

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103）

仮設調整テンプレートの改良と換気計算用モジュールの開発

**Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST(Part 103)  
Temporary Adjustment Templates for HVAC System Annual Design and  
Ventilation Network Module**

正会員 〇二宮 博史（日建設計）

技術フェロー 長井 達夫（東京理科大学）

正会員 菰田 英晴（鹿島建設）

正会員 品川 浩一（日本設計）

技術フェロー 長谷川 巖（日建設計）

特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）

技術フェロー 野原 文男（日建設計）

正会員 大西 晴史（関電工）

正会員 木本 慶介（大林組）

Hiroshi NINOMIYA\*<sup>1</sup> Shuzo MURAKAMI\*<sup>2</sup> Tatsuo NAGAI \*<sup>3</sup> Hisaya ISHINO\*<sup>4</sup> Hideharu KOMODA\*<sup>5</sup>

Fumio NOHARA \*<sup>1</sup> Koichi SHINAGAWA\*<sup>6</sup> Haruhito ONISHI\*<sup>7</sup> Iwao HASEGAWA \*<sup>1</sup> Keisuke KIMOTO\*<sup>8</sup>

\*<sup>1</sup> Nikken Sekkei Ltd. \*<sup>2</sup> Institute for Building Environment and Energy Conservation \*<sup>3</sup> Tokyo University of Science

\*<sup>4</sup> Tokyo Metropolitan University \*<sup>5</sup> Kajima Corporation \*<sup>6</sup> Nihon Sekkei \*<sup>7</sup> Kandenko Co.,Ltd. \*<sup>8</sup> Obayashi Corporation

This paper presents the outline of improvements in Temporary Adjustment Templates for HVAC System Annual Design and development of Ventilation Network Calculation Module.

## はじめに

BEST 専門版の空調システム関連のモジュールおよびテンプレートに対して改良および新規開発を継続して行っている。ここでは、それらの中からいくつか取り上げ概要を説明する。また、移動平均による改良版仮設調整テンプレートの調整方法と、多数室換気回路網による換気計算用の新モジュールの計算方法を説明し、それらの計算例を報告する。

## 1. モジュールおよびテンプレートの拡充

多種多様な空調システムおよびその運用方法のシミュレーションに対応するために、空調関連モジュールおよびそれらで構成されるテンプレートの機能アップを行った。主な改良および新規開発について以下に紹介する。

### 1.1 搬送テンプレートの拡充

ポンプは流量と揚程（ファンは風量と静圧）を入力するだけで、必要とする動力や機器サイズはモジュールが自動設計する新たなモジュールに置換えた2次ポンプテンプレートを作成した。これまで2台の台数制御であったものを複数のポンプを台数制御できる制御モジュールとし、さらに配管系や送風系の圧力損失モデルを組み込み、定流量、段数制御、吐出圧一定制御、末端差圧一定

制御、予想末端差圧制御を簡単に切り替えて検討ができるようにした。ファンについても同様に、複数のファンを台数制御する制御モジュールを作成した。

### 1.2 デュアルダクト方式への対応

デュアルダクト方式を計算するために、これに対応したデュアルダクト用2コイル空調機テンプレート、デュアルダクト用ゾーン空調テンプレートを作成した。

空調機および熱源の多様な運転方法に対応できるように、これらの制御モジュールを改良した。一日の発停を複数設定できるようにし、曜日別に一日の運転パターンを設定可能とした。曜日パターンは3組まで登録でき、冷房、暖房、中間期などの3シーズンの運転パターン切替えに対応した。さらに、冷温水の熱源の出口設定温度や2次側への送水設定温度を月別に変更可能とした。

### 1.3 仮設調整テンプレートの改良

仮設調整テンプレートでは、ビル用マルチ室内機とEHPタイプの室外機の改良版仮設調整テンプレート、デュアルダクト用2コイル空調機の仮設調整テンプレート、冷熱と温熱の仮設調整熱源を作成した。2章に改良した容量調整方法の説明と計算例を示す。

### 1.4 建物全体テンプレートの4管式モデル

4管式に対応した建物全体のテンプレートを新たに用

意し、年間冷暖房の空調システムの計算も容易に開始できるようにした。これと各種仮設調整テンプレートをを使用することで、空調設備容量の計算などの事前作業（建物データの作成を除く）を必要とせず直ちにシミュレーションを開始することができ、その結果から各ゾーンへの送风量、空調機、ポンプや熱源などの仕様決定を効率的に行うことが可能となる。

### 1.5 多数室換気回路網による換気計算モジュール

多数室換気回路網によるゾーン換気計算用モジュールを開発した。これを使用することで、中間期の自然換気やナイトバージなどの計算が可能とした。多数室換気回路網の計算方法は節点圧力仮定法による。3章に計算方法と計算例を示す。

### 1.6 自作設備モジュールの合成利用ツール

BEST プログラムは Java 言語によるオブジェクト指向、モジュラープログラムとして設計されている。BEST の設備モジュールは BEST 専門版開発委員会により開発し提供されているが、ユーザーが自作した設備モジュールを BEST 本体に合成して計算することが可能な仕組みを予め用意している。この作業を簡単に行えるよう、自作設備モジュールを本体プログラムと合成利用する時の調整手順を自動化するツールを開発した。

## 2. 仮設調整テンプレートの改良と能力調整試算例

### 2.1 移動平均値による調整方法

改良版では、要求熱量や要求风量など対象とする容量の移動平均値を予め設定した計算ステップ数で求め、この移動平均値により容量を調整する方法に改めた。移動平均値を算出する調整計算ステップ数は変更可能で、例えば5分間隔計算の時に12計算ステップで調整すると1時間の移動平均値で、6計算ステップで調整すると30分の移動平均値で容量調整を行うこととなる。

調整対象の容量の初期値は小さい値としておき、これを制御モジュールからの操作量で調整するフィードバックの増大調整方法としている。例えばゾーンへの送风量の調整方法は、VAV方式で空調システムを構築しておき、VAVユニットの风量を制御するPID制御モジュールの操作量の最大値を1.01など1を超える値とすることで、負荷に対して容量が不足する場合は一定の割合でVAVユニット最大风量を増加させる。PID制御（自動調整）モジュールから送られる操作量は通常0～1の値である。操作量が0の場合は運転容量が最小风量（ここではゾーンの必要外気量）、操作量が1の場合は運転容量を最大风量としてVAVユニットが運転する。調整の場合はこの操作量の最大値を1より大きな値（今回は1.01とした）に設定してあるので、1を超える操作量を受取った室内機モジュールは、今の最大风量では能力不足であると判断し、自身の最大风量を見直し操作量に応じて増大させる。個々のVAVユニットでの风量調整は、VAVファン制御

モジュールによって集計され、仮設調整空調機側の必要送风量も同時に調整される。仮設調整空調機から発する冷温水流量は仮設調整熱源で集計され、自身の最大能力の見直しを行う。以上のような流れで、VAVユニットから空調機や熱源まで連続して装置容量が調整されていくこととなる。

### 2.2 試算条件

デュアルダクト方式の空調設備の仮設調整の試算に使用した建物条件、空調条件を次に示す。

建物は既報<sup>3)</sup>のモデルで北側4ゾーン、南側4ゾーンの2系統、空調はデュアルダクト方式で2コイル空調機および冷熱源と温熱源の4管式年間冷暖房とし目標温度を22℃～26℃、送風温度は冷風14℃温風32℃、最小送风量は100m<sup>3</sup>/h、その他は既報<sup>2)</sup>の条件としている。

調整ステップ数は12ステップ、計算時間間隔5分で2年間の計算を実行した。

図-1はデュアルダクト方式の空調機とゾーンの構成の概要を示したものである。新たに開発したデュアルダクト方式の仮設調整空調機テンプレートは、図-1の空調機部分の冷風・温風の送風温度を設定しておき、VAV方式で負荷に応じて変動するゾーンへの送风量と還り空気の温湿度とから、冷水コイルと温水コイルの必要交換熱量とそれぞれの水側の出口温度を算出する。各ゾーンのVAVユニットには負荷（PID制御モジュールからの操作量）に応じて最大风量を自動調整する機能を追加して使用している。

熱源は、冷熱用と温熱用の仮設調整熱源テンプレートを分けて設け、4管式で空調機側と接続している。なお、デュアルダクト方式の建物全体設備テンプレートを用意してあるので、テンプレート間の複雑なダクト、配管および制御信号の接続作業は不要で、熱源や空調機のテンプレートを仮設調整テンプレートに入替ることで容易に計算が可能である。

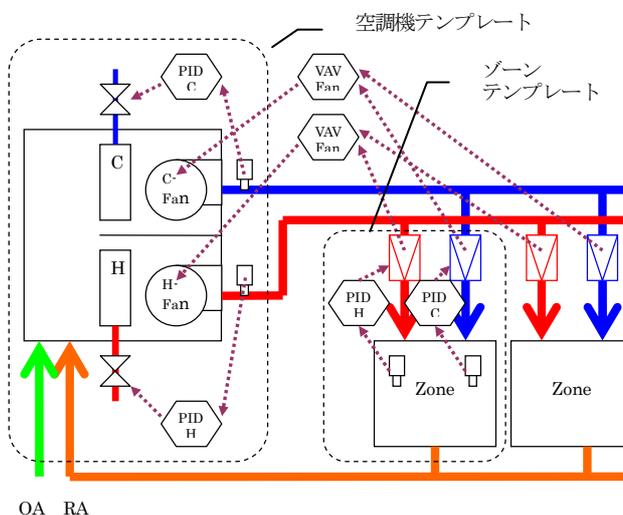


図-1 デュアルダクト方式の空調機とゾーンの構成

### 2.3 試算結果

デュアルダクト方式の仮設調整空調機テンプレートの試算例として、図-2 に冷風の送風量の調整状況を示す。インテリアゾーンでは冬期でも冷房負荷が発生し、1年目の5月までは調整途中のため冷風の送風量が不足しており室温が設定温度の26°Cを超えているが、2年目は冷風量が調整されたため26°Cに冷房されている。暖房負荷は少なく、初期値の最小風量からわずかな増加量の調整がされている。

図-3 に冷熱源と温熱源の各計算ステップの必要容量と12計算ステップの必要容量の移動平均値を示す。この試算では計算時間間隔を5分で行っているため、12ステップの平均容量は1時間の平均容量を表す。

### 3. 換気計算用モジュールの計算方法と計算例

換気計算用モジュールの計算方法と計算例を以下に説明する。

#### 3.1 開口を通過する風量の計算方法

表-1 に開口を通過する風量の計算方法を示す。式(1-1)が風量を求める基本式で、開口が面する空間iと空間jの圧力差、空気密度、開口面積と流量係数から求める。外気に面する開口では、式(1-2)による風圧を考慮し、開口の高さにおける圧力差として式(1-3)を用いる。開口部の空気の流れは開口部の下端と上端の圧力差の関係から(A)から(D)の4通りに分類して通過風の状態を求めている。

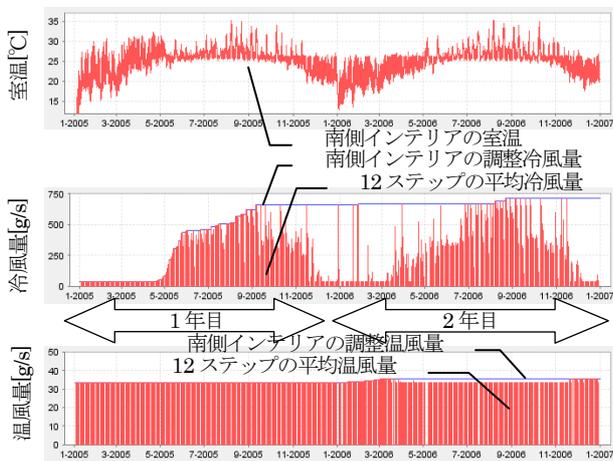


図-2 冷風と温風の送風量の調整の状況 (2年間)

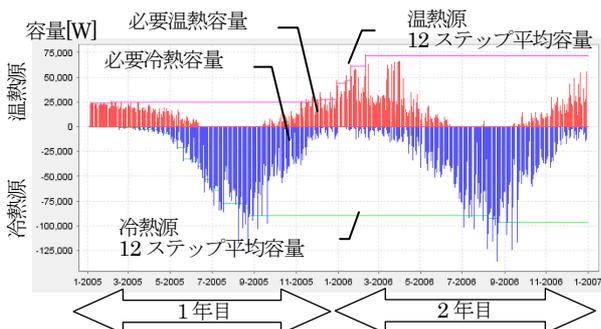


図-3 冷・温熱源の容量調整の状況 (2年間)

表-1 開口を通過する風量の計算方法

ベルヌーイの定理

$$P_1 - P_2 = \Delta p = (\zeta_1 + \lambda L/d + \zeta_2) \rho v^2 / 2$$

$\zeta$  : 形状抵抗係数  $L$  : 厚さ[m]  $d$  : 開口直径[m]  
 $\lambda$  : 摩擦抵抗係数[m]  $v$  : 風速[m/s]

開口の通過風量  $Q$ [m<sup>3</sup>/s]、断面積  $A$ [m<sup>2</sup>]

$$Q = vA = \alpha A (2\Delta p / \rho)^{0.5} \dots (1-1)$$

$$\alpha = (\zeta_1 + \lambda L/d + \zeta_2)^{-0.5}$$

$\alpha$  : 流量係数 (通常の窓で0.6~0.7程度)

$\alpha A$  : 実効面積あるいは相当開口面積

風圧  $P_w$ [Pa]、風圧係数  $C$ [-]、空気密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、風速  $v$  [m/s]とすると

$$P_w = C \rho v^2 / 2 \dots (1-2)$$

外気密度  $\rho_o$ [kg/m<sup>3</sup>]、室内空気密度  $\rho_i$ [kg/m<sup>3</sup>]、外気基準高さの圧力  $P_o$ [Pa]、室床面の圧力  $P_i$ [Pa]、開口の室床面からの高さ  $h_i$ [m]、開口の外気基準高さからの高さ  $h_o$ [m]、重力加速度  $g$  [m/s<sup>2</sup>]とすると、開口の内外の温度差 (密度差) と風圧  $P_w$ による圧力差  $\Delta P_{io}$ [Pa]は

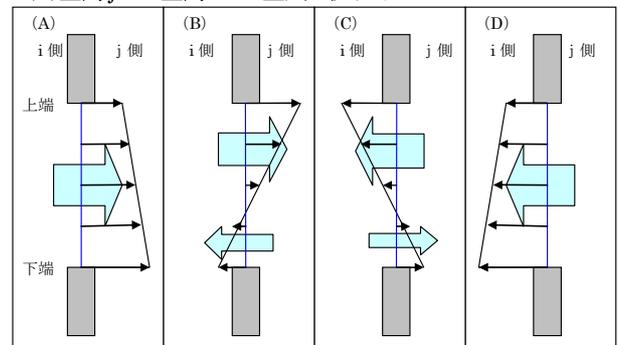
$$\Delta P_{io} = (P_i - \rho_i g h_i) - (P_o - \rho_o g h_o + P_w) \dots (1-3)$$

開口部の圧力差の状態は図に示すように次の4通りに分けられる。空間iと空間jの間に開口があるとして、

- (A) 開口部のすべてにおいてi側の圧力が大きい場合
- (B) 開口部上部はi側、下部はj側の圧力が大きい場合
- (C) 開口部上部はj側、下部はi側の圧力が大きい場合
- (D) 開口部のすべてにおいてj側の圧力が大きい場合

これらの開口部の風の流れは、

- (A) 空間i → 空間j → 空気が流れる
- (B) 上部はi → j → 空気が流れる、下部はj → i → 空気が流れる
- (C) 上部はj → i → 空気が流れる、下部はi → j → 空気が流れる
- (D) 空間j → 空間i → 空気が流れる



開口部の下端と上端についての圧力差  $\Delta P_{ij}$  を求め、(A)から(D)のどれに該当するか判定を行う。風量は開口部の圧力差分布により積分して求める。

一つの開口部の空気の流れは、i→jとj→iの2方向あるとして扱う。

表-2 多数室換気回路網の計算方法

ある接点iに接続されるm本の換気回路の体積流量を  $Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{im}$ 、質量流量を  $G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{im}$ とすると風量収支として次の式が成立する。

$$\sum G_{ib} = \sum Q_{ib} \rho_{ib} = Q_{i1} \rho_{i1} + Q_{i2} \rho_{i2} + \dots + Q_{im} \rho_{im} = 0$$

( $\Sigma$ はbを0~mで変化させる)

接点iの風量収支を  $f_i (P_1, P_2, \dots, P_n) = 0$ として、節点1~nの全節点の連立1次方程式を解くことで近似解を求める。

$$\begin{pmatrix} f_1(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ f_2(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ \dots \\ f_n(P_1, P_2, \dots, P_n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \partial f_1 / \partial P_1 & \partial f_1 / \partial P_2 & \dots & \partial f_1 / \partial P_n \\ \partial f_2 / \partial P_1 & \partial f_2 / \partial P_2 & \dots & \partial f_2 / \partial P_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial f_n / \partial P_1 & \partial f_n / \partial P_2 & \dots & \partial f_n / \partial P_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = 0$$

これを全節点の風量残差が固定値 (例えば=0.15 m<sup>3</sup>/h ≒ 0.05 g/s) 未満となるまで繰り返す。

(B)と(C)の場合は一つの開口部で2方向の風の状態をそれぞれ求めている。

### 3.2 多数室換気回路網の計算方法

表-2に多数室換気回路網の計算方法を示す。

### 3.3 換気計算用モジュールの開口制御

この換気計算用モジュールは他の設備モジュールと同様に、外部制御信号や媒体情報の受渡しを行っており、次のような条件を変えた換気計算ができる。

表-3 換気計算の条件

換気計算期間：中間期の5/1~6/30の24時間
気象データ：東京2006年1分データ
計算時間間隔：1分 建物モデル：2章に同じ
外部開口：全ペリメータの床上1mから0.1mHの開口
各ゾーン間は間仕切り無し、ゾーンの天井高2.7m
コア部分との開口は無し、北側と南側は独立換気回路
フロア高さ地上4m、外気基準高さは地上0m
外部開口の制御条件：風速5m/sを超えると閉、
降雨時は閉、再オープン遅延時間10分
換気計算用モジュールは北側用と南側用に2個使用

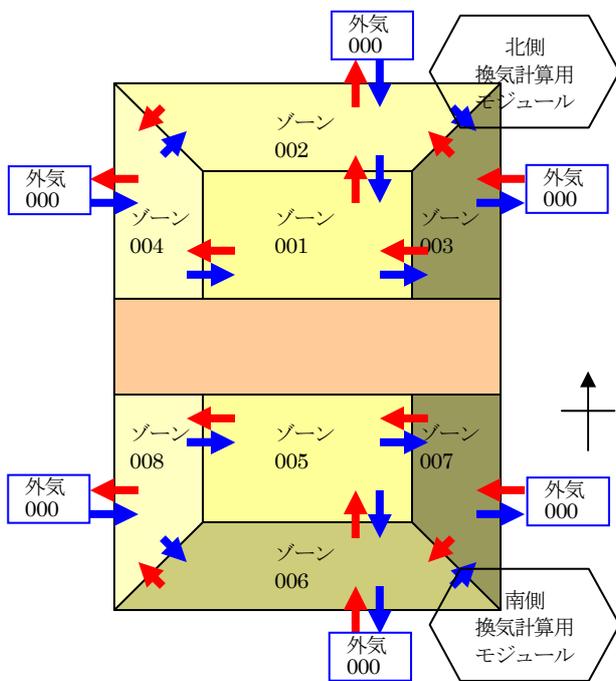
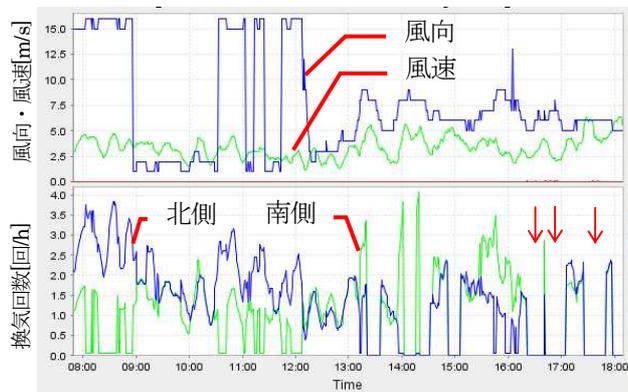


図-4 ゾーンと開口



風向：北北東1、東4、南8、西12、北16

図-5 換気計算の結果 (5/24 8:00~18:00)

空調の停止時のみ換気計算をするなど期間や時間指定による換気計算実行の制御、外気冷房を意識して内外の乾球温度や比エンタルピの差による外部開口の開閉制御、同様に外部空気を取り入れる際の設定下限値による外部開口の開閉制御、強風時や降雨時の外部開口の開閉制御を設定できる。また、外部開口の開動作後の開動作までの遅延時間を設定できるようにしている。

このモジュールで計算された開口部の空気の出入りは風上であるゾーンあるいは外気の状態値と計算流量を風下のゾーンへ伝える。ゾーンは従来の熱収支計算に流入空気を加えた計算がなされ、室温や湿度に反映される。

### 3.4 換気計算用モジュールの計算例

換気計算例の条件を表-3に、ゾーンと開口の関係を図-4に示す。換気計算用モジュールを2個使用し、北側4ゾーンと南側4ゾーンを独立して計算し、換気回数(各4ゾーンの合計容積に対する1時間の流入外気量)を比較する。結果を図-5に示す。5/24の昼間の換気回数、外部風速、風向を表示している。午前中の北風の時には北側の換気回数が大きく、午後の南風の時には南側の換気回数が大きい。強風5m/sを超える場合と降雨時(図中の↓)は換気回数が0となっており、遅延時間で設定した10分後に再オープンしている。

### 4. まとめ

空調システム関連のモジュールおよびテンプレートの機能アップとして、2次ポンプテンプレート、デュアルダクトシステムへの対応、改良版仮設調整テンプレートによる空調送風量の自動調整、4管式建物全体テンプレート、換気計算用モジュールについて概要を説明した。デュアルダクト方式と改良仮設調整テンプレートおよび換気計算用モジュールによる多数室換気回路網の計算方法と計算例を報告した。

【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 コンソーシアム」・「BEST 企画委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本雄三委員長)、統合化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。統合化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(首都大学東京)、内海康雄(宮城工業高等専門学校)、大西晴史(関電工)、木下泰斗(日本板硝子)、木本慶介(大林組)、工月良太(東京ガス)、郡公子(宇都宮大学)、菰田英晴(鹿島建設)、佐藤誠(佐藤エネルギーリサーチ)、芝原崇慶(竹中工務店)、新武康(清水建設)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀典(鹿児島大学)、保木栄治(東京電力)、野原文男、二宮博史、丹羽勝巳、長谷川巖、久保木真俊、田端宏宏(以上、日建設計)、柳井崇、品川浩一(以上、日本設計)、事務局：生稲清久、石田真理(以上、建築環境・省エネルギー機構)

【文献】 1) 二宮・村上・坂本・石野・野原・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65)、空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、pp. 2539-2542、2010. 9  
 2) 二宮・村上・石野・野原・長井・菰田・大西・品川：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84)、空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、2011. 9  
 3) 松村、村上他 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8報、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1041-1042、2008. 9