

# 博士学位論文審査等報告書

審査委員 主査 尾崎明仁

副査 内田保博

副査 松原斎樹

1 氏 名 李 明香

2 学位の種類  
博士 (学術)

3 学位授与の要件  
学位規程第3条第3項該当

4 学位論文題目  
建築系と人体系の熱・水分・空気移動の連成解析と温湿度環境評価に関する研究

5 学位論文の要旨および審査結果の要旨

**【学位論文の要旨】**

別紙に記載

**【論文目録】**

別紙に記載

**【審査結果の要旨】**

本論文は、建築に係る熱と水分と空気の複合移動を非平衡熱力学に基づき詳細に数理モデル化することで、建築外被および建築全体の熱環境を予測可能な数値シミュレーションソフトを開発し、熱橋部位を含む外壁および窓枠の防露性能、および躯体の吸放湿が室内の恒温恒湿性能に及ぼす影響について評価している。さらに、建築系と人体系の伝熱モデルを連成することにより、室内および躯体の温湿度や不均一熱環境が人体の温熱感に及ぼす影響を予測するとともに、温熱感を基にした実際の空調制御による省エネルギー効果について解析している。

第1章では、研究の背景、熱・水分伝導、熱・水分伝達、熱放射などの伝熱理論

について整理し、従来の数値シミュレーションの方法と課題を明確にして、本論文の位置づけを行っている。

第2章では、一次元あるいは二次元の非定常熱・水分複合移動計算に基づく建築外被の温湿度解析ソフト「Hygrabe」を開発し、外壁および熱橋部位の温湿度分布を予測している。既存の表面結露と内部結露の判定を目的とした国際基準「ISO 13788」および国内基準「省エネルギー基準」と比較して、いずれの方法も冬季結露の有無に関する評価結果は概ね同じになるが、一次元定常計算に基づく既存基準は、材料の蓄熱蓄湿や熱・水分流の時間遅れなど、非定常な熱・水分移動の影響を無視できない夏期結露の判定には適さず、わが国のような期間蒸暑地域では通年に亘る湿害評価のために非定常計算を導入する必要があることを明らかにしている。また、一次元計算の既存基準では判定できない熱橋の結露についても検討している。樹脂サッシとアルミ樹脂複合サッシを例に温湿度変動を解析して Hygrabe の高い計算精度を確認し、サッシ構造の違いにより防露可能な地域が異なること、地域に適する躯体構成について検討するには、多次元の熱・水分複合移動解析を要すること、などを示唆している。

第3章では、建築全体の熱・水分・空気の複合移動を建築物理に則り忠実に再現可能な熱環境・熱負荷解析ソフト「THERB」を開発し、内装材に厚板赤松を用いた戸建住宅を例に恒温恒湿性能について要因解析している。まず、調湿性能評価基準「湿度応答法 (JIS A 1470-1) と温度応答法 (JIS A 1470-2)」に準拠した環境試験室実験とその数値計算を行い、厚板赤松の吸放湿特性および計算精度を明らかにしている。さらに、数値シミュレーションにより蓄熱と調湿に係わるパラメータ感度解析を行い、内装材の吸放熱と吸放湿が夏季の高湿化と冬季の過乾燥の緩和に有効なことを示している。

THERB は、熱力学エネルギーに基づく建築躯体の熱・水分移動計算、無次元整理式による部位ごとの熱・水分伝達の時変性、内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算、窓面透過日射の多重反射・吸収計算、放射熱伝達の非線形性と室内表面間の長波放射熱授受、自然・強制換気計算、などの特徴を有するため、設計段階において詳細な建築伝熱計算を要する自然エネルギー利用建築への適用が期待される。

第4章では、建築系「THERB」と人体系「SET\*および COMSET\*」の伝熱モデルを連成することで、室内温湿度、周囲からの不均一な熱放射、局所的な人体の接触熱伝導が温熱感に及ぼす影響について推定し、建築環境の熱的快適性を定量的に評価している。均一熱環境においては単質点系 SET\*と多質点系 COMSET\*はほぼ同じ値となるが、不均一熱環境では人体各部位の放射強度の違いや接触熱伝導の有無を考慮できる COMSET\*の方がより正確に温熱感を再現できることを明らかにしている。また、接触面の熱伝導は非接触面の対流・放射熱伝達に比べて熱流束が多いた

め、特に座位姿勢のように床との接触面積が広い場合は、熱伝導による人体温度への影響を無視できないことを示している。

第5章では、温水配管からの三次元熱伝導、床温度の上昇にともない発達する対流熱伝達の時変性を考慮できるように THERB のアルゴリズムを拡張し、温水床暖房システムの室内熱環境を予測している。また、建築系と人体系の連成シミュレーションにより、床暖房による温熱感への影響を解析し、熱的快適性に基づいて暖房制御した場合の省エネルギー性について考察している。まず、温水床暖房実験と比較することで、THERB が温度および熱負荷を高い精度で予測できることを示している。次に、省エネルギー基準の標準住宅モデルを対象として数値シミュレーションを行い、不均一熱放射や接触熱伝導を考慮して人体の温熱感に基づいて室内を暖房制御した場合には、同じ温熱感であれば床暖房の方がエアコン暖房より熱負荷を大幅に削減できる可能性があることを明らかにしている。

第6章では、各章で得られた知見をまとめて総括とし、本論文で提案した数値シミュレーションの有用性についてまとめている。

本論文は、建築系と人体系の熱・水分・空気の複合移動を建築物理に則り詳細に予測できる数値計算ソフトを開発し、温湿度環境から省エネルギー性、快適性、耐久性について評価している。従来の断熱気密化による居住環境および省エネルギー性の改善という一元論ではなく、自然エネルギーや蓄熱・調湿性能を利用したパッシブ・ヒーティング&クーリング技術などの幅広い検討を可能にしており、優れた学術性と高い実用性を有している。

以上より、本論文は博士学位論文の要件を十分に満たすものであると評価できる。

## 6 最終試験の結果の要旨

平成26年2月12日午前11時30分より、図書館視聴覚室において博士学位論文発表会を公開で開催し、口頭発表後に質疑応答を行った。質問内容は、数値シミュレーションの計算方法、境界条件、開発コンセプト、物理モデルと工学モデルの方向性、研究成果の今後の発展と社会への貢献、快適性と省エネルギーの両立など、多岐にわたったが、それぞれの質問に適切に回答した。以上より、最終試験の結果については、審査員全員一致で合格と判断した。

以上