空調システムシミュレーション ツールの比較研究

— 第一報 DeST と LCEM ツールの比較 —

坂井友香 — * 1 楊 湛 — * 1
竹島卓磨 — * 1 渡邊 剛 — * 2
尹 奎英 — * 3 丹羽英治 — * 4
時田 繁 — * 5 奥宮正哉 — * 6

キーワード：
システムシミュレーション, LCEM, コミッショニング, DeST

Keywords:
System simulation, LCEM, Commissioning, DeST

THE COMPARATIVE STUDY OF THE AIR-CONDITIONING SYSTEM SIMULATION TOOL

— Part 1: Comparison of DeST and LCEM tool —

Yuka SAKAI — * 1 Zhan YANG — * 1
Takuma TAKESHIMA — * 1 Takeshi WATANABE — * 2
Gyuyoung YOON — * 3 Hideharu NIWA — * 4
Shigeru TOKITA — * 5 Masaya OKUMIYA — * 6

From the viewpoint of indoor environmental control and CO₂ discharge reduction, it's necessary to evaluate the air-conditioning system in life cycle. And the system simulation is effective for evaluating an air-conditioning system. We compared "DeST" with "LCEM tool", which are the air-conditioning system simulation program, in the characteristic, calculation algorithm, function and result of simulation for the model building. They have some difference of handling components and the calculation algorithm. However, we showed we can get almost same result when we adjust points that we can.

1. はじめに

日本の建築設備、特に空調設備の分野において、「ライフサイクル性能検証過程（コミッショニング）」や「ライフサイクルマネジメント」の必要性が広く認識されつつある。すなわち、空気調和システムを適切に設計・施工し、建物を使用する全期間にわたり適切に維持・管理していくことが、室内環境の適正制御、CO₂排出量削減の両方の観点から重要であるといえる。

そのためには、オフピーク期を含めた季節や期間ごとのシステム挙動や室内環境・エネルギー性能を把握し評価することが必要であるが、丹羽¹⁾が述べるように、空調システムは、個別に異なる非線形な特性を持つ複雑な系であり、それを評価するツールにはコンピュータを利用した「システムシミュレーション」が有効である。

一方で、利用者は、多種類のシミュレーションツールから自身の目的に最適なツールを選定する必要があるが、現実的にはツールの特徴や計算結果を比較検討した調査研究の事例が少なく、各ツールの特徴を十分に生かした利用をされていない場合がある。

そこで著者らは、近年開発され実建物のシミュレーションに適用され、その計算結果の妥当性が示されており²⁾³⁾今後、建物のライフサイクルにおいて様々な用途への活用が期待される「LCEM ツール」と「DeST」に着目した。そして、その特徴や機能、同一のモデル建物を対象としたシミュレーション結果の比較を行い、その結果について報告する。

2. 対象ツールの概要

2.1 DeST の概要

DeST (Designer's Simulation Toolkit) は、中国北京清華大学の研究グループにより開発された空調システムシミュレーションツールである。

DeST のプログラム言語は C++ であり、その構造は図-1 に示すように、DeST データベースを中心に 11 個のコアプログラムから構成されている。コアプログラムは、建物の熱的挙動を計算するプログラムであり室温や負荷の計算機能を有する BAS (Building Analysis & Simulation) や、空調機を含む二次側システムと熱源サブシステムのシミュレーション機能を有する AHU、CPS (Combined Plant Simulation) などがある⁴⁾。

2.2 LCEM ツールの概要

LCEM ツールは、国土交通省が開発した空調シミュレーションツールである。LCEM ツールは、マイクロソフト社の Excel で動作する構造で、一部 VBA (Visual Basic for Applications) を利用している。LCEM ツールには、空調システムの個々の構成要素をモジュール化した「オブジェクト」が用意されており、ユーザーは、これらを Excel のシート上で、図-2 のように順に繋いで並べることで、システムの構築・シミュレーションが可能である。各オブジェクトは独立しているため、ユーザーはシステムの任意の範囲に限定したシミュレーションが可能である。本ツールをもとに、英語版 LCEM ツールが名古屋大学 (奥宮正哉研究室) で開発されている。

図 1 DeST の概念図

¹⁾ 名古屋大学環境学研究科 博士前期課程
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

²⁾ NTT ファシリティーズ研究開発本部 修士 (工学)

³⁾ 名古屋市立大学芸術工学研究科 准教授・博士 (工学)

⁴⁾ 日建設計総合研究所 理事・博士 (工学)

⁵⁾ 公共建築協会 常務理事

⁶⁾ 名古屋大学環境学研究科 教授・工博

¹⁾ Master Course Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

²⁾ NTT Facilities, INC., Research and Development Headquarters, M. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., School of Design & Architecture, Nagoya City Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ General Manager, Nikken Sekkei Research Institute, Dr. Eng.

⁵⁾ Managing Director, Public Buildings Association

⁶⁾ Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

図2 LCEM ツールの概念図

3. 主な計算アルゴリズムの比較

DeST と LCEM ツールの主なモデルの計算アルゴリズムを比較する。

3.1 熱源機器

DeST では、機器の出力とエネルギー消費量は負荷率、外気条件や冷水温度などの性能パラメータを独立変数とする式(1)のような特性式で算定される。

$$(Q, E) = f(PLR, t_{a,in} / t_{w,in}, W) \quad \dots (1)$$

LCEM ツールでは、DeST と同様に特性式を用いてエネルギー消費量が算出される。電動冷凍機や直置き吸収冷温水機の冷却運転時のエネルギー消費量を算出する特性式を式(2)、式(3)に示す。冷却水入口温度、冷水出口温度、部分負荷率、冷却水量、冷水量の関数である5つの影響係数 C1~C5 による性能特性を考慮したモデルとなっている。

$$E = eE_{rated} \quad \dots (2)$$

$$e = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \quad \dots (3)$$

3.2 冷却塔

DeST の冷却塔出口水温は式(4)でされる。送風機動力は式(5)で算出され、制御方法によって異なる。

$$t_{cw,out} = f(PLR, G, W, t_{wb,OA}) \quad \dots (4)$$

$$E = f(\text{ControlStrategy}) \quad \dots (5)$$

一方で、LCEM ツールの冷却水往温度は、式(6)で計算される。

$$t_{cw,out} = f(W, t_{cw,in}, t_{wb,OA}) \quad \dots (6)$$

冷却塔の送風機の消費電力量は、運転中は定格出力で一定としている。冷却水下限値制御を行う場合には、送風機を発停させて運転する。この場合、送風機の定格出力に式(7)の係数を乗ずる。

$$C_{IPW} = (t_{cw,in} - t_{cw,set}) / (t_{cw,in} - t_{cw,f}) \quad \dots (7)$$

3.3 送風機・ポンプ

DeST の送風機・ポンプの特性は、式(8)で定義される。

$$E = f(\eta, G \text{ or } W, \text{freq}, H) \quad \dots (8)$$

ここで、 η は送風機・ポンプの効率である。LCEM ツールも同様の考え方であるが、効率 η は変動せず一定である。

3.4 冷却・加熱コイル

DeST のコイル計算は、以下の3つの式を連立させることで求めたい状態値（例えば空気の出入口温度、風量、入口水温が既知で、出口水温と流量を求める）を算出する。

$$\begin{cases} E_g = \frac{1 - \exp[-\beta(1-\gamma)]}{1 - \gamma \exp[-\beta(1-\gamma)]} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{w1}} \\ E' = 1 - \exp\left[(-\alpha_w \cdot a \cdot N) / (V_y \rho C_p)\right] = 1 - \frac{t_2 - t_{2s}}{t_1 - t_{1s}} \\ G(i_1 - i_2) = WC(t_{w2} - t_{w1}) \end{cases} \quad \dots (9)$$

$$\text{ここで、} \beta = \frac{K_s F}{\xi G C_p}, \gamma = \frac{\xi G C_p}{WC}, V_y = \frac{G}{F_y \rho}, \xi = \frac{i_1 - i_2}{C_p(t_1 - t_2)},$$

$$K_s = \left[\frac{1}{B \cdot V_y^m \xi^p} + \frac{1}{D \cdot \omega^n} \right]^{-1} \text{ であり、パラメータは型番ごとに既知の値となる。}$$

LCEM ツールでは、コイルの列数を既知としてコイル入口側と出口側の空気条件より、冷水量と冷水出口温度を求める。冷水量は、式(10)に示す濡れ面係数法により求められる交換熱量が、式(11)に示す空気側の交換熱量と一致するよう収束計算により求める。なお、冷水出口温度は冷水量が決まれば従属的に決まる。

$$Q_c = WSF \cdot K_f \cdot F_y \cdot N \cdot MTD \quad \dots (10)$$

$$Q_a = G(i_1 - i_2) \quad \dots (11)$$

3.5 ファンコイルユニット (FCU)

DeST では、FCU 系統内の配管内圧力損失と各 FCU にかかる負荷を考慮して流量を算出する。FCU の送風機は処理する負荷が無い時間を除き常に一時間定格運転される。

LCEM ツールでは、要求負荷に対する FCU の処理能力の比率から運転時間を決定する。なお、同一系統の FCU は、全台数同じ運転となる。水量と出口水温は、負荷が下限出力値になるまで二方弁が比例制御されると想定し計算される。その時間中は全 FCU の送風機は定格で運転される。

3.6 給気温度および風量の設定

1) 定風量方式の計算アルゴリズム

DeST では、1 つの空調機に接続される複数の室の給気温度は式(12)で表現される。

$$\begin{aligned} t_{k,supply}(\tau) &\in (t_{k,set,min}(\tau) + \frac{t_{k,set,min}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_k(\tau)}, \\ &t_{k,set,max}(\tau) + \frac{t_{k,set,max}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_k(\tau)}), A = \psi C_p \rho \end{aligned} \quad \dots (12)$$

各室の給気温度が同じであるには、式(13)を満足する必要がある。

$$t_{system,supply}(\tau) \in \Omega_{t,system}(\tau) = \bigcap_k (t_{k,supply,min}(\tau), t_{k,supply,max}(\tau)) \quad \dots (13)$$

ここで、 $\Omega_{t,system}(\tau)$ は τ 時刻に空調機に要求される給気温度の範囲である。ある時刻に $\Omega_{t,system}(\tau)$ が存在しなければ、その時刻では全室の温・湿度の要求条件は満足できないことになる。 $\Omega_{t,system}(\tau)$ が存在する場合には、コイル負荷が最少となる給気温・湿度が決定される。室温の計算吹出し温度が決まれば、室温は式(14)で計算される。

$$t_k(\tau) = \frac{\hat{t}_k(\tau) + AG_k(\tau) \cdot t_{system,supply}(\tau)}{1 + AG_k(\tau)} \quad \dots (14)$$

LCEM ツールでは、最大風量を給気風量として室の顕熱負荷と基準温度から要求給気温度を式(15)により算出する。

$$t_{r,supply}(\tau) = t_r(\tau) - Q_s(\tau) / C_p G_{max} \quad \dots (15)$$

要求給気温度が給気温度と異なる場合には、この差を不足温度として算出する。室温は、室負荷と給気風量、給気状態から式(16)により算出する。

$$t_r(\tau) = t_{supply}(\tau) + Q_s(\tau) / C_p G_{max} \quad \dots (16)$$

2) 変風量方式の計算アルゴリズム

DeST では、給気温度は、式(17)~(19)で示されるように給気量範囲と室内設定温・湿度範囲を総合的に考慮し吹出し温度を決める。

$$t_{k,supply}(\tau) \in (t_{k,supply,min}(\tau), t_{k,supply,max}(\tau)) \quad \dots (17)$$

$$t_{k,supply,max}(\tau) = MAX(t_{k,set,min} + \frac{t_{k,set,min}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k,min}}, t_{k,set,min} + \frac{t_{k,set,min}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k,max}}),$$

$$t_{k, set, min} + \frac{t_{k, set, max}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k, min}}, t_{k, set, min} + \frac{t_{k, set, max}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k, max}} \quad \dots (18)$$

$$t_{k, supply, min}(\tau) = \min(t_{k, set, min} + \frac{t_{k, set, min}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k, min}}, t_{k, set, min} + \frac{t_{k, set, max}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{AG_{k, max}}), \dots (19)$$

そして、式(13)より給気温度を計算する。部屋の給気量の計算は、式(20)、(21)より室温の上限・下限値に応じて給気量を求める。

$$G_{k, cal, min}(\tau) = \frac{t_{k, set, min}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{A(t_{k, supply}(\tau) - t_{k, set, min}(\tau))} \quad \dots (20)$$

$$G_{k, cal, max}(\tau) = \frac{t_{k, set, max}(\tau) - \hat{t}_k(\tau)}{A(t_{k, supply}(\tau) - t_{k, set, max}(\tau))} \quad \dots (21)$$

また、送風機の消費エネルギーを最少にするように、式(22)により τ 時刻の室への給気量を計算する。

$$G_k(\tau) = \min((G_{k, cal, min}(\tau), G_{k, cal, max}(\tau)) \cap (G_{k, min}, G_{k, max})) \quad \dots (22)$$

室温は定風量方式と同様に、式(14)で計算される。

LCEM ツールでは、給気温度を一定として、室の顕熱負荷と室温設定値から要求風量を算出し、式(23)により給気風量を決定する。

$$G(\tau) = Q_s(\tau) / \{C_p \cdot (t_r(\tau) - t_{supply})\} \quad \dots (23)$$

算出した給気風量が最大風量を上回る場合には、給気風量を最大風量として不足風量を算出する。要求風量が最少風量を下回る場合には、給気風量を最少風量として不足風量を算出する。室温は、室負荷と給気風量、給気状態から式(24)により算出する。

$$t_r(\tau) = t_{supply} + Q_s(\tau) / C_p G(\tau) \quad \dots (24)$$

以上より、両ツールの主な計算アルゴリズムの比較を行った。各設備機器の特性式は計算アルゴリズムの違いによって異なる点もあるが、考慮する特性パラメーターの種別には大差はない。

4. 計算可能なシステムと制御方法の比較

4.1 シミュレーション可能なシステム

表-1 に DeST、LCEM ツールにて取り扱い可能な熱源機器、空調機器および搬送系の各システムを示す。

4.2 シミュレーション可能な制御方式

表-2 に両ツールの各制御方式の、表-3 に熱源台数制御方式の、表-4 に空気調和機の給気温度・湿度制御方式の、表-5 に外気導入制御方式の対応状況を示す。表より、両ツールとも一般的な空調システムの制御方式はシミュレーション可能であるが、一部、対応可能な制御方式に異なる点も見受けられる。

5. モデル建物におけるシミュレーション結果の比較

5.1 比較検証の手順と境界条件の設定

各構成要素の性能や特性を整合させシミュレーションを行い、両者のエネルギー消費やシステム動作を比較検証した。比較検証を行うための手順を図-3 に示す。また境界条件を下記のように設定した。

- ・ LCEM ツールは熱負荷計算機能がなく、室モデルが DeST と異なるため、AHU の境界条件として DeST で算出された室内温度・湿度、風量を使用した。また、LCEM ツールの FCU モデルでは AHU のような境界条件を与えられないため、DeST で算出された熱負荷を境界条件とした。

表 1 取り扱い可能なコンポーネントの比較

区分	機器名・項目	LCEM	DeST
熱源機器	冷凍機	遠心冷凍機 蒸気吸収冷凍機	○ ○
	空冷熱源ヒートポンプ	○	○
	吸収式	ガスだき	○
	冷温水機	排熱投入	○ ×
	チラー	○	○
	ブラインチラー	○	○
	スクリュウ冷凍機	○	○
	温水発生機	○	○
	蒸気ボイラー	○	○
	水蓄熱	温度成層型 連結式完全混合型	○ ○
	氷蓄熱	内融式 外融式	○ ○
	冷却塔	開放型 密閉型	○ ○
搬送系	ポンプ	○	○
空気調和機	空気調和機 (ユニット/コンパクト)	○	○
	ファンコイルユニット	○	○
	デシカント空調機	○	○
	送風機	○	○
	全熱交換機	○	○

表 2 取扱可能な制御方式比較

	制御方式	LCEM	DeST
給気還気	定風量	○	○
	変風量	回転数制御(定圧) 回転数制御(変静圧)	○ ○
1 次ポンプ	定流量	パルス制御なし	○
	変流量	回転数制御(定圧) 回転数制御(最小吐出圧)	○ ○
2 次ポンプ	定流量	○	○
	変流量(並列絞り運転)	回転数+パルス制御(定圧) 回転数制御(定圧) 回転数制御(最小吐出圧)	○ ○ ○
	変流量(台数制御+並列絞り運転)	回転数+パルス制御(定圧) 回転数制御(定圧) 回転数制御(最小吐出圧)	○ ○ ○
	変流量(台数制御→1 台のみ絞り運転)	○	○
	ヘッド-パルス制御	ヘッド-パルスあり ヘッド-パルスなし	○ ○
	定流量	パルス制御なし パルス制御(下限温度)	○ ○
	変流量(ポンプ 1 台)	回転数制御(定圧) 回転数制御(最小吐出圧)	○ ○
冷却水ポンプ	変流量(並列絞り制御)	○	○
	変流量(台数制御→並列絞り運転)	○	○
	変流量(台数制御→1 台のみ絞り運転)	○	○
	変流量(台数制御→1 台のみ絞り運転)	○	○
FCU	定流量	二方弁 On/Off 制御	○
	変流量	二方弁比例制御(下限負荷率)	○ ×

表 3 熱源台数制御方式比較

制御	制御方法	LCEM	DeST
並列運転	手動切替	○	○
台数制御(並列絞り運転)	流量による制御	○	○
	熱量による制御	○	○
	自動切替 ^{*1}	○	○

^{*1} 流量、熱量それぞれから必要稼働台数を算定し多い方を運転台数として選択

表 4 空気調和機の給気温度・湿度制御方式

制御方法	適用システム	LCEM	DeST
代表室温度による制御	CAV	○	○
AHU の給気温湿度固定	VAV ^{*1}	○	○

^{*1} LCEM ツールでは給気温度のロードリセットは自動的に行えない

表 5 外気導入制御方式の対応状況

制御手法	設定/判定	LCEM	DeST
最少外気量運転		○	○
全熱交換器	なし	○	○
	あり(全外気運転)	○	○
外気冷房	外気温湿度(又はエンタルピー)のレンジで On/Off	○	○
外気カット	On/Off スケジュール	○	○

- 各熱源機器の特性は機器表の情報をもとに入力した。部分負荷における性能・特性を整合するために必要な機器特性データはLCEMツールを用いて発生させ、それをDeSTに入力した。

5.2 モデル建物および空調システムの概要

比較検討対象とするモデル建物を図-4に示す。モデル建物は、東京に所在するオフィスビルを想定しており、中央部のコア部を挟み、南北に執務室を有する平面プランとなっている。空調運転は、6/1～9/30、11/1～3/31の期間中に行われ、8時から19時までスケジュール運転される。(日曜・祝日は除く)

表-6にシステム設計に用いた年間最大負荷計算結果を示す。空調システムは、熱源側サブシステムは電気主体システム(遠心冷凍機と空冷ヒートポンプ(以後空冷HP)の熱源機器構成による複式ポンプシステム)とガス主体システム(直焚き吸収冷温水機による複式ポンプシステム)の両方を想定し、二次側サブシステムは空調機とFCUからなるシステムを想定した。主な機器表を表-7に、空調システムの配管とダクト系統図を図-5に示す。

表-8に空調システムの制御概要を示す。なお、電気主体システムにおける夏期の熱源機器の運転順位は、遠心冷凍機、空冷HPの順に、設定した。

図3 比較検討の手順

図4 建物概要および基準階平面図

図5 空調システム系統図(電気主体システム)

表6 最大負荷計算結果(Micro PEAK)

基準階(kW)		最上階(kW)		建物全体(kW)	
冷房	暖房	冷房	暖房	冷房	暖房
121	42	141	72	1,230	450

表7 機器表

電気主体システム	遠心冷凍機	冷却能力: 704kW 消費電力: 130kW 冷水量: 2,017 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 冷却水量: 2,433 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (32-37℃)	1台
	空冷ヒートポンプ	冷却能力: 475kW 消費電力: 138.1kW 冷水量: 1,362 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 加熱能力: 475kW 温水量: 1,362 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (40-45℃)	2台
	冷却塔	開放型: 704kW $\times$ 2, 433 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (32-37℃) 消費電力: 4.0kW	1台
ガス主体システム	直焚き吸収冷温水機	冷却能力: 422kW ガス消費量: 25.5 Nm ³ /h 冷水量: 1,210 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 加熱能力: 338kW ガス消費量: 30.8 Nm ³ /h 温水量: 1,210 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (51-55℃) 冷却水量: 2,000 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (32-37℃) 消費電力: 3.9kW	3台
	冷却塔	開放型: 578kW $\times$ 2, 000 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (32-37℃) 消費電力: 4.0kW	3台
二次側(共通)	ユニット型空調機(基準階)	コイル: 6列(チューブ本数 16本/列) 送風機: 5,600m ³ /h $\times$ 750Pa $\times$ 3.7kW 冷却能力: 41.3kW $\times$ 118 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 加熱能力: 32.3kW $\times$ 93 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (40-45℃)	20台
	還気送風機	5,600m ³ /h $\times$ 210Pa $\times$ 1.5kW	20台
	可変風量装置	最大風量: 2,800m ³ /h 最小風量: 1,800m ³ /h	40台
	ファンコイルユニット(北/南)	送風量: 520m ³ /h 冷却能力: 2.0kW $\times$ 6.0 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 加熱能力: 1.0kW $\times$ 3.0 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (40-45℃)	140台
	ファンコイルユニット(東/西)	送風量: 880m ³ /h 冷却能力: 2.8kW $\times$ 9.0 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (7-12℃) 加熱能力: 1.0kW $\times$ 3.0 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ (40-45℃)	80台

表8 空調システム制御概要

熱源	台数制御	並列絞リ運転
1次ポンプ	定流量	バイパス制御なし
2次ポンプ	変流量	定圧制御(回転数制御)
冷却水ポンプ	定流量	バイパス制御あり(下限水温 32℃)
給気/還気送風機	変風量	定圧制御(回転数制御)
空調機	VAV	給気温度一定(15℃)
外気導入	最小外気量一定制御	(1,800m ³ /h)

5.3 シミュレーション条件

気象データは、アメダス標準年気象データ(地域:東京)を利用した。また、機器特性として、図-6,7(熱源機器)図-8,9(搬送系機器)に示す特性を与えた。計算期間は、空調運転期間である夏期6/1～9/30と冬期11/1～3/31の間とした。

図6 遠心冷凍機の運転性能・特性曲線

図7 吸収冷温水機の運転性能・特性曲線

図8 二次ポンプの特性曲線

図9 送風機の特性曲線

5.4 比較結果

モデル建物について LCEM ツール、DeST それぞれ空調シミュレーションを行った結果比較を示す。

1) システム全体

システム全体および各サブシステムのエネルギー消費量の計算結果を電気主体システムは図-10 に、ガス主体システムは図-11 に示す。冷房期間、暖房期間ともに、両者はよく一致しているといえ、DeST が LCEM ツールより最大約 12% 大きくなっている。

2) 熱源

空冷 HP、吸収冷凍機の機器特性と、熱源機器出力の計算結果を図-12, 13 に示す。図より、両機器ともに、LCEM ツールと DeST の結果は一致している。夏期における熱源エネルギー消費量はやや LCEM のほうが大きくなっているが、図-14 に示すように、熱源機器出力の差によるものである。前述したように FCU の室モデルが異なるためである。

図 10 電気主体システムのシステム全体エネルギー消費量比較

図 12 空冷 HP 特性比較 (夏期/冬期)

図 13 吸収冷凍機特性比較 (夏期/冬期)

3) ポンプ類

図-10, 11 に示すように各ポンプのエネルギー消費量はほぼ一致している。特筆すべき、変流量 (回転数) 制御を採用した二次ポンプ特性を図-15 に示す。二次ポンプ特性は両者一致しているが、流量において DeST が LCEM ツールより大きくなっている。この差は、図-17 に示す、二次側システム (AHU, FCU) のコイル特性の違いによるものである。

3) AHU 周り

送風機特性の比較を図-16 に示す。両者の送風機特性は一致している。

4) FCU 周り

送風機動力は、DeST が LCEM ツールより大きい。(図-10, 11 参照) これは 3 章で述べた LCEM ツールと DeST の FCU 送風機モデルの違いに関連している。

図 11 ガス主体システムのシステム全体エネルギー消費量比較

図 14 熱源機器出力比較 (夏期/冬期)

図 15 二次ポンプ特性比較

図 16 AHU 送風機特性比較

図 17 AHU・FCU コイル特性

5.5 まとめ

両ツールを利用する上で、機器特性の整合性をとることが、重要なポイントであり、整合可能な事項を整合させることができれば、両者のシミュレーション結果はほぼ一致するといえる。しかし AHU と FCU のコイル特性は完全に合わせることができない。コイルのスペックなどを合わせたとしても、伝熱計算のモデル化に違いがあるため、同じ特性を有するコイルをシミュレーション上で再現できない。両ツールを利用する際に、ユーザーはこの点に注意が必要である。また、今後のツール開発に生かすべき点でもある。

6. 今後の展開

今後は、各種熱源システムに対する比較やケーススタディーを行い、建物のライフサイクルエネルギーマネージメントの見地から、より有効な活用方法について検討し報告する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた(社)公共建築協会/空調システムシミュレーションツールの国際的評価検討委員会の江教授、朱教授、下田教授はじめ委員会委員諸氏に謝意を表します。

【空調システムシミュレーションツールの国際的評価検討委員会委員】座長：奥宮正哉(名古屋大学)、中原信生(建築設備コンソーシアム 協会)、江億(清華大学)、朱穎心(清華大学)、時田繁(公共建築協会)、下田吉之(大阪大学)、田中英紀(中部大学)、尹奎英(名古屋市立大学)、丹羽英治(日建設計総合研究所)、渡辺剛(NTT ファシリテーズ)、鄭明傑(三晃空調)、中村紀吉(東京電力)、濱根潤也(関西電力)、村西良司(中部電力)、市川徹(東京ガス)、船谷昭夫(大阪ガス)、草深隆道(東邦ガス)、野村修(建築保全セクター)ワグナー・ハーパー：伊藤誠恭、村山雄介、神島博俊、鈴木和佳(国土交通省大臣官房官庁営繕部・設備課)

参考文献

- 1) 丹羽英治:動的システムシミュレーションの現状, 空気調和衛生工学会誌, 2003. 11
- 2) Fangting Song: Research on the method and application of HVAC system energy consumption simulation in built large-scale public building, 精華大学博士論文, 2009. 12
- 3) 岡崎徳臣, 奥宮正哉ほか: ライフサイクルエネルギーマネージメントのための空調システムシミュレーション開発(第3報)、(第7報), 空気調和・衛生工学会学術講演会, 2006
- 4) Da Yan ほか: DeST-An Intergrated Building Simulation Toolkit Part I: Fundamentals, Build Simulation(2008) 1 pp.95-110
- 5) 杉原ほか: ライフサイクルエネルギーマネージメントのための空調システムシミュレーション開発(第2報), 空気調和・衛生工学会学術講演会, 2007
- 6) DeST User Guide, 2004
- 7) Excel による空調システムシミュレーション~LCEM ツール Ver.3 利用解説~, 社団法人 公共建築協会, 2008

記号一覧

B : 調整変数 $[W/(m \cdot K \cdot s)]$	C, C_p : 水, 空気 の比熱 $[J/(kg \cdot K)]$
C_1 : 負荷率影響係数 $[-]$	C_2 : 冷却水還温度影響係数 $[-]$
C_3 : 冷却水量影響係数 $[-]$	C_4 : 冷水温度影響係数 $[-]$
C_5 : 冷水量影響係数 $[-]$	D : 調整変数 $[W/(m \cdot K \cdot s)]$
E : エネルギー消費量 $[J]$	e : エネルギー消費率 $[-]$
E' : 通用熱交換効率 $[-]$	E_g : 全熱交換効率 $[-]$
E_{rated} : 定格エネルギー消費量 $[J]$	$freq$: 回転数 $[Hz]$
F, F_y : フィンつきコイルの外側伝熱面積, コイル正面面積 $[m^2]$	
G : 空気の風量 $[kg/s]$	$G_k(\tau)$: τ 時刻の k 室への給気量 $[kg/s]$
$G_{k,cal,min}(\tau)$: k 室への実際送風最小給気量 $[kg/s]$	
$G_{k,cal,max}(\tau)$: τ 時刻の k 室への実際送風最大給気量 $[kg/s]$	
$G_{k,max}(\tau)$: τ 時刻の k 室への送風可能な最大給気量 $[kg/s]$	
$G_{k,min}(\tau)$: τ 時刻の k 室への送風可能な最小給気量 $[kg/s]$	
G_{max} : 送風機最大風量 $[kg/s]$	$G(\tau)$: τ 時刻の給気風量 $[kg/s]$
H : 揚程 $[Pa]$	i_1, i_2 : 入口空気, 出口空気のエンタルピー $[J/kg]$
K_f : 伝熱係数 $[W/(m^2 \cdot K \cdot Row)]$	
K_s : 湿り伝熱面のフィン効率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	m : 調整変数 $[-]$
MTD : 対数平均温度差 $[K]$	N : コイル列数 $[Row]$
n : 調整変数 $[-]$	p : 調整変数 $[-]$
PLR : 部分負荷率 $[-]$	Q : 出力 $[W]$
Q_a : 空気側交換熱量 $[W]$	Q_l : 水側交換熱量 $[W]$
$Q_s(\tau)$: τ 時刻の室内顕熱負荷 $[W]$	
t_1, t_2 : 入口空気, 出口空気の温度 $[^{\circ}C]$	
t_{1s}, t_{2s} : 入口空気, 出口空気の設定温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{a,in}$: 熱源出口空気温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{cw,out}, t_{cw,in}$: 冷却塔出口温度, 入口温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{cw,f}$: フリークーリング状態の冷却水往温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{cw,set}$: 強制的にファンを止めた場合の設定温度 $[^{\circ}C]$	
$t_k(\tau)$: τ 時刻の k 室の設定温度 $[^{\circ}C]$	
$\hat{t}_k(\tau)$: τ 時刻の k 室の自然室温 $[^{\circ}C]$	
$t_{k,set,max}(\tau)$: τ 時刻の k 室の設定上限温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{k,set,min}(\tau)$: τ 時刻の k 室の設定下限温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{k,supply}(\tau)$: τ 時刻の k 室への給気温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{k,supply,min}(\tau)$: τ 時刻の k 室への最小給気温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{k,supply,max}(\tau)$: τ 時刻の k 室への最大給気温度 $[^{\circ}C]$	
$t_r(\tau)$: τ 時刻の室内温度 $[^{\circ}C]$	$t_{supply}(\tau)$: τ 時刻の給気温度 $[^{\circ}C]$
$t_{r,supply}(\tau)$: τ 時刻の要求給気温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{system,supply}(\tau)$: τ 時刻の空調機の吹出し温度 $[^{\circ}C]$	
$t_{wb,OA}$: 外気湿球温度 $[^{\circ}C]$	$t_{w,in}$: 熱源出口水温 $[^{\circ}C]$
t_{w1}, t_{w2} : コイルの入口, 出口水温 $[^{\circ}C]$	V_y : コイル風速 $[m/s]$
W : 水量 $[kg/s]$	WSF : 濡れ面係数 $[-]$
α_w : コイルの外側 (空気側) 熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	
η : 効率 $[-]$	ξ : 析湿係数 $[-]$
ρ, ρ_w : 空気の比重, 水の比重 $[kg/m^3]$	
ψ : 単位空調熱量の室温への影響度 $[(m^3 \cdot K)/(W \cdot kg)]$	
$\Omega_{t,system}(\tau)$: τ 時刻に空調機に要求される吹出し温度の範囲	
ω : コイル水速 $[m/s]$	

[2010年2月19日原稿受理 2010年4月5日採用決定]