

学位論文要旨

学位授与申請者

李 明 香

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

本研究では、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により、建築外被の温湿度および建築全体の熱環境の予測精度を格段に向上した数値シミュレーションソフトを開発し、それらを使用して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、室内温湿度、不均一熱環境、人体の姿勢および接触熱伝導が温熱感に及ぼす影響を予測するとともに、温熱感を基に空調制御した場合の建築熱環境や省エネルギー効果について解析している。

本論文は6章より構成される。以下に、各章で得られた知見を記述する。

第1章 序論

第1章では、本論文の研究目的を記し、熱・水分伝導、熱・水分伝達、熱放射などの伝熱理論および熱環境制御の方法について、従来の計算方法とその課題について整理した。従来法では、壁体伝熱系モデルに総合熱伝達と単純熱伝導を採用しているため、対流熱・水分伝達の時変性、放射熱伝達の多重反射と非線形性、躯体の水分移動、在室者の快適性など、実現象を詳細には検討できないことを示し、本論文の位置づけを行った。

第2章 建築外被の熱・水分複合移動解析と防露評価

第2章では、1次元あるいは2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」を開発して外壁および熱橋部位の温湿度分布を予測し、既存の防露評価方法と比較している。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」と比較すると、計算方法、室内温湿度の設定条件、結露（あるいは湿害）の判定条件は異なるものの、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った。しかし、1次元定常計算に基づく既存基準は、非定常な熱・水分移動（材料の蓄熱蓄湿と熱・水分流の時間遅れ）の影響を無視できない夏季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た。また、冬季は熱橋に結露発生することが多いが、1次元計算の既存基準では判定できない。そこで、結露発生し易い窓枠熱橋を対象として測定値と計算値を比較することで、Hygrabeは熱橋部位の温湿度分布も精度よく予測できることを示した。さらに、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、サッシ構造の違いにより防露可能な地域が異なることを明示し、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を示唆した。

第3章 建築全体の熱・水分・空気複合移動解析と温湿度環境評価

第3章では、躯体の吸放湿を含む建築全体の温湿度変動を伝熱現象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た。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れらの実験条件に基づいた数値計算を行い、厚板赤松の吸放湿特性および熱・水分移動に関する計算精度を明らかにした。次に、戸建住宅の温湿度測定と数値計算により、厚板赤松の優れた恒温恒湿性能と THERB の高い計算精度を確認した。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明らかにした。

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、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が可能となることを示した。

第4章 建築系と人体系を連成した室内の温熱環境予測

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、定常および非定常に変化する建築環境の熱的快適性を定量的に評価できるようにした。エアコン暖房および床暖房に関する既往の調査結果を対象として温熱感指標の妥当性について検討し、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た。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単位面積あたりの熱流が多いため、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た。

第5章 人体温熱感に基づく建築熱環境・省エネルギー解析

第5章では、温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を予測するため、THERB のア

ルゴリズムを拡張し、温水配管からの2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した。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た。まず、環境試験室において実大家屋を使用した温水床暖房実験を行い、床暖房開始直後の躯体および空気の温度変化や熱負荷を測定し、THERBによる計算結果と比較した。床暖房の立ち上がりを早くするホットダッシュ運転、On-Offの時間制御運転、常時稼働運転で実験を行い、いずれの運転条件に対しても、THERBは温度および熱負荷を高い精度で捕捉することを示した。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室温を低下できるため、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た。

第6章 総括

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た。