

ZEB 時代に対応するビル用マルチエアコンの開発と検証

Development and Performance analysis of multiple split air-conditioning system for “net-Zero Energy Building”

ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター

Daikin Industries, Ltd. Technology and Innovation Center

松井伸樹

Nobuki Matsui

キーワード：ZEB (Zero Energy Building)、ビル用マルチエアコン (Multiple split air-conditioning system)、潜熱・顕熱分離空調システム (Air conditioning system with individual humidity and temperature control)、部分負荷効率 (Partial load efficiency)、冷媒蒸発温度 (Refrigerant evaporation temperature)

1. 開発の背景

近年、建築物の省エネルギーを推進する目的で、ネット・ゼロ・エネルギーの実現を目指す取組が実施されている。このような中、業務用建築物のエネルギー消費量の冷暖房熱源、空調搬送用熱源が占める割合は 40% を越えており、業務用建築物のエネルギー消費量削減には空調消費エネルギー削減が強く求められている。

こうした状況の中、ヒートポンプ空調機のエネルギー効率は、トップランナー方式での省エネ規制の下で飛躍的に向上してきた。ここでのエネルギー効率の向上は、図 1 に示すように主に二つの手段で主に実現されている。

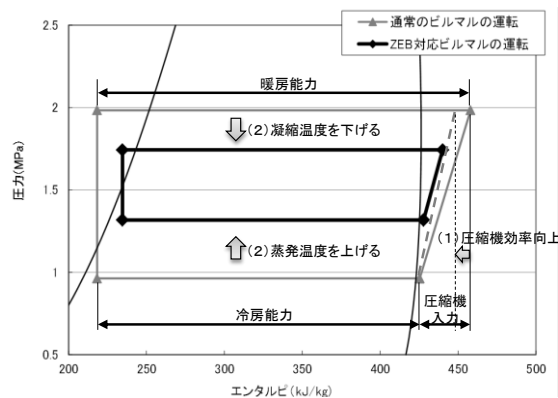


図 1 空調機の省エネルギー手法

(1) 圧縮機の効率を高くすることによって、冷媒圧縮に必要な動力を低減する。

(2) 冷熱・温熱を取り出すところである熱交換器の効率を高め、冷媒と空気の温度差を小さくすることによって圧縮機の必要仕事を低減する。

一方、図 2 に示すように、(2) の手段で冷房運転時におけるエネルギー効率を高めていくと冷媒の蒸発温度が高くなることによって、省エネルギーではあるが除湿されないといった快適性の観点からは問題のある空調機になっていくことが懸念される。つまり、除湿量とエネルギー効率はトレードオフの関係にあり、必要除湿量確保による快適性の維持を大前提とすると、エネルギー効率の向上には限界があった。この課題を解決するためには、1 台の機器で湿度と温度を同時にコントロールする現行の空調システムから、湿度と温度を別々の機器で制御する潜熱・顕熱分離空調システムが期待されている。潜

熱・顕熱分離空調を実現するためには、高効率に湿度を処理する機器が必要となる。このような中、吸着現象を利用して湿度処理を行うデシカント技術を用いた外調機が注目を受けている。

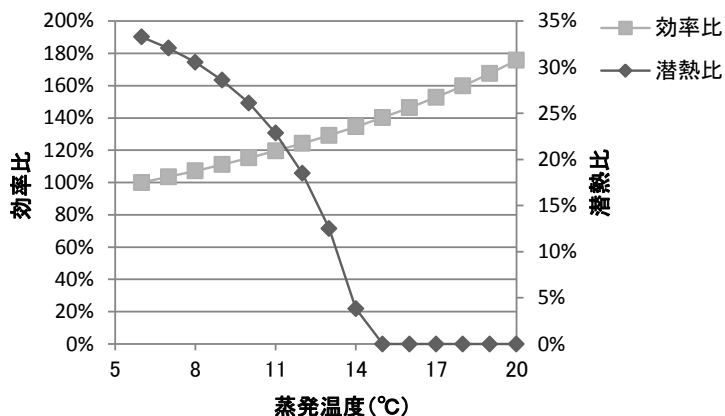
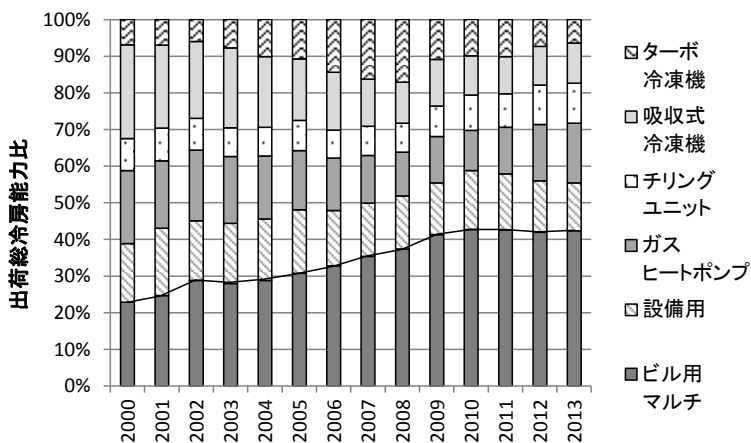


図 2 冷媒蒸発温度と効率、潜熱処理能力の関係

図 3 に業務用空調機の出荷総冷房能力比率を示す。図に示すように、ビル用マルチエアコンの出荷総冷房能力割合は 4 割強と業務用空調機の中で大きな割合を占めている。従って、業務用空調全体のエネルギー消費量削減を実現には、ビル用マルチエアコンのエネルギー消費量削減が必須である。



日本冷凍空調工業会の空調機出荷状況調査結果より推測

図 3 業務用空調機における出荷総冷房能力比率

図 4 にビル用マルチエアコンを用いた潜熱・顕熱分離空調システムを示す。主として潜熱を処理するヒートポンプを用いた調湿機能付外気処理機（HP デシカント）と、顕熱処理に特化したビル用マルチエアコンを組合せて構成されている。

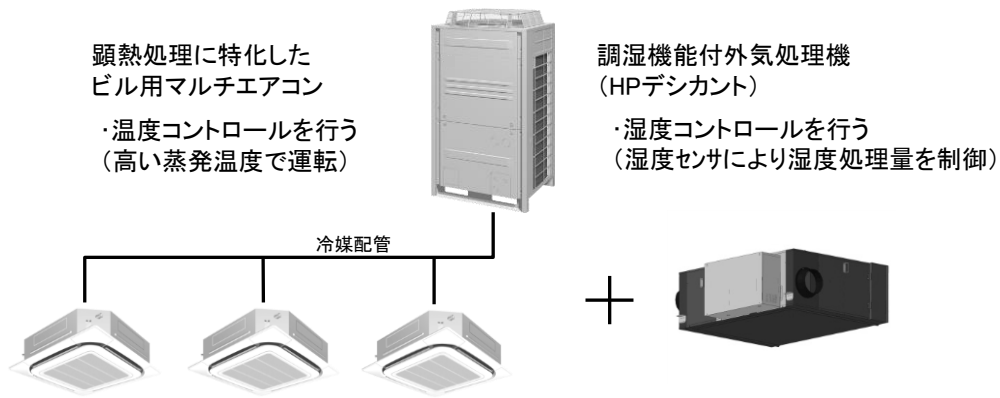


図 4 ビル用マルチエアコンを用いた潜熱・顕熱分離空調システム

本報においては、ビル用マルチエアコンを用いた潜熱・顕熱分離空調システムの性能向上を狙った開発を行い、実在の建築物における実証試験結果および省エネ建築物（グリーンビルディング）に本システムが採用された際の性能予測結果について報告する。

2. 調湿機能付き外気処理機（HP デシカント）

2-1. 従来のデシカント空調機の課題

図 5 に一般的な 2 ロータータイプのデシカント除湿機の構成図を示す。従来のデシカント方式は、吸着材を塗布したローターを回転させて湿度を含んだ高湿度の空気をローターに流通して除湿し（①→②）、水分を含んだローターを熱源で温めた空気（⑤→⑥）で再生する（⑥→⑦）ことによって乾燥させることにより調湿（除湿）運転を実現している。

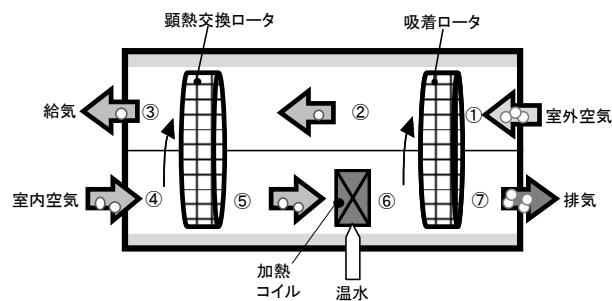


図 5 従来のデシカント外調機の構成図（2 ローター方式）

運転時の各操作ポイントにおける空気線図を図 6 に示す。暑く湿った空気①が吸着ローターを流通し、水分を吸着することによって乾燥するとともに、水分を吸着する際に吸着熱が発生するために温度が上昇し、熱い乾燥した空気②が得られる。この時、空気②は吸着ローターを再生する空気⑥の相対湿度で理論的な吸着限界線が存在し、33℃、22.0g/kg の空気を 9.0g/kg まで除湿するためには 68℃の理論再生温度が必要となる。実際の装置上では熱伝達ロス（熱交換器－空気、空気－ローター）、ローターの熱容量のロスなどが積み重なるため 80～100℃の高温の再生温度が必要となり、電気ヒーターなどの低効率な熱源での再生が必要となるため、ガスエンジンの排熱など高温の排熱発生源が存在する場所や冷却吸着では得られない超低湿度な空気を必要とする特殊用途でしか普及してこなかった。

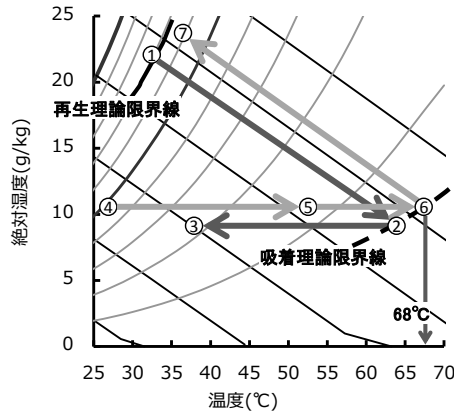


図 6 従来のデシカント外調機空気線図（2ローター方式）

2-2. 直接冷却吸着、直接加熱再生

デシカント除湿機を、一般的な空調機として普及させるためには大幅な効率向上が必要であった。効率を向上させるために吸着材の再生をヒートポンプの凝縮熱（約 40°C）程度の低温で実現可能とする必要があった。そこで、吸着理論限界の低温化を実現するために、直接冷却しながら吸着、直接加熱をしながら再生を行った際の理論再生温度の試算を行った。

直接冷却吸着および直接加熱再生を実施した際の各操作ポイントにおける空気線図を図 7 に示す。図に示すように、吸着熱を吸着しながら直接除熱することによって図 6 と同じ空気条件において理論再生温度が 36°C に低減した。これによって、直接冷却吸着、直接加熱脱着が実現できれば、ヒートポンプの凝縮熱による吸着材再生が実現可能であることがわかった。

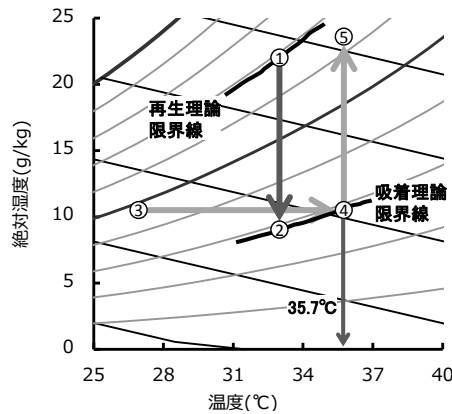


図 7 直接冷却吸着、直接加熱再生空気線図

2-3. 熱交換器一体型デシカントデバイス

実際に直接冷却吸着、直接加熱再生を実現するために空調機の熱交換器のフィン上に吸着材をコーティングしたデバイスの開発を実施した。開発したデバイス、熱交換器一体型デシカントデバイスの外観図を図 8 に示す。

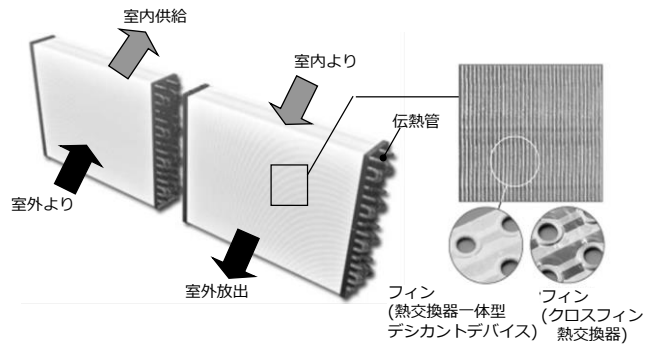


図 8 熱交換器一体型デシカントデバイス

図に示す通り熱交換器一体型デシカントデバイスは、通常の空調機に使用されるクロスフィン熱交換器の表面上に吸着材の塗膜を形成したものである。開発したデバイスをヒートポンプサイクルに組み込んだ機器の開発を実施した。二つの熱交換器一体型デバイスをヒートポンプ空調機の冷媒回路に接続することにより、再生を行う熱交換器一体型デバイスは凝縮器として動作し、吸着を行う熱交換器一体型デバイスは除湿器として動作する。従って、直接冷却吸着によって吸着熱を除熱することにより暑い湿った空気を冷たく乾燥した空気にすると同時に、発生する凝縮排熱を利用して吸着材の再生を行うことが出来る。

3. 潜熱・顕熱分離空調システム

ビル用マルチエアコンは、冷媒を直接室内に搬送することによって冷暖房を行う直膨空調システムである。直膨空調システムの利点として、大きく以下の三つが考えられる。一つ目は、エネルギー密度が高い冷媒を搬送して空調に必要な熱量を供給するため搬送に必要な動力が小さいこと、二つ目に熱交換を行う回数が少ないため、潜熱・顕熱分離空調システムのように冷媒と空気の温度差を小さくすることによってエネルギー効率を高める方式に適していること、三つ目に、冷媒の膨張機構を室内側に有するため、オフィスビルの空調負荷の大半を占める冷房運転時に搬送途上の配管における熱損が発生しないことである。

図 9 に典型的なオフィスビルにおける、空調機の運転負荷率と年間の空調負荷積算値の関係を示す。図の通り、負荷率 30～50%程度の比較的低い負荷率が年間空調負荷に占める割合が大きいことがわかった。

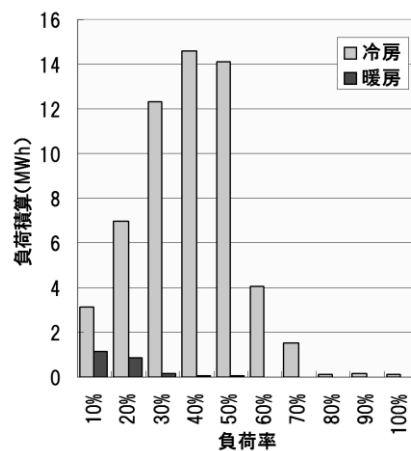


図 9 典型的なオフィスビルにおける負荷率と負荷積算値の関係

そこで、直膨空調システムの利点を生かしながら、必要な空調负荷に応じて冷媒圧力を制御することにより、特に部分负荷時の効率を向上させることによって、年間での空調由来のエネルギー消費量削減を狙ったビル用マルチエアコンの開発を行った。開発したビル用マルチエアコンの特性を、図 10 に示す。図に示すように必要な空調能力に応じて、冷媒圧力を可変にする制御を採用することによって、従来のビル用マルチエアコンと比較して、部分负荷時における効率を大幅に向上させることに成功した。

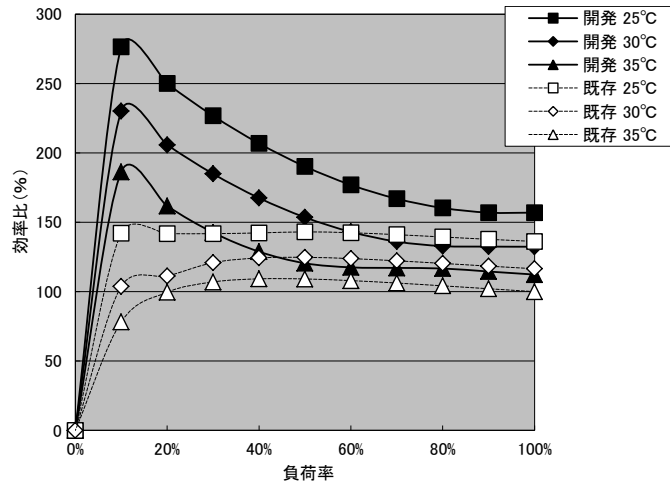


図 10 開発を行ったビル用マルチエアコンの特性

開発のポイントの一つ目は、潜熱・顕熱分離空調を採用することによって、蒸発温度の上限を大幅に高くすることが可能となったことである。二つ目は、顕熱制御処理に特化したビル用マルチエアコンに適した圧縮機の開発である。ビル用マルチエアコンに広く用いられているスクロール形圧縮機は、固定スクロールと作動スクロールを差圧で押し付けあうことで、圧縮室を形成しているため、差圧が低下する（圧縮機の圧縮比が低下する）と、冷媒の漏れを発生し運転効率が大幅に低下するという特性をもっていた。従って、高低差圧をある程度以上低下させることが出来ないため、蒸発温度の上限を大幅に高くすることが出来なかった。そこで低差圧、低回転の領域で運転効率が低下しにくいスクロール圧縮機を新規開発して搭載することで、より低い高低差圧（部分负荷運転）での高効率運転を可能とした。

三つ目は、目標温度に対して制御を行う従来の空調システムと異なり、顕熱（温度）と潜熱（湿度）を分離して別々に制御を行うことによって図 11 に示すように潜熱を過剰処理することがなくなるため空調処理熱量が低下することによって、エネルギー消費量の削減を可能とした。

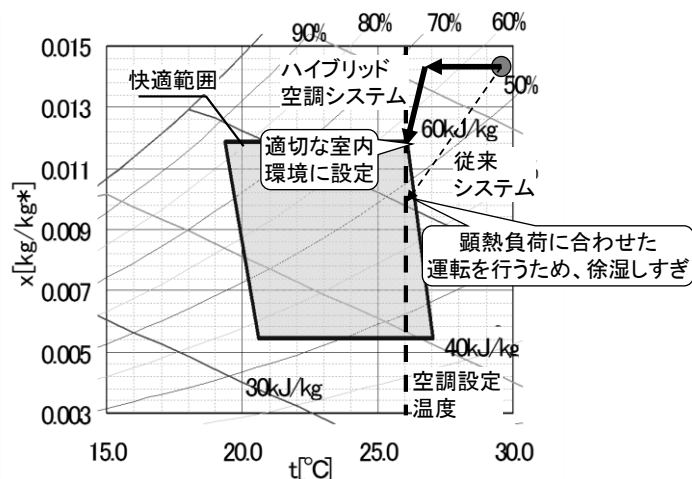


図 11 空調システムの運転目標

4. 実証試験

開発システム（ハイブリッド空調システム）の効果を検証するために、実証試験を行った。

実証試験は、名古屋大学内のオフィスで行った。図 12 に示すように、一つの部屋を実証試験のために二つに分割して従来型の空調システムと開発システムを併設し、同時運転可能として比較検証を行った。導入した装置は、従来システム側は、通常のビル用マルチエアコンと加湿機能＋加熱コイル付全熱交の組合せとした。試験スペースの広さを完全に同一には出来なかったため、以後のエネルギー消費量の数値は全てエネルギー消費量を床面積で割った数値で比較検証を行う。床面積で割っても厳密にいうと使用条件や方位によって空調負荷に差が出る可能性があるため、実運転状態を模擬可能とするエネルギーシミュレーションを作成して比較検証を行った。

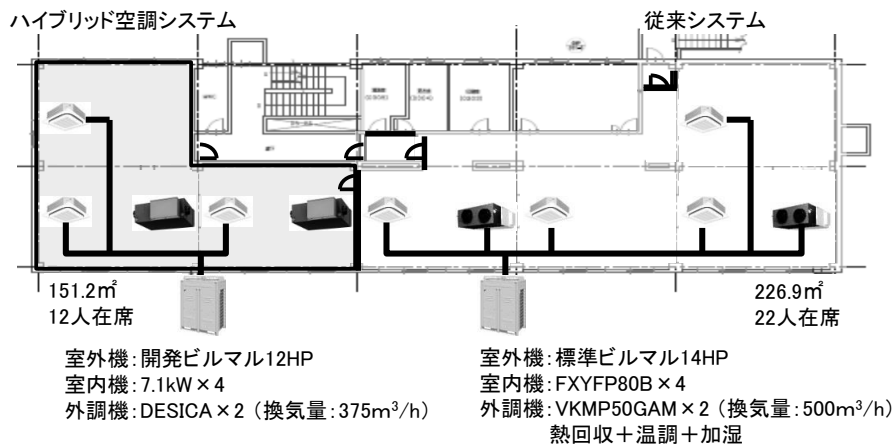


図 12 実証試験サイトの設備据付け概要

4.1 夏季試験結果

6月～9月の間運転を実施し、室内環境と消費電力量の計測を行った。

従来システムとハイブリッド空調システムの、運転期間中の室外温湿度、室内温湿度の1時間毎の平均値を空気線図上に記した図を、図 13, 14 に示す。図に示す通り 28℃設定において、ハイブリッド空調システムは目標室内環境に温度湿度共に制御出来ているが、従来システムは湿度が目標室内環境よりも高い部分に分布しており、除湿不足を発生していることがわかった。東日本大震災以後、社会的な電力不足を背景に、夏季の設定温度をクールビズ設定（28℃設定）で運用されていることが多い。しかしこの結果から、日本の様に夏季の湿度の高い気候で調湿機能を持たない空調システムを 28℃設定で運用すると、除湿不足を発生して快適な室内環境を維持できないことがわかった。

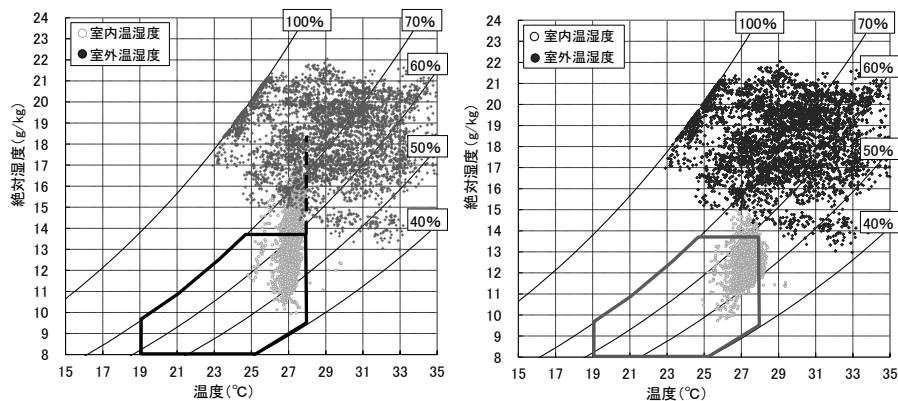


図 13 28℃設定時の室内温湿度環境

また、26℃設定において、ハイブリッド空調システムは28℃設定時と同様に目標室内環境に温湿度共に制御出来ているのに対し、従来システムは湿度が低めに制御されており、過除湿を発生していることがわかった。

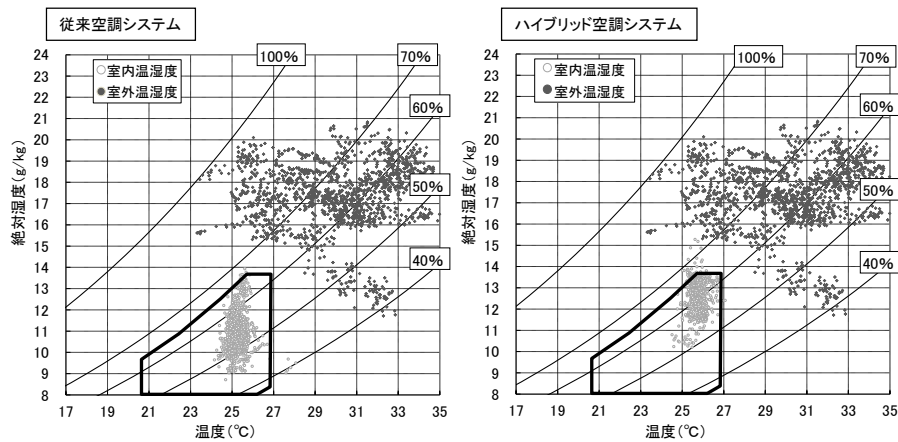


図 14 26℃設定時の室内温湿度環境

室内の執務者に対するアンケート結果を図 15 に示す。執務者の体感においてもハイブリッド空調システムの方がより快適であるとの結果を得た。

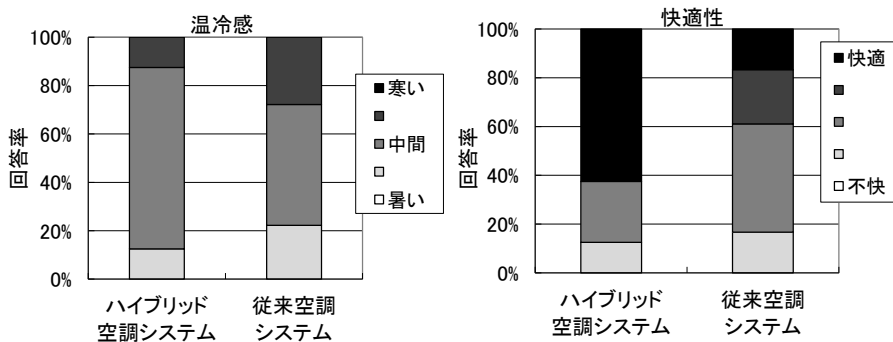


図 15 夏季運転時における在籍者のアンケート結果

夏季試験期間中の空調消費電力を積算した値を、運転時間を1日12時間として1日の消費電力量に換算した値を図 16 (28℃設定時) に示す。消費電力量を約半減できることが確認された。

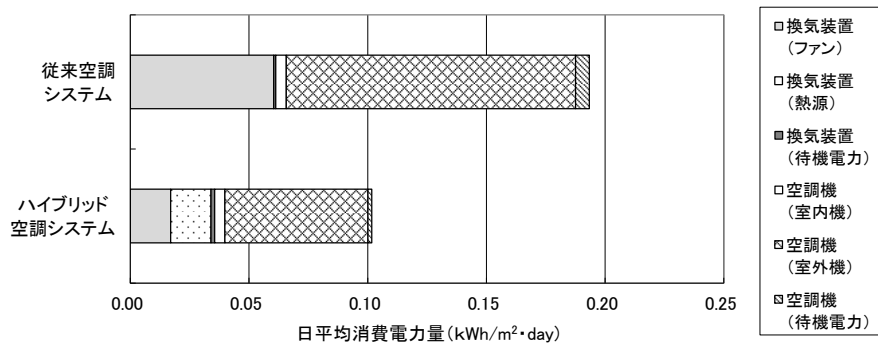


図 16 28℃設定時の日平均消費電力量

4.2 冬季試験結果

冬季試験として、12月～2月の間運転を実施した。冬季試験期間中の空調消費電力を積算した値を、運転時間を1日12時間として1日の消費電力量に換算した値を図17に示す。図に示す通り、消費電力量を30%弱削減できることが確認された。

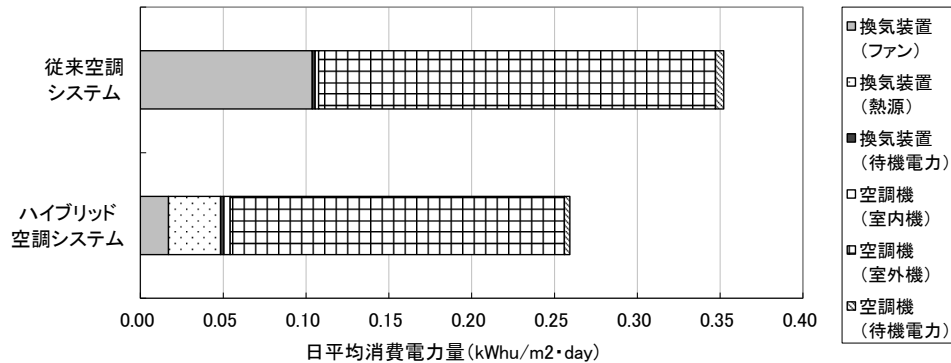


図17 冬季運転時の日平均消費電力量

5. おわりに

直膨方式であるビル用マルチエアコンとデシカント外調機を組み合わせた潜熱・顕熱分離空調システムであるハイブリッド空調システムについて概説した。潜熱、顕熱を分離して処理することによって湿度調節が可能となることによる処理負荷の削減、潜熱処理性能の高いデシカント外調機、顕熱処理に特化することで部分負荷性能を大幅に向上させた高顕熱運転特化型ビル用マルチエアコンの三つを組み合わせることによって、大幅な省エネルギー性能が実現可能となった。

このシステムによって、2020年以降義務化が進むZEBの実現可能性が高まるものと期待する。

<参考文献>

- 1) 池上周司, 松井伸樹, 藪知宏, 「外調機の調湿技術の進展: (2) “湿度”・“温度”個別コントロール空調システム」, 空気調和・衛生工学, vol.82, No.8, 2008, p661-666.
- 2) 池上周司, 松井伸樹, 小林正博, 高橋隆, 藪知宏, 「湿度・温度個別コントロール空調システムの実用化技術開発と実証評価」, 空気調和・衛生工学, vol.83, No.7, 2009, p527-531.
- 3) 松井伸樹, 藪知宏, 池上周司, 高橋隆, 成川嘉則, 「(6)温度・湿度個別コントロール空調システム(技術, 日本機械学会賞[2009年度(平成21年度)審査経過報告]」, 日本機械学会誌, vol.113, No.1098, 2010, p326
- 4) 松井伸樹, 稲塚徹, 藪知宏, 「湿度・温度個別コントロールシステム」, 冷凍, vol.85, No.992, 2010, p472-473
- 5) 松井伸樹, 池上周司, 西村忠史, 「高顕熱形ビル用マルチエアコンとヒートポンプデシカントシステムによる潜熱・顕熱分離空調システム」, 冷凍, vol.86, No.1003, 2011, p420-424
- 6) 松井伸樹, 西村忠史, 林立也, 奥宮正哉, 丹羽英治, 「直膨個別分散空調機を用いた潜熱・顕熱分離空調システムエネルギー性能の実証・評価研究: 第1報 研究概要と研究計画, 平成24年空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 2012, 2729
- 7) 林立也, 松井伸樹, 西村忠史, 奥宮正哉, 丹羽英治, 「直膨個別分散空調機を用いた潜熱・顕熱分離空調システムエネルギー性能の実証・評価研究: 第2報 シミュレーションモデルの構築, 平成24年空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 2012, 2733
- 8) 西村忠史, 松井伸樹, 林立也, 奥宮正哉, 丹羽英治, 「直膨個別分散空調機を用いた潜熱・顕熱分離空調システムエネルギー性能の実証・評価研究: 第3報 フィールド機の開発概要, 平成24年空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 2012, 2737
- 9) 西村忠史, 松井伸樹, 奥宮正哉, 林立也, 佐藤孝輔, 丹羽英治, 「直膨個別分散空調機を用いた潜熱・顕熱分離空調システムエネルギー性能の実証・評価研究: 第4報 開発システムの概要と実証試験結果, 平成24年空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 2013
- 10) 林立也, 佐藤孝輔, 西村忠史, 松井伸樹, 奥宮正哉, 丹羽英治, 「直膨個別分散空調機を用いた潜熱・顕熱分離空調システムエネルギー性能の実証・評価研究: 第5報 実測とシミュレーションの比較による開発システムの精度検証, 平成24年空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 2013
- 11) Tadafumi Nishimura, Nobuki Matsui, Masaya Okumiya, “Experimental Evaluation Study of The HVAC System with Temperature and Humidity Independent Control Using Separate Type Air Conditioners”, 11th IEA Heat Pump Conference, 2014