

4.3 微小切削域における皮質骨の被削性

4.3.1 実験方法と微小切削装置

4.3.1.1 電子顕微鏡内2次元切削装置

直接観察しながら骨の微小切削に関する基礎的な力学的データを得るため、Fig.4.42 に示すように、3 分力動力計を組み込んだ2次元切削装置を電子顕微鏡内に設置した。ここでは切りくず生成や切りくず内の亀裂発生の微細観察を目的とするとともに、主として微小切削域での切削抵抗の測定を行い、それに基づいて比切削抵抗を算出した。

この装置で用いる工具はすくい角 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、逃げ角 5° の2次元の単結晶ダイヤモンドバイトであり、切削速度は $200 \mu\text{m/sec}$ である。

4.3.1.2 光学顕微鏡下2次元切削可視化装置

前述した電子顕微鏡では切りくず生成形態の詳細な観察が十分ではなく、切りくず生成時のせん断角測定には、4.2 節で使用した光学顕微鏡下2次元切削装置をここでも使用した。切削抵抗測定に際しては、3 分力動力計を X-Y ステージ上に置き、その上に被削材を取り付けた。

X-Y 微動電動ステージは 40 mm 角のテーブルを有し、テーブルを $125 \mu\text{m/sec}$ の速度で移動しながら固定した工具で切削する。ここで用いた工具は上述したすくい角 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の2次元ダイヤモンドバイトである。

4.3.1.3 被削材とその採取方法

冷凍保存した豚大腿骨の骨幹部を解凍後 35°C で乾燥し、実験目的によって $1 \sim 10 \text{ mm}$ の厚さに輪切りした。そして、この実験では緻密質骨だけを使用するので、輪切りした骨の緻密質部を選択して被削材を採取した。その機械的性質を Table 4.1 に示す。この表の中で、マイクロビッカース硬度の欄の A と C は測定面で、A は骨軸に平行面、C は骨軸に直角な切断面である。また、せん断強度の欄の T, P, A はせん断強度測定方向で、T は骨軸方向、P は骨軸の接線方向、A は骨軸の切断面の半径方向である。

ここでのせん断強度は、切削抵抗動力計を使用し、すくい角 0° の2次元バイト

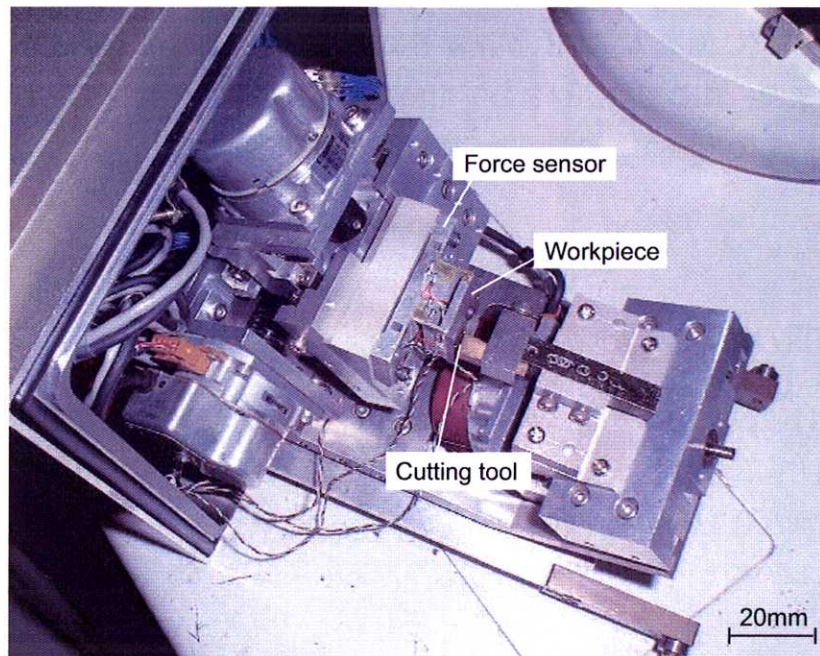


Fig.4.42 電子顕微鏡内 2 次元微小切削装置

Table 4.1 実験に用いた皮質骨の機械的性質

Bone type	Apparant density [g/cm ³]	Vickers hardness load:0.1 N	Shear strength [MPa]
compact	1.96	A:43-51 C:46-55	T:43 P:39 A:76

note1) A and C in Vickers hardness mean the cutting plane. T,P,A in Shear stress mean the feed direction. Refer to Fig. 4.5 regarding measurement plane and direction.

note2) Hardness is the mean value of the 10 points.

によって単純せん断破壊力を測定し求めたものである。

C面の硬度はA面よりも多少高くなる。また、せん断強度でみると、切断面の半径方向のせん断強度は他の二つの方向に比べて2倍近い値となる。すなわち、A面やT面に比べてC面をA方向に切削するには大きな切削力が必要であることが推測できる。また、ここで被削材として用いた皮質骨の表面組織はFig.4.3(a)とほぼ同じである。この組織は、密度が高く緻密的である。

4.3.2 切取り厚さと比切削抵抗の関係

Fig.4.43は工具すくい角をパラメータとして切取り厚さと比切削抵抗との関係を三つの切削方向、すなわち、Fig.4.5で定義したような、骨軸接線方向、骨軸長手方向、骨軸断面半径方向の三方向に切削したものである。図に示すように、いずれの切削方向においても、比切削抵抗と切取り厚さの関係は、ある切取り厚さまでは対数グラフ上で直線関係となる。そして、それ以上の切取り厚さになると、切取り厚さが増加しても比切削抵抗はほとんど変化しない。逆に言えば、切取り厚さが減少すると比切削抵抗は指数関数的に増大する。

これは4.2.4節でも述べた切りくずの流れ型―亀裂型境界に関連していると考えられる。例えば、(a)のタイプT切削では、グラフの折れ曲がり点が5～15 μm の間にあり、その切取り厚さ以上になると切りくず内部に亀裂が発生しやすくなるのではないかと推測される。4.2.4節で述べたように、タイプTの切削形式における切りくず生成の流れ型―亀裂型境界が10 μm 程度であるとしたことと定性的に一致している。

タイプPの切削形式では、すくい角が5°の場合にとくに大きな比切削抵抗がみられるが、それを除けばタイプT切削の場合と大きな違いは見られない。4.2.6節でも観察したように、すくい角が5°の場合には、切れ刃前方の亀裂が長く発生し、すくい角が小さいためにすくい面に沿って切りくずは立ち上がる。そして、切りくずの中に亀裂は発生せず、そのために比切削抵抗は非常に大きくなる。一方、すくい角が30°の場合には、切れ刃前方へ先行する亀裂は微小であり、すくい面で小さな曲率でカールしやすく、そのために切りくずの内部に微小亀裂を発生しやすい。例えば、Fig.4.24では、30～50 μm 間隔の亀裂が切りくずの中で観察された。しかし、切りくず生成そのものをマクロに見ると、一見そういう亀裂の発生とは無縁の流れ型切りくずのようにきれいにカールする。これは4.2.4節でも述べたように、亀裂を伴う切りくず生成と流れ型切りくず生成の両者が混在した中間的な切りくず

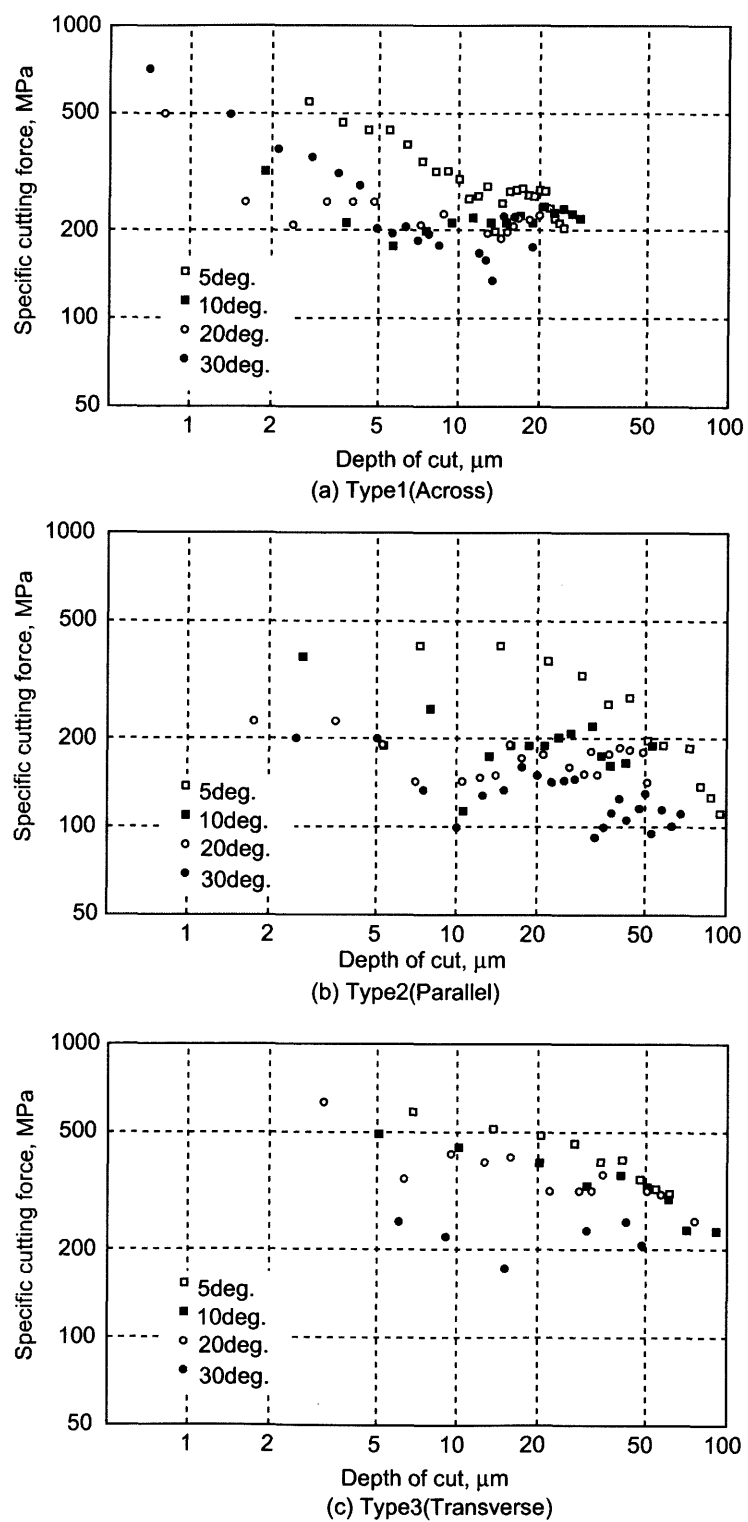


Fig.4.43 切取り厚さと比切削抵抗の関係

生成状態が存在することを示している。これらの結果から、このタイプPの切削の場合でも、すくい角 5° を除いて、グラフの折れ曲がり点近傍の切取り厚さで切りくず内に微視的な亀裂が発生する可能性が指摘される。

これに対してタイプA切削では、グラフの折れ曲がり点は見られない。しかもすくい角 30° を除いて比切削抵抗は各すくい角ともに格段に大きい。これはこの方向のせん断強度が最も高いためであるが、すくい角を 30° 以上では大きなすくい角の効果によって比切削抵抗は低下する。

また、切取り厚さの減少による比切削抵抗の増大は、流れ型切りくず生成と寸法効果の二つの影響が同時に加わったためであると考えられる。そして、切取り厚さが工具の切れ刃丸み半径に近づくと、その影響も入ってくる。

4.3.3 すくい角及び切削方向と比切削抵抗の関係

Fig.4.44 は切削方向をパラメータとして工具すくい角と比切削抵抗の関係を示したものである。また、切取り厚さをパラメータとして求めた工具すくい角と比切削抵抗の関係を Fig.4.45 に示す。どの方向に切削しても、すくい角 5° の場合の比切削抵抗が極端に大きい。そして、切削方向がタイプTとPの比切削抵抗に対するすくい角の影響はよく似ている。これに対して、タイプA切削では、すくい角 30° を除いてすくい角によって比切削抵抗はあまり影響を受けないことが分かる。Fig.4.43 および Fig.4.44 から分かるように、すくい角の小さい工具を使用すると比切削抵抗は1.5～2.5倍の値になる。これは第3章でも述べたように、骨軸、すなわち、オステオン軸断面半径方向のせん断強度が長手方向及び接線方向の約2倍になることが原因である。したがって、緻密質の皮質骨は典型的な加工異方性を示す材料であると言える。

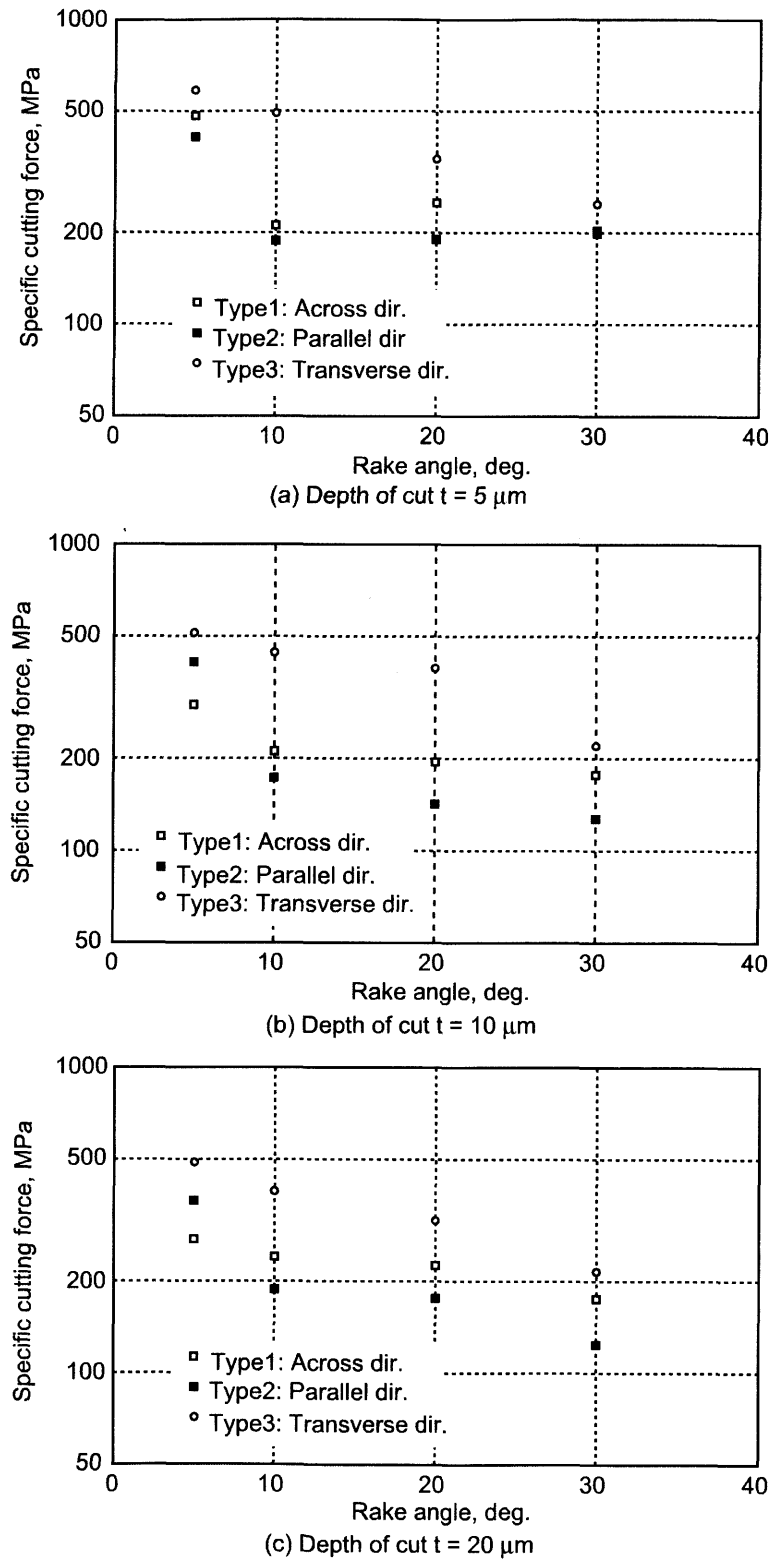
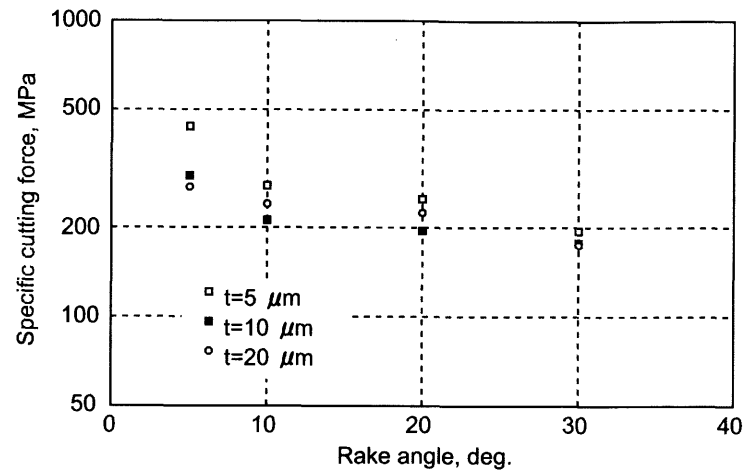
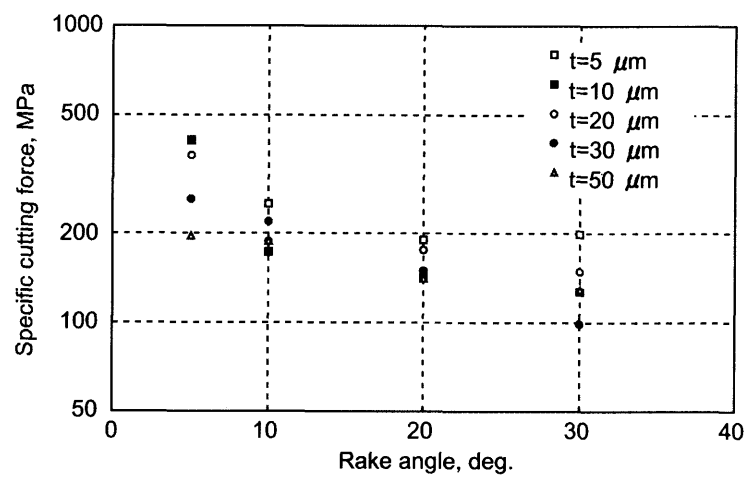


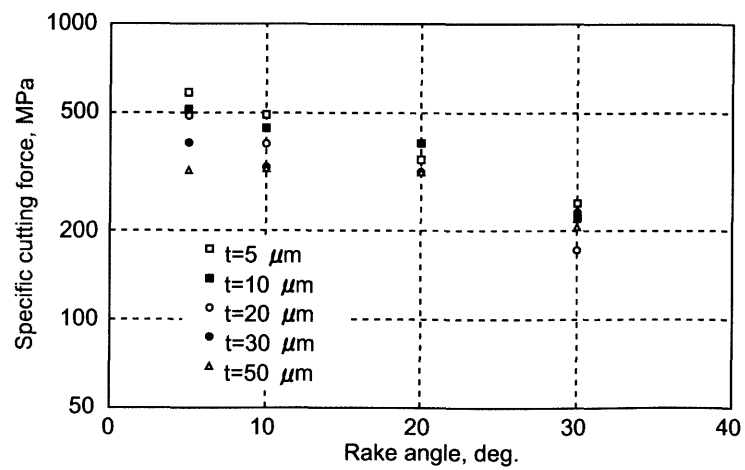
Fig.4.44 すくい角が比切削抵抗におよぼす影響, パラメータ: 切削方向



(a) Type 1 cutting (Across)



(b) Type 2 cutting (Parallel)



(c) Type 3 cutting (Transverse)

Fig.4.45 すくい角が比切削抵抗におよぼす影響, パラメータ: 切取り厚さ

4.3.4 上向き切削と下向き切削の影響

Fig.4.46 と Fig.4.47 はすくい角 5° と 30° の工具を用いて微小切削域で上向き切削 (切取り厚さが徐々に大きくなる切削) と下向き切削 (切取り厚さが徐々に小さくなる切削) した場合の比切削抵抗を比較したものである。この両図を比較すると、確かにすくい角の影響は認められるが、上向き切削と下向き切削の間で差異はほとんど見られない。これは、微小切削域で切取り厚さが小さく、切削速度が非常に遅い ($200 \mu\text{m/sec}$) ために、下向き切削で工具が被削材に衝突しても機械的衝撃の比切削抵抗に与える影響が顕著に出ないためである。

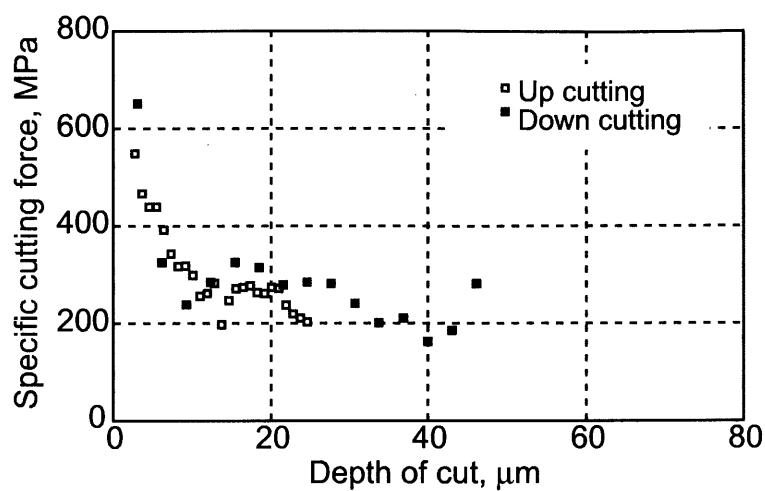
Fig.4.47 によると、工具すくい角を大きくした効果が出て、どの切削方向に削っても比切削抵抗は低く、しかも上向き切削と下向き切削での比切削抵抗の差はほとんど認められない。

以上の結果から、医療現場で骨切削ロボットを有効に使用し、生体への侵襲性を下げて患者の負担を軽減するためには、 30° くらいの大きなすくい角を持った工具の使用が推奨される。

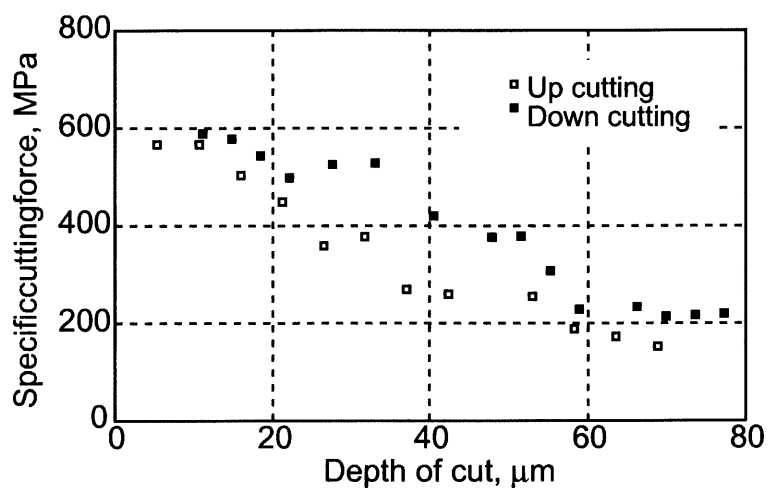
ところが、コラーゲンによく似た分子構造をもつアラミド樹脂の切削では、すくい角が正に大きくなると亀裂形切りくずとなり切削仕上げ面が悪くなる。また、負に大きなすくい角をとると、圧縮ひずみが大となるので滑らかな仕上げ面が得られる [61]。

しかしながら、すくい角を負に大きくした場合、切削抵抗が増大することが推測される。人工膝関節置換術での骨切削加工においては、切削抵抗の増大は、生体に対する力学的な負担の増加のために侵襲性を高めることになり、同時にそのことが切削温度の上昇ももたらす。すなわち、切削抵抗が大きくなることは、骨に与えるダメージを軽減するために極力避けねばならないことである。骨切除手術の医療現場からの要求は、(1) 骨切削面が平滑であることよりも高い形状加工精度であることが重要であるのでその点からしても切削抵抗は低いことが望ましい、(2) 温度が 50°C を超えると組織壊死を生ずる可能性が高くなるので、切削温度が上昇する要因はできる限り避けねばならないということである。したがって、高分子材料と骨は材質的に似たところがあっても、その加工目的からすると骨は医療上の問題からまったく別な加工概念を構築しなければならず、単なる一般的な機械加工としての加工の良否とは別問題である。

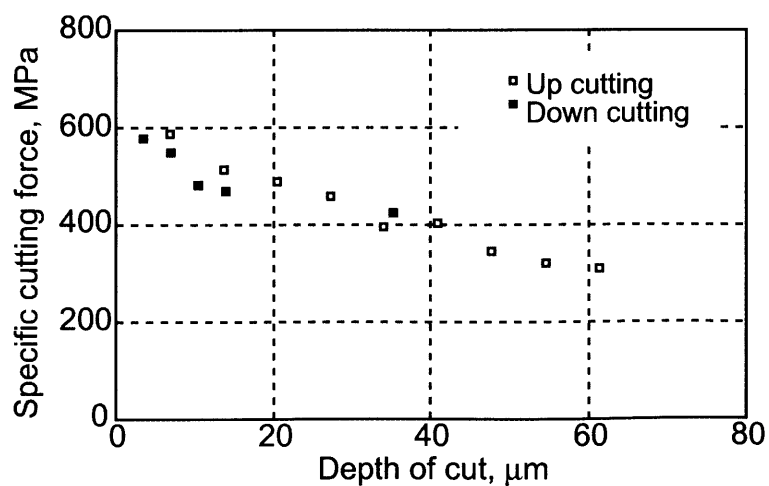
以上のことから考えると、負のすくい角はできるだけ避けねばならないということになり、反対に切削抵抗を下げるすくい角の大きな工具を選択すべきである。



(1) Type 1 cutting (Across)

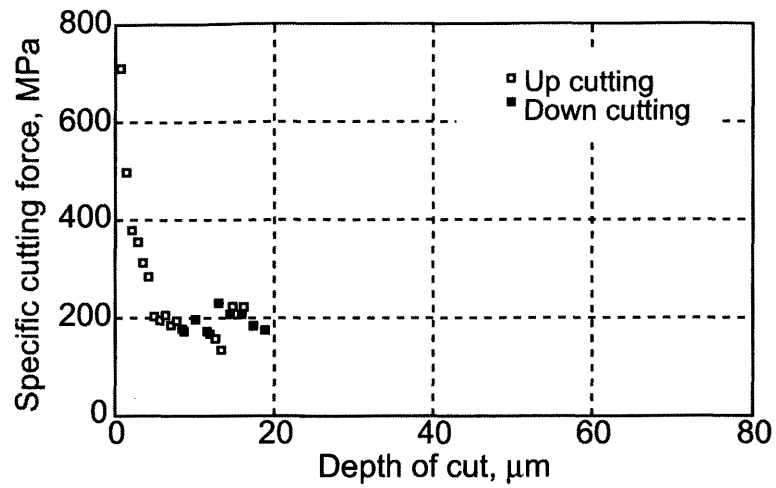


(2) Type 2 cutting (Parallel)

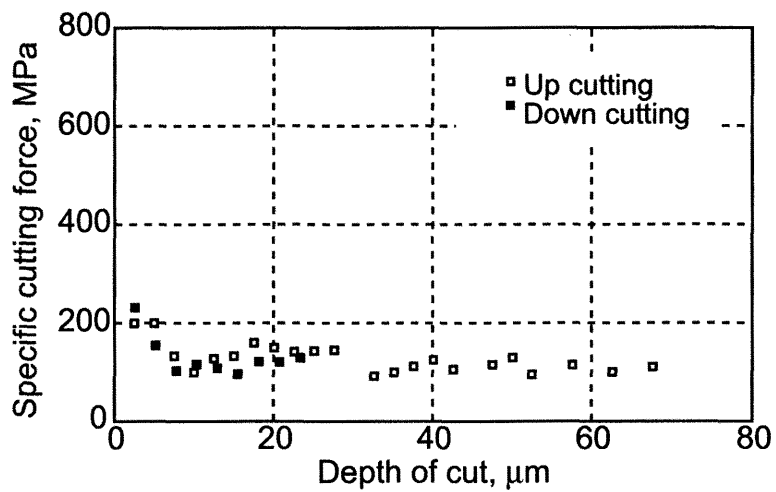


(3) Type 3 cutting (Transverse)

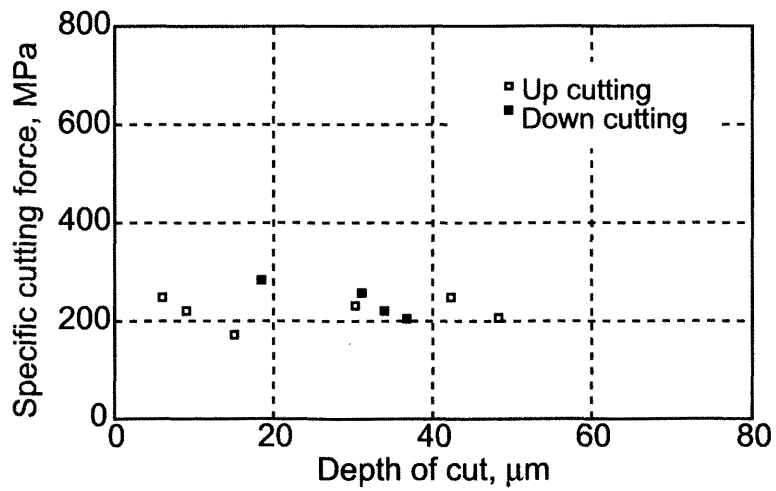
Fig.4.46 すくい角 5° の工具を用いた上向き切削と下向き切削における切削抵抗の比較



(1) Type 1 cutting (Across)



(2) Type 2 cutting (Parallel)



(3) Type 3 cutting (Transverse)

Fig.4.47 すくい角 30° の工具を用いた上向き切削と下向き切削における切削抵抗の比較

4.3.5 微小切削域における切削せん断面のせん断応力

Fig.4.1, Fig.4.2 に示した装置を用いて, 2次元切削を光学顕微鏡視野下で可視化し, 動的映像を記録してその静止画から切取り厚さと切りくず厚さを実測した. そこから切削のせん断角を求め, せん断面でのせん断応力 (以後切削せん断応力と略称する) を計算した.

ここで考慮しなければならないことは, 切削せん断応力を求めることができるのは, 切りくず生成の根拠となる切削せん断面が形成されていなければならないことである. ところが, 大きな切取り厚さになると, 大規模な亀裂発生のためにせん断面を形成することがなく, ほとんど塑性変形せずに亀裂型の切りくずを生成することが多い. このことはすでに Fig.4.21 に示した通りである. Fig.4.21 によると, 切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ までは切りくず中に亀裂を含んでいるにもかかわらず, 明瞭なせん断面が観察される. そして, 切取り厚さ $100\ \mu\text{m}$ の場合の切りくずは, せん断面を形成せずに亀裂だけで切りくずが生成されている.

このような結果から, ここでは切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ 以下では擬似的にしる切削せん断面が形成されるものと考え, 原則として $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 以下でのせん断角の観察と測定を行った. しかしながら, その一方で, 切削過程を詳細に観察すると, 切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ 以上で亀裂型破壊切りくずを生成しやすいときでも, 一時的にせん断面を形成し延性的な切りくずになることがあるので, 切りくずが亀裂を含んで生成されていてもせん断面さえ形成されていれば, その時点の切削抵抗から切削せん断応力を求めることにした.

したがって, ここではこのような観点から, 主として切削せん断応力から豚皮質骨の切削特性を考察した. また, 切りくず生成がすべて亀裂型破壊で形成される場合は別に検討することとした.

Fig.4.48 は工具すくい角 α と切削せん断角 ϕ および切削せん断応力 τ_s との関係を示したものである. せん断角測定の根拠となる切取り厚さと切りくず厚さは画像上で測定したために, 測定値には誤差とばらつきを生じ, 数点の測定値の平均で示している.

Fig.4.48 によると, せん断角はすくい角にほとんど依存しないが, Fig.4.5 に示した切削タイプの影響は多少認められる. すなわち, 骨幹部輪切り面, C面を削るタイプ A の切削モードでのせん断角は, 他のタイプの場合よりも大きい. 一方, 切削せん断応力ではすくい角の影響が認められる. すくい角が 30° では三つの切削タイプともに切削せん断応力は低く, しかも3者でほとんど差異はないが, すくい角が減少するにつれてタイプ T と A の切削モードでの切削せん断応力が増加する.

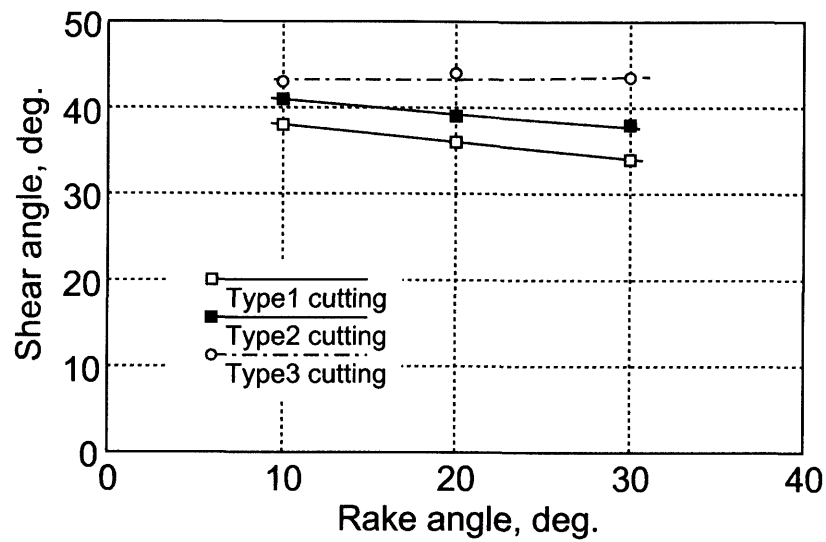
これに対して、タイプ P 切削ではほとんど変わらない。

すくい角 20° と 30° でのタイプ T と P の切削形式における切削せん断応力に大きな差はないが、そのことでタイプ T と P の切りくず生成形態が同じであるとは断定できない。タイプ T と P ではオステオン組織を切削する方位が 90° 異なるので、厳密にいうとむしろ同じ切りくず生成にはならないと考えたほうがよい。では何故切削せん断応力が近い値になったのであろうか。周知のように、切削せん断面上のせん断応力はどのような切りくず生成形態であろうと、測定した切削抵抗とせん断角で一意的に計算される値なので、切削抵抗とせん断角が近い値で測定されたら切削せん断応力も似た値になるのは当然である。したがって、その切削せん断応力の中に切りくず生成形態の影響が直接的には含まれないと考えるべきである。

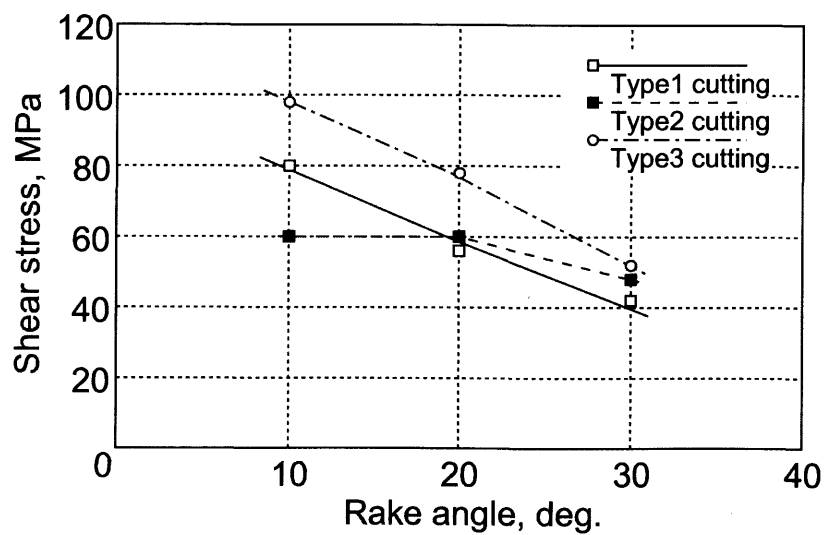
各切削タイプにおける切りくず生成形態の一例を Fig.4.49 に示す。(a) のタイプ T 切削では、Fig.4.5 に示したように、骨幹部の骨軸接線方向、すなわち、オステオンの棒状組織の接線方向に削ることになり、Fig.4.43 によると比切削抵抗の低い切削方向になる。そのために切取り厚さ $40\text{ }\mu\text{m}$ でも切りくずは連続型に近い形態を呈している。そして、 $25\text{ }\mu\text{m}$ になるとほぼ完全な連続型の切りくずとなっている。これに対して、(b) に示すタイプ P 切削では、オステオンの長手方向、すなわち、コラーゲン線維の長手方向に削ることになり、切削によってコラーゲン線維を巻き上げて曲げ破壊しやすくなる。切りくずの曲げ破壊は切取り厚さが $25\text{ }\mu\text{m}$ でも明瞭に観察されるが、せん断面も観察されるので擬似的な連続型切りくずとなっている。そして、 $10\text{ }\mu\text{m}$ になると連続型切りくずが生成している。

次に、(c) のタイプ A 切削では、切取り厚さ $40\text{ }\mu\text{m}$ 、工具すくい角が 20° や 30° の場合、同じ切削行程の中でもこの図で見られるような不連続せん断型の切りくずを生成するときと、Fig.4.54 に示すような擬似的な連続流れ型切りくずを生成するときに混在する。この (c) においてもすくい面上のせん断型切りくずの先端では連続流れ型切りくずも観察される。その理由として考えられることは、切れ刃が接触した場所の骨材質の違いに起因しているのではないかということである。そして、切取り厚さが $10\text{ }\mu\text{m}$ に近づけば常に連続型切りくずを生成するようになる。すなわち、4.2.4 節で述べたように、ある切取り厚さを境にして切りくず生成は明らかに亀裂型から流れ型に変化する。

切削タイプによる切削せん断応力の違いはむしろ Table 4.1 に示した皮質骨固有のせん断強度の異方性に関係しているのではないかと考えられる。すなわち、Fig.4.43 に示したように、タイプ A 切削の比切削抵抗は、すくい角 30° において他の二つの切削モードの場合とほぼ同じであるが、すくい角が小さくなると明らかに大きくなっており、その傾向は Fig.4.48 の場合と類似している。すなわち、このことは小さなすくい角の工具によるタイプ A 切削における切削抵抗が大きいこと



(a) Shear angle



(b) Shear stress

Fig.4.48 すくい角がせん断角とせん断応力におよぼす影響

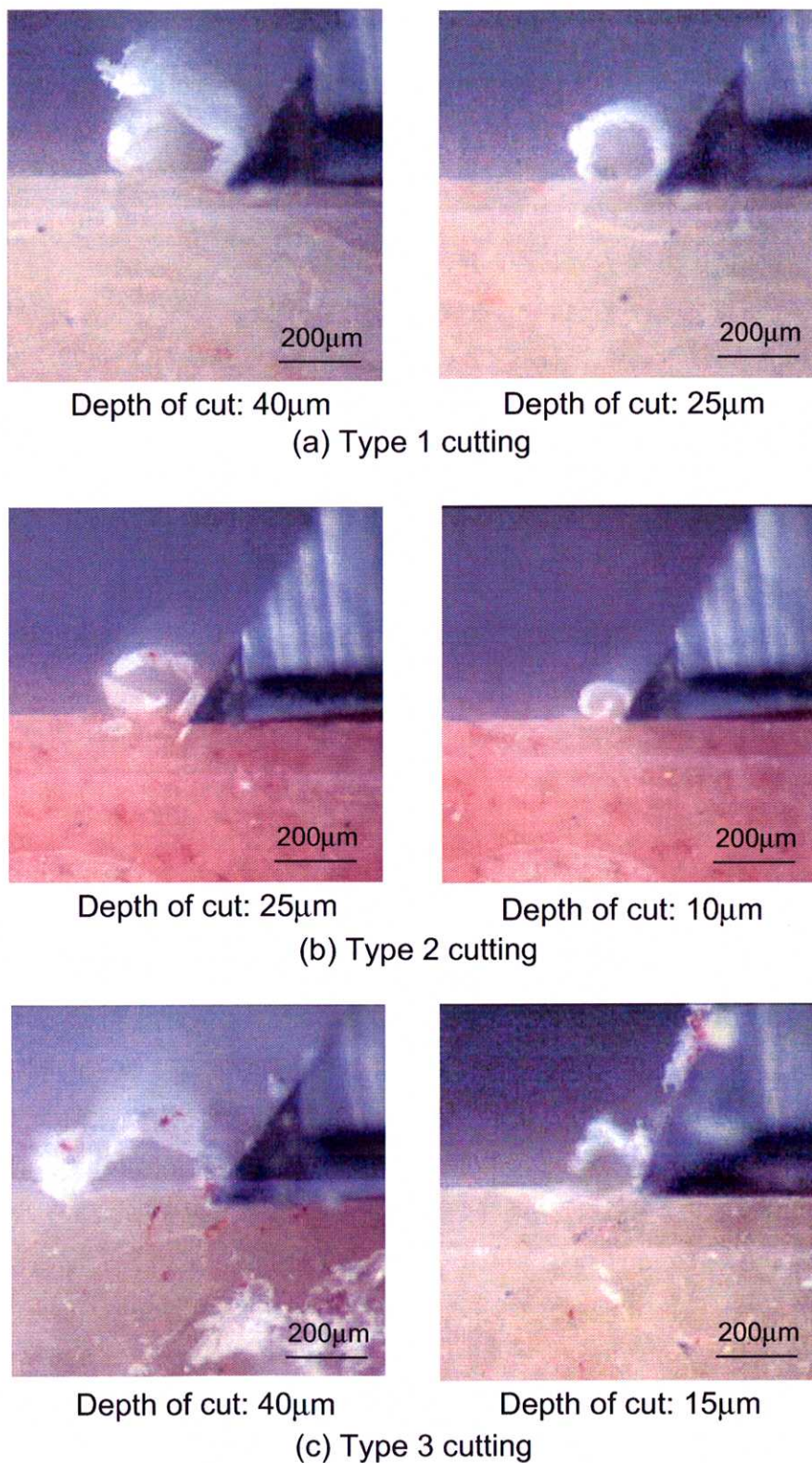


Fig.4.49 切削形式による切りくず生成形態の相違

を示唆している。

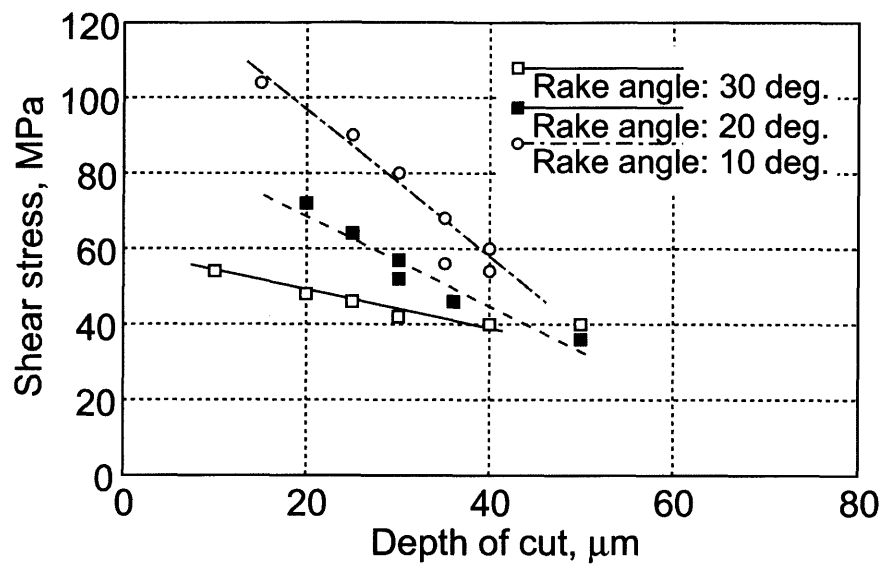
次に、切取り厚さによって切削せん断応力がどのように変化するかを三つの切削タイプの場合について述べる。Fig.4.50 はタイプ T 切削における切削せん断応力と切取り厚さの関係である。また、参考までにこの実験において得られた主分力から計算した比切削抵抗値も示す。どのすくい角でも切取り厚さが小さくなるにつれて切削せん断応力 τ_s は大きくなるが、すくい角が小さいほどその増加割合は大きい。このことは比切削抵抗でも同じことが言える。

この図では切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ を越えると比切削抵抗は一定値に近づくが、切りくずの中に亀裂が多く含まれるとこのような傾向になりやすく、切りくず生成が亀裂型になるとその傾向は一層顕著になる。なお、グラフの横軸に切削面積ではなく、切削幅を一定にして、あえて切取り厚さをとったのは、切削面積では切れ刃の切込量そのものの影響が直接的に捉えられないからである。また、切取り厚さの減少とともに切削せん断応力も比切削抵抗も増大するのは、金属切削の場合と同様に寸法効果がその一因と考えられる。

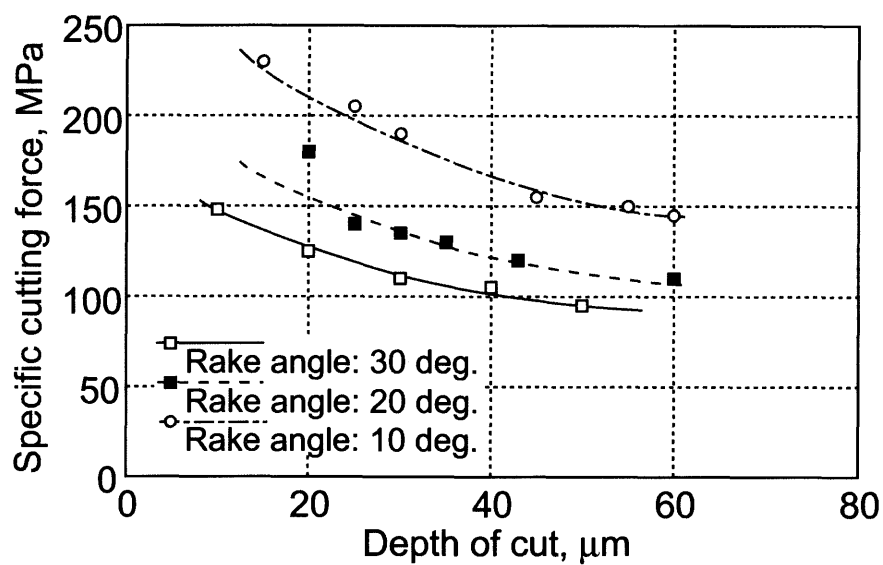
Fig.4.51 はタイプ P 切削における切削せん断応力と切取り厚さの関係を示す。この場合には、基本的にすくい角の影響があまり認められない。タイプ P 切削では、Fig.4.49 の切りくず生成からも分かるように、切取り厚さの大きいときには、切れ刃がオステオンの軸方向に線維を巻き上げるような材料除去形態となり、切りくずを曲げ破壊するのですくい角の影響が出にくいのではないかと考えられる。

Fig.4.52 はタイプ A 切削における切削せん断応力と切取り厚さの関係を示す。この場合には、タイプ P 切削とは対照的に切削せん断応力はすくい角の影響を受ける。また、 20° と 30° のすくい角では、 $20\ \mu\text{m}$ 以上の切取り厚さでせん断応力はあまり変化しない。

切削せん断応力が大きくなるすくい角 10° の工具でタイプ A の切削モードをとったとき、連続流れ型、せん断型、亀裂型の3種類が一つの切削条件で同時に観察された例を Fig.4.53 に示す。切削抵抗波形中に Fig.4.53(a)(b)(c)(d)(e) に対応する場所を示す。Fig.4.53(a) は切削開始後 7sec の時点で、切り残し部を切削しており、切取り厚さが $15\ \mu\text{m}$ で連続流れ型の切りくずを生成している。また、切削抵抗は小さくその変動も小さい。それから 5sec 後の Fig.4.53(b) は切取り厚さが $30\ \mu\text{m}$ で断面三角形のせん断型切りくずを生成している。Fig.4.53(a) に比べて切削抵抗は約 2 倍となり、せん断型切りくずが不連続に生成する度に切削抵抗は大きく変動する。そして、Fig.4.53(c) のように切取り厚さが $50\ \mu\text{m}$ になった時点で切削抵抗が急増し、その大きな切削抵抗のためにいったん工具が停止する。その 0.01sec 後に亀裂と振動衝撃が同時に発生して Fig.4.53(d) のように図の画面が衝撃振動のため

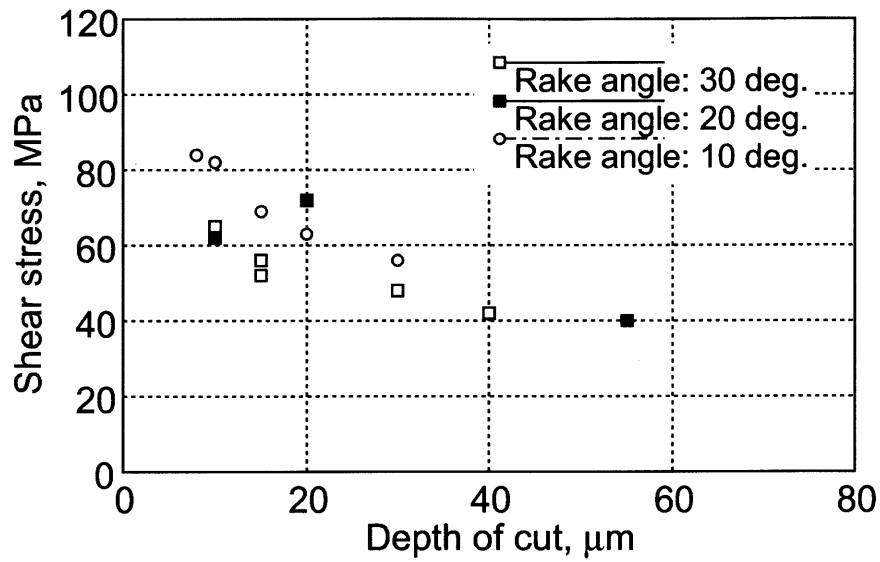


(a) Shear stress to depth of cut

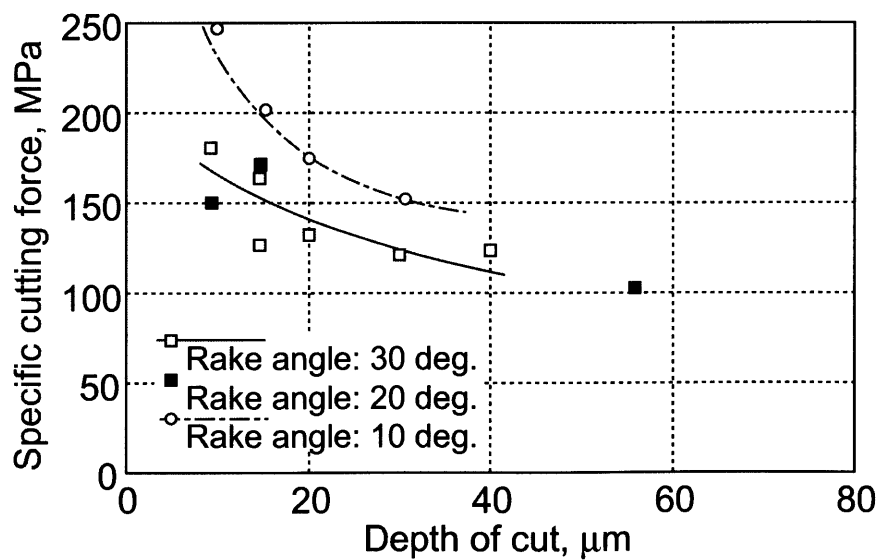


(b) Specific cutting force to depth of cut

Fig.4.50 タイプ T 切削における切取り厚さとせん断応力および比切削抵抗の関係

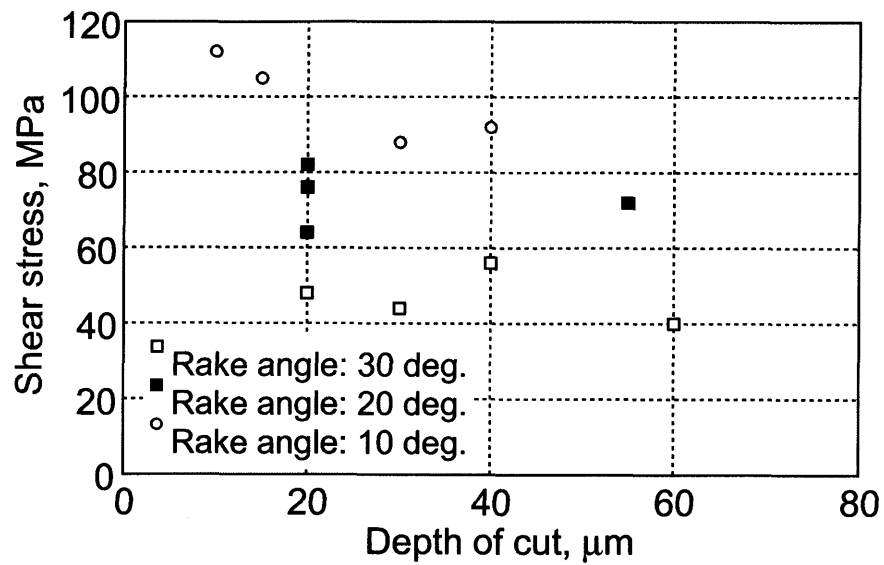


(a) Shear stress to depth of cut

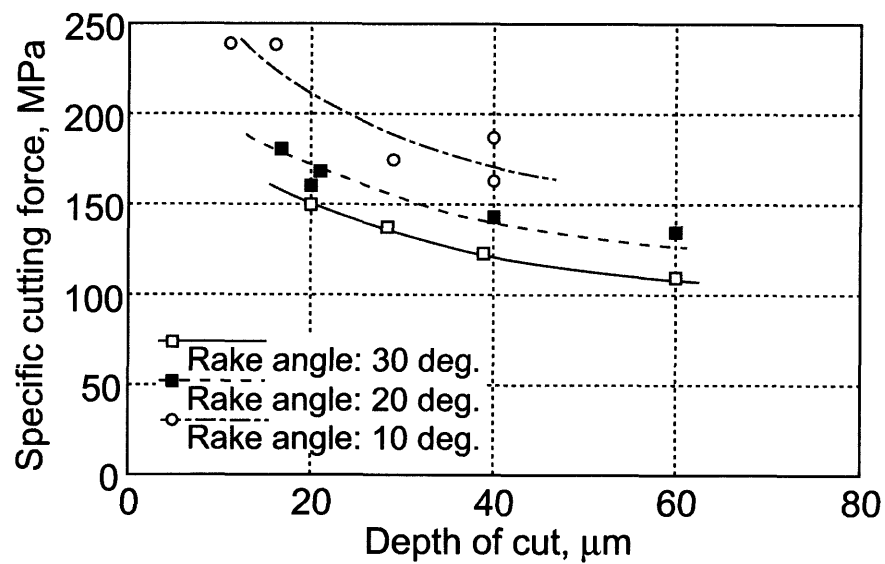


(b) Specific cutting force to depth of cut

Fig.4.51 タイプ P 切削における切取り厚さとせん断応力および比切削抵抗の関係



(a) Shear stress to depth of cut



(b) Specific cutting force to depth of cut

Fig.4.52 タイプ A 切削における切取り厚さとせん断応力および比切削抵抗の関係

に揺れる．やがてその 0.01sec 後に衝撃振動は収まって，(e) の写真のように亀裂型の切りくずをすくい面上に残す．工具は前進して再び被削材に接触するので，切削抵抗は切削抵抗波形上の Fig.4.53(e) 点のピークにまで達することになる．以後このような亀裂型切りくず生成を繰り返す，亀裂型切りくずを生成するときの切削抵抗は連続流れ型切りくずを生成するときの切削抵抗の 3 倍以上にも達する．

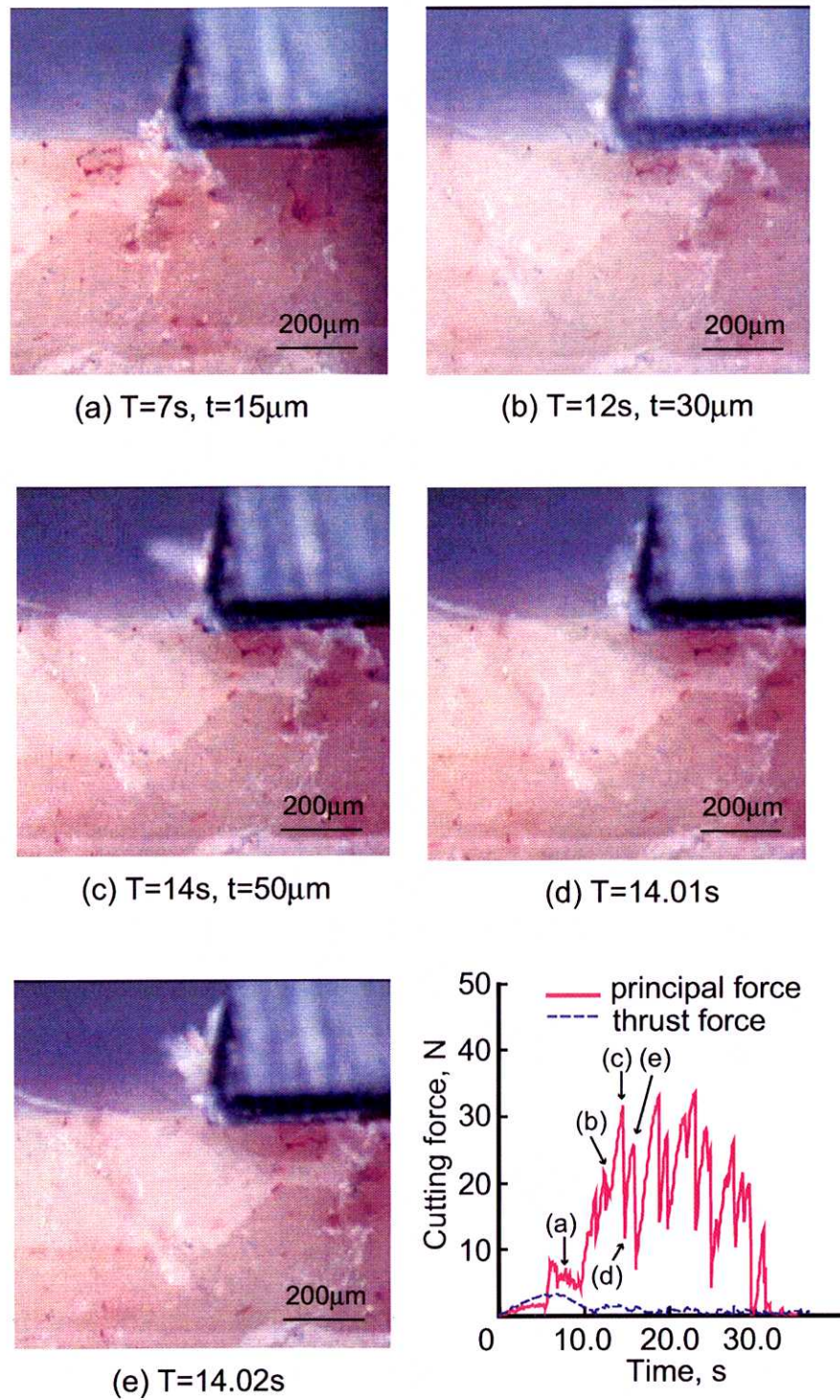
これに対して，Fig.4.52 に示したように，すくい角 30° の工具を使用してタイプ A の切削を行ったときの切削せん断応力は低い．この場合にはどのような切りくず生成となるのであろうか．Fig.4.54 は Fig.4.53 と同様に，すくい角 30° の工具でタイプ A 切削を行ったときと同じ切削行程の中で，切取り厚さの異なった箇所での切りくず生成と切削抵抗波形を示す．Fig.4.54(a) のように切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ にもなる場合には，すくい角が大きくても，前述の Fig.4.49 のように，せん断型切りくずと連続型切りくずが混在する．したがって，Fig.4.54(a) に示すような連続流れ型切りくずもしばしば観察される．このような切りくずを生成する場合には，切削抵抗波形に示すように切削抵抗が低く，すくい角 10° の工具で亀裂型切りくずを生成するとき (Fig.4.53) の切削抵抗の約 $1/3$ である．このことが Fig.4.52 においてすくい角 30° 工具の切削せん断応力が低くなった原因と考えてよい．

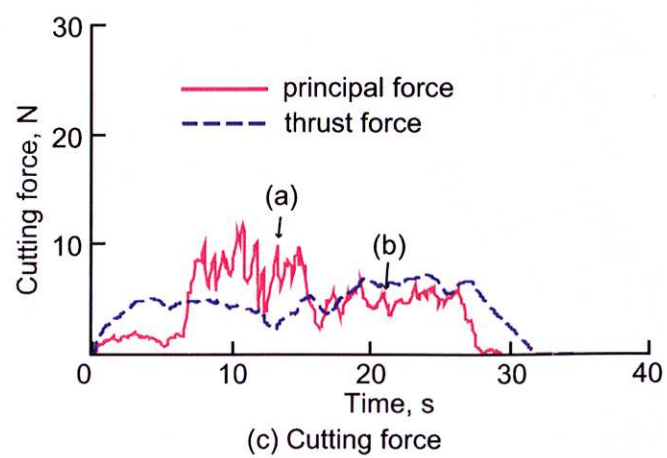
また，この切削抵抗波形において背分力が異常に大きいのは，切削開始点で削り難さのために切れ刃が逃げて設定切込にならなかったためである．これによって刃先下方への圧縮応力成分が増加したために，亀裂を発生しにくくなり，その結果として連続型切りくずが生成しやすくなったとも考えられる．

切削特性を示すその他の性質として工具すくい面での平均摩擦係数がある．それを工具すくい角との関係で示したのが Fig.4.55 である．摩擦係数に切削タイプの影響はほとんど認められないが，すくい角の影響は大きい．この図は，切削幅を 2 mm 一定として，各プロット点横の [] 内に示す切取り厚さの範囲で計算し，その平均値を示している．また，() 内は摩擦係数のばらつきの範囲を示す．この結果からみると，切削せん断面を形成する $50\ \mu\text{m}$ 以下の切取り厚さでは，摩擦係数は切取り厚さの影響をあまり受けないことが分かる．

すくい角が大きくなるにしたがって摩擦係数が大きくなる理由については次のように考えられる．これまでの実験結果によると，切取り厚さが $40\ \mu\text{m}$ 以下において工具のすくい角が大きく，連続流れ型切りくずを生成する場合，切削抵抗の主分力は小さくなるが背分力はあまり変化しない．そのために工具すくい面上の垂直力が減少し，摩擦係数が大きくなる．

骨の摩擦係数に関しては，Itoh ら [32] は人骨について測定した．その結果として，摩擦係数は切削面積には依存しないが，工具すくい角の影響がわずかに認められたことを報告した．また，その摩擦係数値はすくい角が $-5^\circ \sim 20^\circ$ で $0.4 \sim 0.6$ で

Fig.4.53 タイプ A 切削におけるすくい角 10° の工具による切りくず生成

(a) Depth of cut: 40 μm (b) Depth of cut: 20 μm Fig.4.54 タイプ A 切削におけるすくい角 30° の工具による切りくず生成

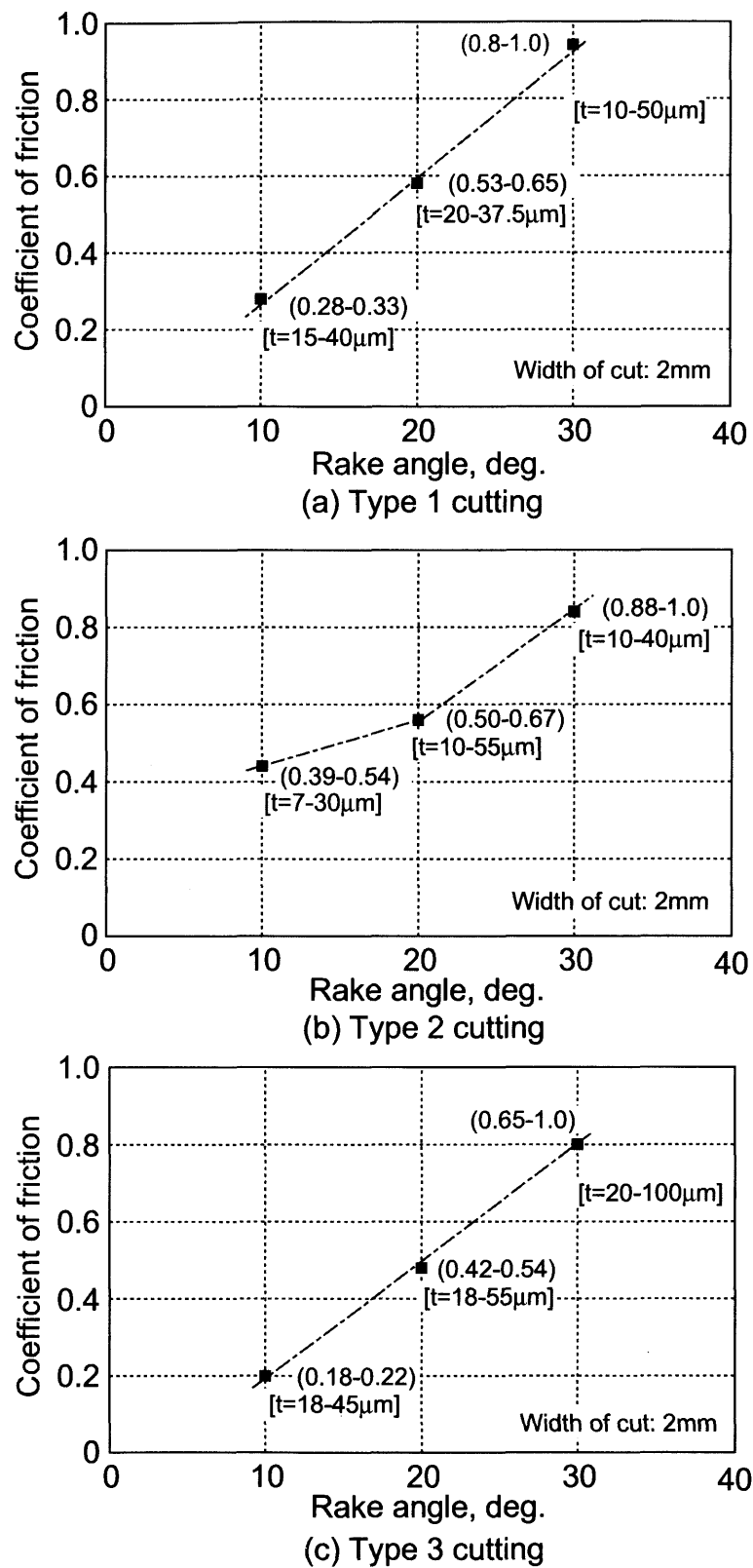


Fig.4.55 すくい面における摩擦係数

あった。この切削面積というのは切削幅を一定にしたときの切取り厚さと同義であるので、その意味では筆者の結果と一致していると言える。一方、筆者の場合、すくい角が $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の摩擦係数は $0.2 \sim 0.6$ であり、すくい角の影響が大きい。しかしながら、Itoh らの実験での切取り厚さは $200 \sim 500 \mu\text{m}$ であって筆者の場合の約 10 倍であり、そのような大きな切取り厚さでは、これまでに述べたように、切りくず生成が亀裂型になりやすい。切取り厚さの小さな場合と比べて切削のメカニズムが大きく異なるために、単純に比較することは困難である。

4.4 結言

第4章をまとめると次のようになる。

[緻密皮質骨の切削挙動]

- (1) 乾燥緻密皮質骨の切削において切取り厚さが大きい時、亀裂は工具刃先前方に先行し、途中からせん断面もしくは表面に向きを変えるので、ブロック状の切りくずが生成される。この場合の切削抵抗は亀裂発生に対応して激しく変動する。一方で、切取り厚さが小さくなると、連続流れ型のリボン状切りくずが生成される。
- (2) 含水骨の場合には、切取り厚さが $100\ \mu\text{m}$ でも大きな亀裂の生成はみられず、切りくず生成は一見流れ型である。しかしながら、詳細に観察すると、切りくず内に微小な亀裂を多数集積しながら切りくず生成が行われているので、含水骨でも切りくず生成に亀裂発生は無関係ではない。含水骨に含まれる水分(約20%)によってオステオン組織が湿潤することにより組織構造の脆化が防がれ、大きな亀裂の発生が阻止されていると考えられる。

[多孔皮質骨の切削挙動]

- (3) 乾燥多孔皮質骨の切削において工具すくい角が小さい場合、脆弱化した組織欠陥部で大規模な亀裂が被削材内部に深く侵入し、設定切取り厚さの3倍程度の深さからブロック状の切りくずが排出される。この時、切削抵抗は大きく変動する。一方、すくい角の大きな工具で切削すると、組織の変質脆弱化にもかかわらず組織に依存することなく、亀裂は工具先端で切削方向に平行に発生し、続いてその向きを上に変えてブロック状の切りくずを排出する。この時、切りくず生成が組織欠陥にほとんど左右されないために、切削表面に大きな損傷を残さずにすむ。脆弱な組織欠陥のために切削抵抗の変動が著しく、すくい角の影響がその中に隠されてしまうため、すくい角が切削状態に関与する割合は小さい。
- (4) 緻密皮質骨における組織異方性とは異なり、多孔質骨では組織がしばしば特定の方向に偏って配向し、切削状態に影響をもたらす。切削方向に対して組織配向角が鋭角になる状態では、組織欠陥部に大規模な亀裂が配向方向に発生侵入し、大きな切削抵抗変動をともなって過切削のブロック状切りくずを生成する。

[海綿骨の被削性]

- (5) 海綿骨の三方向における切削挙動において、マクロなレベルで比較すれば、この三方向の切削挙動に大きな差異はなく、皮質骨とは大きく異なる。皮質骨に比べて非常に粗に分布する骨梁組織と、骨梁を構成する個々の極細い骨のために、三方向のどちらの強度も低いことから、骨梁が切削を大きく支配することはないと考えられる。

[皮質骨の切りくず生成形態]

- (6) すくい角の大きな工具を用いて、切取り厚さを $5\sim 100\ \mu\text{m}$ にとって切削したときの切りくず生成から、切りくず生成の流れ型と亀裂型の境界を検討した。その結果、切取り厚さ $100\ \mu\text{m}$ の場合の切りくず生成は完全に亀裂型だと判断されたが、 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ の切取り厚さでは、切りくず生成がマクロには流れ型であっても、切りくずの中に亀裂が含まれることから考えて、流れ型の切りくずと亀裂型の切りくずの中間的な切りくず生成ではないかとみられた。また、切取り厚さが $5\ \mu\text{m}$ では連続型の切りくずになっていることが分かった。したがって、これらのことから、切りくず生成の流れ型と亀裂型の境界は切取り厚さが $10\ \mu\text{m}$ 以下にあると推測される。

[皮質組織構造が切削に及ぼす影響]

- (7) 緻密質骨のオステオン組織に存在するセメント線やハバース管はある種の組織欠陥として切削に影響する。工具刃先がセメント線もしくはハバース管に近づくと、そのわずか手前で突然刃先からセメント線もしくはハバース管に向かって亀裂が走る。

[皮質組織異方性が切削に及ぼす影響]

- (8) 皮質骨はオステオン構造や層板構造から理解できるように、骨軸に沿った方向と直角方向とでは機械的性質が大きく異なり、そのことが組織の異方性として切削状態にも顕著な影響を与える。

タイプ T 切削ではオステオン組織の接線方向に切削するために、工具刃先前方のせん断面でせん断すべりとせん断破壊を生じやすく、切りくずの中に亀裂を生成することが多い。

タイプ P 切削では、骨軸方向に伸びた層板のコラーゲン線維層に平行に切削するので、切りくず内に亀裂を発生することなく、薄い層板を剥ぐような切りくず生成が観察される。このとき刃先直前には常に小さな亀裂が前方へ連続的に発生している。

タイプ A 切削では、骨軸に直角な骨幹部切断面を削るために、最もせん断強度の高い面の切削となって、他の二つの切削タイプに比べて大きな切削抵抗となる。このときの切りくず生成は亀裂型で、刃先に発生する前下方の亀裂と前上方に方向転換した亀裂によって切りくず生成し、塑性的な変形挙動は観察されなかった。

[皮質骨における応力ひずみと亀裂発生]

- (9) 工具先端で亀裂が発生する前に、刃先前方に発生する応力によってひずみ模様が観察されることが多い。一方、亀裂と切りくず生成との関係は組織、工具すくい角、切取り厚さなどによって異なる。タイプ T 切削において、緻密質骨では工具すくい角が小さいと亀裂は刃先前下方(すくい面延長上)からせん断面に向かって発生しやすいが、すくい角が大きくなるにつれて、亀裂の発生進行方向は切削方向に平行な方向へ変わる。
- (10) 多孔質骨では、すくい角が小さいと組織の欠陥部に大規模な亀裂と破壊を生じやすく、そのために大きなブロック状切りくずを生成する。これに対して、すくい角が大きくなるにつれて、刃先前下方へ発生する亀裂は短く、組織欠陥部で向きを変えてせん断面へ向かう。そのために三角形状の切りくずを生成する。
- (11) 環状層板をタイプ A 切削するときの亀裂と切りくず生成の関係は他の場合とは形態を異にする。すくい角の大きい工具で切取り厚さが少ない場合の切削の例に限定されるが、切れ刃先端ですくい面の延長方向に亀裂を発生し、その亀裂はすぐに向きをほぼ 90° 変えて上方に向かう。そのために、断面三角形状の亀裂型の切りくずを生成し、切削そのものに亀裂型破壊の音を伴う。

[皮質骨微小切削における比切削抵抗とせん断応力]

- (12) 皮質骨材質と工具すくい角をパラメータとして、切取り厚さと比切削抵抗の関係を求めてみると、この両者は、対数グラフ上で近似的に直線関係で示され、工具すくい角が大きい場合には、切削抵抗は下がる。その結果によると、緻密質骨ではすくい角の影響が大きい、多孔質骨では、その影響は少ない。これらのことから考えると、工具寿命を問題にしない人工関節手術での骨切削では、人体に対する侵襲性を低く保って患者の負担を軽減するために、すくい角が正に大きな工具の使用が推奨される。
- (13) 切削せん断応力はすくい角の影響を受ける。すくい角が大きくなると三つの切削タイプの切削せん断応力は同じ値に近づくが、すくい角が逆に小さくな

るとタイプ T と A の切削では増加する。このすくい角と切削せん断応力の関係はすくい角と比切削抵抗の関係によく対応していることから、比切削抵抗の大小が切削せん断応力の大小に関係していると考えられる。

- (14) 切削せん断応力と切取り厚さの関係は切削タイプによって異なる。すなわち、タイプ P 切削ではすくい角によって切削せん断応力は大きな影響は受けないが、タイプ A 切削ではすくい角の影響が大きく、切取り厚さに関係なくすくい角が小さくなると切削せん断応力は大きくなる。また、タイプ T 切削ではタイプ P 切削とタイプ A 切削の中間の状態になる。