HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	熱エネルギーの面的利用の高効率化に向けた搬送動力の削減手法に関する研究
Author(s)	阿部, 佑平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14447号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14447
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81290
Type	doctoral thesis
File Information	Yuhei_Abe.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博 士 論 文

熱エネルギーの面的利用の高効率化に向けた搬送動力の削減手法に関する研究

北海道大学大学院工学院
空間性能システム専攻

阿 部　佑 平

目　次

第 1 章　序論

1.1　研究の背景……1

1.1.1　省エネルギー社会の実現に向けて……1

1.1.2　再生可能エネルギーの導入拡大……2

1.1.3　熱エネルギーの面的利用……2

1.1.4　エネルギーの地産地消……4

1.2　本研究の目的……5

1.3　既往の研究……5

1.3.1　熱エネルギーの面的利用に関する研究……5

1.3.2　搬送動力の削減に関する研究……6

1.4　本論文の構成……8

第 2 章　民生部門等を対象としたエネルギー消費量の調査

2.1　はじめに……15

2.2　調査方法……16

2.3　施設属性調査……17

2.4　エネルギー消費量調査……21

2.4.1　年間のエネルギー消費量……21

2.4.2　月別のエネルギー消費量……23

2.5　まとめ……26

第 3 章　都市におけるエネルギー需要の推定

3.1　はじめに……29

3.2　推定方法……30

3.3　エネルギー需要の推定結果……32

3.4　エネルギー需要の空間分布特性……36

3.5　まとめ……41

第 4 章　建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式

4.1　はじめに……45
4.2　実験概要……46
4.3　制御方式……50
4.3.1　回転数一定運転……50
4.3.2　末端差圧一定制御……50
4.3.3　推定末端差圧制御……50
4.3.4　二次側温水往き温度一定制御……50
4.3.5　バルブ開度制御……51
4.4　実験条件の確認……52
4.5　実験結果と考察……55
4.6　まとめ……68

第 5 章　建物群に対する熱供給を対象とした数値解析手法

5.1　はじめに……71
5.2　数値解析手法……72
5.2.1　数値解析手法の概要……72
5.3　数値解析手法の妥当性の確認……75
5.3.1　既往実験の概要……75
5.3.2　解析概要……75
5.3.3　解析結果と考察……79
5.4　まとめ……87

第 6 章　数値解析による差圧を用いない変流量制御方式の制御特性の評価

6.1　はじめに……91
6.2　差圧を用いない変流量制御方式「バルブ開度制御」の概要……92
6.3　実建物群を想定した数値解析……94
6.3.1　解析概要……94
6.3.2　バルブ開度制御の運用範囲の検討……97
6.3.3　バルブ開度制御の制御特性の評価……99

6.4　まとめ……...109

第 7 章　総括

7.1　本研究のまとめ……...111

7.2　今後の課題と展望……...114

謝辞……115

第１章

序論

1.1　研究の背景

1.1.1　省エネルギー社会の実現に向けて

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第 5 次報告書によれば、世界の最終エネルギー消費のうち、建築部門は 32%を占めている [1)]。日本における 2018 年度の最終エネルギー消費を見ると、家庭部門が 14%、業務他部門が 16.1%を占めており、最終エネルギー消費のうち、建築物によるエネルギー消費が 3 割を占めている [2)]。

COP21（国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議）では、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して 2℃未満に抑えることが掲げられるとともに、1.5℃に抑える努力を追及することについても言及された [3)]。日本は約束草案で、2030 年度に 2013 年度比で 26%の温室効果ガスを削減するとしている [4)]。政府の長期エネルギー需給見通しでは、2030 年度までの省エネ量を原油換算で 5,030 万 kL 程度としている [5)]。削減の内訳を見ると、産業部門 1,042 万 kL 程度、運輸部門 1,607 万 kL 程度、業務部門 1,226 万 kL 程度、家庭部門 1,160 万 kL 程度となっており、業務部門と家庭部門で合計 47%の削減が求められている。この目標を達成するには、化石燃料の使用制限、化石燃料に依存しない社会構築が急務であり、徹底した省エネルギー社会の実現が不可欠である。

省エネルギー社会を実現するためには、これまで数多くの研究蓄積がある個々の建物単体における高断熱化や高効率設備の導入等によるエネルギー消費量の削減は重要であるが、都市および地域的な視点からもエネルギー消費量を把握し、削減する取り組みが必要である。具体的には、街区等への再生可能エネルギー設備、コージェネレーションシステム、CEMS（Community Energy Management System）等の導入により、建築や都

市におけるエネルギー設備の高効率化を図るとともに、未利用エネルギーの有効活用などが考えられる。

1.1.2　再生可能エネルギーの導入拡大

省エネルギー社会の実現には、建築物の徹底した省エネルギーに加え、再生可能エネルギーの導入が必要である。しかし、平成 29 年度において、全国と北海道における一次エネルギー総供給量に占める新エネルギーの割合を見ると、それぞれ 7.6%、7.8%であり [6]、今後の導入拡大が不可欠である。特に、北海道は、広大な土地と地域資源が豊富であるため、再生可能エネルギーの賦存量が全国的にも大きいため、今後の更なる導入拡大が期待されている。

また、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による地震・津波および原子力発電の事故は、国民生活や経済のみならず、日本の今後のエネルギー供給のあり方に大きな影響を与えた。さらに、平成 30 年北海道胆振東部地震では、地震による揺れで、震源に近い北海道電力苫東厚真発電所の停止と送電線の事故の複合要因により、地震発生 18 分後から北海道全域同時停電（ブラックアウト）が発生し、社会経済活動に大きな二次的な被害をもたらした。このような大規模災害の経験を通して、非常時におけるエネルギー安定供給の重要性が顕在化し、太陽光や風力等の再生可能エネルギーを活用した分散型電源への関心が高まっている。

1.1.3　熱エネルギーの面的利用

近年、個々の建物ではなく、地区・街区レベルの複数の建物群においてエネルギー利用の最適化を図り、エリア全体のエネルギー消費量を削減することが可能な熱エネルギーの面的利用が注目されている。図 1-1 と表 1-1 に熱エネルギーの面的利用の類型と特徴を示す。規模や契約形態、法的位置づけ、供給形態などから「①地域熱供給事業型」、「②地点熱供給事業型（集中プラント型）」、「③建物間熱融通型」の 3 つに類型されている [7)~9)]。熱エネルギーの面的利用の代表的なものには、地域熱供給システムがあり、国内の大都市において導入が進められ、これまでに数多くの研究が行われている [例えば 10),11)]。また、地方都市では、エネルギーの地産地消の観点から木質バイオマスを熱源とした地点熱供給を行う事例も見られ、研究が進められている [12)~14)]。

複数の建物群に熱供給を行う場合、異なる負荷パターンを組み合わせることで負荷平準化や熱源機器容量の低減、熱源機の効率が低下する部分負荷運転の回避、再生可能エネルギーや未利用エネルギーの活用が可能になる等のメリットがある。建物単体では、

河川水、海水などの自然エネルギーや、ごみ焼却排熱や下水熱などの都市排熱の利用が困難となる場合が多い。これに対して、地域熱供給システムでは、本格的な活用が可能である。例えば、ごみ焼却排熱や工場排熱などの比較的高温の未利用エネルギーは、冷房、暖房、給湯の多様な用途に利用できる。熱エネルギーの面的利用は、再生可能エネルギーや未利用エネルギーの利用推進に寄与するシステムであり、省エネルギーや CO_2 排出量の削減が可能となる [15]。一方で、広域に冷水や温水を供給するため、ポンプの搬送動力や熱導管からの熱損失が大きくなり、省エネルギーの点では課題がある [16]。既設の熱供給プラントを対象とした調査によると、熱供給プラント内における電力消費量のうち、搬送系の占める割合は約 2 割と報告されている [17]。

今後、エネルギー需要密度の高い都市部では、都市機能のさらなる集約化（コンパクトシティ化）が進むと考えられる。都市構造の変革にあわせてエネルギーの面的利用を推進することで、一層の省エネルギーと CO_2 排出量の削減が期待される。また、エネルギーの面的利用は、エネルギーシステムの多重化による災害緊急時等の都市の業務・生活機能の継続機能といったセキュリティの向上にも貢献するため、都市の低炭素化や高機能化の観点からも重要なシステムであると言える [18]。

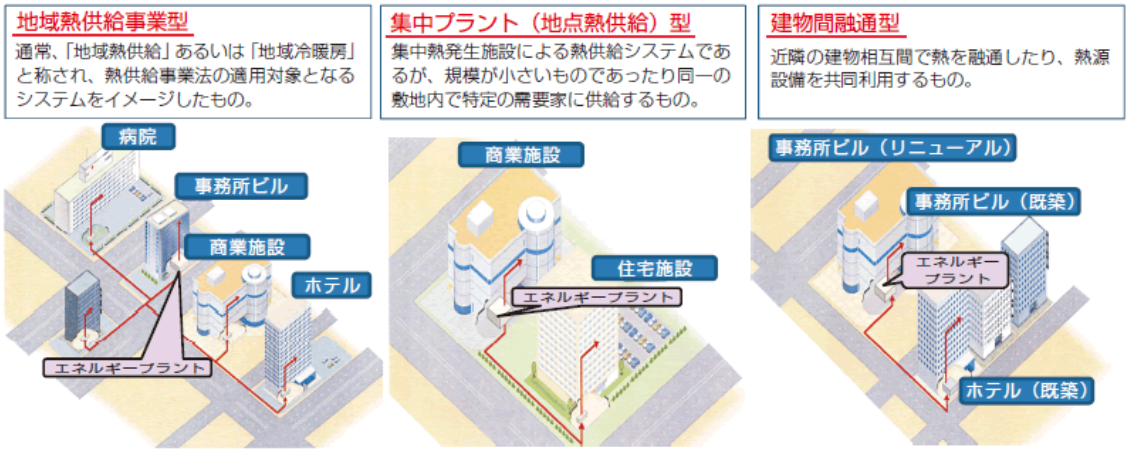


図 1-1　熱エネルギーの面的利用の類型 [8]

表 1-1　熱エネルギーの面的利用の類型と特徴 [9)]

分類	地域熱供給事業型	地点熱供給事業型 (集中プラント型)	建物間熱融通型
概要	通常「地域熱供給」あるいは「地域冷暖房」と称され、その多くは熱供給事業法の適用対象となるシステム。地域冷暖房プラント間を接続するものもある。	集中熱発生施設による熱供給システムであるが、規模が小さいものであったり、同一の敷地内で特定の需要家に供給するもの。	近隣の建物相互間で熱を融通したり、熱源設備を共同利用するもの。
規模	大 (加熱能力 21GJ/h 以上)	中～小	小
契約等	熱供給事業法に基づく供給義務（供給条件は供給規定に基づく）	供給者・需要家間の契約に基づく供給義務（供給条件は契約に基づく）	建物所有者同士の相互契約に基づく供給義務（供給条件は相互契約に基づく）

1.1.4　エネルギーの地産地消

近年、エネルギーの地産地消による産業振興や地域経済の活性化が期待されている。道内市町村においても、地域のエネルギー資源を地域で利用する取り組みが行われており、中でも CO_2 排出量の削減に効果がある木質バイオマスエネルギーの利用が注目されている[例えば 19)]。しかし、木質バイオマスボイラは化石燃料ボイラに比べイニシャルコストが非常に高く、採算性を確保するためには、年間を通じて大きな熱需要のある宿泊施設等への導入や、複数の建物群にまとめて熱供給することを検討する必要がある。しかし、このようなエネルギーの地産地消の取り組みは、地方都市で行われることが多い。北海道の地方都市において、建物群が密集しているのは中心市街地の限られたエリアである。このため、複数の建物群に対して熱供給をする場合、熱導管の距離が長くなり、ポンプの搬送動力や熱導管からの熱損失が大きくなる。今後のエネルギーの地産地消を推進していくうえでも、熱供給システムの高効率化に関する技術開発が必要である。

1.2　本研究の目的

環境負荷を低減し、省エネルギー社会を実現するには、建築物の省エネルギーは喫緊の課題である。この課題を解決するため、熱エネルギーの面的利用はひとつの有効な手段であり、熱源機器の高効率な運転や再生可能エネルギーや未利用エネルギーの活用により、建物単体では成し得ない省エネルギーやCO_2排出量の削減が期待される。

しかしその一方で、熱エネルギーの面的利用によるエネルギー利用の高効率化を実現するには、省エネルギーの観点から特に課題となっているポンプの搬送動力削減に対する技術開発が必要である。搬送動力を削減するためには、ポンプの変流量制御が有効であるが、差圧計や流量計等の測定機器を導入する必要があり、イニシャルコストが増大する。また複雑な制御システムになると、運用後の調整が困難な場合も考えられる。このため、動力の削減効果はもちろんのこと、シンプルで分かりやすく、かつイニシャルコストを最小限に抑えた制御システムの開発が望まれる。

したがって、本研究は、道内市町村を対象に熱エネルギーの面的利用の導入可能性を示すとともに、その高効率化に向け、ポンプの搬送動力の更なる削減と制御システムにかかるイニシャルコストの削減を目指した差圧を用いない変流量制御方式に関する今後の技術開発に知見を与えることを目的とする。

1.3　既往の研究

本研究に関連する熱エネルギーの面的利用や搬送動力の削減に関する既往の研究について、以下に簡単にまとめる。

1.3.1　熱エネルギーの面的利用に関する研究

国内における熱エネルギーの面的利用に関する研究については、佐土原ら[10),20)]による東京都23区を対象とした地域冷暖房の導入に関する研究、下田ら[21)]による大阪市を対象としたエネルギー需要のモデル化とエネルギーシステムの更新シナリオに関する研究、山口ら[22)]による大阪市を対象とした地域冷暖房の導入可能性評価に関する研究、坂本ら[23),24)]による名古屋市を対象としたエネルギー需要と未利用エネルギーの活用による省エネルギー効果に関する研究、石河・村木ら[25)]による東京都23区を対象としたコージェネレーションの導入による最適な市街地のあり方に関する研究などがある。これらの研究は、主に温暖地におけるエネルギー需要密度の高い大都市を対象としたものである。また、竹部ら[26)]による地域冷暖房を利用した大規模環境建築のZEB評価に関

する研究、渡邊ら [27]による地域冷暖房の蓄熱槽を活用したデマンドレスポンスに関する研究も見られる。一方で、エネルギー需要密度の低い地方都市を対象とした熱エネルギーの面的利用に関する研究も見られるものの[例えば 28]、寒冷地の地方都市を対象とした研究はほとんど行われていない。しかし、海外では、熱負荷密度の低い地方都市であっても地域熱供給が行われている。オーストリアでは、数棟の建物を数百 m の熱導管で接続する小規模なバイオマス地域熱供給（マイクロ地域熱供給）が行われており、学校や役場などの公共施設の中にバイオマスボイラを導入し、その施設へ熱を供給するだけではなく、周辺の戸建住宅などへ熱導管を接続して熱供給を行っている事例が多い [29]。

地方都市は、今後、少子高齢化による人口減少、中心市街地の衰退がより一層進む中で大きく都市構造が変わることが予想されるため、中長期視点から都市および地域のエネルギー需給について検討する必要があると考える。また、寒冷地は温暖地に比べ、特に冬期の暖房による熱需要が多く、温暖地のエネルギー需要構造とは大きく異なることが予想される。

1.3.2　搬送動力の削減に関する研究

ポンプの搬送動力の削減の削減に関する研究については、佐藤ら [30]が最小差圧変流量制御を対象に、他の変流量制御との比較によるケーススタディを行い、流量の偏在が搬送動力に与える影響を確認し、搬送動力の低減効果や搬送効率を理論的に検討している。富樫 [31]は最小差圧変流量制御の搬送動力を予測するために、複雑な配管回路網を収束計算せずに簡易に解ける新たな回路網モデルを開発している。國友ら [32)~35)]は需給連携制御を導入した地域冷暖房システムにおいて、搬送動力の低減効果や制約条件の影響をシミュレーションにより検証している。趙ら [36]は一般的な設計法で課題となっている低負荷時の非効率な運転を解決する方策として、2 次ポンプにおいて小流量・低揚程のポンプを直列配置するポンプ直列配置を提案し、その省エネルギー効果について検討している。これらの研究は、主にシミュレーションにより搬送動力の低減を研究したものである。また、Liu ら [37)~39)]は中央ポンプ制御方式と分散ポンプ制御方式の省エネルギーポテンシャルを実験と CFD シミュレーションにより検討している。

一方で、実建物の実測調査を行い、搬送動力の低減を検討した研究も見られるが例えば [40]、個別の制御方式を特定の熱負荷で評価している研究がほとんどである。複数の制御方式を同一条件で評価した研究では、上野・射場本ら [41]が実規模（約 5,000 ㎡）を想定した変流量実証装置を用いて、実験により変流量制御方式別の搬送動力等に関する制御特性を評価している。また、百田ら [42]も VWV 制御方式別の省エネ効果を示している

が、建物単体を対象とした従来の差圧による変流量制御方式（吐出圧一定制御、末端差圧制御、推定末端圧制御）の評価に留まっている。

これらの既往研究では、差圧を用いてポンプの回転数や台数を制御する変流量制御方式を対象としている。差圧を用いた変流量制御方式は、運用後に差圧の調整が必要な場合も報告されており[43]、差圧の設定によっては圧力が過剰となり、運用当初から十分な搬送動力の削減効果が期待できない場合もある。

1.4　本論文の構成

図 1-2 に本論文の構成を示す。本論は全 7 章から構成される。各章の概要は以下のとおりである。

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について概説し、本研究の位置付けを示した。

第 2 章「民生部門等を対象としたエネルギー消費量の調査」では、北海道富良野圏域 5 市町村（富良野市、上富良野町、中富良野町、南富良野町、占冠村）を対象に民生部門エネルギー等の需要構造を明らかにするために、自治体が所有する公共施設を対象とした施設属性調査、およびエネルギー消費量調査を行った。エネルギー消費量調査より、浴場や温水プール等の温浴施設を有する施設のエネルギー消費量が特に多く、年間の給湯エネルギーが暖房エネルギーを上回る施設もあることが分かった。これらの施設では、暖房のみならず給湯の省エネルギー化が必要である。また、各施設のエネルギー消費量のデータより、建物用途別のエネルギー消費原単位と各月のエネルギー消費量の変動を示す変動係数を作成した。

第 3 章「都市におけるエネルギー需要の推定」では、北海道富良野市の民生部門を対象に、エネルギーのエリアマネジメントを検討するために必要となる都市のエネルギー需要を推定した。第 2 章で作成した建物用途別のエネルギー消費原単位と都市計画基礎調査による建物の属性データを用いてエネルギー需要を推定したところ、年間の電力需要は約 220TJ、熱需要は約 731TJ となり、熱需要は電力需要の約 3.3 倍であることが分かった。熱需要を暖房と給湯に分離すると、年間の暖房および給湯需要は、それぞれ約 378TJ、約 354TJ と推定され、暖房と給湯需要はほぼ同じであった。また、建物用途別で見ると、電力および熱需要ともに、住宅での需要が年間を通じて最も多いため、民生部門のエネルギー需要の削減には、住宅の省エネルギーが重要である。さらに、富良野市のエネルギー需要を 250m×250m メッシュ間隔で分析し、空間分布特性を把握した。熱負荷密度と熱電比を入力データとしてクラスター分析を行うことにより、各メッシュの特性を明らかにした。夏期でも熱需要のある医療施設や宿泊施設の占める面積割合が大きいエリアでは、熱負荷密度が 4.2TJ/ha 以上となり、熱エネルギーの面的利用による省エネルギー効果が期待できることを示した。

第 4 章「建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式」では、建物群に対する熱供給を対象に、従来の差圧によるポンプの変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式（二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御）を開

発し、その制御特性を実験により評価した。開発する変流量制御方式の評価にあたっては、従来の差圧による変流量制御方式と同一条件において制御特性を比較した。2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した実験を行い、変流量制御方式別の搬送動力等の基礎データを収集した。実験結果より、開発した変流量制御方式でもポンプの回転数を制御でき、搬送動力の削減効果があることを明らかにした。これにより、差圧計を用いなくてもポンプの回転数を制御することが可能となり、制御システムにかかるイニシャルコストを削減できる可能性を示した。

第 5 章「建物群に対する熱供給を対象とした数値解析手法」では、建物群に対する熱供給を対象に、ポンプの変流量制御方式の導入による搬送動力等の制御特性を定量的に評価するため、流体移動と熱移動を同時に解析する手法を検討した。流体移動はポンプの特性（流量-揚程特性曲線）を考慮して流体管路網を用いて計算し、熱移動は各部位を節点（ノード）と熱コンダクタンスからなる熱回路網を後退差分法により解いた。数値解析手法の妥当性を検証するため、第 4 章で行った実験を対象に解析を行った。一次側流量、末端差圧、二次側温水往き温度について、実験結果と解析結果を比較したところ、両者は概ね一致したため、解析手法の妥当性を確認した。

第 6 章「数値解析による差圧を用いない変流量制御方式の制御特性の評価」では、第 4 章で開発したバルブ開度制御を対象に第 5 章で検討した数値解析手法を用いて、熱負荷パターンの異なる 3 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した数値解析を行い、制御特性を評価した。解析結果より、バルブ開度制御は、従来の差圧による変流量制御方式よりもインバータでポンプの回転数を下げて運転することが可能であり、水動力を比較すると 10～17%程度の削減効果があることを明らかにした。また、バルブ開度制御は、建物側の熱負荷が増加し、電動バルブの開度が全開になった時の二次側温水往き温度の低下を検知することでポンプの回転数を制御し、必要な流量を供給できるようにしている。この温度低下の許容範囲を検討したところ、二次側温水往き温度の設定が 60℃の場合では、建物側の熱負荷を満足するために必要な一次側流量を供給し、かつ二次側流量を大きくしないためには、許容範囲を 2℃以内にする必要があることを示し、適正な運用範囲を明らかにした。

第 7 章「総括」では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題と展望について述べた。

第 1 章　序論
・熱エネルギーの面的利用のメリット・デメリット
　メリット：再生可能エネルギー等の活用による省エネルギー、CO_2 排出量の削減
　デメリット：ポンプの搬送動力の増大、熱導管からの熱損失
・本研究の目的：道内市町村における熱エネルギーの面的利用の導入可能性を示し、高効率化に向けたポンプの搬送動力の削減手法を検討

熱エネルギーの面的利用の導入可能性に関する調査

第 2 章　民生部門等を対象としたエネルギー消費量の調査
・北海道富良野圏域 5 市町を対象に調査
・建物用途別のエネルギー消費原単位等の作成

第 3 章　都市におけるエネルギー需要の推定
・北海道富良野市を対象に都市のエネルギー需要を推定
・熱エネルギーの面的利用が有効なエリアを抽出

高効率化に向けたポンプの搬送動力の削減手法に関する検討（デメリットの解決）

第 4 章　建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式
・ポンプの搬送動力の更なる削減を目指した変流量制御方式を提案
・実験により搬送動力の削減効果を評価

第 5 章　建物群に対する熱供給を対象とした数値解析手法
・流体移動と熱移動を同時に解析可能な数値解析手法の開発
・数値解析手法の妥当性の確認

第 6 章　数値解析による差圧を用いない変流量制御方式の制御特性の評価
・実建物群を想定した搬送動力の削減効果の評価
・提案する変流量制御方式の適正な運用範囲の明確化

第 7 章　総括
・本研究のまとめ、今後の課題と展望

図 1-2　本論文の構成

参考文献

1) 環境省：気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書（AR5）サイクル，http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/，2020.12.10 参照
2) 経済産業省資源エネルギー庁 : 令和元年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書），https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020pdf/whitepaper2020pdf_2_1.pdf，2020.12.10 参照
3) 環境省：国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）及び京都議定書第 11 回締約国会合（COP/MOP11）の結果について，http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/index.html，2020.12.10 参照
4) 地球温暖化対策推進本部：日本の約束草案，https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/mat01_indc.pdf，2020.12.10 参照
5) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し 平成 27 年 7 月，https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf，2020.12.10 参照
6) 北海道経済部：北海道エネルギー関連データ集，2020.4
7) エネルギーの面的利用促進研究会 : エネルギーの面的利用に関する調査報告書，2005.3
8) 経済産業省資源エネルギー庁 :「平成 21 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2010） 第 1 部 エネルギーをめぐる課題と今後の政策，p.116
9) 一般社団法人都市環境エネルギー協会 : 地域冷暖房技術手引書改訂第 4 版，2013.11
10) 佐土原聡, 尾島俊雄 : 地域冷暖房の熱需要特性による東京の地区分類に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.364，pp.86-93，1986.6
11) 下田吉之，水野稔，内海巖，横林直規：環境保存型地域熱供給システムの総合評価手法に関する研究 第 1 報 評価指標の選定と各指標の計算手法，空気調和・衛生工学会論文集，No.70，pp.59-71，1998.7
12) 福島明，魚住昌広 : バイオマスを用いた地域熱供給システムに関する調査研究，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.89，pp.111-114，2016.6
13) 山崎慶太，斉藤雅也，宿谷昌則 : 木質バイオマスを活かす地域熱供給システムのエクセルギー解析 北海道下川町を事例として，日本建築学会環境系論文集，Vol.81，No.721，pp.295-305，2016.3
14) 阿部佑平，月館司 : 公営住宅を対象とした木質バイオマスによる熱供給システムに

関する研究 その 1 竣工初年度における運用評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1335-1336，2018.9
15) 一般社団法人都市環境エネルギー協会 : 地域冷暖房技術手引書改訂第 4 版，2013.11
16) 小山一茂，岡井大八，米良まり子 : 地域冷暖房における搬送動力と熱ロスに関する調査，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.157-160，2014.9
17) 国立研究開発法人建築研究所 : 新設地域熱供給プラントの一次エネルギー換算係数に関する研究，建築研究資料，No.201，2020.11
18) 柏木孝夫，浅野浩志，船橋信之他：スマートエネルギーネットワーク最前線 新エネルギー促進、制御技術からシステム構築、企業戦略、自治体実証試験まで，2012.4
19) 下川町：森林未来都市 エネルギー自立と地域創造 北海道下川町のチャレンジ，2014.7
20) 河原透，佐土原聡，尾島俊雄 : 低温熱媒地域冷暖房導入に伴う東京の地区分類に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.448，pp29-38，1993.6
21) 下田吉之，山口容平，浅井崇志，水野稔 : 地区を基本単位とした都市エネルギー需給のモデル化と将来シナリオに関する研究，日本都市計画学会都市計画論文集，No.41-3，pp833-838，2006.10
22) 山口容平，下田吉之 : 建物規模・用途別の熱源システム採用状況を考慮した地域冷暖房施設導入可能性評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.663，pp509-515，2011.5
23) 坂本雄三，中原信生，元田晃二 : 名古屋市域における未利用エネルギーの活用による省エネルギー効果の推計と評価 第 1 報 エネルギー需要と未利用エネルギーの賦存量，空気調和・衛生工学会論文集，No.57，pp73-82，1995.2
24) 坂本雄三，中原信生，元田晃二 : 名古屋市域における未利用エネルギーの活用による省エネルギー効果の推計と評価 第 2 報 省エネルギー効果の推計と評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.58，pp111-118，1995.6
25) 石河正寛，村木美貴，菊地啓 : エネルギー供給システムからみた最適市街地のあり方に関する研究－コージェネレーションに着目して－，日本都市計画学会都市計画論文集，Vol.47，No.3，pp937-942，2012.10
26) 竹部友久，中川優一 : 地域冷暖房を利用した大規模環境建築における ZEB 評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp1351-1354，2019.9
27) 渡邊幸芳，福田敦，小澤浩，水谷佳奈，高田修，小材幸稔 : 多彩なエネルギーリソ

ースを活用したバーチャルパワープラント構築の実証 （第 3 報）蓄熱システムを活用したディマンドリスポンス実証結果報告，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.221-224，2017.9

28) 住友雄太，古林敬顕，中田俊彦：バイオマス資源と熱需要分布を考慮した中山間地域熱供給システムの設計，エネルギー・資源学会論文誌，Vol.36，No.5，pp1-11，2015.9

29) 三浦秀一：第 3 回「オーストリアにおける森林によるマイクロ地域熱供給の取り組み」，熱供給，Vol.82，2012

30) 佐藤文秋，竹迫雅史，北村邦彦，山下博幸，佐々木邦治，安田健一，野部達夫：最小差圧変流量制御による搬送効率向上に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集，No.259，pp.21-30，2018.10

31) 富樫英介：ポンプの最小差圧変流量制御のエネルギー消費量予測，日本建築学会環境系論文集，Vol.84，No.757，pp.281-289，2019.3

32) 國友理，佐藤勲，荒木和路，廣島雅則，中村元：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 第 1 報 基礎特性の検証，空気調和・衛生工学会論文集，No.255，pp.1-11，2018.6

33) Osamu Kunitomo, Isao Satoh, Masanori Hiroshima: Reduction of Conveyance Power Consumption of District Cooling and Heating Systems using Demand-Supply Coordinated Control Part 2 - Energy Saving Effect of Demand-Supply Coordinated Control System, E3S Web of Conferences, Volume 111, id.06008, CLIMA 2019 Congress

34) 國友理，佐藤勲，廣島雅則，中村元：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 第 3 報 配管長が供給温度および搬送動力へ与える影響に関する考察，空気調和・衛生工学会論文集，No.273，pp.1-8，2019.12

35) 國友理，佐藤勲，廣島雅則，中村元：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 第 4 報 熱需要家数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, 空気調和・衛生工学会論文集, No.283，pp.1-11，2020.10

36) 趙飛，住吉大輔：建築空調システムにおけるポンプ直列配置の省エネルギー効果，空気調和・衛生工学会論文集，No.230，pp.9-19，2016.5

37) Liu, M.; Ooka, R.; Choi, W.; Ikeda, S. Experimental and numerical investigation of energy saving potential of centralized and decentralized pumping systems. *Appl. Energy* **2019**, 251, 113359.

38) 劉明哲，大岡龍三，池田伸太郎，崔元準，増田正夫：再生可能エネルギー利用のための水循環分散型ヒートポンプシステムの開発 第 3 報 空調用水搬送システムにおける分散ポンプ方式の省エネルギー性に関する検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.9-12，2016.9

39) 劉明哲，大岡龍三，池田伸太郎，崔元準：再生可能エネルギー利用のための水循環分散型ヒートポンプシステムの開発 第 6 報 CFD による配管内圧力損失の解析，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.9-12，2017.9

40) 笹嶋賢一，山本智美，田中亨平，廣島雅則，國友理，山田崇暁，仲沢竜一：スマートエネルギーネットワークによる省 CO_2 まちづくり 第 6 報 最適最低圧（実末端圧）送水制御による省エネ・省 CO_2 効果の実績評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.261-264，2015.9

41) 上野友嗣，射場本忠彦，柳原隆司，百田真史，羽原宏美，澤地孝男，赤嶺嘉彦，釱持尚紀，米倉賢志郎：非住宅建築物を対象とした先導的省エネルギー技術の評価手法に関する研究 その 14 変流量制御方式別による省エネルギー効果の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.201-204，2018.9

42) 百田真史，射場本忠彦，赤司泰義，羽原宏美，澤地孝男，赤嶺嘉彦，林鍾衍，宮田翔平，米倉賢志郎：ビル空調・熱源システムの変風量・変流量制御による省エネ効果の評価方法に関する研究 第 1 報 研究の全体概要と変流量制御に関する実験的検討について，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.157-160，2019.9

43) 坂本裕，山本弦，藤野健治，佐々木邦治：大規模複合建物における空調用ポンプ搬送動力低減への取り組み，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.57-60，2013.9

第２章

民生部門等を対象としたエネルギー消費量の調査

2.1　はじめに

都市のエネルギー需要を把握するためには、都市にあるすべての建物のエネルギー消費量を把握する必要があるが、これは現実的に困難である。このため、建物用途別に整備されたエネルギー消費原単位と建物の延床面積を掛け合わせて推定する手法がよく用いられる。一般的に用いられているエネルギー消費原単位は、温暖地を対象としたものが多く[例えば 1),2)]、寒冷地の都市や地域の気候特性を踏まえたエネルギー需要を推定するのが困難である。

本章では、研究の対象とする北海道富良野圏域 5 市町村（富良野市、上富良野町、中富良野町、南富良野町、占冠村）において、気候特性を踏まえた都市のエネルギー需要を推定するために、民生部門エネルギー等の需要構造を明らかにすることを目的とする。まず、自治体が所有する公共施設を対象とした施設属性調査を行い、施設の竣工年度、延床面積、熱源種別、機器種別、利用状況等を調査する。さらに、エネルギー消費量を行い、建物用途別のエネルギー消費量の特徴を把握するとともに、エネルギー消費原単位と各月のエネルギー消費量の変動を示す変動係数を作成する。

なお、本章は道総研戦略研究「地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築」により実施した。

2.2　調査方法

調査対象は、北海道の道央に位置する富良野圏域 5 市町村（富良野市、上富良野町、中富良野町、南富良野町、占冠村）が所有する公共施設（建築物を伴う施設）とした。なお、公営住宅、教員住宅、公園内施設および国・北海道が所有する公共施設は対象外とした。

表 2-1 に調査項目を示す。調査は、施設属性調査とエネルギー消費量調査について実施した。施設属性調査では、富良野圏域 5 市町村を対象に、施設の竣工年度、延床面積、熱源種別、機器種別、利用状況等を調査した。エネルギー消費量調査では、富良野市、上富良野町および中富良野町の 3 市町を対象に、2012 年 4 月～2014 年 3 月の 2 年間における電力、重油、灯油、プロパンガスの月別消費量を調査した。調査は各市町村のエネルギー施策担当部署に依頼し、2014 年度に実施した。

表 2-1　調査項目

項目		調査内容	
施設属性調査	名称等	建物名称、住所、所管部署、竣工年度、延床面積(m^2)、増築及び断熱・設備仕様の変更に関わる改修の年度・内容	
	熱源種別	暖房、給湯、ロードヒーティング	
	機器種別	暖房、冷房	
	利用状況	共通	職員数（契約職員等含む）
		庁舎、図書館等	年間利用者数
		学校等	児童・生徒数
		病院等、宿泊施設等	ベッド数・宿泊定員 年間外来・日帰り利用者数
		処理施設	処理量（t/年など単位記入）
エネルギー消費量調査		2012年4月～2014年3月の電力、重油、灯油、プロパンガスの月別消費量	

2.3　施設属性調査

表 2-2 に施設属性調査を行った施設の用途分類と件数を示す。建物用途は、エネルギーの使用の合理化に関する建築主等および特定建築物の所有者の判断の基準の用途区分を参考に、本庁舎、職員 10 名以上庁舎、図書館等、宿泊施設等、病院等、店舗等、学校等、体育館等、処理施設等の 9 つの用途に分類した。本調査における対象施設は、合計で 187 施設である。多くの公共施設は各市町村の中心市街地に立地しているが、学校、集会場等は各集落に、宿泊施設等、処理施設等は郊外にも立地している。

表 2-2　用途分類と調査対象施設の件数

分類	具体例	施設属性調査件数	エネルギー消費量調査件数	
本庁舎	市役所、役場庁舎	5	3	(2)
職員10名以上庁舎	支所、分庁舎	6	2	(3)
図書館等	児童センター、集会場、その他事務系庁舎(職員10名未満)	50	20	(17)
宿泊施設等	宿泊施設、寮	7	3	(4)
病院等	病院、診療所、老人福祉施設	14	9	(2)
店舗等	物産館、道の駅	3	0	(3)
学校等	学校、保育所	44	32	(12)
体育館等	体育館、スポーツ施設、プール、スキー場ロッジ	13	8	(4)
処理施設等	廃棄物処理施設、水道・下水道施設、火葬場、給食センター、食品加工施設、車庫	45	21	(18)
計		187	98	(65)
			163	

※エネルギー消費量調査件数の(　)内の数字は、エネルギービジョンで調査した件数

図 2-1～2-4 に施設属性調査の結果を示す。それぞれ属性不明の施設を除く件数を N 数として図中に示している。また、熱源と機器は主な種別により分類している。

図 2-1 に建設年代の度数分布を示す。1971～2000 年に建設されている施設が多く、近年では新設される施設は減少傾向にある。特に、1981～1990 年に建設されている施設が多く、これらの施設は建設から約 30 年を迎えるため、今後設備更新が必要となる施設が多いと考えられる。

図 2-2 に暖房熱源種別の度数分布を示す。灯油を暖房熱源としている施設が最も多く、その中でも用途分類で図書館等に該当する施設で多く使用されている。また、比較的規模の大きい庁舎や学校では、A 重油が使用されている。ヒートポンプは、温泉熱回収型が 1 件であるが、2014 年度以降に 3 件の施設で、地中熱ヒートポンプの使用を開始している（燃焼機器との併用を含む）。木質燃料は 3 件で、近年、南富良野町および占冠村で地域材の活用を意図した木質ボイラーの導入が進んでいる。

図 2-3 に暖房設備種別の度数分布を示す。集中暖房と FF ストーブが同程度の割合である。集中暖房のうち約半数が温水暖房であるが、本庁舎、体育館等では温風暖房が主に採用されている。また、上富良野町および中富良野町の学校は、防衛省から防音工事の補助を受けている事情から、ほとんどが換気を兼ねた温風暖房が採用されている。

図 2-4 に給湯熱源種別の度数分布を示す。温浴施設や熱需要の多い処理施設で A 重油、灯油が使用されているほかは、多くが LPG である。ただし、上富良野町で電気ヒーター式、占冠村で灯油が多く、地域の熱源供給事情が影響している可能性がある。

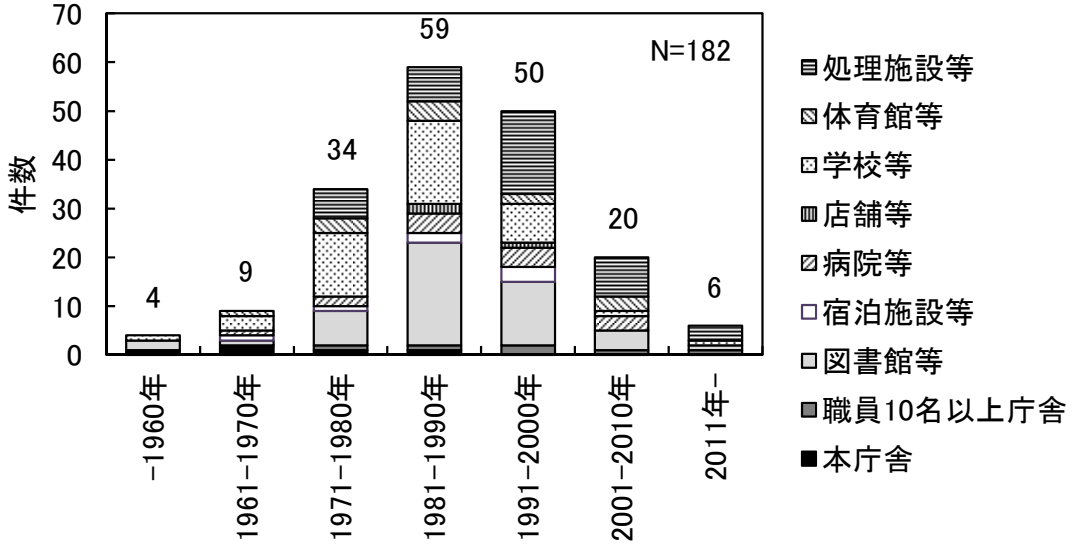


図 2-1　建設年代の度数分布

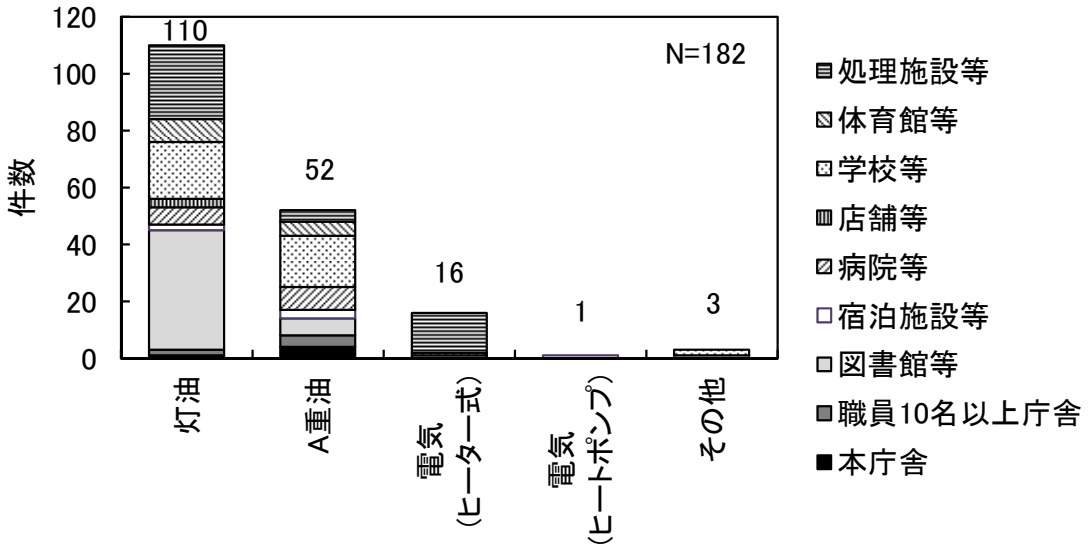


図 2-2　暖房熱源種別の度数分布

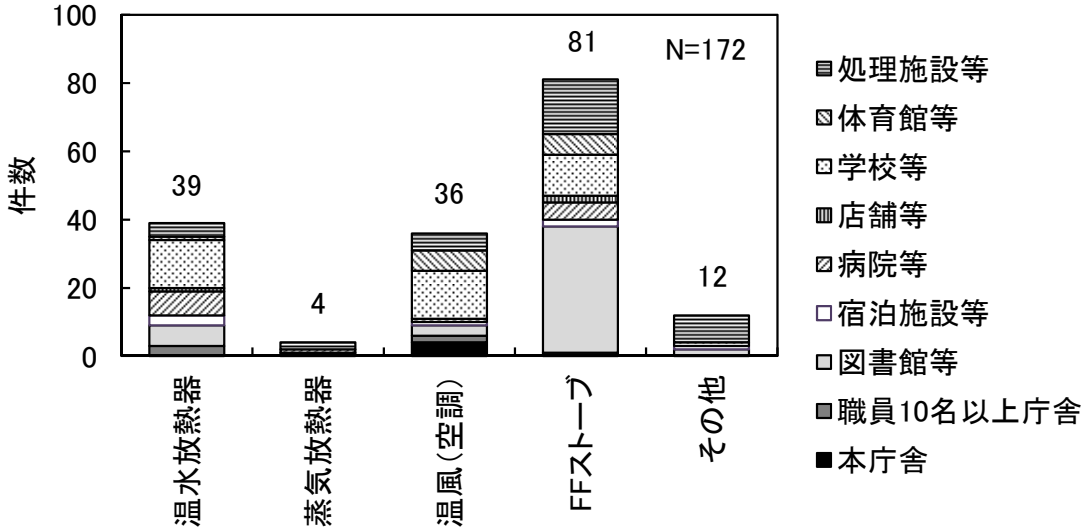


図 2-3　暖房設備種別の度数分布

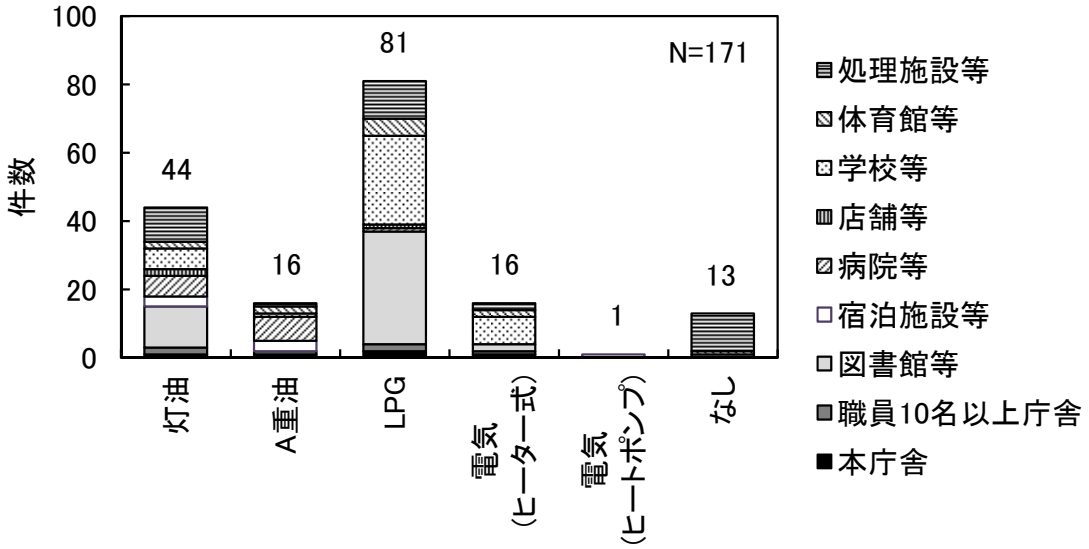


図 2-4　給湯熱源種別の度数分布

2.4　エネルギー消費量調査

2.4.1　年間のエネルギー消費量

表 2-2 にエネルギー消費量調査を行った施設の用途分類と件数を示す。本調査における対象施設は、合計で 98 施設である。一方、富良野圏域では、中富良野町を除く 4 市町村（富良野市、上富良野町、南富良野町、占冠村）で、NEDO の「地域新エネルギー・省エネルギービジョン策定等事業」により、新エネルギービジョンまたは省エネルギービジョンを策定している[3)~7)]（以下、「エネルギービジョン」という）。これらのエネルギービジョンにおいても、公共施設の年間のエネルギー消費量が調査されている。そこで、今回エネルギー消費量調査を行わなかった施設については、エネルギービジョンに記載の値を参考に用いることとした。ただし、調査年に最大 10 年の乖離があるため、都道府県別エネルギー消費統計[8)]の北海道のデータを用い、業務他（第三次産業）における各年の消費量と 2012 年の消費量の比を用いて補正を行った[注 1)]。

図 2-5 に各施設のエネルギー消費量の熱および電力内訳と延床面積を示す。熱および電力の消費量はそれぞれ燃料と電力の消費量から熱量換算した最終エネルギー消費として示している[注 2)]。また、表 2 に示す用途分類ごとに、消費量の合計が昇順になるように並べている。浴場や温水プール等の温浴施設を有する施設に●印を付しているが、これらの施設のエネルギー消費量が特に多いことがわかる。また、処理施設等の中では、広域のごみ処理を担う焼却施設のエネルギー消費量が突出している。それ以外の処理施設等では、給食センター、食品加工施設、火葬場で熱の消費が多く、下水道処理施設、送水場で電力消費量が多い。

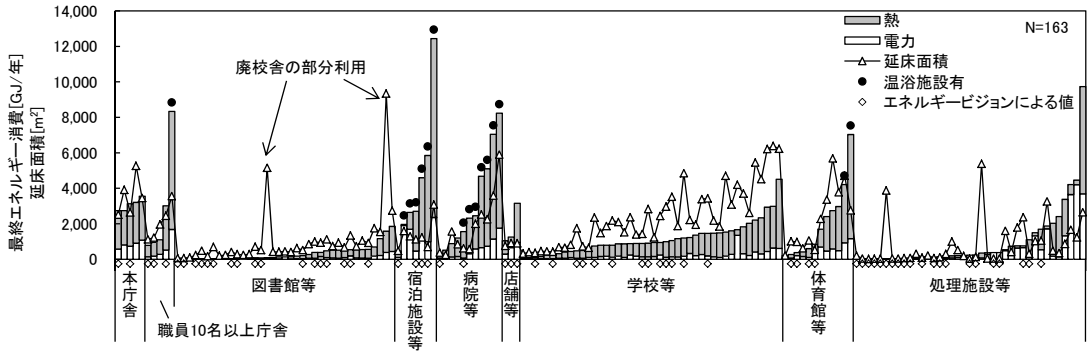


図 2-5　各施設のエネルギー消費量の熱・電力内訳と延床面積

図 2-6 にエネルギー消費量を延床面積で除して算出したエネルギー消費原単位を示す。図中には図 2-5 に示した施設のうち、熱需要の暖房と給湯の内訳を把握できた施設を示している。温浴施設を有する施設で給湯エネルギーが多く、中には暖房エネルギーを上回る施設も見られる。また、学校等のうち保育所、専門学校で給湯エネルギーがやや目立つが、他の施設では圧倒的に暖房エネルギーが多い。

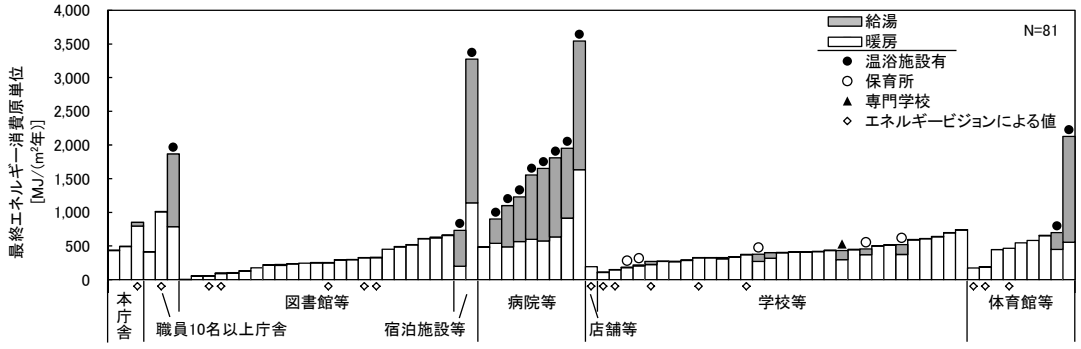


図 2-6　各施設のエネルギー消費原単位

図 2-7 に用途別のエネルギー消費原単位を示す。エネルギー消費原単位は用途別の平均値を示しており、処理施設等は延床面積とエネルギー消費量の相関が小さいため、本集計からは除いた。また、参考値として、非住宅建築物の環境関連データベース（以下、「DECC」という）[9]の北海道に該当する地域区分から集計した類似用途の値を、図中の○印で示す。

まず、本研究による原単位を見ると、熱と電力を合計した原単位は、宿泊施設等で最も大きく、店舗等、病院等、職員 10 名以上庁舎、体育館等、本庁舎、学校等、図書館等の順に小さくなった。熱と電力の内訳を見ると、各用途において電力よりも熱の原単位の方が大きい。熱の原単位は、宿泊施設等や病院等で大きく、図書館等、学校等で小さい傾向にあり、電力の原単位は、宿泊施設等や店舗等で大きく、図書館等、学校等で小さい傾向にあった。また、宿泊施設等の標準偏差が他の施設に比べ大きかったことから、他の用途に比べ、エネルギー消費量のバラツキが大きかったと言える。

次に、本研究による原単位と DECC の原単位と比較すると、本研究による原単位は宿泊施設等で特に大きな値となり、DECC の約 2.1 倍であった。これは調査対象施設の多くが大浴場を有し、温泉も 1 施設を除き加温が必要であることによると考えられる。また、宿泊施設等を除く他の用途では、本研究による原単位と DECC の原単位は、ほとんど同じ値であった。

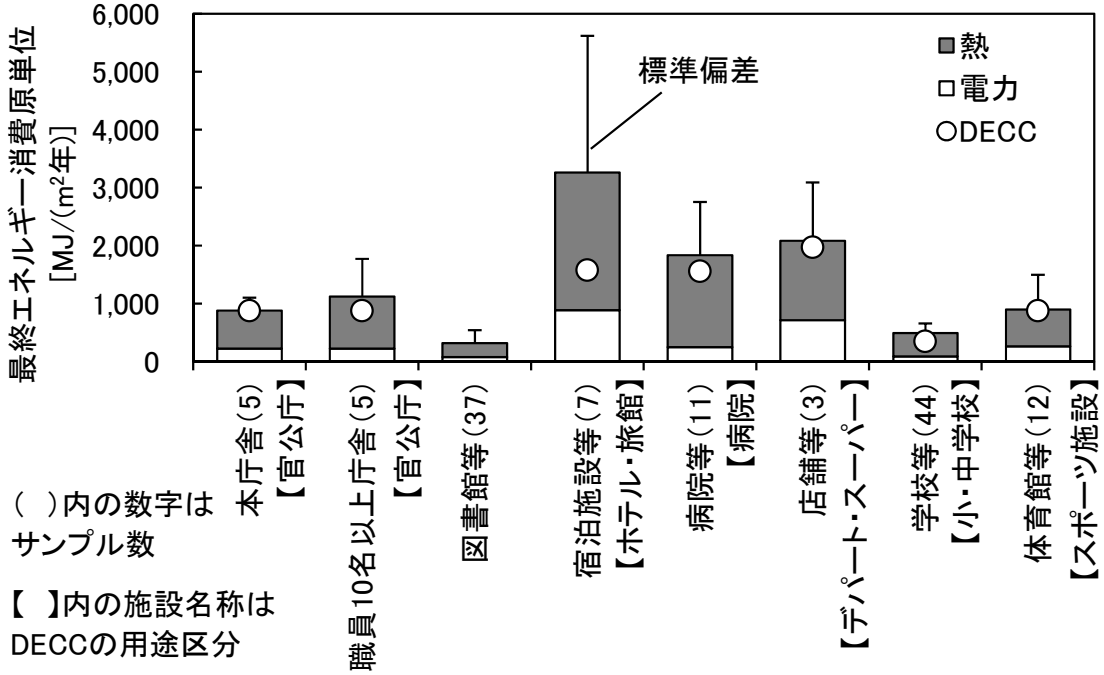


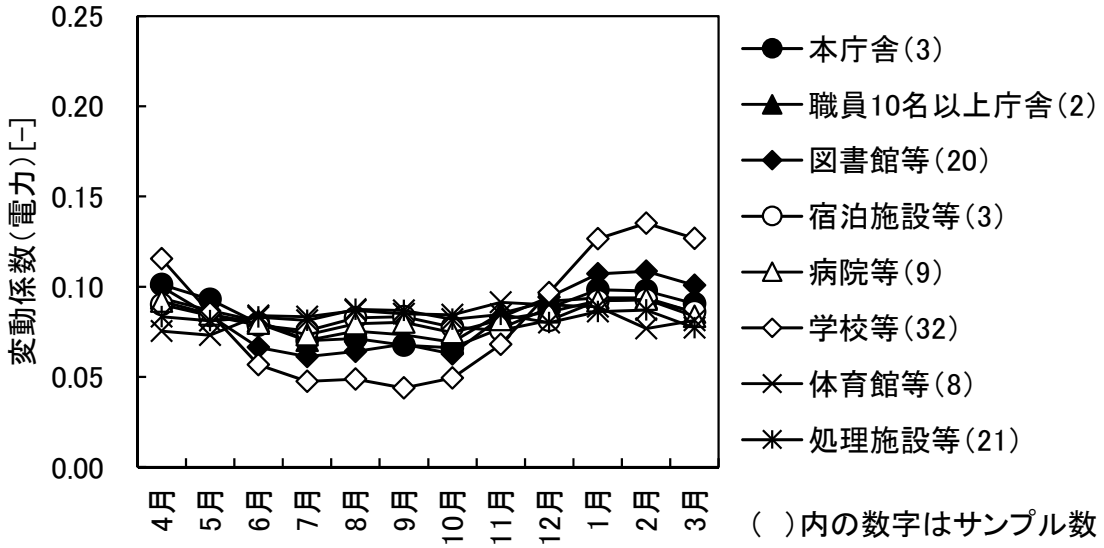
図 2-7　用途別のエネルギー消費原単位

2.4.2　月別のエネルギー消費量

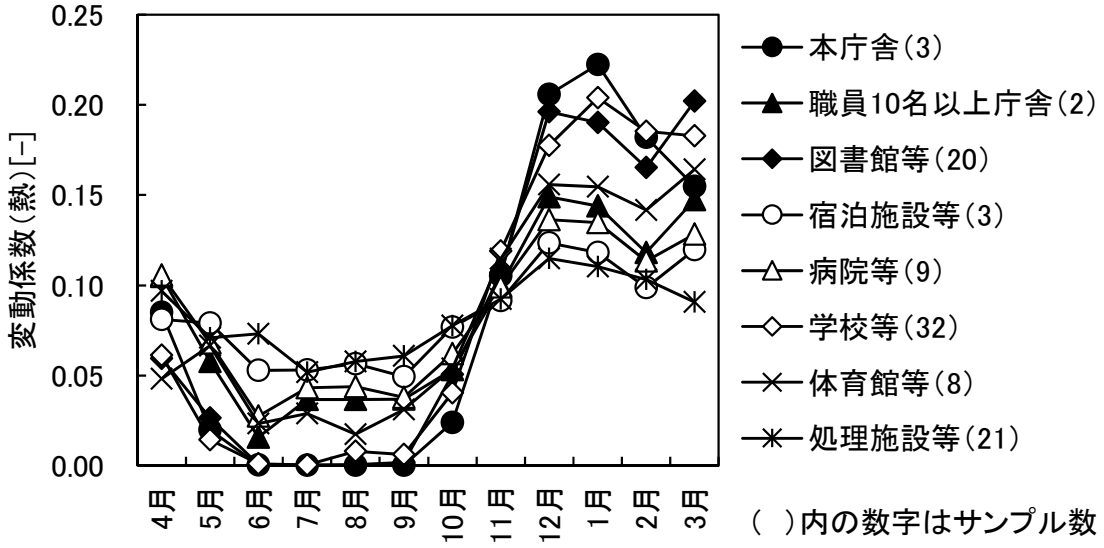
図 2-8 に用途別の電力および熱の変動係数を示す。変動係数は、月別エネルギー消費量を年間エネルギー消費量で除して算出し、図中には 2012～2013 年度の平均値を示している。

まず、電力需要の変動係数を見ると、電力消費量が少なく、使用時間もほぼ日中に限られる学校等や図書館等で冬期に増加する傾向にある。これは、断定はできないが、照明の点灯時間の違い等が影響していると考えられる。その他の用途では、電力消費量の季節変動は少なく、年間を通じてほぼ同じ値であった。

次に、熱需要の変動係数を見ると、本庁舎、図書館等、学校等で冬期に非常に大きく、これらの施設では夏の燃料消費がほぼゼロである。一方、処理施設等や宿泊施設等は季節変動が比較的少なく、病院等、体育館等も温浴施設のある場合は、夏期に熱需要が生じる。



(a)電力

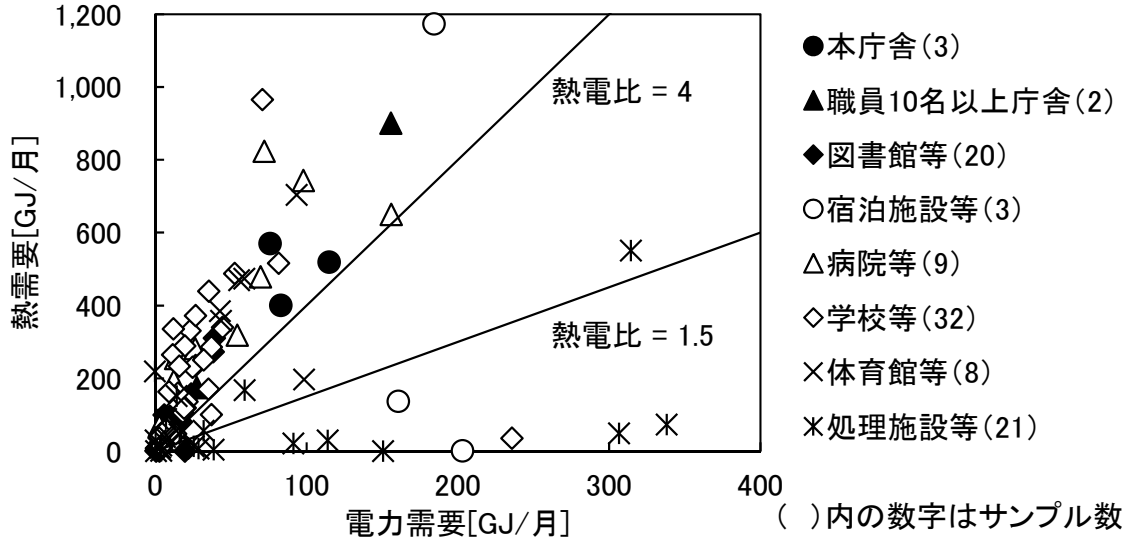


(b)熱

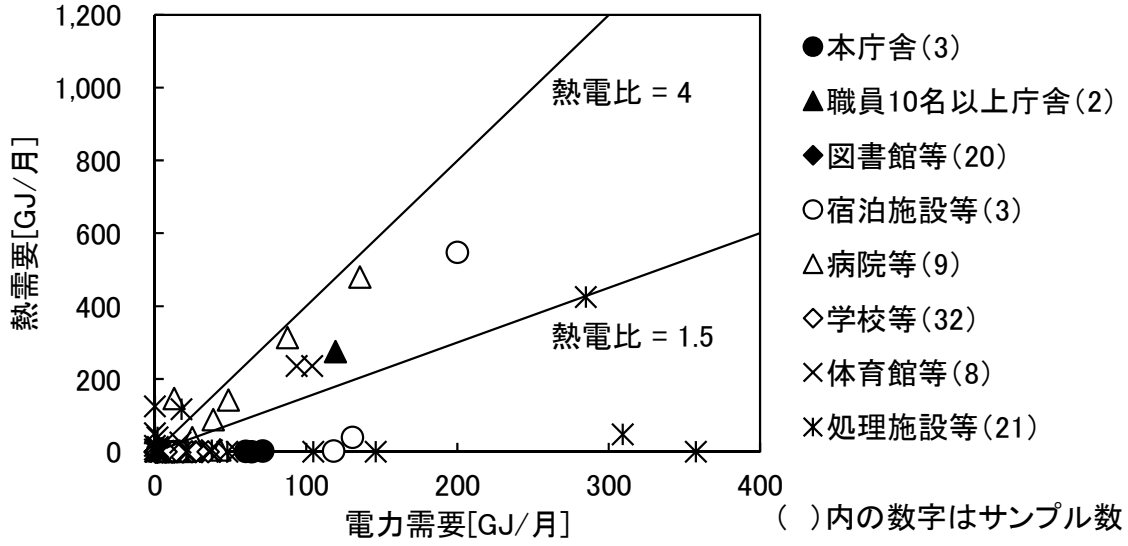
図 2-8　用途別の変動係数

図 2-9 に 1 月と 7 月における熱需要と電力需要の関係を示す。図中には熱電比[注 3)]を示しているが、熱電比は値が大きいほど、電力需要に比べ熱需要の割合が大きいことを示す指標である。図中の熱電比=1.5 と 4 の直線は、それぞれガス、バイオマスによるコージェネレーションの熱電比を想定している。1 月は暖房による熱需要があるため、調査対象の施設のうち、約 70%で熱電比が 4 を上回っている。一方、7 月は熱電比が 4 を

上回る施設はほとんど見られないが、温浴施設がある宿泊施設等や病院等では、熱電比が 1.5～4 であった。このように、夏期においても熱需要が多い施設においては、コージェネレーションの採用により省エネルギーが図られる可能性が高いと考えられる。



(a)1 月



(b)7 月

図 2-9　熱需要と電力需要の関係

2.5　まとめ

本章では、北海道富良野圏域 5 市町村が所有する公共施設を対象に、施設属性調査とエネルギー消費量調査を行った。以下に得られた知見をまとめる。

1) 施設属性調査より、1981～1990 年に建設されている施設が特に多いことが分かった。これらの施設は建設から約 30 年を迎えるため、今後設備更新が必要となる施設が多いと考えられる。また、暖房熱源、暖房設備、給湯熱源の導入状況には、各自治体の特徴が見られた。
2) エネルギー消費量調査より、浴場や温水プール等の温浴施設を有する施設のエネルギー消費量が特に多く、年間の給湯エネルギーが暖房エネルギーを上回る施設もあった。これらの施設では、暖房のみならず給湯の省エネルギー化が必要である。また、各施設のエネルギー消費量のデータより、用途別のエネルギー消費原単位と変動係数を作成した。

注

注 1) 都道府県別エネルギー消費統計の業務他（第三次産業）には 15 項目のデータがあるが、本研究では表 2 に示す用途が該当する「電気・ガス・熱供給・水道業」、「宿泊業・飲食サービス業」、「生活関連サービス業・娯楽業」、「教育・学習支援業」、「医療・福祉」、「公務」の 6 項目のデータを使用し、付表 1-1 に示す補正係数を作成した。なお、付表 1 には、エネルギー消費量の補正に使用した補正係数のみを示している。

付表 2-1　エネルギービジョンのエネルギー消費量の補正に使用した補正係数

分類	補正係数			
	富良野市	上富良野町	南富良野町	占冠村
本庁舎	-	-	1.19	1.28
職員 10 名以上庁舎	-	1.22	1.19	1.28
図書館等	-	0.78	0.65	0.69
宿泊施設等	-	-	1.25	1.28
病院等	-	-	-	0.84
店舗等	-	-	1.25	1.28
学校等	0.88	0.78	0.65	0.69
体育館等	-	1.01	0.95	-
処理施設等	0.89	0.89	0.88	0.89

注 2) 本研究における「熱」とは、燃料消費量を示しており、ヒーター、ヒートポンプ等の電力消費量は少量として無視した。「電力」とは電力消費量を示している。また、換算係数は、電力 3.6[MJ/kWh]、A 重油 39.1[MJ/L]、灯油 36.7[MJ/L]、LPG50.8[MJ/kg]とした。

注 3) 熱電比は、熱需要を電力需要で除して算出した。

参考文献

1) 一般社団法人都市環境エネルギー協会 : 地域冷暖房技術手引書改訂第 4 版，2013.11
2) 公益社団法人空気調和・衛生工学会 : 都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用，2015.3
3) 富良野市地域新エネルギービジョン報告書，富良野市，2010.2
4) 上富良野町地域省エネルギービジョン報告書，上富良野町，2010.2
5) 上富良野町地域新エネルギービジョン報告書，上富良野町，2011.2
6) 南富良野町地域新エネルギービジョン報告書，南富良野町
7) 占冠村地域新エネルギービジョン，占冠村，2006.2
8) 都道府県別エネルギー消費統計，経済産業省　資源エネルギー庁，http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/，2016.12.10 参照
9) 非住宅建築物の環境関連データベース，一般財団法人日本サステナブル建築協会，http://www.jsbc.or.jp/decc_download/，2016.12.10 参照

本章に関連する既発表論文

1) 阿部佑平，月館司，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆 : 北海道富良野圏域を対象とした民生部門エネルギー等の需要構造分析, 日本建築学会環境系論文集, No.739, pp.801-809，2017.9
2) 立松宏一，阿部佑平，月館司，堤拓哉，鈴木大隆 : 富良野圏域のエネルギー消費分析 第 1 報 公共施設のエネルギー消費量調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88，pp.133-136，2015.6
3) 阿部佑平，立松宏一，戸松誠，月館司，堤拓哉，鈴木大隆 : 富良野圏域のエネルギー消費分析 第 2 報 民生部門を対象としたエネルギー需要量の推定, 日本建築学会北海道支部研究報告集，No.88，pp.137-140，2015.6
4) 阿部佑平，月館司，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆 : 地域のエネルギー需給の最適化に関する研究 その 1 北海道 K 町を対象としたエネルギー需要量の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.761-762，2016.8

第３章

都市におけるエネルギー需要の推定

3.1　はじめに

第 2 章では、北海道富良野圏域 5 市町村が所有する公共施設を対象に、建物用途別のエネルギー消費原単位と各月のエネルギー消費量の変動を示す変動係数を作成した。

本章では、北海道富良野市の民生部門を対象に、エネルギーのエリアマネジメントを検討するために必要となる都市のエネルギー需要を推定することを目的とする。エネルギー需要は、第 2 章で作成した建物用途別のエネルギー消費原単位と都市計画基礎調査による建物の属性データを用いて推定する。また、推定したエネルギー需要の空間分布特性を分析し、熱エネルギーの面的利用が有効できるエリアを明らかにする。

なお、本章は道総研戦略研究「地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築」により実施した。

3.2　推定方法

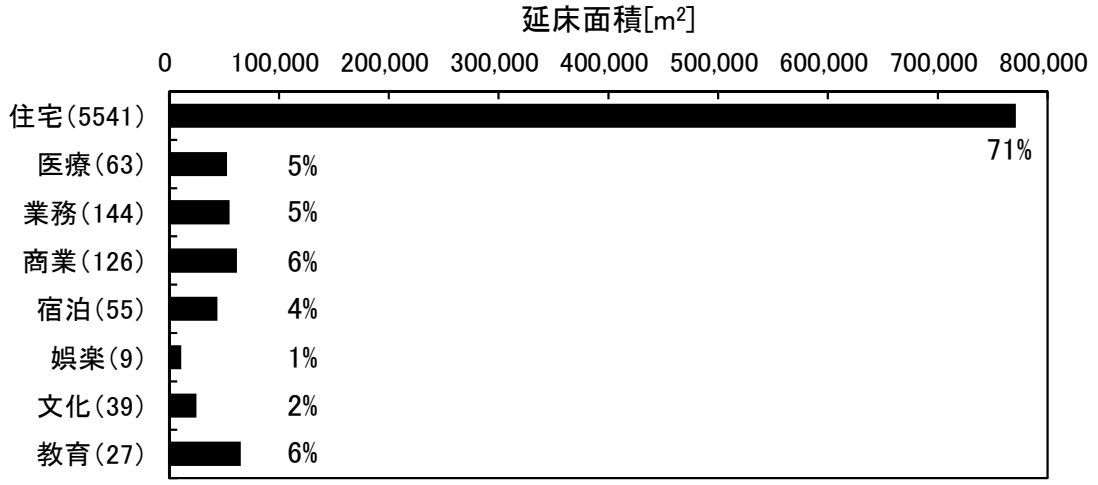
第 2 章においては、富良野圏域 5 市町村を対象に分析を行ってきたが、ここでは、富良野市を対象に今後のエネルギーのエリアマネジメントを検討するために、民生部門のエネルギー需要構造の分析を行う。

都市のエネルギー需要構造を分析するために、都市の電力および熱のエネルギー需要を推定する。エネルギー需要は、用途別のエネルギー消費原単位に建物の延床面積と各月の変動係数を掛け合わせ、月別に算出を行う。表 3-1 に本研究で設定した用途別のエネルギー消費原単位を示す。エネルギー消費原単位および変動係数は、基本的には本研究の調査より明らかにした図 2-7、2-8 に示す値を用いることとする[注 1)]。調査対象外の用途（興業施設、遊技施設、住宅）については、DECC[1)]および北海道消費者協会[2)]による既往の調査結果に基づき値を設定した。また、建物の延床面積は、都市計画基礎調査データ（平成 22 年度）を使用した。都市計画基礎調査データには、都市計画区域内にある建物の属性データ（土地利用、建築物の構造、建築面積、延床面積等）が 34 種類の用途に分類され収められているが、表 3-1 には富良野市内にある民生部門の用途のみを示している。また、本研究では、都市計画基礎調査の分類を「住宅、医療、業務、商業、宿泊、娯楽、文化、教育」の 8 つの用途に再分類している。

エネルギー需要の推定は、都市計画区域内で用途地域が定められているエリアを対象とする。図 3-1 にエネルギー需要を推定したエリアにおける用途別の延床面積の内訳を示す。このエリアには、約 6,000 棟の建物があるが、用途別に見ると住宅の延床面積が最も多く、全体の 71%を占めている。なお、都市計画区域内には、富良野市の人口の約 80%が居住している。

表 3-1　用途別のエネルギー消費原単位

都市計画基礎調査の分類			本研究の分類	エネルギー消費原単位 [MJ/(m²年)]		出典
大分類	中分類	小分類		熱	電力	
商業	官公署施設	地方国家施設	業務	652	225	本庁舎
		自治体施設		652	225	
	専用商業施設	業務施設		652	225	
		宿泊施設	宿泊	2,380	884	宿泊施設等
	娯楽施設	興業施設	娯楽	407	176	DECC
		遊技施設		407	176	
		スポーツ施設		640	260	体育館等
	店舗施設	専用店舗施設	商業	1,366	715	店舗等
住宅	住居施設	専用住宅	住宅	483	119	北海道消費者協会
		共同住宅		542	166	
		一般店舗併用住宅		483	119	
		事務所併用住宅		483	119	
		飲食店併用住宅		483	119	
		作業所併用住宅		483	119	
文教厚生	文教施設	教育施設	教育	406	86	学校等
		文化施設	文化	239	77	図書館等
		宗教施設		239	77	
	厚生施設	医療施設	医療	1,584	248	病院等
		運動施設	娯楽	640	260	体育館等
		社会福祉施設	医療	1,584	248	病院等
		厚生施設		1,584	248	



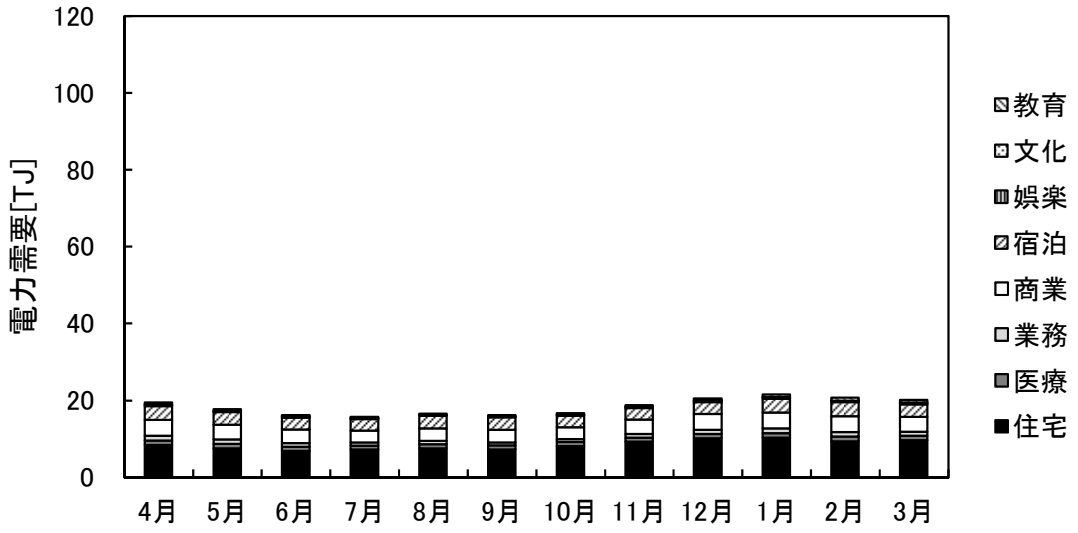
( )内の数字は建物棟数

図 3-1　エネルギー需要を推定したエリアにおける用途別の延床面積の内訳

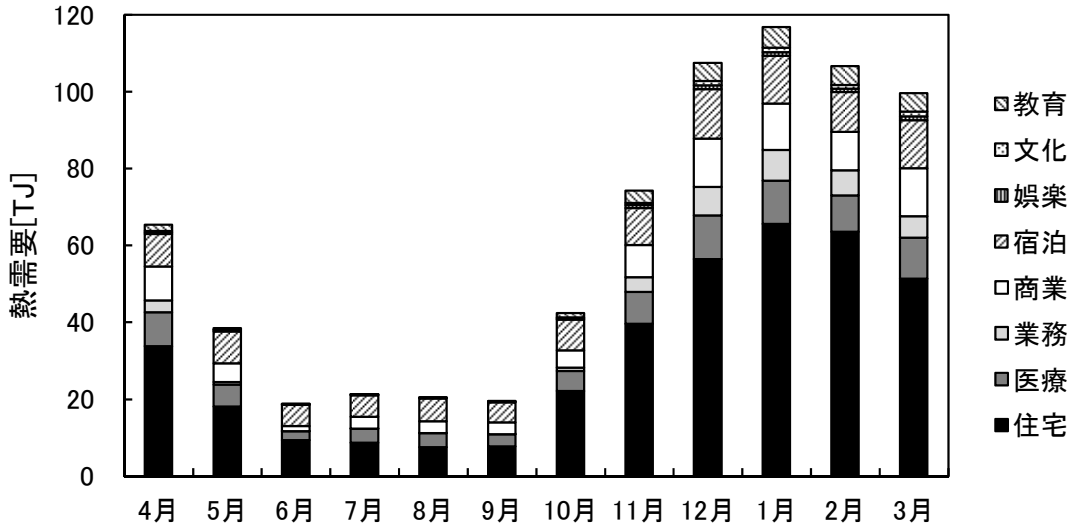
3.3　エネルギー需要の推定結果

図 3-2 に電力および熱の月別エネルギー需要を示す。まず、電力需要を見ると、冬期にやや需要が多くなっているが、年間を通じて大きな季節変動は見られなかった。各月の電力需要は 20TJ 前後であり、年間の電力需要は約 220TJ と推定された。用途別に見ると、住宅の電力需要が年間を通じて最も多く、年間の電力需要の 46%を占めていることが分かった。

次に、熱需要を見ると、冬期の暖房による熱需要により季節変動が大きく、需要のピークは 1 月にあり、約 117TJ と推定され、夏期の約 6 倍であった。年間の熱需要は約 731TJ と推定され、電力需要の約 3.3 倍であることが分かった。用途別に見ると、電力需要と同様に、住宅の熱需要が年間を通じて最も多く、年間の熱需要の 53%を占めていることが分かった。



(a)電力



(b)熱

図 3-2　月別エネルギー需要（電力・熱）の推定結果

図 3-3 に用途別の電力および熱需要と熱電比を示す。住宅におけるエネルギー需要が他の用途に比べてかなり多い。また、熱電比を見ると、医療や教育で熱電比が大きくなっており、他の用途に比べ熱需要の割合が大きい傾向にある。

図 3-4 に電力と熱需要を合計して算出した年間エネルギー需要の用途別割合を示す。住宅が最も大きく 51%を占め、次いで、宿泊が 15%、商業が 14%、医療が 10%の順になっている。住宅のエネルギー需要が最も多いのは戸数が大きく影響しており、民生部門のエネルギー消費を削減するには、住宅の省エネルギーが重要である。

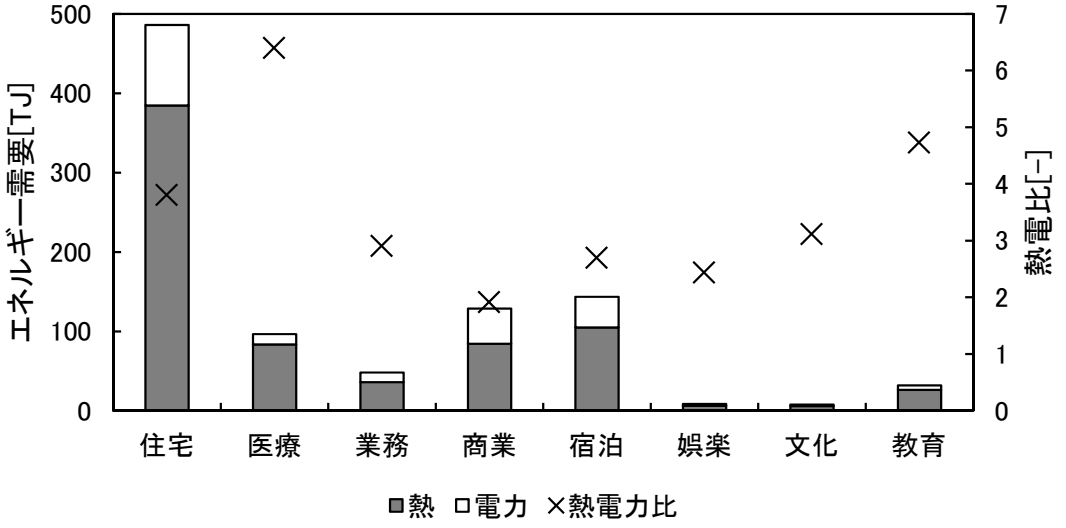


図 3-3　用途別の電力・熱需要と熱電比の推定結果

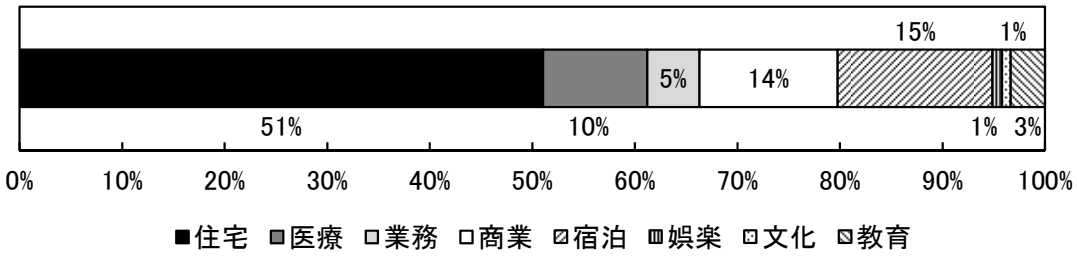


図 3-4　年間エネルギー需要の用途別割合の推定結果

図 3-5 に各月の熱需要を暖房と給湯に分離した結果を示す。暖房と給湯の代表的な分離方法として、三浦 [3]が行っているように、非暖房期のエネルギー消費量を給湯とし、暖房期でこれを上回った量を暖房とする方法がある。この方法により各月の給湯需要を算出すると、各月の需要は同じになってしまうが、給水温度は月によって変動するため、ここでは給湯需要の月変動を考慮し分離する。分離方法は、立松ら [4]の方法に倣い、給湯は湯使用量が年間を通じて一定、給湯温度を 40℃と仮定し、旭川の給水温度データ [5]を用いて変動係数を設定し算出した。また、6～9 月は暖房需要がないと仮定し、暖房は各月の熱需要から給湯を引いて算出した。これにより、年間の暖房および給湯需要は、それぞれ約 378TJ、約 354TJ と推定され、年間を通じて比較すると暖房と給湯需要はほぼ同じであった。月別で見ると、暖房は 1 月、給湯は 2 月に需要が最も多くなっている。12～2 月の熱需要を見ると、暖房と給湯の比は概ね 7 : 3 であり、冬期でも給湯が熱需要に占める割合が少なくないと言える。

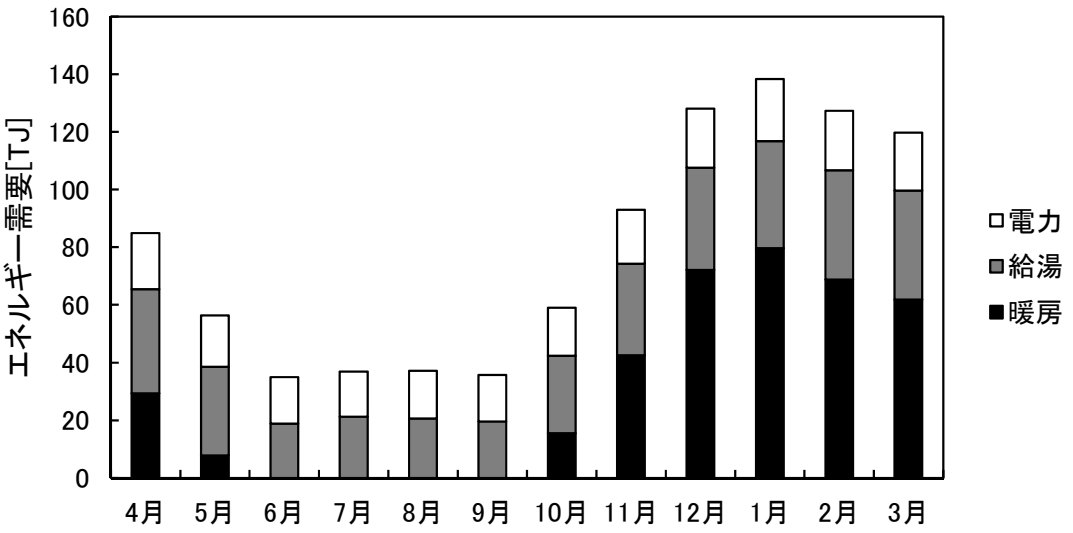


図 3-5　月別電力・暖房・給湯需要の推定結果

3.4　エネルギー需要の空間分布特性

前節の推定結果より、GIS を用いて富良野市におけるエネルギー需要の空間分布特性を把握する。GIS で作成するマップの種類には、町丁目単位によるマップと、メッシュ単位によるマップがある。町丁目単位によるマップでは、町丁目面積によりエネルギー需要が左右され、面積の異なる町丁目では同一に比較することができない。一方、メッシュ単位によるマップでは、全メッシュが同面積であるため、メッシュ同士のエネルギー需要を比較することができる。このため、本研究ではメッシュ単位で分析することとし、メッシュ単位は将来的な建物間の熱電力融通の検討に活用することも考慮し、250m×250m メッシュ間隔とした[6]。分析の対象となる総メッシュ数は 116 である。

図 3-6 に電力および熱需要を合計した年間エネルギー需要を示す。年間エネルギー需要が 10[TJ/年]未満のメッシュが数多く分布しており、医療施設や商業施設がある中心市街地では、需要が多くなり、40[TJ/年]以上となるメッシュがある。また、宿泊施設がある西側の郊外においても、需要の大きなメッシュが見られた。

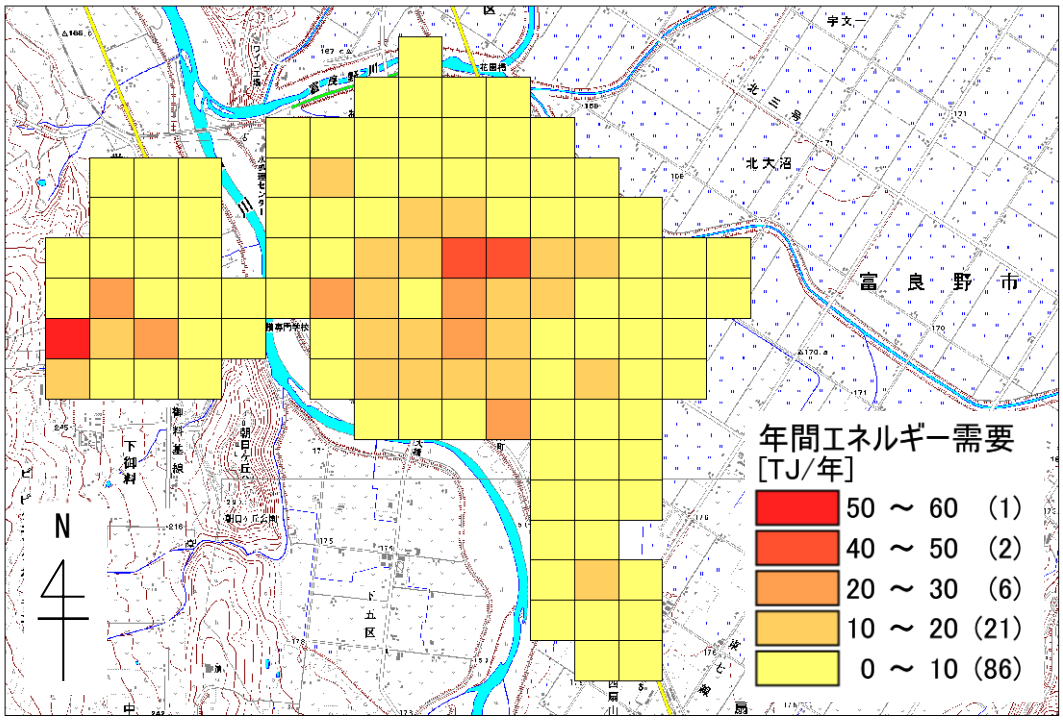


図 3-6　年間エネルギー需要[注 2)]

図 3-7 に熱負荷密度を示す。熱負荷密度は熱需要をメッシュ面積（250m 四方、6.25ha）で除して算出した。図 3-6 と比較すると、年間エネルギー需要が多いところでは、熱負荷密度も大きい傾向にあり、熱負荷密度の最大値は 6.41[TJ/ha]であった。佐土原ら[9]は、地域冷暖房の導入可能性を検討するため、熱負荷密度を指標として用い、4.2[TJ/ha]以上であることを抽出条件としている。算出結果によると、4.2[TJ/ha]以上となるメッシュは、3 メッシュあった。

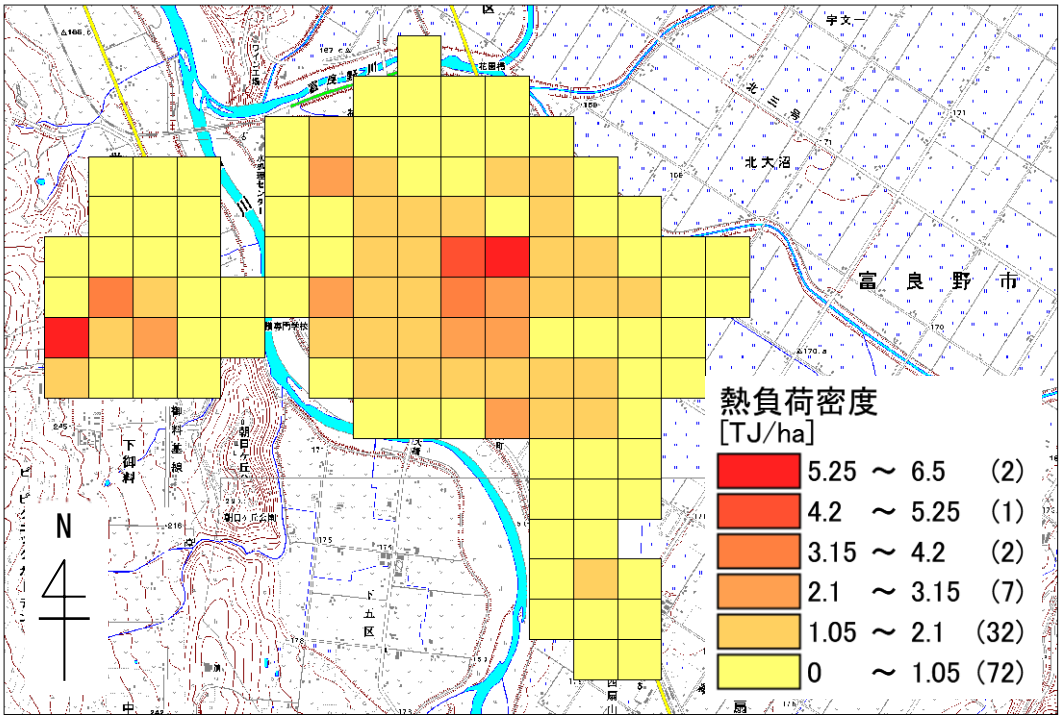


図 3-7　熱負荷密度[注 2)]

次に、熱負荷密度、熱電比を入力データとして、凝集法による階層型のクラスター分析を行い、各メッシュの類型化を行った。その際の距離計算はユークリッド平均距離、合併後の距離計算はウォード法とし、6 つのクラスターに分類した。

図 3-8 にクラスター分析による類型化の結果、図 3-9 に各クラスターの用途別延床面積の割合を示す。どのクラスターも住宅と非住宅により構成されているが、クラスター6 では、住宅よりも非住宅（医療、商業、宿泊施設）が占める面積割合が大きく、他のクラスターでは、住宅が最も大きく 50%以上を占めている。

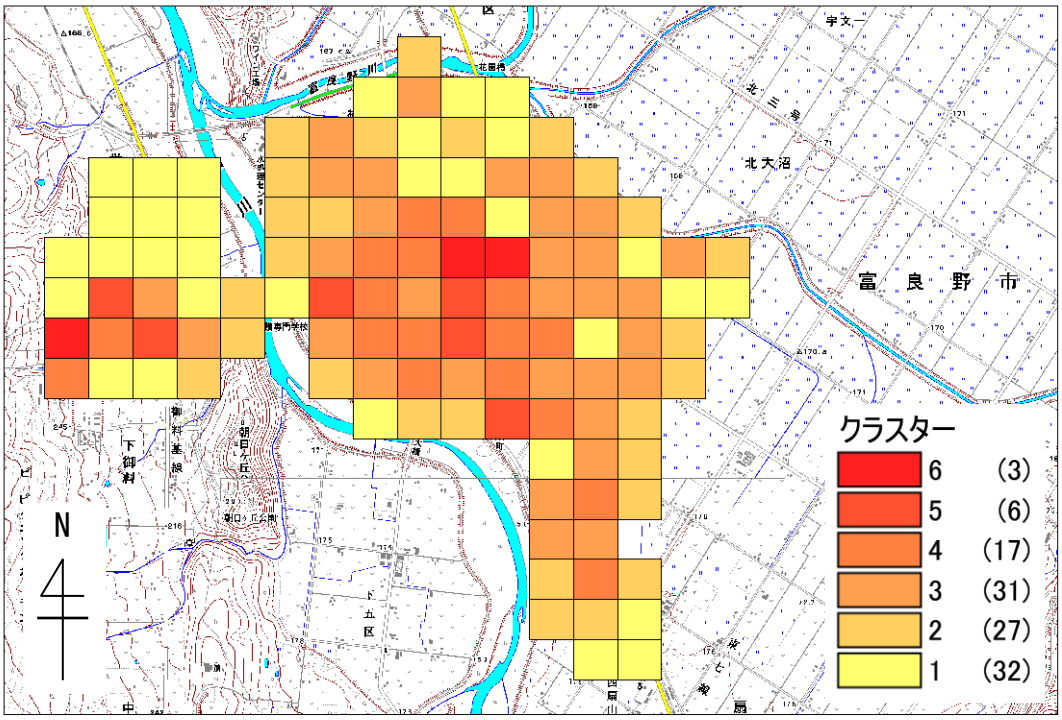


図 3-8　クラスター分析による類型化[注 2)]

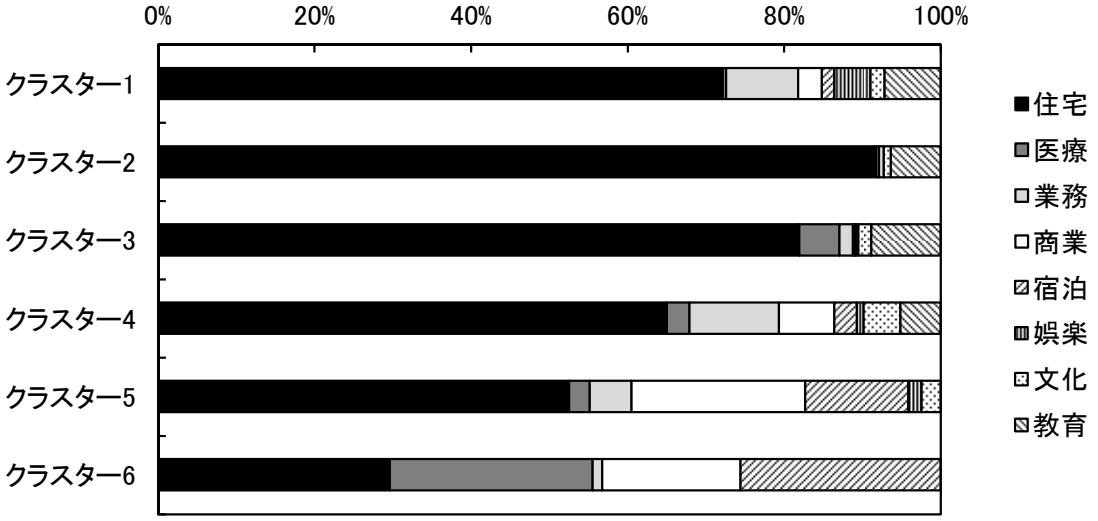


図 3-9　各クラスターの用途別延床面積の割合

図 3-10 に各クラスターの熱負荷密度と熱電比の関係、表 3-2 に各クラスターの熱負荷密度と熱電比の平均値を示す。クラスター6 は、夏期でも熱需要のある医療施設や宿泊施設が占める面積割合が大きいため熱負荷密度が大きく、熱負荷密度の平均値は 5.8[TJ/ha]となった。熱負荷密度が 4.2[TJ/ha]以上となったことから、エネルギーの面的利用による省エネルギー効果が期待できるエリアであると言える。本研究では、地域冷暖房の導入可能性を検討する抽出条件を用いてエネルギーの面的利用が有効なエリアを抽出したが、建物間の熱電力融通や地点熱供給は、地域冷暖房に比べ小規模な形態であるため、熱損失や搬送動力が小さくなり熱負荷密度が 4.2[TJ/ha]未満のエリアであっても導入の可能性があると考えられる。このため、他のクラスターであってもエネルギーの面的利用が可能なエリアがあると考えられ、これについては、今後の検討課題としたい。一方で、住宅の占める面積割合が大きいクラスター2 やクラスター3 では、イニシャルコストを考慮すると個別熱源方式による省エネルギー化を図るのが有効であると言える。外皮の断熱改修のみならず、設備更新にあわせコージェネレーションやヒートポンプ等を導入することが必要である。また、クラスター3 では医療施設と教育施設の用途が占める延床面積が他のクラスターに比べ大きいため、熱電比の平均値が 4 を上回った。

以上より、富良野市のエネルギー需要を削減するためには、熱負荷密度の大きいエリアではエネルギーの面的利用を進め、住宅の占める面積割合が大きいエリアでは個別熱源方式による省エネルギー化を図るのが有効であると考える。

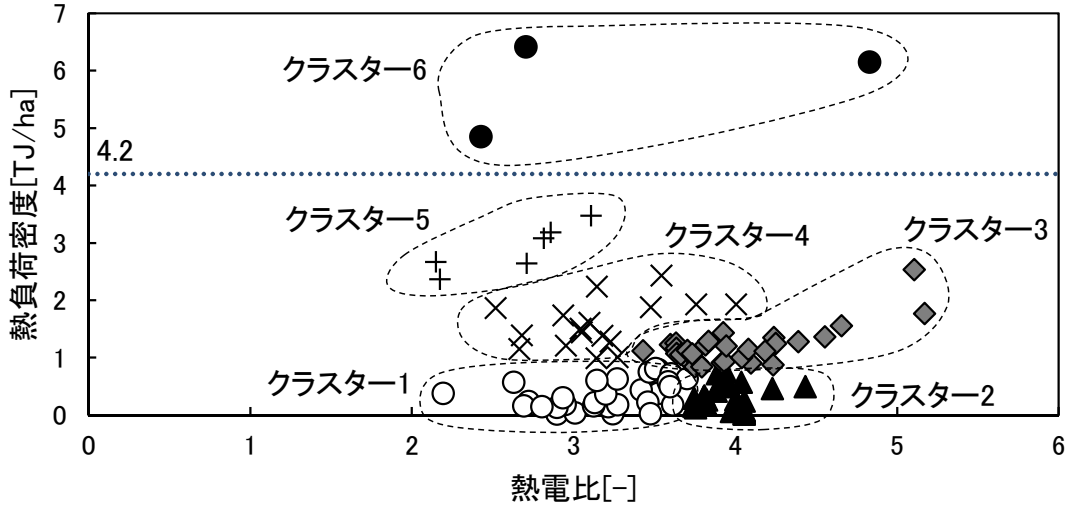


図 2-10　各クラスターの熱負荷密度と熱電比の関係

表 3-2　各クラスターの熱負荷密度と熱電比の平均値

クラスター	メッシュ数	熱負荷密度 [TJ/ha]	熱電比 [-]
1	32	0.34	3.19
2	27	0.29	3.96
3	31	1.18	4.01
4	17	1.58	3.16
5	6	2.90	2.64
6	3	5.80	3.32

3.5　まとめ

本章では、北海道富良野市の民生部門を対象に、エネルギーのエリアマネジメントを検討するために必要となる都市のエネルギー需要を推定した。以下に得られた知見をまとめる。

1) 富良野市の民生部門を対象に、都市のエネルギー需要を推定した。年間の電力需要は約 220TJ、熱需要は約 731TJ と推定され、熱需要は電力需要の約 3.3 倍であることが分かった。熱需要を暖房と給湯に分離すると、年間の暖房および給湯需要は、それぞれ約 378TJ、約 354TJ と推定され、暖房と給湯需要はほぼ同じであった。また、用途別で見ると、電力および熱需要ともに、住宅での需要が年間を通じて最も多いため、民生部門のエネルギー需要を削減するためには、住宅の省エネルギーが重要である。
2) 富良野市のエネルギー需要を 250m×250m メッシュ間隔で分析し、空間分布特性を把握した。熱負荷密度と熱電比を入力データとしてクラスター分析を行うことにより、各メッシュの特性を明らかにした。夏期でも熱需要のある医療施設や宿泊施設の占める面積割合が大きいエリアでは、熱負荷密度が 4.2TJ/ha 以上となり、熱エネルギーの面的利用による省エネルギー効果が期待できることを示した。

本研究では、地域冷暖房の導入可能性を検討する抽出条件を用いてエネルギーの面的利用が有効なエリアを抽出したが、建物間の熱電力融通や地点熱供給のような小規模な形態であれば他のエリアであっても導入の可能性があると考えられるため、これについては、今後の検討課題としたい。

注

注 1) 本研究では、都市のエネルギー需要を推定するために、主に公共施設のエネルギー消費量調査から作成したエネルギー消費原単位を用いている。図 2-7 に示すように、用途によってはサンプル数が 1 桁のものもあるが、本研究で作成した原単位と DECC の原単位を比較すると、宿泊施設等を除き、ほとんど同じであることを確認している。このため、本研究で作成したエネルギー消費原単位を民間施設にも適用し、都市のエネルギー需要を推定した。

注 2) 背景地図には、国土地理院の数値地図 25000（地図画像）「旭川・夕張岳」を掲載

参考文献

1) 非住宅建築物の環境関連データベース，一般財団法人日本サステナブル建築協会，http://www.jsbc.or.jp/decc_download/，2016.12.10 参照
2) 一般社団法人北海道消費者協会, 石油連盟北海道石油システムセンター : 平成 19 年度北海道家庭用エネルギー消費実態調査（2007 エコファミリー省エネアンケート）報告書，2008.3
3) 三浦秀一 : 全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.510，pp77-83，1998.8
4) 立松宏一，福島明，鈴木大隆，月館司，廣田誠一，高倉政寛，池田裕雅 : 北海道における高断熱戸建て住宅の温熱環境とエネルギー消費の実態 熱損失係数が 1.3W/m^{2}K レベルの住宅を主たる対象とした調査，日本建築学会環境系論文集，Vol.77，No.679，pp713-720，2012.9
5) ソーラーシステム標準気象データ及び給水温度, ソーラーシステム振興協会, p85, 2003.3
6) 崔錦丹，吉田聡，佐土原聡 : 既成市街地における建物間熱融通の導入効果のポテンシャル把握－横浜市におけるケーススタディー, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.684，pp213-222，2013.2

本章に関連する既発表論文

1) 阿部佑平，月館司，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆 : 北海道富良野圏域を対象とした民生部門エネルギー等の需要構造分析, 日本建築学会環境系論文集, No.739, pp.801-809，2017.9
2) 立松宏一，阿部佑平，月館司，堤拓哉，鈴木大隆 : 富良野圏域のエネルギー消費分析 第 1 報 公共施設のエネルギー消費量調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88，pp.133-136，2015.6
3) 阿部佑平，立松宏一，戸松誠，月館司，堤拓哉，鈴木大隆 : 富良野圏域のエネルギー消費分析 第 2 報 民生部門を対象としたエネルギー需要量の推定, 日本建築学会北海道支部研究報告集，No.88，pp.137-140，2015.6
4) 阿部佑平，月館司，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆 : 地域のエネルギー需給の最適化に関する研究 その 1 北海道 K 町を対象としたエネルギー需要量の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.761-762，2016.8

5) 月館司，阿部佑平，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆：地域のエネルギー需給の最適化に関する研究 その 2 K 町における地域分散型エネルギーシステムの検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.763-764，2016.8
6) 阿部佑平，月館司，立松宏一，堤拓哉，鈴木大隆：北海道富良野圏域を対象としたエネルギー需要構造分析 その 1 富良野市の民生部門を対象とした分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.799-800，2017.8

第４章

建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式

4.1　はじめに

熱エネルギーの面的利用では、熱導管からの熱損失やポンプの熱搬送動力等が省エネルギーの点で課題があり、新たな技術開発が求められている。ポンプの熱搬送動力を削減するには、変流量制御方式が有効であるが、差圧計や流量計等の測定機器が必要となるため、イニシャルコストが増大する。

本章では、建物群に対する熱供給を対象として、ポンプの熱搬送動力の更なる削減と制御システムにかかるイニシャルコストの削減を目指し、従来の差圧による変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式を開発し、その制御特性を実験による評価することを目的とする。開発する変流量制御方式の評価にあたっては、2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した実験を行い、従来の差圧による変流量制御方式と同一条件において制御特性を比較する。

なお、本章は道総研重点研究「木質バイオマスエネルギーの高性能な供給・利用システムの開発」により実施した。

4.2　実験概要

図 4-1 に実験装置の概要、写真 4-1 に実験の様子を示す。実験は北方建築総合研究所の室内環境シミュレータ室で行った。本実験では、2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定する。ここでは、熱交換器の熱源側を一次側、放熱器側を二次側と呼ぶことにする。

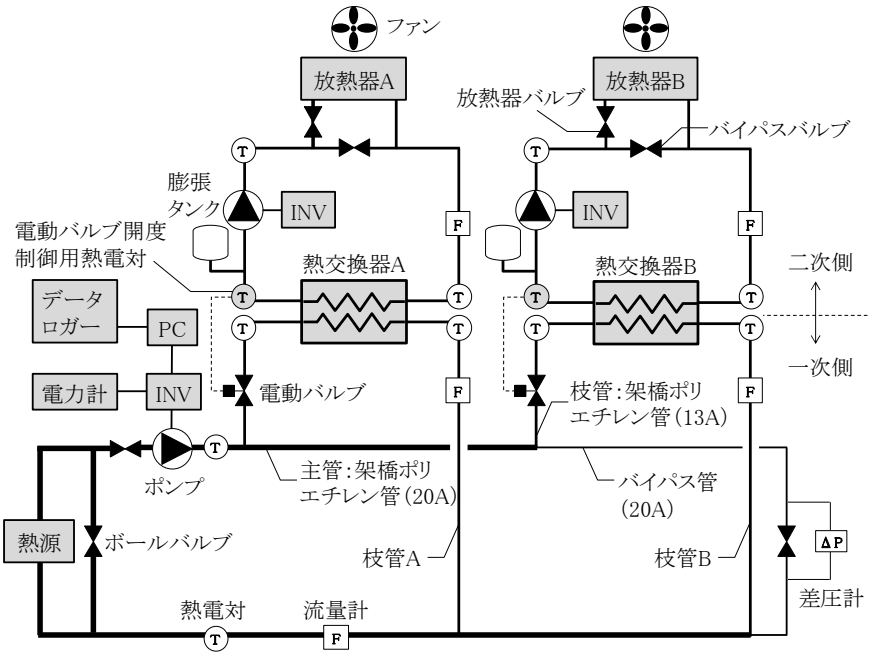


図 4-1　実験装置の概要

写真 4-1　実験の様子

一次側には熱源水を循環させるポンプを 1 台設置した。主管から 2 つの枝管を設置し、バイパス管には差圧計を取り付け、末端差圧を測定した。差圧計の間には、2 つの電動バルブが同時に全閉止になったとしても、ポンプの流量を確保するためにボールバルブを取り付け、ボールバルブの開度はほぼ全閉止に近い状態とした。実験中、後述する回転数一定運転の場合を除いて、バイパス管には熱源水がほとんど流れていないことを確認している。

二次側には負荷を発生させるため、放熱能力の異なる放熱器を 2 台設置し、それぞれの放熱器には温水を循環させるためのポンプを設置した。循環温水は熱交換器を介して加熱されるとし、放熱器の温水往き配管には、放熱器の放熱量を変えることができるようにボールバルブを取り付けた。熱交換器にはブレージングプレート式熱交換器を使用し、熱交換器 A と B の仕様は同じである。配管には架橋ポリエチレン管を採用し、一次側主管とバイパス管の仕様は呼び径 20A、一次側枝管と二次側配管は呼び径 13A とした。配管は実験室の床に設置した。配管には、最大負荷を大きくするため、断熱材を取り付けていないが、二次側温水往き温度と電動バルブの開度制御用の温水温度を同じ場所で測定することができなかったため、両者の温度がほとんど同じによるように、両測定場所間の配管については断熱材を取り付けた。また、設置した 3 台のポンプ（一次側 1 台、二次側 2 台）は仕様が同じである。単相 100V50Hz で使用した場合、標準吐出量は揚程 1.5m で 480L/h、最大吐出量（揚程 0m の時の吐出量）960L/h、最高揚程（全揚程）2.4m、消費電力 26W である。また、3 台のポンプにはインバータを取り付け、ポンプ回転数を制御することにより、流量を調整できるようにした。

実験では、熱源装置に電気ヒータを用いて一次側温水往き温度を 75℃に設定し、二次側温水往き温度は 70℃を維持するように熱交換器一次側に取り付けた電動バルブの開度を PID 制御した。一次側循環流量は、二次側の 2 つの負荷が最大になった時に、電動バルブが全開になり、かつ一次側ポンプが 50Hz で運転するようにボールバルブで流量を調整した。最大負荷時の放熱器 A の放熱量は 1,400W、放熱器 B の放熱量は 1,600W、末端差圧は 5.5kPa である。一次側ポンプは 50Hz から運転を始め、データロガーで記録した 20 秒毎のデータをもとに、リレーによりインバータで回転数を制御した。インバータ周波数は 6Hz 刻みで制御し、14、20、26、32、38、44、50Hz の 7 段階に設定した。また、複数の制御方式による搬送動力を同一条件で評価するためには、二次側の負荷パターンを同じにする必要がある。そこで本実験では、大きな負荷の差を作るため、表-1 に示す二次側の循環ポンプのインバータ周波数、ファンの使用、バイパスバルブ及び放熱器バルブの開閉を 30 分毎に変え、負荷の偏在を考慮しながら実験を行った。ファン

は放熱器からの放熱量を最大にし、最大負荷にするために使用した。図 4-2 に二次側流量を示す。図 4-2 は、表 4-1 に示す条件で実験をした際の流量であり、各制御方式の実験において、二次側流量の設定は同じである。実験時間は 3 時間であり、実験データはデータロガーにより 20 秒間隔で測定した。データの分析では 1 分間隔で平均した値を使用する。

図 4-3 に実験装置の一次側枝管 A と B の配管抵抗を示す。図 4-3 は、一次側枝管に取り付けた電動バルブの開度を全開にした時の差圧と流量から求めた配管抵抗である。配管抵抗の最大値は枝管 A で 5.6kPa、枝管 B で 6.5kPa であり、配管抵抗は流量の 2 乗に比例した。なお、一次側枝管 A の入口と枝管 B の入口の距離は直管で 1.74m と短く、その間の圧力損失はほぼ無視できると考えられることから、差圧には図 4-1 に示す差圧計で測定した値を用いた。

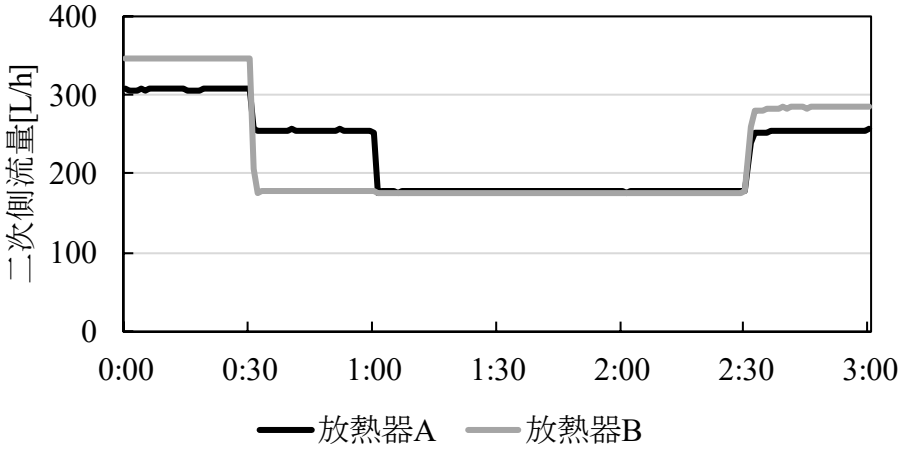


図 4-2　二次側流量

表 4-1　一次側・二次側の実験条件

	時間	一次側	二次側							
			放熱器A				放熱器B			
		熱源水	循環ポンプインバータ周波数	ファン	バイパスバルブ	放熱器バルブ	循環ポンプインバータ周波数	ファン	バイパスバルブ	放熱器バルブ
step0	熱源水温度安定まで	ON	60Hz	OFF	close	open	60Hz	OFF	close	open
step1	30min	ON	60Hz	ON	close	open	60Hz	ON	close	open
step2	30min	ON	50Hz	OFF	close	open	25Hz	OFF	open	open
step3	30min	ON	25Hz	OFF	open	open	25Hz	OFF	open	close
step4	30min	ON	25Hz	OFF	open	close	25Hz	OFF	open	close
step5	30min	ON	25Hz	OFF	open	open	25Hz	OFF	open	open
step6	30min	ON	50Hz	OFF	close	open	50Hz	OFF	close	open

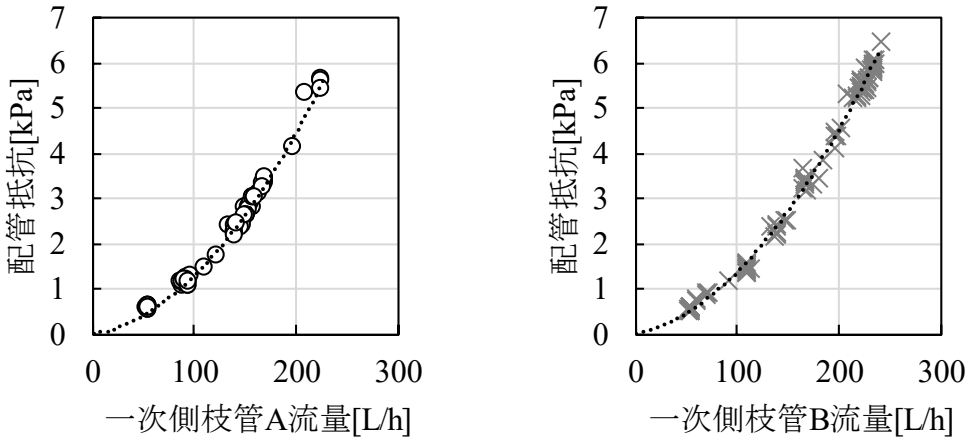


図 4-3　一次側枝管の配管抵抗

4.3　制御方式

本研究で対象とする制御方式は、回転数一定運転、末端差圧一定制御、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御の 5 つである。二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御については、本研究で開発する差圧を用いないでポンプ回転数を制御する方式である。各制御方式における一次側ポンプの制御について、以下に説明する。

4.3.1　回転数一定運転

一次側ポンプのインバータ周波数を 50Hz 一定に設定し、ポンプ回転数を制御しない。

4.3.2　末端差圧一定制御

一次側の末端差圧が最大負荷時の差圧 5.5kPa を常に維持するよう、差圧が 5～6kPa の範囲内に収まるようにインバータでポンプ回転数を制御する。

4.3.3　推定末端差圧制御

一次側の末端差圧の設定テーブルを放熱器 A と B の最大負荷に対する負荷率 r_A と r_B から推定した。具体的には、負荷率 r_A と r_B のうち、最大の負荷率を r_{max} とする。末端差圧はいくつかの試行をもとに負荷率の 1.5 乗に比例するとし、最大負荷時の末端差圧 ΔP_{max} を用いて、式（4-1）より末端差圧 ΔP を計算する。

$$\Delta P = \Delta P_{max} \times r_{max}^{1.5} \tag{4-1}$$

差圧の測定値が ΔP を上回ったら、ポンプ回転数の設定を 1 段下げる。また、差圧の測定値が ΔP-1 を下回ったらポンプ回転数の設定を 1 段上げる。

4.3.4　二次側温水往き温度一定制御

前述の差圧を用いてポンプ回転数を制御する方式とは異なり、二次側放熱器の温水往き温度によりポンプ回転数を制御することを試みた。

具体的には、二次側放熱器 A と B の温水往き温度のうち、温度の低い方が 69℃を上回ったらポンプ回転数の設定を 1 段下げ、68℃を下回ったらポンプ回転数の設定を 1 段上げる。なお、負荷に対して供給熱量が満足している系統では、PID 制御により二次側温水往き温度は 70℃に維持される。

4.3.5　バルブ開度制御

バルブ開度を用いた制御方式には、バルブ開度を監視して負荷変動に応じて圧力制御の目標値を変更し、必要最低の揚程でポンプを運転するものがある[例えば 1)]。従来のバルブ開度制御では、差圧を維持するために全開のバルブが出ないよう最大開度を 90%程度に設定することが多い。しかし、本研究では、既存の制御方式とは異なり、積極的に差圧を下げて搬送動力を低減させることを目的として、バルブの最大開度を設定せず、バルブ開度と二次側放熱器の温水往き温度によりポンプ回転数を制御することを試みた。

具体的には、2 つの電動バルブのうち、開度の大きい方が 85%を下回ったらポンプ回転数の設定を 1 段下げる。また、放熱器 A と B の二次側温水往き温度のうち、温度の低い方が 68.5℃を下回ったらポンプ回転数の設定を 1 段上げる。

本研究のバルブ開度制御では、全開の電動バルブがない状態では、二次側温水往き温度は設定温度を維持し、負荷を満足するように一次側流量が制御されていると判断できる。しかし、負荷が増加すると電動バルブが全開となり、やがて二次側温水往き温度が低下する。その低下を検知することでポンプ回転数を制御し、必要な流量を供給できるようにした。

4.4　実験条件の確認

図 4-4 に二次側放熱器の放熱パターンの一例として、回転数一定運転の結果を示す。放熱量 Q は、式（4-2）より算出した。

$$Q = c\rho V(T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}}) \tag{4-2}$$

ここで、c：比熱[J/(kgK)]、ρ：密度[kg/m^3]、V：流量[m^3/s]、

T_{in}：温水往き温度[℃]、T_{out}：温水還り温度[℃]

放熱量は表 4-1 で示した step1 の時に最大となり、この時、二次側は最大負荷となる。放熱器 A では最大負荷時の放熱量 1,400W において流量は 306L/h、放熱器 B では最大負荷時の放熱量 1,600W において流量は 345L/h であった。実験中の最大負荷に対する平均負荷率は、放熱器 A で 0.65、放熱器 B で 0.44 あった。平均負荷率は放熱器 A の方が大きい。

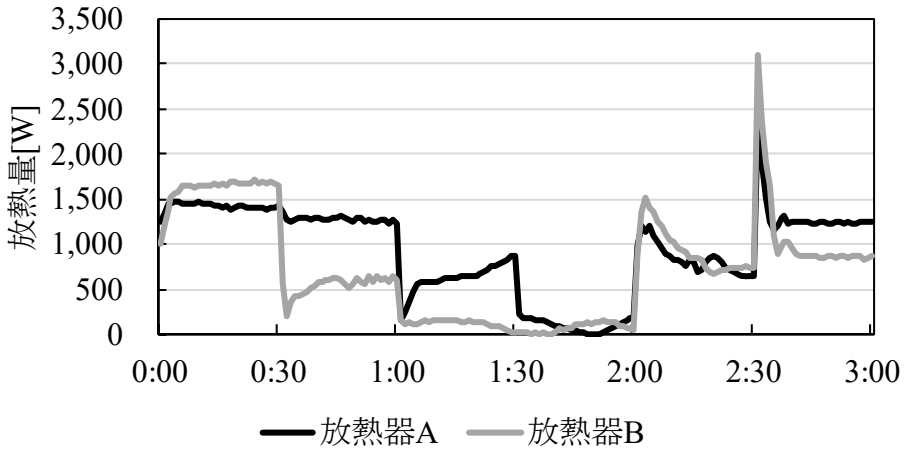
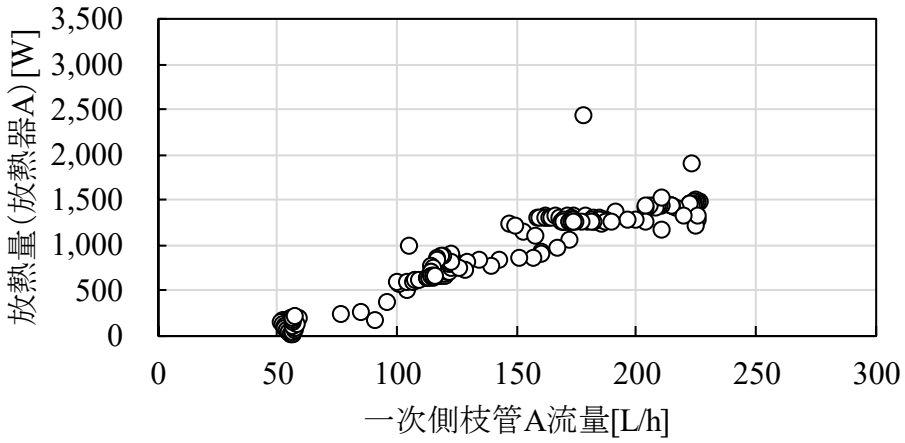
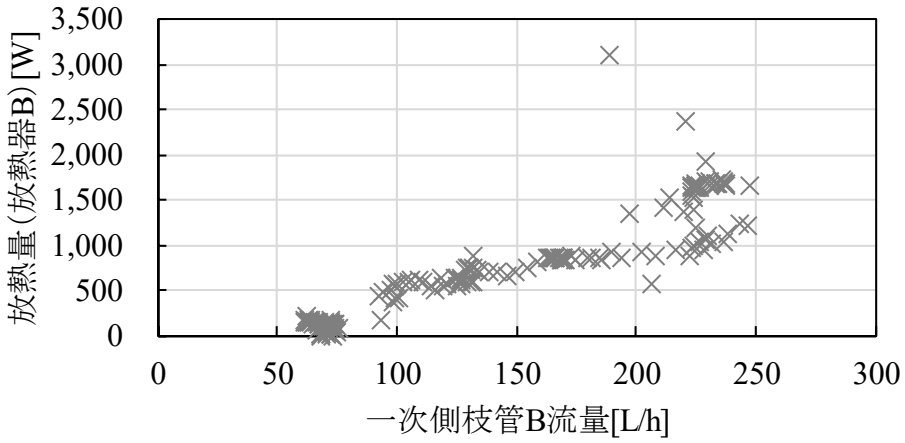


図 4-4　二次側放熱器の放熱パターン（回転数一定運転）

図 4-5 に一次側枝管流量と二次側放熱量の関係の一例として、回転数一定運転の結果を示す。一次側枝管流量が大きくなると二次側放熱量は大きくなり、一次側枝管流量は枝管 A で 53～227L/h、枝管 B で 61～248L/h で変化した。



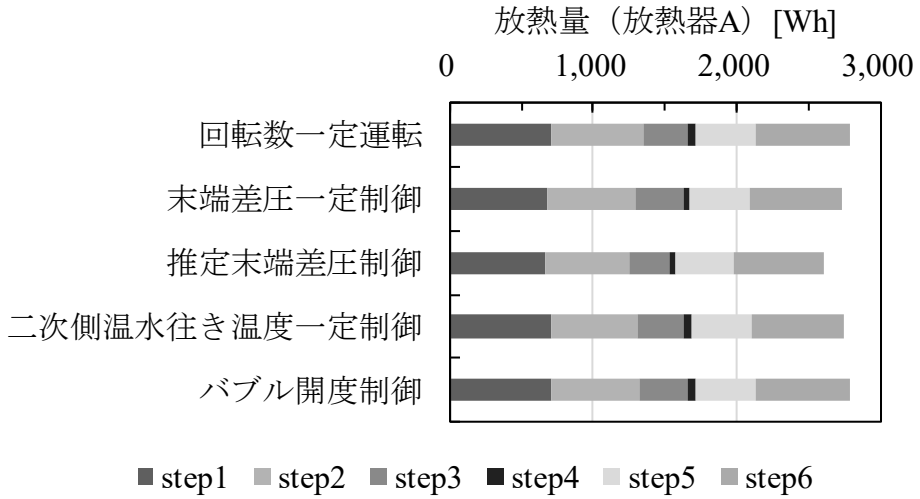
（a）放熱器 A



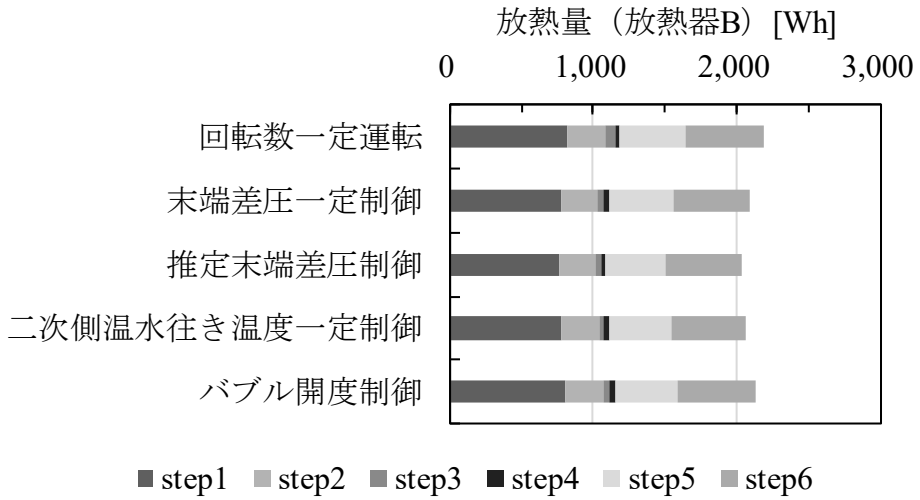
（b）放熱器 B

図 4-5　一次側枝管流量と二次側放熱量の関係（回転数一定運転）

図 4-6 に各制御方式の二次側放熱器の放熱量を示す。放熱器 A では、推定末端差圧制御でわずか放熱量が小さかったものの、各制御方式で大きな違いは見られず、実験中における放熱量の合計値は約 2,730Wh であった。また、放熱器 B においても各制御方式で大きな違いは見られず、実験中における放熱量の合計値は約 2,100Wh であり、放熱器 A よりも小さかった。以上より、各制御方式における実験は、ほぼ同じ条件で行われたと言える。



（a）放熱器 A

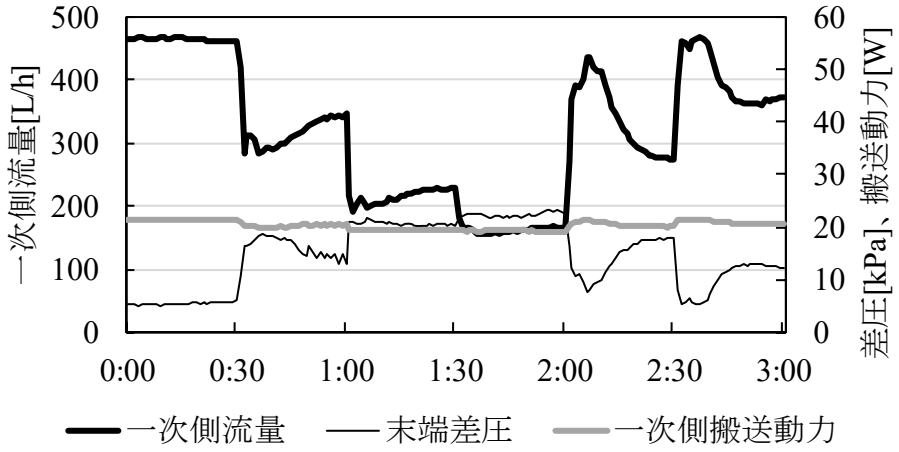


（b）放熱器 B

図 4-6　各制御方式の二次側放熱量の確認

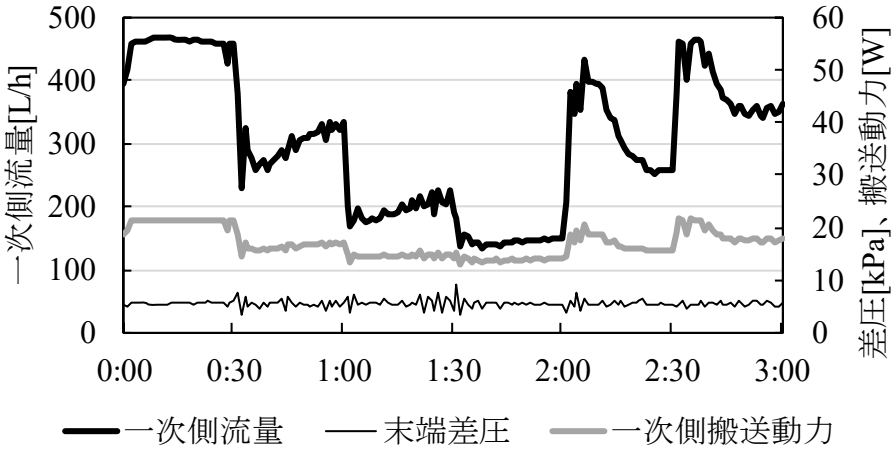
4.5　実験結果と考察

図 4-7 に各制御方式の一次側流量、末端差圧、一次側搬送動力の変動を示す。回転数一定運転では、一次側ポンプのインバータ周波数を 50Hz 一定で運転しているため、一次側枝管に取り付けた電動バルブが抵抗となり、差圧は電動バルブの開度により変動した。二次側が最大負荷になると電動バルブが全開となるため差圧は下がるが、部分負荷になると電動バルブが閉まるため差圧は上がり、最大で 23kPa に達していた。ポンプ回転数を制御していないため、搬送動力は 20W 一定で推移した。末端差圧一定制御では、末端差圧が最大負荷時の 5.5kPa を維持するようにポンプ回転数を制御したため、差圧に応じてポンプ回転数が制御され、搬送動力が低減した。実験中の平均差圧は 5.5kPa であり、設定どおりに制御することができていた。推定末端差圧制御では、二次側の負荷に応じて末端差圧の設定値を計算しポンプ回転数を制御したので、末端差圧と一次側流量は他の制御方式に比べて変動が大きく、搬送動力も変動する結果となった。この変動のひとつの要因としては、末端差圧を推定する際に生じるタイムラグによる影響が考えられる。二次側温水往き温度一定制御では、二次側温水往き温度によりポンプ回転数を制御し、バルブ開度制御では、バルブ開度と二次側温水往き温度によりポンプ回転数を制御したが、両制御方式とも差圧を用いなくてもポンプ回転数を制御することができ、搬送動力を低減することができた。また、両制御方式の一次側流量、末端差圧、一次側搬送動力はほぼ同じような変動であった。

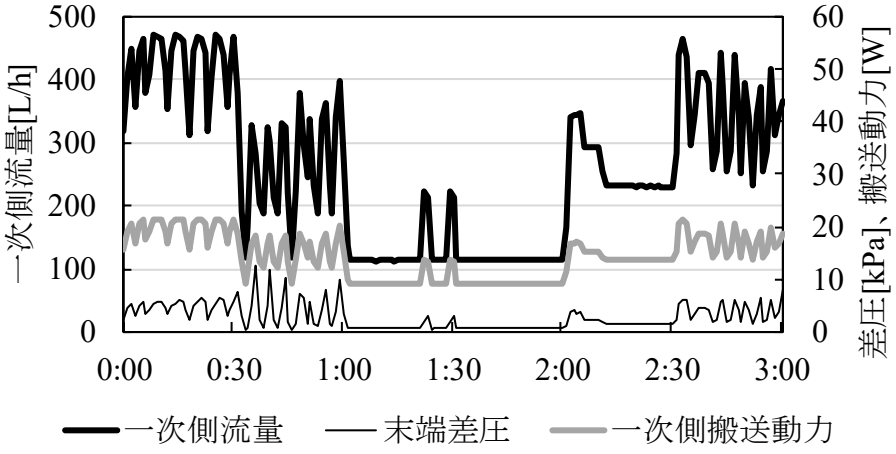


(a) 回転数一定運転

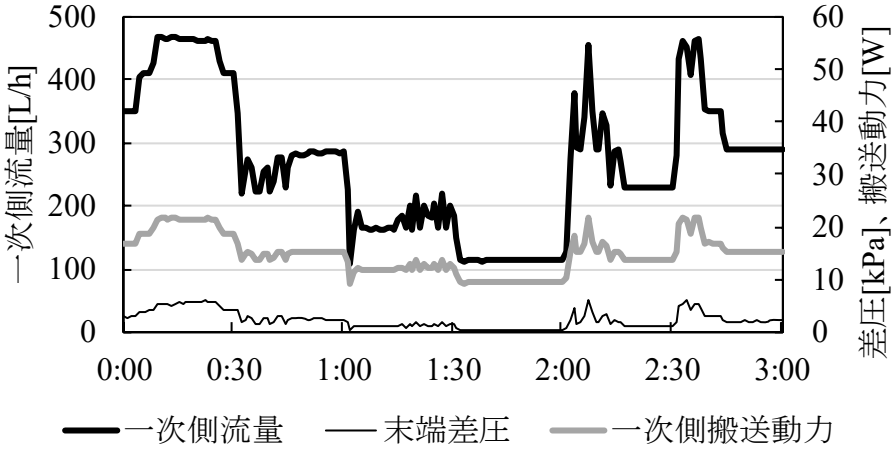
図 4-7　一次側流量、末端差圧、一次側搬送動力の変動



（b）末端差圧一定制御

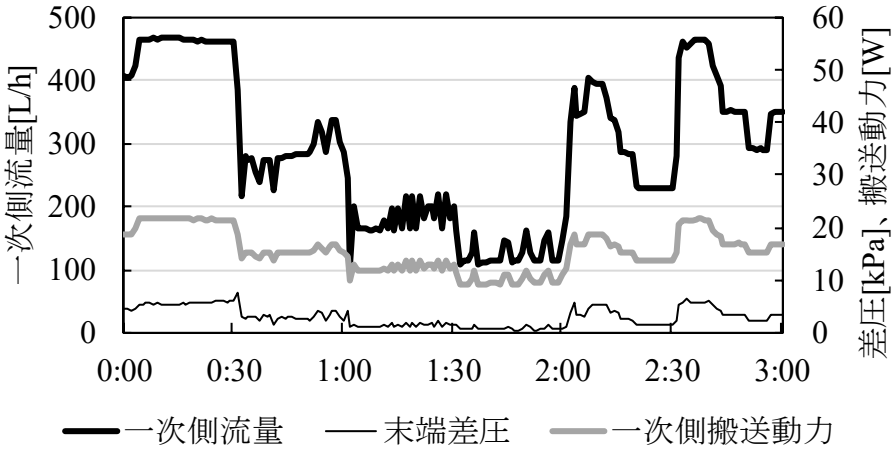


（c）推定末端差圧制御



（d）二次側温水往き温度一定制御

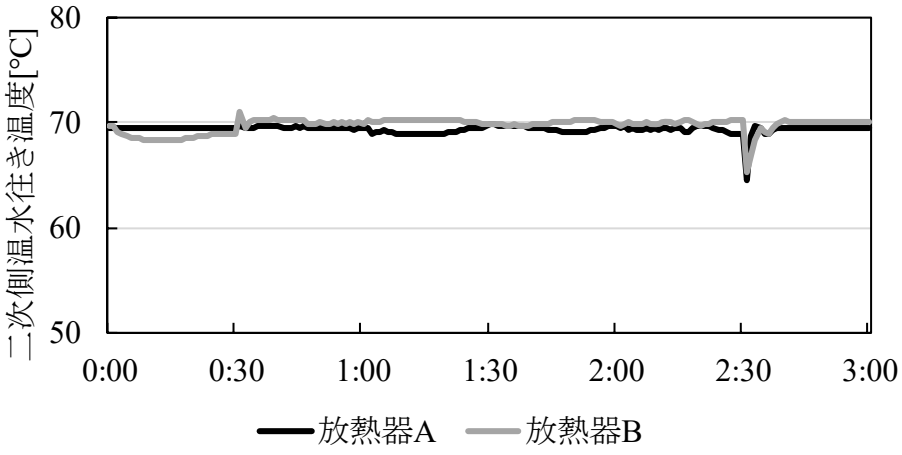
図 4-7　一次側流量、末端差圧、一次側搬送動力の変動



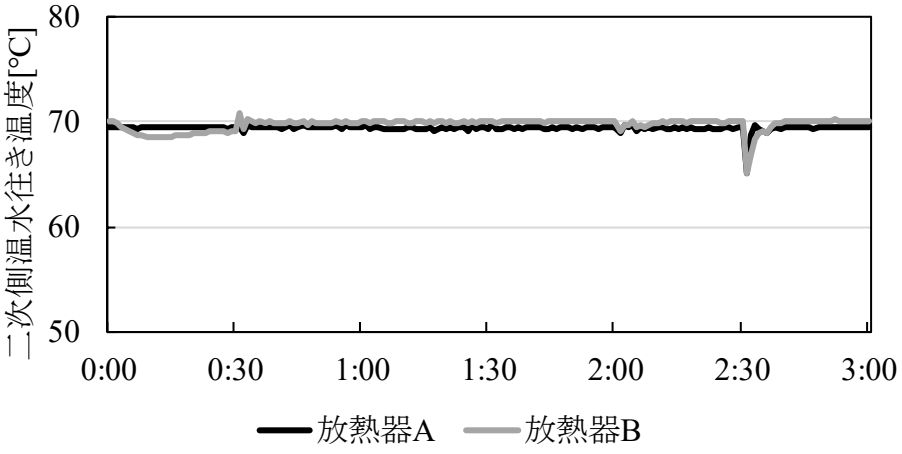
（e）バルブ開度制御

図 4-7　一次側流量、末端差圧、一次側搬送動力の変動

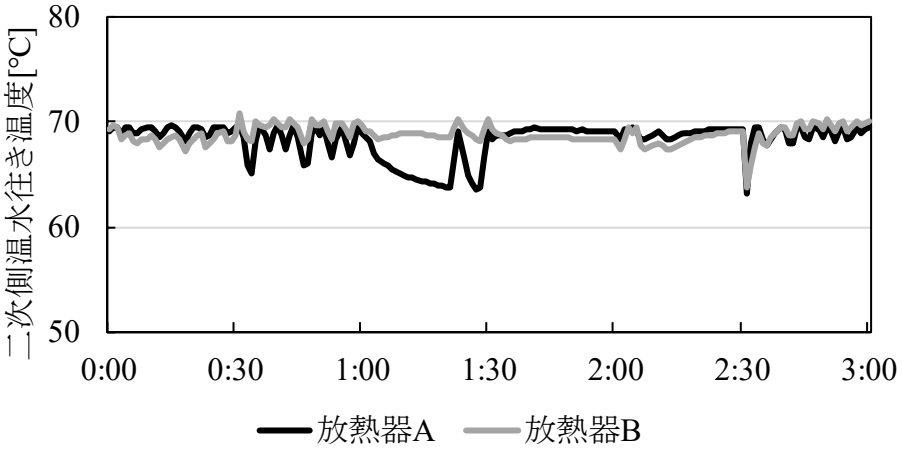
図 4-8 に各制御方式の二次側温水往き温度の推移を示す。回転数一定運転と末端差圧一定制御では、負荷変動により二次側温水往き温度がわずかに 70℃を下回ることもあったが、ほとんどの時間帯で安定して 70℃に制御することができていた。推定末端差圧制御では、図 4-7 で示したように末端差圧と一次側流量が変動したため、これにより二次側温水往き温度も変動した。放熱器 A では、温水往き温度が 64℃まで低下する時間帯が見られたが、放熱器 B では、このような低下は見られなかった。温水温度は他の制御方式に比べ変動したが、実験中の平均温水往き温度は、放熱器 A で 68.3℃、放熱器 B で 68.8℃であった。温水温度を安定させるためには、末端差圧の推定法に改善の余地があると考えられる。二次側温水往き温度一定制御では、二次側温水往き温度はほとんどの時間帯で安定して 68～70℃に制御することができていた。また、負荷に対して供給熱量が満足している場合には、PID 制御により温水温度は 70℃に維持することができていた。実験中の平均温水往き温度は、放熱器 A で 68.8℃、放熱器 B で 69.0℃であった。バルブ開度制御においても、二次側温水往き温度はほとんどの時間帯で安定して 68～70℃に制御することができていた。放熱器 A と B の温水往き温度のうち、温度の低い方が 68.5℃を下回った累積時間は、実験時間全体の 11%であった。実験中の平均温水往き温度は、放熱器 A で 69.1℃、放熱器 B で 69.4℃であった。



（a）回転数一定運転

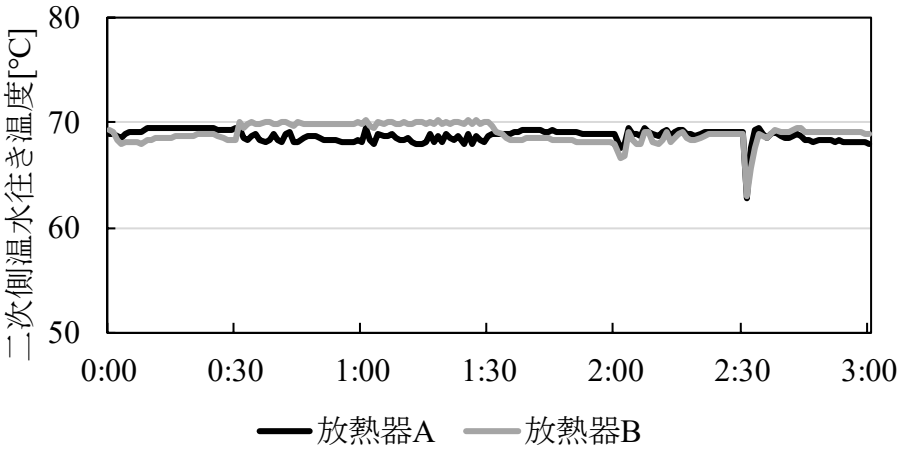


（b）末端差圧一定制御

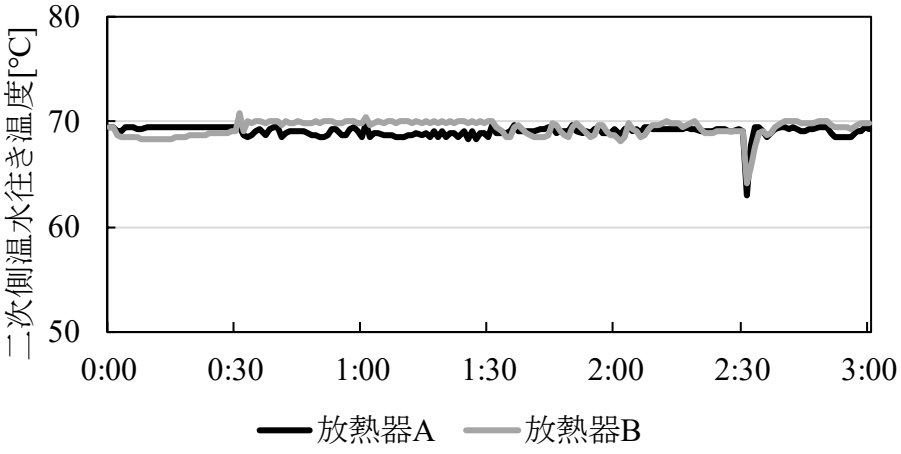


（c）推定末端差圧制御

図 4-8　二次側温水往き温度の推移



（d）二次側温水往き温度一定制御

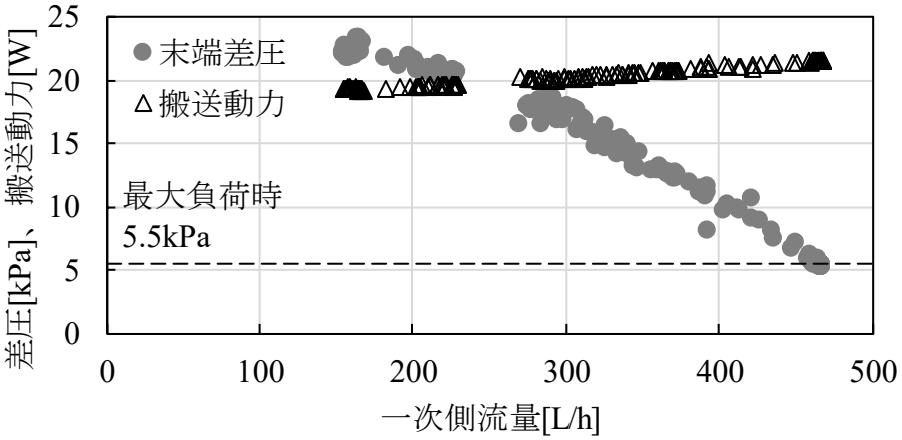


（e）バルブ開度制御

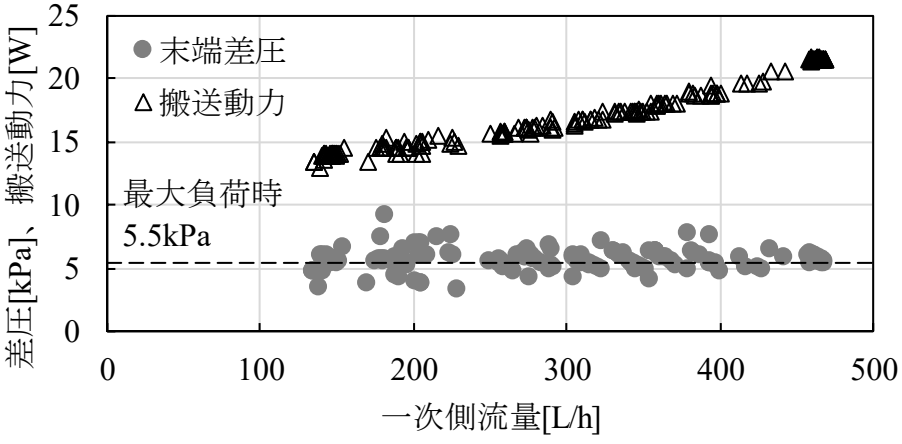
図 4-8　二次側温水往き温度の推移

図 4-9 に各制御方式の一次側流量と末端差圧・搬送動力の関係を示す。回転数一定運転では、流量と差圧の関係はポンプの特性に沿った曲線となり、搬送動力は流量によらずほぼ一定である。末端差圧一定制御では、流量によらず末端差圧を最大負荷時の差圧にしたので、搬送動力が低減できている。

一方、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御では、最大負荷時の末端差圧よりも差圧を低くすることができている。最小差圧を 0.5～0.7kPa まで下げることができ、末端差圧一定制御よりも搬送動力の低減効果が大きいことを確認した。また、今回の実験では、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御の一次側流量と末端差圧・搬送動力の関係はほとんど同じであった。

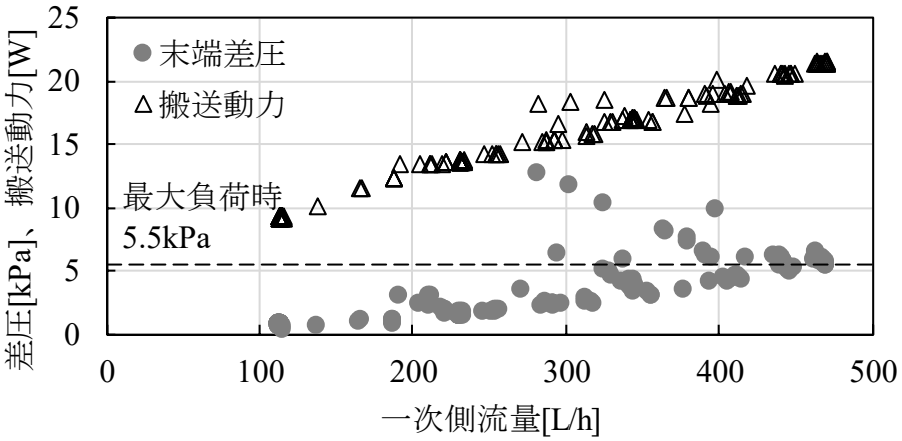


（a）回転数一定運転

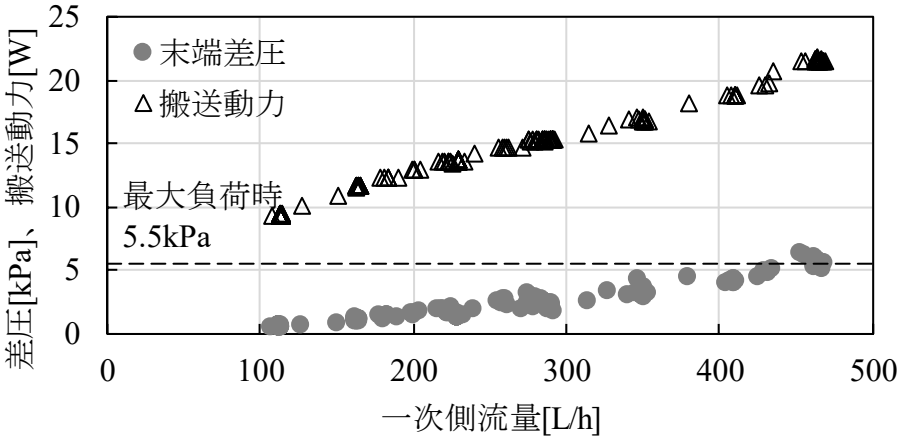


（b）末端差圧一定制御

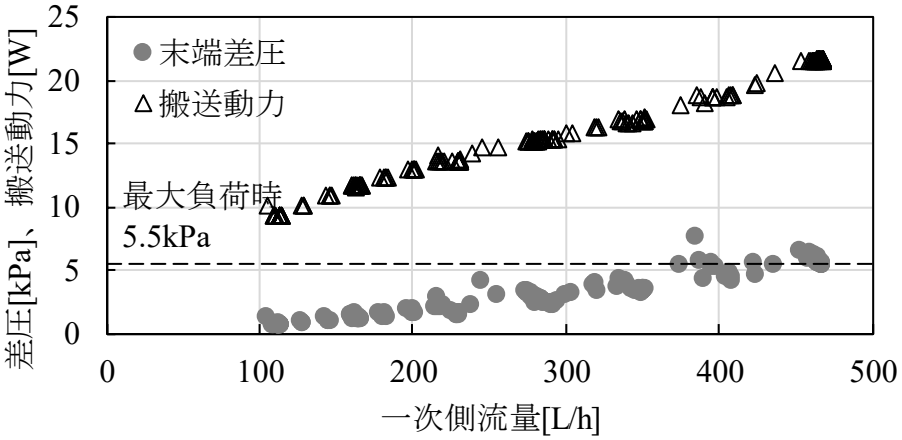
図 4-9　一次側流量と末端差圧・搬送動力の関係



（c）推定末端差圧制御



（d）二次側温水往き温度一定制御

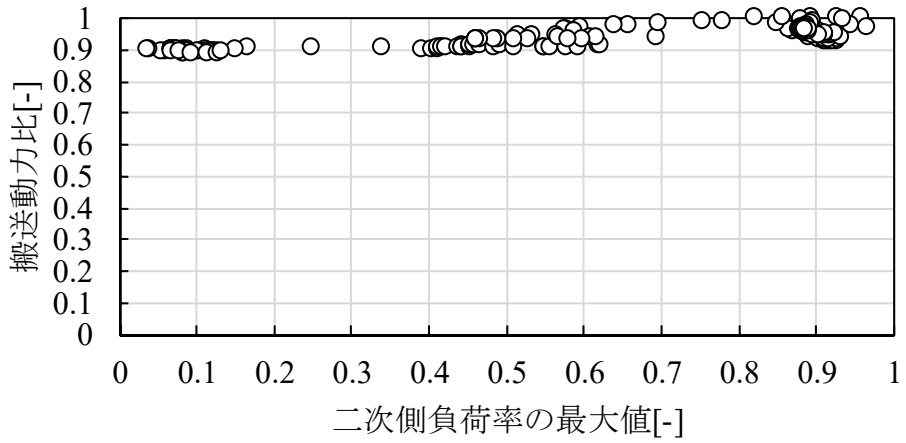


（e）バルブ開度制御

図 4-9　一次側流量と末端差圧・搬送動力の関係

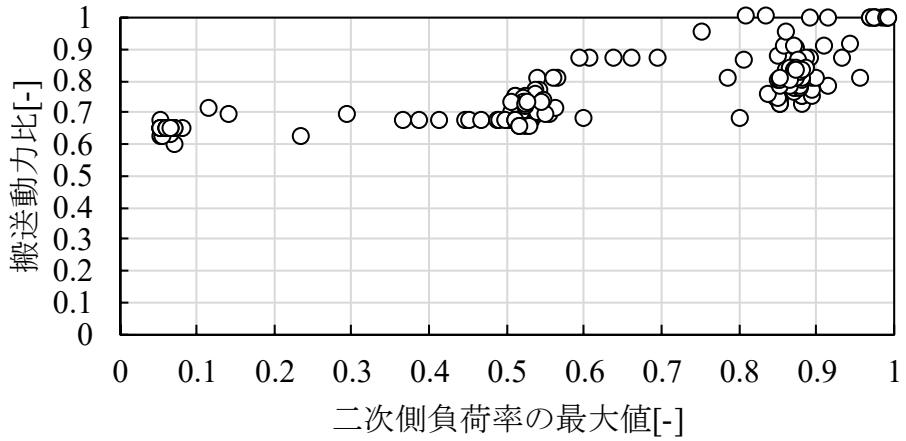
図 4-10 に各制御方式の二次側負荷率と搬送動力比の関係を示す。負荷率とは最大負荷に対する比率であり、搬送動力比とは最大搬送動力に対する比である。負荷が偏在した条件で実験を行ったため、図中の負荷率は、放熱器 A と B の負荷率のうち最大値を図示している。また、わずかであるが負荷率が 1 よりも大きくなることがあったが、ここでは、部分負荷時における搬送動力の低減について考察するため、負荷率が 1 以下になった時のデータを図示している。

回転数一定運転では、二次側負荷率によらず搬送動力比は 0.9～1 でほぼ一定であるが、末端差圧一定制御、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御では、低負荷率になると搬送動力比も小さくなり、負荷率に応じて搬送動力が低減されている。負荷率が 0.5 を下回るとほぼ一定の搬送動力比となり、末端差圧一定制御では 0.6～0.7、推定末端差圧制御では 0.4～0.5、二次側温水往き温度一定制御とバルブ開度制御では 0.4～0.6 になった。

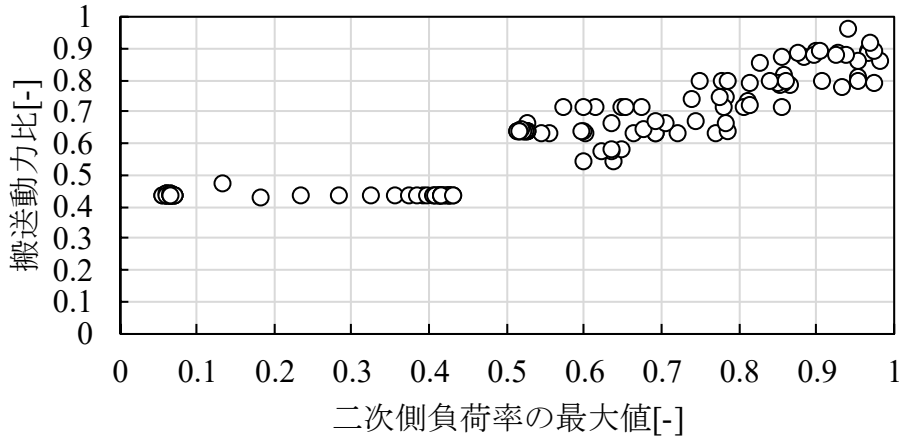


(a) 回転数一定運転

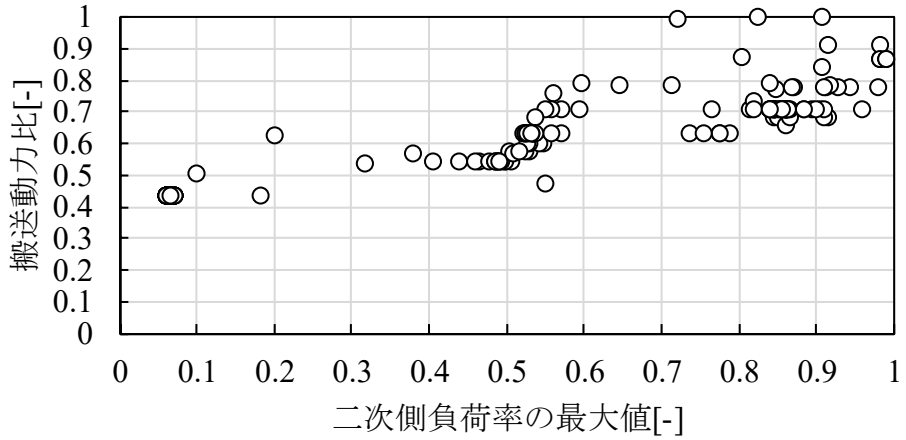
図 4-10　二次側負荷率の最大値と搬送動力比の関係



（b）末端差圧一定制御

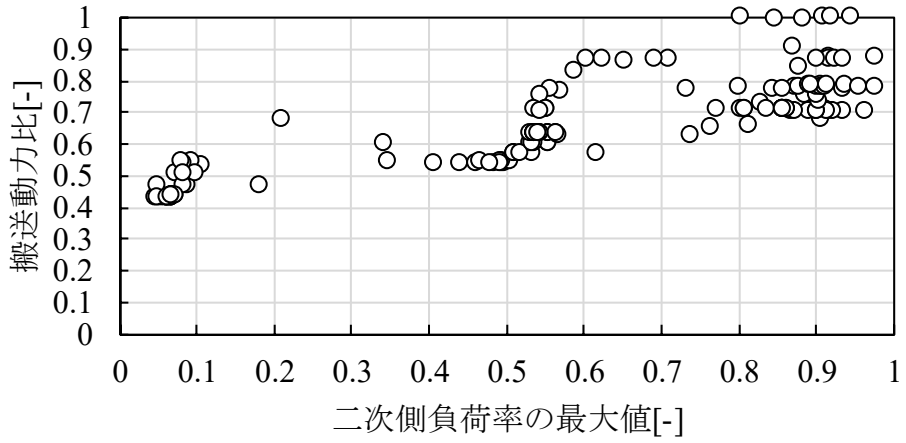


（c）推定末端差圧制御



（d）二次側温水往き温度一定制御

図 4-10　二次側負荷率の最大値と搬送動力比の関係



（e）バルブ開度制御

図 4-10　二次側負荷率の最大値と搬送動力比の関係

図 4-11 に各制御方式の流量比と搬送動力比の関係を示す。流量比とは、一次側の最大流量に対する比である。回転数一定運転では、流量比が小さくなっても搬送動力比は 0.9 程度にしかならず、流量が小さくなっても搬送動力は低減されない。末端差圧一定制御では、流量比が小さくなると搬送動力比は直線状に小さくなり、流量比が 0.3 の時に搬送動力比は 0.6 であった。推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御では、流量比と搬送動力比の関係はほぼ同じになり、流量比が小さくなると搬送動力比は直線状に小さくなった。流量比が 0.24 の時に搬送動力比は 0.43 であり、末端差圧一定制御よりも流量比と搬送動力比をともに小さくすることができた。実建物を調査した既往研究[2)]では、流量比と搬送動力比には 2 次曲線の関係があると報告されているが、本実験では、実建物で使用されるポンプに比べて著しく小さい実験用ポンプを使用して実験を行ったため、ポンプ小出力時の効率低下等が影響し、既往研究とは異なる傾向になったと考えられる。

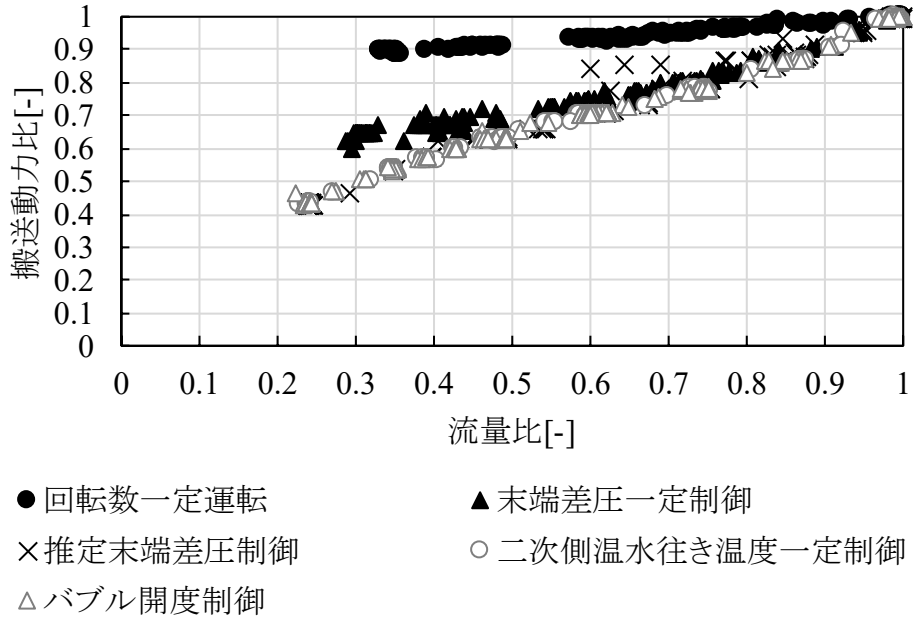


図 4-11　流量比と搬送動力比の関係

図 4-12 に各制御方式の一次側平均流量を示す。実験条件下において、回転数一定運転を基準に流量の低減効果を算出すると、末端差圧一定制御で 5%、推定末端差圧制御で 19%、二次側温水往き温度一定制御で 16%、バルブ開度制御で 9%であった。一次側平均流量が異なるのは、制御方式により二次側温水往き温度の設定が若干違うことが影響しており、これにより一次側枝管の流量が異なるためである。また、わずかであるが、制御方式によりバイパス管を流れる流量が異なることも影響している。

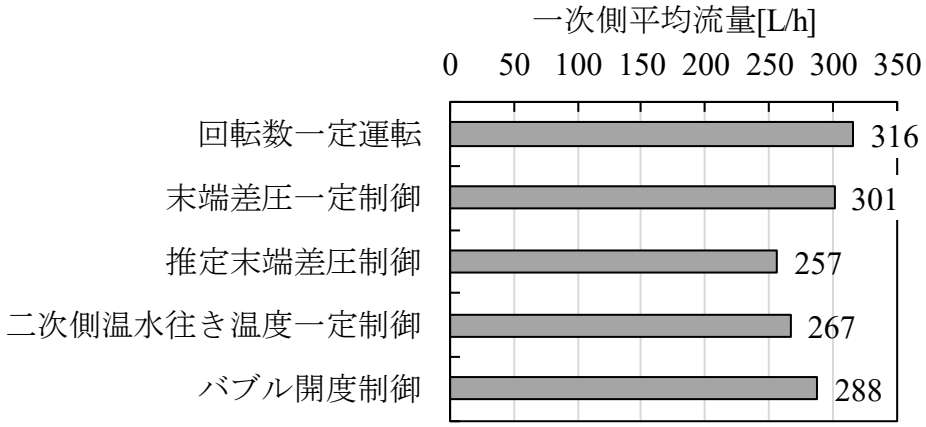


図 4-12　一次側平均流量

図 4-13 に各制御方式の一次側ポンプの搬送動力を示す。平均流量と同様に、実験条件下において、回転数一定運転を基準に搬送動力の低減効果を算出すると、末端差圧一定制御で 16%、推定末端差圧制御で 30%、二次側温水往き温度一定制御で 28%、バルブ開度制御で 24%であった。

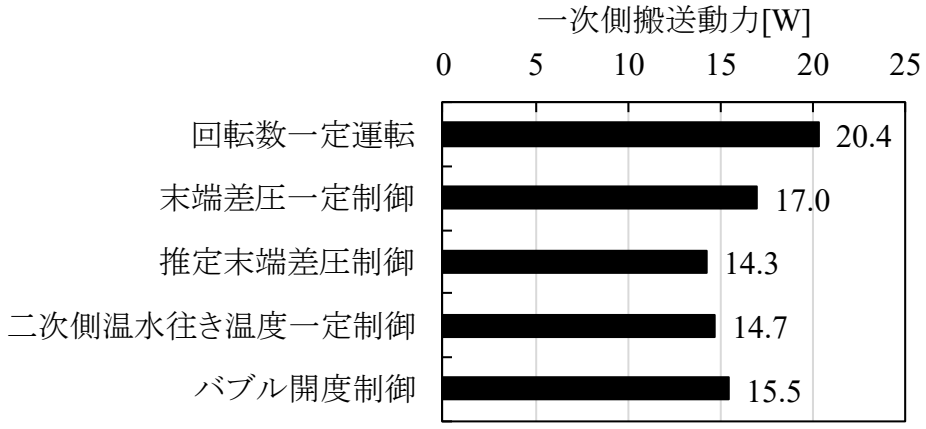


図 4-13　一次側搬送動力

図 4-14 に各制御方式の WTF（Water Transportation Factor）を示す。WTF は一次側搬送熱量を一次側搬送動力で除して算出した。WTF は熱搬送効率を示す値であり、値が 35 以上になると効率がよいとされている [3)]。本実験では、実験用のポンプを使用し、かつ実験装置の配管抵抗が小さいため、WTF の値は大きい傾向にあるが、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御の熱搬送効率はほとんど同じであることを確認した。

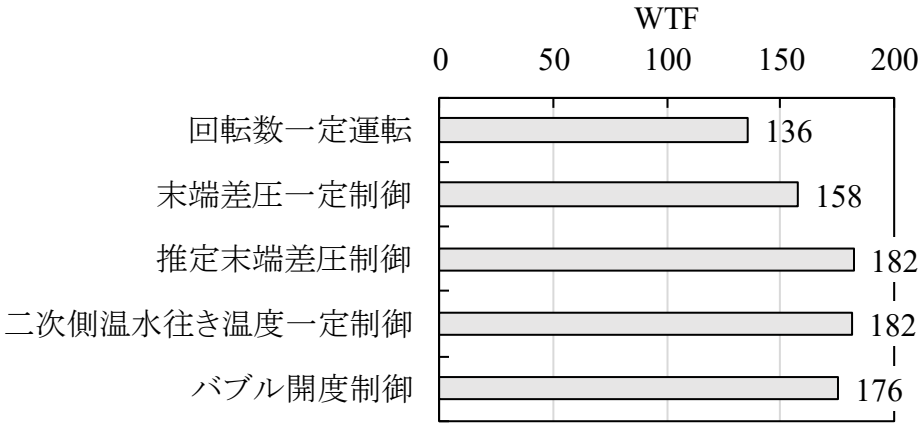


図 4-14　WTF

以上より、二次側温水往き温度一定制御とバルブ開度制御は、差圧を用いないでポンプ回転数を制御でき、搬送動力の低減効果があることを確認した。しかし、制御パラメータの設定によっては、搬送動力の低減効果や負荷変動への追従性が変わるため、パラメータの設定方法については今後検討が必要である。また、本研究では、容量の小さいポンプを用いて実験を行ったため、一般的に建築物で使用される汎用ポンプに比べて低負荷時の効率は低いと考えられる。このため、汎用ポンプに置き換えた場合の搬送動力の削減効果については、今後検討する必要がある。

4.6　まとめ

本章では、建物群に対する熱供給を対象として、従来の差圧による変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式（二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御）を開発し、その制御特性を実験により評価した。開発する変流量制御方式の評価にあたっては、従来の差圧による変流量制御方式と同一条件において制御特性を比較した。以下に得られた知見を示す。

1) 2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した実験を行った。二次側の負荷を同一条件にして、一次側ポンプを 5 つの制御方式（回転数一定運転、末端差圧一定制御、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御）で制御した場合における搬送動力等の基礎データを収集した。
2) 各制御方式の二次側負荷率と搬送動力比の関係を分析したところ、回転数一定運転では、二次側負荷率によらず搬送動力比は 0.9～1 でほぼ一定であった。末端差圧一定制御、推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御では、低負荷率になると搬送動力比も小さくなり、負荷率が 0.5 を下回ると末端差圧一定制御では 0.6～0.7、推定末端差圧制御では 0.4～0.5、二次側温水往き温度一定制御とバルブ開度制御では 0.4～0.6 になった。
3) 各制御方式の流量比と搬送動力比の関係を分析したところ、回転数一定運転では、流量比が小さくなっても搬送動力比は 0.9 程度であった。末端差圧一定制御では、流量比が小さくなると搬送動力比は直線状に小さくなり、流量比が 0.3 の時に搬送動力比は 0.6 であった。推定末端差圧制御、二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御では、流量比と搬送動力比の関係はほぼ同じになった。流量比が小さくなると搬送動力比は直線状に小さくなり、流量比が 0.24 の時に搬送動力比は 0.43 であった。
4) 二次側温水往き温度一定制御では、二次側温水往き温度が一定になるように直接ポンプ回転数を制御したが、搬送動力の低減効果があることを確認した。また、バルブ開度制御でも、バルブ開度と二次側温水往き温度により直接ポンプ回転数を制御したが、既往研究で報告されている搬送動力の低減効果を確認した。
5) 本研究で開発した二次側温水往き温度一定制御とバルブ開度制御は、従来の差圧による変流量制御とは異なり、差圧を用いずに直接ポンプ回転数を制御したとしても、負荷を満足するように差圧と流量を小さくでき、搬送動力の低減効果があること確

認した。これより、建物群に対する熱供給を熱交換器による間接受入方式で行う場合には、差圧計を用いなくてもポンプを制御することが可能となり、制御システムにかかるイニシャルコストを削減できる可能性があると考えられる。ただし、制御パラメータの設定方法については、今後詳細な検討を行う必要がある。

参考文献

1) 竹迫雅史，角之上芳明，佐藤文秋，米木伸一，安田健一，江崎晃：制御弁監視による冷温水ポンプ揚程最適化 VWV 制御の実測結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.125-128，2004.9
2) 増田正夫，柴田克彦，倉田昌典，友田衛，山本誠，鈴木康司，中村真，宮田征門，五味弘：各種制御が導入された空調・給湯システムのエネルギー消費の実例 その 2 VWV 制御システムの実例，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.5-8，2013.9
3) 空気調和・衛生工学会 : 建築・設備の省エネルギー技術指針 非住宅編，pp124-126，2008

本章に関連する既発表論文

1) 阿部佑平，月館司，羽山広文 : 建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式に関する実験的検討，空気調和・衛生工学会論文集，No.273，pp.9-18，2019.12

第５章

建物群に対する熱供給を対象とした数値解析手法

5.1　はじめに

第 4 章では、建物群に対する熱供給を対象として、従来の差圧による変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式を開発し、その制御特性を実験により評価した。しかしながら、実験で多様な熱負荷条件を再現し、変流量制御方式別の制御特性を定量的に把握するには、実験期間やコストが膨大となるため限界がある。このため、実験では限られた熱負荷条件でしか検討ができず、多様な熱負荷条件や制御パラメータの影響を考慮し、変流量制御方式別の制御特性を定量的に把握するためには、数値解析が有効である。

本章では、建物群に対する熱供給を対象に、ポンプの変流量制御方式の導入による熱搬送動力等の制御特性を定量的に評価するために、流体移動と熱移動を同時に解析する手法の検討を目的とする。数値解析手法の妥当性を検証するため、第 4 章で行った実験を対象に解析を行い、実験結果と解析結果を比較する。

5.2　数値解析手法

5.2.1　数値解析手法の概要

図 5-1 に解析の流れを示す。本研究では、流体移動と熱移動を同時に解析することが可能な数値解析手法を検討する。数値解析では、1 ステップ前の値を用いて電動バルブの開度、インバータとポンプの条件を決定して、流体移動解析により流量を計算し、その値を用いて熱移動解析を行うことで、温水温度や熱量を求める。

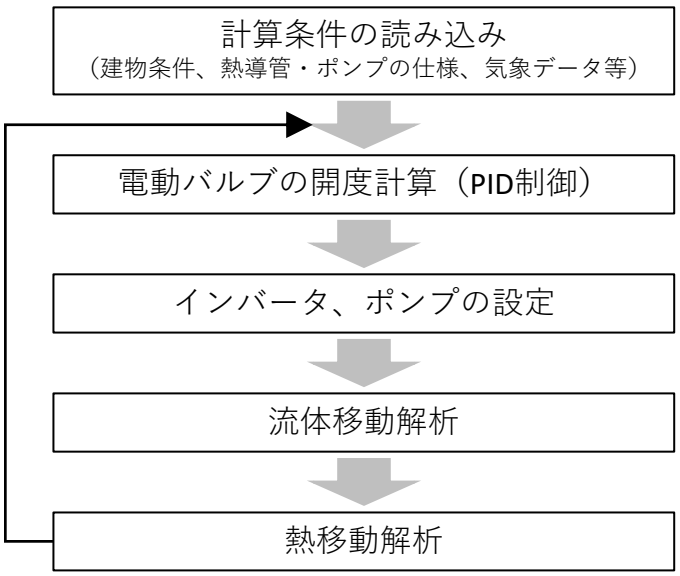


図 5-1　解析の流れ

まず、流体移動は、流体管路網を用いて計算する。管路や機器の接合部に節点（ノード）を設けると節点 ij 間の流量は式(5-1)で表される。また、ポンプの特性を式(5-2)で表す。

$$F_{\mathrm{ij}} = A_{\mathrm{ij}} \left\{ \frac{2}{\xi_{\mathrm{ij}} \rho} \left(P_{\mathrm{i}} - P_{\mathrm{j}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} = a_{\mathrm{ij}} \left(P_{\mathrm{i}} - P_{\mathrm{j}} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{5-1}$$

$$f_{\mathrm{ip}} = G_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{\mathrm{i}} - P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{x}}} \right) \right\}^{\frac{1}{n}} \tag{5-2}$$

ポンプがある場合の各節点における流量収支は、ポンプの吐出し側の節点を 1、吸込み側の圧力基準点を o とすると、式(5-3)で表される。また、ポンプがない場合の各節点における流量収支は、式(5-4)で表される。

$$a_{12}(P_1-P_2)^{\frac{1}{2}}+a_{13}(P_1-P_3)^{\frac{1}{2}}+\ \cdots\ +a_{1\mathrm{j}}\left(P_1-P_{\mathrm{j}}\right)^{\frac{1}{2}}=G_{\max}\left\{1-\left(\frac{P_1-P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{x}}}\right)\right\}^{\frac{1}{n}} \tag{5-3}$$

$$a_{\mathrm{j}1}\left(P_{\mathrm{j}}-P_1\right)^{\frac{1}{2}}+a_{\mathrm{j}2}\left(P_{\mathrm{j}}-P_2\right)^{\frac{1}{2}}+\ \cdots\ +a_{\mathrm{j}\,\mathrm{j}\text{-}1}\left(P_{\mathrm{j}}-P_{\mathrm{j}\text{-}1}\right)^{\frac{1}{2}}=0 \tag{5-4}$$

ここで、式(1)において$K_{\mathrm{ij}}=a_{\mathrm{ij}}\left(P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{j}}\right)^{\frac{1}{2}-1}$、式(2)において$L=G_{\max}\left\{1-\left(\frac{P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{x}}}\right)\right\}^{\frac{1}{n}-1}$とすると、式(5-1)、(5-2)はそれぞれ式(5-1)’、(5-2)’のように表される。

$$F_{\mathrm{ij}}=a_{\mathrm{ij}}\left(P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{j}}\right)^{\frac{1}{2}-1}\left(P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{j}}\right)=K_{\mathrm{ij}}\left(P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{j}}\right) \tag{5-1)'}$$

$$f_{\mathrm{ip}}=G_{\max}\left\{1-\left(\frac{P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{x}}}\right)\right\}^{\frac{1}{n}-1}\left\{1-\left(\frac{P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{x}}}\right)\right\}=L-\frac{L}{P_{\mathrm{x}}}\left(P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{o}}\right) \tag{5-2)'}$$

式(5-1)’、(5-2)’を用いて式(5-3)、(5-4)を線形化すると、式(5-5)、(5-6)のように表される。

$$K_{12}(P_1-P_2)+K_{13}(P_1-P_3)+\ \cdots\ +K_{1\mathrm{j}}\left(P_1-P_{\mathrm{j}}\right)=L-\frac{L}{P_{\mathrm{x}}}\left(P_1-P_{\mathrm{o}}\right) \tag{5-5}$$

$$K_{\mathrm{j}1}\left(P_{\mathrm{j}}-P_1\right)+K_{\mathrm{j}2}\left(P_{\mathrm{j}}-P_2\right)+\ \cdots\ +K_{\mathrm{j}\,\mathrm{j}\text{-}1}\left(P_{\mathrm{j}}-P_{\mathrm{j}\text{-}1}\right)=0 \tag{5-6}$$

式(5-5)、(5-6)を各節点の圧力で整理すると、式(5-7)、(5-8)のように表される。

$$\left(K_{12}+K_{13}+\ \cdots+K_{1\mathrm{j}}+\frac{L}{P_{\mathrm{x}}}\right)P_1-K_{12}P_2-K_{13}P_3-\ \cdots-K_{1\mathrm{j}}P_{\mathrm{j}}=L+\frac{L}{P_{\mathrm{x}}}P_{\mathrm{o}} \tag{5-7}$$

$$-K_{\mathrm{j}1}P_1-K_{\mathrm{j}2}P_2-\ \cdots-K_{\mathrm{j}\,\mathrm{j}\text{-}1}P_{\mathrm{j}\text{-}1}+\left(K_{\mathrm{j}1}+K_{\mathrm{j}2}+\ \cdots+K_{\mathrm{j}\,\mathrm{j}\text{-}1}\right)P_{\mathrm{j}}=0 \tag{5-8}$$

KおよびLを1ステップ前の圧力から求めると、この連立方程式から新たに各節点の圧力が求められる。これを収束するまで繰り返し計算を行い、求められた圧力から各節点間とポンプの流量を算出する。この値を用いて熱移動解析を行う。

次に、熱移動は、各部位を節点と熱コンダクタンスからなる熱回路網を後退差分法で解く。ある節点における熱収支は式(5-9)で表される。熱コンダクタンスK_{ip}は、熱伝達、熱伝導、移流のそれぞれに対して式(5-10)で表される。

$$C_{\mathrm{p}}\left(\theta_{\mathrm{p}}-\theta_{\mathrm{p}'}\right)=\left\{\sum K_{\mathrm{ip}}\left(\theta_{\mathrm{i}}-\theta_{\mathrm{p}}\right)+Q_{\mathrm{p}}\right\}\Delta t \tag{5-9}$$

$$K_{\mathrm{ip}}=\alpha A、\ K_{\mathrm{ip}}=A\lambda/d、\ K_{\mathrm{ip}}=GC \tag{5-10}$$

熱交換器は向流型熱交換器とし、熱交換器の出口温度 $\theta_{1\mathrm{out}}$、$\theta_{2\mathrm{out}}$ を式(5-11)～(5-16)で計算する[1),2)]。

$$S=-\left(1-\frac{GC_1}{GC_2}\right)\frac{KA}{GC_1} \tag{5-11}$$

$$E_1=1-e^{S} \tag{5-12}$$

$$E_2=1-\frac{GC_1}{GC_2}e^{S} \tag{5-13}$$

$$EF=\frac{E_1}{E_2} \tag{5-14}$$

$$\theta_{1\mathrm{out}}=\theta_{1\mathrm{in}}-EF(\theta_{1\mathrm{in}}-\theta_{2\mathrm{in}}) \tag{5-15}$$

$$\theta_{2\mathrm{out}}=\theta_{2\mathrm{in}}+EF\frac{GC_1}{GC_2}(\theta_{1\mathrm{in}}-\theta_{2\mathrm{in}}) \tag{5-16}$$

熱導管からの熱損失を考慮して温水温度を計算する場合、熱導管は地盤と一体として扱い、二次元あるいは三次元非定常熱伝導モデルを用いて解析することが可能である。しかし、本研究では周囲温度 θ_{r} を与条件として与え、式(5-17)、(5-18)の熱交換モデルを用いて簡易的に熱導管の温水出口温度を計算する。計算では、パイプおよびその中の流体の熱容量を考慮するため、パイプを 2 等分し、その間にパイプ全体の熱容量をもつ節点を設けて計算する。

$$EF=1-e^{(-KA/GC)} \tag{5-17}$$

$$\theta_{\mathrm{out}}=(1-EF)\theta_{\mathrm{in}}+EF\times\theta_{\mathrm{r}} \tag{5-18}$$

5.3　数値解析手法の妥当性の確認

前節で述べた数値解析手法の妥当性を検証するため、第 4 章で行った実験を対象に解析を行う。実験結果と解析結果を比較することにより、解析手法の妥当性を確認する。

5.3.1　既往実験の概要

図 5-2 に実験装置の概要を示す。実験では、2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した。実験条件等の詳細については、第 4 章を参照されたい。

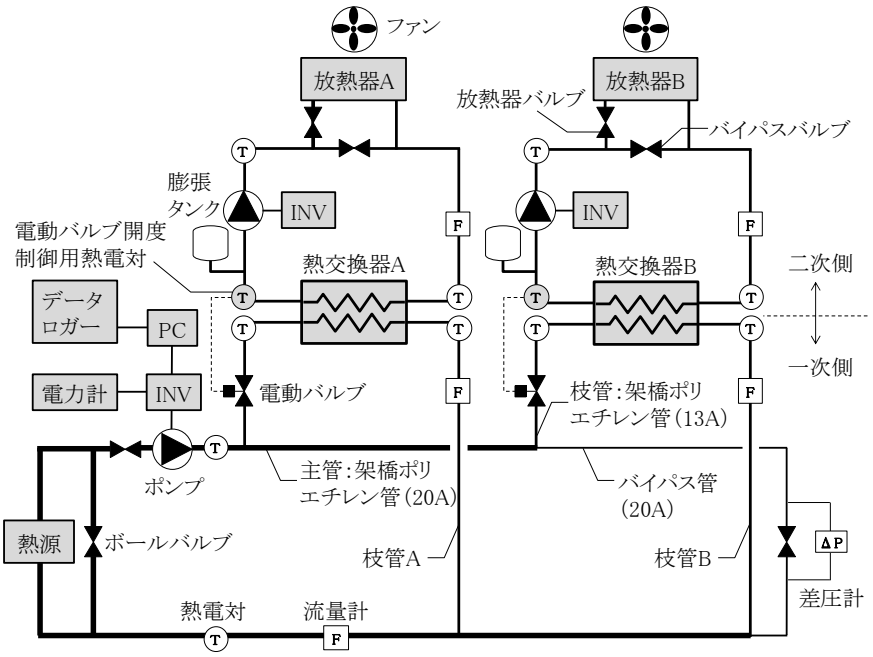


図 5-2　実験装置の概要

5.3.2　解析概要

図 5-3 に解析モデルを示す[1)]。流体移動解析は一次側、熱移動解析は一次側と二次側で行う。本解析では、第 4 章で行った実験のうち、回転数一定運転と本研究で開発したバルブ開度制御を対象に解析を行う。熱源から 75℃の温水を供給し、二次側温水往き温度は 70℃となるように一次側枝管に設置された電動バルブの開度を PID 制御した。図 5-4 にポンプの周波数毎の特性（流量－揚程（圧力）特性曲線）を示す。実験で使用したポンプの製造者が公表している諸元を参考に、インバータの周波数が 50Hz におけるポンプの特性は、式(5-2)で n=1.8、P_x=23.52kPa、G_{max}=960L/h とした。他の周波数における特性については、n=1.8 として、周波数に比例して P_x と G_{max} を変更した。二次側流

量は、図 5-5 に示す実験値を与えた。二次側の放熱器 A と B の節点では、放熱器からの放熱量と配管からの熱損失に加え熱交換器からの熱損失も考慮するため、図 5-6 に示す実験で得られた熱交換器一次側熱量を与えて計算した。

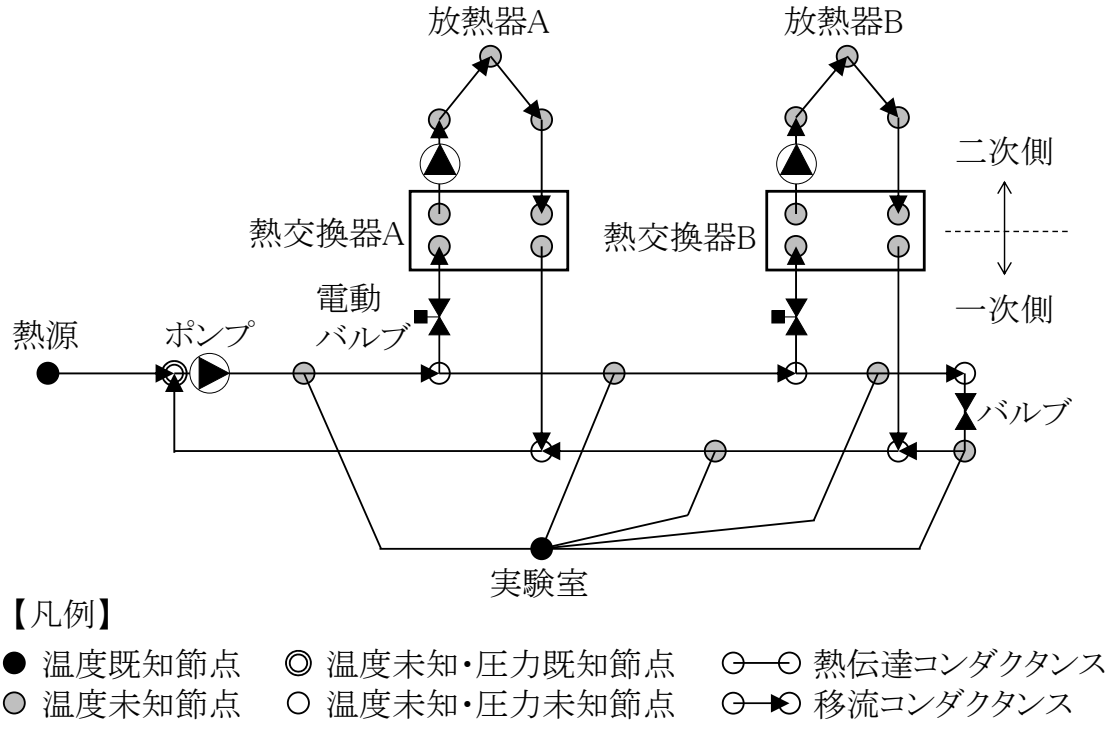


図 5-3　解析モデル

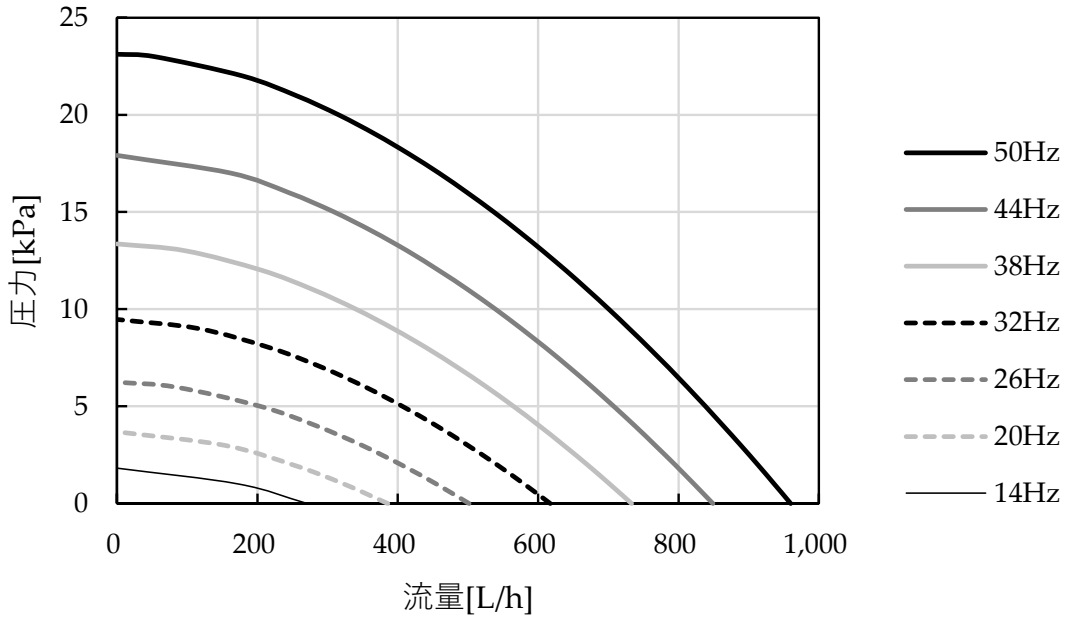


図 5-4　ポンプの周波数毎の特性

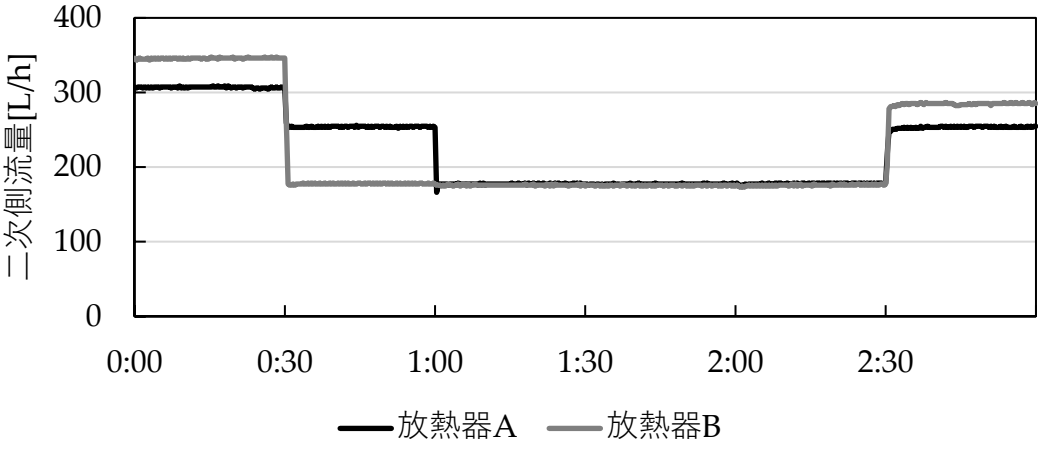
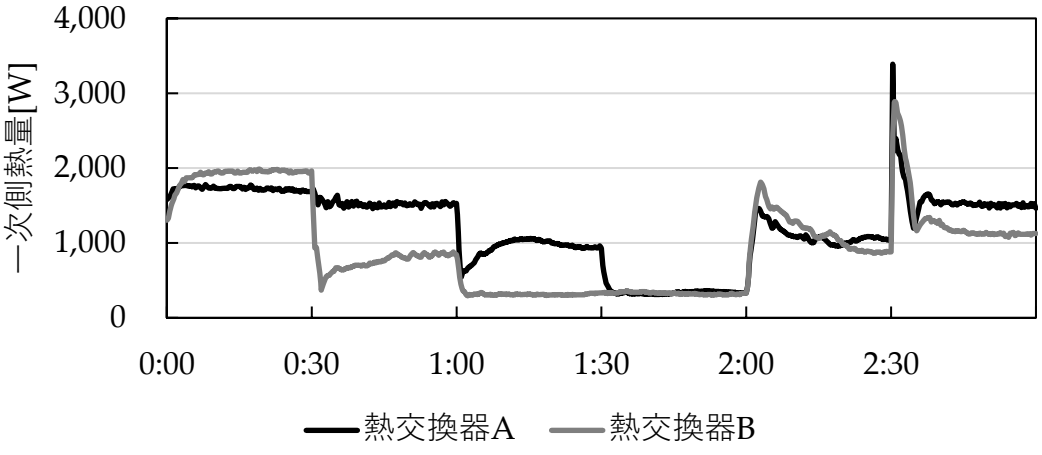
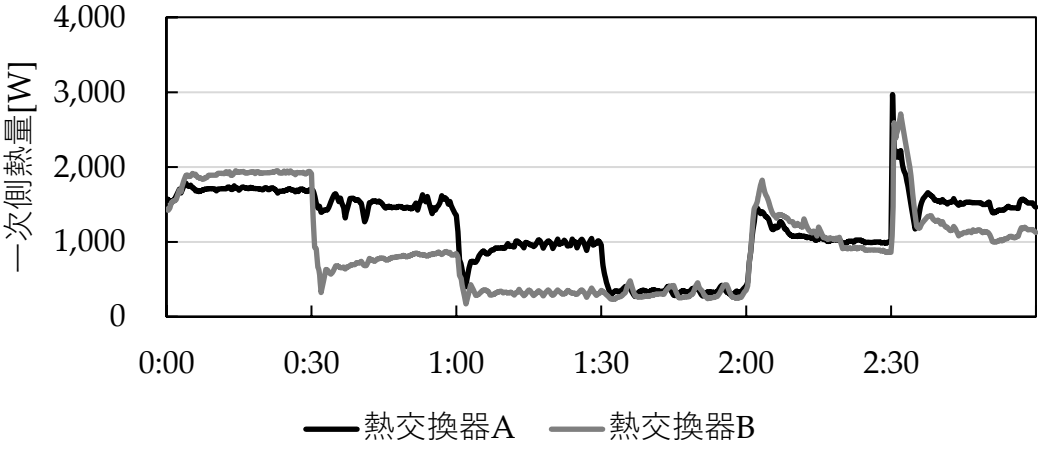


図 5-5　二次側流量



(a)回転数一定運転



(b)バルブ開度制御

図 5-6　熱交換器一次側熱量

熱交換器の *KA* は、実験結果より式(5-19)に示す一次側枝管流量 G_{1b} を用いた近似式を作成した。これを用いて熱交換器 A と B の *KA* を計算し、熱交換器の出口温度を式(5-11)～(5-16)で計算した。

$$KA = 1.32G_{1b} + 232.57 \tag{5-19}$$

また、配管の *KA* は、架橋ポリエチレン管（0.41W/mK）の線熱通過率を計算し[2)]、これに配管長を乗じて求めた。さらに、式(5-18)において、配管の周囲温度 θ_r は、実験中における実験室の平均温度を与えた。配管からの熱損失は一次側主管で考慮し、枝管では考慮していない。

制御の影響を検討する場合、計算時間間隔は十分小さくする必要があるため、2 秒間

隔で計算を行った。回転数一定運転の計算を行う場合、インバータの周波数は 50Hz 一定で計算した。バルブ開度制御の計算を行う場合、インバータの周波数は、実験と同様に 20 秒毎に設定の変更を判断した。インバータの周波数の具体的な変更方法としては、実験と同様に、2 つの電動バルブのうち、最大開度が 85%を下回るとインバータの周波数を 6Hz 下げてポンプ回転数を下げた。また、温水温度の温度低下の許容範囲を 1.5℃とし、電動バルブが全開となり、放熱器 A と B の二次側温水往き温度のうち、どちらか一方が 68.5℃を下回るとインバータの周波数を 6Hz 上げてポンプ回転数を上げた。

5.3.3　解析結果と考察

（1）回転数一定運転

図 5-7～5-11 に回転数一定運転を対象に解析を行った場合の実験結果と解析結果を示す。図 5-7 の一次側流量、図 5-8 の一次側枝管流量を見ると、負荷が増加し流量が大きくなる時間帯で、実験結果よりも解析結果の方がやや流量が小さくなっているが、両者の傾向は概ね一致している。図 5-9 の末端差圧を見ると、一次側流量の実験結果と解析結果の誤差がやや大きい時間帯では、末端差圧も誤差がやや大きくなっているが、それ以外の時間帯では、実験結果と解析結果は概ね一致している。図 5-10 の一次側流量と末端差圧の関係を見ると、実験結果と解析結果は概ね一致している。図 5-11 の二次側温水往き温度を見ると、放熱器 A・B ともに実験結果と解析結果はよく一致しており、設定温度の 70℃付近を推移している。

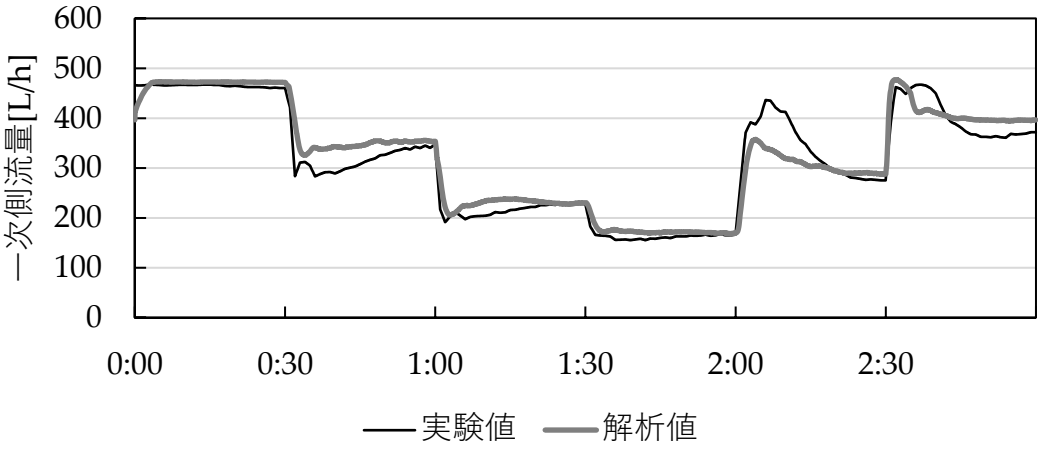
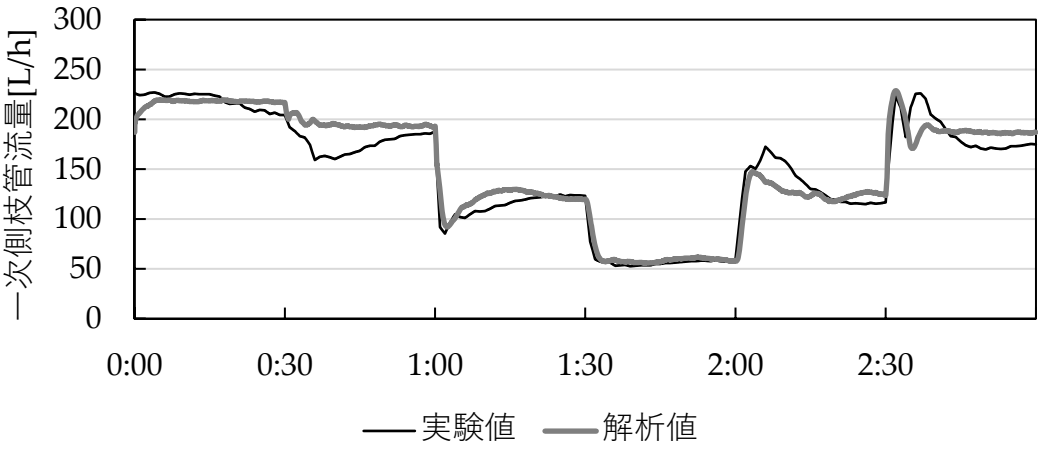
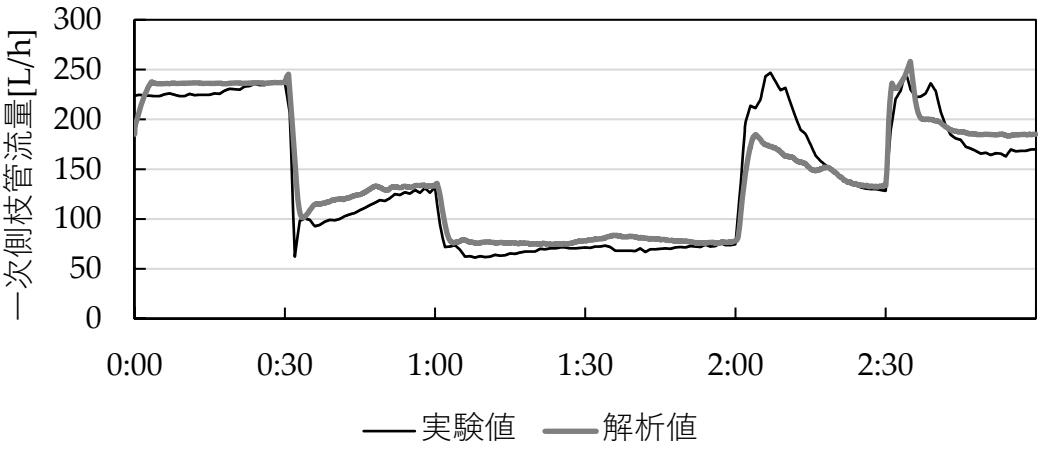


図 5-7　一次側流量（回転数一定運転）



(a)枝管 A



(b)枝管 B

図 5-8　一次側枝管流量（回転数一定運転）

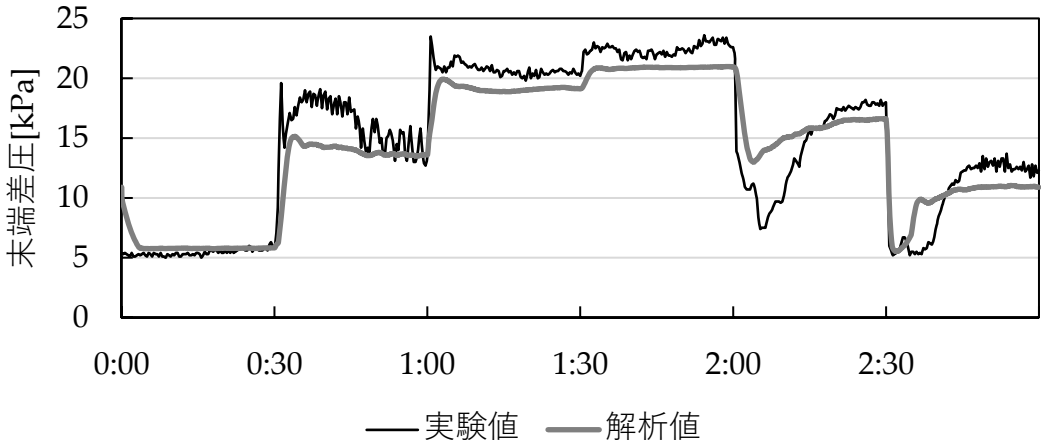


図 5-9　末端差圧（回転数一定運転）

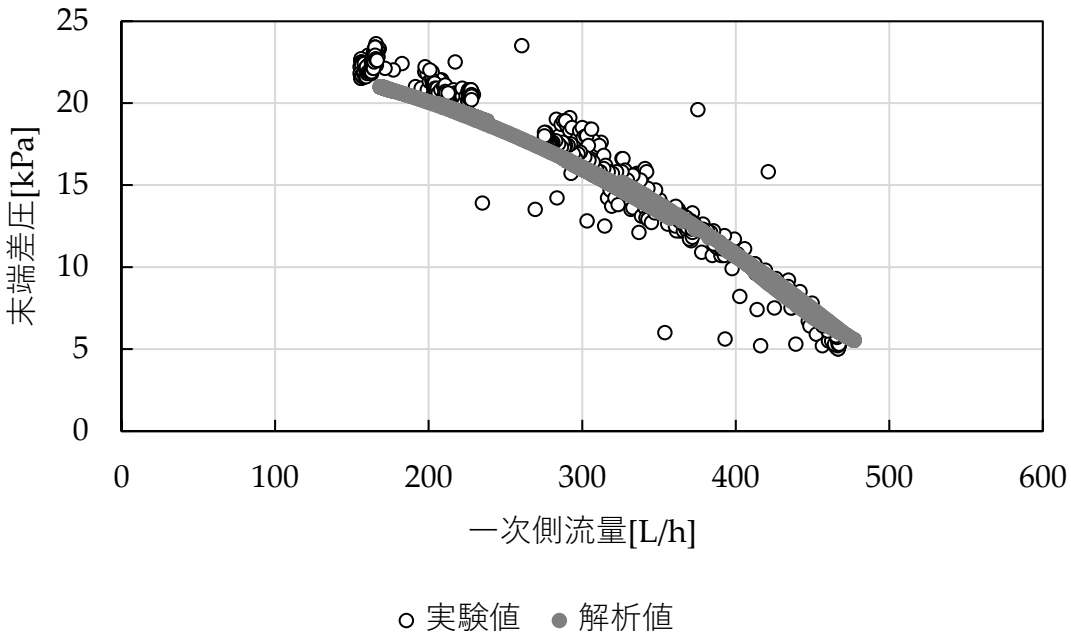
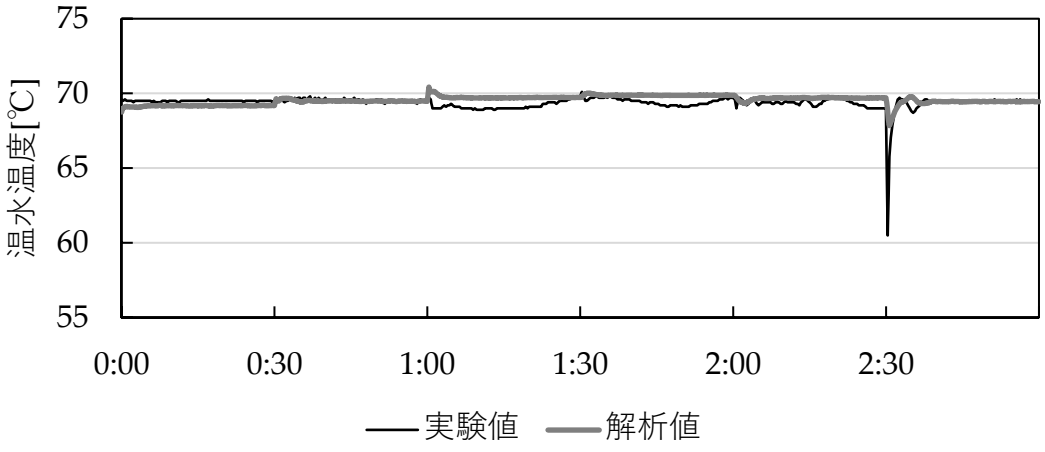
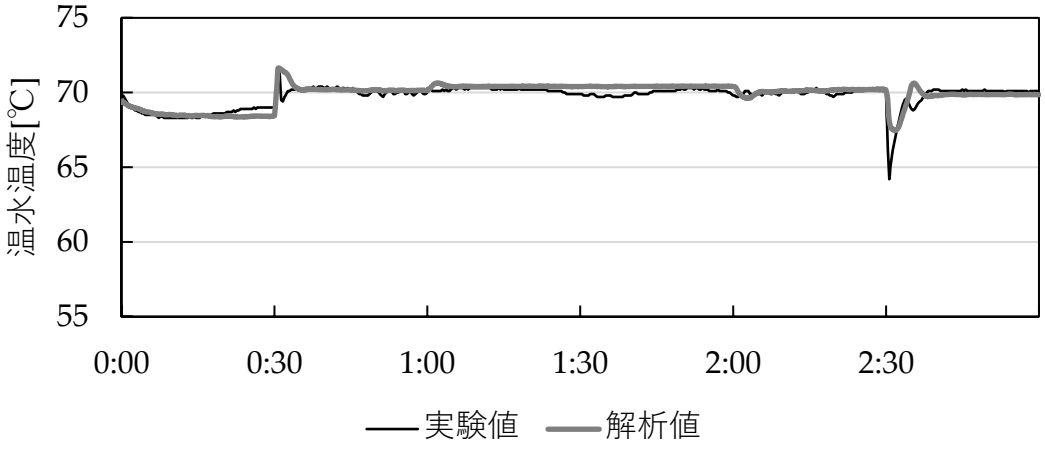


図 5-10　一次側流量と末端差圧の関係（回転数一定運転）



(a)放熱器 A



(b)放熱器 B

図 5-11　二次側温水往き温度（回転数一定運転）

（2）バルブ開度制御

図 5-12～5-16 にバルブ開度制御を対象に解析を行った場合の実験結果と解析結果を示す。図 5-12 の一次側流量、図 5-13 の一次側枝管流量を見ると、実験結果と解析結果は概ね一致しているが、両者の差がやや大きくなっている時間帯もある。また、解析結果では実験結果の細かな変動を再現できていないところがあり、この理由として、電動バルブの特性を考慮した解析を行っていないことが考えられる。図 5-14 の末端差圧を見ると、一次側流量がやや小さく計算されている時間帯や、一次側流量の細かな変動を再現できていない時間帯では、実験結果と解析結果の差がやや大きくなっているが、流量と同様に傾向は概ね一致している。図 5-15 の一次側流量と末端差圧の関係を見ると、解析結果は実験結果の範囲内に収まっている。図 5-16 の二次側温水往き温度を見ると、放熱器 A・B ともに実験結果と解析結果はよく一致しており、設定温度の 70℃付近を推移している。

回転数一定運転とバルブ開度制御の実験を対象に解析を行ったところ、いずれの解析結果も実験結果と概ね一致することが分かり、本研究で検討した数値解析手法の妥当性を確認した。

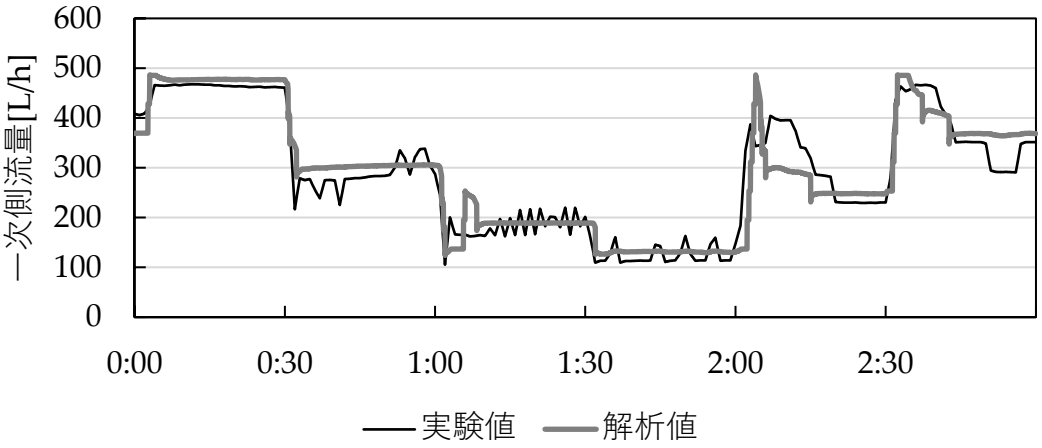
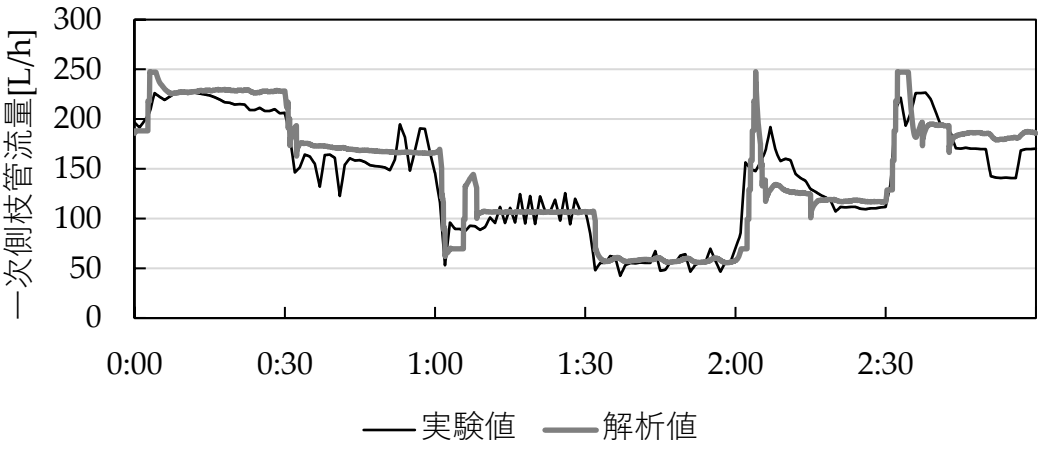
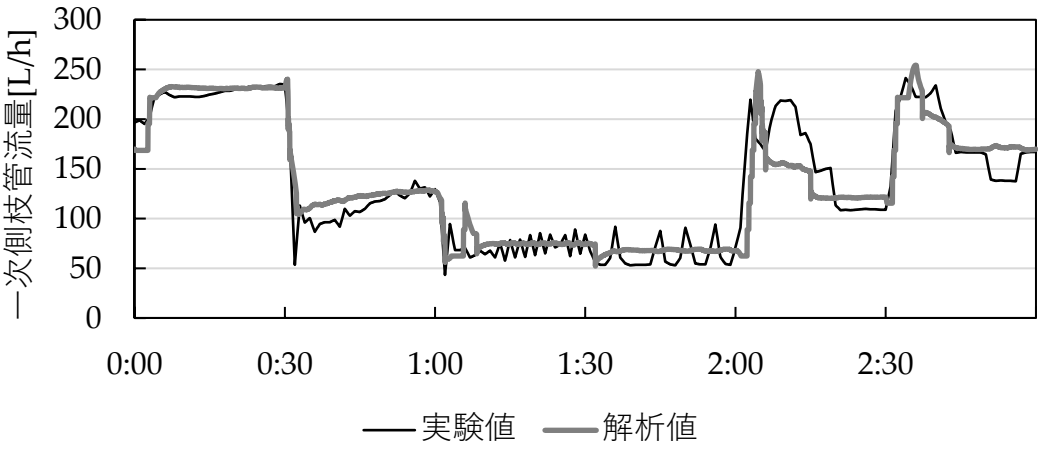


図 5-12　一次側流量（バルブ開度制御）



(a)枝管 A



(b)枝管 B

図 5-13　一次側枝管流量（バルブ開度制御）

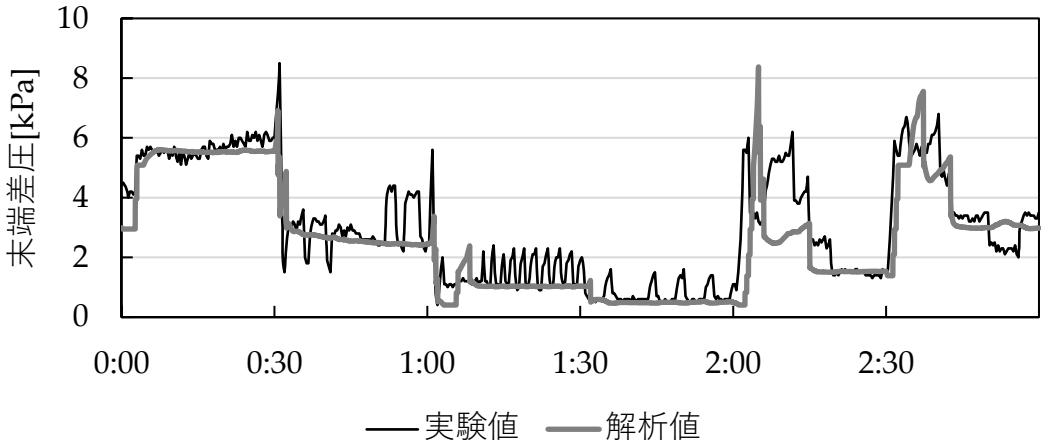


図 5-14　末端差圧（バルブ開度制御）

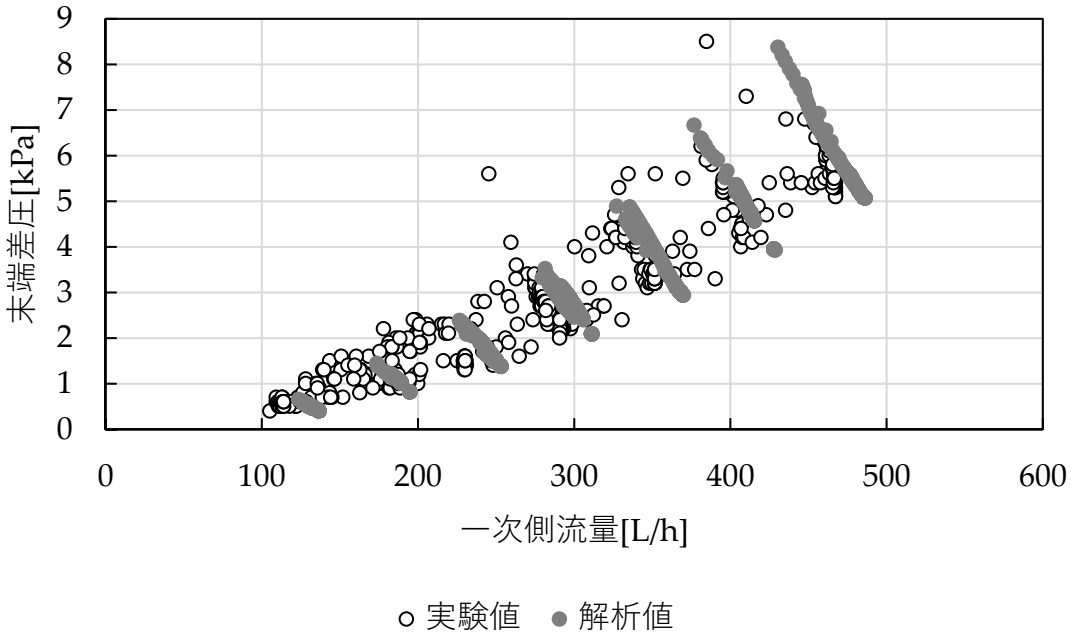
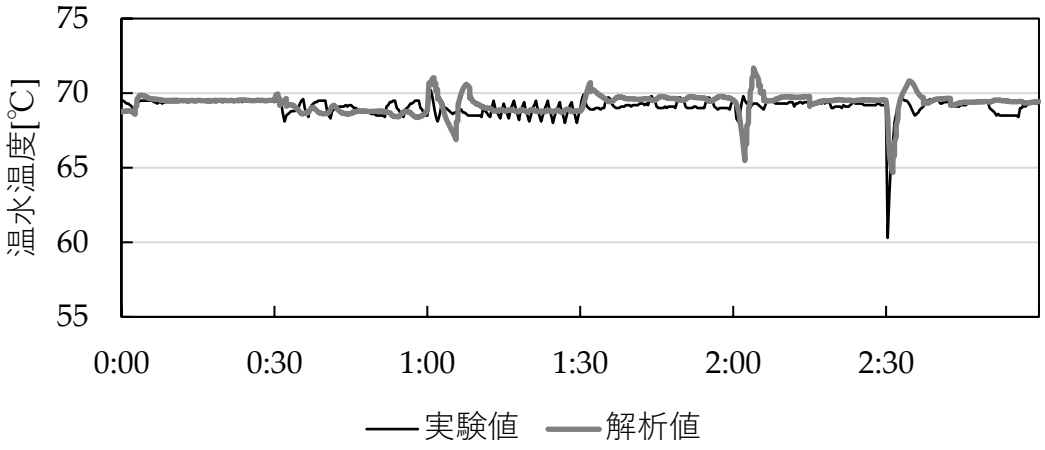
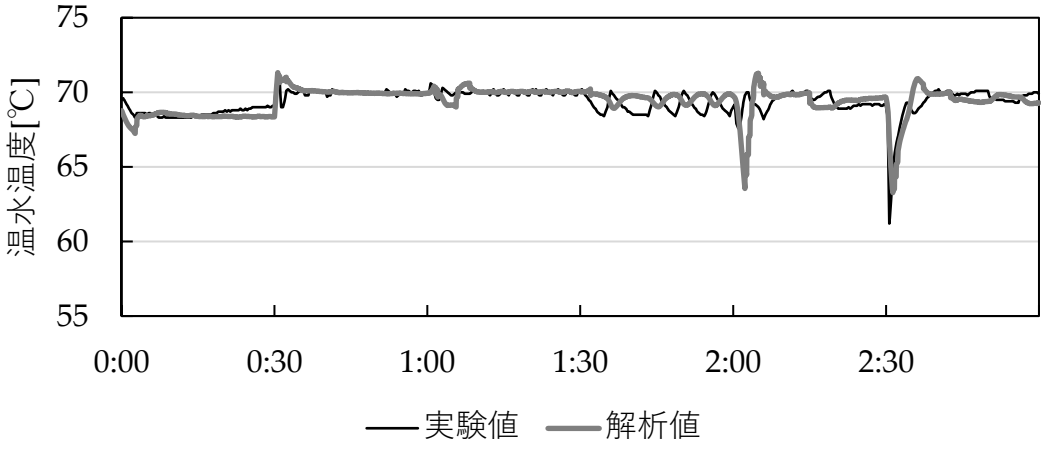


図 5-15　一次側流量と末端差圧の関係（バルブ開度制御）



(a)放熱器 A



(b)放熱器 B

図 5-16　二次側温水往き温度（バルブ開度制御）

5.4　まとめ

本章では、建物群に対する熱供給を対象に、ポンプの変流量制御方式の導入による熱搬送動力等の制御特性を定量的に評価するために、流体移動と熱移動を同時に解析する手法を検討した。以下に得られた知見を示す。

1) 建物群に対する熱供給を対象として、流体管路網と熱回路網を用いた数値解析手法を検討し、数値解析プログラムを作成した。
2) 数値解析手法の妥当性を検証するため、第 4 章で行った実験を対象に解析を行った。実験結果と解析結果を比較したところ、両者は概ね一致することが分かり、解析手法の妥当性を確認した。これにより、多様な熱負荷条件や制御パラメータの影響を考慮し、変流量制御方式別の制御特性を定量的に評価することが可能となった。

参考文献

1) 月館司，田代勉，保科秀夫，木村正典，柴田耕平，横山浩樹：融雪・太陽熱給湯複合システムの開発 第 2 報 太陽熱給湯実験と解析，空気調和・衛生工学会論文集，No.68，pp.55-64，1998.1
2) 一般社団法人日本機械学会：伝熱工学資料，改訂第 5 版，2013.3

本章に関連する既発表論文

1) 阿部佑平，月館司，羽山広文：建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式に関する実験的検討，空気調和・衛生工学会論文集，No.273，pp.9-18，2019.12

記号表

A ：面積[m^2]
A_{ij} ：節点 ij 間の開口面積[m^2]
C ：流体の容積比熱[$J/(m^3K)$]
C_p ：節点 p の熱容量[J/K]
d ：厚さ[m]
F_{ij} ：節点 ij 間の流量[m^3/s]
f_{ip} ：吐出し側の節点 i に対するポンプ流量[m^3/s]
G ：流量[m^3/s]
G_{max} ：最大流量[L/h]
G_{1b} ：一次側枝管流量[L/h]
GC ：流体の流量と容積比熱の積[W/K]
GC_1 ：流体 1 の流量と容積比熱の積[W/K]
GC_2 ：流体 2 の流量と容積比熱の積[W/K]
K_{ip} ：節点 i と節点 p の間の熱コンダクタンス[W/K]
KA ：熱通過率と伝熱面積の積[W/K]
P_i ：節点 i の圧力[Pa]
P_x ：ポンプの全圧（全揚程の圧力換算値）[Pa]
Q_p ：節点 p への供給熱量[W]
Δt ：時間[h]

α　　：熱伝達率[W/(m^{2}K)]

θ_p　　：節点 p の現在の温度[℃]

$\theta_{p'}$　　：節点 p の Δt 時間前の温度[℃]

θ_i　　：節点 i の現在の温度[℃]

θ_{in}　　：流体の入口温度[℃]

θ_{out}　　：流体の出口温度[℃]

θ_{1in}　　：流体 1 の入口温度[℃]

θ_{1out}　　：流体 1 の出口温度[℃]

θ_{2in}　　：流体 2 の入口温度[℃]

θ_{2out}　　：流体 2 の出口温度[℃]

θ_r　　：周囲温度[℃]

λ　　：熱伝導率[W/(mK)]

ξ_{ij}　　：節点 ij 間の抵抗係数[-]

ρ　　：流体の密度[kg/m^3]

第６章

数値解析による差圧を用いない変流量制御方式の制御特性の評価

6.1　はじめに

第 5 章では、建物群に対する熱供給を対象に、ポンプの変流量制御方式の導入による熱搬送動力等の制御特性を定量的に評価するために、流体移動と熱移動を同時に解析する手法を検討し、数値解析プログラムを作成した。これにより、多様な熱負荷条件や制御パラメータの影響を考慮し、変流量制御方式別の制御特性を定量的に評価することが可能となった。

本章では、第 5 章で作成した数値解析プログラムを用いて、実建物群に対する熱供給を想定した数値解析を行い、本研究で開発した差圧を用いない変流量制御方式の一つである「バルブ開度制御」を対象に制御特性を評価することを目的とする。制御特性を評価するにあたっては、バルブ開度制御の適正な運用範囲を明らかにするため、二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲を検討するとともに、従来の差圧による変流量制御方式等も対象とした解析を行い、水動力の削減効果等を検討する。

6.2　差圧を用いない変流量制御方式「バルブ開度制御」の概要

図 6-1 に本研究で開発した差圧を用いない変流量制御方式のひとつである「バルブ開度制御」の概念図を示す。図 6-1 は建物群に対して、熱交換器による間接受入方式で熱供給を行うことを想定している。バルブ開度を用いた従来の制御方式には、バルブ開度を監視して負荷変動に応じて差圧制御の目標値を変更し、必要最低の揚程でポンプを運転するものがあるが [1)]、バルブ開度は、全開のバルブが発生しないように最大開度を90%程度に設定することが多い。この制御方式では、差圧を最小にすることができず、更なる搬送動力の削減の余地が残されている。このため、本研究では従来の制御方式とは異なり、搬送動力の削減を目的として、積極的に差圧を下げて全開のバルブが発生することを許容し、さらに差圧を用いずに、バルブ開度と二次側温水往き温度により直接ポンプ回転数を制御する方式を開発した。

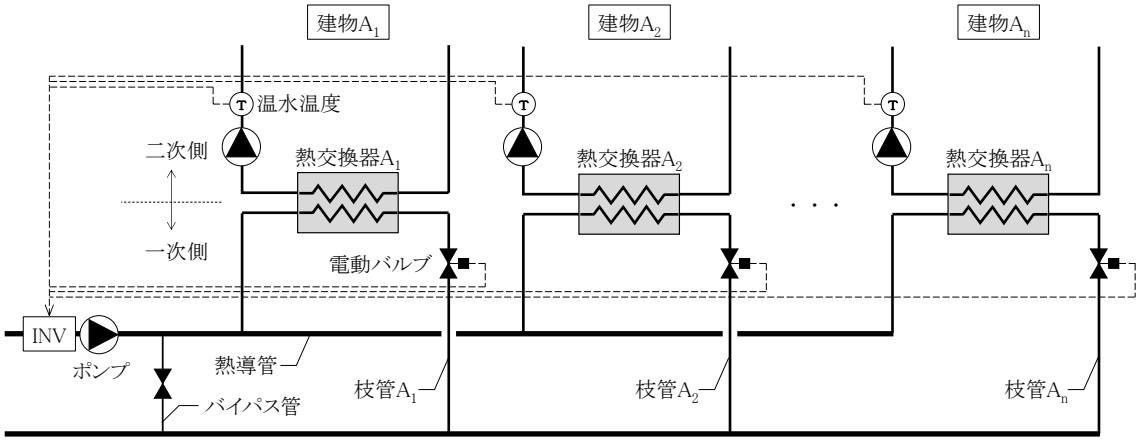


図 6-1　バルブ開度制御の概念図

開発したバルブ開度制御では、複数ある電動バルブの開度のうち、全開の電動バルブが発生していない状態では、二次側温水往き温度は設定温度を維持し、負荷を満足するように一次側流量が制御されていると判断できる。しかし、建物側の負荷が増加すると電動バルブが全開となり、やがて二次側温水往き温度が低下する。その低下を検知することでポンプ回転数を制御し、必要な流量を供給できるようにした。

具体的には、複数ある電動バルブの開度から最大開度を求める。併せて、各建物の二次側温水往き温度において、設定温度からの温度低下を求める。バルブの最大開度が設定値よりも下回った場合には、建物側の負荷がすべて満足されていると判断し、インバータの周波数を下げてポンプ回転数を下げる。また、バルブが全開となり、ある建物の

二次側温水往き温度が温度低下の許容範囲を上回った場合には、負荷を満足するような流量が供給されていないと判断し、インバータの周波数を上げてポンプ回転数を上げる。このようなポンプ回転数の制御を行うことで、建物側の負荷を満足する流量の供給を可能としている。

6.3　実建物群を想定した数値解析

第 5 章で作成した数値解析プログラムを用いて、実建物群に対する熱供給を想定した数値解析を行い、バルブ開度制御の搬送動力等の制御特性を定量的に評価する。

6.3.1　解析概要

熱負荷パターンの異なる 3 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した数値解析を行う。図 6-2 に解析モデルを示す。流体移動解析は一次側、熱移動解析は一次側と二次側で行う。

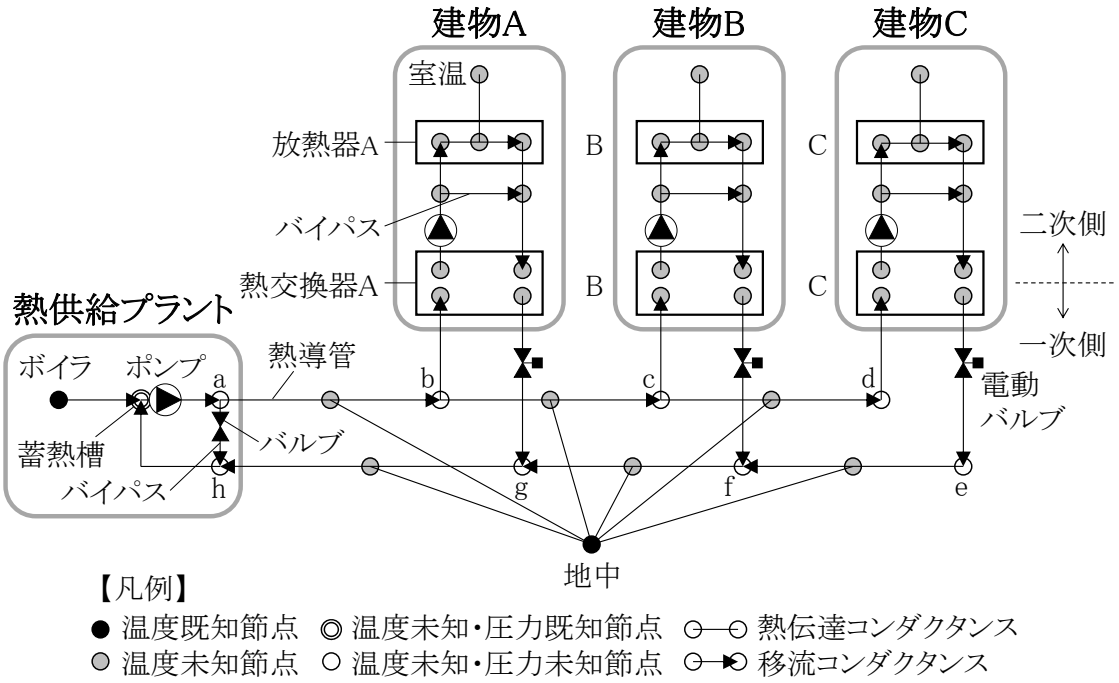


図 6-2　解析モデル

熱供給プラントのボイラは設定温度 80℃で運転し、蓄熱槽内の温度が 75℃になるように制御した。プラント内にはポンプが 1 台あり、一次側流量を制御する場合にはインバータで周波数を調整し、ポンプの回転数を制御するシステムとする。インバータの周波数が 50Hz におけるポンプの特性は、前章で示した式(5-2)で n=1.8、P_x=58.8kPa、G_{max}=2,700L/h とした。他の周波数の特性については、n=1.8 として、周波数に比例して P_x と G_{max} を変更した。

一次側主管の節点 ab、bc、cd、ef、fg、gh 間は熱導管であり、呼び径 25A の架橋ポリ

エチレン管（0.41W/mK）の外側に断熱材 35mm（0.04W/mK）が取り付けてあるものを想定した。熱導管は、管の中心が地表面から深さ 0.6m に地中埋設されている。各接点における熱導管の距離は 20m である。熱導管の線熱通過率を計算し、これに配管長を乗じて *KA* を求めた。求めた *KA* を用いて、前章で示した式(5-17)、(5-18)から温水温度を計算するが、式(5-18)の周囲温度 θ_r については、地中温度とした。本解析は、熱導管からの熱損失を評価することが目的ではないので、地中温度は簡易的に求めることとし、式(6-1)で計算した地表面からの深さ 0.6m における地中温度の値を用いた [2)]。一般に、地表面から 0.5m より深くなると地中温度の日変動はないと考えてよいので、地中温度は日変動を考慮せず、1 日毎に計算した。

$$T_{\mathrm{GRZ}} = T_{\mathrm{GRO}} + \frac{1}{2}\Delta T_{\mathrm{GRS}} e^{-0.526Z} \cos\left(\frac{n - 213 - 30.556Z}{365} 2\pi\right) \tag{6-1}$$

式(6-1)を用いて地中温度 T_{GRZ} を計算する場合、地表面および地中温度の観測値が必要となるが、一般的にこれらの観測値は得られないことが多い。このため、地表面温度の年較差ΔT_{GRS} の代わりに気温の年較差、不易層温度 T_{GRO} の代わりに年平均気温を用いても実用上問題ないとされているので、本解析ではこれに倣い、地中温度を計算した。

また、一次側枝管は呼び径 15A であり、枝管内には電動バルブを設置した。電動バルブの開度を制御することにより、一次側枝管流量を調整できるようにした。配管からの熱損失は、一次側の熱導管部分で考慮し、その他の一次側枝管と二次側配管等では考慮していない。

表 6-1 に建物条件を示す。各建物の空間は単純化し、熱容量のある 1 点で代表した。熱容量に重み係数法を適用して室温を計算し、各建物の暖房はその温度により制御される。暖房は温水暖房であり、放熱器と配管で構成される。暖房条件は、建物 A が暖房時間 6～18 時で設定室温 22℃、建物 B は 24 時間連続暖房で日中と夜間で設定室温を 18℃、22℃に変更し、建物 C は 24 時間連続暖房で設定室温 20℃とした。暖房時間において、室温が維持されるように建物内の温水循環を PID 制御した。その循環温水は熱交換器により加熱され、二次側温水往き温度が 60℃となるように一次側枝管に設置された電動バルブの開度を PID 制御した。熱交換器 A～C の *KA* は 1,000W/K、熱交換器の二次側を通過する流量は 1,000L/h で一定とした。建物内に設置された放熱器からの放熱量は、前章で示した式(5-17)、(5-18)の熱交換モデルを用いて出口温度を計算し、放熱量を計算した。

気象データには、標準年拡張アメダス気象データ 2000 年版 [3)] の北海道札幌市の気象

データを用いた。計算時間間隔は 2 秒として、1～3 月の 3 か月間の計算を行った。図 6-3 に計算で使用した外気温と式(6-1)で計算した深さ 0.6m における地中温度を示す。地中温度は気温の年較差 24.3℃、年平均気温 8.8℃を用いて計算した。計算期間における外気温の最高は 10.9℃、最低は-15.4℃、平均は-1.9℃であった。また、地中温度の最高は 2.78℃、最低は-0.06℃、平均は 0.81℃であった。また、ポンプ回転数は、計算時間間隔の 2 秒毎に制御した。インバータの周波数は 14～50Hz とし、回転数を調整する場合は周波数を 2Hz ずつ増減させた。

なお、解析モデルは、実際のプラントを想定したものではなく、機器容量や熱負荷は住宅レベルとしたが、制御特性を評価するには十分なモデルと考える。

表 6-1　建物条件

	建物A		建物B		建物C
延床面積[㎡]	150		200		200
延床面積当たりの熱損失[W/㎡K]	1.6		1.6		1.6
暖房条件	間欠暖房		24時間連続暖房		24時間連続暖房
設定室温[℃]	22	6～18時	18	8～19時	20
			22	上記以外	
放熱器の能力[W/K]	600		300		300
二次側温水往き温度[℃]	60		60		60

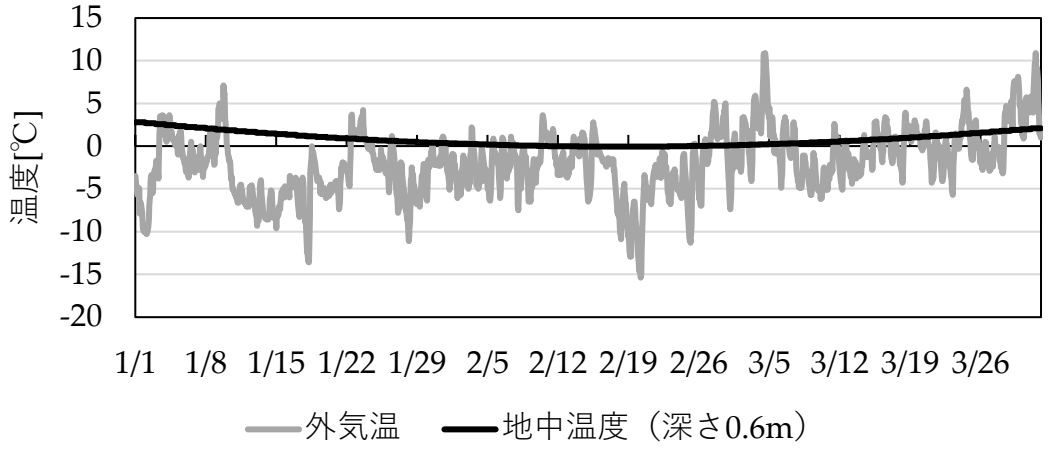


図 6-3　外気温と地中温度

6.3.2　バルブ開度制御の運用範囲の検討

開発したバルブ開度制御は、負荷が増加し電動バルブの開度が全開になった時の二次側温水往き温度の低下を検知することでポンプ回転数を制御し、必要な流量の供給を可能としている。このため、二次側温水往き温度の低下が大きくなると、負荷を満足する必要な流量が供給できない可能性があり、温度低下の許容範囲を明確にする必要がある。そこで、二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲をパラメータとして、1℃、1.5℃、2℃、4℃、6℃、10℃に設定した場合の数値解析を行った。ただし、ポンプ回転数を下げる条件として使用されるバルブの最大開度は、85%とした。

表 6-2 に解析結果を示す。一次側流量、二次側流量、二次側温水往き温度、室温は、計算を行った 1～3 月の 1 分毎のデータの平均値である。一次側流量は、二次側温水往き温度の温度低下が 1～2℃では同じ流量であるが、温度低下が 4℃以上になると、僅かであるが徐々に流量が減少した。また、二次側流量は、二次側温水往き温度の温度低下が 4℃以上になると、建物 B と C の両方で流量が大きくなった。

二次側温水往き温度を見ると、建物 A ではすべてのケースで同じ温度であったが、建物 B と C では、温度低下が 6℃以上になると温水温度が低下した。さらに、室温と供給熱量は、すべてのケースで値は同じであった。

以上より、二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲を大きく設定すると、二次側の放熱器を通過する流量を大きくしないと建物の負荷を満足するような熱が供給できないことが分かった。このため、負荷を満足するために必要な一次側流量を供給し、かつ二次側流量を大きくしないためには、二次側温水往き温度の設定が 60℃の場合では、温度低下の許容範囲を 2℃以内にする必要がある。

表 6-2　バルブ開度制御における二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲をパラメータとした解析結果

温度低下許容範囲	一次側流量[L/h]				二次側流量[L/h]		
	合計	枝管A	枝管B	枝管C	建物A	建物B	建物C
1℃	884	180	343	362	202	324	253
1.5℃	884	180	342	361	202	324	253
2℃	884	180	342	361	202	325	253
4℃	882	180	341	361	202	326	254
6℃	879	179	340	359	203	327	255
10℃	868	179	333	356	203	345	259

温度低下許容範囲	二次側温水往き温度[℃]			室温[℃]			供給熱量[kW]		
	建物A	建物B	建物C	建物A	建物B	建物C	建物A	建物B	建物C
1℃	61.1	59.4	59.3	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
1.5℃	61.1	59.4	59.3	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
2℃	61.1	59.4	59.3	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
4℃	61.1	59.4	59.3	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
6℃	61.1	59.3	59.2	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
10℃	61.1	59.1	59.0	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1

6.3.3　バルブ開度制御の制御特性の評価

バルブ開度制御の制御特性を評価するため、表 6-3 に示す変流量制御方式を対象に数値解析を行う。本解析では、ポンプ回転数を制御しない「回転数一定運転」、差圧によりポンプ回転数を制御する「バイパス差圧一定制御」、「末端差圧一定制御」、全開のバルブが発生しないようにバルブ開度の上限を設定し、差圧を用いないでバルブ開度によりポンプ回転数を直接制御する「バルブ開度制御 A」、筆者らが開発した制御方式である「バルブ開度制御 B」の 5 つの制御方式を対象とする。「バイパス差圧一定制御」、「末端差圧一定制御」における差圧は、最大負荷時の値をもとに設定した。「バルブ開度制御 B」において、バルブの最大開度は 85%、二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲は、前節の検討を踏まえ 2℃に設定した。

表 6-3　解析対象とする制御方式

制御方式	制御ロジック
回転数一定運転	一次側ポンプのインバータの周波数を 50Hz 一定に設定し、ポンプの回転数を制御しない。
バイパス差圧一定制御	一次側バイパス管の差圧（ah 間）が 31kPa となるように、一次側ポンプの回転数を制御する。
末端差圧一定制御	一次側の末端差圧（de 間）が 20kPa となるように、一次側ポンプの回転数を制御する。
バルブ開度制御 A	3 つの電動バルブのうち、最大開度が 80%を下回るとポンプ回転数を下げる。最大開度が 90%を上回るとポンプ回転数を上げる。
バルブ開度制御 B	3 つの電動バルブのうち、最大開度が 85%を下回るとポンプ回転数を下げる。二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲は 2℃とし、電動バルブが全開となり、建物 A～C の二次側温水往き温度のうち、どれかが 58℃を下回るとポンプ回転数を上げる。

（1）代表週における考察

最寒日を含む 2 月 15～21 日を代表週とする。ここでは計算結果の一例として、バルブ開度制御 B の解析結果について 1 分毎のデータを用いて考察する。

図 6-4 に一次側流量を示す。一次側流量は朝 6 時に流量が最大となり、1,300L/h まで達するが、その後流量は小さくなり、熱負荷が小さい時には 560L/h 程度まで小さくなる日もあった。枝管 A では、建物 A の暖房が始まる朝 6 時に流量が 500L/h まで上昇し、その後、徐々に小さくなった。枝管 B では、建物 B の暖房の設定温度が変わる時に流量が上下しているが、日中は 230～430L/h、夜間は 360～540L/h 程度で推移していた。枝管 C の流量は 300～530L/h で推移していた。

図 6-5 に各建物の二次側温水往き温度を示す。各建物の二次側温水往き温度の設定温度は 60℃である。建物 A では、暖房開始時に温水温度が 35℃程度まで低下するが、その後、加熱されて温水温度は 56℃程度まで上昇した。代表週は最寒日を含むため、設定温度よりもやや低い温水温度で推移していたが、他の週では概ね設定温度付近まで上昇していたことを確認している。建物 B では、暖房の設定温度が変わる時に温水温度の上昇や低下が見られるが、それ以外の時間帯では 60℃で推移していた。建物 C では、ほとんどの時間帯において 60℃で推移していた。

図 6-6 に各建物の室温と外気温を示す。建物 A は間欠暖房であるため、夜間に室温が下がり、最寒日の 2 月 20 日では 15℃程度まで下がった。日中の暖房時間では、概ね設定値の 22℃程度で推移していた。建物 B、C は連続暖房であるため、最寒日の 2 月 20 日では、室温は設定値を下回る時間帯も見られたが、それ以外の時間では、室温は設定値を維持していた。

図 6-7 に熱供給プラントと各建物の放熱器からの供給熱量を示す。熱供給プラントとでは、建物 A の暖房開始時に供給熱量が最大となり、30～35kW まで達している。建物 A では、暖房開始時に多くの熱を消費し、供給熱量が 15kW まで達している。建物 B では、設定温度が変わる時間帯で供給熱量が変わるが、5～10kW 程度で推移していた。建物 C では、供給熱量は 6～10kW 程度で推移していた。

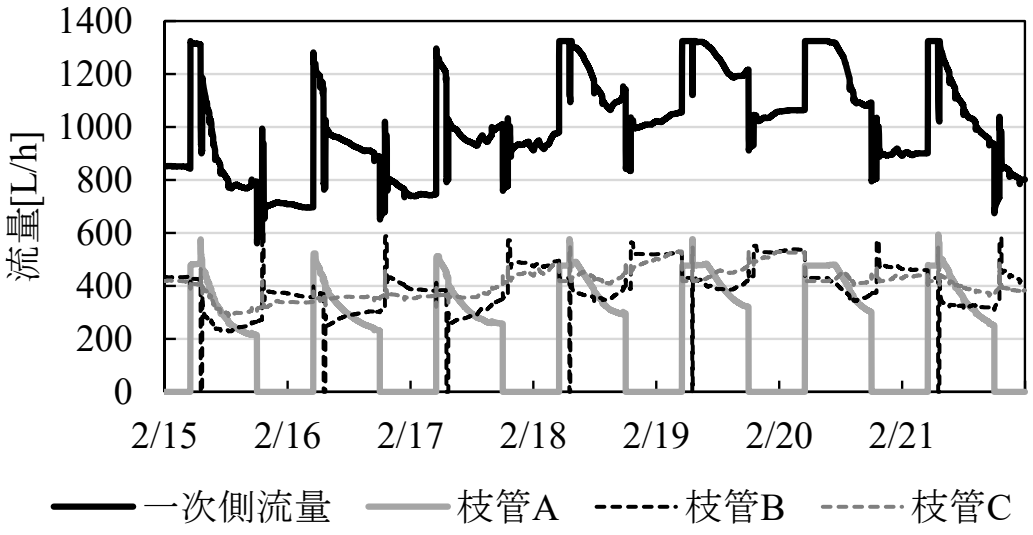


図 6-4　一次側流量

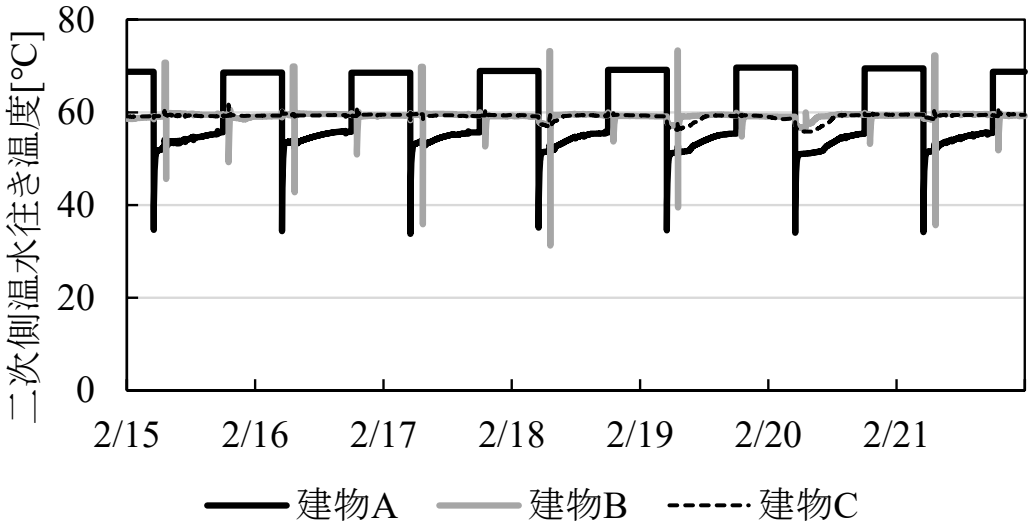


図 6-5　二次側温水往き温度

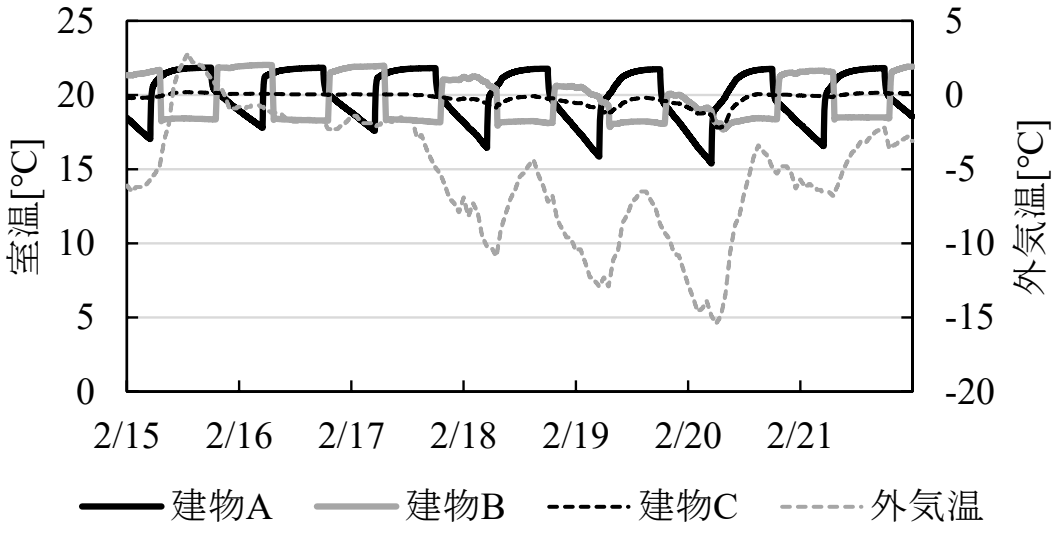


図 6-6　各建物の室温と外気温

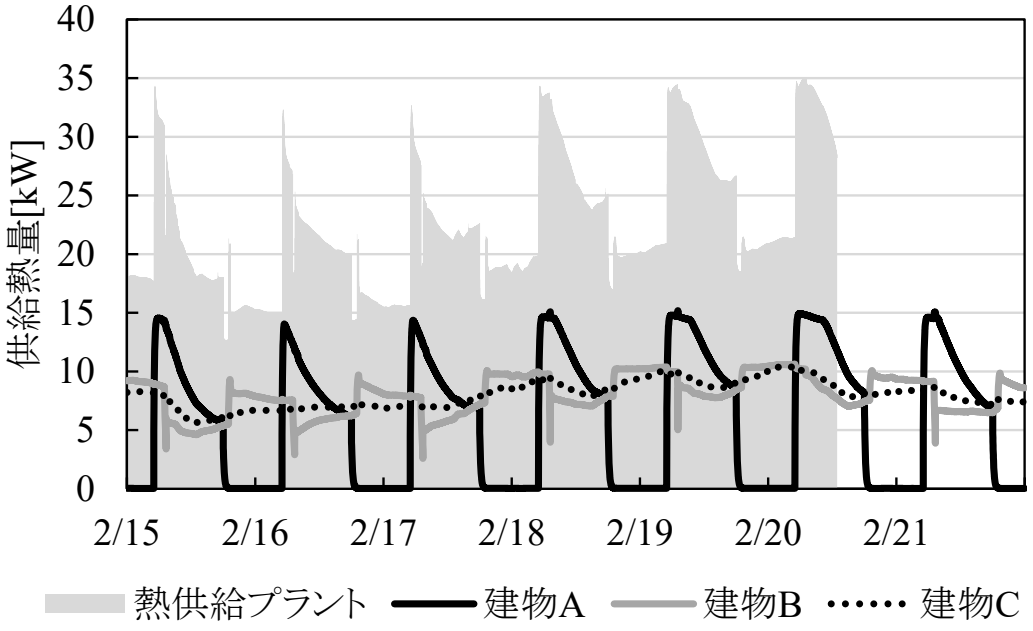


図 6-7　熱供給プラントと各建物の供給熱量

(2) 計算期間における考察

計算を行った 1～3 月を対象に、1 分毎のデータを用いて考察する。

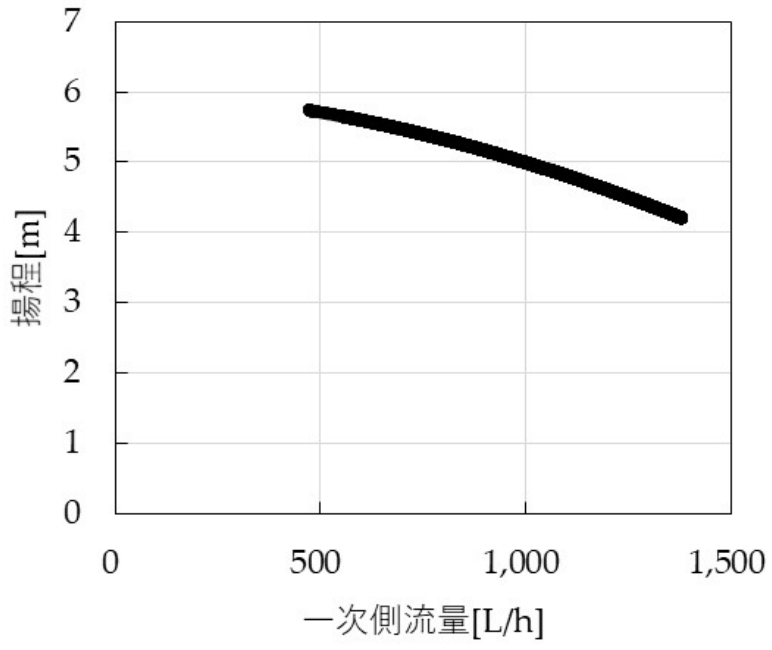
表 6-4 に変流量制御方式別の解析結果を示す。一次側流量、二次側流量、二次側温水往き温度、室温は、計算期間における平均値である。一次側流量については、回転数一定運転は他の制御方式に比べてわずかに流量が大きいが、解析を行った各制御方式において大きな違いはなかった。二次側流量、二次側温水往き温度についても同様に、各制御方式でほとんど違いはなく、室温と供給熱量については、値はすべて同じであった。これより、各制御方式の解析は同一条件で行われたと言える。

表 6-4　変流量制御方式別の解析結果

制御方式	一次側流量[L/h]				二次側流量[L/h]		
	合計	枝管A	枝管B	枝管C	建物A	建物B	建物C
回転数一定運転	911	191	350	370	195	318	249
バイパス差圧一定制御	896	186	345	365	199	324	253
末端差圧一定制御	892	184	343	364	200	326	253
バルブ開度制御A	890	182	345	364	200	322	252
バルブ開度制御B	884	180	342	361	202	324	253

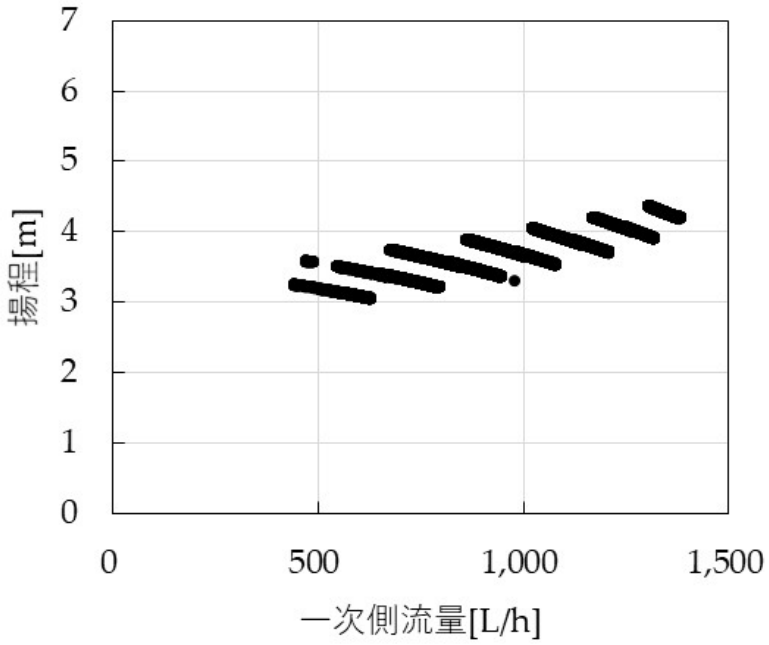
制御方式	二次側温水往き温度[℃]			室温[℃]			供給熱量[kW]		
	建物A	建物B	建物C	建物A	建物B	建物C	建物A	建物B	建物C
回転数一定運転	61.0	59.8	59.7	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
バイパス差圧一定制御	61.0	59.6	59.5	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
末端差圧一定制御	61.0	59.5	59.4	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
バルブ開度制御A	61.1	59.5	59.4	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1
バルブ開度制御B	61.1	59.4	59.3	20.3	20.1	20.1	5.1	7.1	7.1

図 6-8 にポンプ揚程と一次側流量の関係を示す。回転数一定運転では、インバータの周波数を 50Hz 一定でポンプを運転したので、ポンプ揚程と一次側流量の関係は 50Hz の特性曲線となっている。バイパス差圧一定制御では、一次側バイパス管の差圧が一定となるように制御したので、インバータの周波数を 38Hz まで下げることができ、ポンプ揚程を 3m 程度まで下げることができている。末端差圧一定制御では、インバータの周波数を 32Hz まで下げることができている。バイパス差圧一定制御よりも周波数を下げることができ、ポンプ揚程は 2m 程度まで下げることができている。バルブ開度制御 A とバルブ開度制御 B では、両者ともにインバータの周波数を 18Hz まで下げることができ、ポンプ揚程を 0.6m 程度まで下げることができている。バイパス差圧一定制御と末端差圧一定制御よりも揚程を下げて、ポンプが運転可能であることを確認した。しかし、バルブ開度制御 A とバルブ開度制御 B では、バイパス差圧一定制御と末端差圧一定制御に比べて、同じ回転数におけるポンプ揚程と一次側流量の振れ幅が大きくなっている。例えば、外気温に応じてインバータの周波数の上限値を設定すれば、揚程と流量の振れ幅は小さくなり、より搬送動力の削減が可能となると考えられる。

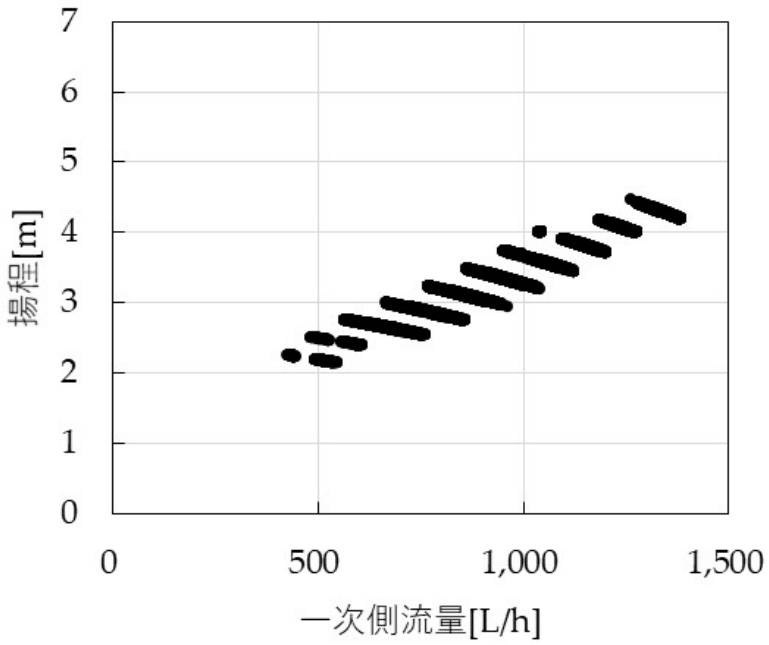


(a)回転数一定運転

図 6-8　ポンプ揚程と一次側流量の関係

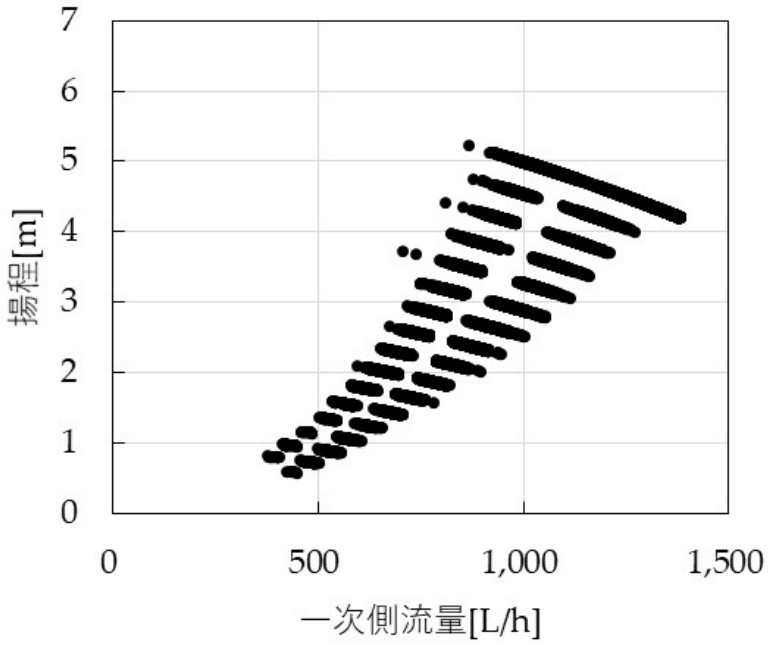


(b)差圧一定制御

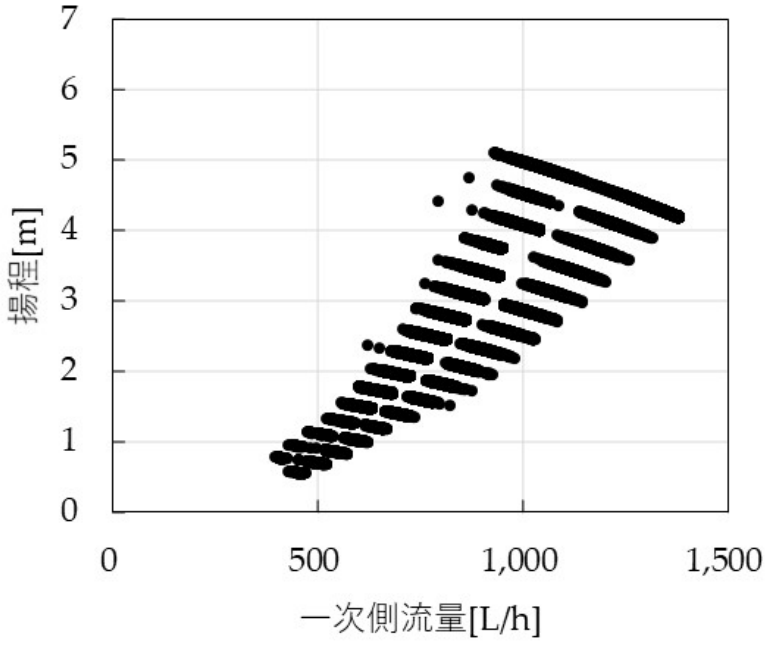


(c)末端差圧一定制御

図 6-8　ポンプ揚程と一次側流量の関係



(d)バルブ開度制御 A



(e)バルブ開度制御 B

図 6-8　ポンプ揚程と一次側流量の関係

図 6-9 に枝管に設置された電動バルブの開度の平均値を示す。ポンプを変流量制御することにより、各枝管に設置された電動バルブの開度が大きくなっている。バルブ開度制御 B は開度の上限を設定していないので、バルブ開度制御 A や差圧を用いた制御方式よりも電動バルブの開度を大きくすることができている。

図 6-10 に水動力を示す。解析条件下において、回転数一定運転を基準に水動力の削減効果を算出すると、バイパス差圧一定制御で 27%、末端差圧一定制御で 33%、バルブ開度制御 A で 33%、バルブ開度制御 B で 39%であった。バルブ開度制御 B の削減効果が最も大きくなったのは、他の制御方式に比べて電動バルブの開度を大きくすることができ、インバータでポンプ回転数を積極的に下げて運転することができたためである。また、本研究で開発した制御方式であるバルブ開度制御 B と差圧を用いた制御方式の水動力を比較すると、10～17%程度の削減効果があった。

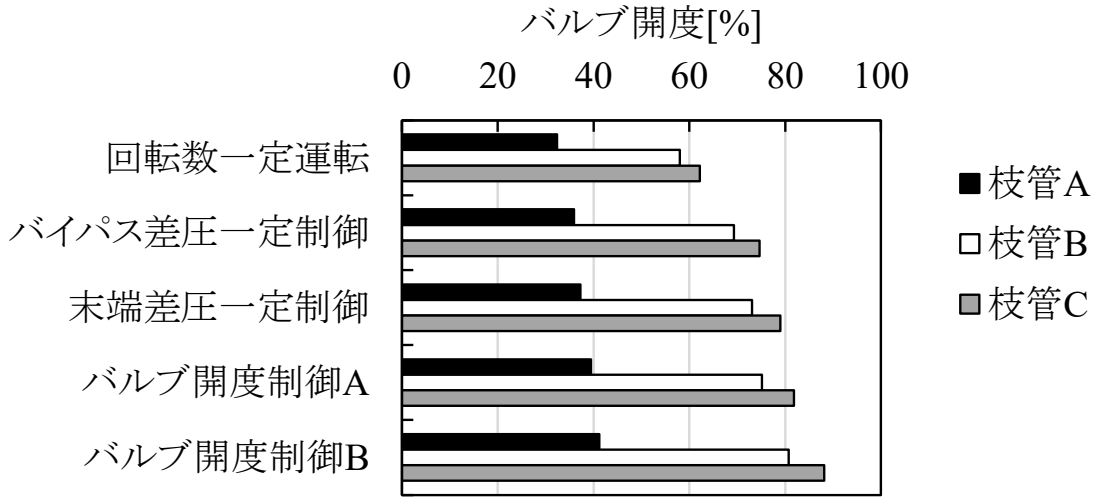


図 6-9　電動バルブの開度の平均値

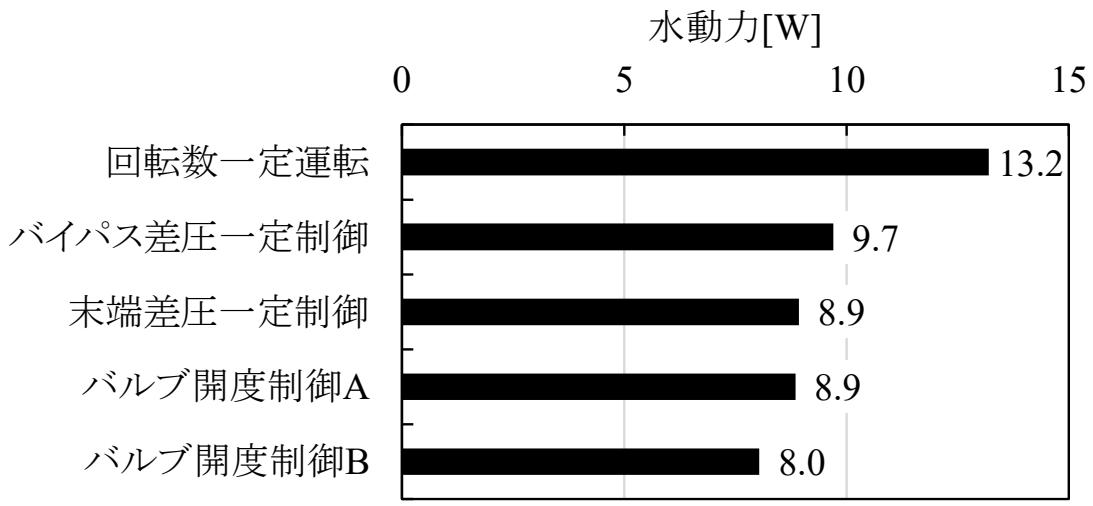

水動力[W]
0
5
10
15
回転数一定運転
バイパス差圧一定制御
末端差圧一定制御
バルブ開度制御A
バルブ開度制御B
13.2
9.7
8.9
8.9
8.0

図 6-10　水動力

6.4　まとめ

本章では、第 5 章で作成した数値解析プログラムを用いて、実建物群に対する熱供給を想定した数値解析を行い、バルブ開度制御の制御特性を評価した。以下に得られた知見を示す。

1) バルブ開度制御における二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲を検討した。二次側温水往き温度の設定が 60℃の場合では、建物側の負荷を満足するために必要な一次側流量を供給し、かつ二次側流量を大きくしないためには、二次側温水往き温度の温度低下の許容範囲を 2℃以内にする必要があることを示し、開発した制御方式の適正な運用範囲を明らかにした。
2) バルブ開度制御は、従来の差圧を用いた制御方式と比べて、枝管に設置された電動バルブの開度をより大きくできることを示した。これにより、インバータでポンプ回転数を積極的に下げて運転することが可能となり、解析条件下において差圧を用いた制御方式と水動力を比較すると、10～17%程度の削減効果があることを示した。

以上より、本研究で開発したバルブ開度制御は、従来の差圧を用いた変流量制御方式よりも搬送動力の削減効果があることを示した。また差圧計を用いずに直接ポンプ回転数を制御できることから、制御システムにかかるイニシャルコストを削減できる変流量制御方式であることが示唆された。差圧を用いた変流量制御方式は、運用当初は差圧を安全側に設定することが多く、運用実績に基づき差圧を最適な値に調整しないと十分な搬送動力の削減効果が期待できない場合がある。しかし、開発したバルブ開度制御は、バルブ開度と二次側温水往き温度の温度低下を制御パラメータに用いているため設定が分かりやすく、運転当初から適切な制御を行える可能性が高く、運用面でもメリットのある変流量制御方式であると考えられる。

ただし、差圧による変流量制御方式に比べて、同じ回転数におけるポンプ揚程と一次側流量の振れ幅が大きく、無駄な動力が消費される可能性があるため、今後はこの振れ幅を小さくする検討が必要である。

参考文献

1) 竹迫雅史，角之上芳明，佐藤文秋，米木伸一，安田健一，江崎晃：制御弁監視による冷温水ポンプ揚程最適化 VWV 制御の実測結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.125-128，2004.9
2) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法，pp.72-73，1986.12
3) 標準年拡張アメダス気象データ，株式会社気象データシステム，https://www.metds.co.jp/product/ea/eadata/，2020.12.9 参照

記号表

n　：通日[日]
T_{GRZ}　：深さ Z における地中温度[℃]
T_{GRO}　：不易層温度[℃]
ΔT_{GRS}　：地表面温度の年較差[℃]
Z　：深さ[m]

第７章

総括

7.1　本研究のまとめ

本研究は、「熱エネルギーの面的利用の高効率化に向けた搬送動力の削減手法に関する研究」と題して、道内市町村を対象に熱エネルギーの面的利用の導入可能性を示すとともに、その高効率化に向け、ポンプの搬送動力の更なる削減と制御システムにかかるイニシャルコストの削減を目指した差圧を用いない変流量制御方式に関する今後の技術開発に知見を与えることを目的としたものである。以下の各章の要点をまとめる。

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

第 2 章「民生部門等を対象としたエネルギー消費量の調査」では、北海道富良野圏域 5 市町村（富良野市、上富良野町、中富良野町、南富良野町、占冠村）を対象に民生部門エネルギー等の需要構造を明らかにするために、自治体が所有する公共施設を対象とした施設属性調査、およびエネルギー消費量調査を行った。施設属性調査より、1981～1990 年に建設されている施設が特に多いことが分かった。これらの施設は建設から約 30 年を迎えるため、今後設備更新が必要となる施設が多いと考えられる。また、暖房熱源、暖房設備、給湯熱源の導入状況には、各自治体の特徴が見られた。エネルギー消費量調査より、浴場や温水プール等の温浴施設を有する施設のエネルギー消費量が特に多く、年間の給湯エネルギーが暖房エネルギーを上回る施設もあることが分かった。これらの施設では、暖房のみならず給湯の省エネルギー化が必要である。また、各施設のエ

ネルギー消費量のデータより、建物用途別のエネルギー消費原単位と各月のエネルギー消費量の変動を示す変動係数を作成した。

第 3 章「都市におけるエネルギー需要の推定」では、北海道富良野市の民生部門を対象に、エネルギーのエリアマネジメントを検討するために必要となる都市のエネルギー需要を推定した。第 2 章で作成した建物用途別のエネルギー消費原単位と都市計画基礎調査による建物の属性データを用いてエネルギー需要を推定したところ、年間の電力需要は約 220TJ、熱需要は約 731TJ となり、熱需要は電力需要の約 3.3 倍であることが分かった。熱需要を暖房と給湯に分離すると、年間の暖房および給湯需要は、それぞれ約 378TJ、約 354TJ と推定され、暖房と給湯需要はほぼ同じであった。また、建物用途別で見ると、電力および熱需要ともに、住宅での需要が年間を通じて最も多いため、民生部門のエネルギー需要の削減には、住宅の省エネルギーが重要である。さらに、富良野市のエネルギー需要を 250m×250m メッシュ間隔で分析し、空間分布特性を把握した。熱負荷密度と熱電比を入力データとしてクラスター分析を行うことにより、各メッシュの特性を明らかにした。夏期でも熱需要のある医療施設や宿泊施設の占める面積割合が大きいエリアでは、熱負荷密度が 4.2TJ/ha 以上となり、熱エネルギーの面的利用による省エネルギー効果が期待できることを示した。

第 4 章「建物群に対する熱供給を対象とした差圧を用いない変流量制御方式」では、建物群に対する熱供給を対象に、従来の差圧によるポンプの変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式（二次側温水往き温度一定制御、バルブ開度制御）を開発し、その制御特性を実験により評価した。開発する変流量制御方式の評価にあたっては、従来の差圧による変流量制御方式と同一条件において制御特性を比較した。2 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した実験を行い、変流量制御方式別の熱搬送動力等の基礎データを収集した。実験結果より、開発した変流量制御方式でもポンプの回転数を制御でき、搬送動力の削減効果があることを明らかにした。これにより、差圧計を用いなくてもポンプの回転数を制御することが可能となり、制御システムにかかるイニシャルコストを削減できる可能性を示した。

第 5 章「建物群に対する熱供給を対象とした数値解析手法」では、建物群に対する熱供給を対象に、ポンプの変流量制御方式の導入による搬送動力等の制御特性を定量的に評価するため、流体移動と熱移動を同時に解析する手法を検討した。流体移動はポンプ

の特性（流量-揚程特性曲線）を考慮して流体管路網を用いて計算し、熱移動は各部位を節点（ノード）と熱コンダクタンスからなる熱回路網を後退差分法により解いた。数値解析手法の妥当性を検証するため、第 4 章で行った実験を対象に解析を行った。一次側流量、末端差圧、二次側温水往き温度について、実験結果と解析結果を比較したところ、両者は概ね一致したため、解析手法の妥当性を確認した。これにより、多様な熱負荷条件や制御パラメータの影響を考慮し、変流量制御方式別の制御特性を定量的に評価することが可能となった。

第 6 章「数値解析による差圧を用いない変流量制御方式の制御特性の評価」では、第 4 章で開発したバルブ開度制御を対象に第 5 章で検討した数値解析手法を用いて、熱負荷パターンの異なる 3 つの建物に対して、熱交換器による間接受入方式で暖房の熱供給を行うことを想定した数値解析を行い、制御特性を評価した。解析結果より、バルブ開度制御は、従来の差圧による変流量制御方式よりもインバータでポンプの回転数を下げて運転することが可能であり、水動力を比較すると 10～17%程度の削減効果があることを明らかにした。また、バルブ開度制御は、建物側の熱負荷が増加し、電動バルブの開度が全開になった時の二次側温水往き温度の低下を検知することでポンプの回転数を制御し、必要な流量を供給できるようにしている。この温度低下の許容範囲を検討したところ、二次側温水往き温度の設定が 60℃の場合では、建物側の熱負荷を満足するために必要な一次側流量を供給し、かつ二次側流量を大きくしないためには、許容範囲を 2℃以内にする必要があることを示し、適正な運用範囲を明らかにした。

7.2　今後の課題と展望

本研究を通して明らかになった今後の課題と展望を以下に示す。

熱エネルギーの面的利用に向けて

熱エネルギーの面的利用を推進するためには、まちづくりとの連携が不可欠である。特に、道内地方都市の都市構造は、全国に比べて広域に分散していることから、コンパクトな市街地形成が求められている。コンパクトシティの拠点形成と熱エネルギーの面的利用を関連づけ、地域特性に応じた再生可能エネルギーの導入を図ることで一層の省エネルギーと CO_2 排出量の削減が期待される。

また、本研究では、北海道富良野市を対象に熱エネルギーの面的利用の導入可能性を検討したが、今後は他の地方都市でも導入可能性を明らかにする必要がある。導入可能性を判断する際、本研究では、地域冷暖房の抽出条件（熱負荷密度 4.2[TJ/ha]以上）を用いて検討したが、地方都市では地域冷暖房のような大規模システムを導入することは難しく、地点熱供給や建物間の熱融通などの規模の小さい面的利用が考えられる。しかし、これらの導入可能性を示す抽出条件については、これまで十分な検討がされていないため、今後は抽出条件を整備するとともに、検討対象とするメッシュ間隔についても検討が必要である。

差圧を用いない変流量制御方式の実用化に向けて

本研究では、従来の差圧による変流量制御方式とは異なる差圧を用いない変流量制御方式を開発し、実験と数値解析により制御特性を評価し、熱搬送動力の削減効果等を明らかにした。実験では、容量の小さいポンプを用いたため、一般的に建築物で使用される汎用ポンプに比べて低負荷時の効率は低いと考えられる。このため、汎用ポンプに置き換えた場合の搬送動力の削減効果については、今後の検討課題としたい。

また、数値解析より、差圧による変流量制御方式に比べて、同じ回転数におけるポンプ揚程と一次側流量の振れ幅が大きく、無駄な動力が消費される可能性が確認されたため、今後は外気温に応じてインバータ周波数の上限値を設定するなどして、この振れ幅を小さくする対策が必要である。

さらに今後は、実建物群への導入検討を行うことで、導入に際しての課題を整理し、変流量制御方式として技術を確立させ、実用化を目指していきたい。

謝　辞

本論文は、筆者が 2017 年 4 月から 2021 年 3 月にかけて北海道大学大学院工学研究院に在籍し取りまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの方々の多大なるご指導とご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

北海道大学大学院工学研究院の羽山広文特任教授には、学部生として建築環境学研究室に在籍させていただいて以来、常に心暖かい激励のもと、研究の視点から、進め方、取りまとめに至るまで、実に多くのことをご指導いただきました。本論文をまとめるにあたり、時には厳しくかつ明確なご指導やご助言をいただき、最後まで心暖かくご指導、ご鞭撻を賜りました。本論文がこのように完成を迎えることができたのは、先生のご指導のお陰でございます。心より深く感謝申し上げます。

長野克則教授、林基哉教授、森太郎准教授には、このたび副査をお引き受けくださり、本論文の審査にあたり、多くのご指導、ご助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

濱田靖弘教授、千歩修特任教授、岡崎太一郎教授、菊地優教授、瀬戸口剛教授、森傑教授、小澤丈夫教授、菊田弘輝准教授には、審議委員として論文内容に関する貴重なご指摘やご意見をいただきました。心より感謝申し上げます。

繪内正道名誉教授には、建築環境学研究室で学部から修士課程まで、多くのご指導を賜りました。先生には建築環境工学の基礎を学ばせていただき、先生との出会いを通して、研究の面白さを経験し、研究者として歩む人生を決めたと言っても過言ではありません。心より感謝申し上げます。

宮城学院女子大学の本間義規教授には、先生が当時岩手県立大学盛岡短期大学部に勤務されていた時に、筆者を受託研究員として受け入れてくださいました。その時に、プログラミングの基礎について懇切丁寧にご指導を賜りました。第 5 章で数値解析プログラムを作成するに当たり、先生からのご指導が非常に役立ちました。心より感謝申し上げます。

本論文は、筆者が所属する北海道立総合研究機構北方建築総合研究所にて執り行った研究成果を取りまとめたものです。お世話になりました多くの先輩、同僚諸氏に心より感謝申し上げます。特に、博士号取得を勧めていただいた福島明博士（現北海道科学大学教授）、親身なご指導と多くの励ましをいただいた鈴木大隆博士（現北海道立総合研究機構理事）に心より感謝申し上げます。月館司博士には、実験や数値解析、本論文の

作成まで、終始助言を賜り、建築環境工学の専門的な観点よりご指導いただきました。心より感謝申し上げます。椿谷敏雄建築研究本部長、松村博文副所長、福井淳一部長には、論文執筆の追い込み時期に集中して取り組む環境を与えていただき、心より感謝申し上げます。

本論文でまとめた研究成果は、すべてチームとして実施したものです。共同研究者の堤拓哉博士、立松宏一博士、戸松誠博士、竹内慎一博士、村田さやか博士、谷口円博士、ならびに北海道立総合研究機構の関係職員の方々に心より感謝申し上げます。皆様のご支援がなくしては、本論文は成し得ませんでした。また、調査に多大なるご協力をいただきました富良野圏域 5 市町村（富良野市、上富良野町、中富良野町、南富良野町、占冠村）の担当者各位に心より感謝申し上げます。(株)北海道日建設計の小林直樹氏、畑中壮大氏には、建築設備設計の実務者の視点からの貴重なご助言をいただきました。同じ研究室の先輩でもあり、筆者にとって本当に力強く頼りになる存在です。心より感謝申し上げます。

本論文の作成を通して、自身の無知と無力さを痛感させられる日々を過ごしました。この気持ちを忘れることなく、研究者として遅いスタートをやっと切ることができましたので、これから始まる新たな歩みを楽しみにしつつ、今後も日々努力し誠実に励む所存です。

最後に、私事ではありますが、いつも応援し支えてくれた両親、祈り励ましてくれた義父母、筆者の研究に日頃から深い理解と支援をしてくれた愛する妻愛、長女愛衣、二女優灯、三女優実に心より感謝申し上げます。

2021 年 2 月　　阿部 佑平