

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48）  
**昼光利用効果の感度解析**

**Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part25)**  
**Sensitivity Analysis of Daylighting Effect**

正会員 一ノ瀬 雅之(東京理科大学) 特別会員 村上 周三(建築研究所) 正会員 井上 隆(東京理科大学)  
 正会員 石野 久彌(首都大学東京名誉教授) 正会員 郡 公子(宇都宮大学) 正会員 木下泰斗(日本板硝子)

Masayuki ICHINOSE \*1 Shuzo MURAKAMI \*2 Takashi INOUE \*1  
 Hisaya ISHINO \*3 Kimiko KOHRI\*4 Taito KINOSHITA \*5

\*1 Tokyo University of Science \*2 Building Research Institute \*3 Tokyo Metropolitan University  
 \*4 Utsunomiya University \*5 Nippon Sheet Glass

This paper presents simulation method of daylighting and solar shading for estimating energy-saving effect by daylight utilization. It is enabled to estimate energy-saving effect of daylight utilization by coupling calculation of daylight illuminance and artificial lighting output. As energy-saving performance evaluation example by a daylight utilization, test calculation results by the released BEST program are presented.

1 はじめに

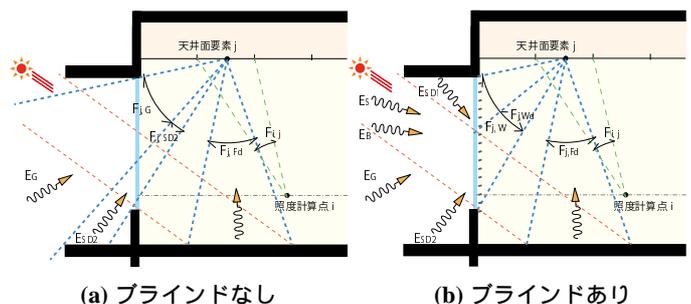
建築物の開口面積は拡大傾向にあり、ファサードを全面的にガラスで構成する高層ビルが見られるようになった。開口部は眺望性・開放感を室内にもたらし、自然光を建物内に導入するといった窓本来の機能を有する一方で、壁体と比較して日射熱取得及び熱損失が大きいため、冷暖房用エネルギー消費量や室内熱環境の形成に対して配慮が必要である。このような背景から、BESTでは数多くのガラス種類および複数の窓タイプについて熱負荷および昼光利用効果の比較検討が可能となっている。

前年までの検討<sup>1)2)</sup>の延長線上として、遮蔽物の指向透過光特性を考慮し、昼光照度算出過程における間接照度算出法の改善を行った。本報ではこれらの算出法の概要および各種ガラスによる昼光利用効果の感度解析<sup>3)4)</sup>を行った結果について報告する。

2 計算法の改良

2.1 間接照度の算出法

建築空間内における光環境の予測評価を目的としたシミュレーションプログラムは数多くあり、計算精度が高いものもある。しかしながら、年間計算を前提としたものは少なく、年間計算に対応した計算法としては切断面公式による手法<sup>5)</sup>がある。本報では、遮蔽物を介して得られる間接光の効果のある程度の精度で反映させるため、



(a) ブラインドなし (b) ブラインドあり

図1 間接照度計算模式図

表1 昼光照度計算式 記号一覧は本報末尾に記す

昼光照度

$$E_{Daylight(i)} = f_M \cdot f_R \cdot (E_{D(i)} + E_{R1(i)} + E_{Rr})$$

(ブラインド開のとき)

$$E_{D(i)} = \tau_{Gs} \cdot (F_{i,S} \cdot E_{SH} + F_{i,B} \cdot E_B + F_{i,SD1} \cdot E_{SD1})$$

$$E_{R1(i)} = \sum_j F_{i,j} \cdot \rho_C \cdot \{ \tau_{Gd} \cdot F_{j,Fd} \cdot \rho_F \cdot \sin \theta_h \cdot E_{DN} + \tau_{Gs} \cdot (F_{j,G} \cdot E_G + F_{j,SD2} \cdot E_{SD2}) \}$$

(ブラインド閉のとき)

$$E_{D(i)} = \tau_{GBds} \cdot F_{i,Wd} \cdot \delta\omega_{1d}/0.5 \cdot E_{Wd}$$

$$+ \tau_{GBs} \cdot F_{i,W} \cdot \delta\omega_{1s}/0.5 \cdot E_{Ws}$$

$$E_{R1(i)} = \sum_j F_{i,j} \cdot \rho_C \cdot \{ \tau_{GBdd} \cdot F_{j,Fd} \cdot \rho_F \cdot \sin \theta_h \cdot E_{DN} + \tau_{GBds} \cdot F_{j,W} \cdot \delta\omega_{2d}/0.5 \cdot E_{Wd} + \tau_{GBs} \cdot F_{j,W} \cdot \delta\omega_{2s}/0.5 \cdot E_{Ws} + F_{S} \cdot E_{SH} + F_B \cdot E_B + F_G \cdot E_G + F_{SD2} \cdot E_{SD2} \}$$

$$E_{Wd} = \cos \theta_i \cdot E_{DN}$$

(2次反射以降の光束による関節照度)

$$E_{Rr} = \{ S_L \cdot \sum_i (E_{D(i)} + E_{R1(i)}) \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \} / \{ S_L \cdot (1 - \rho_1 \cdot \rho_2) \}$$

照明照度

$$E_{Lamp(i)} = E_{D(i)} + E_R$$

$$E_{D(i)} = \sum_i \alpha(j) \cdot \pi \cdot L \cdot F_{Lamp(i,j)}$$

$$L = 1/\pi \cdot \alpha_L \cdot m_L \cdot W \cdot \eta_L$$

$$E_R = (\pi \cdot L \cdot \sum S_{(j)} \cdot \rho_1 \cdot \rho_2) / \{ S_L \cdot (1 - \rho_1 \cdot \rho_2) \}$$

図1に示すように天井面を経由する1次反射光および床面に直接照射される直射光の2次反射光については、照度分布を考慮する方法とした。以降の反射については、光束量としてはわずかとなるが、切断面公式で空間全体に配分する。修正した照度算出式を表1に示す。遮蔽物の有無で算出方法を選択している。

## 2.2 遮蔽物の透過指向性

ブラインドは直射光を遮蔽しつつ、スラット面での反射による間接光によって昼光利用効果を得られる。このような効果の計算においては、遮蔽物を介した透過光の指向性が重要となるが、従来は一樣均等拡散と扱うか、上下配分比率を定める方法であった。そこで、既往の研究<sup>6)</sup>を参考に、小さい計算負荷で遮蔽物の透過指向性を反映する手法を導入した。図2は、直射光・天空光・地面反射光の別に、ブラインド単体での透過率について、スラットを介さない直接透過、スラット経由の間接透過の上下成分のスラット角度による変化を算出した一例である。これらの特性を用いて、ブラインド自動制御下における西方位窓面の透過光束の上下方向成分の時刻変化を算出した例を図3に示す。12:00ごろから窓面に直射光が照射され、13:30ごろからスラット角が被っていくに従い、上下透過光束の比率も変化していく様子が見られる。

## 3 昼光利用効果の感度解析

### 3.1 計算条件

計算対象建物モデルおよび計算条件の一覧を図4に示す。評価対象は南方位ペリメータゾーンとした。気象データは東京2006年1分値実測データを使用している。窓面積と外壁面積については合計表面積は変更せずに窓面積率を0.3~92.5%まで変化させた。ガラス種類については表2に示す熱・光性能を有する5種類を検討対象としており、ブラインドスラットは白色、ブラインドは直射光を適切に遮蔽する自動制御とした<sup>7)8)</sup>。

照明は主方位窓面から奥行方向に1.5m間隔で配置し、調光制御時は床面高さ75cmの机上面照度を750lx以上に保つように連続調光を行う設定とした。ただし、照明調光制御に寄与する昼光は直射光を除いたペリメータゾーンにおける主方位窓からの昼光照度のみを反映させた。直射光の間接照度は昼光照度に反映している。

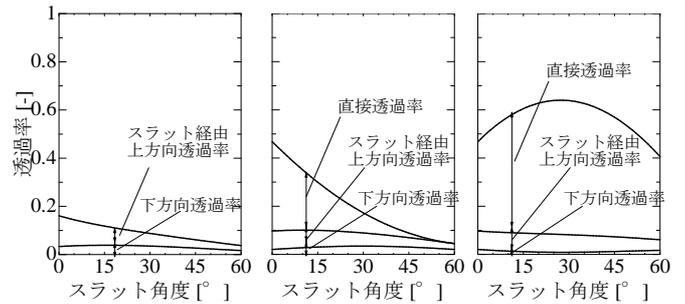


図2 ブラインドスラットの透過率 (スラット反射率 0.5)

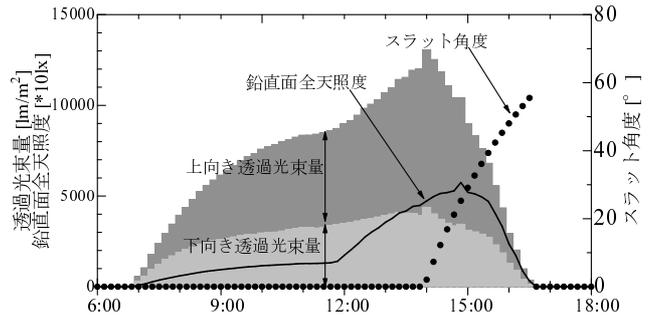


図3 ブラインド自動制御下における窓透過光束量の指向性

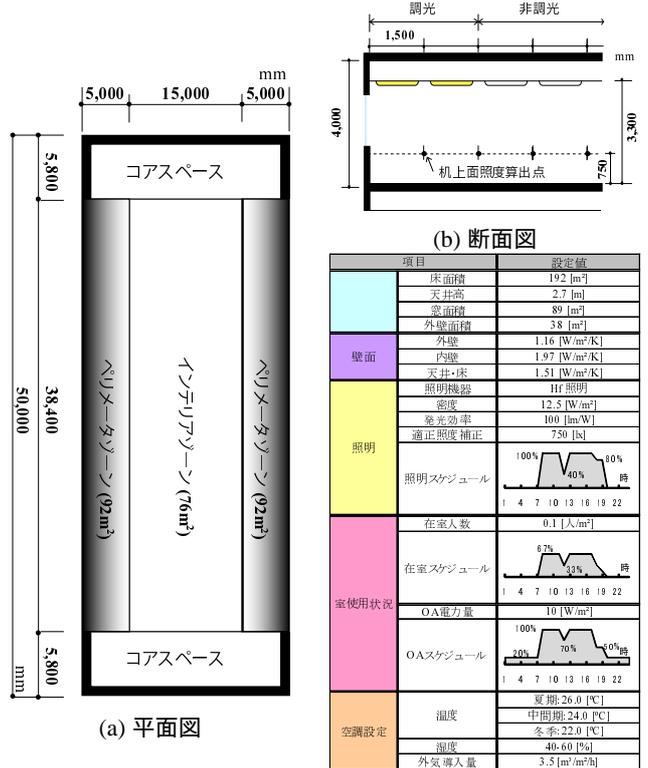


図4 昼光計算連成計算検討室モデル

表2 計算対象ガラス性能値一覧

	可視光特性		熱性能	
	[ ] 透過率	[ ] 反射率	[W/m <sup>2</sup> K] 熱貫流率	[ ] 日射熱取得率
透明	0.88	0.08	5.8	0.82
透明複層	0.79	0.15	2.9	0.73
高性能熱反 (SS8)	0.08	0.41	4.6	0.22
高性能熱反 (TBL35)	0.35	0.22	5.5	0.45
Low-E(Ag2) 複層	0.67	0.12	1.6	0.39

### 3.2 ブラインド・調光制御有無による影響

図5に、透明単板ガラスの仕様における、ブラインドの有無および調光制御の有無による熱負荷、照明電力量の変化を比較した結果を示す。一次エネルギーは空調・照明電力消費量から簡易的に換算した。

暖房負荷に大きな差は見られないが、冷房負荷においてはブラインドが無い場合の増大傾向が強くなる。調光の有無による差は照明電力の削減によって生じている。

照明電力量をみると、調光制御を行った場合は窓面積の拡大とともに電力量が低減する傾向にあるが、開口率40%の付近で収束している。ブラインドの有無では電力量の変化に大きな影響はないことから、ブラインド制御を導入する場合は昼光利用効果を損なわずに直射光の遮蔽が実現できる。

結果として、1次エネルギーでは調光を行わないケースは最もエネルギー消費量が多いことが示されている。また、自動制御を行うブラインドの効果はガラス面積が拡大するにつれて大きくなっている。

### 3.3 ガラス種類による影響

図6に、自動制御ブラインドを併用した窓における、ガラス種類による比較を行った結果を示す。

暖房負荷は遮蔽性能が高い高性能熱反の2種類が窓面積の拡大に伴う増大傾向を示している。

冷房負荷においては、高性能熱反が最も窓面積の拡大による影響が小さい。その他は、透明単板、透明複層、Low-E複層の順番である。

照明電力量では、可視光透過率が最も低い高性能熱反SS8は、窓面積を拡大させても殆ど昼光利用効果を得られていないことがわかる。その他のガラスでは昼光利用効果が得られるが、電力量の低減程度は若干異なっている。

1次エネルギーで比較すると、各ガラスが有する可視光透過および熱性能によって、窓面積率の拡大に対する変化傾向が大幅に異なっている様子が見られる。可視光を殆ど透過しない高性能熱反は窓面積が拡大しても殆ど増減がみられない。熱性能が低い透明単板においては、開口率20%程度までは昼光利用効果でエネルギーが削減されるが、それ以降は熱取得が卓越して急な増大となる。高い可視光透過性能と日射遮蔽性能・断熱性能を有するLow-Eガラスは、開口率40%までエネルギーは低下し、それ以降は緩やかな増加に抑えられている。

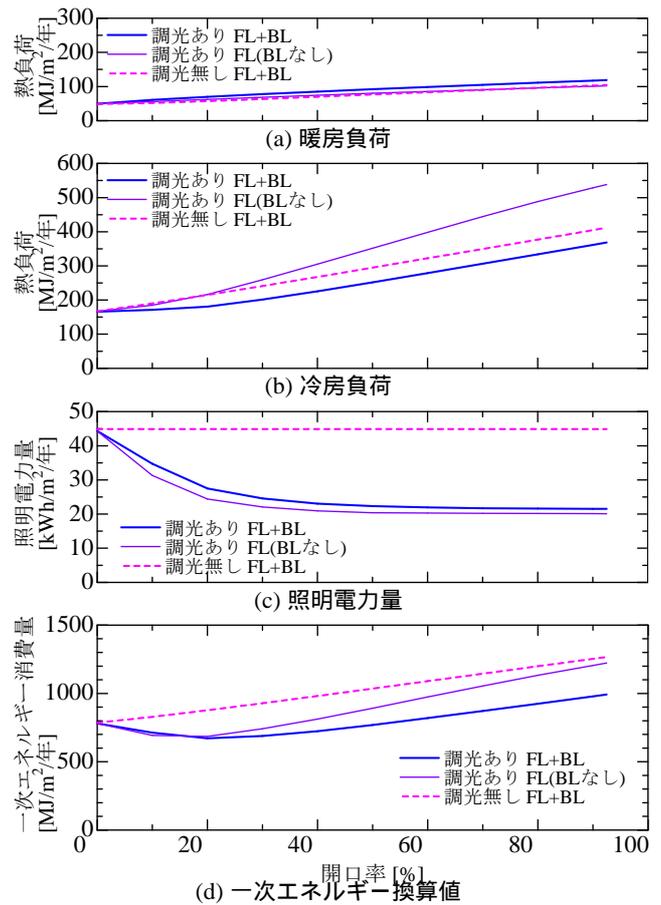


図5 ブラインド・調光制御の有無による熱負荷・照明電力への影響(透明単板ガラス)

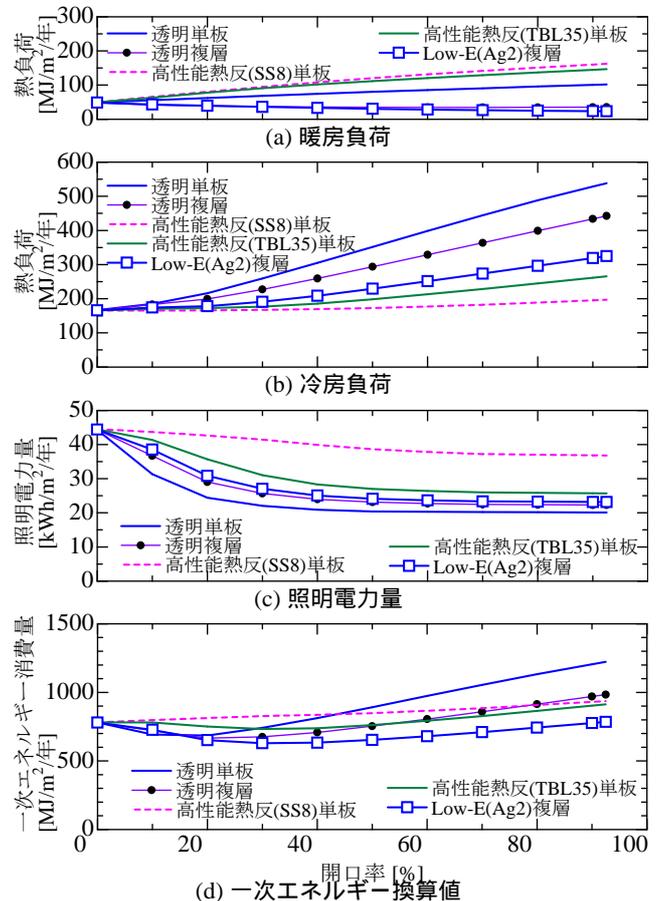


図6 ガラス種による熱負荷・照明電力への影響(BL・調光あり)

## 4 まとめ

昼光利用効果による熱負荷・照明電力削減を予測するための計算法について、遮蔽物を介した昼光利用効果の算出方法の改良を行った。なお、本手法は別途誌上にて計算精度が実証されている手法である<sup>9)</sup>。

昼光利用を想定した計算事例として、ガラス面積の拡大に伴う熱負荷・照明電力量への影響の感度解析について、ブラインドの有無・調光制御の有無、ガラス種類による比較を行った。調光照明は比較的容易に導入可能でありながら、直接の照明電力量削減と間接的な熱負荷低減の相乗的な省エネルギー効果が期待でき、BESTを用いることによって様々な窓仕様に対して熱と光を連成した試算が可能である。

今後の課題としては、CIE171<sup>10)</sup>で示されている照度計算プログラムの検証について実施していく予定である。

### 【記号】

$E_{Daylight}$ : 昼光照度 [lx],  $E_D$ : 直接照度 [lx],  $E_R$ : 間接照度 [lx],  $E_{R1(i)}$ : 天井面 1 次反射による照度 [lx],  $E_{Rr}$ : 2 次反射以降による間接照度 [lx],  $f_M$ : メンテナンスファクタ,  $f_R$ : コレクションファクタ,  $\tau_{Gs}, \tau_{Gd}$ : ガラス窓の透過率 (拡散, 直射),  $\tau_{GBs}$ : ブラインド併用ガラス窓の拡散光透過率,  $\tau_{GBds}, \tau_{GBdd}$ : ブラインド併用ガラス窓の直射光透過率 (スラット経由, 直接透過),  $\delta\omega_{1s}, \delta\omega_{2s}$ : ブラインド透過後の下方光束比 (拡散, 直射光),  $\delta\omega_{2d}, \delta\omega_{1d}$ : ブラインド透過後の上方光束比 (拡散, 直射光),  $\rho_C$ : 天井面反射率,  $\rho_F$ : 床面反射率,  $\theta_i$ : 直射光の窓面入射角 [rad],  $\theta_h$ : 太陽高度 [rad],  $F_S, F_B, F_G$ : 天空, 隣棟, 地面を見る形態係数,  $F_{SD1}, F_{SD2}$ : 上側, 下側底面を見る形態係数,  $F_W$ : 窓面を見る形態係数,  $F_{Wd}$ : 直射光の当たる窓面を見る形態係数,  $F_{Fd}$ : 直射光の当たる床面を見る形態係数,  $F_{i,j}$ : 照度計算点  $i$  から天井面要素  $j$  を見る形態係数,  $E_{DN}$ : 法線面直射照度 [lx],  $E_{SH}$ : 水平面天空照度 [lx],  $E_B, E_G$ : 隣棟建物, 地面反射光束発散度 [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ],  $E_{SD1}, E_{SD2}$ : 上側, 下側底面光束発散度 [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ],  $E_{Wd}, E_{Ws}$ : 窓面直射, 拡散照度 [lx],  $\rho_1$ : 作業面上向き可視光等価反射率,  $\rho_2$ : 作業面下向き可視光等価反射率,  $S_L$ : 照度計算用作業面積 [ $\text{m}^2$ ]  $E_{Lamp(i)}$ : 計算点 ( $i$ ) の照明による照度,  $\alpha_{(j)}$ : 照明ゾーン ( $j$ ) の点灯率,  $L$ : 照明輝度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],  $\alpha_L$ : 照明器具効率,  $m_L$ : 照明保守率,  $W$ : 照明出力 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\eta_L$ : 照明発光効率 [ $\text{lm}/\text{W}$ ]

### 【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), 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: 井上隆, 一ノ瀬雅之 (以上, 東京理科大学), 上田博嗣, 角谷亜璃砂 (以上, 大林組), 内海康雄 (宮城工業高等専門学校), 木下泰斗 (日本板硝子), 工月良太 (東京ガス), 黒本英智 (東京電力), 郡公子 (宇都宮大学), 菰田英晴 (鹿島建設), 芝原崇慶 (竹中工務店), 菅長正光 (菅長環境設備一級建築士事務所), 瀧澤博 (元鹿島建設), 長井達夫 (東京理科大学), 二宮秀與 (鹿児島大学), 野原文男, 二宮博史, 丹羽勝巳, 田端康宏 (以上, 日建設計), 平林啓介 (新日本空調), 柳井崇 (日本設計), 事務局: 生稲清久 (建築環境省エネルギー機構)

### 【参考文献】

- 1) 一ノ瀬, 村上, 井上, 石野, 郡, 木下: 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 15) 昼光利用および日射遮蔽制御の計算法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.2025-2028, 2007.9
- 2) 一ノ瀬, 村上, 井上, 石野, 郡, 木下, 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 25) 昼光利用照明計算について, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1101-1104, 2008.8
- 3) 井上隆, 一ノ瀬雅之, 木下, 寺山, 近江, 好井: オフィスビルにおける昼光利用照明による省エネルギー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 1327-1330, 2007.8
- 4) 建築物における昼光利用照明と省エネルギー, 板硝子協会, 2007.3
- 5) HASP-L 利用マニュアル, 板硝子協会省エネルギー委員会, 日本建築設備士協会, 1980
- 6) 石野久彌, 伊藤直明, 須永修通, 三浦満雄: 開口部の熱遮断機構に関する研究 (第 1 報) ブラインドの熱遮断特性の基礎理論, 空気調和・衛生工学会学術論文集, pp.393-396, 1982 年 10 月
- 7) SHASE-M-1008-2009 「省エネルギーと快適な熱・光環境の両立を図る自動制御ブラインドの仕様と解説」
- 8) 一ノ瀬, 井上, 田宮ほか: 自動制御ブラインドによる省エネルギーと快適性の両立に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1783-1790, 2008.8
- 9) 一ノ瀬雅之, 井上隆, 齊藤寛: 高性能窓システムの熱・光性能の現場測定法, 日本建築学会環境系論文集 第 641 号, pp.845-851, 2009.7
- 10) Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs, CIE 171, International Commission on Illumination, 2006