

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06047

研究課題名（和文）橈骨遠位端骨折の生体力学的要因の解明に向けた統合的研究

研究課題名（英文）Integrated Study on the Biomechanical Factors of Distal Radius Fracture

研究代表者

プラムディタ ジョナス（PRAMUDITA, Jonas Aditya）

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：50615458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、橈骨遠位端骨折における骨折形態の多様性の発生要因を解明するために、破壊モデルを導入した手首有限要素モデルを新たに構築し、橈骨遠位端骨折を予測できる数値解析手法の確立を試みた。その結果、検証により妥当性が確認された精巧な手首有限要素モデルを得ることができた。また、ウシ大腿骨から採取した骨試験片による力学試験およびその試験の再現解析により、外力に対する骨組織の力学特性を取得するとともに骨折発生閾値を明らかにすることができた。さらに、手首有限要素モデルによるパラメータスタディにより、いくつかの骨折形態を再現でき、骨折形態に及ぼす生体力学的要因を推定することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、実験および数値解析を組み合わせた統合的研究手法を用い、工学と医学の連携による分野横断型の研究である。その成果として、手首有限要素モデルによる橈骨遠位端骨折の数値解析手法を得ることができた。本研究の手法は特に骨折形態に関する医工学研究に有用であると考えている。また、本研究では橈骨遠位端骨折を対象としていたが、本研究の手法は他部位の骨折解析にも適用することができ、傷害防止などの工学的研究にも応用できると考えている。本研究の成果は転倒時の回避行動戦略の考案や衝撃緩衝材の開発のような骨折に対する有効な予防策に工学的知見を与えることが可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to understand the factors that influence variations in the fracture pattern of distal radius fracture, a novel wrist finite element model with damage model was developed and a computational method based on the wrist model for predicting distal radius fracture was also established. As a result, a sophisticated wrist finite element model that well validated could be obtained. Furthermore, from mechanical tests using specimens obtained from bovine femur and reconstruction simulations of the tests, the mechanical characteristics of bone tissue under external loading as well as bone fracture thresholds could be acquired. In addition, according to the result of parameter study using the wrist model, some fracture patterns were successfully reconstructed and the factors that cause the variations could be estimated.

研究分野：生体力学

キーワード：橈骨遠位端骨折 骨折形態 有限要素解析 破壊モデル 荷重特性 力学試験 妥当性検証 パラメータスタディ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本の人口の急速な高齢化に伴い、骨粗鬆症（骨量減少によって骨強度が低下し、骨折しやすくなった状態）の患者が年々増加しており、その数は約1300万人と推測されている。このような患者において、転倒などにより大腿骨近位部や橈骨遠位端の骨折が発生しやすく、社会問題となっている<sup>(1)</sup>。骨折は死亡の直接的原因にはならないが、実際に介護が必要となる原因として第3位に入っており<sup>(2)</sup>、高齢者のADL (Activities of Daily Living) を著しく低下させる。上記の骨折の中で、橈骨遠位端骨折は大腿骨近位部骨折等と比べて骨折形態の多様性が大きく、臨床分類 (AO 分類<sup>(3)</sup>) により9種類の骨折に分類できる。橈骨遠位端骨折における骨折形態の多様性の発生要因は未だに明らかになっておらず、医学だけでなく工学視点からの研究アプローチも必要であると考えている。

これまで研究代表者は、有限要素法に基づいて骨折解析の開発に取り組んできた。頭部有限要素 (FE) モデルによる衝突解析において破壊モデルをサブルーチンとして解析ソルバーに組み込むことにより頭蓋骨の陥没骨折の進展を予測できる可能性を示した<sup>(4)</sup>。また、ブタ腓骨の圧縮試験およびヒト屍体の手首のピンチング試験の結果に基づいて同定した破壊モデルを用いて手指挟みの有限要素解析 (FEA) を行い、中節骨の骨折の力学的発生条件を推定できることを示した<sup>(5)</sup>。しかし、橈骨遠位端骨折における骨折形態の多様性の発生要因を解明するために、新たに構築した手首 FE モデルに骨折解析手法を実装する必要がある。先行研究では、有限要素法 (FEM) による橈骨遠位端骨折の数値解析<sup>(6, 7)</sup>が行われてきているが、骨折形態の多様性に着目しておらず、単純な条件下での議論にとどまっている。橈骨遠位端骨折の骨折形態の多様性の発生要因として内部因子（骨密度など）と外部因子（荷重特性など）が挙げられ、これらの影響を数値解析的に調査するために、精巧な手首 FE モデル、多様な骨折形態を再現できる破壊モデルおよび骨折事例を再現できる解析手法の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

上記の背景およびこれまでの研究成果を踏まえて、本研究は転倒等による橈骨遠位端骨折に着目して、実験データに基づいて開発し検証した手首有限要素 (FE) モデルを用いて骨折形態の多様性の発生要因を検討することを目的とした。具体的には、下記の項目を研究期間内に実施することとした。

- ① 医用画像から手首 FE モデルの構築およびこのモデルによる解析手法の確立
- ② 骨組織による力学試験および破壊モデルの開発と FE モデルへの導入
- ③ 実験との比較による手首 FE モデルの検証と妥当性確認
- ④ 橈骨遠位端骨折の再現解析および骨折形態と力学的要因との関係の分析

### 3. 研究の方法

- ① 手首有限要素 (FE) モデルの構築および解析手法の確立

#### (1) CT 画像に基づいた手首 FE モデルの構築

有限要素解析 (FEA) を実施するために、有限要素モデル (FEM) が必要となるため、手首 FE モデルを新たに構築した。手首の CT 画像をもとに、Mimics (Materialise 社) を用いて手首構成骨（橈骨、尺骨、舟状骨、月状骨と三角骨）の形状を抽出し、図1に示す三次元モデルを作製した。そして、Hypermesh (Altair Engineering 社) を用いて要素分割を行うことにより、手首 FE モデルを完成させた。なお、CT 画像の利用について新潟大学の人を対象とする研究等倫理審査委員会の承認を得ている。

靭帯が骨間の相対運動に大きく影響しているため、人体解剖学書<sup>(8)</sup>を参考に複数のビーム要素を用いて主要な靭帯をモデル化した。また、衝撃緩和に影響すると考えられる橈骨の軟骨をソリッド要素でモデル化した。さらに、手首伸展時の CT 画像を活用することにより、舟状骨、月状骨および三角骨の位置調整を行い、伸展角  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  および  $90^\circ$  の3種類の手首 FE モデルを構築した。

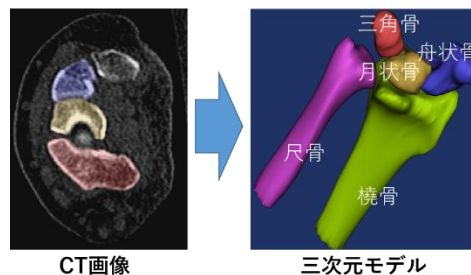


図1 手首の CT 画像から構築した三次元モデル

#### (2) 不均一な材料特性の設定

骨において場所により骨密度が異なっている。このような骨密度分布を再現するために、CT 画像の輝度値 (HU: Hounsfield Unit) に基づいて不均一な材料特性を手首 FE モデルに適用した。CT 撮影時に同時に撮影された骨量ファントム (B-MAS200, Kyoto Kagaku 社) を用いて HU と密度およびヤング率との関係式を求め、この関係式に基づいて各要素の密度およびヤング率を算出

し、手首 FE モデルの各要素に設定した。

### (3) 転倒時の衝撃力を模擬する解析の確立

橈骨遠位端骨折は転倒時に手が床につくことによって発生する。解析では床からの衝撃力を模擬するために、転倒実験における衝撃力を報告した文献<sup>(9)</sup>を参考に荷重条件を設定した。荷重曲線、荷重方向、拘束条件等を図 2 に示す。なお、荷重の最大値は体重比に従ってスケールリングを行った。本研究では、有限要素解析ソルバーとして LS-DYNA (LSTC 社) を利用した。

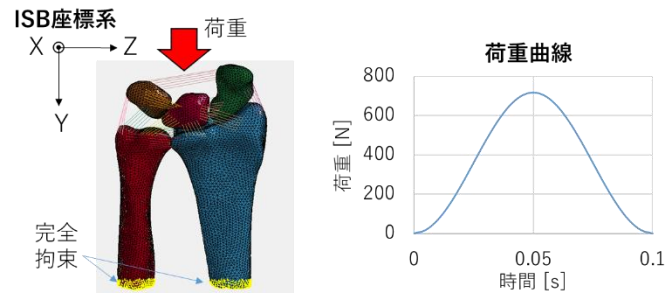


図 2 荷重条件および拘束条件

## ② 骨組織の力学試験および骨折発生閾値の取得

### (1) ウシ大腿骨から採取した骨試験片による力学試験の実施

外力に対する骨組織の力学応答および破断特性の基礎データを得るために、骨試験片を用いて引張試験、圧縮試験およびせん断試験を実施した。ウシ大腿骨の骨幹部の皮質骨から試験片を採取した。図 3 に示すように試験時の荷重方向が骨軸に対して平行になる試験片 (L 試験片) と垂直になる試験片 (T 試験片) の 2 種類の試験片を用意した。小型卓上試験機 EZ-LX (株式会社島津製作所) を用いて、クロスヘッドスピード 1 mm/min で試験片が破断するまで試験を行った。なお、試験はすべて室温条件下で実施した。試験結果から荷重-変位曲線、応力-ひずみ曲線、破断点等を求めた。

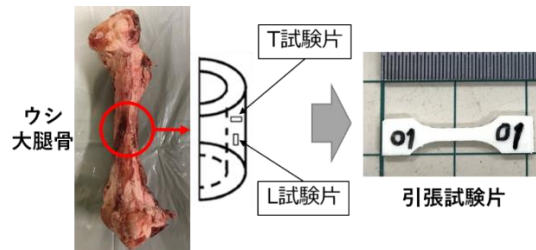


図 3 ウシ大腿骨から採取した T 試験片および L 試験片

### (2) 力学試験の再現解析の実施

(1) で得られた結果を手首 FE モデルに適用するために、力学試験の再現解析を行い、試験片内部の力学応答と破断閾値を求めた。各試験片の平均寸法より試験片 FE モデルを作製した。試験片モデルは弾性体と仮定し、その物性値が引張試験の結果から算出した値とした。また、試験片モデルの骨密度は一様に分布していると仮定した。力学試験を再現するために、図 4 に示すように各試験片モデルに試験時と同様の荷重条件を与えた。

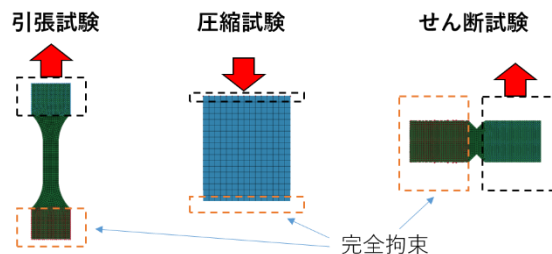


図 4 試験片 FE モデルによる力学試験の再現解析

### (3) 力学試験と異なる試験の再現可能性の検討

力学試験と異なる試験を再現することにより、破壊モデルの有用性を確認することができる考えた。そこで、過去に実施した衝撃試験<sup>(10)</sup>で用いたブタ腓骨をモデル化し、衝撃試験時と同様の条件下で再現解析を実施し、骨折形態等を比較した。

## ③ 手首 FE モデルの検証と妥当性確認の実施

### (1) 応力分布について屍体実験結果との比較

文献<sup>(11)</sup>における屍体実験の再現解析を行い、応力分布および骨折可能性の高い場所の比較を行った。屍体実験では、近位部を固定した橈骨の骨軸方向に圧縮荷重を与え、骨折が発生する時



の荷重や骨折形態を明らかにした。また、この実験の有限要素解析を行うことにより応力分布も明らかにした。本研究プロジェクトでは、手首 FE モデルを用いて実験と同様の条件下で解析を行い、実験において骨折が発生した荷重 971N における橈骨遠位部の応力分布を求め、骨折箇所等を比較した。

#### (2) 局所ひずみについて屍体実験結果との比較

文献<sup>(12)</sup>における屍体実験の再現解析を行い、局所ひずみ値の比較を行った。屍体実験では、橈骨の近位部を固定し、掌部を床に向かって 300N まで圧縮することにより、転倒事故を模擬した。その際、橈骨表面に貼り付けた複数のひずみゲージにより局所ひずみを計測し、場所によるひずみ値の変化傾向を明らかにした。本研究プロジェクトでは、手首 FE モデルを用いて掌側から骨軸方向に荷重を与えることにより、実験の再現解析を行った。そして、実験とほぼ同じ場所におけるひずみ値を手首 FE モデルから算出し、比較した。

#### ④ 橈骨遠位端骨折の骨折形態を再現するパラメータスタディの検討

①～③で開発し検証した手首 FE モデルを用いて骨折形態に与える外力条件の違いの影響を調査した。その調査方法として、荷重方向、荷重配分および荷重曲線を変更させたパラメータスタディを実施した。荷重方向は、図 2 に示した荷重方向に加えて X 軸回りに 30° および -30° 回転させた方向とした。荷重配分は、月状骨・三角骨：舟状骨に 1:1、1:2 および 2:1 の比率とした。荷重曲線は、図 2 に示した荷重曲線に加えて最大値および持続時間を 1/2 倍にした荷重曲線とした。解析結果から得られた骨折形態を A0 分類と照らし合わせることで骨折形態の再現可能性を評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 精巧な手首 FE モデル

不均一な材料特性を有している手首 FE モデルを図 5 に示す。図 5 より、場所によって骨密度が異なっていることが確認できた。応力分布に関する検証では、手首 FE モデルが尺骨切痕から背側結節に向かって大きな応力を示した。これは屍体実験において骨折線が確認された場所と一致している。局所ひずみに関する検証では、ひずみ値が橈骨遠位部で最大となり、近位部よりも大きいことが再現できた。また、表 1 に示すように解析結果のひずみ値が屍体実験のひずみ値のばらつき範囲内に収まっていることが確認できた。以上より、本研究の手首 FE モデルの妥当性が確認され、橈骨遠位端骨折の有限要素解析に応用できると考えられる。

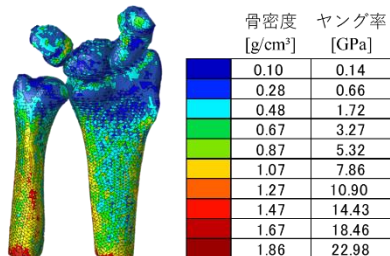


図 5 手首 FE モデルの材料特性分布

表 1 橈骨表面における局所ひずみの比較

測定場所	最大圧縮ひずみ	最大引張りひずみ	
遠位部	実験結果	-1,695 ± 396 με	1,143 ± 296 με
	解析結果	-1,882 με	1,098 με
近位部	実験結果	-1,128 ± 112 με	660 ± 194 με
	解析結果	-1,169 με	632 με

#### (2) 骨組織の力学応答と骨折挙動の再現

図 6 に力学試験と有限要素解析の荷重-変位曲線および骨折再現の結果を示す。引張、圧縮、せん断および曲げ試験の再現解析の結果より、すべての試験において両試験片 (T 試験片と L 試験片) とともに、解析結果が実験結果のばらつき範囲内に収まっていることが確認された。つまり、骨の変形挙動と破断特性をおおむね再現することができたと言える。また、ブタ腓骨の衝撃試験の再現解析の結果より、骨折が 2 方向に分かれて進展していることが確認された。実際の試験においても同様の骨折が進展していることから、本研究の破壊モデルおよび破断閾値が力学試験と異なる荷重条件下における骨折解析にも適用できると考えられる。

#### (3) 骨折形態の再現と多様化の要因

破断閾値を超えた要素を削除することにより、解析結果において骨折形態を示すことができた。解析結果の一例を図 7 に示す。図 7(a) は Y 軸方向に負荷した解析結果を示したものである。図 7(a) より、関節内で複雑骨折が発生していることがわかった。図 7(b) は荷重配分 1:1 または 2:1 で斜めに負荷した解析結果を示したものである。図 7(b) より、橈骨関節外骨折が発生していることが確認できた。図 7(c) は荷重配分 1:2 で斜めに負荷した解析結果を示したものである。図 7(c) より、橈骨関節内部分骨折が発生していることが明らかとなった。以上より、橈骨遠位端は衝撃荷重の影響を最も受けやすい部位であることが明らかとなった。また、骨折形態は月状骨か舟状骨との接触の違いによって変化すると考えられる。さらに、本研究では、骨折形態の変化に及ぼす荷重配分と荷重方向の影響が手首伸展角や負荷速度の影響に比べて大きいことが確認された。

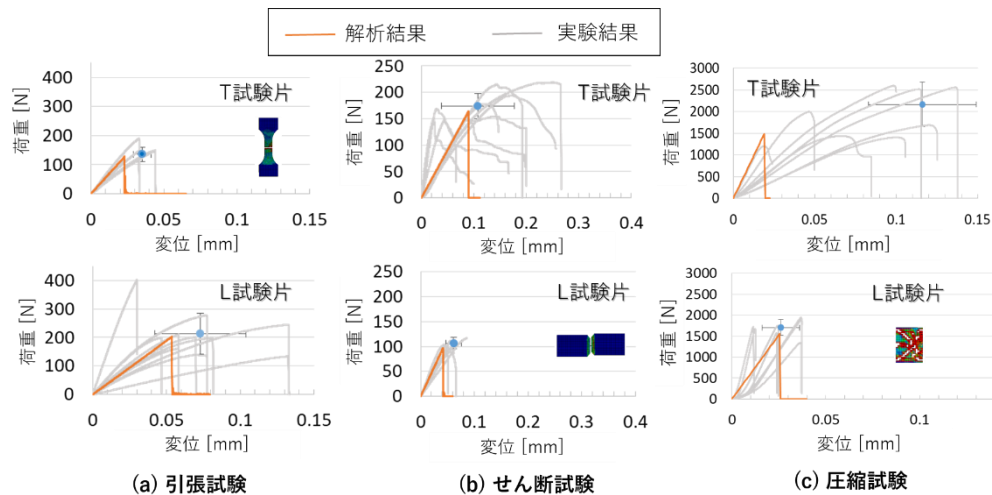


図6 力学試験結果と試験再現解析結果の比較

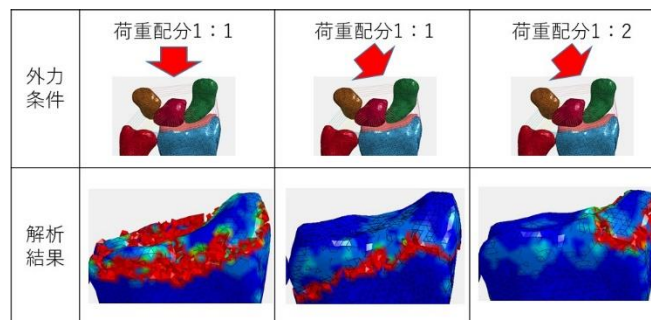


図7 パラメータスタディから得られた骨折形態の一例（赤の要素は骨折を示している）

#### (4) 今後の展望

本研究で使用した手首 FE モデルは骨形状や骨密度の個体差を考慮していない。そのため、個体別手首 FE モデルを用いて個体差の影響を調査する必要があると考えている。また、妥当性検証に文献データを利用していたが、橈骨の姿勢や骨密度などの情報が不明であるため、正確な再現解析を実施することが難しい。今後、実験で実際に用いた試料の有限要素モデルを構築し、実験時と同様の姿勢および荷重条件の下で再現解析を実施し、より高度な妥当性検証を試みる。

#### <引用文献>

- (1) 日本骨粗鬆症学会, 骨粗鬆症の予防と治療ガイドライン 2015 年版, 2015.
- (2) 厚生労働省, 平成 25 年国民生活基礎調査, 2014.
- (3) Meinberg EG, et al., “Fracture and dislocation classification compendium-2018”, *J Orthop Trauma*, 32:S1-S170, 2018.
- (4) Katagiri M, et al., “Development and application of stress-based skull fracture criteria using a head finite element model”, *J Biomech Sci Eng*, 7(4):449-462, 2012.
- (5) Pramudita JA, et al., “Estimation of conditions evoking fracture in finger bones under pinch loading based on finite element analysis”, *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 20(1):35-44, 2017.
- (6) Bhatia VA, et al., “Predicting surface strains at the human distal radius during an in vivo loading task: finite element model validation and application”, *J Biomech*, 47(11):2759-2765, 2014.
- (7) Matsuura Y, et al., “Accuracy of specimen-specific nonlinear finite element analysis for evaluation of distal radius strength in cadaver material”, *J Orthop Sci*, 19(6):1012-1018, 2014.
- (8) Kapandji AI, カラー版 カバンジー機能解剖学 I(1) 上肢 原著第 6 版, 医歯薬出版, 2006.
- (9) DeGoede KM, et al., “Fall arrest strategy affects peak hand impact force in a forward fall”, *J Biomech*, 35(6):843-848, 2002.
- (10) 嘉藤将史 他 2 名, “落錘式衝撃試験機を用いた三点曲げ試験によるブタ腓骨の動的応答評価”, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 2016.
- (11) Brent Edwards W, et al., “Finite element prediction of surface strain and fracture strength at the distal radius”, *Med Eng Phys*, 34(3):290-298, 2012.
- (12) Troy KL, et al., “In vivo loading model to examine bone adaptation in humans: a pilot study”, *J Orthop Res*, 31(9):1406-1413, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Jonas A. Pramudita, Ippei Shimizu, Yuji Tanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Mechanical Behavior of Bovine Cortical Bone Tissue under Tension, Compression and Shear Loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 141-146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/aem.4.0_141	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Jonas A. Pramudita, Ippei Shimizu, and Yuji Tanabe
2. 発表標題 Bone Fracture Thresholds Based on The Experimental and Finite Element Analysis Results
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (ATEM ' 19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣木航, プラムディタ ジョナス, 田邊裕治, 依田拓也
2. 発表標題 荷重条件等の違いによる橈骨遠位の力学応答への影響
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水一平, プラムディタ ジョナス, 田邊裕治
2. 発表標題 有限要素法による骨折モデルの妥当性評価
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣木 航, プラムディタ ジョナス, 依田 拓也, 田邊 裕治
2. 発表標題 動的荷重下における橈骨遠位の力学的応答の解析
3. 学会等名 日本機械学会 第31回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水 一平, プラムディタ ジョナス, 田邊 裕治
2. 発表標題 ウシ皮質骨の力学特性の評価と有限要素モデル化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 プラムディタ ジョナス, 廣木 航, 依田 拓也, 田邊 裕治
2. 発表標題 衝撃荷重を受ける橈骨遠位端の応力分布に関する有限要素解析
3. 学会等名 日本実験力学学会バイオメカニクス分科会 The 18th Conference on Biomechanics in Niigata
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jonas A. Pramudita, Masashi Kato, Yuji Tanabe
2. 発表標題 Assessment of long bone fractures under dynamic bending and pinching loadings
3. 学会等名 XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (ISB 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jonas A. Pramudita, Ippei Shimizu, Yuji Tanabe
2. 発表標題 Mechanical Characterization of Bone Tissue Excised from Bovine Femur
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (13th ISEM'18) (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	依田 拓也 (YODA Takuya)  (60769454)	新潟大学・医歯学総合研究科・特任助教  (13101)	
研究分担者	田邊 裕治 (TANABE Yuji)  (60143020)	新潟大学・自然科学系・教授  (13101)	
研究分担者	小林 公一 (KOBAYASHI Koichi)  (70296317)	新潟大学・医歯学系・教授  (13101)	
研究分担者	坂本 信 (SAKAMOTO Makoto)  (80215657)	新潟大学・医歯学系・教授  (13101)	