

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04179

研究課題名(和文)皮下の微細構造とゲルマットが体表面圧迫下のずれに対して血管閉塞を防ぐ効果の解明

研究課題名(英文) Investigation of the effect of subcutaneous microstructure and gel-like mat to prevent vascular closure against body surface pressure accompanied with shear

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：豚肩部の骨格筋に接する皮下脂肪組織では、ずれに対して浅筋膜で最も大きな変位が生じた。ゲル様材料の層を有するマットレスはウレタンフォームに比べてずれに対して小さな変形抵抗を示した。超音波診断装置を用いた前腕橈側皮静脈の閉塞挙動の解析より、皮膚表面の圧迫は静脈を容易に閉塞させたのに対し、ずれの寄与は小さい傾向が見られた。以上より、血管閉塞に及ぼすずれの影響は圧迫に比べて明らかに小さく、ずれに対するゲル様材料の褥瘡予防効果はその分だけ小さくなると推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

皮膚表面をずらしたときに皮膚と骨格筋の間に存在する皮下脂肪組織中の浅筋膜に主にずれが生じることを微細構造と関連づけて定量的に示したことは学術的意義がある。また、ゲル様材料の層はウレタンフォームのマットレスに比べてずれに対する変形抵抗が小さいものの、超音波測定では前腕橈側皮静脈は皮膚表面の圧迫に対して容易に閉塞するのに対して、ずれが閉塞に及ぼす寄与が小さいことと関連付けることにより、ずれに対するゲル様材料の層の褥瘡予防効果がその分だけ小さいことを分かりやすく示唆できた。

研究成果の概要(英文)：In the subcutaneous adipose tissue which contacts with the skeletal muscle of the porcine shoulder, the displacement occurred mainly in the superficial fascia under shear. Mattresses with a layer of gel-like material showed less deformation-resistance than urethane foam under shear. Analysis of the closure behavior of the forearm cephalic vein using ultrasonography showed that pressure on the skin surface easily closed the vein, whereas the contribution of shear tended to be small. Based on the above results, the effect of shear on venous closure is clearly smaller than that of compression, and it is speculated that the effect of gel-like material on shear in preventing pressure injury is reduced accordingly.

研究分野：生体力学

キーワード：褥瘡 皮下組織 ゲル 圧力 ずれ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 皮膚と腱・骨格筋に挟まれた皮下組織は弱い結合状態で、変位が不連続になることが予測される。弱い結合は、体表面の圧迫では組織間の力の伝達に影響しないが、ずれでは影響が現れる。皮下組織の力学特性は弾性率では説明できず、X線CT画像での皮下組織の構造や繰返しせん断負荷下の応力-ひずみ曲線は部位による違いが見られるので、微細構造と力の伝達特性との関係の解明が不可欠である。

(2) 軟部組織(皮膚、皮下組織、骨格筋)の毛細血管は圧迫で閉塞する。組織内の血流量は測定されるが、毛細血管の変形は可視化できず、有限要素解析で代用される。また、褥瘡の好発する仙骨部の体表面圧 10kPa 程度に対し、前腕の皮下静脈は同程度の体表面圧で閉塞した。外力による静脈閉塞条件は、静脈圧と周辺組織の力学特性に依存し、毛細血管の閉塞条件に代わる褥瘡発症リスクの指標として期待される。

(3) 圧迫とずれに対する褥瘡予防には、体圧分散とずれ抵抗を利用する。このうち、ずれに対する予防には、低いせん断弾性率のゲル様の材料を用いるが、合成ゴムなどのゲル様材料は圧縮に対して下に凸の応力-ひずみ関係を示し、骨突起部での体圧分散の効果はウレタンフォームほど期待できない。また、米国国家規格 ANSI/RESNASS-1:2019 では、腰部から大腿部の模型をマットレスに乗せて水平に引張り、変形抵抗を調べている。一方、人の体重・体型は様々なので、圧迫とずれを受けるゲル様材料の層の褥瘡予防効果は、圧力や測定装置の底面形状を調整して測定するのが望ましい。

2. 研究の目的

皮下組織は結合力が弱く、微細構造と力の伝達との関係の解明なしには、皮下組織・骨格筋内の血管閉塞のメカニズムを解明できない。また、ゲル層やウレタンフォーム層からなるマットに圧迫とずれが同時に加わる場合の褥瘡予防効果の評価が不足している。そこで本研究では、褥瘡の発症条件や予防効果を力学的観点から定量的に示すため、皮下組織の微細構造と力の伝達を関連付けて血管閉塞の決定因子を同定する。また、褥瘡好発部位の静脈の周辺組織に依存した閉塞条件を褥瘡発症リスクの指標として提示する。さらに、圧縮・せん断試験と運搬可能な測定装置での測定により、ゲル層の褥瘡予防効果を定量化する。

3. 研究の方法

(1) ブタ皮下脂肪組織に対する実験・解析：皮下脂肪組織の弱い結合力に関する研究について、豚ロース肉に対し、組織染色とマイクロスコープ下の圧縮・せん断試験を行い、皮下脂肪組織の微細構造と力学的挙動を関連付ける。力学試験では、脂肪細胞をズダンブラックで染色し、力の測定とともにカメラ付の実体顕微鏡で皮下脂肪組織の局所的ずれ変形を動画撮影し、運動解析ソフトウェアで2次元ひずみ解析を行った。組織学的観察では、皮下脂肪組織をエタノールで固定し、マッソン・トリクローム染色やヘマトキシリン・エオジン染色等により皮下脂肪組織の微細構造を観察した。

(2) 被験者の前腕の実験データに対する変形解析：褥瘡を発症しやすい部位の皮下組織内の静脈の閉塞に関する研究について、被験者への事前の説明と被験者からの同意および倫理委員会の承認を得て既に取得したデータについて、静脈の体表面からの深さと静脈圧を主要因子とし、体表面の圧迫とずれによる静脈の閉塞条件を調べた。その際、ソフトウェア Igor Pro の画像処理機能を用いて静脈内腔と皮膚表面の抽出を行い、ソフトウェア DippMotion の点追跡機能を用いてずれ変形における皮膚表面、静脈内腔の上下の点の運動を調べた。また、有限要素解析ソフトウェア Abaqus を用い、軟部組織の力学特性を定め、静脈の閉塞と体表面のずれに対する変形挙動のシミュレーションを行った。さらに、褥瘡発症リスクを静脈閉塞条件の観点から検討した。

(3) ゲル層付マットレス・マットに対する実験と解析：ゲル層の褥瘡予防効果に関する研究について、市販のゲル層付マットレスとマットとゲル層のないマットレスにつき、力学特性(圧縮・せん断)と褥瘡予防効果を実験とソフトウェア Abaqus を用いた有限要素解析により定量化した。実験では2種類の測定装置を用いた。一つ目の装置では、円板の中央の円孔からシャフトが突出しており、シャフトと周辺の円板に作用する力を測定できるようにした。もう一つのこれを改良した装置では、自動ステージ2台を鉛直方向と水平方向に移動させることによってマットレスに球面を押し付けてずらし、3軸力センサ3台を用いて球面全体の力ベクトルと球面上の2箇所の力ベクトルを測定できるようにした。実験によって圧縮・せん断変位と鉛直・水平方向の力の関係を調べ、圧力分配とずれ抵抗を評価した。さらに、有限要素解析で、装置とマットレスの接触面での応力集中、ゲル層の変形を調べ、実験と比較した。また、マットレスの下からクッションで支える間接法の効果をずれと関連づけて調べた。

4. 研究成果

(1) ブタ皮下脂肪組織に対する実験・解析：皮下組織の弱い結合力に関する研究について、ブタ肩ロース肉に対し、脂肪細胞をズダンブラックで染色し、力の測定とともにCCDカメラ付マイクロスコープで皮下組織の局所的ずれ変形を動画撮影して変位解析を行い、実験後、固定してシリウスレッドで染色し、顕微鏡観察を行った。また、骨格筋と皮下組織からなるブロックを圧縮負荷下と圧縮とせん断の同時負荷下でエタノール固定し、マッソン・トリクローム染色とヘマトキシリン・エオジン染色により皮下組織の微細構造を観察した。その結果、外からずれを受ける皮下組織の微視的構造において、脂肪小葉に属する脂肪細胞の動きを捉えることができた。

皮下脂肪組織にせん断変位を作用したときの豚ロース肉の脂肪組織内部の変形挙動を定量的に解析するとともに、膠原線維を染色した画像と重ねて比較した結果、浅筋膜などの膠原線維の領域で大きなずれが生じ、脂肪細胞群のせん断変形は小さいことが定量的に得られた。また、表面に付着したスプレー粒子を用いた画像相関法の変形解析でも、ずれが集中する帯状領域を確認した。

繰返しせん断変形を受ける豚ロース肉の皮下組織の1周期にわたるせん断応力とせん断ひずみとの関係に着目して、線形粘弾性モデルの一つである標準線形固体モデルを用いて応力の応答を再現した。モデルの緩和弾性係数は圧縮ひずみの大きさによらずほぼ同じで、緩和時間にはある程度違いが見られた。ひずみが大きくなるとモデルが予測する応力は実験の応力値をやや下回る傾向があるが、本モデルによって応力の応答を概ね再現できた。

(2) 被験者の前腕の実験データに対する変形解析：褥瘡発症部位の皮下組織内の静脈の閉塞の研究について、仙骨部の軟部組織の2次元平面応力状態の既存の有限要素モデルにおいて、皮下組織の弾性特性を柔らかくするとともにウレタンフォーム製マットレスの弾性特性を実験データに基づいて修正し、圧迫とずれを与えて、静脈閉塞を再現し、対象部位の褥瘡発症リスクの定量的評価を試みた。その結果、皮膚表面近くの微小血管は、マットレスによる体表面圧の増加に対しては徐々に閉塞したが、ずれに対しては閉塞する傾向は見られなかった。

前腕橈側皮静脈に着目した被験者の画像解析を5人の被験者の各2例に対して実施して、皮膚を1mm前後ずらしたときの静脈の変形挙動を調べた。4人の被験者については、皮膚に近接した静脈の上部で皮膚と同様の変位が見られ、静脈の下部では被験者によって変位が異なっていた。また、1人の被験者については静脈上部が皮膚から離れていて、静脈上部の変位は皮膚と比べて顕著に減少していた。また、皮下組織の薄い被験者と皮下組織の厚い被験者に着目し、皮膚を圧縮した場合と皮膚をずらした場合の皮膚押し込み下の前腕橈側皮静脈の変形に関する3次元有限要素解析を実施して超音波画像解析と比較した結果、静脈壁の水平方向変位は測定結果と同様の傾向を示し、着目する静脈壁上の位置によって変位量に差が生じやすかった。

(3) ゲル層付マットレス・マットに対する実験と解析：ゲル層の褥瘡予防効果の研究について、ゲル層付ウレタンフォーム製マットレス1種、ウレタンフォーム製マットレス表裏2種につき、繰返し圧縮変位と一定圧縮変位・繰返しせん断変位の条件を用意し、自動ステージで中央の球面状突出部および1段下がった周辺の円板面をマットレスに押し付けてずらし、小型3軸力センサで球面状突出部の力を測定し、6軸力センサで周辺部の力を測定し、圧力分配とずれ抵抗を評価した。その結果、ゲル層付ウレタンフォーム製マットレスがいずれについても最も優れた挙動を示した。

マットレスの褥瘡予防効果を定量的に評価する装置を改良した。装置下面は球面状で、2つの3軸測定用装置が球面の中心部鉛直方向と斜め方向の2箇所に設置され、1つの3軸力測定用装置で球面に作用するカベクトルを測定するようにした。本装置をゲル層付ウレタンフォーム製マットレス1種、ウレタンフォーム製マットレス表裏2種に対して、一定速度での圧縮変位に続いて一定圧縮変位の下で一定速度でのせん断変位を作用させ、各々の力センサに生じるカベクトルを測定した。その結果、圧縮変位に関してはマットレスカバーの張力、せん断変位に関してはカバーと装置の下面との間の摩擦が重要であることが示唆された。

上から順に厚さ6mmのポリマー層（ゲル層）と厚さ10mmのウレタンフォーム層を有する厚さ18mmの層状マットに対して直径20mmの半円筒をマットの10%だけ圧縮してから同じく10%だけずらしたところ、ポリマーは圧縮に対しては半円筒の直下で局所的に変形し、ずれに対しては広い範囲で変形し、その下のウレタン層にはほとんど変形の影響がなかった。

従来の仙骨部の2次元有限要素モデルを改良し、高反発ウレタンフォームマットレスを模したマットレスを仙骨部の皮膚に押し付けてずらし、皮膚内の微小血管の変形挙動を調べたところ、従来の類似の解析結果と同様に、仙骨部の皮膚内の微小血管はマットレスの押し付けに対しては閉塞するのに対して、ずれに対しては血管の主軸が傾くだけで閉塞しなかった。

マットレスの下からクッションで支える間接法の効果を体圧変化と主観評価から検討した。小クッションの厚さはずれ量には影響するものの、主観とは異なり体圧変化に及ぼす影響は無視できるほど小さく、体圧分散効果を得るには上半身と下半身の大きさの違いを考慮して、接触面積を大きくする方が重要であるという知見を得た。

以上の結果から、皮下組織内の静脈は皮膚表面の圧迫に対して容易に閉塞するのに対し、皮膚表面のずれの影響は小さいように見受けられた。また、ゲル様材料はウレタンフォームに比べてずれに対して変形しやすく、滑り始めた後のずれ抵抗にはカバーの摩擦の寄与が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 田中マキ子 | 4. 巻 151 |
| 2. 論文標題 体圧分散寝具の開発と新しい対位変換法 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本医師会雑誌 | 6. 最初と最後の頁 1357-1360 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 山田 宏 | 4. 巻 70 |
| 2. 論文標題 褥瘡の発症・予防に関わる力学的因子の評価 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 非破壊検査 | 6. 最初と最後の頁 158-164 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田宏, 中山夢仁 |
| 2. 発表標題 豚ロース皮下脂肪組織片の一定圧縮変位・繰返しせん断変位下での粘弾性応答 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田宏, 田上友貴, 霜出秀平 |
| 2. 発表標題 皮膚押込み下の前腕橈側皮静脈の変形に関する三次元有限要素解析と超音波画像解析との比較 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第34回バイオエンジニアリング講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田上友貴, 霜出秀平, 田中マキ子, 山田宏 |
| 2. 発表標題 皮膚表面の圧縮変位による前腕橈側皮静脈の閉塞に及ぼす静脈圧の影響 (超音波画像と力の測定データの解析) |
| 3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオフロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田宏, 石井和希 |
| 2. 発表標題 マットレスの力学特性評価のための球面状押付面及びその2つの局所表面領域の3軸力測定装置の開発 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田宏, 田上友貴 |
| 2. 発表標題 皮膚のずれに対する皮下組織内の前腕橈側皮静脈の変形に関する有限要素解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第35回バイオエンジニアリング講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Yamada, Y. Tanoue, S. Shimoide, Y. Morita |
| 2. 発表標題 Analyses of shear deformations of the forearm soft tissue with an embedded cephalic vein and a mat with layered polymer and polyurethane foam |
| 3. 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Yamada, M. Tanaka |
| 2. 発表標題 A microvessel near the sacral skin surface is closed by pressure but not shear of a polyurethane foam mattress: a plane-stress finite-element model study |
| 3. 学会等名 17th International Symposium on Computer Methods on Biomechanics and Biomedical Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田宏, 石井和希 |
| 2. 発表標題 球面状突出部と円盤状周辺部を有する3軸力測定装置による3種類のマットレスの圧力分配とずれ抵抗の評価 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオエンジニアリング講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田宏, 中山夢仁, 森田康之, 自見至郎 |
| 2. 発表標題 豚ロース肉を用いた圧縮・せん断を受ける皮下組織の変形測定と染色組織構造の顕微鏡観察 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石井和希, 山田宏 |
| 2. 発表標題 3軸力測定装置を押しつけてずらしたときのウレタンフォーム製マットレスの力学的応答に及ぼすゲル層の影響に関する有限要素解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田宏, 中山夢仁, 自見至郎 |
| 2. 発表標題 豚口ース皮下脂肪組織の構造とそのせん断下での不連続変位の微視的觀察 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田上友貴, 山田宏 |
| 2. 発表標題 皮膚表面押込み変位量と前腕橈側皮静脈の変形との関係に関する超音波画像解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会・講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田 宏, 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 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田 宏, 真鍋 誠 |
| 2. 発表標題 ゲル様マットに対する3軸力センサを用いた圧縮・ずれ負荷試験装置の開発 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田 宏, 霜出 秀平, 田中 マキ子 |
| 2. 発表標題 前腕皮膚圧迫・ずれ下の橈側皮静脈の超音波測定に対する画像処理変形解析 |
| 3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中山 夢仁, 山田 宏 |
| 2. 発表標題 せん断変形を受けたブタ脂肪組織の脂肪細胞群に対する顕微鏡下での変位測定 |
| 3. 学会等名 第30回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井 和希, 山田 宏 |
| 2. 発表標題 球面状突出部と円盤状周辺部を有する3軸力測定装置によるゲル層付マットレスの圧力分配とずれ抵抗の測定 |
| 3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 田中マキ子 | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 照林社 | 5. 総ページ数 161 |
| 3. 書名 新まるわかり褥瘡ケアー最新ガイドライン DESIGN-R2020に基づくー | |

| | |
|------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 田中マキ子 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 メヂカルフレンド社 | 5. 総ページ数 28 |
| 3. 書名 老年看護技術 第4版(泉キヨ子他編著) | |

〔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 | 自見 至郎 (Jimi Shiro) (30226360) | 福岡大学・公私立大学の部局等・研究特任教授 (37111) | |
| 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) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|