



Title	生体力学シミュレーションによる体内応力予測値を基準とした腰痛予防のための個別対応マットレス設計に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	船井, 孝
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15180号
Issue Date	2022-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/87190
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takashi_Funai_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 船井 孝

学位論文題名

生体力学シミュレーションによる体内応力予測値を基準とした腰痛予防のための個別対応マットレス設計に関する研究

(Research on individualized mattress design for back pain prevention based on predicted stress in the body using biomechanical simulation)

腰痛は多くの人々が抱える痛みの自覚症状である。厚生労働省が実施した 2019 年国民生活基礎調査は、男女ともに 10 人に 1 人が腰痛の有訴者であると報告している。これは、1995 年の調査以降、2019 年まで大きな変化はない。また 1995 年の調査以降、男性における腰痛の有訴者数は常に第 1 位、女性では肩こりに次いで常に第 2 位である。これらの統計は、日本国民の多くが慢性的に腰痛の自覚症状を有していることを示している。本研究では、日本人の多くが抱える自覚症状である腰痛に着目し、人生の 1/3 を占める睡眠において予防、緩和できるマットレスの個別対応設計方法を提案した。腰痛は、椎間板変性に起因する可能性が高いため、椎間板負荷を指標として提案したマットレスの腰痛予防効果を評価する方法について検討した。椎間板負荷は、古くは穿刺による椎間板内圧測定で評価されていたが、近年では被験者への高い身体的負担から、倫理的に実施が困難である。そこで本研究では、X 線 CT や MRI で撮影された人体の断層画像に基づいて構築された三次元人体モデルに対する力学的有限要素法解析、すなわち生体力学シミュレーションを導入する事とした。三次元人体モデルは、すでに様々な研究機関で構築手法が確立されている。また有限要素法システムも、優れた製品が市販されている。しかしながら、生体力学シミュレーションで必須となる生体組織の材料特性パラメータが明らかになっておらず、生体力学シミュレーションの結果を評価するための有効な実験的手法も確立されていなかった。そのため本研究では、「生体組織の材料特性パラメータの導出」を行い、有限要素法解析のバリデーションに活用できる「臥床状態におけるマットレス変形量測定手法の提案」を行った。また、生体力学シミュレーションで臥床状態のマットレスの変形を再現するためには、マットレス素材の変形挙動を有限要素法で良好に再現する必要があるため、使用頻度の高い「ウレタンフォームの材料特性パラメータの導出」を行った。さらに、「使用者の体型に合わせて変形するマットレスの設計手法の提案」を行い、この手法で設計されたマットレスの腰痛予防効果を生体力学シミュレーションで評価した。以下に本研究で得られた結果の概要を示す。

「生体組織の材料特性パラメータを導出」では、生体力学シミュレーションの実施に不足している生体組織の材料特性パラメータの導出を行った。非線形有限要素法では、使用するひずみエネルギー関数が凸関数であれば解の唯一性が担保され、生体力学シミュレーションを安定的に解くことができる。そこで、Mooney-Rivlin モデル派生で凸関数となるひずみエネルギー関数を提案した。またこの関数は、いくつかの生体組織に対して限られた試験モード（例えば単軸引張り試験結果）から、他の試験モード（例えば単軸圧縮試験結果や等方二軸引張り試験結果）を概ね再現できる事を示した。これらの事から、本研究が提案したひずみエネルギー関数は、有限要素法において生体軟組織の変形挙動を再現することに適していると判断した。合わせて、提案したひずみエネルギー関数を、これまで様々な研究で実施されてきた生体軟組織の材料試験結果に適用し、代表的な組織の材料特性パラメータ

を導出した。提案したひずみエネルギー関数は Mooney-Rivlin モデル派生の関数なので、導出したパラメータは一般的な非線形有限要素法システム (例えば ANSYS) で活用可能である。ここで導出した生体組織の材料特性パラメータは、「使用者の体型に合わせて変形するマットレスの設計手法の提案」の生体力学シミュレーションの腰痛予防効果の確認で使用された。

「臥床状態におけるマットレス変形量測定手法の提案」では、有限要素法解析のバリデーションに活用できる実験値取得方法として、X 線 CT による臥床状態のマットレス変形量測定手法を確立した。X 線 CT で撮影可能な造影剤を塗布した撮影用マットレスを作製した。このマットレスに使用者が臥床した状態を X 線 CT で撮影し、断層画像に確認された造影剤の位置を画像処理することで、マットレス変形形状を数値化する手法を確立した。また、確立した手法は 0.3 mm 程度の誤差でマットレス変形量が測定できる事を示した。この手法は、「ウレタンフォームの材料特性パラメータの導出」における導出したパラメータの妥当性評価および「使用者の体型に合わせて変形するマットレスの設計手法の提案」における使用者の重量推定で活用された。

「ウレタンフォームの材料特性パラメータの導出」では、使用者がマットレスに臥床した状態を再現する生体力学シミュレーションにおいて、マットレスの素材であるウレタンフォームの変形挙動を再現できる材料特性パラメータを導出した。ウレタンフォームの変形挙動を再現するためには、体積変化を考慮できるひずみエネルギー関数を導入する必要があるが、ポアソン比 0 を定義することで単軸試験結果のみから材料特性パラメータが導出できることを示した。また、「臥床状態におけるマットレス変形量測定手法の提案」で確立した手法で測定された、使用者の背中形状を模した模型が乗った状態のマットレス変形量と、導出した材料特性パラメータによる再現有限要素法解析を比較することで、ウレタンフォームの圧縮試験のみから導出した材料特性パラメータで、1.0~1.5 mm 程度の誤差でマットレスの変形が再現できる事を示した。導出したウレタンフォームの材料特性パラメータは、「使用者の体型に合わせて変形するマットレスの設計手法の提案」における腰痛予防効果を評価するための生体力学シミュレーションで活用された。

「使用者の体型に合わせて変形するマットレスの設計手法の提案」では、使用者の背中形状に沿って変形するマットレスの設計手法を提案し、腰痛予防効果を生体力学シミュレーションで評価した。提案手法で設計されたマットレスは、使用者の背中形状に沿って変形する様に設計されていることが確認された。生体力学シミュレーションによる椎間板応力評価では、一様構造のマットレスに対して、設計マットレスに臥床した際の椎間板応力が低いことが示された。この結果は、使用者の脊柱形状が三次元人体モデル構築時の姿勢に近い事を示している。すなわち、本研究が提案するマットレス設計手法を椎間板負荷が少ない姿勢で構築された三次元人体モデルに適用することで、椎間板負荷が少ないマットレスが設計できる事を示している。

以上の事から、本研究が提案するマットレスの個別対応設計手法を活用することで、腰痛の原因となる椎間板負荷を臥床時に低減できるマットレスが設計できる事が示唆された。これにより、日本において有訴者数が最も多い腰痛を、人生において最も長い時間を占める睡眠において予防できると考える。また本研究では、これまで生体力学シミュレーションの実施において十分ではなかった生体軟組織に向けたひずみエネルギー関数の提案と代表的な組織の材料特性パラメータを導出した。これらは、マットレスの設計のみならず、今後の生体力学シミュレーション実施に大きく貢献するものと考えられる。