

変形性関節症のための非侵襲深部温熱治療システムの開発

Development of Noninvasive Deep-thermotherapy System for Osteoarthritis

新藤康弘*

1. はじめに

変形性関節症は、その多くが、病変の進行とともに軟骨組織の菲薄化、骨の新生増殖などが生じる、進行性の変性疾患である¹⁾。さらに、関節機能を著しく阻害するため、日常生活や社会活動が制限されてしまう。日本のコフォート研究では、推定有症有病者数が約 800 万人と推測され、その多くが中高齢者である^{2,3)}。また、変形性関節症の温存的治療法として、ヒアルロン酸製剤を関節内へ直接投与する治療が行われているが、進行した関節症に対しての効果は低いとされている³⁾。さらに症状が進行し、関節破壊が重度となってしまった場合、人工関節への置換手術等の外科的手術が必要となるため、初期段階で変性阻止に有効な温存的治療法の確立が急務である^{1,4)}。

現在、変形性関節症等の関節疾患を対象とした簡便なリハビリテーション方法として温熱療法が広く行われている^{1,6)}。変形性関節症を対象とした温熱療法では、関節深部を 36~38℃程度に温めることで、関節症による痛みの緩和および病変の進行を防ぐ効果があるとされている^{1,4)}。

特に効果的な温熱リハビリテーションを実現させるためには、図 1 に示すように、関節腔内深部の損傷した関節軟骨細胞を集中的に温めることが必要不可欠である^{1,3)}。特に、骨に挟まれた深部間隙組織を加温可能なアプリケーションの開発が求められている^{2,4)}。

現在、臨床で用いられている具体的な加温手法として、ホットパックやパラフィン浴等の、体表面から関節部を温める方法や、図 2 に示すマイクロ波照射型治療装置を用いた加温治療方法（以下、極超短波治療）が挙げられる^{1,4)}。極超短波治療は、プローブ内部に設けられたループアンテナから、関節部へ 2.45 GHz の電磁波を照射し、関節部の非接触加温を行う治療方法である。

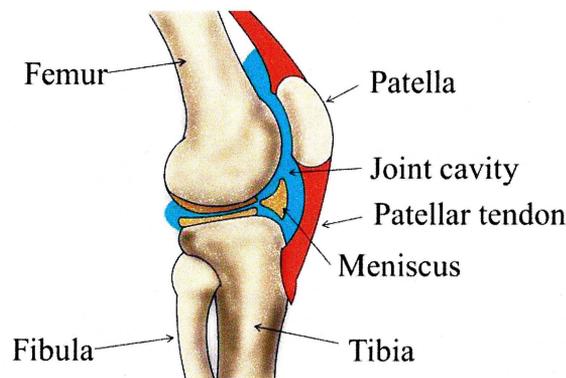


図 1 関節部概略

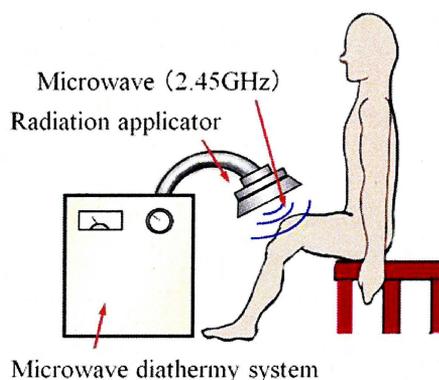


図 2 マイクロ波照射型治療装置

しかし、使用する電磁波の周波数が高くなるほど、電磁波エネルギーの吸収深さを表す表皮効果(skin depth)が小さくなるため、極超短波治療において、電磁波エネルギーが深部組織まで到達することは困難であるとされている^{2,4,6)}。本研究では、このような問題を解決するための一手法として、先行研究で培った深部加温技術⁷⁻⁹⁾を応用し、シールド付き空洞共振器アプリケーションを用いた非接触温熱リハビリテーション手法（以下、本加温方式）を提案している。本報告では、試作加温装置と臨床で用いられている極超短波治療装置とによる筋肉等価寒天ファントムを用いた加温実験結果についてそれぞれ比較検討を行う。これらの実験的検討により、本加温方式

*理工学部 機械工学科

を用いることで、変形性関節症の飛躍的な温熱治療効果の向上が期待できることを明らかにする。

2. 実験方法

図3は本研究で提案する、非接触温熱リハビリテーション手法の概念図を示している。本加温システムでは、高周波電力増幅器から空腔共振器内に設けたアンテナへ特定の周波数の高周波電力を供給することで、共振器内部に封じ込められている電磁界振幅を増大させ、周波数に応じた電磁界共振現象を発生させる⁷⁻⁹⁾。また、本研究では、目的部位以外への不要な電磁エネルギーの集中を抑えるため、シールド板と呼ばれるテーパ型円管を空腔共振器内部に設置した^{10,11)}。

図4に、シールド付き空腔共振器アプリーケータの概念図および寸法を示す。共振器外形寸法は人体膝関節の加温治療を目的とし、直径400 mm、高さ500 mmの円筒形とした。空腔共振器内部に設けた上下の内円筒(リエントランス)は直径100 mm、高さ120 mmとした。空腔共振器壁面には人体脚部を挿入するための直径160 mmの開孔部を足首側と大腿部側に二か所設けた。脚部の非加温部を覆う、シールド板は空腔共振器壁面と電氣的に接続させることで、効率的に加温エネルギーを深部組織へ集中させている^{10,11)}。加温電力および加温時間は同一条件として、加温電力50 W、加温時間10 minとした。加温電力および加温時間は、臨床で用いられている温熱リハビリテーションを参考にした^{5,6)}。また、被加温体は人体の筋肉組織の電氣的、熱的特性が等価とされている寒天ファントムを人体脚部形状で作製し、加温実験に使用した。脚部型寒天ファントムの寸法は、一般的な成人男性と同程度とし、長さ730 mm、太もも部直径180 mmである。

図5は実際に試作した加温システムの設置図である。本加温実験で使用する高周波電力増幅器(周波数可変発信器内蔵型)は周波数可変帯域200-400 MHz、最大加温電力150 Wである。また、図6に、本研究で比較対象と

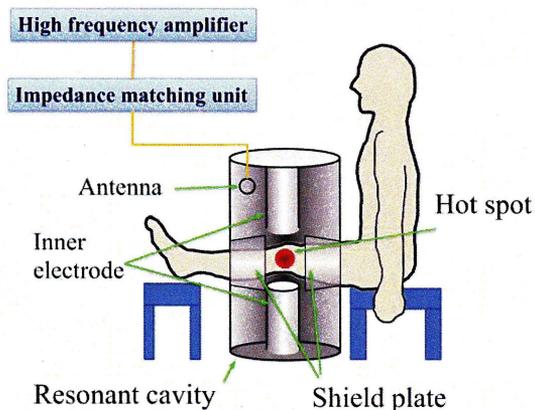


図3 空腔共振器加温システム概略

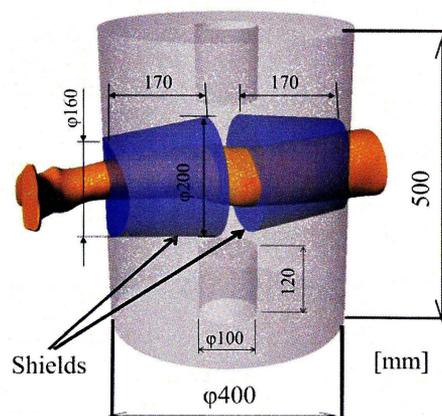


図4 空腔共振器寸法

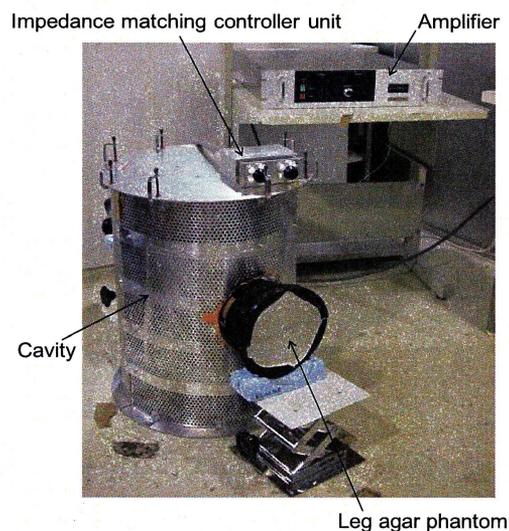


図5 試作加温システム設置図

したマイクロ波照射型治療装置の写真を示す。脚型寒天ファントムにおける膝上部10cmの位置に照射プローブを配置し加温実験を行った。照射プローブから発生する電磁波の周波数は2.45GHzである。

3. 加温実験結果

図7は、脚部型寒天ファントムを用いた、それぞれの加温システムによる加温実験直後の脚部型寒天ファントム中央断面における赤外線サーモ画像を示している。図7(a)は、極超短波治療装置を用いた際の加温実験結果である。初期温度は24.5°C、最高温度は膝頭の部分で27.9°C、その温度上昇は約3.4°Cであった。図7(b)は、本研究で提案している空洞共振器を用いた際の加温実験結果である。寒天ファントムの初期温度は25.0°C、最高温度は本研究で加温対象とした関節中央部で29.0°C、温度上昇は4.0°Cであった。また、この時の共振周波数は、339.02 MHzであった。

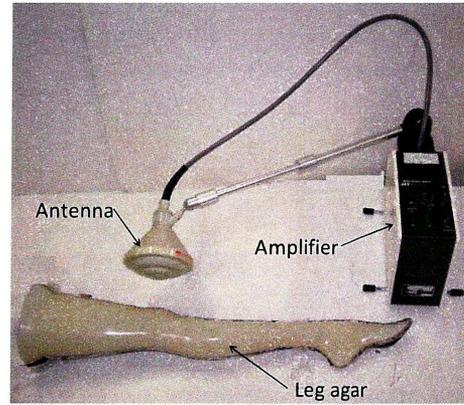
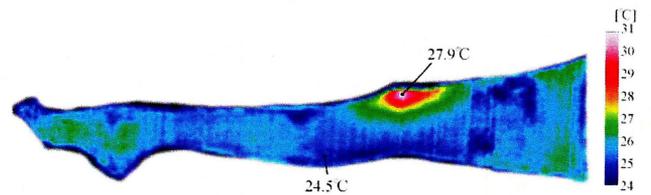
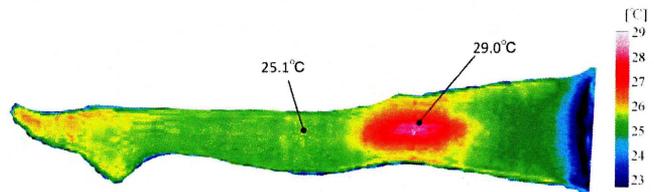


図6 極超短波治療装置



(a) 極超短波治療装置実験結果



(b) 空洞共振器加温システム実験結果

図7 寒天ファントム中央断面の熱画像

4. 考察

図7(a)に示した、極超短波治療装置を用いた実験結果から、電磁波を照射した膝頭の部分が、最も加温されていることが確認できる。これは、周辺に比べて凸になっている膝頭に対して上面から電磁波が照射され、凸部に電磁エネルギーが局所集中したためであると考えられる。

一方、図7(b)に示すように、本加温方式を用いた場合、表層面は加温されずに加温目的位置である膝部中央が最高温度に加温されていることが確認できた。

図8は、図7に示した加温実験結果の、寒天中央断面における図中Z軸上の温度プロファイルについて、式(1)を用いて正規化し、それぞれの加温特性を比較した結果である。

$$T_N = \frac{T - T_0}{T_{MAX} - T_0} \quad (1)$$

ただし、 T_N : 正規化温度、 T_0 : 初期温度(°C)、 T_{MAX} : 寒天ファントム中央断面での最高温度(°C)、 T : 寒天ファントム中央断面での温度(°C)である。ここで、正規化温

度値について、変形性関節症を対象とした温熱リハビリテーションにおいて目的とする温度帯は、36-38°Cであり、膝関節の初期温度32°Cを正規化温度値0.0、最高温度38°Cを正規化温度値1.0とすれば、36°Cのそれは0.7程度に相当する。このことから、正規化温度プロファイルにおける有効加温領域は、正規化温度値0.7以上の領域である。この観点から、それぞれの加温手法における、有効加温領域の相違について議論する。まず、極超短波治療装置の結果に着目すると、その最高温度は表層面より約10 mmの深さ位置で発生していることが確認できる。

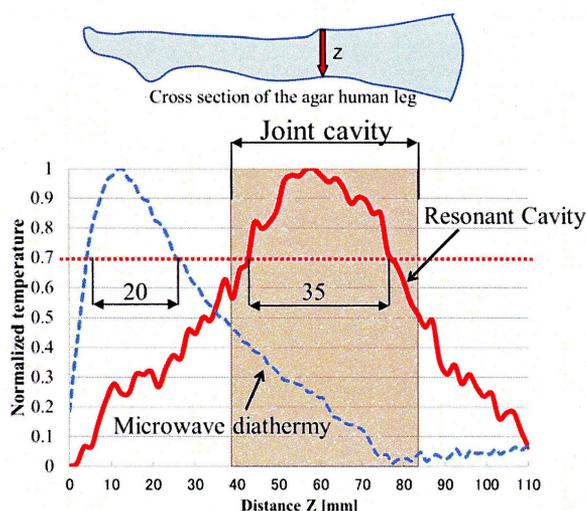


図8 極超短波治療装置

また、その有効加温領域は、約20 mmであった。円筒型寒天ファントムを用いた加温実験結果と比較して、有効加温領域が広がったのは、膝頭部分が凸形状であるため、あらゆる方向から加温エネルギーが入ったためであると考えられる。一方、空洞共振器加温システムを用いた場合には、最高温度点は深さ55 mmの位置であり、脚部型寒天ファントムの関節腔にあたる部分が最高温度に加温されていることが確認できる。また、有効加温領域は約35 mmであり、極超短波治療装置を用いた結果の約1.7倍程度であった。また、空洞共振器加温方式を用いた場合、その有効加温領域はどちらもプロファイル全長の約1/3程度であった。このことから、本加温方式を用いることで、被加温体中央1/3程度の領域を有効加温できることを明らかにした。

これらの実験結果より、空洞共振器加温システムを用いることで人体脚部のような凹凸のある被加温体に対しても、膝頭や大腿部などの凸部が異常加温されることなく、目的部位である膝関節の深部を局所的に加温できる可能性を確認できた。

5. 結言

変形性関節症の深部温熱治療を目的として、空洞共振器を用いた非接触深部加温システムを提案し、その有用性を実験的に検討した。複雑な被加温体形状による加温

特性検討を行うため、人体脚部形状の寒天ファントムを用いて加温実験を行い、極超短波治療装置との比較検討を行った。その結果、極超短波治療装置を用いた場合、脚部型寒天ファントムの膝頭にあたる部分に加温エネルギーが集中し、表層のみが加温されてしまうことが確認できた。一方、空洞共振器加温システムを用いた場合、被加温体形状に依らず、目的とする膝関節深部を集中的に加温できることを実験的に明らかにした。

今後、試作加温システムを改良し、臨床応用へ向けて生体を用いた加温実験を計画している。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費26750169の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Amimoto K.: "Physical Therapy". Igaku-Shoin Ltd., pp. 28-35, 2008. (Japanese)
- 2) Takahashi K., Tonomura H., Arai Y.: Hyperthermia for the treatment of articular cartilage with osteoarthritis. Int J Hyperthermia, 25: 661-667, 2009.
- 3) Uchida A., Nakamura T., Itoi E., Baba H.: "Standard textbook Orthopedics". Igaku-Shoin Ltd., pp. 610-645, 2012. (Japanese)
- 4) Kurasaki H., Mori S., Takahashi K.: Marked response to radio-frequency hyperthermia in a patient having back pain with no evidence of magnetic resonance imaging abnormalities. Thermal Med, 26: 131-133, 2010.
- 5) Giombini A., Giovannini V., Di Cesare A., Pacetti P., Ichinoseki-Sekine N., Shiraiishi M., Hisashi N., Nicola M.: Hyperthermia induced by microwave diathermy in the management of muscle and tendon injuries. Br Med Bull, 83: 379-396, 2007.
- 6) Jobb R.W., Piva S., Beinant L., Dacre J., Gishen P.: A one-year, randomised, placebo (saline) controlled clinical trial of 500-730 kDa sodium hyaluronate (Hyalgan) on the radiological change in osteoarthritis

- of the knee. *Int J Clin Pract*, 57: 467-474, 2003.
- 7) Matsuda J., Kato K., Saitoh Y.: The application of a re-entrant type resonant cavity applicator to deep and concentrated hyperthermia. *Jpn Hyperthermic Oncol*, 4: 111-118, 1988.
 - 8) Shindo Y., Kato K., Takahashi H., Uzuka T., Fujii Y.: Heating properties of re-entrant resonant applicator for brain tumor by electromagnetic heating modes. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2007: 3609-3612, 2007.
 - 9) Yabuhara T., Shindo Y., Kazuo K., Takahashi H., Uzuka T., Fujii Y.: Heating properties of resonant cavity applicator for brain tumor hyperthermia TM-like modes permit heat production without physical contact. *Thermal Med*, 24: 141-152, 2008.
 - 10) Shindo Y., Watanabe K., Iseki Y., Kato K., Kurosaki M., Takahashi K.: Heating properties of resonant cavity applicator for treatment of osteoarthritis - temperature distributions calculated by 3-D FEM -, *Thermal Med*, 30: 1-12, 2014. in press
 - 11) Shindo Y., Iseki Y., Yokoyama K., Arakawa J., Watanabe K., Kato K., Kubo M., Uzuka T., Takahashi H.: SAR Analysis of the improved resonant cavity applicator with electrical shield and water bolus for deep tumors by a 3-D FEM. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2012: 5679-5682, 2012.