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 MODIFICATION OF THE SWEATING MODEL IN 2-NODE MODEL AND IT'S APPLICATION TO THERMAL SAFETY FOR HOT ENVIRONMENT

南 百合子*, 大岡 龍三**, 沢崎 慎祐***, 佐古井 智紀****, 都 築和代****

*Yuriko MINAMI, Ryoza OOKA, Shinsuke SAWASAKI,
Tomonori SAKOI and Kazuyo TSUZUKI*

Recently, due to global warming and the heat-island effect, more and more people are exposed to danger of heat disorder. The hot thermal environment can be evaluated by various indexes, such as new Standard Effective Temperature (SET*) using the 2-Node Model (2NM), Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), Predicted Heat Strain Model (PHS Model) and so on. The authors aim to develop a safety evaluation approach for hot environments. Subject experiments are performed in a laboratory to comprehend the physiological response of the human body. The results are compared with the computed values from the 2NM and PHS models and modified the sweating model in 2NM in order to take account the relationship with metabolic rate. Additionally, this new sweating model was applied to evaluation for thermal safety for hot environment.

Keywords: Hot environment, Thermal evaluation, 2-node model, PHS model, ISO7933

暑熱環境、温熱環境評価、2 ノードモデル、PHS モデル、ISO7933

1. はじめに

地球規模の熱波や異常気象に加え、都市部ではヒートアイランド現象により、気温が上昇する傾向にある。今後、世界の全ての地域で最高気温は更に上昇し、高温日が増加すると予想されている。このような気温上昇は、環境だけでなく人類の健康にも多大な影響を与え、夏期における暑熱障害の危険性が高まっている。日本においても、近年、熱中症（暑熱障害）患者が増加している。熱中症による死者数は、1968 年から 2004 年までの 37 年間で、5,079 件（男 3,184 件、女 1,895 件）に上っている。この間の熱中症死者数の年次推移をみると、多い年は 589 件（1994 年）に達しており、それぞれの年の気象条件によって大きな変動がみられる。38℃以上の日が出現した年は熱中症の発生も多くなっている。また、10 代および 65 歳以上の高齢者でその発生率は高くなっており、暑熱化に加え、超高齢社会を迎える日本では熱中症は今後更に増加していくと推測される¹⁾。

現在、一般には WBGT (Wet Bulb Globe Temperature Index: 湿球グローブ温度指標) が熱中症予防予報などに用いられている。WBGT

は、湿球温度およびグローブ温度、乾球温度の重み付け平均で求められる温度単位の指標である。暑熱条件における軍事訓練の限界を提示する目的で提案され、現在でも ISO 7243²⁾および JIS において標準尺度として示されている。WBGT は暑熱環境のリスクを評価する指標として有効な手段であると報告されている。しかし、WBGT は物理的環境指標であり、人体側の温熱環境条件（着衣量、代謝量）や人体形状や体温調節反応などは考慮されていないため、人体の熱ストレスを的確に反映してはいない。そのため、熱中症予防対策として、ある WBGT の暑熱環境下において運動を避けるよう推奨するといった大まかな指針を示すのみとなっている。

ISO ではこの他、ISO7933 において労働者の温熱的安全性評価方法として PHS model (Predicted Heat Strain model) が採用されている³⁾。このモデルは仮想的な必要発汗量と人体の熱収支から人体の温熱生理反応を予測するもので、人体の熱ストレスを反映した評価方法となっている。しかし、これは比較的高代謝な労働活動を行っている労働環境を対象に作られた評価方法であり、生活環境全般に適用できるかどうかは定かではない。

* 東京電力㈱ 修士(工学)

** 東京大学生産技術研究所 准教授・博士(工学)

*** 東日本旅客鉄道㈱ 修士(工学)

**** 独立法人産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門 博士

Tokyo Electric Power Company, M. Eng.

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, the Univ. of Tokyo, Ph. D.

East Japan Railway Company, M. Eng.

Institute for Human Science and Biomedical Engineering, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST, Ph. D.

一方建築分野では、温熱環境評価指標として SET*（Standard Effective Temperature：新有効標準温度）が用いられてきた。昨今ではヒートアイランド現象における都市の温熱環境評価に用いられることも多い。SET*は、人体の温熱生理反応を簡略的にモデル化した 2-Node Model（以下 2NM）を用いて算出するため、人体の熱ストレスを反映した指標となっている⁴⁾。しかし、2NM は室内等の熱的に中立に近い環境での温熱環境評価を主眼に体系化されたモデルであるため、暑熱な環境の評価にそのまま適用できるかどうかは検討が必要である。また、上記の 2 つの人体温熱生理反応モデルは欧米での被験者実験より構築されたものであり、人種や生活環境の異なる日本人には適応しないということも懸念される。例えば、能動汗腺数において明らかに有意な差が生後 2 年間の生育環境によって生ずることが報告されている⁵⁾。したがって、被験者の人種、生活環境により、生理応答反応が異なることは十分に考えられる。

そこで本論文では、暑熱環境における被験者実験から、夏期の暑熱な環境に対する上記 2 つの既存の簡易的な人体温熱生理反応モデルの適用可能性とその改良方法について検討を行う。さらに、人体の熱ストレスを反映した暑熱環境の温熱安全性の評価と暑熱障害の積極的な対策を提案する。

2. 暑熱環境における被験者実験

2.1 実験概要

暑熱環境における人体の温熱生理反応把握を目的として被験者実験を行った。表 1 に実験概要、表 2 に実験ケース、図 1 に実験風景、図 2 に実験スケジュールを示す。実験期間は夏季 2 回（実験 A、C）、冬季 1 回（実験 B）の計 3 回であり、被験者は大学生年齢の健康な男女延べ 39 名である。被験者は実験用着衣に着替えた後、およそ 27℃ に調節された前室において安静状態で 60 分間待機し、その後チャンパー内で 60 分間または 45 分間滞在し、その間に皮膚温、深部温（鼓膜温）、水分減少量を計測した。皮膚温は携帯型温度ロガーと

図 1 実験風景

図 2 実験スケジュール

図 3 各実験における水分減少量(ケース 2)

プローブ（Gram 社製 LT-8）を用い、ISO8996 に基づき 8 点で 1 分毎に計測した⁶⁾。深部温は赤外線式体温計（森下仁丹社製 S-30）で 5 分毎に、発汗量と呼吸による水分蒸発量を含む体の水分減少量は精密秤量計（Sartorius 社製 IS150IGG）で体重減少を 5 分毎に計測した。

実験ケースはケース 1 を標準ケースとし代謝量は 1.0 met で椅座安静とした。ケース 2, 3 では treadmill で 0.9m/s, 1.4m/s の歩行運動を行った。ケース 4 を高湿、ケース 5 を高温の条件とした。実験 A ではケース 1, 2, 4, 5 を、実験 B では全ケースを行った。実験 C ではケース 1, 2, 3 を行った。

2.2 実験結果・考察

図 3 に夏期と冬期の水分減少量の比較を示す。また、図 4 に各ケースの深部温、皮膚温、水分減少量の実験値と 2NM, PHS model による計算結果との比較を示す。図 3~4 中縦棒は実験値の標準偏差を示している。各ケースを比較すると、高代謝のケース 2, 3 において水分減少量が増加する傾向が見られた（図 4b) c)）。これは周知のように代謝産熱の増加分を放熱するために、蒸発熱損失量を増加させ体温調節を行った結果と考えられる。ケース 5 では皮膚温は他の

表 1 実験概要

期間	実験 A: 2005 年 8 月 1 日 ~8 月 15 日
	実験 B: 2006 年 1 月 9 日 ~1 月 23 日
	実験 C: 2006 年 9 月 14 日 ~10 月 5 日
場所	東京大学生産技術研究所 極限環境試験室
被験者	大学生年齢の健康な男女延べ 39 名
	実験 A: 男子 6 名、女子 7 名(計 13 名)
	実験 B: 男子 6 名、女子 6 名(計 12 名)
	実験 C: 男子 7 名、女子 7 名(計 14 名)
内容	各種生理量の計測

表 2 実験ケース

	環境条件				人体条件		被験者数	
	気温 [℃]	MRT [℃]	相対湿度 [%]	気流 [m/s]	代謝量 [met]	着衣量 [clo]	男	女
ケース 1	35	35	50	0.1	1.0	0.5	19	20
ケース 2					2.0		19	20
ケース 3					3.0		13	13
ケース 4					1.0		12	13
ケース 5	40	40	50				12	13

a) ケース 1 (気温 MRT35°C、相対湿度 50%、代謝量 1.0met)

b) ケース 2 (気温 MRT35°C、相対湿度 50%、代謝量 2.0met)

c) ケース 3 (気温 MRT35°C、相対湿度 50%、代謝量 3.0met)

d) ケース 4 (気温 MRT35°C、相対湿度 70%、代謝量 1.0met)

e) ケース 5 (気温 MRT40°C、相対湿度 50%、代謝量 1.0met)

図 4 2NM、PHS model の予測値と実験値の比較

ケースよりも高い値を示している(図4e))。これは皮膚温が高い環境温度、MRT(40℃)の影響を受けたものと考えられる。また、図3において、実験の行われた季節ごとに比較すると、水分減少量は冬期(実験B:表1参照)では値が小さく、時間の経過につれ、夏期(実験A,C:表1参照)とほぼ等しい値となった。これは明確な季節順化の影響と考えられる。

3. 実験結果と人体モデルによる計算結果との比較

上記の被験者実験によって得られた生理量の時間変化と2NM、PHS modelによる予測値を比較し、両モデルの暑熱環境における適用性を検討した。なお暑熱環境評価の意味合いから、実験値は夏期(実験A,C)のデータを使用し、比較を行っている。

3.1 計算条件

2NMおよびPHS modelの計算には各文献(文3,4)を参考に作成したプログラムを用いた。各生理量の初期値、環境条件には実験値を与えた。

3.2 比較結果・考察

表3に2NM、PHS modelの予測値と実験値の対応を示す。2NMは、椅座安静状態と運動を行ったケースでその対応度合いが異なり、低代謝のケースでは比較的良好に実験値に一致した。ケース2,3の高代謝の条件では皮膚温及び深部温が実験値より高い値をとっており、運動に伴う代謝産熱の増大に対し蒸発熱損失の評価が小さく見積もられたためであると推察される。PHS modelは、全般に実験との対応がよくなかった。これは高代謝を前提とする労働環境での水分減少量、深部温の予測を目的として構築されているためであると考えられる。また、皮膚温の算出を目的としておらず、計算の過程で、重回帰分析に基づき設定している数値があるために、皮膚温は全てのケースで非常に対応が悪い。以上の結果から、本研究の目的に合致する人体暑熱生理モデルとして2NMを採用し、その精度をさらに高めていくこととした。

表3 各モデルの予測値と実験値の対応

		2NM			PHSmodel		
		T_{gr}	T_{sk}	m_{sw}	T_{gr}	T_{sk}	m_{sw}
低代謝	ケース1	○ (0.140)	○ (0.063)	○ (0.187)	○ (0.308)	× (2.870)	△ (0.876)
	ケース4	× (1.968)	○ (0.040)	○ (0.221)	× (5.499)	× (4.824)	× (1.429)
	ケース5	△ (0.835)	△ (0.084)	○ (0.518)	× (4.475)	× (7.421)	△ (0.901)
高代謝	ケース2	○ (0.080)	× (1.261)	△ (1.125)	× (0.121)	× (1.753)	○ (0.458)
	ケース3	△ (0.879)	△ (1.188)	× (5.009)	△ (0.995)	× (1.945)	× (2.541)

○:よく対応($C < 0.8$), △:標準偏差の近傍で対応($0.8 \leq C \leq 1.2$),

×:対応せず($C > 1.2$)。ここで評価基準となる統計量Cを下記のように定義した。

$$C = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum \sigma_i^2}, \quad Y_i: \text{時刻} i \text{ における予測値}, \quad \bar{Y}_i: \text{時刻} i \text{ における実験値の平均}, \quad \sigma_i: \text{時刻} i \text{ における実験値の標準偏差(ただし時刻} i \text{ は初期値の影響を除くため} i \geq 15 \text{ 分としている)}$$

即ち、 $C=0$ のとき、予測値は実験値の平均と完全に一致し、 $C=1$ のときには予測値と実験値の誤差がほぼ実験値の標準偏差に対応する。表中()内文字はCの値を示す。

4. 2NMにおける発汗モデルの改良^{※3)}

4.1 改良発汗モデルの提案

図5に代謝量と水分減少量の関係を示す。水分減少量は45分間の積算値である。実験値と2NMの予測値を比較すると、代謝量の増加に伴う水分減少量の増加は実験値の方が多くっており、2NMは水分減少量に対して、代謝量の感度が低い。その原因について2NMの発汗モデルの式を以下に示し、考察する。

$$m_{sw} = 170 \cdot (T_b - 36.49) \cdot \exp\left(\frac{T_{sk} - 33.7}{10.7}\right) \quad (1)$$

式(1)において、予測される発汗量に対する代謝量の増加の影響は、代謝産熱の増加に伴い深部体温が上昇して、それによる平均体温 T_b の上昇により与えられており、代謝量に変数として直接的に組み込まれてはいない。

図5 代謝量と水分減少量の関係(3.0 metまで)

しかしながら、体温情報とは別に運動そのものが独立に刺激として発汗を促すという報告もある。Yanagimotoらは気温35℃、相対湿度50%、最小の気流に維持されたチャンパー内で、3ケースの運動強度で60rpmの自転車運動をランダムに60秒実施するという内容の被験者実験を行い、体温が変化する前の動的運動時に、有毛な皮膚(胸、前腕、太腿)では運動強度が増すに連れて発汗反応が増加したという結果を報告している⁷⁾。また、近藤は、既に汗をかいている状況で動的運動を実施すると深部体温や皮膚温の変化なしに数秒以内に発汗が増加し、一方皮膚血流量は動的運動開始時に一過性に減少する、これらの反応はいずれも運動強度に依存することを指摘している。動的運動時には筋への血流を確保するために皮膚への血流配分を抑制するが、これにより熱放散量は低下し、この低下を補うように非温熱性要因が発汗量増加を引き起こしていると考えられる⁸⁾。以上から運動強度、それに伴う代謝量の増加が発汗に及ぼす影響についてモデルを再考する必要がある。

表4 代謝量と実験値、2NMの予測値の比率

代謝量[met]		2.0	3.0
水分減少量の 平均値 [g/m²h]	実験値	192.1	235.6
	皮膚温、深部温の実験値を用いた計算値	112.4	135.9
比率[-]		1.71	1.73

表5 2NMにおける発汗モデルの改良点

	現存の2NM	改良後の2NM
発汗量に対する代謝量の影響の組み込み	$m_{sw} = 170 \cdot (T_b - 36.49) \cdot \exp\left(\frac{T_{sk} - 33.7}{10.7}\right)$	$m_{sw} = 170 \cdot (T_b - 36.49) \cdot \exp\left(\frac{T_{sk} - 33.7}{10.7}\right) \times \left(1 + 3 \cdot \exp(-0.5(M-1)) \{1 - \exp(-(M-1))\}^2\right)$
有効発汗率の組み込み	$E_{max} \geq 0$ $E_{rsw} = 0.68 \cdot m_{sw}$ $w_{rsw} = E_{rsw} / E_{max}$ $w = 0.06 + 0.94 \cdot w_{rsw}$ $E_{sk} = w \cdot E_{max}$ $w_{dif} = 0.06(1 - w_{rsw})$ $E_{dif} = w_{dif} \cdot E_{max}$ <p>最大ぬれ率 w_{max} を風速で設定</p> <p>clo=0 のとき</p> $w_{max} = 0.38 \cdot V^{(-0.29)}$ <p>clo>0 のとき</p> $w_{max} = 0.59 \cdot V^{(-0.08)}$ <p>最大ぬれ率以上、つまり $w \geq w_{max}$ のとき</p> <p>有効発汗率は最大ぬれ率の値に従い、無効発汗が起る</p> $w = w_{max}$ $w_{rsw} = (w - 0.06) / 0.94$ $E_{rsw} = w_{rsw} \cdot E_{max}$ $w_{dif} = (1.0 - w_{rsw}) \cdot 0.06$ $E_{dif} = w_{dif} \cdot E_{max}$ $E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif}$ $m_{drip} = (m_{sw} \cdot 0.68 - E_{rsw}) / 0.68$	$E_{max} \geq 0$ <p>ぬれ率の初期値は任意 (デフォルトは発汗がないとみなし不感蒸泄分の0.06)</p> <p>最大ぬれ率は1.0</p> <p>時刻iのときの有効発汗率は $\eta_i = 1 - \frac{w_{i-1}^2}{2}$</p> <p>$w_{i-1} < 1.0$ のとき</p> $E_{rsw} = \eta \cdot 0.68 \cdot m_{sw}$ $w_{rsw} = E_{rsw} / E_{max}$ $w_{dif} = (1.0 - w_{rsw}) \cdot 0.06$ $E_{dif} = w_{dif} \cdot E_{max}$ $w = w_{rsw} + w_{dif}$ $E_{sk} = w \cdot E_{max}$ <p>最大ぬれ率以上、つまり $w_{i-1} = 1.0$ のとき</p> $w = 1.0$ $w_{rsw} = 1.0$ $E_{rsw} = E_{max}$ $w_{dif} = 0$ $E_{sk} = w \cdot E_{max}$ $m_{drip} = (m_{sw} \cdot 0.68 - E_{rsw}) / 0.68$

表4に2NMの発汗モデルに皮膚温、深部温の実験値を代入し計算した値と実験値の比率を代謝量別に示す。この比率を基に、式(2)のように代謝量の影響を発汗モデルに組み込んだ。また、暑熱環境における早川らの実験値⁹⁾を用いて感度解析を行い、6.0metまで対応可能な形とした^{注1)}。

$$m_{sw} = 170 \cdot (T_b - 36.49) \cdot \exp\left(\frac{T_{sk} - 33.7}{10.7}\right) \times \left(1 + 3 \cdot \exp(-0.5(M-1)) \{1 - \exp(-(M-1))\}^2\right) \quad (2)$$

ここでMは代謝量であり単位はMetである。

さらに、2NMでは最大ぬれ率を風速の関数で設定し、最大ぬれ率を超えるまで発汗の有効発汗率は1としていたが、本研究の改良では式(3)の有効発汗率^{10), 11), 12)}を導入し、より現実の蒸発性熱放散現象に近づけた。

$w < 1.0$ のとき

$$\eta = 1 - \frac{w^2}{2} \quad (3)$$

$$E_{rsw} = \eta \cdot 0.68 \cdot m_{sw} \quad (4)$$

表5に発汗モデルの改良点をまとめる。

図6に6.0 metまでの既往研究における15分間の水分減少量⁸⁾の実験値と2NMの計算結果、改良発汗モデルを組み込んだ2NM（以下2NMnew）の計算結果を示している。実験は気温35℃、MRT35℃、湿度50%、風速<0.2m/sの環境で行われ、着衣量は0.5clo、被験者は代謝量0.91 met, 2.66 met, 4.37 met, 6.20 metの4段階の強度でエルゴメータで15分間の運動を行った。被験者は健康な女子5名であった。

4.2 改良発汗モデルを用いた2NMの検証

実験値と、現存の2NMを用いた計算結果と2NMnewを用いた計

図6 代謝量と発汗量の関係(6.0 metまで)

算結果の比較を行い、2NMnew の精度を検証した。

図 7 に深部温の結果を示す。低代謝ケースではほぼ変化がなく、2NM、2NMnew とともに実験値に近い値を示した。高代謝ケースでは 2.0 met では実験値よりも 0.17℃ 低い値をとったが、標準偏差内であった。3.0 met のケースでは実験値に非常に近くなった。図 8 に皮膚温の結果を示す。低代謝ケースでは 2NMnew は 2NM よりも 0.35℃ ほど高い値をとったが標準偏差内であった。高代謝ケースでは、2.0

met、3.0 met とともに実験値に非常に近くなった。図 9 に水分減少量の結果を示す。皮膚温の結果と同様に、低代謝ケースではほぼ変化がなく、2NM、2NMnew とともに実験値に近い結果となった。高代謝ケースでは、2.0 met、3.0 met とともに実験値に近くなった。

蒸発による熱損失が増したことにより深部温、皮膚温が下がり、実験値に近くなった。全体として 2NMnew では 2NM に比べ、精度が向上したといえる。

図 7 改良発汗モデルを用いた 2NM による深部温の結果

図 8 改良発汗モデルを用いた 2NM による皮膚温の結果

図 9 改良発汗モデルを用いた 2NM による体内の水分減少量(積算値)の結果

5. 暑熱環境における温熱安全性評価

ISO7933 では、深部温が 38.0℃ 以上になると危険であるとしている。また、水分減少量が、飲水のない場合は体重の 3% 以上、飲水のある場合は 50% の人間が体重の 7.5% 以上、95% の人間が 5% 以上になると危険であるとしている。人体温熱生理モデルによって非定常状態の生理量を予測することにより、各生理量の暑熱曝露に対

する限界値から、その暑熱環境における曝露可能時間を算定することができる³⁾。

また、暑熱障害を予防する上で、水分補給は非常に重要とされている。大谷らは暑熱環境下の作業・運動時には、発汗量相当の水分補給を行うことが深部温上昇の抑制および体液恒常性の維持に最も効果があり、つまり暑熱障害や運動能力低下を防ぐ上で最も効果的

であるとしている¹³⁾。人体温熱生理モデルを用いて体の水分減少量を正確に算出することにより、必要な水分補給量を求めることができ、積極的に暑熱障害を予防できるようになる。

さらに、SET*は感覚、生理反応および健康状態についての関連が示されており¹⁴⁾、これを用いて WBGT と同様に大まかな環境の温熱安全性を評価することも可能である。

5.1 計算条件

単棟建物周辺の日向と日陰の2地点において暑熱曝露可能時間、SET*、必要水分補給量を2NMと2NMnewを用いて計算した。環境条件には、東京の7月23日13時を検討対象とした単棟建物モデルの対流・放射連成計算の結果を用いた。図10に計算対象を示す。解析範囲は110m(X)×110m(Y)×60m(Z)であり、建物は10×10×10mのモデルで、建物・地表面はすべてコンクリートで構成されている。放射計算はモンテカルロ法を、対流計算には標準k-εモデルを用いて解析を行った。計算手法に関しては文献15)を参照されたい。建物、地表面のアルベドは0.2、長波放射率0.95、対流熱伝達率を11.6W/m²Kとした。風速は1/4乗プロファイルを仮定し、建物高さ10mで2.0m/sとした。気温は31℃、大気中の水蒸気分圧の初期値は2.8Pa(相対湿度61.6%)を解析領域一様に与えた。暑熱曝露可能時間、SET*、必要水分補給量は図10のPoint A(日向)とPoint B(日陰)の2地点において計算した。人体のMRTの計算は注2)参照。体格は日本人の平均身長・体重(161.9cm, 59.0kg)を用い、体表面積の算定はDuBoisの式を利用した。人体の短波吸収率を0.5とし、長波放射率を0.95、衣服抵抗を0.5cloとし、屋外における歩行状態を想定し、代謝量は2metとした。また人体表面の熱伝達率はSeppanenの式¹⁶⁾より算定した。表6にPoint A, Bの環境条件と人体側の条件を示す。

5.2 結果・考察

表7に暑熱曝露可能時間、SET*と必要水分補給量の計算結果を示す。2NMnewと2NMを比較すると、SET*はともに日向で34.0℃、日陰で32.2℃となり、差はみられなかったが、暑熱曝露可能時間は、2NMnewは2NMと比較して日向、日陰ともに26分短く算定した。1時間後の必要水分補給量は、2NMnewでは日向で50.2g、日陰で37.9g多くなった。また、日向と日陰を比較すると、暑熱曝露可能時間は日向の方が2NMnew、2NMともに36分短くなり、1時間後の必要水分補給量は2NMnewで49.6g、2NMで37.4g多くなった。このように温熱評価指標であるSET*と暑熱曝露可能時間両方を示すことにより、暑熱環境の温熱安全性をより正確に評価することができ、必要水分補給量を求めることにより暑熱障害に対してより具体的に積極的な対策を行うことができる。2NMnewは2NMよりも高精度に水分減少量を予測できるため、暑熱障害の危険性と対策をより正確に示すことができる^{注4)}。

6. まとめ

本研究は、人体の熱ストレスを反映した暑熱環境の温熱安全性の評価とそれに基づいた暑熱障害の積極的な対策を示すことを目的としている。

- 暑熱環境における人体の温熱生理反応を把握するため、被験者実験を行った。実験結果には季節順化の影響がみられた。
- 夏期のデータを用いて被験者実験による深部温、皮膚温、発

汗量の結果を2NMおよびPHS modelと比較した。その結果、2NMは低代謝ケースで精度が高かった。

- 2NMの発汗モデルに代謝の影響を組み込むことにより、新しい発汗モデル(2NMnew)の提案を行った。2NMnewは特に高代謝域においてその予測精度が向上した。
- 単棟建物周辺の日向と日陰の2地点において暑熱曝露可能時間、SET*、必要水分補給量(=水分減少量)を2NMと2NMnewを用いて計算し、その環境の正確な温熱安全性と定量的な暑熱障害対策を示した。
- 今回は、大学生年齢の健康な男女を対象に検討を行ったが、現実的弱者である、老人や小人にも適用可能とするためには、より広範な被験者実験を継続する必要がある。

【記号】

T_{re} : 深部温[℃], T_{sk} : 皮膚温[℃], T_b : 平均体温[℃], M : 代謝量 [met]
 η : 有効発汗率[-], E_{max} : 最大蒸発熱損失量 [W/m²]
 E_{sk} : 皮膚からの蒸発熱損失量 [W/m²]
 E_{sw} : 発汗による蒸発熱損失量 [W/m²]
 E_{diff} : 不感蒸泄による蒸発熱損失量 [W/m²]
 m_{sw} : 発汗量 [g/hm²], m_{diff} : 無効発汗量 [g/hm²], w : ぬれ率 [-]
 w_{sw} : 発汗によるぬれ率 [-], w_{diff} : 不感蒸泄によるぬれ率 [-]
 clo : 着衣量 [clo], V : 風速 [m/s]

注

注1) 改良発汗モデルの導出は以下のように考えた。本文(1)式に補正項 $X(M)$ を乗ずる。

$$m_{sw} = 170 \cdot (T_b - 36.49) \cdot \exp\left(\frac{T_{sk} - 33.7}{10.7}\right) \cdot X(M) \quad (5)$$

ここで $X(M)$ は代謝量 M [met]の関数である。低代謝時($M=1$)においては、2NMの発汗予測の精度は高いことにより、 $X(1)=1$ であるとする。また運動による発汗促進は筋肉刺激の信号によりもたらされるものと仮定し、十分に代謝量が高い状態においては、その刺激の影響は

図10 対流・放射連成計算対象

表6 2NM, 2NMnew 計算条件

	気温 [℃]	MRT [℃]	相対湿度 [%]	風速 [m/s]	着衣量 [clo]	代謝量 [met]
Point A(日向)	31.2	53.3	61.7	1.98	0.5	2.0
Point B(日陰)	31.2	43.8	61.5	2.01		

表7 暑熱曝露可能時間とSET*、必要水分補給量

	Point A(日向)		Point B(日陰)	
	2NM	2NMnew	2NM	2NMnew
暑熱曝露可能時間 [min]	214	188	250	224
SET* [℃]	34.0	34.0	32.2	32.2
1時間後の必要水分補給量 [g]	263.4	312.9	227.8	265.1

小さくなるものと想定する。すなわち $X(\infty)=1$ を制約条件とする。したがって $X(M)$ を次のように決定する。

$$X(M)=1+X'(M), \quad X'(1)=0, \quad X'(\infty)=0 \quad (6)$$

$$X'(M)=X_1(M) \cdot X_2(M), \quad X_1(1)=0, \quad X_2(\infty)=0 \quad (7)$$

$X_1(M)$, $X_2(M)$ を次のように定式化する。

$$X_2(M)=a(\exp(b(M-1)))^c$$

$$X_1(M)=(1-\exp(d(M-1)))^e \quad (8)$$

ここで、 $a \sim e$ はモデル定数。以上の定式化が著者らの実験結果 (図5) と早川ら⁹⁾ の実験結果 (図6) に合致するように上記定数 $a \sim e$ を決定した。 $X(M)$ のプロファイルを下記の補図に示す。 $M=1$ において1であり、 $M=1$ でピークを迎え、その後緩やかに減少する曲線となる。

補図 X(M)のプロファイル

注2) 日射を含めた全放射エネルギーを考慮した位置 i の MRT T_{ri} は (9) 式で計算される。

$$6h^2\sigma T_{ri}^4 = 6h^2 \sum_{l=1}^3 q_l \alpha_{kl} c_l + 6h^2 \sum_{l=1}^3 \left[\sum_{j=1}^n B_{lj} \sigma T_j^4 c_l \right] \quad (9)$$

T_{ri} : 位置 i における MRT [K]

l : 微小立方体を構成する面の向きを表す指標 (全6面)

q_l : 微小立方体の面 l に到達する日射量 (直達+天空+反射) [W/m^2]

c_l : 微小立方体各面の日射吸収に関わる重み係数。立方体上下面には0.024, 側面には0.238という係数を使用¹⁷⁾。

T_j : 微小面要素 j の温度 [K]

α_{kl} : 人体の短波放射(日射)吸収率 [-] (本研究では $\alpha_{kl}=0.5$)

B_{lj} : 任意の要素 j から微小立方体の面 l への吸収係数 [ND]

h : 微小立方体の辺長。ただし計算では必要とされない。

ここで、(9)式の右辺第1項は日射による放射エネルギーを示し、右辺第2項は長波放射エネルギーを示している。

注3) 今回の2NMの改訂にあたり、他のパラメータについても人種差や環境の差による違いが予想される。差異が生ずる可能性がある2NM上のパラメータとして、脂肪率・骨量・筋肉量比の違いによるコア領域の熱容量並びに熱抵抗、血流量等が考えられる。紙面の都合上ここには示さぬが、これらのパラメータに関しても若干の感度分析を行い、これらのパラメータの影響を検討した所、殆ど差異が見られなかった、あるいは実験値から更に離れる傾向となった。そのためこれらの影響は小さいものと考え、今回の2NMの改良の対象とはしなかった。

注4) 5節における検討は実際の屋外の環境条件を想定してシミュレーションを行った。しかしながら、本研究で提案された発汗式の元となる実験は室内で行われたため、強い放射環境や風環境等、屋外特有の環境を考慮したわけではない。これに対して本研究においては人体の熱応答は、取得熱量が同じであれば、その形態(放射によるものか対流によるものか等)が何であれ、同じ応答するとの仮定に基づいている。もちろん取得熱量が同じであってもその形態が異なれば、人体が異なる熱応答を示す可能性も否定できない。この件に関しては今後の検討事項としたい。

参考文献

- 1) 環境省：熱中症保健指導マニュアル 2006
- 2) ISO 7243: „Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature), 1989
- 3) ISO 7933: Standard Title Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the

predicted heat strain, 2004,

- 4) A.P.Gagge, *et al.*: A Standard Predictive Index of Human Response to The Thermal Environment, ASHRAE Transactions, vol.92-1, pp.709-731, 1986
- 5) Y. Kuno: Human perspiration, Charles C. Thomas, Springfield, III. USA., 1956
- 6) ISO 9886:2004, Ergonomics – Evaluation of thermal strain by physiological measurements
- 7) Shuji Yanagimoto, *et al.*: Intensity-dependent thermoregulatory responses at the onset of dynamic exercise in mildly heated humans, Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 285: pp200-207, 2003
- 8) 近藤徳彦, 非温熱性要因が運動時の熱放散反応に及ぼす影響, 日本生気象学会雑誌, Vol.42, No. 1, pp.39-53, 2005年
- 9) 早川ら, 気温と運動強度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集 (394), 10-19, 1988年
- 10) Candas V: Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating, J Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol, 46(3), pp522-528, 1979
- 11) Helmut Peter: Testing climate indices in the field, ERGONOMICS, VOL38, NO.1, pp86-100, 1995
- 12) B. Alber-Wallerström and I. Holmér: Efficiency of sweat evaporation in unacclimatized man working in a hot humid environment, Eur J Appl Physiol, 54, pp480-487, 1985
- 13) 大谷ら, 暑熱環境下長時間間欠運動時における発汗量相当の水分補給が体温と体液および全身持久力に及ぼす影響, 体力科学, 52(6), 717, 2003年
- 14) 中山昭雄編: 温熱性理学, 理工学社, 1981年
- 15) 吉田ら, 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, Vol.529, pp.77-85, 2000年
- 16) O.Seppanen, P.E.McNall, D.M.Munson and C.H.Sprague, Thermal Insulating Values for Typical Indoor Cloth-ing Ensembles, ASHRAE Transactions, Vol.78 (1972), 120-130
- 17) 中村泰人, 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会計画系論文報告集, 第376号, pp.29-35, 1987.6

(2007年3月9日原稿受理, 2007年9月25日採用決定)