

血流による伝熱の冷却効果を考慮した 人体内部温度分布の推定モデル

—床暖房時の低温火傷の予防に関連して—

鄭 華美・永村一雄・深井一夫・中根芳一

Simulation Model for Body Temperature Distribution in Considering of Refrigerant Effect of Blood Circulation

— Prevention of Low Temperature Burn by Floor Heating System—

HUAMEI ZHENG, KAZUO EMURA, KAZUO FUKAI and YOSHIKAZU NAKANE

1. はじめに

快適な暖房のひとつである床暖房に関する研究は、可なり広い範囲で行われてきた。設計に関する重要な問題は、主に快適性と安全性の問題である。快適性に関してはほぼ解明されている¹⁾。しかし、床暖房の安全性に関する面は、まだ十分に明解されているわけではない。ひとつの問題点は、局部加熱による低温熱傷である。実際に不備な設計や施工で低温熱傷を生じた例²⁻³⁾もあった。固定姿勢で長時間身体を動かさない弱者にとっては回避できない問題なので、低温熱傷の検討は重要なことである。一方、深井ら⁴⁻⁷⁾は、接触温を評価するための装置を試作し、血流が接触温に及ぼす影響を検討するための模擬実験を行った。

低温熱傷の既往研究では、田中・石黒・山田ら⁸⁻¹⁰⁾の、温水マットを用いた低温熱傷に関する伝熱解析モデルがある。本報で筆者ら¹¹⁾は、まず、彼らの報告を踏み、そのモデルによる解析結果の疑問点を挙げ、有限要素法 (FEM)¹²⁾による数値解析でモデルの改良を試みる。次に、模擬実験の結果を数値解析で検証する。

2. 温水マットの既往研究の疑問点

田中ら⁸⁻¹⁰⁾は、体温維持のための温水マットを用いた手術中の麻酔患者に関する低温熱傷の症例を報じ、人体組織厚さ50mmにおいて、一次元無限の伝熱モデルを用いて差分解析を行った。低温熱傷は、人体組織温度が蛋白質

変成温度42°Cより高くなって発生する皮膚損傷という⁹⁾。

筆者ら¹¹⁾も、彼らと同様のモデルでFEMによる数値解析して比較する。

2.1 解析結果の比較

計算条件は以下のとおりである。まず、一般成人の場合、基礎代謝産熱は約1320W/m²で、通常の温水マットと人体接触面の熱伝達率は約180W/m²Kである。温水マットの温水温度37°C、人体組織の初期温度36°Cで、人体内部の基礎代謝産熱は均一分布で血流影響を考慮しない。この計算条件は田中らの条件と同一のものである。30分毎に計5時間までの計算結果を図1に示す。計算結果はよく一致している。

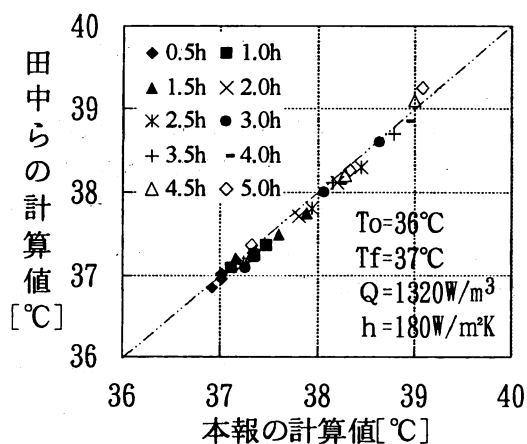


図1 一般的条件下での人体内部温度の比較

次に、危険側の条件を考える。田中らは、基礎代謝産熱を一般成人の2倍 $2640\text{W}/\text{m}^3$ とし、温水マットと人体接触面の熱伝達率は通常時の $1/10$ の $18\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ と設定した。人体内部の基礎代謝産熱も均一分布で血流を考慮せずに人体の内部温度をシミュレートした。この計算結果(図2)もほぼ一致している。このモデルと条件設定では、3時間後の人体深部温度、5時間後の接触温度は蛋白質変成温度を越え、低温熱傷の発生が懸念される。

2.2 疑問点

田中らの報告では、この数値解析モデルより『温水マットによる火傷とその条件の特徴を模擬することができる』¹⁰⁾と報じられているが、以下の点で不合理な問題を含んでいると思われる。

まず、彼らのモデルでは、①皮膚表面よりも組織深部の方が高温となることが多く(図2(b))、皮膚表面の損傷がなく深部損傷を受けるといった、実際の低温熱傷の症例と異なる解析結果が得られている。

彼らの解析結果によって、皮膚表面温より深部温が高いため、温水マットは代謝産熱を取り除くための冷却作用のようなものである。そうであれば、彼らのモデルでは、②温水流量が少ないほど低温熱傷発生の危険性が増加し、温水がまったく流れない場合が最も危険で、極端に考えれば、温水マットを用いず断熱材の上に寝かせると熱傷が起こるという不合理な解析結果を招く。

この原因のひとつは、③代謝産熱の設定がすべての組織の単位体積当たりで一様としている点にあると考えられる。実際の人体の代謝産熱は主に骨格筋、臓器、脳などで発生し、皮膚および脂肪組織での発熱はごくわずかである。

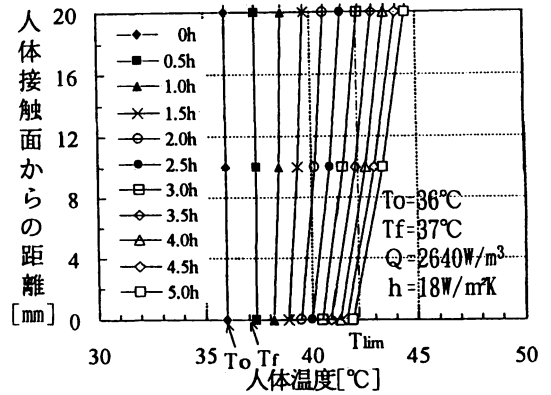
2.3 モデルの改良

彼らのモデルでは、温水温度が蛋白質の変成温度 42°C 未満にもかかわらず、低温熱傷の発生の状況が起こっている(図2(b))。これは、先の③が原因のひとつと考えられる。そこで、この点の改良を行い、FEMによる数値解析を再度試みる。

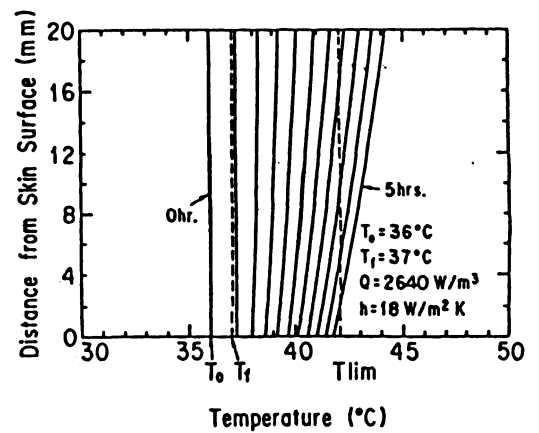
皮膚、脂肪組織での発熱は少ないため、代謝産熱は、接触皮膚表面より $20\sim 40\text{mm}$ の深さの人体内部にのみ集中すると仮定する。その計算結果を図3に示す。5時間後、人体深部温度、接触温度はそれぞれ約 40°C 、 39°C となり、低温熱傷の発生の危険性がなくなっていることを示している。

以上のように、彼らのモデルに対する代謝産熱の設定を改良すると、異なる解析結果が得られる。従って、人体モデルによる伝熱解析の場合、人体側の設定条件は重要なことと考えられる。彼らのモデルのままで温水床暖

房における熱傷発生の可能性を評価することにはやや無理がある。



(a) 本報



(b) 田中ら

図2 危険側条件下での人体内部温度分布の比較

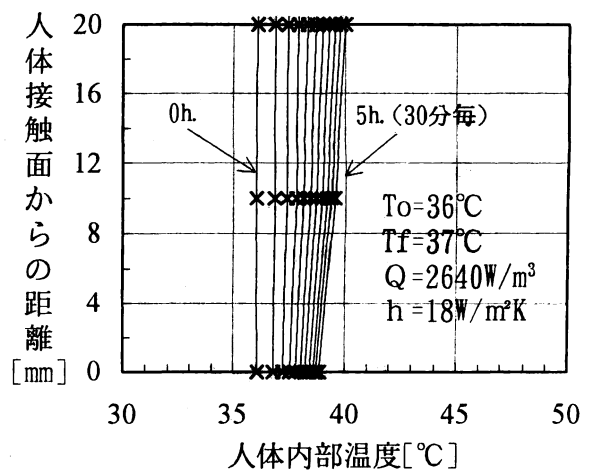


図3 改良された人体内部温度分布

3. 温水床暖房の実験とその検証

上述した温水マットと類似している‘炕’についても、不慮の事故による低温熱傷が報告³⁾されている。床暖房での低温熱傷は、床面に接触する人体の皮膚表面温度(接触温)が、蛋白質の変成温度を超えたとき発生しやすいと考えられる。接触温を評価するひとつの方法は、その測定装置を作製し、直接評価する方法である。深井ら⁴⁻⁷⁾は、血流模擬の実験装置を試作し実験を行った。そこで、本章は、この模擬実験結果を数値解析で検証する。

3.1 実験装置

人体模擬装置は、アクリル製ボックス(高さ100mm, 厚さ2mm)に、下半部がシリコン樹脂で充填され、上半部が深部温を固定するための恒温槽とし、下面より20mmの深さに、血管を想定した真鍮パイプ(内径2mm, 外径3mm)を10mm間隔で9本配置したものである。それらの材料の熱特性値を表1に示す。図4は人体模擬装置、床暖房パネル(厚さ5mm)、および温度測定場所の概要である。

3.2 実験方法

本実験では、床温は30°C以下に設定するため、木質フローリングと温水パネルとの間に、フェルト(厚さ約3mm/枚)を敷いて調節した。また、人体模擬装置と木質フローリングとの接触具合を考慮し、接触面に1枚フェルトを挟んだ(図4の参照)。床面からの熱放射の影響を人体模擬装置に与えないよう、人体模擬装置の周囲は断熱した。実験装置の系統図を図5に示す。循環温水の一部を、血管と想定した真鍮パイプに送り、深部温を37°Cで固定した。その後、人体模擬装置を床面に移動させた。測定は、実験開始から約3~4時間を血流有で、その後に血流を停止(パイプ内の温水を抜く)し、約17時間測定を続けた。実験は、エアコンを設置している実験室に、室温約20°C、4種類の温水温度で4回行われた。実験条件、期間、場所を表2に示す。

測定項目は室温、床温、温水パネル面温、接触温、および実験体の内部温で、測定間隔は2分間、T-0.2mmφ熱電対を用いての測定である。なお、人体模擬装置の内部温は、上下間隔が5mmで計10点測定する。

表1 実験体材料の熱物性値

項目	熱伝導率[W/mK]	容積比熱[J/m³K]
シリコン樹脂	$\lambda_s=0.20$	1.57×10^6
アクリル	$\lambda_a=0.25$	1.71×10^6
フェルト	$\lambda_e=0.05$	0.13×10^6
真鍮	96.12	3.12×10^6
木質フローリング	0.138	0.65×10^6

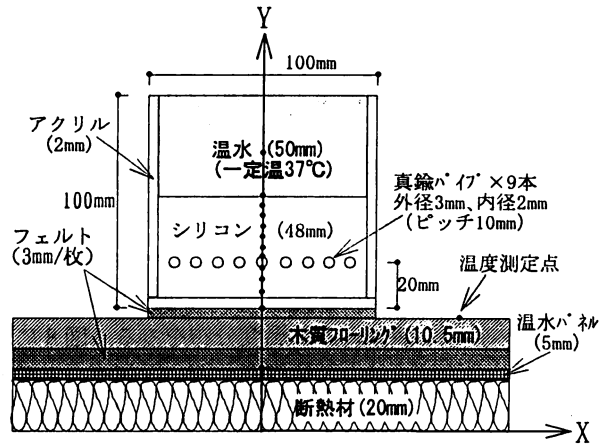


図4 実験装置の概要

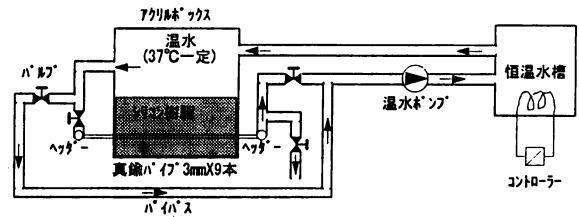


図5 実験装置の系統図

表2 実験条件

温水設定温度[°C]	フローリング下のフェルト[枚]	室温[°C]	総合熱伝達率 α	深部温[°C]	床温[°C]	血流
47	1	20	13.2 W/m²K	37	29	有無
52	2					
57	3					
65	4					
実験期間			1995年6月15~21日			
実験場所			横浜国立大学			

3.3 血流熱移動モデル

図6の計算モデルは、血流による熱移動を示したものである。血管Iと左右組織セルF, Hの伝熱は微小と考えられ⁴⁻⁸⁾、その熱移動は主に血管Iとその上下組織セルE, Gとの間で熱が運ばれるものとする。その移動熱量 Q_b は、一定の血流量で、それぞれの節点平均温度と血管のそれとの差で求める¹⁵⁾。

$$Q_b = \rho C Q_w (T - T_b) \quad [W/m^2]$$

ここで、 ρ , C , Q_w はそれぞれ血液の密度[Kg/m³], 比熱[J/KgK], 血流量[m³/m²(組織)/min.]である。

3.4 実験結果の検証

図7は、各実験条件下で、室温、床温(T_f)、および接触温(T_c)の実験値と計算値の経時変化を示したもので

ある。床温は、木質フローリングの下にフェルトで調節したため、異なる温水温度にもかかわらず、約29°Cとなっている。それらの実験値と計算値をみると、床温はほぼ一致し、接触温は、血液(温水)有りの時(血流量約82.3ml/min.)、実験値と計算値との残差が最大約1.9°C(図7(b))となる。血流停止後2時間で接触温はほぼ定常となり、10時間のとき、両者の残差は最大で約0.8°Cとなる。実験、数値解析とも血流による熱除去効果が出ている。

次に、人体模擬装置の内部温度分布をみる。図8に、各実験での血流停止時の人体模擬装置の内部温の実験値と計算値を示す。ただし、定常状態に達している10時間後のものを用いた。図によれば、実験値と計算値との残

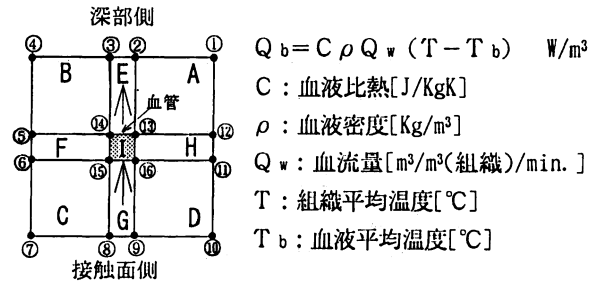


図6 血流移動モデル

差は血管の上部の位置で最大約1°C(図8(a))である。

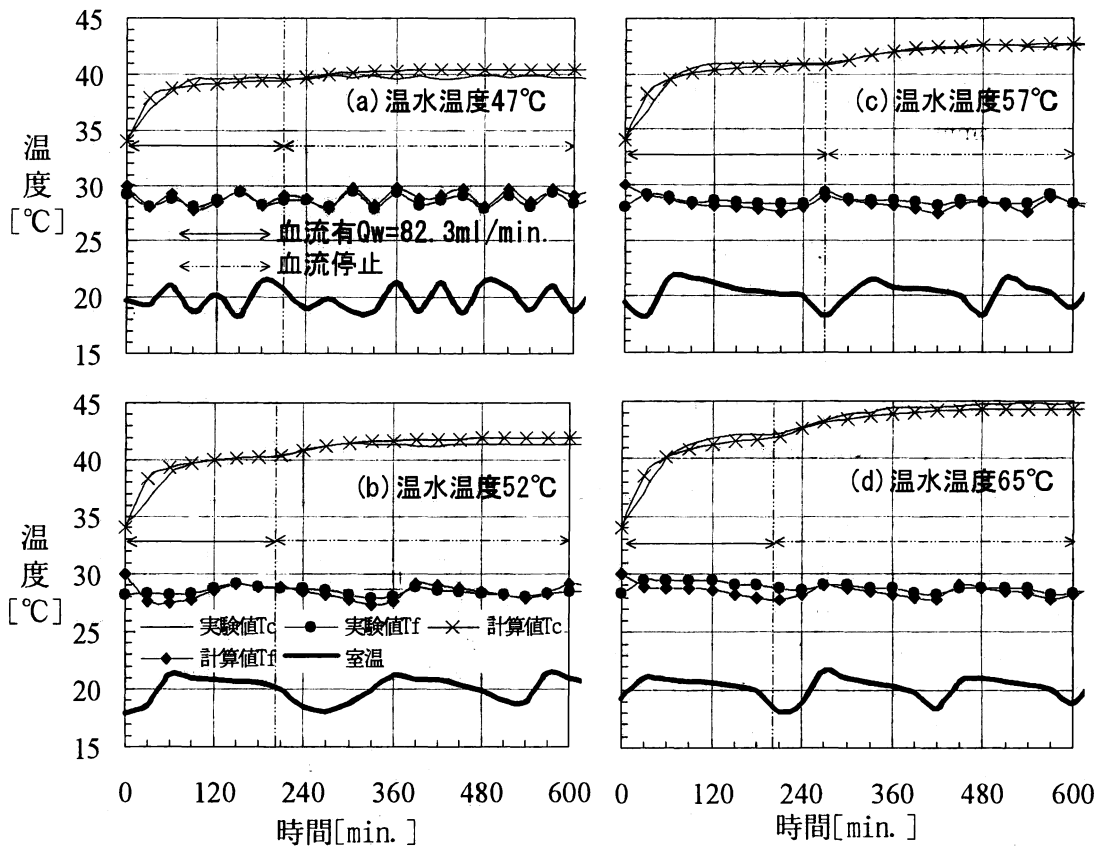


図7 床温Tfと血流量Qwによる接触温Tc

4. まとめ

温水マットによる低温火傷について、既往研究の解析モデルの改良を試みた。温水床暖房における実験では、床材の熱抵抗が異なっても、接触温を模擬でき、血流の熱除去の効果も検討可能であることが判った。

ただし、この解析結果は、本モデルでの限られた条件下のものであり、必ずしも現実的ではない仮定も含んでいることには注意をしておく必要がある。

【謝辞】

本研究は、空気調和・衛生工学会近畿支部平成6年度環境工学研究会「模擬足による床暖房の安全性評価」、および平成7年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)「接触温を考慮した床暖房設計規準の提案と竣工検査用模擬足の開発」(代表 永村一雄)の援助を受けた。

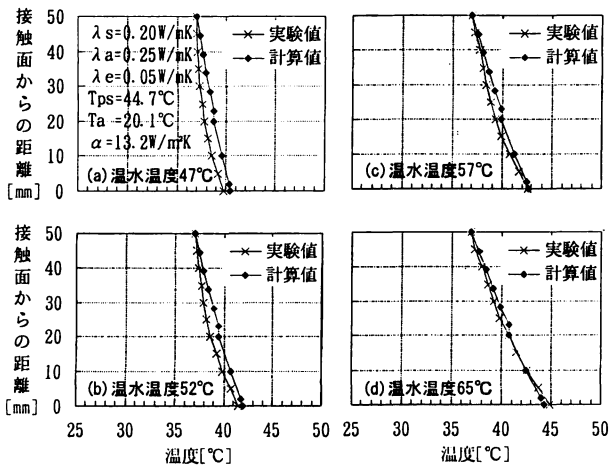


図8 実験体の内部温度の実験値と計算値

【参考文献】

- 1) 空気調和・衛生工学会 床暖房のアメニティ評価に関する研究委員会：床暖房のアメニティ評価に関する研究報告書(1991～1994)
- 2) Guyot, B. Dore, M. Gay and J. P. Lemesle: Les planchers chauffants basse température, Cegibat Centre E.D.F.-G.D.F. Dinfomation Du Batiment, pp.4-35(1987)
- 3) 王 希珍：自身擠圧熱焼傷の処理，中華外科雑誌，第25巻，第9期，pp.534～535(1987)
- 4) 深井一夫，永村一雄：床暖房時の床温の評価 床温についての考え方と床接触温評価装置の試作，日本建

- 築学会学術講演梗概集，環境工学 I D-1，789～790 (1995)
- 5) 深井一夫，永村一雄：試作装置による床暖房時の床接触温の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1289～1292 (1995)
- 6) 鄭 華美ほか：接触温評価装置とそのシミュレーション，その2 床暖房時における低温火傷，日本生理人類学会第35回大会プログラムおよび抄録，(1995)
- 7) 鄭 華美ほか：床暖房時の接触温度に与える血流の影響，第19回人間-生活環境系シンポジウム，10～13(1995)
- 8) 田中忠良ほか：温水マットによる熱傷発生要因の検討(温水マットにより人体を加温した場合の熱移動の理論解析)，日本機械学会論文集(B編)，Vol.55, No. 515, pp.2018～2023 (1989)
- 9) 石黒 博ほか：生体を温水マットで保温した場合に発生する低温熱傷の伝熱学的研究，日本機械学会論文集(B編)，Vol.56, No.525, pp.1457～1466 (1990)
- 10) 山田幸生ほか：保温マットによる低温熱傷の伝熱学的研究，第14回人間-熱環境系シンポジウム報告集，pp.114～117 (1990)
- 11) 鄭 華美ほか：模擬足による床暖房の性能評価のための伝熱解析，その1 人体接触部位モデルと内部温度，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1293～1296(1995)
- 12) 矢川元基，一宮正和：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，pp.223～301(1992)

Summary

The object of this study is to perform the floor heating safety by investigating the contact temperature through experiment and heat transfer analysis. Floor heating is an ideal heating system from the viewpoints of the heat distribution balance in the room and the resulting comfortable feeling of warmth. It points out important problem of low temperature burn for persons who are immobile for a long time especially the weak with heating panel due to their physical disability. In this context, it is important to simulate and estimate the heat transfer and distribution of temperature under the skin at which heating panel is contacted in order to propose the safety guide for preventing the low temperature burn by floor heating.

In this paper, first workers examined the heat transfer-simulation model previously proposed by Tanaka et al, and discussed its availability. Second, the more suitable experimental model was proposed for heat transfer analysis of human body heated with floor heating system in consideration of refrigeration effect of blood circulation, and the body temperature distribution was analyzed although the numerical analysis method. As a result, the contact temperature could be simulated both in experiment and analysis though the heat-resistant of flooring material is different. The heat refrigerat effect of blood circulation could also be discussed.