

深部温を制御目標とする冷房環境制御

Optimal Air-Conditioning control of Core Temperature

田中 宏明

Hiroaki Tanaka

(株)日建設計 設備設計部門設備設計室

Nikken Sekkei Ltd.

キーワード：非定常(dynamic)、深部温(core temperature)、最適制御(optimal control)、冷房(cooling)

1. はじめに

人が温熱的に非定常状態にあるエントランスや半屋外空間などの空間では、生理・心理の過渡的な応答を考慮して温熱環境制御を行うことが望まれる。体温調整の主要な入力値であり、かつ目標値でもある深部温を制御目標とする冷房設計方法の研究結果を報告する。

2. 研究の目的と概要

夏期、暑熱環境下で歩行を行い体温が上昇した状態で冷房空間へ入室するような場合には、人体は周辺環境の急激な変化に曝され、さまざま温冷感や生理応答を体験する。例えば、暑い屋外にある駅のホームで滞在した後、冷房された電車に乗ったときに感じる涼しさや、屋外からエントランスホールなどの冷房空間へ入室後、初めさわやかな涼しさを感じるが後に寒さを感じるといった具合である。日常の多くの場面で、人体は温熱的に非定常状態にあるにもかかわらず、生理と心理の過渡的な応答を反映して、建築空間の温熱環境制御や空調システムの設計を行うことは稀である。非定常状態における温冷感や生理量変動の特性を十分解明できていないことがその理由の1つと考えられるが、健康かつ省エネルギー的な空調環境制御を行うためには、生理・心理の過渡応答や体温調節機能の特性を把握し、それらと矛盾なく室内温熱環境を制御することが本来必要である。

本研究では、非定常状態における生理特性と心理特性を反映した室内環境制御手法の開発を視野に入れ、その基礎情報となる生理量と心理量の過渡応答性状の把握とそれらを踏まえた冷房環境の制御方法に関する基礎的検討の結果を報告する。特に、非定常状態における体温調節系の評価指標として、体温調節系の主要な入力の一つであるにもかかわらず温冷感や快適感あるいは健康に及ぼす影響が未だ十分に明らかにはされていない“深部温”に着目する。具体的には、夏期の高温環境下で歩行程度の運動を行った後、冷房空間へ入室する場合を対象に、深部温、皮膚温、血流量などの生理量の変化性状を検討し、深部温や心理量をより望ましい方向に制御するためにどのような室内環境制御を行えば良いかという問題に対する解を見出すことを目的とする。

3. 深部温の一過性変動に関する被験者実験とメカニズムに関する知見

3.1 概要

冷房設計の観点から着目すべき深部温に関する生理現象として、高温環境から冷房空間へ移動すると深部温は一旦上昇し極値をとった後に低下するという「一過性の変動」を取り上げ、被験者実験と人体熱モデルによる解析結果をもとに得られたメカニズムに関する知見を示す。

3.2 被験者実験

屋外を模擬した高温環境下で歩行程度の運動を行った後冷房空間へ入室した場合の、深部温の変動性状に関する被験者実験検討を行う。実験は2004年9月17,18日に実験室で行われた。被験者は健康な男子大学生1名であり、トランクスのみ着用する。屋内外移動を模擬した図3-1に示すスケジュールで恒温恒湿室に滞在し、その間の各部位温度、発汗量及び血流量、体重と心拍数を測定する。実験は2ケース行う。屋外での歩行を模擬した踏み台昇降運動を35-50%RHの高温環境で30分間行い、運動終了後は

そのまま 35 50%RH の高温環境に椅座安静で在室するケース 1 と、運動終了後は冷房空間を想定した 26 50%RH の空間に移動し椅座安静で在室するケース 2 である。踏み台昇降については、図 3-2 に示すように 1 サイクル 4 秒の運動を 10 回/min のペース (3.5met 相当) で繰り返す。

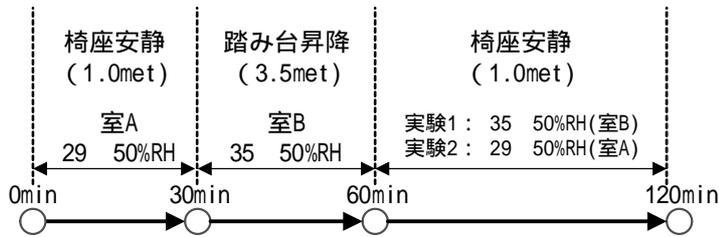


図3-1 被験者実験のスケジュール

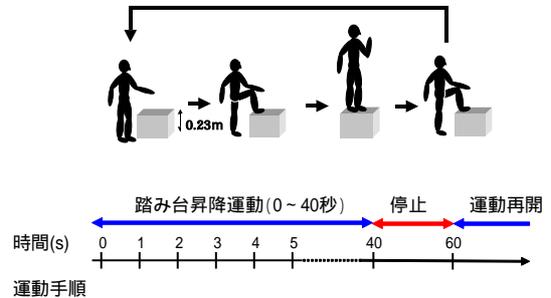


図3-2 踏み台昇降運動の概要

3.3 実験結果と考察

3.3.1 深部温の変動性状

図3-3、図3-4に各ケースの直腸温変動を示す。運動を停止した60分以降の変動について結果を述べる。ケース 1 の場合、運動終了後37.7 から37.8 まで0.1 上昇する。その後は実験終了時点まで37.6 ~ 37.8 の範囲でほぼ安定する。ケース 2 の場合、運動を終え26 の室に入室した後に、37.5 から最大37.9 まで0.4 上昇する。温度のばらつきはあるものの全体的な傾向としては26 の室に入室した後直腸温は上昇し、73分以降に低下を始め、80分には運動終了時と同じ温度まで戻る。人体周辺の空気温度が低下したにもかかわらず直腸温に一過性の上昇変動が生じている。この上昇は低温室に移動後10分程度続き、室移動前の深部温に戻るまでに20分もの時間がかかっている。

以上の結果より、高温環境で運動をした後、より低温の室に移動して椅座安静で在室するケース 2 の方が、運動停止後も同じ高温環境下で椅座安静で在室するケース 1 よりも、直腸の一過性の温度上昇が大きいことが分かる。いずれにしても、深部温を速やかに低下させるという冷房により予想される温度変動とは逆の変動である。

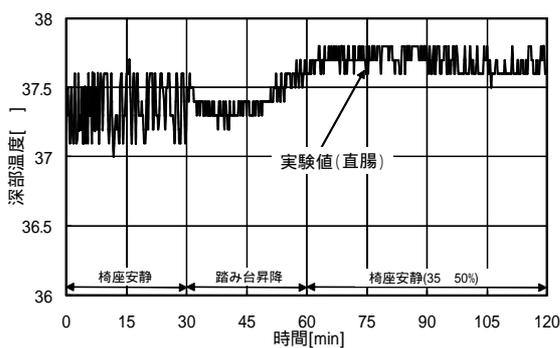


図3-3 深部温変動 (ケース 1)

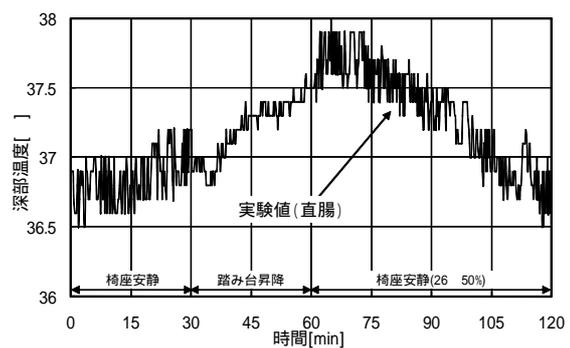


図3-4 深部温変動 (ケース 2)

3.3.2 皮膚温および心拍数の変動性状

(1)平均皮膚温の比較 図3-5に平均皮膚温を示す。運動を停止した60分以降の皮膚温変動についてみると、ケース 1 の場合には、運動を停止した後の温度変動は少なく、60 ~ 75分の間は35.3 ~ 35.7 の範囲で変動し、75分以降は35 ~ 35.3 でほぼ一定となる。これに対し、ケース 2 の場合には、26 の室に入室後、平均皮膚温は3分間で1.8 も急激に低下する。以降実験終了まで低下を続け、120分時点で33.0 となる。

(2)心拍数の比較 図3-6に心拍数変動を示す。実験を通してケース1の方がケース2の場合よりも10回/min程度心拍数は多い。運動開始後には、ケース1とケース2ともに13~15回/minほど心拍数は増加する。運動停止後には、ケース1では運動開始後運動停止後に16回/min低下するのに対し、運動停止後26の室に移動するケース2では、運動停止後に23回/min低下する。心拍数の低下は、ケース1の場合よりケース2の場合の方が大きい。またケース2では運動開始前の値とほぼ同じ程度まで心拍数は減少するが、ケース1では、運動開始前の値よりも停止後30分間は7~8回/min程度大きくなり、同じ程度に戻るのに時間がかかる。

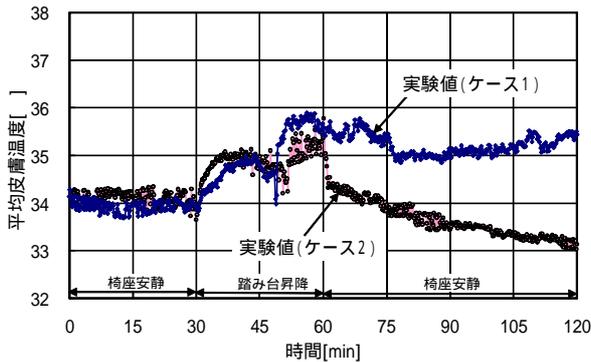


図3-5平均皮膚温変動の比較

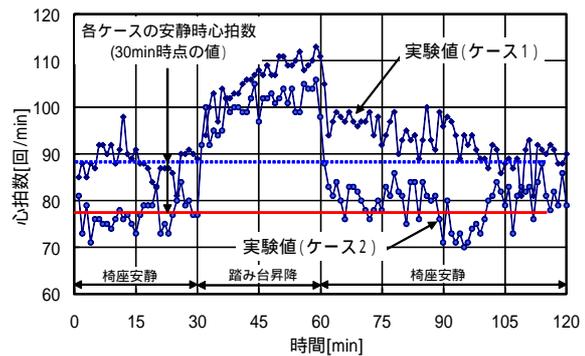


図3-6 心拍数変動の比較

3.4 人体熱モデルを利用したメカニズムの説明

ここでは、深部温が一過性に変動するメカニズムに関する知見を得ることを目的とする。被験者実験の結果を踏まえ、人体熱モデルを用いた解析により一過性的の変動に及ぼす血流量の影響を検討する。人体熱モデルは、人体の温熱生理制御をマクロな視点でモデル化したもので、測定が困難な筋や深部の総血流量の変動特性を容易に解析でき、生理応答のメカニズムに関する知見が得られる。また、解析結果は今後同様の目的で被験者実験を行う場合の貴重な情報として活用できる。

3.4.1 人体熱モデルによる解析のための基礎方程式

人体を頭部(皮膚、深部)、胴部(皮膚、筋部、深部)、四肢部(皮膚、深部)および中央血流溜まりの計8 nodeに分割するStolwijkらの人体熱モデルを基礎とする。ただし、脚運動による脚と腕の温熱生理応答の違いを考慮するため、四肢部を足・腿・脛をまとめて脚部(皮膚、深部)、手・腕をまとめて腕部(皮膚、深部)と称して4分割し、人体を合計10nodeに分割した。人体熱モデルの概念図を図3-7に示す。

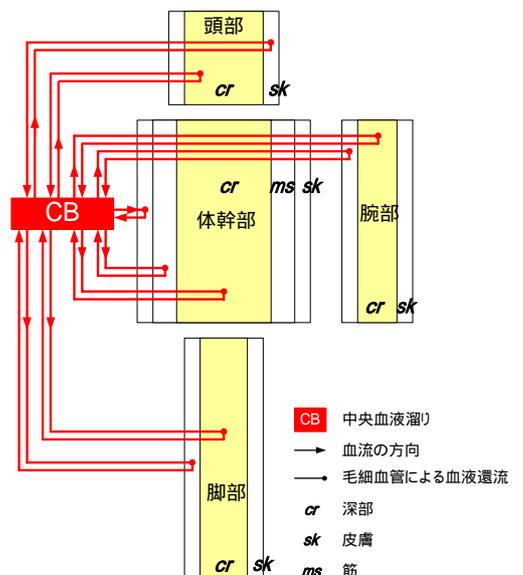


図 3-7 人体熱モデルの概要

3.5 実験結果と解析結果の比較

ケース2の胴深部温の解析値と直腸温実験値との比較を図3-8に示す。解析結果は実験値の変動特性をよく再現できている。運動を開始した直後の一過性の温度低下、運動を停止し26の室に移動して椅座安静後に直腸温が一過性に上昇するといった実験値の変動特性を、解析値はよく再現できている。運動開始後、実験値では0.2 低下するのに対し解析値では0.18 であり、よく一致している。

3.6 深部温が一過性に変動するメカニズムに関する考察

高温環境で運動を停止し、より低温の環境に移動した直後に生じる深部温の一過性上昇に及ぼす血流量変動の影響を数値解析により検討し、以下の結果を得た。

「一過性に低下した場合と逆の生理的メカニズムにより、図 3-9 示す 3 つの過程を順に経て、深部温は一過性に上昇する。すなわち、胸深部温は、基礎代謝による熱発生量、深部から筋への熱伝導による流出熱量、血流を介した深部から血液への流出熱量の 3 つの熱量の収支により決まる。低温環境に移動し運動を停止すると皮膚血管収縮により皮膚血流量が減少するため血液と体組織間の熱交換量が減少し、胸深部へ還流する血液温度は高くなる。温度の上昇した血液が胸深部へ還流するため、胸深部からの血流による正味流出熱量は減少し、胸深部温は一過性に上昇する。」

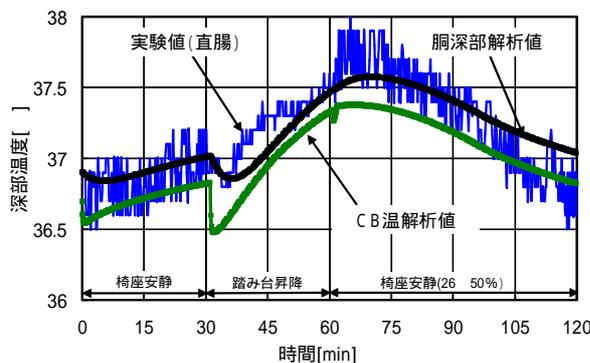


図3-8 深部温の実験値と解析値の比較

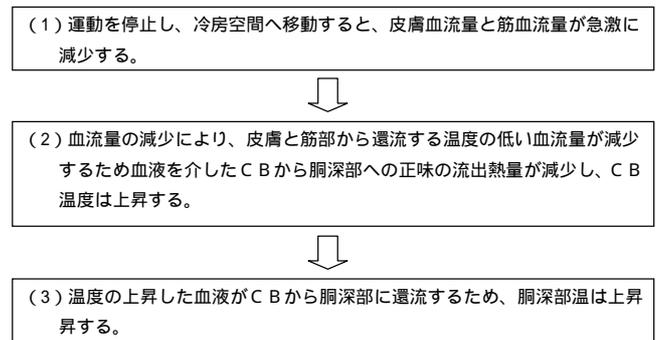


図3-9 深部温が一過性に上昇するプロセス

4 深部温を制御目標とする冷房環境制御

前章までに示したように、環境の変化に曝される場合や運動を行う場合には、定常状態とは異なり深部温はしばしば大きく変動する。室内環境条件を設定する際、一般的には人の温冷感あるいは快適感などの心理量を評価指標として室内環境条件を決定する 경우가多い。例えば、人体が定常状態にある場合には PMV や SET*などが用いて室内環境条件を設定することが多く、非常状態においても温冷感の非常性を考慮して室内環境条件を決定する方法などが提案されている。

本章では、深部温を評価指標とした冷房環境の設定方法に関する提案を行う。具体的には、高温環境から冷房空間へ入室した際に、深部温の一過性上昇や停滞をなくし速やかに深部温を低下させるために最適な設定室温の決定方法を提案する。さらに、非常状態における温冷感申告値の予測式を用いて決定した設定室温と、提案した室温設定方法により得られた最適室温の比較検討を行う。

4.1 問題の定式化

4.1.1 解析対象

解析対象とする系を図 4-1 に示す。夏期高温な屋外で歩行した後に冷房空間へ入室する状況を想定する。この冷房空間において、次節に示す深部温に関わる評価関数を最小化する室温を求めることを問題とする。解析モデルには、人体については Stolwijk らの人体熱モデルを用いる。

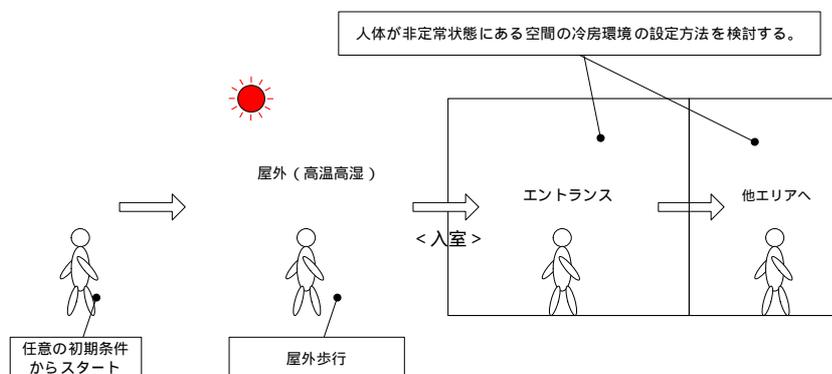


図 4-1 解析対象とする系

4.1.2 評価関数

評価対象時間の終了時刻における深部温のセットポイント値からの偏差の絶対値 J を評価関数とする。すなわち、評価時間内において高温状態にある深部温をどれだけセットポイントに近い状態まで低下させることができたかを評価する。式(6.1)に評価関数 J を示す。

$$J = \left| T_{CR}(t_E) - T_{CR,set} \right|_{t=t_E} \quad (4.1)$$

ここで、 t は時刻を表し、評価を開始する時刻を 0、評価を終了する時刻を t_E とする。 $T_{CR}(t)$ は時刻 t における深部温度であり胸部深部温とする。 $T_{CR,set}$ は深部温度のセットポイント温度である。

この評価関数 J を最小にする室内環境条件(室内温湿度、風速、平均放射温度など)を決定することが本問題の目的である。本研究では、深部温を評価指標とする冷房環境の設定方法を定式化することを目的としているため、室内温度のみを変数とする単純な系を取り扱う。

以下では評価関数 J の値が最小になる時々刻々の室温を「評価指標 J に関する最適解あるいは最適室温」と称する。

4.2 深部温を評価指標とする冷房時の最適室温

4.2.1 解析条件

計算対象とする人体の体重と身長を表 6-1 に、建物内外の移動スケジュールを図 6-2 に示す。身体条件は第 2 章で行った被験者実験における被験者と同じとし、特性把握を目的としているため解析条件を単純化し裸体に関する解析を行う。29~50%の空調室に 30 分間滞在した後、35~50%の屋外に移動し 3.0met の歩行を 30 分間行ない、その後、冷房室へ入室する状況を想定する。冷房室入室直後から 1 時間を評価対象時間とする。

表 4-1 計算対象とする人体の身長と体重

| 身長 (cm) | 体重 (kg) |
|---------|---------|
| 169.0 | 54.5 |

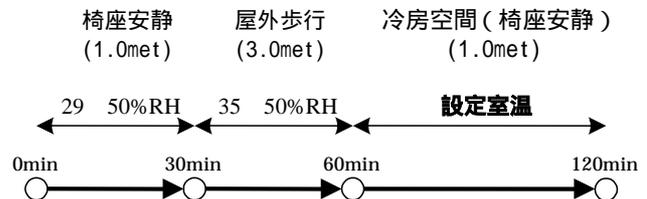


図 4-2 計算対象とする人体の移動スケジュール

4.2.2 解析方法

時刻ごとに設定室温を様々に変化させた複数の計算を行い、その中から評価関数 J を最小化する設定室温を探索する。冷房室に滞在する 60 分間を 15 分毎に 4 つの時間帯に区分けする。60~75 分、75~90 分、90~105 分、105~120 分の時間帯ごとに室温を設定し、15 分間は設定室温を一定とする。時間帯ごとに複数の設定室温の候補値を設け、それら候補値の全ての組み合わせについて計算を行う。

候補値としては、 $24 \leq T_a(t) \leq 35$ の範囲とし、 $24 \sim 35$ の間で 1 刻み、すなわち 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 の計 12 個を候補値とする。従って、組み合わせ数は $12^4=20,736$ 通りである。屋外から冷房室へ入室した 60 分時点における生理量を初期条件として計算を開始し、冷房室に滞在する 60 分間について 20,736 通りの数値解析を行なう。その中から J を最小にする設定室温を求め、それらを最適室温とする。

4.3 最適室温の解析結果

4.3.1 最適室温について

評価関数 J に関する最適室温を図 4-3 に示す。比較のため、評価関数 J の値が最大になる、すなわち 120 分時点における胸深部温が最も高くなる場合の設定室温も示す。

最初の 15 分を 35（候補値中の最大値）、残りの 45 分を 24（候補値中の最小値）とした場合に最適室温となる。 J の値が最大になるときの室温、すなわち深部温度がもっとも高くなる条件は、最初の 30 分を 32、次の 15 分を 29、最後の 15 分を 28 にした場合であった。

表 4-2 に最適室温あるいは評価関数 J 最大時の室温と、その時の胴深部温を示す。最適室温時の胴深部温は 36.91 となる。 J が最大値になるときの胴深部温度は 37.45 であり、胴深部温は 36.91 から 37.45 の 0.54 もの広い幅に分布し、深部温変動に及ぼす設定室温の影響が大きいことが分かる。

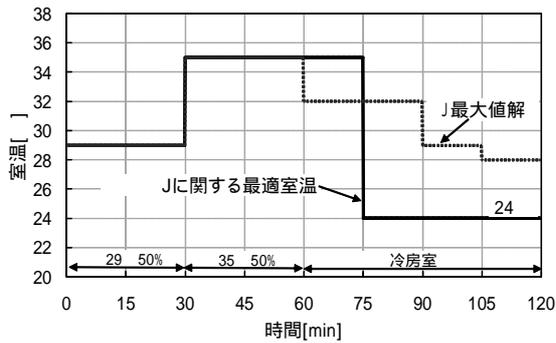


図 4-3 最適室温

表 4-2 最適室温と評価関数 J 最大時の室温との比較

| | 時刻(分) | | | | 時刻120分の 胴深部温() |
|--------------|-------|-------|--------|---------|--------------------|
| | 60~75 | 75~90 | 90~105 | 105~120 | |
| Jに関する最適室温 | 35 | 24 | 24 | 24 | 36.9 |
| Jが最大値になる時の室温 | 32 | 32 | 29 | 28 | 37.45 |

4.3.2 深部温変動について

図 4-4 に最適室温時の胴深部温を示す。室温は 35 一定とする場合には、胴深部温は冷房室入室後 0.03 だけわずかに上昇した後は単調に低下し、120 分時点で 37.14 になる。時刻 60~120 分の 60 分の間に 0.25 低下する。最適室温時には、時刻 75 分に室温が 35 から 24 に変化すると、胴深部温は一旦 0.05 程度上昇するがその 5 分後には低下に転じる。以降、胴深部温は急激に低下し、時刻 100 分以降は設定室温 35 一定の場合より、温度は低くなる。時刻 75 分~120 分までの 45 分の間に 0.43 も温度が低下する。 J の値が最大になる設定室温の場合には、胴深部温は運動停止後 30 分間も上昇を続ける。時刻 90 分以降に低下に転じるが、温度の低下は非常に緩やかであり、時刻 120 分においても深部は 37.45 と高い温度のままである。

図 4-5 に最適室温時の頭深部温を示す。時刻 120 分における頭深部温の温度を比較すると、最適室温時の場合には、35 一定遠く場合よりも 0.3 も低い温度になる。頭深部温に及ぼす設定室温の影響は、胴深部温の場合と同様に大きい。

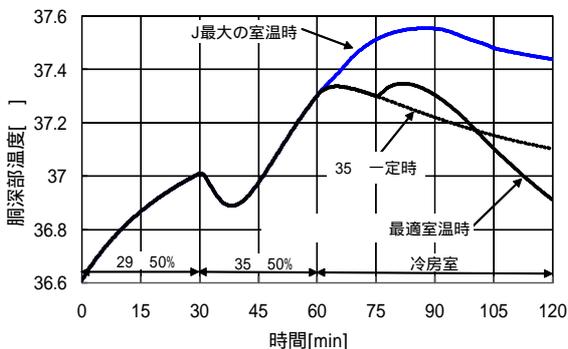


図 4-4 胴深部温の解析結果

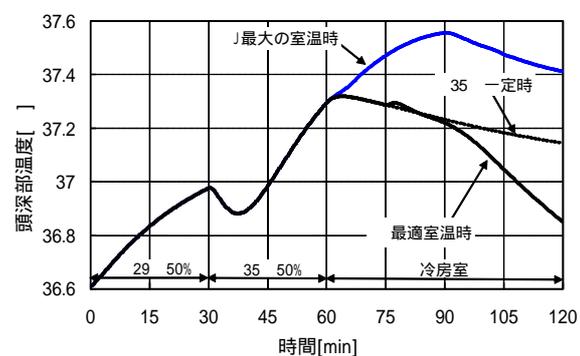


図 4-5 頭深部温の解析結果

4.4 温冷感を評価指標とする最適室温との比較

ここでは、温冷感を評価指標とした場合の最適室温を求め、前節で求めた胴深部温を評価指標とする最適室温の結果と比較する。

4.4.1 温冷感申告値の予測式

本研究で用いる非定常状態における温冷感申告値の予測式を以下に示す。この式は、森らにより導かれたものであり、森らは図 4-6 に占める温冷感スケールを用いた被験者実験を行い、非定常過程で得られた皮膚温や深部温等の生理量と温冷感申告値の重回帰分析を行い、以下に示す温冷感申告値の予測式を導いた。温冷感予測申告値の制御設定値 I が、冷房室滞在中の 60 分間のどの時刻においても得られるような室温を収束計算により求め、得られた室温を「温冷感予測申告値 I に関する最適室温」と呼ぶことにする。以降の計算では、制御設定値を $I=0$ (中立) および $I=1$ (涼しい) に設定した場合の各々の最適室温を求め、深部温の評価関数 J に関する最適室温と比較する。

$$I = Aq_{sk} + BT_{sk} + C \frac{dT_{sk}}{dt} + DT_{cr} + E \frac{dT_{cr}}{dt} + F \quad (4.2)$$

ここで、 I : 温冷感予測申告値 [n.d.] A : 回帰係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$] = -0.01285 B : 回帰係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] = 0.5725
 C : 回帰係数 [$\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$] = 0.4158 D : 回帰係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] = -0.8648 E : 回帰係数 [$\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$] = -2.088
 F : 回帰係数 [n.d.] = 13.75 q_{sk} : 皮膚表面熱流 [W/m^2] (皮膚表面から室空気への流出熱流を正とする。)
 T_{sk} : 平均皮膚温 [$^{\circ}\text{C}$] t : 時刻 [t] T_{cr} : 深部温 [$^{\circ}\text{C}$] (胴深部と頭深部の体積平均値とする。)

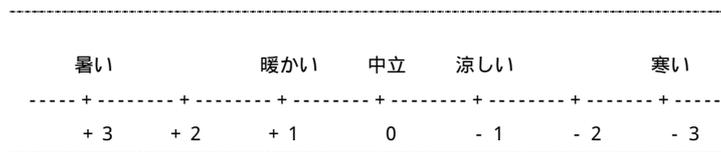


図 4-6 全身温冷感申告のスケール

4.4.2 解析結果と考察

(1) 最適室温の比較

図 4-7 に最適室温を示す。温冷感の設定値を $I=0$ (中立) とした場合、60 から 104 分の間に 34°C ~ 32°C 間で緩やかに低下した後、104 分に 27.8°C まで急激に低下する。温冷感の設定値を $I=-1$ (涼しい) とした場合には、入室直後に 28°C まで一瞬低下した後 65 分には 30°C まで上昇する。その後は徐々に低下し、85 分に 23.2°C まで急激に低下し、以降は 24°C でほぼ一定値となる。両ケースともに皮膚での汗の蓄積がなくなった時点で、最適室温は急激に低下する結果となる。冷房室入室後に 30°C から 34°C の高温を維持した後、 24°C から 28°C まで急激に設定室温が低下するといった変動を示すが、この変動傾向は評価関数 J に関する最適室温の変動傾向に類似している。

(2) 胴深部温の比較

図 4-8 に胴深部温変動を示す。120 分における胴深部温の値を比べると、評価関数 J に関する最適室温時には 36.91°C となるが、 $I=0$ に設定した場合の最適室温時には 37.35°C となり、 $I=-1$ に設定した場合の最適室温時には 37.17°C となる。深部温を評価指標とした場合よりも各々 0.40°C 、 0.28°C も胴深部温度は高くなる。

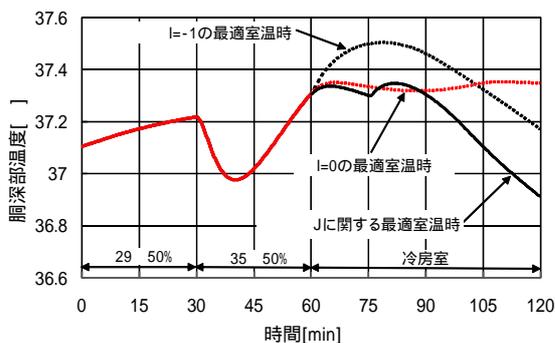


図 4-7 最適室温の比較

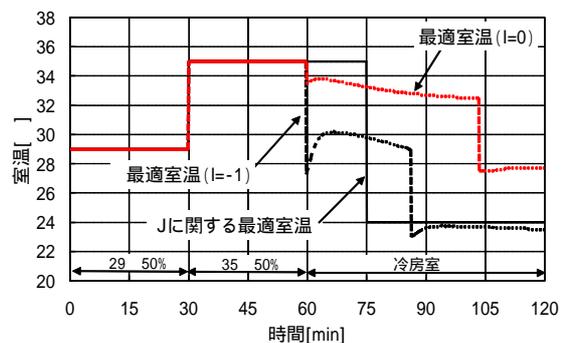


図 4-8 胴深部温度の比較

(3) 温冷感予測申告値

図4-9に全身温冷感の予測申告値を示す。評価関数 J に関する最適室温時には、はじめの15分間は $I=0.3$ と暖かい側の申告値となるが、75分に室温が24℃に低下すると、予測申告値 $I = -2.2$ まで急激に小さくなる。97分に $I = -1$ まで大きくなるが、これは皮膚における汗の蓄積がなくなり蒸発潜熱が少なくなったことが理由である。75～97分の間は $I=-2.2$ で寒い側の申告になるため、快適性の観点からは改善が必要である。深部温と温冷感申告値の両方を考慮した多目的評価を行ない、両者の整合のとれた設定室温の決定方法などに関する検討を行うことも必要であるかもしれない。

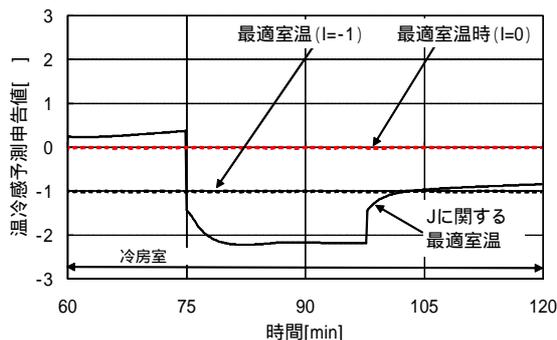


図4-9 全身温冷感の予測申告値

4.4 まとめ

本研究では、深部温を評価指標とする冷房環境の設定方法に関する提案を行った。高温環境から冷房空間へ入室した場合に、深部温の一過性上昇や停滞をなくし速やかに深部温を低下させるために最適な室温を決定する方法を示し、最適室温時の深部温の放熱特性に関する考察を行った。以下に結論を示す。

- (1) 終端時刻における深部温のセットポイント値からの偏差の絶対値を評価関数とした場合の最適室温の解析方法を提案した。
- (2) 高温状態にある深部温を早く低下させるためには、高温環境から冷房空間へ入室後、はじめは室温を高く保ち、ある時点から室温を低くするという室温制御を行うことが有効であることを示した。
すなわち、
「冷房室に滞在する60分間のうち、前半の15分は室温を高く設定し、平均皮膚温を高温のまま維持することにより皮膚血流量の減少を防ぎ、血流を介した深部からの放熱を促すことで深部の温度を低下させる。15分以降は設定室温を低くし、胴深部からの体組織を介した熱伝導による流出熱量を増加させることで胴深部温を低下させる室温制御により、深部温を早く低下させることができる。」
- (3) 温冷感の予測申告値に関する最適室温と、深部温を評価指標とする最適室温の比較を行い、両者の変動傾向が類似することを示した。