

住宅における温熱快適性の評価

田辺 新一 (お茶の水女子大学助教授)

キーワード：1) 環境工学, 2) 快適性, 3) 温熱環境, 4) 体感, 5) ドラフト, 6) 住宅, 7) 人間

1. はじめに

本報告では、住宅における人体の熱的快適性の評価に関して述べる。高気密・高断熱住宅が省エネルギー政策のために多く建設されるようになってきている。これらの住宅においては、単にエネルギー消費量が削減されるだけでなく居住者の住み心地が改善される。例えば冬季同じ暖房温度設定であっても、断熱性の高い住宅では上下温度分布が生じにくいとともに平均放射温度も高くなり設定温度が低くても快適に感じる。住宅の外皮性能が語られる場合に、エネルギーや熱量的側面からのみが強調されるが、本来外皮性能の向上は、在室者の感覚を含めて考えるべきものである。また、高気密・高断熱住宅は、日射遮蔽が適切に行われていないと温暖地において夏季のオーバーヒートが指摘されている。窓開放したときの通風による人体冷却はどの程度まで可能であるのかなど在室者の特性と地域気候特性を考慮して住宅を設計・提供する必要がある。このような背景をもってまず、人体の熱的快適性の条件、ドラフトなどの局部不快感について述べた後、住宅におけるいくつかの快適手法の考察を行う。

2. 熱的快適性とは

熱的快適性は、ASHRAEによって、「その温熱環境に満足を示す心の状態」として定義されている^{文1)}。快適性は在室者の心理状態、感覚として表わされる。また、許容できる温熱環境とは、在室者の少なくとも80%以上がその環境を許容できる環境と定義されている。温熱環境研究分野で用いられている狭義の熱的快適性とは一般にネガティブな状態で熱的不快を感じない状態をいう^{文2) 文3)}。

これに対して積極的な快適感も存在する^{文4)}。自然界の時変動にともなう快適性を人工環境の中に取り込むのは長年の夢である。しかし、変動をともなう刺激は必ずしも在室者全てに快適感をもたらすわけではない。建物内では年齢、活動、衣服、その他の条件が異なった様々な居住者がいることをよく念頭においておく必要がある。

久野は、コンフォートとプレザントネスを2次元上に配置したモデルを提案している^{文5)}。温熱環境に関しては、寒暑涼暖モデルと呼ばれている。図1に2次元温冷感モデルの概念図を示す。特に、暑いときに風がくると

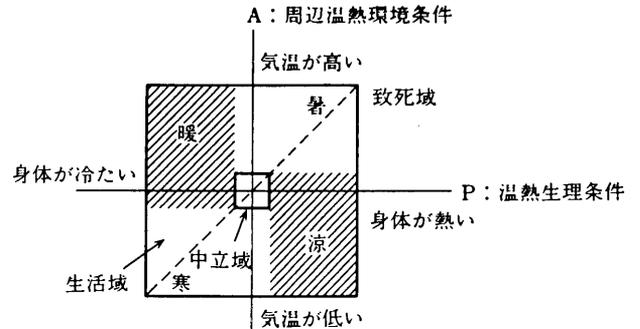


図1 2次元温冷感モデルの概念 (久野)

涼しいというような人体の非定常状態での感覚を理解するのに役立つ。熱的快適性に関しては、様々な定義があるが日本語の『寒暑』、『涼暖』という語感に左右されている点も興味深いものである。他の言語でもその地域の気候風土がそれらの感覚を表現する言葉に影響を与えているということであろう。

3. 温熱環境の6要素

ここでは、温熱環境に影響を与える6要素に関して簡単に説明する。図2に温熱環境の6要素を示す。人間は体内での熱産生をほどよく外部環境に逃がし熱平衡を保ち、深部体温を一定に保っている。この人体と環境との熱交換に影響を与える要素を温熱環境要素と呼ぶ。人体

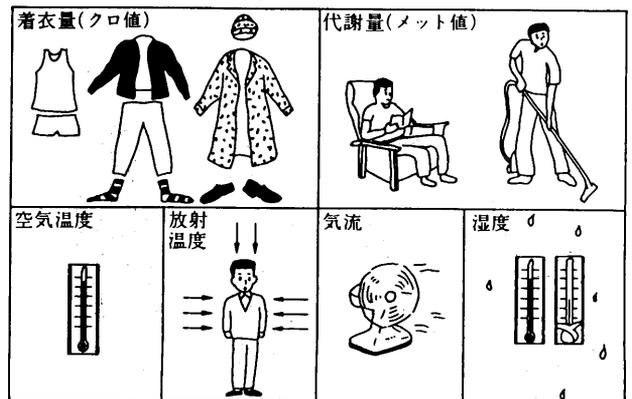


図2 温熱環境の6要素

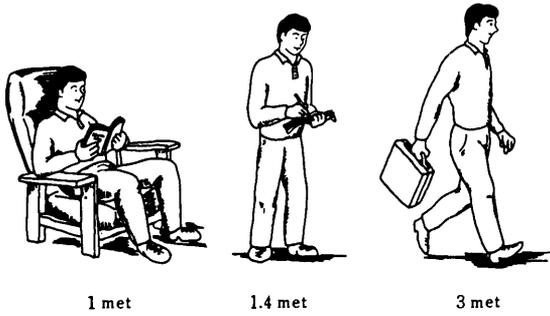


図3 典型的活動時の代謝量

表1 様々な活動時の代謝量

活動	met
休息時	
寝床時	0.7
安静時	0.8
椅座静位	1.0
起立時	1.2
歩行時	
3.2 km/h	2.0
4.8 km/h	2.6
6.4 km/h	3.8
事務作業時	
読書・椅座静位	1.0
タイプ・ワープロ	1.1
ファイル整理・椅座	1.2
ファイル整理・立位	1.4
歩き回る	1.7
物を運ぶ・持ち上げる	2.1
運転時・飛行時	
自動車運転	1.0~2.0
通常飛行	1.2
その他の作業	
調理	1.6~2.0
掃除	2.0~3.4
縫物	1.8
その他の活動	
ダンス	2.4~4.4
テニス・シングル	3.6~4.0
バスケットボール	5.0~7.6

注 1 met = 58.2 W/m²

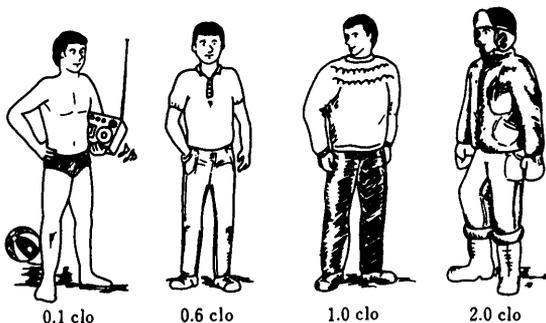


図4 典型的衣服のクロ値

の熱的快適感に影響する主要素は、代謝量、着衣量、空気温度、放射温度、気流、湿度である。代謝量と着衣量は人体側要素で、他の4要素は環境物理要素である。非定常時は時間も要素となる。以下にそれぞれの要素に関して述べる。

3.1 代謝量

人体の代謝量は、メット (met) という単位で表わされる。1met は、椅座静位状態の代謝量で58.2W/m²である。活動と概略の代謝量を図3に示す。通常の事務作業時は、1.1~1.2metの代謝量となる。人体の熱平衡は体格の違いなどを考慮するため単位体表面積あたりで示されることが多い。日本人成人の体表面積は、約1.4~1.9m²程度である。実際の代謝量を測定するのは技術的に熟練を要するため温熱環境予測のためには表1に示したように個々の活動から代謝量を推定することが行われる。作業によっては代謝量の一部は機械の仕事(W)として消費されるが、通常の事務作業では機械の仕事はないと考えて良い。

3.2 着衣量

衣服の断熱性は、クロ(clo)値という単位で表わされる。冬の厚手のスリーピーススーツが約1.0cloである。衣服別のクロ値を図4に示す。温熱環境指標の計算などに用いられるクロ値は、皮膚表面から着衣外表面までの熱抵抗で、1cloは0.155°C m²/Wである。クロという単位は、1941年にアメリカ・イェール大学・ピアス研究所のGaggeによって提案された^{文6)}。クロ値は、人間が生理的・心理的に快適さを維持できる衣服の断熱性能として定義される。椅座静位の人が室温21°C、静穏気流下で快適なときの衣服の断熱性能が1クロとなる。この条件より、快適時に平均皮膚温33°C、人体よりの顕熱損失量44 W/m²とし、21°C、50% rh、0.1m/sの状態での衣服熱抵抗を計算すると0.155°C m²/Wが算出される。従って、正確に述べるとクロ値は、熱抵抗でありながら、人体の



図5 サーマルマネキン

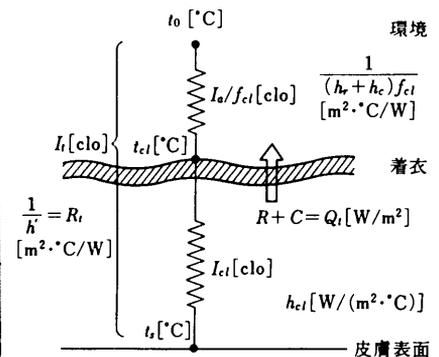


図6 皮膚表面-着衣-環境における顕熱移動

条件と周囲の環境条件の影響を受けるという問題があるが、衣服熱抵抗をマクロ的に表現できるため広く使用されている。

クロ値は、正確にはサーマルマネキンで測定される(図5)。図6に皮膚表面-着衣-環境における顕熱移動を示す。I_{cl}が基礎熱抵抗値(通称:クロ値)である。着衣外表面から環境までの熱抵抗を含めI_tをクロ値と呼ぶ場合もあるので注意が必要である。f_{cl}は、着衣面積比である。熱抵抗は裸体時の体表面積を基準に定義されており、着衣時表面積が増加することにより、見かけ上熱抵抗が減少する。f_{cl}は、正確には写真法により裸体時と着衣時の外表面積を比較し算出する。これまで多くの式が提案されているが、近年McCulloughによって多くの測定結果をもとに式(4)が提案されている⁷⁾。また、一般的には着衣外表面から環境までの熱抵抗を測定するのが困難なため、裸体時の熱抵抗値を便宜上用いている。表2に典型的衣服組合わせのクロ値を示す⁸⁾。また、

クロ値を個々の衣服の熱抵抗を積算することによる方法⁹⁾、衣服重量より推定する方法も提案されている¹⁰⁾。

$$I_t = (t_s, cl - t_o) / 0.155 Q_t \dots\dots\dots(1)$$

$$I_a = (t_s, n - t_o) / 0.155 Q_a \dots\dots\dots(2)$$

$$I_{cl} = I_t - I_a / f_{cl} \dots\dots\dots(3)$$

$$f_{cl} = 1 + 0.3 I_{cl} \dots\dots\dots(4)$$

- I_t : 被服外表面から環境までの熱抵抗 [clo]
- I_{cl} : クロ値, 着衣の基礎熱抵抗値 [clo]
- I_a : 皮膚表面から環境までの熱抵抗 [clo]
- Q_a : 裸体時の熱損失 [W/m²]
- Q_t : 着衣時の熱損失 [W/m²]
- f_{cl} : 被服着用時の全表面積/体表面積 [-]
- t_o : 作用温度 [°C]
- t_s : 平均皮膚温 [°C]
- cl : 着衣時 [-]
- n : 裸体時 [-]

表2 典型的衣服組合わせのクロ値

作 業 服	I _{cl} [clo]	日 常 着	I _{cl} [clo]
ショーツ・ボイラスーツ・ソックス・靴	0.70	パンティ・Tシャツ・ショートパンツ・薄地ソックス・サンダル	0.30
ショーツ・シャツ・ズボン・ソックス・靴	0.75	パンティ・ベチコート・ストッキング・袖つき薄地ドレス・サンダル	0.45
ショーツ・シャツ・ボイラスーツ・ソックス・靴	0.80	ショーツ・半袖シャツ・薄地ズボン・薄地ソックス・靴	0.50
ショーツ・シャツ・ズボン・ジャケット・ソックス・靴	0.85	パンティ・ストッキング・半袖シャツ・スカート・サンダル	0.55
ショーツ・シャツ・ズボン・スモック・ソックス・靴	0.90	ショーツ・シャツ・薄地ズボン・ソックス・靴	0.60
半袖つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ジャケット・ソックス・靴	1.00	パンティ・ベチコート・ストッキング・ドレス・靴	0.70
半袖ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ボイラスーツ・ソックス・靴	1.10	肌着・シャツ・ズボン・ソックス・靴	0.70
長袖ズボン下つなぎ肌着・サーモジャケット・ソックス・靴	1.20	肌着・トラックスーツ(セータとズボン)・長ソックス	0.75
半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ジャケット・サーモジャケット・ソックス・靴	1.25	パンティ・ベチコート・シャツ・スカート・厚手膝下ソックス・靴	0.80
半袖半ズボン下つなぎ肌着・ボイラスーツ・サーモジャケットとズボン・ソックス・靴	1.40	パンティ・シャツ・スカート・丸首セータ・厚手膝下ソックス・靴	0.90
半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ジャケット・サーモジャケットとズボン・ソックス・靴	1.55	ショーツ・半袖シングレット・シャツ・ズボン・Vネックセータ・ソックス・靴	0.95
半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ジャケット・厚地キルティングジャケットとオーバーオール・ソックス・靴	1.85	パンティ・シャツ・ズボン・ジャケット・ソックス・靴	1.00
半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ジャケット・厚地キルティングジャケットとオーバーオール・ソックス・靴・帽子・手袋	2.00	パンティ・ストッキング・シャツ・スカート・ベスト・ジャケット	1.00
長袖長ズボン下つなぎ肌着・サーモジャケットとズボン・戸外用サーモジャケットとズボン・ソックス・靴	2.20	パンティ・ストッキング・ブラウス・ロングスカート・ジャケット・靴	1.10
長袖長ズボン下つなぎ肌着・サーモジャケットとズボン・厚地キルティングパーカ・厚地オーバーオール・ソックス・靴・帽子・手袋	2.55	肌着・半袖シングレット・シャツ・ズボン・ジャケット・ソックス・靴	1.10
		肌着・半袖シングレット・シャツ・ズボン・ベスト・ジャケット・ソックス・靴	1.15
		長袖長ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・Vネックセータ・ジャケット・ソックス・靴	1.30
		半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ベスト・ジャケット・コート・ソックス・靴	1.50

注 立位サーマルマネキンで測定。1 clo = 0.155 m²・°C/W

3.3 空気温度

空気の温度のことである。椅座静位の場合の体中心を床高0.6m、立位の場合の体中心を床高1.1mとすることが多い。

3.4 放射温度

放射環境を表現するために平均放射温度という概念が用いられる。平均放射温度とは、実際の不均一な放射場において在室者が周囲環境と放射熱交換を行うのと同量の放射熱交換を行う場合の仮想均一周圍温度である。平均放射温度では人体と周囲との形態係数が考慮されているので、姿勢、室内での人体位置により平均放射温度は異なる。壁面、天井などの周壁平均表面温度とは異なるので注意が必要である。式(5)に平均放射温度の定義を示す。これは、周壁の放射率が1に近い場合に適用される。厳密には、相互放射を考慮して算出する必要がある。周壁・天井・床面等と人体との形態係数 (Fpi) は、立位、椅座位の場合について Fanger^{x11)}、堀越^{x12)}らによって提案されている。

$$tr = \sqrt[4]{\sum Fpi (ti + 273)^4} - 273 \quad \dots\dots\dots(5)$$

- tr : 平均放射温度 [°C]
- ti : 周壁・天井・床面などの表面温度 [°C]
- Fpi : 周壁・天井・床面などと人体の形態係数 [-]

放射の不均一性を表現するために微小面放射温度が用いられる。微小面放射温度は、1974年に英国のMcIntyreにより提案された^{x13)}、微小面に対する半球の放射温度である(図7)。式(6)に定義を示す。また、微小面放射温度のベクトル差(Δtpr)で放射の不均一性の評価が行われる。

$$tpr = \sqrt[4]{\sum Fni (ti + 273)^4} - 273 \quad \dots\dots\dots(6)$$

- tpr : 微小面放射温度 [°C]
- Fni : 周壁・天井・床面等と微小面の形態係数 [-]

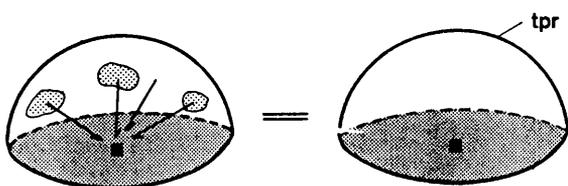


図7 微小面に対する半球の放射温度の概念

3.5 気流

気流とは空気の動きのことである。人体が動いている場合は、その動きも含めた相対気流として定義される。気流は、体感に与える影響が大きく、特に夏季の涼感、冬季の寒さ感覚には大きな影響がある。近年、平均風速のみでなく、気流の乱れが人体の温熱感に影響を与えることが知られてきている。室内気流測定評価のためには平均風速のみではなく気流速度の標準偏差を同時に測定することが勧められる^{x14)}。

3.6 湿度

湿度は相対湿度あるいは絶対湿度で表現される。湿度は温冷感に影響を与えるとともに、低湿度・高湿度では人体に非熱的不快感を与える。低湿度では静電気、ドライスキン、コンタクトレンズなどの問題が生じる。高湿度では皮膚のぬれ率増加による不快感がある。また、室内空気質 (IAQ) との関係で湿度が問題となることがあり、温熱感にのみ関して湿度を考えるのではなく総合的判断が必要である。

4. PMV と SET*

4.1 快適方程式

快適方程式及び PMV (Predicted Mean Vote) は Fanger によって提案された^{x15)}。快適方程式は人体の熱的中立温度を予測するもので、PMV は熱的中立に近い状態の人体の温冷感を予測する指標である。

熱的中立になるためには、熱平衡とともに、平均皮膚温と皮膚よりの蒸発熱損失量がある適当な範囲にならなければならない。快適方程式では、式(7)、(8)に示すように熱的中立時の平均皮膚温と皮膚よりの蒸発熱損失量が代謝量の関数となると考えている。これにより熱平衡式は6要素のみで表現される。また、人体に関する熱平衡式は、式(9)のように表現される。また、各々の要素は式(10)~(15)のように表わされる。

$$ts = 35.7 - 0.028(M - W) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$Es = 0.42(M - W - 58.15) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$(M - W) - Ed - Es - Ere - Cre = K = R + C \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$Ed = 3.05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6.99(M - W) - Pa) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$Ere = 1.7 \cdot 10^{-5} M (5867 - Pa) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$Cre = 0.0014M (34 - ta) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$K = (ts - tcl) / 0.155Icl$$

$$= (35.7 - 0.028(M - W) - tcl) / 0.155Icl \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$R = 3.96 \cdot 10^{-8} fcl ((tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$C = fcl hc (tcl - ta) \quad \dots\dots\dots(15)$$

Fanger の快適方程式では、人体に対する対流熱伝達率は、Winslow^{文16)}による式(16)が使用されている。また、着衣面積比は式(17)が使用されている。これらの一連の式を満たす条件として熱的中立を予測する。

$$\left. \begin{aligned} h_c &= 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} \text{ あるいは} \\ h_c &= 12.1 \sqrt{v} \text{ の大きいほう} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{cl} &= 1.00 + 0.2I_{cl}, \text{ at } I_{cl} \leq 0.5clo \\ f_{cl} &= 1.05 + 0.1I_{cl}, \text{ at } I_{cl} \geq 0.5clo \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

- C : 対流熱損失量 [W/m²]
- Cre : 呼吸による顕熱損失量 [W/m²]
- Ed : 不感蒸泄量 [W/m²]
- Ere : 呼吸による潜熱損失量 [W/m²]
- Es : 発汗による蒸発熱損失量 [W/m²]
- K : 衣服を通る顕熱損失量 [W/m²]
- M : 代謝量 [W/m²]
- Pa : 水蒸気圧 [Pa]
- R : 放射熱損失量 [W/m²]
- W : 機械的仕事量 [W/m²]
- t_{cl} : 着衣外表面温度 [°C]
- t_s : 平均皮膚温 [°C]
- v : 平均風速 [m/s]

4.2 PMV (予想平均温冷感申告)

熱的中立からはずれた場合の温冷感を予測する方法として、Fanger が PMV 理論を発表している。これは、1984年に ISO-7730^{文17)}として国際規格化された。PMV 理論は、温熱環境の6要素を代入すると、その条件で、暖かいと感じるか、寒いと感じるかを数値として表現してくれる。人体に関する熱平衡式と1300人に及ぶ被験者実験結果に基づいて提案された。図8にそのスケールを



図8 温冷感スケール

示す。この尺度はASHRAEが温冷感申告を調べるために用いているものと同じで、ASHRAE 7段階温冷感申告尺度と呼ばれる^{文18)}。

PMVは、人体の熱負荷(L)に基づき算出される。人体の熱負荷とは熱的中立状態からの仮想上の偏差を熱量で表わしたものである。実際の人体は、生理学的に皮膚温度、蒸発熱損失量を調整し熱平衡を保っている。式(9)の左辺から右辺を引いて人体の熱負荷は求められる。式(18)中の着衣外表面温度(t_{cl})は、以下の式で求める。

$$L = (M - W) - Ed - Es - Ere - Cre - R - C \dots\dots\dots(18)$$

$$t_{cl} = t_s - 0.028(M - W) - 0.155I_{cl}(3.96 \cdot 10^{-8}f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl}hc(t_{cl} - t_a)) \dots\dots(19)$$

Fangerは、人体の熱負荷(L)が変化すれば温冷感申告(Y)が変化すると考えた。被験者実験結果は、作用温度の関数として温冷感申告値(Y)が示されているので、作用温度の変化量に対する人体の熱負荷の変化量がわかれば、人体の熱負荷(L)と温冷感申告(Y)の関係を表わす微分方程式が求められる。代謝量が異なる4種類の被験者実験結果^{文19), 文20), 文21)}について、各々のδY/δL値を求めて、微分方程式を作成した。この微分方程式を積分し、申告値Y=0(中立)時熱負荷(L)は0という初期条件を代入した。この積分で求められたYをPMV(Predicted Mean Vote)と名付けた。PMVは、式(20)で算出される。

$$PMV = (0.303e^{-0.036M+0.028}(M - W - Ed - Es - Ere - Cre - R - C)) \dots\dots\dots(20)$$

着衣外表面温度(t_{cl})は、式(19)より求める。これらの式は放射に関して4乗の項を含むので反復計算が必要である。ISO-7730にはコンピュータプログラムが示されている。また、FangerはPMVとPPDの関係を提案している。PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)とは不満足者率を意味する。ISO-7730では快適域としてPMV, PPDの値として、-0.5 < PMV < +0.5, PPD < 10%を推奨している。図9にPMVとPPDの関係を示す。

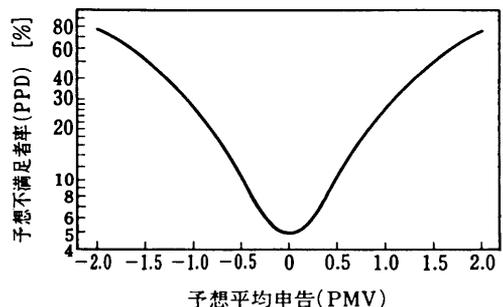


図9 PMV と PPD の関係

4.3 新有効温度 (ET*)

イェール大学・ピアス研究所のGaggeらにより発表された理論に基づく体感温度である²²⁾。旧有効温度(ET)²³⁾は被験者実験に基づいている。旧有効温度と区別するため新有効温度あるいはET*と呼ばれる。温熱環境の主要素である代謝量, 着衣量, 空気温度, 放射温度, 気流, 湿度を変数として含む。人体のぬれ率と平均皮膚温に基礎をおいている。ぬれ率(w), 皮膚温(t_s)は簡単には推定できないので, これらを算出するため人体をコアとシェルに分割し, 生理学的制御モデル(2ノードモデル)を使用して計算を行う。ET*は任意の代謝量, 着衣量に対して定義され, 同一着衣量, 代謝量でなければET*の値の大小で温冷感, 快適感を直接比較できない。そこで, 椅座静位, 着衣量0.6clo, あるウッドコック(Woodcock)のim係数, 静穏気流, 平均放射温度=空気温度という標準状態において定義された新有効温度を新標準有効温度(SET*)と称する。新標準有効温度(SET*)では, 着衣量を代謝量によって修正し, 各々の代謝量において標準着衣量を設定している。これによって異なる代謝量における温冷感, 快適感評価を可能にしている²⁴⁾。

新有効温度(ET*)では発汗による蒸発熱損失を考慮しているので快適範囲を含んだ暑熱環境, 寒冷環境の評価にも適用できる。快適に近い範囲において新有効温度とPMVの評価値の間に大きな差異はないが²⁵⁾, 発汗をとまなう暑熱環境評価にはET*の方が優れている。また, ET*による評価は大気圧が通常と異なる環境の評価にも拡張されている²⁶⁾。これにともないSET*と温冷感(TSENS), 快不快感(DISC)は平均体温(T_b)より算出されることとなった。なおSET*で用いられている温冷感申告尺度(TSENS)はASHRAE 7段階温冷感尺度とは異なるので注意が必要である。

5. 快適温度

5.1 快適温度

PMVなどの温熱環境指標で熱的快適性を表現するの

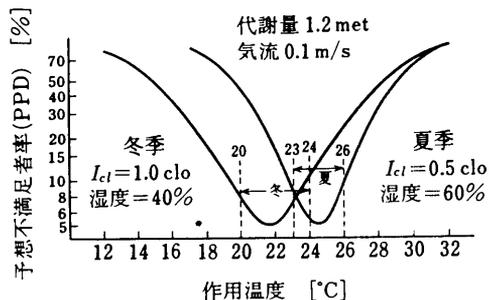


図10 夏季と冬季を想定した作用温度とPPD(不満足者率)の関係

は一般的ではあるが, それらの値そのものではわかりにくいときもある。温熱環境要素のうちいくつかを固定すれば, 作用温度によって快適範囲を表現することができる。図10に夏季と冬季を想定した作用温度とPPD(不満足者率)の関係を示す。気流速度は0.1m/s, 平均放射温度は空気温度に等しいと仮定した^{27), 28)}。

夏季を想定した, 0.5clo, 1.2met, 60% rhの場合, 快適温度は24.5°Cで, $-0.5 < PMV < +0.5$ (PPD < 10%)の範囲は作用温度で23°C~26°Cである。また, 冬季を想定した, 1.0clo, 1.2met, 40% rhの場合, 快適温度は22°C, $-0.5 < PMV < +0.5$ (PPD < 10%)の範囲は作用温度で20°C~24°Cである。冬と夏の快適温度が異なるのは着衣量が異なるからである。また, 着衣量が夏季に低いいため, 夏季の快適温度幅は冬季より狭い。また, ASHRAEでは, 夏季と冬季を想定した快適温度範囲をET*を用いて表現している。図11にASHRAE55-92Rによる快適温度範囲を示す²⁹⁾。ここでは, 通常のオフィス事務作業, 夏, 冬の事務作業に適した服装, 静穏気流が仮定されている。ASHRAEによる熱環境基準は, PMVが±0.5の範囲とほぼ一致していることがわかる。なお, 図に示されている相対湿度の上限値に関しては様々な議論がある。

5.2 民族・地理的条件差

これまで述べてきた快適温度に関する基準値は主として欧米人を対象とした被験者実験結果に基づくものであった。これらの基準値, 推奨値が日本人にも当てはまるのかという疑問が生じる。カンザス州立大学で行われた米国人に対する被験者実験^{30), 31), 32)}と全く同一の実験方法, 同一ASHRAE温冷感申告尺度, 同一衣服, 活動量で行われた被験者実験結果の温冷感申告とSET*の関係を表3に示す。併せて, 日本人^{33), 34)}, アメリカ人, デンマーク人³⁵⁾, シンガポール人³⁶⁾の被験者実験結果

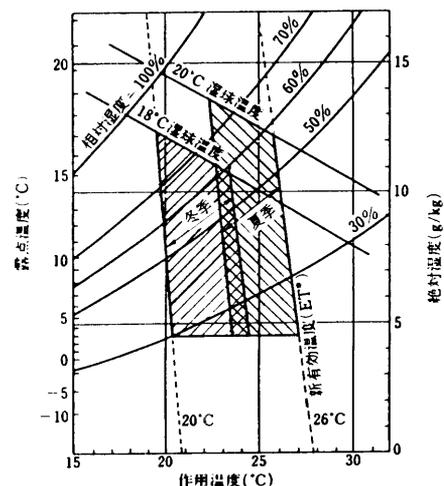


図11 ASHRAE55-92Rによる快適温度範囲

表3 日本人, アメリカ人, デンマーク人, シンガポール人の中立温度と温冷感

	回帰式	中立温度 [°C]
日本人 夏季	$TSV = -8.882 + 0.339SET^*$	26.2
日本人 冬季	$TSV = -6.883 + 0.271SET^*$	25.4
アメリカ人	$TSV = -8.010 + 0.290SET^*$	25.8
デンマーク人	$TSV = -7.420 + 0.310SET^*$	25.6
シンガポール人	$TSV = -9.388 + 0.367SET^*$	25.6

より算出した中立温度（温冷感申告が中立時の温度）も示す。熱的中立温度に関しては、同一衣服・活動量、同一温冷感申告尺度を用いた実験では、国別の相違はほとんどないと考えて良いようである。栃原らによっても同様のことが報告されている^{文37)}。また、SET* の変化量に対する温冷感申告値の変化にも大きな差異はない。

しかし、人体が生理学的調節を強いられる熱的中立から離れた環境下や環境物理要素の個々の影響を考えると、例えば発汗のように民族、気候順化等によって反応が異なることもあるであろう。今後幅広く日本人に関する被験者実験データが必要とされる。

5.3 快適温度の個人差, 年齢差, 性別差等

人間は年齢、活動量などが同じ条件でも個人差がある。Langkilde^{文38)}らの実験によると快適条件での標準偏差は1.2°Cと報告されている。Rohlesは快適に近い範囲では個人差が大きいと報告している^{文39)}。個人差は無視できない要素である。

高齢者については、代謝量が低下するので通常の健常者よりも高い設定温度が推奨されている^{文40)}。しかし、

ASHRAEによる大規模な実験研究では高齢者と大学生年齢の被験者が同じ温熱環境に曝露されたときの温冷感申告差にはほとんどないが、高齢者の方が高い気温を好んだという報告がある^{文41)}。また、Fangerによる実験では同一着衣量、椅座静位における中立温度差に有意差はなかったと報告されている^{文42)}。しかし、実際の生活環境下では実験室実験と異なり、高齢者と大学生年齢被験者は同じ活動を行っているとは考えにくい。現実的には高齢者の方が活動性が低くそのために設定温度を高くした方がよいと考えるのが適当であろう。また、高齢者は熱的中立からはずれたところでの適応能力が低下しており、若年者よりストレスの低い環境が必要である。

男女差に関しては実際の環境条件下では女性の方が一般的に着衣量が少ないことが主要因といわれている。McIntyreによる中立より低い環境で女性の方が男性より寒さを感じ易いという報告もある^{文43)}。

身体障害によって体温調節機構がうまく機能しない場合がある^{文44)}。社会的弱者に対する配慮を行った設計が望まれる。また、温熱環境基準のもととなる被験者実験は健康な大学生年齢の被験者を用いて行われることが多くこの点は念頭においておく必要がある。

6. 局部不快感

全身温冷感が中立状態にあっても主として図12に示すような理由で局部温冷感による不快が存在すれば快適な状態とはならない。局部温冷感による不快の主原因は、不均一放射、ドラフト、上下温度分布、床温度の4つである。また、これらの不快感は全身温冷感が中立に近いという前提条件で定義されている。

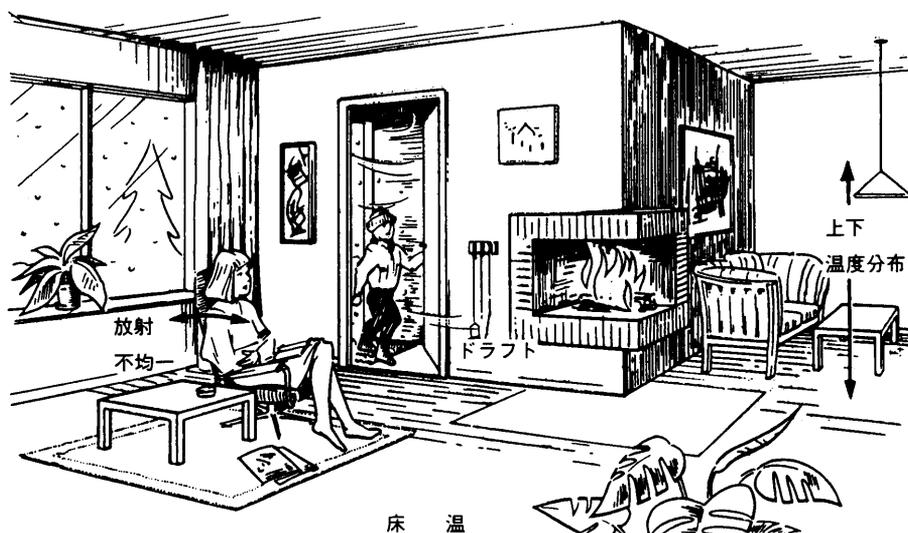


図12 局部温冷感

6.1 不均一放射

放射の不均一性は、微小面放射温度のベクトル差を用いて表わされる。図13に不均一放射に対する不満足者率の関係を示す^{245), 246)}。暖かい壁面、冷たい天井に関しては不快感は少ない。ASHRAE55-92, ISO-7730では、暖かい天井に対する不均一限界は、5℃以内である。冷たい窓・壁面に対する不均一性の限界を10℃以内としている。不均一放射による不快感を防ぐには特に開口部の断熱計画が重要である。

6.2 ドラフト

夏季には気流を増すことによって涼感を得ることができるが、暖房・空調・換気空間では気流を増加させ過ぎるとドラフトを生じる。暖房・空調時最も対応が難しい問題である。ドラフトとは望まれない局部気流と定義される。室内のドラフト評価のために ADPI²⁴⁷⁾ がよく用いられている。ADPIとは、居住域内の多数の点が、快適域にある体積割合のことであり、空気拡散性能指数と呼ばれる。しかし、近年空気温、平均風速のみでなく気流の乱れがドラフトによる不快感に影響を与えていることが指摘されている。

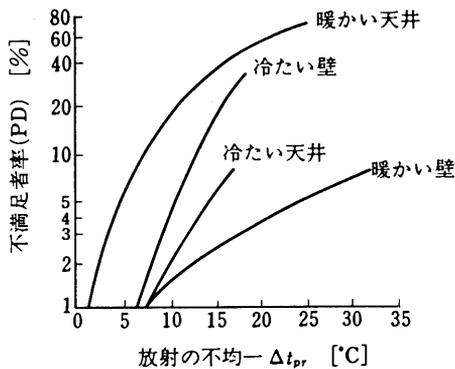


図13 不均一放射に対する不満足者率の関係

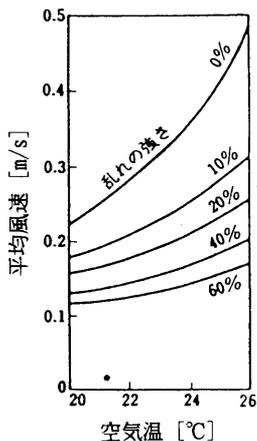


図14 ドラフト許容限界

図14に ISO-7730, ASHRAE55-92, DIN-1946²⁴⁸⁾ による室内気流の許容限界を示す。室温、平均風速、乱れの強さを関数とした場合のドラフトによる不満足者率を示す。図は不満足者率15%を示したものである。乱れの強さが大きければ低い平均風速で不快を感じる事がわかる。このドラフト限界は、Fangerらによって行われた実験結果に基づいているが、主として冬季の環境に用いられるもので、夏季の快適な気流感に関してこの図を用いる方がよいのかについては様々な議論がある。この点に関しては後述する。

6.3 室内上下温度分布

室内上下温度による不満足者率を図15に示す。ISO-7730では上下温度分布の限界に関しては、くるぶし(床0.1m)と頭(床1.1m)との温度差が3℃以内を推奨している。ASHRAE55-92では、床0.1mと1.7mの差としている。この推奨値のもととなった実験²⁴⁹⁾では被験者は静穏気流下に曝露されていた。実際の環境下では上下温度分布が生じる際に足元の気流速度が増加していることが多く、この許容範囲を満たしていても不快感を生じることがあるので注意が必要である。

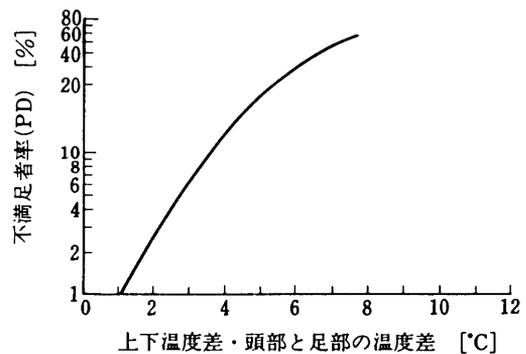


図15 室内上下温度による不満足者率

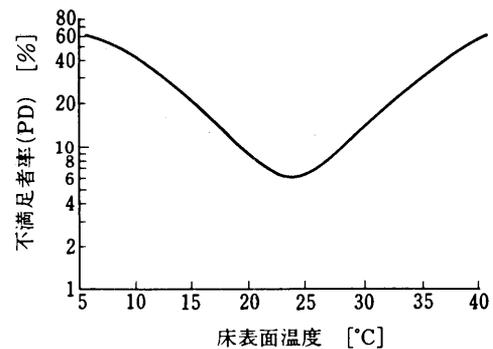


図16 床温度と不満足者率の関係

6.4 床温度

図16に床温度と不満足者率の関係を示す^{文50), 文51), 文52)}。

ISO-7730では通常の室内では床温度は19℃から26℃が推奨され、床暖房装置があるときは最大暖房負荷時のための最高温度は29℃以下とすることが薦められている。また、ASHRAE55-92では、18℃から29℃の範囲としている。これらの推奨値は靴を履き、椅座状態におけるものである。日本のように床座を行う生活様式に関して、床暖房を行った場合、温冷感申告が椅座位に比較してかなり上昇したという坊垣の報告がある^{文53)}。また、体温より高い表面温度の伝導による暖房は低温やけどを起こす危険性があり避けるべきである。

素足の場合の床表面温度、素材と熱的快適感の関係については Olesen らによる実験結果^{文54)}を参照のこと。また、接触温冷感に関しては松井^{文55)}、岡島ら^{文56)}の研究がある。

7. 住宅における快適手法の考察

7.1 夏季の通風とここちよさ

通風と換気は異なる概念である。換気は室内の空気を入れ換えることであるが、通風は換気プラス人体冷却という意味がある。通風を考える場合、人体への影響を考慮することなしには成り立たない。図17に種々の研究者によって提案されている快適な、好まれる気流速度を示す^{文57)}。この図は興味深い。夏季の好まれる気流は、空調温度である26℃以上で涼感と呼ぶが、これも30℃ぐらいで頭打ちになってしまう。すなわち、自然通風を利用したり扇風機を利用しても室温がせいぜい30℃ぐらいまでが限界であることを示している。これ以上になると相当に高い風速の気流を人体に当てなければ涼しくならない。風速を高くしても対流熱伝達率の上昇率は小さくなっていくので当然といえる。

また、自然風にはゆらぎがある。図18は川越の民家とエアコンを設置したある会議室で採取した室内気流である^{文58)}。気流の特徴・体感影響を平均風速のみでとらえるだけでは不十分である。気流に関して1/fゆらぎがよく話題となる。これは自然の風を周波数分析してみるとこういった傾向があるので1/fゆらぎは体によいという考えに根ざしているようである。風のゆらぎが人間の熱的快適感に影響を与えるのは、ゆらぎにより人体表面から奪われる熱が変化するのでなく皮膚表面近くにある冷点、温点などの反応が異なってくるからである。このような点からみると単にゆらぎの人間への影響を周波数分析結果後の1/fだけで評価するのではなく平均風速、標準偏差、乱れの強さ、瞬時風速、中央値・加速度の頻度分布など色々な点から考えていく必要があるようである^{文59)}。

夏季の非冷房空間を想定して種々の変動気流を発生さ

せ体感に及ぼす影響について実験を行った^{文60)}。64人の異なる被験者が4つの温湿度下の人工気候室に入室した。周期が10秒、30秒、60秒のサイン波形変動風と最大値が他の平均風速に等しい周期30秒のサイン波、ファンによる定常風、定常風に近いランダム波、周期30秒の方形波の7種の波形を人間に当てた。実験の結果人間はサイン波形変動風をより涼しく感じていることがわかった。通常人体よりの対流熱伝達率は、平均風速の対数に比例するとして計算を行っているがさらに考慮が必要なようである。

冷房室内における変動気流が体感に及ぼす影響についても実験を行った^{文61)}。ファンによる平均風速0.22m/s

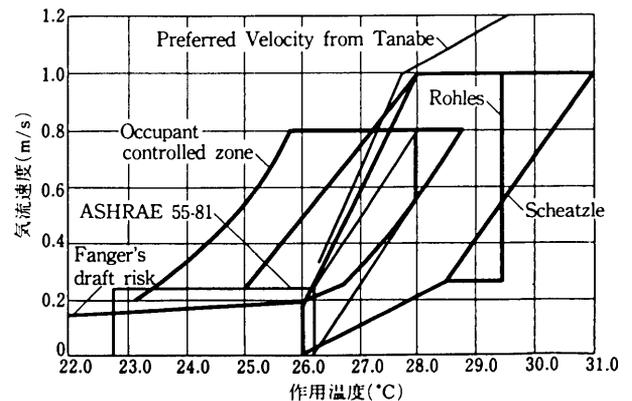
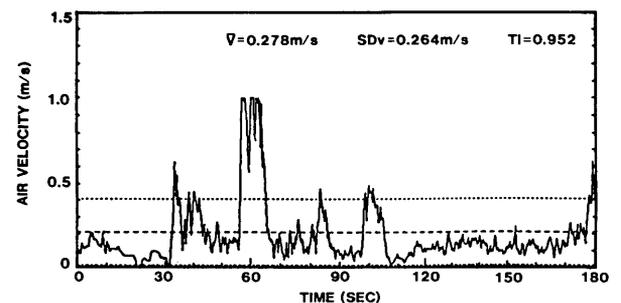
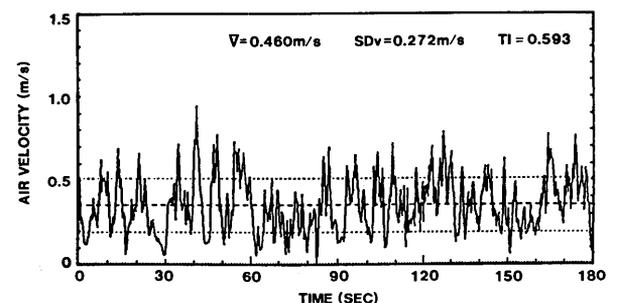


図17 種々の研究者のよって提案されている好まれる気流速度



川越の伝統的民家での室内気流



エアコンを設置したある会議室の室内気流

図18 川越の民家とエアコンを設置したある会議室で採取した室内気流

の定常気流と、周期30秒、平均風速0.21m/sのサイン波形変動気流を比較した。被験者は同じ平均風速下でも、サイン波形の変動風を定常風より涼しく感じた。ところが、両者とも生理学的指標である平均皮膚温は33.8℃と同じであった。定常気流を感じる人の割合は47%、変動気流は64%であった。ドラフトを感じる人の割合は定常気流下で4.7%、変動気流下で10.9%であった。冷房空間でも変動気流は、定常気流より冷却力を持っている。ドラフトの許容値を超えない範囲で変動性を積極的に利用すれば、効果的空調が可能であるかもしれない。

Henselが述べているが皮膚の温受容器、冷受容器は定常の温度値のみではなく動的な変動にも応答する⁶²⁾。気流のみだれ、ゆらぎは人体の対流熱伝達率を変化させるだけではなく、皮膚面の動的な温度変化を生じ受容器の励起状態が変わる。単に皮膚表面までの伝熱機構を考えるのみではなく人間の感覚を含めてゆらぎを考えることが必要であろう。

7.2 湿度環境

夏季に湿度を低くすると健康で快適であるといわれるがこれは真実であろうか。結論的にいうと湿熱的湿度の許容範囲は広い。湿度の湿熱的影響に関しては、多くの研究が行われているが、ここでいくつかの大規模実験データ例を示す⁶³⁾。

図19にオフィス環境試験室実験と田辺・木村実験の結果より求めた相対湿度と温冷感との関係を示す。25℃、27℃では相対湿度が80%までは熱的中立以下で、28℃以上になると暖かく感じている。27℃～28℃の間で温冷感はステップ的に上昇している。また、図20にオフィス環境試験室での実験とKSU実験の相対湿度と温冷感との関係を示す。一定湿度で温度を変化させたときの温冷感の変化は日本人とアメリカ人はおおむね等しくなったが、一定温度で湿度を変化させたときの温冷感の変化は温度によって特性がみられた。25℃付近では日本人はKSU

実験の予測値よりも涼しく感じていたが、28℃付近の低相対湿度ではKSU実験の予測値よりも暖かく感じていた。30℃付近では温冷感と予測値はほぼ等しくなった。

湿度を考える場合大変重要なのは非湿熱的影響である。主として、Brundrett⁶⁴⁾を参考とすると以下のようなことが考察される。

- 1) 鼻腔の乾燥：室内の相対湿度が25%以下になると鼻腔の乾燥を知覚する。乾燥によりゴミや微生物の除去が困難になり、細菌やウィルスが長く生存し、風邪をひきやすくなる。
- 2) ドライアイ：乾燥環境によっておこるドライアイの症状は低相対湿度、速い気流下でおこる。眼の乾燥には個人差があるが、相対湿度20%～30%では、コンタクトレンズに付着する塵が多くなり、不快感が大きくなる。
- 3) 皮膚：快適な相対湿度は23℃、70%のときであった。
- 4) ハウスダスト・ダニ：アレルギーを引き起こす。ダニの繁殖の最適環境は気温25℃、相対湿度80%である。
- 5) カビ：喘息発作の原因になる。カビが繁殖しやすい湿度はおおむね高相対湿度で、70%から85%の間で多くのカビが繁殖する。しかし、ダニ・カビの成長に関しては、室内温湿度のみではなく、壁面近傍、壁面の温湿度影響によるところが大きい。
- 6) ウィルス：空気感染は、媒介となるウィルスの湿度への反応が様々であり、普遍的なパターンはない。
- 7) 静電気ショック：防ぐためには相対湿度の下限を30%～40%にする必要がある。英国の冬季の実測例では35%を境に静電気ショックが多くなっている。静電気の問題が低湿度の場合最もクリティカルである。日本のように夏季に蒸し暑く、冬季に乾燥する気候では、静電気の問題は季節により異なる。人体、カーペット、什器の含水率は1日の平均相対湿度に左右されるので、同じ相対湿度であっても夏季は冬季より静電気ショックが発生しにくいと考えられる。

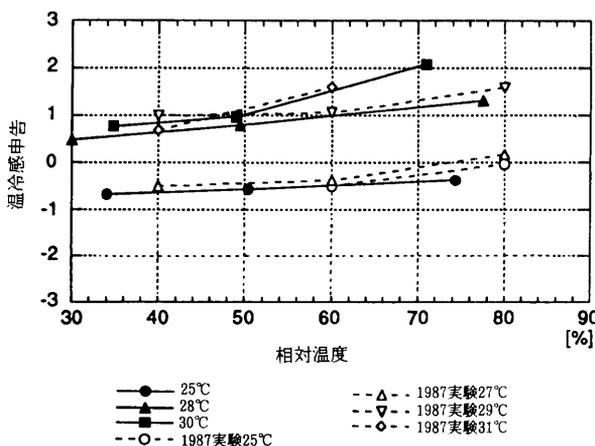


図19 相対湿度と温冷感との関係

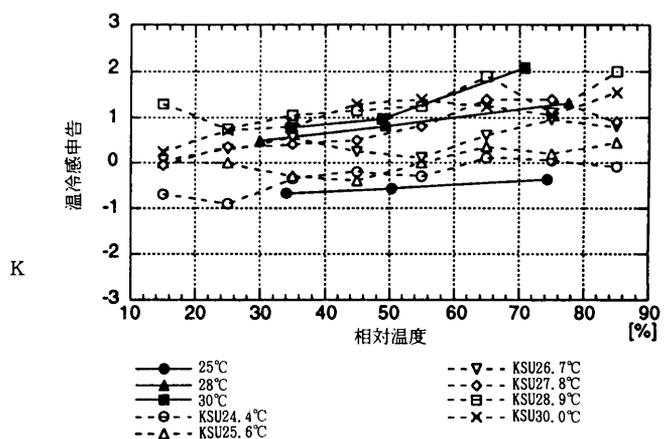


図20 オフィス環境試験室での実験とKSU実験の相対湿度と温冷感との関係

総合的に考えると快適な温湿度範囲は、温熱感覚に基づく快適範囲のみではなく、健康な生活を送るために、生活衛生も考慮して決定する必要がある。温熱的には、熱的中立に近い温度における湿度の許容限界は広い。また、最近室内の化学物質汚染による症状の中に喉が渇いているという症状が観察される場合がある。特に高気密・高断熱住宅において、ホルムアルデヒド、VOC、有機リン系家庭内農薬などの存在が、湿度による不快感と区別できないことがあるので注意が必要である。

7.3 換気と温熱感覚

最近日本における住宅換気の一手法としてパッシブ換気が提案されている^{x65)}が、この手法に関して温熱快適性の点から考察を行う。

1) 全身温冷感と足下の冷え

冬季の椅座静位の在室者にとって足下の冷えは大きな問題である。足下の冷えは、全身温冷感に大きく依存する。すなわち、全身温冷感が中立あるいは暖かい場合は、多少足下の空気温度が低く、気流があっても不快感が少ない。すなわち、全身のヒートバランスが重要である。これは、全身が暖かい状態のある場合、抹消部にも血流が多く流れているためである。

ドラフトに関する項ですでに述べたが、ドラフトの許容限界に関しては、Fangerらが行った結果^{x66)}が基準として良く用いられている。Fangerらによるドラフトの実験では、通常の室内で冬季に人体を様々な気流下に曝露して実験を行っている。この実験で重要なのは、被験者は全身温冷感が中立に近い状態におかれているということである。また、最も感受性が高かったのは頭部と報告されているが、Houghtenの実験^{x67)}と異なり頭部のみを気流に曝露したものではない。Fangerらは、室内環境基準を作成するために最も感受性の高い位置での測定を行い、ドラフト感を示したものである。

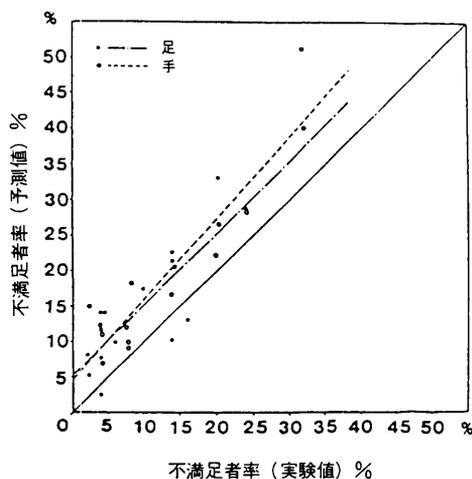


図21 足部と手の部位の曝露気流値に対するPD予測値と実際の値 (Fanger et al.)

被験者実験時の質問の流れとしては、全身温冷感を申告させ、気流を感じるか？、感じるとするとその気流は不快か？、どこに気流を感じるかを質問している。ドラフトの式は、感じるか、不快か、の質問によって不満足者率の計算が行われているので、頭の位置のみでのドラフト感を示したものではない。図21に足部と手の部位の曝露気流値に対するPD予測値と実際の値が示してある。頭部は他の部位と比較すると感受性が高くなっている。

論文中の記述で、“The model may be used for all heights in the occupied zone, although it may tend to overestimate the draft risk at arms and feet level. For people with bare arms and ankles or with nylon stockings, it may be a reasonable approximation to use the model for the head throughout the occupied zone.”と述べてある。足部気流速度、乱れの強さ、空気温度での評価には直接用いることができないが、日本のように住宅内での靴を履かない生活者にはこの基準を用いることは安全側であるともいえる。

また、MunceyとHoldenの実験^{x68)}では17人の被験者を90分間人工気候室に曝露した。床上0.025mと0.75mの温度差が最大6℃までとし種々の実験が行われた。全身が寒い側では足部温度と足の冷えの関係が多かったことを指摘している。Munro and Chrenkoは室温13℃で、0.05m/sと0.25m/sの風を当てて実験した^{x69)}。足の冷えに対する気流速度の影響は少ないと結論している。FishmanとSemereの実験^{x70)}によると足部の冷えに影響するのは足部周囲の空気温度で気流速度の影響は少ない。女性は男性よりも足部皮膚温が低かったと報告している。

7.4 放射温度と快適さ

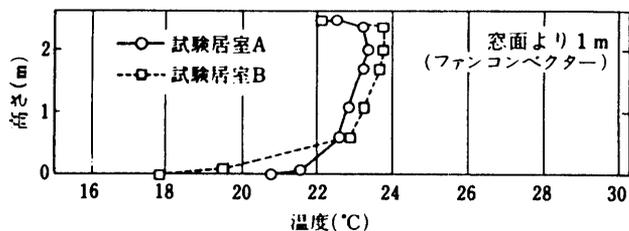
住宅の断熱・気密性能はエネルギー消費量のみではなく、室内温熱環境形成に大きな影響を与える。断熱・気密性が悪い住宅の場合、単純に室内への投入エネルギー量を増加させても暑くも寒くもない環境は得ることができ、上に述べたような快適条件を満たすことはできない。また、冷房時は日射遮蔽をしっかりと行うことで、放射温度の上昇を防ぎ快適性を増すことができる。

ここでは、暖房時の例を紹介する^{x71)}。R-2000に相当する断熱・気密基準の約18㎡の居室Aと旧省エネ基準の相当する同サイズの居室Bに床置き形のファンコンベクターを窓側に設置し、室内中央でのPMVがほぼ0となるように暖房機器の能力制御を行った。図22に上下温度分布、PMV分布、ドラフトによる不満足者率、床面温度、不均一放射を示す。断熱・気密性に優れた居室Aでは、室内環境の快適性が高いことがわかる。また、エネルギー消費量は居室Aで24W/㎡、居室Bで66W/㎡となった。高断熱・高气密化により省エネルギーだけでなく室内温熱環境の質の向上がみられた。

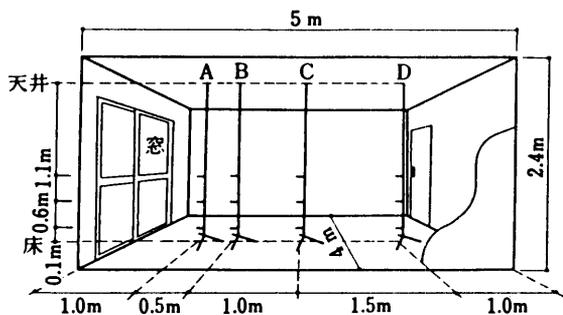
各試験居室の断熱仕様

	試験居室 A	試験居室 B
断熱仕様	R-2000 IV地域に相当	旧省エネ基準IV地域に相当
窓	ペアガラス 樹脂サッシ [2.30 kcal/m ² ・h・°C]	甲板ガラス アルミサッシ [5.60 kcal/m ² ・h・°C]
外壁	35 k グラスウール 90 mm ウレタンボード 22 mm 気密シート [0.27 kcal/m ² ・h・°C]	10 k グラスウール 30 mm [0.88 kcal/m ² ・h・°C]
床	スチレンボード 100 mm [0.26 kcal/m ² ・h・°C]	スチレンボード 20 mm [0.69 kcal/m ² ・h・°C]
天井 (2階建の 1階天井)	10 k グラスウール 50 mm 周囲部のみ 235 mm [0.72 kcal/m ² ・h・°C]	10 k グラスウール 50 mm [0.72 kcal/m ² ・h・°C]
漏気量 (換気回数)	4.5 m ³ /h (0.1 回/h)	50.0 m ³ /h (1.1 回/h)

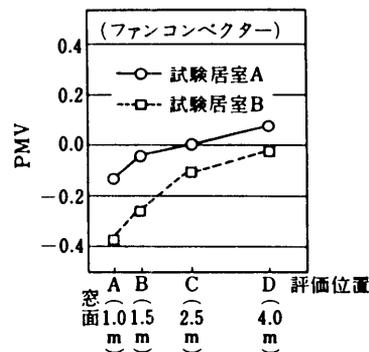
[] 内は熱貫流率



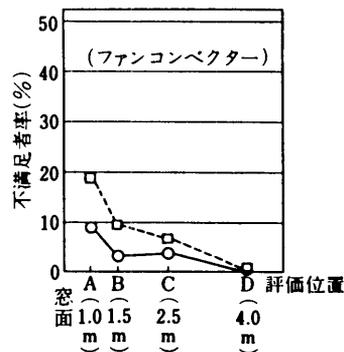
快適性評価位置



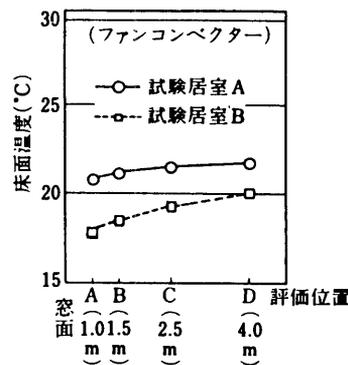
室内上下温度分布の比較



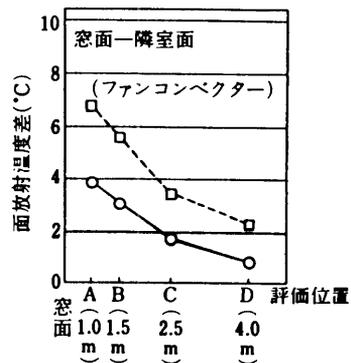
PMV



ドラフト



床面温度



不均一放射

図22 断熱・気密性の相違による温熱環境

8. おわりに

本報告では、特に温熱環境に限定して快適性に関して述べた。しかし、本来快適性は人間の五感に関わる。従って、温熱に関わる皮膚感覚のみで快適性が語られるだけでは不十分である。例えば、非喫煙室であるが温度は低い、喫煙室であるが温度レベルは快適であるときなど、視環境、空気環境など他の環境との複合影響に関しても充分考慮する必要がある。

<参考文献>

- 1) ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-92R: Thermal environmental conditions for human occupancy, 1992
- 2) 田辺新一, 快適性と空調, 空調衛生設備士, 第21巻4号, p.1, 1989
- 3) S.Kuno et al.: A two-dimensional model expressing thermal sensation in transitional conditions, ASHRAE Trans. Vol.93 Part 2, pp.396~406, 1987
- 4) 坊垣和明: 積極的な快の条件, 住サイエンス, Vol.10, pp.33~38, 1989
- 5) 大野他, 快適性の科学, 朝倉書店, 1993
- 6) A.P.Gagge et al.: Practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment, Science, pp.428~430, 1941
- 7) E.A.McCullough et al.: A comprehensive data base for estimating clothing insulation, ASHRAE Trans., Vol.91, pp.29~47, 1985
- 8) B.W.Olesen: 温熱環境と衣服の快適性, 繊維と工業, Vol.43, No.6, p.17, 1987
- 9) ASHRAE, ASHRAE handbook -1989 fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., pp.8.1~8.32, 1989
- 10) 三平和雄, 花田嘉代子: 衣服と熱環境, 住宅熱環境評価シンポジウム, pp.38~42, 1975
- 11) P.O.Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 12) 堀越哲美他: 人体と矩形面との間の形態係数及び人体の有効ふく射面積に関する研究, 1. 算出理論と椅座着衣の場合の実測, 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp.109~120, 1978
- 13) D.A.McIntyre: The thermal radiation field, Building Science, Vol.9, pp.247~262, 1974
- 14) ISO-7726: Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities, 1985
- 15) P.O.Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 16) C.E.A.Winslow, et al.: The influence of air movement upon heat losses from the clothed human body, Journal of Physiology, Vol.127, pp.505~518, 1939
- 17) ISO-7730: Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1984
- 18) ASHRAE, ASHRAE handbook -1993 Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993
- 19) P.O.Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 20) R.G.Nevins et al.: Temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons, ASHRAE Trans., Vol.72, pp.283~291, 1966
- 21) P.E.McNall et al.: Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity, ASHRAE Trans. Vol.73, Part1, 1967
- 22) A.P.Gagge et al.: Standard Effective Temperature-A single temperature index of temperature sensation and thermal discomfort, Proc. of the CIB Commission W45 (Human Requirements), Symposium, Thermal comfort and Moderate Heat Stress, Building Research Station, pp.229~250, 1973
- 23) C.P.Yaglou and W.E.Miller: Effective temperature with clothing, ASHVE Trans., Vol.31, pp.89~99, 1925
- 24) A.P.Gagge et al.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans. Vol.93, Part, pp.709~731, 1987
- 25) 木村建一他: 夏期における人体の熱的快適感に関する基礎的研究 (その1, PMV, ET* の特性比較), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.545~546, 1985
- 26) Y.Nishi and A.P.Gagge: Effective temperature scale useful for hypo-and hyper-baric environments. Aviation Space and Environmental Medicine, Vol.48, pp.97~107, 1977
- 27) B.W.Olesen: Thermal Comfort, B&K Technical Report, 1982
- 28) 田辺新一, 建築環境学 (木村建一編), 5章温熱快適性, 1992, 丸善
- 29) ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-92R: Thermal environmental conditions for human occupancy, 1992
- 30) R.G.Nevins et al.: Temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons, ASHRAE Trans., Vol.72, pp.283~291, 1966
- 31) F.H.Rohles and R.G.Nevins: The nature of thermal comfort for sedentary man, ASHRAE Trans., Vol.77, pp.239~246, 1971
- 32) F.H.Rohles et al.: Effective temperature (ET*) as a predictor of thermal comfort, ASHRAE Trans., Vol.81, Part1, pp.148~156, 1975
- 33) S.Tanabe et al.: Thermal comfort requirements during the summer season in Japan, ASHRAE Trans., Vol.93, pp.564~577, 1987
- 34) S.Tanabe: Thermal comfort requirements of sedentary college-age subjects during the winter season in Japan, 日本家政学会誌, Vol.41, No.5, pp.437~445, 1990
- 35) P.O.Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 36) R.J.deDear et al. Thermal comfort in the humid tropics- Part2 Thermal acceptability climate-chamber experiments in Singapore, ASHRAE Trans., Vol.97, Part1, pp.880~886, 1991
- 37) 栃原裕: 日本人の生理 (佐藤方彦編著), 1988, 朝倉書店
- 38) P.O.Fanger and G.Langkilde: Inter-individual Differences in ambient temperature preferred by seated persons, ASHRAE Transactions, Vol.81, pp.140~147, 1975
- 39) F.H.Rohles: Special topics on thermal comfort studies, 熱的快適要件と室内環境評価に関する国際セミナー, 国際人間環境研究所, p.85, 1988
- 40) 三浦豊彦他: 住みよい住宅熱環境, 労働科学研究所, 1986
- 41) F.H.Rohles and M.A.Johnson: Thermal comfort in the elderly, ASHRAE Trans., Vol.78, Part1, pp.131~137, 1972
- 42) P.O.Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 43) D.A.McIntyre: Indoor Climate, Applied science Pub., 1980
- 44) 吉田燦他: 身体障害者の温熱環境に関する研究 (その2~14), 日本建築学会学術講演梗概集, 1978~1991
- 45) P.O.Fanger et al.: Comfort limits for heated ceiling, ASHRAE Trans. Vol.86, Part2, pp.141~156, 1980
- 46) P.O.Fanger et al.: Comfort limits for asymmetric thermal radiation, Energy and Buildings, Vol.8, pp.225~236, 1985
- 47) R.G.Nevins et al.: The effect of floor surface temperature on comfort, Part 1 College age males, ASHRAE

- Trans., Vol.70, pp.29~36, 1964
- 48) DIN 1946 Teil 2 1987. "Raumluftechnik Gesundheitstechnische Anforderungen." (VDI-Luftungsregeln), Deutsches Institut für Normung, Berlin 1983
 - 49) B.W.Olesen et al. : Vertical air temperature differences and comfort, Proc. of INDOOR CLIMATE ed. by P.O. Fanger, Danish Building Research Institute, Copenhagen, pp.561~579, 1979
 - 50) R.G.Nevins et al. : The effect of floor surface temperature on comfort, Part 1 College age males, ASHRAE Trans., Vol.70, pp.29~36, 1964
 - 51) R.G.Nevins and A.M.Feyerherm : Effect of floor surface temperature on comfort. Part 2 Cold floors, ASHRAE Trans., Vol.73, pp.2.1~2.8, 1967
 - 52) B.W.Olesen : Thermal comfort requirements for floors, Proc. of the meeting of Commissions B1, B2, E1 of the IIR, Belgrade, pp.337~343, 1977
 - 53) 坊垣和明 : 体感に及ぼす熱放射の影響, 空気調和・衛生工学, Vol.59, No.4, pp.343~349, 1975
 - 54) B.W.Olesen : Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, ASHRAE Trans., Vol. 83, Part 2, pp.41~57, 1977
 - 55) Matsui, I : On the contact thermal sensation of materials, 2nd International conference, Vehicle Comfort, Italy, pp.303~312, 1992
 - 56) 岡島他, 建築仕上げ材の触覚的特性に及ぼす温度の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, pp. 1~10, 1991
 - 57) M.Fountain, E.A.Arens, Air movement and thermal comfort, ASHRAE Journal August, pp.26~30, 1993
 - 58) 田辺新一, 風のゆらぎと体感, 建築雑誌, Vol.104, No1291, 1989年10月号, pp.32~33
 - 59) 窪田秀樹 : 室内気流と体感, 空気調和・衛生工学, Vol.58, No.3, pp.33~38, 1983
 - 60) S.Tanabe and K.Kimura : Importance of air movements on thermal comfort under hot and humid conditions, ASHRAE Far East, pp.95~103, 1989
 - 61) S.Tanabe, K.Kimura, T.Hara, T.Akimoto, Effects of Air Movement on Thermal Comfort in Air-conditioned Spaces During Summer Season, 日本建築学会計画系論文報告集, 第382号, 1987年12月, pp.20~30
 - 62) H.Hensel : Thermoreception and temperature regulation, Academic Press, 1981
 - 63) 小関敬子, 田辺新一, 今村寿子, 鈴木孝佳, オフィスにおける湿度が熱的快適性に与える影響 (その1, その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1994年10月, pp. 433~440
 - 64) G.W. Brundrett, Criteria for Moisture Control, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1990
 - 65) 大澤他, 住宅用換気システムの温熱快適性能評価に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.707~708, 1995など多数の論文あり。
 - 66) P.O.Fanger, Perception of Draught in Ventilated Spaces, ERGONOMICS, Vol.29, 2, pp.215~235, 1986
 - 67) F.C.Houghten, C.P.Yaglou, Cooling effect on human beings produced by various air velocities, J. ASHVE, Vol. 30, pp.169~184
 - 68) R.W.Muncey, T.S.Holden, The Influence of Air Temperatures near the Floor on the Temperature and Comfort of the Human Foot, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia Division of Building Research Technical Paper No5, 1959
 - 69) A.F.Munro, F.A.Cherenko, The Effects of Air Temperature and Velocity and of Various Flooring Materials on the Thermal Sensations and Skin Temperature of the Feet, Journal of Hygiene, pp.451~456, 1948
 - 70) A Preliminary Investigation into the Subjective Effects of Low Level Draughts (Temperature Variation), British Gas, Watson House, British Gas Report WH/T/R&D/77/12, 1977
 - 71) 須藤, 小峯, 田辺, 倉淵, 吉田, 斎藤, 高気密・高断熱居室と標準住宅における各種暖房の温熱環境・エネルギー消費量に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 1992