

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656092

研究課題名(和文) イメージベース有限要素法による褥瘡発生のバイオメカニズム的病因の解明

研究課題名(英文) Clarification of Cause of Occurrence and Biomechanism of Pressure Ulcer by Image-based Finite Element Method

研究代表者

高野 直樹 (TAKANO, NAOKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10206782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円、(間接経費) 900,000 円

研究成果の概要(和文)：褥瘡の根本的な発生要因の解明は、介護・看護法の改善に重要な課題となっている。本研究では、臀部の骨-筋肉界面の線維組織の損傷に起因するとの仮説に立脚し、界面ひずみをイメージベース有限要素法により解析し、バイオメカニズム的病因を分析した。脂肪と筋肉の力学的物性値および分量、損傷部位とその大きさ、体位の違いの計7つのパラメータに不確かさを考慮したモンテカルロシミュレーションにおいて、高いひずみ値になるパラメータの組を探索する独自手法を開発した。解析結果より、仰臥位で脂肪量が多い患者で、脂肪と筋肉のヤング率が低い場合に、せん断ひずみによる繊維損傷リスクが特に高まるとの知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：It is important to clarify the fundamental cause of occurrence of pressure ulcer to improve the nursing care for its prevention. Based on the hypothesis that the initial cause of pressure ulcer lies in the damage of fibril tissue at the interface between bone and muscle in the human buttock, in this study, interfacial strain analysis was carried out by image-based finite element method and the biomechanism was discussed. An original computational method has been developed to find the pair of parameters that lead to high strain value in the Monte Carlo simulation considering the uncertainties in 7 parameters. They are the mechanical properties of fat and muscle, volume fraction of fat, location and size of damage and positioning. The numerical results implied that the risk of fibril tissue damage due to shear strain increased if the Young's moduli of fat and muscle are low for such patient that has high volume fraction of fat, lying on bed in supine position.

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：有限要素法 モンテカルロ法 裾野確率 サンプリング法 褥瘡 看護・介護 イメージベースモデリング 界面切欠き

### 1. 研究開始当初の背景

褥瘡(床ずれ)は治癒までの期間が長い上に頻繁な医療行為による人件費・医療資源の浪費という社会的問題がある。治療用薬剤の研究は多々あるが、根本的な褥瘡発生メカニズムとそれに基づく予防法の研究は進んでいない。褥瘡発生には継続的圧迫による虚血、湿潤、低栄養の複合要因があげられ、皮膚表面ではなく体内深部で発生するが、その詳細はまったくわかっていない。この点に関し、看護師が体位変換をさせる際などに起きる骨と筋肉を結合する線維破断が、やがて自己治癒できないレベルに進展することが最初のトリガになるとの仮説を立てた。本仮説に基づき、その妥当性を示す数値シミュレーションを行うとともに、患者の種々の状態の内、リスクが高いパラメータを抽出できれば、褥瘡予防につながる看護・介護法の研究に貢献することができるかと期待される。

### 2. 研究の目的

医療費増大の社会的問題の一つでもある褥瘡の体内深部で起きるとされる根本的な発生要因を探り、介護法の研究等に役立つ知見を得ることを目標とする。具体的に、臀部に注目し、骨-筋肉界面の線維破断に起因するとの独自のバイオメカニズムの仮説に立脚し、それをCTイメージベース有限要素法とモンテカルロ法によるバイオメカニクス解析により科学的に示すことを目的とする。界面ひずみにより損傷した繊維組織の進展リスクを評価する手法をまず確立した上で、筋肉と脂肪組織の力学的物性値、骨-筋肉界面の幾何学的形態、損傷部位とその大きさ、体位の違いによる荷重条件の違いを不確かなパラメータとしたモンテカルロシミュレーションを行う。このため、バイオメカニクス解析とともに皮膚変形特性の計測装置の開発、体位に応じた荷重条件の測定も行う。

### 3. 研究の方法

3ヶ年にわたり、大別して以下の5つの研究項目に取り組んだ。

(1) 臀部のCTイメージベース有限要素モデルの作成

2Dモデルと3Dモデルの両者を作成することとした。他者の先行研究から、必ずしも3Dモデルが高精度の結果を与えるものではないことから、最終的には2Dモデルを用いたモンテカルロシミュレーションを実施したが、3Dモデルを用いた動的解析手順も確立することができた。

(2) 骨-筋肉界面の線維損傷進展リスク評価法の確立

線維損傷は実際の観察により検証されたものではなく、仮説の段階である。本研究では、線維損傷域を切欠きとして有限要素モデル化した。界面ひずみを高精度に計算するためのモデリング手法を確立するとともに、進

展リスク予測方法を確立する。妥当性の検証には、骨切り術を模した解析を行い、骨切り後も再発事例があるとの事実をシミュレーションで再現できるかどうかを検討する。

(3) 有限要素解析パラメータ値の取得

皮膚変形特性の計測と、体位を変化させた場合の荷重条件を測定する。前者には、圧迫と介護時の体位変換で患者に付与されると想定されるせん断変形(ずれ)を同時に与えることができる装置を独自開発する。後者については、医療現場で用いる体圧測定器の精度を検討した後に、独自に接触面積の測定を行うことにより荷重値を同定する。

(4) 裾野確率に焦点を当てた不確かさのモデリング・シミュレーション法の提案

通常のモンテカルロ法では、各パラメータの確率密度関数を与え、10,000点のサンプル点を乱数発生させ、有限要素解析を行う。乱数発生には高精度なメルセンヌ・ツイスター法を採用する。しかし、注目量である界面ひずみが高い値となるパラメータ予測には精度保証が不十分とわかったため、低頻度ながら高いひずみ値となる裾野確率が高精度かつ高効率に予測できる独自手法を開発する。この際、入力パラメータのいくつかは、確率密度関数として表現できないパラメータを設定し、その扱い方を検討する。

(5) バイオメカニクス解析の実施と結果の考察

(1)~(4)を統合し、筋肉と脂肪組織の力学的物性値(ヤング率、筋肉のせん断係数はヤング率と相関あり)、骨-筋肉界面の幾何学的形態、損傷部位とその大きさ、体位の違いによる荷重条件の違いを不確かなパラメータとした解析を行い、解析結果から褥瘡発生リスクに深くかかわる因子の抽出を行う。

### 4. 研究成果

「研究の方法」に記載した5項目に対応した研究成果を以下にまとめる。

(1) 臀部のCTイメージベース有限要素モデルの作成

まずCT画像の一例を図1に示す。本研究の核となる骨-筋肉界面の線維の模式図もあわせて示す。これを、界面ひずみの高精度予測、任意位置の線維損傷モデルの自動作成に配慮しつつ、筋肉と脂肪の分量が異なる3種類の有限要素モデルを図2のように作成した。また、3Dモデル作成には、市販ソフトウェア SimpleWare を活用し、動的解析ソフトウェア Dyna3D との連携を可能とした。

(2) 骨-筋肉界面の線維損傷進展リスク評価法の確立

図1に模式的に示した繊維の損傷進展は、引張ひずみまたはせん断ひずみにより生じると仮定した。また、損傷がない場合、すな

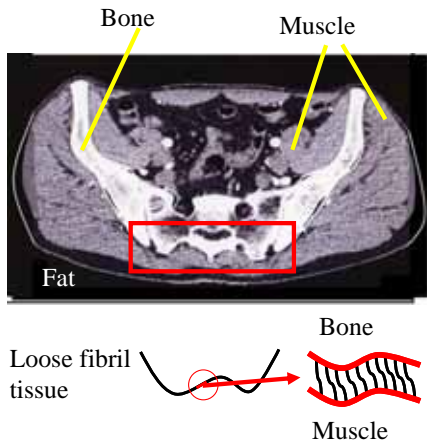


図1 臀部のCT画像と界面繊維の模式図

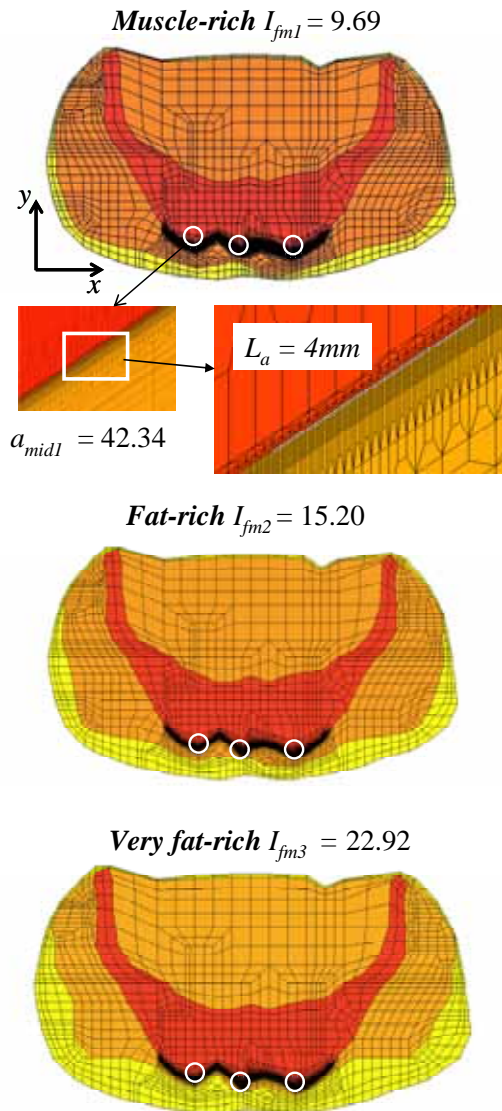


図2 2D有限要素モデル

わち健康体において生じるひずみ値は安全であるとの仮定をおき、損傷がある場合のひずみ値が、損傷がない場合のひずみ値より大きい場合に損傷進展リスクがあるとの評価法を提案した。

この検証のため、骨切りモデルに対して

surgical flap という手術を行った場合の解析を行った。現実には、手術後に褥瘡の再発が報告されているケースである。解析結果から、外力としてずれ力が生じる場合のみ損傷進展リスクが予測された。これは、再発の説明として妥当だと判断し、上述の損傷進展リスク評価法を以後用いることとした。図3は損傷の有無によるせん断ひずみ値の比較を行った典型的な一例であり、図3ではリスクありと判定された。

なお、繊維損傷は有限要素モデルにおいて切欠きとしてモデル化し、切欠き端部のひずみ値の計算にはひずみ分布の外挿を採用することとした。図4のように、端部に最も近い点での評価値より、外挿補間した値の方が信頼性が高いといえる。

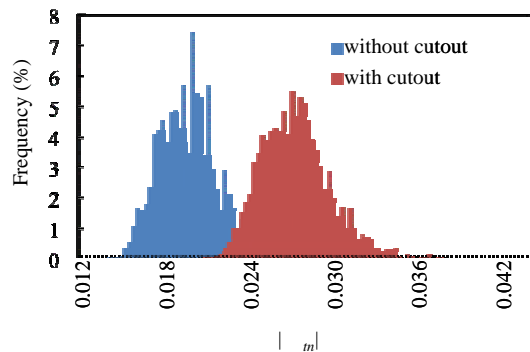


図3 繊維損傷進展評価の典型例

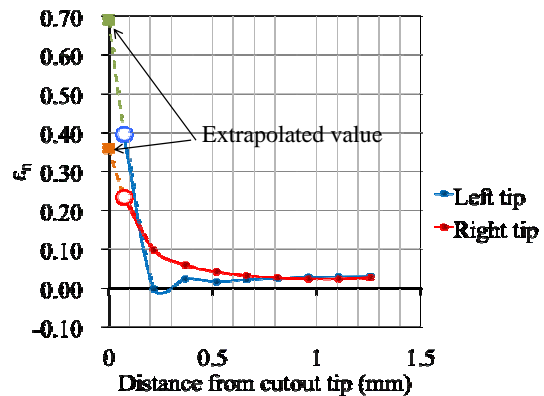


図4 切欠き端部ひずみ値の外挿補間の例

### (3) 有限要素解析パラメータ値の取得

まず、皮膚変形特性を、圧迫とせん断変形を同時に付与して計測するため、図5の装置を開発し、統計データを得た。

次に、患者の静的な体位での圧力計測には、医療現場で頻りに用いられる計測器 PREDIA の計測精度を検証したが、接触面積の影響を強く受け、統計的、工学的に信頼できる値は得られなかった。介護時の体位変換中の動的な荷重条件を取得するため、図6に示す代表的な体位変換方法を実験し、図7のように接触面積を測定し、体重から圧力値を算出した。

### (4) 裾野確率に焦点を当てた不確かさのモデリング・シミュレーション法の提案

まず出力値の裾野確率に焦点を当てたサ

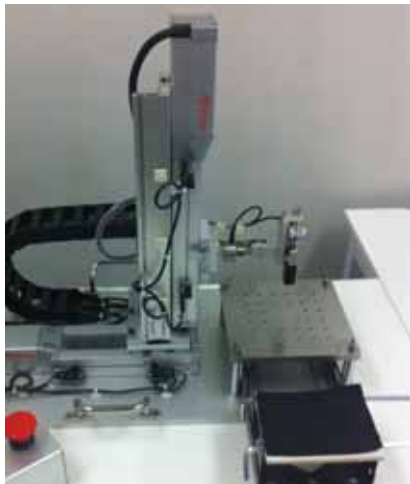


図5 皮膚変形特性計測装置（圧迫とずれ）



図6 荷重計測のための体位変換の実験

ンプリング法とモンテカルロシミュレーション法について、一般化した定式化を完成させた。提案手法は3ステップからなる。まず、出力値の期待値の収束判定を行う手法を提案した。そこまでの解析結果から、裾野確率となり得るパラメータの組が、多次元パラメータ空間内でどこに位置するかを、多角形の集合体として表現する方法を提案した。これ

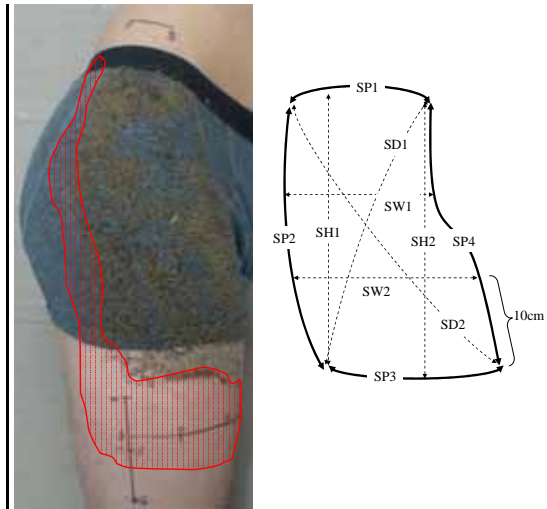


図7 体位変換時の動的な接触域計測

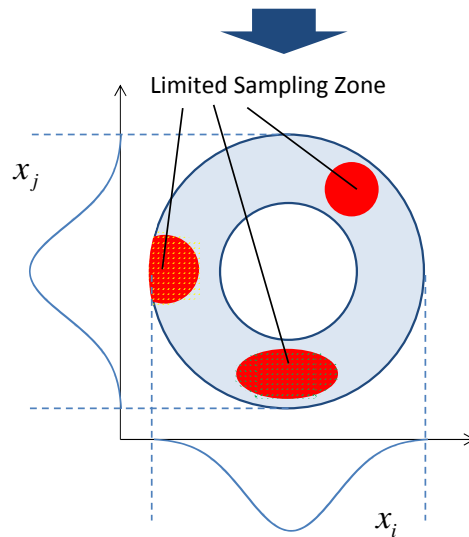
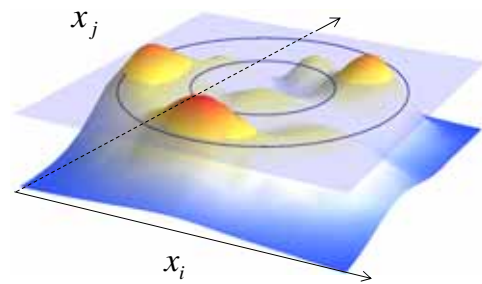


図8 裾野確率の高精度サンプリング法

を Limited sampling zone (LSZ) とよぶこととした。最後に、LSZ 内でのみサンプリング点を発生させ、裾野確率を高精度に予測するという Stepwise limited sampling (SLS) 法を確立した。図8に SLS 法の概念図を示す。

具体的に図2の2Dモデルについて、SLS法を自動化するプログラム開発を行った。

#### (5) バイオメカニクス解析の実施と結果の考察

「研究の方法」に示した計7つのパラメータについて解析を行った結果、多次元パラメータ空間内で投影して得られたLSZを図9に、



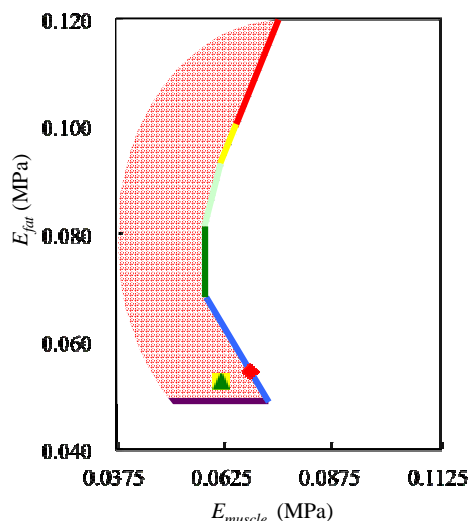


図9 高せん断ひずみ値となるパラメータの組の存在領域(limited sampling zone)

また非常に高いひずみ値となる3ケースを図中に示した。注意するひずみ値はせん断ひずみであることがわかった。せん断ひずみは、繰返し付与されると疲労破壊につながると推察される。体位については、仰臥位が側臥位よりひずみ値が高かった。この際、筋肉、脂肪の力学的物性値が低い場合に、高ひずみ値となるとの知見を得た。また、脂肪量が多い患者について、上記の条件がそろうと、非常に高いひずみ値になり得るとの結果を得た。これらの知見は、寝たきり患者に対して、患者の個体差を知った上で、介護・看護を行う際に注意すべき知見になりえる。また、開発した手法・プログラムを用いれば、今後さまざまなケースの予測が可能になるため、褥瘡発生の要因を研究する新手法となることが期待される。

#### 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2件)(以下全て査読有)

Samuel Susanto Slamet, Kyohei Hatano, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Practical Monte Carlo simulation method highlighting on tail probability with application to biomechanics analysis of pressure ulcer, Transactions of JSCES, Vol. 2014, 2014, Paper No. 20140001, DOI:http://dx.doi.org/10.11421/jscs.2014.20140001

Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano, Yoshiyuki Tanabe, Asako Hatano and Tomohisa Nagasao, Biomechanics analysis of pressure ulcer using damaged interface model between bone and muscle in the human buttock, Journal of Computational Science and

Technology, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 70-80,  
DOI: 10.1299/jcst.6.70

[学会発表](計10件)

Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Uncertainty modeling and sampling scheme with focus on tail probability applied to biomechanics simulation of pressure ulcer, 日本計算工学会第19回計算工学講演会, 広島, 2014.

Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Uncertainty modeling and simulation highlighting on tail probability in biomechanics study of pressure ulcer, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, Singapore, 2013.

Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano, Kyohei Hatano and Tomohisa Nagasao, Local strain analysis of human buttock for biomechanics study on pressure ulcer considering uncertainty factors and tail probability, The 7th Asian Pacific Conference on Biomechanics, Seoul, Korea, 2013.

波多野恭平, 岡本功太, Samuel Susanto Slamet, 高野直樹, 永竿智久, 不確かさを考慮した有限要素シミュレーションによる褥瘡発生リスクの予測, 日本計算工学会第18回計算工学講演会, 東京, 2013.

波多野恭平, 岡本功太, Samuel Susanto Slamet, 高野直樹, 永竿智久, 褥瘡発生メカニズム解明のための有限要素シミュレーション, 日本材料学会第62期学術講演会, 東京, 2013.

Kohta Okamoto and Naoki Takano, Finite element mesh superposition method applied to stochastic multiscale analysis, International Computational Mechanics Symposium 2012, 神戸, 2012. Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Biomechanics analysis of pressure ulcer using damaged interface model between bone & muscle, 18th Congress of the European Society of Biomechanics, Lisbon, Portugal, 2012.

Sho Suzuki, Naoki Takano, Kota Okamoto and Mitsuteru Asai, Monte Carlo simulation highlighting on the tail probability for a dynamic problem, 日本計算工学会第17回計算工学講演会, 京都, 2012.

Samuel Susanto Slamet, Yoshiyuki Tanabe, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Biomechanics analysis of

pressure ulcers using damaged interface model between bone and muscle in the human buttocks, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会, 岡山, 2011.

Samuel Susanto Slamet, Naoki Takano and Tomohisa Nagasao, Interface strain analysis between bone and muscle for biomechanical study of pressure ulcers, 日本計算工学会第 16 回計算工学講演会, 柏, 2011.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

慶應義塾大学形成外科 医学 - 工学研究グループ

<http://biomedical-engineering-research.org/member/group.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高野 直樹 (TAKANO, Naoki)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号：10206782

### (2) 研究分担者

永竿 智久 (NAGASAO, Tomohisa)  
慶應義塾大学・医学部・准教授  
研究者番号：20245541

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：