

【研究成果の要約】 継続中

氏名	古川琢磨
1. 研究題目	数値サーマルマネキンモデルを用いた赤外線式燃焼ヒーターが人体熱反応に及ぼす影響の解明と熱的安全・快適条件の創成
2. 研究内容	<p>赤外線式燃焼ヒーターは高温のサウナ室内で頻りに使用されているが、ヒーターからの熱量と発汗等の人体の生理反応と相関関係については明らかとなっておらず人体反応の観点からヒーターの熱的安全設計はされていない。そこで本研究では赤外線式燃焼ヒーターが人体熱反応に及ぼすメカニズムを定量的に解明し、人体に安全なヒーター運転方法や熱機構を提案することを最終目的とする。本研究では、サウナのような高温環境での人体熱反応を定量的に予測する生体温熱モデルを開発することを目的とする。本目的を達成するために、1. サウナ入浴中における人体深部、皮膚温度の計測とサウナ室環境の温度計測、2. 生体温熱モデルを用いたデータ同化解析による人体熱反応の予測精度の評価を行った。以下にそれぞれの項目の具体的な研究内容を示す。</p> <p>1. サウナ入浴中における人体深部、皮膚温度の計測とサウナ室環境の温度計測 実験では盛岡市内にある入浴施設「ゆっこ盛岡」の協力を仰ぎ、施設内のサウナ室での実験を行った。実地計測では、小型のグローブ温度計およびアルミニウムでシールド加工した温度計を用いてサウナ室のふく射平衡温度および気温を測定した。またカプセル温度計および、ウェアラブルデバイスを用いてサウナ入浴中の人体深部、皮膚温度の計測を行った。共同研究期間であるNTT東日本の協力を仰ぎ、4名の被験者で実験を行った。また計測ではサウナ入浴のみならず、水風呂も加味した温冷交替入浴中での人体熱反応の計測を行った。</p> <p>2. 生体温熱モデルを用いたデータ同化解析による人体熱反応の予測精度の評価 本研究期間では代表的な人体熱反応の一種であるFialaモデルを使用して、サウナ温冷交替入浴中の熱反応がデータ同化によって予測可能かを評価した。腕部計測温度と解析温度を比較して、生体温熱モデルのパラメータフィッティングを行った。評価の結果、通常のFialaモデルでは、人体の深部温度を過大に予測することが明らかとなったため、本研究ではFialaモデルに対して、生体の多孔質性を考慮した疑似フーリエ効果を組み込んだ生体熱伝導方程式による解析を行った。ウェアラブルデバイスの熱反応計測による深部温度予測の可能性を検証するために、</p>
3. 研究成果	<p>図1にFialaモデルと非フーリエ効果を加味したFialaモデルによる予測結果とサウナ温冷交替入浴中の人体深部、皮膚温度の比較結果を示す。図に示されるように、Fialaモデルでは人体皮膚、深部温度の位相差を適切に再現することはできなかった。その一方で、非フーリエ効果を考慮したFialaモデルは深部温度の遅れを再現し、さらには皮膚温度の予測性能も向上することが明らかとなった。</p>

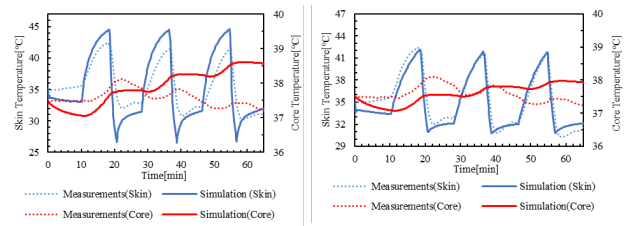


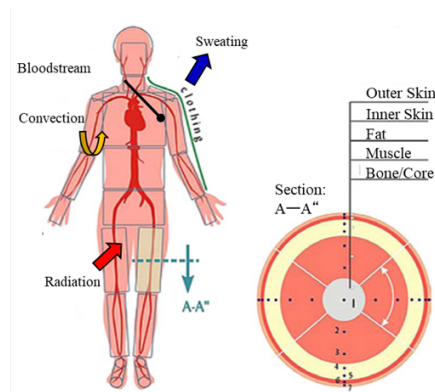
図1 サウナ温冷交替入浴中の人体熱反応との比較結果

【研究成果の概要】																										
氏名	古川琢磨																									
1. 研究題目	数値サーマルマネキンモデルを用いた赤外線式燃焼ヒーターが人体熱反応に及ぼす影響の解明と熱的安全・快適条件の創成																									
<p>1 緒言</p> <p>赤外線燃焼ヒーターが設置されるようなサウナ室環境はおおよそ 80 °C，高温環境である。従来，赤外線燃焼ヒーターはふく射熱流束量の観点からその熱的設計が行われていた。しかしながら，ヒーターの快適性，安全性を考慮するためには人体の熱的応答を加味してヒーターの熱的設計をしなければならない。そこで本研究では代表的な生体温熱モデルである Fiala モデルを数値サーマルマネキンモデルとして定義し，本モデルによって算出された人体熱反応から赤外線燃焼ヒーターの新しい熱的設計指針を確立することを最終目的とする。従来，Fiala モデルは 50 °C 以下の熱環境を対象としたモデルと見なされており，サウナ室のような 80 °C 以上の熱的環境の適用可能性については議論されていない。そこで本研究では，サウナ温冷交替入浴中の人体深部，皮膚温度を計測し，その人体熱反応が Fiala モデルに予測可能かを議論した。比較結果から，Fiala モデルの予測精度とその予測精度を向上させる非フーリエ効果の適用可能性について議論した。</p> <p>2 実験方法</p> <p>盛岡市にある銭湯業者にて 4 名の男性の被験者 A，B，C，D に協力していただき，サウナ繰り返し入浴中の皮膚温度，体内深部温度を測定した。表 1 に被験者の情報を示す。人体深部温度の測定には無線カプセル温度計 (BODYCAP, e-celsius) を使用した。また皮膚温度測定には，ウェアラブルデバイス (Biodata Bank, CNRIA) を使用した。サウナ室及び休憩時の浴室の気温は水銀気温計，デジタル温湿度計 (Rotronic, HP32) を使用して測定した。気温系はふく射の影響を防止するために気温計の先端をアルミホイルで覆う構造とした。また，ふく射温度と水風呂中温度はデータロガー (HIOKI, LR5021) に専用のプローブ (testo, ふく射熱プローブ)，(MK Scientific, HP-602A-M18) を装着して測定した。表 1 にはそれぞれの被験者の年齢，身長を記載する。サウナ浴 (8 分)，水風呂 (2 分)，外気浴 (5 分) の流れを 1 セットとし，これを 3 セット行うものとした。A，B の被験者は無線カプセル温度計を実験開始の 30 分前に飲用し，C，D の被験者は実験開始 8 時間前に飲用した。</p>																										
<p>Table 1 Information of objectives</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sex</td> <td>Male</td> <td>Male</td> <td>Male</td> <td>Male</td> </tr> <tr> <td>Age</td> <td>38</td> <td>31</td> <td>34</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td>Height cm</td> <td>175</td> <td>171</td> <td>168</td> <td>168</td> </tr> <tr> <td>Weight kg</td> <td>84</td> <td>68</td> <td>63</td> <td>68</td> </tr> </tbody> </table>			A	B	C	D	Sex	Male	Male	Male	Male	Age	38	31	34	39	Height cm	175	171	168	168	Weight kg	84	68	63	68
	A	B	C	D																						
Sex	Male	Male	Male	Male																						
Age	38	31	34	39																						
Height cm	175	171	168	168																						
Weight kg	84	68	63	68																						

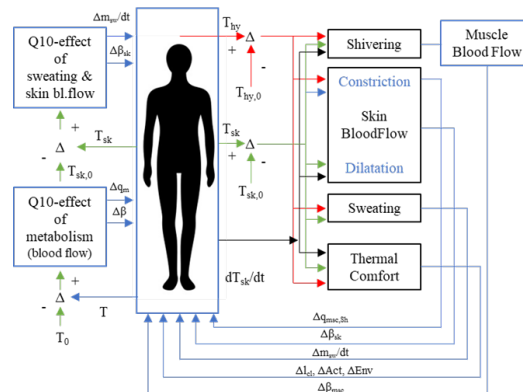
3 計算方法

3.1 FIALA モデル

FIALA モデルは人体を 12 部位に分割し、骨、筋肉、脂肪、皮膚で構成されている。また、部位ごとに角度による分割も追加されている。FIALA のマルチノードモデルでは動脈・静脈を考慮し、各部位からの静脈血が混合することを想定して血液温度を決定している。図 1 に本モデルの概念図を示す。FIALA モデルでは図 1(a)のように、人体を分割し、図 1(b)のような血管拡張・収縮、発汗、シバリングは皮膚温度、視床下部温度によって計算されると仮定している。



(a) FIALA model schematic diagram



(b) FIALA model schematic diagram

Figure 1 FIALA model

FIALA model の熱伝導方程式を式(1)に示す。

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = k \nabla^2 T + \rho_{bl} w_{bl} c_{bl} (T_{bla} - T) + q_m \quad (1)$$

ここで ρ : 密度[kg/m³], c : 比熱[J/(kg · K)], T : 人体温度[°C], t : 時間[s], k : 熱伝導率[W/(m · K)], bl : 血液, T_{bla} : 動脈温度[°C], w : 灌流速度[m³/(m³ · s)], q_m : 代謝による発熱[W/m³]である。動脈温度 T_{bla} と T_{blp} 算出式を式(2)(3)に示す。

$$T_{bla} = \frac{T_{bip} \sum_r^{nodes} \beta_r V_r}{h_x + \sum_r^{nodes} \beta_r V_r} + \frac{h_x \sum_r^{nodes} T_r \beta_r V_r / \sum_r^{nodes} \beta_r V_r}{h_x + \sum_r^{nodes} \beta_r V_r} \quad (2)$$

$$T_{bip} = \frac{\sum_j^{elem} \left(\frac{\sum_r^{nodes} \beta_{j,r} V_{j,r}}{h_{x,j} + \sum_r^{nodes} \beta_{j,r} V_{j,r}} \times \sum_r^{nodes} \beta_{j,r} V_{j,r} T_{j,r} \right)}{\sum_j^{elem} \left(\sum_r^{nodes} \beta_{j,r} V_{j,r} \right)^2 / (h_{x,j} + \sum_r^{nodes} \beta_{j,r} V_{j,r})} \quad (3)$$

ここで、 T_{bip} ：血液プール温度[K]， β_r ：血液貫流率起因の等価エネルギー[W/m・K]， V_r ：各組織の体積[m³]， h_x ：対向する血管同士の熱交換率[W/K]，nodes：一つの部位での各組織の要素領域，elem：各体の部位， j ：部位番号である。

3.2 非フーリエ効果の加味

前述した FIALA モデルは、生体組織が連続媒体と仮定した生体温熱モデルである。しかしながら、実際の生組織は血液が流れる多孔質媒体であり、多孔質の伝熱現象を記述した生体熱伝導方程式による使用が必要である。過去の研究によって多孔質起因による伝熱の遅れが示唆されており、サウナ温冷交替入浴のような環境温度変化が急峻な熱的環境にはこの多孔質媒体による伝熱現象の時間遅れが顕著になると考えられる。そこで本研究では過去の研究にならい、多孔質による伝熱の時間遅れを考慮した独自の生体温熱モデルを開発した。本研究では FIALA モデルに対して、多孔質媒体の熱的時間遅れ（非フーリエ効果）を考慮した生体熱伝導方程式を使用した。以下に使用した非フーリエ効果型生体熱伝導方程式を示す。

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\delta T}{\delta t} = & k \nabla^2 T + \rho_{bl} w_{bl} c_{bl} (T_{bla} - T) + q_m + k \tau_T \frac{\delta(\nabla^2 T)}{\delta t} - \tau_q \rho c \frac{\delta^2 T}{\delta t^2} \\ & + \tau_q \rho c \frac{\delta(\rho_{bl} w_{bl} c_{bl} (T_{bla} - T))}{\delta t} + \tau_q \frac{\delta q_m}{\delta t} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで τ_q ：熱流束緩和時間， τ_T ：温度勾配緩和時間である。右辺の第1から第3項までは通常の FIALA モデルの熱伝導方程式であり、第4項から第7項が非フーリエ効果を加味した項である。2つの熱緩和時間を設けることで疑似的な非フーリエ効果を再現している。

4 結果と考察

実地調査による人体温度変化を図2に、サウナ室、休憩室及び水風呂の温度変化を図3に示す。各熱的条件の温度、湿度、ふく射平衡温度を表2に示す。

図2に示されるように、全ての被験者で周期的な皮膚温度・深部温度変化が見られた。皮膚温度はサウナ浴時に42℃付近に達し、水風呂時に34~36℃付近まで下降した。皮膚温度が最も上昇した被験者は被験者Dで3セット目に44℃に達した。深部温度の最高温度は被験者Bの39℃であった。被験者Aの深部体温では2セット目と3セット目において急峻な温度変化が見られる。同様に被験者Bの深部体温の変化が他の被験者と比較して大きいことが分かる。原因として無線カプセル温度計の体内位置が被験者C・Dと異なったことが考えられる。また、被験者A・B共

に深部温度が皮膚温度よりも遅れて変化していることから、皮膚温度と深部温度の最高温度時間に位相差が発生していることが確認できた。被験者 C も同様に水風呂時に皮膚温度が減少し、休憩に入るタイミングで深部温度の上昇が確認できる。しかし、被験者 D では皮膚温度と深部温度の時間変化に大きな位相差は発生していない。カプセル温度計の体内位置の違いによる影響も考えられるが、個人差である年齢、体格の違い等も位相差が発生しない要因の一つになると考える。

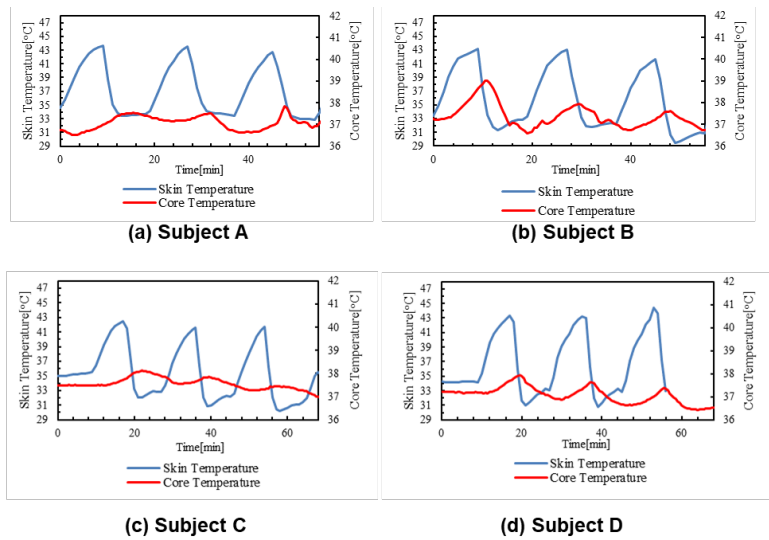


Figure 2 Thermal response of each subject

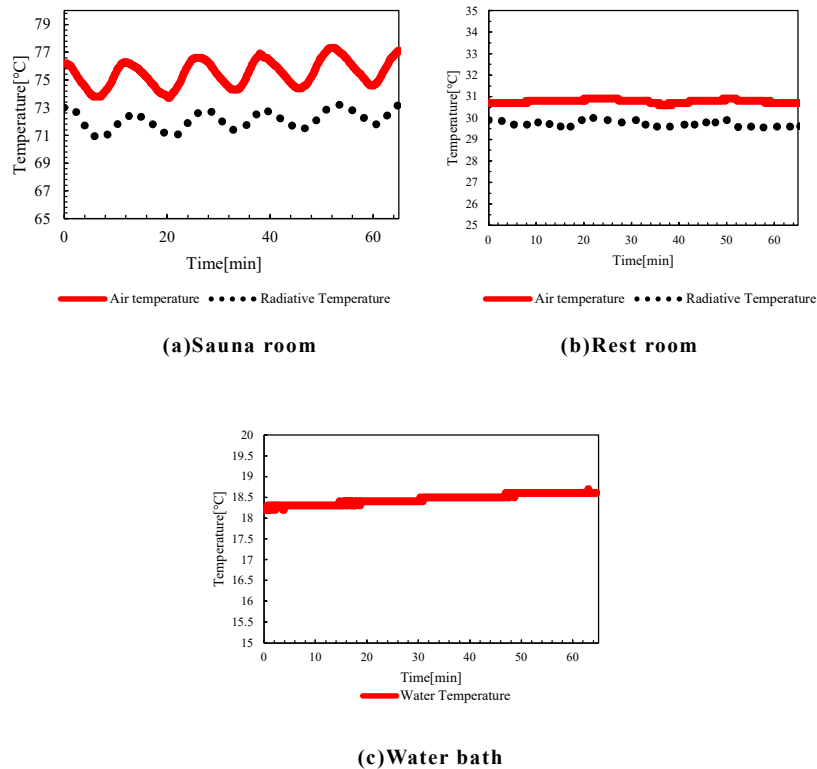


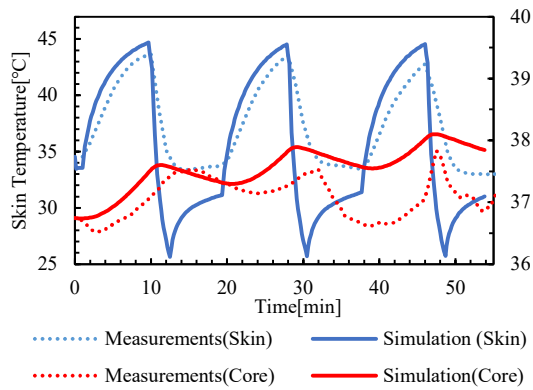
Figure 3 Temperature of experimental condition

Table 2 Environmental conditions

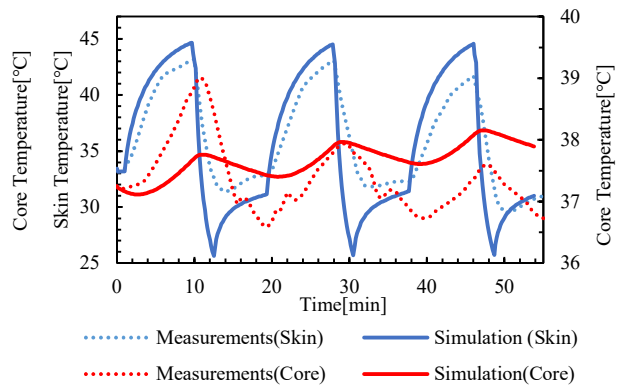
	Temperature[°C]	Radiative Temperature[°C]	Relative Humidity[%]
Sauna	75.0	72.0	23.0
Water bath	18.0	—	90.0
Rest	30.0	29.0	90.0

図 4 に FIALA モデルによる体温予測結果を示す。皮膚温度の上昇傾向は実測データと同等な変化をしている。解析による皮膚温度変化も実測データと同様にサウナ浴、水風呂の切り替え時にピークが現れていることが分かる。水風呂時の皮膚温度も実測値と近い値となっており、皮膚が空気のみではなく、水に接している場合でも良好な結果が得られることが確認できた。しかし、深部温度は実測データよりも大きい値となり、誤差が見られる。また被験者 B, C で見られたような長期的な周期的深部温度の低下は補足することができなかった。

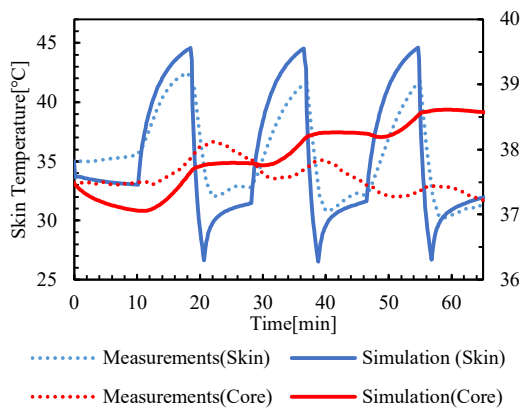
非フーリエ効果を適用した FIALA モデルの体温予測結果を図 5 に示す。皮膚温度変化は実測データと同等で最高温度をとるタイミングもよく一致している。深部温度変化も通常の FIALA モデルよりも実測データに近くなった。被験者 B・C で見られる長周期的な深部温度の低下を捉えられている。非フーリエ効果による熱緩和項が深部温度の上昇を抑え、このような結果が得られたと考えられる。



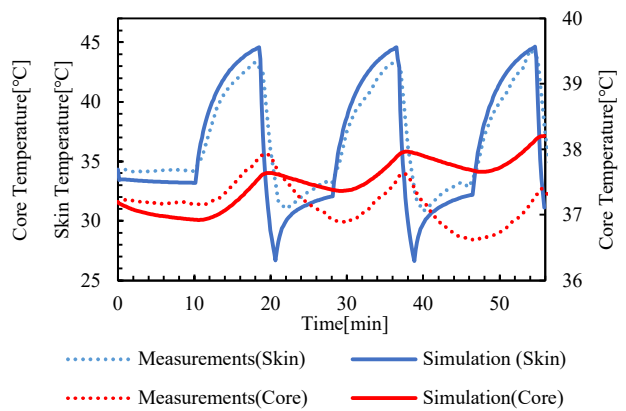
(a) Subject A



(b) Subject B

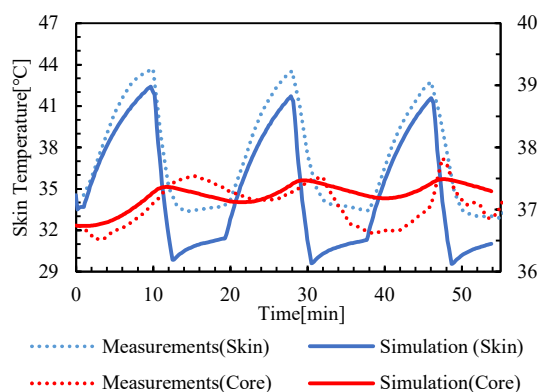


(c) Subject C

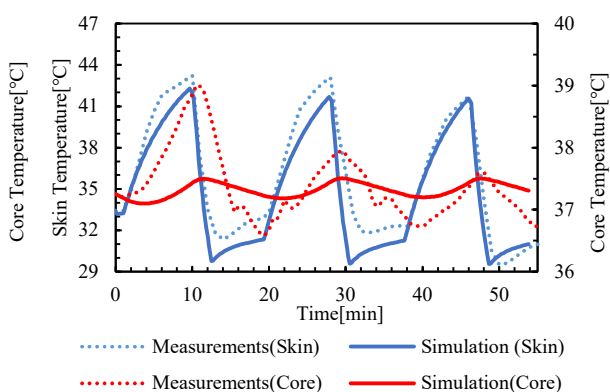


(d) Subject D

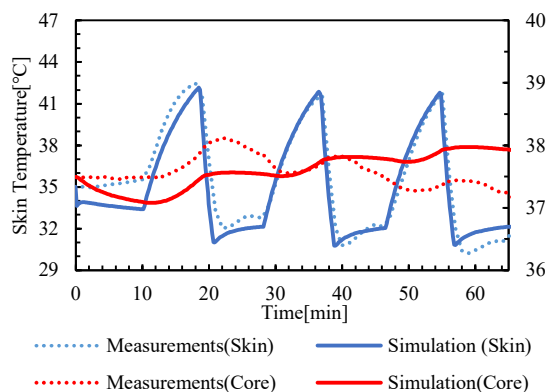
Figure 4 Comparison with Fiala model



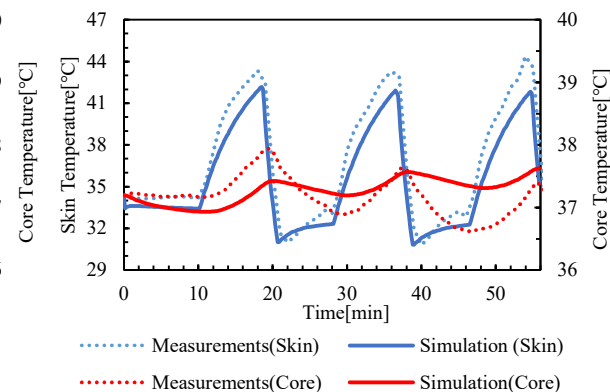
(a) Subject A



(b) Subject B



(c) Subject C



(d) Subject D

Figure 5 Comparison with non-Fourier Fiala model

5. 結言

本研究では、赤外線燃焼ヒーターが設置されるサウナ室での温冷交替入浴の人体熱反応を計測し、Fiala モデルでの熱反応の予測可能性について議論した。比較検証の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 従来の Fiala モデルでは、サウナ温冷交替入浴中の深部温度、皮膚温度を定量的に予測することはできなかった。さらに深部、皮膚温度の位相差を再現することは難しいことが明らかとなった。
- (2) Fiala モデルに対して生体の多孔質性を模擬するために非フーリエ効果を適用した時、深部、皮膚温度の位相差を再現することができた。さらに、深部、皮膚温度の予測精度も向上することが明らかとなった。