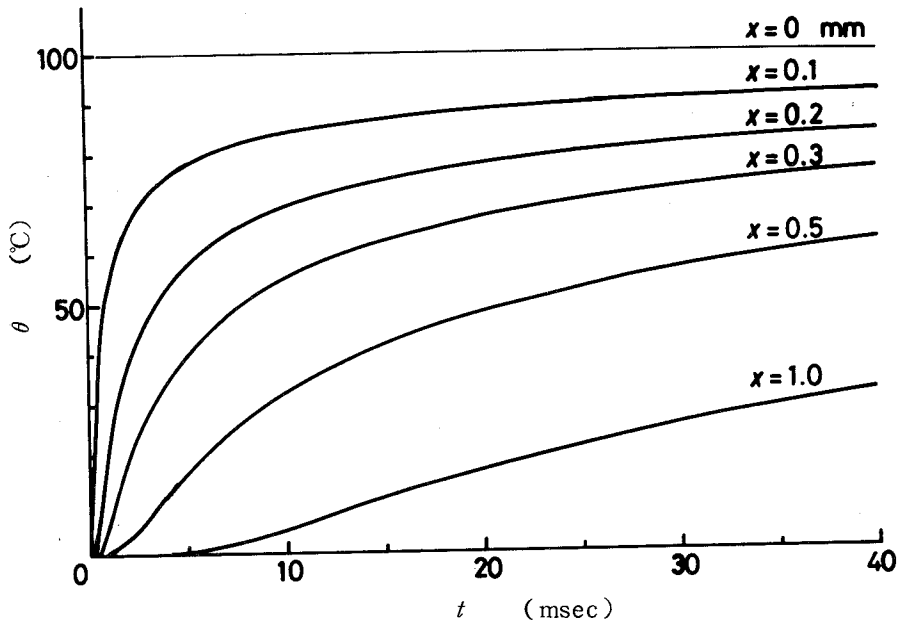


図 4-1 半無限固体表面近傍の過渡温度応答
 ((4-2)式で $\theta_0=0$, $\theta_s=100^\circ\text{C}$ とした場合)
 t : 時間, θ : 温度, x : 表面からの距離

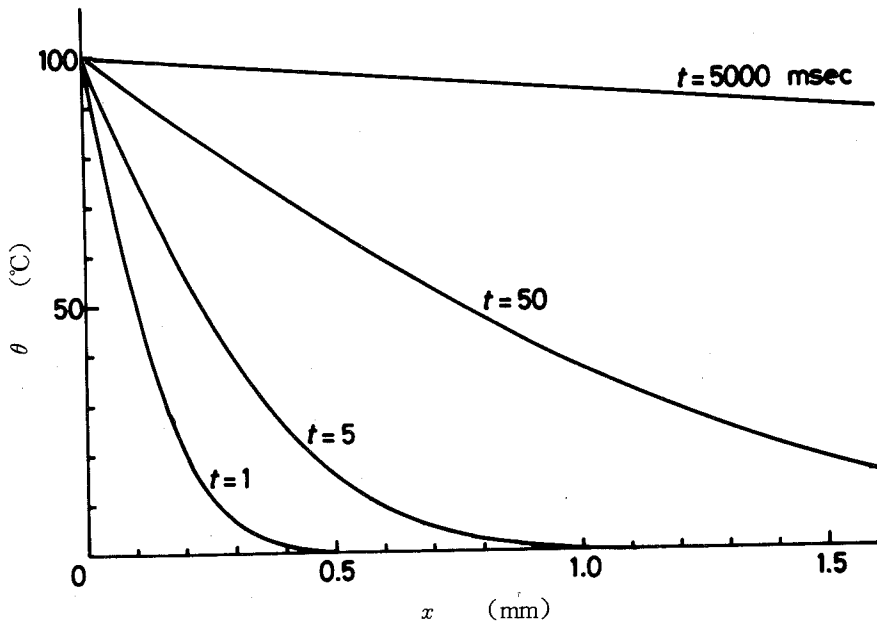


図 4-2 半無限固体表面近傍の温度分布
 t , θ , x : 図 4-1 に同じ

筒座標系一次元熱伝導の基礎式は，半径方向の座標を r とすると，

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{A}{\lambda} \quad (4-3)$$

である¹⁴⁷⁾。ここで内部発熱がないとして，温度場を図4-3のように同心円筒に分割し，節点を等間隔に配置すると，階差計算法によって非定常温度分布が求まる。すなわち，時刻 $t = p \Delta t$ ($p = 0, 1, 2, \dots$) における第 n 番目の節点 (位置 $r = n \Delta r$; $n = 0, 1, 2, \dots$) の温度を θ_n^p とすると，次の前進差分形階差式が得られる¹⁴⁷⁾。

$$\begin{aligned} \theta_n^{p+1} = & a \Delta t / (\Delta r)^2 \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \theta_{n+1}^p + a \Delta t / (\Delta r)^2 \left(1 - \frac{1}{2n}\right) \theta_{n-1}^p \\ & + \{1 - 2a \Delta t / (\Delta r)^2\} \theta_n^p \end{aligned} \quad (4-4)$$

また，刃先すなわち円柱の中心から単位時間，単位長さ当り q の熱量が供給される場合の，中心節点の式は，

$$\theta_0^{p+1} = \frac{4a \Delta t}{(\Delta r)^2} \theta_1^p + \left(1 - \frac{4a \Delta t}{(\Delta r)^2}\right) \theta_0^p + \frac{1}{\lambda \beta} \frac{8a \Delta t}{(\Delta r)^2} q \quad (4-5)$$

である。上式の β は刃先角である。

初期値 $\theta_0^0, \theta_1^0, \theta_2^0, \dots$ を階差式の右辺へ代入して，左辺の値より $t = \Delta t$ の時刻の解 $\theta_0^1, \theta_1^1, \theta_2^1, \dots$ を求める。この操作を繰り返して $\theta_0^p, \theta_1^p, \theta_2^p, \dots$ を順次計算する。

ここで図4-1の計算に使った数値を用い，初期温度が 0°C ($\theta_0^0 = \theta_1^0 = \theta_2^0 = \dots = 0$) である円筒の中心部 (具体的には半径 $\Delta r/2$ の円柱部) を，瞬間的に 100°C としたときの温度応答を， $\Delta t = 0.05 \text{ msec}$ ， $\Delta r = 0.05 \text{ mm}$ とし，(4-4)式によって計算した (図4-4)。図4-4から明らかのように，円柱中心部 (半径 $\Delta r/2 = 0.025 \text{ mm}$) からは，周囲 360° に熱が伝えられるため，一方向にしか熱が伝わらない半無限固体の場合に比べて，周囲の温度上昇が鈍い。 $r = 0.1 \text{ mm}$ の位置においても， 10 msec 経過後にやっと 40°C に達するのみである。すなわち，刃先を一定温度に加熱した場合，数

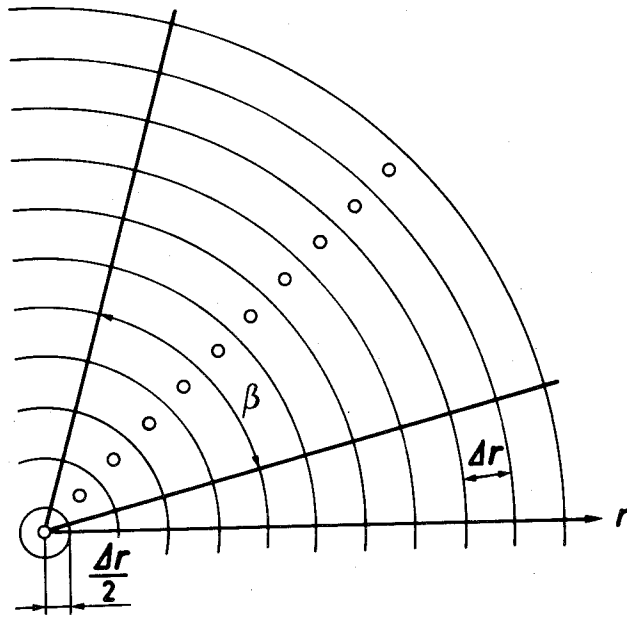


図4-3 刃先を中心とする円筒座標
 r : 半径方向座標, β : 刃先角

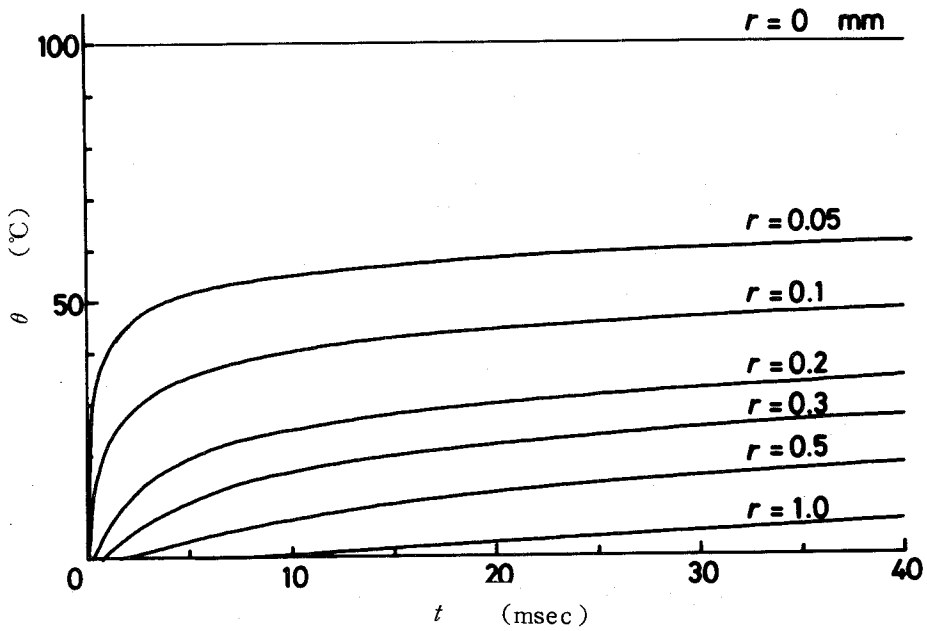


図4-4 円柱中心部の過渡温度応答
 (初期温度 0°C として中心を瞬間的に 100°C とした場合)
 t : 時間, θ : 温度, r : 中心からの距離

msec 経過後の時点では，刃先から0.5 mm程度以内の範囲しか温度が上昇しないことを示す。そしてこの範囲で大きな温度傾斜が発生することになる。図4-4をもとにして求めた温度分布を図4-5に示すが，参考のために1秒経過後の温度分布も記入した。また同図には，刃先線（円柱中心線）に垂直な平面（刃物の横断面）における温度分布の時間変化も示した。

以上は，微小時間内の単なる過渡温度応答を示したに過ぎない。そこで，実際の断続切削を想定した数値計算を次に試みる。問題を簡単にするため次の仮定をおく。(1)すくい面と逃げ面は断熱面とする。(2)刃先が被削材に食い込んでいる間は，一定熱量が刃先からのみ流入する。(3)工具の熱的性質は温度によって変化しない。これらを仮定すると，(4-4)と(4-5)式が適用できることになる。また切削力の主分力を F_1 ，切削速度を v ，切削幅を b とし，切削所要動力 $F_1 v$ がすべて熱に変わるとすると，単位時間，単位刃先長さ当りの発熱量 q は，

$$q = \frac{F_1 v}{J b} \quad (4-6)$$

となる。ただし， J は熱の仕事当量である。

工具には超硬合金を想定して，必要な数値は図4-1の場合と同じものを用いた。刃先角 (β) は 60° とし， $v = 20 \text{ m/sec}$ ， $b = 2.7 \text{ mm}$ の断続切削とした。すなわち，5 msec 間の切削と 20 msec 間の中断を繰り返すものとし，切削時の主分力 (F_1) は 1 kgf とする。ただし，発熱量の 10% の熱量のみが工具に流入するとした。これらの条件のもとに，(4-4)と(4-5)式を使って，切削開始後 1 秒までの温度応答を計算した。なお $\Delta t = 0.125 \text{ msec}$ ， $\Delta r = 0.1 \text{ mm}$ とし，工具の初期温度は 0°C とした。

図4-6に，切削開始直後と約 1 秒経過後の，刃先近くの数節点の温度変化を示す。図4-6から明らかなように，断続切削中の刃先は，刃先が被削材に食い込んでいる間に急激な温度上昇を示し，被削材から離れると工具内の熱伝導によってまた元の温度近くまで降下することを繰り返す。そしてこの温度変化を繰り返している間に，刃先近くの温度が全体的に徐々に上昇していく。ま

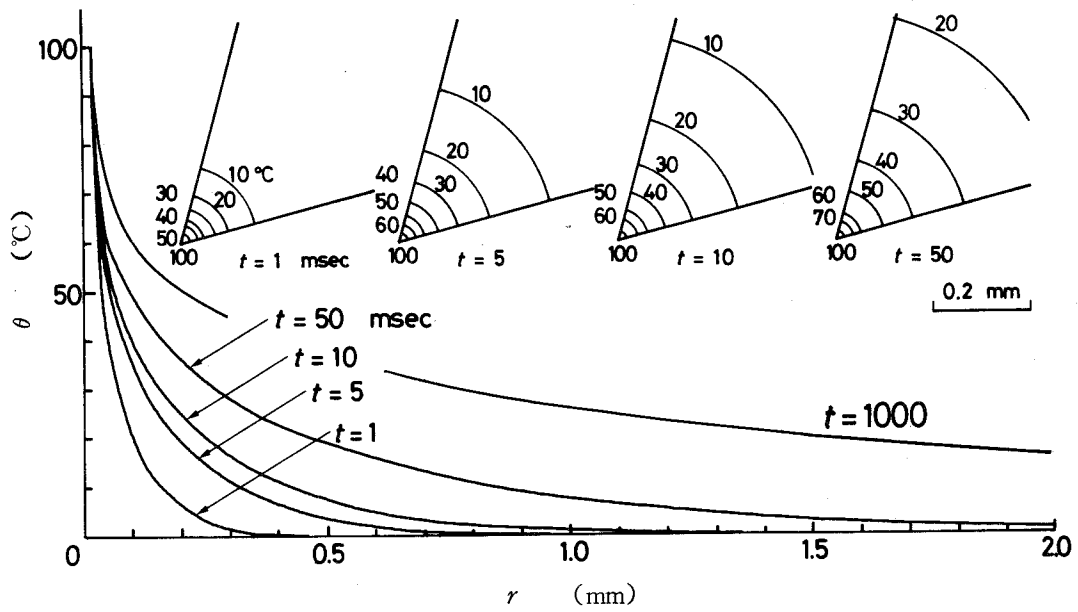


図4-5 円柱中心部の温度分布
 t, θ, r : 図4-4に同じ

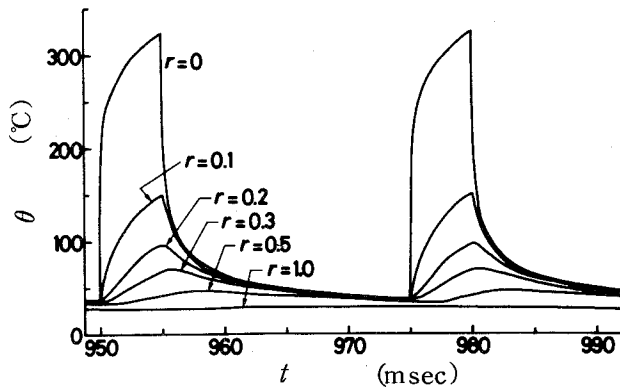
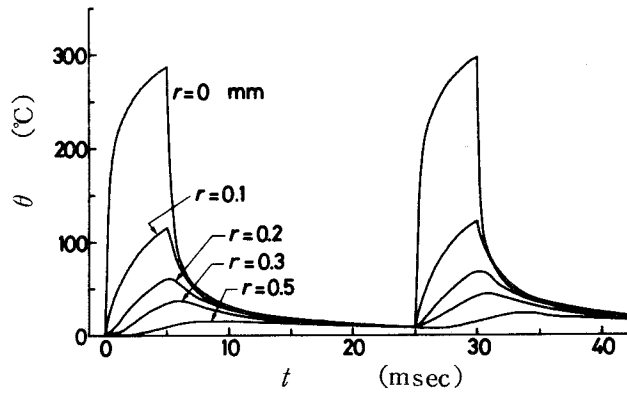


図4-6 断続切削時の刃先近傍の温度変化(数値計算)
 t, θ, r : 図4-4に同じ

た、刃先が被削材に食い込むたびの温度変化は、図4-6の場合せいぜい刃先から0.5mmまでの領域であり、しかも刃先から離れるにしたがって温度変化が遅れる傾向のあることがわかる。刃先から1mmの点では、単に温度が非常にゆるやかに上昇するのみで、刃先からの断続的な熱の供給の影響は全く認められない。図4-6は、かなり粗い仮定のもとに求めた刃先の温度変化であるため、温度の絶対値については問題もあるが、木材切削工具の刃先の温度挙動について、大略の傾向は表しているものと考えられる。

4.2 逃げ面摩擦時の刃先温度¹⁴⁸⁾

ここでは、単一鋸歯の逃げ面を木材試片で連続的に摩擦したときの、刃先の温度上昇と到達温度に及ぼす、摩擦力と摩擦速度の影響についての実験結果を述べ、木材切削時の刃先の温度上昇に及ぼす逃げ面摩擦の影響について考察する。

4.2.1 実 験

(a) 装置と方法

実験方法の模式図を図4-7に示す。金属用旋盤の主軸に、厚さ約20mm、直径約240mmのブナ板目材(気乾)の円板を、金属円板ではさみつけて固定した。一方試験用チップソー(表2-2に示した鋸〔F〕と同種)から切り取った単一鋸歯(刃先の幅2.8mm、刃先角60°)を、鋸身面を水平とし、ホルダ、円板型3成分工具動力計^{142,143)}、高さ調節用治具を介して、旋盤刃物台に固定した。温度測定のための赤外線放射顕微鏡(Barnes RM-2A)¹⁴⁹⁾は、旋盤外部のアームに、光軸が垂直になるように取り付け、鋸歯側面に焦準できるようにした。なお顕微鏡の測温スポット径は50μmであり、応答周波数は1Hzとして使用した。

実験手順は、まず木材円板の表面(旋盤主軸に垂直な面)を鋸歯で切削して平面とした。次に、回転していない円板の外周部近くの表面に、適当な力で刃先を押しつけて刃物台を固定し、赤外線放射顕微鏡の測温スポットを刃先角の二等分線上、刃先先端から約0.15mmの距離にある鋸歯側面上の点に定めた

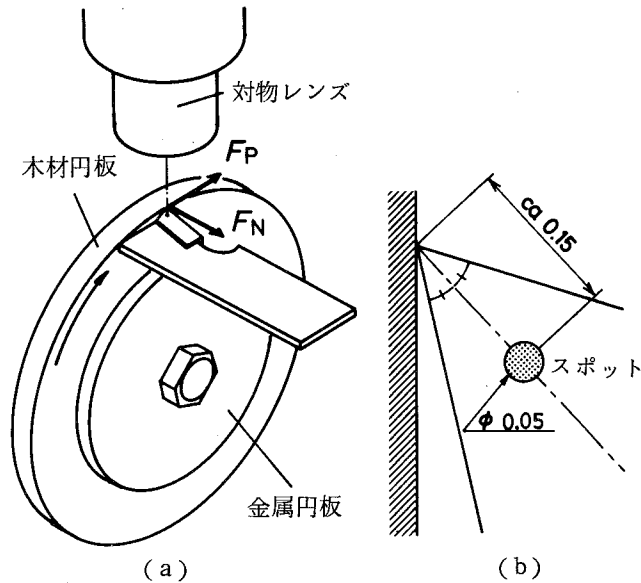


図4-7 逃げ面摩擦の模式図(a)と温度測定位置(b)

(単位 mm)

F_N : 鋸歯を木材円板に押しつける力

F_P : 鋸歯と木材円板の摩擦力

(図4-7)。そこで円板を切削時の逆方向に回転することにより、刃先逃げ面側を摩擦し、その時の顕微鏡と工具動力計の出力をペンレコーダに記録した。工具動力計では、鋸歯を円板面に押しつける力 F_N と、摩擦力と考えられる円板面に平行な力 F_P を測定した。旋盤刃物台は、摩擦中も固定し続けた場合と、摩擦力の F_N を所定の値に保持するため途中で $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度後退させた場合とがある。なお円板の回転数は $133 \sim 1240 \text{ rpm}$ の間の7段階としたが、摩擦速度では $1.6 \sim 23.6 \text{ m/sec}$ となる。また鋸歯の円板面に対する逃げ角は 13° とした。

ところで、鋸歯先端に力が作用すると、動力計、治具を含めた弾性系のたわみにより、刃先の位置が移動する。しかしこの移動量は、 F_N 方向に 1 kgf の力が作用したとき同方向に $1 \mu\text{m}$ 、 F_P 方向 1 kgf のとき同方向 $10 \mu\text{m}$ ときわめて小さく、本実験での力の範囲内ではこの刃先の移動が特に問題になることはない。

(b) 超硬チップの放射率

赤外線放射を利用した温度測定の場合、最も問題になるのは測定表面の放射率である¹⁴⁹⁾。図4-8は、表2-1に示した3種類の超硬チップを種々の温度に加熱した時の放射率を、本実験に用いた顕微鏡(検出波長域 $1.8\sim 5.5\mu\text{m}$)で測定した結果である。各プロットは7~9点の平均値であり、そのときの最大と最小の範囲も示した。

図に示した3種の超硬チップの放射率は、値の大小、ばらつきの程度がそれぞれ異なるものの、いずれも室温から 100°C の範囲で顕著な温度依存性を示す。ちなみに各チップ表面の粗さ曲線を図4-9に示す。これらのチップはダイヤモンド砥石(#400)で同様に研削したものであるが、チップFとGは非常に滑らかな表面を示すものの、Hは $1\mu\text{m}$ にも達する粗さを呈している。放射率は、その物体を構成する成分のみでなく、当然その表面状態にも大きな影響を受けるが、図4-8にみられるチップHの高い放射率と大きなばらつきの理由の一つは、その比較的粗い表面構造にあるものと考えられる。いずれにしても、温度上昇によって酸化膜が形成され、放射率も大きく変化する¹⁴⁹⁾ 鋼

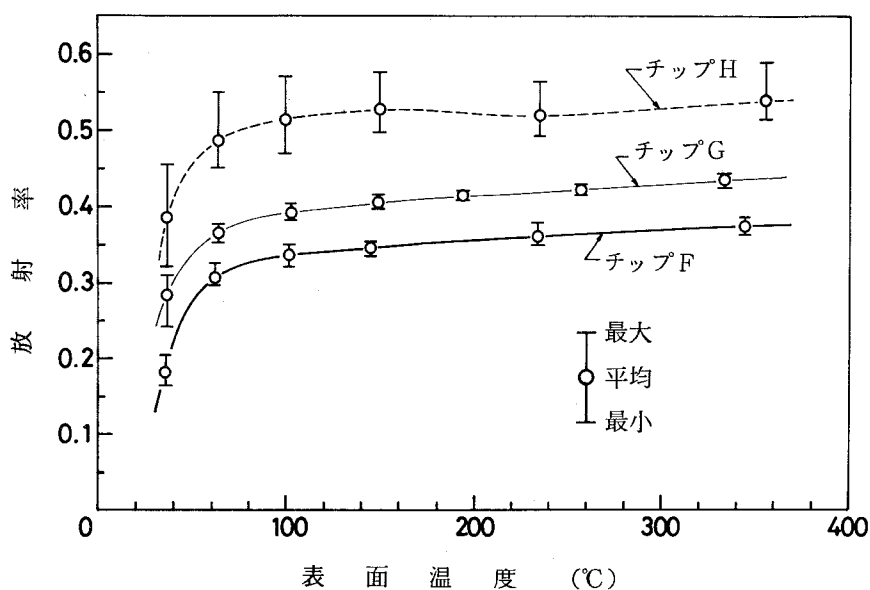


図4-8 超硬チップの放射率と表面温度の関係

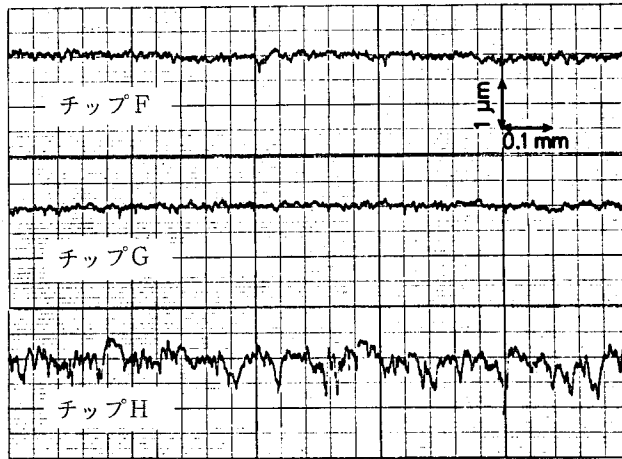


図4-9 超硬チップ表面の粗さ曲線

製工具に比べ、超硬チップは室温付近を除いて放射率が比較的安定しており、適切な材種を選べば再現性もよく、この種の実験には最適な工具といえる。

なお本実験では、図4-8に示したチップFの曲線を用い、測定時の室温を考慮して、顕微鏡出力（放射輝度）を温度に変換した¹⁴⁹⁾。

4.2.2 刃先温度の時間変化

旋盤刃物台を固定したままで摩擦を続けた場合の、刃先温度と F_N 、 F_P の時間変化の例を図4-10～12に示す。

図4-10にみられるように、比較的低速で摩擦した場合には、刃先温度は摩擦開始時から1～2秒の間に急激に上昇し、その後は定常になるか、わずかずつ上昇を続ける。このような低速で、温度があまり上昇しない場合には、 F_N と F_P はある程度の変動を示すものの、摩擦中も一定とみなせる。ところが速度が高くなると、当然温度も高くなるが、さらに時間とともに F_N も増大していくのが認められた（図4-11）。この場合、 F_N はある時間経過後に安定して、その時温度も定常になるが、図4-11に示したように、75秒経過後も直線的に上昇を続ける場合もある。さらに速度が高くなると（図4-12）、この傾向が一層顕著になり、23.6 m/sec の場合には、 F_N の値が摩擦開始時の4倍近くにもなって安定している。この F_N が増大する原因の一つには、刃先および木材の熱膨張が考えられるが、それのみで説明するには無理がある。

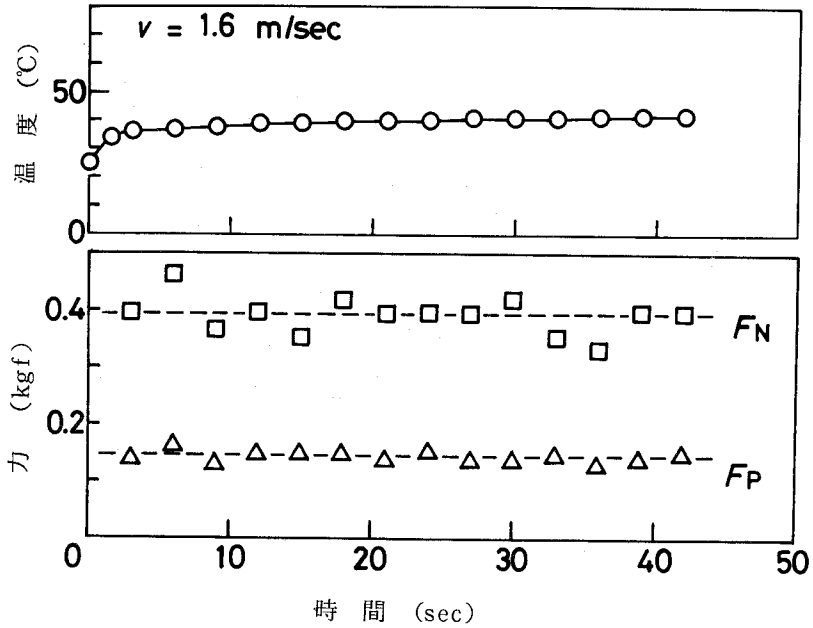


図 4-10 刃先温度 (上) と刃先にかかる力 (下) の時間経過 (刃物台固定)

v : 摩擦速度

F_N , F_P : 図 4-7 に同じ

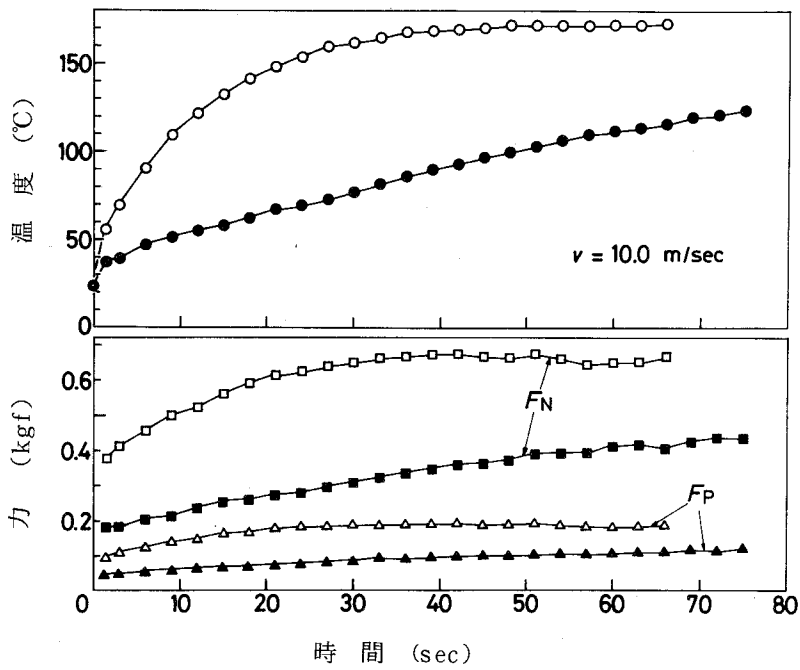


図 4-11 刃先温度 (上) と刃先にかかる力 (下) の時間経過

(刃物台固定) F_N の初期値が高い場合 (○, □, △) と低い場合 (●, ■, ▲) を示す

v , F_N , F_P : 図 4-10 に同じ

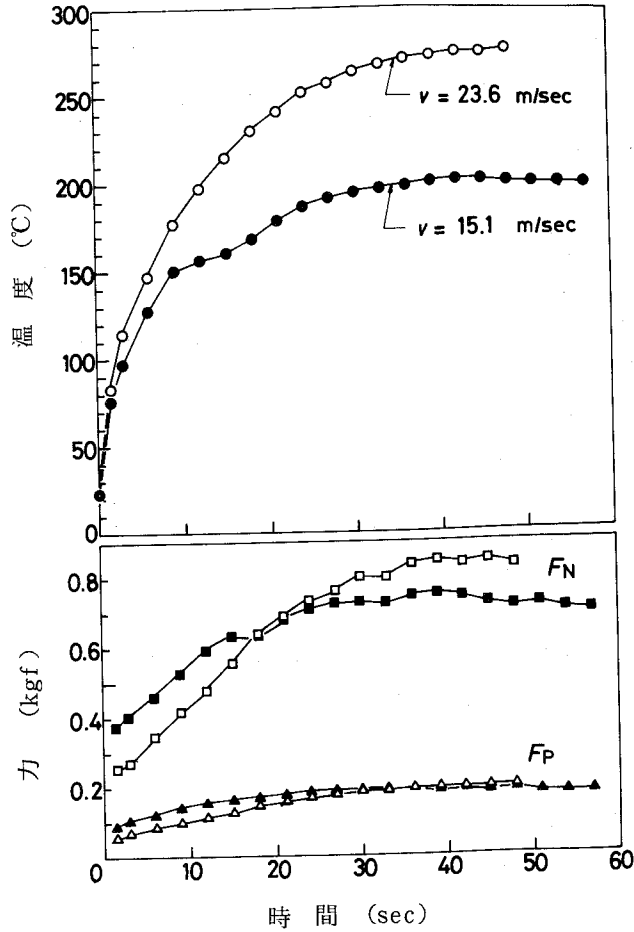


図4-12 刃先温度(上)と刃先にかかる力(下)の時間経過
(刃物台固定)

v , F_N , F_P : 図4-10に同じ

この点について明確な結論は得られなかったが、熱膨張に加えて、刃物台のわずかな遊びにより、鋸歯の位置が若干変化したとするのが最も妥当であろう。

なお、図4-11, 12にみられるように、 F_N の増大とともに F_P も大きくなるが、両者の比は、摩擦速度が同一であれば、常に一定とみなせた。また、刃先逃げ面と木材の接触長さは、実験後の刃先の観察から、刃先線より0.1mm前後と推定された。

4.2.3 刃先温度に及ぼす摩擦速度と刃先にかかる力の影響

前項で示したように、刃物台を固定して摩擦を続けた場合には、 F_N を一定値に保った状態での刃先の定常温度が得られなかった。そこで、 F_N が常に設定値に保たれるように、摩擦の途中で刃物台を円板面からわずかに後退させ、

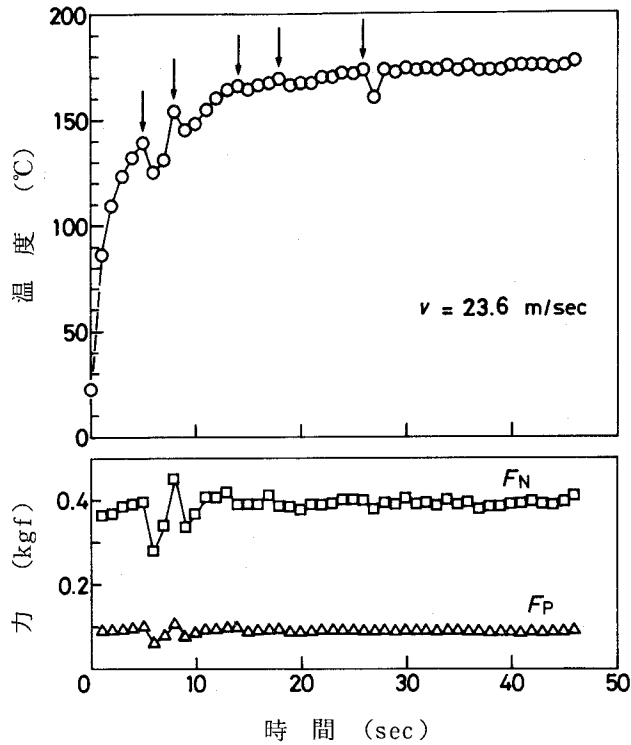


図4-13 摩擦途中で鋸歯をわずかに後退させた(矢印の時点) 場合の刃先温度(上)と刃先にかかる力(下)の時間経過 v , F_N , F_P : 図4-10に同じ

設定した F_N 値での定常温度を得た。図4-13はその一例で、 F_N が約 0.4 kgf となるように数回刃物台を後退させ(矢印の時点で後退させた)、約 170 °C の定常温度を得ている。

図4-14は、この方法で得た刃先温度と F_N , F_P の関係を、4段階の摩擦速度(v)について示したものである。刃先の温度は F_N の増加とともに直線的に上昇しているが、その傾きは高速の場合ほど大きくなっている。また刃先での摩擦に密接に関わる F_P は、刃先温度にきわめて著しい影響があり、特に高速の場合には、0.1 kgf 程度のわずかな変化が 80 °C もの温度変化をもたらすことがわかる。

本節の実験で刃先の温度上昇をもたらすのは、逃げ面摩擦による発熱のみであり、その単位時間当りの発熱量(仕事)が刃先温度を左右することになる。

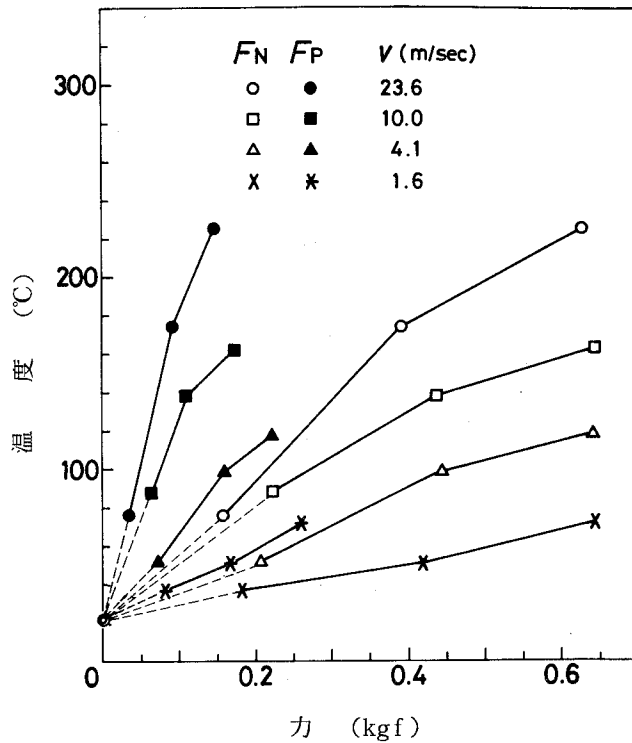


図4-14 刃先温度と刃先にかかる力 (F_N , F_P) の関係
 v , F_N , F_P : 図4-10に同じ

そこで、図4-14の結果も含めて、刃先温度が定常に達したと判断できるすべての場合について、その時の摩擦速度 v と円板面に平行な力 F_P の積、すなわち円板の鋸歯に対する仕事率と刃先温度の関係を求めた(図4-15)。両者は、図4-15に示したように、両対数グラフ上で良好な直線関係を有し、例えば木材の常用切削速度である 50 m/sec の速度では、0.2 kgf の F_P が作用すれば、逃げ面の摩擦のみによって、刃先温度は 400 °C 以上にも達することが推定できる。

ここで摩擦係数に相当する F_P/F_N が摩擦速度にかかわらず一定であれば、図4-15は F_N と刃先温度との関係をも示すことになる。しかし、前項でも指摘したように、同一速度であればこの比は一定とみなせるが、速度が異なれば値が変化し、顕著な速度依存性を示した(図4-16)。従って 0.2 kgf の F_P は、低速(2 m/sec)では約 0.5 kgf、高速(50 m/sec)では約 1 kgf の F_N が作用した場合に相当する。

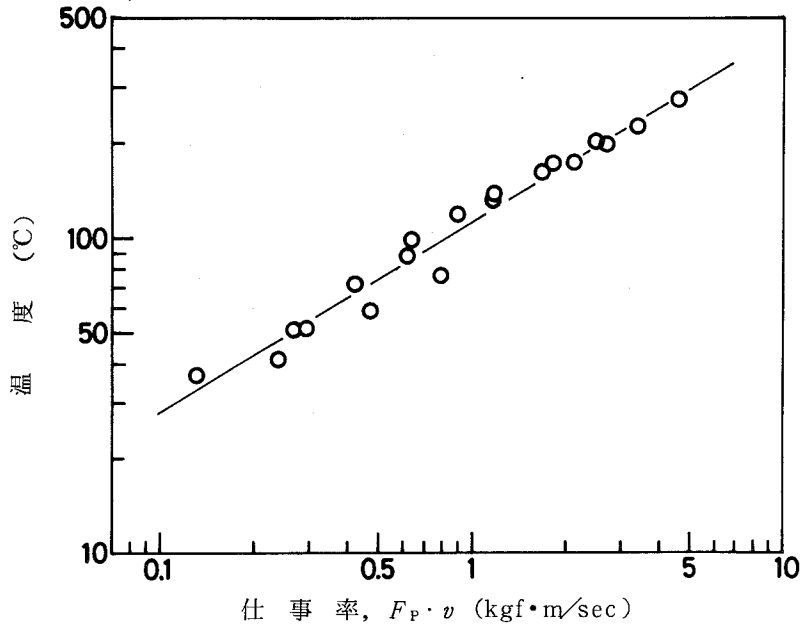


図4-15 摩擦の仕事率 ($F_p \cdot v$) と刃先温度との関係
 F_p , v : 図4-10に同じ

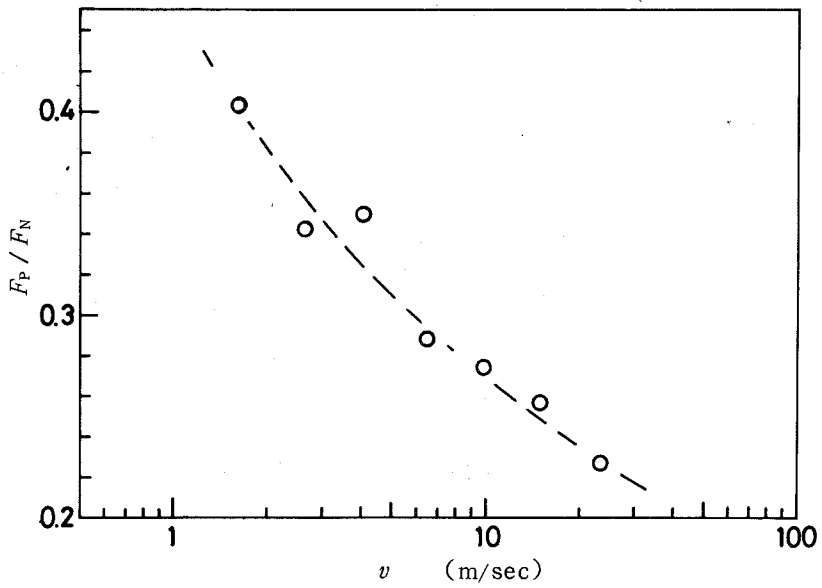


図4-16 刃先にかかる二つの力の比 (F_p / F_N) の
 摩擦速度 (v) 依存性
 F_N , F_p : 図4-7に同じ

金属面と木材の摩擦係数については、村瀬¹⁵⁰⁾が50 m/secの高速域までの速度依存性について詳細に検討しているが、そこでは気乾木材の場合には速度によって摩擦係数はほとんど変化しないことが明らかにされている。本節の実験で求めた F_P/F_N の比が、いわゆる摩擦係数と呼べるかどうか疑問は残るが、図4-16で得られた結果は、切削工具の刃先における摩擦について、一つの問題点を提供するものと考えられる。

実際の切削時には、工具逃げ面の摩擦のみでなく、すくい面と切屑との摩擦が当然生起し、さらに鋸切削やフライスでのみぞ切りの場合には刃物側面での摩擦も加わる。また本節の実験では刃先から約0.15 mm離れた点の温度を測定したが、前節の図4-5でも示したように、刃先の熱源からわずかに離れれば温度は大きく降下するため、実際の刃先温度は測定値よりもさらに高いことも考えられる。したがって、既に報告されている300~500℃の刃先温度^{131,132)}は、本節の実験からも十分予測できるものであり、被削材と工具の摩擦が、木材切削における刃先の温度上昇の主要な原因であることを示唆することにもなる。

4.3 断続切削中の単一鋸歯側面の温度分布^{151,152)}

ここでは、超硬チップを付け歯した単一鋸歯を用い、主切刃のみで木材を断続的に切削した場合(二次元切削)と、実際の鋸切削により近づけるために回転している被削材ブロックの外周面に鋸歯を送り込んで断続切削した場合(みぞ切り)の、鋸歯側面の温度変化と温度分布に関する実験結果について述べる。

4.3.1 実 験

(a) 装 置

すべての実験は、主軸を垂直にするためのパーティカルアタッチメントを取り付けた金属用旋盤で行った(図4-17)。水平面板に取り付けて回転させた2個の被削材の外周面を、円板型工具動力計^{142,143)}を介して旋盤刃物台に固定して送りを与えた単一鋸歯で切削した。鋸歯の送りにともなう変位は、変位変換器(共和DT-20D)によって検出した。赤外線放射顕微鏡(Barnes

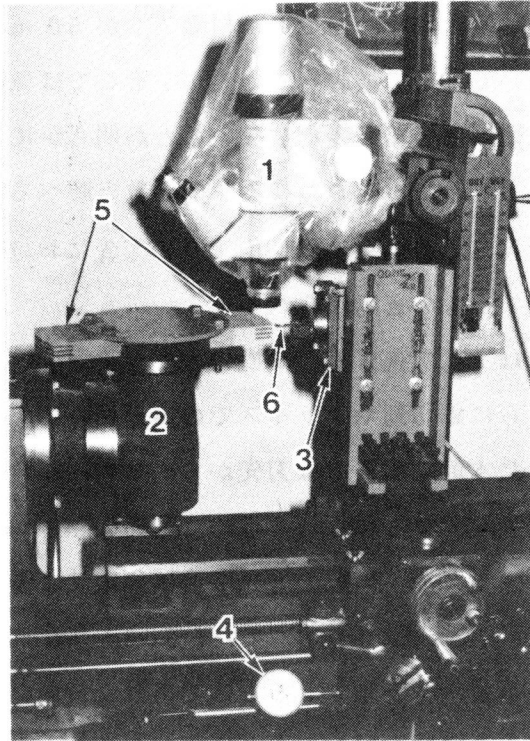


図4-17 実験装置

- 1：赤外線放射顕微鏡，2：バーチカルアタッチメント，
 3：工具動力計，4：変位変換器，5：被削材，
 6：鋸 歯

RM-2A)¹⁴⁹⁾を旋盤外部の支柱に固定し，鋸歯側面の温度が測定できるようにした。顕微鏡の周波数応答は400 Hz（公称）として用いた。

(b) 被削材と工具

二次元切削とみぞ切りの場合の切削方法の模式図を，それぞれ図4-18と図4-19に示す。

被削材はブナ気乾材（気乾比重，平均0.66）のまさ目板（幅100×厚さ25mm）であるが，逆目切削を避けるため繊維方向を21°傾けて木取りした。この2枚の板を木表が外側になるように面板に取り付け，回転径を316~318mmになるように削った。なお二次元切削の場合には，あらかじめ被削材の外周面を図4-18に示すように楕状に加工し，鋸歯の主切刃のみで切削ができるようにした。またみぞ切りの場合は，鋸歯の上側に2mm厚の被削材が残るよう

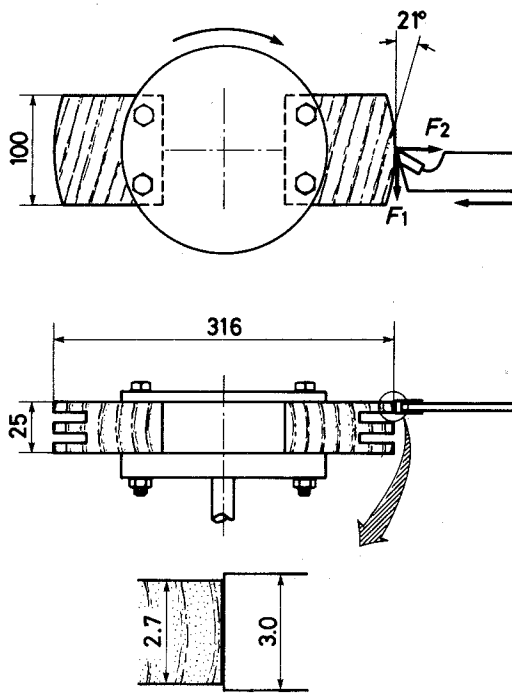


図4-18 二次元切削の模式図(単位mm)
 F_1 , F_2 : 切削力の主分力と背分力

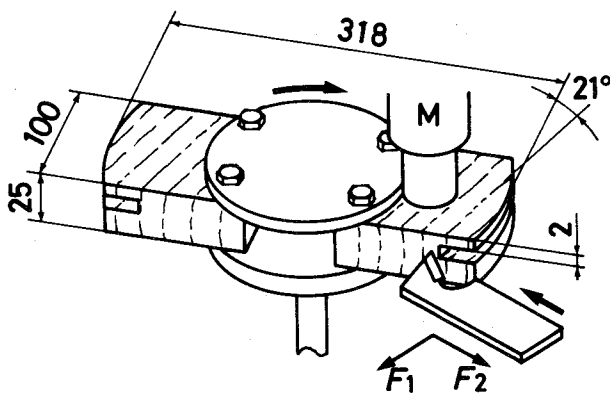


図4-19 みぞ切りの模式図(単位mm)
 M: 赤外線放射顕微鏡
 F_1 , F_2 : 図4-18に同じ

に、被削材外周面に鋸歯を送り込んだ(図4-19)。

工具に超硬チップ(K20)²¹⁾を付け歯した特製の単一鋸歯を用いたが、その形状は図4-20に示すとおりである。逃げ角(α)、刃先角(β)、すくい角(γ)の組み合わせの異なる4種を用いたが、側面の逃げ角(σ , τ)とともに表4-1に値を示す。ただし、二次元切削では側面の逃げ角が 0° の鋸歯を用いた。側面の逃げ角 σ と τ の公称値はそれぞれ 3° と 1° であるが、側面の輪郭が必ずしも直線でないため、刃先から1mm前後の範囲における実測値(表4-1)は公称値よりも小さくなっている。

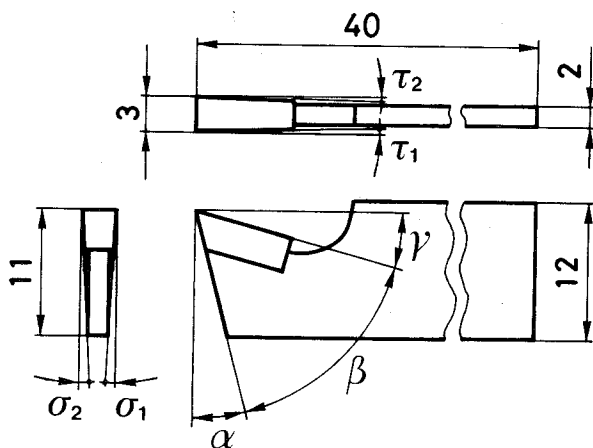


図4-20 単一鋸歯の形状(単位mm)

α :逃げ角, β :刃先角, γ :すくい角,
 $\sigma_1, \sigma_2, \tau_1, \tau_2$:側面の逃げ角(添字
 の1は温度測定面側を示す)

表4-1 超硬チップの諸角度^{a)}

$\alpha - \beta - \gamma$	$\sigma_1^{b)}$	σ_2	$\tau_1^{b)}$	τ_2
$15^\circ - 40^\circ - 35^\circ$	0.8°	2.2°	0.1°	0.7°
$5^\circ - 50^\circ - 35^\circ$	0.9°	1.7°	-0.4°	0°
$15^\circ - 60^\circ - 15^\circ$	2.9°	2.3°	0.5°	-0.2°
$5^\circ - 70^\circ - 15^\circ$	2.9°	2.6°	1.0°	0.1°

a) 二次元切削に用いたものはすべて $\sigma_1, \sigma_2, \tau_1, \tau_2$ が 0° である

b) 添字の1は温度測定面側を示す

温度測定に必要な超硬チップ側面の放射率は，表面をアセトンで清浄した切削前と，鋸歯を約2 mm送り込んで切削した後の状態について，超硬チップを種々の温度に加熱して測定した。その結果，二次元切削の場合は，切削前後ではほとんど差は認められず，それよりも測定部位によるばらつきの方が大きかった（図4-21）。また前節でも指摘したように，100℃以下の温度で放射率が表面温度に強く依存していることがわかる。二次元切削の温度測定には，図4-21に示した温度-放射率曲線を用いた。一方みぞ切りの場合には，鋸歯が被削材中に送り込まれることによって超硬チップ側面に切屑の微粉が付着するため，切削後の放射率は切削前よりも高くなり，また切屑微粉の付着の程度が場所によって異なるため，同一表面温度でも測定位置によるばらつきが大きい（図4-22）。ちなみに図4-22の切削後の放射率は，実際に温度を測定する部位について求めたものである。みぞ切りにおける放射率としては切削後の平均的な値を採用することにし，図4-22に太い実線で示した曲線を温

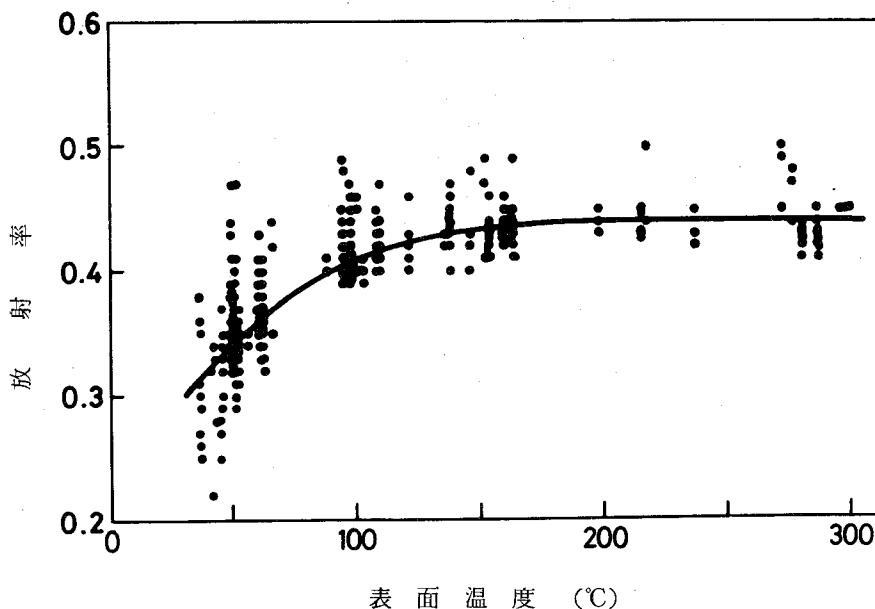


図4-21 超硬チップの放射率と表面温度の関係
（二次元切削）

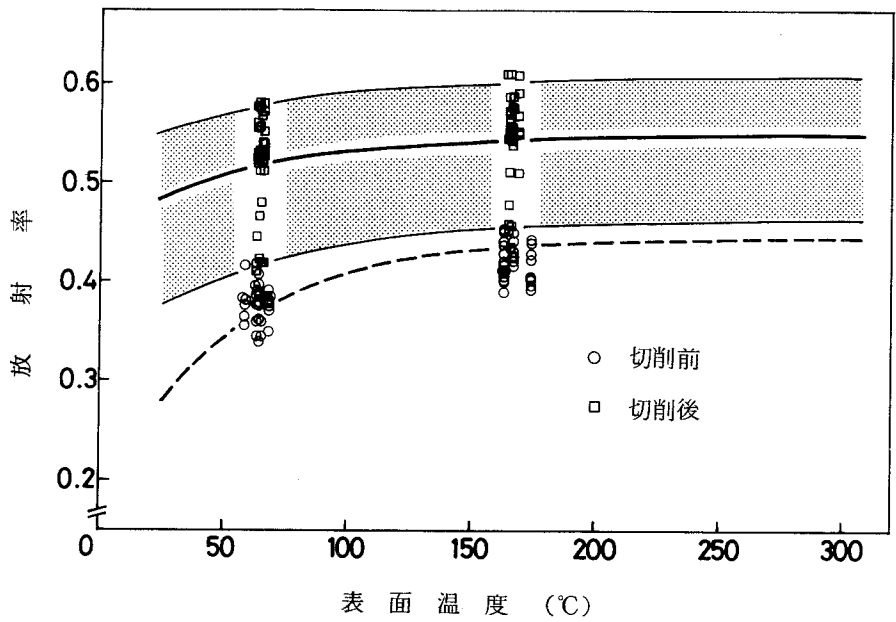


図4-22 みぞ切り前後における超硬チップの放射率と表面温度の関係

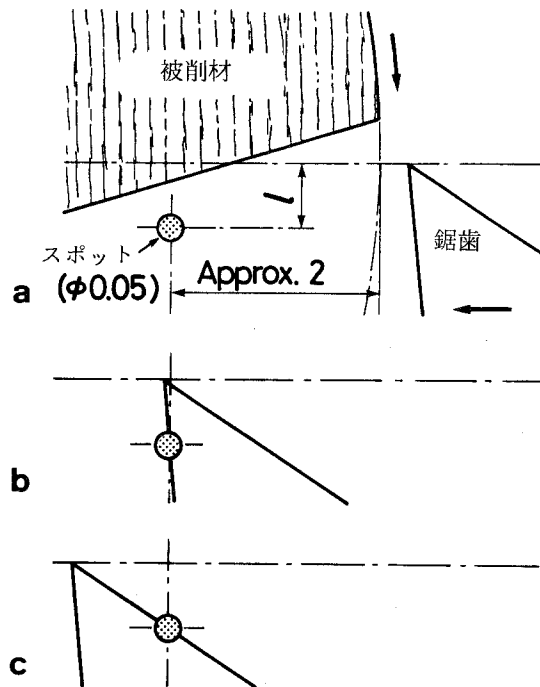


図4-23 温度測定の様式図

度測定に用いた。なお放射率のばらつきによる温度測定の誤差については，図 4 - 21 の曲線から放射率が $\pm 10\%$ されると，測定温度は約 $\pm 4\%$ 変化する。また図 4 - 22 の太い実線から上下の細い実線まで放射率が変化すると，表面温度が $60\text{ }^\circ\text{C}$ の場合で -2° ， $+5^\circ\text{C}$ ， $150\text{ }^\circ\text{C}$ の場合で -6° ， $+9^\circ\text{C}$ の測定誤差となる。

被削材は $333, 817, 1240\text{ rpm}$ で回転させたが，切削は外周面から約 10 mm の深さまで行ったので，平均切削速度はそれぞれ $5.4, 13.2, 20.0\text{ m/sec}$ となる。鋸歯の送りは主軸 1 回転当り 0.043 mm で，実験のすべてを通じて一定とした。

(c) 温度の測定方法

まず顕微鏡の測定スポットを被削材の回転外周面または挽きみぞの底から約 2 mm 内側で 刃先の進行線から距離 l 離れた直線上にセットする (図 4 - 23 a)。この状態で被削材を回転して鋸歯を送ると，超硬チップの刃先部分は被削材を切削しながら測定スポットを通過することになり，このとき超硬チップ側面の温度が測定できる。側面がスポット中心に入る時点 (図 4 - 23 b) と出る時点 (図 4 - 23 c) は変位変換器で確認できる。本節の実験における測定系は図 4 - 24 に示すとおりであるが，顕微鏡の出力 (赤外線放射輝度) は，切削力の 2 分力と鋸歯の変位とともに電磁オシログラフに記録すると同時に，データレコーダにも記録した。そしてその再生出力を 1000 Hz のサンプリング周波数で，A/D コンバータを通してコンピュータに入力し，超硬チップの放射率と室温を考慮して所定の変換曲線¹⁴⁹⁾ に従って温度に変換し，プロッタに出力した。なお刃先の進行線からの距離 l (図 4 - 23) は，二次元切削の場合は $0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7\text{ mm}$ の 5 段階で，みぞ切りの場合は $0.1, 0.3, 0.7\text{ mm}$ の 3 段階とした。また，みぞ切りの 0.3 と 0.7 mm の場合は，既に形成されている挽きみぞの底に，主切刃がほとんど接触するまで近づけてから被削材を回転した。

図 4 - 25 に二次元切削の場合，図 4 - 26 にみぞ切りの場合について，切削力の 2 分力，鋸歯の変位，赤外線の放射輝度を同時に記録したチャートの一

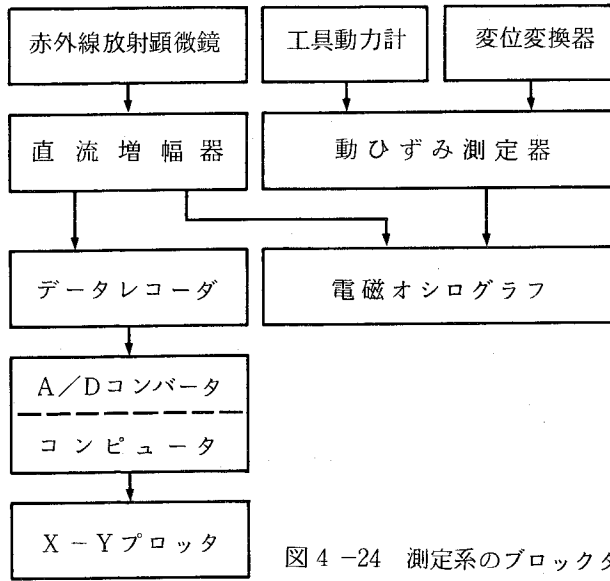


図4-24 測定系のブロックダイアグラム

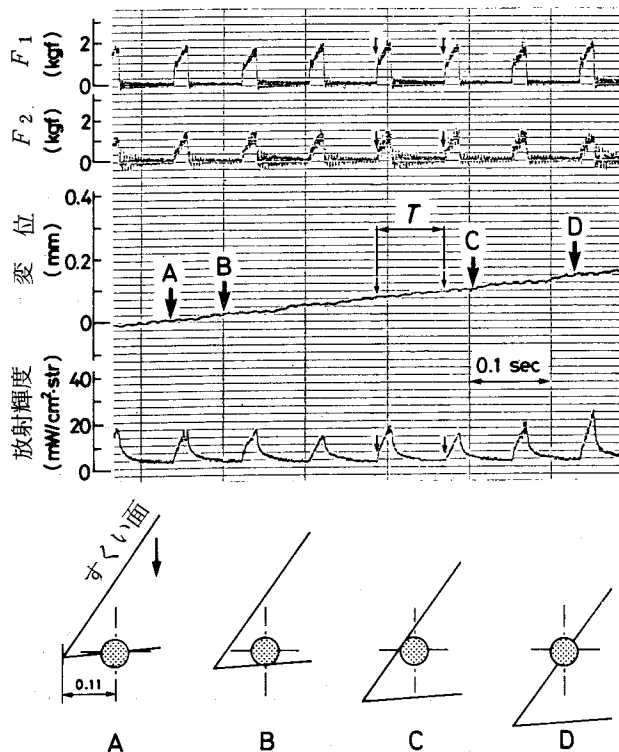


図4-25 二次元切削時の切削力の2分力，鋸歯の変位，赤外線放射輝度の記録例（鋸歯： $15^{\circ}-45^{\circ}-35^{\circ}$ ，被削材回転数：333rpm）
 チャート上のA～Dは鋸歯が下図のA～Dの位置にあることを示す。
 T ：切削サイクルの周期
 F_1, F_2 ：図4-18に同じ

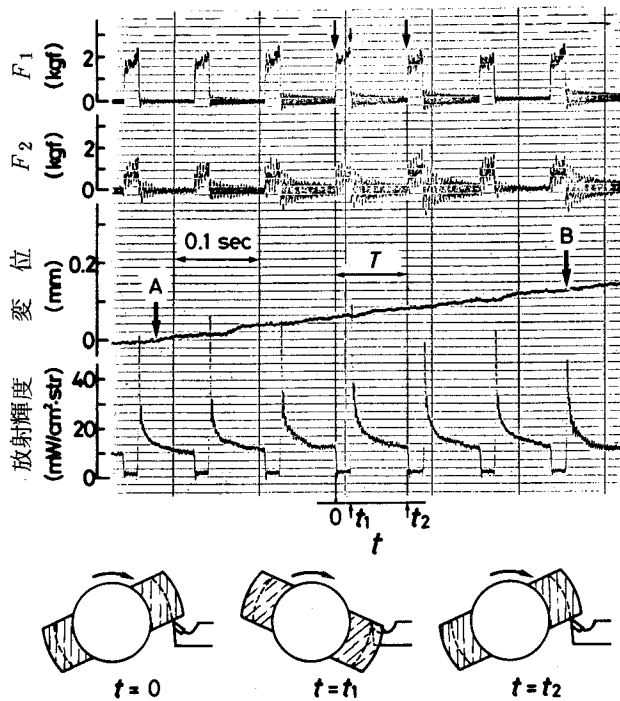


図4-26 みぞ切り時の切削力の2分力，鋸歯の変位，赤外線放射輝度の記録例
 (鋸歯： $15^{\circ}-50^{\circ}-35^{\circ}$ ，被削材回転数：333rpm， $\ell=0.09$ mm)
 鋸歯は時間 (t) $0 \sim t_1$ の間に被削材に食い込み， $t_1 \sim t_2$ の間は
 被削材から離れている
 A, B：図4-25のA, Dに対応
 T, F_1 , F_2 ：図4-25に同じ
 ℓ ：図4-23参照

例を示す。図4-25の場合，超硬チップ側面が顕微鏡の測定スポット下にある間 (A～D) に鋸歯は被削材を6回切削しているが，スポット全面が側面上にあるのはB～C間であり，この間の温度が測定できる。図にみられるように，被削材を切削する毎に放射輝度は大きく変動している。ここで刃先が一つの被削材に食い込んでから次の被削材に食い込むまでを，周期Tの切削サイクルとすると，この間の鋸歯の送り方向の移動量は測定スポット径の半分以下に相当する0.0215 mmである。従って，任意の切削サイクルにおける放射輝度すなわち温度の変化は，超硬チップ側面の対応する点における1切削サイクル内の現象とみなすことができる。また，鋸歯を約2 mm送り込んだ後では，チップ側面

の温度測定領域は熱的にほとんど定常状態になることが予備実験で確かめられたので、図4-25と同様のチャートからいくつかの切削サイクルを抜き出し、それぞれの開始点を基準にして重ね合わせると、超硬チップ側面の異なった位置における1切削サイクル内の温度変化が求まる。

図4-26のみぞ切りの場合にも、同様の放射輝度の変化が得られるが、この場合は、測定スポット下に超硬チップの側面があっても、刃先が被削材に食い込んでいる間(0~ t_1)は温度を測定する刃先近くの側面が被削材に隠れるため、チップの温度は測定できない。したがって、刃先が被削材から離れて次の被削材に食い込むまでの間(t_1 ~ t_2)でのみ、チップ側面の温度が測定できる。

(d) 切削過程についての検討

本節で採用した断続切削における切削過程を検討するため、切削時の切屑の挙動と、鋸歯と切屑や被削母材との接触状況について、予備実験で調べた。

図4-27は、二次元切削における切屑の挙動を、図4-17に示す顕微鏡の位置から高速度カメラ(日立 16HD)で撮影した写真である。撮影は毎秒5000コマまで行ったが、図4-27には約3 msec毎に抜き出した8コマを示す。切屑は、刃先が被削材に食い込んでから離れるまで、途切れることなく滑らかに排出され、超硬チップの側面を覆ったりすることはない。排出された切屑の形状は、みぞ切りの場合でも大差なく、同様の切削過程が進行しているものと考えられる。

鋸歯の刃先における切屑や被削材との接触状態を検討するためには、切削前後における超硬チップの顕微鏡観察と、チップ表面に塗布した塗料の剥離した幅から接触長さを推定することを試みた。なお塗料は事務用修正液を希釈したものであり、塗膜の厚さは約3 μm である。また鋸歯を3~5 mm送り込んで切削した後、剥離幅を測定した。図4-28は、みぞ切りにおける切削前後の超硬チップ側面と、チップ表面に塗料を塗布してから切削した場合のすくい面と逃げ面の顕微鏡写真である。みぞ切り後のチップ側面には切屑の微粉が付着し、部分的に研磨条痕が不明瞭となっている。特にすくい面側には帯状の強固な付着が認められる。温度を測定しようとする、刃先から0.1~0.7 mm離

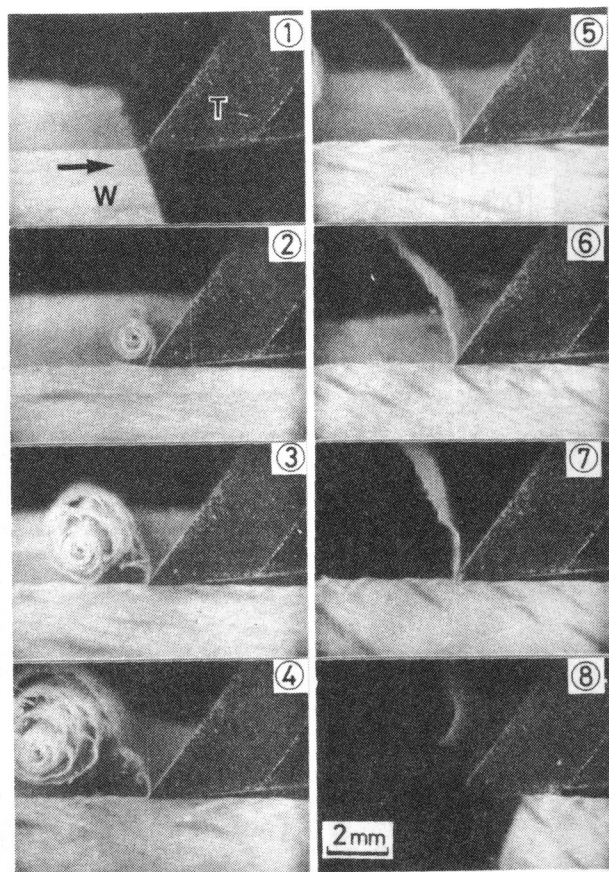


図4-27 二次元切削の高速度カメラ写真（各写真の時間
間隔は約3 msecである）

鋸歯： $5^{\circ}-50^{\circ}-35^{\circ}$ ，被削材回転数：333rpm

撮影速度：毎秒5000コマ

T：鋸歯，W：被削材

れた直線の近辺では，みぞ切りの場合何らかの形で被削材との接触が生起すると考えられる。

すくい面側における塗膜の剥離部（研磨条痕のみえるところ）と非剥離部（実際は白色塗料であるが落射照明のため暗くみえる）の境界は直線的できわめて明瞭であり，刃先線に平行である（図4-28）。この剥離部の幅はすくい角 15° のチップで0.17 mm， 35° の場合0.20 mmであった。一方逃げ面側の塗膜剥離の境界は全体的には刃先線に平行であるが，部分的な凹凸が顕著で

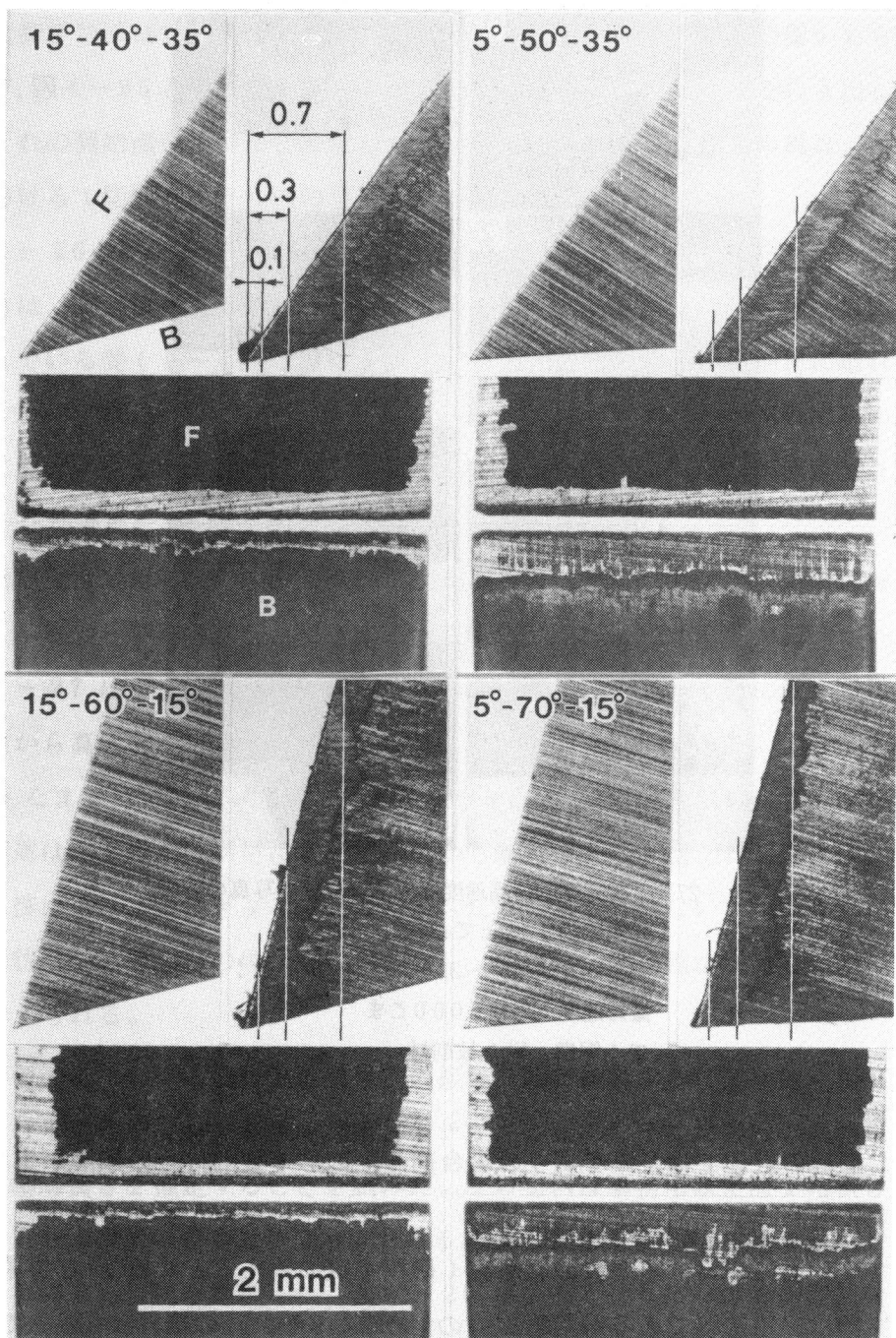


図4-28 みぞ切り前(左上), 後(右上)の超硬チップ側面と切削後のすくい面(F, 中), 逃げ面(W, 下)の塗膜剥離を示す顕微鏡写真

ある。また塗膜が完全に剥離した部分と非剥離部の間に、塗膜が薄くなって所々剥離している領域がある。この中間領域には切屑微粉の堆積や付着が認められないこと、完全に塗膜が剥離した部分には樹脂状物質の強固な付着がみられること等から判断して、逃げ面側では被削材と常に強く接触する領域（完全剥離部）と、比較的弱くまたは時々接触する領域（中間部）が存在することが推定される。なお塗膜が完全に剥離した部分の平均的な幅と、それに塗膜が薄くなった部分も含めたときの平均的な幅は、逃げ角 15° のチップでそれぞれ 0.12 と 0.16 mm、 5° の場合 0.32 と 0.57 mm であった。また二次元切削の場合についても、逃げ面とすくい面側の剥離幅は図 4-28 と同様の値が得られた。以上から、本節の切削における超硬チップのすくい面と切屑の接触長さは $0.17 \sim 0.2$ mm、逃げ面と被削材のそれは $0.1 \sim 0.3$ mm であると推定できる。

ちなみに、図 4-28 で明らかなように、みぞ切りの場合にはすくい面上の塗膜が側面の切刃に沿った領域でも剥離している。これは主切刃で生成された切屑が挽きみぞから排出される途中でこの領域に接触するか、切屑または切屑の細片がこの領域により多く衝突するためではないかと考えられる。

4.3.2 二次元切削における刃先温度

最も低速で切削した場合の、刃先角の二等分線に沿った 5 点における 1 切削サイクル内の温度変化の例を図 4-29 に示す。同図において、刃先は時間 0 で被削材に食い込み、 t_1 で離れ、 t_2 では次の被削材に食い込む。刃先に近い点の温度は、刃先が被削材に食い込むと同時に上昇し始め、刃先が被削材から離れる時点で極大値に達した後、次の被削材に食い込むまでの間に元の値まで降下している。刃先から離れるにしたがっての温度変化は小さくなり、理論的にも期待されるように（4.1 節参照）、温度変化がやや遅れる傾向がある。

図 4-30 は、前図と同様の温度変化をより高い切削速度について示したものである。図 4-30 でも前述と同様の温度変化がみられるが、切削速度が高いこととより小さい逃げ角のため、温度が全体的に高くなっている。切削速度の増大とともに当然切削サイクルの周期も短くなるが、最高速の 1240 rpm の場合には、刃先に最も近い点では 5 msec の間に 80°C もの急激な温度上昇

がみられる。図4-29, 30以外の切削条件についても、同様の温度変化が得られた。

図4-30にみられるような、msec オーダの急激な温度上昇は、¹³²⁾ Chardin
 によって既に測定されており、彼が示したオシログラムによると、32.4 m/sec
 の速度で約15 msecの間切削することにより、すくい面の温度は500℃も
 の定常温度まで達している。本節の実験とは、測定方法や切削条件が異なるが、
 いずれにしても、刃先近くでは極めて短時間に著しい温度上昇が生起するこ
 とは注目すべき点である。また、図4-29, 30にみられた側面の温度変化は、
 刃先線を円柱の中心と仮定して数値計算によって求めた図4-6の温度変化の
 パターンとよく一致する。ただし、図4-6では刃物表面からの冷却を考慮し
 ていないため、刃先の温度が他の部分より低くなることはあり得ないが、図4
 -29では明らかに刃先に向って温度が低下している時間帯がある。

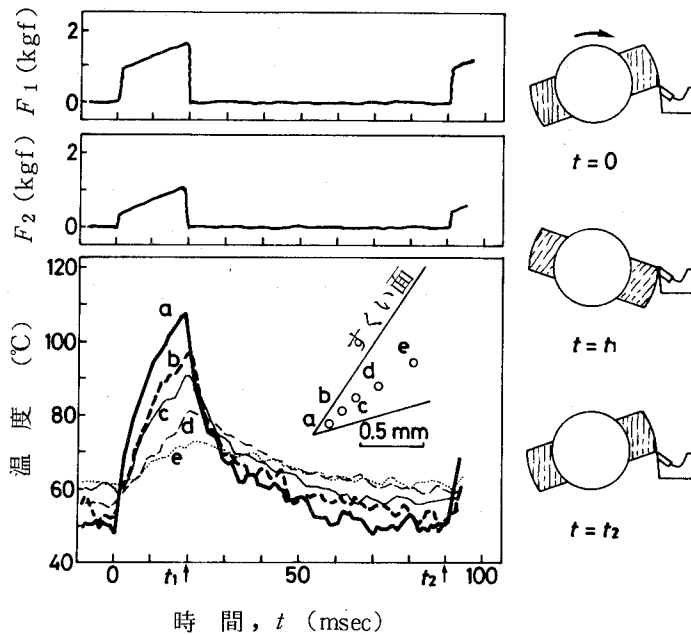


図4-29 切削サイクル内の鋸歯側面の温度変化(二次元切削)
 鋸歯: 15°-40°-35°, 被削材回転数: 333rpm
 室温: 20℃
 F_1, F_2 : 図4-18に同じ

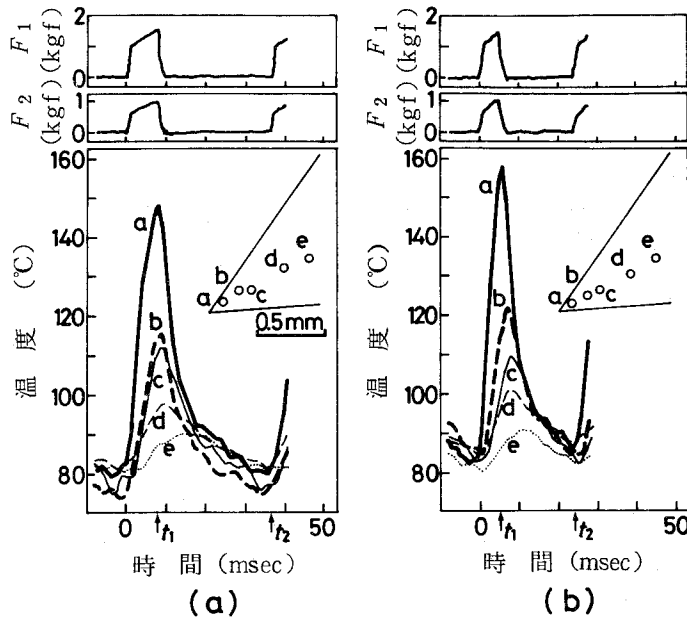


図4-30 切削サイクル内の鋸歯側面の温度変化(二次元切削)

(a) 鋸歯: $5^{\circ}-50^{\circ}-35^{\circ}$, 被削材回転数: 817rpm, 室温: 22°C

(b) 鋸歯: $5^{\circ}-50^{\circ}-35^{\circ}$, 被削材回転数: 1240rpm, 室温: 20°C

F_1, F_2 : 図4-18に同じ

t_1, t_2 : 図4-29参照

図4-29, 30に示したそれぞれ5点の温度変化に, さらに他の点の温度変化を加え, 刃先が被削材に食い込む時点($t=0$)と離れる時点($t=t_1$)における各点の温度から, 超硬チップ側面の温度分布を求めた(図4-31)。 $t=0$ における側面の温度は測定領域全体にわたってほとんど一様であるが, 低速の場合(a)には刃先に向かって低下する傾向が認められる。一方 $t=t_1$ では, 刃先に近い部分のみが著しく高い温度になっていることがわかる。

ところで, 4.1節で既に指摘したように, 鋸歯の表面を断熱面とし, 熱源が刃先に限定されていると仮定すると, 鋸歯側面における温度分布は, 円柱の中心から周辺への熱伝導の問題と同等に扱える。その場合, 当然等温線は刃先を中心とする同心円状となる(図4-5)。実際, 超硬チップ側面の温度は, 図4-31にみられるように, 刃先からの距離のみに関係しているようである。そこで, 各切削条件について, 時間0と t_1 における超硬チップ側面上各点の

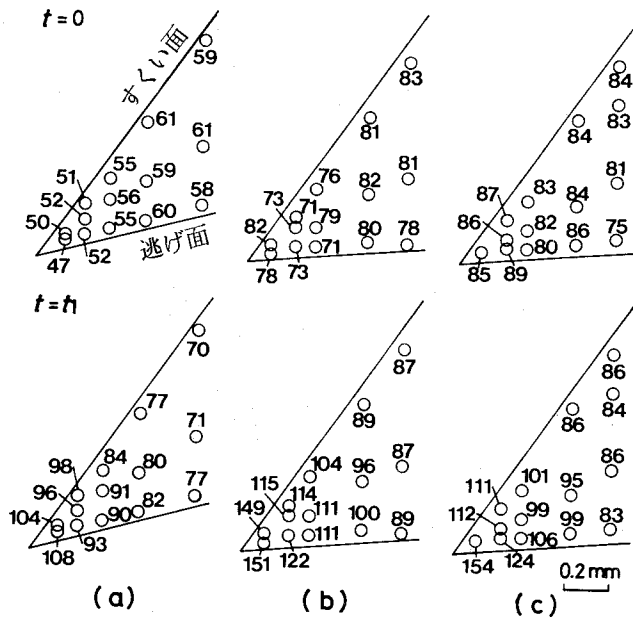


図 4-31 刃先が被削材に食い込む時点 ($t=0$) と離れる時点 ($t=t_1$) における鋸歯側面の温度分布の例 (二次元切削)
 (a), (b), (c) の切削条件はそれぞれ図 4-29, 4-30 a, 4-30 b に同じ

温度を刃先からの距離に対してプロットした (図 4-32)。その結果, 図 4-32 からわかるように, 各超硬チップの一群のプロットは, ある程度のばらつきはあるものの, 単調増加または単調減少のなめらかな曲線を描いた。このことは, 上記の仮定を裏付けるものである。図 4-32 から, 各超硬チップの $t=0$ における温度は測定面全体にわたってほぼ一様であること, その温度は切削速度とともに高くなること, 低速の場合には刃先に向かって温度が低下する傾向のあることなどがわかる。さらに, $t=t_1$ における温度は刃先に向かって急傾斜で高くなっているが, 刃先から約 1mm 以上離れた部分では $t=0$ の場合とほとんど変わらない温度であることがわかる。また $t=t_1$ における刃先近くの温度も切削速度とともに高くなる傾向は示しているが, この図からは切削速度の明確な効果を読みとり難い。

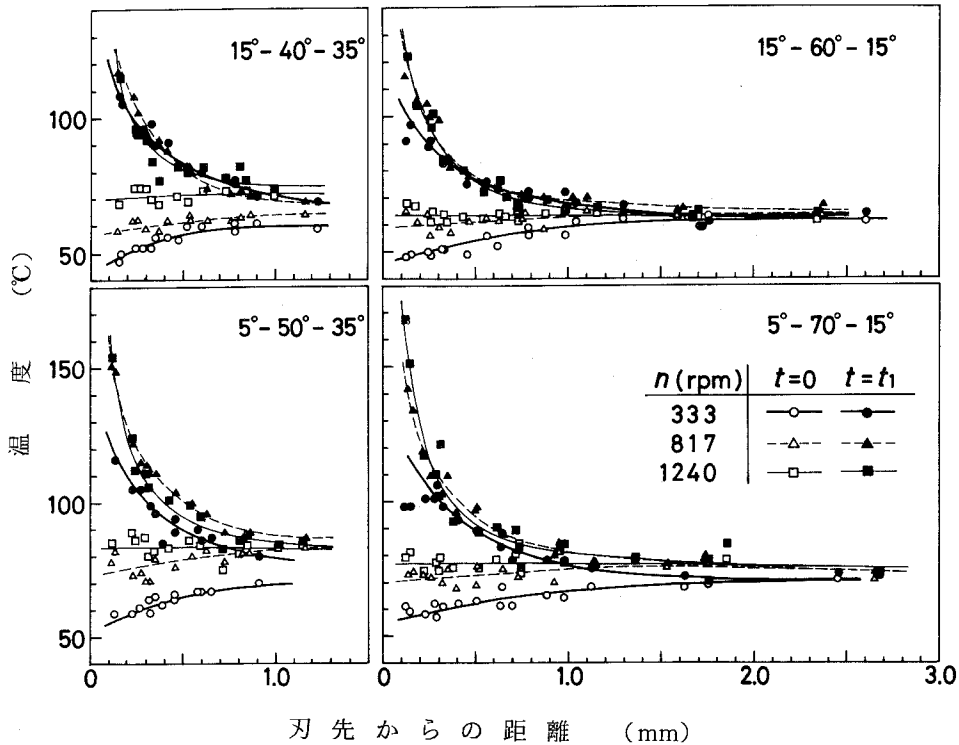


図4-32 切削サイクル内の2時点 ($t=0$, t_1) における
鋸歯側面の温度分布 (二次元切削)
 n : 被削材の回転数

図4-33は図4-32の曲線を切削速度毎に再構成したものである。同図からわかるように、同じすくい角をもった超硬チップの温度は、同一切削速度であれば、逃げ角 15° よりも 5° の方が明らかに高い温度となる。しかし、刃先角とすくい角の影響については不明確である。ちなみに刃先角が 40° から 70° に変わると切削力は $30\sim 40\%$ 増加したが、刃先角の増大によって、加熱される刃先部分の熱容量も大きくなるため、切削力の増大が必ずしも鋸歯温度の上昇に結びつかないものと考えられる。図4-33で示されるように、顕著な温度変化の現れる領域は切削速度が高くなるとともに狭くなり、 $t=t_1$ における温度傾斜はより急になっている。特に 1240 rpm の場合、激しい温度変化が現われるのは刃先から 0.5 mm 以下の領域に限られる。

以上のように、木材を二次元的に断続切削したときの鋸歯側面の温度分布と

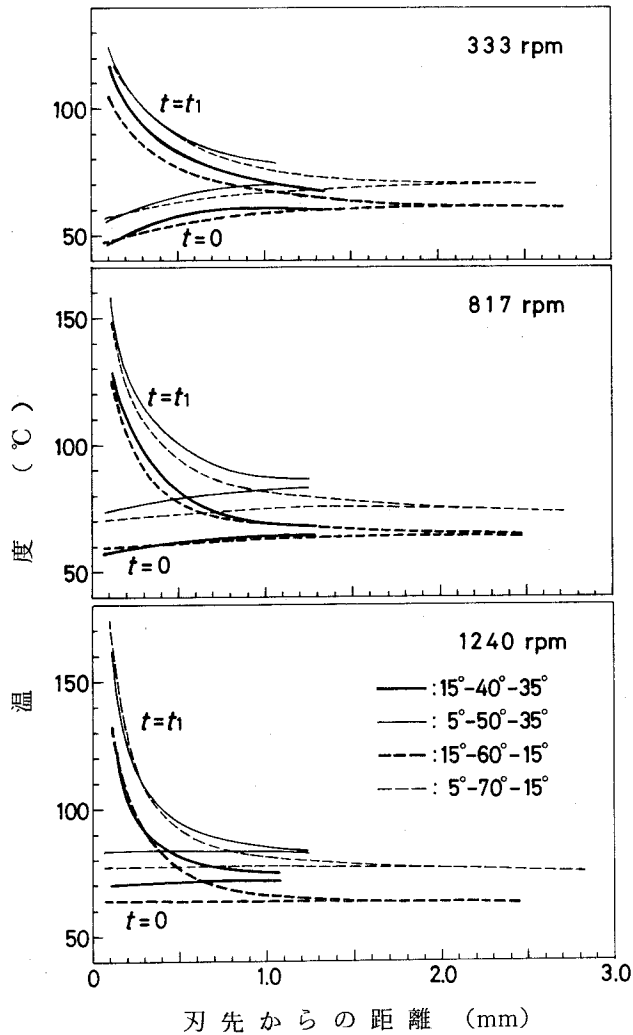


図4-33 切削サイクル内の2時点 ($t=0$, t_1) における
鋸歯側面の温度分布 (二次元切削)
(図4-32の曲線を再構成した)

温度変化は、少なくとも定性的には、円柱中心からの過渡的な熱伝導として数値計算した結果 (図4-5, 6) とほぼ一致した。しかし低速での切削のように刃先の冷却時間が長い場合には、表面からの熱伝達も考慮する必要があるようである。

前節での実験結果から、また数値計算による結果¹³³⁾ から、木材を連続的に

切削した場合には，刃先の温度は 400°C 以上に上昇し得ることが確められている。木材切削ではより一般的な切削形態である断続切削では，この温度上昇に加えて，熱の断続的発生に基づく周期的でかつ急激な温度変化が，刃先付近の限定された領域に，しかもかなりの温度範囲で生起することは注目されるべきであろう。このため，単なる温度上昇ばかりでなく，きわめて短い周期で繰り返し発生する熱応力あるいは熱衝撃が，刃先摩耗を促進するものと考えられる。

なお本節の実験では，熱源と考えられる，逃げ面と被削母材およびすくい面と切屑の接触域からある距離をもった，側面の温度を測定した。したがって，それらの接触域では，ここで測定した温度よりもさらに高い温度まで上昇していることが期待される¹³²⁾。

4.3.3 みぞ切りにおける刃先温度

みぞ切りにおける，超硬チップ側面上3点の1切削サイクル内の温度変化を図4-34，35に示す。両図における各点の温度波形は，時間0と t_1 で急激な下降と上昇を示しているが，これは図4-26において指摘したように，みぞ切りでは0～ t_1 の間は超硬チップではなく被削材（ほぼ室温と考えてよい）の温度を測定しているためである。また各図におけるa，b，c3点の温度波形は時間0， t_1 ， t_2 で重なり合うはずであるが，必ずしもそうになっていない。これは放射輝度から温度への変換を1 msec 毎に行ったこと，被削材の回転径が3点の温度測定時毎に異なること，飛散した切屑によってチップ側面からの赤外線が瞬間的にしゃ断される場合があることなどによるものと考えられる。

図4-34，35からわかるように，刃先から1 mm以内の側面は短時間の切削（約2 mmの送り込み）によって，切削条件に応じて室温から $30\sim 120^{\circ}\text{C}$ の温度上昇を示す。そのうえでさらに，各切削サイクル内で刃先が被削材に食い込んでいる間の温度上昇と次の被削材に食い込むまでの間の温度降下を繰り返している。この温度変化は一般に刃先に近い点ほど激しく，数 msec の間に 100°C 近く温度が上昇する場合もある。また切削速度が高くなると各超硬チップの温度は全体的に高くなり，短い周期で温度変化が繰り返される。これら

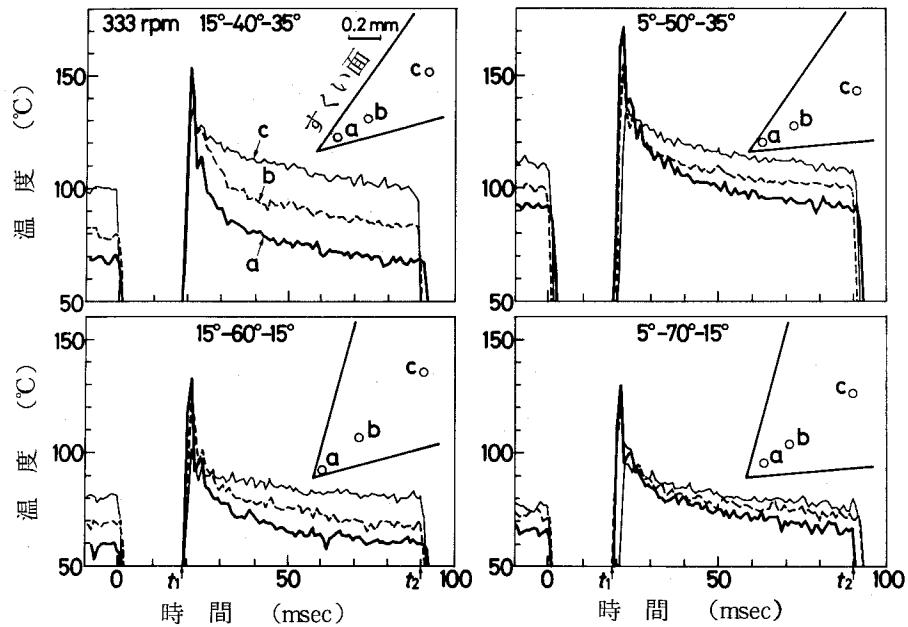


図4-34 切削サイクル内の鋸歯側面の温度変化(みぞ切り)

被削材回転数：333rpm，室温：25℃

t_1, t_2 ：図4-29参照

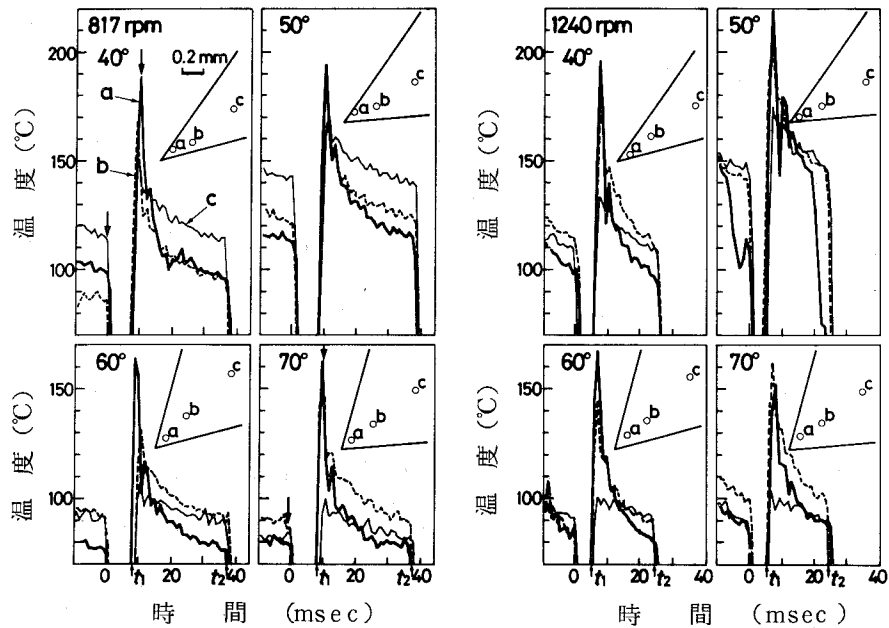


図4-35 切削サイクル内の鋸歯側面の温度変化(みぞ切り)

角度は鋸歯の刃先角を示す

矢印は図4-36の温度分布を求めた時点を示す

被削材回転数：817(左)，1240rpm(右)

室温：25℃

t_1, t_2 ：図4-29参照

の温度変化のパターンは，前項の二次元切削の場合と同様であるが，温度は $10 \sim 70$ °C 高くなっている。なお切削力の主分力は，どの切削速度においても $1.6 \sim 2.0$ kgf で，常に刃先角とともに大きくなった。また背分力は刃先角 $40 \sim 60$ ° の鋸歯では $0.7 \sim 0.8$ kgf であるが， 70 ° の場合のみ 1.1 kgf とやや大きい値を示した。これらの値は二次元切削の場合よりも主分力で 30 %，背分力で $10 \sim 20$ % 大きい。

二次元切削の場合と同様に，図 4 - 34 ， 35 のような温度変化の重ね合わせから，切削サイクル内の任意の時点における超硬チップ側面上の二次元的温度分布が得られる。図 4 - 36 は，刃先が被削材に食い込む直前 ($t = 0$ または $t = -1$ msec) と被削材から出てきた直後 ($t = 10$ msec) の温度分布を，被削材の回転数を 817 rpm としたときの刃先角 40 ° と 70 ° の超硬チップを例として示したものである。図の下側のグラフは各時点におけるチップ側面上各点の温度を，刃先からの距離に対してプロットしたものである。なおこれらの温度分布を求めた時点は図 4 - 35 に矢印で示した。図 4 - 36 からわかるように，側面の温度は刃先が被削材に食い込む直前では刃先に向かって低下しているが，被削材から出てきた直後には逆に刃先に近いほど温度が高く，この例の場合には，約 10 msec の間に 100 °C 前後の温度上昇がみられる。また各時点における温度は，ある程度のばらつきを示すものの，刃先からの距離に対して単調増加または単調減少の曲線を描く。このことは，前項の二次元切削の場合にも指摘したように，主たる熱源が刃先近くの微小部に限定されることを意味し，さらに各時点における超硬チップ側面上の等温線が刃先を中心とする同心円状であることを示す。

図 4 - 37 は，各超硬チップ側面の温度分布を，被削材の回転数が 333 と 1240 rpm の場合について，図 4 - 36 と同様にして求めたものである。ここで時間 t が -1 msec の場合のプロットは刃先が被削材に食い込む直前の温度分布を， t が 22 と 7 msec の場合のプロットは刃先が被削材から出てきた直後の温度分布を示す。切削サイクル内の二つの時点における各チップの温度分布のパターンは図 4 - 36 と同様であり，二次元切削の場合 (図 4 - 32)

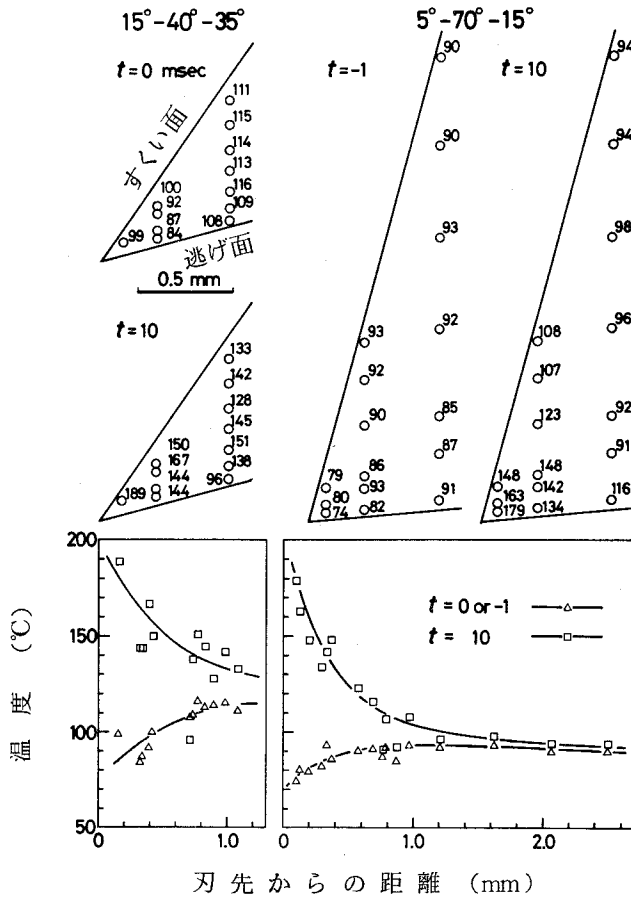


図4-36 刃先が被削材に食い込む直前 ($t=0, -1$) と離れた直後 ($t=10$)における鋸歯側面の温度分布の例 (みぞ切り)
被削材回転数: 817 rpm

と基本的には一致する。各チップの温度を両切削速度で比較すると、切削速度の高い方が明らかに高く、特に刃先角 50° のチップの場合には両者で大きな差が認められる。同一切削速度でチップ間の比較をすると、刃先角 50° の場合の温度が最も高く、次いで 40° であった。この二つの超硬チップの比較では逃げ角の小さい方が温度が高いが、刃先角 60° と 70° の場合ではほとんど差がなく、逃げ角の影響については即断できない。二次元切削の場合には、刃先が被削材から出てきた直後にみられる温度傾斜は、切削速度が高くなるほど著しくなり、同時に温度傾斜の発生する領域が刃先寄りに狭くなった(図4

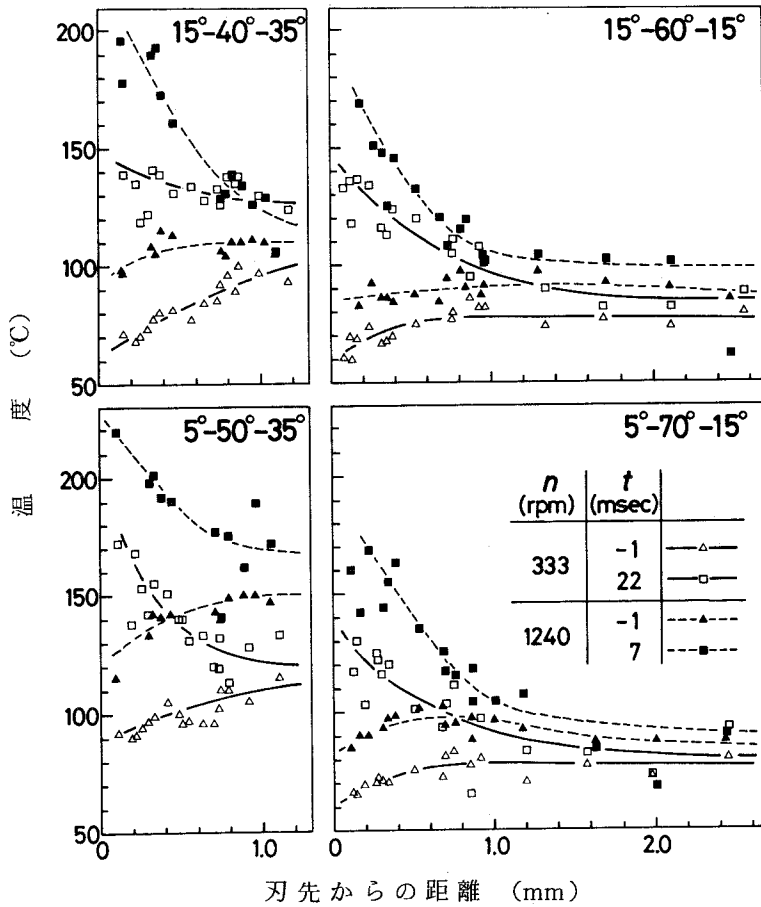


図4-37 切削サイクル内の2時点における鋸歯側面の温度分布(みぞ切り)
 n : 図4-32に同じ

— 33)。みぞ切りについてもそうした傾向が認められる場合もあるが、全体的には二次元切削の場合ほど明確ではない。

ところで二次元切削では、鋸歯に熱を供給できるのはすくい面と切屑、逃げ面と被削母材との接触域に限られる。一方みぞ切りでは、これらに加えて挽きみぞ側面と超硬チップ側面との接触域からも熱が供給される。そこでこのチップ側面における摩擦が刃先の温度上昇に及ぼす影響を検討するため、通常のみぞ切りをした後で鋸歯を後退させ、挽きみぞ側面のみがチップに接触するようにし、4.3.1項の(c)に述べたと同様の方法で温度を測定した。図4-38は、こうして求めた超硬チップ側面3点の温度変化の例である。このときの主成分力

方向の力（摩擦力）は，切削時の15～20％に相当する0.3～0.4 kgfであった。同図から，鋸歯を約2mm送り込む間に側面の温度は室温から15～50℃上昇していることがわかる。しかしこの温度は図4-34に示した切削時の温度よりも約30℃低い。また被削材に接触する毎に刃先に近い点の温度が10～30℃上昇するが，これは切削時にみられる温度上昇に比べてはるかに小さく，刃先から0.8～1.0mm離れた点ではこの温度変化はほとんど認められない。これらの結果から，みぞ切りの場合にはチップ側面における被削材との摩擦があるため，チップの温度は二次元切削の場合よりも全体的に高くなるが，刃先が被削材に食い込む毎にみられる大きな温度上昇は，主として主切刃から供給される熱，すなわち逃げ面とすくい面における被削母材や切屑との摩擦による熱によるものと判断される。このことはまた，図4-36，37の温度分布が熱源を刃先の微小部に限定することによって説明できることから裏付けられる。ただし高速の二次元切削でみられた刃先に向っての著しい温度傾斜

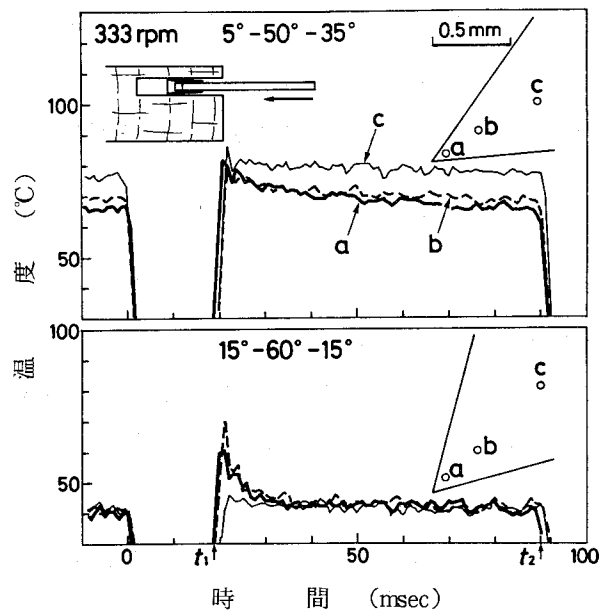


図4-38 側面摩擦による鋸歯側面の温度変化
 被削材回転数：333 rpm，室温：25℃
 t_1, t_2 ：図4-29参照

(図 4 - 33) がみぞ切りの場合にはそれほどでもなく、みぞ切りでは熱源となる領域が二次元切削の場合よりはやや広がっていることをうかがわせる。

なお図 4 - 38 の二つの超硬チップは刃先角が 10° 異なるのみであるが、両者の温度にはかなりの差がみられる。この原因の一つは、チップ側面の逃げ角の差であると考えられる。すなわち二次元切削の逃げ角に相当する側面の逃げ角 σ は、表 4 - 1 に示すように、刃先角 50° のチップが最も小さい。従って切削時にこの超硬チップが最も高い温度になった一つの原因もここにあるかもしれない。

4.3.4 刃先摩耗に及ぼす温度の影響

丸鋸切削を想定した本節のみぞ切りにおいて、最も高い切削速度 (20.0 m/sec) の場合、刃先近くが瞬間的には 200°C 前後まで上昇することが確かめられた。また刃先近くはこの温度を極大値として、切削サイクル毎に 100°C もの範囲に及ぶ温度変化をしていることも確かめられた。実用切削速度 ($50\sim 100 \text{ m/sec}$) の場合や実際の丸鋸切削の場合についても、刃先の温度挙動のパターンは本節のみぞ切りで得られたものと基本的には一致すると考えられる。その場合の上昇温度については、本節の実験からのみでは推定できないが、カッターによる切削¹³¹⁾で $300\sim 400^\circ\text{C}$ の刃先温度が、また単一の切削過程¹³²⁾で 500°C 近いすくい面温度が報告されていることから、少なくとも瞬間的には、刃先が $400\sim 500^\circ\text{C}$ の温度に上昇し得ると考えられる。。

ところで本節のみぞ切りで得られた 200°C 程度のしかも短時間の加熱では、工具材料の軟化等の材質劣化は考え難い。またより高速の切削で期待される $400\sim 500^\circ\text{C}$ の温度の場合には、炭素鋼工具では刃先部の硬さ低下が十分起り得る¹³¹⁾が、本研究で問題にしている超硬合金ではたとえ定常的な加熱であっても材質が大きく劣化することは考えられない。しかしながら、第 2 章と第 3 章の刃先の摩耗形態の観察から明らかなように、逃げ面側の摩耗面が比較的平滑で、WC 粒子が Co 基材中に押し込まれたような様相を呈していることや、周刃フライス切削した超硬工具逃げ面に焼結材の流動らしきものが観察さ

れている⁵⁵⁾ ことなどからして、逃げ面の被削材との接触域などではさらに高い温度まで上昇し、WC 粒子の脱落の一つの原因になっている可能性もある。特に刃先摩耗が進行した状態では、被削材との摩擦がより強くなり、摩擦面や刃先の温度は本節の実験よりは相当高くなることが考えられる。一方、本節の実験のような、鋭利な刃先による木材の断続切削では、切削熱によって例えば化学摩耗が促進されることはあっても、温度上昇そのものが超硬チップの摩耗の主原因になり得る可能性は低いと判断される。それよりも断続切削時の刃先微小部の温度変化による膨張と収縮の繰り返し、さらに被削材や切屑との接触部での局所的なしかも瞬間的な温度上昇による熱応力あるいは熱衝撃の周期的発生が、超硬チップなどの刃先の材質劣化や摩耗にとってはより重要であると考えられる。これらの効果は温度変化の幅と周期、繰り返し回数、さらに温度傾斜の大きさ等に依存するが、発生する熱応力の大きさや発生部位などについては、刃先の三次元的な温度分布の解析等を通じさらに検討していく必要がある。

なお、本章 4.1 節では刃物内の熱伝導のみを考慮して、刃先からの過渡的熱伝導について数値計算を行った。それから得られた温度分布や温度変化は、本節での実験結果と定性的にはほぼ一致したが、刃先角が小さい場合や低速切削では刃先に向かって温度が低下する場合があります、刃物表面での熱伝達による放熱も考慮する必要があるようである。この熱伝達は高速で回転する刃物ではより重要と考えられるが、工具の 1 回転では空気中への放熱はほとんどないとする指摘¹³¹⁾ もあり、今後の検討が待たれる。

4.4 要 約

超硬チップを付け歯した単一鋸歯の刃先温度に関する本章の結果は以下のようになる。

(1) 単一鋸歯の逃げ面を木材によって連続的に摩擦したときの刃先の温度は、摩擦速度と摩擦力に強く依存し、摩擦の仕事率に対して面対数グラフ上で直線関係を示した。そこから、常用切削速度程度であればわずかの力による逃げ面

摩擦のみによって、刃先近くは 400 °C 以上の温度に達することが推定された。この温度は既に報告されている木材切削工具の刃先温度に匹敵するものであり、木材切削においては被削母材や切屑との摩擦が、刃先の温度上昇の主要な原因であると考えられる。

(2) 単一鋸歯の主切刃のみで回転している被削材を断続的に切削した場合、鋸歯側面の温度は刃先が被削材に食い込んでいいる間に上昇し、被削材から離れている間に下降することを繰り返すが、その変動幅は刃先に近いほど大きく 100 °C 近くに達する場合もある。しかし刃先から 1 mm 以上離れた部分ではこの温度変化はほとんど認められなかった。その結果刃先が被削材を切削する毎に刃先に向っての著しい温度傾斜が発生した。刃先近傍の温度は切削速度が高いほど、また逃げ角が小さいほど高くなる傾向を示した。これらの鋸歯側面における温度変化や温度分布は、鋸歯表面を断熱境界とし、熱源が刃先に限定されると仮定して、円柱中心部からの半径方向への過渡的な熱伝導として数値計算した結果と、定性的にはほぼ一致した。

(3) 実際の丸鋸切削を想定して、回転している被削材外周面に単一鋸歯を送り込んで断続的なみぞ切りをした場合、鋸歯側面の温度挙動や温度分布は、主切刃のみで断続切削した場合と基本的には一致した。しかし鋸歯の刃先側面での摩擦が加わるため、温度は全体的に 10 ~ 70 °C 高く、20 m/sec の切削速度では 200 °C 前後を極大値として 100 °C もの範囲で刃先温度が変動した。

(4) 以上の結果から、チップソーのような断続切削工具の場合には、刃先の単なる温度上昇のみならず、極めて短い周期で繰り返し発生する熱応力あるいは熱衝撃が、刃先摩耗を促進する重要な因子になり得ると考えられる。特に超硬工具のように耐熱性の高い工具では、後者の要因がより重要になると考えられる。

総 括

木材切削工具の刃先摩耗については，種々の観点から研究が進められ，既に多くの知見が得られているが，それらの整理と相互の関連付けから工具の摩耗現象を体系化するまでにはまだ至っていない。その原因の一つには木材切削工具の形態および材種が多岐にわたることと，木材切削工具の摩耗が考慮すべき多くの因子を含んだ複雑な現象であることが考えられる。したがって摩耗現象の体系化や摩耗機構の解明のためには，できるだけ単純な実験条件のもとでの基礎的研究の積み重ねが不可欠であると考えられるが，このような研究は比較的少ない。そこで本論文では，木材・木質材料切削用工具として現在最も汎用化している超硬チップソーの摩耗を取りあげ，刃先を強度に摩耗させる木質材料の一つであるパーティクルボード切削時の摩耗経過，摩耗形態，摩耗に伴う切削性能の低下を，超硬チップの主成分であるWC粒子の大きさとの関係で検討し，さらに刃先摩耗に及ぼす衝撃の影響と，刃先摩耗を促進させる重要な因子の一つと考えられる切削時の刃先温度についても検討を加え，チップソーの摩耗機構を解明することを試みた。なお本論文では不確実な要因をできるだけ排除するため，主として単一鋸歯による断続切削実験を試みた。結果は以下のように要約される。

超硬チップの摩耗経過をいくつかの摩耗量について検討した結果，刃先摩耗はまず切削開始初期に急激に進行してある値にまで達し（初期摩耗），その後はゆるやかに進行し，本論文で実施した切削長の範囲では切削終了までこの状態が続いた。また初期摩耗を経過した後は主切刃の逃げ面側と刃先側面での摩耗が著しくなり，摩耗刃先の先端は刃先角の二等分線からすくい面側に偏った位置をとる。これらの摩耗経過はWC粒子の大きさが異なっても同様であった。

摩耗刃先の形態をSEMで観察した結果，逃げ面側の摩耗面には工具材料がかき取られたような条痕が存在するが，さらに微視的にみればその面は比較的

平滑であり、個々の WC 粒子が Co 基材中に押し込まれたような様相を呈する。一方すくい面側では、工具材料の薄片状の脱落が認められるものの摩耗条痕は存在せず、その摩耗面には角の鋭い WC 粒子が浮き出たように存在し、全体的に粗い面を呈する。またすくい面では摩耗面の境界が不明瞭であり、研磨面との間に表面がやや荒れた移行領域が存在する。これらの摩耗面の差は両面における摩耗機構の差と考えられ、初期摩耗を経過した後では逃げ面側ではアブレッシブ摩耗、すくい面側では切屑との衝突による摩耗が主体であると考えられ、その中では前者が刃先を摩耗させる主要原因と考えられる。

刃先摩耗と切削力の関係については、切削力の 3 分力とも刃先摩耗の進行につれて大きくなったが、特に背分力が刃先摩耗に鋭敏であり、背分力と逃げ面摩耗帯幅との間には強い直線相関が認められた。逃げ面摩耗帯幅と背分力は他の測定量に比べて最も広範囲に変化する量であり、刃先摩耗と切削性能の最も適切な指標であると考えられる。

刃先にかかる衝撃力の影響を検討するため断続と連続切削を行った結果、超硬チップの摩耗形態、摩耗経過、摩耗面の性状に両切削方法の明らかな差は認められなかった。どちらかといえば連続切削時の方が摩耗量が大きくなる傾向を示し、断続切削時の衝撃が特に摩耗を促進する効果は認められなかった。

WC 粒子の大きさと摩耗の関係については、本論文では明確な結論を得ることができなかった。ただし、当然の結果とも考えられるが、種々の実験を通じて最も安定した耐摩耗性を示したのは通常用いられる $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ の大きさの WC 粒子を含む超硬チップであった。超微粒子の超硬チップは、断続切削時などの衝撃による刃先の欠損についてはかなりの抵抗性を示したが、逃げ面などにみられるアブレッシブ摩耗に対する抵抗性に乏しく、このチップを付け歯したチップソーの挽材実験では最も寿命が短かかった。この超微粒超硬チップは、刃先が最も鋭利に研磨でき、刃先の欠損にも強いことから、適切な使用条件を選定できれば有用な材種になり得る可能性がある。また粗大な WC 粒子から成る超硬チップは硬さと抗折力の材質指標では最も劣り、実際単一鋸歯の実験では最下位の耐摩耗性を示したが、被削材の焼けを指標としたチップソーの寿命

試験では最も長い寿命を示した。このことは木材切削工具の材種と刃先摩耗および刃先摩耗と寿命の関係を探るうえで一つの問題を提起していると考えられる。

単一鋸歯の刃先温度に関する検討から、刃先逃げ面をわずかの力で摩擦することにより、刃先近くは400℃以上の温度に達し得ること、したがって刃先の温度上昇の主要な原因は被削母材や切屑との摩擦であることが明らかとなった。また丸鋸切削を想定した単一鋸歯の断続切削では、刃先は被削材に食い込んでいる間の温度上昇と被削材から離れている間の温度降下を繰り返すこと、この温度変化は刃先から1mm以内の領域に限定され、刃先に近いほど大きいため、刃先近くでは著しい温度傾斜が繰り返し発生することが明らかとなった。特に、20 m/secの切削速度では、200℃前後を極大値として100℃もの範囲で刃先温度が変化した。切削速度や刃先の角度と温度の関係は、特に刃先の角度については一概に結論を下せないが、切削速度が高いほど刃先温度は高くなり、主切刃および側面切刃の逃げ角が小さいほど温度が高くなる傾向が認められた。

以上の結果を総合して超硬チップソーの摩耗機構について考察を加えると以下のようなになる。超硬チップの鋭利な刃先は、まず切削力による切刃の微小な欠損や被削材中の硬い粒子によるひっかけ作用により一様に摩耗してある丸味をもった形となる。この過程は刃先にある個々のWC粒子の脱落やまとまっただの脱落と考えられるが、その進行は比較的速く、いわゆる初期摩耗である。その後すくい面側では切屑との衝突によってWC粒子がたたき出されたり、薄片状となって脱落していくが、これによる摩耗は比較的小さい。一方逃げ面側や刃先側面では被削材とより強く接触するため、硬い粒子のひっかけ作用によって表面からWC粒子が順次脱落していく。これによる摩耗が刃先では優越するが、初期摩耗に比べてその進行速度ははるかに小さい。またこのような機械的摩耗に加えて、刃先の温度上昇あるいは温度変化の影響が摩耗の全過程を通じて加わる。超硬チップの場合は、単なる温度上昇の影響は小さいとしても、極めて短い周期で繰り返し返生する熱応力あるいは熱衝撃の影響は無視し得ない

と考えられ、これによって疲労した表面から機械的な力によって WC 粒子がより容易に持ち去られるものと考えられる。なお被削材中の硬い粒子としては、パーティクルボードの場合は不純物として含まれる無機物質の微粒子、硬化した接着剤や増量剤中の不純物が考えられる。

超硬チップソー用の超硬合金を選定するにあたっては、初期摩耗に耐えるすなわち鋭利な状態での欠損に抵抗性のあること、硬い粒子のひっかけ作用に耐えること、熱的疲労に強いことなど、従来の鋼製工具に要求される条件と同様の基準で選定されるべきことが、以上の考察からも明らかである。

結

言

本研究は，超硬チップソーの摩耗を，主として単一鋸歯という単純な工具による実験から把握し，その摩耗機構を解明しようとしたものである。その結果いくつかの知見が得られたものの，当然のことながらチップソーの摩耗を包括的に解明するには至っていない。残されている課題のうちのいくつかを拾ってみると，(1)切削速度と摩耗の関係，(2)被削材の種類と摩耗の関係，(3)生材切削時の化学摩耗の影響，(4)摩耗した刃先の温度挙動，などが挙げられる。これらの課題はチップソーにとどまらず，広く他の切削工具の摩耗とも密接に関係があるはずであり，さらに検討していく必要があろう。本研究では，きわめて定性的ではあるが，チップソーの摩耗現象と摩耗機構について一応の把握はできたと考える。この結果が，チップソー用超硬合金材種の選定や木材切削工具の摩耗機構解明の一助となれば望外の幸せである。

最後に，本研究の遂行と論文の作成にあたり終始懇切な御指導と激励を賜った京都大学農学部杉原彦一教授に衷心より謝意を表す。また本論文の取りまとめに際し多くの御教示を賜った京都大学農学部中戸莞二教授，同川村登教授に深く謝意を表す。さらに，SEM観察について多くの御援助と御助言をいただいた京都大学農学部佐伯浩助教授に深く感謝する。また実験の遂行に御協力いただいた羽岡政紀氏，大井健司氏，故槇野義行氏，池内健治氏，横山幸明氏，奥田徹氏をはじめとする京都大学農学部林産機械学研究室の各位には，ここに記して深謝する。終わりに，京都大学大学院農学研究科在籍中から長期にわたり常に変わらぬ御指導と激励を賜った，京都大学農学部原田浩教授に深く謝意を表す。

引用文献

- 1) Prokeš, S.: Abstumpfungsverhalten der Holzbearbeitungswerkzeuge. Die Holzbearbeitung (4), 25-29 (1970)
- 2) Klamecki, B. E.: A review of wood cutting tool wear literature. Holz Roh-Werkstoff 37, 265-276 (1979)
- 3) 福井 尚：木材切削における工具切刃の摩耗現象．材料 30, 646-656 (1981)
- 4) 木下直治：超硬チップソーの寿命に関する研究．木材工業 13, 554-558 (1958)
- 5) 山口喜弥太，青山経雄：超硬チップソーの挽材摩耗試験．林試研報 No. 138, 121-145 (1962)
- 6) Stefaniak, W.: Einfluß der Schnittgeschwindigkeit auf das Abstumpfen hartmetallbestückter Sägeblätter beim Schneiden von Spanplatten. Holz-technol. 12, 9-15 (1971)
- 7) 古賀達是，七沢喜男：超硬合金丸のこの寿命特性（第1報）切削諸因子および超硬合金材質の影響．木材誌 19, 311-316 (1973)
- 8) 古賀達是，七沢喜男：超硬合金丸のこの寿命特性（第2報）切削速度の影響．木材誌 19, 317-322 (1973)
- 9) Burwell, J. T., Jr.: Survey of possible wear mechanisms. Wear 1, 119-141 (1957/58)
- 10) 曾田範宗：トライボロジについて—イギリスにおけるトライボロジ活動と潤滑の近代的意義．日本機械学会誌 74, 12-18 (1971)
- 11) 松原 清：“トライボロジ”，産業図書 (1981)
- 12) 竹山秀彦：切削工具材料面からみた切削加工．精密機械 39, 871-876 (1973)

- 13) 杉原彦一：切削，“木材工学（梶田茂編）”，養賢堂，p. 329-380(1961)
- 14) 杉原彦一：木材切削の特質．材料試験 **10**, 841-845(1961)
- 15) 林大九郎：木材切削加工における問題点．精密機械 **30**, 763-769(1964)
- 16) 横山五郎：木工刃物の切味と耐久性．木材工業 **19**, 99-102(1964)
- 17) Kirbach, E.: Methods of improving wear resistance and maintenance of saw teeth. Forintek Canada Corp. Technical Report No. 3, p. 1-45 (1979)
- 18) Kirbach, E.: New methods for reducing saw tooth wear and maintenance. In “Modern Sawmill & Panell Techniques 1”, Miller Freeman Pub., Inc., San Francisco, p. 40-49 (1980)
- 19) 平岩元徳：木材工業に於ける超硬工具の進歩．木材工業 **14**(10), 1-5 (1959)
- 20) 能上 進：WC系超硬質合金の動向．精密機械 **39**, 901-909(1973)
- 21) JIS B 4053-1961（超硬合金の使用選択基準）
- 22) Dinglinger, E.: Hartmetall=Werkzeuge für die Schichtholz=Bearbeitung. Holz Roh-Werkstoff **7**, 29-36 (1944/45)
- 23) Reynolds, R. V.: Status of tungsten carbide in the woodworking industry. For. Prod. J. **8**(5), 24A-26A (1958)
- 24) Duff, K. W.: Carbide wood cutting tools. For. Prod. J. **8**(5), 33A-36A (1958)
- 25) Weill, T. C.: Cemented tungsten carbides and their application to the woodworking field. For. Prod. J. **8**(6), 21A-14A (1958)
- 26) Fessel, F.: Hartmetallwerkzeuge für die Bearbeitung von Holz und Holzwerkstoffen. Holz Roh- Werkstoff **22**, 386-392 (1964)
- 27) Jones, D. S.: Cemented tungsten carbide in the woodworking industry. Aust. Timber J. **31**(8), 37, 39, 40, 44 (1965)
- 28) 坂井秀春：日本ののこぎりの履歴(6)．木工機械 No. 45, 4-7(1971)
- 29) 坂井秀春：“チップソー”，楨書店(1974)
- 30) 関口八重吉，長谷川一郎：木材切削に関する研究（第2報）木工鉋の切削作用に就て．機械学会論文集 **2**，38-46(1936)

- 31) 関口八重吉，長谷川一郎：木材切削に関する研究（第4報）木工鉋機械用刃物の切削作用に就て．機械学会論文集 **3**，344-349(1937)
- 32) 田中義信，津和秀夫：木材の切削に関する研究（第2報）分離力と変形力に就て．精密機械 **15**，247-250(1949)
- 33) 枝松信之，大平 裕：鋸歯の切味と寿命．日林大講集 No. 63，291-292 (1954)
- 34) 枝松信之，大平 裕：鋸歯の歯角と挽材による摩耗性．木材誌 **3**，67-70 (1957)
- 35) 斎藤美鶯，枝松信之，大平 裕：製材用鋸歯の切味．林試研報 No. 97，33-60(1957)
- 36) 枝松信之：熱帯材の切削における鋸歯の摩耗性についての実験．北林産試月報 No. 174，32-37(1966)
- 37) 大迫靖雄，外山 豊，杉本隆一：丸鋸の寿命と摩耗形態に関する研究 京大農演報 No. 42，245-258(1971)
- 38) 大迫靖雄：木材加工工具の摩耗による仕上げ面の微視的变化について．熊大教育学部紀要 No. 21，第1分冊，39-52(1972)
- 39) 山口喜弥太：帯鋸の歯先硬化法．木材工業 **16**，66-69(1961)
- 40) 桜井敏夫，伊藤邦昭：帯鋸の寿命延長法に関する研究(1)刃先焼入れ効果について，(2)刃先焼入れ帯鋸による実地製材試験，(3)鋳造合金（ステライト）熔着法の効果について，(4)南方材特殊硬材に対するステライト熔着帯鋸の効果．岐阜林誌報告 No. 9，40-57(1963)
- 41) 山口喜弥太：鋸歯硬化材料．木材工業 **19**，31-34(1964)
- 42) 北沢暢夫，柳沢良雄，鷹栖紀明：凍結材の製材(1)．北林産試月報(11)，9-12 (1968)
- 43) 鎌田昭吉，鷹栖紀明：針葉樹の挽材におけるステライト盛金歯の効果(1)道産エゾマツ・トドマツ材に対するステライト材種の耐摩耗性の比較，(2)シトカ・スプルス材に対する鋸歯の寿命，(3)鋸歯の摩耗と挽材状態の比較．北林産試月報(4) 1-6，(5) 1-4，(6) 2-7 (1972)

- 44) 小西千代治, 山口喜弥太: ステンレス鋼帯のこの耐摩耗性. 木材工業 **33**, 533-537(1978)
- 45) 吉田直隆, 奈良直哉: 鋳鋸(鋸齒)の寿命. 北林産試月報(9), 11-16(1970)
- 46) 鈴木竜太郎: 木材の含有水分が刃物の切れ味の変化に及ぼす影響. 木材誌 **6**, 1-4(1960)
- 47) 大沼加茂也, 中井宏明: 木材切削における鋼種別自動鉋刃の刃先の変化. 産工試報告技術ノート No. 52, 1-22(1963)
- 48) 小西千代治, 鎌田昭吉, 鈴木藤吉: プレナー切削における超硬刃の実用試験. 北林指月報 No. 136, 2-10(1963)
- 49) 大沼加茂也, 中井宏明, 熊谷定勝: 鋼種別鉋歯の摩耗と切味について. 木材工業 **22**, 211-213(1967)
- 50) 小西千代治, 鈴木藤吉, 河島 弘, 栢沢文夫: プレーナ切削における刃物の寿命(1), (2), (3), (4). 北林産試月報(1) 3-8, (2) 1-5, (3) 5-8, (4) 4-10(1968)
- 51) 小西千代治: 超硬鉋刃の研削および切味の変化について(1), (2). 木工機械 No. 36, 16-19, No.37, 5-6(1969)
- 52) 小西千代治: 回転かんな盤におけるナイフの切れ味について. 木材誌 **18**, 223-229(1972)
- 53) 小西千代治, 鈴木藤吉, 河島 弘: 木材の回転切削工具の寿命に関する研究. 北林産試研報 No. 58, 1-106(1972)
- 54) 福井 尚, 横地秀行: 木材および木質材料の加工におけるフライス工具切れ刃の摩耗パターンについて. 木材誌 **23**, 131-138(1977)
- 55) 林 和男, 福井 尚, 小島嘉豊: 木材の周刃フライス削りにおける工具刃先の摩耗状態の走査電子顕微鏡による観察. 木材誌 **25**, 383-391(1979)
- 56) 林 和男: 摩耗刃の切削性能. 木材誌 **26**, 445-462(1980)
- 57) 枝松信之, 長原芳雄: 北海道材のドリルによる穴あけ加工性(2)ドリルの寿命と穴あけの仕上げ状態. 北林産試月報 No. 172, 1-5(1966)
- 58) 枝松信之, 長原芳雄: パーティクルボードのドリルによる穴あけ加工性.

- 北林産試月報 No. 177, 11-15(1966)
- 59) 枝松信之, 長原芳雄: 南洋材のドリルによる穴あけ加工性. 木材工業 **25**, 172-176(1970)
- 60) 番匠谷薫, 森 稔: 木材および木質材料の穴あけ加工における工具寿命 (第1報) 主軸回転数の影響. 木材誌 **26**, 74-80(1980)
- 61) 番匠谷薫, 森 稔: 木材および木質材料の穴あけ加工における工具寿命 (第2報) 工具材種および被削材の影響. 木材誌 **27**, 640-648(1981)
- 62) 栃木紀郎, 小笠原和彦, 林大九郎: 木材切削における工具の摩耗および鈍化に関する研究 (第1報) 二次元横切削における摩耗による背分力の変化と刃先後退量. 木材誌 **24**, 85-90(1978)
- 63) 林大九郎, 小笠原和彦, 栃木紀郎: 木材切削における工具の摩耗および鈍化に関する研究 (第2報) 二次元横切削における摩耗による糸切り値, U型細胞切断率および刃先の形状変化について. 木材誌 **24**, 802-807(1978)
- 64) 井上裕之, 森 稔: 木材の三次元切削における切削性能. バイアス角が刃先摩耗におよぼす影響. 木材誌 **27**, 25-31(1981)
- 65) 大迫靖雄, 堂本邦彦: 工具材料表面の腐食による変化と切削エネルギーに関する研究. 京大農演報 No. 42, 235-244(1971)
- 66) 田中千秋, 桜井敏夫, 堀江恒志: 手押かんな盤の振動と騒音 (第2報) 刃先まもと騒音. 島大農学部研報 No. 4, 93-96(1970)
- 67) Harris, P.: The machining of abrasive timber. Engineering **150**, 501-502 (1940)
- 68) Fessel, F.: Standzeitverbesserung von Holzbearbeitungswerkzeugen durch Hartverchromung. Holz Roh- Werkstoff **4**, 102-109 (1941)
- 69) Skoglund, C., Söderlund, S.: Förslitning av Kutterstål. Sven. Träforsk. Trät. Audel., Meddelande **19B**, 1-18 (1951)
- 70) Kivimaa, E.: Was ist die Abstumpfung der Holzbearbeitungswerkzeuge? Holz Roh- Werkstoff **10**, 425-428 (1952)
- 71) Endersby, H. J.: The blunting of wood-cutting edges. For. Prod. Res. Spec. Rep. No. 11, 1-16 (1956)

- 72) Mang, W.: Zerspanungsuntersuchungen über die Abnutzung von Fräuserschneiden beim Gleich- und Gegenlaufräsen von Buchenschichtholz mit verschiedener Leimfugenbeschaffenheit. Holz Roh- Werkstoff **14**, 339–352 (1956)
- 73) Chardin, A.: Le stellitage des lames de scies a ruban. Bois Forêts Tropiques (50), 49–56 (1956)
- 74) Pahlitzsch, G., Schultz, K.: Schnittkraftmessung und Schneidenabstumpfung beim Hobeln von Holz mit kreisender Schnittbewegung. Holz Roh- Werkstoff **15**, 159–170 (1957)
- 75) Knospe, L.: Der Verschleiß an Holzbearbeitung, die Mittel zu seiner Verringerung und seine Bestimmung. Fertigungstechnik **12**, 567–573 (1958)
- 76) Prokeš, S.: Einfluß der Ausgangsqualität von Schneiden aus Werkzeugstahl und aus gesintertem Hartmetall auf die Abstumpfung. Holztechnol. **2**, 234–238 (1961)
- 77) Rackwitz, G.: Der Einfluß von Leimstreckmitteln auf die Abstumpfung von Werkzeugschneiden bei der Bearbeitung von Lagenhölzern. Holz Roh- Werkstoff **20**, 398–403 (1962)
- 78) Pahlitzsch, G., Jostmeier, H.: Beobachtungen über das Abstumpfungsverhalten beim Fräsen von Spanplatten. Holz Roh- Werkstoff **22**, 139–146 (1964)
- 79) Pahlitzsch, G., Jostmeier, H.: Weitere Beobachtungen über das Abstumpfungsverhalten und den Einfluß der Schnittgeschwindigkeit beim Fräsen von Spanplatten. Holz Roh- Werkstoff **22**, 424–429 (1964)
- 80) Klinga, L.O., Back, E. L.: Fiber building board variables influencing the wear of cutting tools. Svensk Papperstidn. **67**, 309–316 (1964)
- 81) Pahlitzsch, G., Jostmeier, H.: Beobachtungen über das Abstumpfungsverhalten beim Fräsen von Schichtstoff=Verbundplatten. Holz Roh- Werkstoff **23**, 121–125 (1965)
- 82) Pahlitzsch, G., Sommer, I.: Erzeugung von Holzschneidspänen mit einem Messerwellen=Spaner II. Einfluß der Schneidengeometrie auf Schneidenabstumpfung, Schnitt- und Vorschubkraft und Güte der Späne. Holz Roh- Werkstoff **24**, 109–117 (1966)

- 83) Pahlitzsch, G., Sandvoß, E.: Verschleißuntersuchungen beim Fräsen von Faserhaltplatten. Holz Roh- Werkstoff 28, 245–254 (1970)
- 84) Neusser, H., Schall, W.: Beitrag zum Problem der Werkzeugabnutzung bei Bearbeitung von Spanplatten und halbharten Faserplatten. Holzforsch. Holzverwert. 22, 110–116 (1970)
- 85) Bridges, R. R.: A quantitative study of some factors affecting the abrasiveness of particleboard. For. Prod. J. 21(11), 39–41 (1971)
- 86) Pahlitzsch, G., Sandvoß, E.: Verschleißuntersuchungen beim Fräsen von Faserhartplatten II. Einfluß der Schnittbedingungen auf die Beanspruchung und den Verschleiß der Schneide. Holz Roh- Werkstoff 30, 133–143 (1972)
- 87) Power, G. E., Wulfekotter, D.: Machinability defects in laminates caused by tool wear. For. Prod. J. 24(1), 40–48 (1974)
- 88) Stevens, R. R.: Apparatus to facilitate comparison of abrasiveness of wood panel products. For. Prod. J. 24(8), 37–39 (1974)
- 89) Wassipaul, F., Kail, A.: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Aufbau von Holzwerkstoffen und der Werkzeugabnutzung. Holzforsch. Holzverwert. 28, 59–65 (1976)
- 90) Stevens, R. R., Fairbanks, A. W., Jr.: Effects of several test variables on evaluation of particleboard abrasiveness. For. Prod. J. 27(11), 37–40 (1977)
- 91) Fischer, R., Tröger, J., Herath, M.: Untersuchung zum Einfluß von Gestaltfehlern rotierender Holzbearbeitungswerkzeuge auf Verschleiß und Qualität. Holztechnol. 18, 224–231 (1977)
- 92) Tröger, J., Kröppelin, D., Läuter, G.: Zur Beurteilung der Bearbeitungsqualität der Schmalflächen besichteter Möbelbauteile. Holztechnol. 20, 3–5 (1979)
- 93) Chardin, A., Froidure, J.: L'utilisation des lames de scies a dents stellitees, choix du grade et des conditions de coupe. Bois Forêts Tropiques (85), 41–54 (1962)
- 94) Antoine, R.: Influences conjuguées de stelliteage et de la réduction de vitesse sur la durée de coupe de l'outil dans le sciage de bois abrasifs. Bois Forêts Tropiques (90), 33–38 (1963)

- 95) Halvorson, H.N., Stuart, W. M.: Improvement of sawmill cutting tool sharp life by surface hardening. *For. Prod. J.* **13**(3), 108–111 (1963)
- 96) Jones, D. S.: Wear resistant tips for saw teeth. *Aust. Timber J.* **29**(8), 70, 71, 75 (1963)
- 97) Booth, H. E., Sulc, V.: Hard chromed saw lift sawmill productivity. *Aust. Timber J.* **31**(7), 63–64 (1965)
- 98) Booth, H. E., Sulc, V.: Chromed saws in N. S. W. sawmills. *Aust. Timber J.* **32**(7), 57–59, 61 (1966)
- 99) Barz, E.: Standzeitverlängerung an Holzbearbeitungsschneiden durch Hartverchromung. *Holz Roh- Werkstoff* **24**, 593–597 (1966)
- 100) Chardin, A., Froidure, J.: Étude de l'usure des dents de scies. Introduction (1968), Vol. 1 (1968), Vol. 2 (1970), Centre Techn. Forest. Tropical, Nogent-sur-Marne
- 101) Barz, E., Breier, H.: Kurzverfahren zur Prüfung der Verschleißwirkung und der Zerspanbarkeit von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz Roh- Werkstoff* **27**, 148–152 (1969)
- 102) Chardin, A.: Saw tooth performance. Variables affecting tooth wear. *Proc. 3rd Wood Mach. Semin. Richmond.* p.1–14(1971)
- 103) Kirbach, E., Bonac, T.: Cutting unseasoned western red cedar with titanium carbide-coated, carbide-tipped saws. *Proc. 5th Wood Mach. Semin. Richmond,* p. 15–32 (1977)
- 104) Kirbach, E., Bonac, T.: Assessing circular-saw dullness by measuring cutting force and power. *Wood Sci.* **11**, 159–163 (1979)
- 105) Klamecki, B. E.: Dependence of particleboard cut edge roughness on sawtooth wear. *For. Prod. J.* **31**(4), 41–43 (1981)
- 106) Mackenzie, B. C.: Stellite for the woodworking industry. *J. For. Prod. Res. Soc.* **2**(4), 44–45 (1952)
- 107) Deger, M., Fischer, R., Tröger, J.: Standwegverlängerung durch modifiziertes Borieren von Holzbearbeitungswerkzeugen. *Holztechnol.* **10**, 229–232 (1969)
- 108) May, D.: Härten von Sägezähnen mit Hochfrequenz. *Holz- Kunststoffverarbeitung* **10**, 336–338 (1975)

- 109) Krilov, A.: Stellite-tipping versus high-frequency hardening of bandsaw teeth. *J. Inst. Wood Sci.* **7**(3), 10–12 (1976)
- 110) Krilov, A.: Effect of thermal high-frequency surface hardening on the hardness and microstructure of bandsaw teeth. *Wood Sci. Technol.* **10**, 199–208 (1976)
- 111) Krilov, A.: Dimensional saw-chip configuration. Non-destructive indication of blade behavior. *Holz Roh-Werkstoff* **35**, 307–310 (1977)
- 112) McKenzie, W. M.: Effects of edge bluntness in the cutting of wood. *For. Prod. J.* **17**(4), 45–50 (1967)
- 113) Pahlitzsch, G., Dziobek, K.: Untersuchungen über das Abstumpfungverhalten eines Schneidzahn. *Holz Roh-Werkstoff* **26**, 162–170 (1968)
- 114) McKenzie, W. M., Karpovich, H.: Some factors affecting wear and blunting of a tool corner. Paper presented at IUFRO-5 Meeting, South Africa (1973)
- 115) McKenzie, W. M., Karpovich, H.: Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material. *Wood Sci. Technol.* **9**, 59–73 (1975)
- 116) Hillis, W. E., McKenzie, W. M.: Chemical attack as a factor in the wear of woodworking cutters. *For. Prod. J.* **14**(7), 310–312 (1964)
- 117) McKenzie, W. M., Hillis, W. E.: Evidence of chemical acceleration of wear in cutting plant materials. *Wear* **8**, 238–243 (1965)
- 118) McKenzie, W. M., McCombe, B.: Corrosive wear of veneer knives. *For. Prod. J.* **18**(3), 45–46 (1968)
- 119) Kirbach, E., Chow, S.: Chemical wear of tungsten carbide cutting tools by western redcedar. *For. Prod. J.* **26**(3), 44–48 (1976)
- 120) Klamecki, B. E.: The effect of extractives on tool wear in the turning of incense cedar. *Proc. 5th Wood Mach. Semin. Richmond*, p. 5–14 (1977)
- 121) Klamecki, B. E.: Electrical effects in wood cutting tool wear. *Holz Roh-Werkstoff* **33**, 107–110 (1978)
- 122) Klamecki, B. E., Tsai, G. S. C.: Corrosion in the wear of wood cutting tools. *Proc. 6th Wood Mach. Semin. Richmond*, p. 154–168 (1979)
- 123) Klamecki, B. E.: Interaction of tool wear mechanisms in woodcutting. *Wood Sci.* **13**, 122–126 (1980)

- 124) Tsai, G. S. C., Klamecki, B. E.: Separation of abrasive and electrochemical tool wear mechanisms in wood cutting. *Wood Sci.* **12**, 236-242 (1980)
- 125) Kröppelin, D.: Beobachtung von Hartmetallschneiden unter dem Elektronenrastermikroskop. *Holztechnol.* **16**, 151-153 (1975)
- 126) 斎藤美鶯, 森 稔: 帯鋸の切削熱について. 第64回日林大講集, 356-358(1955)
- 127) 青山経雄: 材の送り速度および鋸速度と鋸歯の切削温度. *木材誌* **4**, 55-59(1958)
- 128) 青山経雄: 鋸歯の切削温度におよぼす挽材条件の影響. *林試研報* No. 130, 79-114(1961)
- 129) Okushima, S., Sugihara, H.: Temperature distribution of circular saw blade. Measurement with infrared radiometric microscope. *Mokuzai Gakkaishi* **15**, 11-19 (1969)
- 130) Mote, C. D., Jr., Holøyen, S.: The temperature distribution in circular saws during cutting. *Norsk Treteknisk Institutt Medd. Nr 49*, pp. 30 (1973)
- 131) Okushima, S., Sugihara, H., Umemoto, M.: Temperature of cutter-cusp in wood cutting. *Mokuzai Gakkaishi* **15**, 197-202 (1969)
- 132) Chardin, A.: Laboratory studies of temperature distribution on the face of a sawtooth. *Proc. 4th Wood Mach. Semin. Richmond*, p. 67-84 (1973)
- 133) 奥島俊介, 杉原彦一: 差分法による木材切削工具の温度分布解析. *京大農演報* No. 43, 328-334(1972)
- 134) Sugihara, H., Okumura, S., Haoka, M., Ohi, T., Makino, Y.: Wear of tungsten carbide tipped circular saws in cutting particleboard. Effect of carbide grain size on wear characteristics. *Wood Sci. Technol.* **13**, 283-289 (1979)
- 135) 大草喜太雄, 北川亮三, 山本英司: 超硬工具の切削性能と材料特性-炭素鋼の旋削と正面フライス切削の場合. *精密機械* **42**, 113-119(1976)
- 136) Montgomery, R. S.: The mechanism of percussive wear of tungsten carbide composites. *Wear* **12**, 309-329 (1968)

- 137) 雨宮礼一，青山経雄，栃木紀郎：単一のこ歯の切削抵抗（第1報）ばちあさりのこ歯の切削抵抗．木材誌 **27**，290-295(1981)
- 138) 雨宮礼一，青山経雄：単一のこ歯の切削抵抗（第2報）振り分けあさりのこ歯の切削抵抗．木材誌 **28**，31-38(1982)
- 139) 奥村正悟，杉原彦一，池内健治：チップソーの摩耗経過－単一鋸歯によるパーティクルボードの断続切削．京大農演報 No. 50，201-208(1978)
- 140) Bier, H., Hanicke, P.: Die spezifische Schnittkraft als Funktion der Schneidenabstumpfung beim Fräsen. Holztechnol. **4**, 158-162 (1963)
- 141) 奥村正悟，杉原彦一，横山幸明：パーティクルボードの旋削における超硬チップの摩耗．材料 **30**，685-690(1981)
- 142) 奥島啓式外2名：抵抗線ひずみ計を利用せる切削3分力測定器．機械学会論文集 **21**，709-711(1955)
- 143) Okushima, K., Hitomi, K.: A design of a three-component tool dynamometer. Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. **23**, Part 4, 321-334 (1961)
- 144) 白井英治：“切削・研削加工学（上）”，共立出版（1971）
- 145) 林 和男：木材の周刃フライス切削における工具摩耗と切削速度の関係．第30回日本木材学会大会研究発表要旨集，p. 157(1980)
- 146) 井上裕之，森 稔：木材の連続切削と間欠切削における刃先温度の比較．第31回日本木材学会大会研究発表要旨集，p. 142(1981)
- 147) 日本機械学会編：“伝熱工学資料（改訂第3版）”，日本機械学会（1975）
- 148) 奥村正悟，杉原彦一：木材による逃げ面摩擦時の鋸歯先端温度．京大農演報 No. 53，241-247(1981)
- 149) 杉原彦一，奥島俊介：赤外線放射顕微鏡による木材切削工具の温度測定(1)，(2)．木材工業 **23**，378-381, 419-422(1968)
- 150) 村瀬安英：高速域における木材の摩擦特性．木材誌 **26**，61-65(1980)
- 151) Okumura, S., Okuda, T., Sugihara, H.: Temperature distribution on the side face of a saw tooth in interrupted cutting I. Orthogonal cutting. Mokuzai Gakkaishi **29**(2)，(1983) (印刷中)

- 152) 奥村正悟，杉原彦一，奥田 徹：断続切削中の単一鋸歯側面の温度分布
(第2報)みぞ切りの場合．木材誌 **29**(2)，(1983)(印刷中)
- 153) 杉原彦一，羽岡政紀，大井健司，楨野義行：パーティクルボード切削による超硬チップの摩耗．第22回日本木材学会大会研究発表要旨集，p.
104(1972)