



Title	熱ストレスインデックスの検討
Author(s)	射場本, 勘市郎; 西, 安信
Citation	衛生工学, 12, 15-24
Issue Date	1966-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/36177
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_15-24.pdf



熱ストレスインデックスの検討

射場本 勘市郎 *

西 安 信 **

昭和41年 2 月31日 受理

An Examination of the Heat Stress Index

Kan'ichiro IBAMOTO

Yasunobu NISHI

Synopsis

Recently the HEAT STRESS INDEX, that was presented by H.S. Belding and T.F.Hatch in 1955, is explained in the data-book or handbook of air-conditioning to be the most rational and accurate index for evaluating the thermal sensation.

The authors tried to examine this index with the heat transfer theory, as our former reports, and found out the followings.

-----It is questionable that the formulae of the heat transfer coefficient for convection and evaporation accurately express the human thermal property.

According to these formulae the equivalent cylinder of human body on convectional heat transfer property is about 15~20 cm in diameter and on the evaporative heat transfer property that is about 30~100cm even in the range of lower wind speed.

About the simplifying method, the difference between Eq. 7. and Eq. 22. is not so little, as shown in Fig. 3., and the difference between fixed skin temperature at 95F and true skin temperature is thought to be not so little too, -----

If these approximation are made, this index is one of the rational method to reveal the approximate magnitude of heat load to man.

So it is desired, using this index, to perceive its limit of accuracy and not to mistake its application.

* 産業環境工学講座教授 工博

** 大学院博士課程学生

1 序 言

筆者らは熱伝達論に基礎をおき工学的手法によつて人間の体感温を定量的に表示することを目標として、すでにいくつかの知見を発表、さらに研究を進めている。

それに付随して過去に発表された各種温感指標の分析も合せ行なつてきた。^{1), 2), 3), 4), 5)}

ここでは最近になつて技術資料などに紹介される様になつた「熱ストレスインデックス」について分析、検討した結果を報告するとともに、この指標の目的および構成について再認識し、ともすれば起りがちな盲目的追従への警鐘としたい。

2 熱ストレスインデックスの概略

1955年米国のH. S. Belding & T. F. Hatch により発表された⁷⁾熱ストレスインデックス(Heat Stress Index)は人体に対する外界の熱負荷を大まかではあるが工学的手法をもつて表現し、この熱負荷と人間の放熱の調節力との関係に着目した温感指標である。

Belding らは高温環境下における作業強度や作業時間の調整、熱障害の予知、高温環境への適性、医療計画、作業手当の算定などへの応用を目的としてこの指標を提案した。

人体からの放熱はほとんどその全量が、対流、ふく射、蒸発の三つの経路をへて行われると考えてよい。Belding らは人間が快適状態にあるときは次の熱平衡式が成立つものとしている。

$$M + R + C = 0 \quad (1)$$

但し M:産 熱 量

R:ふく射による受熱量

C:対流による受熱量

もし環境の温熱条件の変動により人体への熱負荷が変動し、 $M + R + C$ が正の値をとるときには体温調節機能としての生体反応が起り、それに見合う汗の蒸発による放熱 E_{req} を行つて熱平衡を維持せしめ、体温を恒常的に保つ。すなわち発汗は環境条件が快適域からずれたとき生体に起こる適応現象で、逆にこの現象に着目して発汗量の大小をもつてその環境条件の快適域からのずれの程度を評定することができる。

1) 射場本勘市郎; 温感についての工学的研究とその暖冷房への応用, 1956

2) 射場本勘市郎, 西 安信; 不快指数の不解性, 衛生工学 No 10 1965 P.9

3) 射場本勘市郎, 西 安信; 温熱環境の試作測器, 衛生工学 No 9 1964 P.33

4) 射場本勘市郎, 西 安信; 修正有効温度の検討, 衛生工学 No 11 1965 P.1

5) 射場本勘市郎, 西 安信; 温感指標群の検討(乾性放熱型及び湿性放熱型), 日本労働衛生工学会第5回学会抄録, 1965,

6) 空気調和・衛生工学会; 空気調和衛生工学便覧, 1964, P.35など。

7) Belding, H. S., Hatch, T. F.; Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains, Heating Piping & Air Conditioning, Aug. 1955 P. 129

一方人間の発汗による放熱量には人間側と環境側の両方の条件によつてきまる限界値 E_{max} が存在する。Belding らはこの限界値 E_{max} と必要熱量 E_{req} の比をもつて熱ストレスインデックスを定義した。

3 熱ストレスインデックスの手法

(1) 式の関係を具体的な数量で表現するため次の様な仮定をおいている。

- a, 平均皮温は 95°F (35°C) で一定である。
- b, 平均的体格を持つ標準人間を想定し、その体表面積 (20ft^2) を基にこの人間の各放熱量を算定する。
- c, 不感蒸泄量はその量と他の荒さとの関連から無視する。
- d, 衣服は考えない。
- e, 全体表面は平均皮温における飽和水蒸気圧に保たれているものとする。

以上の設定条件を基にして

ふく射による受熱量 R を

$$R = 22(t_p - 95) \quad \text{Btu/h} \quad (2)$$

$$H_{R,st}^* = 5.45(T_p - 35) \quad \text{Kcal/m}^2\text{h} \quad (3)$$

また、対流による受熱量 C を

$$C = 2\sqrt{v}(t_a - 95) \quad \text{Btu/h} \quad (4)$$

$$H_{C,st} = 6.95\sqrt{V}(T_a - 35) \quad \text{Kcal/m}^2\text{h} \quad (5)$$

の各式で表わした。さらに両式をまとめて

$$R + C = (22 + 2\sqrt{v})(t_{g,st} - 95) \quad \text{Btu/h} \quad (6)$$

但し

$$t_{g,st} = \frac{22 \cdot t_p + 2\sqrt{v} \cdot t_a}{22 + 2\sqrt{v}} \quad ^{\circ}\text{F} \quad (7)$$

(7) 式で表わされる $t_{g,st}$ がわかれば、実際の計算において $R + C$ のまとまつた型で取り扱うのが便利である。ここで $t_{g,st}$ を近代的にグローブ温度計の示度をもつて読み替えることとしている。

* suffix "st" は stress Index の意

以上の関係より作業によつてきまる産熱量がわかれば次の関係より、必要とされる蒸発による放熱量が決まる。

$$M + R + C = E_{req} \quad (8)$$

また皮膚全面が完全に濡れているときには環境の水蒸気分圧によつてきまる最大の蒸発による放熱量 E_{max} は次式によつて与えられるものとしている。

$$E_{max} = 10.3 v^{0.4} (42 - P_a) \quad \text{Btu/h} \quad (9)$$

$$HE_{max} = 11.7 V^{0.4} (42 - P_a) \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \quad (10)$$

ここで E_{req} と E_{max} から熱ストレスインデックスは次式で定義される。

$$INDEX = (E_{req} / E_{max}) \times 100 \quad (11)$$

但し

$$\begin{aligned} t_p, T_p &: \text{平均ふく射温} & [^{\circ}\text{F}], [^{\circ}\text{C}] \\ t_a, T_p &: \text{周囲気温} & [^{\circ}\text{F}], [^{\circ}\text{C}] \\ v, V &: \text{気流} & [\text{ft/min}], [\text{m/sec}] \\ P_a, &: \text{周囲空気中の水蒸気圧} & [\text{mmHg}] \end{aligned}$$

4 筆者からの方法の概略

熱ストレスインデックスが発汗量に着目しているのに対し、筆者らは次の様な熱平衡式を基礎に体感温を皮温に代表させて定量的に表わすことを試み、すでにいくつかの成果を報告したが更に研究を進めている。^{1), 5)}

その詳細は別に報告の予定であるのでここではその概略についてふれ、熱ストレスインデックスを分析する上での参考としたい。

定常状態にあつては体内で生産された熱量はふく射、対流、蒸発の三つの経路をへて外界へ放散される。

$$H = H_R + H_C + H_E \quad (12)$$

$$= \alpha_r (T_s - T_p) + \alpha_c (T_s - T_a) + \beta (P_s - P_a), \epsilon \quad (13)$$

但し H : 全産熱量

α_r : ふく射熱伝達率

α_c : 対流熱伝達率

β : 蒸発に伴う熱伝達率

T_s : 皮温

P_s : 皮温における飽和水蒸気圧

ϵ : ぬれ率

この式で放熱量および外的条件が与えられれば、熱平衡を保つために T_s がこれらの函数として定

まる。すなわち T_s は生体にかかってくる熱負荷を総合的に表現していると考えられ、筆者らはこの T_s をもつて温感指標とすることを試みてきた。

暖房を対象とする様な通常の室内環境を問題とするときには蒸発に伴う放熱の項を

$$\beta (P_s - P_a), \epsilon \div \text{Const.} \quad (14)$$

と見なしてよく、この様な取扱いで湿性放熱量を固定して乾性放熱量とそれに関係する外的因子の関係を整理したのがすでに発表した温感線図である。¹⁾

(13) 式において水蒸気分圧を温度関数に読み替えれば次式の様に湿性放熱量を変動量として扱った関係に整理される。

$$H = \bar{\alpha}_c (T_s - \bar{T}_a) + \alpha_r (T_s - T_p) \quad (15)$$

$$\text{但し } \bar{\alpha}_c = (1 + a \cdot \epsilon \cdot k), \alpha_c \quad (16)$$

$$\bar{T}_a = \frac{T_a + \frac{\epsilon \cdot k \cdot \psi_a}{100} (A \cdot T_a^2 + B \cdot T_a + C - \frac{100}{\psi_a} \cdot b)}{(1 + a \cdot \epsilon \cdot k)} \quad (17)$$

$$P_s = a \cdot T_s + b \quad (18)$$

$$P_a = \frac{\psi_a}{100} (A \cdot T_a^2 + B \cdot T_a + C) \quad (19)$$

$$\beta = k \cdot \alpha_c \quad (20)$$

a, b, k, A, B, C : 定数

ψ_a : 相対湿度 %

(15) 式における T_s は気湿も含めた温熱因子により表わされる。この式で表わされる人体モデルの皮温と人間の温感との関係を求めれば、この T_s をもつて温感指標とすることが考えられる。

5 熱伝達率等の検討

Belding らは(2), (3), (9) 各式の熱伝達率を N. Nelson⁸⁾ らの(共同研究者として T. F. Hatch も含む)実験の結果よりそのまま引用している。

対流熱伝達率 対流熱伝達率は円筒、球、平板など非常に限られた形状の物体についてのみ、介在する流体の性質や流速、物体寸法の関係が理論的、実験的に整理されている。これらの知識を利用する点においても、また問題を単純化するためにも、筆者らは人体を円筒型放熱体と見なして扱う。ここで Belding らの用いた $6.95 \sqrt{V} \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ なる対流熱伝達率と各種寸法の円筒の対流熱伝達率とを同一図上にて比較する。なお円筒の対流熱伝達率は流れに直角におかれた円筒表面からの平均対流熱伝達率で McAdams⁹⁾ により提案されている式に従った。

8) Nelson, N., et al; Thermal Exchange of Man at High Temperature, Am. J. of Physiology. Vol. 151 Dec. 1947 P. 626

9) McAdams, W. H.; Heat Transmission, 3rd Ed. P. 265 McGraw Hill

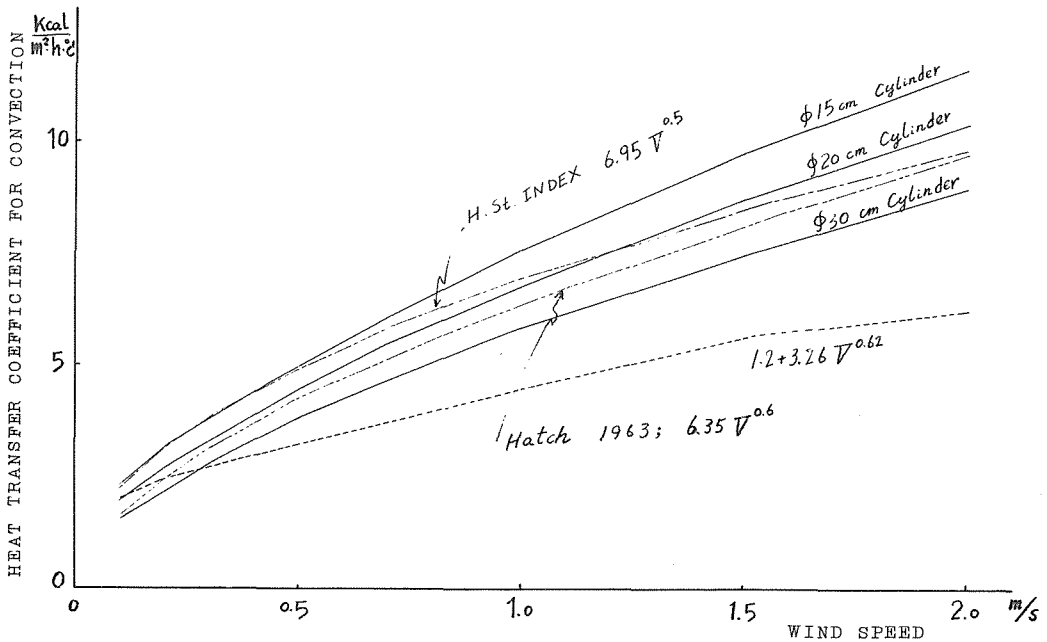


Fig. 1 諸氏の人体対流熱伝達率の比較

Comparison with some kinds of heat transfer
Coefficient for convection

Fig. 1 に示されるように、熱ストレスインデックスにおける対流熱伝達率は直径 15～20 cm の円筒のそれに相当することがわかる。放熱体としての人体を直径 15～20 cm の円筒と等価であると見なすには、大きさの点で抵抗が感じられる。ちなみに筆者らは種々の実験データの分析より直径 30 cm の円筒と仮定して論を進めている。

蒸発に伴う熱伝達率 蒸発に伴う熱伝達率については現象の特殊性の故か対流熱伝達率におけるが如き理論上、実験上の整理がなされていない。

筆者らはこの関係を求めるに当つて、皮ふ面からの汗の蒸発は物体表面からの水蒸気移動という物質伝達現象に他ならないことに着目して熱伝達現象と物質伝達現象のアナロジーより次式を誘導している。^{*}

$$\beta = 3.42 \alpha c \quad (21)$$

但し 常温において

(21) 式の関係を用いれば、対流熱伝達率の知れている任意の形状の物体表面からの蒸発に伴う

^{*} 式の誘導については別に報告の予定である。

熱伝達率を求めることができる。

ここでBelding らの提案している蒸発に伴う熱伝達率 $11.7 V^{0.4} \text{ Kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ と筆者の方法による各種寸法の円筒表面からのものと同一図上で比較したものがFig. 2, である。

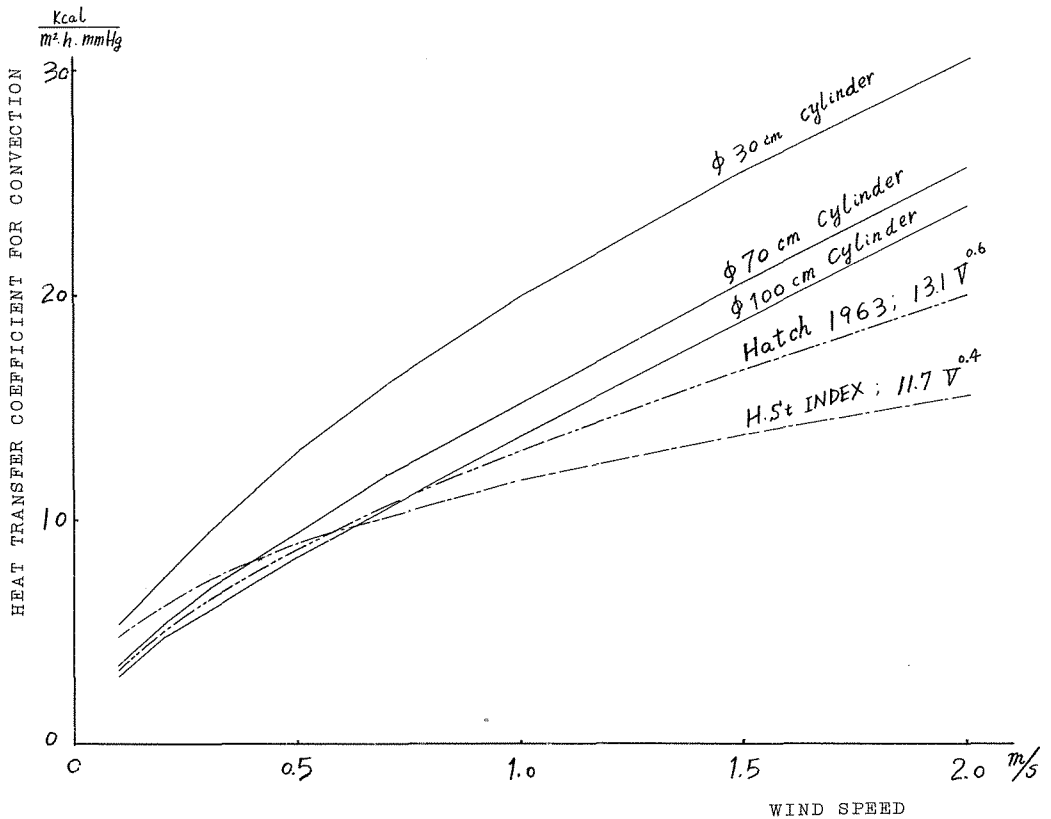


Fig. 2. 諸氏の蒸発に伴う熱伝達率の比較

Comparison with some kinds of heat transfer coefficient for evaporation

これによれば熱ストレスインデックスにおいては蒸発に伴う熱伝達率をかなり過少に見積っていることが考えられる。

Tg.st とグローブ温度

(7)式で表わされる温度をグローブ温度計の示度で読み替えることによって生ずる誤差について考えてみる。

グローブ温度計は直径15cmのつや消し黒塗りの球型であり、その示度はこの大きさに応じた対流熱伝達率を含む次式で表わされる。

$$T_{\text{globe}} = \frac{T_P + 2.37 \sqrt{V} T_a}{1 + 2.37 \sqrt{V}} \quad \text{C} \quad (22)$$

すなわち(7)式と(22)式の差は読み替えによつて生ずる誤差を示す。

$$T_{g:st} - T_{globe} = \frac{1.09 \sqrt{V} (T_p - T_a)}{1 + 3.65 \sqrt{V} + 3.04 V} \quad \text{C} \quad (23)$$

この関係をFig. 3に示す。

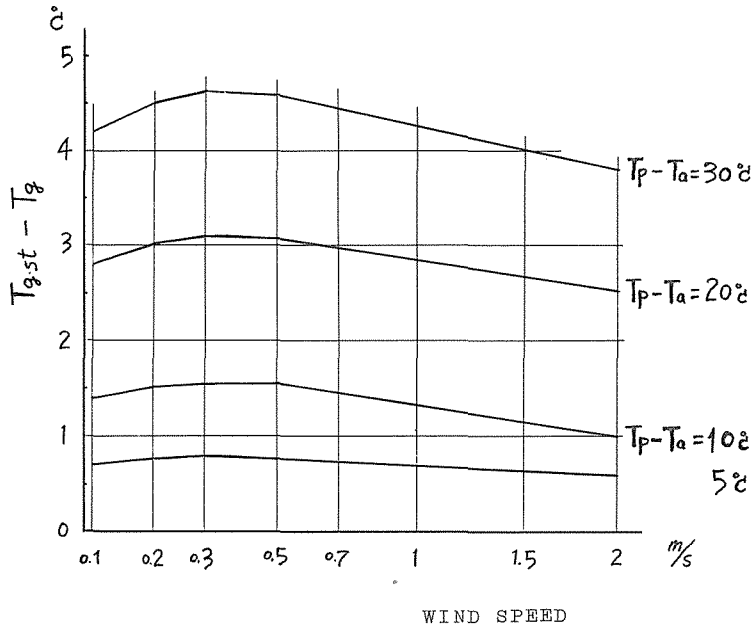


Fig. 3, $T_{g:st}$ と T_{globe} の差
Difference between " $T_{g:st}$ " and " T_{globe} "

図に見られるように平均ふく射温と気温に差のあるときはグローブ温度に読み替えることにより少なからぬ誤差を生ずることになる。

6 Fort Knox Study¹⁰⁾について

Belding らの引用したNelsonらの実験はFort Knox Studyとして一般に呼称されている。彼らは高温域での人間の熱交換に関する実験を生体実験に基いて行つた。実験の概略をまとめると——被験者4名、温湿度の組合せ7種類(気温90~150°Fまで4種、湿度13~36mmHgまで3種)、気流15cm/sec~2m/secまで5種。

実験環境の種類は十分とは言えないが、生理学的な実例をもとに各熱伝達率を定めた。

10) Nelson, N., et al; at the armored Medical Research Laboratory, Fort Knox, Kentucky

対流熱伝達率およびふく射熱伝達率はまとめた形で次式の様に気流 V の関数として与えられている。

$$\alpha_{r, st} + \alpha_{c, st} = 5.65 + 7.5 V^{0.5} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (24)$$

又は

$$\alpha_{r, st} + \alpha_{c, st} = 6.85 + 3.26 V^{0.62} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (25)$$

上の2式は明らかに気流に関係のないふく射熱伝達率と対流熱伝達に分けて考えることができる。Nelson らは対流熱伝達率が気流 V の0.62乗に比例するという関係について理論的見地から興味を示しているが、ふく射熱伝達率の6.85 Kcal/m²·h·°Cという値がかなり大きく、さらに(24)式においてのふく射熱伝達率の5.65 Kcal/m²·h·°Cという値は平均ふく射温48°C(実験にて実現された一環境)において人体表面のふく射有効面積比が約90%となるため、この点の適合性をもつて(24)式を採用している。なお(25)式を5.65 Kcal/m²·h·°Cなるふく射熱伝達率と1.2+3.26 V^{0.62} Kcal/m²·h·°Cなる対流熱伝達率の和であると解釈して、先に示したFig. 1.上で各種対流熱伝達率と比較を試みた。その結果この様な整理の仕方が有利であるとの結論は得られない。

Nelson らは蒸発に伴う熱伝達率について

$$\beta'_{st} = 1.44 V^{0.37} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} \quad (26)$$

という関係を実験より導いた。しかしPowell¹¹⁾らにより行われた円筒表面からの蒸発についての実験結果が気流 V の0.6乗に比例するという例に照し合わせて、その理由を

a, 被験者の皮ふ面が高風速下では完全に濡れた状態になかったのではなかったのではないか。

b, 人体は円筒の集合体と考えられるが、実際上はこの見方に無理があるのではなからうか。

との疑問をいただきながらも、結局は次式の形に整理している。

$$\beta_{st} = 1.4 V^{0.4} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} \quad (27)$$

以上Nelson らのまとめた結果は実験データーの代表値を示すものではあるが、生体という非常に特殊の熱特性を持つ物体からの放熱を単純化して取扱うだけに、表面に現われてこない諸因子の影響など、仮定条件が実験では十分に実現されているとは考えられず、実験式に対する信頼性は十分に高いと言えない。

7 Hatchの改良式

熱ストレスインデックスの発表者の一人であるT. F. Hatchは1963年になり各熱伝達率をFort Knox Studyの実験資料を再分析して次の様に書き換えた。¹²⁾

11) Powell, R. W., Trans. Inst. Chem. Eng. (London) 18;36, 1940

12) Hatch, T. F.; Assessment of Heat Stress, Temperature, Its measurement and Control in Science and Industry. Reinhold, New York 1963

$$\alpha_{r.Ha}^* = 6.15 \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (28)$$

$$\alpha_{c.Ha} = 6.38 V^{0.6} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (29)$$

$$\beta_{Ha} = 1.31 V^{0.6} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} \quad (30)$$

$$= 2 \cdot \alpha_{c.Ha} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} \quad (31)$$

これらのうち対流熱伝達率および蒸発に伴う熱伝達率はそれぞれFig. 2. 上で他の関係式のものと比較を試みた。これによれば、対流熱伝達率は直径25cm程度の円筒のそれに相当することがわかる。しかし蒸発に伴う熱伝達率は依然小さく筆者らの方法にもとずけば低風速域でも直径30~100cm程度と風速により大きく変る寸法をとる。

8 あとがき

熱ストレスインデックスについて主に熱伝達の点に着目して検討を試みた。

その結果ふく射熱伝達率はともかく、対流熱伝達率は過大に、蒸発に伴う熱伝達率は過少に見積っていることが考えられる。これらをもとにして熱計算をすれば結果にはかなりの誤差が集積するものと考えられる。

また単純化のためグローブ温度への読み替えや皮温を固定するという取扱いの、精度を犠牲にしても使い易さを選ぶという立場を考え合わせれば、この指標の応用範囲には自ずから限界があることはつきりする。

またついでながらこの指標の応用分野として提案されている二つの方法にもふれておく。

体内に蓄熱が起る様な環境での作業継続可能時間の算定は体温の過渡的温度経過や、体内の温度分布などの考慮が必要で、この指標で採用しているような定常的取扱いで算定することは単なる便法にしかすぎず、場合によつては大きな誤りの原因となることが考えられる。

またそれぞれ強度の違う作業を継続したときの平均的指数の算定方法は、たとえ短時間であつても生体に苛烈な影響を与えるような負荷も、平均化されることにより、表面に現われてこなくなるという危険性を含んでいる。

以上述べてきたように熱ストレスインデックスはその精度や方法に少なからぬ問題を含んでいる。その点これらを認識しないで盲目的に用いることは大きな誤りの原因となるのであろう。

* Suffix "Ha" は Hatch—1963 の意