



Title	運動時における標準新有効温度の検討
Author(s)	早瀬, 英男; 佐古井, 智紀; 持田, 徹 他
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . 1-9
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 44-47
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7141
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-9_p44-47.pdf



運動時における標準新有効温度の検討

早瀬 英男 (北海道大学) 佐古井智紀 (北海道大学)
持田 徹 (北海道大学) 長野 克則 (北海道大学)
嶋倉 一實 (北海道大学)

1. はじめに

人は常に環境との間で熱授受を行っている。その温熱環境を構成する主要素である、環境側の気温、湿度、気流、放射および人体側の代謝量、着衣量のすべてを考慮している指標として、Fangerにより提案された PMV (予測温冷感申告) と Gagge らによってつくられた SET* (標準新有効温度) があり、室内環境を設計・評価・制御する際に使用されている。PMV は発汗による蒸発放熱量や皮膚温に快適時の値を用いているため、発汗による蒸発放熱量が卓越する暑熱環境への適用や、熱負荷と温度感覚の関係などへの疑問が指摘されている^{1) 2)}。一方、SET*は、発汗等の体温調節機構を含む人体数値モデル(two-node model)に基づき、PMV に比して広範囲に適用され、ASHRAE (米国暖冷房空調学会) のスタンダードとしても用いられているが、温度、湿度の影響度合の定量³⁾、異なる代謝間での温度感覚の与え方に疑問が呈されている⁴⁾。本研究では、異なる代謝および着衣、気流条件での相互比較を可能とする標準環境の設定について、検討を行うとともに、SET* の特性を定性的に明らかにする。また、Nevins や McNall らによる実験データを基に、SET* の補正を試みる。

2. 記号

h	: 総合熱伝達率	[W/m ² °C]
h _c	: 対流熱伝達率	[W/m ² °C]
h _s	: 標準総合熱伝達率	[W/m ² °C]
h _{cs}	: 標準対流熱伝達率	[W/m ² °C]
T _{sk}	: 平均皮膚温	[°C]
T _{sk,t}	: SET*24°Cに対応する平均皮膚温	[°C]
T _{sk,n}	: 実際に中立を与える平均皮膚温	[°C]
T _{op}	: 作用温度	[°C]
T _{op,t}	: SET*24°Cを与える作用温度	[°C]
T _{op,n}	: 実際に中立を与える作用温度	[°C]
T _a	: 気温	[°C]
T _r	: 平均放射温	[°C]
P _{sk} *	: T _{sk} における飽和水蒸気圧	[kPa]
P _{Top} *	: T _{op} における飽和水蒸気圧	[kPa]
P _{SET*} *	: SET* における飽和水蒸気圧	[kPa]

w	: ぬれ面積率	[-]
I _{cls}	: 標準着衣量 (clo 表示)	[-]
F _{cle}	: 衣服の有効伝熱効率	[-]
F _{pcl}	: 衣服の有効透湿効率	[-]
F _{cles}	: 標準状態の衣服の有効伝熱効率	[-]
F _{pcls}	: 標準状態の衣服の有効透湿効率	[-]
M	: 代謝量 (met 表示)	[-]
W	: 外部仕事量 (met 表示)	[-]
LR	: Lewis の係数 (=16.5)	[°C/kPa]

3. 標準環境の検討

SET*では、異なる代謝および着衣、気流条件での相互比較を可能とするために、標準環境を設定している。標準対流熱伝達率 h_{cs} と標準着衣量 I_{cls} は次式で与えている⁵⁾。

$$h_{cs} = 5.66(M - 0.85)^{0.39} \quad (1)$$

$$I_{cls} = \frac{1.3264}{(M - W) + 0.7383} - 0.0953 \quad (2)$$

標準着衣量は、温感が中立とされる PMV=0 の時に SET*24°Cを与えるように設定されたものであるため⁵⁾、中立環境以外での信頼性に疑問も残る。また、図-1 (着衣量 0.6clo)、図-2 (着衣量 0clo) から見てとれるように、代謝量が大きくなるに従い、PMV=0 と SET*24°Cのずれが大きくなっている。また、裸体の条件下では、代謝量を大きくすると、SET*24°C線が低湿度側で逆転してしまうという矛盾も見てとれる。

いま、裸体かつ相対湿度 50% の環境に着目して、式(1)、式(2)を検討する。SET* の定義から式(3) が得られる。

$$\begin{aligned} & h(T_{sk} - T_{op})F_{cle} + wLRh_c \left(P_{sk}^* - \frac{P_{Top}^*}{2} \right) F_{pcl} \\ & = h_s (T_{sk} - SET^*) F_{cles} \\ & \quad + wLRh_{cs} \left(P_{sk}^* - \frac{P_{SET^*}^*}{2} \right) F_{pcls} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、裸体という条件から、以下の関係が得

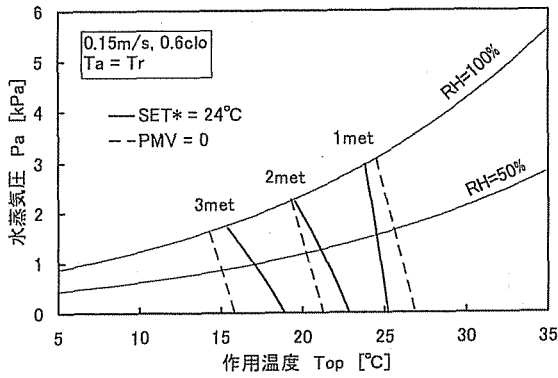


図-1 SET*24°C線とPMV=0線 (0.6clo)

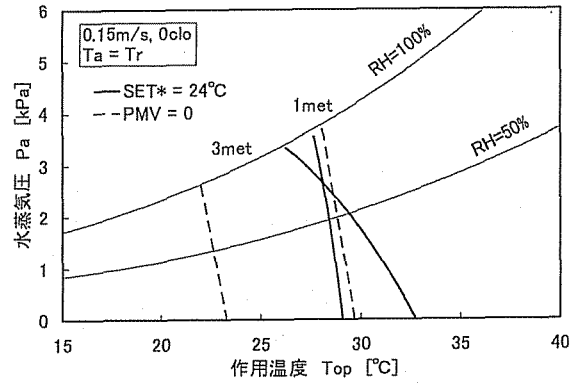


図-2 SET*24°C線とPMV=0線 (0clo)

られる。

$$h \geq h_s, h_c \geq h_{cs} \quad (4)$$

$$F_{cle} \geq F_{cles}, F_{pcl} \geq F_{pcls} \quad (5)$$

式(3)~(5)より式(6)が導かれる。

$$T_{op} \geq SET^* \quad (6)$$

式(6)の関係は代謝量に関係なく成り立つため、代謝量が多い場合でも、裸体かつ相対湿度50%以下の環境では、SET*の示値は T_{op} を上回らないことになり、SET*24°Cが作用温度24°C以上で与えられ(図-3)、SET*の限界値である40°Cも活動量が大きくなっても40°Cを下回らないこととなる⁶⁾。裸体とはいえ、活動量が大きくなれば、中立を与える作用温度は24°Cを下回るはずである。このことは、裸体時に、温度巾に対するSET*の変化巾がほとんど変わらなくなることを示唆するものである。

4. SET*の補正

3章に述べた問題の原因が標準環境の設定法にあると考え、標準環境を設定し直すことにより、SET*の補正を試みる。

4-1 中立環境の設定

補正を行う上で、基準が必要であるため、ここでは着衣量0.6clo、静穏気流下における、Nevinsら(1966)⁷⁾やMcNallら(1967)⁸⁾による代謝量1~2.7metの実験データを用いた。その実験データから、それぞれの代謝量に対して、図-4にその1例を示すように、中立環境(相対湿度50%)を推測した。また、椅座時の対流熱伝達率はMitchellの式から算出し、作業時の対流熱伝達率については、歩行時と立位時のそれぞれの対流熱伝達率をSeppenanらの式から求め、その時間的平均値を用いた(表-1)。着衣量と衣服表面積率については、

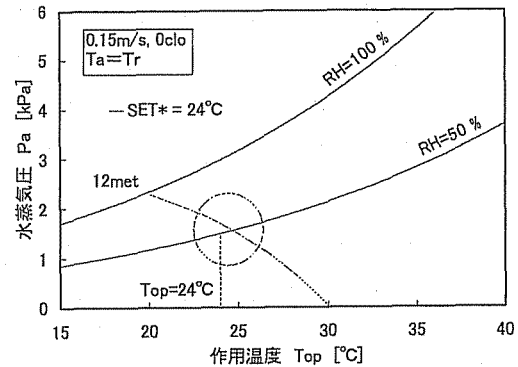


図-3 SET*24°C線 (0clo, 12met)

表-1 代謝量と対流熱伝達率、中立環境

代謝量 [met]	湿度50%での中立温度 [°C]	対流熱伝達率 [W/m ² °C]
1	25.4	3.10
1.6	21.3	4.41
2.1	19.6	4.82
2.7	16.4	5.23

それぞれ記述にある通り、0.6 [clo]、1.1 [-]を用いた。また、ここでは、活動に伴う着衣熱抵抗の減少を考慮した。

4-2 標準環境の設定

式(2)で与えられる標準着衣量を用いて、標準対流熱伝達率 h_{cs} を設定し直したところ、代謝量が小さい時に、 h_{cs} が3.1(静穏気流での対流熱伝達率)を下回ってしまうため、標準着衣量 I_{cls} も設定し直す必要がある。そこで、1metの時に $h_{cs} = 3.1$ を与えるように、また、それぞれの活動量に適した着衣を考えることで、標準着衣量 I_{cls} を新たに設定し直したところ、式(7)が得られた。

$$I_{cls} = \frac{2.16}{(M - W) + 1.14} - 0.136 \quad (7)$$

次に、設定した各値を用い、中立環境にSET*24°Cが対応するように、各作業レベルにおける h_{cs} を算出し、求めた4つの h_{cs} から、近似的

に式(8)を得た。

$$h_{cs} = 10.3(M-1)^{0.36} + 3.1 \quad (8)$$

4-3 修正 SET*

式(7)、式(8)による修正された SET* (以後、修正 SET* と記す) は、図-5 に見られるように、高代謝時に SET*24°C が作用温度 24°C を下回らないという問題点を改善できたが、低代謝と中代謝の SET*24°C 線が交差するという問題を完全に改めることはできなかった。

また、Gagge らの SET* と同様、修正 SET* も、低代謝から中代謝において、裸体時に代謝量が変わっても、中立温度が変わらないという傾向も見られた。SET* と修正 SET*、双方において算出される SET*24°C 線が良い一致を示した事実から、SET* の標準着衣量も同様の手法で設定されたと推測できる (図-6)。

ここで、図-6 に見られるように、着衣時では実際の値や PMV の値と一致するものの、裸体時 (図-2) には大きく異なる理由について、Gagge らの SET* を例に、理論的に検討する。Fanger は、代謝量が増加するにつれ、快適と感じる平均皮膚温が低くなる事実を明らかにした (図-7)⁹⁾。他方、SET* の算出結果では、図-8 に示されるように、中立と感じる SET*24°C において、平均皮膚温は代謝量が増加するとともに高い値をとる傾向が見られ、真木らが指摘したように¹⁰⁾ SET* の人体モデルが実際の人体の生理反応と合致しない矛盾が見てとれる。そこで、 T_{sk} に関する矛盾が SET* による評価にどのような影響を及ぼすか、中立に対応する平均皮膚温を $T_{sk,n}$ 、SET*24°C に対応する平均皮膚温を $T_{sk,t}$ として考察する。実際に中立を与える作用温度 $T_{op,n}$ と、24°C を中立温感とする標準環境の関係を、実際に中立と感じる平均皮膚温 $T_{sk,n}$ と標準作用温度の定義を用いて表すと、式(9)が得られる。

$$h(T_{sk,n} - T_{op,n})F_{cle} = h_s(T_{sk,n} - 24)F_{cles} \quad (9)$$

同様に、two-node model を用いて算出される、SET*24°C を与える作用温度 $T_{op,t}$ と、平均皮膚温 $T_{sk,t}$ の関係は式(10)で表される。

$$h(T_{sk,t} - T_{op,t})F_{cle} = h_s(T_{sk,t} - 24)F_{cles} \quad (10)$$

中立と感じる平均皮膚温の与え方が中立と感じる作用温度に及ぼす影響は、 $T_{op,t}$ と $T_{op,n}$ の差として表され、式(9)、式(10)より式(11)が導かれる。

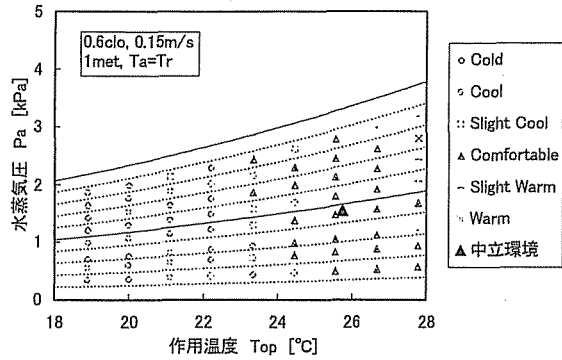


図-4 中立環境の設定方法

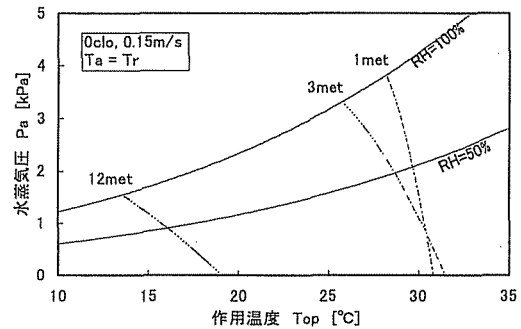


図-5 修正 SET*24°C 線 (0clo)

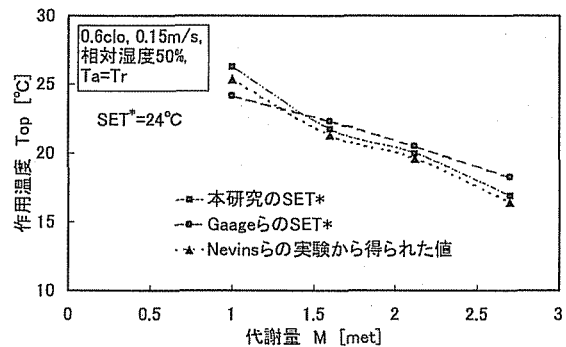


図-6 SET*24°C における代謝量と作用温度の関係

*ここでの対流熱伝達率は表-1 の値を用いた。

$$T_{op,t} - T_{op,n} = (T_{sk,t} - T_{sk,n}) \left(1 - \frac{F_{cles}}{F_{cle}} \right) \quad (11)$$

図-7、図-8 から、高代謝ほど、実際に中立と感じる平均皮膚温 $T_{sk,n}$ と、SET*24°C において two-node model より算出された平均皮膚温 $T_{sk,t}$ の差が大きくなる傾向が見てとれる。この関係と式(11)から、実際に中立を与える作用温度 $T_{op,n}$ と SET*24°C を与える作用温度 $T_{op,t}$ の差は、高代謝量ほど大きくなる。また、着衣量が小さいほど、式(11)中の $1 - F_{cles}/F_{cle}$ の正の値が大きくなるため、実際に中立と感じる領域よりも SET*24°C 線が暑暖側へと移動する。逆に着衣量が大きいと、1-

$F_{cl_{es}}/F_{cl_e}$ の値が負となるため、実際に中立と感じる領域よりも $SET^*24^{\circ}C$ 線が寒冷側に位置することになる。このため、図-2に見られるように、代謝量が大きくなっても中立温度はほとんど変化しなかったと考えられる。

次に、湿り空気線図上において、裸体・静穏気流下で、低代謝時の $SET^*24^{\circ}C$ 線と中代謝時の $SET^*24^{\circ}C$ 線が交わる理由について考察した。

湿り空気線図上における等 SET^* 線の勾配は式(12)で表される。

$$-\frac{hF_{cl_e}}{wLRh_cF_{pcl}} = -\frac{1}{w} \cdot \frac{1}{LR} \cdot \frac{h_c + h_r}{h_c} \cdot \frac{F_{cl_e}}{F_{pcl}} \quad (12)$$

式(12)において、代謝量の変化とともに大きく変動する値は h_c および w であり、 h_c の値は相対風速を考慮すると、代謝量が大きくなるほど大きくなること、また two-node model より算出される w についても同様のことが言えることから、代謝量が大きくなるにつれ、湿り空気線図上における湿度の影響が大きくなるのがわかる。裸体・静穏気流の湿り空気線図上において、低代謝時の $SET^*24^{\circ}C$ 線と中代謝時の $SET^*24^{\circ}C$ 線が交差する要因は、前述のように、標準環境における $24^{\circ}C$ と等価な作用温度が代謝量が大きくなってもほとんど変わらない一方、低代謝においてほど SET^* が湿度の影響を小さく評価し、高代謝においてほど大きく見積もることによると考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた結論を以下に示す。

- [1] 裸体時において、相対湿度 50% 以下では SET^* の示値は作用温度を上回らない。
- [2] 裸体時の低代謝と中代謝の $SET^*24^{\circ}C$ 線が交差するという現象が見られた。この原因は、 SET^* の標準環境の設定に問題があるのではなく、 SET^* 算出に用いられる数学モデルが実際の人体の生理状態にそぐわないためであるとされる。
- [3] 高代謝時の SET^* の適用範囲が、静穏気流、かつ着衣量 0.6clo に限られる。
- [4] 定性的な傾向として、高活動時には低着衣・高風速ほど実際に中立と感じる領域よりも $SET^*24^{\circ}C$ 線が暑暖側に位置し、逆に高着衣・低風速ほど寒冷側に位置する。

参考文献

- 1) 堀越哲美：PMV 快適方程式の検討、空気調和・衛生学会論

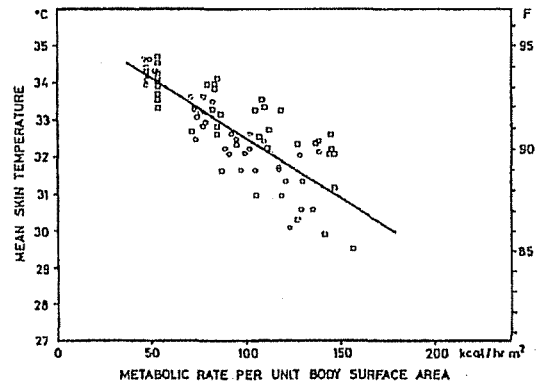


図-7 代謝量による中立環境を与える平均皮膚温の変動 (Fanger)⁹⁾

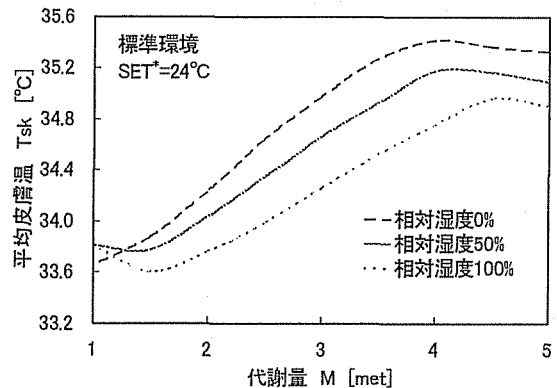


図-8 two-node model より算出された $SET^*24^{\circ}C$ における皮膚温

- 文集、第60巻、第10号、pp.936-969 (1986).
- 2) 西安信：PMV の成果と問題点、日本生気象学会誌、29号、pp.141-146 (1992).
- 3) 佐古井智紀、持田徹ら：平均皮膚温・ぬれ面積率と等温感線の形状、空気調和・衛生工学論文集、No.79、pp.11-16 (2000).
- 4) 深井一夫：体温調節モデルに基づく新標準有効(SET^*)による温熱環境の評価に関する研究、博士学位論文、第3章 (1994).
- 5) Gagge, A.P., Fobelets, A.P. and L.G. Berglund : A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2B, pp.709-731 (1986).
- 6) 持田徹、長野克則ら：暑さの指標の特性と評価、空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演論文集、p.115-118 (2001)
- 7) Nevins, R.G., Rohles, F.H., Springer, W. and A.M. Feyerherm : A temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons, ASHRAE Journal, April:55 (1966).
- 8) McNall, P.E., Jaax, Rohles, F.H., Nevins, R.G. and W. Springer : Thermal comfort (thermally neutral) condition for three levels of activity. ASHRAE Transactions, 73, I, I.3.1 (1967).
- 9) P.O. Fanger : Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering, Chapters 2&3 (1970).
- 10) 真木学、窪田英樹ら：運動時における発汗特性と平均皮膚表面温度の予測、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.385-386 (1997)