

新菱神城ビルで開発した環境配慮技術

Environmentally Friendly Technology Developed for the Shinryo Shinjo Building

新菱冷熱工業株式会社
SHINRYO CORPORATION
坂本 裕
Yu SAKAMOTO

□キーワード /自然換気(Natural Ventilation)、ダクトレス空調(Ductless air conditioning)、ダイナミックレンジ放射空調 (Dynamic Range Radiant air conditioning)、変風量コアングダ空調 (Variable Air Volume Coanda air conditioning)、Excel 連携制御(Optimal control linked to Excel)

1. はじめに

新菱神城ビルは、東京都千代田区神田に建つ中規模テナント事務所ビルである。建築主である新菱冷熱工業と設計監理者の三菱地所設計と芝浦工業大学秋元孝之研究室の共同研究によって、国内初の環境配慮設備技術を多数導入し2020年6月に竣工した。

環境性能としてはBELS評価において★5およびZEB Ready、LEED認証ではGOLDランクを取得している。また、このビルで開発した技術がもたらす省エネルギー性能やその開発・評価プロセスは、関連学術団体からも高い評価を受けており、第60回空気調和衛生工学会技術賞をはじめ世界レベルの技術賞として、ASHRAE（米国暖房冷凍空調学会）が主催する2023 ASHRAE Technology Awardsの“新築オフィスビル部門”において世界最優秀賞を受賞している（図-1）。



図-1 第60回 空気調和衛生工学会賞技術賞（左）
2023 ASHRAE Technology Award First Place（右）

2. 建築概要

建物名称	新菱神城ビル
所在地	東京都千代田区神田多町 2-9-2
延床面積	4,619.55 m ²
階数	地下1階，地上9階
構造	地下：鉄骨造 地上：鉄骨鉄筋コンクリート造
用途	事務所，共同住宅，駐車場
竣工年度	2020年6月
設計監理	三菱地所設計
建築	大林組
空調設備	新菱冷熱工業
電気設備	大栄電気
衛生設備	城口研究所

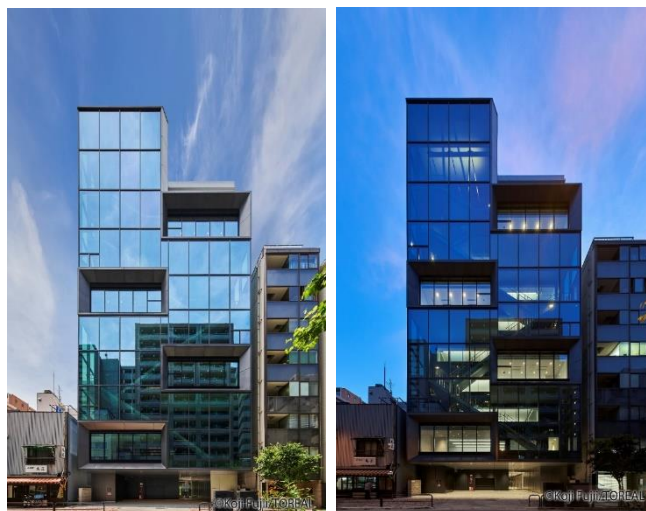


図-2 建物外観

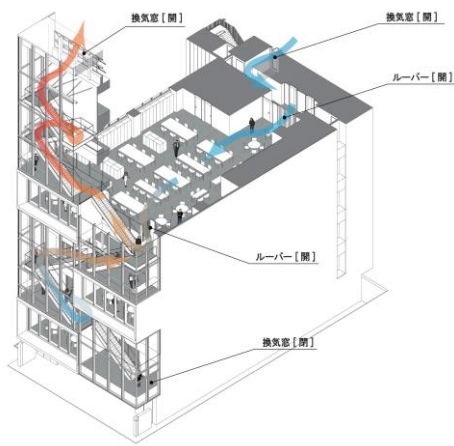
所在地の東京都千代田区多町は、江戸最古の町の一つで現在も趣のある町並みが残っており、このような立地に建つ新菱神城ビルは自然や人とのつながりを大切にしてきた下町らしさを取り込んだ環境配慮型オフィスビルである。また、神田祭の際にはエントランスを町内会のお神輿が鎮座するスペースとして提供するなど地域社会にも貢献をしている（図-3）。



図-3 神田祭時の町会神輿神霊入れ

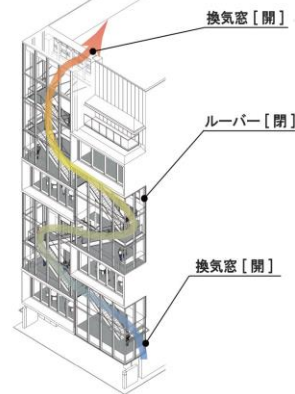
意匠面の特徴は、建物の前面に直通避難階段を配し、ほぼ全面をガラスでおおうシンボリックなデザインとしている。この階段室は中間期にはチムニー効果を利用した自然換気ツールとして、中間期以外も屋外からの侵入熱のバッファゾーンとして空調負荷の抑制など一年を通して空調の省エネルギーにも貢献する（図-4）。

中間期



夏期

ダブルスキンとして、
スキンを抑制。



冬期

サンルームとして日射熱を閉じ込め
スキンを抑制。

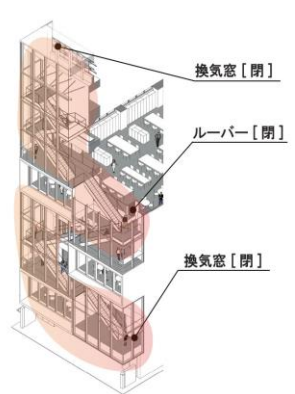


図-4 前面階段室の省エネルギー活用

また、建築プラン計画上で空調設備が大きな貢献をしている。所在地には高さ制限があり一般的な階高では8階建になるところを、全館ダクトレス空調とすることで階高の縮小が可能となり1フロアの増床を可能にした。導入したダクトレス空調は、「ダイナミックレンジ放射空調」と「変風量コアンダ空調」の2種類（図-5）で、いずれも従来のダクトレス空調をベースにしているが、それぞれに独自開発した技術を取り入れることで省エネルギー性能を大きく向上させている。

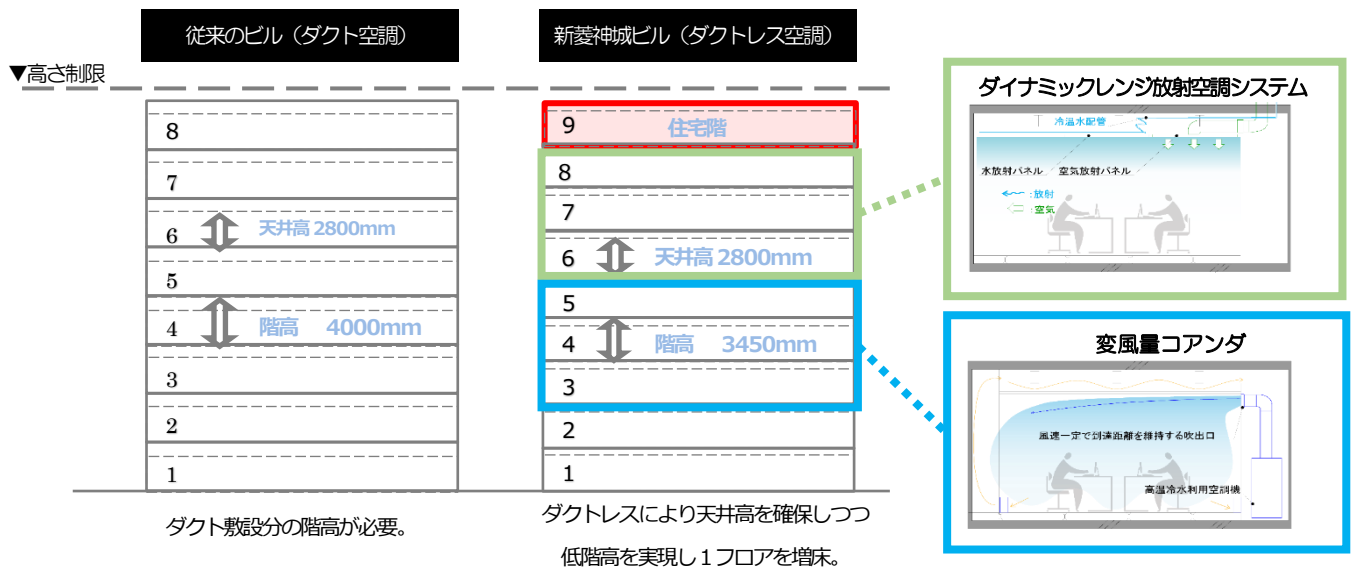


図-5 ダクトレス空調採用による+1フロア

3. 新開発ダクトレス空調

3.1 ダイナミックレンジ放射空調

従来の水式放射空調システムは、熱容量が大きい水で熱を運ぶため熱搬送効率が高いこと、あるいは比較的高い水温（暖房時は低い水温）で熱源機器の効率を高くできることから、省エネルギー性が高い空調方式といわれている。しかしながら、従来の放射空調システムには、以下に示すような省エネルギーを阻害する要素や課題もある。

- ・ダクト敷設スペース、費用対効果、放射パネル結露抑制面などから外気冷房と併用がしづらい。
- ・放射パネルの樹脂管が酸素を透過する対策のために、熱交換器を挿入し酸化腐食対策をするシステムでは、熱交換器の通水低抗や効率の悪い小容量循環ポンプ設置を要するなど効率低下要因になる。
- ・室温制御の応答性が悪く、省エネルギー制御にも悪影響を及ぼすことがある。

今回開発した“ダイナミックレンジ放射空調”は、主に図-6に示す4つの導入技術が相互に連携することで、これらの課題を解決し高い省エネルギー性能を発揮する。

導入技術1 プレクール冷却塔

プレクールとフリークーリングを切り換え、自然エネルギーを活用する

導入技術2 熱交レスシステム

無薬注防食装置により樹脂管からの酸素透過による腐食リスクを低減

導入技術3 還水温度カスケード制御

放射パネルの能力を安定的に制御

導入技術4 VWV-VT 制御

還水温度情報（負荷）に応じて流量と温度レンジを可変

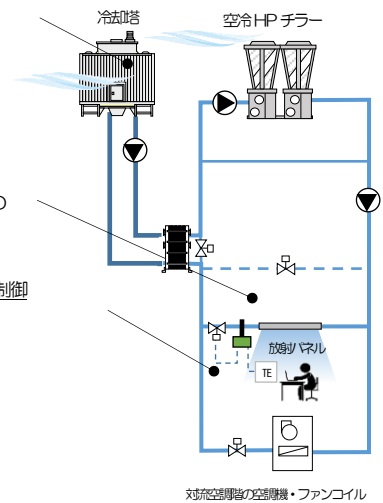


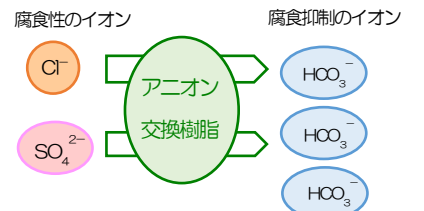
図-6 ダイナミックレンジ放射空調の導入技術

導入技術1 自然エネルギー活用するプレクール冷却塔

主熱源である空冷ヒートポンプモジュールチラーの上流に開放型冷却塔を配置し、放射空調の熱媒である高温冷水を予冷（プレクーリング）もしくは冷却塔だけで冷却（フリークーリング）する。

導入技術2 熱交レスを可能にする無薬注防食装置

天井放射パネルの樹脂チューブの酸素透過による配管、機器の腐食対策として、新菱冷熱工業の独自技術である無薬注型防食システム“Corro-Guard®”（図-7）と脱酸素装置を併設した。この防食技術により、省エネルギー上のデメリットが多い熱交換器を設置せずに熱源からダイレクトに放射パネルに熱媒を送水する“熱交レス配管システム”を可能とした。

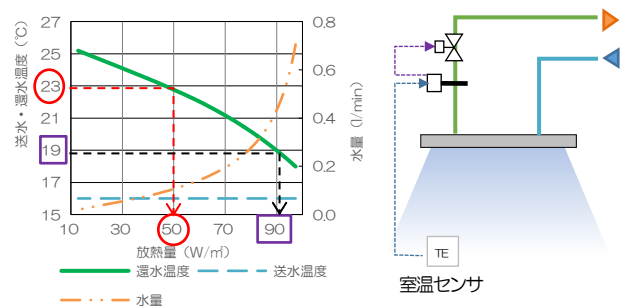


腐食性イオンを腐食抑制イオンに変換

図-7 “Corro-Guard”の原理

導入技術3 制御性を改善する還水温度カスケード制御

放熱量を安定的に制御する方式を考案した。図-8に示す放射パネルの能力特性例のとおり、放熱量と還水温度がほぼ負の比例関係になることに着目し、還水温度で放熱量を制御する。放熱量を水温で制御するため、制御弁のオーバーシュートを抑制し制御応答性を向上させる。この還水温度設定値を室温に応じカスケード可変することで負荷変動に対し安定して室温を維持する。



“還水温度設定値”を変えると放熱量が変化

室温に応じて“還水温度設定値”を可変

図-8 還水温度による室温制御方法

導入技術4 熱源効率を向上させるVWV-VT制御

VWV-VT制御とは、負荷（流量）が大きいときは省エネルギー効果が高い変流量制御（VWV）で搬送動力を優先的に低減し、ある負荷以下では、流量を低減させずに往還温度レンジを高温側に移行（VT）させる制御方法である。

図-8の通り、水式放射パネルの還水温度は放熱量によって大きく変化する。例えば 16℃送水時に最大放熱時の往還温度は 2℃差しかつかない。逆に、放熱量が小さくなるにつれて還水温度は室温(25℃)近づき、往還温度は 8℃差まで拡大する。このように、往還温度差が放熱量によって変化するということは、放熱量と流量は単純比例関係ではなく、指数関数的に変化する。したがって、最大放熱量付近では放熱変化量に対する流量変化率が大きく、かつ配管抵抗の変化量も大きいので、放熱量を流量で調整することによる搬送動力低減効果は大きい。ところが、放熱量が小さくなるにつれて放熱量変化に対する流量変化率は徐々に小さくなり、配管抵抗も水量低減量の二乗で小さくなることから、水量低減によるエネルギー低減効果は相乗的に小さくなる。一方、放熱量は流量と往還温度差の積であることから、流量を維持したまま、熱媒の往還温度差を変えることでも放熱量をコントロールすることができる。ここで、当システムの放熱能力は、導入技術 3 による還水温度で制御しており、冷房時は負荷が少なくなるにつれて還水温度設定値は高温側へ移行する。この還水温度設定値に送水温度を追従させれば、負荷に応じて容易に往温度可変(VT)制御を行うことができる。

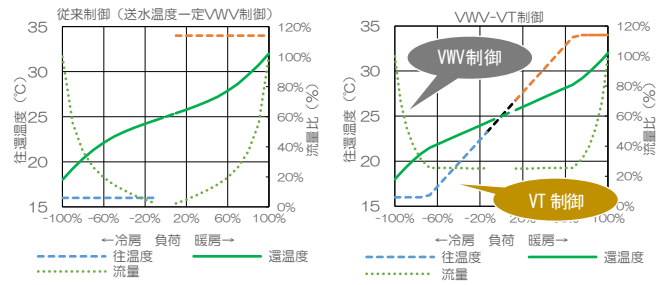


図-9 従来 VVW 制御と VVW-VT 制御

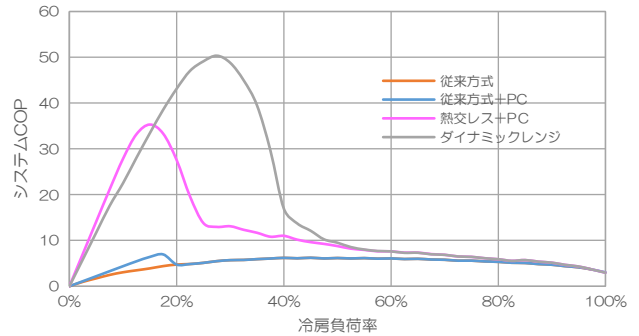


図-10 負荷率によるシステム COP 予測

※システム COP の計算には、チラー、一次・二次冷水ポンプ、冷水ポンプ、冷却塔ファンの消費電力を含む

そこで、VVW-VT 制御では、還水温度設定値が図-9 で両端の領域(最大負荷付近)では、往水温度を定格送水温度(34℃若しくは 16℃)に固定して VVW 制御により搬送動力の低減を優先し、ある程度負荷が減少(還水温度設定値が上昇)した際は 流量を絞らず送水温度を緩和する(VT 制御)。この VVW-VT 制御は、導入技術1のプレクール冷却塔と導入技術2の熱交レス配管システムとの組み合わせによって大きな省エネルギー効果をもたらす。

図-10 は、仮条件でダイナミックレンジ放射空調を構成する各技術の有無によって負荷率とシステム COP の関係を比較したものである。横軸は負荷、縦軸は効率であるため、横に膨らむほど冷却塔の活用期間が拡大され、上に膨らむほど高効率となる。したがって、線で囲まれた面積が広いほど省エネルギー性能が高くなる。熱交換器を設置した従来方式に、単に冷却塔を追加したシステムでは、冷却塔の有効期間(負荷率)は短く、システム COP の向上もほとんど期待できない。これを無薬注装置による熱交レス配管システムとするとその面積は大きく拡大する。さらに、送水温度を可変する VVW-VT 制御を取り込んだ“ダイナミックレンジ放射空調システム”では、縦軸・横軸方向ともに大きく延伸される。

これら技術を導入したシステムにおいて、年間の省エネルギー効果を NewHASP による予測負荷をもとにエネルギーシミュレーションを実施したところ、顕熱処理にかかるエネルギーを 46%程度削減できる効果が見込まれた(図-11)。

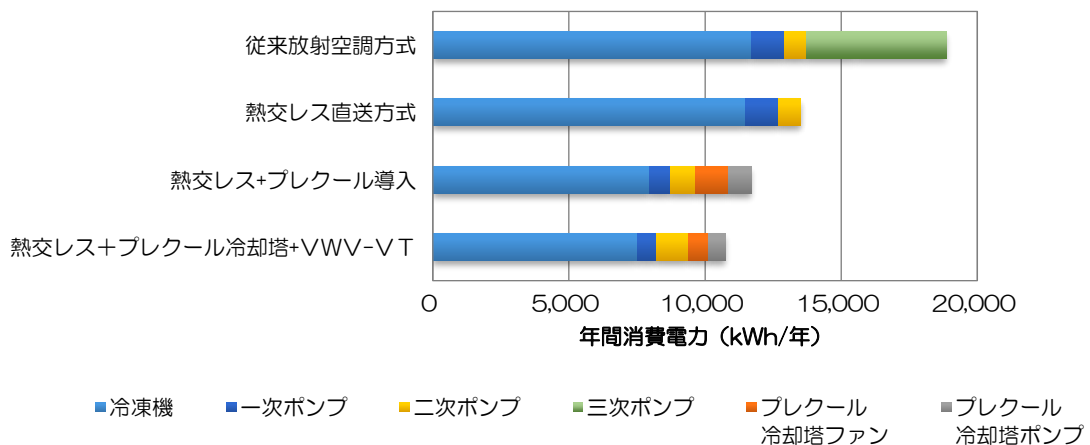


図-11 高温冷水熱源年間消費電力比較

実運用後の性能検証結果の抜粋として、冷房運転時の外気状態とその時に稼働した熱源を空気線図にプロットし集計した(図-12)。計画時の試算では、年間冷房時間の約70%で自然エネルギーの活用を予想していたが、実績もほぼ予想とおり68%の利用率であった。また、一般的な対流空調の外気冷房で不可となる室温や室エンタルピー(太破線)を超過した外気環境でもフリークーリング(外気冷却)で冷却しており、外気冷房(自然エネルギー活用)を併用しなくともそれ以上の外気冷却効果を得ている。ちなみに、別フロアでの対流式空調での外気冷房による年間外気冷却利用率は50%以下であった。なお、当高温冷水熱源システムの年間システムCOPは8.1であった。

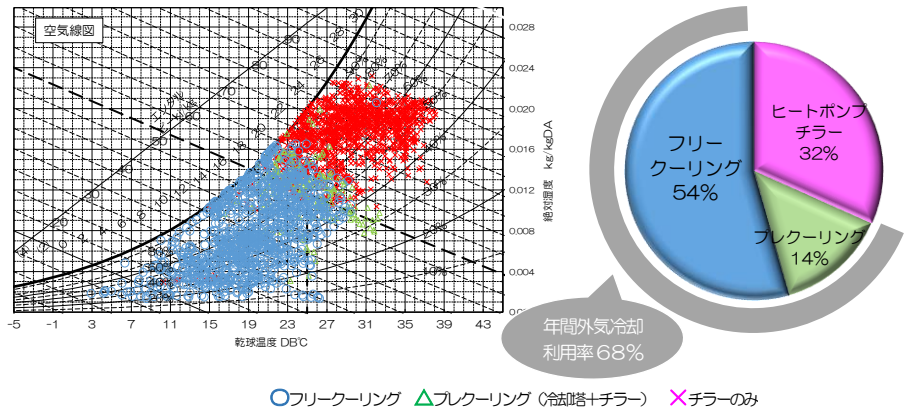


図-12 外気冷却利用実績

更なる省エネルギー化を目指した Excel 連携最適制御

これら運用データの分析により、当開発システムが概ね設計思想通りに運用できていることを確認した一方で、分析の過程では、更なる省エネルギーが可能な事も示唆された。

しかしながら、より省エネルギーになる最適解(最適送水温度)をリアルタイムに演算するには、収束計算や対数計算など複雑な計算が必要で、実装している汎用コントローラーでのプログラム化は困難であった。一方、机上では汎用表計算ソフトである Excel を用いて最適解を算定している。そこで、図-13のように中央監視装置と Excel をリンクさせ、必要な運転データから最適送水温度を10分間隔で演算し、送水温度設定値に反映する制御システムを新たに構築した。

この表計算ソフト連携制御導入によるシステム COP の向上効果を図-14に示す。特に少負荷時にシステム COP の向上効果が大きく、最高システム COP は導入前の30から50超まで向上し、年間では10%以上のシステム COP 向上効果が確認された。また、Excel 連携システムが効果的に機能した日のトレンド例を図-15に示す。この日は外気温度に比べ湿球温度が低く、その湿球温度の変化に応じて送水温度を最適に可変しており、最高気温が33.2°Cの真夏日ながら終日冷却塔だけ(フリークーリング)で顕熱負荷を処理した。

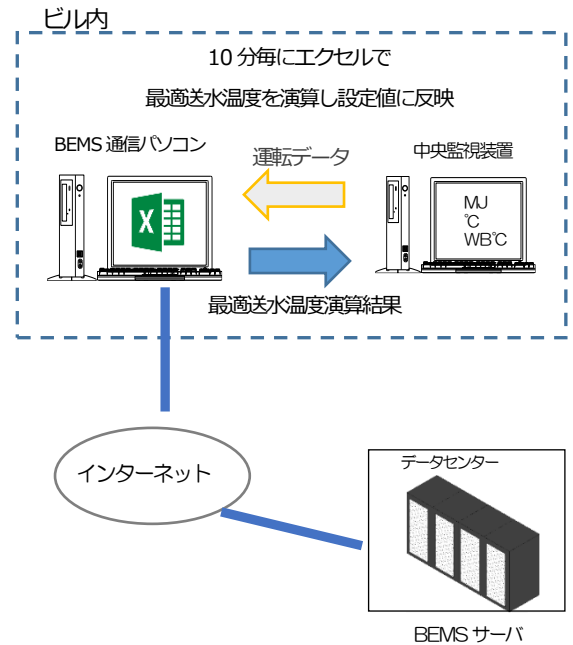


図-13 表計算連携最適制御システムの概要

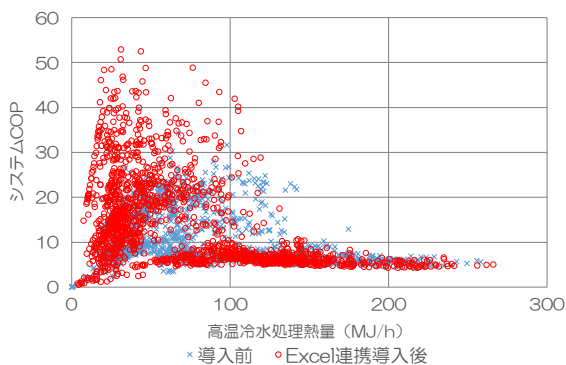


図-14 Excel 連携によるシステム COP 向上効果

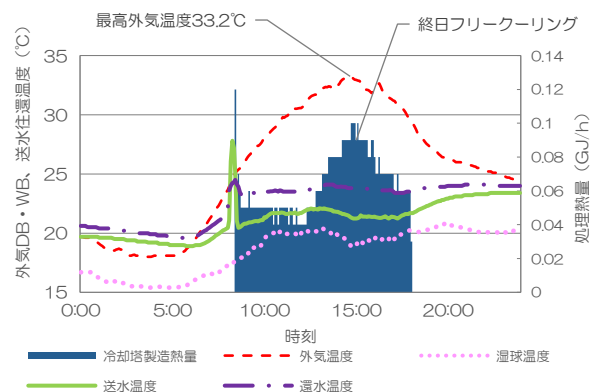


図-15 30°C超過日の冷水熱源トレンド

3.2 変風量コアンダ空調

“コアンダ空調”とは、**図-16**のように天井面に沿って吹出した空気が平滑な天井面に付着して移動するコアンダ効果を利用して部屋全体に空調空気を搬送する方式である。コアンダ空調自体も従来からある空調方式であるが、負荷が少ない時に風量を低減して省エネルギーをはかる「変風量制御」とコアンダ空調を併用すると、吹出風速の低下にともない到達距離が極端に短くなり、室内温熱環境の維持ができなくなる（**図-17**）。そのため、これまでのコアンダ空調は常時一定風量が必要で省エネルギー性が高い空調方式とはいえなかった。

そこで、風量が減少しても到達距離を維持する“自律式風速一定吹出口（Air-Soarer®）”を三菱地所設計、芝浦工業大学、協立エアテック社、および弊社の4社で共同開発した。

“Air-Soarer®”の構造は**図-18**のとおりで、器具内の可動板は回転軸を中心に、板にあたる風圧と軸の反対に側に取り付けたウェイトとのバランスする位置で自律的に開口高さを変化する機構を有している。

この機構により、風量が多い時は風圧によるモーメントが大きく働き開口面積も大きくなり、逆に小風量時にはウェイトのモーメントが勝り開口面積が小さくなることから、センサや動力を一切使用せず常に一定の風速で吹出すことで到達距離を維持する。

従来の「定風量コアンダ空調」では搬送動力低減効果は僅かであるが、当開発器具を使用することで変風量制御との併用が可能となり、大幅な搬送動力削減効果を得ることができる（**図-19**）。

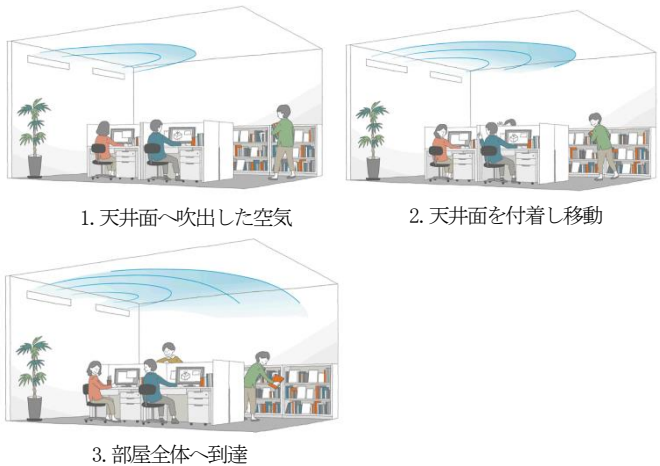


図-16 コアンダ空調のイメージ

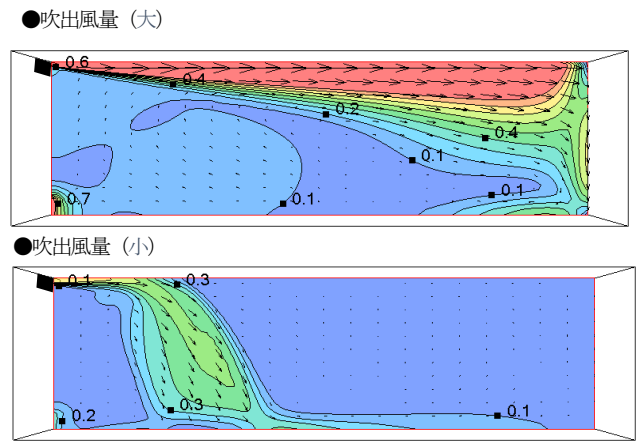


図-17. 風量削減時の到達距離イメージ

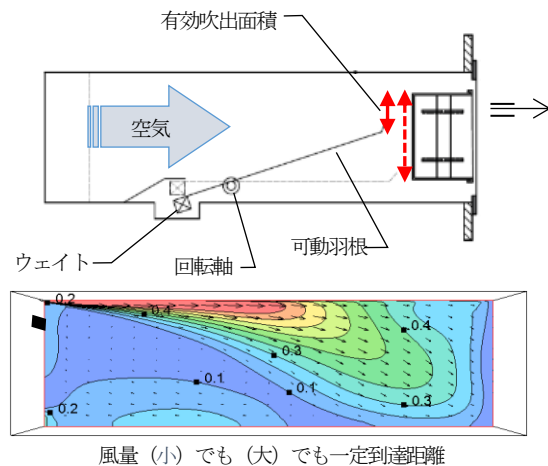


図-18. 自律式風速一定吹出口（Air-Soarer®）の構造と到達距離イメージ

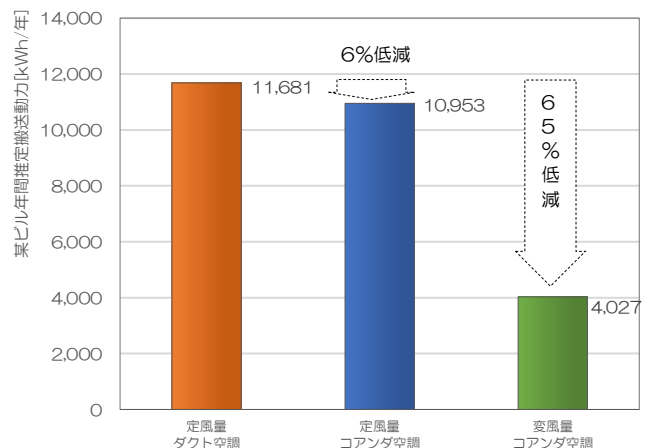


図-19. 空調方式による年間搬送動力比較
※某オフィスの運用データから推定

4. そのほかの開発導入技術

～ドレン水の気化熱を利用した循環型打ち水空調システム～
 1 F エントランスには、気化冷却式空調機を採用している。気化冷却の水源は一般的には上水を使うが、当ビルでは上階空調機で凝縮されたドレン水を利用し蒸発させている。また、ドレン水を気化させる空気には、地下倉庫の換気に利用した冷涼な空気をカスケード利用し冷却効果を高めている（図-20）。

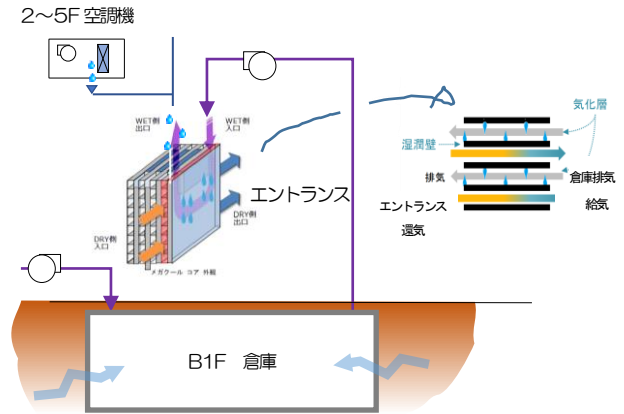


図-20. 気化冷却空調機

～臭気レベルに応じたトイレ換気風量制御～

各階トイレに臭気センサを設置し、臭気レベルによりトイレ換気回数を5～10回/hに可変する。低臭気時にトイレ換気の削減分を執務室空調機の熱交換器への還気増量にあてることで、全熱交換器の交換効率を向上させ外気負荷を低減する（図-21）。

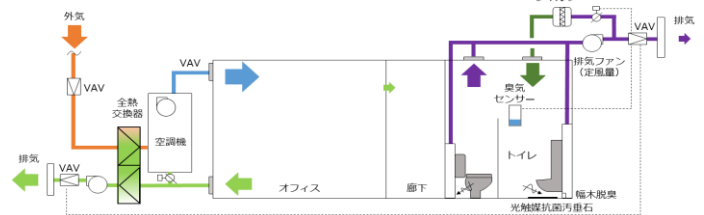
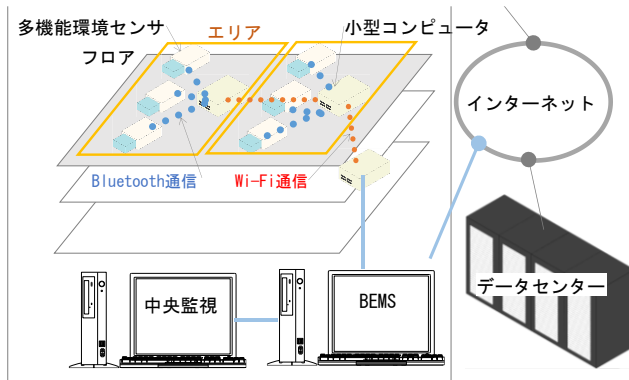


図-21 トイレ換気アクティブ制御

～リアルタイム環境ビジュアライザー～

無線でデータ通信が可能な多機能環境センサをビル内に分散配置し、図-22のようなモニタリングシステムを構築することで、リアルタイムの室内環境状態を執務者にWeb経由で開示している。また、温度ムラなど環境改善や階段室内に配置したセンサ情報から自然換気やダブルスキンモード時の温度、気圧測定値からドラフト検証にも利用した。



Webによる空調操作・環境視認画面

図-22 リアルタイム環境ビジュアライザーの概要

5. 事前検証の概要

ここで紹介した空調方式や省エネルギー手法は、これまでに実績がないこともあり、その技術品質、確実性、あるいは環境性能を確認すべく事前検証にも注力した。基本計画に並行し弊社イノベーションハブ（研究所）に、当ビル執務エリアの1スパンを模した実大実験室（図-24）をつくり、コアンダ空調の気流性状や開発器具の基本性能の確認を初め、よりよい空調システムとするための検証など多岐にわたる実験を数年かけて実施した。これらの結果、開発吹出器具の機構改良やサイズ、配置の最適化、暖房時に効果的な吸い込み位置などを比較検討し、実建物に適宜反映した。また、延べ100人程度の被験者実験やサーマルマネキンを用い開発技術が快適性に大きな問題がない事を確認した。

これら事前検証の有用性として、竣工直後にも現地で事前予測の再現性・精度を確認している（図-25）。事前検証とは空調条件の違いなど条件差があるものの、冷気の到達距離や天井から冷気の剥離する位置などはCFDや実大実験室での検証結果に近い結果にあり実大実験が有用であったことを確認した。

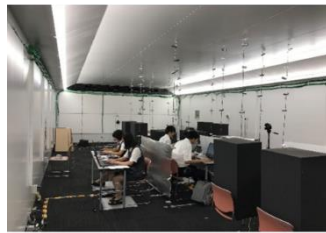
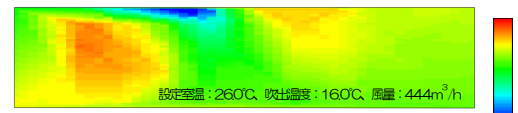
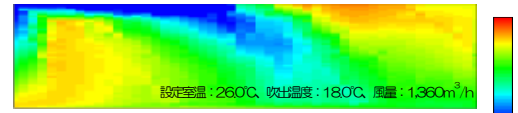


図-24 実大実験室による事前評価例

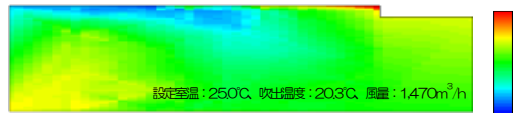
また、ダイナミックレンジ放射空調の開発でも、当実験室の壁面に設置した放射パネルを利用し新しい制御方法の有効性、効果検証、あるいは最適パラメータの模索にも活用し開発技術の品質や制御精度を大きく向上させた。



CFD 解析



モックアップ実大実験室



フィールド試験（入居前）

図-25 事前検証と実測比較

6. 快適性の評価

テナント入居者に実施したアンケート結果を図-26に示す。アンケートは移転前の入居ビルでも実施しており、移転前後で相対的に比較した。どちらの空調方式も移転前に比べて光環境以外の空気環境、温熱環境、総合環境の満足度がそれぞれ大きく向上し、開発した2つの新しい空調方式は快適性を犠牲にすることなく省エネルギー性能を発揮していることが確認された。

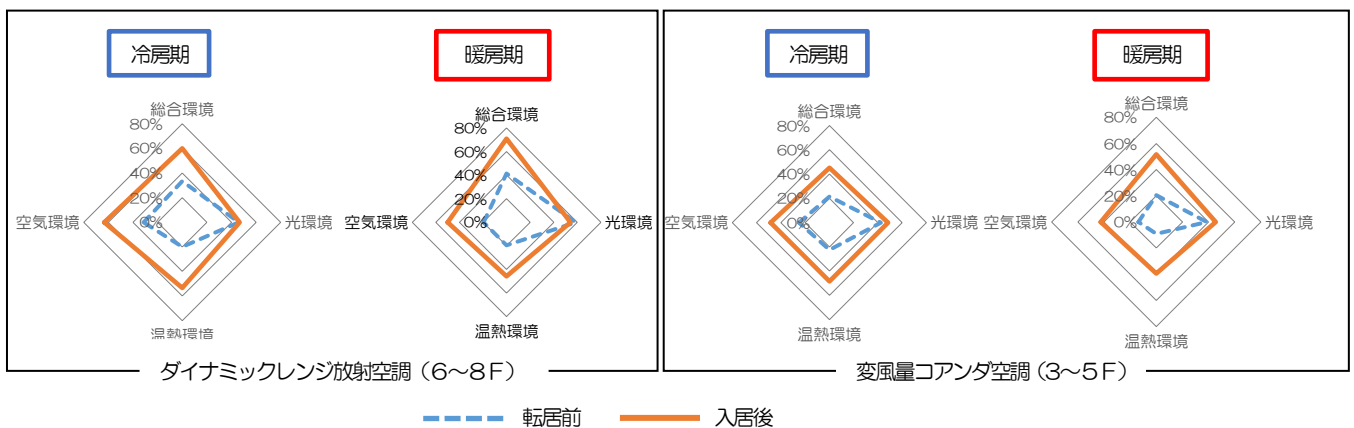


図-26 入居者アンケート結果

謝辞

本システムの開発・設計から運用段階の評価に至るまで、芝浦工業大学建築学部建築学科の秋元孝之教授と研究室の皆様には多大なるご指導とご協力を賜りました。また、入居テナントの皆様には省エネルギービル運営へのご理解、あるいはアンケートや環境測定にもご協力頂きここに記して感謝の意を申し上げます。