

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K09676

研究課題名(和文) オールセラミック修復における熱刺激に対するリスク予測システムの構築

研究課題名(英文) Risk assessment for thermal stress in all-ceramic restorations

研究代表者

小奈 正弘 (Ona, Masahiro)

東京医科歯科大学・歯学部・非常勤講師

研究者番号：70507772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：口腔内の歯冠修復材料は、常に熱変化の刺激にさらされている。異なる熱特性を有する修復材料と歯質との界面に生じる熱応力の影響は明らかになっておらず、界面破壊および辺縁漏洩の危険性がある。各種セラミッククラウンと歯質に生じる熱応力の影響を力学的側面から明らかにすることを目的とした。異なる修復材料を有する支台歯の3次元モデルを構築し、有限要素解析により熱変化と熱応力を評価した。クラウンの材質により異なる熱応力を示し、さらにはクラウンや支台歯、それぞれの組み合わせの違いが熱応力に影響する事が示された。歯冠修復治療の長期予後を見据えた材料選択や補綴設計に熱応力解析が有効であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年高強度の材料の開発が目覚ましい一方で、新たに開発される材料の耐久性と口腔内での長期予後については未知数である。これまで、咬合力を想定した機械的強度を中心に評価されているが、この研究により慢性的に引き起こされる熱変化に起因する劣化を考慮した補綴設計の重要性が示された。口腔内の熱変化とそのリスクに関する情報は不足しており、今後も基礎的および臨床的データの蓄積し、関連を明らかにすることで、より安定した補綴治療の長期予後を提供することが可能になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The effect of thermal stress generated at the interface between restorative materials and dentin, which have different thermal properties, has not been clarified, and there must be a risk of interface fracture and marginal leakage.

The aim was to clarify the influence of thermal change on the thermal stress of restorative materials. The first principal stress of some types of crowns and abutment tooth was calculated using finite element analysis.

Results indicated that the thermal stress varies depending on the material of the crown and that the combination of the crown and the abutment tooth affects the thermal stress. Thermal stress analysis was considered adequate for material selection and prosthesis design with a view to the long-term prognosis of prosthetic treatment.

研究分野：補綴歯科学

キーワード：熱応力 有限要素解析 セラミック修復

1. 研究開始当初の背景

我々は日常生活において高温の食品や飲料を口にするため、口腔内に装着された修復物は、常に熱変化の刺激にさらされている。口腔内に用いられる修復材料には歯科用合金、コンポジットレジンおよびセラミックスがあるが、いずれの材料も天然の歯牙とは異なる熱特性（熱膨張率、熱伝導率、比熱）を有している。温度が1℃変化するときの物体の歪みの変化は熱膨張係数と呼ばれるが、熱によって膨張する物体を形態変化が生じないよう外部から拘束すると、物体内部には応力（これを熱応力という）が発生する。ここでクラウン修復された歯の構造について考えてみると、象牙質、エナメル質、クラウン、築造体、その間に介在するセメント等、異なる物質から構成されているため、熱を付与した際には歯冠表面から熱が内部に伝わり、各材料の熱膨張係数の差と、外側性や内側性の拘束の違いにより局所に異なる応力が生じると考えられる。

歯科治療においてメタルラウンを用いた治療は歴史が長く、長期予後に関して確立されているが、オールセラミッククラウンに関しては近年高強度の材料の開発が目覚ましい一方で、新たに開発される材料に関する耐久性と長期的な臨床予後については未知数である。メタルとセラミックの熱膨張係数に関して注目してみると、エナメル質や象牙質はメタルとセラミックの中間に位置する。つまり、同じ熱が加わった際に、メタルクラウンの場合とセラミッククラウンの場合とで、圧縮と引張の応力関係において全く異なる熱応力が発生する事が予想される。クラウンと支台歯との界面における熱応力はクラウンの長期予後において重要な因子である事が予想され、セメント層の剥離や破壊、さらには辺縁漏洩による歯髄への影響が懸念される。

これまでにクラウンの熱応力に着目した研究は少なく、口腔内での劣化環境を想定してサーマルサイクル試験が行われるが、サーマルサイクル後の修復物の破折強度の低下に注目した研究がほとんどである。一方で、5℃と55℃のサーマルサイクルを10万回付与しただけで、ジルコニアクラウンが破折したという報告があり¹⁾、熱応力が咬合力により生じる応力に匹敵する、またはそれ以上である可能性が示唆されている。しかしながら、それらの応力において、引張や圧縮などに関して詳しく分析されておらず、これらを考慮した分析を加えることで、口腔内における熱応力の修復物の予後予測が可能になるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、熱負荷により修復物とセメント、支台歯に生じる熱応力を分析し、修復材料と厚みの影響を評価することで、歯冠修復における熱負荷のリスクを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

有限要素解析ソフトウェア(ANSYS2022R1)を用いてクラウン、セメント、支台歯の3次元有限要素モデルを作成した(図1)。厚みの異なるクラウンに異なる修復材料を用い、セメントにはレジンセメント、支台歯に象牙質の熱特性および機械的特性を設定した(表1)。

まず、口腔内の温度変化をシミュレーションするため、初期設定温度を36℃とし、体温の変化は小さいと仮定し、支台歯底面を36℃に固定した。次に、クラウンと支台歯外表面を冷刺激として5℃、高温刺激として55℃に変化させた時の温度分布を過渡伝熱解析を用いて算出した。過渡伝熱解析では、温度刺激の暴露時間に依存した温度変化を算出する事が可能である。口腔内での暴露時間を考慮し、過渡伝熱解析で得られた2秒経過時の温度分布を用いて、各材料に生じる第一主応力を静的構造解析により算出し、クラウンマージン部に生じる応力値を評価した。

表1 各材料の機械的特性および熱特性

	ヤング率 (Gpa)	ポアソン比	熱膨張率 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	密度 ($\times 10^{-6}\text{ kg}/\text{mm}^3$)	比熱 ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
ジルコニア	210	0.31	10	3	6	470
金合金	90.5	0.35	15.5	320	18.3	140
レジンセメント	8.3	0.35	39	0.261	2.02	1150
象牙質	18.6	0.31	10.6	0.63	2	1170
エナメル質(参考)	84.1	0.33	17	0.92	2.8	750



図1 有限要素モデル

4. 研究成果

・温度変化

図2に0.5mmジルコニアクラウンにおける2秒後の熱変化を示す。36 から外表面を5 に変化させると、ジルコニアは、クラウン外表面から内面にかけて温度が低下し、厚みの増加に伴いその温度差が大きくなった。一方で、金合金の方はジルコニアよりもクラウン外表面と内面の温度差が小さく、厚みの増加に伴い、クラウン全体の温度低下は少なかった。これは55 の高温への変化でも同様の熱変化を示した。

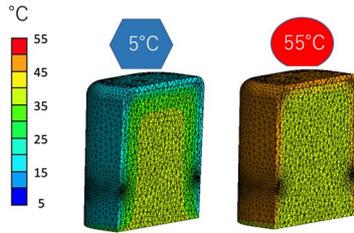


図2 ジルコニアにおける2秒後の熱変化

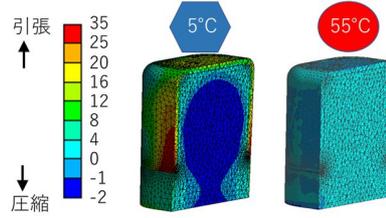


図3 ジルコニアにおける熱応力（第一主応力）

・熱応力

図3に0.5mmジルコニアクラウンに2秒間の熱変化を与えた際の熱応力の分布を示す。熱応力の指標として、材料の破折の起点となり得る引張応力を示す第一主応力の結果を抽出した。5 の場合、第一主応力はクラウンマージン部に集中した。そこで、クラウンマージンの応力集中部におけるクラウンとセメントの第一主応力の結果を図4にまとめた。

第一主応力の最大値は、厚み0.5mmジルコニア(31.2MPa)が最も高く、厚みの増加とともに減少した。金合金においても同様の傾向を示したが、ジルコニアと比較すると低い値であった。一方で、55 の場合は、第一主応力はいずれのクラウンにおいてもマージン部には集中しなかった。また、同部位におけるセメントに生じる第一主応力の結果では、5 において、いずれの材料においても 1.0×10^{-16} MPa 以下であったのに対し、55 では0.5mm金合金(2.25MPa)で最も高い値を示し、厚みの増加に伴いセメントの第一主応力は減少した。ジルコニアにおいても同様の結果を示したが、金合金のセメントと比較すると低い値であった。

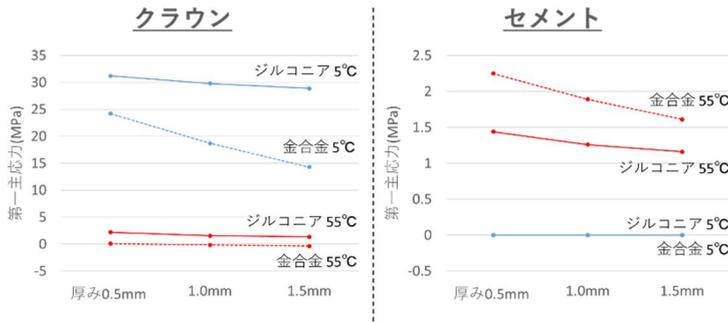


図 クラウンとセメントのマージン部に生じる第一主応力の結果

低温の熱負荷では、熱伝導の影響により外側にあるクラウンの熱収縮量が大きく、内側の支台歯は熱変化が少ないため、収縮量が相対的に小さく、クラウン外表面に引張応力が発生したと考えられる。また、クラウンの厚みの増加とともに、クラウンの熱変化が小さくなるため、熱収縮量が減少し、第一主応力が低下したと考えられる。一方で高温の熱負荷は、熱変化の少ない内側の支台歯よりも外側のクラウンの熱膨張が大きいため、セメントに引張応力を生じさせたと考えられる。これにより、低温の飲食物の摂取時には、ジルコニアクラウンの厚みが薄いと損傷リスクが高まり、高温の場合は、金合金クラウン内部のセメント破壊のリスクが高まる可能性が示唆された。

クラウンや支台歯、それぞれの組み合わせの違いが熱応力に影響する事が示唆された。歯冠修復治療の長期予後を見据えた材料選択や補綴設計に熱応力解析が有効であると考えられる。

5. 文献

1) Nakamura K, Ankyu S, Nilsson F, Kanno T, Niwano Y, Vult von Steyern P, et al. Critical considerations on load-to-failure test for monolithic zirconia molar crowns. J Mech Behav Biomed Mater 2018; 87: 180-9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 UCHIKURA Keiichiro, MURAKAMI Natsuko, YAMAZAKI Toshiki, LYU Huaxin, NAGATA Kohji, ONA Masahiro, IWASAKI Naohiko, TAKAHASHI Hidekazu, WAKABAYASHI Noriyuki	4. 巻 41
2. 論文標題 Fracture resistance of CAD/CAM restorative materials in mismatched removable partial denture rests: An <i>in vitro</i> experimental and finite element analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Dental Materials Journal	6. 最初と最後の頁 466 ~ 472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4012/dmj.2021-224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Lyu Huaxin, Murakami Natsuko, Yamazaki Toshiki, Wada Junichiro, Utsumi Miona, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 67
2. 論文標題 Evaluation of PEEK and zirconia occlusal rest designs for removable partial dentures based on finite element analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	6. 最初と最後の頁 196 ~ 205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2186/jpr.JPR_D_22_00011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kenji Fueki, Yuka Inamochi, Junichiro Wada, Yuki Arai, Atsushi Takaichi, Natsuko Murakami, Takeshi Ueno, Noriyuki Wakabayashi	4. 巻 66
2. 論文標題 A systematic review of digital removable partial dentures. Part I: Clinical evidence, digital impression, and maxillomandibular relationship record	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	6. 最初と最後の頁 40-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2186/jpr.JPR_D_20_00116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Takaichi, Kenji Fueki, Natsuko Murakami, Takeshi Ueno, Yuka Inamochi, Junichiro Wada, Yuki Arai, Noriyuki Wakabayashi	4. 巻 66
2. 論文標題 A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	6. 最初と最後の頁 53-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2186/jpr.JPR_D_20_00117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamazaki T, Murakami N, Suzuki S, Handa K, Yatabe M, Takahashi H, Wakabayashi N.	4. 巻 63
2. 論文標題 Influence of block-out on retentive force of thermoplastic resin clasps: an in vitro experimental and finite element analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of prosthodontic research	6. 最初と最後の頁 303-308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpor.2019.01.002	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 Wakabayashi Noriyuki, Murakami Natsuko, Takaichi Atsushi	4. 巻 1
2. 論文標題 Current Applications of Finite Element Methods in Dentistry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Handbook of Mechanics of Materials	6. 最初と最後の頁 1757 ~ 1783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-10-6884-3_37	査読の有無 無
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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 小峰広平, 村上奈津子, 山崎俊輝, 内海澗奈, 李彬, 小奈正弘, 若林則幸
2. 発表標題 歯冠修復材料の厚みが熱応力に与える影響
3. 学会等名 日本補綴歯科学会 東京支部学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hao Jialin, Murakami Natsuko, Yamazaki Toshiki, Iwasaki Naohiko, Yatabe Masaru, Takahashi Hidekazu, Wakabayashi Noriyuki.
2. 発表標題 Flexural Behavior of Machinable Polyester Denture Material Under Cyclic Loading
3. 学会等名 2020 IADR/AADR/CADR General Session (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内倉慶一朗, 村上奈津子, 山崎俊輝, 永田浩司, 小奈正弘, 岩崎直彦, 高橋英和, 若林則幸
2. 発表標題 レストの接触状態がCAD/CAM材料の破折挙動に与える影響.
3. 学会等名 第74 回日本歯科理工学会学術講演会, 長崎
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Jialin, Murakami Natsuko, Yamazaki Toshiki, Iwasaki Naohiko, Yatabe Masaru, Takahashi Hidekazu, Wakabayashi Noriyuki.
2. 発表標題 Fatigue resistance of machinable polyester for dentures
3. 学会等名 第74 回日本歯科理工学会学術講演会, 長崎
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内倉慶一朗, 村上奈津子, 半田和之, 高橋英和, 若林則幸
2. 発表標題 レストの適合がレストシートを付与した歯冠色材料の破折抵抗性に与える影響
3. 学会等名 公益社団法人日本補綴歯科学会第128回学術大会, 札幌
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

生体補綴歯科学分野ホームページ
<https://www.tmd.ac.jp/pro/>

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
研究 分 担 者	村上 奈津子 (Murakami Natsuko) (80706995)	東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教 (12602)	

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