

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その22）

建物側プログラムの概要

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 22)

Outline of Building Simulation Programs

正会員 ○ 郡 公子（宇都宮大学）

特別会員 村上 周三（建築研究所）

正会員 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）

正会員 長井 達夫（東京理科大学）

Kimiko KOHRI*¹ Shuzo MURAKAMI*² Hisaya ISHINO*³ Tatsuo NAGAI*⁴

*¹Utsunomiya University *²Building Research Institute *³Tokyo Metropolitan University *⁴Tokyo University of Science

This paper describes the features of the building calculation method and the outline of building simulation programs. An activity diagram of simulation procedures and class diagrams are presented to clarify the relation between simulation parts or classes.

1. 序

本報では、建築側の計算法の特徴、既報¹⁾に対して改良した点、建築側プログラムの概要として、計算主要部のクラス構成、設備システムとの接点となるクラス、計算順序などについて報告する。

2. 建築計算法の特徴

建築計算は、計算時間間隔が可変である、時間帯により解法を切り換えられる、ゾーン間の相互影響を考慮できるなどの特徴をもつ。具体的には、各ゾーンの空気温湿度を未知数とし、空調システムとの連成計算を行う時間帯は、各ゾーン熱平衡式をエクスプリシット法である4次ルンゲクッタ法で独立して解き、空調システムとの連成計算を行わない時間帯は、多ゾーンの熱平衡式を連立させて解くインプリシット法をとるというように切り換え可能である。建築単独計算の場合はインプリシット法のみで計算し、従来の熱負荷計算と同様、具体的な空調システムは想定せず、冷暖房装置容量、設定室内温湿度、換気量の入力条件だけで熱負荷・熱環境計算を行う。

表1は、建築計算法の概要をまとめたものである。表面温度は未知数とせず、室熱取得に対する室熱負荷応答の伝達関数を使用して壁体の熱取得応答を熱負荷応答に変換することで、対流・放射の近似分離を行う。壁体の熱負荷応答を求める際の応答近似に、固定5根ではなく変動2根を用いるように改良した。また、窓の日射遮蔽性能値の計算法を改良した。従来ブラインド使用時窓に対してもガラスの入射角特性を流用していたが、表2に示すようにプロファイル角に応じたブラインド特性を考慮する方法とした。ただし、現在はスラット角45°の場合に固定している。任意のスラット角での性能値の実用計算法が開発され次第、組み込む予定である。BESTでは、主要方位の窓からの採光による昼光照明計算が可能であり、昨年に対してブライ

ンドスラット角制御時の昼光計算と照明器具の調光計算、電力消費量計算も可能とした。熱計算と異なり、光計算では任意のスラット角での照度計算が可能である。そのほか、隙間風計算に漏気係数法を追加、ゾーン間換気計算にスケジュール入力による時刻変動考慮の計算法を追加したなどの改良を行った。

3. プログラムの概要

3.1 計算順序

BESTでは、建築と空調・電気・衛生との連成計算を行うこと、建築計算は2種の解法を切り換えることから、計算順序をどのようにするか整理が必要であった。検討の結果、建築と設備システムおよび共通部分の計算は、図1に示すような順序で行っている。共通時間とスケジュールデータの設定を行った後、計算条件の入力は、まず建築、次にシステムについて行う。建築側のゾーン情報の設定が終わった後、システムの初期設定において、建築側クラスからゾーン情報を取得する。システムとの連成計算を行う場合のエクスプリシット法の各時間ステップの処理では、まず建築側で、前ステップに計算した現ステップの室内温湿度を設定し、それと前ステップの熱負荷状態から温熱環境指標の計算を行う。照明・発熱機器の熱取得、ブラインド状態の計算、必要に応じて、昼光・調光計算・電力消費量計算をする。次にシステム側で、建築側クラスから室内熱環境や照度、電力消費量などを受け取りシステムシミュレーションを行い、空調供給熱量や機器放熱量などの情報を建築側クラスへ伝達する。建築側では、システム側から取得した熱情報と熱負荷要素別の計算結果から次ステップの室内温湿度計算を行う。インプリシット法の場合は、熱負荷要素別計算後に現ステップの室内温湿度、温熱環境指標の計算を行う。

3.2 主要部クラス構成

熱・光要素の計算クラスの構成を図2に示す。熱負

荷要素の計算用に、インターフェース LoadElement があり、その実装クラスとして外壁、内壁をはじめとする熱負荷要素クラスがある。その他昼光計算用に DaylightElement、電力消費量計算用に ElectricElement のインターフェースを用意した。また、抽象クラスとして、貫流熱などの計算を行う ConductiveHeat、内部発熱を計算する InternalHeat を導入した。インターフェース、スーパークラスの主要メソッドを表3にまとめた。実装クラスを利用するプログラムでは、インターフェース、抽象クラスを介することで、実装クラスの交換や追加・廃止があってもコード変更が不要となる。

空間に関するクラスは、図3に示すように現在 MultiSpace、RoomSpace の3つがある。MultiSpace は相互影響を考慮する多ゾーンの熱計算を行うクラス、Room は表面間放射熱移動のある閉空間に関する計算として、壁体の熱取得応答から熱負荷応答の変換や各表面に吸収される日射や内部発熱放射熱の配分値管理を行う。Space は室温均一のゾーンに関する計算として、熱負荷・照度・電力消費量・温熱環境指標の計算を行う。

表1 建築計算の概要

項目	概要
計算時間間隔	非空調時1時間、空調時5分など可変設定可
対象用途	事務所、住宅ほか任意
連成・単独	空調・電気・衛生システムとの連成のほか、建築単独計算も可能（空調室のゾーン負荷と外気負荷を計算）
未知数	各ゾーンの室温と絶対湿度
多数室	隣接ゾーンの相互影響考慮
空間分割	水平分割可。上下分割は現在は対象としない
長波放射・対流分離	近似的に分離。表面温は未知数としない。壁体取得応答を熱負荷応答に変換して使用
湿気	壁面吸放湿・結露は、現在計算しない
熱的快適性	各ゾーンASTを利用した作用温度、PIW計算
壁材物性DB	3つのライブラリ（①空調学会便覧、②ISQ、③熱・湿気データ）を用意
窓性能DB	豊富なガラス種類についてブラインド内側・内蔵の一般窓の基準入射条件での熱性能値および代表ガラスの入射角特性計算用データを整備。ガラス可視光透過率も整備。
各種スケジュール	折れ線変動・ステップ変動の選択可
隣棟	隣棟高さや隣棟までの距離から計算
外部日除け	垂直・水平・ボックスルーバ
壁体	一次元伝熱計算（項別公比法）
家具類	オフィス家具類を想定した遅れ特性を考慮
窓	日射熱取得率と熱貫流率を利用する計算。入射角のほかプロファイル角の影響も考慮。エアフローエインドウの計算可。熱計算では、現在スラット角45°の性能値を使用しているが、昼光計算では、任意のスラット角での計算が可能。スラット角制御も可。
昼光	窓からの奥行き方向照度分布（連窓想定）
照明	調光計算可能
隙間風	換気回数法、漏気係数法*
ゾーン間換気	風量の時刻変動、移動方向変動の指定可
在室者	Two-Nodeモデルを応用した発熱量計算

* 漏気係数法とは、外皮漏気性を3段階に分類し、分類ごとに漏気係数を仮定して、中性帯を建物中央高さに仮定した場合の内外差圧を用いて隙間風量を計算する。

図4は、熱平衡式を取り扱うクラスの関係を示したもので、エクスプリシット法、インプリシット法の解法クラスはインターフェース ISolver の実装クラスであり、EquationsController クラスで、ISolver の指定を変えるだけで、簡単に解法切り換えを実行できる。

3.3 建築側クラスと情報交換するモジュール

表2 一般窓の日射熱取得計算法

■ 日射熱取得
日射熱取得 HG_{SR} [W/m²] の短波放射成分 $HG_{SR,SR}$ 、長波放射成分 $HG_{SR,LR}$ 、対流成分 $HG_{SR,C}$ [W/m²] を、次式で表す。

$$HG_{SR,SR} = I_D \cdot \tau_D + I_S \cdot \tau_{SKY} + I_G \cdot \tau_{GR} \quad \dots(1)$$

$$HG_{SR,LR} = k_{LR} (HG_{SR} - HG_{SR,SR}) \quad \dots(2)$$

$$HG_{SR} = I_D \cdot \eta_D + I_S \cdot \eta_{SKY} + I_G \cdot \eta_{GR} \quad \dots(3)$$

$$HG_C = HG_{SR} - HG_{SR,SR} - HG_{SR,LR} \quad \dots(4)$$

【記号】 I_D 、 I_S 、 I_G ：窓面の直達、天空、地表面反射日射量 [W/m²]、 τ_D 、 τ_{SKY} 、 τ_{GR} ：直達、天空、地表面反射日射に対する透過率[-]、 k_{LR} ：長波放射成分係数[-]、 η_D 、 η_{SKY} 、 η_{GR} ：直達、天空、地表面反射日射に対する日射熱取得率[-]

■ ブラインド使用時の日射熱取得率と透過率

透過率 τ_{GB} [-] を、スラット隙間を通り抜ける成分とスラットに当たる成分に分けて求める。また、日射熱取得率 η_{GB} [-] は、長波放射・対流成分 η_{GBA} [-] と τ_{GB} の和として求めるが、 η_{GBA} は、透過率と同様に、2つの項に分けた式で推定する。

$$\tau_{GB} = x_{GAP} \cdot \tau_G + (1 - x_{GAP}) \tau_{GB'} \quad \dots(5)$$

$$\eta_{GB} = \eta_{GBA} + \tau_{GB} \quad \dots(6)$$

$$\eta_{GBA} = x_{GAP} \cdot k_B \cdot \eta_{GA} + (1 - x_{GAP}) \eta_{GBA'} \quad \dots(7)$$

$$\text{ただし、} \tau_G = \tau_{G0} \cdot g_G \quad \dots(8)$$

$$\tau_{GB'} = \tau_{GB0} \cdot g_B \cdot g_{GOUT} \quad \dots(9)$$

$$\eta_{GA} = \eta_{G0} \cdot f_G - \tau_{G0} \cdot g_G \quad \dots(10)$$

$$\eta_{GBA'} = \eta_{GB0} \cdot f_{GOUT} - \tau_{GB0} \cdot g_{GOUT} \quad \dots(11)$$

【記号】 x_{GAP} ：ガラス透過日射のうちスラット隙間を通り抜ける比率[-]、 η_{GA} 、 τ_G ：ブラインド非使用時の日射熱取得率長波放射・対流成分、透過率[-]、 $\eta_{GBA'}$ 、 $\tau_{GB'}$ ：ガラス透過日射がスラットに当たる窓面に限定したときの日射熱取得率長波放射・対流成分、透過率[-]、 k_B ：ブラインド断熱係数[-]、 η_{G0} 、 τ_{G0} ：ブラインド非使用時の基準入射条件での日射熱取得率、透過率[-]、 η_{GB0} 、 τ_{GB0} ：ブラインド使用時の基準入射条件での日射熱取得率、透過率[-]、 g_B ：ブラインド補正係数[-]、 f_G 、 g_G ：ブラインド非使用時の基準化日射熱取得率、基準化透過率[-]、 f_{GOUT} 、 g_{GOUT} ：ブラインドより外側のガラスの基準化日射熱取得率、基準化透過率[-]

■ 諸係数

・スラット隙間を通り抜ける日射比率 x_{GAP} （スラット角45°）（直達日射）

$$x_{GAP} = 0.18 - 0.82 \tan p \quad \dots(12-1)$$

$$\text{ただし } x_{GAP} < 0 \text{ のとき } x_{GAP} = 0$$

（垂直窓の天空日射） $x_{GAP} = 0.02 \quad \dots(12-2)$

（垂直窓の地表面反射日射） $x_{GAP} = 0.50 \quad \dots(12-3)$

・ブラインド補正係数 g_B （スラット角45°）

g_B は、透過率に対して、プロファイル角の違いを補正する係数である。

（直達日射） $g_B = 1.27 - 0.009p \quad \dots(13-1)$

$$\text{ただし } g_B > 1.16 \text{ のとき } g_B = 1.16$$

（垂直窓の天空日射） $g_B = 0.98 \quad \dots(13-2)$

（垂直窓の地表面反射日射） $g_B = 1.80 \quad \dots(13-3)$

・ブラインド断熱係数 k_B

k_B は、ブラインドによる室内侵入熱の低減を考慮する係数である。

（ブラインド内側窓） $k_B = U_{GB} / U_G \quad \dots(14-1)$

（ブラインド内蔵窓） $k_B = 1.0 \quad \dots(14-2)$

【記号】 p ：プロファイル角、 U_{GB} 、 U_G ：ブラインド使用時、非使用時の窓熱貫流率

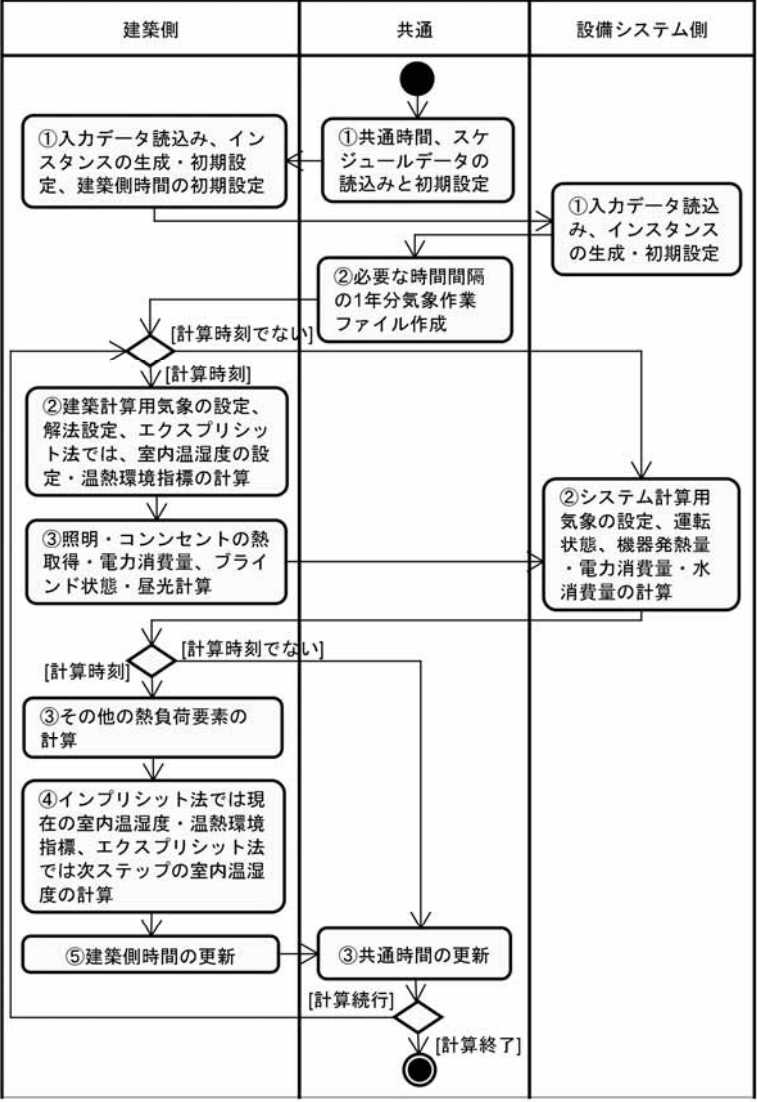


図1 建築・設備システムの計算順序（アクティビティ図）

表3 熱・光計算のインターフェース・抽象クラスの主要メソッド

メソッド	処理内容
（熱負荷要素のインターフェース：LoadElement）	
input	ユーザ入力データの設定
initialize	特別計算前の前処理計算。例えば、項別公比法の係数計算、隙間風外皮漏気係数計算、放射熱取得の吸収面の整理と配分率設定など
preOutCal	各時間ステップの第1段階熱計算。例えば、窓・内部発熱放射熱取得の各表面への配分など
outCal	各時間ステップの室熱平衡式係数変動成分と定数項の計算。
update	各時間ステップの後処理計算。例えば、蓄熱量や表面温度の計算など
evaluate	各時間ステップの評価計算。例えば温熱環境指標の計算など
（昼光要素のインターフェース：DaylightElement）	
input	ユーザ入力データの設定
initialize	特別計算前の前処理計算。
outCal	昼光照度計算
（電力要素のインターフェース：ElectricElement）	
outCalElectric	発熱量と消費電力計算
getElectricPowerLoad	消費電力の取得
（貫流熱要素のスーパークラス：ConductiveHeat）	
getOriginalResponse	貫流・吸熱熱取得のステップ応答取得
getLoad	現在の壁体熱負荷の取得
setSurfaceHeatIntegrator	項別公比法による壁体非定常熱計算クラスのインスタンスを設定
setLoadResponse	貫流・吸熱熱負荷のステップ応答の設定
getSurfaceTemp	現在の（表面温度-室温）の取得
（内部発熱要素のスーパークラス：InternalHeat）	
getHg	対流、放射、潜熱成分別の内部発熱熱取得の取得

ほかに、LoadElementの実装メソッド

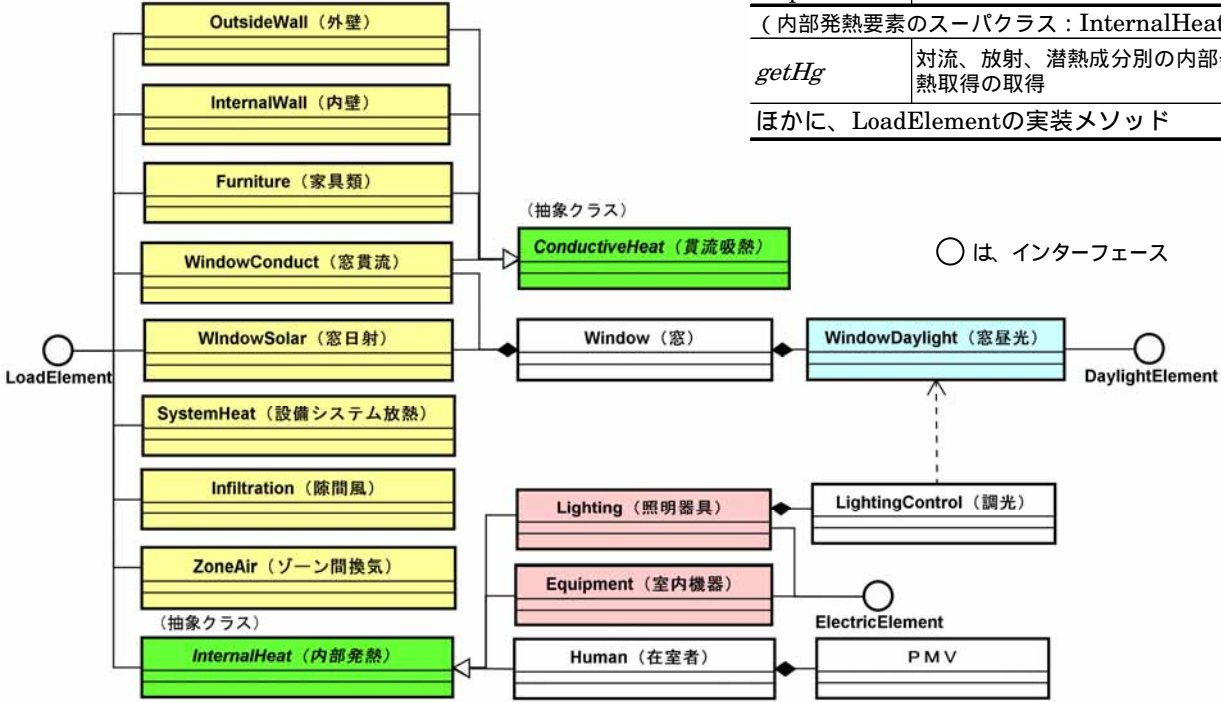


図2 熱・光計算クラスとインターフェース類

システムとの連成計算時には、建築・システム間の情報交換が必要であり、その役目をするシステム側モジュールとその機能を表4に、建築とシステムの接点部分のクラス構成を図5に示す。今後、建築一体化空調などのシステムを拡充すると、建築側と情報交換するシステムモジュールを追加することになる。

4. 結

建築側プログラムの構造を説明した。今後、建築単独計算での最大熱負荷計算を初めとする計算機能の追加、出力情報の整理などを行う予定である。

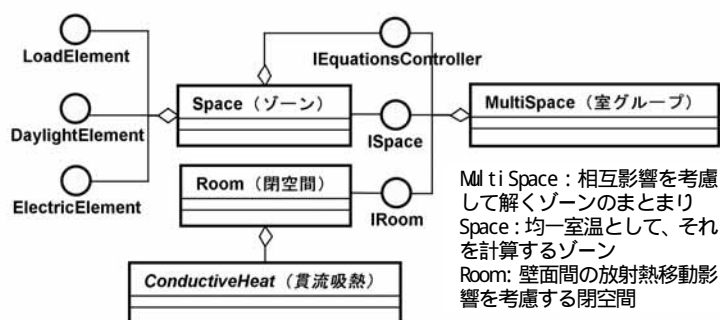


図3 空間クラスとインターフェース類

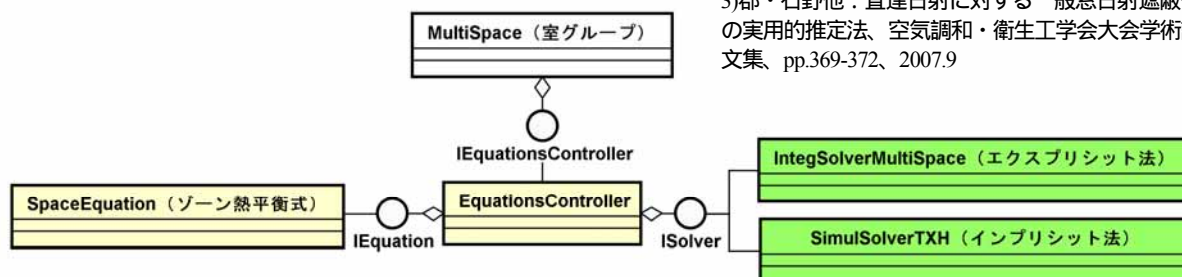


図4 熱平衡式を取り扱うクラス

表4 建築側と情報交換するシステム側モジュールの機能

モジュール名	機能
ZoneAirModule	入力側に接続された他のモジュールから吹出空気状態を受け取り、ゾーン熱平衡式の係数、定数項に関わる値を計算して建築側クラスへ渡し、リターン空気状態を出力側に接続されたモジュールへ渡す。
ZoneEnvModule	ゾーンの室温、湿度、作用温度、PMなどの熱環境状態値を他のモジュールへ出力する。制御用のセンサーモジュールと接続するなどが考えられる。
ZoneEPLoadModule	建築側で計算した各ゾーンの照明・コンセント電力消費量を、分電盤などの接続モジュールに出力する。
ZoneHeatGainModule	配管や発熱機器などの接続モジュール（複数接続可能）から受け取った発熱量情報（顕熱、潜熱、温度レベル）を建築側クラスへ渡す。
ZoneModule	上記4つのモジュールを統合し、1つのモジュールで複数のモジュールの機能を果たすモジュール

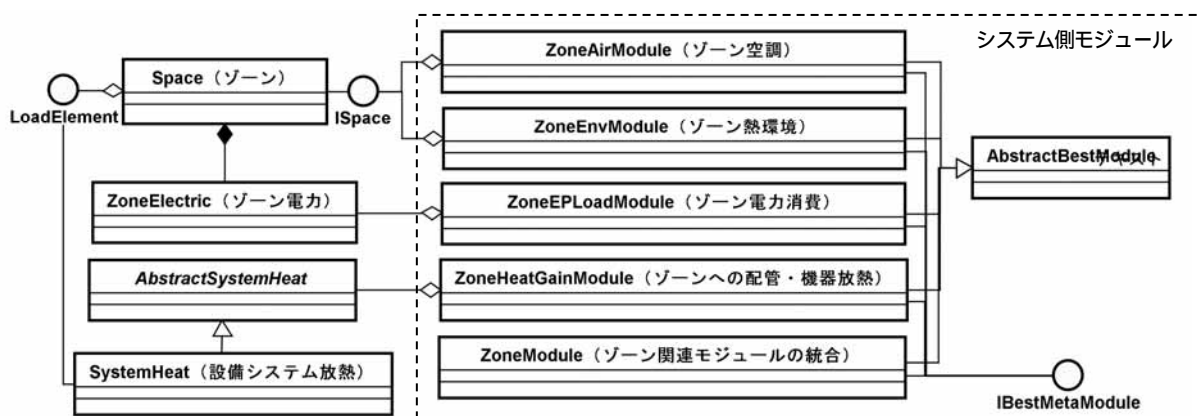


図5 システム側と情報交換するクラス

【謝辞】

エネルギー機構）【謝辞】本報は、（財）建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST開発普及事業研究会（村上周三委員長）」ならびにアーキテクチャ検討部会（坂本雄三部会長） 建築・空調設備作業部会（石野久彌部会長）、クラス構想WG（石野久彌主査）の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。クラス構想WG名簿（順不同）主査：石野久彌（首都大学東京名誉教授） 委員：一ノ瀬雅之（東京理科大学） 内海康雄（宮城高専） 郡公子（宇都宮大学） 長井達夫（東京理科大） 羽山広文（北海道大学） 上田博嗣（大林組） 木下泰斗（日本板硝子） 後藤裕（三機工業） 菟田英晴（鹿島建設） 芝原崇慶（竹中工務店） 平林啓介

（新日本空調） 松村一誠（清水建設） 渡邊剛（NTT ファシリティーズ） 協力委員：瀧澤博（元鹿島建設） 菅長正光（自営） 二宮博史、國吉敬司、篠原奈緒子（以上、日建設計） オブザーバー：野原文男（日建設計） 事務局：生稲清久（建築環境・省エネルギー機構）

【文献】

- 1) 郡・村上・石野・長井：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その13）、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.2017-2020、2007.9
- 2) 郡・村上・石野・長井：建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第3報、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008.9
- 3) 郡・石野他：直達日射に対する一般窓日射遮蔽性能値の実用的推定法、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.369-372、2007.9