

深部温を評価指標とする最適空調制御

平成 20 年 3 月

田 中 宏 明

目次

第1章 序論

1.1 本論文の目的	1
1.2 従来の研究	3
1.2.1 深部温の過渡応答	3
1.2.2 人体熱モデル	4
1.2.3 着衣における水分の蓄積を考慮した人体生理の過渡応答	4
1.2.4 非定常状態における温冷感予測	5
1.2.5 頭部冷却時の生理・心理応答に関する研究	6
1.3 本論文の構成	8

第1部 深部温の過渡応答に関する基礎的検討

第2章 深部温の一過性変動に関する被験者実験

2.1 はじめに	10
2.2 被験者実験の概要	10
2.2.1 実験概要	10
2.2.2 測定項目	12
2.3 実験結果と考察	13
2.3.1 深部温の変動性状	13
2.3.2 皮膚温の変動性状	14
2.3.3 心拍数、皮膚血流量及び発汗量の変動性状	18
2.3.4 心理応答の結果	21
2.4 深部温の一過性変動に関する考察	22
2.5 2章のまとめ	23

第3章 深部温が一過性に変動するメカニズムに関する考察

3.1 本章の目的	24
3.2 人体熱モデルによる解析のための基礎方程式	24
3.2.1 体組織と血液の熱収支式	24
3.2.2 調節発汗量制御式と皮膚表面での水分収支式	29
3.2.3 皮膚血流量制御式	31
3.2.4 筋血流量制御式	31
3.2.5 熱産生量に関する式	32
3.3 実験結果と解析結果の比較	33

3.3.1	解析条件	33
3.3.2	深部温の比較	34
3.3.3	発汗量および血流量の比較	35
3.3.4	皮膚温の比較	37
3.4	深部温が一過性に変動するメカニズムに関する考察	42
3.4.1	考察の概要	42
3.4.2	深部温の一過性低下に及ぼす血流量変動の影響	42
3.4.3	深部温の一過性上昇に及ぼす血流量変動の影響	45
3.4.4	筋血流量と熱産生量の影響	48
3.4.5	深部温の一過性変動に及ぼす各要因の寄与率	51
3.5	深部温変動に及ぼす血液と体組織間の熱移動の影響	52
3.5.1	検討を行うモデルの概要	52
3.5.2	血液溜りの容積と表面積	56
3.5.3	血液と体組織間の熱コンダクタンス	56
3.5.4	解析ケース	58
3.5.5	C Bモデルと血液多質点モデルの比較	59
3.5.6	深部温変動に及ぼす熱コンダクタンスの影響	60
3.5.7	まとめ	65
3.6	3章のまとめ	66

第2部 深部温変動に及ぼす着衣と代謝量の影響

第4章 被験者実験による深部温に及ぼす着衣と代謝量の影響に関する検討

4.1	本章の目的	67
4.2	代謝量と着衣における水分蓄積の影響に関する被験者実験	67
4.2.1	実験概要	67
4.2.2	測定項目	68
4.3	実験結果と考察	70
4.3.1	被験者周辺の空気温湿度	70
4.3.2	深部温と深部温変動に関わる生理量の変動	71
4.3.3	各部位皮膚温度	74
4.3.4	着衣温度及び着衣間の空気温湿度	76
4.3.5	心理応答	80
4.4	4章のまとめ	81

第5章 着衣 人体熱移動モデルによる深部温変動の予測	
5.1 本章の目的	82
5.2 解析に用いた数値解析モデルの概要	82
5.2.1 解析モデルの概要	82
5.2.2 着衣の熱水分同時移動方程式	84
5.2.3 着衣間空気の熱水分収支式	85
5.2.4 解析条件	86
5.2.5 解析に用いた物性値と諸定数	87
5.3 解析値と実験値の比較	89
5.3.1 深部温等の比較	89
5.3.2 皮膚温等の比較	91
5.3.3 着衣温湿度の比較	94
5.3.4 着衣間空気温湿度の比較	95
5.4 深部温変動に及ぼす代謝量の影響	97
5.4.1 解析条件	97
5.4.2 解析結果と考察	97
5.5 5章のまとめ	99

第3部 深部温を評価指標とする冷房環境の最適設計

第6章 深部温を評価指標とする冷房環境制御	
6.1 はじめに	100
6.2 問題の定式化	100
6.2.1 解析対象	100
6.2.2 基礎式	101
6.2.3 評価関数	101
6.3 深部温を評価指標とする冷房時の最適室温	101
6.3.1 解析条件	101
6.3.2 解析方法	102
6.3.3 最適室温の解析結果	103
6.3.4 最適室温に関する考察	105
6.4 温冷感を評価指標とする最適室温との比較	109
6.4.1 温冷感申告値の予測式	109
6.4.2 解析結果と考察	110
6.5 6章のまとめ	112

第7章 深部温変動と快適性に及ぼす頭部冷却の影響	
7.1 はじめに	113
7.2 検討対象とする系	113
7.3 局所冷却に関する被験者実験	114
7.3.1 実験概要	114
7.3.2 測定項目	115
7.3.3 局所冷却方法の概要	116
7.4 深部温に関する実験結果と考察	117
7.4.1 冷却ダクト内の温熱環境	117
7.4.2 深部温変動	118
7.4.3 心拍数と血流量の変動	122
7.4.4 平均皮膚温変動	125
7.4.5 頭部皮膚温変動	126
7.4.6 その他部位の皮膚温変動	127
7.4.7 深部温変動などに関する考察	128
7.5 心理応答に関する実験結果と考察	130
7.5.1 温冷感申告値	131
7.5.2 温冷感申告値に関する考察	132
7.6 7章のまとめ	133
7.A Appendix 局所冷却時のダクト内環境	134
第8章 結論	136
引用文献	140
本研究に関する発表論文	146
謝辞	148

第1章 序論

1.1 本論文の目的

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。このように、日常の多くの場面で、人体は温熱的に非正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。非正常状態における温冷感や生理量の変動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、空調により健康かつ省エネルギー的な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、それらと整合のとれた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、非正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を行う。環境がステップ的に変化する場合の人体の生理応答に関する研究は古くから行われ多くの成果が得られているが、本研究では、非正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。

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「一過性の変動」を取り上げる。冷房室に入室したにもかかわらず深部温が上昇するというこの変動は、冷房の結果として予想される変動とは逆方向の変動であり、その理由を解明することは深部温を最適な状態に維持する観点からも重要である。本論文では、深部温の一過性上昇や停滞を少なくし、速やかに深部温を冷却させる空調方式の開発を視野に入れ、そのための基礎的検討を行う。

本論文の目的を以下の(1)～(3)に示す。

(1) 深部温が一過性に変動するメカニズムに関する検討

高温環境で歩行程度の運動を行った後、より低温の環境に移動し運動を停止した際に深部温が一過性に上昇する理由について、被験者実験と数値解析結果をもとに検討を行う。生理メカニズムを説明する方法としては、被験者実験に加えて、人体熱モデルによる数値解析を用い、解析結果をもとに人体各部位間の熱収支の観点から一過性に上昇するメカニズムを明らかにする。解析においてはStolwijkらの人体熱モデルを基礎とするが、従来検討が行われていない運動に伴う筋血流量と熱産生量の非定常特性（時間遅れ）の影響を考慮したモデルを提案し、その影響を定量的に検討する。

(2) 深部温変動に及ぼす代謝量と着衣量の影響に関する検討

人体が定常にある状態では、深部温は安定しておりその変動を問題にすることは少ないが、環境の変化に曝される場合や歩行から座位状態に移行するなど代謝量が変化する場合には深部温の変動は大きく、このような状況下では深部温を望ましい状態に維持する環境制御を行うためには、深部温がどのように変動しているかを把握し、それを予測する必要がある。

代謝量、着衣量の異なる状況下での深部温変動について被験者実験を行い、その変動特性を把握するとともに、人体熱モデルとして人体各部位を多質点化したStolwijkモデルを、着衣には熱水分同時移動方程式モデルを用いた解析を行ない、被験者実験結果と比較することで解析モデルの予測精度の検証を行う。

(3) 深部温を評価指標とする冷房環境制御手法の提案

深部温変動に関する上記2項目の基礎的な検討結果を踏まえ、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最適な室温の決定方法を提案する。さらに、非定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最適室温と、提案した方法により得られた最適室温の比較検討を行う。また、深部温を速やかに低下させ、同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として頭部冷却に着目し、その適用可能性を被験者実験により検討する。

1.2 従来の研究

高温環境から冷房空間へ移動した場合の人体生理の非定常応答に関して、これまでの研究のレビューを行う。具体的には、高温環境から冷房空間へ移動した場合の深部温の過渡応答に関する研究、人体熱モデルに関する研究、着衣における熱水分同時移動を考慮した解析に関する研究、頭部冷却時の人体の心理・生理応答に関する研究などについて説明を行う。

1.2.1 深部温の過渡応答

運動を行わない状態で環境温変化に曝された時の深部温の変動性状に関する研究としては、Behnke, Savard, Aschoffらの研究がある。Behnke¹⁻¹⁾らは、被験者3名を寒冷環境から高温環境に移動させた場合に直腸温が一過性に低下することを示し、この生理現象をafter drop と称しているが、一過性の低下が生じる理由は述べていない。Savard¹⁻²⁾らは、低体温状態から人体を温めた直後に深部温が一過性に低下する生理現象をafter dropと称し、その原因を被験者実験により検討している。17℃の冷水に30分間浸かった後、40℃のお湯に温浴させる実験を6名の被験者に対し行い、温浴初期に外耳道、直腸温、食道温が一過性に低下することを示した。このとき前腕、脛及び足における皮膚血流量の増加が小さいことを理由に、after dropに及ぼす皮膚血流量の影響は小さく、むしろ冷水槽から温浴槽までの歩行に伴う筋血流量の増加、冷水槽から出たことによるふるえ産熱の減少及び体組織間の熱伝導の時間遅れが影響していると推測している。Aschoff^{1-3) 1-4)}らは、26℃から-3℃の温度環境に被験者を移動させる実験を行い、-3℃の環境に移動後、直腸温が一時的に上昇することを示している。直腸温が上昇する理由を「抹消血管収縮により外層部にある温かい血液が核心部に環流されるため」と説明し、この現象をparadoxical riseと称しているが、26℃の環境下において抹消部の血液温度が直腸温より高いと解釈することには無理がある。高田ら¹⁻⁵⁾は、深部の熱容量が深部温の一過性の上昇および低下に及ぼす影響を数値解析により検討している。

運動開始直後の深部温変動に着目した研究は多い。Johnson¹⁻⁶⁾らは、室温24℃の環境下において被験者実験を行い、脚運動を開始後、前腕皮膚と前腕筋の血流量が運動初期に低下することを示し、同時に前腕皮膚温及び食道温も運動初期に低下すると報告している。同様の実験結果は他の文献¹⁻⁷⁾にも示されているが、食道温が一過性の低下を示す理由は考察されていない。また、Wenger¹⁻⁸⁾らは15℃, 25℃, 35℃の3条件の温度環境下において被験者実験を行い、運動開始直後に食道温が一過性の低下を示すことを示した。運動開始直後に、他部位より温度の低い活動筋における筋血流量が増加し、温度の低下した血流が全身に分配されることが深部温の低下する理由である可能性があると考えられている。また、運動強度が強いほど運動開始後の食道温低下が大きくなるという実験結果¹⁻⁹⁾も示されている。運動時には安静時とは異なる血流再分配調節¹⁻¹⁰⁾が行われることから、皮膚、筋及び深部における血流量変動が深部温の一過性の低下に関係していると考えられる。運動開始直後の研究が多く見られる一方で、運動停止後の深部温変動に着目した研究¹⁻¹¹⁾は少なく、屋外から冷房空間へ移動する場合のように、運動の有無と環境温変化が混在する被験者実験はほとんど行われていない。

1.2.2 人体熱モデル

Stolwijkら¹⁻¹²⁾は人体各部位を頭、胴、四肢で代表させたモデルを提案している。このモデルでは頭部を皮膚と深部、胴部を皮膚と筋と深部、四肢を皮膚と深部に分割し、血流は中央血流溜まりと称して1点で代表させている。生理学の知見をもとに、頭深部温、平均筋温及び平均皮膚温のセットポイント温度を定め、そのセットポイントとの偏差に応じて発汗量、血流量及びふるえ産熱を制御する温熱調節制御システムを構築している。Stolwijkらは人体の分割数を多くしたモデル¹⁻¹³⁾も提案している。同時にプログラムも公開し、解析に用いる諸係数の値も明記している。

Gagge¹⁻¹⁴⁾らはStolwijk¹⁻¹²⁾のモデルを簡易化し、人体をスキンとコアの2層に分割するTwo-Nodeモデルを提案した。Jones¹⁻¹⁵⁾らはTwo-Nodeモデルの皮膚ノードを着衣による被服状態により分割し、各部位の熱水分収支式を解いている。

Wissler¹⁻¹⁶⁾¹⁻¹⁷⁾は、人体を15個の部位に分け、各部位を円柱で近似し直径方向の1次元温度分布を計算するモデルを提案した。各部位に血液溜まりを配置させ、Stolwijkらよりも体組織と血管網を詳細に分割したモデルを提案しているが、諸係数値及び温熱制御モデルについては十分明らかにされていない。

StolwijkあるいはWisslerらのモデルが提案された以降、Gordon¹⁻¹⁸⁾、Arkin¹⁻¹⁹⁾、Fiala¹⁻²⁰⁾、Huizenga¹⁻²¹⁾、Tanabe¹⁻²²⁾、Smith¹⁻²³⁾、竹森¹⁻²⁴⁾、横山¹⁻²⁵⁾¹⁻²⁶⁾等により、各研究者の独自の視点より新しい人体熱モデルの開発がなされている。これらのモデルに共通した傾向は、体組織あるいは血管の分割数を多くし、血流のモデル化についても、対向流熱交換、動静脈吻合による血液移動、血管拡張や収縮による血管径変化を考慮するなど、人体各部のより詳細な温度分布を計算できるように改良していることである。例えば、Smithは不均一な温熱環境に曝された人体の詳細な温度分布を求めることをも目的に、人体を15個の円柱部位で近似し3次元温度分布を計算している。血管網については1次元円管モデルで近似し、円柱内部に血管網を簡易的に配置させることで、血管を介した組織への熱移動を考慮した解析を行っている。

多くの人体熱モデルが提案されているが、発汗・血流などの制御モデルについてはStolwijkモデル以降あまり発展していない。また、解析に用いられる物性値や諸係数の同定の必要性和、解析モデルでどの程度被験者実験を再現できるかといった検証の必要性は、すべてのモデルに共通した解決すべき課題であり、今後も人体熱モデルの改良は必要であると考えられる。

1.2.3 着衣における水分の蓄積を考慮した人体生理の過渡応答

高田ら¹⁻²⁷⁾¹⁻²⁸⁾¹⁻²⁹⁾は、高温環境で発汗し着衣に汗を含んだ状態で冷房空間へ入室する状況を模擬した被験者実験を行い、汗の蒸発過程における人体生理と着衣の熱水分の変動性状に関する検討を行っている。解析モデルとして人体にはGaggeらのTwo-Nodeモデルを、着衣には熱水分同時移動方程式¹⁻³⁰⁾¹⁻³¹⁾を用いたモデルを提案し、被験者実験結果を概ね再現できることを示している。また、着衣の水分容量を考慮した場合としない場合の解析¹⁻³²⁾を行い、蒸発過程における差は大きく水分容量として取り扱うことの重要性を示している。これらの実験では、単純な系による特性把

握を目的として、トランクスとTシャツのみの軽装な場合を研究対象としている。

1.2.4 非定常状態における温冷感予測

定常状態における人体が滞する環境の温熱設計や空調制御に広く用いられている指標としてはPMV⁽¹⁻³³⁾とSET*⁽¹⁻³⁴⁾があげられる。PMVは、人体と環境との熱収支を快適方程式により定式化し、熱平衡からのずれと温冷感の関係を示した温冷感指標であり、定常状態で用いることを前提とした指標である。SET*(標準新有効温度)は、Gaggeらにより提案された温熱環境の評価指標であり、ASHRAE(米国暖冷房空調学会)のスタンダードとされており、一般的には定常状態で用いられる。リアルタイムでSET*を算出する試み^{(1-35) (1-36)}等もなされているが、非定常状態における温冷感との対応関係は明らかにされていない。

非定常状態における温冷感予測を行うモデルとして、堀江⁽¹⁻³⁷⁾らは気温や放射温といった物理量のステップ変化に対する温冷感の応答を線形的にモデル化し、飯田⁽¹⁻³⁸⁾らは気温または平均皮膚温を入力とした人体の生理・心理応答の非線形モデルを提案しているが、これらのモデルでは本研究の対象とする多量の発汗がありそれが蒸発する環境条件を対象にはしていない。

斉藤⁽¹⁻³⁹⁾らは変動風がある場合の温冷感申告率を平均皮膚温とその変化率から予測するモデルを、桑沢⁽¹⁻⁴⁰⁾らは同じく平均体温から予測するモデルをそれぞれ提案しているが、室温一定の場合のみしか扱っていない。

Frank^{(1-41) (1-42)}らは、温冷感申告に対する皮膚温と深部温の相対的な寄与率を明らかにするために被験者実験を行い、温冷感申告を平均皮膚温と鼓膜温の線形回帰式で近似している。静脈内に冷輸液を注入して鼓膜温度を下げるという方法をとっているため、環境条件の変化に伴う自律的な温熱生理応答を検討したものではない。

Ring^{(1-43) (1-44)}らは実験から得られた感覚のデータと皮膚表面へ与えられた温度刺激に対する温度受容器との反応を関連づけるモデルを提案しているが、被験者実験等によるモデルの検証を行うには至っていない。

Fiala⁽¹⁻⁴⁵⁾らは、Fialaらの研究以前に行われた220ケースの被験者実験データの重回帰分析を行ない、平均皮膚温とその変化率及び視床下部温を説明変数とする非定常状態における温冷感予測式を提案し、実験結果とよく一致することを示している。

Wang⁽¹⁻⁴⁶⁾らは、動的な温冷感は温度受容器の静的応答と動的応答の和により決定されると仮定し、静的応答を平均皮膚温の関数により、動的応答を全身への流入熱量の関数により表現した温冷感予測式を作成している。ただし、被験者実験による確認は行われていない。

Guan^{(1-47) (1-48) (1-49)}らは、全身への流入熱量と平均皮膚温を説明変数とする非線形な温冷感予測式を作成している。

Zhang^{(1-50) (1-51) (1-52)}らは27名の被験者に対し109ケースの実験を行い、全身19部位ごとに局所温冷感申告の予測式を重回帰分析により求め、局所温冷感申告予測値の重み平均で算出する全身温冷感申告値を提案している。局所の温冷感予測式はFialaらに倣いシグモイド関数で近似し、説明変数として局所皮膚温とそのセットポイント、平均皮膚温とそのセットポイント、局所皮膚温の

変化率及び深部温の変化率を用いている。同様の方法で局所快適感と全身快適感の予測式も提案している。

Taniguchi¹⁻⁵³⁾¹⁻⁵⁴⁾らは、屋外から自動車に乗車し人体が熱的な非定常状態にある場合を対象に、顔面7点の平均皮膚温とその変化率を説明変数とする全身温冷感申告の予測式を提案している。被験者実験結果の重回帰分析により予測式の係数を決定し、顔面の平均皮膚温とその変化率のみで全身温冷感の予測が可能と説明している。

森ら¹⁻⁵⁵⁾は、発汗および蒸発する過程における温冷感予測式を構築することを目的に、高温環境から冷房空間へ移動する状況を想定した被験者実験を行い、皮膚表面の全熱流、平均皮膚温とその変化率、鼓膜温とその変化率の5つを説明変数とする温冷感予測式を重回帰分析により導出している。沢ら¹⁻⁵⁶⁾は、森らの実験結果に運動時の被験者実験結果も追加して重回帰分析を行い、運動により代謝量が変化する場合にも適用できるように森らの予測式を改良している。

1.2.5 頭部冷却時の生理・心理応答に関する研究

高温状態にある人体に対し、頭部冷却を行った場合の心理・生理応答を検討した研究は多く、頭部冷却時の心理・生理応答に関する基礎的な研究、人体各部位における温冷感覚の感受性に関する研究などが行われており、実用的な観点からは高温環境における熱ストレス軽減に及ぼす頭部冷却の効果に関する研究も行われている。

頭部冷却時の生理・心理応答に関しては、例えば、Kato¹⁻⁵⁷⁾、森¹⁻⁵⁸⁾の研究があげられる。Katoらは、40℃の風呂に被験者を45分間浸からせ、頭部に2度にわたり気流を5分間吹き付けた場合の生理・心理応答を検討している。頭部に気流を吹き付けた場合には、前額と頬の皮膚温は低下、心拍数は減少し、温冷感申告はWarmからNeutralに、快適感申告はUncomfortableからComfortableに即座に改善できるとしている。同時に、頭部を冷却した場合には、冷却しない場合に比べて、45分間における鼓膜温と食道温の上昇幅は小さいことを示している。同様の研究はShiraki¹⁻⁵⁹⁾、Rigger¹⁻⁶⁰⁾、Hirata¹⁻⁶¹⁾、McCaffrey¹⁻⁶²⁾、Cabanac¹⁻⁶³⁾らによっても行われている。

森らは高温環境で頭部を冷却した場合の生理・心理応答に関する検討を行っている。人体熱モデルによる解析により、“高温環境で頭部を冷却すると発汗調節の主要な入力信号となっている頭部の温度が下がるため、他の部位を同程度冷却する場合と比較して調整発汗量が少なくなり、全身からの放熱量が抑えられ、平均皮膚温が高くなる。”といった仮説を導き、被験者実験により仮説の検証を行っている。

頭部の温冷感覚の感受性に関しては、例えば、Crawshaw¹⁻⁶⁴⁾、李¹⁻⁶⁵⁾、西原¹⁻⁶⁶⁾、Nadel¹⁻⁶⁷⁾らの研究があげられる。Crawshawらは人体の各部位に水冷サーモードによる冷刺激を与え、冷感覚と大腿部における局所発汗の減少量を評価指標として用い、その結果から体幹部や脚部と比較して前額の冷感受性が高いとしている。李らは、全身の皮膚25点に鉄製プローブによる冷刺激を与え部位による冷感受性の違いを検討し、顔面と体幹部の冷感受性が高く、手掌と足底を除く四肢部

は低いと報告している。西原らは分割衣服を用いて曝露面積を等しくした条件で冷気曝露による局部冷刺激の実験を行い、頸曝露時には体幹部の皮膚温や温冷感が有意に低下し、また冷却していない部位への影響も大きいと報告している。温感受性については、Nadelらがランプ放射により人体各部位へ温刺激を与え、大腿での局所発汗の変化量を評価指標として用い、その結果から体幹部や大腿に比べて顔面の温感受性は3倍程度、下腿は大腿の半分程度であるとしている。

これらの研究では前額や顔面など頭部の冷感受性は高いという結果が報告されている。

熱ストレス軽減の観点から頭部冷却に着目した研究としては、Nunneley¹⁻⁶⁸⁾、物部¹⁻⁶⁹⁾らの高温環境で特殊な装備を着用して作業する状況下で頭部冷却を適用する実用的な研究、睡眠時に冷却枕を利用して熱ストレスを軽減させる水野¹⁻⁷⁰⁾らの研究などあげられる。Nunneleyらは航空機のコクピット内でのヒートストレス軽減を目的に、水冷キャップとベストの使用による頭部と体幹部への冷却を行い、直腸温、心拍数、前額及び全身からの発汗量、快適感による評価に基づき、頭部への冷却が有効であるとしている。物部らは、消防員装具を着用時のヒートストレス軽減を目的に冷却剤と送風により頭部を冷却し、外耳道温、脈拍数、温熱感による評価から、頭部冷却特に送風による冷却が有効であるとした。装具内ポケットに入れた冷却剤による体幹部の冷却は、平均皮膚温、外耳道温、脈拍数、温熱感による評価の結果からあまり効果がないと結論づけている。水野らは高温高湿環境で睡眠時に冷却枕を使用することによって、睡眠中の覚醒が抑制され発汗量が減少することから、温熱ストレスを軽減できる可能性を示している。

また、頭部を冷却する場合には人体は非定常で非一様な温度環境に曝されるため、頭部冷却時の温冷感予測にはそれらの影響を考慮する必要がある。森¹⁻⁷¹⁾ 1-58)ら部位の温冷感受性を考慮した非定常温冷感予測式の検討を行っている。平均皮膚温とその変化率を説明変数として含む温冷感予測式を提案しているが、平均皮膚温算出に際し面積平均でなく感受性の重みを考慮した平均皮膚温を利用することで、足部冷却時の温冷感変動を予測できることを示しているが、頭部冷却時については十分な一致を得るには至っていない。1.2.4章で示したZhang¹⁻⁵⁰⁾らの提案式を作成する際に不均一環境の1つとして頭部の冷却の被験者実験とそれにかかわる温冷感予測を行っている。

以上より、過去の研究では、頭部は温冷感覚の感受性が高く頭部冷却により熱ストレスを軽減できるといった定性的な結果は得られているが、熱的に非定常状態にある人体に対して頭部冷却を適用する場合における生理・心理応答の特性把握とその予測方法は、十分明らかにされていない。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1-1 に、各章で行う検討の概要を以下に説明する。

第 1 章では、本論文の目的と構成及び本研究に関わる研究のレビューを行う。

第 1 部では、人体深部温の過渡応答に関する基礎的検討を行う。

第 2 章では、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被験者実験を行い、その際の深部温の一過性変動性状を検討する。冷房室の温度条件が異なる 2 ケ - スの被験者実験を行い、深部温を含む生理応答の比較検討を行なう。

第 3 章では、人体熱モデルを用いて第 2 章の被験者実験結果を再現するとともに、解析結果に基づき深部温が一過性の上昇を示すメカニズムを明らかにする。具体的には、深部温の変化に関係すると考えられる生理量のうち、皮膚と筋の血流量、及び熱産生量と筋血流量の非定常特性に注目し、それらが深部温の一過性上昇に及ぼす影響を検討する。さらに、各因子が一過性の上昇に及ぼす寄与率を感度解析により検討する。

第 2 部では、深部温変動に及ぼす着衣と代謝量の影響に関する検討を行う。深部温を望ましい状態に維持する空調設計を行うためには、日常経験する様々状況で深部温がどのように変動しているかを把握し、それを予測する必要がある。代謝量と着衣は深部温変動に及ぼす影響が大きい代表的な要因であり、それらの影響を検討する必要がある。

第 4 章では、深部温変動に大きな影響を与える要因である代謝量と皮膚血流量について検討する。代謝量については、代謝量の違いが深部温の一過性変動に与える影響を検討する。皮膚血流量については、屋外から冷房空間へ入室した場合に皮膚温に顕著な影響を与える着衣の水分蓄積に着目して、その影響を検討する。具体的には、高温環境で発汗して着衣に多量の汗を含んだ後で冷房空間へ入室し、汗の蒸発により人体が冷却していく過程における深部温変動を検討する。T シャツと短パンなど着衣量の少ない被験者実験は既に報告されているが、夏期の服装としては着衣量が大きい場合についての検討はなされていないため、本研究ではその影響を検討する。

第 5 章では、高温環境から冷房空間へ移動する場合の深部温変動を予測するための解析モデルを提示し、第 4 章で示した被験者実験の結果と計算値とを比較することで、解析モデルの精度を検討する。人体熱モデルには人体各部位を多質点化した Stolwijk モデルを、着衣には熱水分同時移動方程式を用いたモデルを用い、被験者実験結果と比較することで予測精度の検証を行う。

第 3 部では、深部温を評価指標とする冷房環境制御について検討を行う。

第 6 章では、深部温を評価指標とする冷房環境の設定方法を提案する。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抑制し速やかに深部温を低下させる最適な室温の決定方法を提案する。また、非定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最適室温と、提案した方法により得られる最適室温の比較検討を行う。

第 7 章では、深部温を速やかに低下させ、同時に温熱快適性も満足するための冷房方法として、

頭部冷却に着目し、その可能性を被験者実験により検討する。高温状態にある人体に対し、冷感受性の高い頭部を優先して冷却することにより、設定室温が高温の場合でも涼しい側の温冷感が得られる可能性があることを考慮し、高温環境で歩行を行ない高温状態にある人体に対し、頭部冷却による局所冷房を行なった場合の温冷感申告と深部温変動に関する検討を被験者実験により行い、頭部冷却の適用可能性について検討を行う

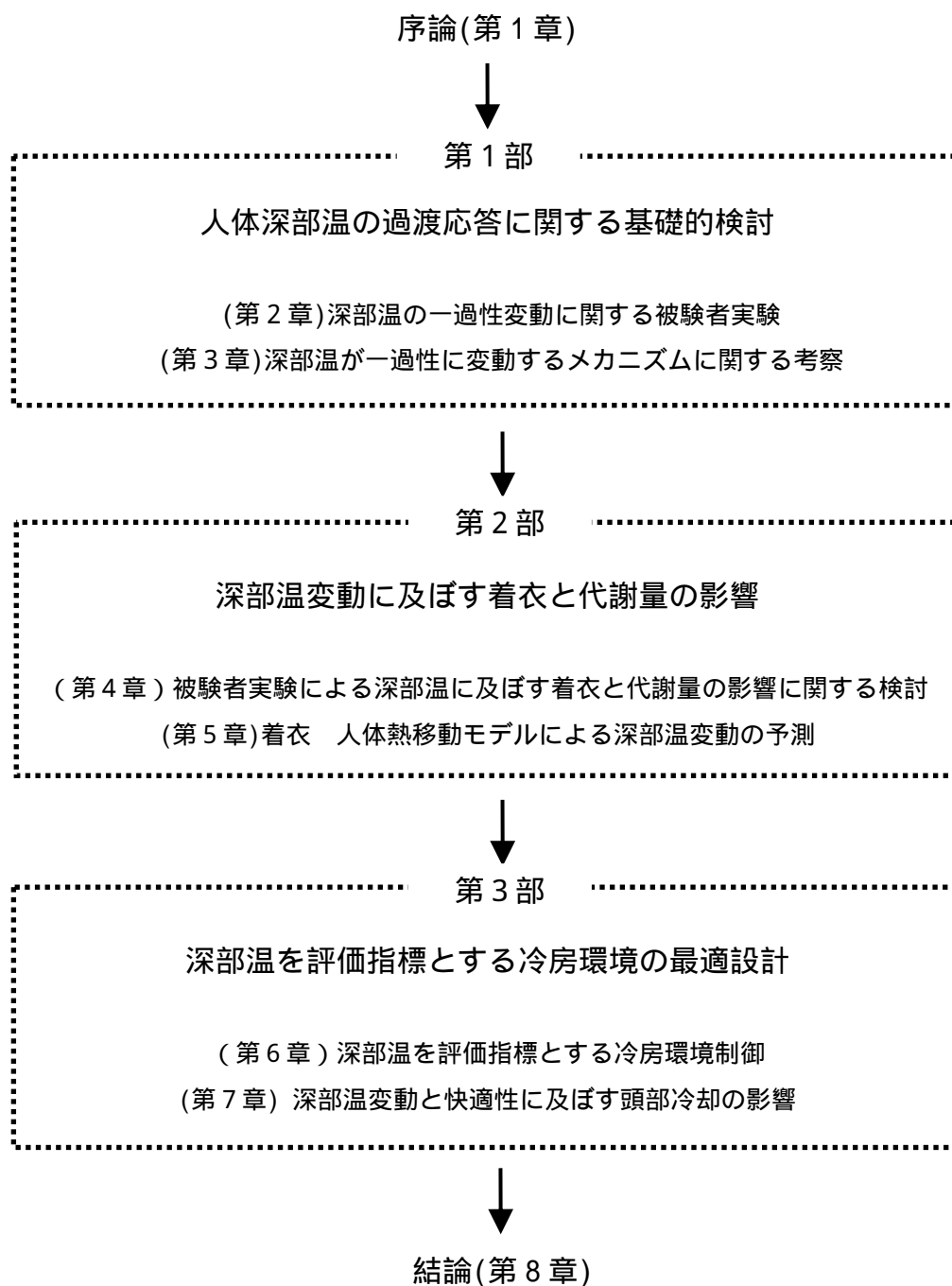


図 1-1 本論文の構成

第 1 部

深部温の過渡応答に関する基礎的検討

第2章 深部温の一過性変動に関する被験者実験

2.1 はじめに

高温状態にある人体を冷房などにより冷却した場合の人体からの放熱特性を検討する際、皮膚温変動や皮膚表面からの放熱特性に着目した研究は多く見られるが、人体内部の温熱調節制御系や深部温の変動特性に着目して検討を行った研究は少ない。高田・銚井らにより、高温環境から冷房空間へ移動した場合の深部温変動特性に関する研究²⁻¹⁾²⁻²⁾が行われている。これらの研究では、温湿度の階段的变化を想定した被験者実験を行っているが、興味深いことに、気温が階段的变化すると、皮膚温は気温と同じ方向に変化するのに対し、深部温は気温とは逆方向に変化し極値をとった後、気温と同方向に変化するという一過性の変動特性を示す場合がある。つまり、より温度の高い環境に移動した場合には深部温は一過性の低下を示し、より温度の低い環境に移動した場合には、深部温は一過性の上昇を示す。例えば、暑い屋外に滞在した後冷房空間に入室する状況では、冷房を行っているにも関わらず深部温は一過性に上昇する。深部温が一過性に上昇するというこの変動は、冷房に期待する効果に矛盾しているように見える。

本章では、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検討を行う。特に、冷房空間へ移動し、運動を終了した後に深部温が示す一過性の温度上昇に着目し、深部温変動が一過性の変動特性を示すその生理的なメカニズムに関する知見を得ることを目的とする。冷房室の温度条件が異なる2ケースの被験者実験を行い、深部温、各部位皮膚温、心拍数などの比較検討を行なう。

2.2 被験者実験の概要

2.2.1 実験概要

実験は2004年9月17,18日に京都大学内の実験室で行われた。被験者は健康な男子大学生1名(体重54.5kg,身長169.0cm,23歳)であり、トランクスのみ着用する。被験者は屋内外移動を模擬した図2-1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、発汗量及び血流量を10秒間隔、体重と心拍数を1分間隔で測定する。被験者は実験開始の約1時間前から26 50%RH程度に調整された室に滞在する。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2-2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²⁻³⁾)で繰り返す。恒温恒湿実験室の概要を図2-3に示す。

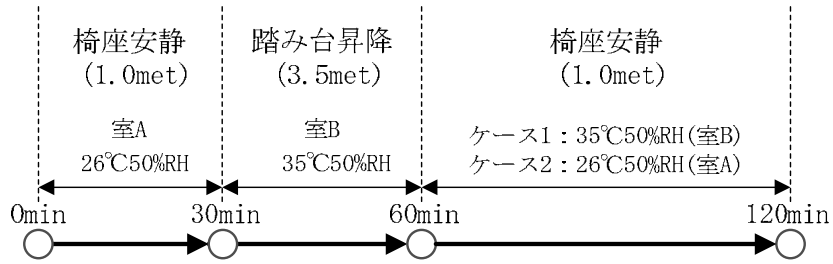


図2-1 被験者実験のスケジュール

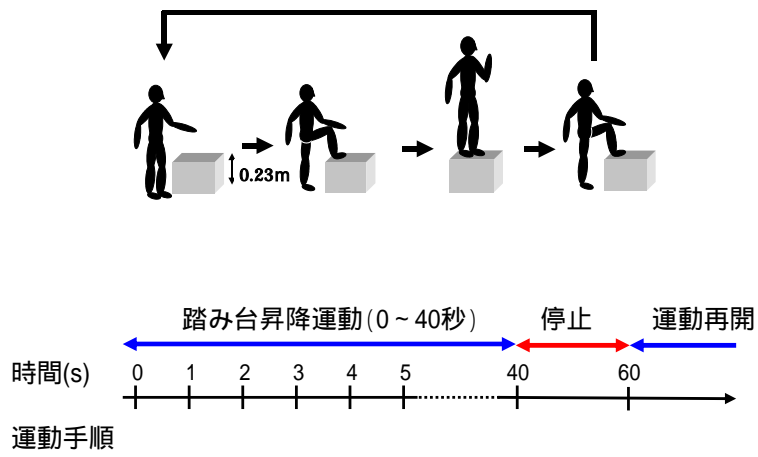


図2-2 踏み台昇降運動の概要

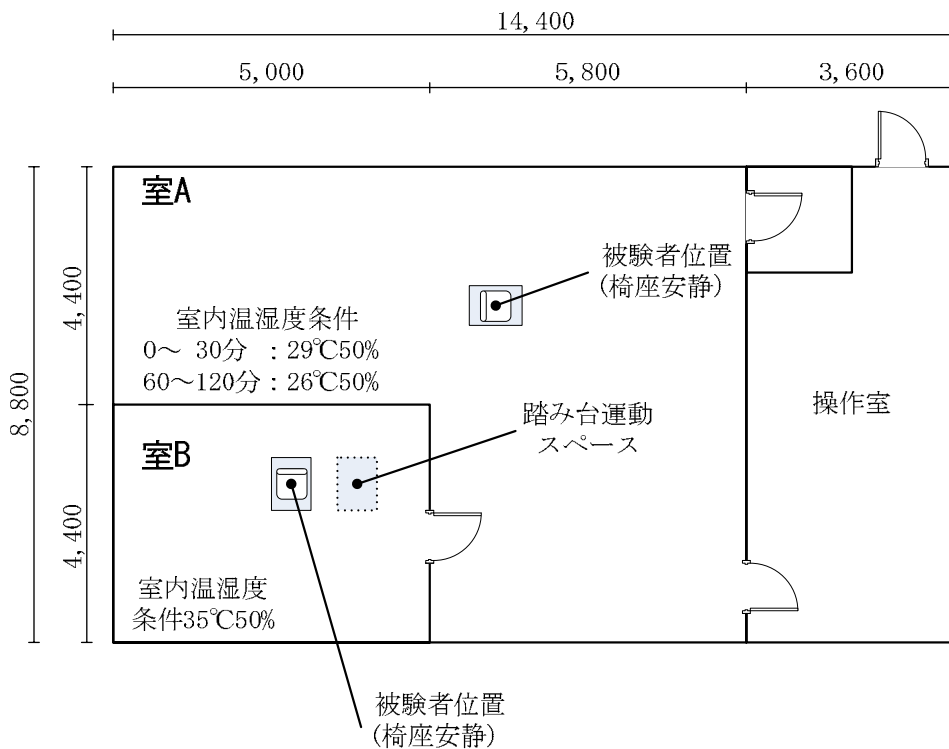


図2-3 恒温恒湿実験室の概要

2.2.2 測定項目

測定部位と測定項目などを表2-1に示す。皮膚温11点（前額、後頸、前腕、手背、大腿、脛、足背、胸、腹、背、肩）と、直腸温・鼓膜温の人体各部位温度を測定した。全身温冷感申告及び全身快適感申告スケールを図2-4a、2-4bに示す。温冷感スケールはASHRAEの直訳スケール²⁻⁴⁾を用いた。踏み台昇降運動中（30～60分）の体重と心拍数の測定は、図2-2に示すように1分間のうち踏み台昇降運動を停止する40～60秒の20秒間に行う。この時、被験者に温冷感と快適感の申告をしてもらう。

表 2-1 測定項目

測定項目	測定部位など	測定装置	測定間隔
皮膚温	前額、後頸、前腕、手背、大腿、脛、足背、胸、腹、背、肩の11点	T型熱電対(0.2mm)	10sec
深部温	直腸、鼓膜	専用のT型熱電対センサー	10sec
発汗量	大腿皮膚	換気カプセル方式の連続蒸散・発汗測定装置（ケ-アト [®] IAMU-100）	10sec
皮膚血流量	大腿皮膚	レーザー血流計（アドバン [®] ALF21）	10sec
体重損失量		電子天秤（メトラ [®] KCC150）	1min
心拍数	左耳朶	光電脈波検出式心拍計（キャットアイ）	1min
室内温湿度	FL+0, 0.1, 0.6, 1.1mの4点	小型温湿度計（エ-アト [®] デイTR-72S）	10sec
心理量	温冷感申告値、快適感申告値	-	1min

・ 温冷感についてはあなたの「暑い」「寒い」「どちらでもない(中立)」の感覚を基準にして下さい。

・ 下記のものさしに沿って小数第1位までの数値で答えて下さい。

・ 「非常に暑い」「非常に寒い」よりも強い温冷感を感じた場合には、3以上の数値を答えてもかまいません。

非常に暑い 暑い やや暑い 中立 やや寒い 寒い 非常に寒い

-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----

+ 3 + 2 + 1 0 - 1 - 2 - 3

図2-4a 全身温冷感申告のスケール

・ 快適感について下記のものさしに沿って、-2から+2までの整数で答えて下さい。

快適 やや快適 中立 やや不快 不快

-----+-----+-----+-----+-----

+ 2 + 1 0 - 1 - 2

図2-4b 快適感申告のスケール

2.3 実験結果と考察

2.3.1 深部温の変動性状

図2-5, 図2-6に各ケースの直腸温変動を示す。

運動開始直後の30分以降、2ケースとも深部温は一過性の低下を示す。両ケースとも0～30分における直腸温実験値のばらつきは大きく、データに雑音が含まれていると考えられるが、ここでは20～30分における深部温の最高温度と高温室入室後の最低温度を比較して一過性低下の程度を説明する。ケース1の場合で37.6 から37.2 まで0.4 低下、ケース2の場合でも37.2 から36.8 まで最大0.4 低下するといったように、ケース1およびケース2とも気温の変化方向とは逆方向に変化する。すなわち、より温度の高い室に移動したにもかかわらず、深部温は一過性の低下を示す。ばらつきを勘案し、20～30分における平均値と高温室入室後の最低温度を比較した場合でも、ケース1で37.4 から37.2 まで0.2 低下、ケース2の場合で37.0 から36.8 まで0.2 低下する。

次に運動を停止した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分間程度続き、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。

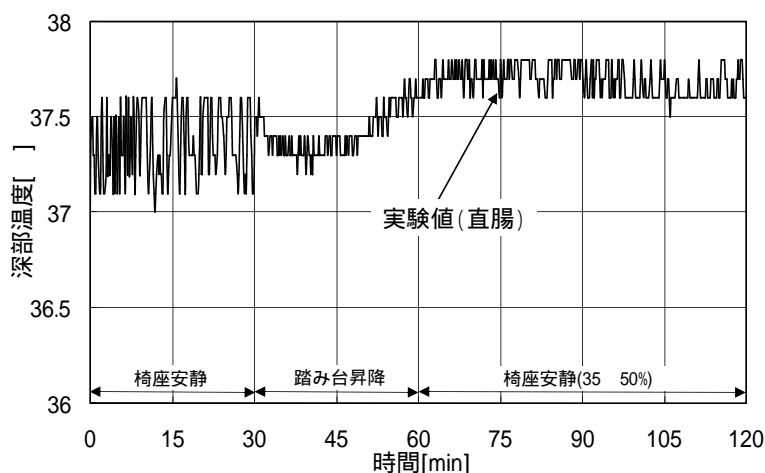


図2-5 深部温変動 (ケース1)

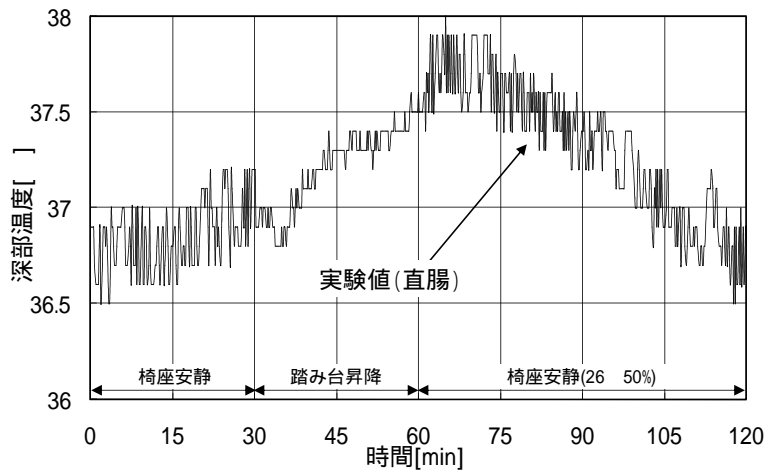


図2-6 深部温変動(ケース2)

2.3.2 皮膚温の変動性状

(1) 平均皮膚温の比較

Hardy & Duboisの7点法²⁻⁵⁾により求めた平均皮膚温を図2-7に示す。センサーの接触不良により腹部温が異常値を示していたため、腹部の代わりに背部、肩部、胸部のうち中間の温度変動を示した肩部温度を用いて平均皮膚温を算出した。

高温室では、ケース1とケース2はほぼ同様の変動性状を示す。高温室入室5分後には約1℃温度が上昇する。35～45分に極大値をとった後に一旦低下し、47分過ぎから再度上昇する。

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。

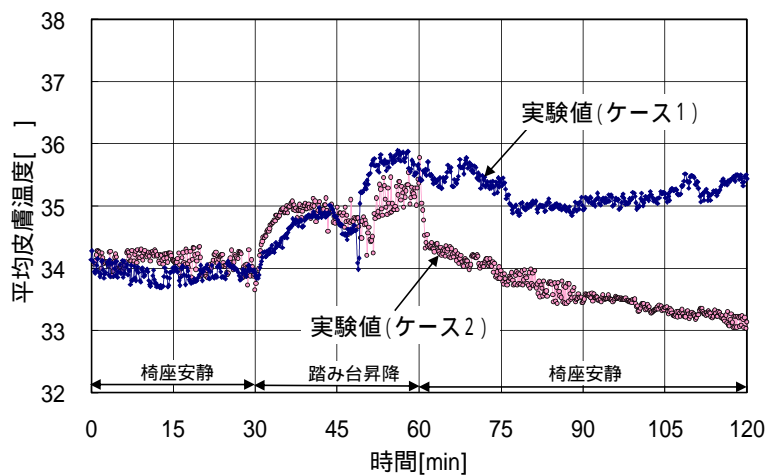


図2-7 平均皮膚温変動の比較

(2) 末梢部皮膚温の比較

末梢部皮膚温として、足背と前腕の皮膚温変動を図2-8、図2-9に示す。足背についてみると、ケース1の場合には、運動停止後も発汗が続いているにもかかわらず(図2-18)、皮膚温は上昇を続け、35 から36.5 まで1.5 も上昇する。皮膚温度が室空気温(35)より高いことから、この温度上昇は、運動停止による皮膚表面の熱・湿気伝達率の減少による皮膚表面から室空気への放熱量の減少、あるいは運動停止後の血流再循環¹⁻¹⁰⁾等による皮膚血流量の増加、などが影響していると考えられる。ケース2では、運動停止後も90分までほぼ同じ温度を維持した後、徐々に低下する。前腕については、ケース1では運動停止後も温度上昇が続き、70分過ぎに一旦低下するが80分頃から再び上昇を始める。ケース2では、運動を停止後急激に低下するがすぐ上昇し、70分以降は実験終了まで低下を続ける。

以上のように、末梢部の皮膚では、ケース1では運動を停止した後も皮膚温の上昇が続く傾向を示すが、ケース2の場合には、運動を停止した後は、ほぼ同程度の温度を維持した後、緩やかに低下するといった傾向を示す。

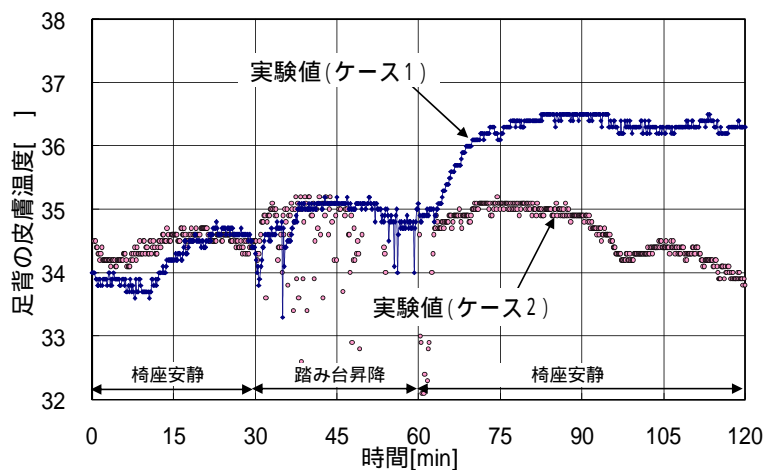


図2-8 足背皮膚温変動の比較

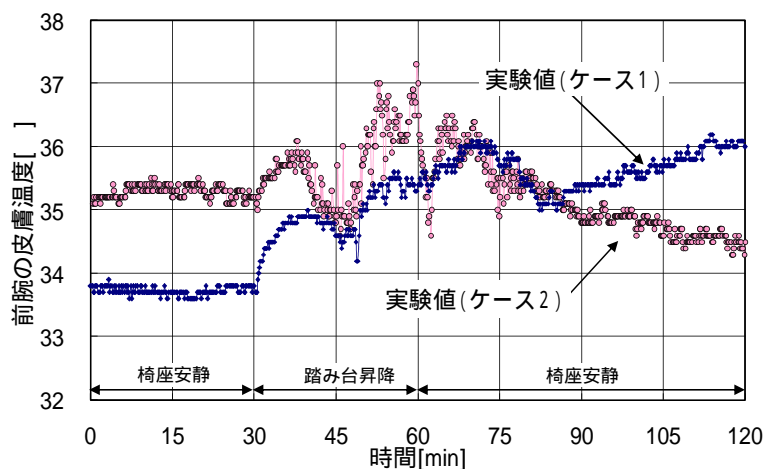


図2-9 前腕皮膚温変動の比較

(3) 脛と大腿の皮膚温比較

脛と大腿の皮膚温変動を図2-10、図2-11に示す。脛と大腿の皮膚温変動の特徴としては、他部位に比べて運動中の温度上昇が大きいことが挙げられる。これは、脚運動の影響により脛と大腿の筋における熱産生量が大きいことが理由と考えられる。

脛では運動開始から急激に皮膚温は上昇し、60分の時点でケース2で4℃、ケース2で5℃も上昇する。ケース1の場合、運動停止後も皮膚温は上昇を続け、72分に37.8℃に達した後、徐々に低下を続け120分の時点で36℃程度になる。ケース2の場合、運動中に一旦35℃で安定した後50分以降に38℃程度まで急激に上昇する。運動終了後26℃の室に移動すると、5分間で4℃も急激に低下する。その後5分間ほど34.2℃を保った後、低下を続け120分には32.6℃になる。

大腿皮膚においても、運動開始後皮膚温は急激に上昇し、55分の時点でケース1では40℃に、ケース2では37℃まで上昇する。ケース1で7℃、ケース2で4℃も上昇している。運動終了後は、ケース1とケース2ともに緩やかにほぼ単調に皮膚温は低下する。

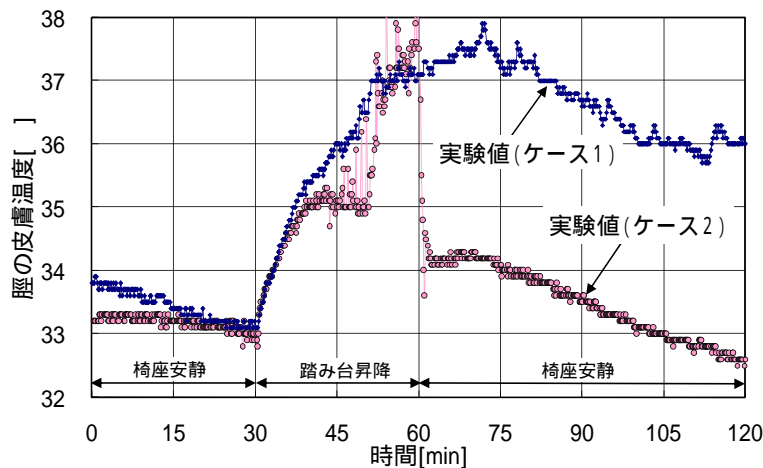


図2-10 脛皮膚温変動の比較

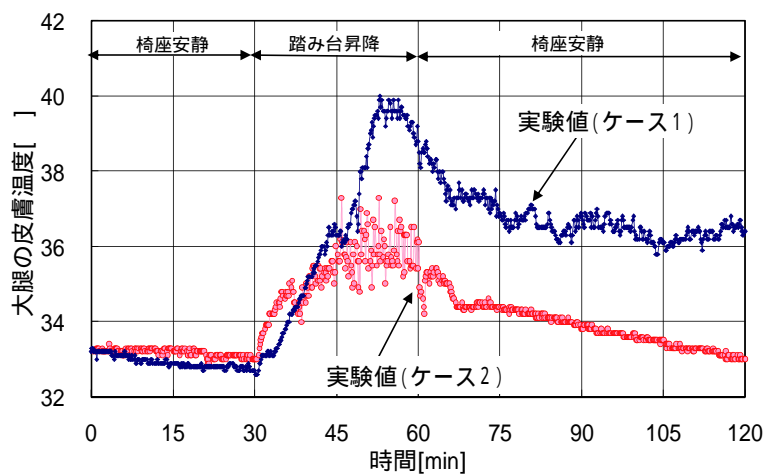


図2-11 大腿皮膚温変動の比較

(4) 胸部皮膚温の比較

背、肩、胸の皮膚温変動を図2-12～図2-14に示す。

高温室では、両ケースとも全ての部位で同様の変動性状を示す。すなわち運動開始直後に1程度上昇し、35～45分間に極大値をとった後一旦低下する。その後、45分過ぎに再上昇するという特徴的な変動特性を示す。ケース1では運動開始して2分後に、ケース2では7分後に発汗量が急激に増加する(図2-18)が、これらが皮膚温に影響を及ぼしていると考えられる。

運動停止後については、35の高温室に滞在し続けるケース1の場合、背では温度は低下せずむしろ徐々に上昇し、肩でも80分以降は緩やかに上昇する。胸では急激に低下後上昇し、その後再び低下する。運動停止後に26の冷房室に移動するケース2では、全ての部位で皮膚温は急激に低下する。75分までの15分間で背で約2、肩で3、胸で4温度は低下し、80分以降はほぼ一定の値になる。また、90分以降における胸皮膚温のばらつきが大きいのが、これは汗の影響によりテープが剥がれ熱電対の皮膚への密着性に問題があったことが理由と考えられる。

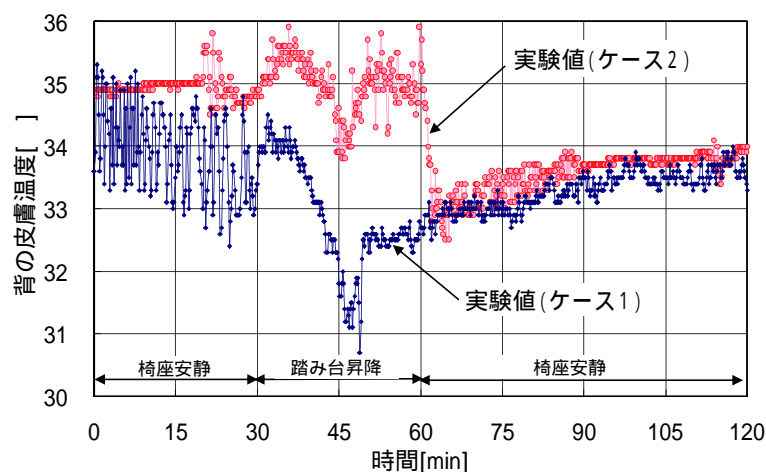


図2-12 背皮膚温変動の比較

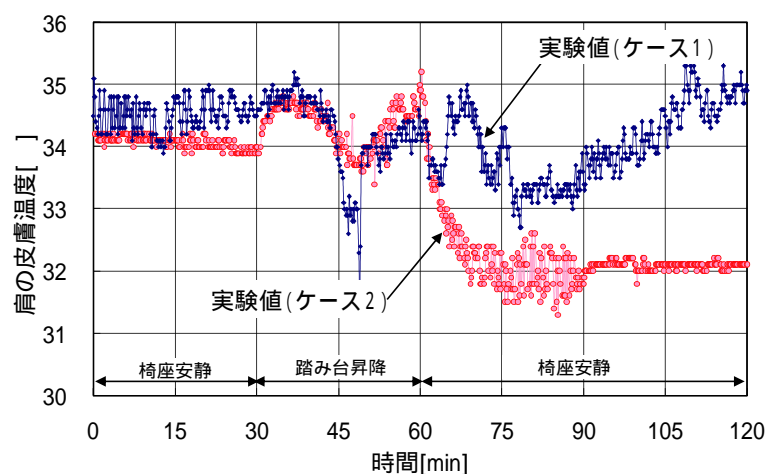


図2-13 肩皮膚温変動の比較

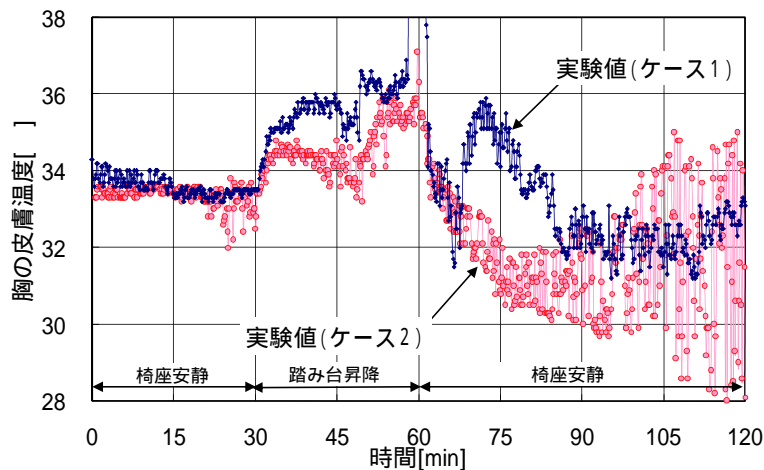


図2-14 胸皮膚温変動の比較

(5) 前額皮膚温の比較

前額皮膚温変動を図2-15に示す。実験のばらつきが大きい0~30分の結果は分析対象としない。30分以降実験が終了する120分まで、ケース1とケース2は同様の変動性状を示す。昇降運動直後に36℃まで1℃程度上昇した後はしばらく一定温を保ち、45分以降再び急激に上昇をはじめ、60分の時点で約40℃にも達する。運動終了後、ケース1では皮膚温は急激に低下し、ケース2においても70分以降に急激に皮膚温が低下する。35℃の高温環境に滞在するケース1では8℃程度低下した後、90分以降はほぼ一定値となる。26℃の冷房室に移動するケース2では75分までに6℃程度低下する(75分以降はばらつきが大きいため分析対象とはしない)。

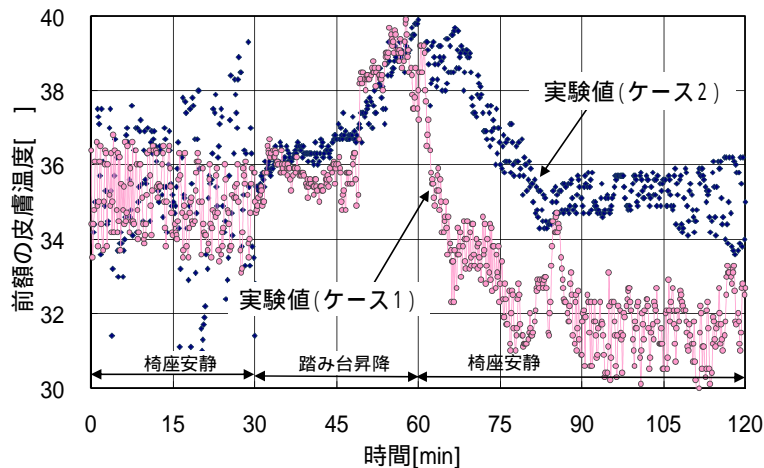


図2-15 前額皮膚温変動の比較

2.3.3 心拍数、皮膚血流量及び発汗量の変動性状

(1) 心拍数の比較

図2-16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。

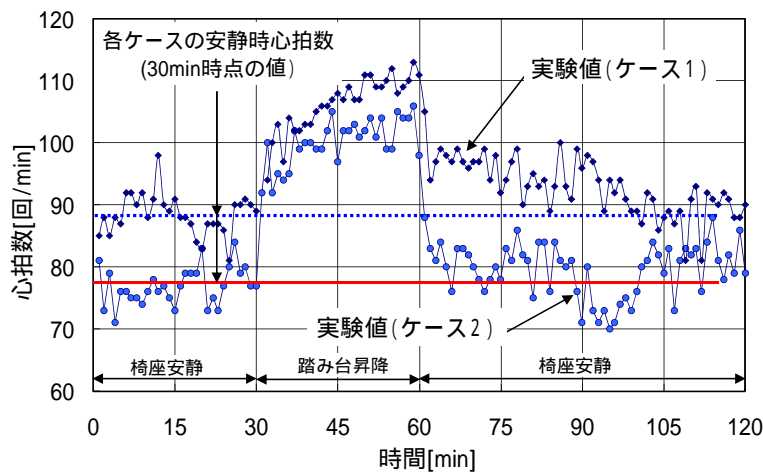


図2-16 心拍数変動の比較

(2) 皮膚血流量の比較

センサーの接触不良によりケース2はデータ欠損であるため、ケース1の結果のみを図2-17に示す。踏み台昇降運動のサイクルのうち、運動を行っている0~40秒間の値は、停止中の40~60秒の値よりも0.7~1.0 (ml/min/100g)程度大きくなる。運動中に高い値を示すのは、筋収縮の影響¹⁻¹⁰⁾であると考えられる。運動停止後については、60分(運動を停止した状態)の値を基準に見ると、運動停止すると皮膚血流量は緩やかに低下し、75分以降に0.7~0.9 (ml/min/100g)でほぼ定常値になる。35の高温室に滞在する60分以降の皮膚血流量は、29の前室(0~30分)時の値よりも1.6倍程度多い。

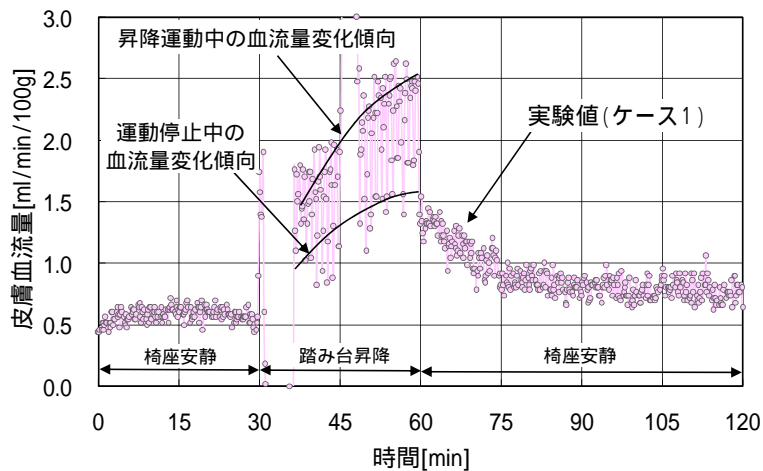


図2-17 大腿部皮膚血流量(ケース1)

(3) 発汗量及び体重減少量の比較

大腿部の発汗量を図2-18に、時刻30分の体重を基準にした体重減少量を図2-19に示す。

ケース1では、運動開始直後に発汗量は急激に増加し、47分に最大値をとった後低下し、運動中は $0.07\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ でほぼ一定の値となる。60分に運動停止した後も発汗は続き15分間は $0.07\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ でほぼ一定を保つ。その後徐々に減少し、発汗は実験終了まで続く。45分過ぎに発汗量が急激に減少するが、これは一時的にカプセルの密着性が悪くなったためと考えられる。ケース2では、60分に運動を停止し26の冷房室に移動して2分たった時刻62分に発汗は停止する。

体重減少量については、30～120分までの90分間にケース1では350g、ケース2では200gとなる。30～60分の体重減少量は両ケースで等しく約160gであるが、60分以降の平均体重減少速度はケース1で $3.7\text{g}/\text{min}$ 、ケース2で $2.5\text{g}/\text{min}$ となり60分以降も発汗が続くケース1の方が減少速度は大きい。また、ケース2では、60～75分の平均体重減少速度は $4.0\text{g}/\text{min}$ 、75～120分の平均体重減少速度は $1.2\text{g}/\text{min}$ となり、75分頃を境に減少速度が変化する。75分頃までに皮膚に蓄積した汗は蒸発してなくなり、75分以降は不感蒸泄と呼吸による水分蒸発により体重減少が生じていると考えられる。

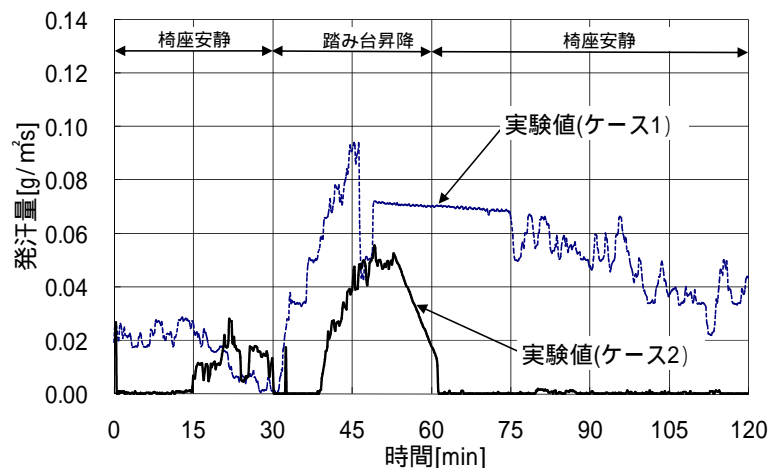


図2-18 大腿部発汗量の比較

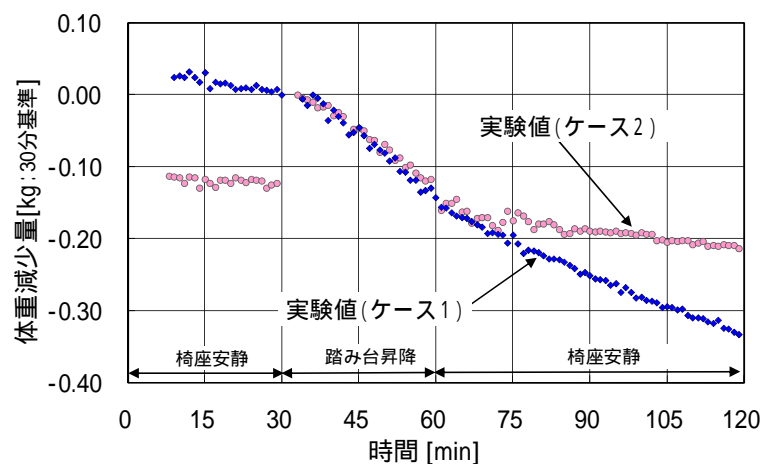


図2-19 体重減少量の比較(時刻30分基準)

2.3.4 心理応答の結果

(1) 温冷感申告値

図2-20に全身温冷感申告値を示す。高温室入室とともに全身温冷感申告値は大きくなり、60分時点でケース1で3.5、ケース2で4.0となる。冷房室入室後は徐々に小さくなり、ケース2では75分に0(中立)に戻る。35 の高温環境に滞在するケース1では90分に1.5(やや暑いと暑いの間)となり、温冷感申告値はほぼ一定に達する。

(2) 快適感申告値

図2-21に全身快適感申告値を示す。高温室入室とともに全身快適感申告値は小さくなり、60分時点で両ケースとも-2(不快)になる。26 の低温室に入室するケース2では、冷房室に入室すると申告値は徐々に大きくなり、90分に+1(やや快適)で定常になる。ケース1では75分に-1(やや不快)で定常に達する。

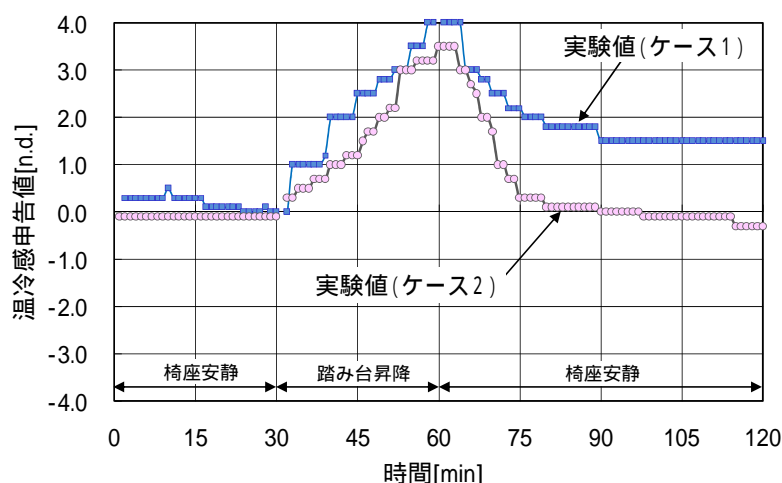


図2-20 全身温冷感申告値

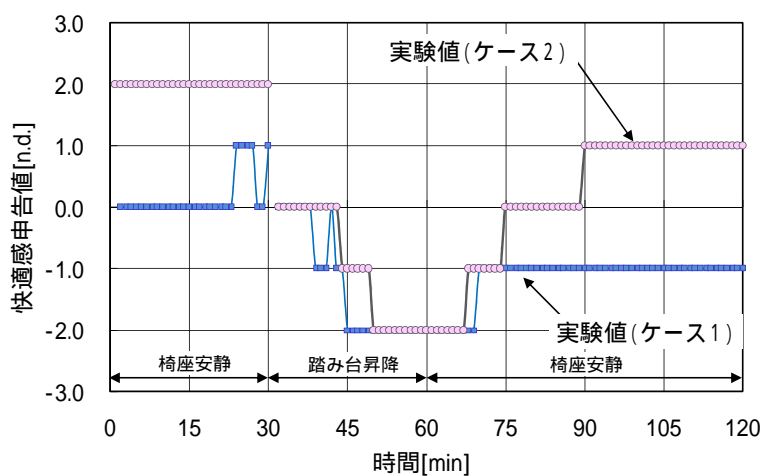


図2-21 全身快適感申告値

2.4 深部温の一過性変動に関する考察

以下では皮膚温、皮膚血流量および心拍数の変動性状に着目して、深部温が一過性に変動する理由を考察する。

(1) 高温環境に移動して運動を開始した後に示す一過性の低下について

高温環境に移動し運動を開始した直後、ケース1とケース2ともに、皮膚温、心拍数とも急激に上昇する。また、ケース1の皮膚血流量の測定結果では、運動開始後に皮膚血流量も増加している。等温環境下において運動を開始した後に、血流の再循環により皮膚血流量が減少し筋血流量が増加するという実験報告¹⁻⁶⁾¹⁻⁸⁾¹⁻¹⁰⁾があるが、今回の実験結果では、筋血流量に加えて皮膚血流量も増加したと考えられる。

各部位の温度について考察する。高温室入室時点の直腸温は、ケース1で37.5、ケース2で37.0である。各部位皮膚温は両ケースともに33~35の範囲になり、直腸温は皮膚温よりも約2~4高い。皮膚血流量が増加したこと、直腸温が他部位の皮膚温より高いことから、

「筋血流量と皮膚血流量の増加により、深部から筋と皮膚への正味の流出熱量が増加するため直腸温は一過性に低下した」

という説明が考えられる。

(2) 運動を停止して低温室に移動した後に示す一過性の上昇について

運動を終え26の低温室に入室したケース2では、ケース1の場合よりも心拍数の低下回数が大きく、かつ平均皮膚温の低下も急激であったことから、ケース1の場合よりも皮膚血流量の減少量が大きかったと考えられる。

各部位の温度について考察する。運動を停止した60分時点の直腸温は、ケース1で37.7、ケース2で37.5である。ケース2の場合の各部位皮膚温は、脛及び前額皮膚では直腸温より約1~2程度高いが、それ以外の皮膚温は33~36の範囲になり直腸温より約1~4も低い。心拍数の低下が大きかったこと、一部の部位を除き直腸温は他部位よりも温度が高かったことから、

「60分以降に皮膚血流量が急激に減少すると、深部から皮膚への正味の流出熱量が減少するため深部温は一過性に上昇する。」

といった説明が考えられる。

2.5 2章のまとめ

屋外を模擬した高温環境で歩行程度の運動を行った後、より低温の環境に移動し運動を停止した場合の被験者実験を行い、その際の深部温の一過性変動性状に関する検討を行った。

- (1) 29 50%の中立環境に 30 分間椅座安静で滞在し、35 50%の高温環境へ移動後運動を始めると直腸温は一過性に低下する。このとき、全ての部位で皮膚温は上昇し、心拍数が急激に増加することを実験により示した。

- (2) 35 50%の高温環境で運動をした後、より低温の 26 50%の室に移動して椅座安静で在室する場合の方が、運動停止後も同じ 35 50%の高温環境下で椅座安静で在室する場合よりも、直腸の一過性の温度上昇が大きいことを示した。この結果は、冷房により予想される温度変化とは逆方向の変化である。また、26 50%の室に移動して椅座安静で在室する場合の方が、心拍数の低下回数と皮膚温の低下幅は大きいことを示した。

第3章 深部温が一過性に変動するメカニズムに関する考察

3.1 本章の目的

本章では、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。第2章の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の変動に及ぼす血流量と熱産生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。以下に本章で行う検討の手順を示す。

- (1) 人体熱モデルによる解析精度の検証を行う。
- (2) 解析結果をもとに一過性変動のメカニズムを説明する。以下の3つの要因の影響を検討する。
 - 皮膚血流量と筋血流量の影響
 - 代謝による熱産生量の非定常特性の影響
 - 代謝による筋血流量の非定常特性の影響
- (3) 上記の各要因が一過性上昇に及ぼす寄与率を検討する。

3.2 人体熱モデルによる解析のための基礎方程式

3.2.1 体組織と血液の熱収支式

人体を頭部(皮膚,深部)、胸部(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¹⁻¹²⁾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3-1に示す。

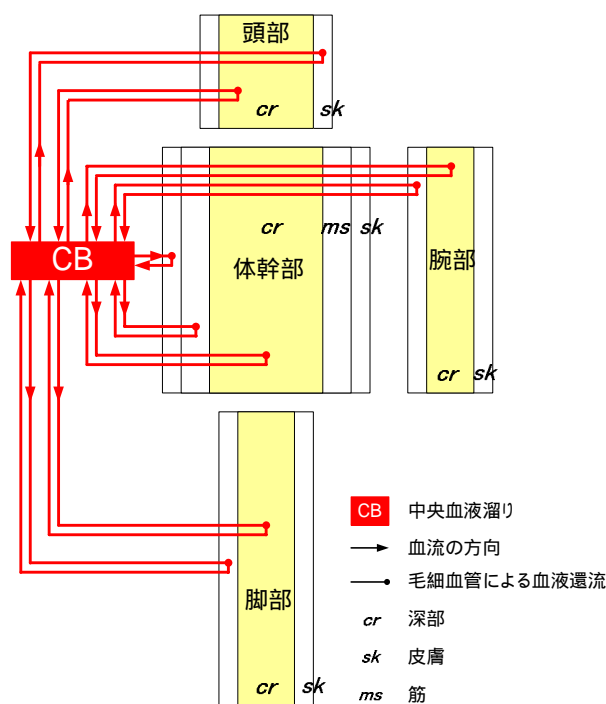


図 3-1 人体熱モデルの概要

(1) 深部（頭、胴、脚、腕）と筋部（胴）の熱収支式

右辺第1～3項は体組織での熱産生であり、順に基礎代謝、運動に伴う産熱、震え産熱を表す。右辺第4項は呼吸に伴う熱移動、右辺第5項は中央血液溜りと体組織間の血液灌流による熱交換、右辺第6項は体組織間の熱伝導を表す。呼吸による熱取得量 $q_{res,i}$ は原著では定数であるため、ここでは式(3-6)³⁻¹⁾を用いた。また、今回の解析条件では、常に震え産熱量 $q_{SHV}=0$ であった。

$$c_i W_i \frac{dT_i}{dt} = q_{mtb,i} + q_{ex,i} + q_{shv,i} + q_{res,i} + c_b \rho_b B F_i (T_{CB} - T_i) + \sum_j k_{ij} S_i (T_j - T_i) \quad (3-1)$$

(2) 皮膚（頭、胴、脚、腕）の熱収支式

右辺第1項は基礎代謝に伴う産熱、右辺第2項は中央血液溜りと体組織間の血液灌流による熱交換、右辺第3項は体組織間の熱伝導、右辺第4項と第5項は各々室空気から皮膚表面への潜熱放熱量と顕熱放熱量を表す。

$$c_i W_i \frac{dT_i}{dt} = q_{mtb,i} + c_b \rho_b B F_i (T_{CB} - T_i) + \sum_j k_{ij} S_i (T_j - T_i) + r \alpha_i S_i (X_o - X_i) + (\alpha_{r,i} + \alpha_{c,i}) S_i (T_o - T_i) \quad (3-2)$$

ここで

$$q_{mtb,i} = C_{mtb,i} \cdot Q_{MTB} \quad (3-3)$$

$$q_{ex,i} = C_{ex,i} \cdot \eta \cdot q_{EX} \quad (3-4)$$

$$q_{res,i} = C_{res,i} \cdot q_{RES} \quad (3-5)$$

$$q_{RES} = (q_{MTB} + q_{EX}) \{0.0173(5.87 - P_o) + 0.0014(34 - T_o)\} \quad (3-6)$$

$$q_{shv,i} = C_{sh,i} \cdot q_{SHV} \quad (3-7)$$

$$q_{SHV} = 0.07 \sum_{CR} \sum_{SK} \quad (3-8)$$

$$S_i = C_{s,i} \cdot S \quad (3-9)$$

$$W_i = C_{w,i} \cdot W \quad (3-10)$$

$C_{mtb,i}$, $C_{ex,i}$, $C_{res,i}$, $C_{sh,i}$, $C_{s,i}$, $C_{w,i}$ は、部位 i ごとに決まる定数であり、Stolwijkら¹⁻¹²⁾¹⁻¹³⁾の示した数値と同じ比率とした。表3-1に各部位 i に対応する値を示す。

記号

BF : 部位 i の血流量 [m^3/s]

c : 比熱 [J/kgK]

k_{ij} : 部位 i と j 間の組織間熱コンダクタンス [W/m^2K], 文献¹⁻¹²⁾による以下の定数

$$k_{12} = k_{21} = 18.53$$

$$k_{34} = k_{43} = 9.14, \quad k_{45} = k_{54} = 43.34$$

$$k_{67} = k_{76} = k_{89} = k_{98} = 20.81$$

P : 水蒸気圧[kPa]
 r : 水の相変化熱[J/kg]
 T : 温度[K]
 t : 時間[s]
 S : 体表面積[m^2]
 W : 質量[kg]
 X : 絶対湿度[kg/kg']
 q_{MTB} : 基礎代謝量[W] , 定数とし58.2W (=1.0met) とした。
 q_{EX} : 運動に伴う基礎代謝量からの代謝量増加量 [W]
 q_{SHV} : 呼吸による熱取得量[W]
 q_{RES} : ふるえ産熱による熱産生量[W]
 $q_{mtb,i}$: 部位 i の基礎代謝量[W]
 $q_{ex,i}$: 部位 i の運動に伴う熱産生量[W]
 $q_{shv,i}$: 部位 i のふるえ産熱量[W]
 $q_{res,i}$: 部位 i の呼吸による熱取得量[W]
 α : 総合熱伝達率[$W/(m^2 \cdot K)$]
 α_c : 対流熱伝達率[$W/(m^2 \cdot K)$]
 α_r : 放射熱伝達率[$W/(m^2 \cdot K)$]
 α' : 湿気伝達率[$kg/\{m^2 \cdot s \cdot (kg/kg')\}$]
 η : 仕事効率[$n.d.$] =0.80
 ρ : 密度[kg/m^3]

添え字

b : 血液
 CB : 中央血流溜り
 CR : 深部
 i : 部位
 j : i 部に隣接する部位
 o : 室空気
 MS : 筋
 SK : 皮膚
 sat : 飽和
 set : セットポイント
 $-$: 平均値

表 3-1 人体モデルに用いた諸定数

部位名称と番号		$c_{mtb,i}$	$c_{ex,i}$	$c_{res,i}$	$c_{sh,i}$	$c_{s,i}$	$c_{w,i}$
頭部	深部 ($i=1$)	0.174	0	0.5	0.04	0.093	0.067
	皮膚部 ($i=2$)	0.002	-	-	-	0.093	0.005
胸部	深部 ($i=3$)	0.628	0	0.5	0	0.348	0.341
	筋部 ($i=4$)	0.060	0.30	0	0.38	0.348	0.165
	皮膚部 ($i=5$)	0.007	-	-	-	0.348	0.019
脚部	深部 ($i=6$)	0.087	0.68	0	0.34	0.378	0.264
	皮膚部 ($i=7$)	0.007	-	-	-	0.378	0.019
腕部	深部 ($i=8$)	0.032	0.02	0	0.24	0.180	0.092
	皮膚部 ($i=9$)	0.003	-	-	-	0.180	0.009
中央血流溜り ($i=10$)		-	-	-	-	-	0.019

(3) 血液の熱収支式

全身の血液を1質点でモデル化し、これを中央血流溜り（以下CBで略）と称する。中央血流溜りと体組織の熱移動としては、毛細血管での体組織への血液灌流による熱交換のみを考慮する。CBの熱収支式を以下に示す。

$$c_b W_b \frac{dT_{CB}}{dt} = \sum_i c_b \rho_b B F_i (T_i - T_{CB}) \quad (3-11)$$

ここで、 $B F_i$ は各部位*i*とCBとの交換血流量であり、式(3-12)で得られる。

頭深部、胸深部への血流量は一定値、皮膚への血流量は総皮膚血流量 SBF × 皮膚面積比 $S_i / \sum_{i=2,5,7,9} S_i$ により、筋血流量は総筋血流量 MBF × 筋質量比 $W_i / \sum_{i=4,6,8} W_i$ により求められる。

$$\begin{cases} B F_1 = 1.425 \times 10^{-5}, & B F_2 = 0.138 SBF, & B F_3 = 5.833 \times 10^{-5} \\ B F_4 = 0.30 MBF, & B F_5 = 0.286 SBF, & B F_6 = 0.61 MBF \\ B F_7 = 0.362 SBF, & B F_8 = 0.09 MBF, & B F_9 = 0.173 SBF \end{cases} \quad (3-12)$$

ここで、

MBF : 総筋血流量 [m^3/s]

SBF : 総皮膚血流量 [m^3/s]

Stolwijk モデルでは、直径 1cm以上の血管と心臓に貯留される血液量を C B の血液量としており、その値は 1350ml で固定である。一般的に血液量は体重の 1/13 程度³⁻²⁾であり、例えば身長 178cm、体重 63kg の被験者の血液量が 5200ml との測定結果³⁻³⁾がある。

このことから、Stolwijk モデルでは、1cm 以下の動静脈血管や毛細血管内の血液温度は隣接する組織温と等しいと仮定していることになる。つまり、1cm 以上の血管壁や臓器壁は、体組織との熱移動がない断熱した状態とし、逆に 1cm 以下の血管内血液は隣接する組織温度と瞬時平衡になると仮定している。また、血管壁や臓器壁を断熱としているため、C B が人体のどこに配置されているかは解析結果には関係しない。第 3.3 章と第 3.4 章ではこの仮定を用いて解析を行う。

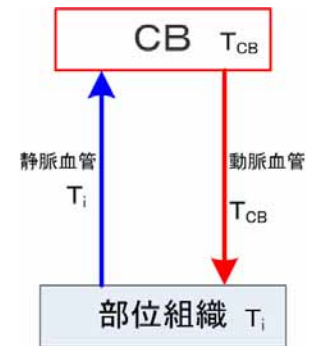


図 3-2 中央血液溜りと部位組織の熱移動

(4) 定数など

人体皮膚表面積 S は蔵澄ら³⁻⁴⁾の式により算定した。

$$S = 100.315 \times 10^{-4} H^{0.693} (\sum W_i)^{0.383} \quad (3-13)$$

ここで、

H : 身長 [m]

$\sum W_i$: 体重 [kg]

(5) 温熱調整制御信号とセットポイント

頭深部、平均皮膚温及び平均筋温と、それぞれのセットポイントとの偏差を制御信号 Σ とする。制御信号及び各部のセットポイントを以下に示す。

$$\Sigma_{CR} = T_1 - T_{CR,set} \quad \text{ただし、} \Sigma_{CR} < 0 \text{ の時、} \Sigma_{CR} = 0 \quad (3-14)$$

$$\Sigma_{MS} = \overline{T_{MS}} - T_{MS,set} \quad \text{ただし、} \Sigma_{MS} < 0 \text{ の時、} \Sigma_{MS} = 0 \quad (3-15)$$

$$\Sigma_{SK} = \overline{T_{SK}} - T_{SK,set} \quad \text{ただし、} \Sigma_{SK} < 0 \text{ の時、} \Sigma_{SK} = 0 \quad (3-16)$$

ここで、 $T_{CR,set}$, $T_{SK,set}$, $T_{MS,set}$ は、頭深部、平均皮膚温及び平均筋温のセットポイントであり、原著¹⁻¹²⁾に示される以下の値を用いた。

$$\begin{aligned} T_{CR,set} &= 36.60 \\ T_{SK,set} &= 34.10 \\ T_{MS,set} &= 35.88 \end{aligned} \quad (3-17)$$

3.2.2 調節発汗量制御式と皮膚表面での水分収支式

Stolwijkらのモデルでは、発汗量の全てが瞬時に蒸発すると仮定して皮膚表面からの蒸発潜熱量を計算しているが、被験者実験において汗の蓄積が観察されたため、皮膚表面での汗の蓄積を考慮した以下の水分収支式¹⁻²⁹⁾を用いた。

$$0 = \alpha'_i(X_o - X_i) + \alpha'_{SK}(X_{sat,i} - X_i) + m_{rsw,i} \quad (3-18)$$

ただし、式(3-18)で求まる X_i の値が $X_{sat,i}$ より大きい場合、 $X_i = X_{sat,i}$ とし、かつ次式により皮膚表面での蓄積量を決定する。

$$\frac{dm_{st,i}}{dt} = \alpha'_i(X_o - X_i) + \alpha'_{SK}(X_{sat,i} - X_i) + m_{rsw,i} \quad (3-19)$$

ここで、部位別の単位皮膚表面積当り発汗量 $m_{rsw,i}$ は、以下の1)~3)の手順で決定した。

(1) 単位表面積当りの発汗量の全身平均値 M_{rsw} の決定

Stolwijkらが示した人体皮膚表面全体からの汗の蒸発による放熱量算出式(3-20)を、水の蒸発潜熱 $r \times$ Stolwijkらの解析で用いた人体皮膚表面積 (1.771m^2) の積で除して、全身における単位面積当たりの発汗量平均値を求めた。ただし、第1項は導出過程を明示した論文³⁻⁵⁾の結果をもとに係数と単位に間違いがあると判断して、係数の68を58に置き換えさらに蒸発潜熱 r のみで除した。結果、 M_{rsw} は式(3-21)で求められる。

$$q_{rsw} = 68 \sum_{CR} \sum_{SK} + 200 \sum_{CR} \sum_{MS} \quad (3-20)$$

$$M_{rsw} = (100 \sum_{CR} \sum_{SK} + 200 \sum_{CR} \sum_{MS}) / 3.6 \times 10^{-6} \quad (3-21)$$

(2) 部位別の発汗量制御式の導出

部位ごとの発汗量の差異は、部位別係数 K_i を用いることで考慮する。部位別係数 K_i は、以下の(3)に示す方法により求め、頭部 $K_2 = 0.43$ 、胸部 $K_5 = 2.28$ 、脚部 $K_7 = 0.30$ 、腕部 $K_9 = 0.30$ 、その他部位では $K_i = 0.0$ とし、各部位の単位表面積当りの発汗量 $m_{rsw,i}$ を式(3-22)により計算した。

$$m_{rsw,i} = K_i M_{rsw} = K_i (100 \sum_{CR} \sum_{SK} + 200 \sum_{CR} \sum_{MS}) / 3.6 \times 10^{-6} \quad (3-22)$$

(3) 部位別の発汗量係数 K_i の決定方法

部位別係数 K_i は、織田らの実験結果³⁻⁶⁾をもとに以下で決定した。

織田らは、トランクスのみを着用した男性被験者(身長172cm、体重68kg、年齢22才)1名を対象に、30~80%の高温環境下で30分間の歩行運動を行い、その間の各部位皮膚発汗量の測定を行った。

外側をアルミ箔で断湿したスポンジに30分間に吸収された汗の質量を測定することで、各部位における30分間の累積発汗量を測定し、この累積発汗量を比較することで、発汗量の部位差を定量化した。同じ面積のスポンジに吸収された汗の質量は、胸、額、下腿、腕の順に0.019g、0.0034g、

0.0018g、0.0017g であり、胸部の発汗量が他よりも大きいことを示した。

本研究ではこの結果を用いて K_i を設定した。額(頭部 $i=2$)、胸(胸部 $i=5$)、脚(下腿 $i=7$)、腕(腕 $i=9$)の部位別発汗量比率を R_i (和が1になるように設定)とし、上記に示した累積発汗量の比を参考に、 $R_2=0.13$ 、 $R_5=0.69$ 、 $R_7=0.09$ 、 $R_9=0.09$ と設定した。このとき、各部位における単位面積当たりの発汗量 $m_{rsw,i}$ は、全身での総発汗量 $M_{rsw}S$ を S_iR_i の比率で重み付した以下の式で求められる。

$$m_{rsw,i} = \frac{R_i}{\sum_i S_i R_i} M_{rsw} S \quad (3-23)$$

式(3-22)に式(3-23)を代入し、 K_i を求めると、

$$K_i = \frac{R_i}{\sum_i S_i R_i} \cdot S \quad (3-24)$$

となる。ここで、 $\sum_i K_i = S$ である。

式(3-24)に $R_2=0.13$ 、 $R_5=0.69$ 、 $R_7=0.09$ 、 $R_9=0.09$ 、 $R_i=0.0(i=1,3,4,6,8)$ を代入すると、 $K_2=0.43$ 、 $K_5=2.28$ 、 $K_7=0.30$ 、 $K_9=0.30$ 、その他 $K_i=0.0(i=1,3,4,6,8)$ となる。

記号

m_{rsw} : 調節性発汗量 [$kg/(m^2 \cdot s)$]

m_{st} : 皮膚表面での汗の蓄積量¹⁻³³⁾ [kg/m^2]

α'_{SK} : 皮膚飽和領域から表面までの湿気伝達率 = 2.07×10^{-4} [$kg/\{m^2 \cdot s \cdot (kg/kg')\}$]

q_{rsw} : 発汗による皮膚からの熱損失量 [W] (皮膚から室空気への流出を正とする。)

M_{rsw} : 調節性発汗量の皮膚表面積全体における平均値 [$kg/(m^2 \cdot s)$]

K_i : 部位 i における発汗量の部位別係数 [$n.d.$]

R_i : 部位 i における発汗量の部位別係数 [$n.d.$] とし、 $\sum_i R_i = 1.0$

3.2.3 皮膚血流量制御式

総皮膚血流量制御式を式(3-25)に示す。{ }内の第1項は定常項、第2項は頭深部温及び平均皮膚温の各セットポイントとの差の積により算出される血管拡張を表す項、第3項は平均皮膚温の影響を受ける血管反応を表す項である。

$$SBF = \left\{ 10.6 + 36 \sum_{SK} \sum_{CR} + 0.93 \left(\overline{T_{SK}} - T_{SK,set} \right) \right\} / 3.6 \times 10^{-6} \quad (3-25)$$

3.2.4 筋血流量制御式

運動開始および終了後における筋血流量の非定常特性を考慮した人体熱モデルは、1966年のStolwijkモデル¹⁻¹²⁾のみである。以下にStolwijkらによる筋血流量制御式を示す。

$$MBF = \left\{ 15 + MBF_W + 2.5 \left(\overline{T_{SK}} - T_{SK,set} \right) \right\} / 3.6 \times 10^{-6} \quad (3-26)$$

{ }内の第1項は定常項、第3項は平均皮膚温変動に伴う温熱性要因による変化量、第2項の MBF_W はエネルギー代謝に伴う非温熱性要因³⁻⁷⁾³⁻⁸⁾³⁻⁹⁾による筋血流増加量であり式(3-27)で表される。は酸素負債などの筋血流量の非定常特性に関係する定数である。

$$MBF_W = C_{mbf} \int (q_{EX,ST} - \beta MBF_W) dt \quad (3-27)$$

Stolwijkらの解析では、 $\beta = 0$ とおき筋血流の非定常特性の影響を無視した解析を行っており、他の研究でも解析例はなく、その影響は明らかにされていない。本研究では、式(3-27)を利用して筋血流の非定常特性が深部温の一過性変動に与える影響を検討する。

式(3-27)の両辺を時間微分し、微分表現に書き直すと以下となる。

$$\frac{dMBF_W}{dt} = C_{mbf} \{ q_{EX,ST} - \beta MBF_W \} \quad (3-28)$$

ここで $\beta_1 = \beta C_{mbf}$ 、 $C_1 = 1/\beta$ と置き換え、運動の有無を表す階段関数 g_1, g_2 を導入して、以下の式とする。

$$\frac{dMBF_W}{dt} = g_1 \beta_1 \{ C_1 q_{EX,ST} - MBF_W \} + g_2 \beta_2 MBF_W \quad (3-29)$$

ここで、 $g_1 = (\text{運動時 } 1, \text{それ以外 } 0)$ 、 $g_2 = (\text{運動時 } 0, \text{それ以外 } -1)$

MBF_W の初期値=0とおき計算を開始する。式(3-26)と式(3-29)を用いて、筋血流の非定常応答が深部温の一過性上昇に及ぼす影響を検討する。 β_1, β_2 は時定数に関わる定数であり、本研究ではその変動性状が心拍数変動に類似するように決定した。 C_1 はStolwijkの原著¹⁻¹²⁾に示される値、すなわち代謝量116W当たり50L/hの筋血流量増加が生じるように決定した。

筋血流量の非定常特性を考慮しない解析を行う場合には、式(3-29)の左辺=0とおき MBF_W を計

算した。運動時には非温熱性要因の影響により、筋だけでなく皮膚及び深部への血流の再分配¹⁻¹⁰⁾が行われるが、再分配時の血流量の特性については不明なため、今回の解析では考慮しない。

記号

MBF_W : 運動による筋血流量増加分[m^3/s]

$q_{EX,ST}$: 運動が定常に達した状態における基礎代謝量からの代謝量増加量[W]

C_{mbf} : 運動に伴う単位代謝量当りの筋血流増加量[$l/(h \cdot W)$]

C_1 : 筋血流量に関わる係数=0.43[$l/(h \cdot W)$]

β_1, β_2 : 筋血流量に関わる係数[*n.d.*]

g_1, g_2 : 運動の有無に関わる階段関数[*n.d.*]

3.2.5 熱産生量に関する式

ステップ的に運動を開始あるいは停止した場合の酸素摂取動態は、図3-3に示すように指数関数的に増加及び減少することはよく知られているが³⁻¹²⁾、このことから運動に伴う熱産生量も酸素摂取動態と同様の変動³⁻¹³⁾を示すと考えられる。本研究では深部温の一過性上昇に与える熱産生量の非定常特性の影響を検討することを目的に、筋血流量制御式で行ったモデル化と同様の簡易モデルを作成し、その影響を検討した。熱産生量に関する式を式(3-30)に示す。

$$\frac{dq_{EX}}{dt} = g_1 \cdot \beta_3 \{q_{EX,ST} - q_{EX}\} + g_2 \beta_4 q_{EX} \quad (3-30)$$

ここで、 β_3, β_4 は時定数に関する定数(*n.d.*)であり、筋血流と同様に、心拍数の変化性状に類似するように決定した。熱産生量の非定常特性を考慮しない場合には、式(3-30)の左辺=0とおき q_{EX} を計算した。

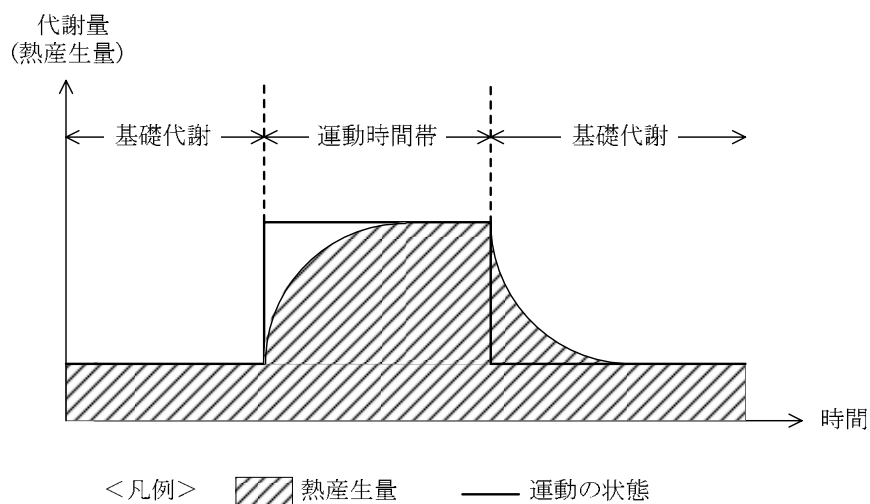


図 3-3 熱産生量の非定常応答の概念図

3.3 実験結果と解析結果の比較

3.3.1 解析条件

(1) 解析ケース

ケース1とケース2の各々について、解析値と実験値の比較を行い、解析モデルの再現精度を確認する。まず、皮膚血流量と筋血流量の変動が深部温の一過性変動に及ぼす影響を検討する。筋血流量 MBF 及び運動に伴う熱産生量 q_{EX} の影響については次節で検討するものとし、本節では考慮しない。すなわち、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.0$ とおいて解析を行う。

(2) 解析に用いた係数

人体皮膚表面と室空気間の熱・湿気伝達率を表3-2に示す。熱伝達率は人体周りの風速からユルゲスの式により、湿気伝達率はルイスの関係より決定し、全身一様とした。解析に用いた初期値は、皮膚温は実験値を、胴深部温と中央血流溜り温は直腸温の実験値を、胴筋部、脚深部、腕深部は筋のセットポイント値である35.88 とした。室空気温湿度条件は、高さ方向の温度に差がなかったため、FL+1.1mの実験値を与えた。

その他計算に用いた定数を次に示す。 $c_i = 3474$, $c_b = 3851$, $\rho_i = \rho_b = 1000$, $r = 2.424 \times 10^{-6}$, $q_{MTB} = 58.2$, $q_{ET,ST} = 145.5$ (2met相当), $\eta = 0.80$

表 3-2 室空気と皮膚間の熱・湿気伝達率

時間 [分]	対流熱伝達率 [W/(m ² K)]	放射熱伝達率 [W/(m ² K)]	湿気伝達率 [kg/(m ² s kg/kg)]
0-30	4.65	4.65	4.65×10^{-3}
30-60	5.80	4.65	5.80×10^{-3}
60-120	4.65	4.65	4.65×10^{-3}

3.3.2 深部温の比較

胸深部温の解析値と直腸温実験値との比較を図3-4a、図3-4bに示す。ケース1とケース2ともに、解析結果は実験値の変動特性をよく再現できている。

ケース1の場合、高温環境に移動して運動を開始した直後の一過性の温度低下を再現できている。運動を停止した後については、実験値ではほぼ同じ温度で推移するのに対し解析値では単調に低下する変動となるが、一過性の温度上昇が生じないといった現象は再現できている。

ケース2の場合も、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。一方、運動停止後に実験値では0.4 上昇するのに対し、解析値では0.11 の上昇となり温度上昇幅が小さい結果となり、一過性の上昇温度幅には改善の余地が残る。これについては、3.4.4で示すように筋血流量および熱発生量の非定常特性を考慮することで解析精度は向上する。

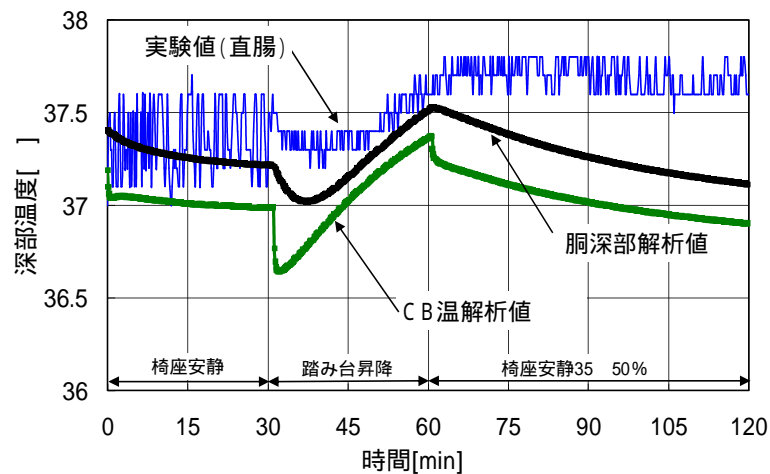


図3-4a 深部温の実験値と解析値の比較（ケース1）

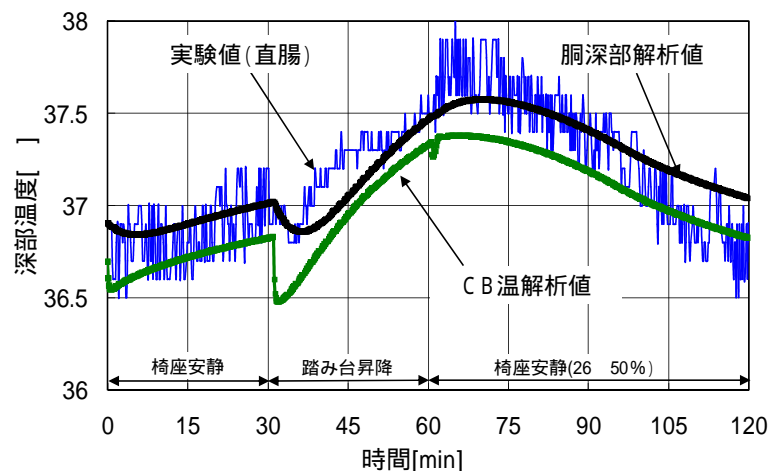


図3-4b 深部温の実験値と解析値の比較（ケース2）

3.3.3 発汗量および血流量の比較

(1) 発汗量

図 3-5a、図 3-5b に時刻 30 分における値を基準とした場合の体重減少量を、大腿部の発汗量を図 3-6a、図 3-6b に示す。

体重減少量については、ケース 1 およびケース 2 の場合ともに解析値と実験値は概ね一致している。例えば、120 分時点の値は、ケース 1 では実験値の -0.332kg に対し解析値は -0.331kg、ケース 2 では実験値の -0.23kg に対し解析値は -0.214kg でありよく一致している。

大腿部の発汗量については、運動開始後に増加し運動停止後に減少するといった変動特性は再現できているが、最大値を比較するとケース 1 では解析値は実験値の約 1/3、ケース 2 では約 60% の値となり、解析値は実験値よりも小さい。先に示した通り体重減少量の一致は良いことから、測定位置による発汗量のばらつきの影響が実験値に現れている可能性がある。変動特性を比較すると、ケース 1 では運動停止後に緩やかに低下していく現象は再現できている。ただし、45 分過ぎに急激に減少するがこの変動を解析では再現できていない。ケース 2 では、冷房室で発汗が停止する時間が解析値の方が遅い。実験では運動を停止して 2 分後に発汗は止まるが、解析では 75 分過ぎまで続く。解析では、平均筋温と頭部深部温がともにセットポイント以上の値になり式(3-21)の第 2 項が 0 にならないためである。

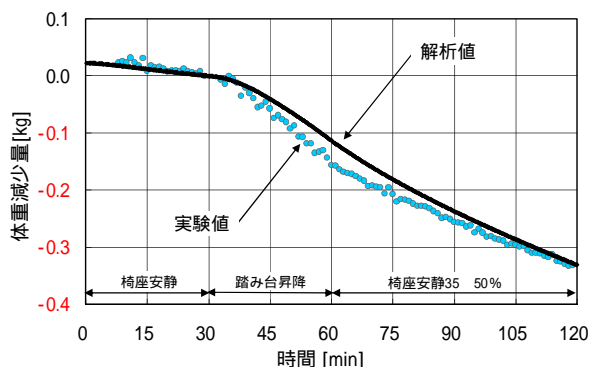


図3-5a 体重減少量の比較 (ケース1)

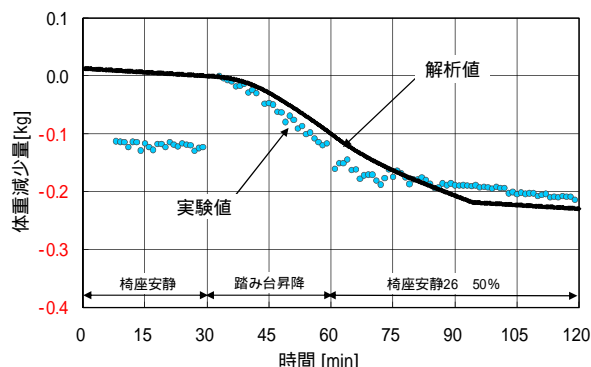


図3-5b 体重減少量の比較 (ケース2)

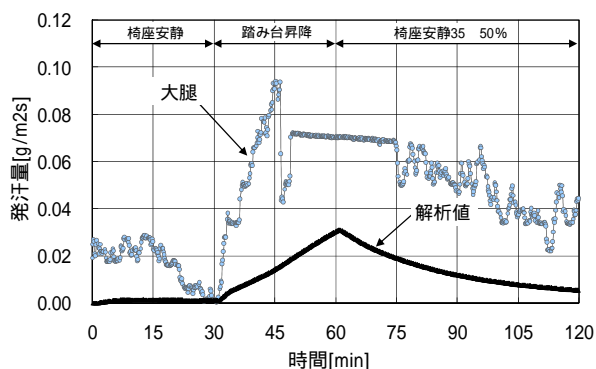


図3-6a 発汗量の比較 (ケース1)

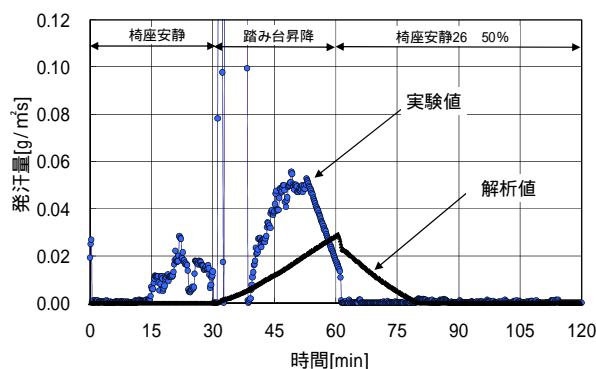


図3-6b 発汗量の比較 (ケース2)

(2) 汗の蓄積量

汗の蓄積量解析値を図 3-7a、図 3-7b に示す。胸部のみに汗の蓄積が生じた。ケース 1 の場合、45 分過ぎから汗の蓄積が始まり、60 分に運動を停止した後も蓄積量は増え続け、実験終了まで汗は蓄積されたままである。発汗量が徐々に減少するので、95 分過ぎには減少に転じる。ケース 2 では 45 分過ぎから汗の蓄積が始まり、運動停止後も発汗は続くため汗の蓄積量は増え続けるが、67 分から減少をはじめ 93 分に蓄積量は 0 になる。

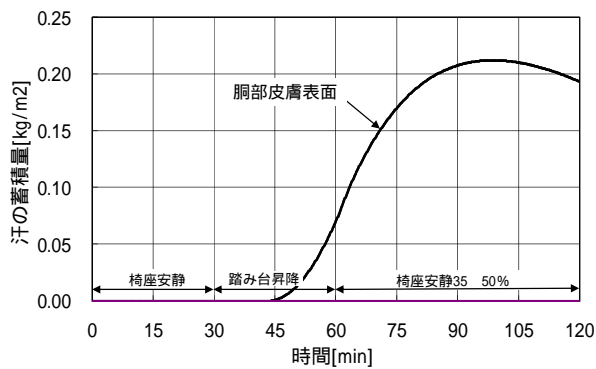


図3-7a 皮膚表面の汗の蓄積量 (ケース1)

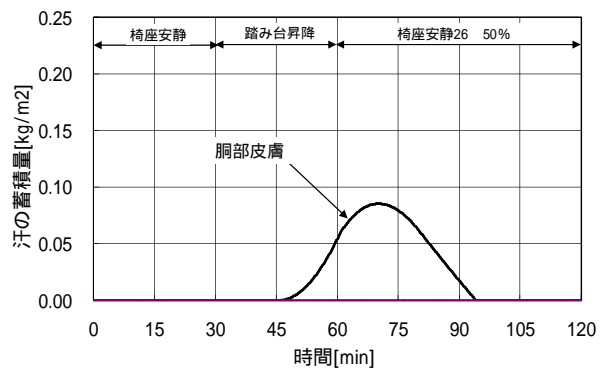


図3-7b 皮膚表面の汗の蓄積量 (ケース2)

(3) 血流量

総筋血流量と総皮膚血流量を図 3-8a、3-8b に示す。総筋血流は両ケースとも同様の変動性状を示し、運動開始とともに $3.3 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ まで増加する。これは運動開始前の約 8 倍に相当する。総皮膚血流量は運動開始とともに増加し、60 分時点では約 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ の値となり、総筋血流量の 1/3 程度の値となる。60 分以降については、ケース 2 では急激に減少するのに対しケース 1 では一旦上昇後緩やかに減少する。

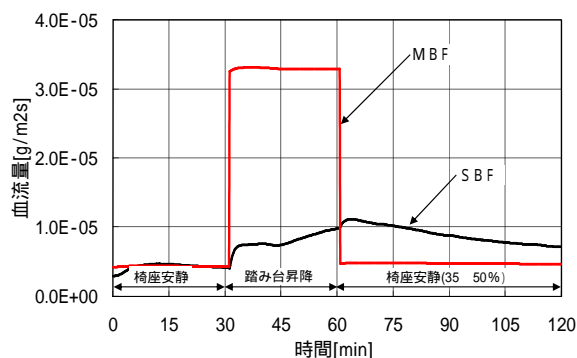


図3-8a SBFとMBF (ケース1)

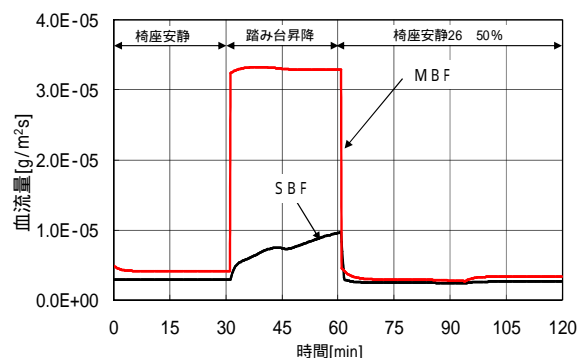


図3-8b SBFとMBF (ケース2)

3.3.4 皮膚温の比較

(1) 胸部皮膚温

図3-9a、図3-9bに胸部皮膚温の解析値と実験値との比較を示す。両ケースで観察される高温室に入室して極大値をとった後一旦低下し再度上昇するという実験値の変動特性を、解析結果はよく再現できている。高温室では、皮膚での汗の蒸発による潜熱放熱量が、皮膚血流および筋からの熱伝導による流入熱量の和よりも大きくなった時点で、皮膚温は低下に転じる。その後、運動の影響でCB温と筋温は上昇していき、汗の蓄積が始まり皮膚からの潜熱放熱量が頭打ちになった時点で、皮膚温は上昇に転じる。

運動停止後については、ケース1では運動停止直後に皮膚温が一旦上昇するが、これは運動停止により皮膚表面の熱・湿気伝達率が減少して皮膚から室空気への放熱量が減るためである。ケース2では、運動を停止すると急激に皮膚温は低下し90分には実験値よりも約3℃低くなるが、これは60分以降の発汗量解析値が実験値よりも大きいためである。ただし、第3.4.3章の(3)の理由により深部温の一過性変動に胸部皮膚温の解析値と実験値の差が及ぼす影響はほとんどない。

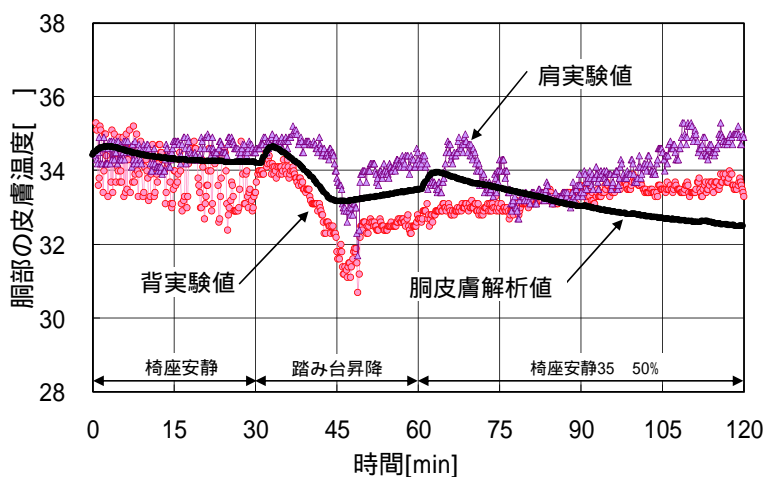


図3-9a 胸部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース1）

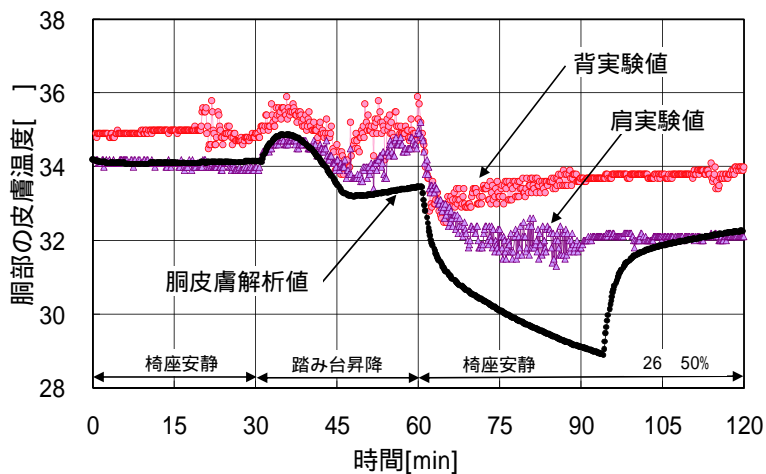


図3-9b 胸部皮膚の実験値と解析値の比較（ケース2）

(2) 脚部皮膚温

図3-10a、図3-10bに脚部解析値と脛・大腿の実験値との比較を示す。高温室において実験値は上昇し続けるが、解析値はこの変動を概ね再現できている。解析結果は脛皮膚温に近い値となり、45分以降に見られる大腿皮膚温の急激な温度上昇は、再現できていない。大腿と脛各々の特徴を再現するには、大腿と脛を分割し各々実態に合った熱産生量の設定が必要である。

次に冷房室入室後の変動を比較する。ケース1では、大腿と脛とも75分以降は37～36 の範囲で緩やかに低下するが、解析値では35.9から36.1 まで緩やかに上昇する。変動特性に差はあるものの絶対値は概ね等しい。

ケース2では、冷房室における実験値と解析値の一致は良い。解析値では、冷房室入室後2.2 程度急激に低下した後、0.3 程度上昇し、80分以降に緩やかに低下していく。大腿と脛の皮膚温変動を再現できている。

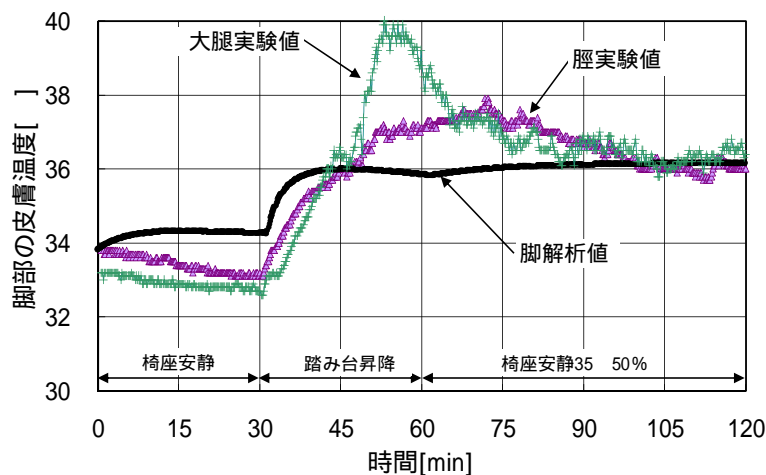


図3-10a 脚部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース1）

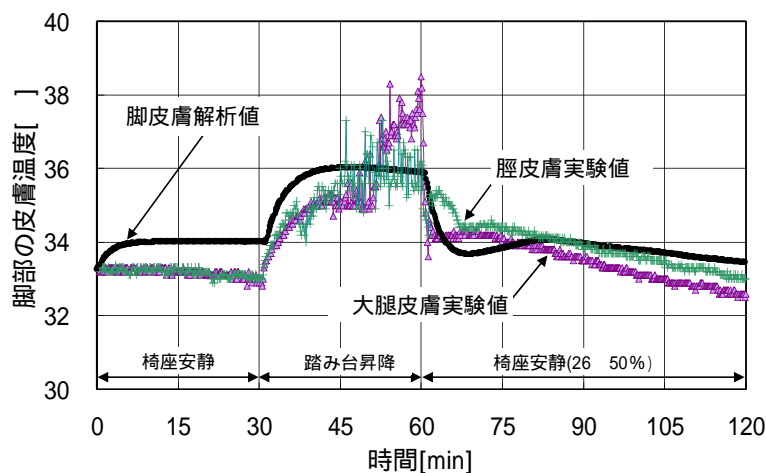


図3-10b 脚部温皮膚の実験値と解析値の比較（ケース2）

(3) 腕部皮膚温

図3-11a、図3-11bに腕部解析値と前腕皮膚温の実験値との比較を示す。ケース1では解析値と実験値は概ね一致している。実験値では、高温室入室後皮膚温が上昇し、冷房室でも全体的な傾向として120分時点までに2 上昇するといった変動を示すが、解析値ではこの変動特性をよく再現できている。より詳細にみると、高温室においていったん低下した後、45分頃から最上昇するが解析値ではこの現象を再現できていない。前述した胴皮膚温の解析結果から判断すると、解析では汗の蓄積は生じていない結果であったが、実験では汗の蓄積が生じていた可能性がある。

ケース2については、高温室で皮膚温は上昇し冷房室で低下するといった変動性状を再現できてはいるが、実験値と解析値は約2~3 の温度差がある。前腕の実験値は他の部位と比べても2 程高い傾向にあることから、腕振りなどケース2に限定した運動による熱産生により皮膚温度が高くなった可能性がある。

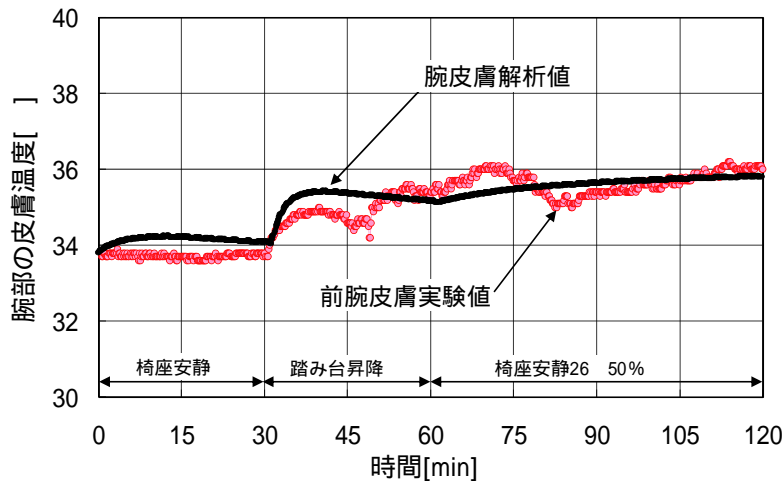


図3-11a 腕部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース1）

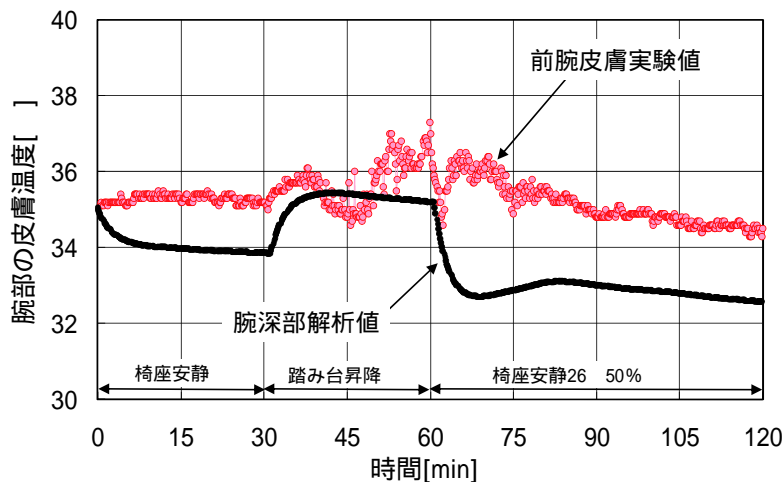


図3-11b 腕部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース2）

(4) 頭部皮膚温

図3-12a、図3-12bに頭部皮膚解析値と前額皮膚温の実験値との比較を示す。ケース1と2ともに実験値では45分以降から90分までに急激に温度が上昇するが、この傾向を解析では再現できていない。また、ケース1の実験値では、35℃の高温環境であっても皮膚温は急激に減少するが、解析では他の部位同様緩やかに上昇する。実験値では、頭部特有の血流量変動¹⁻⁷²⁾などが生じていると考えられる。

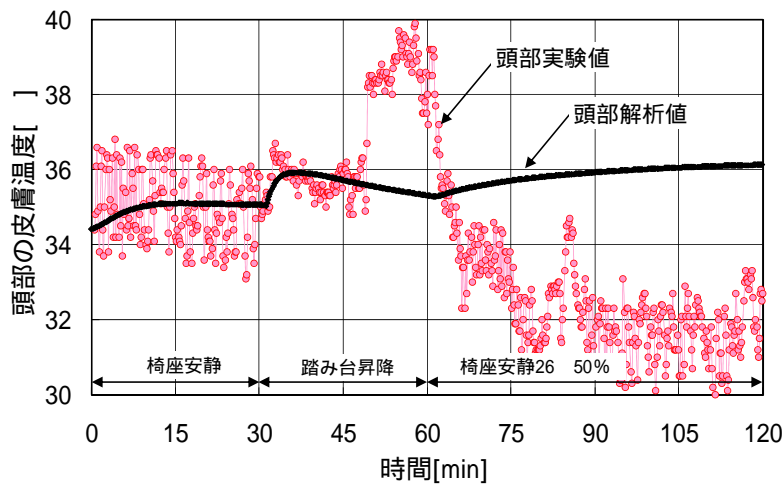


図3-12a 頭部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース1）

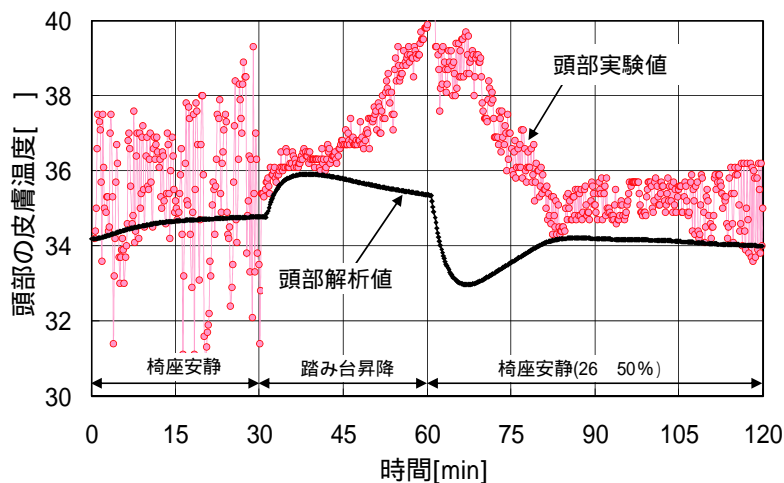


図3-12b 頭部皮膚温の実験値と解析値の比較（ケース2）

(5) 平均皮膚温

図3-13a、図3-13bに平均皮膚温の比較を示す。ケース1とケース2ともに、実験値と解析値は概ね一致している。

ケース1では、高温室で45分以降に皮膚温の再上昇が生じるが、実験値で1 程度上昇するのに対し、解析値では0.1 程度の上昇にとどまる。この差は、主に腕部、大腿部、頭部皮膚の温度差が原因である。冷房室に入室後、ほぼ同じ値を維持するといった実験値の状況を解析値はよく再現できている。

ケース2では、高温室での温度はよく一致している。冷房室入室後は、解析では2.5 も皮膚温が低下するため、60～90分の間は実験値より1.5 ～2.0 程度温度が低くなる。解析では、発汗量が大きめに計算されていることが理由である。

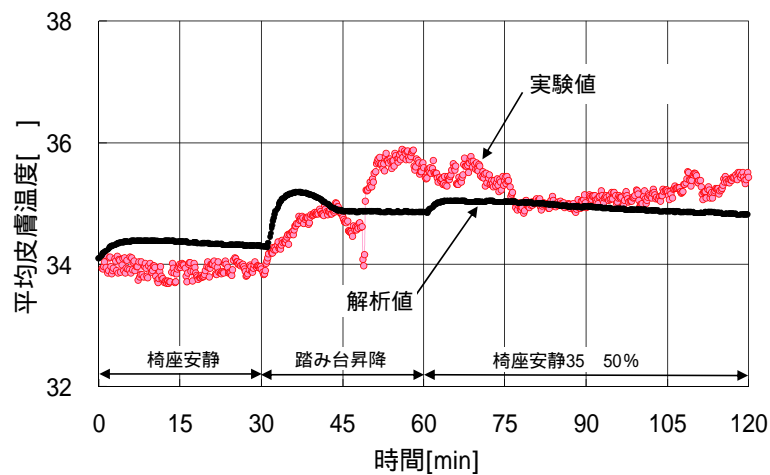


図3-13a 平均皮膚温の実験値と解析値の比較 (ケース1)

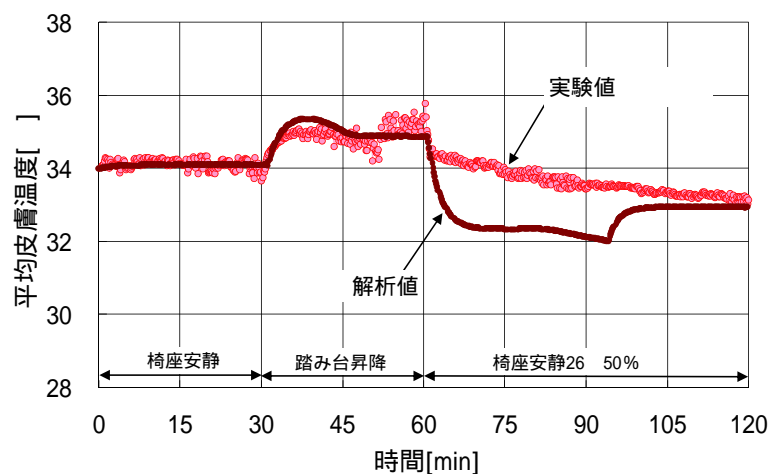


図3-13b 平均皮膚温の実験値と解析値の比較 (ケース2)

3.4 深部温が一過性に変動するメカニズムに関する考察

3.4.1 考察の概要

深部温の一過性変動が生じるメカニズムについて、胴深部の熱収支に着目し考察を行う。以下では、運動終了後に深部温の上昇が大きかったケ - ス2について、深部温変動に及ぼす皮膚と筋の血流量の影響を考察する。冷房室の設定温度を35 50%に固定したケース1 (0~60分はケース2の解析を行い、60分以降の冷房室温を35 50%に固定した計算)の解析も行い、ケース2の解析結果と比較することで一過性上昇の理由について説明する。

3.4.2 深部温の一過性低下に及ぼす血流量変動の影響

解析結果では、図3-14に示す3つの過程を順に経て、深部温は一過性の低下に至る。以下ではこの3つの過程の内容を具体的に説明する。

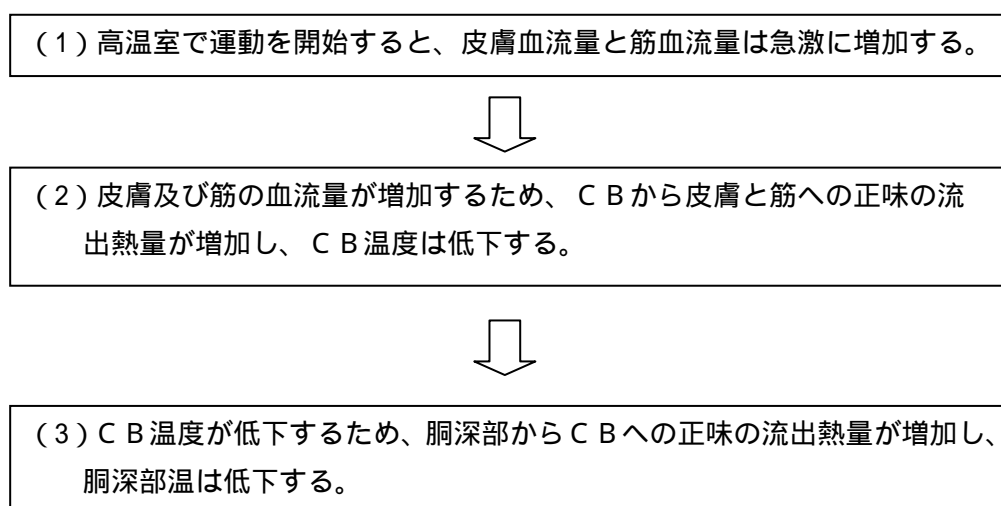


図3-14 深部温の一過性に低下するプロセス(解析結果より)

(1) 血流量が増加する過程

図3-15a、図3-15bに筋血流量と皮膚血流量を示す。高温室に移動して運動を開始すると、筋血流量M B Fと皮膚血流量S B Fは各々急激に増加する。運動による代謝量の増加により筋血流量が増加し、平均皮膚温の上昇により皮膚血流量が増加する。

M B Fについては、運動開始前の $4.16 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ から、 $3.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ まで約8倍に増加する。S B Fは運動開始前の $2.94 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ から、胴深部温が極小値をとる36分には $6.04 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ まで約2倍増加する。筋血流量の増加率が大きい。

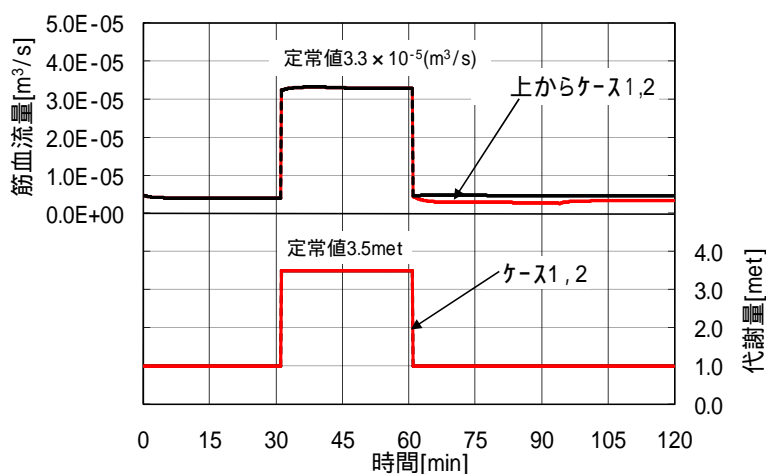


図3-15a 筋血流量と代謝量の変動（ケース1と2の比較）

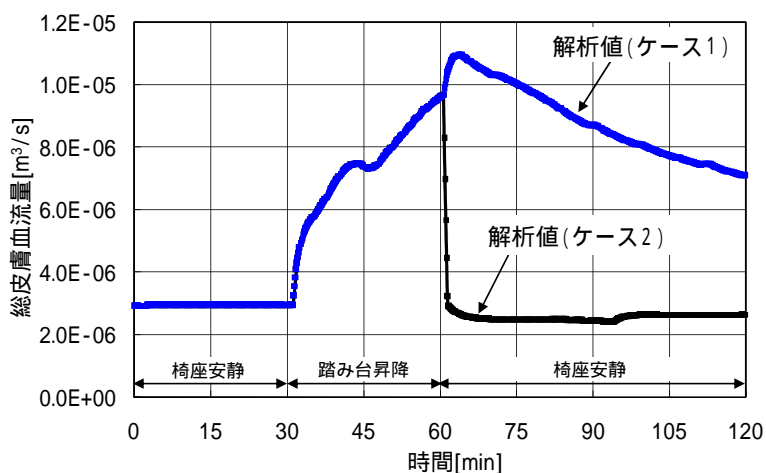


図3-15b 総皮膚血流量変動の比較（ケース1と2の比較）

(2) C B 温度が低下する過程

ケース2における各部位温度を図3-16aに示す。高温室に入室する時刻30分の温度は、胴深部、頭深部、C Bの順に温度が高く、他の部位は左記3部位より1～3程度低い。従って皮膚と筋の血流量が増加すると、C Bから筋及び皮膚への正味の流出熱量が増加するためC B温度は低下する。C B温の低下に及ぼす要因としては、筋血流量が増加する影響が大きい。図3-16bにMBFとSBFを介したC Bから各部位への正味の流出熱量を示す。運動開始直後に、M B FによるC Bから胴筋部及び脚・腕深部への正味の流出熱量の合計は、運動開始前の22Wから最大137Wまで6.2倍も増加する。S B FによるC Bから皮膚への流出熱量も29.3Wから最大31.5Wまで7%程度増えるが、増加量・増加率ともM B Fの場合よりも小さく、C B温の低下に及ぼす筋血流量の影響が大きい。

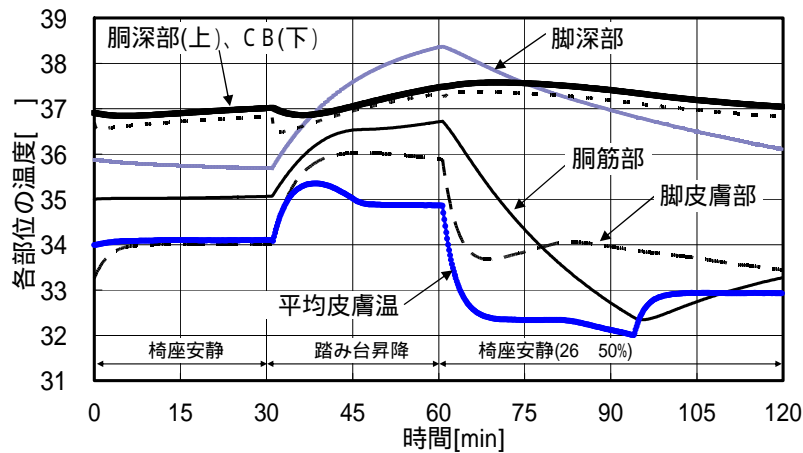


図3-16a 各部位温度 (ケース2の解析値)

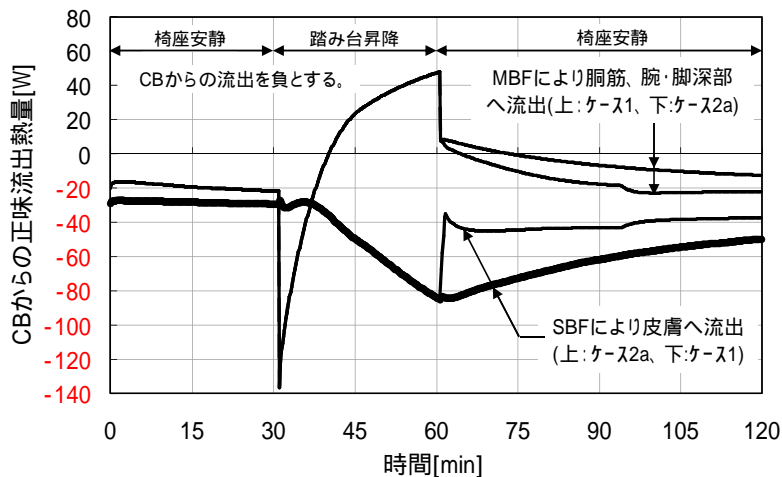


図3-16b MBFとSBFによるCBからの流出熱量 (ケース1と2の比較)

(3) 胴深部温が低下する過程

図3-17に胴深部の熱収支を示す。本研究で用いた解析モデルでは胴深部温の変動は、以下の3つの熱量により決まる。

基礎代謝による熱産生量

胴深部から胴筋への熱伝導による流出熱量

血流による胴深部からCBへの正味の流出熱量

高温室で運動を開始すると、 Q_{CB} の血流による胴深部からCBへの正味の流出熱量が急激に増加する。 Q_{met} の基礎代謝による熱産生量の変化なし、胴筋部温度は上昇するため Q_{con} の胴深部から胴筋への熱伝導による流出熱量は減少するため深部温を上昇させる方向に影響する。以上より、深胴深部からCBへの正味の流出熱量が増加することが深部温が一過性に低下する理由となる。

運動を続けていくと、代謝の影響により時間経過とともに人体各部位の温度は単調に増加するため、筋及び皮膚血流を介した胴深部からCBへの正味の流出熱量は徐々に減少し、37分に胴深部温は上昇に転じる。

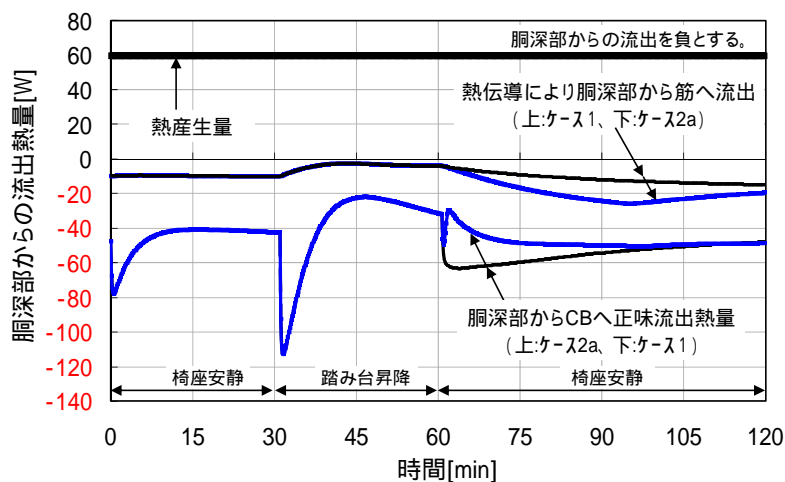


図3-17 胴深部の熱収支（ケース1とケース2の比較）

3.4.3 深部温の一過性上昇に及ぼす血流量変動の影響

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3-18に示す3つの過程を順に経て、深部温は一過性に上昇する。以下ではこの3つの過程の内容を具体的に説明する。

(1) 運動を停止し、冷房空間へ移動すると、皮膚血流量が急激に減少する。



(2) 皮膚流量が減少するため、CBから皮膚への正味の流出熱量が減少し、CB温度は上昇する。



(3) CB温度の上昇により、胴深部からCBへの正味の流出熱量が減少するため、胴深部温は上昇する。

図3-18 深部温が一過性に上昇するプロセス(解析結果より)

(1) 血流量が低下する過程

高温室で運動を停止して低温室に移動すると、筋血流量と皮膚血流量は各々急激に減少する（図3-15a、図3-15b）。運動停止に伴ない代謝量が減少するため筋血流量は減少し、図3-19に示すように平均皮膚温が急激に低下する影響を受け、皮膚血流量は減少する。

MBFは、運動開始中の $3.29 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ から、冷房室入室後に $2.94 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ まで約1/11に減少する。SBFは高温室での $9.66 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ から、胸深部温が極大値をとる67分には $2.51 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ まで約1/4に減少する。筋血流量及び皮膚血流量ともに減少率は大きい。

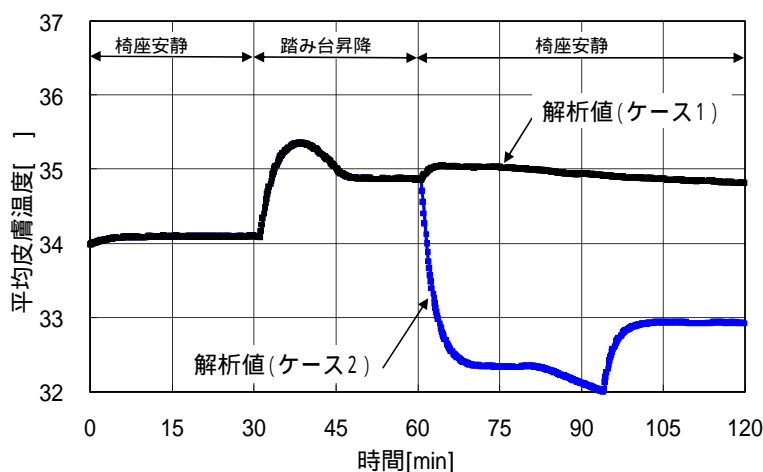


図3-19 平均皮膚温の比較（ケース1と2の比較）

(2) CB温度が上昇する過程

ケース2における各部位温度を図3-16aに示す。低温室入室時の各部位温度は、脚深部38.4、胸深部37.6、頭深部37.5、CB37.4の順に高く、活動筋である脚深部温が最も高い。他の部位は上記4部位より2~3程度低くなる。従って、皮膚血流量が急激に減少すると、CBから皮膚への正味の流出熱量が減少し、CB温度は上昇する。

図3-16bにMBFとSBFを介したCBから各部位への正味の流出熱量を示す。一過性に低下する場合は異なり、一過性の上昇には皮膚血流量の変化のみが影響する低温室入室後、SBFによるCBから皮膚への正味の流出熱量は、運動停止前の85Wから35Wまで58%も減少する。MBFについては、CBから胸筋部と腕深部へ流出する正味の熱量は32Wから5Wまで85%も減少するが、脚深部からCBへ流入する正味の熱量も80Wから9Wまで88%も減少するため、流入出熱量が相殺し、MBFからCBへの正味の流入熱量の合計は運動停止前の58Wから4Wまで減少し、むしろCB温度を低下させる方向に働く。

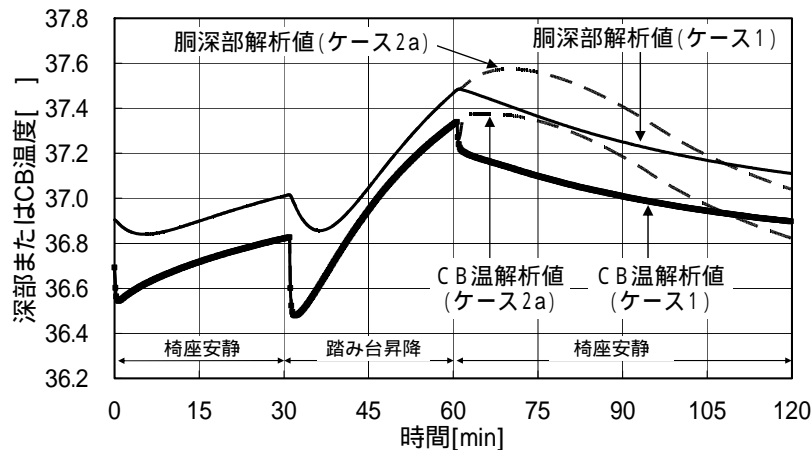


図3-20 解析値の比較（ケース1と2の比較）

(3) 胸深部温が上昇する過程

図3-17に胸深部の熱収支を示す。先に示した、基礎代謝による熱発生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流による胸深部からCBへの正味の流出熱量、の熱収支で深部温は決まるが、冷房室に移動し運動を停止すると、の胸深部からCBへの正味の流出熱量は急激に減少するが、の基礎代謝による熱発生量は変化なし、胸筋温が低下するための胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量は増加するため深部温を低下させる方向に影響する。従って、の血流による胸深部からCBへの正味の流出熱量が減少することが、深部温が一過性に低下する理由となる。

時間の経過につれ、皮膚表面から室空気へ放熱により深部を除く各部位の温度は低下するため、熱伝導による胸深部からの流出熱量が増加することで深部温は低下に転じる。ただし、変動速度は非常に緩やかであり、冷房室入室時の温度まで戻るのに30分もかかる。

冷房室の温度が35～50%の場合には、運動停止後のS B Fの減少は緩やかであるため、CBから皮膚への正味の流出熱量の減少量(図3-16b)は少なくなり、図3-20に示すようにCB温は低下する。温度の低下した血液がCBから胸深部へ還流するため深部温は低下する。

(4) 平均皮膚温の実験値と解析値の差が深部温変動に及ぼす影響について

図3-13bに示すように、ケース2の場合には62～95分における平均皮膚温の解析値が実験値より最大1.5℃程度低くなるが、これは解析では汗の蒸発量を過大に評価しているためと考えられる。平均皮膚温のセットポイントである34.1℃を下回る時刻は解析値と実験値で3分程しか差がないため、解析精度を向上させた場合でも、今回の解析で得られた“皮膚血流量が急激に減少するという変動特性”は再現される。また、平均皮膚温がセットポイントより低い場合には、皮膚血流量は式(3-25)の第一項の定常値に近い値で安定するため、平均皮膚温の解析値と実験値の差が、皮膚血流量S B Fの解析結果に与える影響は少ない。

3.4.4 筋血流量と熱産生量の影響

(1) 解析ケース

運動終了後に深部温の上昇が大きかったケース2について、筋血流量と熱産生量の非定常特性が深部温の一過性の上昇及び低下に与える影響を検討する。ここでは、ケース2をケース2aと書き改め、表3-3に示す筋血流量及び運動に伴う熱産生量を考慮した2b,2c,2dの計4ケースの解析を行った。筋血流量 MBF 及び運動に伴う熱産生量 q_{EX} の変化形状が心拍数変動に類似するよう $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.005$ とした。また、比較のためケース1'の結果も合わせて示す。その他の条件は前節と同じとする。

表 3-3 解析ケース

解析ケース	筋血流量の非定常特性	運動に伴う熱産生量の非定常特性
ケース 2a	無 ($\beta_1 = \beta_2 = 0.0$)	無 ($\beta_3 = \beta_4 = 0.0$)
ケース 2b	考慮する ($\beta_1 = \beta_2 = 0.005$)	無 ($\beta_3 = \beta_4 = 0.0$)
ケース 2c	無 ($\beta_1 = \beta_2 = 0.0$)	考慮する ($\beta_3 = \beta_4 = 0.005$)
ケース 2d	考慮する ($\beta_1 = \beta_2 = 0.005$)	考慮する ($\beta_3 = \beta_4 = 0.005$)
ケース 1	無 ($\beta_1 = \beta_2 = 0.0$)	無 ($\beta_3 = \beta_4 = 0.0$)

(2) 解析結果

< 筋血流量と熱産生量の時間遅れ >

図3-21aに心拍数実験値と筋血流量解析値の比較を示す。筋血流変動と心拍数の変化形状は概ね一致している。図3-21bに示すように、ケース2aでは MBF と代謝量ともに運動開始あるいは停止に合わせて階段関数的に変化する。ケース2bでは筋血流量が、ケース2cでは代謝量が、ケース2dでは MBF と代謝量の両方が、運動開始直後から指数関数的に増加し、運動停止後に指数関数的に減少する。

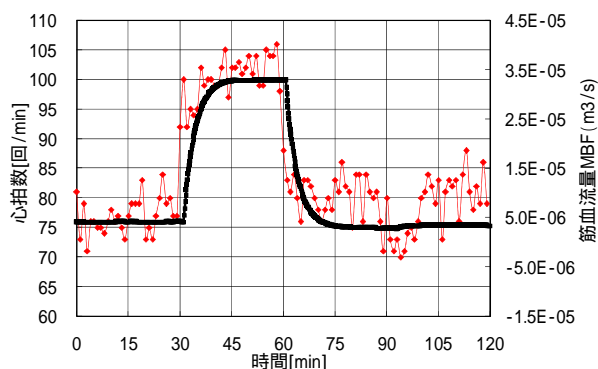


図3-21a 心拍数実験値とMBF解析値

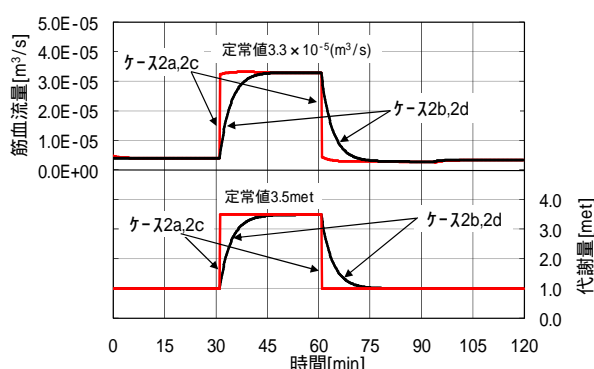


図3-21b 筋血流量と代謝量の解析値

< 高温室に入室し運動を開始した後の深部温の一過性低下について >

図3-22aに30分時点での値で基準化したC B温変動を示す。一過性の低下は、全てのケースで生じる。極小値を比べると、ケース2aでは-0.33、ケース2b -0.20、ケース2cは-0.38、ケース2dは-0.26 となり、一過性の低下幅はケース2bの場合に小さく、ケース2cの場合に大きくなる。ケース2bでは、ケース2aの場合よりも筋血流の増加が緩やかになるため、温度の低い筋からの血液還流量が減少しC B温は高くなる。ケース2cでは、ケース2aの場合よりも筋における熱産生量が減少するため筋温しいては還流する血液温度が低くなるため、C B温は低下する。ケース2dでは、筋血流と熱産生量の時間遅れの影響が相殺し、ケース2bとケース2cの中間の温度になる。図3-22bに30分時点での値で基準化した胸深部温を示す。

深部温はC B温の影響により、ケース2bの場合に最も一過性の低下幅が小さく、ケース2cの場合に最も大きくなる。ケース2dとケース2aの温度差は0.01 と小さく、ほとんど同じ温度になる。

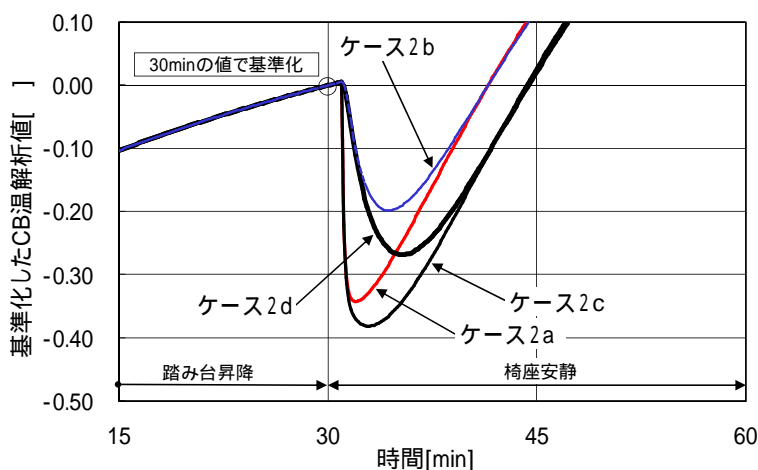


図3-22a CB温の一過性低下の比較

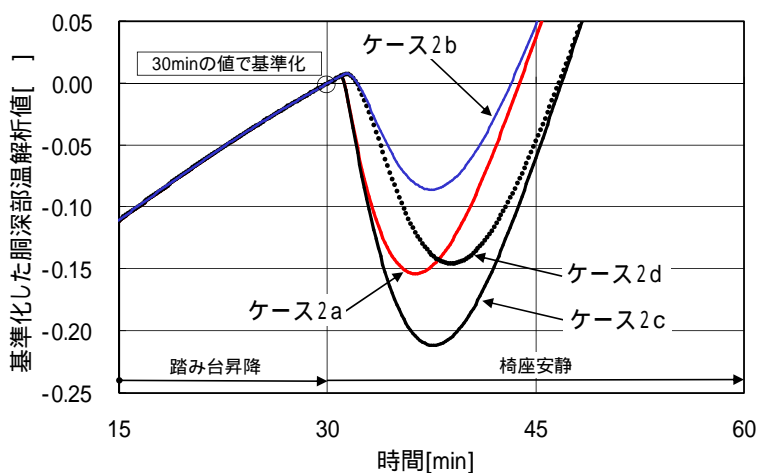


図3-22b 胸深部温の一過性低下の比較

< 冷房室に入室して運動を停止した後の深部温の一過性上昇について >

図3-23a、図3-23bに各々30分時点での値で基準化したC B温、および胴深部温を示す。解析結果の特徴を以下に示す。

- ・先に述べた一過性に低下する場合とは異なり、筋血流と熱産生量の非定常応答性を考慮した場合（ケース2b, 2c, 2d）には、それらを考慮しないケース2aの場合よりも、C B温及び胴深部温のいずれの場合も、一過性に上昇する温度幅は大きくなる。
- ・筋血流量の非定常特性は、運動停止後5～15分間程度の短い時間帯のみに影響する。熱産生量の非定常特性は30分以上続く。

詳細を以下に示す。

各ケースの極大値はケース2aでは0.05、ケース2bは0.10、ケース2cは0.07、ケース2dは0.13となり、ケース2dの場合に最も大きく、ケース2aの場合に最も小さくなる。

ケース2aと2cでは、運動停止直後にC B温が一旦0.06減少した後すぐ上昇するという特徴的な変動を示すが、これは筋血流量と皮膚血流量の変動が関係している。すなわち、運動停止後に筋血流量が階段関数的に減少すると、脚筋からC Bへの正味の流入熱量が急激に減少する影響によりC B温は一旦低下する。その1, 2分後に皮膚血流量が急激に減少しC Bから皮膚への正味の流出熱量が減少するため、C B温は上昇に転じる。筋血流量が階段関数的に変化しないケース2bと2dでは、C B温の低下は生じない。

筋血流の非定常性を考慮したケース2bと2dでは、筋血流量による脚深部からC Bへの正味の熱流入が続き、かつ運動停止による皮膚表面の熱伝達率の低下による皮膚表面からの放熱量の減少もあり、C B温は60分以前よりも大きい変化率で上昇する。ただし、ケース2bの場合、62分には低下に転じ67分にはケース2aとほぼ同じ温度に戻ることから、筋血流の非定常特性の影響は運動停止後の短い時間のみに作用する。また、ケース2cでは、時間遅れで生じる産生熱が筋血流を介して徐々にC Bへ流入してくるため、ケース2aと2bの場合よりも極大値をとる時間（71分）が遅くなる。ケース2dの場合には、初期の突出したピークは筋血流の影響であり、その後産生熱の影響を受ける。

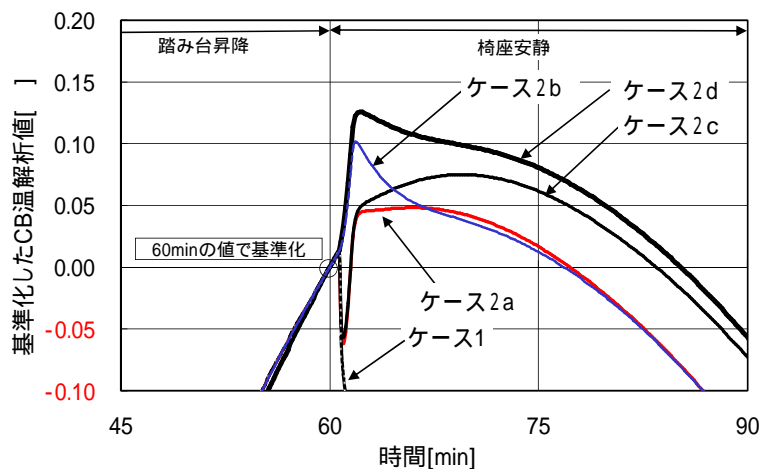


図3-23a 60分以降のCB温変動の比較

胸深部温は、C B温の影響を受け、ケース2dの場合に最も一過性の上昇幅が大きくなる。極大値は、ケース2aの場合と比べて、ケース2bでは0.01、ケース2cでは0.04、ケース2dでは0.07程度大きくなる。

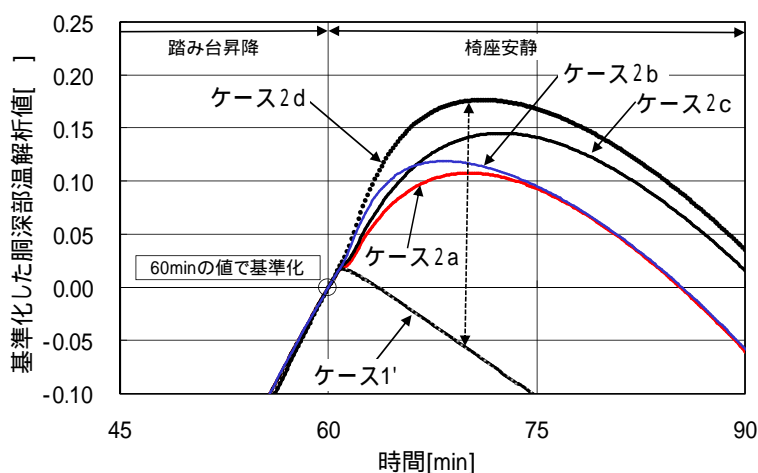


図3-23b 60分以降の胸深部温の一過性上昇の比較

3.4.5 深部温変動の一過性変動に及ぼす各要因の寄与率

前節までの解析結果より、深部温が一過性に上昇する要因として、以下の3要因の可能性を示した。

皮膚血流量と筋血流量の影響

代謝による組織での熱産生量の非正常特性の影響

代謝による組織での筋血流量の非正常特性の影響

深部温の一過性上昇に及ぼす影響度をケース1からの上昇温度で表すと、ケース2cの場合に最大0.23上昇することから、0.16上昇するの影響度が70% ($=0.16 / 0.23$)、0.20上昇するの影響度が17% ($=0.04 / 0.23$)、残りの0.03の影響度が13% ($=0.03 / 0.23$)であり、0.03の影響が他の2つの要因に比して大きい。

3.5 深部温変動に及ぼす血液と体組織間の熱移動の影響

3.4節では、全身の血液を中央血流溜りであるCB1点で質点化するStolwijkらのモデル¹⁻¹²⁾による解析を行ない、深部温が一過性に変動するメカニズムに関する検討を行った。StolwijkらはCBの解剖学的な位置づけを明確にしていなが、一過性変動のメカニズムに対する知見を得る手法として解析を利用する立場からは、CBおよびCB温の意味する内容を明確しておく必要がある。

本節では、全身の血液を多質点化した場合と中央血流溜り1点でモデル化した場合との解析結果を比較することで、CBモデルの解剖学的な位置づけを明らかにする。さらに、血液と体組織間の熱コンダクタンスに関する感度解析を行い、血管壁を介した血液から体組織への熱移動が深部温に及ぼす定性的な影響を明らかにする。

3.5.1 検討を行うモデルの概要

本章で検討を行う2つのモデルの概要を説明する。

(1) CBモデル

全身の血液を1質点でモデル化する中央血流溜りモデルを式(3-11)に再掲する。血液と体組織間の熱移動としては毛細血管を通しての体組織への血液灌流による熱交換のみを考慮している。

$$c_b W_b \frac{dT_{CB}}{dt} = \sum_i c_b \rho_b B F_i (T_i - T_{CB}) \quad (3-11)$$

ここで

$B F$: 部位*i*の血流量[m^3/s]

c : 比熱[J/kgK]

T : 温度[K]

t : 時間[s]

W : 質量[kg]

ρ : 密度[kg/m^3]

添え字

i : 部位

b : 血液

CB : 中央血流溜り

Stolwijkらは、直径1cm以上の血管と心臓に貯留される血液量1,350mlをCBの血液量としており、その内訳は、心臓300ml、大動脈血管375ml、大静脈血管375ml、頭・腕・脚の動静脈血管に各々100mlである。従って、CBは、心臓に貯留される血液と胸、頭、腕、脚に分布する1cm以上の動静脈血管を1質点で表現していることになる。

(2) 血液多質点モデル

本研究では、C Bを分割して各部位に配置させたモデルを“血液多質点モデル”と称し、図3-24に示すように各部位深部に動脈血液溜り(以下 AP で略)と静脈血液溜り(以下 VP で略)を配置すモデル化を行う。血液は、胸部の AP から各部位 AP に流れ、各組織と血液灌流による熱交換を行なった後、各部位 VP に流れ、胸部 VP を介して胸部 AP に戻る。血液と体組織の熱移動としては毛細血管での血液灌流による熱交換に加え、血液から血管壁を介した組織への熱移動も考慮する。動脈血液溜りの容積や、血液と体組織間の熱コンダクタンスの設定方法は以降で説明する。血液溜りの熱収支式を次に示す。

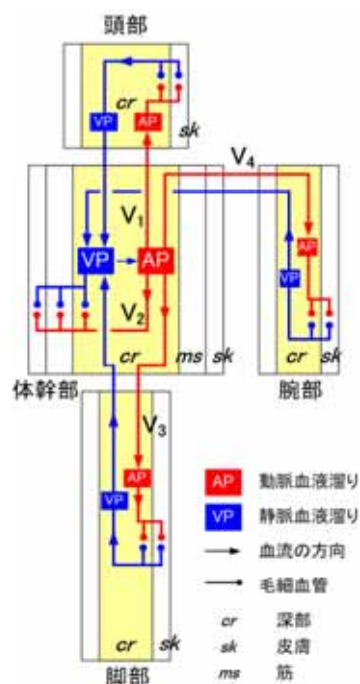


図 3-24 血液多質点モデルの概要

・ 動脈血液溜りの熱収支式

$$c_b W_{a,n} \frac{dT_{a,n}}{dt} = c_b \rho_b V_n (T_x - T_{a,n}) + h_{a,n} A_{a,n} (T_i - T_{a,n}) \quad (3-31)$$

ここで、 i は人体各部位を、 n は各部位血液溜りを表す。 T_i は各動脈血液溜りに接する体組織の温度を表す。 T_x は n 部動脈血液溜りへ流入する血液温度であり以下となる。

$$T_x = \begin{cases} n=1, 3, 4 \text{ のとき, } T_{a2} (\text{胸部動脈血液溜り温度}) \\ n=2 \text{ のとき, } T_{v2} (\text{胸部静脈血液溜り温度}) \end{cases} \quad (3-32)$$

V_n は n 部血液溜りに流入する血液量を表し、以下で計算する。

$$V_1 = BF_1 + BF_2, \quad V_2 = \sum_{i=1}^9 BF_i, \quad V_3 = BF_6 + BF_7, \quad V_4 = BF_8 + BF_9 \quad (3-33)$$

・ 静脈血液溜りの熱収支式

$n = 1, 3, 4$ のとき

$$c_b W_{v,n} \frac{dT_{v,n}}{dt} = c_b \rho_b \sum_j BF_j T_j - c_b \rho_b V_n T_{v,n} + h_{v,n} A_{v,n} (T_i - T_{v,n}) \quad (3-34)$$

$n = 2$ のとき

$$c_b W_{v,2} \frac{dT_{v,2}}{dt} = c_b \rho_b \sum_{m=1,3,4} V_m T_{v,m} + c_b \rho_b \sum_j BF_j T_j - c_b \rho_b V_2 T_{v,2} + h_{cv,2} A_{v,2} (T_3 - T_{v,2}) \quad (3-35)$$

以上の式を具体的に書くと、式(3-36), (3-37)になる。

・ 動脈血液溜り温度について

$$\begin{cases} c_b W_{a1} \frac{dT_{a1}}{dt} = c_b \rho_b V_1 (T_{a2} - T_{a1}) + h_{ca1} A_{a1} (T_1 - T_{a1}) \\ c_b W_{a2} \frac{dT_{a2}}{dt} = c_b \rho_b V_2 (T_{v2} - T_{a2}) + h_{ca2} A_{a2} (T_2 - T_{a2}) \\ c_b W_{a3} \frac{dT_{a3}}{dt} = c_b \rho_b V_3 (T_{a2} - T_{a3}) + h_{ca3} A_{a3} (T_3 - T_{a3}) \\ c_b W_{a4} \frac{dT_{a4}}{dt} = c_b \rho_b V_4 (T_{a2} - T_{a4}) + h_{ca4} A_{a4} (T_4 - T_{a4}) \end{cases} \quad (3-36)$$

・ 静脈血液溜り温度について

$$\begin{cases} c_b W_{v1} \frac{dT_{v1}}{dt} = c_b \rho_b (BF_1 \cdot T_1 + BF_2 \cdot T_2) - c_b \rho_b V_1 T_{v1} + h_{cv1} A_{v1} (T_1 - T_{v1}) \\ c_b W_{v2} \frac{dT_{v2}}{dt} = c_b \rho_b (V_1 \cdot T_{v1} + V_3 \cdot T_{v3} + V_4 \cdot T_{v4}) + c_b \rho_b (BF_3 \cdot T_3 + BF_4 \cdot T_4 + BF_5 \cdot T_5) \\ \quad - c_b \rho_b V_2 T_{v2} + h_{cv2} A_{v2} (T_2 - T_{v2}) \\ c_b W_{v3} \frac{dT_{v3}}{dt} = c_b \rho_b (BF_6 \cdot T_6 + BF_7 \cdot T_7) - c_b \rho_b V_3 T_{v3} + h_{cv3} A_{v3} (T_3 - T_{v3}) \\ c_b W_{v4} \frac{dT_{v4}}{dt} = c_b \rho_b (BF_8 \cdot T_8 + BF_9 \cdot T_9) - c_b \rho_b V_4 T_{v4} + h_{cv4} A_{v4} (T_4 - T_{v4}) \end{cases} \quad (3-37)$$

記号

$A_{a,n}, A_{v,n}$: 部位 n の動脈血液溜り、静脈血液溜りの表面積[m^2]

BF_i : 部位 i の灌流血流量[m^3/s]

c_b : 血液の比熱[J/kgK]

$h_{a,n}, h_{v,n}$: 部位 n の動脈血液溜り、静脈血液溜りから体組織までの熱コンダクタンス[W/K]

$T_{a,n}, T_{v,n}$: 部位 n の動脈血液溜り温度、静脈血液溜り温度[K]

V_n : 血液溜り n へ流入、あるいは血液溜り n から流出する血流量[m^3/s]

t : 時間[s]

$W_{a,n}$, $W_{v,n}$: 部位 n の動脈血液溜り、静脈血液溜りの質量[kg]

ρ_b : 血液の密度[kg/m^3]

添え字

i : 体組織の各部位 (頭深部 $i=1$, 頭部皮膚 $i=2$, 胴深部 $i=3$, 胴筋部 $i=4$, 胴皮膚部 $i=5$, 脚深部 $i=6$, 脚皮膚部 $i=7$, 腕深部 $i=8$, 腕皮膚部 $i=9$)

n : 血液溜りの各部位 (頭深部 $n=1$, 胴深部 $n=2$, 脚深部 $n=3$, 腕筋部 $n=4$)

a : 動脈血液溜り

b : 血液

v : 静脈血液溜り

・体組織の熱収支

体組織の熱収支式を式(3-38)に示す。式(3.1)、(3.2)に、血液から血管壁を介した組織への熱移動を表す項を第7項及び第8項として追加した。第7項及び第8項は、各々動脈血液溜りまたは静脈血液溜りから血管壁を介して体組織へ流入する熱量を表す。

$$c_i W_i \frac{dT_i}{dt} = q_{mtb,i} + q_{ex,i} + q_{res,i} + q_{shv,i} + \sum_j k_{ij} S_i (T_j - T_i) + c_b \rho_b B F_i (T_{a,i} - T_i) + h_{ca,i} A_{a,i} (T_{a,i} - T_i) + h_{cv,i} A_{v,i} (T_{v,i} - T_i) \quad (3-38)$$

ここで、

k_{ij} : 部位 i と j 間の組織間熱コンダクタンス[W/m^2K]

S : 体表面積[m^2]

q_{mtb} : 部位 i の基礎代謝量[W]

q_{ex} : 部位 i の運動に伴う熱産生量[W]

q_{shv} : 部位 i のふるえ産熱量[W]

q_{res} : 部位 i の呼吸による熱取得量[W]

添え字

i : 部位

j : i 部に隣接する部位

b : 血液

3.5.2 血液溜りの容積と表面積

表 3-4 に、血液多質点モデルにおける各部位の血液溜り容積を示す。血液溜り容積はStolwijkらにより示された数値を用いて、胸部容積を 1050ml (心臓 300ml, 大動脈血管 375ml, 大静脈血管 375ml)、頭部・腕部・脚部の容積を各々100mlとした。容積変化はなしとする。頭部、腕部、脚部の大動脈と大静脈の容積比は横山¹⁻²⁵⁾1-26)を参考に動脈容積:静脈容積=1:2とした。

血管溜りの表面積については、各部位内にある直径 1cm 以上の動静脈血管の表面積の総和を、動脈及び静脈血液溜りの表面積と設定する。ある限定された部位の血管の表面積についてはOlufsen³⁻¹⁴⁾、Sheng³⁻¹⁵⁾、K.H.Keller³⁻¹⁶⁾、Pennes³⁻¹⁷⁾らにより値が示されているが、人体全体での血管表面積は明らかにされていないため、次の 1) ~ 3)の手順で血管表面積を求めた。

- 1) 部位ごとに直径 1cm以上の血管の代表直径³⁻³⁾を動脈と静脈各々に設定する。
- 2) 各血液溜り容積を代表直径時の断面積で除して、各部位の総血管長を求める。
- 3) 総血管長 × 円周長により血管表面積を計算する。

表 3-4 血液溜りの容積と血管表面積 (血液多質点モデル)

部位	血液量 (ml)	血液溜り容積(ml)		血管代表直径 $D(m)$		血管表面積 $A(m^2)$		
		動脈 $W_{a,n}$	静脈 $W_{v,n}$	動脈 $D_{a,n}$	静脈 $D_{v,n}$	動脈 $A_{a,n} \times 10^{-4}$	静脈 $A_{v,n} \times 10^{-4}$	
頭部 ($n = 1$)	動脈+静脈	100	33	67	0.025	0.03	53	89
胸部 ($n = 2$)	心臓	300	87	213	0.025	0.03	140	284
	大動脈	375	375	-	0.025	-	600	-
	大静脈	375	-	375	-	0.03	-	500
	小計	1,050	462	588			740	784
脚部 ($n = 3$)	動脈+静脈	100	33	67	0.025	0.03	53	89
腕部 ($n = 4$)	動脈+静脈	100	33	67	0.025	0.03	53	89
計		1,350	562	788			900	1,050

3.5.3 血液と体組織間の熱コンダクタンス

Smith¹⁻²³⁾、竹森¹⁻²⁴⁾は血管を剛な円管とみなし、血液と体組織間の熱コンダクタンスとして、円管における強制対流時の熱伝達率を用いている。この際、血管壁の熱抵抗は無視している。本研究においても血管を円管とみなし式(3-39)と式(3-40)により熱コンダクタンスを計算する。

$$\text{動脈血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス} \quad h_{a,n} = \frac{Nu_{a,n} \lambda_{a,n}}{D_{a,n}} \quad (3-39)$$

$$\text{静脈血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス} \quad h_{v,n} = \frac{Nu_{v,n} \lambda_{v,n}}{D_{v,n}} \quad (3-40)$$

ここで、ヌッセルト数 Nu は、式(3.41)により計算した。粘性係数と血流速度は一定値とした。血管内の流れ性状に関する測定結果³⁻¹⁸⁾ 3-19)を引用し、動脈血管内血流は乱流、静脈血管内血流

は層流とした。解析に用いた基準値を表 3-5 に示す。表 3-6 に、血管表面積 A_{an}, A_{vn} と血管に関する熱コンダクタンス $h_{a,n}, h_{v,n}$ から求めた血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス $h_{an}A_{an}, h_{vn}A_{vn}$ を示す。

$$Nu = \begin{cases} 4.36 & (\text{層流}) \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} & (\text{乱流}) \end{cases} \quad (3-41)$$

記号

Nu : ヌッセルト数

Re : レイノルズ数[$Re = Du\rho/\mu$]

Pr : プラントル数[$Pr = c_b\mu/\lambda$]

u : 血管内の代表血流速[m/s]

D : 血管の代表直径[m]

λ : 血液の熱伝導率[W/mK]

μ : 血液の粘性係数[kg/ms]

c_b : 血液の比熱[J/kgK]

ρ_b : 血液の密度[kg/m³]

符号

n : 血液溜りの各部位 (頭深部 $n=1$, 頭部皮膚 $n=2$, 胴深部 $n=3$, 胴筋部 $n=4$)

a : 動脈血液溜り, b : 血液, v : 静脈血液溜り

表 3-5 解析に用いた諸数値

血管	血管 代表直径 D (m)	代表 血流速 u (m/s)	血液の 熱伝導率 λ (W/mK)	粘性係数 μ (kg/ms)	Re 数	Pr 数	Nu 数	熱コンダクタンス $h_{a,n}, h_{v,n}$ (W/m ² K)
大動脈	0.025	0.5	0.52	0.003	4,417	22.22	53.30	1,109
大静脈	0.03	0.15	0.52	0.003	1,590	22.22	4.36	76

表 3-6 血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス

部位	熱コンダクタンス(W/K)	
	動脈 $h_{an}A_{an}$	静脈 $h_{vn}A_{vn}$
頭部 ($n=1$)	82.0	5.9
胴部 ($n=2$)	5.9	0.7
脚部 ($n=3$)	5.9	0.7
腕部 ($n=4$)	5.9	0.7

3.5.4 解析ケース

第2章で行った被験者実験の再現計算を行う。解析条件1を表3-7に、解析条件2を表3-8に示す。

解析条件1では、CBモデルと血液多質点モデルの解析結果を比較することで、血液の分布が深部と皮膚の温度に与える影響を検討する。CBモデルの解析結果は、第3.4節ケース2aの解析結果を用いる。血液多質点モデルの解析では、式(3.31)～(3.41)を用いた解析を行なう。筋血流量と熱産生量の非定常性は考慮せず、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.0$ とおき解析を行う。

表 3-7 解析条件1 (CBモデルと血液多質点モデルの比較)

解析ケース	血液の質点数	血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス
Case 1	CB1点	0
Case 2a	動静脈血液溜り 計8点	0

解析条件2では、血液溜りと体組織間の熱コンダクタンスが解析結果に与える影響を検討する。 $h_{an}A_{an}, h_{vn}A_{vn}$ を0～とおいた解析を行ない、上下限範囲の確認と定性的影響を確認する。

表3-6に示す $h_{an}A_{an}, h_{vn}A_{vn}$ を基準条件とし、 $h_{an}A_{an}=0, h_{vn}A_{vn}=0$ とおいた場合、基準条件×5倍の場合、基準条件×100,000倍の場合の計4ケースの解析を行う。

基準条件×5倍の値は血管直径1cmの値に相当する。また、基準条件×100,000倍という条件は、それ以上の値では解析結果に差がないことから、 $h_{an}A_{an}, h_{vn}A_{vn}$ を とすることに相当する。

表 3-8 解析条件2 (血液溜りと体組織間の熱コンダクタンスの影響の検討)

解析ケース	血液の質点数	血液溜りと体組織間の熱コンダクタンス	備考
Case 2a	動静脈血液溜り 計8点	0	
Case 2b		基準条件 (表 3-6 に示す $h_{an}A_{an}, h_{vn}A_{vn}$)	
Case 2c		基準条件×5	血管直径1cmに相当する値
Case 2d		基準条件×100,000	血管直径 に相当する値

3.5.5 C Bモデルと血液多質点モデルの比較

解析条件1の結果をもとに、C Bモデルと血液多質点モデルの差を検討する。

(1) 定常状態の場合

C Bモデルの場合には、式(3-11)の左辺=0とおき T_{CB} について解くと、定常状態における以下の解が得られる。結果、 T_{CB} は各部位血液量の重み平均で求められる。

$$T_{CB} = \frac{\sum_{i=1}^9 c_b \rho_b B F_i T_i}{\sum_{i=1}^9 c_b \rho_b B F_i} \quad (3-42)$$

血液多質点モデルの場合には、式(3-36)と(3-37)の左辺=0とおき、 $T_{a,n}$ 、 $T_{v,n}$ について解くと、

$$T_{a1} = T_{a2} = T_{a3} = T_{a4} = T_{v2} = \frac{\sum_{i=1}^9 c_b \rho_b B F_i T_i}{\sum_{i=1}^9 c_b \rho_b B F_i} \quad (3-43)$$

となる。以上の結果より、 $T_{a1} = T_{a2} = T_{a3} = T_{a4} = T_{v2} = T_{CB}$ となり、定常状態では、C B温 T_{CB} と多質点モデルで計算した動脈血液溜り温度($T_{a1} = T_{a2} = T_{a3} = T_{a4}$)および胸部静脈血液溜り温度(T_{v2})とは等しくなる。血液温度が等しいので体組織温も等しくなる。この結果より、C B温は、各部位にある動静脈の血液を容積平均した温度ではなく、動脈血液温度を表していることになる。

(2) 非定常状態の場合

C B温と動静脈血液溜り温を図3-25に示す。C B温と、血液多質点モデルで計算した動脈血液溜り温との差は0.01以下である。非定常状態の場合でも、C B温と動脈血液溜り温は等しくなる。また、C B温度は、Case2aの場合で求めた各血液溜り温度を容積平均した温度と異なる。すなわち、C B温度は動脈血液温度および胸部静脈血液溜り温度と同じであり、全身の血液溜り平均温度とは異なる。以上より、血管壁を介した血液から体組織への熱移動を無視した場合、血液多質点モデルとC Bモデルの結果は等しくなる。

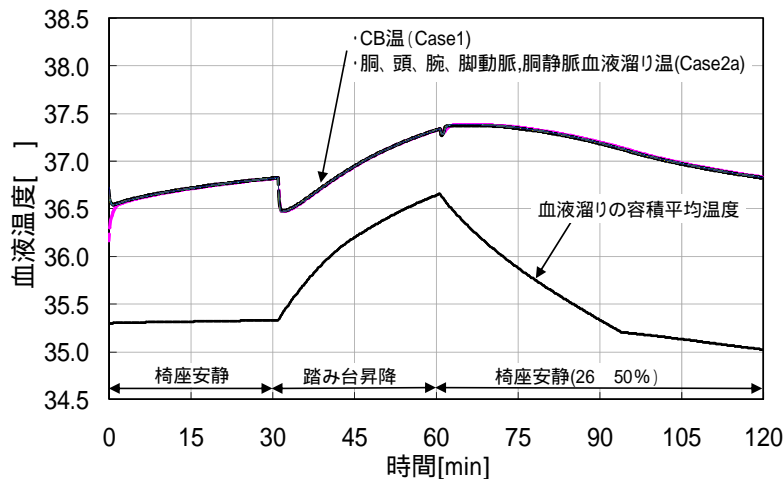


図3-25 C B温と動静脈血液溜り温の比較

3.5.6 深部温変動に及ぼす熱コンダクタンスの影響

解析条件2の結果をもとに、血液と体組織間の熱コンダクタンスの影響を部位ごとに説明する。

(1) 腕部について

図3-26aに各ケースの動脈血液溜り温度と静脈血液溜り温度を示す。熱コンダクタンスが大きいほど、動脈血液溜り温度は低く静脈血液溜り温度は高くなり、基準条件×100,000倍のケース2dでは両者の温度は等しくなる。末梢に相当する腕部では、腕深部とそこへ流入してくる胸部動脈血液溜り温度の差が大きいため、動脈血液温度に及ぼす熱コンダクタンスの影響は大きくなる。

図3-26bに皮膚温と深部温を示す。熱コンダクタンスが大きくなると、動脈血液溜りから血液壁を介して深部に流入する熱量が増加するので深部温は高くなる。逆に、温度の低くなった動脈血液が流入するため皮膚温は低下する。例えば時刻120分におけるケース2dの場合には、ケース2aの場合よりも筋では0.3 高く、皮膚では0.6 低い。熱コンダクタンスの差が腕部の皮膚温に及ぼす影響は無視できないオーダーであり、実態にあった熱コンダクタンスの設定が必要である。

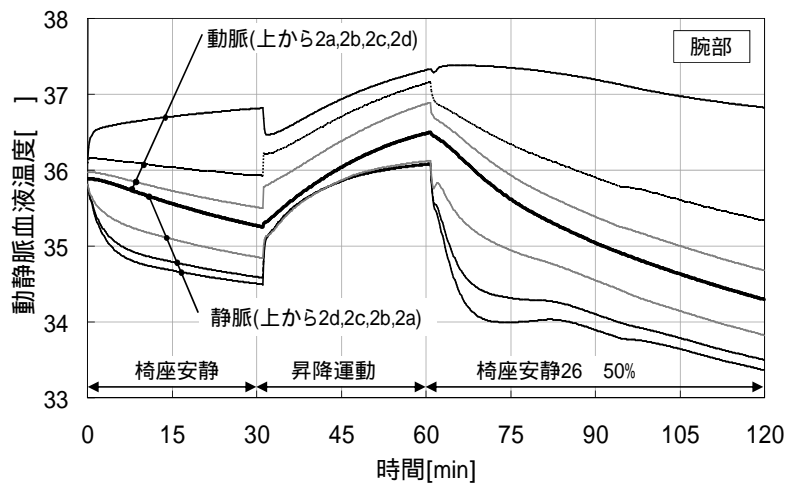


図3-26a 動脈血液溜り温と静脈血液溜り温の比較(腕部)

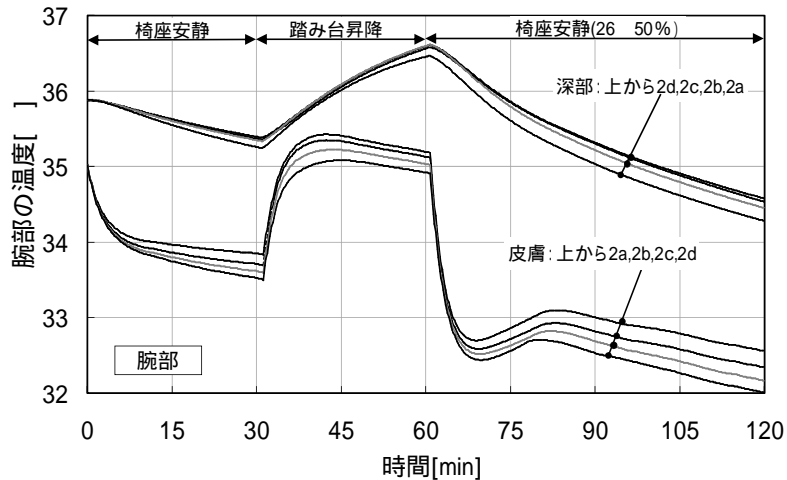


図3-26b 腕部皮膚温・腕部深部温の比較

(2) 腕部における熱収支について

熱収支の一例として、75分におけるCase2aとCase 2bの熱収支を図3-27a、3-27bに示す。熱コンダクタンスが大きくなると、動脈血液溜りと静脈血液溜りの間で熱のショートサーキットが生じ、胸部動静脈血液溜りから腕部への正味の流入熱量は減少する。胸部深部から腕部への放熱量が減少することになり、深部温の一過性上昇は大きくなる方向に変化する。

次に皮膚表面から室空気への放熱量について説明する。Case 2bの場合、Case 2aと比べて動脈血液溜りから深部組織への放熱量が増加（1.53Wから1.80W+0.49W=2.29W）するため、動脈血液溜り温度が低下し（37.35 から36.34 ）、動脈血液から皮膚への放熱量は減少（7.44Wから5.99W）する。これにより皮膚温が低下（32.86 から32.72 ）するため、皮膚表面から室空気への放熱量は2%程度減少（24.94Wから24.56W）、C Bから深部への正味の放熱量も約8%減少する。

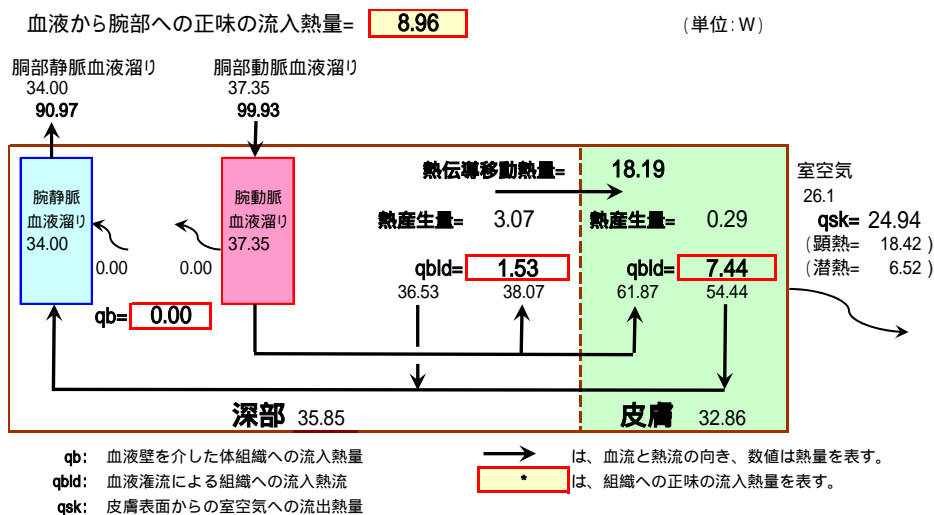


図3-27a Case2aにおける腕部の熱収支 (75分)

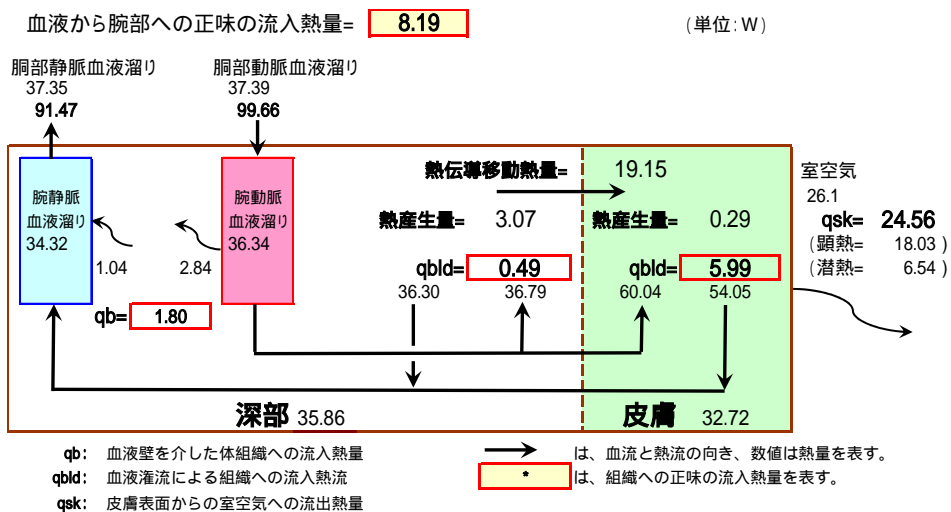


図3-27b Case2bにおける腕部の熱収支 (75分)

(2) 胸部について

図3-28a、図3-28bに胸部動脈血液溜り温度、胸部深部温度を示す。Case2a~2d全ての場合で、胸部深部温は一過性の変動を示す。血液を多質点化した場合でも、中央血流溜り1点でモデル化した場合と同様のメカニズムにより深部温の一過性変動が生じることを確認した。

熱コンダクタンスが大きくなると、動脈血液溜り温は高くなるが、これは次の2つの理由による。

- 1) 腕部で示したように熱コンダクタンスが大きくなると動脈と静脈血液溜り間でショートサーキットが生じ、胸部静脈血液溜りに還流する腕部静脈血液溜りからの血液温度が上昇するため正味の流出熱量が減少し、血液温度は上昇する。
- 2) 胸部深部は胸部動脈血液溜りより温度が高いため、熱コンダクタンスが大きくなると胸部深部から胸部動脈血液溜り温へ流入する熱量が増加し、動脈血液溜り温は上昇する。

上記の理由により、熱コンダクタンスが大きくなるほど深部温の一過性に上昇する温度幅は大きくなる。60分の値を基準にした一過性上昇の温度幅を比べると、Case2a, 2b, 2c, 2dの場合に各々0.10、0.11、0.13、0.19 上昇する。Case2aとCase2dの場合の温度差は0.09 であるが、深部温の差としては小さくなく、胸部深部温変動に及ぼす熱コンダクタンスの影響は大きい。

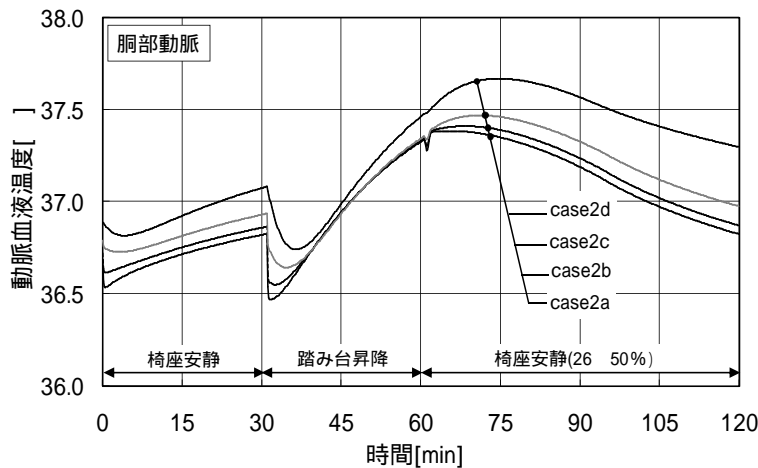


図3-28a 胸部動脈血液溜り温の比較

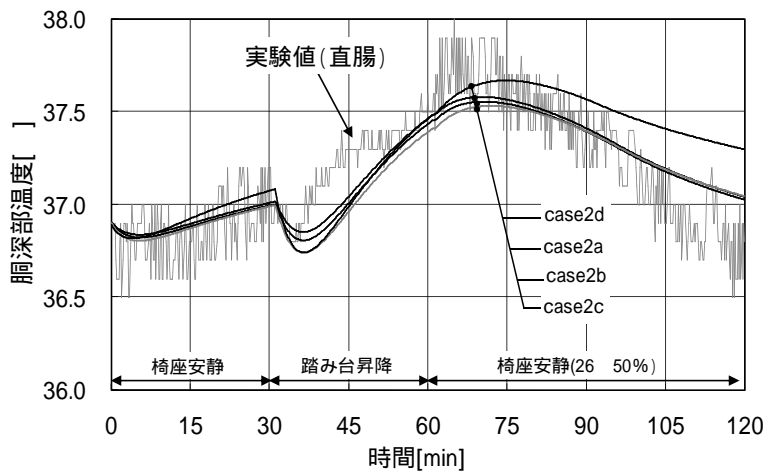


図3-28b 胸部深部温の比較

図3-28cに皮膚温と筋温を示す。Case2bまたはCase2cと、Case2aとの差は0.01 以下であり、ほぼ同じ温度になる。Case2dの場合でも、冷房入室後に皮膚温が低下する過程では、他の3ケースとほぼ同じ温度になる。胴深部温と胴部動脈血液溜りへ流入してくる静脈血液温の温度差が少ない(0.1 程度)胴部では、皮膚温と筋温に及ぼす熱コンダクタンスの影響は非常に小さい。

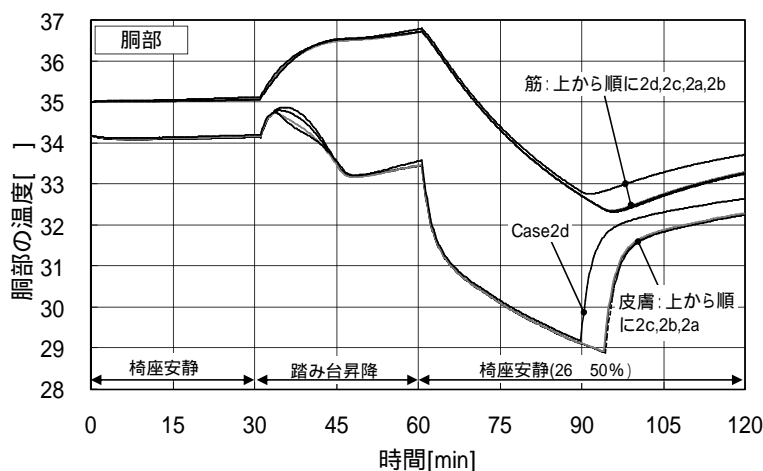


図3-28c 胴皮膚温及び胴筋温の比較

(3) 頭部について

図3-29aに頭部の動脈血液溜り温、図3-29bに頭深部温及び頭皮膚温を示す。頭深部と頭動脈血液溜りへ流入してくる胴部動脈血液溜りとの温度差が少ない(0.1 程度)頭部では、胴部と同様の変動傾向を示す。すなわち、皮膚温については、ケース2aに比べてケース2b、2cの温度差は0.01 と少なく、ケース2dにおいても0.15 程度である。皮膚温に及ぼす熱コンダクタンスの影響は小さい。熱コンダクタンスが大きくなるほど、動脈血液溜り温度は上昇し、その影響により頭深部温も上昇する。Case2aとCase2dの深部温の差は0.1 程度であり、熱コンダクタンスが深部温変動に及ぼす影響は小さくない。

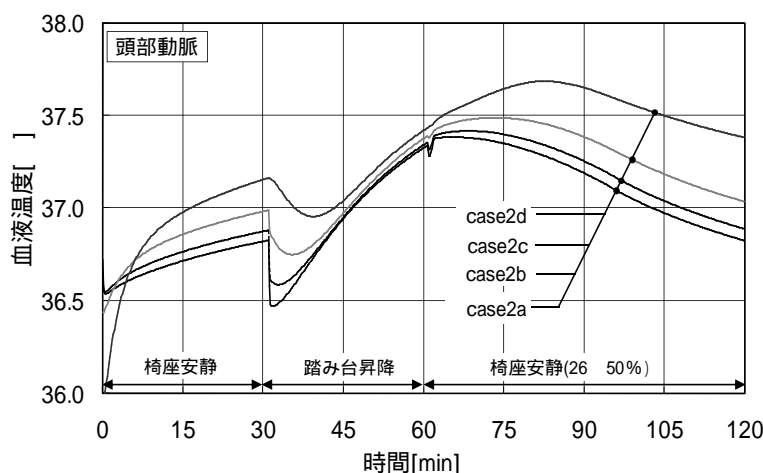


図3-29a 頭部動脈血液溜り温の比較

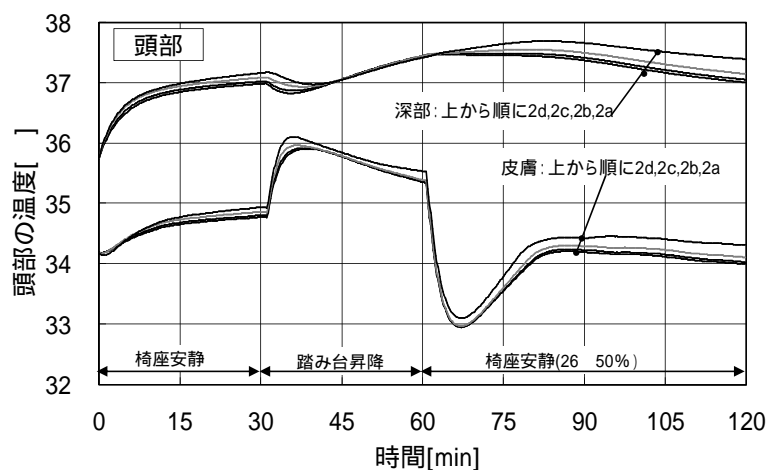


図3-29b 頭皮膚温及び頭深部温の比較

(4) 脚部について

図3-30aに脚部動脈血液溜り温度を、図3-30bに脚部の皮膚温と筋温を示す。脚部も腕部と同様に末梢部位に相当するが、脚部の皮膚と深部に及ぼす熱コンダクタンスの影響は胸部または頭部の変動と同様の傾向を示す。運動による熱産生により深部の温度が高くなり、脚動脈血液溜りへ流入してくる胴深部血液溜り温との温度差が比較的小さいため、脚部の皮膚と深部に及ぼす熱コンダクタンスの影響は小さい。

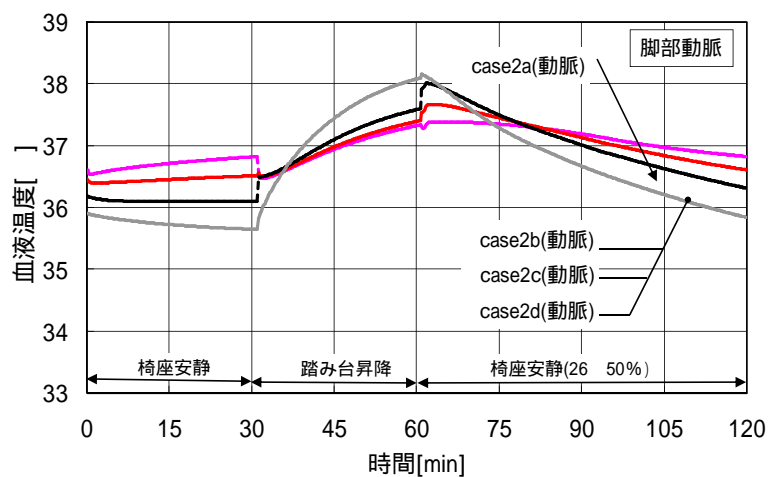


図3-30a 脚部動脈血液溜り温の比較

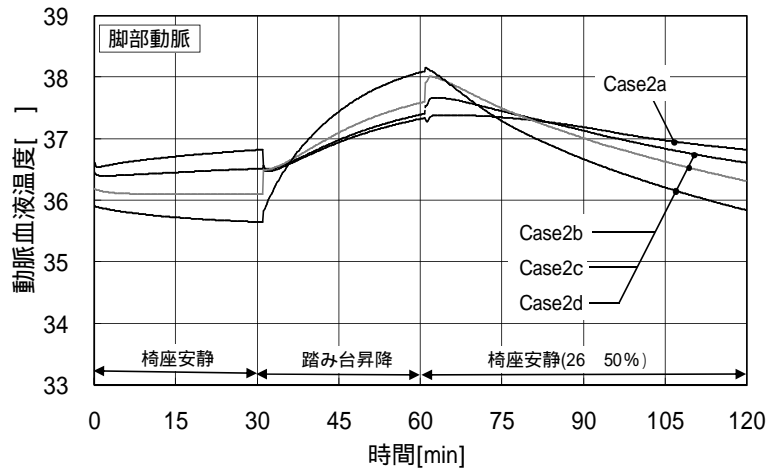


図3-30b 脚皮膚温及び脚深部温の比較

3.5.7 まとめ

(1) C Bの解剖学上の位置づけ

- ・ C Bは、心臓に貯留される血液と直径 1cm 以上の動静脈血管とを 1 質点化したものである。
- ・ C B温は、心臓に貯留される血液と直径 1cm 以上の動静脈血管内血液の容積平均温度ではなく、動脈血液温度を意味する。

(2) C Bモデルと多質点モデルの違い

- ・ 血管壁を介した血液から組織への熱移動を考慮しない場合には、血液多質点モデルと C Bモデルの解析結果は等しい。
- ・ 血液を多質点化し、血管壁を介した血液と体組織間の熱移動を考慮した場合でも、C B1 点でモデル化した場合と同様のメカニズムにより、深部温は一過性の変動を示す。

(3) 熱コンダクタンスが深部温変動に与える影響

- ・ 血液と体組織間の熱コンダクタンスが大きくなると、深部組織において動脈血液と静脈血液間で熱のショートサーキットが生じ、胴深部には温度の高くなった血液が還流し、胴深部からの正味流出熱量は減少する。これにより、胴深部の一過性の上昇幅は大きくなる方向に変化する。
- ・ 深部温変動の解析精度を向上するには、実態にあった熱コンダクタンスの設定が必要である。

(4) 熱コンダクタンスが皮膚温変動に与える影響

- ・ 組織温度とそこへ流入する動脈血液温度の差が比較的大きい腕部では、血液と体組織間の熱移動が皮膚及び深部に及ぼす影響は大きい。逆に温度差が小さい胴部と頭部では、血液と体組織間の熱移動が皮膚温変動に及ぼす影響は非常に小さい。

3.6 3章のまとめ

深部温が一過性変動するメカニズムについて、人体熱モデルを用いた数値解析結果をもとに数値解析結果をもとに以下のことを明らかにした。結論を以下に示す。

(1) 一過性に低下するメカニズムについて

高温室に移動し運動を開始した直後に生じる深部温の一過性低下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。

「胸深部温は、基礎代謝による熱発生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流による胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量、の3つの熱量の収支により決まる。高温環境に移動し運動を開始すると、筋と皮膚の血流量が増加することで中央血流溜まりから筋と皮膚への正味の流出熱量が増加し、中央血流溜まり温度は低下する。中央血流溜まり温度が低下するため、胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量が増加し、胸深部温は一過性に低下する。」

(2) 一過性に上昇するメカニズムについて

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。

「胸深部温は、基礎代謝による熱発生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流による胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量、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、中央血流溜まりから皮膚への正味の流出熱量が減少し、中央血流溜まり温度は上昇する。中央血流溜まり温度が上昇するため、胸深部からの中央血流溜まりへの正味の流出熱量が減少し、胸深部温は一過性に上昇する。」

(3) 一過性の上昇に及ぼす各要因の寄与率について

過去の研究では検討されていない運動に伴う筋血流量の非定常特性（時間遅れ）と熱発生量の非定常特性（時間遅れ）を考慮した解析モデルを提示し、その影響を定量的に検討した。深部温の一過性上昇に影響を及ぼす要因として、皮膚血流量と筋血流量の影響、代謝による組織での熱発生量の非定常特性の影響、代謝による組織での筋血流量の非定常特性の影響、の3つの要因が関係することを解析により示した。深部温の一過性上昇に及ぼす影響度は、 α の影響度が70%、 β の影響度が17%、 γ の影響度が13%であり、 α の影響が大きい。

(4) 深部温変動に及ぼす血液と体組織間の熱移動の影響について

血液を多質点化した解析モデルと中央血流溜り1点で質点化したstolwijkモデルの解析結果を比較することで、CBの解剖学上の位置づけ及びCBモデルと多質点モデルの結果の差を明らかにした。さらに、熱コンダクタンスの感度解析を行い、熱コンダクタンスが深部温変動に及ぼす影響を明らかにした。

第2部

深部温変動に及ぼす着衣と代謝量の影響

第4章 被験者実験による深部温に及ぼす着衣と代謝量の影響に関する検討

4.1 本章の目的

深部温を望ましい状態に維持する空調設計を行うためには、日常経験する様々状況で深部温がどのように変動しているかを把握する必要がある。

前章では、代謝に伴う熱産生量変動の時間遅れ、代謝に伴う筋血流変動の時間遅れ及び皮膚血流量の減少が、深部温が一過性に変動する要因である可能性を示した。本章では、深部温に大きな影響を与える要因である代謝量と皮膚血流量の2つに着目し、その影響を検討する。代謝量については、代謝量の大きさの違いが深部温に及ぼす影響を検討する。皮膚血流量については、皮膚血流量との相関が高い皮膚温に着目し、屋外から冷房空間へ入室した場合に皮膚温に顕著に影響を与える着衣の水分蓄積の影響を検討する。具体的には、以下に示す内容について被験者実験により検討を行う。

- (1) 代謝量の大きさの違いが深部温の一過性変動に与える影響を検討する。
- (2) 高温環境で発汗して着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房空間へ入室し、汗の蒸発により人体が冷却していく過程における深部温変動を検討する。T シャツと短パンなど着衣量の少ない被験者実験は既に報告されているので、本研究では夏期の服装としては着衣量が大きいスーツなどの重ね着をした状態を対象に検討を行う。

4.2 代謝量と着衣における水分蓄積の影響に関する被験者実験

4.2.1 実験概要

実験は2004年1月30日と2月5日に、京都大学桂キャンパス環境制御実験室内で行われた。被験者は健康な男子(30歳、体重88.5kg、身長175.0cm)1名である。被験者は屋内外移動を模擬した図4-1に示すスケジュールで恒温恒湿室に滞在し、表4-1に示す2ケースの実験を行った。

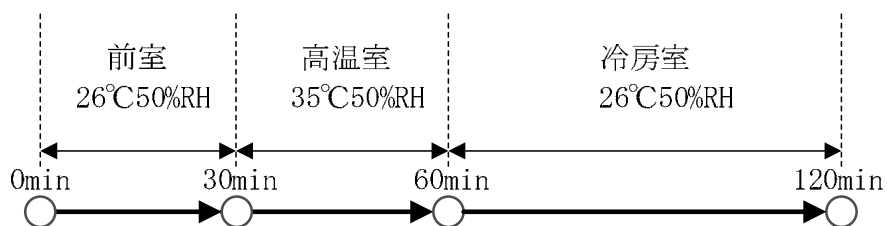


図4-1 被験者実験のスケジュール

屋外での歩行を模擬した踏み台昇降運動(6.0met²⁻³)を行うケース1と、椅座安静(1.0met)のままのケース2の実験を行う。6.0metの代謝量は、スポーツを行う場合を除いて日常生活で体験する上限に近い値であると考えられる。また、6metの代謝時には多量の汗をかくため、着衣の水分蓄積も多く、代謝量と着衣量の水分蓄積の影響が顕著に現れる被験者実験を行うことに相当する。

着衣条件を表 4-2 に示す。上半身に半袖Tシャツと長袖カッターシャツを、下半身にトランクス、長ズボン、靴下、皮靴を着衣する。着衣量は約 0.8clo²⁻⁴)に相当する。皮膚と着衣間、あるいは着衣と着衣間の空気流動の影響を少なくするため、Tシャツ、カッターとも人体と着衣との間隙が小さいものを選定した。

表 4-1 実験条件

	前室	高温室	冷房室
ケース 1	椅座安静 (1.0met)	踏み台昇降(6.0met)	椅座安静 (1.0met)
ケース 2		椅座安静(1.0met)	

表 4-2 被験者の着衣条件

上半身	Tシャツ(綿 100%) 長袖カッターシャツ(綿 50%ポリエステル 50%)
下半身	トランクス(綿 100%)、長ズボン(ポリエステル 100%) 靴下(綿 100%)、皮靴(合皮、表面防水加工)

4.2.2 測定項目

測定部位と測定項目などを表4-3に示す。皮膚温は11点、深部温は2点を測定した。30～60分の運動中における体重と心拍数は、運動停止中の20秒間(図2-2)に測定した。着衣表面温の測定では熱電対が着衣から剥がれるを防止するため、着衣の室空気側表面に糸で縫い付けた。Tシャツ - 皮膚表面間空気層の空気温湿度は、高速絶対湿度計を用いて胸、肩と背の3点で測定した。図 4-2aに全身温冷感申告のスケールを、図4-2bに快適感申告のスケールを示す。

<ul style="list-style-type: none"> ・温冷感についてはあなたの「暑い」「寒い」「どちらでもない(中立)」の感覚を基準にして下さい。 ・下記のものさしに沿って小数第1位までの数値で答えて下さい。 ・「非常に暑い」「非常に寒い」よりも強い温冷感を感じた場合には、3以上の数値を答えてもかまいません。
非常に暑い 暑い やや暑い 中立 やや寒い 寒い 非常に寒い
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
+ 3 + 2 + 1 0 - 1 - 2 - 3

図4-2a 全身温冷感申告のスケール(ASHRAE²⁻⁴)の直訳スケール)

・快適感について下記のものさしに沿って、- 2 から + 2 までの整数で答えて下さい。

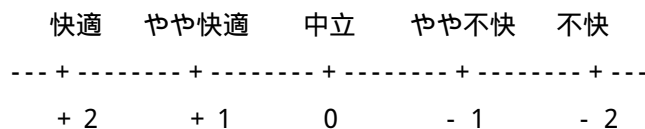


図4-2b 快適感申告のスケール

表 4-3 測定項目

測定項目	測定部位	測定装置	測定間隔	
皮膚温	前額、後頸、前腕、手背、大腿、脛、足背、胸、腹、背、肩の11点	T型熱電対(0.2mm)	10sec	
深部温	鼓膜、直腸	専用のT型熱電対センサー	10sec	
着衣表面温	カッター	前腕、腹、肩	T型熱電対(0.2mm)	10sec
	Tシャツ	背、腹、肩、胸	T型熱電対(0.2mm)	10sec
	長ズボン	脛、大腿	T型熱電対(0.2mm)	10sec
Tシャツ-皮膚間 空気温湿度	背、肩、胸	高速絶対湿度計	10sec	
皮膚血流量	大腿	レーザー血流計(アドバンスALF21)	10sec	
発汗量	大腿	換気カプセル方式の連続蒸散・発汗測定装置(ケアト イSAMU-100)	10sec	
体重		電子天秤(オラート KCC150)	1min	
心拍数	左耳朶	光電脈波検出式心拍計(キャットアイ)	1min	
室内温湿度	FL+0, 0.1, 0.6, 1.1mの4点	小型温湿度計(エアドテイトR-72S)	10sec	
心理量	温冷感申告値、快適感申告値		1min	

4.3 実験結果と考察

4.3.1 被験者周辺の空気温湿度

図 4-3a、図 4-3b に人体周辺の室内空気温度、空気絶対湿度を示す。ケース 1 では設定条件をほぼ満足していた。ケース 2 では空調運転の影響により室内温湿度は周期的変動を繰り返す結果となった。具体的には、ケース 2 の冷房室では空気温度 26 ± 0.4 、絶対湿度 $10.4 \pm 0.3\text{g/kg}$ 、高温室では絶対湿度 $18.9 \pm 0.5\text{g/kg}$ の周期的変動であった。高温室の空気温度は 35.0 から 35.2 の範囲でほぼ一定であった。ケース 2 の結果を考察する際、この周期的な変動に留意する必要がある。

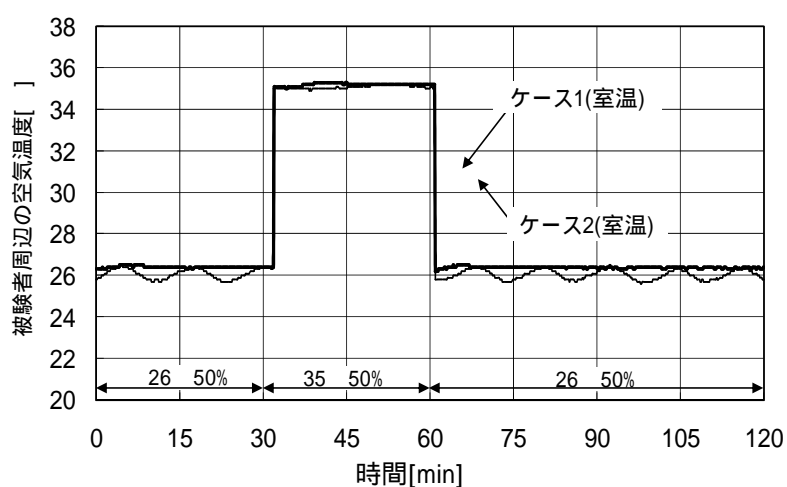


図 4-3a 被験者周辺の空気温度

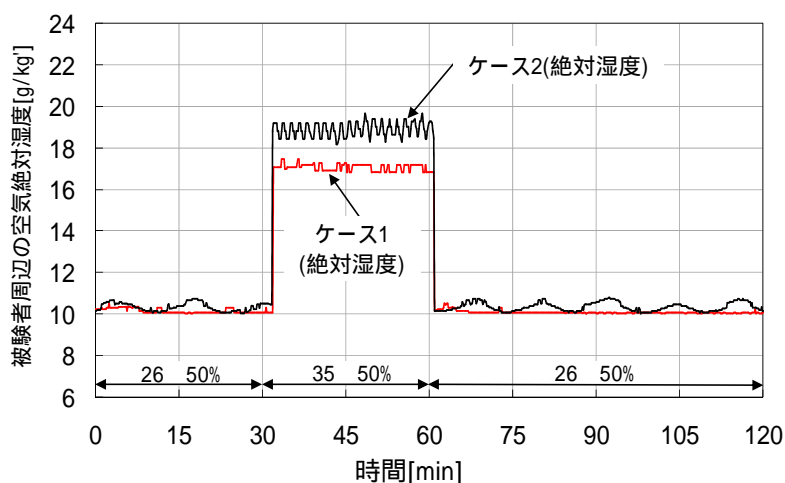


図 4-3b 被験者周辺の空気絶対湿度

4.3.2 深部温と深部温変動に関わる生理量の変動

(1) 発汗量と体重減少量

図 4-4a に体重減少量を示す。実験中の体重減少量は、ケース 1 で 510g/2h、ケース 2 で 150g/2h であった。実験終了時に Tシャツにはケース 1 で 50 g、ケース 2 で 6g の汗が吸収されていたことから、ケース 1 で約 560g、ケース 2 で約 160g の発汗と不感蒸泄があったことになる。ケース 1 では、体重減少量は高温室入室直後から大きくなり、時刻 60 分には -240g、時刻 120 分には -510g になる。ケース 2 では、高温室入室後も緩やかに減少を続け時刻 60 分には -64 g、時刻 120 分には -150 g になる。

図 4-4b に大腿部の発汗量変動を示す。両ケースとも高温室で発汗量は増加し、冷房室では減少する。多量の汗をかくケース 1 の方が発汗の停止する時刻は早い。汗の蒸発の影響により皮膚温が急激に低下した(図 4-8)こと等が理由であると考えられる。

ケース 1 では、32 分に発汗が発現、51 分に最大値に達した後、最大値の 75%程度まで急激に減少する。冷房室入室後は急激に減少し 80 分に発汗は止まる。ケース 2 では、高温室滞在中は増加を続け冷房室入室後にゆるやかに低下し、117 分に発汗が止まる。

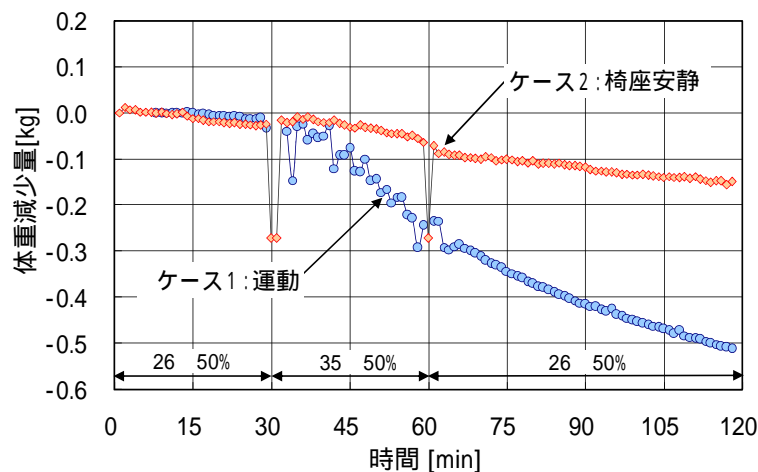


図 4-4a 体重減少量(時刻 0 基準)

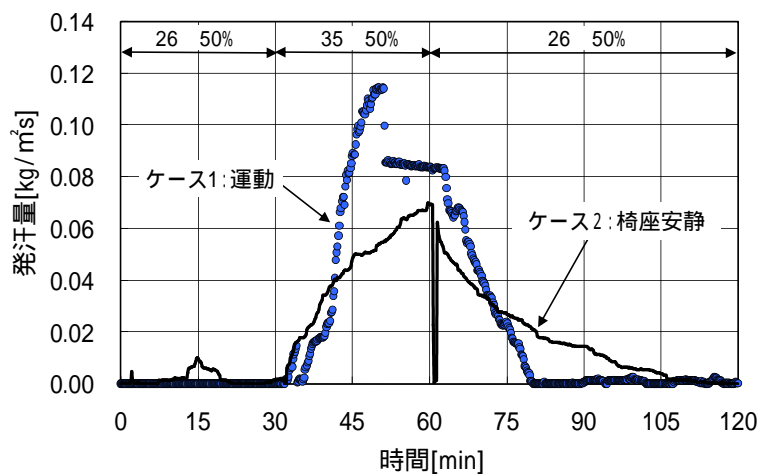


図 4-4b 大腿部の発汗量変動

(2) 深部温変動について

図 4-5 に直腸温と鼓膜温の変動を示す。ケース 1 の直腸温と鼓膜温については、31 分以前はデータ欠損であったため 32 分以降のデータのみを示す。

高温室で踏み台昇降運動を行うケース 1 では、30 分間の運動により直腸温は 1.4 も上昇する。その後、運動を停止し冷房室に移動すると 0.3 程度一過性に上昇し、時刻 63~81 分の 18 分間にわたり、38.3~38.4 の最大値を維持した後緩やかに低下する。冷房室入室時の 38.2 に戻るまでに 25 分もの時間を要する。時刻 120 分の段階でも、前室滞在中の温度(37.4 ~37.6)より 0.6 も高い。椅座安静で高温室に滞在するケース 2 では、高温室、冷房室ともに直腸温はほとんど変化しない。

以上より、6met の運動を行う場合には、深部温の上昇幅は 1.4 も上昇すること、冷房室に入室後に一過性の上昇を示し、1 時間にわたって高温状態になることを示した。

鼓膜温については、ケース 1 では運動開始後に一過性の低下を示し、冷房室に移動すると急激に低下し 85 分には運動開始前(時刻 30 分)と同じ 36.4 に戻る。ケース 2 の場合には、鼓膜温はほとんど変動しない。

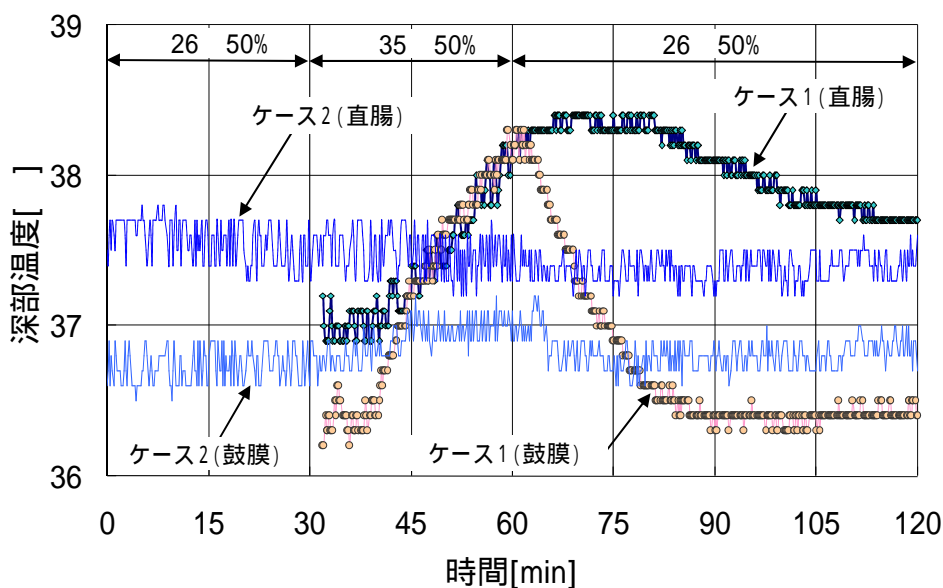


図 4-5 直腸温と鼓膜温

(3) 心拍数

図 4-6 に心拍数変動を示す。踏み台昇降を行うケース 1 では、運動開始直後から増加し 180 回/min まで上昇、運動を停止し冷房室移動後、急激に 3 分間で 130 回/min まで低下した後は緩やかに低下を続ける。心拍数は実験終了時点でも 100 回/min あり、前室の値よりも約 15 回/min 大きく、安静時の心拍数には 1 時間経っても戻らない。ケース 2 では実験を通して心拍数の変化はほとんどなく、80~90 回/min の間で安定している。

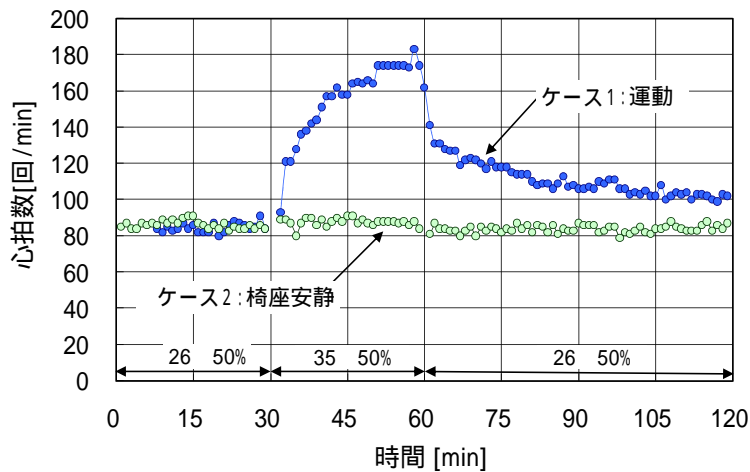


図 4-6 心拍数変動

(4) 平均皮膚温

図 4-7 に平均皮膚温を示す。運動により多量の汗をかいたケース 1 では、冷房室に入室後、実験終了までの 60 分間、温度の低下は続き、120 分にはケース 2 より平均皮膚温は約 1.5 低くなる。第 3 章の 3.6. で示した温熱生理メカニズムを参考に、平均皮膚温が直腸温変動に及ぼす影響を考察する。着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房室に入室すると、汗の蒸発により皮膚温は急激に低下する。その影響により皮膚血流量が減少し深部へ還流する血流量が減少するため、還流する血液温度が上昇し、血液を介した深部からの正味の流出熱量が減少し、深部温が下がらないといった生理現象が生じている可能性がある。深部温制御の観点からは、温熱制御系がうまく機能していないと言えるのかもしれない。

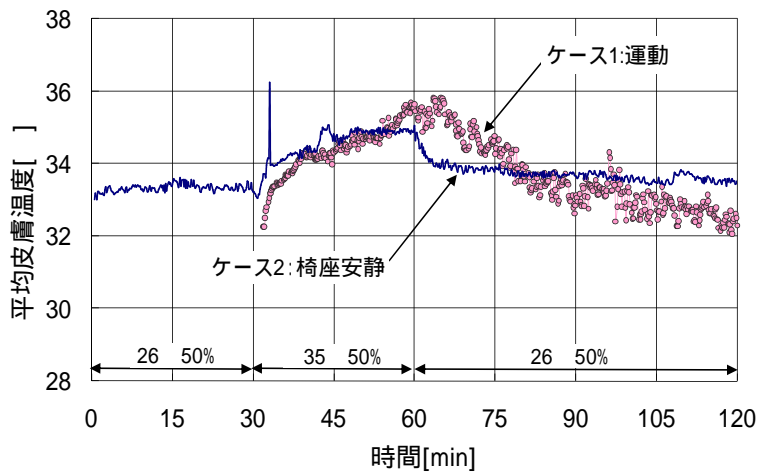


図 4-7 平均皮膚温

4.3.3 各部位皮膚温度

(1) 胸部皮膚温

胸部皮膚温の1例として、背皮膚温の結果を説明する。

まず、冷房室における皮膚温変化の特徴について考察する。図4-8に背の皮膚温を示す。ケース1では、冷房室入室して2分間で1.6℃も急激に低下する。その後も低下を続け、実験終了の時刻120分には29.7℃になり、冷房室に滞在する60分の間に約6℃も皮膚温は低下する。時刻120分の背皮膚温は、ケース1の場合の他部位の皮膚温と比べて約3~5℃も低く、ケース2の背皮膚温と比べても3.5℃も低い。この著しい皮膚温低下は、80分に発汗が停止した(図4-4b)にもかかわらず皮膚温低下が続いたこと、実験終了時でもTシャツに53gの汗が含まれていたことから、着衣からの汗の蒸発が原因であると判断できる。着衣の水分蓄積が皮膚温変動に与える影響は非常に大きい。

次に、高温室における皮膚温変化の特徴を考察する。多量に汗をかくケース1では、入室後、38分に極大値になる。これは、同時刻に発汗量が急激に増加(図4-4b)し、かつ背Tシャツ温が同形状の鋭角な変化形状をとることから、着衣における汗の吸着熱が影響していると考えられる。ケース2では40分過ぎに一過性の上昇が生じるが、これもケース1と同様に吸着熱の影響と考えられる。

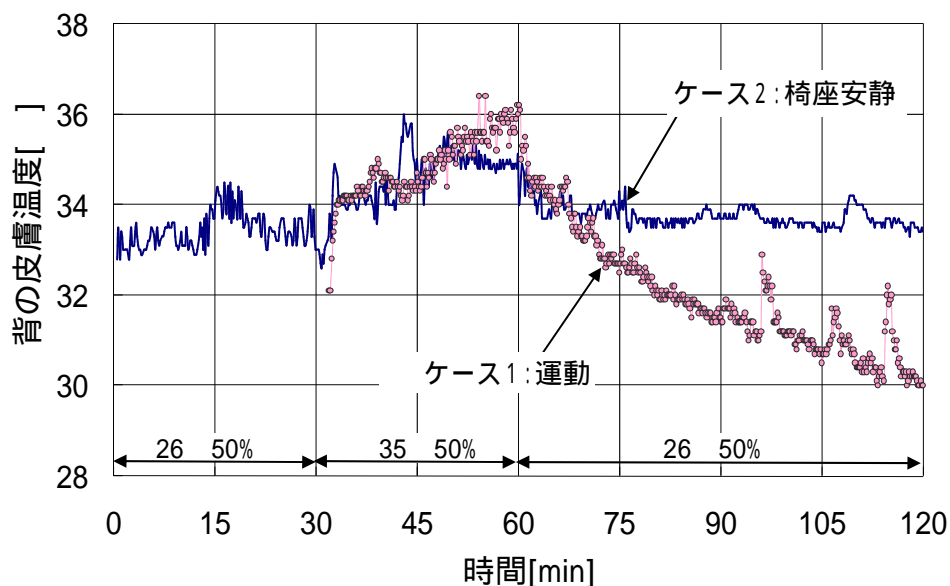


図4-8 背皮膚温

(2) 足部の皮膚温

図 4-9a ~ 9c に、大腿、脛、足背の皮膚温を示す。ケース 1 では、運動時間中に足背で 3℃、脛で 6℃、大腿で 4℃ も上昇するが、椅座安静で滞在するケース 2 では 1.5 ~ 2.0℃ 程度の上昇にとどまる。冷房室においては、ケース 1 では 120 分時点でも大腿、すね、足背の各部位において、前室滞在時の皮膚温より約 2℃ も高い。踏み台昇降の影響が 60 分間も残っている。

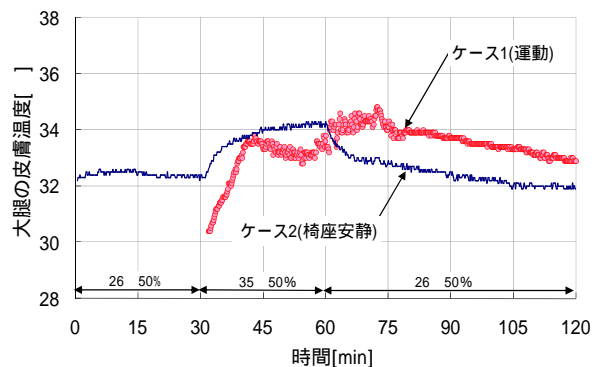


図 4-9a 大腿皮膚温

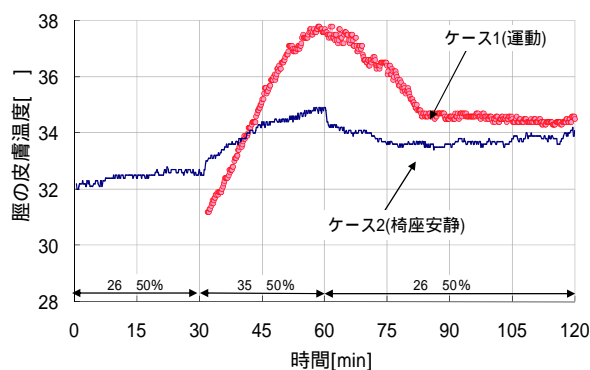


図 4-9b 脛皮膚温

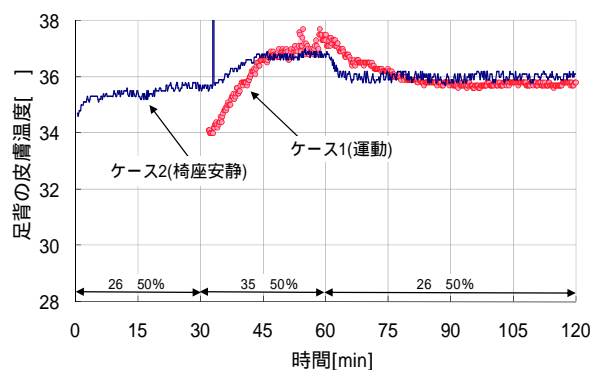


図 4-9c 足背皮膚温

(3) 腕部皮膚温

図 4-10a, 10b に前腕と手背の皮膚温を示す。ケース 1 では、運動を停止し 26℃ の冷房室に移動したにもかかわらず、前腕と手背の皮膚温は 34℃ から 38℃ まで約 4℃ も上昇する。60 ~ 80 分に最大値を維持した後、急激に低下するという特徴的な変動を示す。運動に伴う皮膚の血流再配分¹⁻¹⁰⁾などが関係していると考えられる。ケース 2 では、高温室入室後に皮膚温は上昇し冷房室移動後に低下するという変動を示す。

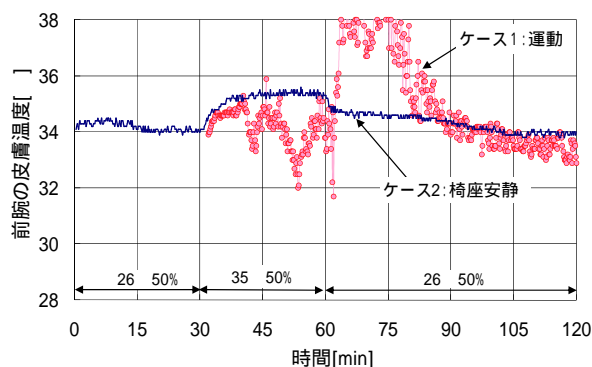


図 4-10a 前腕皮膚温

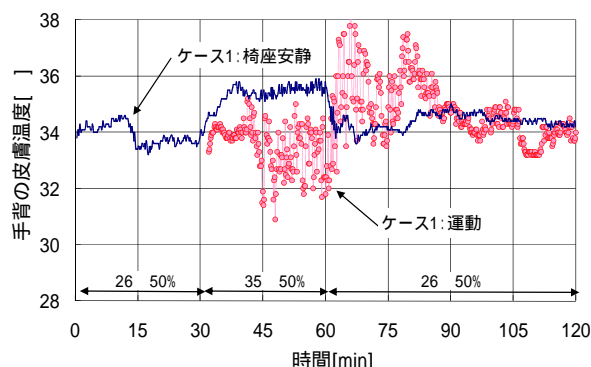


図 4-10b 手背皮膚温

4.3.4 着衣温度及び着衣間の空気温湿度

(1) 胴部着衣温

背部Tシャツと肩部カッターの室内側表面温度を図4-11a、4-11bに示す。

冷房室における着衣温変動について説明する。ケース1では、カッター温度は冷房室入室後の2分間で4.8℃も急激に低下するが、Tシャツ温度は緩やかに低下する。Tシャツと皮膚は近接した状態であるが、Tシャツとカッター間は1cm以上の間隙があったことから、熱コンダクタンスが影響していると考えられる。ケース2では、冷房室入室後5分程度でTシャツとカッターシャツの両方とも高温室入室前の温度に戻る。温度が周期的に変動しているのは、室空気温湿度変動の影響である。次に、高温室における着衣温変動について説明する。ケース1では、40分に鋭角なピーク温度が生じる。室空気の水蒸気あるいは汗の吸着熱の影響によるものと考えられるが、Tシャツの温度上昇の方がカッターのそれより大きいことから、汗の吸着の影響が大きいと判断できる。ケース2ではケース1ほど顕著なピーク温度は観察されない。

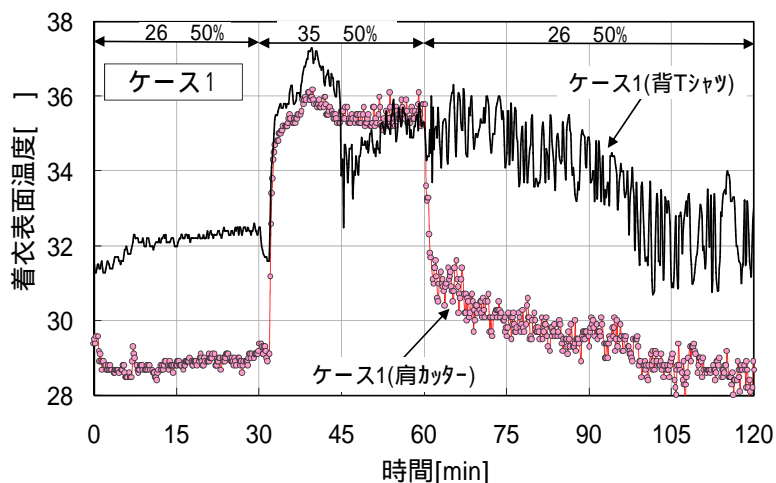


図4-11a 背Tシャツと肩カッターの表面温度（ケース1）

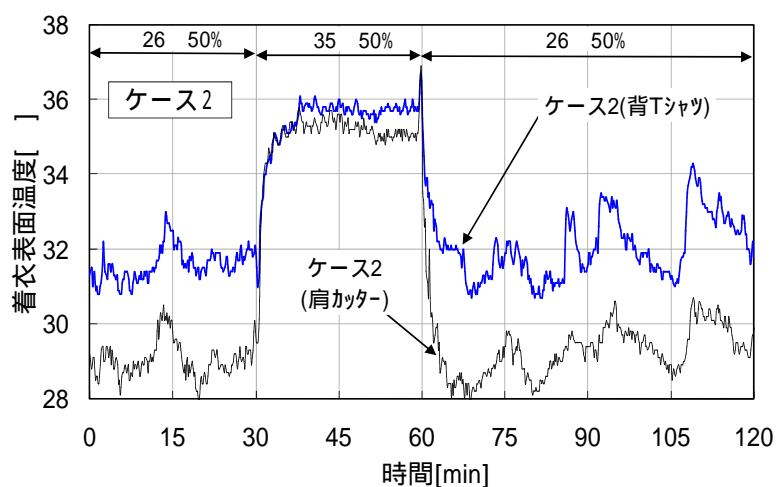


図4-11b 背Tシャツと肩カッターの表面温度（ケース2）

(2)四肢の着衣温

図 4-12a, 12b に大腿部長ズボンと前腕部カッターシャツの室側表面温度を示す。

長ズボンでは、ケース 1 とケース 2 は同様の变化性状になる。高温室入室後に急激に上昇し 2 分後には約 35 でほぼ安定し、冷房室入室後は急激に低下する。ケース 1 の背部 T シャツで見られた汗の吸着による鋭角なピーク温度は生じない。

前腕カッターでは、ケース 1 で 45 分ごろから温度が低下する点を除くと、ケース 1 とケース 2 は同様の变化性状となる。ケース 1 における 45 分から 60 分までの温度低下は前腕皮膚温(図 4-10a)と同様の変動性状であるが、温度低下が生じる理由は明らかではない。

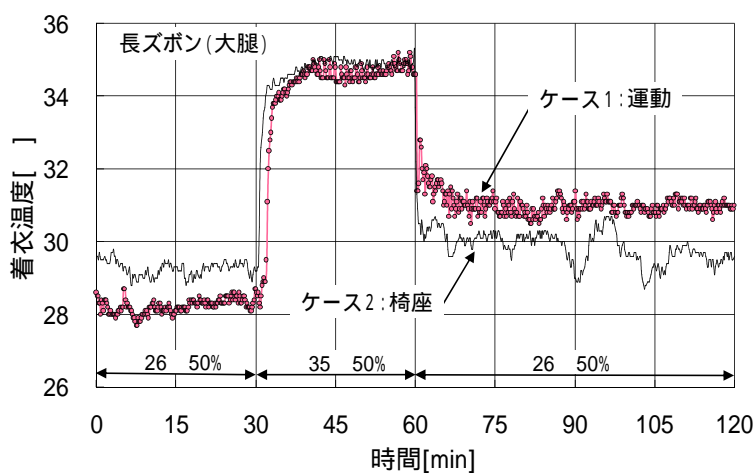


図 4-12a 長ズボン (大腿)

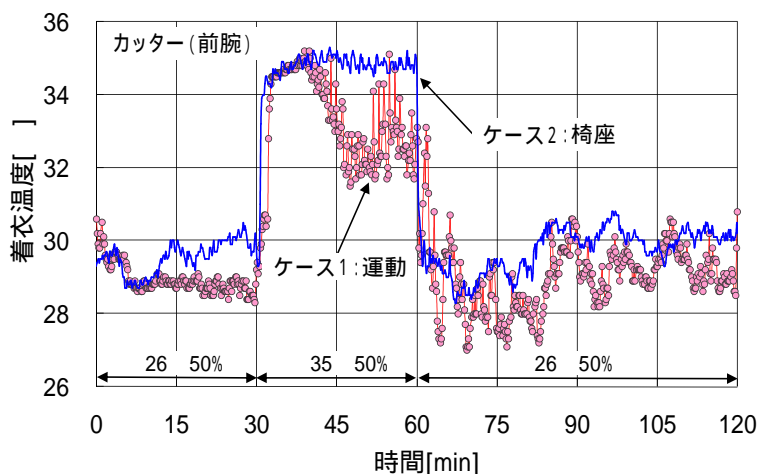


図 4-12b カッターシャツ (前腕)

(3) 着衣間の空気温湿度

皮膚とTシャツ間空気層の相対湿度、絶対湿度、空気温度を図 4-13a、4-13b、4-13c に示す。背はデータ欠損であったため、肩と胸部における値を示す。

空気相対湿度について説明する。ケース 1 では、高温室での発汗量の増加(図 4-4b)とともに相対湿度は増加し、45 分に肩部で 93%、胸部で 80%に達する。その後、冷房室へ移動しても約 87 ~ 97%の高湿状態が実験終了まで 1 時間も続く。80 分に発汗が停止したにもかかわらず、それ以降も高湿状態が続いた理由はTシャツに含まれる汗が蒸発する影響であると考えられる。ケース 2 においても、高温室では空気相対湿度は増加し胸部で約 90%になるが、冷房室入室後は急激に低下し実験終了時には 45%程度になる。冷房室入室時における着衣に吸収されている汗の量により、着衣間空気の相対湿度変動は大きく異なる。

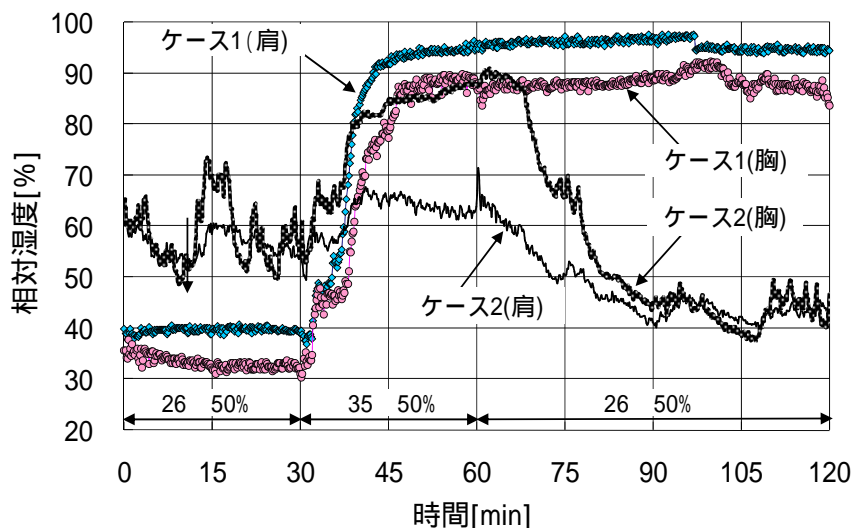


図 4-13a Tシャツ - 皮膚間の空気相対湿度

空気絶対湿度について説明する。ケース 1 の場合、発汗発現と同時に絶対湿度は増加し、60 分時点で胸部 44g/kg、肩部 36.7 g/kg の最大値をとる。このときの空気温度(図 4-13c)は、胸部で 36.7、肩部で 35.0 であり、高温高湿な環境に人体は曝されている。冷房室入室後の絶対湿度の低下は遅く、高湿な状態が 1 時間も続く。絶対湿度の変動を詳細にみると、大腿での発汗が一旦無くなる 34 分~36 分では変化率が小さくなり、再発汗後に発汗量の増加の影響で絶対湿度も急激に上昇する。その後は 38 分頃と 47 分頃の 2 度にわたり絶対湿度の上昇率が変化する。上昇率が変化する理由は、次章の数値解析結果をもとに考察する。

ケース 2 では冷房室入室後に絶対湿度は急激に低下し、時刻 80 分頃には高温室入室前と同じ湿

度に戻る。時刻 80 分には着衣に含まれる汗の蒸発が完了し前室と同じ含水状態に戻ったと考えられる。ケース 1 とケース 2 の冷房室における変化の違いは、着衣に含まれる汗の量の差が関係していると考えられる。

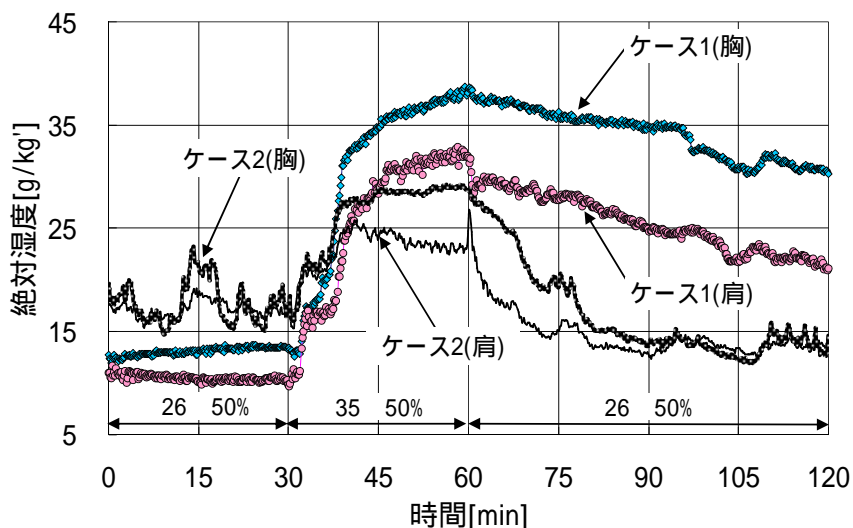


図 4-13b Tシャツ - 皮膚間の空気絶対湿度

空気温度について説明する。ケース 1 の場合、高温室では、背皮膚温およびTシャツ温と同様に、極大値をとった後一旦低下し再度上昇するといった変動性状を示す。胸部と背部では約 2 の温度差があるが、変化性状はほぼ同様になる。

冷房室入室後は、ケース 1 では緩やかに温度が低下していくのに対し、ケース 2 では急激に低下した後再上昇する。

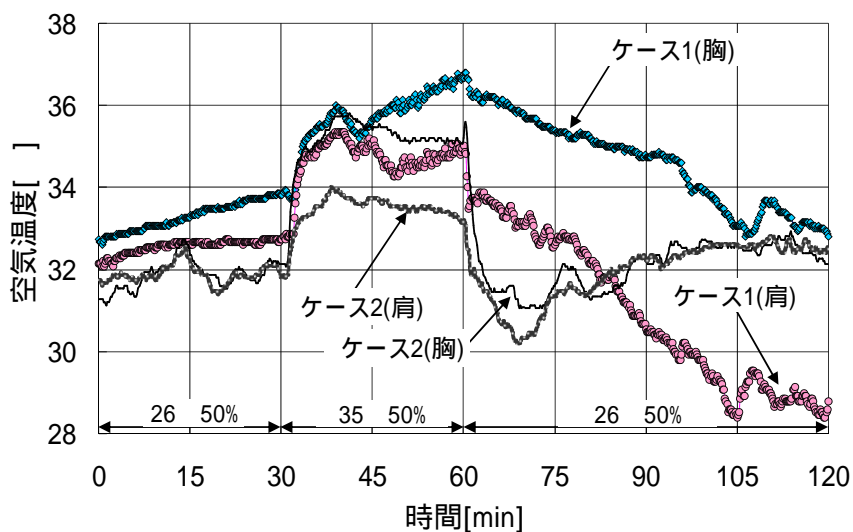


図 4-13c Tシャツ - 皮膚間の空気温度

4.3.5 心理応答

図 4-14a, 14b に全身温冷感申告値と全身快適感申告値を示す。全身温冷感申告値については、高温室で踏み台昇降を行うケース 1 では 40 分以降は 2.0(暑い)になるが、椅座安静で滞在するケース 2 では 0.5(やや暑いと中立の間)の値となる。冷房室における全身温冷感申告値を比較すると、両ケースともほぼ 0 であり中立の申告値となった。

快適感申告値は高温室ではケース 1 では 45 分から 52 分の間に 2.0(快適)になるがその他の時間では 1.0(やや快適)になり、ケース 2 の場合では 1.0 になる。冷房室では、ケース 1 の場合には 1.0、ケース 2 の場合には 0(中立)になり、ケース 1 の場合の方が快適感が高い結果が得られた。

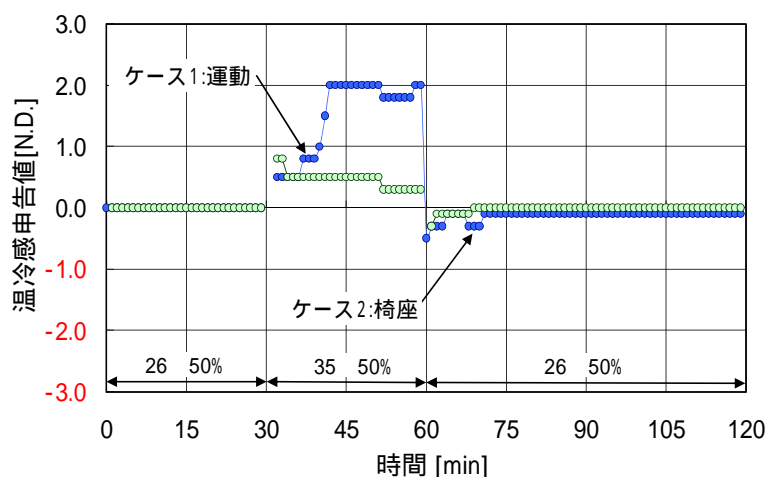


図 4-14a 全身温冷感申告値

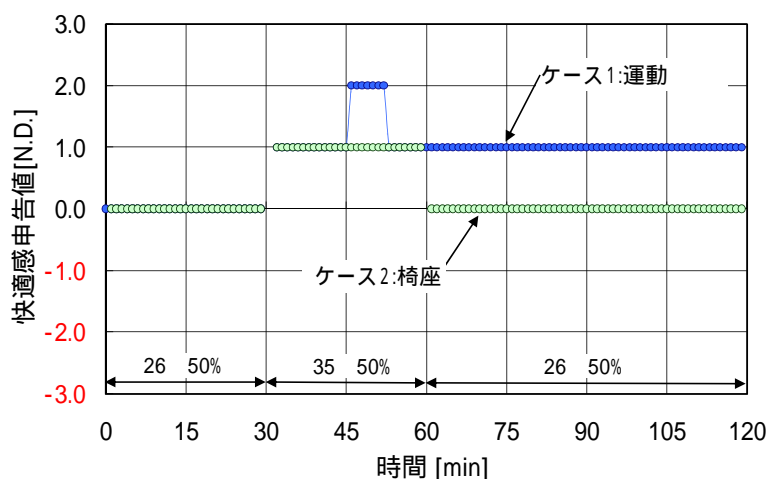


図 4-14b 快適感申告値

4.4 4章のまとめ

本章では、代謝量と着衣の水分蓄積が深部温変動に及ぼす影響を被験者実験により検討した。高温環境で発汗し着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房空間へ入室する場合を想定した被験者実験を行い、高温環境で6metの踏み台昇降運動を行い550g程度の汗をかく場合と、高温環境で椅座安静で滞在し150g程度の汗をかく場合との比較検討を行なった。以下に結果を示す。

(1) 深部温変動

椅座安静で滞在する場合には、高温室、冷房室ともに直腸温はほとんど変化しないが、高温室で6metの踏み台昇降運動を30分間行なった後26の冷房室へ移動する場合には、深部温は以下の変動を示す。

- ・高温室での30分間の運動により直腸温は1.6 上昇する。
- ・冷房室に入室した後に0.3 の一過性上昇を示し、冷房室入室前の直腸温に戻るのに30分の時間がかかる。また、1時間後でも運動開始前の直腸温より0.6 高く、1時間にわたり高温状態が続く。

以上より、着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房室に入室後、汗の蒸発により皮膚温が低下することで皮膚血流量が減少し、深部へ還流する血液量が減少するため、血液を介した深部からの正味の流出熱量が減少し、深部温が下がらないといった生理現象が生じている可能性がある。

(2) 皮膚温の変動

踏み台昇降運動を行なった後、冷房室に入室した場合の皮膚温変動の特徴を以下に示す。

- ・汗を含んだ着衣に面する胴皮膚では、1時間にわたり皮膚温低下が続き、運動開始前の安静状態の場合と比べて約3 皮膚温は低下する。
- ・大腿と脛の皮膚温の低下は遅く、1時間後でも安静時より約1 温度が高い。
- ・足甲の温度は測定部位中最も高い。靴により汗の蒸発が抑制されるためと考えられる。
- ・前腕及び手背では、冷房開始後に皮膚温が一時的に上昇した後に低下する。

(3) 着衣温度変動

- ・高温室では、汗の水分吸着の影響により着衣温度は鋭角なピーク値を示す。
- ・冷房室では、皮膚との間隙が小さい部位(背および肩)のTシャツ温度は1時間以上にわたり低下し続けるが、その他の部位では、着衣温は冷房室入室後に急激に低下し定常値に達する。

(4) 着衣間空気温湿度

実験期間中の体重減少量が550gになる多量の汗をかいた場合には、皮膚 Tシャツ間の空気相対湿度は冷房室移動後も1時間にわたり飽和に近い状態が続く。

第5章 着衣 - 人体熱移動モデルによる深部温変動の予測

5.1 本章の目的

深部温の過渡応答を考慮した空調設計を行うためには、日常の様々な状況下における深部温応答を予測する必要がある。本章では、深部温をはじめとする温熱生理に関わる生理量変動を予測するための解析モデルを提示し、第4章で示した被験者実験の再現計算を行ない、解析値と実験値を比較することで解析モデルの再現精度を検討する。以下に検討内容を示す。

(1) 解析モデルによる深部温の予測精度の検討

人体熱モデルには、人体各部位を多質点化したStolwijkモデル¹⁻¹²⁾を、着衣には熱水分同時移動方程式¹⁻³⁰⁾¹⁻³¹⁾を用いたモデルによる数値解析を行ない、第4章の被験者実験結果と比較することで予測精度の検証を行う。

(2) 代謝量が深部温に及ぼす影響の検討

高温環境から冷房空間へ入室する場合を対象に、高温環境における代謝量の差違が冷房室入室時の深部温に及ぼす影響を解析モデルにより定量的に検討する。

5.2 解析に用いた解析モデルの概要

5.2.1 解析モデルの概要

人体熱モデルについては、第3章で用いたStolwijkモデルを用いる。ただし、着衣の有無・枚数などが各部位皮膚の温湿度変動に与える影響を考慮するために、着衣状態に応じて皮膚と深部を分割する。図5-1に解析モデルを、表5-1各部位皮膚に接する着衣の種類を示す。深部、筋部は第3章のモデル化と同じとし、皮膚のみ分割したモデル化を行う。

表 5-1 各部位の着衣条件

部位		各部位の着衣状態				着衣枚数
頭部		皮膚 - 室空気				無
胸部	上部	皮膚 - 空気層 -	半袖Tシャツ - 空気層 -	長袖カット -	室空気	2枚
	下部	皮膚 - 空気層 -	半袖Tシャツ - 空気層 -	長袖カット -	室空気	2枚
脚部	大腿上部	皮膚 - 空気層 -	トランクス - 空気層 -	長ズボン -	室空気	2枚
	大腿下部	皮膚 - 空気層 -	長ズボン -	室空気		1枚
	下腿	皮膚 - 空気層 -	長ズボン -	室空気		1枚
	足	皮膚 - 空気層 -	靴下 -	空気層 -	靴 - 室空気	2枚
腕部	上腕	皮膚 - 空気層 -	半袖Tシャツ - 空気層 -	長袖カット -	室空気	2枚
	前腕	皮膚 - 空気層 -	カッター	室空気		1枚
	手	皮膚 -	室空気			無

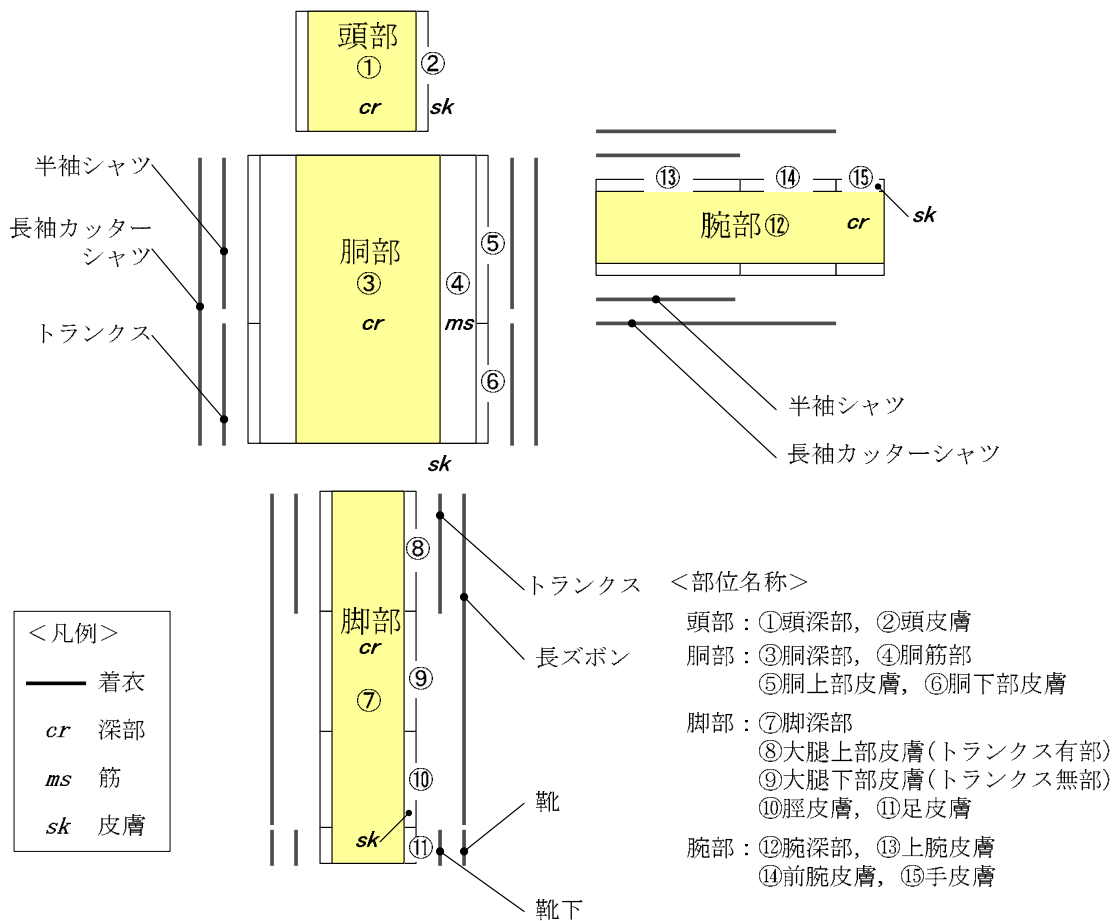


図 5-1 人体-着衣系解析モデルの概要

表 5-2 人体モデルに用いた諸係数

部位名称と番号		$c_{mb,i}$	$c_{ex,i}$	$c_{res,i}$	$c_{sh,i}$	$c_{s,i}$	$c_{w,i}$	
頭部	深部 (i=1)	0.1740	0	0.5	0.04	0.093	0.067	
	皮膚部 (i=2)	0.0020	-	-	-	0.093	0.005	
胸部	深部 (i=3)	0.6280	0	0.5	0	0.348	0.341	
	筋部 (i=4)	0.0600	0.3	0	0.38	0.348	0.165	
	皮膚部	上半身 (i=5)	0.0049	-	-	-	0.244	0.013
		下半身 (i=6)	0.0021	-	-	-	0.104	0.006
脚部	深部 (i=7)	0.0870	0.68	0	0.34	0.378	0.264	
	皮膚部	大腿上部 (i=8)	0.0025	-	-	-	0.132	0.007
		大腿下部 (i=9)	0.0025	-	-	-	0.132	0.007
		脛 (i=10)	0.0014	-	-	-	0.076	0.004
		足 (i=11)	0.0007	-	-	-	0.038	0.002
腕部	深部 (i=12)	0.0320	0.02	0	0.24	0.180	0.092	
	皮膚部	上腕 (i=13)	0.0014	-	-	-	0.086	0.004
		前腕 (i=14)	0.0013	-	-	-	0.076	0.004
		手 (i=15)	0.0003	-	-	-	0.018	0.001
中央血流溜り (i=16)		-	-	-	-	-	-	

5.2.2 着衣の熱水分同時移動方程式

着衣の解析に用いた熱水分同時移動方程式¹⁻²⁹⁾を式(5-1)から式(5-3)に、解析モデルの概念図を図5-2に示す。多量の汗が着衣に付着する場合には、液相と気相の水分移動が同時に生じているが、本研究では気相と液相両方の水分移動を簡易的に蒸気拡散として表現する。解析では人体を模擬した円柱周壁面に垂直な方向の熱水分移動のみを考慮した1次元系とする。また、着衣の表面積は皮膚面積と等しいと近似する。

$$\text{水分収支式} : \rho_w \frac{\partial w_{cl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda' \frac{\partial X_{cl}}{\partial x} \right] \quad (5-1)$$

$$\text{熱収支式} : c_{cl} \rho_{cl} \frac{\partial T_{cl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} + r \lambda' \frac{\partial X_{cl}}{\partial x} \right] \quad (5-2)$$

$$\text{平衡含水率曲線} : w_{cl} = f(H_{cl}) \quad (5-3)$$

着衣と着衣内空気あるいは室内空気及び皮膚と着衣内空気の境界条件は第3種境界条件とする。境界条件を式(5-4)～(5-7)に示す。皮膚に蓄積された汗の移動に関しては以下の仮定を用いる。

1. 皮膚との密着度の高いTシャツ、トランクス、靴下に面する皮膚では、皮膚に汗が蓄積されると同時に着衣に液水のまま一様に吸収されるとした。このとき、相変化は生じないので吸着熱は発生しない。
2. 着衣に吸収される汗の量は絶対乾時空隙率(=0.776)を上限とし、吸収されない汗は皮膚に蓄積されたままとする。また、汗の移動に伴う顕熱移動も取り扱う。

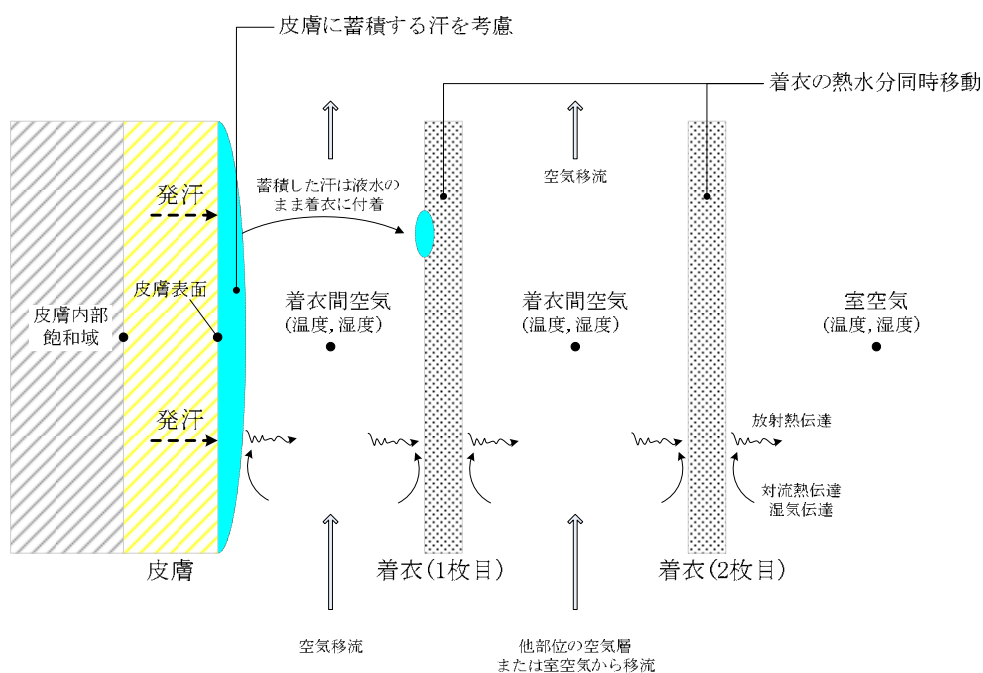


図5-2 着衣及び着衣間空気層の解析モデル

・ Tシャツ、トランクス、靴下の皮膚側表面の境界条件

$$-\lambda' \frac{\partial X_{cl}}{\partial x} = \alpha' (X_{cl} - X_a) + S_m \quad (5-4)$$

$$-(\lambda + r\lambda') \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} = \alpha (T_{cl} - T_a) + r\alpha' (X_{cl} - X_a) + c_w S_m T_{sk} \quad (5-5)$$

・ その他部位の着衣境界条件

$$-\lambda' \frac{\partial X_{cl}}{\partial x} = \alpha' (X_{cl} - X_o) \quad (5-6)$$

$$-(\lambda + r\lambda') \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} = \alpha (T_{cl} - T_o) + r\alpha' (X_{cl} - X_o) \quad (5-7)$$

ここで、

c : 比熱[J/kgK]

H : 相対湿度[%]

r : 水の相変化熱[J/kg]

S_m : 皮膚から着衣へ液のまま吸収される汗の量[kg/m²s]

T : 温度[K]

t : 時間[s]

X : 絶対湿度[kg/kg']

x : 座標[m]

w : 体積含水率[m³/m³]

λ : 熱伝導率[W/(m・K)]

λ' : 湿気伝導率[kg/{ms(kg/kg')}]

ρ : 密度[kg/m³]

α : 総合熱伝達率[W/(m²sK)]

α' : 湿気伝達率[kg/{m²s(kg/kg')}]

添え字

cl : 着衣

a : 空気 (T_a 及び X_a は、着衣-着衣間または皮膚-着衣間の空気温度及び空気絶対湿度)

w : 水

sk : 皮膚

o : 室

5.2.3 着衣間空気の熱水分収支式

皮膚と着衣間、あるいは着衣と着衣間の空気層の熱水分収支式を以下に示す。表 5-1 に示す各空気層ごとに質点を設ける。各空気層では、皮膚及び着衣からの熱水分移動、各部位空気層間あ

るいは各部位空気層と室空気間の移流を考慮する。

$$\rho_a l S \frac{\partial X_a}{\partial t} = \sum_j \alpha_j S (X_j - X_a) + \sum_m \rho_a n l S (X_m - X_a) \quad (5-8)$$

$$c_a \rho_a l S \frac{\partial T_a}{\partial t} = \sum_j \alpha_j S (T_j - T_a) + \sum_m c_a \rho_a n l S (T_m - T_a) \quad (5-9)$$

ここで、

l : 着衣 皮膚間または着衣 着衣間の空気層の厚さ [m]

S : 着衣または皮膚の表面積 [m²]

n : 着衣 皮膚間または着衣 着衣間の空気層に隣接する空気層との換気回数 [回/h]

添え字

j : 計算対象の空気層に面する着衣または皮膚

m : 計算対象の空気層に隣接する空気層または室空気

5.2.4 解析条件

高温環境で 6met の踏み台昇降運動を行った後 26 の冷房室に移動し、深部温が一過性に上昇したケース 2 の再現計算をおこなう。時刻 0~31 分まではデータ欠損であったため、データが得られた時刻 32 分以降を解析対象とする。解析条件を以下に示す。

・初期値

皮膚温、着衣温、着衣間空気温湿度は時刻 32 分の実験値を用いた。頭深部、胴深部は各々鼓膜温および直腸温の実験値を、胴筋部、脚深部温と腕深部温は筋のセットポイント値(35.88)とした。着衣の含水率は 26 50%時の平衡含水率(=0.0273 m³/m³)とした。

・室内空気温湿度条件

FL+1.1m における実測値を室内空気条件として与えた。

・筋血流量及び熱産生量について

熱産生量と筋血流の非正常性状を考慮した検討を行う。熱産生量及び筋血流量の変化性状が心拍数のそれに類似するように $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.003$ として解析を行う。

・数値解析法

空間は中心差分、時間は前進型有限差分を用いた。着衣は皮膚側、中心、室空気側の 3 質点としそれぞれ布の厚さの 1/4, 1/2, 1/4 とした。汗の吸収がある場合は皮膚側 1/4 の質点に全て吸収されるとする。時間刻みは 0.01 秒とした。

5.2.5 解析に用いた物性値と諸定数

解析に用いた着衣の熱伝導率、湿気伝導率及び平衡含水率曲線を式(5-10)～(5-12)に示す。これらの物性値は全ての着衣で同じとし、湿気伝導率及び平衡含水率曲線は、図 5-3aと図 5-3bに示すように綿 100%のTシャツに関する実験式⁵⁻¹⁾⁵⁻²⁾を用いた。熱伝導率は汗の吸着による含水率の変動を簡易的に考慮する目的で、着衣実質部、空隙空気、水分(汗)の体積平均値とした。着衣に関する物性値⁵⁻³⁾を表 5-3 に示す。

・熱伝導率 $\lambda_{cl} = a\lambda_a + w\lambda_w + (1-a-w)\lambda_s$ (5-10)

・湿気伝導率 $\lambda'_{cl} = \frac{1.5 \times 10^{-4}}{(102 - H_{cl})} + 1.5 \times 10^{-6}$ (5-11)

・平衡含水率曲線

$$w = \begin{cases} 3.2/(-30 - H_{cl}) + 0.11 & w \leq 0.057, H_{cl} \leq 30.38 \\ 5.2/(133 - H_{cl}) + 0.003 & 0.057 < w \leq 0.148, 30.38 < H_{cl} \leq 96.63 \\ 0.3/(102 - H_{cl}) + 0.093 & 0.148 < w, H_{cl} > 96.63 \end{cases} \quad (5-12)$$

ここで

$\lambda_{cl}, \lambda_a, \lambda_w$: 着衣、空気、水の熱伝導率 [W/mK]

a : 個体(着衣)の空隙率 [n.d.]

w : 着衣の含水率 [kg/kg]

λ'_{cl} : 着衣の湿気伝導率 [kg/ms(kg/kg')]

H_{cl} : 着衣の相対湿度 [%]

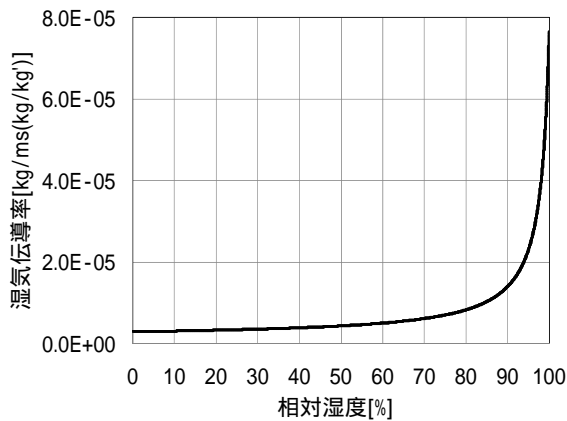


図 5-3a 湿気伝導率

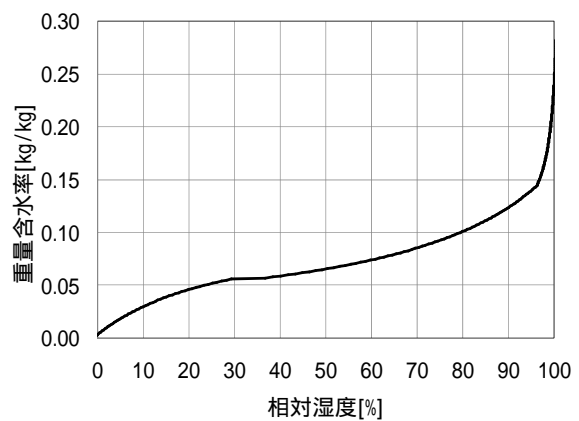


図 5-3b 重量含水率

表 5-3 着衣に関する物性値

物性値		数値または算出式
熱伝導率	実質部	0.16661 [W/mK]
	空気	0.023 [W/mK]
	水	0.580 [W/mK]
着衣	比熱 ⁵⁻³⁾	1,380 [J/(kg・K)]
	実質部密度 ⁵⁻³⁾	1,540 [kg/m ³]
	空隙率	0.773 [n.d.]
着衣厚さ	靴	3.0 [mm]
	長ズボン	1.0 [mm]
	靴下	1.0 [mm]
	その他	0.5 [mm]
空気層厚さ	皮膚－着衣間	2.0 [mm]
	着衣－着衣間	2.0 [mm]

熱湿気伝達率を表 5-4、5-5 に示す。着衣と室空気間、あるいは皮膚表面と室空気間の熱伝達率は、人体周りの風速からユルゲスの式により決定した。Tシャツまたはトランクスと皮膚表面の熱伝達率は接触する影響を加味して十分大きな数値¹⁻²⁹⁾とした。着衣と皮膚が接触していない場合の伝達率は文献⁵⁻⁴⁾の値を参考に決定した。靴の室内空気側の湿気伝達率は、防水加工仕上げであることを考慮し 0 とした。

表 5-4 室空気と着衣表面（または露出部皮膚表面）間の伝達率

時間 [分]	対流熱伝達率 [W/(m ² K)]	放射熱伝達率 [W/(m ² K)]	湿気伝達率 [kg/(m ² s kg/kg)]
高温室	6.96	4.65	6.69 x 10 ⁻³
低温室	4.65	4.65	4.65 x 10 ⁻³

足背部の室内空気 靴間の湿気伝達率は 0 とした。

表 5-5 着衣間表面または皮膚表面の伝達率

部位		対流熱伝達率 [W/(m ² K)]	放射熱伝達率 [W/(m ² K)]	湿気伝達率 [kg/(m ² s kg/kg)]	
胴	人体 Tシャツ間	100	4.65	100 x 10 ⁻³	
	人体 トランクス間				
	人体 靴下間				
	Tシャツ カッター間	高温室	40	4.65	40 x 10 ⁻³
	低温室	40	4.65	40 x 10 ⁻³	
四肢	人体 ズボン・ カッター間	高温室	20	4.65	20 x 10 ⁻³
	低温室	20	4.65	20 x 10 ⁻³	

5.3 解析値と実績値の比較

5.3.1 深部温等の比較

(1) 深部温の変動

図 5-4a に胸深部解析値と直腸温実験値の比較を示す。実験値は、運動開始直後に一過性低下を示し、60 分に運動を終え 26 の冷房室に移動した後に一過性上昇を示すが、解析値はこの傾向をよく再現できている。ただし、実験値では時刻 63 分から 81 分まで極大値をとった後 120 分までの 39 分間に 0.6 低下するが、解析値では時刻 75 分から 81 分までに極大値をとった後 39 分間で 0.2 低下するのみであり、極大値後の低下速度が実験値より遅い。

図 5-4b に頭深部の解析値と鼓膜温の比較を示す。鼓膜温は室内空気の移流の影響を受けるため、実験値と解析値の単純な比較はできないが、参考のため結果を示す。冷房室入室後に鼓膜温は急激に低下するが、頭深部の解析値は 0.1 低下するのみで実験終了時までほぼ同じ値を維持し、両者の結果は一致しない。

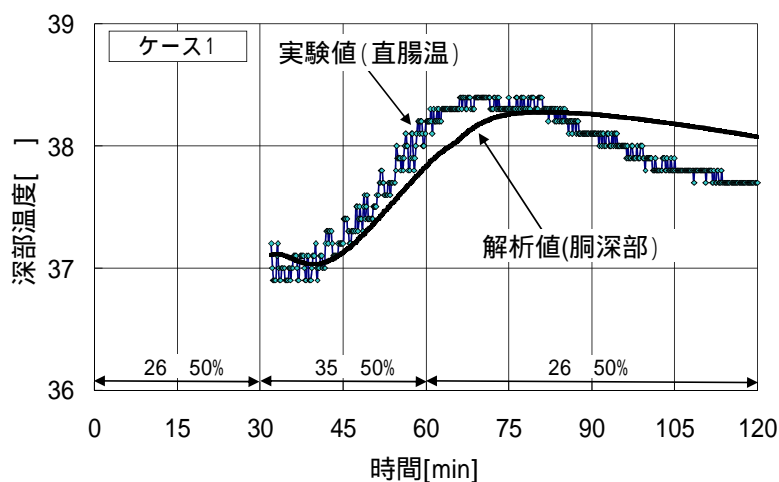


図 5-4a 直腸温実験値と胸深部温解析値の比較

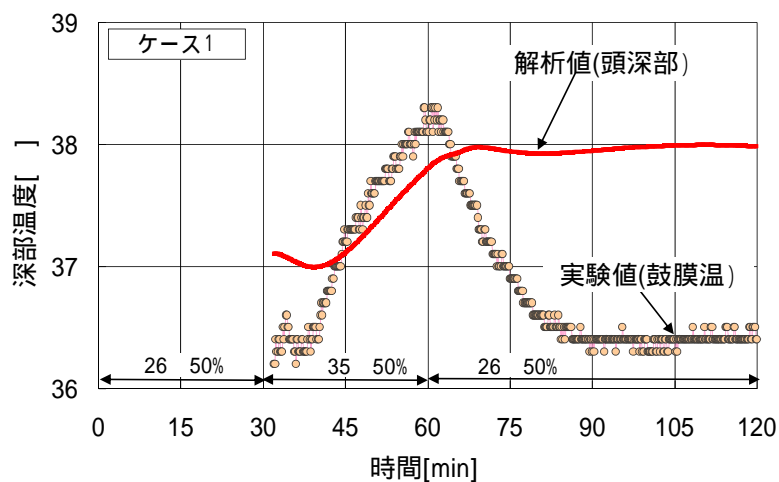


図 5-4b 鼓膜温実験値と頭深部温解析値の比較

(2) 血流量変動

図 5-5a に SBF と MBF を示す。冷房室入室後に SBF は急激に低下し、MBF は階段関数的にはなくなだらかに低下する。解析結果では、SBF の急激な減少により胴深部から皮膚への正味の流出熱量が減少することと、熱産生量及び筋血流量の時間遅れの影響により胴深部温は一過性の上昇を示すが、これは第 3 章で示したメカニズムと同じ結果となる。比較的着衣量が多い場合でも、第 3 章で示したメカニズムにより、深部温の一過性上昇が生じる。

図 5-5b に代謝量と心拍数の変化特性に比較を示す。両者の変化特性は概ね類似している。

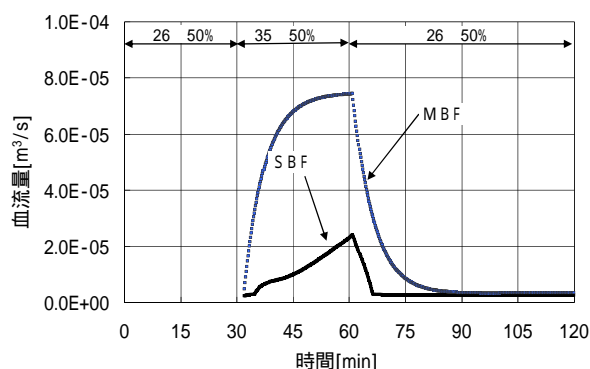


図 5-5a SBF と MBF の変動（解析値）

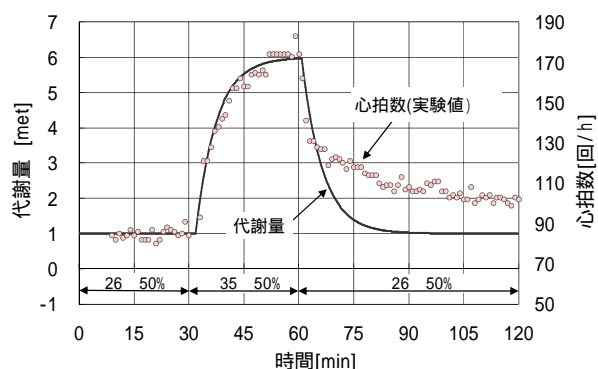


図 5-5b 心拍数と代謝量の変化特性の比較

(3) 平均皮膚温

図 5-6 に平均皮膚温を示す。高温室入室後の温度上昇、冷房室入室後の温度低下を概ね再現できているが、さらに精度を向上させるには、後に示す脚部皮膚温と腕部皮膚温の予測精度の向上が必要である。

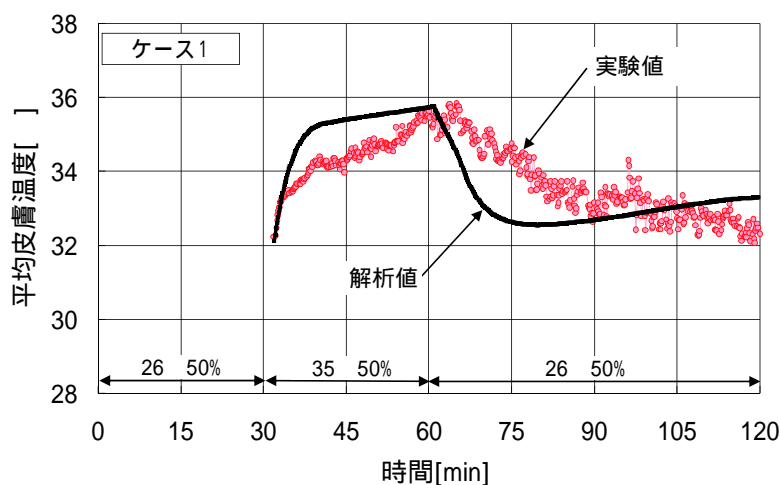


図 5-6 平均皮膚温の比較

5.3.2 皮膚温等の比較

(1) 胸部皮膚温

図 5-7 に背皮膚の実験値と胸部皮膚温の解析値を示す。両者は非常によく一致しており、解析により背皮膚部の温度変化を再現できている。以下では、高温室、冷房室各々における皮膚温変化の特徴を解析結果をもとに説明する。

< 高温室における皮膚温変化の特徴 >

解析結果を図 5-7 に示す から の3つの過程に区分し、各々の変動性状について説明する。

！ 高温室入室後の増加について

高温空気から皮膚表面への熱流入と血流による深部からの皮膚への正味の流出熱量の増加により皮膚温は上昇するが、加えて、汗の吸着によりTシャツ温度が上昇しTシャツからの熱流入により背皮膚温は上昇する。

極大値後の皮膚低下について

極大値後、発汗量の増加とともに皮膚から室空気への汗蒸発による流出熱量が増加し、皮膚温は低下に転じる。

42分以降の皮膚温の再上昇について

皮膚表面が飽和に達する 42分に皮膚温は上昇に転じる。皮膚表面が飽和に達すると、皮膚からの水分蒸発が頭打ちになるが、一方、運動による筋温の上昇により血流による深部から皮膚への正味の流出熱量が増加するため、皮膚温は上昇に転じる。

< 低温室における皮膚温変化の特徴 >

低温室入室後は、実験終了の 120 分まで緩やかに減少を続ける。これは、着衣と皮膚に蓄積された汗の蒸発が 120 分まで続くことが理由である。

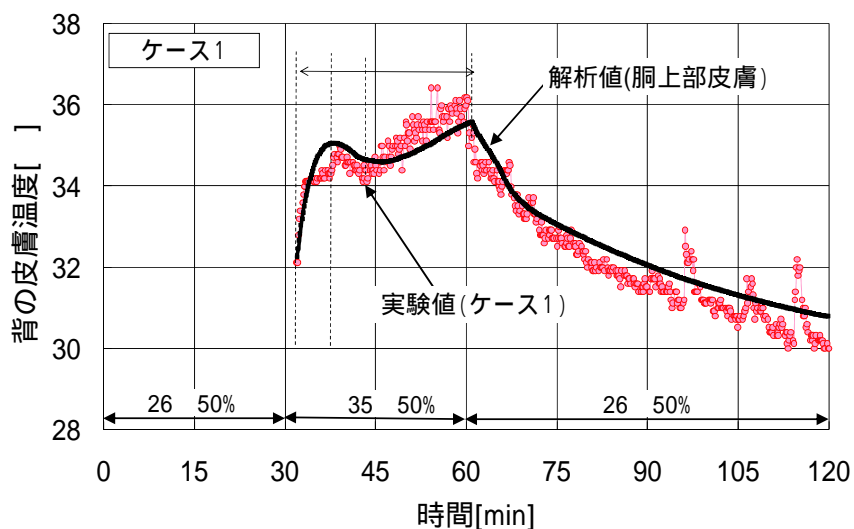


図 5-7 背皮膚温の比較

(2) 足部皮膚温

図 5-8a に、足背の皮膚温を示す。足背では、実験値と解析値は良く一致しており、冷房室入室後も靴内部が高温状態にある実験値の傾向を再現できている。靴表面の室内側湿気伝達率を 0 とおき解析を行っているが、靴から汗が蒸発しないため、靴の内部が高温状態になる。

図 5-8b に、脛皮膚と大腿皮膚の面積平均皮膚温の比較を示す。高温室で上昇し低温室で低下するという全体的な傾向は再現できているが、絶対値の差は 2 にもなる。冷房室においては、解析ではいったん低下した後、発汗量が減少するため 75 分以降に皮膚温は上昇に転じるが、実験値では時刻 75 分以降は単調に低下しており、解析値と実験値は一致していない。熱発生量、発汗量などに関する検討が必要である。

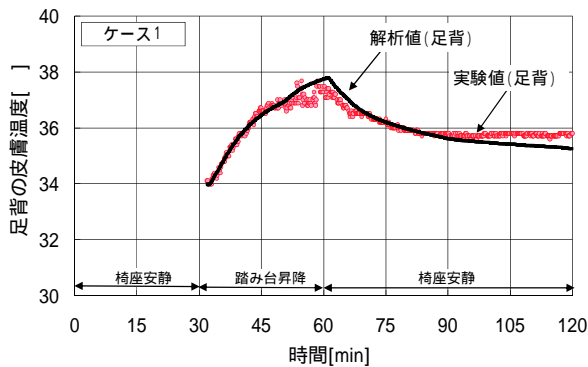


図 5-8a 足背皮膚温の比較

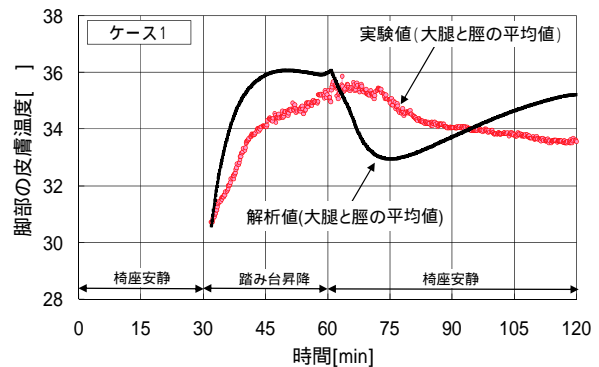


図 5-8b 脛と大腿の平均皮膚温度の比較

(3) 腕部皮膚温

図 5-9a、図 5-9b に、前腕と手背の皮膚温を示す。冷房室入室後に皮膚温が上昇する実験値の変動特性を解析では再現できていない。運動終了後の血流再配分、あるいは動静脈吻合など血流量のモデル化に関する検討が必要である。

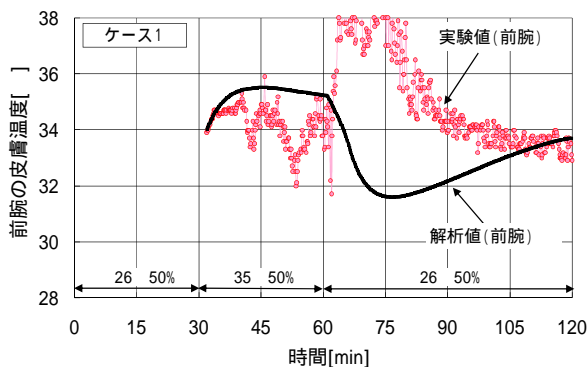


図 5-9a 前腕皮膚温の比較

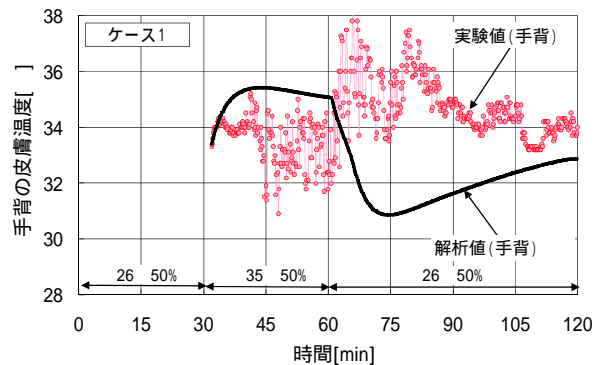


図 5-9b 手背皮膚温の比較

(4) 発汗量と体重減少量

図 5-10a に 32 分の値を基準とした場合の体重減少量を示す。時刻 120 分における体重減少量は、実験値の -470g に対し解析値では -430g となり、約 1 割の誤差はあるものの全体的な変動性状は概ね再現できている。図 5-10b に脚部の発汗量を示す。運動後に発汗が停止する時刻を比べると、実験では時刻 80 分に解析では時刻 105 分に停止し、解析では実験よりも 25 分ほど停止する時刻が遅い。脚部及び腕部の皮膚温が冷房室で実験値よりも大きく低下する(図 5-8b, 5-9a, 5-9b)のは、発汗量を課題に計算していることが理由であると考えられる。

図 5-10c に皮膚表面における汗の蓄積量の解析結果を示す。汗の蓄積は胸部皮膚のみで生じ、他の部位では生じない。50 分過ぎから汗の蓄積が始まり、冷房室入室後も蓄積量は増加を続け、時刻 100 分に減少に転じる。図 5-10d に、胸部 T シャツの含水率解析値を示す。45 分過ぎに汗が吸収され始めると含水率は急激に増加し、52 分に含水率の最大値である 0.773 に達した後は、実験終了まで着衣の皮膚側表面に水分が蓄積された状態が続く。実験終了時点における T シャツの質量は、実験開始前の質量よりも汗の付着により 50g 増加していた。解析結果では、T シャツの質量は 53g 増加しており、実験値と解析値は概ね一致している。

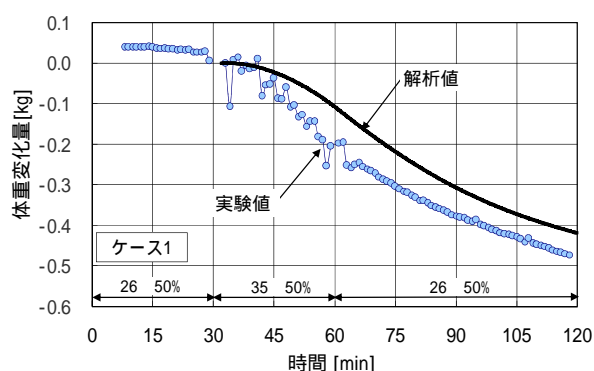


図 5-10a 体重減少量の比較

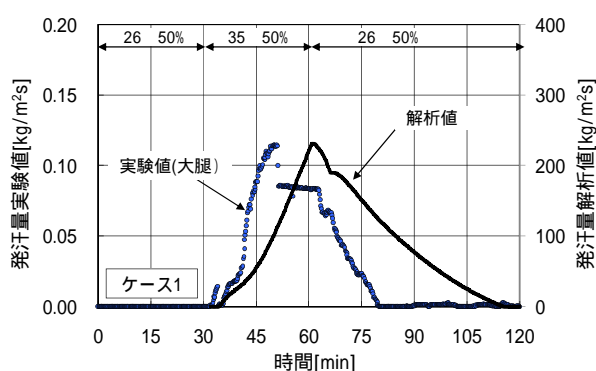


図 5-10b 発汗量の比較

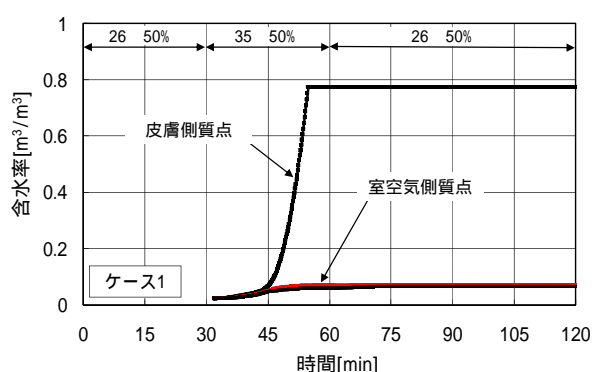


図 5-10c 皮膚表面の汗の蓄積量 (解析値)

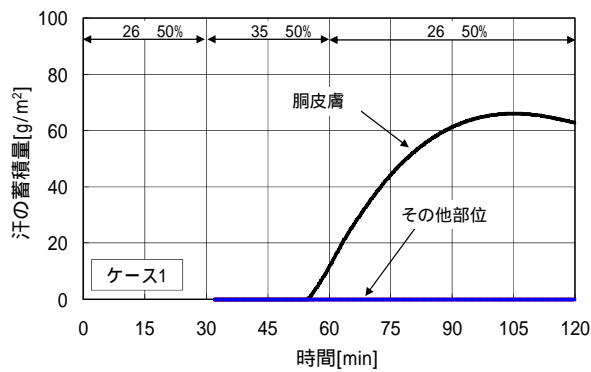


図 5-10d 胸部 T シャツの含水率 (解析値)

5.3.3 着衣温湿度と比較

図 5-11a、5-11b に肩部のカッターと背部Tシャツの室内側表面温度を示す。

肩部カッターについて、解析値と実験値は非常によく一致している。高温室入室後の一過性の温度上昇、及び冷房室に移動した後の急激な温度低下を解析値により再現できている。高温室入室後に鋭角なピーク値をとる理由は、解析結果から汗の水分吸着によるものである。

背Tシャツについては、高温室における変化性状をよく再現できている。実験値では高温室入室とともに急激に4 程度上昇し、極大値をとった後に急激に約3 も低下する。解析においても運動開始後約4 上昇した後、急激に2 低下する。実験値と解析値の一致は良い。冷房室入室後は、解析値は実験値よりも2 から3 温度が低い。より実態に合った伝達率あるいは空気の移流などの検討が必要である。

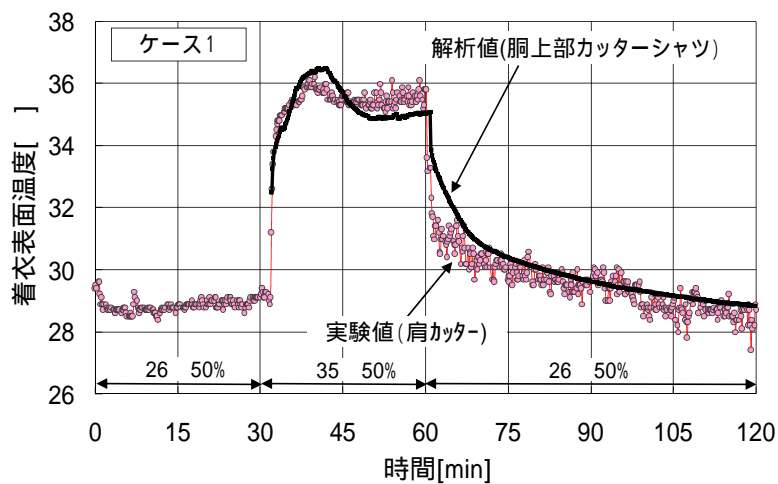


図 5-11a 肩部カッターと胸部カッター表面温度の比較

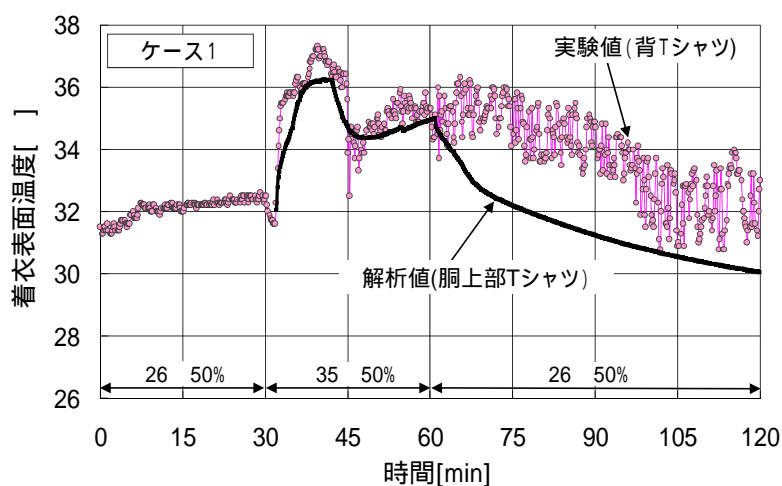


図 5-11b 背部Tシャツと胸部Tシャツの表面温度の比較

5.3.4 着衣間空気温湿度の比較

(1) 絶対湿度

図 5-12a に肩及び胸部の皮膚 Tシャツ間空気の絶対湿度変動を示す。解析値は、実験値の示す特徴的な変動をよく再現できており、高温室及び低温室とも一致は良い。以下では、図 5-12a に示す ~ の3つの過程に区分し、各々の変動性状について説明する。

実験値では、高温室入室後に増加し 17g/kg 程度で一旦安定した後、38分過ぎに再び増加し以降は60分まで上昇を続けるが、途中40分と47分の2度にわたり変化率が緩やかになる、といった変動を示す。以下に、解析結果をもとにこの変動性状の理由を説明する。

高温室入室後の増加について

この時点で発汗は生じていないため、絶対湿度の増加は、周辺環境が高湿になることと不感蒸泄による皮膚からの水分蒸発が増加するために生じる。

37分以降の急激な増加について

実験値では36分に発汗が生じてから1分後に急激に空気絶対湿度は増加するが、解析においても発汗量が増加したことにより、絶対湿度が上昇する。

高温室における上昇率の変化について

解析では42分に皮膚表面が飽和に達すると、皮膚表面の絶対湿度の上昇がそれ以前と比べて緩やかになる。その影響により、着衣間空気絶対湿度の上昇率が緩やかになる。

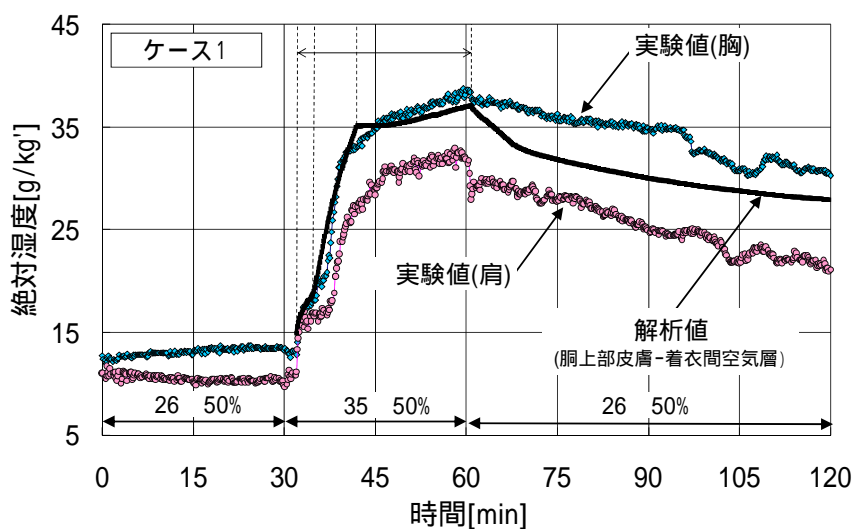


図 5-12a 着衣間空気絶対湿度

(2) 相対湿度

図 5-12b に空気相対湿度変動を示す。解析値は肩部空気の相対湿度に近い値を示しており、高温室入室後の変動性状、及び 45 分以降の高湿な状態を再現できている。実験値では肩部における相対湿度は最大 97% であるが、解析では 45 分以降は 100% になる。

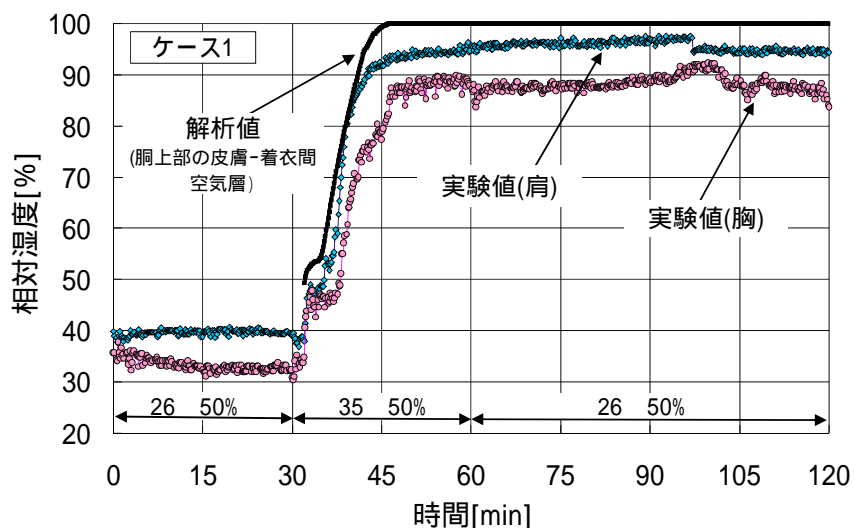


図 5-12b 着衣間空気相対湿度

(3) 空気温度

図 5-12c に空気温度変動を示す。解析値は、肩部の空気温度に近い値を示しており、実験値の変動性状をよく再現できている。高温室では、入室後、急激に増加し一旦低下した後再度増加するといった実験値の変動と同様の変動性状を示す。低温室における温度の低下速度も概ね一致している。

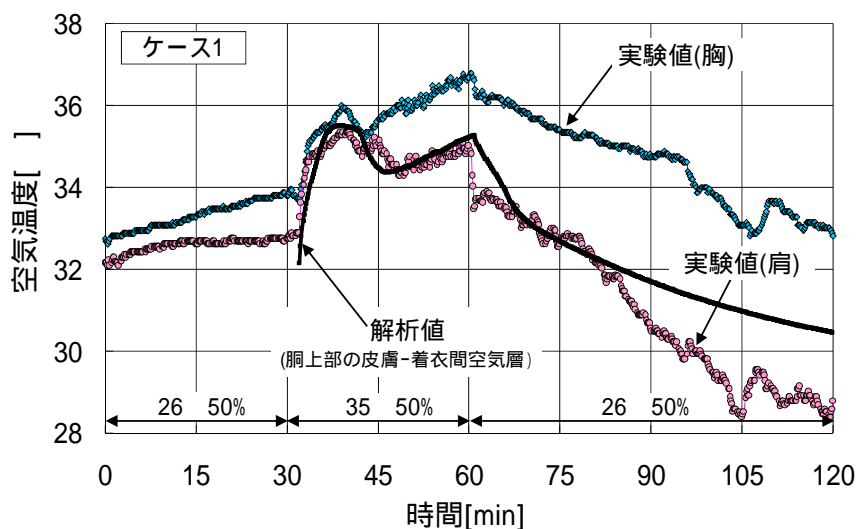


図 5-12c 着衣間空気温度

5-4 深部温変動に及ぼす代謝量の影響

本節では、深部温の一過性上昇に及ぼす高温環境における代謝量の影響を検討する。

5-4-1 解析条件

第 5.3 章で行った解析条件のうち、高温室の代謝量を 1 met から 6met まで 1.0met ごとに变化させた 6 ケースの計算を行ない、その際の深部温変動を比較する。第 5.3 章では $\rho=0.003$ とおき計算を行ったが、ここでは $\rho=0.005$ とおいた計算も行い深部温変動に及ぼす ρ の影響も検討した。

5-4-2 解析結果と考察

(1) 深部の温度上昇に及ぼす代謝量の影響

運動を開始してから終了するまでの 30 分間における胴深部温の上昇幅（=運動を開始して 30 分後の深部温 - 運動開始前の深部温）を図 5-13a に示す。 $\rho=0.005$ および $\rho=0.003$ のどちらの場合でも、2met の時に最も温度上昇が小さく、3met 以上では代謝量が大いほど温度上昇は大きくなる。代謝量が 1met の場合には運動を行わないため深部温の一過性低下は生じないが、2met 以上の場合には運動を開始すると深部温は一過性に低下する。2met 以上の場合には代謝量が大いほど一過性の低下は大きく、深部温が低下する前の温度に戻るまでの時間も短くなるが、2met の場合には一過性に低下した後に元の温度に戻るまで時間がかかるため、1met の場合よりも深部温の上昇幅は小さくなる。

(2) 深部の一過性上昇に及ぼす代謝量の影響

胴深部における一過性の温度上昇幅（=冷房室における深部温の極大値 - 冷房室入室時の深部温）を図 5-13b に示す。 $\rho=0.003$ の場合、代謝量が大いほど一過性の温度上昇幅も大きくなるがこれは次の 2 つの理由による。すなわち、代謝量が大きくなるほど、冷房室入室後の産生熱量と筋血流量の積算熱量が大きくなるため、深部へ流入する熱量が増加し一過性の温度上昇幅は大きくなる。運動終了時点での皮膚血流量は増加するため、冷房室入室後の皮膚血流量の減少量については胴深部への血液還流量の減少量も大きくなる。これにより、深部からの正味流出熱量の減少量が大きくなり、一過性の上昇幅は大きくなる。

ただし、 $\rho=0.005$ においては 3met 以上では一過性上昇の温度幅は大きくなる。これは、胴深部温が高くなると、熱伝導による他組織への流出熱量も大きくなるためである。

(3) 運動時間が深部温変動に及ぼす影響

代謝量を 6met とおき計算した場合の、運動時間と胴深部の上昇温度の関係を図 5-13c に示す。運動開始後一過性の温度低下が生じるため、 $\rho=0.005$ の場合で 10 分後、 $\rho=0.003$ の場合で 13 分後に胴深部温は運動開始前の温度に戻り、その後は 2 次関数的に上昇を続ける。屋外で 10 分に満たない歩行をする程度であれば、深部温はほとんど変化しない結果が得られた。

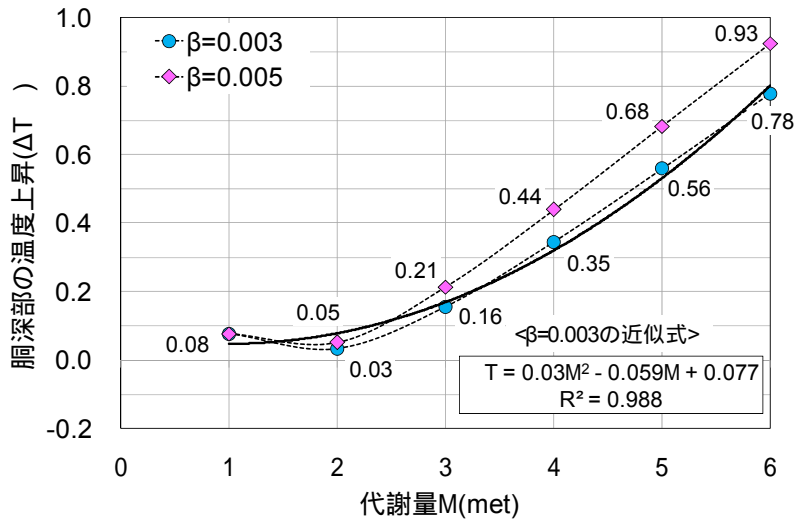


図 5-13a 深部の上昇温度と代謝量の関係(運動開始 30 分後の値)

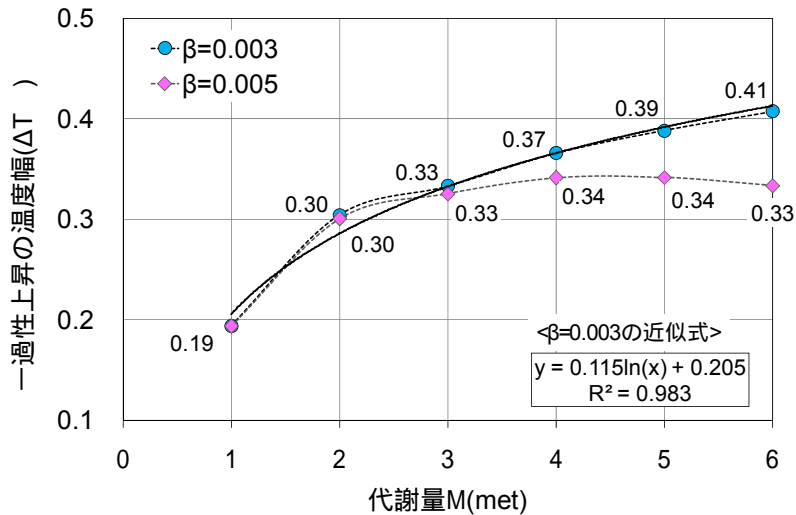


図 5-13b 深部温の一過性上昇に及ぼす代謝量の影響

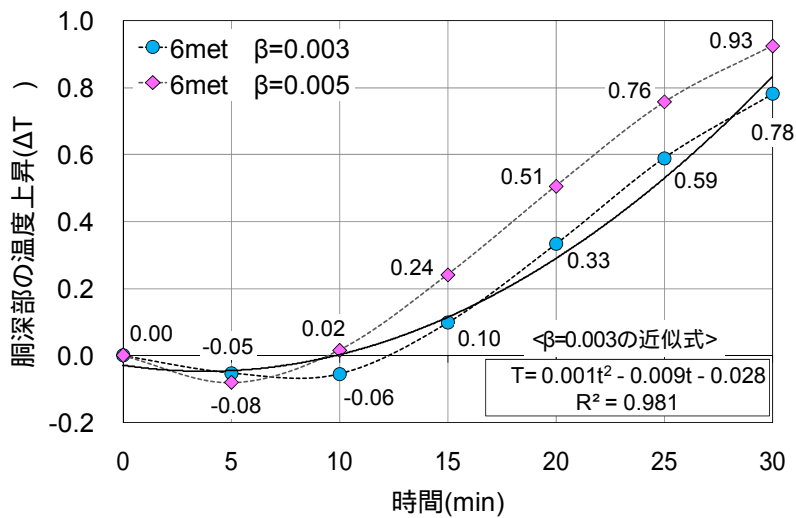


図 5-13c 運動時間が深部温変動に及ぼす影響

5.5 5章のまとめ

本章では、夏期の着衣条件としては比較的着衣量の多い場合を対象に、高温環境から冷房空間へ移動する場合の深部温変動を予測するための解析モデルを提示し、第4章で示した被験者実験の結果と再現計算値とを比較することで、解析モデルの精度を検証した。解析モデルには、人体熱モデルとして Stolwijk モデルを多質点化したモデルを、着衣には熱水分同時移動方程式を用いた。結論を以下に示す。

- (1) 提案した解析モデルにより被験者実験の結果を概ね再現できた。特に、深部温の一過性上昇、胸部皮膚温の変化性状、着衣の温度変動については、実験値と解析値は良く一致した。ここで示した解析方法により、高温環境や冷房空間における人体生理応答の予測を行うことが可能である。
- (2) 高温環境で運動を終了し冷房室入室後に前腕と手背の皮膚温が一時的に上昇する実験結果については、数値解析により再現できなかった。運動終了後の血流再配分あるいは動静脈吻合など血流のモデル化に関する検討が必要である。
- (3) 代謝量が深部温の一過性上昇に及ぼす影響を定量的に検討した。一過性の温度上昇幅は、冷房室入室以前の代謝量が大きいほど大きくなる。

第3部

深部温を評価指標とする冷房環境の最適設計

第6章 深部温を評価指標とする冷房環境制御

6.1 はじめに

第5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場合が多い。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、非定常状態においても温冷感の非定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。一方、温熱環境や代謝量が変化する場合には健康で省エネルギーな生活環境の創造には、体温調節の主要な入力値でありかつ目標値である深部温変動を考慮して室内環境条件を決定する必要があると考えられるが、深部温変動を考慮して室内環境制御を行った事例はない。

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、非定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。

6.2 問題の定式化

6.2.1 解析対象

解析対象とする系を図6-1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。

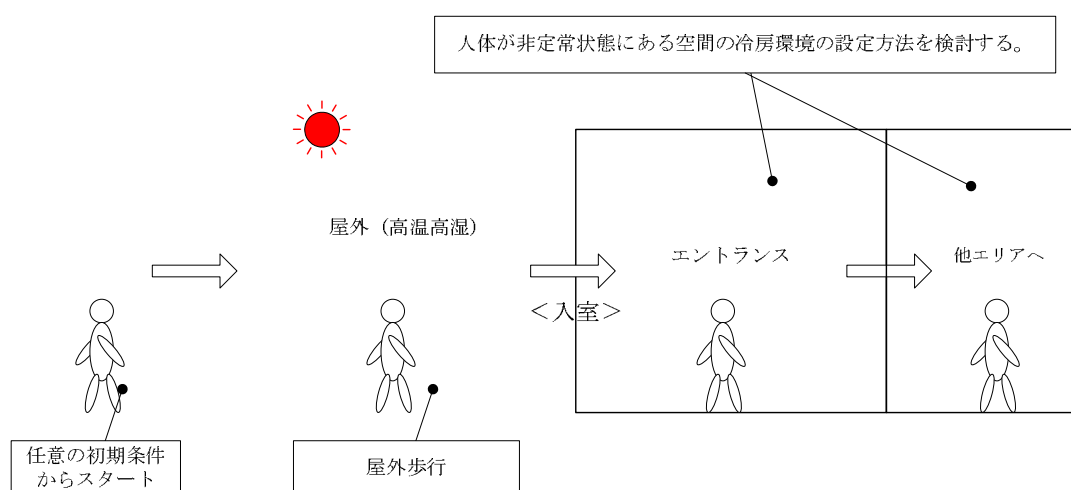


図6-1 解析対象とする系

6.2.2 基礎式

第5章で用いた解析モデルを用いる。すなわち、人体についてはStolwijkらの人体熱モデルを基礎とし、人体各部位の分割数を多くしかつ代謝による熱発生量と筋血流量の時間遅れを考慮したモデルを用いる。

6.2.3 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。

$$J = \left| T_{CR}(t_E) - T_{CR,set} \right|_{t=t_E} \quad (6.1)$$

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。

6.3 深部温を評価指標とする冷房時の最適室温

6.3.1 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。

解析に用いた人体各部位の初期値は、セットポイント値と同じとし、皮膚温 34.1、筋温 35.88、深部温 36.6、CB温 36.6 とした。皮膚表面の熱・湿気伝達率は、第3章の表 3-2 と同じ条件とした。セットポイント値については、 $T_{CR,set} = 36.6$ とした。熱発生量及び筋血流量の時間遅れを表す係数 β_i については、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.005$ として計算を行った。

表 6-1 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

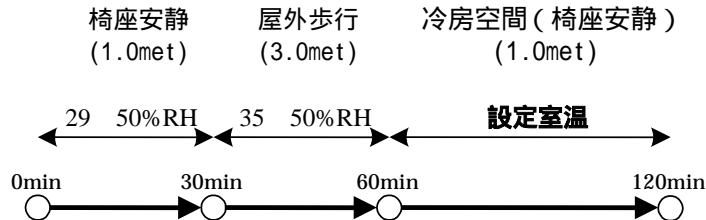


図 6-2 計算対象とする人体の移動スケジュール

6.3.2 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。屋外から冷房室に入室した 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。

6.3.3 最適室温の解析結果

(1) 最適室温について

評価関数 J に関する最適室温を図 6-3 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 分時点における胴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 6-2 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、深部温度変動に及ぼす設定室温の影響が大きいことが分かる。

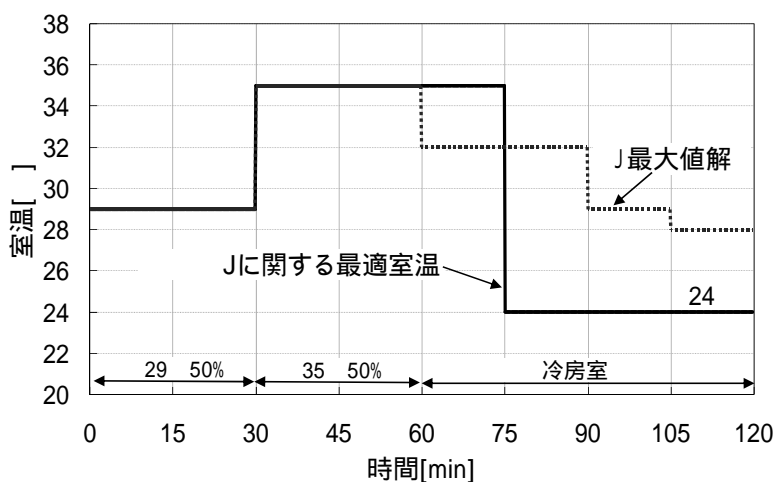


図 6-3 最適室温

表 6-2 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

(2) 深部温度変動について

図 6-4 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 6-5 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。

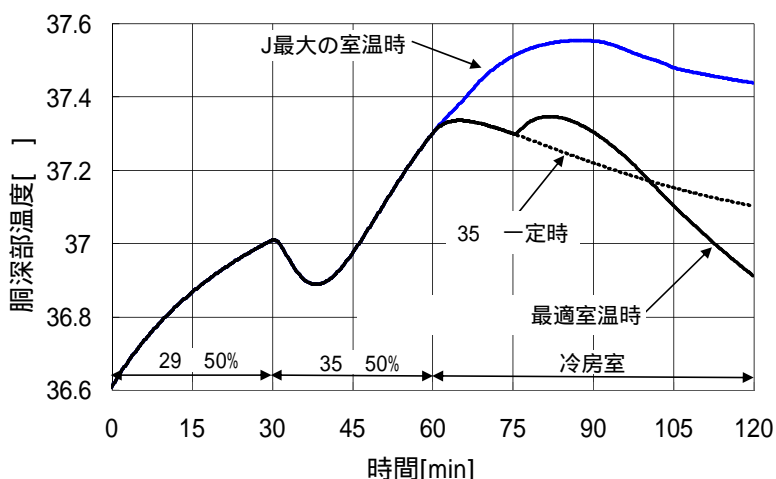


図 6-4 胴深部温の解析結果

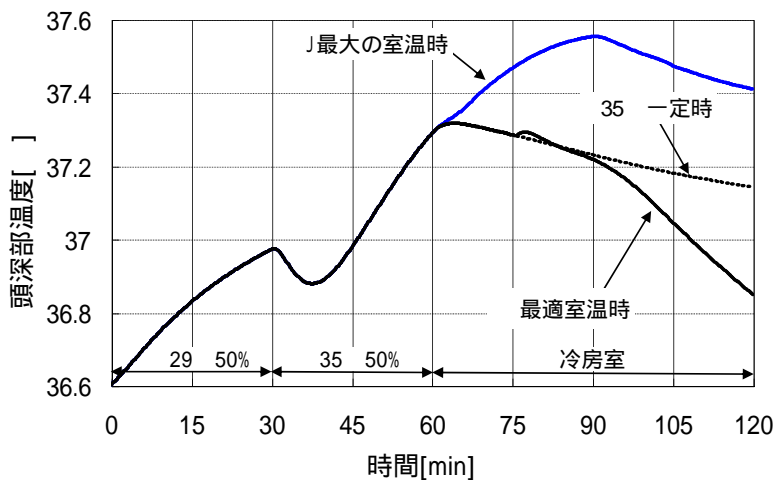


図 6-5 頭深部温の解析結果

6.3.4 最適室温に関する考察

前節では、はじめの 15 分を候補値のうち最大値である 35 に設定し、15 分以降は候補値のうち最小値である 24 に設定した場合に、評価関数 J に関する最適室温が得られることを示した。ここでは、深部温度変動に及ぼす設定室温の影響を考察することにより、深部温度を速やかに低下させるために最適な室温の設定方法を明らかにする。

(1) 評価関数 J の解について

J に関する解のうち、小さい順 5 ケースの設定室温とその時の胸深部温度、平均皮膚温度および評価関数 J を表 6-3 に示す。5 ケース全てに共通した傾向としては、はじめの 15 分間は 35 に設定し、残り 45 分間は 24~26 の低い温度に設定することである。高温状態にある深部温度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。

表 6-3 評価関数 J の値 (小さい順 5 ケース)

順位	設定室温()				120分における温度()		評価関数 J (n.d.)
	60~75分	75~90分	90~105分	105~120分	胸深部温	平均皮膚温	
1	35	24	24	24	36.91	32.20	0.31
2	35	24	24	25	36.92	32.48	0.32
3	35	24	24	26	36.93	32.76	0.33
4	35	24	25	24	36.94	32.26	0.34
5	35	25	24	24	36.94	32.23	0.34

(2) 設定室温と胸深部の熱移動について

まず、冷房室の設定室温を 35 に一定にした場合と 24 に一定にした場合における深部の熱移動を比較する。

胸深部からの正味の流出熱量を図 6-6 に示す。胸深部の温度は、基礎代謝に伴う熱産生量、熱伝導による胸深部から胸筋への流出熱量、および血流による胸深部から各部位への正味の流出熱量、の 3 つの熱収支によりその値が決定される。冷房室入室直後から 13 分間(時刻 60~73 分)は、室温を 35 に設定する方が正味の流出熱量は大きくなり、残り 47 分間(時刻 73~120 分)では室温を 24 に設定する方が胸深部からの正味の流出熱量は大きくなる。

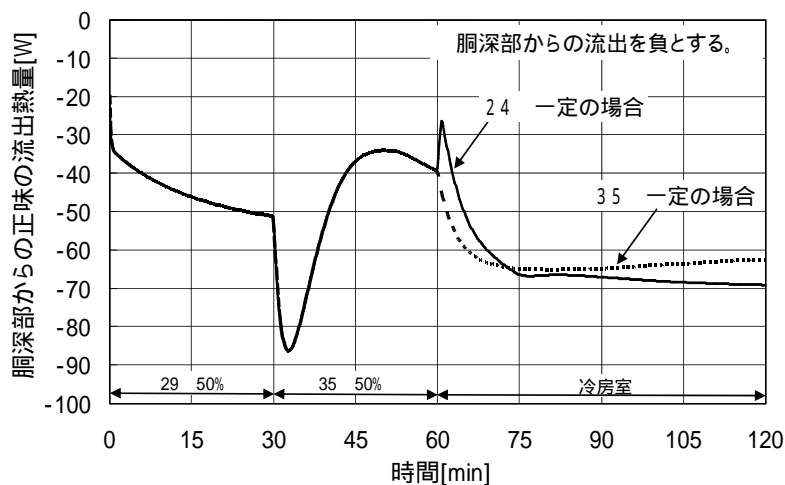


図 6-6 胸深部からの正味の流出熱量

胸深部からの熱移動の内訳を図 6-7 に、平均皮膚温と皮膚総血流量 SBF の解析結果を図 6-8、図 6-9 に示す。

血流による胸深部からの正味の流出熱量について説明する。胸深部からの正味の流出熱量は、60～101分は設定室温を 35 にした方が大きく、102分以降は設定室温を 24 にした方が大きい。設定室温を 24 にした場合には、冷房室入室直後に平均皮膚温は急激に低下(図 6-8)するため、皮膚総血流量も急激に減少し(図 6-9)、胸深部から皮膚への正味の流出熱量(図 6-7)は急激に減少する。設定室温が 35 の場合には、平均皮膚温は高い温度のままであるため皮膚血流量の減少は少なくなり、血流による胸深部から皮膚への正味の流出熱量の減少量も非常に小さくなる。このため、60～101分の間は、設定室温を 35 にした場合の方が正味の流出熱量は大きくなる。ただし、設定室温を 35 にした場合には、胸深部温の低下とともに皮膚と深部の温度差が小さくなるため血流による胸深部からの正味の流出熱量が徐々に減少し、102分には設定室温を 24 にした場合の方が正味の流出熱量は大きくなる。

熱伝導による胸深部から筋への流出熱量の変動については、60分以降は、設定室温を 24 にした場合の方が設定室温を 35 にした場合よりも熱伝導による胸深部から胸筋への流出熱量は大きくなる。設定室温を 35 にした場合には、120分間発汗が続くため流出熱量は緩やかに増加していくが、常に設定室温を 24 にした場合よりも流出熱量は小さい。

以上の結果より、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、血流による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する室温制御により、熱伝導による胸深部から胸筋部への流出熱量を増加させることで、胸深部温を最も早く低下させることができる。

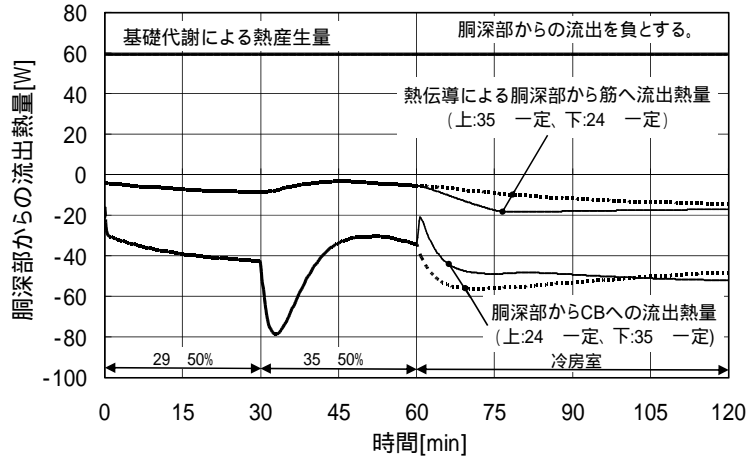


図 6-7 胸深部の熱収支

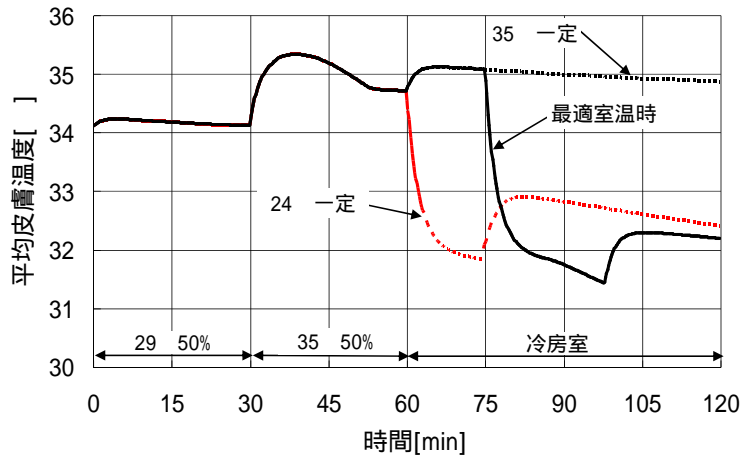


図 6-8 平均皮膚温の比較

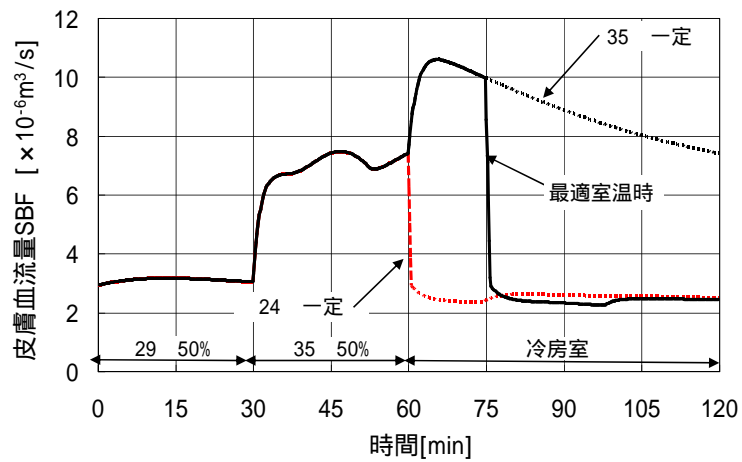


図 6-9 皮膚総血流量 SBF の比較

(3)最適室温時における胴深部からの流出熱量

図 6-10 に、最適室温時における胴深部からの正味の流出熱量を、図 6-11 に胴深部からの流出熱量の内訳を示す。

最適室温の場合、75分に室温が24 に変化すると胴深部への血液還流量が減少する(図 6-9)ため、胴深部からの正味の流出熱量が減少(図 6-10)するが、85分には他の2 ケースと同じ流出熱量まで戻り、以降は流出熱量は急激に増加する。室温を急激に下げると一旦流出熱量は減少するため、胴深部温は増加するが、今回の解析ではその上昇の程度は小さく(図 6-4 , 図 6-5)、すぐに低下に転じる。設定室温を低くしたことにより、熱伝導による胴深部からの流出熱量が増加するため、胴深部からの正味の流出熱量も急激に増加し、120分時における胴深部温は最も低くなる。

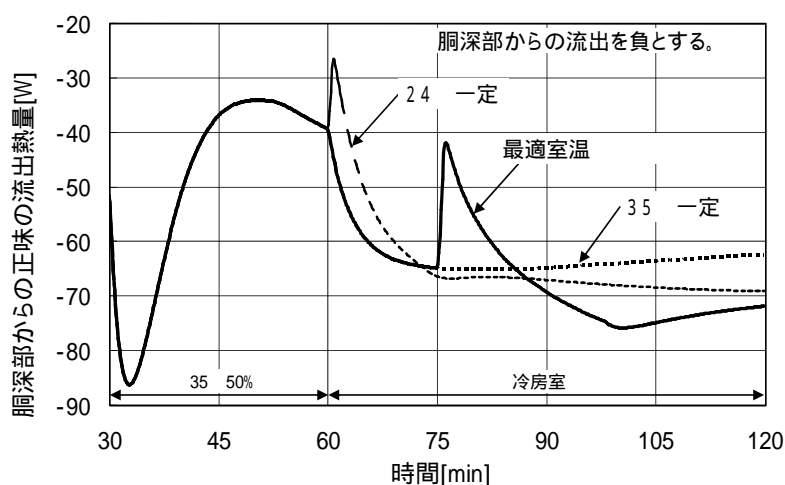


図 6-10 最適室温時の胴深部からの正味流出熱量

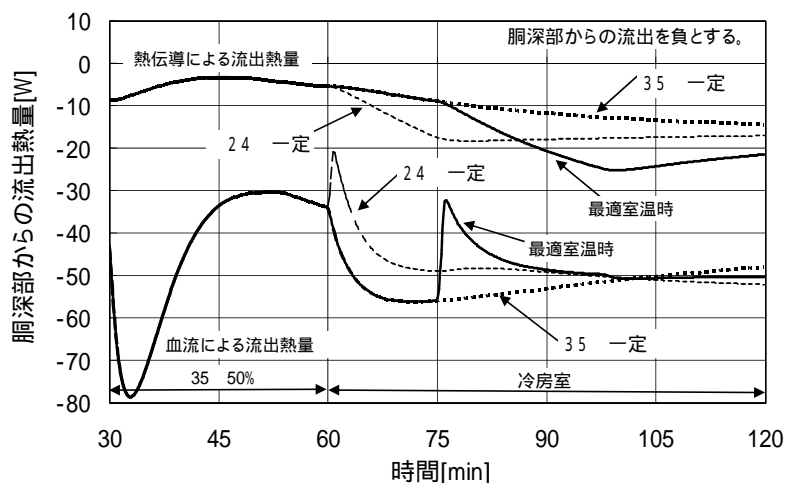


図 6-11 最適室温時における胴深部の熱移動の内訳

6.4 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。

6.4.1 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¹⁻⁵⁵⁾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 6-12 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。

$$I = Aq_{sk} + BT_{sk} + C \frac{dT_{sk}}{dt} + DT_{cr} + E \frac{dT_{cr}}{dt} + F \quad (6.2)$$

ここで

I : 温冷感予測申告値[n.d.]

A : 回帰係数 [$m^2 \cdot W^{-1}$]=-0.01285

B : 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]=0.5725

C : 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]=0.4158

D : 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]=-0.8648

E : 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]=-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 [$^{\circ}C$]

t : 時刻[t]

T_{cr} : 深部温 [$^{\circ}C$] (胴深部と頭深部の体積平均値とする。)

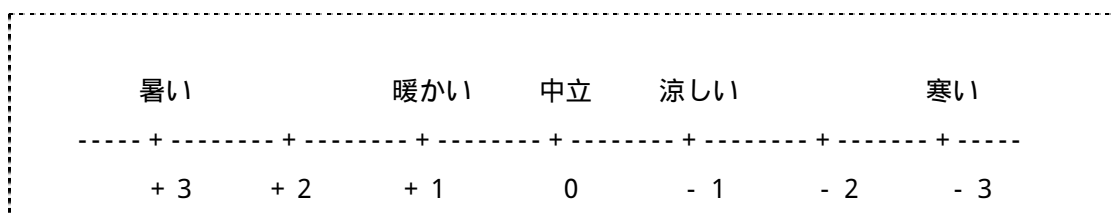


図6-12 全身温冷感申告のスケール

ここで、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。

6.4.2 解析結果と考察

(1) 最適室温の比較

図 6-13 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 ~ 32 間で緩やかに低下した後、104 分に 27.8 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 まで一瞬低下した後 65 分には 30 まで上昇する。その後は徐々に低下し、85 分に 23.2 まで急激に低下し、以降は 24 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 から 34 の高温を維持した後、24 から 28 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。

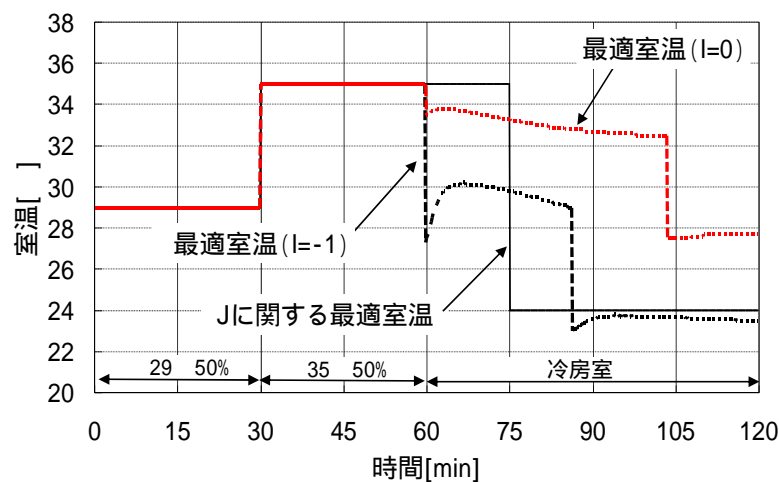


図 6 - 13 最適室温の比較

(2) 胴深部温の比較

図 6-14 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 となるが、 $I=0$ に設定した場合の最適室温時には 37.35 となり、 $I=-1$ に設定した場合の最適室温時には 37.17 となる。深部温を評価指標とした場合よりも各々 0.40、0.28 も胴深部温度は高くなる。

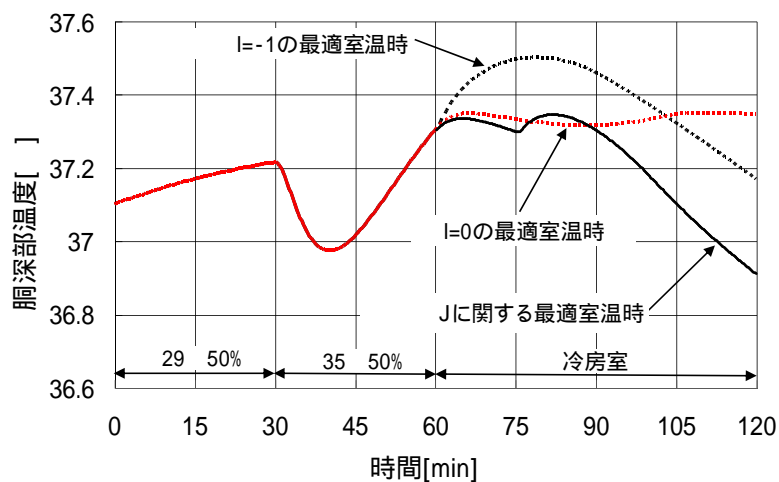


図 6 - 14 胴深部温度の比較

(3) 温冷感予測申告値

図 6-15 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。

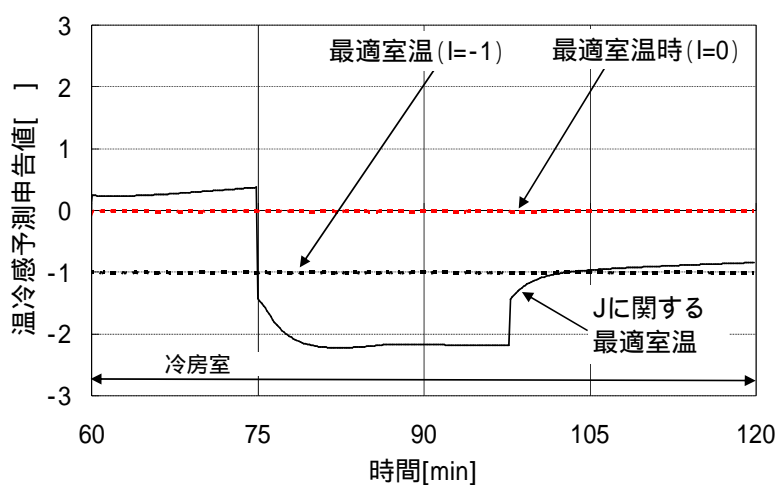


図 6 - 15 全身温冷感の予測申告値

6.5 6章のまとめ

本章では、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。

第7章 深部温変動と快適性に及ぼす頭部冷却の影響

7.1 はじめに

前章において、冷房により深部温を速やかに低下させるには、屋外から冷房空間へ入室後しばらくの間は室温を高温に保ち、ある時点から室温を低下させるといった室温制御が有効であることを示した。また、非定常状態における温冷感申告予測式を用いた解析により、入室後に設定室温を高温に保つと予測申告値が暑い側になり、深部温調整制御と温冷感申告値に不一致が生じる可能性があること示した。

これらの結果を踏まえ、本章では、深部温を速やかに低下させ、同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として、頭部冷却に着目し、その適用可能性を被験者実験により検討する。高温状態にある人体に対し、頭部冷却を行った場合の心理・生理応答を検討した研究は多く、例えば、Crawshaw¹⁻⁶⁴⁾、西原¹⁻⁶⁶⁾、森¹⁻⁷¹⁾は頭部と他部位を冷却した場合の生理・心理応答の違いについて検討を行い、Kato¹⁻⁵⁷⁾、Hirata¹⁻⁶¹⁾は頭部冷却の有無による生理・心理応答の違いについて検討している。これらの研究では頭部は他の部位に比べて冷感受性が高いことが示されており、冷感受性の高い頭部を優先して冷却することにより、設定室温を高温に保った場合でも快適性を確保できる可能性がある。本章では、被験者実験により、高温環境で歩行を行ない高温状態にある人体に対し頭部冷却による局所冷房を行なった場合の温冷感申告と深部温変動性状に関する検討を行い、頭部冷却の適用可能性について検討を行う。

7.2 検討対象とする系

解析対象とする系を図7-1に示す。夏期高温な屋外で歩行後に入室する冷房室の設定温度を比較的高温に保ち、頭部に冷風を吹付ける状況を想定する。頭部に冷風を吹付ける方法としてはスポット空調を想定し、この際の温冷感と深部温の変動特性を検討する。

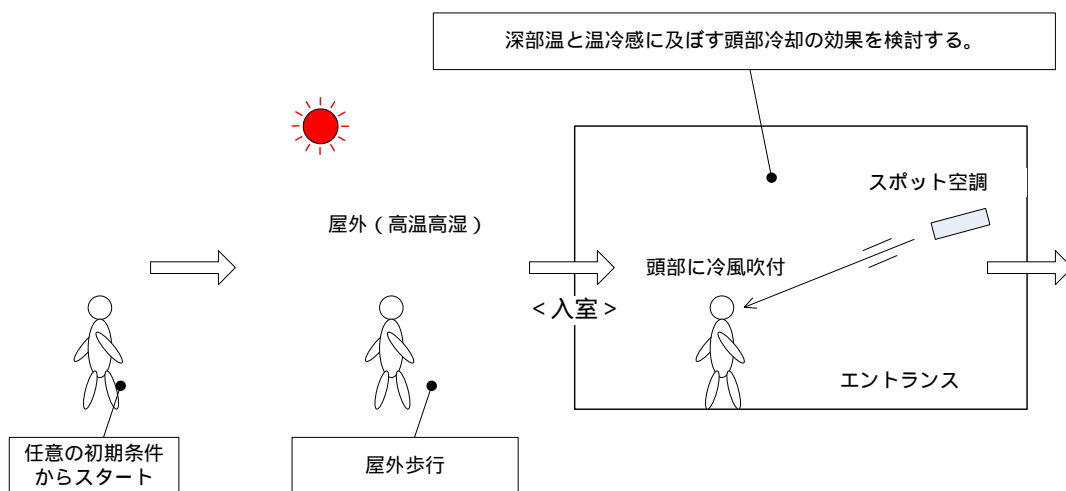


図7-1 検討対象とする系

7.3 局所冷却に関する被験者実験

7.3.1 実験概要

実験は2006年9月に京都大学内の実験室で行われた。被験者は健康な男子大学生2名でありトランクスのみ着用した。身長体重などを表7-1に示す。被験者は屋内外移動を模擬したスケジュール(図7-1)で恒温恒湿室に滞在し、その間の生理量を10秒間隔、体重と心拍数および全身温冷感申告値を1分間隔で測定する。被験者は表7-2に示す実験1a~1cと2a~2cの6ケースの実験を行う。実験1では、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20分間行い、運動終了後も35 50%RHの高温環境に椅座安静で滞在して、局所冷却を20分間行う。その後、局所冷却を止め29 の室に移動し椅座安静で15分間滞在する。図7-2に示す1サイクル70分のスケジュールを連続して3回行い、1回目は頭部冷却、2回目は局所冷却なし、3回目は足部冷却の計210分間の実験を行う。ただし、被験者Bでは足部冷却を除く実験1aと実験1bのみ行った。

実験2では35 の高温環境で運動終了後29 の部屋に移動し、全身を冷却することに加えて、局所冷却を20分間行う。冷却後は29 の室にそのまま15分間滞在する。実験1と同様に連続して3回の実験を行い、実験1と同様に局所冷却を行う。

表7-1 被験者の身長・体重など

被験者	年齢	体重(kg)	身長(cm)	皮膚表面積(m ²)
A	23	74	174	1.862
B	23	60	179	1.752

蔵澄らの式³⁻⁴⁾を用いて算出した。

表7-2 実験ケース

実験ケース	冷却部位	室内 温湿度	部位冷却条件			
			冷風条件		冷却面積(m ²)	
			温湿度	冷却ダクトの 断面平均風速 (m/s)	被験者 A	被験者 B
実験1 (1日目)	1a	35 50%	26.0 75%	0.6~0.7	0.130	0.123
	1b		-	-	-	-
	1c		26.0 75%	0.6~0.7	0.372	0.350
実験2 (2日目)	2a	29 50%	20.5 75%	0.6~0.7	0.130	0.123
	2b		-	-	-	-
	2c		20.5 75%	0.6~0.7	0.372	0.350

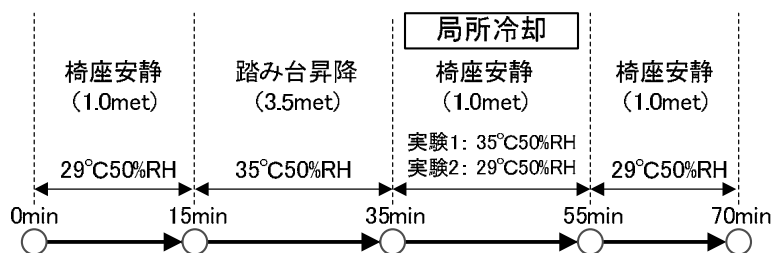


図7-2 被験者実験のスケジュール

7.3.2 測定項目

測定部位、測定項目及び測定装置を表7-3に示す。皮膚温10点（前額、前腕、手背、大腿、脛、足背、胸、腹、背、肩）と、直腸温・鼓膜温の人体各部位温度を測定した。データロガーは29の室に設置した。30～60分の運動中における体重と心拍数は、運動停止中の20秒間（第2章の図2-2）に測定した。図7-3及び図7-4に、全身温冷感申告値と快適感申告値のスケールを各々示す。

表7-3 測定項目

測定項目	測定部位	測定装置
皮膚温	前額、前腕、手背、大腿、脛、足背、胸、腹、背、肩の10点	T型熱電対(0.2mm)
深部温	鼓膜、直腸	専用のT型熱電対センサー
発汗量	前腕、大腿	換気カプセル方式の連続蒸散・発汗測定装置(ケアット イSAMU-100)
皮膚血流量	前腕、大腿、中指	レーザー血流量计(アドバンスALF21)
体重損失量		電子天秤(メラート KCC150)
心拍数	耳朶	光電脈波検出式心拍計(キャットアイ)
室内温湿度	FL+0, 0.1, 0.6, 1.1mの4点	小型温湿度計(エアット デイTR-72S)
冷却ダクト内 空気温湿度・グローブ温度	ダクト内2点	小型温湿度計(エアット デイTR-72S)
		グローブ球
風速	ダクト内1点	KANOMAX 熱線式風速計
	室内2点	KANOMAX 熱線式風速計

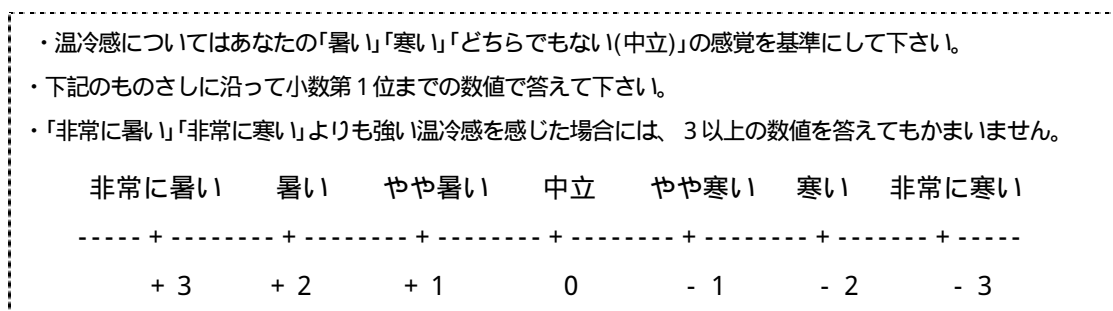


図7-3 全身温冷感申告のスケール (ASHRAEの直訳スケール^{2,4)})

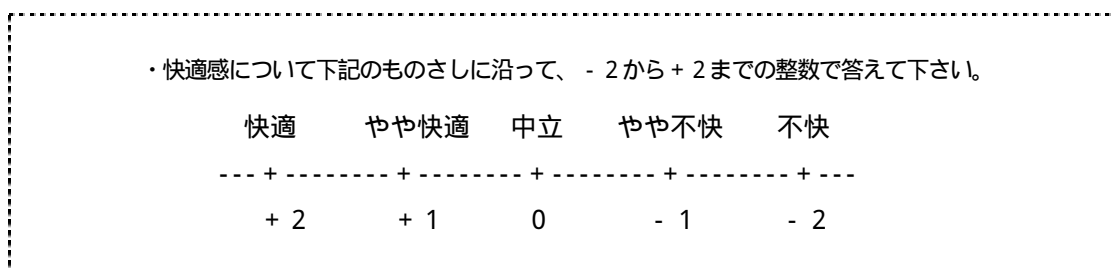


図7-4 快適感申告のスケール

7.3.3 局所冷却方法の概要

局所冷却の方法を図7-5と図7-6に示す。冷却部位をダクトで内包し、冷風を送風することで局所冷却を行う。局所冷却を行う部分と他の部位をダクトにより区画し、冷却部位以外への冷風の影響を少なくしている。冷風の温湿度と風速条件および冷却部位の皮膚表面積を表7-2に示す。実験1a, 1c, 2a及び2cにおける冷風の温湿度と平均風速(ダクト断面)を同一にした。

冷却用ダクトの内寸法は幅0.39m、高さ0.45m、長さ3.68mである。頭部冷却の場合には頸より上の頭部全体を、足部冷却の場合は両足の膝より下の部位全てをダクトに内包し、パッケージ空調機により冷風を送風する。送風量は全てのケースで同じ風量とし、ダクトの断面平均風速を0.7m/s程度に設定した。冷風温度は、室温より8~9 程度低い条件とし、実験1の場合で26.0 程度、実験2の場合で20.5 程度とした。冷却部位の皮膚表面積は、Hardy-Dubois²⁻⁵⁾により示された面積比率(頭部0.07、足部0.20)を用いて算定した。足部の冷却面積は頭部の冷却面積の約2.8倍になる。

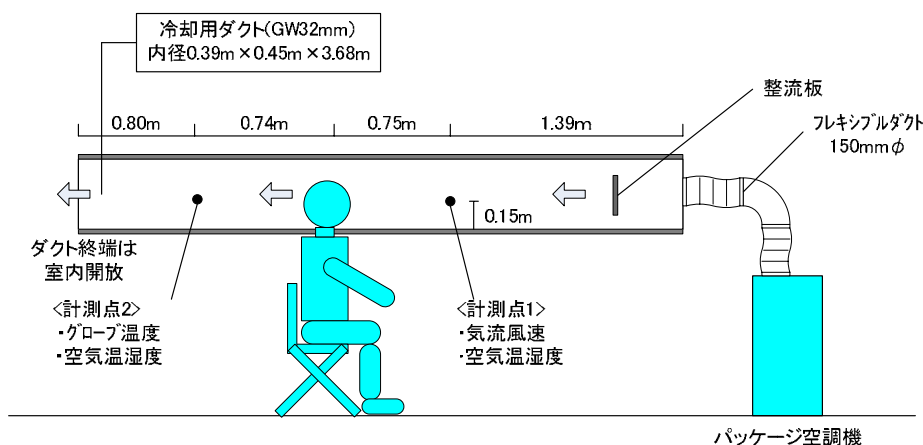


図7-5 頭部冷却方法(断面図)

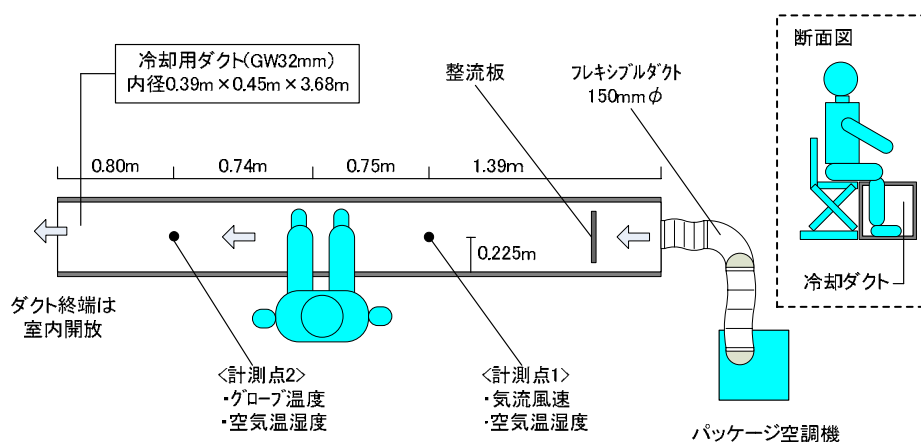


図7-6 足部冷却方法(俯瞰平面図)

7.4 深部温に関する実験結果と考察

以降では、頭部冷却を行った場合と局所冷却を行わなかった場合のみを取り上げ結果の説明と考察を行い、深部温変動に及ぼす頭部冷却の影響を検討する。

7.4.1 冷却ダクト内の温熱環境

被験者Aの実験1aの場合を除き、表7-2に示す条件を概ね満足できていることを確認した。(Appendix.7.A参照) 図7-7a,7-7bに実験1の被験者Aにおけるダクト内空気温度と風速を示す。

実験1aでは、冷却用ダクトとフレキシブルダクトの接続不良により、冷風温度は41～47分間にいったん29℃まで上昇した後26℃まで低下し、この間の温度は設定条件よりも高い温度となった。以降の説明ではこの点も留意して考察を述べる。グローブ温度は、実験1c以外では空気温度より0.5℃程度高く、実験1aでは28℃まで上昇した後、実験1cと等しい26.5℃になる。ダクト内風速については、フレキシブルダクトの接続不良により、頭部冷却の場合の風速は1.0m/s以上の値となり、設定条件より大きい風速であった。

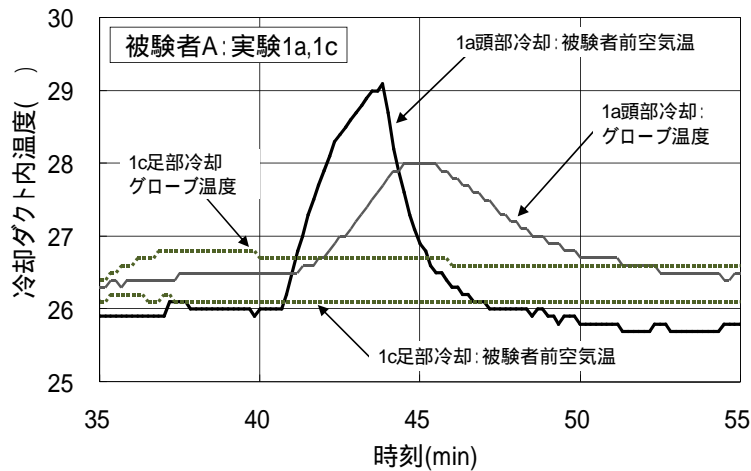


図7-7a ダクト内空気温度(実験1被験者A)

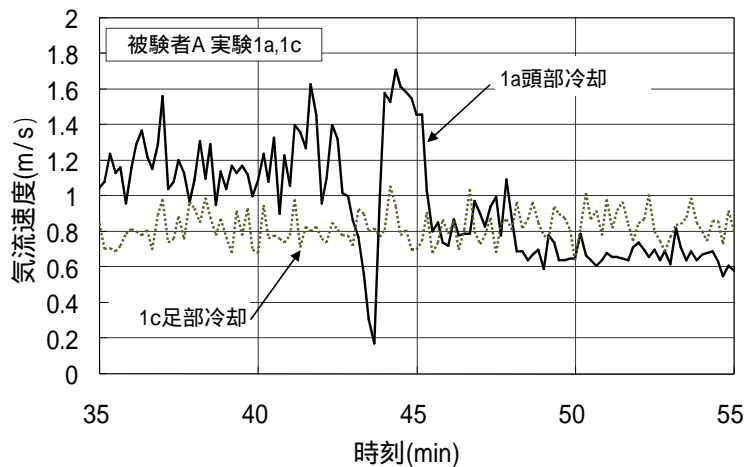


図7-7b ダクト内風速(実験1被験者A)

7.4.2 深部温変動

(1) 直腸温変動について

実験1被験者Aの局所冷却なしの場合、実験2被験者Bの局所冷却なしの場合にはデータのばらつきが大きく異常値を示していたため、これを除くデータについて結果を述べる。

実験1の結果を図7-8a(被験者A)、図7-8b(被験者B)に示す。被験者Aについては、頭部の冷却を開始すると直腸温は0.1 上昇し、その後頭部冷却中の20分間はその温度を保つ。被験者Bについては、局所冷却を行わない場合には、時刻35分に運動を終了すると0.1 程度上昇して37.9 になり、時刻35分から60分までの25分間は37.8 から37.9 で安定する。頭部を冷却した場合には冷却開始後に直腸温は単調に低下を始め、局所冷却を止める時刻55分までの20分間に38.0 から37.6 まで0.4 も低下する。

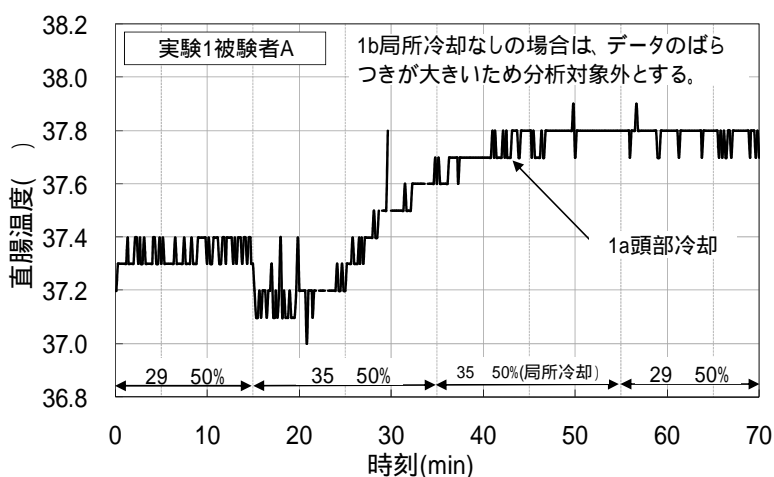


図7-8a 直腸温変動(実験1被験者A)

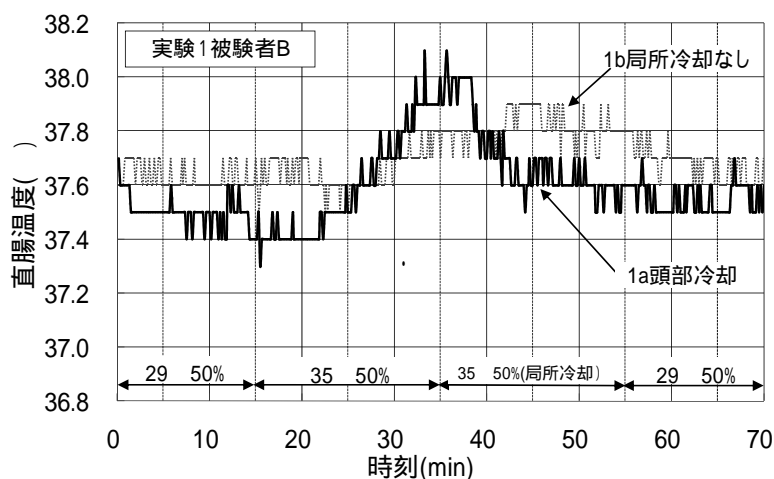


図7-8b 直腸温変動(実験1被験者B)

実験2について、被験者Aの結果を図7-8cに、被験者Bの結果を図7-8dに示す。被験者Aについては、局所冷却を行わない実験2bの場合には、高温環境で運動を終了し29 の冷房室に移動すると

0.1 ほど直腸温は一過性に上昇するが、運動終了後に29℃に移動して頭部を冷却する実験2aの場合には、局所冷却中もそれ以前と同じ温度を保ち深部温の変化はない。被験者Bについては、頭部を冷却する場合には、局所冷却開始後に約0.1℃ほど一過性に上昇する。

実験1の被験者B（図7-8b）および実験2の被験者A（図7-8c）の結果より、頭部を冷却した場合には、局所冷却を行わない場合よりも一過性の温度上昇幅は少ないが、あるいは単調に減少するという結果が得られた。

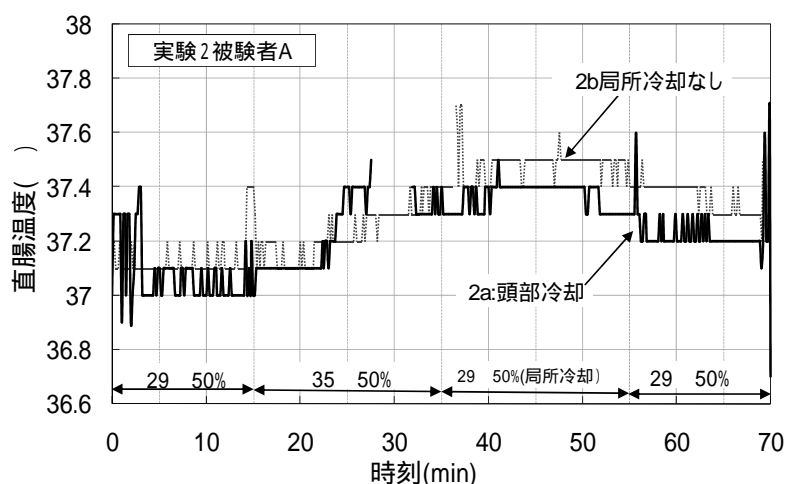


図 7-8c 直腸温変動(実験 2 被験者 A)

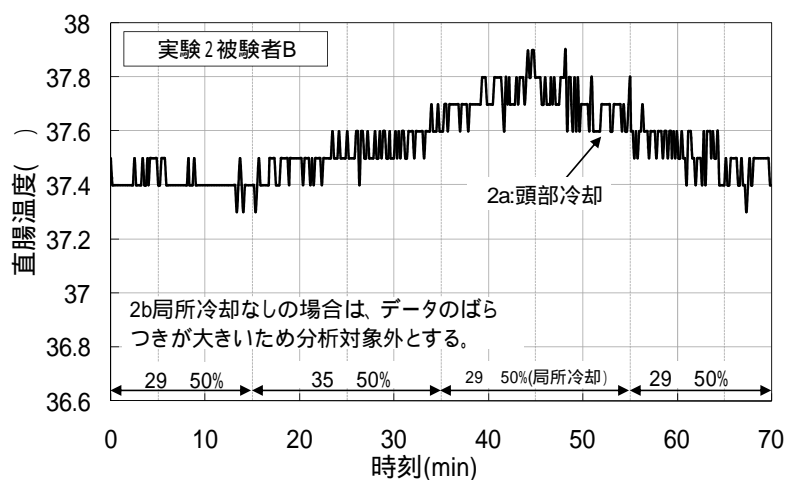


図 7-8d 直腸温変動(実験 2 被験者 B)

(2) 鼓膜温変動について

実験1被験者Aの局所冷却なしの場合、実験2被験者Bの場合にはデータのばらつきが大きく異常値を示していたため、これを除くデータについて結果を述べる。

実験1の被験者A(図7-9a)においては、頭部を冷却する場合には頭部冷却中の20分間で鼓膜温は0.1 低下する。実験1の被験者B(図7-9b)においては、局所冷却なしの場合には時刻35~55分の間、鼓膜温はほぼ同じ温度であるが、頭部冷却の場合は1.0 も急激に低下する。

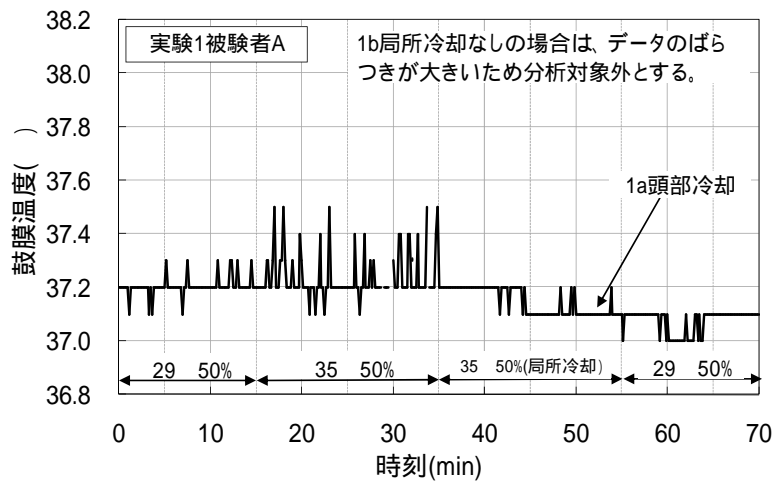


図 7-9a 鼓膜温変動(実験 1 被験者 A)

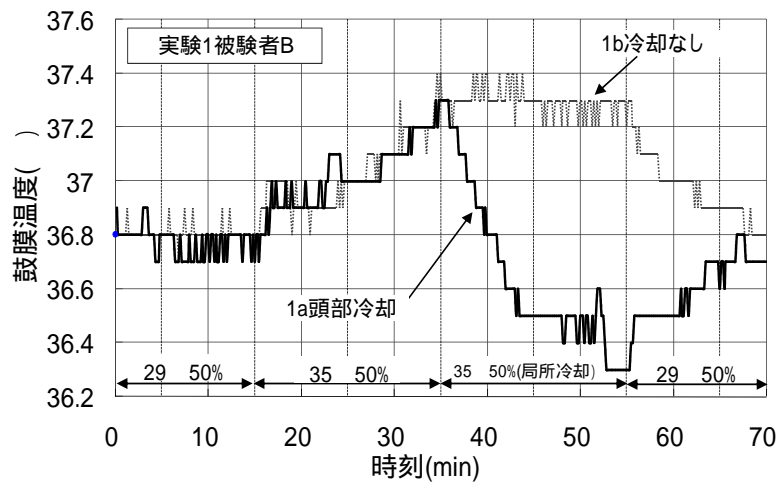


図 7-9b 鼓膜温変動(実験 1 被験者 B)

実験2の被験者Aについては、頭部を冷却する場合を図7-9cに、局所冷却なし場合を図7-9dに示す。頭部を冷却する場合にh頭部冷却中の20分間で鼓膜温は0.2 低下する。局所冷却なしの場合は0.1 上昇する。

以上の結果より、頭部を冷却する場合には、鼓膜温は単調に低下し頭部冷却中の20分間で0.1 から最大1.0 も低下する結果が得られた。局所冷却を行わない場合には、鼓膜温は低下しない。鼓膜温を低下させる冷房方式として、頭部を冷却することは効果的であると考えられる。

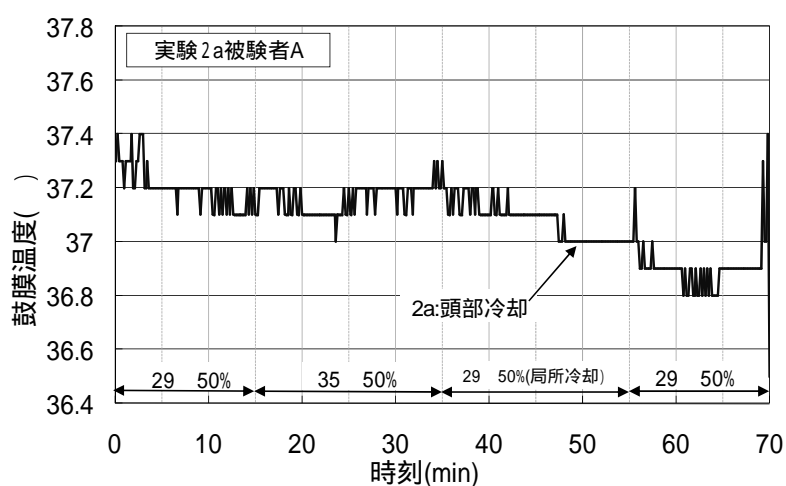


図 7-9c 鼓膜温変動(実験2被験者A)

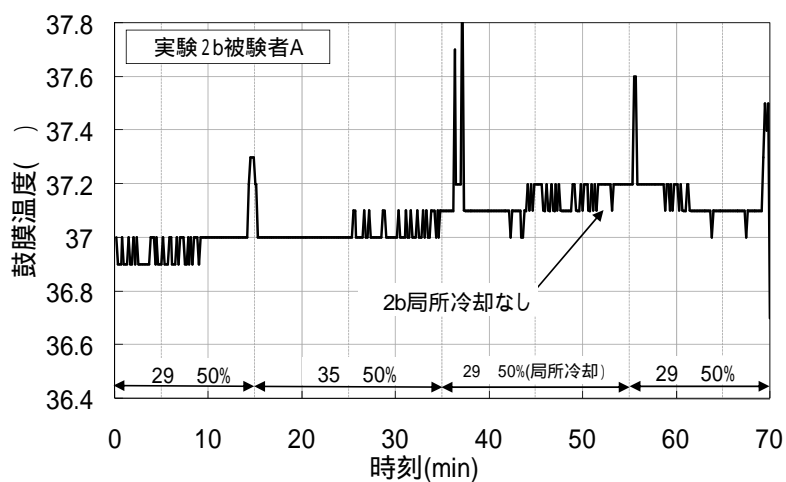


図 7-9d 鼓膜温変動(実験2被験者A)

7.4.3 心拍数と血流量の変動

(1) 心拍数について

図7-10a～図7-10dに心拍数変動を示す。時刻35分から55分（局所冷却中）の心拍数変動を比較する。実験1の被験者Aの場合には、頭部冷却を行った場合と局所冷却を行わなかった場合の変動性状の差はほとんどないが、他の3ケースでは頭部冷却を行った方が心拍数の減少数が大きい。すなわち、頭部冷却を開始した時刻35分と冷却を終了した時刻55分における心拍数を比べると、実験1被験者Bでは頭部冷却の場合に16回/分減少、局所冷却なしの場合に9回/分減少、実験2被験者Aでは頭部冷却の場合に17回/分減少、局所冷却なしの場合に13回/分減少、実験2被験者Bでは頭部冷却の場合に29回/分減少、局所冷却なしの場合に20回/分減少となる。同様の結果は既存の研究でも示されている。

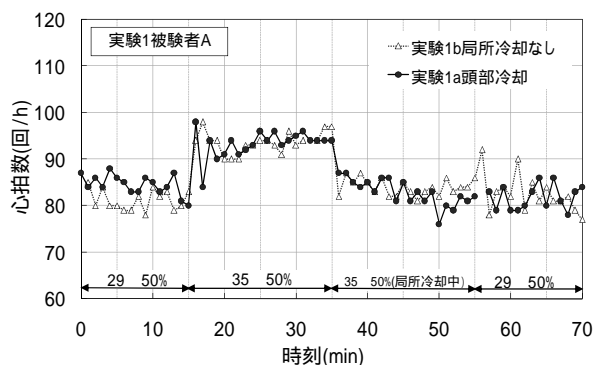


図 7-10a 心拍数(実験 1 被験者 A)

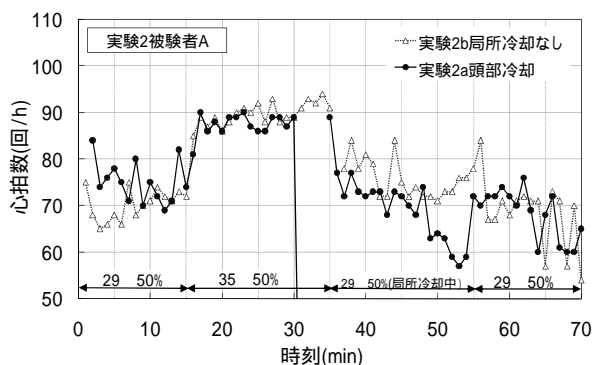


図 7-10c 心拍数(実験 2 被験者 A)

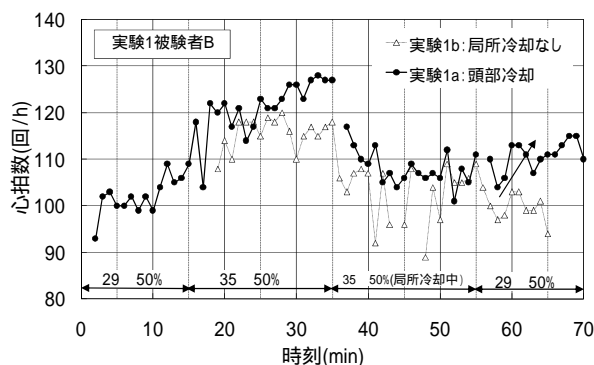


図 7-10b 心拍数(実験 1 被験者 B)

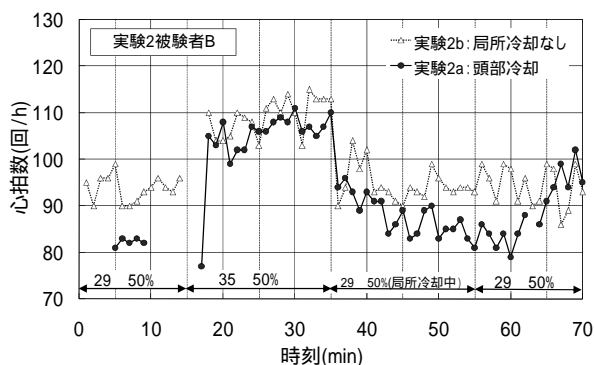


図 7-10d 心拍数(実験 2 被験者 B)

(2) 皮膚血流量変動について

図7-11a～図7-11dに左中指の皮膚血流量変動を示す。血流量のばらつきが大きいいため、5分間ごとの平均値を求めその値により変動傾向を検討する。

全ての実験に共通してみられた現象として、運動開始後である時刻15から20分の5分間の平均皮膚血流量は前時刻である時刻10～15分の5分間における平均皮膚血流量より減少する。

実験1の結果(図7-11a~図7-11b)について説明する。時刻35~40分(運動を終了して35の高温室に椅座安静で滞在する時間帯)における皮膚血流量と時刻30~35分の皮膚血流量を比較すると、局所冷却を行わない場合には両被験者ともに皮膚血流量は増加するが、これは運動停止に伴う血流量再配分調整などの影響と考えられる。頭部冷却を行う場合には、被験者Aの場合には時刻30~35分の皮膚血流量よりも減少し、被験者Bの場合には増加する。このときの直腸温変動(図7-8a,図7-8b)を比べると、皮膚血流量が減少した被験者Aの場合には0.1ほど一過性に上昇し、皮膚血流量が増加した被験者Bでは単調に減少している。第3章の結論「胸深部温は、基礎代謝による熱発生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流による胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量、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、中央血流溜まりから皮膚への正味の流出熱量が減少し、中央血流溜まり温度は上昇する。中央血流溜まり温度が上昇するため、胸深部からの中央血流溜まりへの正味の流出熱量が減少し、胸深部温は一過性に上昇する。」と矛盾のない実験結果となっている。

実験2の結果(図7-11c~図7-11d)について説明する。時刻35~40分(35の高温環境で運動した後29の低温室に椅座安静で滞在する時間帯)における皮膚血流量と時刻30~35分の皮膚血流量を比較すると、局所冷却を行わない場合には両被験者の皮膚血流量は減少する。頭部冷却を行う場合には、被験者Aでは時刻35~40分における皮膚血流量は前時刻よりも増加し、被験者Bの場合には減少する。このときの直腸温変動(図7-8c,図7-8d)変動を比較すると、皮膚血流量が増加した被験者Aの場合には一過性に上昇せず同じ温度のままであり、皮膚血流量が減少した被験者Bでは0.2程度の一過性上昇が生じている。上述の深部温変動のメカニズムに関する知見と矛盾しない実験結果になっている。

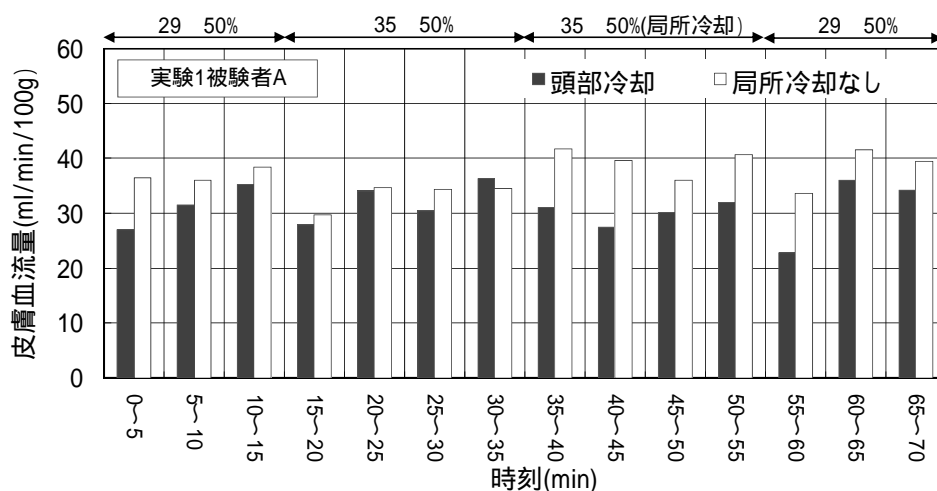


図7-11a 左中指の皮膚血流量変動(実験1被験者A)

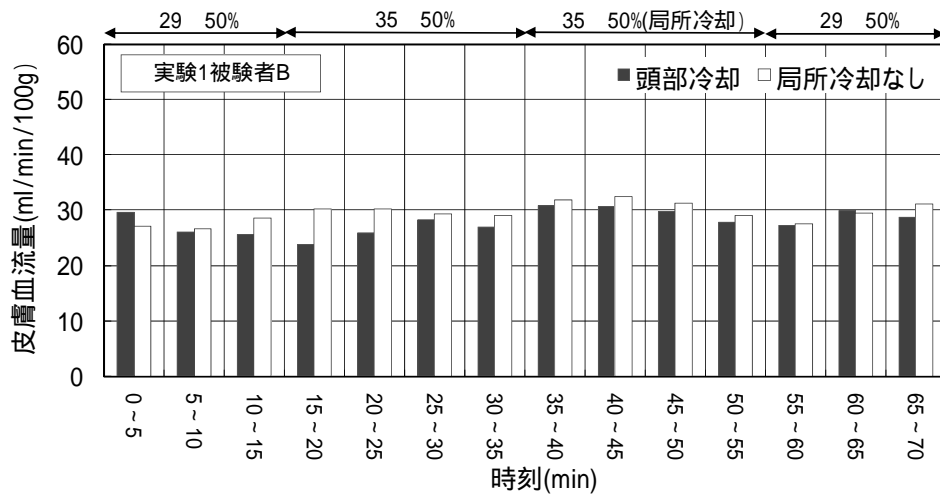


図 7-11b 左中指の皮膚血流量変動 (実験 1 被験者 B)

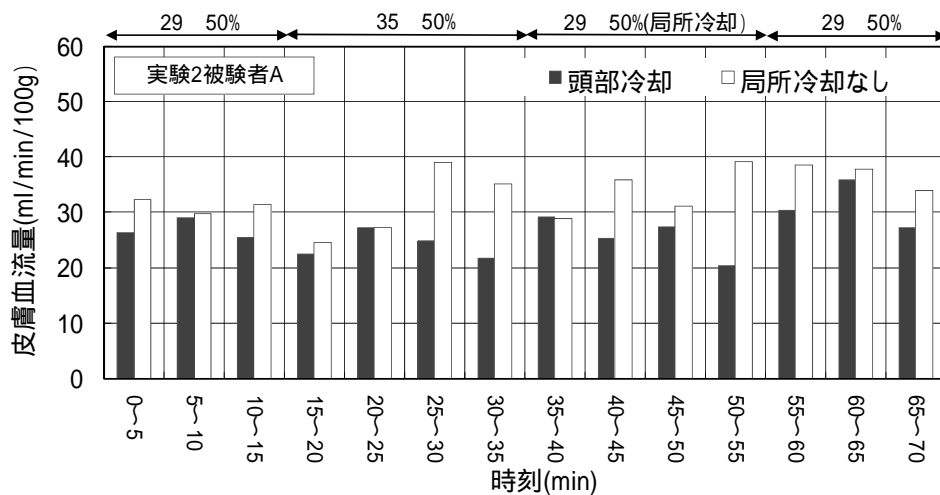


図 7-11c 左中指の皮膚血流量変動 (実験 2 被験者 A)

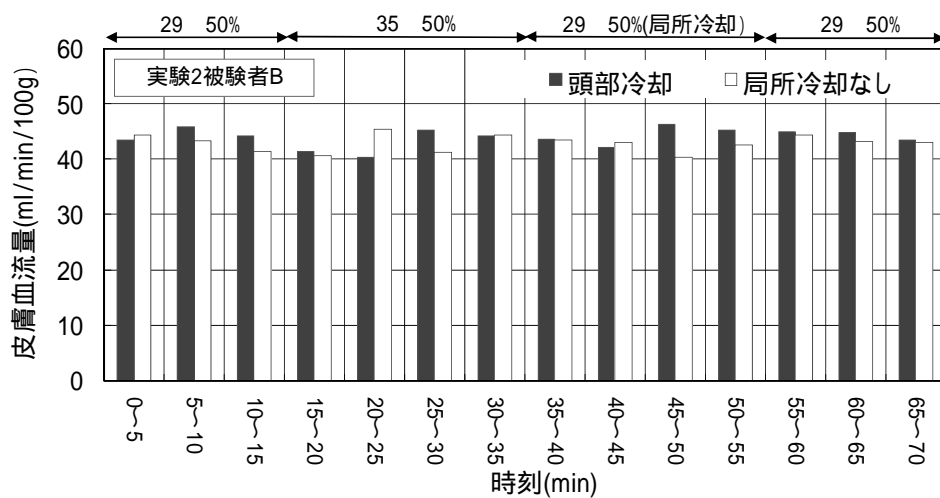


図 7-11d 左中指の皮膚血流量変動 (実験 2 被験者 B)

7.4.4 平均皮膚温変動

局所冷却を行う 35 から 55 分までの変動性状について説明する。

図 7-12a, 図 7-12b に、実験 1 の場合の平均皮膚温を示す。頭部冷却を行う実験 1a の場合には、被験者 A では冷却開始とともに緩やかに低下し、頭部冷却中の 20 分間で 0.6 低下する。被験者 B では冷却開始後いったん急激に低下した後、徐々に上昇していく。頭部冷却中の 20 分間で 0.4 低下する。両被験者の場合ともに頭部を冷却した場合には平均皮膚温は低下する。局所冷却を行わない実験 1b の場合には、被験者 A と B の両方の場合ともに、運動を終了した後時刻 35 から 45 分までの 10 分間に平均皮膚温は緩やかに上昇し、その後はほぼ一定の温度で安定する。

図 7-12c, 図 7-12d に、実験 2 の場合の平均皮膚温を示す。被験者 A の結果については、データにばらつきが大きかったため 1 分間ごとの平均値を示す。被験者 A の場合、運動を終了し 29 の室に移動すると、実験 2a と 2b のどちらの場合も平均皮膚温はいったん低下した後上昇に転じるが、頭部冷却の有無による平均皮膚温の差は少ない。被験者 B の場合にも、運動を終了し 29 の室に移動すると、実験 2a と 2b のどちらの場合も平均皮膚温はいったん低下した後上昇に転じるが、頭部冷却を行う場合には、局所冷却を行わない場合よりも平均皮膚温は低く、低下幅も大きくなる。4 ケースの実験のうち 3 ケース（実験 1 の被験者 A と B、実験 2 の被験者 B）の実験において、頭部を冷却した場合には局所冷却を行わない場合に比べて、平均皮膚温の低下率は大きい結果が得られた。

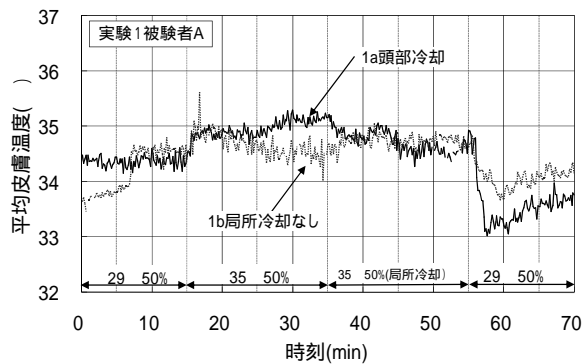


図 7 - 12a 平均皮膚温変動 (実験 1 被験者 A)

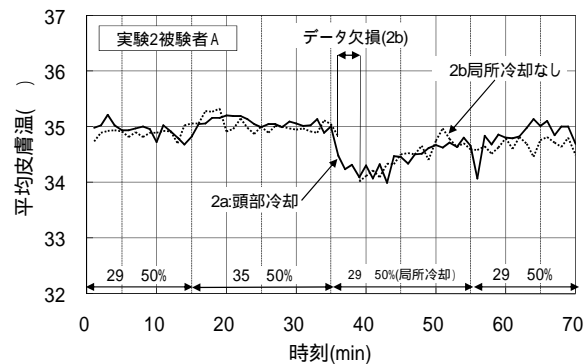


図 7 - 12c 平均皮膚温変動 (実験 2 被験者 A)

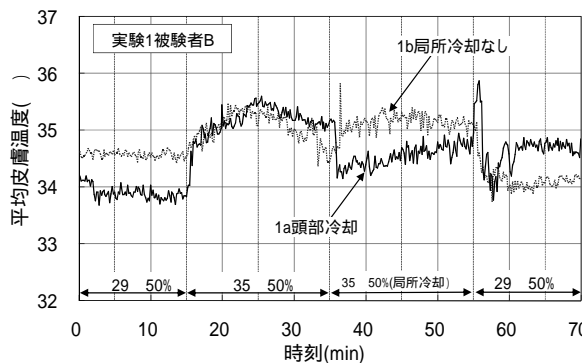


図 7 - 12b 平均皮膚温変動 (実験 1 被験者 B)

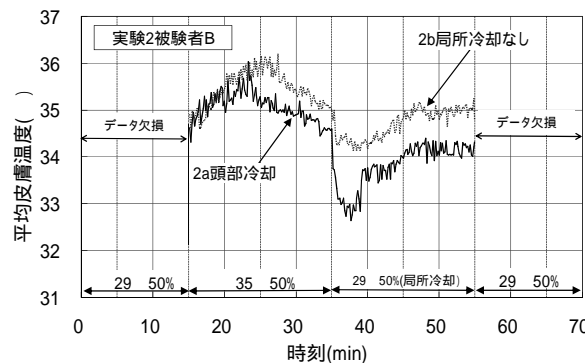


図 7 - 12d 平均皮膚温変動 (実験 2 被験者 B)

7.4.5 頭部皮膚温変動

図 7-13a、図 7-13b に実験 1 における頭部皮膚温を示す。実験 1 では前額皮膚、実験 2 では頬皮膚のデータのばらつきが大きかったため、実験 1 では頬皮膚温を実験 2 では前額皮膚温について結果を示す。被験者 A と B とともに、頭部冷却を開始すると頭部皮膚温は低下し、冷却を止めると上昇する。被験者 A の場合には冷風温変動の影響を受けるため単調な変化ではないが、全体的な変化性状としては、冷却開始後に 36 から 27 まで 9 低下し、頭部冷却を止め 29 の室に移動すると 32 まで 5 も上昇する。被験者 B では頭部冷却開始後急激に 26 程度まで低下し、頭部冷却中はばらつきがあるもののほぼ 26 の温度になる。局所冷却を行わない場合は温度変化はほとんどない。

図 7-13c、図 7-13d に実験 2 の場合の頭部皮膚温を示す。実験 1 では頬皮膚温、実験 2 では前額皮膚温を示す。被験者 A と B とともに、35 の高温環境で運動を終了し 29 の室に移動して頭部冷却を開始すると前額皮膚温は単調に低下し、冷却を止めると上昇する。時刻 35 から 55 分の 20 分の間に、被験者 A では 35 から 29 に、被験者 B では 36 から 30 まで、いずれの場合も約 6 低下する。29 の低温室に移動して局所冷却を行わないケース 2b の場合には、各ケースとも約 1 から 1.5 低下する。

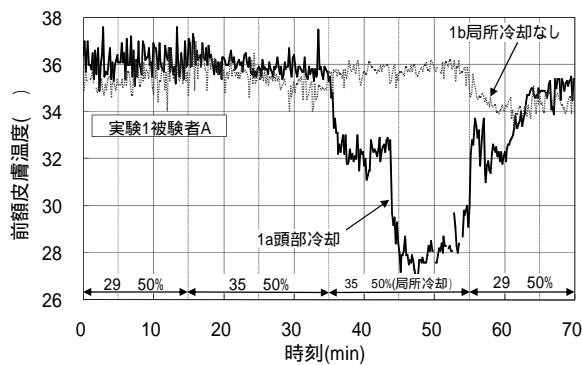


図 7-13a 前額皮膚温変動 (実験 1 被験者 A)

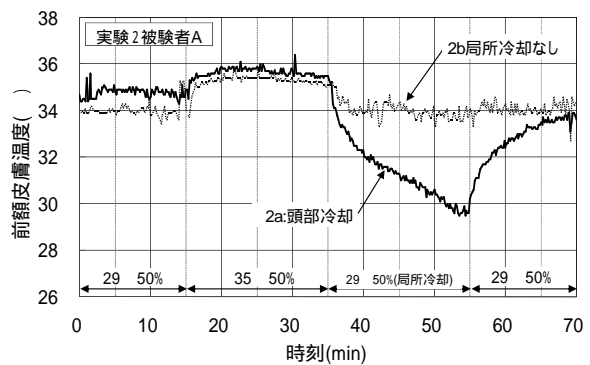


図 7-13c 頬皮膚温変動 (実験 2 被験者 A)

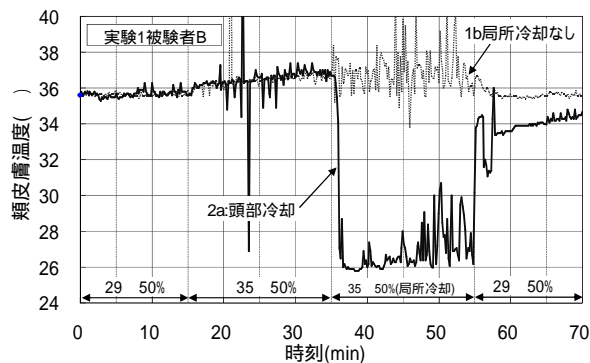


図 7-13b 頬皮膚温変動 (実験 1 被験者 B)

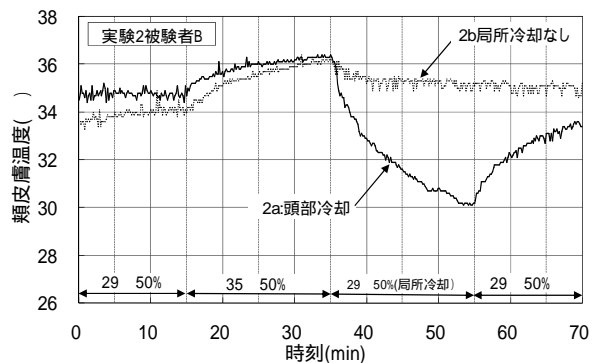


図 7-13d 前額皮膚温変動 (実験 2 被験者 B)

7.4.6 その他部位の皮膚温変動

図 7-14a ~ 図 7-17d に、腹部皮膚、大腿皮膚、手背皮膚及び足甲皮膚の温度変動を示す。図 7-14、図 7-15 に実験 1 の被験者 A 及び被験者 B の結果を、図 7-16、図 7-17 に実験 2 の被験者 A 及び被験者 B の結果を示す。35 の高温環境で運動を終了した時刻 35 分以降の結果について説明する。

(1) 実験 1 の結果

被験者 A 及び B の場合ともに、冷却部位(頭部または足部)以外の皮膚温は、運動終了後に上昇するか、ほとんど温度が変化しないかのどちらかの変動性状を示す。特に手背皮膚の温度上昇が大きく、時刻 35 から 55 分までの 20 分間に被験者 A では 1.0、被験者 B では頭部冷却の場合に 1.5、局所冷却がない場合に 1.0 上昇する。被験者 B の腹皮膚、大腿皮膚、手背皮膚については、頭部冷却を行った方が局所冷却を行わない場合よりも 20 分間で上昇する温度幅は大きい。

(2) 実験 2 の結果

被験者 A の場合には、足部以外の皮膚温は、運動終了後に上昇する。被験者 B で頭部を冷却する場合には、手背では冷却中に上昇するがその他の部位では低下する。

7.4.7 深部温変動などに関する考察

既往の研究における被験者実験では、冷却しない場合と頭部冷却の場合を比較すると、鼓膜温¹⁻⁵⁷⁾¹⁻⁵⁸⁾⁷⁻¹⁾(外耳道温¹⁻⁶⁹⁾、直腸温¹⁻⁶⁸⁾⁷⁻²⁾、食道温¹⁻⁵⁷⁾が低くなることが確認されている。今回の実験においても、実験 1 の被験者 B、実験 2 の被験者 A において、鼓膜温と直腸温はともに冷却しない場合と比べて頭部冷却の場合に低くなっており、既往の研究成果と同様の結果となっている。これらの結果から、頭部冷却を行った場合には、冷却を行わなかった場合に比べて鼓膜および直腸温などの深部温は低くなるかあるいは一過性の上昇幅が小さくなり、深部温の低下に寄与する方向に作用すると考えられる。

平均皮膚温については、冷却しない場合よりも頭部冷却の場合に低くなるという結果¹⁻⁶⁹⁾⁷⁻¹⁾が確認されている一方で、あまり差がない¹⁻⁷⁰⁾という報告もある。今回の実験結果では、4 ケースの実験のうち 3 ケースで頭部冷却の場合に低くなるという結果が得られた。

非冷却部位の皮膚温については、頭部を冷却した場合に冷却しない場合よりもむしろ高くなるという結果¹⁻⁵⁵⁾¹⁻⁶⁸⁾⁷⁻¹⁾⁷⁻²⁾⁷⁻³⁾が報告されている。森¹⁻⁵⁵⁾らは、被験者実験と人体熱モデルを用いた解析を行い、頭部を冷却した場合には足部を冷却した場合あるいは冷却を行わなかった場合に比べて、発汗量の減少により放熱量が少なくなるため非冷却部位の皮膚温が高くなることを示している。今回の実験結果においては、実験 1 被験者 B(図 7-15a, 15b, 15c)において同様の傾向がみられるが、他の部位(図 7-14a, 14c, 16a, 16b, 16d, 17a, 17b)においては局所冷却なしの場合と顕著な差はみられない。森らの実験条件とは異なり、多量の汗を皮膚に蓄積した状況で頭部の冷却を開始するため、皮膚温に及ぼす発汗量減少の影響があまり大きくないためである可能性がある。

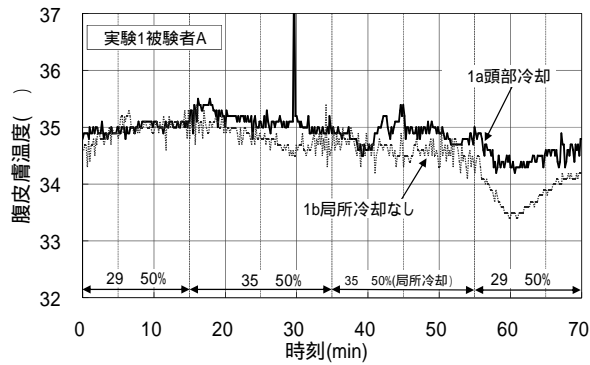


図 7-14a 腹皮膚温 (実験 1 被験者 A)

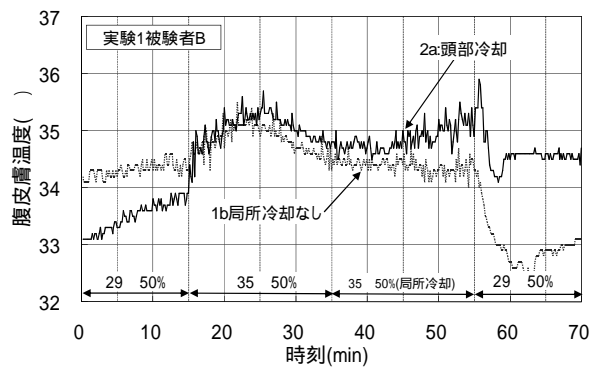


図 7-15a 腹皮膚温 (実験 1 被験者 B)

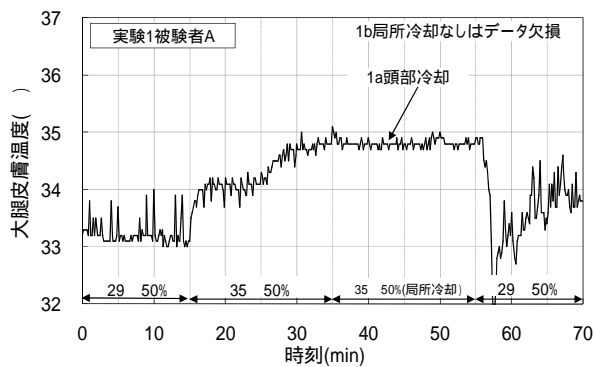


図 7-14b 大腿皮膚温 (実験 1 被験者 A)

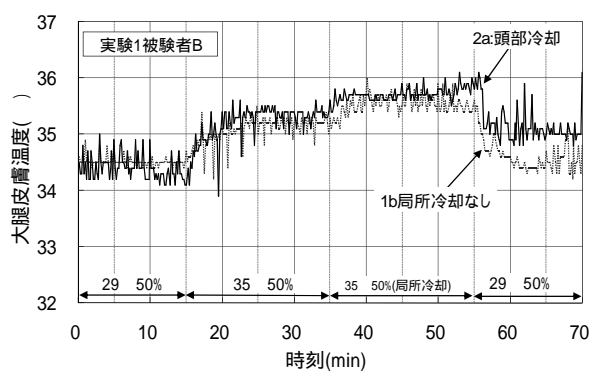


図 7-15b 大腿皮膚温 (実験 1 被験者 B)

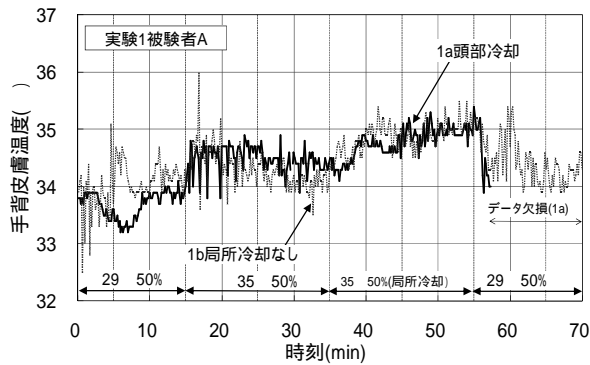


図 7-14c 手背皮膚温 (実験 1 被験者 A)

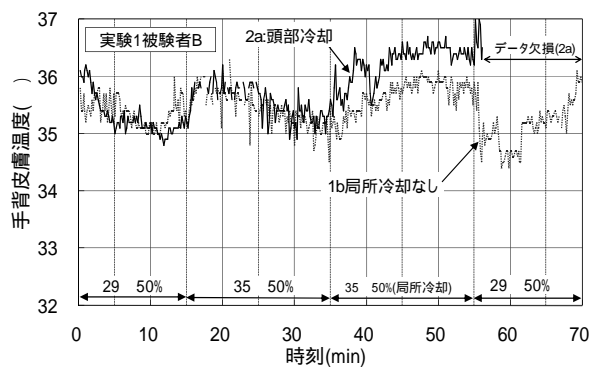


図 7-15c 手背皮膚温 (実験 1 被験者 B)

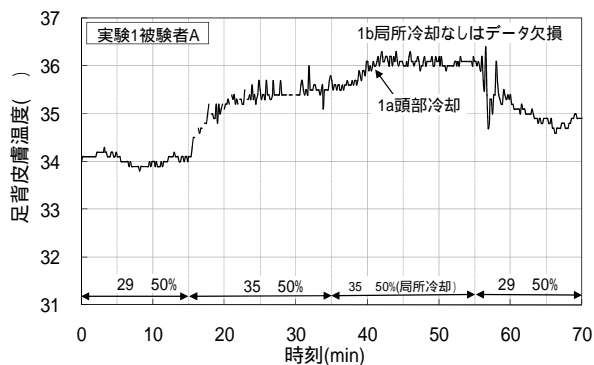


図 7-14d 足甲皮膚温 (実験 1 被験者 A)

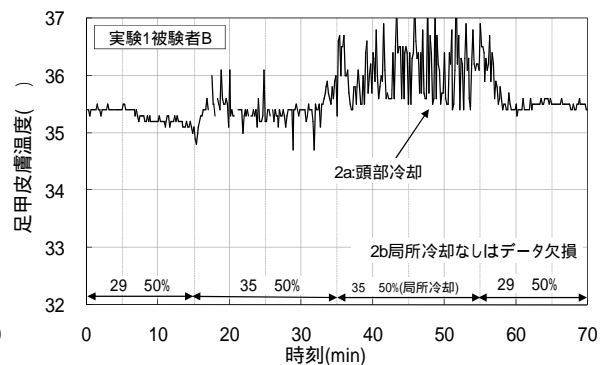


図 7-15d 足甲皮膚温 (実験 1 被験者 B)

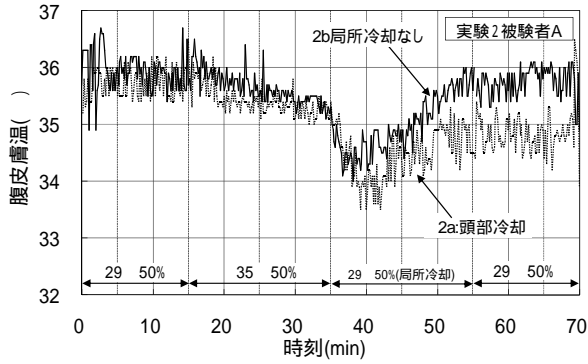


図 7-16a 腹皮膚温 (実験 2 被験者 A)

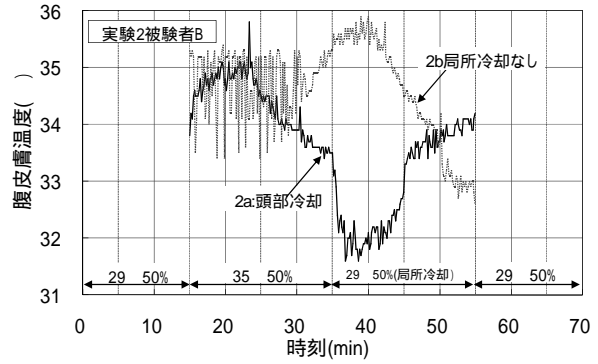


図 7-17a 腹皮膚温 (実験 2 被験者 B)

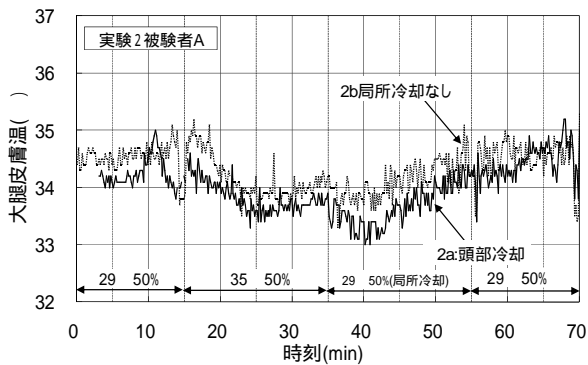


図 7-16b 大腿皮膚温 (実験 2 被験者 A)

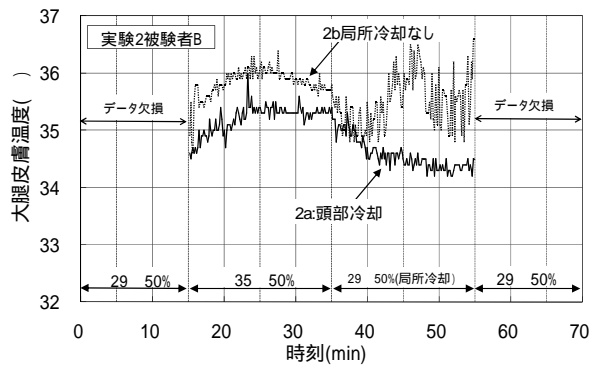


図 7-17b 大腿皮膚温 (実験 2 被験者 B)

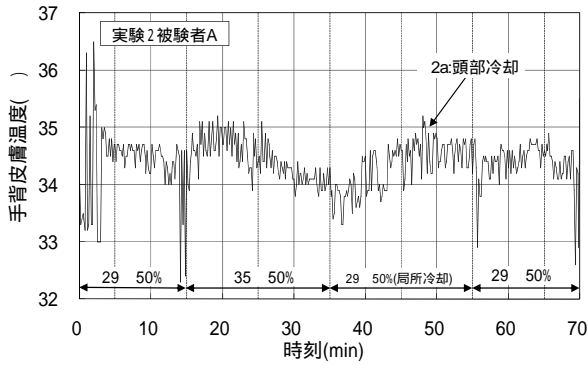


図 7-16c 手背皮膚温 (実験 2 被験者 A)

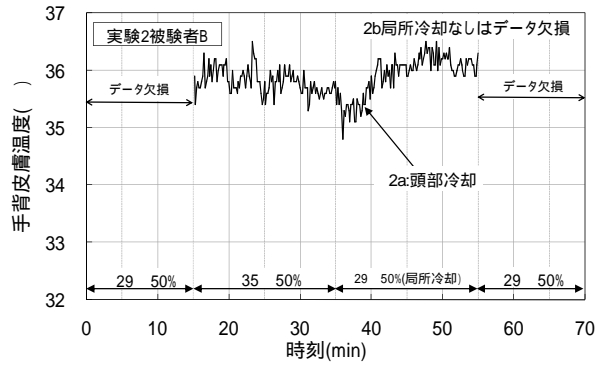


図 7-17c 手背皮膚温 (実験 2 被験者 B)

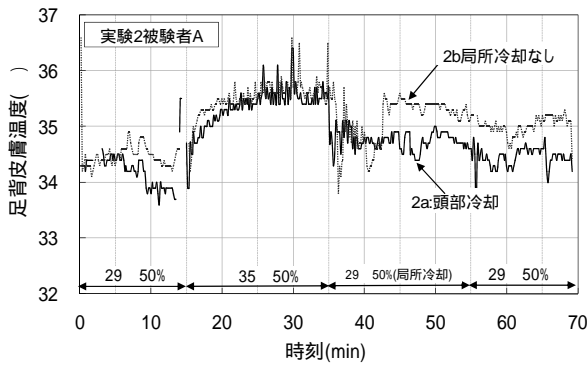


図 7-16d 足甲皮膚温 (実験 2 被験者 A)

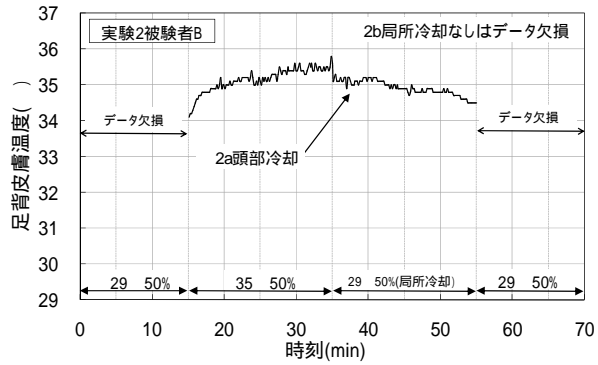


図 7-17d 快適感申告値 (実験 2 被験者 B)

7.5 心理応答に関する実験結果と考察

ここでは、頭部冷却が温冷感申告に与える影響について説明する。頭部冷却の有無による温冷感申告の違いだけでなく、温冷感覚の感受性の部位による差を確認するため、頭部冷却と足部冷却を比較した結果も説明する。

7.5.1 温冷感申告値

(1) 実験1の全身温冷感申告値について

被験者A(図7-18a)については、時刻35から55分における温冷感申告値は頭部冷却、足部冷却、局所冷却なしの順に小さい。頭部冷却を行うケース1aの場合、冷却開始2分後に-3(非常に寒い)まで小さくなり、43分にいったん-2.6まで上昇後再度低下し、頭部冷却中は-2.8~-3.0でほぼ一定となる。頭部冷却を止め、29の室に移動すると申告値は急激に大きくなり、入室5分後以降はほぼ0(中立)になる。足部冷却を行うケース1cの場合、冷却開始後、徐々に小さくなり入室10分後に0(中立)になる。29の室に移動後は、-0.2までわずかに低下するのみでほとんど変化しない。

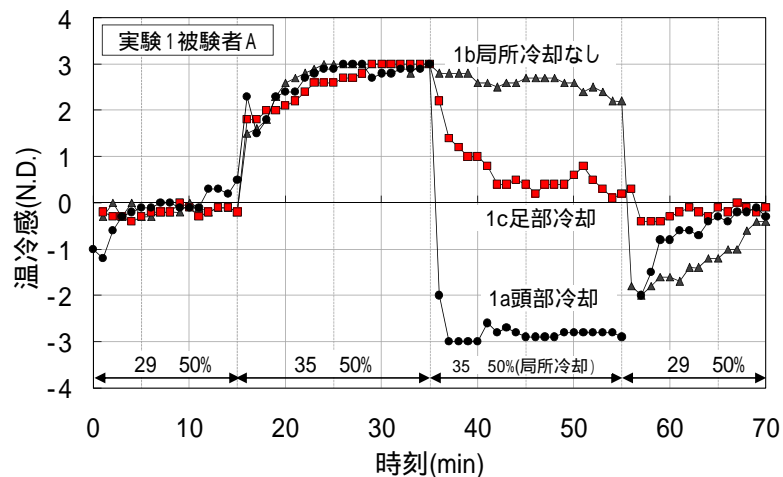


図 7-18a 全身温冷感申告値 (実験1 被験者 A)

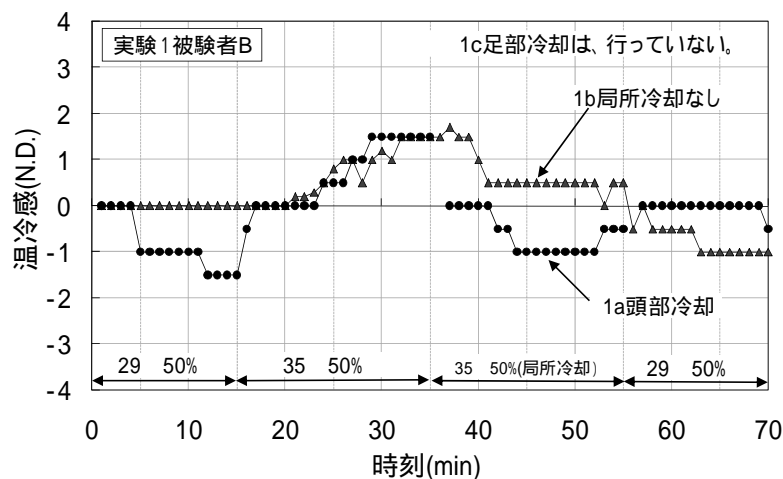


図 7-18b 全身温冷感申告値 (実験1 被験者 B)

足部冷却の場合に比べて、頭部冷却の場合には冷風温度も高く冷却面積も 1/3 以下であるにもかかわらず、小さい(寒い側の)温冷感申告値になる。被験者 B (図 7-18b) についても、頭部冷却の場合には、局所冷却を行わない場合に比べて、局所冷却中の温冷感申告値は小さくなる。

(2) 実験 2 の全身温冷感申告値について

被験者 A (図 7-18c) の場合には、35 の高温環境で運動を終了し 29 の低温室に移動すると、全てのケースで温冷感申告値は寒い側に変化し申告値は小さくなる。実験 1 の場合と同様に、温冷感申告値は頭部冷却、足部冷却、局所冷却なしの順に小さい値となる。被験者 B (図 7-18d) の場合には、時刻 35 ~ 55 分における温冷感申告値は、頭部冷却の場合に最も小さく -1 から -2 となり、足部冷却と局所冷却なしの場合は 0 (中立) になる。実験 1 と同様に実験 2 の場合も、頭部を冷却した場合には、局所冷却を行わないあるいは足部を冷却するよりも小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値になる。

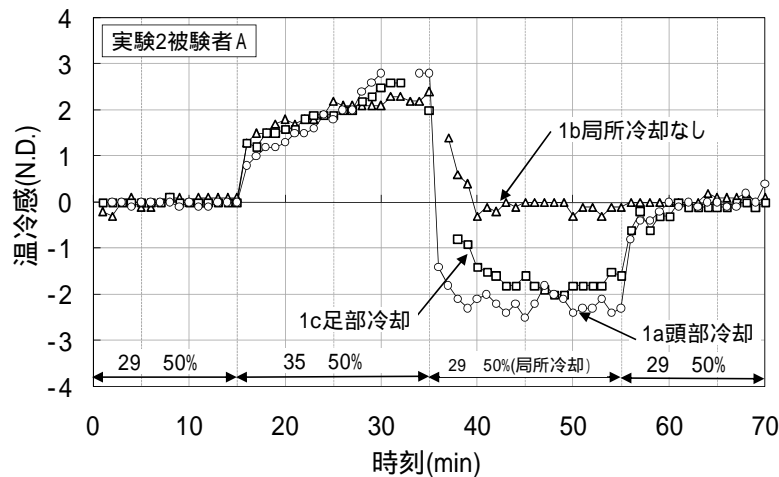


図 7-18c 全身温冷感申告値 (実験 2 被験者 A)

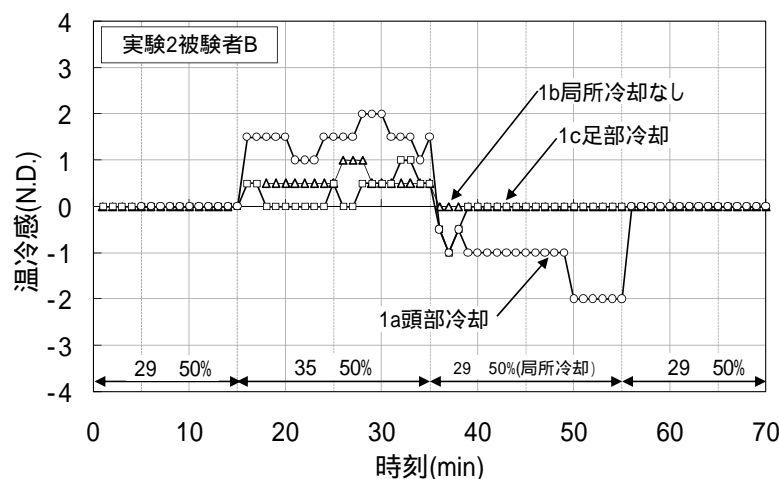


図 7-18d 全身温冷感申告値 (実験 2 被験者 B)

7.5.2 温冷感申告値に関する考察

被験者実験の結果をもとに、温冷感申告値と頭部皮膚温の関係について考察する。

(1) 被験者 A について

実験 1 と実験 2 のどちらの場合においても、前額皮膚温 (図 7-13a、図 7-13c) は、時刻 35 分に頭部冷却を開始すると急激に低下し、時刻 55 分に冷却を止めると上昇するといった変動を示すが、これは全身温冷感申告値 (図 7-18a、図 7-18c) と同じ変化性状である。

実験 1 については、腹、大腿 (図 7-14a、図 7-14b) は頭部冷却を開始してもほとんど変化せず、手背、足背 (図 7-14c、図 7-14d) は頭部冷却を開始すると上昇する。脛と背で 0.5 程度低下する (図省略) が、それ以外の部位では上昇するかほとんど変化しないかのどちらかであり、全身温冷感申告値の変動と同様の変動をするのは前額、脛、背だけである。また、時刻 55 分に 29 の室に入室すると全身温冷感値は -2.5 から 0 まで大きくなる。このとき、前額温は上昇するが、前額以外の全ての部位で皮膚温は低下する。これらの結果から、全身温冷感に及ぼす頭部皮膚温の寄与は大きいと考えられる。

実験 2 については、時刻 55 分に頭部冷却をやめると、全身温冷感申告値は -2.0 から 0 まで大きくなる。このとき、頬皮膚温は 20 分間で 4 上昇する (図 7-13c) が、腹、手背、足背の皮膚温 (図 7-16a、7-16c、7-16d) はほとんど変化せず、大腿 (図 7-16b) では 20 分間で 1 上昇する程度である。実験 2 においても全身温冷感に及ぼす頭部皮膚温の寄与は大きいと考えられる。

(2) 被験者 B について

被験者 A 同様に、実験 1 と実験 2 のどちらの場合においても、時刻 35 分に頭部冷却を開始すると、頬皮膚温 (図 7-13b、図 7-13d) は急激に低下し、時刻 55 分に冷却を止めると上昇するといった変動を示すが、これは全身温冷感申告値 (図 7-18b、図 7-18d) と同じ変化性状である。

実験 1 では、頭部冷却開始後に皮膚温が下がるのは頬皮膚のみであり他の全ての部位で皮膚温は上昇する。また、時刻 55 分に 29 の室に入室すると全身温冷感値は -0.5 から 0 まで大きくなるが、このとき、皮膚温が上昇するのは頬温のみである。これらの結果から、全身温冷感に及ぼす頭部皮膚温の寄与は大きいと考えられる。実験 2 においても頬皮膚温と全身温冷感申告値は同様の変動を示す。

7.6 7章のまとめ

本章では、深部温を速やかに低下させ、同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として、頭部冷却に着目し、被験者実験により頭部冷却時の深部温を主とする生理量変動の特性把握と、全身温冷感申告値の変化性状に関する検討を行った。被験者2名を対象に、35℃の高温環境で運動して冷房室へ移動した後に、頭部冷却および足部冷却を行う実験を行い、その際の全身温冷感申告値と深部温変動などを検討した。

(1) 生理量変動について

- ・頭部を冷却する場合には、局所冷却を行わない場合よりも、鼓膜温および直腸温は低下するかあるいは一過性の上昇幅が小さくなる。
- ・平均皮膚温については、頭部を冷却する場合に4ケースの実験のうち3ケースで平均皮膚温が低くなる結果が得られた。

(2) 全身温冷感申告値について

- ・頭部を冷却する場合には、局所冷却を行わない場合よりも、小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値が得られる。また、同一の冷風条件で局所冷却を行った場合には、足部を冷却するより頭部を冷却した方が、小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値が得られる。

(3) 上記2つの結果より、冷感受性の高い頭部を優先して冷却することにより、設定室温を高温に保った場合でも快適性を確保でき、かつ深部温の低下する時間を短くできる。

深部温を速やかに低下させる冷房環境の制御方法として、屋外から冷房空間へ入室後しばらくの間は、設定室温を高温に保つことで深部から皮膚血流を介した放熱を促進させ、頭部冷却により温冷感を確保するといった、深部温と温冷感の両者を最適に制御する冷房方式の可能性を示した。今後様々な条件に対しその適用可能性を検討する必要がある。

7.A Appendix 局所冷却時のダクト内環境

図7-19にダクト内空気温度を、図7-20にダクト内の空気相対湿度を、図7-21にダクト内風速を示す。被験者Aの実験1aの場合を除き、表3に示す条件をほぼ満足できている。

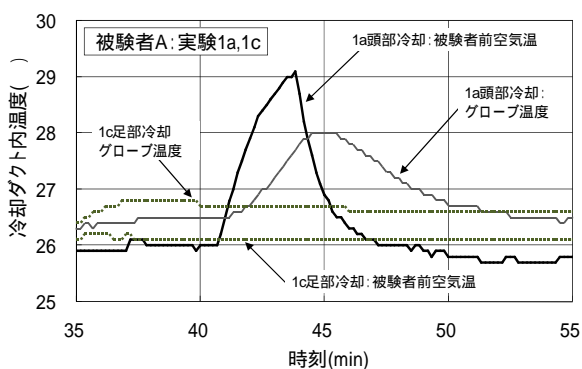


図7-19a ダクト内空気温度(実験1被験者A)

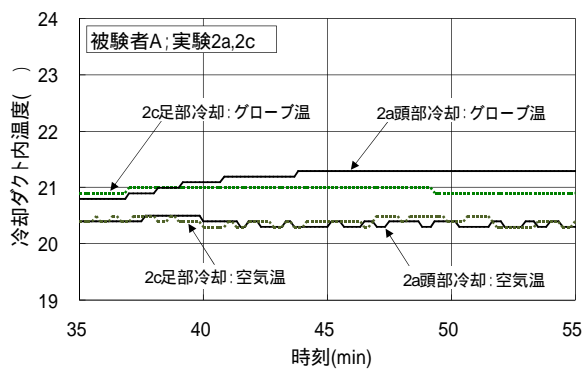


図7-19c ダクト内空気温度(実験2被験者A)

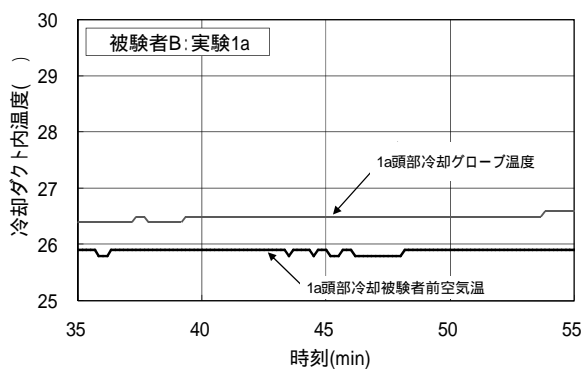


図7-19b ダクト内空気温度(実験1被験者B)

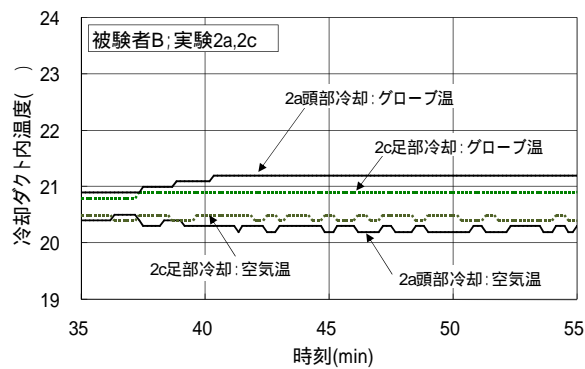


図7-19d ダクト内空気温度(実験2被験者B)

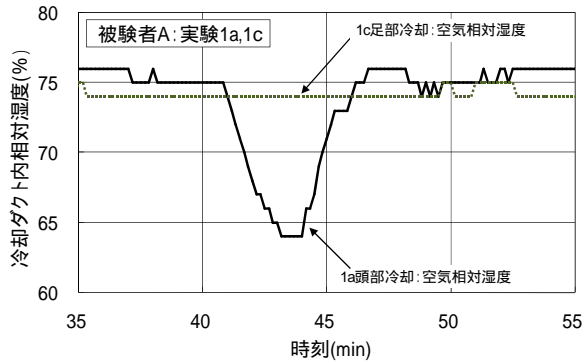


図7-20a 空気相対湿度 (実験1被験者A)

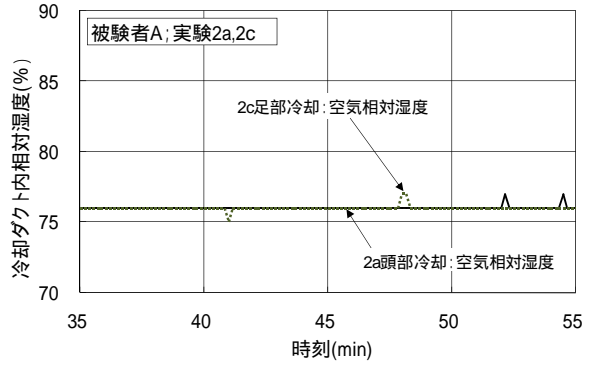


図7-20c 空気相対湿度(実験2被験者A)

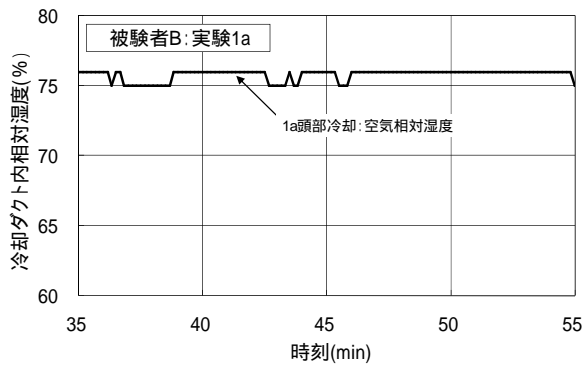


図 7-20b 空気相対湿度(実験 1 被験者 B)

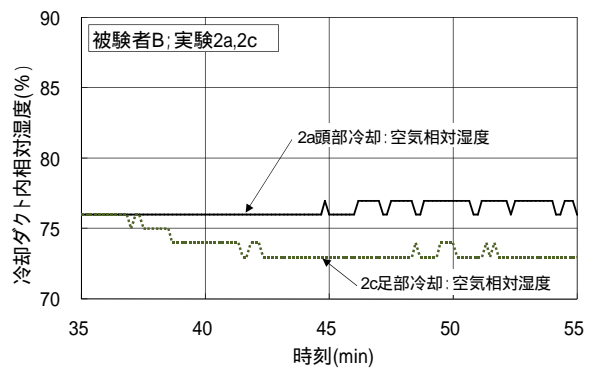


図 7-20d 空気相対湿度(実験 2 被験者 B)

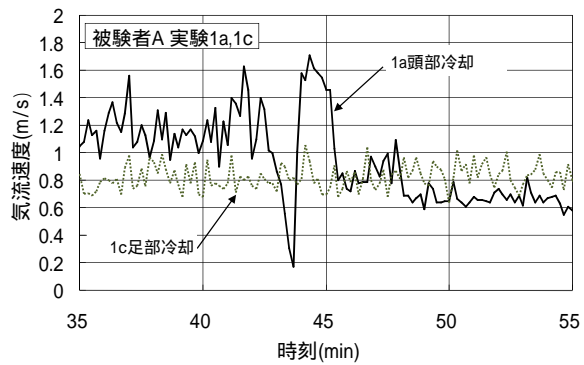


図7-21a ダクト内風速(実験1被験者A)

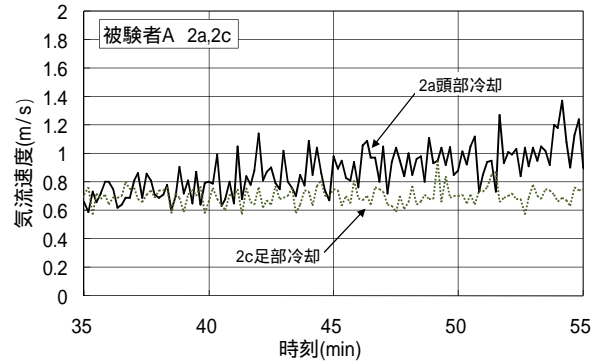


図7-21c ダクト内風速(実験2被験者A)

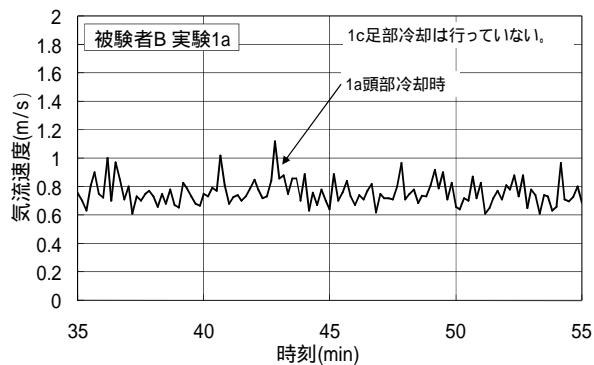


図 7-21b ダクト内風速(実験 1 被験者 B)

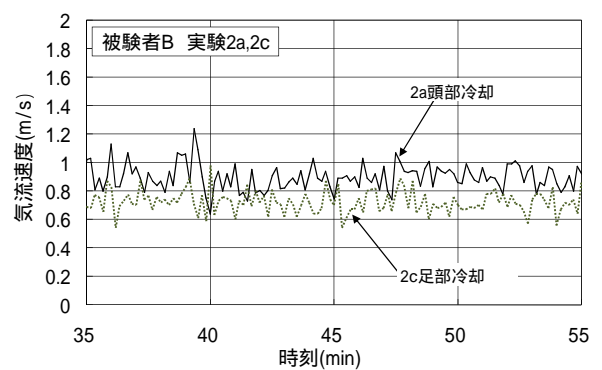


図 7-21d ダクト内風速(実験 2 被験者 B)

第 8 章 結論

本論文では、非定常状態における生理・心理の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制御方法に関する検討を行った。

第 1 章では、高温環境から冷房空間へ移動した場合の人体生理および心理の非定常応答に関するこれまでの研究のレビューを行ない、本研究の目的と構成を説明した。

第 1 部では、深部温が一過性に変動するメカニズムを明らかにするために、被験者実験と人体熱モデルを用いた解析により検討を行った。

第 2 章では、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する被験者実験を行い、その際の深部温の一過性変動について検討した。冷房室の温度条件が異なる 2 ケースの被験者実験を行い、深部温を含む生理応答に関する以下の結論を得た。

- (1) 29 50% の中立環境に 30 分間椅座安静で滞在し、35 50% の高温環境へ移動後運動を始めると直腸温は一過性に低下する。このとき、全ての部位で皮膚温は上昇し、心拍数が急激に増加することを実験により示した。
- (2) 35 50% の高温環境で運動をした後、より低温の 26 50% の室に移動して椅座安静で在室する場合の方が、運動停止後も同じ 35 50% の高温環境下に椅座安静で在室する場合よりも、直腸の一過性の温度上昇幅が大きいことを示した。これは冷房により予想される温度変化とは逆方向の変化である。また、26 50% の室に移動して椅座安静で在室する場合の方が、心拍数の減少と皮膚温の低下幅は大きいことを示した。

第 3 章では、深部温が一過性に変動するメカニズムについて、人体熱モデルを用いた解析結果をもとに考察を行い、以下のことを明らかにした。

- (1) 高温室に移動し運動を開始した直後に生じる深部温の一過性低下に及ぼす血流量変動の影響を検討し、以下の知見を得た。
「 胸深部温は、基礎代謝による熱産生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流による胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量、の 3 つの熱量の収支により決まる。高温環境に移動し運動を開始すると、筋と皮膚の血流量が増加することで中央血流溜まりから筋と皮膚への正味の流出熱量が増加し、中央血流溜まり温度は低下する。中央血流溜まり温度が低下するため、胸深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量が増加し、胸深部温は一過性に低下する。」
- (2) 高温環境で運動後、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検討し、以下の知見を得た。
「 胸深部温は、基礎代謝による熱産生量、胸深部から胸筋への熱伝導による流出熱量、血流

による胴深部から中央血流溜まりへの正味の流出熱量、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、中央血流溜まりから皮膚への正味の流出熱量が減少し、中央血流溜まり温度は上昇する。中央血流溜まり温度が上昇するため、胴深部からの中央血流溜まりへの正味の流出熱量が減少し、胴深部温は一過性に上昇する。」

- (3) 深部温の一過性上昇に影響を及ぼす要因として、皮膚及び筋血流量の急激な変動、運動に伴う筋血流量の非定常変動(時間遅れ)、運動に伴う熱産生量の非定常変動(時間遅れ)が関係することを解析により明らかにした。一過性の上昇に及ぼす各要因の寄与率に関する検討を行い、の影響度が70%、の影響度が17%、の影響度が13%であり、の皮膚及び筋血流量の急激な変動の影響が大きいことを明らかにした。

第2部では、深部温変動に及ぼす代謝量と着衣量の影響を被験者実験と人体熱モデルによる解析により検討した。代謝量、着衣量の異なる状況を模擬した被験者実験を行い、深部温の変動特性を把握するとともに、提案した解析モデルの再現精度を検証した。

第4章では、高温環境で発汗し着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房空間へ入室する場合を想定した被験者実験を行い、高温環境で6metの踏み台昇降運動を行い550gの汗をかく場合と、高温環境で椅座安静で滞在し150g程度の汗をかく場合との比較検討を行なった。

- (1) 深部温変動については、椅座安静で滞在する場合には、高温室、冷房室ともに直腸温の変化は少ないが、高温室で6metの踏み台昇降運動を30分間行なった後26の冷房室へ移動する場合には以下の変動を示す。

- ・運動により30分間で深部温は1.6 上昇する。
 - ・冷房室入室後に0.3 の一過性上昇を示し、冷房室入室時の温度に戻るのに30分かかる。
 - ・1時間後でも運動開始前の温度より0.6 高く、冷房室では1時間に亘り高温状態が続く。
- 以上より、着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房室に入室後、汗の蒸発により皮膚温が低下した影響で皮膚血流量が減少し、血流による深部から皮膚への正味の流出熱量が減少するため、深部温が低下するのに時間を要するという生理現象が生じていると考えられる。

- (2) 踏み台昇降運動を終了し冷房室に入室した後の皮膚温変動の特徴を以下に示す。

- ・汗を多量に含んだTシャツ及びカットシャツに面する胴皮膚では温度の低下が1時間続き、運動を開始する前の皮膚温と比べて約3 も皮膚温は低下する。
- ・大腿皮膚温と脛皮膚温の低下は遅く、1時間後でも運動開始前の皮膚温よりも約1 温度が高い。
- ・足甲の温度は測定部位中最も高い。靴により汗の蒸発が制限されることが理由であると考えられる。
- ・前腕及び手背では、冷房開始後に皮膚温が一時的に上昇する。

- (3) 高温室では、汗の水分吸着の影響により着衣温度は一時的に上昇し、極大値を示す。冷房室では、汗の付着が少ない部位の着衣温度は冷房室入室後に急激に低下した後、すぐに定常値

に達しそれ以上低下しないが、汗を多量に含んだ着衣の温度は 1 時間以上にわたり低下を続ける。

- (4) 体重減少量が 550g にも達するような多量の汗をかく実験においては、皮膚 T シャツ間の空気相対湿度は冷房室入室後も 1 時間にわたり飽和に近い状態が続く。

第 5 章では、高温環境から冷房空間へ移動する場合の深部温変動を予測するための解析モデルを提案し、第 4 章で示した被験者実験の結果と計算値とを比較することで、解析モデルの精度を検討した。解析モデルには、人体熱モデルとして Stolwijk モデルを多質点化したモデルを、着衣には熱水分同時移動方程式を用いた。

- (1) 提案した解析モデルにより被験者実験の結果を概ね再現できた。特に、深部温、胴部皮膚温、着衣温については、実験値と解析値は良く一致した。ここで示した解析法により、高温環境や冷房空間における人体生理応答の予測を行うことができる。
- (2) 解析では、高温環境で運動を終え冷房室に入室した後に前腕皮膚温と手背皮膚温が一時的に上昇するという実験結果を再現できていない。運動終了後の血流変動に関わるモデル化の検討が必要である。

第 3 部では、深部温を評価指標とする冷房環境制御手法に関する検討を行った。

第 6 章では、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ことのできる室温の決定方法を提案した。

- (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を評価指標とする最適室温を求める方法を提案した。
- (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、書記は室温を高く保ち、ある時点から低くするといった室温制御が有効である。

「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、血流による深部から皮膚への放熱を促すことで深部温を低下させる。15 分以降は設定室温を低くし、胴深部から筋及び皮膚への熱伝導による流出熱量を増加させることで、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。今後、深部温と温冷感の両方を考慮した多目的評価を行なう必要がある。

第 7 章では、深部温を速やかに低下させ、同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として、頭部冷却に着目し、被験者実験により頭部冷却時の温冷感申告値および深部温変動に関する検討を行った。被験者 2 名を対象に、35 の高温環境で運動後冷房室へ移動した際の全身温冷感申告値と生理応答について、頭部を冷却する場合、足部を冷却する場合、局所冷却をしない場

合の3ケースの実験を行った。結論を以下に示す。

(1) 生理量変動について

- ・頭部を冷却する場合には、局所冷却を行わない場合よりも、鼓膜温および直腸温は低下するかあるいは一過性の上昇幅が小さくなる。
- ・平均皮膚温については、頭部を冷却した場合に4ケースの実験のうち3ケースで平均皮膚温が低くなる結果が得られた。

(2) 全身温冷感申告値について

頭部を冷却する場合には、局所冷却を行わない場合よりも、小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値になる。また、同一の冷風条件で局所冷却を行った場合には、足部を冷却する場合より、頭部を冷却した方が、小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値が得られた。

- (3) 上記2つの結果より、冷感受性の高い頭部を優先して冷却することにより、設定室温を高温に保った場合でも快適性を確保でき、かつ深部温低下に要する時間を短くできる可能性がある。今後様々な条件に対し、その適用可能性を検討する必要がある。

引用文献

1章の引用文献

1.2.1 章の引用文献

- 1-1) A. R. Behnke AND C. P. Yaglou, : Physiological Responses of Men to Chilling in Ice Water and to Slow and Fast Rewarming., Journal of Applied Physiology, 591-602,1950.
- 1-2) G. K. Savard, K. E. Cooper, W. L. Veale and T. J. Malkinson, Peripheral blood flow during rewarming from mild hypothermia in humans, the americal physiological society, Vol.38,1,4-13,1985.
- 1-3) Aschoff J, :Wärme haus halt In Lehrfuch des Plujsiologie des Menschen,(Ed.Landois-Rosemann) Munchen-Berlin,p331-369,1960.
- 1-4) 入来正躬：体温生理学テキスト,pp.61-62,文光堂,2003.
- 1-5) 高田、鉾井、原田：気温の変動に対する深部温の過渡応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2,pp.487-488,2003.
- 1-6) J. M. Johnson and L. B. Rowell, Forearm skin and muscle vascular responses to prolonged leg exercise in man., Journal of Applied Physiology, Vol.39,6, pp.920-924,1975.
- 1-7) 宮村実晴編：新運動生理学 下巻,pp.244-250,真興交易医書出版部,2001.
- 1-8) C. B. Wenger, M. F. Roberts, J. A. J. Stolwijk, E. R. Nadel, Forearm blood flow during body temperature transients produced by leg exercise., Journal of Applied Physiology, Vol.38,1,58-63,1975.
- 1-9) 平田耕造、井上芳光、近藤徳彦編：体温 運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因, pp.59,ナッブ,2002.
- 1-10) 宮村実晴編：最新運動生理学,pp.236 ~ 241,真興交易医書出版部,1996.
- 1-11) 高田、鉾井、原田、松井：人体各部位における温度変動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集,D - ,pp.511-512,2004.

1.2.2 章の引用文献

- 1-12) J. A. J. Stolwijk and J. D. Hardy, Temperature Regulation in Man – A Theoretical Study., Pflügers Archiv 291,129-162,1966.
- 1-13) J. A. J. Stolwijk, A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA-Langley, CR-1855,1971.
- 1-14) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk and Y. Nishi, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response., ASHRAE Transactions, Vol.77, 247-262,1971.
- 1-15) B. W. Jones and Y. Ogawa, Transient interaction between the human and the thermal environment., ASHRAE Transactions, Vol.98,1, 189-195,1992.
- 1-16) E. H. Wissler, Steady-state temperature distribution in man, Journal of Applied Physiology, 16,4, 734-740,1961.

- 1-17) E. H. Wissler, A mathematical model of the human thermal system., BULLETIN OF MATHEMATICAL BIOPHYSICS, Vol.26, 147-166,1964.
- 1-18) R. G. Gordon, R. B. Roemer, and S. M. Horvath, A Mathematical Model of the Human Temperature Regulatory System – Temperature Cold Exposure Response., IEEE Transactions on BIOMEDICAL ENGINEERING, Vol. BME-23, No.6, 434-444, 1976.
- 1-19) H. Arkin, and A. Shitzer, A Model of Thermoregulation in the Human Body., THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 84-WA/HT-66, 1-7, 1984.
- 1-20) D. Fiala, K. J. Lomas and M. Stohrer, A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions : passive system., Journal of Applied Physiology, 87, 1957-1972,1999.
- 1-21) C. Huizenga, Z. Hui and E. Arens, A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments., Building and Environment, 36,691-699,2001.
- 1-22) S. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki and M. Konishi., Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)., Energy and Buildings, 34,637-646,2002.
- 1-23)C. E. Smith, A transient, three-dimensional model of human thermal system, Ph. D. Thesis of Kansas State University,1991.
- 1-24)竹森利和, 熱環境快適性評価のための人体熱モデル開発, 博士論文, 平成7年1月.
- 1-25)横山真太郎、角田直人、富樫貴子、濱田靖弘、中村真人、落藤澄、部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発 第1報 生体内内移動方程式とその解法、空気調和・衛生工学会論文集、No.77, pp.1-12,2000.
- 1-26) 横山真太郎, 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会, 1993.

1.2.3 章の引用文献

- 1-27) S. Takada, S. Hokoi, N. Kawakami and M. Kudo, Experimental study on thermo-physiological response of clothes subjects exposed to thermal transients – sweating and evaporation process -, Journal of the Human-Environment System, Vo2.1,57-67,1999.
- 1-28) T. Umeno, S.Hokoi and S.Takada, Transient thermal response of human body considering moisture accumulation in clothing, ASHRAE Transactions, Vol.107, Part I, 2001.
- 1-29) 高田暁, 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答, 学位論文, 平成14年10月.
- 1-30) 松本衛, 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 学位論文, 1978.
- 1-31) 銚井修一, 建築環境学2, 丸善. Pp.109-149, 1993.
- 1-32) 梅野徹也, 銚井修一, 高田暁, 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答(その3) 発汗・蒸発過程における皮膚・着衣温の測定と数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集,D - ,417-418,1998.

1.2.4 章の引用文献

- 1-33) P. O. Fanger, Thermal Comfort, McGraw-Hill Book company, 1970.
- 1-34) A. P. Gagge, A. P. Fobelets and L. G. Berglund, a standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, 709-731, 1986.
- 1-35) 大橋俊介, 西安信, ウィンドウズ 95 対応の標準有効温度: SET*のリアルタイム・モニタリングシステム(第1報)システムの構成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D - , 363-364, 1998.
- 1-36) 西安信, 大橋俊介, ウィンドウズ 95 対応の標準有効温度: SET*のリアルタイム・モニタリングシステム(第2報)リアルタイム計測による環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D - , 365-366, 1998.

1.2.4 章の引用文献

- 1-41) Steven M. Frank, Srinivasa N. Raja, Christian F. Bulcao and David S. Goldstein, Relative contribution of core and cutaneous temperatures to thermal comfort and autonomic responses in humans, Journal of Applied Physiology, 86,5, 1588-1593, 1999.
- 1-42) C. F. Bulcao S. M. Frank, S. N. Raja, K. M. Tran and D. S. Goldstein, Relative contribution of core and cutaneous temperatures to thermal comfort in humans, Journal of Thermal Biology, 25-1,2, 147-150, 2000.
- 1-43) J. W. Ring and R. J de Dear, Temperature Transients: a Model for heat diffusion through the skin, thermoreceptor response and thermal sensation, Indoor Air 4, 448-456, 1991.
- 1-44) R. J de Dear, J. W. Ring and P. O. Fanger, Thermal Sensations Resulting from Sudden Ambient Temperature Changes, Indoor Air 3, 181-192, 1993.
- 1-45) D. Fiala, K. J. Lomas and M. Stohrer, First principles modeling of thermal sensation response in steady-state and transient conditions, ASHRAE Transactions 109, 179-186, 2003.
- 1-46) D. Wang, H. Zhang, E. Arens and C. Huizenga, Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort, Building and Environment, 1-11, 2006.
- 1-47) Y. D. Guan, M. H. Hosni, B. W. Jones and T. P. Giolda, Investigation of human thermal comfort under highly transient conditions for automobile applications –Part1: Experimental Design and Human Subject Testing Implementation, ASHRAE Transactions 109, 885-897, 2003.
- 1-48) Y. D. Guan, M. H. Hosni, B. W. Jones and T. P. Giolda, Investigation of human thermal comfort under highly transient conditions for automobile applications –Part1: Thermal sensation modeling, ASHRAE Transactions 109, 898-907, 2003.
- 1-49) Y. D. Guan, M. H. Hosni, B. W. Jones and T. P. Giolda, Literature review of the advances in thermal comfort modeling, ASHRAE Transactions , 908-915, 2003.
- 1-50) H. Zhang., Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, Thesis, University of California, Berkeley, 2003.

- 1-51) H. Zhang., C. Huizenga, E. Arens and D. Wang, Thermal sensation and comfort in transient non-uniform thermal environments, *European Journal of Applied Physiology*, 92,728-733,2004.
- 1-52) J. P. Rugh, R. B. Farrington, D. Bharathan, A. Vlanhinos, R. Burke, C. Huizenga and H. Zhang., Predicting human thermal comfort in a transient non-uniform thermal environment, *European Journal of Applied Physiology*, 92,721-727,2004.
- 1-55) 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 田中宏明, 非常常温冷感における温冷感予測の実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第 563 号, 9-15,2003.1.
- 1-56) 沢俊和, 銚井修一, 原田和典, 高田暁, 非常常状態における温冷感予測式に関する研究 代謝量が大きい場合への適用性の検討, 日本建築学会近畿支部 D - , 405-408, 2004.

1.2.5 章の引用文献

- 1-57) M. Kato, J. Sugeno, T. Matsumoto, T. Nishiyama, N. Nishimura and Y. Inukai, T. Okagawa and H. Yonezawa, The effects of facial fanning on thermal comfort sensation during hyperthermia, *Pflügers Arch-European Journal of Physiol.*, 443, 175-179,2001.
- 1-58) 森郁恵, 非常常状態における生理的・心理的な温熱環境指標に関する研究, 京都大学学位論文, 平成 16 年 3 月.
- 1-59) K. Shiraki, S. Sagawa, F. Tajima, A. Yokota, M. Hashimoto and G. L. Brengelmann, Independence of brain and tympanic temperature in an unanesthetized human, *The American Physiological Society*, 482-486,1988.
- 1-60) C. E. Riggs Jr., D. J. Johnson, B. J. Konopka and R. D. Kilgour, Exercise heart rate response to facial cooling, *European Journal of Applied Physiology*, 47,323-330,1981.
- 1-61) K. Hirata, T. Nagasaka, T. Nunomura, A. Hirai and M. Hirashita, Effects of facial fanning on local exercise performance and thermoregulatory responses during hyperthermia, *European Journal of Applied Physiology*, 56,43-48,1987.
- 1-62) T. V. McCaffrey, R. D. McCook and R. D. Wurster, Effect of head skin temperature on tympanic and oral temperature in man, *Journal of Applied Physiology*, 39,1, 114-118,1975.
- 1-63) M. Cabanac, M. Germain and H. Brinnet, Tympanic temperature during hemi-face cooling, *European Journal of Applied Physiology*, 56,534-539,1987.
- 1-64) L. I. Crawshaw, E. R. Nadel, J.A.J Stolwijk, and B. A. Stamford, Effect of Local Cooling on Sweating Rate and Cold Sensation, *Pflügers Archiv*, 354,19-27,1975.
- 1-65) 李旭子, 田村照子, ヒトの冷感受性の部位差について, 日本家政学会誌, Vol.46,11,pp.1081-1090,1995.
- 1-66) 西原直枝, 長谷部ヤエ, 局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差, 日本生気象学会雑誌, Vol.39,4,107-120,2003.
- 1-67) E. R. Nadel, J. W. Mitchell and J.A.J Stolwijk, Differential thermal sensitivity in the human skin, *Pflügers Archiv*,340,71-76,1973.

- 1-68) S. A. Nunneley and R. J. Maldonado, Head and/or torso cooling during simulated cockpit heat stress, *Aviation, space and environmental medicine*, 54(6), 496-499, 1983.
- 1-69) 物部博文, 村山雅巳, 生野晴美, 中橋美智子, 頭部冷却による消防員装具のヒートストレス快善、*日本生理人類学会誌*, 7(3), 123-127, 2002.
- 1-70) 水野一枝, 都築和代, 水野康, 冷却枕が睡眠および体温に及ぼす影響, 第 24 回人間 生活環境系シンポジウム報告集, 113-116, 2002.
- 1-71) 森郁恵, 高温環境における部位冷却時の温冷感と生理応答に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 507-508, 2004.

2 章の引用文献

- 2-1) 高田：深部温の過渡的応答と血流調節反応に関する研究、HES27 in Chiba, 5-6 Dec., 189-192, 2003.
- 2-2) 高田、鉾井：気温の変化に対する深部温の過渡応答特性—被験者実験に基づく検討—, *日本生気象学会雑誌* 40(3), S55, 2003.
- 2-3) 垣鏑ら：身体の機能と構造計測マニュアル、197-200, 文光堂, 2003.
- 2-4) 社団法人空気調和・衛生工学会, 快適な温熱環境のメカニズム, pp.83, 丸善, 平成 9 年.
- 2-5) J. D. Hardy and J. A. J. Stolwijk, The technic of measuring radiation and convection, *Journal of Nutrition*, Vol.15, 461-475, 1966.

3 章の引用文献

- 3-1) ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 8, 1997.
- 3-2) 標準生理学、医学書院 .
- 3-3) ALAN.C. BURTON : PHYSIOLOGY and BIOPHYSICS of the CIRCULATION, YEAR BOOK MEDICAL PUBLISHERS, 1965.
- 3-4) 蔵澄、堀越、土川、松原：日本人の体表面積に関する研究、*日本生気象学会雑誌*、Vol.31, NO.1, pp5-29, 1994.4.
- 3-5) Hardy, J. D. and Stolwijk, J. A. J., Partitional calorimetric studies of man during exposures to thermal transients, *Journal Applied Physiology*, 21, 1799-1806, 1966.
- 3-6) 織田、鉾井、原田、高田：着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答 (その 13) *日本建築学会近畿支部*, 245-248, 2001.
- 3-7) 近藤徳彦 非温熱性要因が運動時の熱放散反応に及ぼす影響, *日本生気象学会誌*, 42(1), pp.39-53, 2005.
- 3-8) B. Saltin, G. Radegran, M. D. Koskolou and R. C. Roach, Skeletal muscle blood flow in humans and its regulation during exercise, *Acta Physiology Scandinavian*, 162, 421-436, 1998.
- 3-9) G. Radegran and B. Saltin, Muscle blood flow at onset of dynamic exercise in humans., *The American Physiological Society*, 21, H314-H322, 1998.
- 3-10) B. Grassi, D. C. Poole, R. S. Richardson, D. R. Knight, B. K. Erickson and P. D. Wngner, Muscle O₂ uptake kinetics in humans: implications for metabolic control., *The American Physiological Society*, 988-998, 1996.

- 3-11) 近藤、井上、平田:体温-運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因、ナップ,2002.
- 3-12) W. D. McArdle, F. I. Katch and V. L. Katch, EXERCISE PHYSIOLOGY, 田口, 矢部, 宮村, 福永, 監訳, 杏林書院, 1992.
- 3-13) 宋、加藤、朱、佐古井:高温多湿気候におけるアダプティブ空調システムに関する研究(その8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D - ,483-484,2004.
- 3-14) Olufsen,M.S.,Peskin,C.S.,Kim,W.Y., Pedersen,E.R.,Nadim,A.,Larsen,J., : Numerical simulation and experimental validation of blood flow in arteries with structured-tree outflow conditions, Annals of Biomedical Engineering 28,1281-1299,2000.
- 3-15) Sheng,C., Sarwal,S.N.,Watts,K.C., Marble,A.E., : Computational simulation of blood flow in human systemic circulation incorporating an external force field, Medical and Biological Engineering and Computing 33,8-1,2003.
- 3-16) K.H.Keller, L.Seiler, An analysis of peripheral heat transfer in man. Journal of Applied Physiology 30,779-786, 1971.
- 3-17) Pennes,H.H.,: Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm , Journal of Applied Physiology Vol1,93-122,1948.
- 3-18)日本エム・イー学会, 血液のレオロジーと血流, コロナ社, 2003.
- 3-19)日本エム・イー学会, 循環系のバイオメカニクス, コロナ社, 2005.

5章の引用文献

- 5-1) S. Takada, S. Hokoi and K. Nakazawa, Measurement of moisture conductivity of clothing, Journal of the human-environment system, Vol.7,1, 29-34, 2004.
- 5-2) 中澤和弘, 銚井修一, 原田和典, 高田暁, 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答(その13), 日本建築学会大会梗概 D-2, pp.357-358, 2002.
- 5-3) 熱物性ハンドブック, 衣料の熱物性値, 熱物性学会編, p.463-472, 1990.
- 5-4) 中澤和弘, 銚井修一, 高田暁, 着衣 人体間における熱・水分・空気移動解析のための基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第580号, 23-30,2004.6.

7章の引用文献

- 7-1) A. V. Desruelle and V. Candas, Thermoregulatory effects of three different types of head cooling in humans during a mild hyperthermia, European Journal of Applied Physiology, Vol.81,33-39,2002.
- 7-2) A. Kawabata and H. Tokura, Effects of two kinds of pillow on thermoregulatory responses during night sleep, Journal of physiological anthropology, Vol.15,4, 155-159,1996.
- 7-3) J. B. Gohen, J. R. Allan and P. J. Sowood, Effect of heat or neck cooling used with a liquid-conditioned vest during simulated aircraft sorties, Aviation, space and environmental medicine, 60, 315-320, 1989.

本研究に関する発表論文

1. 査読付論文

- 1) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 高温環境から冷房空間へ移動する場合の深部温の過渡応答, 日本建築学会環境系論文集 第 609 号, pp.23-30, 2006.11.
- 2) 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 田中宏明, 非定常温冷感における温冷感予測の実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第 563 号, pp.9-15, 2003.1.

2. 日本建築学会大会学術講演梗概集

- 1) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 重ね着した人体の各部位における温熱生理量の非定常応答(その1) - 着衣の水分蓄積を考慮した着衣内空気温湿度性状の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 環境工学,
- 2) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 高温高湿環境から冷房空間へ移動した場合の深部温の非定常応答会解析、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 環境工学,
- 3) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 高温高湿環境から冷房空間へ移動した場合の深部温の非定常応答会解析(2) - 深部温変動に及ぼす冷房室内温湿度の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 環境工学,
- 4) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 血液と体組織間の熱移動モデルに関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集,
- 5) 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 田中宏明, 非定常温冷感における温冷感予測の実験的検討 - 発汗・蒸発過程における温冷感申告値と生理量の相関, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 環境工学, pp.369-370, 2001.9.
- 6) 松尾勇亮, 銚井修一, 原田和典, 高田暁, 森郁恵, 田中宏明, 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答(その16) 入室時の生理的条件が室内での体温変動に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 環境工学, pp.351-352, 2002.8.

3. 日本建築学会近畿支部研究報告集

- 1) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 重ね着した人体の各部位における温熱生理量の非定常応答(その1) - 着衣の水分蓄積を考慮した着衣内空気温湿度性状の検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集,
- 2) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 高温高湿環境から冷房空間へ移動した場合の深部温の非定常応答会解析、日本建築学会近畿支部研究報告集,
- 3) 田中宏明, 銚井修一, 高田暁, 血液と体組織間の熱移動モデルに関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集,
- 4) 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 田中宏明, 汗の蒸発を考慮した非定常温冷感指標の検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 41 号環境系, pp.265-268, 2002.8.

4．空気調和・衛生工学会学術講演論文集

- 1) 田中宏明，銚井修一，高田暁，重ね着した人体各部位温度と衣服内気候の非定常応答解析
汗の蒸発・発汗過程の熱水分同時移動方程式による解析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，
- 2) 森郁恵，銚井修一，高田暁，田中宏明，温冷感の非定常性を考慮した空調方式に関する研究(第2報)汗の蒸発過程における温冷感指標の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1385-1388,2001.9.
- 3) 田中宏明，銚井修一，高田暁，森郁恵，温冷感の非定常性を考慮した空調方式に関する研究(第3報)展示施設における夏期の室温設定と熱負荷性状の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1389-1392,2001.9.
- 4) 田中宏明，銚井修一，高田暁，頭部冷却を利用した冷房方式に関する研究(第1報)高温環境から冷房空間へ移動して局所冷却を行う場合の被験者実験，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1389-1392,2001.

5．その他

- 1) 森郁恵，銚井修一，高田暁，田中宏明，非定常状態における温冷感指標の実験的検討，日本生気象学会雑誌，Vol.38,No.2,pp.S11,2001.10.
- 2) 森郁恵，銚井修一，高田暁，田中宏明，非定常状態における温冷感指標の実験的検討，日本正気象学会雑誌，Vol.38,No.2,pp.S11,2001.10.
- 3) 森郁恵，高田暁，銚井修一，川上直紀，田中宏明，汗の蒸発過程における生理応答と温冷感の非定常性状，第24回人間－生活環境系シンポジウム報告書，pp.117-120，2000.11.
- 4) 高田暁，銚井修一，川上直紀，森郁恵，田中宏明，人体－着衣系における非定常熱水分移動解析，第24回人間－生活環境系シンポジウム報告書，pp.85-88,2000.11.
- 5) 森郁恵，銚井修一，高田暁，田中宏明，非定常状態における温冷感指標の実験的構築検討，第25回人間－生活環境系シンポジウム報告書，pp.207-210，2001.12.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なご指導を頂いた京都大学教授・銚井修一博士に深く感謝の意を表明致します。学部生のころから現在に至るまでの間、研究に関するご指導・ご鞭撻を頂くとともに、実務的な視点からも種々のご教示と励ましを頂きました。とらわれない自由な発想で研究に取り組むことの大切さを教えて頂きました。心より感謝申し上げます。

神戸大学名誉教授・故松本衛博士には、卒業論文・修士論文の研究をはじめ、種々のご教示を頂きました。慎んでご冥福を御祈り致します。

京都大学教授・宗本順三博士、高橋大弐博士には本論文のまとめに際し有益な助言を頂くとともに、今後取り組むべき課題についてご教授を頂きました。厚く御礼申し上げます。

京都大学准教授・原田和典博士には、ドクターセミナーあるいは学会などを通して有益な示唆を頂きました。深く感謝申し上げます。

神戸大学准教授・高田暁博士には、人体の生理・心理研究のいろはからはじまり、本論文のまとめに至るまで、すべての面で惜しみないご指導を頂きました。共同研究からはじまり、まがりなりにも論文を書くことができるようになるまでご助言と励ましを頂きました。深く感謝申し上げます。

京都大学助教・小椋大輔博士には、学部生のころから現在に至るまで研究に関するご援助、ご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

(株)日建設計・渡辺健二室長をはじめ、(株)日建設計設備設計部門の皆様には、折にふれて励ましの言葉を頂きました。また実務への応用について貴重な示唆を頂きました。深く感謝申し上げます。

京都大学銚井研究室の石黒晃子氏をはじめ在籍した皆様には、ドクターセミナーあるいは被験者実験などを通して、本研究の遂行にあたりご協力頂きました。深く感謝致します。

最後に、博士課程への進学に際し、暖かく見守ってくれた両親と日々支えてくれた家族に深く感謝致します。ありがとうございました。

なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金の助成を受けた。