

部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの 開発と温熱環境評価への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

省エネルギー性を考慮した床暖房あるいはインテリジェントビルでのパーソナル空調、車室内空調など不均一な温熱環境に対する精度の高い評価法と制御法が求められている。本研究は、それらの要請に対応するため部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムを開発し、多様な温熱環境の評価を可能とする温熱環境評価シミュレータの確立に向けてなされたものである。従来の温熱環境評価で用いられてきた数値モデルは、人間を質点系とみなし集中定数化されたもので、不均一な温熱環境の評価には原理的に対応が不可能といえる。

本研究で開発したプログラムの主な特徴は以下のとおりである。1)生体の解剖と機能の面から人体を 16 部位に分割し、さらに各部位を内部構造、機能、熱移動現象を考慮し円筒層モデルとした。2)環境との熱授受、生体内の熱伝導、血液による熱輸送、産熱を忠実に再現する各組織および動脈系、静脈系についての生体内熱移動方程式の数値解法に基づいており、3)特に、定常状態の解法については極めて効率的なアルゴリズムとした。4)生理学的知見を基に、発汗、血流、ふるえ産熱の体温調節出力量を与えるプログラムを組込んだ。5)部位毎の温熱環境因子の入力のみで、皮膚層から内臓層までの温度と熱流束分布および詳細な各部位各層毎の動脈、静脈温度の予測値を得ることができる。

次に、生体内温度予測プログラムの精度向上のための基礎データの収集を目的として被験者実験を行った。実測結果と計算結果を比較検討し、本研究のプログラムの有効性を確認した。最後に、温熱環境評価シミュレータとして活用する場合に必須な、環境との熱授受の対流熱伝達と放射熱伝達の計算について独自に開発したプログラムについて述べ、環境との熱授受の面から部位別特性を考慮すべき具体例を示した。

本論文は 9 章より構成され、各章の概要を以下に述べる。

第 1 章は、序論であり、人間の温熱生理状態に基づく温熱環境評価のための生体内温度予測プログラムの開発の意義を述べた。

第 2 章では、人体の熱移動モデルおよび環境との熱授受の部位別特性に関する既往の研究を概説し、本研究の目的および位置づけを述べた。

第 3 章では、環境との熱授受、熱伝導、産熱、血流による熱輸送を記述する生体内熱移動方程式を提示し、その数値解法について検討した。また数値計算対象の生体について、本研究では生体機能の面から人体を大きく 16 分割したモデルを考え、各部

位はその内部構造に着目し，円筒層モデルとした．定常状態の生体内熱移動方程式の解法として，効率的なアルゴリズムを提案した．すなわち産熱と血流を含む生体内熱移動方程式の一般解を，変形 Bessel 関数の線形結合によって表わせることを示し，その解と領域分割法の概念を基に，動脈血液，静脈血液の熱収支式との連立解法を示した．また，非定常状態の生体内熱移動方程式の解法のための離散定式化を説明し，組織，動脈血液，静脈血液の熱収支式の連立解法を示した．

第4章では，体温調節出力量の数理モデルについて述べた．体温調節機構の調節様式としては血流量調節，発汗量調節，産熱量調節が発達しているが，生理学的知見に基づき，それぞれの調節様式についての数理モデル式を検討し，体温調節出力量の算出プログラムを開発した．

第5章では，生体内温度予測プログラムによる計算結果とその考察を述べた．まず，比較の実測値の揃っている大腿部の計算結果を中心に，生体内熱移動方程式の一般解の特性，各項の寄与の割合について考察した．次に，中立領域と考えられる温熱環境条件下の全身のシミュレーションを行い，各部位の内部温度，血液温度，放熱量について検討した．計算結果はいずれも，過去に報告された断片的な深部温度の実測結果と適合し，その温度分布は部位別特性を反映しているものと考えられた．さらに，温熱環境変化に伴う非定常シミュレーションを行った．温熱環境条件がステップ変化した場合を想定し，体温調節系の血流量調節の効果の妥当性について検討した．環境が低温側に移行したときは，血流量調節により，深部温の低下が抑制されること，同時に誘発される皮膚温の低下が，放熱量を抑制するという過程を定量的に示した．

第6章では，生体内温度予測プログラムの精度を一層高めるための基礎データの収集を目的として行った被験者実験について述べた．実験は，温熱環境条件の制御可能な空気環境試験室内にて行った．主要な測定項目は全身皮膚温，直腸温，鼓膜温，産熱量で，温熱環境因子と共に連続測定した．設定条件は6種で，計18例の基礎データを得た．次に，実測結果と生体内温度予測プログラムによる計算結果を設定条件毎に比較検討した．計算結果は実測結果を概ね再現することが示された．皮膚温についてみると，部位別特性を反映した結果となり，下腿部，足部を除けば実測値と計算値の差は 1.3°C 以内の範囲となった．また，計算値と実測値の差が相対的に大きかった下腿部，足部でも吹出し気流の乱れ成分の影響をそれぞれの部位に与えることによって，実体に近づけることが可能であると考えられた．直腸温については気温 $26^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ の条件で，その差は 0.3°C 以内となり，本研究のプログラムによる組織内部温度の予測精度は良好なものであることが示された．

第7章は，上記のプログラムを温熱環境評価シミュレータとして活用する場合に必要な，環境との熱授受の対流熱伝達計算モジュールについての章である．本研究では頭部・頸部に代表される複雑な曲面形状や躯幹部と四肢との相対的位置関係の変化による多様な姿勢条件にも対応可能な気流解析プログラムを独自に開発した．そのため，形状適合のためのBFC法と計算効率向上のためのCFSV法の活用を考えた．開発プログラムの有用性を示すための例として，インテリジェントビル空調で採用されることが多い床吹出し気流を取り上げ，シミュレーションを行った．人体という制限物に対する床吹出し気流の全体特性と速度ベクトルの部位間による大きな変異，特に下腿部，大腿部の流速および乱れが大きいことを示した．

第8章では、温熱環境評価シミュレータへの展開のための人体と環境との放射熱伝達計算モジュールについて述べた。本研究では、放射熱伝達計算のための形態係数の算出法として数値積分法を採用した。具体的には微小面要素で構成される人体モデルを作成し、その面要素と壁面要素の形態係数を求めることが可能なプログラムとなっている。応用例として、小オフィススペースでの部位と壁面の形態係数、部位同士の形態係数の実数値を示し、人体の放射熱伝達の部位別特性を定量的に明らかにした。

第9章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	落藤	澄
副査	教授	持田	徹
副査	教授	絵内	正道
副査	助教授	横山	真太郎

学位論文題名

部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの 開発と温熱環境評価への応用に関する研究

省エネルギー性を考慮した床暖房あるいはインテリジェントビルでのパーソナル空調，車室内空調など不均一な温熱環境に対する精度の高い評価法と制御法が求められている．本論文は，それらの要請に対応するため部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムを開発し，多様な温熱環境の評価を可能とする温熱環境評価シミュレータの確立に向けてなされたものである．

この研究で開発されたプログラムの主な特徴は以下のとおりである．1)生体の解剖と機能の面から人体を16部位に分割し，さらに各部位を円筒層モデルとした．2)環境との熱授受，生体内の熱伝導，血液による熱輸送，産熱を忠実に再現する各組織および動脈系，静脈系についての生体内熱移動方程式の数値解法に基づいており，3)特に，定常状態の解法については極めて効率的なアルゴリズムとした．4)生理学的知見を基に，発汗，血流，ふるえ産熱の体温調節出力量を与えるプログラムを組込んだ．5)部位毎の温熱環境因子の入力のみで，皮膚層から内臓層までの温度と熱流束分布および詳細な各部位各層毎の動脈，静脈温度の予測値を得ることができる．

さらに，被験者実験を行い，実測結果と計算結果を比較検討することにより，プログラムの有効性を確認している．最後に，温熱環境評価シミュレータとして活用する場合に必須な，環境との熱授受の対流熱伝達と放射熱伝達の計算について独自に開発したプログラムについて述べ，環境との熱授受の面から部位別特性を考慮すべき具体例を示している．

本論文は9章より構成され，各章の概要を以下に述べる．

第1章は，序論であり，生体内温度予測プログラムの開発の意義を述べている．

第2章では，人体の熱移動モデルおよび環境との熱授受の部位別特性に関する

既往の研究を概説し、本研究の目的および位置づけを述べている。

第3章では、環境との熱授受、熱伝導、産熱、血流による熱輸送を記述する生体内熱移動方程式を提示し、その数値解法について検討している。特に、各部位を円筒層モデルとした場合における、定常状態の生体内熱移動方程式の解法として、変形 Bessel 関数を用いた効率的なアルゴリズムを提案している。

第4章では、生理学的知見に基づき、体温調節機構の血流量調節、発汗量調節、産熱量調節の数理モデル式を検討し、体温調節出力量の算出プログラムを開発している。

第5章では、生体内温度予測プログラムによるシミュレーションを行い、各部位の内部温度、血液温度、放熱量の計算値はいずれも、過去に報告された実測結果と適合し、部位別特性を反映していることを示している。また、体温調節系の血流量調節が温度分布に与える影響を定量的に示している。

第6章では、生体内温度予測プログラムの精度を一層高めるための基礎データの収集を目的として行った被験者実験について述べている。計算結果は実測結果を概ね再現し、プログラムの有効性が示されている。

第7章は、上記のプログラムを温熱環境評価シミュレータとして活用する場合に必須な、環境との熱授受の対流熱伝達計算モジュールについての章である。形状適合のための BFC 法と計算効率向上のための CFSV 法を活用した独自のプログラムを開発し、人体周辺の気流シミュレーションを行っている。人体という制限物に対する気流特性と速度ベクトルの部位間による大きな変異を示している。

第8章では、温熱環境評価シミュレータへの展開のための人体と環境との放射熱伝達計算モジュールについて述べている。人体の表面要素と壁面との形態係数の実数値を示し、人体の放射熱伝達の部位別特性を定量的に明らかにしている。

第9章は総括であり、研究の成果をまとめ、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は、生体内熱移動方程式、体温調節機構の数理モデルを基に部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムを開発し、その有効性を示している。さらに、部位毎の対流熱伝達、放射熱伝達の計算モジュールを開発し、生体内温度予測プログラムと組み合わせることにより、不均一な温熱環境に対する精度の高い評価シミュレータを構築できることを示しており、温熱環境工学、空気調整工学および人間環境計画学の進展に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。