

睡眠時の温熱生理・心理反応の非定常モデル

平成 21 年 1 月

石黒 晃子

目次

第1章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	既往の研究	1
1.2.1	睡眠時の温熱環境と生理反応	1
1.2.2	睡眠深度の出現周期を推定するモデル	2
1.2.3	人体熱モデル	2
1.2.4	睡眠時の体温のセットポイント	3
1.2.5	寝姿勢と生理反応	3
1.2.6	定常状態を対象とした温冷感指標	3
1.2.7	非定常状態を対象とした温冷感指標	4
1.2.8	局所の温熱刺激に対する温冷感と熱的快適感	4
1.3	研究の目的	5
1.4	論文の構成	5
	第1章の引用文献	7

第2章 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

2.1	はじめに	13
2.2	睡眠実験の概要	13
2.2.1	実験条件	13
2.2.2	実験手順	14
2.2.3	測定項目	15
2.2.4	実験時刻	20
2.2.5	室内環境	21
2.2.6	寝床内環境	26
2.3	睡眠実験の結果と考察	29
2.3.1	皮膚温度	29
2.3.2	深部温度	34
2.3.3	心拍数	36
2.3.4	皮膚血流量	38
2.3.5	発汗量	40
2.3.6	体重変化量	42
2.3.7	寝姿勢と体動	43
2.3.8	睡眠段階	48
2.3.9	睡眠変数	51

2.3.10	睡眠感	53
2.3.11	寝姿勢と温熱環境および温熱生理反応	58
2.3.12	寝姿勢と生理反応および心理反応	60
2.4	第2章のまとめ	62
	第2章の引用文献	64
第3章 睡眠時の温熱生理モデルの構築		
3.1	はじめに	65
3.2	基礎理論	65
3.2.1	人体各部位の熱収支式	65
3.2.2	体温調節制御式	67
3.2.3	皮膚表面における水分収支式	69
3.2.4	着衣および掛布団の内部の熱水分収支式	70
3.2.5	着衣および掛布団の境界条件	71
3.2.6	物理定数および飽和水蒸気圧の算定式	71
3.3	睡眠時の温熱生理モデルの解析条件	74
3.3.1	解析対象	74
3.3.2	解析に用いた諸定数	74
3.3.3	境界条件と初期条件	79
3.3.4	人体各部位の温度の計算値と実験値の対応	79
3.4	睡眠時の温熱生理モデルによる解析結果	80
3.4.1	皮膚温度	80
3.4.2	深部温度	86
3.4.3	解析のまとめ	87
3.5	感度解析	88
3.5.1	各パラメータの感度解析結果	88
	(1)セットポイント	88
	(2)体動	93
	(3)中立環境における皮膚血流量	95
	(4)各部位の皮膚血流量比率	98
	(5)頭部深部層血流量	101
	(6)体組成(体幹部における隣接する層ととの間の熱コンダクタンス)	103
	(7)皮膚表面とそれと接する周辺環境ととの間の熱コンダクタンス	105
3.5.2	感度解析のまとめ	108
3.6	第3章のまとめ	110
	第3章の引用文献	113

第4章 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

4.1	はじめに	115
4.2	睡眠時の体温調節反応	115
4.2.1	実験概要	115
4.2.2	実験結果	116
4.2.3	睡眠実験結果の考察	121
4.3	姿勢変化時の生理反応	121
4.3.1	姿勢変化実験の目的	121
4.3.2	姿勢変化実験の概要	121
4.3.3	姿勢変化実験の結果	123
4.3.3.1	室内環境	123
4.3.3.2	人体生理量（実験 3-6 の場合）	124
	(1)皮膚温度	124
	(2)深部温度	126
	(3)皮膚血流量	126
	(4)血圧	128
	(5)心拍数	128
4.3.3.3	人体生理量（平均値）	129
	(1)皮膚温度	129
	(2)深部温度	131
	(3)皮膚血流量	132
	(4)血圧	133
	(5)心拍数	134
4.3.4	測定結果の考察	134
4.4	第4章のまとめ	137
	第4章の引用文献	138

第5章 覚醒時の温冷感予測指標に基づく温熱環境制御

5.1	はじめに	139
5.2	空調制御システム	139
5.3	温冷感の推定方法	140
5.3.1	睡眠時の温冷感評価	140
5.3.2	温冷感予測指標	141
5.3.3	温冷感予測値の計算	142
5.4	エアコン制御の方法	146
5.4.1	制御プログラム	146

5.4.2	制御条件	147
(1)	快適域	147
(2)	エアコンの設定温度	148
5.5	温冷感制御実験の結果と考察	148
5.5.1	温冷感予測値の経時変化	148
5.5.2	エアコンの設定温度と室温	149
5.5.3	皮膚温度および深部温度と温冷感予測値	150
5.5.4	皮膚表面熱流と温冷感予測値	151
5.5.5	睡眠段階と温冷感予測値	152
5.6	第5章のまとめ	152
	第5章の引用文献	154
第6章	温冷感予測指標の睡眠時への拡張	
6.1	はじめに	155
6.2	温冷感予測指標の再構築	155
6.2.1	再構築の方法	155
6.2.2	結果	158
6.3	睡眠時の温冷感予測値の再計算	163
6.3.1	計算方法	163
6.3.2	計算結果と考察	166
6.4	第6章のまとめ	170
	第6章の引用文献	172
第7章	結論	173
	本研究に関する論文および研究報告	177
	謝辞	180

1. 序論

1.1. 研究の背景

私達が充実した生活を送るためには健康の維持と増進が重要であるが、そのためには十分な睡眠を取ることが大切である。すなわち睡眠は私達にとって日常かつ生存のために不可欠な行為といえる。

ところが、現実にはグローバル化や高度情報化により、この睡眠を慢性的に犠牲にする生活様式が広がっており、結果として様々なひずみが生じている。睡眠が不足すると、ストレスによって疲れた心身が回復せず疲労が蓄積し、いらいらしたりやる気がなくなったりして生活の質が損なわれる。場合によっては、生命維持に支障をきたすなどの健康面での障害を引き起こす。

このような社会的背景のもと、睡眠への関心は年々高まってきている。快眠の観点より室内の温熱環境をとらえたとき、改善すべき点が残されている。特に夏期における睡眠環境は、いまだ快適なものとはいえない。睡眠時においても体温調節がなされており、また高温環境や低温環境では中途覚醒が起こることから、睡眠時においても温冷感を有していると考えられる。快適な睡眠のためには温熱環境の調整が必要と考えられるが、覚醒時と比較すると難しい。すなわち、覚醒時ならば温冷感に基づいてエアコンなどの空調機器を利用して快適な温熱環境を整える、着衣を調整する、快適な環境を求めて移動するといった手段がとれる。しかし睡眠中はそのような行動が、睡眠を阻害する可能性がある。季節に応じた寝具や着衣の選択、エアコンのタイマー機能の利用などがなされるが、そうした方法には限界がある。特に夏季の都市域においては、熱帯夜のため空調無しの快眠は困難である。しかし、空調のために冷えすぎや乾燥が生じることもあり、満足できる温熱環境の実現は必ずしも容易ではない。

快眠の獲得には、睡眠時に適した温熱環境を形成する手法を確立することが重要と考える。そのためには睡眠時の温熱環境と皮膚温度および深部温度などの生理反応および温冷感や睡眠感などの心理反応の関係を理解し、予測することが必要である。

1.2. 既往の研究

本節では、睡眠時の温熱環境と皮膚温度、深部温度などの生理反応および温冷感や睡眠感などの心理反応に関する従来の研究についてレビューを行う。

1.2.1. 睡眠時の温熱環境と生理反応

睡眠時の体温調節反応に関しては、生理学を基礎とする多くの知見が得られている。

深部温度については、就寝後に低下することが数多く報告されており^{1-1,1-2,1-3,1-4,1-5,1-6,1-7,1-8}、代謝量の減少や睡眠時の体温のセットポイントの低下による説明がなされている¹⁻⁹。

皮膚温度については、Henane et al.¹⁻¹⁰はレム睡眠で低下に転じることを指摘しているが、レム睡眠と顕著な関係はみられないという報告もある¹⁻⁷。

皮膚血流量については、Sindrup et al.¹⁻¹¹は、就寝後の増加および皮膚血流量と睡眠段階との関係を指摘しているが、それにより全ての皮膚血流量の変化を説明することはできないとも記述している。

発汗量については、Henane et al.¹⁻¹⁰、Libert et al.¹⁻¹²および Sagot et al.¹⁻⁸は、睡眠段階が深いほど多く

なること、レム睡眠では少なくなることを指摘しているが、そうでない時間帯が出現するとも述べており、鈴木ら¹⁻¹³⁾は、睡眠時の暑熱負荷に対する発汗反応の大きさは睡眠やその深度に影響されないことを示している。

睡眠の質については、Haskell et al.^{1-2, 1-14)}、Candas et al.¹⁻¹⁵⁾、Kreider et al.¹⁻⁴⁾、今井ら¹⁻¹⁶⁾は高温環境や低温環境では、中途覚醒、体動の増加や睡眠段階の変化が起こることを報告している。岡田ら¹⁻¹⁷⁾は、寝床内環境が入眠感および睡眠に対する満足度に影響を及ぼすと報告している。都築¹⁻¹⁸⁾は気流により中途覚醒が減少し、温冷感や睡眠感が改善されたことを、水野ら¹⁻⁶⁾は高温高湿環境での頭部冷却が睡眠の質に効果があることを、久保¹⁻⁵⁾は低温環境での足部加温により入眠潜時が短くなることを報告している。

生理学を基礎とした研究では、睡眠時と覚醒時の体温調節反応や睡眠段階の違いに着目した報告が多い。寝床内環境を伝熱系として表現し、人体と周辺環境（着衣、寝具、室内空気）との間の熱水分移動とそれと連動して変化する生理反応および温冷感や睡眠感などの心理反応を検討するといったアプローチはみられない。

1.2.2. 睡眠深度の出現周期を推定するモデル

睡眠を意識水準の観点からみると、睡眠と覚醒、レム睡眠とノンレム睡眠といったいくつかの睡眠深度に分類できる。このような睡眠深度の出現を推定するモデルとして、小林ら¹⁻¹⁹⁾はレム睡眠・ノンレム睡眠の出現サイクルを、Borbely¹⁻²⁰⁾は睡眠・覚醒の出現サイクルを、藤森ら¹⁻²¹⁾、辛島ら¹⁻²²⁾はレム睡眠・ノンレム睡眠および睡眠・覚醒の出現サイクルを再現するモデルを提案している。また、Nakao et al.¹⁻²³⁾は体温と睡眠・覚醒リズムのモデルを提案している。このモデルでは眠気のオシレータを仮定して、睡眠物質が蓄積すると体温を下げる睡眠物質系と体温調節系が相互作用することを前提としている。

そのようなモデルは睡眠深度あるいは睡眠時の体温の周期性を表しているが、人体と周辺環境との間の熱水場挙動については記述されていない。

1.2.3. 人体熱モデル

人体熱モデルは、人体の伝熱系を定量的に記述するものであるが、多くのモデルはセットポイントの概念を導入して、体温調節機構における情報処理を説明している。セットポイントに関しては議論があるものの、現象を妥当な精度で説明できることから、温熱生理の研究では広く用いられている¹⁻²⁴⁾。建築分野ではこれらの人体熱モデルが評価や設計に利用されている。人体熱モデルを用いると、気温や湿度などの周辺環境変数を入力として深部温度や皮膚温度といった温熱性の生理反応や人体周辺環境との熱および水分のやりとりを計算することができる。これまでに人体モデルとして、人体を3つの円柱で代表させて、深部層、筋層、皮膚層に分割したStolwijk et al.¹⁻²⁵⁾のモデル、人体を15の円柱で代表させて、内部の温度分布を求めたWissler¹⁻²⁶⁾のモデル、人体を1つの球で代表させてcoreとskinの2つに分割したGagge et al.¹⁻²⁷⁾の2-node-model、人体を15の円柱で代表させて血管網を組み込んだSmith¹⁻²⁸⁾のモデル、Smithモデルを基本として動静脈吻合を考慮した竹森ら¹⁻²⁹⁾のモデル、人体を16の円柱で代表させて各円柱を複数の層に分けた横山ら¹⁻³⁰⁾のモデル、人体を16部位に分け頭を球で残りは円柱で代表さ

せた田辺ら¹⁻³¹⁾のモデル，環境温による血流の方向性の違いを考慮した佐古井ら¹⁻³²⁾のモデルなど数多く提案されている。

そうした人体熱モデルが対象としているのは覚醒時であり，睡眠時ではない。これまで非定常状態にある睡眠時の人体の温熱性生理量を予測するモデルは提案されていない。

睡眠時に対応する人体熱モデルが提案されていない理由としては，睡眠時の体温調節が前述の睡眠物質系などの影響で覚醒時と異なるとみなされていること，身体の一部のみが寝床内に存在するなど人体が不均一環境かつ就寝中の姿勢変化などにより経時変化する温熱環境に曝露されていること等複雑な状態にあることが考えられる。

これまで，寝具における熱水分移動とそれと連動して変化する人体の温熱生理について，人体を深部1点，皮膚3点に分割したモデルを用いて，睡眠実験の測定結果を対象とした解析は行われている¹⁻³³⁾。

ただ，現時点では，睡眠時の温熱性の生理反応を従来の覚醒時のモデルでどの程度まで説明できるか，睡眠時に用いればどのような問題があるのかなどについて十分に確認されていない。

1.2.4. 睡眠時の体温のセットポイント

体温調節反応におけるセットポイントとは，狭義には制御工学の概念を導入して現象を記述するための理論上の目標値を指す¹⁻³⁴⁾。睡眠時の体温調節反応の特徴として深部体温の低下があげられるが，鳥居ら¹⁻³⁵⁾，山本ら¹⁻³⁶⁾，彼末ら¹⁻³⁷⁾，菅屋¹⁻³⁸⁾は，覚醒から睡眠への移行による体温のセットポイントの変更の結果として説明している。ただ，睡眠時は代謝量の減少¹⁻³⁹⁾や人体と周辺環境（着衣，寝具，室内空気）との間を移動する熱流が，深部温度の低下に影響を与えていることも考えられるため，セットポイントの変化を用いずに説明することも可能と考えられる。

1.2.5. 寝姿勢と生理反応

通常の睡眠における特徴の1つは，姿勢が臥位（仰臥位，伏臥位，側臥位）であることといえるが，このことは体温調節反応に影響を及ぼしていると考えられる。寝姿勢と体温調節反応に関して，Krauchi et al.¹⁻³⁾および藏澄ら¹⁻⁴⁰⁾は，側臥位では椅座位より代謝量が少なくなること，姿勢が伝熱形態に影響を及ぼすこと¹⁻⁴¹⁾を示している。姿勢と皮膚血流量との関係について，三輪ら¹⁻⁴²⁾は姿勢変化における皮膚血流量の変化を若年女子と高年女子とで比較している。田辺ら¹⁻⁴³⁾は前額の皮膚血流量と皮膚温の変化が姿勢の違いによる影響を受けていることを指摘している。梶井¹⁻⁴⁴⁾は入浴時の姿勢と皮膚血流量および体温との関係を求めている。また，血圧の変動と立ちくらみについて八代¹⁻⁴⁵⁾，江西ら¹⁻⁴⁶⁾，齋木ら¹⁻⁴⁷⁾が検討を行っている。

姿勢と生理反応に関する研究の多くは，検討の対象を睡眠時に限っておらず，睡眠を想定した条件での検討は少ない。したがって，皮膚表面と周辺環境との間の熱移動が経時変化している状況は十分に考慮されていない。

1.2.6. 定常状態を対象とした温冷感指標

温熱環境の評価や設計において広く用いられている指標としては，PMV¹⁻⁴⁸⁾とSET*^{1-27,1-49)}があげられ

る。PMVは人体と環境との間の熱収支を快適方程式によって定式化し、熱平衡からのずれと温冷感を関連付けた指標である。SET*は、Gagge¹⁻²⁷⁾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いる。いずれも基本的には定常状態での適用に限定されている。

温湿度などの環境因子と温冷感申告値および熱的快適感の対応について、深井ら^{1-50,1-51)}は、SET*と温冷感と満足感、不快感などとの関係について検討している。入来ら¹⁻⁵²⁾は、心拍数が熱的快適性の評価尺度として有効であることを示している。Lin et al.¹⁻⁵³⁾は、Fangerの快適方程式の考え方を睡眠環境に拡張する試みを行っている。

1.2.7. 非定常状態を対象とした温冷感指標

非定常状態における温冷感指標に関する検討としては、堀江ら^{1-54,1-55,1-56)}は気温、放射温度などの環境のステップ変化に対する温冷感を表現する線形モデルを、飯田ら¹⁻⁵⁷⁾は、気温または平均皮膚温度を入力値として、温冷感を表現する非線形モデルを提案しているが、発汗がある場合を対象とはしていない。

徐ら¹⁻⁵⁸⁾は、暑熱環境において気流がある環境に移動したときの生理反応や快適感などに与える影響を調べているが、発汗の影響については十分に検討していない。

発汗の影響を考慮した検討としては、磯田ら¹⁻⁵⁹⁾、石野ら¹⁻⁶⁰⁾、垣鏑ら¹⁻⁶¹⁾は温冷感と平均皮膚温度の関係を、間宮ら¹⁻⁶²⁾は温冷感と全身の放熱量の関係を、後藤ら¹⁻⁶³⁾は代謝量と温冷感の関係を調べているが、生理反応と心理反応との関係の考察が中心であり、周辺の温熱環境との関係については詳細に検討されていない。

温熱環境を考慮した研究として、須藤ら¹⁻⁶⁴⁾は代謝量の変化が温冷感に与える影響をPMVにより検討しており、米木ら¹⁻⁶⁵⁾は冷房の立ち上がりにおける温熱感覚についてPMVとSET*による評価を試みているが、適用した指標は非定常状態を対象として提案されたものではない。

非定常状態を想定した温冷感予測指標を森ら^{1-66,1-67)}が提案している。発汗および蒸発過程における温冷感予測指標を構築することを目的として、中立環境と高温または低温環境の間を移動する状況を想定した被験者実験を行い、皮膚表面熱流、平均皮膚温度とその変化率、鼓膜温度とその変化率の5つを説明変数とする温冷感予測指標を重回帰分析より導出している。

1.2.8. 局所の温熱刺激に対する温冷感と熱的快適感

温冷感はいずれも各部位の皮膚の温度受容器からの情報により形成される感覚であるが、部位による差の影響についての検討が行われている。

丸山ら¹⁻⁶⁸⁾は、背中、上腕部の皮膚温が全身温冷感に与える影響が大きいことを、李ら¹⁻⁶⁹⁾は下腹部、腰などの体幹部と、掌、足底などの四肢の末梢部において冷刺激に対する感受性が高いことを、岩崎ら¹⁻⁷⁰⁾は、足部の温熱生理反応が快適感に与える影響を示している。中村ら¹⁻⁷¹⁾は温冷感や快・不快感に部位の特異性があり、頭部は冷却による快適感を、腹部は加温による快適感を得やすいと報告している。Nadel et al.¹⁻⁷²⁾はランプ放射により人体各部位への温冷感刺激を与え、大腿での局所発汗の変化量を評価

指標として他の部位を評価した結果、体幹部や大腿に比較し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。これらの検討における実験では、温熱刺激が比較的小さいため、全身温冷感や快適感への影響については明確ではないが、温熱刺激の感受性に部位差があることを示している。

平均皮膚温度は、人体の部位毎の皮膚温度に重みを乗じてそれらの和により算出され、全身の皮膚温度の平均値を示すものである。最も有名な指標は体表面積の加重平均によるHardy & Dubois¹⁻⁷³⁾の平均皮膚温度である。このHardy & Duboisの平均皮膚温度を基本として、部位毎の熱感受性や姿勢を考慮して重み付けされた指標が提案されている。Nadel et al.¹⁻⁷²⁾は部位毎の温度感覚を、持田¹⁻⁷⁴⁾、桑原ら¹⁻⁷⁵⁾は皮膚表面の総合熱伝達率を考慮している。藏澄ら^{1-76,1-77,1-78)}は、平均皮膚温度の算定には室内空気に接している部位を用いることを提案しており、各姿勢の体表面積を詳細に測定し、姿勢毎に各部位の重み付けの値を決定している。

定常状態かつ発汗が少ない状態においては平均皮膚温度の1次関数で温冷感申告値が表現されることから¹⁻⁷⁹⁾、平均皮膚温度は温冷感を表現する指標として広く用いられている。しかしながら発汗がある場合などの非定常状態の影響を十分に表現できないため、平均皮膚温度のみで、経時変化する環境下にある日常生活の温冷感を評価することは難しいといえる。

1.3. 研究の目的

睡眠環境と生理・心理反応に関する研究は数多くみられるが、従来の研究では睡眠時の人体と周辺環境（着衣、寝具、室内空気）との間の熱水分移動を表現し、それと連動して変化する皮膚温度、深部温度などの生理反応および温冷感、睡眠感などの心理反応を非定常系として扱っておらず、現時点では睡眠環境の設計や評価に適用するための知見は十分に得られていない。

本研究では快適な睡眠を実現する温熱環境の設計と評価の方法を確立するために、非定常状態かつ睡眠時に対応した温熱生理モデルと温冷感予測指標を構築することを目的とする。

1.4. 論文の構成

図1-1に本論文の構成を示す。第2章では、本論文で検討の対象とする2004年、2005年の夏期に各4回実施した睡眠実験の概要と被験者の温熱生理反応および心理反応の結果を示し、睡眠の状況とそれらとの関係について考察を行う。第3章では、人体熱モデルにおいて寝床内環境の非一様性を考慮して熱水場を記述し、睡眠時の皮膚温度および深部温度の実験結果の再現を試みる。さらにそのモデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察する。第4章では、姿勢が体温調節反応に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、姿勢が体温調節反応に与える影響は、睡眠・覚醒により大きく変わらないと仮定し、覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させた実験を行い、周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより、姿勢変化に伴う各生理量の変化が説明できることを示す。第5章では、快適な睡眠環境を形成する手法として、覚醒時の温冷感予測指標を用いて就寝者の温冷感を推定し、空調機の設定温度にフィードバックする温熱環境制御システムを提案する。また、その有効性を2004年の第2回目の睡眠実験を対象として検討する。第6章では、温冷感予測指標の説明変数のひとつである全身の平均皮膚温度を、四肢の末梢部に対応する前腕、手背、下腿、

足背の4点の平均皮膚温度に変更することにより、温冷感予測指標の睡眠時への拡張を、第3章の温熱生理モデルにより得られた計算値を用いて試みる。第7章では、本論文より得られた結論を示す。

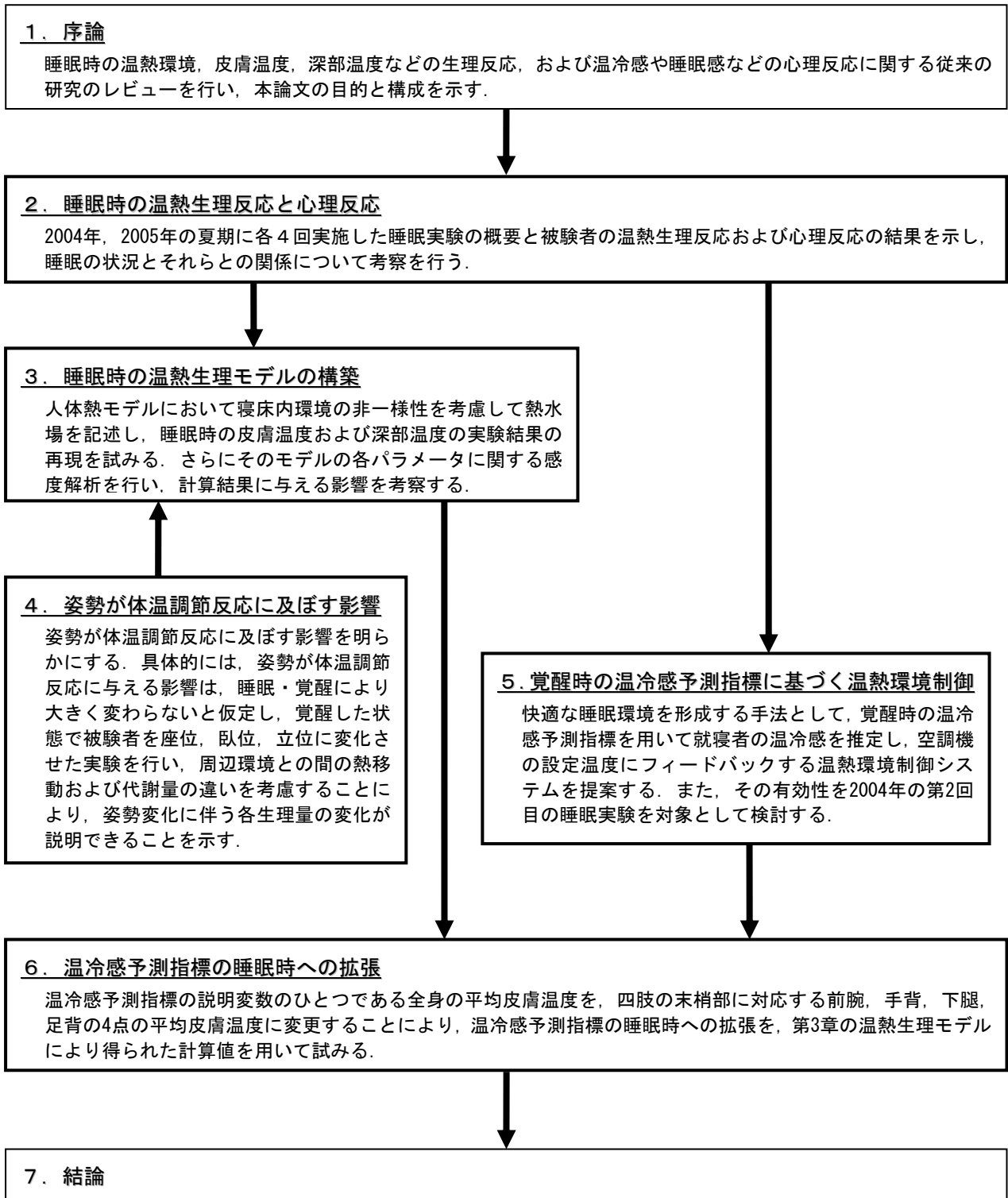


図 1-1 本論文の構成

第1章の引用文献

- 1- 1) Gillberg, M. and Akersredt, T.: Body temperature and sleep different times of day, *Sleep*, 5(4), pp.378-388, 1982.
- 1- 2) Haskell, E. H., Palka, J. W., Walker, J. M., Berger, R. J. and Heller, H. C.: Metabolism and thermoregulation during stages of sleep in humans exposed to heat and cold, *J. Appl. Physiol.* 51, pp.948-954, 1981.
- 1- 3) Krauchi, K., Cajochen, C. and Wirz-Justice, A.: A relationship between heat loss and sleepiness: effects of postural change and melatonin administration, *Journal of Applied Physiology*, vol. 83, pp.134-139, 1997.
- 1- 4) Kreider, M. B. and Iampietro, P. F.: Oxygen consumption and body temperature during sleep in cold environments, *J. Appl. Physiol.* 14, pp.765-767, 1959.
- 1- 5) 久保博子：住環境学の立場から見た睡眠環境に関する研究，第26回快適性を考えるシンポジウム—寝装・寝具—，pp.3-9，2004.
- 1- 6) 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，pp.113-116，2002.
- 1- 7) Palca, J. W., Walker, J. M. and Berger, R. J.: Thermoregulation, metabolism, and stages of sleep in cold-exposed men, *J. Appl. Physiol.* 61(3), pp.940-947, 1986.
- 1- 8) Sagot, J. C., Amoros, C., Candas, V. and Libert, J. P.: Sweating responses and body temperatures during nocturnal sleep in humans, *Am. J. Physiol.*, 252, pp.R462-R470, 1987.
- 1- 9) Hammel, H. T., Jackson, D. C., Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D. and Stromm, S. B.: Temperature regulation by hypothalamic proportional control with an adjustable set point, *J. Appl. Physiol.*, 18(6), pp.1146-1154, 1963.
- 1-10) Henane, R., Buguet, A., Roussel, B. and Bittel, J.: Variations in evaporation and body temperatures during sleep in man, *J. Appl. Physiol., Respirat Environ. Exercise Physiol.*, 42(1), pp.50-55, 1977.
- 1-11) Sindrup, J. H., Kastrup, J., Madsen, P. L., Christensen, H., Jorgensen, B. and Wildschiodtz, G.: Nocturnal variations in human lower leg subcutaneous blood flow related to sleep stages, *J. Appl. Physiol.*, 73(4), pp.1246-1252, 1992.
- 1-12) Libert, J.P., Candas, V., Muzet, A. and Ehrhart, J.: Thermoregulatory adjustments to thermal transients during slow wave sleep and REM sleep in man, *J. Physiol. Paris*, 78, pp.251-257, 1982.
- 1-13) 鈴木（今井）一乃，大西範和，西山哲成，菅屋潤壹，小川徳雄：睡眠時の発汗の動的特性，*発汗学*，2-1，pp.25-27，1995.
- 1-14) Haskell, E. H., Palka, J. W., Walker, J. M., Berger, R. J. and Heller, H. C.: The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages, *Electro. Clin. Neurophysiol.*, 51, pp.494-501, 1981.
- 1-15) Candas, V., Libert, J. P. and Muzet, A.: Heating and cooling stimulations during SWS and REM sleep in man, *J. Therm. Biol.*, vol.7, pp.155-158, 1982.
- 1-16) 今井京子，宮沢モリエ，梁瀬度子，花岡利昌：夏期の睡眠環境の寝床気候・睡眠経過に及ぼす影響，*家政学研究*，26-1，pp.62-67，1979.

- 1-17) 岡田モリエ, 永井慈子, 江角宣子, 磯田憲生, 梁瀬度子: 低温および中温環境下における寢床面温度が寢床気候および心理・生理相互に及ぼす影響, 家政学研究, 30-2. pp.27-34, 1984.
- 1-18) 都築和代: 暑熱環境における気流が青年の睡眠と体温調節に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.547-548, 2004.
- 1-19) 小林敏孝, 遠藤四郎, 辻陽一, 高橋静昭: 睡眠の数学モデル, 電気通信学会技術研究会報告, 86-3(MBE86, 4), pp.25-31, 1986.
- 1-20) Borbely, A.: A two process model of sleep regulation, *Human Neurobiology*, 1, pp. 195-204, 1982.
- 1-21) 藤森久, 中尾光之, 片山統裕, 中村和浩, 山本光璋: 睡眠—覚醒サイクル制御機構の神経回路モデル, 電気情報通信学会技術研究報告, 99-458(MBE99, 103-114), pp.53-60, 1999.
- 1-22) 辛島彰洋, 玉川雄一, 片山統裕, 中尾光之, 小山純正: 睡眠—覚醒リズムを制御する神経機構の数理モデル, 電子情報通信学会技術研究報告, 106-79(NC2006, 1-8), pp.19-24, 2006.
- 1-23) Nakao, M., McGinty, D., Szymusiak, R. and Yamamoto, M.: A thermoregulatory model of sleep control. *Jpn. J. Physiol.*, 45, pp.291-309, 1995.
- 1-24) 入來正躬: 体温生理学テキスト～わかりやすい体温のおはなし～, pp.118-128, 分光堂, 2003.
- 1-25) Stolwijk, J. A. J. and Hardy, J. D.: Temperature regulation in man - theoretical study, *Pflugers Archiv.*, vol.291, pp.129-162, 1966.
- 1-26) Wissler, E. H.: A mathematical model of the human thermal system, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 226, pp.147-166, 1964.
- 1-27) Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. and Nishi, Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Trans.*, 77(1), pp.247-262, 1971.
- 1-28) Smith, C. E.: A transient, three-dimensional model of the human thermal system, Ph.D. Dissertation, Kansas State University, 1993.
- 1-29) 竹森利和, 中島健, 庄司佑子: 人体熱モデルの開発 (熱的快適性評価のための基本モデル開発), 日本機械学会論文集 (B 編), 61-584, pp.297-304, 1995.
- 1-30) 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, 空気調和衛生工学会論文集 77, pp.1-11, 2000.
- 1-31) 田辺新一, 中野淳太, 小林弘造: 温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 541 号, pp. 9-16, 2001.
- 1-32) 佐古井智紀, 都築和代, 加藤信介, 大岡隆三, 宋斗三, 朱晟偉: 不均一熱環境評価のための 3 次元人体モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.491-492, 2005.
- 1-33) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積 その 2 夏期睡眠実験の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.221-222, 2003.
- 1-34) 彼末一之, 中島敏博: 脳と体温—暑熱・寒冷環境との戦い—, 共立出版, pp.155-160, 2000.
- 1-35) 鳥居鎮夫編: 睡眠と体温・エネルギー, *Annals Physiol. Anthropol.*, 4-4, pp.328-330, 1985.

- 1-36) 山本光暁, 中尾光之: 体温と睡眠調節, 日本睡眠学会編: 睡眠学ハンドブック, 朝倉書店, pp.153-157, 2004.
- 1-37) 彼末一之, 中島敏博: 脳と体温—暑熱・寒冷環境との戦い—, 共立出版, p.168, 2000.
- 1-38) 菅屋潤壹, 松本孝朗, 西山哲成, 西村直記, 加藤雅子, 犬飼洋子, 米澤弘恵, 岡川友子: 睡眠と体温調節の相互作用, 睡眠と環境, 6-1, pp.26-33, 2002.
- 1-39) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, p.86, 1981.
- 1-40) 藏澄美仁, 中村亮, 松原斎樹: 作用温度 28°Cにおける日本人青年の安静時代謝量に及ぼす姿勢の影響, 日本生気象学会雑誌, 37-1, pp.27-37, 2000.
- 1-41) 藏澄美仁, 土川忠浩, 鳥居孝行, 九手貴行, 山下千華, 松原斎樹, 堀越哲美: 姿勢の違いと人体の放射伝熱面積に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 598 号, pp.31-36, 2005.
- 1-42) 三輪恵美子, 飯塚幸子: 姿勢変化における皮膚血流量の変化—若年女子と高年女子の比較—, 実践女子大学生生活科学部紀要 32, pp.77-84, 1995.
- 1-43) 田辺実, 平下政美, 平井敦夫, 永坂鉄夫: 高温環境下の姿勢変換による顔面の発汗量と皮膚血流量, 日本生気象学会雑誌 32-1, pp.37-44, 1994.
- 1-44) 梶井宏修: 入浴姿勢と血流および体温変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.381-382, 2001.
- 1-45) 八代公夫: たちくらみ・脳貧血, 小児科医療, 47-4, pp.501-504, 1984.
- 1-46) 江西一成, 秋元博之, 田島文博: 急速立位および段階的立位に対する循環反応, 理学療法学, 28, No. Supplement 2, p.148, 2001.
- 1-47) 齋木しゅう子, 米澤久幸: 姿勢と血圧変動, 理学療法, 24-1, pp.115-122, 2007.
- 1-48) Fanger, P. O. Thermal comfort, McGraw-Hill, pp.1-143, 1970.
- 1-49) Gagge, A. P., Fobelets, A. P. and Berglund, L.G.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans., 92, pp.709-731, 1986.
- 1-50) 深井一夫, 斎藤純司, 後藤滋, 伊藤宏: 標準新有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究 第 1 報—冬季被験者実験による検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.48, pp.21-28, 1992.
- 1-51) 深井一夫, 伊藤宏, 後藤滋, 阿久井哲, 斎藤純司: 標準新有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究 第 2 報—冬季および夏季における温熱感覚の比較, 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, pp.139-147, 1993.
- 1-52) 入來正躬, 土屋清, 長谷部ヤエ, 田辺新一, 高橋和子: 心電図 R-R 間隔検査を用いた熱的快適性の評価, 日本生気象学会雑誌, 30 (2), pp.57-63, 1993.
- 1-53) Lin, Z. and Deng, S.: A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics – Developing a thermal comfort model for sleeping environments, Building and Environment, 43, pp.70-81, 2008.
- 1-54) 堀江悟郎, 桜井美政, 松原斎樹, 森本宏: 室温変化に対する皮膚温, 温冷感, 不快感のインパルス応

- 答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.723-724, 1985.
- 1-55) 堀江悟郎, 桜井美政, 松原斎樹, 森本宏: 変動室温に対する主観申告の応答 夏季実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.685-686, 1986.
- 1-56) 桜井美政, 松原斎樹, 森本宏, 堀江悟郎: 気温・放射の変化に対する皮膚温の主観申告のインパルス応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.357-358, 1987.
- 1-57) 飯田美奈子, 永村一雄: 非定常熱環境における生理・心理反応の応答特性の推定, 日本生理人類学会誌, 1-2, pp.87-92, 1996.
- 1-58) 徐国海, 久野覚, 田中将彦, 齋藤輝幸: 暑不快環境から気流のあるやや暑い環境へ移動した場合の生理・心理反応に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 524 号, pp.37-44, 1999.
- 1-59) 磯田憲生, 久保博子, 早川和代, 梁瀬度子: 冷房時における室内外気温差の人体影響について 第 3 報 冷房温度 28°C の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.683-684, 1988.
- 1-60) 石野久彌, 谷本潤, 八田芳子: 非定常温度場における温熱感の過渡的応答特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.1005-1006, 1992.
- 1-61) 垣鏑直, 井上義美: 室温をステップ変化させた時の人体の生理・心理反応に関する実験的研究 その 1 冷房時の相対湿度の違いによる熱ストレスの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.719-720, 1998.
- 1-62) 間宮尚, 松尾陽, 井上隆, 丸山一真: 非定常温熱感における湿度の影響 その 2 夏季入室時における快適要因の考察と生理データの解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.841-842, 1990.
- 1-63) 後藤伴延, 三田村輝章, 吉野博, 田村明弘, 持田灯, 深井一夫: 代謝量の step change が温熱感覚に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.485-486, 2003.
- 1-64) 須藤美音, 村上周三, 加藤信介, 富永正道, 宋斗三: 高温高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 6) 代謝量の時間変化が人間の温熱生理・心理に及ぼす影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.381-382, 2002.
- 1-65) 米木貴文, 岩本静男: 低湿冷房に関する被験者実験—立ち上がり時における検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.339-340, 1999.
- 1-66) 森郁恵, 鉾井修一, 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, 2001 年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.1385-1388, 2001.
- 1-67) 森郁恵, 鉾井修一, 高田暁, 田中宏明: 非定常状態における温冷感予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第 563 号, pp.9-15, 2003.1.
- 1-68) 丸山康子, 田村照子: 不均一刺激に対する皮膚温・温冷感反応, 日本生気象学会雑誌, 26(3), pp.143-154, 1989.
- 1-69) 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, 46-11, pp.1081-1090, 1995.
- 1-70) 岩崎房子, 斜木祐里, 小柴朋子, 田村照子: 22~34°C 環境下における足部の温熱生理特性, 日本

- 家政学会誌, 51-7, pp.587-593, 2000.
- 1-71) 中村真由美, 依田珠江, 齋藤泰世, 彼末一之: 温度感覚, 温熱的快・不快感の部位特異性, 日本生気象学会雑誌, 44(3), p66, 2007.
- 1-72) Nadel, E., R., Mitchell, J. W. and Stolwijk, J. A. J.: Differential thermal sensitivity in the human skin, Pflugers Archiv., 340, pp.71-76, 1973.
- 1-73) Hardy, J. D. and Dubois, E. F.: The technique of measuring radiation and convection, J. Nutr, 15-5, pp.461-475, 1938.
- 1-74) 持田徹: 平均皮温の算出式に関する工学的研究—熱伝達率と皮面積で重み付けした平均皮温, 日本建築学会論文報告集, 第 259 号, pp.67-73, 1977.
- 1-75) 桑原浩平, 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實: 熱伝達率を加味した平均皮膚温の算出式, 人間と生活環境, 8(1,2), 33, pp.33-40, 2001.
- 1-76) 藏澄美仁, 大和義昭, 山本志津恵, 松原斎樹: 姿勢の違いを考慮した平均皮膚温算出法に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 34(4), pp.101-112, 1997.
- 1-77) 藏澄美仁, 松原斎樹, 古川倫子, 藤原三和子, 上麻美, 植木弥生, 長井秀樹, 山本志津恵: 姿勢の違いと日本人の平均皮膚温算出法, 日本生気象学会雑誌, 35(4), pp.121-132, 1998.
- 1-78) 藏澄美仁, 土川忠浩, 住谷孝一郎, 大和義昭, 鳥居孝行, 松原斎樹, 堀越哲美: 対流熱伝達率を考慮した平均皮膚温に関する研究—正座位, 胡坐位, 横座位, 立て膝位, 投げ足位, 側臥位, 仰臥位姿勢の算出法, 日本建築学会環境系論文集, 第 585 号, pp.19-26, 2004.
- 1-79) 中山昭雄編: 温熱生理学, p.566, 理工学社, 1981.

1. 序論

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

2.1. はじめに

本章では、本論文で検討の対象とする 2004 年、2005 年の夏期に各 4 回実施した睡眠実験の概要と被験者の温熱生理反応および心理反応の結果を示し、睡眠の状況とそれらとの関係について考察を行う。

2.2. 睡眠実験の概要

2.2.1. 実験条件

(1) 被験者

被験者は、2004 年、2005 年の睡眠実験とも、健康な青年男子 1 名の計 2 名である。被験者の年齢および体格を表 2-1 に示す。なお、ヘルシンキ宣言に基づき、被験者には研究内容についてあらかじめ十分に説明を行い、同意を得ている。

表 2-1 被験者の年齢と体格

年度	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]	体表面積 [m ²] ^{*2-a}
04	22	180	70	1.87
05	24	163	58	1.62

*2-a 被験者の体表面積は、身長と体重より藏澄ら²⁻¹⁾の式を用いて求めた。

(2) 実験場所

住宅型実験棟内の寝室を模した実験室である。図 2-1 に見取り図を、図 2-2 に全景写真を示す。約 8 畳の広さであり、天井高は 240cm である。

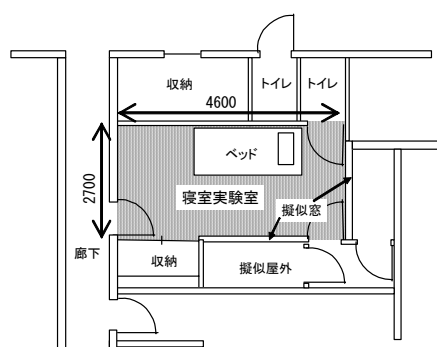


図 2-1 寝室実験室見取り図



図 2-2 実験室全景写真

(3) 着衣・寝具

概要を表 2-2 に示す。着衣は、通常の睡眠で使用するものとした。敷布団はベッドの上に敷いて使用した。掛布団は夏期であるため、タオルケットを使用した。

表 2-2 着衣と掛布団の概要

	着衣	掛布団	敷布団
種類と素材	綿の半袖Tシャツ	綿のタオルケット	3層の綿層構造で層と層の間には、厚さ1mm未満の編の荒い布が挟まれている
	綿のトランクス		
	綿の膝丈ズボン		

2.2.2. 実験手順

睡眠実験の手順を図 2-3 に示す。夕食から約 90 分後に入浴する。夏期のため、浴槽にはつからず、シャワーのみとする。出浴後に体重測定を行う。その後、実験室に入室し、センサの取付けを開始する。全てのセンサの取付けが終了次第、スタッフは実験室から退室する。被験者には 6~7 時間の睡眠をとらせる。起床時刻になると、スタッフが被験者を起こすため実験室に入室する。起床後すぐに睡眠感などの主観申告の聞き取りを行う。その後、センサの取外し、体重測定、睡眠調査票への記入を順次行い、実験終了となる。

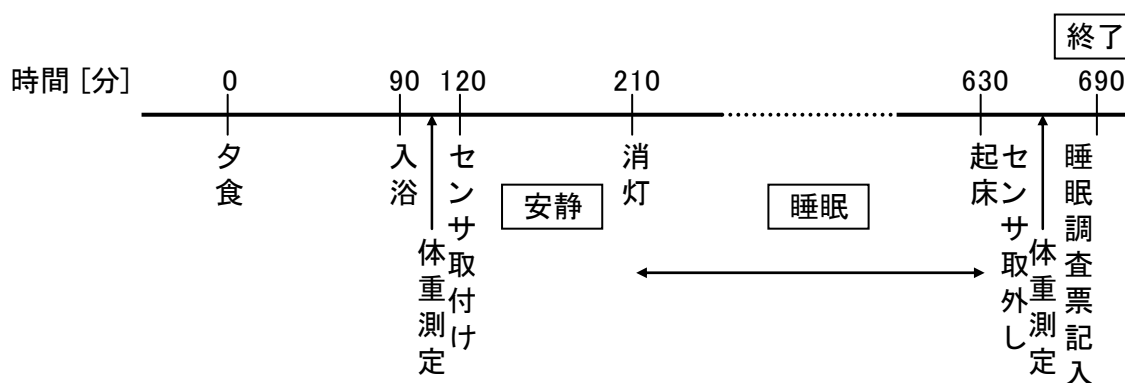


図 2-3 実験手順

2.2.3. 測定項目

人体および環境に関する測定項目を表 2-3, 表 2-4 に示す. 睡眠段階判定に必要な脳波の電極の配置図を図 2-4 に, 敷布団の測定箇所を図 2-5 に示す.

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

表 2-3 測定項目(人体)

分類	測定項目	部位等	測定器具等	測定間隔等	節
温熱生理量	皮膚温度	前額, 腹, 背中, 前腕, 手背, 大腿, 下腿, 足背	T 型熱電対 (0.1mm φ)	1min	2.3.1
	深部温度	鼓膜, 直腸	モナサーム (MALLINCKRODT 社製), T 型熱電対 (0.1mm φ)	1min	2.3.2
	皮膚血流量	指先 (人差し指)	レーザー血流量計 (FLO-C1, オメガウ ェーブ社製)	1min	2.3.4
	発汗量	前腕	発汗計 SKD-1000(ス キノス社製)	1min	2.3.5
上記以外の人体に関する 生理量・物理量	体重変化量	体重	電子天秤 (KCC-150S, メトラ ートレード社製)	就寝前と起床後	2.3.6
	体動	左右の腰	体動計 (ライフコー ダ, Kenz 社製)	2min	2.3.7
	寝姿勢	サーモカメラ画像	サーモカメラ (TVS-620, 日本ア ビオニクス社製)	1min	
	心拍数	心電位[0.005sec 間隔で測定] より算出.	AgCl 電極, 脳波計 (polymate AP1132, Teac 社製)	1min	2.3.3
睡眠段階	脳波 (国際 10-20 法による測 定点 C3, C4, O1, O2), 眼 電位 (右上脛, 左下脛), 頤 筋電位 (左右頤) [全て 0.005sec 間隔で測定] より, 国際睡眠段階判定基準を参 考にして判定.	30sec ごとに判 定		2.3.8	
心理量 ^{*2-b}	睡眠変数	就床時間, 入眠潜時, 中途覚 醒時間, 睡眠時間, 深睡眠時 間, 中途覚醒回数など	—	—	2.3.9
	睡眠感	OSA 睡眠調査票	—	就寝前と起床後	2.3.10
	主観申告	—	—	起床後	

*2-b 本論文においては, 直接物理的な測定ができない人体の状態を表す量と定義する.

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

表 2-4 測定項目（環境）

分類	測定項目	部位等	測定器具等	測定間隔等	節
室内・温熱物理量	温度	室中央部（床，床上 10cm，床上 50cm，床上 120cm，床上 180cm，天井．ただし床は計測機器の熱の影響の少ない場所にずらしている．）	T 型熱電対 (0.2mm φ)	1min	2.2.5
	グローブ温度	室中央部（床上 120cm）	T 型熱電対 (0.2mm φ)	1min	
	温度・湿度	室中央部（床上 50cm，床上 120cm） 被験者頭上	おんどとり TR-72S（T&D 社製），温湿度センサユニット(薄型センサ THP-B28T, 温湿度変換器 THT-B121, 神栄社製), 高速絶対温湿度計測器 RHM-1000s（リコーエレメックス社製）	1min	
寝床内・温熱物理量	温度	掛布団（内側・外側）	T 型熱電対 (0.2mm φ)	1min	2.2.6
	温度・湿度	枕	温湿度センサユニット(薄型センサ THP-B28T, 温湿度変換器 THT-B121, 神栄社製)	1min	
		敷布団上（A,B,C,D,E,F,G,H,I）	おんどとり		
		敷布団中上（B,D,E,F,H）	TR-72S（T&D 社製），温湿度センサユニット(薄型センサ THP-B28T, 温湿度変換器		
		敷布団中下（B,D,E,F,H）	THT-B121, 神栄社製)		
敷布団下（B,D,E,F,H）	おんどとり				

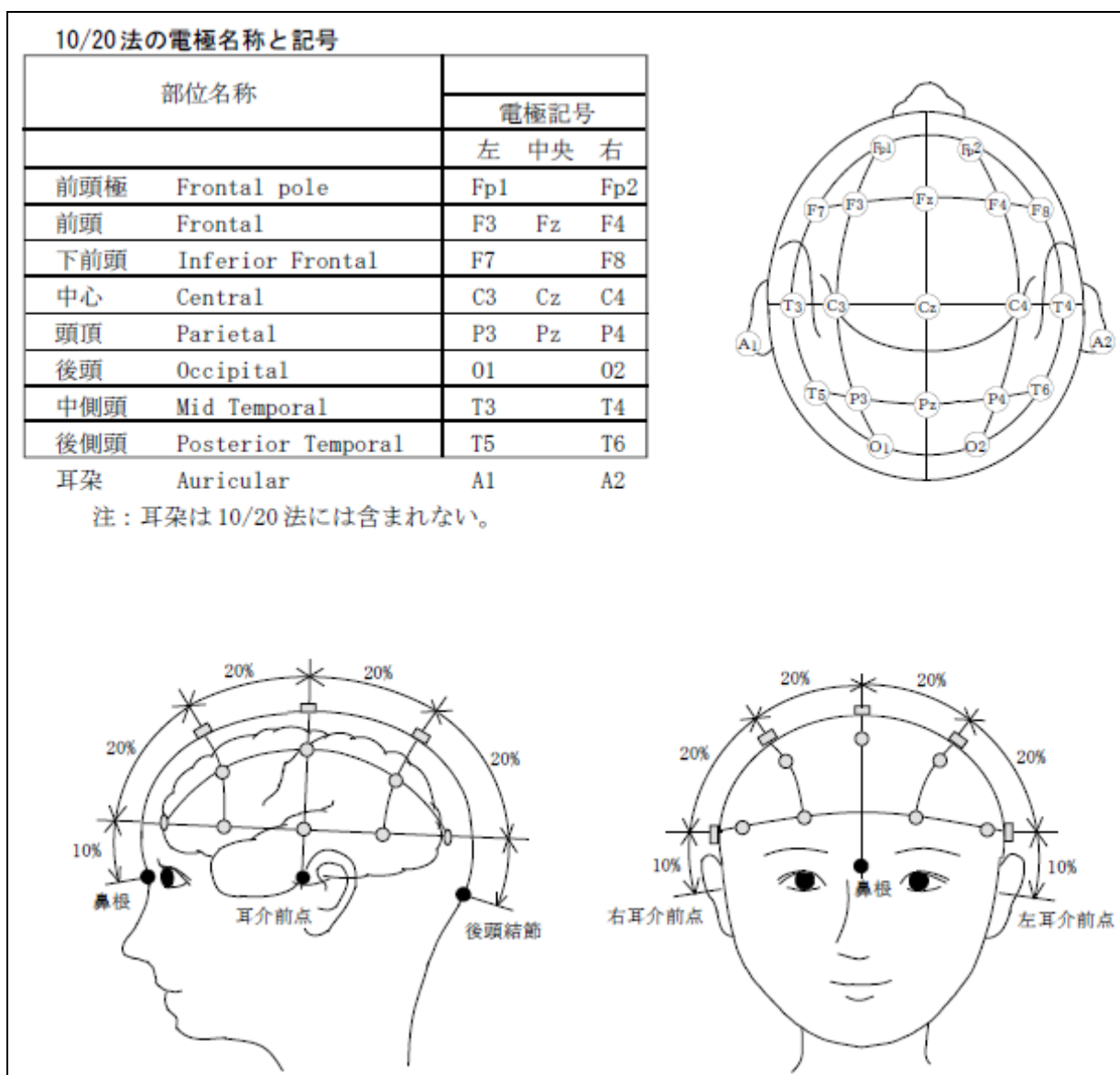


図 2-4 電極の配置図 (10/20 法) *2-c

*2-c 10/20 法 (テン/トゥエンティ法) とは、国際脳波学会が標準方式として推奨している脳波を測定するための電極の配置法である。頭部を計測することによって導出部分を割り出していく方法で、鼻根(Nasion)と後頭結節(Inion)間、および左右両耳介前点 (または外耳孔) 間をそれぞれ計測し、それを 10%および 20%で均等間隔に分割していくものである。計測によって電極位置を定めるので、何度検査をしても、あるいは検者が変わっても、必ず同一部位につけることができ、位置に関して再現性のある導出結果が得られる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

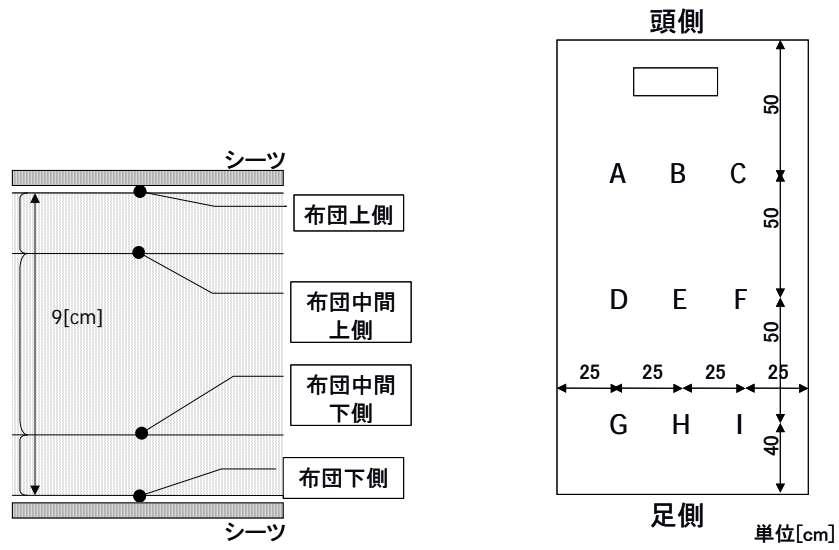


図 2-5 敷布団 測定箇所(左:断面, 右:平面)

2.2.4. 実験の実施時刻

各実験の実施時刻を表 2-5 に示す。なお、実験番号は 2004 年度の第 1 回目の実験を 04-1 と表示する。通常の睡眠の状況を測定するため、実験では夜から朝にかけて睡眠をとらせた。平均就床時間は、04 年度は 436.5 分、05 年度は 373.3 分であった。

表 2-5 各実験の実施時刻

実験番号	実施日	消灯時刻	起床時刻	就床時間 [min]
04-1	2004/8/2	11:43	7:00	437
04-2	2004/8/4	11:48	7:00	432
04-3	2004/8/9	11:45	7:00	435
04-4	2005/8/11	11:38	7:00	442
05-1	2005/7/29	1:10	7:02	352
05-2	2005/7/29	0:48	7:00	372
05-3	2005/8/9	0:21	7:00	399
05-4	2005/8/12	0:53	7:03	370

2.2.5. 室内環境

(1) 概観

就床時間における室内環境平均を表 2-6 に示す。各実験の測定結果を図 2-6～図 2-13 に示す。温度は 23℃～26℃、相対湿度は 60%前後であった。最も低温であった実験は 04-3 であり、高温の実験は 05-3 であった。ルームエアコンを制御しているため、周期を持つ変動が生じている。温度変化は 04 年度より 05 年度の方が小さかった。

表 2-6 室内環境平均（頭部周辺）

実験番号	室内環境平均（頭部周辺）		
	温度 [°C]	相対湿度 [%]	絶対湿度 [kg/kg]
04-1	23.4	56.7	0.010
04-2	23.2	61.9	0.011
04-3	22.8	62.8	0.011
04-4	24.8	57.4	0.011
05-1	24.2	67.6	0.013
05-2	23.7	67.8	0.013
05-3	26.4	60.7	0.013
05-4	23.5	60.9	0.011

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

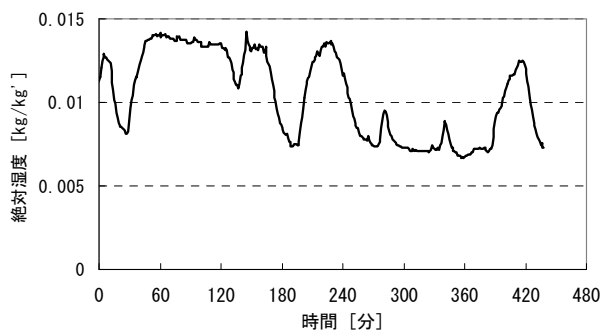
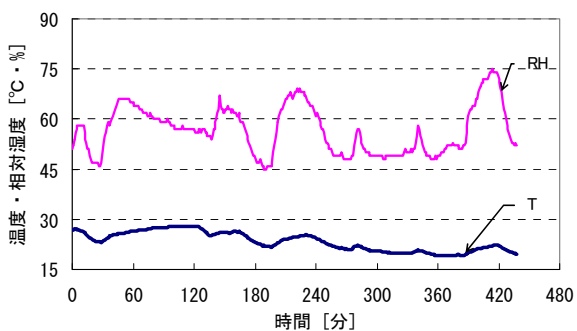


図 2-6 室内環境 04-1 [左：温度，相対湿度，右：絶対湿度]

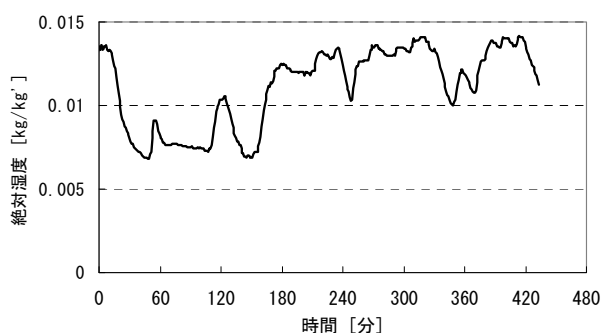
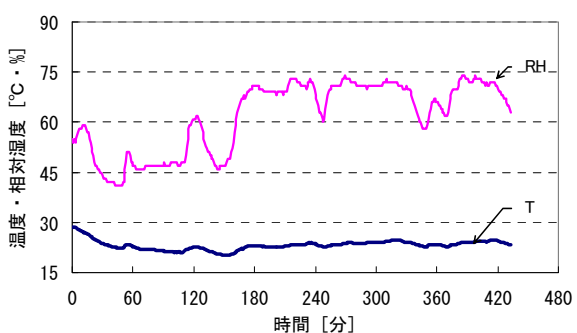


図 2-7 室内環境 04-2 [左：温度，相対湿度，右：絶対湿度]

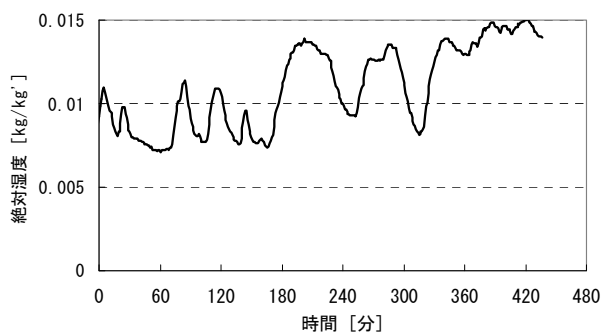
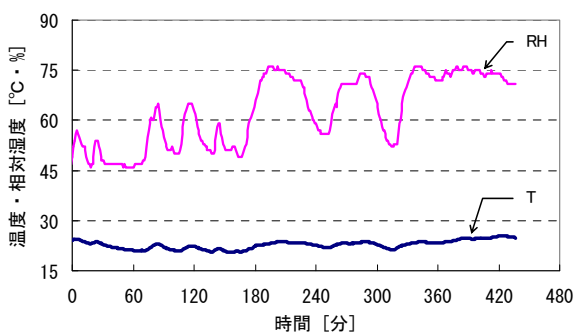


図 2-8 室内環境 04-3 [左：温度，相対湿度，右：絶対湿度]

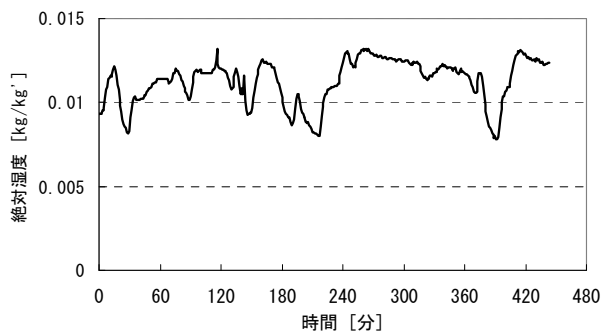
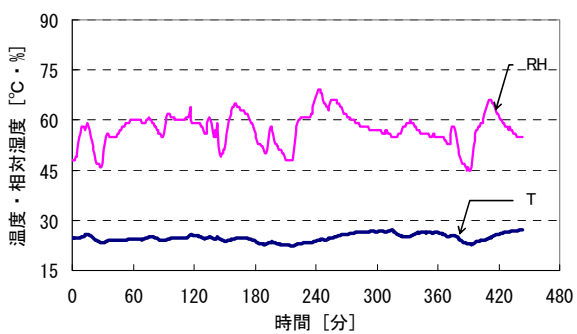


図 2-9 室内環境 04-4 [左：温度，相対湿度，右：絶対湿度]

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

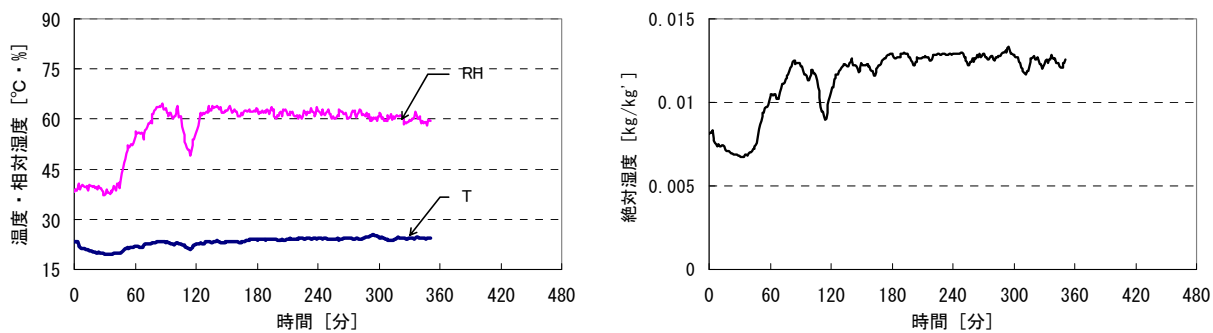


図 2-10 室内環境 05-1 [左：温度，相对湿度，右：絶対湿度]

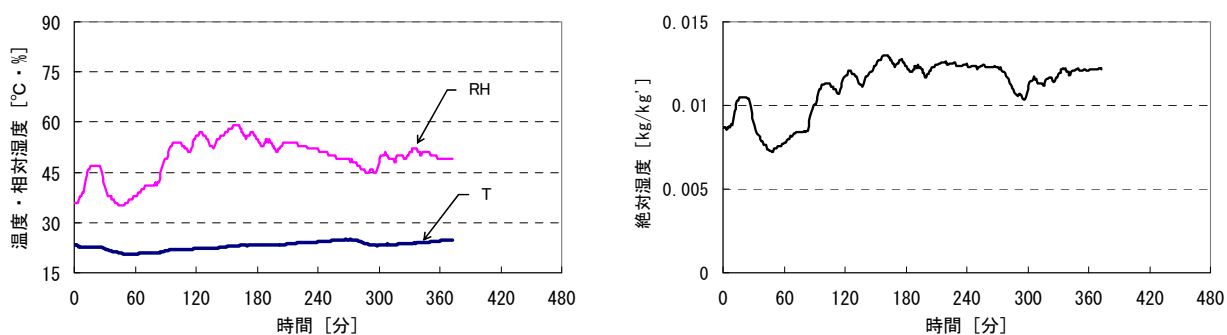


図 2-11 室内環境 05-2 [左：温度，相对湿度，右：絶対湿度]

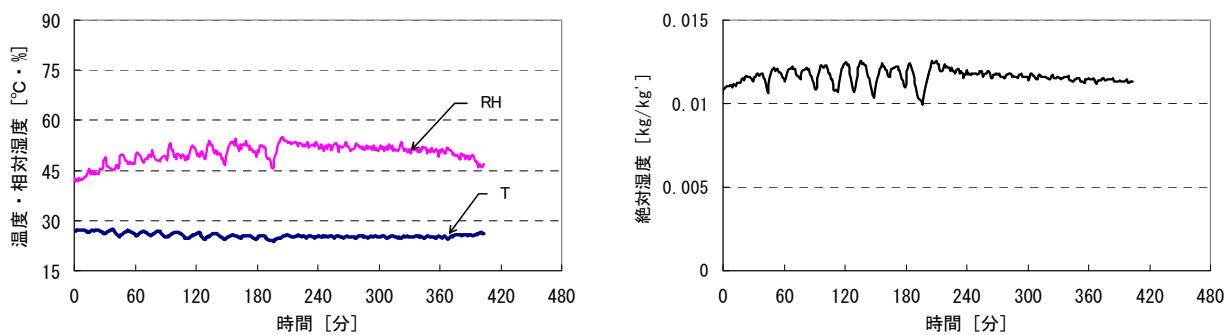


図 2-12 室内環境 05-3 [左：温度，相对湿度，右：絶対湿度]

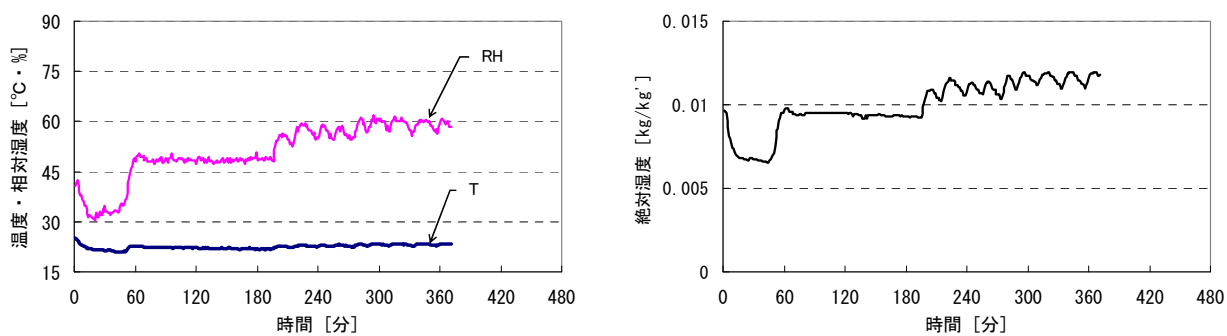


図 2-13 室内環境 05-4 [左：温度，相对湿度，右：絶対湿度]

(2) 温度分布

室内の中心部での温度分布（床，床上 50cm，床上 120cm，天井）の測定結果を図 2-14～図 2-21 に示す。いずれの実験でも床と天井の表面温度が室内空気温度より高かった。室内温度は 05 年度より 04 年度の方が大きく変動している。エアコンの設定温度の変更が多かったためと考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

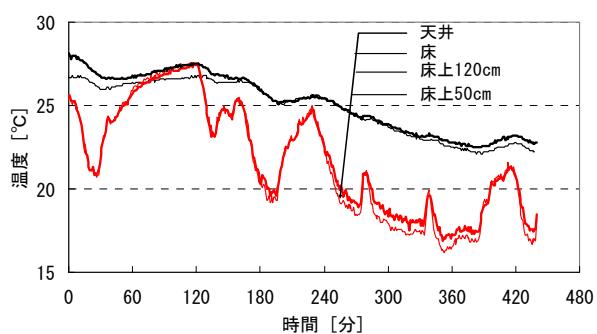


図 2-14 室内環境温度分布 04-1

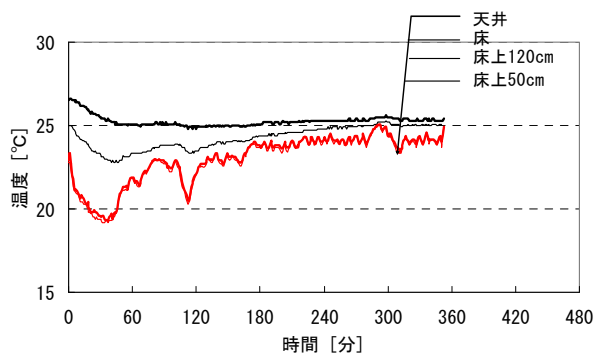


図 2-18 室内環境温度分布 05-1

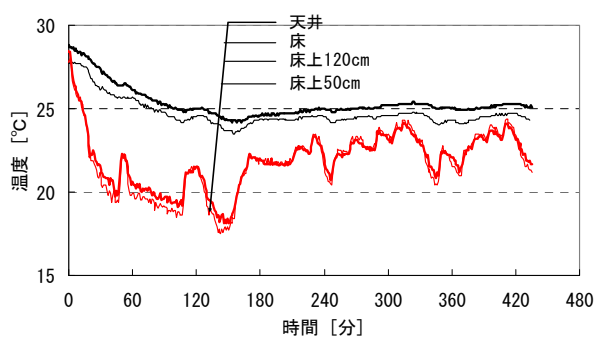


図 2-15 室内環境温度分布 04-2

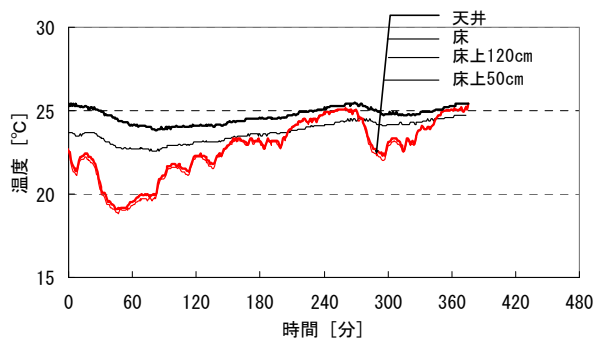


図 2-19 室内環境温度分布 05-2

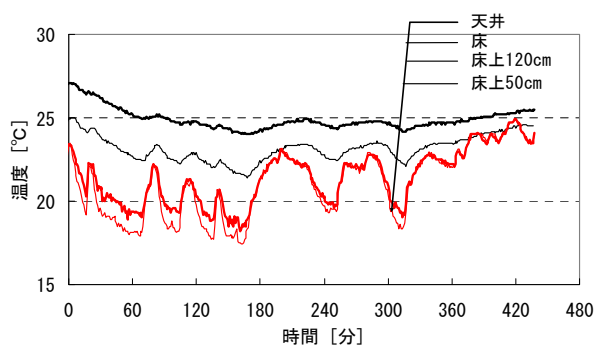


図 2-16 室内環境温度分布 04-3

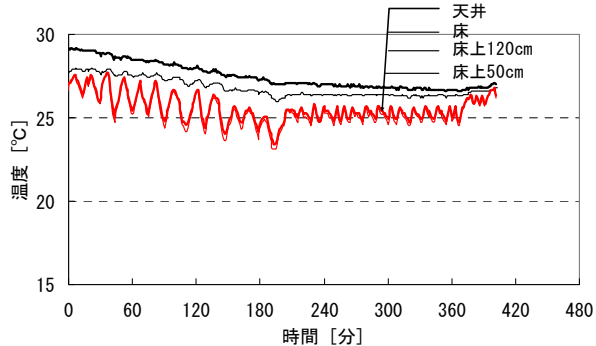


図 2-20 室内環境温度分布 05-3

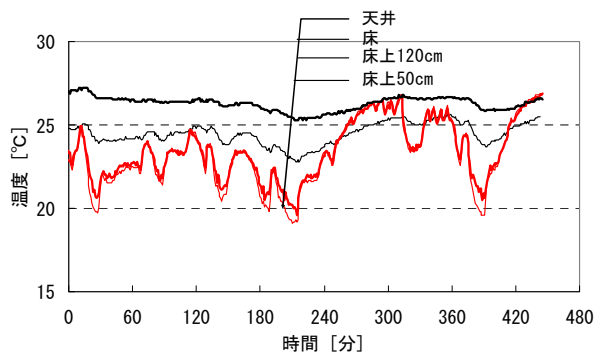


図 2-17 室内環境温度分布 04-4

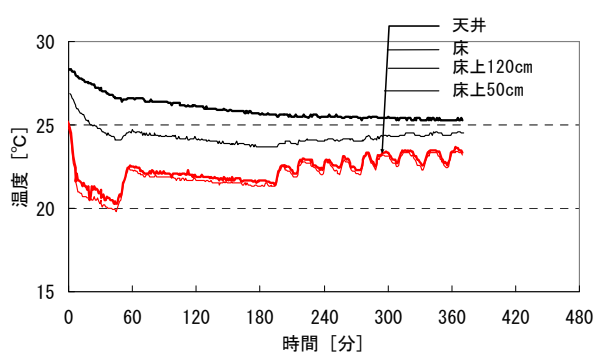


図 2-21 室内環境温度分布 05-4

2.2.6. 寝床内環境

寝床内環境の一例として、敷布団上の中心線上の点 B, E, H (図 2-5) の温度と湿度の測定結果を図 2-22～図 2-29 に示す。B は背中付近, E は腰付近, H は下腿付近の測定点である。B, E は H よりも温度および相対湿度とも平均的に高かった。

温度, 相対湿度の変化は, 人体が測定点に接しているか否かの影響が大きいと考えられる。人体が与える影響は, 発汗による湿度の上昇と吸着熱による温度の上昇, 皮膚からの熱伝達による温度の上昇などがあると推定される。すなわち寝返りなどで人体が移動するために, そうした変化が起こっていると見える。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

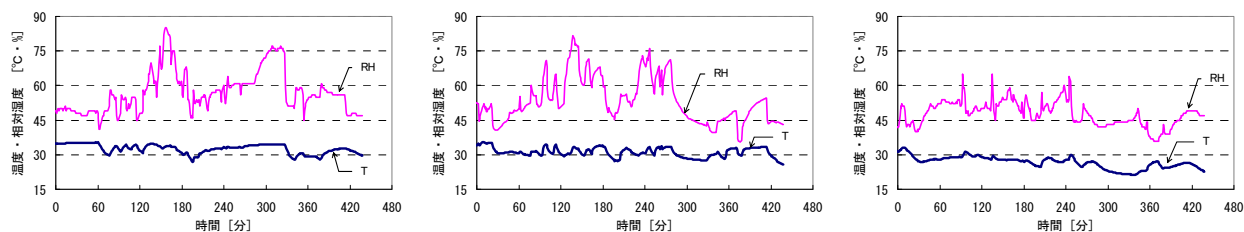


図 2-22 寝床内環境 04-1 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 下:敷布団上 H]

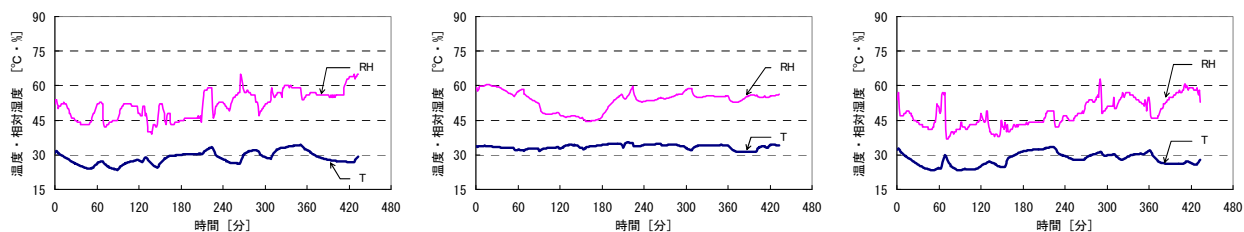


図 2-23 寝床内環境 04-2 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

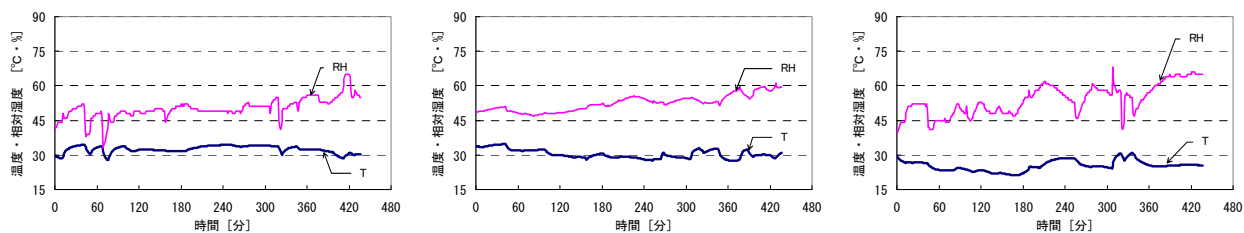


図 2-24 寝床内環境 04-3 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

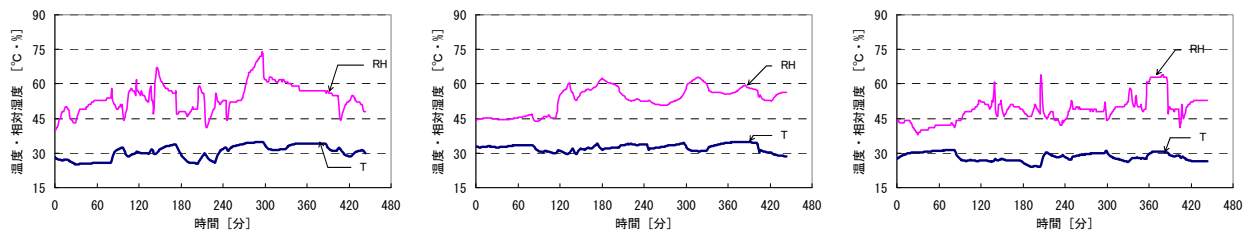


図 2-25 寝床内環境 04-4 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

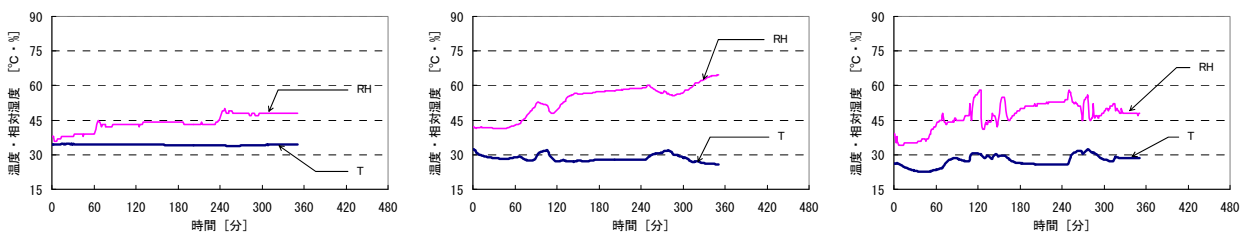


図 2-26 寝床内環境 05-1 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

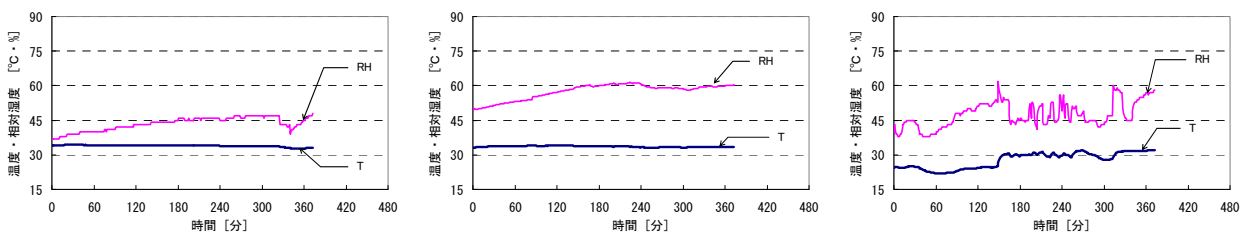


図 2-27 寝床内環境 05-2 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

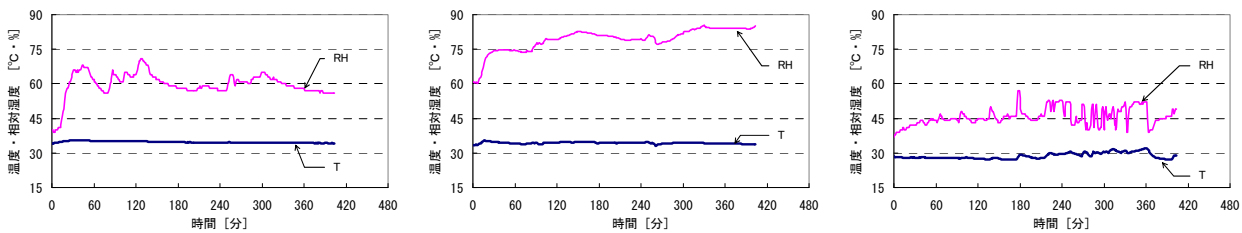


図 2-28 寝床内環境 05-3 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

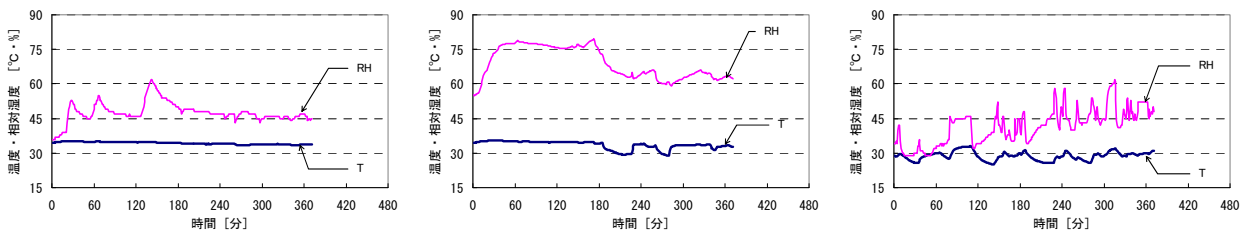


図 2-29 寝床内環境 05-4 [左:敷布団上 B, 中央:敷布団上 E, 右:敷布団上 H]

2.3. 睡眠実験の結果と考察

2.3.1. 皮膚温度

(1) 概観

前額、腹、背中、前腕、手背、大腿、下腿、足背の測定結果を図 2-30～図 2-37 に示す。05-1 の下腿と 05-2 の前腕および 05-3 の下腿の 311 分以降は欠測であった。04-3 の大腿、04-4 の大腿と足背、05-1 の腹、前腕、手背と大腿、05-2 の腹、手背と下腿、05-3 の腹、前腕、下腿と足背、05-4 の腹、前腕と下腿では値のバラツキが認められるが、何らかのノイズの影響を受けたものと考えられる。

概ね 31°C～36°Cを示しており、部位による温度差と経時変化が認められ、腹と背中は高温側、前腕と下腿は低温側である。そうした皮膚温度の測定結果は、人体の周辺環境、すなわち室内環境と寝床内環境の影響と体温調節反応の影響によるものと考えられる。

室内環境と寝床内環境は、エアコンを制御しているため一定ではなく、寝床内環境は、寝返りや体動の影響を受けている。このような環境の下、腹は伏臥位するとき、背中は仰臥位のとときに敷布団と接触し、放熱しづらくなることに伴い温度が上昇するような変化、前腕と下腿は掛布団の外に露出していることが多く、室内空気の影響を受けて皮膚温度が低下するような変化が生じたものと考えられる。また、05 年度が 04 年度より変化が小さいのは、室内環境の変化が小さいためと考えられる。

また、体温調節機構²⁾²⁾ (図 2-38) において、皮膚には熱放散反応の放熱器としての機能が備わっている。発汗による潜熱流および熱伝導などによる顕熱流によって皮膚から放熱を行うため、体温調節反応として皮膚温度に変化が生じたものと考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

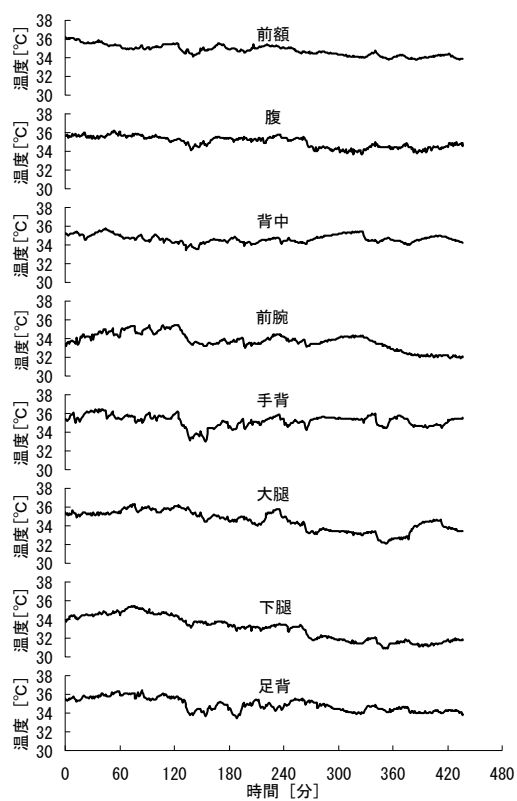


図 2-30 皮膚温度 04-1

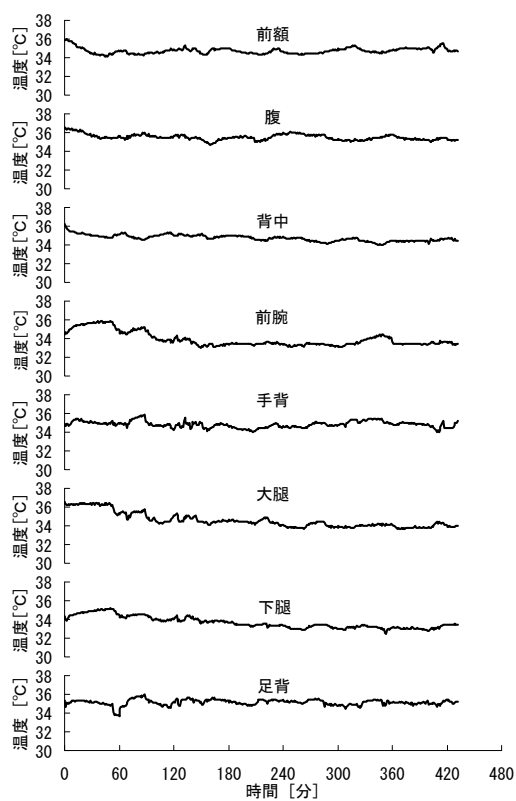


図 2-31 皮膚温度 04-2

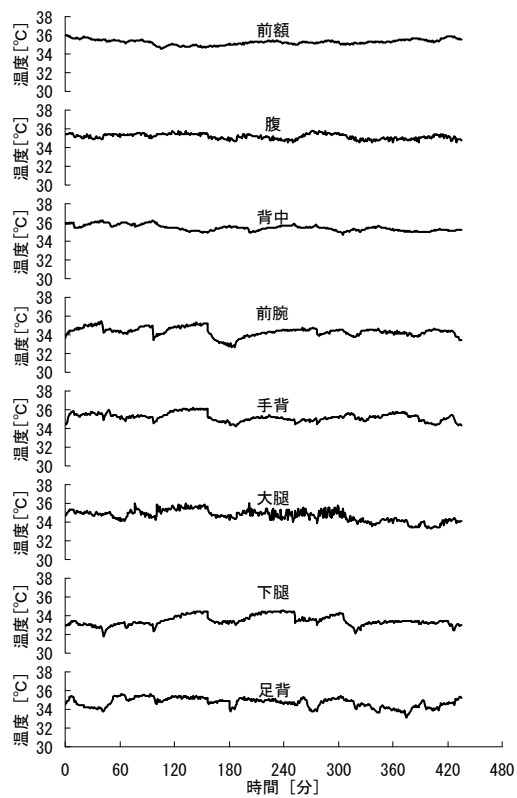


図 2-32 皮膚温度 04-3

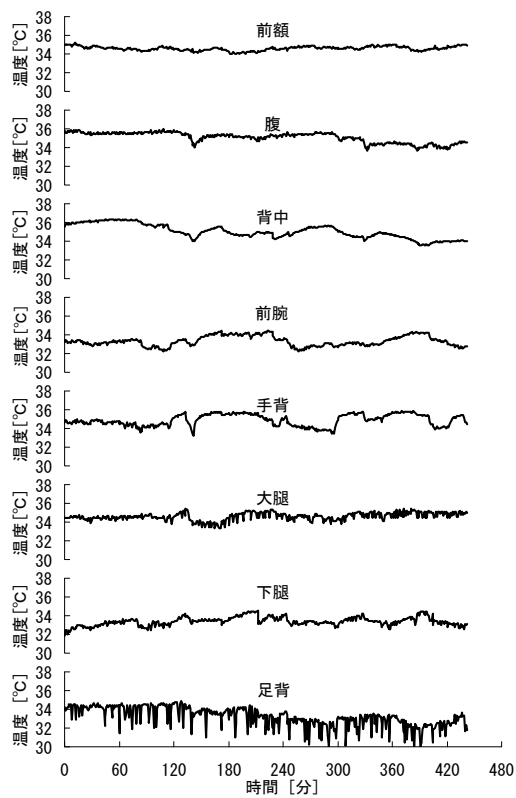


図 2-33 皮膚温度 04-4

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

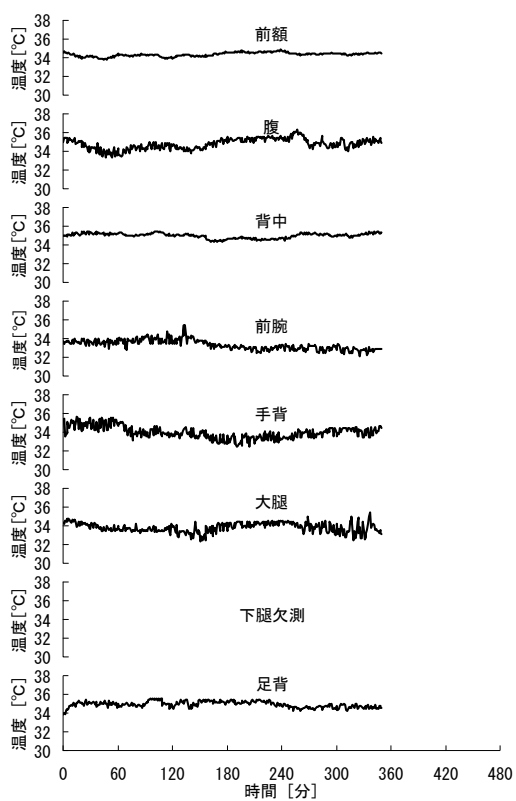


図 2-34 皮膚温度 05-1

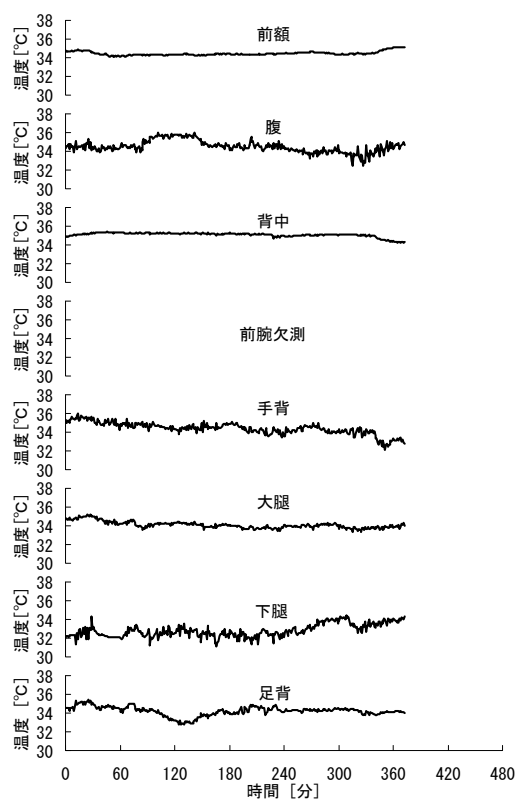


図 2-35 皮膚温度 05-2

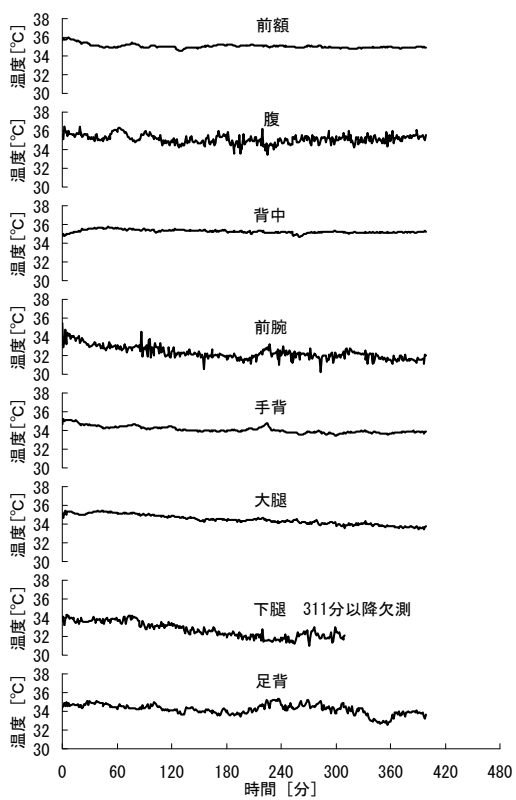


図 2-36 皮膚温度 05-3

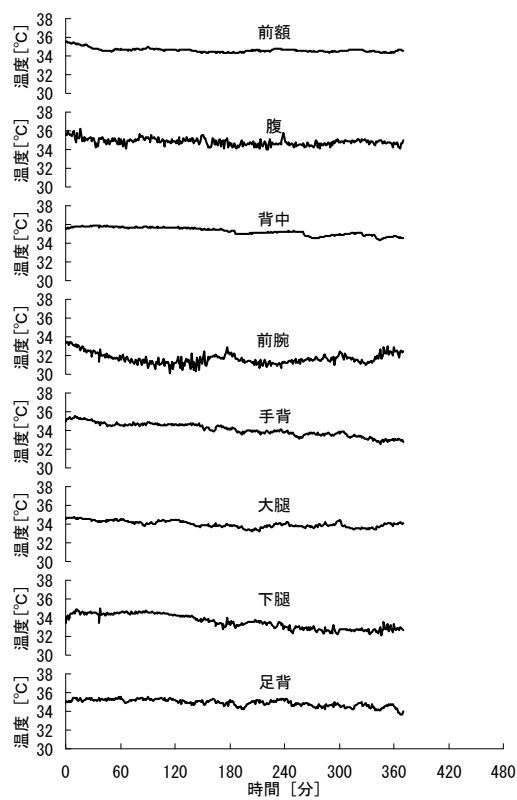


図 2-37 皮膚温度 05-4

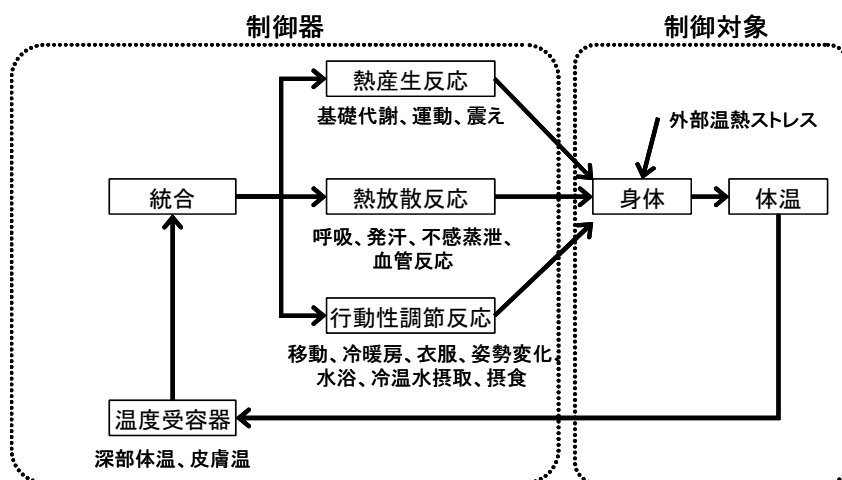


図 2-38 体温調節機構

(2) 平均皮膚温度

平均皮膚温度を図 2-39～2-44 に示す. 平均皮膚温度は, 温冷感の指標としてよく用いられている²⁻³⁾. ここでは, 一般的な体表面積比率によって計算した. その比率を表 2-7 の左の列に示す. これは表 2-7 の中の列に示す第 3 章で扱う Stolwijkモデルの頭部, 体幹部, 四肢部の各部位の体表面積比率を考慮して求めた値である. 具体的には, モデルの頭部には前額が対応するものとした. モデルの体幹部には腹と背中が対応するものとし 0.5 を乗じた. モデルの四肢部には, 前腕, 手背, 大腿, 下腿, 足背が対応するものとして, 表 2-7 の右の列に示すHardy-Duboisの 7 点法の比率を参照して決定した.

平均皮膚温度を概観すると, 就寝後は上昇するが, しばらくすると, 安定あるいは低下に転じる. 就床時間全体でみると, 時間経過とともに低下する傾向がみられる.

表 2-7 平均皮膚温度算定に用いた各部の面積比率

平均皮膚温度算定に用いる 各部位の体表面積比率		Stolwijk モデルの 各部位の体表面積比率		[参考] Hardy-Dubois の 7 点法の体表面積比率	
部位	比率	部位	比率	部位	比率
前額	0.090	頭部	0.090	前額	0.07
腹	0.185	体幹部	0.37	躯幹	0.35
背中	0.185				
前腕	0.151	四肢部	0.54	前腕	0.14
手背	0.043			手背	0.05
大腿	0.113			大腿	0.19
下腿	0.170			下腿	0.13
足背	0.063			足背	0.07
計	1	計	1	計	1

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

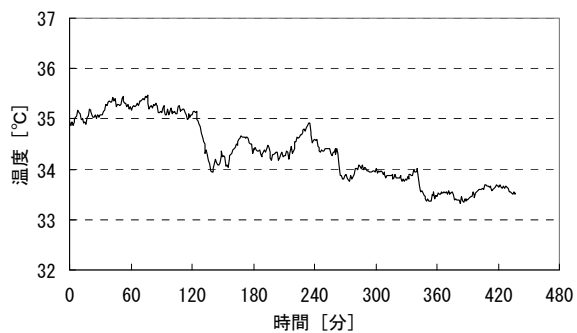


図 2-39 平均皮膚温度 04-1

平均皮膚温度 05-1 欠測(下腿)

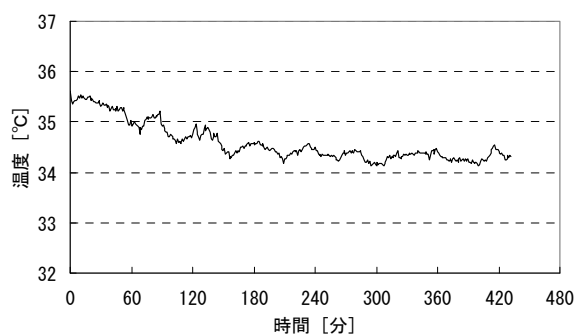


図 2-40 平均皮膚温度 04-2

平均皮膚温度 05-2 欠測(前腕)

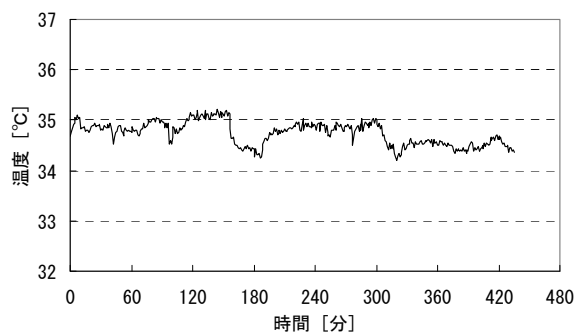


図 2-41 平均皮膚温度 04-3

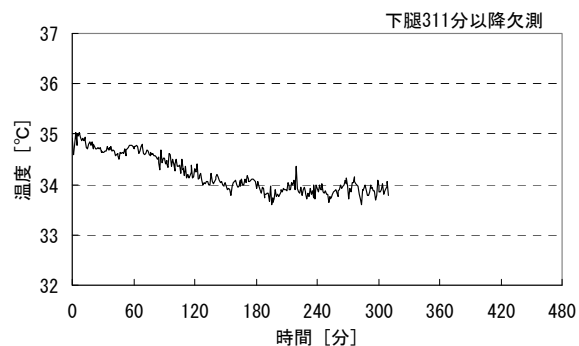


図 2-43 平均皮膚温度 05-3

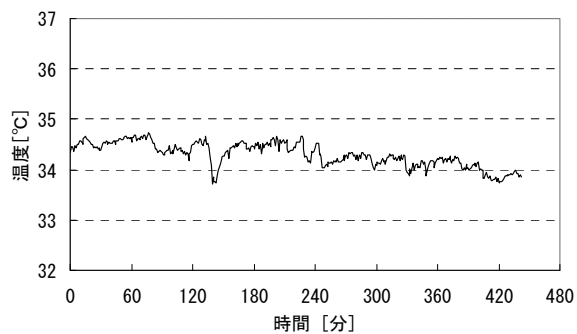


図 2-42 平均皮膚温度 04-4

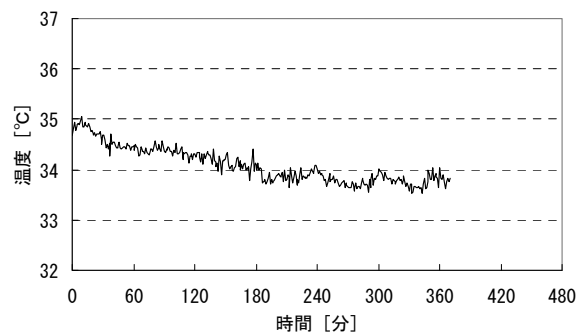


図 2-44 平均皮膚温度 05-4

2.3.2. 深部温度

深部温度として、鼓膜温度と直腸温度の測定結果を図 2-45～図 2-52 に示す。04-1 の直腸温度は 247 分以降欠測であった。深部温度は睡眠の経過とともに低下する傾向があり、特に直腸温度において明確である。代謝量の低下による影響を受けていると考えられる。鼓膜温度は直腸温度より低く、変動が大きい。これは鼓膜温度が寝床内や室内環境の変化の影響を受け易いためと考えられる。実験により鼓膜と直腸の温度差は異なっている。04-1 と 05-1 では両者は近似しているが、04-2 では最大で 1℃程度の差が生じている。なお、04-1, 04-3, 05-3, 05-4 の鼓膜、04-4 の直腸は値のバラツキが認められるが、皮膚温度と同様、何らかのノイズの影響を受けたものと考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

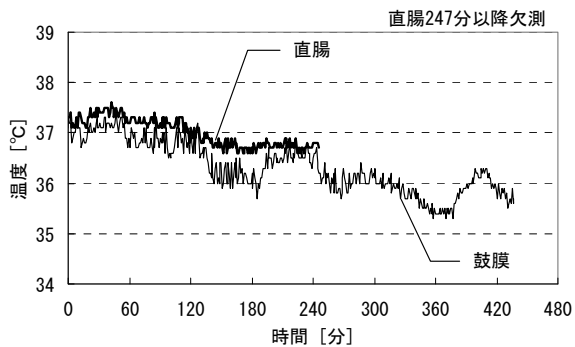


図 2-45 深部温度 04-1

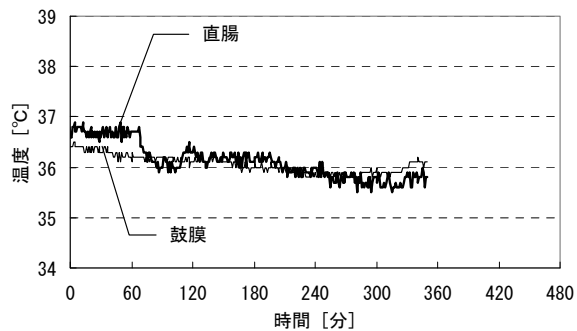


図 2-49 深部温度 05-1

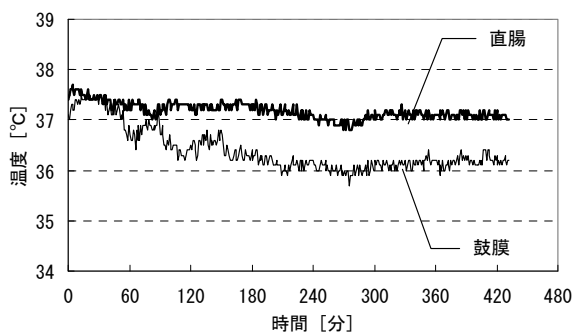


図 2-46 深部温度 04-2

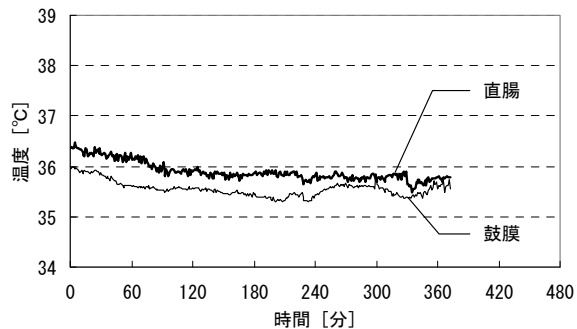


図 2-50 深部温度 05-2

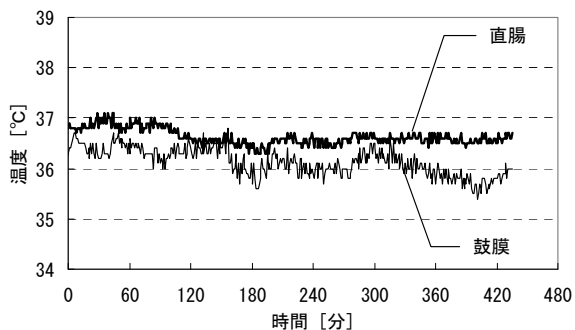


図 2-47 深部温度 04-3

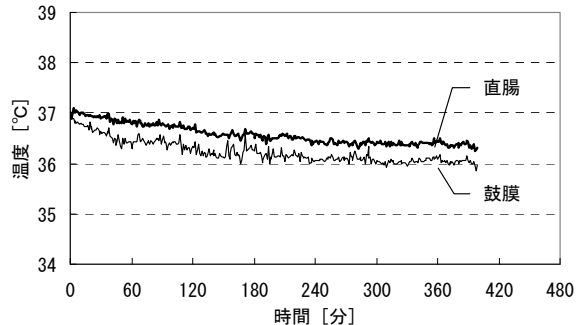


図 2-51 深部温度 05-3

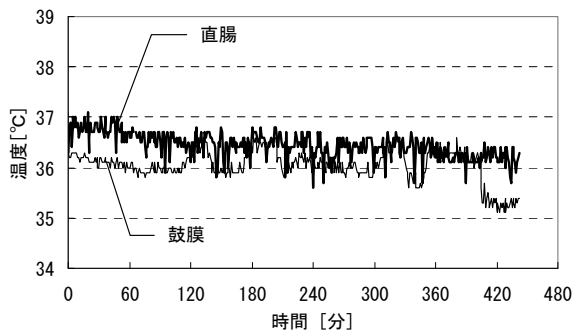


図 2-48 深部温度 04-4

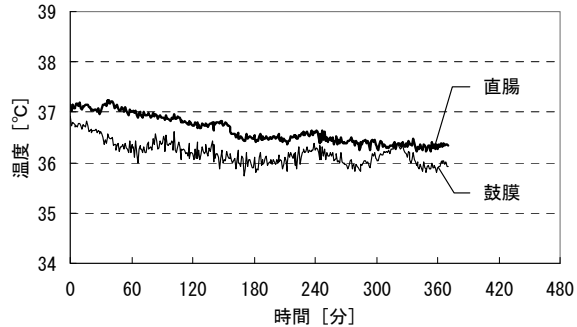


図 2-52 深部温度 05-4

2.3.3. 心拍数

心拍数の計算結果を図 2-53～図 2-60 に示す。心電位の波形より計算したものである。いずれの実験においても 40～70[1/min]の範囲を変動している。心拍数は自律神経機能の変化を反映して²⁻⁴⁾、睡眠中は副交感神経系が優位になるといわれており、就寝後では平均的には心拍数が低下していることと対応している。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

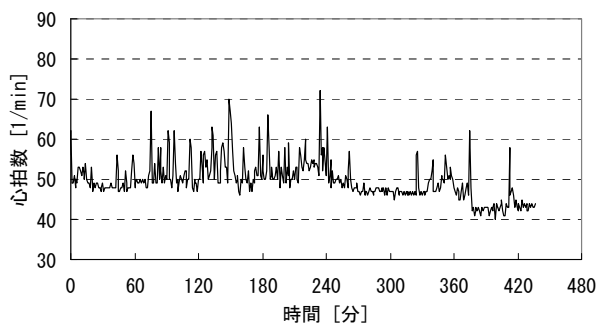


図 2-53 心拍数 04-1

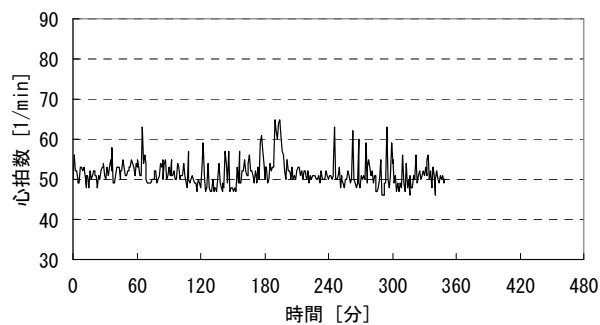


図 2-57 心拍数 05-1

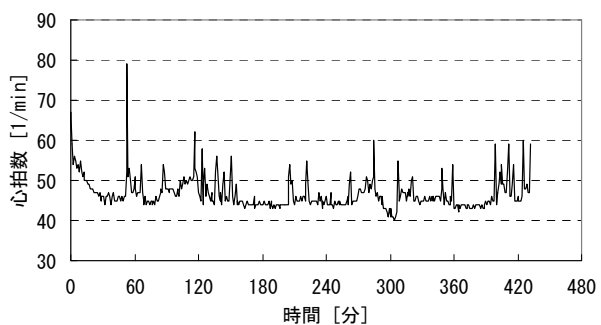


図 2-54 心拍数 04-2

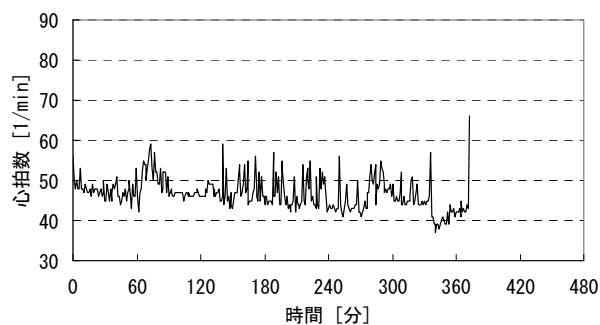


図 2-58 心拍数 05-2

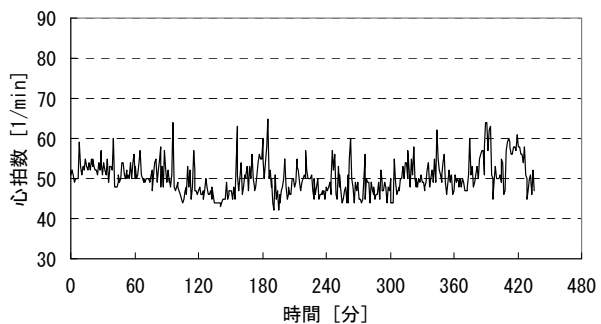


図 2-55 心拍数 04-3

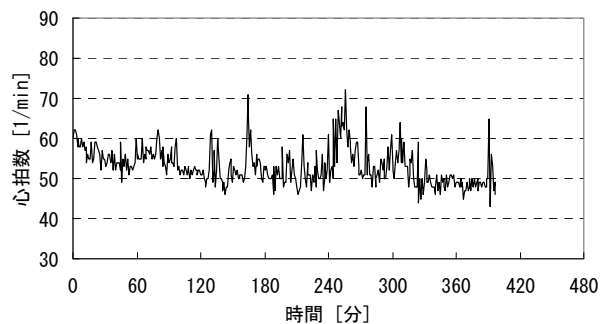


図 2-59 心拍数 05-3

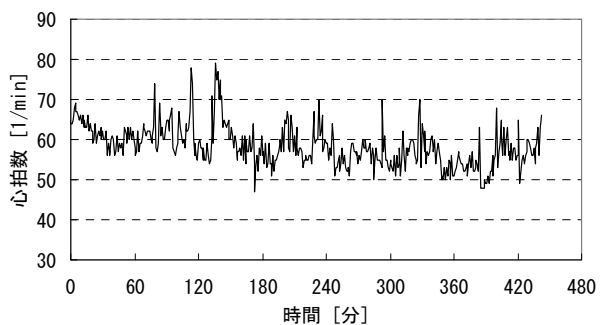


図 2-56 心拍数 04-4

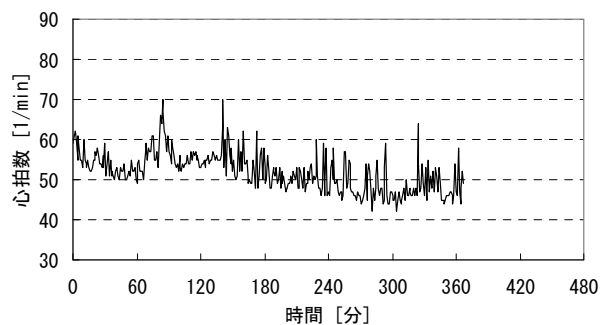


図 2-60 心拍数 05-4

2.3.4. 皮膚血流量

皮膚血流量は、体組織 100g あたり 1 分間に流れる血液の量で示される。皮膚血流量の測定結果を図 2-61～図 2-67 に示す。なお、04-1 は欠測であった。実験により値の差が大きい。取り付け部位の差、個体差、人体周辺環境の変化によるものと考えられる。皮膚血流量は体温調節のための熱放散反応における制御器の役割を持つ。放熱量を増やすためには、血管が拡張し、皮膚血流量が増加する方向に調節される。すなわち各実験での相対的な値が大きい時間帯には、体温調節反応が活発に行われていたと考えられる。

04 年度は 05 年度より各実験での平均値は小さいが、相対的な値の変動が大きい。平均値の差は個体差によるものと考えられ、体温調節反応が活発に行われたのは、相対的な値の変動を大きい 04 年度であった可能性がある。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

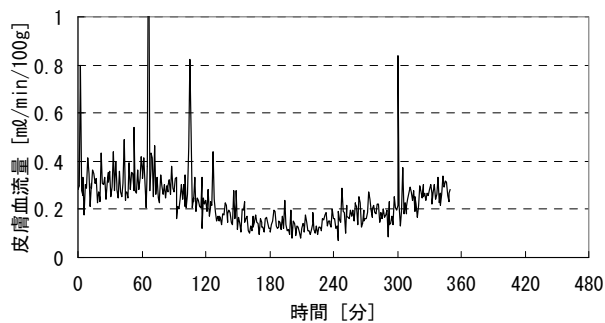


図 2-64 皮膚血流量 05-1

皮膚血流量 04-1 (欠測)

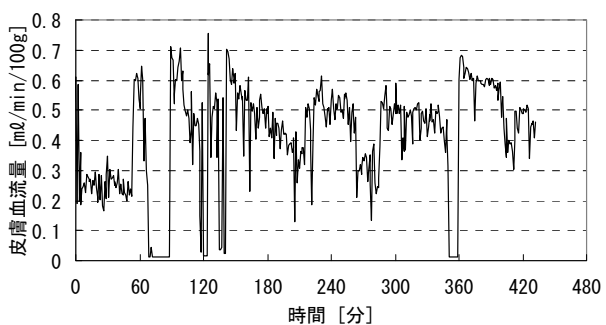


図 2-61 皮膚血流量 04-2

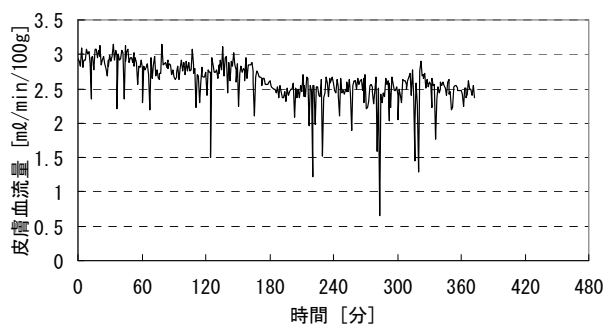


図 2-65 皮膚血流量 05-2

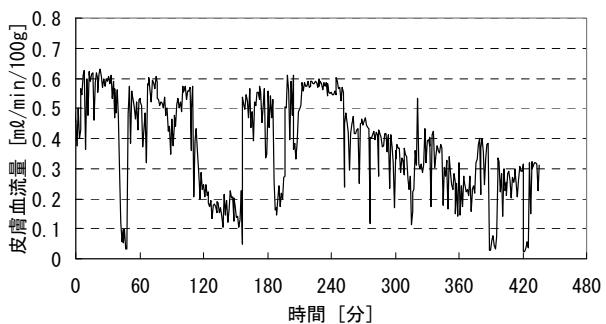


図 2-62 皮膚血流量 04-3

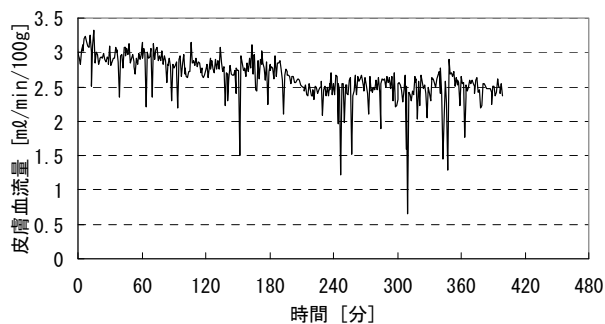


図 2-66 皮膚血流量 05-3

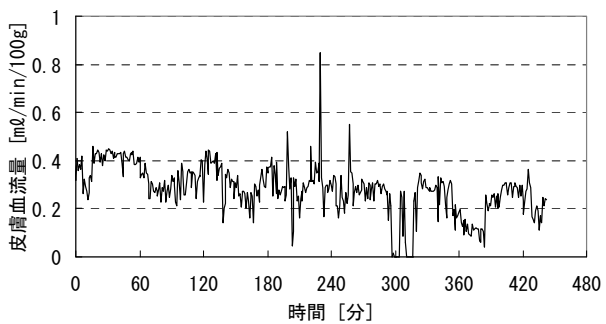


図 2-63 皮膚血流量 04-4

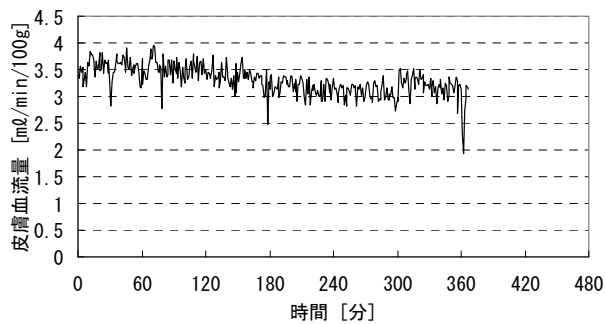


図 2-67 皮膚血流量 05-4

2.3.5. 発汗量

発汗量の測定結果を図 2-68～図 2-75 に示す。発汗は体温調節反応と関係しており、皮膚表面での蒸散によって放熱が行われる。概ね、04 年度が 05 年度より値が大きく、変動も大きい。取り付け部位や個体差によるものと考えられる。また人体周辺の環境の変化が大きいため体温調節反応が活発に行われたことも一因と考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

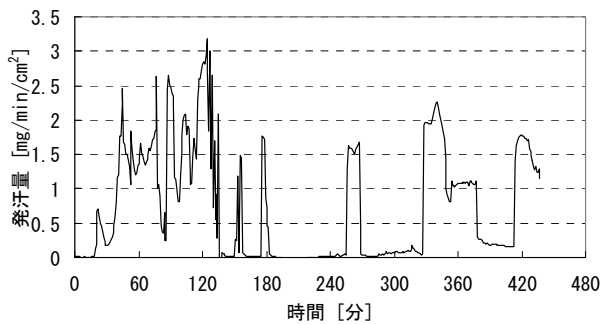


図 2-68 発汗量 04-1

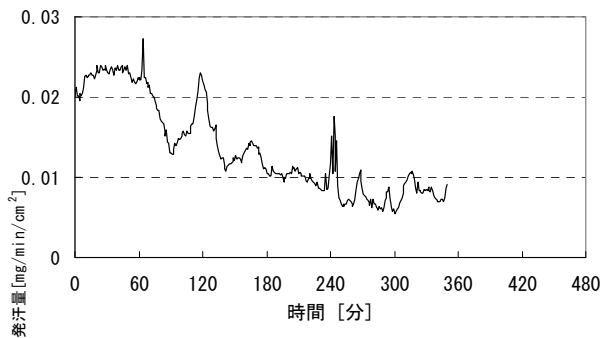


図 2-72 発汗量 05-1

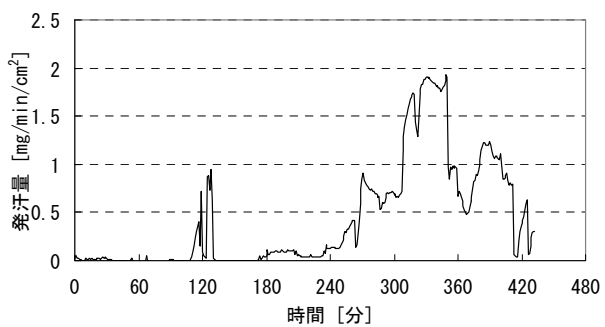


図 2-69 発汗量 04-2

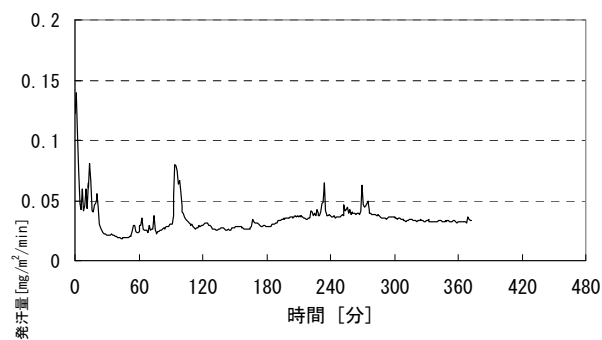


図 2-73 発汗量 05-2

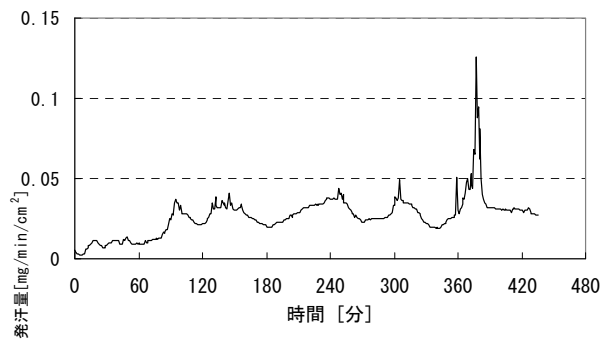


図 2-70 発汗量 04-3

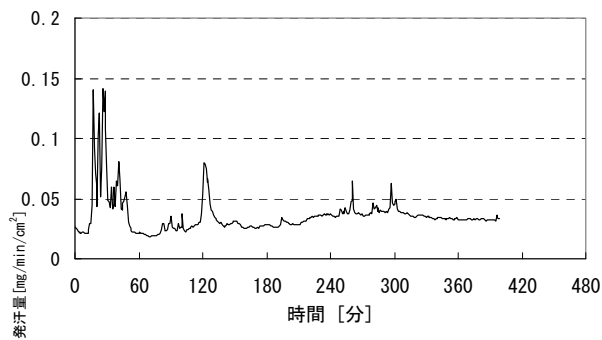


図 2-74 発汗量 05-3

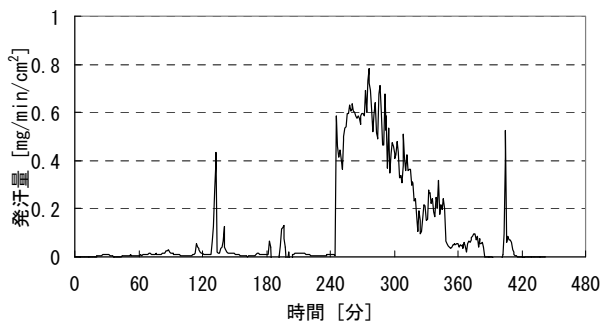


図 2-71 発汗量 04-4

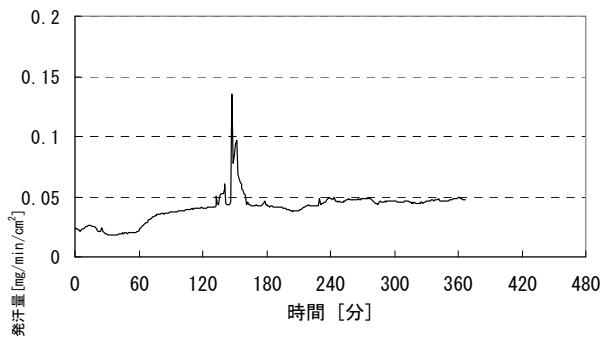


図 2-75 発汗量 05-4

2.3.6. 体重変化量

就寝前と起床後の体重とその変化量を表 2-8 に示す。呼吸，発汗および不感蒸泄により睡眠中に人体から水分が失われたために起床後は体重が減少していた。05-2 の変化量が極端に少ないが，何らかの原因による測定ミスの可能性が考えられる。05-2 を除くと平均で約 0.8kg 減少した。

表 2-8 体重変化量

実験番号	就寝前 [kg]	起床後 [kg]	変化量 [kg]
04-1	69.87	68.56	▲1.30
04-2	69.23	68.49	▲0.74
04-3	69.23	68.49	▲0.74
04-4	71.50	70.37	▲1.13
05-1	58.17	57.69	▲0.48
05-2	57.68	57.60	▲0.08
05-3	56.68	56.24	▲0.44
05-4	58.33	57.60	▲0.73

2.3.7. 寝姿勢と体動

人体各部位の動き、寝姿勢および体動値の測定結果を図 2-76～図 2-83 に示す。

各部位の動きと寝姿勢は、1 分毎に撮影した赤外線カメラの画像から調べたものである。各部位の動きは、頭、右手、左手、腹、背中、右足、左足が 1 分前の画像と異なっている場合にプロットしている。この方法では、部位の動きがあっても、掛布団の下にあるまたは赤外線カメラの撮影範囲から外れている状況が考えられるため、全ての動きをプロットすることはできないが、大略の動きは把握できる。寝姿勢は、仰臥位を 0° 、右向きの側臥位を 90° 、伏臥位を 180° 、左向きの側臥位を 270° として示している。体動計とは、加速度計が内蔵されており、人体の動きの強度を測定するものである。実験では被験者に 2 台の体動計を左右の腰に装着させており、2 台の出力値の和を体動値として示す。

赤外線カメラの画像に寝姿勢の変化がみられるときは、概ね体動値が出力されているが、寝姿勢の変化が確認されていない時間帯でも、体動値が出力されている。これは、体動計の感度が高いためと考えられる。

寝姿勢をみると、04 年度では寝姿勢の変化が多く、大きな寝返りもあった。それに対し、05 年度では、寝姿勢の変化が少なく、伏臥位になることはなかった。周辺環境や個体差によるものと考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

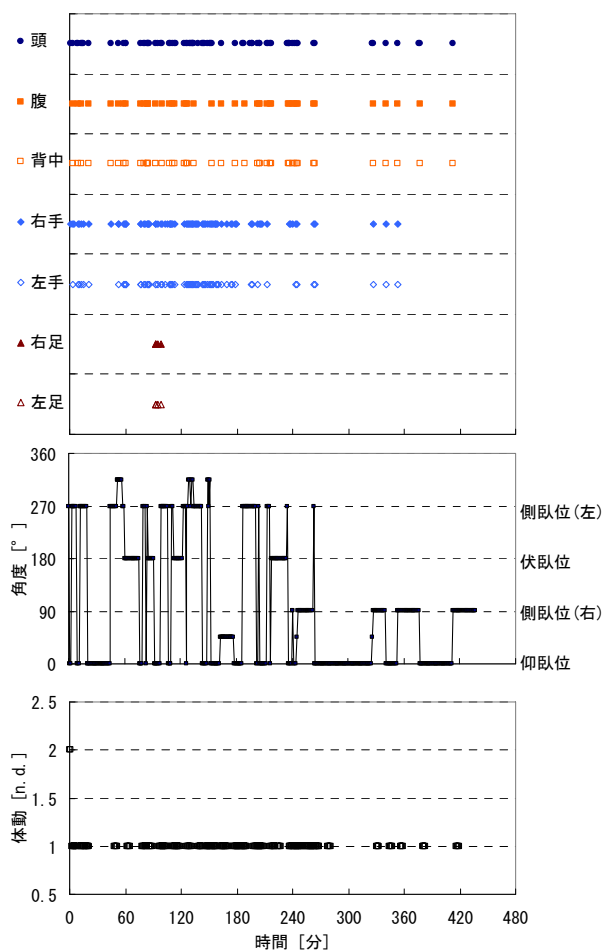


図 2-76 体動・寝姿勢 04-1
(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動)

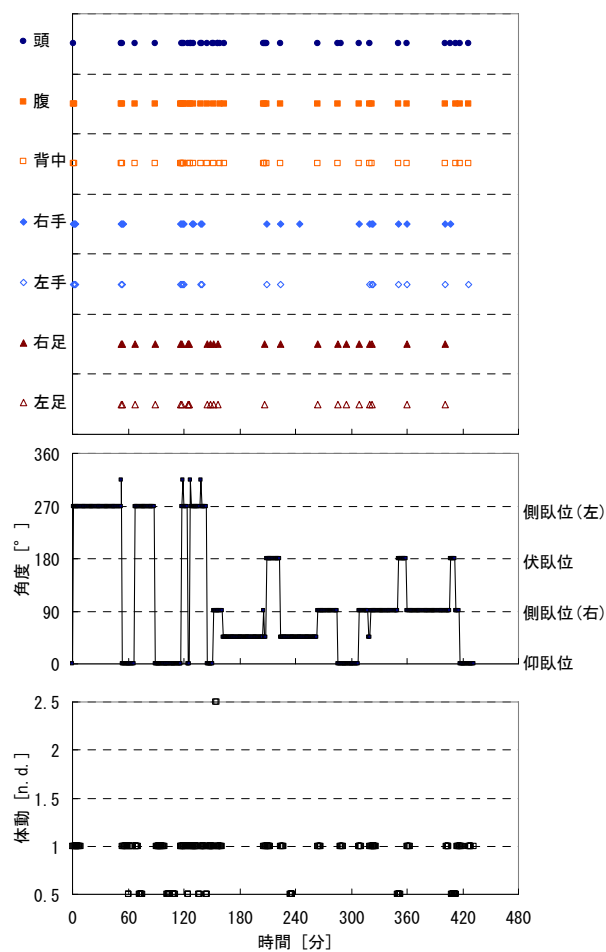


図 2-77 体動・寝姿勢 04-2
(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

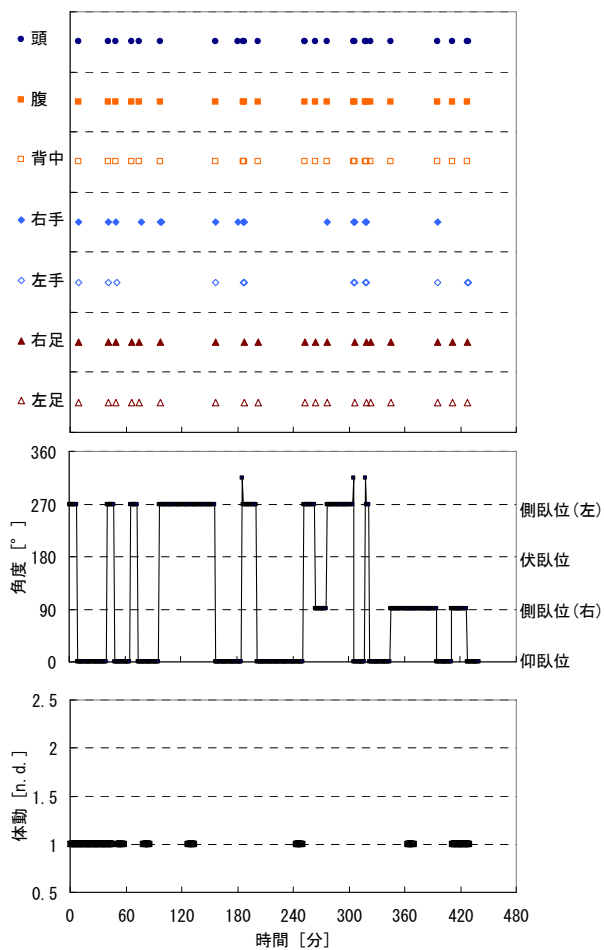


図 2-78 体動・寝姿勢 04-3

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

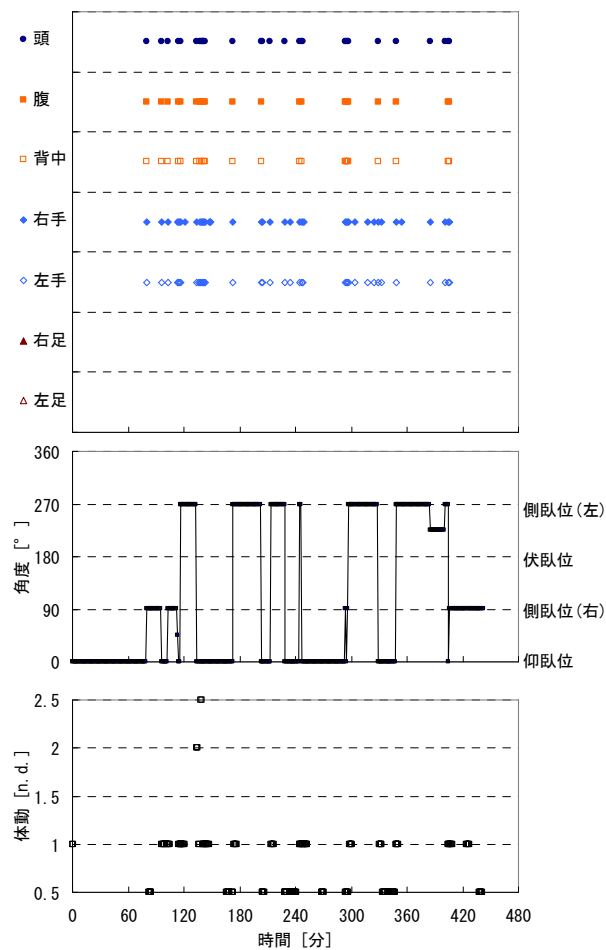


図 2-79 体動・寝姿勢 04-4

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

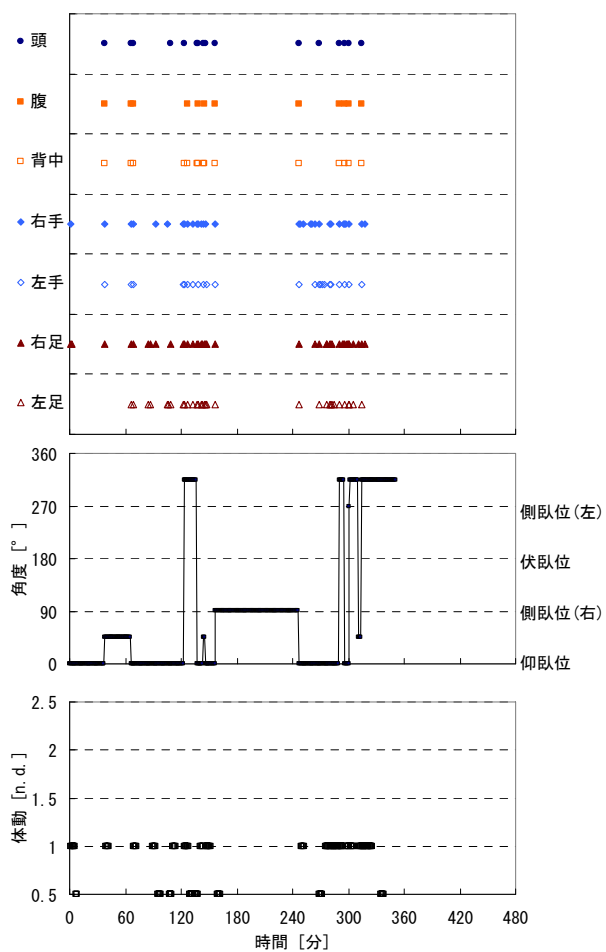


図 2-80 体動・寝姿勢 05-1

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

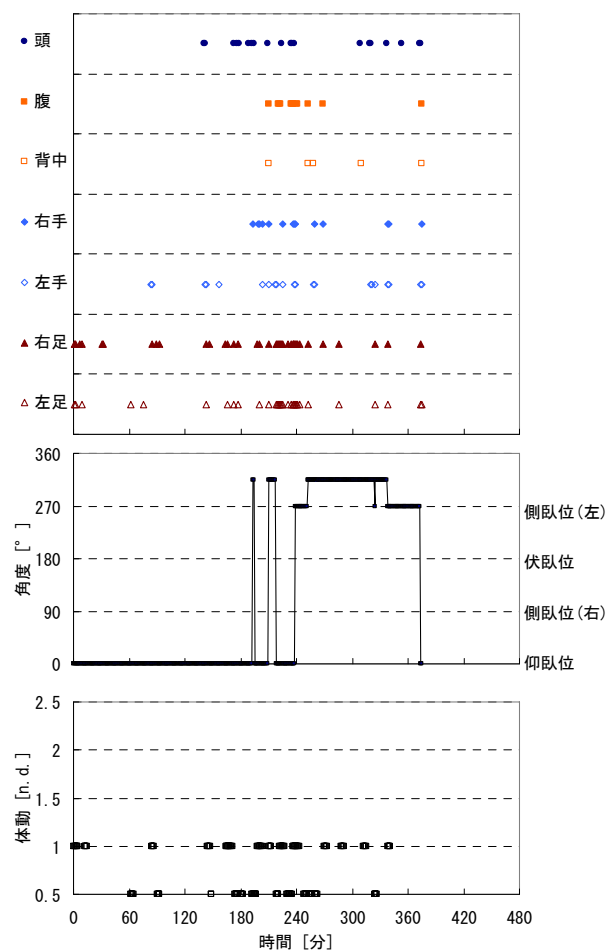


図 2-81 体動・寝姿勢 05-2

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

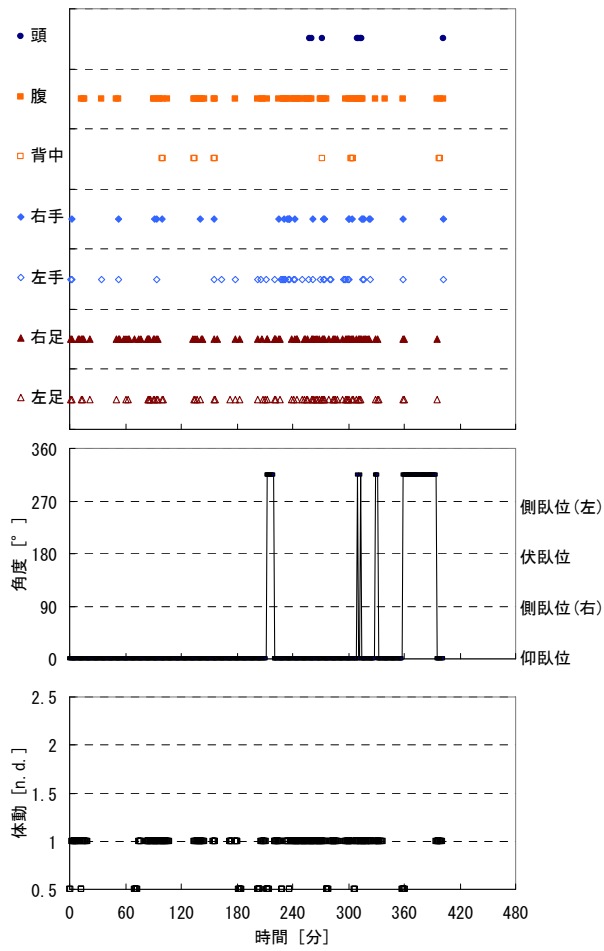


図 2-82 体動・寝姿勢 05-3

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

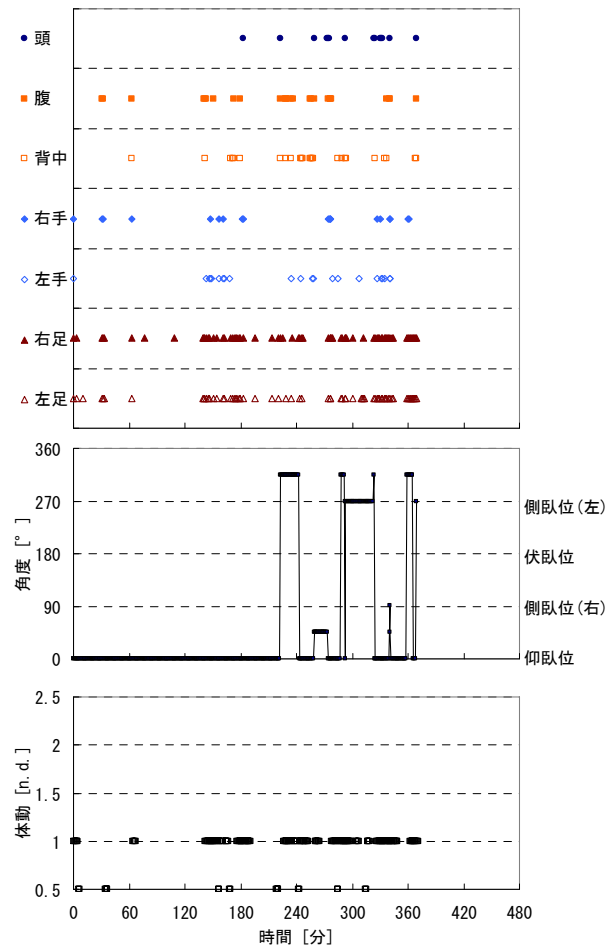


図 2-83 体動・寝姿勢 05-4

(上:部位の動き, 中:寝姿勢, 下:体動値)

2.3.8. 睡眠段階

睡眠の状態は、通常脳波で調べる^{2-5,2-6)}。脳波には、 β 波、 α 波、 θ 波、 δ 波など様々な周波数帯域の波があり、これらの波の成分より、睡眠あるいは覚醒かを決定する。さらに睡眠は、深さの程度などにより睡眠段階に分類される。

睡眠には、性質の異なるレム睡眠とノンレム睡眠の2種類がある。この2種類があるのは、大脳を休ませるための合理的な生存戦略のためといわれている²⁻⁵⁾。生物学的には、ヒトにとって睡眠の第一の目的は、大脳を休ませることである。ノンレム睡眠は、大脳を休ませて回復させる役割を持っている。ノンレム睡眠では意識水準の低下および体温の低下のため、覚醒へのスムーズな移行が困難となる。そこで睡眠と覚醒との橋渡しをする、すなわち大脳をノンレム睡眠から目覚めさせる役割を持つのがレム睡眠といわれている。なお、レム睡眠は、もともと変温動物が身体を休ませる休息方法であったが、恒温動物では、そのような役割に変化して残ったという解釈もある²⁻⁵⁾。

睡眠と覚醒および睡眠段階の境界については議論があり、便宜的に国際基準が定義されている(表2-9)²⁻⁷⁾。ノンレム睡眠は脳波の特徴から4段階に分けられているが、STAGE1とSTAGE2の浅睡眠(Light Sleep)と、STAGE3とSTAGE4の深睡眠(Deep Sleep)の2段階の分類でも、睡眠の特徴を捉えるためには十分と考えられる。

そこで本研究では、睡眠実験での意識水準を、レム睡眠(REM)、浅睡眠(STAGE L)、深睡眠(STAGE D)の睡眠3段階と、覚醒(WAKE)に分類することとした。なお、体動などにより判定不能な区間はMT(Movement Time)とした。具体的には、電位、眼電位、頤筋電位の測定結果を目視して、30秒を1つの区間として判定を行った。

睡眠段階の判定結果を図2-84～図2-91に示す。なお、04-3は196分以降、04-4は331分以降では欠測であった。

健康な成人では、ノンレム睡眠とレム睡眠の2種類の睡眠が約1.5時間の単位を作り、いくつかの単位がまとまって、一夜の睡眠を構成しているといわれている²⁻⁵⁾。04-4と、05-4では、約2時間の周期があるようにもみえるが、明確ではない。

また睡眠の最初の3時間(睡眠サイクルの2単位)で、深睡眠がまとまって出現するといわれている²⁻⁵⁾。いずれの実験においても、睡眠の初期の時間帯にまとまった深睡眠がみられる。一方、実験によっては他の時間帯でもまとまった深睡眠がみられる。04-1では300分前後に、04-2では、180前後にまとまった深睡眠が出現している。05-1は睡眠の中盤頃、05-3は起床前にもまとまった深睡眠の出現がある。深睡眠が大脳を休ませる役割を持つと考えると、睡眠初期の段階での深睡眠の時間では十分ではなかったといえる。

表 2-9 国際睡眠段階判定基準

分類		状態	ポリグラフ (脳波, 眼球運動, 筋電図)
WAKE		覚醒している状態である。	α 波と低電位で様々な周波数の脳波が混在する。 瞬き, 速い眼球運動や高振幅で持続性の筋電図が見られる。
NON-REM (Non-REM Sleep)	STAGE L (Light Sleep)	STAGE 1	<p>脳波にしめる α 波の割合が 50%未満となり, 比較的低電位の様々な周波数の脳波が混在する。睡眠の初期には緩やかな眼球運動がよくみられるが, 速い眼球運動はみられない。</p> <p>0.5 秒以上持続する 12-14Hz の睡眠紡錘波 (σ 波) と 0.5 秒以上の K 複合波が出現し, stage3,4 の定義を満たすだけの高振幅徐波は認められない。</p> <p>2Hz 以上, 振幅 75μV 以上の高電圧の徐波 (δ 波) が判定区間の 20%以上 50%未満を占める。</p> <p>2Hz 以上, 振幅 75μV 以上の高電圧の徐波 (δ 波) が判定区間の 50%以上を占める。</p>
		STAGE 2	
	STAGE D (Deep Sleep or Slow Wave Sleep)	STAGE 3	
		STAGE 4	
REM (REM Sleep)		<p>大脳をノンレム睡眠の状態から目覚めさせる役割を持つ睡眠である。体はぐったりしているが, 脳は覚醒に近い状態になっている。</p>	<p>比較的低電位で様々な周波数の脳波が混在し, 急速眼球運動 (Rapid eye movements: REMs) が共存する段階。</p> <p>また同時に頤部の筋電図の持続的活動レベルが, 睡眠記録の全経過を通じて相対的に最低レベルである。</p>
MT (Movement Time)		寝姿勢の変化や寝返りなどの体動が生じている。	体動を伴う筋緊張やアーチファクトで, 脳波と頤筋電図記録が判定期間の 50%以上判定不能である。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

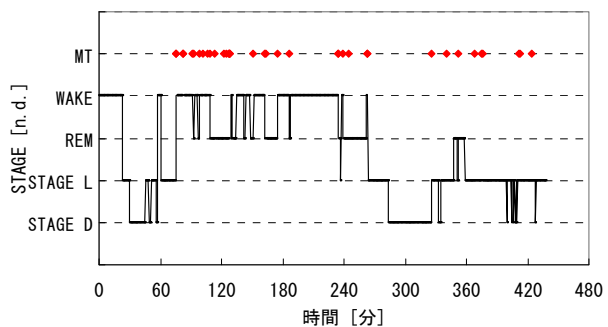


図 2-84 睡眠段階 04-1

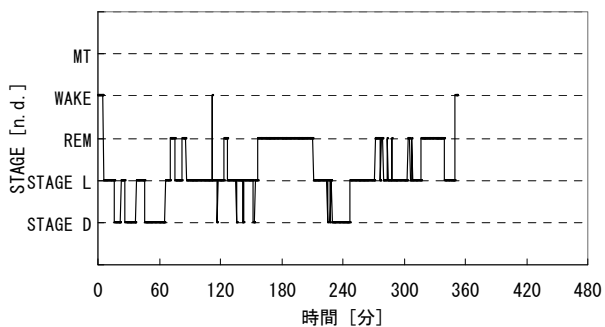


図 2-88 睡眠段階 05-1

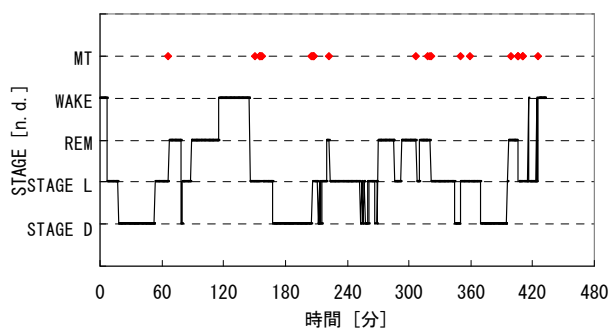


図 2-85 睡眠段階 04-2

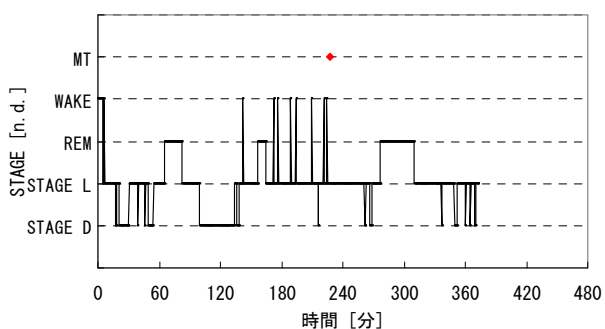


図 2-89 睡眠段階 05-2

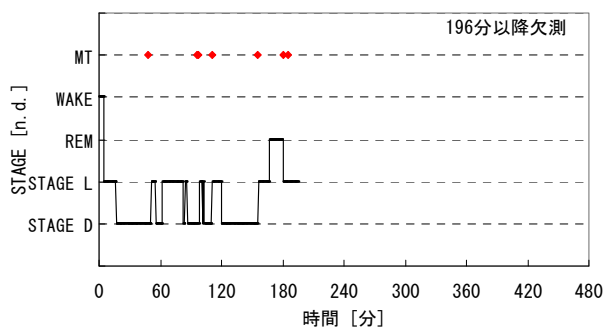


図 2-86 睡眠段階 04-3

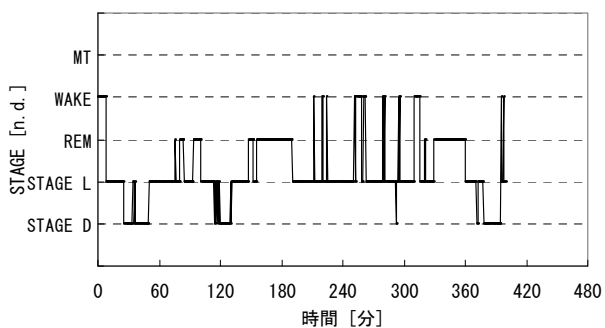


図 2-90 睡眠段階 05-3

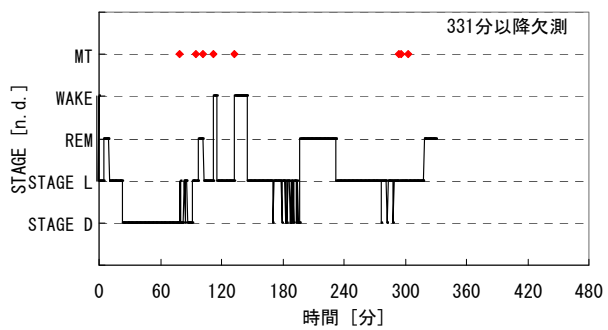


図 2-87 睡眠段階 04-4

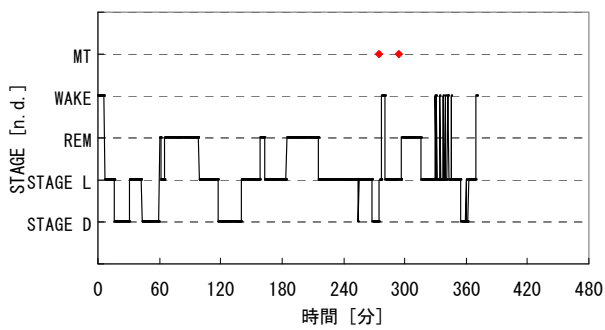


図 2-91 睡眠段階 05-4

2.3.9. 睡眠変数

睡眠段階の判定結果を時間軸上で表示すれば、睡眠の経時変化を把握する指標となる。これに対し、睡眠変数は、睡眠の経時変化を量的に把握する指標であり、計算値は睡眠の質を論じるときの客観的データとなる。主な睡眠変数を表 2-10 に、各実験の睡眠変数を表 2-11 に示す。

全般的には、05 年度の方が 04 年度より就床時間が短かった。入眠潜時は、04-1 以外は 10 分以内であった。中途覚醒の時間は、04-1, 04-2, 05-3 で長かった。05 年度の実験は、中途覚醒の時間が短く、睡眠効率が良かった。深睡眠の継続時間は、04 年度の方が長く、SWS の割合は 04 年度の方が高かった。中途覚醒は、04-1 で頻繁にみられた。

ここで、04-1 の結果に着目する。入眠潜時間が長く、中途覚醒の時間および回数とも多い。そのため、睡眠効率がよくない。実験初日のための影響（第 1 夜効果）と考えられる。しかしながら、SWS の割合は極端に少ないわけではない。以上より、04-1 の睡眠は、睡眠効率はよくないものの、大脳を休ませるための十分なノンレム睡眠は確保されていたといえる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

表 2-10 主な睡眠変数

睡眠変数	定義
Time in bed (TIB)	就床から起床までの時間
Total sleep time (TST)	入眠から翌朝起床するまでの時間のうち、 中途覚醒を除いた時間
Sleep period time (SPT)	入眠から翌朝起床するまでの時間
Sleep efficiency index (SEI)	$TST/TIB \times 100$
Sleep onset latency (SOL)	消灯から入眠までに要した時間
Total wake time	睡眠時間内での覚醒時間の合計
Number of Awakenings	睡眠時間内での中途覚醒の数
SWS time %	SWS(stage3, stage4)が睡眠時間にしめる割合
REM sleep latency	入眠から最初に REM が現れるまでの時間

表 2-11 各実験の睡眠変数

実験 番号	Time in bed (TIB)	Sleep onset latency (SOL)	Total wake time	Sleep period time (SPT)	Sleep efficiency index (SEI)	SWS time	SWS time %	Number of Awakenings	備考
	就床時間	入眠潜時	中途覚醒 時間	睡眠時間	就床時間に 対する睡眠 時間の割合	STEGED 時間	睡眠時間に 対する STAGE D 時間の割合	中途覚醒 回数	
	[min]	[min]	[min]	[min]	[%]	[min]	[%]	[n.d.]	
04-1	437	23.0	113.5	300.5	68.8	67	22.3	16.0	
04-2	432	7	38.5	386.5	89.5	114	29.5	4	
04-3	435	4.5	(0)	(190.5)	(57.7)	(96)	(49.2)	0	196min 以降欠測
04-4	442	0	(15.5)	(314.5)	(95.3)	(74)	(22.4)	2	329min 以降欠測
05-1	352	5.5	7	339.5	96.4	60	17.7	2	
05-2	372	5	4.5	362.5	97.4	61.5	17.0	9	
05-3	399	8	20	371.0	93.0	55	14.8	12	
05-4	370	6.5	9.5	354.0	95.7	68	19.2	9	

2.3.10. 睡眠感

睡眠段階と睡眠変数は、睡眠の客観的指標であるが、睡眠を総合的に把握するためには、それらに加え、熟睡感や起床時の体調などの主観的睡眠感を考慮する必要がある。OSA睡眠調査票は、主観的睡眠感を評価するために開発された²⁻⁸⁾。この調査票は就床直前に記入する睡眠前調査と、起床後に記入する起床時調査（図 2-92）の2部から構成される。起床時調査は、睡眠感に関する31項目の質問で構成され、これらの質問に対して6段階で回答する。睡眠に影響を及ぼす5つの因子「眠気」「睡眠維持」「気がかり」「統合的睡眠」「寝つき」と、各質問項目を対応させ、その寄与率が回答毎に標準得点化されている。これにより、個人の主観的睡眠感を把握することが可能となる。各因子の定義を表 2-12 に示す。

各因子の得点の年度別の平均値の一覧を表 2-13 に、グラフ化したものを図 2-93 に示す。各因子の合計はほぼ同じ値であり、平均的には、ほぼ同じ睡眠感を得ていたと考えられる。ただし、04年度の被験者は、眠気はさほど感じない傾向、05年度の被験者は、気がかりはさほどなく、より満足感を感じる傾向がみられ、睡眠に影響を及ぼす因子に対する評価には差があった。

04年度の各実験の各因子の得点一覧を表 2-14 に、グラフ化したものを図 2-94～図 2-97 に示す。最もよい評価をしているのは、04-4である。各因子の得点が平均的に高いこと、特に統合的睡眠の評価が高いことから、満足感が得られた睡眠であったと考えられる。一方、04-1の評価が著しく低い。中途覚醒の時間が長く、中途覚醒後の寝つきの悪さと、十分な睡眠時間が確保できていないために、睡眠への満足度が低かったと考えられる。しかしながら、他の因子に比較して、眠気はさほど感じていないと評価している。これは、前節で述べたように、睡眠時間は短い、深睡眠の時間が長く、大脳を休ませる睡眠であったという評価に対応している。04-2は、合計点が高く、眠気や気がかりはあまりなかったと評価しているが、睡眠を維持できたとは感じていない。深睡眠の時間が十分に確保できていたが、中途覚醒の時間が長かったことが影響していると考えられる。04-3は、平均値に近く、バランスのよい睡眠であったといえる。

05年度の各実験の各因子の得点一覧を表 2-15 に、グラフ化したものを図 2-98～図 2-101 に示す。05-4が睡眠を維持でき、気がかりがなかったと感じており、最も評価が良かった。睡眠時間が長く、深睡眠の時間も十分に確保できたためと考えられる。睡眠潜時は短時間であったが、寝つきと統合的睡眠の評価はさほどよくなかった。これは、客観的評価としては寝つきがよかったが、主観的評価としての寝つきがよくなかったと解釈できる。また、統合的睡眠と寝つきの評価値が連動している傾向があり、この被験者は主観的な寝つきのよしあしで睡眠の満足度を評価していると考えられる。05-3は、他の実験と比較して、著しく評価がよくない。中途覚醒の時間が長かったこと、睡眠時間、深睡眠時間がともに短かったことが影響していると考えられる。ただし、睡眠変数や睡眠段階の結果からは、睡眠の質はさほど悪くはなかった。05-3でも客観的評価と主観的評価では差があったことを示している。また、05-1と05-2は、平均的には評価が高く、よく似た傾向を示しているが、睡眠維持の評価には差がみられる。05-2の方が中途覚醒の回数が多かったためかもしれない。

なお、睡眠感の結果は、起床直後の聞き取り結果とよく対応していた。

B. 起床時調査

氏名: _____

月 日 時 分

B-1

1. 昨夜は、ふだんにくらべて	ぐっすり寝れた	_____	悪くなかった
2. いまして、この調査に	十分な集中が保たれる	_____	ほとんど苦しい
3. 昨夜は、ふだんにくらべて、寝返りが	頻になつた	_____	頻にならなかった
4. 今朝は、ふだんにくらべて、気分が	妙つたりしている	_____	緊張している
5. 今日、やることなすことすべて	うまくいきそうだ	_____	うまくいけそうもない
6. 全身として、昨夜の睡眠は	よい	_____	わるい
7. 今朝は、ふだんにくらべて	疲労がある	_____	疲労がない
8. 昨夜の寝つけ方は、ふだんにくらべて	よかつた	_____	わるかつた
9. 今朝は、ふだんにくらべて	不快な気分である	_____	さかやかな気分である
10. おきめて寝がけを繰り返すまでの時間は、ふだんにくらべて	短い	_____	長い
11. 今朝は、ふだんにくらべて	疲労感がある	_____	ストレスを感じる
12. 夜中にめがめた回数、ふだんにくらべて	多かつた	_____	少なかつた
13. 今朝は、ふだんにくらべて、からだの	だるい	_____	しゃっきりとしている
14. 全身として、今朝の睡眠は	わるい	_____	よい
15. 今朝は、ふだんにくらべて	困む	_____	困らなかつた
16. 今朝は、ふだんにくらべて、昨夜の寝違ひ状態が	同じになる	_____	悪化する
17. 昨夜の寝違ひ回数、ふだんにくらべて	多い	_____	少ない
18. 今朝は、ふだんにくらべて	集中力がある	_____	集中力がない
19. 昨夜は、ふだんにくらべて、まぶたの重さが	軽くなつた	_____	重くなつた
20. 今朝は、ふだんにくらべて、寝返りが	頻っている	_____	減らされている
21. 寝返りの回数、ふだんにくらべて	多かつた	_____	少なかつた
22. 今朝は、ふだんにくらべて	やる気がある	_____	やる気がない
23. 全身として、今朝の睡眠は	よい	_____	わるい
24. 昨夜は、ふだんにくらべて、気分が楽なのは	快満だつた	_____	不快だつた
25. 今朝は、ふだんにくらべて、心臓が	多	_____	少ない
26. 昨夜の寝違ひの回数、ふだんにくらべて	多い	_____	少ない
27. 今朝は、ふだんにくらべて、気分が	イライラしている	_____	のんびりしている
28. 今朝は、ふだんにくらべて、いま、自分がかかっている問題に、考えが	とらわぬやう	_____	とらわれやう
29. 寝つけから、ウトウトしている状態は、ふだんにくらべて	少なかつた	_____	多かつた
30. 昨夜の夢の内容は	多かつた	_____	少なかつた
31. 昨夜の夢の内容は	悪し	_____	不快

* 昨夜は、ふだん、どのくらい寝たかと思えますか。満点を記入してください。 _____ 時間 _____ 分くらい

B-2

今朝の起床時の状態として、次のことからのうち、当てはまるものを2個、印でかこんで下さい。

また、その程度がどの場合にも、下の内に、その番号を記入して下さい。

1. 煩雑	2. 突然	3. 急げまり	4. せき	5. 下痢	6. 腹痛
7. おぼれ	8. 立ちくらみ	9. ふらつき	10. 舌のむづれ	11. 社会性	12. 遅くもろい
13. 動悸	14. 手足のむくみ	15. だるさ	16. 胸内痛	17. 頭痛	18. 口のかわ
19. 寒しん	20. 便閉	21. 熱汗	22. 手足のふるえ	23. 潮風	

記入もれがないよう、確かめて下さい。
ご協力、ありがとうございます。

図 2-92 OSA 睡眠調査票 起床後調査 記入用紙

表 2-12 睡眠に影響を及ぼす 5 つの因子

因子	説明
①眠気の因子	眠気をもよおしたかどうか
②睡眠維持の因子	睡眠中に目を覚ましたりせずに、睡眠を維持できたか
③気がかりの因子	眠れないのではないかとといった不安感が強いかわるか
④統合的睡眠の因子	統合的に判断して睡眠に対する満足度
⑤寝つきの因子	寝つきはよかつたかどうか

表 2-13 各因子の得点一覧（年度別平均値）

実験	眠気	睡眠維持	気がかり	統合的睡眠	寝つき	合計
04年度	26.5	15.5	21.9	16.8	23.3	104.1
05年度	20.3	15.8	24.3	20.7	22.8	103.8

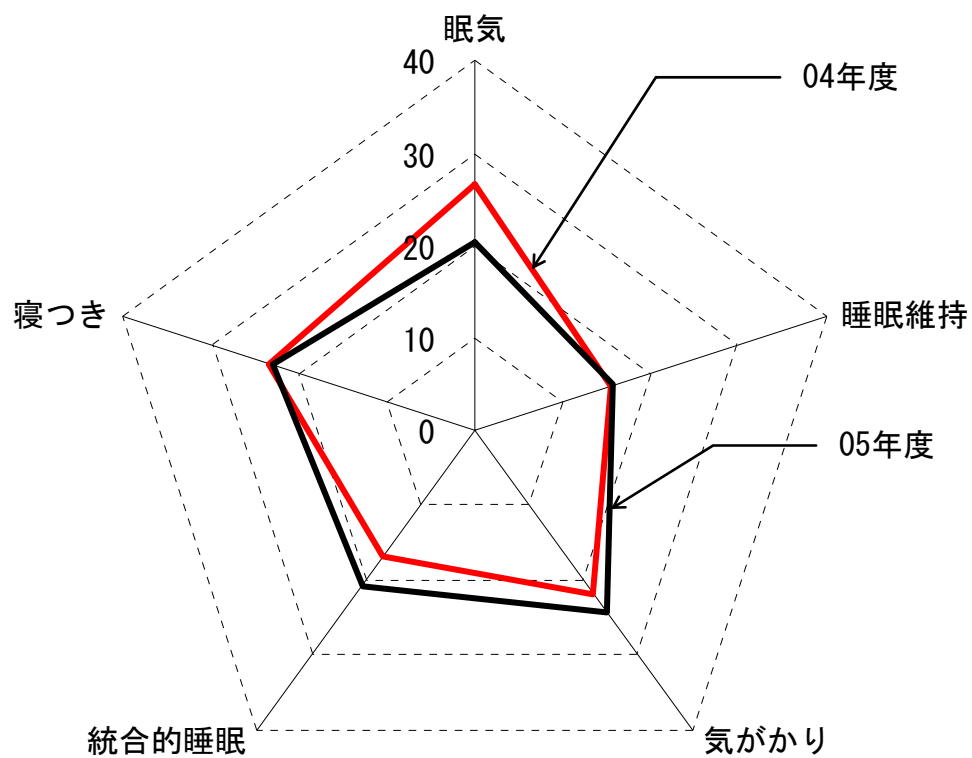


図 2-93 各因子の得点（年度別平均値）

表 2-14 各因子の得点一覧 (04 年度)

実験番号	眠気	睡眠維持	気がかり	統合的睡眠	寝つき	合計
04-1	23.8	13.8	13.8	9.3	13.7	74.5
04-2	33.3	9.2	26.4	15.7	28.7	113.2
04-3	23.8	18.7	19.6	16.7	23.0	101.7
04-4	25.1	20.3	27.8	25.7	28.0	126.9
平均	26.5	15.5	21.9	16.8	23.3	104.1

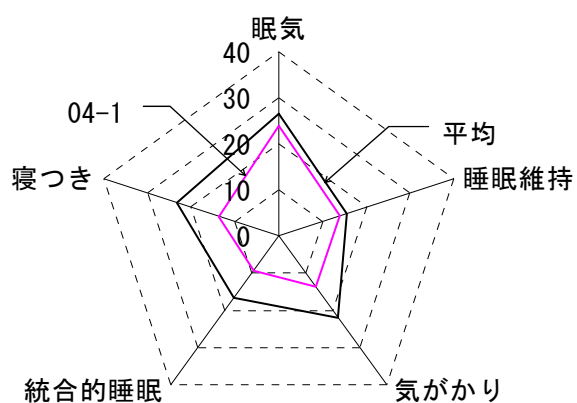


図 2-94 各因子の得点 04-1

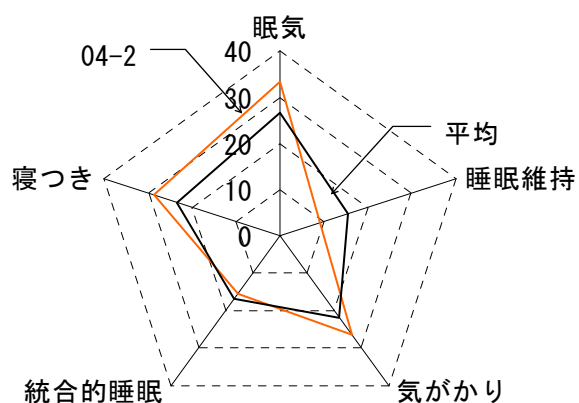


図 2-95 各因子の得点 04-2

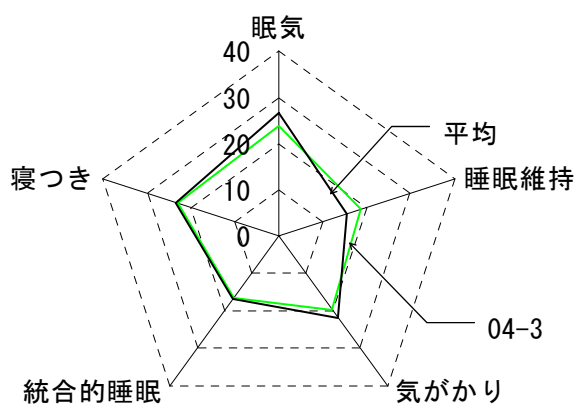


図 2-96 各因子の得点 04-3

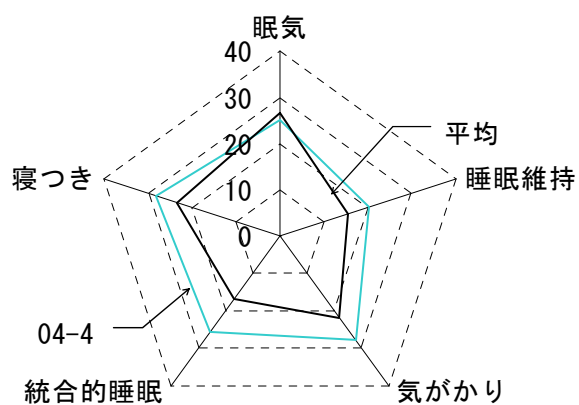


図 2-97 各因子の得点 04-4

表 2-15 各因子の得点一覧 (05 年度)

実験番号	眠気	睡眠維持	気がかり	統合的睡眠	寝つき	合計
05-1	22.8	15.5	23.8	25.7	26.0	113.7
05-2	19.7	8.8	25.8	27.0	29.0	110.3
05-3	15.2	14.2	17.6	10.3	13.7	70.9
05-4	23.5	24.5	29.8	19.7	22.7	120.1
平均	20.3	15.8	24.3	20.7	22.8	103.8

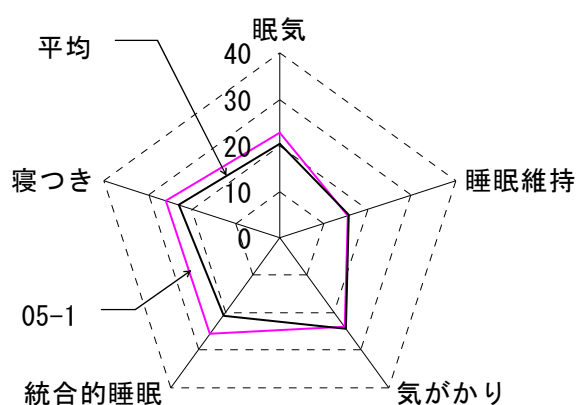


図 2-98 各因子の得点 05-1

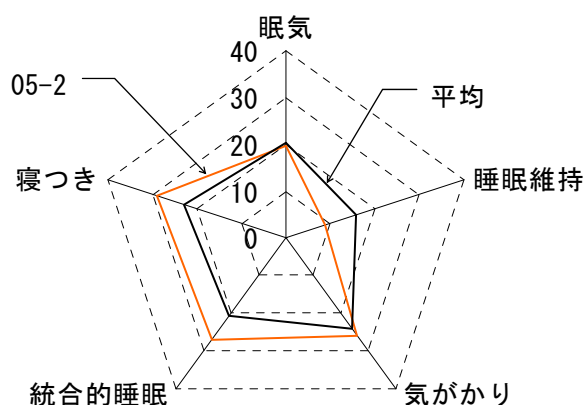


図 2-99 各因子の得点 05-2

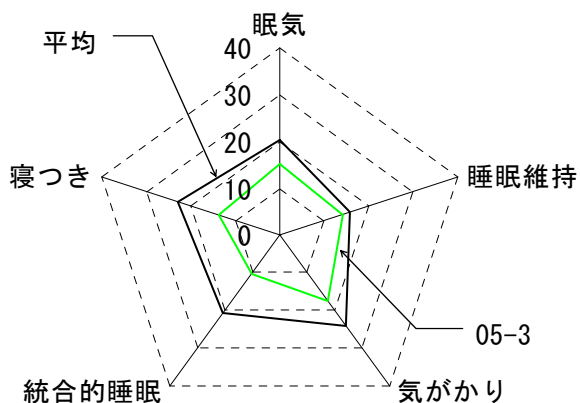


図 2-100 各因子の得点 05-3

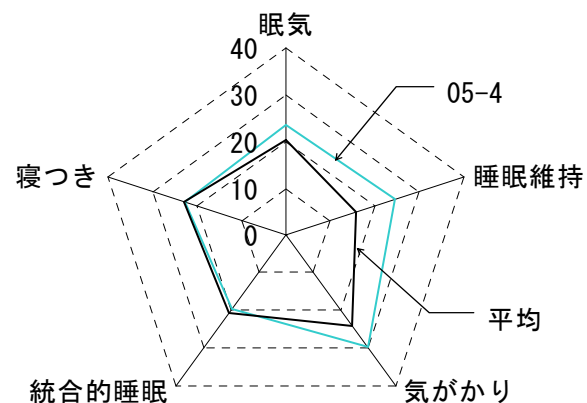


図 2-101 各因子の得点 05-4

2.3.11. 寝姿勢と温熱環境および温熱生理反応

寝返りや体動が起こると、人体と周辺環境との間の熱移動に変化が生じる。それに伴う体温調節反応の結果として、人体の各部位の温度が変化することが推測される。したがって、寝姿勢の変化と腹温度・背中温度および敷布団の温度には相互の関係があると考えられる。そこで本節では、これらの関係について考察する。

例として、04-2 と 05-4 の実験について検討する。敷布団の温度としては、腹・背中と接触していた B 点および E 点の 2 点の測定値を用いる。

04-2 の結果を図 2-102 に示す。寝姿勢の変化が起こっているときには、腹温度と背中温度は上昇あるいは低下に転じており、同時に敷布団温度にも同様の変化があるという明確な関係がみられる。ただし、敷布団温度は、それ以外の時刻にも変化している場合が多い。また寝姿勢が仰臥位から右向きの側臥位になるといった回転方向と、腹・背中温度および敷布団温度が上昇あるいは低下に転ずるといった変化の方向との間には高い相関はみられない。

05-4 の結果を図 2-103 に示す。睡眠の前半では寝姿勢の変化がみられないが、後半では、寝姿勢の変化と同時に、背中温度、腹温度および敷布団温度が上昇あるいは低下に転ずる場合がみられる。また、寝姿勢の変化はみられないが、背中温度、腹温度および敷布団温度が同時に変化している場合もみられる。これは寝姿勢の変化には至らないものの、周辺環境の変化が生じている場合と考えられる。

以上より、寝姿勢と腹・背中温度および周辺の敷布団温度の変化は、相互に関係していることが分かる。それらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や温熱環境から、人体の温熱生理反応を予測できる可能性がある。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

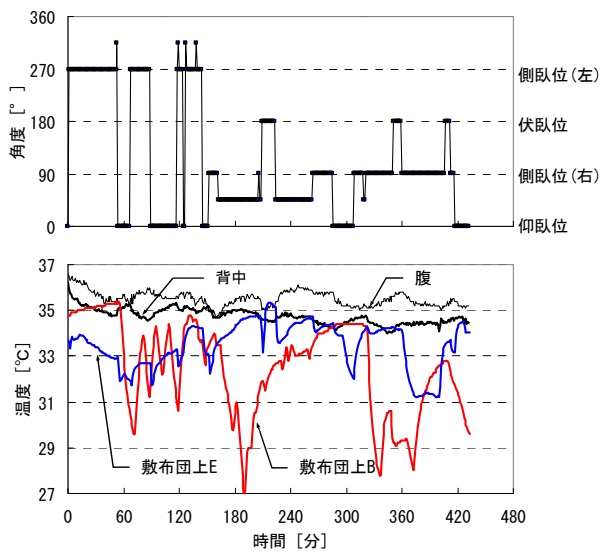


図 2-102 寝姿勢と皮膚温度および敷布団温度 04-2

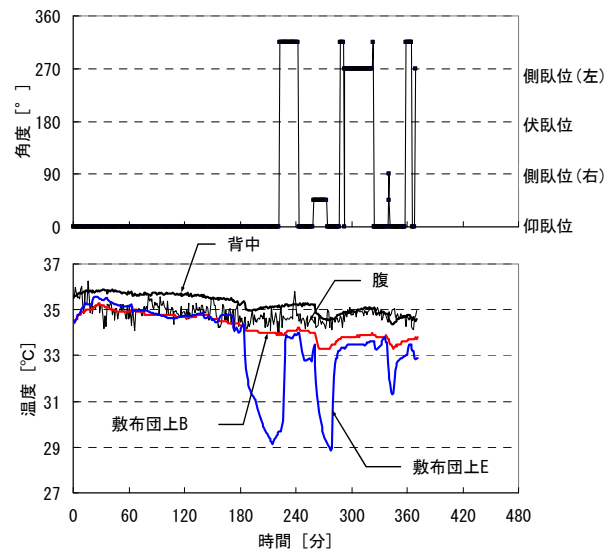


図 2-103 寝姿勢と皮膚温度および敷布団温度 05-4

2.3.12. 寝姿勢と生理反応および心理反応

寝返り時には、運動量の増加により代謝量がわずかに増加する。また、寝姿勢が変化すると、睡眠段階が変化することが報告されている²⁻⁹⁾。また、レム睡眠とノンレム睡眠では、自律神経機能が変わるといわれている²⁻⁴⁾。したがって寝姿勢の変化と、心拍数および睡眠段階は、相互に影響を及ぼしている可能性がある。また、レム睡眠では、発汗量が少なくなる^{2-10,2-11,2-12)}ことが報告されている。ただし、睡眠時の暑熱負荷に対する発汗反応の大きさは、睡眠やその深度に影響されないという報告もある²⁻¹³⁾。本節では、寝姿勢と睡眠段階および心拍数の時間変化率との関係、ならびに発汗量との関係について考察を行う。

例として、前節と同様、04-2 と 05-4 の実験について検討する。心拍数の時間変化率については、心拍数が大きく変化した時刻を表示する。具体的には、1分前と比較して04-2では、 $\pm 5[1/\text{min}]$ 、05-4では $\pm 8[1/\text{min}]$ の差が生じる時刻をプロットする。04-2の結果を図2-104に、05-4の結果を図2-105に示す。

心拍数変化については、04-2では、寝姿勢が変化するとき心拍数の時間変化率が大きくなるという明確な関係がみられる。また、このときに、睡眠段階が変化するか、睡眠段階の判定不能となる場合が多くみられる。05-4では、04-2と同様、寝姿勢が変化するとき心拍数が変化する場合がみられるが、寝姿勢と睡眠段階との関係については、あまりよい相関はみられない。05年度の被験者は、04年度よりも寝姿勢の変化が少なかったことから、よく寝返りをする就寝者では、心拍数の時間変化率や睡眠段階との関係があるなど、各生理量の間には個体による差があると考えられる。

発汗量については、04-2では、睡眠の後半の時間帯においては寝姿勢の変化時に発汗量が大きく変化する時刻がみられるが、05-4ではそのような傾向はみられない。またいずれの実験とも睡眠段階との明確な関係はみられず、レム睡眠で発汗量が少なくなるといった挙動も測定値からは確認できなかった。このことは発汗量が人体の周辺環境の変化を大きく受けている可能性を示している。

以上より、寝姿勢と睡眠段階および心拍数の時間変化率との間に、相関があることが分かる。それらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や心拍数から、睡眠段階など心理反応を予測できる可能性がある。また、発汗量については、睡眠段階との関係はみられなかったため、周辺環境の変化の影響が大きかったものと考えられる。

2. 睡眠時の温熱生理反応と心理反応

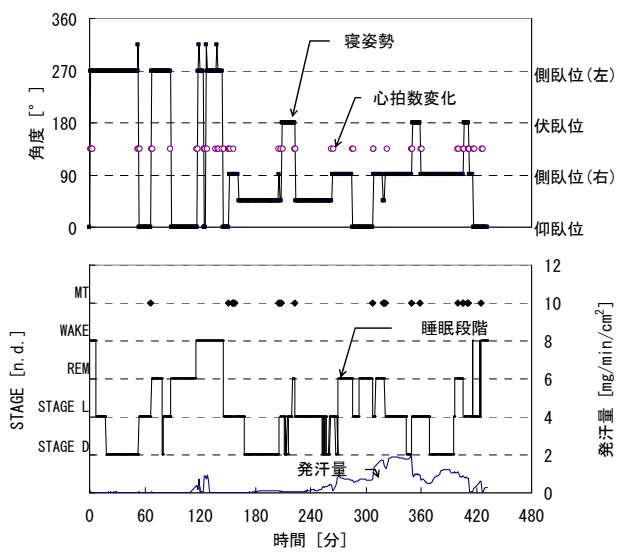


図 2-104 寝姿勢, 心拍数変化, 睡眠段階及び発汗量

04-2

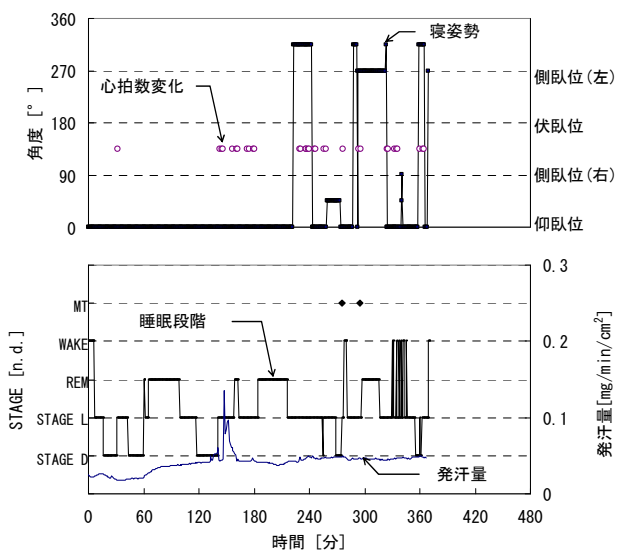


図 2-105 寝姿勢, 心拍数変化, 睡眠段階及び発汗量

05-4

2.4. 第2章のまとめ

本章では、本論文で検討の対象とする睡眠実験の概要と被験者の温熱生理反応および心理反応の結果を示し、睡眠の状況とそれらとの関係について考察を行った。

(1) 実験概要

2004年および2005年に、いずれも健康な青年男子1名の計2名の被験者を対象として、住宅型実験棟内の寝室実験室において夏期に各4回睡眠実験を実施した。

(2) 皮膚温度

部位による温度の違いと経時変化が認められた。室内環境と寝床内環境の影響と体温調節反応の影響によるものと考えられる。特に、腹と背中では高温、前腕と下腿は低温側であった。腹は伏臥位の際、背中は仰臥位の際に敷布団と接触し、放熱しづらくなることに伴い温度が上昇した。前腕と下腿は掛布団の外に露出していることが多く、室内空気の影響を受けて低温になった。05年度が04年度より変化が小さいのは、室内環境の変化が小さいためである。

(3) 平均皮膚温度

就寝後は上昇するが、しばらくすると、安定あるいは低下に転じた。就床時間全体でみると、時間経過とともに低下する傾向がみられた。

(4) 深部温度

睡眠の経過とともに低下する傾向があり、特に直腸温度において明確であった。代謝量の低下による影響を受けていると考えられる。鼓膜温度は直腸温度より低く、変動が大きかった。鼓膜温度は寝床内や室内環境の変化の影響を受け易いためと考えられる。また、実験により鼓膜と直腸の温度差は異なっていた。

(5) 心拍数

いずれの実験とも40~70[1/min]の範囲を変動していた。就寝後は平均的には心拍数が低下していたが、睡眠中に副交感神経系が優位になることと対応している。

(6) 皮膚血流量

各実験により値の差が大きいが、取り付け部位の差、個体差、人体周辺の環境の変化によるためと考えられる。皮膚血流量は体温調節のための熱放散反応における制御器の役割を持つ。放熱量を増やすためには、血管が拡張し、皮膚血流量が増加する方向に調節される。すなわち値が大きいときは、体温調節反応が活発に行われていたと考えられる。

04年度は05年度より各実験での平均値は小さいが、相対的な値の変動が大きい。平均値の差は個体差によるものと考えられ、体温調節反応が活発に行われたのは、相対的な値の変動を大きい04年度で

あった可能性がある。

(7) 発汗量

概ね、04年度が05年度より値が大きく、変動も大きかった。取り付け部位や個体差によるものであると考えられる。また人体周辺の環境の変化が大きいため体温調節反応が活発に行われたことも一因と考えられる。

(8) 体重変化量

呼吸、発汗および不感蒸泄により睡眠中に水分が失われたために、起床後は平均で約0.8kg減少した。

(9) 寝姿勢と体動

赤外線カメラの画像より人体各部位の動きと寝姿勢の変化を目視で読み取り、体動計により体動の発生時刻と強度を測定した。赤外線カメラ画像に寝姿勢の変化がみられるときは、概ね体動値が出力されているが、寝姿勢の変化が確認されていない時間帯でも、体動値が出力されていた。これは、体動計の感度が高いためと考えられる。寝姿勢をみると、04年度では寝姿勢の変化が多く、大きな寝返りもあった。それに対し、05年度では、寝姿勢の変化が少なく、伏臥位になることはなかった。周辺環境や個体差によるものと考えられる。

(10) 睡眠段階

脳波による睡眠段階の判定を行った。健康な成人では、ノンレム睡眠とレム睡眠の2種類の睡眠が約1.5時間の単位を作り、いくつかの単位がまとまって、一夜の睡眠を構成しているとされているが、本研究の実験では明確ではなく、約2時間の周期がある例がみられるのみであった。

また睡眠の最初の3時間(睡眠サイクルの2単位)で、深睡眠がまとまって出現するといわれている。いずれの実験においても、睡眠の初期の時間帯にまとまった深睡眠がみられる。一方、実験によっては他の時間帯でもまとまった深睡眠がみられる。05-1は睡眠の中盤頃、05-3は起床前にもまとまった深睡眠の出現がある。その理由は、睡眠初期の段階での深睡眠だけでは、大脳を休ませるためには十分ではなかったためと考えられる。

(11) 睡眠変数

睡眠変数から、各実験での睡眠の質を評価した。05年度の実験は、中途覚醒の時間が短く、睡眠効率が良かった。04年度の実験は、深睡眠の継続時間は長く、SWSの割合(深睡眠 [STAGE D]の全睡眠時間に占める割合)が高かった。04-1の睡眠は中途覚醒が多かったことから、睡眠効率はよくなかったが、SWSの割合が高いため、大脳を休ませるための十分なノンレム睡眠は確保されていたと言える。

(12) 睡眠感

被験者ごとの平均をみると、睡眠に影響を及ぼす各因子の合計点はほぼ同じ値であり、平均的には、

ほぼ同じ睡眠感を得ていたと考えられる。ただし、04年度の被験者は、眠気はさほど感じない傾向、05年度の被験者は、気がかりはさほどなく、より満足感を感じる傾向がみられ、睡眠に影響を及ぼす因子に対する評価には差があった。これらの結果は起床後の主観申告とよく対応していた。

(13) 寝姿勢と温熱環境および温熱生理量

寝姿勢と腹・背中温度および周辺の敷布団温度の変化が、相互に関係していることを確認した。これらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や温熱環境から人体の温熱生理反応を予測できる可能性がある。

(14) 寝姿勢と心拍数および心理反応

寝姿勢と睡眠段階および心拍数の時間変化率の間に相関があることを確認した。これらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や心拍数から睡眠段階など心理反応を予測できる可能性がある。発汗量については、睡眠段階との関係はみられなかったため、周辺環境の変化の影響が大きかったものと考えられる。

第2章の引用文献

- 2- 1) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 31-1, pp.5-29, 1994.
- 2- 2) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, p.253, 1981.
- 2- 3) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, p.566, 1981.
- 2- 4) 日本睡眠学会編: 睡眠学ハンドブック, p.42, 朝倉書店, 1994.
- 2- 5) 井上昌次郎: 初心者のための睡眠の基礎と臨床「睡眠の基礎」, 第4回「睡眠科学・医療専門研修」セミナー, 1999.
- 2- 6) 井上昌次郎: 脳と睡眠, 共立出版, 1989.
- 2- 7) Rechtschaffen, A. and Kales, A. eds. 清野茂博訳: 睡眠脳波アトラス, 医歯薬出版, 1971.
- 2- 8) 小栗貢, 白川修一郎, 阿住一雄: OSA 睡眠調査票の開発, 精神医学 27 卷 7, pp.791-799, 1985.7.
- 2- 9) 梁瀬度子: 睡眠と環境, 第9回人間—熱環境シンポジウム報告集, pp.100-103, 1985.
- 2-10) Henane, R., Buguet, A., Roussel, B. and Bittel, J.: Variations in evaporation and body temperatures during sleep in man, J. Appl. Physiol., Respirat Environ. Exercise Physiol., 42(1), pp.50-55, 1977.
- 2-11) Libert, J. P., Candas, V., Muzet, A. and Ehrhart, J: Thermoregulatory adjustments to thermal transients during slow wave sleep and REM sleep in man, J. Physiol. Paris, 78, pp.251-257, 1982.
- 2-12) Sagot, J. C., Amoros, C., Candas, V. and Libert, J.P.: Sweating responses and body temperatures during nocturnal sleep in humans, Am. J. Physiol., 252, pp.R462-R470, 1987.
- 2-13) 鈴木(今井)一乃, 大西範和, 西山哲成, 菅屋潤壹, 小川徳雄: 睡眠時の発汗の動的特性, 発汗学, 2-1, pp.25-27, 1995.

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

3.1. はじめに

本章では睡眠時に対応可能な人体熱モデルを提案するための出発点として、覚醒時の人体熱モデルの睡眠時への適応可能性を検討する。具体的には、人体熱モデルにおいて寢床内環境の非一様性を考慮して熱水場を記述し、睡眠時の皮膚温度および深部温度の実験結果の再現を試みる。さらにそのモデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察する。

3.2. 基礎理論

睡眠時の人体各部位の温度を、人体周辺環境の熱水分移動とともに解析する。人体に関しては、人体を頭部(Head)、体幹部(Trunk)、四肢部(Extremities)の3つの円柱で代表させて、これを更に深部層、筋層、皮膚層に分割し、中央血流溜り (Central Blood, 以下CBという.) と血流による熱交換を行うとする計8分割のStolwijk et al.³⁻¹⁾のモデル(以下, Stolwijk モデルという.) を、皮膚表面の水分移動に関してはJones et al.³⁻²⁾のモデルを、着衣・寝具に関しては熱水分移動の式³⁻³⁾を用いる。

3.2.1. 人体各部位の熱収支式

睡眠時には、身体の一部のみが寢床内に存在するなど人体は部位により異なる温熱環境に曝露されている。そのような寢床内環境における熱水場挙動を記述するため、人体各部位を図3-1に示すように、Stolwijk モデルの頭部(深部層と皮膚層)を上側(前額部)と下側(後頭部)に、体幹部(深部層、筋層および皮膚層)を上側(腹部)と下側(背中部)に、四肢部(深部層と皮膚層)を腕部(arms)、手部(hands)、大腿部(thighs)上側と下側、膝部(knees)上側と下側、足部(feet)上側と下側に更に分割し、CBを含め計27分割とした。

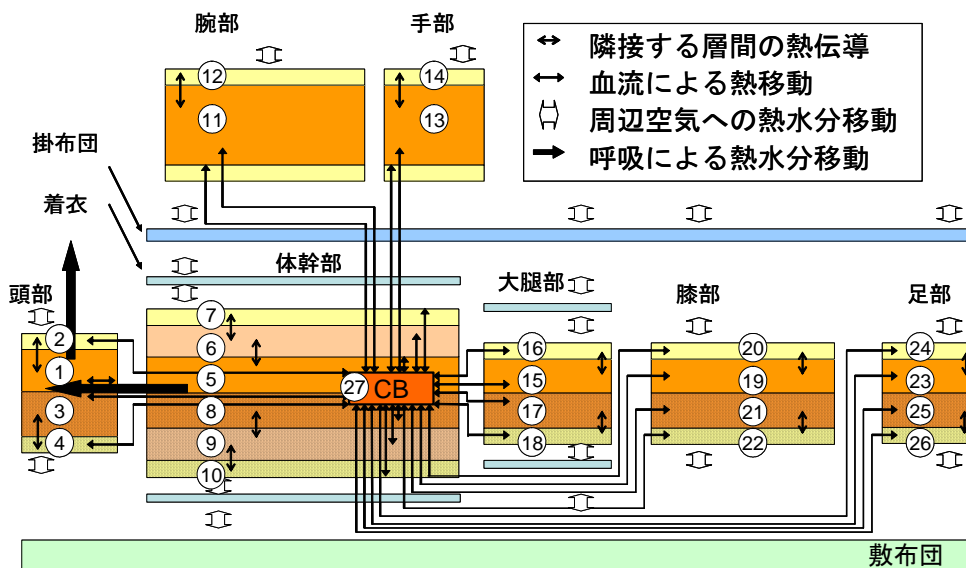


図3-1 人体熱モデルの概念図 (図中の○内の番号は、人体部位番号)

CBを除く人体の各部位($i = 1 \sim 26$)における熱収支は、基礎代謝量、震えおよび運動による産熱量、呼吸、不感蒸泄および調節性発汗による放熱量、血流によるCBへの熱損失量、伝導による隣接する層への熱損失量、対流および放射による皮膚表面と接する層(着衣層、寝具層または室空気層)への熱損失量によって説明され、式[3-1]で表される。

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i + SHV_i + EXS_i - EVR_i - EVI_i - SWT_i - BF_i - CD_i - ENV_i \quad [3-1]$$

部位ごとに示すと、以下のとおりとなる。

(1) 頭部深部層 ($i = 1, 3$)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i + SHV_i - EVR_i - BF_i - CD_i \quad [3-2]$$

(2) 体幹部深部層 ($i = 5, 8$)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i - EVR_i - BF_i - CD_i \quad [3-3]$$

(3) 体幹部筋層 ($i = 6, 9$)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i + SHV_i + EXS_i - BF_i - CD_i \quad [3-4]$$

(4) 四肢部深部層 ($i = 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25$)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i + SHV_i + EXS_i - BF_i - CD_i \quad [3-5]$$

(5) 各部位皮膚層 ($i = 2, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26$)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = MTB_i - EVI_i - SWT_i - BF_i - CD_i - ENV_i \quad [3-6]$$

ここで $\Delta T_{m,n} = T_m - T_n$ とおくと、

$$ENV_i = Sr_i \cdot S(CHR_i + CHC_i) \Delta T_{i,e} \quad [3-7]$$

CB($i = 27$)における熱収支は、血液を介して各部位との間の熱移動によって表される。

$$C_{27} \frac{dT_{27}}{dt} = \sum_{i=1}^{26} BF_i \quad [3-8]$$

記号

BF	: 血流による CB への熱損失量 [W]
C	: 人体の熱容量 [KJ/K]
CD	: 伝導による隣接層への熱損失量 [W]
CHC	: 対流熱伝達率 [$W/m^2/K$]
CHR	: 放射熱伝達率 [$W/m^2/K$]
ENV	: 対流および放射により皮膚表面と接する層へ熱損失量 [W]
EVI	: 不感蒸泄による放熱量 [W]
EVR	: 呼吸による放熱量 [W]
EXS	: 運動による産熱量 (添字がない場合は総量) [W]
MTB	: 基礎代謝量 [W]
S	: 体表面積 [m^2]
Sr_i	: 部位 i の人体における体表面積比率 [n.d.]
SHV	: 震えによる産熱量 (添字がない場合は総量) [W]
SWT	: 調節性発汗による放熱量 (添字がない場合は総量) [W]
T	: 温度 [$^{\circ}C$]
t	: 時間 [s]

添字

i	: 人体部位番号
e	: 皮膚表面と接する層

3.2.2. 体温調節制御式

調節性発汗量, 震え産熱量, 皮膚血流量および筋血流量は, 頭部深部温度, 平均皮膚温度, 平均筋温度とそれらのセットポイントとの差によって決定される. 式[3-1]の右辺の各項は以下のように表される.

(1) 調節性発汗量

各部位皮膚層 ($i = 2, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26$) における調節性発汗による放熱量は, 式[3-9], 式[3-10]で表される.

$$SWT_i = Sr_i \cdot SWT \quad [3-9]$$

$$SWT = (68\Delta T_{hc, hcset} \Delta T_{sk, skset} + 200\Delta T_{hc, hcset} \Delta T_{ms, msset}) \cdot (4186/3600) \quad [3-10]$$

ただし,

$$\Delta T_{hc, hcset} < 0 \text{ または } \Delta T_{sk, skset} < 0 \text{ のとき, } \Delta T_{hc, hcset} \Delta T_{sk, skset} = 0$$

$$\Delta T_{hc, hcset} < 0 \text{ または } \Delta T_{ms, msset} < 0 \text{ のとき, } \Delta T_{hc, hcset} \Delta T_{ms, msset} = 0$$

記号

T_{hc}	: 頭部深部温度 [°C]
T_{hcset}	: 頭部深部温度セットポイント 36.6 [°C]
T_{ms}	: 平均筋温度 [°C]
T_{msset}	: 平均筋温度セットポイント 35.88 [°C]
T_{sk}	: 平均皮膚温度 [°C]
T_{skset}	: 平均皮膚温度セットポイント 34.1 [°C]

(2) 震え産熱量

体幹部筋層 ($i = 6,9$), 四肢部深部層 ($i = 11,13,15,17,19,21,23,25$) における震え産熱量は, 式[3-11], 式[3-12]で与えられる.

$$SHV_i = Mr_i \cdot SHV \quad [3-11]$$

$$SHV = 60\Delta T_{hc,hcset} \Delta T_{sk,skset} \cdot (4186/3600) \quad [3-12]$$

ただし,

$$\Delta T_{hc,hcset} > 0 \text{ または } \Delta T_{sk,skset} > 0 \text{ のとき, } \Delta T_{hc,hcset} \Delta T_{sk,skset} = 0$$

記号

Mr_i	: 部位 i の体重比率 [n.d.]
--------	-----------------------

(3) 皮膚血流量

各部位皮膚層 ($i = 2,4,7,10,12,14,16,18,20,22,24,26$) における血液を介して CB ($i=27$) へ移動する熱量は, 式[3-13], 式[3-14]で与えられる.

$$BF_i = Sr_i \cdot c\rho_{bl} \cdot SBF\Delta T_{i,27} \quad [3-13]$$

$$SBF = (SBF_0 + 36\Delta T_{hc,hcset} \Delta T_{sk,skset} + 0.93\Delta T_{sk,skset}) \cdot (10^{-3}/3600) \quad [3-14]$$

ただし, $SBF > 0$, かつ,

$$\Delta T_{hc,hcset} < 0 \text{ または } \Delta T_{sk,skset} < 0 \text{ のとき,}$$

$$\Delta T_{hc,hcset} \Delta T_{sk,skset} = 0$$

記号

SBF	: 総皮膚血流量 [m^3/s]
SBF_0	: 中立環境における血流量 10.6 [ℓ/h]
$c\rho_{bl}$: 血液の体積比熱 3.85×10^6 [$J/K/m^3$]

(4) 筋血流量

体幹部筋層 ($i = 6,9$), 四肢部深部層 ($i = 11,13,15,17,19,21,23,25$) における血液を介して CB ($i=27$) へ移動する熱量は, 式[3-15]~式[3-17]で与えられる.

$$BF_i = Mr_i \cdot c\rho_{bl} \cdot MBF\Delta T_{i,27} \quad [3-15]$$

$$MBF = (15 + MBF_w + 2.5\Delta T_{sk,skset}) \cdot (10^{-3}/3600) \quad [3-16]$$

ただし,

$$MBF_w = \alpha \int (SHV + EXS - \beta \cdot MBF_w) dt \quad [3-17]$$

記号

MBF : 総筋血流量 [m^3/s]

MBF_w : 筋の代謝活動に必要な血流量 [l/h] (ただし $\alpha=0.5$, $\beta=0$ とする)

3.2.3. 皮膚表面における水分収支式

各部位の皮膚層 ($i = 2, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26$) の表面における水分の収支は式[3-18]~式[3-22]で表される.

$$X_{skin,i} = \frac{1}{\alpha'_{skin,i} + \alpha'_{e,i}} (\alpha'_{skin,i} X_{satskin,i} + \alpha'_{e,i} X_{e,i} + m_{sw,i}) \quad [3-18]$$

$\cdot X_{skin,i} \geq X_{satskin,i}$ のとき,

$$\frac{dm_{st,i}}{dt} = \alpha'_{e,i} (X_{e,i} - X_{satskin,i}) + m_{sw,i}, \quad X_{skin,i} = X_{satskin,i} \quad [3-19, 3-20]$$

$\cdot X_{skin,i} < X_{satskin,i}$ のとき, $m_{st,i} = 0$

[3-21]

ただし,

$$m_{sw,i} = \frac{(EVI_i + SWT_i)}{S \cdot Sr_i \cdot H} \quad [3-22]$$

記号

H : 相変化熱 [J/kg]

m_{st} : 皮膚表面の汗の蓄積量 [kg/m^2]

m_{sw} : 発汗速度 [$kg/m^2/s$]

X_e : 皮膚表面と接する層の絶対湿度 [kg/kg']

$X_{satskin}$: 皮膚の飽和状態時の絶対湿度 [kg/kg']

X_{skin} : 皮膚の絶対湿度 [kg/kg']

α'_e : 皮膚表面—皮膚表面と接する層との間の湿気コンダクタンス [$kg/m^2/s/(kg/kg')$]

α'_{skin} : 皮膚の湿気コンダクタンス 2.07×10^{-4} [$kg/m^2/s/(kg/kg')$]

3.2.4. 着衣および掛布団の内部の熱水分収支式

図 3-1 に示すとおり，腹部，背中部および大腿部上側と下側には着衣が，腹部，大腿部上側，膝部上側および足部上側には掛布団がある．各部位において垂直方向 1 次元モデルを考え，着衣・掛布団は 2 質点で代表させる（図 3-2，図 3-3）．

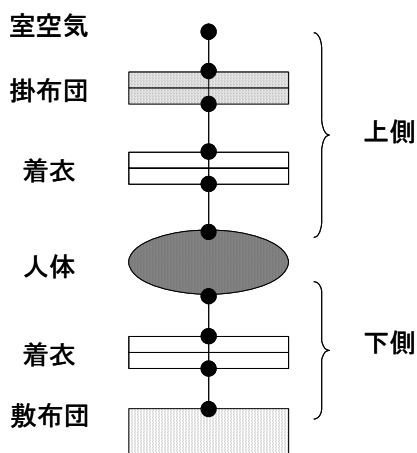


図 3-2 着衣・寝具モデル（腹部，背中部，大腿部）

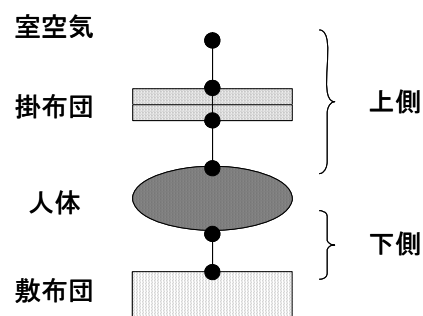


図 3-3 着衣・寝具モデル（膝部，足部）

(1) 水分収支式

着衣・寝具（掛布団）における水分の収支は，1 次元系では式[3-23]で表わされる．ただし，液水移動は少なく，水蒸気移動で近似的に表現できるものとする．

$$\rho_{water} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right] \quad [3-23]$$

(2) 熱収支式

着衣・寝具（掛布団）における熱収支は式[3-24]で表される．

$$c\rho_{cl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{cl} \frac{\partial T}{\partial x} + H\lambda_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right] \quad [3-24]$$

記号

- $c\rho_{cl}$: 着衣または掛布団の体積比熱 [J/K/m³]
- W : 体積含水率 [n.d.]
- x : 厚さ [m]
- X : 絶対湿度 [kg/kg⁰]
- λ : 熱伝導率 [W/m/K]
- λ' : 湿気伝導率 [kg/m/s/(kg/kg⁰)]
- ρ : 密度 [kg/m³]

添字

cl : 着衣または掛布団

$water$: 水

3.2.5. 着衣および掛布団の境界条件

着衣または掛布団についての境界条件は式[3-25]～式[3-28]で表される。ただし、皮膚表面に蓄積した汗（液）は移動しないものとする。

(1) 皮膚と隣接する質点

$$\left[-\lambda_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right]_{cl} = \alpha'_e (X_{skin} - X_{cl}) \quad [3-25]$$

$$\left[-\lambda_{cl} \frac{\partial T}{\partial x} - H\lambda'_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right]_{cl} = \alpha_e (T_{skin} - T_{cl}) + H\alpha'_e (X_{skin} - X_{cl}) \quad [3-26]$$

(2) その他の質点

$$\left[-\lambda_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right]_{cl} = \alpha'_{adcl} (X_{adcl} - X_{cl}) \quad [3-27]$$

$$\left[-\lambda_{cl} \frac{\partial T}{\partial x} - H\lambda'_{cl} \frac{\partial X}{\partial x} \right]_{cl} = \alpha_{adcl} (T_{adcl} - T_{cl}) + H\alpha'_{adcl} (X_{adcl} - X_{cl}) \quad [3-28]$$

記号

α_e : 皮膚表面—皮膚表面と接する層との間の熱コンダクタンス（対流と放射） [W/m²/K]

α_{adcl} : 着衣または掛布団表面—着衣または掛布団表面と接する層との間の熱コンダクタンス（対流と放射） [W/m²/K]

α'_{adcl} : 着衣または掛布団表面—着衣または掛布団表面と接する層との間の湿気コンダクタンス [kg/m²/s/(kg/kg['])]

添字

$adcl$: 着衣または掛布団表面と接する層 (adjacent to clothes)

3.2.6. 物理定数および飽和水蒸気圧の算定式

(1) 飽和水蒸気圧及び絶対湿度の算定式

温度と飽和水蒸気圧との関係式は式[3-29]で与えられる。

$$P_{sat} = 10^{2.78614 + 10.79594 \left(1 - \frac{273.16}{T + 273.16} \right) - 5.028 \log_{10} \frac{T + 273.16}{273.16}} + 1.50475 \times 10^{-4} \left(1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T + 273.16}{273.16} - 1 \right)} \right) + 0.42873 \times 10^{-3} \times 10^{\left[4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T + 273.16} \right) - 1 \right]} \quad [3-29]$$

水蒸気分圧(P_w)と相対湿度(RH)との関係式は式[3-30]で与えられる.

$$P_w = P_{sat} \frac{RH}{100} \quad [3-30]$$

標準大気圧と水蒸気分圧(P_w)から絶対湿度(X)を算定する式は式[3-31]で与えられる.

$$X = 0.622 \frac{P_w}{P_{air} - P_w} \quad [3-31]$$

記号

- RH : 相対湿度 [%]
 P_{air} : 標準大気圧 [Pa]
 P_{sat} : 飽和水蒸気圧 [Pa]
 P_w : 水蒸気分圧 [Pa]

(2) 熱伝達と水分伝達

熱伝達と水分伝達の間には相似性があり, 対流熱伝達率と湿気伝達率には次のような関係が成立する.

$$\frac{\alpha_c}{\alpha' C_{air}} = L_e \quad (L_e \leq 1) \quad [3-32]$$

ルイス数 L_e はレイノルズ数等, 流れ方によっても変わるが, 通常 $L_e = 1$ と近似できる. このとき式 [3-33] が成り立ち, その関係をルイス関係という.

$$\frac{\alpha_c}{\alpha' C_{air}} = 1 \quad [3-33]$$

したがって,

$$\alpha' = \frac{\alpha_c}{C_{air}} \quad [3-34]$$

記号

- α' : 湿気伝達率 [kg/m²/s/(kg/kg['])]
 α_c : 対流熱伝達率 [W/m²/K]
 C_{air} : 乾き空気の定圧比熱 [J/kg/K]
 L_e : ルイス数 [n.d.]

(3) 含水率

含水率には重量含水率と体積含水率とがある。

重量含水率 W_g : 着衣(または掛布団) の実質部 1kg あたりの水の質量 [n.d.]

体積含水率 W : 着衣(または掛布団) 1m^3 あたりの水の体積 [n.d.]

両者の間には以下のような関係式が成り立つ。

$$W = \frac{\rho_{co}(1-a)}{\rho_{water}} W_g \quad [3-35]$$

記号

a : 着衣および掛布団の空隙率 [n.d.]

W_g : 重量含水率 [n.d.]

添字

co : 綿の実質部

(4) 着衣と掛布団の平衡含水率曲線

平衡含水率曲線は、式[3-36]に示す分数関数で近似する (図 3-4)。

$$W_g = \frac{-0.037609876}{\frac{RH}{100} - 1.15555556} + 0.0022222 \quad [3-36]$$

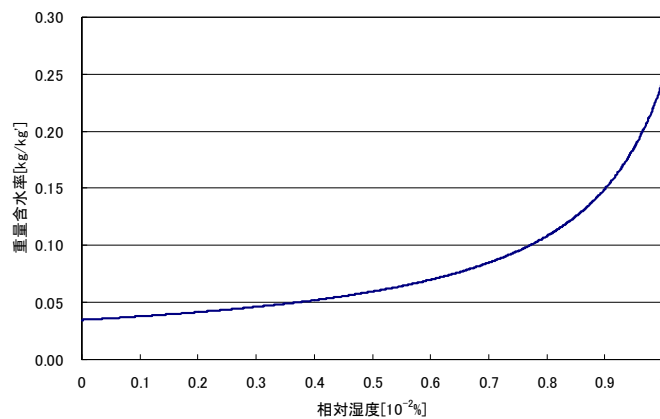


図 3-4 平衡含水率曲線

(5) 着衣・掛布団の熱容量

着衣・掛布団の体積比熱は水分の影響を考慮して式[3-37]で求める。

$$c\rho_{cl} = c_{water}\rho_{water}W + c_{co}\rho_{co}(1-a) \quad [3-37]$$

記号

c : 比熱 [J/kg/K]

3.3. 睡眠時の温熱生理モデルの解析条件

3.3.1. 解析対象

2005年度に実施した4回の睡眠実験のうち、第1夜効果を考慮し、1回目の05-1を除いた05-2, 05-3, 05-4の3回を解析対象とする。実験の詳細については、第2章を参照。

3.3.2. 解析に用いた諸定数

Stolwijkモデルでは、人体に関する諸定数は標準的な人体の体格を定義し、それに基づいて与えられている。本研究の被験者の体格はそれと異なるため（表3-1）、解析に用いる諸定数は体格の比率を考慮した（表3-2）。

基礎代謝量は、体表面積あたりで示すことが有効な尺度とされていること³⁻⁴⁾、不感蒸泄による放熱量、体幹部における各層間の熱コンダクタンスは、モデルの各層の円柱の表面積に比例する値として与えられていることより、それらのパラメータについては、体表面積に比例するものとした（表3-2のNO.1～NO.8）。体表面積比率のうち、四肢部の分割には、Stolwijk³⁻⁵⁾による人体モデルの各部位の比率を用いた。ただし、前述のモデルでは分割されていない膝部と足部の比率については、Hardy and DuBois³⁻⁶⁾の7点法による平均皮膚温度の算出で用いる重み付けより求めた（表3-4）。熱容量は質量に比例すること、呼吸による放熱量は肺の体積に、また深部血流量および中立環境における皮膚血流量は体内の血液量に依存し、人体の体積は体重とほぼ比例関係にあると考えられることから、それらのパラメータについては体重に比例するものとした（表3-2のNO.9～NO.13）。各部位の質量比率には、Stolwijk³⁻⁵⁾が示している人体モデルの各部位の体積と、体表面積比率と同様、Hardy and DuBois³⁻⁶⁾の7点法による平均皮膚温度の算出に用いる重み付けを使用した（表3-3）。皮膚血流量の各部位の比率は、著者らが行った実測結果を参考に決定した（表3-4）。各部位の質量、体表面積、皮膚血流量の上下の比率はいずれも1:1とした。運動による熱発生量は、 $0W/m^2$ とした。室内空気に接している皮膚および掛布団の放射による熱流量は、その表面温度と壁体表面温度との差と放射熱伝達率の積で、対流による熱流量はその表面温度と室温との差と対流熱伝達率の積で表現される。本研究では簡単のため、壁体表面温度が室温と一致しているという定式化を行う。ただし、低温条件（05-2, 05-4）では、壁体表面温度が室温より高く、皮膚温度または掛布団温度との差が小さかったため、低温条件では、高温条件（05-3）より室内空気に接している皮膚または掛布団と室内空気との間の放射熱伝達率を通常用いられる値より小さく設定し、その影響を考慮した（表3-5）。また対流による熱流量は人体・着衣・寝具それぞれの間が存在する空気層の形状や厚さに大きく依存する値であるが³⁻⁷⁾、実測することは困難である。そこで本研究では実験値をよく再現できるように対流熱伝達率を決定した。湿気伝達率はルイス関係を用いて対流熱伝達率から決定した。着衣と掛布団に関する諸数値は、厚さには実測値を、熱伝導率、比熱、実質部密度、空隙率には文献^{3-8,3-9)}値を、湿気伝導率には既往研究^{3-10, 3-11, 3-12, 3-13)}の値を使用した（表3-6）。解析で用いた物理定数を表3-7に示す。

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

表 3-1 体格の比較

	身長[cm]	体重[kg]	体表面積[m ²]
Stolwijk モデル	---	71	1.83
05 年度被験者	163	58	1.62 ^{*3-a}
比率	---	0.82	0.89

*3-a 被験者の体表面積は、身長と体重より蔵澄ら³⁻¹⁴⁾の式を用いて求めた。

表 3-2 体格を考慮した人体に関する諸定数

N0.	定数	人体部位番号 <i>i</i>	単位	比率 ^{*3-b}	Stolwijk モデル	05 年度の 被験者
1	基礎代謝量 [MTB]	-----	W	体表面積	82.8	73.3
2	層間の熱コンダクタンス (頭部・深部層—皮膚層)	1⇔2,3⇔4	W/K		3.06	2.71
3	層間の熱コンダクタンス (体幹部・深部—筋層)	5⇔6,8⇔9	W/K		5.64	4.99
4	層間の熱コンダクタンス (体幹部・筋層—皮膚層)	6⇔7,9⇔10	W/K		26.74	23.67
5	層間の熱コンダクタンス (四肢部・深部層—皮膚層)	11⇔12, 13⇔14, 15⇔16, 17⇔18, 19⇔20,21⇔22, 23⇔24,25⇔26	W/K		20.58	18.22
6	不感蒸泄による放熱量 [EVI] (頭部皮膚層)	2,4	W		0.93	0.82
7	不感蒸泄による放熱量 [EVI] (体幹部皮膚層)	7,10	W		3.84	3.40
8	不感蒸泄による放熱量 [EVI] (四肢部皮膚層)	12,14,16,18,20,22,24,26	W		5.65	5.00
9	人体の熱容量 [C]	-----	KJ/K	体重	246.4	201.45
10	呼吸による放熱量 [EVR] (頭部深部層, 体幹部深部層)	1,3,5,8	W		5.23	4.28
11	深部血流量 (頭部深部層) [CBF]	1,3	m ³ /s		1.43×10 ⁻⁵	1.17×10 ⁻⁵
12	深部血流量 (体幹部深部層) [CBF]	5,8	m ³ /s		5.83×10 ⁻⁵	4.77×10 ⁻⁵
13	中立環境における皮膚血流量[SBF ₀]	-----	ℓ/h		10.6	8.67

*3-b 比率は表 1 の値を用いた。体重比率 : 0.82 体表面積比率 : 0.89

(05 年度の被験者の定数) = (比率) × (Stolwijk モデル の定数)

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

表 3-3 各部位の質量比率

部位			Stolwijk モデル	05 年度の被験者			
頭部	深部	上	0.067	0.0335			
		下		0.0335			
	皮膚	上	0.005	0.0025			
		下		0.0025			
体幹部	深部	上	0.341	0.1705			
		下		0.1705			
	筋	上	0.165	0.0825			
		下		0.0825			
	皮膚	上	0.019	0.0095			
		下		0.0095			
四肢部	腕	深部	0.356	0.0850			
	手			0.0069			
	大腿			上	0.0515		
				下	0.0515		
	膝			上	0.0753		
				下	0.0753		
	足			上	0.0052		
				下	0.0052		
	腕			皮膚	0.028	0.0067	
	手					0.0005	
	大腿					上	0.0041
						下	0.0041
	膝					上	0.0059
						下	0.0059
足	上	0.0004					
	下	0.0004					
中央血流溜り			0.019			0.0190	
計			1			1	

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

表 3-4 各部位の体表面積比率と皮膚血流量比率

部位		体表面積比率		皮膚血流量比率			
		Stolwijk モデル	05年度の被験者	Stolwijk モデル	05年度の被験者		
頭部	上	0.09	0.045	0.138	0.080		
	下		0.045		0.080		
体幹部	上	0.37	0.185	0.286	0.057		
	下		0.185		0.057		
腕部		0.54	0.151	0.535	0.122		
手部			0.043		0.113		
大腿部	上		0.057		0.061		
	下		0.057		0.061		
膝部	上		0.085		0.092		
	下		0.085		0.092		
足部	上		0.032		0.071		
	下		0.032		0.071		
計			1		1	0.959	0.959

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

表 3-5 熱および湿気伝達率

		定数	熱コンダクタンス[W/m ² /K]		湿気コンダクタンス [kg/m ² /s/(kg/kg')]
		条件	低温条件	高温条件	
		実験番号	05-2, 05-4	05-3	
頭部	上	皮膚 — 空気	5.8	9.3	0.0046
	下	皮膚 — 枕	9.3	9.3	0.0046
体幹部	上	皮膚 — 着衣	9.3	9.3	0.0046
		着衣 — 掛布団	9.3	9.3	0.0046
		掛布団 — 空気	7.0	9.3	0.0046
	下	皮膚 — 着衣	97.7	97.7	0.0926
		着衣 — 敷布団	97.7	97.7	0.0926
腕部		皮膚 — 空気	7.0	9.3	0.0046
手部		皮膚 — 空気	3.5	5.8	0.0012
大腿部	上	皮膚 — 着衣	14.0	14.0	0.0093
		着衣 — 掛布団	14.0	14.0	0.0093
		掛布団 — 空気	11.6	14.0	0.0093
	下	皮膚 — 着衣	97.7	97.7	0.0926
		着衣 — 敷布団	97.7	97.7	0.0926
膝部	上	皮膚 — 掛布団	9.3	9.3	0.0046
		掛布団 — 空気	7.0	9.3	0.0046
	下	皮膚 — 敷布団	12.8	12.8	0.0081
足部	上	皮膚 — 掛布団	5.8	5.8	0.0012
		掛布団 — 空気	3.5	5.8	0.0012
	下	皮膚 — 敷布団	9.3	9.3	0.0046

表 3-6 着衣と掛布団に関する諸数値

		着衣	掛布団
綿の実質部の熱伝導率	[W/m/K]	0.0556	
綿の実質部の湿気伝導率	[kg/m/s/(kg/kg')]	5.0×10 ⁻⁶	
厚さ	[m]	5.0×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻³
綿の実質部の比熱 c_{co}	[J/kg/K]	1380	
綿の実質部密度 ρ_{co}	[kg/m ³]	1540	
空隙率 a	[n.d.]	0.773	

表 3-7 物理定数

水の密度	ρ_{water}	[kg/m ³]	1000
水の比熱	c_{water}	[J/kg/K]	4186
相変化熱	H	[J/kg]	2259600
標準大気圧	P_{air}	[Pa]	101325
空気の定圧比熱	C_{air}	[J/kg/K]	1004.64

3.3.3. 境界条件と初期条件

温湿度の境界条件としては、頭部上側では頭部周辺空気の、頭部下側では枕の、体幹部上側、腕部、手部、大腿部上側、膝部上側、足部上側では、室の中央部の空気の、体幹部下側、大腿部下側では中央部の敷布団上B点の、膝部下側および足部下側では足元付近の敷布団上H点の温湿度測定値を用いる(表 3-8, 図 3-5)。初期条件には睡眠開始時刻 0 での実験値, もしくは助走計算を参考に決定した値を用いる。

表 3-8 温湿度の境界条件

箇所		境界条件
頭部	上	頭部上周辺空気
	下	枕
体幹部	上	室中央部空気
	下	敷布団上 B
腕部		室中央部空気
手部		室中央部空気
大腿部	上	室中央部空気
	下	敷布団上 B
膝部	上	室中央部空気
	下	敷布団上 H
足部	上	室中央部空気
	下	敷布団足元 H

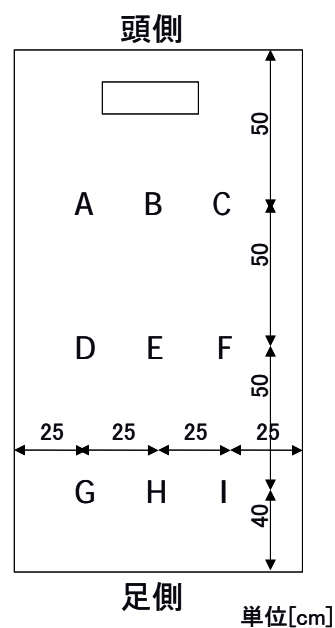


図 3-5 敷布団の測定点

3.3.4. 人体各部位の温度の計算値と実験値の対応

計算値 (C で表す.) においては、頭部上側深部層と下側深部層の温度の平均値および体幹部上側深部層と下側深部層の平均値には、それぞれ実験値 (E で表す.) の鼓膜温度, 直腸温度を対応させた。また頭部上側皮膚層温度には前額温度を、体幹部上側皮膚層温度には腹温度を、下側皮膚層温度には背中温度を、腕部皮膚層温度には前腕温度を、手部皮膚層温度には手背温度を、大腿部上側皮膚層温度には大腿温度を、膝部下側皮膚層温度には下腿温度を、足部上側皮膚層温度には足背温度を対応させた(表

3-9). 前額温度および背中温度は測定している 2 箇所の平均値を用いる.

表 3-9 人体各部位温度の計算値 [C] と実験値 [E] の対応

計算値 [C]	人体部位番号 i	実験値 [E]
頭部深部層の平均値	1, 3	鼓膜
体幹部深部層の平均値	5, 8	直腸
頭部上側皮膚層	2	前額
体幹部上側皮膚層	7	腹
体幹部下側皮膚層	10	背中
腕部皮膚層温度	12	前腕
手部皮膚層温度	14	手背
大腿部上側皮膚層	16	大腿
膝部下側皮膚層	22	下腿
足部上側皮膚層	24	足背

3.4. 睡眠時の温熱生理モデルによる解析結果

3.4.1. 皮膚温度

前額 (図 3-6~図 3-8) については, いずれの実験においても計算値は実験値を大略再現できている. 05-2 では起床直前の上昇を再現できてないが, 全体的に精度よく再現できている. 05-3 では 140 分頃までは概ね再現できているが, 140 分以降で実験値では温度上昇がみられる. 赤外線カメラの画像によるとその時刻で頭が動いており, その影響で測定点付近の状況が変化したためと考えられる. 05-4 は精度よく再現できている.

腹 (図 3-9~図 3-11) については, 05-2 は実験値にばらつきがあることを考慮すると平均的には再現できているが, 85 分の実験値の上昇と 140 分の低下については一致していない. 05-3, 05-4 では, 概ね一致している.

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

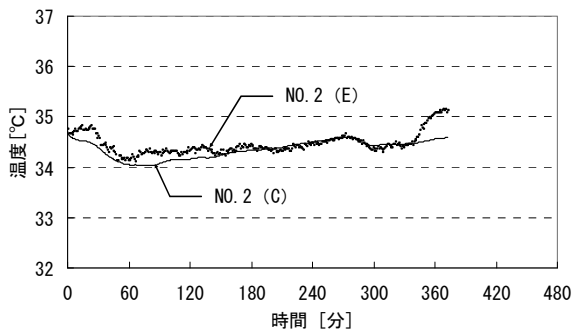


図 3-6 前額温度 05-2

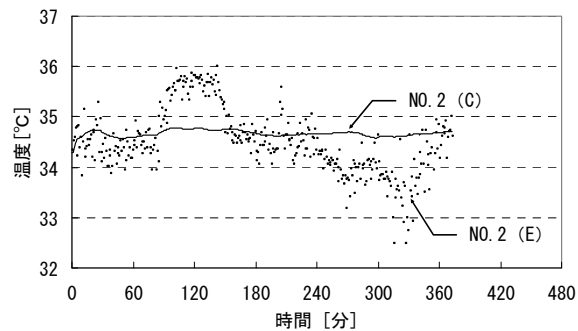


図 3-9 腹温度 05-2

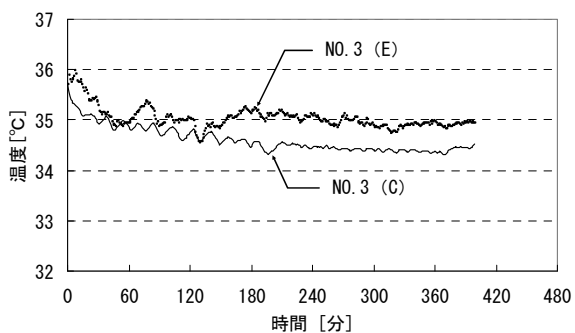


図 3-7 前額温度 05-3

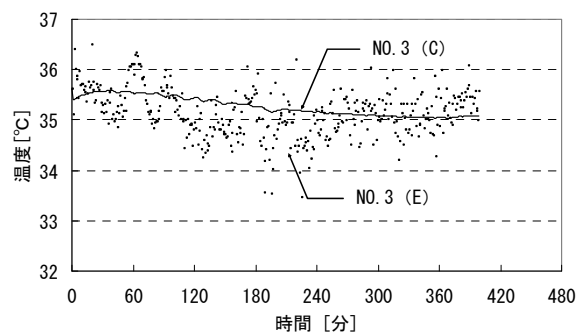


図 3-10 腹温度 05-3

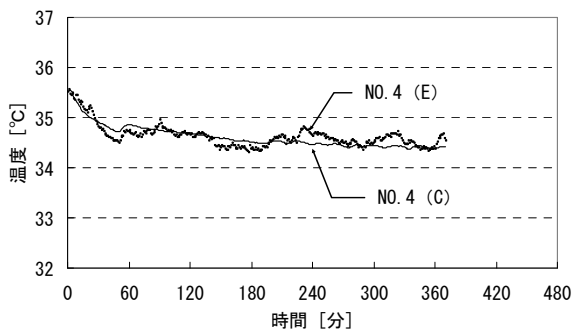


図 3-8 前額温度 05-4

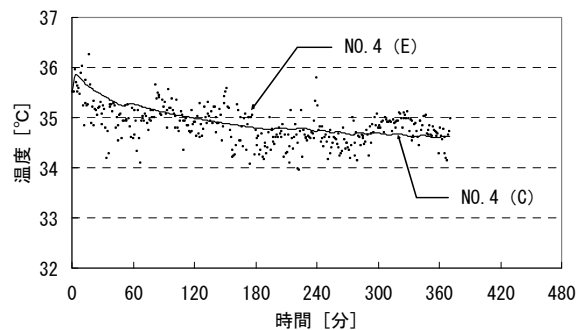


図 3-11 腹温度 05-4

背中 (図 3-12~図 3-14) については, 05-2 では, やや高めであるが, 概ね再現できている. 05-3 では, センサの 1 点がはずれていたため, 他方の 1 点の実験値と比較する. 平均的に少し高めであるが, 変化の傾向は再現できている. 05-4 では, 計算値はやや高めであり, また 185 分の低下が再現できていない. 赤外線カメラの画像によると, 185 分の前 10 分間で背中が頻繁に動いており, その影響で背中 of 測定点付近の状況が変化したことが推測される.

前腕 (図 3-15~3-17) については, 05-2 では欠測であったため計算値のみ示している, 05-3, 05-4 では平均的には再現できている.

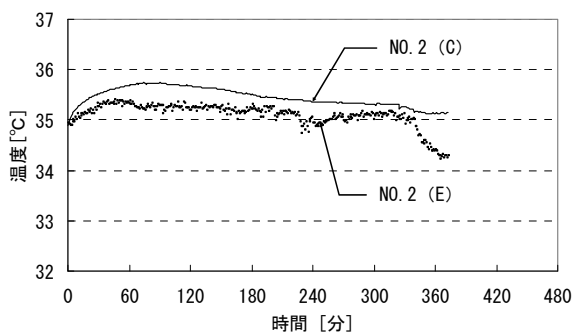


図 3-12 背中温度 05-2

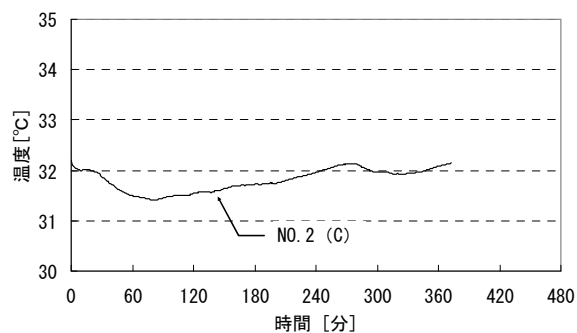


図 3-15 前腕温度 05-2(欠測)

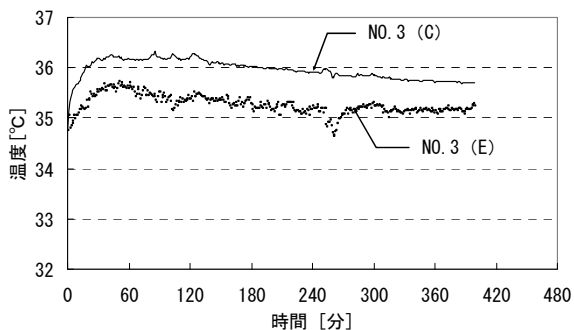


図 3-13 背中温度 05-3

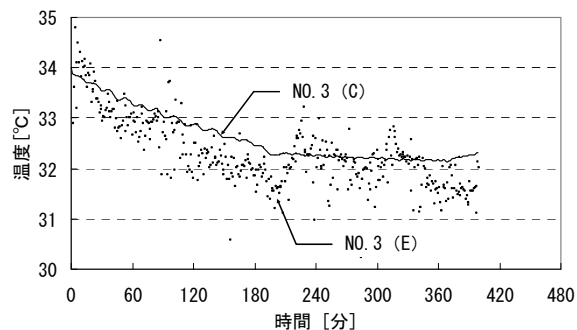


図 3-16 前腕温度 05-3

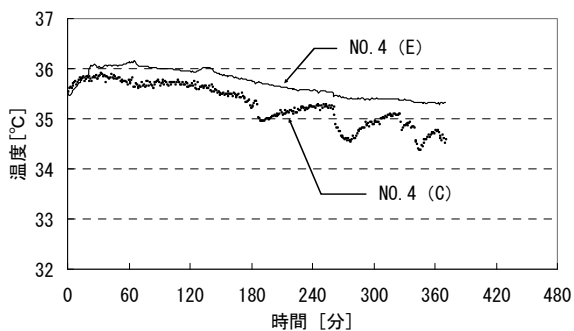


図 3-14 背中温度 05-4

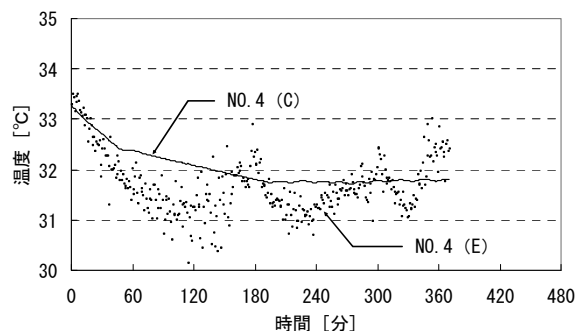


図 3-17 前腕温度 05-4

手背（図 3-18～図 3-20）、大腿（図 3-21～図 3-23）については、どの実験においても、概ね再現できている。ただし手背の 05-4 の 240 分以降と大腿の 05-3 の 50 分以降の実験値の低下が再現できていない。赤外線カメラの画像によると、その時刻に手は頻繁に動いており、大腿では、7 分以降に、膝より下の部分がタオルケットの外に出ていた。そのような状況が影響していると考えられる。

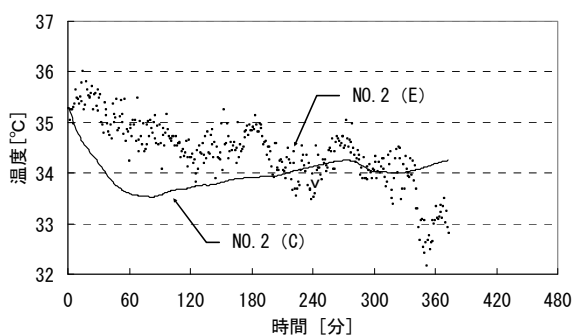


図 3-18 手背温度 05-2

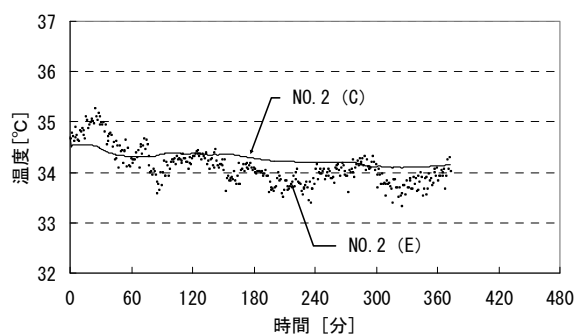


図 3-21 大腿温度 05-2

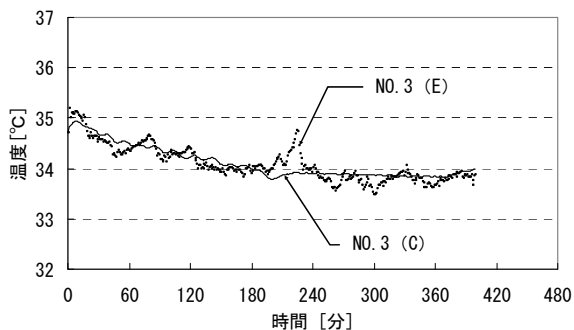


図 3-19 手背温度 05-3

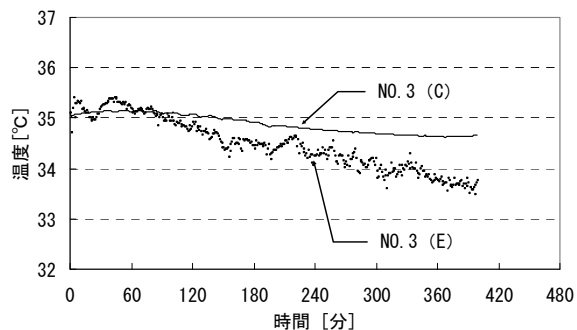


図 3-22 大腿温度 05-3

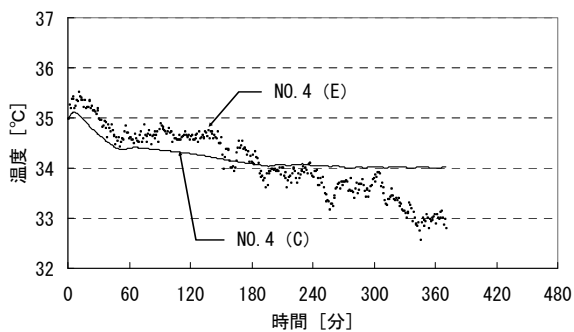


図 3-20 手背温度 05-4

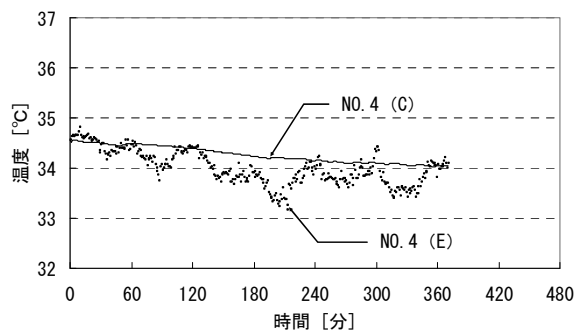


図 3-23 大腿温度 05-4

下腿（図 3-24～図 3-26）については、05-2 では消灯後、解析値は実験値より低めで推移するが、180 分以降は概ね再現できている。05-3 では 120 分頃まで再現できているが、その後実験値の低下は再現できていない。赤外線カメラの画像より、膝がタオルケットの外に出ていたことを確認しており、その影響によるものと考えられる。なお、311 分以降は欠測であった。05-4 では平均的には再現できている。

足背（図 3-27～図 3-29）については、05-4 では概ね再現できているが、05-2、05-3 では計算値と一致しない時間帯がある。このとき赤外線カメラの画像によると、足が動いており、その影響によるものと考えられる。

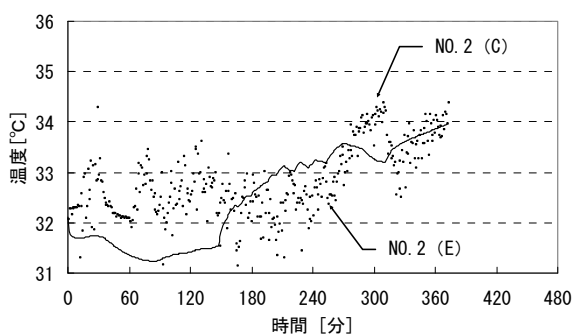


図 3-24 下腿温度 05-2

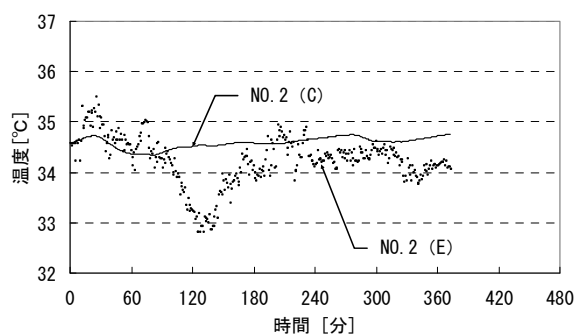


図 3-27 足背温度 05-2

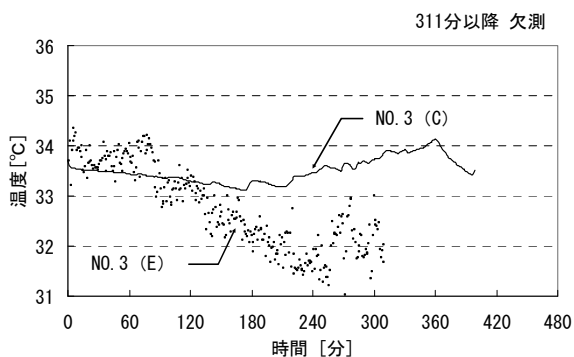


図 3-25 下腿温度 05-3

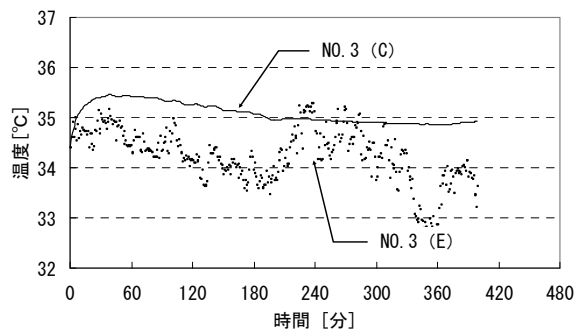


図 3-28 足背温度 05-3

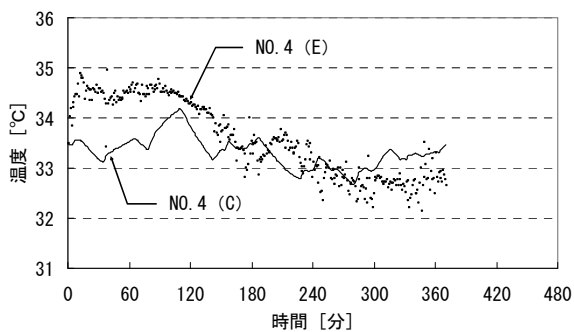


図 3-26 下腿温度 05-4

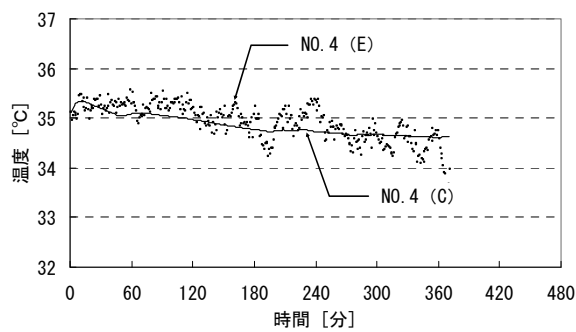


図 3-29 足背温度 05-4

平均皮膚温度を図 3-30～図 3-32 に、四肢部の前腕、手背、大腿、下腿、足背の 5 つの測定値の体表面積比による平均値（以降、平均四肢部温度(5) と表す。）を図 3-33～図 3-35 に示す。05-2 では前腕温度が全測定時間において、05-3 では下腿温度が 311 分以降欠測であったため、当該部分の実験値は除外した。

平均皮膚温度、平均四肢部温度(5)とも 05-3 では、80 分までは概ね一致している。80 分以降、下腿の温度が低下しており、この影響が少し見られるが、全体的にはよく再現できている。05-4 では、精度よく再現できている。

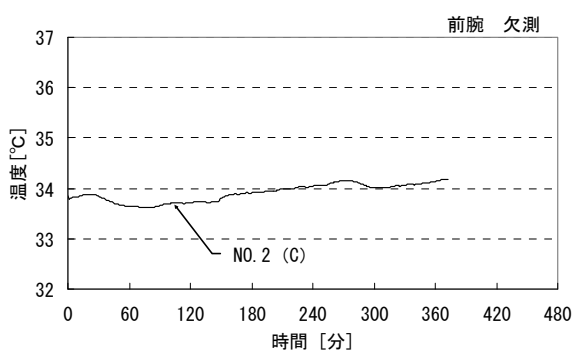


図 3-30 平均皮膚温度 05-2

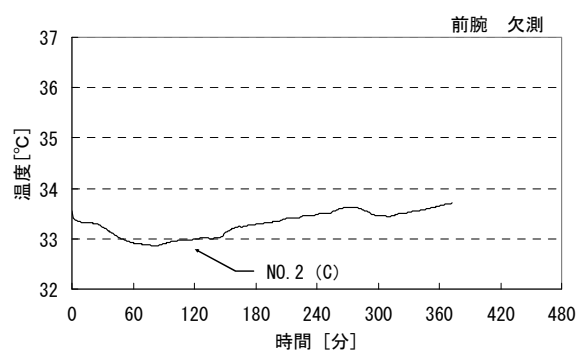


図 3-33 平均四肢部温度(5) 05-2

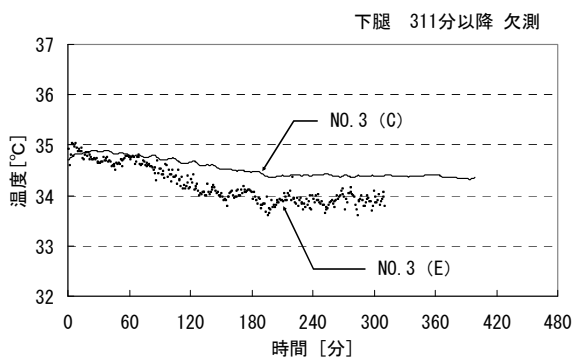


図 3-31 平均皮膚温度 05-3

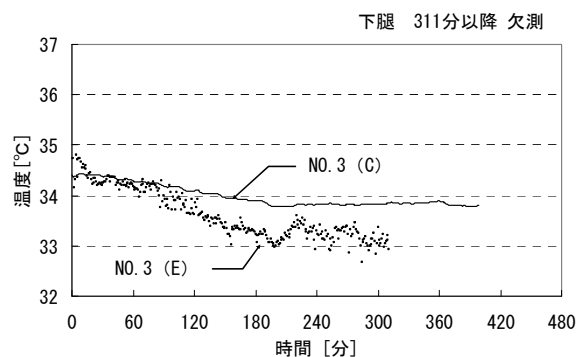


図 3-34 平均四肢部温度(5) 05-3

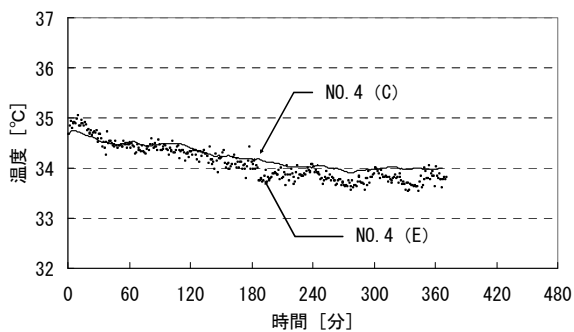


図 3-32 平均皮膚温度 05-4

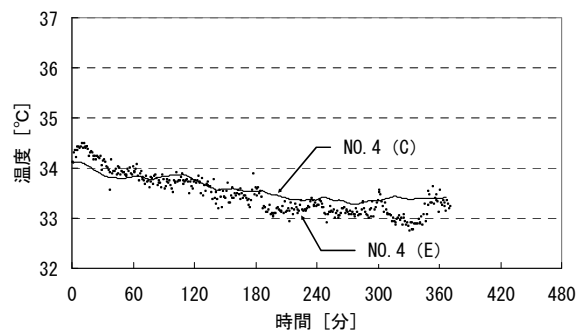


図 3-35 平均四肢部温度(5) 05-4

3.4.2. 深部温度

鼓膜（図 3-36～図 3-38）については，05-2 では計算値が 100 分で上昇に転ずるものの，大略再現できている．05-3，05-4 では精度よく再現できている．

直腸（図 3-39～図 3-41）については，05-2，05-3 では精度よく再現できている．05-4 では，計算値がやや低めであるが，概ね再現できている．

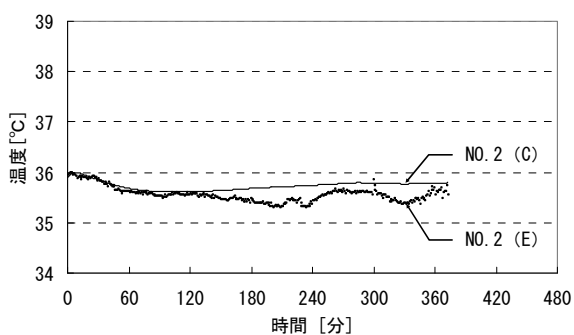


図 3-36 鼓膜温度 05-2

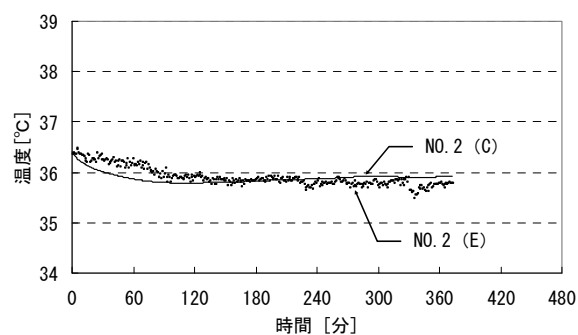


図 3-39 直腸温度 05-2

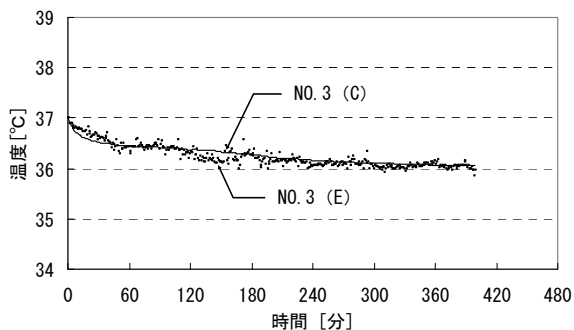


図 3-37 鼓膜温度 05-3

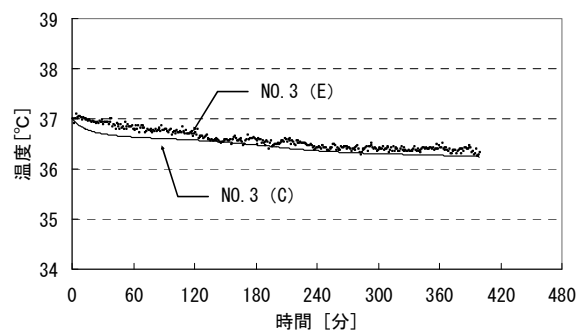


図 3-40 直腸温度 05-3

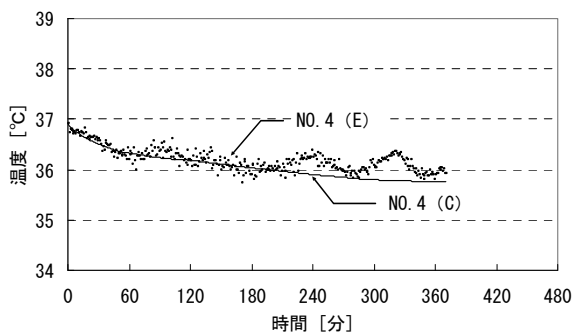


図 3-38 鼓膜温度 05-4

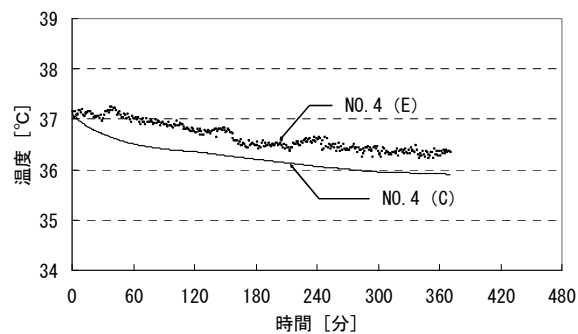


図 3-41 直腸温度 05-4

3.4.3. 解析のまとめ

本節では覚醒時の人体熱モデルと、周辺環境の温湿度などの測定値より決定された熱コンダクタンスを導入した着衣・寝具モデルにより構成する睡眠時の温熱生理モデルを提案し、人体の各部位の温度の再現を試みた。覚醒時を対象とした Stolwijk モデルにおいて、寝床内環境の非一様性を考慮して熱水場挙動を記述するためにモデルの部位分割を細かくし、更に体格の影響を適切に考慮することにより、複数回の睡眠実験における皮膚温度および深部温度の測定値を大略再現することができた。

3.5. 感度解析

温熱生理モデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察する。一例として、05-4の結果を示す。

3.5.1. 各パラメータの感度解析結果

(1) セットポイント

Stolwijk モデルで定義されている、頭部深部温度、平均皮膚温度、平均筋温度の3種のセットポイント（以下SPと称する。）について、検討する。Stolwijk モデルの値を基準条件として、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 変更した場合の計算を行った（表 3-10）。

表 3-10 解析条件（SP感度解析）

変数	基準条件	条件 1	条件 2
①頭部深部温度 SP [$^{\circ}\text{C}$]	36.6	36.1	37.1
②平均皮膚温度 SP [$^{\circ}\text{C}$]	34.1	33.6	34.6
③平均筋温度 SP [$^{\circ}\text{C}$]	35.88	35.38	36.38

① 頭部深部温度 SP

頭部深部温度 SP の感度解析の結果を図 3-42～図 3-53 に示す。SP を低くすると、皮膚および深部温度とも 0.1°C 程度低くなり、SP を高くすると、いずれの温度ともわずかに上昇した。

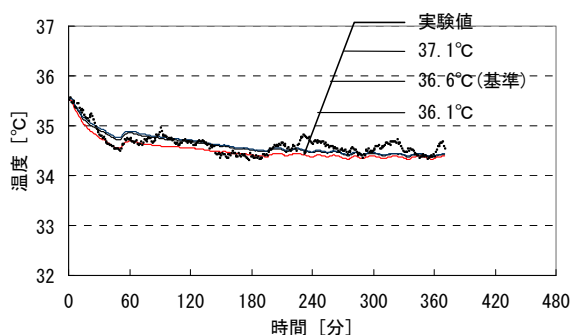


図 3-42 前額（頭部深部温度 SP の感度解析）

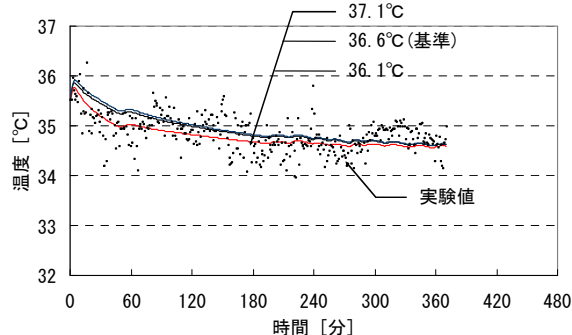


図 3-43 腹（頭部深部温度 SP の感度解析）

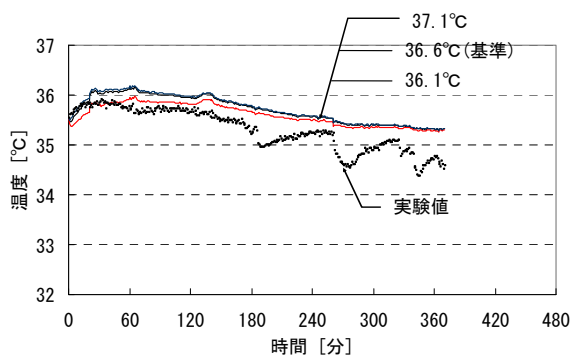


図 3-44 背中（頭部深部温度 SP の感度解析）

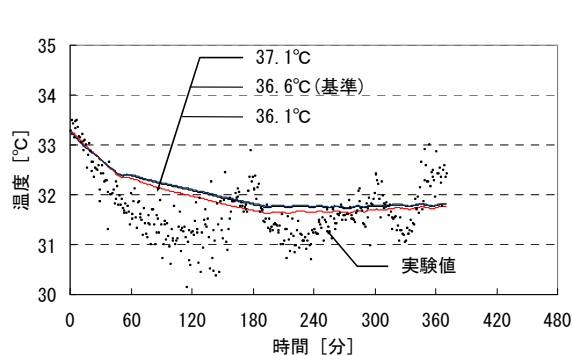


図 3-45 前腕（頭部深部温度 SP の感度解析）

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

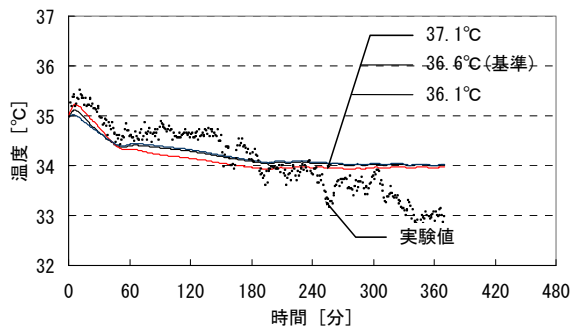


図 3-46 手背 (頭部深部温度 S P の感度解析)

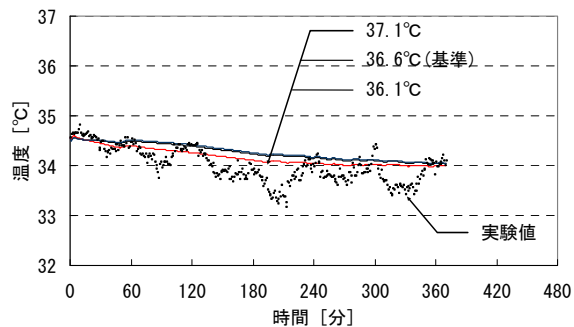


図 3-47 大腿 (頭部深部温度 S P の感度解析)

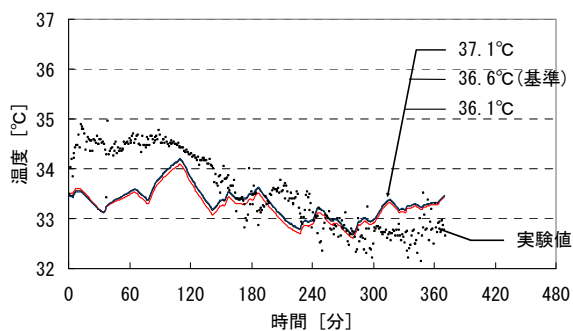


図 3-48 下腿 (頭部深部温度 S P の感度解析)

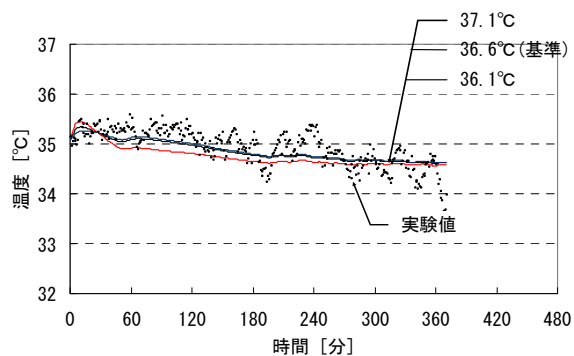


図 3-49 足背 (頭部深部温度 S P の感度解析)

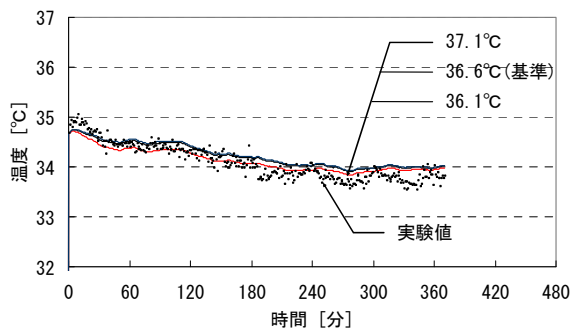


図 3-50 平均皮膚温度 (頭部深部温度 S P の感度解析)

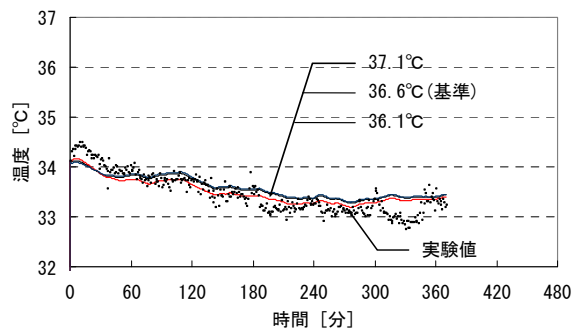


図 3-51 平均四肢部温度 (5) (頭部深部温度 S P の感度解析)

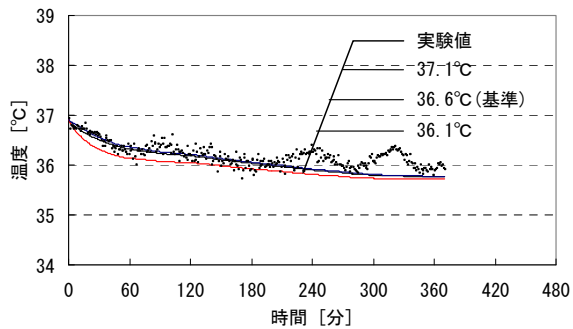


図 3-52 鼓膜 (頭部深部温度 S P の感度解析)

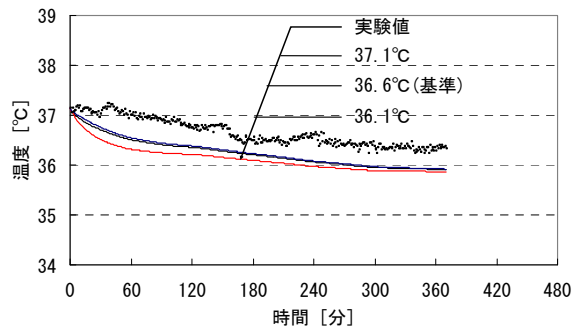


図 3-53 直腸 (頭部深部温度 S P の感度解析)

②平均皮膚温度SP

平均皮膚温度 SP の感度解析の結果を図 3-54～図 3-65 に示す。前額、腹および背中の皮膚温度は SP を高くすると高く、SP を低くすると低くなった。また、SP を高くする条件の方が顕著な変化がみられた。前腕の皮膚温度はどの条件においても就床後には低下し、この時間帯で最も高かったのは SP が低い条件であった。180 分頃では基準条件と SP が低い条件ではほとんど変化しないが、SP が高い条件でのみ上昇に転じ、その後 250 分頃では他の条件よりも高くなった。手背、大腿、下腿、足背でも、SP が高い条件でのみ睡眠の途中で上昇に転じた。平均皮膚温度と平均四肢部温度(5)は、就床後は、いずれの条件ともほとんど同じ値であるが、SP が高い条件において、平均皮膚温度では 130 分頃に、平均四肢部温度では 180 分頃に上昇に転じ、起床直前では、平均皮膚温度と平均四肢部温度(5)とも他の条件と比較して約 0.3℃高くなっていた。深部温度は、SP を高くすると高く、SP を低くすると低くなった。

このように、平均皮膚温度の SP を変更すると、頭部および体幹部の皮膚温度、深部温度は SP を低くする条件では低下し、高くする条件では上昇した。四肢部の皮膚温度は、就寝後はほとんど変化ないが、SP を高くする条件でのみ、睡眠の途中で上昇に転じた。四肢部の皮膚温度は、平均皮膚温度 SP との差を小さくするように変化したと考えられる。SP が低い条件では、平均皮膚温度および平均四肢部温度(5)への影響はほとんどみられなかった。

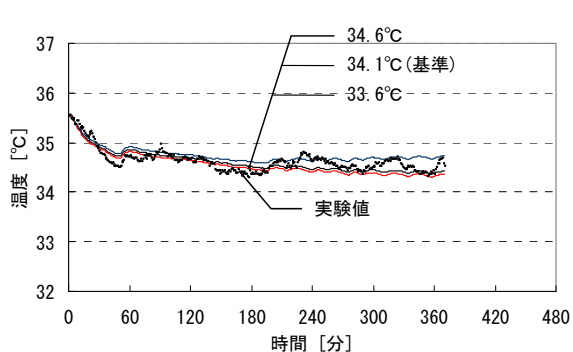


図 3-54 前額（平均皮膚温度 SP の感度解析）

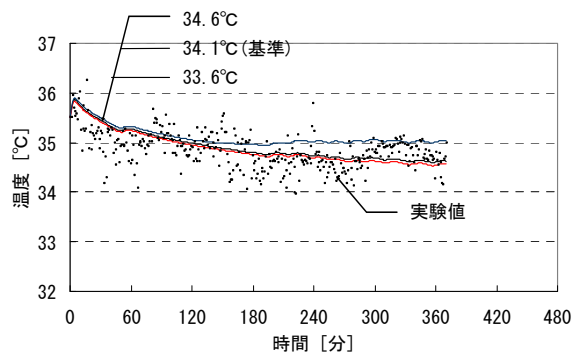


図 3-55 腹（平均皮膚温度 SP の感度解析）

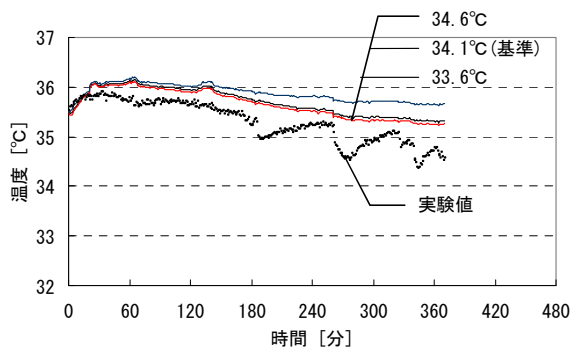


図 3-56 背中（平均皮膚温度 SP の感度解析）

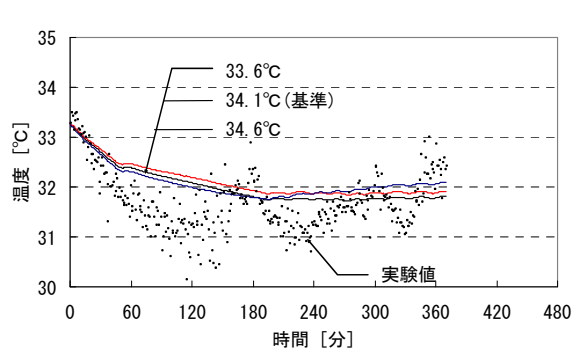


図 3-57 前腕（平均皮膚温度 SP の感度解析）

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

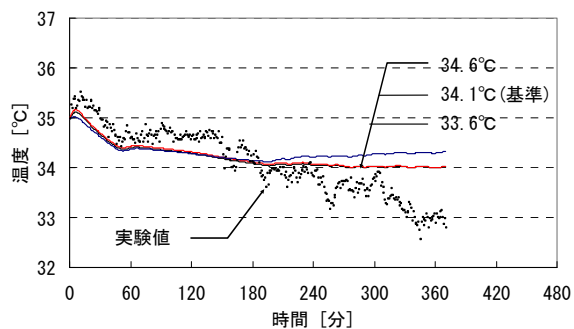


図 3-58 手背（平均皮膚温度SPの感度解析）

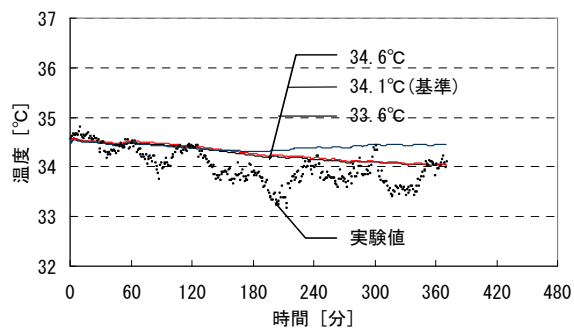


図 3-59 大腿（平均皮膚温度SPの感度解析）

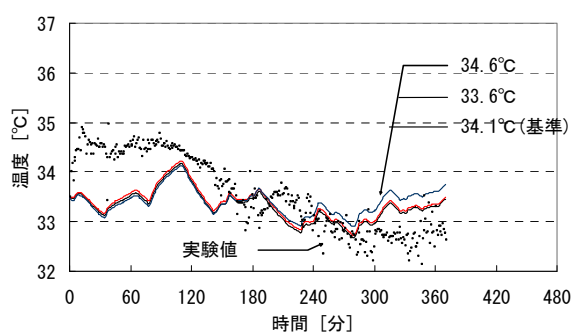


図 3-60 下腿（平均皮膚温度SPの感度解析）

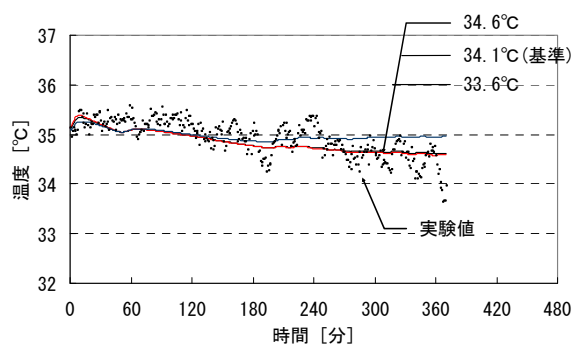


図 3-61 足背（平均皮膚温度SPの感度解析）

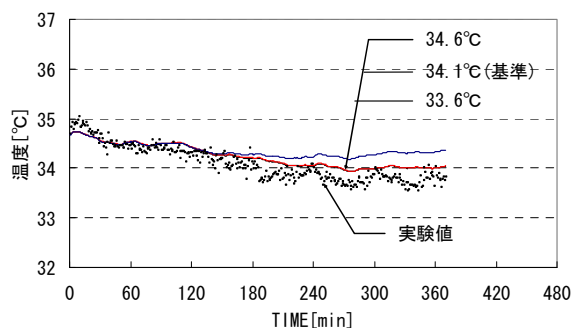


図 3-62 平均皮膚温度（平均皮膚温度SPの感度解析）

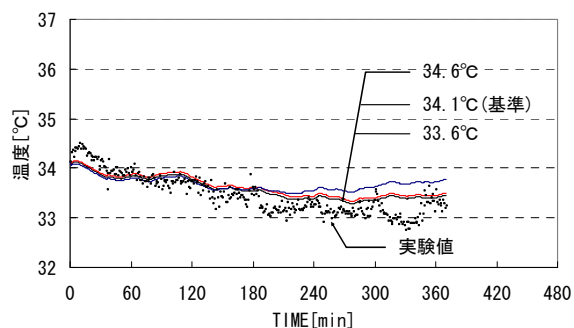


図 3-63 平均四肢部温度(5)（平均皮膚温度SPの感度解析）

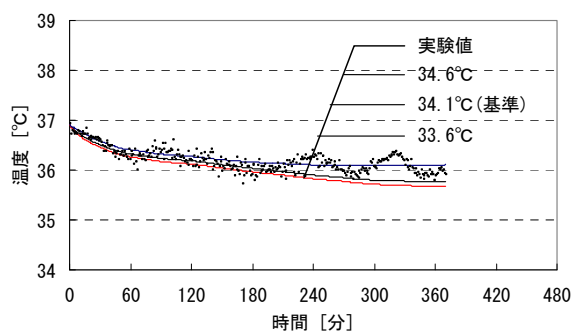


図 3-64 鼓膜（平均皮膚温度SPの感度解析）

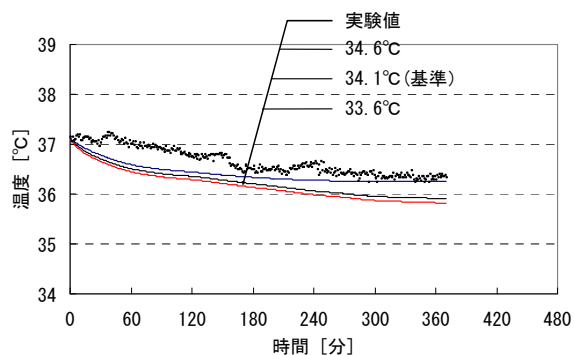


図 3-65 直腸（平均皮膚温度SPの感度解析）

③平均筋温度SP

平均筋温度 SP の感度解析の結果を図 3-66～図 3-77 に示す. SP を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 変更しても, 計算結果への影響はほとんどみられなかった.

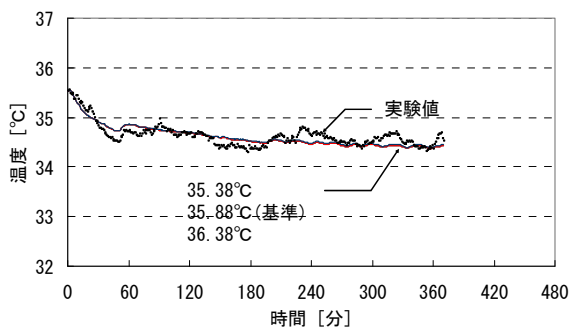


図 3-66 前額 (平均筋温度 SP の感度解析)

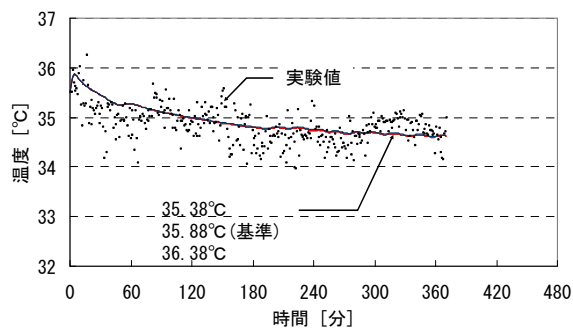


図 3-67 腹 (平均筋温度 SP の感度解析)

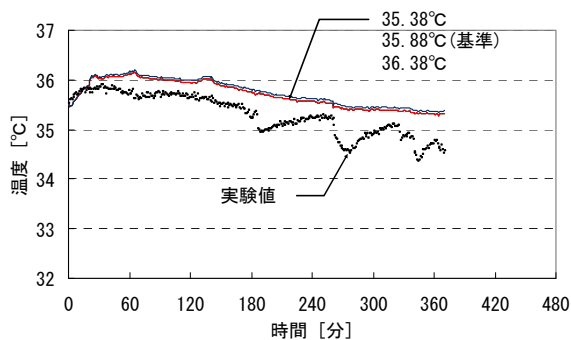


図 3-68 背中 (平均筋温度 SP の感度解析)

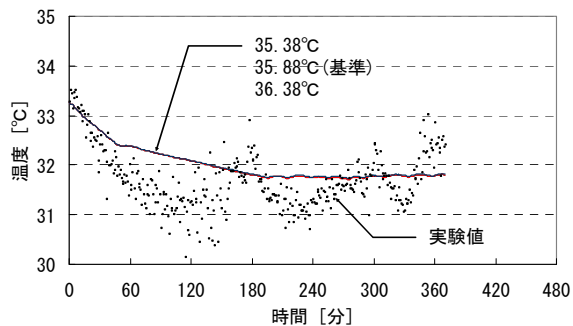


図 3-69 前腕 (平均筋温度 SP の感度解析)

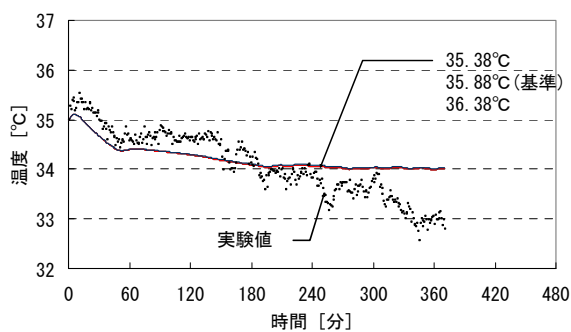


図 3-70 手背 (平均筋温度 SP の感度解析)

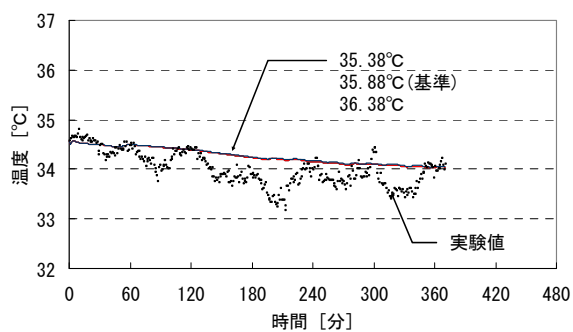


図 3-71 大腿 (平均筋温度 SP の感度解析)

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

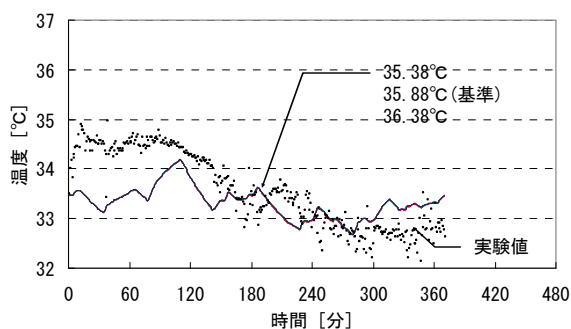


図 3-72 下腿 (平均筋温度SPの感度解析)

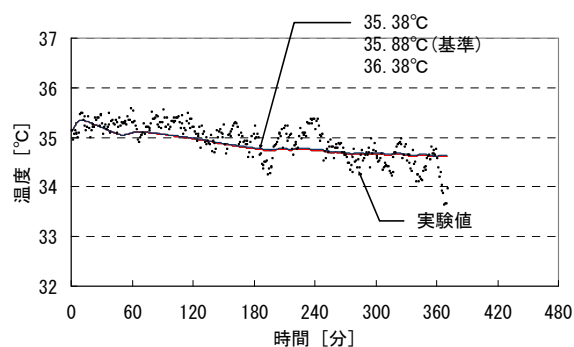


図 3-73 足背 (平均筋温度SPの感度解析)

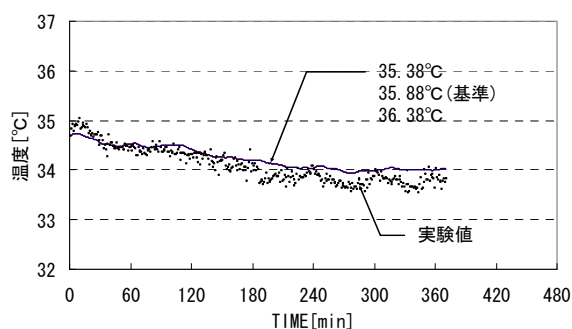


図 3-74 平均皮膚温度 (平均筋温度SPの感度解析)

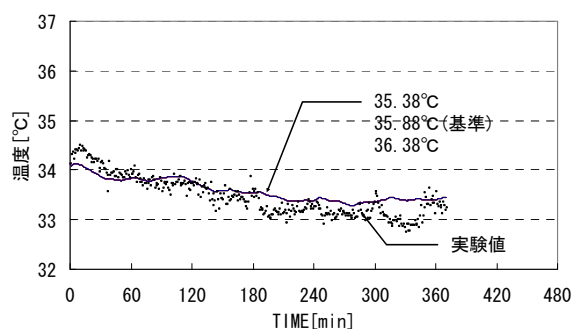


図 3-75 平均四肢部温度(5) (平均筋温度SPの感度解析)

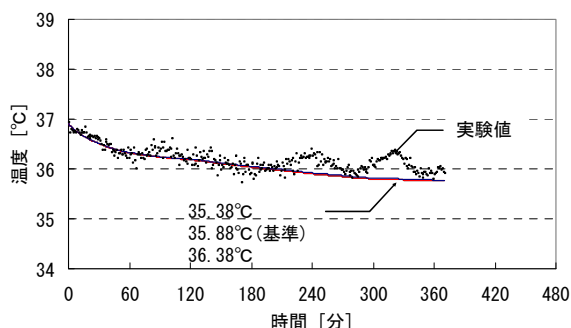


図 3-76 鼓膜 (平均筋温度SPの感度解析)

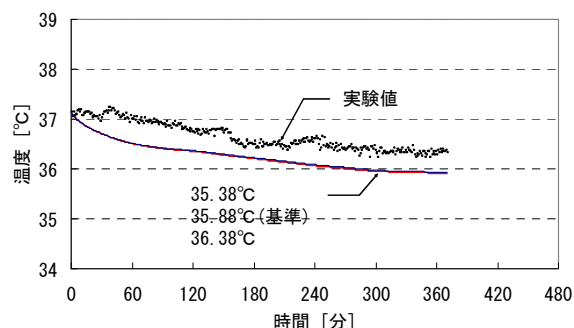


図 3-77 直腸 (平均皮膚温度SPの感度解析)

(2) 体動

体動の影響を調べるため、寝姿勢が変化するとき、運動量が 30W 増加するとして計算を行った。図 3-78 に運動量の時間変化を示す。体動を考慮した解析結果を図 3-79～図 3-90 に示す。本被験者の場合には体動が少なかったが、体動に伴う運動量の増加を考慮すると、皮膚温度と深部温度にわずかな上昇がみられた。頻繁に寝返りをする就寝者の場合は、皮膚温度と深部温度が上昇するものと推測される。そのような結果は、深部温度が睡眠の経過とともに低下し、起床時刻に近づくると上昇するという睡眠時特徴とされる生理現象を、代謝量の変化で説明できる可能性を示している。

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

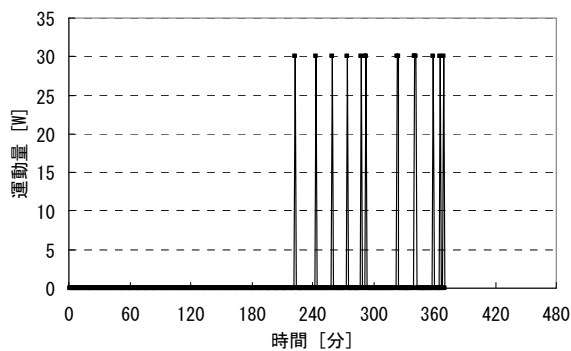


図 3-78 体動の感度解析の運動量の条件

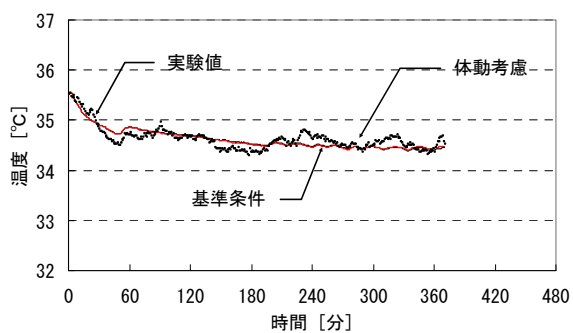


図 3-79 前額 (体動の感度解析)

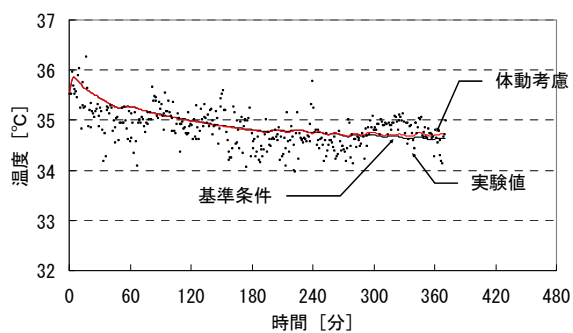


図 3-80 腹 (体動の感度解析)

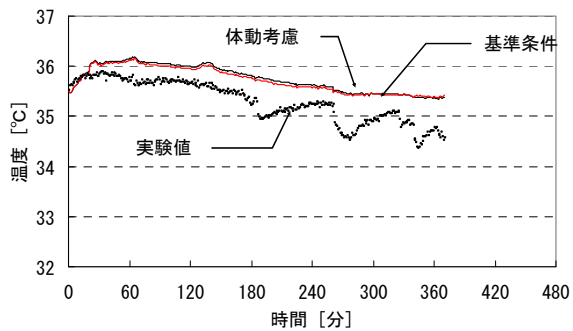


図 3-81 背中 (体動の感度解析)

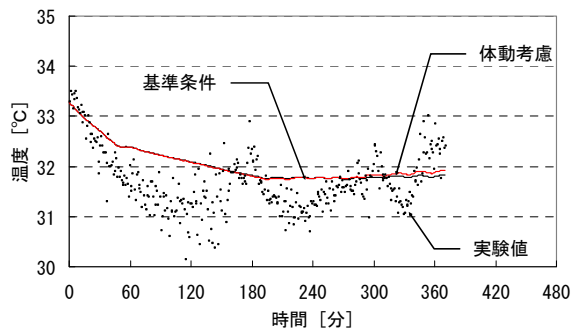


図 3-82 前腕 (体動の感度解析)

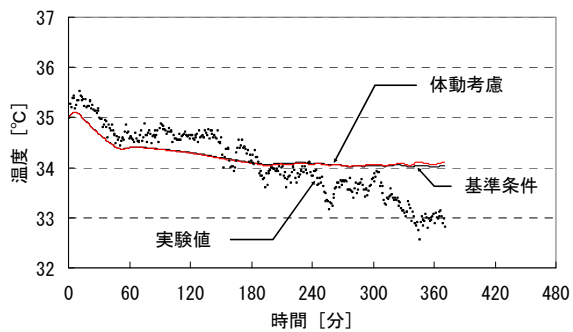


図 3-83 手背 (体動の感度解析)

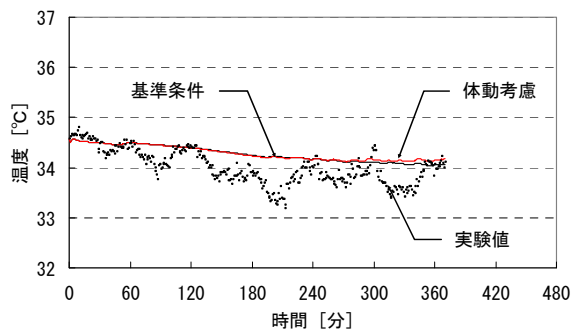


図 3-84 大腿 (体動の感度解析)

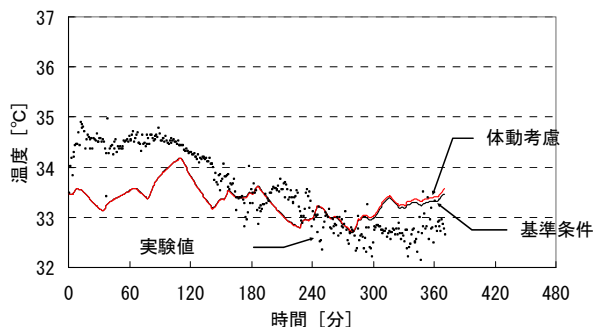


図 3-85 下腿（体動の感度解析）

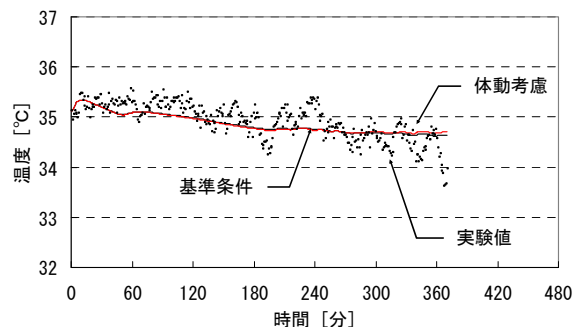


図 3-86 足背（体動の感度解析）

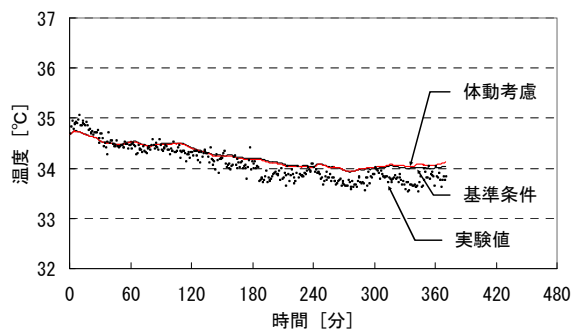


図 3-87 平均皮膚温度（体動の感度解析）

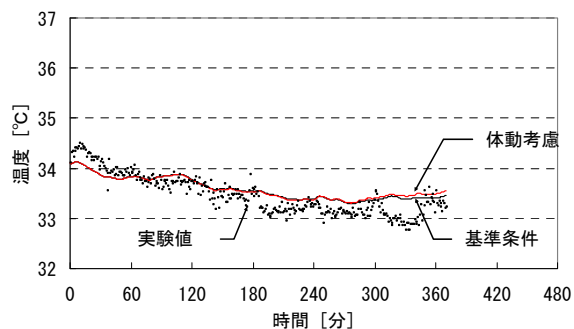


図 3-88 平均四肢部温度(5)（体動の感度解析）

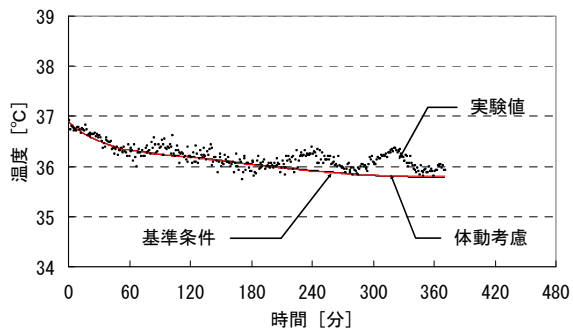


図 3-89 鼓膜（体動の感度解析）

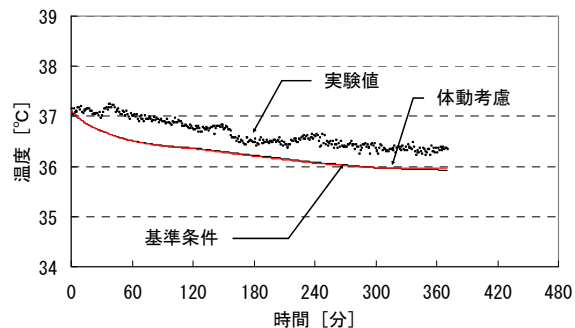


図 3-90 直腸（体動の感度解析）

(3)中立環境における皮膚血流量

中立環境における皮膚血流量については、Stolwijk モデルの値を基準として、 $\pm 20\%$ 変更する条件で計算を行った（表 3-11）。全身の総皮膚血流量は中立環境における皮膚血流量が大きく影響している（図 3-91）。また、皮膚と CB との間の血液による熱移動は、CB と皮膚の温度差ならびに皮膚血流量に比例する。したがって、皮膚血流量が少ない条件では、深部温度と皮膚温度との温度差が大きくなることから、深部温度は上昇し、皮膚温度は低下すると推測された。

計算では、皮膚血流量が少ない条件では、深部温度は上昇し、皮膚温度は四肢部では低下するが、頭部および体幹部では上昇する（図 3-92～図 3-103）。逆に、皮膚血流量が多い条件では、深部温度と頭部

および体幹部の皮膚温度は低下するが、四肢部の皮膚温度は上昇する。平均皮膚温度の変化量は、各部位の変化に比較するとわずかであった。

この理由について検討するため、頭部および体幹部の皮膚層の代表例として背中を、四肢部の皮膚層の代表例として前腕を選択し、各部位の全熱量とそれらを構成する熱量成分の全睡眠時間の平均値を計算した(表 3-12, 表 3-13)。中立時における皮膚血流量が増加すると、背中では全熱量が減少したが、前腕は増加した。すなわち、背中では、皮膚血流量と全熱量は負の相関が、前腕では正の相関があったことになる。その理由は、表 3-12 より、背中での全熱量は、皮膚血流による熱移動よりも伝導による隣接層へ熱移動が大きく影響しているためとみられる。

以上より、四肢部の皮膚温度の決定においては皮膚血流による熱移動が、頭部および体幹部の皮膚温度の決定においては伝導による隣接層への熱移動が大きく影響していると考えられる。

表 3-11 解析条件 (皮膚血流量)

変数	基準条件	条件 1	条件 2
中立環境における皮膚血流量 [l/h]	8.67	6.93	10.40

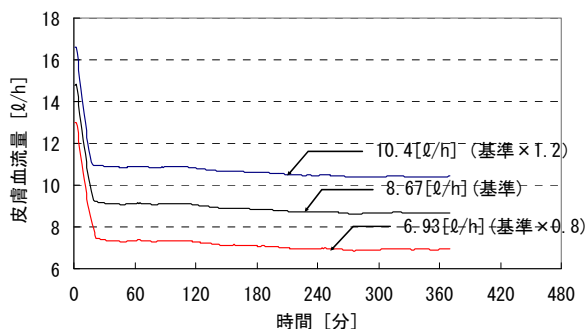


図 3-91 総皮膚血流量

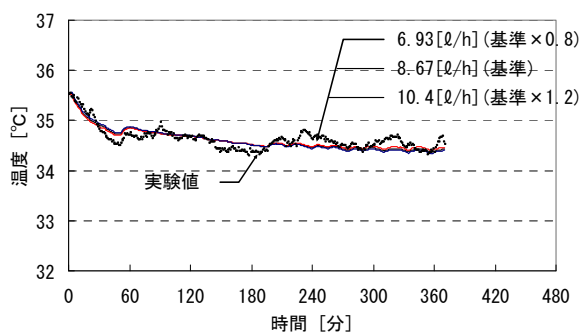


図 3-92 前額 (皮膚血流量の感度解析)

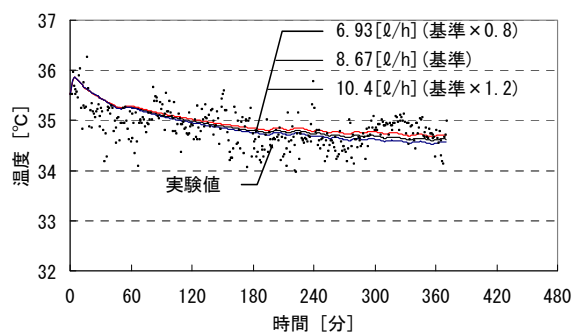


図 3-93 腹 (皮膚血流量の感度解析)

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

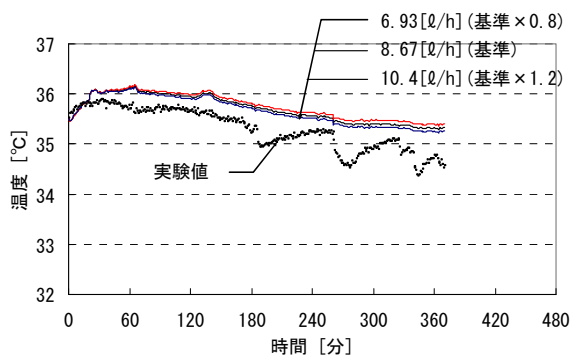


図 3-94 背中 (皮膚血流量の感度解析)

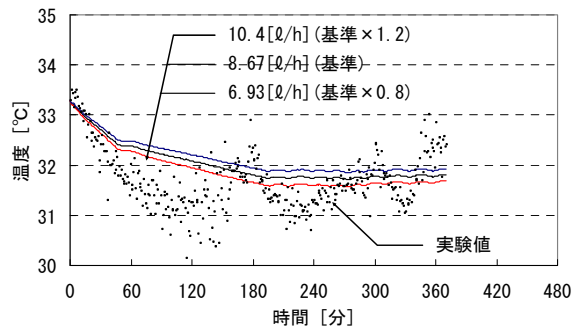


図 3-95 前腕 (皮膚血流量の感度解析)

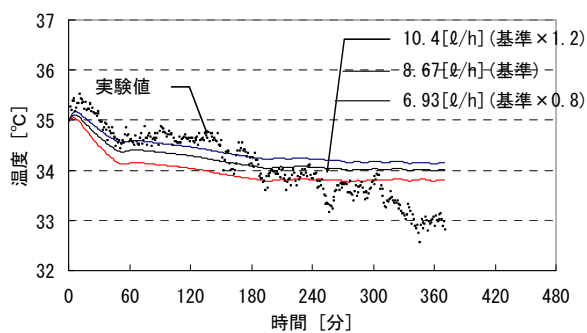


図 3-96 手背 (皮膚血流量の感度解析)

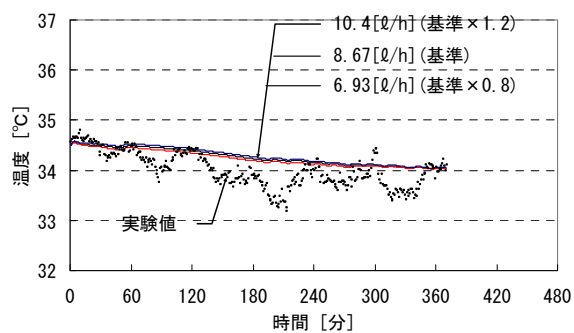


図 3-97 大腿 (皮膚血流量の感度解析)

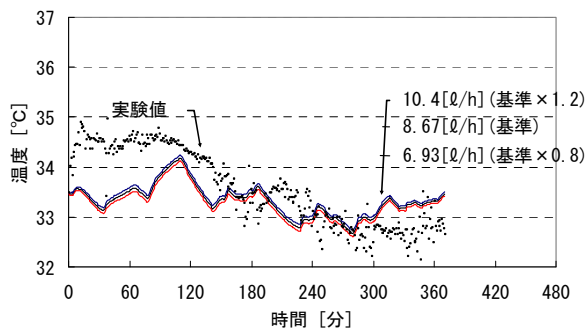


図 3-98 下腿 (皮膚血流量の感度解析)

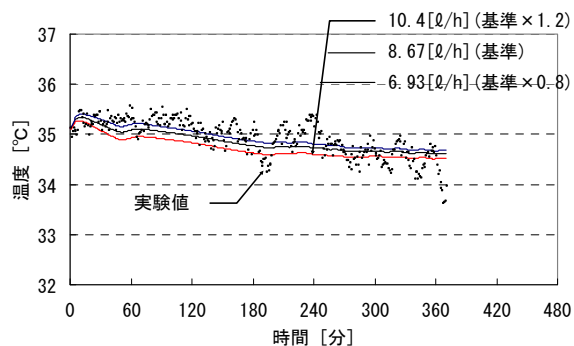


図 3-99 足背 (皮膚血流量の感度解析)

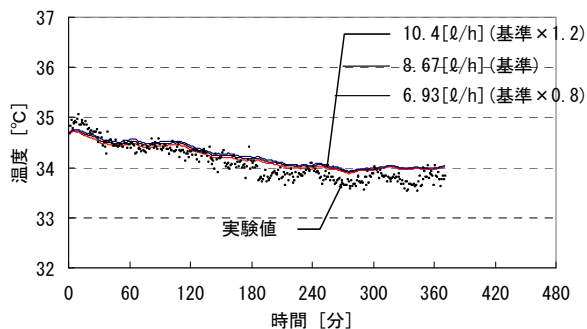


図 3-100 平均皮膚温度 (皮膚血流量の感度解析)

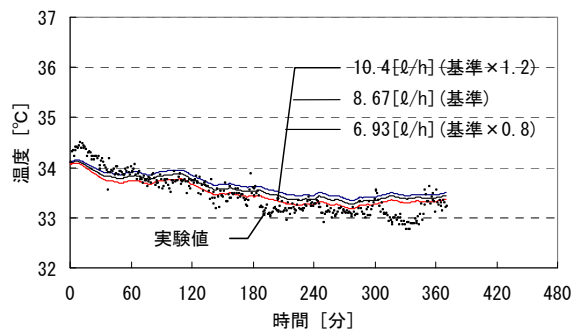


図 3-101 平均四肢部温度 (5) (皮膚血流量の感度解析)

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

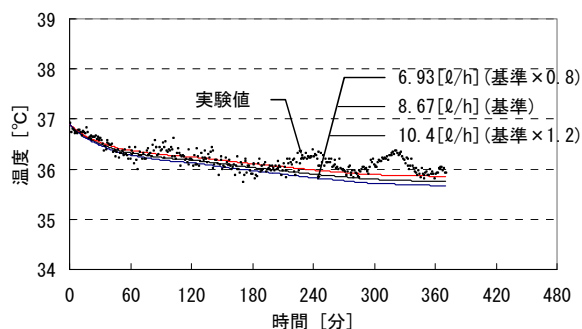


図 3-102 鼓膜温度（皮膚血流量の感度解析）

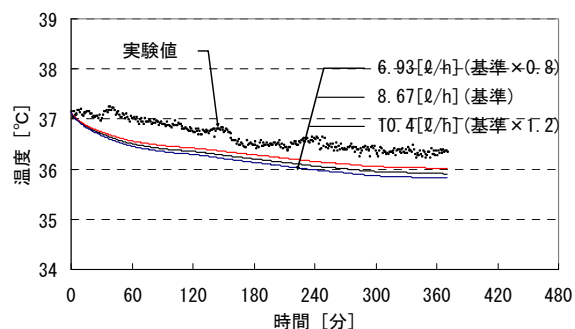


図 3-103 直腸温度（皮膚血流量の感度解析）

表 3-12 背中 of 皮膚層における熱量の全睡眠時間の平均値

中立時の皮膚血流量 [l/h]	全熱量[W]	血流による CB へ移動する熱量 [W]	基礎代謝量 [W]	不感蒸泄による発熱量 [W]	調節性発汗による放熱量 [W]	伝導による隣接層へ移動する熱量 [W]	対流による周辺空気へ移動する熱量 [W]
条件 1 6.93	-0.015	0.170	0.257	-1.701	-0.062	4.755	-3.435
基準条件 8.67	-0.022	0.192	0.257	-1.701	-0.058	4.606	-3.217
条件 2 10.40	-0.027	0.209	0.257	-1.701	-0.054	4.478	-3.217

表 3-13 前腕の皮膚層における熱量の全睡眠時間の平均値

中立時の皮膚血流量 [l/h]	全熱量[W]	血流による CB へ移動する熱量 [W]	基礎代謝量 [W]	不感蒸泄による発熱量 [W]	調節性発汗による放熱量 [W]	伝導による隣接層へ移動する熱量 [W]	対流による周辺空気へ移動する熱量 [W]
条件 1 6.93	-0.045	1.999	0.103	-0.701	-0.025	6.267	-7.688
基準条件 8.67	-0.042	2.362	0.103	-0.701	-0.024	6.015	-7.797
条件 2 10.40	-0.039	2.692	0.103	-0.701	-0.022	5.787	-7.897

(4)各部位の皮膚血流量比率

皮膚血流量の各部位の比率は、基準条件では、表 3-4 で示すとおり Stolwijk モデルで示された比率ではなく、実測値を参考に決定した比率を用いている。その場合と Stolwijk モデルで示された皮膚血流量比率を用いる場合と比較する。ただし、本論文において部位分割を細かくした部位への分配は、体表面積比率によるものとする（表 3-14）。Stolwijk モデルでの条件で比率が大きいのは体幹部であり、小さいのは手背部、足背部である。

表 3-14 皮膚血流量比率

部位		05年度の被験者 (基準)	Stolwijk モデル		
			文献値	各部位への分配	
頭部	上	0.080	0.138	0.069	
	下	0.080		0.069	
体幹部	上	0.057	0.286	0.143	
	下	0.057		0.143	
腕部		0.122	0.535	0.150	
手部		0.113		0.042	
大腿部	上	0.061		0.056	
	下	0.061		0.056	
膝部	上	0.092		0.084	
	下	0.092		0.084	
足部	上	0.071		0.031	
	下	0.071		0.031	
計		0.959		0.959	0.959

解析の結果を図 3-104～図 3-115 に示す。皮膚温度は、腹、背中、前腕で上昇し。手背、足背では、低下した。特に、手背では約 1.5℃、足背では約 0.8℃と大きく低下し、実験値との差が大きかった。その結果、平均皮膚温度は、約 0.2℃低下した。深部温度は、鼓膜温度、直腸温度とも、約 0.1℃上昇した。

各部位への皮膚血流量の比率は、結果に与える影響が大きいことが示された。またモデルを分割する場合、皮膚血流量の比率を皮膚表面積比率で与えると、実験値との一致がよくない部位が生じた。したがって、各部位の皮膚血流量比率は、皮膚表面積比率では決定できないと考えられる。

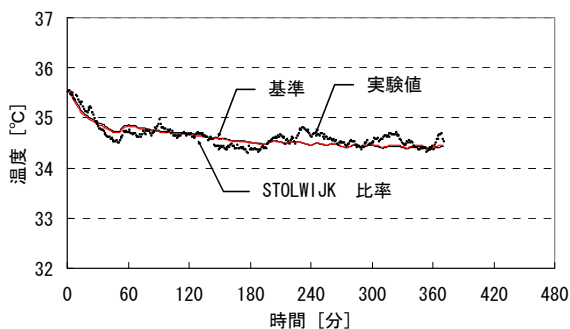


図 3-104 前額（皮膚血流量比率の感度解析）

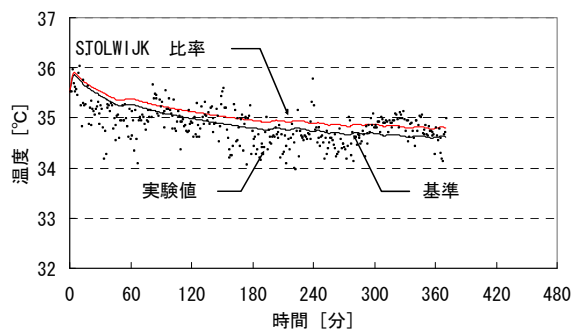


図 3-105 腹（皮膚血流量比率の感度解析）

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

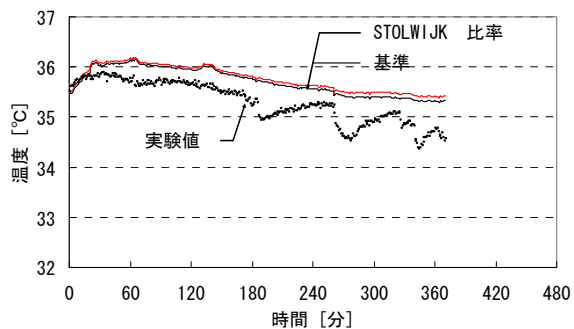


図 3-106 背中 (皮膚血流量比率の感度解析)

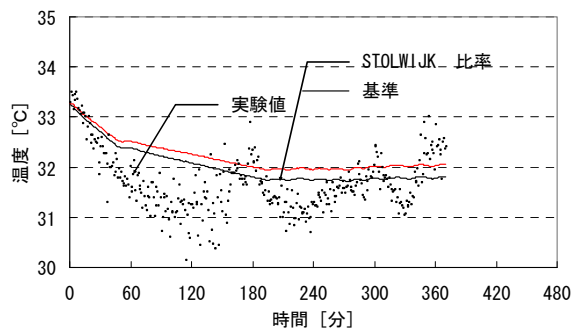


図 3-107 前腕 (皮膚血流量比率の感度解析)

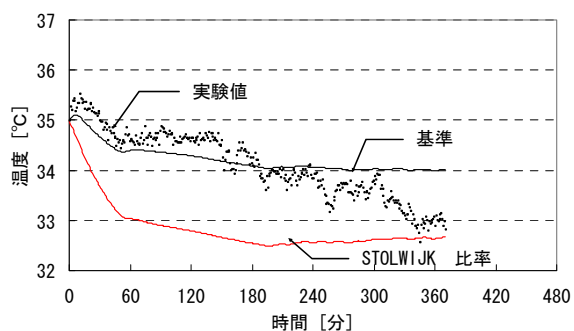


図 3-108 手背 (皮膚血流量比率の感度解析)

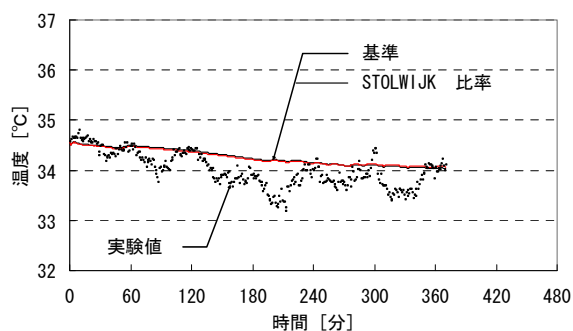


図 3-109 大腿 (皮膚血流量比率の感度解析)

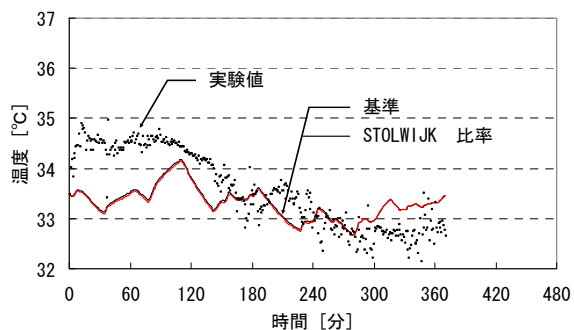


図 3-110 下腿 (皮膚血流量比率の感度解析)

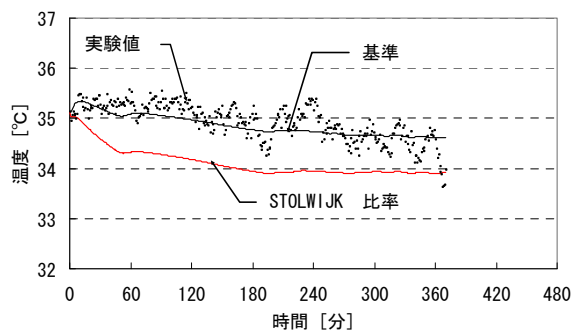


図 3-111 足背 (皮膚血流量比率の感度解析)

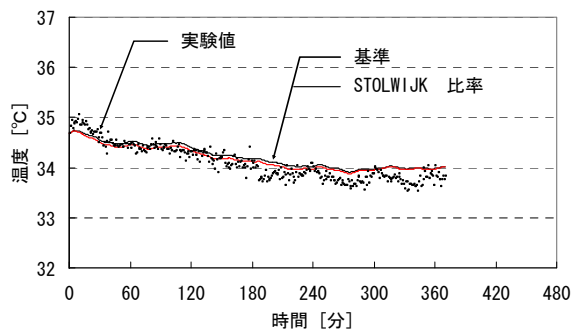


図 3-112 平均皮膚温度 (皮膚血流量比率の感度解析)

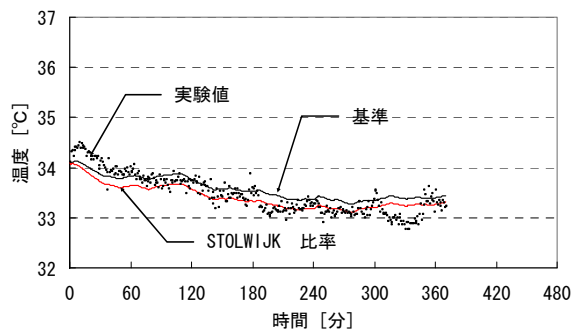


図 3-113 平均四肢部温度(5) (皮膚血流量比率の感度解析)

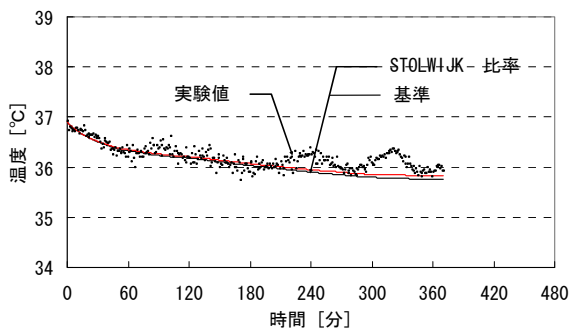


図 3-114 鼓膜（皮膚血流量比率の感度解析）

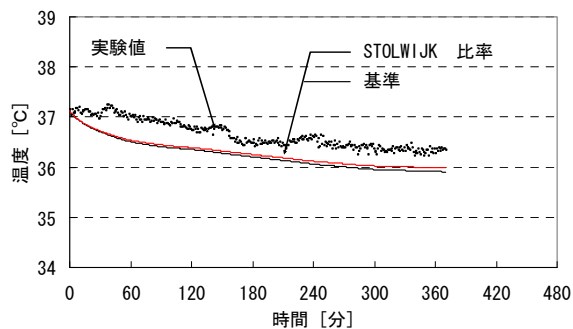


図 3-115 直腸（皮膚血流量比率の感度解析）

(5) 頭部深部層血流量

頭部深部層血流量については、Stolwijk モデルの値を基準値として、 $\pm 20\%$ 変更させた場合の計算を行った（表 3-15）。この程度の変化では、計算結果はほとんど変化しなかった（図 3-116～図 3-127）。

表 3-15 解析条件（頭部深部層の感度解析）

変数	基準条件	条件 1	条件 2
頭部深部層血流量 [l/h]	41.94	33.55	50.33

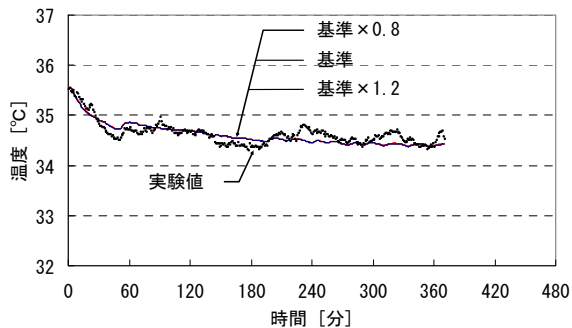


図 3-116 前額（頭部深部層血流量の感度解析）

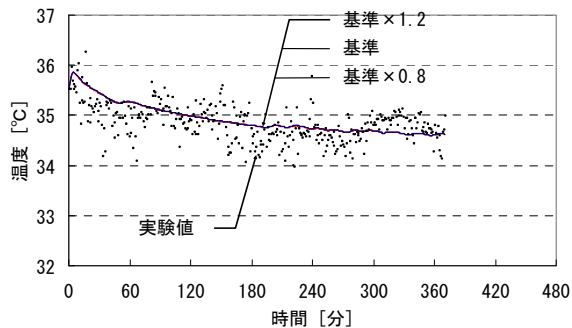


図 3-117 腹（頭部深部層血流量の感度解析）

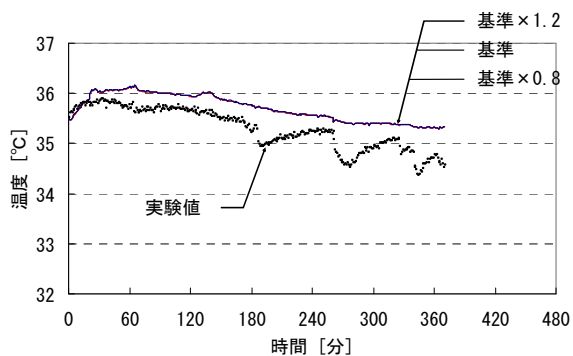


図 3-118 背中（頭部深部層血流量の感度解析）

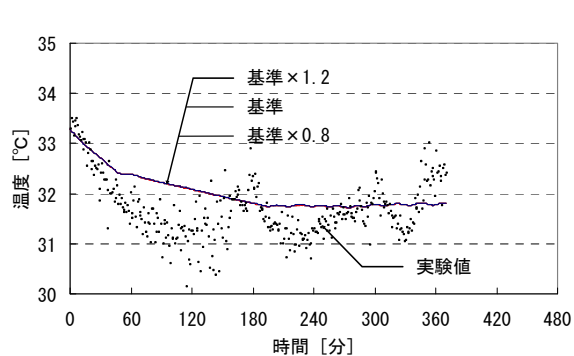


図 3-119 前腕（頭部深部層血流量の感度解析）

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

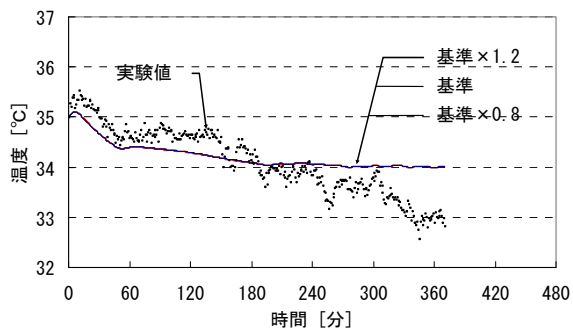


図 3-120 手背（頭部深部層血流量の感度解析）

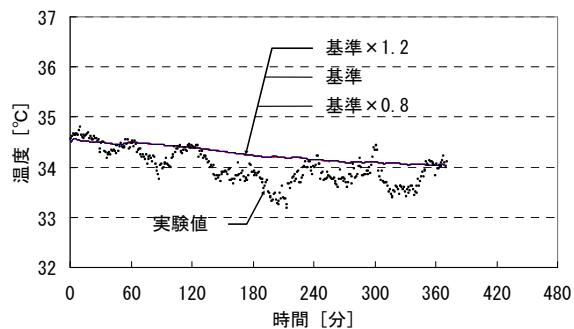


図 3-121 大腿（頭部深部層血流量の感度解析）

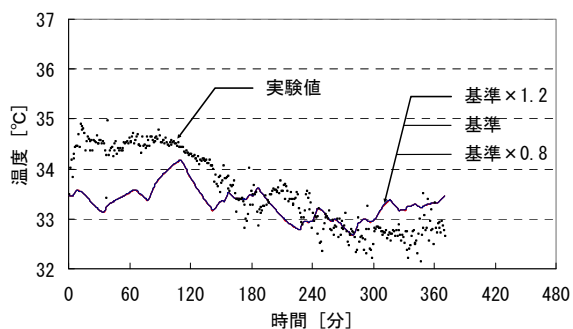


図 3-122 下腿（頭部深部層血流量の感度解析）

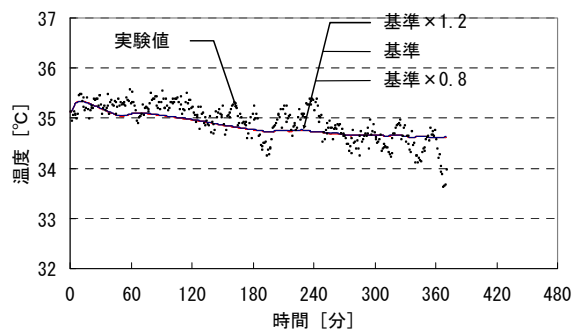


図 3-123 足背（頭部深部層血流量の感度解析）

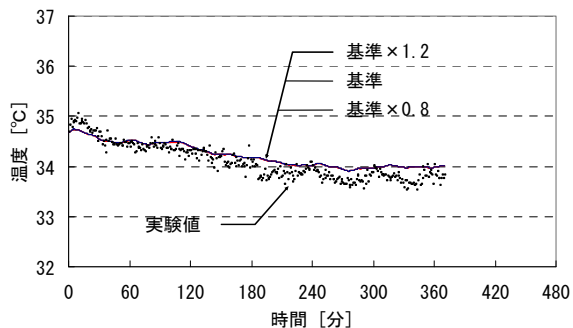


図 3-124 平均皮膚温度（頭部深部層血流量の感度解析）

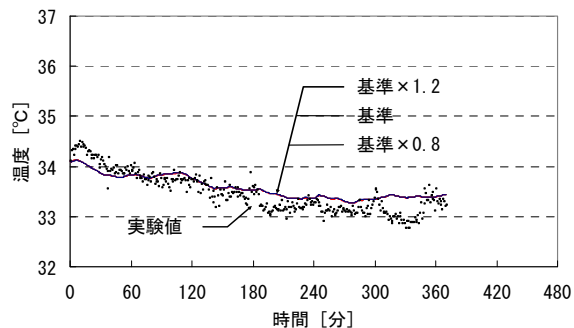


図 3-125 平均四肢部温度(5)（頭部深部層血流量の感度解析）

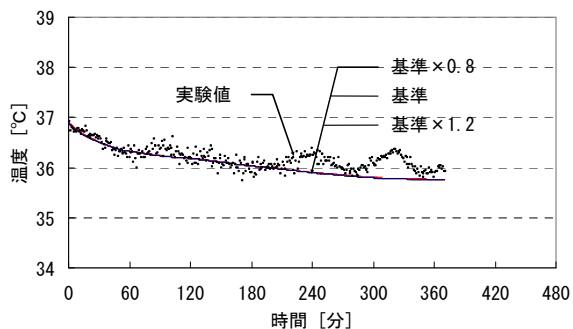


図 3-126 鼓膜（頭部深部層血流量の感度解析）

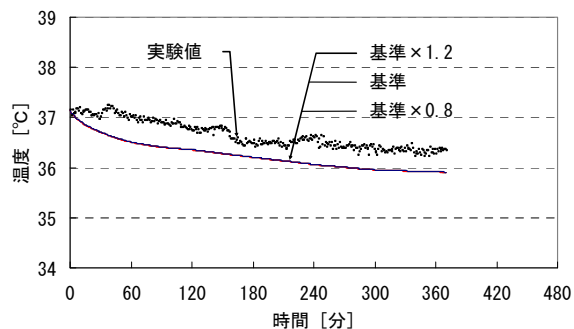


図 3-127 直腸（頭部深部層血流量の感度解析）

(6)体組成（体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンス）

骨格筋量や体脂肪量などにより体組成率が異なると、体内における熱抵抗が変化するものと考えられる。そこで体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンスについては、Stolwijk モデルの値を基準値として、±20%変更させた場合の計算を行った（表 3-16）。その結果、熱コンダクタンスが小さい場合には直腸温度が上昇し、腹温度および背中温度が低下して深部と皮膚の温度差が大きくなった（図 3-128～図 3-139）。また逆に、熱コンダクタンスが大きい場合には、直腸温度は低下し、腹温度および背中温度が上昇して深部と皮膚の温度差が小さくなった。

表 3-16 解析条件（体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンス）

変数	対象	基準条件	条件 1	条件 2
体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンス[W/K]	深部層—筋層	5.00	4.00	6.00
	筋層—皮膚層	23.69	18.95	28.42

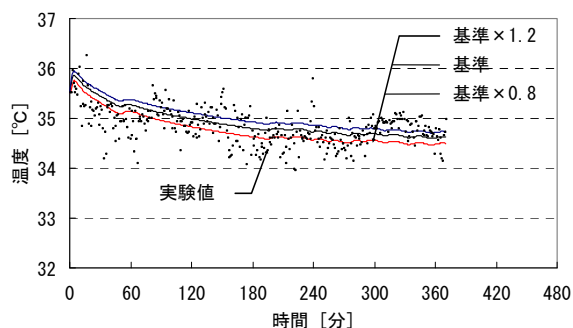
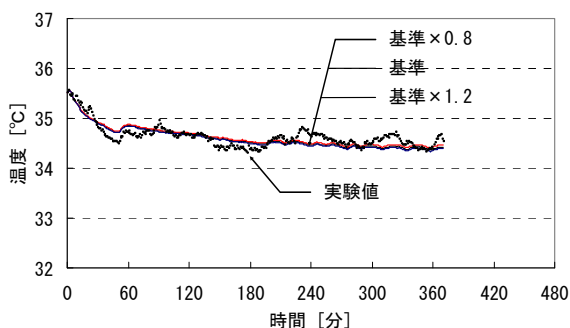


図 3-128 前額（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析） 図 3-129 腹（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析）

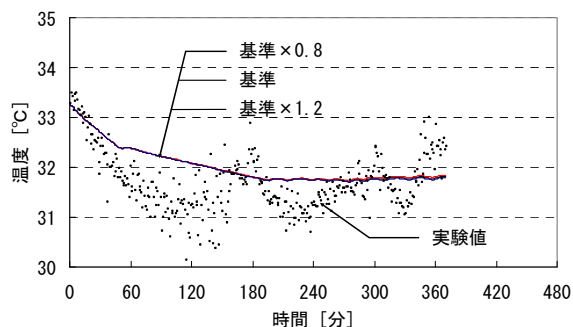
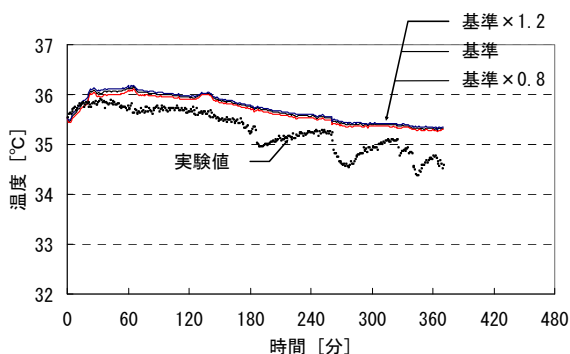


図 3-130 背中（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析） 図 3-131 前腕（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析）

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

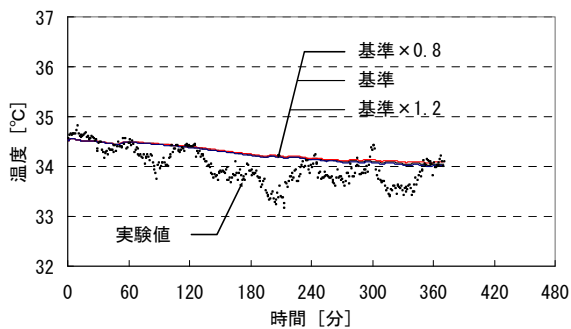
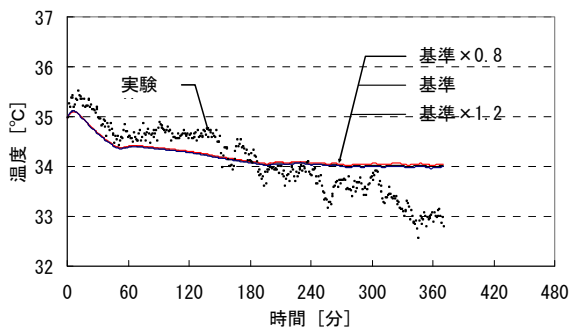


図 3-132 手背（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析） 図 3-133 大腿（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析）

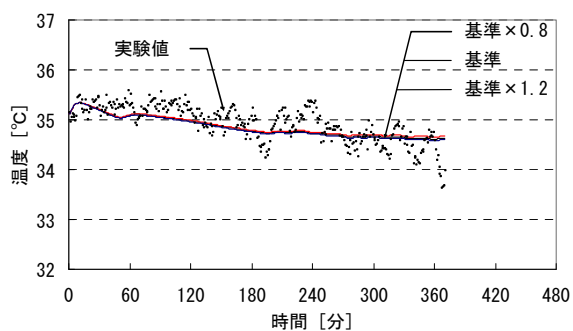
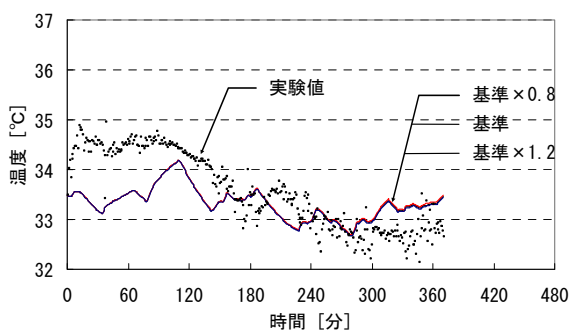


図 3-134 下腿（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析） 図 3-135 足背（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析）

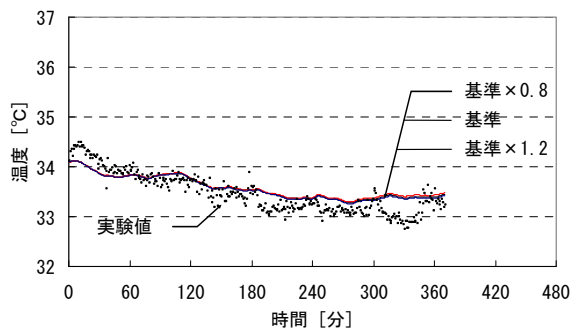
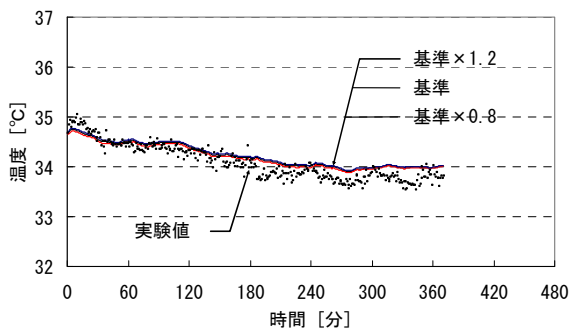


図 3-136 平均皮膚温度

図 3-137 平均四肢部温度(5)

(隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析)

(隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析)

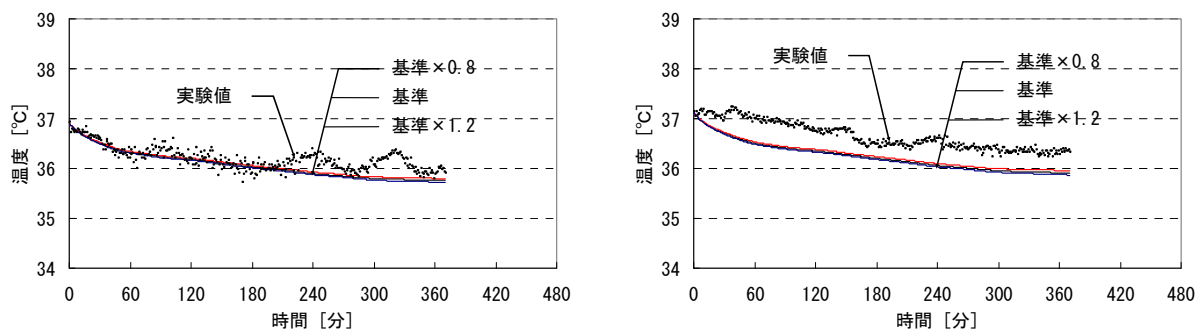


図 3-138 鼓膜（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析） 図 3-139 直腸（隣接層間の熱コンダクタンスの感度解析）

(7)皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンス

前節の解析条件での計算結果では、深部温度に比較して皮膚温度の変化の再現がよくないが、これは姿勢変化や体動に伴う皮膚表面における熱流量の変化を適切に考慮できていないためと考えられる。本項では熱コンダクタンスの値を時間変化させて解析を行った。姿勢が体温調節反応に与える影響については、第4章で詳しく述べる。

皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンスの値は、赤外線カメラと体動計の測定データから調べた寝姿勢と体動の推定結果に基づき、実験値をよく再現するよう探索した。それらの周辺環境に伴い時間変化する熱コンダクタンスを用いて、皮膚温度と深部温度を計算した。計算結果と熱コンダクタンスの時間変化を図 3-140～図 3-151 に示す。皮膚温度は熱コンダクタンスが一定値の場合でもよく再現されていたが、熱コンダクタンスを時間変化させると、再現精度が格段に向上した。また深部温度については、直腸温度、鼓膜温度とも一定値の場合と大きな差はなかった。すなわち、皮膚温度はコンダクタンスにより大きく影響を受けるが、深部温度の変化は小さいといえる。

深部温度、皮膚温度の平均的变化は、Stolwijk モデルに体動の変化と平均的な熱コンダクタンスを用いることにより大略表現できるが、一致のよくない皮膚温度の経時変化については、熱コンダクタンスの時間変化を考慮すれば再現されると言える。この結果は、皮膚温度の再現精度を向上させるためには、姿勢変化や体動による熱移動の変化を考慮することが必要であり、平均値を用いることとともに熱コンダクタンスの時間変化を適切に設定することの重要性を示している。

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

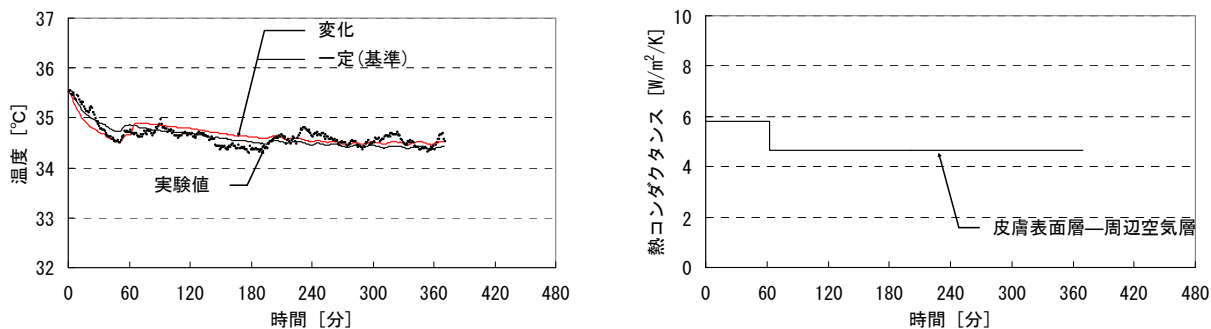


図 3-140 前額（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

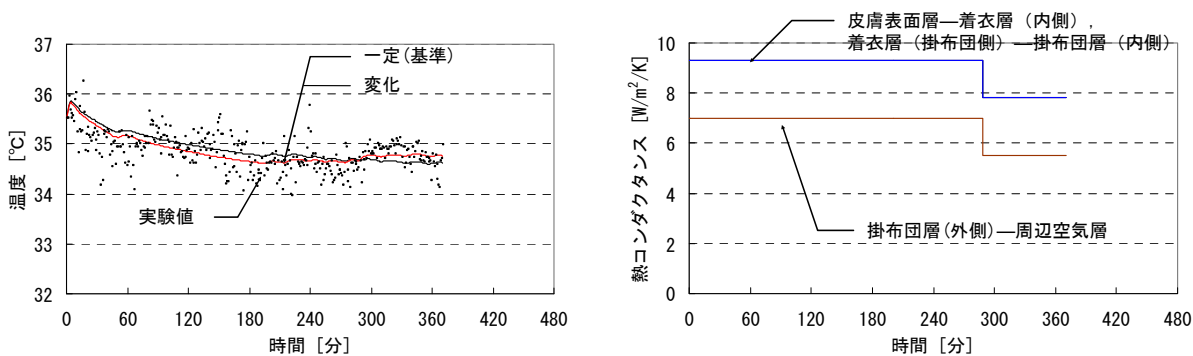


図 3-141 腹（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

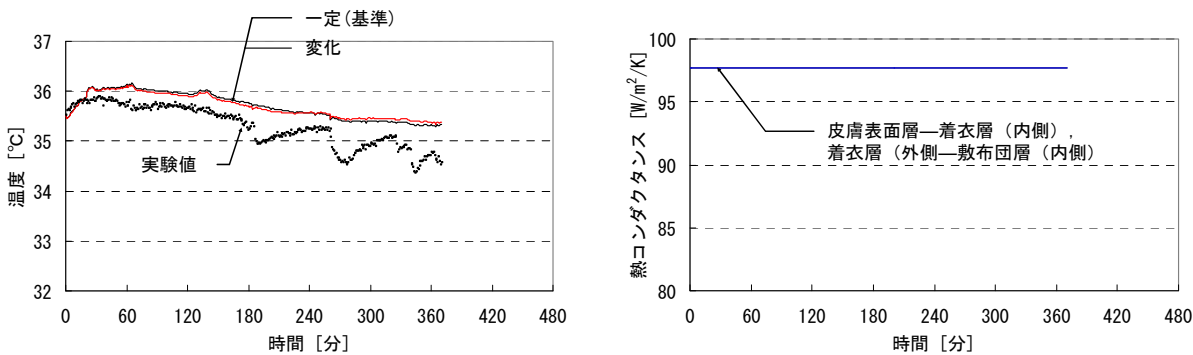


図 3-142 背中（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

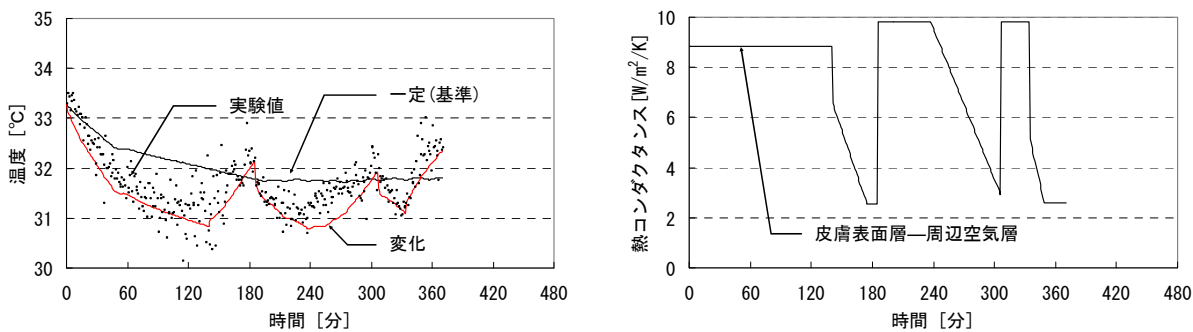


図 143 前腕（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

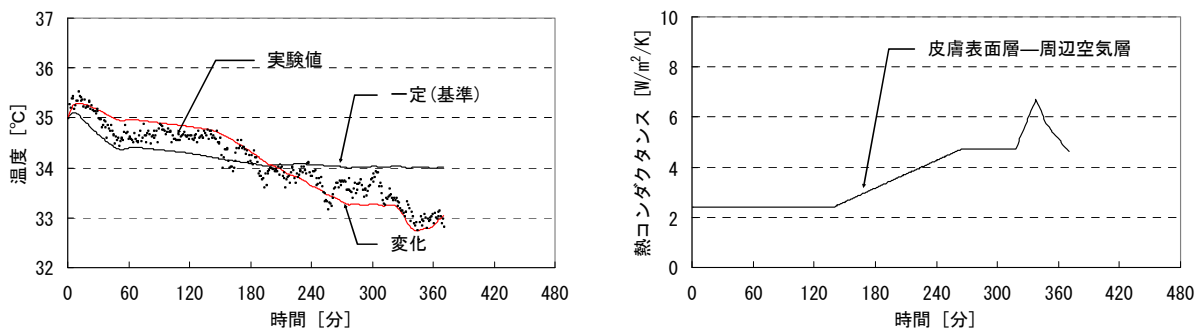


図 3-144 手背（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

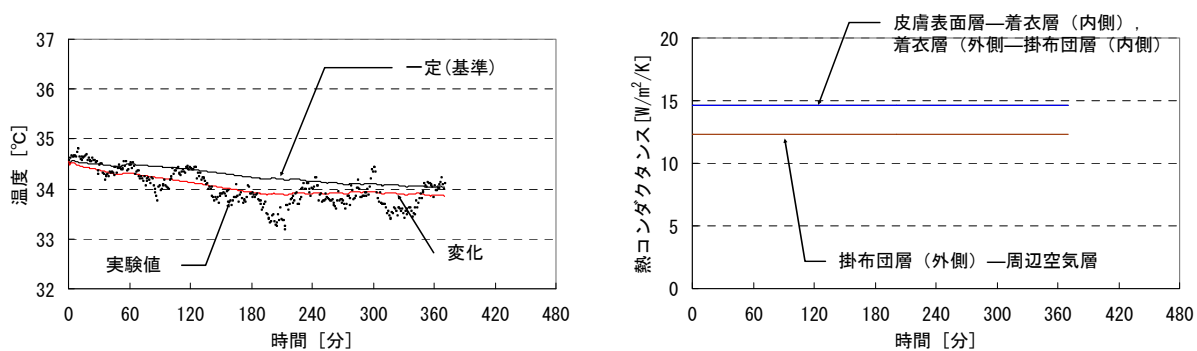


図 3-145 大腿（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

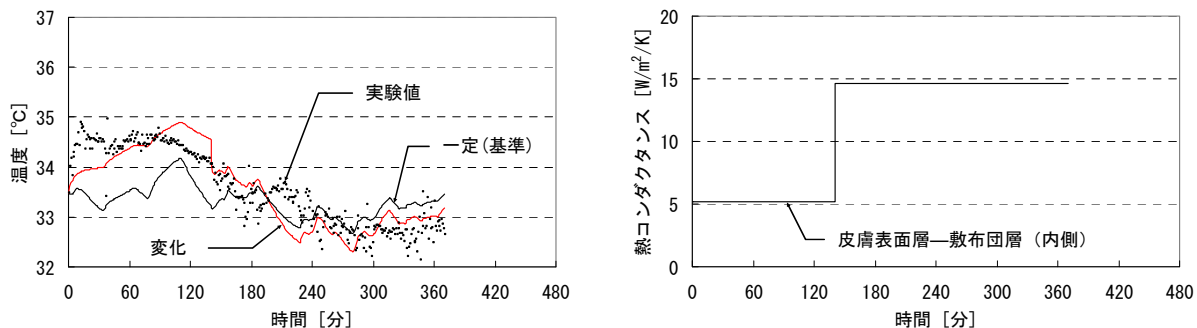


図 3-146 下腿（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

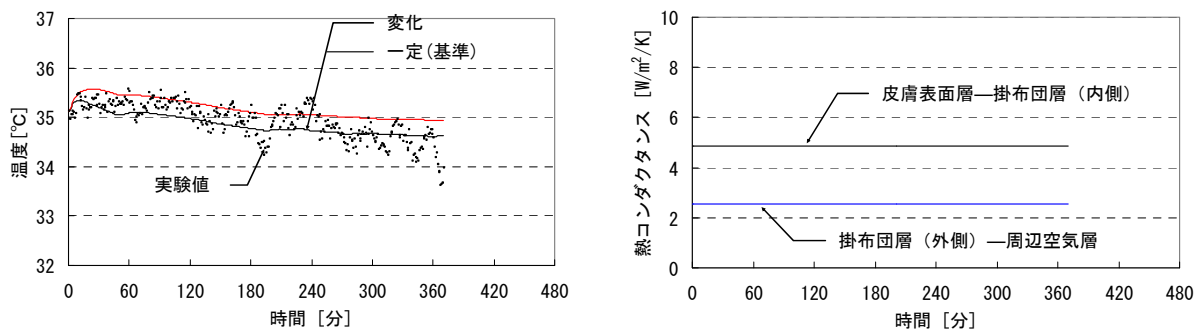


図 3-147 足背（皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析）[左：計算結果，右：熱コンダクタンス]

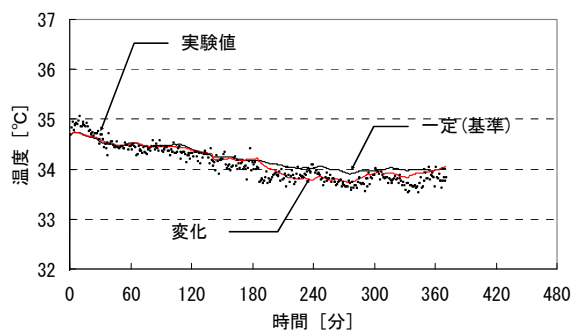


図 3-148 平均皮膚温度

(皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析)

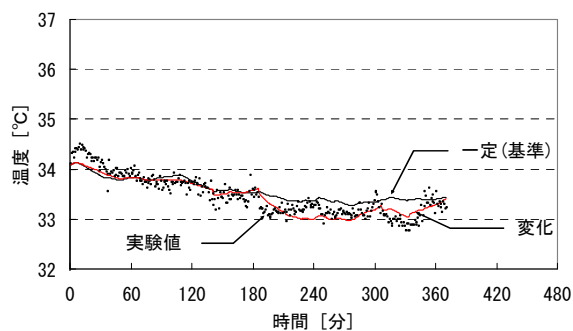


図 3-149 平均四肢部温度(5)

(皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析)

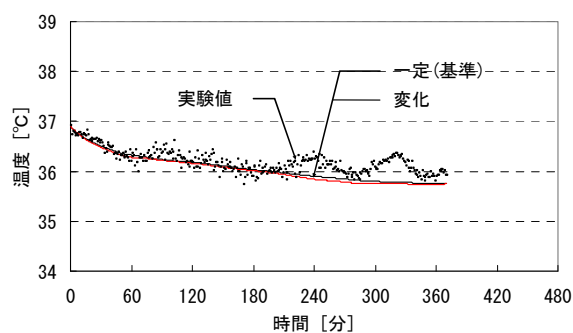


図 3-150 鼓膜

(皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析)

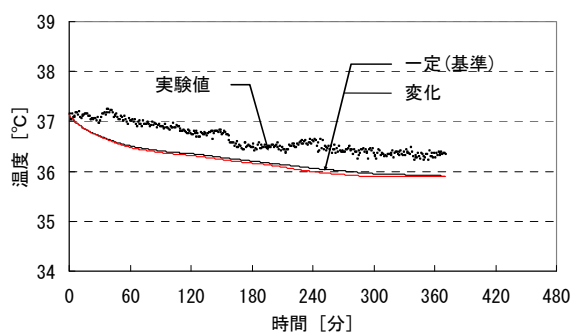


図 3-151 直腸

(皮膚と周辺環境間の熱コンダクタンスの感度解析)

3.5.2. 感度解析のまとめ

本節では、温熱生理モデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察した。得られた結果を以下に記す。

(1) セットポイント (SP)

頭部深部温度 SP を低くすると、皮膚および深部温度とも 0.1°C 程度低くなり、SP を高くすると、いずれの温度ともわずかに上昇した。平均皮膚温度 SP を変更すると、頭部および体幹部の皮膚温度、深部温度は SP を低くする条件では低下し、高くする条件では上昇した。四肢部の皮膚温度は、就寝後はほとんど変化ないが、SP を高くする条件でのみ、睡眠の途中で上昇に転じた。四肢部の皮膚温度は、平均皮膚温度 SP との差を小さくするように変化したと考えられる。SP が低い条件では、平均皮膚温度および平均四肢部温度(5)への影響はほとんどみられなかった。また、平均筋温度 SP を ±0.5°C 変更しても、計算結果への影響はほとんどみられなかった。

(2) 体動

本被験者の場合には体動が少なかったが、体動に伴う運動量の増加を考慮すると、皮膚温度と深部温度にわずかな上昇がみられた。頻繁に寝返りをする就寝者の場合は、皮膚温度と深部温度が上昇するものと推測される。そのような結果は、深部温度が睡眠の経過とともに低下し、起床時刻に近づくと上昇するという睡眠時の特徴とされる生理現象を、代謝量の変化で説明できる可能性を示している。

(3) 中立環境における皮膚血流量

皮膚血流量が少ない条件では、深部温度は上昇し、皮膚温度は四肢部では低下したが、頭部および体幹部では上昇していた。逆に、皮膚血流量が多い条件では、深部温度と頭部および体幹部の皮膚温度は低下したが、四肢部の皮膚温度は上昇した。平均皮膚温度の変化量は、各部位の変化に比較するとわずかであった。また各部位の全熱量とそれらを構成する熱量成分の全睡眠時間の平均値を比較すると、四肢部の皮膚温度の決定において皮膚血流による熱移動が、頭部および体幹部においては伝導による隣接層への熱移動が大きく影響していた。

(4) 各部位の皮膚血流量比率

各部位への皮膚血流量の比率は、計算結果に与える影響が大きいことが示された。またモデルを分割する際、皮膚血流量の比率を体表面積比率で与えると、実験値との一致がよくない部位が生じた。すなわち、各部位の皮膚血流量比率は、体表面積比率では決定できないと考えられる。

(5) 頭部深部層血流量

頭部深部層血流量については、 $\pm 20\%$ 程度の変化では、計算結果に与える影響はほとんどなかった。

(6) 体組成（体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンス）

熱コンダクタンスが小さい場合には、直腸温度が上昇し、腹温度および背中温度が低下して、深部温度と皮膚温度の差が大きくなった。また逆に、熱コンダクタンスが大きい場合には、直腸温度は低下し、腹温度および背中温度が上昇して深部と皮膚の温度差が小さくなった。

(7) 皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンス

皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱移動を考慮するため、解析で用いる熱コンダクタンスの値を、赤外線カメラと体動計の測定データから調べた寝姿勢と体動の推定結果に基づき、実験値をよく再現するよう探索した。時間変化するものとして決定した皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンスを用いて、皮膚温度と深部温度を計算した結果、熱コンダクタンスが一定値の場合と比較すると皮膚温度の再現精度が向上した。深部温度については、直腸温度、鼓膜温度とも一定値を用いた場合と大きな差はなかった。すなわち皮膚温度はコンダクタンスにより大きく影響を受けるが、深部温度の変化は小さいといえる。

深部温度、皮膚温度の平均的变化は、Stolwijk モデル、体動の変化、平均的な熱コンダクタンスを用

いて大略表現できるが、一致のよくない皮膚温度の経時変化については、熱コンダクタンスの時間変化を考慮すれば表現できるようになる。この結果は、皮膚温度の再現精度を向上させるためには、姿勢変化や体動による皮膚表面における熱移動の変化を考慮することが必要であり、平均値を用いることとともに熱コンダクタンスの時間変化を適切に設定することの重要性を示している。

3.6. 第3章のまとめ

本章では睡眠時に対応する人体熱モデルを提案するための出発点として、覚醒時の人体熱モデルの睡眠時への適応可能性を検討するため、睡眠時の人体各部位温度の再現を試みた。覚醒時を対象とした Stolwijk モデルにおいて、寝床内環境の非一様性を考慮して熱水場挙動を記述するためにモデルの部位分割を細かくし、さらに体格の影響を適切に考慮することにより、複数回の睡眠実験における皮膚温度および深部温度の測定値を大略再現することができた。

さらに、温熱生理モデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察した。特に、寝姿勢や体動を考慮して、皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンスを時間変化させることにより、深部温度に大きな影響を及ぼすことなく皮膚温度の一致を大幅に改善することができた。なお、これらの解析で用いた人体、着衣、寝具および周辺環境の間の熱コンダクタンスは、周辺環境の温湿度や赤外線カメラ画像、体動計などの測定結果を可能な限り考慮して決定しており、再現性があるものと考えられる。

以上の検討により、覚醒時の人体熱モデルが睡眠時にも適応できることを明らかにした。

本研究では被験者 1 名のみを対象に検証を行ったが、異なる被験者についても同様のことがいえるのか³⁻¹⁵⁾、今後、検証が必要であると考えられる。

記号

a	: 着衣および掛布団の空隙率 [n.d.]
BF	: 血流による CB への熱損失量 [W]
C	: 人体の熱容量 [KJ/K]
c	: 比熱 [J/kg/K]
C_{air}	: 乾き空気の定圧比熱 [J/kg/K]
CD	: 伝導による隣接層への熱損失量 [W]
CHC	: 対流熱伝達率 [$W/m^2/K$]
CHR	: 放射熱伝達率 [$W/m^2/K$]
$c\rho_{bl}$: 血液の体積比熱 3.85×10^6 [J/K/m ³]
$c\rho_{cl}$: 着衣または掛布団の体積比熱 [J/K/m ³]
ENV	: 対流および放射により皮膚表面と接する層へ熱損失量 [W]
EVI	: 不感蒸泄による放熱量 [W]
EVR	: 呼吸による放熱量 [W]
EXS	: 運動による産熱量 (添字がない場合は総量) [W]
H	: 相変化熱 [J/kg]
L_e	: ルイス数 [n.d.]
MBF	: 総筋血流量 [m ³ /s]
MBF_w	: 筋の代謝活動に必要な血流量 [l/h] (ただし $\alpha=0.5$, $\beta=0$ とする)
Mr_i	: 部位 i の体重比率 [n.d.]
m_{st}	: 皮膚表面の汗の蓄積量 [kg/m ²]
m_{sw}	: 発汗速度 [kg/m ² /s]
MTB	: 基礎代謝量 [W]
P_{air}	: 標準大気圧 [P_a]
P_{sat}	: 飽和水蒸気圧 [P_a]
P_w	: 水蒸気分圧 [P_a]
S	: 体表面積 [m ²]
RH	: 相対湿度 [%]
SBF	: 総皮膚血流量 [m ³ /s]
SBF_0	: 中立環境における血流量 10.6 [l/h]
SHV	: 震えによる産熱量 (添字がない場合は総量) [W]
Sr_i	: 部位 i の人体における体表面積比率 [n.d.]
SWT	: 調節性発汗による放熱量 (添字がない場合は総量) [W]
T	: 温度 [°C]
t	: 時間 [s]
T_{hc}	: 頭部深部温度 [°C]

T_{hcset}	: 頭部深部温度セットポイント 36.6 [°C]
T_{ms}	: 平均筋温度 [°C]
T_{msset}	: 平均筋温度セットポイント 35.88 [°C]
T_{sk}	: 平均皮膚温度 [°C]
T_{skset}	: 平均皮膚温度セットポイント 34.1 [°C]
W	: 体積含水率 [n.d.]
W_g	: 重量含水率 [n.d.]
x	: 厚さ [m]
X	: 絶対湿度 [kg/kg']
X_e	: 皮膚表面と接する層の絶対湿度 [kg/kg']
$X_{satskin}$: 皮膚の飽和状態時の絶対湿度 [kg/kg']
X_{skin}	: 皮膚の絶対湿度 [kg/kg']
α'	: 湿気伝達率 [kg/m ² /s/(kg/kg')]
α'_{adcl}	: 着衣または掛布団表面—着衣または掛布団表面と接する層との間の熱コンダクタンス (対流と放射) [W/m ² /K]
α'_{adcl}	: 着衣または掛布団表面—着衣または掛布団表面と接する層との間の湿気コンダクタンス [kg/m ² /s/(kg/kg')]
α_c	: 対流熱伝達率 [W/m ² /K]
α_e	: 皮膚表面—皮膚表面と接する層との間の熱コンダクタンス (対流と放射) [W/m ² /K]
α'_e	: 皮膚表面—皮膚表面と接する層との間の湿気コンダクタンス [kg/m ² /s/(kg/kg')]
α'_{skin}	: 皮膚の湿気コンダクタンス 2.07×10^{-4} [kg/m ² /s/(kg/kg')]
λ	: 熱伝導率 [W/m/K]
λ'	: 湿気伝導率 [kg/m/s/(kg/kg')]
ρ	: 密度 [kg/m ³]

添字

$adcl$: 着衣または掛布団表面と接する層 (adjacent to clothes)
cl	: 着衣または掛布団
co	: 綿の実質部
e	: 皮膚表面と接する層
i	: 人体部位番号
$water$: 水

第3章の引用文献

- 3- 1) Stolwijk, J. A. J. and Hardy, J. D.: Temperature regulation in man - theoretical study, Pflugers Archiv., Vol.291, pp.129-162, 1966.
- 3- 2) Jones, B. W. and Ogawa, Y.: Transient interaction between the human and the thermal environment, ASHRAE Trans., 98, 1, pp.189-195, 1992
- 3- 3) 松本衛：新建築学大系 10 環境物理, 第3章, 彰国社, 1994.
- 3- 4) 中山昭雄編：温熱生理学, 理工学社, pp.80-84, 1981.
- 3- 5) Stolwijk, J. A. J.: A mathematical model of physiological temperature regulation in man, NASA Langley, CR-1855, 1971.
- 3- 6) Hardy, J. D. and Dubois, E. F.: The technique of measuring radiation and convection, J. Nutr., 15-5, pp.461-475, 1938.
- 3- 7) 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, 日本建築学会環境系論文集, 580, pp.23-29, 2004.6.
- 3- 8) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック, 養賢堂, pp.463-472, 1990.
- 3- 9) 繊維学会編：繊維便覧第2版, 1994.
- 3-10) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤：夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積 その2 夏期睡眠実験の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.221-222, 2003.
- 3-11) 高田暁, 銚井修一, 箸方稔：着衣の平衡含水率測定と湿気伝導率同定, 第21回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.262-264, 2000.
- 3-12) 高田暁, 銚井修一, 中澤和弘：着衣の湿気伝導率測定, 第22回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.244-246, 2001.
- 3-13) 高田暁, 銚井修一, 川上直紀, 工藤正則：着衣における熱・水分移動と蓄積を考慮した人体の非定常温熱生理応答—被験者実験と Two-node model を用いた解析—, 日本建築学会計画系論文集, 549, pp.23-30, 2001.11.
- 3-14) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹：日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 31-1, pp.5-29, 1994.
- 3-15) 高田暁, 小林弘明：人体熱モデルと体温調節反応における個体差, 「人体熱モデル・熱環境シミュレーションの最前線」シンポジウム, pp.21-26, 2006.

3. 睡眠時の温熱生理モデルの構築

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

4.1. はじめに

通常の睡眠は、一般的な姿勢が臥位（仰臥位，伏臥位，側臥位）で行われる。姿勢によって、皮膚表面と周辺環境（着衣，寝具または空気層）との間の熱移動および人体の代謝量が変化すると考えられる。したがって、姿勢の変化が体温調節反応に影響を与える可能性がある。

第2章で述べたように、睡眠中の皮膚温度，深部温度ともに複雑な変動をする場合が多かった。その理由の1つは、睡眠時の人体が、身体の一部のみが寝床内に存在する，寝返りをするといった寝姿勢の変化により不均一かつ経時変化する温熱環境に曝露されていること，すなわち，皮膚表面と周辺環境との間の熱移動が非一様に経時変化する状況にあることといえる。

本章では，姿勢が体温調節反応に及ぼす影響を明らかにするため，周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより，姿勢変化時の各生理量の変化の説明が可能であることを示す。

まず，睡眠実験における人体各部温度の経時変化について，皮膚表面と周辺環境との関わり方を考慮して考察する。次に，姿勢が体温調節反応に与える影響は，睡眠・覚醒により大きく変わらないと仮定し，覚醒した状態で被験者を座位，臥位，立位に変化させて，皮膚温度，深部温度および皮膚血流量等の生理量を測定し，周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより，各生理量の変化の説明を試みる。

4.2. 睡眠時の体温調節反応

本節では，2004年度に実施した4回の睡眠実験のうち，一例として2回目の実験04-2の結果を用いて，人体各部位温度を中心とする生理量の経時変化について考察し，皮膚表面と周辺環境との関係について検討する。

4.2.1. 実験概要

実験の詳細については，第2章を参照。実験04-2のタイムテーブルを図4-1に示す。測定は，消灯55分前より開始し，起床23分後に終了している。

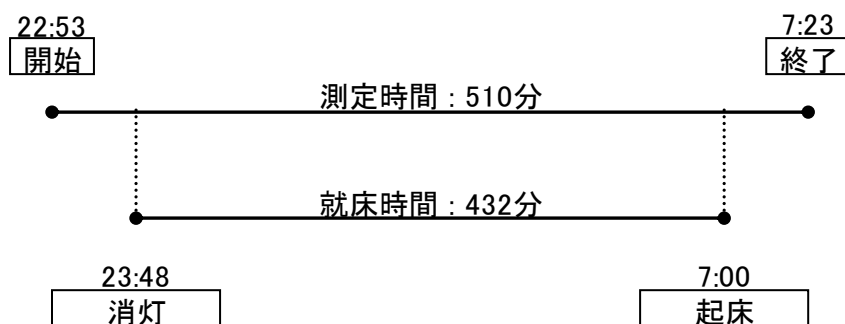


図 4-1 実験04-2のタイムスケジュール

4.2.2. 実験結果

寝床内環境と寝姿勢の経時変化を比較する。寝床内環境は、図 4-2 に示す敷布団上の A~I の測定点の温度 (T で表す.) と相対湿度 (RH で表す.) で表し、寝姿勢は赤外線カメラの画像から調べたものである。詳細は、2.3.7 を参照。図 4-3 には、被験者から見て敷布団上の右側の測定点 (A, D, G 点) の、図 4-4 には、中央の測定点 (B, E, H) の、図 4-5 には左側の測定点 (D, F, I) の温度と相対湿度および寝姿勢の結果を示す。グラフの横軸は時間 (分) であり、0 分が消灯時刻、432 分が起床時刻である。

寝姿勢が変化する時刻では、敷布団の温度と湿度が上昇から下降あるいは、下降から上昇に転じる場合が多くみられる。例えば、寝姿勢が 209 分には右向きの側臥位から伏臥位、224 分には元の右向きの側臥位に戻っていた時間帯に着目する。伏臥位になると、敷布団上右側と中央では温度と相対湿度が顕著に上昇したが、再び側臥位になると、下降した。一方、敷布団左側では、伏臥位になると温度と相対湿度がいったん急激に下降するが上昇に転じ、側臥位になるとその上昇が止まった。

また、腹および背中中の皮膚表面熱流と寝姿勢の経時変化を図 4-6 に示す。姿勢と熱流の変化する時刻がよく対応していた。

そのような結果は、寝姿勢の変化とともに、人体が敷布団上の一定の場所に存在していなかったためと推定される。また、体温調節反応による発汗や皮膚血流量の変化に伴い人体からの放熱が変化すること、室内空気の経時変化の影響を受けていることも考えられる。

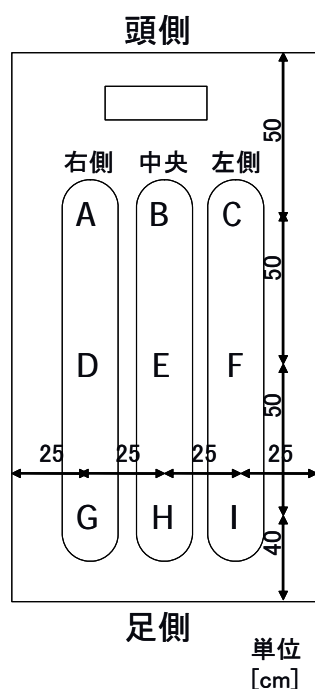


図 4-2 敷布団上の測定点

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

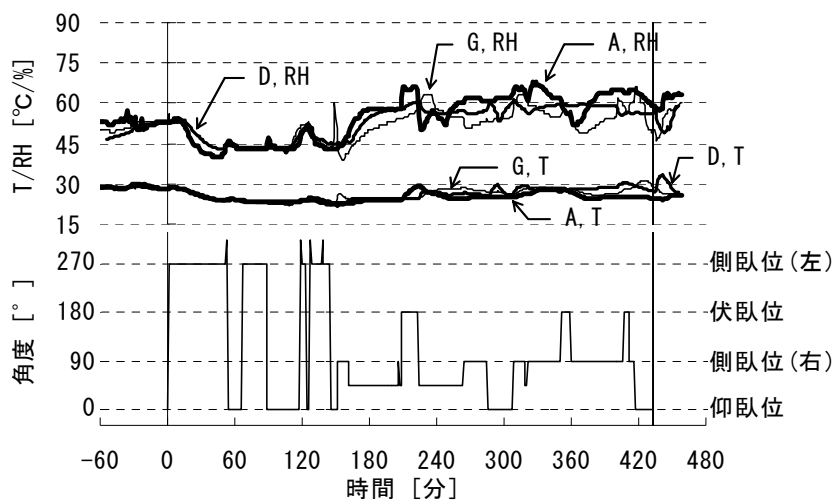


図 4-3 敷布団上右側(A, D, G)の温度 (T) と相対湿度 (RH) および寝姿勢

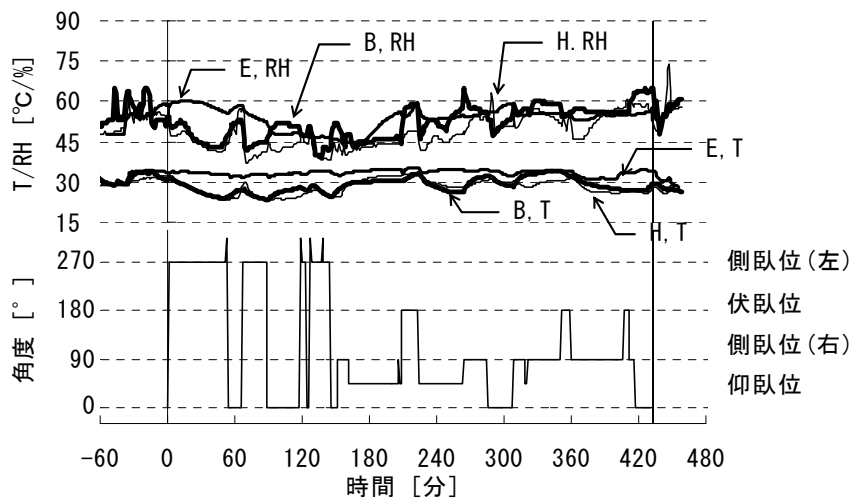


図 4-4 敷布団上中央(B, E, H)の温度 (T) と相対湿度 (RH) および寝姿勢

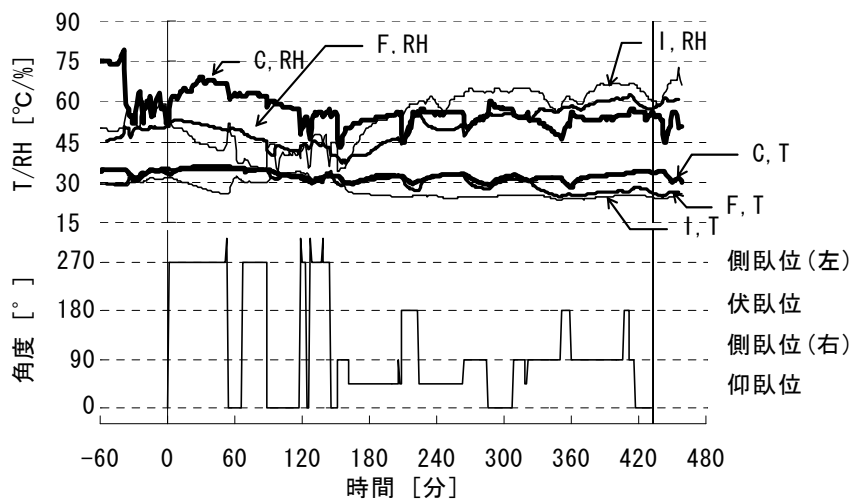


図 4-5 敷布団上左側(C, F, I)の温度 (T) と相対湿度 (RH) および寝姿勢

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

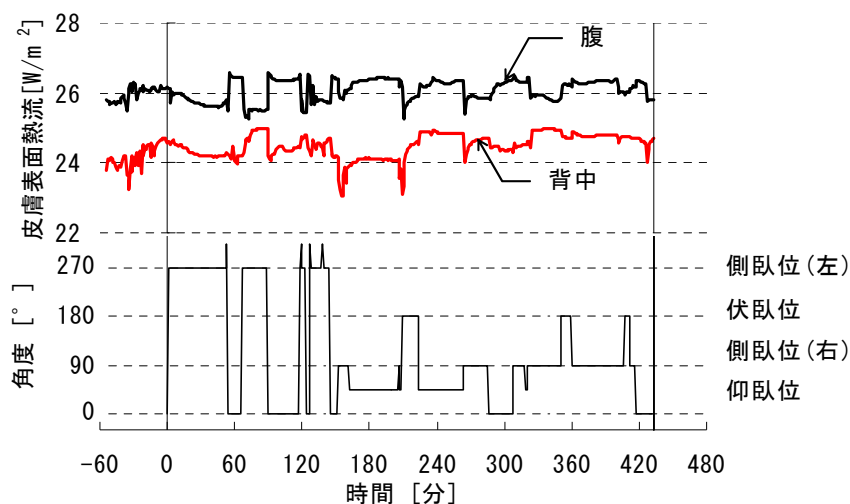


図 4-6 皮膚表面熱流と寝姿勢

各部位の皮膚温度の経時変化を図 4-7 に，深部温度である鼓膜温度と直腸温度については図 4-8 に示す。

まず，消灯前後に着目する。皮膚温度において，前額は消灯前後の時間帯では下降しており，手背は上昇していた。腹，背中，大腿および下腿は消灯前では上昇していたが，消灯後では下降に転じていた。前腕および足背は消灯直前では下降していたが，消灯後では上昇に転じていた。深部温度においては，直腸，鼓膜とも消灯前後の時間帯で上昇していた。

次に，起床前後に着目する。皮膚温度においては，前腕と足背は起床前後の時間帯では下降しており，前額と腹は上昇しており，下腿はほとんど変化していなかった。背中では，起床前では下降しているが，起床後では上昇に転じていた。手背は，起床前ではほとんど変化していなかったが，起床後では顕著に低下していた。大腿は，起床前では上昇していたが，起床後では下降に転じていた。深部温度においては，起床前後の時間帯でほとんど変化していなかった。

睡眠時に着目する。皮膚温度においては，いずれの部位も上昇と下降を繰り返していた。特に四肢部での変化が大きく，大腿では，最大値と最小値の差は約 $2.6^{\circ}C$ であった。深部温度においては，直腸，鼓膜とも 270 分頃を境に，下降から緩やかな上昇に転じており，直腸は 300 分頃からほとんど変化していなかった。詳細をみると，270 分までの下降において，皮膚温度ほど大きな温度幅ではないが，上昇と下降を繰り返していた。

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

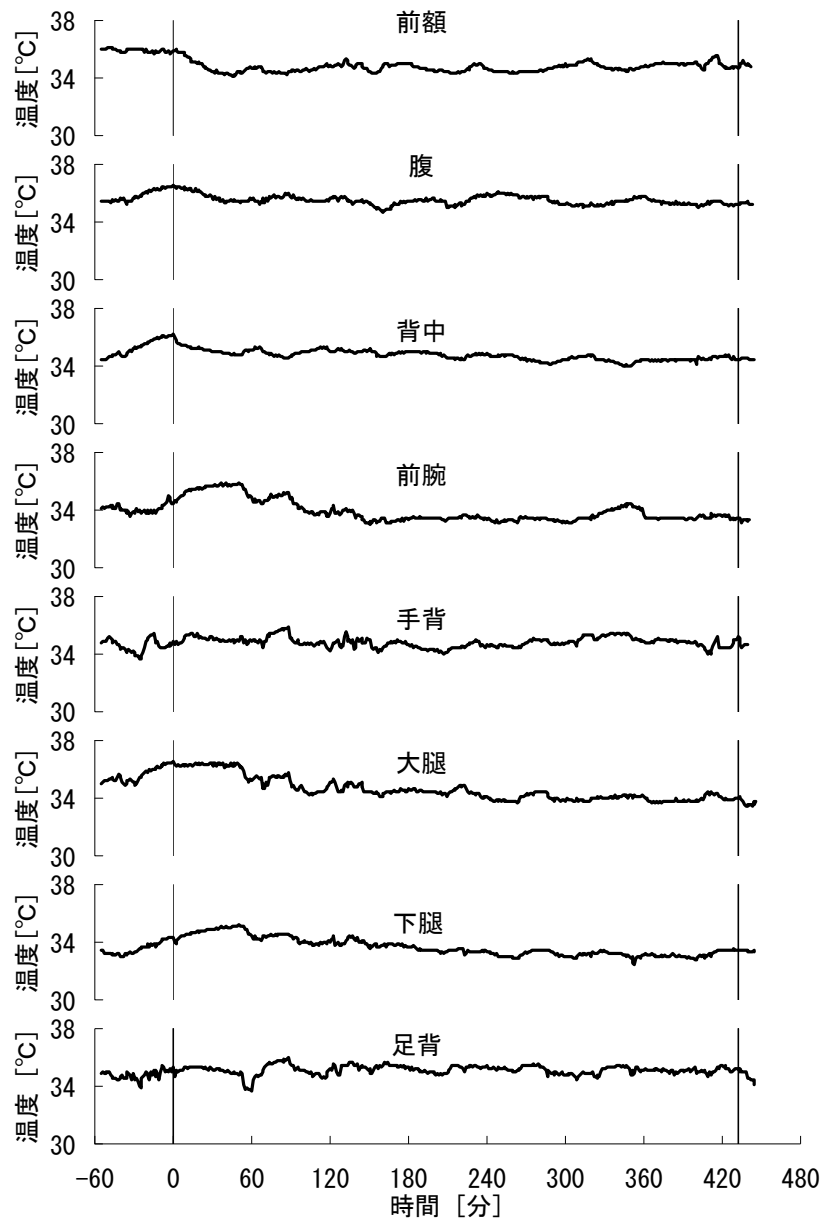


図 4-7 皮膚温度 (各部位)

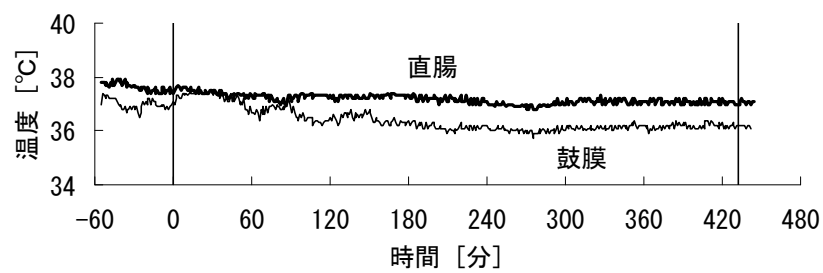


図 4-8 深部温度 (直腸, 鼓膜)

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

睡眠段階と発汗量の経時変化を図 4-9 に示す。睡眠段階と発汗量は関係しており、レム睡眠では発汗量が少なくなることが報告されている^{4-1,4-2,4-3}。測定結果をみると消灯後では発汗量が少なく、レム睡眠時では発汗がほとんどみられないが、270 分以降はレム睡眠時でも発汗がみられる。この時間帯では、手背の皮膚温度と発汗量については相関がみられるが（図 4-10）、睡眠段階と発汗量については明確な関係があるとはいえない。

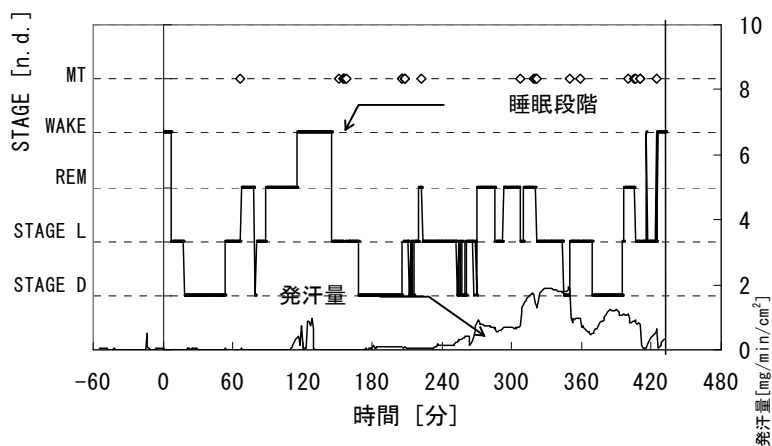


図 4-9 睡眠段階と発汗量

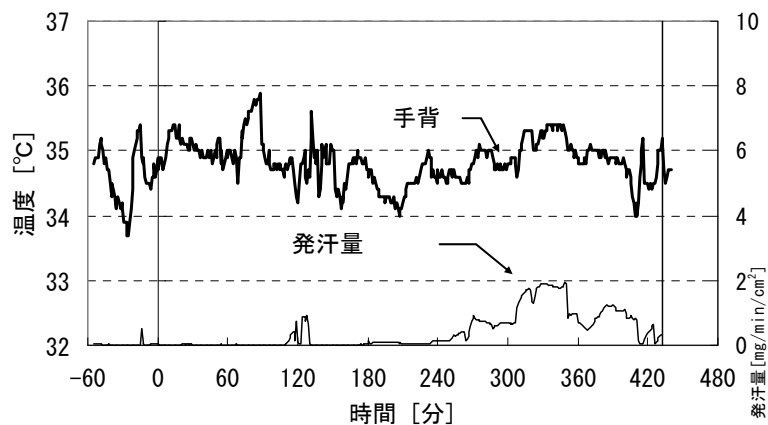


図 4-10 皮膚温度（手背）と発汗量

4.2.3. 睡眠実験結果の考察

寝床内環境の測定結果より、人体の敷布団上の位置、体温調節反応、室内環境の影響を受けて、寝床内の温湿度が複雑に変化していること、また人体各部位の温度は上昇と下降を繰り返していることが示された。このことは、人体各部位温度と寝床内の温湿度が相互に影響を及ぼしていることを示している。消灯前は被験者には各種センサの取り付けが行われており、被験者はベッドの上に座って安静かつ覚醒状態にあった。消灯直前に寝姿勢になるが、消灯と同時に睡眠状態に移行していなかった。したがって、消灯時に人体各部位の温度変化が生じているのは、覚醒から睡眠状態への移行による体温調節反応のセットポイントの変化ではなく、姿勢の変化およびそれともなう周辺環境の変化による影響であると考えられる。また直腸温度が消灯前に低下しているのは、安静状態で代謝量が低下しているためと考えられる。また、睡眠段階と発汗量との間には、明確な関係がみられなかった。発汗量は睡眠段階の変化よりも、人体周辺の環境の変化など温熱的要因による影響が大きいと考えられる。

4.3. 姿勢変化時の生理反応

前節では、姿勢により皮膚表面と周辺環境との間の熱移動および代謝量が変わるため、姿勢が体温調節反応に影響を与える可能性があることを示した。本節では、覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させて、皮膚温度、深部温度および皮膚血流量等の生理量を測定し、周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより、各生理量の変化を説明する。

4.3.1. 姿勢変化実験の目的

本実験では、覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させて、皮膚温度、深部温度および皮膚血流量等の生理量を測定し、姿勢の変化と各生理量の変化の関係について考察を行う。

4.3.2. 姿勢変化実験の概要

覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させたときの生理反応の測定を行った。被験者は健康な男子学生 11 名（表 4-1、平均と標準偏差：身長 173.4±5.4cm、体重 65.7±12.1kg、年齢 23.8±3.4 歳）である。なお、ヘルシンキ宣言に基づき、被験者には研究内容についてあらかじめ十分に説明を行い、同意を得ている。

表 4-1 被験者属性（姿勢変化実験）

被験者	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	平均	標準偏差
身長 [cm]	165	174	179	168	170	179	172	172	184	171	173	173.4	5.4
体重 [kg]	58	74	58	60	55	69	76	53	75	54	91	65.7	12.1
年齢 [歳]	22	23	23	23	23	23	34	22	23	23	23	23.8	3.4

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

睡眠実験と同じ寝室実験室（図 2-1）にて、姿勢変化のタイムテーブルの異なる実験 1（2006 年 8 月 7 日，12 日），実験 2（2006 年 12 月 21 日，22 日），実験 3（2007 年 7 月 4 日，5 日，13 日）を行った（表 4-2，図 4-11）。いずれの実験においても 10 分毎に姿勢を変え，実験 1 および 2 では姿勢番号 2～10 を，実験 3 では姿勢番号 1～6 を被験者に行わせた。姿勢の順番は，通常の睡眠とその前後の行為を想定しており，臥位は 30 分間継続させ，その前後は，座位または立位となるようにしている。最初の立位まで，すなわち姿勢番号 1～6 までの測定結果を検討の対象とする。各姿勢の状況を図 4-12 に示す。座位では，「椅座位」と「足投出座位」の 2 種を設定し，「椅座位」では椅子に座る姿勢を，「足投出座位」ではベッドの上に足を投げ出して座る姿勢とする。臥位では，「仰臥位」，「側臥位」および「伏臥位」の 3 種を設定し，「仰臥位」では仰向けの姿勢を，「側臥位」では右の脇腹をベッドにつけて横たわる姿勢を，「伏臥位」ではうつ伏せの姿勢とする。「立位」では，仰臥位の接触条件と揃えるために室内の壁に立てかけたマットレスに背中をつけて立つ姿勢とする。着衣は綿の T シャツ，ショートパンツ，トラックスである。室内の温湿度環境は，各実験とも気温 28℃，相対湿度 60%を目標として制御した。

表 4-2 各実験の被験者と実施日（姿勢変化実験）

実験 1 群	被験者	実施日	実験 2 群	被験者	実施日	実験 3 群	被験者	実施日
1-1	A	2006/8/7	2-1	G	2006/12/21	3-1	F	2007/7/4
1-2	B	2006/8/7	2-2	F	2006/12/21	3-2	I	2007/7/4
1-3	C	2006/8/7	2-3	B	2006/12/21	3-3	J	2007/7/5
1-4	D	2006/8/12	2-4	H	2006/12/22	3-4	K	2007/7/5
1-5	E	2006/8/12	2-5	E	2006/12/22	3-5	C	2007/7/13
1-6	F	2006/8/12	2-6	C	2006/12/22	3-6	B	2007/7/13



図 4-11 タイムテーブル（姿勢変化実験）

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

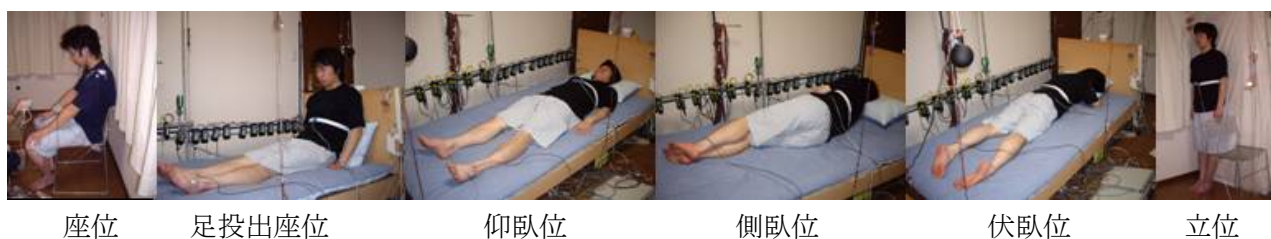


図 4-12 各姿勢の状況

周辺環境に関しては、室の中心部の床から 50cm および 120cm の高さでの気温と相対湿度、120cm の高さでのグローブ温度を測定した。気温と相対湿度は、薄型センサ（THP-B28T：神栄社製）と温湿度変換器（THT-B121：神栄社製）により、グローブ温度は直径 15cm のグローブ球と T 型熱電対（直径 0.1mm）により測定した。

被験者に関する測定項目は、実験 1 では腹、背中、足背の皮膚血流量と皮膚温度、実験 2 では前額、腹、背中、前腕、大腿、足背の 6 ヶ所の皮膚血流量と皮膚温度および鼓膜温度、実験 3 では実験 2 の項目に加え、直腸温度、心拍数、血圧を測定した。全測定箇所とも正面から見て、人体の左側で測定した。皮膚温度は、T 型熱電対（直径 0.1mm）をサージカルテープで皮膚に貼り付けて測定した。鼓膜温度および直腸温度は鼓膜センサおよび直腸センサ（モナサーム：MALLINCKRODT 社製）を用いて測定した。皮膚血流量は、レーザー血流計（FLO-C1：オメガウェーブ社製、ALF21：アドバンス社製の 2 機種）を用いて測定した。心拍数は携帯型ポリグラフ（polymate, AP1132：Teac 社製）により、サンプリング周期 200Hz で測定した心電位の波形より算出した。血圧はカフ式家庭用血圧計（HEM-632：オムロン社製）を用いて、姿勢変化の直後（以降、姿勢開始時という。）と姿勢維持の終了直前（以降、姿勢終了時という。）に測定した。どの姿勢においても心臓とカフの高さをあわせるように被験者に指示した。測定項目のうち記録装置が内蔵されていないものは、データロガー（DARWIN、横河電機社製）によって 2 秒間隔で記録した。

4.3.3. 姿勢変化実験の結果

4.3.3.1. 室内環境

実験室の床上 50cm および 120cm の高さでの気温と相対湿度、120cm の高さでのグローブ温度の全実験の全実験時間における平均値および標準偏差を表 4-3 に示す。この表に示す数値から、室内環境は制御目標である気温 28℃ならびに相対湿度 60%に対してそれぞれ 0.3℃ならびに 1%程度の差があるが、概ね同等の温熱環境とみなせる程度であった。

表 4-3 室内環境の平均値(標準偏差)

	温度 [°C]	相対湿度 [%]
床上 50cm	27.74 (± 0.64)	61.38 (± 3.47)
床上 120cm	28.35 (± 0.57)	60.89 (± 3.95)
グローブ 120cm	28.25 (± 0.35)	—

4.3.3.2. 人体生理量 (実験 3-6 の場合)

まず、1 例として実験 3-6 を取り上げ、測定結果を考察する。

(1)皮膚温度

前額、腹、背中、前腕、大腿、足背の皮膚温度の測定結果を図 4-13 に示す。横軸は時間であり、各点は 1 分間に取得した 30 個のデータの平均値と標準偏差を示している。また姿勢を変化させている時間帯のデータは除いている。各部位間でばらつきがあり、異なる変動があることがわかる。各部位間で最も大きな温度差が生じているのは、椅座位のときであり、前額が腹より約 3.2℃高く、最も差が小さい側臥位のときでも、前額が背中より約 0.2℃高い。背中をみると、仰臥位で大きく上昇するが、側臥位では下降に転じる。一方、腹は仰臥位では低いですが、側臥位では上昇し、伏臥位では再び下降に転じる。そのような挙動は、皮膚表面と周辺環境との間の熱移動が姿勢によって変化しているためと考えられる。

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

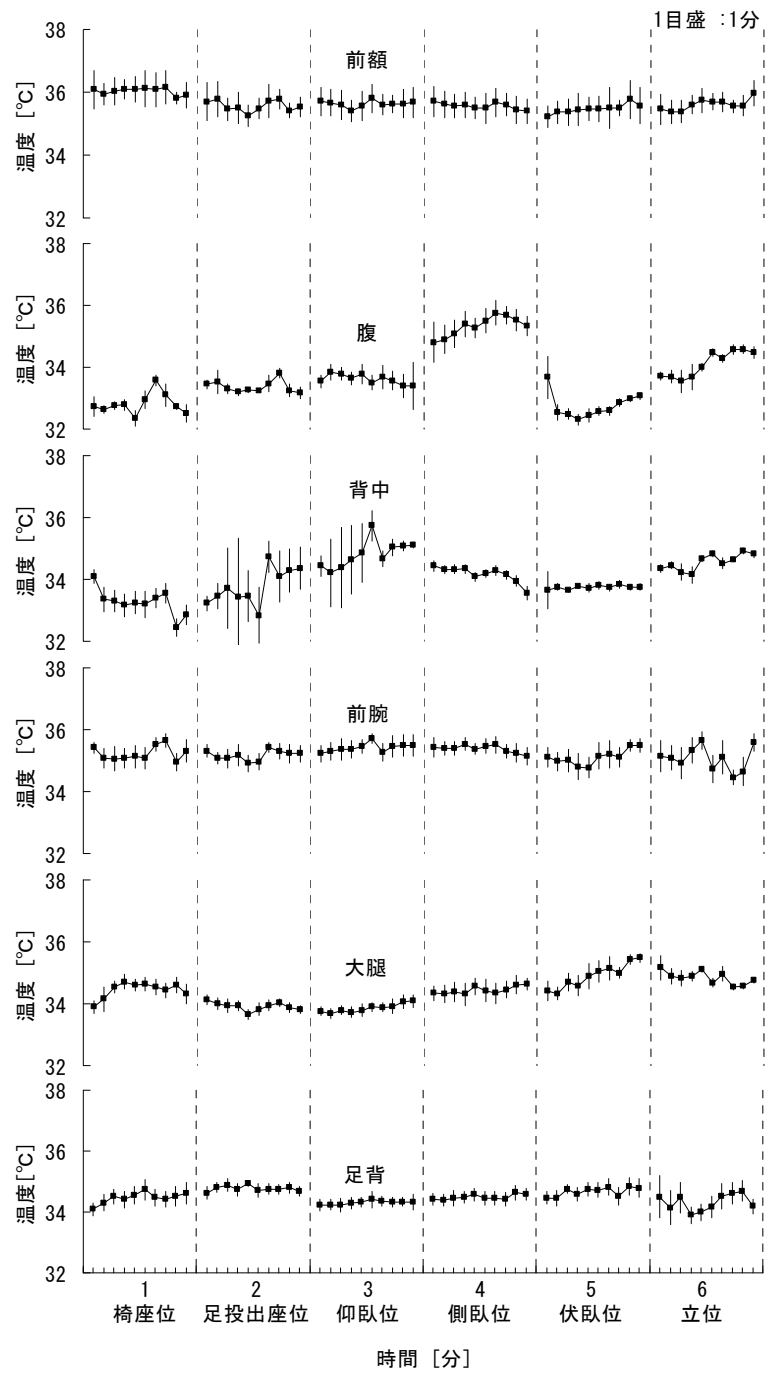


図 4-13 各部位の皮膚温度 (実験 3-6)

(2) 深部温度

鼓膜温度と直腸温度の測定結果を図 4-14 に示す。座位から臥位にかけて低下しているが、立位で上昇に転じている。そうした挙動は、姿勢によって代謝量や皮膚表面と周辺環境との間の熱移動が変化している影響によるものと考えられる。

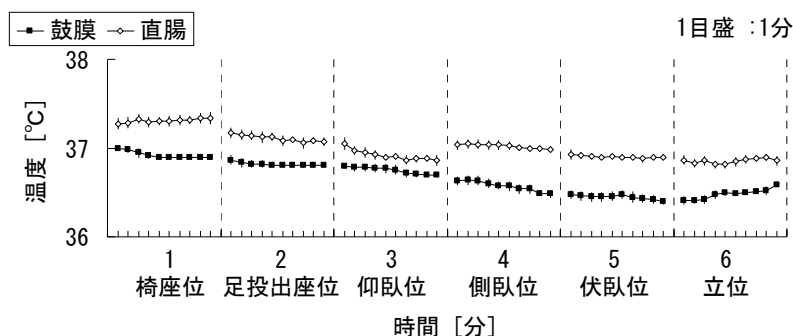


図 4-14 深部温度 (実験 3-6)

(3) 皮膚血流量

皮膚血流量は体組織 100g あたりに 1 分間に移動する血液量で表される。2 秒ごとに測定した前腕の測定結果を図 4-15 に示す。姿勢変化の前後で皮膚血流量が増加する傾向がみられる。それは姿勢の変化に伴い、皮膚血流量が瞬時に変化することを示している。また、姿勢により皮膚血流量の平均値が異なっている。

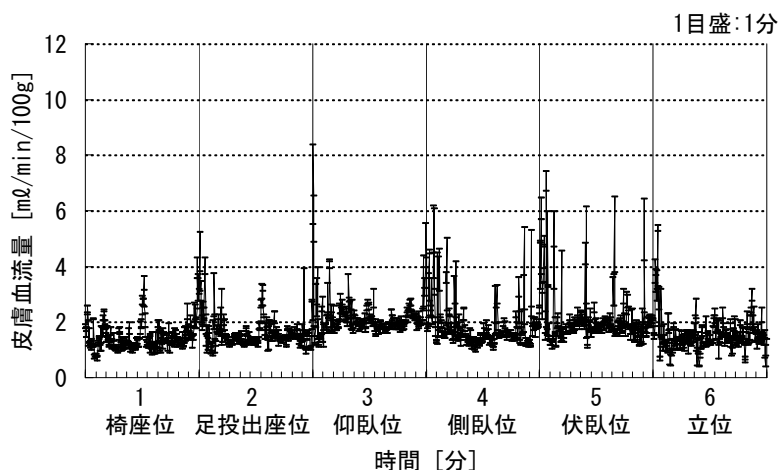


図 4-15 前腕の皮膚血流量 (実験 3-6)

各部位の皮膚血流量について、1 分間に取得した 30 個のデータの平均値の経時変化を図 4-16 に示す。皮膚温度と同様、各部位の値には差があり、異なる挙動を示している。前額をみると、ばらつきがあるものの、平均的には姿勢による差は少なく、他の部位と比較して高い値を示している。腹、背中および

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

前腕は、値と変動ともによく似た挙動を示している。いずれも値は概ね $0.5\sim 4[\text{ml}/\text{min}/100\text{g}]$ であり、座位、臥位では、姿勢開始から1分で急激な低下を示している。大腿の値は、足投出座位と仰臥位で最大 $12[\text{ml}/\text{min}/100\text{g}]$ となり、顕著な上昇を示している。以上の結果より、姿勢と関係する要因が皮膚血流量の変化に影響を与えている可能性があるといえる。

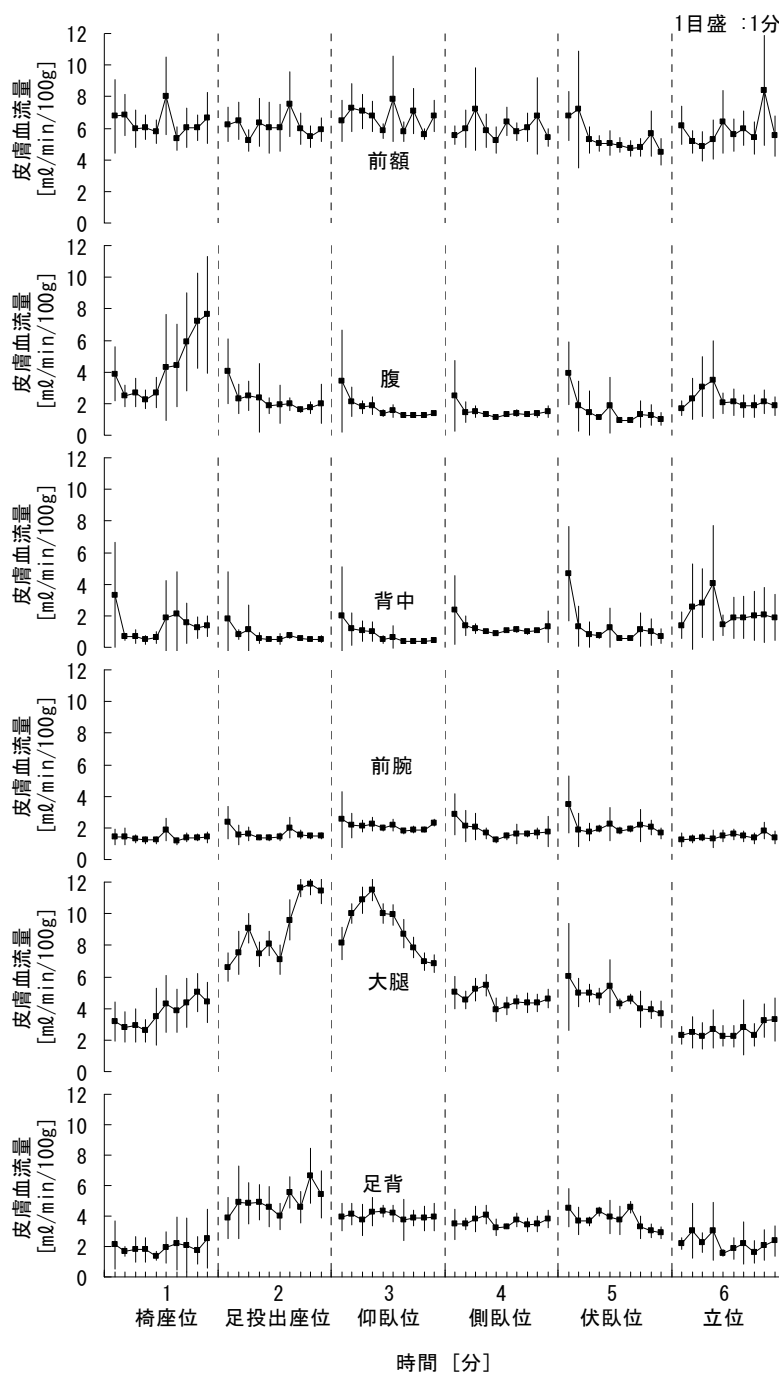


図 4-16 各部位の皮膚血流量 (実験 3-6)

(4) 血圧

収縮期血圧と拡張期血圧の平均値を血圧の値として、その経時変化を図 4-17 に示す。椅座位、足投出座位と仰臥位で値の変化が大きい。被験者に対してどの姿勢においても、心臓とカフの高さを合わせて測定するように指示したが、姿勢により差が生じたものと考えられる。姿勢開始時と姿勢終了時とで比較的差が小さい側臥位、伏臥位と立位を比較すると、立位が最も大きい値となっている。

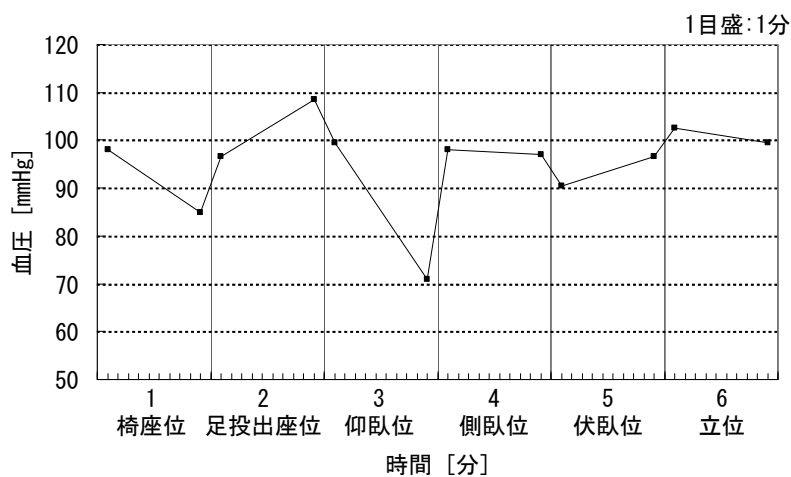


図 4-17 血圧 (実験 3-6)

(5) 心拍数

心拍数の経時変化を図 4-18 に示す。臥位では低下しているが、立位で顕著な上昇を示している。

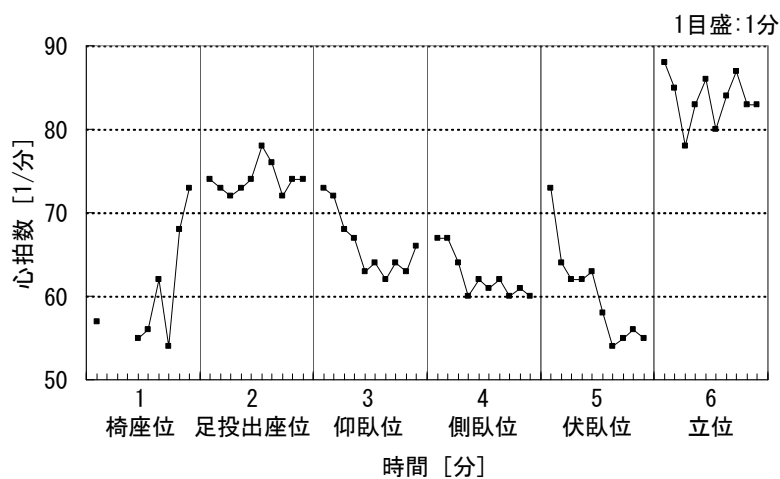


図 4-18 心拍数 (実験 3-6)

4.3.3.3. 人体生理量（平均値）

実験 1-1～実験 3-6 の 18 回の測定結果の平均値について考察する。

(1)皮膚温度

各部位の皮膚温度の経時変化を図 4-19 に示す。前額はいずれの姿勢でも約 36℃であり、ほとんど変化がみられない。腹は、座位から臥位にかけて上昇するが、立位ではやや低下している。背中は、足投出座位から仰臥位にかけて上昇するが、側臥位では下降に転じている。前腕と大腿は、椅座位から足投出座位で低下し、臥位で上昇に転じるが、立位で再び低下に転じている。足背は、座位から臥位にかけて上昇するが、立位で下降に転じている。

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

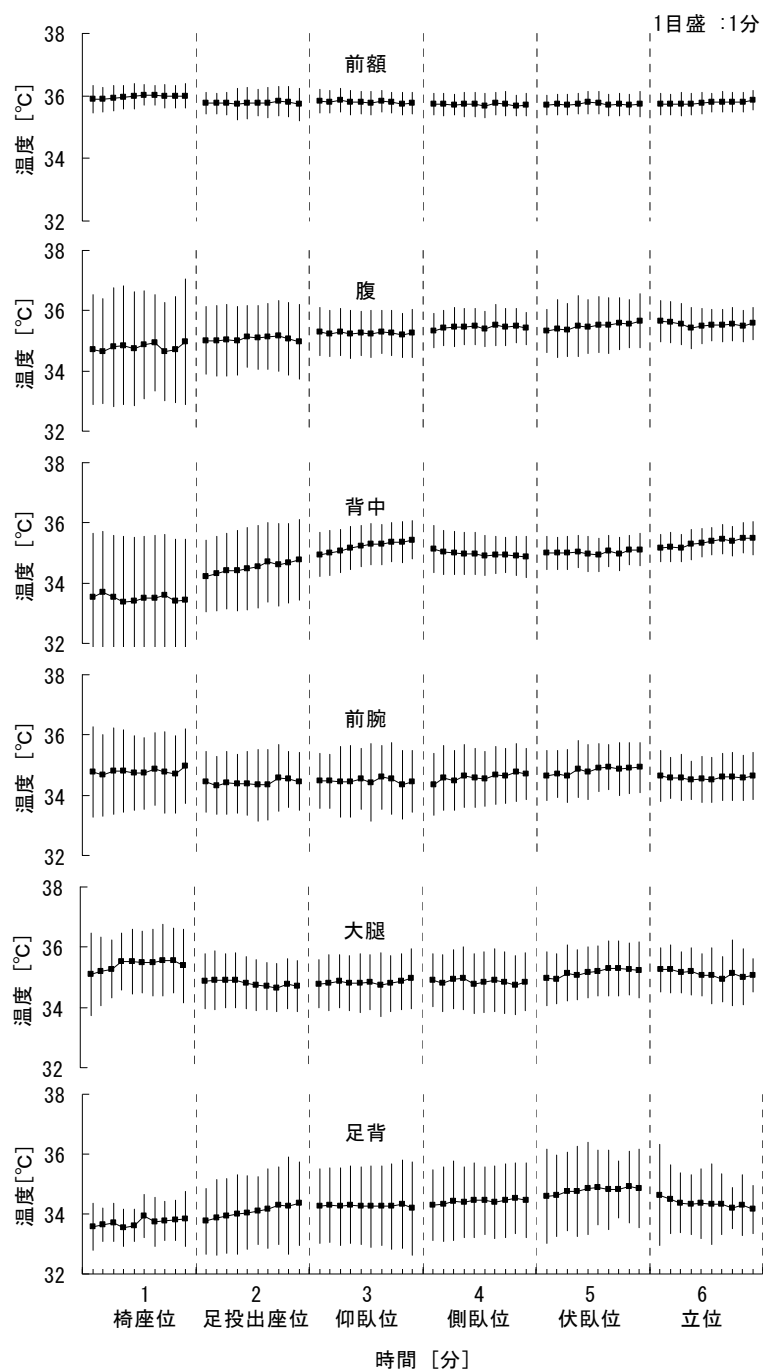


図 4-19 各部位の皮膚温度（平均値）

平均皮膚温度の経時変化を（図 4-20）に示す．実験 1 については，腹，背中，額の単純平均とし，実験 2, 3 では，Hardy-Dubois の 7 点法を参考に，皮膚表面積比率（前額：腹：背中：前腕：大腿：足背＝0.09：0.185：0.185：0.194：0.113：0.233）により計算した．座位から臥位にかけて上昇するが，立位で下降に転じている．

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

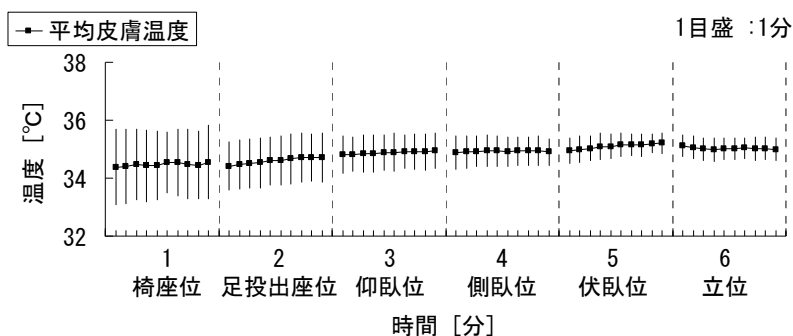


図 4-20 平均皮膚温度 (平均値)

(2) 深部温度

鼓膜温度と直腸温度の経時変化を図 4-21 に、鼓膜温度と直腸温度の単純平均を平均深部温度と定義し、その経時変化を図 4-22 に示す。鼓膜温度は実験 2-6 が欠測であった。座位から臥位で低下を示し、立位では上昇に転じており、平均皮膚温度と逆の挙動を示している。

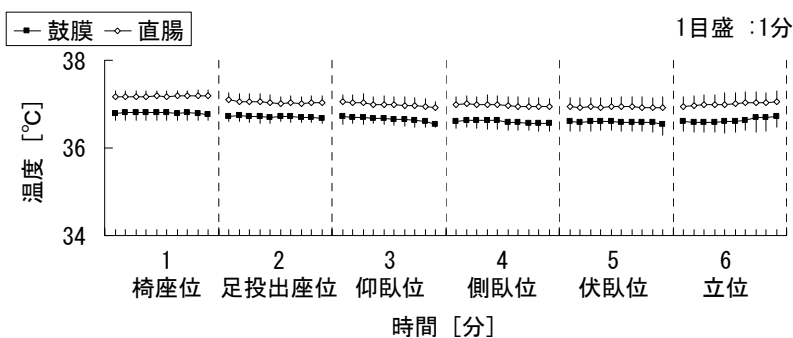


図 4-21 深部温度 (平均値)

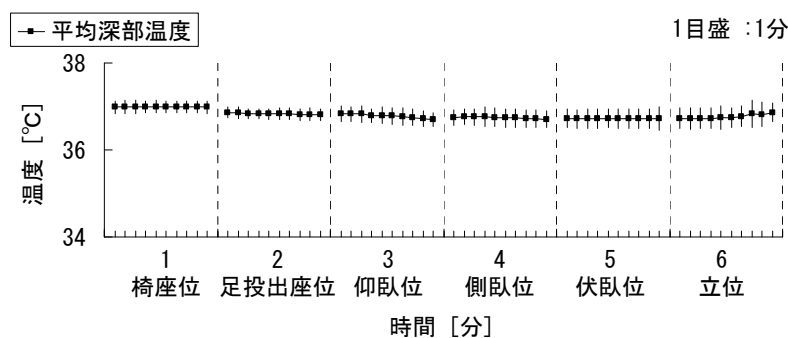


図 4-22 平均深部温度 (平均値)

(3)皮膚血流量

各部位の皮膚血流量の経時変化を図 4-23 に示す。腹は実験 2 の全ての実験で、足背は実験 2-2 で欠測であった。前額は、時間経過とともに低下している。腹は、足投出座位、臥位では大きな値を、椅座位、立位では小さな値を示している。背中と前腕は、臥位が大きな値を、立位が小さな値を示している。大腿も、背中、前腕と同じような挙動を示しているが、立位では値が顕著に小さい。足背は、足投出座位、立位で大きな値を、椅座位、立位で小さな値を示している。

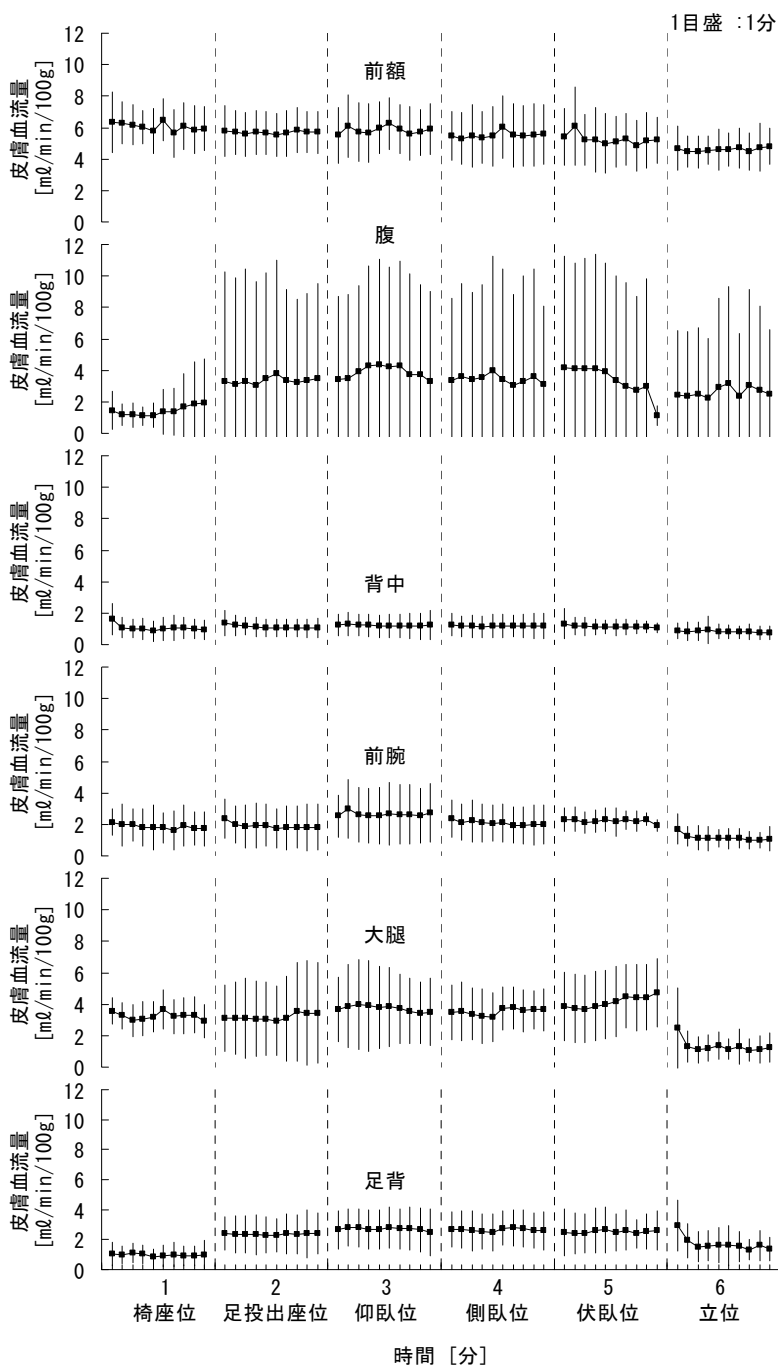


図 4-23 各部位の皮膚血流量 (平均値)

今回測定している6箇所の皮膚血流量を単純平均したものを平均皮膚血流量と定義し、その経時変化を図4-24に示す。概ね、臥位では、座位、立位よりも大きな値を示している。

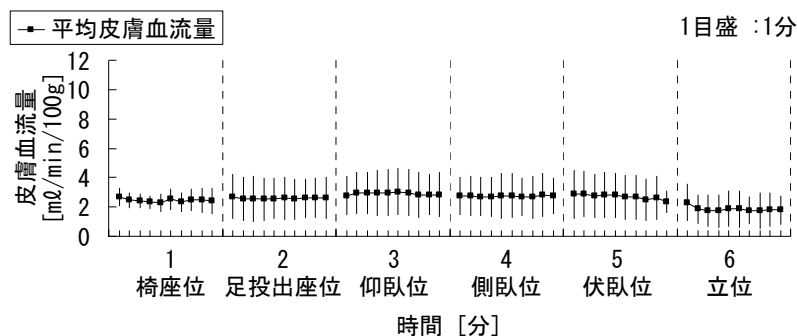


図 4-24 平均皮膚血流量 (平均値)

(4) 血圧

血圧は経時変化を図4-25に示す。実験3-4は欠測であった。椅子位、足投出座位と仰臥位では、姿勢開始時と終了時で大きな差がある。姿勢開始時と終了時で比較的差が小さい側臥位、伏臥位と立位を比較すると、立位の値が大きい。

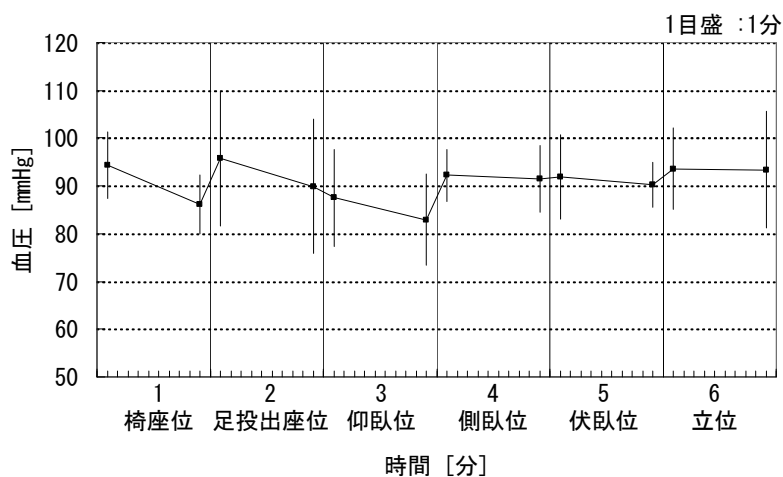


図 4-25 血圧 (平均値)

(5)心拍数

心拍数の経時変化を図 4-26 に示す。臥位では小さな値を，立位では著しく大きな値を示している。座位，臥位では，姿勢開始時に大きな値を示す傾向がみられる。

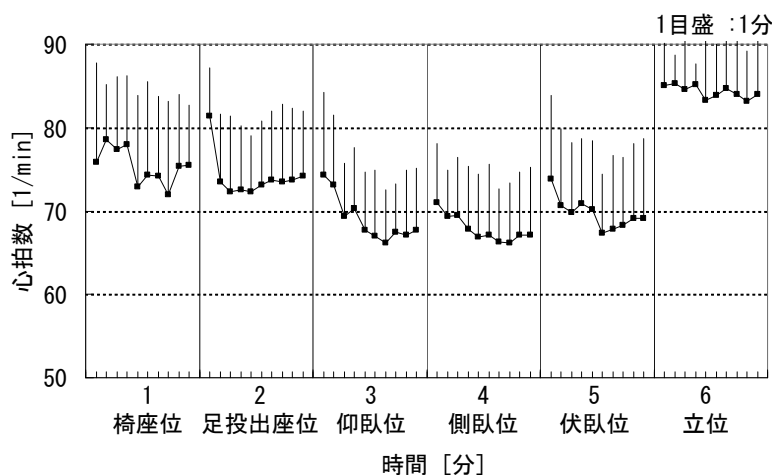


図 4-26 心拍数 (平均値)

4.3.4. 測定結果の考察

姿勢によって人体からの放熱しやすさと代謝量が異なると考えられる。姿勢と各生理量の関係を説明するために、皮膚表面と周辺環境との間の平均的な熱伝達率が大きい姿勢を「放熱しやすい姿勢」、小さい姿勢を「放熱しにくい姿勢」と分類して、それぞれの場合の各生理量を比較する。

本章では、「放熱しやすい姿勢」には「座位・立位」を、「放熱しにくい姿勢」には「臥位」を対応させる。その理由は、座位では上半身がマットレスに接触していないため、また立位ではマットレスに接触させることで仰臥位と接触条件を揃えようとしたが、腰部など接触しない部分が生じたため、いずれも臥位と比較して室内空気と接している皮膚表面積の割合が多く、一方、臥位はマットレスとの接触面積が多いと推測されるためである。

まず、臥位での深部温度の低下の原因としては、心拍数の減少、代謝量の低下、人体からの放熱量の増加が考えられるため、心拍数と平均深部温度との関係に着目する。平均深部温度と心拍数の散布図を図 4-27 に示す。平均深部温度と心拍数との間には、明確な相関はみられないが、「臥位」群において「座位・立位」群よりも平均深部温度がやや低く、心拍数は少なくなる傾向を示している。

また、臥位での平均皮膚温度の上昇の原因としては、皮膚からの放熱量が多くなることによる皮膚血流量の増加が考えられるため、平均皮膚温度と平均皮膚血流量との関係に着目する。平均皮膚温度と平均皮膚血流量の散布図を図 4-28 に示す。平均深部温度と心拍数と同様に平均皮膚温度と平均皮膚血流量の間には、明確な相関はみられないが、「臥位」群が「座位・立位」群よりも平均皮膚温度が高く、平均皮膚血流量が多くなる傾向を示している。

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

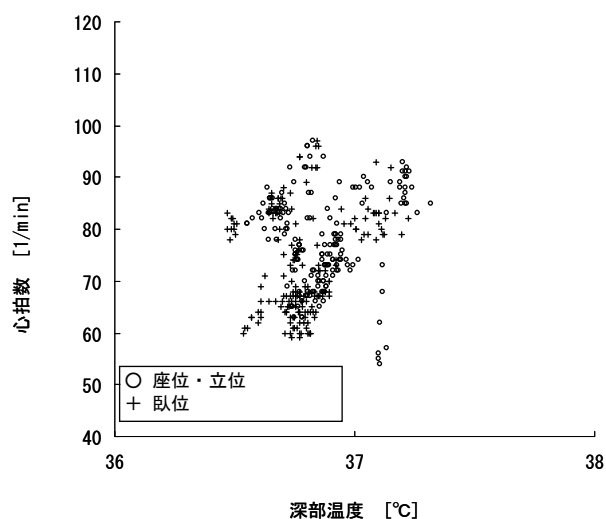


図 4-27 平均深部温度と心拍数（全実験平均値）

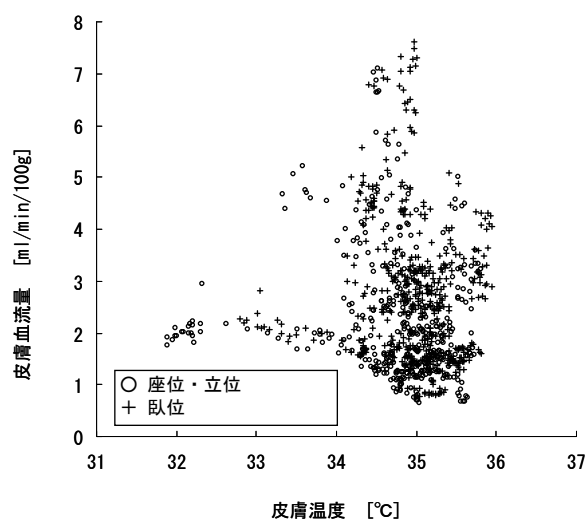


図 4-28 平均皮膚温度と皮膚血流量（全実験平均値）

以上より、平均深部温度と心拍数、および平均皮膚温度と平均皮膚血流量について、両者には明確な相関は見られないが、姿勢が異なるとこれらの生理量が異なることがわかる。

そこで、各生理量の姿勢毎の平均的な特性を把握するため、各群の平均皮膚温度、平均深部温度、平均皮膚血流量、血圧および心拍数の平均値に着目する。計算結果を図 4-29 に示す。

「臥位」群は、「座位・立位」群と比較して、平均皮膚温度は低い値を、平均深部温度は高い値を、平均皮膚血流量は高い値を、血圧は低い値を、心拍数は低い値を示している。「座位・立位」群と「臥位」群との値の間には、平均皮膚血流量、心拍数では有意水準 1%以下で、平均皮膚温度では有意水準 5%以下で有意差が認められた。「座位・立位」群と「臥位」群の値の大小関係をまとめて示したものが表 4-4 である。この結果に基づいて姿勢変化に伴う生理量と体温調節反応の関係をみると、以下のような説明が可能と考えられる。

姿勢が座位または立位から臥位に変わると、寝床内では室空気との接触面積が少なくなるため、皮膚から放熱しにくい状況となり、放熱量が減少するため、放熱を促進する方向に体温調節反応が起こる。すなわち、血管の拡張と皮膚血流量の増加により、深部から皮膚へ血液を介して移動する熱量が増加する。また、臥位では、筋活動量が立位・座位と比較して減少するため、代謝量が減少する。この二つの要因により、皮膚温度の上昇と深部温度の低下が起こる。また、血圧と心拍数の低下が生じるのは、血管が拡張する影響を受けたためと考えられる。

逆に、姿勢が臥位から座位または立位に変わると、皮膚から放熱しやすくなり、放熱量が増加するため、放熱を抑制する方向に体温が調節される。皮膚血流量が減少するため、深部から皮膚へ移動する熱量が減少する。また立位・座位では、臥位より代謝量が増加する。その結果、深部温度の上昇と皮膚温度の低下が起こる。この場合にも、血圧と心拍数が増加するのは、血管が縮小するためと推測される。

4. 姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

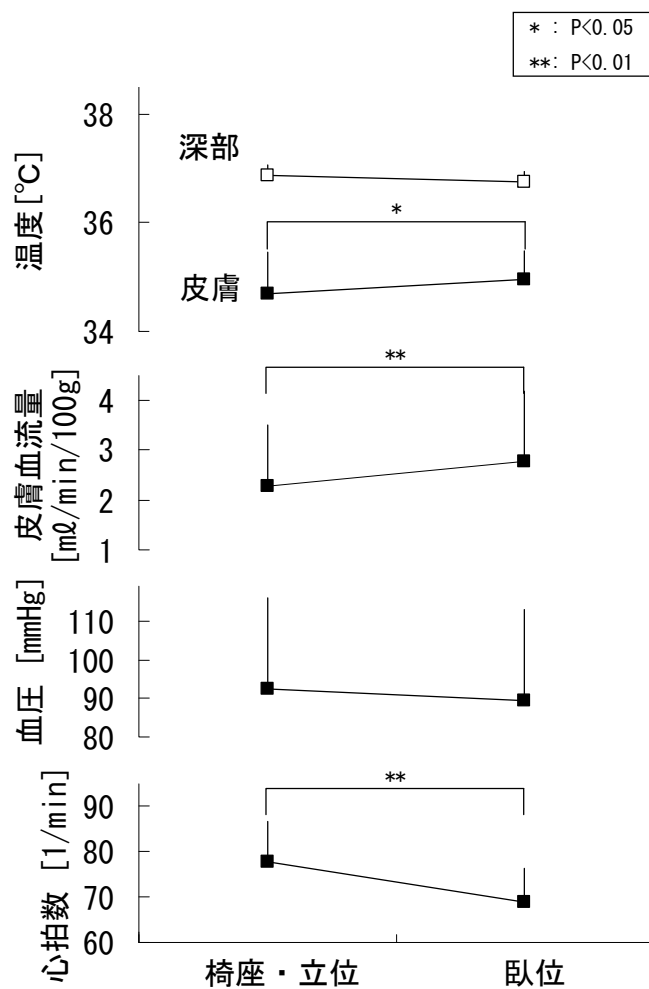


図 4-29 座位・立位と臥位における各パラメータの平均値

表 4-4 姿勢に対する各生理量の傾向

	座位・立位	臥位
皮膚温度	低	高
深部温度	高	低
皮膚血流量	低	高
血圧	高	低
心拍数	高	低

4.4. 第4章のまとめ

本章では、姿勢が体温調節反応に及ぼす影響を明らかにするため、周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより、姿勢変化時の各生理量変化の説明を試みた。

まず、睡眠実験から、人体各部温度の変化には、姿勢による周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いが影響している可能性を確認した。

次に姿勢の変化が体温調節反応に与える影響を明らかにするために、覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させて、皮膚温度、深部温度および皮膚血流量等の生理量を測定した。

その結果、座位・立位は「放熱しやすい姿勢」、臥位は「放熱しにくい姿勢」であると考え、周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより、各生理量の変化の説明が可能であることを示した。したがって、睡眠時の各生理量は、姿勢が座位・立位から臥位に変化したことに伴う、人体の皮膚表面と周辺環境との間の熱移動の変化および代謝量の変化の影響を大きく受けていると考えられる。

第3章の温熱生理モデルにおいて、赤外線カメラや体動計の測定結果を参考に、皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンスを時間変化させて皮膚温度と深部温度を計算した結果、熱コンダクタンスが一定値の場合と比較すると、皮膚温度の再現精度が向上しており、これは本章の結論と矛盾しない。

第4章の引用文献

- 4-1) Henane, R., Buguet, A., Roussel, B. and Bittel, J. : Variations in evaporation and body temperatures during sleep in man, *J. Appl. Physiol., Respirat Environ. Exercise Physiol.*, 42(1), pp.50-55, 1977.
- 4-2) Libert, J.P., Candas, V., Muzet, A. and Ehrhart, J: Thermoregulatory adjustments to thermal transients during slow wave sleep and REM sleep in man, *J. Physiol., Paris*, 78, pp.251-257, 1982.
- 4-3) Sagot, J.C., Amoros, C., Candas, V., and Libert, J.P.: Sweating responses and body temperatures during nocturnal sleep in humans, *Am. J. Physiol.*, 252, pp.R462-R470, 1987.

5. 覚醒時の温冷感予測指標に基づく温熱環境制御

5.1. はじめに

睡眠時においても体温調節がなされており、また高温環境や低温環境では中途覚醒が起こることから、睡眠時においても温冷感を有していると考えられる。快適な睡眠のためには温熱環境が重要である。エアコンなどの空調機器を利用する、着衣を調整する、快適な環境を求めて移動するといった温熱環境の調整は、覚醒時ならば温冷感に基づいて行われるが、睡眠時においては、そうした方法をとると睡眠を阻害する可能性がある。睡眠時において覚醒時のような温冷感に基づく環境調整を行うためには、睡眠時に適した温熱環境形成手法を確立することが重要である。

本章では、快適な睡眠環境を形成する手法として、覚醒時の温冷感予測指標を用いて、就寝者の温冷感を推定し、空調機の設定温度にフィードバックする温熱環境制御システムを提案する。また、その有効性を2004年の第2回目の睡眠実験を対象として検討する。

5.2. 空調制御システム

本章で提案する空調制御システム概念図を図5-1に示す。エアコン、プログラム、リモコンの3つの部分から構成される。プログラムは本システムの制御部であり、温冷感推定とエアコンの設定温度の決定を行う。まず就寝者の皮膚温度や環境の温湿度の測定値から温冷感を推定する。あらかじめ設定している快適域の範囲内であれば、就寝者は熱的快適条件を満足していると判定し、逆に範囲外であれば満足していないと判定する。それに基づいてエアコンの設定温度を決定する。設定温度の情報は、プログラムからリモコンに、さらにリモコンからエアコンに伝達される。エアコンはその設定温度で運転を行う。本システムは、そのような一連のプロセスの繰り返しにより、温冷感予測に基づく空調制御を達成しようとするものである。

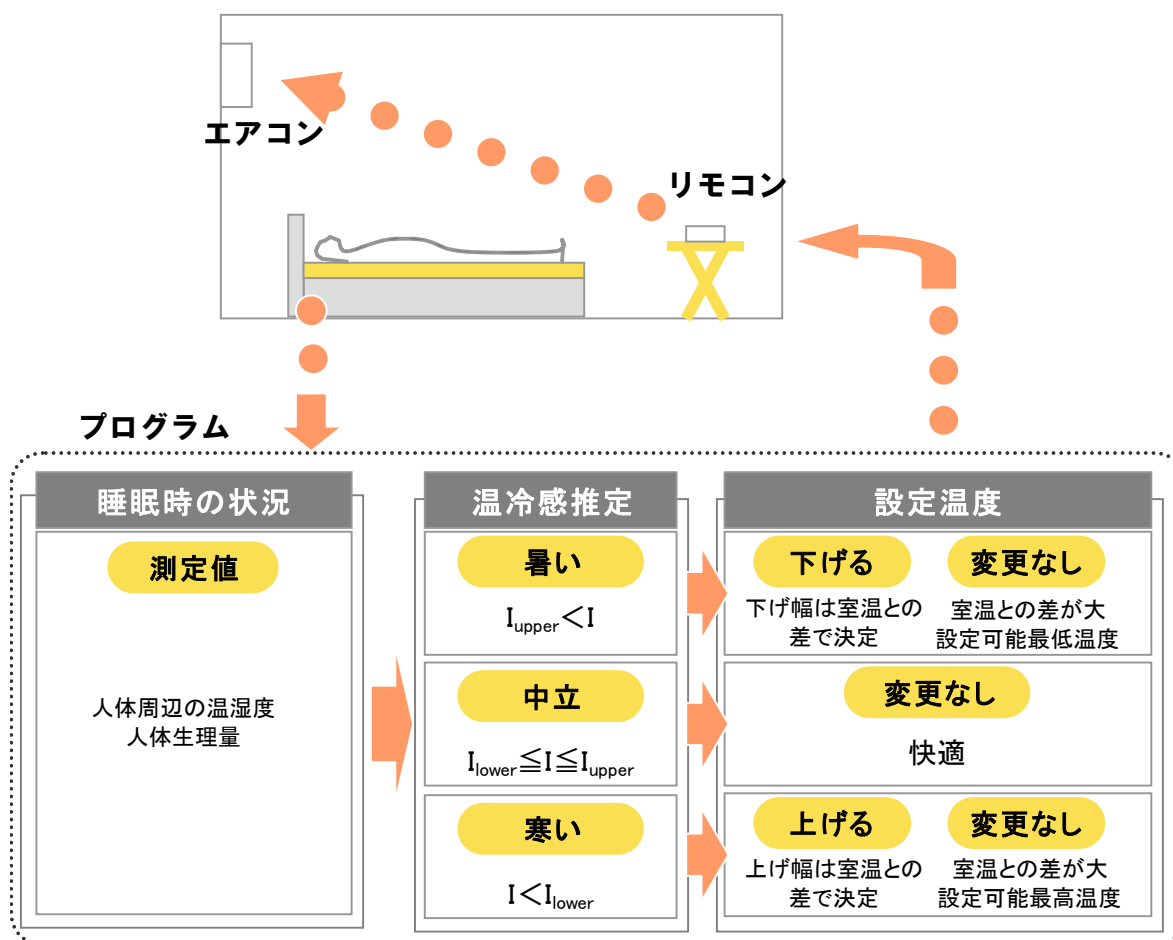


図 5-1 空調制御システムの概念図

5.3. 温冷感の推定方法

5.3.1. 睡眠時の温冷感評価

温熱刺激は、覚醒時でも睡眠時でも全身で受容されると考えられる。一方、足が冷たい、背中が暑いなどの局所部位に対する温熱刺激によって不快感が生じる。また温冷感や快・不快感に部位の特異性があることが報告されている⁵⁻¹⁾。したがって覚醒時・睡眠時とも温冷感を評価するときに、局所の皮膚温度を用いるか、全身の平均皮膚温度を用いるかについては議論の余地がある。ただ、局所部位に対する温熱刺激あるときには皮膚温度の非一様性が生じるが、その際に全身の平均皮膚温度が影響を受けることは明らかである。また、局所部位に対する刺激が睡眠に与える影響については明確にされていない。そこで本章では、睡眠時の温冷感について平均皮膚温度を用いて評価するものとする。

平均皮膚温度は、定常状態かつ発汗が少ない状態において温冷感をよく説明することが明らかにされており、平均皮膚温の一次関数で温冷感申告値が表現されている⁵⁻²⁾。ところが非定常状態においては、平均皮膚温度を用いて温冷感を定量的に表現しているものは少ない。森らの提案した温冷感予測指標^{5-3,5-4)}が定量的な表現をしている指標のひとつである。

そこで本章では、睡眠時の温冷感研究の出発点として、非定常状態に対応しかつ皮膚温度について

は全身の平均皮膚温度を説明変数の一つとして用いている森らの覚醒時の温冷感予測指標⁵⁻⁴⁾を睡眠時に適用して、温冷感を評価する。

なお、後節で詳述するように、この指標を用いて睡眠時の温冷感を説明しようとする、快適域を中立より高めであると仮定する必要が生じる。そこで第6章では、全身の平均皮膚温度を局所の皮膚温度に変更することにより、覚醒時・睡眠時とも利用できる温冷感予測指標の再構築を試みる。

5.3.2. 温冷感予測指標

本章で検討に用いる温冷感予測指標⁵⁻⁴⁾は、式[5-1]で示される。

$$I = A \cdot Q_{sk} + B \cdot T_{sk} + C \cdot \frac{dT_{sk}}{dt} + D \cdot T_{cr} + E \cdot \frac{dT_{cr}}{dt} + F \quad [5-1]$$

記号

A	: 回帰係数	$[\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}]$
B	: 回帰係数	$[\text{°C}^{-1}]$
C	: 回帰係数	$[\text{s} \cdot \text{°C}^{-1}]$
D	: 回帰係数	$[\text{°C}^{-1}]$
E	: 回帰係数	$[\text{s} \cdot \text{°C}^{-1}]$
F	: 回帰係数	[n.d.]
I	: 温冷感予測値	[n.d.]
Q_{sk}	: 皮膚表面熱流	$[\text{W}/\text{m}^2]$
t	: 時間	[s]
T_{cr}	: 深部温度	$[\text{°C}]$
T_{sk}	: 平均皮膚温度	$[\text{°C}]$

式[5-1]では、非定常状態における温冷感予測値 I が、皮膚表面熱流(Q_{sk})、平均皮膚温度(T_{sk})、深部温度(T_{cr})、および平均皮膚温度と深部温度の時間変化率で説明されている。これは非定常時の温冷感が皮膚及び深部での温度受容に関係する生理量によって説明できるという仮定に基づいている。回帰係数 A , B , C , D , E は各項の影響度(重み)である。各係数は、被験者を椅座安静で温湿度がステップ変化する環境に曝露した実験において得られた温冷感申告と生理量の測定値から、重回帰分析により決定された。ただし、これらの値は、皮膚表面熱流値により区分して求められた(表5-1)。本研究における睡眠時の皮膚表面熱流(Q_{sk})が、概ね $29[\text{W}/\text{m}^2]$ から $58[\text{W}/\text{m}^2]$ の間を変動していたため、本章での検討においては、皮膚表面熱流 $29 \leq Q_{sk} < 58[\text{W}/\text{m}^2]$ の場合の回帰係数を用いる。

温冷感予測値 I に用いられる温冷感スケールを図5-2に示す。温冷感予測値 I の正の値は暑い・暖かい感覚に、負の値は寒い・涼しい感覚に、0は暑さも寒さも感じない中立の感覚に相当する。

表 5-1 説明変数の回帰係数

皮膚表面熱流 [W/m ²]	A	B	C	D	E	F
$Q_{sk} < 29$	0.002	0.513	0.053	0.376	0.048	-29.290
$29 \leq Q_{sk} < 58$	-0.023	0.919	0.103	0.131	0.016	-34.000
$58 \leq Q_{sk} < 87$	0.007	0.678	1.662	-0.281	-0.005	-12.810
$87 \leq Q_{sk}$	-0.010	-0.302	0.486	-0.139	-1.612	15.150

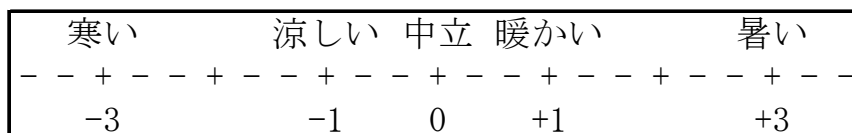


図 5-2 温冷感スケール

5.3.3. 温冷感予測値の計算

温冷感予測値 I は皮膚表面熱流 (Q_{sk}) と平均皮膚温度 (T_{sk}), 深部温度 (T_{cr}) および平均皮膚温度と深部温度の時間変化率で表現されている。

平均皮膚温度 (T_{sk}) は, 前額, 腹, 背中, 手背, 腕, 足背, 下腿, 大腿の温度の測定値を用いて, Hardy-Dubois の 7 点法を参考に決定した体表面積比率 (表 5-2) を重みとして算定した。深部温度 (T_{cr}) には, 直腸温度と鼓膜温度の測定値の単純平均値を用いた。

皮膚表面熱流 (Q_{sk}) は, 人体の皮膚層を上下に分割し, さらに上側を着衣がある被覆部と着衣がない露出部に 2 分割し, また下側は着衣がある被覆部としたモデル (図 5-3) を用いて計算する^{5-5,5-6}。式 [5-2] に示すよう, 皮膚層各部位における熱流を計算し, 体表面積比率を重みとして算定したものを皮膚表面熱流とする。

$$Q_{sk} = Sr_{clu} Q_{clu} + Sr_{nau} Q_{nau} + Sr_{cll} Q_{cll} \quad [5-2]$$

なお, 皮膚層の各部位における熱流は, 式[5-3]~式[5-5]で与えられるとした。

上側被覆部

$$Q_{clu} = K_{clu} (T_{clu} - T_a) + HK'_{clu} w_{clu} (X_{clu} - X_a) \quad [5-3]$$

上側露出部

$$Q_{nau} = \alpha_{nau} (T_{nau} - T_a) + H\alpha'_{nau} w_{nau} (X_{nau} - X_a) \quad [5-4]$$

下側被覆部

$$Q_{cll} = K_{cll} (T_{cll} - T_{mui}) + HK'_{cll} w_{cll} (X_{cll} - X_{mui}) \quad [5-5]$$

記号

H	: 相変化熱 [J/kg]
K	: 熱貫流率 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$]
K'	: 湿気貫流率 [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}/(\text{kg}/\text{kg}')$]
Q	: 熱流 [W/m^2]
Sr	: 体表面積比率 [n.d.] (Surface ratio)
T	: 温度 [$^{\circ}\text{C}$]
w	: 濡れ面積比率 [n.d.]
X	: 絶対湿度 [kg/kg']
α	: 熱コンダクタンス [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$]
α'	: 湿気コンダクタンス [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}/(\text{kg}/\text{kg}')$]

添字

a	: 室内空気
cll	: 被覆部下側 (Clothed lower)
clu	: 被覆部上側 (Clothed upper)
mui	: 敷布団中間上側 (Mattress upper inner)
nau	: 露出部上側 (Naked upper)

皮膚表面熱流計算に用いる質点について、計算モデルの質点番号と測定値との対応を表 5-3 に示す。上側被覆部、上側露出部および下側被覆部の皮膚表面温度(T_{clu} , T_{nau} , T_{cli})には、腹、前額および背中 of 温度の測定値をそれぞれに対応させる。室内空気の温度と絶対湿度(T_a , X_a)には室中央床上 120cm 測定値を、敷布団中間上側の温湿度(T_{mui} , X_{mui})には敷布団中間上側の E 点の測定値を対応させる。測定箇所の詳細は 2.2.3 を参照。皮膚の絶対湿度(X_{clu} , X_{nau} , X_{cli})は、皮膚表面温度に対する飽和絶対湿度に濡れ面積比率(w)を乗じて求める。飽和絶対湿度は、第 3 章の式[3-29]~式[3-31]により計算する。

皮膚の上側被覆部および下側被覆部の熱貫流率(K_{clu} , K_{cli})と湿気貫流率(K'_{clu} , K'_{cli})ならびに上側露出部の熱コンダクタンス(α_{nau})と湿気コンダクタンス(α'_{nau})の計算においては、各質点間の熱コンダクタンス(表 5-4)、着衣、掛布団ならびに敷布団の物性値等の諸数値(表 5-5)を用いた。表 5-4 の値は、既往研究⁵⁻⁷⁾の値もしくは皮膚表面と寝具表面における熱流の計測値に基づいて算出した。表 5-5 の値は、実測値もしくは測定値を再現するように決定したものである。また各質点間の湿気コンダクタンスは第 3 章の式[3-32]~式[3-34]に示すレイス数($Le=1$)より計算した。以上の条件より、熱貫流率(熱コンダクタンス)と湿気貫流率(湿気コンダクタンス)を求めた(表 5-6)。

濡れ面積比率(w)、体表面積比率(Sr)を表 5-7 に示す。これらの値は、測定値を再現するように決定したものである。その他の物性値を表 5-8 に示す。

表 5-2 平均皮膚温度の計算のための体表面積比率

部位	比率
前額	0.07
腹	0.175
背中	0.175
前腕	0.14
手背	0.05
大腿	0.19
下腿	0.13
足背	0.07
計	1

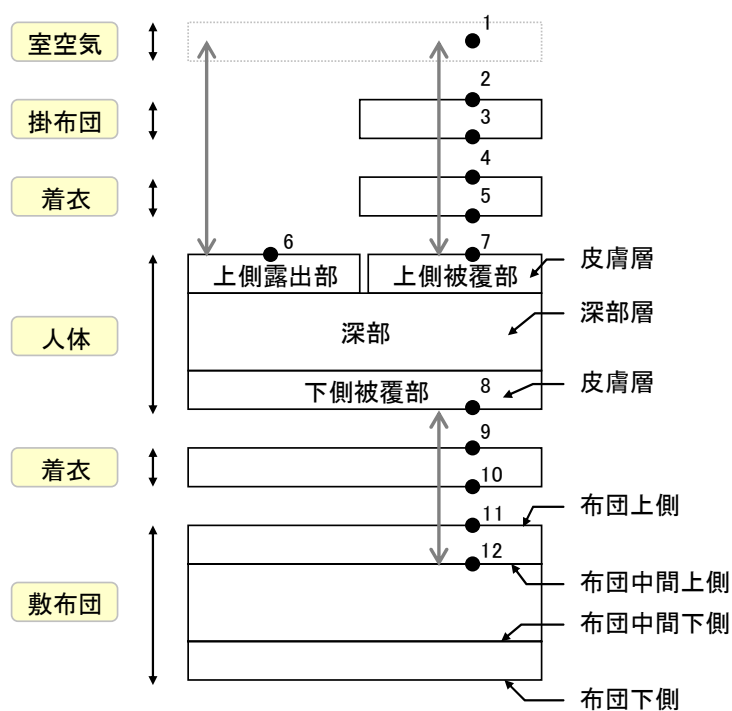


図 5-3 皮膚表面熱流計算モデル

(●は質点, 質点の右上の数字は質点番号を表わす.)

表 5-3 皮膚表面熱流計算に用いるモデルの質点番号と測定値の対応

	人体側		環境側	
	質点番号	測定箇所	質点番号	測定箇所
被覆部上側	7	腹	1	室中央部床上 120cm
露出部上側	6	前額		
被覆部下側	8	背中	12	布団中間上側 E点

表 5-4 各質点間の熱コンダクタンスならびに湿気コンダクタンス

計算対象	質点番号	放射熱伝達率 [W/m ² /K]	対流熱伝達率 [W/m ² /K]
皮膚層被覆部上側	1⇔2	4.65	5.23
	3⇔4	4.65	10.00
	5⇔7	4.65	10.00
皮膚層露出部上側	1⇔6	4.65	5.23
皮膚層被覆部下側	8⇔9	4.65	10.00
	10⇔11	4.65	10.00

表 5-5 着衣, 掛布団ならびに敷布団に関する諸数値

	熱伝導率[W/m/K]	湿気伝導率 [kg/m/s/(kg/kg')]	厚さ [m]
着衣	0.0556	0.000005	0.0005
掛布団	0.03	0.0067	0.003
敷布団	0.06	0.0025	0.004

表 5-6 皮膚層各部位の熱貫流率ならびに湿気貫流率

(ただし, 皮膚層露出部上側は, 熱コンダクタンスと湿気コンダクタンスである.)

	熱貫流率 [W/m ² /K]	湿気貫流率 [kg/m ² /s/(kg/kg')]
皮膚層被覆部上側	2.88	0.0016
皮膚層露出部上側	9.88	0.0052
皮膚層被覆部下側	4.71	0.0014

表 5-7 皮膚表面熱流計算のための諸数値

	濡れ面積比 w [n.d.]	体表面積比率 S_r [n.d.]
皮膚層被覆部上側	0.18	0.57
皮膚層露出部上側	0.18	0.08
皮膚層被覆部下側	0.18	0.35

表 5-8 物性値

水の密度	ρ_{water}	[kg/m ³]	1000
水の比熱	c_{water}	[J/kg/K]	4186
相変化熱	H	[J/kg]	2259600
標準大気圧		[Pa]	101325
空気の定圧比熱		[J/kg/K]	1004.64

5.4. エアコン制御の方法

5.4.1. 制御プログラム

温冷感予測値より、就寝者が暑い状態であると判定された場合は設定温度を下げ、寒い状態であると判定された場合は設定温度を上げることを基本方針とし、使用するエアコンの運転特性に合わせてチューニングを行い、以下のとおりの制御方式を決定した（図 5-4）。このエアコンでは、設定温度の最低値が 16°C、最高値は 31°C で、0.5°C 単位で設定が可能である。

皮膚温度（前額、腹、背中、前腕、手背、大腿、下腿、足背）、深部温度（鼓膜、直腸）、敷布団（中間上 E 点）および室内空気の温湿度を測定し、それらの値を用いて前節で述べた手順で現在時刻(n)における温冷感予測値($I_{(n)}$)を算出する。温冷感予測値($I_{(n)}$)が制御目標である快適域の範囲の上限値(I_{upper})よりも大きい場合($I_{(n)} > I_{upper}$)には就寝者が暑い状態であると判断し、次の時刻($n+1$)におけるエアコンの設定温度($T_{set(n+1)}$)を現在の設定温度($T_{set(n)}$)よりも低くする。設定温度の下げ幅は、現在の設定温度と現在の室内空気の温度($T_{a(n)}$)との差によって区分し、設定温度($T_{set(n)}$)が室内空気の温度($T_{a(n)}$)より 1°C 以上高ければ -1°C とし、そうでなければ -0.5°C とする。逆に、温冷感予測値($I_{(n)}$)が制御目標範囲の下限値(I_{lower})よりも低い場合($I_{(n)} < I_{lower}$)には就寝者が寒い状態であると判断し、次の時刻($n+1$)におけるエアコンの設定温度($T_{set(n+1)}$)を現在の設定温度($T_{set(n)}$)よりも高くする。設定温度の上げ幅についても下げるときと同様、現在の設定温度($T_{set(n)}$)と室内空気温度($T_{a(n)}$)との差によって区分し、設定温度が寝室温度より 3°C 以上低ければ +2°C とし、そうでなければ +0.5°C とする。温冷感予測値($I_{(n)}$)が快適域($I_{lower} \leq I_{(n)} \leq I_{upper}$)にある場合には、就寝者は熱的快適状態にあると判断し、エアコンの設定温度の変更は行わない（図 5-4, STEP 1）。

また、室内空気温度がエアコンの設定温度に達するまでの時間を考慮し、設定温度と室内空気温度との間に、極端な差が生じないようにした。具体的には、設定温度を下げる場合は、室内空気温度より 4°C 以上には低くならないよう、設定温度を上げる場合は、2°C 以上は高くならない範囲とした（図

5-4, STEP 2).

設定温度の範囲については、使用するエアコンが設定可能でなければならないので、設定温度の上限値（31℃）と下限値（16℃）を定めた（図 5-4, STEP 3）.

このようなエアコン設定温度の調整を 1 分毎に行うことにより、就寝者の温冷感を考慮した空調制御を試みた.

記号

- I_{lower} : 快適域の下限値(1.0) [n.d.]
- I_{upper} : 快適域の上限値(1.3) [n.d.]
- T_a : 室内空気温度 [°C]
- T_{set} : エアコンの設定温度 [°C]

添字

n : 時刻 [分]

	$I_{(n)} < I_{lower}$	$I_{lower} \leq I_{(n)} \leq I_{upper}$	$I_{upper} < I_{(n)}$
STEP 1	$-3 < T_{set(n)} - T_{a(n)}$ $T_{set(n)} - T_{a(n)} \leq -3$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} = T_{set(n)} + 0.5$ $T_{set(n+1)} = T_{set(n)} + 2$	$T_{set(n+1)} = T_{set(n)}$	$1 \leq T_{set(n)} - T_{a(n)}$ $T_{set(n)} - T_{a(n)} < 1$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} = T_{set(n)} - 1$ $T_{set(n+1)} = T_{set(n)} - 0.5$
STEP 2	$2 < T_{set(n+1)} - T_{a(n)}$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} \text{ は } 2^\circ\text{C} \text{ 以上高くない温度に設定}$	$-4 \leq T_{set(n+1)} - T_{a(n)}$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} \text{ は } 4^\circ\text{C} \text{ 以上低くない温度に設定}$	
STEP 3	$T_{set(n+1)} > 31$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} = 31$		$T_{set(n+1)} < 16$ <div style="text-align: center;">⇓</div> $T_{set(n+1)} = 16$

図 5-4 エアコンの設定温度の制御方式

5.4.2. 制御条件

(1) 快適域

覚醒時の熱的快適条件は、図 5-2 の温冷感スケールの中立近傍の帯域（たとえば、 -0.5 から $+0.5$ の間など）を設定することが適切である。しかしながら、予備的な検討⁵⁻⁸⁾において、温冷感予測値 I が 0 となることをエアコンの制御目標として実験を行ったところ、就寝後 1 時間程度で、設定温度が下限値を取る時間が継続した。これは、第 4 章で述べたように、寝姿勢では放熱しにくくなるために

全身の平均皮膚温度が上昇し、温冷感予測値 I が上昇することから、就寝者が暑さを感じていると判定し、エアコンの設定温度を低くしたためである。

本章では、制御システムのエアコンの設定温度が低くなりすぎないように、睡眠時の熱的快適条件は覚醒時の中立ではなく、より暖かいときであると仮定して検討した。具体的には、睡眠時においては、温冷感予測値の快適域が $1.0 \leq I \leq 1.3$ であると仮定し、この範囲を制御目標として実験を行った。

(2) エアコンの設定温度

エアコンの設定温度の決定においては、前節で示したように室内温度との比較が必要であるが、これには室中央部の床から 120cm の測定値を対応させる。エアコンの初期設定温度は 27.5°C とした。

5.5. 温冷感制御実験の結果と考察

2004 年の夏に行った 4 回の睡眠実験では、室内温度は前節で提案した空調制御システムにより制御されていたが、本章では実験 04-2 を検討の対象とする。実験の概要は第 2 章を参照。

5.5.1. 温冷感予測値の経時変化

温冷感予測値 I の経時変化を図 5-5 に示す。横軸は時間であり、時刻 0 は消灯時刻を示す。快適域の上限値(I_{upper})の 1.3、下限値(I_{lower})の 1.0 についても表示している。温冷感予測値 I は、消灯後は快適域よりも高い値を示していることから、被験者の状態は暑いと判断される。睡眠の経過とともに温冷感予測値 I は徐々に低下し、ほぼ 60 分以降に快適域の値となる時間帯が生じるようになる。その後は上昇と下降を繰り返しながら、次第に快適域に収束する。

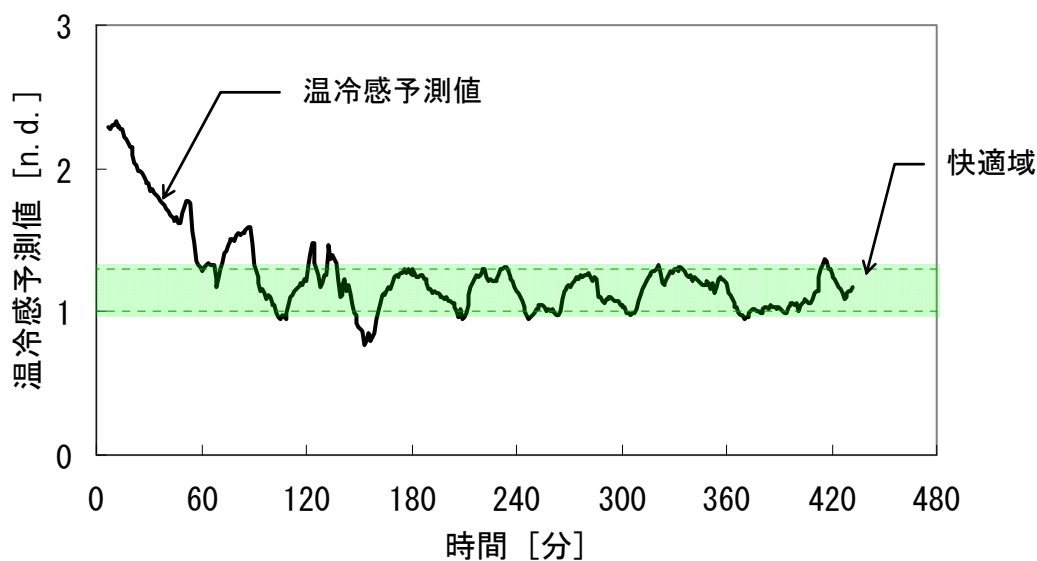


図 5-5 温冷感予測値

5.5.2. エアコンの設定温度と室温

エアコンの設定温度と室温の経時変化を図 5-6 に示す。設定温度はやや低めではあるが、予備検討のように最低値を維持することはなかった。室内空気温度は、設定温度よりやや低めであるが、エアコンの設定温度に連動して変動していた。

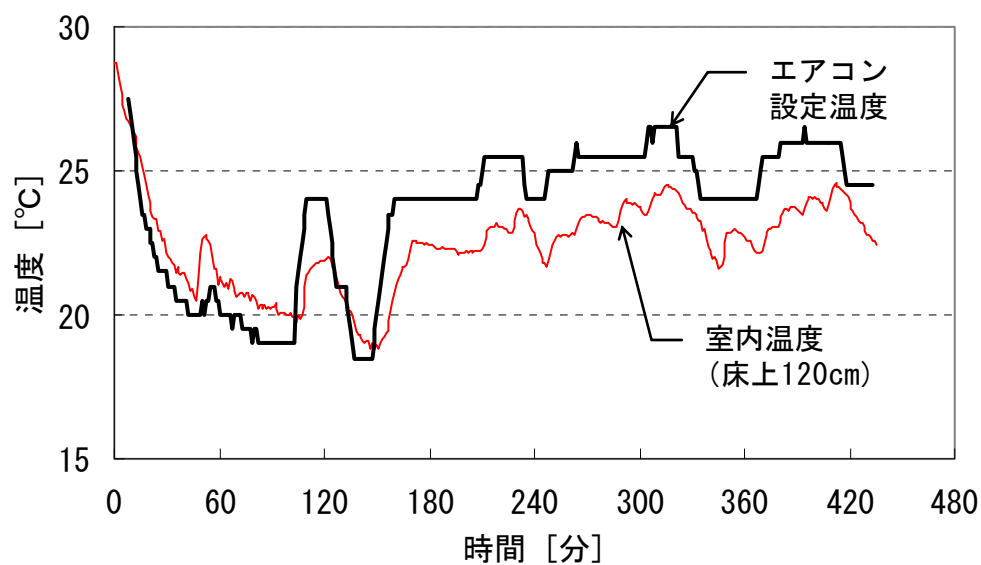


図 5-6 エアコンの設定温度と室内空気温度

5.5.3. 皮膚温度および深部温度と温冷感予測値

温冷感予測値 I と被験者の皮膚温度および深部温度の経時変化を図 5-7 に示す。温冷感予測値と皮膚温度は、いずれも消灯後に低下し、睡眠時間の経過とともに上昇と下降を繰り返しており、両者の間には高い相関がある。また、深部温度については、温冷感予測値と平均的な変化の傾向が同じであり、やや相関があるといえる。

この理由については、温冷感予測値 I は式[5-1]で表されるが、本章で用いた皮膚表面熱流が $29 \leq Q_{sk} < 58$ [W/m²] の場合においては、皮膚温度の回帰係数 B の値が 0.919 と他の回帰係数と比較して顕著に大きく、次いで深部温度の回帰係数 D の値 0.131 であるためと考えられる。

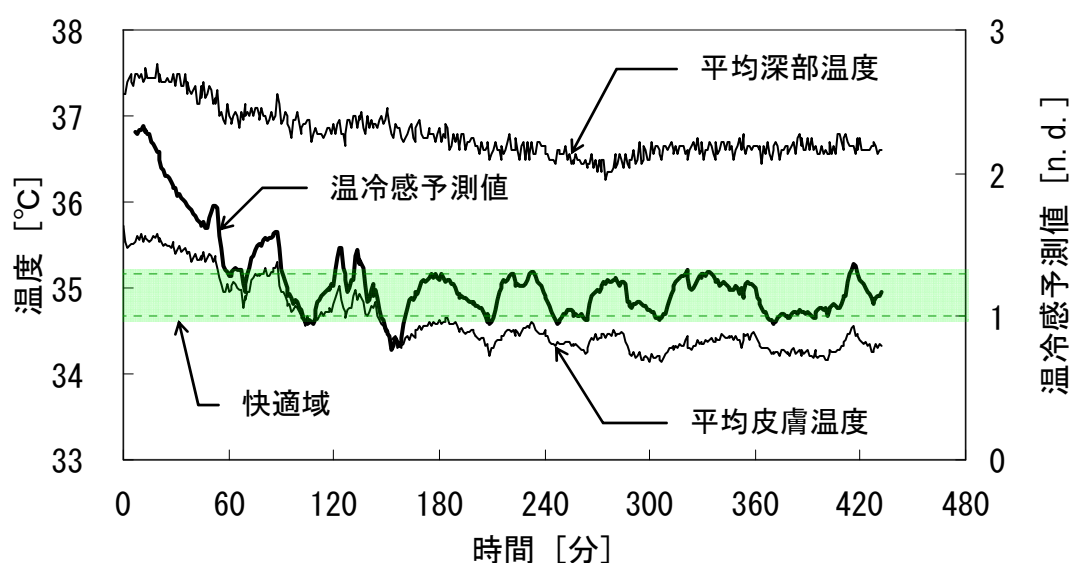


図 5-7 人体温度と温冷感予測値

5.5.4. 皮膚表面熱流と温冷感予測値

温冷感予測値 I と被験者の皮膚表面熱流の経時変化を図 5-8 に示す。温冷感予測値 I が上昇するときは、皮膚表面熱流が低下し、逆に温冷感予測値 I が低下するときは、皮膚表面熱流が上昇するという、大略逆の方向に変化しており、負の相関がある。

この理由は、皮膚表面熱流の回帰係数 A の値は -0.023 と大きくはないが負の値であること、また皮膚表面熱流の値が $45 \sim 68 [\text{W}/\text{m}^2]$ と比較的大きいためと考えられる。

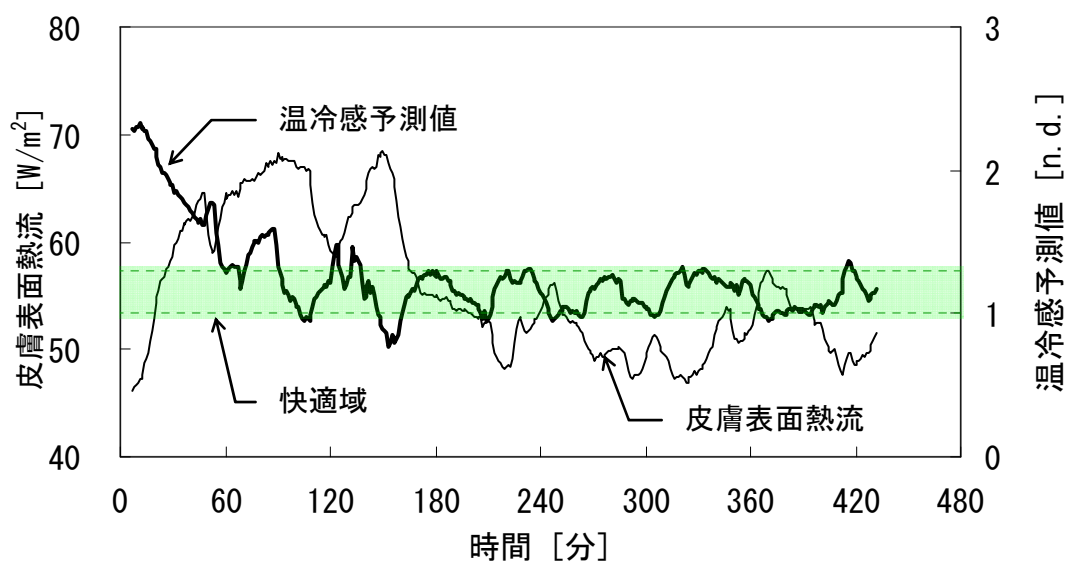


図 5-8 皮膚表面熱流と温冷感予測値

5.5.5. 睡眠段階と温冷感予測値

温冷感予測値 I と睡眠段階を図 5-9 に示す。睡眠段階の判定方法については 2.3.8 を参照。

温冷感予測値 I と睡眠段階との間に明確な相関はみられない。ただし、被験者の中途覚醒を確認した 116 分～145 分の時間帯の前後に着目すると、温冷感予測値 I は 103 分に快適域をはずれ低い値を示し、その後 116 分に中途覚醒している。これは、温冷感予測値 I が快適域の下限より低くなって寒さを感じ、中途覚醒が生じたと理解することができる。また温冷感予測値 I が安定した値を推移する 165 分以降では、中途覚醒は起こっていない。以上より、定性的な確認の範囲では、温冷感予測値と睡眠の快適感との間には正の相関があるといえる。

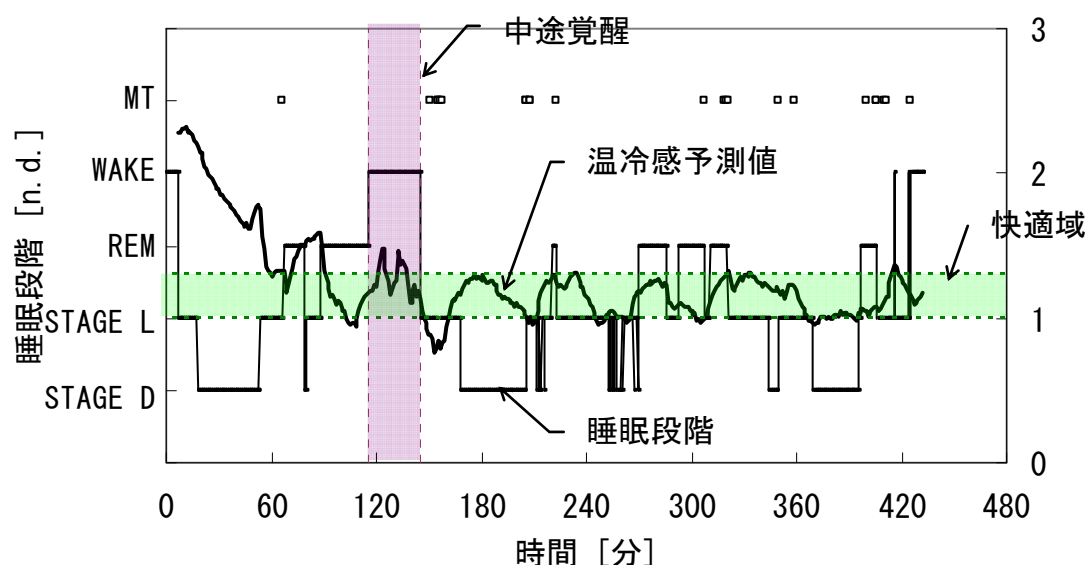


図 5-9 睡眠段階と温冷感予測値

5.6. 第 5 章のまとめ

本章では、室内温湿度、寝具温湿度および人体各部温度の測定値を用いて、睡眠中の被験者の温冷感を予測し、その結果を空調機の設定温度にフィードバックするシステムを提案した。

温冷感予測値 I が安定した値を推移するときは、中途覚醒が起こらなかった。これは温冷感予測値と睡眠の快適感との間に正の相関があることを示しており、睡眠時の快適な温熱環境を形成する手法として、温冷感予測指標による温熱環境制御システムが有効であるといえる。

ただし、温冷感予測値の快適域を中立より高め($1.0 \leq I \leq 1.3$)として評価を行っており、睡眠時と覚醒時には温冷感のずれがある。睡眠時には寝具との関係で皮膚温度の非一様性が大きく、局所の温熱刺激が温冷感に大きく影響していた可能性がある。そこで第 6 章では、温冷感予測指標の説明変数のひとつである全身の平均皮膚温度を局所における皮膚温度に変更し、覚醒時・睡眠時のいずれの状況においても利用できるような指標の再構築を試みる。

記号

A	: 回帰係数 [$m^2 \cdot W^{-1}$]
B	: 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]
C	: 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]
D	: 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]
E	: 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]
F	: 回帰係数 [n.d.]
H	: 相変化熱 [J/kg]
I	: 温冷感予測値 [n.d.]
I_{lower}	: 快適域の下限値(1.0) [n.d.]
I_{upper}	: 快適域の上限値(1.3) [n.d.]
K	: 熱貫流率 [$W/m^2/K$]
K'	: 湿気貫流率 [$kg/m^2/s/(kg/kg')$]
Q	: 熱流 [W/m^2]
Q_{sk}	: 皮膚表面熱流 [W/m^2]
Sr	: 体表面積比率 [n.d.] (Surface ratio)
T	: 温度 [$^{\circ}C$]
t	: 時間 [s]
T_a	: 室内空気温度 [$^{\circ}C$]
T_{set}	: エアコンの設定温度 [$^{\circ}C$]
T_{sk}	: 平均皮膚温度 [$^{\circ}C$]
T_{cr}	: 深部温度 [$^{\circ}C$]
w	: 濡れ面積比率 [n.d.]
X	: 絶対湿度 [kg/kg']
α	: 熱コンダクタンス [$W/m^2/K$]
α'	: 湿気コンダクタンス [$kg/m^2/s/(kg/kg')$]

添字

a	: 室内空気
cll	: 被覆部下側 (Clothed lower)
clu	: 被覆部上側 (Clothed upper)
mui	: 敷布団中間上側 (Mattress upper inner)
n	: 時刻 [分]
nau	: 露出部上側 (Naked upper)

第5章の引用文献

- 5-1) 中村真由美, 依田珠江, 齋藤泰世, 彼末一之: 温度感覚, 温熱的快・不快感の部位特異性, 日本生気象学会雑誌, 44(3), p.66, 2007.
- 5-2) 中山昭雄編: 温熱生理学, p.566, 理工学社, 1981.
- 5-3) 森郁恵, 鉾井修一, 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, 2001年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.1385-1388, 2001.
- 5-4) 森郁恵, 鉾井修一, 高田暁, 田中宏明: 非定常状態における温冷感予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第563号, pp.9-15, 2003.1.
- 5-5) McCullough, E.A., Jones, B.W. and Tamura, T., A database for determining the evaporative resistance of clothing, ASHRAE Transactions, 95, 2, 1989.
- 5-6) Takada, S., Hokoi, S. and Nakazawa, K., Measurement of Moisture Conductivity of Clothing, Journal of the Human-Environment System, Vol.7, No.1, pp.29-34, 2004.2.
- 5-7) 河本奈都子, 鉾井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積 その2 夏期睡眠実験の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.221-222, 2003.
- 5-8) 石黒晃子, 鉾井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究(その1)夏期および冬期睡眠実験, 2004年度日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.549-550.

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

6.1. はじめに

第5章で述べたように、全身の平均皮膚温度を用いた覚醒時の温冷感予測指標⁶⁻¹⁾により睡眠時の温冷感評価を行う際には、快適域を中立より高めに設定する必要があった。睡眠時には寝具との関係で皮膚温度の非一様性が大きく、局所の温熱刺激が温冷感に大きく影響していた可能性がある。

第5章の温冷感予測指標では、温冷感は皮膚からの放熱とも関係していることを示しているが、通常放熱は主に末梢部である四肢で行われているため、覚醒時・睡眠時に係わらず、主に手足の温熱感覚が温冷感を決定している可能性がある。

そこで本章では、第5章の温冷感予測指標は、全身の平均皮膚温度を説明変数のひとつとしているが、それを四肢の末梢部に対応する前腕、手背、下腿、足背の4点の平均皮膚温度（以降、平均四肢部温度(4)と称する。）に変更し、この温冷感予測指標の睡眠時への拡張を、第3章の温熱生理モデルにより得られた計算値を用いて試みる。

6.2. 温冷感予測指標の再構築

6.2.1. 再構築の方法

第5章に示したように、覚醒時の温冷感予測指標は式[6-1]で表される。この指標の回帰係数は、4名の被験者（表6-1）による中立環境と高温または低温環境の間を移動する8回の実験（図6-1、表6-2）での温冷感申告値を用いて、重回帰分析により決定されている。ただし、これらは皮膚表面熱流値により区分されている。

$$I = A \cdot Q_{sk} + B \cdot T_{sk} + C \cdot \frac{dT_{sk}}{dt} + D \cdot T_{cr} + E \cdot \frac{dT_{cr}}{dt} + F \quad [6-1]$$

記号

A	: 回帰係数	$[m^2 \cdot W^{-1}]$
B	: 回帰係数	$[^{\circ}C^{-1}]$
C	: 回帰係数	$[s \cdot ^{\circ}C^{-1}]$
D	: 回帰係数	$[^{\circ}C^{-1}]$
E	: 回帰係数	$[s \cdot ^{\circ}C^{-1}]$
F	: 回帰係数	[n.d.]
I	: 温冷感予測値	[n.d.]
Q_{sk}	: 皮膚表面熱流	$[W/m^2]$
t	: 時間	[s]
T_{sk}	: 平均皮膚温度	$[^{\circ}C]$
T_{cr}	: 深部温度	$[^{\circ}C]$

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

表 6-1 被験者属性

被験者	身長[cm]	体重[kg]	体表面積 [m ³]*6-a	実験番号
S1	167	59	1.66	1
S2	178	59	1.73	2, 3, 4
S3	178	80	1.95	5, 6, 7
S4	171	68	1.78	8

*6-a 被験者の体表面積は、身長と体重より蔵澄ら⁶⁻²⁾の式を用いて求めた。

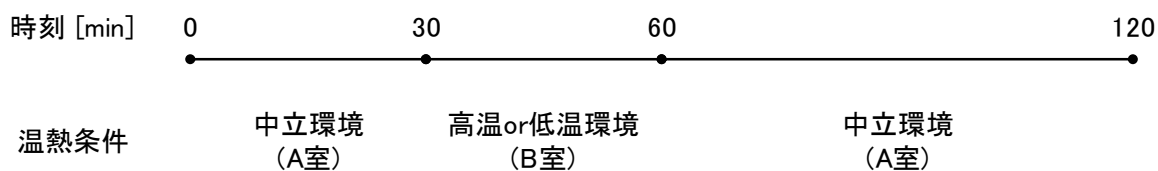


図 6-1 実験スケジュール

表 6-2 被験者実験の温熱環境条件

実験番号	制御目標値		実測値(室滞在中の平均値[標準偏差])	
			左：気温[°C], 右：相对湿度[%]	
	A 室	B 室	A 室(60～120 分)	B 室(30～60 分)
1	26°C	35°C 80%RH	26.8[0.22], 49.0[4.7]	36.2[0.26], 89.8[4.1]
2	40%RH		26.8[0.24], 44.9[3.4]	35.4[0.25], 83.1[5.5]
3	31°C 40%RH		31.4[0.17], 45.8[3.2]	35.8[0.17], 74.7[2.1]
4			31.1[0.11], 48.5[1.8]	35.2[0.16], 75.9[2.5]
5			31.1[0.15], 48.7[4.5]	35.3[0.15], 75.0[3.1]
6			30.7[0.13], 55.5[3.3]	35.0[0.07], 64.0[2.8]
7	22°C 60%RH		30.4[0.10], 41.3[1.1]	22.9[0.33], 59.6[3.6]
8			30.4[0.08], 45.9[2.1]	22.8[0.34], 60.8[4.0]

本節では、温冷感予測指標の再構築を行うため、前述の8回の実験の測定データを用いて、式[6-2]のように、平均皮膚温度(T_{sk})を平均四肢部温度(4) (T_{sk_ex})に変更して重回帰分析を行い、新たな回帰係数を決定する。なお、平均四肢部温度(4)の計算に用いる前腕、手背、下腿、足背の重み付けには、表 6-3 に示す Hardy-Dubois の7点法を参考に決定した体表面積比率を用いる。

$$I_{ex} = A_{ex} \cdot Q_{sk_ex} + B_{ex} \cdot T_{sk_ex} + C_{ex} \cdot \frac{dT_{sk_ex}}{dt} + D_{ex} \cdot T_{cr} + E_{ex} \cdot \frac{dT_{cr}}{dt} + F_{ex} \quad [6-2]$$

添字

ex : 平均四肢部温度(4)を用いて温冷感予測指標を計算した場合 (ex: extremities)

表 6-3 平均皮膚温度の計算のための体表面積比率

部位	比率
前額	0.07
腹	0.175
背中	0.175
前腕	0.14
手背	0.05
大腿	0.19
下腿	0.13
足背	0.07
計	1

6.2.2. 結果

平均四肢部温度(4)を用いた重回帰分析により求められた回帰係数を表 6-4 に示す。

温冷感申告値と説明変数の重相関係数(表 6-5)をみると、全身の平均皮膚温度を用いる場合よりはよくないが、高い相関がある。時系列の結果(図 6-2~図 6-9)をみると、両者の値は近似している。ただし、平均四肢部温度(4)を用いた場合は、実験 2、実験 3、実験 4 および実験 6 の A 室への入室により生じる温冷感の変化の再現がよくない。これは発汗の影響を表現できていないためと考えられる。また実験 6 では、B 室の再現がやや悪い。一方、温冷感がほぼ定常状態にある実験 5 の 80 分以降、実験 7 の 70 分頃、実験 8 の 50 分~60 分頃では、平均四肢部温度(4)を用いた場合のほうが、一致がよくなっている。このような結果は、平均四肢部温度(4)を用いた温冷感予測指標により温冷感申告値の変化が大略説明できることを示している。

したがって、平均四肢部温度(4)を用いた温冷感予測指標は覚醒時にも適用可能と言える。

表 6-4 説明変数の回帰係数(平均四肢部温度(4)の場合)

	A _{ex}	B _{ex}	C _{ex}	D _{ex}	E _{ex}	F _{ex}
$Q_{sk} < 29$	0.003	0.428	0.363	0.152	0.007	-18.103
$29 \leq Q_{sk} < 58$	-0.009	0.896	0.392	-0.062	-0.080	-26.609
$58 \leq Q_{sk} < 87$	0.039	0.617	2.263	-0.311	0.037	-11.617
$87 \leq Q_{sk}$	-0.013	-0.424	-0.024	-0.066	-1.511	16.616

表 6-5 温冷感申告値と説明変数の重相関係数

	平均四肢部温度(4)	平均皮膚温度
$Q_{sk} < 29$	0.802	0.824
$29 \leq Q_{sk} < 58$	0.938	0.953
$58 \leq Q_{sk} < 87$	0.713	0.799
$87 \leq Q_{sk}$	0.863	0.841

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

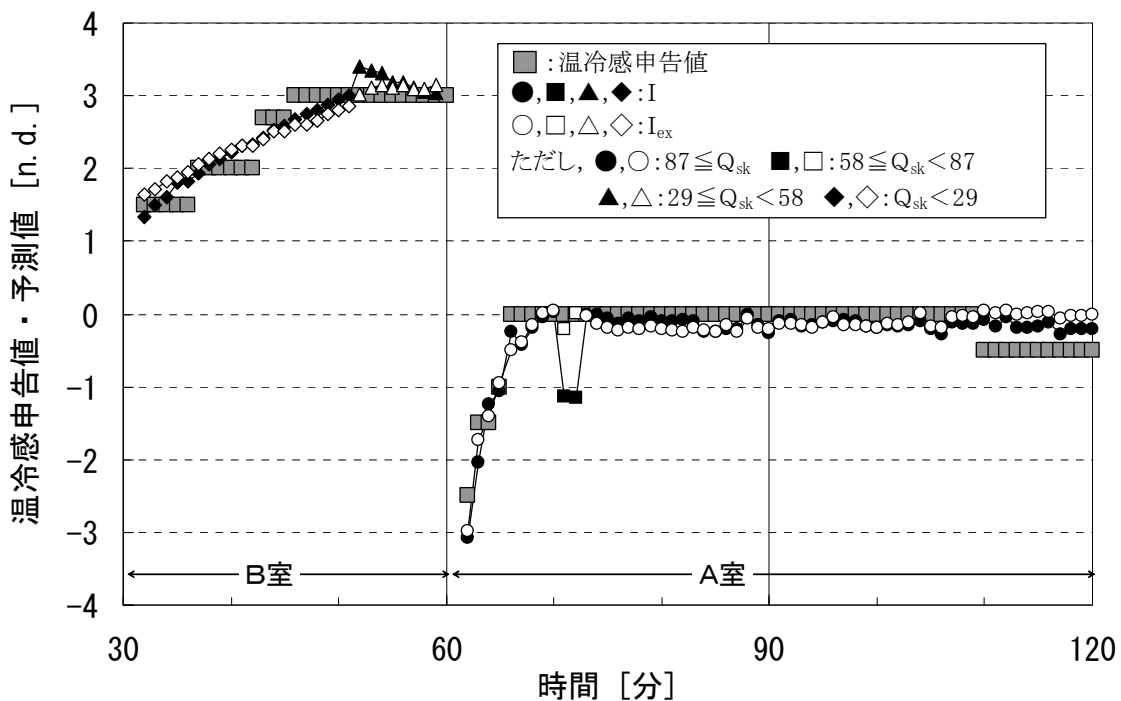


図 6-2 温冷感申告値と予測値(実験 1)

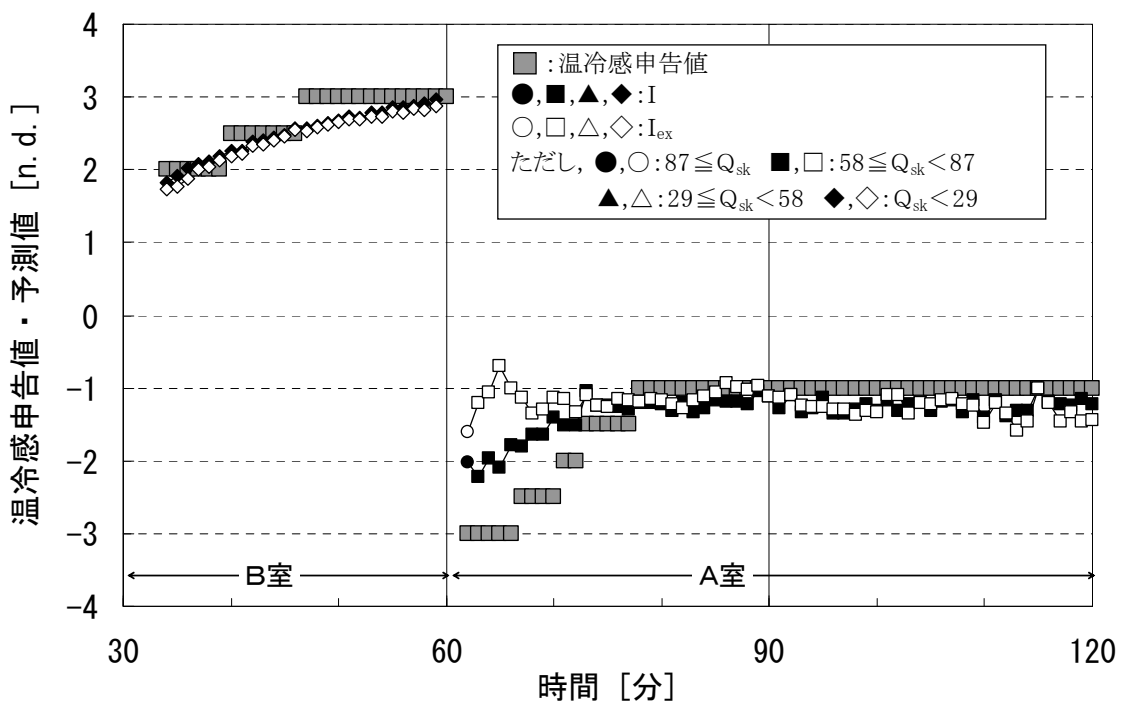


図 6-3 温冷感申告値と予測値(実験 2)

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

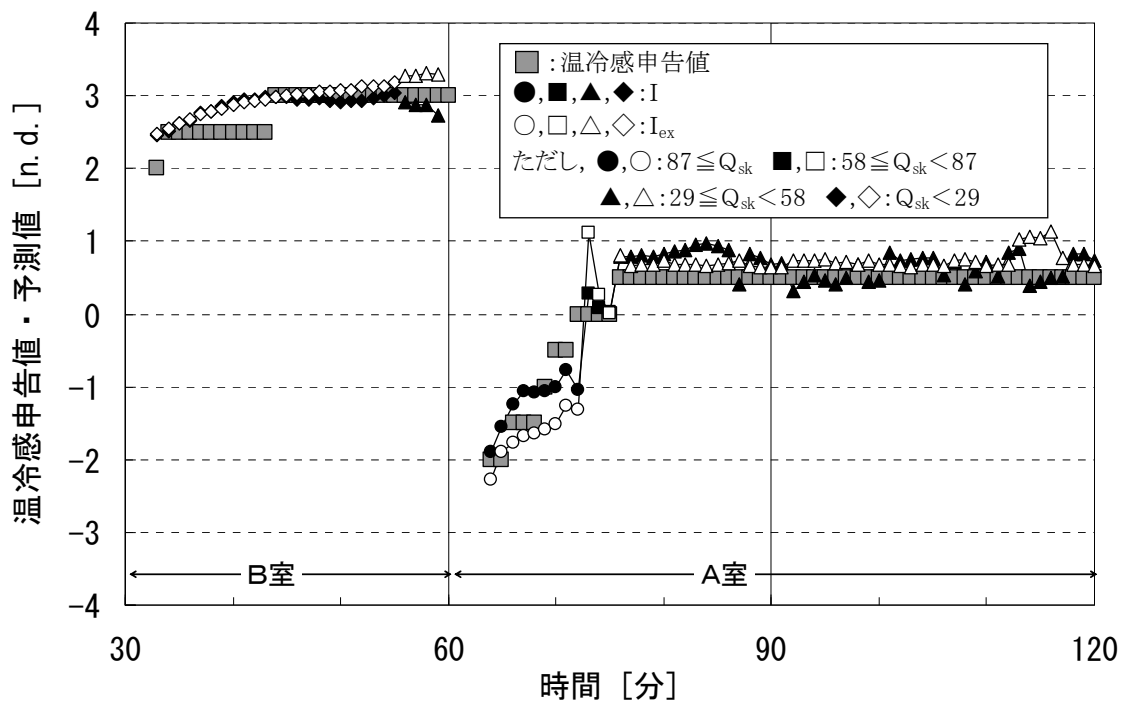


図 6-4 温冷感申告値と予測値(実験 3)

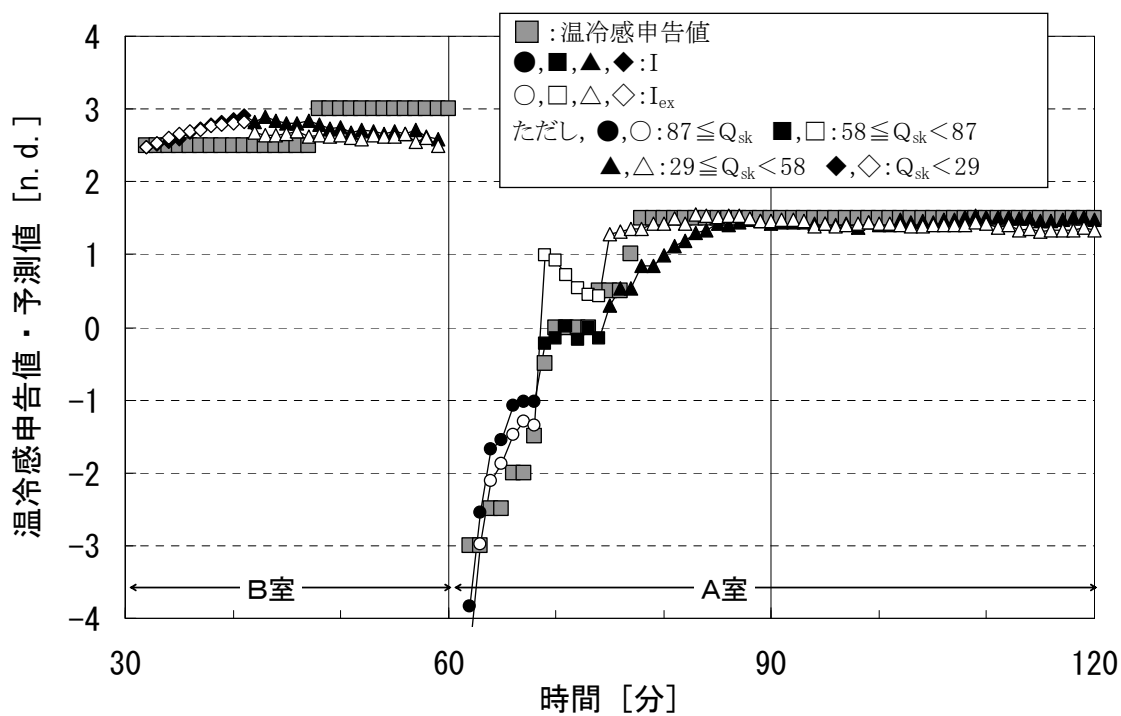


図 6-5 温冷感申告値と予測値(実験 4)

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

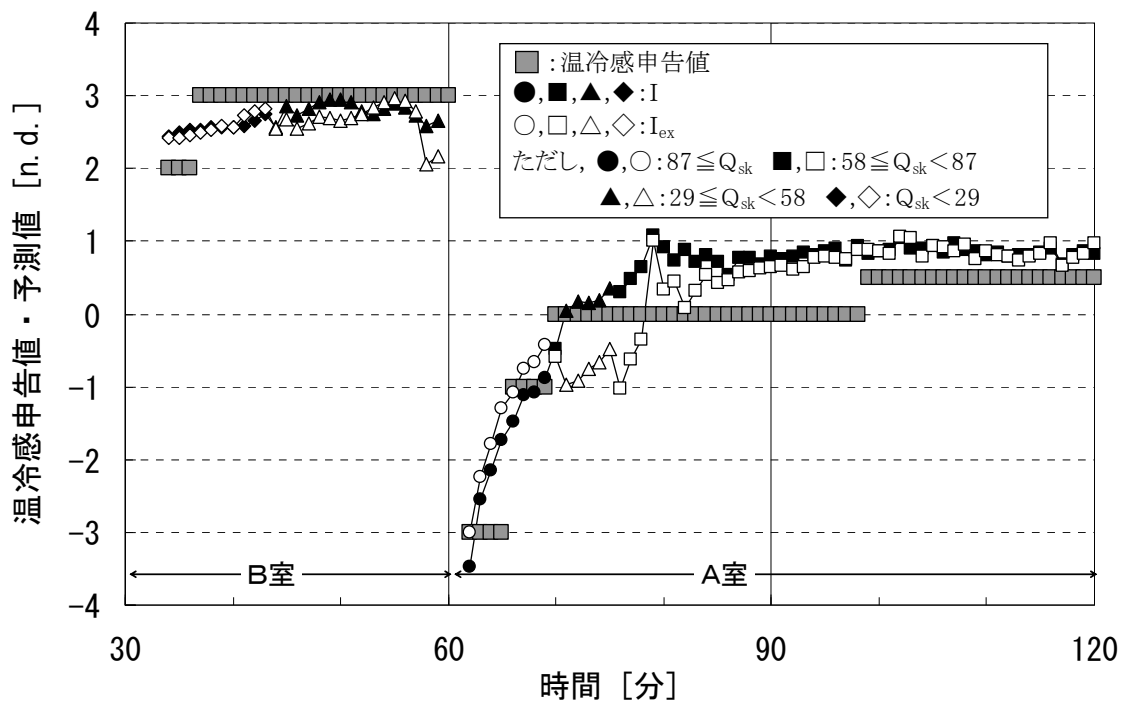


図 6-6 温冷感申告値と予測値(実験 5)

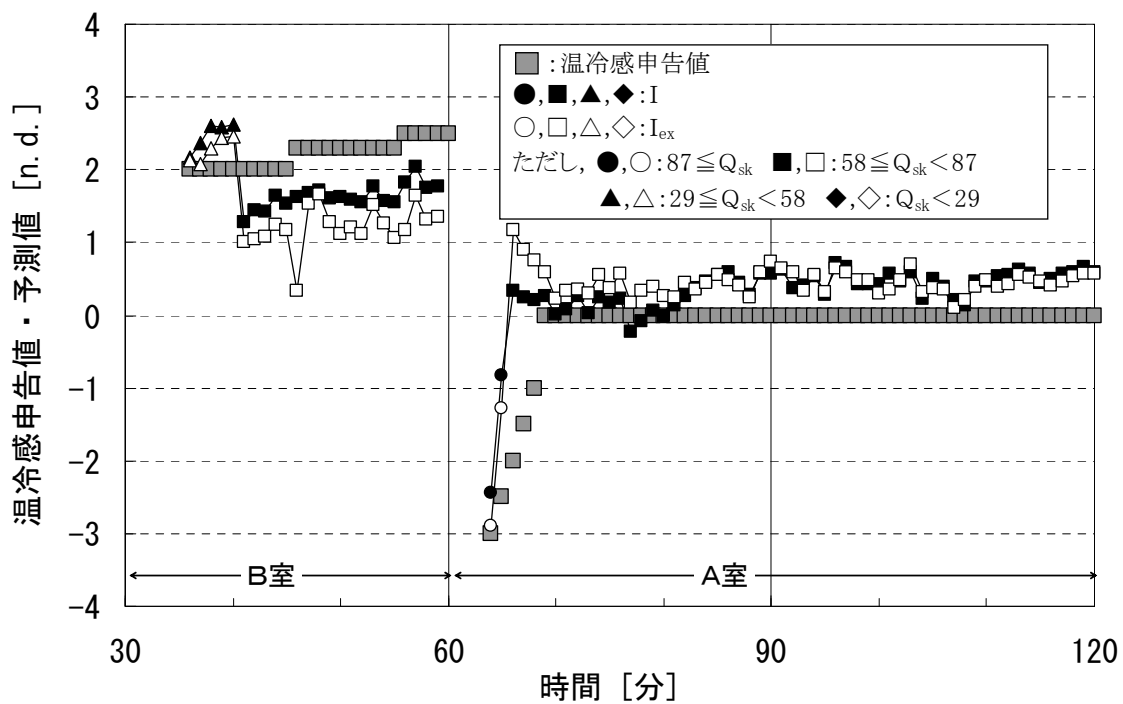


図 6-7 温冷感申告値と予測値(実験 6)

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

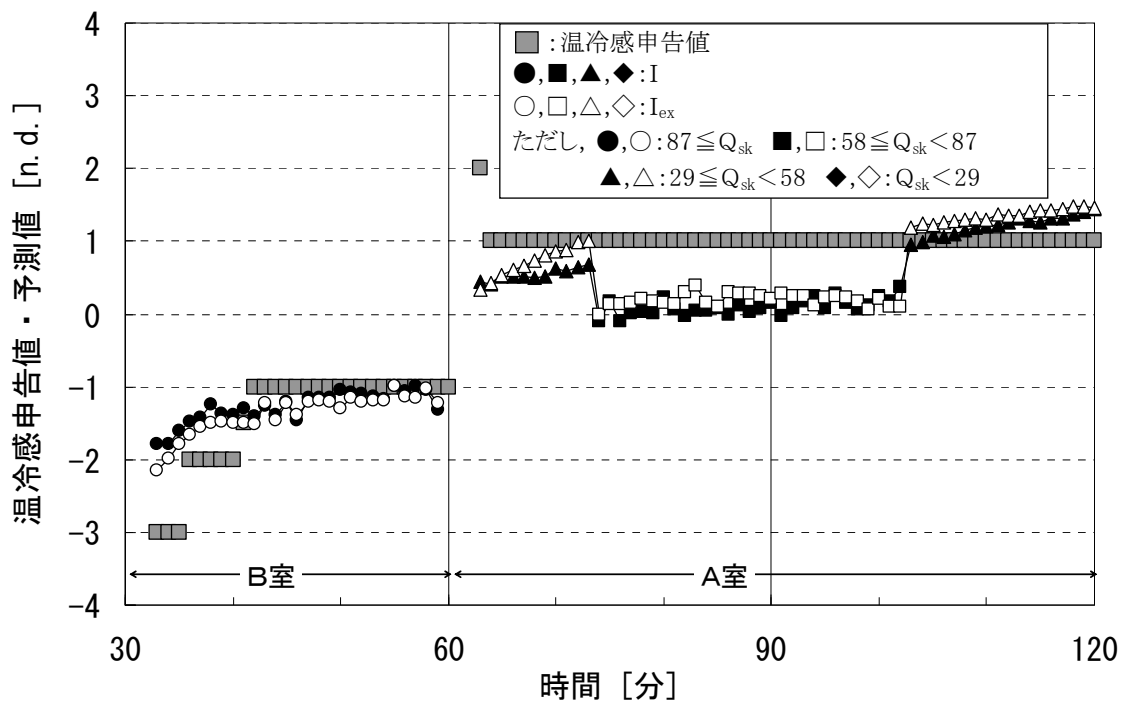


図 6-8 温冷感申告値と予測値(実験 7)

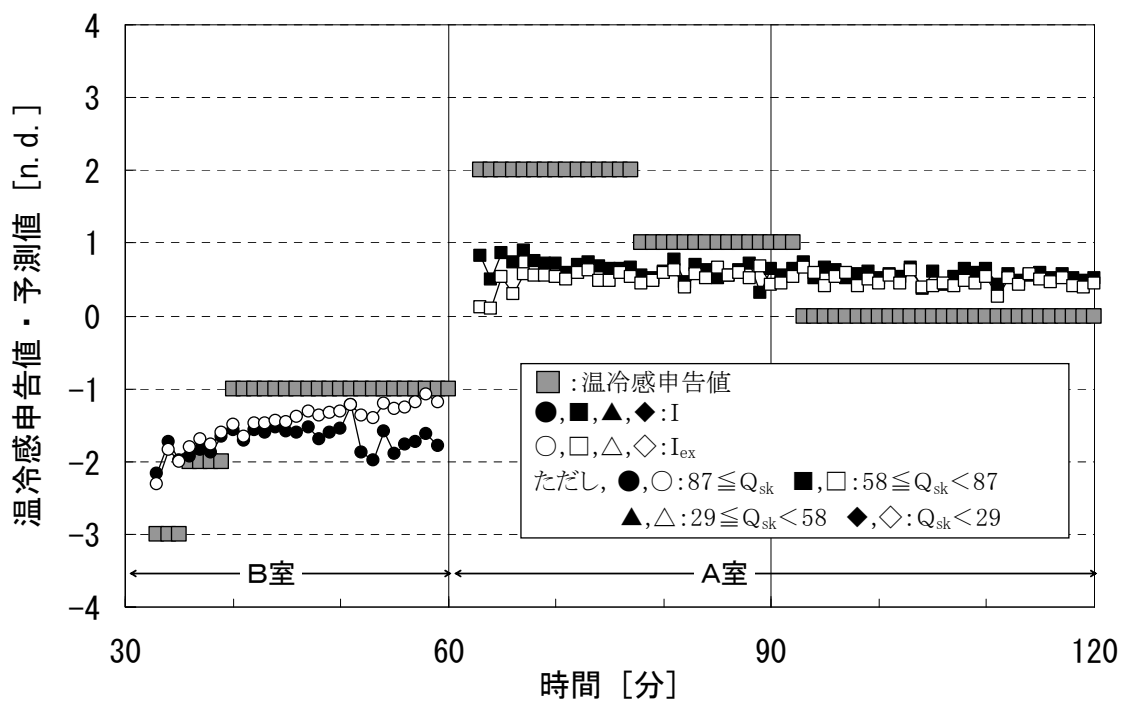


図 6-9 温冷感申告値と予測値(実験 8)

6.3. 睡眠時の温冷感予測値の再計算

本節では、平均四肢部温度(4)を用いた温冷感予測指標が睡眠時に適用できるかを検討する。一例として、温冷感予測値の計算に用いる生理量には、第3章で述べた睡眠時の温熱生理モデルにより実験 05-2～05-4 の人体周辺環境の温湿度を境界条件として計算した値を用いることとし、2種の温冷感予測指標による予測値を比較する。

6.3.1. 計算方法

温冷感予測指標は、皮膚表面熱流(Q_{sk})、平均皮膚温度(T_{sk})または平均四肢部温度(4)(T_{sk_ex})、深部温度(T_{cr})および平均皮膚温度と深部温度の時間変化率で表現されている。

平均皮膚温度(T_{sk})、平均四肢部温度(4)(T_{sk_ex})とも、第3章の睡眠時の温熱生理モデルの解析で用いた Stolwijk モデルの体表面積比率を重みとして求める(表 6-6)。深部温度(T_{cr})は、鼓膜温度と直腸温度の単純平均値を用いる。

表 6-6 平均皮膚温度および平均四肢部温度(4)の算定に用いた部位の体表面積比率

部位	平均皮膚温度に用いる部位 の体表面積比率	平均四肢部温度(4)に用いる 部位の体表面積比率
前額	0.090	----
腹	0.185	----
背中	0.185	----
前腕	0.151	0.354
手背	0.043	0.100
大腿	0.113	----
下腿	0.170	0.398
足背	0.063	0.148
計	1	1

皮膚表面熱流(Q_{sk})は、睡眠時の温熱生理モデル(図6-10)の各部位の皮膚表面における熱流を、体表面積比率により平均したものとする(式[6-3])。

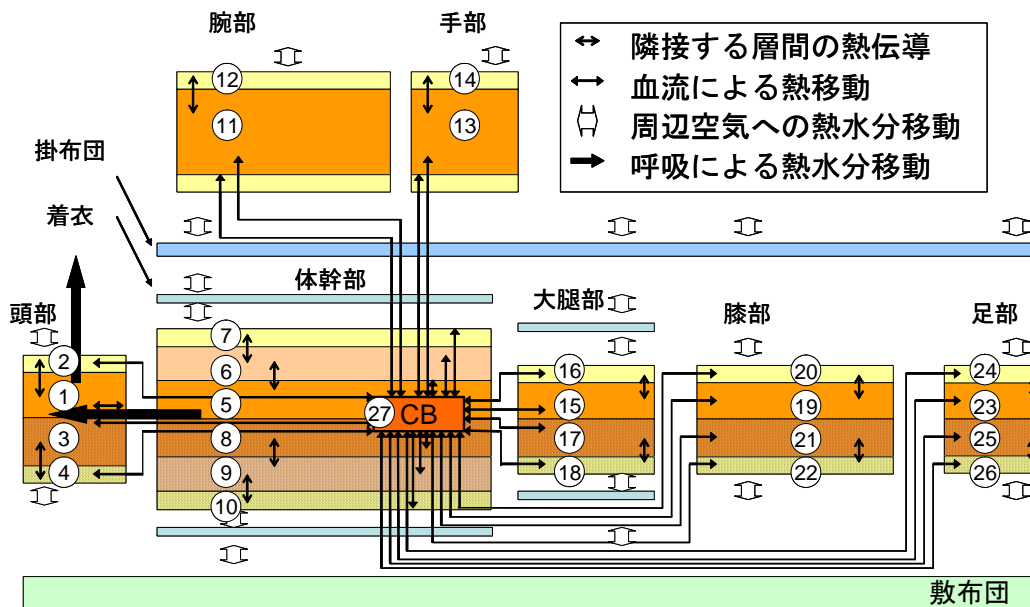


図 6-10 人体熱モデルの概念図(図中の○内の番号は、人体部位番号)

$$Q_{sk} = \sum_i Sr_i Q_i \quad [6-3]$$

ただし、 i は人体熱モデルの各部位の皮膚層($i = 2, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26$)

記号

Sr_i : 部位 i の人体における体表面積比率 [n.d.]

Q_i : 部位 i の皮膚表面熱流 [W/m^2]

なお、各部位における皮膚表面熱流は式[6-4]で表される。

$$Q_i = \alpha_{e,i}(T_i - T_e) + H\alpha'_{e,i}(X_i - X_e) \quad [6-4]$$

記号

H : 相変化熱 [J/kg]

T_e : 部位 i の表面と接する質点(人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気)の温度 [$^{\circ}C$]

T_i : 部位 i の表面の温度 [$^{\circ}C$]

X_e : 部位 i の表面と接する質点(人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気)の絶対湿度

[kg/kg³]

X_i : 部位 i の表面の絶対湿度 [kg/kg³]

$\alpha_{e,i}$: 部位 i の表面—表面と接する質点（人体側の着衣表面，掛布団表面または室空気）との間の熱コンダクタンス（対流+放射）[W/m²/K]

$\alpha'_{e,i}$: 部位 i の表面—表面と接する質点(人体側の着衣表面，掛布団表面または室空気)との間の湿気コンダクタンス [kg/m²/s/(kg/kg³)]

皮膚温度および絶対湿度の計算式は 3.2 を参照。

温冷感予測値の計算に用いる説明変数の回帰係数値を検討する。各実験の皮膚表面熱流の計算結果を図 6-11～図 6-13 に示す。概ね 29～58[W/m²]の範囲で変化している。そこで温冷感予測値の計算に用いる説明変数の回帰係数は $29 \leq Q_{sk} < 58$ [W/m²]の場合の値とする（表 6-7）。

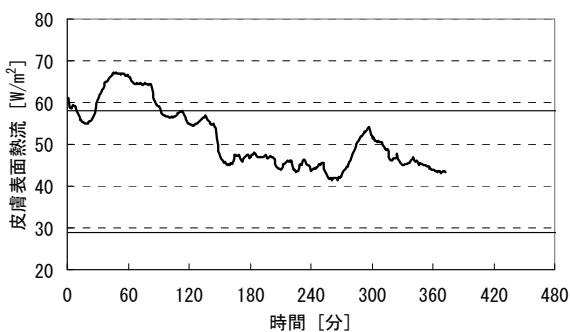


図 6-11 皮膚表面熱流 (05-2)

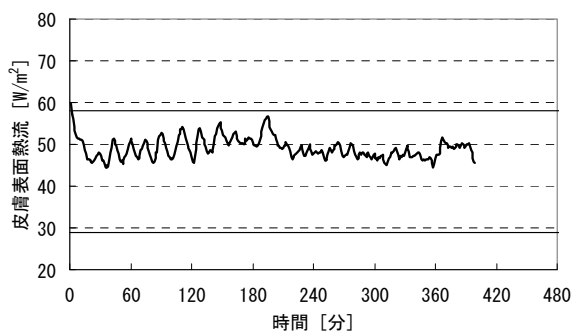


図 6-12 皮膚表面熱流 (05-3)

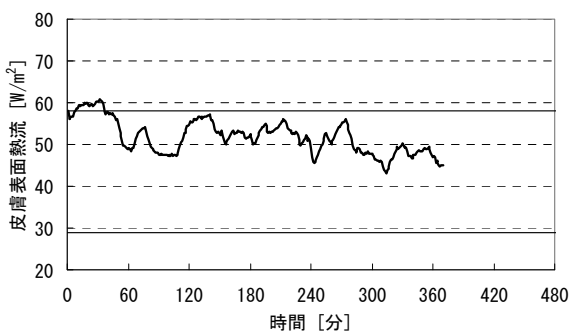


図 6-13 皮膚表面熱流 (05-4)

表 6-7 計算で用いる回帰係数 ($29 \leq Q_{sk} < 58$ の場合)

指標値	回帰係数					
	A or A_{ex}	B or B_{ex}	C or C_{ex}	D or D_{ex}	E or E_{ex}	F or F_{ex}
I	-0.023	0.919	0.103	0.131	0.016	-34.000
I_{ex}	-0.009	0.896	0.392	-0.062	-0.080	-26.609

6.3.2. 計算結果と考察

第3章で述べた睡眠時の温熱生理モデルにより、実験 05-2～05-4 の人体周辺環境の温湿度を境界条件として計算した値（皮膚温度および深部温度）を用いて計算した全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)と平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})の経時変化を図 6-14～図 6-16 に示す。いずれの結果においても、平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})の方が、全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)より小さくなり、中立の 0 の値に近づく時間帯が増加している。快適域を中立近傍である $-0.5 \sim 0.5$ の範囲と考えると、快適域を推移する時間帯が多くなっている（表 6-8）。

睡眠段階の経時変化（図 2-90～図 2-92）とは、あまり相関はみられなかった。睡眠変数（表 2-11）の結果は、いずれの実験とも睡眠効率がよくよい睡眠であることを示しているが、その中で比較すると実験 05-3 の睡眠効率がよくなかった。一方、快適域の温冷感予測値(I_{ex})の全睡眠時間に占める比率をみると、実験 05-3 が最も低かった。したがって、睡眠の快適感と温熱的快適感の傾向は一致しているといえる。

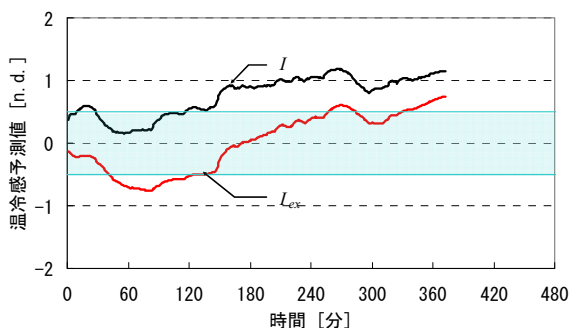


図 6-14 睡眠時の温冷感予測値 (05-2)

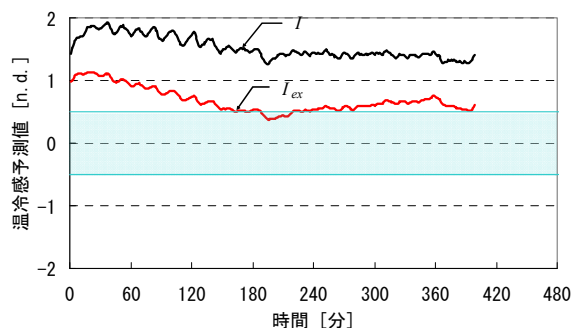


図 6-15 睡眠時の温冷感予測値 (05-3)

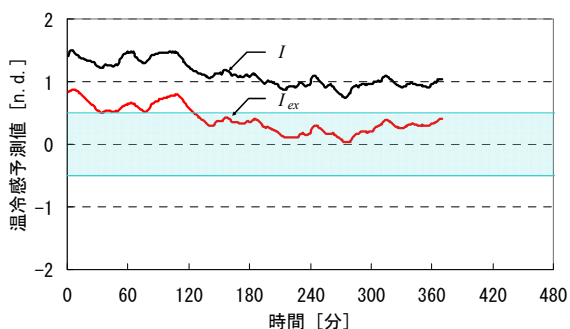


図 6-16 睡眠時の温冷感予測値 (05-4)

表 6-8 快適域(-0.5~0.5)の温冷感予測値の時間および全睡眠時間に占める比率

実験番号	I_{ex}		I	
	時間[分]	全睡眠時間に占める比率[%]	時間[分]	全睡眠時間に占める比率[%]
05-2	302	81.2	97	26.1
05-3	37	9.3	0	0
05-4	247	66.6	0	0

平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})の方が、全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)より小さくなった理由を、温冷感予測値の主な成分である皮膚表面熱流成分、皮膚温度成分、深部温度成分より検討する。

皮膚表面熱流成分(図 6-17~図 6-19)は、平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})の方がわずかに増加しているが、皮膚温度成分(図 6-20~図 6-22)、深部温度成分(図 6-23~図 6-25)は大きく減少しており、平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})を小さくしている。また、05-3 で平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})が中立近傍よりも大きかったのは、他の実験と比較して皮膚温度が高かったことが影響している。

以上より、全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)と比較すると、平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})を用いる方が睡眠感との一致がはるかに良く、睡眠時の温冷感の予測に適用可能と考えられる。

また、この平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})は、6.2 で示したように、覚醒時にも用いることができるため、指標として汎用性の高いものといえる。

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

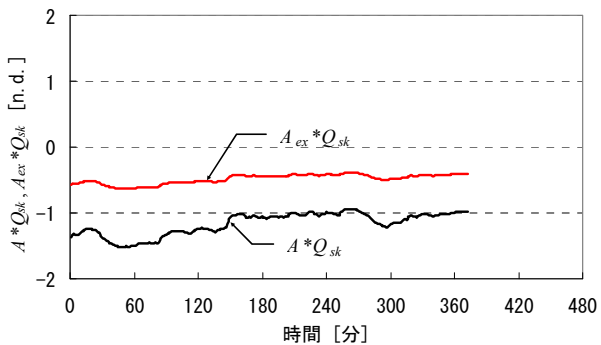


図 6-17 皮膚表面熱流成分 (05-2)

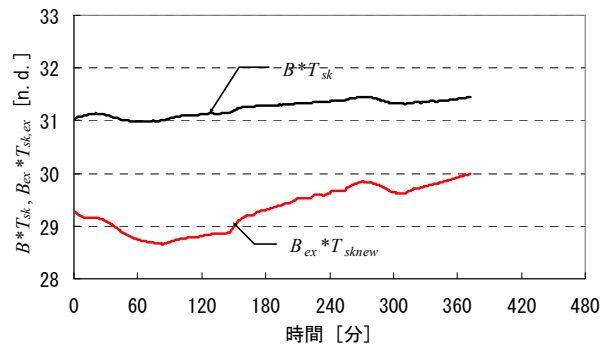


図 6-20 皮膚温度成分 (05-2)

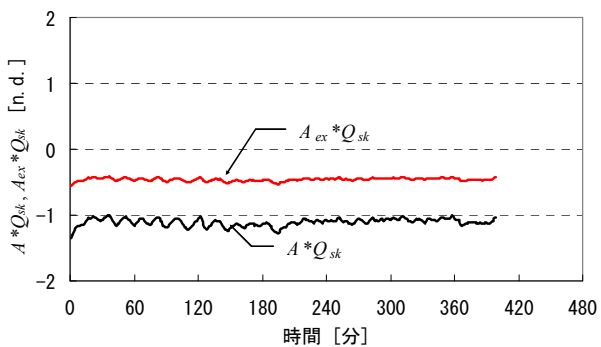


図 6-18 皮膚表面熱流成分 (05-3)

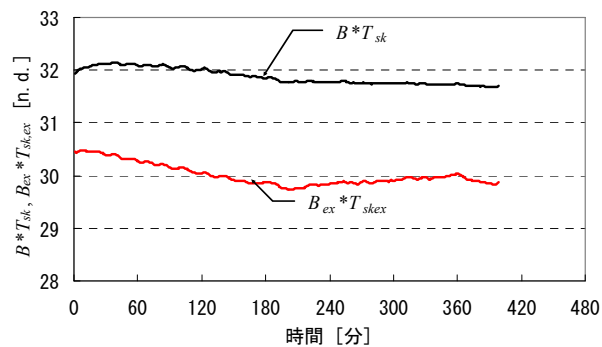


図 6-21 皮膚温度成分 (05-3)

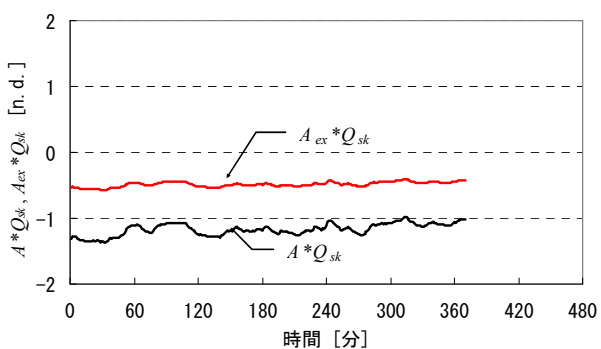


図 6-19 皮膚表面熱流成分 (05-4)

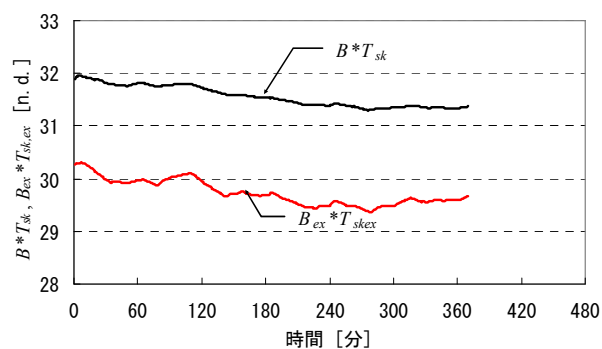


図 6-22 皮膚温度成分 (05-4)

6. 温冷感予測指標の睡眠時への拡張

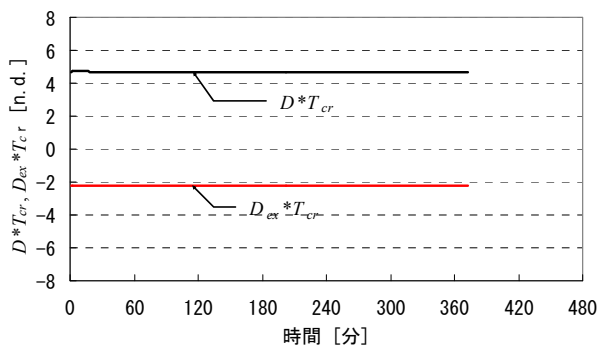


図 6-23 深部温度成分 (05-2)

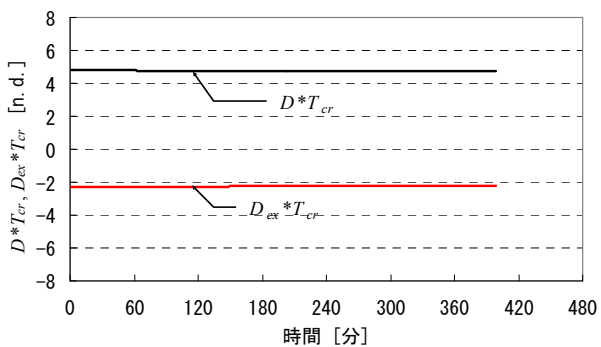


図 6-24 深部温度成分 (05-3)

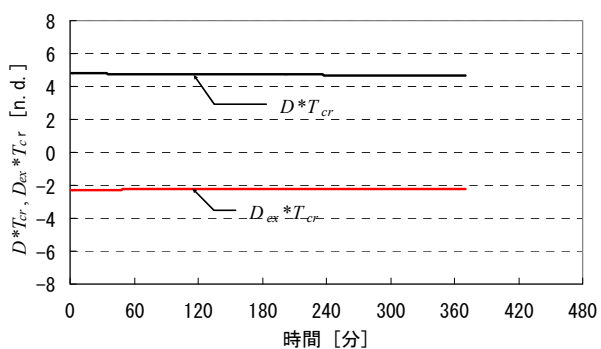


図 6-25 深部温度成分 (05-4)

6.4. 第6章のまとめ

本章では、四肢の末梢部に対応する前腕、手背、下腿、足背の4点の皮膚温度の体表面積比率の重みによる平均四肢部温度(4)を用いた温冷感予測指標(I_{ex})の提案を行い、この指標が覚醒時・睡眠時の区別なく適用できるかを検討した。

覚醒時においては、再構築した平均四肢部温度(4)を説明変数とする温冷感予測値(I_{ex})を用いても、全身の平均皮膚温度を用いた温冷感予測指標(I)とほぼ同程度に申告値を説明できることが明らかとなった。

睡眠時においては、再構築した平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})が、全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)と比較して、睡眠感との一致がはるかに良くなった。したがって睡眠時の温冷感の予測に適用できる指標といえる。同時に、覚醒時・睡眠時に係わらず、手足に対する温度刺激が温冷感に大きな影響を及ぼしていることを示しており、従来^{6-3, 6-4)}の知見と矛盾しない。また温冷感予測値(I_{ex})の計算には、第3章の温熱生理モデルにより得られた生理量を入力としており、モデルの有効性も確認した。

記号

A	: 回帰係数 [$m^2 \cdot W^{-1}$]
B	: 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]
C	: 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]
D	: 回帰係数 [$^{\circ}C^{-1}$]
E	: 回帰係数 [$s \cdot ^{\circ}C^{-1}$]
F	: 回帰係数 [n.d.]
H	: 相変化熱 [J/kg]
I	: 温冷感予測値 [n.d.]
Q_i	: 部位 i の皮膚表面熱流 [W/m^2]
Q_{sk}	: 皮膚表面熱流 [W/m^2]
Sr_i	: 部位 i の人体における体表面積比率 [n.d.]
t	: 時間 [s]
T_e	: 部位 i の表面と接する質点 (人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気) の温度 [$^{\circ}C$]
T_i	: 部位 i の表面の温度 [$^{\circ}C$]
T_{cr}	: 深部温度 [$^{\circ}C$]
T_{sk}	: 平均皮膚温度 [$^{\circ}C$]
X_e	: 部位 i の表面と接する質点 (人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気) の絶対湿度 [kg/kg°]
X_i	: 部位 i の表面の絶対湿度 [kg/kg°]
$\alpha_{e,i}$: 部位 i の表面—表面と接する質点 (人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気) との間の熱コンダクタンス (対流+放射) [$W/m^2/K$]
$\alpha'_{e,i}$: 部位 i の表面—表面と接する質点(人体側の着衣表面, 掛布団表面または室空気)との間の湿気コンダクタンス [$kg/m^2/s/(kg/kg^{\circ})$]

添字

ex : 平均四肢部温度(4)を用いて温冷感予測指標を計算した場合 (ex: extremities)

第6章の引用文献

- 6-1) 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予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第563号, pp.9-15, 2003.1.
- 6-2) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 31-1, pp.5-29, 1994.
- 6-3) 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, 46-11, pp.1081-1090, 1995.
- 6-4) 岩崎房子, 斜木祐里, 小柴朋子, 田村照子: 22~34℃環境下における足部の温熱生理特性, 日本家政学会誌, 51-7, pp.587-593, 2000.

7. 結論

本論文では、快適な睡眠を実現する温熱環境の設計と評価方法を確立するために、非定常状態かつ睡眠時に対応した温熱生理モデルと温冷感予測指標を構築することを目的として、人体と周辺環境（着衣、寝具、室内空気）との間の熱水分移動と、それに連動して変化する皮膚温度、深部温度などの生理反応および温冷感、睡眠感などの心理反応を非定常系として扱い、検討した。

第1章では、睡眠時の温熱環境と皮膚温度、深部温度などの生理反応および温冷感、睡眠感などの心理反応に関する従来の研究についてレビューし、本論文の目的と構成を示した。

第2章では、本論文で検討の対象とする睡眠実験の概要と被験者の温熱生理反応と心理反応の結果を示し、睡眠の状況とそれらとの関係について考察を行った。

睡眠実験は、2004年および2005年に、各年とも健康な青年男子1名の計2名の被験者を対象に、住宅型実験棟内の寝室実験室において夏期に各4回実施した。

皮膚温度には、部位による温度の違いと経時変化が認められた。室内環境と寝床内環境の影響と体温調節反応の影響によるものと考えられる。特に、腹と背中では高温、前腕と下腿は低温側であった。腹は伏臥位のと看、背中は仰臥位のと看に敷布団と接触し、放熱しづらくなることに伴い温度が上昇した。前腕と下腿は掛布団の外に露出していることが多く、室内空気の影響を受けて低温になった。05年度が04年度より変化が小さいのは、室内環境の変化が小さいためである。

平均皮膚温度は、就寝後は上昇するが、しばらくすると安定あるいは低下に転じた。就床時間全体で見ると、時間経過とともに低下する傾向がみられた。

深部温度は、睡眠の経過とともに低下する傾向があり、特に直腸温度において明確であった。代謝量の低下による影響を受けていると考えられる。鼓膜温度は直腸温度より低く、変動が大きかった。鼓膜温度は寝床内や室内環境の変化の影響を受け易いためと考えられる。また実験により鼓膜と直腸の温度差は異なっていた。

皮膚血流量は、実験により値の差が大きいが、取り付け部位の差、個体差、人体周辺の環境の変化によるためと考えられる。皮膚血流量は体温調節のための熱放散反応における制御器の役割を持っており、放熱量を増やすためには、血管が拡張し、皮膚血流量が増加する方向に調節される。すなわち値が大きいときは、体温調節反応が活発に行われていたと考えられる。

04年度は05年度より各実験での平均値は小さいが、相対的な値の変動が大きい。平均値の差は個体差によるものと考えられ、体温調節反応が活発に行われたのは、相対的な値の変動を大きい04年度であった可能性がある。

発汗量は、概ね04年度が05年度より値が大きく、変動も大きかったが、これは取り付け部位や個体差によるものと考えられる。また人体周辺の環境の変化が大きいため体温調節反応が活発に行われたことも一因と考えられる。

寝姿勢と体動は、赤外線カメラの画像により目視で読み取った人体各部位の動きと寝姿勢の変化の結果および体動計で測定された体動の発生時刻と強度より把握した。寝姿勢をみると、04年度では寝姿勢の変化が多く、大きな寝返りもあった。それに対し、05年度では、寝姿勢の変化が少なく、伏臥位になることはなかった。周辺環境や個体差によるものと考えられる。

睡眠変数から、各実験での睡眠の質を評価した。05年度の実験は、中途覚醒の時間が短く、睡眠効率が良かった。04年度の実験は、深睡眠の継続時間は長く、SWSの割合（深睡眠 [STAGE D]の全睡眠時間に占める割合）が高かった。04-1の睡眠は中途覚醒が多かったことから、睡眠効率はよくなかったが、SWSの割合が高いため、大脳を休ませるための十分なノンレム睡眠は確保されていたといえる。

寝姿勢と温熱環境および温熱生理量の対応より、寝姿勢と腹・背中温度および周辺の敷布団温度の変化が、相互に関係していることを確認した。それらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や温熱環境から、人体の温熱生理反応を予測できる可能性がある。また、寝姿勢と心拍数および心理反応の対応より、寝姿勢と睡眠段階および心拍数の時間変化率の間に相関があることを確認した。それらの関係を明らかにすることにより、寝姿勢や心拍数から睡眠段階など心理反応を予測できる可能性がある。

第3章では、睡眠時に対応する人体熱モデルを提案するための出発点として、覚醒時の人体熱モデルが睡眠時に適応が可能であるか、すなわち睡眠時の人体各部位温度が再現できるかを検討した。

覚醒時を対象とした Stolwijk モデルにおいて、寝床内環境の非一様性を考慮して熱水場挙動を記述し、さらに体格の影響を適切に考慮することにより、複数回の睡眠実験における皮膚温度および深部温度の測定値を大略再現することができた。

さらに温熱生理モデルの各パラメータに関する感度解析を行い、計算結果に与える影響を考察した。得られた結果は以下のとおりまとめられる。

・セットポイント (SP)

頭部深部温度 SP を低くすると、皮膚および深部温度とも 0.1°C 程度低くなり、SP を高くすると、いずれの温度ともわずかに上昇していた。平均皮膚温度 SP を変更すると、頭部および体幹部の皮膚温度、深部温度は SP を低くする条件では低下し、高くする条件では上昇していた。四肢部の皮膚温度は、就寝後はほとんど変化ないが、SP を高くする条件のみ、睡眠の途中で上昇に転じた。四肢部の皮膚温度は、平均皮膚温度 SP との差を小さくするように変化したと考えられる。SP が低い条件では平均皮膚温度および平均四肢部温度(5)への影響はほとんどみられなかった。また、平均筋温度 SP を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 変更しても、計算結果への影響はほとんどみられなかった。

・体動

睡眠中に体動が少ない場合でも、その体動に伴う運動量の増加を考慮すると、皮膚温度と深部温度にわずかな上昇がみられた。頻繁に寝返りをする就寝者の場合は、皮膚温度と深部温度が上昇するものと推測される。そのような結果は、深部温度が睡眠の経過とともに低下し、起床時刻に近づくと上昇するという睡眠時の特徴とされる生理現象を、代謝量の変化で説明できる可能性を示している。

・中立環境における皮膚血流量

皮膚血流量が少ない条件では、深部温度は上昇し、皮膚温度は四肢部では低下したが、頭部および体幹部では上昇していた。逆に、皮膚血流量が多い条件では、深部温度と頭部および体幹部の皮膚温度は低下したが、四肢部の皮膚温度は上昇した。平均皮膚温度の変化量は、各部位の変化に比較するとわずかであった。各部位の全熱量とそれらを構成する熱量成分の全睡眠時間の平均値より、四肢部の皮膚温度の決定においては皮膚血流による熱移動が、頭部および体幹部においては伝導による隣接層への熱移動が大きく影響していることがわかった。

・各部位の皮膚血流量比率

各部位への皮膚血流量の比率は、計算結果に与える影響が大きいことが示された。またモデルを分割する際、皮膚血流量の比率を皮膚表面積比率で与えると、実験値との一致がよくない部位が生じた。すなわち、各部位の皮膚血流量比率は、皮膚表面積比率では決定できないことが示された。

・頭部深部層血流量

頭部深部層血流量については、 $\pm 20\%$ 程度の変化では、計算結果に与える影響はほとんどなかった。

・体組成（体幹部における隣接する層との間の熱コンダクタンス）

熱コンダクタンスが小さい場合には、直腸温度が上昇し、腹温度および背中温度が低下して、深部温度と皮膚温度の差が大きくなった。また逆に、熱コンダクタンスが大きい場合には、直腸温度は低下し、腹温度および背中温度が上昇して深部と皮膚の温度差が小さくなった。

・皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンス

熱コンダクタンスの値は、赤外線カメラと体動計の測定データから調べた寝姿勢と体動の推定結果に基づき、実験値をよく再現する値を探索した。時間変化するものとして決定した皮膚表面とそれと接する周辺環境との間の熱コンダクタンスを用いて、皮膚温度と深部温度を計算した結果、熱コンダクタンスが一定値の場合と比較すると皮膚温度の再現精度が向上した。深部温度については、直腸温度、鼓膜温度とも一定値を用いた場合と大きな差はなかった。すなわち皮膚温度はコンダクタンスにより大きく影響を受けるが、深部温度の変化は小さいといえる。

深部温度、皮膚温度の平均的变化は、Stolwijk モデル、体動の変化、平均的な熱コンダクタンスを用いて大略表現できるが、一致のよくない皮膚温度の経時変化については、熱コンダクタンスの時間変化を考慮すれば表現できるようになる。そのような結果は、皮膚温度の再現精度を向上させるためには、姿勢変化や体動による皮膚表面における熱移動の変化を考慮することが必要であり、平均値を用いることとともに熱コンダクタンスの時間変化を適切に設定することの重要性を示している

第4章では、睡眠時の姿勢の変化が体温調節反応に与える影響を明らかにするために、姿勢が体温調節反応に与える影響は睡眠・覚醒により大きく変わらないと仮定し、覚醒した状態で被験者を座位、臥位、立位に変化させて、皮膚温度、深部温度および皮膚血流量等の生理量を測定した。

その結果、座位・立位は「放熱しやすい姿勢」、臥位は「放熱しにくい姿勢」であると考え、周辺環境との間の熱移動および代謝量の違いを考慮することにより、各生理量の変化の説明が可能であることを示した。

それにより、睡眠時の各生理量は、姿勢が座位・立位から臥位に変化したことに伴う、人体の皮膚表面と周辺環境との間の熱移動の変化および代謝量の変化の影響を受けていることが明らかとなった。

第5章では、快適な睡眠環境を形成する手法として、覚醒時の温冷感予測指標を用いて、就寝者の温冷感を推定し、空調機の設定温度にフィードバックする温熱環境制御システムを提案した。さらに、その有効性を2004年夏期の第2回目の睡眠実験で得られた温冷感予測値と室内温度制御の結果より検討した。

温冷感予測値 I が安定した値を推移するときは、中途覚醒が起こらなかった。これは温冷感予測値と睡眠の快適感との間に正の相関があることを示しており、睡眠時の快適な温熱環境を形成する手法として、温冷感予測指標による温熱環境制御システムが有効であるといえる。

ただし、温冷感予測値の快適域を中立より高め($1.0 \leq I \leq 1.3$)として評価を行っており、睡眠時と覚醒時には温冷感のずれがある。睡眠時には寝具との関係で皮膚温度の非一様性が大きく、局所の温熱刺激が温冷感に大きく影響していた可能性がある。

第6章では、第5章の結果を考慮し、温冷感予測指標の説明変数のひとつである全身の平均皮膚温度を局所における皮膚温度に変更し、覚醒時・睡眠時のいずれの状態においても利用できるような指標の再構築を試みた。具体的には、四肢の末梢部に対応する前腕、手背、下腿、足背の4点の皮膚温度の体表面積比率の重みによる平均四肢部温度(4)を用いた温冷感予測指標(I_{ex})の提案を行い、この指標が覚醒時・睡眠時の区別なく適用できるかを検討した。

覚醒時においては、再構築した平均四肢部温度(4)を説明変数とする温冷感予測値(I_{ex})を用いても、全身の平均皮膚温度を用いた温冷感予測指標(I)とほぼ同程度に申告値を説明することができた。

睡眠時においては、再構築した平均四肢部温度(4)による温冷感予測値(I_{ex})を用いることにより、全身の平均皮膚温度による温冷感予測値(I)と比較して、睡眠感との一致がはるかに良くなった。したがって睡眠時の温冷感の予測に適用できる指標といえる。同時に、覚醒時・睡眠時に係わらず、手足に対する温度刺激が温冷感に大きな影響を及ぼしていることを示しており、従来知見と矛盾しない。また温冷感予測値(I_{ex})の計算には、第3章の温熱生理モデルにより得られた生理量を入力としており、モデルの有効性も確認した。

以上のように、本論文では快適な睡眠を実現する温熱環境の設計と評価方法を確立することを目的とした検討を行い、睡眠時に対応した温熱生理モデルと温冷感予測指標を構築した。今後は睡眠時の快適な温熱環境の実現に向けて、より多くの測定結果による検証を行う必要がある。

本研究に関する論文および研究報告

1. 査読付論文

- 1) Ishiguro, S. Hokoi, S. Takada, N. Komoto, M. Abuku, K. Ishizu: Indoor climate for comfortable sleep, considering heat and moisture transfer between the room, bedding and human body: Air control system using a predictive model for thermal comfort, Proceedings of the Third International Building Physics Conference, Research in Building Physics and Building Engineering, pp. 775-781, 2006.8.
- 2) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 着衣・寝具を考慮した睡眠時の人体熱モデルに関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, 2009.2. (印刷中)
- 3) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—姿勢が体温調節反応に及ぼす影響—, 日本生気象学会雑誌. (投稿中)

2. 国際会議

- 1) A. Ishiguro, S. Hokoi, S. Takada, N. Komoto, M. Abuku, K. Ishizu: Indoor climate for comfortable sleep, considering heat and moisture transfer between a bedroom, bedding and a human body: Air control system using a predictive model for thermal comfort, The Third International Conference on Human-Environment System, Bunka Women's University, Tokyo, Japan, pp.139-144, 2005.9.

3. シンポジウム

- 1) 石津京二, 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 岩前篤: 空調運転による快適な睡眠環境の創造に向けて, 第 18 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.343-346, 2003.10.
- 2) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積—その 1 夏期及び冬期睡眠実験—, 第 19 回睡眠環境シンポジウム, 2003.11.
- 3) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積—その 2 夏期睡眠実験の解析—, 第 19 回睡眠環境シンポジウム, 2003.11.
- 4) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 (その 1) 被験者睡眠実験の概要および結果の考察, 第 21 回睡眠環境シンポジウム, pp.29-32, 2004.12.
- 5) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 (その 2) 温冷感予測式を用いた睡眠環境制御実験, 第 21 回睡眠環境シンポジウム, pp.33-36, 2004.12.
- 6) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 竹野耕生, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—夏期睡眠時における人体各部位の温度の検討—, 第 21 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.441-444, 2006.11.

- 7) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究, 第9回環境工学シンポジウム, pp.9-19, 2007.11.

4. 日本建築学会近畿支部研究報告集

- 1) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 岩前篤: 寝具の熱水分移動及び人体の温熱生理応答を考慮した睡眠時の快適性に関する研究—その1 夏期及び冬期睡眠実験—, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第43号, pp.185-188, 2003.6.
- 2) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤: 寝具の熱水分移動及び人体の温熱生理応答を考慮した睡眠時の快適性に関する研究—その2 夏期睡眠実験の解析—, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第43号, pp.189-192, 2003.6.
- 3) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第44号, pp.373-376, 2004.6.
- 4) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—寝姿勢における皮膚血流量と体温調節—, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第47号, pp.65-68, 2007.6.

5. 日本建築学会大会学術講演梗概集

- 1) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積 その1 夏期および冬期の睡眠実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.219-220, 2003.8.
- 2) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 岩前篤: 夏期および冬期睡眠時の人体生理・心理応答と寝具における熱・水分移動と蓄積 その2 夏期睡眠実験の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.221-222, 2003.8.
- 3) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 その1 夏期および冬期睡眠実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.549-550, 2004.8.
- 4) 河本奈都子, 銚井修一, 高田暁, 石黒晃子, 石津京二, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 その2 実験結果の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.551-552, 2004.8.
- 5) 石津京二, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石黒晃子, 安福勝, 岩前篤: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 その3 温冷感予測式を用いた睡眠環境制御実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.553-554, 2004.8.
- 6) 森郁恵, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石津京二, 石黒晃子, 安福勝: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究, その1 夏期および冬季睡眠実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.517-519, 2005.9.

- 7) 石津京二, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石黒晃子, 安福勝, 森郁恵: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 その2 温冷感予測式を用いた睡眠環境制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.519-520, 2005.9.
- 8) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 河本奈都子, 石津京二, 安福勝, 森郁恵: 寝具の熱水分移動・蓄積を考慮した快適な睡眠環境の形成に関する研究 その3 空調制御指標に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.521-522, 2005.9.
- 9) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 竹野耕生, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—夏期睡眠実験と人体熱モデルによる解析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.525-526, 2006.9.
- 10) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—寝姿勢における皮膚血流量と体温調節—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.414-415, 2007.8.

6. 空気調和・衛生工学会学術講演論文集

- 1) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—人体熱モデルによる解析—, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1309-1310, 2006.9.

7. 日本生気象学会雑誌

- 1) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 竹野耕生, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—夏期睡眠時における人体部位の温度の検討—, 日本生気象学会雑誌, 第43巻, 第3号, p.S55, 2006.10.
- 2) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—人体熱モデルによる解析—, 日本生気象学会雑誌, 第44巻, 第3号, p.S78, 2007.11.

8. その他

- 1) 石黒晃子, 銚井修一, 高田暁, 石津京二: 睡眠時の快適な温熱環境の形成に関する研究—人体熱モデルによる解析—, 日本睡眠学会第32回定期学術集会・第14回日本時間生物学会学術大会合同大会梗概集, p.166, 2007.11.

謝辞

京都大学教授・銚井修一博士には、本論文の作成において、終始一貫して丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました。研究を進める上でご助言と励ましを頂くとともに、自由な視点で考えるという研究の基本姿勢を学び、研究の面白さを知りました。心より感謝と敬意の意を申し上げます。

京都大学教授・宗本順三博士，高橋大次博士には、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示賜りました。厚く御礼申し上げます。

京都大学准教授・原田和典博士，助教・小椋大輔博士には、ゼミ等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、論文の書き方，被験者実験のやり方など研究全般に亘りひとかたならぬご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

独立行政法人 産業技術総合研究所・森郁恵博士，株式会社日建設計・田中宏明博士をはじめ京都大学・銚井研究室に在籍した皆様には、折に触れて励ましと助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

日本建築学会，空気調和・衛生工学会，日本生気象学会ならびに生活環境快適性創造研究会などの研究発表の機会を通じて、多くの先生方に有益なご意見を頂きました。深く感謝申し上げます。

京都大学・銚井研究室に在籍した安福勝氏，河本奈都子氏，竹野耕生氏には、被験者実験の実施や論文の作成において多大なる協力を頂きました。また、本研究では多くの方々が被験者として協力して下さいました。深く謝意を申し上げます。

京都大学技官・木内隆子氏には、学生生活においてサポートを頂きました。厚く御礼申し上げます。

関西電力株式会社 エネルギー利用技術研究所 渡辺敏緒所長をはじめ、研究所の皆様には、折に触れて励ましの言葉を頂きました。関西電力株式会社・石津京二主任研究員をはじめ関西電力株式会社 エネルギー利用技術研究所 商品評価研究室に在籍した方々には、被験者実験の実施協力とともに、様々な助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

最後に、本論文をまとめるにあたり、温かく見守ってくれた家族、特に夫に謝意を記します。

なお、本研究の一部は、京都大学，神戸大学，関西電力株式会社による共同研究「空調運転方式の最適化による快適な睡眠環境創造の評価研究（平成14年～平成19年）」において実施した。