

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	需給連携制御を導入した地域冷暖房システムにおける搬送動力低減に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	國友理
Author(English)	Osamu Kunitomo
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4178号, 授与年月日:2020年10月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:齊藤 卓志,井上 剛良,伊原 学,佐藤 勲,末包 哲也,伏信 一慶
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4178号, Conferred date:2020/10/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

(2000字程度)

報告番号	乙 第 号	学位申請者	國 友 理	
	氏 名	職 名	氏 名	職 名
論文審査員	主査 齊藤 卓志	准教授	末包 哲也	教 授
	井上 剛良	教 授	伏信 一慶	准教授
	伊原 学	教 授		
	佐藤 勲	教 授		

本論文は「需給連携制御を導入した地域冷暖房システムにおける搬送動力低減に関する研究」と題し、全8章から構成されている。

第1章「緒論」では、地域冷暖房システム（以下、地冷）の歴史と日本における導入経緯を紹介し、省エネルギー、温暖化対策、スペース有効利用等のメリットをまとめている。また、地冷の進化として、特に近年のICT（情報通信技術）活用によるスマートエネルギーネットワーク化を示した上で、現状における課題が熱需要家へ熱媒を送る冷温水搬送ポンプの搬送動力低減にあることを述べ、熱供給側と熱需要家の情報ネットワーク構築により実現できる差圧と流量が可変な需給連携制御導入の必要性を指摘している。加えて、優れた搬送システム制御を導入するだけでは地冷の搬送動力の大幅低減が図れるわけではなく、最適化を目指したPDCAサイクルを継続的に実行するサステナブル運用が必要であることも指摘している。その上で、このような需給連携制御を導入した地冷が、理想的な搬送動力低減を実現するためにはどのような制約があり、その制約が搬送動力への程度影響を及ぼすのかを、可能な限り一般化されたモデルの構築により検証することが本研究の目的であると述べている。

第2章「シミュレーションモデルの構築」では、熱供給側と熱需要家における需給連携制御（変差圧変流量制御）における搬送動力の低減を検討するために構築したモデルの説明と、実物件への適用によるモデルの妥当性検証を行っている。構築したモデルでは、機器や配管は可能な限り単純化しているが、地冷の評価上無視できない配管長に応じた熱媒体の到達時間は考慮されている。モデル要素として「配管」「熱源機」「搬送ポンプ」「熱需要家」を設定し、数値解析ソフトを用いて地冷の動作を模擬している。また、温度に関する「配管」内の熱媒体のミキシング特性について、CFD解析結果との比較により、本研究で対象とする状態では十分な妥当性を有することを検証している。

第3章「熱負荷変動速度の熱源機の負荷追従速度に対する相対値を用いた検証」では、熱供給側と熱需要家が一对一のモデルにおいて、熱負荷を正弦波と仮定し新たに定義した「熱負荷変動速度に対する熱源機の負荷追従速度の相対値（以下、相対値）」と供給安定性および搬送動力の関係を、領域Ⅰ（安定領域）、領域Ⅱ（供給安定性は保たれるが搬送動力は相対値増加により微増）、領域Ⅲ（供給安定性が維持できず搬送動力が大きく増加）の3つに分類して検証している。一般的な熱負荷および熱源機を有する地冷では、大半の時間帯で理想値に近い搬送動力となるため、需給連携制御の評価は領域Ⅰでの分析のみとなることを明らかにしている。また、朝の立ち上がりなど熱負荷変動速度が大きい場合は、少なくとも相対値が1.6程度より小さくなるように熱源機を選択することで、安定供給が実現できることを見いだしている。

第4章「配管長が供給温度および搬送動力に与える影響に関する検証」では、前章と同じモデルにおいて、熱供給側に熱媒体の温度乱れが生じて、配管長が長い場合にはミキシングによる温度乱れの減衰により供給安定性を確保できる範囲が広がるため、一般的な熱源機の場合、配管長が600m程度以上になると相対値によらず供給安定性を保てる可能性があることを見いだしている。一方、ミキシングにより温度の供給安定性が確保されても搬送動力自体は低減されないため、搬送動力低減に関しては配管長に応じた圧力損失のみが制約となることを明らかにしている。

第5章「熱需要家が複数の場合の基礎理論」では、熱供給側と熱需要家を一对多に発展させた場合の基礎（最小値）となる搬送動力の算出手法を述べている。すなわち、理想的な制御の在り方として、熱需要家数が複数になってもポンプ揚程は熱供給側の抵抗と最遠端の熱需要家の抵抗のみで決定されるが、最遠端の熱需要家は二次側流量の大きさ等により切り替わることを示した上で、理想条件での搬送動力は、各熱需要家の流量のみを変数とする関数で表すことができるとしている。これにより、理想的な制御の在り方と理想条件での搬送動力に関する理論式を組合せた算出手法において、熱需要家毎の流量を入力値として、任意の瞬時ポンプ揚程と搬送動力を計算することができ、実物件にも適用できることを明らかにしている。加えて熱

需要家数を N に増やす場合は、既知である特定の条件が N 個になり、既知とする条件を極力出現頻度の高い熱負荷とすることで実負荷の再現精度を高めることができることを見いだしている。

第6章「搬送動力低減に対する各種制約の検証」では、相対値が十分小さく、かつ熱供給側と熱需要家が一對二となるモデルにおいて、搬送動力に影響を及ぼす制約を、理想条件における搬送動力との比較により検証している。制御上の制約は「制御起因」「インバータ周波数下限」であり、特にインバータ周波数下限についてはサステナブル運用を行わないと搬送動力が32%増加することを明らかにしている。また、設備構成上の制約は「ポンプの各種効率」「熱交換器能力の低下」「配管長の延長」であり、特に熱交換器能力の低下は搬送動力への影響が大きいことを指摘している。さらに、運用上の知見として、最遠端の熱需要家は最も流量の大きい熱需要家で決定できること、ポンプ揚程や各熱需要家の流量バランスが適切であるかの判断は最遠端の需要家の流量調整弁開度が指標となること、熱交換器の更新や増減段閾値変更の判断材料となる熱交換器能力の低下は搬送動力の観点では熱交換器の出入口温度差の基準値からの逸脱が指標となること、を明らかにしている。

第7章「熱需要家が複数の場合のポンプ揚程および搬送動力推定手法の提案」では、計算時間の短縮や不足するデータの補完を目的に、熱需要家毎の積算流量を入力として、任意の平均ポンプ揚程と搬送動力を推定する手法を提案している。この手法は、熱需要家数を N に増やす場合は既知である特定の条件を $N+1$ 個にするだけでよく、最遠端の熱需要家の切替回数が少ない、もしくは切替回数が多い場合でも積算流量の分割数を増やすことで、推定値の精度を高めることができる特長を有している。また、この手法を実負荷に適用する場合、実負荷を正弦波状の熱負荷に変換することで対応できることを明らかにしている。

第8章「結論」では、本研究で得られた研究成果を総括するとともに、本研究を実物件での設計や運用に活かすため、今後どのような研究に発展させることが望まれるかを述べている。

以上を要するに、本論文は熱供給側と熱需要家の情報ネットワーク構築により実現できる需給連携制御を導入した地域冷暖房システムの搬送システム構築、およびサステナブル運用において、最適な結果を導くためのプロセス標準化に資する知見を得ており、工業上および工学上貢献するところが大きい。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。