

BEMSにおけるシミュレーションの活用事例

Application of simulation in BEMS

NTTファシリティーズ 研究開発本部

NTT Facilities, INC., Research and Development Headquarters

渡邊 剛

Takeshi WATANABE

キーワード：BEMS(BEMS)、システムシミュレーション(System Simulation)、フォルト検知(Fault Detection)、エネルギーマネジメント(Energy Management)

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。一方で、近年の科学技術や IT の発展は居住者が建物に求める要求の激しい変化と多種多様化を、経済状況の低迷は設計施工期間の短縮と低予算化をもたらせた。そのため、将来変化にシームレスに対応できる設計施工を効率的に行い、それにフレキシブルに対応できる運用を迅速に行う必要がある。そのためには、建物性能を明確にして、その性能評価に必要な情報を継続的に収集し、正しく解析・評価・反映できるデータマネジメントをライフサイクルにわたり成立させることが重要である。

2. 空調システムのライフサイクルエネルギーマネジメントとシミュレーション

2.1 シミュレーション支援ファシリティ・エネルギーマネジメントの概念

システムを最適に設計施工し、ライフサイクルにわたり適切に保守管理することが、居住者を満足させ、機器の寿命を長くし、省エネルギーに寄与する事になる。それには「一貫して」情報を収集管理できるツールと、「一貫した」評価ができる評価ツールが必要であり、それらがシームレスに情報を継承・交換し、協調することが重要である。このツールの関係を図1に示す。

評価を行うためには、「入力条件」と、「制御方法」や「システムや機器の特性」に関する条件が必要である。空調システムの評価は、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予測する必要がある。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」が必要となる。空調システムの評価指標と、その評価指標に応じたシステムシミュレーションプログラムを企画や設計の初期段階で明確にし、そのプログラムをライフサイクルにわたり使い続けることで評価手法の一貫性を確保する。また、「制御方法」や「システムや機器の特性」に関する情報はシステムシミュレーションモデルに含まれることから、システムシミュレーションのモデル自体も情報管理ツールとして有効である。システムシミュレーションモデルをライフサイクルにわたり、継承・更新することで、一貫した評価のための情報伝達を行う。

本報では、エネルギー評価および情報管理ツールとして、システムシミュレーションの利用を提案し、システムのライフサイクルにわたるエネルギー評価と、それに必要な情報収集および管理を「シミュレーション支援ファシリティ・エネルギーマネジメント（Simulation Assisted Facility and Energy Management：SAFEM）」[2]と呼ぶ。図2に SAFEM における情報フローを、下記にその概要を示す。

- ・各フェーズでシミュレーションを利用してシステムの評価を行い、その結果をフィードバックする。
- ・評価指標は企画フェーズで設定し、ライフサイクルにわたり一貫して使用する。
- ・シミュレーションプログラムは、フェーズや目的別で使い分けせず、ひとつのプログラムを一貫して利

用し、不足する機能がある場合は、他のプログラムと連携する。プログラムを一貫して利用することで、エネルギー性能を一貫した手法で評価でき、適切に次フェーズへ情報伝達が可能となる。

- ・ 入力条件は、プログラムの境界条件と評価指標に応じて企画フェーズで設定し、ライフサイクルにわたり管理する。運用フェーズではBEMSデータを利用する。

シミュレーションモデルは、企画フェーズで既知である情報や想定した条件に応じ構築し、設計フェーズ以降は必要に応じ更新することでライフサイクルにわたり継承し管理する。設計時や竣工時のモデルを保存しておくことで、設計時や竣工時との比較が容易となる。

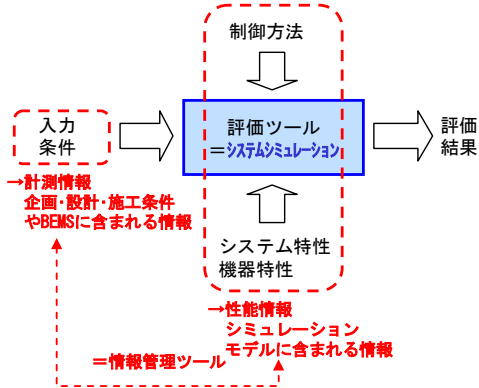


図1 情報管理と評価の関係

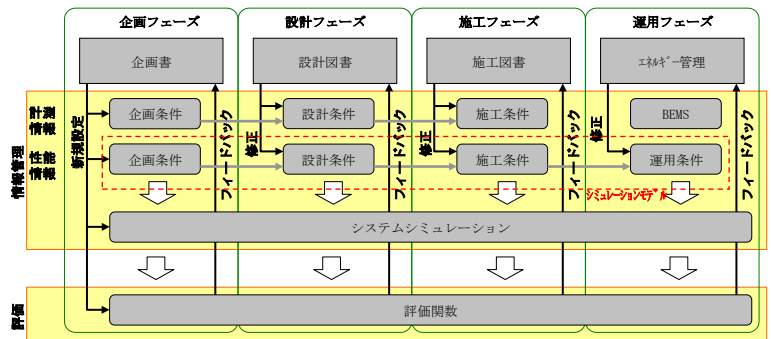


図2 SAFEMの情報フロー

運用フェーズにおける SAFEM の構成を図3に示す。評価のプロセスを以下に示す。

- ① シミュレーションモデルの確認を行う。FMデータなどを利用し、オブジェクトの接続、制御方式、機器の定格能力や特性を確認し、現実と異なる場合は修正する。また、入力条件にBEMS値を設定する。
- ② BEMS値を境界条件としたシミュレーションを行い、評価基準値など算出する。
- ③ 各システムや機器について、現在の状態を評価し、結果を可視化する。シミュレーションが利用できない場合はデータ比較手法を用いる。評価結果は、オペレーターや建物管理者にフィードバックする。

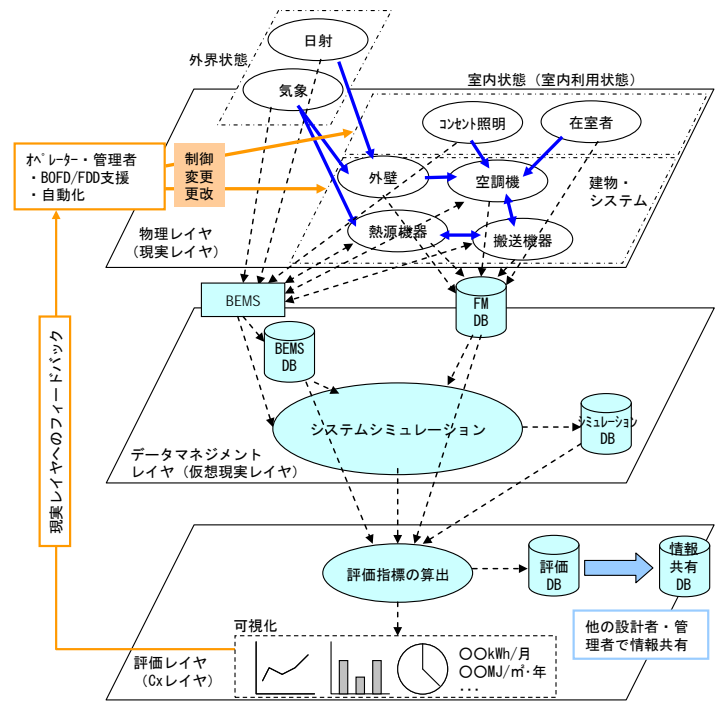


図3 運用フェーズにおける SAFEM の構成

2.2 評価ツール

SAFEM では、ライフサイクルを通して、一貫したエネルギー性能の評価や情報伝達を行うことを目的としている。以下に要求される条件を示す。

- 1) 変動する気候条件や室内状況に応じ評価できること。
- 2) 様々な機器特性の設定や制御方式の検討ができること。
- 3) 全体システムだけでなく、サブシステムや機器ごとに評価できること。
- 4) 企画フェーズでもシステムを対象とした評価が可能で、順次情報が更新可能であること。
- 5) BEMSデータなどを境界条件に利用できること。
- 6) 他のシミュレーションプログラムと連携できること。

7) 特殊なスキルが不要で、簡易に扱えること。
 ライフサイクルエネルギーマネジメントにおける評価ツールの位置付けを図4[3][4]に示す。CASBEE など建物総合評価ツールでは、ライフサイクルの主要な時点で建物全体の総合的な定性評価が可能であるが、様々な気象状況や室内状況に対応した評価が困難である。また、HASP/ACSS など静的シミュレーションツールでは、気象や室内状況に応じた詳細で定量的なエネルギー評価が可能であるが、設計フェーズ以降の利用が中心となることと、実務者に高度なシミュレーション技術が要求される。

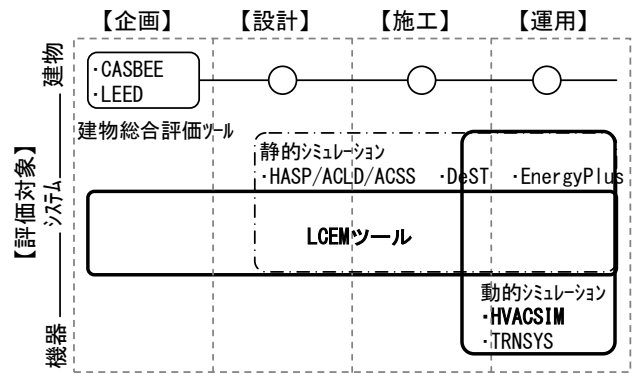
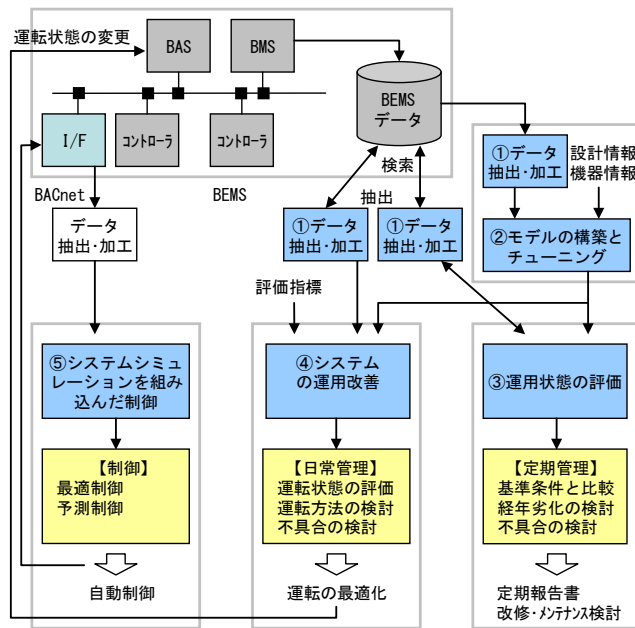


図3 評価ツールの位置づけ

2.3 BEMSにおけるシミュレーションの活用方法

運用フェーズでBEMSとシミュレーションを活用したエネルギーマネジメント手法を図4に示す。



BAS : Building Automation System
 BMS : Building Management System
 BAcnet : Building Automation and Control networking protocol

図4 BEMSとシミュレーションを活用したエネルギーマネジメント

① データ抽出と加工

BEMSデータベースから必要なデータを抽出する。BEMSデータは、事前に日報や月報、請求書、現場計測値、機器定格値などと比較し、データの正しさを検証する。また、修繕履歴や故障履歴を確認し、抽出したデータに、特異なデータが含まれないことを確認する。

② モデルの構築とチューニング

施工フェーズから継承したシミュレーションモデルを対象建物の状況に応じパラメータの変更を行う。モデルがない場合は構築する。構築・変更後は、モデルのチューニングを行う。以下に概要を示す。

1) シミュレーションモデルの構築・変更

下記に示す情報をもとにLCEMツールのモデル構築とパラメータの変更を行う。

- ・系統図：機器の接続
- ・機器表：各機器のオブジェクトの属性
- ・納品書：ポンプ及びファンのP-Q特性

2) パラメータのチューニング

計測機器の誤差、機器の経年劣化など評価対象のシステムにおいて、パラメータとして数値化できないものに対応するためチューニングを行う。チューニングは、主要構成機器の特性や、エネルギー消費量について、シミュレーション結果とBEMSの値との比較により実施する。チューニング結果は、チュー

ニングを行うデータと収集期間が異なるデータを利用して検証する。

③ 運用状態の評価とフォルトの可能性の検討

評価対象期間のエネルギー消費量、SCOP、WTF のような評価指標を、BEMS 値を境界条件としたシミュレーションを利用した場合と、実際に計測された値を用いた場合について算出し比較する。比較は、システム全体から開始し、サブシステム、機器の比較へとブレイクダウンするようトップダウンアプローチ的に実施し、シミュレーション値と異なるサブシステムや機器とその原因を明確にする。原因がシステムや機器の不具合による場合は、その改善施策を検討し、抽出データにある場合は、データの抽出に戻り、再度チューニングを行う。この結果は定期管理報告書への記載や、改修・メンテナンス計画の立案に応用する。

④ システムの運用改善に向けた検討

②のモデルと BEMS で計測された外気や室内の条件を境界条件として、エネルギー消費量を削減できるシステムや機器の運転方法の設定値について検討する。室内の温湿度環境の検討や、混合損失、システムや機器の動的挙動の改善については別のツールと組み合わせる必要がある[5]。LCEM ツールでは、既報[6]にあるように、熱源の運転パターンの検討、室内温度・湿度設定変更のような運用フェーズの運用改善検討などが可能である。

⑤ システムシミュレーションを組み込んだ最適制御

BEMS の計測データ（リアルタイムデータ）を境界条件としてシミュレーションを実施し、その結果を自動制御に直接利用することで、システムの動的な最適化を行う。HVACSIM⁺のような動的シミュレーションツールを利用する必要がある[7]。

3 空調システム全体の運用状態の評価と運転改善の検討事例

3.1 建物と空調システムの概要

対象建物は、東海地方の事務所ビル（2001 年竣工）[8]、延床面積は約 24,000 m²（基準階約 2,000 m²）である。図 5 にシステム系統図を示す。この建物では、大温度差・温度成層型水蓄熱槽方式を採用している。熱源は、井水熱源スクリーヒートポンプチラー（675 kW×1 台）、空気熱源ヒートポンプチラー（300 kW×1 台）が設置されている。二次側の空調方式は、エアフローウィンドによるペリメータレス空調、単一ダクト方式 VAV 制御、低温送風空調方式を採用している。

3.2 モデルの構築とチューニング

LCEM ツールでモデルを構築し、チューニングを行う。熱源機器、ポンプ、ファンの各機器の特性は、メーカーの仕様書や BEMS データを利用して実状と整合した。モデルのチューニングは、2004/6/1～2004/9/30 の BEMS データを利用し、熱源機器、ポンプ、ファンの主要構成機器について実施した。チューニングでは、機器ごとに、6/1 日～9/30 日の電力消費量の合計が、シミュレーション結果と BEMS 値が近くなるよう調整した。ポンプおよびファンは、BEMS データが小数点以下の値が切り上げされているため、シミュレーション結果も同様の処理を行った上で調整した。2007/6/1～2007/9/30 の BEMS データでモデルの検証を行った結果を図 6 に示す。

3.3 境界条件の推定

LCEM ツールでは、境界条件として時刻別の室内顕熱負荷(QS)と室内潜熱負荷(QL)を与える必要がある。

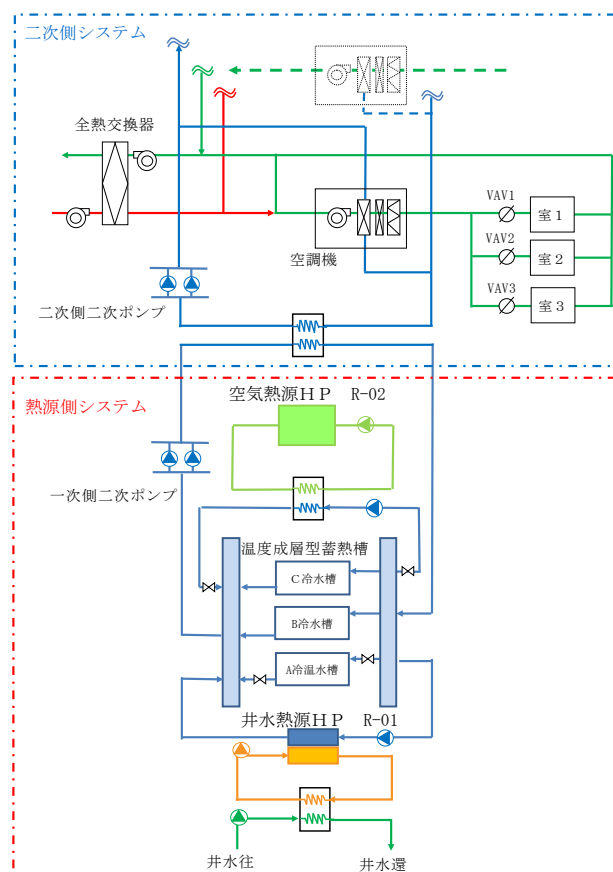


図 5 システム系統図

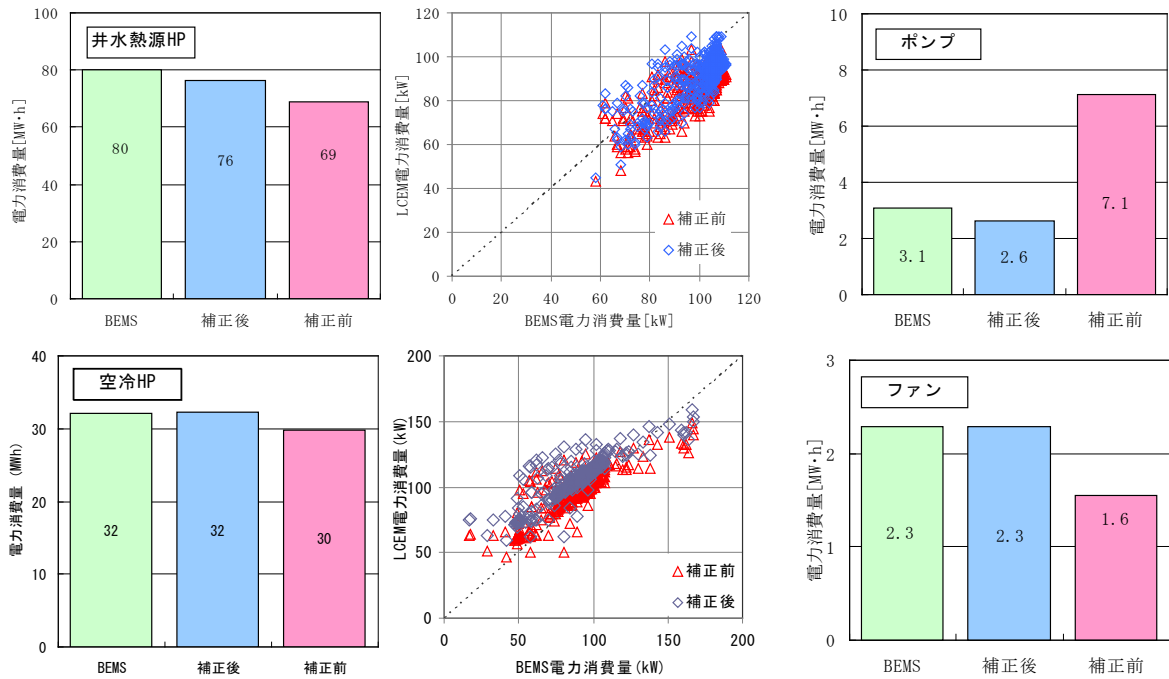


図 6 チューニング結果とその精度検証

対象建物の空調機まわりでは、空調機の運転時間 ($Rmin$)、各 VAV ゾーンからの合流点における還気条件(温度 (Tra)、露点温度 ($TDra$)、給気温度 (Tsa)、各 VAV 風量 ($Fvav$) が計測されている。そこで本報では、室の潜熱負荷を求めるため、室の絶対湿度 (Hra) は、各 VAV ゾーンからの合流点における還気の露点温度 ($TDra$) から決定した。また、給気の絶対湿度 (Hsa) は図 5.2.6 のように求め、空気の比熱 (Cp)、空気の比重 (G)、水潜熱 (hw) から、式(1)および式(2)に示すよう室内顕熱負荷 (QS) と室内潜熱負荷 (QL) を設定した。

$$QS = Cp \times G \times \sum Fvav \times (Tra - Tsa) \times Rmin / 60 \quad (1)$$

$$QL = hw \times G \times \sum Fvav \times (Hra - Hsa) \times Rmin / 60 \quad (2)$$

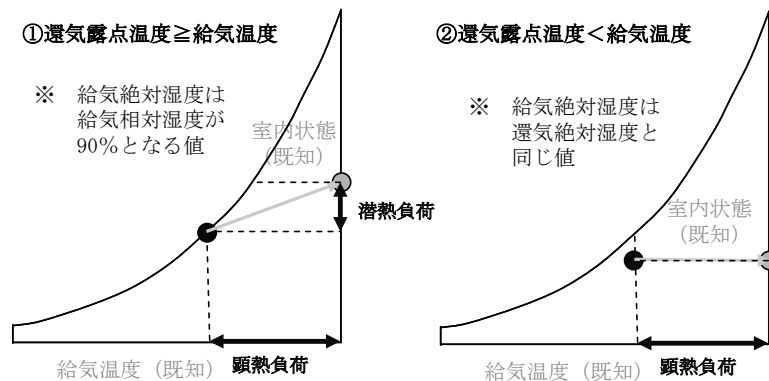


図 7 境界条件の設定

3.4 運用状態の評価

3.2 のモデルを利用し、2004/6/1~2004/9/30 を対象とし、空調システム全体を対象としたシミュレーションを実施した。ここでは、検討期間における空調システム全体と、主要機器のエネルギー消費量について比較した。シミュレーションでは、外気条件(乾球温度、相対湿度)と、3.3 で推定した室内負荷を境界条件として与えた。機器やシステムは設計時の制御方法で運転した。図 9~図 12 にシミュレーション結果と BEMS データから集計した実績値との比較を示す。

- 1) 図 8 に全体と機器ごとの電気消費量の比較を示す。図より空調システム全体の電力消費量、ファンの電力消費量、熱源機器の電力消費量合計値 (R-01 と R-02 の合計: シミュレーション=154MW・h、BEMS=157MW・h) はほぼ同じであるが、熱源機器別と水搬送系の電力消費量は異なることがわかる。
- 2) 図 9 に熱源・水搬送系の月別電気消費量の比較を示す。図より、熱源機器の合計値は月別でも大差はな

いが、機器の運転比率は月ごとに異なり、R-01 が常に BEMS 値の方が小さく、特に冷房負荷が大きな時期の乖離が大きいことがわかる。また、ポンプの消費電力は7月と8月で BEMS 値が大きい。

- 3) 図 10 に蓄熱槽の上部および下部の水温経時変化を示す。実測値では、蓄熱槽下部水温が、送水設定温度 (5°C) をほとんどの時間帯で維持できていないことがわかる。このため、冷水流量が増加し、冷水ポンプの消費電力が増加したと考えられる。また蓄熱槽上部水温が、蓄熱運転中に BEMS 値の方が早く低下することがわかる。このため、R-01 の運転がシミュレーションより早く停止され、結果的に R-02 が運転しており、R-01 と R-02 の運転時間がシミュレーションと異なると考えられる。
- 4) 図 11 に R-01 と R-02 の出入口水温の BEMS 値 (冷凍機稼働時間のみをプロットした) を示す。図より、各冷凍機の出口水温が設定値(5°C)に対し、安定していないことがわかる。このため蓄熱槽下部水温が不安定になると考えられる。

以上から、対象建物の空調システムのエネルギー消費量はほぼ妥当な状態であると考えられるが、冷凍機の出口水温制御の改善を検討する必要があることがわかる。

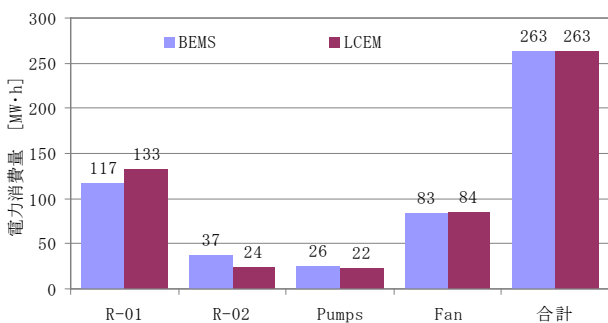


図 8 BEMS 値とシミュレーション値の比較 (全体)

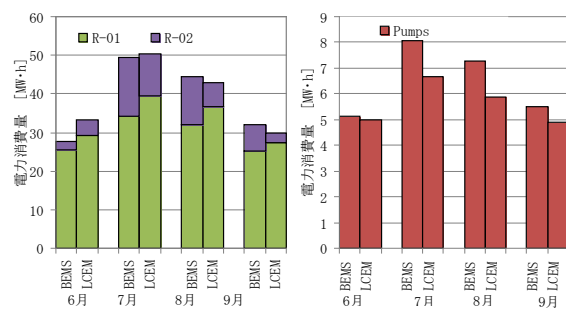


図 9 BEMS 値とシミュレーション結果の比較 (熱源・水搬送)

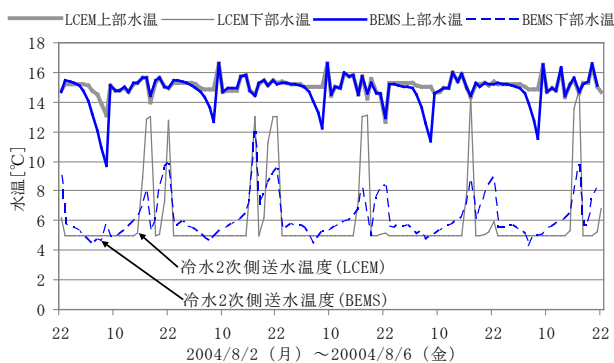


図 10 冷水 2 次側送水温度比較 (代表日)

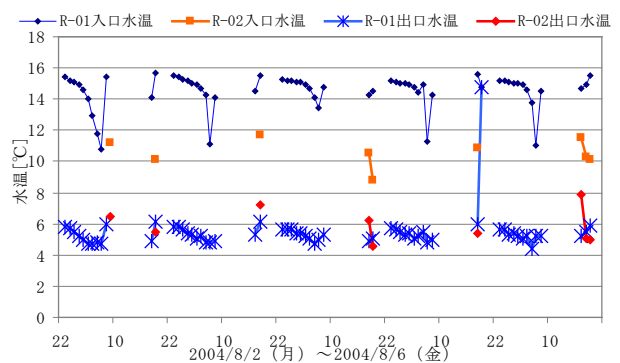


図 11 冷凍機出入口水温 (BEMS 値)

5.2.5 システムの運用改善の検討

BEMS データと天気予報から、翌日の負荷を予測し、LCEM ツールを利用して空調システムのエネルギー消費量を削減できる運転パラメータについて検討する。本システムは蓄熱システムであり、日常的に送水温度など 1 次側の運転条件を変更することは現実的でないため、本報では運転パラメータとして給気温度設定値について着目し、12°C~+18°Cの範囲で、空調システム全体のエネルギー消費量を最小化できる給気温度設定値を検討した。また、検討期間は 2007/6/1~2007/9/30 とした。以下に検討手順を示す。また、天気予報から予測した外気温度の 1 日の平均値、空調負荷および室内除去熱量の 1 日の合計値を、実際の BEMS 値と比較した結果を図 12 に示す。

- 1) 2004 年の BEMS データから、日、曜日、最高気温、最低気温の表を作成する。ここで最高気温と最低気温の算出は、天気予報に合わせた時間帯における値とする [9]
- 2) 負荷予測対象日の前日の天気予報データから、1) の表のうち負荷予測対象日の曜日と同じ曜日を対象として、天気予報に最も近い 1 日を設定し、その日の BEMS データから室内除去熱量を求めた。
- 3) LCEM ツールを利用し、2) で決定した 1 日の外気条件と、室内除去熱量を境界条件として、毎日 22 時の残蓄熱量を初期状態としたシミュレーションを行い、翌日の給気温度設定値を 12°C~18°Cの範囲で変

更し、翌日の 21 時までの空調システム全体の電力消費量が最小となる給気温度設定値を決定する。給気温度設定値の 8 月の検討結果を図 13 に、給気温度設定値変更の効果を図 14～図 15 に示す。ここで、 $SCOP = (\text{二次側負荷}) / (\text{システム全体消費電力量})$

とした。今回のケーススタディでは、給気温度を 12℃～18℃に変化した場合の室内環境は室内基準温度（各室ごとに 25～28℃）に対し±2℃の範囲、室内相対湿度が 45～60%の範囲であった。一般的な事務所建物で、日常的な用途を対象とした検討であれば、LCEM ツールを利用した給気温度設定値の検討は有効であると考えられる。図および表より以下のことがわかる。

- 1) 検討期間中の多くの日で、給気温度を下げることで建物の電気消費量を削減できる結果が見られた。これは本建物の空調システムでは、空調機ファンの消費電力が占める割合が大きく、給気温度を下げることで空気ファンの消費電力が大きく低減できるためである。
- 2) 給気温度の変更により、全体では約 7%の空調消費電力を削減することができた。また、SCOP も約 5%改善された。

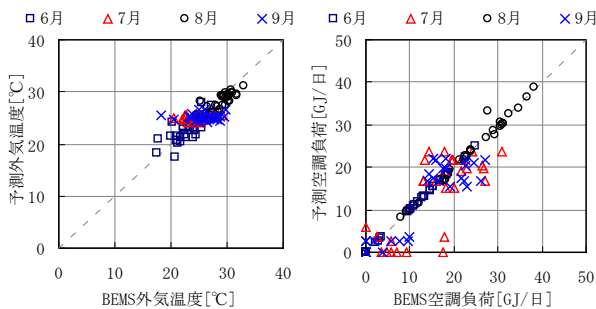


図 12 予測負荷と BEMS 値の比較

	12℃	13℃	14℃	15℃	16℃	17℃	18℃		12℃	13℃	14℃	15℃	16℃	17℃	18℃
1日	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	2.1	17日	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	3.1	3.2
2日	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.5	2.6	18日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3日	2.2	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	19日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20日	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	3.5	3.4
5日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21日	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3
6日	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	22日	2.6	2.7	2.8	2.9	3.4	3.5	3.5
7日	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	23日	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
8日	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.5	2.6	24日	2.1	2.0	2.1	2.2	2.3	2.9	3.0
9日	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	25日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10日	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	26日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27日	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	4.3
12日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28日	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.3	2.4
13日	2.0	2.1	2.3	2.3	2.5	2.5	2.6	29日	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8	1.9	2.1
14日	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	30日	1.4	1.7	1.7	1.8	3.2	3.3	3.7
15日	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.3	31日	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3
16日	2.1	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2								

図 13 給気温度設定値検討結果 [8月] [MW・h/日]

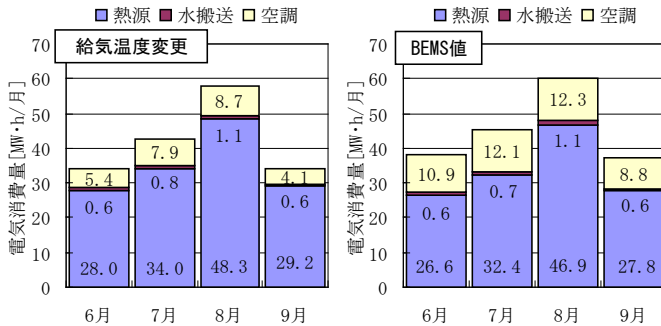


図 14 給気温度設定値変更の効果

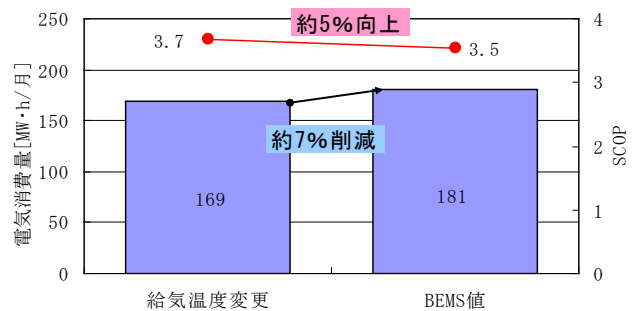


図 15 給気温度設定値変更の効果

4 動的シミュレーションプログラムを利用したフォルト検知の事例

4.1 空調システムのフォルト検知

フォルト検知では、機器やシステムが正常である状態と、故障である状態を考察する事が重要である。ここで、運用状態において不具合が生じる原因を大別すると、

- (1) センサや機器のようなハードウェアの劣化や故障
- (2) 機器やシステムの間違った運転状態や制御
- (3) 設計や施工時の間違い

である。(1)は性能劣化→運転効率の低下→使用不能となるため、日常管理で、いち早く性能劣化を検知し、メンテナンスやオーバーホールを行う必要がある。(2)は調整不足→エネルギー消費量の増加→室内環境の悪化となる。過去や同種他ビルとの比較により、不具合状態を検知し、設定変更など行う必要がある。(3)は運用状態で改善することは困難であり、大規模な修繕・改修を要する場合が多い。

フォルト検知において、「本来あるべき性能や状態」を求めることができるシミュレーションの果たす役割は大きい。そこで、本節では動的シミュレーションプログラム HVACSIM+ を利用し、回帰分析を利用した

フォルト検知手法について検討した事例を紹介する。

4.2 検討の概要

ここでは、空調システムの中で重要な構成機器のひとつである給気ファンに着目し、重回帰分析により、その特性曲線を求めフォルト検知を行った。検討を行ったシステムを図 16 に示す。

具体的な手順として、HVACSIM⁺により求めた特性曲線に対し、危険率を α とした t -分布を用いた信頼区間を決定する。そこに、表 1 に示すようなフォルトを想定したシミュレーションを HVACSIM⁺により行い、その結果を求めた信頼区間に対しプロットすることでフォルト検知を行った。

表 1 フォルトケース一覧

CASE	フォルトの内容
1	圧力センサ異常 [セットポイント=700 Pa]
2	圧力センサ異常 [セットポイント=100 Pa]
3	圧力センサ異常 [セットポイント=300 Pa]
4	ダクトの目詰り [ダクト抵抗係数が 2 倍]
5	ファン特性異常 [$P - Q$ 特性が 1/2]
6	ファン効率異常 [効率 2 割減]

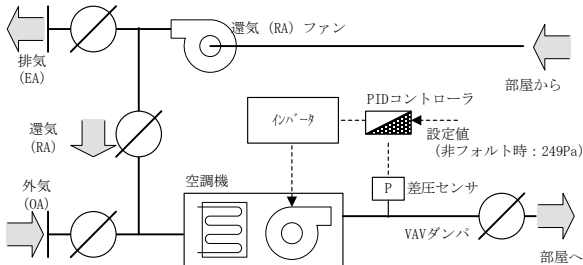


図 16 給気ファンまわりのシステムフロー

信頼区間の決定において、説明変数として「給気風量 (F)」と「回転数制御信号 (N)」を、目的変数として「エネルギー消費量 (E)」を採用し、 E を F や N の関数 (f)として決定した。また、危険率 α として1%とした場合と、5%とした場合について検討した。

信頼区間の決定方法を図 17[10]に示す。一般に、 f は線形多項式で記述することができる。今、 E を F によりモデル化を行うとすれば、式(1)のようになる。ここで、多項式の最高次数が問題となるが、本研究では非フォルト状態のシミュレーション結果から図 18 に示すような相関分析を行い、説明変数が F の場合は2次が、 N の場合は3次が適切であると決定した。

4.3 検討の結果

フォルトシミュレーション結果を図 19 に、フォルト検知率（フォルト発生中検知数/フォルト発生中の標本数）を表 2 示す。図中の中心線はモデル近似、内側の 2 線はモデル近似の信頼区間、外側の 2 線はモデル予測値の信頼区間を示す。図から以下の事がわかる。

- 1) F を説明変数にした場合は、信頼区間はやや広がるが、全体的に安定したモデル近似を行うことが可能で、 N を説明変数とした場合は、信頼区間の大きさに差ができるが、部分的には精度の良いモデル近似を行うことができる。
- 2) 圧力センサ異常のケース(CASE1~3)は F を説明変数にした方が、フォルト検知率が良い。ただし、圧力異常の程度により同じくらい検知できる場合(CASE1)もあり、全く検知できない場合(CASE3)もある。
- 3) ファン特性異常のケース(CASE5、6)は、フォルト検知率は N を説明変数にした方が良い。ただし、ファン効率異常のケース(CASE6)は説明変数による差は小さく、フォルトの程度によって検知率が異なると考えられる。
- 4) ダクト目詰まりのフォルト(CASE4)は検知することができなかった。これは、ファンがインバータ制御されており、今回実施したシミュレーションの範囲では、ここで想定したファン制御の方式に対しては検知できない。ただし、ファンの制御方式によっては検知可能であると考えられる。

5 まとめ

空調システムのライフサイクルエネルギーマネジメントに、「システムシミュレーション」と「BEMS」を利用することは有効であると言える。LCEM ツールのような静的シミュレーションプログラムでは、年間や期間のエネルギー評価に優れている。また、HVACSIM+のような動的シミュレーションプログラムは、室内

- E と F のモデル式

$$E = a_{x0} + a_{x1} \cdot F + a_{x2} \cdot F^2 \quad \dots\dots (1)$$
- n 個の標本を得た場合のモデル式 (行列表記)

$$\{E\}_{n \times 1} = [F]_{n \times 3} \cdot \{a\}_{3 \times 1}$$
- $[F]$ の分散共分散 (Cov) $\dots\dots (2)$

$$Cov = \sigma^2 \cdot (F^T \cdot F)^{-1} \quad \dots\dots (3)$$
- モデルの分散 (Var(E_i))

$$Var(E_i) = \{F_i\} \cdot (Cov) \cdot \{F_i\}^T$$

$$= \sigma^2 \cdot \{F_i\} \cdot (F^T \cdot F)^{-1} \cdot \{F_i\}^T \quad \dots\dots (4)$$
- モデル近似値の信頼区間

$$E_i \pm t_{n-3}(\alpha/2) \cdot \sqrt{Var(E_i)} \quad \dots\dots (5)$$
- モデル予測点の分散 (Var(\hat{E}))

$$Var(\hat{E}) = Var(E_i) + \sigma^2 = \sigma^2 \cdot \{F_i\} \cdot (F^T \cdot F)^{-1} \cdot \{F_i\}^T + 1 \quad \dots\dots (6)$$
- モデル予測値の信頼区間

$$E_i \pm t_{n-3}(\alpha/2) \cdot \sqrt{Var(\hat{E}_i)} \quad \dots\dots (7)$$

図 17 信頼区間の決定

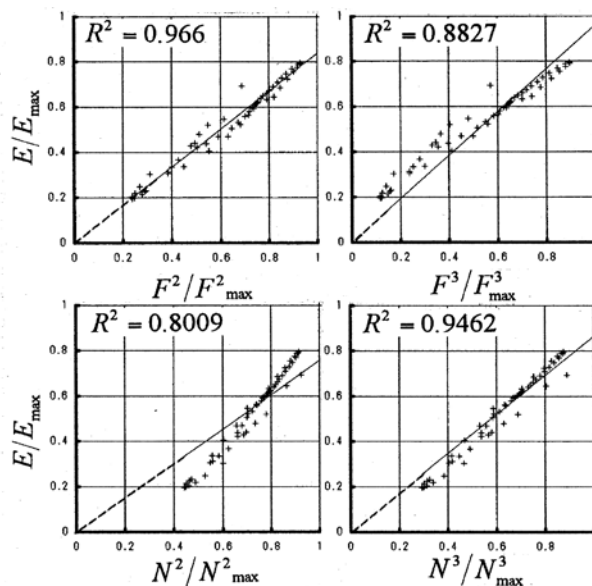


図 18 F/N と E の相関

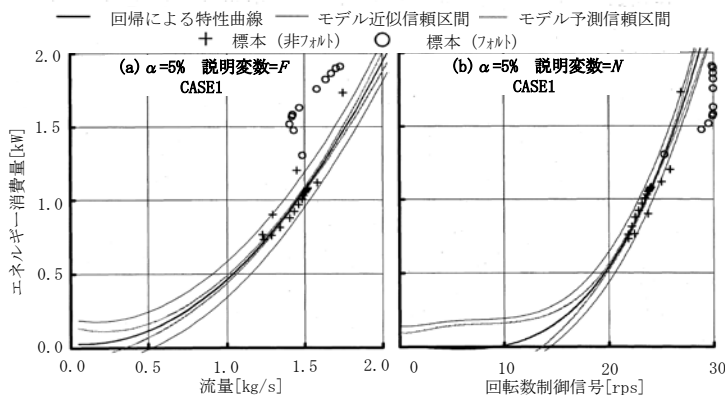


図 19 フォルト検知シミュレーション結果

表 2 フォルト検知率

独立変数	5%		1%	
	F	N	F	N
CASE 1	12 / 12	11 / 12	12 / 12	11 / 12
CASE 2	6 / 12	1 / 12	4 / 12	0 / 12
CASE 3	0 / 12	0 / 12	0 / 12	0 / 12
CASE 4	2 / 12	2 / 12	2 / 12	1 / 12
CASE 5	0 / 12	12 / 12	0 / 12	12 / 12
CASE 6	5 / 12	7 / 12	3 / 12	7 / 12

■ : 検知率(10/12~12/12) □ : 検知率(5/12~9/12)

環境品質の評価や制御系、システムの動特性のフォルト検知を行うことに向いていると考えられる。システムシミュレーションやBEMSを必要に応じ利用することで、空調システムを適切に設計・施工し運転できると言える。また、フォルト状態をいち早く検知し、改善できることも期待できる。近年では、設計図のCAD化、BEMSのオープン化により、システムシミュレーションとの接続しやすい環境が整いつつあり、今後はさらなる連携方法の検討や、それに必要なツールの整備・開発が期待される。

ただし、「シミュレーション」も「BEMS」も単なるツールの一つで、それらを利用し活用するのは、「人」であり、かつ対象である空調システムは、個別に異なる非線形な特性を持つ複雑な系であることを認識する必要がある。それを効果的に活用するためには

- ① 企画や設計など、空調システムのライフサイクルの早い段階で、「評価基準」「分析・可視化方法」「評価する期間や時期」などを階層的に分類・整理し、関係者間で情報共有する。
- ② 分類・整理した評価を実施するために必要な、「シミュレーションプログラム」「BEMS画面」「BEMSアプリケーション」「計測ポイント」などを決定し、設計や施工に利活用しつつ、スペックインする。
- ③ 受渡時や、竣工時において、設計者や施工者も参加し、①で設定した情報をもとに、詳細なエネルギー管理計画書を作成する。

ことが重要であると言える。特に近年では、運用管理業務については、アウトソーシングされる傾向にあり、本来は建物主が負うべきエネルギー管理責任が、外部業者、建設会社やメーカーが負うケースが多く

見られる。アウトソーシングされる場合、どうしても目先の省エネルギー施策にばかり注目し、大きな投資を伴う施策などは敬遠される傾向にある。建物は、重要な企業の経営資源であることを再認識し、地球環境保護へ貢献するためにも、建築主が率先して、長期的視野からトップダウン的に建物のエネルギーを削減し、ライフサイクルエネルギーを低減できるよう努力すべきと考える。

<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] 渡邊，丹羽他；建築設備のライフサイクルマネジメントにおけるシステムシミュレーションの活用に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集 No128，P25-34，2007
- [3] 空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 プログラム解説書，(社)建築設備技術者協会
- [4] 丹羽，中原，伊藤，渡邊，菅長，田中他；コミッショニングツールとしてのシミュレーションプログラム比較，第1報～第7報，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，P1217-1220，2003
- [5] 近藤，尹他；CFD と連成した空調システムシミュレーションに関する研究 平成 21 年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集，P2307-2311，2009
- [6] Da Yan ほか；DeST-An Intergrated Building Simulation Toolkit Part I:Fundamentals, Build Simul(2008) 1 pp.95-110
- [7] 丹羽英治ほか；VAV 空調システムにおける制御パラメータの設定不全がシステムの動特性に及ぼす影響とその最適調整法に関する研究，日本建築学会計画系論文集 第 477 号，1995. 11
- [8] 渡邊，奥宮他；BEMS とシステムシミュレーションを利用した建物運用最適化に関する研究，平成 21 年度空気調和・衛生工学会中部支部学術講演論文集，P161-164，2009
- [9] 気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/>)，気象等の知識
- [10] Norford, Ph. D. 他；Fault Detection and Load Monitoring in Ventilation System, HRAE Transactions, 1993, p590～602