

## Two-node model による定常状態での皮膚温の再現性 多人数の平均的性状に対する再現性の検討

崎山 拓也 1), 高田 暁 1)

1) 神戸大学大学院工学研究科

### Validity of Two-Node Model for Prediction of Skin Temperature in Steady State Reproducibility of Average Behavior for Considerable Number of Subjects

SAKIYAMA Takuya 1) and TAKADA Satoru 1)

1) Graduate School of Engineering, Kobe University

**Abstract:** The validity of the two-node model for the prediction of the skin temperature in the steady state is studied, by comparing the calculated results with those of experiments for a considerable number of subjects under various thermal conditions in thermal steady state at low-activity condition. The calculations based on the two-node model are performed by both 1971 and 1986 editions. As the result, 1986 edition can predict the skin temperature fairly well. However, under low-temperature environment, the solution by 1971 edition is lower than the experimental result because of the absence of shivering model, which is added in 1986 edition. Although for neutral and high-temperature environment, 1971 edition can predict well.

**Key Words:** Two-node model, Subject experiment, Average, Steady state, Reproducibility

**要旨:** Two-node model による定常状態における皮膚温の予測精度を検証するため、多様な温熱環境条件下での被験者実験の結果と、Two-node model による計算の結果とを、低代謝条件において比較した。計算値は、1971年版および1986年版のTwo-node model によった。1986年版のモデルは、定常状態に関しては、多人数の平均的性状をおおむね再現できていた。一方、1971年版のモデルでは、暑熱・中立環境条件下で再現性が良いが、ふるえが考慮されていないため、寒冷環境下での皮膚温の計算値が実験値と比べて低くなった。

**キーワード:** Two-node model、被験者実験、平均、定常状態、再現性

#### 1.はじめに

Two-node model は、Gagge らによって提案された人体熱モデルであり、SET\*の算出などに幅広く用いられている。ただし、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、予測精度を明らかにした例は非常に少ない。

既報において、非定常過程について、比較的多人数の被験者による実験で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を行い、問題点を示した。

本研究では、定常状態について、中立環境、寒冷環境、暑熱環境下での被験者実験の結果と Two-node

model の計算結果を皮膚温について比較する。比較に際しては、著者らによる被験者実験の他にも、既往の文献からデータを読み取ることで、多人数の被験者から得られたデータに基づいて検討を行う。実験条件は、椅座安静程度の低代謝条件に限定する。計算結果としては、1971年版(Gagge ら、1971)および1986年版(Gagge ら、1986)のTwo-node model の両方を対象とし、それぞれについて平均皮膚温の定常解の再現性を検討する。

表 1 実験条件、被験者の属性、平均皮膚温 (実験値、計算値)

	Thermal Conditions						Subjects				Mean Skin Temperature			
	Air Temperature [°C]	Relative Humidity [%]	Clothing [clo]	Usual Metabolic Rate [Met]	Exposure Time [min]	Method of Measuring Skin Temperature	Average Height [cm]	Average Weight [kg]	Total Number of Subjects		Experimental Mean Skin Temperature [°C]	Calculated Mean Skin Temperature [°C]		
									Male	Female		1971 Edition	1986 Edition	
Authors (Kobayashi (2008))	29.4	47.0	0.06	1.0*	90	Thermocouple	169.5	65.1	28	0	34.3	34.6	33.6	
	26.3	46.1							4	0	33.4	32.7	32.7	
	38.8	68.1							7	0	38.1	36.7	36.7	
Mori et al. (2003)	26.8	47.0	0.06	1.0*	60	Thermocouple	172.5	59.0	2	0	31.5	32.7	32.8	
	31.1	49.6							4	0	34.5	35.0	34.0	
	30.4	43.6							2	0	34.5	34.8	33.8	
Tamura (1983)	22	50	0.1	0.7	120	Thermography	154.9	50.1	0	27	29.4	27.2	30.1	
	25										30.9	29.6	31.4	
	28										33.0	32.1	32.8	
	31										34.2	34.6	34.0	
Minami et al. (2008)	35	50	0.3	1.0*	60	Thermistor			19	20	35.5	35.6	35.0	
	35	70							12	13	35.7	35.6	35.1	
	40	50									36.1	35.9	35.9	
Ogawa et al. (1974)	21.8	60	0.06	0.9	90				6	0	31.6	27.7	29.9	
	24.2										32.6	29.7	31.1	
	26.9										33.3	32.2	32.5	
	29.2		34.1	34.3							33.6			
	21.8		0.1	0.8							30.8	27.7	30.1	
	24.2											32.0	29.6	31.2
	26.9	32.8			32.0	32.5								
	29.2	33.9	34.2	33.8										
	21.8	0.6	0.8	32.8	30.4	31.8								
	24.2				33.4	32.6	32.8							
	26.9				34.2	34.5	33.7							
	29.2	34.8	35.0		34.0									
Ogawa et al. (1975)	21.8	60	0.06		0.9	90				8	0	30.5	27.7	29.9
	24.2											31.7	29.7	31.1
	26.9			32.7								32.2	32.5	
	29.2		33.5	34.3	33.6									
	21.8		0.1	0.8	30.3							27.6	30.1	
	24.2											31.7	29.6	31.2
	26.9	32.6				31.9	32.5							
	29.2	34.0	34.1	32.6										
	21.8	0.6	0.8	31.6		30.4	31.8							
	24.2					32.5	32.4	32.7						
	26.9				33.2	34.5	33.7							
	29.2	34.0	35.0		34.0									
Ogawa et al. (1976)	19.5	60	0.6		0.8	90				8	8	31.4	28.7	31.0
	22.0											32.1	30.5	31.9
	24.5			33.0								32.8	32.9	
	27.0			33.9								34.5	33.7	
Ogawa et al. (1977)	17.1	60	0.6	0.8	90				8	8	30.5	26.7	30.1	
	19.6										31.1	28.5	31.0	
	21.8										32.0	30.1	31.8	
	24.2										32.9	32.0	32.7	
Arita et al. (1989)	16.1	50	0.6	1.0	90	Thermocouple	167.7	59.6	4	0	30.1	27.1	29.8	
	20.5										32.3	30.6	31.4	
	24.4										33.6	34.2	33.3	
	27.7										34.8	34.9	33.9	
Yokoyama et al. (1999)	22	72	0.06	1.0	60	Thermistor	168.3	63.2	3	0	30.3	28.8	30.2	
	24	64									32.0	30.0	31.2	
	26	57									32.7	31.2	32.3	
	28	51									33.3	32.5	33.3	
	30	45									34.0	34.0	33.8	
	32	40									34.2	34.4	34.2	

注) 通常時代謝量(Usual Metabolic Rate): ふるえが生じていないときの代謝量を示す。代謝量が測定されている文献については、全実験条件のうち最も代謝量が小さい条件での値を、通常時の代謝量とみなした。代謝量が測定されていない場合\*は、実験時の姿勢に応じ設定した。

## 2. 方法

### 2. 1. 被験者実験データ

Two-node modelによる皮膚温の定常解の再現性を検討するため、過去に行われた被験者実験を引用し、皮膚温のデータを収集する。対象とするデータは、低代謝条件、定常状態での実験結果である。実験条件は、気温 16~40°C、相対湿度 40~72%、着衣量 0.06~0.6clo と多様である。概要を表 1 に示す。なお、引用元に非定常過程の皮膚温が示されている場合、皮膚温が安定し、定常状態に達していると思われる段階での値を用いた。

### 2. 2. Two-node model による生理量の算出

1971年版 (Gagge ら、1971) および 1986年版 (Gagge ら、1986) の両方の Two-node model を用いる。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年版と異なり、さらに、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。

生理量の算出においては、実験ごとに、表 1 の太枠内に示した気温、湿度、着衣量、通常時代謝量をそれ

それを入力し、セットポイントを初期条件として、10時間滞在を想定した非定常計算を行い、10時間後の解をもって定常解とした。その他の計算条件は表3の通りである。

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 <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> ]	0	$M_{shiv} = 19.7 \cdot c_{sig}_{cr} \cdot c_{sig}_{sk}$ (5)
Skin ratio [-]	0.042	$\alpha = 0.0417737 + \frac{0.7451832}{V_{bl} + 0.585417}$ (6)

注)

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

$m_{rsw}$ : 発汗量[g/(m<sup>2</sup>·h)]、 $V_{bl}$ : 血流量[g/(m<sup>2</sup>·h)]、 $M_{shiv}$ : ふるえによる代謝量[W/m<sup>2</sup>]、 $w_{sig}$ : 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]、 $\alpha$ : 外殻率[n.d.]、 $T$ : 温度[°C]

$$w_{sig}_{sk} = T_{sk} - T_{sk,set} \quad , \quad w_{sig}_{body} = T_{body} - T_{body,set} \quad , \quad c_{sig}_{cr} = T_{cr,set} - T_{cr} \quad ,$$

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

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

Mean Radiant Temperature	Equal to Air Temperature	Height	177.0[cm]
Convective Heat transfer Coefficient	3.1[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Weight	81.7[kg]
Radiative Heat transfer Coefficient	4.65[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Body Surface Area	1.96[m <sup>2</sup> ]
		External Mechanical Efficiency	0

### 3. 結果

定常状態での皮膚温の実験値と計算値の関係を、表1の網掛け部分および図1に示す。1971年版のTwo-node modelによると、皮膚温が33°C以上の範囲に関してはおおむねよく実験値を再現できた。ただし、皮膚温の実験値が33°C以下となる、寒冷環境と考えられる範囲で、計算値が実験値よりも低くなった。一方、1986年版による計算では、暑熱・中立・寒冷環境の別を問わず、全体に実験値に近い値を得ることができた。

また、皮膚血流量、発汗量、ふるえの計算値を図2~4に示す。皮膚血流量について、皮膚温の実験値が33°C以下の範囲で、1971年版と比べ1986年版のモデルの血流量が多くなっており、皮膚温が33°C以上の範囲では逆に1971年版のモデルの血流量が多くなっている。発汗量に関しては、1971年版・1986年版の両モデルともおおむね同じ傾向である。また、ふるえが1986年版のモデルのみで生じる。

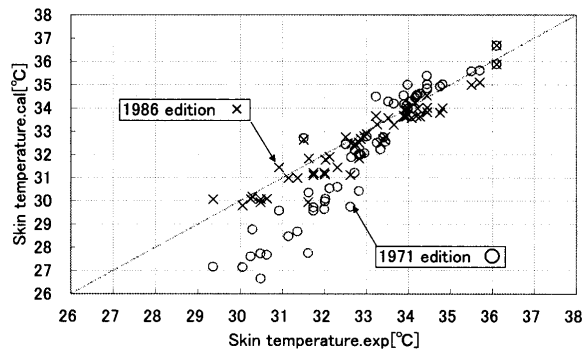


図1 新旧Two-node modelによる皮膚温の計算値\*\*

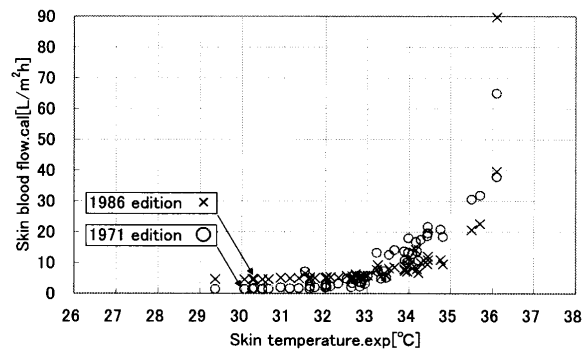


図2 新旧Two-node modelによる血流量の計算値\*\*

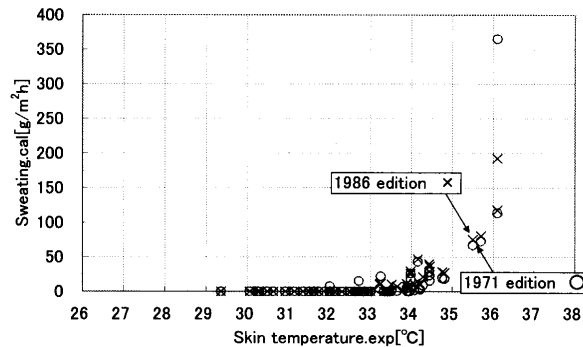


図3 新旧Two-node modelによる発汗量の計算値\*\*

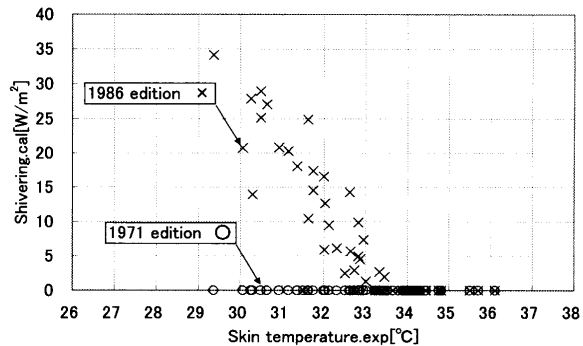


図4 新旧Two-node modelによるふるえの計算値\*\*

\*\*表1の太枠内に示した各温熱環境条件に対応する計算値をプロットしている。横軸は、各条件における皮膚温(実験値)である。

#### 4. 考察

寒冷環境において、1971年版は実験値と比べて皮膚温が低い、1986年版では実験値に近い。この原因は、ふるえのモデルの有無にあると考えられる。寒冷環境では、発汗が生じず、発汗モデルの違いは皮膚温に影響しない。そのため、ある気温・平均放射温度下での皮膚温は、皮膚から外へ流出する熱流（定常状態においては代謝量に等しい）のみによって定まる。1986年版では、式(5)のようにふるえがモデル化されており、代謝量の増加により、寒冷環境での皮膚温の低下が抑えられているといえる（図4）。

なお、1986年版では、寒冷環境での皮膚血流量が1971年版と比べて多い（図2）。これは、血流調節を表す式(1)および(3)の分母にみられる血管収縮の係数が、1971年版で0.5、1986年版で0.1であるために、1986年版で血管収縮が生じにくいことによる。また、1986年版では外殻率が皮膚血流量に応じて変化し、かつ、外殻率が基本的に大きい（皮膚の熱容量が大きい）が、定常状態での皮膚温には影響しない。

#### 5. まとめ

多様な温熱環境条件下での多人数についての実験結果を用いて、Two-node modelによる皮膚温の再現性を、安静・定常状態について検討した。1986年版のモデルは、定常状態に関しては、多人数の平均的性状をおおむね再現できている。一方、1971年版のモデルでは、暑熱・中立環境条件下で再現性が良いが、ふるえが考慮されていないため、寒冷環境下での皮膚温の計算値が実験値と比べて低くなる。

**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、著者らによる被験者実験は、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

- 崎山拓也, 高田暁, 2008: 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, 第 32 回人間—生活環境系シンポジウム報告集, 81/84
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., 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

- 小林弘明, 2008: 体温調節系における個体差の定量化に関する研究—Two-node model による検討—, 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程前期課程修士論文
- 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 田中宏明, 2003: 非定常状態における温冷感予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, (563), 9/15
- 田村照子, 1983: 裸体健康成人女子の皮膚温分布, お茶の水医学雑誌, 31-4, 225/241
- 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
- 小川庄吉, 長田泰公, 山本弘, 細川輝男, 久野由基一, 吉田敬一, 磯田憲生, 小林陽太郎, 金光克己, 1974: 至適温度条件に関する実験的研究, 公衆衛生院研究報告, 23-2, 72/87
- 小川庄吉, 長田泰公, 久野由基一, 吉田敬一, 1975: 至適温度条件の季節差について, 公衆衛生院研究報告, 24-4, 221/231
- 小川庄吉, 長田泰公, 栢原裕, 久野由基一, 吉田敬一, 浅見雅子, 1976: 坐位軽作業における至適温度条件, 公衆衛生院研究報告, 25-3, 145/154
- 小川庄吉, 長田泰公, 栢原裕, 大中忠勝, 山崎信也, 大池東茂子, 吉田敬一, 浅見雅子, 1977: 軽作業時の温冷感に関する研究, 公衆衛生院研究報告, 26-3・4, 142/151
- 有田恒之, 篠原道正, 大西正弘, 石野久彌, 椅座安静時の代謝熱量の熱収支について その 2 熱収支算定結果, 1989: 日本建築学会学術講演梗概集 D 環境工学, 917/918
- 横山真太郎, 角田直人, 中村光良, 下川兼司, 正木辰明, 濱田靖弘, 中村真人, 落藤澄, 富樫貴子, 1999: 部位別特性を考慮した人体の熱移動モデルの開発とその応用に関する研究—血流量調節域の被験者実験と数値モデルの比較—, 衛生工学シンポジウム論文集, 7, 143/148

#### <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  
E-mail アドレス: 081t031t@stu.kobe-u.ac.jp