

骨切除術時の熱侵襲の抑制に関する研究

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 榎本研究室 水谷 建

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ダイヤモンド砥石、すなわちダイヤモンドバーと呼ばれる工具を用いた研削加工が行われる。この工具は、ダイヤモンド砥粒を電着した研削工具(図1)で、ドリルといった他の骨切除用機器と比較し、軟組織の誤切断や巻き込みが発生しにくく、骨の選択的な切除が可能であるといった特徴を有する。このため神経周辺の骨といった慎重な切除が必要な場面で多用されているが、加工熱による周囲組織の壊死、すなわち、周辺の神経といった重要部位への熱侵襲が大きな問題となっている。実際には、冷却水を供給しながら手術は行われる。そこで、冷却水供給量を増加させることで発熱をより抑制することが考えられるが、術部視野の確保のためにその供給量をより減少させることが手術現場では強く望まれている⁽¹⁾。

そこで本研究では、骨切除時の熱侵襲の抑制を目的に、実際の手術現場と同条件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

マシニングセンタを用いて手術環境を模擬し、骨の研削加工特性の評価を行った(表1)。被削材は牛大腿骨の乾燥骨を長さ25mm×幅15mm×厚さ1.5mm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。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%を実験に用いた。冷却水の供給量は、生体への熱侵襲温度である50℃程度⁽²⁾に術部温度を抑制できないことが知られている3 mL/minとした⁽³⁾。また、加工特性の評価として、加工中の温度と加工トルクを計測した。加工中の温度は、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によって計測した。

図2(a)からわかるように、本実験条件では25~70秒付近で急激に温度とトルクが上昇しており、熱侵襲発生温度である50℃⁽²⁾を超えることがわかった。また、加工後

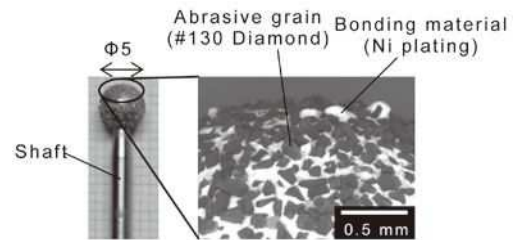
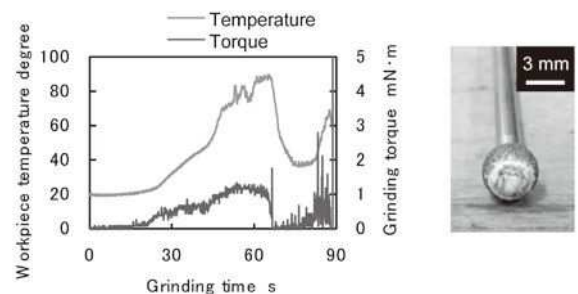


Fig. 1 Overview and enlarged view of diamond bur

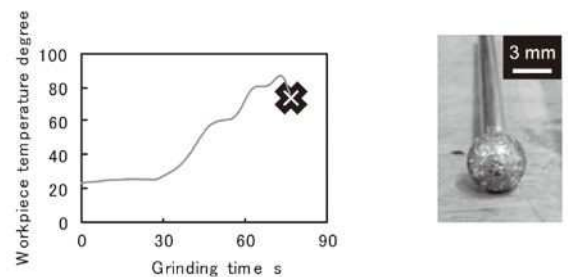
Table 1 Bone grinding conditions

Workpiece	Bovine femoral compact bone (Wet)
Tool	#130 Diamond bur NAKANISHI Inc., No. 11217 Nose shape : Round Diameter : 5 mm
Spindle rotational speed	50000 rpm
Tool feed	1 mm/min
Coolant	Saline (3 mL/min)



(a) Changes in temperature and torque (b) Tool surface

Fig. 2 Grinding characteristics of commercial tool with supplying saline



(a) Changes in temperature (b) Tool surface

Fig. 3 Grinding characteristics of commercial tool in quick stop process

の工具表面を観察すると、大量の切りくずが付着していた(図2(b))。ここで、70~80秒では急激に温度とトルクが低下しており(図2(a))、この理由を検討するために

この時間付近で加工を中断する実験を行った(図3)。その結果、工具表面には切りくずはほとんど付着しておらず、以上より、切りくず付着が温度上昇の要因であること⁽⁴⁾が確認された。

この付着は切りくずと工具表面の相互作用によって発生し、その相互作用は水の影響が大きいと考えられ、そこで冷却水に着目した実験を行った。まず冷却水を供給しなかった場合は、温度は上昇した(図4；green line)が、加工後の工具表面には切りくずの付着はほとんどなかった(図5(a))。そして生理食塩水のかわりに純水を供給した場合は、緩やかに温度が上昇した(図4；red line)。加工後の工具表面には、生理食塩水供給時には褐色の切りくずが付着していた(図2(b))が、純水供給時には白色の切りくずが付着していた(図5(b))。これらのことから切りくずの付着、および急激な温度上昇には生理食塩水中の成分が大きく影響してい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

加工対象である皮質骨は無機成分としてヒドロキシアパタイト、有機成分としてタンパク質、多糖体からおもに構成されている。まず、無機成分であるヒドロキシアパタイトは強いイオン吸着性や吸水性を有する⁽⁵⁾。これにより切りくずは生理食塩水中で電離したナトリウムイオンと塩化物イオンや水分を吸着し、それら相互作用により工具表面へ付着しやすくなると考えられる。一方、有機成分であるタンパク質と多糖体をあわせて加熱すると、ナトリウムイオンなどの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⁽⁶⁾を起し、反応組織は褐色化し、硬化することが知られている。この反応により、付着した切りくずが褐色化や硬化を起

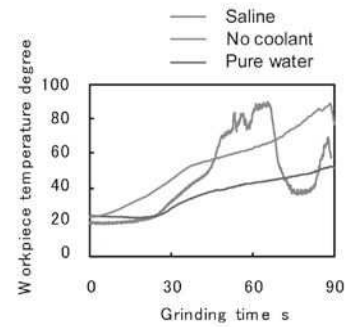
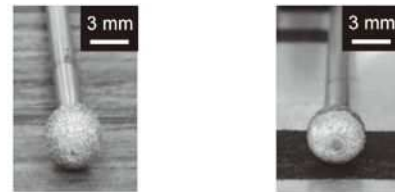


Fig. 4 Influences of coolant on grinding characteristics of commercial tool



(a) No coolant (b) Pure water
Fig. 5 Commercial tool surface

し、工具表面に強固に付着したと考えられる。

骨成分に関する各反応にもとづき、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を考察する。まず、加工によって切りくずが生じる(Phase 1；0～25秒、図6参照)。次に、生成された切りくずがイオンや水分の吸着によって凝集し工具表面に付着し、ナトリウムイオンを触媒としてメイラード反応が発生し、付着した切りくずが強固な目づまりとなり、温度やトルクが急上昇する(Phase 2；25～70秒、図6参照)。そして、硬化した

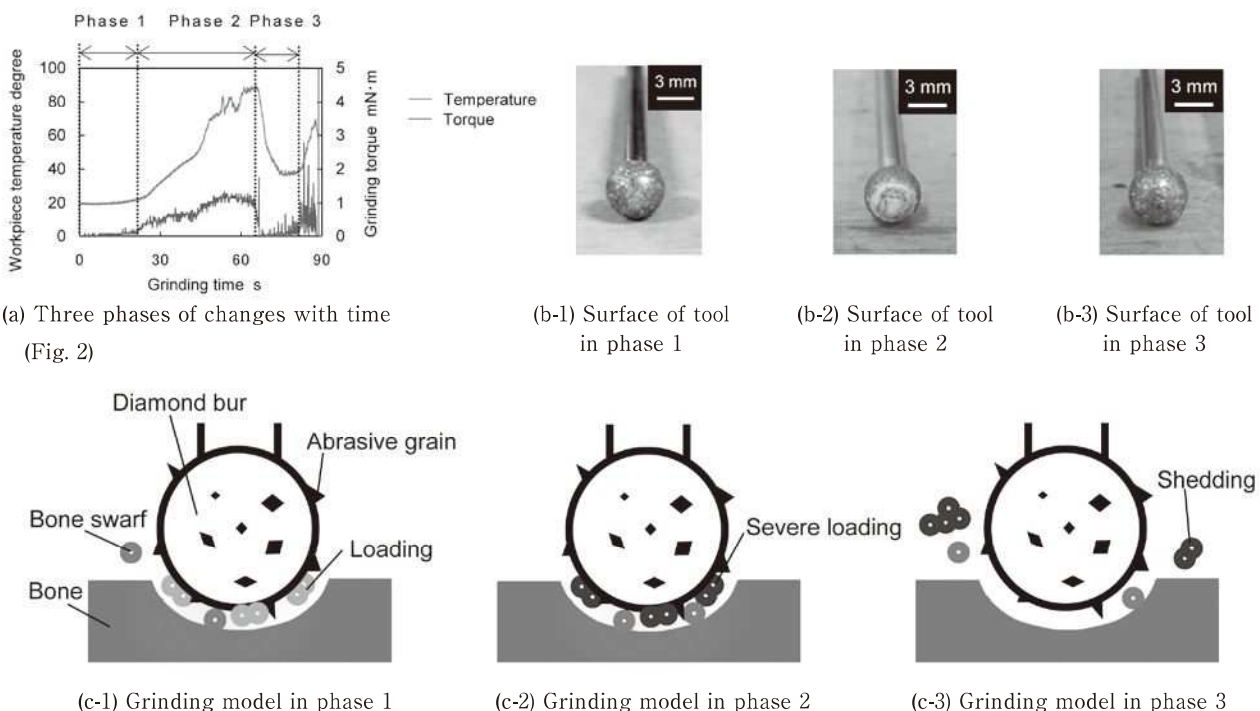


Fig. 6 Grinding model of commercial tool with supplying saline

切りくずが工具表面より剥離し、温度やトルクが低下する (Phase 3 ; 70~80秒, 図6参照)。

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、Phase 2における対策として、生理食塩水以外の金属イオンを含まない冷却水を用いることが考えられるが、手術現場では生体への侵襲を防ぐため、等張液である生理食塩水しか用いることができない。このため、Phase 2の抑制は困難であると考えられ、そこで、Phase 1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付着に着目した温度上昇の抑制

Phase 1の切りくずの付着を抑制するために、二酸化チタン (TiO_2) を工具表面に複合めっきした。二酸化チタンはその優れた親水性⁽⁷⁾により工具表面に水膜を形成し、切りくずと工具表面との接触を防ぐことで、Phase 1の切りくず付着の抑制が期待できる。

この工具を用いて実験した場合の結果を図7に示す。純水を供給した場合は温度上昇がなく (図7 ; red line), また工具表面への切りくずの付着も抑制できた (図8 (a))。しかし、生理食塩水を供給した場合は温度が上昇し (図7 ; green line), 工具表面にメイラード反応が発生したことを示す褐色の切りくずが付着していた (図8 (b))。これは、先述した切りくずのイオン吸着性によるものと考えられる。二酸化チタン複合めっき面はその表面の水酸基によって親水性を実現しているが、水酸基は電気的な分布があるため、イオン吸着した切りくずを引き寄せてしまう。このため、純水供給時では、親水性によって工具表面に水膜を形成することで切りくずの付着を抑制できたが、生理食塩水供給時は、その表面の電気的な分布によってイオンを吸着している切りくずが工具表面や水膜に引き寄せられ、強固な付着になったと推測される。

以上のように、工具表面に電気的な分布がある場合、イオン吸着した切りくずを引き寄せてしまい、切りくずの付着抑制が不十分となり、メイラード反応により強固な付着が発生し温度上昇を抑制できないと考えられる。

5. 骨切りくずの工具表面からの剥離に着目した温度上昇の抑制

前章において、Phase 1の切りくずの付着抑制は困難であることがわかった。そこで、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、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、電気的な相互作用を低下

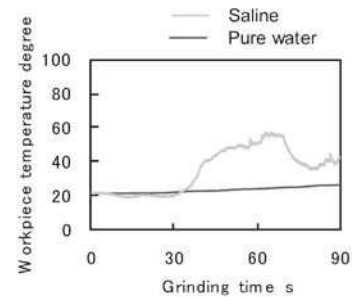


Fig. 7 Grinding characteristics of TiO_2 deposited tool



(a) Pure water (b) Saline
Fig. 8 TiO_2 deposited tool surface

させ剥離性を向上させるため、工具表面にフッ素系の皮膜、具体的にはトリフルオロメチル基 (CF_3) を有する自己集積化単分子膜 (ティー・ティー・エム製, WR-LIVE ④) を形成した。トリフルオロメチル基は表面エネルギーが極めて低く⁽⁸⁾, 他の物質との電気的な相互作用が弱いいため、骨切りくずとの付着力を低下させることが期待される。そして自己集積化単分子膜は、吸着分子同士の相互作用により、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を特徴とする。この膜処理剤は、ケイ素を中心にトリフルオロメチル基と水酸基を有し、その水酸基と金属表面の水酸基が吸着・脱水縮合することで高い密着性を有する膜を形成する (図9)。そこで、超音波洗浄後にプラズマ処理を行い工具表面の水酸基数を増加させた後、膜処理剤に1時間ほど浸漬、そして熱処理を施してフッ素系の皮膜⁽⁵⁾を有する工具を作製した。

図10に加工実験結果を示す。プラズマ-フッ素表面処理を行った工具を用いることで、組織損傷を生じる危険性のある温度である50℃以下に温度上昇を抑制することができた。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、再現性の高い結果が得られた。加工後の工具表面には切りくずが付着していた (図10 (b)) が、この付着は超音波洗浄で簡単に除去することができた。市販工具で加工した場合は、超音波洗浄でも切りくずの付着を除去できなかったことより、プラズマ-フッ素処理によって切りくずの剥離性を大きく向上でき、それにより温度上昇を抑制することができた。

6. 結言

本研究では、生理食塩水供給下における骨切除時の熱侵襲を抑制する医療用研削工具の開発を目的に、骨の研削加工特性を評価した。そこで得られた知見にもとづき、骨切りくずの工具表面からの剥離の促進を目的に、プラズマ-

フッ素処理を施した工具を新たに開発し、これにより切除点温度の上昇を大きく抑制することができた。

文献

- (1) 犬塚一男, 瀧本勲, 稲福繁, カutting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.
- (2) Kraus, WR. et al., *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 109, No.3(1987), pp.263-271.
- (3) 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しうる, 臨床整形外科, Vol.44, No.7(2009), pp.643-650.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 木村進, 食品変色の化学, 光琳, (1995), p.415.
- (7) 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.
- (8) 山本洋之, 大久保雄司, 小川一文, 内海邦広, 高耐久フッ素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.

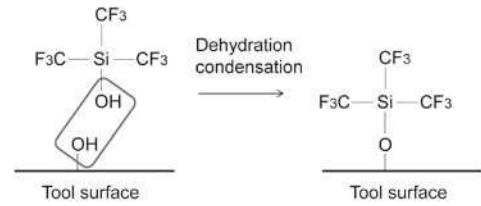


Fig. 9 Self-assembled monolayer treatment

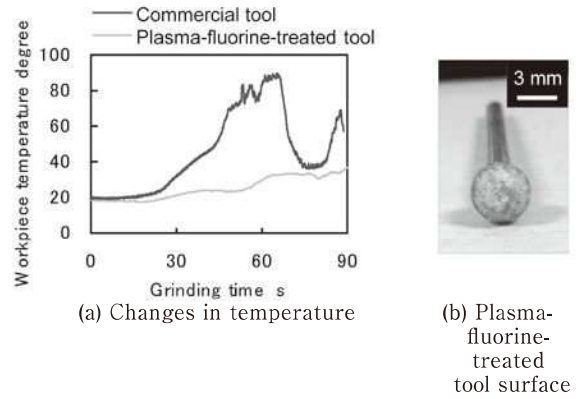


Fig. 10 Grinding characteristics of plasma-fluorine-treated tool



大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻
博士後期課程1年

加工学にもとづいた医療機器の
研究・開発