

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12678

研究課題名(和文) 運動器症候群の予防を目的とした下肢骨格筋深部加温システムの開発

研究課題名(英文) Development of deep heating system for prevention of locomotive syndrome

研究代表者

新藤 康弘 (Shindo, Yasuhiro)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：00553017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高齢化社会で問題となっている、運動器症候群(ロコモ)の予防を目的として下肢骨格筋を非侵襲的に深部局所加温可能なシステムの開発を行った。具体的には、これまでの先行研究で培った、空胴共振器を用いた深部加温技術を応用した、全く新しい下肢骨格筋および膝関節腔内を効果的に深部加温することができる加温装置を設計した。本アプリケーションの有用性について、コンピュータシミュレーションと加温実験の両面から検討を行った。解析結果および実験結果より、本研究で提案するアプリケーションを用いることで脚の深部を集中的に加温できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高齢化社会を迎えた日本では運動器疾患が50歳以降急増しており、予備軍を含めて4700万人いるとされている。さらに世界的に長寿命化していることから、高齢者の社会活動を支えるためにも、早期に効果的な予防策を開発する必要があるといえる。高齢化社会で今後さらに問題となる中高齢者のロコモを予防可能な加温システムの開発を実現したことで、筋組織の修復機能を賦活化させ、これまでと比べてより効果的に運動器症候群の予防ができ、中高齢者の生活の質向上、社会活動長期化に大きく貢献できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a system that can non-invasively deep heat the musculoskeletal system of the lower limb to prevent locomotor syndrome, which has become a problem in an aging society. Specifically, we developed a completely new heating device that can effectively deep heat the lower limb skeletal muscles and knee joint cavity. The heating properties of this applicator was investigated by both computer simulation and heating experiments.

The analytical and experimental results confirmed that the applicator proposed in this study can be used to intensively heat the deep part of the leg.

研究分野：医用機械工学

キーワード：温熱リハビリテーション ロコモ 局所加温 空胴共振器 非侵襲

### 1. 研究開始当初の背景

ロコモティブシンドローム(運動器症候群:以下ロコモ)とは運動器の障害によって、日常的な社会生活へ支障をきたし、要介護状態やそのようになるリスクの高い状態を示している[1]。超高齢化社会となっている日本では特に、社会的生産性の高い50代以降での発生が急増しており、日本のコフォート研究によると予備軍を含め約4700万人が何らかの運動器障害を抱えていることが報告されている[1、2]。日本のみならず世界的にもロコモや変形性膝関節症による中高齢者の生活の質(QOL)の低下および社会的生産性の低下は、医学的にも経済的にも深刻な問題であり早急に解決すべき問題の一つである。

このロコモの重要な要因の一つとしてサルコペニアがある。サルコペニアとは、加齢に伴う筋力の低下および筋肉量の減少を意味している[3]。近年サルコペニアに対して温熱治療を施すことで筋肉組織内のミトコンドリアが賦活化され、筋力回復に有効であるという分子メカニズムが報告され注目されている[4]。また変形性関節症に関しても膝関節腔内を38-40程度に加温することによって、疼痛の緩和や病変進行の阻害ができることとされている。しかしながら、既存の整形外科分野で用いられているホットパック等の熱伝導による加温方式や、マイクロ波照射型加温システムでは表面組織の加温には大変優れているものの、深部組織までを加温することは困難であり、下肢の深部組織までを加温できるような装置の開発が強く望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、高齢化社会で問題となっている、運動器症候群(ロコモ)の予防を目的として下肢骨格筋を非侵襲的に深部局所加温可能なシステムを開発を行う。具体的には、これまでの先行研究で培った、空胴共振器を用いた深部加温技術を応用した、全く新しい下肢骨格筋および膝関節腔内を効果的に深部加温することができる加温装置の開発を実施し、高齢化社会で今後さらに問題となる中高齢者の「ロコモ」を予防可能な加温システムの実現することを目的とする。本研究で開発する深部加温システムを用いることで、筋組織の修復機能を賦活化させ、これまでと比べてより効果的に運動器症候群の予防ができ、中高齢者の生活の質向上、社会活動長期化に大きく貢献できると考えている。

### 3. 研究の方法

本研究では両下肢の深部組織を集中加温可能な、新しい空胴共振器アプリケーションの開発を行った。具体的には、図1に示すような空胴共振器アプリケーションを設計した。本研究で提案する空胴共振器加温システムでは、加温部位を空胴共振器に挿入し、リエントラント間隙部の高周波電流によって共振モードを発生させ、深部集中加温が可能となっている。本アプリケーションの加温特性に関して、FDTD法を用いた数値シミュレーションおよび試作加温装置を用いた筋肉等価寒天ファントムの加温実験を実施し、数値的かつ実験的検討を行った。

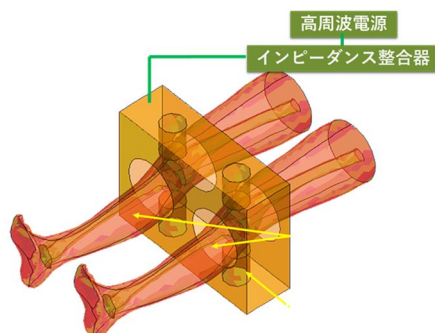


図1 下肢加温用空胴共振器加温システム

(1) 解剖学的標準人体モデルを用いた数値解析  
内臓や骨付きの解剖学的標準人体モデルの消費電力密度(SAR)分布を、FDTD法を用いて解析し、共振周波数を求めた上で温度分布連成解析を行った。

図2に内臓や骨付きの解剖学的標準人体モデルを示す。この解剖学的標準人体モデルは300以上の組織・臓器によって構成されている。この解剖学的モデルの両脚部を共振器アプリケーションに挿入し、膝部分をリエントラント間隙部に設置した。

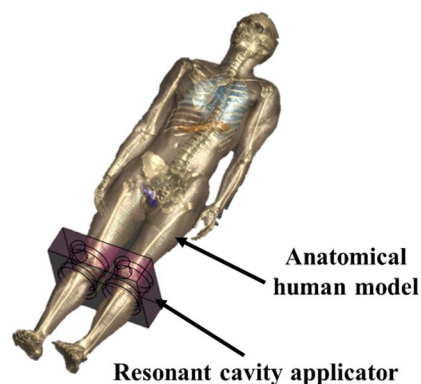


図2 解析モデル

(2) 人体脚部寒天ファントムを用いた加温実験

図3に試作した加温システムを示す。人体脚部寒天ファントムを用いて、加温実験を行った。実験方法として、空胴共振器の前後にテフロン台を置き、人体脚部形状の筋肉等価寒天ファントムをテフロン台の上に乗せ、膝部分をリエントラント間隙部に設置した。ネットワークアナライザとインピーダンス整合器を使用し共振周波数を探し出し、加温を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) FDTD 法による SAR 分布解析結果

図4は挿入した、内臓・骨付きの解剖学的標準人体モデルの矢状面における SAR 分布解析結果を示す。解析結果より、挿入した膝の深部に電磁エネルギーが集中していることを確認できる。また、膝関節の間隙部まで両脚共に電磁エネルギーが集中していることが確認できた。

また、加温目的部位以外(上半身や下腹部など)への電磁エネルギー集中がないことから、本加温システムの安全性についても数値的に示した。

解剖学的人体モデルを用いた解析を実施し、人体脚部をアプリケーション内に挿入した際の温度分布とアプリケーション周辺の電磁界漏洩についても数値解析した結果、アプリケーション周辺への電磁界漏洩が最小限であること、目的部位である両脚を同時に深部集中加温できることを確認した。

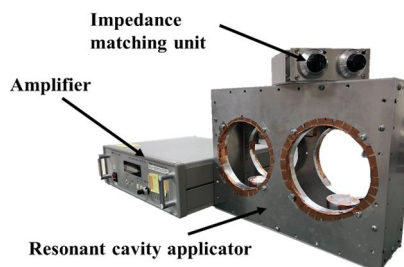
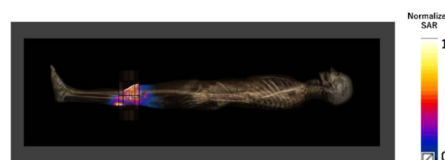
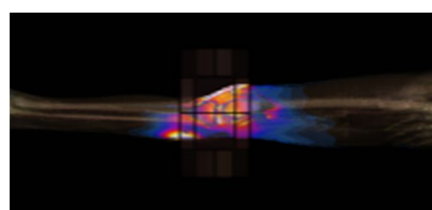


図3 試作加温装置



(a) 全体図



(b) 拡大図

図4 SAR 分布解析結果

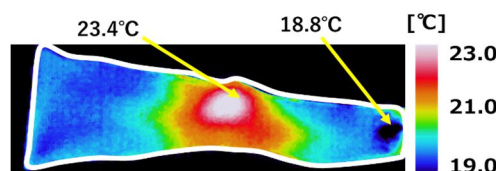
##### (2) 試作加温装置を用いた加温実験結果

図5(a)(b)はそれぞれ穴1(左脚側)、穴2(右脚側)に挿入した人体脚部形状寒天ファントムの加温直後の赤外線サーモ画像を示す。

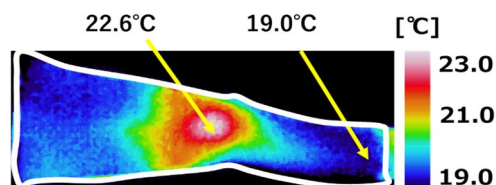
穴1の初期温度 18.8℃、最高温度 23.4℃、温度上昇 4.6℃であった。穴2の初期温度 19.0℃、最高温度 22.6℃、温度上昇 3.6℃であった。この実験結果より、両脚共に深部集中加温ができていることが確認できた。また、その温度上昇についても同程度であった。

##### (3) 研究成果のまとめ

本研究で開発したシステムはロコモティブシンドロームのみならず、膝関節深部まで加温できることから、変形性膝関節症の温熱リハビリテーション用アプリケーションとしても応用できる可能性を数値的かつ実験的に示すことができた。また、本研究課題では、当初予定に比べて研究が進み、臨床応用への可能性を高めるため脚部を曲げた状態で挿入可能な空洞共振器についても開発に着手することができた。これらの研究成果により、深部加温技術を応用した全く新しい下肢骨格筋(主に腸腰筋、大腿四頭筋群)を効果的に深部加温することができる加温装置の開発を実現し、高齢化社会で今後さらに問題となる中高齢者のロコモや変形性膝関節症を予防可能な加温システムの開発を世界に先駆けて実現することができた。また、ここで示した研究成果に関しては、本研究で得られたものの一部であり、研究成果に関しては国内外の学会において積極的に発表を行った。



(a) 左足側



(b) 右足側

図5 加温実験結果

#### 引用文献

- [1] 中村耕三、ロコモティブシンドローム、日老医誌、49、pp. 393-401、2012
- [2] 吉村典子、ロコモティブシンドロームの臨床診断値と有病率、日老医誌、52、pp.393-401、2015
- [3] Cruz-Jentoft AJ、et al. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. Age Ageing 39、pp. 412-23、2010
- [4] Y. Tamura and H. Hatta、Heat stress induces mitochondrial adaptations in skeletal muscle、J Phys Fitness Sports Med、6 (3): 151-158 (2017)

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 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 HAYASHI NANASE, KATO KAZUO, SHINDO YASUHIRO, ISEKI YUYA	4. 巻 38
2. 論文標題 Heating Characteristics of Small Rectangular Resonant Cavity Applicator with Non-invasive Temperature Measurement Function	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Thermal Medicine	6. 最初と最後の頁 51 ~ 61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3191/thermalmed.38.51	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 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Chen Liang, Yasuhiro Shindo
2. 発表標題 Development of a simultaneous heating system for both legs to treat knee osteoarthritis
3. 学会等名 The 1st Annual Meeting of BioEM（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新藤康弘
2. 発表標題 マイクロ波温熱治療装置周辺の漏洩電界の可視化と非侵襲生体内温度分布推定
3. 学会等名 日本学術会議 公開シンポジウム 第12回計算力学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梁晨, 新藤康弘
2. 発表標題 人体解剖学的モデルを用いたOA用空洞共振器アプリケーションの加温特性解析
3. 学会等名 日本生体医工学学会関東支部若手研究者発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田尾多駿人, 新藤康弘
2. 発表標題 変形性膝関節症を対象とした両脚同時加温システムの加温特性解析
3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田尾多駿人, 新藤康弘, 梁晨
2. 発表標題 膝深部温熱リハビリテーション用両脚同時加温システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新藤康弘, 加藤和夫
2. 発表標題 非侵襲温度分布計測機能を有する小形矩形空洞共振器アプリケーションの加温特性
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梁晨, 新藤康弘
2. 発表標題 矩形型空洞共振器を用いた温熱リハビリテーションシステム周辺の漏洩電界解析
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田尾多駿人, 新藤康弘, 梁晨
2. 発表標題 両脚同時加温を目的とした円筒型空洞共振器加温システムの開発
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yiqing Zhao, Yasuhiro Shindo
2. 発表標題 Development of rectangular cavity applicator for heating both legs simultaneously
3. 学会等名 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dai Onuma, Yasuhiro Shindo
2. 発表標題 RF capacitive heating system for effective thermal therapy of locomotive syndrome
3. 学会等名 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Hayashi, Y. Shindo, K. Kato
2. 発表標題 Heating characteristic of developed rectangular resonant cavity applicator with ultrasound temperature measurement system
3. 学会等名 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大沼大, 新藤康弘
2. 発表標題 筋組織の運動効果上昇を目的としたRF誘電加温システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙一清, 新藤康弘
2. 発表標題 運動器症候群のための深部筋組織加温システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research map <a href="https://researchmap.jp/y-shindo">https://researchmap.jp/y-shindo</a>
---

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	加藤 和夫  (KATO KAZUO)  (80115104)	明治大学・理工学部・専任教授    (32682)	

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