

エネルギー自立型サステナブル研究施設 ICT を活用した先進の中央監視と今後の取組

柴田克彦・鈴木徳利*¹・平原美博
清水昭浩・木村健太郎・羽鳥大輔*²・武藤友香*²

The Energy Self-Sufficient Innovation Center Advanced Central Monitoring System Utilizing ICT

Katsuhiko Shibata・Narutoshi Suzuki*¹・Yoshihiro Hirahara
Akihiro Shimizu・Kentaro Kimura・Daisuke Hatori*²・Yuka Mutoh*²

高砂熱学イノベーションセンターには、ICT を活用した先進の中央監視システム（BACS: Building Automation and Control System）を導入している。この BACS は、クラウドコンピューティングを基盤に、クラウドの中央監視サーバとクライアント、オンプレの監視サーバとクライアント、モバイル操作端末で構成されている。さらに、ビッグデータ計測として無線通信技術を採用し、オフィス空間の詳細な温度計測等を実現した。これらの中央監視システムについて、今後の展開として次世代通信網である 5G を活用したクラウド監視システムを実証中である。また、オフィス内はフリーアドレス・レイアウトにより、空調負荷がダイナミックに変動する。今後、負荷変動を予測しながら最適な運用に向けて、その前段階として居室内温熱環境の自動制御と数値流体力学（CFD）との連成解析を試みた。

1. はじめに

環境負荷削減と知的生産性向上の両立を目指したエネルギー自立型研究施設の高砂熱学イノベーションセンター（以下 TIC）には³⁾、最新の省エネルギー技術と働き方に呼応した新規開発の空調システムが導入されている。これら装置の性能を最大に発揮させるには、情報通信技術（ICT）との連携が必須である。ICT の進歩は著しく、業務分野もしくは産業分野に関わらず様々なシステムの概念実証（POC）が行われている。特に、クラウド事業者が提供するサービスでシステム構築できるクラウドコンピューティング（以下クラウド）、無線通信ネットワーク、そしてシミュレーションを活用したデジタルツインが目を引く。しかしながら稼働の安定性や便益性など不確実な面が多く、建物の中央監視システム（以下 BACS）にまで普及していないのが現状である。サステナブル建築や ZEB 化実現が必須となっている今日において、中央監視システムの機能として、エネルギーマネジメントや運用の最適化の必要性がより高まってきている。ビッグデータと言われる多くの計測データを短い周期で収集するなど、その役割を最大に発揮するには、これらの技術を活用したシステム構築が必要となってくる。さらに、働き方改革に伴い働く人びとが個々の事情に応じた多様で柔軟な働き方を、自分で選択できる環境要求は、オフィス自体の有り様を大きく変化させている。これには、知的生産性の向上と居住者満足度が対でなければならない。この解決策として、TIC にも導入されたフリーアドレス・オフィスがあり、負荷がダイナミックに変動するオフィススタイルに適合した空調の運用が課題としてある。

今回これらの解決として、TIC に先進の中央監視システムを構築した。それらのシステム紹介と、空調負荷のダイナミックな変動に対する自動制御の今後の取組について紹介する。

※2020 年度空調調和・衛生工学会大会講演論文^{1,2)} を加筆修正したものである。

*1 東京本店電気計装部、*2 株式会社三菱地所設計

2. 中央監視システムの構築

2.1 システムの狙い

従来 BACS は建物の監視室に設置され、建物の設備運転管理員のみが現地設置のシステムであるオンプレミス（以下オンプレ）で設備の運転状況を監視操作するものであった。しかし、遠隔地で運転管理以外の観点から閲覧が可能となると、運転管理やエネルギー管理などの役割分担体制の適正化が図れる。また、近年省エネルギー性や知的生産性向上の目的でエネルギー分析の高度化が求められ、今まで以上に計測データの収集が必要となってきている。

このような状況を踏まえ、TIC の BACS ではオンプレ以外にも BACS 閲覧を可能とするクラウド中央監視システムと、無線ネットワークを活用し、システムとして構築することで今後のあらゆるニーズに対応するものとした。

構築したシステム全体概要を図 1 に示す。①部分がクラウド、②部分が無線を活用した構成箇所である。プライベートクラウドネットワーク環境と社内ネットワーク環境により通信速度を確保し、社内プライベートクラウドとして公開する形で構築した。

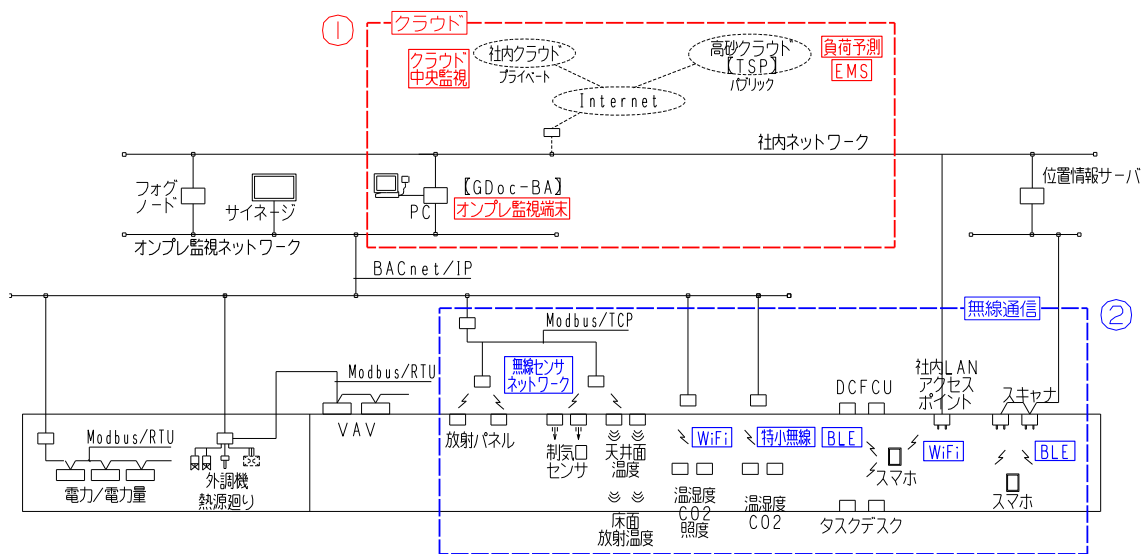


図 1 中央監視システムの概要

2.2 クラウド化の特徴

BACS においてクラウドを採用することにより、

- ・オンプレのシステム機器資産の保守修繕が最小に抑えられる
- ・ソフトウェア資産のバージョンアップ・更新をクラウド上で実施可能となる
- ・保守サービスコストの平準化など、ランニングコストのメリットが得られる

また、建物に導入する際には、

- ・オンプレに設置するシステム機器を最小限に抑える
- ・オンプレシステムにおけるエンジニアリング作業の低減など、インシャルコスト低減および工期短縮を図ることが出来る

以上の通り建物オーナー、設備エンジニアリング会社ともに採用効果が得られることが特徴である。

2.3 クラウドシステム構築の課題

クラウドを採用する際にはオンプレとクラウドをインターネット回線により接続する必要があり、BACS においては通信回線に大量のデータを伝送する。そのため通信容量が非常に大きいインフラの準備が必要となり、クラウド通信サービス費が高くなるなど、ランニングコストが導入効果以上にかかることが、BACS での展開が進んでいない原

因の一つである。

これらを解決する方法として、昨年から本格的に展開された 5G を活用したクラウドネットワーク環境の構築がある。これにより通信容量およびランニングコストを抑えることができ、クラウド中央監視システムにおいても実際の展開が現実的となる。

また、クラウド環境に構築するためインターネット上でのセキュリティ対策を万全とする必要がある。クラウドではセキュリティ対策を考慮した通信方式 (IoT Hub 技術など) が開発されている。クラウドで構築する際にはそれらの通信方式を採用することにより対策できる。5G 以降も将来的に Beyond5G、6G が展開されていくことから、クラウドを採用した BACS のシステム導入は、設備エンジニアリング会社、システムインテグレータに求められるニーズである。

2.4 先進のクラウド型中央監視

前述の通り 5G 以降の次世代ネットワークの採用が必要となるが、今回はプライベートクラウドを採用しクラウド環境を構築した。5G 採用については 3.5 節にて詳述するが、別システムとして 5G ネットワークを構築し並行して検証を実施しており、本システム実証と合わせ将来展開を現実的なレベルとすることができる。

クラウド中央監視システムを構築する上で下記 3 つの運用パターンを想定した。

① オンプレと遠隔地の双方で役割の異なる監視

監視する側がある程度の規模の建物の場合には、オンプレに常時運転管理員などが配置する必要がある。オンプレの運転管理員がすべての業務を行うことより、日常点検や設備の運転管理など実機の確認を伴う業務と、設備の運転計画、エネルギー管理などの業務役割分担を分けて行うことの方が多くは効率的である。オンプレで常時監視、操作ができる BACS を配置、さらに遠隔地でも監視が行えるクラウド監視システムを構築することでオンプレ、遠隔地双方での業務に必要な監視が実施することが出来る。(図 2 参照)

② 多拠点を遠隔地で統合監視

監視対象の拠点が小規模、中小規模な場合は必ずしも常時運転管理員が監視している必要性がない、または運用人員、コスト低減のため削減を求められている建物もある。ただし、この場合においても設備の異常時などでは緊急対応する必要がある。代表異常のみを移報する仕組みを構築しているのはそのためである。しかしながら異常発生のみ把握では不足する設備内容や建物用途の場合は、本来はそこまで必要ではないがオンプレに BACS を構築し運転管理員を配置している。

このような建物において遠隔地にて統合してリアルタイム監視を行うことで、オンプレにおける作業を定期巡回などの最小限の業務に絞り込むことが出来る。(図 3 参照)

③ モバイル端末による操作

ビルなどの建物においてテナントへのサービスとしてテナント内設備の運転操作をテナント執務者のモバイル端末で実施できるシステムは、近年様々な物件で展開されている。クラウド中央監視システムとは少し異なる内容ではあるが、実際の導入に際してはクラウドを活用したテナント実務者向けのサービスとして必要な機能であり、今回の設計コンセプトに含める。

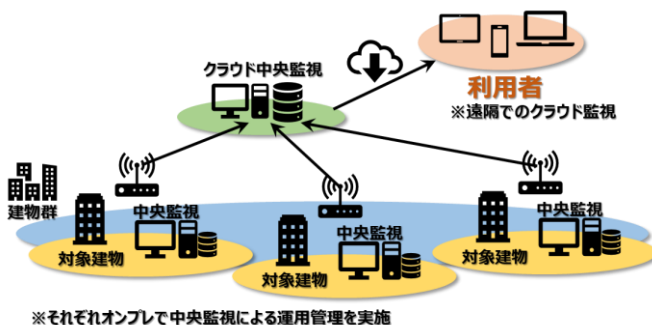


図 2 クラウド想定パターン①

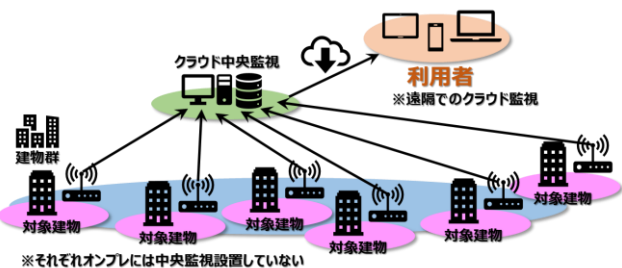


図 3 クラウド想定パターン②

2.5 構築事例

これらのコンセプトをもとに、図4に示すクラウド中央監視システムを今回構成した。また、図5に監視表示例を示す。構成機器の詳細は次の通りである。

①クラウド

プライベートクラウドを採用し、オンプレとクラウド間の通信は社内ネットワークで接続した。インターネット回線を利用したVPN網であるが、パブリッククラウド環境ではないため、今後5Gを採用した際でも対応できるようにクラウドとの通信はIoTHub技術およびJSONコード（現在クラウド事業者で多く採用されているデータ処理に使用するデータ形式）に対応したシステムとしている。

②クラウド中央監視サーバ

クラウド上に配置する中央監視サーバはクラウド構成に対応した監視ネットワークアプリケーションを利用した。IoTHub技術に対応しており汎用的なクラウドプラットフォーム上に構築が可能である。

③クラウド監視クライアント

監視クライアント端末はクラウド監視サーバへブラウザを利用しアクセスすることで監視画面を表示操作可能である。

④オンプレ監視サーバ

前節の想定パターン①②ともに対応できるようにオンプレ側も監視サーバを配置した。想定パターン②の場合オンプレ側にはサーバではなく、クラウドとデータ通信するデータ通信装置（以下G/W）を配置することで対応可能である。G/Wにおいては今回構築したオンプレ監視サーバと同様のシステムで実現できるが、クラウド監視サーバとのデータ通信に必要な機能のみとすることが出来るため、連続稼働に強い通信端末でも稼働できるシステム負荷とすることが出来る。

⑤オンプレ監視クライアント

前節の想定パターン①ではオンプレ側で単独に監視操作が必要となる。クラウド監視サーバへのアクセスによる監視も可能であるが、通信負荷軽減のためオンプレ監視サーバへ直接アクセスした監視も可能である。

⑥モバイル操作端末

クラウド監視サーバでは監視クライアントからのアクセスで監視表示できるとともに、モバイル端末からのアクセスで設備機器のWeb操作表示を可能とした。監視クライアントと別のWebサーバとすることで、テナント実務者からの集中アクセスに対して監視クライアント側への影響を最小限にしている。

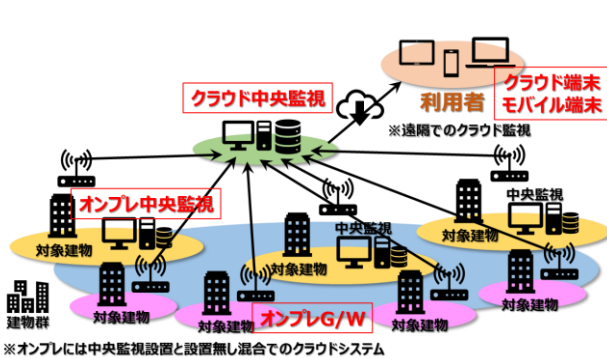


図4 クラウド中央監視システム構成



図5 中央監視の画面表示例

3. 無線通信ネットワーク

3.1 無線通信技術の採用効果

前途の通り今後さらにビックデータ計測が必要となってくる。当建物では室内環境計測を今まで以上に詳細に行うことを目的に挙げた。天井面温度および床面放射温度ではオフィス棟居室空間のみで約 1,100 点の計測を計画した。

多くの計測を実現するには、多数の計測センサ類への配線にかかるコストが、導入を妨げる要因となる。そこで無線通信技術を活用し導入コストを最小限に抑えることで、より多くの計測データを監視できるシステムとする。

3.2 無線通信の特徴

無線通信は様々な方式が規格されており、通信用途により適切な規格やプロトコルを選択し、無線ネットワークを構築している。電波法で定義されている無線局の中で、中央監視などのシステム構築に採用できる無線局および特徴は、以下の通りである。

①特定小電力無線局

特定小電力無線とは、電波法による“免許を必要としない無線局”の内の小電力無線局の一種である。使用する周波数は 429MHz 帯であり、空中線電力 10mW 以下と小さいことが特長である。

②小電力データ通信システム無線局

この無線局には以下が含まれる。1)無線 LAN (IEEE 802.11) 2)無線センサネットワーク (IEEE802.15.4) 3)Bluetooth (IEEE 802.15.1)。いずれも 2.4GHz 帯での無線通信であるが、最大接続台数、通信速度などそれぞれ特徴が違うが、使用する周波数は 2.4~2.5GHz 帯である。

これら無線局は、総務省規定に用途毎の技術基準が定められており、これへの適合が認証された機器（適合表示無線設備）のみしか利用できない。

3.3 導入の無線システム

計測項目と計測点数の概略は以下の通りである。

- ・温度/湿度/CO₂濃度/照度 : 100 点 (各居室毎)
- ・天井面温度/床面放射温度 : 1,100 点 (2 m² 毎)
- ・制気口風量 : 310 点 (各制気口)

また、前報⁴⁾で詳細を示している執務者個別対応のタスク空調についての監視点数は下記の通りである。

- ・DCFCU : 200 点
- ・タスクデスク空調機 : 100 点
- ・放射パネル : 700 点

上記すべてを無線通信による BACS への接続とした。採用した無線通信は以下である。

- ・特定小電力無線 : 室内温湿度 CO₂センサ
- ・無線 LAN : 室内温湿度照度 CO₂センサ
- ・無線センサネットワーク : 風量センサ、放射パネル、タスクデスク空調機
- ・Bluetooth (BLE) : DCFCU

3.4 無線通信電波強度状況

下記に設置範囲が広く電波強度が影響されると想定していた、特定小電力無線での温湿度計測センサ無線ネットワークの電波強度の測定による無線通信実証結果を図 6 に示す。電波強度に影響のある躯体、間仕切りや、建屋間（渡り廊下接続）などを介しての無線ネットワーク構築であるが、経路が遮断されことなく通信が出来ていることが分かる。また、各無線局は複数の経路を確保しており、一部の機器のトラブル時でも別の経路で正常機器の通信を確保できるようメッシュ型ネットワークが形成されていることも確認できた。

3.5 次世代通信網への対応

前途の通りクラウド中央監視システムについて今後の展開を進めていくため、通信回線の課題を解消するべく次世代通信網である 5G を活用したクラウドネットワークを利用したクラウド中央監視システムを構築し実証中である。

将来的な対応を見据え、自営のローカル 5G と通信キャリアによる 5G の双方を活用し実証環境構築を進めている。現在実証中の 5G クラウドネットワーク概念図を図 7 に示す。

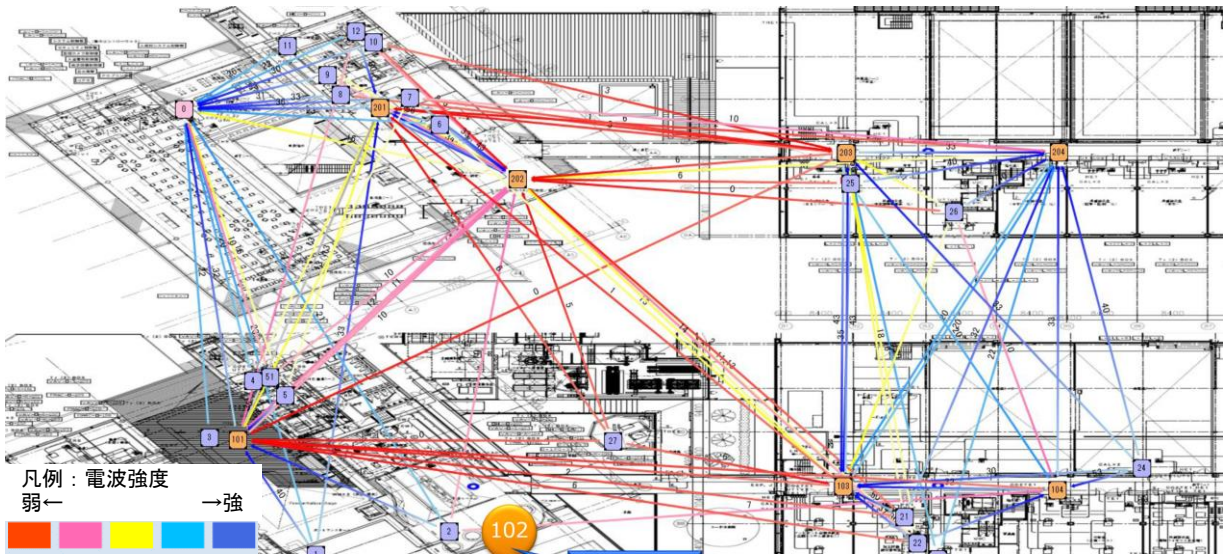


図 6 無線通信電波の強度検証

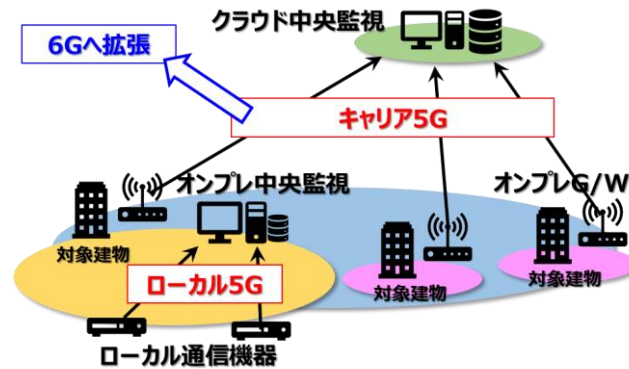


図 7 5G クラウドシステムの概要

4. 今後の自動制御に向けた連成解析の取組

4.1 連成解析のモデル化

室内温熱環境シミュレーションの要である数値流体力学 (CFD) の汎用ソフトウェアには、解析モデル作成・メッシュ生成・計算実行・結果表示の一連の操作を一つのアプリケーションの中で実行することができる。しかし、その操作の一部を外部プログラムと連携して実行することが連成解析である。本報では、CFD のソフトウェアに FlowDesigner(アドバンスト・ナレッジ研究所製)、外部プログラムに Excel(マイクロソフト製)のマクロを使用した。2つを連携させるには、次の機能が必要である⁵⁾。

①オートメーション機能

Excel から FlowDesigner の起動/終了を含め各操作をコントロールする。これにより、操作の自動化で解析作業の効率化が図れる。

②外部連携

Excel から FlowDesigner に対し反復計算における各条件をコントロールする。FlowDesigner では、連携でのターゲットとして解析結果をセンサ情報として出力するようにプログラムされている。センサ情報を基に Excel で制御ロジ

ックの演算などの処理を実行し、再度計算条件のコントロールをすれば、自動制御による室内環境の動的変化を模擬する連成解析が可能となる。

図8に外部連携の概要を示す。

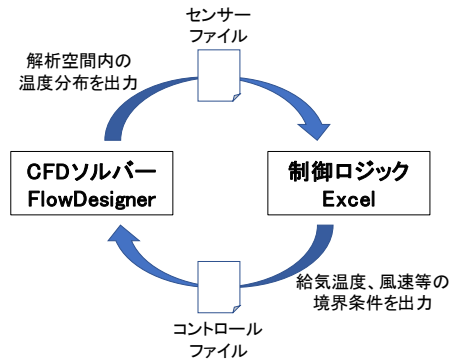


図8 シミュレーションと外部連携の概要

4.1.1 解析モデル

図9および図10に解析対象の建築及び空調システム、図11に解析モデルを示す。フリーアドレス・オフィスの運用のため人体負荷の位置が適宜変動し、オフィスの一部を切り出してのモデル化が不可能である。そこで、オフィスの全空間（約36 mL×15.6 mD×3 mH）をモデル化した。实在設備への実装ではシミュレーションとオンタイムでの自動制御を想定しているため、計算時間の短縮が必要となる。そこで、システム天井のモジュール600 mm×600 mmに合わせた簡略モデルとした。室温評価として人体の前方100 mmにセンサを配置した。

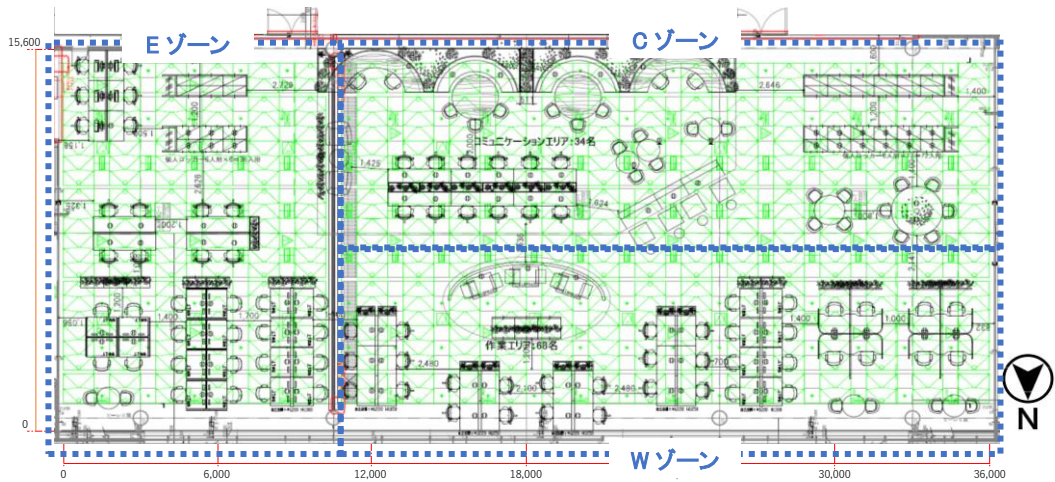


図9 解析対象室のキープラン



図10 空調システムの概要

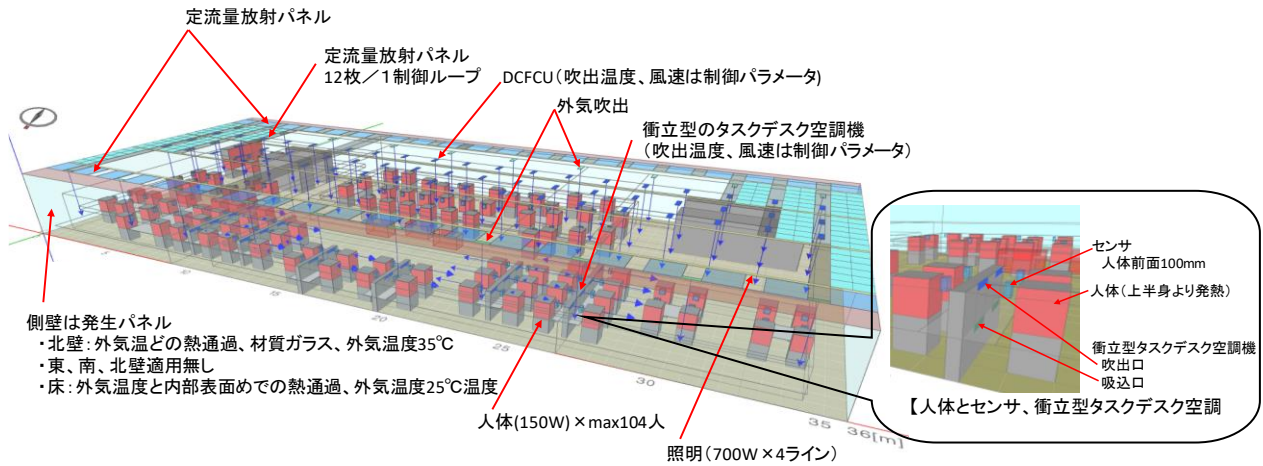


図 11 CFD の解析モデル

4.1.2 解析フロー

解析フローを図 12 に示す。FlowDesigner の実行を計算の始点として、センサ情報を出力する。外部プログラムの Excel では、ファイルの読み込みを起点に制御ロジックとして記載の演算を実行し、境界条件となる給気温度、風量などをファイル出力する。以降、これらの処理を演算終了判定条件まで繰り返す。なお、本報の連成解析では出力ファイルをインターフェースとしているので、FlowDesigner と Excel で計算のステップ数を合わせる必要がある。

4.1.3 解析条件と解析ケース

解析条件と解析ケースを表 1 に示す。解析条件は、通常の CFD と同様の設定である。解析空間外との境界条件は、壁、床は熱授受を考慮し、天井面は外気および DCFCU の吹出風量をブランクパネルから自然流入条件としている。解析ケースは、外気給気および南北の定流量放射パネルをベース空調とし、空間内部の変流量放射パネル、DCFCU、衝立型タスクデスク空調機の運転/停止をパラメータとしている。

表 1 解析条件と解析ケース

【CFD解析条件】	
メッシュ数	480(X) × 208(Y) × 40(Z) = 3,993,600
乱流モデル	K ε
吹出口	外気 タスク
吸込口	自由流入条件
壁面境界	速度 一般化対数則 温度 対流熱伝達率(6.0 W/m ² K)
隣室温度	25°C
内部発熱	照明 700 W × 4列 人体 PC含め150 W/人 プリンタ 150 W × 3台 大型モニタ 200 W × 2台

【解析ケースとパラメータ】

case	外気給気		天井放射パネル		個別空調		解析方法
	風量 (m ³ /min)	温度 (°C)	定流量型冷却能力 (W)	変流量型 (W)	DCFCU 吹出風速 (m/sec)	衝立型吹出風速 (m/sec)	
Case-1	2.28 × 20 ^{*1}	20	80 × 38 ^{*2}	240 × 57 ^{*3}	0	0.3	定常
Case-2				0			
Case-3				240 × 57 ^{*3}			
Case-4				0	0		
Case-5				1.14 × 20 ^{*1}			
Case-6				0.68 × 20 ^{*1}			
連成解析	2.28 × 20 ^{*1}				OFF/ 0.1/0.3/0 .5	OFF/ 0.1/0.2/0 .3	連成、 非定常

* 1: 吹出口の個数 * 2: 定流量型放射パネルの組数
* 3: 変流量型放射パネルのグループ数

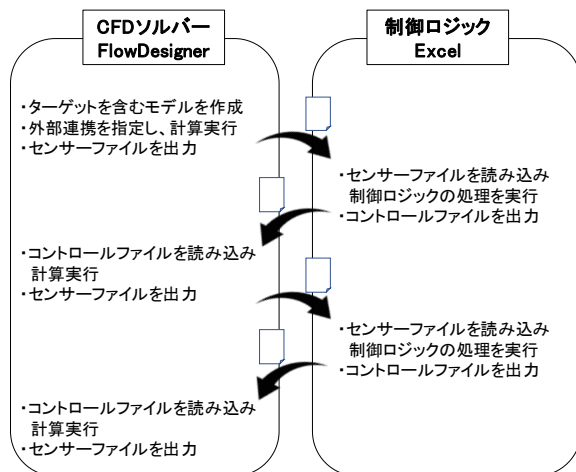


図 12 連成解析のフロー

4.2 解析結果

4.2.1 空調方式による温度分布の違い

CFDの解析事例として、図13に冷房運転時ケース1での居住者座位に相当する床上1.1mのZ面温度コンターを示す。プリンター、大型モニタなど局所的な発熱負荷周辺は温度が高くなるものの、人体周辺の温度分布はさほど大きくない。図14に解析ケースごとのゾーン別センサ位置での最高最低と平均温度を示す。Case-1,2とCase-3~6の比較からタスクデスク空調機を運転した場合は、最高最低の温度差が大きくなるのがわかる。また、Case-1とCase-2、Case-3とCase-4の比較から天井放射を停止すると、各ゾーンともわずかに温度差が大きくなることを確認した。さらに、空調方式の組合せ、外気給気量の変更に伴い、センサ部の温度変化が見られた。

以上の結果、空調方式による温度分布の違いが確認できた。なお、実測値との比較ができていないため、解析モデルの妥当性は今後の検証となる。ただし、発熱近傍のブルームなど基本的な流れ場が再現されていることから、相対的な比較は可能と判断する。

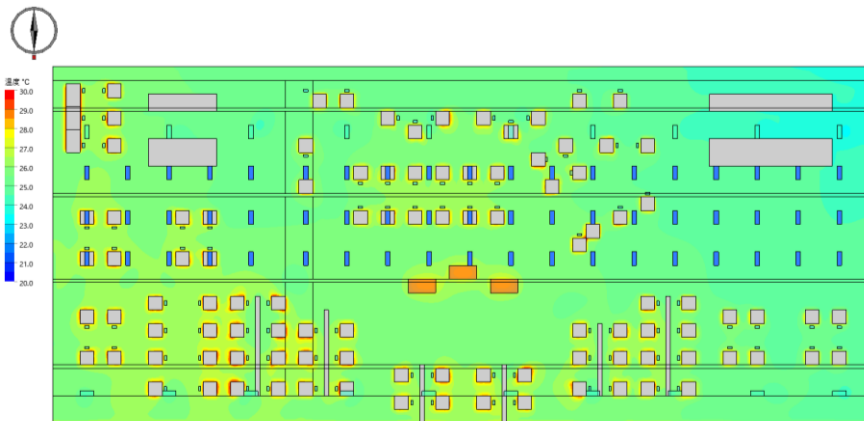


図13 CFDの解析結果の一例(Case-1 Z=1.1m)

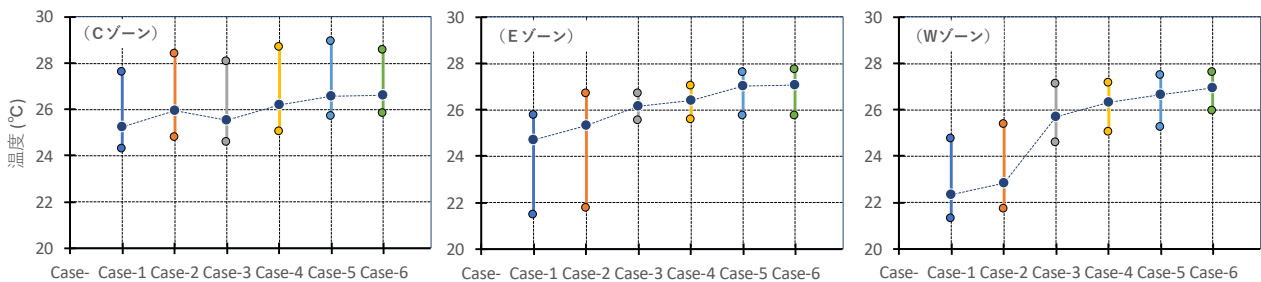


図14 解析ケースによる温度変化

4.2.2 連成解析による個別空調の効果

図15に人体の前方100mmに位置するセンサ温度から個別空調を自動制御した連成解析の一例を示す。センサ温度が26℃を超えると冷風を送風し、さらに温度が高くなると冷風の風速を大きくし、給気温度を下げるという制御ロジックが組み込まれている。図16にセンサ温度の制御目標値が26℃と25℃の解析結果を示す。室温の初期値を25℃として30分間の変動を示しているが、解析の収束性と目標値の違いよりゾーン内での室温変化の違いが確認できた。さらに、今回の制御ロジックでは、個別空調の稼働率が平均35%程度となる結果を得た。これらから、本解析手法は、搬送動力の削減と居住域の快適性を両立させる個別空調の運転検討に有用なものとする。

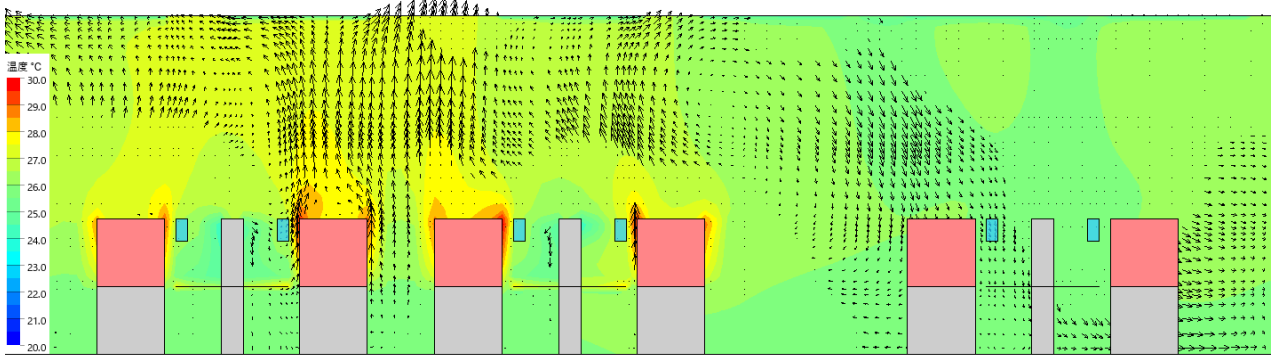


図 15 連成解析結果の一例

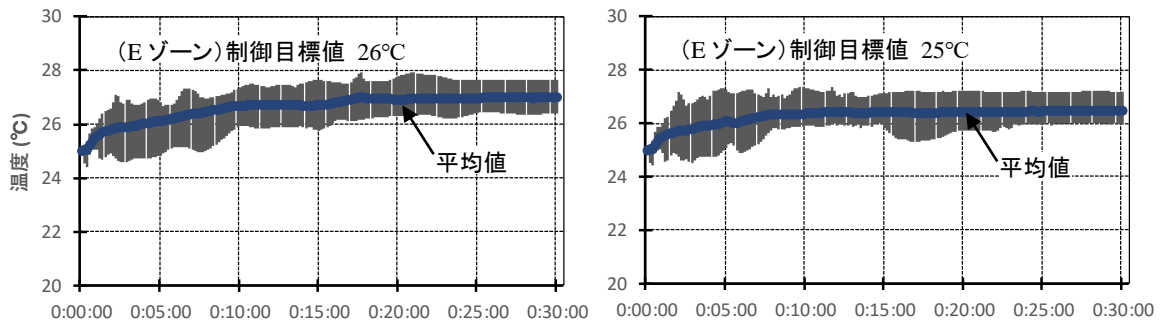


図 16 連成解析による温度分布の推移

5. おわりに

クラウド技術および無線通信技術という最新の ICT を活用した中央監視を実装し、約 4,750 m² の TIC オフィス棟において管理点数 4,500 点という詳細な運転データを収集記録している。さらに、クラウド中央監視システムを構築したことで、24 時間稼働設備に対しても夜間無人での管理が実現できている。

また、オフィス内の空調自動制御と CFD の連成解析が実現できたことで、フリーアドレス・レイアウトのオフィスにおいてダイナミックな負荷変動と執務者の環境要求の変化に応えながら、快適性と省エネルギーが両立できる運転の可能性を得た。これには、モデル予測制御など先進の制御アルゴリズムが必要で、今後の課題となる。

ICT は日々進化しているので、今回実装の技術に留まらず中央監視関連の機能向上に寄与する技術を今後も取り入れ、システムのブラッシュアップとここで実証した技術の普及展開に取り組んでいくつもりである。

文 献

- 1) 鈴木ほか:エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第6報)クラウド中央監視システムと無線通信システムの構築, 2020 年度空衛学会大会(オンライン), J-35, pp.165-168(2020.9)
- 2) 柴田ほか:フリーアドレス・オフィスにおける空調システムの最適化制御 CFD と制御ロジックの連成解析, 2020 年度空衛学会大会(オンライン), J-27, pp.133-136(2020.9)
- 3) 武藤ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 1 報), 2019 年度空衛学会大会, B-24, pp.185~188, (2019.9)
- 4) 木村ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要, 2020 年度イノベーションセンター報, (2021.3)
- 5) フローデザイナー2019リファレンスガイド, p.788

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering Innovation Center has introduced an advanced central monitoring system (BACS) that makes full use of ICT. Based on cloud computing, this BACS consists of three parts: a central cloud monitoring server and clients, an on-premise monitoring server and clients, and a mobile operation terminal. Furthermore, wireless communication technology is adopted for big data measurement, and realized detailed temperature measurement of the office space. Aiming to develop these central monitoring systems, we are demonstrating a cloud monitoring system with the 5G, which is the next-generation communication network. In addition, the air conditioning load dynamically fluctuates in the office due to the non-territorial office layout (hot-desking). In the future, we plan to perform automatic control for optimal operation while predicting load fluctuations. As the preliminary step, we attempted a coupled analysis of automatic control in the office space and computational fluid dynamics (CFD).
