

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560083

研究課題名（和文） 褥瘡発症の力学的メカニズムの解明と褥瘡予防機器の最適設計

研究課題名（英文） Mechanical Analysis of Generation Mechanism of Pressure Ulcer and Optimal Design of Apparatus for Prevention of Pressure Ulcer.

研究代表者

坂本 二郎 (SAKAMOTO JIRO)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：20205769

研究成果の概要（和文）： 褥瘡発症の力学的メカニズムを明らかにし、褥瘡予防機器を改良してその予防効果を高めることを目的に研究を行った。皮膚圧迫による皮膚内部の血管変形を求める力学解析手法を提案し、解析結果を動物実験と比較してその有効性を確認した。また、褥瘡発生リスク評価のためのヒト腰部有限要素モデルを作成して実験との比較により妥当性を確認した。さらには、ヒト腰部モデルを褥瘡予防マットレスの評価に応用し、最適化の可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）: Purpose of this study is to clarify generation mechanism of pressure ulcer in mechanical viewpoint and to improve efficiency of equipment for prevention of pressure ulcer. Mechanical analysis method to analyze deformation of capillary vessel inside of skin while compressing skin was proposed and validated by comparing with animal experiment. Finite-element model of human buttock for risk evaluation of occurring pressure ulcer was developed and verified by experiment. Furthermore, the buttock model was applied to mechanical evaluation of air mattress for prevention of pressure ulcer, and possibility of its optimization was clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：機械工学・材料力学，生物・生体工学，バイオメカニクス，医療・福祉，シミュレーション工学

## 1. 研究開始当初の背景

我が国では寝たきり高齢者の数が2010年には全国で170万人にもなると予想されてい

る（厚生省予測，1993年）。寝たきり者の多くが苦しんでいる問題が、褥瘡（床ずれ）の発症である。自ら身体の位置を変えることができないため、常に同じ場所の皮膚が圧迫さ

れて血流が遮断され、組織が壊死して皮膚潰瘍を生じる。一旦褥瘡ができると治癒し難く、進行すると骨組織が露出してその傷からの感染症で死に至ることもある。予防のため従来は介護者が一定時間ごとに患者の体位を変えるという方法が取られてきたが、これは介護者への負担が極めて大きく、また人手不足で手当も十分行き届かないことも多い。褥瘡の問題は高齢者介護における最重要課題の1つであるが、それに関する国内外の研究は、いずれも経験に基づく介護方法の改善や患部の病理組織評価が中心で、褥瘡の発症と予防にとって最も重要な力学的因子を考慮した研究は十分に行われていない。褥瘡は皮膚が持続的に力を受け内部の血管が閉塞状態になった結果生じる組織の壊死である。皮膚および血管の応力・ひずみ状態が大きく関与する現象であるから、褥瘡の発症機序を明らかにするには生体組織の機械的特性を反映した力学解析が必要不可欠である。研究代表者はこれまで材料力学や計算力学の技術を応用して、骨粗鬆症患者の骨の強度解析や、脊椎固定インプラント、人工関節の強度設計に関する研究等を行ってきた。そこで培った計算力学を生体に応用する技術は、褥瘡の発症機序を解明する上でも大いに役立ち、また褥瘡予防機器の評価・設計にも応用が可能なことから、本研究の実施に至った。

## 2. 研究の目的

以下のことを目的に研究を行った。

- (1) 皮膚内部の血管分岐網の分布を考慮し、皮膚圧迫による血管の変形を求める力学解析法を確立する。
- (2) 褥瘡を発症させる動物実験との比較から解析法の有効性を検証する。
- (3) 解析と実験の両面から、褥瘡発症の力学的メカニズムについて検討する。
- (4) 提案した解析法と最適化法を組み合わせ、褥瘡予防機器の最適設計を行う。

以上の研究により、褥瘡発症の力学的メカニズムを明らかにし、褥瘡予防機器の予防効果を大いに高めることを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究の内容は、褥瘡発症の力学的メカニズムを明らかにするための研究と、臨床において褥瘡予防機器を改良するための研究の二つに大きく分けることができる。それぞれの研究について以下に示す。

① 皮膚内部の血管網を考慮し、皮膚圧迫による血管の変形を解析できるマルチスケールな力学解析手法を開発する。開発した手法を、褥瘡を発症させた動物実験と比較し、その有効性を検証する。

② 褥瘡予防機器を想定したねたきり患者の力学モデルの作成と力学解析を行う。力学モデルの有効性を実験で検証し改良した後、それを応用して褥瘡予防エアマットレスの最適化について検討する。

以下に①②の具体的な方法を述べる。

### (1) 皮膚内部の血管変形解析手法の開発

ラットの皮膚圧迫実験に対応する図1に示すような有限要素モデルを作成した。以下ではこれをマクロモデルと呼ぶ。このマクロモデルの解析結果を参照し、図2に示す皮膚深部の毛細血管周囲(筋組織)の微小部分を模擬したモデル(以下ではこれをマイクロモデルと呼ぶ)を用いて解析を行う。本研究ではマクロモデルの変形が毛細血管の有無に大きく影響されないという仮定のもとで、その変形を反映した境界条件をマイクロモデルに与えて解析する方法を提案した。

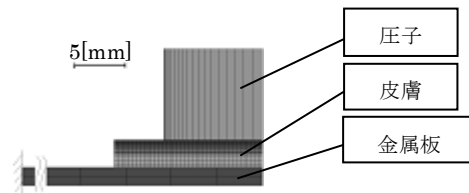


図1 皮膚圧迫実験を模擬した有限要素モデル(マクロモデル)

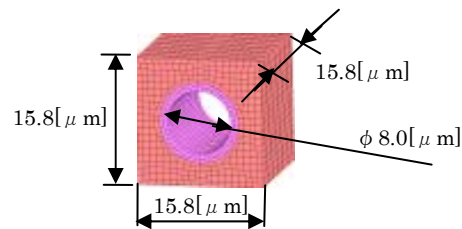


図2 毛細血管の周囲組織を模擬した有限要素モデル(マイクロモデル)

### (2) 褥瘡予防機器設計のための腰部モデルの開発

解析モデルの作成では、褥瘡発症率の最も高い腰部のみを対象とした。腰部モデルの作成にあたり、人体全体の有限要素モデルである THUMS (TTDC Co.) を利用し、腰部のみを取り出してモデルを作成した。取り出したモデルを2層モデル、さらにそれを改良して作成したモデルを3層モデルとする(図3)。

2層モデルは骨盤、軟組織、皮膚から構成されているが、3層モデルは骨盤、筋層、脂肪層および皮膚で構成されている。なお、このモデルは175[cm]、77[kg]の成人男性を想定している。各組織の材料定数はTHUMSで与えられている値を用いた。3層モデルの筋層、脂肪層、皮膚の材料特性については文献値を参照し、非線形弾性の解析で用いられるOgdenの定式化により与えた。作成した2種類のモデルを用いて、仰向けに寝た状態を想

定した解析を行い、さらに実験結果と比較することで、評価用モデルの妥当性を検討する。また、作成した評価用モデルの適用例として、褥瘡予防機器のひとつである褥瘡予防エアマットレスを対象にした解析を行い、その性能評価を行った。

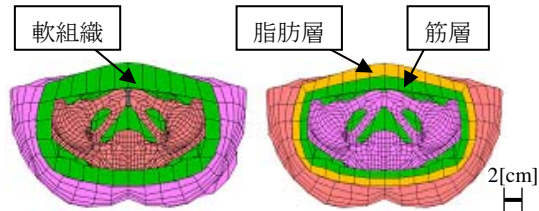


図3. ヒト腰部有限要素モデルの2層モデル(左)と3層モデル(右)の断面の様子

#### 4. 研究成果

##### (1) 皮膚内部の血管変形解析手法の開発

提案した解析手法の具体的な手順の概要を示す。

- ① マクロモデルの皮膚深部における有限要素と同じサイズのモデル(これをメゾモデルと呼ぶ)を作成する。
- ② メゾモデルを分割した1つの要素の大きさがマイクロモデルの大きくなるようメッシュ分割する。①, ②の手順を図4に示す。
- ③ 下位のモデルで生成した新たな節点aの変位ベクトル  $u_a$  を要素の補間関数  $\phi$  と上位モデルの節点変位ベクトル  $u_i$  から求めて、境界条件として与える。

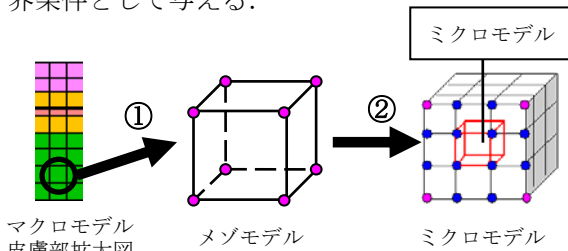


図4. 階層的有限要素モデル

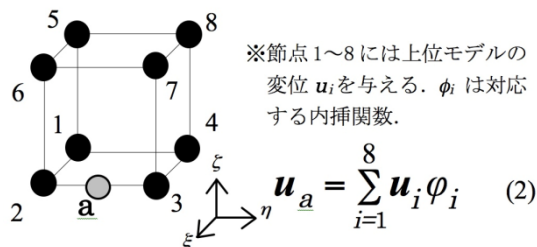


図5. 階層が下位の有限要素モデルに与える変位の計算方法の例

提案した手法を用いた解析結果について示す。マクロモデルにおいて圧縮主応力が高い要素とせん断変形の大きい要素の2箇所から境界条件を導出し、マイクロモデルでの解析

を行った。前者を解析A, 後者を解析Bとして図6に示す。

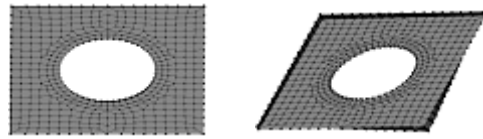


図6. 解析Aでの変形(左)と解析Bでの変形

解析Aでは、血管断面積の減少率は約12%で、必ずしも毛細血管が閉塞するには至らなかった。圧縮主応力も褥瘡発生の指標とされるヒト毛細血管内圧の4.3KPaを下回っていた。実験でも筋組織の層では一部に出血痕が見られるものの褥瘡までは発生しておらず、毛細血管は閉塞に至らずとも虚血に近い状態であることを示した解析は妥当と考えられる。また、大きなせん断変形を伴う解析Bでは血管断面積の減少率は約19%となり、褥瘡発生にせん断の影響が大きいことが定量的にも明らかになった。提案したマルチスケール解析法の有効性から、詳細な血管分岐網モデルまでを作成する必要は無く、むしろ分岐部の形状をマイクロモデルに反映させる解析の方がより効率的であることがわかった。

##### (2) 褥瘡予防機器設計のための腰部モデルの開発

作成した2種類のモデルを用いて、仰向けに寝た状態を想定した解析を行った。腰部モデルは水平方向の変位を拘束し、骨盤部に荷重を与え、床材を模擬した有限要素モデルに押し付ける。床材及び腰部モデルには接触を考慮した。ただし、摩擦係数はすべて0としている。境界条件及び腰部の有限要素モデルを図7に示す。なお解析には汎用有限要素解析ソフト MSC. Marc (MSC Software Co.) を用いた。

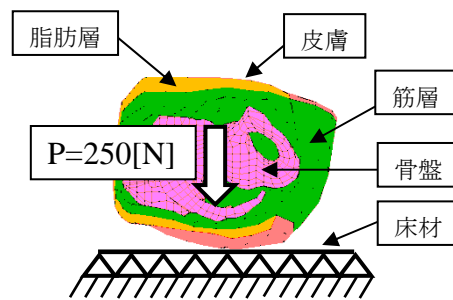


図7. 3層モデルの断面図及び境界条件

THUMS から参照した線形弾性体の材料定数を与えた2層モデルの解析結果、及び非線形性を考慮した材料定数を与えた3層モデルの解析結果を図8に示す。2層モデル解析結果において、最大の接触圧力が臀部で発生していることがわかり、その値は約21.8[KPa]であった。一方、3層モデル解析結果において

は、最大の接触圧力が発生している箇所が、仙骨下であることがわかり、その値は約24.5[KPa]であり、両者に違いが見られた。

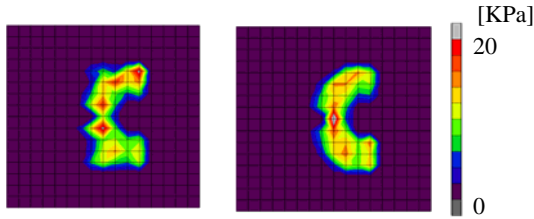


図 8. 接触圧力分布(左:2層モデル, 右:3層モデル)

次に、解析の妥当性を検証するために、接触圧力計測実験を行った。被験者は解析モデルとの対応を考慮し179[cm], 72[kg]の成人男性とした。実験では、仰臥位における腰部の接触圧力を圧力センサ(ニッタ社製BIG-MAT2000)で計測した。実験の様子及び計測結果を図9に示す。計測結果から、仙骨部において高い接触圧力が発生していることが分かる。この結果は仰臥位において体重の約40%の力が仙骨部に集中するという報告と一致している。

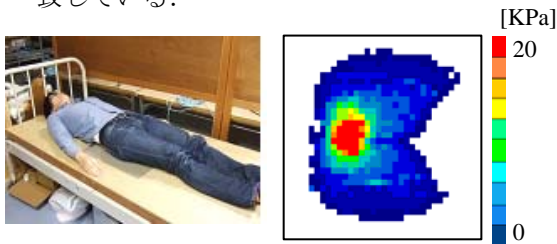


図 9. 実験の様子(左)と計測結果(右)を表す。

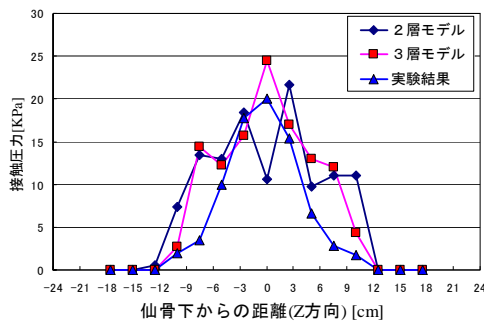


図 10. 接触圧力の変化の比較(仙骨下から内外側方向)

仙骨下を中心に横方向(内外側方向)への接触圧力の変化を示したグラフを図10に示す。この結果から、3層モデル及び実験結果の圧力の変化は定性的に類似しているのに対し、2層モデルにおいては、仙骨下で接触圧力が減少しており、大きく傾向が異なるとわかった。この理由としては、軟組織を線形弾性として仮定した2層モデルでは、臀部があまり変形せず接触圧力が臀部に集中

した結果、仙骨下に高い接触圧力が発生しなかったためと考えられる。以上より、今回作成した材料の非線形性を考慮した3層モデルは、体圧分布解析に対し、より有効なモデルであることが明らかとなった。

次に、3層モデルを用いて図11に示すような褥瘡予防器具の一つである圧切替型エアマットレスを対象に解析を行い、その性能評価を行った。エアマットレスモデルに腰部モデルを接触負荷させることで、マットレス上に仰臥位に寝た状態を再現した。腰部モデルは、水平方向の変位を拘束し、骨盤の仙骨中央に鉛直下向きの点荷重を与えた。荷重の大きさとしては、体重の約40%が作用するものとした。モデル外観を図12に示す。



図 11. エアマットレス外観(左)及びエアセル内圧切替の様子(右)

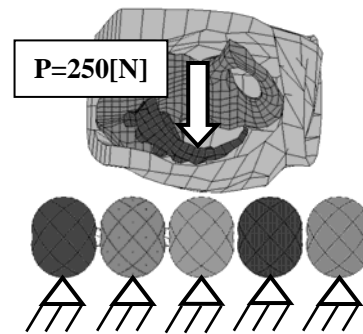


図 12. エアマットレスモデル及び境界条件

エアセルモデルは、最下点を完全拘束し、また下面と側面は剛体版により支持した。腰部モデルは、仙骨の突出部がエアセルの中央に位置するように配置した。本研究で対象としたエアマットは、3本のエアセルが1組となり内圧が切り替わるものである。そこで、1周期の内圧切り替えの状態を考慮して、4つの内圧条件を与えた。すべてのエアセルが膨張し内圧が均一となる条件、および3本のセルのうち1本が収縮状態となる内圧不均一の条件である。内圧不均一の条件では、中央

3本のエアセルを体幹側からエアセル①、②、③とし、それぞれが収縮する条件を内圧不均一①、②、③とする。本研究の解析条件は、エアセルの内圧が各々の条件で保持されて十分に時間が経過した状態とみなせる。実際の内圧切り替えは5分ごとなので、ほぼその条件に対応していると考えられる。なお膨張および収縮時の内圧の値は、エアマット使用時の設定で与えられる値を用いた。

エアマットレスの接触圧力分布を図13に示す。ここで、接触圧力分布は腰部と接触する3本のエアセルの中央部分のみを表示している。エアセルの内圧が均一なモデルにおいて、エアセル全体に圧力が分布し接触圧力を低く保っている。さらにエアセルの内圧が不均一なモデル①、②、③においては、内圧を切り替えることで、収縮したセル上の接触圧力が解放されていることが確認できる。このように、圧切替による接触圧力の変化の様子を確認することが可能となった。

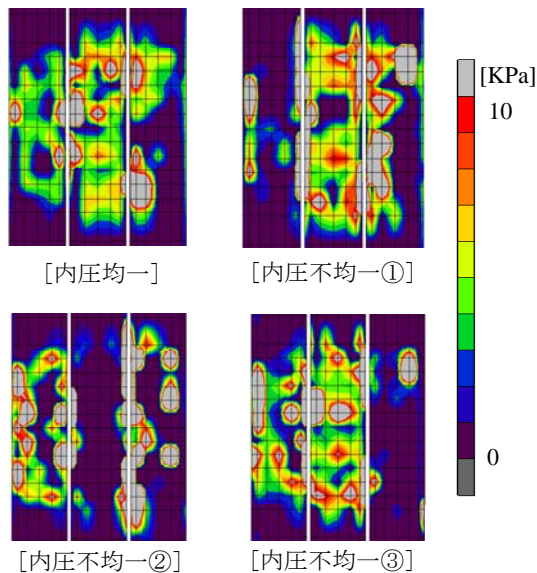


図13. 各内圧条件におけるエアマットレスの接触圧力分布

さらに、作成した腰部モデルを基準モデルとし、実際に褥瘡が発症しやすい寝たきり高齢者の特徴を有した腰部有限要素モデルを作成した。日本人高齢者は、筋肉や脂肪が萎縮しており、腰部の軟組織は薄く扁平である。そこで、過去に寝たきり高齢者の仙骨下の軟組織の厚さを計測したデータをもとに、臀部の軟組織を扁平に変形させ高齢者腰部モデルを作成した。寝たきり高齢者のデータは超音波検査により得られたもので、仙骨突出部の皮膚および軟組織の厚さは8.5[mm]であったため、仙骨突出部の軟組織の厚さが8.5[mm]となるように腰部の軟組織全体を変形させた。作成した高齢者腰部モデルを図14に示す。

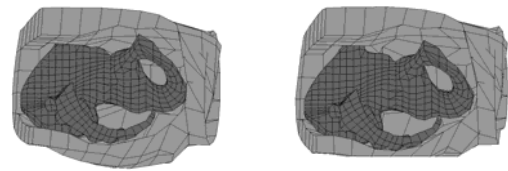


図14. 基準モデル(左)と高齢者モデル(右)

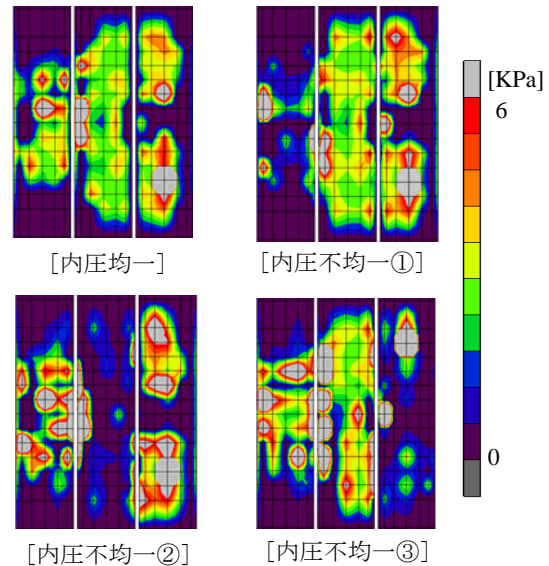


図15. 各内圧条件におけるエアマットレスの接触圧力分布(高齢者モデル)。

作成した高齢者モデルを用いて、エアマットレスモデルに腰部を接触負荷させる解析を行った。高齢者モデルを用いた解析結果を図15に示す。前述の解析結果と同様にエアセルの内圧が均一なモデルにおいて、エアセル全体に圧力が分布し接触圧力を低く保っている。さらにエアセルの内圧が不均一なモデル①、②、③においては、内圧を切り替えることで、収縮したセル上の接触圧力が解放されていることが確認できた。

褥瘡発生の一つの指標として、約27[KPa]の圧力が2時間継続して負荷されると組織壊死が発生するという報告があるが、高齢者モデルによる解析において、腰部と接触している箇所の最大接触圧力が内圧不均一②における16.8[KPa]であり、さらに、エアセルは内圧切替によりエアセルの膨張時間も約10分であることから、エアマットレスは現状の設計においても褥瘡予防効果を十分に有していることが明らかとなった。

本研究で得られた腰部解析モデルを用いれば、様々な条件下における接触圧力や患者の軟組織内部の応力を求めることが可能であるため、圧力切替時間の設定やセル寸法を調節することで、より褥瘡が起り難くなるようにエアマットレスを最適化することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Matsuo, J., Sugama, J., Sanada, H., Okuwa, M., Nakatani, T., Konya, C., Sakamoto, J., Development and validity of a new model for assessing pressure redistribution properties of support surfaces, Journal of Tissue Viability, 20-2(2011), 55-66, 査読有
- ② 松尾淳子, 須釜淳子, 褥瘡対策 体圧分散寝具の選び方と使い方, 難病と在宅ケア, 16-7(2010), 61-64, 査読無
- ③ Shimamura, K., Nakatani, T., Ueda, A., Sugama, J., Okuwa, M., Relationship between lymphangiogenesis and exudates during the wound-healing process of mouse skin full-thickness wound, Wound Repair and Regeneration, 17-4(2009), 598-605, 査読有
- ④ Shigeta, Y., Nakagami, G., Sanada, H., Oba, M., Fujikawa, J., Konya, C., Sugama, J., Exploring the relationship between skin property and absorbent pad environment, Journal of Clinical Nursing, 18-11(2009), 1607-1616, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① 田井遙, 坂本二郎, 須釜淳子, 筋骨格系力学解析による褥瘡発生リスク評価について, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会, 2012 年 1 月 8 日, 大阪大学基礎工学部 (大阪府)
- ② 竹中一博, 坂本二郎, 須釜淳子, 松尾淳子, 褥瘡発生リスク評価のための腰部有限要素モデルの開発, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会, 2012 年 1 月 8 日, 大阪大学基礎工学部 (大阪府)
- ③ 坂本二郎, 竹中一博, 記村美恵子, 須釜淳子, ラット皮膚の褥瘡発生実験における皮膚の応力評価, 日本機械学会 第 23 回計算力学講演会, 2010 年 9 月 24 日, 北見工業大学 (北海道)
- ④ 田井 遙, 福井 悠, Karla Huerta, 坂本二郎, 枕高さの生体力学的検討 (頭部高さが筋張力に与える影響について), 日本設計工学会北陸支部 平成 22 年度研究発表講演会, 2010 年 6 月 26 日, 富山県立大学 (富山県)
- ⑤ 松尾淳子, 須釜淳子, 真田弘美, 紺家千津子 (他 4 名, 2 番目), ベッドメイキングがもたらす体圧分散寝具の圧再分配機能低下, 第 6 回日本褥瘡学会中部地

方会学術集会, 2010 年 2 月 21 日, あいち健康の森健康科学総合センター (愛知県)

- ⑥ 福井悠, Karla Huerta, 坂本二郎, 仰臥位において頭部位置が筋張力に与える影響の筋骨格モデルによる検討, 日本機械学会 第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 2010 年 1 月 10 日, 岡山理科大学 (岡山県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂本 二郎 (SAKAMOTO JIRO)  
金沢大学・機械工学系・教授  
研究者番号: 20205769

### (2) 研究分担者

須釜 淳子 (SUGAMA JUNKO)  
金沢大学・保健学系・教授  
研究者番号: 00203307

### (3) 連携研究者

該当無し