

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号： 3 2 6 6 5

研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間： 2019 ~ 2021

課題番号： 1 8 K K 0 4 0 2

研究課題名（和文）動的荷重に対するヒト手首の力学応答に関する実験的研究

研究課題名（英文）Investigation of The Mechanical Responses of Human Wrist Under Dynamic Loadings

研究代表者

プラムディタ ジョナス（PRAMUDITA, Jonas）

日本大学・工学部・准教授

研究者番号： 5 0 6 1 5 4 5 8

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000 円

渡航期間： 6 ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、橈骨遠位端骨折の骨折形態に及ぼす前腕姿勢の影響を調べるために、米国バージニア大学と共同でヒト前腕を用いた衝撃実験を実施し、手首有限要素モデルによる実験再現解析を実施した。衝撃実験より、転倒時の衝撃を受けた前腕の力学応答を明らかにすることができた。また、臨床で確認された骨折形態を実験で再現することができ、前腕の傾きや転倒方向などの前腕姿勢と骨折形態との関係性を示すことができた。さらに、実験再現解析結果より、橈骨で発生した内部力学パラメータを明らかにすることができ、内部力学パラメータの分布が骨折箇所や骨折形態に大きな影響を与える可能性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、日本と米国の大学による国際共同研究であり、日本が得意とした人体モデルによる数値解析と米国が得意とした献体による実験を融合したものである。また、工学と医学の連携による分野横断型の研究でもある。その成果として、新たな実験手法とこれによる新たな実験データを獲得することができた。また、同一個体による実験と実験再現解析を実施することができ、解析結果に対する個体差の影響を低減できたと考えられる。本研究の成果は骨折の発生閾値および骨折形態の多様化の発生メカニズムの議論に新たな知見を与えるものだと考えている。将来的に転倒時の骨折を予防・軽減する対策・技術の設計開発につながることを期待している。

研究成果の概要（英文）：In this study, to investigate the effect of forearm posture on the fracture pattern of distal radius fracture, impact test using cadaver (PMHS) forearms was conducted and reconstruction analysis using wrist finite element model was also performed in collaboration with University of Virginia. From the impact test, the mechanical responses of forearm under impact loading during fall could be obtained. Furthermore, clinically confirmed fracture patterns could be reconstructed by the experiment and a possible relationship between fracture patterns and forearm postures could also be drawn. In addition, from the reconstruction analysis, the internal mechanical parameter of radius could be visualized. The distribution of internal mechanical parameter on the radius may have a significant effect on the location and pattern of the distal radius fractures.

研究分野： バイオメカニクス

キーワード： 橈骨遠位端骨折 骨折形態 実験再現解析 衝撃試験 手首有限要素モデル 前腕姿勢 PMHS 転倒

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

日本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いる<sup>(1)</sup>。このような患者において、転倒などにより大腿骨近位部、脊髄、橈骨遠位端などで骨折が発生しやすい。骨折により介護が必要となったり ADL（日常生活動作）が低下したりする。上記の骨折の中で、特に橈骨遠位端骨折は骨折形態の多様性が大きいことが知られている<sup>(2)(3)</sup>。しかし、骨折形態の多様化の発生要因は未だに明らかになっていない。骨折形態の多様化の発生要因や発生メカニズムを解明できれば、より有効な安全対策や保護技術の開発に科学的知見を与えることができると考えている。

基課題（17K06047）の研究では、CT データから手首有限要素モデルを構築し、このモデルを用いて転倒時の荷重条件を模擬した有限要素解析を実施することにより、橈骨遠位端におけるひずみ分布を調べることができ、荷重条件の違いによるひずみ分布の違いが骨折形態の多様化を引き起こす可能性のあることを明らかにした<sup>(4)</sup>。また、ウシ大腿骨から取得した試料を用いた機械試験を実施することにより、様々な荷重条件下における骨組織の機械的特性を得ることができ、この機械的特性をもとに骨折を表現できる破壊モデルを構築した<sup>(5)</sup>。さらに、この破壊モデルを手首有限要素モデルに導入することにより、橈骨遠位端骨折を再現する解析手法を確立するとともに、臨床で確認された骨折形態を再現できる可能性を示した。

しかし、橈骨遠位端骨折の解析手法を確立できたものの、手首有限要素モデルの検証と妥当性確認が行われていないという課題が残っている。また、有限要素解析結果より荷重条件の違いが骨折形態の多様化に影響を与える可能性が明らかになったが、実際の転倒事故や実験においてこの結果は確認できていない。そのため、ヒト前腕を用いた衝撃実験により荷重条件（転倒条件）の影響を明らかにするとともに、手首有限要素モデルの検証と妥当性確認に必要なデータを取得する必要がある、本国際共同研究プロジェクトをスタートした。

### 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、本研究では米国バージニア大学と共同でヒト前腕を用いた衝撃実験を実施し、実験再現解析により手首有限要素モデルの検証と妥当性確認を実施するとともに、骨折形態に及ぼす転倒条件の違いによる影響を調査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した。なお、本研究はバージニア大学、日本大学および新潟大学の倫理審査を受け、各機関より実施許可を得た。

- (1) 様々な転倒条件を模擬可能な衝撃試験法の確立
- (2) 衝撃荷重下におけるヒト前腕の力学応答および骨折形態の取得
- (3) 実験と同様の条件下における骨折再現解析の実施

### 3. 研究の方法

- (1) 様々な転倒条件を模擬可能な衝撃試験法の確立

#### ① 試料固定治具の開発

転倒時の手首や前腕の姿勢および荷重条件を再現するために、試料固定治具を新たに開発する必要がある。そこで、手首が伸展した状態のヒト前腕の近位部を固定し、掌側から橈骨軸方向に向かって衝撃荷重を与え、前腕の力学応答や外観挙動を取得できるように固定治具を設計した。この固定治具はバージニア大学で過去に実施した研究<sup>(6)</sup>において使用された落錘試験機に取り付け使用することを想定して開発した。

本研究で開発した固定治具の概略図を図 1 に示す。試料を固定した状態で CT 撮影を行うため、樹脂材料およびアルミニウム平板を用いて固定治具を作製し、CT 撮影時に発生する金属アーチファクトを軽減した。試料であるヒト前腕の近位部を治具の下部に固定し、手首が伸展した状態で掌面にインパクターを接触させた。このインパクターに 32kg の落錘を 1m の高さから落下させることにより、手首や橈骨に衝撃荷重を与えた。

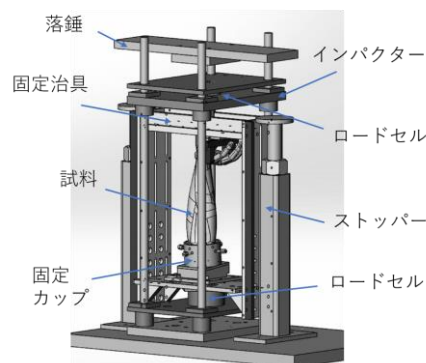


図 1 試料固定治具の概略図

#### ② 前腕の力学応答の計測

衝撃荷重を受けたヒト前腕の力学応答を調べるために、複数のセンサーを活用した。インパ

クターにロードセル，加速度計およびストリング式ポテンシオメーターを取り付け，インパクトの荷重，加速度および変位を計測した．また，治具の下部にもロードセルを取り付け，前腕の近位部の荷重応答を計測した．さらに，高速度ビデオカメラで前腕の外観挙動も取得した．

## (2) 衝撃荷重下におけるヒト前腕の力学応答および骨折形態の取得

### ① 試料

高齢女性の献体より6つの前腕試料を得た．日本人高齢女性の標準体型に近い献体を選定した．また，すべての献体を検査し，骨折歴のないことを確認した．上記の固定治具を用いて前腕の姿勢を維持しながら固定した．各試料に32kgの死荷重を約10分間負荷することにより，各試料に予備負荷を与えた．なお，実験を行う前に固定治具と試料のCT撮影を実施した．

### ② 試験条件

橈骨と尺骨のねじれ状態および前腕の傾きの影響を調べるために，6種類の試験条件を設定した．橈骨と尺骨のねじれ状態および前腕の傾きの組み合わせを表1に示す．橈骨と尺骨のねじれ状態は，前方転倒時の前腕を模擬した橈骨と尺骨がクロスしている状態と後方転倒時の前腕を模擬した橈骨と尺骨がクロスしていない状態の2種類とした．前腕の傾きは，転倒時の肩部の位置に対する手部の位置を模擬した直立(0°)，尺側へ5°傾斜および橈側へ5°傾斜の3種類とした．

表1 試験条件

| 条件の組み合わせ |          |       |
|----------|----------|-------|
|          | 橈骨と尺骨    | 前腕の傾き |
| 1L       | クロスしている  | 0°    |
| 1R       | クロスしていない | 0°    |
| 2L       | クロスしている  | 尺側へ5° |
| 2R       | クロスしていない | 尺側へ5° |
| 3L       | クロスしている  | 橈側へ5° |
| 3R       | クロスしていない | 橈側へ5° |

### ③ 実験後のCT撮影

実験後に試料を固定治具から取り外し，CT撮影を再度行った．そして，CT画像を確認し，各試料における骨折の位置および形態を特定した．本研究では，骨折形態をバートン骨折，ミス骨折およびコーレス骨折の3種類の骨折に分類した．

## (3) 実験と同様の条件下における骨折再現解析の実施

### ① 有限要素モデルの作製

実験前に撮影したCTデータから橈骨，尺骨，舟状骨，月状骨および三角骨の三次元形状を抽出し，要素分割を行うことにより手首有限要素モデルを構築した．また，解剖学参考書や文献を参考に軟骨モデルおよび靭帯モデルを構築した．

前腕と同時に撮影された骨量ファントムを用いて，CT値と見かけ骨密度との関係を求め，文献の計算式<sup>(4)</sup>を用いて骨モデルの各要素の密度とヤング率を算出した．そして，この材料特性を骨モデルの各要素に割り当てた．手首有限要素モデルにおける密度とヤング率の分布の一例を図2に示す．

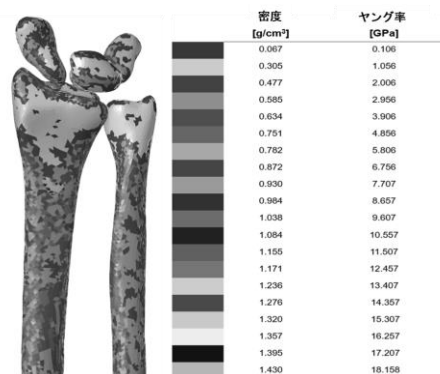


図2 手首有限要素モデルと材料特性の分布

### ② 実験再現解析

手首有限要素モデルを用いて実験再現解析を実施した．実験再現解析では，橈骨と尺骨の近位部を完全拘束し，インパクトの落下方向と同様の方向にロードセルで計測した衝撃荷重を月状骨，三角骨および舟状骨に与えた．解析結果よりミーゼス応力分布などの内部パラメータを算出し，応力集中箇所と実験から明らかにした骨折箇所との比較を行った．

#### 4. 研究成果

##### (1) 衝撃荷重をうけた前腕の力学応答

実験で計測したインパクターの荷重、加速度と変位および前腕の近位部の反力をデジタルフィルタ CFC60 により平滑化し、それぞれの最大値を求め、比較した。図 3 に近位部の反力およびインパクターの変位の最大値の比較および平均値を示す。近位部の反力およびインパクターの変位の平均値はそれぞれ 2,759N および 22.2mm であった。先行研究<sup>(6)</sup>で近位部の反力およびインパクターの変位の最大値がそれぞれ 4.1 kN～5.4 kN および 5.6 mm～8 mm と報告されていることより、本研究で計測された最大反力が小さくなっていることがわかった。これは先行研究の落錘の落下高さとの差異によるものであると考えられる。

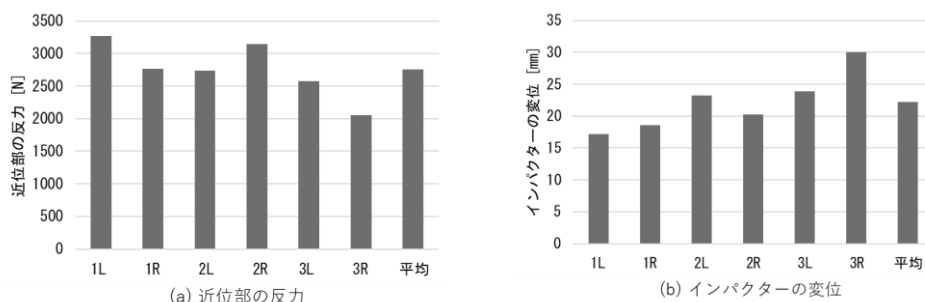


図 3 各試料の力学応答の比較

##### (2) 転倒条件の違いによる骨折形態の変化

実験後に撮影した CT 画像より、試験片 1L と 1R にバートン骨折、試験片 2L にスミス骨折、試験片 3L と 3R にコーレス骨折が確認された。また、一部の試料では、舟状骨骨折や月状骨窩骨折も確認された。

##### (3) 橈骨遠位端骨折と内部パラメータとの関係

有限要素解析によって得られたミーゼス応力分布の結果の一例を図 4 に示す。橈骨は関節表面、関節表面から少し離れた箇所および完全拘束された近位部に近い箇所でミーゼス応力が高くなっている。また、尺骨は橈骨に比べてミーゼス応力が低いことが確認された。

橈骨の関節表面の高応力値は舟状骨窩と月状骨窩で発生しており、それぞれ舟状骨と月状骨との接触によって発生するものである。また、橈骨の関節表面から少し離れた箇所での高応力値は遠位部から骨幹部へ移行しているエリアで発生しており、このエリアにおける骨表面形状による応力集中や骨密度分布が原因であると考えられる。

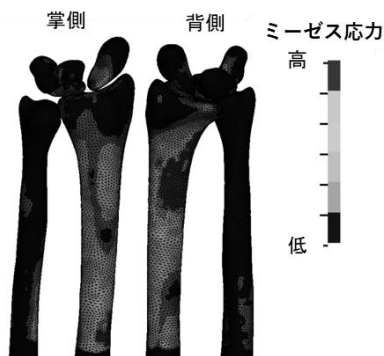


図 4 実験再現解析より得られたミーゼス応力分布

#### <引用文献>

- (1) Hagino, H., et al.: “Changing Incidence of Hip, Distal Radius, and Proximal Humerus Fractures in Tottori Prefecture, Japan”, *Bone* 1999, 24, 265–270.
- (2) Shehovych, A., et al.: “Adult Distal Radius Fractures Classification Systems: Essential Clinical Knowledge or Abstract Memory Testing?”, *Annals* 2016, 98, 525–531.
- (3) Porrino, J.A., et al.: “Fracture of the Distal Radius: Epidemiology and Premanagement Radiographic Characterization”, *Am. J. Roentgenol.* 2014, 203, 551–559.
- (4) Pramudita, J.A., et al.: “Variations in Strain Distribution at Distal Radius under Different Loading Conditions”, *Life* 2022, 12, 740.
- (5) Pramudita, J.A., et al.: “Mechanical Behavior of Bovine Cortical Bone Tissue under Tension, Compression and Shear Loading”, *Adv Exp Mech* 2019, 4, 141–146.
- (6) Forman, J., et al.: “Injury tolerance of the wrist and distal forearm to impact loading”, *J Trauma Acute Care Surg* 2014, 77, S176–S183.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 1件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Pramudita Jonas, Hiroki Wataru, Yoda Takuya, Tanabe Yuji                               | 4. 巻<br>12              |
| 2. 論文標題<br>Variations in Strain Distribution at Distal Radius under Different Loading Conditions | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Life   | 6. 最初と最後の頁<br>740 ~ 740 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3390/life12050740  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>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<br>橈骨遠位端骨折の骨折形態の再現解析手法の開発          |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会東北支部第56期総会・講演会            |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>プラムディタ ジョナス, Sang-Hyun Lee, Kevin Kopp, Sara Sochor, 依田 拓也, Jason Kerrigan |
| 2. 発表標題<br>動的荷重に対するヒト手首の力学応答の計測   |
| 3. 学会等名<br>日本実験力学学会The 19th Conference on Biomechanics                                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>日本機械学会 北陸信越支部 第57期総会・講演会     |
| 4. 発表年<br>2020年                         |

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

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>プラムディタ ジョナス, Sang-Hyun Lee, Kevin Kopp, Sara Sochor, 依田 拓也, Jason Kerrigan |
| 2. 発表標題<br>橈骨遠位端骨折の骨折形態に及ぼす転倒条件の影響に関する実験的研究   |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2021年度年次大会   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Jonas A. Pramudita, Sang-Hyun Lee, Kevin Kopp, Sara Sochor, Takuya Yoda, Jason Kerrigan |
| 2. 発表標題<br>Effect of forearm postures during falls on distal radius fracture pattern               |
| 3. 学会等名<br>The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2021) (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>プラムディタ ジョナス, 戸田駿, 大木裕人, 高橋優                 |
| 2. 発表標題<br>手首の詳細有限要素モデルを用いた骨折実験再現解析手法の開発               |
| 3. 学会等名<br>日本実験力学学会The 20th Conference on Biomechanics |
| 4. 発表年<br>2022年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)          | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                       | 備考 |
|-------------------|------------------------------------|---|----|
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | ケリガン ジェイソン<br><br>(Kerrigan Jason) | バージニア大学・Center for Applied Biomechanics・Associate Professor |    |
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | リー サン・ヒュン<br><br>(Lee Sang-Hyun)   | バージニア大学・Center for Applied Biomechanics・Research Scientist  |    |

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                |                                 |  |
|---------|------------------------|---------------------------------|--|
| 米国      | University of Virginia | Center for Applied Biomechanics |  |