

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03553

研究課題名(和文) 無侵襲温度計測機能を有する非接触型立体共振器アプリケーションの開発

研究課題名(英文) Development of non-contact applicator using rectangular resonant cavity with non-invasive temperature measurement function

研究代表者

加藤 和夫 (Kato, Kazuo)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：80115104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、効果的な温熱治療システムの構築を目的として、(1)非接触型立体共振器アプリケーションの開発、(2)加温前後の超音波画像を用いた非侵襲温度分布計測システムの開発、(3)開発された上記の試作システムによる、寒天および模擬生体ファントムの加温実験、(4)3次元有限要素法による加温時の温度分布シミュレーションを実施した。その結果、被加温体に接触することなく、深部加温とその加温位置制御が可能であり、その際の3次元温度分布を非侵襲的に画像化計測できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ここで構築されたアプリケーションシステムは、(1)生体の浅部から深部に発生した腫瘍や患部を非接触状態で加温治療できる可能性、且つ(2)加温時の温度分布を非侵襲的に画像化計測できる可能性を有している。さらに、従来の接触型加温システムおよびMRIを用いた温度計測システムに比べて、(3)深部加温特性と温度計測手法に優れている、(4)小型軽量であるため持ち運びが可能、(5)低コスト、(6)簡便な操作性、などの優位点を有している。これらのシステム開発では、独創的な手法が生かされており学術的意義が大きい。さらに実用化されることによって、飛躍的な治療効果が期待されるため、社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, for the purpose of constructing an effective thermal treatment system, (1) development of a non-contact three-dimensional resonant cavity applicator, (2) a non-invasive temperature distribution measurement system using ultrasound images before and after heating, (3) Heating experiments of agar and simulated biological phantoms by the developed prototype systems, and (4) temperature simulations at the time of heating by the 3-D FEM were carried out.

As a result, it was shown that deep heating and its heating position control are possible without contacting the heated body, and the possibility of non-invasively imaging and measuring the 3-D temperature distribution at that time was shown.

研究分野：伝熱工学、画像処理工学、医用工学

キーワード：空洞共振器アプリケーション 非侵襲深部加温 無侵襲温度計測 超音波温度計測 ハイパーサーミア 深部癌 変形性膝関節症

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波ハイパーサーミアは、副作用の少ない癌の温熱治療法として注目されており、これまでに種々の電磁波加温方式が提案されているが、脂肪層の高温化、目的部位以外での異常加温、疼痛などの問題点が多く、未だに決定的な装置の開発には至っていないのが現状である。このような問題に対し、著者は、これまでにマイクロ波の分野でよく知られている円筒形状の空洞共振器を応用した非接触型の加温装置を提案している。有限要素法によるコンピュータシミュレーションおよびこのシミュレーション結果に基づく加温システムを試作し、寒天ファントムおよび動物の加温実験を通して、その有効性を実証してきた。また、この加温方式を応用した小型空洞共振器加温システムを開発し、変形性膝関節症の臨床研究を開始している、しかしながら、これらの空洞共振器加温システムでは、円筒型の空洞共振器を使用していたため、例えば人体腹部の深部腫瘍を非接触状態で加温しようとした場合、あるいは変形性膝関節症の電磁波温熱治療に際して、空洞共振器内に収まっている目的部位以外の領域をも加温されてしまう危険性が指摘されていた[1]。さらに、臨床加温時の温度分布計測に関しては、人体に負担の少ない無侵襲的な手法は、普及しておらず治療効果の向上の面からも熱望されていた。

### 2. 研究の目的

円筒型空洞共振器の欠点を克服するために、新たな矩形形状立体空洞共振器アプリケーションを開発し、さらに臨床で普及している超音波画像から無侵襲的に三次元温度計測する手法を開発する。具体的には、加温時の体内温度分布を超音波画像から自動計測しつつ、生体に傷を付けることのない「無侵襲温度計測機能を有する非接触型立体共振器アプリケーション」を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 矩形空洞共振器アプリケーション

図1に本研究で試作開発した矩形空洞共振器およびパワーアンプを示す。被加温体の形状に応じて、正面パネルの変更が可能である。さらに、軽量コンパクトであるため、容易に移動可能である。本矩形空洞共振器の寸法は、 $700 \times 600 \times (230 \pm 30)$  mm である。空洞共振器内には、加温に要する電力を供給する必要がある。これに使用するパワーアンプの仕様は、最大加温電力：150W、周波数帯：200~550MHz、自動共振周波数探索機能および自動インピーダンス整合機能を有している。

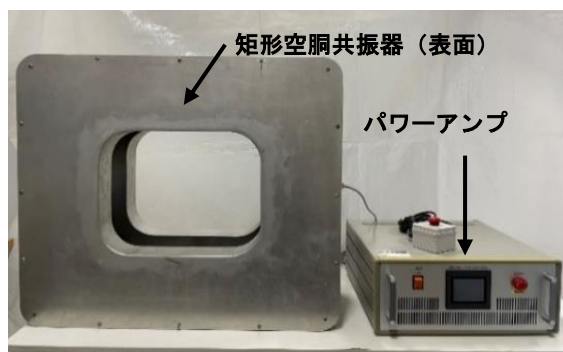


図1 矩形空洞共振器およびパワーアンプ

図2は、コンピュータ制御により加温前後の超音波画像を撮像するための機構である。電動スライダー先端部に装着した超音波プローブを共振器側面の開口窓から自動的に入れ入れ可能な機能を有している。

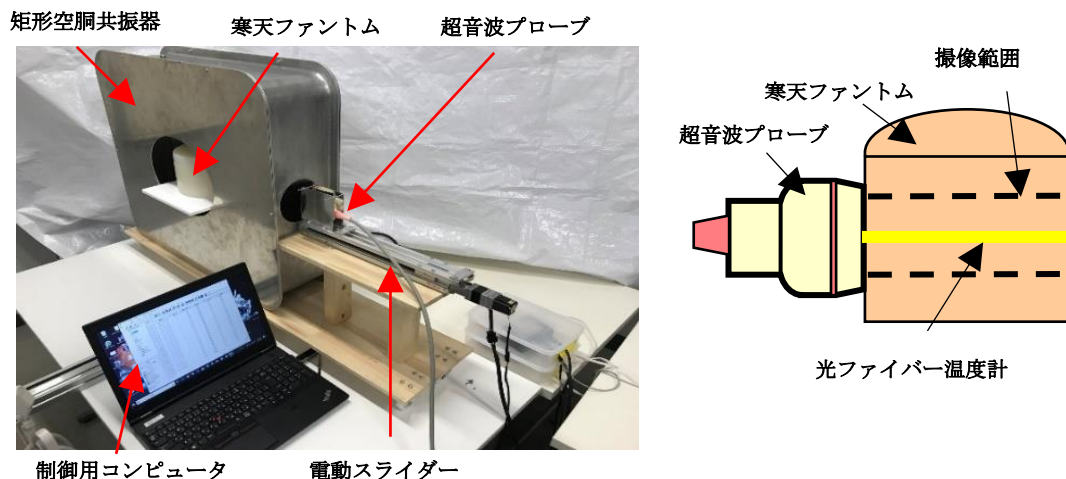


図2 超音波画像撮像システム

(2) 無侵襲温度計測のためのアルゴリズム

加温時の温度上昇  $\delta T$  は、加温前後における超音波画像の変位量を ( $\Delta d$ ) とすれば、次式で表せる [2]。

$$\delta T(z) = k \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\Delta d)$$

このアルゴリズムの詳細については、紙面の都合上、省略するが、加温前後 (1 対) の超音波画像を入力し、テンプレートマッチング、サブピクセル処理、各種のフィルタ処理などを施して画像変位量 ( $\Delta d$ ) の微分値を求め、これに種々の被加温体組織に特有な熱定数  $k$  を乗じることにより、加温時の温度上昇値  $\delta T$  を求めることができる。

4. 研究成果

(1) 寒天ファントムを用いた加温実験結果

図 3 は、寒天ファントム (直径: 18cm、高さ: 12cm) の加温実験結果である。図 (a) は、加温終了直後のファントム中央切断面における赤外線サーモ画像である。この図から寒天中央部が非接触状態で局所的に加温されていることが分かる。図 (b) は、寒天を切断することなく、無侵襲的に撮像した超音波画像から本手法により計測した図 (a) に対応した位置での温度分布である。すなわち、図 (b) から図 (a) と同様に寒天中央部が局所加温されていることが確認できる。

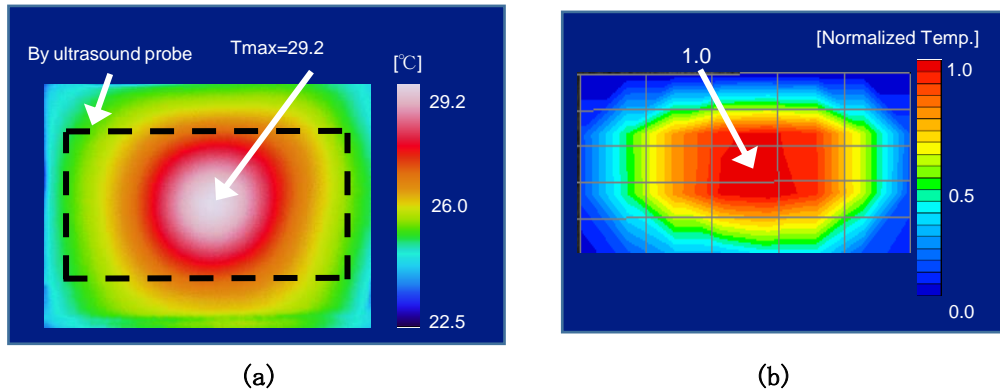


図 3 温度分布計測結果 (a:侵襲的、b:無侵襲的)

図 4 は、赤外線サーモカメラ、光ファイバー温度計および超音波画像を応用した温度計測手法の精度を比較した結果である。この図 4 から、本手法による無侵襲温度計測結果は、誤差  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  程度であることが確認できる。なお加温電力: 50W、加温時間: 15 分であった。

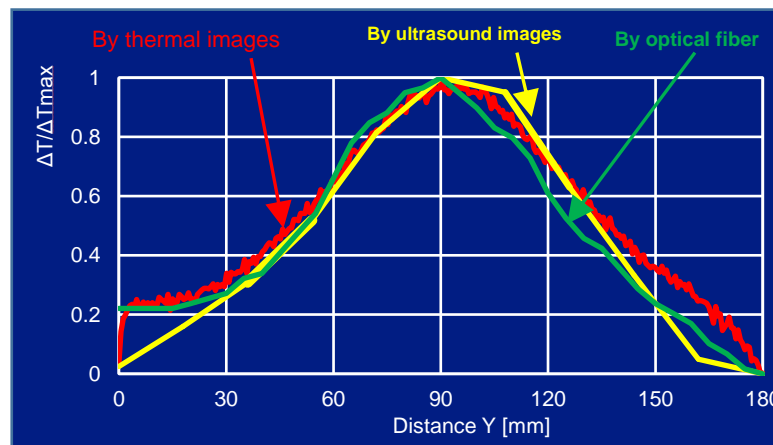


図 4 温度計測結果の比較

(2) 精肉および骨で構成した模擬生体組織の加温結果

生体組織は均一ではなく、異なる電気的および熱的性質を有している。ここでは脂肪組織が混在する豚精肉、骨、空気層で構成した模擬生体組織の加温結果を図 5 に示す。図 5 中に示す様に、精肉を重ねた図 b、中央部に鶏骨を設置し、本アプリケーションによる加温直後の温度分布を赤外線サーモ画像により観測した。図中 a. ~c. に示すとおり、上述の寒天ファントム加温結果と同様に中央部 (4 枚目) において局所的に加温されていることが確認できる。

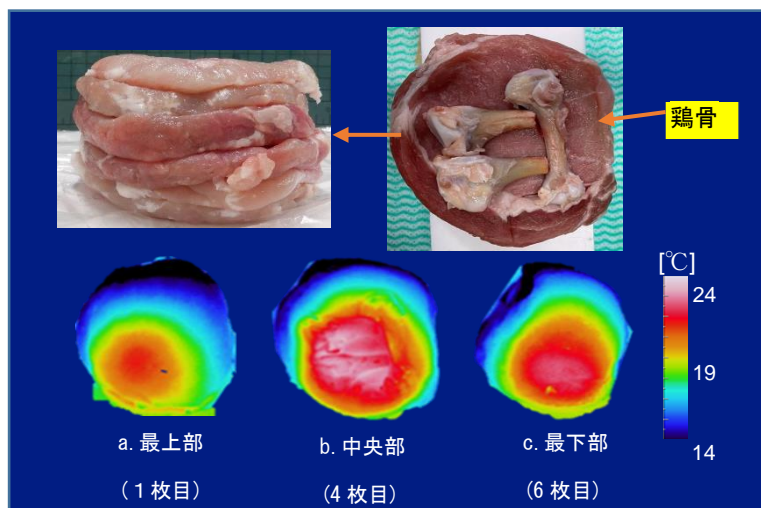


図5. 模擬生体組織（精肉モデル）の加温結果

(3) 人体模擬膝関節加温時の三次元温度分布

変形性膝関節症の温熱治療に対しても電磁波加温療法が有効であることが確認されている[3]。ここでは、これを模擬した加温実験を試みた。具体的には、人体の膝関節部に対応する寒天ファントムを作成し、本研究で構築した矩形空胴共振器加温および超音波画像から求めた温度上昇値の計測を実施した結果、図6. に示すように、複数の二次元温度分布図を重ね合わせることにより、加温部位での三次元温度分布を把握できることが確認できる。この無侵襲三次元温度分布計測手法の応用例として、HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) 治療時の温度分布計測結果についても報告している[4]。

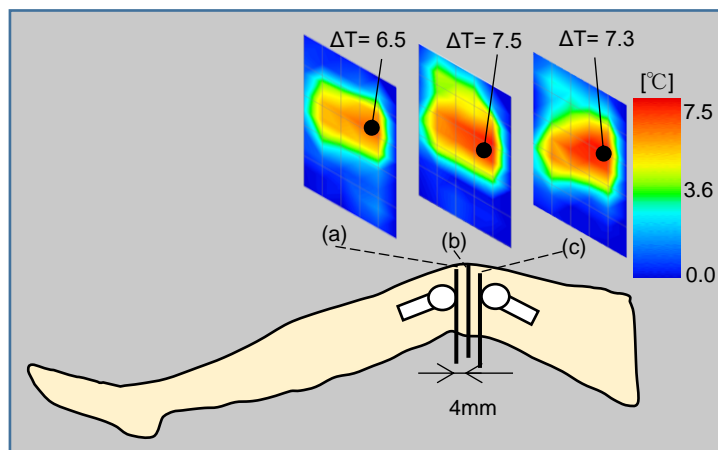


図6. 模擬膝関節の温熱治療時における三次元温度分布

<引用文献>

- [1] Ichishima Y., Shindo Y., Iseki Y., Kato K.: Heating characteristics of developed rectangular resonant cavity applicator for non-contact hyperthermia treatments, *Thermal Med*,35,2019,1-11 (Japanese)
- [2] Iseki Y., Nakamura K., Anan D., Kato K.: Development of ultrasound-guided resonant cavity applicator system -Non-invasive measurement of temperature distributions-, *Thermal Med*,31,2015,13-26 (Japanese)
- [3] Shindo Y., Watanabe K., Kodera Y., Kato K., Kurosaki M., Takahashi K.: Heating properties of resonant cavity applicator for treatment of osteoarthritis -Heating experiments using prototype applicator-, *Thermal Med*,30,2014,13-25 (Japanese)
- [4] R. Sakakibara, Y. Shindo, K. Kato, P.K. Choi and A. Takeuchi: Basic Study of 3-D Non-Invasive Measurement of Temperature Distribution using Ultrasound Images during HIFU Heating, *Advances in Science, Technology and Engineering System Journal*, 5, 2020, 131-140

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] 計3件 (うち査読付論文3件/うちオープンアクセス3件)

1. 著者名 Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, Y. ISEKI, K. KATO	4. 巻 35
2. 論文標題 Heating Characteristics of Developed Rectangular Resonant Cavity Applicator for Non-contact Hyperthermia Treatments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Thermal Medicine	6. 最初と最後の頁 1-11
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている	国際共著 -

[学会発表] 計12件 (うち国際学会12件)

1. 発表者名 N. Hayashi, Y. Shindo and 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 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA2021) (国際会議)
4. 発表年 2021年

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	新藤 康弘 (SHINDO Yasuhiro) (00553017)	東洋大学・理工学部・准教授 (32663)	
	井関 祐也 (ISEKI Yuya) (00780222)	八戸工業高等専門学校・その他部局等・ 准教授 (51101)	

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 YASUHITO ICHISHIMA, YASUHIRO SHINDO, YUYA ISEKI, KAZUO KATO	4. 巻 35
2. 論文標題 Heating Characteristics of Developed Rectangular Resonant Cavity Applicator for Non-contact Hyperthermia Treatments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Thermal Medicine	6. 最初と最後の頁 1-11
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 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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 T. Takamatsu, K. Kato, Y. Shindo, Y. Iseki
2. 発表標題 Heating characteristics of non-contact rectangular resonant cavity applicator with ultrasound temperature measurement system
3. 学会等名 41th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Sakakibara, K. Kato, P.-K. Choi, A. Takeuchi
2. 発表標題 Development of High Intensity Focused Ultrasound System with 3-D Temperature Measurement Function from Ultrasound Images
3. 学会等名 41th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Shindo, K. Kato, F. Ikuta and K. Takahashi
2. 発表標題 Validation of Noninvasive Ultrasound Temperature Measurement System Through Experiments Using Resonant Cavity Applicator
3. 学会等名 41th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Takamatsu, Y. Shindo, Y. Iseki, K. Kato
2 . 発表標題 Development of Non-Contact Rectangular Resonant Cavity Applicator with 2-D Ultrasound Temperature Measurement System
3 . 学会等名 The International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications(ICEAA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Sakakibara, K. Kato, P.-K. Choi, A. Takeuchi
2 . 発表標題 Basic Study of 3-D Non-Invasive Measurement of Temperature Distributions from Ultrasound Images during HIFU Treatments
3 . 学会等名 The International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications(ICEAA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, Y. ISEKI, K. KATO
2 . 発表標題 Heating characteristics of proposed applicator using rectangular resonant cavity for treating deep tumors without contact
3 . 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, K. KATO
2 . 発表標題 Heating characteristics of developed rectangular resonant cavity applicator
3 . 学会等名 The 7th Asian Congress of Hyperthermic Oncology (国際学会)
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	新藤 康弘  (Shindo Yasuhiro)  (00553017)	東洋大学・理工学部・准教授   (32663)	
研究 分担者	井関 祐也  (Iseki Yuya)  (00780222)	八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授   (51101)	

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