

LCCEMツール開発の背景と概要

Background of Development and Outline of Life Cycle Energy Management Tool

日建設計総合研究所

Nikken Sekkei Research Institute

丹羽 英治

Hideharu NIWA

キーワード：LCCEM(Life Cycle Energy Management)、システムシミュレーション(System Simulation)、
空気調和システム(Air Conditioning System)

はじめに

国土交通省の LCCEM (Life Cycle Energy Management) ツールは、官庁施設におけるライフサイクルエネルギーマネジメントのための空調システムシミュレーションツールとして開発が進められた。「ライフサイクルエネルギーマネジメント (LCCEM)」とは、ライフサイクルを通して一貫した管理指標、管理目標を定め、共通したツールでその達成度を評価・検証する枠組みを言い、平成 16 年度より、公共建築協会／LCCEM 検討委員会 (委員長：村上周三 (慶應義塾大学)) において、その枠組みの検討とツールの開発が行われてきた。そして、平成 18 年 7 月に LCCEM ツール Ver.1 が公開され、その後、継続的なバージョンアップを経て、現在は Ver.3.03 が公開されている。

ここでは、LCCEM ツールの開発背景、オブジェクト化セルズ法を用いたツールの概要と解法、空調システムの構築方法等を紹介する。なお、本稿は(社)公共建築協会／LCCEM 検討委員会 (委員長：村上周三 (慶応大学)) の報告書[1]および既往文献[2][3][4]を抜粋、一部加筆したものである。

1. ツール開発の背景

1.1 エネルギーマネジメントの現状

エネルギーマネジメントに着目したビジネスとして、ESCO や省エネルギー診断の適用事例が、近年多く報告されている。ESCO については 800 件以上 (1998～2004 年)、また、省エネルギー診断については、実数は把握できないが、相当数の事例の存在が伺われる。ESCO の事例では、その適用により、数%～数 10%に及ぶエネルギー消費量の削減が実現されているようである。このように大幅なエネルギー消費の削減が可能であることは、エネルギーマネジメントによる改善余地が大きく、注目に値することを示している。

表 1.1 にエネルギーマネジメントの現状と LCCEM 実現のための提案を示す。現状では、主として運用段階を対象としたエネルギーマネジメントが実施されているが、次のような解決されない問題が残されている。

- ① 多くの例では運用実態に合わない過大な機器による非効率な運転などが日常的に行われている。
- ② 機器製作や試運転などでは定格仕様を満足するかを中心に確認が行われ、オフピーク時の性能や期間にわたる省エネ性能などが確認されていない。
- ③ 多くの例では設計意図や施工意図が反映されないまま運転が行われている。

以上は、ライフサイクルを通じての省エネ目標設定、対応する管理指標、確認方法などが明確になっていないことに由来していると考えられる。

表 1.1 エネルギーマネジメントの現状と LCEM 実現のための提案

	エネルギーマネジメントの現状	LCEM 実現のための提案
企画	具体的なエネルギー管理目標が提示されることは稀。	エネルギーマネジメントに関わる具体的な要求事項の確立
設計	PAL/CEC などによる省エネルギー管理が主体であるが、施工、運用段階に至る対象とはなっていない。	設計条件の明確化 目標を実現するための諸検討（オフピーク性能検討を含む） 目標達成を盛り込んだ設計図書
施工	特段のエネルギーマネジメントは行われていない。	エネルギー管理目標の達成を意図した機器製作承認。 試運転調整における目標達成状況の確認
運用	エネルギー管理が行われているが、管理項目、管理指標が明確になっていない。また、施設ごとに異なる。	運転管理データの集積・分析 設計値と実績値の照合による目標達成状況の確認。必要に応じた運転の改善

1.2 LCEM の必要性

以上のようなエネルギーマネジメントの諸問題を解決するには、企画段階から運用段階までを通じた一貫性のあるエネルギーマネジメントのしくみとツールが不可欠である。企画から運用、改修にいたる LCEM の全体の概念を図 1.2 に示す。各段階の要点は以下の通りである。

- ① 企画段階：建築主の省エネルギーに対する要求や目標を具体的に明示することが重要である（目標設定）。これにより、ライフサイクルを通じてのエネルギーマネジメントの出発点が形成される。
- ② 設計段階：建築主の要求を踏まえて、省エネに関する諸々の検討を加える。最終的には、設計内容が目標に合うようにしなければならないが、必要に応じて、目標値の修正が行われる。
- ③ 施工段階：設計内容を満足するように施工がなされねばならない。この段階では、機器製作・試運転調整・検収時の性能検証が特に重要である。これらの実行の要点は、ピーク負荷時の性能確認だけでなく、オフピーク時の性能を確認することなどにある。
- ④ 運用段階：エネルギーの管理指標、管理項目に従い、運転データを集積・分析し、当初の企画段階や設計段階で設定した省エネルギー目標が、実際の運転において達成されたかを確認する。達成できていない場合には、運転改善等の必要な修正措置を講ずる。

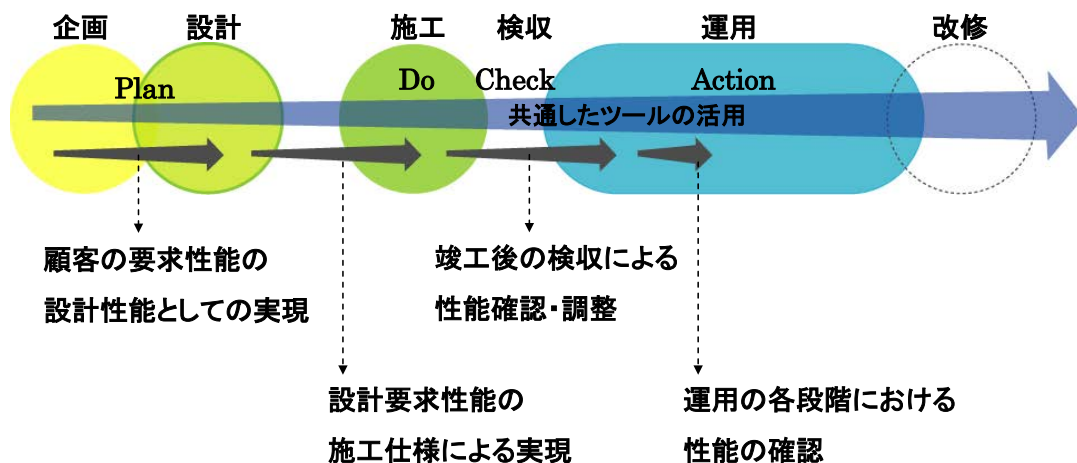


図 1.2 ライフサイクルエネルギーマネジメントの概念図

1.3 LCEM の重要目的

以下に、LCEM における重要目的を記す。

- ① 要求性能の明確化：現状、ピーク性能以外は明確にされていないことが多い要求性能を明確にする。
- ② オフピーク稼動状況の把握：現状、ピーク性能が主体の設計、施工、運用管理から、オフピーク

稼働状況を把握したマネジメントを行う。

- ③ 定量的計画・運転の支援：現状、ピーク性能以外は勘と経験に依るところが多い計画・設計・運転を定量的に支援する。
- ④ 継続的な性能検証と評価：現状、断続的に行われている性能評価や性能確認を、ライフサイクルを通じて一貫した指標で継続的に性能保証、性能評価を行い、PDCA サイクルを実施する。
- ⑤ 潜在化する不具合の検知と解析：現状、見逃されている潜在的な不具合を検知、解析を行えるようにする。
- ⑥ オペレータのトレーニング：現状、ほとんど実施されていないと思われるオペレータトレーニングを確実に実施する。

なお、ライフサイクルエネルギーマネジメントの対象は、広くはエネルギー消費システム全体を指すこともあるが、ここでは、空調システムに限定している。また、このときの室内環境は、拘束条件と考え、要求される室内環境条件が満足されていることを前提としている。

1.4 LCEMにおけるシミュレーションツールの必要性

LCEMを遂行するには、ライフサイクルを通じて、省エネルギー目標の達成度を計る「物差し」が必要である。このため、LCEM検討委員会では、空調設備に関わる「物差し」としての空調システムシミュレーションツールの開発を行ってきた。開発にあたっての目標は、次に示す通りである。

- ① エネルギー消費量だけでなく、システムの状態値を予測評価できること。
 - ② 設計～運用のどの段階にも共通して使用できること。
 - ③ 設計内容に照らして、機器製作内容・試運転調整内容を確認できること。
- 検収時や運転時等に、設計値と運転状態値（実績値）とを比較照合しながら、性能評価ができること。
- ⑤ ピーク負荷時の性能だけでなく、オフピーク時の性能を予測評価できること。
 - ⑥ 全体システムからサブシステム、機器単体まで、種々のレベルに自由度高く適用できること。
 - ⑦ パーソナルコンピュータ上で、容易に試行できること。

2. ツールの概要

2.1 LCEMにおけるツールの位置づけ

図 2.1 に、既存の性能評価ツール、空調システムシミュレーションツールと LCEM の観点から開発が必要と考えられるシミュレーションツールとの関係を示す。

1) 近年整備されてきた建築物性能評価ツール

CASBEE, LEED に代表される建築物の環境性能評価ツールが近年整備されてきた。ただし、これらのツールは建築物全体の性能をマクロに定性評価するツールであり、詳細なシステム評価やエネルギー消費量などの定量的評価を行うことを目的としていない。

2) 既存の空調システムシミュレーションツール

既存の空調システムシミュレーションは、HASP/ACSS や BECS/CEC/AC、DOE 等に代表される比較的マクロなシステムシミュレーションツールと、HVACSIM+に代表されるマイクロなツールに大別される。前者がシステム全体及びサブシステムレベルが評価の対象であるのに対して、後者は機器および機器を構成するコンポーネントを評価対象としている。いずれも、空調システムの定量的な評価を行うことが目的であるが、ツールが高度であるため、利用者が一部の技術者や研究者に限定されているのが実情である[7]。

3) LCEM の観点から必要と考えられるシミュレーションツール

LCEM の観点から必要と考えられるシミュレーションツールは、上述の 1) と 2) をつなぐ、空気調和システムを対象としたエネルギーシミュレーションツールである。これは、空調システムのエネルギー性能をマクロに予測、評価し、大きなふるい目で空調システムの不具合を把握できるもので、ライフサイクルの各段階で、運転管理者を含む実務者が容易に扱えるツールが必要である。特に、LCEM の

観点から次の3点が重要と考える。

- ① ユーザーが容易に扱え、かつ中身を把握して修正・拡張ができること
- ② 計算過程がブラックボックスになりにくい表計算方式の簡易なツールであること
- ③ 部分負荷状態における状態値が計算され、機器、サブシステムごとの年間、期間性能が把握できること

		マクロな性能評価ツール	マクロとミクロを繋ぐ性能評価ツール	ミクロな性能評価ツール
評価対象	建物全体	建築物性能評価ツール 建築物総合環境性能評価ツール (CASBEE等) ・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	LCEMの観点から 整備が必要なシミュレーションツール	既存のシステムシミュレーションツール
	システム		空調システムを対象とした エネルギーシミュレーションツール ・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 ・容易に扱えること	静的システムシミュレーションツール (ACSS, DOE2など) ・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			動的システムシミュレーションツール (HVACSIM+など) ・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 2.1 LCEMの観点から必要なシミュレーションツール

2.2 ツールの特徴

開発ツールは実用性を重視している。従って、機器特性のほとんどは実験式で構成し、実際の機器との比較照合を容易にしている。また、汎用表計算ソフトの「反復計算」機能を利用して、機器間の平衡状態を求めている点が特徴的である。その他の特徴を1)~5)にまとめる。なお、プロトタイプツールが対象とする空調システムは図 2.2 に示す、ファン、空調機 (コイル)・冷凍機・冷却塔およびポンプで構成される中央式空調システムとし、室内モデルや外気は境界条件として扱う。

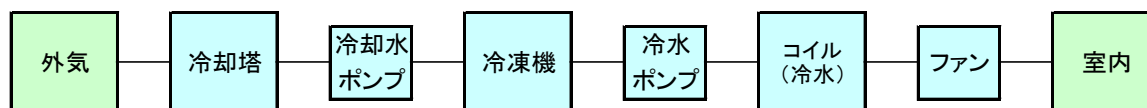


図 2.2 プロトタイプツールの対象空調システムの基本構成

1) 機器単体の性能評価が可能

機器単体の検証において、定格と異なる温度・流量条件における運転状態の解明が可能である。

2) 任意のサブシステムの性能評価が可能

一次側サブシステム

- ・ 1組の冷却塔+ポンプ+冷凍機
- ・ 冷凍機+冷水一次ポンプ+冷水二次ポンプ
- ・ 異機種、異容量の熱源 等の組み合わせ

二次側サブシステム

- ・ 空調コイル+ファン+室内
- ・ 複数組の冷凍機+空調コイル+ファン 等の組み合わせ

- 3) 全体システムの性能評価が可能
年間エネルギー計算を行う場合には、別途用意した熱負荷（顕熱、潜熱）を境界条件として与えてシミュレーションを行う。
- 4) 計画・設計～運用に至る各段階での利用が可能
1)～3)により、様々なレベル、段階で利用が可能。
- 5) 操作性、拡張性が高い
 - a) 空調関係者なら容易に扱える操作性を有する。
 - b) シミュレーターはブラックボックス化されずツールの中身が理解しやすい。また、ユーザーが容易に変更、機能の拡張が可能。
 - c) 多様な入力に対応能（手入力や熱負荷計算結果のオフライン、計測値のオンライン入力等）
 - d) 結果の処理が容易

これらのプログラム作成と解法には汎用表計算ソフトの Excel を用いている。解法には単純な演算の他に収束計算が含まれるが、これには表計算ソフトが有する「反復計算」による収束性を利用した。なお、マクロの利用は外部の熱負荷計算結果や計測データを読み込む等の特別な操作に留めることを基本としている。

2.3 ツールの構造

1) オブジェクト化セルズ法を用いた解法

開発ツールでは、オブジェクト化セルズ法と名付けた解法を用いて、空調システムの運転状態値を求める。一般に、表計算では図 2.3 左に示すように、シート上のセルに数式や数字を記入して計算を行うが、本手法では、機器モデルを構成する数式を図 2.3 右に示すように複数のセルに記述し、このセル群を一つの機器すなわちオブジェクトとして扱う。

図 2.4 に冷却塔オブジェクトの詳細例を示す。両側には、外気と冷却水ポンプのオブジェクトが接続する。冷却塔オブジェクトの上から 4 行の通信部分でオブジェクト間のデータの受け渡しを行う。その下 2 行は制御部分の入力欄であり制御の目標値などが割り当てられる。さらに下 2 行は演算部分であり、最後の下 5 行は冷却塔の属性データを記述する入力欄である。演算部分は通信、制御、属性データを用い、冷却水往温度と動力を計算する。計算した結果は通信部分に送られる。なお、通信部分は必ず隣のオブジェクトとしか通信しないため、図 2.5 のように冷却塔と冷凍機の間で冷却水温度を交換する場合は冷却水ポンプを中継する必要がある。このように、一筆書きのように機器を接続することで空調システムを構築することが可能になる。また、計算の流れがシート上で一次的に表現出来るため、表計算でありながら二次元あるいはシートを挟んだ三次元的な構造にならず、明快になる。さらに、通信部分の書式さえ守ればアルゴリズムの変更等は自由に行える。

ところで図 2.4 の矢印で示した冷却水往温度は冷凍機オブジェクトの入力条件であり、還温度は冷凍機オブジェクトの出力でありかつ冷却塔オブジェクトの入力である。これは、表計算でお互いのセルが参照し合う、すなわち循環参照である。そのままではエラー表示になるが後述する表計算ソフトの「ツール」⇒「オプション」⇒「計算方法」を選択し、「反復計算」のチェックボックスをオンにすることで循環参照は許容され、反復計算によって収束解が求まる。

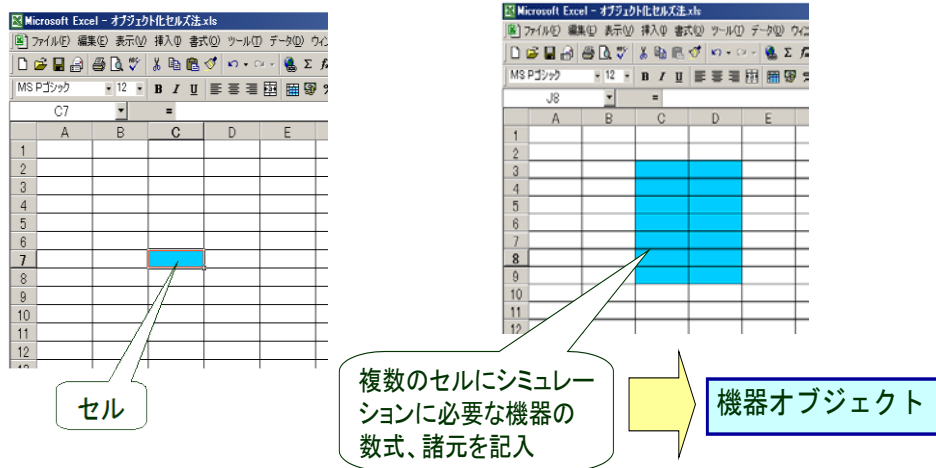


図 2.3 表計算ソフトのセルとオブジェクト化セルズ

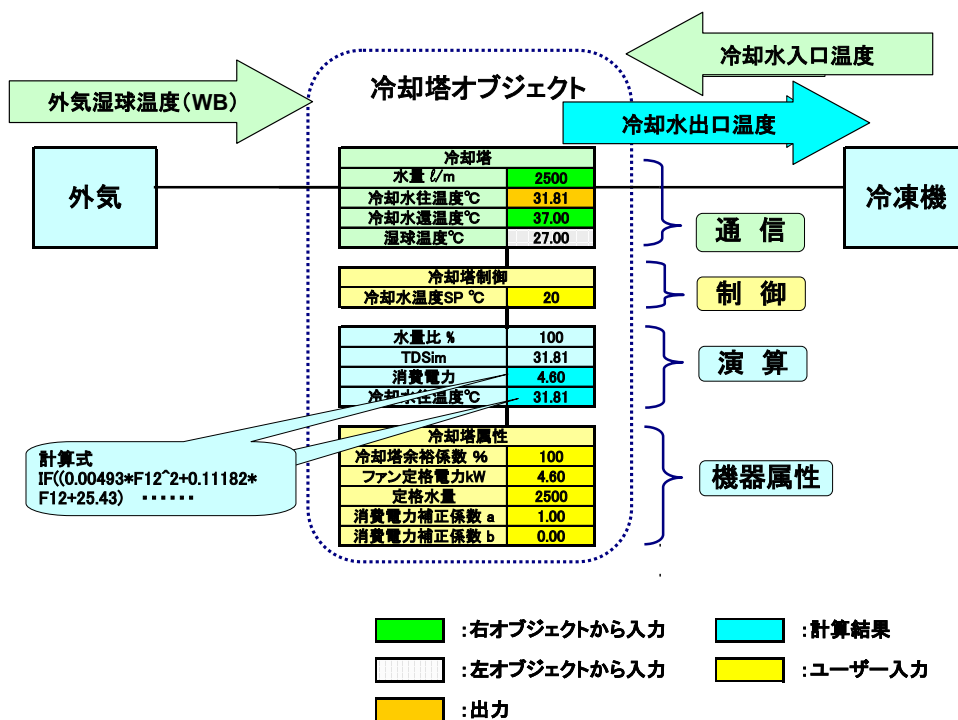


図 2.4 オブジェクトの基本構成 (冷却塔の例)

2) モデル化とシステムの構築方法

基本的な方法と手順について述べたので、これより具体的な空調システムが組めるよう準備を進める。まずは冷却塔の例に従って、必要なオブジェクトを図 2.5 左上に示すオブジェクトメニュー部に準備する。そこから必要なオブジェクトを「選択」、「コピー」、そして「貼り付け」の操作を行うことで、空調システムを構築していく。貼り付けた段階でオブジェクト間の計算が始まる。これらは、グラフィカルな操作であり、メインプログラムがなく個別分散で相互に計算する形態は、GUI を使ったオブジェクト指向のプログラミングといえる。モデル化は、図 2.6 に示すように、機器単位で行い、それらを接続することによりシステムを構築する。図 2.2 に示したプロトタイプ開発のためのシステムは、単純化した全体空調システムであるが、図 2.7～図 2.12 に示すように、機器単体から全体システムまで任意のサブシステムも、「選択」「コピー」「貼り付け」操作で構築できる。なお、この図の冷凍機のように隣にポンプのオブジェクトがない場合には、通信部分に冷凍機に必要なデータだけを備えた境界条件用オブジェクトを接続する。

3) オブジェクトの入出力

入力が必要とする部分は、各オブジェクトの制御部分、属性部分と外気、室内等の境界条件となるオブジェクトの通信部分である。各オブジェクト内の諸数値が出力となる。オフライン入力ではセルへの手入力や熱負荷計算結果などの配列データの自動入力があり、オンラインの場合は計測データを直接入力することになる。

4) 期間計算の方法

期間計算を行う場合には、図 2.13 に示すように、境界条件データをあらかじめ表形式でデータ入力シートに準備しておき、表計算ソフトのマクロ機能を利用して、構築シートの所定の位置に入力、逆に出力結果をデータ出力シートに書き出し、期間計算結果を得る。

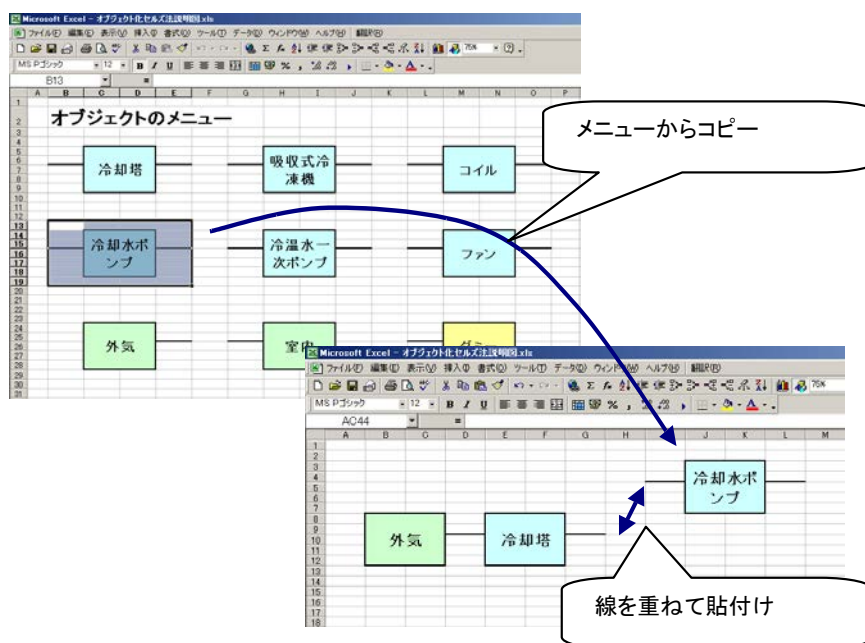
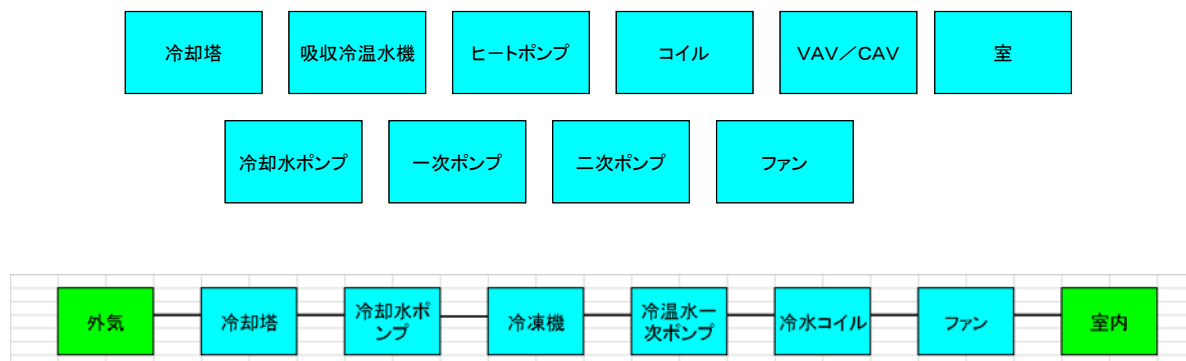


図 2.5 システム構築のイメージ



熱源サブシステムの構築例

図 2.6 モデル化と熱源サブシステムの構築例



図 2.7 機器単体の構築イメージ

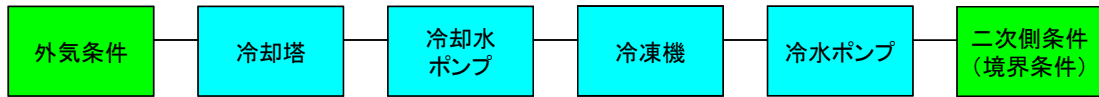


図 2.8 熱源+補機の構築イメージ

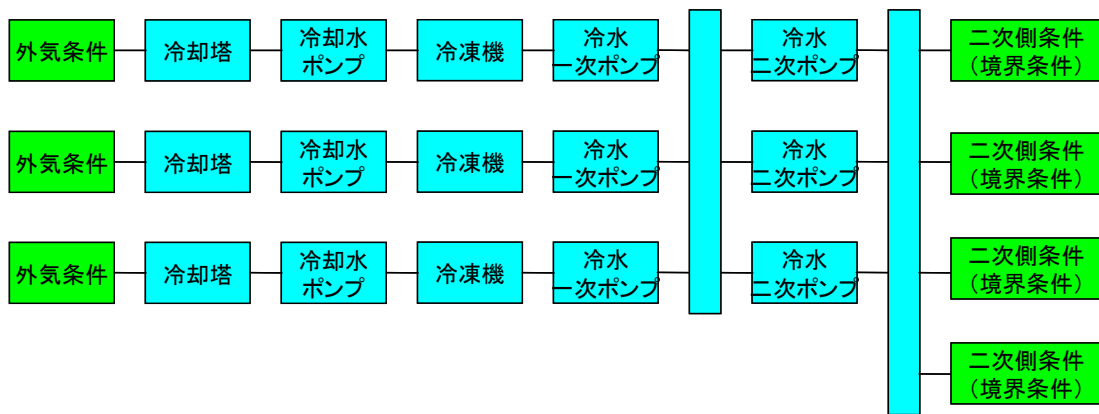


図 2.9 一次側サブシステムの構築イメージ

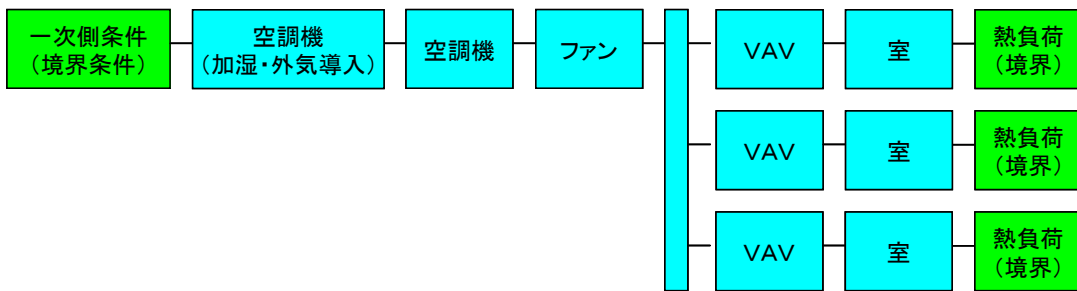


図 2.10 二次側サブシステムの構築イメージ

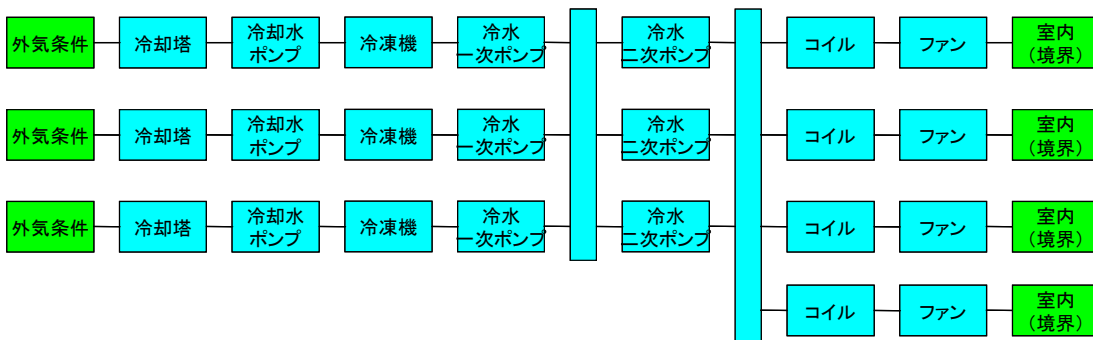


図 2.11 一次側+二次側システムの構築イメージ

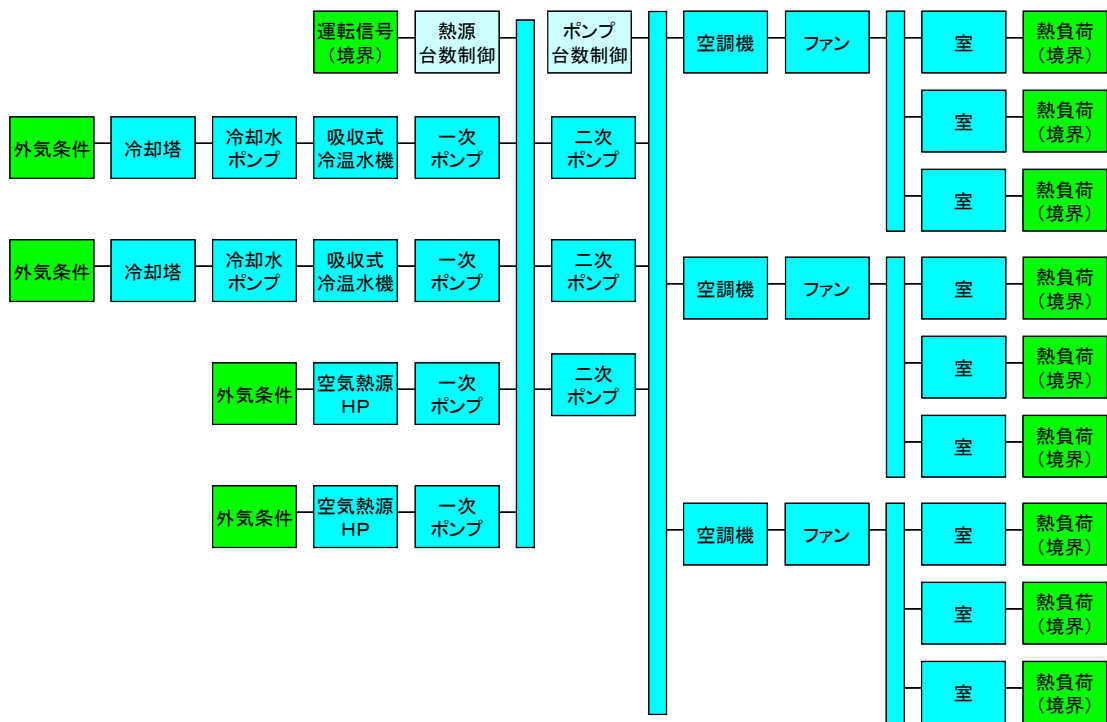


図 2.12 空調システム全体の構築イメージ

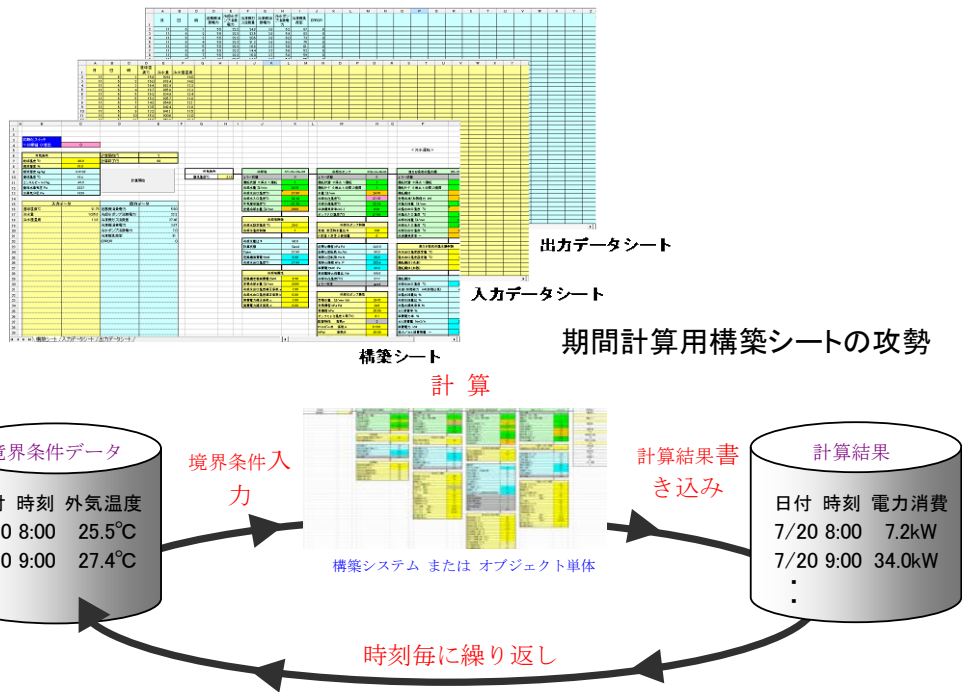


図 2.13 期間計算の方法

3. 空調システムの構築例

図 3.1 に、熱源サブシステムの構築例を示す。サブシステムはガス吸収冷温水機と冷却塔、一次ポンプ、冷却水ポンプから構成される。この場合、境界条件は外気湿球温度と冷温水量、冷温水還温度となり、境界条件の変化による熱源サブシステムの挙動確認を、表計算ソフト上で容易に行うことが可能である。図 3.2 に、熱源 2 台と二次ポンプから構成される熱源システム全体を構築した例を示す。

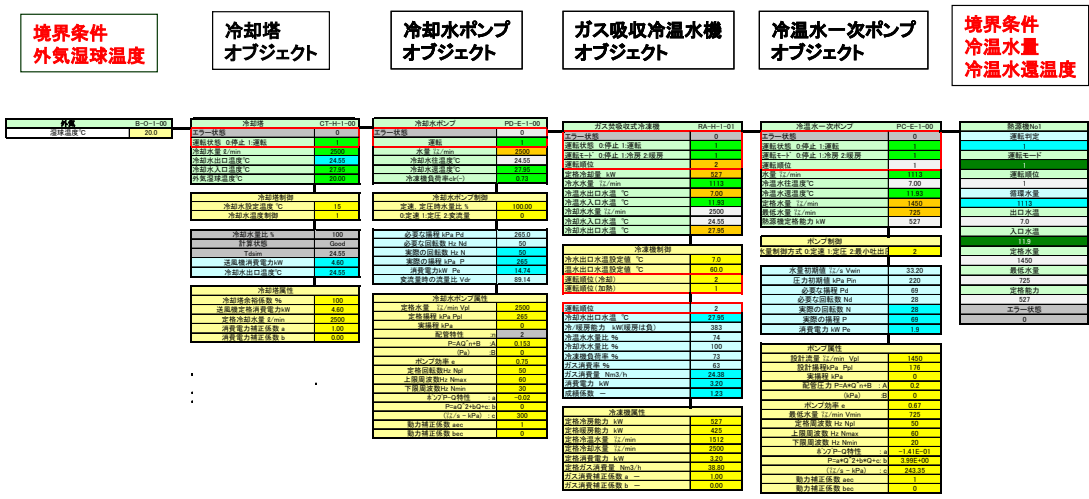


図 3.1 熱源サブシステムの構築例

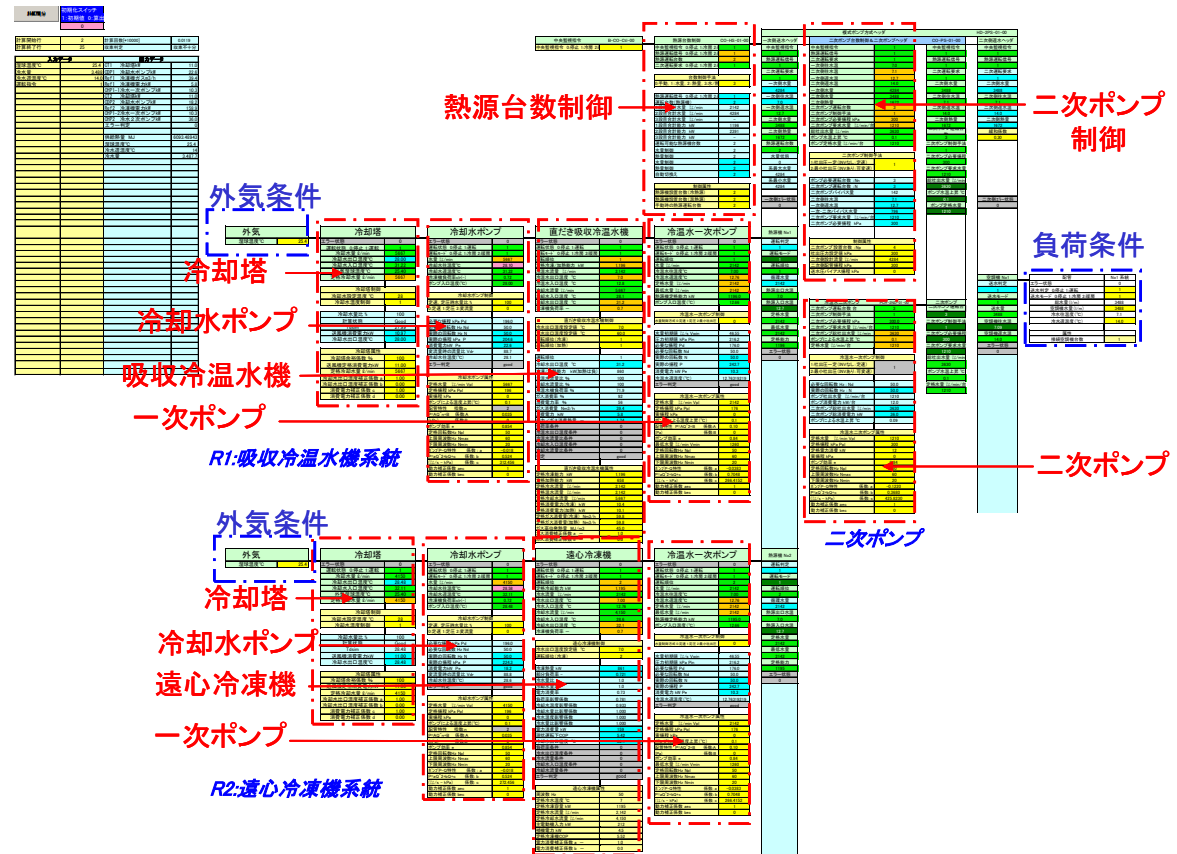


図 3.2 熱源サブシステム全体の構築例

おわりに

本稿は、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ツール(LCEMツール) について、その開発背景、オブジェクト化セルズ法を用いたツールの概要と解法、空調システムの構築方法、機器・制御モデルの概要等を示した。なお、LCEM 検討委員会は LCEM 整備・開発委員会として現在も継続されている。

【参考文献】

- [1] 公共建築協会:公共建築物におけるライフサイクルエネルギー管理(LCEM) 検討委員会報告書 2007 年 3 月
- [2] 時田:建物維持管理とサステナビリティ/サステナブル建築と LCEM,建築雑誌 vol.120,2005 年 4 月
- [3] 時田・杉原・松縄・丹羽ほか: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 1 報～第 34 報), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2005 年～2010 年
- [4] 丹羽:性能検証とシステムシミュレーション, 平成 16 年度空気調和・衛生工学会学術講演会オーガナイズドセッション,2005 年 9 月