

JIER-046

研究調査報告書

赤外放射と冷暖感・冷暖房

平成 8 年 3 月

社団法人 照明学会

赤外放射と人体の冷暖感に関する研究調査委員会

目 次

1. まえがき	(松井松長)	1
2. 赤外放射と人体の冷暖感		
2. 1 皮膚の光学特性	(松井松長)	4
2. 2 放射と冷暖感	(玉重繁良)	10
3. 放射冷暖房の理論		
3. 1 人体の快適条件	(笹森宣文)	16
3. 2 P M Vと放射の作用効果	(同上)	16
3. 3 冷感	(森田政明)	21
3. 4 温感	(同上)	25
3. 5 予測計算	(宮永俊之)	29
4. 放射冷暖房の方式と実施例		
4. 1 放射冷暖房方式の種類	(富田和彦)	31
4. 2 床暖房	(同上)	34
4. 3 部分暖房	(吉井嘉寿憲)	39
5. 放射冷暖房の評価法, 計測法		
5. 1 環境の評価法	(坊垣和明)	45
5. 2 環境の計測法	(谷治 環)	50
5. 3 計画・設計と実施例	(高木恒雄)	55
5. 4 予測計算	(宮永俊之)	61
6. 放射冷暖房の将来	(河本康太郎)	65
6. 1 放射冷暖房の損失のまとめ		65
6. 2 初期設備費		66
6. 3 既設設備への適用性の拡大		66
6. 4 冷暖房条件設定上の問題		66
7. あとがき	(松井松長)	68

1. ま え が き

1.1 はじめに

最近、次世代の冷暖房方式として放射冷暖房が注目されている。いうまでもなく、冷暖房(熱)は、光、音、臭気とともに、われわれの居住空間を快適に保つための重要な要素である。現代人は全生活時間の約8割を住宅や職場などの室内で生活していると言われていて、室内空間を快適に保持するための技術や設備が、日常生活の中で必要不可欠なものとなってきている。放射冷暖房は従来の対流式にくらべて、室温の上下差が殆どなく、天井あるいは床などの広い放射面から熱放射が室内の全方向に放射される(冷房時は逆に人体から)ので、人体にとって快適であり、さらに無音、無臭、無風の理想的な冷暖房方式である。このことから当委員会では放射による冷暖房が、近い将来の冷暖房方式の主流になるものと考え、その実施方式や評価法と共に、基礎となる人体の冷暖感について調査研究することにした。

本報告書は、平成5年10月から平成8年3月までの2年6カ月間の委員会活動で得た成果を取りまとめたもので、放射と冷暖感、放射冷暖房の理論、放射冷暖房の方式と実施例、放射冷暖房の評価法と計測法、放射冷暖房の将来性など全7章で構成されている。

1.2 委員会の構成と活動概況

委員会の構成は次の通りで、委員長1，副委員長1，幹事2，委員9の計13名である。

「赤外放射と人体の冷暖感に関する研究調査委員会」委員構成

委員長	松井松長	(福山大学工学部)
副委員長	河本康太郎	(東芝ライテック(株)技術本部研究所)
幹事	笹森宣文	(東京都立工業技術センター光音部)
同	玉重繁良	(岡山職業能力開発短期大学校電子技術科)
委員	市川真人	(日本電熱協会、名古屋大学名誉教授)
同	高木恒雄	(中国電力(株)技術研究センター)平成6年3月から
同	富田和彦	(北海道工業試験場資源エネルギー部)
同	坊垣和明	(建設省建築研究所第5研究部)
同	森田政明	(栗原工業(株)技術部)
同	谷治環	(埼玉大学工学部)
同	横内洋文	((株)四国総合研究所バイオ・新素材研究部)
同	吉井嘉寿憲	(松下寿電子工業(株)坂出事業部)

同 宮永俊之 ((財)電力中央研究所狛江研究所)平成7年9月から

途中退任者

委員 高木建起 (中国電力(株)技術研究センター)

委員会の開催は12回で、審議経過は下記の通りである。

委員会経過(開催地の記入がないのはすべて東京)

第1回委員会(平成5年10月20日(水))

委員会設置の趣旨説明。委員会運営方針の審議。話題提供「快適度センサ(サーマル・コンフォート・メーター)について」、「皮膚の赤外線特性」ほか。

第2回委員会(平成5年12月14日(火)、東京都立工業技術センター)

公開研究会開催について。松下インターテクノ(株)によるサーマル・コンフォート・メーターの展示と説明。

第3回委員会(平成6年3月14日(月))

委員会予算について。話題提供「天井放射冷暖房施設の紹介」ほか。

第4回委員会(平成6年5月26日(木)建設省建築研究所(つくば市))

公開研究会について。建築研究所の概要説明。話題提供「快適室内環境と床暖房」。

第5回委員会(平成6年8月30日(火)、新宿ラムダックス・ビル)

学会からの連絡事項(理事会、部門運営会議)。話題提供「生活環境における放射環境とその人体への影響および評価法」(田辺新一氏)、「天井放射冷暖房システムの紹介」。

第6回委員会(平成6年11月17日(木)、東京都庁第1庁舎29F会議室)

文献紹介。中国電力(株)エネルギーハウス・アルファイン21の説明。話題提供「赤外放射と温熱感」。

第7回委員会(平成7年3月6日(月)、東京都庁第1庁舎29A会議室)

学会全国大会について。話題提供「放射暖房設計法」、「省エネルギーと遠赤外線の活用」、ガラスの高断熱化と断熱ガラスの種類」ほか。

第8回委員会(平成7年6月2日(金)、関西電力(株)宮津エネルギー研究所)

学会からの連絡事項(総会報告、事務所移転)。文献紹介。宮津エネルギー研究所の研究概要説明。

第9回委員会(平成7年9月4日(月))

資料紹介。話題提供「放射冷房の特徴、快適性、解析プログラムについて」

第10回委員会(平成7年11月28日(火))

学会からの連絡事項(総会、学会誌の体裁変更など)。SPIE赤外線ハンドブックの紹介。委員会報告の項目、執筆担当者(案)。

第11回委員会（平成8年2月8日(木)）

学会からの連絡事項、(全国大会、赤外線関係新設委員会、ほか)。話題提供「皮膚の光学特性の測定」。委員会報告書の細目、分担審議・決定。

第12回委員会(平成8年3月15日(金)、オキツモ(株)本社(三重県名張市))

委員会報告書の編集について、オキツモ株式会社の概要と耐熱塗料の説明。
提供資料数 計132件

本委員会の設置期間中に開催した研究会は3回、見学会は6回であって、その概要は次の通りである。

研究会の開催

第1回研究会

平成6年2月12日(金)、機械振興会館(共催)

第2回研究会

平成7年2月10日(金)、東京都立食品技術センター(共催)

第3回委員会

平成8年2月16日(金)、東京都立食品技術センター(共催)

見学会の開催

第1回見学会(平成5年12月14日(火)、東京)

東京都立工業技術センター(光音部)

第2回見学会(平成6年5月26日(木)、つくば市)

建設省建築研究所(冷暖房、照明)

第3回見学会(平成6年8月30日(火)、東京)

新宿ラムダックス・ビル(日本国土開発(株))(冷暖房)

第4回見学会(平成7年3月6日(月)、東京)

東京都庁防災施設

第5回見学会(平成7年6月20日(金)、京都府宮津市)

関西電力(株)宮津エネルギー研究所(冷暖房、新エネルギー)

第6回見学会(平成8年3月15日(金)、三重県名張市)

オキツモ株式会社(耐熱塗料、赤外線塗料)

(松井松長)

2. 赤外放射と人体の冷暖感

最も快適性が高い冷暖房といわれている放射冷暖房も、物理的には人体を対象とした放射冷却と放射加熱であり、天井や床面と人体との間の放射エネルギーの授受(放射熱交換)である。天井面または床面の温度 T_r と皮膚表面または着衣外表面の温度 T_s のそれぞれの4乗の差に比例した放射($T_r > T_s$ (暖房)の場合、 $A\epsilon\sigma(T_r^4 - T_s^4)$ 、後章で詳述される)の授受である。

本章では、まずこの4乗の差の放射の受光面(暖房)または放射面(冷房)である皮膚の光学特性(分光透過特性、分光反射特性)について、次いでこれらの赤外放射に対する生体の温熱感覚について述べる。

2.1 皮膚の光学特性

2.1.1 皮膚の構造

皮膚は表皮と真皮の2層からなり、真皮の内側には脂肪の多い皮下組織がある。皮膚に付属するものとして、毛包(毛あな)・毛・つめ・汗腺・脂腺などがあるが、これらは表皮が変形したものである(図2-1 参照)¹⁾。

表皮は上より角層・透明層・顆粒層・有棘層・基底層の5層からなる。表皮の厚さは0.1mm程度であるが、足の裏や手の平ではこれよりも厚く、最も薄い部分は上まぶたである。基底層で造られた表皮細胞は、基底細胞→有棘細胞→顆粒細胞→角質細胞と、皮膚の表面に向かって形を変えながらゆっくりと移動し、最後はうろこのような薄片となってはがれていく(ふけ、あか)。

真皮は上から乳頭層・乳頭下層・網状層の3層からなり、網状層が真皮の大部分を占めていて、表面に平行して網状に走るタンパク質の繊維からなっている。

皮膚の色はメラニンの量が多くなるにつれて茶褐色、暗褐色、黒色になる。この量には個人差があり、人種的には白人は少なく、黒人は多い。日本人はその中間である。日焼けで皮膚が褐色になるのは、紫外放射により、色素細胞の働きが活発になり、多量のメラニンが造りだされるからである。

皮膚にある感覚器は、皮膚の全面に一様に広がっているのではなく、点状に分布していて、しかも分布状態は場所によって異なるため、感覚の鋭敏な所と鈍感な所がある。皮膚に照射された赤外放射は、反射成分を除く他の大部分は皮膚の組織内で吸収されて熱エネルギーに変換される。この熱は皮膚の温度を上昇させて組織内の感覚器(温度受容器・痛覚受容器)を刺激し、温熱感、痛感をもたらすと考えられている^{1) 2)}。

2.1.2 皮膚の分光透過特性、分光反射特性

遠赤外域(3 μm 以上)においては、人間の皮膚は極めて高放射率(≈ 0.99)であるというものが赤外線研究者の間では定説になっている。一方、可視、近赤外域では比較的反射率、透過率が高いことも日常経験していることである。

皮膚の分光透過率および分光反射率に関しては、これまで若干の報告があるが、中でも最も信頼性があり広く利用されているのは、図2-2、図2-3に示したHardyらの測定によるものである³⁾。

皮膚の分光透過率および分光反射率は、同図に示すように2 μm 以上の波長域においてはいずれも10%以下であって、入射した赤外放射の長波長成分(遠赤外)の90%以上が、表皮において吸収されることを意味している。これに対して2 μm 以下の波長域(可視、近赤外)では、分光透過率が比較的が高く、入射した可視・近赤外放射は皮膚組織中で徐々に吸収されて深部まで達することを示している。

2.1.3. 皮膚の光学特性の再確認

皮膚の分光透過特性としては、前述した通りHardyらのものが最も多く利用されている。しかし、これは十分な配慮のもとで行われたとはいえ、その測定年代が1930年代であり、その後の光学、電子技術の格段の進歩を念頭にして、この際再検討してみる必要があるのではないかと考え、敢えて測定してみることにした。測定に当たり特に留意した事項は、a.直進透過光のみでなく、拡散透過光、拡散反射光も測定すること、b.複数サンプルについて測定することである。

近年、近赤外放射を用いた生体計測が盛んになってきている。それは前述の通り遠赤外放射と異なり、近赤外放射の生体組織中の透過性の良さにある。しかし、皮膚を含めて生体内は拡散透過が主であるから、測定に際してはこの点を考慮して機種を選定せねばならない。測定には図2-4に示した可視・近赤外用ダブルビーム型分光光度計を用いた。

図2-5、2-6、2-8に測定結果を示す⁴⁾(波長0.8 μm 付近、および1.9 μm 以上においてノイズがやや大)。図2-7は比較のために透過式の分光光度計による測定例を示した。図2-5と図2-2、図2-6と図2-3を対比させると、分光透過特性も分光反射特性もともに細部を除き概して一致している。ガルバノメータを用いたHardyらの測定技術の優秀さに敬意を表したい。

参考文献

- (1) 勝木保次(編):感覚の生理学、医学書院(1976)
- (2) 安田利顕:皮膚、現代ホーム百科事典・第8巻、(株)学習研究社(1966)
- (3) Hardy, Muschenheim:J.Clin. Invest., p.193(1936)
- (4) 松井松長、玉重繁良、山田一雄:皮膚の光学特性の測定(Ⅰ)、照明学会赤外放射と冷暖感研究調査委員会資料、IRS-126(1996.3)

(松井松長)

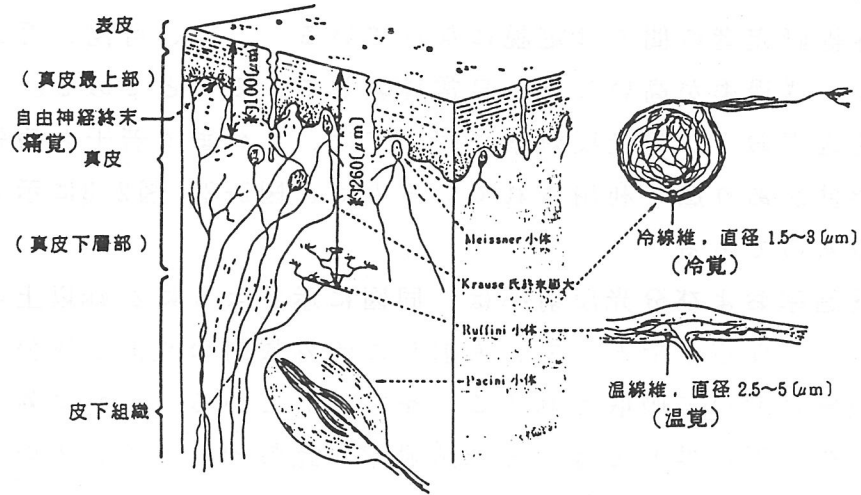


図 2-1 皮膚の構造と温熱感覚器官

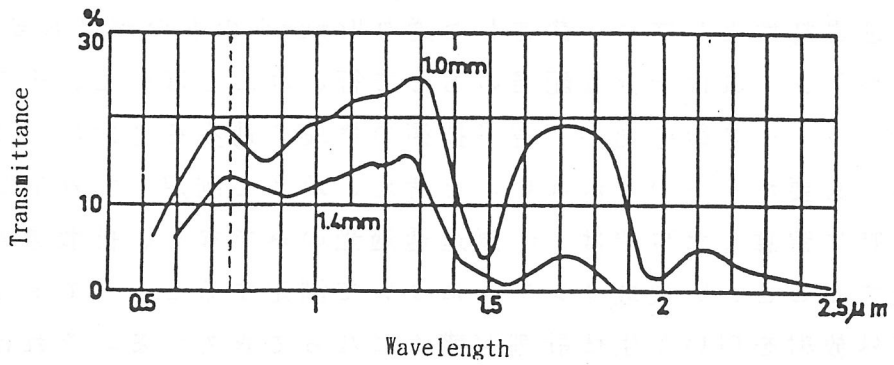


図 2-2 皮膚の分光透過率

厚さ: 1.0mm, 1.4mm

(Hardy and Muschenheim, J.Clin. Invest., 1936 より)

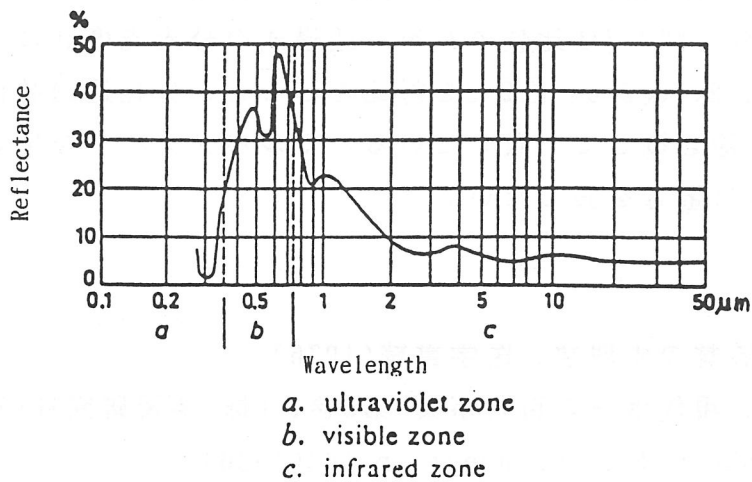
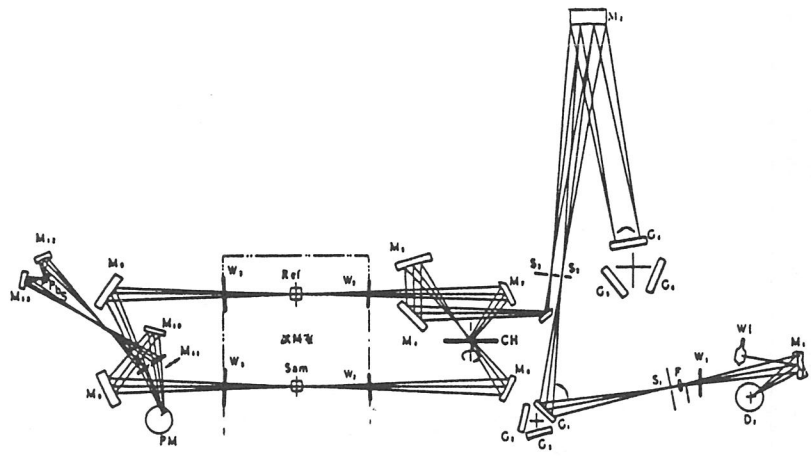
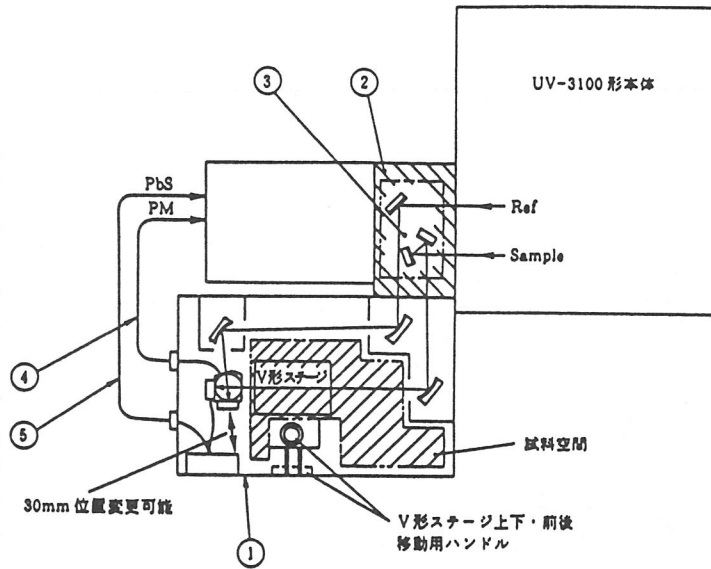


図 2-3 皮膚の分光反射率(白人)



- D₂ : 重水素ランプ
- W₁ : ハロゲンランプ
- F : フィルタ
- G₁~G₂ : 第1分光器回折格子
- G₃~G₆ : 第2分光器回折格子
- S₁ : 入口スリット
- S₂ : 中間スリット
- S₃ : 出口スリット
- W₁~W₃ : 窓板
- CH : チョップミラー
- M₁~M₁₃ : ミラー (M₁:光源切換えミラー, M₁₁:検出器切換えミラー)
- Ref : 対照側セル
- Sam : 試料側セル
- PM : フォトマルチプライヤ
- PbS : PbSセル

(a) 光学系統図



- ① 大形試料室ユニット本体
 - ② 試料室 ASSY
 - ③ 付属光学系ユニット
 - ④ PM 信号ケーブル
 - ⑤ PbS 信号ケーブル
- (b) 大形試料室ユニットの概念図

図 2-4 可視・近赤外分光光度計
(島津製、UV-3100)

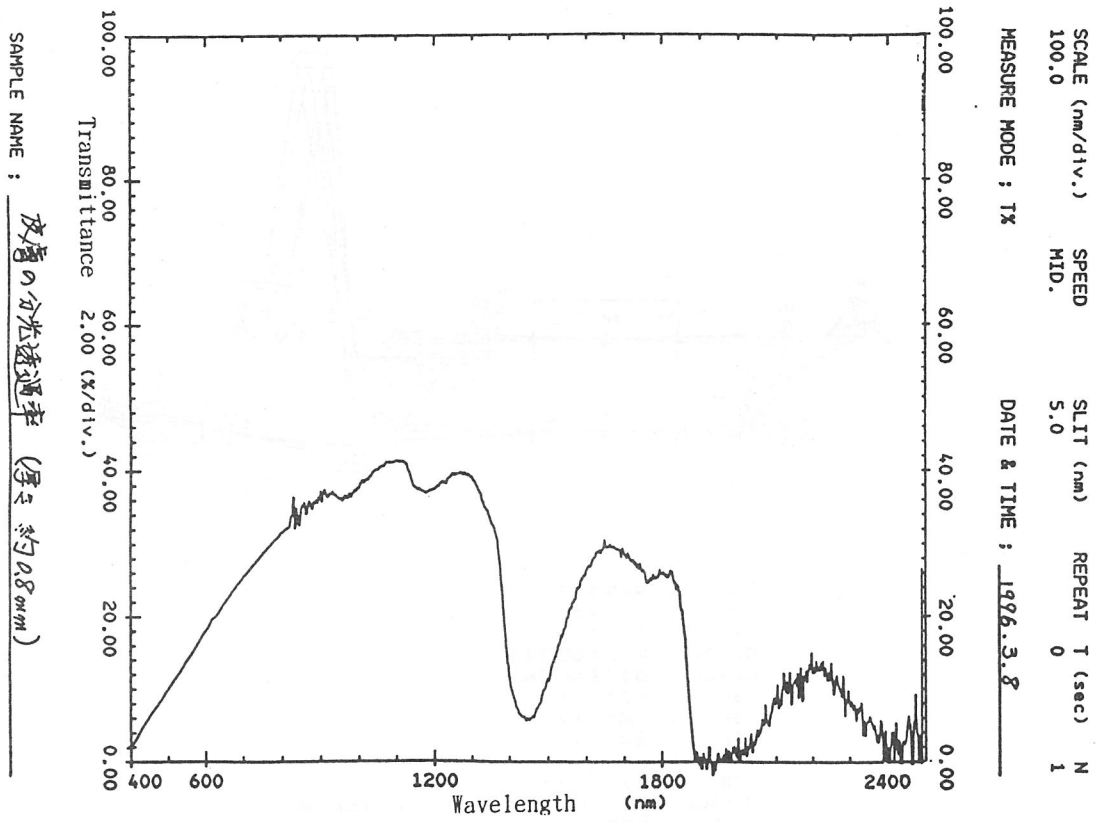


図 2-5 皮膚の分光透過率
厚さ: 約0.8mm

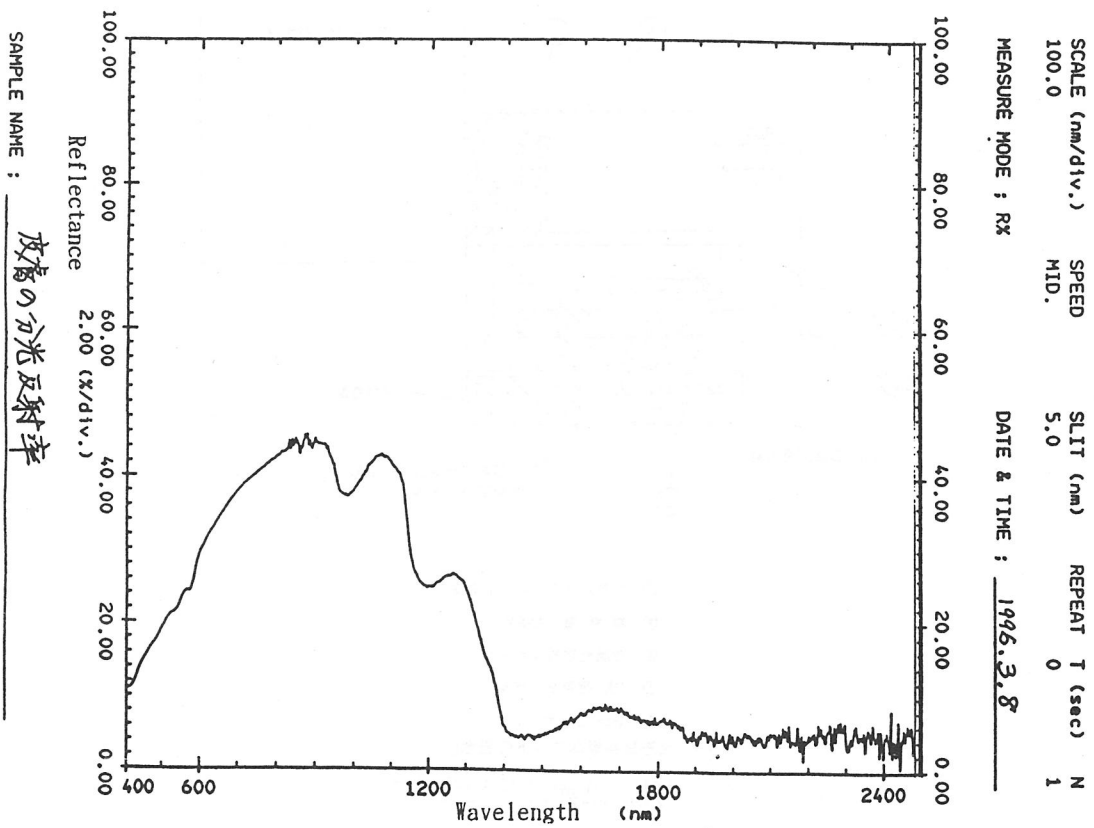


図 2-6 皮膚の分光反射率

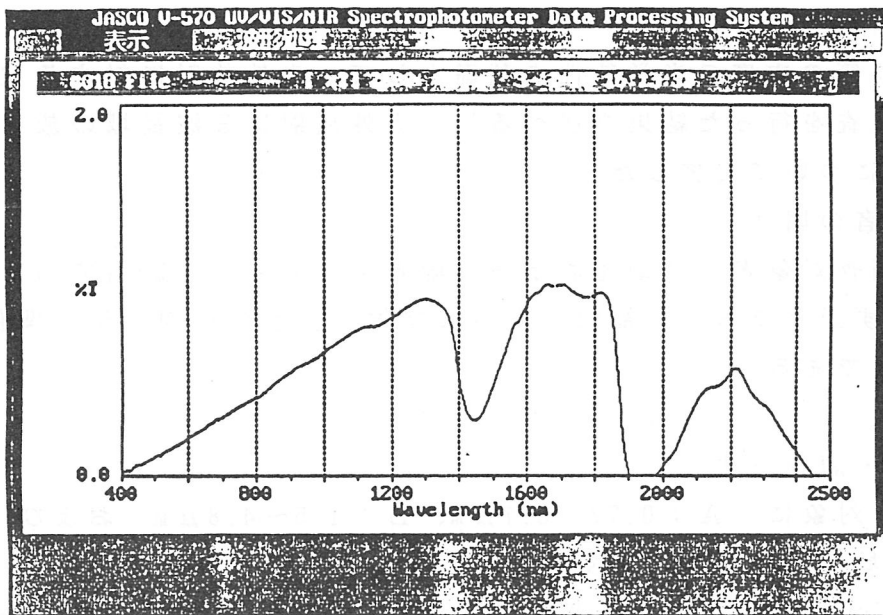


図 2-7 皮膚の分光透過率

厚さ:約0.8mm

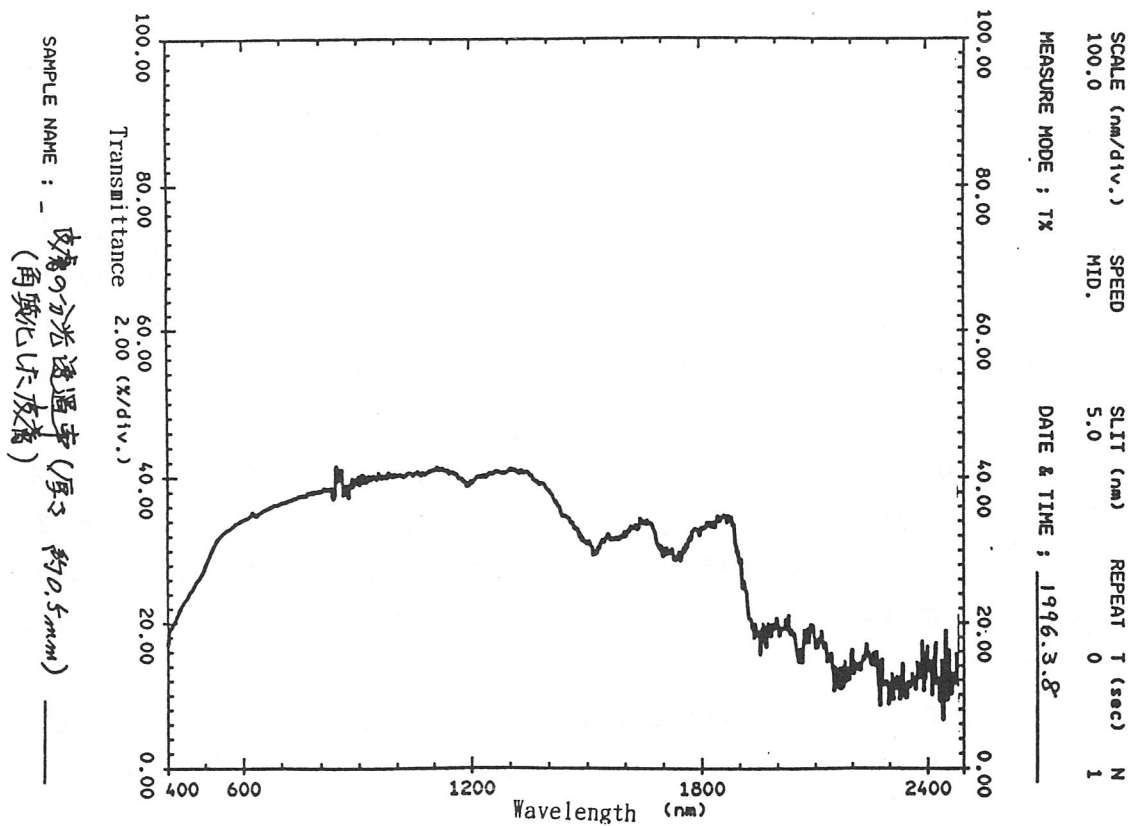


図 2-8 皮膚の分光透過率

厚さ:約0.5mm(角質化した皮膚)

2.2 放射と冷暖感

ここでは前節の皮膚の光学特性を基礎として、赤外放射に対する皮膚の温熱感覚について調査を行った結果を述べる¹⁾。赤外放射は3波長域の放射源とし、被験者は155名について実施した。

2.2.1 被験者の属性

被験者（調査対象者）は幼児および高齢者を除く男女155名である。その属性は表2-1で示す通りであり、福山大学および佐保女学院短期大学の関係者（教職員、学生他）である。

2.2.2 実験・調査方法

全被験者を対象に、A：0.72～2.7 μm 、B：1.5～4.8 μm 、およびC：6～20 μm の3波長域の赤外放射に対する皮膚の温覚について調査を行った。図2-7に3波長域の放射源の外観を示す。帯域放射源A・B・Cは赤外線電球、セラミック・ヒータに光学フィルタを併用して構成した。各放射源はその開口部（直径7cm、開口面積38.5 cm^2 ）において、200 mW/cm^2 の等放射照度になるように放射源の入力を制御した。放射照度の測定にはサーモパイル（東京精工（株）、RE-II）を用いた。なお上記の開口部の放射照度は、皮膚の連続照射に耐えられる限界値を考慮した値である²⁾。

これらの帯域放射を各被験者の手の甲および頬に照射する（図2-8）。暴露時間は手の甲が20秒間、頬が15秒間で、終了後に温熱感および刺激度を申告してもらった。また実験中は室温を17～22 $^{\circ}\text{C}$ の範囲に保ち、被験者は照射5～10分前に入室して体調を整えた後に照射を受けることとした。

2.2.3 調査結果

被照射面、すなわち被験者の皮膚の表面の位置における放射照度（放射エネルギー）が等しくなるように各帯域放射源を調整して、手の甲または頬を照射した。規定の時間だけ暴露した後、短・中・長波長域の3種類の帯域放射A・B・Cの相互に対する温熱感および刺激度の申告を受けた。図2-9～2-16にこれらの集計結果を示す。

図2-9は全被験者に対する皮膚の温熱感についての調査結果である。手の甲の場合は帯域放射AとBとではAが「熱い」または「暖かい」と答えた者が12.3%に対して、Bと回答した者が、85.8%であり、頬の場合はAが6.4%、Bが90.4%である。いずれも帯域放射Bすなわち長波長放射の方が「熱い」と感じた者が圧倒的に多くなっている。

帯域放射AとCとの温熱感の比較においても、手および頬共に長波長側のCの方が「熱い」と感じた者が90%以上を占めている。これに対して帯域放射BとC

については、手の甲の場合Bの52.2%に対してより長波長側のCの方が45.2%、頬の場合はBの31.0%に対してCが66.4%であって若干の相違はあるが、BとCとの間に大きな差が認められない。

図2-10,2-11の男女の集計結果においても上記とほぼ同様の傾向を示している。また、図2-12,2-13,2-14の年齢別の結果においても30~75才の高年齢側の被験者が少ないが同様である。従って、波長に対する温熱感に関しては、男女間および年齢層間に大きな差はないと考えてよい。

次に温熱感に伴う刺激すなわち温熱感とともに生じる副次的な感覚についての調査結果を図2-15,2-16に示す。これは皮膚がある放射照度以上の放射を受けた場合に、「熱さ」、「温かさ」とともに生じる感覚であって「穏やかな」、「まろやかな」、「やわらかな」、「心地よい」温かさまたは熱さと、「びりびりする」、「刺す感じ」、「痛い感じ」の熱さなどの「熱さの違い」についての調査結果である。

図2-15は「痛い感じの熱さ」と回答した数であって、短波長の帯域放射Aよりも長波長の帯域放射B、Cの方が圧倒的に多い。この傾向は長波長側が温熱感が大であることと一致している。

一方、図2-16は「心地よい熱さ」と答えた数であって、どちらかといえば長波長放射B、Cよりも短波長放射Aの方が「心地よい熱さ」と感じた者が多く、特に女性の方に著しい。帯域放射BとCの相互間では、温熱感と同様にこれに伴う刺激（熱さの違い）もほぼ同数の回答であって、皮膚に対する刺激に大差がないことを示している。

2.2.4 考察

眼以外の人体組織、とくに皮膚組織には本来光に対する感覚すなわち光覚（明暗感）および色覚（波長に対する感覚）はないと考えてよいが、皮膚は前述のような分光的な特性を有することから間接的に何らかの波長的な感覚の差異があっても不合理ではない。つまり異なった波長の赤外放射に対して、皮膚の感覚、特に温熱感に差があるのではないかと考えられる。

前節で述べた帯域放射A、B、Cに対する皮膚の温熱感の差は、これらと同じ波長帯域内の皮膚の分光放射率、分光透過率、および伝熱特性によって説明される。すなわち、皮膚は2 μ m以下の近赤外帯域放射Aに対しては、比較的高反射率かつ高透過率であるから、表皮内に入射する近赤外放射は少ないが、入射後は直接温点を刺激することになる。従って照射直後から温かさを感じるが、温熱感が弱く穏やかな温かさである。

これに対して帯域放射BおよびCは波長域は全く異なっているが、両帯域とも2 μ m以上の長波長放射が大部分または全部である。このことは入射した中・遠赤外放射は大部分が表皮で吸収されて多量の熱となり、それが深部の真皮下層部

まで伝達されて温点を刺激するために、強い温熱感を与えるものと考えられる。この場合、数秒の時間の遅れがあると答えたものが多く、伝達過程から温点まで達するのに若干の遅れがあることを裏付けている。また、痛点は表皮下部にあり温熱によっても痛感を起こさせることから、中・遠赤外放射による表皮の強い加熱で刺すような痛感を与えるものと説明できる。

このように2 μ m以下の近赤外放射よりも2 μ m以上の中・遠赤外放射のほうが皮膚に刺激のある強い温熱感をもたらすことが確認されたが、その他の知見としては、(1)2 μ m以上波長域における温熱感については、波長に対する有意の差は認められないが、強いて言えば長波長側が若干大きい(このことは花岡氏の結果と一致する)^{2) 3)}。(2)各帯域放射に対する温熱感は、男女、年齢層などの各グループ間での大きな差がない。(3)痛さ、心地よさなどの付随する感覚に限り女性の回答が際だって少ない。これは女性特有の原因(生理学的な違い、化粧の影響など)によるものと考えられる。

皮膚の波長的な温熱感覚は、眼のように放射(光)が直接視覚に刺激を与えるのとは異なり、皮膚で吸収された放射が熱に変換された後に温点を刺激することになる。特に長波長の中・遠赤外域においては、高い吸収率をもった受光面=表皮とその背後のセンサ=温点という受容システムは、丁度熱形光検出器に似た構成であることから、必然的に感覚の時間遅れが生じる。また、熱形光検出器の分光感度が受光面の光学特性(分光吸収特性および分光反射特性)により定まると同じ様に、皮膚の光学的特性により定まったことになり、中・遠赤外域においては、波長依存性をもたないものと考えてよい。これに対して短波長域では、温点を含む真皮層が光子形検出器にやや似た受容機構と考えられ、応答も速い。

このように皮膚の赤外線に対する波長別の温熱感覚は、皮膚の光学特性によって定まるものと考えられるから、感覚の波長依存性も吸収線のようなシャープな特性ではなく、幅広い吸収帯としての感覚をもつものとするのが妥当である。

参考文献

- (1) 松井松長、玉重繁良、高木 亨：波長域別赤外放射に対する皮膚の温熱感覚
福山大学工学部紀要、第8号、35~43(1986)
- (2) 森田政明：National Technical Rep., Vol.27, No.3, P.469~480(1981)
- (3) 花岡利昌、染瀬度子、奥山桂世、出水裕子：家政学研究、Vol.22, No.2、
116~123(1976)

(玉重繁良)

表2-1 被験者の属性

年齢 \ 性別	男	女	合計
10～29才	77名	44名	121名
30～49才	6	6	12
50～75才	16	6	22
10～75才	99	56	155

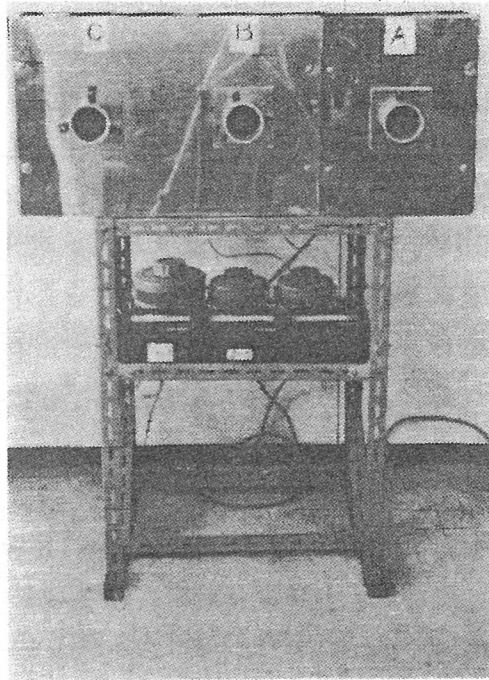


図2-7 3波長域の放射源の外観

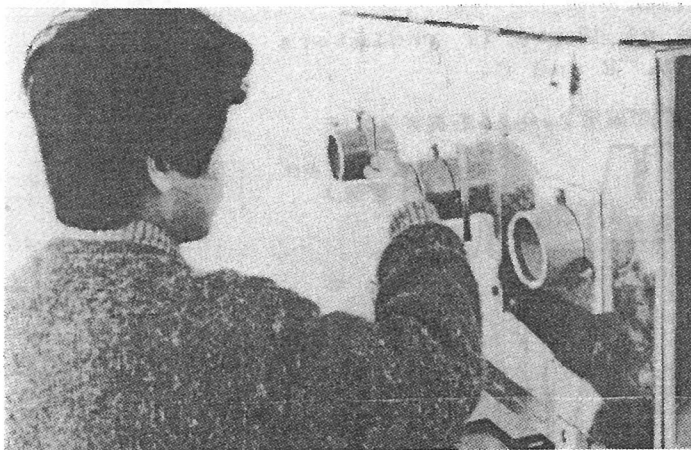


図2-8 手の甲に帯域放射Bを照射中の被験者

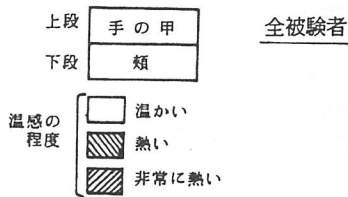
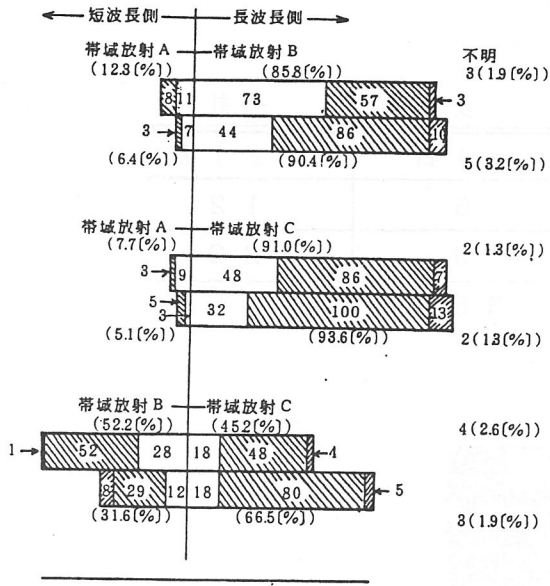


図 2-9 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (全被験者)

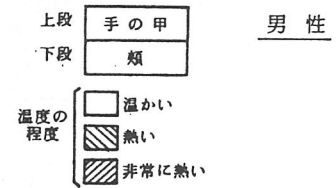
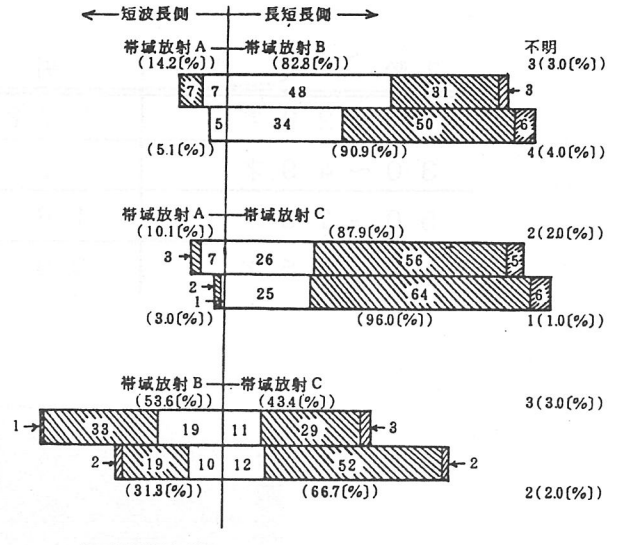


図 2-10 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (男性)

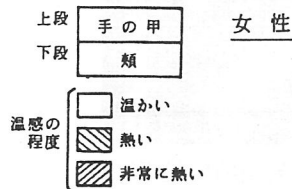
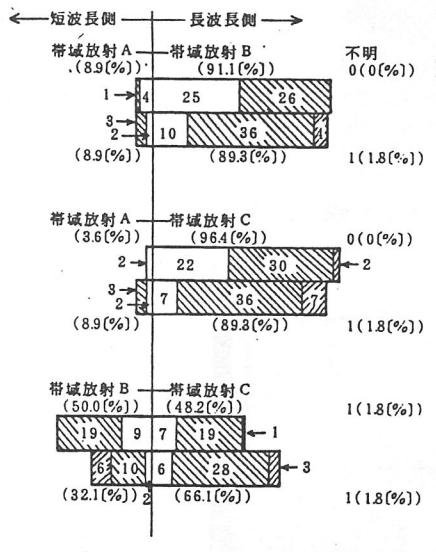


図 2-11 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (女性)

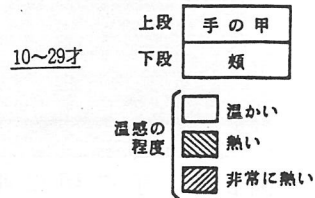
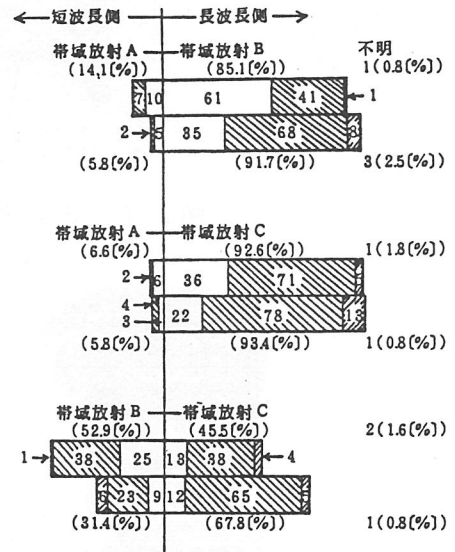


図 2-12 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (10~29才)

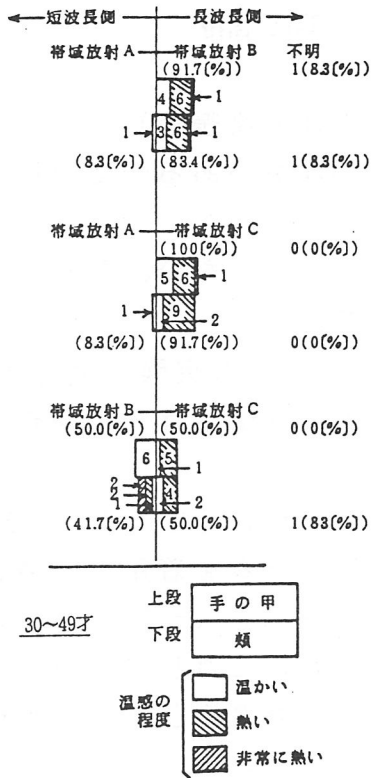


図 2-13 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (30~49才)

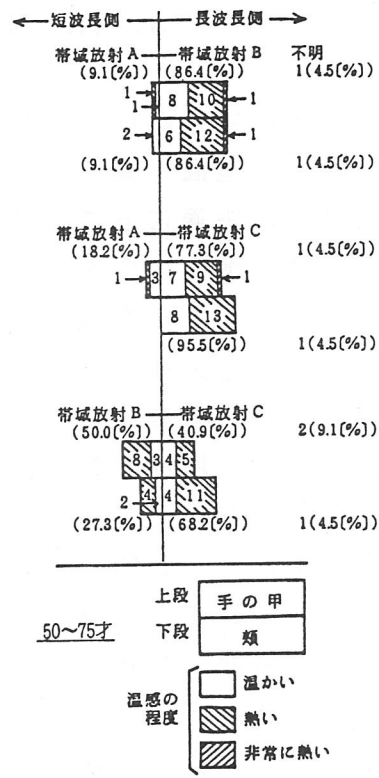


図 2-14 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (50~75才)

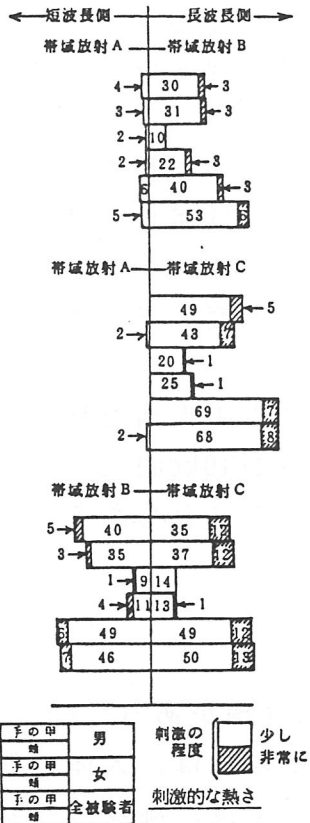


図 2-15 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (刺激的な熱さ)

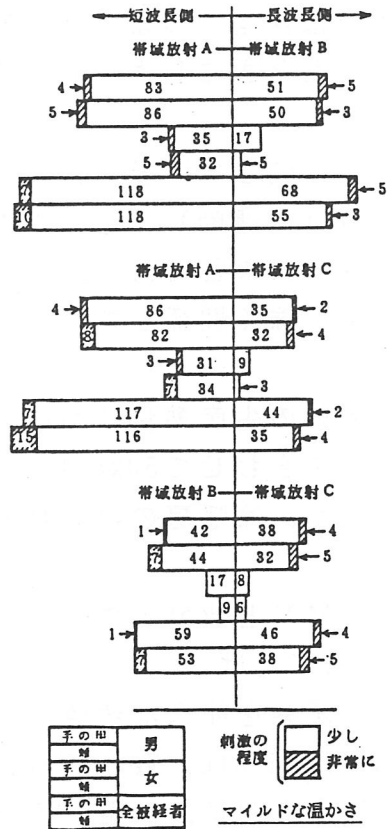


図 2-16 各帯域放射に対する皮膚の温熱感覚 (マイルドな温かさ)

3. 放射冷暖房の理論

3. 1 人体の快適条件（温度、湿度、放射量と人体の冷暖感）

人体は定温（恒温）動物であるところから、熱的環境がある一定の幅の中に入っていないならば快適に過ごすことはできない。

古代の人々は地面に穴を掘って縦穴住居生活を送っていたが、それは図3.1のように、地中は地上よりも温度の変化が少ないからである[1]。

また室内温度と人体各部の温度について、図3.2のような実験結果がある[2]。この結果によると温度の低下に対して、頭部・腹部の皮膚温は余り変化しないが、手足・指などの末梢部分の皮膚温の低下は著しい。

室内の温度・湿度と人体の感じる快適さを示したものに、図3.3がある[3]。

この図によると、人間が快適であると感じるのは、上衣を着用した場合で温度が約17～24℃、軽装の場合で約22～27℃、湿度はどちらも30～70%の範囲となっている。人は温度の変化は敏感に感じるが、湿度の変化に対してはそれほど影響は感じない。また同図でET（℃）と表された数値は有効温度といい、管球温度、湿球温度、気流速度から求められるものである。

一方、人体が快適であるということ、逆の表現をすると人間が暑さ寒さを感じる現象を整理すると、人体内で生産される熱量と人体から放熱する熱量が等しいときに人体は快適（つまり暑さ寒さを感じない状態）であり、生産熱量が放熱熱量を上回ったときに暑さを、生産熱量が放熱熱量を下回ったときに寒さを感じるわけである。

生産熱量に関して、その値を意識して増産させる方法としては、筋肉でのエネルギー消費（＝運動）、血行の増進（＝アルコールの飲用）、熱の取得（＝温かい食物の飲食）などである。

放熱熱量に強く関係しているものは、着衣の量、温度、赤外線照射、気流などである。

なお、人体の生産熱量については、室内にいる成人1人当たり、対流と放射による放熱量を合わせて50kcal/h、蒸発による放熱量が40kcal/hであるという大ざっぱな数値が、冷暖房の際の負荷計算では用いられることもある[4]。

3. 2 PMVと放射の作用効果[5]

3.2.1 PMVとは

人体の冷暖感を簡単な数値で表現したものにPMV理論がある。PMVとは予想平均申告（The Predicted Mean Vote）の略である。PMV理論は、人体の熱的快適感に与える衣服、発熱量、気温、平均ふく射温度、気流速度、湿度の6要素の値によって、熱的快適感（PMV値）を決定するものである。6要素のうち、衣服と人体の

発熱量の2つは人間側に起因した要素である。

PMV値の例を挙げると、PMVの0は暑くも寒くもない、+1はやや暖かい、+2は暖かい、+3は暑い、-1はやや涼しい、-2は涼しい、-3は寒いとなっている。

3.2.2 冷暖感と着衣の関係[5]

人体が暑さ寒さを感じた場合、一般的には着衣の量を調節することによってその冷暖感を解消している。着衣の量によって快適と感じる温度が変化することは、前に掲げた図3.3でも調査されている。

近年、人体の冷暖感を簡単な数値で表現する方法（PMV理論）が採用され、それに伴い人体からの放熱に対する衣服の保温の度合いを、細かく数値化することが行われた。

衣服（clothing）の保温の度合いは、cloという単位で表される。1 cloは $0.155 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ である[6]。

裸体は0 cloである。Tシャツと半ズボンでは0.3 clo、Tシャツと長ズボンでは0.5 clo、三つ揃いの背広は1.0 clo、襟元の締まったオーバーコートと毛糸の帽子では3.0 cloなどとなっている[7]。

3.2.3 冷暖感と運動量の関係

人体からの放熱に対する衣服の保温の度合いをcloで表したように、PMV理論では、人体の運動によって起こる発熱量（metabolic）を、metという単位で表す。

metの例を挙げると、着座している状態は1.0 met、デスクワークは1.2 met、軽作業は2.2 met、テニスとダンスは4.0 metなどである[8]。

3.2.4 PMVと赤外放射

PMV理論において赤外放射は平均ふく射温度として関連している。

平均ふく射温度とは、室内の人体に対して不均一なふく射が照射された場合に、同じ量のふく射熱の熱収支を行う周囲温度の値を指す。ここで、人体に不均一なふく射が照射された場合というのは、ストーブや窓、床などからの赤外放射量は、それぞれバラバラな（不均一な）放射量であるということを示している。

人間が室内のどこにいるかによって平均ふく射温度は異なる。同じ室内温度でも窓からの日射を受けていると暑く感じる。それは、その時の窓際の平均ふく射温度が高いということである。

暖房器具を使用しているときなどは、特に室内各部位の温度は異なり、それぞれの部位から人体に照射する赤外放射量も大きく異なっている。そのため、各部位から人体に対する赤外放射量を全て求め、その赤外放射量を温度に換算するこ

とによって平均ふく射温度が求められる。

3.2.5 不均一な赤外放射の作用

人体は上下に長い円柱形をしているので、横からの放射の影響を大きく受ける。このため、赤外放射による冷暖房を行うには、天井パネル・床パネルよりも、つい立型のパネルの方が効率的であると言える。しかし、家具などを置くために制約を受けることも事実である。

人体に照射される赤外放射の量に大きなアンバランスがあると、不快感を感じる。例えば、断熱が悪く、すきま風の多い冷えた室内で放射型のストーブに当たっている場合、体の正面は暖かいが、背後は寒いということになる。

不均一ふく射に関して、人体は横方向のふく射の不均一より上下方向の不均一に対して敏感である。不均一ふく射を評価する方法として、室内各部から人体に照射される赤外放射量を温度に換算した、微小面ふく射温度の手法がある。その値の例として、冷たい壁またはガラス窓面と暖かい室内側の場合では、温度差は10℃以内、暖かい天井と冷たい床の場合では温度差は5℃以内をISOでは推奨している。

以上のことから、窓側（冬季低温、夏季高温の箇所）にふく射型冷暖房器具を設置する放射冷・暖房方式は、人体に対して最も快適な方式であると言える。

参考文献

- [1] 木村幸一郎 建築計画原論 共立出版(株) p.159 1975
- [2] 熱と環境 ダウ化工(株) p.173 1988
- [3] 木村建一 建築設備基礎理論演習 学献社 p.85 1992
- [4] 同上 p.84
- [5] 田辺新一 赤外線放射と快適室内環境 赤外線の利用技術 東京都立工業技術センター p.39～ 1989
- [6] 長谷部ヤエ訳 B.W.Olesen 著 温熱環境と衣服の快適性 繊維学会誌 Vol.43 No.6 1987
- [7] ブリュエル&ケアー社 Thermal Comfort Meter Type 1212 カタログ
- [8] 同上

(笹森宣文)

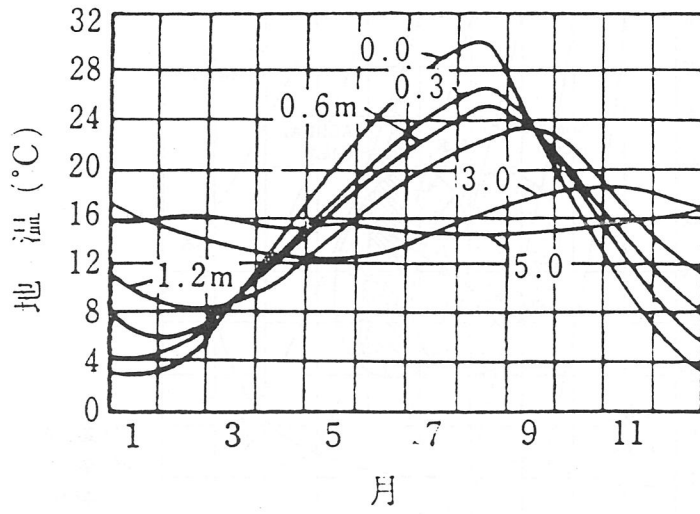


図3.1 東京および大阪での地中温度変化

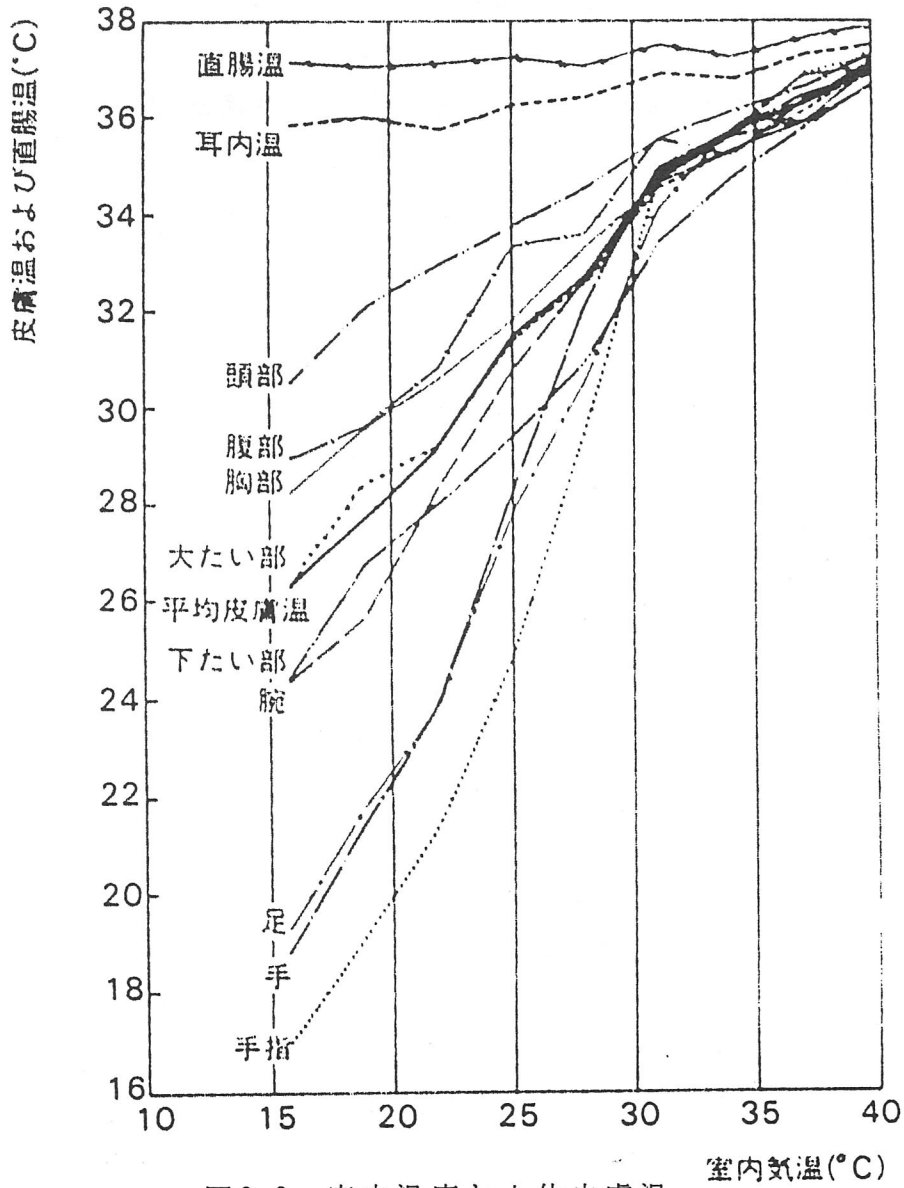


図3.2 室内温度と人体皮膚温

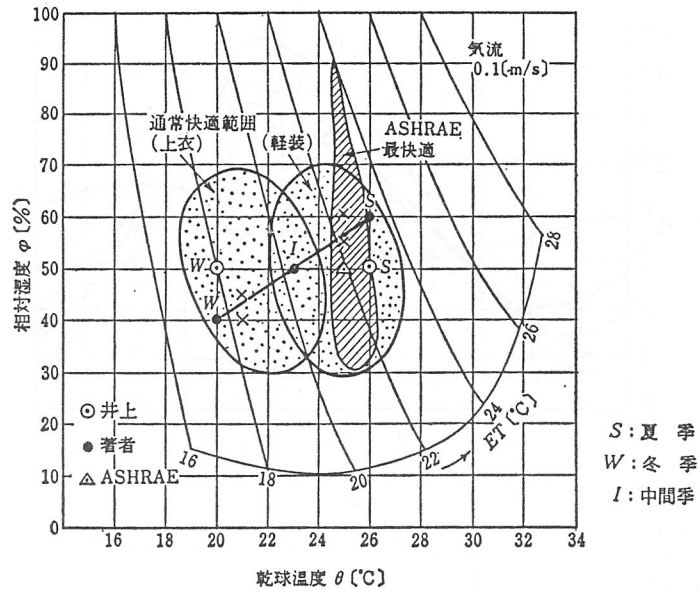


図 3.3 室内温度・湿度と人体の快適範囲

3.3 冷感

3.3.1 はじめに

本委員会の研究活動の課題は「赤外放射の人体に対する冷暖感」であり、本報告ではこの主旨から赤外放射による冷感について調査研究の結果をとりまとめた。赤外放射による温感については、実際に暖房機器として使用されていることから、今までに多くの報告を見ることができる。しかし赤外放射による人体の冷感についての研究や報告は、筆者の不勉強のため残念ながら入手できたのは極めて少なく、十分な調査とすることができなかつた。したがってここで採用したのは、主として当研究調査委員会の席上提出された資料をもとに作成したものである。

・一般的に人体の感じる冷感・温感はFanger氏のPMVおよびISO-7730規格に定めるように室温、湿度、気流、着衣、代謝量、放射の各要因が重畳したものと受け取られており、放射の項目のみ取り上げ、他の条件を一定にした冷感についての検討は少ない。

・また放射照度(放射パワー)と冷感を実効温度として表示する変換手段が不明確である。この放射照度を手軽にかつ必要な確度・精度で測定できる測定器が簡単に手に入らない。ことに起因すると思われる。

3.3.2 放射による冷感[1][2]

人体の周囲にある体温より低温度の物体に対し人体表面から赤外放射が放散されることにより、皮膚表面の温度が低下し血流増加、皮膚表面の収縮などの機作で補いきれなくなった場合、皮膚組織下の神経乳頭が刺激され冷感を生じる。冷感の乳頭数は温感のその数倍以上多いとされており、温感よりも広く多く分布している。この結果、冷感の発生は同時に皮膚の収縮により血流が低下し体温の低下を防止する。このため温感の場合のように全身に冷感が広がるのではなく局部的な冷感が中心になるものと考えられる。図3-3-1に皮膚の断面を模式的に示したものである。

3.3.3 人体と周囲との放射熱の授受として考えられ、文献[3]にあるように、人体の表面は実効的に円筒形と考えられるので円筒と直方体の周囲の壁面との間の形態係数と両者の温度によって決定される。両者の放射熱の授受は両者の絶対温度の4乗の差に比例する。数式で示すと次式のようなになる。

$$R = \sigma (T_b^4 - T_r^4) \varepsilon \quad [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}]$$

ここで

R : 人体と取りまく壁面と人体の間の放射熱の授受パワー

σ : ステファン・ボルツマンの定数 ($4.8 \times 10^{-8} \cdot \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$)

T_b : 人体の表面温度 [K] ($t_b + 273.15$)

T_r : 壁面の平均温度 [K] ($t_r + 273.15$)

ε : 放射率 (人体、壁面とも0.90程度と推定される)

・Fanger氏およびISO-7730規格に定めるようにPMVの計算式はすでに多くの報告に採用されているので、ここでは割愛する[4]。

3.3.4 放射照度・温度差で評価した冷感

・冬季に寒冷的な窓を背にした室内の人の寒冷感など。

(1)国際照明委員会(CIE)物理環境の基礎(E-1.6)委員会では、好ましい室内環境の物理的評価の原案として図3-3-2に示す条件で次のような数値を示している[5]。この様な室内物理環境では、左右一上下の放射照度の差が $10\text{W}/\text{m}^2$ ないし $20\text{W}/\text{m}^2$ の値程度を越えると放射の違いによる人体の不快を生じる。この時の放射温度の差は 10°C 程度である。逆に言えば放射冷房では $20\text{W}/\text{m}^2$ 以上の放射の授受は不愉快になるため避けなければならない。換言すれば、放射冷房には最大 $20\text{W}/\text{m}^2$ 程度の熱放散が限界ということになる。室温としては上下の温度差は $1^\circ\text{C}/\text{m}$ ないし $2^\circ\text{C}/\text{m}$ の範囲におさえることが必要。なをこの値は放射照度の人体に対する検出閾値とほぼ同程度の値である

(2)小型冷放射パネルを使用した冷感の実験研究[6]

・ワークステーションを置いた事務機の両側に冷パネルを設置し、気温は 26°C から 30°C の間で 2°C 間隔で変化させ維持し、パネル温度を 25°C から 10°C まで 5°C 間隔に変化させ、放射パネルの冷感に及ぼす効果を調査した。この結果によると、平均放射温度(気温と放射温度の平均温度)より低い場合は申告感覚は高い温度の方にシフトし、高温帯域では両者の差は少なくなる。

(3)窓の冷感についての放射ドラフトについては、平均放射温度で 8°C 以上の温度差は好ましくない。[3]

(4)天井放射パネル冷房についての観察結果では、室温 27°C で天井冷房方式の天井温度が 22°C では暑いと感じないとの結果が報告されている。[7]

(5)電子冷却機器を使用した小規模パネル使用の冷感実験の結果では[4]、全身温冷感が中立域以上のとき近接した冷放射パネルの効果は、PMV の評価方式で求めた値よりも下回る。また室内空気温度が中立温度より高い場合に有効との結果が得られている。

(6)一般空気冷房と放射冷房の方式の違いによるPMV方式の評価を採用した電力中央研究所の報告[8]によると温度・湿度条件を同一にし、放射冷房パネルの温度を空気温度より 4°C 低くした場合、放射冷房のほうがPMV値で1程度低い方向にシフトする。

3.3.5 まとめ

いままでに報告されている資料をもとに放射冷房の効果と物理条件の関係を調査し、放射冷房についての統一的な指標を定めるべく努力したが、筆者の手元にある資料では十分な結果が得られなかった。この理由は放射の授受は両者の絶対温度の4乗に比例するという物理法則が厳然として存在するため、人体にたいする放射暖房のように温度差を大きくとることが出来ないこと、また授受される放射パワーの増大のために形態係数を大きくすることに、空間的な限界があることが理由であると考えられる。ここで述べたことを要約すると

- ・人体に不快を与えない放射冷房は、放射照度で示すと人体の相対する側面の放射照度の差が $10\text{W}/\text{m}^2$ ないし $20\text{W}/\text{m}^2$ の程度を越えないこと。温度で示すと $8\sim 10^\circ\text{C}$ 程度以内の温度にすること。
- ・同一温度で冷房する場合、放射パネルを採用すると、空気のための冷房にたいし数度低い放射温度と等価になること。
- ・放射冷房の効果は、気温が中立帯域を越える領域ではPMVの計算値より下回る効果が得られること。
- ・わが国においては、夏季の気候条件から放射冷房では必ず結露を生じるため室内での使用に大きな制約になっていること。

参考文献

- [1] 中山昭雄 編：温熱生理学 理工学社(1981)
- [2] 森田政明：熱放射環境の計量化について、赤外線技術第6号p23(1981)
- [3] 坊垣和明：体感に及ぼす熱放射の影響 空気調和・衛生工学会誌
第59巻4号25,
- [4] 木村建一 他：ふく射冷暖房の体感評価に基づく室内環境制御方式の開発
(63850130)、昭和63年度一平成元年度科学研究費補助金
(試験研究(2)研究成果報告書) P-9 (平成元年3月)
- [5] 佐土根範次、猪野原誠：CIE. E-1.4 物理環境の基礎 松下電器産業株式会社
照明研究所 研究資料(昭和45年8月)
- [6] 田辺新一、木村建一：蒸し暑さの限界 日本建築学会環境工学委員会
熱小委員会第18回熱シンポジウム p-7
- [7] 新田義孝：省エネルギーと遠赤外線の利用 遠赤外線協会会報
vol. 6, No. 2, P1(1995)
- [8] 宮永俊之、中野幸夫：放射冷房とその快適性の調査 電力中央研究所研究報告
狛江研究所 No. T91064 (平成4年3月)

(森田政明)

mg	ミクロン	可視線			赤外線	
		0.40	0.55	0.75	1.0	1.4
0	表皮	45%	20%	30%	30%	72%
0.5	真皮	55%	75%	40%	48%	20%
2	皮下組織		5%	25%	22%	8%
2.5	深部組織			5%		

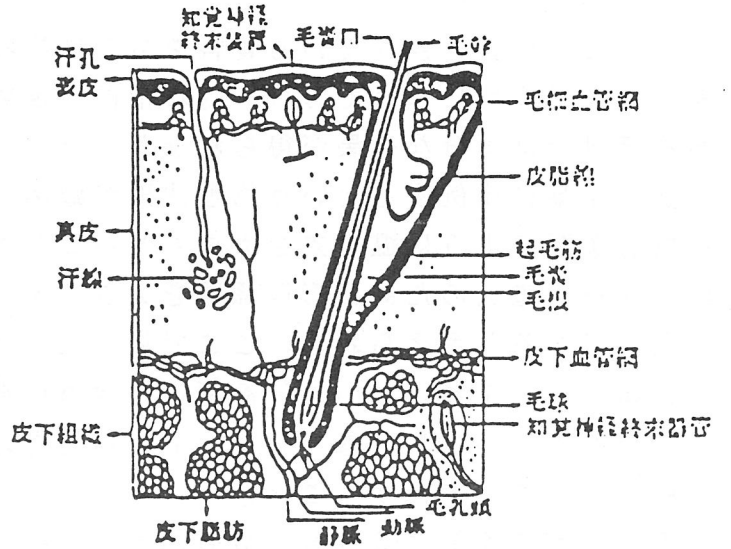


図 3 - 3 - 1 人体皮膚の断面模式図

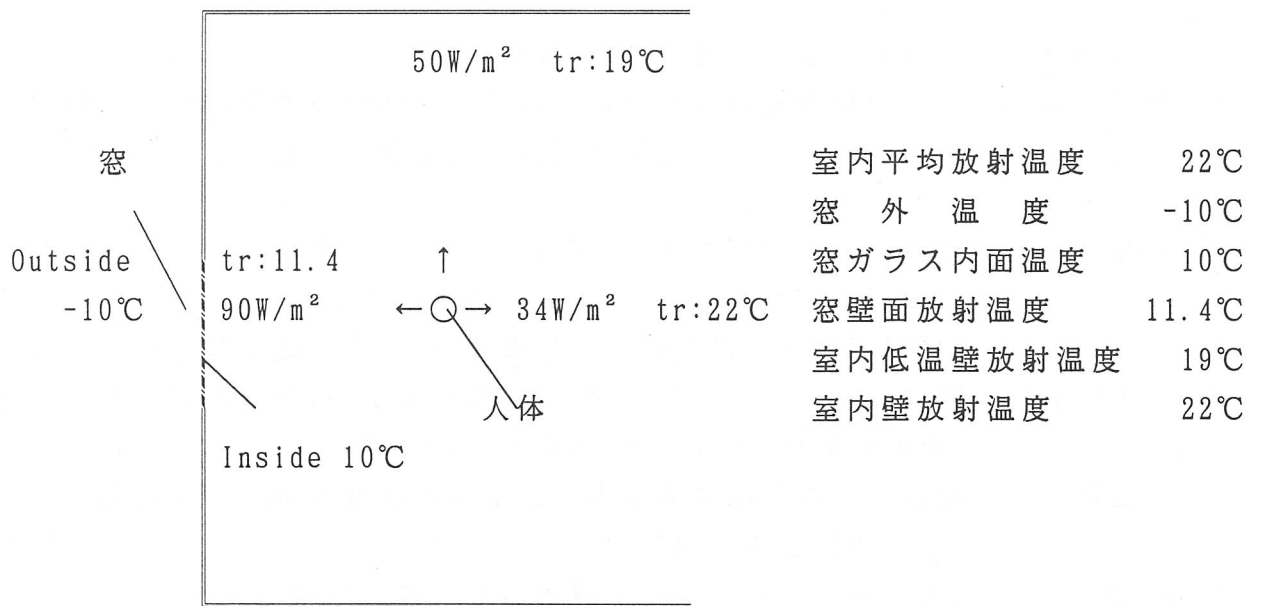


図 3 - 3 - 2 室内放射環境の定量評価の例

3.4 温感[1]-[3]

3.4.1 はじめに

赤外放射を暖房に使用する技術はすでに大古の昔から利用されてきた。その効用については理論的にも実験的にも確立されている。特にFanger氏による研究とISO-7730規格に定めるようにPMVによる評価方法は現在では最も広く採用されている。

・放射暖房については、局部暖房と全般暖房について考えられる。いずれも皮膚表面の受熱放射照度が直接関与する。そのメカニズムはちょうど冷感の場合と反対になる。皮膚表面が放射パワーを吸収すると、波長によって若干の差異があるが表面近傍の異なった深さの組織内で熱に変換される。この熱による組織の温度上昇が神経乳頭を刺激し温感を生じる。また組織の温度上昇が組織の膨張をもたらし、血流の増加がおこり、温度上昇した組織中を通過した血流により全身の温暖感に波及する。温感を担当する温感乳頭の数冷感の神経乳頭数の数分の1程度と少ない。また温感乳頭数は身体の部位によって異なり、指頭部・頬部に多く、背中・ふくらはぎは少ない。また、同一の放射照度でも照射面積、照射時間によって温熱感覚が異なることが明らかになっている。

放射暖房の有利な点は、放射源の温度を高くすることができることと、光学的方法を用いて反射・集光の技術が使用できることである。放射源の温度は現在実用化されている材料では3,000Kまで容易に使用できる。これは、さきに述べた放射冷房の場合は低温にできる限界が絶対零度までであり、温度差が最大310℃が限度となるのに比べ温度で10倍、放射パワーで10,000倍になる。これは放射暖房の場合は小面積の放射源から人体に与える放射パワーを適切に調節できることを意味する。また光学反射理論、レンズによる焦点集光技術が使用できるので放射照度の調節が極めて簡単に出来る。

技術の最も重要な役割は、自然現象の制御であり、放射暖房の目的に合った放射源を適切に選ぶことにより、放射強度（放射照度）、放射配光、放射の波長、放射の照射時間などが自由に調節できることにより最も優れた暖房を可能にするものとする。これに対し放射冷房では、前述のように温度差が大きくとれないため、人体から放出する放射パワーの制御は、温度差による方法よりも人体と周囲環境との間の形態係数で制御するより方法がない。この点が最もおおきいものと考え得る。

人体に対する快適性が議論の対象になるが、現在の「快適さ」は消極的な快適性で、不快でないという条件をもって快適の定義にしている。本当の快適に近づくには、全体として準備出来る平均的に与えられる物理条件のみではなく、個人個人が自由に自分の欲求に合った条件を実現できることであると考えられるなら、放射暖房はその実現に最も近い技術であるといえる。個人が調節する物理条件の範

囲はそれほど広い範囲ではなく、平均的条件の±20%の範囲で十分と考えている。

ここでは赤外放射と温熱感の定量的な取扱いのため、今までに報告されている実験研究のデータのうち筆者の手元にあるものを中心に記述する。

3.4.2 物理的刺激と人体の刺激量(局部放射暖房)

・ J. Stevens の式

$$\Psi = N (\Phi - \Phi_0)^k$$

ここで Ψ : 温暖感としての刺激

Φ : 温暖感としての物理刺激の強さ(W/m²)

Φ_0 : 温熱感としての物理刺激の強さの閾値(W/m²)

k, N : 定数、以下の要素によって決まる

*面積効果(閾値、等価) *時間効果 *部位効果 *波長効果 *放射照度

3.4.3 田中 貢氏の式[4]

・一定の放射照度を片方の手に受けたとき、他の手に同等の温感を生じる空気温度で置換する。これを実効放射温度とする。図3-4-1に放射照度と実効放射温度の関係を示す。

$$t_r = 240 R^{0.7} \quad (^\circ\text{C})$$

ここで t_r : 実効放射温度 (温度上昇:°C)

R : 放射照度 (W/m²)

3.4.4 平均放射温度 (Mean Radiant Temperature) [5]

$$MRT = \Sigma (t_{wi} \cdot A_i) / \Sigma A_i$$

ここで

MRT : 平均放射温度 (°C)

t_{wi} : 室内各面素の温度 (°C)

A_i : 各面素の面積 (m²)

3.4.5 グローブ温度計による実効温度[6]

$$ET = (t + MRT) / 2 \quad (^\circ\text{C})$$

ここで ET : 快適温度放射範囲で19~21°Cが好ましい

$$MRT = t_g + 2.35 \sqrt{V} (t_g - t)$$

t_g : グローブ温度計による指示温度 (°C)

V : 風速(m/s)

t : 空気温度(°C)

3.4.6 暖房時の頭部における許容放射照度（空気調和衛生学会）[6]

室温	12 °Cの時	:29~41	(W/m ²)
	15 °Cの時	:17~29	(W/m ²)
	18 °Cの時	:14~17	(W/m ²)
	20 °Cの時	:12~14	(W/m ²)

3.4.7 作業場での許容放射照度（ACGIH）[7]

軽作業 = WBGTで評価して30 (°C) 以下
中作業 = WBGTで評価して26.7 (°C) 以下
重作業 = WBGTで評価して25 (°C) 以下

ここで 日射のある屋外: $WBGT = 0.7 t' + 0.2 t_g + 0.1 t$

日射のない屋外または屋内: $WBGT = 0.7 t' + 0.3 t_g$

WBGT: Wet Bulb Globe Temperature Index

t' : 湿球温度 (°C)

t_g : グローブ温度 (°C)

t : 乾球温度 (°C)

*湿度10%の増減は温度1°Cの上下に相当する（発汗の多少に影響）

*風速0.5 m/sの増加は乾湿球1.5°Cの上下に相当する

3.4.8 おわりに

・赤外放射による人体の温感は、すでに多くの研究や報告があり、快適な暖房・経済的な採暖など理論的にも実験的にも明確になっているといえる。しかし完成した施設の最も大切な定量評価に使用する計測器に適切なものが手に入らないという難点がある。この測定器があれば気温による温感と放射による温感の分離評価が可能になる。この分野の一層の進展が期待される。

参考文献

- [1] 中山昭雄 編：温熱生理学 理工学社(1981)
- [2] 森田政明：熱放射環境の計量化について，赤外線技術第6号p23(1981)
- [3] 森田政明：放射環境とその評価 Nat., Tech., Report, 27., No. 3. P469(1974)
- [4] 田中貢：輻射熱の暖房効果について 電気学会誌 第51巻. 7号. P403(昭6.7)
- [5] 田辺新一：生活環境における放射環境の人体影響と評価法 日本赤外線学会誌 第2巻. 第2号 P1 (1992.12)
- [6] 空気調和衛生工学会編：空気調和設備の実務の知識 112. オーム社(1972)

(森田政明)

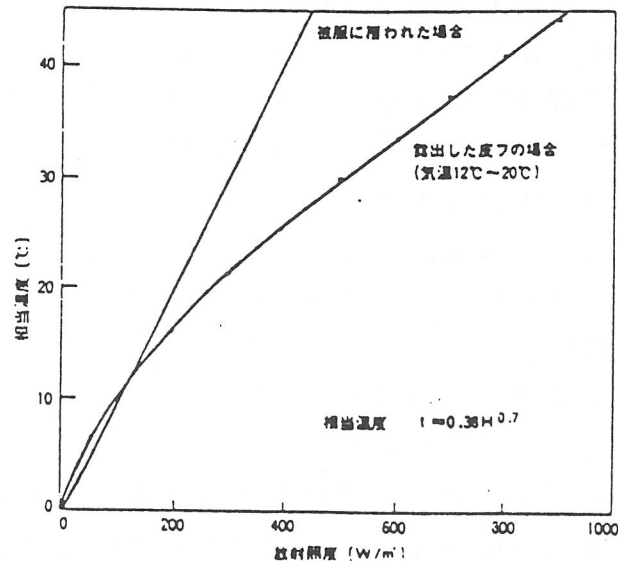


図3-4-1 放射照度と実効温度の関係(田中貢氏のデータ)

3.5 予測計算

室内の平均放射温度、気温、水蒸気圧（湿度）、気流速度、人体の活動量および着衣量の6つの物理量を用いて温熱快適指標の一つである平均予想申告PMV (Predicted Mean Vote) および予想不満足率PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) の計算する。以下にそれぞれの算出式を示す。

$$\begin{aligned} \underline{PMV} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) \\ & - 3.05 \times 10^{-3} \times \{5733 - 6.99(M - W)\} - P_a - 0.42 \times \{(M - W) - 58.15\} \\ & - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - W) - 0.155 I_{cl} [3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 \\ & - (t_r + 273)^4 \} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \end{aligned}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.5 \text{ clo} \end{cases}$$

$$\underline{PPD} = 100 - 95e^{\{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)\}}$$

式で使用される記号の意味を以下に示す。

- M : 人体の代謝量 (W/m²)
- W : 外部仕事 (多くの場合は0) (W/m²)
- I_{cl} : 着衣の熱抵抗 (m²°C/W)
- f_{cl} : 裸体時の皮膚表面積に対する着衣時の露出皮膚表面積の割合
- t_a : 気温 (°C)
- t_r : 平均放射温度 (°C)
- v_{ar} : 気流速度 (m/sec)
- P_a : 水蒸気圧 (Pa)
- h_c : 対流熱伝達係数 (W/m²°C)
- t_{cl} : 着衣の表面温度 (°C)

表3.5.1に人体の代謝量の一例を、表3.5.2に着衣の組み合わせによるの熱抵抗値の一例を示す。

表3.5.1 様々な活動に対する人体の代謝量の一例

Activity	met	W/m ²
Lying down	0.8	47
Seated, quietly	1.0	58
Sedentary activity (office, home, laboratory, school)	1.2	70
Standing, relaxed	1.2	70
Light activity, standing (shopping, laboratory, light industry)	1.6	93
Medium activity, standing (shop assistant, domestic work, machine work)	2.0	117
High activity (heavy machine work, garage work)	3.0	175

表3.5.2 様々な着衣の組み合わせによる熱抵抗値

Clothing combination	clo	m ² C/W
Naked	0	0
Shorts	0.1	0.016
Typical tropical clothing outfit Briefs (underpants), shorts, open neck shirts with short sleeves, light socks, and sandals	0.3	0.047
Light summer clothing Briefs (underpants), long light-weight trousers, open neck shirts with short sleeves, light socks, and shoes	0.5	0.078
Working clothes Underwear, cotton working shirts with long sleeves, working trousers, woolen socks, and shoes	0.8	0.124
Typical indoor winter clothing combination Underwear, shirts with long sleeves, trousers, sweater with long sleeves, heavy socks, and shoes	1.0	0.155
Heavy traditional European business suit Cotton underwear with long legs and sleeves, shirts, suit comprising trousers, jacket and waistcoat (US vest), woolen socks, and heavy shoes	1.5	0.233

(参考文献) Olesen, B. W., Thermal Comfort, B&K Technical Review, No.2, 1982.

(宮永俊之)

4. 放射冷暖房の方式と実施例

4. 1 放射冷暖房方式の分類

4.1.1 放射暖房方式

放射暖房方式は、室内の床・壁・天井などを直接加熱して放熱体としたものや、壁や天井に加熱した鋼板パネルなどを取り付けて放熱体とし、これらの放熱体から放射される熱放射によって暖かさを感じさせる暖房方式である。床を加熱する場合を床暖房方式、天井を加熱する場合を天井暖房方式ともいわれ、加熱面をパネルということからパネルヒーティング方式とも呼ばれる。

(1) パネル表面温度による分類

①低温方式 パネル表面温度を45℃程度以下に保つもので、パネル内に配管コイルを埋設し、これに温水などの熱媒を通す。パネル面としては床・壁・天井が利用できるが、わが国では床パネルの利用が多い。快適性や安全性の観点から、床の表面温度は30℃以下、天井の場合には天井高にもよるが45℃程度まで許容される[1]。熱媒としては、温水のほかに電熱や温風が用いられる。

②中温方式 ヨーロッパで広く用いられている暖房方式で、放熱器としてパネルラジエータ[2]が壁に取り付けられる。パネル材質は鋼あるいはアルミニウム製で、60～80℃程度の温水が通され、表面温度は50～70℃程度である。

③高温方式 鋼板に放熱管を溶接などで固定し、これに100～200℃の高温水や蒸気を通してパネル表面温度を百数十度の保ち、これから放出される放射熱により、直接、あるいは床面や壁面をも加熱し二次的に人体を暖める方式である[3]。天井の高い大型機械工場、体育館、倉庫などに採用されている。

④赤外線方式 燃焼ガスや電熱を用いてパネル表面を800～1000℃程度に赤熱し、そこから発する赤外線を直接人体に放射して暖房効果が得られるようにしたものであり、工場、倉庫の暖房のほかに、建物入口や屋外などの局所暖房に利用されている[4]。また、この種の暖房方式として近年、排気筒に遠赤外線放射塗料を塗布し、これを放熱体として用いる燃焼排ガスを利用した暖房機が開発され、体育館や工場などで広く用いられている。放射体の表面温度は200～400℃程度である[5]。

(2) パネルの位置による分類

①天井パネル方式 天井の建築構造体内にコイルを埋設したり、二重天井用パネル裏側にパイプをコイルを取り付け、あるいは高温方式や赤外線方式のようにユニット型のパネルを天井から吊るすこともある。

②床パネル方式 建物の床構造体内にパイプを埋設したり、ユニット型パネルを敷設するような設備型から、電熱カーペットのように床に敷く簡易なものまでである。

③壁パネル方式 わが国では、建物の壁構造体内にパイプを埋設する方式はほとんど採用されていない。一般には、窓面からのコールドドラフトを防止する目的から、パネルラジエータを窓下壁面に取り付けて用いるのがほとんどである。また、工場や体育館などでは、赤外線方式の暖房機を壁面に取り付けるケースもみられる。

以上、現在一般に用いられる放射暖房方式（暖房機器を含む）について、パネルの表面温度と取付け位置の関係で整理したものを、表4.1.1にまとめて示す。

4.1.2 放射冷房方式

放射冷房方式は、天井パネルあるいは床パネルに冷水を通して冷房する方式であり、結露防止の面からパネル表面温度は室内露点温度より2℃以上高く制御して顕熱のみを処理する。このため、潜熱負荷および外気負荷は別途ダクト式冷房システムで処理する必要がある、一般には暖房も兼ねた空気式空調システムとの併用方式となる[6]。なお、パーソナル空調用として、熱電素子を利用した放射パネルによるスポット冷房などが試みられている[7]。

参考文献

- 1) 坊垣和明：体感に及ぼす熱放射の影響，空気調和・衛生工学，59-4，1985，pp25-31
- 2) J I S A 4 0 0 4 -1995 暖房用自然対流・放射形放熱器
- 3) 空気調和・衛生工学便覧（第11版）第Ⅱ巻，空気調和・衛生工学会，1989，ppⅡ 127-128
- 4) 水野末雄：ガス赤外線バーナによる暖房，燃料及燃焼，36-9，1969，pp9-16
- 5) 加藤正顕：灯油，ガスだき遠赤外線ヒーター，燃料協会誌，69-6，1990，pp413-423
- 6) 齊藤正信：天井放射空調方式の特長と実施例，空気調和・衛生工学，59-4，1985，pp59-67
- 7) 田中英夫：パーソナル空調の種類と特徴，空気調和・衛生工学，65-7，1991，pp13-18

（富田和彦）

図4.1.1 放射暖房方式（機器）の分類

位置	温度			高
	低温方式	中温方式	高温方式	赤外線方式
天井	天井暖房		高温放射パネル	ガスだき遠赤外線暖房装置 シュバング型赤外線放射暖房器
壁	壁暖房	パネルラジエータ ペチカ		
床	床暖房			

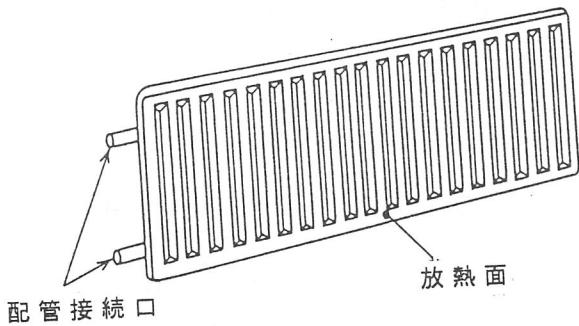


図4.1.1 パネルラジエータ [2]

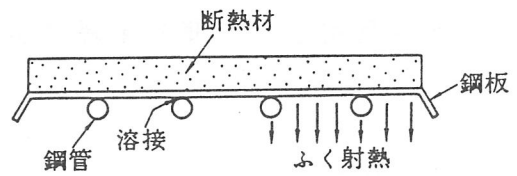


図4.1.2 高温放射パネル [3]

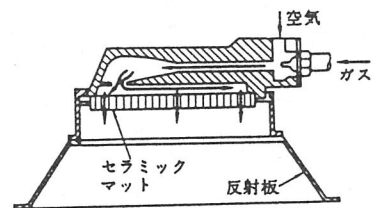


図4.1.3 シュバング型赤外線放射暖房器 [4]

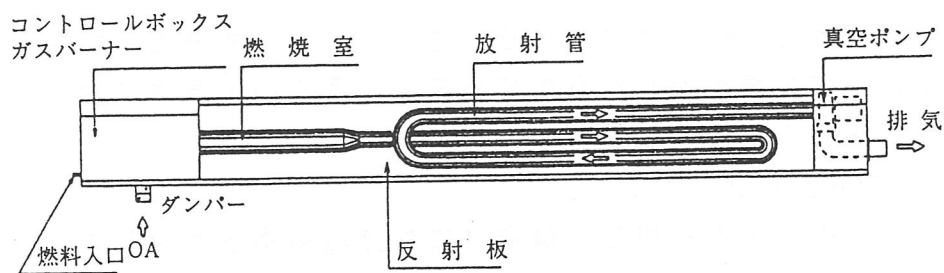


図4.1.4 ガスだき遠赤外線暖房装置 [5]

4. 2 床暖房

4.2.1 床暖房の種類と構造[1]

(1) 床暖房の種類

床暖房は、建物に組み込む「設備型」と既存の床の上に敷く「簡易型」に大別される。設備型は、一般建築物の床構造に収めるタイプであり、新築時に敷設されるケースが多い。簡易型は、床上に上敷として使用され、既存住宅で容易に使用できるが、機能としては補助暖房の要素が強い。

図4.2.1に示すように、設備型については「温水式」と「電気式」に分かれ、さらに温水式には「埋込方式」「根太間設置方式」「根太上設置方式」が、電気式には「埋設方式」「パネル方式」「敷込方式」がある。

簡易型についても設備型と同様、「温水式」と「電気式」に分かれ、ストーブの排熱を利用した「簡易床暖房装置」[2]と「電気カーペット」がそれぞれ該当する。

(2) 床暖房の構造

温水式床暖房について構造的に分類すると、次の4種の方式が広く採用されている。

①埋込方式（図4.2.2）

直接、床面に埋設する方式でコンクリートスラブの上に断熱材、溶接金網、または配管突起をもうけた断熱材を設置し、その上に温水循環パイプを現地工事で配管し、コンクリートを打ち、床仕上げ材を施す方式である。

②根太間設置方式（図4.2.3）

放熱部となる床暖房パネルを床下の根太と根太間に設置する方式である。パネル一体型と放熱部の温水パイプ・放熱板などの主要部品を現場で組み立てるタイプがある。

③根太上設置方式（図4.2.4）

(イ)ハードタイプ

放熱部寸法を畳サイズに合わせ、温水パイプ・放熱板・断熱材などを一枚のパネルにして工場生産したものである。パネルの大きさについては統一した規格として決められている[3]。

(ロ)ソフトタイプ

パイプに樹脂管を採用し、構造材にも発泡樹脂を使用したソフト温水マットとしたもので、ハードタイプと同じように設置できる。

(ハ)ゴムチップタイプ[4]

構造体にゴムチップマットを使用するもので、温水パイプを組み入れた畳サイズのパネル方式と、パイプ溝の入ったゴムチップマットを現地で敷き詰め、溝の中に樹脂パイプを敷設する組立方式がある。このゴムチップパネルは、廃タイヤと建築廃材を破碎し、樹脂で結合させてつくられるリサイクル製品である。

4.2.2 床暖房の設計・制御

(1) 設計上の留意点

床暖房の性格上、加熱面である床面は常に人体の一部と接触している可能性がある。このことから、加熱面の温度には上限値が設けられており、日本床暖房工業会では上限温度を30℃としている[1]。従って、床温30℃の際の放熱量より暖房負荷の小さい建物が条件となり、これより負荷の大きい建物の場合はパネルラジエータなどの放熱器を併用する必要がある。

(2) 床暖房の制御

床暖房では床面からの放熱量は、図4.2.5に示すように、建物の断熱状態つまり周囲の壁面温度（UMRT）がわかれば、床温により一義的に決まる。いい換えれば、床温を制御することが室温の制御につながる。

室温を制御する方法としては、①床温を直接検出して温水循環を発停する方法、②温水温度を制御して間接的に制御する方法、の二通りが用いられるが、どちらも一長一短がある。床暖房は一般に応答が遅く、日射の変化に対応して加熱量を変動することは難しい。そこで、床暖房による加熱量は床面に冷たさを感じない床温度にとどめ、主暖房をパネルラジエータなどによって行い、これの加熱量を制御することで室温をコントロールする暖房方法が快適性、安全性の面から推奨される。

4.2.4 実施例[5]

一般住宅を用いた床暖房の室温分布測定の実施例を以下に紹介する。

測定対象は、札幌市内の新築住宅の1階の居間（12畳）である（図4.2.6）。居間の暖房は、床暖房とパネルラジエータの併用暖房方式を用いており、床暖房としてはゴムチップ床暖房パネル9枚（敷設率：75%）による根太上設置方式を採用、床面は12mm木質フロア仕上げとなっている。

温度測定に際し、運転条件として床暖房単独、パネルラジエータ単独、床暖房とパネルラジエータの併用の3種類について行っている（表4.2.1）。

3種の暖房方式を比較した室内中央での垂直温度分布を図4.2.7に示す。最大温

度差をみると、床暖房が2℃と最も小さく、次に床暖房+パネルラジエータ併用が約3℃、続いてパネルラジエータが4℃となっている。図4.2.8は、室内中央断面の温度分布を示す等温線図である。床暖房の場合、窓下付近が周囲の気温より低くなっているのが、これは窓面からのコールドドラフトによるためである。これに対し、パネルラジエータ単独および床暖房との併用運転では、このコールドドラフトの問題が解消されているのがわかる。従って、これら3種の暖房方式のなかでは床暖房とパネルラジエータの併用が最も優れた暖房方式であるといえる。

- 1) 日本床暖房工業会：温水床暖房システム 設計・施工ハンドブック, 1993
- 2) 富田和彦、三上正樹：排熱利用簡易床暖房システムに関する調査, 北海道立工業試験場報告, No.285, 1986, pp115-122
- 3) 財団法人ベターリビング：冷・暖房システム温水床暖房ユニット性能試験方法, 1994
- 4) 富田和彦他：ゴムチップ温水床暖房パネルの開発, 北海道立工業試験場報告, No. 287, 1988, pp101-113
- 5) 富田和彦他：ゴムチップ温水床パネルの工場生産化, 北海道立工業試験場 共同研究報告書, No.16, 1989

(富田和彦)

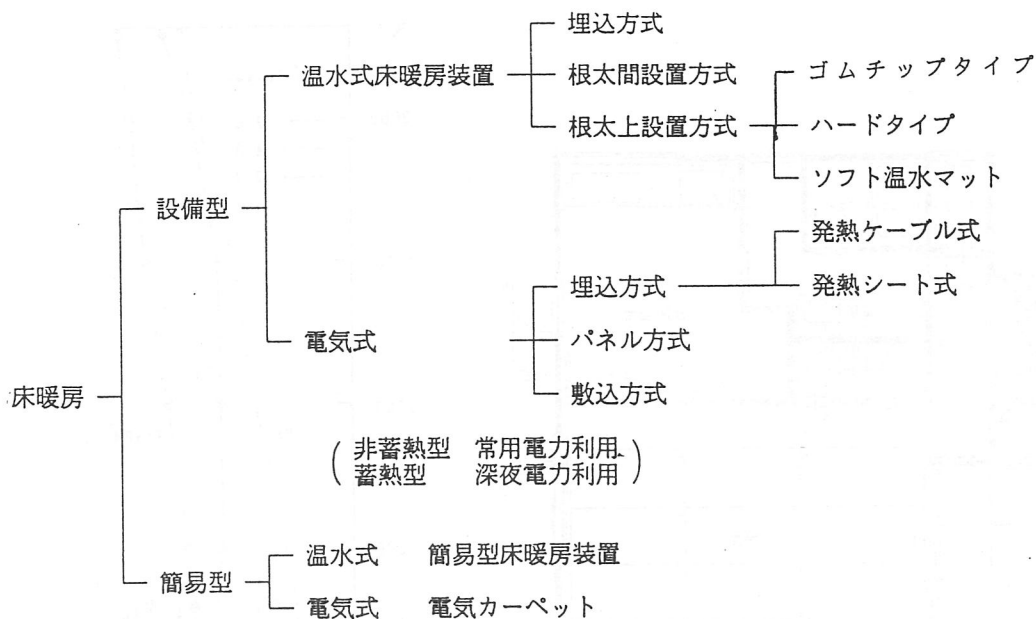


図4.2.1 床暖房の種類[1]

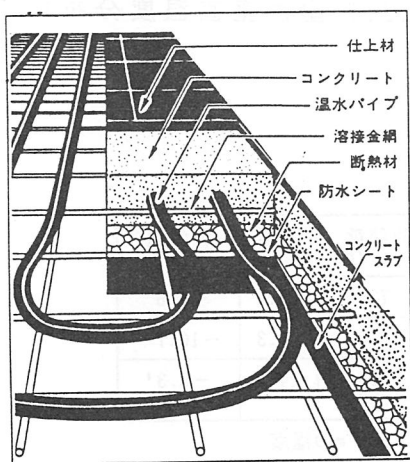


図4.2.2 埋込方式[1]

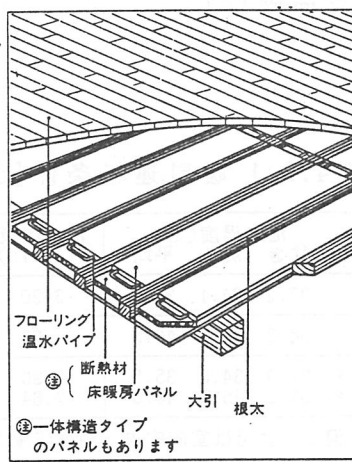


図4.2.3 根太間設置方式

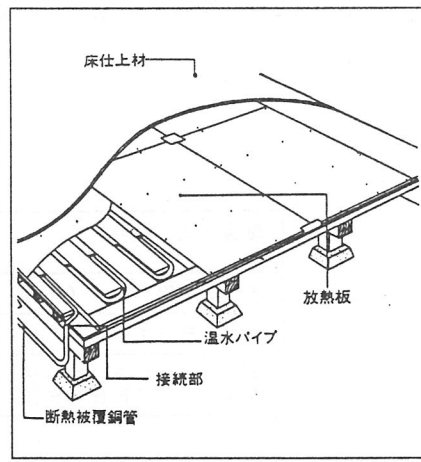


図4.2.4 根太上設置方式

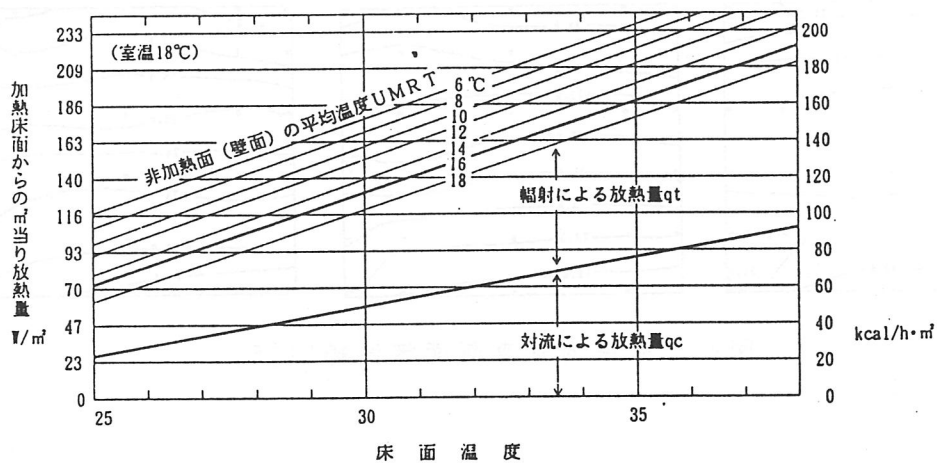


図4.2.5 床表面からの放熱量[1]

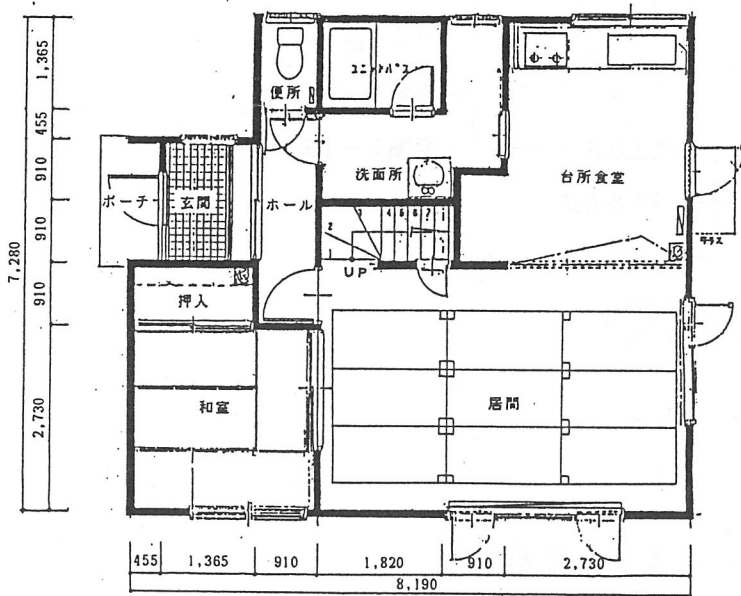


図4.2.6 実験住宅の1階平面図[5]

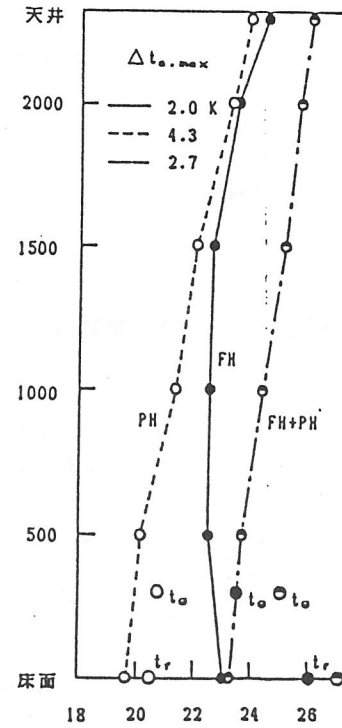


図4.2.7 室内垂直温度分布[5]

表4.2.1 暖房運転条件[5]

暖房方式(記号)	温水温度(°C)			温水流量 (l/min)	放熱量 (kcal/h)	室温 (°C)	外気温 (°C)	
	行き	戻り	平均					
床暖房 (FH)	37.2	34.1	35.6	3.90	725	22.5	-4.6	
パネルラジエータ (PH)	54.2	44.7	49.5	2.30	1310	21.3	-10.7	
床暖, パネルラジエータ 併用 (FH+PH)	F	37.0	34.0	35.5	3.90	700	24.3	-6.3 ^a
	P	52.2	45.7	49.0	2.64	1030		

但し、室温は室内中央(測定位置①)床上1mの温度

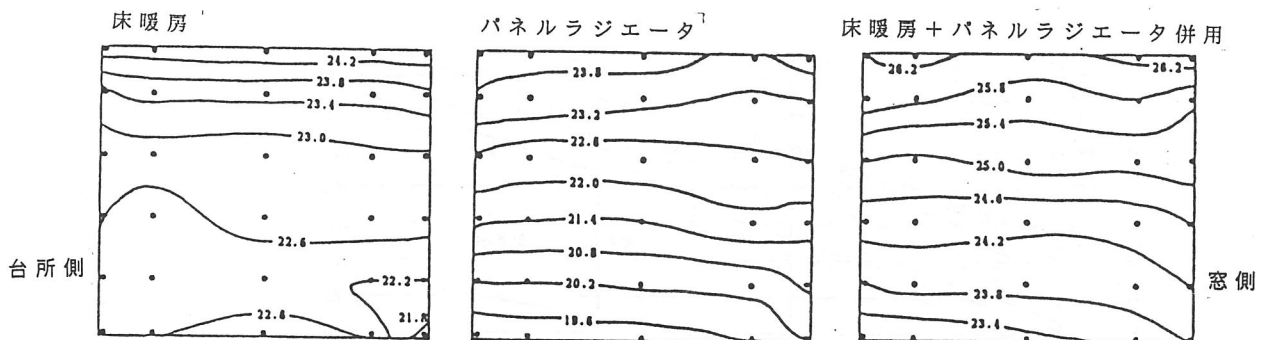


図4.2.8 室内垂直断面等温線図[5]

4. 放射冷暖房の方式と実施例

4. 3 部分暖房

4. 3. 1 部分暖房の種類

部分暖房には、身近な個人用暖房器として、古くからストーブ、こたつ類が使用されている。このストーブの加熱エネルギー源には電気、ガス、石油、固形燃料が主に使用されているが部分暖房には取扱いが簡便でクリーンな電気エネルギーを利用したものが多い。ここでは、電気エネルギーを使用した部分暖房方式と一実施例について述べる。この他に、暖房の範疇には入らないが健康維持、疲労回復のために赤外放射を利用した赤外線治療器、遠赤外線サウナがある。

4. 3. 2 部分暖房に使用される赤外放射源

(1) ストーブ用放射源 ^{1) 2) 3) 4) 5)}

初期の電気ストーブには磁器製ボビンにニクロム線巻いた温度約800Kのものが使われたがその後、ニクロム線をコイル状に巻き石英管内に挿入した石英管ヒータ（発熱体の温度1000～1200K）が使用されるようになった。

石英管ヒータはニクロム線の巻線加工にも花巻状に巻く工夫がされ、石英管とニクロム線の接触を点接触とし、コイル温度上昇と均一化を図り、石英管の表面にボロシロキサン等のセラミック皮膜を設け、遠赤外領域の放射強度を改善したものがある。その一例を図4. 3. 1に発熱体の外観及び断面図を図4. 3. 2に示す。

図4. 3. 3は風呂用ストーブの一例で浴室の天井に取り付けて使用するもので発熱体には、タングステンフィラメントを石英バルブ内にアルゴンガスと共に封止した赤外線ランプ400W2本が使われており、タングステンフィラメントの温度は約2400Kで使用されている。ニクロム線ヒータに比べ立ち上がりや速いことと、高放射照度を得られ、高効率反射板と組み合わせたものは天井からのスポット暖房に適している。

ストーブのなかには椅子生活に合わせた縦型ストーブが使用されるようになった。発熱体には、花巻加工したタングステンフィラメントを石英バルブ内にアルゴンガスと共に封止した赤外線ランプ470W2本が使われている。この発熱体は垂直に保持して使用するのでフィラメントが自重で垂れるのを防止するための内側に突起状のディンプルを設けてあり、タングステンフィラメントの温度は約1400Kである。ストーブの背面には小型のファンが組み込まれ、反射板後部を冷却すると共に、温まった空気を全面に温風として吹き出し、暖房に使用する工夫がされている。1m前面の放射電力密度は40mW/cm²に達する。そのストーブの一例を図4. 3. 4に示し、発熱体を図4. 3. 5に示す。

最近では、人体、衣服に吸収のよい遠赤外放射面状発熱体を用いたストーブやセラミック皮膜を施した高放射率化シーズヒータを用いたストーブも普及している。その一例を図4. 3. 6に示す。

(2) こたつ用放射源 ^{6) 7)}

初期のこたつには、磁器製のボビンにニクロム線を巻いたものが用いられたがその後耐熱ガラス管を環状に曲げ、コイル状に巻いたニクロム線を挿入した発熱体を使用された。1960年速熱性に優れた赤色レモン形バルブにタングステンフィラメントを封止した300W赤外線ランプが使用され、速熱性と赤色光の視覚効果が特徴であった。間もなく温度特性を改善した400Wと80Wのダブルフィラメント赤外線ランプにかわった。その後、発熱部を薄くして、こたつ内部を広く使用するための発熱体の小型化がされ、こたつ内の温度分布を均一にするのと、発熱部の過熱を防ぐため、小型ファンを設け、発熱体は石英バルブにタングステンフィラメントをアルゴンガスと共に封止したフィラメント温度約2400Kの500W赤外線ランプが使用されるようになった。

遠赤外線の人体、衣服への吸収がよく、温熱効果の高いことから、遠赤外線面状発熱体を使用した槽こたつも開発された。

その後、石英バルブ表面に貴金属触媒を担持したセラミック被覆層を設け、人体、衣服に吸収のよい遠赤外領域の放射照度を強くすると共に、こたつ内の悪臭を浄化する触媒被覆層付赤外線ランプが使用されている。その一例を図4. 3. 7に示す。

最近では、槽の下面に表面温度が約90℃の遠赤外線面状ヒーター又は、環状石英バルブ赤外線ランプを設け、布団を掛けずに使用出来る布団レスこたつが開発されている。

(3) 赤外線治療器用放射源 ⁸⁾

赤外線電球を赤外放射源に使用した赤外線治療器は筋肉痛、神経痛、疲労回復等の温熱療法として一般に愛用されている。従来から使用されている赤外線治療器は、分光放射強度の最大点が1.1μmの近赤外領域を放射する赤外線電球が使用されたが最近、人体の皮膚組織に吸収のよい発熱体の温度約700Kの遠赤外線発熱体を使用した遠赤外線治療器が使用されるようになった。その発熱体の一例を図4. 3. 8に示す。

赤外線電球方式のものも石英バルブを使用した赤外線ランプが用いられるようになり、石英バルブ表面にセラミック被覆層を設け、遠赤外領域の放射強度を増加させ、人体への温熱効果を改善したものが使用されている。その一例を図4. 3. 9に示す。図4. 3. 10はセラミック被覆層付赤外線ランプを示し、図

4. 3. 1 1はセラミック被覆層の有無における赤外線分光放射特性の比較図である。

(4) サウナ用放射源⁹⁾

遠赤外放射を利用した低温サウナには放射源として遠赤外線発熱体を使用されている。この低温サウナは身体への負担が高温サウナに比べ比較的軽く約60℃の温度で発汗作用を促すことが出来るので家庭用サウナとして普及している。

4. 3. 3 おわりに

赤外放射は空気を暖めず、照射体を直接加熱することの出来る特徴があり、赤外放射のスポット暖房への応用は省エネルギー高効率手段である。今後生活空間の快適環境造りに積極的に利用されることが望まれる。

参考文献

- 1) 松井松長：赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長依存性 赤外線技術 第12号(1987)
- 2) 小林正博：生体の分光放射特性 JIRA Report Vol.3, No.5 No.7 (1992)
- 3) 牧 正雄 他：赤外線輻射コーティング Nat. Tech. Rep., Vol. 35. No. 5(1989)
- 4) 森田政明：熱放射環境評価 赤外線技術 第6号 (1981)
- 5) 西野 敦：遠赤外線材料とその応用展開 エネルギー資源 Vol. 10, No. 5 (1989)
- 6) 河本康太郎：遠赤外放射体 燃料協会誌 第69巻第6号(1990)
- 7) 星川水哉 他：遠赤外線ふく射暖房 東芝レビュー 36巻12号(1981)
- 8) Th. J. J. A. Manders, The "Infraphil", an apparatus for infrared therapy, Philips Techn. Rev., Vol. 8, June(1946)
- 9) 菅屋潤壹 他：異なる波長の赤外線の持続照射による体温変化と発汗応答 日生気誌 27(2) (1990)

(吉井嘉寿憲)

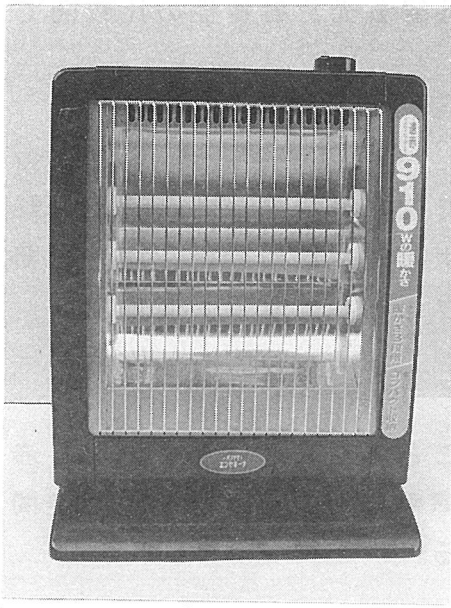


図 4.3.1 横型電気ストーブ

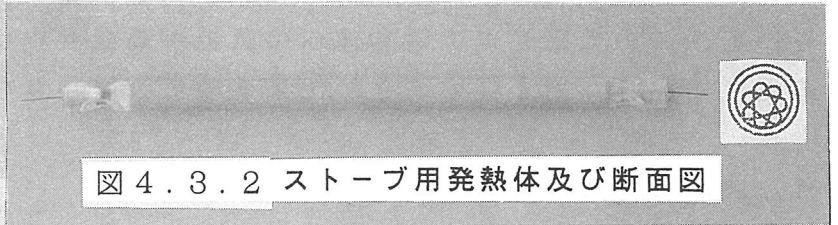


図 4.3.2 ストーブ用発熱体及び断面図

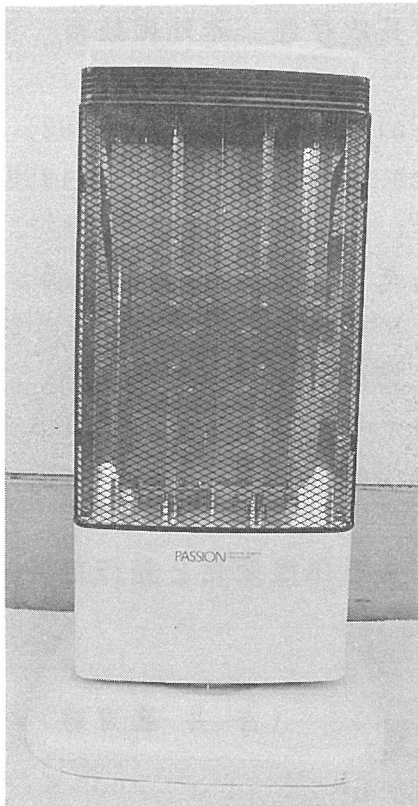


図 4.3.4 ファン付縦型ストーブ

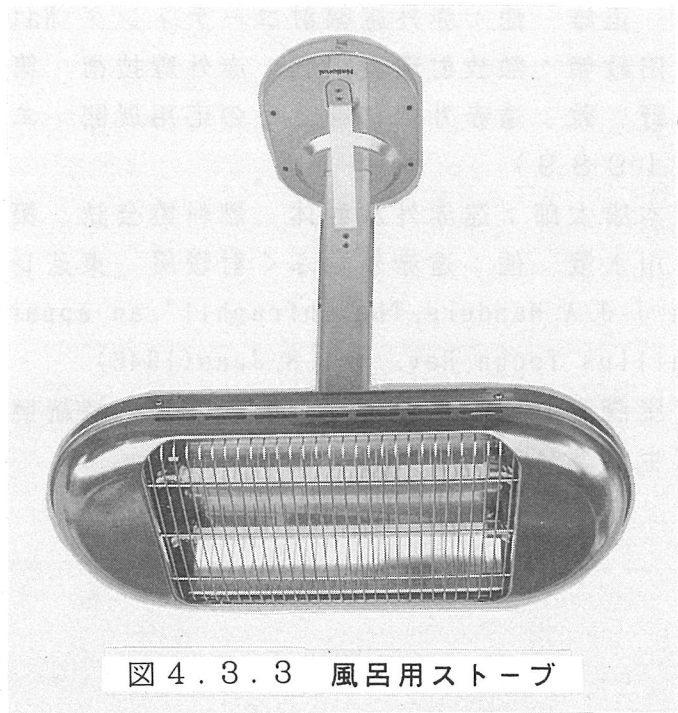


図 4.3.3 風呂用ストーブ

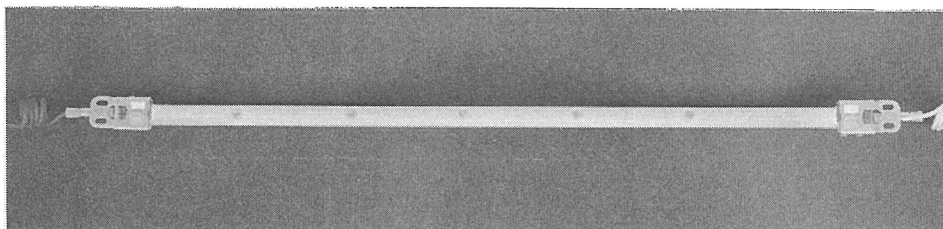


図 4.3.5 縦型ストーブ用発熱体

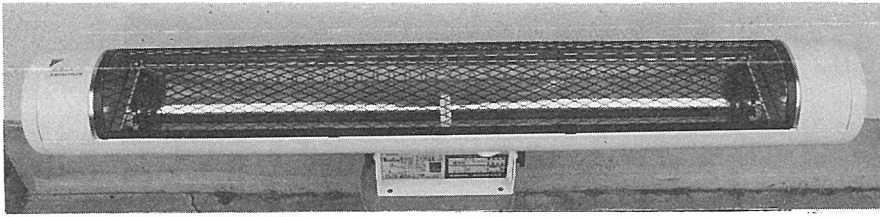


図 4.3.6 シーズヒーター壁掛けストーブ

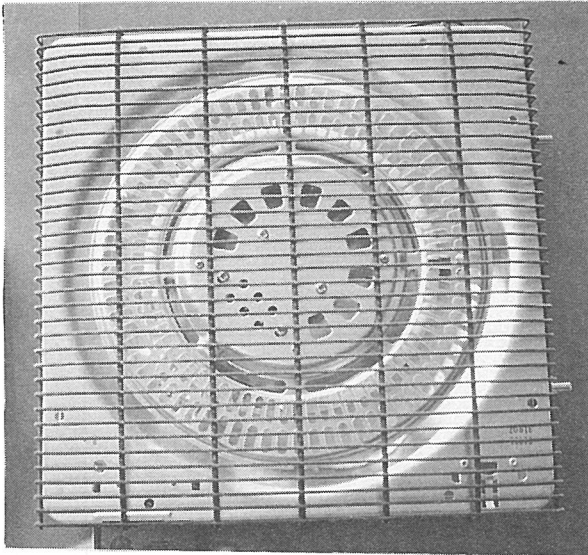


図 4.3.7 こたつ用発熱部

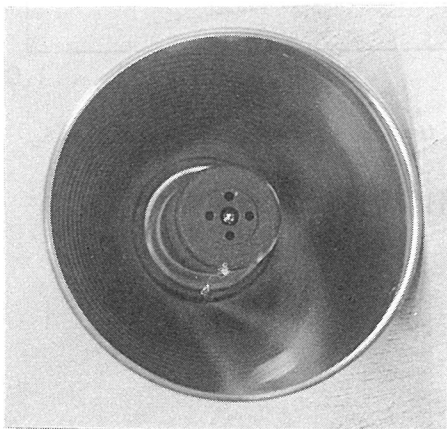


図 4.3.8 遠赤外線発熱体



図 4.3.9 赤外線治療器

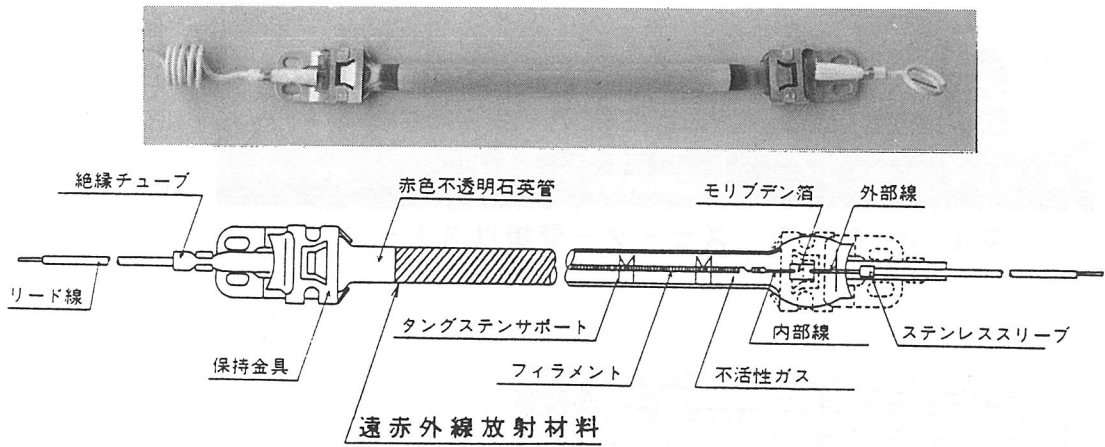


図 4.3.10 セラミック被覆層付赤外線ランプ

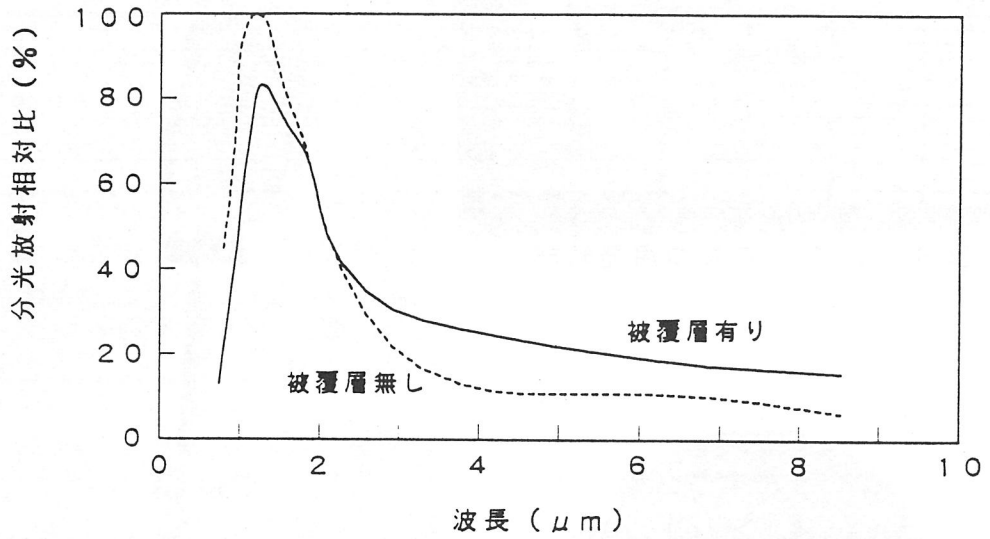


図 4.3.11 赤外線治療器用発熱体の分光放射特性の比較

5. 放射冷暖房の評価法、計測法

5. 1 環境の評価法

5. 1. 1 温熱環境評価要素

一般的な室内における温熱環境の評価要素は、温度、湿度、気流、放射の4つである。これらは、温熱4要素と総称され、物理的な室内環境の測定や評価の対象となる。快適性まで含めた評価には、人体側の2要素、すなわち、代謝量と着衣量が加わり、合計6要素が用いられる。

一般には温度が最も重視されるが、他の要素も人体に大きく影響し、それぞれに季節に応じて適切な範囲が存在する。

実際の熱環境においては、これら相互の関連を考慮しながら、総合として評価する観点が重要である。最近では、このような総合評価の指標として、PMVやSET*が取上げられる機会が増えている。PMV(Predicted Mean Vote:予測平均温感申告)は温冷感を数値化して予測する指標で、デンマークのFangerによって提案されISO(国際標準化機構)の規格に採用されている。SET*は米国のGaggeらの提案した指標で、湿度50%、静穏気流、標準着衣の状態と等しい温熱感を与える室温として表され、ASHRAE(米国冷凍空調技術者協会)の規格になっている。これらの指標では、温熱4要素と人体側2要素の全てを考慮して、環境の快適性を評価することができる。

PMVやSET*も含めて、通常の評価では環境要素の不均一は考慮されない。しかしながら、一般の空間では必ず不均一や変動が存在し、快適性に影響する。したがって、上下温度分布や放射温度の不均一、室温の変動、気流の不均一などにも配慮しなければならない。さらに、最近では、個人差や男女差、年齢への配慮も不可欠な要素となっている。

5. 1. 2 温熱環境評価

温熱環境の評価には、2つの方向がある。一つは、温熱要素毎に基準値を定めて評価する方法であり、もう一つは、総合的な環境評価手法を用いて評価する方法である。個別の要素にもまた総合的にも適切な水準が存在するので、これらを組合わせた評価が望ましいと言えるであろう。

個別の要素に関しては、温熱4要素のうち、温度、湿度、気流について、ビル管法(建築物における衛生的環境確保に関する法律、1971年制定)および建築基準法において、延べ床面積3000㎡以上の建物を対象に、管理の基準が定められている。(表5.1.2-1参照)しかしながら、ここで定められている水準は極めて幅が広く、最低水準を示すという色合いが強く快適性の評価には向かない。これ以外には、室内温熱環境に関する公的な基準や評価手法はない。

そこで、一例として、「POEM-O (Post Occupancy Evaluation Method - Office)」で用いられている温熱環境評価の基準を示しておこう。¹⁾ (表5.1.2-2)「POEM-O」は、熱環境以外にも音・光・空気・空間の評価も行うことができる総合的なオフィス環境の評価手法である。5段階での評価を行い、評価点2から3を現状の標準レベルとして、5を最も良い水準に設定している。

一方、総合的な評価として、PMVとSET*では次のように判断される。PMVは、0の場合に95%以上の人々が快適であり、90%の快適範囲は 0 ± 0.5 である。SET*では、80%以上の人々が快適性を得られる範囲は、 $22.2 \sim 25.6$ ℃ETとなっている。

以上の評価は、温熱要素に不均一がないことを前提としており、不均一等に起因する局部不快に関しては表5.1.2-3のような許容限界が示されている。

5. 1. 3 放射環境の評価

一般的な環境評価では、放射の影響は平均放射温度 (MRT: Mean Radiant Temperature) で表現し評価される。平均放射温度は、全方位に対して放射の影響を平均化して表されているので、放射の方向性や強さは示されない。

放射式の暖房・冷房の場合には、放射の強度や方向性が問題となる。以下、放射源となる部位毎に、放射の影響や評価方法を示す。

5. 1. 3. 1 天井加熱・冷却の影響と評価

人体は、一般に温放射に関して横方向の不均一よりも上下方向の不均一に対してより敏感である。

図5.1.3-1には、天井放射暖房の場合の許容限界を示した。^{2) 3)}天井放射暖房の場合の放射温度差の推奨限界は5Kとされているが、同図の不満足率5%の限界曲線がおおむね5Kの限界と一致している。

頭寒足熱は快適な温度分布であり、天井が冷やされる場合の放射温度差の限界は暖房と比べて大きく、14℃である。しかも、天井冷房の場合には、結露の問題から極端な低温にはできないため、不均一による不快は問題とならないであろう。

5. 1. 3. 2 壁・窓の影響

壁や窓が暖冷房の放射源となることは考えにくい。

図5.1.3-2は、冷たい窓面が不快な放射源とならないための限界を示したものである。²⁾放射パネル冷房の場合の参考になると思われるが、冷房に関しては結露の問題から、天井同様に不均一の不快は問題とならないであろう。

暖房の場合の水平方向の不均一の限界は10Kであり、図5.1.3-2よりやや厳しいが、通常の温水等を熱源とする低温放射パネル暖房では問題とならないで

あろう。ただし、熱源が高温である場合や冷えた窓面との放射温度差が大きい場合などには不均一による不快に留意する注意がある。

放射パネル暖房では、放射の不均一よりも、むしろ接触時の低温火傷の問題の方が重要である。

5. 1. 3. 3 床面の影響と評価

床暖房は、最も一般的な放射型暖房である。

床暖房における床温と室温の推奨範囲については、図5.3.1.1-3に示されている、一般的には直接床に座ったりする機会の多いわが国の床暖房の場合、床表面温の限界は29～30℃程度と考えられている。床暖房に適用される放射温度差による不均一の不快に関する指標はなく、このような表面温度の限界で示される。

床に靴を介して接触する欧米においては、床温は26℃程度を上限とする提案が多い。

冷たい床に対しては、表5.1.3-1に床材別の快適床温を示す。材料の熱伝導率によって快適温度が変わることに留意する必要がある。

参考文献

- 1)室内環境フォーラム編：オフィスの室内環境評価法（POEM-O普及版），ケイブン出版，1994.5.30
- 2)McIntyre,D.A.：Indoor Climate, Applied Science Publishers Ltd., 1980
- 3)Fanger,P.O.,Banhidi,L.,Olesen,B.W.,Langkilde,G.：Comfort Limits for Heated Ceilings, ASHRAE Trans., Vol.86,Part II, 1980
- 4)ISO7730など
- 5)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, 1985.4

(坊垣 和明)

表5.1.2-1 ビル管法等における室内環境基準値

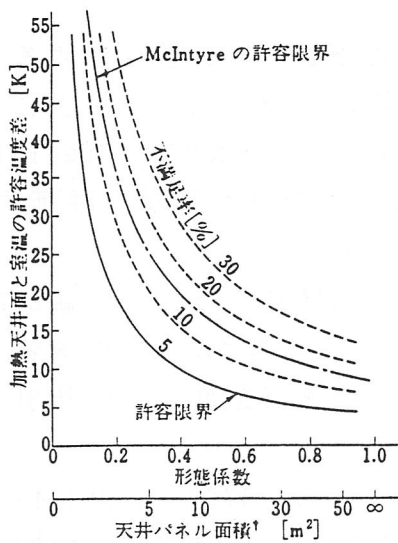
項目	基準値
温度	1. 17℃以上28℃以下 2. 居室内温度を外気温度より低くする場合には、その差を著しくしないこと
相対湿度	40%以上70%以下
気流	0.5 m/s以下

表5.1.2-2 「POEM-O」における評価基準値

評価点		1	2	3	4	5
室温 (℃)	冷房期	>29≥ <21≤	>28≥ <22≤	>27≥ <23≤	>26≥ <24≤	
	中間期	>28≥ <20≤	>27≥ <21≤	>26≥ <22≤	>25≥ <23≤	
	暖房期	>27≥ <19≤	>26≥ <20≤	>25≥ <21≤	>24≥ <22≤	
相対湿度 (%)		>85≥ <15≤	>75≥ <25≤	>65≥ <35≤	>55≥ <45≤	
室内気流速度 (m/s)		>0.45≥	>0.35≥	>0.25≥	>0.15≥	
放射温度 (黒球温-室温) (℃)	冷房期	>4≥	>3≥	>2≥	>1≥	
	中間期	>4≥ <-4≤	>3≥ <-3≤	>2≥ <-2≤	>1≥ <-1≤	
	暖房期	<-4≤	<-3≤	<-2≤	<-1≤	
上下温度差 (℃)		>5≥	>4≥	>3≥	>2≥	
P M V		>2.0≥ <-2.0≤	>1.5≥ <-1.5≤	>1.0≥ <-1.0≤	>0.5≥ <-0.5≤	

表5.1.2-3 不均一等に対する許容限界の例⁴⁾

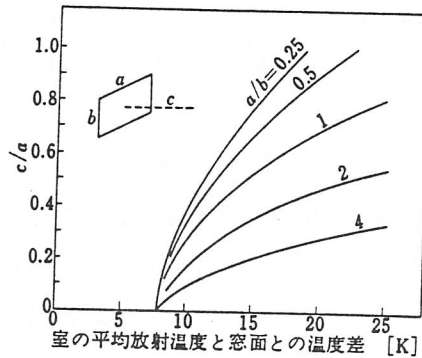
項目	基準値
上下温度差	3℃以下 <くるぶし(0.1m)と頭(1.1m)の温度差>
水平放射温度差	8℃以下 <冷たい窓面など> 10℃以下 <放射暖房>
垂直放射温度差	5℃以下 <天井放射暖房の場合> 14℃以下 <天井冷放射の場合>
室内気流	0.15 m/s以下 (暖房期) 0.25 m/s以下 (冷房期)



注 1 天井高 2.5 m とした場合の加熱天井面パネル面積である。ただし、正方形でパネル中心下 1.9 m に微小水平面があるとする。

床上 0.6 m における微小水平面と加熱天井面との形態係数と天井面と室温の温度差の関係図上における不満足度曲線(Fanger はか)

図 5.1.3-1 天井放射暖房の場合の許容限界



冷却された窓面が不快原因とならない窓までの最短距離と窓の大きさおよび MRT と窓面との温度差の関係

図 5.3.1-2 窓面冷放射の許容限界

表 5.1.3-1 床材質による快適床温の比較

床 材 (下地はコンクリート)	DIN 52614 による熱損失 [kJ/m²]		快 適 床 温 [°C]		不満足率が 15% 以下の範囲
	1 min	10 min	1 min	10 min	
木 ^{a)}	38	134	26.5	25.5	23~28
コンクリート ^{b)}	50	293	28.5	27	26~28.5
ウールカーペット ^{b)}	20	91	21	24.5	21~28
コルク(5 mm) ^{c)}	26	145	24	26	23~28
ビニルアスベスト ^{b)}	80	485	30	28.5	27.5~29
リノリウム[2.5 mm ^{c)} , 木下地]	46	176	28	26	24~28
リノリウム[2.5 mm ^{c)} , コンクリート下地]	45	296	28	27	26~28.5
大理石 ^{b)}	75	511	30	29	28~29.5

注 a) Olesen(1977) b) Wäänänen と Veijalainen(1971) c) Cammer(1961)

5.2 環境の計測法

前節では、放射冷暖房の理論に基づいて設計されたシステムを評価する方法及びシステムについて紹介した。ここでは、放射環境の指標として使用されているPMV (Predicted Mean Vote: 平均予想申告値) [1]、あるいはPPD (Predicted Percentage Dissatisfied: 予想不満足率) の計測法、及び放射環境を評価するのに必要な各種パラメータの計測法とセンサについて紹介する。

PMVは7段階 (-3 (寒い) ~ +3 (暑い)) の温熱感尺度により人の主観的評価の平均を予想する指標で、PMV=0を理想的温熱環境とする。なお、PMVは国際規格で認定されている (ISO-7730) [2]。PMVは気温、湿度、気流速度、平均放射温度、人体の着衣量、人体の代謝量から次式により計算される。

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0.303 e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times \{5733 - 6.99(M - W) - \\ & P a\} - 0.42 \times \{(M - W) - 58.15\} - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P a) - 0.0014 M (34 - t a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t a)] \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

$$\text{PPD} = 100 - 95 \times \exp\{- (0.03353 \times \text{PMV}^4 + 0.2179 \times \text{PMV}^2)\}$$

(5.2.2)

但し、

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} [3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t a)]$$

また、

$$2.38(t_{cl} - t a)^{0.25} > 12.1 v a^{1/2} \text{の時、}$$

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t a)^{0.25}$$

$$2.38(t_{cl} - t a)^{0.25} < 12.1 v a^{1/2} \text{の時、}$$

$$h_c = 12.1 v a^{1/2}$$

$$I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W} \text{の時、}$$

$$f_{cl} = 1.00 + 1.290 I_{cl}$$

$$I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W} \text{の時、}$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl}$$

ここで、

M : 人体の代謝量 (W/m²)

W : 外部仕事量 (W/m²)

t_r : 平均放射温度 (°C)

t_a : 空気温度 (°C)

t_{cl} : 衣服の表面温度 (°C)

P_a : 水蒸気分圧 (Pa)

v_a : 相対気流速度 (m/s)

h_c : 対流熱伝達率 (W/m²·°C)

I_{cl} : 衣服の熱抵抗 (m²·°C/W)

f_{cl} : 裸体時の皮膚表面積に対する着衣時の露出皮膚表面積の割合

一般に、人体の着衣量と代謝量は予め作業の種類と季節を考慮して推定してお

く。PMVは以下の方法の一つにより決定される。

- a) コンピュータにより (5.2.1) 式から計算する。
- b) センサを統合したシステム (PMV測定装置、快適指数測定装置) により直接測定する。
- c) ISO-7730の付録にあるPMVの表から決定する。

どの方法を採用するにしても、PMVを決定するための気温、湿度、気流速度、平均放射温度を測定する必要がある。研究・開発レベルでは、a)の方法により、種々のセンサを単独あるいは組み合わせ、コンピュータ制御及びデータ処理を行える独自の放射環境評価システムを構築している所も多い。しかし、一般には、マイクロプロセッサの普及により、種々のセンサを統合しマイクロプロセッサと組み合わせたb)のシステムが「コンフォートメータ」等の名称で開発され、使用されている。

5.2.1 平均放射温度 (Mean Radiant Temperature, t_r)

放射環境を評価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、人体全体に周囲固体面から入射する放射パワー密度と同量の放射パワー密度を放射する仮想的な等温黒体の温度と定義されており、次式で表わされる。

$$t_r = \{ \sum A_j t_{p,j}^4 / (\sum A_j) \}^{1/4} \quad (5.2.3)$$

ここで、 $t_{p,j}$ は面放射温度であり、次式で表わされる。

$$t_{p,j} = \{ \sum C_{ij} t_i^4 / (\epsilon_j A_j) \}^{1/4} \quad (5.2.4)$$

但し、 C_{ij} はi-j面間の直接交換面積、 t_i はi面の温度、 A_j はj面の面積、 ϵ_j はj面の平均放射率である。面放射温度は人体の局所的な放射環境を表わす指標である。

また、人体は従来解析では、微小球、微小立方体、円筒として表現されてきたが、近年人体の局所的な温熱環境を詳細に評価するために、より実際の人体に近い分割モデル [3] が提案されている。

実際に、平均放射温度を算出する方法としては、①周囲壁面温度を測定し形態係数を算出して求める方法、②微小面放射温度等により求める方法、及び③グローブ温度による方法がある。①と②の方法は、建物の設計や研究室レベルで使用されるもので、詳細な研究がなされているがあまり実用的ではない。最も広く利用されているのは③の方法である。他の方法が複雑な形態係数などの計算を必要とするのに対し、この方法はグローブ温度と空気温度を測定するだけで、次式により平均放射温度を求められるからである。

$$t_r = t_g + 2.35 v a^{1/2} (t_g - t_a) \quad (5.2.5)$$

ここで、 t_g はグローブ温度計による指示温度、 $v a$ は気流速度、 t_a は空気温度を表わす。(5.2.5) 式中の係数2.35の値は、対流熱伝達率の推定時にどのような計

算式を用いたかによるので、他の値が使用されることがある。

グローブ温度計（黒球温度計ともいう）は、一般に、直径15cm程度の中空黒塗り銅球でできており、周囲壁面からの放射、周囲空気からの対流及び熱伝導熱を取り込み、グローブ内に設置されたサーモパイルやサーミスタなどの温度センサにより放射温度を測定する。その使用温度範囲は-50～300℃、測定精度は±0.5℃、応答速度は約15分である。グローブ温度計の欠点は応答速度が遅いことである。これを改善するために、グローブ球の表面6方向に応答速度の速い熱流計を取り付け、この熱流計の出力とグローブの中心温度を合成することにより、その他の性能は同等で応答速度が10秒程度の高速応答タイプのものが開発されている [4]。

5.2.2 室内の温度

米国暖房冷凍空調学会では、椅座静位の場合の体中心を床上0.6m、立位の場合の体中心を床上1.1mとしている。従って、室内の温度は、室内の空間を格子状に分割し、その格子点に熱電対を設置し、温度分布をデータとして蓄積する。一点で測定する場合には、室内のどの位置でどのような体位かを想定しておく必要がある。

温度センサとしては、銅-コンスタンタン熱電対、白金抵抗温度計、及びサーミスタなどが使用されている。また、その形状は小さく、温度変動に敏感に追従するようになっており、放射による影響を除去するための反射コーティングが施されているものもある。その測定温度範囲は-50～+150℃、測定精度±0.2℃（20℃において）、応答速度約5秒である。

5.2.3 室内の湿度

湿度は相対湿度あるいは絶対湿度で表わされる。湿度は温冷感に影響を与えるとともに、低湿度・高湿度では人体に比熱的不快感を与える。測定には相対湿度が使用され、測定点は温度に比較すると室内において数点ですむ。

湿度センサとしては、現在、静電容量式湿度計が多く使用されている。高分子膜や金属酸化物膜に水蒸気が吸着すると、水の誘電分極作用によって電極間の静電容量が増加することを利用して測定している。その測定湿度範囲は0～100%RH、測定精度±1.5%以内（20℃において）、応答速度約15秒である。その他、露点温度を測定し、水蒸気圧、相対湿度を表示するセンサも使用される。このセンサはLED、フォトダイオード、冷却素子、温度センサ及び鏡により構成されている。LEDからの光を鏡により反射しフォトダイオードで受光するシステムにおいて、鏡を冷却していくと、ある温度で結露し、鏡面からの反射光は露により散乱され減少する。この事から露点温度がわかり、水蒸気圧や相対湿度等が計算できる。

5.2.4 気流速度

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、温熱感に与える影響が大きく、特に夏季の涼感、冬の寒さ感覚には大きな影響がある。また、気流は人体の対流熱伝達率に影響を与える。

気流速度センサとしては、定温型風速計が使用されている。タングステン、白金あるいはサーミスタの細線に温度を一定に保つように電流を制御し、その電流値を測定することにより、細線の熱損失から、風速を測定できる。その測定範囲は0~10m/s、測定精度 $\pm 0.05\text{m/s}$ (0.05~1.00m/sにおいて)、応答速度約1秒である。但し、気流速度は、一般に、リアルタイムでの測定の他に、数秒間、数分間の時間平均値で評価することが多い。

5.2.5 代謝量と着衣量

PMVを計算する場合、これまで述べてきた環境側の4条件に加え、人体側の2条件、代謝量と着衣量が必要である。

代謝量はメット (met) という単位で表わされる。1metは椅座安静状態の代謝量で58.2W/m²である。通常作業時は1.1~1.2metの代謝量になる。

着衣量はクロ (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。PMVの計算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。着衣量は人体から環境までの熱抵抗として機能する。

PMVを計算する場合、代謝量と着衣量は、一般に、測定値ではなく条件分けされた状態に合致した数値を設定値として使用する。

5.2.6 快適性の計測

これまで快適性の指標として主にPMVを使用してきた。その他に、PMVに至るまでの中間的なパラメータとして使用されている等価温度 (Equivalent Temperature) t_{eq} [5] と標準新有効温度SET* (Standard New Effective Temperature) [6] を用いた快適度センサが開発されている。ここでは、その定義と各々のセンサについて概説する。

t_{eq} は (Madsenの式から与えられるが、) 気温 t_a 、平均放射温度 t_r 及び気流速度 v_a から計算される。人間の体と同じに加熱したセンサの温度に湿度、着衣量、代謝量を加算してPMVを計算する。

SET*はこれまでの温熱指標とは異なり、モデル化された人体の体温調節機能を組み込んだ人体とその周囲を取り巻く温熱環境との間の熱平衡式に基づいて定義される新有効温度 (ET*) を、異なった条件の温熱環境でも比較できるように標準

化した温熱環境指標である。一般に、「標準的な着衣 (0.6clo)」の人が「標準気流 (0.1m/s)」、「相対湿度50%」のもとで経験する「気温」と等価な熱刺激を人に与える温熱条件を表わす指標とされている。従って、測定パラメータは温度、湿度、平均放射温度及び気流速度であり、PMVの測定パラメータと同じである。各パラメータを測定するセンサもPMVで使用されたものとほぼ同じである。SET*による中立的温冷感を得られる範囲は22.0~25.4℃であり、その温熱パラメータを変化させた場合の詳細な検討が報告されている [7]。

5.2.7放射環境の人的要因の計測

放射環境の計測において、人による影響を評価したり、室内全体ではなく人が室内に位置する所の局所的な放射環境を制御する必要がある。この人に関する情報 (位置、人数、人体温度など) を赤外線画像センサシステムにより検知し、床壁温度、床壁位置、設定位置、及び湿度、温度などから室内にいる人それぞれについてPMVの快適制御に基づいた、エアコンの吹き出し温度、風量、風向、及び吹き出し形状などの制御を可能にするシステムが開発されている [8]。

また、ホールやアトリウムなどの人の多い大空間やデパートのような人の出入りの多い環境では、放射環境の均一化や位置による快適制御が必要である。このような場合には、PMVに必要な環境パラメータを計測できるセンサ、マイクロプロセッサ、及びコントローラを集積しシステム化することにより、より質の高い快適制御が可能になる。そのためのセンサの開発が進められている [9]。

参考文献

- [1] P. O. Fanger: "Thermal comfort" Danish Technical Press (1970)
- [2] ISO-7730, "Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PDD indices and specification of the conditions for thermal comfort" (1984)
- [3] B. W. Olesen: "Thermal Comfort" B&Ktechnical review, No.2 (1982)
- [4] 英弘精機: "高速グローブ温度計" 本委員会資料IRS-84 (1989)
- [5] 伊藤昭彦: "快適度センサ" 本委員会資料IRS-85 (1995)
- [6] システック環境研究所: "コンフォート・モニタリング・アナライザ`ETSTAR-MODEL1000" 本委員会資料IRS-85 (1995)
- [7] 伊藤宏他: "標準新有効温度 (SET*) と温熱感覚の関係" 大成建設技術研究所報, 27 (1994) 243-248
- [8] 出口隆: "エアコン用赤外線画像センサシステム" センサ技術, 13, 4 (1993) 43-46
- [9] 下山善久: "体感温熱センサの開発" センサ技術, 13, 5 (1993) 81-84
(谷 治 環)

5.3 計画・設計と実施例

放射冷暖房の方式やその特徴を生かした効果的な利用（適用）箇所等については、前章で述べられたとおりである。

ここでは、これら多種多様な方式が、どのような基準のもとに計画・設計され、実際の建物にどのように適用されているのか等、その実施例について述べる。

5.3.1 放射暖房

現時点においては、放射暖房の中でも、放射床暖房が、その快適性を一般的に認識され、もっとも効果的に実際の建物に導入されている。一方、放射天井暖房や放射スポット暖房も製品化の域にあり、その普及が期待されている状況にある。

5.3.1.1 放射床暖房の計画・設計 ^{1) 2) 3) 4)}

放射床暖房方式を分類（表 5.3.1.1-1 参照）すると、灯油やガスを熱源として水を暖めて循環させる温水式のものと、電気で床内のヒーターを加熱する一般電力利用の非蓄熱式のもの、また深夜電力を利用して熱を貯め込み、利用時に放熱する蓄熱式（図 5.3.1.1-1 参照）のものなどがある。いずれも、暖房の快適さや安全性の面で、対流式に勝るクオリティを発揮している。

しかし、これら多種多様なものの中から、最適な方式を採用するにあたっては、床暖房の計画・設計（選定）において、電気式または温水式のいずれの熱源形式の場合でも、建物での使用条件（状況）と各方式別の立ち上がり時間を十分に把握して、その熱源形式と放熱（パネル）面タイプ（表 5.3.1.1-2 参照）を選定することが重要である。

詳細設計手順としては、図 5.3.1.1-2のとおりである。

なお、平成6年9月（社）空気調和衛生工学会の「床暖房のアメニティ評価に関する研究委員会」から床暖房を行なう際の床表面温度・室温の奨励範囲について指針（図 5.3.1.1-3 参照）が示されており、設計の参考となっている。

5.3.1.2 放射床暖房の実施例 ⁵⁾

放射床暖房は、住宅、福祉施設・病院、官公庁舎、幼稚園・保育園、ホテル・オフィス等を中心にあらゆる建物分野に普及しているため、実施の例を待たない状況にある。

ここでは、未利用エネルギーを有効に利用する目的で、変圧器（25 MVA）の排熱を建物の玄関ホール（約 300㎡）の放射床暖房に利用したシステムを構築した実施例を紹介する。（図 5.3.1.2-1 参照）

このシステムの特徴は、変圧器が年中運転されているので、暖房が必要な冬季の11～3月の期間は、休日、夜間を問わず、連続して床面から約30～40KWH/hrの放熱量（床面温度：20～30℃）が得られることである。

特に、月曜日の朝でも足もとから暖められ、省エネルギー効果だけでなく、快適環境面からも、その効果が発揮されている。

5.3.1.3 その他の放射暖房の計画・設計と実施例 ^{6) 7) 8)}

放射床暖房の他にも、天井暖房、スポット暖房、パネルヒータ等に放射熱を利用した方式が、文献等でその特徴や計画・設計の手順および実施例を含め紹介されているが、ここでは、紙数の関係上、参考となったものを参考文献6)～8)に記載するにとどめた。

5.3.2 放射冷房

室内の床、天井、壁内に冷却体を設けて放射熱による冷房を行なう方式で、快適性には優れているが、結露の問題がある。

このため、まだ、完全に実用・普及の段階に達しているとは言えないであろう。しかし、放射冷房、特に放射天井冷房の開発研究は盛んである。

5.3.2.1 放射天井冷房の計画・設計と実施例 ^{9) 10)}

上述したように、未だ、各種研究機関等で、研究開発中であるが、平成5年度省エネルギーセンター会長賞を受賞した「天井輻射冷暖房システム」について、実施例として紹介する。

本システムは、開発メーカーの自社ビル内に導入され、すでに実用に供されている。

本システム（系統図：図 5.3.2.1-1 参照）は、ファンコイルユニット循環系統と天井輻射パネル循環系統が三方弁を介して連結されている。そして、冷房時には室内に設置したファンコイルユニットを通過した冷水（7～12℃）と天井輻射パネル内を通過してきた冷水（20℃前後）とを、室内の温湿度センサーにより露点温度を検出し、天井輻射パネル表面で絶対に結露が発生しない冷水温度に三方弁で混合して天井輻射パネル内に流入させる方法がとられている。

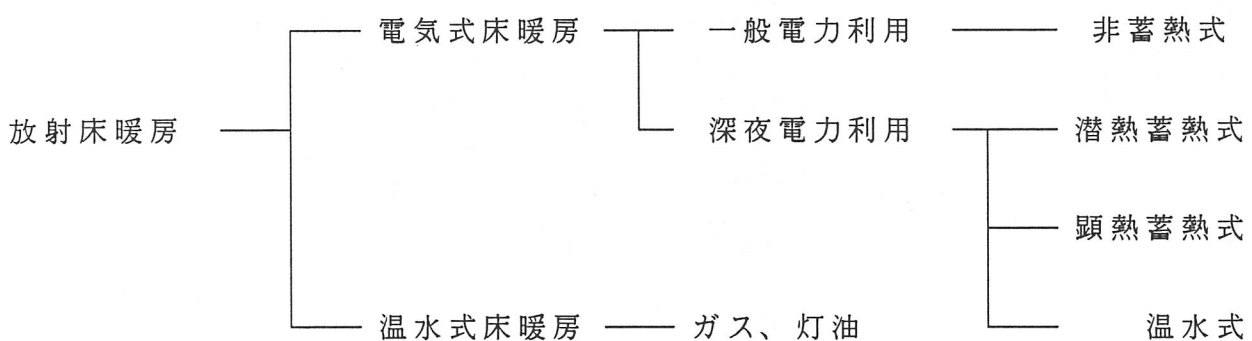
参考文献

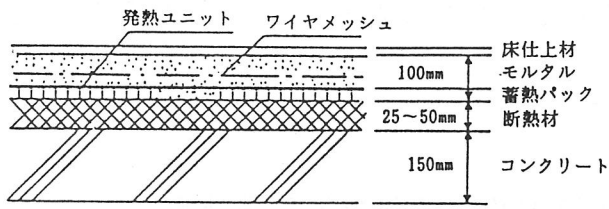
- 1) 空気調和・衛生工学便覧 II巻 （第11版） 昭和62年12月1日
第6編 空調設備設計 第3章 3・11 ふく射暖房方式
- 2) 村瀬 豊 テーテンス事務所 「最近の床暖房」
住SUMAI 1994. 10

- 3) 須藤義裕 東京ガス(株) 「2×4住宅とTES床暖房システムNOOK」
住SUMAI 1995. 4
- 4) 「床暖房のアメニティ評価に関する研究(4)」
(社)空気調和・衛生工学会 平成6年9月
- 5) 藤岡哲夫、山田和浩 「変圧器排熱利用設備の運転特性試験結果」
中国電力 技術研究センター 技研時報 No. 85
- 6) (株)サンアングル 「天井暖房の設計のポイント “天暖” 遠赤外線
天井輻射熱暖房システム」 住まいと電化 1994. 11
- 7) ピーエス(株) 「HR-Eスポット電気暖房の快適採用事例を通して」
住まいと電化 1994. 11
- 8) 旭イノボックス(株) 「温水用パネルヒータの暖房プラン」
住SUMAI 1995. 11
- 9) 「建設工業」新聞 1994. 2. 2
- 10) 「天井輻射冷暖房システム」 日本国土開発(株) 技術本部
平成6年8月30日

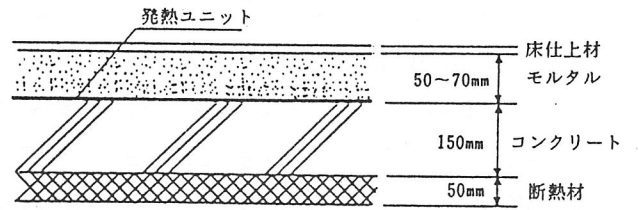
(高木恒雄)

表 5.3.1.1-1 放射床暖房方式





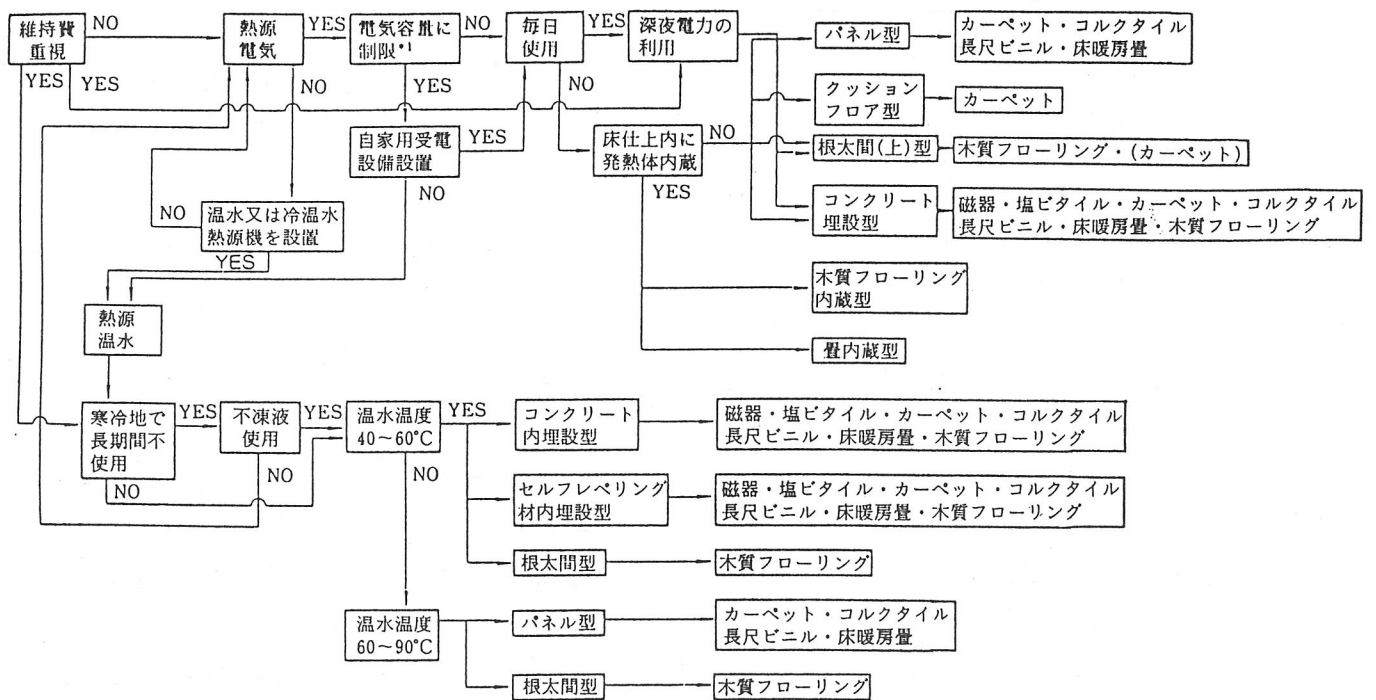
潜熱蓄熱式



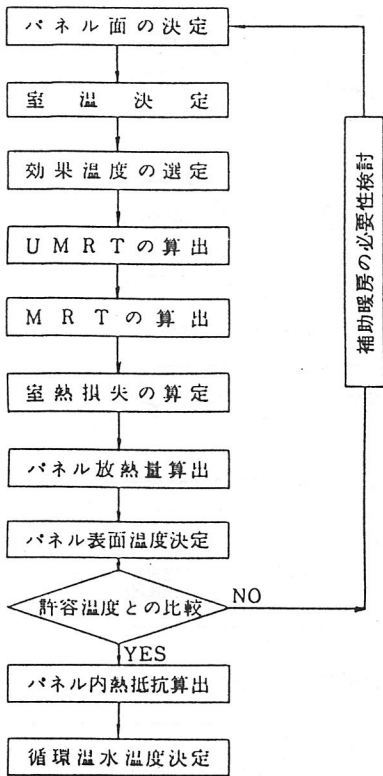
顕熱蓄熱式

図 5.3.1.1-1 蓄熱式床面の構造例

表 5.3.1.1-2 熱源形式と放熱（パネル）面タイプの選定



「建設知識設計カタログ住宅編」より



この床表面温度よりも高ければ、
接触を続けても皮膚温は低下せず、
また椅座でも寒くありません。

この床表面温度よりも低ければ、
火傷に対して安全で、また床座でも
暑くありません。

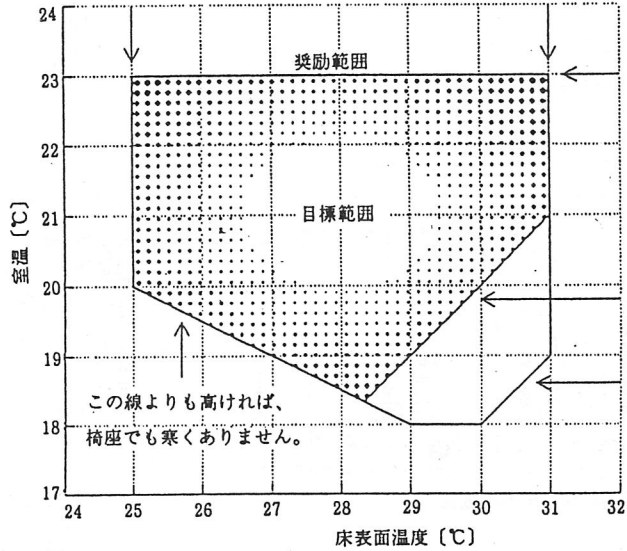


図 5.3.1.1-2 詳細設計手順

図 5.3.1.1-3 床暖房を行なう際の床表面温度・室温の奨励範囲

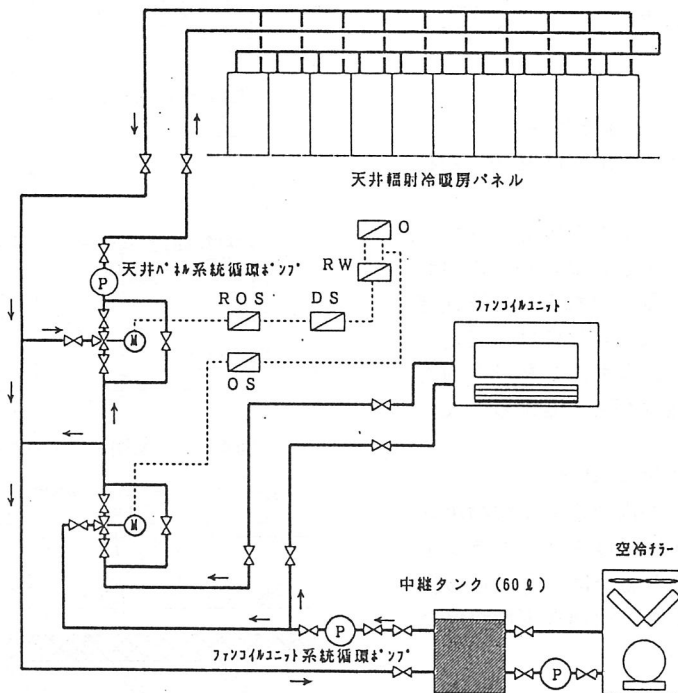


図 5.3.2.1-1 天井輻射冷暖房システム系統図

(1) まえがき

技研(変)の変圧器排熱を技研本館玄関ホールの床暖房および温風暖房に有効利用する設備を設置し、平成6年11月～平成7年3月にかけて、運転特性試験を実施したので紹介する。

(2) 概要

a. システムおよび仕様

図1にシステム構成図を示す。

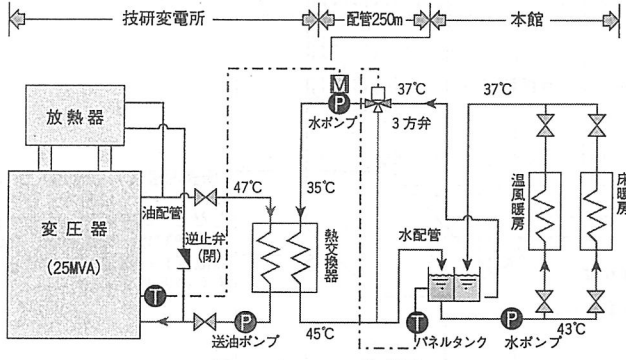


図1 システム構成図

b. 運転制御

運転制御は、変圧器の絶縁油温度により油ポンプおよび水ポンプを自動で運転/停止することにより行う。

絶縁油温度が47℃以下の時は、水ポンプを停止し、56℃以上になると水ポンプを運転して、排熱を暖房に使用する。ただし、油温が70℃以上に上昇した場合は、水・油ポンプ共停止し、送油経路を変圧器の放熱器側へ切り替え、油温を下げるよう制御する。

c. 運転試験結果

(a) 変圧器排熱有効利用特性および運転特性

図2に示すとおり、変圧器排熱量の50～60%が有効利用できることが分かった。

図3に運転特性を示す。早朝は変圧器の負荷が少なく、油温が上昇しないため、排熱は利用されないが、この間の排熱の一部は変圧器に蓄熱されるので水ポンプ運転時に有効利用できる。また、負荷の大きい日中は、安定した有効利用熱量が供給されている。なお、排熱量と利用熱量の差は熱ロスで、その90%程度が変圧器からの放熱によるものである。

(b) 変圧器排熱利用による床暖房への効果

排熱利用による床暖房を実施した場合と未実施の場合の本館玄関ホールの室内温度と床面温度を示すグラフを図4-1と図4-2に示す。床暖房ありの場合は、床からの輻射熱により足元から暖められるため、快適な環境が保たれることが分かった。

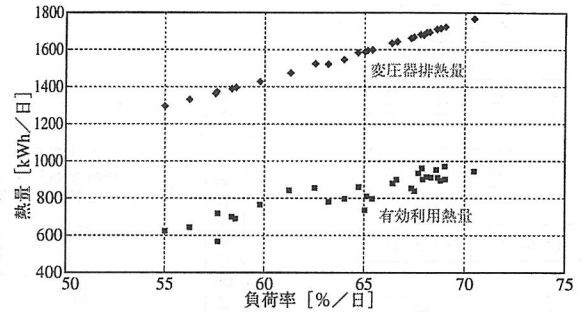


図2 変圧器排熱有効利用特性

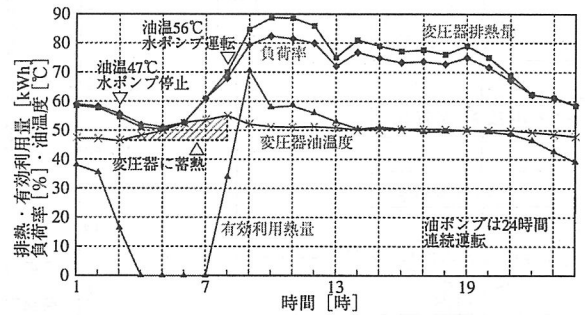


図3 変圧器排熱利用設備運転特性

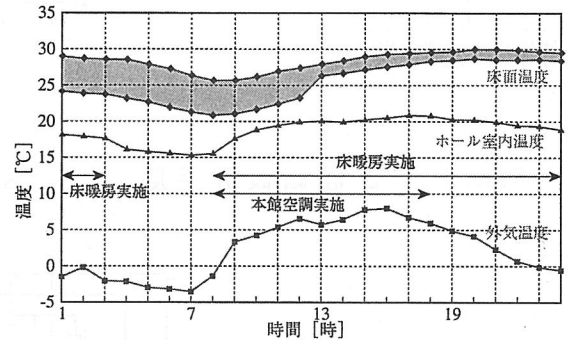


図4-1 玄関ホールの温度状況(床暖房実施)

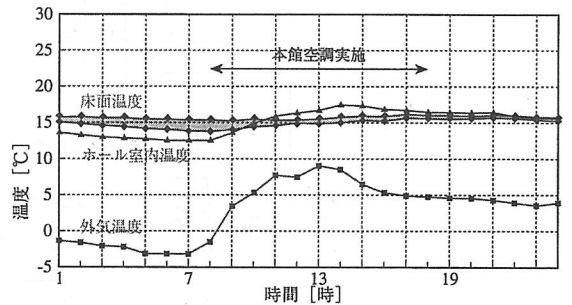


図4-2 玄関ホールの温度状況(床暖房未実施)

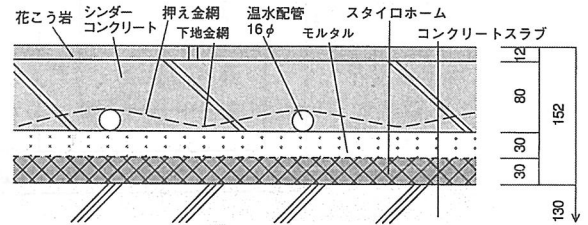


図5 床暖房部 床断面図

図 5.3.1.2-1 変圧器排熱の有効利用による放射床暖房実施例

5.4 予測計算

放射冷暖房空間の温熱環境の予測計算のフローを図5.4.1に示す。図の左側は解析条件，中央の①～⑥は解析手法，右側は出力結果である。本節では、①～⑥の解析手法を概説する。

使用する記号の意味（単位のないものは無次元）

A:面積(m²),C:空気の比熱(J/kg/°C),F:形態係数,G:面の熱放射の交換係数,h:面表面の対流熱伝達率(W/m²/°C),hout:面外側の対流熱伝達率(W/m²/°C),K:面の熱通過率(W/m²/°C),N:空間内部の面の総数,n:空間内の換気率(1/sec),T:面の温度(°C),Ta:空間内部の空気温度(°C),Ta,out:空間外部の空気温度(°C),V:空間の体積(m³),β:面の法線と面間の重心を結ぶ直線とがなす角度,γ:面間の重心を結ぶ直線の長さ(m),ε:面の平均放射率,ρ:面の平均反射率,σ:Stefan-Boltzmann定数(W/m²/°C⁴)

①個体面間の形態係数の計算法

空気による熱放射の吸収や射出がないと仮定すると、黒体面i,j間の形態係数F_{ij}は次式で定義される。

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\beta_i \cos\beta_j dA_i dA_j}{\pi r_{ij}^2} \quad \dots(5.4.1)$$

空間に含まれる面の組み合わせすべてについて5.4.1式を解析的に解くことにより厳密な形態係数が計算できる。しかし、面が三次元的に複雑な位置関係にある場合や面間に熱放射の遮へい物が存在する場合には、解析的に解くことができないことがほとんどである。このような場合には、各面の組み合わせに対する熱放射の遮へい判定を行いながら数値解析的に近似解を求めるしか方法がない。これまでに簡便な方法がいくつか提案されている^{1)～3)}。また、前記以外の直接解法として、モンテカルロ法⁴⁾やその改良法である放射熱線追跡法⁵⁾がよく知られている。

②相互反射を考慮した熱放射の交換係数の計算法

空間内部の面の放射率および反射率が温度や波長に依存しない灰色体かつ拡散面とし、空間内の空気は熱放射を吸収および射出しないと仮定すると、GebhartのEnclosure Analysis Method⁶⁾により面間の熱放射の交換係数（以下Gとよぶ）を計算できる。

具体的に、次のようにする。N個の面からなる閉空間では、i面から射出された放射エネルギーは閉空間内部を移動し、反射を繰り返しつつ面に吸収される。一方、j面から射出された放射のうち最終的にi面へ吸収される放射はj面からi面に直接到達し吸収される成分とj面以外の面で一度反射してi面に到達し吸収される成分の和であるから、次式が成り立つ。

$$A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 G_{ji} = A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 F_{ji} \varepsilon_i + (A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 F_{j1} \rho_1 G_{1i} + A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 F_{j2} \rho_2 G_{2i} + \dots \\ \dots + A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 F_{jn} \rho_n G_{ni}) \quad \dots(5.4.2)$$

(8)式の両辺を $A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4$ で割って、 i および j を $1 \sim N$ まで変化させて整理すれば、次式の $N \times N$ のマトリクス方程式を得る。

$$\begin{pmatrix} -1 & \cdots & F_{1i}\rho_i & \cdots & F_{1N}\rho_N \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ F_{ii}\rho_i & & -1 & & F_{iN}\rho_N \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ F_{Ni}\rho_i & \cdots & F_{Ni}\rho_i & \cdots & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1N} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ G_{ii} & & G_{ii} & & G_{iN} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & \cdots & G_{Ni} & \cdots & G_{NN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & -F_{1i}\varepsilon_i & \cdots & -F_{1N}\varepsilon_N \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ -F_{ii}\varepsilon_i & & 0 & & -F_{iN}\varepsilon_N \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ -F_{Ni}\varepsilon_i & \cdots & -F_{Ni}\varepsilon_i & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad \dots(5.4.3)$$

空間内部の面間の形態係数 F_{ij} をあらかじめすべて求めておけば、(5.4.3)式を解くことにより $G_{ij}(i, j=1, 2, \dots, N)$ を求めることができる。

④熱バランス方程式

気温分布が一様で、熱伝導は面の厚さ方向のみと仮定すれば、 i 面における放射、対流、熱伝導を考慮した定常時の熱バランス式は以下のようにかける。

$$\sum_{k=1}^N A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 G_{ki} - A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 + A_i h_i (T_a - T_i) = K_i A_i (T_i - T_{a,out}) \quad \dots(5.4.4)$$

放射熱交換量 + 対流伝熱量 = 面を通過する伝導熱量

さらに、空間内部の空気についての熱バランス式は以下のようにかける。

$$\sum_{k=1}^N A_k h_k (T_k - T_a) + CnV(T_{a,out} - T_a) = 0 \quad \dots(5.4.5)$$

対流伝熱量 + 換気熱量 = 0

(5.4.4)式と(5.4.5)式をすべて合わせると未知温度 $T_1, T_2, \dots, T_N, T_a$ についての $N+1$ 個の非線形方程式が導かれる。これらの連立非線形方程式を Newton-Raphson 法で解き、各面の温度を計算できる。

⑤放射温度計算

(a) 面放射温度 T_{PRT} (Plane Radiant Temperature)

面放射温度は人体の局所的な放射環境を表す指標である。人体のある部分に周囲固体面から入射する熱放射エネルギー密度と同じエネルギー密度の熱放射を射出する仮想的な等温黒体の温度と定義されており、次式で表される。

$$T_{i,PRT} = \left(\frac{\sum_{j=1}^N G_{ji} T_j^4}{\varepsilon_i A_i} \right)^{0.25} \quad \dots(5.4.6)$$

(b) 平均放射温度 T_{MRT} (Mean Radiant Temperature)

平均放射温度は人体周囲の平均的な放射環境を表す指標である。人体全体に周囲固体面から

入射する熱放射エネルギー密度と同じエネルギー密度の熱放射を射出する仮想的な等温黒体の温度と定義されており、次式で表される。

$$T_{MRT} = \left(\frac{\sum_{j_{man}=1}^{N_{man}} A_{j_{man}} T_{j_{man},PRT}^4}{\sum_{i_{man}=1}^{N_{man}} A_{i_{man}}} \right)^{0.25} \quad \dots(5.4.7)$$

$i_{man}(j_{man})$ 、 N_{man} はそれぞれ人体表面の面、人体表面を構成する面の総数を示す。

(C) 作用温度 T_{OT} (Operative Temperature)

人体と周囲環境との間で行われる対流と放射による熱交換量と同じ熱放射エネルギー密度を射出する仮想的な等温黒体の温度と定義されている。ただし、室内の気流速度が 0.2m/sec 以下の静穏気流の場合、便宜的に次式を用いて計算される⁷⁾。

$$T_{OT} = \frac{T_a + T_{MRT}}{2} \quad \dots(5.4.8)$$

⑥温熱快適指標計算

3.5節参照のこと。

参考文献

- 1)宮永、大沼；「三次元空間の熱放射環境の解析法の開発 (1) -遮へい効果を考慮した形態係数解析法の開発とその応用」、研究報告：T93045、平成6年5月。
- 2)宮永、大沼；「三次元空間の熱放射環境の数値解析(2)-形態係数計算法の改良と複雑形状への応用-」、研究報告：T94031、平成7年5月。
- 3)宮永、大沼；「三次元空間の熱放射環境の解析法の開発(3)-解析プログラムの改良とその妥当性の実験的検証-」、研究報告、平成8年5月。(予定)
- 4)大森、谷口他；「室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用」、空気調和・衛生工学会論文集、No.42、1990年2月、pp9～18。
- 5)早坂、工藤、谷口；「放射熱線法による放射熱伝達の解析 (二次元モデルでの検討)」、日本機械学会論文集B、Vol.52、No.476、pp.1734-1740 (1985)。
- 6)Siegel,R., Howell,J.R. : Thermal Radiation Heat Transfer 2nd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1981, pp838-839
- 7)李、村上他；「床暖房居室の温熱空気環境に関する研究 (1) 暖房方式の違いが不均一放射・対流場に与える影響」、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.208、1993年。

(宮 永 俊 之)

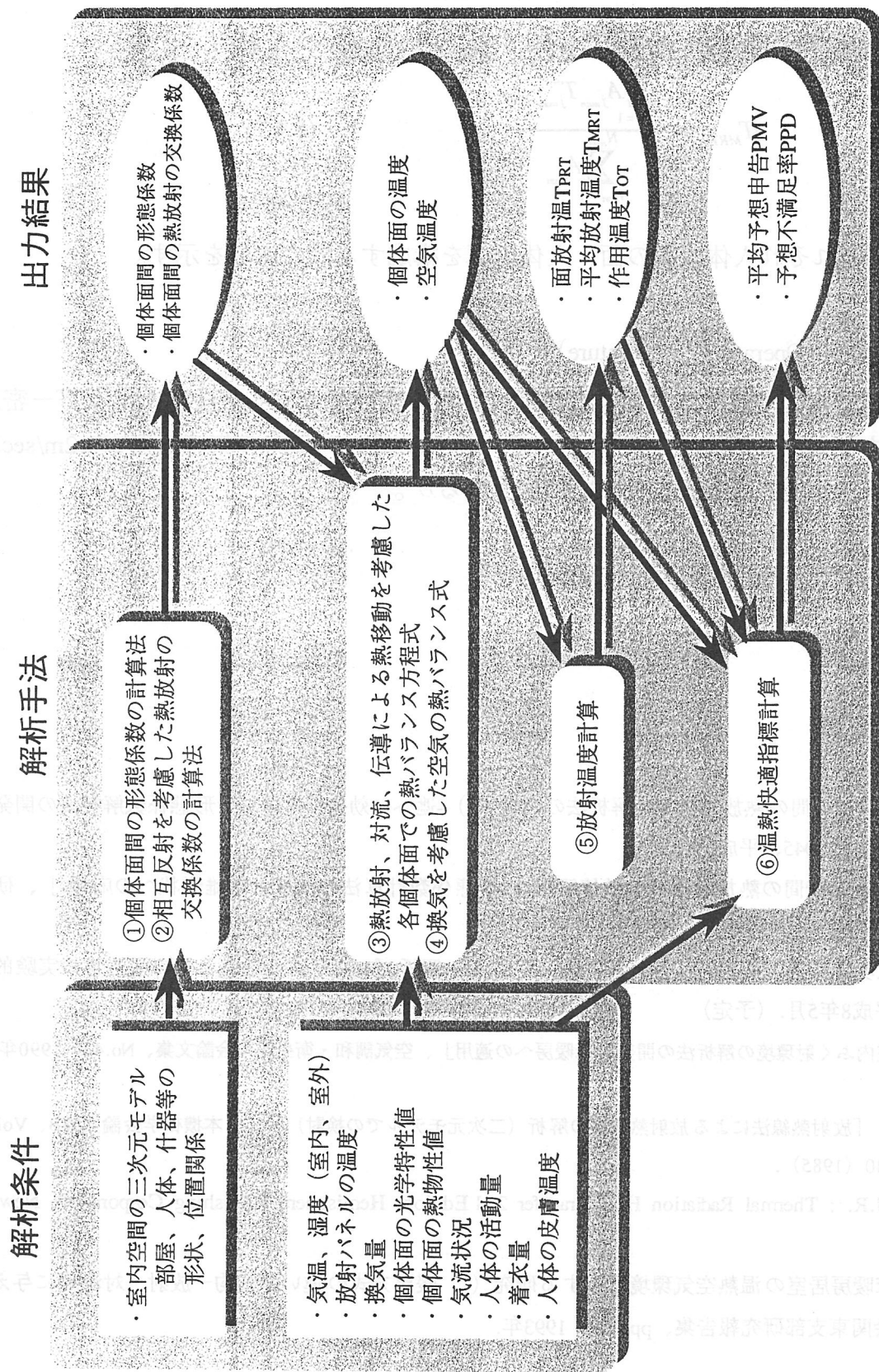


図5.4.1 放射冷暖房空間の温熱環境の予測計算

6. 放射冷暖房の将来

6.1 放射冷暖房の得失のまとめ

以上前章までのところで、放射冷暖房の原理や理論、方式・システム、具体的実施例、環境を含めた評価法などについて述べてきたが、放射冷暖房システムの利点と実用上の問題点をまとめると、表6.1の通りとなる。

表 6.1 放射冷暖房の得失のまとめ

利 点	実用上の問題点
①人間自身の熱エネルギーを体表面の放射の出入りによりコントロールするのは、人間に対する最も摂理に適った方式であり、快適な冷暖感覚の実現が可能。	①初期設備費が他の冷暖房方式と比較して大きい。
②地下水や太陽熱など自然のエネルギーを利用し易い方式であり、エネルギー・コストが安い。	②既設の設備を変更して適用することが困難（改造設備費が高くなる。）
③夜間電力利用の蓄熱・蓄冷方式と併用し易い方式であり、エネルギー・コストが安い。	③比較的低温の放射を利用するため、熱交換部分に広い面積を必要とする。
	④冷暖房の設定条件の幅（例えば、温度範囲や単位時間当たりの交換熱エネルギー量など）を広くとることが困難。
	⑤比較的低温の放射を利用するため、単位時間当たりの交換熱エネルギー量を大きくとることが困難。（急速に冷やしたり暖めたりすることが困難。）

表6.1により明らかなように、放射冷暖房方式には、他の冷暖房方式に無い優れた利点がある反面、広く実用化を図るためには、今後技術開発を進め、克服しなければならない問題点も多い。放射冷暖房方式の将来性を検討する上では、これらの実用上の問題点が今後、どの程度克服されていくかということが大きな要素となる。

そこで以下に、表6.1に上げた現在考えられる実用上の問題点の中の主なものについて、今後解決していくための検討課題に関連していると思われる事項につ

いて要点を述べる。

6.2 初期設備費

具体的方式にもよるかも知れないが、放射冷・暖房の中で、得に冷房の方が初期設備費が大きくなる。前章までの記述で明らかなように、放射冷暖房方式は、設備をしてしまえば従来の冷暖房方式と比較して、同一の温熱環境を造出するためのエネルギー・コストの低減が可能である。エネルギー・コストの低減は我が国にとって、というよりも全地球規模で必要不可欠なことであるから、対象設置場所によっては、初期設備費に対して、適切な行政的支援を行って普及させるような施策が必要であろう。

我が国では省エネルギー推進策として、“省エネ・リサイクル支援法”（エネルギー等の使用の合理化及び再生資源の利用に関する事業の促進に関する臨時措置法）の改正、並びに“エネ革税制”（エネルギー需給構造改革投資促進税制）の制定（時限立法）などが実施されている。

これらは、基本的には産業用・業務用の設備を対象としたものであるが、必要に応じ、民生用設備への適用範囲の拡大や、適用条件の緩和などの具体的施策の推進が必要であろう。

6.3 既設設備への適用性の拡大

初期設備費が大きいという問題の他に、放射冷暖房方式は、既設の（別の方式の冷暖房システムが設備されている）設備に対しては、必ずしも簡便に適用できないという問題点がある。これは、理想的に放射冷暖房方式を既設の設備に適用しようとする場合、場合によっては建物本体を含む周辺設備の大幅な改造を必要とすることが多いからである。

これも前項同様、適切な行政的支援システムが有効である。前項の“省エネ・リサイクル支援法”や“エネ革税制”は、本来的には対象が新規設備に限られているが、新規設備に導入する場合の初期設備費と同様に、設備改造の場合についても、適用が拡大されるなどの施策が必要であろう。

6.4 冷暖房条件設定上の問題

放射冷暖房方式は、一般の、温・湿度調節された空気の循環を基本とする冷暖房（エア・コン）や、比較的高温（400℃以上）の熱源（ヒーターやストーブなど）による放射暖房方式に比べて、冷暖房条件の設定幅を広くとったり、冷暖房の設定条件を（大幅にかつ）急速に変化させたりすることが困難である。したがって、放射冷暖房方式を採用した場所においては、例えば冬の寒い日に、外から帰って来たような時の入室直後、“暖房条件が物足りない”というようなことが

起きる可能性がある。（冷房の場合も同様である。）

この問題点の解決は簡単ではない。やゝ姑息な方法であるが、小規模な緩衝部分を設けたり、局部的に別条件で設定された従来方式の冷暖房システムを併用するのはひとつの方法であると考えられる。

いずれにしてもこれらの問題点の解決の可否が、放射冷暖房方式の今後の普及のカギを握っていることになることはいうまでもない。

（河本康太郎）

7. あとがき

今後、ますます発展・普及すると思われる放射冷暖房に関連する人体の冷暖感、放射冷暖房の理論・方式・実施例・計測法・評価法など放射冷暖房の全分野にわたる3か年の調査研究活動の成果を取りまとめたのがこの報告書である。項目によっては不十分な点もあるかと思われるが、その他の問題点と共に次期赤外関係委員会に委ねたい。

おわりに、本委員会の活動に関連して各地方、各分野の方々にお世話になった。特に毎年度2回の見学会と兼ねた各地での委員会開催に際しては、都立工業技術センター、建築研究所（つくば市）、東京都庁、新宿ラムダックス・ビル（日本国土開発（株））、宮津エネルギー研究所（関西電力（株））、オキツモ（株）（三重・名張市）の各位には多大のご支援、ご協力を頂いた。末筆ながら、これら関係各位には厚く御礼申し上げる次第であります。また、委員各位には本務多忙な中をご執筆頂いた。記して謝意を表します。

（松井松長）