



Title	暑さ・寒さをはかる
Author(s)	持田, 徹
Description	第1回衛生工学シンポジウム（平成5年11月17日（水）-18日（木） 北海道大学学術交流会館）．パネルディスカッション．環境をはかる
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 1, 399-403
Issue Date	1993-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7489
Type	departmental bulletin paper
File Information	1-PD4_p399-403.pdf



暑さ・寒さをはかる

持田 徹 (北海道大学工学部衛生工学科)

1. はじめに

水銀やアルコールを封入した棒状温度計は、本来気温を測るものであるが、「寒暖計」と呼ばれていることからわかるように、通常の静穏な室内で、椅子に座っているような場合には、その時の気温によって暑さ寒さの度合い、すなわち体感温（温感）の程度をやや定量的に表現することができる。しかし、夏季に気温が多少高くても、湿度が低い時や風があれば、然程暑さを感じなかったり、冬に厚着や運動をしている場合には、気温が低くてもある程度の寒さを凌げるといった経験からも知れるように、気温のみで体感温の評量ができるのは、極く一部の場合に限られる。暑さ寒さの感覚（温冷感覚）は、年齢、性差、健康、馴れといった個人的な要因に負う点も多いが、一般には環境側の物理的な要素と、人体側の生理的な要素の両面から大きな影響を受ける。人の温冷感や快適感に影響を与える環境側と人体側の要素は種々あるが、その中でも、気温・ふく射温（壁温）・湿度・風速・着衣・産熱量（代謝量）の6要素は、体感温を評定する上で第一義的に考慮すべき必須要素である。これらの要素が相互にかつ複雑に作用し合って温冷感覚が生じるが、温冷感覚は温度などの物理量そのものよりは、体内で産生された熱と人体からの放熱とのバランスに依存する。

2. 温冷感に影響を及ぼす環境因子と熱バランスの関係

人も自然界の一員であり、人から環境への熱伝達も特殊なものではなく、他の物体同志の熱伝達と同様、基本的には熱伝達の物理法則に従う。しかし、精巧な機能と複雑な外形を有し、微妙な生理心理反応を示す人体からの熱伝達について考える時、便宜上無生物の熱伝達と異なる扱いや見方が必要になる場合がある。

人は食事で得たエネルギーの約1/4で生活活動を行なう一方、残りの大部分は熱として体外に放出し、体温の恒常性を保っている。産熱量（代謝量）は図-1に示すように、作業内容によって異なり¹⁾、年齢や男女による微差もある。また、見掛けは同じ作業状態であっても、図-2のように、環境条件によって産熱量が変化し、低温域での震えや高温域での酵素の活性化に

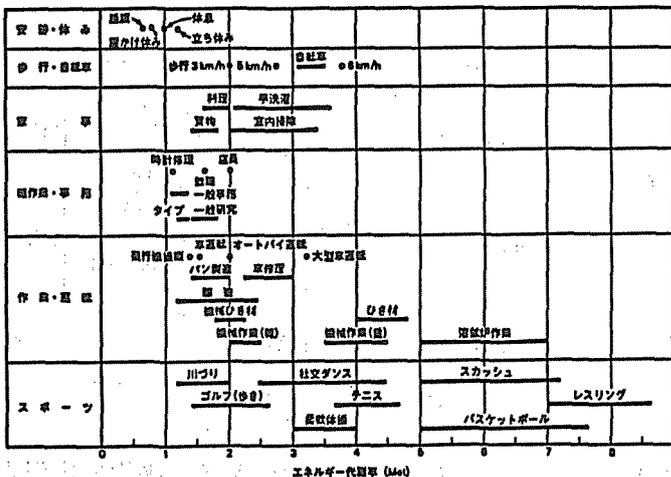


図-1 作業内容と産熱量¹⁾

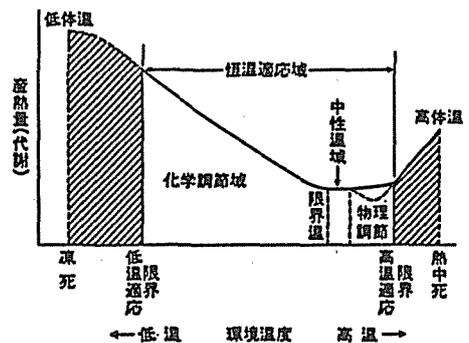


図-2 環境温度と産熱量²⁾

伴なう産熱増加がみられる。²⁾

着衣は熱抵抗および湿分抵抗として作用し、通常の着衣と熱抵抗の関係は表-1で示される。¹⁾一方、湿分抵抗も熱抵抗の関数として整理されている。^{3) 4) 5)}なお、衣服を着ることによって衣服下換気が生じ、それに伴う放熱も微量ながら存在する。^{6) 7)}

人体からの放熱は、通常の状態ではその大部分が体表面からの、対流、ふく射、蒸汗によって占められ、そのほか微量量として、呼吸放熱量⁸⁾、伝導伝熱量⁹⁾、衣服下換気に伴う放熱量、外部仕事に費やされる熱量などがあり、さらに体温調節領域を超えた高温あるいは低温環境の非定常域では、体内温が変化し、蓄熱や過冷が起こる。

着衣も衣服気候・衣服環境と呼ばれる観点から環境因子として捉えると、伝熱形式を介して産熱量と環境因子の相互関係は、図-3で表わされる。

図-3のように種々の伝熱経路を介して、環境因子の熱的影響(刺激)を受けた生体は、体温の恒常性を保つ為に生理的調節を行なうが、この時に感じる温冷感や熱的快・不快感は、生理的調節を行なった結果生じる皮膚温(平均皮膚温)、発汗量などの生理的状态値と密接な関係がある。特に平均皮膚温は、温冷感や快・不快感と良い相関を有することが、多くの生理実験から立証されており、その関係は図-4、5に示される。¹⁰⁾

衣 類 名	容 積 係 数	厚 度 (cm)	透 気 係 数 (cm)	容 積 係 数	厚 度 (cm)	透 気 係 数 (cm)	
質広上下(両手)	△	0.567	0.35	ドレス(両手、質地性)	△	0.160	0.17
・(両手)	△	0.848	0.49	・(両手)	△	1.180	0.03
スポーツジャケット(両手)	△	0.848	0.49	長袖ブラウス(両手)	△	0.028	0.20
・(両手)	△	0.848	0.49	・	△	0.167	0.26
長袖シャツ	△	0.201	0.29	半袖ブラウス(両手)	△	0.028	0.17
半袖シャツ	△	0.187	0.19	ジャケットブレザー(両)	△	0.210	0.21
長袖ニットシャツ(両)	△	0.198	0.24	・(両)	△	0.709	0.43
・(両)	△	0.201	0.37	袖なしセーター(両手)	△	0.173	0.17
半袖ニットシャツ(両)	△	0.201	0.22	長袖セーター(両手)	△	0.201	0.37
・(両)	△	0.193	0.25	ベスト(両手)	△	0.193	0.20
チヨッキ(両手)	△	0.202	0.20	オーバー(ナイロン・綿)	△	0.0/50	0.484-0.810
・(両手)	△	0.232	0.30	ショール(両手)	△	0.227	0.20
オーバー(ナイロン・綿)	△	0.484-0.810	0.55	スラックス(両手)	△	0.182	0.26
・	△	0.332	0.29	・	△	0.521	0.44
スポーツ(両手)	△	0.519	0.32	スカート(両手、質地性)	△	0.422	0.22
・	△	0.085	0.08	フロッパーとパンティー	△	—	—
袖なしアンダーシャツ	△	0.099	0.09	ガードル	△	—	—
半袖アンダーシャツ	△	0.087	0.08	スリッパ	△	—	—
ブリーフ	△	0.142	0.25	長スリッパ	△	—	—
長下着(両手) (上)	△	0.108	0.25	長下着(上)	△	0.142	0.25
・(上) (下)	△	0.170	0.35	・(下)	△	0.198	0.25
・(下) (上)	△	0.227	0.35	長下着(両手) (上)	△	0.170	0.35
・(下) (下)	△	0.027	0.03	・(下) (下)	△	0.227	0.25
ソックス(両手)	△	0.113	0.04	パンティー・ストッキング	△	—	—
・	△	0.113	0.06	タイツ(両手)	△	0.113	0.06
ハイソックス(両手)	△	0.170	0.06	ハイソックス(両手)	△	0.113	0.06
・	△	0.459	0.04	・	△	0.170	0.06
短ぐつ	△	0.567	0.15	くつ	△	0.284	0.03
長ぐつ(両手)	△	0.907	0.30	ひざ掛けブーツ(両)	△	0.907	0.30

男子用

女子用

表-1 着衣の熱抵抗値

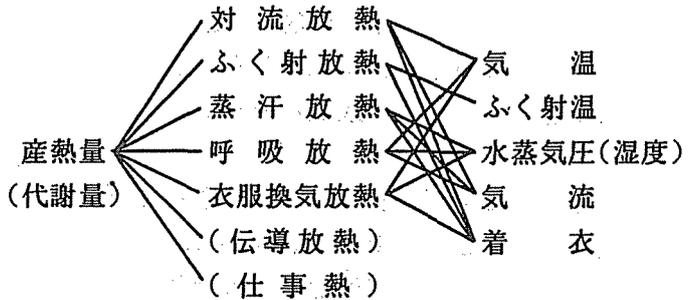


図-3 産熱量と環境因子の相互関係

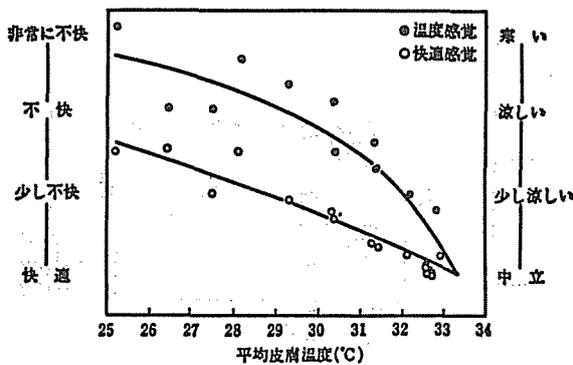


図-4 低温域における平均皮膚温と温冷感・快適感の関係¹⁰⁾

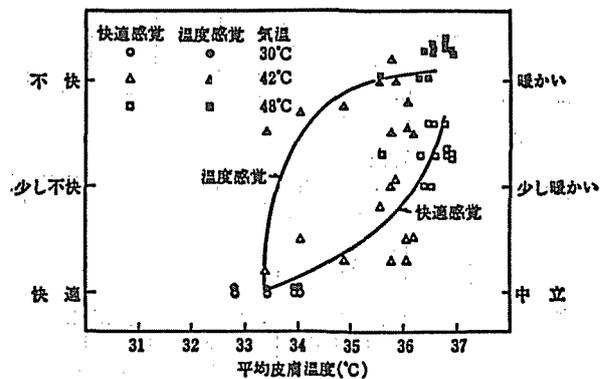


図-5 高温域における平均皮膚温と温冷感・快適感の関係¹⁰⁾

図-4と図-5から、一般に温冷感と快適感は別種の感覚であることおよび、暖かくも涼しくもないという温熱的「中立」と、快・不快を表わす「快適」のみが平均的には一致し、かつその時の平均皮膚温は33~34℃(平均値33.5℃)であることが読み取れる。このことは逆に、数種の環境因子が複雑にからみ合って形成された、生理的状态値としての平均皮膚温が、33~34℃を示す環境は全て快適環境とみなされ、そのような環境因子の組み合わせは無数に存在することを意味する。同様に、「中立」以外の温感、例えば等暖感や等涼感を形成させる環境因子の組み合わせも、それぞれ無数に存在する。

3. 暑さ寒さの測り方と測る道具 —— 温感指標と温感計測器

暑さ寒さの度合(温冷感)や快・不快の程度(快適感)を測る道具・手段を大別すれば、温感指標(温感図表)と温感計測器に分けられる。前者は、人体側と環境側の主要6要素を知って(測って)、それらを組み合わせ、図表や数式によって総合的に温感を判定するものであり、後者は、人体の放熱模型を作って、その装置が示す内部温度、表面温度、放熱量などにより環境の温熱性を評価するものである。

環境の温熱性や快適性を評価したり、空調暖冷房設計の基本となる環境の設計値を求める為の温感指標は、その作成過程から二つに大別される。一つは産熱量と各放熱量に関する熱平衡式をたて、それに人の生理的・心理的状态値を代入して指標を作成する方法であり、Fangerの予想平均温冷感PMV(Predicted Mean Vote)⁸⁾やGaggeらの新有効温度ET* (New Effective Temperature)¹¹⁾などが代表である。他の一つは、多数の被験者を用いて大規模な生理心理実験を重ね、その結果をまとめて実験式やノモグラムを導くもので、Yaglouの有効温度ET (Effective Temperature)¹²⁾がこれに属し、1970年頃までのほぼ半世紀の間、代表的な温感指標として使用されていた。現在では前記のPMVとET*が広く使用されているが、この二つの指標も提案されてから20年以上が経過し、実際の人体反応と合致しない点などが指摘されはじめており、生理心理実験を踏まえ、熱伝達論を基礎にした生体工学の分野からの、より人体^{13) 14) 15) 16)}の温熱反応に近い指標の作成が待たれている。

一方、計測器型の温感測定器は、その装置を室内など実際の環境に置いて温熱性や快適性を判定したり、空調機器と連動させて環境の制御に使用される。温感計測器の制御方式による分類は前述のようであるが、形の上からは、球型、円筒型、ソーセージ型、まゆ型、さらには発熱マネキンに分類される。室内の微風速を測る計器として今も使われているカタ寒暖計も、1914年にHillが発明した当初は、温冷感を測る人体の放熱模型であったが、現在ではMadsenの快適計が比較的多く使用されている。代表的な温感指標と温感計測器を表-2に掲げる。¹⁰⁾

4. おわりに

一日の大部分を屋内の人工環境で過ごす現代人にとって、熱・空気質・音・色などによって形成される室内環境を快適に保つこと、あるいは快適な室内環境を設計することは、日常生活・作業効率向上への基礎である。それ故に、小環境としての室内環境問題は、地球環境、都市環境といった大スケールの環境問題に劣らず、もっとも身近で重要な問題と考えられる。特に熱的要素や空気質が人間の快適性に与える影響は大きく、健康や省エネルギーの観点からも、人体の生理反応により正確な温感指標の開発が望まれる。また、人体に関する熱移動現象を考究することは、個人を対象とするオフィス空調のパーソナル化への対応、電車・自動車や宇宙船内あるいは将来の宇宙都市や海底住居の熱環境制御、医学的な面での病気治療や人工臓器の開発など、多方面に寄与するところが多い。

表-2 代表的な温感指標と温感計測器¹⁰⁾

分類	指 標	提 案 者	物理的・生理的意義と特徴	適 用 範 囲
物理計測に基づく指標	湿球温度	Haldane(1905)	水蒸気分圧と気温の評価 $T_{wb}=T_a-2.0 \times [P_{wb}^*-P_a]$	発汗による調節域の上限付近, 高温作業環境
	カタ冷却力	Hill (1916)	環境の冷却力の評価. 気流の影響を過大に評価する傾向がある $H=(0.2+0.4\sqrt{v})(36.5-T_a)$ ただし v : 風速 [$m \cdot s^{-1}$], H : 冷却力	風速計として利用される
	グローブ温度	Vernon (1930)	放射, 気温, 気流の3因子の総合評価, 作用温度 T_O を近似的に計測するのに用いられる	放射効果, 平均放射温(T_r)の算出に用いられる $T_r=T_g+2.37\sqrt{v}(T_g-T_a)$
	comfort meter	Madsen (1973)	放射, 気温, 気流の総合評価をもとに着衣量, 作業量, 湿度を電子回路系の定数として与え PMV(predicted mean vote)を指示する	暖房環境
生理反応	P.SR	McArdle (1947)	発汗量の予測を気温, 放射, 湿度, 気流, 作業量を変数とするノモグラムを用いて行なう	耐暑限界の予測
	有効温度 (ET)	Houghten と Yaglou (1923)	気温, 湿度, 気流の組み合わせを被験者の主観的判断に基づいて比較, 等価温度のノモグラムを構成. 低温域にて湿度の影響を過大に, 高温域にて過少に評価, 生理的反応との間に相関が少ない	暖冷房環境
	修正有効温度 (CET)	Vernon (1932)	上記 ET を求める際, 気温の替りにグローブ温度を用いるもので ET に放射の効果を組み入れる効果がある	放射源のある暖冷房環境
	不快指数 (THI)	米国気象局	温湿度の組み合わせにより上記 ET の近似値を与える. 簡便で理解が容易 $THI=0.72(T_a+T_{wb})+40.6$	冷房環境
	WBGT	Yaglou と Minard (1957)	気温, 気流, 放射, 湿度の計測より上記 ET の近似値を与える試み $WBGT=0.7T_{wb}+0.2T_g+0.1T_a$ または $=0.7T_{wb}+0.3T_a$	軍における兵士の訓練の限界の予測や作業環境の評価
	Oxford index (WD)	Lind (1964)	$WD=0.15T_a+0.85T_{wb}$ により気温と湿度の評価	暑熱環境
	Windchill Index	Siple (1948)	気温と風速を因子とする環境の冷たさの評価 $WCI=(10.45+10\sqrt{v-v})(33-T_a)$	極地における凍傷の予防
熱平衡式に基づく指標	作用温度 (TO, STO)	Gagge (1937)	放射, 気温, 放射熱伝達率, 対流熱伝達率を含む等価仮想気温	放射環境, 通常室内
	熱ストレスインデックス (HSI)	Belding と Hatch (1955)	気温, 放射, 水蒸気分圧, 気流, 作業量をもとに蒸発によって失われるべき熱量(E_{req})を算出, 蒸発によって調節可能な余地の評価	高温作業環境, 耐暑限界の予測
	comfort chart	Fanger (1970)	気温, 湿度, 気流, 放射, 呼吸放熱量, 作業量, 着衣量を変数として熱平衡をもたす環境因子の組み合わせを求める. ただし発汗による調節は含まない	暖房環境
	新有効温度 (ET*, STO _H)	Gagge, Stolwijk, Nishi(1971)	発汗による体温調節機能を含む熱平衡モデルに基づき気温, 放射, 湿度, 気流, 着衣, 作業量, 気圧, 人工空気などの環境変数より, 生理因子として皮膚温, 体内温, 発汗量, 貯熱などを総合的に評価できる	人工空気, 気圧, 水中などを含むあらゆる環境

引用・参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築設計資料集成－環境1、丸善、P.106 & P.107、1978
- 2) 菊地安行・坂本弘・佐藤方彦・田中正敏・吉田敬一：生理人類学入門、南江堂、P.30 & P.31、1981
- 3) A. H. Woodcock : Moisture transfer in textile system, Part I, Textile Research Journal, P.628, 1962
- 4) Y. Nishi & A. P. Gagge : Moisture permeation of clothing — a factor governing thermal equilibrium and comfort, ASHRAE Trans., Vol.76, Part I, P.137, 1970
- 5) 持田徹・横山真太郎：着衣の透湿抵抗に関する工学的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.3、P.79、1977
- 6) T. Mochida : Influence of heat loss by clothing ventilation on thermal sensation, Memoirs of Faculty of Engrg., Hokkaido Univ., P.46, 1977
- 7) L. G. Berglund, D. J. Cunningham & J. A. J. Stolwijk : The resistance type dew point sensor for moisture measurements on sweating humans, Proc. of 6th Conference Biometeorology and aerobiology, P.6, 1983
- 8) P. O. Fanger : Thermal comfort, Danish technical press, P.28 & P.24, 1970
- 9) 土肥まり子・辻知佳子・堀越哲美：冷房空間における温熱環境条件の人体影響に関する実験的研究 —— その1 接触伝導を考慮した気温の皮膚温・放熱量への影響、日本建築学術講演梗概集、P.265、1987
- 10) 西安信：人体と環境との熱交換（中山昭雄編・温熱生理学）；理工学社、P.60の図2.19と図2.20 およびP.69の表2.20より転載
- 11) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk & Y. Nishi : An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans., Vol.77, P.247, 1971
- 12) F. C. Houghten & C. P. Yag(log)lou : Determining lines of equal comfort, ASHRAE Trans., Vol.29, P.163, 1923
- 13) 堀越哲美：PMVと快適方程式の検討、空気調和・衛生工学、第60巻、第10号、P.963、1986
- 14) 西安信：PMVの成果と問題点、日本生気象学会雑誌、Vol.29、P.142、1993
- 15) 持田徹・落藤澄・堀越哲美・鳴倉一實：蒸汗放熱表示式の特徴とぬれ面積率の変化特性を考慮した等平均皮膚温線、空気調和・衛生工学会論文集、No.48、P.51、1992
- 16) 持田徹：新有効温度E T* の成果と問題点、日本生気象学会雑誌、Vol.29、P.133、1993