

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号： 1 2 6 0 2

研究種目： 若手研究

研究期間： 2018 ~ 2021

課題番号： 1 8 K 1 7 1 3 8

研究課題名（和文）メッシュレス解析（SPH法）を応用した理想的な粘弾性を持つ次世代軟質裏装材の開発

研究課題名（英文）Development of novel soft lining materials using SPH method

研究代表者

井上 実（Inoue, Minoru）

東京医科歯科大学・歯学部・非常勤講師

研究者番号： 6 0 7 3 6 2 4 7

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：クリープ試験の結果から、シリコン系軟質裏装材は弾性体的挙動を示し、一方でアクリル系軟質裏装材と粘膜調整材は粘弾性体的挙動を示すことが明らかとなった。また、SPH法によるシミュレーションの結果から、軟質裏装材の種類の違いによって、粘膜の応力分布に変化が生じることが分かった。アクリル系軟質裏装材はシリコン系軟質裏装材よりも粘膜にかかる応力を軽減させる可能性が示唆された。さらに実際の義歯の挙動に即した解析を行うため、2次元解析であったSPH法を3次元へと応用することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軟質裏装材の軟らかさや種類については数多くのものが存在する。コンピュータ上でシミュレーションが可能となれば、軟質裏装材の物性値を自由に変更できる。これにより、どの材料的特性を持つものが粘膜への応力を最小にするかを算出することができ、最適な軟質裏装材開発の一助となる。また、デジタル化が進む現在において、SPH法という新たな技術を用いてシミュレーションの方法を確立したことは歯科界に大きく寄与するものである。本手法を用いることで、今後は軟質裏装材に限らず多くの不定形に変化する材料の解析を可能とすると推察される。

研究成果の概要（英文）：From the result of the creep test, the silicone soft denture liners showed elastic behavior, whereas the acrylic soft denture liner and tissue conditioner exhibited viscoelastic behavior. The result of the SPH method simulation revealed that the differences in soft denture liners affected the stress distribution of the oral mucosa. It was suggested that the acrylic soft denture liner resulted in lower stress on the oral mucosa compared to the silicone soft denture liner. Furthermore, we succeeded in applying the SPH method from two-dimensional to three-dimensional in order to conduct an analysis that matches the actual movement of a denture.

研究分野： 補綴・歯科理工学系

キーワード： 軟質裏装材 メッシュレス解析 SPH法

## 1. 研究開始当初の背景

硬質床用レジンを用いて痛みのない総義歯を製作することは、時として非常に困難を極める。そのため、咬合時の痛みを緩和する目的で軟質裏装材が広く用いられ始めている。しかし、軟質裏装材に関する文献的報告はいくつかあるものの、理想的な物性について統一した解は得られていない。不定形に変形する物体の解析が得意な Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (SPH 法) を用いることで、下顎総義歯が沈下した際に軟質裏装材の物性値の違いが顎堤粘膜にかかる応力に与える影響について解析を行うことができる。また、当分野ではこれまでフッ素樹脂を用いた軟質裏装材の開発を進めてきた。フッ素系モノマーとアクリル系モノマーの配合比率を変更することにより粘弾性の値をコントロールできることが明らかになった。フッ素系樹脂を用い、最適な粘弾性を持つ軟質裏装材の開発が可能である。

## 2. 研究の目的

メッシュレス解析 (SPH 法) を用いて顎堤粘膜への応力を解析し、顎堤粘膜への応力が最小となる理想的な軟質裏装材の粘弾性を求め、その理想的な粘弾性を持つ軟質裏装材を試作し、物性、耐汚染性、接着性を明らかにする。

\*2020 年度の研究成果から、2 次元であった解析では複雑な義歯の挙動を再現しきれないことが明らかとなった。そのため、実際にフッ素系軟質裏装材の試作をする前に、3 次元でのシミュレーションが必要となった。従って、当初の目的を修正し、2021 年度は 3 次元 SPH シミュレーションにて軟質裏装材を用いた義歯床下粘膜の応力解析を実施し、粘膜の応力分布と軟質裏装材の理想的な物性を解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) クリープ試験

シリコン系軟質裏装材として Sofreliner Super Soft、Sofreliner Tough Medium (トクヤマデンタル)、アクリル系軟質裏装材として Vertex Soft (Vertex Dental)、粘膜調整材として Visco-gel (Dentsply Sirona) の試料を製作し、クリープメーターにて各軟質裏装材の弾性率、粘性率の平均値を求めた。

### (2) SPH 法によるシミュレーション

従来の有限要素法では取扱うのが困難な、不定形に変形する物体のシミュレーションを可能とする SPH 法を用い、下顎総義歯が沈下した際に粘膜にかかる応力の分布を示す 2 次元解析モデルを設計した。計測した各軟質裏装材の弾性率、粘性率を解析モデルに適用し、シミュレーションを行った。口腔粘膜を 4 つの領域 (A: 頬側辺縁、B: 頬棚、C: 顎堤頂、D: 舌側辺縁) に分け、粘膜にかかる Mises 応力を求めた。

### (3) シミュレーションの 3 次元化

2020 年度までに実施した研究を基に、2 次元解析であった SPH 法をさらに 3 次元解析へと拡張した。実際の複雑な形状を計測する前段階として、まずは簡素化したモデルで予備実験を行った。CAD ソフトを用いて形態を簡素化した義歯、軟質裏装材、粘膜の 3 次元モデルを作成した。2 次元解析時と同様に、義歯の咬合面に垂直方向から咬合力がかかるシミュレーションモデルを設計した。また、それより使用していた 2 次元 SPH 解析ソフトウェアのアルゴリズムを改良することで、3 次元解析が可能となるよう修正を行った。

## 4. 研究成果

(1) クリープ試験より、Sofreliner Tough Medium、Sofreliner Super Soft は加重と共にほぼ最大歪みを生じるが、除荷直後に歪みは元に戻り、残留ひずみは 0 になるという挙動を示したのに対して、Vertex Soft、Visco-gel は荷重後遅延時間を伴いながら歪みを増し、除荷終了後にも残留ひずみを生じるという挙動を示した。従って、シリコン系軟質裏装材は、より弾性体に近い材料であることが示された。一方で、アクリル系軟質裏装材である Vertex Soft、アクリル系ティッシュコンディショナーである Visco-gel は、典型的なクリープ曲線を示したことから粘弾性体であることが明らかとなった。また、Sofreliner Super Soft、Visco-gel は Sofreliner Tough Medium、Vertex Soft と比較して大きな歪み率を示した。

(2- ) SPH 法を用いたシミュレーションより、どの材料においても加圧開始から 0.05～0.06 秒後まで粘膜にかかる応力は時間の経過とともに増加していった。その後どの材料においても粘膜に伝わる応力は 0.6 秒後には平衡に達して応力分布に変化がなくなり、ほぼ一定となることが明らかとなった。

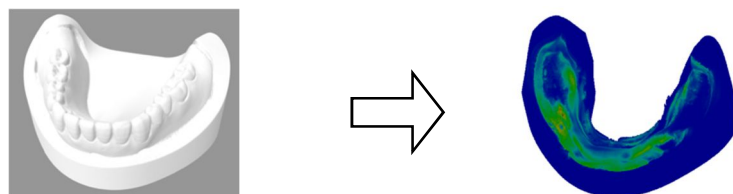
(2- ) 材料ごとの比較をすると、最大となる平均 Mises 応力値は Sofreliner Super Soft、Visco-gel、Sofreliner Tough Medium、Vertex Soft の順に小さくなった。どの材料においても 0.6 秒ほどで応力は一定値に収束した。収束後の応力値は、最大となる平均 Mises 応力値と同様に、Sofreliner Super Soft、Visco-gel、Sofreliner Tough Medium、Vertex Soft の順に小さくなることが明らかとなった。領域ごとの比較をすると領域 A ( 頬側辺縁部 ) は全体を通して他部位よりも平均 Mises 応力が高く、領域 D ( 舌側辺縁部 ) は全体を通して他部位よりも平均 Mises 応力が小さい傾向にあった。

(2- ) 0.6 秒後の時点における各材料、各領域の Mises 応力の比較では、粘膜面の粒子一つ一つにかかる Mises 応力を領域ごとにまとめた。全ての材料に関して、領域 A にかかる Mises 応力は他領域と比べて統計学的に有意に大きい応力値を示した。また、Vertex Soft を使用した際の領域 A にかかる応力値は、他の 3 つの材料を使用した際の領域 A にかかる応力値と比較して有意に小さかった。一方で、領域 D に関しては他の領域と比べ応力が小さくなる傾向を認めたものの、材料間における有意差は認められなかった。

(2- ) Sofreliner Super Soft や Visco-gel などの歪み率の大きい材料に関して、粘膜にかかる Mises 応力が大きくなったことから、軟らかく変形しやすい材料はかえって粘膜への応力を増加させる可能性が示唆された。また、骨の形態によって応力の分布に差が出ている可能性があることが分かった。例えば、骨が凸状の形態となっている頬側辺縁部は粘膜にかかる応力が高くなる傾向が認められた。骨の支持が咬合圧方向に存在しない舌側辺縁部は応力が低くなる傾向があった。そのため舌側に下顎隆起などがあれば骨が凸状になるため応力は高くなる可能性があることが示唆された。

(2- ) Sofreliner Super Soft や Visco-gel は Vertex Soft に比べ歪み率が大きいため裏装材が大きく変形した結果粘膜に伝わる応力が不安定になり応力が高くなったと考察された。一方で、Sofreliner Tough Medium と Vertex Soft はほぼ同じ歪み率であったが、アクリル系である Vertex Soft の持つ粘弾性によって応力の分散が起こり、応力が小さくなった可能性が考えられた。

(3) 3 次元モデルにおいても軟質裏装材の弾性率、粘性率を変えることで粘膜にかかる応力に違いが出るということが明らかとなった。また、軟質裏装材の適用方法によっては応力分布に大きな差が出るということが示唆された。予備実験の結果を踏まえ、さらに実際の形態に即した形の義歯で解析を行うために、粘膜模型から義歯、下顎骨を製作し、それらを光学スキャナーにてデータ化した。これらのデータを用いて、より正確な解析ができるよう、義歯が沈下した際に粘膜が受ける応力解析モデルを作成した。予備的検討から軟質裏装材の適用方法に関しても応力分布に影響を与えることが明らかとなったため、軟質裏装材の適用範囲を変えたモデルも同時に作成し解析を行った。解析結果の一例を図に示す。この結果、詳細な解析条件については、更なる検討が必要であることが明らかとなった。今後は、臨床を考慮した様々な条件下での 3 次元応力解析を実施する必要がある。



図：SPH 法による粘膜面の 3 次元応力解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Onuma Hiraku, Inokoshi Masanao, Hirayama Daisuke, Inoue Minoru, Minakuchi Shunsuke	4. 巻 117
2. 論文標題 Stress distribution analysis of oral mucosa under soft denture liners using smoothed particle hydrodynamics method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials	6. 最初と最後の頁 104390 ~ 104390
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmbbm.2021.104390	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 猪越正直, 大沼啓, 平山大輔, 井上実, 水口俊介	4. 巻 40
2. 論文標題 粒子法シミュレーションの歯科材料への応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本歯科理工学会誌	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 大沼 啓, 猪越正直, 平山大輔, 井上 実, 守澤正幸, 水口俊介
2. 発表標題 SPH法による各軟質裏装材使用時の義歯床下粘膜にかかる応力解析
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第129回学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Onuma H, Inokoshi M, Hirayama D, Inoue M, Minakuchi S
2. 発表標題 Stress distribution of mucosa under soft denture-liners using SPH method
3. 学会等名 98th General Session & Exhibition of the IADR (国際学会)
4. 発表年 2020年

1．発表者名 大沼啓，猪越正直，平山大輔，井上 実，水口俊介．
2．発表標題 SPH法を用いた軟質裏装材の応力解析シミュレーション：アクリル系軟質裏装材とシリコン系 軟質裏装材の比較
3．学会等名 第74回日本歯科理工学会学術講演会 2019.10.05 長崎
4．発表年 2019年

1．発表者名 大沼啓，猪越正直，平山大輔，井上 実，水口俊介．
2．発表標題 SPH法を用いた軟質裏装材の応力解析シミュレーション：クリープ試験による軟質裏装材の粘弾性解析
3．学会等名 第73回日本歯科理工学会学術講演会 2019.04.21 東京
4．発表年 2019年

1．発表者名 大沼啓，猪越正直，平山大輔，井上 実，水口俊介
2．発表標題 SPH法を用いた軟質裏装材の応力解析シミュレーション：クリープ試験による軟質裏装材の粘弾性解析
3．学会等名 第73回日本歯科理工学会学術講演会
4．発表年 2019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
研究協力者	猪越 正直  (Inokoshi Masanao)		

6．研究組織（つづき）

	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
研究協力者	大沼 啓  (Onuma Hiraku)		
研究協力者	平山 大輔  (Hirayama Daisuke)		

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
---------	---------