

研 究 報 告

令和 7 年 3 月 31 日

公益財団法人 前田記念工學振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 八戸工業高等専門学校 機械・医工学コース

氏 名 : 古川琢磨

研究課題名 :

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

タイトル欄：生体温熱モデルのデータ同化技術の援用による非定常環境の人体熱反応の予測

英文タイトル欄：Prediction of Human Thermal Responses in Unsteady Environments by Applying Data Assimilation Techniques to Biothermal Models

八戸工業高等専門学校 准教授 古川琢磨

（研究計画ないし研究手法の概略）

近年増加する熱中症・ヒートショック等の熱的事故の防止には、熱的指標値によるリスク評価が不可欠である。従来の熱的危険性の予測には湿球黒球温度（WBGT）や作用温度など定常値を用いたものであった。一方、熱中症やヒートショックは深部温度と皮膚温度に位相差が生じる非定常条件下で発生する。さらに、個々人の特性によってその非定常性は劇的に異なる。そのため、WBGT等の従来の指標値では、熱的事故の予防において非定常な状況や個々の特性による影響を見逃す可能性がある。以上のことから、熱的事故発生の定量予測のためには、WBGTや作用温度などとは全く異なった、非定常性、個人差を考慮可能な人体熱反応予測モデルの開発が急務である。本研究では独自に作成した、非フーリエ型 Fiala モデルに対してデータ同化を適用させ、データ同化によって生体熱反応がどの程度向上するのかを議論・評価することを目的とする。

本目的を達成するために、サウナ繰り返し入浴中の皮膚温度、深部温度をウェアラブルデバイス及び無線型カプセル温度計で計測を行い、開発した生体温熱モデルとの比較を行った。比較ではデータ同化の適用可能性を議論するために、生体温熱モデル中の血液灌流率の式のパラメータをチューニングし、皮膚温度、深部温度をそれぞれ算出した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

本研究ではデータ同化の初歩段階として、生体温熱モデルでの血管拡張・収縮パラメータを調整し、最も実験結果と差異の小さい条件を探索した。本研究では Fiala モデルをベースとした生体温熱モデルを用いており、以下の血液灌流率の式を用いた。

$$\beta_i = \frac{\beta_{0,i} + \alpha_{dl,i} DL \cdot Pr_1}{1 + \alpha_{cs,i} CS \cdot Pr_2 \cdot e^{-DL/80}} \cdot 2^{\frac{T_{sk,i} - T_{sk,i,0}}{10}}.$$

ここで β_i [W/K]は i 番目の部位における皮膚の血液灌流率、 $\beta_{0,i}$ [W/K]は i 番目の皮膚の中立状態における皮膚血液灌流率、 $\alpha_{cs,i}$ [-]および $\alpha_{dl,i}$ [-]はそれぞれ、血管収縮、拡張の重み付け係数、 CS [-]および DL [-]は血管拡張、収縮の回帰式、 $T_{sk,i}$ [°C]は i 番目体部位の皮膚平均温度、 $T_{sk,i,0}$ [°C]は i 番目の部位の中立状態における皮膚温度を示す。本式に現れる、 Pr_1 [-]および Pr_2 [-]は血管拡張・収縮のパラメータを示しており、本パラメータを調整することにより血管流量が増加、減少を表現することができる。探索条件として、本研究では Pr_1 および Pr_2 のグリッドリサーチとした。グリッドリサーチの結果、通常の Fiala モデル、非フーリエ型を考慮した Fiala モデルでは能動的な血管拡張・収縮が発生しない条件が実験値との差異が最も小さかった。本結果はサウナ繰り返し入浴のような非定常性が極めて大きい環境では、Q10効果のみの血管拡張・収縮が支配的であり、アクティブな血流制御が行われていないことを示唆している。以下に示す、結果考察では血管流量が最適化された条件での熱反応結果について議論する。

図 1 に実験で測定した皮膚温度、深部温度の初期状態からの時間変化と解析で取得した温度変化の比較を示す。図 1 に示されるように、非フーリエ効果を考慮しない Fiala モデルではサウナ入浴中の皮膚温度を過大に予測し、水風呂入浴中の皮膚温度を過小に予測していることが分かる。実験値の深部温度結果から示されるように、深部温度はサウナ入浴で高くなり、水風呂入浴で低下するものの長時間の平均値は若干低下していることが分かる。しかしながら、フーリエ効果ベースの Fiala モデルの深部温度の比較結果から示されるように、深部温度は過大に予測していることが分かる。本結果からフーリエ効果ベースの Fiala モデルでは人体周囲の伝熱特性を正確に評価することができなく、人体深部への熱流束量の見積もりが過大に評価され、高温の深部温度予測結果になったと考えられる。一方で非フーリエ効果の比較結果から示されるように、非フーリエ効果を加味した Fiala モデルでは皮膚温度を高精度に予測していることが分かる。本結果から人体組織の多孔質性に起因する熱遅れがサウナのような非定常性の強い環境での伝熱現象に大きく影響を及ぼしていることが推察される。

表 1 に図 1 での初期状態からの温度上昇のそれぞれのモデルにおける RMSE 値を示す。表 1 に示されるように、非フーリエ効果を適用することにより、皮膚温度予測が 3.3 °C、深部温度予測が 0.3°C 程度向上できることが明らかとなった。

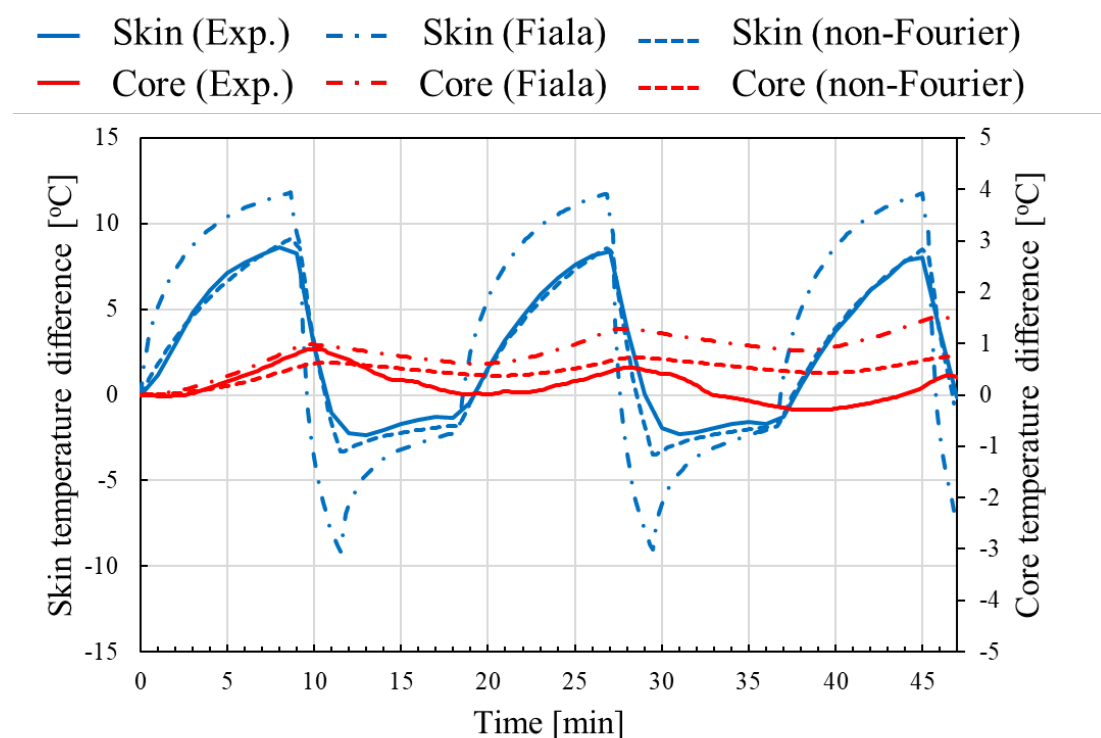


図 1 サウナ入浴直前を初期状態とした時からの皮膚温度、深部温度の変化の比較、実験値は 4 人分の体温変化の平均値を示す。非フーリエ効果の有効性を示すために、フーリエ効果をベースにした Fiala モデル、非フーリエ効果をベースにした Fiala モデルの比較結果を示す。解析では血流量を調節し、最も実験結果との差異が少なかった条件を示している。

表 1 Fiala モデル及び非フーリエ型 Fiala モデルにおける皮膚温度，深部温度上昇の RMSE 値（図 1 から算出）

	Skin [°C]	Core [°C]
Fiala model	3.929	0.716
Non-Fourier Fiala model	0.594	0.406

本研究では上記で得られた知見をより深く検証するために，他の研究者によって取得されたサウナ入浴中の深部温度，皮膚温度の時間推移について同様のデータ同化解析を実施した．図 2，図 3，図 4 はそれぞれ，70 °C のドライサウナ，45 °C，38 °C のミストサウナにおける皮膚温度，深部温度の推移を示す．比較のため通常の Fiala モデルにおけるデータ同化解析結果も示す．図 2，3，4 に示されるように全てのサウナ条件において非フーリエ効果を考慮したデータ同化解析結果は皮膚温度，深部温度を適切に予測していることが分かる．一方で通常の Fiala モデルではサウナ入浴中の皮膚温度は過大に予測し，サウナ入浴後の皮膚温度を過小に予測していることが分かる．本傾向は本研究で取得した実験結果との比較でも示されており，本研究で開発した非フーリエ型 Fiala モデルの有効性を強化する知見であると考えられる．

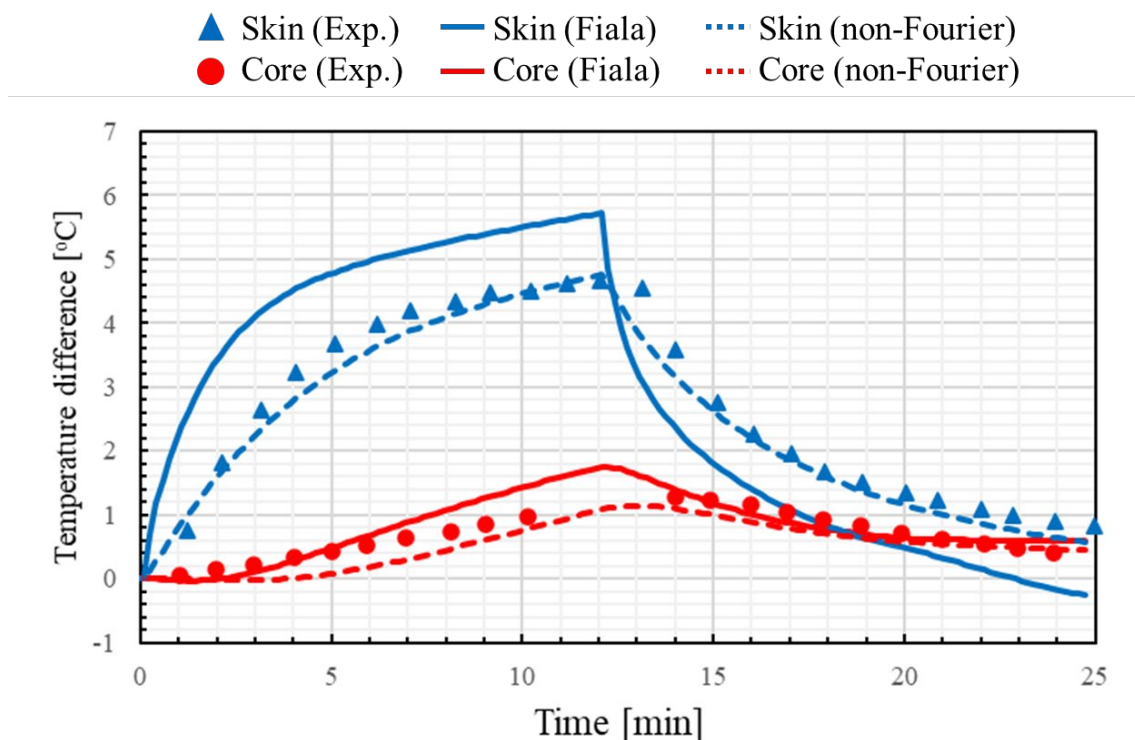


図 2 70 °C のドライサウナにおける皮膚温度，深部温度のデータ同化解析結果

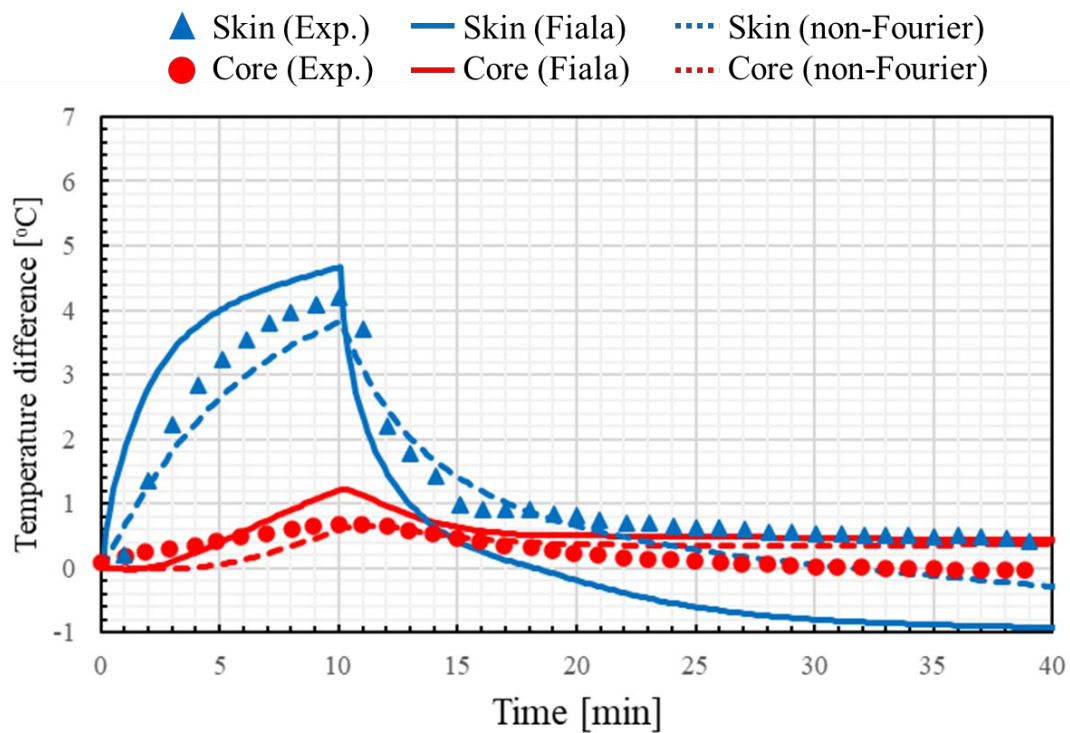


図 3 45 °C のミストサウナにおける皮膚温度，深部温度のデータ同化解析結果

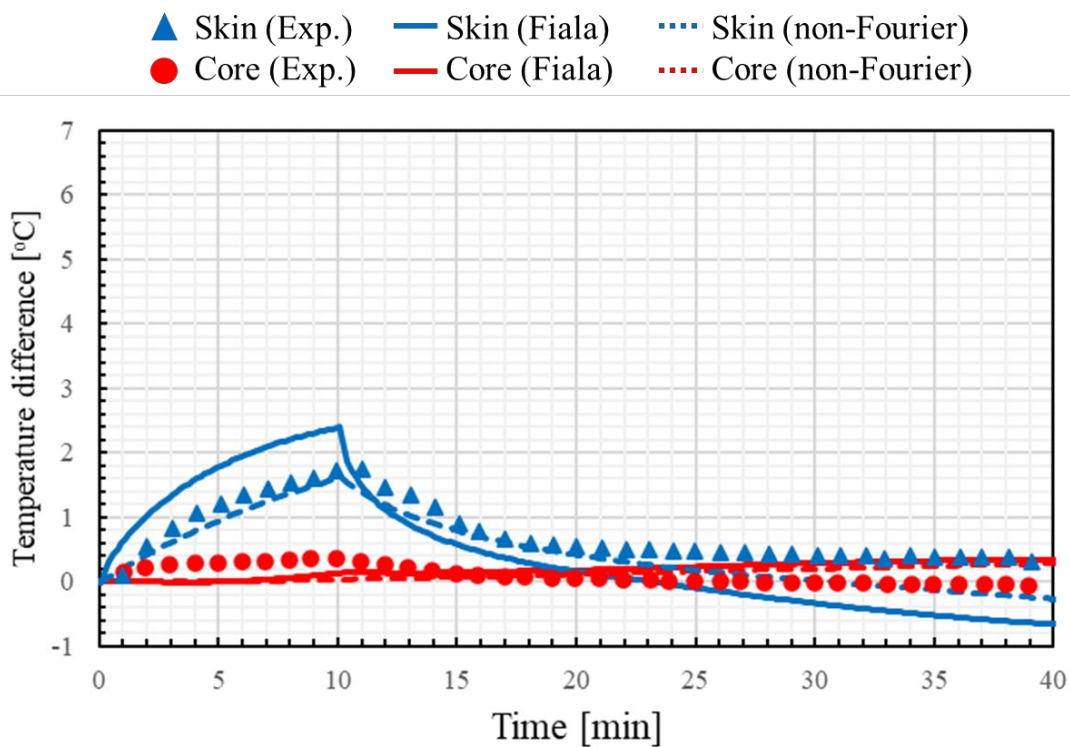


図 4 38 °C のミストサウナにおける皮膚温度，深部温度のデータ同化解析結果

（結論）

本研究から非フーリエ効果を考慮した Fiala モデルを使用と血液灌流率のデータ同化を実施することにより、サウナ繰り返しのような極めて非定常性の強い環境においても皮膚温度、深部温度を定量的に予測可能になることが明らかとなった。本研究を応用することにより、サウナ繰り返し入浴以外の熱環境での人体熱反応が適切に予測できる可能性があり、WBGT に代用される熱中症指数の開発にも貢献できると考えられる。

（発表論文）

査読付き論文

- Kurumu Nishidate, Yasuhiro Shimazaki, Junnosuke Okajima, **Takuma Kogawa**, “Development of non-Fourier thermoregulation model for extreme transient thermal environments such as repeated sauna bathing”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 163, 108737, (2025).

口頭発表

- 古川琢磨，西館来夢，島崎康弘，岡島淳之介，“非定常熱環境に適応可能な生体温熱モデルの開発”，第 61 回日本伝熱シンポジウム，神戸，(2024).