

博士（工 学） 菊 田 弘 輝

学 位 論 文 題 名

高断熱建物の躯体蓄熱暖冷房システムと  
その制御手法に関する研究

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

建築は、常に物理的寿命と社会的寿命の双方の問題を抱えており、新築や改修いずれにしても建築環境・設備の果たすべき役割は非常に大きい。特に、環境性能の向上や環境負荷の低減を実現する際に、厚い断熱が容易な外断熱による「建物の高断熱化」は有効な省エネ手法であると考えられる。従って、建物の高断熱効果や躯体の蓄熱・蓄冷効果を的確に理解した上で、高断熱建物に相応しい暖冷房システムやその制御手法の提案は益々重要となってくる。

その 1 つとして、水方式による直接熱伝導が可能な配管型の躯体蓄熱暖冷房システムが挙げられる。高断熱建物の場合、室温が安定化すると考えられるため、室温変動の許容を前提とした低温度差の暖冷房システムを計画・設計することが可能となる。従って、高温水や低冷水だけではなく、外気処理に一度使用した温冷水を再度使用するカスケード的な利用によって、省エネ時代に対応したシステムとして、あるいは複雑な機械設備を解消するシステムとしても期待できる。しかし、一般的な空気方式による暖冷房システムに比べて、空気搬送動力が削減される一方で、建物の高断熱効果による内部取得熱、躯体の蓄熱・蓄冷効果による時間的な遅れ等は当然考慮されなければならない。本研究の目的は、RC 造外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムの既存技術を発展させて、事務所用途の高断熱建物に適用可能な躯体蓄熱暖冷房システムとして、最適な制御手法を提案することである。具体的には、空気方式による暖房システムを導入した高断熱建物の実態と問題点を把握し、新たに制御手法を提案した上で、土日の運転停止の問題や日中の室温上昇の問題等、暖冷房エネルギー消費量と室内温熱環境の特性を検証する。特に、事務所特有の大きな室内発生熱に対して、床冷却による躯体の蓄冷効果の可能性を総合的に評価し、関連分野の発展に繋げる。

本論文は全 6 章より構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的を述べ、関連する既往の研究を概説し、本研究の位置付けを示した。

第 2 章「外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムの再現」では、燃料電池に係わる電力需要と熱需要のマッチングという難問に対処するべく、固体高分子形燃料電池 (PEFC) からの排熱を躯体蓄熱型暖房システムの熱源に利用し、貯湯槽や補助ボイラーをシステム化した数 kW の超小型コージェネレーションシステム ( $\mu$  CGS) の有意性を検証した。室温・床表面温度、PMV・PPD (快適指標)、躯体内温度分布、貯湯槽水温・放熱量・最大出力を基に、排熱利用と深夜電

力利用による夜間蓄熱の可能性について検討し、本システムを総合的に評価した。その結果、数値シミュレーションを通じて、夜間蓄熱（8時間運転以下）の可能性や軸体内温度分布の可視化に加えて、μCGS の問題における補助ボイラーの必要性、短時間運転における本システムの不合理性を明らかにした。最終的に、解析手法とモデル化の妥当性、軸体の蓄熱効果の可能性を示した。

第 3 章「高断熱建物の実態把握」では、寒冷地における外気負荷低減システムを導入した高断熱建物の実測調査を通じて、①建物の高断熱効果と軸体の蓄熱効果に関わる温度特性について、②高断熱建物の運用状況に関わる暖房システムとその制御手法について、③外気負荷低減システムの導入に関わるエネルギー削減効果と有用性について検討した。その結果、①1時間程度の予熱運転であっても、十分に快適な室内温熱環境が得られること、断熱厚さの増加やヒートブリッジの解消等が可能となる外断熱では、より有効に床スラブの蓄熱効果が機能することを明らかにした。②現段階では、高断熱建物における新しい熱負荷計算法である平均負荷計算法を適用する際に、実情は安全側に配慮された大きな熱源機器容量で計画・設計されていることを確認した。しかし、土日の運転停止後の月曜日に過剰なピーク運転に繋がったことから、設定室温や運転方法を含めた適切な制御手法による運用は、寒冷地における高断熱建物にとっても重要であることを示した。③外気負荷低減システムの併用による有用性が実証されて、外気負荷の削減率は最大で 41% に達し、外気負荷は相対量・絶対量で大きく削減できることを明らかにした。最終的に、寒冷地における高断熱建物の実態と問題点を把握し、軸体蓄熱暖冷房システムで必要とされる制御手法の方向性を示した。

第 4 章「簡易予測制御の提案」では、前章で得られた知見（①床スラブの蓄熱効果の有用性、②暖冷房システムやその制御手法の課題）を踏まえ、室温変動の許容を前提とした簡易予測制御を提案し、その手順を示した。更に、次章で必要とされるモデル化や平均負荷計算法との整合に加えて、総合熱伝達率を変数とした感度解析によって、軸体蓄熱暖冷房システムにおける冷房期の過大評価を確認した。

第 5 章「高断熱建物の軸体蓄熱暖冷房システムの検証」では、簡易予測制御を適用した高断熱建物の軸体蓄熱暖冷房システムについて、暖冷房エネルギー消費量や室内温熱環境の特性を基に、連続運転と夜間運転の有用性について検討した。時間積算のエネルギー消費を検証した結果、土日の運転停止 + 平日の連続運転の不合理性を確認した。日積算と年積算のエネルギー消費を検証した結果、日積算値は運転方法に大きく左右されたが、年積算値は 5% 程度の差に留まった。従って、間欠運転以外に、平日夜間や土日の運用次第では、連続運転や夜間運転といった暖冷房の運転方法の選択に対する自由度が増すことを示した。更に、室内温熱環境の特性を検証した結果、同じ夜間運転でも季節毎に内部取得熱の扱いが異なることから、暖房期においては、連続運転（夜間：軸体蓄熱、日中：軸体蓄熱 + 内部取得熱）や夜間運転（夜間：軸体蓄熱、日中：内部取得熱）のような連続相当の運転方法、対照的に冷房期においては、間欠運転（夜間：なし、日中：軸体蓄冷）や夜間運転（夜間：軸体蓄冷、日中：なし）のような間欠相当の運転方法が効果的であることを示した。最終的に、床冷却で懸念される結露の問題、軸体の吸放熱特性と軸体内温度分布を総合的に評価した結果、季節毎対応に準拠した簡易予測制御を夜間運転に適用しても、快適な室内温熱環境の入手が可能なことを明らかにした。

第 6 章「総括」では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題について考察した。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 繪内正道

副査 教授 崎田英樹

副査 教授 横山真太郎

副査 助教授 羽山広文

## 学位論文題名

### 高断熱建物の躯体蓄熱暖冷房システムと その制御手法に関する研究

物理的寿命と社会的寿命に係わって、建築の新設や改修における建築環境・設備の果たすべき役割は大きい。特に、厚い断熱が容易な外断熱による「建物の高断熱化」は有効な省エネ手法であるが、高断熱効果や躯体の蓄熱・蓄冷効果を的確に理解した上で、それに相応しい暖冷房システムとその制御手法の提案が重要になってきている。

高断熱建物の場合、室温変動幅が小さくなるので、変動の許容を前提とした水方式による配管埋設型の躯体蓄熱暖冷房システムを計画・設計（外気処理に使用した温冷水を再度使用するカスケード的な利用等）が可能になる。しかし、従来の一般的な空気方式による暖冷房システムに比べ、空気搬送動力が削減される一方、高断熱効果による内部取得熱、躯体の蓄熱・蓄冷効果による時間的な遅れ等への配慮が求められる。本研究では、RC 造外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムの既存技術を発展させ、事務所用途の高断熱建物に適用可能な躯体蓄熱暖冷房システムとその最適な制御手法を提案している。

本論文は、研究の背景と目的を述べた第1章、外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムを取り上げた第2章、高断熱建物の実態把握を行った第3章、簡易予測制御の提案した第4章、高断熱建物の躯体蓄熱暖冷房システムの検証した第5章、最後に本研究の知見を取りまとめた第6章、の全6章からなる。

本論文の成果は以下の4点に求めることが出来る。

(1) 外断熱住宅を対象に、躯体蓄熱型暖房システムとして燃料電池に係わる電力需要と熱需要のマッチングという難問に検討を加え、固体高分子形燃料電池（PEFC）からの排熱を躯体蓄熱型暖房システムの熱源に利用し、貯湯槽や補助ボイラーをシステム化した数kWの超小型コーチェネレーションシステム（ $\mu$ CGS）の有意性を明らかにした。室温・床表面温度、PMV・PPD（快適指標）、躯体内温度分布、貯湯槽水温・放熱量・最大出力を基に、排熱利用と深夜電力利用による夜間蓄熱の可能性について検討し、夜間蓄熱（8時間運転以下）の可能性や $\mu$ CGSに対する補助ボイラーの必要性、短時間運転における本システムの不合理性、及び解析手法とモデル化の妥当性や躯体の蓄熱効果の可能性を明らかにした。

(2) 寒冷地における外気負荷低減システムを導入した高断熱建物の実測調査を通じ、次の3点を検討し、①建物の高断熱効果と躯体の蓄熱効果に関する温度特性では、1時間程度の予熱運転であっても十分に快適な室内温熱環境が得られること、断熱厚さの増加やヒートブリッジの解消等が可能な外断熱の場合、より有効に床スラブの蓄熱効果が機能することを明らかにした。また、②高断熱建物の運用状況に関する暖房システムとその制御手法では、高断熱建物における新しい熱負荷計算法である平均負荷計算法を適用する際に、実情は安全側に配慮された大きな熱源機器容量で計画・設計されていることや、土日の運転停止後の月曜日に過剰なピーク運転が行われていることから、設定室温や運転方法を含めた適切な制御手法による運用こそが、寒冷地における高断熱建物にとっても重要であることを示した。次いで、③外気負荷低減システムの導入に関するエネルギー削減効果と有用性では、外気負荷低減システムの併用による有用性の実証と、外気負荷の削減率が最大で41%に達し、外気負荷は相対量・絶対量で大きく削減できることを明らかにした。

(3) 実測を通じて得られた寒冷地における高断熱建物の実態と問題点、例えば、①床スラブの蓄熱効果の有用性や②暖冷房システムやその制御手法の課題を踏まえ、室温変動の許容を前提とした簡易予測制御を提案するため、平均負荷計算法との整合に加えて、総合熱伝達率を変数とした感度解析から躯体蓄熱暖冷房システムにおける冷房期の過大評価を確認した。

(4) 高断熱建物の躯体蓄熱暖冷房システムの検証では、暖冷房エネルギー消費量や室内温熱環境の特性を基にして、簡易予測制御を適用した高断熱建物の躯体蓄熱暖冷房システムの連続運転と夜間運転の有用性について検討し、時間積算のエネルギー消費の検証から、土日の運転停止+平日の連続運転の不合理性を明らかにした。日積算と年積算のエネルギー消費の検証から、日積算値は運転方法に大きく左右されるが、年積算値は5%程度の差にとどまり、平日夜間や土日の運用によって、暖冷房の運転方法の選択(連続運転や夜間運転)に対する自由度が増すことを示した。室内温熱環境の検証をベースに、同じ夜間運転でも季節毎に内部取得熱の扱いが異なることから、暖房期の場合、連続運転(夜間:躯体蓄熱、日中:躯体蓄熱+内部取得熱)や夜間運転(夜間:躯体蓄熱、日中:内部取得熱)のような連続相当の運転方法、冷房期の場合、間欠運転(夜間:なし、日中:躯体蓄冷)や夜間運転(夜間:躯体蓄冷、日中:なし)のような間欠相当の運転方法が有用であることを明らかにした。

これを要するに著者は、高断熱建物に相応しい躯体蓄熱暖冷房システムとその制御手法に関する基礎的な新知見を明らかにしたものであり、建築設備学、建築環境学、建築計画学に対して貢献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あるものと認める。