

## 第 4 章

# 骨の 2 次元切削挙動と微小切削特性

### 4.1 緒言

これまでに、Jacob ら [33][36]、Wiggins ら [34]、Itoh ら [32] によって人骨や動物骨の大腿骨における異なった部位の切削抵抗が測定され、貴重なデータが提供されているが、骨のミクロな組織構造との関連付けや、骨構造の異方性との関係において議論の余地がある。また、骨の組織構造と切りくず生成との関係を可視的に観察した例はほとんど見当たらない。

その一方で、第 3 章でも述べたように、骨組織は非常に複雑であることが分かり、それが骨の切削特性と密接な関係があると考えられるが、そのことを論じた報告はない。そのために、骨の組織によって微視的にどのような切削の違いが見られるのか、あるいはまた、その切削メカニズムが被削性とどのような関係があるのかなどを明らかにして、その加工情報を骨切除装置で利用する必要性に迫られている。

本章では被削材として主に豚皮質骨を用いる。その理由として次のようなことが挙げられる。第 5 章でも述べるように、海綿骨は皮質骨に比べて密度が約 1/2 で強度も低いために、比切削抵抗は約 1/3 程度にしかない。そのために、骨切削の難易を切削抵抗で評価し考慮するならば、当然比切削抵抗の高い皮質骨の被削性に注目しなければならない。しかしながら、骨組織と人工関節の接合強度を鑑みた場合、海綿骨の加工特性も重要となる。このような観点から、本章における研究の主な部分で豚大腿骨の皮質骨を被削材として採用したが、後半で海綿骨の切削挙動についても実験的考察を加えた。

試料として用いた豚皮質骨は均質なものではなく、採取部位や場所によって組織の緻密度が全く異なるのが通例である。一つの見方として、その組織の緻密度の違

いを密度の違いとして評価することができるが、他の見解からすると、密度の低い皮質骨は多孔になっており、また、密度の高い皮質骨は緻密になっている。そこで、別の評価法として、前者を多孔皮質骨、後者を緻密皮質骨として区別して論ずる必要がある。

また、生体における切削現象を把握するためには、含水骨での切削を検討することが不可欠となる。そこで、切削挙動、切りくず生成、組織構造が切りくず生成に及ぼす影響、組織異方性の影響、ひずみ模様、亀裂発生と切りくずの関係、の各観点から含水骨の切削挙動を解析し、乾燥骨と含水骨間での被削性の相違について検討することとした。

第3章で述べたように、皮質骨は直径200 $\mu\text{m}$ 前後のオステオン組織の集合構造と外輪と内輪の層板構造が長管骨の骨軸長手方向に伸びている構造からなっている。したがって、その構造から皮質骨は一方向繊維強化型高分子複合材料の構造に類似している可能性が考えられる。この繊維強化型高分子材料の繊維組織と切削特性との関係については、従来から観察と理論解析の両面にわたって多く報告されている[54][55][56][57][58]。ただここで注目しなければならないのは、繊維強化型複合材料の繊維径は10 $\mu\text{m}$ 前後、繊維充填率は数十パーセントで、他は高分子マトリクスである。これに対して、皮質骨はオステオンにしても外輪や内輪層にしてもコラーゲン線維で充填されている組織であり、層板構造をとっている。このようなことから考えると、繊維強化型複合材料と皮質骨とは組織構造が異なっているとみなければならない。したがって、繊維強化型複合材料と皮質骨の切りくず生成にどの程度の関連性がみられるのかが注目される。

ところで、人工膝関節置換術での骨の加工では、大きなねじれ角を持ったエンドミルで行われているために、その切削挙動は非常に複雑であり、微視的な切削挙動や被削性が明らかにされたとはいえない。そこで、本章では、骨の微小切削現象そのものを2次元切削において動的に捉え、切削における切りくず生成を明瞭に把握するとともに、2次元微小切削における、いわゆる切削理論的な切削特性を明らかにすることによって、骨の被削性を論ずることとした。

## 4.2 組織からみた 2 次元切削挙動

### 4.2.1 実験方法と 2 次元切削可視化装置

#### 4.2.1.1 光学顕微鏡下 2 次元切削可視化装置

Fig.4.1, Fig.4.2 は、顕微鏡視野下での 2 次元切削可視化装置とその計測システムを示す。40 mm 角のテーブルを持った X-Y 微動電動ステージ上に骨被削材を固定し、テーブルを 125  $\mu\text{m}/\text{sec}$  の速度 (切削速度) で動かしながら、固定した 2 次元バイトで切削した。

ステージ上に 3 分力測定可能な小型動力計を設置し、その上に被削材を固定して切削力を測定した。本章での骨の切削挙動観察では、主として切削主分力を測定し、切削挙動との対応や因果関係を得た。

実験に際して、切削抵抗波形を切削現象の記録と同期させて記録した。また、顕微鏡視野下で連続的に観察される切削現象は動画としてビデオに記録した。したがって、切削抵抗波形と切削現象の動画とは完全に同期しており、切削現象の変化を切削抵抗波形で評価することができる。

また、2 次元切削での切取り厚さを 10~100  $\mu\text{m}$  にとり、 $5^\circ$  と  $35^\circ$  の正のすくい角をもつ 2 種類の高速度鋼バイト (逃げ角  $5^\circ$ ) を用いた。

#### 4.2.1.2 被削材

大腿骨の骨幹部において、遠位部に近い皮質骨が厚い部位から 5 mm の厚さで輪切りにし、その 1 枚の輪切り試料の骨組織が密である部分から緻密質骨を、また、同じ面内での骨組織が疎である部分から多孔質骨を採取して被削材とした。

一方、海綿骨は、大腿骨遠位端側顆部より採取した。この組織構造は、第 3 章 Fig.3.3 に示した通りであり、多数の骨梁が縦横に張り巡らされ、3 次元網目構造をなしている。また、骨梁間に多孔質細胞が存在し、密度は皮質骨の約 1/2 で、0.8~1.2  $\text{g}/\text{cm}^3$  程度である。

この皮質骨緻密質骨を  $35^\circ\text{C}$  で 1 時間乾燥した乾燥骨 (dry bone) と、生体骨に近い含水骨 (wet bone) を実験に供した。含水骨は、屠殺後冷凍保存されたものを実験直前に解凍し、生理食塩水中にて保存した。含水骨において、乾燥前後の質量および体積より水分含有率を測定したところ、皮質骨では約 10%~20%、海綿骨では

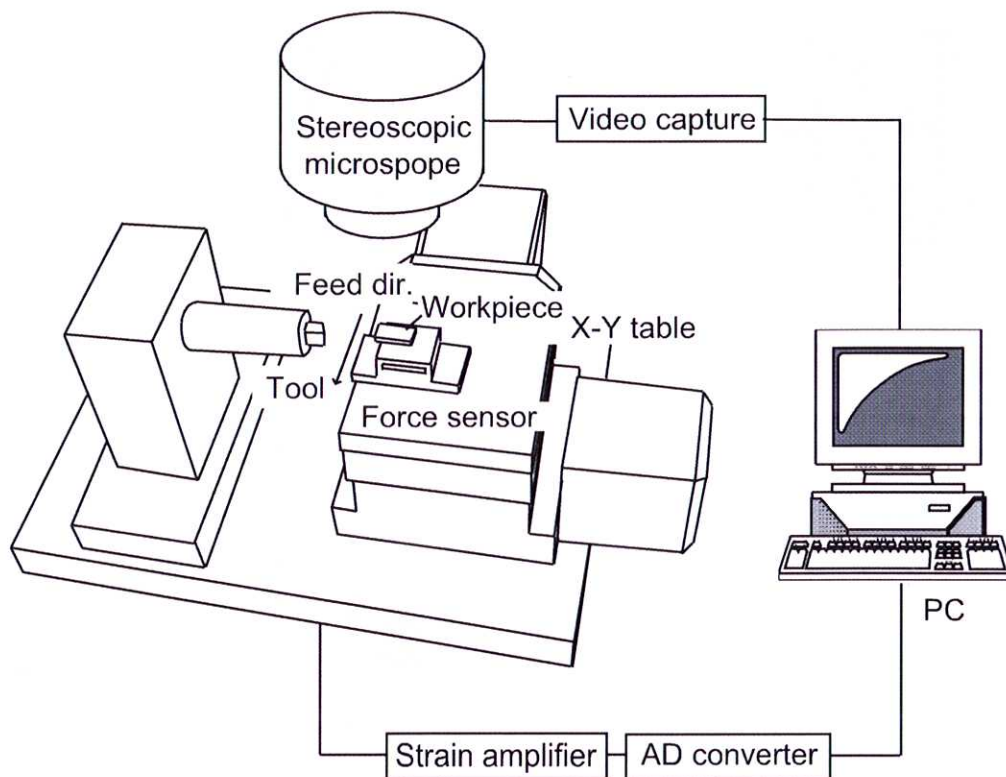


Fig.4.1 可視化2次元微小切削システムの構成

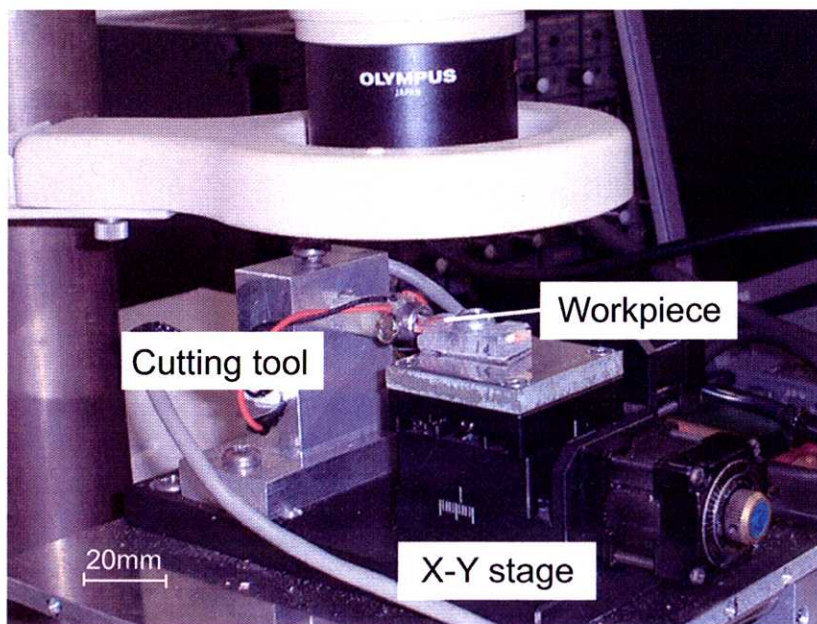


Fig.4.2 可視化2次元微小切削システムの概観



また、必要に応じて、切削実験終了後の被削材を用い、第3章の Fig.3.6～Fig.3.9 に示したように、切削面のマイクロビッカース硬度を測定し、硬度と組織の関係を調べた。

ここで皮質骨における緻密質骨と多孔質骨の骨軸切断面(輪切り面)の顕微鏡写真例を Fig.4.3, Fig.4.4 に示す。Fig.4.3(a)の緻密質骨のオステオン組織では、ハバース管やセメント線あるいはハバース管の周りに存在するコラーゲン線維が観察される。このハバース管の周りでセメント線に囲まれて存在するコラーゲン線維の集合組織全体を骨単位もしくはオステオンと呼んでいる(ここでは、オステオンと呼ぶことにする)。すなわち、文字通り皮質骨を形成する最小単位であるが、その直径は図に示したように、100～200  $\mu\text{m}$  である。

また、Fig.4.3(b)は、オステオン組織の外側に存在する、皮質骨の外層部となる層板組織である。図に見られるように、厚さ 100～150  $\mu\text{m}$  の層がオステオン組織まで数層存在する。この層も長いコラーゲン線維が骨軸方向に互いに交差しながら配列している複雑な組織である。

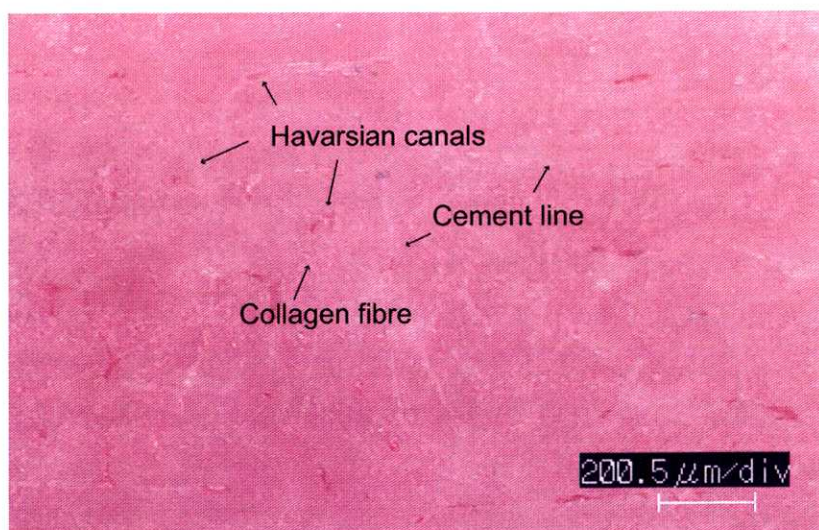
次に、Fig.4.4(a)は、多孔質組織でハバース管やオステオン組織が観察される個所の写真である。また、(b)は同じ多孔質骨の孔の分布状態を示す。Fig.4.4(a)(b)のような状態になると、組織の脆弱化を招いているのではないかと推察される。

#### 4.2.1.3 切削面、切削方向と切削状態の定義

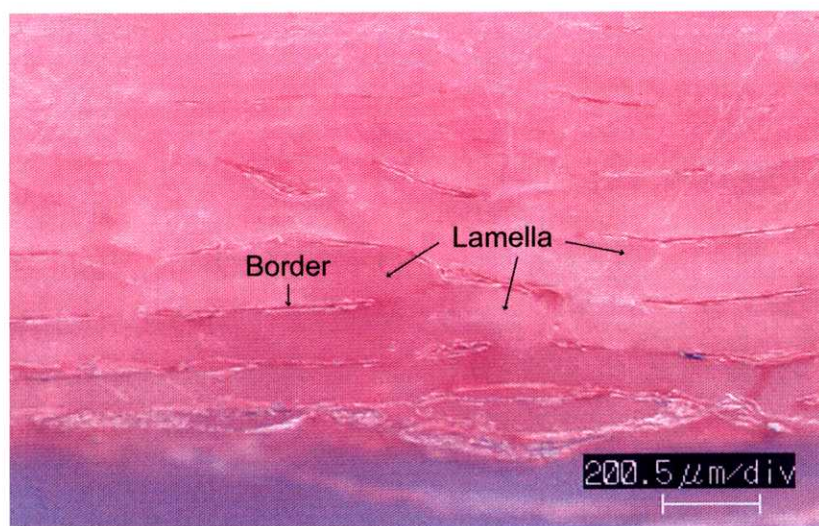
大腿骨の骨幹部から被削材を採取した方法を Fig.4.5 に示す。すなわち、骨幹部を輪切りにした後、骨組織の異方性と切削特性との関係を知るために、図に示すような切削面と切削方向、および、観察面を決定した。すなわち、骨幹部外表面に平行で骨軸に平行な面を A 面、骨軸方向を A 方向、それに直角な骨軸接線方向面を T 面、A 方向に直角な方向を T 方向とする。また、骨軸切断面(輪切り面)を C 面とし、骨軸に直角な骨幹部断面の半径方向を C 方向と定義して、被削材を採取した。

このように切削面、切削方向、観察面を定義すると組織の異方性との関係で6通りの切削モードが考えられるが、オステオンの構造上、幾何学的にみて同じモードとなる切削方向の切削抵抗にはほとんど差がないとの報告があるので [34]、本研究では、A 面を T 方向に切削し、観察面を C 面とする**タイプ T 切削 (Transverse cutting direction)**と、A 面を A 方向に切削し、観察面を T 面とする**タイプ P 切削 (Parallel cutting direction)**、および C 面を T 方向に切削し観察面を A 面とする**タイプ A 切削 (Across cutting direction)**の3通りを選択した。

この定義に関しては、既に第3章の Fig.3.12 でも述べた通りである。

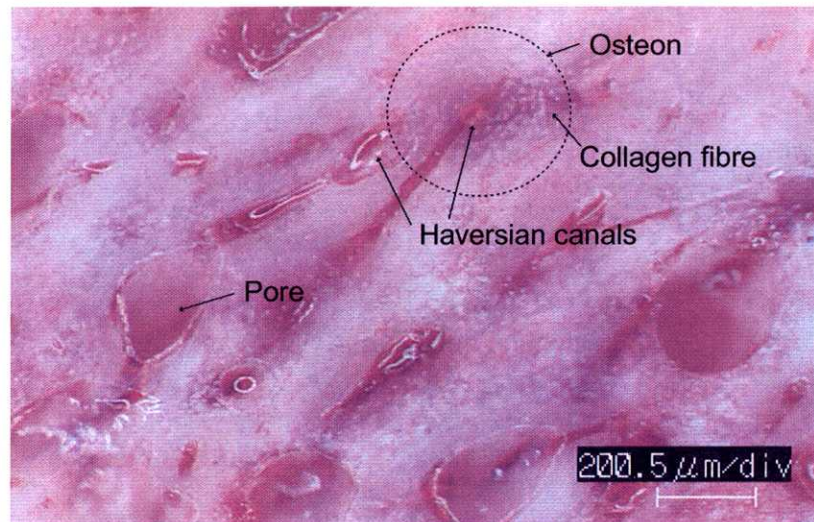


(a) Osteon

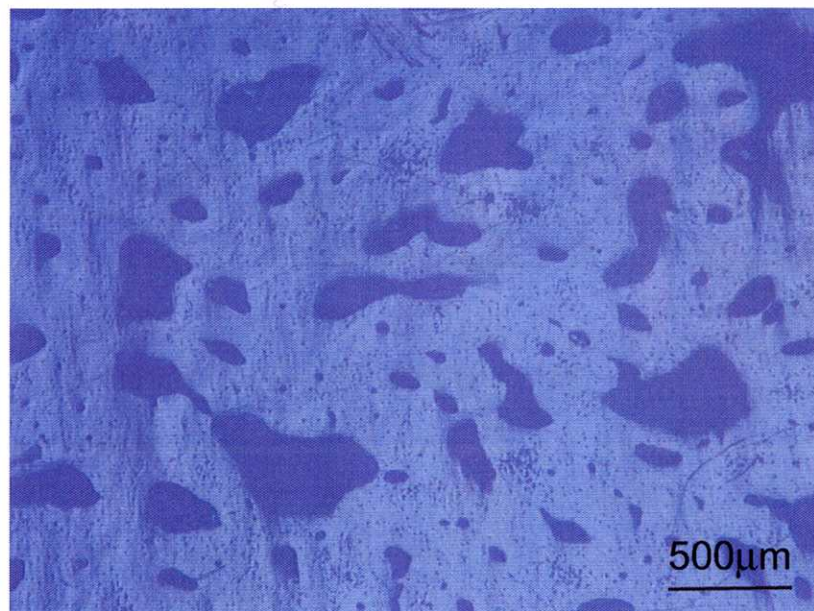


(b) Lamella

Fig.4.3 緻密質骨の顕微鏡写真



(a) Osteon



(b) Distribution of pore

Fig.4.4 多孔質骨の顕微鏡写真



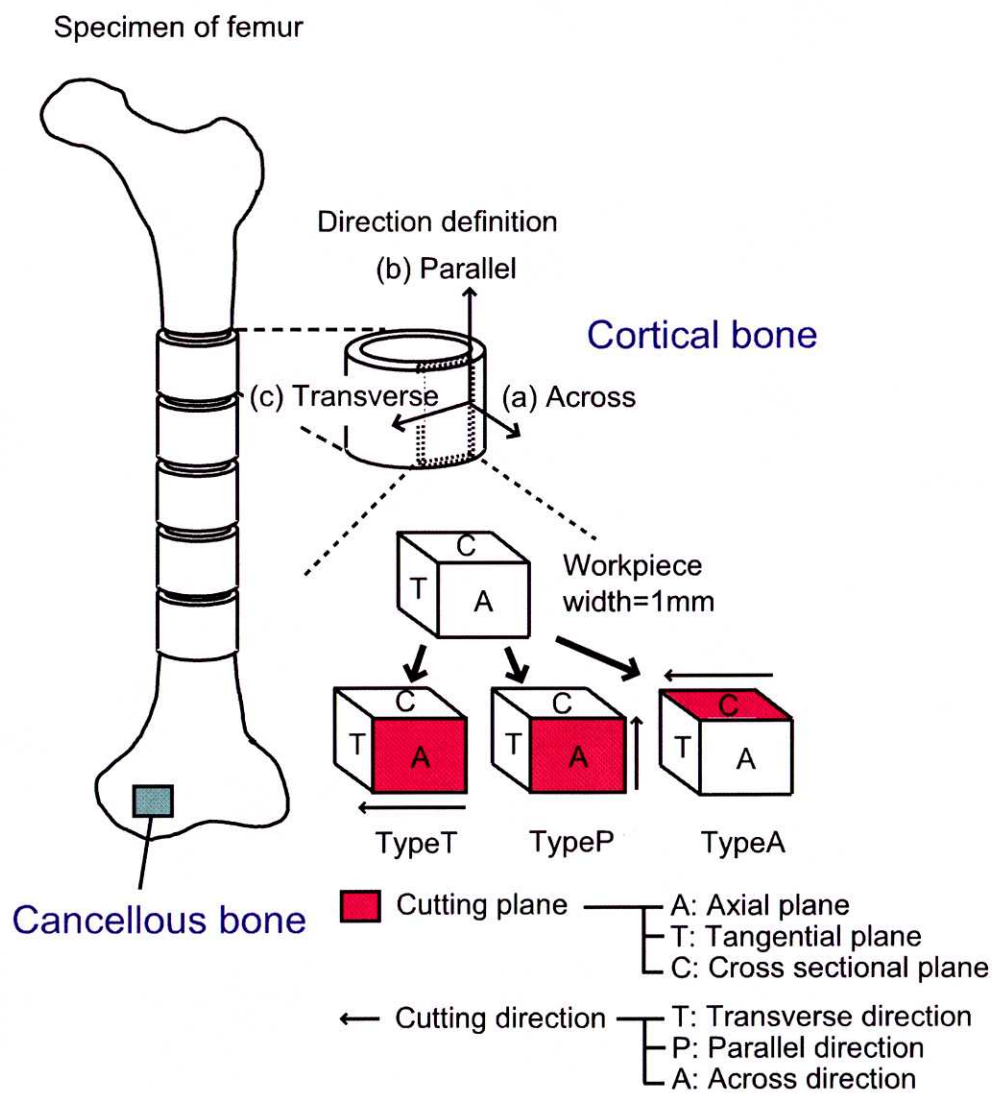


Fig.4.5 実験試料の採取方法と切削方位の定義

### 4.2.2 皮質骨緻密質骨と多孔質骨の切削挙動

ここでは、緻密質骨と多孔質骨を2種類のすくい角の工具で、2種類の切取り厚さをとったときの2次元切削挙動について概観する。いずれの切削も Fig.4.5 に示すタイプ T の切削形態で行った。

Fig.4.6 と Fig.4.7 はすくい角  $5^\circ$  の工具で乾燥骨と含水骨の緻密質骨を切削したときの切取り厚さによる切削挙動の比較である。第5章でも述べるように、乾燥骨では、切取り厚さが大きくなると切りくず生成は亀裂型になるが、Fig.4.6 で明らかのように、工具刃先前下方へ常に亀裂が先行発生し、途中でせん断面方向に向きを変えてブロック状の切りくずとなって排出される。したがって、この場合にはせん断面での単純なせん断破壊で切りくず生成となったとは考えにくい。

この場合の切削挙動を切削抵抗波形から考察してみると、切削抵抗が亀裂発生に対応して激しく変動していることが分かる。すなわち、切削が亀裂の発生にともなって断続的に行われたと理解できる。

これに対し含水骨の切削では、乾燥骨の場合のような切りくず生成時に明瞭な亀裂が観察されず、典型的なせん断形切りくずが生成されている。しかし、せん断面でのすべりが断続的に行われており、切削抵抗の変動を伴うことから考えて、せん断面に沿った亀裂の発生が考えられる。

ここで行ったタイプ T 切削は、コラーゲン線維束である円筒形のオステオン束を接線方向に切削したものである。したがって、切取り厚さが  $100\ \mu\text{m}$  にもなると、後述するように、オステオン内部よりも結合強度が低いとみられるセメント線近傍やハバース管部での破壊が亀裂型破壊に関与していると考えられる。このことは硬度測定からもある程度裏付けられる。すなわち、第3章の Fig.3.8 から分かるように、セメント線近傍の硬度 ( $\text{HV}=38\sim50$ ) がオステオン中心部の硬度 ( $\text{HV}=57\sim65$ ) よりも低い。このことからセメント線部の結合強度が低いと結論づけられる。

そして、4.2.5 節で述べるように、乾燥骨の場合、亀裂の間隔はセメント線とハバース管の間隔に対応する寸法であることは興味深い。この時、切削抵抗の変動も亀裂間隔に対応して変動している。

これに対して、Fig.4.7 に示す切取り厚さの小さな場合 ( $5\ \mu\text{m}$ ) には、乾燥骨でも含水骨でも連続的な流れ型のリボン状切りくずを生成する。もちろん、切取り厚さが数 $\sim 10\ \mu\text{m}$  付近では、切れ刃先端部の丸みの影響が無視できず、実質的にはすくい角が負の工具で削っていることになる。みかけのすくい角で単純に比較はできないが、切取り厚さが小さくなると、あるところから切りくずは連続流れ型の形態となることが確認できる。この時、切削抵抗波形を見ても切削抵抗の変動はほとんど

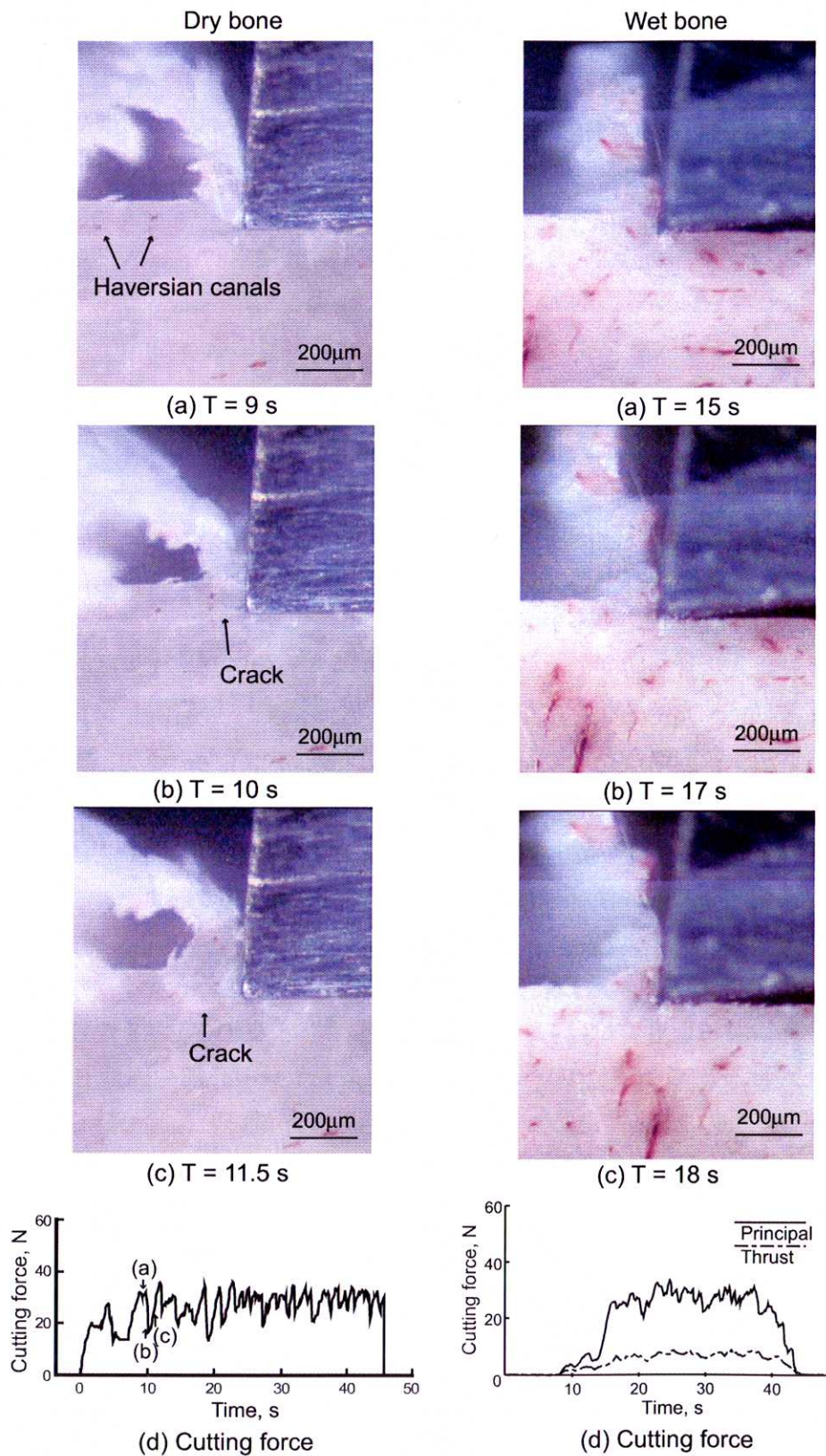


Fig.4.6 すくい角  $5^\circ$  の工具による乾燥骨と含水骨の緻密皮質骨切削: 切り厚さ  $100\ \mu\text{m}$   
 Cutting type: Type T, Rake angle:  $5\ \text{deg.}$ , Depth of cut:  $100\ \mu\text{m}$ , T: time since tool started



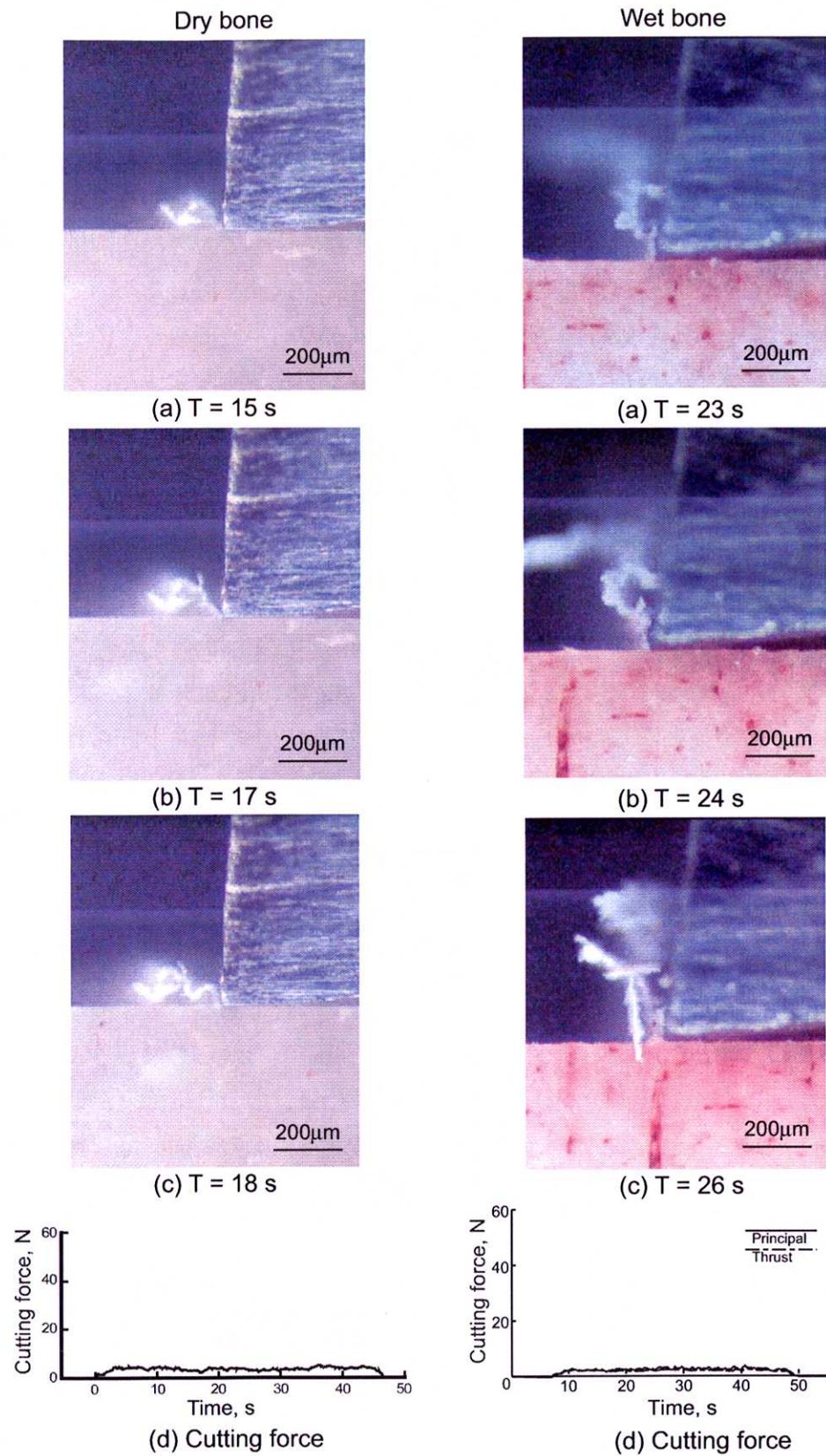


Fig.4.7 すくい角  $5^\circ$  の工具による乾燥骨と含水骨の緻密皮質骨切削: 切取り厚さ  $5\ \mu\text{m}$   
 Cutting type: Type T, Rake angle:  $5\ \text{deg.}$ , Depth of cut:  $5\ \mu\text{m}$ , T: time since tool started



みられない。

ここで、Fig.4.6 や Fig.4.7 に比べて工具すくい角を大きくした場合の切削挙動を Fig.4.8 と Fig.4.9 に示す。切取り厚さの大小にかかわらず、観察される切削挙動と切りくず生成は、基本的に Fig.4.6 と Fig.4.7 の場合と大差ない。ただし、含水骨ではせん断形の切りくずが生成されずに、微小な亀裂の集積した切りくずが観察される。そのために、乾燥骨における切削抵抗の変動に比べて大きな切削抵抗変動は発生しない。これは骨自体が含有水分によって材質の延性を増したためであろうと考えられる。ここで、Fig.4.8 の切削抵抗が Fig.4.6 の約半分であるということは、工具すくい角が大きく、切れ味が増した効果が出て削りやすくなったと考えられる。

一方、多孔質骨の場合にはどのような切削挙動が観察されるのであろうか。Fig.4.10 と Fig.4.11 はすくい角の小さな工具で切取り厚さを変えて乾燥多孔質骨を削ったときの切削挙動を示す。

Fig.4.10 に示すように、Fig.4.10(a) の時点では亀裂はまだ発生していないが、A の個所に組織の欠陥部があり、次の Fig.4.10(b) の段階になるとそこに亀裂が発生する。この部分の組織は左下に配向しており、亀裂は組織の脆弱な配向方向、すなわち、図の左下方へ侵入していく。その結果、Fig.4.10(c) に示すように、工具の進行によって大規模に深く侵入した亀裂部から被削材は上に持ち上げられるように排出される。そして、図でも分かるように、そのようなブロック状の切りくずが排出された後には大きな孔が残ることになる。

切削抵抗波形は、このような切削挙動をよく示している。すなわち、大規模な亀裂が発生し、その部分からブロック状の切りくずが排出され、孔になると、切削抵抗は急激に減少する。そして、このような切削挙動を繰り返すことになる。

Fig.4.11 は Fig.4.10 の切取り厚さを小さくした場合である。大規模な亀裂で生じた孔のところから切削が始まっているが、切削抵抗波形からも分かるように、切取り厚さが小さくて切削抵抗が低いので、この多孔質骨のように強度が低下した骨でも、切削によって亀裂は発生しない。すなわち、骨組織の表面に亀裂状の損傷を与えずに切削しているということになる。そして、切りくずも亀裂型ではなく、どちらかという流れ型の切りくずになっている。もし亀裂型切りくず生成ならば、Fig.4.10 のように切削抵抗波形は大きく変動するはずであるが、そういう意味での切削抵抗変動はみられない。

次に、Fig.4.12 と Fig.4.13 は乾燥多孔質骨をすくい角  $35^\circ$  の工具で削った時の切削挙動である。切取り厚さが大きく  $100\ \mu\text{m}$  のときの切削挙動を見た時、すくい角の小さな場合の Fig.4.10 に比べて、様子が異なる。すくい角が小さい時には、工具先端で亀裂が発生し、その亀裂が組織の脆弱な個所で組織の配向方向に沿って、

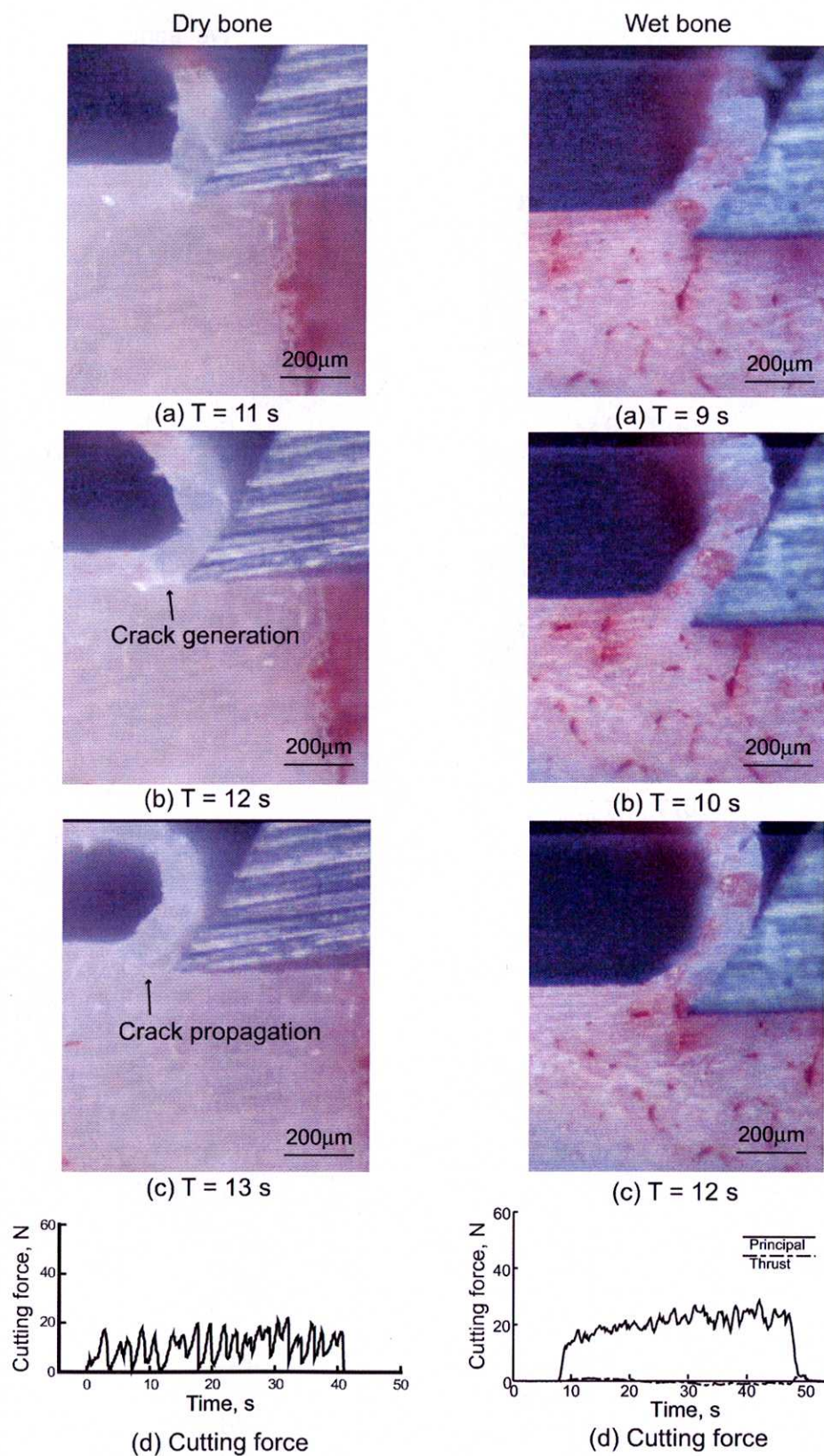


Fig.4.8 すくい角  $35^\circ$  の工具による乾燥骨と含水骨の緻密皮質骨切削: 切取り厚さ  $100\ \mu\text{m}$   
 Cutting type: Type T, Rake angle:  $35\ \text{deg.}$ , Depth of cut:  $100\ \mu\text{m}$ , T: time since tool motion started



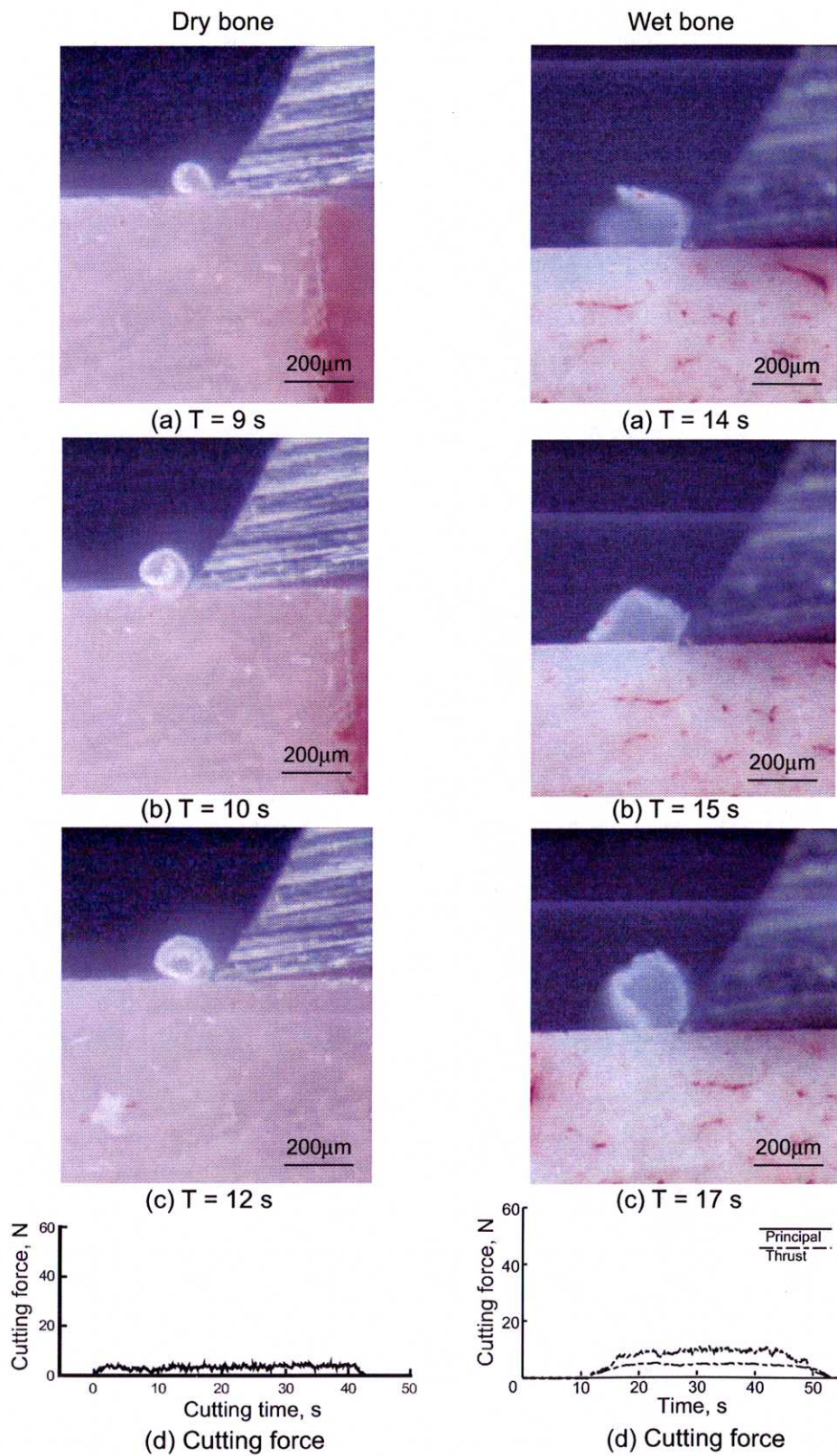
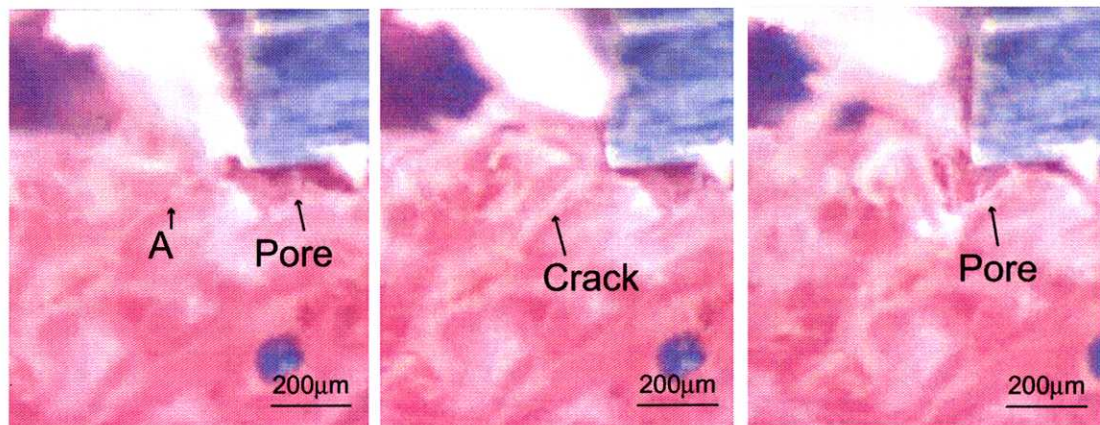


Fig.4.9 すくい角  $35^\circ$  の工具による乾燥骨と含水骨の緻密皮質骨切削: 切取り厚さ  $5\ \mu\text{m}$   
 Cutting type: Type T, Rake angle:  $35\ \text{deg.}$ , Depth of cut:  $5\ \mu\text{m}$ , T: time since tool motion  
 started



(a) T = 23 s

(b) T = 24 s

(c) T = 25 s

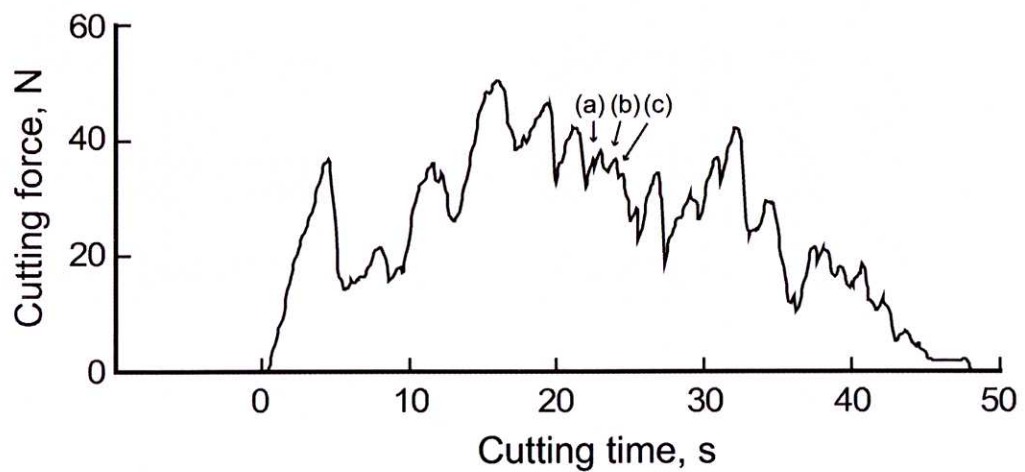


Fig.4.10 すくい角  $5^\circ$  の工具による多孔皮質骨切削において切込み量が多い場合: 切取り厚さ  $100 \mu\text{m}$   
 Cutting type: Type T, Rake angle:  $5 \text{ deg.}$ , Depth of cut:  $100 \mu\text{m}$ , T: time since tool motion started



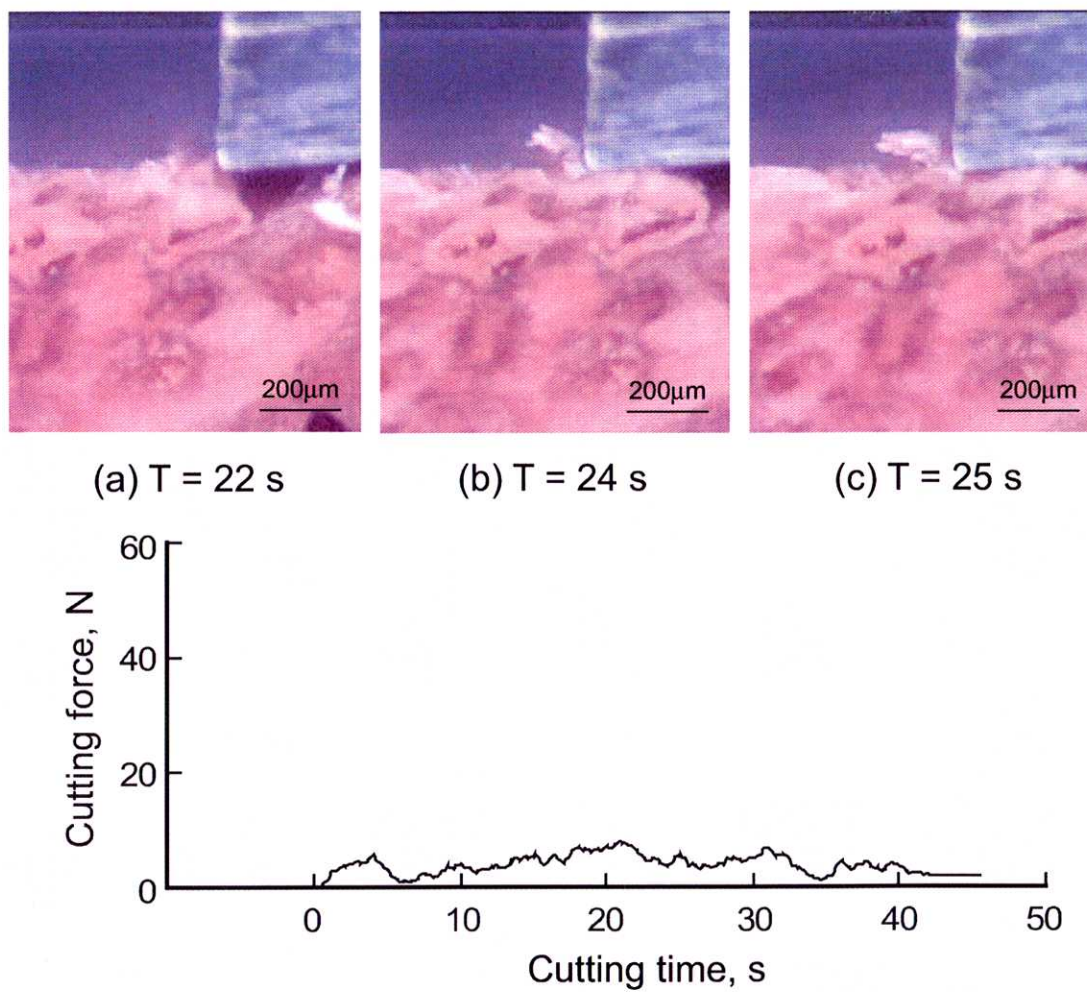


Fig.4.11 すくい角  $5^\circ$  の工具による多孔皮質骨切削において切込み量が小さい場合: 切取り厚さ  $5 \mu\text{m}$

い場合: 切取り厚さ  $5 \mu\text{m}$

Cutting type: Type T, Rake angle:  $5 \text{ deg.}$ , Depth of cut:  $5 \mu\text{m}$ , T: time since tool motion started

被削材内部へ深く侵入したが、すくい角を大きくすると Fig.4.12 の (a)(b)(c) に示す切削過程で分かるように、工具刃先端で切削方向に平行に亀裂が発生し進行する。そして、亀裂は被削材内部へ侵入することなく、やがて左上方向、すなわち、せん断面方向に向きを変えて、せん断形に近いブロック状の切りくずを生成し排出されることになる。

Fig.4.12 から分かるように、この間の切りくずは亀裂に支配されて生成している。したがって、発生した一つの亀裂が進展し、表面に達するまでの間にブロックが工具すくい面上を次々と上に移動していくのだが、切削抵抗波形上でもこの挙動の特徴がよく理解される。すなわち、一つの亀裂発生によって一つのブロックが生成されるごとに切削抵抗は大きく変動する。

これに対して、Fig.4.13 のように切取り厚さを小さくすると、組織が切削方向に対して鋭角に配向する切削状態でもなんの損傷も与えずに切削が行われる。これは工具すくい角が大きくなって、切れ刃の楔角が小さくなったために切れ味がよくなったと理解することができる [59][60]。

また、Fig.4.13 の場合には、Fig.4.11 の場合よりも切りくず生成はより延性的で流れ型になっている。したがって、このことから考えると、すくい角が大きい工具で小さな切取り厚さになるほど、切削挙動は多孔質、緻密質というような骨組織に左右されにくくなるのが分かる。

切削抵抗波形は Fig.4.11 の場合と同様に、切削面の粗さに対応して切削抵抗が変動していると考えられる。切削抵抗が非常に低いということは、この多孔質骨の強度、特にせん断強度が組織変質のために低くなったことを意味している。ここで、各種の皮質骨材質と工具すくい角をパラメータとしたときの、切取り厚さと比切削抵抗の関係を Fig.4.14(a)(b) に示す。この両者の関係は対数グラフ上で、近似的に直線関係で示される。

Fig.4.14 において、含水皮質骨は乾燥骨よりも比切削抵抗が大きい。これは、乾燥骨の場合に亀裂発生による切削抵抗の低下がその原因となっていること、新家ら [52][53] が、乾燥骨と含水骨の破壊強度を比較して、水分を含むことによる靱性の増大により含水骨の方が破壊強度が高いことを指摘していることと定性的に一致する。

また、切取り厚さが大きくなると、後述するように、緻密質骨ではハバース管やセメント線のような不連続組織の影響で、Fig.4.14 に示すように切削抵抗は大きく変動する。

Fig.4.14 によると、多孔質骨ではすくい角の影響が小さいが、緻密質骨では、すくい角が大きくなると比切削抵抗は大きく減少することから、すくい角の大きい工具は切れ味が良いことが考えられる。したがって、工具寿命を問題にしない人工関

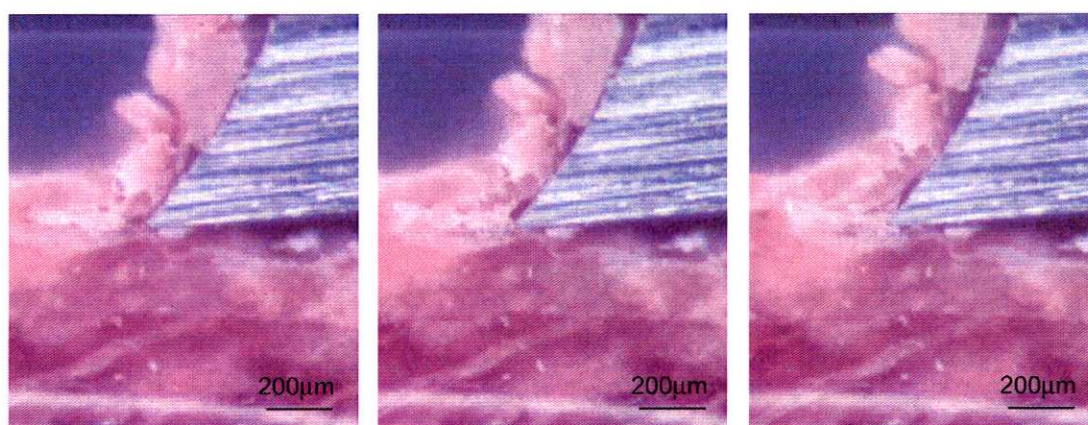
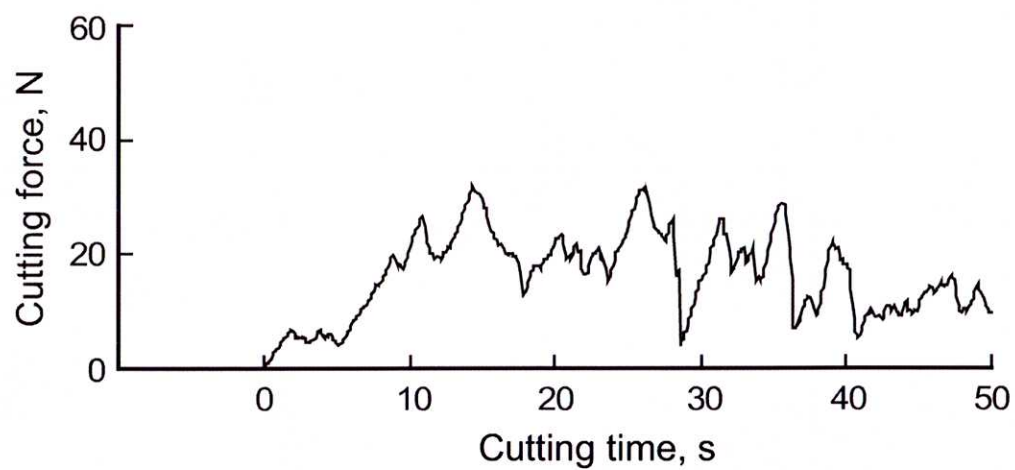
(a)  $T = 22 \text{ s}$ (b)  $T = 22.5 \text{ s}$ (c)  $T = 23 \text{ s}$ 

Fig.4.12 すくい角  $35^\circ$  の工具による多孔皮質骨切削において切込み量が大  
きい場合: 切取り厚さ  $100 \mu\text{m}$

Cutting type: Type T, Rake angle:  $35 \text{ deg.}$ , Depth of cut:  $100 \mu\text{m}$ , T: time since tool motion  
started



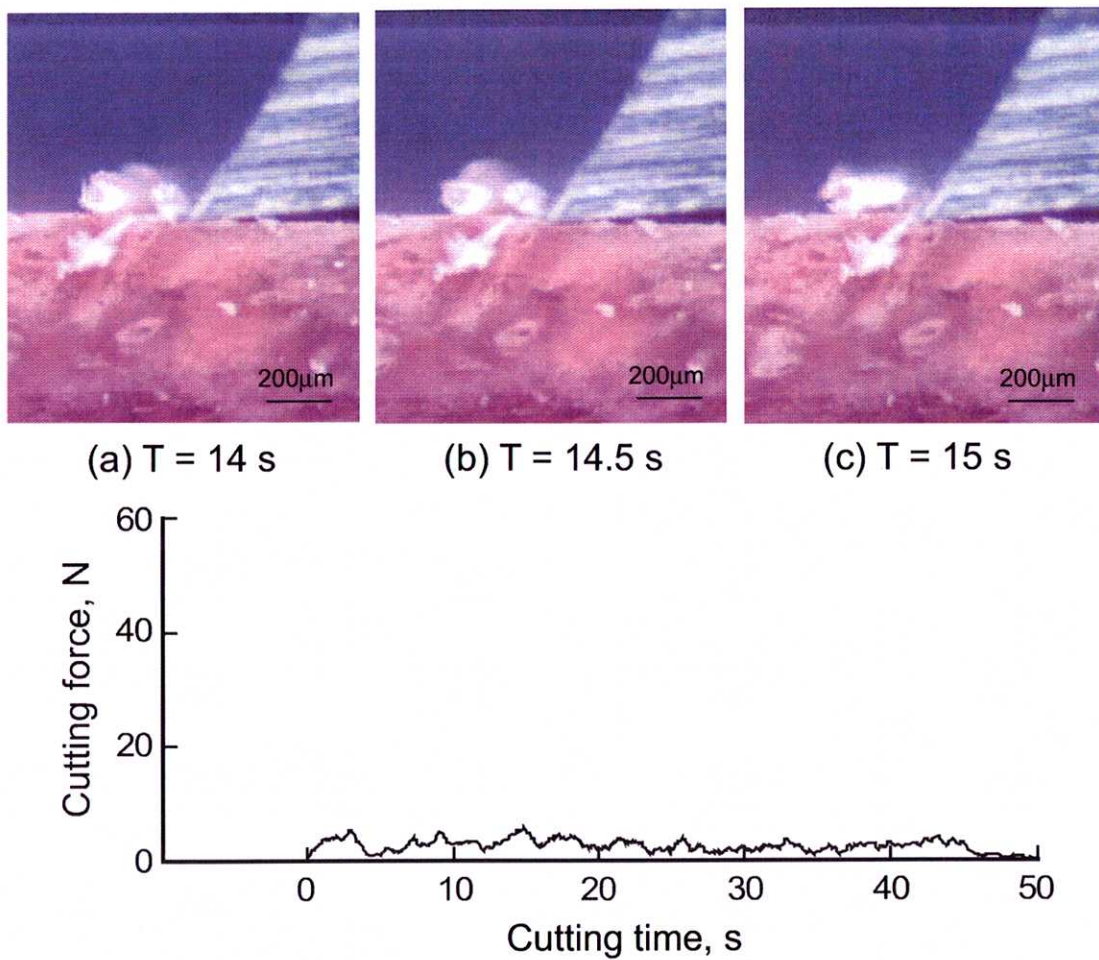


Fig.4.13 すくい角  $35^\circ$  の工具による多孔皮質骨切削において切込み量が小さい場合: 切取り厚さ  $5 \mu\text{m}$   
Cutting type: Type T, Rake angle:  $35 \text{ deg.}$ , Depth of cut:  $5 \mu\text{m}$ , T: time since tool motion started

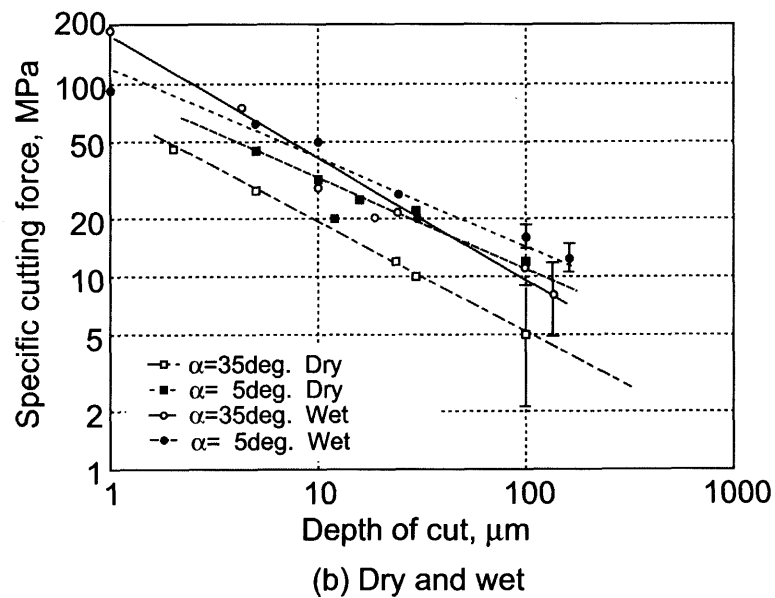
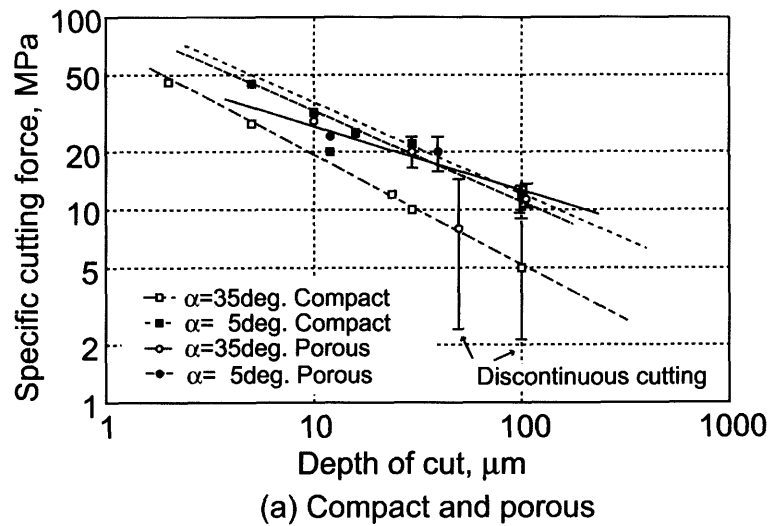


Fig.4.14 緻密質骨と多孔質骨および乾燥骨と含水骨における比切削抵抗と切取り厚さの関係

Cutting type: Type T, Cutting speed:  $125\mu\text{m/sec}$ , Cutting tool: HSS

節手術における骨切削では、人体に対する負担および侵襲性を少なくするために、すくい角が正に大きな工具を使用することが推奨される。

一方、多孔質骨では、脆弱な組織的欠陥のために、切削抵抗の変動が著しく、すくい角の影響がその中に隠れてしまう。そのことから、工具すくい角の切削状態に関与する割合は小さいと考えられる。しかし、切取り厚さが大きくなると、疎な組織欠陥での大規模破壊のために、切削抵抗は図に示すように大きく変動する。

### 4.2.3 組織の配向方向と切削形態

緻密質骨とは異なり多孔質骨の場合には、前項でも述べたように、組織構造が疎になり、しかも変質が偏って生ずるために、どちらかの方向に顕著な組織配向性を示すことが多い。そのために、工具が組織配向に対してどの方向に切削するかによって、切削形態が大きく異なってくることが考えられる。

この組織配向という問題は多孔質骨特有の現象であり、緻密質骨で問題とする組織異方性とは異なった問題であるので、別問題としてここで論ずることとする。

Fig.4.15 は組織が切削方向に約  $30^\circ$  傾いて配向している場合である。Fig.4.15(a) で分かるように、刃先で孔や組織の欠陥部に亀裂が発生し、その亀裂は Fig.4.15(b) に示すように、刃先前方下に大規模な破壊をもたらす。この大規模破壊部はほとんど塑性変形することなく、大きなブロック状の切りくずを形成する。そして、この大規模破壊した部分が切りくずとして離脱した後は、Fig.4.15(c) のように孔が残ることになる。このとき孔が生成残留した段階で、明らかに設定切取り厚さ以上の過剰切削となっている。この図の場合には、設定切取り厚さの約3倍の過剰切削となっていることが分かる。

この間の現象は切削抵抗波形上にも明瞭に出てくる。すなわち、切削抵抗波形上で、Fig.4.15(a) 点にて亀裂が発生したために、切削抵抗はいったん低下する。そして、引き続き Fig.4.15(b) 点で切れ刃が被削材を前方に押し上げているために切削抵抗は上昇し、Fig.4.15(c) 点で切りくずとして離脱した瞬間に切削抵抗は過渡的に低下する。

ただし、切削抵抗波形からすると、波の山形ピーク部がさほどに鋭く尖ってはいないことが分かる。これは、発生した亀裂が組織欠陥部を掘り上げやすく、その部分の被削材が切りくずとして離脱するまでにしばらく刃先で滞留するため、比較的なだらかなピークとなっていると推測される。

切削抵抗波形から分かるように、この多孔質骨の切削において、組織配向角が切

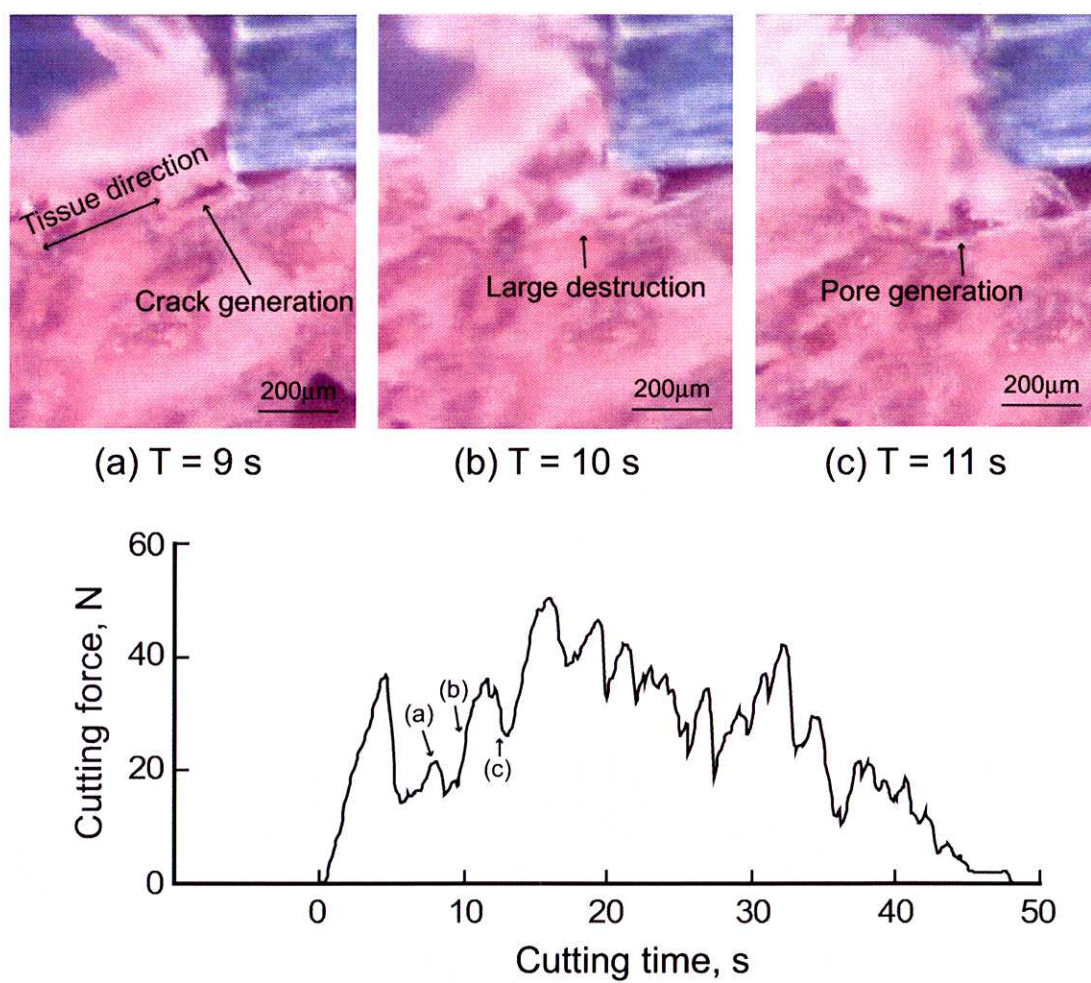


Fig.4.15 切削方向に対して組織配向角が鋭角である例  
 Cutting type: Type T, Rake angle: 5 deg., Depth of cut: 100 μm, T: time since tool motion started

削方向に対して鋭角である場合には、この切削現象を繰り返すことになる。

これに対して Fig.4.16 は、工具進行方向に対して鈍角に傾いた配向を示す組織を切削する場合である。この場合には、切削方向に対して配向角が鋭角になる場合とは異なり、配向した組織を上から工具で押さえ込むような切削形態となる。

このような組織配向角が切削方向に対して鈍角である切削では、Fig.4.16(a) に示す亀裂状の組織欠陥部に工具が近づくと、Fig.4.16(b) に示すように、工具刃先から前下方に向かって亀裂がその組織欠陥部に向かって発生するが、組織欠陥の配向方向がこの亀裂の進行方向をせき止める形となり亀裂進行を止める。その結果、亀裂はその向きを組織欠陥方向に変えて進行すると考えられる。その後、亀裂は、Fig.4.16(c) に示すように左上方向に向きを変えて進行する。そして、この Fig.4.16(b) から Fig.4.16(c) の間で切りくずが生成されるが、組織配向角が切削方向に対して鋭角になる切削の場合のように、大規模破壊を生じないため、過剰切削とはならない。

切削抵抗波形をみると、組織配向角が切削方向に対して鋭角である場合とは様子が異なる。配向角が鋭角である場合の組織よりも緻密度が高いことも要因となり、亀裂発生時に鋭いピークを伴った切削抵抗変動となる。すなわち、亀裂の発生により切削抵抗は急減し、亀裂が被削材表面に達すると切削抵抗は最低値のところまで下落する。そして、再び工具切れ刃が被削材に接触すると、切削抵抗はピーク値に近づくことになる。すなわち、このような組織では、工具の進行とともに (a) から (b)(c) へのプロセスを繰り返すのが通例である。

これらの切削方向に対する配向角が鈍角や鋭角である組織の切削は、我々が木材を削るときに日常的に経験することと変わらず、切削方向に対して配向角が鋭角である切削を行うと、場合によっては切削表面に大きなダメージを与えることも考えられる。

この組織配向の影響をできるだけ受けずに切削するには、(1)Fig.4.13 に示すように、切取り厚さをできるだけ小さくすること (エンドミル切削では、一刃送り量をできるだけ減ずること)、(2) 工具すくい角をできるだけ正に大きくとること、(3) 切削速度をできるだけ高速にすることなどに留意すべきである。このうち、(2) の工具すくい角を大きくとると組織配向の影響を受けない例は Fig.4.12 に示す通りである。切取り厚さが  $100\ \mu\text{m}$  もあるにもかかわらず、すくい角が大きいために、刃先での亀裂進行方向が前下方に向かず、刃先前方に進行し、過切削となる大規模破壊が刃先付近に発生しなくなる。

また、すくい角を大きくとると、Fig.4.17 に示すように、大きな孔を通過する場合でも、大規模な亀裂と破壊は発生せず、切削面に損傷を残さない。



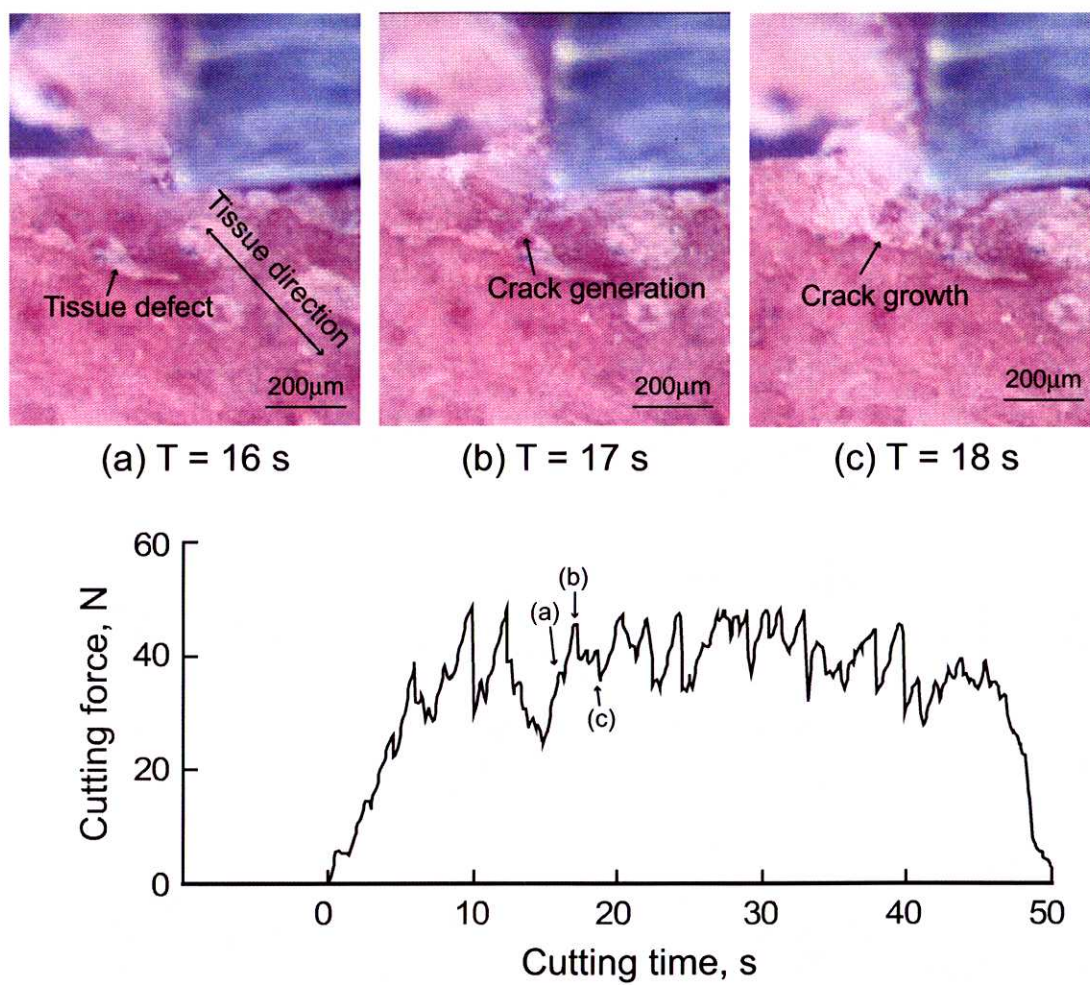


Fig.4.16 切削方向に対して組織配向角が鈍角である例  
 Cutting type: Type T, Rake angle: 5 deg., Depth of cut: 100 μm, T: time since tool motion started

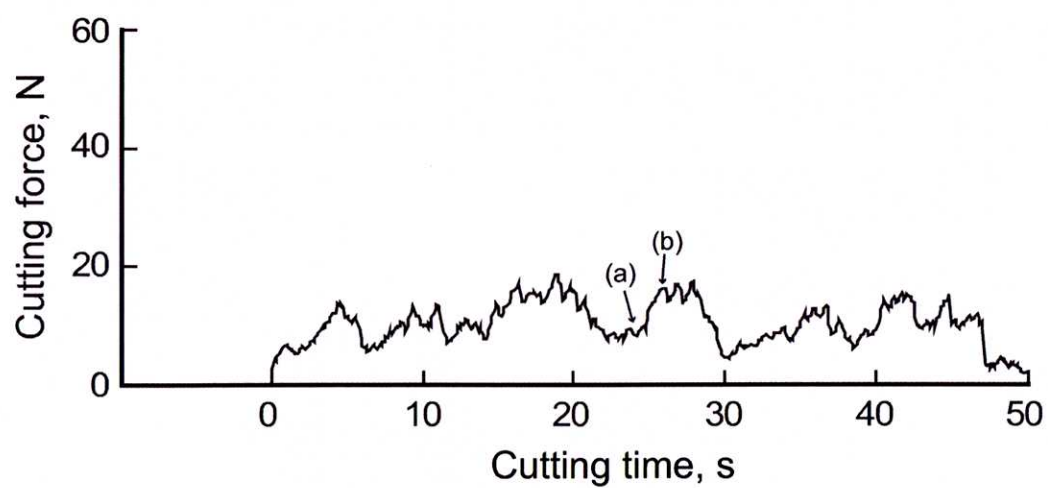
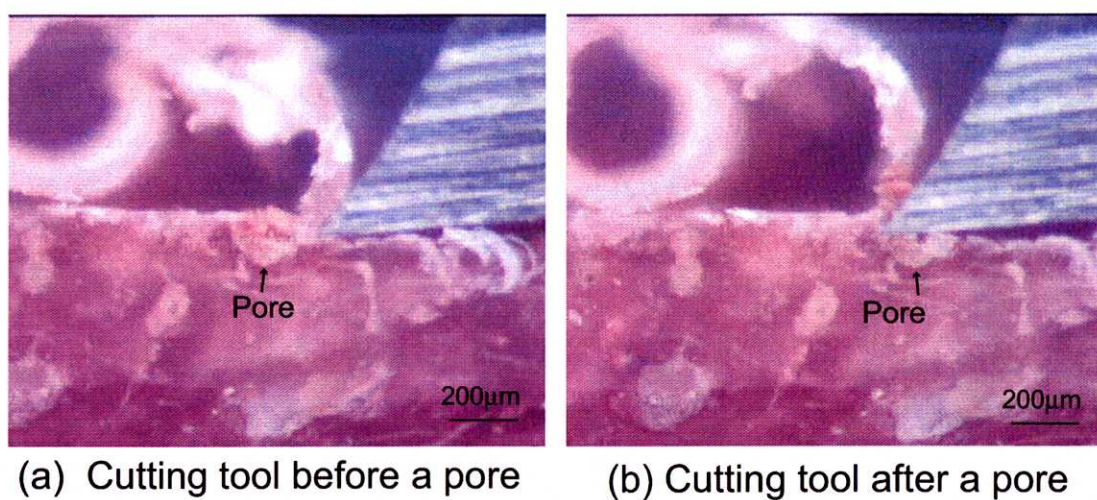


Fig.4.17 孔前後の切削状態  
Porous cortical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 40  $\mu\text{m}$



#### 4.2.4 切りくず生成の流れ型－亀裂型境界

切りくず生成が流れ型か亀裂型かの境界を論ずるに先立って、実際のエンドミル切削にみられる切削抵抗波形の中で、どのような切削挙動が見られるかを前もって検証することが、切りくず生成形態を論ずる上で重要な意味を持つと考えられる。

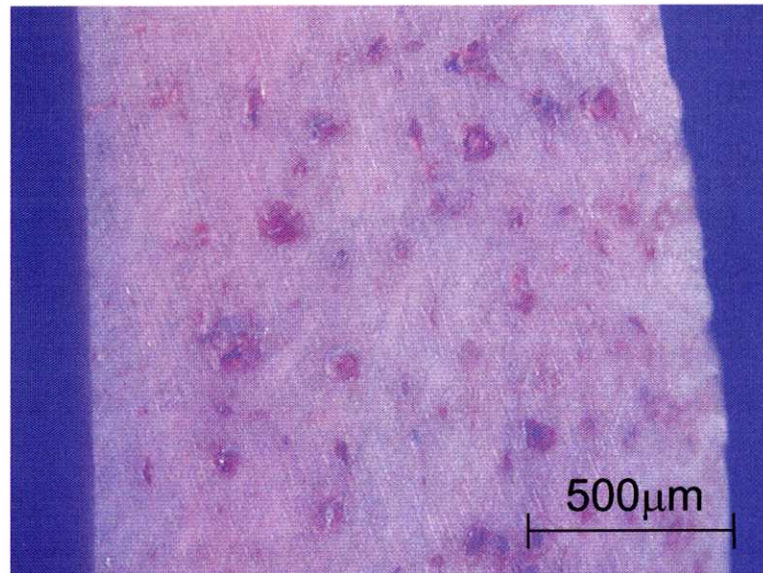
Fig.4.18 は密度の違う2種類の乾燥皮質骨の表面組織であり、Fig.4.19 はそれらをエンドミル切削したときの工具1回転分の切削抵抗波形である。Fig.4.18 で分かるように、密度の高いものは非常に緻密組織であるが、密度の低いものは多孔質になっている。この組織の違いが密度に影響していると考えられる。

Fig.4.19 でこの両者の切削抵抗を比較してみると、(a)の密度が低い場合には、切れ刃が被削材に接触してから切りくず厚さを増すにつれて切削抵抗が大きく変動している。

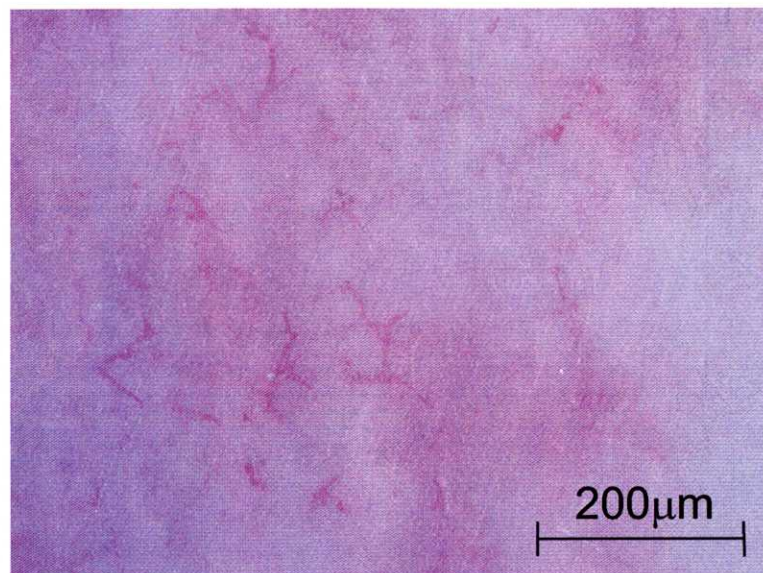
最初に大きな切削抵抗変動があるのは切削開始後約0.01 s後で、それまでに切れ刃は被削材上の工具軌跡上を約3 mm進んでおり、そのときの切りくず厚さは30  $\mu\text{m}$ に近い値である。ということは、そこまでは比較的定常的に切削が行われたと考えることができる。このことから、切削開始後、切りくず厚さの増加とともに、孔の影響と脆弱化した組織の影響で被削材に発生した亀裂によって、30  $\mu\text{m}$ 近くの切りくず厚さになった時に亀裂型の破壊挙動を示したと理解される。そして、切削抵抗がピークに達した後、切りくずの離脱のために切削抵抗は急激に減少する。

これに対して、密度の高い被削材の場合においても、Fig.4.19(b)に示すように、切削時間にして0.01 sec、切りくず厚さが24  $\mu\text{m}$ になって亀裂発生に起因したと考えられる大きな切削抵抗変動がみられる。したがって、この切りくず厚さ25～30  $\mu\text{m}$ あたりが切りくず生成の流れ型－亀裂型を決める重要なポイントになるようである。その後、1～2回の大きな切削抵抗変動があった後、切削抵抗はピークに達し切りくずが離脱する。しかしながら、その切削抵抗変動が直ちに亀裂発生に直結しているかどうかはここでは判断できない。これについては後述の2次元切削における切りくず生成の観察と対応させて検討しなければならない。というのは、この切削抵抗変動と切りくず内部に発生する亀裂間隔の一致性を検討する必要があるからである。

微小切削を行う場合には、工具刃先丸みが問題となるために、丸み半径が無視できない領域では、実質的なすくい角を減ずることとなる。そこで、本実験で用いた工具に関して切除実験後に観察した刃先丸み半径をFig.4.20に示す。各工具における刃先丸みは5  $\mu\text{m}$ 以下であり、切取り厚さが10  $\mu\text{m}$ 以下である場合には、刃先丸みの影響を考慮する必要があると考えられる。特に、すくい角が大きい工具で



(a) Density  $\rho=1.87\text{g/cm}^3$



(b) Density  $\rho=1.96\text{g/cm}^3$

Fig.4.18 見かけ密度による骨表面の相違

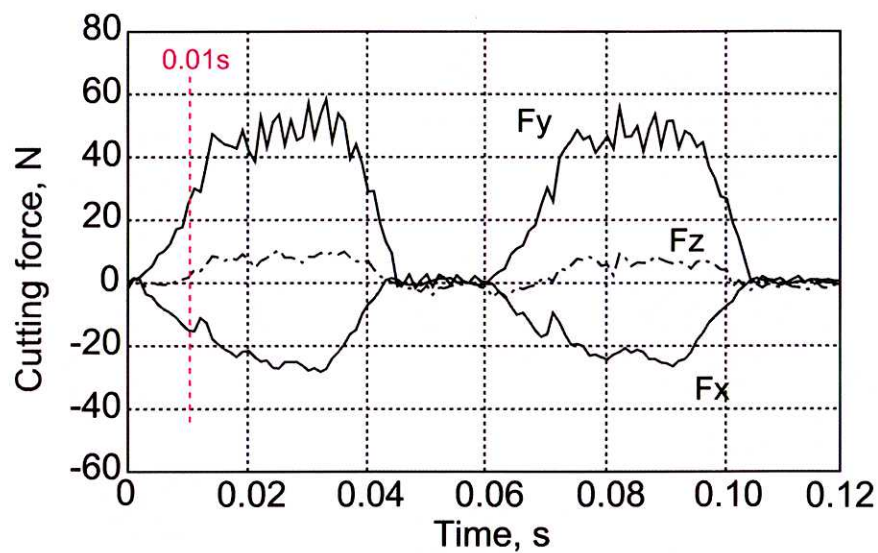
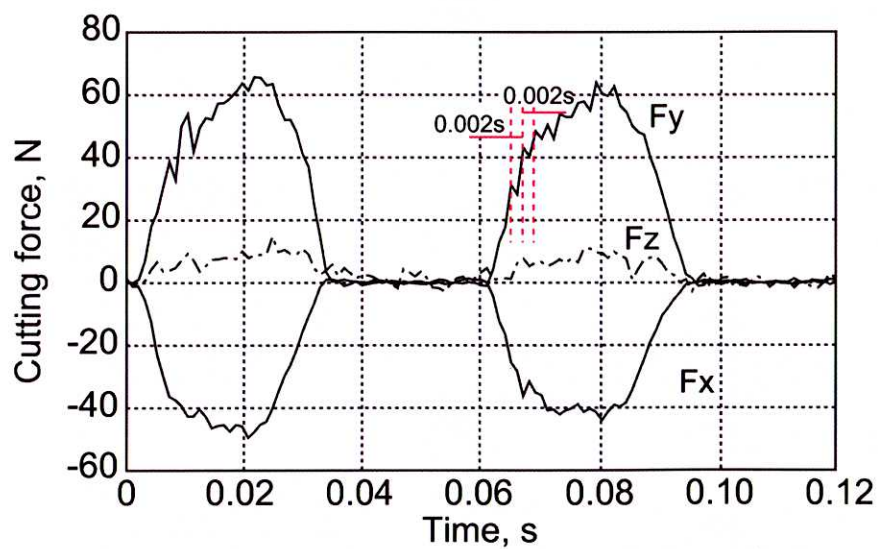
(a) Density:  $1.87\text{g/cm}^3$ (b) Density:  $1.96\text{g/cm}^3$ 

Fig.4.19 緻密骨の切削抵抗波形

Compact cortical bone, Cutting type: Type T, Cutting speed:  $15.7\text{m/min}$ ,  
 Feed per tooth:  $0.06\text{mm/tooth}$ , Axial depth of cut:  $10\text{mm}$ ,  
 Radial depth of cut:  $1\text{mm}$ , Cutting tool: HSS,  $\phi 10$ , 2 flutes, square endmill,  
 rake angle:  $14\text{ deg.}$ , helix angle:  $30\text{ deg.}$ , Up cutting

は、ダイヤモンド、高速度鋼ともに磨耗がみられ、骨加工の場合でもすくい角を大きくとると、磨耗しやすくなると考えられる。

ところで、前項までに種々の切削環境や切削条件における 2 次元切削を観察してきたが、被削材質や工具の問題から、切りくず生成の流れ型—亀裂型境界を明瞭に区別することができるような切削状態を見出すことは困難であり、2 次元切削で唯一観察できたのは、すくい角の大きな工具で密度の高い緻密質骨を削る場合だけであった。その理由は次のようになる。

多孔質骨は組織が疎であり、孔も存在して切りくずそのものの正確な形状が観察できない。また、ここで用いたすくい角の小さい工具は、切取り厚さの小さいときに切れ刃丸みの影響が無視できなくなり、切りくず生成形態を評価することは適当ではない。そのためには、できるだけ切れ刃丸みの小さな工具の使用が望ましい。このような観点に立って切削環境を選択してみると、すくい角  $35^\circ$  の工具を使用し、2 次元切削で緻密質骨を削ることが適している。なお、ここでの他切削条件は、切削速度  $125 \mu\text{m}/\text{sec}$  で、タイプ T 切削とする。

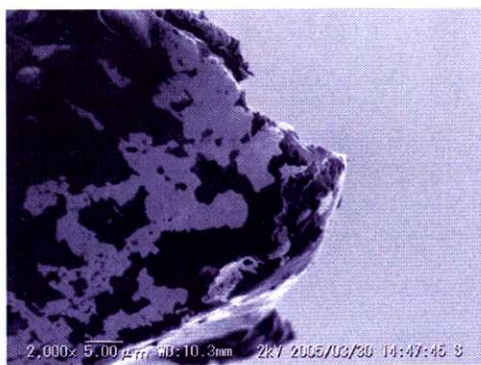
以上を踏まえて、乾燥緻密質骨を切取り厚さが  $5\sim 100 \mu\text{m}$  の範囲で、すくい角  $35^\circ$  の工具を用いて 2 次元切削したときの顕微鏡写真を Fig.4.21 に示す。この写真でも分かるように、切取り厚さが  $30 \mu\text{m}$  まではほぼ連続的な流れ型の切りくずを生成している。ところが、切取り厚さが  $40 \mu\text{m}$  になると、切りくずの中に明らかに亀裂が観察される。

今、この亀裂間隔を Fig.4.19 の切削抵抗波形でみられた変動と比較する。ここでは、密度の高い被削材の切削抵抗変動の場合で考察する。Fig.4.19(b) の二つ目の波形で調べてみると、1 回目の変動間隔は、約  $0.002 \text{ sec}$  後で、切れ刃が工具接触軌跡上を約  $0.5 \text{ mm}$  進んだ点であり、2 回目の変動間隔も約  $0.002 \text{ sec}$  である。したがって、もしこの変動が亀裂発生の直接的な原因であるとするならば、切りくず内部での亀裂発生間隔は約  $0.5 \text{ mm}$  になる。

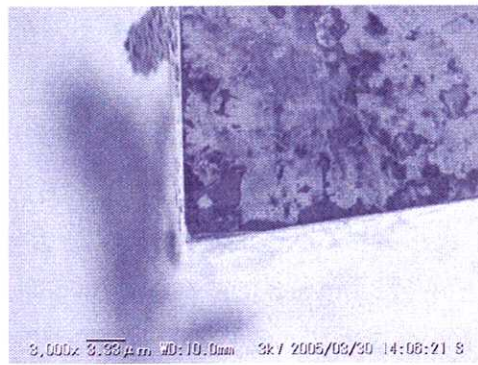
ところが、Fig.4.22 に示すように、乾燥骨の亀裂間隔は切取り厚さのほぼ 2 倍の値をとり、切取り厚さ  $30\sim 100 \mu\text{m}$  の間で亀裂間隔は  $50\sim 200 \mu\text{m}$  となる。すなわち、実際の 2 次元切削で測定された亀裂間隔は、エンドミル切削での大きな切削抵抗変動から求めた亀裂間隔の  $1/10\sim 1/2$  である。ということは、大きな切削抵抗変動だけではなく、小さな切削抵抗変動のときにも亀裂が発生しているということになる。すなわち、回転するエンドミル工具の切れ刃が被削材に接触している  $50\sim 200 \mu\text{m}$  の間隔ごとに亀裂が発生していることになる。これに対して、含水骨の場合には、切取り厚さ  $100 \mu\text{m}$  でも測定できるような亀裂間隔は認められない。

その一方で、Fig.4.21 や Fig.4.22 によれば、乾燥骨の切りくず内の亀裂間隔と切取り厚さが概ね対応していることから、切取り厚さが  $5 \mu\text{m}$  の場合にも、一見完全





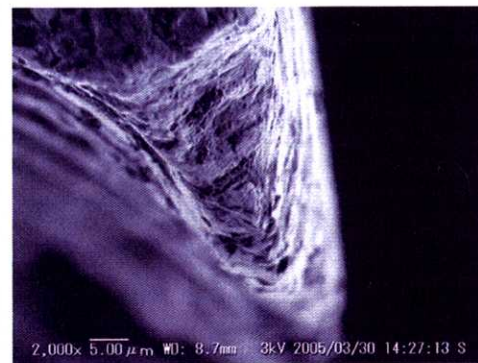
(a) Endmill, HSS, rake angle: 14deg.



(b) Diamond tool, rake angle: 10deg.



(c) Diamond tool, rake angle: 30deg.



(d) HSS tool, rake angle: 35deg.

Fig.4.20 実験に使用した工具の刃先丸み

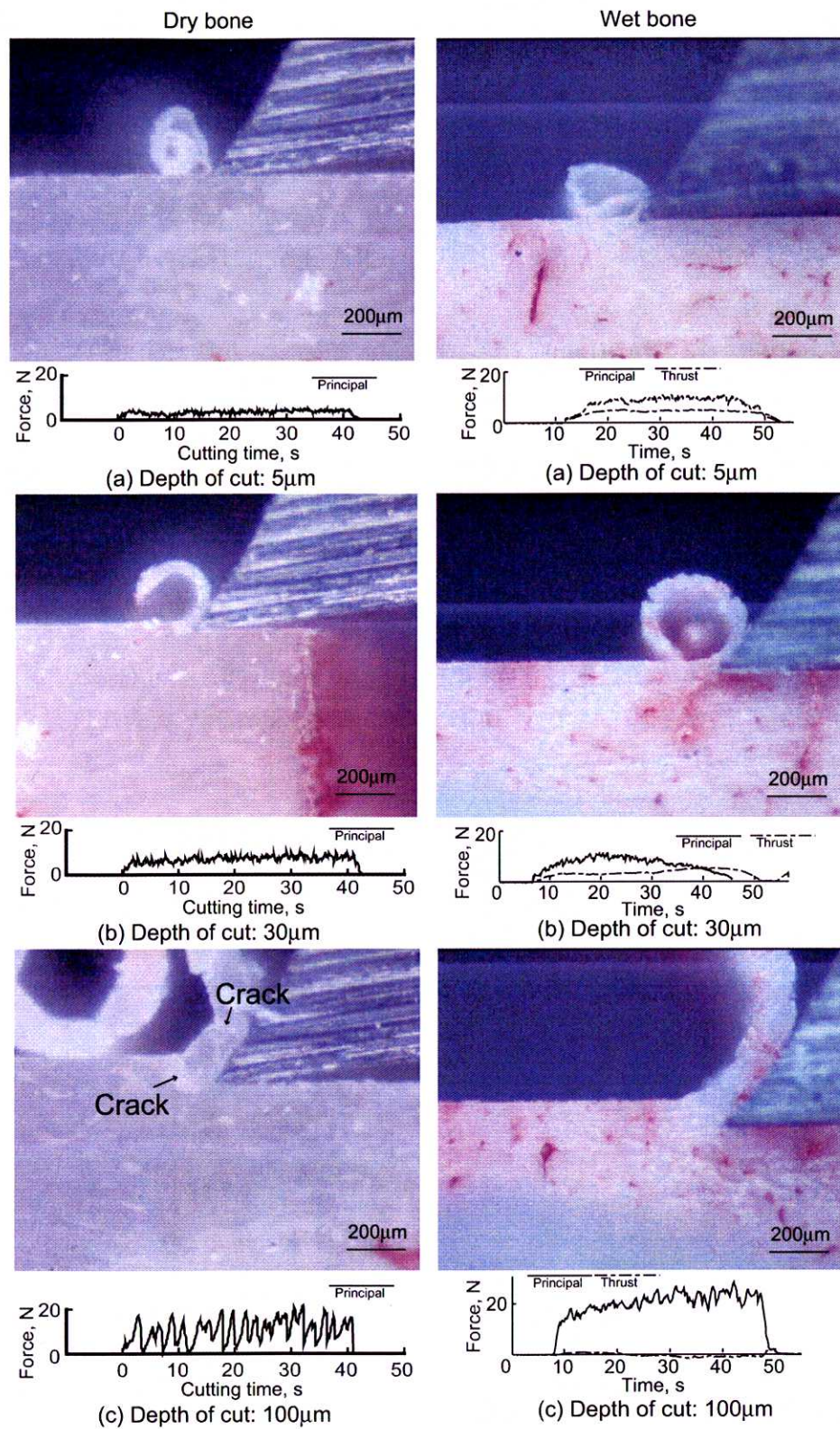


Fig.4.21 緻密皮質質の乾燥骨と含水骨切削における切取り厚さと切りくず生成形態の関係  
Comact cotrical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg.



な流れ型切りくず生成に見えても、観察できないだけで亀裂間隔が数  $\mu\text{m}$  であるということがないとは言えない。しかし、Fig.4.21(a) のようなリボン状の切りくず形状を見る限りでは亀裂の存在はないと推測される。

これらのことを背景に考察すると、切りくず生成の流れ型—亀裂型境界の明確な判断は難しい。この実験では、10  $\mu\text{m}$  以下の低切取り厚さにおける微視的な亀裂挙動の観察のためには、顕微鏡の分解能が不十分であるが、ここで報告したマクロな実験的観察結果の評価から、流れ型切りくず生成は切取り厚さが 10  $\mu\text{m}$  以下になると考えるのが妥当である。

ただし、切取り厚さが 10  $\mu\text{m}$  以下になると、その厚さが切れ刃丸みに近くなり、その影響を無視できなくために、異なったすくい角の工具での切削という問題に移行することになる。

これに対して含水骨の場合には、上述のように切取り厚さが 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。含水骨において亀裂型の切りくず生成が発生しない理由としては、含まれる水分(約 20%) がオステオン組織を湿潤することにより、組織構造の脆化が防がれて大きな亀裂の発生が阻止されていることが考えられる。

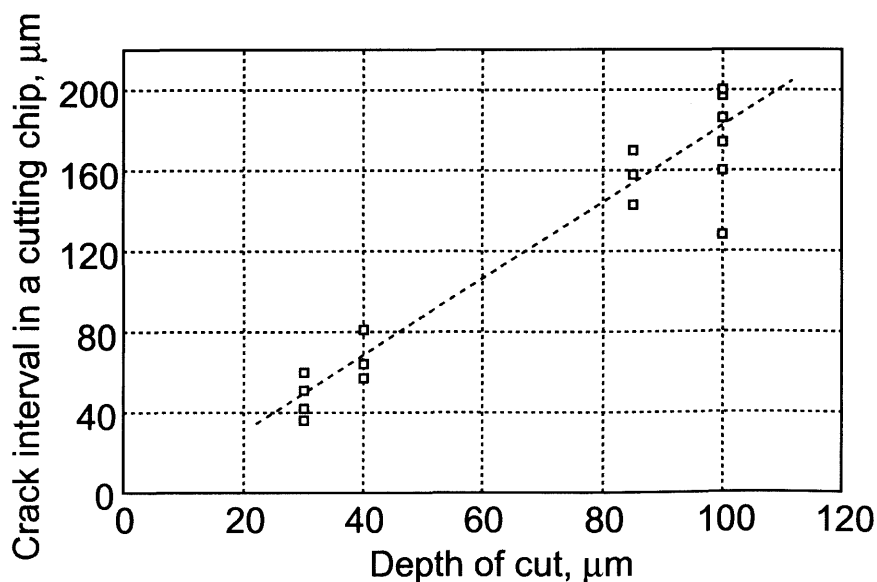


Fig.4.22 切りくずにおける亀裂間隔  
Comact cotrical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg.



#### 4.2.5 セメント線，ハバース管が切りくず生成に及ぼす影響

セメント線はオステオン同士を結合した部分であり，ハバース管は一種の材料欠陥であるので，組織としては不連続に近い組織であると言える。したがって，このような不連続組織が切りくず生成に何らかの影響を与えると考えるのは，当然予測される事柄である。

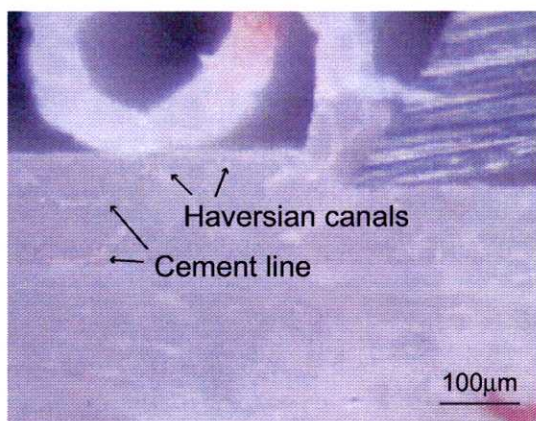
Fig.4.23 は，乾燥緻密質骨を切取り厚さ  $100\ \mu\text{m}$  で 2 次元切削したときの切りくず生成における時系列的変化である。白い粒界状の線がセメント線であり，そのセメント線に囲まれた中心の孔がハバース管である。図の (a) において刃先がちょうどセメント線に達し，そこで亀裂を発生したために切削抵抗は大きく変動している。そして，続いて (b) まで工具が進行してハバース管のところにきた時に，再び亀裂を生ずる。さらに，工具が (c) までくるとセメント線の部分で再び亀裂を生ずる。

この間の切削抵抗は，Fig.4.23 中の抵抗波形に表されるように激しく変動する。その変動の様子はあたかも断続切削に近い状態である。このような切削抵抗波形になる理由としては，図でも明らかなように，セメント線とハバース管の間隔で折れた切りくずは，その間隔の中でほとんど塑性的な変形をすることなく，工具すくい面上に排出されることが考えられる。

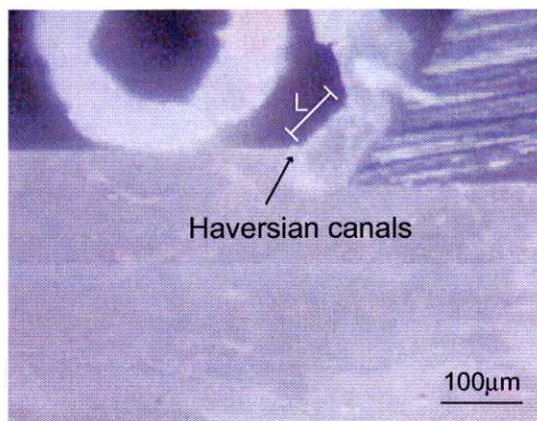
Fig.4.23 中に示した“L”は切りくずの亀裂間隔であり，約  $120\sim150\ \mu\text{m}$  の長さであるが，これはオステオン直径の約半分，すなわち，セメント線とハバース管の間隔にほぼ対応する。Fig.4.22 によると，亀裂間隔は切取り厚さのほぼ 2 倍になるはずであるが，近くにセメント線やハバース管といった不連続組織に亀裂間隔は依存するとみられる。

これに対して含水骨では，ハバース管やセメント線などの不連続組織による顕著な影響は受けないが，Fig.4.26 に示すように，ハバース管やセメント線の箇所ですこやかな振動を生じることがある。しかしながら，Fig.4.23 の乾燥骨切削抵抗波形に示したような大きな切削抵抗波形は発生しない。一つの要因として，含有水分による振動吸収効果が推測される。

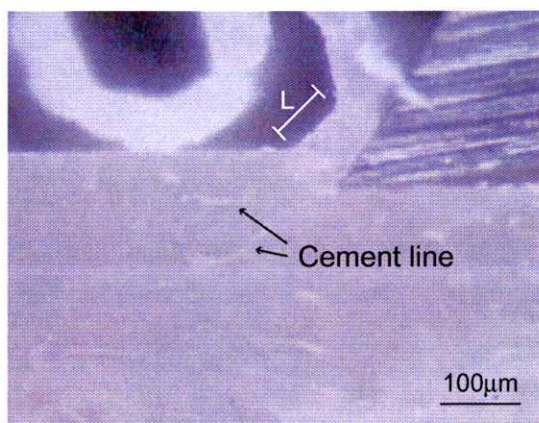
L: Interval of crack in chip



(a) Destruction at the cement line



(b) Destruction at the haversian canals



(c) Destruction at the cement line

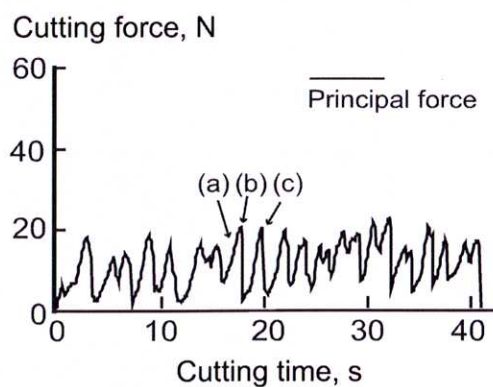


Fig.4.23 セメント線およびハバース管が切りくず生成に及ぼす影響  
Comact cotrical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 100  $\mu\text{m}$

#### 4.2.6 切削形態に及ぼす組織異方性の影響

これまでに述べたように、皮質骨はオステオン構造や環状層板構造のために、骨軸方向とそれに直角の方向によって機械的性質が大きく異なる。したがって、その異方性の影響を知るためには、Fig.4.5 に示した三つのタイプの切削形式について、切削面・切削方向と被削性の関係を明らかにする必要がある。ただし、ここでは、異方性を明確に示すために、タイプ P と A では外輪状層板部を被削材として用いた。以下、すくい角  $5^\circ$  と  $35^\circ$  の工具で切削したときの例を示す。

Fig.4.24 は乾燥および含水緻密質骨のタイプ T 切削とタイプ P 切削における切りくず生成を示す。Fig.4.24(a) は Fig.4.5 に示すように、A 面を T 方向に切削し、C 面を観察したタイプ T 切削である。この場合の切削は、骨軸に平行に伸びたオステオン組織を接線方向に掬うような切削を行っており、この方向はせん断強度が低い方向である。そのために、切れ刃前方のせん断面でせん断すべりと破壊が生じやすく、切りくずの中に亀裂も発生している。Fig.4.24 右側の含水骨における切りくず生成形態は乾燥骨の場合と非常に類似している。すなわち、切りくず内に  $30\ \mu\text{m}$  程度の間隔の亀裂生成が見られる。

同図 (b) は 乾燥骨環状層板部を被削材としている。この場合は、A 面を骨軸方向に切削し、T 面を観察面したタイプ P の切削である。この場合は層板内のコラーゲン線維層に平行に切削する。(a) とは異なって、切りくず内に亀裂がほとんど観察されず、骨軸方向に薄紙を剥ぐように切りくずを生成し、このまま切削を続けると、切りくずは折れずに、切りくずはロール状に巻き取られていく。

その理由としては、刃先先端で切れ刃の進行方向に平行に小さな亀裂が常に連続して先行し、層板構造を剥離していくためと、コラーゲン線維で構成される層板部の長手方向の曲げ強度が高いために、簡単には折れないからである。このことは、工具すくい角が  $5^\circ$  の場合でも同様である。そして、含水骨でも乾燥骨と同様の切りくず生成形態になるので、タイプ T 切削およびタイプ P 切削では乾燥骨と含水骨で切りくず生成形態の差異は基本的にないとみてよい。

また、工具刃先が層板境界部に当たると、この境界部の強度が非常に低いために、切削は、Fig.4.25(a) に示すような層板境界に支配され、例えば、層板境界が左下方に傾いていると、過切削状態となることがある。そして、このまま切削が進み、切削行程の終わりに近づくと、Fig.4.25(b) のように、層板境界部で大きな滑り破壊を生ずる。このような現象からみると、この境界部は一種の亀裂に近いと考えられる。

次に、C 面を T 方向に切削するタイプ A の乾燥骨と含水骨の切削例を Fig.4.26



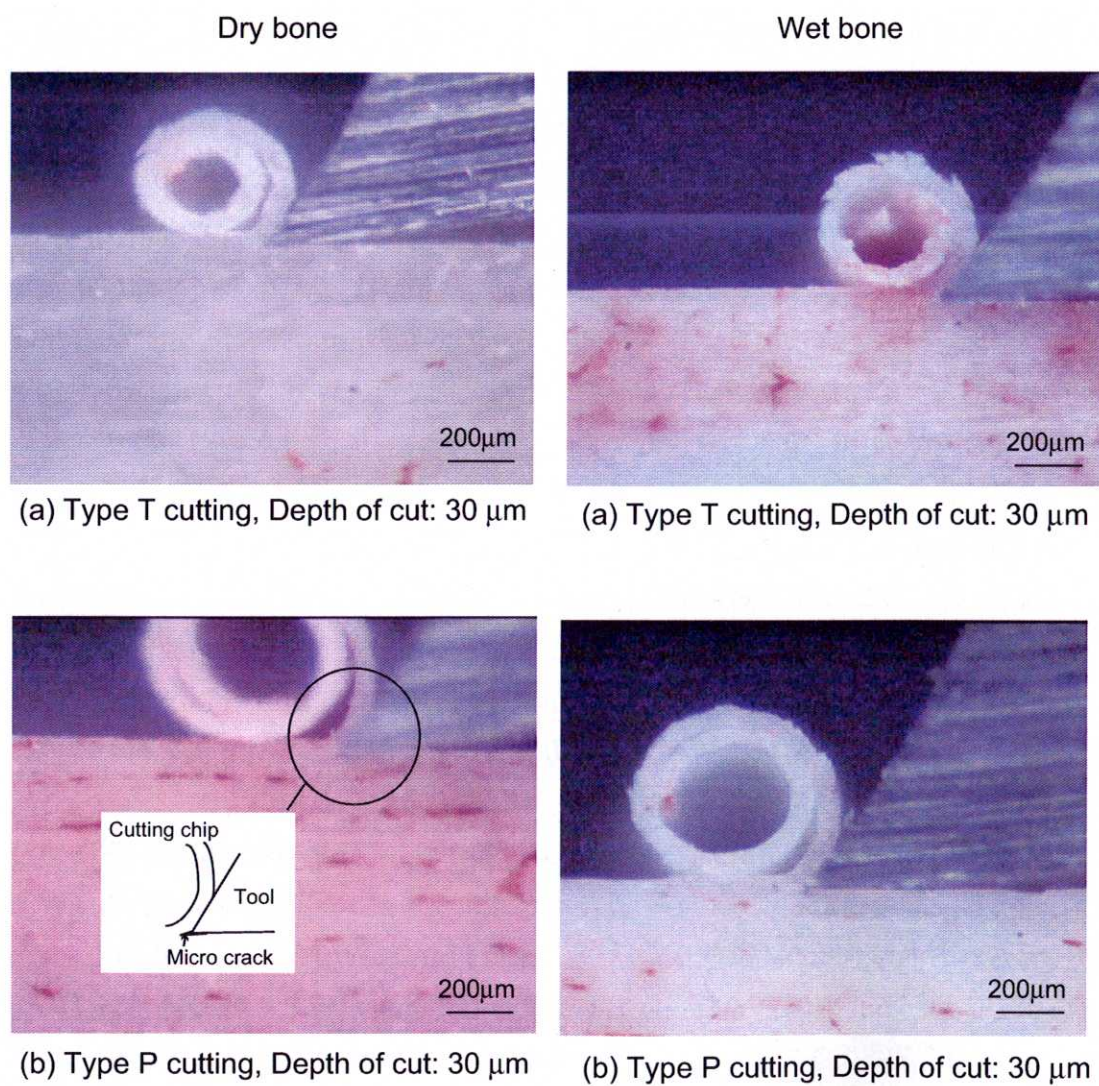
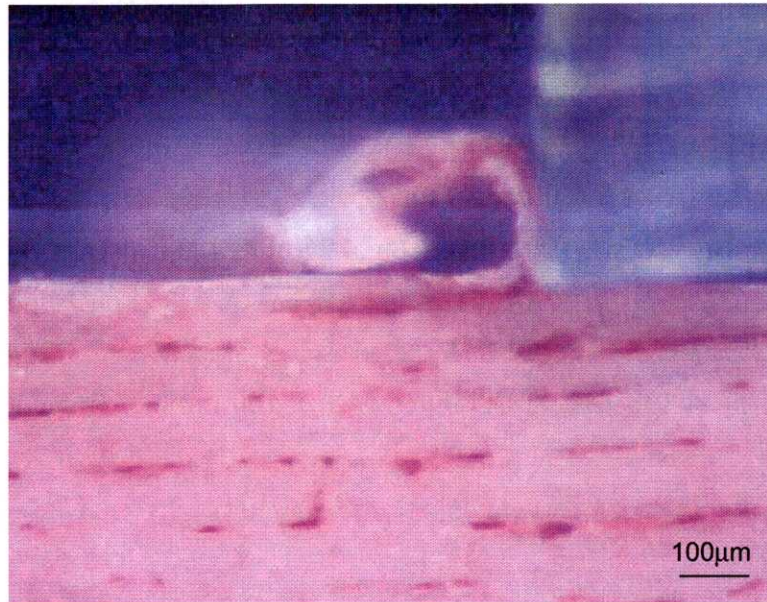


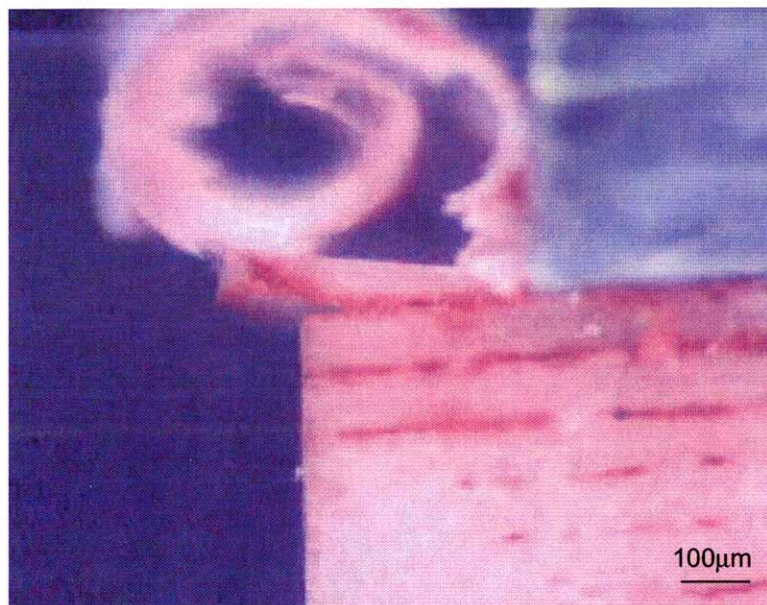
Fig.4.24 乾燥緻密骨と含水緻密骨のタイプTおよびタイプP切削における切りくず生成の比較

Compact cortical bone, Rake angle: 35 deg.





(a) Chip formation, Depth of cut: 30  $\mu\text{m}$



(b) Destruction, Depth of cut: 30  $\mu\text{m}$

Fig.4.25 環状層板における切りくず生成と破壊  
Compact cortical bone, Cutting type: Type P, Rake angle: 5 deg.

に示す。この切削形式では骨軸に直角な骨幹部切断面を削ることになる。これは木材切削の「木口（こぐち）切削」に相当する。乾燥骨の場合、図で分かるように、層板境界は比較的等間隔で規則的に切削面に対して垂直に並んでいる。Fig.4.26(a)で刃先は層板境界に近づいているが、次の瞬間、刃先から層板境界に向かって亀裂が発生し、そのときに過渡的な振動が発生する。そのために、層板境界が振動で振られて Fig.4.26(b) のように1本の線が2重に見える。この振動が発生する時間はほんの1/100 sec 程度である。すなわち、断続切削に似た挙動を示す。

そして、この振動点を通り過ぎると、Fig.4.26(c) のように再び通常の切削が行われる。このタイプ A の切削では、せん断強度が最も大きな方向の切削であるから、非常に切削抵抗が高く、層板境界部を通り過ぎるときには、大きな音を立てる。そのために、剛性の低い実験装置では切取り厚さが100  $\mu\text{m}$  にもなると非常に被削性が悪くなる。

これに対して Fig.4.26 の右側に示した含水骨の場合も基本的には乾燥骨の場合と似た切削形態をとる。図に示すように、ハバース管のところで振動を生ずるが、1/100 sec 後には振動が収まる。しかしながら、このタイプ A 切削で、乾燥骨と含水骨の切りくず生成形態に大きな相違が見られる。乾燥骨では、せん断面に沿った亀裂によるせん断型切りくずになりやすいが、含水骨の場合には連続流れ型（厳密には準連続型）の切りくず生成がなされる。したがって、材質としての延性を増した結果、含水骨の切削ではタイプ A 切削においても被削性が向上したと考えられる。

最後にこれまでの議論を踏まえて、切削応力によるひずみ模様や亀裂が切りくず生成にどのように関係するのかについて次項でまとめる。



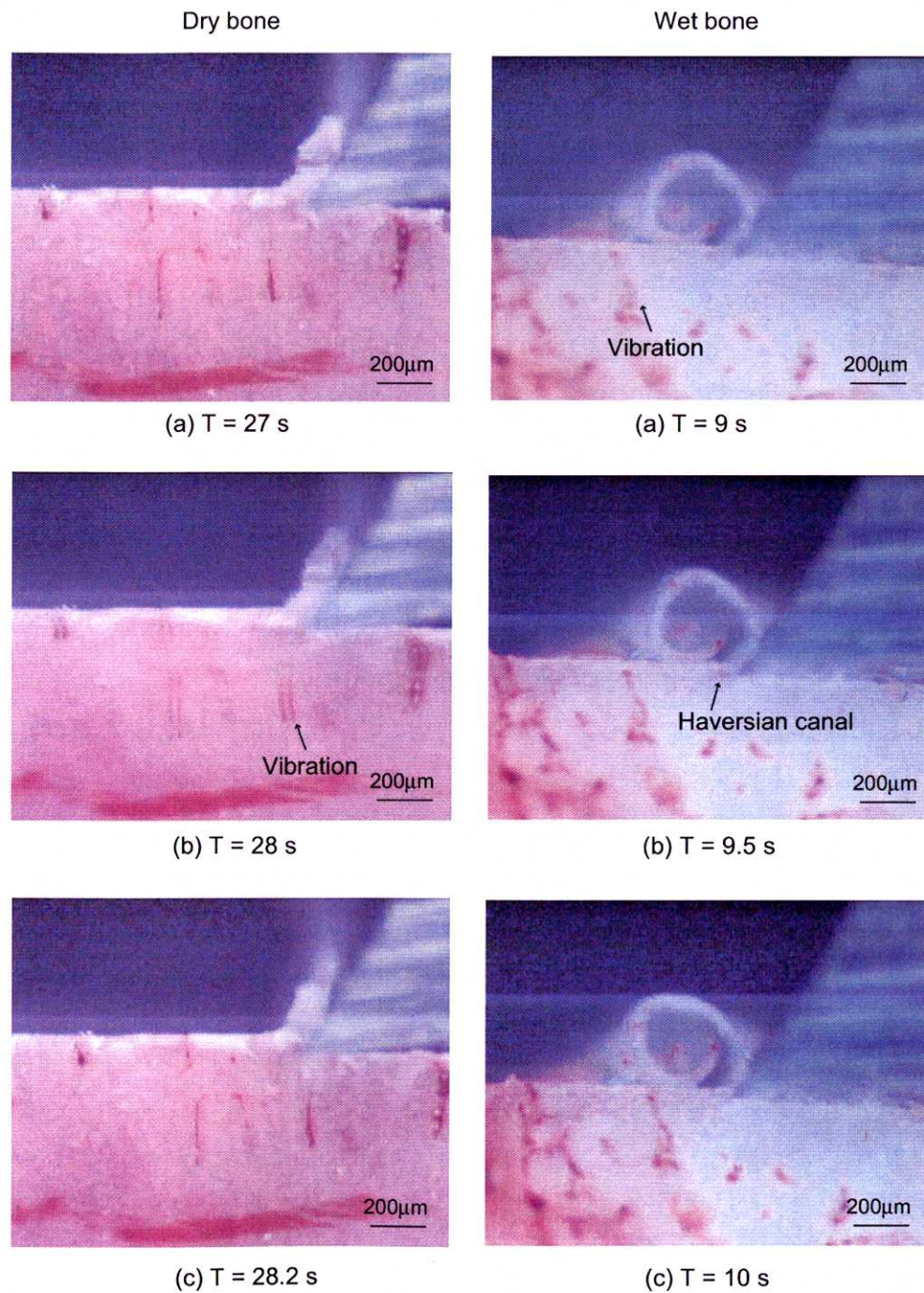


Fig.4.26 乾燥緻密骨と含水緻密骨のタイプ A 切削における切りくず生成の比較)  
Comact cotrical bone, Cutting type: Type A, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 30  $\mu$ m

#### 4.2.7 ひずみ模様と亀裂発生と切りくず生成の関係

これまでの議論で亀裂発生が実際に切りくず生成にどのように関わっているかについては、ほとんど触れてこなかった。そこで、本節ではそれらをまとめておく。ここでの切削条件として、切取り厚さに関しては、刃先での変形や亀裂や破壊の現象を分かりやすく観察するために、原則として  $100\ \mu\text{m}$  という大きな値をとった。

Fig.4.27 は乾燥多孔質骨を  $100\ \mu\text{m}$  で切削したときに観察された、刃先前方でのひずみ模様である。時間的にみて Fig.4.27(a) よりも少し前の段階で、刃先先端の被削材の部分がわずかに白濁し、応力集中によるひずみ模様が発生する。そして、工具が進行すると、Fig.4.27(a) のように、小さな楕円形のリング状ひずみ模様に発展する。続いて Fig.4.27(b) のところまで工具が進んでくると、刃先は被削材に食い込み、リング状ひずみ模様は一層大きく成長する。そのひずみ模様の発生している場所は、せん断面と工具すくい面の延長上と工具刃先の直後である。

刃先前方の被削材が切りくずとなって持ち上げられる Fig.4.27(c) の段階まで切削が進むと、せん断面上のひずみ模様のリングは一層拡大し、刃先すくい面延長上と刃先直後のひずみ模様は白濁化する。

亀裂がこのひずみ模様に沿って発生するかということ必ずしもそうではなく、この後、亀裂は刃先前下方に発生し、工具の進行とともに上方に向きを変えて母材から切り離されて、工具すくい面上に移動する。

このリング状のひずみ模様の発生理由は明らかではないが、せん断面のひずみ模様はせん断面のせん断応力によるひずみ、刃先前下方のすくい面延長上のひずみ模様はこの領域に発生する引張応力によるひずみ、刃先直後のひずみ模様はここに発生する引張応力と背分力からもたらされる圧縮応力によるひずみを表しているものとみてよいであろう。

ここでせん断面のひずみ模様の角度が、工具進行にともなって多少変化していることが分かる。これは工具進行にともなってすくい面前方の被削材が切りくず生成のために少しずつ持ち上げられるために、せん断面の角度が変化しているからである。このことは、切削のせん断角は常に一定ではなく、工具切れ刃が切りくずを生成し排出するまでの短い時間の間に、せん断角が刻々と変化していると考えてよいと推測される。ちなみに、Fig.4.27(a) での角度は  $35^\circ$ 、Fig.4.27(b) では  $27^\circ$ 、Fig.4.27(c) では  $20^\circ$  である。このことから考えると、この場合のせん断角は  $20^\circ$  と  $27^\circ$  の中間の値になる。いずれの場合においても、何らかの形状のひずみ模様がかなり小なり発生するが、明瞭なひずみ模様はどの場合にも発生する訳ではなく、この例だけであった。この明瞭なひずみ模様が発生した場合には、工具刃先近



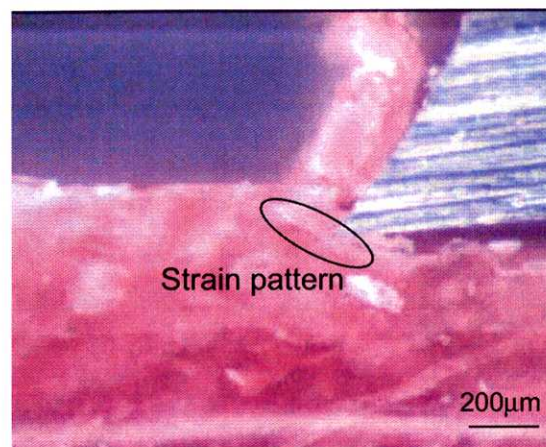
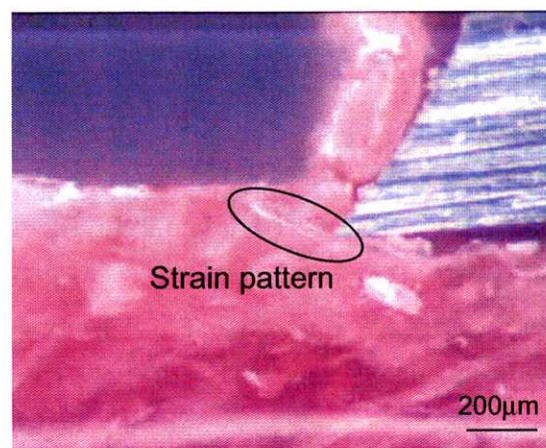
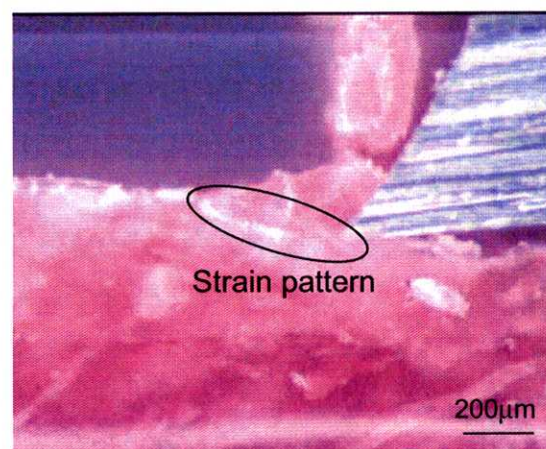
(a)  $T = 25 \text{ s}$ (b)  $T = 26 \text{ s}$ (c)  $T = 27 \text{ s}$ 

Fig.4.27 多孔質骨において刃先前方にみられるひずみ模様  
Porous cortical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 100 μm

傍での被削材の変形がよく把握できる。

Fig.4.28 は乾燥および含水緻密質骨をオステオン接線方向にすくい角の大きな工具で削った例である。Fig.4.28 左図の乾燥骨の場合、Fig.4.28(a) に刃先先端で白く光った小さなひずみ模様が観察される。そして、次の瞬間に Fig.4.28(b) のように、大きな亀裂が刃先先端から工具進行方向に平行に約  $100\ \mu\text{m}$  の長さで発生する。この時、亀裂発生衝撃により、Fig.4.28(b) に示すように切りくずを含め、この部位が激しく振動する。そして、Fig.4.28(c) では、工具進行によって亀裂の先端で被削材は曲げられて折れ、やがて工具すくい面へと移動する。すくい角の大きな工具で切削すると、概ね以上のような亀裂発生と切りくず生成になる。これに対して、Fig.4.28 右図の含水骨の場合には亀裂の発生も振動も観察されない。

Fig.4.29 は乾燥および含水緻密質骨をオステオン接線方向にすくい角の小さな工具で削った場合の例である。Fig.4.29 左図の乾燥骨の場合、すくい角の大きな工具による切削とは多少現象が異なる。刃先前方に細長くひずみ模様が観察されるが、工具がそこを通り過ぎたところでそのひずみ模様は消える。代わって Fig.4.29(b) に示すように、刃先前方がひずみで白くなるとともに、亀裂がせん断面に沿って発生する。そして、Fig.4.29(b) から Fig.4.29(c) にかけて、変形、亀裂、破壊が連続的に進行し、Fig.4.29(d) に示すように、すくい面に三角形の切りくずが排出される。この三角形の切りくずは、亀裂発生と破壊がせん断面で発生したためである。そして、Fig.4.29(d) では、次の切りくず生成のプロセスに入る。

これに対して含水骨の場合には、乾燥骨のときのようなせん断面上での亀裂は観察されないが、典型的なせん断型切りくずを生成して三角形断面の切りくずを排出する。その一方で、乾燥骨の場合と同様に、工具の前進にともなってすくい面前方の被削材が激しく圧縮変形を受け、Fig.4.29(a) や Fig.4.29(b) に示すように刃先先端のすくい面上が灰色に変化する。これも明らかにひずみ模様である。もちろん、ひずみ模様のところがすべて塑性変形をしているわけではなく、工具を後退させるとひずみ模様も消失するので、大半は弾性変形であると思われる。

また、前出の Fig.4.27 は大きなすくい角の工具で乾燥多孔質骨を切削したときの例である。骨組織は少し切削方向に対して鋭角配向であるにもかかわらず、すくい角が大きいために、亀裂は組織にほとんど左右されず、刃先前方へ工具進行方向に平行に発生し進行する。そして、亀裂が  $100\ \mu\text{m}$  ほど進んだところから上方に向きを変え、ブロック状の切りくずを生成することになる。

これに対して、同様に大きなすくい角の工具を用いて、組織が切削方向に対して鈍角に配向した乾燥骨をタイプ P の切削形式、すなわち、A 面を骨軸方向に切削した例を Fig.4.30 に示す。Fig.4.30(a) で刃先先端に小さなひずみ模様を生じ、そこか



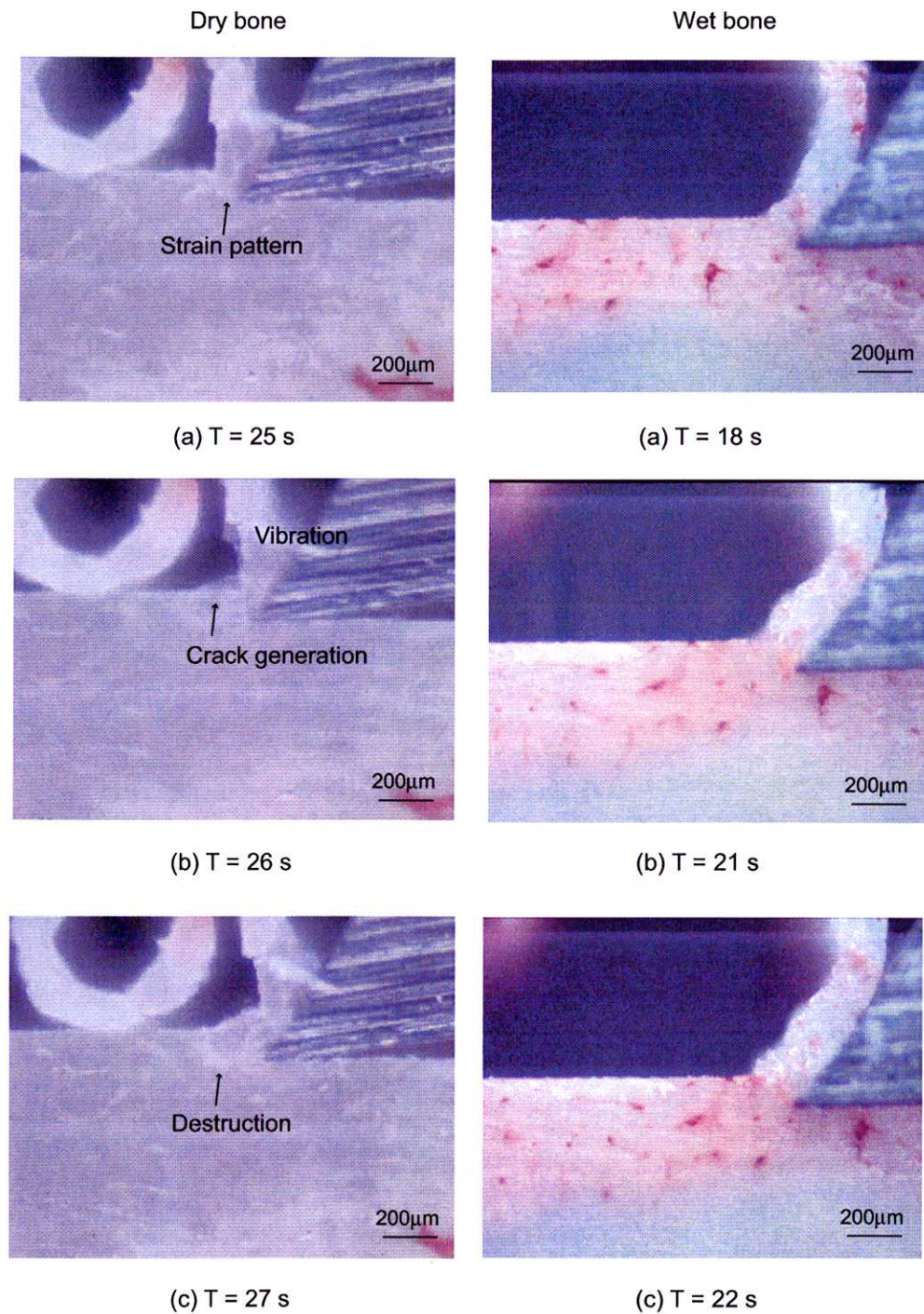


Fig.4.28 乾燥および含水緻密質骨における亀裂進展と切りくず変形, すくい角  $35^{\circ}$   
 Compact cortical bone, Cutting type: Type T, Rake angle:  $35^{\circ}$ , Depth of cut:  $100\ \mu\text{m}$



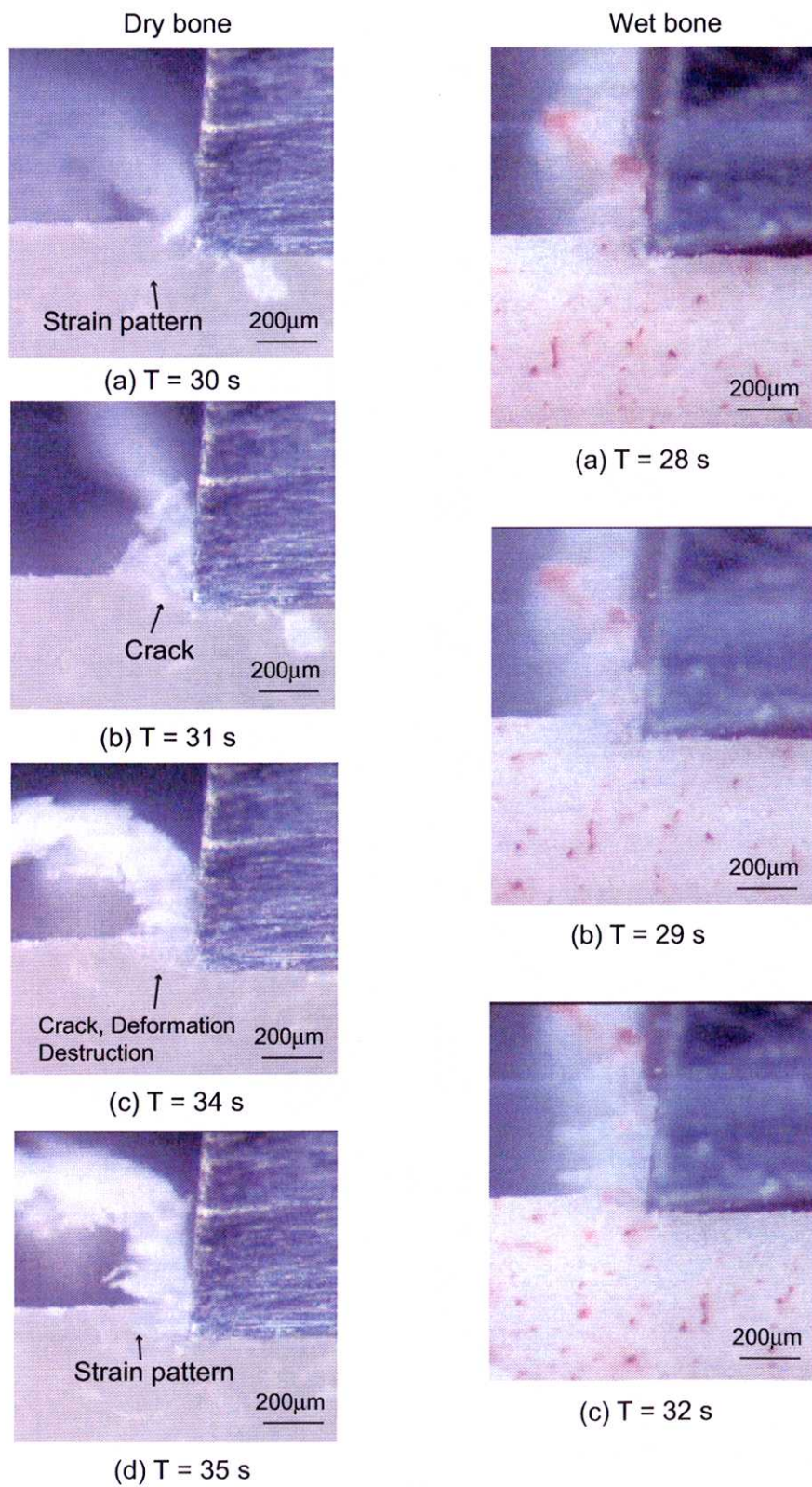


Fig.4.29 乾燥および含水緻密質骨における亀裂進展と切りくず変形, すくい角  $5^{\circ}$   
Compact cortical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 5 deg., Depth of cut: 100  $\mu\text{m}$



ら亀裂は Fig.4.30(b) のようにせん断面に沿って約  $30^\circ$  の角度で発生し進行する。そして、その後三角形の切りくずを生成する。ここで、この  $30^\circ$  という角度がこの場合のせん断角なのか、もしくは組織の配向角なのか判然としないが、多孔質骨の組織が脆弱化しており、切れ刃前方に発生するせん断応力の影響で、せん断面でのせん断破壊を生ずる前に組織の欠陥部で先に配向角に沿って破壊したのではないかと考えられる。そのことを裏付けるように、例えば、Fig.4.30(d) によると、せん断面で破壊したのではなく、組織欠陥部で破壊したとみられる切りくずを生成する。

一方、Fig.4.31 は小さなすくい角の工具で乾燥多孔質骨を切削したときの亀裂発生と切りくず生成の関係を示す。Fig.4.31(a) は前の切削で生成した切りくずを排除しているところであり、Fig.4.31(b) のようにその切りくずの終わりで工具は次の切削行程に入る。そして、刃先前方に発生する引張応力によって、矢印で示す組織欠陥に亀裂が入り Fig.4.31(c) の状態になる。その後、工具刃先はその組織欠陥部を Fig.4.31(d) のように持ち上げ、その部分のブロック状の被削材を切りくずとして排出し、その後に大きな孔を残すことになる。

次に、Fig.4.32 は Fig.4.26 と同じ実験のときのもので、最も切削しにくいと考えられるタイプ A の切削、すなわち、骨軸断面を削ったものである。乾燥骨の場合、これまでに述べた亀裂と切りくず生成とは少し異なった形態を示す。同図左の (a) では、工具は Fig.4.32 中 “1” の手前で刃先からすくい面の延長上に向かって小さな亀裂が発生し、その亀裂はすぐに左上方に向きを変え、断面が三角状のくぼみを残す。このようなことが切削中次々と発生し、Fig.4.32 中 “2” に示すように工具が通過した後、断面三角形のくぼみが生成される。

このように、亀裂が三角形の断面を形成するように進行するので、そこから排出される切りくずの断面は Fig.4.32(b)(c) に示すように三角形断面形状となる。このような亀裂と切りくず生成はタイプ A 切削の場合を除いては発生しない。また、切りくずは連続的にはならず、断片状で排出される。このような亀裂発生に関しては次のように考えられる。

乾燥骨の場合、このタイプ A 切削の方向は最もせん断強度が高いので、せん断面でのせん断破壊を生ずる前に、工具先端前方ですくい面延長上に発生する引張応力によって工具先端直下に亀裂が発生する。この亀裂が発生する方向は切削方向よりもせん断強度、引張強度ともに低い。また、この工具刃先に発生する亀裂の向きは、互いに斜めに交差配向して層板を構成するコラーゲン線維の傾き角にも依存することが考えられる。

これに対して、同図右に示した含水骨の場合、乾燥骨のような三角状断面の切りくずとはならず、一見連続型切りくずの様相を呈する。しかしながら、この場合の

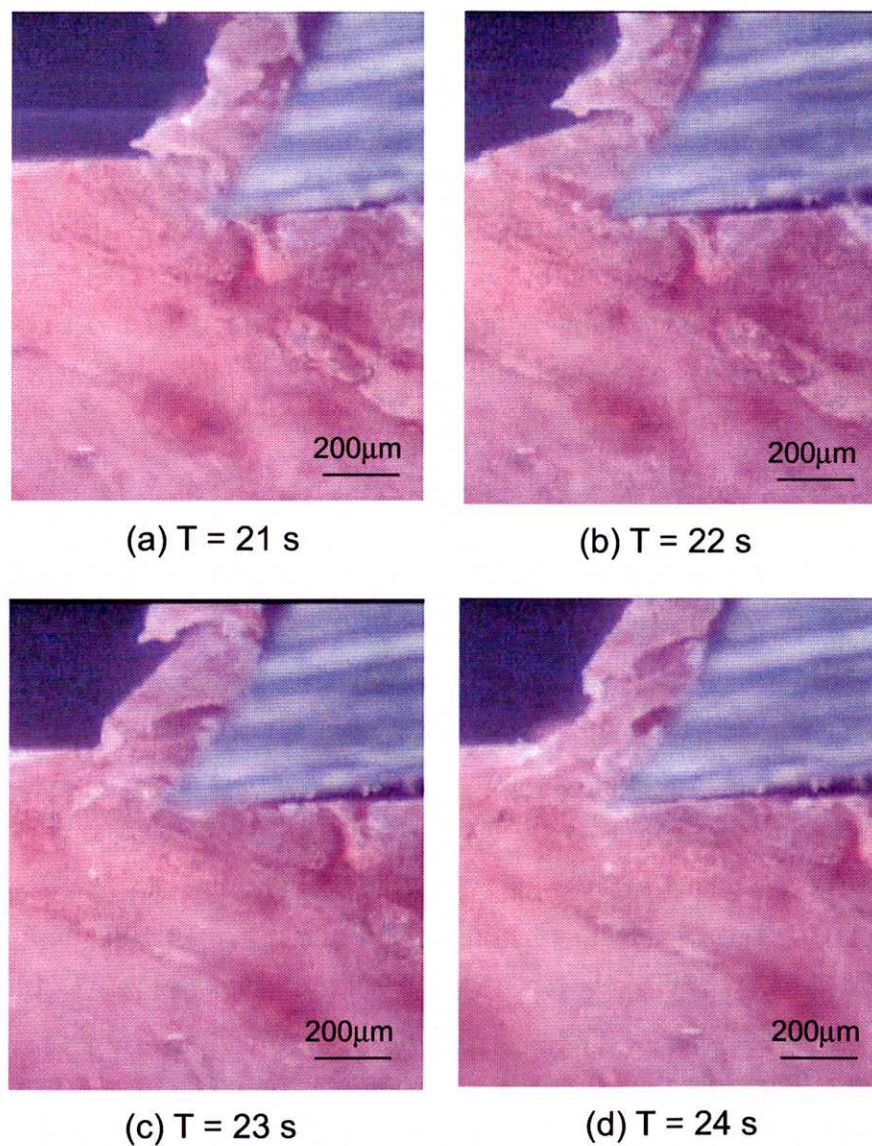


Fig.4.30 すくい角の大きな工具を用いた多孔質骨切削における亀裂進展, タイプ P 切削  
Compact cortical bone, Cutting type: Type P, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 100 μm



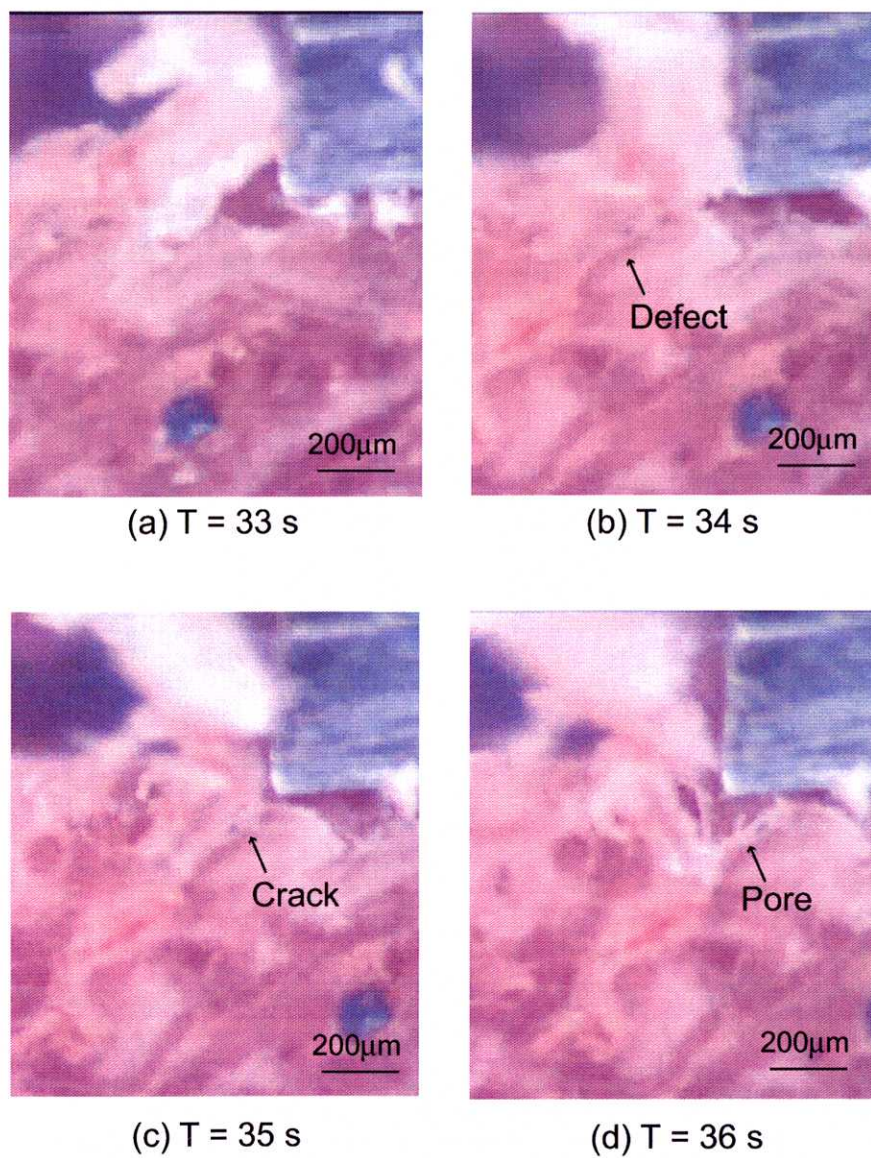


Fig.4.31 すくい角の小さな工具を用いた多孔質骨切削における亀裂進展, すくい角  $5^{\circ}$   
Porous cortical bone, Cutting type: Type T, Rake angle: 5 deg., Depth of cut: 100  $\mu\text{m}$

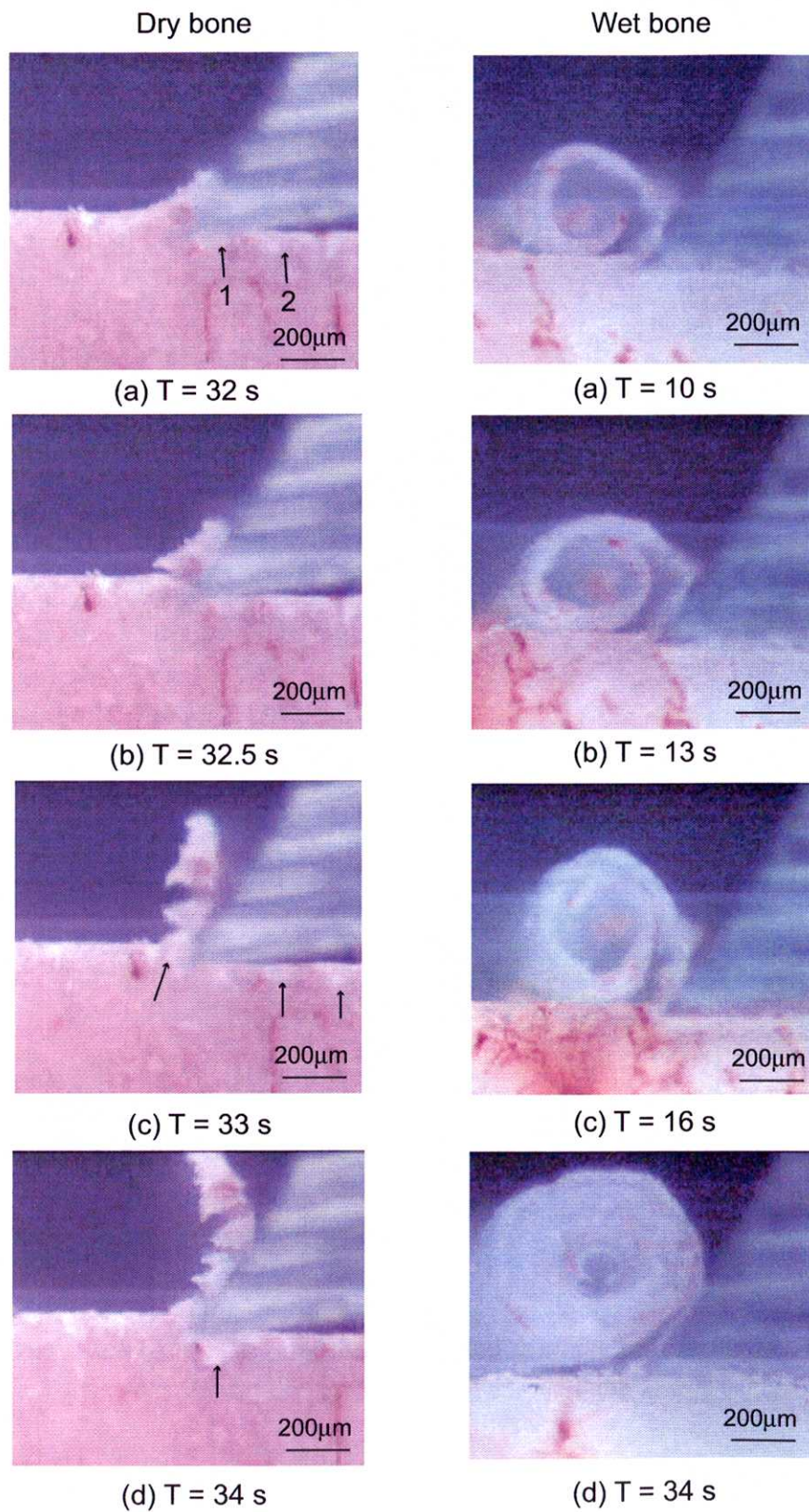


Fig.4.32 タイプ A 切削における亀裂進展  
 Porous cortical bone, Cutting type: Type A, Rake angle: 35 deg.,  
 Depth of cut: 30  $\mu\text{m}$  (a~c), 10  $\mu\text{m}$  (d)



切りくずは、ハバース管やセメント線に遭遇する度に切りくずが切断されるようである。ただし、(d)に示すように、切取り厚さが10  $\mu\text{m}$  以下になると、ハバース管やセメント線のような組織欠陥に依存しない、準連続流れ型切りくずを生成する。

#### 4.2.8 海綿骨切削の特徴と皮質骨切削との比較

これまで各種皮質骨の切削挙動について明らかにしてきたが、海綿骨については触れてはこなかった。その理由は緒言でも述べたように、海綿骨は皮質骨に比べて密度が約1/2で、比切削抵抗も約1/3にしかならないことからみて強度的に弱い組織である。したがって、骨切削の難易性を切削抵抗から議論した時、検討の中心は皮質骨となる。

しかしながら、人工関節と骨との接合強度を保つためには、骨が再生し、人工関節と強力に癒着する状態を作り出すことも重要である。この時、骨再生が起こるためには破骨細胞や骨芽細胞の存在が必要となるが、現在の術式で関節部分を平滑化した場合、骨再生は主に海綿骨部分で起こる。すなわち、人工関節の突端部が骨髓部に入り込み、この部分で再生することが妥当と考えられる。したがって、この場合、切削面の状態よりも、むしろ海綿骨-人工関節の相互作用が重要になる。

本節では、海綿骨において、その切削挙動の実態を明らかにし、皮質骨の切削挙動と比較してどのような相違があるかを検討する。そこで、まず、海綿骨の強度を支える骨梁の配向方向と関係づけて切削挙動の特徴をとらえるとともに、皮質骨切削との比較を行った。

Fig.4.33は、骨梁の配向方向に対してその接線方向(T方向とする)に切削する場合、平行方向(P方向とする)に切削する場合、骨梁断面方向(A方向とする)に切削する場合の3通りの切削形態における切削挙動を示したものである。

まず、切削方位がT方向(Fig.4.33左)の場合、これは皮質骨切削のタイプT切削に相当する。工具の進行に伴って、被削材は切れ刃による圧縮のために、切れ刃先端の前方と前下方へ骨梁組織が破壊されながら大きく圧縮変形する。画面上の白い線は組織から浸出してきた水分である。Fig.4.33(b)で切れ刃先端直下で発生した引張り応力によって亀裂が発生し、工具の進行につれてFig.4.33(c)Fig.4.33(d)に示すように亀裂は拡大する。しかしながら、切れ刃は、その亀裂から被削材を掘り起こすことなく亀裂を仕上げ面に残留しながら亀裂上を通過し、再び次の位置で切削を開始する。このような亀裂が発生するときには切削抵抗は大きく変動する。

次に、皮質骨のタイプP切削に相当するP方向の切削(Fig.4.33真中)を示す。骨組織が切れ刃先端の前方と前直下に大きく圧縮変形すると、それにもって含有水分が浸出して白い線を描く。また、(c)において切れ刃先端で微小亀裂が発生し、

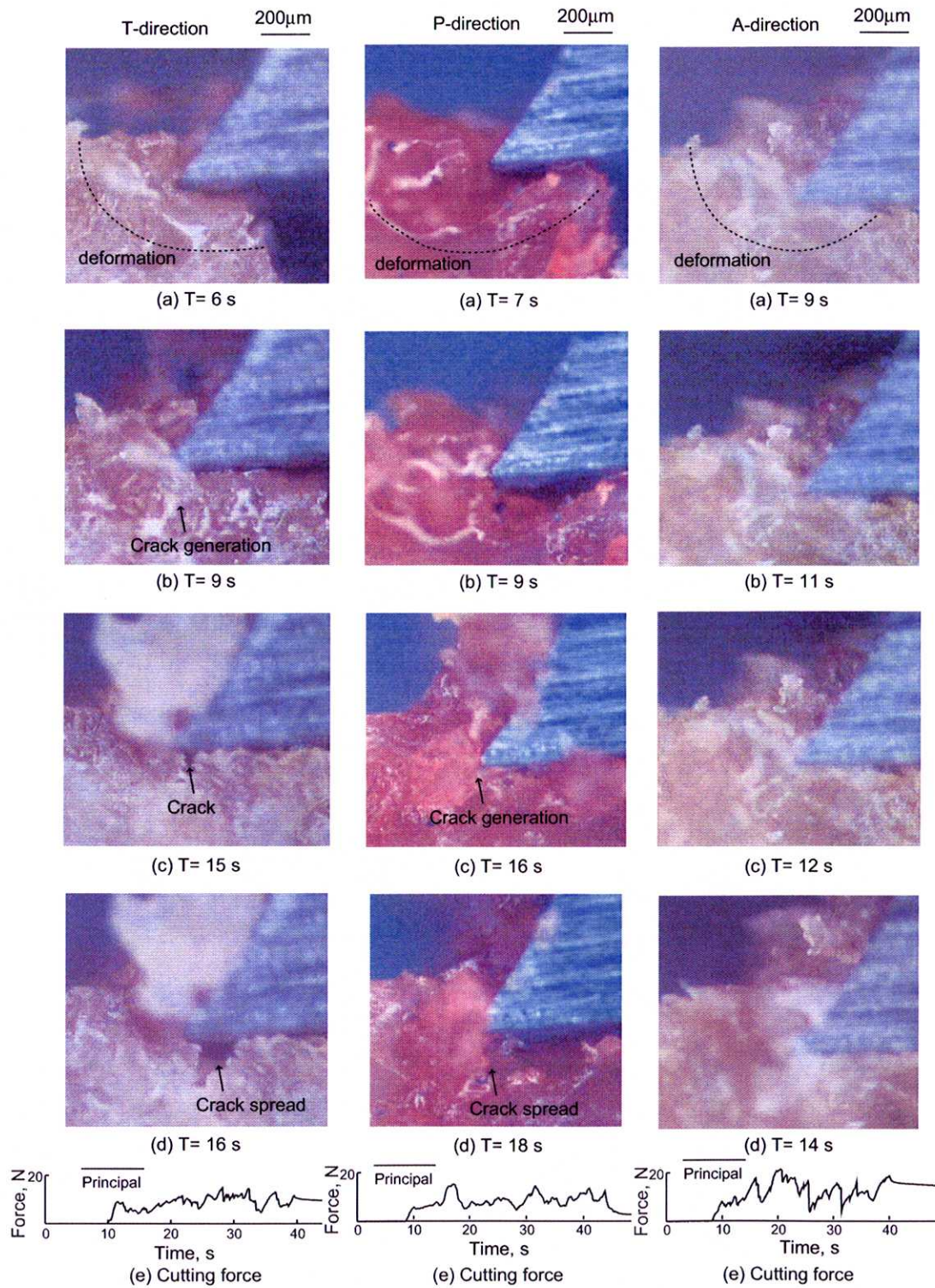


Fig.4.33 海綿骨の切りくず生成と切削方位の関係  
 Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 200 μm

それが (d) のように切れ刃前直下へ拡大する。これらの現象はほとんど T 方向切削の場合と同一である。異なるところがあるとすれば、P 方向切削における圧縮変形領域が T 方向切削のそれに比べて大きく、そのために切削抵抗が大きいこと、および、亀裂拡大が大きいことに起因して切削抵抗の変動も大きくなることである。

これらに対して A 方向の切削 (Fig.4.33 右側) は、皮質骨のタイプ A 切削に相当する。この場合には、P 方向の切削に比べて圧縮変形領域が狭く、そのために切削抵抗はかえって下がり、T 方向切削と同程度になる。また、切りくず生成に際して顕著な亀裂生成が観察されないの、そのことに起因する切削抵抗の大きな変動はみられない。しかし、工具が骨梁を直角に破断しながら進行するために、極微細な振動が観察された。また、T 方向や P 方向とは異なり、切れ刃先端前下方への亀裂の発生と拡大は見られない。これは骨梁組織を直角に切断しながら切削が進行することが原因である。

以上に述べた海綿骨の三方向における切削挙動を総合的に比較評価してみると次のようになる。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疎に分布する骨梁組織と、骨梁を構成する個々の細い骨のために、三方向のどちらの強度も低く、骨梁が切削を大きく支配することはないと考えられる。そのために、三方向の切削挙動に大きな違いが出なかったとみられる。

Fig.4.34 は海綿骨切削における比切削抵抗を示す。海綿骨の場合、 $20\ \mu\text{m}$  以下の切取り厚さでは、切削というよりも海綿骨組織が切削力によって押しつぶされるように変形する。

図によると、皮質骨の場合と同様に、切取り厚さの増加とともに比切削抵抗は減少し、両対数グラフ上でほぼ直線関係を示すが、切削抵抗の変動が大きいために、それに応じて比切削抵抗の変動も激しい。また、切取り厚さが  $500\ \mu\text{m}$  に達すると、亀裂型破壊発生のためにかえって切削抵抗が減少し、その影響で比切削抵抗が急減することが多い。

工具すくい角と比切削抵抗の関係をみると、T 方向と A 方向ではすくい角の小さいときの比切削抵抗は大きい、P 方向では両者に大きな違いは見られない。

ここで皮質骨のタイプ T 切削における比切削抵抗と海綿骨の T 方向の比切削抵抗を比較してみると、切取り厚さが  $100\ \mu\text{m}$  近辺では、海綿骨の比切削抵抗は皮質骨の  $1/3\sim 1/5$  程度である。

Fig.4.35 は骨組織の不連続性に起因した振動切削が海綿骨でも観察された例である。Fig.4.33 における A 方向切削でも述べたように、海綿骨の切削でも極微細な振動を発生しながら切削が進行する。Fig.4.35(b) で微小振動が発生したために画像が鮮明でなくなるが、 $1/100\ \text{sec}$  後には収まる。この場合の切削抵抗波形を、Fig.4.36



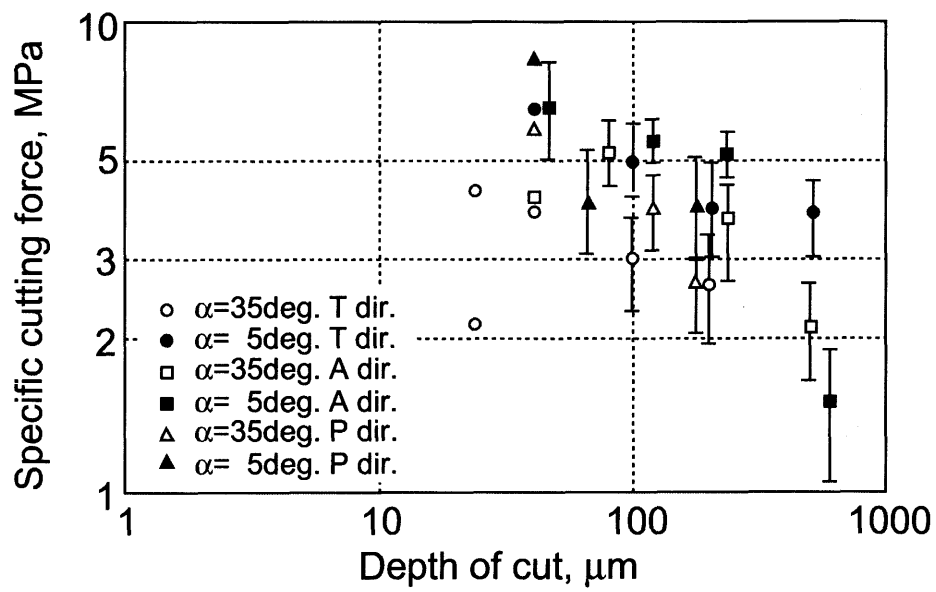


Fig. 4.34 海綿骨の比切削抵抗

に示す。これによると断続切削に近い切削が想定される。皮質骨の場合の振動はハバース管やセメント線のような一種の組織欠陥がその原因だとしたが、海綿骨の場合にはそのような組織欠陥はない。考えられることは骨梁の破壊挙動である。切削過程を2次元で動的に観察してみると、非常に小さい周期の振動が次々に生じていることが観察され、そのことが骨梁の切れ刃による破壊に対応していると考えられる。ただし、骨梁を含んだ海綿骨の強度が非常に低いために切削抵抗の変動は小さく、せいぜい切削抵抗の10~20%程度である。

次に、皮質骨と海綿骨の切削挙動を比較する。Fig.4.37は乾燥緻密皮質骨、含水緻密皮質骨、乾燥多孔皮質骨および含水海綿骨の代表的な切削挙動を示し、Fig.4.38はその切削抵抗波形を示す。

これらの個々の場合については既に述べたが、相対的に比較をすると、Fig.4.37(3)乾燥多孔皮質骨とFig.4.37(5)含水海綿骨の切削過程から分かるように、皮質骨でも組織が粗大化して多孔化が進むと、その組織自体は海綿骨に近くなり、そのことを裏付けるように組織の粗大な多孔皮質骨と海綿骨の切削挙動は非常によく類似した形態をとる。

しかしながら、切削抵抗波形は必ずしも同一の形態はとらない。例えば、Fig.4.38において、多孔皮質骨を切削した(3)では、工具すくい角が小さいこともあり、切削抵抗が大きいが、すくい角が大きくなると(4)のように切削抵抗は低下する。とくにFig.4.38(4)の場合の大きな切削抵抗変動は、切取り厚さに応じた亀裂間隔の切りくずを排出するときの変動であり、Fig.4.38(3)の場合の大きな切削抵抗変動は主として多孔質組織の欠陥に沿った亀裂進行に起因して大規模破壊を繰り返す切りくず生成時の変動である。これに対して、海綿骨を切削したFig.4.38(5)においては、骨梁組織の破壊による微細な切削抵抗変動はみられるが、切れ刃による低い圧縮変形抵抗からみて、Fig.4.37(3)のように切れ刃が粗大化した組織を持ち上げるような挙動はみられない。この時、切れ刃は拡大した亀裂上を低い切削力で通過し、その結果として大きな切削抵抗変動は生じない。

また、緻密皮質骨においては、Fig.4.37(1)とFig.4.37(2)の比較から分かるように、骨中に水分を含有するかどうかで切削挙動が異なる。乾燥骨ではFig.4.37の(1)とFig.4.38の(1)に示すように、切りくず生成が亀裂型の発生と進行に左右されるために、切削抵抗は切りくずの生成毎にゼロと最大値の間を変動している。そして、塑性変形をほとんど伴わないことから、切削抵抗そのものは比較的低い。

これに対して、Fig.4.37(2)の含水骨の場合には、切りくず生成に際して亀裂のない破壊挙動を示し、切削抵抗値には切削力による塑性変形の影響が含まれると考えられる。そのためにFig.4.37(1)に比べて切削抵抗が高くなったと思われる。

以上のような結果を総合すると、大腿骨幹部において外側の部位にある緻密皮質

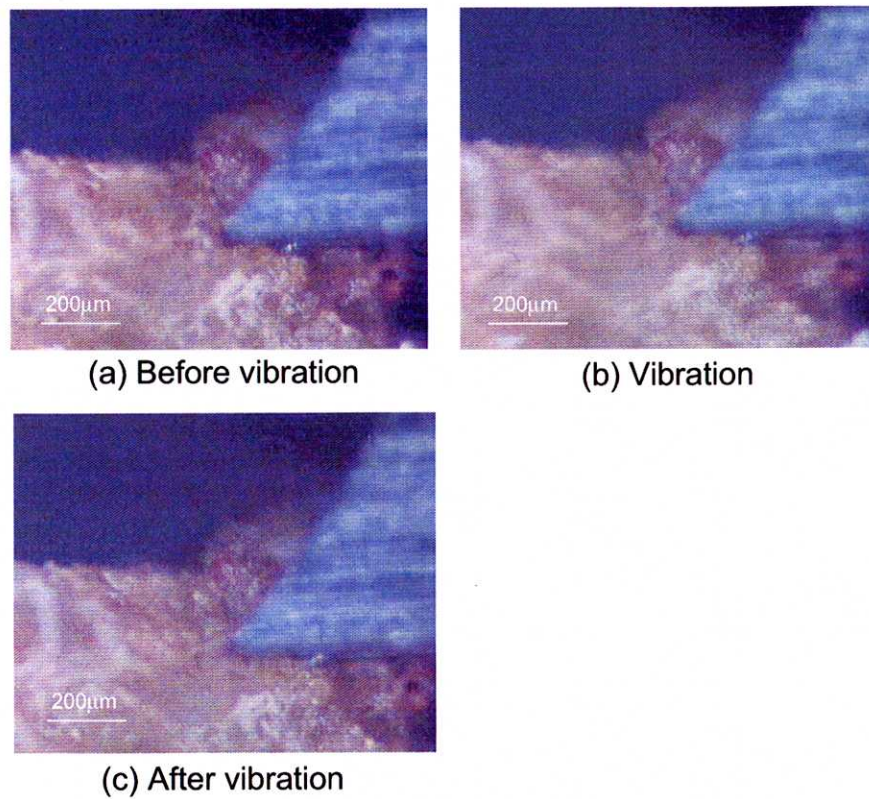


Fig.4.35 海綿骨のA方向切削における振動

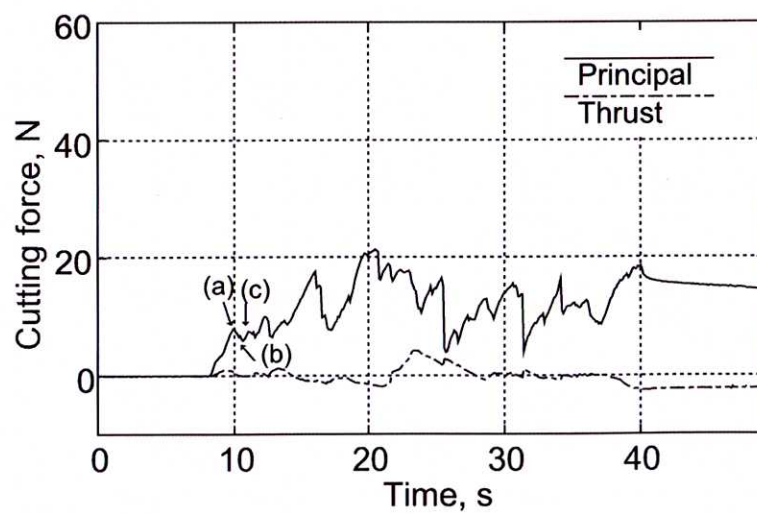


Fig.4.36 Fig.4.35 の切削抵抗



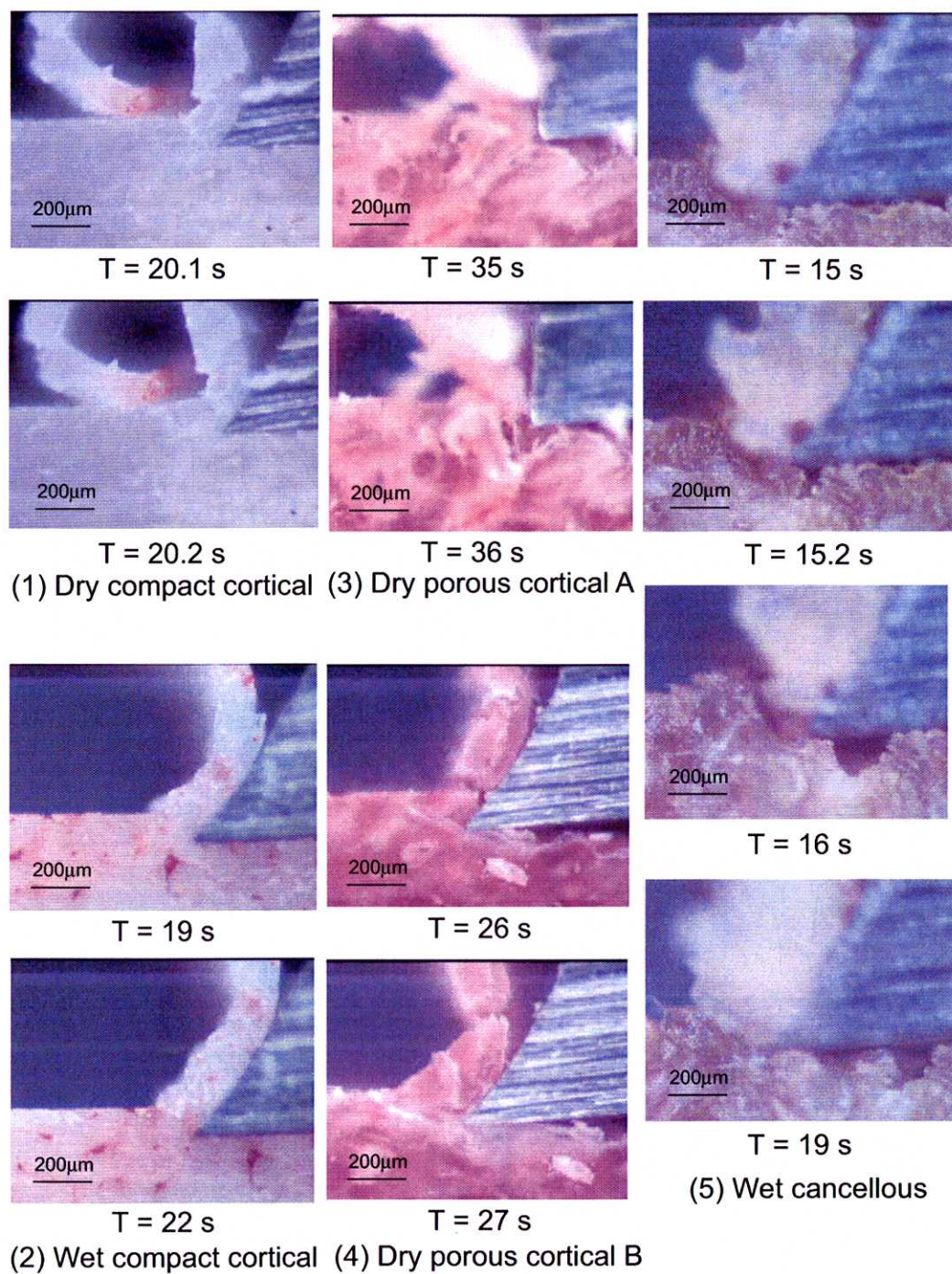


Fig.4.37 皮質骨と海綿骨の組織に依存した切削形態の比較

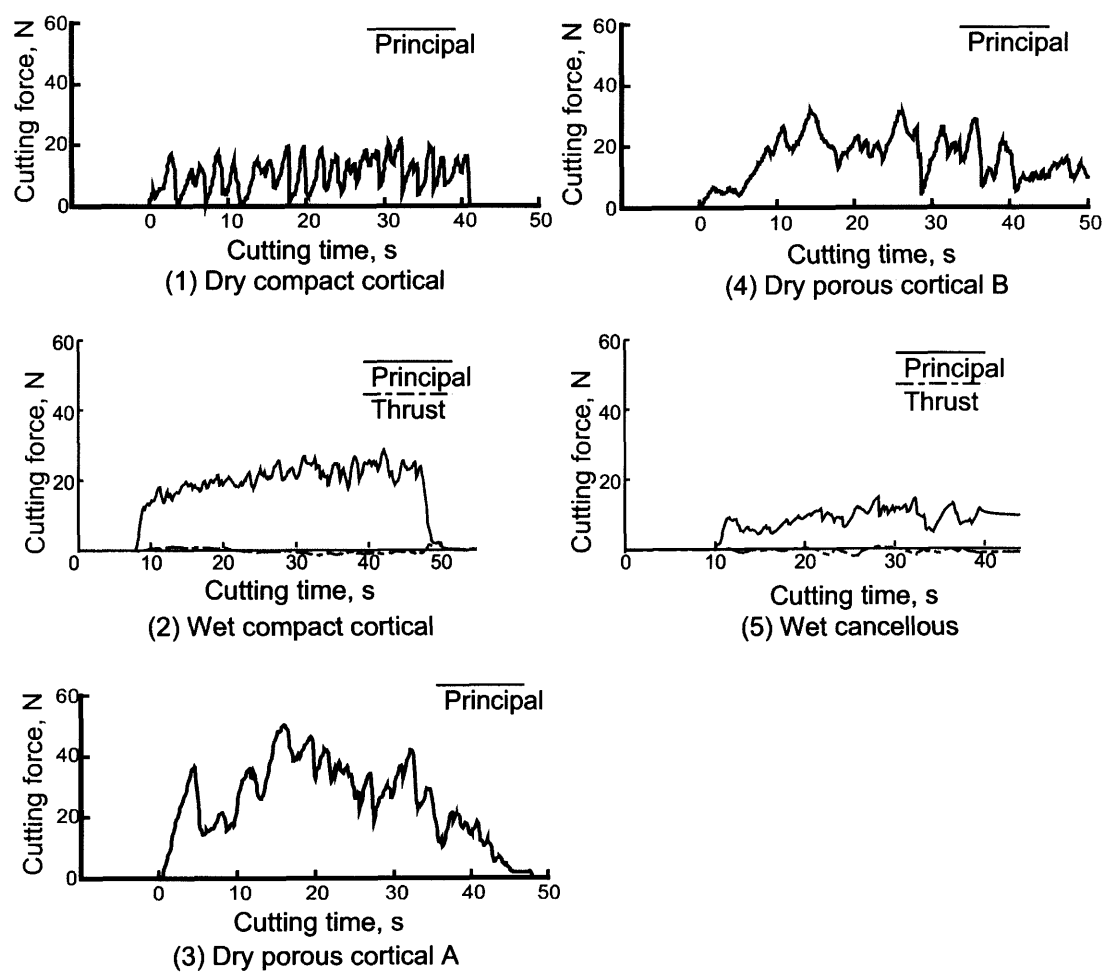


Fig.4.38 皮質骨と海綿骨の組織に依存した切削抵抗波形の比較

骨は含有水分の有無で Fig.4.37(1) あるいは Fig.4.37(2) の切削形態をとり、骨の内部に近づいた部位の多孔皮質骨になると、切削形態は Fig.4.37(3) や Fig.4.37(4) になる。また、骨の中心部に存在する海綿骨では (5) の切削形態となるので、実際の人工関節置換術における骨の切削ではこれらの切削形態が同時に関与することが多く、加工そのものは複雑な様相を呈することとなる。

#### 4.2.9 加工速度による切削現象の相違

本章で用いた 2 次元切削装置では、切削現象の動的直接観察と装置の機能制限から光学顕微鏡下装置で  $125\ \mu\text{m}/\text{sec}$ 、電子顕微鏡下装置で  $200\ \mu\text{m}/\text{sec}$  と非常に遅い速度で加工を行っている。ところが、骨の実用的なエンドミル加工では高速加工であるために、2 次元切削で採用した極低速切削での切削特性がそのまま高速切削での切削特性を示すものだとは限らない。そこで、本節では、加工速度を低速から高速まで変化させ、その時の切削抵抗、切りくず形態、仕上げ面精度、加工表面組織状態などの切削特性から加工速度の影響の有無を検証した。

本実験は、第 5 章で用いたマシニングセンタ上に 2 次元バイト (ダイヤモンドバイト、すくい角  $30^\circ$ ) を設置し、送り速度を  $10\ \text{mm}/\text{min}$  ~  $500\ \text{mm}/\text{min}$  の間で変化させた。この時の切取り厚さは、切りくず形態が流れ型—亀裂型境界付近になる  $30\ \mu\text{m}$  を採用した。他の加工条件は、工具すくい角  $35^\circ$ 、切削タイプ T、切削幅  $1.6\ \text{mm}$  である。

Fig.4.39 に示すように、切りくずは一部亀裂を含む場合があるものの、加工速度に関係なく連続型 (厳密には準連続型) の切りくずが観察される。生成される切りくずの厚さは加工速度に関係なくほぼ等しいことから、各加工速度におけるせん断角も大差ないであろうと推測される。切削速度によってせん断角の変化がほとんどないか小さいであろうことは、Fig.4.40(b) に示す切削抵抗のグラフにおいて、切削抵抗が加工速度にほとんど依存しないことから理解できる。周知のように、通常金属切削においては、切削速度が上昇するとせん断角も大きくなり、切削抵抗は小さくなるので、その点において皮質骨の切削の場合とは異なる。

この点に関しては次のように考えられる。第 6 章でも述べるように、皮質骨の場合、切削速度が 10 倍になっても切削温度の上昇はせいぜい  $10^\circ\text{C}$  にとどまる。したがって、その温度上昇が骨材質を極端に変化させないであろうと推察できる。これに対して金属の場合には、過去の多くの研究によって、切削温度は切削速度に対して指数関数的に上昇することが知られている。したがって、上述のように皮質骨



の場合、切削温度に対する切削速度の関与が小さいために、切削抵抗が切削速度によって大きな影響を受けず、切削形態にも大きな変化がもたらされなかったと考えられる。

一方、Fig.4.40(a) に示すように、仕上面粗さも切削速度の影響をほとんど受けないとみてよい。このことは、Fig.4.41 に示す切削加工面の組織と切削速度との関係からも分かる。各加工速度において微小亀裂を伴って切りくず生成がなされた跡が見られるが、加工速度間において特筆すべき顕著な表面組織変化は見られず、加工速度が切削の形態および影響は大きくないと言えるであろう。

以上のように切りくず形態 (Fig.4.39)、仕上げ面粗さ (Fig.4.40(a))、切削抵抗 (Fig.4.40(b)) および加工表面組織 (Fig.4.41) を評価したが、皮質骨の切削特性は加工速度に大きく依存しなかったと考えられる。したがって、以上の結果から、本章で用いた2次元加工装置は非常に加工速度が遅いが、そこで得られる実験的な知見は高切削速度領域にまで適用できる可能性が高いことが示唆される。

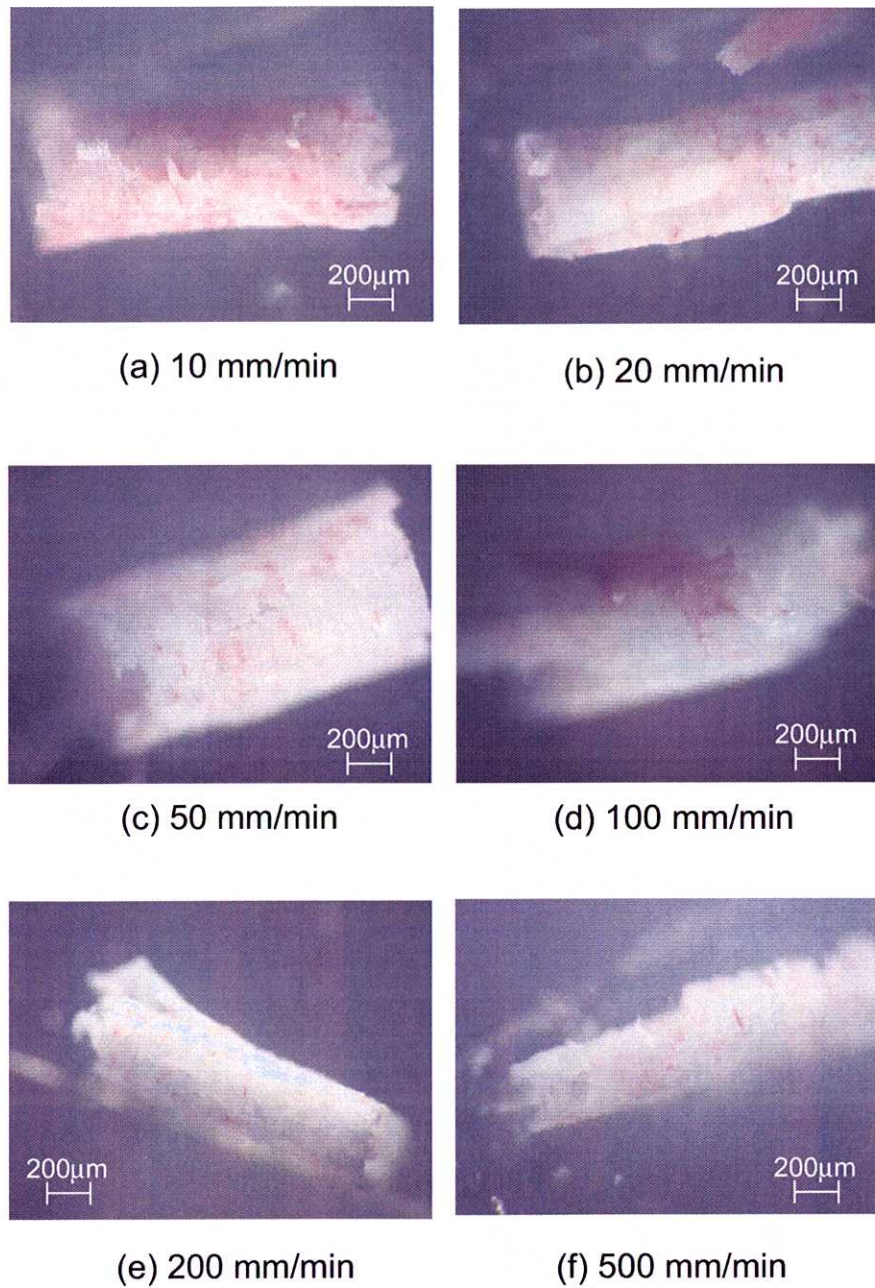
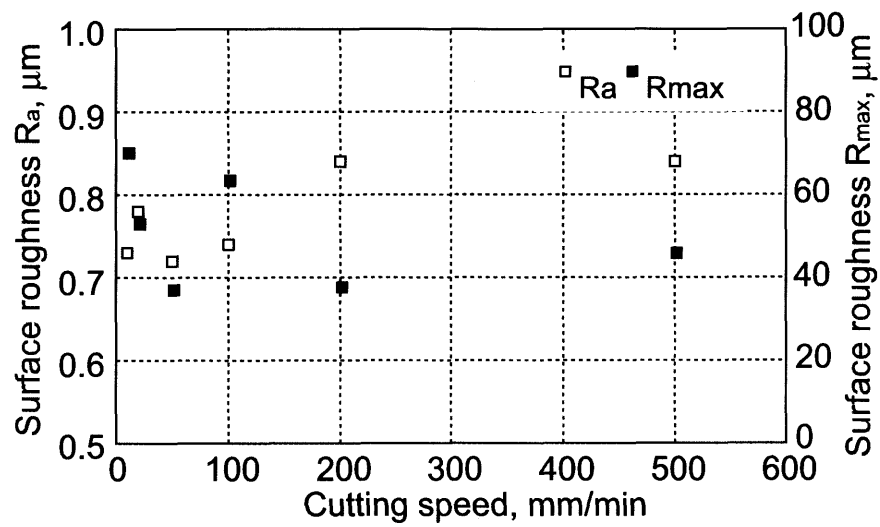
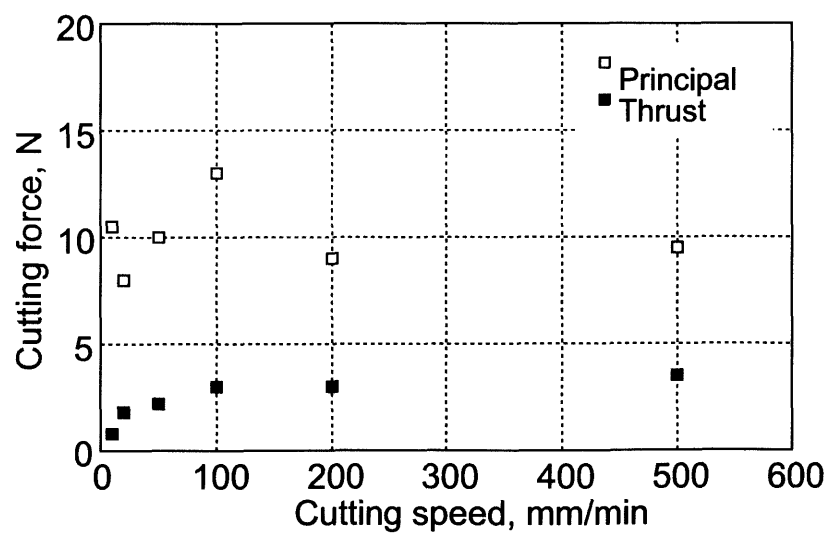


Fig.4.39 切りくず形態  
Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 30  $\mu\text{m}$



(a) Surface roughness



(b) Cutting force

Fig.4.40 仕上げ面精度と切削抵抗  
 Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 30  $\mu m$



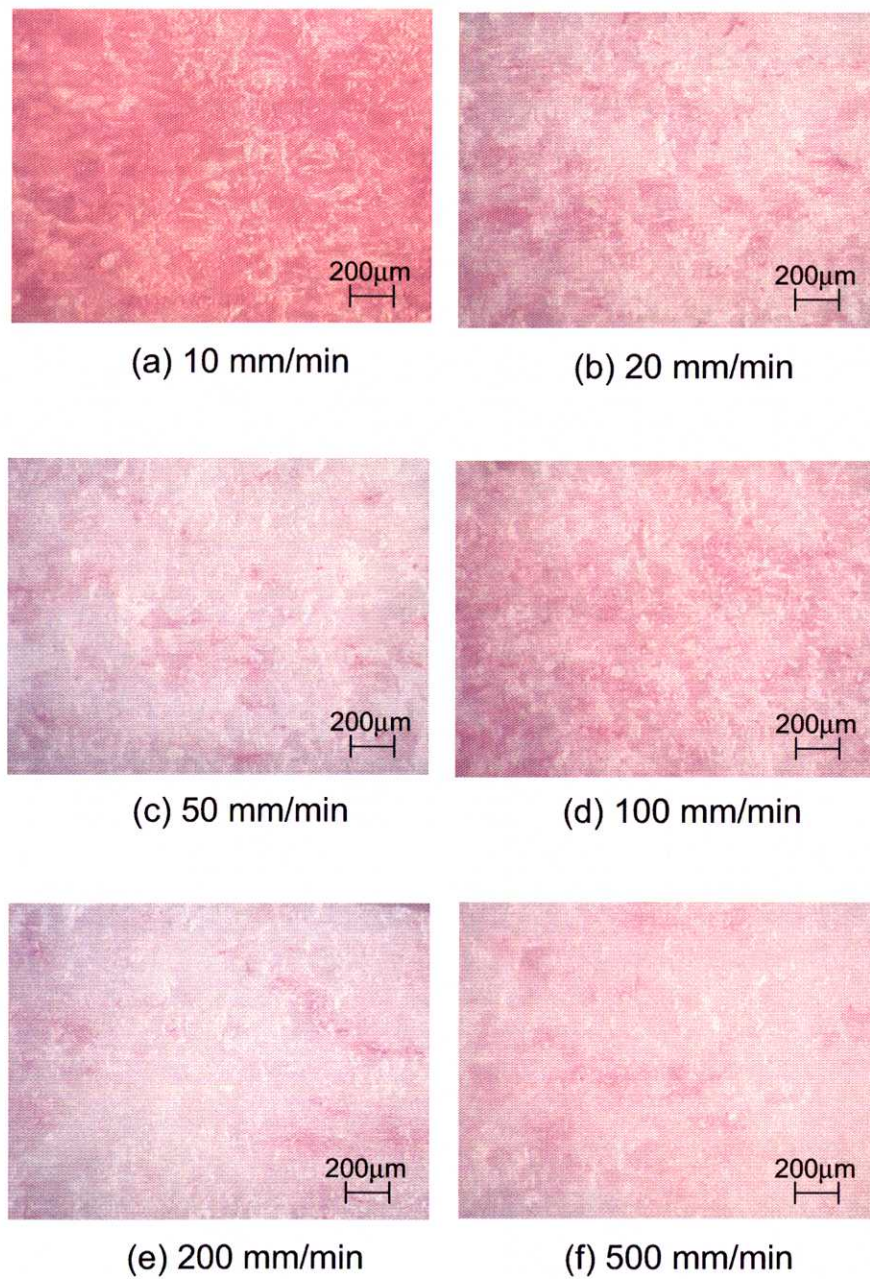


Fig.4.41 加工面の組織状態  
Cutting type: Type T, Rake angle: 35 deg., Depth of cut: 30  $\mu\text{m}$