

生体硬組織の微細加工に関する研究 (第1報) *

—ウォータージェットによる齲蝕部の除去加工—

平尾 政利** 山岸 甚太郎*** 小野 哲†

Micro Machining for Human Hard Tissue (1st Report)

—Removal of Carious Dentin Using Micro Water Jet—

Masatoshi HIRAO, Jintaro YAMAGISHI and Satoshi ONO

Current general odontotherapy uses a diamond small tool to remove caries. Mechanical grinding has generated a vibration, heat, noise, and so on, and causes patients mental and physical pain. In order to avoid these problems, he proposed micro water jet machining. The advantages of using water jet are that it can remove only soft carious dentin and causes less heat during processing than does mechanical grinding. He measured Vickers hardness in caries and showed that caries is soft compared with normal dentin. In this study, he compared performance of water jet and abrasive water jet machining with mechanical grinding for machining force and heat. In addition, he used a harmless abrasive (nut powder) to remove carious dentin. It is found that abrasive water jet machining is useful for odontotherapy.

Key words: water jet, hardness, abrasive, caries, dentin

1. 結 言

現在の歯科治療では、一般的に機械的な方法（ハンドピースによる研削）により齲蝕（うしょく）部、いわゆる虫歯の除去を行っている。これは、ハンドピース内のダイヤモンドバーをタービンにより回転させ、口腔内の挟隙空間で研削加工を行うものである。しかし、加工時に振動や熱、音などが発生し、人体にかなりの精神的、肉体的苦痛を招来する。一方、レーザー光を利用する治療法も近年精力的に研究されている。しかし、人体に及ぼす影響は無視することができず、場合によっては目に対する障害も起こす可能性がある^{1) 2)}と指摘されている。最近、新たな治療法としてエアジェット法などのビーム加工方法³⁾が検討されている。我々はこのようなビーム加工方法の一つとしてウォータージェットを利用した齲蝕除去方法を試みた。

ウォータージェット加工は、他の機械加工に比べ幾つかの優れた特徴を有している⁴⁾。歯の齲蝕部分を除去するためにそれを利用したときの利点は、①高エネルギー密度加工法であるため、材料に対する変形やひずみ、残留応力が小さい。②ウォータージェットの水压を変えることにより硬質材料に付着している軟質材料部分のみを除去できる。③加工時に発生する熱が小さい、などが挙げられる。

本研究では、これらの特徴を生かし基礎的視点から齲蝕除去に関する実験的検討を行った。本報では、痛みを伴わない齲蝕治療の開発を目的とし、加工時に発生する加工力や温度の特性を求めた。そして、実用に供されている齲蝕の治療法（研削加

工法）と比較し、ウォータージェット加工の臨床応用への可能性について検討した。

2. 実験方法

2.1 ウォータージェット加工装置

歯の齲蝕部分を選択的に除去加工するために、ウォータージェット加工装置を使用した。装置の概略図を図1に示す。図1(a)は、ウォータージェットのみによって加工を行う装置で、図1(b)は、ウォータージェットに研磨材（アブレシブ）を混ぜたスラリーを噴射する加工装置を示す。図1(b)において、アブレシブのジェットノズルへの搬送は、アブレシブ供給装置内に設置されているパイプレータを駆動させることにより行った。

ウォータージェットノズルは耐摩耗性を考慮してダイヤモンドで作成したものを使用した。一方、アブレシブをいれたウォータージェット（以下アブレシブジェット）のノズルは、耐摩耗性とノズルの交換頻度を考慮し超硬で作成したものを使用した。ノズルと被加工物（歯）の距離は、0~10mmの範囲で可変する。ジェットの噴流速度は、ジェットポンプ圧を制御することによって調整した。アブレシブジェットノズルの噴射径は1mmである。また、アブレシブジェットノズルの概観寸法は長さが75mm、外径が10mmの大きさである。

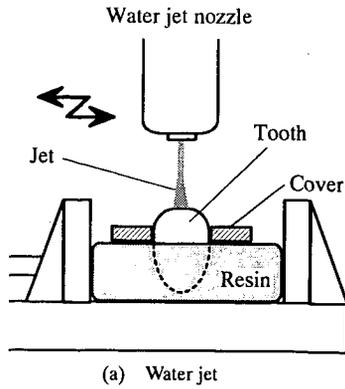
試料には、歯科医院において抜き取られた齲蝕歯や健全歯（親不知や歯槽膿漏などにより健全なまま抜かれた歯など）を使用した。これをホルムアルデヒド水溶液に浸して保存し、実験の際には水洗した。ジェット加工を行う前に、齲蝕歯を安定に保持するためそれをプラスチック容器に入れ、その中に樹脂を流し込んだ。そして歯の2/3程度が埋まる（図1）ように1日放置した。硬化後の樹脂はノズルに対向するようにして万力で保

* 原稿受付 平成11年6月22日

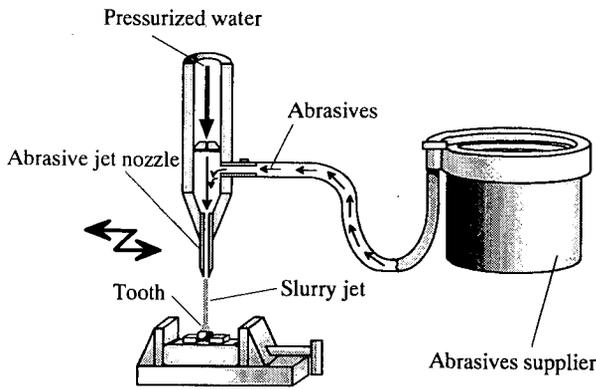
** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

*** 金沢大学大学院

† 金沢大学大学院（現、（株）荏原製作所；東京都大田区羽田旭町11-1）



(a) Water jet



(b) Abrasive water jet

Fig.1 Machining setup

持し、加工を行った。

歯の加工を行う際には、図1に示すようにウォータジェットを一定の速度で送る。加工後、歯に蝕蝕検知液を滴下して加工の状況を調べた。

ウォータジェットを用いて歯の加工を行うと、歯には加工力加わり、マイクロ領域において温度の上昇が見られる。そこで、これらの負荷圧力や温度を実際の歯科治療時に発生する負荷圧力や温度と比較するため、別途研削装置を作成し、校正用のデータを収集した。研削は、棒状ダイヤモンド砥石を一定速度で回転させて加工点に水を供給しながら行った。

ウォータジェットによる加工の場合、加工力や加工時に発生する温度は、ロードセルと熱電対を用いてそれぞれ測定した。その際温度の測定は、研削面から2mm隔たった箇所に小孔をあけて熱電対（銅-コンスタンタン）を挿入して行った。象牙質を貫通し、熱電対を加工するまで定点加工を行い、貫通する手前の最高温度を加工温度とした。被削材は、ハンドピースによる加工の場合、ウォータジェットで加工を行う場合とも、エナメル質の代替材であるアパタイトペレットを使用した。

2.2 蝕蝕部位の観察測定

ウォータジェットによる蝕蝕部位の除去加工を行う際、あらかじめ蝕蝕部位の特定と蝕蝕の程度を観察・計測しておく必要がある。本研究では、蝕蝕部位の特定は肉眼観察と、ピッカース硬度計による硬さの測定を併用して行った。蝕蝕部の硬さは健全象牙質のピッカース硬さ（HV60～80）に比べて小さいことが知られている。蝕蝕が進んで除去しなければならない部分の特定は、蝕蝕検知液を用いて行った。蝕蝕部は検知液によって赤染する⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 蝕蝕部位の特定と硬さ測定

健全な歯は、エナメル質 (Enamel) や象牙質 (Dentin)、セメント質 (Cementum) 等から構成されている。歯の保存修復作業は、主としてエナメル質、象牙質の硬組織の欠損部を対象に行われている。

エナメル質と象牙質の蝕蝕機構はそれぞれ異なっている。エナメル質は92～96%までが石灰塩であり、病変の主体は脱灰である。脱灰軟化したあと白濁もしくは着色をし、ほどなく崩壊する。蝕蝕部分は肉眼で確認することができる。このため、除去の範囲を決定することは比較的容易である。一方、象牙質は20%のコラーゲン線維を主とする有機質を含んだ生体からできている。そしてその生体内を無数の象牙細管が通っており、その中を象牙芽細胞突起が入り込んでいる。それは、栄養付与源ともなっている。したがって病変の主体は、脱灰と有機性気質の破壊の両方から成り立っている。そのため、内部が脱灰しても崩壊することなく、多くの細菌がその途中まで侵入して生存している⁶⁾。よって、象牙質の欠損の修復に先立って、蝕蝕象牙質をどの部位まで除去するかが重要な問題となる。

象牙質の蝕蝕部分の検知は、蝕蝕検知液を用いて行った。健全な象牙質と蝕蝕作用を受けた象牙質では、歯の機械的性質が異なる。機械的性質は、歯の硬さ（ピッカース硬さ）を測定して評価した。

ウォータジェット加工の対象とした歯の赤染状況の写真と象牙質の蝕蝕部分断面をピッカース硬さで測定した硬さ測定マップを図2に示す。写真の赤染部分と赤染していない部分の境界を硬さ測定マップに示す。図2から象牙質の蝕蝕部分は、歯の上部に近づくほどピッカース硬さの値は低くなっており、HV10～30にまで低下している。また、HV40付近で蝕蝕部分と健全部分との境界が赤染して存在しており、健全象牙質のピッカース硬さがHV60～80であることを考慮すると明らかな違いがみられる。このことから、健全部分と蝕蝕部分とは硬さに大きな違いが見られることがわかる。この結果から、ウォータジェットの特徴を生かして蝕蝕部分の選択的除去が可能であるといえる。

エナメル質の蝕蝕は、歯垢などによって増殖したミュータンス連鎖球菌が生み出す有機酸（乳酸）の作用により、りん酸カルシウムが電離するために起こる。本実験では、人の歯のエナメル質部の硬さを直接測定せず、人工的に蝕蝕部を生成した模造歯について検討を行った。模造歯（エナメル質部）は次に述べる過程で作成した。

蝕蝕の機構はエナメル質の脱灰であるため、それと同質にする必要から、エナメル質組織部の代替材であるアパタイトペレットを乳酸（市販品）に4～5週間浸し、脱灰を確認するため、ピッカース硬度計でアパタイトペレットの表面を測定した。図3に脱灰アパタイトペレットのピッカース硬さを示す。図3から、表面からの距離が0.3～0.4mmあたりまで脱灰が進行している様子がわかる。また、硬さも約1/3まで低下している。健全なエナメル質の歯のピッカース硬さがHV300～400であることと比較しても、その値は大きく異なるといえる。

3.2 蝕蝕部位のウォータジェット加工と研削加工

図4に、ウォータジェットで実際の歯を加工したときの加工前後の状態を示す。実験は、表1（No.1）に示す加工条件で行

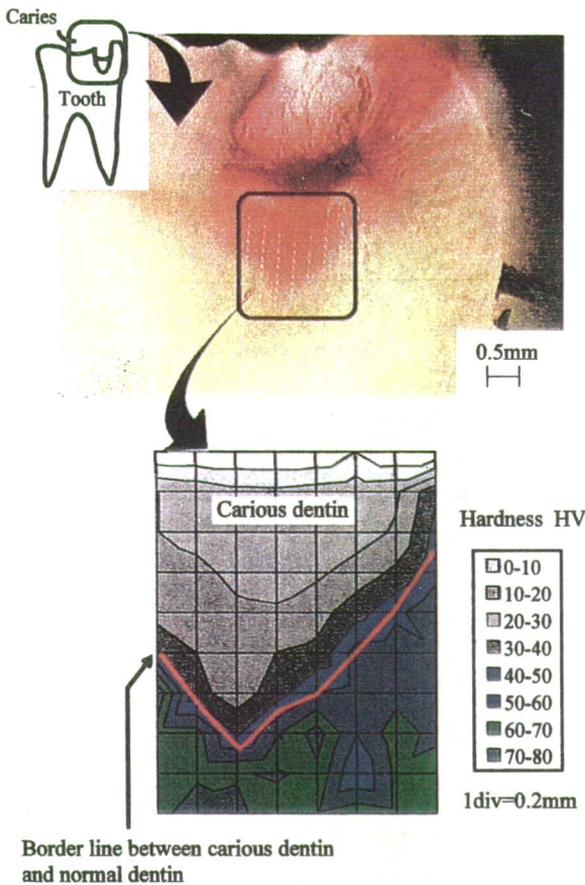


Fig.2 Vickers hardness of carious dentin

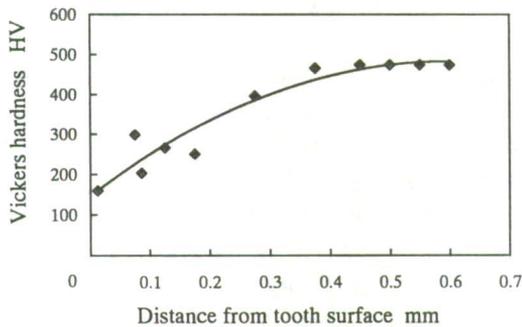


Fig.3 Relation between distance from surface and hardness

った。Dw はウォータージェットノズル径、Da はアプレシブジェットノズル径である。圧力 44MPa 時には加工時の水量は約 8ml/s である。図 4 から、象牙質部に比べエナメル質部は硬質なため、表 1 の加工条件では象牙質部のみ加工され、エナメル質部の加工状況については判然としなかった。象牙質部の加工が確実に行われたかどうか確認するため、加工後の齲歯に齲蝕検知液を再度滴下した。しかし赤染反応がなく、齲蝕部が除去されたことがわかる。

エナメル質部を水だけで加工することは、低圧ジェットでは困難である。そのため、研磨材をウォータージェットに添加するアプレシブジェット加工を試みた。研磨材には Garnet #60 を用いた。アプレシブジェットで齲歯を加工したときの状態を図 5 に示す。実験は、図 4 と同様に表 1 (No.2) に示す加工条件で行った。図 5 から、齲蝕象牙質部が加工されている様子がわかる。しかしながら、本実験条件の下では、アプレシブジェットの加工能力が格段に向上するため、再石灰化可能な健全な象牙

Table 1 Experimental conditions

No.	Nozzle diameter mm	Traverse rate mm/s	Stand-off distance mm	Pump pressure MPa	Abrasive mass flow rate (Garnet #60) g/min
1	Dw=0.2	1.0	10	44	-
2	Dw=0.2 Da=1.0	1.0	10	44	5.0

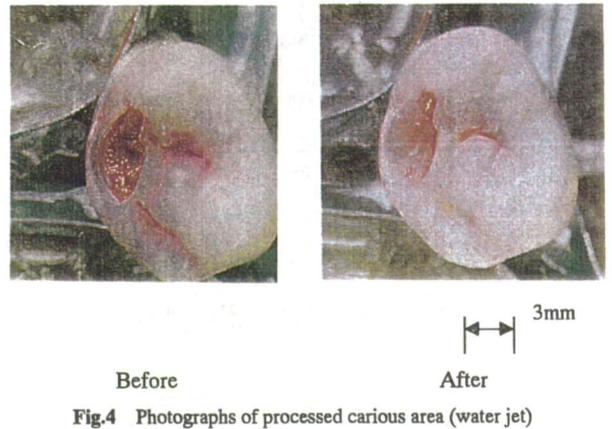


Fig.4 Photographs of processed carious area (water jet)

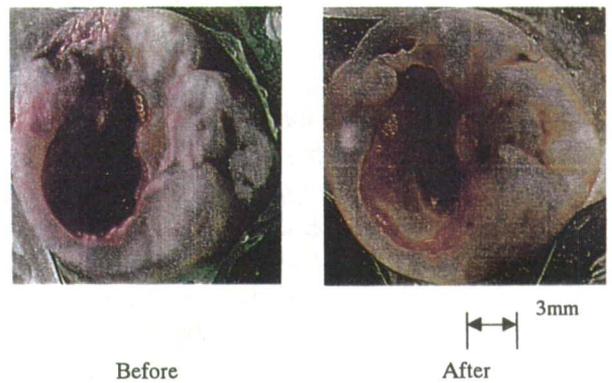


Fig.5 Photographs of processed carious area (abrasive water jet)

質部までも除去されるといった問題がある。

齲蝕部をハンドピースを用いて研削することで除去する加工法の場合、時として「痛み」を惹起する場合がある。露出した象牙質が研削によって何らかの刺激を受けて反応（象牙質知覚と呼ばれる）した結果生ずる。歯の刺激は、研削砥石によって与えられる機械的な圧力のほかに、研削に伴って発生する研削熱がある。

そこで、ハンドピースを用いる研削加工（在来法）とウォータージェットによる加工（本研究の加工法）で、加工に伴う温度の上昇がいかなる程度であるのかを検討した。ハンドピースでの実験は、スティック状のダイヤモンド砥石を用い、工具回転速度を 278000rpm（無負荷時）、研削速度を 1400m/min、テーブル送り速度を 1mm/s、切込み深さを 0.05、0.10、0.15mm の 3 通りに変えて行った。アプレシブジェットによる加工は、図 1(b) に示した実験装置で行った。また、被削材にはアパタイトレットを用いた。

図 6 に、単位時間あたりの除去加工量と加工力の関係を示す。研磨材には Garnet #100 を使用し、供給量は 20g/min とした。加工力はすべて垂直方向成分のみである。図 6 から、研削の場合、アプレシブジェットの場合とも、除去量が増す

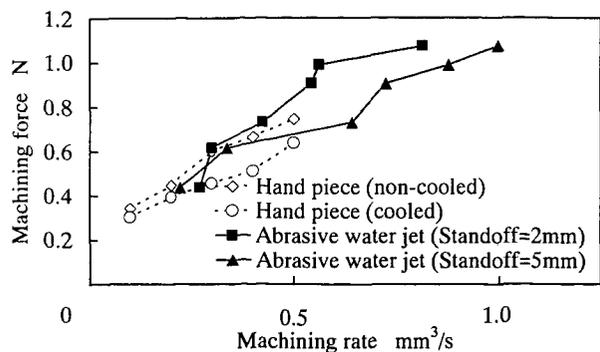


Fig.6 Relation between machining rate and cutting force

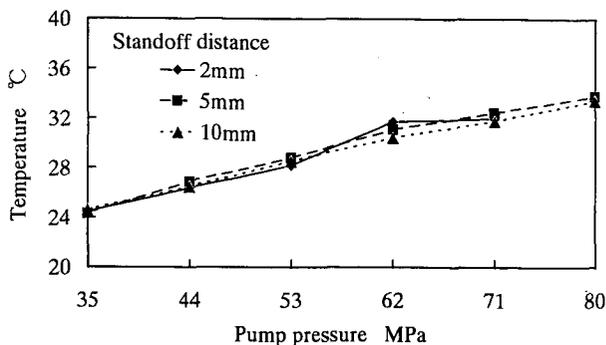


Fig.8 Relation between pump pressure and temperature

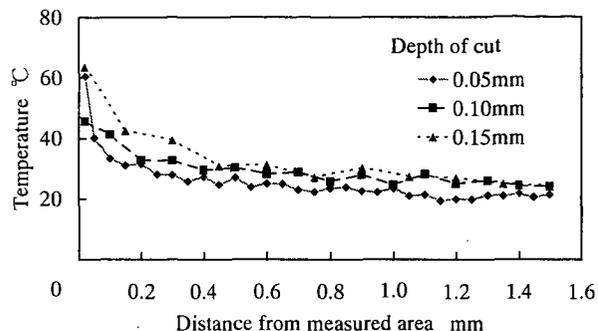


Fig.7 Relation between distance from measured area and temperature

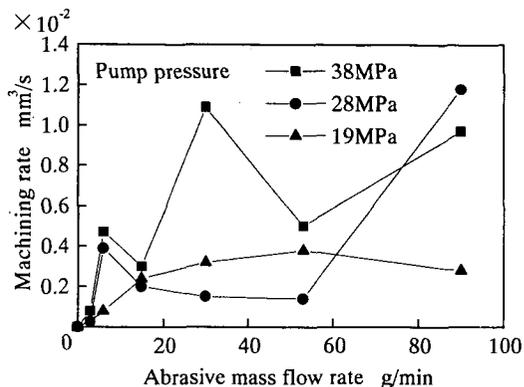


Fig.9 Relation between abrasives mass flow rate and machining area

につれて次第に加工力が増加する様子がわかる。ハンドピースとアブレイブジェットで加工力の絶対値に大きな差は見られない。しかし、ハンドピースの場合、冷却を施した湿式の場合と施さない乾式の場合とでは、加工力の値が異なる。冷却した場合の方が、加工力が小さい。一方、アブレイブジェットの場合は、スタンドオフ値（Standoff distance：ノズルから加工部分までの距離）によって加工力の値が異なる。スタンドオフ値が小さい場合には加工力が大きくなるのが図6から推察される。

図7に、ハンドピースを使用して研削加工を行った場合の温度測定結果を示す。温度の測定は、研削面から2mm隔たった箇所に小孔をあけて熱電対（銅-コンスタンタン）を挿入して行った。図7の横軸は研削点からの距離を表している。図7から、いずれの切込み深さの場合とも、研削点から離れるにつれ急激に温度が下がり、約0.3mmの距離の所ではほぼ一定の値に収束し、それ以後の距離では極めて緩やかに減少していく。切込み深さが大きい場合研削温度も高い。切込み量が0.05mmと小さい場合でも約50°Cの高温となる。

図8にウォータジェット加工時の温度の測定結果を示す。温度の測定は、図7同様、研削面から2mm隔たった箇所に小孔をあけて熱電対を挿入して行った。加工は、研磨材を添加せず、ウォータジェット加工のみについて行った。図8から、ウォータジェット加工の場合、ポンプ圧力が増すにつれて次第に温度も高くなっていく様子がわかる。しかし、その絶対値はスタンドオフ値にほとんど依存しない。また、ポンプ圧力を大きくして71MPaに設定した場合でも、32°Cほどまでしか温度が上昇しなかった。これは、ジェットによる強制冷却効果が大きいと考えられる。温度の観点から見る限り、ハンドピースによる研削加工の場合よりもウォータジェットによる除去加工の方が優れているといえる。

3.3 くるみのパウダによるジェット加工

ウォータジェット加工で憂慮すべき点は、誤動作による歯以外の部分（歯茎など）へのジェットの噴射であり、人体に損傷を与える恐れがある。これを避けるためには、ジェット圧力を下げることが望ましいが、加工能率の点からおのずと限度がある。そのため、前述した通りウォータジェットに研磨材を混入してスラリーとして加工力をあげ、噴射加工を行った。

歯の治療の場合、研磨材は人体に無害なものでなければならない。本研究では、天然素材の一種であるくるみの殻の粉末（モース硬さ2.5~3.0）を用いて実験を行った。また、加工物として厚さ5mmにスライスした歯（健全な象牙質の歯）を用いた。

図9に、アブレイブ供給量と除去加工量の関係を示す。グラフに幾分ばらつきはみられるものの、アブレイブ供給量が増えるにつれて加工量が増加することがわかる。加工量は、ポンプ圧力が大きいほど多い。また、図9からアブレイブの供給が無い場合は、ポンプ圧力が19~38MPaの場合においても加工が行われた様子は見られなかった。

しかしながら、アブレイブを幾分なりとも供給し始めると加工がなされる様子が図9から認められる。ポンプ圧力が最も低い19MPaの場合でも加工が行われることがわかる。すなわち、アブレイブを供給することによって低圧加工が可能となる。当然なことであるが、アブレイブ供給量が少ないと加工能率も悪くなる。供給量としては、15 g/min以上にとると加工能率が向上する。

図10に、アブレイブ供給量と加工力との関係を示す。図10から、アブレイブ供給量を増やすと急激に加工力が低下し、その後7~8g/minの所ではほぼ一定の値となる。それ以降、供給量を増やしていても加工圧力の値は変わらない。しかし、加工力の絶対値はポンプ圧力が大きい方が大きい。実際のハンド

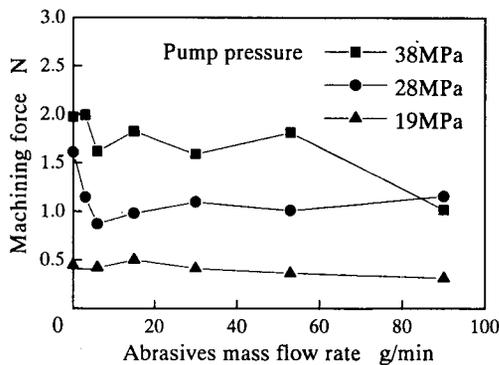


Fig.10 Relation between abrasives mass flow rate and cutting force

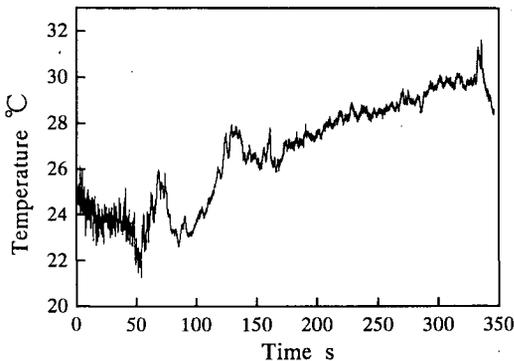


Fig.11 Relation between temperature and machining time

ピースによる研削加工の時に発生する加工力と比較しても、アプレシブジェット加工の加工力と大きな違いは見られない。しかし、加工能率の点からハンドピースと比較すると、劣っている。

次に、圧力 38MPa とし、アプレシブ供給量を 15g/min として健全な象牙質の加工を行った。温度の測定は、象牙質表面から約 2mm の部分に熱電対を包埋し、測定部の真上からアプレシブジェット加工を行った。加工は、象牙質を貫通するまで続行した。図 11 に、加工時に発生する温度の時間経過を示す。

図 11 から、時間が経つにつれ温度が次第に上昇していく様子がわかる。加工によって象牙質は次第に削りとられ、それに伴って測定点と加工点との距離は狭まっていき、やがて一致する。このときの温度を加工点温度とした。

図 11 から、320~330 秒を超えた辺りで温度は下がる様子が見られる。これは、この辺りで熱電対付近の加工が終わったためである。本実験結果から、体温を超えるほどの温度は発生し

ておらず、高温で生じる刺激は発生しないと言うことができ、アプレシブジェット加工の臨床応用への可能性が極めて高いといえる。

4. 結 論

ハンドピースによる歯科治療法に代わる方法として、ウォータージェット加工方法を利用し、実験的検討を行った。その結果、次の結論を得た。

- (1) エナメル質（アパタイトペレット）を脱灰した材料や象牙質蝕蝕部の硬さをマイクロピッカー硬度計で測定し、硬度のマッピングを行った。
- (2) アパタイトペレットを加工したときのポンプ圧力とスタンドオフ距離、除去加工量の関係を明らかにした。
- (3) ハンドピースを用いた研削加工とアプレシブジェット加工の加工力や加工熱を計測し、比較検討した。その結果、ウォータージェットは歯科治療に適用可能であることが明らかになった。
- (4) くるみを使用したアプレシブジェット加工により、象牙質部分の加工が確認できた。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力をいただいた金沢大学工学部技術専門職員の浅野久志氏、(株)黒田精工の井口信明氏、歯の提供並びに歯に関して多くのご指導をいただいた中山歯科医院の院長中山芳男氏、平尾佳子氏（現東京医科歯科大学聴講生）に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松本光吉, 津田忠政: ここまで来たレーザの歯科治療への応用, Dental Diamond, (1992) 40.
- 2) 津田忠政: 拡大するレーザの臨床応用, 歯界展望, 81-4 (1993) 806.
- 3) 厨川常元, 金原 撰, 堀口尚司, 庄可克雄, 山田敏元, 田上順次: マイクロアプレシブジェットマシニングによる蝕蝕歯質の選択的除去に関する研究, 1996 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, 1B22 (1996) 67.
- 4) 日本ウォータージェット学会編: ウォータージェット技術事典, 丸善株式会社, (1993) 9.
- 5) 蝕蝕検知液 CARIES DETECTOR 取扱説明書, (株)クラレ, (1996).
- 6) 須賀昭一: 図説蝕蝕学, 医歯薬出版, (1991) 139.