



Title	Windchill指標群の検討
Author(s)	射場本, 勘市郎; 久保田, 忠男; 杉谷, 克彦
Citation	衛生工学, 17, 21-25
Issue Date	1970-03
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/36201">http://hdl.handle.net/2115/36201</a>
Type	bulletin (article)
File Information	17_21-26.pdf



[Instructions for use](#)

## Windchill 指標群の検討

射場本 勘市郎\*  
 久保田 忠 男\*\*  
 杉 谷 克 彦\*\*

## Analysis of Several Windchill Indexes

Kan-ichiro IBAMOTO  
 Tadao KUBOTA  
 Katsuhiko SUGITANI

## ABSTRACT

In Canada and Alaska, Windchill indexes are frequently used to represent the degree of cold with outdoor temperature and wind speed.

A reasonable scale to express cold sensation must be derived from the heat balance equation between a human body and its environment.

As the result of the examination about three Windchill tables based on the same formulae, it was proved that there were some unreasonable points.

This paper presents those points and proposes a rational index of authors.

Its index shows clothing to keep comfortable in a cold environment.

## 1. 緒 言

寒冷環境において、気湿の体感温にあたる影響は少いので、寒さの程度を表す指標は、着衣面乾性放熱に着目するならば、人体と環境との定常状態における熱平衡式を用いて容易にえられる。

カナダ、アラスカなどで寒さの指標として常用されている、表現法の異なる3種類のWindchillを検討したところ、かなり不合理な点が見いだされた。

ここでは、その結果を述べ、あわせてその不合理が何に起因するかを考察し、呼吸による放熱も考慮して必要着衣量で表現される合理的な指標を提案する。

## 2. 人体の定常熱平衡式

人体と環境との定常熱平衡式は、次式で示される。

$$50N = H + Q \\ = (H_D + H_E) + (Q_D + Q_E) \quad (1)$$

$N$  ; 作業強度 [Met]=50 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$H$  ; 皮面全放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$H_D$  ; 皮面乾性放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$H_E$  ; 皮面湿性放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$Q$  ; 呼吸による全放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$Q_D$  ; 呼吸による乾性放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

$Q_E$  ; 呼吸による湿性放熱量 [Kcal/m<sup>2</sup>hr]

(単位皮面積あたり)

$$H_D = \alpha_r(T_s - T_r) + \alpha_c(T_s - T_a) \quad (2)$$

$$Q_D = G \cdot N (c_n T_n - c_a T_a) \quad (3)$$

$$Q_E = G \cdot N \cdot l(x_n - x_a) \quad (4)$$

ここで

$T_s$  ; 表面温 (裸体の時は皮温,  
 着衣の時は着衣表面温) [°C]

$T_r$  ; 平均ふく射温 [°C]

$T_a$  ; 気 温 [°C]

$T_n$  ; 呼気温 [°C]

\* 産業環境工学講座 教授 工博

\*\* 同大学院修士課程

- $x_a$  ; 気 湿 (g/kg)
- $x_n$  ; 呼気の気湿 (g/kg)
- $\alpha_r$  ; ふく射熱伝達率 [Kcal/m<sup>2</sup> hr deg °C]
- $\alpha_c$  ; 対流熱伝達率 [Kcal/m<sup>2</sup> hr deg °C]
- G ; 1 Met あたり, 人間か服  
い込む乾き空気量=0.35 [kg/Met]
- l ; 水の蒸発潜熱 =0.597 [Kcal/g]
- $c_a$  ; 乾き空気の比熱 =0.240 [Kcal/kg deg °C]
- $c_n$  ; 呼気ガスの比熱 =0.236 [Kcal/kg deg °C]

$$\alpha_{M1} = \sqrt{100 + 10.45 - v} \quad [\text{Kcal/m}^2 \text{ hr deg } ^\circ\text{C}] \quad (6)$$

$$\alpha_{M2} = 10.9\sqrt{v} + 9 - v \quad [\text{Kcal/m}^2 \text{ hr deg } ^\circ\text{C}] \quad (7)$$

v ; 風 速 [m/sec] \*

前記  $\alpha_s$  は, 図-2 上にて,  $v < 2.6$  [m/sec] で  $\alpha_{M1}$  に,  $v > 2.6$  [m/sec] で  $\alpha_{M2}$  に合致する。

\*文献には [km/hr] と書かれているが, ついでながら同じ執筆者の著書「気象と人間」<sup>3)</sup>で [m/sec] とある。一応の結論としては, 前 [km/hr] が誤記と考える。

寒冷環境で, 着衣面からの湿性放熱は, 微少と考えられる。

### 3. Windchill Scale<sup>1)</sup> (以下 Scale と, 略す。)

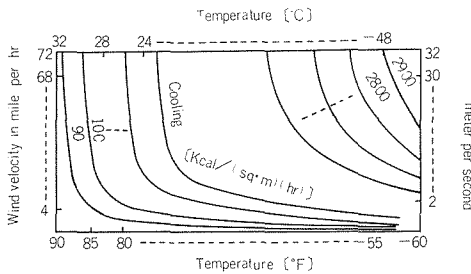


図-1

Scale 算出の基礎となっている熱伝達の式は, Siple (米国, 南極探検家) が, 小円筒中の水の, 凍る時間を測定して得た実験式であるというが, 円筒径の明示はない。皮面温が33°Cに保たれている人体表面からの放熱量  $H$  [Kcal/m<sup>2</sup>hr] をもって, Windchill と定義している。モデル化した裸体を想定していると考えられるが, 呼吸による放熱  $Q$  は考慮しておらず, 着衣の取りあつかいも示ないのうなづけけない。

Siple 使用の円筒直径を求める為に, 著者らの手法により分析を始める。

$$H = \alpha_s(33 - T_a) \quad (5)$$

$\alpha_s$  ; Siple による熱伝達率  
[Kcal/m<sup>2</sup>hr deg °C]

式(5)を用い図-1 を分析した結果,  $\alpha_s$  は, 図-2 上に示される。

<sup>2)</sup> 「生気象学」によれば, Siple の対流熱伝達率の記載は

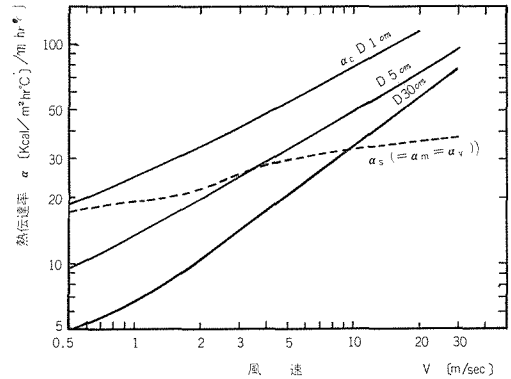


図-2 熱伝達率の関係

### 4. Windchill Chart (以下 Chart と, 略す。)

表-1

ACTUAL TEMPERATURE	WIND VELOCITY			
	0 mile per hr	5 mph	15 mph	..... 45 mph
32°F		29°	13°	..... -3°
⋮		⋮	⋮	⋮
4°F		-9°	-37°	..... -60°

ある風速時の気温 [°F] を, 無風時 (?) の等価な気温 [°F] で表示したという。

放熱的に, 等価である事が, 検算できる。図-3 に示すように Chart 値は, 風速ごと直線上にのりその直線群は座標 (91, 91) の一点で会する。この点は, 前記の Scale におけるのと同じ固定表面温 (91°F ≃ 33°C) であると推定される。

1) M.K.Thomas and D.W.Boyd; Windchill in Northern CANADA The Canadian Geographer No. 10

2) 神山恵三 生気象学 日本生気象学会編 p.336 1968 紀伊国屋書店

3) 神山恵三 気象と人間 p.31 1967 紀伊国屋新書

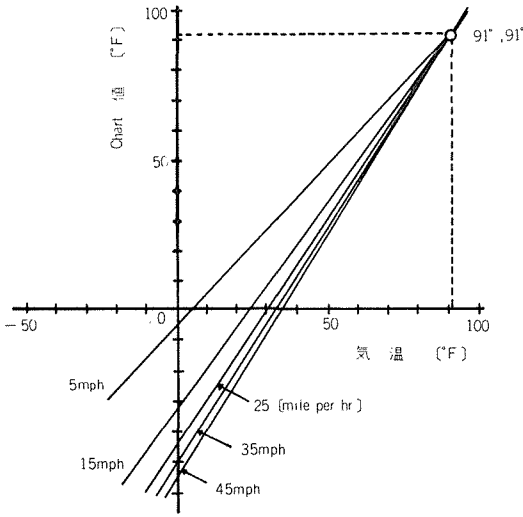


図-3 Chart 値と気温, 風速の関係

従って基準風速への変換式は,

$$\alpha_v(91 - T_a) = \alpha_{v_0}(91 - T_0) \quad (8)$$

- $T_a$ ; 気温 [°F]
- $T_0$ ; Chart の値 [°F]
- $\alpha_v$ ; 風速  $v$  の時の熱伝達率 [Kcal/m<sup>2</sup> hr deg]
- $\alpha_{v_0}$ ; 無風時(?)の熱伝達率 [Kcal/m<sup>2</sup> hr deg]

先の分析で得た直線群の勾配は,  $\alpha_v/\alpha_{v_0}$  を表わしている。ここで  $\alpha_{v_0}$ (無風時とあるが, 基準風速の意であろう) として, 試みに前節で得た Scale の風速 2 (m/sec) における  $\alpha_s$  値を, 代入した  $\alpha_v$  は図-2 上の  $\alpha_s$  線に殆んど合致する。

5. Chill Factor (以下 Factor と, 略す。)

表-2

WIND VELOCITY in mile per hr	TEMPERATURE °F		
	30	25	20
10	14	14	14
20	14	14	14
40	-1	-16	-16

表示の体裁は, 前節の Chart と同じであるが, 評価の書き込み数字には単位が無く, 数値もやや異なる。評価単位が [°F] であると仮定して, 前節と同様に分析を試みる。等風速の Factor 値は図-3 と同じく定直線上に並び, かつ直線群は, (91, 91) なる一点に会する。

Chart の  $\alpha_v/\alpha_{v_0}$  と, Factor の  $\alpha_v/\alpha_{v_0}$  は, 多少数値が異なる。

$\alpha_{v_0}$  として風速 5 [mile/hr] (2.3m/sec) の  $\alpha_s$  値をを与えると,  $\alpha_v$  線は,  $\alpha_v$  線から僅かにずれる。すなわち基準風速の違いが, 両値の僅かな差異となっている。

6. Siple の熱伝達率式の検討

以上3種の Windchill 指標について分析を行ったが, いずれも式(6), (7)すなわち Siple 実験式に基づいている事が判明した。

円筒に関する風速と対流熱伝達率の関係は, Hilpert, の実験式<sup>4)</sup>を用い代表管径で示せば, 図-2 の  $\alpha_c$  曲線群となる。先に述べた曲線  $\alpha_s$  とこれらと比較すれば, 全くその傾向が異なるので, Siple が, 用いた円筒径の推定もゆきずまる。

そこで大胆な推理ではあるが, Siple 式で第3項の  $-v$  を,  $+v$  とすれば,  $\alpha_{M1}, \alpha_{M2}$  は図-4 上の  $\alpha'_M$  曲線で書き表わされ, 直径が微小な  $\alpha_c$  線となるが, 実験用円筒としては, 小さすぎる。

ここで Siple の実験を推察して  $\alpha'_M$  は, 対流熱伝達率のみならず, ふく射熱伝達率もあわせ含みかつ  $T_r \neq T_a$  と考えられる。したがって  $\alpha'_M$  と  $\alpha_c$  は, 次式の関係にある。

$$\alpha'_M(T_s - T_a) = \alpha_r(T_s - T_r) + \alpha_c(T_s - T_a) \quad (9)$$

$$\alpha'_M = \alpha_c + \xi \alpha_r \quad (10)$$

$$\xi = \frac{T_s - T_r}{T_s - T_a} \quad (11)$$

検算によれば,  $-50^\circ\text{C} < T_a < -10^\circ\text{C}$  において,  $\xi \approx 1.6, \alpha_r \approx 3.42$  [Kcal/m<sup>2</sup> hr deg °C] 程度であり図-4 上の  $\alpha'_M$  から,  $\xi \alpha_r \approx 0.547$  Kcal/m<sup>2</sup> hr deg °C を差し引くとほぼ  $\alpha_c$  曲線群の 5cm 円筒となる。

以上の分析によって次の事が判明した。

- 1) 熱伝達率式に, 原著者の誤記があり, 第3項の  $+v$  を  $-v$  とした。
- 2) 算出された熱伝達率式は, ふく射熱伝達率を含み, しかも実験と同じふく射条件においては使用できるが, 他環境への拡張には, 耐えられない。

いずれの Windchill 指標も, 原著者の実験式の不合理に気づかず計算している。

原実験では, おそらく直径 2in の円筒を用いたと推察できたが, 人体放熱モデルとしては, 過少でかつ表面温

4) McAdams, W.H. HEAT TRANSMISSION p. 260 1962 Mcgraw-Hill Kogakusha

を、裸体のしかも33°Cに固定した取扱いは、うなづけない。

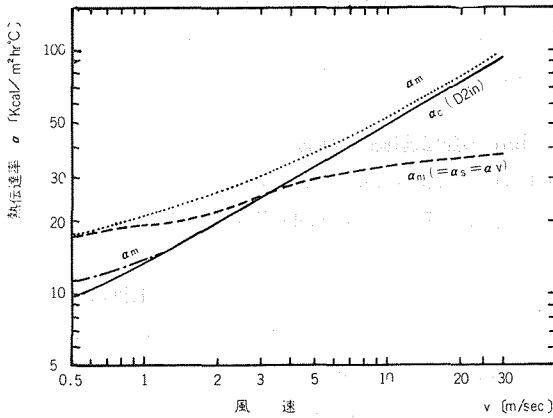


図-4 熱伝達率の関係

## 7. 寒さの指標の提案

寒さの程度を表わす指標は、人体と環境との定常熱平衡式に基づいて決められる。Windchillは、皮面乾性放熱のみに着目した指標であるが、その算出式に疑問が残り、皮面湿性放熱の取り扱いには一応うなずくとしても、呼吸による放熱と着衣の影響を考えていない事は、見逃がせない。

人体の代表管径として30cmを用い、寒冷環境で快適な温度感覚を、保持するために必要な着衣量(clo値)をもって、寒さの指標とする事を提案する。

計算にあたっては、人間の居住環境として都市を想定し、ふく射条件は、 $T_r = T_a$ とした。

式(1)より

$$H_D + H_E = 50N - (Q_D + Q_E) \quad (11)$$

$$Q_D + Q_E = 0.35N \{0.236T_n - 0.240T_a + 0.597(x_n - x_a)\} \quad (12)$$

[Kcal/m² hr]

式(12)の $x_n$ は、湿り空気線図(キャリア線図)の飽和曲線上に存在し次式で近似できる。

$$x_n = 1.54(T_n - 12.2) \quad [g/kg] \quad (13)$$

著者らの行った人体実験より次式の関係が確かめられた。

$$Q = N(38 - T_n) \quad [Kcal/m² hr] \quad (14)$$

式(12), (13), (14)より次式が導かれる。

$$Q = N(8.241 - 0.061T_a - 0.151x_a) \quad [Kcal/m² hr] \quad (15)$$

寒冷環境では、着衣表面からの湿性放熱は、微少で、乾性放熱にのみ着目できると考えられる。

したがって、式(2)において、 $T_r = T_a$ ならば

$$H = H_D = 50N - (Q_D + Q_E) = (\alpha_r + \alpha_c)(T_s - T_a) \quad (16)$$

着衣の熱抵抗を考えると

$$H = \frac{\alpha_r + \alpha_c}{1 + 0.18I(\alpha_r + \alpha_c)} (T_s - T_a) \quad (17)$$

ここで、

$T_s$ ; 皮面積 [°C]

$I$ ; 着衣の熱抵抗 [1 clo] = 0.18 [m² hr °C/Kcal]

快適な温感時の皮温は、実験より次式で表現できた。

$$l_n \frac{H}{15} = 0.2(38 - T_s) \quad (18)$$

式(16), (17), (18)より快適な温感の保持に、必要な着衣量は、

$$I = \frac{1}{0.18} \left\{ \frac{(38 - \frac{1}{0.2} l_n \frac{H}{15}) - T_a}{H} - \frac{1}{\alpha_r + \alpha_c} \right\} \quad (19)$$

ここで

$$H = N(41.759 + 0.061T_a + 0.151x_a) \quad [Kcal/m² hr] \quad (20)$$

したがって、各気温ごとに、 $\alpha_r$ ,  $x_a$ を固定し、対流による熱伝達率 $\alpha_c$ を、風速 $v$ に読みかえると必要着衣量 $I$ は、作業強度 $N$ をパラメーターとして、 $T_a$ と $v$ から算出できる。

横軸、気温 $T_a$ [°C]、縦軸、風速 $v$ [m/sec]とすると式(19), (20)の関係は、図-5となり各曲線上にて、必要着衣量 $I$  cloは、保存される。

図-5を用い、必要着衣量を求めるには、

- 1) 作業強度を決める。
- 2) 気温 $T_a$ [°C] 風速 $v$ [m/sec]を、横軸、縦軸上にとる。
- 3) 気温 $T_a$ と $v$ を延長し、交点の必要着衣量 $I$  cloを読みとる。

実用グラフを、図-6に示す。

ついでながら、clo値と、日常経験する着衣との関係は、表-3となる。

5) 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

6) 射場本勘市郎; 温感機構の工学的解析 労働衛生工学 1969-10 p. 25

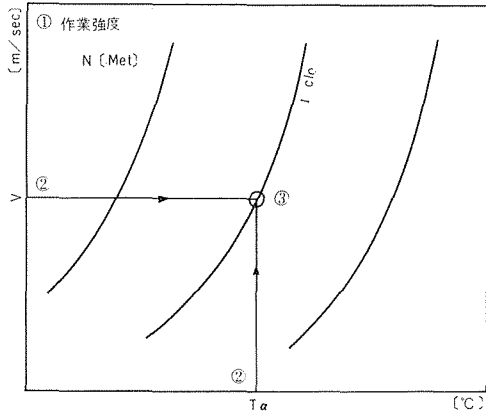


図-5

表-3 クロ値の関係

クロ値 (I clo)	着衣
0	裸
0.5	夏衣
1.0	合衣
2.0	冬衣
3.0	防寒衣
⋮	⋮

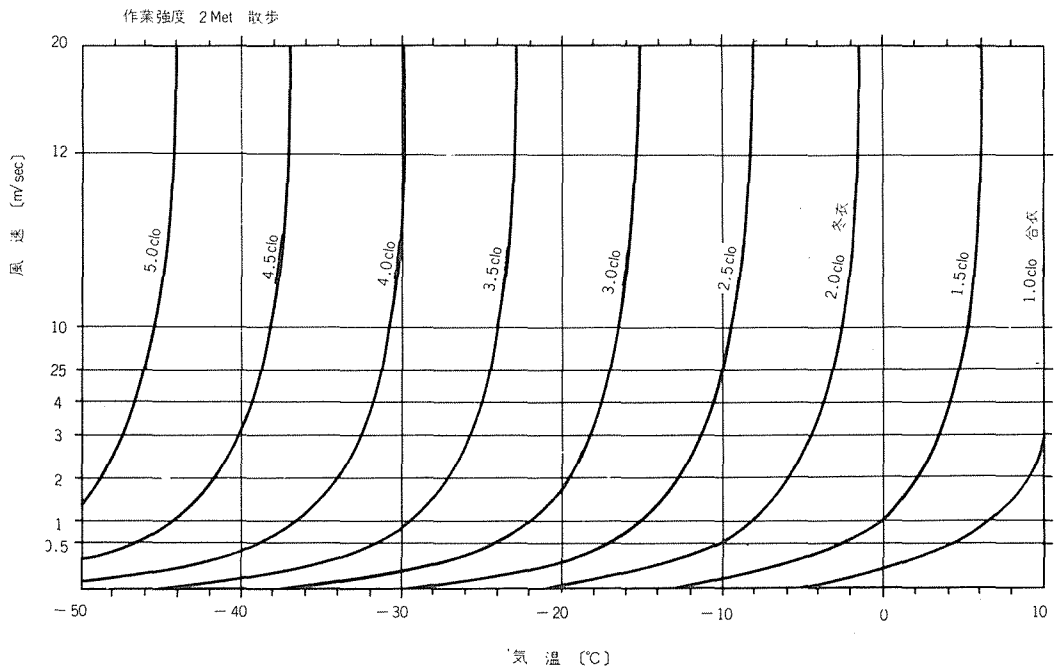


図-6