

# 特集 ゼロ・エネルギー・ビル Net-Zero Energy Building

## 1 ゼロ・エネルギー・ビルへの取り組み Approach to Realize Net-Zero Energy Building

石黒 武 Takeshi Ishiguro\*1

### 1.1 ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB)

地球温暖化が地球全体の環境に深刻な影響を及ぼすことから、2009年に政府は低炭素社会の構築に向けて「1990年比で2020年までに温室効果ガスを25%削減」する意欲的な目標を掲げた。資源エネルギー庁の報告によれば、日本の最終エネルギー消費量は民生部門が3割を占め、特に業務部門（オフィスビル・小売店舗等）は1990年比で4割以上も増加している。今後、新築ビルの省エネ性能向上と既築ビルの省エネ改修の推進が強く求められ、経済産業省は「2030年のZEB達成に向けた研究会」を立ち上げ検討を始めた。Fig.1に示す「ゼロ・エネルギー・ビル(ZEB)」は、建築物における一次エネルギー消費量を建築物・設備の省エネ性能の向上とエネルギーの面的利用、オンサイトでの再生可能エネルギーの活用等により削減し、年間の一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロとなる建築物と定義している。「2030年までに新築建築物全体でのZEB実現」を目指し、省エネ基準達成の義務化や省エネ性能を評価するラベリング制度の整備を進めている。米国は、エネルギー自立安全保障法（2007年）において2030年までに新築されるすべての業務用ビルはZEBとする政策を掲げている。

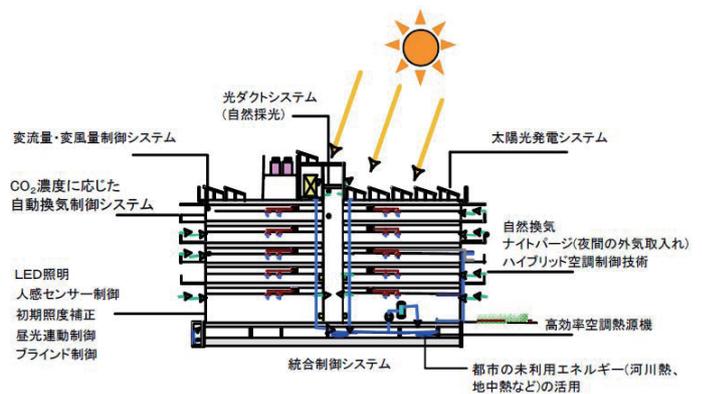


Fig.1 ネット・ゼロ・エネルギー・ビル（経済産業省）  
Net-zero energy building (Ministry of Economy, Trade and Industry)

2010年に示した政府のエネルギー基本計画では、原子力発電を基幹電源として積極的な増設推進、設備利用率拡大を図ることとしていた。しかし、東日本大震災による福島第一原子力発電所の甚大な事故によって、原発依存度を減らす方向で見直しを行うことになった。震災直後、東京電力は計画停電を実施して突発停電を回避した。更に、政府は電力需給が逼迫する夏期のピーク時に、需要側への節電要請を行った。各企業は、空調・照明の運用改善による徹底した省エネを実施したが、一方で執務環境が悪くなり大幅な業務効率の低下による経済的影響も大きかった。また、積極的にLED照明、自家発電などの設備投資を行った企業もあった。停止中の原子力発電所は、再稼働の目途が立たない中で、企業にとっては地震や津波対策を考えた防災機能強化や再生可能エネルギー、蓄電池による自立型エネルギーの構築も踏まえた事業継続計画（BCP）が重要になっている。

当社は、2010年に環境コンセプト「人の感性や創造性を高め、自然を活かし、ゼロカーボン建築からカーボンニュートラルな都市への実現を目指す」をまとめ、環境メッセージ「人と自然をつなぐ」を制定し、2020年までにパイロットプロジェクトでゼロカーボンビル実現を目指している。消費エネルギー削減に加えて、知的生産性を向上させるために、高度なセンシング技術と執務者の選択によるパーソナルな環境制御や、自然のリズムを感じて五感を刺激し、コミュニケーションを図る空間の創造に取り組んでいる。業務ビルの平均的な年間一次エネルギー消費量は約2,400MJ/m<sup>2</sup>であるが、当社東京本店社屋は、省エネ技術の導入と運用改善によって約1,000MJ/m<sup>2</sup>まで削減した。これからのゼロ・エネルギー・ビルは、エネルギー消費量の削減にとどまることなく、ビル・エネルギー管理システム(BEMS)を活用して室内環境とエネルギー性能の最適化を図ることが重要になる。平常時は、再生可能エネルギーを含めて分散するエネルギーを周辺建物と面的に融通し、クラウドコンピューティングのビッグデータ情報を活用して、コミュニケーションを促進し、災害時には、発電・蓄電利用や帰宅困難者の受け入れなど防災拠点としての機能強化を図るスマートコミュニティの構築を目指している。

ZEB実現に向けた当社の取り組みとして、環境技術の研究開発の一例を本報で紹介する。

\*1 技術研究所 マネージャー General Manager, Research & Development Institute

## 1.2 ZEB実現の可能性試算

2009年に竣工したシンガポールの大学施設（3階，床面積4,500m<sup>2</sup>）は，自然換気などの省エネ技術と1,540m<sup>2</sup>の太陽光発電によってZEBを実現している。日本国内でも小規模であれば技術的にZEBは可能であると考えられるが，未だ実現した事例はない。都内で地上10階のオフィスをベースモデル（北面片側コア）とした場合，一次エネルギー消費量は約2,000MJ/m<sup>2</sup>となる。粕谷らは，技術進展を見据えたベストプラクティスマodelを設定して，この規模でZEB実現の可能性を試算した。東西コアで屋外ボイドは吹き抜け空間とし，自然換気と自然採光を利用する。ベースモデルに対してベストプラクティスマodelは，一次消費エネルギーを16%に抑えて，太陽光発電によりオンサイトでゼロエネルギーとなる結果となった。Fig.2に示すように削減効果は，建築・自然エネルギー利用・ライフスタイルの変化で31%，設備システムの技術革新で38%，オンサイトの再生可能エネルギー・エネルギーインフラの効率化で31%となった。建築計画及び自然エネルギーの活用と設備システムの開発技術を効果的に組み合わせて，中層ビルでZEB実現の可能性を示している<sup>1)</sup>。

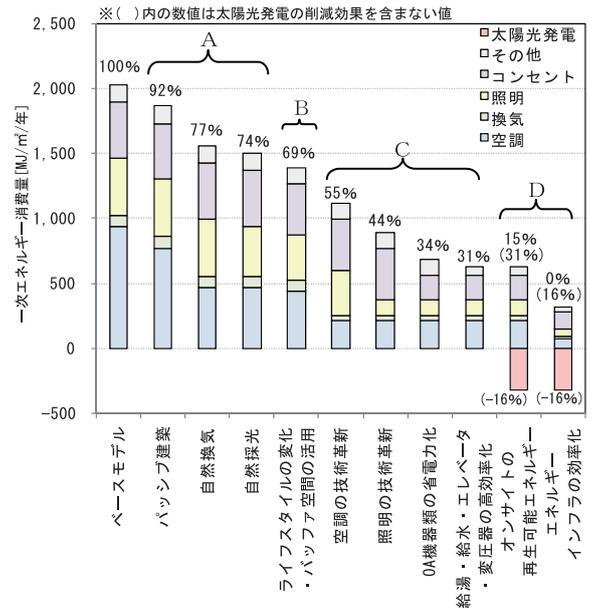


Fig.2 一次エネルギー消費量の削減効果  
The effect of reduction of primary energy consumption

## 1.3 ZEB実現に向けて当社が取り組む環境技術

ZEB実現に向けた環境技術には，A. パッシブ建築・自然エネルギー利用，B. ライフスタイルの変化，C. 設備システムの技術革新，D. オンサイトの再生可能エネルギー・エネルギーインフラの効率化がある。これらの観点で当社が取り組んでいる環境技術の一例を以下に示す。「A. パッシブ建築・自然エネルギー利用」では，自然換気，自然採光が有効である。当社が開発した多機能外装「呼吸するダブルスキン」を導入したオフィスは，断熱とダブルスキン内部の電動ブラインドで日射を遮蔽して熱負荷制御を行っている。自然通風によって冷涼な外気を天井面に沿ってオフィス奥まで導入し，コア側のエコボイドから自然排出することで，空調エネルギーの削減を図った。中央コアゾーンの側面採光，EVシャフトのシースルー化で，オフィスの自然採光利用の向上も図っている。「B. ライフスタイルの変化」では，知的生産性を考慮した「人にやさしい建築空間の研究」に取り組んでいる。一人一人にあったフレキシブルなワークスタイルを実現するため，自然のゆらぎを積極的に取り入れ，いきいきと働ける環境と省エネルギーの両立を図っている。当社技術研究所に最先端の省エネ技術を導入したスマートライフオフィス<sup>®</sup>を建設し，執務者の生理・心理データを取得することで物理環境による知的生産性評価の検証実験を行っている。「C. 設備システムの技術革新」として，次世代空調，次世代照明，センシング技術や制御技術の開発に取り組んでいる。放射空調とパーソナル気流で省エネと快適性を両立させたタスク・アンビエント空調や潜熱顕熱を分離処理するデシカント空調は，既に多くの建物で採用されている。現在，執務者の好みに応じた環境を提供し，不在を迅速に検知して，最小限のエネルギーで制御する高効率熱源を含めたパーソナル空調の開発を行っている。「D. オンサイトの再生可能エネルギー」として代表的な太陽光発電パネルのモジュール変換効率は10～20%である。近いうちに発電効率は徐々に高くなり，低コスト化も進むと考えられる。ZEB実現を目指した創エネルギーには，可能な限り太陽光発電パネルを設置する必要があるが，屋上の設置面積には限界がある。当社技術研究所は，日射遮蔽ルーバーに太陽光パネルを取り付け，ルーバー角度制御で熱負荷削減と高い発電効率の両立を目指した実証実験を行った。また，両面発電型太陽電池モジュールを手摺り部分に設置するなど，建築融合型太陽光発電も提案している。百貨店・ホテルの生ゴミをディスポーザーで破碎し，メタン発酵槽で生成したバイオガスで発電，排熱回収した都市型バイオガス設備が，2013年に日本で初めて大阪の高層ビルで運用される。

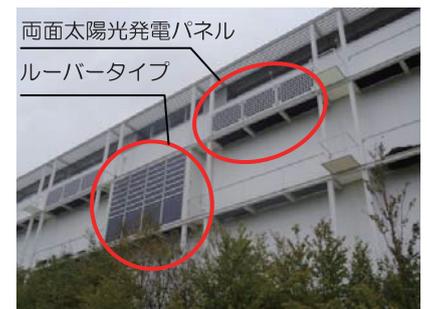


Fig.3 建築融合型太陽光発電の事例  
An example of photovoltaic power generation converged building

## 2 自然エネルギー利用と次世代設備技術 Passive and Active Energy Saving Technologies

### 2.1 全体システム概念

#### Some Energy Conservation Technology which Composes Net-Zero Energy Building

高橋 幹雄 Mikio Takahashi\*2

本章ではゼロ・エネルギー・ビルを実現するために、近年取り組んでいる研究開発の事例、実績について紹介する。Table 1にゼロ・エネルギー・ビル実現に向けた主な環境技術を示す。本節では、「A. パッシブ建築・自然エネルギー利用」、「C. 設備システムの技術革新」から、当社が開発した代表的な自然エネルギー利用と次世代設備技術について解説する。

Table 1 ゼロ・エネルギー・ビル実現に向けた主な環境技術  
Major energy conservation technologies to realize NET-zero energy building

分類	技術項目	環境技術
		当社開発を含む環境技術（下段）
A. パッシブ建築・自然エネルギー利用	日射遮蔽	内ブラインド、ブラインド制御、外ブラインド、外ルーバー、オーニング 気密ブラインド、ロールスクリーン、可変外ルーバー（太陽電池一体型）
		断熱・遮熱
	自然換気	自然通風、外気冷房、ナイトバージ、ソーラーチムニー、ウインドチムニー、クールチューブ ウインドチムニー（欄間開閉機構） ※自然換気口貫通型のダブルスキン、
	自然採光	吹き抜け・光庭、集光装置、光ダクトシステム、ライトシェルフ ※可動型インナーライトシェルフ
	蒸発潜熱利用	屋上緑化、屋根散水、屋外ミスト散布 壁面緑化、汗かき建築、保水性舗装システム
	集熱	太陽光集熱ダクト、地熱利用、※ヒート&クールピット
	設計支援ツール	温熱気流解析（STOKES-PC）、換気解析（MULTI-VENTL） 光・温熱環境シミュレーション
	B. スタイルの変化	エネルギー消費量見える化、BEMS/HEMS
運用・評価技術		人にやさしい空間・環境制御、ワーカーの知識創造性評価技術 ビルコミュニケーションシステム ren.*
C. 設備システムの技術革新	高効率熱源・搬送	高効率ターボ冷凍機、高効率ガス冷温水発生機 高効率ヒートポンプ、コ・ジェネレーション、高効率ボイラ 高効率ポンプ、変流量システム、台数制御、インバータ制御 VCS（自然循環冷媒）、低温水大温度差搬送、中温熱源
		空調方式・制御
	照明方式・制御	人感センサ制御、LED照明、Hf蛍光灯、有機EL照明、昼光連動制御 光る天井、アダプタブル照明、※タスク・アンビエント照明、 ※人にやさしい照明（サーカディアン照明）、※パーソナル環境制御
	給排水	雨水利用、節水・自然水利用
	設計支援ツール	設備システムシミュレーション、LCCO <sub>2</sub> 評価システム
D. 再生可能エネルギー・インフラの効率化	太陽光発電	太陽電池発電パネル 薄膜型太陽電池・両面太陽電池の建材一体化
	その他・未利用エネルギー	風力発電、バイオマス発電、音響発電、温度差発電、太陽熱利用 定置型リチウムイオン電池、NAS電池、河川熱・地中熱・廃熱利用 波力発電、生ゴミ利用発電、振動発電

※：本報で説明する環境技術

\*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

個々の環境技術を取り入れたゼロ・エネルギー・ビルを目指した建物全体システムのイメージをFig.4に示す。中間期の自然換気導入技術は必要不可欠であり、風力と重力換気効果を十分に考慮し、エコポイドの導入や外装の換気開口面積確保を建築デザインへ反映することが重要である。外装の換気開口は断熱性を考慮したダブルスキンなどとともにシステム化することも有効である。2.2節では、ダブルスキン外装ビルへの自然換気導入事例を説明する。自然採光を室内奥まで有効に取り込むためには反射を利用した光ダクト、リフレクターなど光を室内へ導くデバイスが必要となる。2.3節では、リニューアルでも対応できるインナーライトシェルフ（屋内庇）の自然光の反射、拡散効果の実験事例を説明する。省エネルギーと知的生産性を両立するための空調についてもタスク・アンビエントの概念は必要となる。2.4節では、放射を利用したタスク・アンビエント空調とともに、将来的にはパーソナル空調の必要性について述べている。LED照明化が進んでいる照明システムは、タスク・アンビエントを考慮し、アンビエントの照度を低減し、人感センサーにより点灯率を低減することが照明エネルギーの削減に必要となる。室内環境は居住者の知的生産性と健康の維持向上が重要であり、居住者の満足度を維持することも必要である。2.5節ではタスク・アンビエント照明における居住者心理・生理の測定結果についても説明した。その熱容量の大きさから年間温度変化幅が小さい地熱についての空調利用も自然エネルギー利用として重要なアイテムである。近年、地中熱利用ヒートポンプやクールチューブ等の利用が増加しているが、2.6節ではピットを利用したヒート&クールピットによる外気処理空調（顕熱処理）の省エネルギー性について説明する。

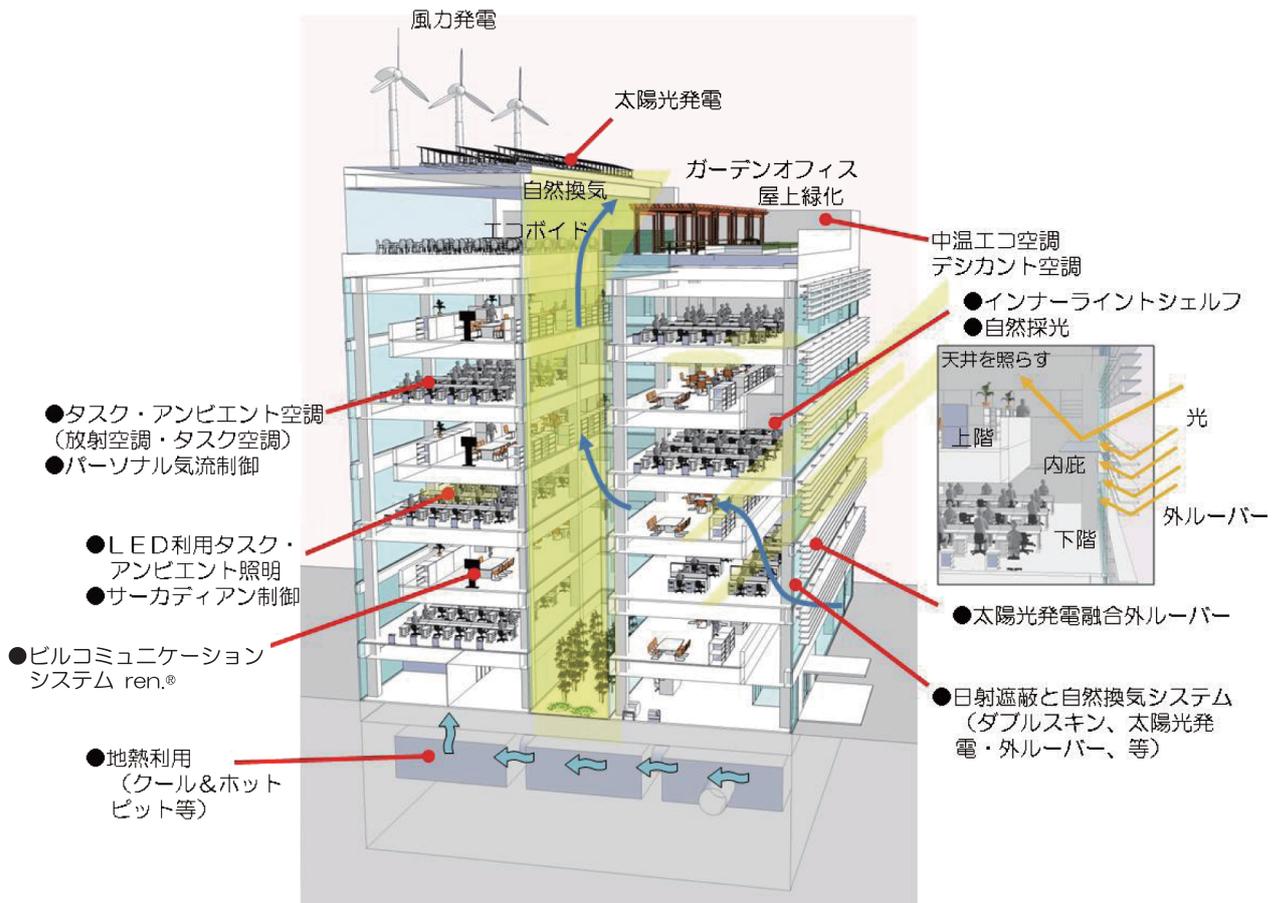


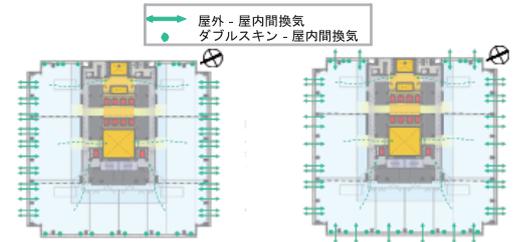
Fig.4 ゼロ・エネルギー・ビル実現を目指す環境技術  
Major energy conservation technologies to realize NET-zero energy building

## 2.2 ダブルスキン外装ビルへの自然通風システムの導入 Adaptation of Natural Ventilation System to a Building with Double Skin Facades

菊池 卓郎 Takuro Kikuchi\*3

自然通風は自然エネルギー利用の代表的な技術となった。2011年の震災後は事業継続性の観点からも自然通風や自然採光の導入が望まれる。本節では、中央にボイドを有する地上27階の高層ビルであるIビルで導入した自然通風と外装の外側にガラスの外皮を設けて空気層をつくったダブルスキンによる空調負荷の低減を最適化することを目的に行った数値解析と評価について紹介する<sup>2), 3)</sup>。

Fig.5に自然換気口の配置と自然換気量の計算予測結果を示す。計画当初はダブルスキンと自然換気口を分離させ、ダブルスキンを東西壁面に配置し、自然換気口を東京の卓越風向に合わせて南北壁面に集中的に配置させる案だったが、多数室換気解析によるパラメトリックスタディを行った結果、南北壁面に集中しながらも全方位の壁面に分散配置させた方が年間を通じた自然換気量を最大化できることが予測された。ダブルスキンと自然換気口を同一の壁面に配置するために、三層吹き抜けで自然換気口貫通型のダブルスキンが考案された。各階に十分な自然換気口を配置できると同時に、三層の上下端にダブルスキン内の排熱換気口を設けることで高低差を大きくし、駆動力を大きくできる。ここで、ダブルスキンを貫通する自然換気口がダブルスキン内の排熱換気の流路を妨げ熱だまりが生じることが懸念された。Fig.6に自然換気口貫通型のダブルスキンの空気の流れの模式図とダブルスキン内の温度と気流の計算予測結果を示す。解析範囲はダブルスキン内の三層とし、熱だまりが発生する可能性が大きいと思われる位置を選定した。夏季の西壁面を想定し、日射量を $622\text{W/m}^2$ 、外気温度を $36.6^\circ\text{C}$ および室内温度を $26.0^\circ\text{C}$ とした。自然換気口の直下で懸念された温度上昇がみられたが大きな熱だまりは発生せず、熱性能やガラスの熱割れへの影響が小さいことを確認できた。Fig.7に竣工後の性能検証で測定評価された環境性能の結果を示す。北北西や北の風向では他の風向に比べて、小さい屋外風速でも大きな換気回数が見られ、東京で発生頻度の高い北北西の風向の時の自然通風の効率が高いことが示された。Fig.5 (2)にみかけの日射熱取得率を示す。測定範囲は西壁面の三層吹き抜けの最下層である22階から最上層である24階までとした。熱流体解析で予測された通り、上層ほどダブルスキン内の温度が高いため日射熱取得率が大きかったが、その差は約0.015とわずかであった。ダブルスキン内の流路を妨げる自然換気口の有る場所(Wa)と無い場所(Wb)とでは大きな差異はないことを確認した。自然エネルギー利用による総合的な省エネルギー性の実現には、解析技術を活用した多角的な設計検討が欠かせない。



(1) 自然換気口を南北壁面に配置した場合 (2) 自然換気口を全方位の壁面に配置した場合

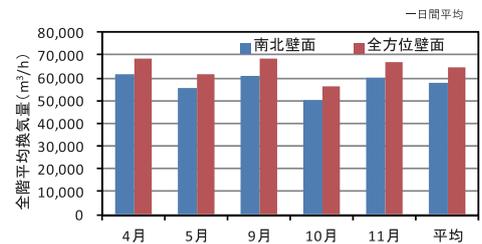


Fig.5 自然換気口の配置と自然換気量の計算予測結果  
Openings arrangement and calculation results of air flow rate

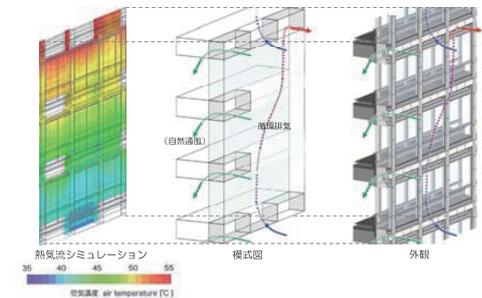


Fig.6 自然換気口が貫通するダブルスキンの空気の流れの模式図とダブルスキン内の温度と気流の計算予測結果  
Air flow outline of double-skin facade penetrating natural ventilation openings and CFD result of double-skin facade inside

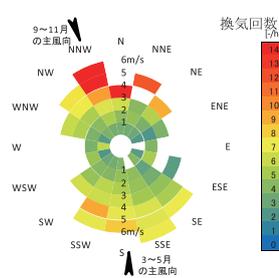


Fig.7 屋外風向風速に対する換気回数  
Air flow rate for outdoor wind speed and direction

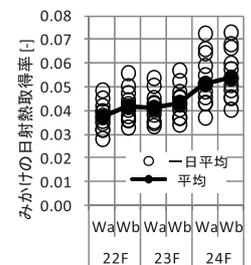


Fig.8 みかけの日射熱取得率  
Apparent solar heat gain coefficient

\*3 技術研究所 博士(学術) Research & Development Institute, Ph.D.

### 2.3 インナーライトシェルフによる自然採光<sup>6), 7)</sup> Architectural Daylighting with the Light Shelf<sup>6), 7)</sup>

黒木 友裕 Tomohiro Kuroki\*4

ZEBの実現に向けて、照明の電力消費を低減することも重要な課題である。そのアプローチには、器具・ランプの高効率化、照明の時間・範囲・照度の限定と適正化、自然採光、がある。本節では自然採光をより効率的にする装置として、新たに開発した多段式・可動型インナーライトシェルフ（以下、多段式内庇）を紹介する。

快適な自然採光を実現するためには採光と遮光両方を考えなければならない。一般に、居住域の高さ以下に直達光が届くと不快なグレアの原因になるばかりか、余計な冷房負荷を発生させる。これを防ぎながら光を天井面のなるべく室内に反射させることが理想と考えられる。太陽は時々刻々位置を変え、その軌跡も日々変わる。夏至の南中高度は78°、冬至は32°（東京）であり、南北断面上での太陽高度（以下、プロファイル角という）は0~90°まで万遍なく出現する。この動きに追従して、常に理想的な自然採光を実現すべく考案されたのが本稿の多段式内庇である。

以降では南面への設置を想定して説明する。仕組みをFig.8に示す。従来の内庇と異なるのは庇が複数枚あり、その枚数・ピッチ・角度を可変としていることである。夏季日中のようにプロファイル角が十分に大きい場合（①）、庇1枚のみを使い、適切な角度とすることで直達光を遮りつつ、室内へ反射光を送ることができる。プロファイル角がこれよりも低い場合（②）、1枚だけでは遮光しきれないので、2枚使用することで遮光・採光する。以下、プロファイル角に応じて6枚まで庇の枚数を増減することで常に最適な採光を維持できる（③の図では3枚まで示す）。ただし、プロファイル角が0°に近い時は最大枚数を使用した上で遮光を優先して庇の角度をかぶせ気味にする。

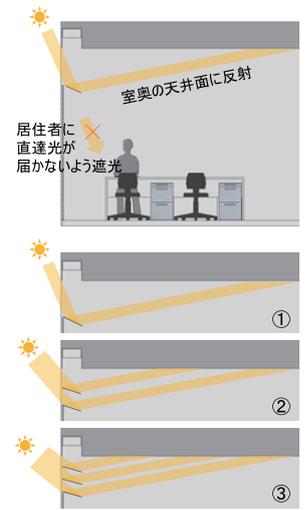


Fig.8 多段式・可動型インナーライトシェルフ  
Controlling method of the Multi-level Movable Inner Light Shelves

内庇なしで60°に固定してブラインドを設置した場合（ケース1）、採光用にブラインド角度可変とした場合（ケース2）、開発した多段式内庇を設置した場合（ケース3）の採光効果をシミュレーションで比較する。ケース3の多段式内庇は窓の上部600mmに300mmの庇を6枚（最大時）設置する仕様とした。

夏至・春分・冬至の晴天日12時の机上面照度分布をFig.9に示す。多段式内庇では特に南中高度の低い冬季において採光効果が大きくなり、窓面から15mでも300lx程度の照度が確保される。冬季ではブラインド比較して、大きな差が生じる。これはブラインドでは羽根の大きさに比べピッチが大きいいため、羽根を外側に傾けて遮光する必要があり、採光が犠牲になるためである。

調光可能な照明設置を前提として、机上面照度を700lx以上確保するために必要な照明用電力を計算した。ケース1と比べた削減率（窓面から15mまでを対象）をFig.9に示す。多段式内庇は冬至南中時に86%の省電力となった。年間でも40%となり、空調負荷増もわずかであった。

これまでにない造作物であり、高反射率によるグレアも懸念されることから、被験者による視環境の印象評価実験を行った。Fig.10に示すようにグレアについては、「気になる」と回答する被験者もあったが、印象評価ではにぎわい・温かみ・陽気さが高まったほか、作業性や満足度の向上が確認され、概ね良好と判断された。

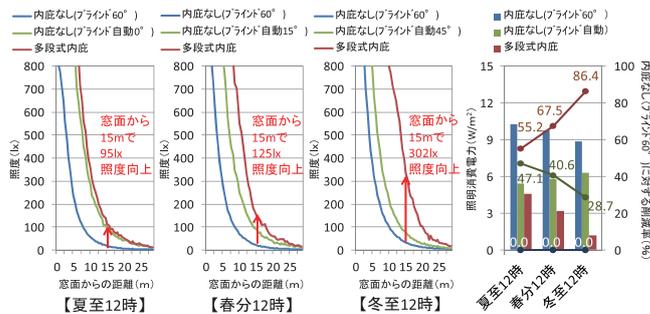


Fig.9 机上面照度分布と照明消費電力  
Lighting effect and energy saving effect of the shelves

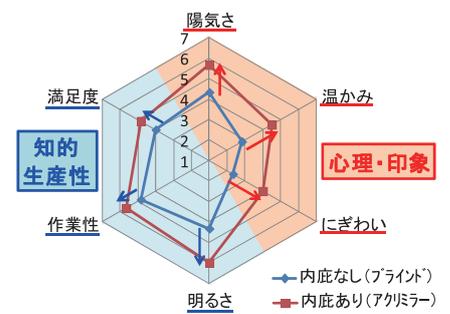


Fig.10 被験者による視環境評価  
Subjective evaluation of impressions

\*4 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

## 2.4 タスク・アンビエント空調から潜顕熱分離パーソナル空調の開発へ Development Process from Task/Ambient Air-Conditioning to Personal Air-Conditioning with Separation Process of Latent Heat and Sensible Heat

和田 一樹 Kazuki Wada\*5

二酸化炭素排出量の削減や節電を目的に、夏季の室温を28℃程度として省エネルギー化を図る取り組みが定着しつつある。一方で、室温を高くし過ぎると温熱満足度が低下し、知的生産性も低下することが指摘されている。このような背景から、快適性を損なわずに室温を高めることができる省エネルギーな空調システムが求められている。

当社ではこれに対応した空調システムの一つとして、タスク・アンビエント対応の放射冷房システムの開発と展開を行ってきた。Fig.11に空調システム概念図を示す。タスク・アンビエント対応の放射冷房は、天井を通気性のある材料（図中ではパンチングパネル）とし、この材料を介して天井内から室内へ冷風を供給する。このようにすることで、天井面を冷却しながら室温調整ができることが特徴である。さらに、天井内の冷えた空気を執務者に向けて吹き出すことができるパーソナル気流ユニットを天井に設けている。このパーソナル気流ユニットは、執務者の操作で風量調節が可能である。人工気象室にて本システムの人の冷却効果について評価を行った結果、Fig.12に示すように同じ28℃設定でも一般的な対流空調に比べて、人の冷却効果が大きく、等価温度を1.6℃低下できる結果を得ている。

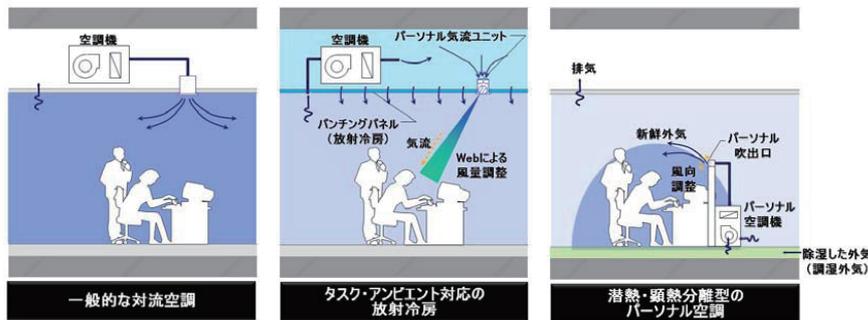


Fig.11 タスク・アンビエント空調と潜熱・顕熱分離型のパーソナル空調  
Task/ambient radiant cooling and personal air-conditioning system with Separation Process of Latent Heat and Sensible Heat

本システムは快適性を損なわず、省エネルギーを図れる空調システムとして、多くのプロジェクトに採用されている。KビルやTビルでは、汎用のビル用マルチ空調システムとの組み合わせで、Iビルではセントラル空調のVAV方式との組み合わせでタスク・アンビエント対応の放射冷房システムを実現している。

更なる快適性と省エネ性能の向上をめざし、潜熱・顕熱分離型のパーソナル空調の開発に取り組んでいる。調湿した新鮮外気を床下から供給する。執務者の要求に応じて冷暖房や局所気流調整ができることのみならず、執務者直近に低湿度の新鮮外気を供給できる。パーソナル空調機は執務者の在不在に応じて必要な分だけ効率的に空調ができることに加え、顕熱処理に特化させることができ、高効率な空調熱源を利用可能である。執務者周辺の気流環境はFig.13に示すような性状が選択可能であり、執務者の活動状態や好みに応じて調節可能とすることで満足度向上を目指している<sup>4), 5)</sup>。

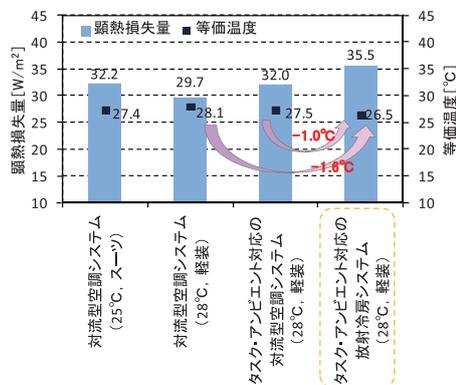


Fig.12 タスク・アンビエント空調の等価温度  
Equivalent temperature of Task/ambient cooling system

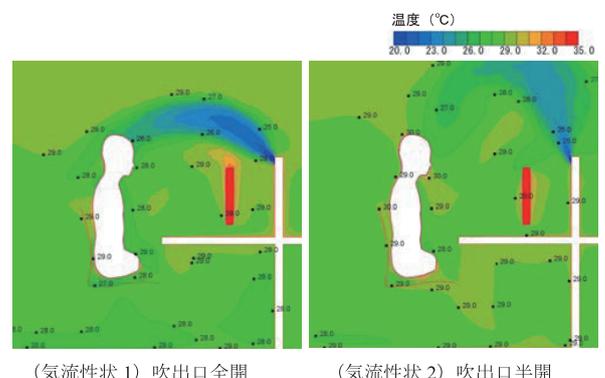


Fig.13 パーソナル吹出口のCFD解析結果  
CFD analysis results of personal air diffuser

\*5 技術研究所 研究主任 Research & Development Institute

## 2.5 タスク・アンビエント照明による生理・心理評価と省エネルギー効果

### Effect of Task and Ambient Lighting System on Psychology, Physiology and Energy Conservation

黒木 友裕 Tomohiro Kuroki\*4

2011年の震災を契機に光環境を見直す動きが活発化している。当社は「人にやさしい空間」研究の一環として、知的生産や健康の観点からふさわしい光環境を追求してきており、これが必ずしも省エネルギーと矛盾しないことが明らかになりつつある。本節では研究から得られた知見を省エネと関連付けながら紹介する<sup>8) 9)</sup>。

知的生産性と環境満足度は強く関連すると考えられる。まず、調光可能な照明システムが満足度に与える影響を検証する被験者実験を紹介する。ここでは、無段階に調光可能なタスク照明の使用を許可（アンビエントは300lx固定、机上面照度を300~700lxの範囲で選択）したケース1と、許可しないケース2（同700lx）を設定し、7名の被験者にタスクをさせる実験を行った。光源は覚醒作用の波長特性を考慮し、夕方までは昼白色（5,000K）、夕方以降は電球色（2,700K）とした。ケース1の机上面照度とそのときの被験者による明るさの評価との関係をFig.14に示す。図中の円の大きさが度数を示している。机上面照度は幅広く選択されているが、平均で日中600lx、夕方以降500lx程度であり、室全体を700lxとした場合（ケース2）に比べ、50%程度の消費電力削減となることがわかった。また、被験者は自分の好きな照度に調整できるため、当然300~400lxでもちょうど良いと評価される傾向にある。

Fig.15は明るさの評価と満足度との関係をケースごとに示している。明るさ評価の度数はケース1のほうが低照度にもかかわらず、ケース2よりも明るい側に偏っている。満足度もケース2を上回っている。調光可能なタスク・アンビエント照明によって、省エネルギーと満足度、ひいては知的生産性の向上を両立することが可能であることを示唆する結果である。

一方、体内時計の調整に光が強く影響していることはよく知られている。ヒトの内因性リズム（外部からの刺激が全くない場合のリズム）は多くの場合24時間以上であるが、様々な刺激によりこれを毎日リセットし、24時間周期の生活をしている。その刺激の1つが光であり、メラトニン（睡眠を司るホルモンで、一般に起床直後に最小値、就寝直後に最大値となる）分泌を抑制する作用があることから、日中に光を浴び、夜間はなるべく浴びないことがスムーズなリズム調整のために重要である。

Fig.16に示すように別の被験者実験では、終日一定の机上面照度としたケースAと、任意のタイミングで照度を上げられ、リズムに配慮したケースBを比較した。ここでは客観的な比較のためいくつかの生理指標も測定している。一例として心電をもとに算出される副交感神経の活動指標HF、交感神経の活動指標LF/HFの測定値をFig.17に示す。ここからケースBでの日中の覚醒の高まり、睡眠の質の向上を読み取ることができ、良好なリズムが形成されたと解釈できる。ここでの日中必要な高照度は自然採光によって賄えばよく、省エネルギーとの両立も可能である。

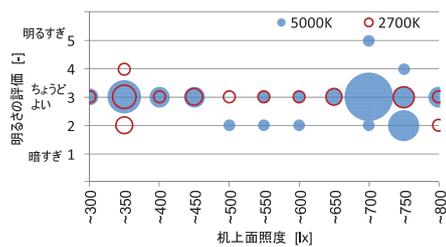


Fig.14 机上面照度と明るさの評価（ケース1）  
Horizontal illuminance on the desk and impression of brightness in case 1

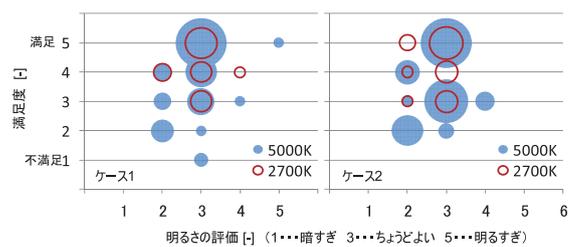


Fig.15 各ケースにおける明るさの評価と満足度  
Impression of brightness and satisfaction

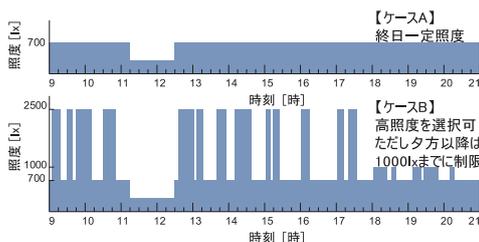


Fig.16 被験者実験における照明の制御条件  
Lighting condition of subject experiment

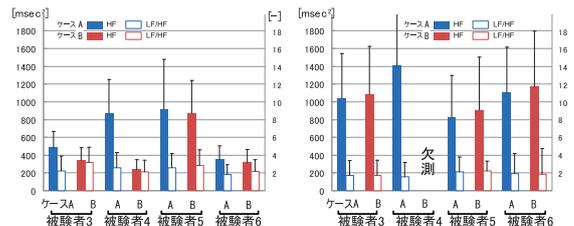


Fig.17 タスク時および睡眠時のHFとLF/HF  
HF and LF/HF in task time and in sleeping time

\*4 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

## 2.6 ヒート&クールピットの省エネルギー性能 Energy-Saving Performance of Heat and Cool Pit

徳村 朋子 Tomoko Tokumura\*6

在室者の健康などを維持するためには、室内に新鮮な外気を入れなければならないが、空調用全エネルギー消費量の中でも外気負荷を処理するために必要なエネルギーが占める割合は大きい。建物の構造上必要な地下躯体は土壌の熱容量の影響で、年間を通じて温度が安定している。地下ピットを経由して外気を取り込むことで、外気の子冷・予熱を行うヒート&クールピットシステムは、建物の空調エネルギー削減に有効な手段である。本節では、東京都内に竣工した建物<sup>10), 11)</sup>における計画段階での数値解析と竣工後の測定結果を紹介する。

同建物では、マクロモデルを用いた詳細な解析により、ヒート&クールピットの有効性や利用するピット範囲、ピットを経由して外気を取り込む期間等を決定した。Fig.18に解析モデルの概念図を示す。またFig.19に検討結果の一例として、ピット利用範囲と取得熱量との関係を示す。外気流路とするピット範囲を拡大することで年間の取得熱量は増大するものの、1ピットあたりの取得熱量は減少する。同建物では1ピットあたりの取得熱量が最大となる地下ピット176m<sup>2</sup>を外気流路とすることとした。

同建物では建物竣工後1年間、外気温や地下ピット各部の温湿度測定を行った。Fig.20に外気温とピット出口空気温度ならびにピットの出入口温度差の経時変化を示す。暖房期間において外気温に対し、地下ピット出口温度は最大8.8℃温度上昇していた。また冷房運転期間においては一部の時間帯を除き、外気温に対し、地下ピット出口温度は低下していた。地下ピットの冬期における加熱効果と夏期における冷却効果が確認できる。

Fig.21に空調運転期間における外調機の顕熱処理熱量の日平均値と地下ピットを経由せずに外気を導入したと仮定した場合の顕熱処理熱量を示す。暖房期間においては、地下ピットを利用することで、外気顕熱負荷が82%に削減されていた。一方、冷房期間においては外気顕熱負荷を20%に削減できており、特に冷房期間の削減割合が大きい結果となった。本建物に導入されている外調機のシステムCOPをもとに算出した外調機での消費電力量を比較した結果、本システムを導入することで、年間14.1MWhの消費電力量を削減できていた。これは建物全体の年間消費電力量(動力)の5.4%に相当する。CO<sub>2</sub>排出量削減効果は4,576kg-CO<sub>2</sub>/年となった。

ヒート&クールピットシステムでは取込外気流路となる地下ピット内の結露発生等の懸念があるものの、地下ピットの止水性や室内へ取り込む空気清浄度確保に留意した設計・施工を行えば、外気負荷削減効果は大きく、ゼロ・エネルギー・ビル実現に向けた有用な省エネルギー技術となり得ると考えられる。

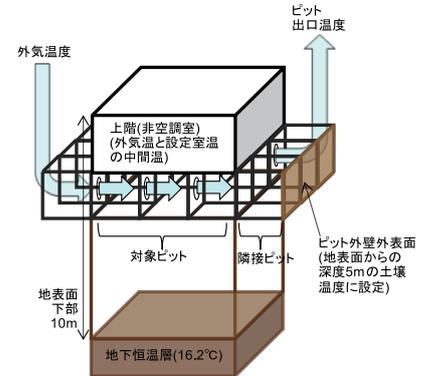


Fig.18 ヒート&クールピット解析モデル  
Thermal analysis model of heat and cool pits

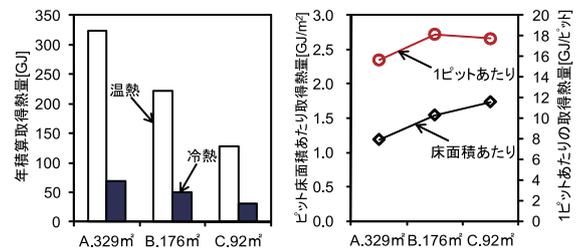


Fig.19 ピット利用範囲と取得熱量  
Interrelation of pit area and sensible heat gain

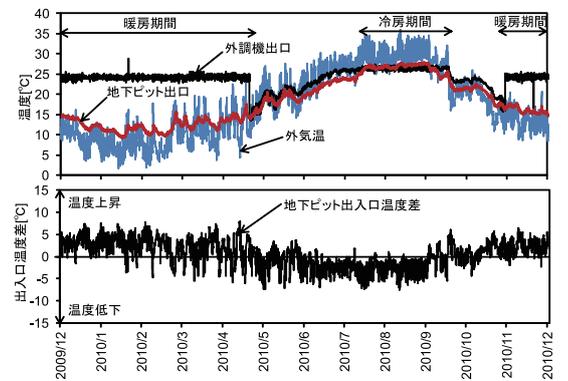


Fig.20 測定期間中の温度変動  
Hourly fluctuation of temperature

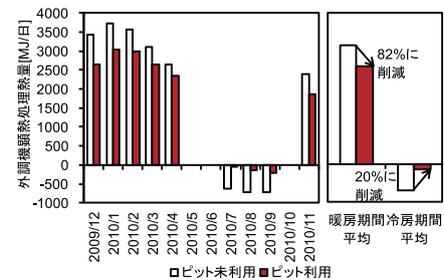


Fig.21 空調時間帯における外調機での顕熱処理熱量  
Sensible heat load of fresh air handling in air conditioning hours

\*6 技術研究所 研究員 Research & Development Institute

### 3 スマートライフオフィス Smart Life Office

近藤 正芳 Masayoshi Kondo\*7

スマートライフオフィスは、建築とITを高度に融合することで個人の好みに合わせて適切に制御できる空間である。これまでに研究開発された技術を統合し、さらに新たな技術を取り込みながらその効果を実証実験するため、当社技術研究所に建設された。

スマートライフオフィスには「パーソナル環境制御技術」「サーカディアンリズムに配慮した環境制御技術」「ビルコミュニケーション技術」などの技術が導入されているが、本章では主に「ビルコミュニケーション技術」について紹介する。

#### 3.1 パーソナル環境制御技術

スマートライフオフィスでは、パーソナル環境制御技術として「タスク・アンビエント照明」「タスク・アンビエント空調」「次世代人検知センサ」が導入されている。

タスク・アンビエント照明は、部屋全体の明るさを制御するアンビエント照明と、個人ごとに制御するタスク照明とを分離することで、省エネ性と快適性とを両立する照明である。室全体としては人感センサや照度センサと連動して必要最低限の照度を保ちながら、1人分のエリアに分割して個別に照明機器を操作できるようになっているため、不要なエネルギー消費を減らすことが可能になる。

タスク・アンビエント空調は、部屋全体の設定温度を制御するアンビエント空調と、個別操作可能なパーソナルファンを用いて、省エネ性と快適性とを両立する空調である。アンビエント空調としては、パンチングパネルを利用した空冷式放射空調によって気流感を抑えた穏やかな室温設定とし、個人の温冷感の違いに応じてパーソナルファンを使用することにより、気温設定は高めであっても体感温度は快適な温熱環境を提供することができる。

これらタスク・アンビエント環境制御技術を効果的に使うために、Fig.22に示す人の在席状態を次世代人検知センサで検知する。一般的な焦電型人感センサは温度変化を捉えることで人の存在を検知するため、オフィス内で静止していると不在と認識してしまう。そこで、温度分布を計測する次世代人検知センサを導入し、静止状態の人を1m×1mの狭い領域で検知している。Fig.23に示すように、長時間静止している状態でも在席しているか否かを個人単位で識別することができるため、より正確に人を検出し、無駄の無い省エネルギー制御が可能になる。

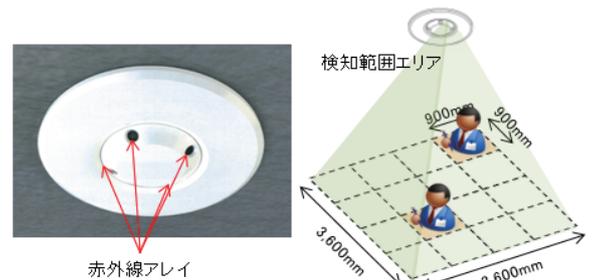


Fig.22 次世代人検知センサ  
New human detect sensor

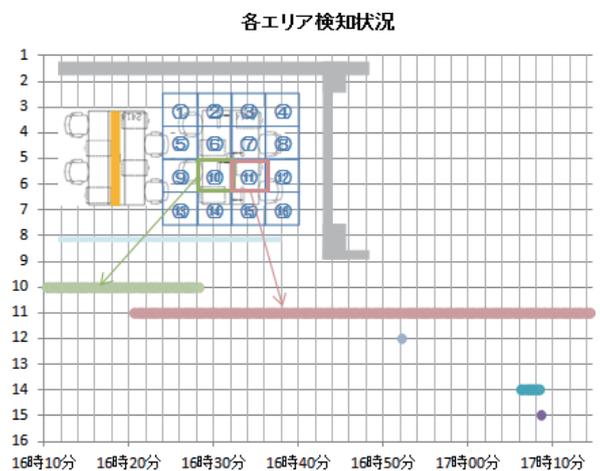


Fig.23 人検知センサによる検出結果  
Result of human detect sensor

#### 3.2 サーカディアンリズムに配慮した環境制御技術

照明や空調が生体リズムに及ぼす影響についての研究を踏まえ、スマートライフオフィスでは、自然な24時間の生体リズム（サーカディアンリズム）に合わせた照明制御、空調制御を行い、物理環境が生体リズムや知的生産性などに及ぼす長期的な影響について継続的に検証している。

\*7 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

サーカディアン照明制御は、光の量により体内時計を調節することを目的としている。調光・調色可能なLED照明を用いて、日中は太陽光と同様に高照度・高色温度として覚醒を高め、夕方以降は低照度・低色温度に変化させることで過度な覚醒にならないよう照明の照度と色温度を制御する。

サーカディアン空調は、空調設定温度を変動させることで深部体温を調節することを目的としている。一日の体温変動の幅を大きくするために、午後からの室温設定を上昇させる制御とし、深い眠りを促す。また、冷房主体のオフィスにおいては省エネルギー効果も期待できる。

### 3.3 ビルコミュニケーションシステム技術

スマートライフオフィスでは、Fig.24に示す新たに研究開発した「ビルコミュニケーションシステム ren.<sup>®</sup>」によって各種環境制御を行っている。以前から社会のトレンドとして環境配慮技術開発が行われてきたが、それぞれの要素を個別にとりいれるだけでは十分な活用ができていなかった。今後はむしろ、これら個別の要素をうまく整理して、統合する技術が重要になってくる、という考えに基づき、研究開発を進めてきた。

ビルコミュニケーションシステム ren. は、ビル管理システムとして、「オープンシステム」「仮想化」「クラウド化」の3つの特徴を持っている。

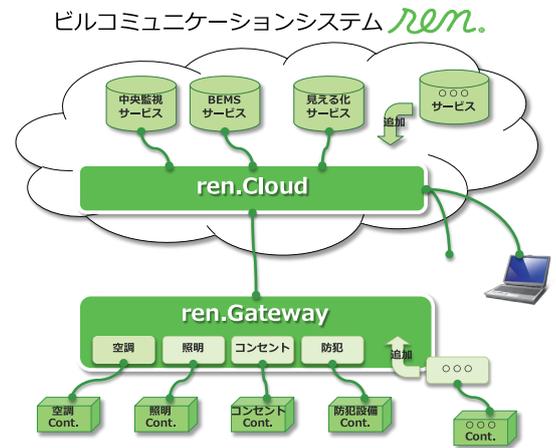


Fig.24 ビルコミュニケーションシステム概念図  
Concept of Building communication system.

#### 3.3.1 オープンシステム

これまで、一般的なビル管理システムでは、照明、空調、防犯などのサブシステムは、それぞれが独立して構築され、各サブシステムを中央監視システムで管理していた。このような場合、サブシステムごとに固有の規格が採用されることや、一部の仕様が非公開であることも多く、サブシステム間の連携には多くの困難が伴う。スマートライフオフィスでは、それぞれの機能をサブシステムとして構築するのではなく、必要な装置やデバイスをネットワーク経由でクラウド上の仮想空間に接続する。具体的には、使用する各設備機器は建物内のゲートウェイ装置に接続されている。そして、ゲートウェイ装置からインターネットを経由してクラウドの管理システムに接続され、各機器の状態は管理システムに反映されるため、各機器の監視や制御はクラウドの管理システムから行う。

建物内の各機器の通信には多種多様な通信プロトコルが混在しているため、ゲートウェイ装置の共通基盤で統合する。ゲートウェイの共通基盤としては、Fig.25に示すようにOSGi (Open Services Gateway initiative) プラットフォームを採用しており、各通信プロトコルに対応するためのモジュール (バンドル) をインストールすることで多様なプロトコルに対応できるようになる。バンドルは遠隔から動的に操作可能で、システムを停止することなくバンドルのインストール、アンインストール、起動、停止が可能となっており、他の機器に影響を与えずにバンドルを追加・更新することができる。OSGiプラットフォームは仕様が公開されているため、新たな導入する機器や独自規格で通信する機器であっても制限なく対応することができる。

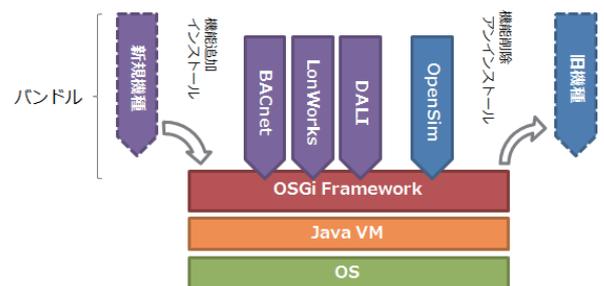


Fig.25 OSGiプラットフォーム  
OSGi Platform

これによって、利用者個人のニーズに合わせて照明や空調など様々な種類の多数の設備機器を操作するパーソナル制御が可能になる。また、管理面からも、複数のビル管理データを企業ごとに統合管理することや、1つのビル管理データを複数の企業に配信することが可能になる。

#### 3.3.2 仮想化

ビルコミュニケーションシステム ren.では、クラウド上に現実空間に対応する仮想空間を構築し、現実空間の各機器と仮想空間の各機器の状態を同期させている。仮想空間内で各機器や制御モジュールが情報をやり取りするこ

とで仮想空間上の設備制御が実現し、Fig.26のように仮想空間での制御は現実空間にも反映される。仮想空間内のソフトウェアによって各機器を連動させることにより、特定のメーカーに依存せずに処理ロジックを構築し、目的とする機能を成立させる構成となっている。スマートライフオフィスの仮想空間と現実空間の例をFig.27に示す。

このようなシステム構成にすることによって、現実の設備機器の通信方式やネットワーク構成の制約を受けずに機器を同等に扱うことができ、連動設定やトリガ設定が容易になる。また、現実の機器が更新されても、制御内容が変わらなければそのままアプリケーションを使い続けることもできる。そして、仮想空間では、建物同士

の物理的な距離とは関係なく同等に扱うことができるため、複数建物間での設備制御も容易に実現することができる。

このように、建築が提供する機能やサービスはクラウド上の仮想空間でアプリケーションとして構築される。このため、例えば「セキュリティ用のセンサによる照明設備利用状況の見える化」など、異なる用途の機能を連携させた新規のアプリケーションを必要に応じて追加することが可能となる。

また、各機器は他のハードウェアに依存せずに仮想空間と接続することで、更新や新規導入をユーザーレベルで容易に実施でき、施設管理者やユーザーによる建物運用の自由度を飛躍的に高めることができる。

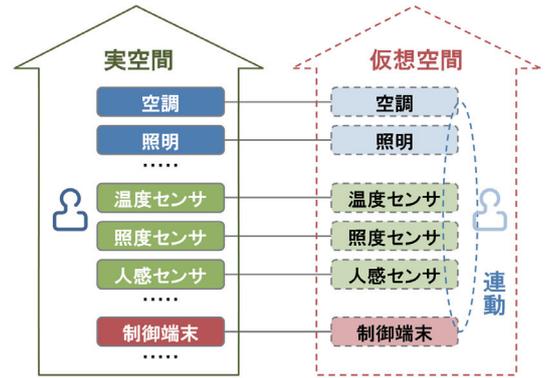


Fig.26 建築設備の仮想化  
Virtualization of building equipment

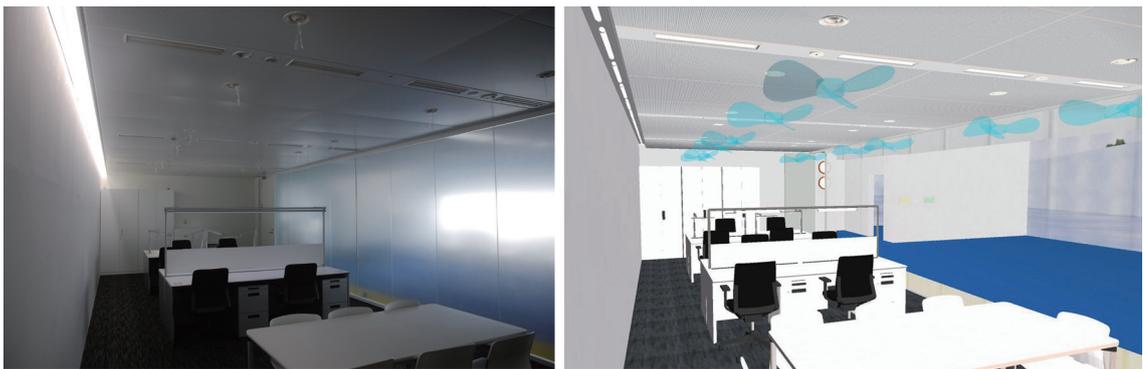


Fig.27 現実空間 (左) と仮想空間 (右) の例  
Real space (left) and virtual space (right)

このシステムを適応した建物制御システムでは、技術の進化や利用者・利用方法の変更などに対応しながら効率よくエネルギーを利用することが可能となるため、求められる機能が変わっても目的に応じたサービスを継続に提供し、建物を永続的に使い続けることができる。

### 3.3.3 クラウド化

これまでのビル管理システムは、システムの安定性・信頼性の観点から建物内に設置され、専門スキルを有する管理者が中央監視室などで常駐管理していた。これに対し、近年のネットワーク技術やデータセンターの発展を受け、必ずしも建物内にシステムサーバを設置しなくても信頼性の高いシステムの構築が可能になってきた。クラウド上にシステムを構築し運用することで、単一建物へのサービス提供に留まることなく、複数建物の施設・エネルギー管理を一元的に行うシステムを実現できるようになった。Fig.28に示すようにクラウドへの移行によるメリットとしては、BEMSやセキュリティなどの基本的なサービスだけでなく、様々な事業者が提供するサービスとの連携が可能

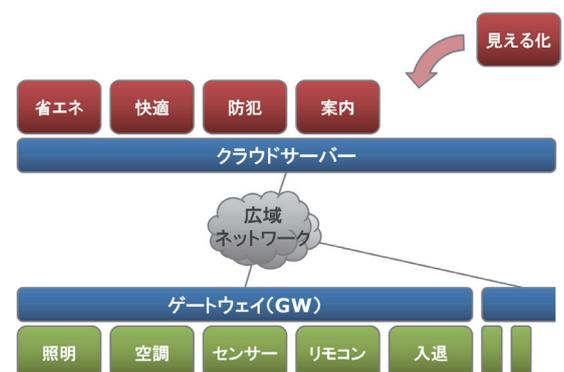


Fig.28 クラウド化  
Use cloud computing system

になることが挙げられる。クラウドやネットワークを通じて社会システムとつながることによって、オフィスは仕事のためのスペースを提供するだけでなく、生活を支えるサービス・プラットフォームとしての役割を担う存在となり得る。

そして、クラウド型BEMSの導入では、Fig.29に示すように複数拠点の設備機器を一元管理できることに加えて、以下に示すようなメリットを得ることができる。

まず、小規模の物件にも導入可能になる。中小規模のビルには維持・運用コストなどの事情によってBEMSを導入できない場合があるが、クラウドに接続可能なゲートウェイ装置を置くことで、建物内でサーバ機器などを保有せずにBEMSを使うことができるようになる。規模が小さく、導入時期が異なっても、同じクラウドのシステムを利用することによって、大規模なシステム改修をすることなく比較的容易に拠点を追加することができる。

さらに、各拠点での設備制御ロジックの構築だけではなく、拠点間をまとめて制御することができる。例えば、北海道の太陽光発電量が余剰があるため九州で余剰分を蓄電するなど、全国各地の事業者間での仮想的な電力融通も可能になる。このことによって、各拠点だけでの省エネルギー制御だけではわからない、事業者全体としての省エネルギー施策が可能になる。

そして、外部からの情報を取り込んで制御に反映させることも容易になる。例えば、インターネットで得られる電力逼迫状況を反映させて節電レベルを変更することや、天気予報を反映させて自然エネルギーの発電量予測、蓄電量や放電量を調整することも可能になる。

また、どのクラウドも建物側から見て等価な位置付けになるため、複数のクラウドを切り替えて運用することも可能になる。例えば、節電制御はA社が提供するクラウド、入退管理はB社のクラウドなど、用途に応じたクラウド選択が可能になるため、導入後のスケールアップや用途変更に伴うサーバリソースの拡張にも対応できるようになる。BCPの観点からも、遠隔地にサーバを設置することで、災害時の事業継続計画が立案しやすくなる。

### 3.3.4 省エネルギー技術としてのビル管理システム

京都議定書の発効を受けて、目標達成のための取り組みの一つとしてITを活用した適切なエネルギー管理（HEMS・BEMS）の普及推進が挙げられ、推進事業としてBEMS導入に対する補助が行われてきた。また2004年、2006年の省エネ法改正により省エネ措置の届け出が義務付けられ、事業者のエネルギー使用報告義務に対するソリューション、省エネ措置の実施例としてのBEMS導入が進められてきた。しかし、エネルギー管理は省エネ対策の基本であるにもかかわらず、計測機器、対応設備、管理サーバなどの設置が必要となるため、一般的にBEMSは高価・高度なシステムとなっており、特に報告義務のない中小規模のビルでは十分なエネルギー管理が行われていなかった。

ところが、2011年3月11日の東日本大震災によって電力供給能力が大幅に低下したことを受けて、ビル機能の1つである「節電」が喫緊の課題として注目されるようになった。

一般財団法人環境共生イニシアチブによる「エネルギー管理システム導入促進事業費補助金（BEMS）」では、中小ビル等の小口の電力需要家におけるBEMSの導入を促進するために、2012年にBEMSアグリゲータを公募により募集し、21事業者が登録された。この事業では、「BEMSアグリゲータ」が重要な役割を果たす。BEMSアグリゲータとは、「中小ビル等にBEMSを導入するとともに、クラウド等によって自ら集中管理システムを設置し、補助事業者に対しエネルギー管理支援サービスを行うエネルギー利用情報管理運営者」とされている。この登録されたBEMSアグリゲータからBEMSを導入し、1年以上のエネルギー管理支援サービスの契約を行う場合に、BEMS導入費用の一部について補助を受けることができる。

BEMSアグリゲータは、クラウド技術などを利用して複数の物件を集中管理することが想定されている。このような事業を支えるネットワークインフラの整備やクラウドコンピューティング技術の発展によって、これまでは

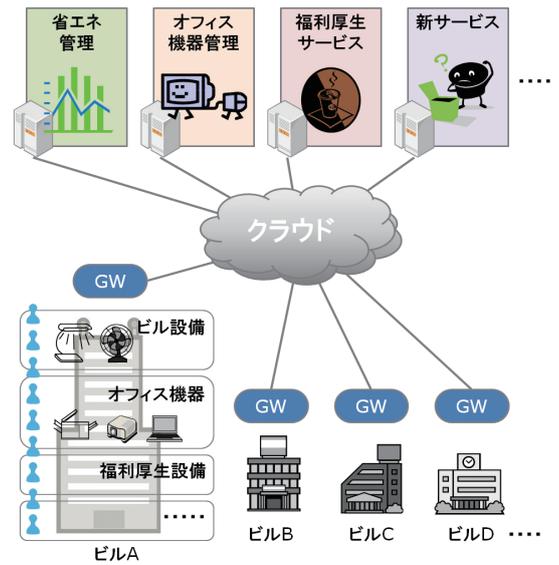


Fig.29 クラウドによる連携  
Operation by cloud computing technology

BEMS導入が難しかった中小規模ビルでも、BEMSアグリゲータへ外部委託することでエネルギー管理を始められる環境が整いつつある。

## 4 結論

### Conclusion

当社は、環境コンセプトに掲げた「人の感性や創造性を高め、自然を活かし、ゼロカーボン建築からカーボンニュートラルな都市への実現」を目指して、2020年のZEB実現に向けて環境技術の開発に取り組んでいる。国内では、東京大学駒場キャンパスのように補助事業を活用したZEB実証プロジェクトも立ち上がっている。個々の省エネルギー技術をシステム全体として統合的に最適制御し、不足分は再生可能エネルギーで補うことで、技術的にはZEB実現の可能性が見えてきた。しかし、こうした技術の導入には当然ながら追加投資が必要になる。ZEBの普及を図るには、税制優遇やラベリングによる不動産価値の向上といったインセンティブを与えることも重要である。今後、エネルギーの面的融通や情報活用による付加価値サービスの提供、災害時の防災機能強化を図ったスマートコミュニティの提案にも取り組む。

### 参考文献

- 1) 粕谷敦, 高井啓明, 阿部裕司, 有吉淳, 鈴木厚志, 高橋幹雄:「自然エネルギーを活用したゼロエネルギービルに関する研究(その4)」, 日本建築学会大会, pp.1099-1100, 2011年9月
- 2) 左 他: ダブルスキンファサードによる日射遮蔽と室内自然通風の一体的な計画と実施(第1報) 計画と数値解析による事前性能評価, 空気調和・衛生工学会梗概集, 2012
- 3) 菊池 他: ダブルスキンファサードによる日射遮蔽と室内自然通風の一体的な計画と実施(第2報) 短期実測による性能評価, 空気調和・衛生工学会梗概集, 2012
- 4) 和田一樹, 樋口祥明, 高橋幹雄, 粕谷 敦, 田辺新一 他:「タスク・アンビエント対応膜放射冷房システムに関する研究(その1)~(その5)」, 日本建築学会大会, 2010年9月
- 5) 和田一樹, 高橋幹雄, 宮崎貴士, 田辺新一 他:「潜熱・顕熱分離を考慮したパーソナル空調システムの快適性に関する研究(その1)~(その4)」, 日本建築学会大会, 2012年9月
- 6) 石橋良太郎 他: ライトシェルフによる建築的採光装置の研究・開発 その1, その2, 日本建築学会大会, 2012年9月
- 7) 石橋良太郎 他: ライトシェルフによる建築的採光装置の研究・開発(多段式・可動型インナーライトシェルフの導入効果予測), 空気調和・衛生工学会梗概集, 2012年9月
- 8) 黒木友裕 他:「人にやさしい空間」の研究 その16, 日本建築学会大会, pp.81-82, 2009年8月
- 9) 高橋幹雄 他: 人にやさしい空間 生体リズムに配慮したタスク・アンビエント照明の光環境が心理・生理に与える影響 その1, その2, 日本建築学会大会, 2012年9月
- 10) 徳村朋子 他: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 学生寮における年間測定結果による検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2011
- 11) 徳村朋子 他: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 シミュレーションによる年間の熱特性評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2012