

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14586

研究課題名(和文) 流体と多孔質弾性体の連成解析による軟骨の変形と滲出が生体潤滑に与える影響の解明

研究課題名(英文) Elucidation of effects of deformation and fluid exudation of an articular cartilage on bio-lubrication by a coupled analysis of fluid and porous elastic body

研究代表者

宮内 優 (Miyuchi, Suguru)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：00758691

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)：本研究では、生体潤滑の定量的な評価のための関節軟骨内外の流れおよび関節軟骨の変形を考慮した流体と多孔質弾性体の連成解析手法の開発に関して、移動境界問題、流体弾性体相互作用、流体に飽和した多孔質弾性体の変形のそれぞれに対し、有効な数値解析手法を調査した。関節軟骨内外の流れおよび関節軟骨の変形を考慮した流体と多孔質弾性体の連成解析まで至らなかったが、計算精度、安定性、計算負荷の観点で実用的な解析コードが開発された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は優れた摩擦特性をもつ生体潤滑の機序の解明を目的として、生体関節で生じる様々な種類の潤滑の効果を実験的に評価するための数値解析手法を開発した。計算精度、安定性、計算負荷の観点で実用的な数値解析手法を調査するために多くの詳細な検証を実施した。将来の研究における、数値解析による生体潤滑の解明に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the bio-lubrication, this study investigated effective analysis methods for a moving boundary problem, an interaction between a fluid and elastic body, and deformation of a fluid-saturated porous media for the development of the coupled analysis of the fluid and porous elastic body which treats the flows inside and outside the articular cartilage and deformation of the articular cartilage. Although the coupled analysis of the fluid and porous elastic body has not been performed, the practical codes have been developed in terms of the numerical accuracy, stability and computational load.

研究分野：生体工学

キーワード：生体潤滑 数値シミュレーション 多孔質弾性体 流体

1. 研究開始当初の背景

変形性関節症は日本国内に 1000 万人以上の患者いると報告されており、高齢化が進む将来において、さらにその人口は増加すると予想される。変形性関節症は関節軟骨の磨耗や損傷によって症状が悪化し、運動機能の低下や疼痛の発生に到った場合には人工関節置換手術によって運動機能の回復や疼痛の除去が行われる。しかし、生体関節は現在実用化されている人工関節の性能に比べると遥かに優れた摩擦特性を有しており、更なる性能向上が望まれている。

関節とは骨と骨の結合する連結部を指し、その全体は関節包と呼ばれる繊維性の膜によって覆われている。関節包内は関節液によって満たされ、骨表面は粘弾性物質である関節軟骨によって覆われている。

関節における生体潤滑機構として、流体潤滑、境界潤滑、弾性流体潤滑などの様々な種類の潤滑が複合的に機能し、その優れた摩擦特性を実現していると考えられている。流体潤滑では、相対運動を行う剛体固体面間の流体に対して、その圧力が上昇することによって固体間に液膜が形成され、摩擦が低減する。その液膜厚さや圧力などの情報は Reynolds の潤滑方程式を解くことによって得られ、高負荷時や運動速度が遅い時には固体間接触を防ぐのに十分な液膜を形成できないことがわかっている。境界潤滑では、関節液に分散するヒアルロン酸分子が関節軟骨表面を吸着し、覆うことによって骨同士との直接の接触を防ぎ、摩擦を低減させる。弾性流体潤滑では、軟骨の変形能によって潤滑のウェッジ効果が高められ、低摩擦に寄与する。さらに、軟骨は多くの水分を含んでおり、関節液への透水性を示すことから周囲圧力の上昇によって軟骨内の水分が軟骨外へ移動する滲出が生体潤滑に影響を及ぼすと考えられる。以上のように生体関節の低摩擦メカニズムのために数多くの説が提案されているが、多くの種類の潤滑が複合的かつ複雑に機能しており、生体潤滑機構の支配的要因は十分に分かっていない。

2. 研究の目的

生体潤滑に対して弾性流体潤滑効果および軟骨の滲出効果による影響が大きいと考え、それらが骨端間に生じる流動に与える影響を数値シミュレーションによって定量的に明らかにすることを本研究の目的とした。このような生体関節の流動解析における数値的困難な点として、流体と固体の境界面が移動する移動境界問題であること、軟骨が単純な弾性物体でなく軟骨内部への流れを許容する多孔質弾性体であることが挙げられる。

多孔質物質内の流動は Darcy 則により記述されるが、その変形を伴う場合には Biot の式によって多孔質の内部流体と骨材の変形は表される。流体の運動方程式 (Navier-Stokes 方程式もしくは Stokes 方程式) と Biot の式の連成解析の例は少なく、流体と多孔質弾性体の相互作用問題に対する数値計算手法は確立されていない。本成果報告書では、生体潤滑の解析に必要な計算手法の検証結果について記す。

3. 研究の方法

生体潤滑機構解明のために関節軟骨内外の流れおよび関節軟骨の変形を考慮した流体と多孔質弾性体の連成解析手法の開発のため、移動境界の取り扱い、流体弾性体相互作用、流体に飽和した多孔質弾性体の変形のそれぞれに対して、有効な数値解析手法を調査した。流体は Newton 流体とし、その運動は Navier-Stokes 方程式、多孔質弾性体は流体と骨材の混合モデルである Biot の式に従うものとした。生体潤滑では流体と多孔質弾性体の界面で生じる力学的・運動学的な相互作用が重要であると考え、界面の条件を直接与えることができる界面適合格子を用いる有限要素法を採用した。

4. 研究成果

(1) 移動境界問題に対する数値解析

移動境界問題に対する流体解析には界面での境界条件を与えやすく、かつ界面における不連続量の再現性に長ける Arbitrary Lagrangian-Eulerian 法を実装し、解析コードの検証によく用いられているスロッピング問題に適用し、実験結果および他の数値解析解と比較した。時間方向の離散化に対して Euler 陽解法、Crank-Nicolson 法、Euler 陰解法の 3 種類、非線形項 (対流項) の扱いに対して Newton-Raphson 法と移流速度を前タイムステップの流速で近似する方法の 2 種類を実装し、計算精度、計算安定性、計算負荷の観点から最適な離散化を調べた。その結果、Crank-Nicolson 法と移流速度を前タイムステップの流速で近似する方法の組み合わせが、十分な計算精度と安定性を有し、実用的な計算負荷であることがわかった。

(2) 流体弾性体相互作用に対する数値解析

流体と弾性体の連成コードを開発し、検証問題による開発したコードの妥当性の確認と解析に適した計算設定を調べた。流体構造連成解析に対するベンチマーク問題として Turek and

Hron が提案した、2次元矩形流路中の弾性棒の流体励起振動問題を利用した。流体解析には移動境界問題に対する流体解析法の一つである Arbitrary Lagrange-Eulerian 法を実装し、弾性体には、検証問題の設定に合わせるために流体に対する透水性を持たない St. Venant-Kirchhoff モデルを使用した。流体と弾性体の連成は強連成とした。界面の移動に対する流体メッシュの制御法には線形弾性体の平衡方程式を使用した。線形弾性体の構成式に使用されるパラメータに対する解の収束性を調べ、メッシュの歪みが小さくかつ求解の反復回数が少ない値を調査した。その結果、構成式のパラメータをポアソン比に変換した場合に、ポアソン比が 0.3 程度の値で最も計算が安定し、求解の反復回数が少ないことがわかった。さらに、有限要素法による流体変数の離散化に関して、流速が双線形、圧力が一定の Q1Q0 要素と流速、圧力がともに双線形の Q1Q1 要素の 2 つを用いて、計算負荷と計算精度を比較した。このベンチマーク問題に対しては、Q1Q0 要素で十分に Turek and Hron の数値解と近い結果を示し、Q1Q1 要素の解析に比べ、計算負荷の観点で優位であった。

(3) 流体に飽和した多孔質弾性体の変形に対する数値解析

多孔質弾性体の支配方程式の解法として、penalty 法、Lagrange 未定乗数法、augmented-Lagrange 法による解析を行い、計算安定性と計算負荷について比較、検討を行った。Biot 理論に基づく多孔質弾性体の支配方程式は、流体相と固体相の空隙率によって平均化された応力の平衡方程式、多孔質媒体中の圧力と浸透流束の関係式(Darcy 則)、多孔質媒体の骨格の変形を考慮した流体の連続の式からなり、これらの方程式群に対して固体に対する流体の相対変位、圧力、固体の変位が独立変数となる。強連成解法のため、数値解析手法として有限要素法を採用し、penalty 法、Lagrange 未定乗数法、augmented-Lagrange 法によって定式化された弱形式を導出した。導出された弱形式は非線形となっているため、Newton-Raphson 法によって線形化を施した。解析対象は多孔質弾性体の単軸圧縮である。変数の要素内分布は流体の相対変位と固体の変位は双線形、圧力は一定(Q1Q0 要素)とした。離散化後の代数方程式のソルバーは GMRES 法である。圧縮後の最終形状が得られるまでに必要な反復回数は、Lagrange 未定乗数法に比べて、penalty 数を与えた augmented-Lagrange 法の方が少なかった。penalty 法は penalty 数が小さい場合には他の手法に比べ反復回数が少なかったが、penalty 数を大きくすると解が求まらずに計算が破綻する結果となった。

本実施期間では解析手法の開発まで実施したが、関節軟骨内外の流れおよび関節軟骨の変形を考慮した流体と多孔質弾性体の連成解析まで至らず、生体潤滑機構解明は今後の課題として残っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----