骨切除時の熱侵襲を抑制する医療用研削工具 (冷却水としての生理食塩水の影響)

水谷 建^{*1}, 榎本 俊之^{*2}, 小園 典也^{*3}, 佐竹 うらら^{*2}, 杉原 達哉^{*2}

Surgical grinding tool for minimally thermal invasive surgery during bone resection (Saline as irrigation)

Takeru MIZUTANI^{*1}, Toshiyuki ENOMOTO^{*2}, Fumiya KOZONO^{*3},
Urara SATAKE^{*2} and Tatsuya SUGIHARA^{*2}

^{*1,*2,*3} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Received: 17 August 2017; Revised: 17 October 2017; Accepted: 22 January 2018

Abstract

Bone grinding with miniature ball-end diamond wheels, called diamond burs by surgeons, is widely used for surgical resection of bones, especially in orthopedic surgery and neurosurgery. During bone resection, a considerable amount of grinding heat is generated, which can cause thermal injury to adjacent tissues, including nerves. To address this problem, several types of countermeasures such as irrigation, namely coolant supplying methods, have been developed; however, the existing measures cannot suppress the excessive heat generation. To solve this problem, our previous studies proposed surgical diamond grinding wheels with titanium dioxide (TiO₂) particles deposited surfaces for preventing strong loading of bone swarf on the wheel surfaces due to hydrophilicity of TiO₂ and found that such wheels reduced the grinding-induced temperature elevation. However, in the experiments, pure water was used as coolant instead of saline, which is typically used in surgery. Then the grinding performances of the wheels under a saline supply were investigated. The experimental results revealed that sodium ion in saline promoted the strong loading on the wheel surface through Maillard reaction and, as a result, the grinding-induced temperature increased rapidly and finally exceeded the threshold for thermal injury. Based on our findings, new grinding wheels with fluorine-treated surfaces were developed in the hopes of promptly shedding of the adhesion of bone swarf on the wheel surface. These wheels significantly and stably suppressed bone temperature elevation compared with commercial and previously developed wheels.

Keywords : Grinding, Tool, Diamond wheel, Grinding heat, Loading, Surgical device, Diamond bur, Minimally invasive surgery, Bone resection

1. 緒 言

整形外科手術や脳外科手術においては硬組織である骨の切除が頻繁に行われ、そこでは医療機器として小径のダイヤモンド研削砥石、すなわちダイヤモンドバーが用いられる。その際、骨切除点で生じる発熱が原因となり、神経といった重要部位をはじめ、周辺組織への熱侵襲が発生してしまうため、その抑制は極めて重要な課題となっている (細野他, 2009)。実際には冷却水を切除点に供給しながら手術は行われ、発熱をより抑制するためにはその供給量を増加することが容易に実施可能な対策として考えられる。しかし、例えば、外側側頭骨切除術においては、回転している工具が重要な部位に接触するだけで重篤な後遺症を引き起こしてしまうため、術部の視野の確保は極めて重要で、そのために冷却水供給量を通常よりも減少させることが望まれており (犬塚他, 1987) (長谷川, 2016)、供給量を増加することはできない。

No.17-00356 [DOI:10.1299/transjsme.17-00356], J-STAGE Advance Publication date : 1 February, 2018

^{*1} 学生員, 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科

^{*3} 大阪大学大学院工学研究科

E-mail of corresponding author: mizutani@cape.mech.eng.osaka-u.ac.jp

著者ら (重田他, 2013) は, 骨切除における発熱の理由を明らかにするために, ダイヤモンドバーを用いて手術環境に近い条件で骨の研削加工特性を評価した. その結果, 骨の主成分であるヒドロキシアパタイトが冷却水中の水分を吸収することで, 骨切りくずが水和殻を形成し (須田他, 1985) ダイヤモンドバー表面に付着し, さらに切除点における脱水反応により付着が強固となり, それにより切除点で大きな発熱が生じることを見出した. そして工具表面の親水性を高めることで強固な切りくず付着を防ぐことを目的に, TiO_2 微粒子を工具表面に付与したダイヤモンドバーを開発し, 実際に研削加工時における温度上昇を抑制することができた. しかし, そこでは冷却水として, 実際の手術現場で用いられる生理食塩水 (林, 1992) ではなく純水を用いており, またダイヤモンドバーの回転数も手術現場で用いられるそれに比べ極めて低い設定であった.

そこで本研究では, 骨切除時の発熱による周辺組織への熱侵襲の抑制を目的に, 実際の外科手術と同じ条件, つまり, 生理食塩水供給時における骨の研削加工特性を評価し, そこで得られた知見にもとづき, 発熱を大きく抑制できる工具を開発した.

2. 生理食塩水供給時における骨の研削加工特性

2・1 加工実験およびその評価方法

既報 (重田他, 2013) 同様に, 工作機械を用いて実際の手術環境を模擬した骨の研削加工実験を行った. 加工条件は骨の切除手術時と同条件 (林, 1992) になるように, 既報 (重田他, 2013) で用いた条件に対して, ダイヤモンドバーの回転数を 5000 rpm から 50000 rpm に, そして冷却水を純水から生理食塩水に変え, さらに被削材についてはより生体に近い状態を再現するために, 乾燥骨ではなく含水骨を用いた (表 1).

図 1 (重田他, 2013) に本研究で用いたダイヤモンドバー (ナカニシ, No. 11217, 直径 5 mm, 粒度 #130) の全体像および走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope ; SEM, 日立ハイテクノロジー TM3000) による観察像を示す. 加工実験にはマシニングセンタ (ヤマザキマザック, AVJ-18) を用い, 電動式超精密高速スピンド

Table 1 Bone grinding conditions

Workpiece	Bovine femoral compact bone (Wet)
Tool	Diamond bur (NAKANISHI INC. No.11217)
Diamond grain size	#130
Tool geometries	Nose shape: Round Diameter: 5 mm
Spindle rotational speed	50000 rpm
Tool feed	1 mm/min
Coolant	Saline (180 mL/h)

Fig. 1 Overview and enlarged view of diamond bur (Shigeta et al., 2013)

ル (ナカニシ, HES810) にダイヤモンドバーをとりつけて加工した。なお, ダイヤモンドバーは外科手術専用の製品ではないが, 滅菌処理以外の仕様については, 外科手術で多用される工具と同一である。被削材は牛大腿骨の乾燥骨を長さ 25 mm × 幅 15 mm × 厚さ 1.5 mm で切り取ることで作製した。なお脊椎手術においては神経に近接する皮質骨部分のみをダイヤモンドバーで切除するため, 被削材は皮質骨のみとし, 海綿骨は被削材作製時に取り除いた。また, 骨は乾湿程度によって硬度等の機械的特性が大きく変化するため, 生体内の骨により近くなるように乾燥骨を生理食塩水に 6 時間以上浸漬させ作製した含水骨 (含水量 10 ~ 20 wt%, 生体内の骨は 15 wt% (須田他, 1985)) を実験に用いた。

加工中の温度の評価は, 手術時に神経に近接している部分の温度が特に重要になるため, 加工面裏側の温度を熱電対 (大晃電工社 K 型, 線径 0.2 mm) によって計測した。また, 加工中に生じる研削トルクをスピンドルのコントロールユニット (ナカニシ, E3000) を用いて計測した。骨の研削加工では, 工具を被削材に対して垂直にした状態で定速送り (1 mm/min) を行い, 工具が骨を貫通する直前まで行った。冷却水の供給量に関しては, 供給量 540 mL/h では生体への熱侵襲発生の危険性のある温度である 50 °C 程度 (Krause, 1987) に術部温度を抑制できる (細野他, 2009) が, 180 mL/h では供給なしとほぼ変わらず 170 °C 程度にまで上昇することから, 本研究では既報 (重田他, 2013) と同様, 骨の周辺組織への侵襲抑制には不十分と考えられる 180 mL/h とした。

2・2 市販工具および TiO₂ 共析工具の研削加工特性

市販工具 (図 1) および既報 (重田他, 2013) で開発した工具を用いて, 加工実験を行った。後者の既開発工具は, 親水性を発現するアナターゼ型 TiO₂ (下吹越, 1999) (テイカ製 TITANIX JA-1, 粒径 180 nm) を電気めっき法により市販工具表面に共析させた工具であり, 供給する冷却水として純水を用いた場合には, 骨切りくずの付着を抑制でき, その結果, 温度上昇を大幅に抑制できた (重田他, 2013)。本研究では, さらに親水性を高めるため, より粒径の小さい TiO₂ 粒子 (テイカ製 AMT-100, 粒径 6 nm) を用いた。

市販工具の研削加工特性を図 2 (図中の温度は最高到達温度) に示す。研削加工開始から 25~70 秒あたりで急激に温度が上昇し, 最高値として 90 °C まで上昇した。ここで, 既報 (重田他, 2013) における市販工具を用いた実験では 100 °C をこえたが, そのように差異が生じたのは, 本実験では被削材を含水骨にしたためと考えられる。そして, 70 秒が経過した付近で温度が急激に低下し, 80 秒付近で再び上昇した。このように組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C をこえており, 純水ではなく生理食塩水を用いた場合も, 180 mL/h 程度の供給量では熱侵襲を抑制できないことがわかった。また, 既報 (重田他, 2013) における純水供給時と同様に 25~70 秒付近で急激に温度とトルクが上昇し, 加工後の工具表面には切りくずが付着していた (図 3)。しかし, 付着した切りくずの色が異なり, 純水供給時 (重田他, 2013) には白色であったが, 本条件, つまり生理食塩水供給時では褐色となった (図 3(a))。ここで, 既報 (重田他, 2013) とは加工条件として冷却水の種類のほかに, 工具回転

Fig. 2 Changes in workpiece temperature and grinding torque using commercial tool with time
Grinding-induced temperature increased rapidly and finally exceed threshold for thermal injury.

Fig. 3 Surface of commercial tool after grinding
Severe loading occurred on wheel surface and its color was brown.

Fig. 4 Grinding characteristics of commercial tool with supplying pure water
Grinding-induced temperature increased gradually and loading on tool surface was white.

Fig. 5 Grinding characteristics of TiO₂ deposited tool
Grinding-induced temperature increased gradually and, however, the temperature finally exceeded the threshold for thermal injury. And loading on tool surface was brown.

数および被削材である骨の状態についても変化させたため、冷却水種類のみの影響を確認するために、表 1 の条件において冷却水を純水として加工実験を行った (図 4)。同図からわかるように、温度は組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C をこえたものの、生理食塩水供給時と異なり、急激な温度上昇は発生せず (図 4 (a))、また工具に付着していた切りくずも褐色ではなく、白色であった (図 4 (b))。なお、同条件で加工実験を 3 回繰り返し行い、加工特性の再現性が高いことを確認した。

次に、純水供給時には骨切りくずの付着および温度上昇を抑制できた TiO₂ 共析工具の研削加工特性を図 5 に示す。このように、市販工具に比べると温度上昇を抑えられたが、生理食塩水供給時には組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C 以下に抑制することはできなかった (図 5 (a))。また、加工後の工具表面には市販工具と同様、褐色の切りくずが付着しており (図 5 (b))、既開発の TiO₂ 共析工具は外科手術には適用できないことがわかった。

以上の結果より、骨切除時の温度上昇の要因としては、既報 (重田他, 2013) で明らかになった冷却水中の水分のほかに、生理食塩水中の成分も挙げられることが推測された。

3. 生理食塩水供給時における温度上昇のメカニズム

生理食塩水中の成分、すなわち NaCl (生理食塩水における濃度は 9 g/L) が切りくず付着に及ぼす影響を検討し、温度上昇のメカニズムについて明らかにすることとした。ここで、加工対象の皮質骨は無機質であるヒドロ

キシアパタイトが約 50%, 有機質であるタンパク質が約 30%, 多糖体が約 5%, 残り 15%が水分から構成されている (須田他, 1985). まず, 骨成分の半分程度を占めるヒドロキシアパタイトに着目した. ヒドロキシアパタイトは特有の結晶構造を持ち, イオン交換特性, イオン吸着特性などの多くの機能を有することが知られている (須田他, 1985) (田中, 町長, 2005). 特に構造中に親水基 (OH) を持ち, またその結晶が非常に小さく, 単位重量当たりの表面積が非常に大きいことから, 水中のヒドロキシアパタイトは水を引きつけ水和殻を形成し, 1.9 倍もの体積になる. これらの性質から, 湿式加工において排出された骨の切りくずは, 周囲の水分を積極的に吸収し水和殻を形成し, 粘着性が増し, 工具表面に付着しやすくなる. さらに, 冷却水に生理食塩水を用いた場合, 切りくずが水分を吸収することで, 生理食塩水中の NaCl の濃度が増加し, 過飽和状態となり析出することで NaCl の固体架橋 (遠藤, 1994) が発生し, これにより骨の切りくずと工具表面との付着力が増加し, その結果, 純水使用時に比べ切りくずがより強固に固化しやすくなると考えられる.

次に, 皮質骨内の有機成分に着目した. 皮質骨中の有機質はそのほとんどがタンパク質からなり, 多糖体も少量含まれる. タンパク質は糖類とあわせて加熱されると, 金属イオンを触媒とし褐色物質を生成する, すなわちメイラード反応 (久田, 2009) を起こす. この反応が起きると, 組織は褐色化し, 硬化する. このように, 骨切除時には生理食塩水中の金属イオンである Na イオンがメイラード反応を促進し, 付着した切りくずが褐色化や硬化を起こし, 工具表面に強固に付着したと考えられる.

以上の反応と前章で述べた生理食塩水供給時における骨の研削加工特性との対応を検討するために, 図 2 にお

(a) Three phases of changes in workpiece temperature and grinding torque using commercial tool with time (Fig. 2)

Fig.6 Grinding model of commercial tool with supplying saline

いて温度が緩やかに上昇した箇所 (Phase 1 : 加工開始後 25 秒まで, 図 6 (a)参照), 温度が急激に上昇した箇所 (Phase 2 : 加工開始後 25 秒から 70 秒までおよび加工開始後 80 秒以降),そして温度が低下した箇所 (Phase 3 : 加工開始後 70 秒付近) で加工を中断し, 工具表面を観察した. Phase 1 では工具に白色の切りくずが付着しており (図 6 (b-1)), Phase 2 では純水を冷却水に用いた場合は工具に白色の切りくずが付着していた (重田他, 2013) が, 生理食塩水を用いた本実験は褐色の切りくずが付着していた (図 6 (b-2)). そして Phase 3 では工具表面には切りくずはほとんど付着していなかった (図 6 (b-3)). また, Phase 2 における褐色化した切りくずは, 超音波洗浄を行わなければ除去できず, 工具表面に強固に付着していた.

これらの結果から, 生理食塩水供給時における温度上昇のメカニズムとしては, 以下のように考えられる.

(A) Phase 1 : 骨の主成分であるヒドロキシアパタイトの吸水による粘着性の増加および NaCl の固体架橋により, 白色の骨切りくずが工具表面に付着し, 温度や研削トルクが上昇し始める (図 6 (c-1)).

(B) Phase 2 : 工具に付着した切りくず中に含まれるタンパク質と多糖体が Na イオンによりメイラード反応を起こし, 褐色化した切りくずが硬化し, 強固な目づまりとなり, 急激に温度や研削トルクが上昇する (図 6 (c-2)).

(C) Phase 3 : 研削トルクが上昇することで硬化した切りくずが工具表面より剥離し, 温度や研削トルクが低下する (図 6 (c-3)).

以上の加工モデルにもとづくと, 温度上昇の抑制方法として, Phase 1 において白色の切りくずの付着の抑制, Phase 2 においてメイラード反応による強固な切りくずの付着の抑制, そして Phase 3 において付着した切りくずの剥離の促進, といった 3 つのアプローチが考えられる. この中で, 既報 (重田他, 2013) では Phase 1 における対策として TiO_2 共析工具を開発したが, 生理食塩水供給時には Phase 2 におけるメイラード反応による切りくずの強固な付着が生じ, 温度上昇を抑制できなかった. そこで, Phase 2 および Phase 3 の研削加工特性に着目した温度上昇の抑制を検討することとした.

4. 骨切りくずの工具表面への強固な付着抑制による温度上昇の抑制

4・1 金属イオン低含有液の冷却水への適用

図 6 の加工モデル中の Phase 2 における急激な温度上昇を抑制する, つまりメイラード反応を抑制し, 強固な切りくずの付着の抑制を行うことで温度上昇を抑制することを試みた. 具体的には, メイラード反応を促進する要因となる金属イオンの含有量を生理食塩水に比べて減らした冷却水を用いることとした. 冷却水としては生理食塩水と同様に人体の浸透圧 (内田, 2002) と等しい等張液である, 5%ブドウ糖液 (大塚製薬製) と KN3 号輸液 (大塚製薬製) を用いた (表 2). これらの液では金属イオンは前者ではゼロで, 後者では 70 mEq/L 含有されており, 生理食塩水 (150 mEq/L) より低い含有量となっている.

実験結果を図 7 に示す. これらからわかるように, いずれの冷却水を用いても温度上昇の抑制を達成できなかった. 5%ブドウ糖液を冷却水として用いた場合 (図 7) は, 加工部全体を覆う切りくずの付着はなかった (図 7 (b)) にも関わらず温度が上昇した. これは, 冷却水内の糖が加熱によって水分を失うことで組織が硬化, 褐色化するカラメル化 (木村, 1995) と呼ばれる反応が生じたために, 工具表面に糖の固着が発生し, 温度が上昇したと考えられる. また, KN3 号輸液を冷却水として用いた場合 (図 7) は, 切りくずの褐色化が確認され (図 7 (c)), メイラード反応による温度上昇が生じていた. このことから, 冷却水内に金属イオンが少量でも含まれるとメイラード反応が発生し, 切りくずが工具へ強く固着してしまうと考えられる.

Table 2 Components of coolants

5% Glucose solution		
Component	Glucose	50 g/L (5%)
KN NO.3 Injection		
Electrolyte concentration	Na ion	50 mEq/L
	K ion	20 mEq/L
	Cl ion	50 mEq/L

(a) Changes in workpiece temperature with grinding time (b) Glucose solution (c) KN NO.3 injection

Fig. 7 Grinding characteristics of commercial tool With supplying 5% glucose solution, grinding-induced temperature increased rapidly and finally exceeded the threshold for thermal injury. And glucose promoted the strong loading on the tool surface through caramelization. With supplying KN NO.3 injection, Grinding-induced temperature increased gradually and, however, the temperature finally exceeded the threshold. And metal ions in the injection promoted the strong loading on the tool surface through Maillard reaction.

4・2 生理食塩水へのメイラード反応抑制剤の添加

前節において、金属イオンを少量でも含有した冷却水ではメイラード反応を抑制できなかったため、メイラード反応を抑制する効果のあるクエン酸 (渡辺, 2014) およびリボフラビン (白河, 永井, 2015) を生理食塩水に添加し、飽和させた冷却水 (クエン酸 700 g/L, リボフラビン 60 mg/L) を作製し、加工実験を行った (図 8). クエン酸を生理食塩水に添加した場合、加工後の工具表面には褐色の切りくずの付着はなく (図 9 (a)), メイラード反応を抑制できたが、温度上昇の抑制効果が不十分であった (図 8). クエン酸の濃度は 700 g/L であり、固体架橋 (遠藤他, 1994) (峯尾他, 2009) が発生し、切りくずがより強固に付着し、温度が上昇したと考えられる. 一方、リボフラビンを添加した場合、温度上昇をある程度抑制できた (図 8) が、加工後の工具表面に褐色の切りくずが付着しており (図 9 (b)), メイラード反応の抑制が不十分であったと考えられる.

Fig. 8 Changes in workpiece temperature using commercial tool Grinding-induced temperature increased rapidly with supplying saline with citric acid added. Grinding-induced temperature increased gradually with supplying saline with riboflavin added.

(a) Addition of citric acid Loading on tool surface was white. Maillard reaction was inhibited. (b) Addition of riboflavin Loading on tool surface was brown. Maillard reaction was not inhibited

Fig. 9 Surfaces of commercial tools after grinding

5. 骨切りくずの工具表面からの剥離性向上による温度上昇の抑制

前章において、図 6 の加工モデル中の Phase 2 における急激な温度上昇を抑制する、つまりメイラード反応および固体架橋反応を同時に抑制することは極めて困難であることがわかった。そこでそれらの反応が発生し急激な温度上昇が生じたとしても、工具表面に付着した切りくずをすみやかに剥離させることで温度上昇の時間を短くし、到達最高温度を低下させることを検討した。すなわち、図 6 の加工モデルにおいて、Phase 2 を極力短い時間とし、すみやかに Phase 3 に移行させることを試みた。そして、付着した切りくずの剥離性を向上させるために、工具表面をフッ素処理、具体的にはトリフルオロメチル (CF_3) 基を有する自己集積化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer, 膜処理剤: ティー・ティー・エム製 WR-LIVE④) を工具表面に形成した。トリフルオロメチル基は表面エネルギーが極めて低く (山辺, 松尾, 1987), 他の物質との相互作用が弱いいため、骨切りくずとの付着力が弱く優れた剥離性を実現することが期待できる。そして自己積化単分子膜は、吸着分子同士の相互作用によって会合体構成分子が密に集合し、分子配向と配列が規則的な構造が自発的に形成される (杉村, 2010) ため、比較的容易な処理で、均質な膜を再現性よく形成することができる。この膜処理剤は、図 10 に示すように、ケイ素を中心にトリフルオロメチル基と水酸基を有し、その水酸基が金属表面の水酸基と脱水縮合することで高い密着性を発揮するシラン基となる。そこで、超音波洗浄 (アセトン 5 min, 純水 5 min) した工具にフッ素表面処理 (膜処理剤: ティー・ティー・エム製 WR-LIVE④ に工具を 1 時間ほど浸漬させた後、熱処理 (大気中, 1 時間, 80 °C)) を施してフッ素系の自己集積化単分子膜を表面に有する工具を作製した (山本他, 2010)。

図 11 に加工実験結果を示す。同図からわかるように、フッ素表面処理を行った工具を用いることで、加工後の砥石表面には褐色の切りくずが付着していた (図 11 (b)) が、組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C 以下に抑制することができた (図 11 (a))。また、加工進行とともに温度が上下に変動しており、これは次に述べるような切りくずの付着と剥離に対応して生じていると考えられる。工具表面はフッ素処理をされているため、切りくずは付着しにくい、実際にはある程度の付着は生じる。そしてその工具表面に付着した切りくずの上に水和化した切りくずがさらに付着し、加工点の圧力や熱によりメイラード反応が発生し、工具表面へ強く付着、強固な目づまりとなり温度が急上昇する。このとき、切りくず付着物そのものの固化も同時に生じ、ここで工具表面の剥離性の効果により、固化した付着物が剥離し、温度が低下する。このサイクルを 1 加工中に何度か繰り返したために、温度の上下変動が発生したと推測される。ここで、加工中に剥離が実際に発生していることを確認するために、温度上昇中および温度下降中に加工を中断し工具を観察した。図 12 からわかるように、温度上昇時には褐色の切りくずが付着し (図 12 (a)), 温度下降時には切りくずは剥離しており (図 12 (b)), 切りくずの剥離により温度が下降することを確認できた。なお、フッ素表面処理を行った工具は表面自由エネルギーが低いいため、剥離性のみならず撥水性も向上するため、図 6 の加工モデル中の Phase 1 における白色の切りくず付着の抑制も発現している可能性もあるが、図 11, 図 12 からわかるように、実際には白色およびそれに続く褐色の切りくず付着は発生した。以上のように、トリフルオロメチル基を有する自己集積化単分子膜で工具表面を処理することで温度上昇を抑制できたが、組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C 付近まで上昇してしまい、さらなる温度上昇の抑制が望まれた。そこで、切りくずの剥離性をさらに高めるために、工具表面に形成されるトリフルオロメチル基数を増加させることを考えた。具体的には、工具を洗浄した後、プラズマ処理 (処理条件: He ガス使用, 100 Pa, 100 W, 120 秒) を行い、工具表面の水酸基の量を増加させ (井手, 1985), より多くトリフル

Fig. 10 Self-assembled monolayer treatment

(a) Changes in workpiece temperature with grinding time (b) Surface of fluorine-treated tool after grinding
Fig. 11 Grinding characteristics of fluorine-treated tool
Grinding-induced temperature increased and decreased gradually and did not exceed the threshold for thermal injury.

(a) In increasing in temperature (b) In decreasing in temperature
Fig. 12 Surfaces of fluorine-treated tools just after grinding interrupt
(left side : Optical microscope image, right side : Scanning electron microscope image)

(a) Changes in workpiece temperature with grinding time (b) Surface of plasma-fluorine-treated tool after grinding
Fig. 13 Grinding characteristics of plasma-fluorine-treated tool
Grinding-induced temperature increased and decreased gradually and did not exceed the threshold for thermal injury

オロメチル基を付与できるようにした。ここで処理の効果を確認するために、水滴接触角の計測を検討した。プラズマ処理を行った工具表面は親水性である水酸基が増加するため未処理のものに対して水滴接触角が減少、プラズマ処理後にフッ素表面処理（プラズマ-フッ素表面処理）を行った工具表面は撥水性のフッ素が増加するため水滴接触角が増加すると考えられるが、工具表面の水滴接触角を測定することは困難である。そこでニッケル板に同様の処理を行い、水滴接触角（3 μL ）が未処理 50.7°，プラズマ処理 6.5°，プラズマ-フッ素表面処理 102.7°と変化したことから、より多くトリフルオロメチル基を付与できたと考えられる。このようにプラズマ-フッ素表面処理を行った工具を用いることで、図 13 に示すように、加工中の温度上昇を安定に抑制でき、組織損傷を生じる危険性のある温度である 50 °C 以下に安定に維持することができた。また、同条件で 3 回、加工実験を行ったが、すべて同程度の温度上昇となり（図 14）、再現性の高い結果が得られた。

Fig. 14 Changes in workpiece temperature with grinding time using plasma-fluorine-treated tool for a plurality of times under same condition, grinding-induced temperature did not exceed the threshold for thermal injury

6. 結 言

ダイヤモンドバーを用いた骨切除時の低熱侵襲化を目的に、実際の外科手術時に冷却水として用いられる生理食塩水供給時の骨の研削加工特性に関する検討を行った。その結果、生理食塩水に含まれる NaCl がメイラード反応や固体架橋反応を促進し、骨の切りくずをダイヤモンドバー表面に強固に付着させ、それにより急激な温度上昇が生じることがわかった。この知見をもとに、急激な温度上昇の原因であるメイラード反応を化学的に抑制することを試みたが、温度上昇を抑制することはできなかった。そこで、加工中にダイヤモンドバー表面に付着した切りくずをすみやかに剥離させることで温度上昇を抑制することを目的に、ダイヤモンドバー表面をプラズマ処理し、その後にトリフルオロメチル基を用いたフッ素表面処理を行った。このように開発したダイヤモンドバーを用いることで、骨の切除において熱侵襲発生の危険性のある温度である 50 °C 以下に加工温度を抑制することができた。

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究（16H04244）および公益財団法人 池谷科学技術振興財団の助成を受けて行われたことを記し、ここに深謝申し上げます。また本研究の遂行にあたりご協力を賜りました、大阪大学大久保雄司先生ならびにテイカ株式会社に深く感謝の意を表します。

文 献

- 遠藤禎行, 向阪保雄, 鬼東秀則, 架橋液乾燥後に形成される塩類の固体架橋による付着力, 化学工学論文集, Vol.20, No.4 (1994), pp.542-558.
 長谷川信吾, 外側側頭骨切除術 ～Hints and Pitfalls～, Otology Japan, Vol.26, No.3 (2016), pp.169-172.
 林浩一郎, OS Now No.6, 整形外科基本手術手技の進歩, メジカルビュー社 (1992).

- 細野昇, 三輪俊格, 向井克容, 武中章太, 牧野孝洋, 富士武史, 高速回転ドリルによる摩擦熱は神経根を傷害する, 臨床整形外科, Vol.44, No.7 (2009), pp.643-650.
- 井手文雄, 低温プラズマ処理による表面改質, 繊維機械学会誌, Vol.38, No.4 (1985), pp.173-185.
- 犬塚一男, 瀧本勲, 稲福繁, カッティングバーの内耳に及ぼす影響について, 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol.90, No.5 (1987), pp.755-817.
- 木村進, 食品変色の化学, 光琳, (1995), p.415.
- Krause, WR., Orthogonal bone cutting: saw design and operating characteristics, Journal of Biomechanical Engineering, Vol.109, No.3 (1987), pp.263-271.
- 久田孝, にがり成分がメイラード反応に及ぼす影響とその反応生成物の抗酸化性に関する研究, 助成研究報告Ⅱ (2009), pp.249-257.
- 峯尾隼人, 斎藤結子, 大野文子, 新藤斎, NaCl 結晶間架橋のメカニズムと固結防止剤の作用, 日本海水学会誌, Vol.63, No.3 (2009), pp.183-189.
- 重田浩典, 榎本俊之, 杉原達哉, 湿潤状態における骨の特性に着目した低侵襲医療用工具の開発, 日本機械学会論文集C編, Vol.38, No.12 (2013), pp.2917-2928.
- 下吹越光秀, 光触媒の超親水性—理論と応用, 表面技術, Vol.50, No.3 (1999), pp.247-250.
- 白河潤一, 永井 竜児, 生体におけるメイラード反応の影響, 化学と生物, Vol.53, No.5 (2015), pp.299-304.
- 須田立雄, 小澤英浩, 高橋栄明, 骨の科学 (1985), 医歯薬出版.
- 杉村博之, 自己集積化単分子膜, 表面処理技術, Vol.61, No.2 (2010), p. 208.
- 杉田直彦, 光石衛, 骨のエンドミル加工における切削温度と冷却, 精密工学会誌, Vol.72, No.2 (2006), pp.276-280.
- 田中智, 町長治, ヒドロキシアパタイトとその前駆体結晶の構造類似性, 日本大学生産工学部研究報告 A, Vol.38, No. 2 (2005), pp.35-39.
- 内田俊也, 水電解質異常, 日腎会誌, Vol.44, No.1 (2002), pp.18-28.
- 渡辺寛人, メイラード反応を阻害する成分の探索, 浦上財団研究報告書, Vol.21 (2014), pp.71-76.
- 山辺正顕, 松尾仁, 含フッ素機能性材料, 有機合成化学協会誌, Vol.45, No. 6 (1987), pp.526-535.
- 山本洋之, 大久保雄司, 小川一文, 内海邦広, 高耐久フッ化炭素系化学吸着膜の離型膜としての応用に関する研究, 成形加工, Vol.22, No.2 (2010), pp.104-114.
- 安原隆雄, 三好康之, 伊達勲, 脊椎手術におけるドリリング時のミストイリゲーションシステムの有効性, 脳神経外科, Vol.38, No. 12 (2010), pp. 1103-1107.

References

- Endou, Y., Kousaka, Y. and Onitsuka, H., Adhesion force arising from solid salt bridge formed after drying of liquid bridge, Kagaku kogaku ronbunshu, Vol.20, No.4 (1994), pp.542-558 (in Japanese).
- Hasegawa, S., Lateral temporal bone resection ~ Hints and Pitfalls ~, Otology Japan, Vol.26, No.3 (2016), pp. 169-172 (in Japanese).
- Hayashi, K., OS Now No.6, Seikeigeka kihonshuzyutsushugi no shinpo, medicalview (1992) (in Japanese).
- Hosono, N., Miwa, T., Mukai, Y., Takenaka, S., Makino, T. and Fuji, T., Potential risks of thermal damage of the nerve roots by a high-speed drill. Cause of C5 palsy, Vol.44, No.7 (2009), pp. 643-650 (in Japanese).
- Ide, F., Surface modification by low-temperature plasma treatment, Journal of the Textile Machinery Society of Japan, Vol.38, No.4 (1985), pp.173-185 (in Japanese).
- Inuzuka, I., Takemoto, I. and Inafuku, S., The inner ear change due to the vibration of the bone cutting burr, The Oto-Rhino-Laryngological Society of Japan, Vol.90, No.5 (1987), pp. 755-817 (in Japanese).
- Kimura, S., Nakabayashi, T. and Kato, H., Shokuhin no henshoku no kagaku, Kohrin (1995), p. 415 (in Japanese).
- Krause, WR., Orthogonal bone cutting: saw design and operating characteristics, Journal of Biomechanical Engineering, Vol.109, No.3 (1987) pp.263-271.
- Kuda, T., Nigariseibun no meiradohanno ni oyobosueikyo to sono hannouseiseibutsu no kosankasei ni kansuru kenkyu, Zyosekenkyu hokokusho II (2009), pp.249-257 (in Japanese).
- Mineo, H., Saito, Y., Ohno, A., Nakamura, K. and Shindo, H., Study on bridge formation mechanism between NaCl crystals and functions of anti-caking agents, Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan, Vol.63, No.3 (2009), pp.183-189 (in Japanese).
- Shigeta, H., Enomoto, T. and Sugihara, T., Development of a medical tool considering material properties of wet bone for minimally invasive surgery, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.38, No.12 (2013),

pp.2917-2928 (in Japanese).

Shimohigoshi, M., Super-hydrophilic photocatalyst and its applications, Journal of The Surface Finishing Society of Japan, Vol.50, No.3 (1999), pp.247-250 (in Japanese).

Shirakawa, J. and Nagai, R., The significance of the maillard reaction in vivo, Kagaku to seibutsu, Vol.53, No.5 (2015), pp.299-304 (in Japanese).

Suda, T., Hone no kagaku, Ishiyaku Publishers, Inc, (1985) (in Japanese).

Sugimura, H., Self-assembled molecular film, Journal of The Surface Finishing Society of Japan, Vol.61, No.2 (2010), p.208 (in Japanese).

Sugita, N. and Mitsuishi, M., Cutting temperature and cooling effects end milling of bone, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.72, No.2 (2006), pp.276-280 (in Japanese).

Tanaka, S. and Machinaga, O., Similarity of crystal structure between hydroxyapatite and its precursor crystal, Nihon Daigaku Seisan Kogakubu kenkyu hokoku. A, Vol.38, No. 2 (2005), pp.35-39 (in Japanese).

Uchida, S., Suishitsu denka izyo, The Japanese Journal of Nephrology, Vol.44, No.1 (2002), pp.18-28 (in Japanese).

Watanabe, H., Miradohanno wo shogaisuruseibun no tansaku, Urakamizaidan kenkyu houkokusho, Vol.21 (2014), pp.71-76 (in Japanese).

Yamabe, M. and Matsuo, M., Fluorine coating functional materials, Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan, Vol.45, No.6 (1987), pp.526-535 (in Japanese).

Yamamoto, H., Ohkubo, Y., Ogawa, K. and Utumi, K., Application of chemically adsorbed fluorocarbon film with highly durability as a mold release agent, Seikei-Kakou, Vol.22, No.2 (2010), pp.104-114 (in Japanese).

Yasuhara, T., Miyoshi, Y. and Date, I., Mist irrigation system at drilling in special surgery, Neurological Surgery, Vol.38, No.12 (2010), pp.1103-1107 (in Japanese).