

バーチャルセンサ利用の可能性 環境シミュレーションの精度検証に関する研究 Possibility of Using Virtual Sensor Study on evaluation of environmental simulation

○吉田 友紀子^{*1}
Yukiko YOSHIDA^{*1}

^{*1} 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻 助教 博士（工学）

Assistant Professor, Major in Urban and Civil Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University,
Ph.D

キーワード：熱負荷計算；実測；検証；快適性；バーチャルセンサ

Keywords: Thermal load calculation; actual measurement; evaluation; comfort; virtual sensor

1. はじめに

近年、研究のみならず、設計においても環境シミュレーションの利用は盛んに行われている。しかし、設計時のシミュレーション条件通りに運用されている事例は少ない。そのため、建築設備設計の性能検証（コミッショニング）という専門分野において、学術的に技術が確立されているほどである。

また、国際的には、2004年に初回が開催された IEA-SHC Task34/ ECBCS Annex 43 (IEA34/43) Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools^{*1}において、BESTEST という建物モデルを用い、各国ソフトウェアの計算精度の検証がされている。現在、実測と環境シミュレーション精度の比較検討はこれからという段階にある。

当方は、国土交通省グリーン庁舎指針^{*2}に準拠した国立環境研究所地球温暖化研究棟（2001年竣工、以下温暖化棟、図1、表1）にて、約6年間計測担当をした。その間、設計から運用時までの各種環境配慮技術の技術検証^{*3}、当時山武との共同研究により BAC-net 通信を用いた照明・空調自動コントロール技術開発^{*4}に至る一連の知見を有している。

今回、環境シミュレーション技術を用いたリアルタイム制御技術の応用として、バーチャルセンサの利用可能性について、経験に基づく知見を報告する。

2. 熱負荷計算

世界において、計算理論が最も精密な熱負荷計算ソフトウェアは、日本が開発した BEST シミュレーション^{*5}である。プログラム操作が複雑で、英語版は存在しないため、ユーザーは日本国内の専門家のみとなっている。開発当初は、建築確認申請時の提出にも認められる省エネ計算ソフトとして利用可能となるように開発された。

しかし、現在の建築確認申請時に認められる、省エネ



図1. 温暖化棟の建物外観（2001年竣工）

表1 温暖化棟における建物概要

施設用途	研究棟，実験棟
構造及び規模	鉄筋コンクリート構造 3階(塔屋1階)
建築面積	2059.86 m ²
延床面積	4884.58 m ²
空調面積	建物内事務所面積 839.16 m ² (東側 189.06 m ² ×2, 西側 230.52 m ² ×2) 実験室対象面積 633.33 × 2 + 155.04=1421.7m ² 交流会議室 163.14 m ² 会議室 45.82 m ² 機械室 439.2+58.4+45.82×2=589.24m ²
設計	大谷研究室・日本設計 設計共同体
監理	国土交通省大臣官房官庁営繕部 筑波研究学園都市施設管理センター 株式会社大谷研究室

WEB プログラム^{*6}が別途で開発されている。床面積 300 m²以上の建築物すべてを簡易に計算できるように作られたもので、BEST シミュレーション理論との整合性はない。

建築設備設計は、主に冷暖房のピーク時に必要とされる機器能力を算出するために、熱負荷計算ソフトが利用される。さらに、通称「茶本」と呼ばれる、国土交通省建築設備設計基準^{*7}に則り、必要冷暖房負荷に安全率などをかけるため、実際の運用時に必要な空調負荷よりも大きな能力の空調機器が選定される。

3. 地球温暖化研究棟におけるバーチャルセンサ運用例

本論では、BEST シミュレーションが開発される以前に温暖化棟における照明・空調自動コントロール技術開発を行ったため、世界標準として認知度が高い熱負荷計算 TRNSYS^{*8}を用いた、バーチャルセンサの利用例を示す。

温暖化棟は、外皮性能向上を中心に、Low-E (複層) ガラス：普通ガラス 6 mm+空気層 6 mm+Low-ε 6 mm [熱貫流率 $U:2.55W/(m^2 \cdot K)$]、ルーバー型底} (1.5m) の設置、バルコニー床面に高アルベド塗料、照明自動制御 (Hf 蛍光灯 32W, 設定照度 700lx), 空調中央熱源方式, VAV 制御が採用され、CASBEE ランク A の建物性能を有する。

また、各種環境配慮技術の検証のため、BEMS による大規模な計測システム (図 2～4, 表 2) のとおり構築された。実験用計測システムとしては、2004 年 IEA34/43 会合時に世界トップと認められた。

ただし、環境シミュレーションと実測を照合すると、まず室内温度センサを空調操作盤側面 (図 5) から AHU 吸込口付近天井 2 m (図 6) へ移設を行う必要が生じた。



図 5 室内空調操作盤

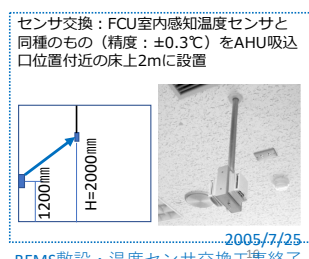


図 6 室内温湿度センサ

(改善前：盤側面温度センサ) (改善後：床上 2 m)

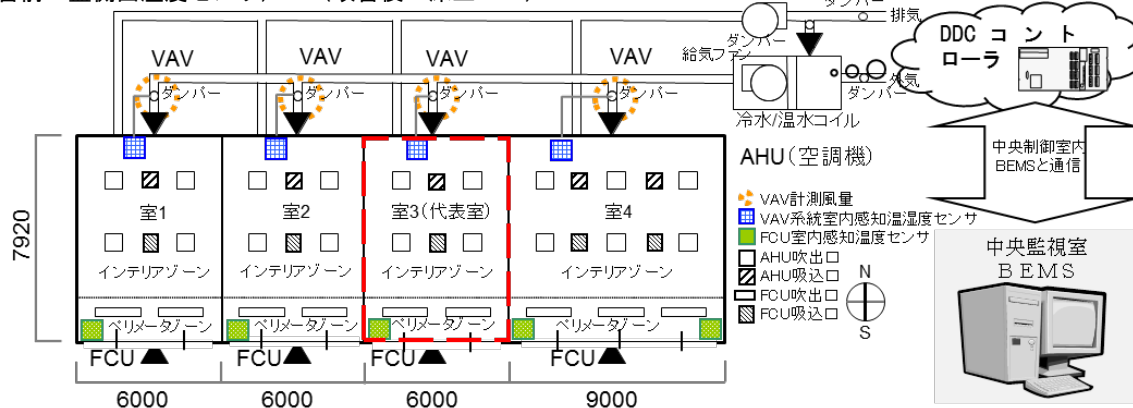


図 3 重点計測エリア (3 階東) 内の空調システム

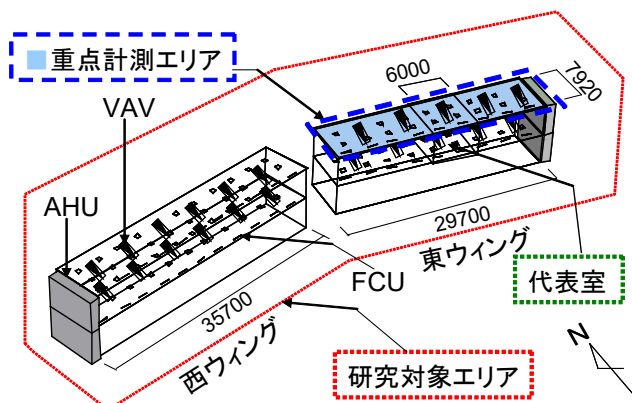


図 2 温暖化棟概況と計測エリア

表 2 温暖化棟における計測ポイント一覧

		代表室	重点計測エリア	研究対象エリア
外界条件(データ10分間隔)		壁面日射量(1点)、外気温(1点)		
室内環境 (データ10分間隔)	室内代表温度	○(1点)	○(5点)	○(22点)
	PMV	○(1点)	×	×
	上下温度	○(3点×5)	×	×
	グローブ温度球	○(1点)	×	×
	窓面温度	○(7点)	×	×
	吹出し温度	○(2点)	×	×
空調実態 (データ30分間隔)	FCU熱量・流量	○(5点)	○(5点)	○(4点×5; 補正必要)
	AHU熱量・流量	×	○(5点)	○(4点×5)
	VAV稼働状況	○(温湿度2点・風速計4点)	○(温湿度9点)	×
室内電力消費量 (データ30分間隔)	照明	○(系統別3点)	○(2点)	○(4点×2)
	コンセント	○(1点)	○(1点)	○(4点)
合計		建物全体約600点(研究対象エリア内139点)		

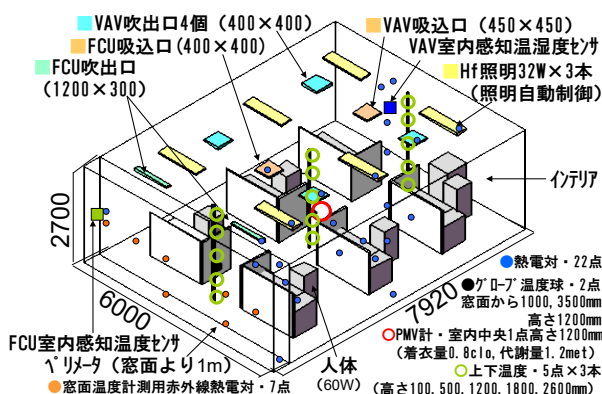


図 4 代表室内の室内環境計測システム

2005 年 12 月 29 日から 2006 年 2 月 3 日平日のみの計測値から、熱負荷計算に用いる入力条件である、在室人数、機器発熱、照明における日々の運用実態と設計値の差を、表 3 に示す。運用時の在席率は約 50%であり、コンセント、照明が人の動きにより変動するため、おおよそピーク時の半分程度の内部発熱となる。

図 7 は、前述の計測日における研究対象エリア、重点計測エリア、代表室の在室密度の時刻別平均値である。コロナ前であるため、日々の運用はほぼパターン値を示していた。図 8 のとおり、内部発熱負荷合計^{※9} [室内熱取得要素に対する瞬時応答係数の輻射熱分と表面熱流を媒介とした対流分の重み係数(対流+輻射/熱取得)を考慮した顕熱負荷： HG^{\ast} (W) = $0.7H_{HS} + 0.5H_{LS} + 0.7H_{ES}$ (H_{HS} : 人体 60W/人, H_{LS} : 照明, H_{ES} : コンセント負荷)] を実測、パターン値、在室人数実測から予想される内部発熱負荷を比較したところ、在室人数から求める内部発熱負荷推定値よりもパターン値の方が実測に近い値を示したため、TRNSYS 入力スケジュールは、図 9 のパターン値を用いた。そのほか、空調の設定変更から設置値どおりに室温が安定するには 15 分から 20 分ほど要するため、在室人数の出入りを頻繁にリアルタイムに制御することがかえってエネルギーロスに繋がることがわかっている。

4. バーチャルセンサ利用によるハイブリッド空調へ

バーチャルセンサとしての TRNSYS 熱負荷計算 (表 4) の利用は、前日 20 時の天気予報を基に、次の日の 1 時間ごとの空調の運用判定を行い運用したところ、室内温湿度の TRNSYS 計算値と実測値 (夏期: 図 10, 中間期: 図 11) はおおむね合致した。そのため、TRNSYS 計算時間約 5 分終了時 (図 12) の空調判定結果を空調制御にダイレクトに用いることが可能となった。

バーチャルセンサの運用にあたっては、毎正時の BEMS 通信量が多いため、正時を避けて、BEMS データ上のデータ上書きを行うことで、従来制御による運用を継続させつつ、管理上の問題はないように工夫した。

BAC-Flex 上の数理計画法リアルタイム制御 (図 13) も同時に運用したものの、エネルギー削減への寄与は、ほぼ TRNSYS 熱負荷計算結果の運用判定であった。

さらなる検討として、外皮性能が良く、自然通風利用の流れがあらかじめ設計されており、一方向の場合、内部発熱負荷合計 HG の除去を目的として、自然通風利用判定 (図 14) の付加を検討した。ほぼ運用実態として、実測でも問題がないことを確認している。

5. まとめ

本論では熱負荷計算結果をバーチャルセンサをセンサ代替として利用することの可能性を実測結果と共に示した。当紙面上の記載が難しいものの、風や光のシミュレ

表 3 研究対象エリア内設計値と実測 (平均値) の比較

研究対象エリア内 設計値と実測の比較		1人あたり 占有面積	在室人数	機器定格 総合	コンセント	照明
単位		㎡/人	人/㎡	Wh/㎡	Wh/㎡	Wh/㎡
実測	平均値	15.4	0.07	22	11	6
	ピーク値	13.1	0.08	31	29	26
設計時の想定値 (ピーク値)		9.6	0.1	29		20

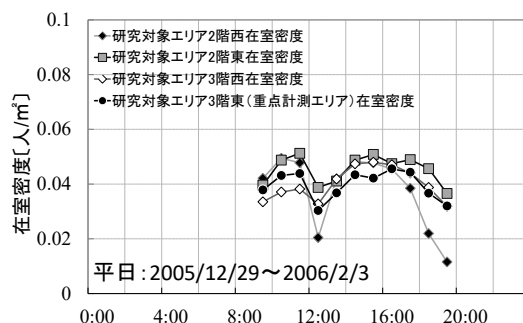


図 7 研究対象エリアの時刻別在室密度平均値

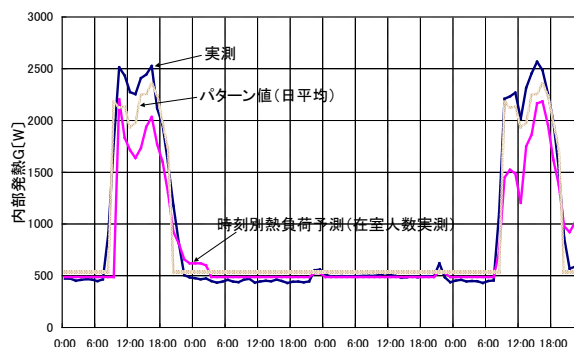


図 8 内部発熱負荷合計 HG の予測

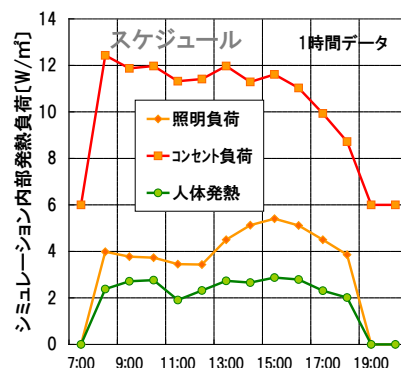


図 9 シミュレーション (TRNSYS) 入力スケジュール

表 4 TRNSYS の計算条件

	暖房設定温度 23℃ 冷房設定温度 25℃ 設定湿度 40%	暖房設定温度 20℃ 冷房設定温度 27℃ 設定湿度 40%
外気取入・冷房禁止	計算条件 1	計算条件 2
外気取入・冷房許可	計算条件 3	計算条件 4
・気象条件は、前日20:00の天気予報値(外気温、湿度、日照時間)を用いる。 ・平日、休日の区別はある。 ・室内発熱量については、実測に基づいたパターン値を使用する。 ・運転スケジュール(暖房 制御/成り行きフラグ) ・運転スケジュール(冷房 制御/成り行きフラグ) ・発熱量スケジュール(在室人数 人/m ²) ・発熱量スケジュール(照明 W/m ²) ・発熱量スケジュール(電源機器 W/m ²) ・発熱量に換算するAHUファン動カスケジュール (W/m ²) ・外気取入冷房スケジュール		

ーションも同様に検討を行っており、今後報告する予定である。

[参考文献]

- 1) IEA-SHC Task34/ ECBCS Annex 43
(IEA34/43) Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools, <https://task34.iea-shc.org/> (アクセス日 2021.10.1)
- 2) 国土交通省グリーン庁舎指針,
<https://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku/keikan/guide/u-sesaku/u-sesaku1.htm> (アクセス日 2021.10.1)
- 3) 平成 13—15 年度環境省地球環境総合推進費 B—5 6 環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証 (研究代表者: 一ノ瀬俊明, 国立環境研究所)
<https://www.env.go.jp/earth/suishinhi/wise/j/J03B5600.htm> (アクセス日 2021. 10. 1)
- 4) 平成 16-18 年度環境省石油特別会計建築物における空調・照明等自動コントロールシステムに関する技術開発
https://www.nies.go.jp/subjects/2005/9543_fy2005.html (アクセス日 2021. 10. 1)
- 5) BEST シミュレーション, IBEC,
<https://www.ibec.or.jp/best/> (アクセス日 2021. 10. 1)
- 6) 省エネ WEB プログラム, 建築研究所,
<https://www.kenken.go.jp/becc/>, (アクセス日 2021. 10. 1)
- 7) 令和 3 年版建築設備設計基準, 国土交通省,
<https://www.mlit.go.jp/gobuild/content/001390961.pdf>, (アクセス日 2021. 10. 1)
- 8) TRNSYS, <http://www.trnsys.com/>, (アクセス日 2021. 10. 1)
- 9) 石野, 木村: 空調熱負荷計算法における時系列重み係数の決定に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 1973 年

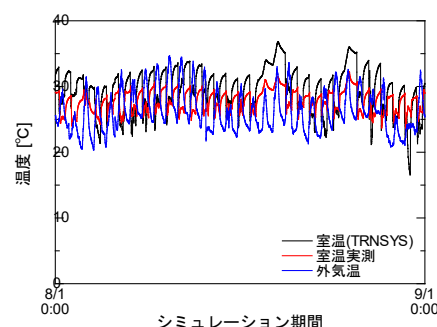


図 10 夏の TRNSYS シミュレーションと実測の照合

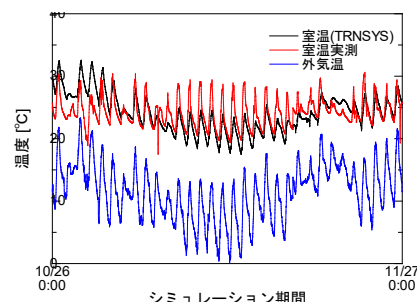


図 11 中間期の TRNSYS シミュレーションと実測の照合

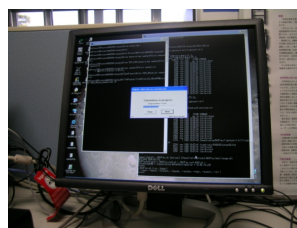


図 12 TRNSYS-GAMS 計算用
計算終了画面

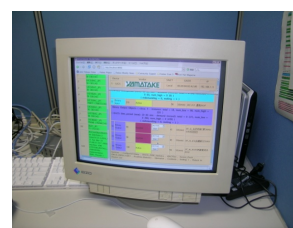


図 13 BAC-Flex
制御監視装置

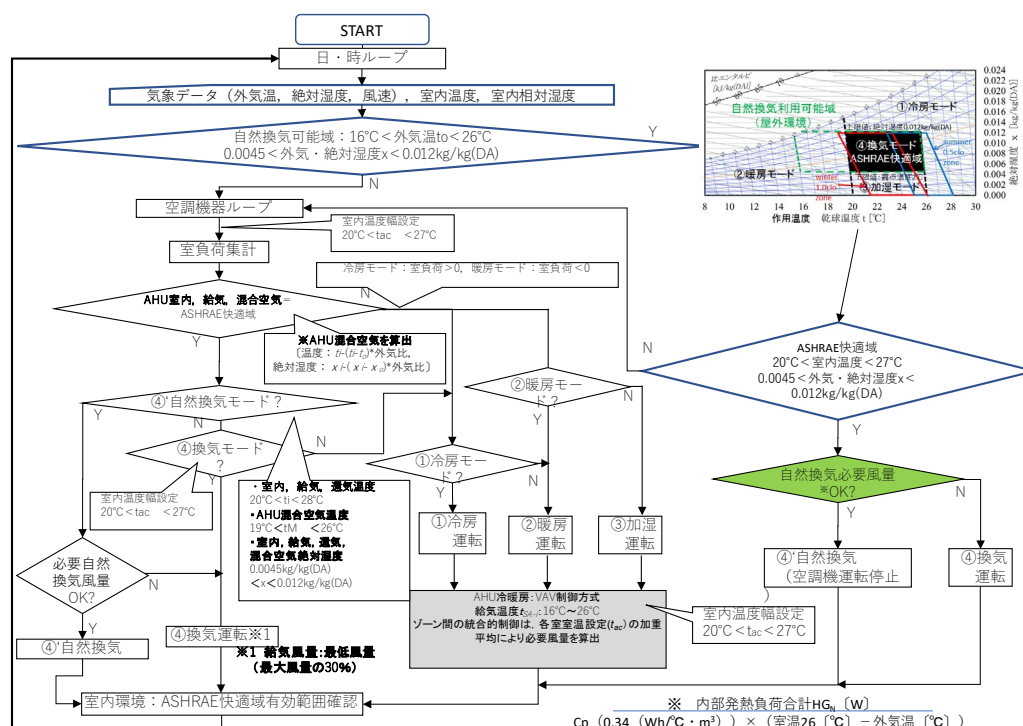


図 14 温暖化棟のハイブリッド空調（機械・自然換気）判定フロー