高精度温度制御加熱装置による温熱治療とその評価*

円山重直^{*1}, 高島 茂^{*2}, 小宮敦樹^{*3}
関 隆志^{*4}, 山家智之^{*5}

Thermal Therapy and Evaluation by Precise Temperature Control Device

Shigenao MARUYAMA^{*6}, Shigeru TAKASHIMA, Atsuki KOMIYA,
Takashi SEKI and Tomoyuki YAMBE^{*6} Institute of Fluid Science, Tohoku University,
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

Moxibustion, one of thermal therapy of oriental medicines, has several problems such that temperature distribution is not uniform, treatment temperature cannot be controlled and smoke is emitted. Therefore, in order to solve these problems, we developed precise thermal heat transfer control device and applied it to clinical medicine as a substitute of conventional moxibustion. Numerical simulation of temperature distribution under the skin when abdominal region is heated is carried out. The abdominal heating controller developed in this study has the effect equal to moxibustion and can heat the treatment region of human skin uniformly. The treatment effect of the device was evaluated on clinical experiment, then it was found that these devices can treat ileus, diarrhea and so on. Optimal temperature for thermal therapy was examined about parameters of sex, BMI and age. Temperature distribution of heated abdominal region is calculated by 2-D axisymmetric model considering bio-heat generation. It is confirmed that thermal effect cannot reach the viscera from the calculation result.

Key Words: Medical Equipment, Medical Engineering, Heat Conduction, Biological Components and Systems, Bio-Heat Transfer Equation

1. 緒 言

灸治療は、中国を中心にアジア各地で何千年以上の間、漢方医学における温熱治療の手法の一つとして用いられてきた⁽¹⁾。灸治療は、ヨモギの葉の裏から取れるもぐさを皮膚上部で燃焼させることによって径穴（いわゆる「ツボ」）や患部を加熱し、様々な症状を軽減するという治療である。近年の研究によると、急性リンパ管炎の治療において、灸で患部を温熱した状態に保つと病状の改善することや、また灸には免疫機能を高め、脳の血流を促進する効果があることが提唱されている⁽²⁾。また、天枢と呼ばれる腹部の経穴に灸を施術すると小腸の働きが活発

になり機能が改善されるという報告がある⁽³⁾。

しかし、これらの効果は経験的・臨床的に知られているのみで、灸治療のような局所的な温熱が人体にどのような影響を物理的に与えるのか、灸治療によって体内の温度はどのように変化するかという定量的な検討は今までなされてきていなかった。また、灸治療では定量的な温度制御ができなため、治療における最適加熱温度や温度と治療効果の関係性に関する十分な議論がなされてこなかった。加熱部の温熱による人体内部の温度上昇測定は困難であるが、高い精度で内部温度分布を推定することは外部加熱が人体に与える影響を解明するためにも重要である。

図1は、本研究で隔塩灸⁽¹⁾を被験者の腹部に施術し、灸を取り除いた後の皮膚表面温度の時間変化を示す。図には中心部の温度が44℃以上になっている場合を示している。44℃以上の加熱ではタンパク質の変性が起こるため、高温での長時間加熱は火傷の危険性がある⁽⁴⁾。灸治療では医者経験と患者による自己申告により、施術温度を調節しているが、温度に対する感覚が鈍っている患者に対しては施術時に火傷が発生する危険性を伴う。また、隔塩灸治療

* 原稿受付 2009年3月31日。

^{*1} 正員、フェロー、東北大学流体科学研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。^{*2} 東北大学大学院工学研究科機械知能工学専攻。^{*3} 正員、東北大学流体科学研究所。^{*4} 東北大学大学院医学系研究科。^{*5} 東北大学加齢医学研究所。

E-mail: maruyama@ifs.tohoku.ac.jp

では大量の煙が発生するため、病院等における屋内での施術においては、煙の除去などの問題も生じる。

著者らは、これまでに生体伝熱の研究において、体表面を加熱・冷却してもある一定の領域に温度変化が止まること⁽⁵⁾を明らかにし、脳冷却によるてんかん診断に応用した⁽⁶⁾。また、体表面の急速冷却の解析を行い、冷却治療用クライオプローブの開発を行ってきた⁽⁷⁾。

本研究の目的は、定量的な評価が難しい従来の灸治療において、工学的な手法を用いて定量的な評価を行うことである。そこで、灸治療の代替となる高精度温度制御を可能とする腹部温熱制御機器を開発し、定量的な温熱治療を可能とした。この装置を使用して、実際に温熱治療臨床で多くの患者に対して施術し、治療効果を確認した後、本機器の施術温度を定量的に評価するために臨床実験を行い、被験者の最適加熱温度の統計を取り、統計処理を行った。さらに、灸の治療効果の伝熱工学的メカニズムを解明するために、二次元軸対称の生体伝熱モデルを用いて、腹部を加熱した際に生じる内部温度分布を評価した。さらに、腹部の物性が内部温度分布にどのように影響を与えるかの検討を行った。

Fig.1 Variations of temperature distribution with time after the moxibustion is removed

2. 腹部温熱制御機器の開発

図2に本研究で開発した腹部温熱制御機器の概略図を示す。本装置は加熱円盤と制御装置で構成されている。加熱円盤は直径 100mm の銅製である。熱伝導率の高い銅を用いることで加熱面の温度を均一にすることができる。本装置は、サーミスタを用いてヒーター出力を比例制御し、目標到達温度と昇温速度を制御することが可能である。本装置は、目標

到達温度を超えることなく加熱円盤温度を制御することができ、火傷の危険性を低減させている。本装置は加熱円盤の温度が 0.1℃の精度で表示されるが、その表示値と実際の温度の差異を検定実験し、最適加熱温度の高精度な統計をとることが可能である。

3. 腹部温熱制御機器の性能評価

本機器の性能を確認するために、目標到達温度の実現性、昇温速度と加熱後の皮膚表面温度分布の均一性を評価した。目標到達温度を 42℃に設定しときの昇温課程を図3に示す。図より、目標到達温度を超えることなく目標到達温度までほぼ正確に到達していることが確認できた。また、加熱負荷を変化させることによって、昇温速度を調節できることを確認した。

次に、本機器を被験者の腹部に施術した後、加熱円盤を取り除いた直後の皮膚表面温度分布の時間変化を図4に示す。温度測定には赤外線画像装置 (NEC/Avio 赤外線テクノロジー社製 TVS-500) を用いた。図より、 $t = 0$ s の温度分布がほぼ均一である。よって、本機器は均一な温度分布で目標到達温度まで正確に加熱できることがわかる。図1と図4を比較して、温度分布の時間変化に着目すると、本装置では温度分布がほぼ均一に保ちながら減少していることがわかる。

本装置は、この実験の後で実際の治療施術に使用され、煙が出ないこと、温度制御が容易で火傷の心配がないこと、安定した温熱治療で治療効果が大きいことにより、多くの患者に治療効果をあげている。現在では、当該病院では隔塩灸治療は本装置で行われ、従来の灸は使用されていない。

Fig.2 Schematic diagram of abdominal heating controller

Fig.3 Variation of the incremental rate of temperature on the skin surface of the subject's abdominal area, in case that the temperature of heating disk was set at 42°C

Fig.4 Variations of temperature distribution with time on the contact-type abdominal heating controller

4. 臨床実験と統計結果

灸治療では、患者が「気持ちが良い」と感じる温度が治療効果も高いとされ、この温度が最適加熱温度といわれている。従来の灸では、最適加熱温度の設定は医師と患者との対話でなされてきたが、本装置は高精度な温度制御が可能なので、あらかじめ最適加熱温度が推定できれば、より効率的な治療が可能であると考えられる。

そこで、臨床で多くの患者に対して施術し最適加熱温度と被験者の条件について統計をとった。被験者の条件については、性別、年齢、BMIについて整理した。ここで、最適加熱温度とは、患者が加熱に対して快適と感じる温度である。

図5に患者1人に対する最適加熱温度と施術回数との関係を示す。最適加熱温度の分布に着目すると、施術の度に、毎回異なる値をとっていることが確認できる。これは、施術を行う際の周囲温度や湿度、体調、気分ならびに治療による快復度に依存すると考えられる。この患者の場合、最大で 5°C の差が生じているので、その影響は大きいと考えられる。こ

のように、最適加熱温度では各個人においても差が生じるために、以後の統計結果では各被験者に対する最適加熱温度の平均値を用いた。また、被験者 1 人に対する最適加熱温度について、不確かさ区間を求め評価を行った⁽⁴⁾。複数回施術を行った被験者に対して、最適加熱温度平均値を中心とした不確かさ区間を示した。

最適加熱温度は体型に依存する可能性がある。そこで、BMI (ボディマス指数) を評価のパラメータとして検討した。BMI は、体型評価の指標であり、

$$BMI = \frac{w}{h^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 w [kg]は被験者の体重、 h [m]は身長を表す。BMI 指数の標準値は 22 であり、18.5 未満はやせ型、25 以上は肥満に分類される。図 6 に男女 17 人に対する最適加熱温度と BMI の統計結果を示す。個人に対して 1 回から 32 回の施術を行った結果を統計処理している。図 6 から明らかなように、最適加熱温度は、男女間には有意差がない。BMI との関係についても有意な傾向がない。これより、体型は最適加熱温度に影響を及ぼさないと考えられる。

次に、図 7 に男女 39 人に対して測定した最適加熱温度と年齢の関係を示す。図中には、最小二乗法により最適加熱温度と年齢の関係の相関を示した。図より、高年齢の被験者ほど、最適加熱温度が高くなっている。これは、高齢になると温度感知が鈍るために、最適加熱温度が高くなると考えられる。最小二乗法による採用式は次式で表される。

$$T_{opt} = 0.00308y + 40.3 \quad (2)$$

ここで、 y は年齢、 T_{opt} [°C] は最適加熱温度を示す。

本研究の統計結果は、臨床において本機器を施術する際の施術温度の指標になると考えられる。

Fig.5 Statistical results of optimal heating temperature of one patient

Fig.6 Relationship between optimal temperature and BMI.

Fig.7 Relationship between optimal temperature and age.

5. 内部温度分布の数値解析

図8に本研究で用いた腹部伝熱の数値解析モデルを示す。モデルは二次元軸対称とし、図8に示すように多層構造とする。腹部の各層の厚さは、皮膚が0.4mm、脂肪層が7.8mm、筋肉層が13.4mmとし、筋肉層よりも深い層は内臓層とした⁽⁸⁾。支配方程式には Pennes の生体伝熱の式を用いた⁽⁹⁾。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_b c_b \omega_b (T_a - T) + \dot{q}_{met}(T) \quad (3)$$

ここで T [°C] は温度、 t [s] は時間、 ρ [kg/m³] は密度、 c [J/(kg·°C)] は比熱、 k [W/(m·°C)] は熱伝導率、また下添え字で a は動脈、 b は血液を表す。 ω_b [1/s] は血液灌流率で単位体積の生体組織に流入する血液流量を表す。右辺第三項は血流と組織との熱交換を表し、右辺第四項は代謝による発熱を表している。本研究では血液灌流率と代謝による発熱が温度に依存するとし、以下の関係式を用いた⁽⁶⁾。

$$\omega_b(T) = \omega_{b0} Q_{10}^{(T-T_0)/10} \quad (4)$$

$$\dot{q}_{met}(T) = \dot{q}_{met0} Q_{10}^{(T-T_0)/10} \quad (5)$$

初期温度分布は実験より初期表面温度が34°Cであることから、これを境界条件として表面に与えて定常計算したものを用いた。また、表面における境界条件は加熱円盤温度を42°Cに設定して温度上昇させた実験データを与え、それ以外の場所は自然対流とふく射による熱伝達境界条件を用いた⁽¹¹⁾。

$$h_t = h_c + 4\epsilon\sigma T_m^3 \quad (6)$$

ここで h_c [W/(m²·K)] は自然対流による熱伝達条件、右辺第2項は有効ふく射熱伝達率⁽¹⁰⁾、 σ [W/(m²·K⁴)] はステファンボルツマン定数、 T_m [K] は皮膚表面温度である。皮膚表面以外の境界条件は断熱とした。

図9は加熱円盤温度を42°Cに設定して温度上昇させた実験データを与えて900s間、腹部を加熱後、加熱円盤を離して自然放熱をさせた場合の体内温度分布である。1000sの温度分布に着目すると、脂肪層内部に温度分布が生じているのがわかる。これは脂肪層内の熱伝導よりも周囲との熱伝達が大きく、表面が急速に冷えるために生じると考えられる。また加熱円盤温度を42°Cに設定して、腹部を15分間加熱しても内臓温度はほとんど温度上昇していないことがわかる。

図10は42°Cで定常状態になるまで腹部を加熱した場合の計算結果である。定常状態においても、内臓と筋肉の境界面の温度は体温に対して0.3°Cしか上昇していない。

以上の結果から、本装置で腹部の加熱による「体の芯まで温まると感じる」現象は、実際上では内臓温度はほとんど上昇しない。従って、温熱治療の効果は、内臓温度が上昇するというより、皮膚近傍の昇温などが自律神経に作用し内臓機能が活発化して得られるのではないと考えられる。著者らの研究によると、腹部温熱により皮膚表面の血流が活発化されることが測定されていること、腹部温熱を施術すると上腸管膜動脈や肘動脈の血流が上昇すること⁽¹¹⁾からも、自律神経の作用など他の要因によって、間接的に内臓機能が改善されると推測される。

Fig.8 2-D axisymmetric multiple layer model of abdominal area

Fig. 9 Temperature Distribution in abdominal region

Fig.10 Temperature Distribution at Steady State

6. 結 言

本研究では、伝統的な灸治療効果を伝熱工学的手法で解明するために高精度で温度制御可能な加熱装置を用いて、次の知見を得た。

1. 高精度温度制御が可能な腹部温熱制御装置を開発した。本装置により、これまでの灸治療では不可能だった温熱治療の施術温度を定量的に評価することができた。
2. 本装置を用いて臨床実験を行い、最適加熱温度と患者の条件に関して統計処理を行った。最適加熱温度について、不確かさ区間の個体差が大きいことを示した。また、最適加熱温度と性別、BMIの間には相関が見られなかったが、年齢に

関しては高齢になるほど最適加熱温度が高くなる傾向を示した。

3. 腹部温熱制御機器を施術した際の体内温度分布を計算し、腹部を加熱しても内臓はほとんど温度上昇しない可能性を示した。温熱治療の効果は、温熱による自律神経の作用などにより、間接的に内臓機能が活発化して得られるのではないと考えられる。

文 献

- (1) Ozaki, A., *Schematic manual of clinical procedure on acupuncture and moxibustion therapy (in Japanese)*, (2003). Ishiyaku Publishers
- (2) Shen, X., Ding, G., Wei, J., Zhao, L., Zhou, Y., Deng, H. and Lao, L., An infrared radiation study of the biophysical characteristics of traditional moxibustion, *Complementary Therapies in Medicine*, Vol.14 (2006), pp.213-219.
- (3) Tabosa, A., Yamamura, Y., Forno, E.R. and Mello, L.E.A.M., A Comparative Study of the Effects of Electroacupuncture and Moxibustion in the Gastrointestinal Motility of the Rat, *Digestive Diseases and Sciences*, Vol.49, No.4 (2004), pp.602-610.
- (4) Ng, E.Y.K. and Chua, L.T., Comparison of One- and Two-Dimensional Programmes for predicting the State of Skin Burns, *Burns*, Vol.28 (2002), pp.27-34.
- (5) Maruyama, S., Okajima, J., Komiya, A. and Takeda, H., Estimation of Temperature Distribution in Biological Tissue by Using Solutions of Bioheat Transfer Equation, *Heat Transfer -Asian Research*, Vol.37, No.6 (2008), pp.374-386.
- (6) Maruyama, S., Takeda, H., Komiya, A., Yambe, T. and Nakasato, N., Brain Mapping Method Utilizing Rapid Cooling Probe, *Proceeding of the 17th International Symposium on Transport Phenomena*, (2006-9), 1-D-I-4.
- (7) Takeda, H., Maruyama, S., Okajima, J., Aiba, S. and Komiya, A., Precise Control of Cooling and Heating Rate Utilizing Peltier Cryoprobe for cryosurgery, *Proceedings of the 19th International Symposium on Transport Phenomena*, (2008-8), No.141(CD-ROM).
- (8) Samaras, T., Christ, A. and Kuster, N., Effects of geometry discretization aspects on the numerical solution of the bioheat transfer equation with the FDTD technique, *Physics in Medicine and Biology*, Vol.51, (2006), N211-N229.
- (9) Pennes, H.H., Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm, *Journal of Applied Physiology*, vol.1, No.2 (1948), pp.93-122.
- (10) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Textbook Series : Heat Transfer*, (2005), The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (11) Takayama, S., et al., Changes of blood flow volume in the superior mesenteric artery and brachial artery with abdominal thermal stimulation, *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, (2009), to be published.