

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K02343

研究課題名（和文）心電図検出用電極の最適化と次世代衣料型スマート装具の提案

研究課題名（英文）Suggestion of Smart Clothing Integrating Auxetic Structured Electrode for Next Generation

研究代表者

金井 博幸（Kanai, Hiroyuki）

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：60362109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：私たちの研究グループは、これまでに「スマート衣料、および熱中症予測・管理システム」に関する研究に取り組んできた。

本研究では、現在市場に流通するスマート衣料の心拍検出性能が、熱中症予測を高精度で行うための要求レベルに達していないという技術課題を解決するために、体表面電位図の計測を通じて、導電性繊維で構成する電極部のウェア上における最適配置の提案を行った。

さらに、身体動作に伴うウェアの引張伸長変形によって電極が垂直方向（皮膚方向）に拡張する機構をもつ Auxetic構造体を開発し、これをウェアに実装した次世代スマートウェアの提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

仕事に熱中症を罹患するリスクが高い職種には、屋外作業を伴う建設業や運送業がある。これらの業界では、スマート衣料等を介した生体情報のモニタリングを通じて、熱中症リスクを通知するシステムが積極的に導入されている。一方、動作中において心拍検出率が70%に達せずに熱中症リスクを予測し得る心拍検出性能の要求レベルを満たさないケースが散見されること、圧迫感の着心地の改善に対する要求が多いこと等の課題が見出されている。

本研究の成果は、衣服による締め付け力（フープテンション）を低減して圧迫感を低下させつつ、心拍検出率の低下を防ぐことを目指して電極部の構造と配置の最適設計法について検討し、効果検証を行った。

研究成果の概要（英文）：Our research group has been working on research on "smart clothing and heat stroke prediction and its management system". The technical problem that the heart rate detection performance of the smart clothing currently on the market has not reached the required level for highly accurate prediction of heat stroke is pointed out.

In this study, we investigated the optimal placement of the electrodes which are made of conductive fabric on the garment, through the measurement of the body surface electrogram. Moreover, we developed an Auxetic structural electrode with a mechanism that expands in the vertical direction (skin direction) by stretching the wear due to wearer's body motion. The implementation of the electrode into clothing was proposed as a next-generation smart wear.

研究分野：感覚計測工学、繊維工学

キーワード：スマートテキスタイル 生理的機能計測 心電図 装具 動作適応型電極 オーセチック構造 接触圧力

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の総務省の報告によれば、平成29年5月から8月までの4か月間において熱中症による救急搬送者数は50,886人と前年の同時期に比較して4,486人の増加となっている。熱中症が発生する環境は住居が全件数の37.0%で最大であるが、仕事場においても12.7%と高い発生率が報告されている。仕事に熱中症を罹患するリスクが高い職種には、屋外作業をとまなう建設業や運送業があげられる。

この社会的課題に対して、当研究室では他機関と産学連携プラットフォームを構築して熱中症リスクを予測するスマート衣料、および熱中症予測・管理システムに関する研究に取り組んできた。一連の研究は既に実用段階にあり、現在も実証試験を重ねているが、その中でスマート衣料については、特に動作中において心拍検出率が70%に達せずに熱中症リスクを予測し得る心拍検出性能の要求レベルを満たさないケースが散見されること、圧迫感の着心地の改善に対する要求が多いこと等の課題が見出されている。ここで心拍信号の検出性能の不足は、スマート衣料が本来備えなければならない最も基本的な機能である。しかし、当該研究室が別途行った市場に流通するスマート衣料を対象とする性能検証では、いずれのスマート衣料も動作中の心拍検出性能が要求レベルを満たしていないことが確認されている。

## 2. 研究の目的

上述の技術課題に対して実効的かつ有効な解を得るためには、「生理学的観点から心拍検出用電極の配置を最適化すること」、ならびに「従来の被服構成法によらない簡便かつ自由度の高い次世代衣料型スマート装具を提案すること」の2点の学際的問いに対して、科学的なエビデンスに基づく検討が必要となる。しかし、これまでのスマート衣料に関する研究報告は、開発事例に偏ったものが多く、電極配置の最適化を図る上で有効となる基礎的知見が十分に蓄積されているとは言えない。

今後、医療分野におけるスマート衣料の一層の展開が期待されることから、心拍検出性能の向上にとどまらず、心電図計測機能の実装も期待されている。このためにはスマート衣料の電極部が体表面に安定的に接触し、動作中でも接触状態が安定して維持できることが必要になる。そこで本課題では、体表面電位図の計測、ならびに動作適応性の高い電極構造の提案と試作を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では2つの技術的観点から研究テーマに取り組んだ。1つ目は、(1)体表面電位図の計測に基づく電極構成位置の最適化である。2つ目は(2)動作適応性の高い電極構造を提案することである。

### (1) 体表面電位図の計測に基づく電極構成位置の最適化

体表面電位の計測を可能にするため、最大で体幹部60点から導出した心電図信号を記録できる装置を作製した。この装置は、第Ⅱ誘導法による手足首からの電位誘導から不関電極を仮定し、これを基準電位とする。この基準電位に対して最大で体幹部60点の個々の観測点から単極誘導される電位を記録できる。さらに、体表面電位計測に伴う実験者、ならびに被験者の疲労軽減を図り、計測効率を向上させるため、6点を単一ブロックとして、この6点から出力される信号を生体計測装置で同時に増幅・記録できるように構成した。これにより一定時間（ $t$  秒間）経過後に、隣接する単一ブロックに自動的に切り替えて増幅・記録が継続され、 $10 \times t$  秒間で全点の心電図信号の記録が可能になった。この装置を使って、20代男性5名に協力を依頼し、立位および仰臥位姿勢において体表面電位図の計測を実施した。

### (2) 動作適応性の高い電極構造の提案

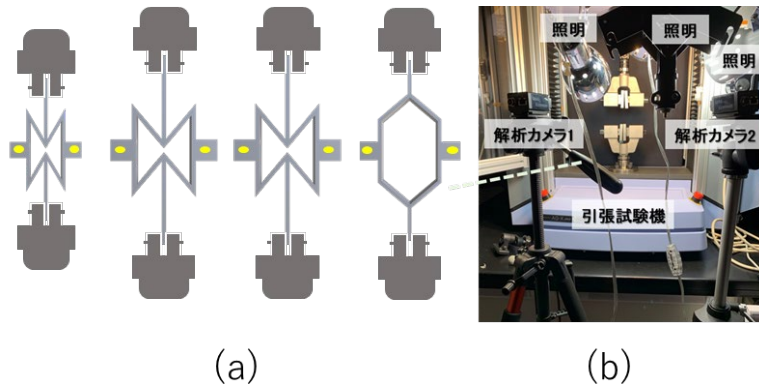
光造形方式の3Dプリンタを使用し、ネガティブポアソン比を有する構造体として知られるリェントラント六角形を作製した。高い可塑性を示す3種類の紫外線硬化樹脂を材料として、一次硬化、洗浄、2次硬化して成形した。

ウェアへの実装のために模擬電極の厚さを低減する必要があった。そこで、Auxetic 構造体の仕様見直しを行った。具体的には、①砂時計型の Auxetic 構造体に対して、ノズル（オリフィス）部分から上側を切断し、下側のみ形状とする改良を行った。また、ネガティブポアソン比は構造にのみ依存し、材料には依存しないことが判明したため、伸長に伴って発生する圧力の増加を目的として、高硬度な紫外線硬化材料を採用した。これにより3Dプリンタの造形精度を向上で

きた。結果として改良 Auxetic 構造体の厚さを、初期試作品の約 1/2 で成形可能とした。

改良 Auxetic 構造体を衣料用副資材（ホック）を使って装具に実装した。試作装具を腕部に装着し、肘関節屈曲運動時の上腕二頭筋の収縮時に筋腹付近で生じる周長変化を利用して、上腕二頭筋に作用する衣服圧の測定を行った。最終的に、ウェア型の胸部装着用装具を作製し、身体動作中の

S(心電図成分)/N(動作によって混入するノイズ成分)の割合指標を用いて模擬電極部の動作適応性能を評価した。



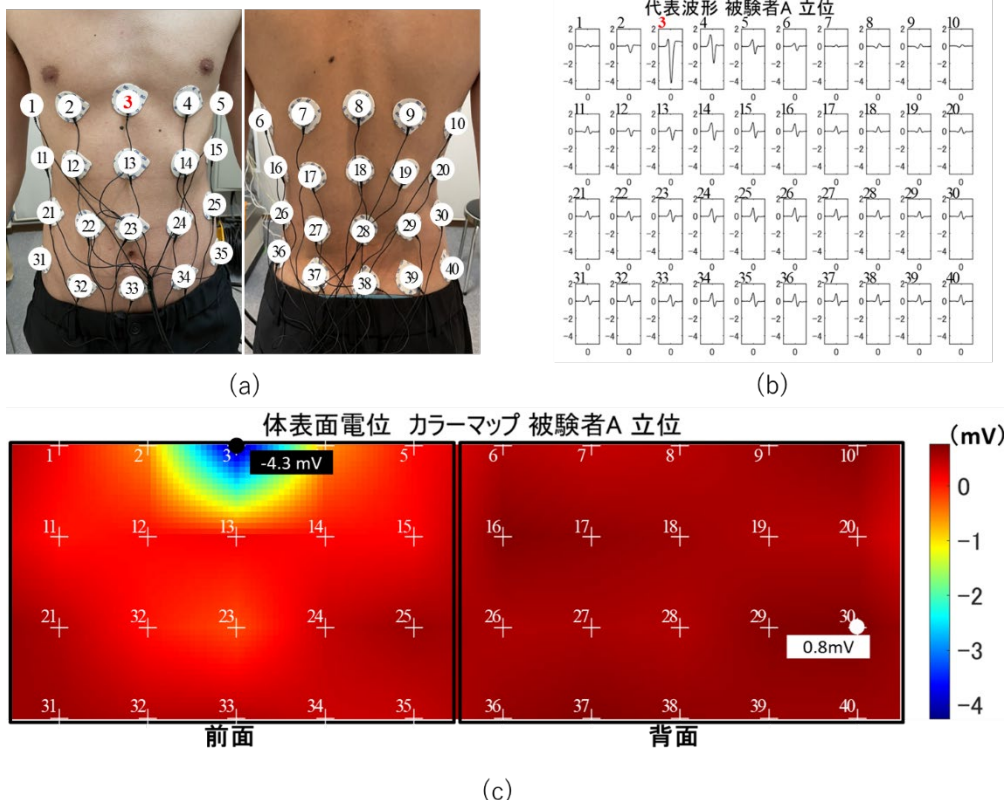
(a) リエントラント六角形の変形挙動, (b) ネガティブポアソン比の計測の様子

図 1 Auxetic 構造体の試作と伸長特性の評価

#### 4. 研究成果

##### (1) 体表面電位図の計測に基づく電極構成位置の最適化

体表面電位図から、電位の大きさに色彩情報に対応させて時間経過に伴って変化する時系列電位分布カラーマップを作製し、身体体幹部で観測される電位分布の変化を可視化した。これらの結果に基づき、心電図モニタリングウェアを設計する際の最適な電極位置として、陽極、および陰極の候補位置を特定した。



(a) 電極配置位置, (b) 計測位置毎の代表波形, (c) 活動電位カラーマップ

図 2 体表面電位図の計測と結果

## (2) 動作適応性の高い電極構造の提案

引張試験機を用いてリエントラント六角形構造体を一軸引張方向に対する直行方向の伸長量の評価した。なお、測定は2台の画像センサを用いたDLT法を適用した。試作リエントラント六角形の一軸引張方向に対する直行方向の伸長量は、理論値の70%に相当した。また、この伸長変形は材料に依存せず構造に起因した変形であることがわかった。これによって、試作したリエントラント六角形は、ネガティブポアソン比を有することがわかった。

続いて、これらのリエントラント六角構造体を組み込んだ模擬電極を試作し、電極全体を一軸伸長（衣服に組み込んだことを想定すると周方向に伸長）させた際、これと直行する方向（衣服に組み込んだことを想定すると衣服内空隙方向）の伸長変形が生じるが、この伸長変形に起因して作用する圧力値を計測した。なお、計測にはエアバック式衣服圧計測機を用いた。垂直方向に18mmの伸長変形が生じた時に作用する圧力の大きさは4.27kPaとなることがわかった。このことから、身体動作による衣服の伸長変形に起因して、電極部が皮膚を押下する特性（すなわち、押下性）を発現できることがわかった。この模擬電極をウェアに組み込むことで、身体動作時に皮膚と電極部が接触し、滑走を抑制する効果が期待できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroyuki Kanai, Kentaro Ogawa, Tetsu Sasagawa, Kiyohiro Shibata	4. 巻 91
2. 論文標題 Influence of the mechanical stretch property of fabrics on the wear comfort of men's suit pants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Textile Research Journal	6. 最初と最後の頁 2771-2785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/00405175211019131	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 -

1. 著者名 Hiroyuki Kanai, Kentaro Ogawa, Tetsu Sasagawa, Kiyohiro Shibata, Kei Kawauchi	4. 巻 77
2. 論文標題 Development of Kinematic Soft Dummy and Application on Clothing Pressure Measurement of Men's Suit Pants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fiber Science and Technology	6. 最初と最後の頁 274-288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2115/fiberst.2021-0031	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 -

1. 著者名 金井博幸	4. 巻 77
2. 論文標題 テキスタイル製品の快適性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 繊維学会誌	6. 最初と最後の頁 472-475
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 金井博幸	4. 巻 62
2. 論文標題 感覚計測をつかって着心地を数値化する技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本試験機工業会誌	6. 最初と最後の頁 7-9
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 亀谷英杏, 大住 晏陽, 金井 博幸, 若月 薫, 森川 英明	4. 巻 22
2. 論文標題 救急隊員の活動時の動作解析に基づく新たな活動服下衣の設計とその効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本感性工学会論文誌	6. 最初と最後の頁 31-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5057/jjske.TJSKE-D-22-00027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 3件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 堀越友凱, 金井博幸, 松雪遼, 荒巻公一, 藤尾宜範, 外山龍二
2. 発表標題 心電図モニタリングウェアの圧迫感低減と 検出性能向上に関する研究
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会 2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本裕貴, 鈴木風春, 金井博幸
2. 発表標題 ネガティブポアソン比を持つ Auxetic 構造の作製と ECG センサへの応用
3. 学会等名 日本繊維機械学会 第74回年次大会 研究発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木風春, 森本裕貴, 金井博幸
2. 発表標題 脳波および眼電図計測のためのヘッドマウント型装具に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本繊維機械学会 第74回年次大会 研究発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻田真奈, 金井博幸, 笹川哲, 柴田清弘
2. 発表標題 動的拳動下肢型ダミーを活用したスラックスの 快適性評価法に関する研究
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会 2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北澤将成, 丸 弘樹, 金井博幸
2. 発表標題 腹巻型心電図モニタリングウェアにおける心拍検出精度向上を目標とした電極配置の最適化
3. 学会等名 日本繊維機械学会 第75回年次大会 研究発表論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹川 哲, 櫻田真奈, 丸 弘樹, 金井博幸
2. 発表標題 動的拳動下肢型ダミーを用いたスラックスの運動機能的着心地評価方法の検討
3. 学会等名 日本繊維機械学会 第75回年次大会 研究発表論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kanai
2. 発表標題 Design and Evaluation of Clothing Comfort for Men's Suit
3. 学会等名 The 16th Asian Textile Conference (ATC-16) (招待講演) (国際学会) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Horiba
2. 発表標題 Evaluation of garment motion comfort using clothing pressure measurement and musculoskeletal simulation
3. 学会等名 The 16th Asian Textile Conference (ATC-16) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀谷英杏, 大住晏陽, 金井博幸, 若月薫, 森川英明
2. 発表標題 救急隊員の活動時の動作解析に基づく新たな活動服下衣の設計とその効果
3. 学会等名 第24回感性工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Morimoto, Hiroki Maru, Hiroyuki Kanai
2. 発表標題 Suggestion for Division of Signal / Noise Component Detected by Wearable ECG Sensor
3. 学会等名 49th Textile Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 生体信号取得用衣服	発明者 金井博幸, 藤尾宜 範, 町澤李咲	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-53754	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電極位置決定方法	発明者 金井博幸, 土井与 之, 徳野禎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-104656	出願年 2021年	国内・外国の別 国内



〔取得〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------