

フリークーリング併用型電算用パッケージ空調機の 性能評価

相澤直樹 ・ 柴田克彦

森川知之^{*1}・毛利哲也^{*1}

The Efficiency Evaluation of Packaged Air-conditioning System for Data Center in combined use Free-cooling Coil

Naoki Aizawa・Katsuhiko Shibata
Tomoyuki Morikawa^{*1}・Tetsuya Mouri^{*1}

ABSTRACT

At the data center, reduction of air-conditioning power is one of main subjects. In this paper, efficiency characteristics of the packaged air-conditioning system which uses the water coil of free-cooling system were examined. Furthermore, the simulation of the energy consumption was carried out and the energy conservation by practical use of the outdoor air cooling in indirectness was evaluated. The annual energy simulation of the direct expansion coil operation combined with free-cooling coil by LCEM tool was performed, and it acquired that the optimal partial load combination which serves as energy saving existed.

1. はじめに

高発熱負荷のデータセンターでは、空調動力の削減が喫緊の課題である。筆者らは、これまでデータセンターの高効率空調システムとして壁面から直接サーバールームに給気する壁吹出し方式を開発し、モックアップ装置での性能検証ならびに実在設備への導入を進めてきた^{1)~4)}。これらの結果から、サーバールームの気流性状として壁吹出し・ホットアイルからの天井吸込みが、室内温熱環境と省エネルギーの両面で効果的であることが分かった。更なる空調システムの省エネルギーには、外気冷房など自然エネルギーの活用を考慮しなければならない。

壁吹出し方式空調システムに対応可能として開発したパッケージ空調機^{5),6)}には、直膨コイルのみによる空冷型と、直膨コイルの前段にフリークーリング利用

の水コイルを設置したフリークーリング併用型の2機種を用意した。そこで、フリークーリング併用型の実運転時の性能を評価するために、モックアップ装置を用いて空冷型の冷却特性とフリークーリング併用型の運転特性を試験した。さらに、得られた特性を基にLCEM（ライフサイクルエネルギーマネジメント）ツール⁷⁾を用いたシミュレーションにより、フリークーリング併用型の年間エネルギー消費と適切な運転方法を検討したので報告する。

2. 性能試験の概要

2.1 試験対象パッケージ空調機

今回試験対象としたパッケージ空調機は、壁吹出し方式空調システムに対応した背面吸込み正面吹出しである。Photo 1に外観を示す。吸込み口から吹出し口の間に、フリークーリング利用の水コイル、直膨コイル、送風機が直列に組込まれている。パッケージ空調機の運転には、吹出し温度優先制御を採用し、還気の

※空調和・衛生工学会大会,F-4(2014)を加筆して再掲

*1 (株)関電エネルギーソリューション

粗熱を水コイルで処理し、目標給気温度となるように直膨コイルの膨張弁開度と室外機の圧縮機回転数で容量制御している。また、給気風量は発熱負荷に応じて手動により変更させている。

2.2 試験対象室

データセンターのサーバールームを模倣した検証試験室を Fig.1 に示す。約 44m²の試験室に 10 台のラックが、コールドアイルを挟んで吸込み面を向け合せて整列している。発熱負荷は、模擬負荷(吸排気温度差 10℃)を利用して最大 54kW である。壁面に設けた吹出し口には H 型グリルを取付けてあり、ラック列に対して上下方向に整流された吹出し気流が到達する。

2.3 試験ケース

性能試験では、まずはパッケージ空調機の基本特性を取得するために、夏期、中間期、冬期に直膨コイル単独での冷却運転を行った。次に水コイルと直膨コイル併用での冷却運転を行い、2 つのコイルの負荷分担と吹出し温度の安定した運転が実現することを確認した。Table 1 に単独運転と併用運転での試験パラメータの一部を示す。発熱負荷に対して水コイル、直膨コイルの各定格能力の比率を部分負荷率で示す。また、給気風量は室内機ファンの入力の影響を確認するため、表に示した発熱負荷に応じた変風量(給排気温度差 10℃で換算した風量に余剰風量 2,500 m³/h を加算)と定風量の試験を行った。吹出し温度は 24℃となるように制御した。なお、併用運転では、水コイルの部分負荷率が所定の値に制御されるよう水コイルの空気側出口温度を設定値とした。各試験ケースとも、パラメータ変更後に吹出し温度、還気温度、圧縮機の周波数がほぼ定常に達するまで運転を継続した。実験データの評価には、監視システムにて 10 分間隔で収集しているデータから、定常と思われる区間の 30 分平均値を用いた。

3. 直膨コイル単独運転の性能特性

Fig.2 に定風量(CAV)及び変風量(VAV)の直膨コイル単独運転での部分負荷率と室内機および室外機の入力を示す。室内機の入力をみると、定風量では部分負荷率に寄らずほぼ一定、変風量では部分負荷率に応じて入力が増加していることから、室内機の入力はファンが支配的であることを確認した。また、室外機の入力を見ると、定風量、変風量とも中間期、冬期では部分負荷率に応じてほぼ線形的に増減しているが、夏期では部分負荷率の増加に伴い入力が急激に増加する傾向

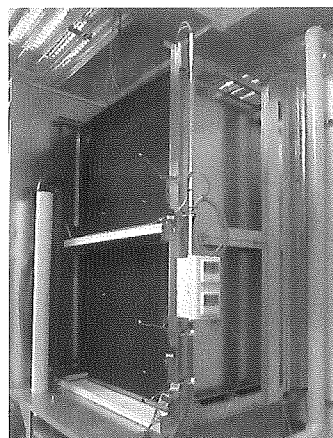


Photo 1 Packaged Air-conditioning System for IDC

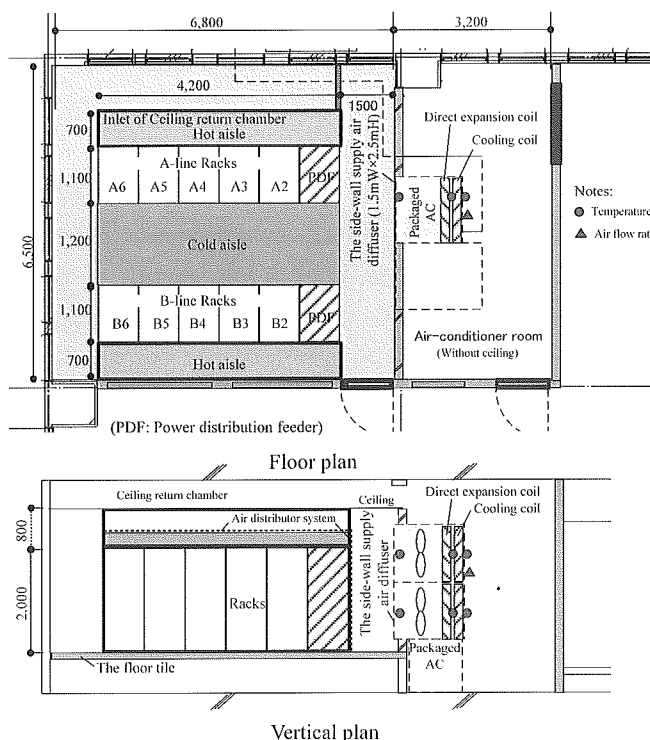


Fig. 1 Schematic diagram of the model room and measurement points of temperature

Table 1 Experimental condition

	Heating load [kW] (at 54kW)	Partial load [%]		Supply air [m ³ /h]	Set point of Cooling coil [°C]	Set point of PAC [°C]	Test case
		Cooling coil	PAC				
Test of direct expansion coil only	100	0	100	18,011	24.0	—	FC/R-24-100(100/0)
	90	0	90	16,974	24.0	—	FC/R-24-90(90/0)
	80	0	80	15,318	24.0	—	FC/R-24-80(80/0)
	70	0	70	13,784	24.0	—	FC/R-24-70(70/0)
	60	0	60	12,302	24.0	—	FC/R-24-60(60/0)
	100	60	40	18,264	27.5	24.0	FC/R-24-100(60/40)
Test of cooling coil and direct expansion coil jointly	90	50	40	16,999	27.8	24.0	FC/R-24-90(50/40)
	80	40	40	15,583	28.2	24.0	FC/R-24-80(40/40)
	70	30	40	14,045	29.3	24.0	FC/R-24-70(30/40)
	60	20	40	12,551	29.3	24.0	FC/R-24-60(20/40)
	50	10	40	10,563	30.1	24.0	FC/R-24-50(10/40)
	40	0	40	8,906	—	24.0	FC/R-24-40(0/40)
	40	5	35	8,906	30.3	24.0	FC/R-24-40(5/35)
	50	15	35	10,613	29.3	24.0	FC/R-24-50(15/35)
	60	25	35	12,107	28.6	24.0	FC/R-24-60(25/35)
	70	35	35	14,028	28.1	24.0	FC/R-24-70(35/35)
	80	45	35	15,562	27.7	24.0	FC/R-24-80(45/35)
	90	55	35	17,211	27.3	24.0	FC/R-24-90(55/35)
	100	65	35	18,651	27.0	24.0	FC/R-24-100(65/35)

が確認できた。Fig.3 に部分負荷率と COP の関係を示す。ここでの COP は、室内機の空気側出入口エンタルピー差と風量から求めた熱量を、室外機入力と室内機入力の合計で除した値である。図より、定風量では部分負荷率の増加に応じて COP が増加する傾向が見られるが、変風量では部分負荷率 50%前後をピークに上に凸の傾向が見られる。次に、変風量での外気温度と COP の関係を Fig.4 に示す。図より、外気温度が凡そ 20℃を境に異なる傾向が見られる。20℃より高い温度範囲では外気温度と負の相関があり、20℃より低い温度範囲では外気温度との明確な相関が見られない。なお、COP の打点が散布している主な要因は、部分負荷

率によるものである。これらの結果から、直膨コイルの単独運転における COP の推定式を次のように整理した。

① 外気温度 < 20℃

$$\text{COP} = 3.7065 + 0.24133 \times \text{PL} - 0.00235 \text{PL}^2 \quad (1)$$

② 外気温度 ≥ 20℃

$$\text{COP} = 19.704 - 0.378 \times \text{OT} - 0.04468 \times \text{PL} + 0.00021 \text{PL}^2 \quad (2)$$

ここに、PL：部分負荷率(%), OT：外気温度(℃)

Fig.5 に外気温度で整理した試験値と推定値、Fig.6 に部分負荷率で整理した試験値と推定値を示す。比較的良好に一致している様子が確認できる。

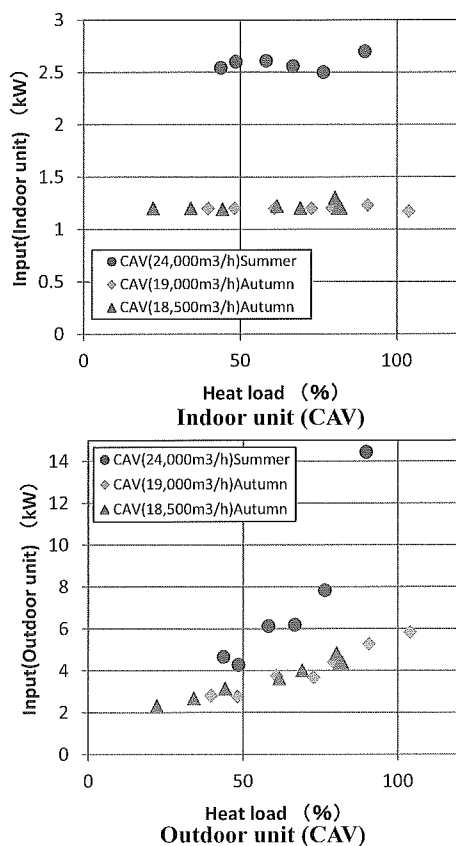


Fig. 2 Heat load and input of Indoor unit and Outdoor unit

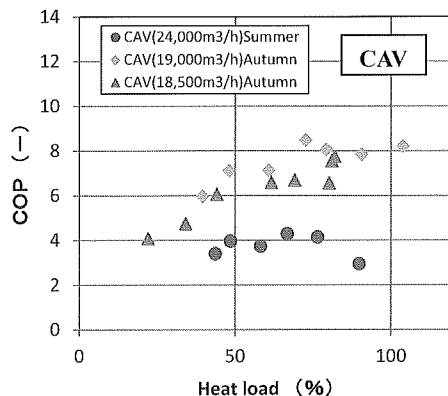
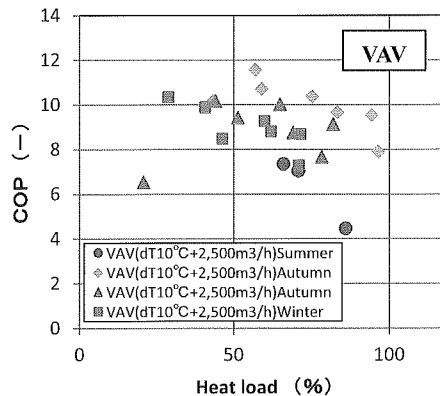
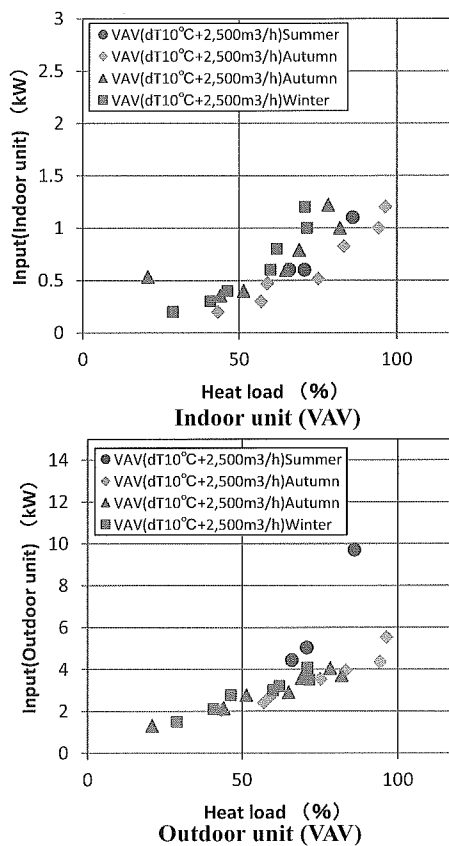


Fig. 3 Partial load characteristics of COP



4. 水コイルと直膨コイル併用運転の性能特性

4.1 併用運転の状況

水コイルと直膨コイル併用運転では、直膨コイルの出力が35～40%の範囲に収まるように、負荷率に応じて水コイルの出力を0～65%で制御した。ここで、直膨コイルの出力は、低負荷運転でのサーモ off 制御の作動による吹出し温度の急激な変化が生じないように、圧縮機容量制御の下限値としたことに依る。水コイルの容量は、空気側出口温度を設定値として制御した。なお、運転条件は前述の Table 1 に依る。Fig.7 に並列運転の状況をトレンドグラフで示す。負荷に追従して水コイルと直膨コイルの合計出力が変動している。水コイルの往還温度と二方弁開度の推移から、流量により水コイルの出力が制御されている様子が確認できた。

4.2 性能試験の結果

Fig.8 に併用運転時の水コイルと直膨コイルの負荷分担を示す。ここでの試験条件は、発熱負荷を試験装置の定格 54kW の 40%～95%まで変動させた。負荷に応じて水コイルの出力が変化し、直膨コイルの出力が負荷率 40%程度の安定した運転となっている。なお、直膨コイルの出力が多少変化しているのは、水コイルの制御を優先したため、処理熱量の不足分を直膨コイルで賄った結果による。

Fig.9 に COP の部分負荷特性を示す。ここでの COP は、直膨コイル単独の出力および水コイルと直膨コイル併用の出力を、室外機入力と室内機入力の合計で除した値で、フリークーリングの冷却塔動力やポンプの搬送動力を含んでいない。直膨コイル単独の出力から算出した COP(Single)では、直膨コイルの出力がほぼ一定にも係わらず、負荷率の増加に伴う風量の増加で室内機の入力が大きくなるため、COP(Single)が低下する。

一方、水コイルと直膨コイル併用の出力から算出した COP(Dual)では、負荷率の増加に伴い COP が上昇し、水コイルによる省エネルギー性の向上が確認できた。

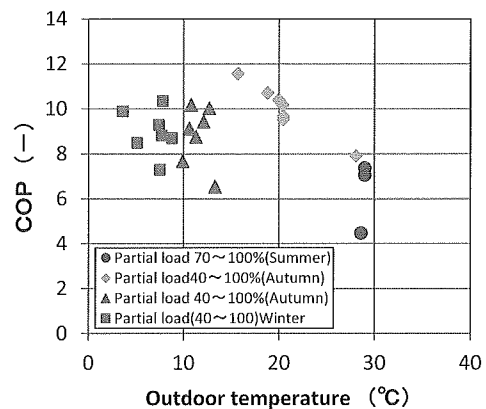


Fig. 4 Outdoor temperature characteristics of COP

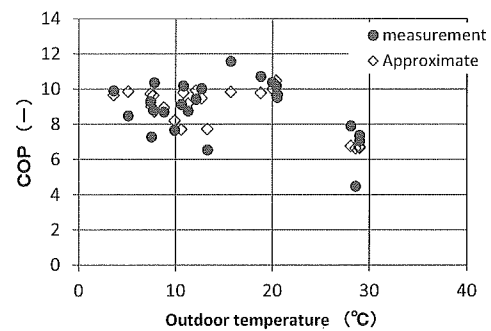


Fig. 5 Comparison of measurement and approximate

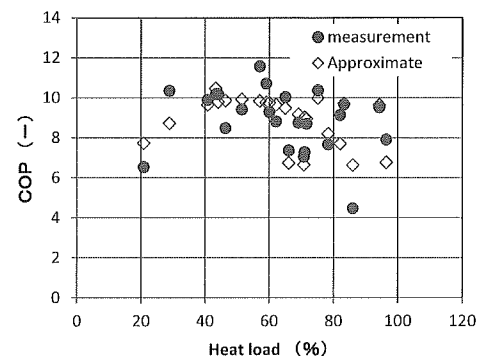


Fig. 6 Comparison of measurement and approximate

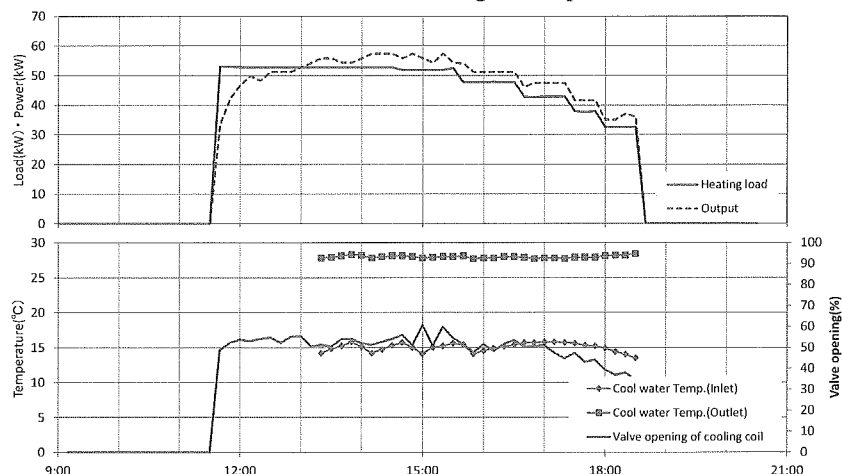


Fig. 7 Trend of heat load and operate condition by cooling coil and direct expansion coil jointly

5. エネルギー消費の年間シミュレーション

5.1 シミュレーションモデル

フリークーリング利用水コイルの年間エネルギーシミュレーションには、LCEM ツールを活用した。Fig.10 に計算モデルのオブジェクト構成をブロック図で示す。現時点で国土交通省からリリースされている LCEM Ver3.10 には、フリークーリングシステムのオブジェクトが登録されていないため、ここでは LCEM Ver3.10 のオブジェクト集から開放式冷却塔とポンプ、水-水熱交換器を転用し、それらを組合せることでフリークーリングシステムのオブジェクトを作成した。また、室内機の水コイル部分には、汎用の空調機オブジェクトを採用した。外気条件は、気象庁のホームページに掲載されている大阪市 2013 年の 1 時間ごとの気象データ 8,760 時間分とした。

5.2 計算手順

計算手順を Fig.11 に示す。水コイル、直膨コイルとも定格出力 28kW×各 2 台の能力を持つとした。フリークーリングシステムから水コイルのエネルギーシミュレーションを LCEM ツールで行い、この結果として得られた未処理負荷が発生した場合は、水コイルの処理を取りやめ、すべての負荷を直膨コイルで処理するとした。これは、LCEM ツールで水熱源の水コイルと空冷の直膨コイルを連成させて安定解を得ることが困難であったからで、連成解については今後の課題である。したがって、今回のシミュレーションは、水コイルもしくは直膨コイルの何れかを単独運転した結果となる。なお、直膨コイルの消費エネルギーは、式(1),(2)から COP を算出し、室内機と室外機の入力に割り戻した。また、給気風量・温度の運転条件は Table 1 による。

5.3 計算結果

負荷率とフリークーリング利用水コイルの年間処理時間を Fig.12 に、水コイルと直膨コイルの処理熱量を Fig.13 に示す。負荷率の増加に伴い水コイルで処理できる時間が減少し、直膨コイルによる運転時間が長くなっている。なお、今回の計算では、吹出し温度の設

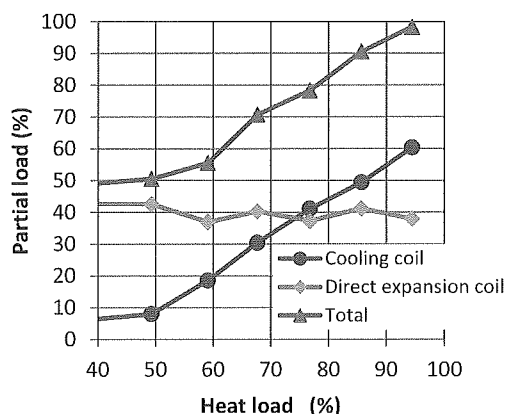


Fig. 8 Partial load of jointly operation

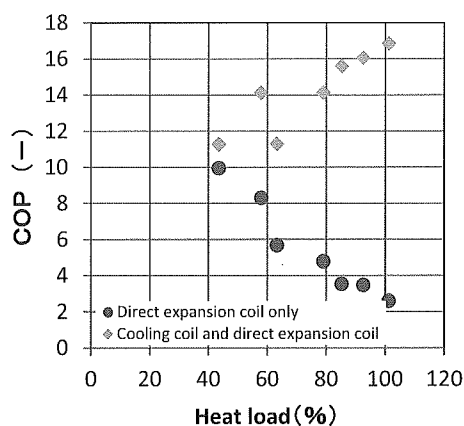


Fig. 9 Partial load characteristics of COP

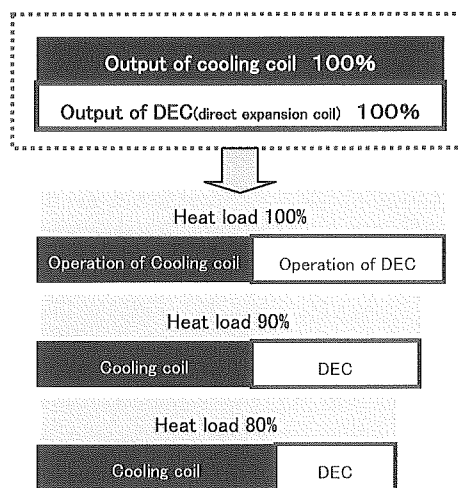


Fig. 11 Schematic diagram of the simulation flow

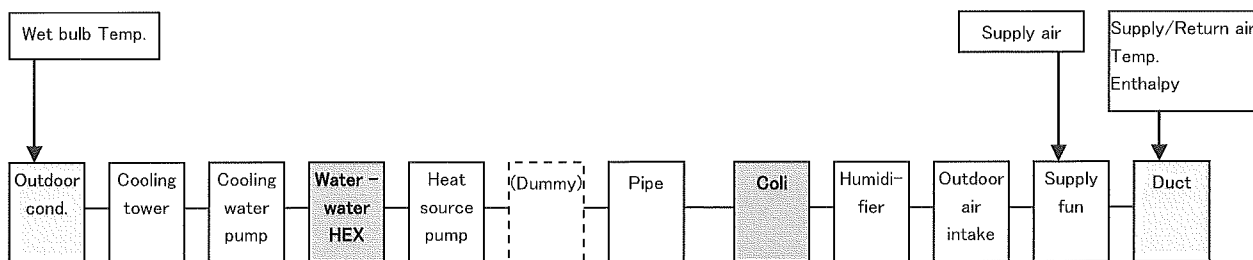


Fig. 10 Schematic diagram of the object structure for LCEM

定を 24℃としたため、負荷率 10%においても水コイルでの処理時間は 95%に留まり、年間を通して水コイル単独の運転は不可能であるとの結果を得た。Fig.14 に、直膨コイル単独と水コイルと直膨コイル切替え運転でのシステム COP を示す。直膨コイル系統の圧縮機は部分負荷運転において高効率となる特性を有しているため、直膨コイル単独では負荷率が低下するほど高 COP となる。一方、切替え運転では、負荷率の増加に伴うフリークーリングシステムの容量に適合した高効率利用と、年間処理可能時間の減少に伴う直膨コイルの運転時間への切替とのトレードオフから、60%をピークに上に凸の特性が得られた。これらの結果、今回の運転条件では、負荷率 60%を境に、高負荷では併用システムでの切替え運転、低負荷では直膨コイルの単独運転が省エネルギーであることがわかった。なお、水コイルと直膨コイルの容量の組合せによっては、分岐点の負荷率が異なると想定される。

6. おわりに

壁吹出し方式空調システム対応可能として開発されたパッケージ空調機の性能検証ならびに LCEM ツールを活用した年間エネルギーシミュレーションから、以下の結果を得た。

- ・直膨コイル単独運転での試験から、外気温度と負荷率をパラメータとする COP の推定式を整理した。
- ・水コイルと直膨コイル併用運転での試験から、制御安定性と負荷変動に対する追従性を確認した。
- ・LCEM ツールを活用したフリークーリング利用水コイルと直膨コイルの年間エネルギーシミュレーションを実行し、負荷率によって省エネルギーとなる運転条件が存在することを確認した。なお、分岐点となる負荷率は、コイル容量の組合せによって異なると想定される。

今後は、コイル容量の組合せによる年間エネルギーシミュレーションのケーススタディを重ねることで、フリークーリング併用型電算用パッケージ空調機の最適設計資料へと纏め上げる所存である。

文 献

- 1) 高西ら: IDC サーバ室向け側壁給気型空調システムの開発(第 1 報) 開発のコンセプト, 空衛講論, 429-432, (2011)
- 2) 相澤ら: IDC サーバ室向け側壁給気型空調システムの開発(第 2 報) モックアップ装置による実証, 空衛講

論, 433-436, (2011)

- 3) 相澤ら: 小浜データセンターの空調設備と試運転時の温熱環境検証, 空衛講論, 1831-1834, (2012)
- 4) 相澤ら: グリーン IDC における壁吹出し空調システムの適用, 空衛講論, 209-212, (2013)
- 5) 相澤ら: IDC-SFLOW 対応パッケージ空調機, 高砂熱学工業総合研究所報, No.27, 5-9, (2013)
- 6) 中村ら: データセンター用高効率空冷パッケージ空調機の紹介, エレクトロヒート, No.196, 46-50, (2014)
- 7) LCEM ツールのダウンロード先 URL

http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html

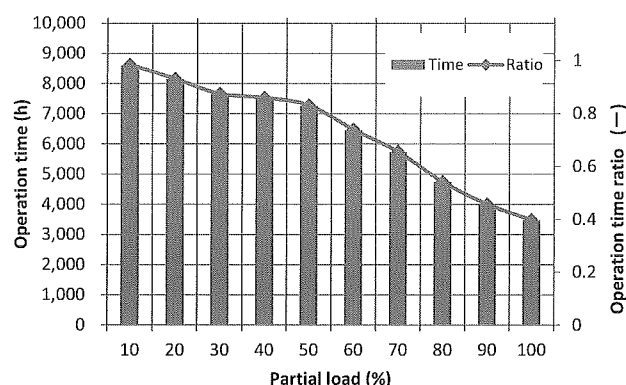


Fig. 12 Operation time of cooling coil

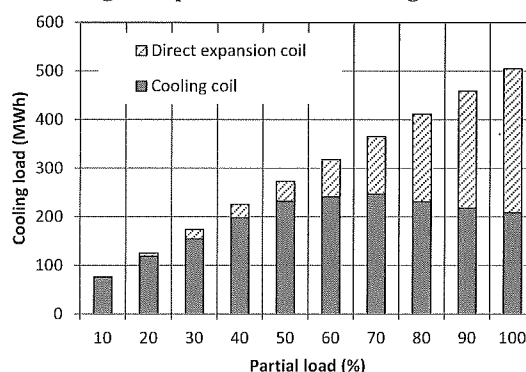


Fig. 13 Cooling load of cooling coil and direct expansion coil

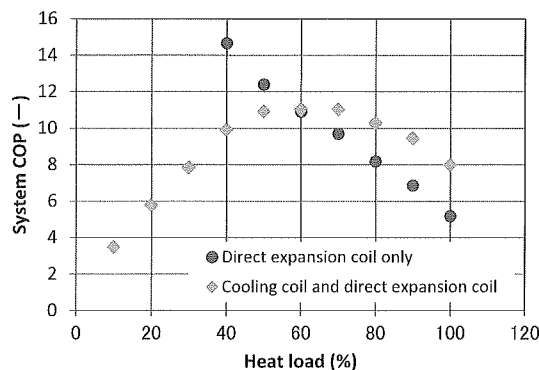


Fig. 14 System COP of cooling coil and direct expansion coil jointly