

氏 名	たなかひろあき 田中宏明
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2909 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 建 築 学 専 攻
学位論文題目	深部温を評価指標とする最適空調制御

論文調査委員 (主査) 教授 銚井修一 教授 高橋大弐 教授 宗本順三

### 論 文 内 容 の 要 旨

空調により健康かつ省エネルギー的な環境制御を行うためには、生理と心理の過渡応答や体温調節機能の特性を把握して室内温熱環境を制御する必要がある。本研究では、温熱的に非定常状態にある人体の生理・心理の過渡応答を反映した室内環境制御手法の開発を視野に入れ、生理量と心理量の変動性状の把握とそれらを踏まえた冷房室温の制御方法に関する基礎的検討を行っている。評価指標として、体温調節系の主要な入力の一つであるにもかかわらず温冷感や快適感あるいは健康に及ぼす影響が未だ十分に明らかにはされていない“深部温”に着目して研究を行っている点に特徴がある。具体的には、夏期の高温環境下で歩行程度の運動を行った後、冷房空間へ入室する場合を対象に、深部温の一過性上昇や停滞を少なくし、速やかに深部を冷却させる空調方式に関する研究を行っている。本論文は8章からなる。第1章は序論であり過去の研究のレビューと本研究の目的を示している。第8章は結論であり本論文で得られた成果について要約している。第2～7章は以降に示す3部構成からなる。

第1部は第2章と第3章からなり、高温環境で歩行程度の運動を行った後、より低温の環境に移動し運動を停止した際に深部温が一過性に上昇する温熱生理メカニズムを、被験者実験と人体熱モデルによる解析の結果をもとに明らかにしている。

第2章では、屋外を模擬した高温環境下で歩行程度の運動を行った後に、異なる温度条件の冷房空間へ入室した場合の被験者実験を行い、深部温の変動特性を検討している。結果を以下に示す。(1) 29℃50%の中立環境に30分間椅座安静で滞在し、35℃50%の高温環境へ移動後運動を始めると、直腸温は一過性に低下する。このとき、全ての部位で皮膚温は上昇し心拍数は急激に増加する。(2) 35℃50%の高温環境で運動をした後、より低温の26℃50%の室に移動して椅座安静で在室する場合の方が、運動停止後も同じ35℃50%の高温環境下で椅座安静で在室する場合よりも、直腸温の一過性上昇幅は大きい。このとき、26℃50%の室に移動する場合の方が心拍数の減少と皮膚温の低下幅は大きい。

第3章では、人体熱モデルを用いた解析結果をもとに、深部温が一過性に変動する温熱生理メカニズムを明らかにしている。(1) 高温室に移動し運動を開始した直後に深部温が一過性に低下するメカニズムは、「胴深部温は、基礎代謝による熱産生量、胴深部から胴筋部への熱伝導による流出熱量、血流による胴深部から血液への正味の流出熱量、の3つの熱量の収支により決まる。高温環境に移動し運動を開始すると筋と皮膚の血管拡張により血流量が増加するため、胴深部から筋と皮膚への正味の流出熱量が増加し、胴深部温は一過性に低下する。」とまとめられる。(2) 高温環境で運動後、より低温の環境に移動した直後に深部温が一過性に上昇するメカニズムは、「胴深部温は、基礎代謝による熱産生量、胴深部から胴筋部への熱伝導による流出熱量、血流による深部から血液への正味の流出熱量、の3つの熱量の収支により決まる。低温環境に移動し運動を停止すると皮膚血管収縮により皮膚血流量が減少するため、胴深部から皮膚への正味の流出熱量が減少し、深部温は一過性に上昇する。」とまとめられる。(3) 運動に伴う筋血流量と熱産生量の非定常特性(時間遅れ)を考慮した解析モデルを提案し、それらが深部温の一過性変動に及ぼす影響を定量的に検討した。深部温の一過性上昇には、①皮膚及び筋血流量の急激な変動、②運動に伴う筋血流量の非定常変動、③運動に伴う熱産生量の非定常変動、の3つの要因が関係し、

特に①の血流量変動の寄与が大きい。

第2部は第4章と第5章からなり、深部温変動に大きな影響を与える代謝量と皮膚血流量に着目し、それらの影響を被験者実験と解析により明らかにしている。

第4章では、高温環境で発汗し着衣に多量の汗を含んだ状態で冷房空間へ入室する場合を模擬した被験者実験を行い、高温環境で6metの踏み台昇降運動を行い550gの汗をかく場合と、高温環境に椅座安静で滞在し150g程度の汗をかく場合を比較している。実験結果を以下に示す。(1) 高温室で6metの踏み台昇降運動を30分間行なった後26℃の冷房室へ移動する場合には、直腸温は冷房室入室後に0.3℃の一過性上昇を示し、1時間後でも運動開始前の温度より0.6℃高い。椅座安静で滞在する場合には、直腸温の一過性上昇は生じない。(2) 体重減少量が550gにも達するような多量の汗をかく実験では、胴部における皮膚とTシャツ間空気の相対湿度は冷房室入室後も1時間にわたり飽和に近い状態が続く。皮膚温は1時間も低下し続け、安静時と比べて約3℃も低下する。

第5章では、人体—着衣系解析モデルを提案し、解析モデルにより第4章の実験結果を再現できることを示している。人体熱モデルには人体各部位を多質点化したStolwijkモデルを、着衣には熱水分同時移動方程式を用いて数値解析を行い、提案した解析モデルにより高温環境や冷房空間における人体生理応答の予測が可能であることを示している。

第3部は第6章と第7章からなり、高温環境から冷房空間へ入室した際に、深部温の一過性上昇や停滞をなくし速やかに深部温を低下させるために最適な室温の決定方法を提案している。さらに、深部温を速やかに低下させ同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として頭部冷却に着目し、その適用可能性を被験者実験により明らかにしている。

第6章では、終端時刻における深部温のセットポイント値からの偏差を評価関数とする最適室温の決定方法を提案している。結論を以下に示す。(1) 高温状態にある深部温をできるだけ速く低下させるには、高温環境から冷房空間へ移動後、初期は室温を高く保ちある時点から室温を低く制御することが有効である。(2) 温冷感の予測申告値に関する最適室温と、深部温を評価指標とする最適室温の変動傾向は類似する。

第7章では、被験者2名を対象に35℃の高温環境で運動後冷房室へ移動した際の全身温冷感申告値と生理応答について、頭部を冷却した場合と冷却しない場合を比較している。結論を以下に示す。(1) 頭部を冷却すると、頭部冷却を行わない場合よりも鼓膜温と直腸温の一過性の上昇幅は小さくなる。(2) 頭部を冷却すると、頭部冷却を行わない場合よりも小さい側(寒い側)の全身温冷感申告値を得ることができる。従って、冷感受性の高い頭部を優先して冷却することにより、設定室温を高温に保った場合でも快適性を確保できる可能性がある。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、温熱的に非定常状態にある人体の生理・心理の過渡応答を反映した室内環境制御手法の開発を視野に入れ、生理量と心理量の変動性状の把握とそれらを踏まえた冷房室温の制御方法に関する基礎的検討を行った研究である。体温調節系の主要な入力の一つであるにもかかわらず、温冷感や快適感あるいは健康に及ぼす影響が未だ十分に明らかにはされていない“深部温”に着目し、研究を行っている点に特徴がある。具体的には、夏期の高温環境下で歩行程度の運動を行った後、冷房空間へ入室する場合を対象に、深部温の一過性上昇や停滞を少なくし、速やかに深部温を冷却させる空調方式に関する基礎的研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 高温環境で歩行程度の運動を行った後、より低温の環境に移動し運動を停止した際に深部温が一過性に上昇する温熱生理メカニズムを、被験者実験と人体熱モデルによる解析の結果をもとに明らかにしている。
2. 人体の熱モデルに、従来、解析事例のない非温熱性要因すなわち代謝により生じる筋血流量と熱産生量の時間遅れを考慮した解析モデルを組み込み、それらが深部温の一過性変動に及ぼす影響を定量的に検討している。
3. 深部温変動に大きな影響を与える要因である代謝量と皮膚血流量に着目し、それらの影響を被験者実験と解析により明らかにしている。
4. 高温環境から冷房空間へ入室した際に、深部温の一過性上昇や停滞を少なくし速やかに深部温を低下させるために最適な室温の決定方法を提案している。さらに、深部温を速やかに低下させ同時に温熱的な快適性も確保するための冷房方法として頭部冷却に着目し、その適用可能性を被験者実験により明らかにしている。

深部温が一過性に変動するメカニズムをはじめ、人体熱モデルによる解析結果をもとに人体各部位間の熱収支の観点から、生理現象の解明と予測を行なっている。今後も人体熱モデル自身の改良が必要ではあるが、人体熱モデルにより実験では解明が困難な生理現象を説明する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ると考えられ、学術上、実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2月22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。