

## 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 221）

### 開発状況の報告と屋内熱中症問題の考察

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 221)

### Recent Development and a Consideration on a Problem Concerning Indoor Heatstroke

技術フェロー ○石野 久彌（首都大学東京名誉教授） 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 二宮 秀典（鹿児島大学） 正会員 宮田 征門（国土技術政策総合研究所）  
 技術フェロー 郡 公子（宇都宮大学） 技術フェロー 長井 達夫（東京理科大学）  
 技術フェロー 大塚 雅之（関東学院大学） 技術フェロー 秋元 孝之（芝浦工業大学）  
 技術フェロー 柳原 隆司（RY 環境・エネルギー設計） 正会員 牧村 功（名細環境・まちづくり研究室）  
 技術フェロー 野原 文男（日建設計総合研究所）

Hisaya ISHINO\*<sup>1</sup> Shuzo MURAKAMI\*<sup>2</sup> Hideyo NIMIYA \*<sup>3</sup> Masato MIYAMOTO\*<sup>4</sup>

Kimiko KOHRI\*<sup>5</sup> Tatsuo NAGAI\*<sup>6</sup> Masayuki OTSUKA\*<sup>7</sup> Takashi AKIMOTO\*<sup>8</sup>

Takashi YANAGIHARA\*<sup>9</sup> Isao MAKIMURA\*<sup>10</sup> Fumio NOHARA\*<sup>11</sup>

\*<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan Univ. \*<sup>2</sup> IBEC \*<sup>3</sup> Kagoshima Univ. \*<sup>4</sup> NILIM

\*<sup>5</sup> Utsunomiya Univ. \*<sup>6</sup> Tokyo Univ. of Science \*<sup>7</sup> Kanto-Gakuin Univ. \*<sup>8</sup> Shibaura Institute of Technology

\*<sup>9</sup> Tokyo Denki Univ. \*<sup>10</sup> Naguwashi E & TP Lab. \*<sup>11</sup> Nikken Sekkei Research Institute

This paper describe the recent development of the BEST. Three types of user interfaces and the engine programs are continuously developed. This paper also presents the results of simulation analysis for a consideration on a problem concerning the heatstroke which may happen to elderly persons in residential houses. Hot space environment in residential houses can be evaluated through simulations on cooling design weather days.

## 1. 序

BEST プログラム全体のこの一年の開発状況を総括するとともに、シミュレーション例として最近問題視されている熱中症事故の被害発生メカニズムを建築環境的に解析したので報告する。

## 2. 最近の開発状況

表 1 に最近 1 年間の BEST 開発状況を示す。

まずは省エネ基準対応ツールであるが、これは実務的省エネ設計及び省エネ法申請用計算に利用できるツールを指している。この 4, 5 年間、建築研究所・国総研関係者から BEST に対する細部の質問・指導を受け、昨年度中にそれらの修正を終えた。現在は正式リリースの指示待ち状態であるが、2019 年 6 月時点、指示はまだ無い。告示条件に合致させた誘導基準対応ツール以外に設計の自由度を考慮できる実務設計用ツールはすでに完成しており、現在は更なる計算機能の拡充を行っている。

住宅版は、本質的には他のツールと同一であるが住宅特有のユーザーの要望に対応することに努めている。どういう訳か室内放射熱量ではなく表面温度に対する要求が強い。

専門版 UI については、Java の利用そのものに関する OpenJDK 利用に関する検討、実務ユーザーを意識した多数の室の最大負荷計算を容易に入力できるように表計算ソフト利用の入力支援ツールの開発、各種ツール間のエキスポート・インポート機能の充実などを行っている。

建築では外気導入制御、自然換気制御の計算機能の改良、光計算ツール Radianc と BEST の連携機能の検討などを行った。

空調ではユーザー定義機器特性による計算機能を開発中である。PID 制御モジュールの動作モードの追加やハンチング低減への調整を行った。

機器特性では、新規熱源機器の市場動向、JIS 改定、既存機器特性の更新必要性を調査した。

蓄熱・蓄電・コジェネについては妥当性検討のために実測値との照合を行っている。排熱投入型吸収冷水機の排熱利用の計算法改良を行った。

## 3. 熱中症被害のケーススタディ

熱中症被害は屋外のみならず屋内でも多く報じられるようになってきている。猛暑期に冷房を入れると問題はないのだが、高齢の健康弱者には種々の理由で猛暑期でも非冷房空間で生活していることも多いようである。このように被害を受ける健康弱者の生活パターンにも問題があるが夏期の暑さが増加している我が国において、屋内熱中症問題は喫緊の課題であり建築環境工学を研究する者にとっては避けられないテーマである。ここでは非空調時間帯の室内環境に焦点を絞り、種々の住宅仕様について試算を行ったので報告する。

計算条件を表 2、図 1 に示す。外界条件は 2010 年版冷房設計用気象データを用いて、評価指標は WBGT(暑さ指数、湿球黒球温度) を用いた。冷房運転は表 2 に示す

ように最低限を想定し、居間の朝と晩、寝室と子供室は晩のわずかな時間帯のみとし、そのときの非空調時間帯における室内環境の危険性に着目した。

図2に木造住宅数種の結果を示す。まず(a)基準ケースにおいて冷房を行わない日中の室内環境が最も厳しくなるのは1階より2階で、最も厳しいのは2階寝室だった。日最高室温は、h-t基準より日射の強いJc-t基準のほうが高くなるが、日最高WBGTは、蒸暑気象日のh-t基準のほうが高くなる室が多い。2階寝室の場合、日最高室温は日最高外気温より10Kほど高く、h-t基準のとき44.2℃、Jc-t基準のとき45.4℃に達した。日最高WBGT

は、h-t,Jc-t基準とも32.9℃となり「熱中症：危険域」である。明け方の各室室温は28℃前後で外気温にほぼ等しく、WBGTは24～25℃で熱中症の危険は少ない。h-t基準設計気象日に「熱中症：危険域」のWBGT31℃以上となるのは、寝室で正午から18時頃までの6h、居間は3h、子供室は5h、和室は1hとなった。図2の(b)はカーテンを開放して日除けもないとしたときの結果であり、寝室は(a)基準ケースに比べて日最高室温が2.1K上昇し、日最高WBGTも1.1K上昇して34.0℃に達した。

(c)は(a)基準ケースに対して一日中全く冷房をしなかったときの結果であるが、日最高室温は(a)基準ケースと比

表1 最近1年間の開発状況

項目	開発・ユーザ支援内容
省エネ基準対応ツール	(誘導基準対応ツール)①UI開発:性能向上計画認定申請(誘導基準)への対応とVer.3.0.0(試行版)のリリース ②妥当性・有用性確認:一次エネルギー消費量とPAL-BESTのテスト及び感度解析、建築研究所提供の計算支援プログラム(webプログラム)との比較、事務所ビルのZEB評価への応用検討 ③ユーザ支援:操作編解説書、理論編解説書の修正・公開、判定機関向けマニュアルの整備、講習会の開催(2回)(設計ツール)①UI開発:最大・年間熱負荷計算機能の改良、結果出力機能の追加、②ユーザ支援:講習会開催(共通)①プログラム:インテリアの昼光利用制御機能の追加、誘導基準対応ツールと設計ツールのデータ互換への対応(今後の計画)BEST誘導基準対応ツールは、登録判定機関の審査マニュアルの作成を終えたので、国交省から指示があり次第正式リリース予定、設計ツールは、計算機能の拡充(デシカント空調、自然換気等)と更新版のリリース
住宅版	①UIと計算機能の開発:計算エンジンの更新、入力操作法の改良、最下階床下温度の設定法改良(月平均気温を利用)、土間床の床暖房計算と表面温度表示、Ver.1.1.3のリリース ②ユーザ支援:入力機能に関する意見収集、マニュアルの追加と修正、BEST-Hの概要説明会の開催(2回)・講習会の開催(1回)・シンポジウムの開催(1回) ③有用性確認:居住者の行動と暴露環境の評価、住宅における自然換気の室内環境改善効果と省エネルギー効果(今後の計画)更新版のリリース、室内暴露環境の表示と評価法の検討、自然換気の計算法検討、BEST-H(簡易版)の開発方針の検討
専門版UI	①専門版新UI開発:一覧機能を重視する共通・建築画面、モジュール接続を容易にする設備画面の開発方針検討、共通・建築画面のレイアウト、入力を容易にする機能の具体案の検討、画面に表示する補足説明類の作成、OpenJDK利用に関する検討 ②専門版現UIの改良・更新:表計算ソフト利用の入力支援ツールにより作成したデータのインポート機能の改良、高DPIモニターに対応する改良とテスト ③表計算ソフト利用の入力支援ツール開発と有用性確認:表計算ソフトにて作成した入力データからXMLを作成する仕組みを完成。入力データを数式(関数)にて設定することも可能、支援ツールの利用テスト、専門版UIへのインポート機能テスト、マニュアルの整備(今後の計画)使いやすさの向上と利用の促進と改良
建築	①プログラム機能拡充:外気導入制御、自然換気制御の計算機能の改良、光計算ツールとの連携機能の検討 ②データ開発:2010年版EA設計用気象データの作成法の検討と妥当性の確認。2000年版に対して、冷房設計用はより安全側危険率の気象データを用意し、直散分離・斜面日射計算法を改良 ③UI開発支援:省エネ設計ツール、住宅版の建築計算法および条件設定法の検討支援、専門版新UIの方針と基本的な画面構成の検討 ④ユーザ支援:マニュアルの改良と講習会テキスト更新と実施 ⑤妥当性・有用性確認:表計算ソフトを活用した入力支援ツールの提案と有用性確認、実験計画法を利用した高性能窓システムの感度解析、ZEBのための省エネ手法の交互作用解析、自然換気システムの換気量簡易設定法の検討、外皮性能と室内環境制御法の効果分析、躯体蓄熱放射冷暖房方式の蓄冷蓄熱効果と省エネルギー効果、BESTとRadianceの連携による昼光利用制御の省エネルギー性の評価(今後の計画)2010年版EA設計用気象データの整備、外部日除けの計算機能拡充のための検討
空調	①プログラム機能拡充:機器モジュールの開発更新(未実装の機器特性を実装)、ユーザ定義機器特性による計算機能(開発中)、テンプレートのデフォルト値・接続のチェックおよび動作調整、冷温水コイルの下限流量特性の扱い検討、PID制御モジュールの動作モードの追加やハンチング低減への調整、熱源台数制御モジュールの動作調整(出口目標温度のスケジュール対応)、蓄熱標準制御モジュールの動作調整(追掛・蓄熱時の温度個別設定対応) ③UI開発支援:専門版新UIの開発方針検討 ③ユーザ支援:マニュアルの整備方針にもとづく主要モジュールの解説書作成、講習会用例題作成と講習会実施 ④検証:新規および機能更新モジュールの機器特性等の検証、放射パネルモジュールの能力補正方法等の改良検討、空調シミュレーション評価ガイドラインの作成協力(今後の計画)ユーザ定義機器特性を利用する計算機能の開発、モジュール解説書の整備、シーケンス接続マニュアルの検討、新規モジュールの開発、既存モジュール・テンプレートの改良
機器特性	①新規機器特性の調査:熱源機器の市場動向・JIS改定・既存機器特性の更新必要性を調査し、その結果に基づき今年度の更新・追加調査を実施。調査対象は、空調機コイル特性、静止型全熱交換器ユニット・アクティブチルドビーム・FCUコイル特性(継続中) ②ユーザ定義機器特性の入力法検討:室内外条件・負荷率に応じた機器特性の設定法を、ルームエアコンを対象に検討。「入力補助ツール(エクセルシート)」を利用しユーザーの利便性にも配慮 ③ユーザ支援:調査を終了した機器(空調機組込み加湿器)についてのマニュアル整備。テスト終了後順次公開予定(今後の計画)新規機器特性調査(蒸気コイ・デシカント空調機)、ユーザー機器特性入力法(中央熱源(電動式・燃焼式)、ビルマルチ(EHP・GHP))、マニュアル整備・テストラン(ヒーティングタワー・間接気化冷却空調機など)
蓄熱・蓄電	①検証・改良:最新版での計算結果の妥当性検証とプログラム改良の継続。2件のビルの蓄熱槽実測値との照合、熱源低負荷領域の計算法や冷温水コイル条件等の変更がエネルギー消費に与える影響の解析、NAS電池・RF電池の実測値との照合、RF電池の補機電力特性を踏まえたプログラム改良、待機時電力の反映方法検討、蓄電池容量自動調整機能の実装 ②有用性確認:蓄熱式と非蓄熱式システムの感度、蓄電池導入効果の評価(今後の計画)プログラム検証と改良、入力画面の改善
コジェネ	①検証・改良:実測データを基にしたCGU補機の動力電力消費率の精度向上、排熱優先運転のための熱源台数制御コントローラの機能拡張、排熱投入型吸収冷温水機の排熱利用の計算法改良(排熱利用量に影響の強い排温水温度、冷却水温度に着目した計算法を再構築)、都内に建設されたCGS導入建物の実測値との照合 ②ユーザ支援:講習会実施(今後の計画)排熱投入型吸収冷温水機の排熱特性に関するプログラム修正と検証、数値解析・テスト

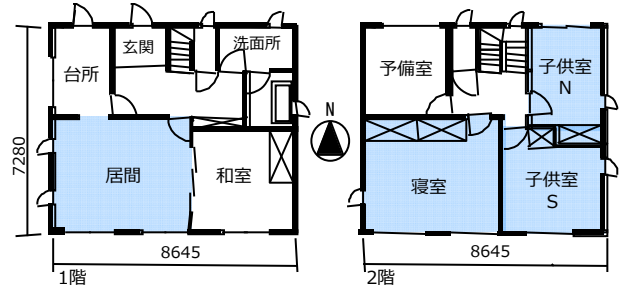
表2 戸建住宅の主な計算条件  
(a) 基準ケース

気象	東京 2010年版EA設計用データ h-t、Jc-t基準最小危険率
建物	外壁・屋根断熱：なし、隙間風：0.2回/h、窓：透明単板ガラス窓、ブラインド常時使用(小窓はブラインドなし)、居間と和室の南窓は庇付き(出：1m)、ゾーン間換気：1回/h(居室-廊下・居室容積基準)、1回/h(居室-和室・居間容積基準)、10回/h(居間-台所・居間容積基準)
発熱	照明・機器：各室適宜考慮、在室者：非考慮
冷房	冷房時間：7:00-8:00・17:00-22:00(居間)、22:00-24:00(寝室)、20:00-22:00(子供室) 冷房設定温度：27℃60%

(b) 比較ケース

ケース	基準ケースに対する変更条件
日除けなし	南庇なし、内部日除けなし
非冷房	全室非冷房
非冷房自然換気	全室非冷房、全室自然換気(自然換気量10回/hで一定)、ゾーン間換気：5回/h(居室-廊下)、10回/h(居間-和室)

べてわずかに上昇する程度、各室の絶対湿度が外気の日平均絶対湿度に近くなるため、寝室の WBGT は(a)基準ケースより 0.6K 高い 33.5℃となり WBGT の危険域の時間数が 7.5h となった。一日中冷房なしの(c)非冷房に対して窓を開けて自然換気ができるようにすると(d)となり日中の室温上昇の抑制に効果があり、寝室で室温降下が 5K ほど認められ外気温より 5K 高い程度であった。その



\* 色塗りの室は、基準ケースの冷房室

図1 住宅平面図

\* WBGT：湿球黒球温度、OT：作用温度、WB：湿球温度

【注記】

1) WBGT (屋内用) [°C] の算出式： $WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度}$ 、本研究では、黒球温度の代わりに作用温度を用いた。

2) WBGT と熱中症予防指針 (日本気象学会)：

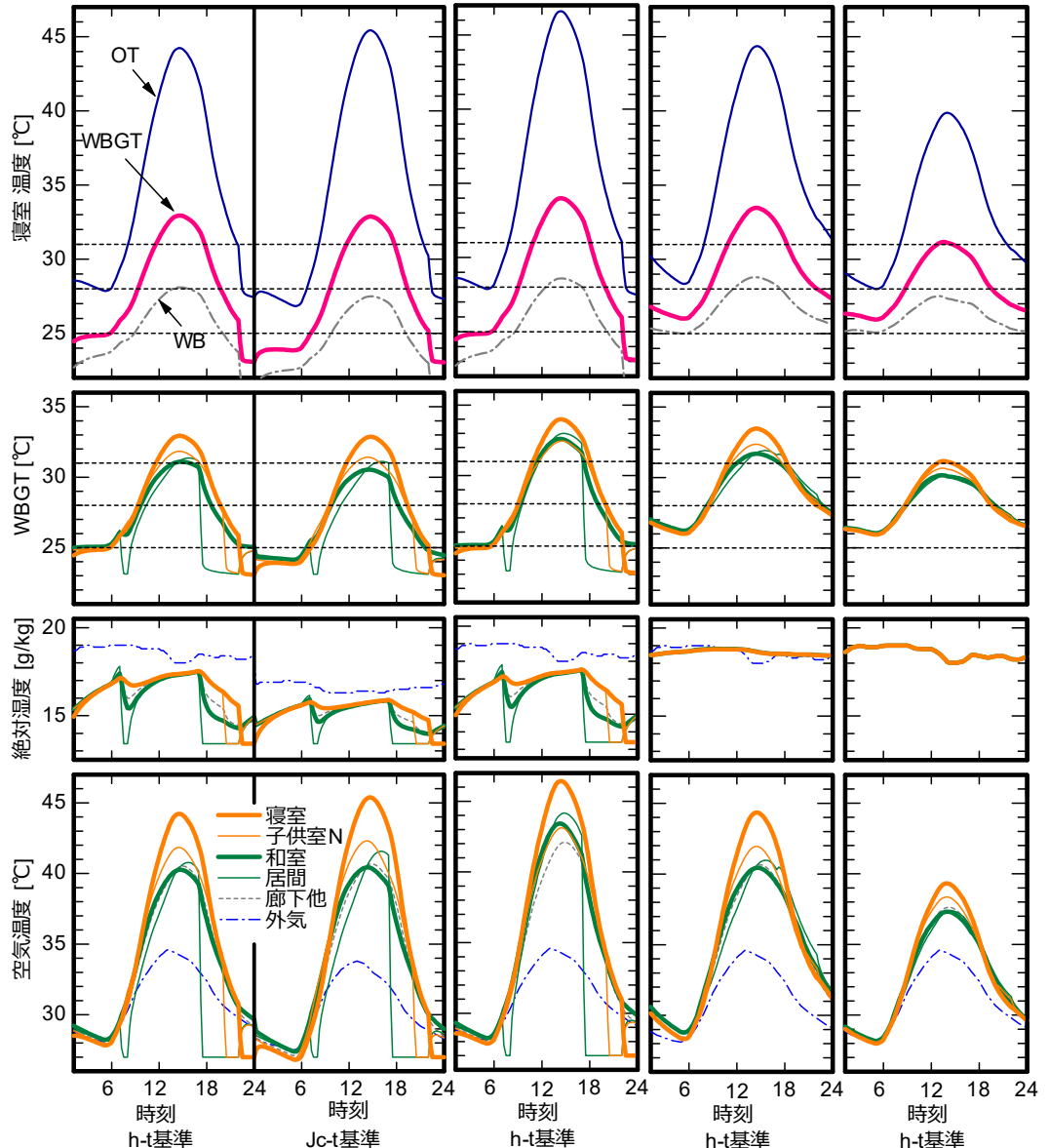
- ・危険 ( $WBGT \geq 31^\circ\text{C}$ )  
高齢者においては安静状態でも危険性が大きい。
- ・嚴重警戒 ( $28^\circ\text{C} \leq WBGT < 31^\circ\text{C}$ )
- ・警戒 ( $25^\circ\text{C} \leq WBGT < 28^\circ\text{C}$ )
- ・注意 ( $WBGT < 25^\circ\text{C}$ )

3) 計算条件：

(人体発熱量) 熱中症発症の危険がある場合の人体の顕熱潜熱放熱量は、健康時とは異なると考えられるため、計算上は考慮しないこととした。

(多数室計算) 居間・和室・台所・寝室・子供室 S、子供室 N・予備室の 7 室とその他の空間(廊下他)の計 8 ゾーンについて、多数室計算を行った。計算時間間隔は 15 分間隔

(設計気象) Js-t 基準は、南面日射が強いものの湿度が低く、h-t、Jc-t 基準より熱中症の危険が低いいため、検討対象になかった。



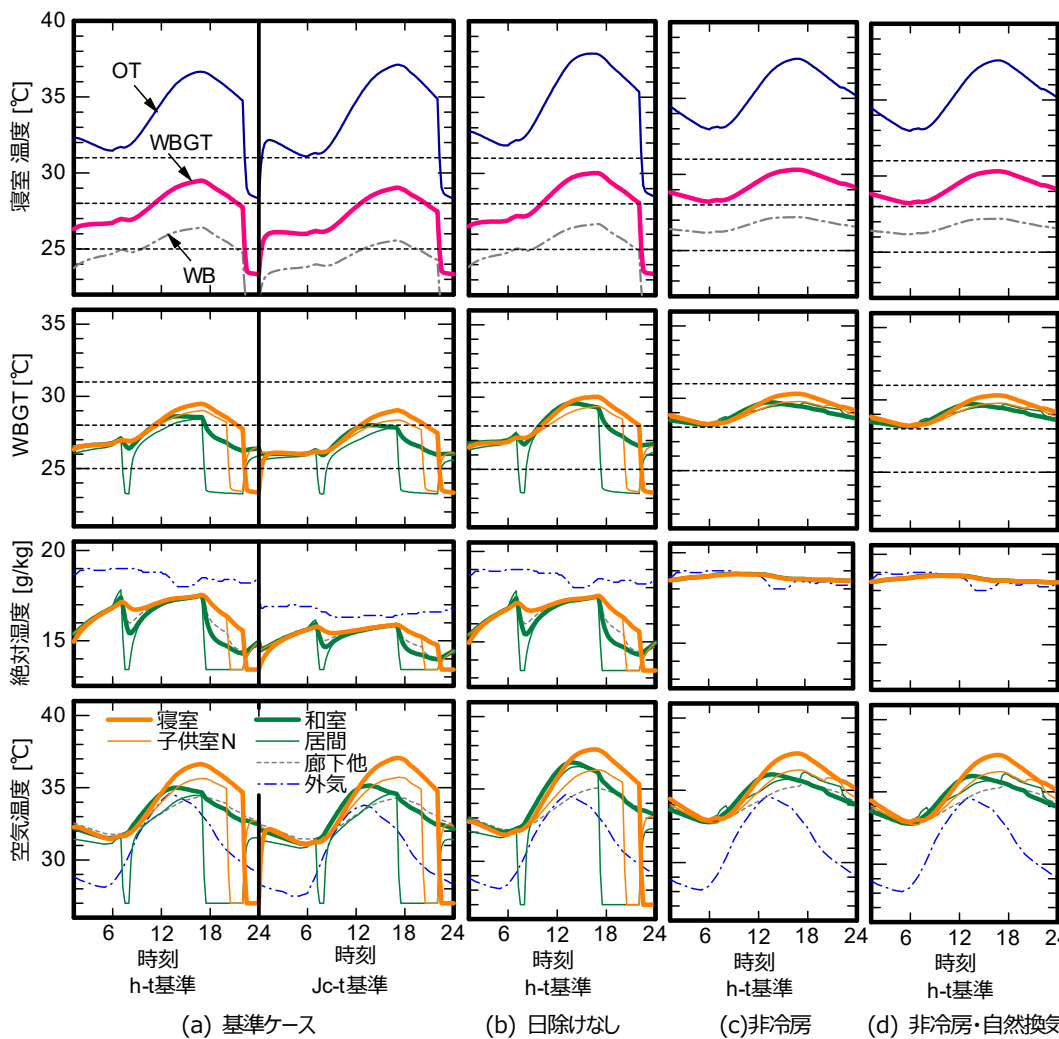
(a) 基準ケース

(b) 日除けなし

(c) 非冷房

(d) 非冷房・自然換気

図2 冷房設計気象日の室内環境 (木造住宅)



【文献】  
 1)石野・村上他：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1)～(その220)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1969-2040、2007.9、pp.1077-1156、2008.8、pp.639-730、2009.9、pp.2527-2590、2010.9、pp.1675-1738、2011.9、pp.1327-1398、2012.9、pp.1-72、2013.9、pp.1-89、2014、pp.1-64、2015、pp.1-72、2016.9、pp.1-76、2017.9、pp.37-96、2018.9  
 2)石野・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1報～第84報、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1027-1042、2008.9、pp.976-1000、2009.9、pp.1293-1298、2010.9、pp.1147-1154、2011.9、pp.1211-1224、2012.9、pp.1235-1246、2013.9、pp.1245-1262、2014.9、pp.963-976、2015.9、pp.1009-1032、2016.8、pp.1463-1476、2017.8、pp.1029-1042、2018.9  
 3)宇田川：標準問題の提案住宅用標準問題、日本建築学会第15回熱シンポジウム、pp.23-33

図3 冷房設計気象日の室内環境 (RC造住宅)

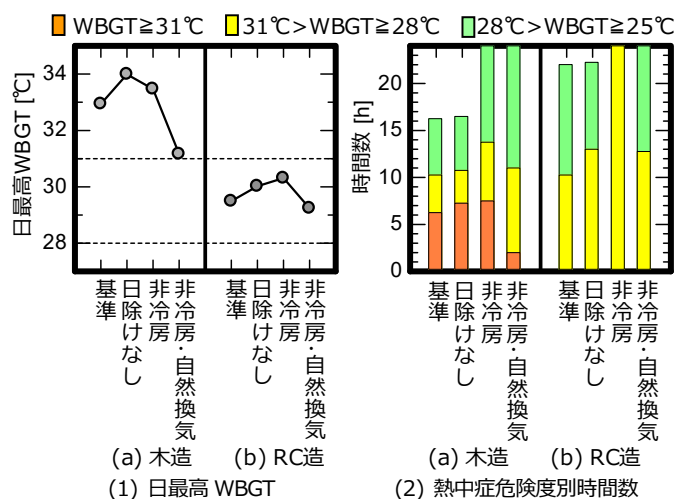


図4 冷房設計気象日の熱中症危険度 (h-t基準・寝室)

結果、日最高 WBGT は 2.3K 低い 31.2°C となり熱中症危険域も 7.5h から 2h に減少した。

図3にはRC造住宅の結果を示す。RC造の断熱性は木造と同程度と設定したがRCの熱容量の効果が大きく表れており、WBGTが31°Cを超えることはなかった。木造の日最高室温は主に14時台に発生したが、RC造の場合は、2階の各室は17時ごろに日最高気温が発生する。

(a)基準ケースのRC造寝室の場合、h-t基準設計気象日の

日最高室温は36.6°C、日最高WBGTは30°Cであった。

図4には、熱中症危険度を総括した。木造住宅はRC住宅に比べ、日最高WBGTが3~4K高くなり危険域に容易に達する。日中に冷房を忘れても自然換気を行うと危険域の時間数を減らすことが可能である。RC住宅は危険域には達さなくても嚴重警戒域(28°C ≤ WBGT < 31°C)の時間数が相当多くなる。

#### 4. 結

最近1年間の開発状況を報告した。また、計算例として我が国の喫緊の課題である熱中症被害の状況を建築環境的に明らかにした。

#### 【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」のBEST企画委員会(村上周三委員長)およびプログラム開発委員会(石野久彌委員長)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表すものである。プログラム開発委員会名簿(順不同) 委員長：石野久彌(首都大学東京名誉教授)、委員：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)、奥田篤(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)、相沢則夫(大林組)、野原文男、二宮博史、丹羽勝巳、長谷川巖、久保川真俊、飯田玲香(以上、日建設計)、品川浩一(日本設計)、山本佳嗣(東京工芸大学)、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)