

(論文内容の要旨)

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している。睡眠環境と生理・心理反応に関する従来の研究とは異なり、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考慮し、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い、それらの関係を明確にしている点に本研究の独創性がある。

本論文は7章から構成されている。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のレビューと本論文の目的と構成を示している。第7章は本論文の結論であり、第2章から第6章は、以下の内容となっている。

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。検討対象の睡眠実験は、2004年および2005年に、健康な青年男子1名ずつの計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回実施した。得られた主な知見を以下に示す。皮膚温度には、部位による温度の違いと経時変化がみられた。これは室内環境と寝床内環境の変化による影響と体温調節反応の結果である。特に、腹と背中では高温、前腕と下腿は低温側であった。腹は伏臥位のとき、背中では仰臥位の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した。前腕と下腿は、室内空気の影響を受けて低温になった。深部温度には概ね時間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。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。寝姿勢と温熱環境および温熱生理量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と、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示唆されている。

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可能であるか、すなわち睡眠時の人体各部位温度を再現できるかを検討している。覚醒時を対象としたStolwijkモデルに、寝床内環境の非一様性を考慮した熱水場の記述と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再現している。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、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に関しては、赤外線カメラなどの測定結果に基づき実験値をよく再現する値を同定した。それらの周辺環境に応じて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すると、一定値を用いた場合より皮膚温度の再現精度が格段に向上した。このとき、深部温度は一定値を用いた場合と大きな差はなかった。すなわち、皮膚温度は熱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。深部温度、皮膚温度の平均的変化は、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。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流量の変化を考慮することが必要であり、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、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大きく受けていることを明らかにしている。

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、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している。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時の快適感との間には正の相関があることを示唆しており、睡眠時の快適な温熱環境を形成する手法として、温冷感予測値による温熱環境制御システムが有効であることを示している。ただし、この実験では、温冷感予測値の快適域を中立より高めとして評価しており、睡眠時と覚醒時の温冷感の間にはずれが生じている。これについては、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考えられる。

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として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も適用できる指標を再構築している。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を用いた温冷感予測指標 (I_{ex}) を提案し、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ている。覚醒時においては、再構築した温冷感予測指標 (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を明らかにしている。睡眠時においては、再構築した温冷感予測値 (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、睡眠感との一致ははるかに良くなった。睡眠時の温冷感の予測に適用できる指標といえる。この結果は同時に、覚醒時・睡眠時に拘わらず、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、従来の知見と矛盾しない。また、温冷感予測値 (I_{ex}) は、第3章の温熱生理モデルにより得られる生理量を入力として算定されており、モデルの有効性を示す結果となっている。

(論文審査の結果の要旨)

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している。睡眠環境と生理・心理反応に関する従来の研究とは異なり、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考慮し、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い、それらの関係を明確にしている点に本研究の独創性がある。本研究の成果は以下のとおり要約される。

(1)睡眠時の温熱生理モデルの構築

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の挙動を記述し、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再現している。非定常状態かつ睡眠時を表現する温熱生理モデルはこれが初めての提案となる。

(2)姿勢が体温調節反応に及ぼす影響

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、各姿勢での生理量を測定している。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ている。

(3)覚醒時の温冷感指標による温熱環境制御

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ている。睡眠実験より温冷感予測値の快適域を中立より高めであると仮定すれば、この手法が有効であることを明らかにしている。

(4)温冷感予測指標の睡眠時への拡張

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部の平均皮膚温度に変更することにより、この指標が覚醒時のみならず睡眠時にも利用できることを示している。

本論文は、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。今後もより多くの測定結果による検証を行う必要があるが、睡眠時における温熱生理反応および温冷感を非定常モデルにより説明し、被験者実験の結果の再現を行うというアプローチは、工学研究に新たな領域を開拓するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 20 年 12 月 25 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。