

Two-node model による椅座安静時の皮膚温・深部温の再現性

非定常温熱環境での被験者実験に基づく検討

崎山 拓也*, 高田 暁**

*神戸大学大学院工学研究科 大学院生, **神戸大学大学院工学研究科 准教授・博士 (工学)

Validity of Two-Node Model for Prediction of Skin and Core Temperature at Sedentary Activity

A Study Based on Subject Experiment in Thermal Transient Condition

SAKIYAMA Takuya*, TAKADA Satoru**

*Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kobe University

**Associate Professor, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr.Eng.

Abstract : Predictability of skin and core temperatures by two-node model was investigated for thermal transient state. The skin and core temperatures calculated by two-node model were compared with the experimental data averaged for considerable number of young male subjects in good health exposed to two types of thermal transient conditions including neutral, low and high ambient temperature at sedentary activity. There were some differences between the experimental temperatures and those calculated by two-node model, both 1971 and 1986 edition model. Compared with the experimental skin temperature, the values calculated by 1971 edition model were higher in neutral condition and lower in low-temperature condition, and those by 1986 edition model were lower in neutral condition and changed more slowly in transient state. The difference in calculated skin temperature between both edition models was explained by the structure of models with respect to the skin blood flow, the regulatory sweating and the skin mass ratio.

Key words : Two-node model, Subject experiment, Sample average, Transient state, Predictability

要旨 : Two-node model による、非定常過程における皮膚温、深部温の再現性について検討した。中立環境、寒冷環境、暑熱環境を含む非定常温熱環境に、比較的多人数の健康な成年男子を椅座安静状態で曝露し、皮膚温および深部温の全被験者の平均値を Two-node model の計算値と比較した。1971 年版および 1986 年版の Two-node model を用いて検討した結果、双方のモデルで実験値との差がみられ、皮膚温に関しては、1971 年版のモデルにおいて中立条件で高く、寒冷条件で低い傾向、1986 年版のモデルにおいて中立条件で低く、非定常過程で変動が遅い傾向がみられた。2つのモデルの計算値の差異は、血流調節、発汗調節、外殻率のモデル化の違いで説明された。

キーワード : Two-node model、被験者実験、被験者平均、非定常過程、再現性

1. はじめに

Two-node model は、非定常過程にも適用できると考えられるが、モデルの予測精度については、実験結果との比較検討によって検証する必要がある。多人数の実験データによる検証が必要であると考えられるが、現状ではそのような例は非常に少ない。

これまでに、南ら (2008) によって、中立環境から暑熱環境に移行する過程について、1986 年版の

Two-node model を用いた検討がなされており、低代謝時について、高代謝時と比べると実験値と比較的によく一致したとされている。しかし、低代謝時の非定常状態における実験値との誤差は、高代謝時よりは小さいものの、皮膚温で最大 0.5℃、深部温で最大 0.3℃程度であり、予測精度には検討の余地がある。また、寒冷環境については対象としていない。

本研究では、中立環境、寒冷環境、暑熱環境を含む

非定常過程における、椅座安静条件での被験者実験の結果を用いる。比較的多人数の健康な成年男子の平均値を用いて、1971年版 (Gaggeら、1971) および1986年版 (Gaggeら、1986) のTwo-node modelにより、皮膚温、深部温の再現性について検討する。

2. 方法

2.1 被験者実験

複数の被験者を非定常温熱環境条件 (Schedule-1 および Schedule-2) に曝露し、深部温 (直腸温)、皮膚温 (Hardy & Dubois の7点) を10秒間隔で測定した。温熱環境条件は、両Scheduleとも、中立条件 (Phase-1)、寒冷条件 (Phase-2)、中立条件 (Phase-3)、暑熱条件 (Phase-4)、中立条件 (Phase-5) の順にステップ変化させた (図1)。実験は、Schedule-1を2006年10月23日、30日、11月24日の3日、Schedule-2を2007年10月4日、5日の2日に分けて行った。実験時間は、Schedule-1で13:30~16:00、Schedule-2で13:00~16:20である。被験者は各実験日において3、4名ずつ、Schedule-1で計10名、Schedule-2で計7名であり、すべて健康な成年男子である (表1)。被験者は椅座安静を保ち、服装はトランクスのみ (0.06clo) とした。

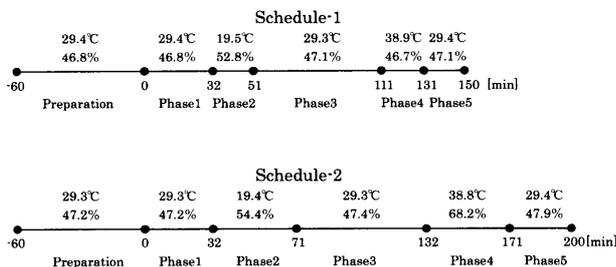


図1 温熱環境条件

表1 被験者の属性

| | Subject number | Sex | Age [year] | Height [cm] | Weight [kg] | Body surface area[m ²] |
|------------|----------------|------|------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| Schedule-1 | 10 | Male | Average | 23.8 | 169.5 | 68.0 |
| | | | SD | 2.3 | 5.0 | 10.7 |
| Schedule-2 | 7 | Male | Average | 22.9 | 170.7 | 65.7 |
| | | | SD | 1.1 | 3.9 | 16.8 |

2.2 Two-node model による生理量の算出

本研究で用いる Two-node model は、1971年版 (Gaggeら、1971) および1986年版 (Gaggeら、1986) である。表2のように、1986年版では、血流モデルの係数値、発汗モデルの式が1971年版とは異なり、ふるえモデルの追加、血流量に応じた外殻率 (全身の質量に占める皮膚の質量の割合) の変動の考慮がなされている。また、以上の調節反応に関わるセットポイントの値も異なる。

計算条件を表3に示す。気温、湿度は実験結果を用

い (図1)、平均放射温度は気温と等しいとした。被験者は実験開始60分前 (図1参照、-60min) から熱的中立条件 (PMV=0) で椅座安静を保っていたため、皮膚温、深部温の初期条件はセットポイントで与えて、実験開始60分前から計算を開始した。

表2 1971年版と1986年版のTwo-node modelの違い

| | 1971 Edition | 1986 Edition |
|--|--|--|
| Tsk,set [°C] | 34.1 | 33.6 |
| Tcr,set [°C] | 36.6 | 36.8 |
| Skin blood flow [g/m ² h] | $V_{bl} = \frac{6.3 + 75 \cdot w_{sig}_{cr}}{1 + 0.5 \cdot c_{sig}_{sk}}$ (1) | $V_{bl} = \frac{6.3 + 200 \cdot w_{sig}_{cr}}{1 + 0.1 \cdot c_{sig}_{sk}}$ (3) |
| Regulatory sweating [L/m ² h] | $m_{rsw} = 100 \cdot w_{sig}_{cr} \cdot w_{sig}_{sk} \cdot 2^{w_{sig}_{sk}/3}$ (2) | $m_{rsw} = 170 \cdot w_{sig}_{body} \cdot \exp(w_{sig}_{sk}/10.7)$ (4) |
| Shivering [W/m ²] | 0 | $M_{shiv} = 19.7 \cdot c_{sig}_{cr} \cdot c_{sig}_{sk}$ (5) |
| Skin ratio [-] | 0.042 | $\alpha = \frac{0.0417737 + 0.7451832}{V_{bl} + 0.585417}$ (6) |

注:

$$T_{body} = \alpha \cdot T_{sk} + (1 - \alpha) \cdot T_{cr} \quad (7)$$

m_{rsw} : 発汗量 [g/(m²·h)], V_{bl} : 血流量 [g/(m²·h)], M_{shiv} : ふるえによる代謝量 [W/m²], w_{sig} : セットポイントからのずれ (温信号) [K], c_{sig} : セットポイントからのずれ (冷信号) [K], α : 外殻率 [n.d.], T : 温度 [°C]

$$w_{sig}_{sk} = T_{sk} - T_{sk,set}, \quad w_{sig}_{body} = T_{body} - T_{body,set}, \quad c_{sig}_{cr} = T_{cr,set} - T_{cr}, \quad c_{sig}_{sk} = T_{sk,set} - T_{sk} \quad (\text{それぞれ負の場合は0とする})$$

cr: 深部, sk: 皮膚, body: 全身平均, set: セットポイント

表3 計算条件

| | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Air temperature | Measured data (Figure 1) | Height | 177.0[cm] |
| Air humidity | Measured data (Figure 1) | Weight | 81.7[kg] |
| Mean Radiant Temperature | Equal to Air Temperature | Body surface area | 1.98[m ²] |
| ConvectiveHeat transfer Coefficient | 3.1[W/(m ² ·K)] | Clothing | 0.06[clo] |
| RadiativeHeat transfer Coefficient | 4.65[W/(m ² ·K)] | Normal metabolic rate | 58.2[W/m ²] |
| | | External mechanical efficiency | 0 |
| | | Initial skin & core temperature | Setpoint (at -60[min]) |

3. 結果

各生理量について、Schedule-1、Schedule-2に共通して同様の傾向がみられた。

深部温について (図2、3)、1971年版モデル (cal. (1971)) と1986年版モデル (cal. (1986)) の計算値は同様の傾向を示したが、どちらも全被験者の実験値の平均 (exp.) より全体に低く、最大0.7°C程度の差があった。また、Phase-2 (寒冷環境) およびPhase-5 (暑熱環境後の中立環境) で、実験値が上昇するのに対し計算値は低下、さらにPhase-3 (寒冷環境後の中立環境) では、実験値が低下するが計算値は上昇しており、実験値と計算値が異なる傾向を示した。

皮膚温について (図2、3) は、実験値と計算値の間に1971年版で最大約3.2°C、1986年版で最大約1.6°Cの差異がみられ、また、両モデルの計算値の間にも相

違がみられた。ほぼ定常状態であると考えられる Phase-1 (中立環境) で、1971 年版は実験値より高く、1986 年版は実験値より低い値になっている。さらに、非常常過程について、Phase-2 (寒冷環境) で 1971 年版は実験値と比べ低くなり、また低下のスピードが鈍らないのに対し、1986 年版は実験値に近い値を示した。Phase-3 (寒冷環境後の中立環境) では、1971 年版が実験値と比べ低い温度から高い温度へと急激に変化するのに対し、1986 年版は変化が緩慢であった。Phase-4 (暑熱環境) でも、1971 年版は変化が急激で、1986 年版は緩慢であったが、最終的に両モデルとも実験値に近い値に落ち着いた。Phase-5 (暑熱環境後の中立環境) では、両モデルとも Phase-1 にみられた定常値に近づいた。また、Schedule-2 の実験値にみられる一過性の皮膚温の低下は再現されていなかった。

皮膚血流量に関して (図 4, 5)、1971 年版と比べ 1986 年版の計算値において、血管収縮があまり起こっていないが、血管拡張は急激である。

発汗量 (図 4, 5) は、1986 年版の方が中立環境で計算値が大きく、Phase-1 で 20[g/m²h] 程度であった。

外殻率について (図 6, 7) は、1971 年版で一定、1986 年版において血流量の関数として変化しているが、全体に 1986 年版で大きな値になっている。

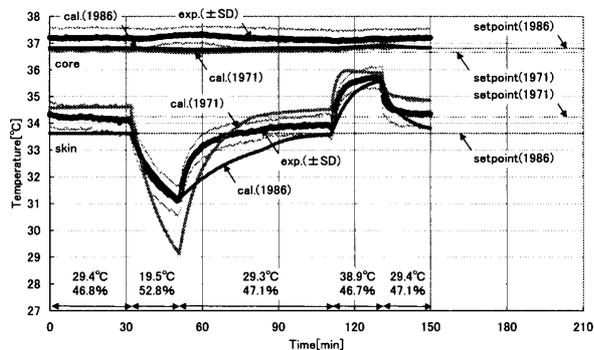


図 2 皮膚温、深部温の実験値 (被験者平均、±SD) および新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-1)

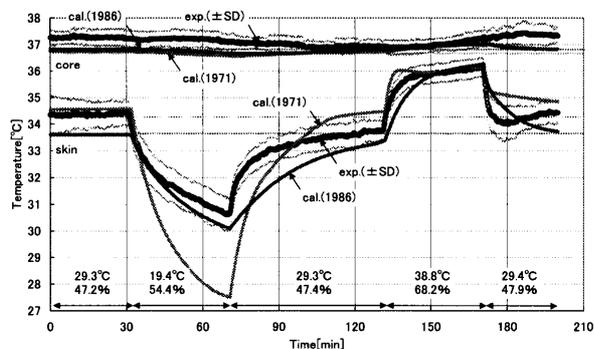


図 3 皮膚温、深部温の実験値 (被験者平均、±SD) および新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-2)

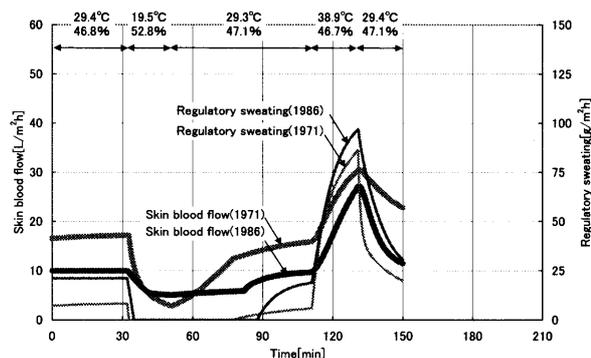


図 4 皮膚血流量、発汗量の新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-1)

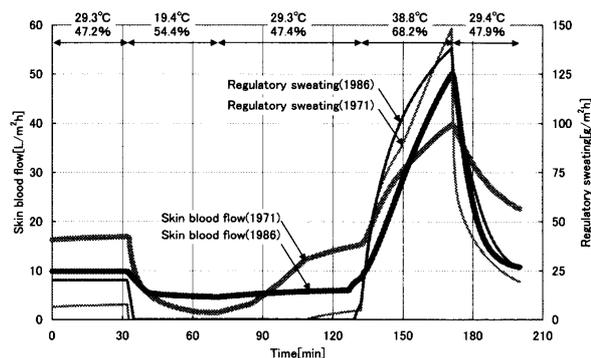


図 5 皮膚血流量、発汗量の新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-2)

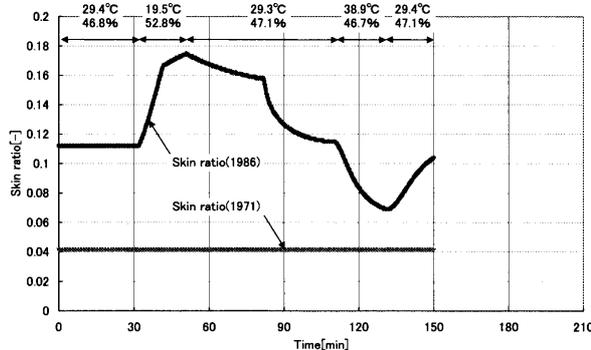


図 6 外殻率の新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-1)

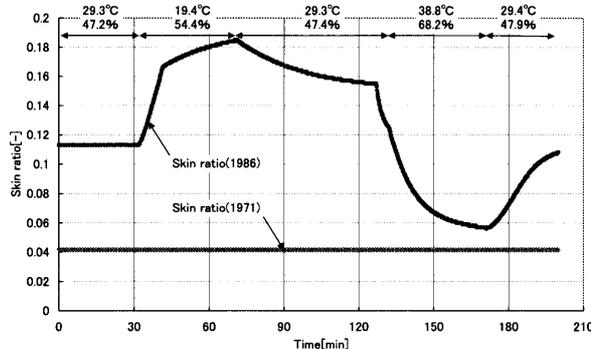


図 7 外殻率の新旧 Two-node model による計算値 (Schedule-2)

4. 考察

皮膚温について 1971 年版と 1986 年版の計算値の間に相違がみられた原因を、モデルの相違点から考察する。また、実験値の全被験者平均と計算値の差について検討する。

まず、Phase-1（中立環境、定常）の皮膚温が、1971 年版で実験値より高く、1986 年版で実験値より低い。熱的中立に近い環境において、1971 年版と比べて 1986 年版のモデルの発汗量が多くなるために、皮膚温が低くなると考えられる。なお、皮膚温が低く外界との温度差が小さくても、発汗量が多いことで 1971 年版の場合と同等の放熱量が確保できている。また皮膚温が低いと深部と皮膚の温度差が大きいが、1986 年版では血流量は少なく、両モデルで深部から皮膚への熱流は同程度である。

Phase-2（寒冷環境）および Phase-3（寒冷環境後の中立環境）において、1971 年版は実験値と比べて皮膚温の低下が激しい。この原因は、式(1)右辺の分母にある血管収縮の係数が 0.5 であり、1986 年版の 0.1 と比べ大きいことによる。血管収縮の係数が大きいと血流量が小さくなりやすく、その結果として皮膚温が下がっている。Phase-2 で皮膚温の低下が速い原因としては、血流量が小さくなりやすい点のほか、外殻率が小さく、皮膚の熱容量が小さい点が挙げられる。一方、1986 年版による計算値は、Phase-2 での皮膚温の変動をよく再現しているといえる。この寒冷条件ではふるえの効果は小さいにもかかわらず、皮膚温の低下が次第に緩やかになっていく様子も再現できており、外殻率が上昇し皮膚の熱容量が大きくなるというモデル化が奏功していると考えられる。しかし、Phase-3 で、実験で皮膚温が急激に上昇しているのに対し、計算値は変化が鈍く、実験結果をうまく再現できていない。Phase-3 に入った時点で外殻率は Schedule-1 で 0.17、Schedule-2 で 0.18 程度であるが、このように外殻率が大きいことが、実験値と異なる挙動につながっているといえる。

Phase-4（暑熱環境）の前半、1986 年版において、1971 年版よりも皮膚温が低く、さらに血流量も少ないため、深部および外界から皮膚に流入する熱量が多くなっている。にもかかわらず、1986 年版では皮膚温の上昇が遅い。これは、1986 年版では外殻率が大きく、皮膚の熱容量が大きいためである。

Phase-5（暑熱環境後の中立環境）で、1971 年版と比べ 1986 年版の皮膚温が低い。それぞれのモデルの皮膚温が Phase-1 でみられた定常値に近づくためであると考えられる。また、Schedule-2 の実験値に一過性の皮膚温の低下がみられる。これは、暑熱環境下で分泌された汗が皮膚表面に残っていたためと考えられるが、

計算値ではこのような現象を考慮していないために、この一過性の低下が表現できていない。

5. まとめ

比較的多人数の被験者を椅座安静状態で非定常温熱環境に曝露し、得られた皮膚温および深部温の全被験者の平均値を Two-node model によってどの程度再現できるか検討した。1971 年版および 1986 年版の両モデルで実験値との差がみられ、皮膚温について、1971 年版のモデルでは中立条件で高く、寒冷条件で低い傾向、1986 年版のモデルでは中立条件で低く、非定常過程で変動が遅い傾向がみられた。両モデルの皮膚温の差異は、血流調節、発汗調節、外殻率のモデル化の違いで説明された。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費 若手研究 A（課題番号 17686050、研究代表者：高田暁）の助成を受けた。また、被験者実験は、京都大学大学院工学研究科付属桂インテックセンター内に設置されたテクノアメニティラボで実施された。

6. 文献

- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. and Nishi, Y. 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Transactions. 77:247/262
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.G. 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions. 92:709/731
- 南百合子, 大岡龍三, 沢崎慎祐, 佐古井智紀, 都築和代. 2008. 2 ノードモデルにおける発汗モデルの改良と暑熱環境安全性評価への適用. 日本建築学会環境系論文集. 73(623):107/114

<連絡先>

著者名 崎山 拓也

住所 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

所属 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻高田研究室

E-mail アドレス 081t031t@stu.kobe-u.ac.jp