

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14612

研究課題名（和文）積層構造を有する湿潤多孔質弾性体の押し込み接触問題の理論解析に関する研究

研究課題名（英文）Analytical Study of Axisymmetric Indentation for Poroelastic Multi-Layer Coating on Substrate Body

研究代表者

三浦 鴻太郎 (Miura, Kotaro)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30846829

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：関節軟骨の構造を想定した積層構造を有する湿潤多孔質弾性体の押し込み接触問題に関する解析手法を確立した。積層構造の影響は伝達マトリクス法を用いることにより首尾よく表すことができ、実時間での解析解は数値ラプラス逆変換を適用することで求めることができた。本解析手法は、単一多孔質層の押し込み接触問題を解析した過去研究の数値結果とよく一致して妥当性を確認できた。積層構造の影響を考慮した数値解析によって、積層化することで表面沈下量が変化することが確認できた。また、表面と多孔質体基礎の透水性の影響が表面沈下の進行速度に大きく影響することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関節軟骨の力学的特性を正確に表現するために湿潤多孔質弾性体としてモデル化し、基礎的な押し込み接触問題に対して解析解を求めた。積層構造を考慮したこの解析解は、インデンテーション試験により関節軟骨の変性度合いや水分含有量によって変化する力学的特性を評価する実験解析に利用することができる。関節軟骨の力学的特性が正確に評価できれば、軟骨の変性疾患の早期診断等に活用できると考えている。

研究成果の概要（英文）：We considered the axisymmetric indentation of poroelastic multi-coating bonded to poroelastic substrate indented by a rigid flat-ended cylindrical indenter. The approach that expressed poroelastic solutions in term of two displacement functions and the transfer matrix method which can formulate the effect of multi-layer composite were applied in this study. Furthermore, we adopted the analytic method that using Laplace-Hankel transform and expressing the normal contact stress at the surface layer as an appropriate series with a Chebyshev orthogonal polynomial to reduce dual integral equations to an infinite system of simultaneous equations in Laplace transform domain. The results of axial displacement for one-layer bonded to rigid impervious substrate given by this study were good agreement with previously reported results. It is found that the permeability of the surface and substrate have a significant effect on the rate of progression of axial displacement of indenter.

研究分野：弾性論

キーワード：接触問題 関節軟骨 積層構造 多孔質材料 弾性論

1. 研究開始当初の背景

関節軟骨に代表される生体軟組織の力学的特性を評価する材料試験法として、インデンテーション試験法が広く利用されている。また、インデンテーション試験法の理論的基礎は押し込み接触問題の解析解によって構築されている。生体軟組織の力学的特性を正確に評価するためには、生体軟組織を適切な力学モデルで表現して、押し込み接触問題の解析解を導出する必要がある。これまでに関節軟骨の時間依存する複雑な挙動を表現するために粘弾性モデルや固相と液相の相互作用を考慮した二相性理論 (Biphasic theory) によるモデル化が行われてきている。二相性理論の基礎は、土質力学分野における Biot の三次元圧密理論が密接に関わっている。Biot は間隙に水や空気が含まれる多孔質の土が圧縮されるときに、透水性に対応して排水に時間遅れが生じることで、時間依存する力学的挙動を数理的に示すために古典弾性論の立場から、三次元圧密支配方程式を提案した。関節軟骨は実際には、表層、中間層、深層、石灰化層からなる力学的特性が内部で変化する層構造を有しているが、この層構造の影響に注目した押し込み接触問題の解析は行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、弾性論と土木分野で用いられている圧密理論によるアプローチから間質液で満たされた関節軟骨を積層湿潤多孔質体として考え、押し込み接触問題に関する理論的研究を行うことで、生体軟組織の時間依存する粘弾性挙動に関して基礎的かつ包括的な知見を与えることを目的とする。また、理論解析によって求められた解析解を基礎理論として、生体軟組織のインデンテーション試験による力学的特性評価手法を確立することを目指した。本来、この種の接触問題は第二種 Fredholm 型積分方程式に帰着されることが多い。これに対して本研究では、接触応力を Chebyshev の直交多項式により級数展開することによって、積分方程式を無限連立一次方程式に帰着させる独創性のある手法を用いる。この解析的手法は、積分方程式の形で記述された問題に対して幅広く適用できる汎用性のある手法であり、接触問題に限らず様々な力学問題への応用が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 積層湿潤多孔質体の押し込み接触問題の理論的解析

本研究では、図 3-1 に示すように円柱座標系において、剛体円柱状圧子により湿潤した積層多孔質体をステップ荷重で押し込む軸対称接触問題を考える。積層多孔質体の表面は排水および非排水条件を想定した。軸対称の多孔質問題の変位と応力成分に関する基礎方程式は McNamee-Gibson の変位関数を用いることで表される。Hankel-Laplace 変換を適用することで変位関数の一般解が得られ、境界条件を適用することで本問題は双積分方程式としてまとめられる。積層構造による各層境界の変位と応力の連続条件式は伝達マトリクス法により整理することができて、積層弾性体の問題と同様に無限連立一次方程式の解法問題に帰着することができる。最終的に数値 Laplace 逆変換することによって、時間領域での結果を得ることができる。本研究では、数値 Laplace 逆変換に Talbot の手法を用いる。

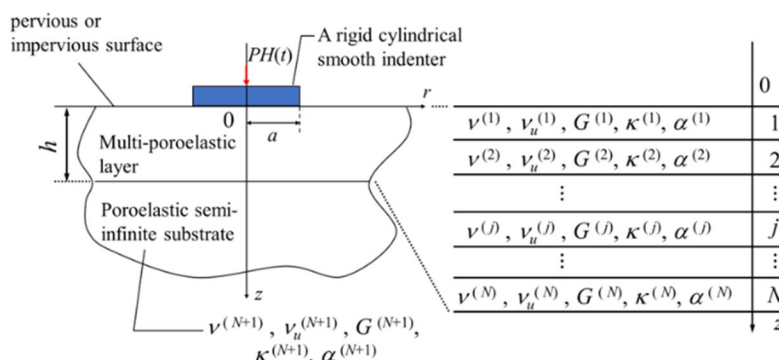


図 3-1 積層構造を有する湿潤多孔質体の押し込み接触問題。

(2) インデンテーション試験装置の開発

押し込み接触問題の解析によって得られた理論解を基礎にして、実験適用を図るためにインデンテーション試験装置を開発した。円柱状圧子を取り付けたヘッド部分をリニアアクチュエータで変位制御する構造となっている。荷重値は圧子取り付け部に設置したロードセルから取得する。また、材料試験装置としての妥当性を調べるために、ゴム硬さが既知であるシリコンゴム試験片を用意して、粘弾性特性同定を行った。得られた粘弾性特性の瞬間弾性率をゴム硬さに換算し既知の値と比較した結果、よく一致し、材料試験装置としての妥当性を示すことができた。関節軟骨の変性度合いは水分含有量に相関があると考えられている。そこで、水分含有量の異なる

るゼラチン試験片を用いて、水分含有量と粘弾性特性の相関を調べる基礎的実験を行った。

粘弾性特性を同定するために、剛体基礎上に密着した弾性厚板を押し込む接触問題の解から線形弾性 - 粘弾性の対応原理を用いて粘弾性解を導出した。この粘弾性解と実験により得られる変位一定の下での荷重値の時間変化を取得して、カーブフィッティングを行うことにより、粘弾性特性を同定した。

4. 研究成果

(1) 積層湿潤多孔質体の押し込み接触問題の理論的解析

本解析手法の妥当性を検討するために、図 4-1 に接触面における押し込み変位量の時間変化の本解析数値計算結果と Selvadurai and Yue (1994)らの文献における数値結果との比較を示す。問題設定は文献と合わせて、非排水性の剛体基礎上に単一の多孔質層が密着して、多孔質表面が排水性の場合の結果を示している。本解析において非排水性の剛体基礎を近似するために、単一の多孔質層と多孔質基礎の横弾性係数比を 1:100、多孔質基礎の透水係数を 0 とした。排水ポアソン比、非排水ポアソン比の設定は文献と合わせた。

図 4-1 より、時間変化を表す横軸 ct が 10^{-2} - 10^3 の範囲では、過去文献の数値結果とよく一致していることがわかる。 ct が 10^{-3} - 10^{-2} の範囲において、本解析では伝達マトリックス法で積層構造の影響を計算する際に、 ct が瞬間的な応答を示す小さい値の範囲で指数関数項の桁数が大きくなってしまい、収束した解を得ることができなかった。瞬間的な応答を表す ct が小さい範囲での計算に関しては、伝達マトリックス法での数値計算手法部分を改良する余地があると考えている。

積層構造の影響を調べるために、横弾性係数が表層から基礎まで線形に減少する (hard-coating system) と上昇する (soft-coating system) の二つの基本的な材料特性分布を想定して、数値計算を行った。横弾性係数以外の多孔質層に定義されるパラメータはすべての層で同一の値に設定した。排水ポアソン比 ν と非排水ポアソン比 ν_u の組み合わせは Selvadurai and Yue (1994)の値を参考にして決めている。図 4-2、4-3 にそれぞれ接触表面が透水性、非透水性の場合の Soft-coating system に対する接触面における押し込み変位量の時間変化の数値結果を示す。図中において、(i), (ii)の結果はそれぞれ多孔質基礎が透水性、非透水性の場合の結果を示している。積層構造の影響を調べるために、単一多孔質層と多層多孔質層の結果を、表層と基礎の横弾性係数比を同一にして比較している。Soft-coating system では多層構造にすることによって、押し込み変位量が大きくなった。接触表面が透水性の場合には、押し込み変位量の進行が早くなることが図 4-2 と図 4-3 の比較から見て取れる。接触表面と多孔質基礎がどちらも非透水性の場合には、押し込み変位量の進行が最も遅くなることが図 4-3 からわかる。これは、多孔質体の間質液の逃げ場がなくなったためであり、妥当な結果であると考えている。

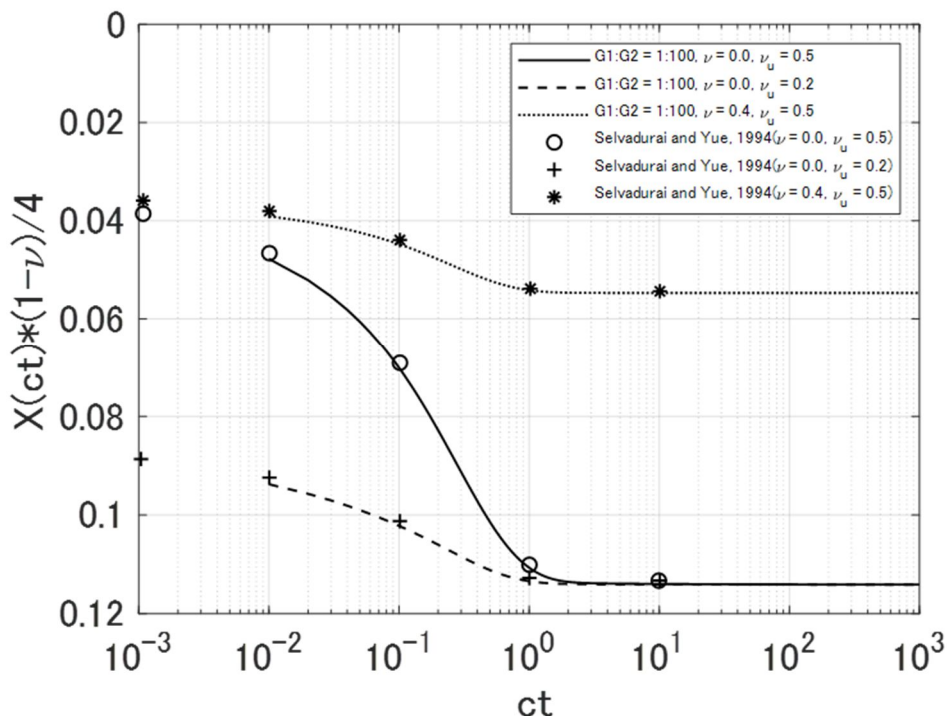


図 4-1 非透水性の剛体基礎上に単一多孔質層が密着している場合の接触面における垂直方向押し込み変位量の時間変化。(先行研究との比較による妥当性検証)

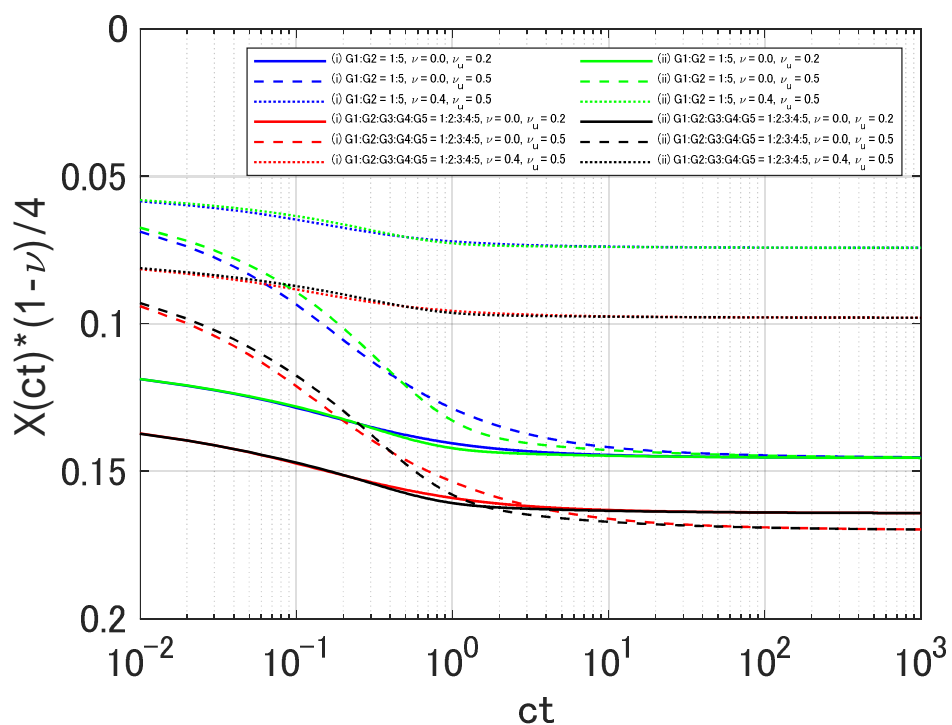


図 4-2 Soft-coating system に対する接触面における押し込み変位量の時間変化。(接触表面が透水性の場合)

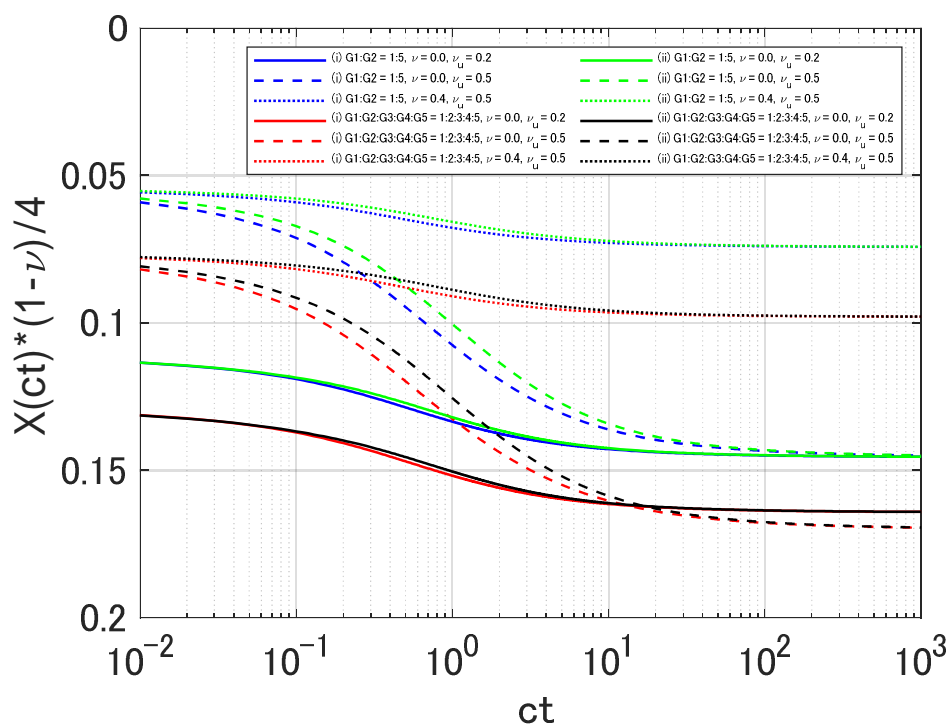


図 4-3 Soft-coating system に対する接触面における押し込み変位量の時間変化。(接触表面が非透水性の場合)

(2) インデンテーション試験装置の開発

開発したインデンテーション試験装置の妥当性を検証するために硬度がわかっているシリコンゴムを用いて、実験から硬度換算をして既知の硬度と比較した。寸法が縦 70 mm 横 70 mm、厚さが 3 mm と 5 mm、硬さ指示値 30 のシリコンゴム (K-123, 十川ゴム) をそれぞれ 5 枚ずつの試験片を用意した。インデンテーション試験には半径 3mm のアルミ製円柱状圧子 (A5052) を取り付けたアクチュエータ (SKR46, THK) を、パソコンセットアップツール (D-STEP, THK) を用いて制御し、押し込み試験を行った。試験片にかかる荷重はロードセルを用いて測定した。測定押し込み量は最大 0.15 mm として押し込んだ後、60 秒間変位を保持して、押し込み荷重を測定する緩和押し込み試験を実施した。インデンテーション試験に用いるシリコンの厚さは計測を 3 回行った平均を使用した。緩和押し込み試験から硬度換算を行って既知の値と比較した結果、厚さが異なっても十分に近い値となっており、試験装置として妥当であることが分かった。

水分含有量と粘弾性特性の相関関係を調べるために、水分含有量の異なるゼラチン試験片を用いて粘弾性特性測定を行った。試料は粉末上のゼラチンを水に溶かし、厚さ 10 mm の正方形の試験片を作製した。水分量が 50%, 60%, 70%, 80% のゼラチンをそれぞれ 5 個ずつ用意した。試験環境は、ゼラチンは 5℃ に設定した冷蔵庫に 1 時間放置して固め、その後 23℃ 暖房に設定した部屋に 1 時間放置した。緩和押し込み試験の試験条件はシリコンゴムと同様である。

図 4-4 では五要素モデルにおける各水分量のゼラチンと粘弾性特性 ($G1$, $G2$, G_{inf} , η_1 , η_2) を比較したグラフを示す。それぞれ相関があり、水分量が高くなるにつれて数値が減少していることが分かる。また、水分量を変えたゼラチンにおける粘弾性特性の有意差検定を行った。人間の水分量は約 70% ほどなので、水分量 70% のゼラチンを基準とし、水分量 50, 60, 80% のゼラチンの粘弾性特性の有意差検定を検証した。優位水準 5% で両側検定の t 検定を行ったところ、どの粘弾性特性においても、水分量 70% との比較では優位差が見られた。このことから、水分含有量が力学的特性に与える影響は大きく、考慮する必要があることが分かった。また、粘弾性特性をインデンテーション試験から取得することで、材料の水分量や変性状態を評価できる可能性が示唆された。

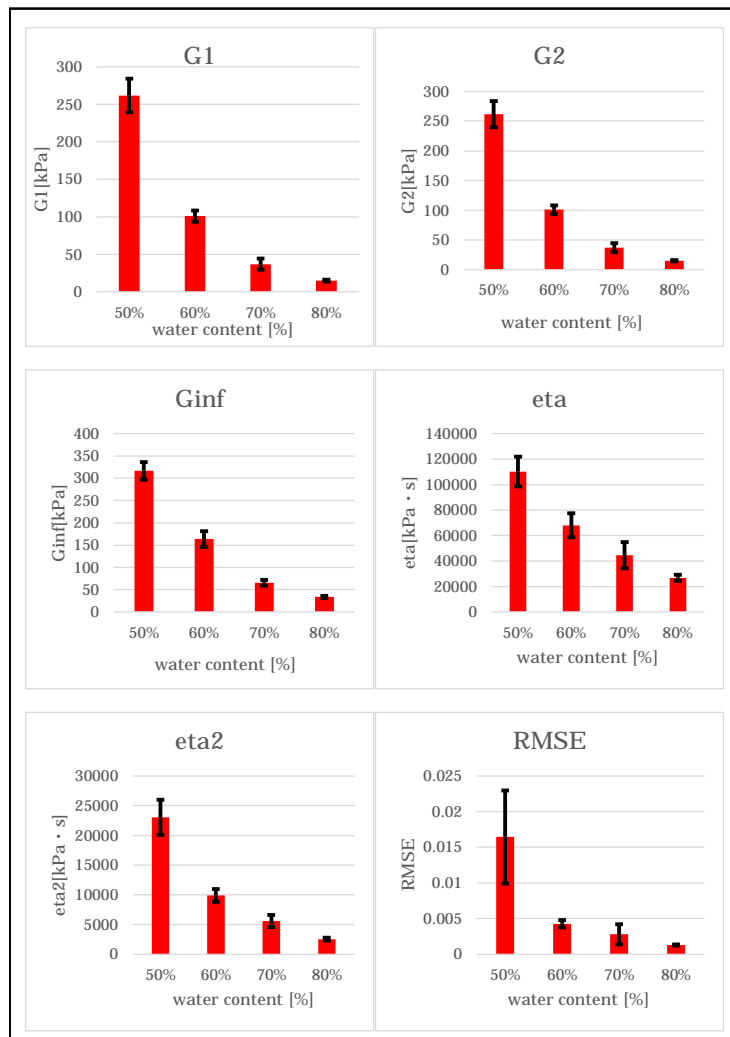


図 4-4 ゼラチン試験片の水分含有量と粘弾性五要素モデルパラメータの相関関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Kotaro Miura, Chihiro Oyama, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe	4. 巻 101
2. 論文標題 Indentation method accounting for thickness effect of viscoelastic layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/zamm.202000272	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 Miura Kotaro, Sakamoto Makoto, Tanabe Yuji	4. 巻 231
2. 論文標題 Analytical solution of axisymmetric indentation of multi-layer coating on elastic substrate body	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Mechanica	6. 最初と最後の頁 4077 ~ 4093
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00707-020-02752-1	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 MIURA Kotaro, SAKAMOTO Makoto, TANABE Yuji	4. 巻 8
2. 論文標題 Analytical solution for the axisymmetric problem of a penny-shaped crack under internal pressure in a multi-layer composite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 No.21-00025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.21-00025	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 三浦鴻太郎, 坂本信, 田邊裕治
2. 発表標題 異種材料からなる積層複合材料の円状き裂に関する軸対称弾性問題
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Miura, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe
2. 発表標題 Transient SH Wave Propagation of Elastic Plate
3. 学会等名 13th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials Under Dynamic Loading (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Miura, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe
2. 発表標題 Evaluation of Viscoelastic Properties of Articular Cartilage by Indentation Method Accounting for Thickness Effect
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡澤祐斗, 三浦鴻太郎, 弓削康平
2. 発表標題 様々な転落条件における乳幼児の頭部損傷評価解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦鴻太郎
2. 発表標題 緩和押込み試験装置の開発と円柱状圧子の先端形状の影響について
3. 学会等名 The 19th Conference on Biomechanics
4. 発表年 2020年～2021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
---------	---------