

# ビル用マルチエアコンの開発を支えるシミュレーション

## Simulation for Development of Multi-Split type Air Conditioning Systems

株式会社日建設計 エンジニアリング部門 設備設計グループ  
M&E Engineering Div. Engineering Dept. NIKKEN SEKKEI  
佐藤 孝輔  
Kosuke SATO

ビル用マルチエアコン(Multi-Split type Air Conditioning Systems)、シミュレーション(Simulation)、  
LCEM(Life Cycle Energy Management)、コミッショニング(Commissioning)、ZEB(Zero Energy Building)

### 1. はじめに

ZEB 普及時代の設備システムを構築する際、設計段階でその効果を定量的に予測するとともに、竣工・運用段階において実運転に応じて適正にその性能を検証することが極めて重要になる。ここでは、近年、業務用ビル空調の分野において、旧来の中央熱源システムに代わり普及・進出が著しいビル用マルチエアコンについて開発が進んでいるシミュレーションプログラムの実態について紹介する。

### 2. 背景

#### 2-1 個別分散型空調システムの普及状況

当学会の空気調和設備委員会個別分散型空調方式の総合評価に関する研究小委員会（設置期間：2009年3月～2012年3月）では、1984年～2011年に竣工した10,000件以上の非住宅建築の熱源設備のストック及び動向に関して統計分析し、「ビル用マルチパッケージ型空調システム—計画・設計から性能評価まで」<sup>1)</sup>としてまとめた。本文献によると、ビル用マルチエアコンを含む個別分散型空調システムが近年広く普及していることが確認できる。

##### (1) 竣工年と熱源方式の関係

図1に、竣工年別の主熱源方式の採用比率を示す。同図から、個別分散熱源方式を主熱源として採用する建物の比率（折線）は増加傾向を示しており、1985年に約30%だった比率が2011年には約70%になっていることが確認できる。なかでも、一方、建物用途毎にその増加傾向を分析すると、以下のとおり異なることがわかる。ビル用マルチエアコンが含まれるEHPの増加傾向が大きい。当該傾向と空調システムの更新周期（10～30年）から、EHP及びビル用マルチエアコンが日本の非住宅建築における空調システムの過半を占有していることを示唆している。

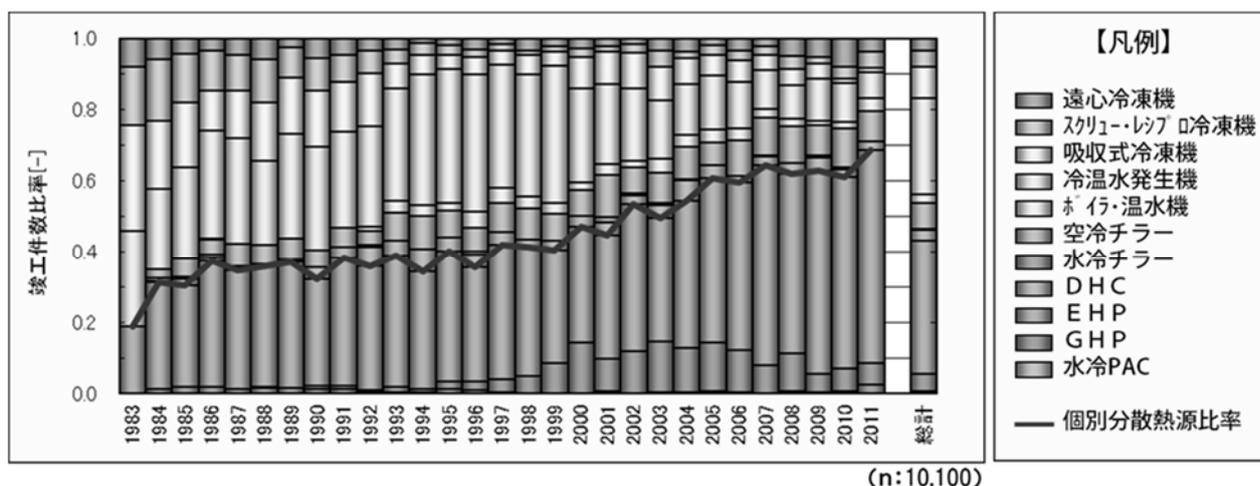


図1 竣工年別の主熱源方式の採用比率

## (2) 建物規模と熱源方式の関係

図2に建物規模別の主熱源方式の採用比率を示す。ここでは、建物規模は、延床面積を5,000㎡単位で集計した。同図から小規模な建物ほど個別分散熱源方式の採用比率が高い、一方、延床面積50,000㎡以上の建物でも個別分散熱源方式が約20%を占めていることがわかる。

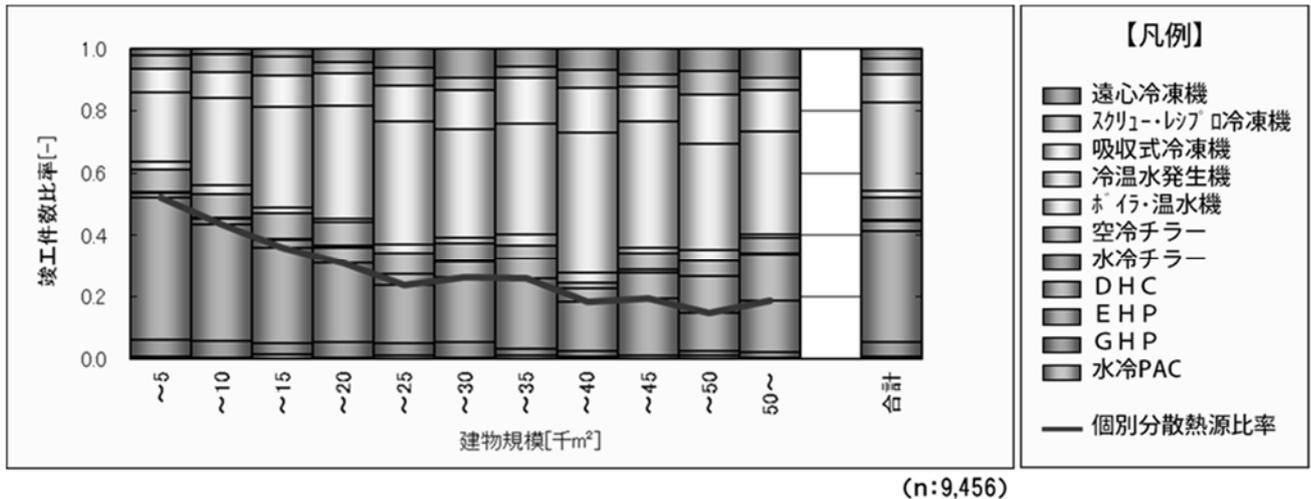


図2 建物規模別の主熱源方式の採用比率

これらの統計分析のようにビル用マルチエアコンが普及を続ける要因として、図3に示すように、従来は、冷媒配管長や室内外機の設置高低差の制約で採用できる建物規模や階数が限られていたものが、製造業者の開発努力により適用範囲が広がったことに加え、空気との熱交換を冷却水で行う（暖房の熱回収は同じ冷却水系を利用してボイラ等の補助熱源から行う）水熱源ビル用マルチのラインナップも充実してきたことにより、従来、中央熱源方式が採用されてきた大規模・高層建築まで市場が拡大し始めていることがあげられる。

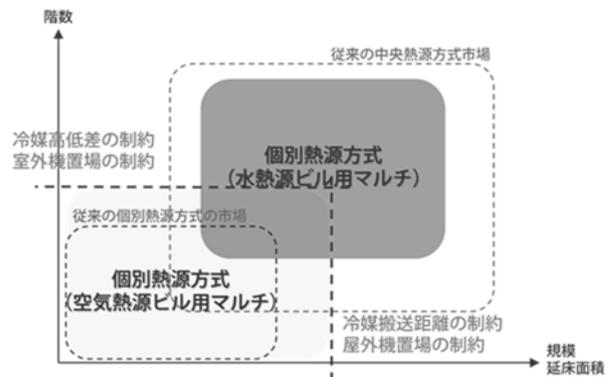


図3 ビル用マルチエアコンの市場

### 2-2 LCEMの必要性

これまで、計画・設計段階、施工段階、運用段階で断片的に行われてきたエネルギー管理を、各フェーズを通じて一貫した目標をもとに行い、確実な省エネルギーと省CO<sub>2</sub>を図る手法を「ライフサイクル・エネルギー管理 (Life Cycle Energy Management :LCEM)」という。具体的には、機器単体及び設備システムの“部分負荷特性”を再現する空気調和システムのシミュレーションツールを活用して、建築物のライフサイクルの各段階における省エネルギー性能を効果的に分析・評価が行うことをいう。

現状におけるエネルギー管理は、図4に示すように、「①特定の段階で断片的なエネルギー管理、②各フェーズを通じた省エネルギー目標が不明確、③設計意図・施工意図の伝達・共有が不十分、

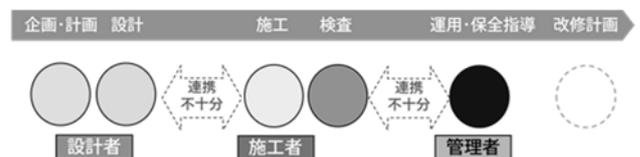
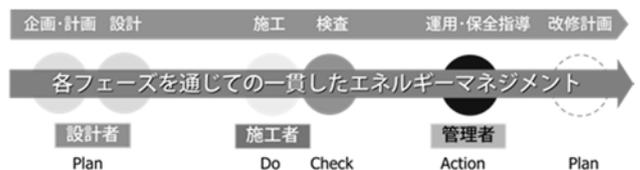


図4 LCEMの現状



#### 【LCEM手法の構築と活用】

- ・ライフサイクルを通じたエネルギー目標の明確化
- ・設計意図の関係者間における共有化
- ・期間性能を把握する“ものさし” (ツール) の整備・活用
- ・運用状態のモニタリングの適正化
- ・的確なコミッションング
- ・省エネルギー省CO<sub>2</sub>化の一層の推進

図5 あるべきLCEMのイメージ

④ピーク負荷に主眼をおいた設計」といった課題があり、ライフサイクル的視点でのマネジメントが不十分と言える。一方、図5に示すように、LCEM手法を活用することで、各フェーズでの目標や評価手法などが共有化され、適正な評価・検証の実施と結果として、省エネルギー及び省CO<sub>2</sub>の推進が可能になる。

### 2-3 ビル用マルチエアコンのシミュレーション開発の目的

前節までに示したように、業務用ビル空調の分野においては、旧来の中央熱源空調システムに変わり、個別分散空調システム（ビルマル）の普及・進出が著しい。また、近年、建築物のライフサイクルにわたるエネルギー性能評価の重要性が認識されている。一方、ビル用マルチエアコンの性能評価方法については、近年コミッシングの必要性が認識されてきた中央方式と比較して確立が遅れている。こうしたなか、ビル用マルチエアコンを“適正”に普及させるためには、定量的な評価を行うためのツール（シミュレーションプログラム）が必要との認識が、学会・業界に浸透してきた。

## 3. シミュレーションツールの開発

### 3-1 シミュレーションに求められる要件

前章の背景からシミュレーションに求められる要件は以下のようにまとめられ、図6に示すように、評価対象や評価メッシュを、マクロに全体を包含できるツールということがいえる。

要件1：ライフサイクルを通じて適用可能

〈効用〉①予測値と実績値との照合が可能、②各段階の情報伝達に有用、③運転員の教育・訓練に有用

要件2：任意の単位での性能評価ができる（全体システム／サブシステム／機器単体）

		評価メッシュ		
		マクロ		ミクロ
評価対象	建物全体	建築物総合環境性能評価ツール <b>CASBEE, LEED等</b> ・建物全体の環境性能効率を定性評価 ・容易に扱える ・主に計画・設計段階で利用	<b>LCEMの観点から必要なシミュレーションツール</b>  <b>LCEMツール等</b> ・エネルギー性能を定量的に評価 ・機器・サブシステムの挙動確認 ・オフピークの機器挙動確認 ・設計段階でも運用段階でも利用できる ・容易に扱える	既往のシステムシミュレーションツール
	システム	<b>静的ツール</b> <b>ACSS, DOE2等</b> ・エネルギー消費量の予測評価 ・サブシステムの詳細挙動解析 ・扱いがやや高度 ・主に詳細設計段階で利用		
	機器	<b>動的ツール</b> <b>HVACSIM+等</b> ・機器レベルの詳細挙動確認 ・室内環境の動的な評価 ・扱いが極めて高度 ・現状では主に研究レベルで利用		

図6 LCEMにおけるシミュレーションツールの位置づけ

さらに、実際のマネジメントや検証作業における実用性を考慮すると、①エネルギー消費量だけでなく、流量や状態値を算出できること（予測値と実績値との照合ができること）、②システム構成の自由度が高く、操作性・拡張性が高いこと、③気象条件・運転条件等の差異を反映可能であること、④トライアル評価、リアルタイム評価、期間性能評価が可能であること、⑤多様な入出力対応が可能であること、⑥機器特性等のブラックボックス化を回避すべき、などが求められる。そこで、今回紹介するシミュレーションツ-

ルの開発においては、市販ソフトの EXCEL<sup>2)</sup>を用いて、オブジェクト化セルズ法を採用することとした。

### 3-2 ビル用マルチモデルの基本構成

個別分散方式は、室外機、配管、室内機がフロン等の冷媒を介して冷凍サイクルを構成しており、これらの構成要素が一体となったシステムとして捉えられる。一方、中央熱源方式における熱源機と空調機という視点では、室外機と室内機は異なるオブジェクトに分けて考える必要がある。開発したモデルでは、室～室内機は、空気状態をコイルシミュレーションし、冷媒配管～室外機は、各種パラメータを用いた代数式から冷媒熱量及びエネルギー消費量を算出するモデルを用いた。

オブジェクトの構成は、図7に示すように、室外機・配管・室内機・室の4つのオブジェクトに分類し、さらに、配管・室内機・室オブジェクトはそれぞれ、配管：2区分、室内機：4区分、室：2区分のサブオブジェクトに分類した。具体的システムのイメージとオブジェクト構成の関係を図8に示す。

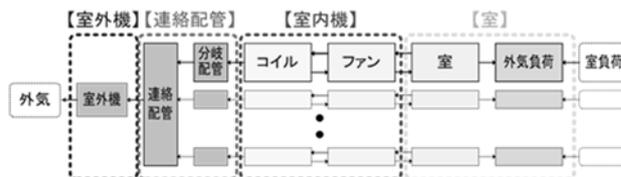


図7 ビル用マルチモデルの基本構成

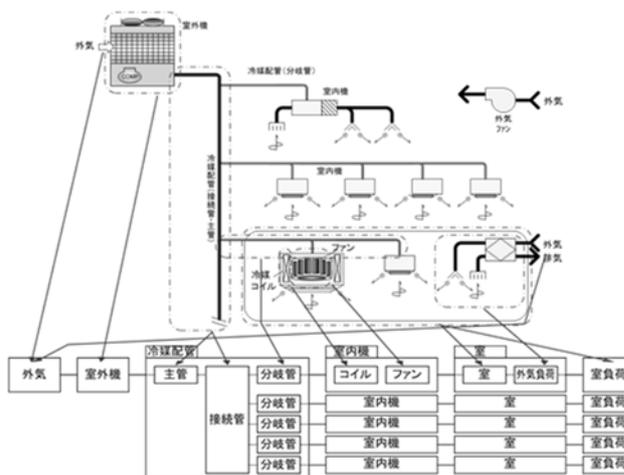


図8 具体的システムとオブジェクトの関係

### 3-3 ビル用マルチモデルの開発状況

開発したモデルの大部分は国土交通省個別分のホームページから無償で公開されている。これまで公開されたモデルを表1に示す。また、これらの公開モデルをベースに、大学や企業が独自の改良を加えて新たなモデルを開発している。一例として、筆者が開発にかかわったモデルの例を表1にあわせて示す。

表1 ビル用マルチ関連モデルの開発状況

■公開モデル		■非公開モデルの例	
¥	公開年	【主モデル】	
1. 標準型空冷マルチモデル		冷凍サイクルモデル	
EHP-1機種、GHP-1機種	2007年	・空冷マルチ	
EHP-2機種に対象拡大	2008年	・水熱源マルチ	
GHP-3機種に対象拡大	2010年	地中熱利用システム	
2. 高効率空冷マルチモデル		外気処理システム	
EHP-1機種	2012年	直膨コイル付外気処理システム	
GHP-3機種	2014年	【オプション機能】	
3. 高顕熱型空冷マルチモデル		水噴霧装置付き室外機モデル	
EHP-1機種	2014年	室外機ショートサーキットモデル	
4. 水熱源マルチモデル			
EHP-1機種	2014年		
5. 発電機能付GHPモデル			
GHP-2機種	2014年		
6. ヒートポンプ調湿外調機システム			
1機種	2014年		
7. 水熱源ヒートポンプユニットシステム			
2機種	2014年		

## 4. ZEB 志向ビル用マルチの性能評価

### 4-1 ZEB 志向ビル用マルチモデルの開発

シミュレーションツールは、第2章に示したように、計画・設計段階、施工段階、運用段階の各段階において、ライフサイクルを通じた共通の目標に向かって、同じ尺度（ものさし）で定量的に評価するための

ツールとして利用される。

一方、図9に示したような、蒸発温度、凝縮温度可変制御などの高度な制御を採用する最新の省エネルギービル用マルチシステム（ZEB志向ビル用マルチ）の詳細な性能把握を行うためには、室外機、室内機、それを連絡する冷媒配管のそれぞれの特性を勘案した精緻なモデルが必要となる。

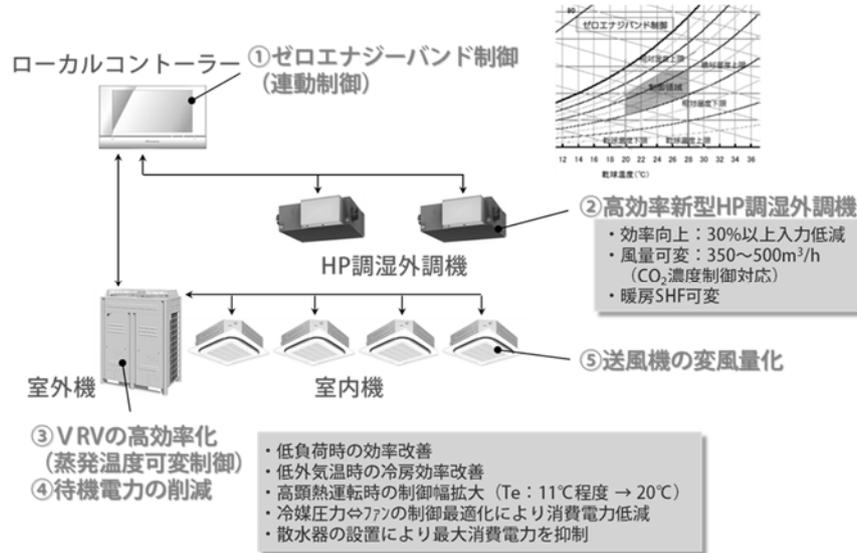


図9 ZEB志向ビル用マルチの開発要素と検証項目

ここで、ZEB志向ビル用マルチの性能評価に求められる要件を以下の通り改めて整理した。

①実測値との比較が可能

②予測性能と実性能に乖離が生じた場合の原因把握が可能

冷媒温度・圧力・循環量を計算値と比較することで、誤差要因分析が可能となる。

⇒ 誤差原因究明・対策が容易：コミショニング力強化

③システム全体ではなく、室内機/室外機単位の特性反映が可能

室内機構成による特性の違いを反映可能

⇒ 実運転時の状況を詳細に予測可能：見える化対策

④冷媒温度制御を組み込んだシステムの評価が可能

冷媒の温度・圧力を伝達情報とすることで、負荷率が異なるゾーン間での蒸発温度最適化がシミュレーション可能となる。

⇒ 高性能機の導入効果を予測可能に：設備設計力強化

⑤実運転上の知見をもとにしたシミュレーション変更が可能

個別発停の影響反映といった、実運転上の知見に基づく計算ロジックの修正が行える。

⇒ バージョンアップの容易性：拡張性の向上

このような性能評価を行う場合には、図10に示すように、システムや機器のエネルギー消費量に影響を与える境界条件となる、外気温度や冷媒の流量・温度・圧力などについて、実態（実測値）と、あるべき姿（計算値）を比較することが求められる。

第3章で示した公開モデルなどで用いられている従来のエネルギー消費量計算では、冷媒の圧力等の計算は行わず、室外機の能力・効率に対して、部分負荷率、室内外機の吸込温度による補正を行っている。一方、ZEB志向ビル用マルチの性能検証のために図11に示すような冷凍サイクルを再現するモデルを開発した。モデルの計算結果は、図12のように示すことができる。

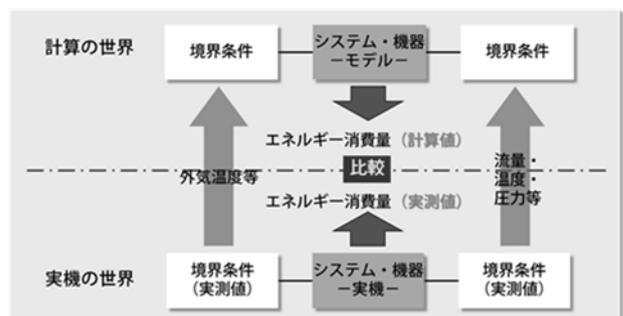


図10 ビル用マルチの性能評価のイメージ

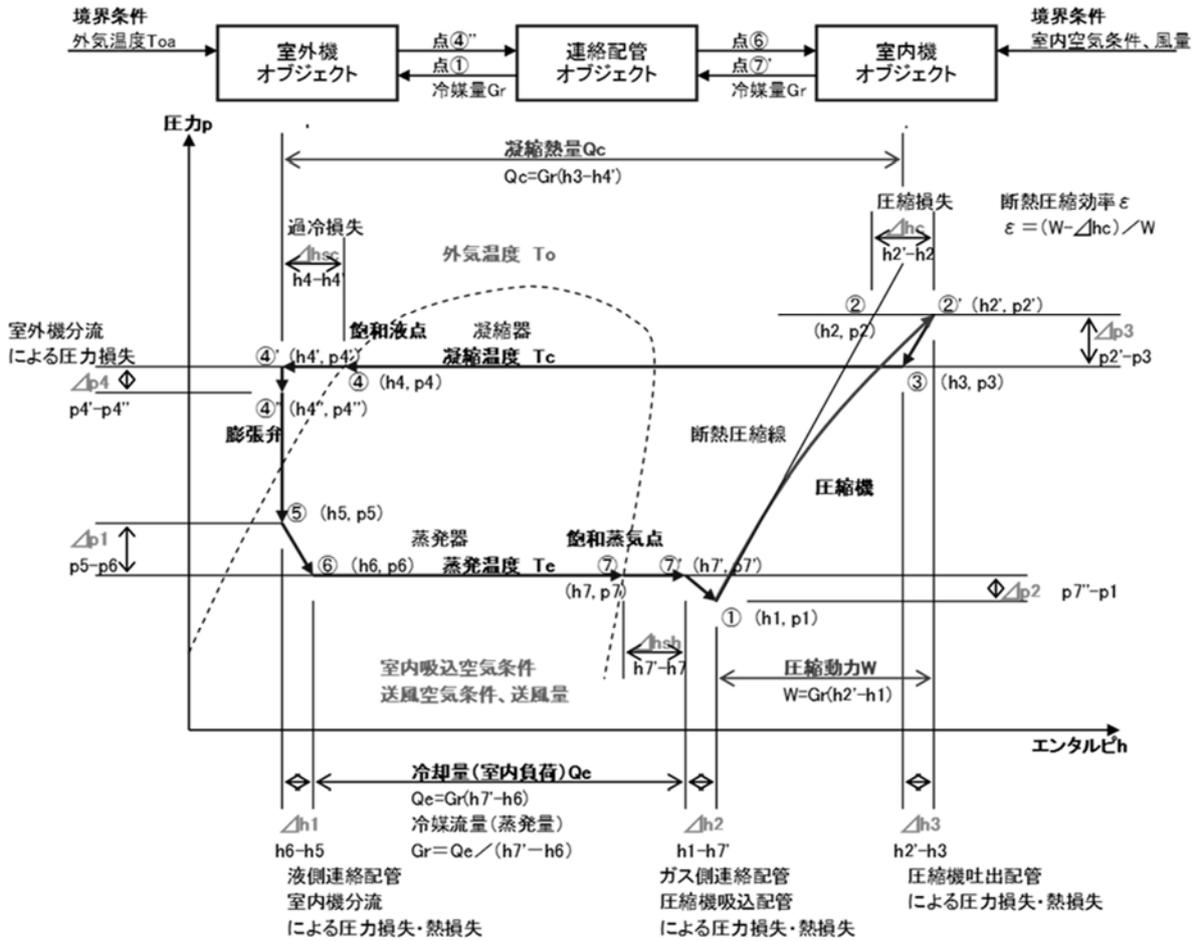


図 1 1 冷凍サイクルモデルのイメージ

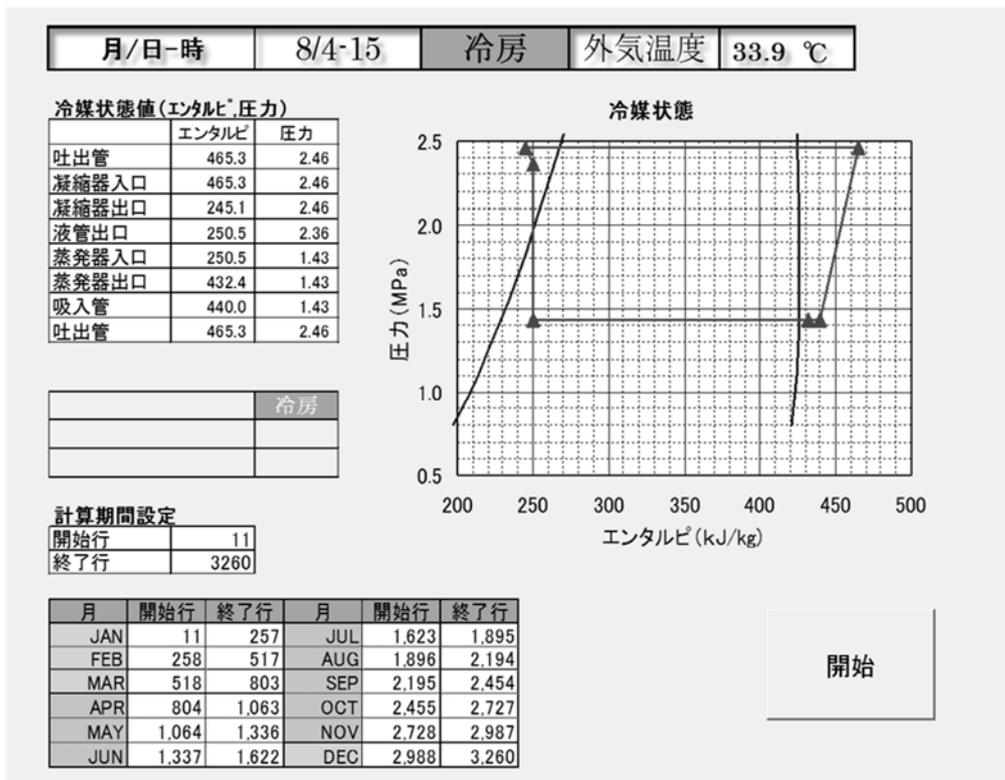


図 1 2 計算結果の表示例 —冷房運転時—

## 4-2 シミュレーションモデルの検証

### (1) モデル建物

名古屋大学内の事務棟である、本部3号館の3階オフィスを対象に、シミュレーションモデルの精度検証及び通年の省エネルギー性の試算を行った。図13にモデル建物の概要を示す。

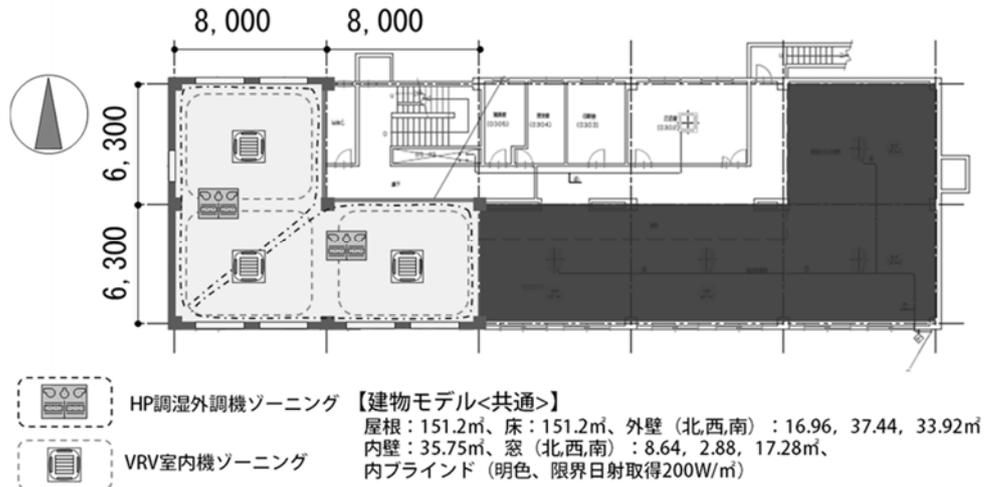


図13 モデル建物概要

### (2) 計算精度

精度検証の概要を以下に示す。

#### ○精度検証の手順

STEP1：実測結果を利用した計算入力条件の算定，STEP2：計算の実行，STEP3：計算結果と実測結果の比較

#### ○対象期間（下記期間の平日）

夏期（冷房期）：2012/7/3～2012/9/27，冬期（暖房期）：2012/12/3～2013/2/28

#### ○検証項目

室外機特性：消費電力の部分負荷特性，COPの部分負荷特性，COPの外気温度特性

室内機特性：室内機の電力消費量特性

HP 調湿外調機：消費電力の部分負荷特性，COPの部分負荷特性システム全体：消費電力の部分負荷特性，COPの部分負荷特性，COPの外気温度特性，時系列での処理負荷及び消費電力，期間電力消費量及び処理分担比率

一例として、期間電力消費量及び処理分担比率の結果を図14に示す。同図から、電力消費量の総量及びVRVとHP調湿外調機の処理負荷の分担比率は、実測値と計算値でほとんど差がなく、システム比較等の検討を行う上での計算精度としては十分な精度が確保できていることを確認した。

### (3) 年間の省エネルギー性能

ビル用マルチエアコンを採用するZEB志向建物の年間の省エネルギー性能を予測するため、前項のモデル建物に対して、表2に示すように建物及び空調システムを省エネ改修した場合を想定した試算を行った。表2に試算ケース、図15に試算結果の一例を示す。同図から、年間電力消費量は、従来システム

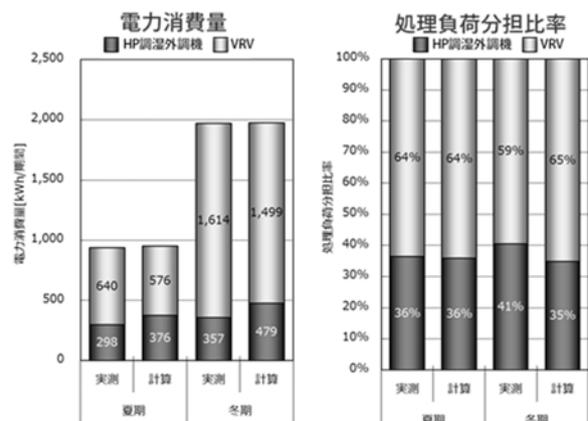


図14 シミュレーションの精度検証結果（期間電力消費量及び処理分担比率）

表 2 試算ケース

ケース	建築仕様	機器発熱 W/m <sup>2</sup>	システム	空調設定	
				冷房	暖房
Case1-0	従来システム	標準	【従来システム】 直膨3体付 全熱交換機1台 +標準型1*4用28HP173)	従来制御	従来制御
Case1-1	従来システム (高断熱)	10		従来制御 26℃ 成行き (計算は50%)	22℃
Case1-2	従来システム (高断熱・高発熱)	20	【開発システム】 調湿外調機 +新型1*4用28HP173)	ZEB制御	ZEB制御
Case2-1	開発システム (高断熱)	10		28℃	20℃
Case2-2	開発システム (高断熱・高発熱)	20	60%	40%	

【共通仕様】 地域：東京、照明発熱14W/m<sup>2</sup>、人員密度：0.2人/m<sup>2</sup>、外気量：25m<sup>3</sup>/h・人、空調期間：冷房4～11月、暖房12～3月、空調運転時間：9～21時  
 【建築仕様】 窓：(標準)貫通3>46mm,(高断熱)Low-E複層、外壁断熱：(標準)厚17+16厚25mm,(高断熱)厚50mm、屋根断熱：(標準)厚17+16厚50mm,(高断熱)厚75mm

(Case1-1) と比較して、ZEB 志向システム (Case2-1) が 74%少ない結果となった。機器別では、外気処理系統及び VRV 室外機の電力削減分が大きく影響している。一方、月別の電力消費量の変動は、開発システム (Case2-1) は、負荷の変動と同様に夏期及び冬期の値が中間期よりも大きくなっているのに対して、ZEB 志向システム (Case1-1) は冬期から夏期に向けて上昇し再び下降する結果となった。

### 5. 最新の事例

大阪府摂津市に 2015 年 11 月に竣工したダイキン工業株式会社の TIC (Technology and Innovation Center) では、第 4 章で開発した ZEB 志向ビル用マルチ用のシミュレーションモデルをさらに改良し、さらに BEMS (Building Energy Management System) に組み込んで日常の運用管理や省エネルギーの見える化で活用している。

#### (1) 空調システム概要

当該建物の事務棟には、第 4 章で紹介した空冷の ZEB 志向ビル用マルチシステムの他に、同じコンセプトを水熱源ビル用マルチに発展させ、さらに一次側の補助熱源に地中熱及び太陽熱利用システムを組み合わせたシステムを採用している。水熱源システムの構成は、図 1 7 の熱源系統図に示すように、①水熱源ビル用マルチエアコン (3 系統：16, 20, 28HP)、②冷却塔：密閉式冷却塔、③ボイラ：真空式ボイラ (185kW)、④温水熱交換器、⑤地熱利用コイルユニット (2 系統)、⑥太陽熱利用システムからなる。

#### (2) システムのモデル化

本建物では、水熱源ビル用マルチシステム用のシミュレーションモデルで、地中熱利用システムや太陽熱利用システムが利用できるように改良を行った。システム全体をモデル化した場合のイメージを図 1 8 に示す。一方、本建物では、開発した計算モデルを BEMS に組み込み、運用段階で活用することを想定し

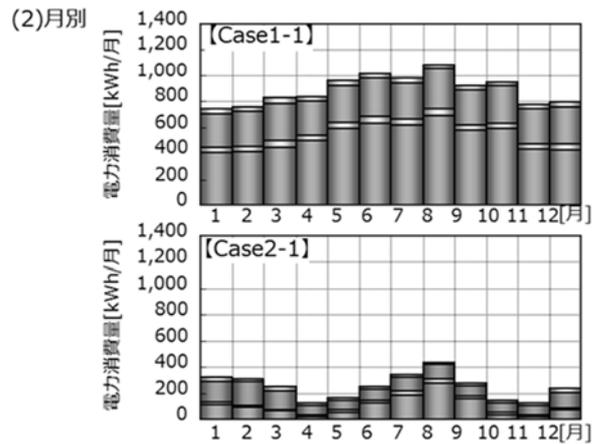
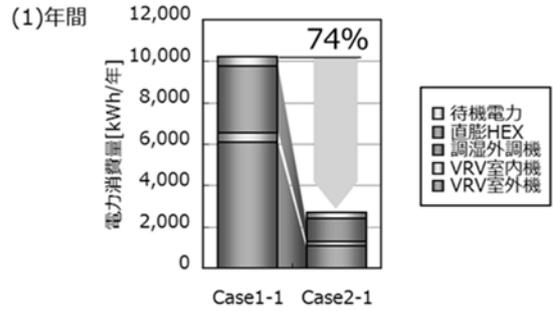


図 1 5 試算結果 (電力消費量の機器別構成)



図 1 6 TIC の外観パース

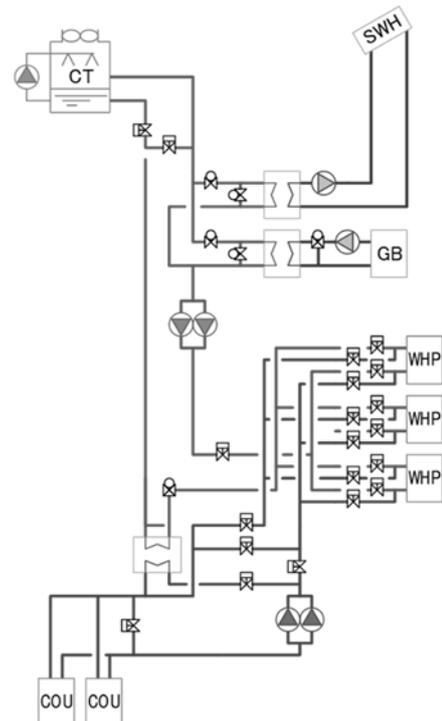


図 1 7 熱源系統図 (水熱源系統)

ている。通常のモデルでは下流側の境界条件を室負荷としているが、実運転において室内機ごとの室負荷を計測することは困難なため、機器側から別途収集した運転情報をもとに、CC法（コンプレッサーカーブ法）を用いて熱交換ユニットごとの冷暖房負荷を別途算出した結果をBEMSで収集し、当該データをシミュレーションの下流側の入力条件とした。BEMSに組み込んだ計算モデルを図19に示す。

(3) BEMSとの連携

前項に示したように、本建物ではBEMSで収集した実運転データを入力条件として、システムに組み込んだシミュレーションプログラムを10分ごとに実行し、実運転の結果と試算結果を時々刻々比較評価できる計画としている。図20にデータ連携のイメージを示す。

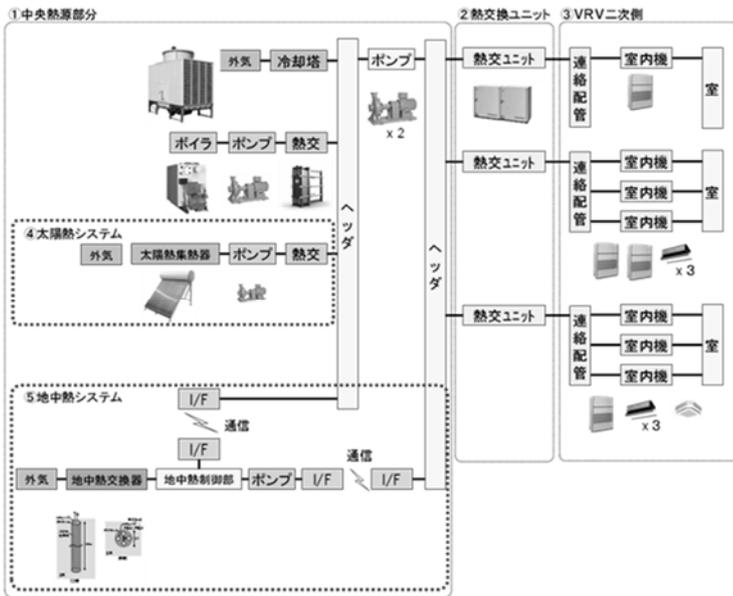


図18 水熱源システム系統全体のモデル化イメージ

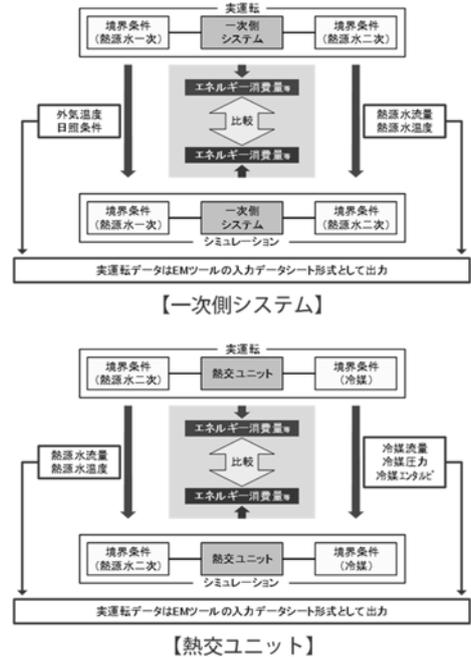


図20 シミュレーションモデルとBEMSの連携イメージ

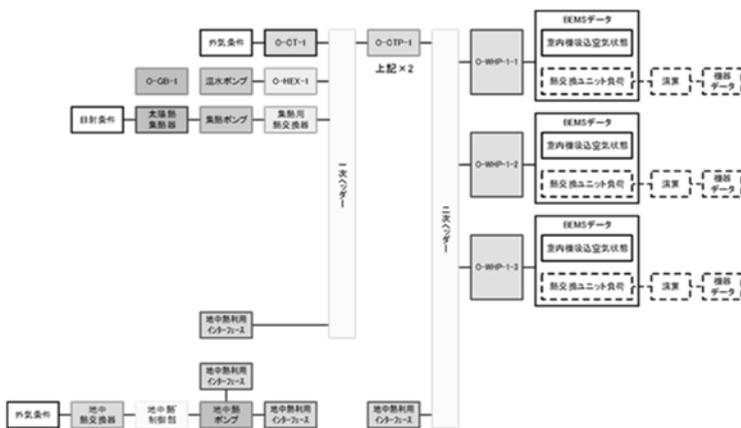


図19 BEMSに組み込んだ計算モデル

<参考文献>

- 1) 空気調和・衛生工学会：ビル用マルチパッケージ型空調システム—計画・設計から性能評価まで，平成26年9月
- 2) Microsoft：Microsoft®Office EXCEL
- 3) 佐藤孝輔，他：ライフサイクルエネルギー管理のための空調システムシミュレーション開発（第17報），2008
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課：LCEM ツール ver3.10 操作説明書，平成26年2月
- 5) 佐藤孝輔，他：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～第8報），2012, 2013, 2014