

令和元年6月10日現在

機関番号：12602

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20483

研究課題名(和文)密着タイプ義歯安定剤による顎堤粘膜への影響：SPH法による三次元シミュレーション

研究課題名(英文)Effect of home reliner on oral mucosa: three dimensional analysis by smoothed particle method

研究代表者

平山 大輔 (HIRAYAMA, Daisuke)

東京医科歯科大学・歯学部附属病院・非常勤講師

研究者番号：10758634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来よりクッションタイプ義歯安定剤は顎堤粘膜に悪影響を与えると考えられてきたが、どのような応力を粘膜に生じるのか、不定型に変形する安定剤を数値解析することは不可能であった。先の研究でSPH法シミュレーションによる粘弾性計算を実現し、この解析を可能なものとしたが、シミュレーション前の材料実験やシミュレーションモデルの作成が困難であり、また解析の計算時間が非常に長くかかることが問題であった。今回の研究では、従来の解析プログラムを改良することで困難を伴う材料実験を回避し、計算時間を僅かに短縮した。また光学スキャニングを導入することで、シミュレーションモデルを簡便でより高精度に作成できるように改良した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プログラムの改良によりSPH法粘弾性シミュレーションはより簡便で確実に実行できるようになり、印象材や裏層材、粘膜調整剤など、今回解析した義歯安定剤より柔らかく、より大きく変形する材料についても解析することが可能となった。これは歯科分野に限らず、工学などの他分野においても今後有用な解析手法となる。また、シミュレーションモデルの作成方法の改良により、従来のコーンビームCTで対象物を撮影する手法では、人体などむやみにX線を照射できない解析対象に関しても、光学スキャナーで容易かつ高精度にモデルを作製することが可能となった。このことにより特に医療分野における解析の幅が今後広がると考えられる。

研究成果の概要(英文)：For decades, many reports have expressed negative opinions about home reliner (HR). But it was impossible to analyze how amorphous HR had affected to oral mucosa. In previous research, We have implemented an SPH program having functions of elastic calculation and a four-element Voigt model for viscoelastic calculation. Our SPH program have enabled to analyze amorphous HR. But this method had some problems with regard to operating difficulties of creating simulation model and material experiments. And also, it takes a long time to calculate. In this research, We improved existing SPH program so that we could avoid delicate material experiments, and slightly shorten calculation time. Furthermore, We have introduced optical scanning system. this system enabled to make a simulation model easier and higher accuracy than existing method which used cone beam CT scanning system.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：粒子法 粘弾性解析 義歯安定剤

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

患者にとって取扱いが容易で、クッションによる疼痛緩和効果が期待される密着タイプ義歯安定剤は薬局で簡単に入手でき、多くの場合、義歯の不適合が大きい患者が自己判断により使用している。歯科医師の多くは古くから密着タイプ義歯安定剤の使用に否定的だが、密着タイプの義歯安定剤は市場の6割以上を占めている。

義歯安定剤のように不定形に大きく変形する材料は、従来の有限要素法 (FEM: Finite Element Method) でのシミュレーション解析が不可能であり、その為害性の科学的な検証が尽くされてきたとは言い難い。そこで、このような大変形体のシミュレーションが可能である SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法に着目し、申請者は横浜国立大学と平成 23 年度より共同研究を進めてきた。平成 26 年度には口腔内のシミュレーション解析に必要とされる、高精度な粘弾性解析を SPH 法で実用化するに至り、密着タイプ義歯安定剤についての 2 次元のシミュレーション解析が可能となり、義歯安定剤を適切な場所に適切量塗布できない場合、義歯は変位して装着され、安定剤を塗布しない場合よりも顎堤粘膜の負担応力は上昇することを数値的に明らかにした (Hirayama et al. Computers in biology and Medicine 2015)。しかしこの解析プログラムは煩雑な方程式で構成される為、解析計算に時間を要することと、計算途中でオーバーフローを起こしやすいことが問題であった。そして、解析試料については予めクリープメーターでの物性値計測が必要となるが、義歯安定剤のように非常に柔らかい材料をクリープメーターで計測することは難しく、試行錯誤を要するという問題があった。また、解析モデルについてはコンピーム CT で解析対象物を撮影し、DICOM データを修正することで粒子モデルを作製しているが、この作業にも多大な労力を伴う問題があった。

### 2. 研究の目的

従来手法では材料の物性値測定とシミュレーションモデルの作成、そしてシミュレーション解析においても実用面で困難を伴うものであった。今回の研究ではこれらの問題を解決し、より簡便に使用可能なシミュレーション方法を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) SPH 解析プログラムの改良

材料物理学において粘弾性材料の応力-歪み応答を示すモデルには Maxwell モデルと Voigt モデルの 2 種類が存在する (図.1)。申請者が先に作成した SPH 法粘弾性解析プログラムでは、その根幹となる計算式について一般化 Voigt モデルを利用してきた。これは SPH 法へ組み込みやすい手法が一般化 Voigt モデルであったためである。その反面、一般化 Voigt モデルは煩雑な方程式で構成される為、計算に時間がかかる。また、1 粒子あたりの計算に必要な変数が多いため、計算途中に消費するパソコンのメモリー容量が膨大になり、オーバーフローを生じやすい問題があった。そこで今回の研究ではより簡便な一般化 Maxwell モデルを SPH プログラムに組み込むこととした。

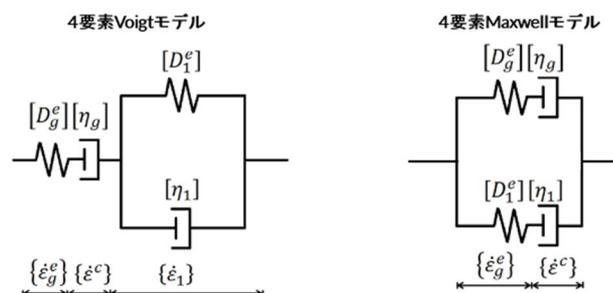


図1: VoigtモデルとMaxwell modelモデル

## (2) 密着タイプ義歯安定剤の動的粘弾性測定

現在では大変形を伴う柔らかい粘弾性体の物性値測定には、レオメーターを用いた動的粘弾性測定が主流であるが、動的粘弾性測定で明らかになるのは貯蔵弾性率、損失弾性率、損失正接であり、一般化 Maxwell モデルや一般化 Voigt モデルの弾性・粘性係数を直接求めることはできない。そこでレオメーターによる動的粘弾性で得られた測定値に Prony 級数近似を利用すれば、一般化 Maxwell モデルの粘性・弾性係数を求められることに着目し(図.2)、先の研究でクリープ解析を行ったクッションコレクトについて、今回はレオメーターによる動的粘弾性解析を行った。測定条件は、周波数範囲 400~0.1rad/sec、測定温度 21, 25, 29, 33, 37, 41 とし周波数依存性のグラフを作製、25 基準のマスターカーブを導出して Prony 級数近似により緩和スペクトルを解析した。

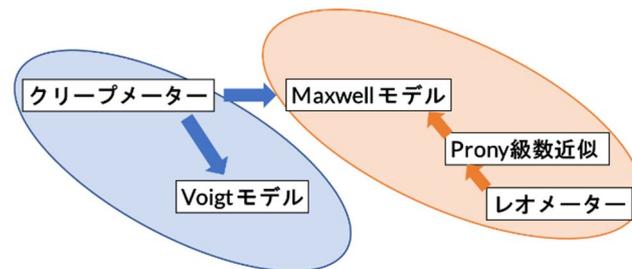


図2：従来法によるVoigtモデルの導出と新手法によるMaxwellモデルの導出

## (3) 義歯安定剤シミュレーションの再計算

一般化 Voigt モデルから一般化 Maxwell モデルに換装した SPH 法プログラムについて基本的な動作検証を行い、計算の整合性を確認した後、以前の研究と同じシミュレーションモデルを計算し、計算速度の変化、シミュレーション結果の変化について検証した。

シミュレーション条件は、左右顎堤頂と義歯の粘膜面間に 1mm の隙間を設けた上顎義歯(不適合状態)に対し、密着タイプ義歯安定剤がなし、左右厚さが 2mm、4mm、左 2mm 右 4mm の 4 種類の条件を設定した。左右咬合面より均等に最大 10N の圧力で 2 回加圧、除荷した際のミーゼス応力分布を計算するものとした。

## (4) 新しいシミュレーションモデル作製方法の検討

SPH 法で使用するシミュレーションモデル(粒子の集合体)について、従来法では蠟堤つき石膏製無歯顎模型(NC-N4; Nisin Dental Products Inc.)をコーンビームCTによりスキャンし、DICOM データを STL ファイルに変換後、粒子モデルを生成していた。しかしここ数年で光学スキャナーの読み取り精度が向上し一般的に普及してきたことを踏まえ、光学スキャナーを用いて同じ模型についてスキャンを行い STL データとし、シミュレーション用の粒子モデルを作成(図.3)、旧手法で作製された粒子モデルとの比較を行った。

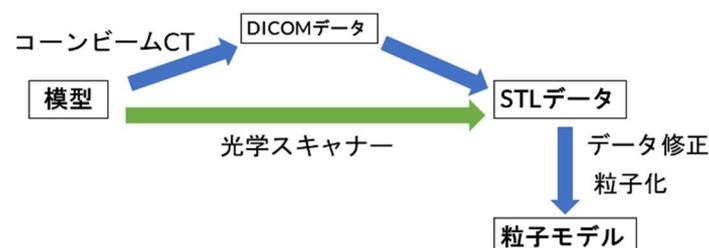


図3：シミュレーション用粒子モデルの作成方法

#### 4. 研究成果

##### (1) 密着タイプ義歯安定剤の動的粘弾性測定

クッションコレクトの動的粘弾性測定より得られたマスターカーブと、Prony 級数近似により得られた 7 要素 Maxwell モデルの弾性係数・遅延時間を以下のグラフに示す。得られた遅延時間から粘性係数を算出し、以降の Maxwell モデルを導入した SPH 解析プログラムに使用した。

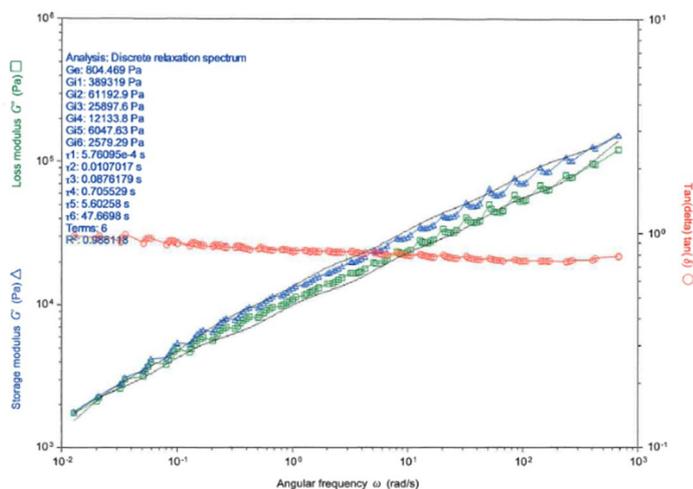


図 4：クッションコレクトのマスターカーブと Prony 級数近似

##### (2) SPH 法解析プログラムの改良とシミュレーションの再計算

Voigt モデルから Maxwell モデルに変更することによる計算速度の向上は 3~13% 程度に留まった(表.1)。安定剤の量が多い条件ほど時間短縮率は小さくなっていることから、計算速度の向上には Maxwell モデルへの改良のみならず、材料が大変形した際に粒子間距離を調節するイタレーション計算の高速処理も必要であることが判った。

Voigt モデルと Maxwell モデルでのシミュレーション画像を比較すると mises 応力の数値的なズレは生じているが、粘膜加圧状況の全体的な傾向としては同様の結果が得られた。その一例を図.5 に示す。数値的な差は材料測定値の差によるところが大きいと考えられる。

これらの結果より、動的粘弾性測定により得られた物性値も SPH シミュレーションに利用できることが明らかとなった。

表 1：解析時間の比較

密着タイプ安定剤の厚さ	計算終了までの時間(min)		計算時間短縮率(%)
	Voigt model	Maxwell model	
なし	4819	4195	13.0
左側 2mm, 右側 2mm	7096	6530	8.0
左側 2mm, 右側 4mm	7540	7086	6.1
左側 4mm, 右側 4mm	7735	7464	3.5

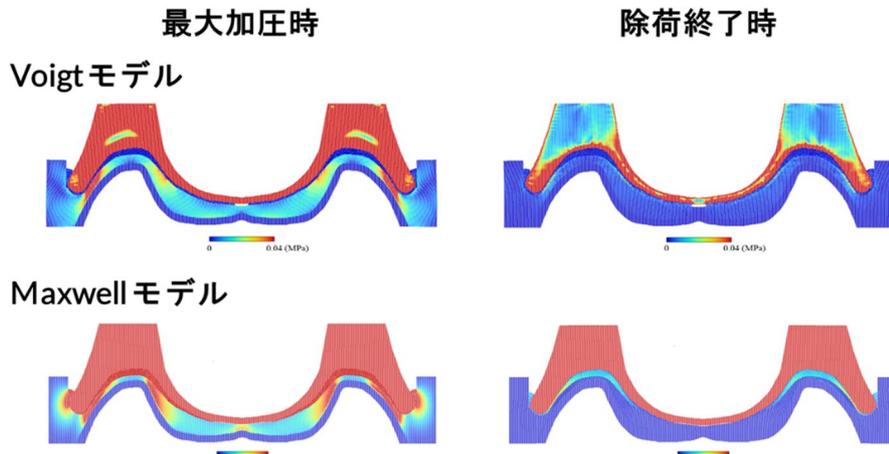


図5：安定剤厚さ4mmの場合のVoigtモデルとMaxwellモデルの比較

### (3) 新しいシミュレーションモデル作製方法の検討

以下に、光学スキャナーによる STL データから作製した SPH シミュレーション用粒子モデルと、コーンビーム CT による DICOM データから作製した SPH シミュレーション用粒子モデルを示す。すべてのモデルについて、粒子径はコーンビーム CT の解像度である 0.03mm とした。拡大図から明らかなように、光学スキャナーによるモデルの方が、コーンビーム CT より解像度の高いモデルを作製できていることが判る。光学スキャンでは、読み取り後そのまま STL データとして保存が可能であるため、コーンビーム CT のように DICOM データの変換作業を必要とせず、また X 線のようにアーチファクトによる影響を受けにくい為、スキャン画像にほとんど修正を加えることなく保存が可能であった。両手法により生成した粒子モデルの比較により、光学スキャンではより簡便で精度の高い粒子モデルが作製されることが明らかとなった。

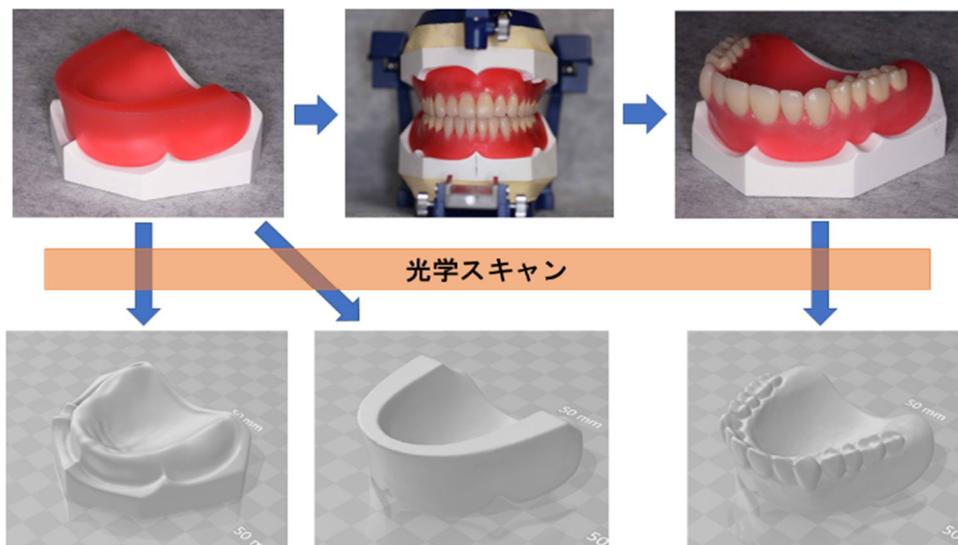


図6：光学スキャナーによるSTLモデルの作製

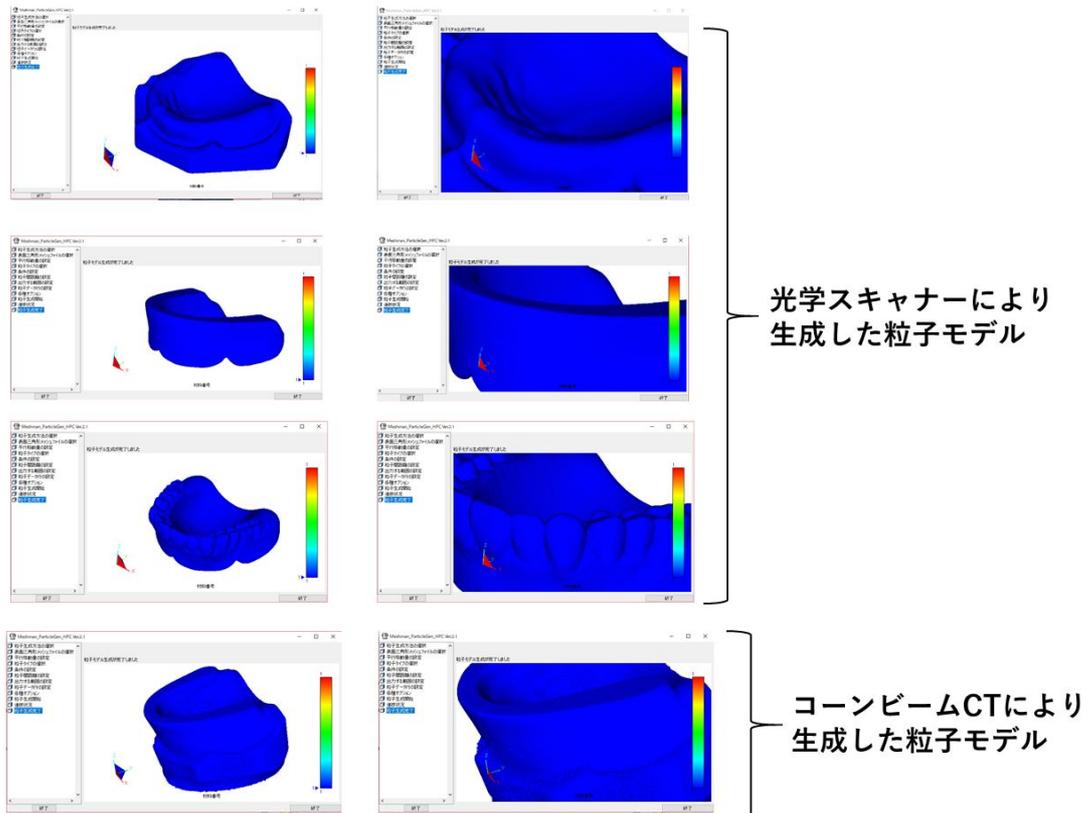


図7：光学スキャナーとコーンビームCTによるモデルの比較

今回新たに確立された一連の手法により、SPH法による粘弾性計算はより簡便で確実にできることとなり、印象材や裏層材、粘膜調整剤など、クリープメーターでは測定不可能な極めて柔らかい材料についてもシミュレーション解析が可能となった。これは歯科分野に限らず、工学などの他分野においても有用な解析手法になる。光学スキャンによるシミュレーションモデル作製手法を確立したことにより、人体などむやみにX線をあてることが困難であった対象物に関しても、容易にモデルを作製することが可能となった。これらの内容について、現在論文執筆中である。また先に述べた新たな手法で、安定剤と義歯、上顎粘膜に関する3次元のシミュレーションモデルを作製し解析計算を開始している。しかし、3次元シミュレーションを現実的に使用可能な時間で計算する為には、イタレーションのGPU化が必須であることが明らかとなった。

## 5．主な発表論文等

現在 Computers in Biology and Medicine への投稿に向けて論文執筆中である。

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

## 6．研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。