

(論文内容の要旨)

本論文は、熱負荷予測の情報をもとにして、蓄熱式空調システムを最適に運転する手法に関する研究成果をとりまとめたものである。

第1章は序論であり、蓄熱式空調システムの運転法に関する既往研究の成果と課題を整理し、本研究の目的および位置付けについて述べている。具体的には、現状の蓄熱式空調システムにおいて、蓄熱槽に満杯に蓄熱する満蓄運転が行われる背景を述べ、その解決策として筆者が開発した、熱負荷予測情報に基づく蓄熱式空調システムの最適運転手法について説明している。

第2章では、蓄熱式空調システムの最適運転のためのアルゴリズムの全体構成について述べている。最適運転アルゴリズムは、空調熱負荷を予測する『熱負荷予測ブロック』、この予測熱負荷に、蓄熱槽やパイプ・ダクトなどの搬送系からの伝熱損失、ポンプやファンなどによる加熱量、槽内平均温度を回復するための熱量を加えて蓄熱槽に蓄えねばならない要求蓄熱量を求める『要求蓄熱量ブロック』、蓄熱を用いた空調システムの運転シミュレーションを行う『システムシミュレーションブロック』（システムの運転をシミュレートし消費電力量等の結果を得る計算ブロック）、ならびに、消費電力量、電力コスト、CO₂排出量の何れかを目的関数として、最適運転を見いだす『運転最適化ブロック』という4つのブロックで構成される。これらのブロックを組み合わせることで、蓄熱式空調システム全体の消費電力量を最小化する冷凍機の設定出口温度と、要求蓄熱量を達成するのに必要な冷凍機運転時間を求める方法について説明している。

第3章では、蓄熱式空調システムの最適運転において特に重要な役割を果たす冷却コイルのモデルについて、実験とシミュレーションによる精度の検証を行った結果について述べている。まず、入口水温等の条件を変えた様々なケースの実験を行い、空調用冷却コイルの特性把握のためのデータを得ている。次に、代表的な7つの空調用冷却コイルのシミュレーションモデルを選定し、計算値と実験値との比較分析を行い、以下のことを見出した。1)全モデルに共通して、出口空気乾球温度（給気温度）はやや高め、出口水温、熱交換量はやや低めに計算される傾向がある。2)給気温度はACSS、出口空気絶対湿度は新津モデル、出口水温はHVACSIM+、全熱交換量はHVACSIM+が最も高い精度を示す。3)新津モデル、HVACSIM+では、低負荷条件の一部のケースで発散や誤差の拡大が見られる。4)総合的に精度が高いモデルはSIMBAD、ACSS、濡れ面係数法であり、誤差は全項目において概ね10%以下である。

この結果に基づき、以降の章における検討では、HASP/ACSS/8502 冷温水コイルモデルを用いている。

第4章では、蓄熱式空調システムの最適運転制御のためのアルゴリズムを全蓄熱システムに適用した場合を想定し、シミュレーションにより、その効果を示している。全蓄熱システムにおいて最適運転を行えば、最大蓄熱運転に対し約36%の省エネルギーを達成し得ること、時間負荷（毎時の熱負荷）に2

σ の余裕を持って蓄熱すれば、高い省エネルギー効果を維持したまま熱負荷の予測誤差による蓄熱不足のリスクを低減させることが可能であることを示している。

第5章では、熱負荷予測情報を用いた水蓄熱式空調システムの最適運転法において、冷水温度を上げて、空調機の除湿性能を低下させない運転アルゴリズムを開発し、シミュレーションによりその効果を分析している。具体的には、変風量方式の空調システムにおいては、給気温度に関する制約条件を設ければ、最適運転を行っても空調機の除湿性能が低下しないことを明らかにした。また、給気温度に関する制約条件を設定すると、負荷の大きい日には冷水温度が低下し、システム全体の消費電力量が僅かに増加する傾向があるが、中負荷、軽負荷条件では、制約条件の有無による差はほとんど生じず、期間全体の消費電力量は0.7%程度と微増に留まることを示した。

第6章では、部分蓄熱システムの最適制御法を提案し、シミュレーションによりその効果を示している。昼間の運転スケジュールについては、放熱完了直前に後詰めしても消費電力量は削減されず、逆に蓄熱が放熱に間に合わないというリスクが生じるため、先詰め運転を行うのが妥当であるとしている。冷凍機設定出口温度については、消費電力量を最小化するには昼夜で共通とし最適化すると良いが蓄熱バランスが昼間移行し電力コストが増加する、電力コストを最小化するためには夜間運転の冷水出口温度を固定し昼間の計画運転の冷凍機設定出口温度を最適化する運転が有効であるとしている。さらに、昼夜の熱源設定温度を別々に最適化すれば、夜間の設定温度を7℃に固定する場合よりも、消費電力量や電力コストを削減することができるとしている。蓄熱基準温度については、設定を月毎に変更し、蓄熱槽の槽利用温度差が大きくとることが有効であるとしている。この際、蓄熱不足の発生するリスクが高まるが、 2σ の蓄熱余裕を見ることでリスクを低減できることを示している。

第7章では、熱負荷予測を用いた水蓄熱式空調システムの最適運転法を実在の建物に適用し、実測とシミュレーションによりその効果を示している。熱負荷予測については、空調稼働率による補正と予測開始直近6時間平均の絶対湿度の利用により予測精度を大幅に改善できることを示した。改善後の予測結果は日負荷 EEP9.8%、時間負荷 EEP12.7%と高い精度を示した。最適運転法については、まず、実測値に基づく評価により、熱源システム COP で約3.5%、システム COP で約10.9%の省エネルギー効果があることを実証した。さらに、シミュレーションを実施し、実測結果が妥当であることを検証している。以上の結果、熱負荷予測を用いた水蓄熱式空調システムの最適運転法が実建物に於いても有効に働くことを実証している。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

蓄熱式空調システムは機構や制御が複雑で、運転の判断や設定値の調整が適切に行われなければ、性能が十分に発揮できず、場合によっては、通常の空調システムよりもエネルギー消費量が増すこともある。従って、蓄熱式空調システムでは、熱負荷の特性を十分把握して、システムの性能を確実に発揮させる自動運転法の開発が求められている。本論文は、熱負荷予測の情報をもとにして、蓄熱式空調システムを最適に運転する手法に関する研究成果をとりまとめたものである。以下に得られた成果の概要を示す。

1. 蓄熱式空調システムをネットワークモデルとしてモデル化し、これを用いて、システム全体の一日の消費電力量、電力コスト、CO₂排出量等を最小とするような冷凍機の設定出口温度、ならびに要求蓄熱量を得るのに必要な熱源運転時間を求めるシミュレーション手法を開発した。
2. 蓄熱式空調システムの最適運転において特に重要な役割を果たす冷却コイルのモデルについて実験を行い、既に提案されている様々なモデルの精度検証を実施し、本研究に利用すべき適切なモデルを特定した。
3. 全蓄熱システムに最適運転を適用した場合の効果をシミュレーションにより分析し、期間全体で約36%の省エネルギー効果があることを示した。また、熱負荷の予測が外れるというリスクを考慮した場合の運転法を検討し、毎時の予測熱負荷の平均値に、標準偏差の2倍の余裕を見た値を予測熱負荷として蓄熱運転すれば、ほぼ空調条件が見たされないというリスクのない運転ができることを明らかにした。
4. 変風量方式の空調システムへの適応では、冷凍機を定格冷水温度で運転した場合に得られる給気温度を上回らないように給気温度に関する制約条件を設ければ、冷凍機の冷水出口温度を上げても空調機の除湿性能が低下しないことを補償する最適運転が可能であることを示した。
5. 昼間にも蓄熱運転をするという、通常一般的な部分蓄熱システムにおける最適運転法を検討し、冷凍機の冷水出口温度を昼と夜で別々に設定し、これを最適化して運転することが省エネルギー上有効なことを示した。
6. 本研究で得た最適運転法を実在の建物に適用し、その有効性を実証実験で示した。最適運転による省エネルギー効果は、熱源システム COP で約3.5%、システム COP では約10.9%となり、シミュレーションの予測に近い結果が得られることを実証した。

以上、本論文では、熱負荷予測情報に基づいて、蓄熱式空調システムを最適に運転するための新しい手法を、システムシミュレーションを活用して開発すると共に、それを実在の建物に適用して効果を実証し、蓄熱式空調システムの省エネルギー性向上に、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年12月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。