

氏 名	たか だ さとる 高 田 暁
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3693 号
学位授与の日付	平 成 15 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常 応答

論文調査委員	(主 査) 教 授 鉦 井 修 一	教 授 高 橋 大 武	教 授 田 門 肇
--------	----------------------	-------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、人体の温冷感や温熱生理に適合した合理的な空調制御法を提案するために、人体・着衣における熱水分移動の非定常モデル、およびそれを用いた非定常空調制御について検討した結果をまとめたものであって、以下の7章からなっている。

第1章は序論であり、多孔質材料における熱・水分同時移動、衣類における熱・水分移動、体温調節、温冷感・快適感に関する従来の研究をレビューし、それを踏まえて本論文の位置付けと本論文の概要について述べている。

第2章では、本研究で目標とする非定常空調制御への応用のイメージを示している。着衣-人体非定常熱収支モデルと非定常温冷感モデルを用いて、温冷感の設計値を実現する物理的条件を求める方法を示し、展示施設を例として、人体側の非定常性を無視した従来の方法と温冷感の非定常性を考慮した方法とを比較検討している。また、温冷感の非定常性を考慮することで、空調用エネルギーのより効率的な利用が可能であることを示し、本モデルを設計に利用するために必要なデータベースについて考察を行っている。

第3章では、非定常状態における人体の温熱生理反応を把握するための基礎として、布における水分移動について検討を行い、水分物性を測定している。綿布の湿気伝導率測定に関しては、試料と水面の間に存在する空気層の水分移動抵抗をカップの重量変化から求める方法を提案している。また、蒸気拡散支配領域と飽和に近い領域で異なる方法を用いて綿布の平衡含水率曲線を測定している。さらに、綿布の横糸方向、縦糸方向それぞれについて、水分拡散係数の同定を行っている。これらの物性値を用いて、液を布面に滴下した場合の濡れの広がりやを予測している。またガンマ線を用いた含水率測定装置により重力に抗した方向の吸水過程の測定を行い、重力を考慮した解析モデルにより実験結果を大略再現できることを示している。

第4章では、発汗とその蒸発を伴う一連の過程を被験者実験により再現し、人体の温熱生理応答および着衣における熱水分挙動を調べ、その特徴を抽出している。裸体の場合と衣服を身に着けた場合の検討を行い、以下の知見を得ている。1) 人体周辺の気温がステップ的に変化した直後の数分間、鼓膜温、腋窩温、直腸温は気温の変化とは逆向きに0.2~0.8℃程度変化する。2) 皮膚温については、部位による差が大きい。発汗後の温度低下幅と温度低下の継続時間は、汗の蓄積量と関係している。3) 発汗過程において、室空気および皮膚表面からの水分吸着により、着衣温は最高で40℃近くまで上昇する。4) 着衣の熱・湿気抵抗と容量のため、衣服下皮膚温(被覆部皮膚温)の蒸発過程初期における温度低下は、露出部に比べてなだらかである。

第5章では、人体熱モデル(Two-node model)の導出過程を検討し、モデルの精度について検討を行っている。Two-node modelにおける発汗調節モデルは、Hardyらの生理実験で得られたデータを回帰したものであり、回帰の精度から考えて発汗量の予測値には少なくとも20%程度の誤差が見込まれること、血流調節モデルはStolwijkらが提案した人体熱モデルからの引用であり、過渡特性に係数値の導出根拠は明らかではないこと、セットポイント値はStolwijkらの人体熱モデルから引用されておりその導出過程は必ずしも明確ではないことを確認している。また、モデルによる体温調節

反応の非定常解と被験者実験の結果との比較を行ない、モデルに含まれる要素のうち、セットポイント、血流調節モデル、発汗調節モデルを変えることにより、実験結果の再現を試みている。検討の結果、体温調節には個体差があること、また、その個体差を適切に考慮した Two-node model により、非定常の体温調節過程を大略予測できることを明らかにしている。

第6章では、着衣を身に着けた場合について、人体周りの熱・水分移動のモデルを検討している。皮膚と着衣の間の空気層における熱水分移動特性を皮膚面に垂直な1次元系の熱・湿気コンダクタンスにより代表させ、その値を推定している。また、皮膚表面から汗が蒸発する際、着衣への吸着に伴う相変化熱が着衣温の低下を抑制していること、汗が人体側から室空気へと蒸発する過程において、着衣の水分移動係数が皮膚温変動、汗の蒸発速度に与える影響が大きいことを示している。検討の結果、着衣に関しては熱水分同時移動モデル、人体については Two-node model を用いた解析により、被験者実験で得られた皮膚温、着衣表面温の変動をほぼ再現できることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、人体の温冷感や温熱生理に適合した合理的な空調制御法を提案するために、人体・着衣における熱水分移動の非定常モデル、およびそれを用いた非定常空調制御について検討したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 建物の空調制御方法について、人体側の非定常性を無視した従来の方法と温冷感の非定常性を考慮した方法とを展示施設の例で比較し、温冷感の非定常性を考慮することで空調用エネルギーのより効率的な利用が可能であることを明らかにするとともに、本論文で提案するモデルを設計に利用する方法を示した。

2. 非定常状態における人体の温熱生理反応を把握するための基礎として、布における熱と水分の移動が熱水分同時移動モデルにより十分な精度で表現されることを明らかにしている。また、布のように薄い多孔質材料の平衡含水率曲線や水分拡散係数を測定する方法を提案し、それを綿布に適用している。

3. 発汗とその蒸発を伴う一連の過程を被験者実験により再現し、人体の温熱生理応答および着衣における熱水分挙動を調べ、その特徴を抽出している。気温のステップ変化に対する深部温の応答、皮膚温の変化特性、着衣への水分吸着の性状とそれが人体に及ぼす影響を明らかにしている。

4. 人体熱モデル (Two-node model) の導出過程およびモデルの精度について検討し、体温調節反応の非定常解と被験者実験結果との比較を行っている。体温調節には個体差があること、また、その個体差を適切に考慮すれば、Two-node model により非定常過程の体温調節反応が予測可能であることを明らかにしている。

5. 皮膚と着衣の間の空気層における熱水分移動特性を熱・湿気コンダクタンスにより代表させその最適値を決定し、さらに着衣に関しては熱水分同時移動モデル、人体については Two-node model を用いた解析により、発汗を伴う非定常過程における皮膚温、着衣表面温の変動をほぼ再現できることを示している。

以上要するに、本論文は、人体および着衣における熱・水分移動の過渡的性状を明らかにし、その解析モデルの妥当性を示すとともに、建物における空調の非定常制御法を提案したものであり、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14年11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。