

# 寒冷反応に関する人体指の二次元熱モデル

A Two-dimensional Thermal Model for Determining Cold-stressed Effects  
on A Human Finger

賀 纒<sup>1</sup>, 河村 哲也<sup>2</sup>, 姫野龍太郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 理化学研究所 情報環境室

埼玉県和光市広沢 2 - 1

e-mail: heyings@postman.riken.go.jp

<sup>2</sup> お茶の水大学 人間文化研究科

東京都文京区大塚 2 - 1 - 1

e-mail: kawamura@is.ocha.ac.jp

<sup>3</sup> 理化学研究所 情報環境室

埼玉県和光市広沢 2 - 1

e-mail: himeno@postman.riken.go.jp

## Abstract

In this paper, a two-dimensional thermal model, which consists of epidermis, dermis, tendon, bone, and four main arteries was developed to investigate the cold-stressed effects on a human finger. Based on Pennes bioheat equation, the two-dimensional temperature distribution of the middle finger in air and in water was calculated. It is found that after experiencing cold stresses, the blood perfusion rate in dermis become higher than that in silent condition. In addition, the finger re-warms in different speeds for different parts. The temperature in the side of finger increases faster than that in the other parts. Furthermore, the simulated results were compared with the experimental result.

*Key Words:* bioheat equation, numerical simulation, human body, cold-stressed fingers

1. 緒言 生体伝熱には、さまざまな応用研究分野がある。例えば、レーザーの医療応用、高温治療、やけどによる傷害、臓器の保存（凍結）、低温外科手術、分子レベルの熱輸送現象、人体と温熱環境の関係などの研究が盛んに行われている。本研究では寒冷環境における指部温度の分布に注目した。

指部は血管網がよく発達している部位であり、血管反応が生体内外の環境の変化に対してかなり鋭敏に現れる部位であるとされている。指部の組織は、主に骨、腱と結合組織、皮膚三つの組織から成っており、全身の他の部位に比べて筋肉が少ない。従って、組織内の産熱変化を一定値扱いにできる。また、皮膚以外の組織の血流は極めて少ないとされているため、皮膚血流の研究には格好の部位である。このような理由から従来指部に関する研究は少ない。

寒冷刺激実験は周辺血管システムの能力評価に対して有用である。Clark と Edholm [1]は手部に関する実験を挙げた。薄いプラスチック手袋をかけ、10°C の冷水中に 1 分間浸入した後、手部の温度回復挙動を赤外放射温度計で記録した。そして、指の基部と末節部の温度が先に暖かくなり、指の中心部は次第に回復する特性があることを報告した。

一方、横山ら[2]は指部における寒冷血管反応のシミュレーションを行った。指部の形状と内部構造をモデル化し、指部の熱移動を Wissler [3]のモデルに基づき、組織

の熱伝導方程式、動脈系と静脈系の熱平衡方程式により記述している。シミュレーションの結果により、皮膚の血流流量の変化は指部の温度に重要な役割を果たすことが明らかになった。

他方、Lingら [4]は有限要素法で大腿に対して冷却影響を調べた。彼らのモデルでは、人体の大腿は骨、筋肉、脂肪、皮膚と二つ主動脈から成り立ち、大腿の周囲は1mmのナイロンに囲まれ、40%の領域は水袋に覆われる。大腿の組織イメージは核磁共振装置から得られた。熱移動は Pennes[5]の生体伝熱方程式によって表され、その数値解析は汎用の FEA コード ANSYS を使って行っている。その結果から大腿の各断面各瞬間の二次元温度分布が得られ、医用臨床への応用に望まれている。

本研究では、寒冷刺激後の回復挙動についてさらに詳しく調べることを目的し、指に四つの動脈管を加え、さらに層状の指モデルを用いた。基礎方程式には多く使用されている Pennes の生体伝熱方程式を採用し、指部の一つ断面内での二次元温度分布の数値計算を行った。

**2. 指の熱モデル** 図1は指のモデルを示している。指は骨、腱、真皮と表皮から成り立ち、四つの動脈管は骨と腱の間に埋められている。

指内部の温度を求めるため、Pennes 生体伝熱方程式を用いる。この方程式は次のように表される

$$\rho_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda_\theta \frac{\partial T_t}{\partial \theta} \right) + q_{met} + \omega \rho_b c_b (T_a - T_t) \quad (1)$$

ただし、 $\rho_t c_t$ 、 $\rho_b c_b$ ：それぞれ組織と血液の単位体積比熱、 $\omega$ ：血液流量、 $\lambda_r$ 、 $\lambda_\theta$ ： $r, \theta$ 方向の熱伝導率、 $q_{met}$ ：基礎代謝の発熱、 $T_a$ ：動脈血液温度、 $T_t$ ：組織温度である。

組織の初期温度分布は、指全体で一定で33°Cと仮定する。動脈血液の温度は、常に一定で37°Cと仮定する。境界条件は以下のように課した。

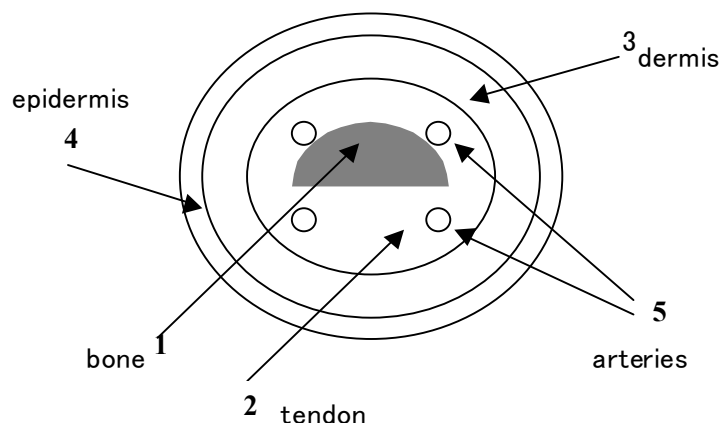


Fig. 1 The Schematic of the Finger

1. 円柱形座標の中心部：

$$r=0 \quad \frac{\partial T_t}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

2. 皮膚表面：

(1) 空気中

$$r = R, \quad \lambda_r \frac{\partial T_t}{\partial r} = h_{ca} (T_{sur} - T_a) + h_{ra} (T_{sur} - T_r) + E_{sk} \quad (3)$$

ここで、 $h_{ca}$ ：皮膚と空気の間対流熱伝達率 ( $W/m^2K$ )、 $h_{ra}$ ：皮膚と空気の間放射熱伝達率 ( $W/m^2K$ )、 $E_{sk}$ ：熱蒸発損失 ( $W/m^2$ ) である。また、空気速度は  $0 < V < 0.15 m/s$  とし、人の対流熱伝達率は安静状態で  $4.0 W/m^2K$  とした。室内温度では、放射熱伝達率はほぼ定数で、 $4.7 W/m^2K$  である。熱蒸発損失は次の式で求められる、

$$E_{sk} = h_e (P_s - P_a) \quad (4)$$

ここで、 $P_s$  は皮膚表面の水蒸気圧力 (kPa) で、通常は皮膚表面温度の飽和水蒸気圧力と仮定する。 $P_a$  は環境温度の水蒸気圧力 (kPa) で、 $h_e$  は蒸発係数 ( $W/m^2kPa$ ) であり、次式から得られる

$$h_e = 124 \sqrt{V} \quad W / m^2 kPa \quad (5)$$

(2) 水中

$$r = R, \quad \lambda_r \frac{\partial T_t}{\partial r} = h_{cw} (T_{sur} - T_w) \quad (6)$$

ただし、 $h_{cw}$  は皮膚と水の間対流熱伝達率である。熱伝達率は円柱周りの自然対流の相関式から求められる。水温が  $10^\circ C$  の場合では、熱伝達率は  $343 W/m^2K$  である。

3. 動脈と組織の熱伝達

動脈と組織の熱伝達は次のように表される

$$r = r_{artery}, \quad \lambda_r \frac{\partial T_t}{\partial r} = h_{at} (T_t - T_{artery}) \quad (7)$$

$$\theta = \theta_{artery}, \quad \lambda_\theta \frac{\partial T_t}{\partial s} = h_{at} (T_t - T_{artery}) \quad (8)$$

動脈管内の血液の流れはニュートン流であり、良く発達した管内層流と仮定する。以上のモデルに基づき、指部の温度分布を求めた。

3. 計算結果 数値計算はFDMで行った。計算条件は次のように設定した。

(1) 環境温度は  $22^\circ C$  で、風速は  $0.1 m/s$  である。

(2) 指は空気中に 6 分間安静状態の後、 $10^\circ C$  の冷水中に 1 分間浸入し、また  $22^\circ C$  の環境に戻る。

各組織の物性値と血液流量は表1に示している。図2はある時刻の指内部の等温線を示している。図2aは安静状態時の指の等温線である。動脈管まわりの組織に温度差がはっきり見られるが、他の組織では温度差が小さい。水中での温度分布は図2b~cに示されている。この時、内部組織と皮膚の温度差が顕著になったが、各部位の皮膚温度がほぼ一定である。皮膚温度が空気にふれて徐々に回復していく様子は図2d~fに示されている。基本的には、時間が経つにつれ、安静状態の温度分布と同一になる傾向がある。しかし、部位毎に皮膚温度回復スピードが異なる。両側の皮膚温度が早く上昇するが、背面と裏面の温度回復は遅い。

図3に皮膚の平均温度を示す。回復初期の皮膚血液流量が安静時と同じ場合を、破線で示し安静時の4倍になる場合を実線で示している。図3aから分かるように、実線は水中を出た5分後に安静状態の温度に達する。一方、破線はこの時間内ではまだ定常になっていない。実験と比較するために、回復期の曲線を図3bに示す。皮膚血液流量が安静状態の4倍であるとき、計算値が実験値の傾向をよく再現することがわかった。

**4. まとめ** 本研究では、指が骨、腱、真皮、表皮と四つの動脈管から構成されると仮定し、Pennes 生体伝熱方程式を用いて、指の温度分布を数値計算し、寒冷刺激が指に及ぼす影響を調べた。その結果から次の結論が得られた：(1) 寒冷刺激後真皮における血液流量は安静状態より大きくなる。これは横山らの結果とよく一致している。(2) 寒冷刺激後の皮膚温度分布は周方向で不均一になる傾向がある。

今後は、実験により指の温度回復挙動を調べたいと考えている。さらに、指だけではなく、手全体の温度回復挙動をシミュレーションしようと考えている。

#### 参考文献

- [1].Clark, R.P. and Edholm O. G., 1985, "Man and his thermal environment", Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- [2].Yokoyama, S. and Ogino, H., 1985, "Developing computer model for analysis of human cold tolerance". *The annals of physiological anthropology*, Vol. 4, No. 2, pp.183-187.
- [3].Wissler, E. H., 1964, "A mathematical model of the human thermal system", *Bulletin of mathematical biophysics*, Vol. 26, pp.147-166.
- [4].Ling, J. X., Young, I. R., and DeMeester, Gordon, 1995, "A finite element model for determining the cooling effects of water bags on the temperature distributions of a human leg". *Advances in heat and mass transfer in biotechnology, ASME, HTD-Vol. 322/BED-Vol.32*, pp.69-71.
- [5]. Pennes, H. H., 1948, "Analysis of tissue and arterialblood temperatures in the resting human forearm". *J. applied physiology*, Vol. 1, No.2, pp.93-122 .

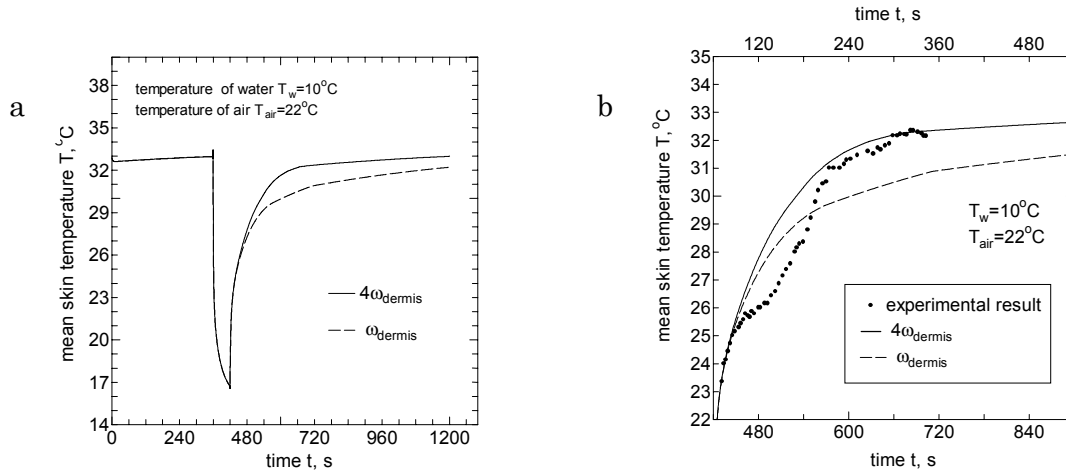


Fig3. Variation of mean skin temperature  
(a. simulated results b. comparison with the experimental result)

Table 1. Physical properties and blood perfusion rate of tissues

	bone	tendon	dermis	epidermis	blood
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1418	1270	1200	1200	1100
$c(\text{J/kgK})$	2094	3768	3391	3391	3300
$\lambda(\text{W/mK})$	2.21	0.35	0.53	0.21	0.50
$\omega(\text{ml/ml/min})$	2.0/100	3.43/100	24/100	0	

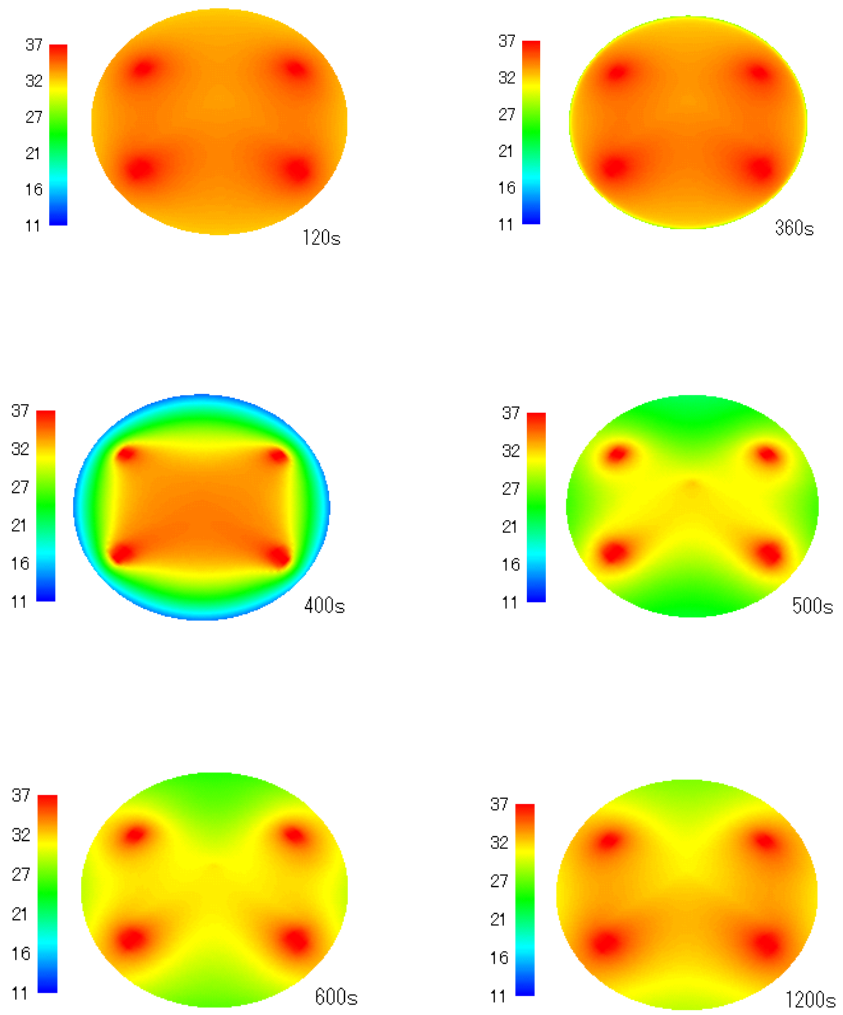


Fig2. Isotherms of the finger at different time