

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02047

研究課題名（和文）低侵襲手術のための骨切除用研削デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of grinding devices for bone resection for minimal injury surgery

研究代表者

榎本 俊之（Enomoto, Toshiyuki）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20403149

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：外科手術，特に脊椎外科手術の分野では小径軸付き研削工具（ダイヤモンドバー）による骨切除時の発熱による術後合併症が大きな問題となっている。従来の研究により発熱のおもな要因は骨切りくずの工具表面への付着，すなわち目づまりであることがわかってきたものの，温度上昇を安定に抑制できる方法の開発には至っていない。そこで本研究では骨切りくずの付着・剥離現象を詳細に検討し，その結果，加工点近傍を気单相あるいは液单相状態にすることが必須であることを明らかにした。そして工具表面を親水化する，あるいは10 程度にコントロールした冷風を供給することで熱侵襲温度である50 以下に温度上昇を安定に抑制することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外科手術，特に脊椎外科手術の分野では小径軸付き研削工具（ダイヤモンドバー）による骨切除が頻繁に行われるが，その際に生じる熱が骨近傍の神経などの重要部位を侵襲してしまい，後遺症麻痺といった重篤な問題がたびたび発生する。本研究では，研削工具の表面を親水化する，あるいは冷却水にかわり10 程度にコントロールした冷風を供給することにより，骨切除時の発熱を大幅に，かつ安定に抑制することに成功した。このように本研究成果は骨切除術に対して，新たな画期的な医用機器を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：Existing surgical technologies are unable to prevent thermal injury to adjacent tissues such as nerves that result from grinding heat generated during bone resection. To address this issue, bone grinding experiments were conducted under saline irrigation using commercial surgical diamond wheels focusing on the adhesion and shedding of bone chips on wheel surface.

On the basis of the findings, new diamond wheels with a hydrophilic-treated surface and a cool air supply method were developed for making a gas single-phase or liquid single-phase state near the grinding point. The wheels and cooling method significantly and stably suppressed bone temperature elevation compared to the commercial wheels.

研究分野：加工学

キーワード：研削加工 医療機器 外科 ダイヤモンドバー 骨切除

1. 研究開始当初の背景

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、そこでは医療デバイスとして小径軸付きダイヤモンド砥石、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、骨の変性によるインプラントとの接合強度の低下や、周辺神経への熱侵襲による後遺症麻痺といった術後合併症の発生が大きな問題となっている。実際には生理食塩水を供給しながら手術は行われ、発熱をより抑制する方法としてその供給量を増加させることが考えられるが、術野の確保のためには供給量をより減少させることが強く望まれ、増加させることはできない。

そこでこれまでに研究代表者は骨切除における発熱の原因を明らかにするために、ダイヤモンドバーを用いて手術に近い条件で骨の研削加工特性を評価してきた。その結果、骨切りくずがダイヤモンドバー表面に付着する、つまり砥石目づまりが生じ、それにより切除点で大きな発熱が生じることを明らかにした。そして骨切りくずを工具表面からすみやかに脱落させることを目的に、工具表面を撥水化させる、実際に工具表面をフッ素処理したり多孔質化したりしたダイヤモンドバーを開発した。その結果、従来のダイヤモンドバーに比べると温度上昇を抑制できたが、安定して抑制することはできず、切除点近傍温度が生体への熱侵襲温度である 50 を超えることもあり、問題の解決とともに、温度上昇に関する詳細なメカニズム解明が必要となった。

2. 研究の目的

本研究では、骨切除時の熱侵襲の抑制を目的に、骨切りくずの工具表面への付着現象に着目することで切除点における発熱メカニズムを明らかにし、そこで得られた知見にもとづき、発熱を大きく、かつ安定に抑制できる工具や周辺機器を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 骨の基本的な研削加工特性

マシニングセンタを用いて手術環境を模擬した加工実験を行い、骨の研削加工特性を評価した。おもな加工条件を表 1 に、本研究で用いたダイヤモンドバーを図 1 に示す。切除点に供給する冷却水には手術時に用いられる生理食塩水の他に、加工特性の解明を目的に、純水および供給なしで行った。骨の厚さはおおよそ 1.5 mm であり、切除点の反対側、つまり骨の裏面に熱電対を設置し、温度を測定した。

Table 1 Bone grinding conditions

Workpiece	Bovine femoral compact bone
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 supply rate	180 mL/min

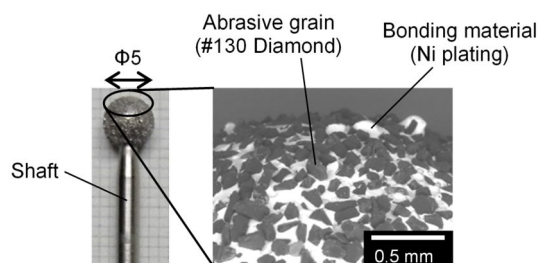


Fig. 1 Overview and enlarged view of diamond bur

図 2 に加工面裏側の温度変化および加工後の工具表面状態を示す。研削距離 0 mm は切除開始に対応し、1.5 mm は切除終了にほぼ対応する。同図からわかるように、冷却水供給なしの場合には切りくず付着は発生せず、温度は徐々に上昇し最終的には 100 を超えた。純水を供給した場合には、白色の切りくずの付着が生じ、温度上昇は緩やかとなった。また実際の手術時に用いられる生理食塩水を供給すると、褐色の切りくずの付着が生じ、切除距離が 0.5 mm を越えたあたりで急激に温度が上昇し、熱侵襲発生温度である 50 を大きく超えることがわかった。

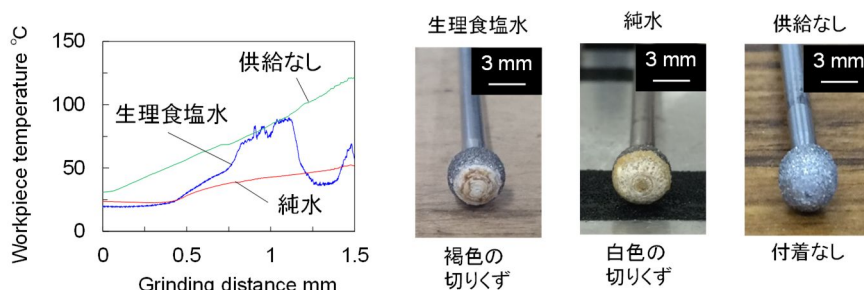


Fig. 2 Grinding characteristics of commercial tool: changes in temperature and wheel surfaces after grinding

(2) 切りくず付着発生・成長のメカニズム

まず、骨切りくずが工具表面に付着する現象について検討した。骨の主成分はヒドロキシアパタイト（50%）、コラーゲン（30%）、糖類（5%）である。親水性の高いヒドロキシアパタイトは水による液架橋を形成しやすく、これにより工具表面に付着すると考えられる。ここで液架橋による切りくずの付着が生じるためには気液界面が必要（図3）であり、実際に液架橋により切りくずが付着しているのかを確認するために、液中での加工（図4）を行った。その結果、切りくず付着は発生せず（図4）、つまり気相（図2 供給なし）および液相では付着は生じず、切りくず付着は気液混相状態で生じる液架橋により発生することを確認できた。

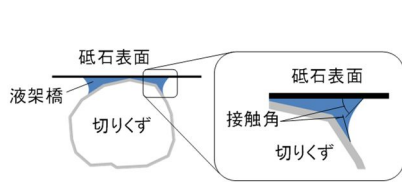


Fig. 3 Adhesion of bone chips due to liquid bridge

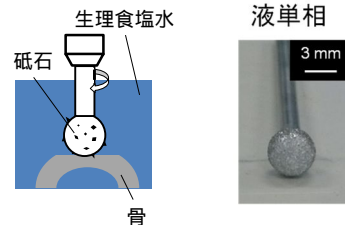


Fig. 4 Grinding experiments in liquid

次に付着した切りくずが成長する、つまり強固な目づまりになる現象について検討した。ナトリウムイオンといった金属イオンの存在によりアミノ化合物（コラーゲン）と糖類はメイラード反応を生じ、これにより切りくずは褐色化、硬化することが知られている。このメイラード反応が加工中に生じていることを確認するために、以下の反応抑制剤を生理食塩水に添加して実験を行った。

- ・リボフラビン：アミノ化合物と糖類は脱水縮合によりアマドリ転移を生じ、アマドリ化合物になる。リボフラビンはそのアマドリ化合物を分解する。
- ・クエン酸：アマドリ化合物はカルボニル化合物に分解され、それがアミノ化合物と反応し、硬化した糖化産物が生成される。クエン酸はアマドリ化合物の分解を抑制する。

実験結果を図5に示す。リボフラビン添加の場合には急激な温度上昇はなく、褐色の切りくずが付着し、クエン酸添加の場合には添加なしに比べると急激な温度上昇は抑制され、褐色の切りくずの付着はなかった。これらのことから、生理食塩水供給時は、メイラード反応により強固な目づまりが発生し、急激な温度上昇が発生することがわかった。

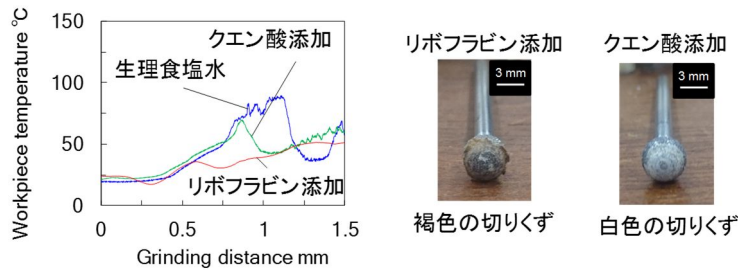
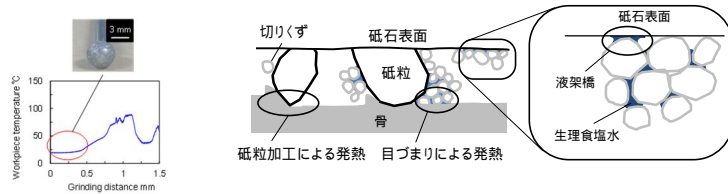


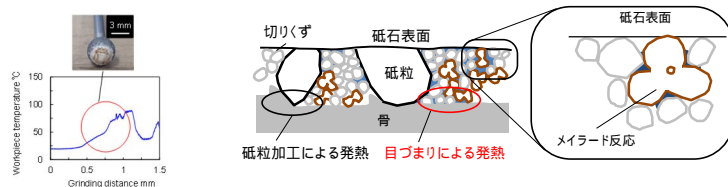
Fig. 5 Grinding characteristics in addition of citric acid and riboflavin

以上の検討より、切りくず付着発生・成長のメカニズムを以下の図6のように整理できる。

1. 砥粒付近に液架橋による切りくずの付着
→ 緩やかに温度上昇



2. 砥石全体にメイラード反応による切りくずの付着
急激な温度上昇



3. 切りくずが剥離
温度低下

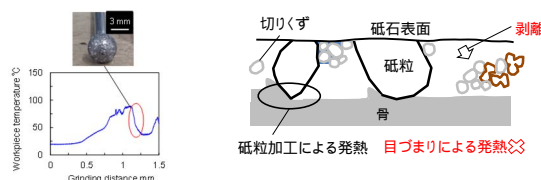


Fig. 6 Model of bone chip adhesion and its growth

(3) 温度上昇の安定した抑制

図6のモデルから考えられるように、温度上昇の抑制には以下の3通りの方法がある。

- a. 砥石表面を液単相状態とし、切りくずの付着を抑制する
- b. 砥石表面を気単相状態とし、切りくずの付着を抑制する
- c. 砥石表面を撥水化し、切りくずの剥離を促進する

まずc.の方法については1.で述べたように、温度上昇は抑制できたものの、安定性に大きな問題があった。この理由としては次のように考えられる。砥石表面を撥水化することで砥石表面-切りくず間の付着力を低減できるものの、切りくず間の付着力は変化しない。ここで常に前者の付着力が後者のそれよりも小さければ砥石表面から切りくず剥離は生じるが、骨の表面特性などに起因して、切りくず間の付着力が小さくなる可能性があり、それにより切りくずを工具表面から安定して剥離させることが困難であったと考えられる。

a. 液単相化による切りくず付着の抑制

砥石表面を親水化し水膜を形成し、表面近傍のみを液単相化した。具体的には砥石表面に二酸化チタンを複合メッキし、親水化した。その結果、図7に示すように、温度上昇は抑制できたものの、砥石表面に目づまりは生じており、温度も50を超えてしまった。これは砥石の回転により水膜が砥石表面に十分に形成できていない、あるいは維持できていないことが理由として考えられる。そこで回転数を50,000 rpm から5,000 rpm に低下させて実験を行った(図8)。

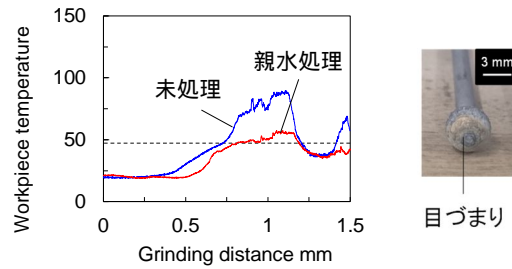


Fig. 7 Grinding characteristics with water-repellent wheels

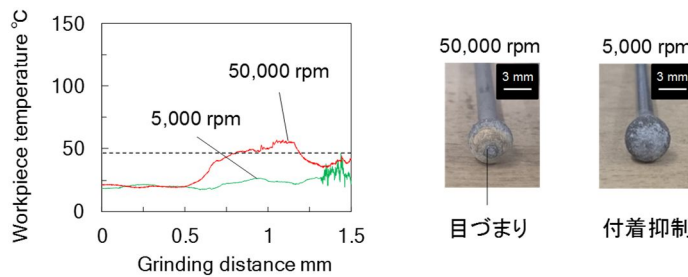


Fig. 8 Influence of rotational speed of wheels on grinding characteristics

同図からわかるように、低回転数化することで切りくず付着はなくなり、温度上昇も大きく抑制できた。また繰り返し実験を行っても、温度上昇を安定して抑制できることを確認した。

b. 気単相化による切りくず付着の抑制

気単相化するために冷却水を供給せず、ただ除去作用による温度上昇を抑制するために送風することとした。

その結果、図9に示すように、凍傷の危険のない10度の冷風を送風することで、切りくず付着を完全に抑制し、温度上昇を安定に50以下に抑制できた。

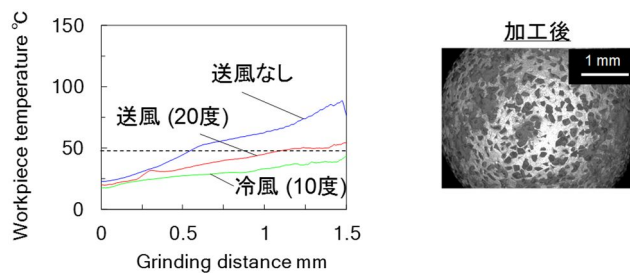


Fig. 9 Grinding characteristics with cooled air supply

4. 研究成果

本研究では、骨切除時の熱侵襲の抑制

を目的に、骨切りくずの工具表面への付着現象に着目することで切除点における発熱メカニズムを検討した。その結果、液架橋による切りくずの工具表面への付着、メイラード反応による切りくず間の強固な付着、付着した切りくずの剥離、の3つの現象が発熱に支配的であることがわかった。この中で、温度上昇の安定した抑制には液架橋による切りくずの工具表面への付着を防止することが最も有効であることを見出した。そして実際に親水化処理をした工具を用いて低回転数条件で骨を切除する方法と冷風を供給しながら骨を切除する方法を提案し、これにより切除点温度の上昇を大きく、かつ安定に抑制することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mizutani Takeru, Satake Urara, Enomoto Toshiyuki	4. 巻 78
2. 論文標題 Bone grinding using coarse-grained diamond wheels to suppress thermal damage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 163 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2022.08.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizutani Takeru, Satake Urara, Enomoto Toshiyuki	4. 巻 70
2. 論文標題 A study on a cooling method for bone grinding using diamond bur for minimally invasive surgeries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 155 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.01.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 水谷 建, 佐竹うらら, 榎本俊之
2. 発表標題 骨切除時の熱侵襲を抑制する方法の検討
3. 学会等名 2021年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiyuki Enomoto
2. 発表標題 Hard tissues and soft tissues machining
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Micro/Nano Mechanical Machining and Manufacturing (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水谷 建, 佐竹うらら, 榎本俊之
2. 発表標題 骨切除時の熱侵襲を抑制する冷却方法の検討
3. 学会等名 2020年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関