

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820283

研究課題名(和文) 建築空調システムにおける配管・ポンプの省エネルギー設計法の開発

研究課題名(英文) A Design Method for Energy Saving in Air-Conditioning Water Distribution Systems

研究代表者

住吉 大輔 (Sumiyoshi, Daisuke)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60432829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は空調システムの水搬送系を対象として低負荷時にも効率的に運転可能な配管・ポンプの設計法を開発し、その省エネルギー効果を示すことを目的とするものである。特に、統合配管とポンプ直列配置の2つの新たな手法を提案し、それらを中心とする設計手法を開発した。新たな設計法の省エネルギー効果について対象システムを変更して検討し、年間で最大55.1%のポンプ動力が削減されることを示した。また、提案した設計法は一般的な流量制御方法であるバルブ制御や吐出圧力制御を採用しているシステムにおいて、より大きな省エネルギー効果が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at developing a new energy conservation design method which serves the water distribution system of air conditioning equipment of buildings. The contents of this design method consist of two elemental technologies. One of them is the installation of integrative piping to reduce the pressure loss in piping. The other is installation of tandem pumps for low flow rates and low pump head operation. We developed the new design method after some simulation examinations about these new technologies. We showed the 55.1% or less as the pump energy reduction effect by the new design method. Moreover, the proposed design method can achieve much effect to use for the systems that have valve control or pressure control.

研究分野：建築設備

キーワード：建築設備 ポンプ 配管 省エネルギー 統合配管 直列配置 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

空調システムにおける搬送系のエネルギー消費量は全体の約30%を占める。申請者はこれまでに2ポンプシステムを採用する空調システムを対象に1次ポンプ余剰圧力制御を開発し、運用段階での省エネルギーの実現に取り組んできた。1次ポンプ余剰圧力制御とは、1次ポンプの送水圧力を利用して2次側まで送水を行い、2次ポンプの運転を極力低出力にする制御である。大学施設における実験により、本制御を導入することで1次ポンプのエネルギー消費量を増加させることなく、2次ポンプのエネルギー消費量を91%削減することに成功した。このように大きな省エネルギーが実現できた要因として、1次ポンプの容量が過大であり、過大な圧力を逃がす構造(連通管バイパス)を持つことでポンプでの送水圧力が有効利用されることなく捨てられていることが挙げられる。対象システムは決して特殊な施設ではなく、一般的な手順で設計がなされたよくある空調システムである。こうした圧力のムダは、現在の配管設計では避けられず、搬送系での省エネルギーの余地が非常に大きいことが示されたと言える。

さらに申請者らが取り組んだ別の研究では、地域冷暖房用の熱源システムにおいて4本の配管を統合することによる搬送動力の削減効果を圧力計算に基づいて分析したところ、流量範囲全般において省エネルギーが実現できることを確認できた。以上の経緯からムダのない送水圧力の活用や配管の統合がもたらす省エネルギー効果についても取り込めるような設計法が必要であると考えた。

2. 研究の目的

現在、空調設備の設計においては、建築設備設計基準(国土交通省大臣官房官庁営繕部監修)が事実上の標準設計法となっている。この建築設備設計基準における最大の課題は単に送水が行えることを主眼に設計法が構築されており、省エネルギーの工夫について言及されていないことである。そこで本研究では、建築設備設計基準をベースに前ページで述べたような省エネルギーの観点を加えて新たな設計法の確立を目指す。本研究の目的を以下にまとめる。

(1)建築設備設計基準をベースとして業務ビルの空調システムにおける配管およびポンプの省エネルギー設計法を開発する。設計法には次の観点を含む。

①配管を適切に組み合わせる統合設計、②負荷率分布を考慮した配管・ポンプサイズ的设计、③エネルギー消費量推計

(2)開発した設計法の省エネルギー効果を定量的に把握する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、図1に示す研究フローで研究を遂行する。課題の中心となるのはSTEP4の配管統合に関する省エネ効

果を検証することである。検証には配管内の圧力分布まで検討できるシミュレーションモデルが不可欠であるため、初年度はシミュレーションモデルの構築と精度検証から取り組む。シミュレーションモデルは既往研究で作成したものをベースに、圧力計算のモジュールを追加することで効率的に構築する。



図1 研究の実施フロー

4. 研究成果

(1)開発した設計法の概要と中心手法の解説

構築した新設計法は、特に低負荷率での運転を効率よく行うことを主眼に、配管の統合およびポンプの直列配置の2つの新たな手法を考案し、取入れたものである。

①配管の統合

現状の空調配管における一般的な設計法では、図2a)に示すように1つの機器(熱源機器や熱交換器など)に対して1本の配管を設ける方法(以下、個別配管)が採用されている。これに対して図2b)のように、一部の共同で使用できる配管を統合し、複数の機器に対し直前までは1本の太い配管で送水し、機器の直前で分配する方法が考えられる(以下、統合配管)。統合配管では、合流や分岐、逆止弁の追加などが必要となり、その分だけ配管の圧力損失が増加する。一方で、配管は径が大きいほど摩擦による圧力損失が小さくなることが知られており、いくつかの配管を束ねて統合し、太い配管を使用することで、特に低流量時に圧力損失を低減できる。

②ポンプの直列配置

現在のポンプの一般的な設計法では、ポンプの台数制御を行う場合、図3a)のように同じ揚程のポンプを複数台並列に設置する。一般にポンプの必要揚程は流量の2乗に比例して変化する。そのため低流量時の必要揚程は定格揚程に対して非常に小さい。インバータにより揚程を落とした運転が可能であるが、機器の安定した運転のためポンプの下限周波数は30%~50%程度に設定されることがほとんどであり、必要揚程がそれ以下の時には結局

必要以上の揚程で送水することになる。

ポンプの直列配置の例を図3b)に示す。複数台のうちの1台のポンプを2台の同じサイズのポンプに分割する。ポンプ直列配置時の流量と揚程の関係を図4に示す。低流量時は、図3に示すV1のバルブを開け、V2のバルブを締めてP1のポンプのみで運転する。流量が大きくなれば、V1のバルブは締め、V2のバルブを開けて、P1とP5の2台のポンプで直列運転を行う。図4に示すように2台のポンプを直列に運転すれば、揚程は1台の時の2倍になる。さらに流量が大きくなった場合は、並列にポンプを設置した場合と同様に、他のポンプも稼働させ並列運転に移行する。

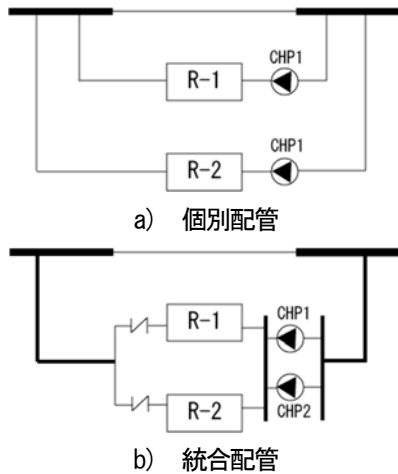


図2 個別配管と統合配管の配管系統図の例

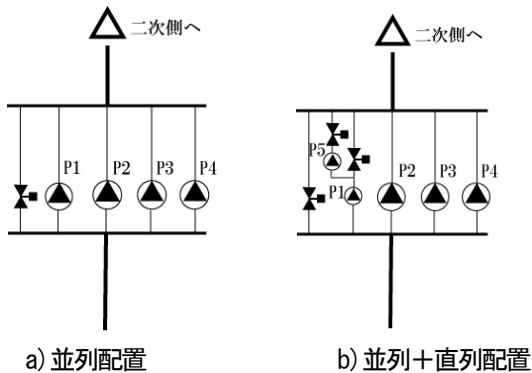


図3 複数台ポンプの設置例

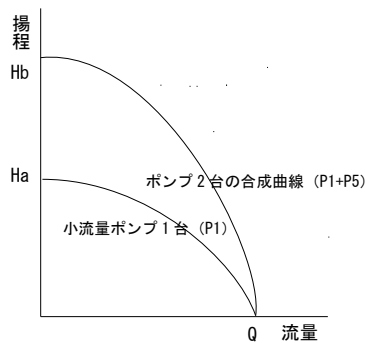


図4 ポンプの直列配置時の流量と揚程の関係

(2) シミュレーションモデルの構築

検討に用いたシミュレーションの概要について示す。配管の計算モデルでは、配管の損失水頭及び配管内各所の総和水頭の計算を行う。配管内を流れる粘性流体の状況はレイノルズ数(以下,Re数)に応じて層流域、中間流域、乱流域の3種類に分類され、それぞれにおける摩擦係数は式(1)~式(3)で表現される。

$$\lambda = \frac{Re}{64} \quad (Re < 2300 \text{ のとき}) \quad \text{式(1)}$$

$$\lambda = \frac{64/2300 \cdot (3500 - Re) + \lambda \cdot (Re - 2300)}{1200} \quad (2300 < Re < 3500 \text{ のとき}) \quad \text{式(2)}$$

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3500 < Re \text{ のとき}) \quad \text{式(3)}$$

ここで λ : 摩擦係数[W/(m·K)], Re:レイノルズ数[-], ϵ : 配管の絶対粗さ[-], d : 管の内径[m]

Re数は動粘性係数の関数となっており、水の動粘性係数は水温に応じて大きく変わる。一般的な空調設備における水温は7~50°C程度の範囲であり、動粘性係数は1.428から0.549まで程度の範囲で変化するため、本計算モデルでは水温の影響も加味している。

管内を水が流れる時、水の粘度と管内面の粗さによって摩擦抵抗が変わる。摩擦抵抗による水頭損失は式(4)によって計算を行う。直管の損失水頭係数は式(5)を利用して計算する。局部抵抗は局部抵抗係数を求め、式(6)により直管相当長さに換算して直管長に加算し、それを式(5)の管の長さLとして用いる。

$$\Delta h_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = k_f Q^2 \quad \text{式(4)}$$

$$k_f = \sum_i \frac{8 \cdot \lambda_i \cdot L_i}{g \cdot \pi^2 \cdot d_i^5} \quad \text{式(5)}$$

$$l_e = \frac{\xi}{\lambda} \cdot d \quad \text{式(6)}$$

ここで Δh_f : 全水頭損失[m], L: 管の長さ[m], V: 平均流速[m/s], g: 重力加速度[m/s²], k_f : 直管の損失水頭係数[s²/m⁵], Q: 流量[m³/s], ξ : 局部抵抗係数[-], l_e : 局部抵抗の直管相当長さ[m], 添え字 i は各配管を表す

配管システムの計算フローを図5に示す。水温、流量、配管の長さや管径などを入力データとして、システム全体の配管抵抗を計算する。

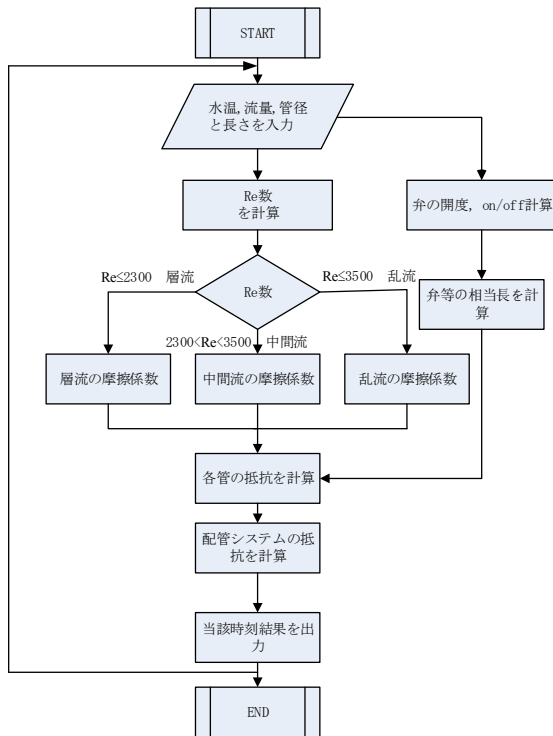


図5 配管システムの計算フロー

(3) 統合配管の省エネルギー効果の検討

個別配管を手法1、統合配管を手法2、手法3としてシミュレーションし、比較する(表1)。統合配管とする手法2、手法3では、個別配管と条件を揃えるため、統合前後の配管の合計断面積が全く同じとなるように統合配管の配管径を設定する。手法2では、ポンプの仕様も手法1と同じとする。手法3では、配管を統合することによる圧力損失の変化を加味して、ポンプを選定し直す。ただしこの際、個別配管の手法1と条件を揃えるため、必要流量と必要揚程に対する余裕率を個別配管と全く同じとしている。

配管方式による圧力損失の比較を表2に示す。統合配管については流量が熱源機器1台分の時と2台分の時の数値を示している。個別配管の単位長さ当たりの圧力損失は0.274kPa/mである。一方、統合配管でも、熱源機器2台が最大流量で稼働していれば単位長さ当たりの圧力損失は0.262kPa/mでありほぼ同程度である。その結果、配管部の合計圧力損失は個別配管で31kPa、統合配管で37kPaとなり、統合配管の方が大きい。熱源機器が1台のみ稼働するときの統合配管の統合部分の単位長さ当たり圧力損失は0.066kPa/mであり、個別配管の約4分の1である。この時、配管全体の合計圧力損失は19kPaとなる。個別配管では、熱源機器が1台のみ運転していてもポンプ1台にかかる圧力は変わらず配管部分で31kPaであり、熱源機器が1台運転の時には統合配管ではポンプ1台の必要揚程が削減される。

検討に用いる制御方法を表3に示す。制御Iは往還ヘッダーの温度差が設定値(5K)で一

定となるようにバルブによって一次側の流量を調整し、ポンプは常に定格で一定運転を行うバルブ制御とする。制御II、制御IIIは吐出圧力一定制御である。制御Iと同様に往還ヘッダーの温度差が設定値(5K)で一定となるようにバルブによって流量を調整し、一次ポンプの吐出圧力が設定値となるよう一次ポンプインバータの出力を決定する。制御IIではシステムの最大流量時に必要となる揚程を吐出圧力の設定値とする(個別配管では165kPa、統合配管では171kPa)。制御IIIでは統合配管の場合において、熱源機器の運転台数が1台の時に1台分の必要揚程を吐出圧力設定値(153kPa)とする。制御IVでは、往還ヘッダーの温度差が設定値(5K)で一定となるようにバルブが制御され、その条件下での必要揚程を満足できるようにポンプインバータの回転数を変えて運転する理想的な制御を想定している。

表1 検討手法

手法1	個別配管
手法2	統合配管(ポンプは手法1と同一)
手法3	統合配管(ポンプを再選定)

表2 配管仕様の設定

	個別配管	統合配管	
		統合部分	単独部分
配管径[mm]	200	283	200
直管長[m]	40.8	25.6	15.0
局部圧損直管相当長[m]	72.8	75.9	29.8 (うち逆止弁8)

表3 制御方法

制御I	バルブ制御+定速ポンプ
制御II	吐出圧力一定制御+インバータ ※個別配管, 統合配管とも最大流量時の必要揚程を設定値とする。
制御III	吐出圧力一定制御+インバータ(圧力設定変更) ※熱源運転台数が1台時に統合配管では設定値を熱源機器1台の最大流量時の必要揚程とする
制御IV	最適揚程制御 ※個別配管, 統合配管とも必要流量を確保できる最適揚程となるようインバータ制御を行う。

各手法における制御別の年間電力消費量を図6に、手法1を基準とした電力消費量の増減率を図7に示す。制御Iでは手法1より手法3の電力消費量が7.2%増加している。制御IIでも、電力消費量は手法2で2.8%、手法3で3.9%手法1より増加しており統合配管の効果は見られない。制御IIIでは、手法2は手法1より7.3%、手法3は6.6%電力消費量が削減される結果となった。制御IVでは、手法2は手法1より電力消費量が6.3%削減されている。同様に手法3の削減量は5.1%である。以上より、個別配管に比べ統合配管では最大流量時の必要揚程が増加し、ポンプサイズが大きくなる可能性がある。そのため、一定の高い揚程で運転するような制御方法(制御Iや制御II)では省エネルギー効果を得ることは難しい。一方で、部分負荷運転時に運転揚程を落とすことができる制御方式(制御IIIや制御IV)では省エネルギーを実現できることが分かった。

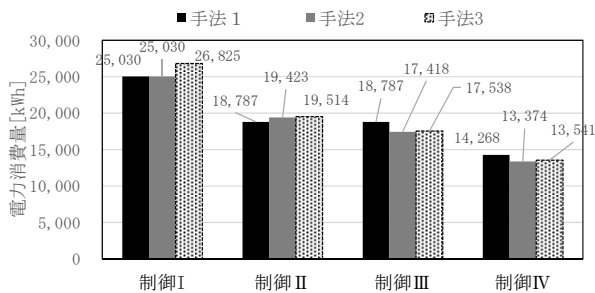


図6 年間電力消費量 (統合配管の効果)

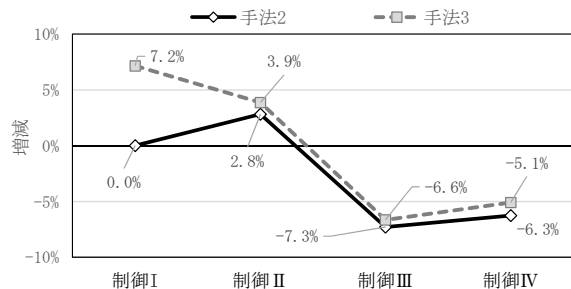


図7 電力消費量の増減率 (統合配管の効果)

(4) ポンプ直列配置の省エネルギー効果

検討ケースを表4に示す。ケース1~ケース5を設定した。検討に用いる制御方法を表5に示す。制御Iはバルブによって流量を調整し、ポンプは常に定速運転を行うバルブ制御とする。制御IIはインバータを用いた吐出圧力一定制御である。制御IIの吐出圧力設定値には各ポンプの定格揚程を用いる。従ってケース3~ケース5のポンプ直列配置のケースでは、P1やP5のみが運転する流量範囲においては低い吐出圧力設定値が採用されることになる。制御IIIではポンプの吐出圧力がその流量において必要な揚程となるようポンプの回転数を変える理想的な運転状態を計算するケースとする。ただし、ポンプの下限周波数は30Hzとする。制御IVも制御IIIと同じであるが、ポンプの下限周波数は20Hzとする。

表4 検討ケース

ケース1	同サイズの4台のポンプを用いるケース
ケース2	異なるサイズの4台のポンプを用いる
ケース3	直列配置(手法1)と3台の同サイズのポンプを並列配置して用いるケース
ケース4	直列配置(手法1)と3台の異なるサイズのポンプを並列配置して用いるケース
ケース5	直列配置(手法2)と3台の異なるサイズのポンプを並列配置して用いるケース

表5 制御方法

制御I	バルブ制御+定速ポンプ
制御II	吐出圧力一定制御+インバータ (圧力設定可変)
制御III	最適揚程制御 (下限周波数 30Hz) ※必要流量を確保できる最小限の揚程となるようインバータ制御を行う。
制御IV	最適揚程制御 (下限周波数 20Hz)

各ケースにおける制御別の年間電力消費量を図8に、ケース1を基準とした電力消費量の削減率を図9に示す。ポンプ直列配置を採用するケース3~ケース5において削減率が大きい。特に制御I、制御IIでの削減率が大き

く、ケース5では60%近い。制御IIIでも効果は高いが、下限周波数を20Hzまで下げた制御IVでは基準となるケース1での電力消費量も少ないため、削減率はケース5で9%程度になっている。このことからポンプ直列配置は低負荷時に揚程を落として運転できることが特徴であり、低負荷時に運転揚程が下がらない制御方法の場合に特に効果的である。

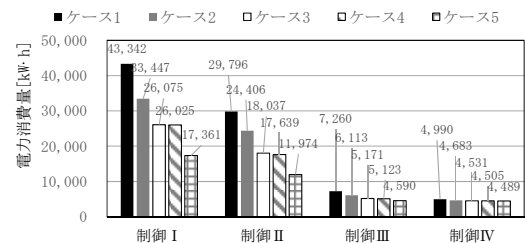


図8 年間電力消費量の比較

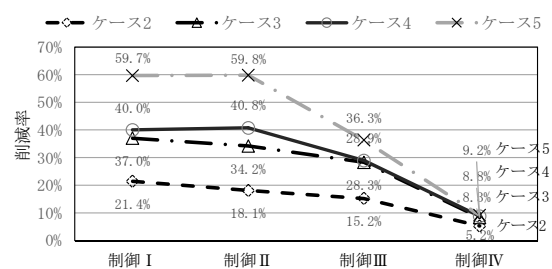


図9 電力消費量の削減率

(5) 新設計法の省エネルギー効果

統合配管とポンプの直列設置に関する検討を従来の設計フローに組み込んだ新設計法を開発した。設計フローを図10に示す。

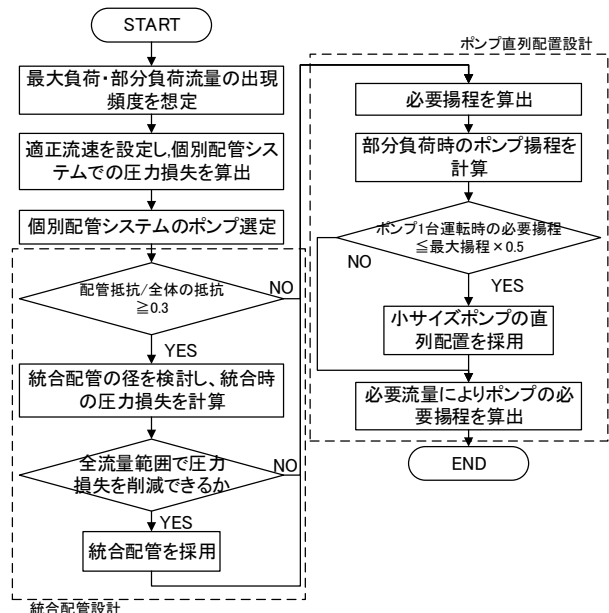


図10 新設計法の設計フロー

上記のフローに従って実在のシステムを設計し直し、表6に示す各制御を行った場合の省エネルギー効果を計算した。制御別の年間電力消費量を図11に、手法1を基準とした手法2の電力消費量の増減率を図12に示す。統合配管のみを採用した1次側では、制御Iで

電力消費量が 5.2%削減されている。統合配管とすることでポンプの定格揚程が下がり、定格消費電力が小さくなったことが省エネルギーに繋がっている。制御Ⅱでは、電力消費量が 8.0%削減された。制御Ⅲでは、30.5%電力消費量が削減される結果となった。部分負荷運転時に吐出圧力の設定値を下げることで、統合配管による摩擦損失の低減をポンプ消費電力の削減に繋げることができるため大きな削減効果が得られている。制御Ⅳでは、電力消費量が 17.6%削減されている。制御Ⅲより効果が落ちるのは、末端差圧制御を採用することで手法 1 の個別配管でも大きくエネルギー消費量が削減されるためである。制御Ⅲでは、個別配管の時には配管が個別であるために、機器の運転台数に応じて吐出圧力設定値を変更することはできない。そのため、機器の運転台数に応じて吐出圧力設定値を変更する手法 2 との差が大きい。

二次側では、新設計法によって統合配管とポンプの直列配置を採用した。制御Ⅰでは新設計法の適用により電力消費量が 43.2%削減された。同様に、制御Ⅱでは電力消費量が 15.3%削減されている。制御Ⅰのバルブ制御では、低負荷時に揚程の小さいポンプ 1 台での運転が可能となり、揚程を落とした運転ができることが大きな省エネルギー効果に繋がっている。一方で制御Ⅱでは、最大負荷時の必要揚程を吐出圧力の設定値としているため、低負荷時も揚程を落とすことができず、削減効果は小さかった。制御Ⅲでは 55.1%、制御Ⅳでは 20.2%電力消費量が削減されている。一次側の結果と同様に、手法 1 において運転揚程を落とした運転が可能な制御Ⅳでは、手法 1 自体のエネルギー消費量が少ないために手法 2 の省エネルギー率が小さくなっている。

以上より、今回提案した設計法によって統合配管とポンプの直列配置を実施する場合、一定の高い揚程で運転するような制御方法(制御Ⅱ)でなければ、最大で 55.1%ポンプのエネルギー消費量を削減できる結果となった。

表 6 制御方法

制御Ⅰ	バルブ制御＋定速ポンプ
制御Ⅱ	吐出圧力一定制御＋インバータ ※最大流量時の必要揚程を設定値とする
制御Ⅲ	吐出圧力一定制御＋インバータ(圧力設定変更) ※熱交換器運転台数に応じた最大流量時の必要揚程を設定値とする
制御Ⅳ	末端差圧制御＋インバータ ※必要最小限の末端差圧を設定値とする

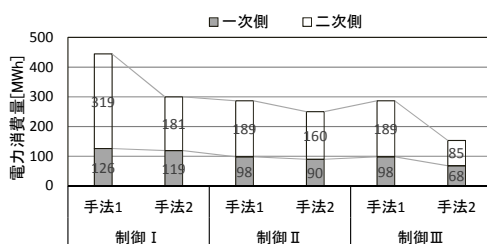


図 11 年間電力消費量の比較

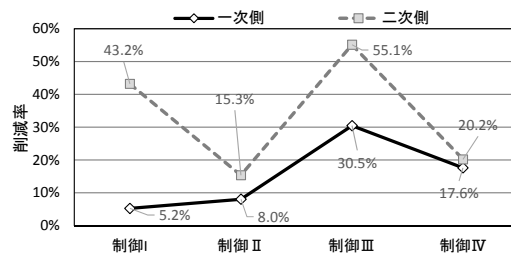


図 12 電力消費量の削減率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

①鈴木智也、住吉大輔、趙飛、他 3 名：ESCO 事業における熱源ダウンサイジング効果、都市・建築学研究九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 26 号、2014.7 (査読有)

[http://catalog.lib.kyushu-](http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1515827/p073.pdf)

[u.ac.jp/handle/2324/1515827/p073.pdf](http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1515827/p073.pdf)

②T.Suzuki、D.Sumiyoshi、F.Zhao、他 3 名：Effects by Downsizing of Heat Source Equipment、Asim 2014、2014.11 (査読有)

③山下周一、住吉大輔、赤司泰義：熱源システムにおける水搬送系の実設計上の課題、都市・建築学研究九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 27 号、2015.1 (査読有)

④趙飛、住吉大輔：建築空調システムにおける配管・ポンプの省エネルギー設計法の開発—シミュレーションの構築と精度検証—、都市・建築学研究九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 27 号、2015.1 (査読有)

[http://catalog.lib.kyushu-](http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1560201/p067.pdf)

[u.ac.jp/handle/2324/1560201/p067.pdf](http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1560201/p067.pdf)

⑤趙飛、住吉大輔：建築空調システムにおける配管・ポンプの省エネルギー設計法の開発—設計手順の提案と省エネルギー効果の検証—、都市・建築学研究、九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 28 号、2015.7 (査読有)

⑥趙飛、住吉大輔：建築空調システムにおける統合配管の省エネルギー効果、空気調和・衛生工学会論文集 第 223 号、2015.10 (査読有)

[http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN000](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN00065706_ja.html)

[65706_ja.html](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN00065706_ja.html)

⑦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 第 230 号、2016.5 (査読有)

[http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN000](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN00065706_ja.html)

[65706_ja.html](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN00065706_ja.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住吉 大輔 (DAISUKE SUMIYOSHI)

九州大学大学院人間環境学研究院・准教授

研究者番号：60432829

(2) 研究協力者

趙 飛 (ZHAO FEI)

九州大学大学院人間環境学府・博士後期課程