

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330318

研究課題名(和文) 数値解析を利用した寝心地シミュレータによる寝心地の推定

研究課題名(英文) Investigation into the sleeping comfort of mattress by using numerical analysis

研究代表者

吉田 宏昭 (YOSHIDA, Hiroaki)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：40456497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：寝具に寝た際に生体内に生じる応力を人間は寝心地として取得しているため、寝具に寝た際に生じる生体内の応力を知ることができれば有益である。そこで、生体内の応力を推定可能な数値解析を用いて寝具の寝心地に関して検討した。様々な体型の人体数値モデルを構築して生体内の応力を調査したところ、体型の変化に伴って腰部と頸部周辺の応力分布や沈み込み量が変化した。また、厚径方向の変化は、身長方向の変化と比較して複雑であり、頸部は体型の特徴が出やすいことが示唆された。つまり、体型の違いによって寝姿勢が変化しており、体型の違いによって寝心地が異なると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The appropriate measurement of stress distribution within the human body would provide valuable information to us. For the appropriate measurement to estimate stress distribution within the human body, numerical analysis is considered one of the most desirable methods. Since human body dimensions have individual differences, it is presumed that the way of the internal stress distribution also changes due to the differences. Thus, we developed human numerical models reproducing various types of the body forms and investigated the sleeping comfort of mattress by using human-mattress numerical models. From the results of numerical analyses, it is considered that sleeping comfort changes according to the differences of the body forms.

研究分野：感性工学

キーワード：感性計測評価 数値解析 有限要素法 寝心地 寝具 シミュレーション 快適性 ベッドマットレス

1. 研究開始当初の背景

睡眠は、脳機能や身体機能を健常に保つために必要不可欠な生理的活動の1つである。しかし、現代社会にはストレスや過度の労働といった睡眠を阻害する要因が多くあふれており、日本人の5人に1人が不眠を訴えているといわれている。睡眠に関するこの問題を学術的に解決するためになされてきた研究は、これまでは外的睡眠環境に関する研究が主流であったが、近年では人間側の要因である寝心地に着目した研究が盛んになっている。しかし、寝心地に關与する要因である心身状態や体型は個人によるバラツキが大きいいため、寝心地についてはまだ解明されていないことが多い。

寝心地の評価手法として、これまで心理評価と生理計測および体圧分布測定や加速度計測が用いられてきた。これらの生体情報に加えて、生体内の変形状態とそれに伴う生体内応力を知ることができれば非常に有益な情報になりうる。なぜなら、寝具上に寝た際に生じる生体内の変形を我々は寝心地として感じているためである。しかし、生体内部への直接的な計測は侵襲性が伴うため、被験者に負担が大きいので、その代替手法として生体内の変形と生体内応力を推定できる数値解析に着目した。申請者はこれまで生体に関する数値解析を10年以上続け、その中で、指先の触覚と摩擦に関する研究を行い、数値解析によって人間の感覚を推定できると感じた。このように、これまで感性情報分野で用いられていなかった数値解析が人間の感性を探求する方法として有効ではないかと着想するに至った。数値解析を用いた睡眠関連研究は床ずれに関して何件か検索されるが、寝心地に限定すると慶應義塾大学と信州大学で行われているのみである。すなわち、数値解析を用いて生体現象を解明している研究は多いが、本研究のように数値解析を用いて人間の感性情報を扱っている研究は国内外でもほとんどない。とくに、数値解析は目に見えない寝心地を可視化するのに適している。本研究では、従来から用いられてきた評価手法にもう一つの切り口として数値解析を加えて、寝心地の本質に迫る。

実際の睡眠実験を行う際に1つの大きな課題がある。それは、人間の体型には個人差があるため、様々な体型の被験者を募るのに時間がかかってしまうことである。一方、数値解析の利点の1つは、様々な体型の人体数値モデルを比較的容易に作成できることである。本研究では、コンピュータ上に様々な体型の人体数値モデルを構築し、寝心地に関する研究を効率的に遂行する。申請者はこれまで男性の平均体型を再現した人体数値モデルを作成し、寝心地に関する数値解析を行ってきた。そこで、これまでの研究成果を発展させて、既に構築されている人体数値モデルを基にして、肥満体型や痩せ型など様々な体型の人体数値モデルを作成し、寝心地に關す

る数値解析を行う。数値解析を用いて生体内応力を調査することによって、コンピュータ上で寝心地が推定可能なシステムを開発し、数値解析に基づいた寝心地シミュレータを構築する。寝心地シミュレータによって寝具の嗜好度や睡眠の質といった快適な睡眠生活を送るために必要な感性情報を明示化し、寝心地を決定する要因を特定する。これまで目に見ることができなかった寝心地を可視化し、数値解析という観点からまだ不明な点の多い寝心地の本質を解明する。

2. 研究の目的

寝具上に寝た際に生じる生体内変形とそれに伴う生体内応力を我々は寝心地として感じているため、生体内変形と生体内応力を推定できる数値解析は、寝心地を評価する際に非常に有益である。本研究では、様々な体型の人体数値モデルを作成し、数値解析を行うことによって生体内応力を調査し、コンピュータ上で寝心地が推定可能なシステムを開発し、寝心地シミュレータを構築する。寝心地シミュレータにより、寝具の嗜好度、負担の少ない寝具特性、適切な寝姿勢、睡眠の質といった快適な睡眠生活を送るために必要な感性情報を明示化し、寝心地を決定する要因を特定する。これまで目に見ることができなかった寝心地を目に見えるようにし、数値解析という新たな観点から未だ不明な点の多い寝心地の本質を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、数値解析手法の一つである有限要素法を用いて人体有限要素モデルを構築した。人体は複雑な構造をしているが、骨・椎間板・靭帯・生体軟組織から構成されると仮定し、二次元人体有限要素モデルを作成した。ここで、生体軟組織とは、皮膚や脂肪、筋肉などを含めた組織のことを示している。二次元モデルは計算コストがかからず、比較的容易に被験者の体型を再現したモデル構築が可能であり、効率が良い。

研究代表者はこれまで平均体型を模倣した人体有限要素モデルを作成してきた(図1)。

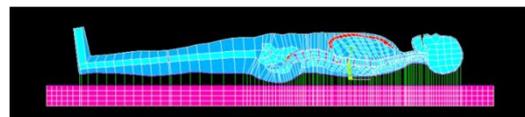


図1 人体とマットレスの有限要素モデル

本研究では、この平均体型有限要素モデルを基に被験者の体型を再現した人体有限要素モデルを構築した。そのためには被験者の人体寸法を採取する必要がある。二次元人体有限要素モデルに反映可能な寸法値として、身長と身体の厚み(厚径)が挙げられる。そこで、既存の人体寸法データベースを参照して、寸法採取点を設定し、被験者の身長と11カ所での体型の厚径を測定した。比較的体型に

特徴がある3名の被験者を選択した(M1、M2、M3とする)。M1の被験者モデルは、M2とM3の被験者モデルに比べ厚みが全体的に厚く、M2はM3と比較して、腹部周辺が厚い。被験者の体型を再現した人体有限要素モデルの作成手順は以下である。まず、平均体型モデルの身長を被験者の身長に調整した。そして、人体モデルの皮膚表面における寸法採取点に相当する腹部と背部の2つの節点の座標値を、採取した寸法値の厚径になるように設定した。次に、皮膚表面の他の節点群の座標を撮影した被験者画像を参考にして、滑らかになるように手動で設定した。その際、骨、靭帯、椎間板などの皮膚表層にない内部構造は変更しなかった。

次に、この被験者の体型を再現した人体有限要素モデルを基に様々な体型を再現した2次元モデルを構築した。図1において、横方向が身長方向、縦方向が厚径方向に相当する。体型の違いは身長と身体各部の厚径によって表現できると単純に仮定した。例えば、身長方向へ0.90倍から1.10倍まで人体有限要素モデルを伸縮させると、身長の違いを表現することが可能である。上述の倍率だと、人体有限要素モデルの身長は最小約156cm、最大約195cmとなり、日本人成人男性の身長のレンジをほぼカバーしている。厚径方向は0.80倍から1.20倍まで伸縮させた。この倍率は、既存の人体寸法データベースを参照し、日本人成人男性の厚径のレンジをカバーできるように設定した。

人体有限要素モデルは、皮膚や筋肉などの生体軟組織は同じ材料特性を有する一層と仮定し、骨・靭帯・椎間板および生体軟組織からなる2次元モデルとした(要素数約800)。ヤング率の異なる4種類のベッドマットレス(マットレスA、B、C、D)を想定し、マットレスは均一な素材と仮定し、簡易な2次元モデルとした。

骨、靭帯、椎間板は線形弾性体と仮定し、文献値を参照した(表1)。

表1 骨・靭帯・椎間板の材料定数

| | ヤング率(MPa) | ポアソン比 |
|-----|-----------|-------|
| 骨 | 10000 | 0.3 |
| 靭帯 | 5 | 0.3 |
| 椎間板 | 1 | 0.49 |

生体軟組織やマットレスは、ひずみが1以上の大変形をすると想定されたため、本研究では、生体軟組織とマットレスは超弾性体(Neo-hookeanモデル)と仮定した。超弾性体のひずみエネルギー W は以下の式のように表される。

$$W = \frac{G_0}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{K_0}{2} (J - 1)^2$$

ここで、 G_0 は初期せん断係数、 K_0 は初期体

積弾性率、 J は体積比、 \bar{I}_1 は偏差ひずみの第一不変量である。なお、初期せん断係数および初期体積弾性率は以下の式を用いてヤング率 E とポアソン比 ν から換算できる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

初期せん断係数に入力する数値として、生体軟組織のヤング率は0.22MPa、ポアソン比は0.49とし、マットレスのヤング率は、マットレスAを14.0kPa、マットレスBを11.4kPa、マットレスCを9.6kPa、マットレスDを6.0kPaとし、ポアソン比は0.01とした。

有限要素解析ソフトとしてANSYS Ver.12を用いた。人間が寝ている状態を再現できるように、人体に重力(重力加速度 9.8m/s^2)をかけて、人体とマットレスを接触させた。人体とマットレス間には接触要素を導入し(摩擦係数は0.5)、マットレスの底面のみを完全固定した。密度はすべて 1000kg/m^3 とした。人体モデルの腰部と頸部の椎間板に相当するある一節点における応力値と沈み込み量を調査した。

4. 研究成果

(1) 主な成果

図2に身長の変化に伴う腰部応力、図3に身長の変化に伴う頸部応力、図4に厚径の変化に伴う腰部応力、図5に厚径の変化に伴う頸部応力を示す。表2に腰部と頸部における体型の変化に伴う相当応力と沈み込み量の傾向を示す。身長方向において倍率が大きくなると身長が高くなり、厚径方向において倍率が大きくなると太っていくとした。

まず、身長について考察する。

身長が高くなるにつれて、腰部の沈み込み量が減少し、腰部の相当応力が低くなっていった(図2)。身長が高くなるとマットレスに接触する面積が相対的に広がるため、腰部のたわみが減少したと考えられる。逆に、身長が低くなると、腰部の沈み込み量が増加し、腰部の応力は増加した。身長が低くなると、体表面の接触面積が減るためにたわみが増大し、その結果として応力が増えたと考えられる。頸部においては、身長が高くなるにつれて、頸部の沈み込み量は増加し、応力も増加した(図3)。身長が高くなると頸部(頭部と胸部との距離)が長くなり、たわみやすくなったため、頸部の応力が増加したと考えられる。逆に身長が低くなると、頸部の沈み込み量は減少し、応力も減少した。身長が低くなると、頸部が短くなるため、頸部のたわみが減り、応力が減少したと考えられる。すなわち、身長が高くなると、腰部は沈み込みにくくなり、頸部は沈み込むことになる。逆に、身長が低くなると腰部は沈み込み、頸部は沈み込みにくくなる。本研究によって体型によって寝姿勢が変化することが示唆された。

次に、厚径について考察する。

太っていくと体重が増加するため、腰部の沈み込みが大きくなり、腰部の応力が大きくなった(図4)。逆に、痩せていくと腰部の沈み込みが小さくなり、腰部の応力も低下した。頸部においては、太っていくと頸部の沈み込みが大きくなったが、逆に頸部の応力は減少した(図5)。太っていくと頸部周辺の生体軟組織の厚径もその分増加するため、変形しやすい生体軟組織の変形の割合が変形しにくい椎間板と比較して大きくなったため、頸部の椎間板周辺の応力が減少したと推測される。逆に、痩せていくと頸部の沈み込みは減少したが、頸部の応力は増加した。痩せていくと生体軟組織の変形の割合が減少し、椎間板の変形が相対的に増加したため、頸部の椎間板周辺の応力が増大したと考えられる。

身長方向の体型変化は、応力と沈み込み量の間に関連関係があったが、特に頸部における厚径方向の変化は応力と沈み込み量は逆相関の関係にあった。すなわち、厚径方向の変化は、身長方向の変化と比較して複雑であり、特に、頸部は体型の特徴が出やすく、枕の高さや枕の好みに影響を与えている可能性がある。

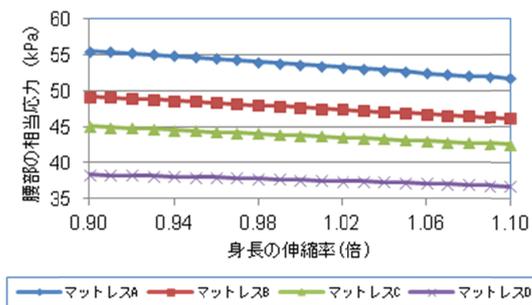


図2 身長の変化に伴う腰部の相当応力 (被験者 M1)

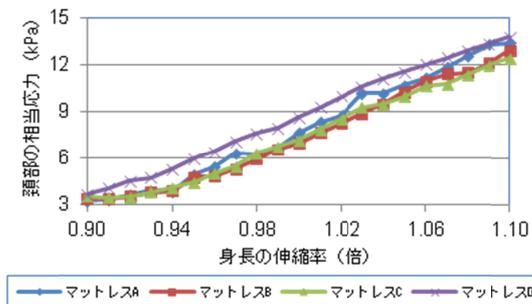


図3 身長の変化に伴う頸部の相当応力 (被験者 M1)

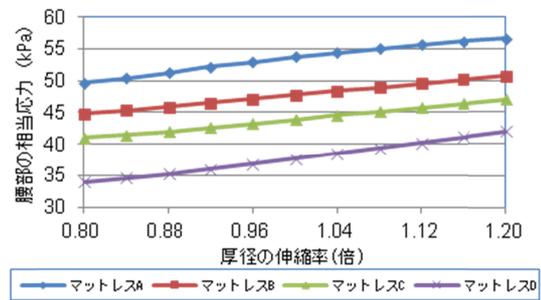


図4 厚径の変化に伴う腰部の相当応力 (被験者 M1)

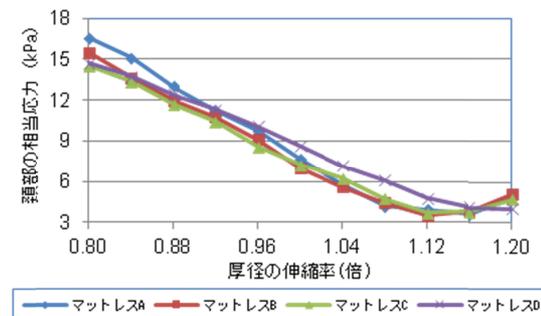


図5 厚径の変化に伴う頸部の相当応力 (被験者 M1)

表2 体型の変化に伴う腰部と頸部の応力値と沈み込み量

| | 腰部・ 応力 | 腰部・ 沈み込み | 頸部・ 応力 | 頸部・ 沈み込み |
|------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 身長が高くなっていく | 減少↓ | 減少↓ | 増加↑ | 増加↑ |
| 身長が低くなっていく | 増加↑ | 増加↑ | 減少↓ | 減少↓ |
| 太っていく | 増加↑ | 増加↑ | 減少↓ | 増加↑ |
| 痩せていく | 減少↓ | 減少↓ | 増加↑ | 減少↓ |

(2) 得られた成果の位置づけ

睡眠に関して様々な研究がなされてきたが、心身状態や体型には個人によるバラツキが大きいと、寝心地についてまだ解明されていないことが多い。寝具に寝た際に生じる生体内変形を、我々は寝心地という感性情報として獲得しているため、生体内の変形を知ることは有益な情報となり得る。よって、生体内変形を推定できる数値解析は有効な手法である。本研究では、数値解析という新たな観点から生体内の応力状態を調査することによって、これまで目に見えなかった寝心地を目に見えるようにし、寝心地の本質を解明することを目的としている。

また、数値解析の利点の1つは、様々な体型の人体数値モデルを比較的容易に作成できることであり、時間の要する被験者実験を実施せずに、寝心地シミュレータによりコンピュータ上で寝心地評価を行うことができ

る。本研究のように数値解析を用いて寝心地シミュレータを構築し、人間の感性情報を扱っている研究はほとんどなく、独創性がある。

様々な体型を再現した人体数値モデルを構築し、寝心地シミュレータを用いて寝心地が評価できれば、一人一人に適した寝姿勢や身体に負担の少ない寝具特性が明示化でき、好みの寝具硬さといった寝具の嗜好度も明確にできる。現在、日本人の5人に1人が不眠を訴えているといわれている。本研究の成果により、睡眠の質や寝具の嗜好度といった快適な睡眠生活を送るために必要な感性情報をコンピュータ上で提供できるので、日常生活における睡眠の質の向上、睡眠改善方法の提案が可能となり、睡眠に関する問題を解決できる。

(3) 今後の展望

様々な体型を模した人体有限要素モデルを用いて寝心地について解析を行ったところ、体型は異なるが生体内応力分布が同じ体型グループがあることが分かってきた。今後は、寝心地に関する官能検査と有限要素解析の結果を照合して、寝心地の本質について探究していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Yaning LI, Masayoshi KAMIJO, Hiroaki YOSHIDA, Effectiveness of the "Tezawari" and "Hadazawari" sensory test methods in the evaluation of fine-textured knitted fabrics, Part1: Coolness and moistness discrimination, Textile Research Journal, Vol. 85(15), pp.1620-1634, 2015, 査読有

橋本一馬, 青井政貴, 吉田宏昭, 上條正義, 相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価, 日本感性工学会論文誌 14(3), pp.381-389, 2015, 査読有

山口穂高, 吉田宏昭, 上條正義, 鉄道車両のシート色が座り心地に与える影響 - 緑系統および青系統における印象評価 -, 日本感性工学会論文誌, Vol.14 (2), pp.291-297, 2015, 査読有

吉田宏昭, 上條正義, オノマトペとリサーチ図形を活用した歩行動作評価法, 日本感性工学会論文誌, Vol.13(2), pp.361-369, 2014, 査読有

吉田宏昭, MRI を利用した靴着用時における靴のフィット性決定要因の検討, デサントスポーツ科学, Vol.35, pp.21-30, 2014, 査読有

松井建興, 烏野大, 吉田宏昭, 花岡正明, 歩行時の立脚相における膝関節運動の解析 - 健康成人の性差の検討 -, 生体応用計測 Vol.5, pp.55-62, 2014, 査読有

Yaning LI, Tomomi TSUGAMA, Masayoshi KAMIJO, Hiroaki YOSHIDA, Study on Cardiovascular and Respiratory Responses Relevant to Tactile Softness Evaluation - Based on ECG and PPG Analysis -, International Journal of Affective Engineering Vol. 13 (4), pp.269-277, 2014, 査読有

Hodaka YAMAGUCHI, Hiroaki YOSHIDA, Masayoshi KAMIJO, Goro FUJIMAKI, Tetsuya NARUSE, Effect of Footrest Angle on Decrement of Leg Swelling while Sitting, International Journal of Affective Engineering, Vol.13 (3), pp.197-203, 2014, 査読有

〔学会発表〕(計 14 件)

安藤春来, 吉田宏昭, 上條正義, 「寝姿勢計測装置の開発について」, 第 17 回日本感性工学会大会, 2015.9.2, 文化学園大学 (東京都渋谷区)

高山裕子, 橋本一馬, 青井政貴, 上前真弓, 吉田宏昭, 上條正義, 「音刺激が睡眠に与える影響」, 第 10 回日本感性工学会春季大会, 2015.3.29, 京都女子大学 (京都府京都市)

橋本一馬, 青井政貴, 上前真弓, 吉田宏昭, 上條正義, 「相変化材料を用いた寝具の吸熱機能が寝心地に与える影響」, 第 10 回日本感性工学会春季大会, 2015.3.29, 京都女子大学 (京都府京都市)

吉田宏昭, 上條正義, 「有限要素解析に基づいたベッドマットレスの寝心地に関する研究」, 第 27 回計算力学講演会, 2014.11.24, 岩手大学 (岩手県盛岡市)

青井政貴, 橋本一馬, 吉田宏昭, 上條正義, 「胸部と腰部の動作分析による睡眠評価法の検討」, 第 16 回日本感性工学会, 2014.9.5, 中央大学 (東京都文京区)

橋本一馬, 青井政貴, 上前真弓, 吉田宏昭, 上條正義, 「相変化材料を用いた温熱調節素材寝具の寝心地評価に関する研究」, 第 16 回日本感性工学会, 2014.9.4, 中央大学 (東京都文京区)

青井政貴, 上前真弓, 吉田宏昭, 上條正義, 「寝返り動作計測による寝心地評価に関する研究」, 平成 26 年度繊維学会年次大会, 2014.6.12, タワーホール船堀 (東京都江戸川区)

槻川原 尚, 吉田宏昭, 上條正義, 「睡眠深度の変遷と睡眠時ブラキシズム発生との関係」, 第 15 回日本感性工学会大会 2013.9.6, 東京女子大学 (東京都杉並区)

青井政貴, 橋本一馬, 上前真弓, 吉田宏昭, 上條正義, 「3 軸加速度センサを用いた睡眠中動作計測による睡眠評価方法の検討」, 第 15 回日本感性工学会大会, 2013.9.5, 東京女子大学 (東京都杉並区)

橋本一馬,青井政貴,上前真弓,吉田宏昭,
上條正義,「相変化材料を用いた温熱調節
寝具の寝心地評価に関する研究」,第15回
日本感性工学会大会,2013.9.5,東京女子
大学(東京都杉並区)

青井政貴,橋本一馬,吉田宏昭,上條正義,
「区分ごとに弾性率の異なるベッドマッ
トレスの寝心地評価に関する研究」,第30
回センシングフォーラム計測部門大会,
2013.8.29,信州大学繊維学部(長野県上
田市)

Masataka Aoi, Kazuma Hashimoto, Hiroaki
Yoshida and Masayoshi Kamijo,
“Evaluation of Sleeping Comfort of Bed
Mattresses with Different Elastic
Moduli for Each Body Region”,
International Conference on Biometrics
and Kansei Engineering (ICBAKE2013),
2013.7.6, Tokyo Metropolitan University
(Chiyoda-ku, Tokyo)

橋本一馬,青井政貴,吉田宏昭,上前真弓,
上條正義,「温度調節素材による寝具の寝
心地評価」,平成25年度繊維学会年次大会,
2013.6.14,タワーホール船堀(東京都江
戸川区)

青井政貴,上條正義,吉田宏昭,「加速度
計を用いた睡眠評価に関する研究」,平成
25年度繊維学会年次大会,2013.6.14,タ
ワーホール船堀(東京都江戸川区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 宏昭 (YOSHIDA, Hiroaki)
信州大学・学術研究院繊維学系・准教授
研究者番号: 40456497

(2) 連携研究者

上條 正義 (KAMIJO, Masayoshi)
信州大学・大学院総合工学系・教授
研究者番号: 70224665

高寺 政行 (TAKATERA, Masayuki)
信州大学・学術研究院繊維学系・教授
研究者番号: 10163221