
論文題目：

都心部の環境特性における躯体熱容量活用型建築の空調計画手法に関する研究

論文要旨

建築の躯体熱容量は、従来の建築計画における空調の設計・運用においては、空調装置容量の増大とそれに伴う部分負荷運転の増加によってエネルギー効率の低下を招くなど、「蓄熱負荷」と言うマイナス面で捉えられてきた。しかし、近年になって、建築の躯体そのものを冷却あるいは加熱することによって躯体熱容量を室内側にある蓄熱体として積極的に活用し、室内温熱環境の安定化と放射温熱環境の向上、そしてエネルギー効率を高める建築が注目されている。

躯体の熱容量を積極的に活用する建築は、欧米では **Thermo Active Building Systems** (以下 TABS) と呼ばれ、100 年弱の歴史を持っている。1990 年代初期に漏水リスクの少ない架橋ポリエチレン管を躯体に埋設して冷温水を通水し、建築躯体を冷却・加熱するシステムである埋設配管型の躯体蓄熱放射空調が考案されたことが契機となり、主として中央ヨーロッパにおいて 1990 年代後半から普及している。これらの国々で普及した理由の一つは、夏季において比較的涼冷かつ低湿度の気候特性を持ち、躯体表面結露のリスクが少ないことと推察される。日本において、躯体の熱容量を活用する技術は、送風機で建築躯体に冷温風を吹き付ける方式を中心に実例と研究が発展してきたが、中間季から夏季にかけて外気湿度が高い環境特性から、躯体表面結露のリスク回避が課題となる埋設配管型躯体蓄熱放射空調 (以下 躯体蓄熱放射空調) の事例は未だ少ない。躯体蓄熱放射空調は、一般の対流空調と比較して、温熱環境の安定性・快適性を高め、空調システムの高効率化が期待できるが、これらの点に関して比較した研究は少ない。また、蒸暑気候や激しい都市騒音などの環境特性を持つ地域において躯体蓄熱放射空調の運用手法も確立されているとは言えず、欧米においても TABS と自然換気・ナイトページを併用する事例は見られない。

本研究では、一般オフィス建築としては国内初となる TABS の空調計画の提案と構築を行い、それによって形成される室内温熱環境と躯体熱挙動の特性、そしてそれらの特性を活かした最適設計・運用手法を研究対象とした。研究の目的は、シミュレーションと実測の両面から TABS の利点を明らかにし、その設計法を示し普及を促すことにある。

本論文では先ず、研究対象建物とした TABS の計画の背景とその設計プロセス、建築計画と設備計画を融合した環境計画、及び環境技術の詳細について述べ、躯体蓄熱放射空調の導入に際しての計画手法と技術を示した。また、この研究対象建物で計画した基本性能を室内温熱環境実測と BEMS データにより検証し、一般の対流空調と比較して室内温熱環境の安定性・快適性が高いこと、一般のオフィス建築と比較して建物全体の一次エネルギー消費量を約 50%削減していることを示した。一方、躯体蓄熱放射空調のエネルギー効率、運用に関して 2 点の課題を抽出した。一点目は、躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を示すためには、実測値を基にした躯体蓄熱モデルの構築が必要なこと、二点目は、躯体熱挙動の時間的遅れが明らかになり、その特性を活かした躯体蓄熱放射空調の運用手法を見出すことである。

一点目の課題解決法として、埋設配管から躯体への熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が計算できる躯体蓄熱モデルを構築し、対流式空調のモデルと、温熱環境及びエネルギー消費量の比較を行った。熱源 COP と熱搬送効率を変化させてシステム COP 比の計算を行った結果、躯体蓄熱時の WTF (水搬送効率) が 10 前後と極端に低くなく、熱源 COP が同等の場合、躯体蓄熱放射空調のエネルギー消費量は対流空調を下回ることを示した。

二点目の課題解決法として、先の躯体蓄熱モデルを用いた運用検討により導いた、熱源・空調システム (躯体蓄熱放射空調の送水時間) と室内環境調整 (執務時間) とを分離して運用する手法を検証するため、躯体蓄熱放射空調の送水時間を執務時間より前倒しにする運用を試行した。その結果、躯体蓄熱放射空調では、熱源・空調システムの運転を室内環境調整の運用スケジュールよりも 2 時間程度早めることで適正化を図ることが出来ることを示した。この運用手法の検証結果を反映させた実運用において、

熱源負荷のピークシフトが行われていることを明らかにし、外気温度の低い早朝に高負荷運転させることによる空気熱源ヒートポンプチャラーの COP 向上効果を示した。

最後に、TABS の計画法を示すとともに、それを基に、実際に設計を行った建物の計画概要、計画手法を示した。

本研究の成果により期待される場所は、蒸暑気候や都市騒音などの環境特性を持つ日本の都心部において、TABS の普及を促す指標となることである。躯体の熱容量を積極的に活用することで、温熱環境の快適性・安定性に大きく貢献し、高い環境性能を導き出すと共に、BCP 性能の向上にも寄与することを示した。

以下に各章毎の概要を述べる。

第 1 章 序論

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、天井の脱落等によってオフィスワーカーの安全を脅かしたばかりか、首都圏で多くの帰宅困難者を生み出し、オフィス建物に籠城することを余儀なくされた。

これら震災の事象を契機として、建築計画・設計においては、快適性、環境性能の向上に加えて、震災時の安全性のさらなる向上と、震災後一定期間における自立性が強く求められるようになった。

筆者は環境・設備設計者としての立場から、その要求に応える建築のあり方の一つとして、躯体の熱容量を活用する建築である「自律安定型環境建築」を提案し、自らその設計・構築に携わってきた。自律安定型環境建築とは、外部環境に応じた可変的な特性を持つ緩衝帯を形成し、TABS により躯体の熱容量を積極的に活用することで、時間変動の大きい自然エネルギーを和らげあるいは蓄えながら取り入れ、自律的に安定した内部環境を創り出すとともに、エネルギー性能の向上、BCP 性能としての自立性を生み出すものである。これを研究対象建物とし、躯体熱容量活用型建築の概念と定義、既往の研究とともにその歴史と動向を述べることで、本研究のテーマを明らかにし、研究目的と本論文の構成を示した。

第 2 章 躯体熱容量活用型建築の計画・設計と基本性能の検証

本研究対象建物は、都内の地上 8 階建、SRC 造のオフィスビルである。平面は熱的緩衝帯となるペリメータアイルを採用し、断面は逆梁構造によりスラブ面がそのまま下階の天井となる。これらの平面・断面計画が自然エネルギーや躯体熱容量を活用する建築の基本骨格を形成する。この骨格に、様々な環境・設備技術を肉付けした。主たる環境・設備技術は、①緑化ファサード、②再生可能エネルギー利用熱源システム、③埋設配管型躯体蓄熱放射・床染出併用空調システム、④自然換気とナイトパージシステム、⑤地熱利用外気供給システム、の 5 項目である。

運用開始後の 1、2 年目の夏期・中間期・冬期に室内温熱環境実測及び執務者アンケート調査を行い、自律安定型環境建築を構成する空調システム・自然換気システムの基本性能、そして躯体熱容量の活用を評価し、室内温熱環境の快適性・安定性が高いことを確認した。BEMS データを活用して、太陽熱・コージェネ排熱を使った吸着式冷凍機をメイン熱源とする熱源システム特性の把握、エネルギー消費傾向の検証、システム・機器の効率を検証し、運用改善を行った結果、年間一次エネルギー消費量は 902 MJ/(m²年)となり、従来のオフィスの約 50%の消費エネルギー量であることを確認した。

また、躯体蓄熱放射空調のエネルギー効率、運用に関する課題を抽出した。躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を示すためには、実測値を基にしたシミュレーションが必要なこと、そして、躯体熱挙動の時間的遅れが明らかになり、その特性を活かした躯体蓄熱放射空調の運用手法を見出すことの 2 点である。

第 3 章 躯体蓄熱モデル構築による運用検討と対流式空調との比較検証

前章で明らかにした本研究の課題の一つである、躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を導くため、埋設配管からスラブへの熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が計算できるシミュレーションモデルを構築した。モデルの精度検証を行った結果、実測値に対する誤差率は約 3.2%となり、十分な精度を持っていることを確認した。

先ず、このモデルを用いて、躯体蓄熱方式の運用方法の検討を行った。これは、送水開始と終了の時

刻のそれぞれを前倒しにした時間をパラメータとして、システム COP 向上率を算出して行ったものである。結果として、送水開始時刻、終了時刻ともに2～4時間程度前倒しにすることでシステム COP が向上することを確認した。

次に、対流式空調と躯体蓄熱放射空調のそれぞれのモデルについて夏季のシミュレーションを行い、室内温熱環境を比較した。乾球温度一定制御の場合には、対流式空調の PMV は躯体蓄熱空調と比較して平均で 0.3 程度高い結果となった。また、同等の PMV とするために PMV 一定制御を行った場合であっても、対流式空調では放射温度と乾球温度の温度差が大きいことを確認し、温熱環境が同等ではないことを示した。シミュレーションによって得られた処理熱量をもとに、対流式空調と躯体蓄熱方式でエネルギー消費量の比較を行った。熱源 COP と熱搬送効率を変化させてシステム COP 比の計算を行った結果、躯体蓄熱時の WTF が 10 前後以上と極端に低くなく、熱源 COP が同等の場合、躯体蓄熱放射空調のエネルギー消費量は対流空調を下回ることを示した。

第4章 実測による躯体熱挙動の把握と運用手法の検証

一般の熱源・空調システムの場合、熱源を一次側、空調と室内空間を一体として二次側と表現することが慣例となっているが、TABS においては、空調と室内空間の間に蓄熱体が存在し、空調の運転と室内環境調整を分けて考える必要がある。そこで本研究においては、熱源・空調を一次側、室内環境調整を二次側と定義する。

第2章で明らかにしたもう一つの課題である躯体の熱挙動を活かした躯体蓄熱放射空調の運用手法を見出すことが本章の目的である。躯体表面熱流及び室内温熱環境の実測により、TABS の躯体熱挙動の詳細を明らかにした上で、一次側と二次側を分離した運用の試行により躯体蓄熱放射空調の運用手法を提案し、その適正化の検証を行った。放射空調の送水時間と執務時間を一致させた運用の場合、天井表面温度の低下と天井表面熱流束の最大値発現に時間遅れが生ずる TABS の特性を実測においても確認した。また、ペリメータの天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動により、ペリメータの温熱環境は安定化することを確認した。夏季空調停止時にも天井スラブ躯体による 10W/m²前後の吸熱があり、室内温度の上昇が抑えられることを確認し、空調立ち上げ負荷の軽減と、非常時に空調停止した場合の BCP 対応の可能性を示した。

一次側と二次側を分離した運用手法の試行を行った結果、本研究建物の躯体蓄熱放射空調では、一次側熱源・空調システムの運転を二次側室内環境調整の運用スケジュールよりも 2 時間程度早めることで適正化を図ることが出来ることを示した。また、運用手法の検証結果を反映させた実運用において、熱源負荷のピークシフトが行われていることを明らかにし、外気温度の低い早朝に高負荷運転させることによる空気熱源ヒートポンプチャラーの COP 向上効果を示した。

第5章 躯体熱容量活用型建築の計画法

本章では、第1章から第4章で得られた知見から、躯体熱容量活用型建築の計画における要求性能、性能検証、及び効果拡大手法を示した。さらに、その性能要件に基づいて計画を行った実例を示した。

第2章、第4章で行った実測データを用いた他、第3章で構築したシミュレーションモデルを用いて、天井部の躯体現しの割合を変化させた場合の影響評価、災害時を想定した BCP 性能の向上の効果、自律安定性の再現と評価、休日の運用による自然エネルギー利用の拡大の評価を行うことで、躯体熱容量活用型建築の設計に役立つ手法を示した。

第6章 総括

本研究の成果により期待される場所は、蒸暑気候や都市騒音などの環境特性を持つ都心部において、躯体の熱容量を活用した建築の普及を促す指標となることである。これまで一般の対流空調の設計においての躯体熱容量は、蓄熱負荷となることでマイナス要素と捉えられていた。TABS は、躯体の熱容量を積極的に活用することで、温熱環境の快適性・安定性に大きく貢献し、高い環境性能を導き出すと共に、BCP 性能の向上にも寄与することを示すことができたと考える。