

水族館建替プロジェクトにおける熱源空調設備を対象としたコミッショニング

(第10報) 熱源水系統における冷却塔ファンの最適制御方法の検討

矢島 和 樹 (新菱冷熱工業)
 原瀬 拓 也 (竹中工務店)
 上町 剛 士 (新菱冷熱工業)
 松下 直 幹 (コミッショニング企画)
 柳原 隆 司 (コミッショニング企画)

前田 龍 紀 (竹中工務店)
 福谷 篤 正 (新菱冷熱工業)
 宮本 大 成 (アズビル)
 岡 敦 郎 (コミッショニング企画)

はじめに

本研究のプロジェクトでは、設計段階から空調システムシミュレーションを用いて、設計から運用までを見据えたコミッショニングを実施している。第4報にて熱源システムのモデル化の概要を示すとともに、熱源水ネットワークの熱源水温度の感度解析を行った結果を示した¹⁾。熱源水の冷却側（冷却水としての役割）では最適なアプローチ温度があり、より詳細に検討することで更にエネルギー消費量やライフサイクルコストを削減できる余地があることがわかった。

本報では、熱源水が冷却側において、より詳細な検討を行い、実システムへの導入を目指した具体的な制御方法を考案した。また、考案した方法の導入効果を試算した。

1. 対象システム

熱源水ネットワークを有する図-1の熱源システムを対象とする。冷房運転が主となる期間は、熱源水は熱源機の放熱分を処理する冷却水としての役割を果たす。対象は、このうち4か所の冷却塔群である(図-1中の点線内)。コージェネレーションシステムにも冷却塔が設置されているが、一定の熱源水温度で制御するため、対象としない。

2. シミュレーションモデル

前報では基本設計フェーズ、実施設計フェーズにおける設計仕様や設計思想・制御などの情報を反映してモデルを作成し、それを活用して感度解析を行った¹⁾。

本報では、基本・実施設計フェーズから施工フェーズに進んだことで、機器の仕様が具体的に確定した。モデルもその機器情報に更新することで精度を向上させ、それを活用して最適制御方法の検討を行った。

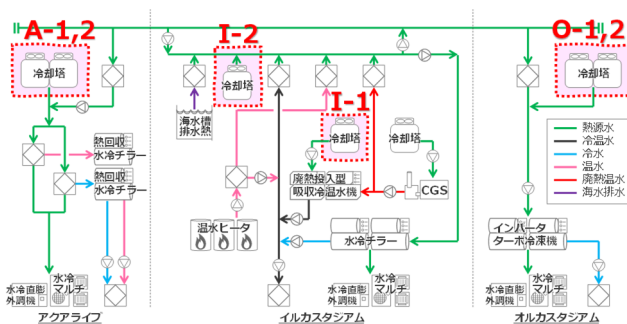


図-1 熱源システムの概略図

3. 冷却塔ファン風量比の最適値探索

3.1 最適値探索の条件

冷却塔ファンの最適制御方法の検討にあたって、最適化の項目（設計変数）を熱源水温度とするか、冷却塔ファンの周波数とするか、シミュレーションで評価した²⁾。文献2)にて、熱源水温度を設定値とする方法と冷却塔ファン周波数を設定値とする方法を比較し、冷却塔ファン周波数設定のほうがセンサ等に誤差があっても最適制御における電力増加が少なく影響を受けづらいという知見が得られたので、冷却塔ファン周波数を設計変数とした。

最適値探索における目的関数は、熱源システム合計の一次エネルギー消費量を最小とランニングコストを最小の2種類とし、別々に探索した。目的関数ごとの換算係数を表-1に示す。

表-1 換算係数一覧

	電力	ガス	上水 / 下水
エネルギー消費量	8.64 MJ/kWh	45 MJ/Nm ³	-
ランニングコスト	12.5 円/kWh	100 円/Nm ³	360 / 265 円/m ³

設計変数は、4 か所の冷却塔群それぞれの冷却塔ファン周波数とし、10 Hz から 60 Hz までの 10 Hz 刻みとした。外気と負荷の条件は、設計時の外気・負荷の月代表日（4月から11月）と冷房ピークの1時間刻み216時間分のデータを用いて計算した。最適値探索のケース数は、目的関数の種類ごとに $6^4 \times 216$ で 279,936 通りである。

3.2 ファン周波数別のエネルギー傾向把握

計算した月代表日の外気と負荷のうち6月の13時を例に、ファン周波数別の1時間当たり一次エネルギー消費量とランニングコストを図-2に示す。なお、冷却塔群は図-1中のI-2を対象とし、その他の冷却塔群のファン周波数は60 Hzで計算した結果である。

一次エネルギー消費量は、ファン周波数が40 Hzで最小値となっており、またランニングコストも同様にファン周波数が40 Hzで最小値となっている。このようにして、ファン周波数の最適値を他の外気と負荷の条件でも求めた。また、図-2では、対象とする冷却塔群以外のファン周波数は固定して図示したが、4か所の冷却塔群同士は熱源水ネットワークにより相互に影響するため、それらの組み合わせも加味して最適値を求めた。

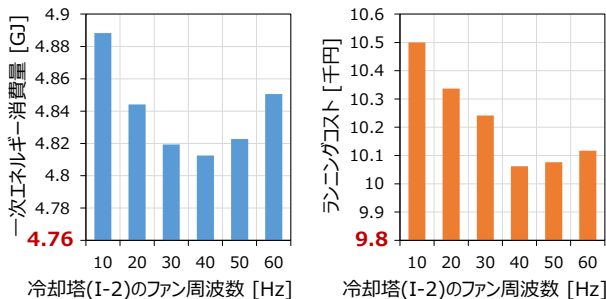


図-2 ファン周波数別の一次エネルギー消費量とランニングコスト

3.3 ファン周波数の最適値探索結果

216時間分の外気と負荷データに対して求めた図-1中のO-1, 2におけるファン周波数の最適値を図-3に示す。目的関数の評価指標は、一次エネルギー消費量である。外気乾球温度が高く、負荷が大きいと考えられる日中の時間かつ夏期である図の中心ほど最適なファン周波数は高くなった。

負荷が最も大きい冷房ピークの13時についても定格周波数である60 Hzではなく、40 Hzが選択されているが、この理由は次の2点が考えられる。ピーク負荷でも熱源機の負荷率は100%ではなく余裕があり、ファン周波数を定格よりも低くして、全体の一次エネルギー消費量を小さくしている。もう一つは、周波数の最適値探索において、実現する熱源水温度を無視して求めている点

がある。熱源機に熱源水上限温度はあるが、次節(4.1)の制御式を導出する際には上限温度関係なく最適値を求めておき、自動制御上で熱源水温度の上下限保障を設ける。これにより、上下限温度が近似式へ与える影響を少なくできる。(図-4) また、4月と11月の日中以外の時間帯は温水負荷となり冷却塔を運転しないため解はない。

図-3には、O-1, 2の一次エネルギー消費量を評価指標とした最適値を例として示したが、他の冷却塔群、またランニングコストについても同様に最適値を探索し、結果が得られている。

単位 Hz	4月	5月	6月	7月	冷房ピーク	8月	9月	10月	11月
1時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
2時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
3時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
4時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
5時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
6時	-	20	20	20	30	20	20	20	-
7時	-	20	20	20	30	30	20	20	-
8時	20	20	20	30	30	30	30	20	-
9時	20	30	30	30	40	40	30	20	-
10時	20	30	30	40	40	40	30	30	20
11時	20	30	30	40	40	40	40	30	20
12時	20	30	30	40	40	40	40	30	20
13時	20	30	30	40	40	40	40	30	20
14時	20	30	30	40	40	40	40	30	20
15時	20	30	30	40	40	40	30	30	20
16時	20	30	30	40	40	40	40	30	20
17時	20	30	30	40	40	30	30	20	20
18時	10	20	30	30	30	30	30	20	10
19時	-	20	30	30	30	30	30	20	-
20時	-	20	30	30	30	30	30	20	-
21時	-	20	30	30	30	30	30	20	-
22時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
23時	-	20	20	20	20	20	20	20	-
24時	-	20	20	20	20	20	20	20	-

図-3 ファン周波数の最適値一覧 (O-1,2)

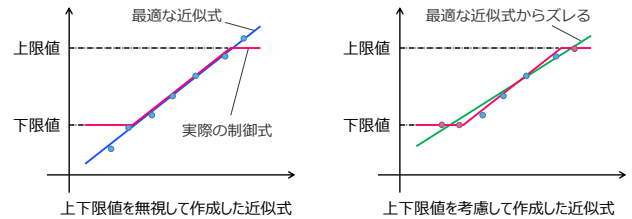


図-4 上下限値が近似式に与える影響の模式図

4. 制御への反映方法と導入効果

4.1 関係式の導出

ファン周波数の最適値探索結果から実システムに導入するための具体的な制御方法を検討した。4か所の冷却塔群それぞれのファン周波数の最適値に対し、関連の深い計算条件の項目を抽出した。図-3のO-1, 2の冷却塔群に関連する項目を同じ形式で図-5、図-6に示す。

これらの関連する項目の計測値から最適なファン周波数を求める方法はいくつか考えられ、テーブルデータ化する方法³⁾、AI (Artificial Intelligence) を用いる方法⁴⁾⁵⁾などがある。本報では、関係式で求める方法⁶⁾を採用した。4か所の冷却塔群それぞれの冷却塔ファン周波数の設定値を式(1)から式(4)を用いて演算する。式(1)から式(4)の左辺は、すべて冷却塔ファンの周波数で、単位はHzである。図-1中のA-1, 2の冷却塔ファン周波数は式(1)で、I-1は式(2)で、I-2は式(3)で、O-1, 2は式(4)で求め、それを設定値とする。

単位 °C	4月	5月	6月	7月	冷房ピーク	8月	9月	10月	11月
1時	-	15.1	18.7	24.0	27.2	24.5	20.0	14.0	-
2時	-	14.8	18.5	23.9	26.6	24.4	19.9	13.7	-
3時	-	14.6	18.3	23.8	26.6	24.3	19.7	13.4	-
4時	-	14.3	18.0	23.5	26.3	24.1	19.6	13.3	-
5時	-	14.1	17.8	23.3	26.0	24.0	19.4	13.1	-
6時	-	14.3	18.0	23.3	26.1	24.0	19.4	12.9	-
7時	-	15.2	18.6	23.8	26.8	24.5	19.8	13.3	-
8時	10.5	16.0	19.4	24.1	27.5	25.1	20.7	14.4	-
9時	11.6	16.5	20.0	24.4	28.0	25.6	21.4	15.4	-
10時	12.3	16.9	20.4	24.7	28.0	25.9	22.0	16.0	10.3
11時	12.9	17.5	20.5	25.0	28.0	26.0	22.2	16.4	10.8
12時	13.3	17.9	20.8	25.2	28.0	26.4	22.5	16.4	11.3
13時	13.4	18.0	21.0	25.3	28.0	26.5	22.7	16.7	11.6
14時	13.5	17.9	20.9	25.4	28.0	26.5	22.6	16.6	11.7
15時	13.3	17.9	21.1	25.4	28.0	26.5	22.7	16.6	11.7
16時	13.3	17.7	21.1	25.4	28.0	26.5	22.5	16.3	11.3
17時	12.9	17.6	20.8	25.2	28.0	26.2	22.2	15.8	10.8
18時	12.5	17.2	20.5	25.0	28.0	25.9	21.8	15.4	10.2
19時	-	16.7	20.1	24.8	28.0	25.8	21.4	15.1	-
20時	-	16.5	19.9	24.5	28.0	25.5	21.0	14.9	-
21時	-	16.1	19.7	24.3	27.9	25.5	20.7	14.6	-
22時	-	15.9	19.5	24.3	28.0	25.3	20.5	14.3	-
23時	-	15.7	19.3	24.1	27.5	25.0	20.3	14.1	-
24時	-	15.4	19.1	23.9	27.4	24.8	20.1	13.9	-

図-5 外気湿球温度一覧

単位 kW	4月	5月	6月	7月	冷房ピーク	8月	9月	10月	11月
1時	-	224.4	499.9	925.8	1,271.7	1,061.9	721.9	265.1	-
2時	-	197.2	479.0	911.6	1,243.9	1,039.7	700.3	237.9	-
3時	-	177.0	458.0	890.5	1,225.7	1,024.9	678.9	217.3	-
4時	-	150.0	436.9	875.7	1,198.1	1,003.1	664.0	210.3	-
5時	-	131.4	434.7	861.4	1,181.1	989.2	642.0	189.8	-
6時	-	231.4	516.3	934.2	1,261.5	1,043.4	662.0	174.0	-
7時	-	469.7	679.6	1,105.5	1,542.7	1,249.3	801.7	270.7	-
8時	222.9	734.4	890.2	1,330.5	1,913.8	1,528.8	1,049.8	535.4	-
9時	375.6	974.1	1,199.4	1,706.4	2,766.2	2,006.6	1,399.2	775.3	-
10時	609.9	1,158.8	1,434.8	2,116.8	3,092.8	2,460.0	1,699.2	982.9	241.8
11時	738.6	1,350.4	1,591.4	2,293.7	3,224.5	2,593.5	1,903.0	1,131.1	463.7
12時	871.8	1,414.8	1,696.1	2,368.8	3,293.9	2,654.4	2,013.5	1,215.7	544.0
13時	898.4	1,422.4	1,737.0	2,392.4	3,372.9	2,727.4	2,025.3	1,241.3	559.6
14時	835.9	1,342.0	1,696.9	2,386.8	3,342.1	2,684.9	1,936.1	1,163.5	536.4
15時	696.2	1,247.2	1,626.9	2,298.3	3,188.3	2,571.5	1,799.3	1,052.5	440.6
16時	541.6	1,099.3	1,531.2	2,165.4	2,989.4	2,396.7	1,649.2	887.7	257.0
17時	292.3	919.4	1,344.7	1,858.6	2,704.8	2,104.4	1,450.4	697.3	94.3
18時	81.1	701.0	1,156.3	1,665.0	2,353.5	1,849.4	1,265.0	590.4	20.4
19時	-	560.6	1,004.4	1,504.1	2,183.4	1,722.8	1,174.8	526.9	-
20時	-	498.1	921.5	1,436.9	2,115.2	1,669.1	1,112.8	474.7	-
21時	-	456.5	770.3	1,222.8	1,756.6	1,413.6	1,004.6	473.5	-
22時	-	322.3	592.7	977.4	1,365.9	1,136.8	800.8	323.8	-
23時	-	294.9	572.0	956.0	1,327.5	1,107.4	764.6	296.7	-
24時	-	261.1	543.8	934.7	1,301.1	1,084.7	742.9	269.7	-

図-6 オルカスタジアムの熱源水熱量

式(1)から式(4)のc1からc6は、最適なファン周波数を目的変数に、関連する項目を説明変数として、重回帰分析で求めた定数である。c1からc6の一次エネルギー消費量を評価指標とした値を表-2に、ランニングコストを評価指標とした値を表-3に示す。本報で示したこれらの値は、施工フェーズの情報から得られたシミュレーションモデルで算出した値である。今後運用を開始して、実績データからシミュレーションモデルの精度向上を行い、改めて算出した値に更新することで最適制御自体の精度改善が図れる。また、年数経過後の機器特性を反映した値とすることで、経年劣化なども考慮することができる。

4.2 実制御での留意事項

冷却塔のファン周波数を式(1)から式(4)で計算するため、条件によっては上下限周波数を逸脱した値が計算される可能性がある。また、ファン周波数を直接指示する方法のため、熱源水温度のフィードバック制御が行われないので、熱源機の上下限温度を逸脱する可能性がある。

上下限周波数に関しては、ファン周波数の設定値に上限値と下限値を設け、式で計算されたファン周波数が上限(下限)より高い(低い)場合は上限値(下限値)とする。上下限値は、任意の定数とし、変更可能にする。初期値は上限値:60 Hz、下限値:10 Hzとした。

熱源水の上下限温度に関しては、制御中に上下限温度を逸脱した場合には、通常(設計)の温度制御に自動で切り替わることで対応する。

$$f_A = c_1 Q'_A{}^2 + c_2 T_{WB}{}^2 + c_3 Q'_A T_{WB} + c_4 Q'_A + c_5 T_{WB} + c_6 \quad \text{式(1)}$$

$$f_{I1} = c_1 Q_{AR}{}^2 + c_2 T_{WB}{}^2 + c_3 Q_{AR} T_{WB} + c_4 Q_{AR} + c_5 T_{WB} + c_6 \quad \text{式(2)}$$

$$f_{I2} = c_1 Q'_I{}^2 + c_2 T_{WB}{}^2 + c_3 Q'_I T_{WB} + c_4 Q'_I + c_5 T_{WB} + c_6 \quad \text{式(3)}$$

$$f_O = c_1 Q'_O{}^2 + c_2 T_{WB}{}^2 + c_3 Q'_O T_{WB} + c_4 Q'_O + c_5 T_{WB} + c_6 \quad \text{式(4)}$$

Q'_A : アクアライブ 熱源水熱量 [kW]

Q_{AR} : 吸収式冷温水機 製造熱量 [kW]

Q'_I : イルカスタジアム 熱源水熱量(海水槽排水熱量除く) [kW]

Q'_O : オルカ熱源水熱量 [kW]

T_{WB} : 外気湿球温度 [°C]

表-2 定数一覧(一次エネルギー消費量)

	f_A	f_{I1}	f_{I2}	f_O
C1	-0.0000128	0.0000367	-0.0000399	-0.0000065
C2	-0.0840477	0.0297760	-0.0141921	-0.1660156
C3	-0.0002467	0.0019081	-0.0025168	0.0017965
C4	0.0567899	-0.0591331	0.1094183	-0.0091705
C5	3.3892004	-1.5348862	2.6266850	4.1456305
C6	-19.5705537	29.8718662	-9.9324404	-10.2024447

表-3 定数一覧(ランニングコスト)

	f_A	f_{I1}	f_{I2}	f_O
C1	0.0000033	0.0000367	-0.0000492	0.0000046
C2	-0.0591461	0.0297760	-0.0310892	0.0355535
C3	0.0028535	0.0019081	-0.0020324	0.0001800
C4	-0.0590132	-0.0591331	0.0767092	-0.0122172
C5	1.5006163	-1.5348862	3.0730289	-1.3017764
C6	3.0681656	29.8718662	-14.9139008	24.2514420

5. 削減効果と運用方法

5.1 削減効果の試算

式(1)から式(4)で求めた値を冷却塔のファン周波数の設定値として制御した場合の削減効果を試算した。設計時の外気・負荷の月代表日と冷房ピークの216時間で計算し、この計算結果に各月の日数と冷房ピークの日数をかけて合計したものを冷房期間の一次エネルギー消費量、ランニングコストとした。一次エネルギー消費量の結果を図-7に、ランニングコストの結果を図-8に示す。図中には、それぞれ3種類の比較を載せている。「比較対象」は、通常(設計)の熱源水温度制御をした場合であり、熱源水温度の設定値は、各冷却塔群共通でアプローチ温度4°Cである。「エネルギー」は、一次エネルギー消費量を最小にするように表-2の定数を用いた関係式で制御し、「ランニングコスト」は、ランニングコストを最小にするように表-3の定数を用いた関係式で制御した場合である。なお、この試算は、4.2で言及した上下限周波数と上下限温度を考慮した計算結果である。

一次エネルギー消費量の比較では、比較対象のアプローチ温度4°Cの制御方法に対し、エネルギー最小の関

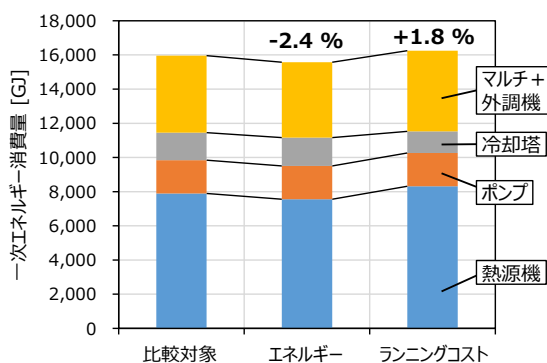


図-7 一次エネルギー消費量の削減効果

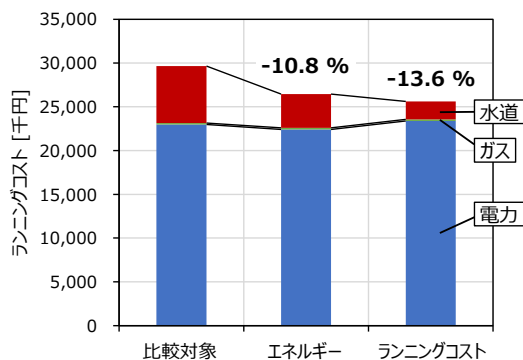


図-8 ランニングコストの削減効果

係式では 2.4 %削減となり、ランニングコスト最小の関係式では 1.8 %増加となった。エネルギー最小の関係式を用いた制御により一次エネルギー消費量を削減することができる。また、評価指標が異なるランニングコスト最小では、比較対象の制御方法よりも増エネルギーとなることがわかった。

ランニングコストの比較では、比較対象のアプローチ温度 4 °C の制御方法に対し、エネルギー最小の関係式では 10.8 %削減となり、ランニングコスト最小の関係式では 13.6 %削減となった。ランニングコストは、エネルギー最小とランニングコスト最小のどちらの関係式を用いても 10 %以上の削減効果があることがわかった。

エネルギー最小の関係式では、一次エネルギー消費量とランニングコストともに削減することができ、ランニングコスト最小の関係式では、一次エネルギー消費量は増加するものの、ランニングコストはエネルギー最小の関係式よりも削減することができる。

5.2 運用方法

図-7 と図-8 に示したように、比較対象の制御方法と、エネルギー最小、ランニングコスト最小の 2 種類の関係式の制御方法、合わせて 3 種類の制御方法を比較した。それぞれ一次エネルギー消費量とランニングコストは異なるが、この結果をもとに運用時は状況と目的に応じて、3 種類の制御方法から 1 つの方法を選択して制御を行う。

3 種類の制御方法は、任意のタイミングで切り替えることができるようにしておき、一次エネルギー消費量を優先して削減したい場合、または一次エネルギー消費量とランニングコストを同時に削減したい場合は、エネルギー最小の関係式で制御する。ランニングコストを優先して削減したい場合は、ランニングコスト最小の関係式で制御する。比較対象であるアプローチ温度 4 °C の制御方法は、4.2 節で言及した熱源水上下限温度を逸脱した場合や、その他の理由で通常の制御をしたい場合に選択する。

6. おわりに

熱源水ネットワークを有する熱源システムにおいて、空調システムシミュレーションを用いて冷却塔ファンの最適制御方法を検討した。最適値探索の結果、冷却塔ファン周波数の設定値を求める関係式を導出した。関係式は、式の形は同じに、エネルギー最小とランニングコスト最小の 2 種類の定数を求めており、目的に応じて式の定数を変更することで、一次エネルギー消費量もランニングコストも削減することが可能である。

今後は、運用フェーズでの最適制御方法の効果検証を予定している。効果検証を進めるとともに、運用フェーズに移行することで期待できるシミュレーションモデル精度向上もあわせて行う。運用開始後に収集した実績データをもとにシミュレーションの機器モデルを改善し、表-2 と表-3 の定数を更新することで、運用実態にあった制御が可能となる。

また、熱源水温度を設定値とする方法と冷却塔ファン周波数を設定値とする方法の比較では、冷却塔ファン周波数設定のほうがセンサ等に誤差があっても最適制御における電力の増加が少なく影響を受けづらいという知見がシミュレーション上で得られているが、その検証も実績データから行う予定である。

謝 辞

本研究は、須磨水族園再開発プロジェクトの Cx チーム（竹中工務店、新菱冷熱工業、アズビル、コミッション企画（神戸製鋼、三菱重工サーマルシステムズ、川重冷熱工業）の活動成果である。研究を進めるに当たり、Cx 会議メンバーの方々から多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 矢島 他. (2023). 水族館建替プロジェクトにおける熱源空調設備を対象としたコミッションング (第 4 報). 空調

和・衛生工学会大会学術講演論文集.

- 2) 矢島 他. (2024). センサ誤差やシミュレーションモデル精度が冷却水サブシステムの電力消費量に与える影響評価. 空気調和・衛生工学会論文集.
- 3) 吉田 他. (2018). 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 13 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
- 4) 岡本 他. (2017). 人工知能を用いた熱源システムの運用最

適化技術の開発 (第 2 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集

- 5) 矢崎 他. (2022). 都市型地域冷暖房の省エネルギー手法に関する研究 (その 5). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
- 6) 矢島 他. (2017). 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究 (第 1 報). 空気調和・衛生工学会論文集.