

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870247

研究課題名(和文) デジタル画像相関法による皮膚裂傷の力学的発生条件の解明と傷害予測解析への応用

研究課題名(英文) Investigation of the mechanical conditions for skin laceration using digital image correlation method and its application to injury prediction analysis

研究代表者

プラムディタ ジョナス (Pramudita, Jonas Aditya)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：50615458

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、皮膚裂傷の力学的発生条件の解明および評価方法の確立を目的として皮膚模擬材料およびブタ皮膚による裂傷実験ならびに皮膚有限要素モデルによる裂傷解析を行った。皮膚模擬材料の表面におけるひずみの最大値は断裂時の荷重と相関関係にあることが明らかとなった。また、ブタ皮膚を用いた実験結果を統計的に分析することにより皮膚裂傷の発生確率を示すリスク曲線を得ることができた。さらに、有限要素解析結果より皮膚裂傷の予測因子として接触面における最大主ひずみが利用可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to determine the mechanical conditions for skin laceration and to establish a proper assessment method, experiments using skin simulant and porcine skin, as well as numerical analysis using skin finite element model were conducted. It is found that maximum strain value at the surface of skin simulant strongly correlated with the increase of rupture load. Moreover, risk curves that indicate the occurrence probability of skin laceration could be obtained by statistically analyzing the experimental result of porcine skin. In addition, from the numerical analysis result, maximum principal strain at contact surface was considered to be a good predictor of skin laceration.

研究分野：生体力学

キーワード：皮膚裂傷 DIC 有限要素解析 傷害指標 生体軟組織

### 1. 研究開始当初の背景

製品の設計開発において人間に対する安全性が重視されつつあり、自動車に限らず、住宅内のあらゆる製品においても事故防止および傷害軽減の対策が施されてきている。国民生活センターが行った調査報告（国民生活センター，2008）によれば、日本全国で起きた住宅内事故が日常生活における事故の約 6 割を占めており、その中で手指傷害が最も多く発生している傷害（全体の 26%）である。

そこで申請者は、日常生活において多発している手指挟み事故による骨折評価を研究の課題とし、ブタの脛骨を用いた骨折実験を行い、この実験結果をもとに累積ひずみをパラメータとした骨折クライテリアの提案および手指有限要素モデルへの実装を行った（神谷ら，2010 & 2011）。また、米国 Virginia 大学から提供された実験データとの比較も行い、手指有限要素モデルの妥当性を検証した（プラムディタら，2011）。

しかし、国民生活センターが報告した住宅内事故の危害内容データを見ると、皮膚裂傷（刺傷、切傷）は骨折を大きく上回り、打撲傷・挫傷と並んで最も多く発生していることがわかった。皮膚裂傷は軽傷に分類されるため、これまであまり注目されず、工学的研究はほとんど見られない。そのため、皮膚裂傷の発生メカニズムや発生条件を明らかにし、骨折と皮膚裂傷を同時に解析できる総合的な評価方法を実験的および数値解析的に検討すべきであると考えられる。

そこで、皮膚裂傷を正確に解析するためには、①皮膚裂傷を再現する実験方法の開発、②皮膚の力学的応答と皮膚裂傷との関係の解明、③皮膚有限要素モデルの構築、および④実験再現解析による皮膚裂傷クライテリアの確立が重要な課題であると考えている。

### 2. 研究の目的

本研究では、皮膚裂傷事故を想定した実験を行うことにより皮膚裂傷の発生メカニズムと力学的発生条件を解明し、また精巧な皮膚有限要素モデルを用いた数値解析により皮膚裂傷クライテリアを提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 皮膚裂傷実験

##### ① 実験装置

皮膚裂傷事故を再現するために、図 1 に示す実験装置を新たに製作した。万能試験機（Tensilon RTC-1225AS，オリエンテック）のクロスヘッドに先端に曲率をもったブレード、剛体テーブルにスライド装置を取り付けることによりブタ皮膚または皮膚模擬材料に対する押し切り試験および引き切り試験を可能にした。スライド装置のアクチュエータとして制御可能な電動シリンダー（ELCM6D10K-A，オリエンタルモーター）を

用いた。また、ブタ皮膚試料を水平に把持し、初期張力を与えるために、ねじ式調整ユニット（XANON150，ミスミ）をスライド装置の上部に取り付けた。さらに、指骨を模擬するために、アルミ製の円筒（直径 8mm）をブタ皮膚試料の直下に設置した。

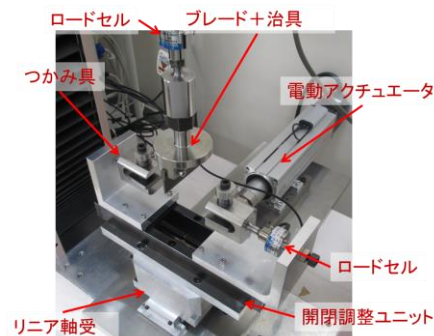


図 1 実験装置

##### ② ブレード

ブレード（図 2）はワイヤー放電加工により製作した。住宅内の家具や電化製品等のエッジを考慮して先端曲率半径の異なった 4 種類のブレード（R0.2, R0.5, R1.0 および R2.5）を製作した。なお、ブタ皮膚試料に対する試験はブレード R0.2 のみで実施した。

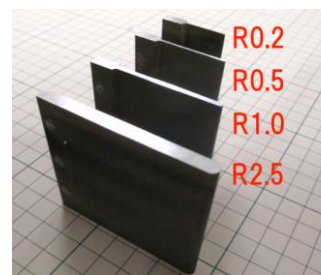


図 2 ブレード

##### ③ 試料

試料（図 3）として皮膚模擬材料およびブタ皮膚を用いた。シリコンゴム（KE-12，信越化学工業）を原材料として真空注型法で皮膚模擬材料の試料（横 100mm×奥 35mm×厚 30mm）を製作した。また、ブタ皮膚の試料は屠殺場より入手したブタの腹部（ventral）および背部（dorsal）の皮膚から切り出したものである。試料の変形挙動を解析するために、試料の表面にマーキングを施した。

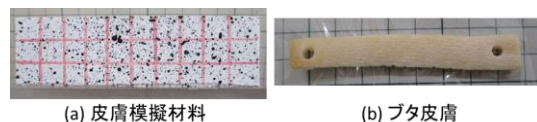


図 3 試料

##### ④ 実験条件および計測

押し切り試験では、試料にブレードを 100mm/min で押し込むことにより試験を実施した。引き切り試験では、ブレードが一定の押し込み量に達した後、スライド装置を前方へ 100mm/min で押し出すことにより試験を

施した。なお、ブタ皮膚試料については、試験直前に初期張力 20N をあらかじめ与えた。

押し込み方向と押し出し方向の荷重および張力を 3 個のロードセル(LUR-A-SA1, LMA-A および LUR-A-SA1, 共和電業) で計測した。試料の変形挙動を撮影するために、ビデオカメラ (VW-6000, キーエンス; FASTCAM MC2. 1, フォトロンまたは HDR-SR11, ソニー) による撮影を行った。なお、ブタ皮膚試料については、実験後に顕微鏡 (XTS-2021SP, 新潟精機) で観察し、裂傷の有無を判定した。

## (2) 表面におけるひずみ分布の解析

### ① アイソパラメトリック有限要素法

皮膚模擬材料の撮影結果にアイソパラメトリック有限要素法によるひずみ解析手法を適用し、表面における最大主ひずみと最大せん断ひずみを算出した。格子点の数値化、計算およびひずみ分布の可視化は MATLAB v2014b (MathWorks) で作成したプログラムにより行った。

### ② デジタル画像相関法

より詳細なひずみ分布を得るために、デジタル画像相関法によるひずみ解析も行った。デジタル画像相関法は変形前と変形後の物体表面のランダムパターンの類似性を検出することにより、物体表面の変形を解析する手法である。MATLAB v2014b 上で動作しているデジタル画像相関法ソフトウェア Ncorr v1. 2 を用いて解析を行った。

## (3) 柔軟物の力学的特性の取得

### ① 引張試験治具

皮膚模擬材料やブタ皮膚のような柔軟物の力学的特性を取得するために、単純引張試験、一軸拘束一軸引張試験および一様二軸引張試験の 3 種類の試験を実施した。万能試験機 (EZ-LX, 島津製作所) で一様二軸引張試験を可能にするために、二軸引張試験治具 (図 4) を新たに開発した。この試験治具は万能試験機のクロスヘッドの垂直の直線運動を機構学的に垂直と水平方向の直線運動に変換することができる特徴を有している。

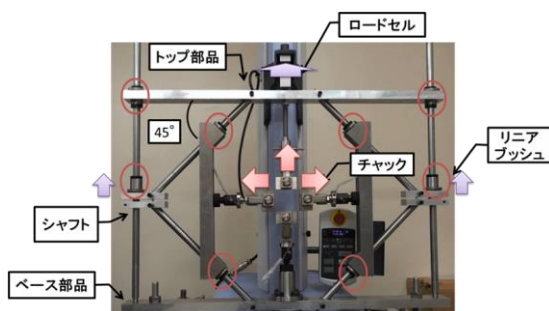


図 4 二軸引張試験治具

### ② 試験片

単純引張試験用にダンベル状試験片、一軸拘束一軸引張試験用に短冊状試験片、一様二軸引張試験用に十字形試験片を用いた。なお、

ブタ皮膚試料については、異方性 (Langer's Line) を考慮して引張方向が脊椎方向に対して垂直と平行な試験片を作製した。また、ブタ皮膚試料の表皮、真皮と皮下組織の厚さを調査するために、顕微鏡下で各層の厚さを測定した。

### ③ 試験条件および計測

単純引張試験では、0 から 10N のサイクル荷重を 3 回負荷した後、引張速度 25mm/min で試験片が破断するまで試験を実施した。一軸拘束一軸引張試験では、0 から 150N のサイクル荷重を 3 回負荷した後、引張速度 25mm/min で荷重が 3500N になるまで試験を実施した。一様二軸引張試験では、上記の試験治具を用いて 0 から 40N のサイクル荷重を 3 回負荷した後、引張速度 25mm/min で荷重が 800N になるまで試験を実施した。

単純引張試験と一軸拘束一軸引張試験では、荷重を試験機のロードセルで計測した。一方、一様二軸引張試験では、垂直と水平方向の荷重を試験治具に取り付けたロードセルにより計測した。試験片の変形挙動をビデオカメラで撮影し、標点距離の変化を数値化することによりひずみを算出した。

### ④ 超弾性 Ogden 材料モデルの同定

柔軟物の力学的特性を表現するために、超弾性 Ogden 材料モデルを用いた。上記の 3 種類の試験から得られたひずみエネルギー関数をフィッティングすることにより、Ogden 材料モデルの定数を同定した。この同定には有限要素解析ソルバー PAM-CRASH (ESI) を利用した。

## (4) 皮膚有限要素モデルの構築および皮膚裂傷実験のシミュレーション

### ① 皮膚有限要素モデル

表皮、真皮と皮下組織の厚さの測定結果をもとに皮膚三層有限要素モデル (図 5) を構築した。真皮と皮下組織は、ソリッドモデルでモデル化し、同定した Ogden 材料モデルを用いた。また、表皮は、シェル要素でモデル化し、文献値 (Kendall ら, 2007) を参考に線形弾性体とした。

この皮膚モデルを用いて単純引張試験と一様二軸引張試験の再現解析を行い、試験結果との比較を行うことにより皮膚モデルの妥当性を検証した。

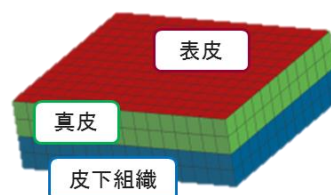


図 5 皮膚三層の有限要素モデル

### ② 実験再現解析

上記のモデルを用いて裂傷実験の再現解析を行い、ブレード直下におけるひずみ分布を算出した。なお、計算負荷を低減するため

に、1/4 モデル（図 6）で解析を実施した。また、実験結果との比較により解析モデルの妥当性も検証した。

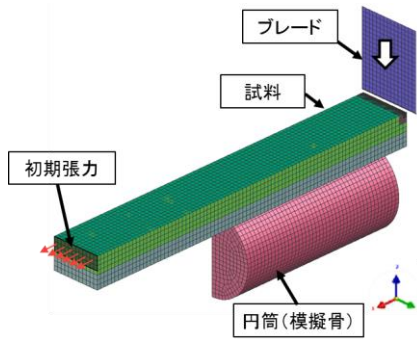


図 6 裂傷実験の再現解析

(5) 皮膚裂傷発生クライテリアの検討

① 実験結果に基づいた裂傷クライテリア

ブレード R0.2 による試験では、荷重応答から裂傷の発生タイミングを把握することが困難であり、荷重応答のみでは裂傷クライテリアを決定できないと考えられる。そこで、ロジスティック回帰分析による統計分析を行い、荷重に対する裂傷発生確率を求めた。この解析には、統計処理プログラム R v3.0.2 (R Foundation) を使用した。

② 解析結果に基づいた裂傷クライテリア

有限要素解析結果をもとに、裂傷実験時の断裂荷重および単純引張試験時の破断荷重に達した際の各種ひずみパラメータの最大値を求め、これらを比較することにより裂傷の発生を予測できるひずみパラメータを検討した。

4. 研究成果

本報告書では、押し切り試験とその有限要素解析から得られた結果を述べる。

(1) 皮膚模擬材料の荷重-貫入量曲線

皮膚模擬材料による試験から得られた荷重-貫入量曲線を図 7 に示す。ブレード R2.5 を用いた試験を除き、押し込み量 20mm で試料の断裂が確認できた。ブレードの先端曲率半径が小さくなるにつれて、断裂時の荷重および貫入量も小さくなることがわかった。これはブレードと試料との接触面積が小さくなり、ブレード直下における応力集中が発生しやすいためであると考えられる。

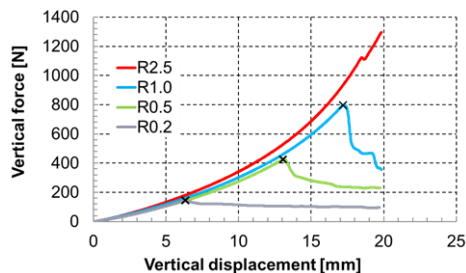


図 7 荷重-貫入量曲線（皮膚模擬材料）

先端曲率半径と断裂時の荷重との関係を図 8 に示す。先端曲率半径と断裂時の荷重に

は強い相関関係があることがわかった。

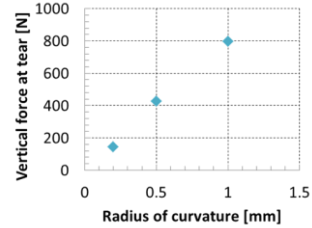


図 8 先端曲率半径と断裂荷重との関係

(2) 皮膚模擬材料の表面ひずみ分布

図 9 にブレード R0.5 による押し切り試験時の試料表面における断裂直前のひずみ  $\epsilon_{xx}$  と  $\epsilon_{xy}$  の分布を示す。 $\epsilon_{xx}$  の分布図より、ブレードの先端から少し下方に離れている領域においてひずみが集中しており、ブレードの押し込み方向に対して垂直な方向 (x 方向) に引張が発生していることが確認できた。また、試料の上表面にあり、ブレードの右側と左側に位置している領域においても、x 方向に引張が発生していることがわかった。 $\epsilon_{xy}$  の分布図より、ブレードの先端から少し斜め下方に離れている領域においてひずみが集中しており、左右対称に分布していることが確認できた。

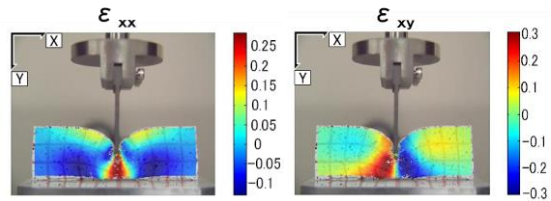


図 9 皮膚模擬材料表面におけるひずみ分布

図 10 に断裂時の荷重および押し込み量とひずみ  $\epsilon_{xx}$  および  $\epsilon_{xy}$  の最大値との関係を示す。この図より、先端曲率半径が大きくなるに伴い、ひずみも増加しており、破断時の荷重と試料表面におけるひずみの最大値には相関関係があることがわかった。つまり、荷重を計測できなくても、表面におけるひずみ分布を計測できれば、断裂の発生を予測できる可能性が示された。

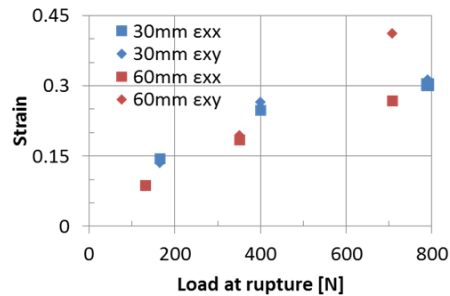


図 10 断裂荷重と表面ひずみとの関係

(3) 皮膚の力学的特性

ブタ皮膚 (dorsal 皮膚) の引張試験結果を図 11 に示す。すべての試験において、脊椎に平行な試験片 (parallel) の試験結果は脊

椎に垂直な試験片 (vertical) の試験結果を下回っている。つまり、ブタ皮膚の力学的特性は非線形で異方性を有していることが確認できた。また、一軸拘束一軸引張試験結果が他の試験結果を大きく下回ってしまったため、Ogden 材料モデルの同定の際は、この結果を除外した。

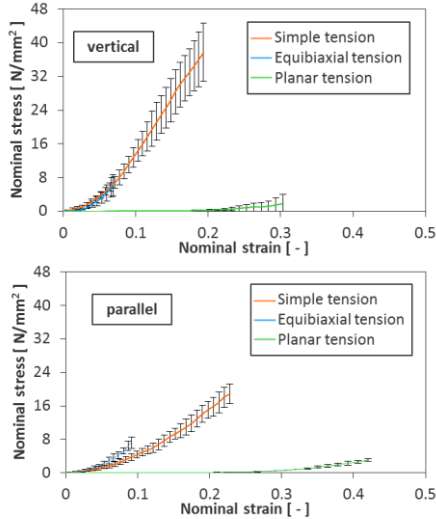


図 11 ブタ皮膚の応力-ひずみ曲線

単純引張試験と一様二軸引張試験結果を用いて真皮の Ogden 材料モデルの同定を行った結果、表 1 に示すパラメータ値を得た。

表 1 Ogden 材料モデルの同定結果 (真皮)

	i	1	2	3
vertical	$\mu_i$ [GPa]	-1.6552E-02	2.7422E-02	6.6999E-02
	$\alpha_i$	-9.3043E+00	5.7668E+00	-4.4988E+00
parallel	$\mu_i$ [GPa]	6.4707E-03	-7.5038E-03	2.6550E-02
	$\alpha_i$	6.8674E+00	-7.8959E+00	-3.7212E+00

#### (4) 皮膚モデルと再現解析手法の妥当性

Parallel 試験片の単純引張試験と一様二軸引張試験の再現解析を行い、解析結果と試験結果を比較したものを図 12 に示す。単純引張試験については、解析結果が実験結果のコリドール内に収まっている。一方、一様二軸引張試験については、伸びが大きくなるにつれて解析結果が実験結果を上回る傾向を示した。

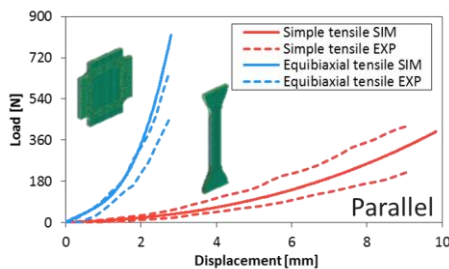


図 12 引張試験と試験再現解析との比較

Vertical 試験片の裂傷実験の再現解析を行い、解析結果と実験結果を比較したものを図 13 に示す。実験再現解析の結果は実験結

果と概ね類似した応答を示し、また実験結果のばらつきの範囲内に収まっていることが確認できた。以上より、皮膚モデルおよび再現解析手法の妥当性が示された。

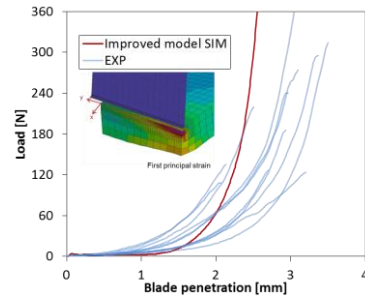


図 13 裂傷実験と実験再現解析との比較

#### (5) 皮膚裂傷クライテリア

ブレード R0.2 による裂傷実験結果をロジスティック回帰で分析した結果、図 14 に示す裂傷リスク曲線を得ることができた。回帰式の予測精度を検証するために、確率 50%で裂傷の発生閾値とした時の感度、特異度および正確度を算出した。その結果、dorsal 皮膚の場合、それぞれ 66.67%, 76.92%および 72.73%であった。一方、ventral 皮膚の場合、それぞれ 77.78%, 60.00%および 71.73%であった。両結果を比較すると、同様の荷重下において dorsal 皮膚の方が裂傷の発生確率が小さく、切れにくいことがわかった。また、裂傷の発生閾値は確率 50%の時の荷重値とした場合、dorsal および ventral 皮膚の裂傷の発生閾値はそれぞれ 214.0N および 160.9N となっている。

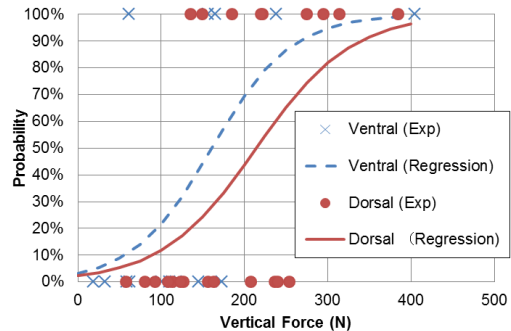


図 14 荷重をパラメータとした裂傷リスク曲線

裂傷実験の断裂荷重および単純引張試験の破断荷重に達した際の各種ひずみパラメータの最大値を比較した結果、最大主ひずみがほぼ同様の値 (0.22~0.25) を示したため、有限要素解析において最大主ひずみは裂傷発生の予測因子の一つとして利用可能であると考えられる。

#### <引用文献>

- ① 独立行政法人国民生活センター, 記者説明会資料, 2008年9月.
- ② 神谷誠治 他, Dynamics & Design Conference 2010, 2010年9月.
- ③ 神谷誠治 他, 第23回バイオエンジニア

- リング講演会, 2011年1月.
- ④ プラムディタ ジョナス 他, 2011年度実験力学学会年次講演会, 2011年8月.
- ⑤ Kendall, M. A. et al., *Biomaterials*, Vol. 28(33), 4968-4977, 2007.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Pramudita, J. A., Yamada, T., Shimizu, Y., Tanabe, Y., Ito, M. and Watanabe, R.: Deformation Behavior of Skin Simulant during Penetration of Blunt Object, *Journal of JSEM*, Vol. 15(Special Issue), 2015. (accepted, 査読有)
- ② Pramudita, J. A., Shimizu, Y., Tanabe, Y., Ito, M. and Watanabe, R.: Tensile Properties of Porcine Skin in Dorsal and Ventral Regions, *Journal of JSEM*, Vol. 14 (Special Issue), s245-s250, 2014. (査読有)
- DOI: 10.11395/jjsem.14.s245

[学会発表] (計10件)

- ① 山田達郎, プラムディタ ジョナス, 田邊裕治: デジタル画像相関法を用いたブレード貫入時の皮膚模擬材料のひずみ解析, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 2015年3月7日, 柏崎市.
- ② 窪田陽考, プラムディタ ジョナス, 田邊裕治, 伊藤雅人, 渡邊竜司: ブタ皮膚の力学的特性の評価とモデル化, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会, 2015年1月9日~10日, 新潟市.
- ③ 伊藤雅人, 渡邊竜司, 清水雄介, プラムディタ ジョナス, 田邊裕治: ブタ皮膚を用いた裂傷発生クライテリアの実験的検討, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会, 2015年1月9日~10日, 新潟市.
- ④ Pramudita, J. A., Yamada, T., Shimizu, Y., Tanabe, Y., Ito, M. and Watanabe, R.: Study on the Deformation Behavior of Skin Simulant during Penetration of Blunt Object, 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2014/11/1-6, New Delhi(India).
- ⑤ 嘉藤将史, プラムディタ ジョナス アディティヤ, 田邊裕治: 落錘式貫入試験機による皮膚模擬材料の動的応答評価, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2014, 2014年10月29日~31日, 長岡市.
- ⑥ プラムディタ ジョナス アディティヤ, 窪田陽考, 田邊裕治, 伊藤雅人, 渡邊竜司: 超弾性材料の二軸引張試験における十字形試験片の最適形状の検討, M&M2014材料力学カンファレンス, 2014年7月18日~21日, 福島市.

- ⑦ 清水雄介, プラムディタ ジョナス アディティヤ, 田邊裕治, 伊藤雅人, 渡邊竜司: ブタ皮膚の幾何学的特性, 表面水分特性および力学的特性の測定, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会, 2014年3月8日, 射水市.
- ⑧ Pramudita, J. A., Shimizu, Y., Tanabe, Y., Ito, M. and Watanabe, R.: Anisotropic Tensile Properties of Porcine Skin in Dorsal and Ventral Regions, The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013/11/3-6, Sendai(Japan).
- ⑨ 窪田陽考, プラムディタ ジョナス アディティヤ, 田邊裕治, 伊藤雅人, 渡邊竜司: 柔軟物の超弾性 Ogden 材料モデルのパラメータ同定のための試験法の開発, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 2013年11月1日~3日, 東京都.
- ⑩ 山田達郎, プラムディタ ジョナス アディティヤ, 清水雄介, 伊藤雅人, 渡邊竜司: ブレード押し込み試験における皮膚模擬材料の変形挙動の解析, 日本実験力学学会2013年次講演会, 2013年8月20日~22日, 由利本荘市.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 鋭利物の切れ味評価装置及び切れ味評価方法

発明者: プラムディタ ジョナス アディティヤ, 清水雄介, 田邊裕治

権利者: 国立大学法人新潟大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-131730

出願年月日: 2014年06月26日

国内外の別: 国内

名称: 二軸引張試験用治具

発明者: プラムディタ ジョナス アディティヤ, 窪田陽考, 田村隆, 田邊裕治

権利者: 国立大学法人新潟大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-165003

出願年月日: 2013年8月8日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

プラムディタ ジョナス

(PRAMUDITA, Jonas A.)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 50615458