

間接外気冷房型データセンターの運用評価と高効率運用方式に関する研究

Research on Operation Evaluation and Efficient Operation Method of Indirect Outside Air-Cooling Data Center

学生会員 任 雅欣 (北海道大学) 正会員 羽山 広文 (北海道大学)
 正会員 前田 健蔵 (鹿島建設) 正会員 三浦 克弘 (鹿島建設)
 正会員 小野 永吉 (鹿島建設) 正会員 下 泰蔵 (鹿島技術研究所)

Yaxin REN^{※1} Hirofumi HAYAMA^{※1} Kenzo MAEDA^{※2} Katsuhiko MIURA^{※3} Eikichi ONO^{※3} Shimo TAIZO^{※3}

^{※1} Hokkaido University ^{※2} Kajima Corporation ^{※3} Kajima Technical Research Institute

The purpose of this research is to analyze the data obtained by monitoring the operation of this system and then to improve the efficiency of air cooling in a data center where the indirect outside air-cooling system is introduced. The overall load has increased compared to last year, but it's still in a state of low load so that the inefficient operation continues. Therefore, we tried to control temperature of supply air and air volume in order to increase working efficiency and minimize the consumption of the system under various conditions of outside air temperature and load of air conditioner.

1. はじめに

本研究は、実測データから間接外気冷房システムを導入した対象施設の運用実態を調査、把握し、空調機機器特性と実測データの集計、分析などから、シミュレーションによる低負荷時における最適な空調システム運用方法を導き出すことを目指している。既往研究³⁾において、サーバ室の低負荷環境における間接外気冷房システムの効率化には、空調機の運転台数を増加し、ブラインポンプ周波数と室外機ファン回転数を同時に制御し、ブライン温度差を確保することが有効であることを述べた。

本研究では、上記の制御方式の変更に伴う効果を検証するとともに、S社Iデータセンターで実測された運転データと該当施設の空調機機器特性を活用してシミュレーションを行い、実運用時の負荷変動に対応した間接外気冷房システムの制御について検討する。さらに、効率的な運転方法を提案するために、適切な運転条件のポイントを把握する。

表-1 架列別平均電力消費量

	電力消費量[kWh]										凡例	下限 [kWh]	下限 [kWh]
	ab	cd	ef	gh	ij	kl	mn	op	qr	合計			
2017.1	0.0	0.4	0.0	0.0	48.0	3.5	0.0	2.9	1.6	56.5	0	5	
2018.1	0.0	0.4	0.0	0.0	38.2	4.2	0.0	2.9	1.6	47.4	5	10	
2018.2	0.0	0.4	0.0	0.0	37.4	4.9	14.8	2.6	1.9	62.0	10	25	
2018.3	0.0	0.4	0.0	0.0	51.8	8.3	26.9	2.9	2.4	92.6	25	50	
2018.4	0.0	0.3	0.0	0.0	56.0	10.3	29.7	3.4	2.8	102.5	50	75	
2018.5	0.0	0.0	0.0	0.0	42.3	12.9	30.8	4.5	2.9	93.5	75	100	
2018.6	0.3	0.0	0.0	0.0	44.3	11.6	30.1	4.0	2.9	93.1	100		
2018.7	0.3	71.1	0.0	0.0	41.8	14.5	27.1	4.1	5.6	164.5			
2018.8	0.3	83.2	0.0	0.0	39.8	11.4	30.8	4.1	7.5	177.2			
2018.9	0.3	47.1	0.0	0.0	23.3	10.2	26.2	4.0	7.4	118.6			
2018.10	0.3	83.0	0.0	0.0	22.5	12.7	24.8	4.1	7.8	155.2			
2018.11	0.9	80.2	0.0	0.0	21.2	12.3	28.1	4.0	7.7	154.5			
2018.12	0.6	28.4	0.0	0.0	21.0	14.6	29.8	4.6	8.2	107.2			
2019.1	0.3	0.1	0.0	0.1	21.0	15.0	36.7	4.6	9.5	87.2			
2019.2	0.3	0.1	0.0	0.0	16.3	23.4	48.0	4.2	10.1	102.4			
2019.3	0.3	0.1	0.0	0.0	18.0	26.4	53.5	4.7	11.2	114.2			
2019.4	0.3	1.5	0.0	0.0	17.0	30.0	55.0	4.5	11.0	119.3			
2019.5	0.3	6.8	0.0	0.0	7.4	30.3	57.6	4.7	12.5	119.5			
2019.6	0.3	6.5	0.0	1.2	4.7	30.3	55.9	4.8	13.5	117.1			
2019.7	0.3	6.5	0.0	2.5	4.3	29.6	68.8	4.7	18.1	134.9			
2019.8	0.3	6.6	0.0	2.8	4.3	28.9	84.1	4.7	18.6	150.3			
2019.9	0.3	7.4	0.0	3.1	4.5	26.4	85.2	4.7	18.9	150.4			
2019.10	0.3	42.6	0.0	3.1	4.4	21.5	85.8	6.0	17.6	181.3			
2019.11	0.3	58.2	0.0	3.0	4.4	21.2	85.8	6.6	14.2	193.6			
2019.12	0.3	67.0	0.0	3.2	4.4	21.0	86.1	6.6	14.3	202.8			
2020.1	0.3	69.2	0.0	3.1	4.3	21.1	86.6	6.6	14.5	205.7			

2. 実測結果に基づく運用実態の把握

2.1 ラック別電力消費量

表1に各架列別の1時間当たりの平均電力消費量を月別に表した。2018年6月までは室全体で約100kWh、7月以降は150~180kWh程度であり、12月に再度負荷が減少し110kWh以下となった。2019年2月~6月に負荷は100~120kWhの範囲内で安定し、7月から徐々に負荷が上がっていた。なお、2018年9月は北海道胆振東部地震の影響で一時的に負荷が減少している。2019年3月から負荷が回復し、200kWhまでに推移している。定格100kWの空調機が13台設置されていることを考慮すると、最大負荷率は僅か15.4%にしかない。

2.2 負荷の推移および解析対象期間

表2に異なる段階の運転状況に応じた期間を示す。2018年4月11日から11月22日までの期間はI期~III期とした。その中で、7月5日にCD列に大きな負荷が加わったことにより、7月6日以降をII期とした。なお、地震により負荷が減少していた期間の結果は扱わないこととする。11月21日以降空調機最適制御方法のための試運転期間が続き、また負荷も低下したため、12月14日以降をIII期とし

表-2 運用状況概要

導入期	2017	12/1	計測データ収集開始、空調機2台運転(AHU6、AHU7)
I期	2018	2/5~15	サーバ増加
		2/20~4/10	SA温度23°Cに固定(以降前面温度を基準に設定変更有り)
II期	2018	4/11~5/24	I A期(4/11~5/24) (負荷約100kW)
		5/25	実測csvフォーム変更
		5/26~7/4	I B期(5/26~7/4) (負荷約100kW)
III期	2018	7/5	CD列サーバ搭載
		7/6~9/5	II A期(7/6~9/5) (負荷約170kW)
		7/27	間接外冷停止温度変更(24°C→16°C)
		9/6	地震によるサーバ負荷の減少
		9/19	サーバ負荷が元に戻る
IV期	2019	9/20~11/20	II B期(9/20~11/20) (負荷約150kW)
		11/21~22	空調機試験運転、以降頻繁に風量等の空調機設定変更
V期	2019	12/14~1/21	III期(12/14~1/21) (負荷75~85kWh、空調機7台運転)
		1/22~2/25	IV A期(1/22~2/25) 間接外冷モード最適制御導入
VI期	2019	2/26~9/30	IV B期(2/26~9/30) (負荷100~150kWh)
		9/30~現在	併用モード最適制御試運転中

た。Ⅲ期では空調機運転台数は2台増加して7台とし、室内機ファン回転数を50%に制御して運用していた。さらに、2019年1月22日からサーバ数が増えて、負荷は115kWh程度に回復したため、1月22日から2月25日までをⅣ期、チューニング後をⅣB期とした。9月下旬から、また間接外気冷房併用モードの制御を変更し、Ⅴ期とした。

2.3 空調効率に関する実測結果

図2にはp. PUE^{注1)}およびICT負荷の推移(日別)を示している。Ⅰ期ではp. PUEは1.4~1.9と高い値を推移しており、変動が大きい。一方で、Ⅱ期になるとp. PUEは1.3~1.5程度に改善し、負荷の増加に伴い、ばらつきも軽減される。7月6日~8月17日に外気温度が16℃~24℃の間のp. PUE平均は1.5から1.4に改善する。Ⅲ期では空調機運転台数は増加したが室内機ファンの回転数を抑えて制御して運用したことで、p. PUEが更に減少した。ⅣB期に70%に再び上げていたので、p. PUEが上昇した。Ⅴ期9月下旬から外気温度が低下したこともあり、p. PUEが下がり続けており、12月に最低点1.1に達し、安定していた。この要因は、AHU室内機の風量を70%から40~50%に変更し、運転台数を増やしたことによる。

図2によりこの長い期間のp. PUEは全体として低下の傾向が明らかに示されている。

冬の時期、間接外気冷房システムを稼働する比率が高く、間接外気冷房熱量が140kW程度で安定している。また、図1に示しているように、この時期p. PUEの変動は間接外気冷房熱量の合計値とほぼ一致することが分かった。また、間接外気冷房冷熱量の安定はp. PUEの安定にも寄与している。

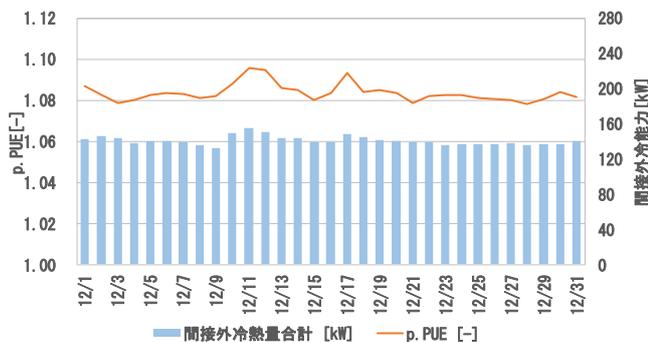


図1 間接外気冷房熱量合計値とPUEの関係

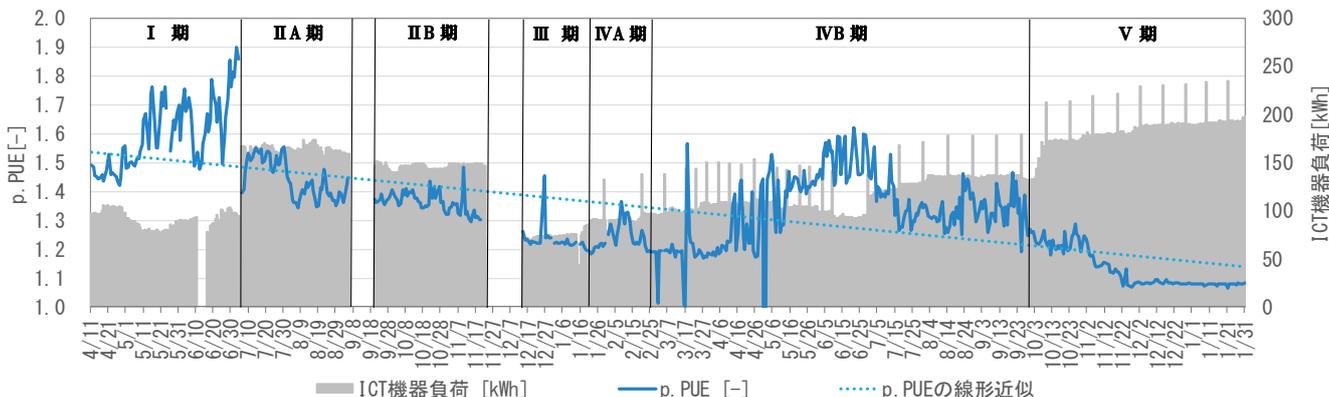


図2 p. PUEおよびICT負荷推移(日別平均値)

3. シミュレーションによる制御法の検討

3.1 シミュレーションモデルと項目設定

本システムのエネルギー効率へ影響を与えるパラメータとして、外気温度及び外気湿度、空調機負荷率、空調機風量(室内機ファン回転数)と空調機給気温度及び還気温度を用いた。

シミュレーションの設定項目及び設定範囲は表3に示す。空調機負荷は20~100kW/台であるが、本シミュレーションのブラインコイル(以下、B/C)定格容量は83.5kW/台で、負荷が定格容量を超える場合は水冷チラーのクーリングコイル(以下、C/C)で超過分の負荷を処理する。空調負荷レンジはコイルの熱交換が可能範囲を想定した。また空調負荷の最大値はB/CとC/C容量の合計値である。定格風量はIデータセンターの空調機の仕様で10,000m³/h×3台である。最低風量7,500m³/hは静圧が確保できるように30,000m³/hの25%で設定し、インバータで調整可能な風量の下限值とした。

本システムのシミュレーションモデルと計算仕様は図3に示す。還気温度RA(B/C)は空調負荷と給気温度SA及び還気湿度から求める。給気温度SA(B/C)は空調負荷と還気温度RA(B/C)及び給気湿度(90% Rh)から計算する。また、空調負荷と外気温度(OA)及び外気湿度から熱交換後のチラーファンの排気温度を算出する。

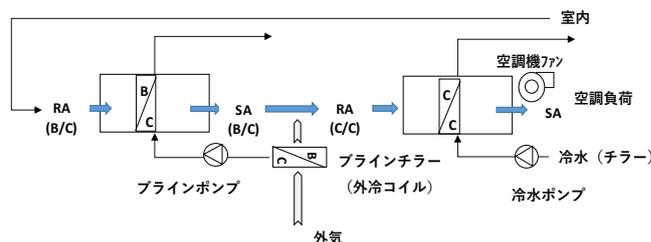


図3 シミュレーションモデル図解

表3 シミュレーション設定項目及び設定範囲

シミュレーション設定項目及び設定範囲	
①外気温度	温度-15~7℃、
②相対湿度	零下15℃、相対湿度100%~7℃、相対湿度90%程度
③空調機負荷	20~100kW
④空調機風量	7,500~30,000m ³ /h
⑤空調機給気温度	13~25℃
⑥還気湿度	50%Rh

3.2 シミュレーター概要と計算目的

3.2.1 計算シートの構成

①計算条件シート

図6の青色セルに計算条件をそれぞれに設定する。条件設定後、図4に示されている計算の流れの矢印に沿って計算が実施される。

②ファン、BC計算、CC計算シート

空調機ファンの仕様を設定し、B/CとC/C及びチラーの仕様を設定する。対数平均温度差を用い、各部分のステータスを判断し、B/C及びB/C/Cとも熱交換可能であれば、ブライン・冷水の最適温度計算する。B/Cの計算ステータスに関するコードを以下に示す。

```
If Range("061") = 0 Then
    Sheet2.Range("C26") = "B/C冷房不可"
    Exit Sub
End If
```

```
If Range("C52") = 0 Then
    Sheet2.Range("C26") = "B/C冷房負荷なし"
    Exit Sub
End If
```

③諸計算シート

エンタルピなどを計算する。

④Simulationシート

計算条件の組合せを事前に設定し（計算条件を組み合わせるコードを利用してこの計算テーブルに読み込む）、設定された組合せの分を逐次計算する。

算出フローチャート及び計算ステータスの判定方式と説明は図4に示す。計算シートの操作画面の一部分は図6に示す。

3.2.2 シミュレーションの範囲

2019年12月末までのBEMSデータを集計し、間接外気冷房空調システム全体の運転状態の推移を把握するとともに、簡易なシステムシミュレーションを行い、適切な制御条件を検討した。また、実際に現地で実証することは長い時間を要するので、シミュレーションによる検討が適している。任意の熱負荷や外気条件の時、エネルギー消費量の変化を考察でき、最適な給気温度と風量を導き出すことも可能である。

今回、システムシミュレーション計算シート（インティ（株）山本氏作成）を用い、各パラメータを変化させることにより、システム全体の消費電力量、エネルギー消費係数と運転効率の変化を検討した。

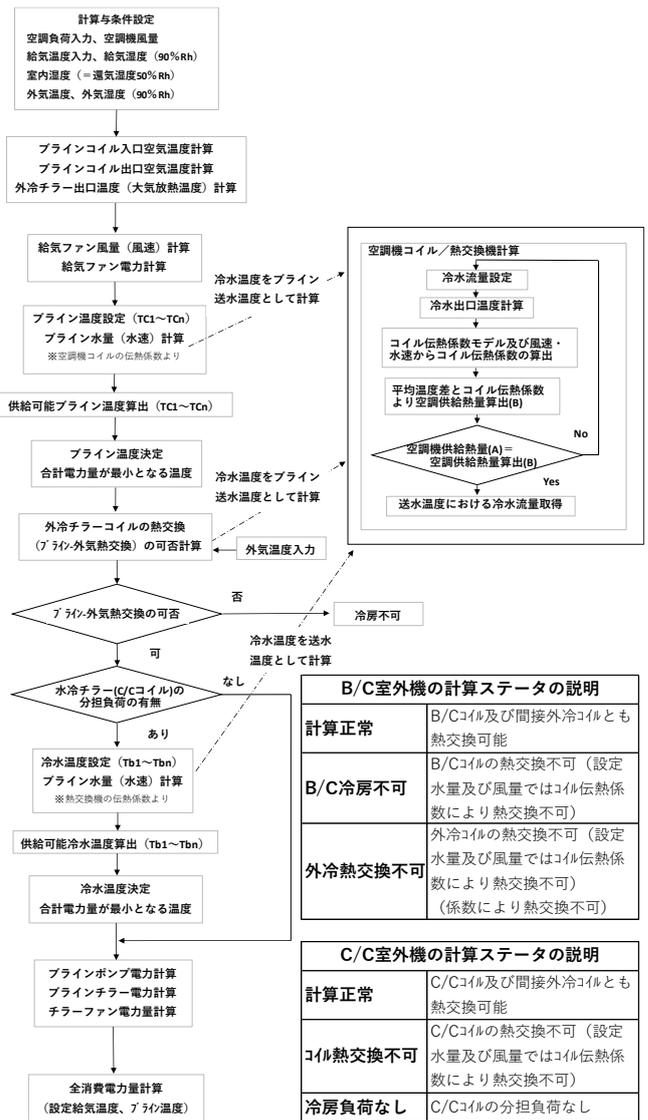


図4 計算の流れと計算ステータスの判断

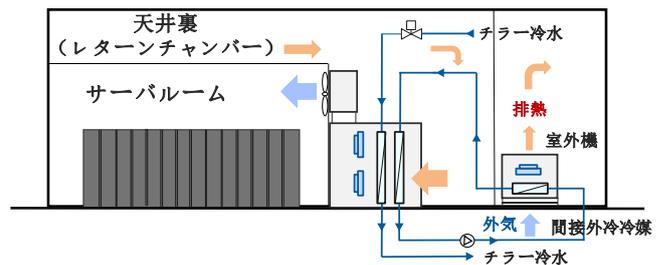


図5 チラー冷水と間接外気冷房冷媒の経路

SIM_No.	kWh/h	m ³ /h	給気温度 (°C)	送気湿度 (%Rh)	計算ステータスと送水温度	行々温度 (°C)	空調機ファン	外冷ファン	ブラインポンプ	チラー単体	チラーファン	チラーポンプ	合計	空調機ファン	外冷ファン	チラーファン	ブラインポンプ	チラーポンプ	送気温度 (°C)	給気湿度 SA(B/C)
1	20	7,500	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.14	5.34	1.49	0.00	0.00	12.50	27.19	0.00	33.86	0.00	21.66327	13.00003
2	20	8,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.16	5.34	1.49	0.00	0.00	13.33	27.19	0.00	33.86	0.00	21.44382	13.00003
3	20	9,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.23	5.34	1.49	0.00	0.00	15.00	27.19	0.00	33.86	0.00	21.07469	13.00003
4	20	10,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.32	5.34	1.49	0.00	0.00	16.67	27.19	0.00	33.86	0.00	20.77673	13.00003
5	20	11,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.43	5.34	1.49	0.00	0.00	18.33	27.19	0.00	33.86	0.00	20.5303	13.00003
6	20	12,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.55	5.34	1.49	0.00	0.00	20.00	27.19	0.00	33.86	0.00	20.32358	13.00003
7	20	13,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.71	5.34	1.49	0.00	0.00	21.67	27.19	0.00	33.86	0.00	20.14769	13.00003
8	20	14,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	0.88	5.34	1.49	0.00	0.00	23.33	27.19	0.00	33.86	0.00	19.9962	13.00003
9	20	15,000	13	50	B/C冷房不可	13	冷房負荷なし	0	1.08	5.34	1.49	0.00	0.00	25.00	27.19	0.00	33.86	0.00	19.8643	13.00003

図6 シミュレーション計算の集計シート

4. 給気温度と風量がシステムに与える影響

4.1 パラメータの設定

まず、外気湿度は90%で一定とした。次は、設定範囲で給気温度は13℃、17℃、21℃、25℃を取り、外気温度-15℃、-8℃、0℃、7℃と組み合わせ、合計16組のデータを設定された。また、給気、外気温度を一定とした前提で、10 kWの間隔で負荷を変化させ、同じ負荷の場合に500m³/hの間隔で風量を設定して各々算出した。

4.2 結果・考察

上記の計算方法で、給気温度21℃、外気温度0℃の場合（表4を参照）、図7に示すようにエネルギー消費係数は風量の低減に伴い小さくなる。即ち、この条件では、空調機風量が小さいほどエネルギー消費係数が低くなり、システム全体的な効率が高くなる。同じ負荷率の場合、風量が小さいほど、効率が高い。

また、風量、給気温度が同じ状況で、外気温度、負荷を変化させた場合のエネルギー消費係数を図8に示す。また、その時の各機器のインバータ周波数を図9に示す。その結果、エネルギー消費係数は外気温度に依存せず、空調負荷率の増加に伴って減少する。この原因は外気温度が低いので、全てのケースにおいてブラインポンプ流量や冷水ポンプの流量が最低流量になるため、同じ電力量となり、増え続ける負荷率で割るとエネルギー消費係数が小さくなる。しかし、負荷90kW以上の場合、B/CとC/Cは同時に稼働しており、チラーファンとチラーポンプ等の電力消費量は同時に増加し、全体的な空調用電力消費量が上昇する。従って、エネルギー消費係数はやや上昇した。

表4 風量、負荷ごとの空調用電力消費量
(給気温度21℃、外気温度0℃)

検証ケース	負荷 [kW]					
	30	50	60	70	90	
風量 [m ³ /h]	7500	4.3	5.1	5.5	5.8	8.9
	10000	4.5	5.3	5.6	6.0	9.1
	15000	5.2	6.0	6.4	6.8	9.9
	20000	6.7	7.5	7.9	8.3	11.4
	30000	12.8	13.6	14.0	14.4	17.5

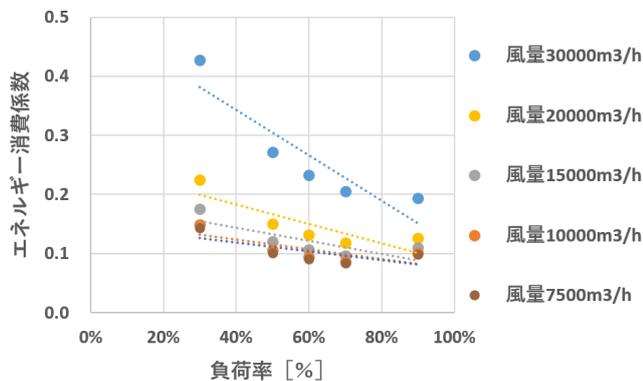


図7 風量、負荷とエネルギー消費係数の関係
(給気温度21℃、外気温度0℃)

5. 総括

1) 空調機の負荷率が小さな場合、空調システムの補機類（ブラインポンプなど）の電力消費量の比率が大きく、効率が極めて低い。

2) 空調機（AHU）の送風用電力は、機器の機内抵抗の比率が大きいため、部分負荷率が小さな場合、空調機の台数制御を行うより、1台当たりの風量を抑制する上で、運転台数を増加させることが空調システム効率の向上に有効である。

3) 冬期間、外気温度が低いので、ブラインポンプ流量や冷水ポンプの流量がいつも最低流量になるため、同じ電力量となる場合が多い。各ポンプの容量選定が重要である。

注 釈

システムエネルギー消費係数とは建物内のエネルギー効率を表す指標である。本稿では、空調用電力消費量を総負荷で割った値を指す。

参考文献

- 井上義之ら：外気冷房を導入したデータセンターの性能評価に関する研究 第5報 機器冷却特性の評価と高効率運用方法の提案, 空調機・衛生工学会大会学術講演論文集, 第3巻, G49, pp. 1-4, 2014.9
- 前田健蔵ら：データセンター空調システムの省エネルギーおよび信頼性向上技術の開発 第5報 シミュレーションを用いた関節が外冷システム運用時の効率向上に関する検討, 空調機・衛生工学会大会学術講演論文集, 第3巻, pp. 93-96, 2018.9
- 町田一樹ら：間接外気冷房型データセンターの高効率運用方法に関する研究 その2 数値流体解析による適正空調給気量の検討, 2019年日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 1169-1170, 2019.9

謝 辞

本報の発表および検証の機会を与えていただいた、さくらインターネット株式会社様に謝意を表す。また、本研究の一部は、民間等共同研究（鹿島建設）および科学研究費助成事業、基盤研究(B)（課題番号：18H01591）による。

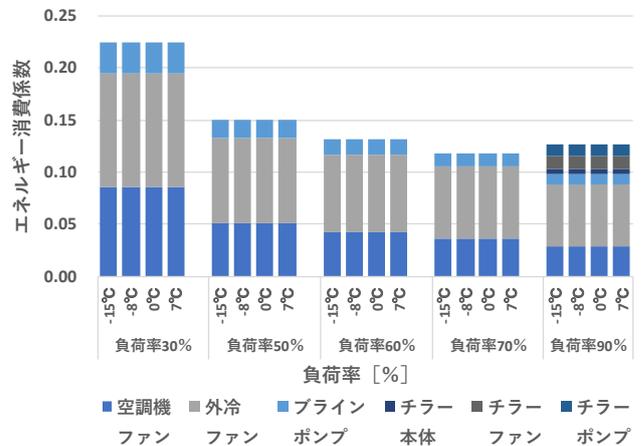


図8 外気温度、負荷とエネルギー消費係数の関係
(給気温度21℃、風量20000m³/h)

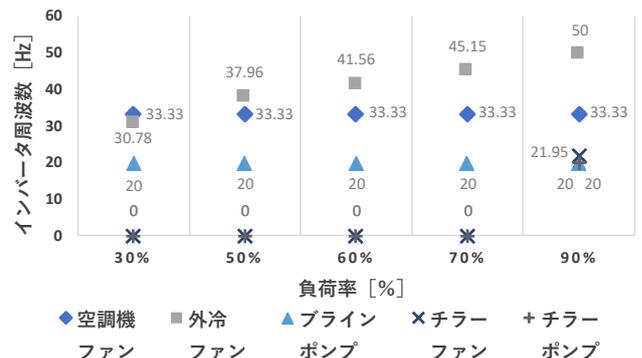


図9 各機器のインバータ周波数