

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06058

研究課題名(和文) 軟部組織の血管閉塞を引き起こす力学的因子とマットレスの褥瘡予防効果の定量的解明

研究課題名(英文) Quantitative elucidation of mechanical factors that cause vascular occlusion in soft tissues and the effect of mattresses on pressure ulcer prevention

研究代表者

山田 宏 (Yamada, Hiroshi)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授

研究者番号：00220400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：20歳代の人の前腕の皮膚表面に圧迫あるいはずれを加えたら、皮下組織内の静脈は圧迫に対して容易に閉塞したのに対し、ずれに対してはほとんど変形しなかった。フタ後足の皮下組織は脂肪組織とシート状の結合組織からなることが微視的観察から分かり、皮下組織のずれ易さが組織構造に起因することが人にも当てはまると考えられた。また、ゲル層を有するマット3種を圧縮してずらしたところ、ずれに対する抵抗力は圧縮量にはあまり依存せずゲル層に依存して、2倍以下の差があった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

褥瘡は軟部組織の持続的な圧迫によって、組織内の微小な血管の網が閉塞し、血流が停滞して発症するが、ずれの影響も指摘されている。本研究では被験者とフタ後足(食肉)に対する測定・観察を行い、圧迫の影響と比べるとともに、微視的な組織構造と関連付けて、皮下組織はずれ抵抗が小さい特徴を持っていることを示した。また、軟部組織へのずれの影響の低減に効果的とされるゲル層付マットについて基礎的な変形特性を調べ、ずれに対する抵抗を数値で示し、比較できるようにした。

研究成果の概要(英文)：When pressure or shear displacement was applied to the skin surface of the forearm of men in their twenties, the vein in the subcutaneous tissue was easily occluded by the compression, but was hardly deformed by the shear displacement. Microscopic observation revealed that the subcutaneous tissue of porcine hind foot consist of adipose tissue and sheet-like connective tissue. Easy displacement in the tangential direction in the subcutaneous tissue was considered to be due to the intra-structure of tissue. Applying the compression and subsequent shear to three mats with a gel layer, the resistance to displacement did not depend much on the amount of compression but on the gel layer with a difference of less than two times.

研究分野：機械工学

キーワード：皮下組織 静脈 閉塞 有限要素解析 マットレス ゲル素材 ずれ抵抗 超弾性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 国際的連合組織 (米国の NPUAP, ヨーロッパの EPUAP, 環太平洋の PPIA) は, 2009 年に医療・看護や学術的根拠に基づいて褥瘡 (pressure ulcer) の定義を示し, 褥瘡の好発部位は骨突起部の皮膚とその下にある組織であり, 外的影響因子は圧力とせん断であるとした。米国の NPUAP は 2016 年に褥瘡 (pressure injury) の症例範囲を拡張して定義を修正し, 軟部組織の破綻は圧力とせん断だけでなく, 組織表面の温湿度, 血液循環, 軟部組織の状態も関与するとした。

(2) 褥瘡発症リスクの指標として外的指標 (皮膚の表面力と血管内圧) と内的指標 (応力, ひずみ) があるが, 血行障害 (血管閉塞) との関係についての検討が不足している。血流低下・血管閉塞については, 血流低下や血管閉塞は褥瘡発症の直接的原因で, 血流量は測定可能なため, 数多く測定されているが, これを引き起こす影響因子との関係解明が不足している。また, 十分な解像度での測定法がないため, 皮膚表面への負荷下での毛細血管や細動静脈の管腔形状の測定例はなく, 皮膚や骨格筋内の微小血管に関する有限要素解析が先行し, 血管内圧やせん断変形, マットレスの硬さが影響因子として指摘されている。皮膚の表面力については, 軟部組織の力学的状態や血流不全は皮膚表面への負荷に依存するが, 骨格筋への負荷は体表面圧では評価できないとの指摘がある。応力は, 高橋, Gefen, Linder-Ganz など著明な研究者が用いている一般的なリスク指標である。マットレスの体圧分散特性については, ウレタンフォームが広く普及しており, 家庭用品品質表示法 (JIS K6400-2) ではマットレスの硬さのみを示しており, スウェーデンでは楕円球状の重りを使って体圧分散を評価する規格 SS 870013 がある。

2. 研究の目的

体表面の圧迫で皮膚などに血行障害が続くと健康な人でも組織が壊死し, これを褥瘡という。壊死した組織は再生せず, 治る場合は肉芽組織に置き換わる。高齢化と孤立化の進行する社会においては, 難治性である褥瘡の発症要因を取り除くことが重要であるが, 褥瘡を引き起こす力学的環境やマットレスの選択については不明な点が多く, 有用な定量的根拠が求められている。そこで本研究では, 軟部組織 (皮膚, 脂肪, 骨格筋) とマットレス (就寝・手術用等) が血管閉塞に及ぼす影響を解明し, 褥瘡予防に必要な定量的根拠を提示する。

3. 研究の方法

(1) ブタ軟部組織に対する実験・解析。

精密ステッピングモータ駆動自動ステージを用い, 皮膚表面を水平方向に移動させて軟部組織にずれを与え, 荷重をロードセルで測定する。ステージの移動はコントローラを通してプログラムで制御する。市内の食肉センターで豚足 (食肉) を入手し, 撮影済の X 線 CT 画像を基に, 腱は避け, 皮下組織の厚さがなるべく一定の領域を選ぶ。軟部組織を骨軸方向に切り, 両側の周辺組織を取り除く。ひずみ解析のためにスプレーの噴霧で微粒子を組織側面に付し, 皮膚にずれを与え, 組織側面の变形と組織間のずれをマクロレンズ付カメラで撮影し, 荷重を計測する。また, 画像相関法による軟部組織側面のひずみ解析, 組織染色した標本についての光学顕微鏡観察と X 線 CT による観察を行う。さらに, 骨格筋組織がなく皮膚と皮下組織からなる部位を使って, 皮下組織の变形挙動を調べる。

(2) 被験者に対する実験・解析。

被験者に対して, 超音波診断装置を用い, 皮膚に圧力・ずれを与えて軟部組織の变形を動画撮影し, 画像処理の輪郭抽出によって静脈の变形を分析する。また, ビデオカメラと運動解析ソフトで測定部位の皮膚の 3 次元形状の測定を行う。さらに, 取得した実験データを用い, 軟部組織の变形と組織内の微小血管の变形を有限要素解析で調べる。被験者に対して, 小さく切り出した褥瘡治療用ドレッシング材 2 種を被験者の前腕の皮膚に貼付し, これを皮膚から静かに剥がし始める瞬間まで実験を行う。撮像した画像を用い, ドレッシング材周辺の領域でひずみを解析する。

(3) マットレスに対する実験・解析。

標準ウレタンフォームマットレス, ゲル層付ウレタンフォームマットレス, エアマットレス, ゲル層付ウレタンフォームマットを用い, 圧力分配測定装置と体圧測定シートを使って種々のマットレスの圧力分布を調べる。種々のマットレスの圧力分配特性を比較・整理する。ゲル層とウレタンフォーム層からなるマットの材料力学試験として, ゲル層のみ, ゲル層とウレタンフォーム層を合わせた全層に対して, 圧縮, 応力緩和, ずれ試験を行う。また, ゲル層とウレタンフォーム層からなるマットとマットレス, ゲル層からなるマットを対象として, 同様の試験と曲面を押し付ける試験を行う。また, 円柱面を使ってウレタンフォームを圧縮したときの非一様な变形を画像相関法によって解析する。

4. 研究成果

(1) ブタ軟部組織に対する実験・解析。

と畜解体したブタの足部軟部組織から切り出した試料の皮膚表面にずれ変位を与え, 長さ 20

mm の 2 つの試料について変位 0.2 mm で傾きが緩やかになる二相性のずれ力とずれ変位の関係を得た。また、変位 2 mm で約 60% の応力緩和を得た。さらに、軟部組織側面の皮下組織の変位場を画像相関法で解析した結果、2 つの試料のうち一方にはほぼ一様なせん断変形が生じ、他方は皮下組織と骨格筋の間で滑って皮下組織がほぼ一様に変位した。このことは、組織間の結合状態が組織の変形に影響を及ぼすことを示唆している。ブタの足部軟部組織のせん断試験として、まず皮膚・皮下組織・骨格筋の 3 層からなる組織層の皮膚表面を 5mm ずらし、応力緩和させた。次に皮膚と皮下組織の 2 層からなる組織層の表面を 2mm ずらして戻すことを 4 回繰り返し、5 回目に 2mm ずらした後、応力緩和させた。その結果、前者の試験では皮下組織のずれ変位に対して力は概ね上に凸の曲線を示した。後者の試験では皮下組織は 2 回目の繰り返し以降は概ね安定して大きなヒステリシス曲線を描いた。前者のホルマリンあるいはアルコールで固定した皮下組織に対してマッソントリクローム染色した組織切片の光学顕微鏡観察と X 線 CT による観察を行った結果、皮下組織にはシート状の膠原線維の層と脂肪組織の集合体が観察された。また、隙間が多く観察され、弱い結合力を有する内部構造が皮下組織層のずれ挙動を決定しているものと示唆された。また、前者及び後者いずれの皮下組織に対しても 1 次元の標準線形固体モデルを適用して応力の時間変化を記述できた。

(2) 被験者に対する実験・解析。

超音波診断装置により前腕部の軟部組織の生理的ずれ運動が観察された。20 歳代と 50 歳代各 1 名の被験者の前腕部の皮静脈を対象として、軟部組織の圧縮とずれに対する皮静脈の変形挙動を超音波診断装置と精密ばかりで調べた。超音波診断装置のプロープを用いて皮膚表面を徐々に圧縮した結果、皮静脈の内腔形状の変形と圧縮力の関係が得られた。また、皮膚表面に周方向のずれ変位を与える実験を行った結果、皮静脈が閉塞する傾向はなかった。20 歳代の健康な被験者 5 名に対し、圧迫またはずれによる右前腕の橈側皮静脈の短軸断面の形状変化を超音波診断装置で測定した。自動ステージを一定速度で鉛直方向に移動させ、プロープに皮膚表面を押し付けた。静脈は皮下組織に存在し、浅部・深部と心臓と同じあるいは 10cm だけ低い高さを条件とした。圧迫時には力覚センサで圧縮力を測定した。また、自動ステージを水平方向に正負 7.5mm だけ移動させて前腕の下側の皮膚表面にずれを与えた。この場合はプロープと皮膚の間には超音波測定用ゼリーで満たされた隙間がある。圧迫に対しては、静脈内腔の高さは圧縮力の増加に対して直径 4mm 以下から概ね直線的に減少し、3N 以下の圧縮力で閉塞に至った。皮膚のずれに対する静脈の変形はわずかであった。皮膚組織と皮下脂肪層との間ではずれ変形が伝わりにくく、静脈は変形し難かったものと推察された。プロープによる皮膚の圧迫による橈側皮静脈の閉塞に関する有限要素解析を実施した。モデルは 3 次元で対称であり、皮膚、皮下組織、静脈壁とプロープからなり、プロープによる圧迫によって静脈の一部が閉塞する様子が定性的に再現された。小さく切り出した褥瘡治療用ドレッシング材 2 種を 20 歳代の健康な被験者 2 名の皮膚から剥がし始める瞬間までの実験を行った結果、ドレッシング材から 2.5mm の領域でひずみが大きく測定された。

(3) マットレスに対する実験・解析。

高さ 42 mm の直方体形状のウレタンフォームに円柱を 15 mm だけ押し込み、変形前後のオープンセル構造の形状を X 線 CT で測定した結果、円柱直下の狭い領域でセルがつぶれ、円柱から離れた広い領域では変形量がわずかであった。顕微鏡に CCD カメラを取り付けた変位場の動画測定の解析においても同様の結果が得られた。圧力分配測定装置を用いた測定において、ゲルシート付ウレタンフォームマットレス(ピュアレックス)における装置突起部の荷重に対する装置の沈み込み量は、ゲルのあるほうが若干大きかった。ウレタンフォームマットレス(ソフィア)とゲルシート付ウレタンフォームマットレス(ピュアレックス)の上に体圧測定シート(アルテスタ)を敷き、その上に円板(周縁の丸みの半径 7 mm を除く直径 286 mm)を乗せ、さらに円板に重りを乗せた(平均圧力 1.6 kPa 相当)。重りを端に設置して偏心荷重を負荷した状態で円板を水平方向に押すと、最大圧力が若干増加した。エアマットレス(ステージア)を加えた計 3 種類のマットレスに人が寝た場合の体圧分布の観察結果はマットレスの変形特性を反映しており、身体のずれは先述の円板のずれと同様の結果を生じる可能性が示唆された。ウレタンフォームマットのゲル層(エクスジェル)とゲルシート付ウレタンフォームマットレス(ピュアレックス)のゲル層を対象として切り出し、一定圧縮ひずみ条件下での単調せん断試験と両振りの繰返しせん断試験を行い、3 軸の力覚センサを用いて力成分と変位成分の時間変化を調べた結果、圧縮ひずみの大きさにかかわらず、ゲル素材の横弾性係数(せん断応力とせん断ひずみの比)は概ね 1kPa で、横方向に変位拘束がない場合には、本素材はせん断力の作用に対して大きくずれることが分かった。ゲル層とウレタンフォーム層からなるマット(エクスジェル)とマットレス(ピュアレックス)、ゲル層からなるマット(アクションパッド)の 3 種を用意し、ゲル層には平らな面で、全層には球状の面で圧縮とずれを自動ステージで加え、力覚センサで圧縮荷重とずれ荷重を測定し、圧縮ひずみに依存したずれ抵抗を調べ、さらに、非圧縮等方の超弾性モデルを用いて圧縮変形挙動からずれ変形を予測した結果、ゲル層のずれ抵抗は素材によって異なり 4-8kPa で、圧縮ひずみ依存性は小さかった。人体によるマットレスへの沈み込みは様々な曲面と圧力分布を生じさせるのに対し、開発した圧力分配測定装置は平均圧が測定される限界があるものの、有限要素解析は応力やひずみの分布を予測して補うのに有効である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Fuwa, W. Z. W. Hasan, H. Yamada	4. 巻 20
2. 論文標題 Measurement and finite element analysis of the load-dependent pressure redistribution behavior of various types of mattresses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 2050031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0219519420500311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 皮膚表面の圧迫による前腕橈側皮静脈の閉塞挙動に及ぼす静脈の除荷形状と内圧の影響に関する有限要素解析
3. 学会等名 第43回日本バイオレオロジー学会年会（誌上開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 霜出秀平
2. 発表標題 皮膚の圧迫とずれによる前腕橈側皮静脈の内腔形状の変化に関する超音波画像解析
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 ウレタンフォームマットに挿入された合成ゴム層のせん断変形特性の測定
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 真鍋誠
2. 発表標題 半円柱の押し付けによるゲル・ウレタンフォーム等4層マットの変形挙動の定量的評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霜出秀平
2. 発表標題 皮膚表面の圧迫による前腕橈側皮静脈の閉塞挙動の解析
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩月裕太郎
2. 発表標題 ブタ皮下組織のずれ変形の測定と組織の結合構造の観察
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 ブタ後ろ足皮膚表面のずれに対する軟組織各層の層内・層間のずれ変形に関する解析
3. 学会等名 第39回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩月裕太郎
2. 発表標題 ブタ後ろ足皮膚表面のずれに対する皮下組織の力学特性の同定と組織観察
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 ブタ後ろ足軟組織層の変形挙動のモデル化に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井勇貴
2. 発表標題 ゲルとウレタンフォーム層を有するマットの圧縮変形特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霜出秀平
2. 発表標題 皮膚表面の圧迫・ずれに対する前腕橈側部の皮静脈の変形の超音波計測
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 体表面のずれに対する軟組織の「滑走」を伴う変形の測定と微小血管の閉塞に関する解析
3. 学会等名 第25回バイオメカニズム・シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 フタ後ろ足皮膚表面のずれで生じる皮下組織のひずみ状態の解析
3. 学会等名 日本機械学会M&M2017材料力学カンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田宏
2. 発表標題 円柱状突起を有する円盤状デバイスで押さえたウレタンフォームマットレスの変形に関する有限要素解析
3. 学会等名 第38回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Finite element study on the correlation between the stiffness of the sacral skin and skin surface pressure at the instant of capillary closure
3. 学会等名 5th Switzerland-Japan Workshop on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塩月裕太郎
2. 発表標題 ブタ後ろ足皮膚表面のずれに対する皮下組織の力学的応答の測定
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 マキ子 (Tanaka Makiko) (80227173)	山口県立大学・看護栄養学部・教授 (25502)	
研究分担者	森田 康之 (Morita Yasuyuki) (90380534)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授 (17401)	