



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トップライト型ボイド空間における入射光による各階の日射負荷の推定
Author(s)	菊田, 弘輝; 泉, 孝典; 羽山, 広文 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 75(647), 51-57 https://doi.org/10.3130/aije.75.51
Issue Date	2010-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50350
Rights	日本建築学会
Type	journal article
File Information	JEE75-647_51-57.pdf



トップライト型ボイド空間における入射光による各階の日射負荷の推定

ESTIMATION OF THE SOLAR RADIATION LOAD AT EVERY FLOOR IN SKYLIGHTED VOID SPACE

菊田 弘輝*, 泉 孝典**, 羽山 広文***, 絵内 正道****

*Koki KIKUTA, Takanori IZUMI, Hirofumi HAYAMA
and Masamichi ENAI*

Recently, buildings that adopted the external insulation method that is possible to take the thick insulation are widely prevalent in cold regions. While the reduction of heating load in winter is generally expected, the increase of cooling load in summer is concerned. So, it is necessary to devise the buildings and facilities like natural ventilation and solar control. The aim of this paper is to estimate the solar radiation load at every floor caused by incident light in skylighted void space. Therefore, we calculate the solar irradiance using ideas of luminous efficacy about the illuminance from the illumination distribution to every floor, and show details of solar radiation load at every floor by model experiment and numerical analysis.

Keywords: Skylighted void space, Solar radiation load, Luminous efficacy

トップライト型ボイド空間, 日射負荷, 発光効率

1. はじめに

現在, 寒冷地を中心に厚い断熱が可能な外断熱工法を採用した建物が広く普及してきている。一般的に冬期の暖房負荷の削減が期待される一方, 夏期の冷房負荷の増大が懸念されるため, 自然換気(外気冷房・夜間換気)や日射制御(日射遮蔽・昼光利用)等の建築的・設備的工夫が必要になる。自然換気においては換気経路の一部にボイド空間を利用した事例が一般的である。また, 日射制御においては側面窓が中心である一方, ボイド空間に合わせて昼光利用を目的にトップライトを設置した事例^{1), 2)}が数多く見受けられる。

本研究ではトップライト型ボイド空間における熱・光環境計画について取り上げるが, 日射・採光に係る自然エネルギー利用の効果として, ダイレクトゲインによる暖房負荷の削減や, 昼光利用による照明負荷の削減が期待できる。一方, 透過日射による冷房負荷の増大や, オーバーヒートやグレアの問題等が懸念され, 熱・光環境の両者を考慮した開口計画が求められる³⁾。しかし, 本研究で取り上げるトップライトからの入射光が及ぼす影響の中でも, 熱環境への影響度を推定することは困難である。事実, ボイド空間の最下層よりも最上層の方が外界の影響を強く受けるため, ボイド空間の最上層に隣接する居室空間の熱環境制御は容易ではない。更に, 建築設備設計基準⁴⁾の熱負荷計算の中でも, トップライトからの日射負荷の内訳までは到底対応し切れていない。熱・光環境の両者を考慮した既往研究として, 宿谷⁵⁾のエクセルギー, 井上・一ノ瀬ら⁶⁾の窓・制御システム, 吉澤・武田ら⁷⁾の熱負荷計算等が挙げられるが, トップライトに関連する研究は非常に少なく, トップライト型ボイド空間へ入射した光の挙動を正確に把握することは重要である。

本研究の目的は, トップライト型ボイド空間における入射光による各階の日射負荷を推定することである。具体的には, 模型実験及び数値解析により各階の照度分布から照度に関する発光効率の概念を用いて日射量を算定し, 各階の日射負荷の内訳を明らかにすることである。

2. 模型実験

2.1 実験概要

各階の日射負荷を推定する際に, 直達光と天空光の性質が大きく異なるため, 直達光の影響が大きい晴天日及び天空光の影響が大きい曇天日における各階の照度分布をそれぞれ明らかにする。想定した建物・壁面形状を表1, 想定した太陽位置を表2に示す。照度に関する影響因子として, 建物形状や壁面形状等の建物因子(基準階高さ(H), トップライト・ボイド形状, 反射率(ρ), 立体角投射率(U))及び太陽位置や天候等の外界因子(太陽高度(h), 太陽方位角(A), 晴天指数(K_{Te}))が挙げられる。太陽高度と太陽方位角は北緯30°~45°地点で, 日射負荷の大きくなる10~14時における太陽位置を想定した。 K_{Te} とは仮想大気圏外水平面全天日射量(I_0)に対する水平面全天日射量の比で, 天空状態を表す指標である。

北海道大学工学部R棟の屋上に, 1フロア40[m]×40[m]=1600[m²](ボイド空間: 1フロアの約1/10 (12.5[m]×12.5[m]=156.25[m²])), 基準階高さ: 約3.5[m]または約5.0[m]の複層オフィスビルを縮尺1/25模型で再現した。計測階の平面図を図1, 模型全体の断面図を図2に示す。本実験は2007年11月に行われた。計測階である1フロアのみに照度ロガー(HIOKI製3640, 計35点)及び小型日射計(英

* 北海道大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

** (株)大林組

*** 北海道大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

**** 北海道大学 名誉教授・工博

Assis. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Obayashi Corporation

Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

弘精機 ML-020VM, 計 2 点) 等を取り付けた。そのフロア中央点に対するトップライトの U を, 想定する階の U と等しくすることで, 建物内の各階を再現した。U の変更には, 計測階上に外壁面や屋根面を積み上げていく工夫を施した。また, 想定した太陽位置には, 模型全体を傾斜させていく工夫を施した。

2.2 実験結果

代表点の照度分布を図 3, 図 4 に示す。東京の夏至における南中時 ($A=0^\circ$, $h=79^\circ$), $H=139[\text{mm}]$, $\rho=\text{天井面 } 80[\%]\cdot\text{壁面 } 0[\%]\cdot\text{床面 } 30[\%]$ の結果である。晴天時には東西軸ボイドかつ $U=0.2$ のみ模型中心 (0, 0) が計測可能であった。曇天時にはフロア中央点に対して対称形であり, 指向性のない天空光のみが入射していたと

表 1 想定した建物・壁面形状

基準階高さ $H[\text{mm}]$	トップライト・ ボイド形状	反射率 $\rho[\%]$	立体角投射率 $U[-]$
139	南北軸 ボイド	天井面 50 80	0.8
		壁面 0	
		床面 30 50	
202	正方形 ボイド	天井面 50 80	0.6
		壁面 0	
		床面 10 30 50	
202	東西軸 ボイド	天井面 50 80	0.2
		壁面 0	
		床面 30 50	

表 2 想定した太陽位置

太陽方位角 $A[^\circ]$	太陽高度 $h[^\circ]$									
	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20
65	65	70	73	75	77	78	79	79	79	79
60	60	60	70	70	70	70	70	70	70	70
50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
20	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

※想定したのは晴天時の場合のみ

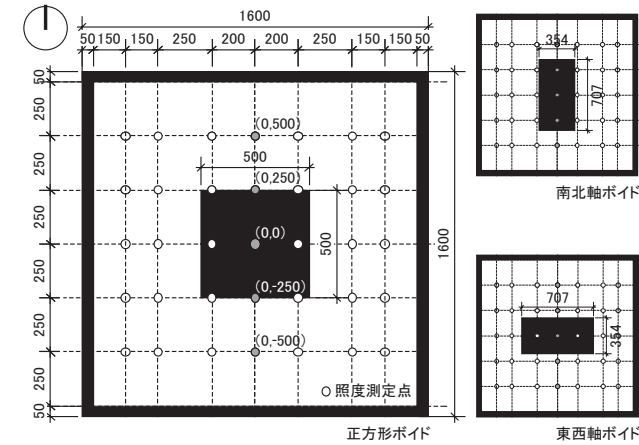


図 1 計測階の平面図

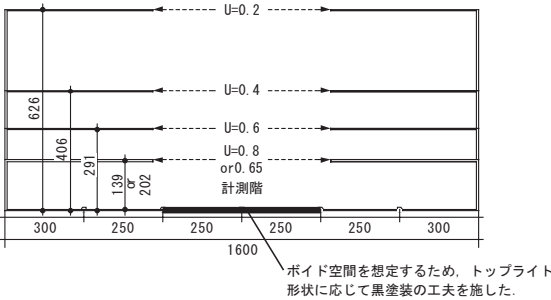


図 2 模型全体の断面図

判断できるため, 南北軸ボイドと東西軸ボイドは同等であると仮定した。また, U の変化による照度の減衰率が一定でないのは, 測定時期に応じて日射量や日射成分が異なったためである。

2.3 解析

2.3.1 解析目的

照度を構成する 4 要素を図 5 に示す。解析目的は, 模型実験から得られた照度を①～④に分解し, 建物形状や壁面形状等の建物因子や太陽位置や天候等の外界因子を関数とした任意の条件下における

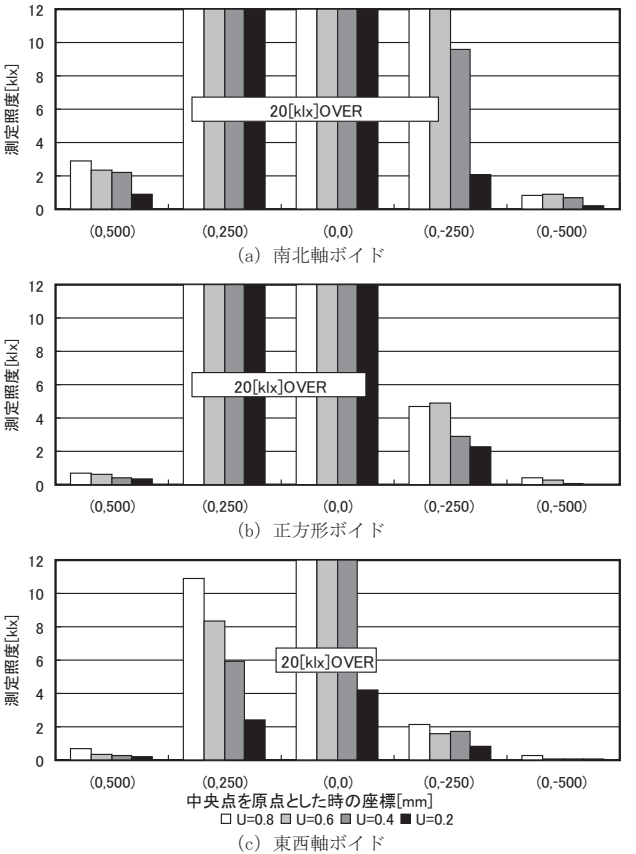


図 3 代表点の照度分布 (晴天時)

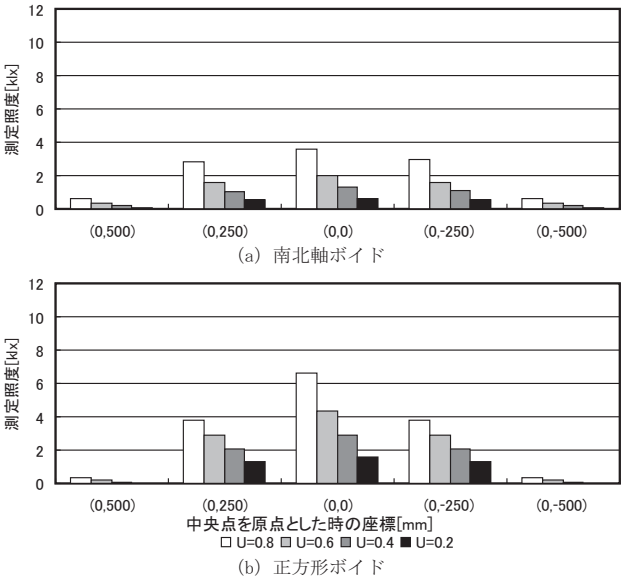


図 4 代表点の照度分布 (曇天時)

照度推定式を導くことである。また、最も照度に影響を与えた建物因子を探ることである。その手順を以下に示す。

【手順1】発光効率の式を用いて、①直達光による直接照度と③天空光による直接照度を導く。

【手順2】天空成分のみが含まれる曇天時に測定された照度から、③を除くことで、④天空光による間接照度を導く。

【手順3】直達成分と天空成分が含まれる晴天時に測定された照度から、これまでに導かれた①・③・④を除くことで、②直達光による間接照度の推定式を導く。

2.3.2 直散分離

日射量は水平面及び模型屋上面の計2点で計測した。直散分離は晴天指数 ($K_{Te}=0.77[-]$) を用いた分離式により行い、全天日射量 (I_G) [W/m^2] から直達日射量 (I_D) [W/m^2] と天空日射量 (I_S) [W/m^2] を算出した⁸⁾。クラウド・レイシオ (C_{Re}) とは全天日射量 (またはグローバル照度) に対する天空日射量 (または天空照度) の比で、天空状態を推測することができる。

$$I_D = I_G - I_S \quad (1)$$

$$I_S = I_G C_{Re} \quad (2)$$

$$C_{Re} = 0.98965 + 0.014886K_{Te} + 0.96096K_{Te}^2 - 8.2762K_{Te}^3 + 6.97074K_{Te}^4 \quad (3)$$

2.3.3 天空光の挙動把握

全天空照度 (E_s) [klx] は全天空照度の発光効率 (η_s) [lm/W] あるいは太陽高度 (h) [rad] の関数として表される⁹⁾。測定時期の異なる照度分布を同等に比較するため、(4) 式の h 及び I_s に関する項を揃え、 E_s を等しくした上で U の関数として整理した。

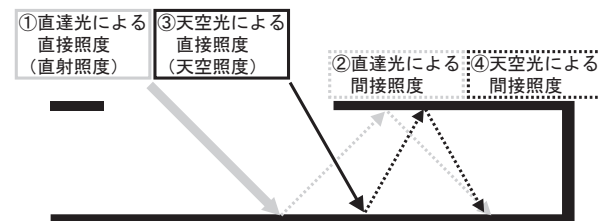


図5 照度を構成する4要素

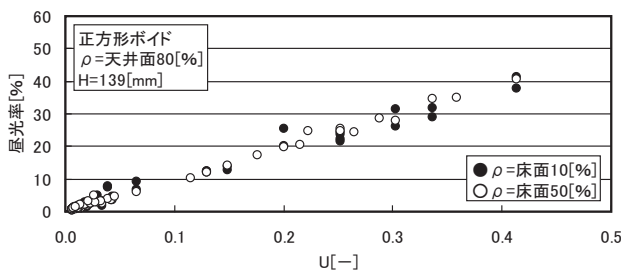


図6 床面反射率の違いによる昼光率

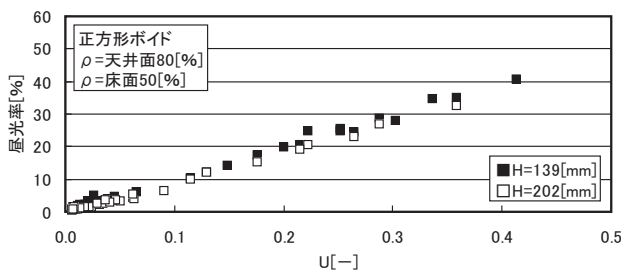


図7 計測階高の違いによる昼光率

$$E_s = \eta_s I_s \\ = (0.1794 + 0.1628h - 0.1389h^2 + 0.0429h^3) I_s^{0.9} \quad (4)$$

床面反射率の違いによる昼光率を図6、計測階高の違いによる昼光率を図7に示す。正方形ポイドから判断すると、床面反射率や計測階高の違いによる変化は殆ど見られず、天空光による間接照度は無視できる範囲と考えられる。測定点の天空照度 (E'_s) [klx] は測定点に対する U を用いて算出する。

$$E'_s = E_s U \quad (5)$$

2.3.4 直達光の挙動把握

直射照度 (E_D) [klx] は直射照度の発光効率 (η_D) [lm/W] あるいは太陽高度 (h) [rad] の関数として表される⁹⁾。測定時期の異なる照度分布を同等に比較するため、(6) 式の h 及び I_D に関する項を揃え、 E_D を等しくした上で $U_l \times U_s$ の関数として整理した。

$$E_D = \eta_D I_D \\ = (0.01184 + 0.06192h - 0.07127h^2 + 0.02667h^3) I_D^{1.2} \quad (6)$$

直達光による間接照度に関する指標 $U_l \times U_s$ を図8に示す。 U_l は直達光受照面の天井投射面が測定点に放射する「光束の大きさ」を表す指標、 U_s は測定点に対してある大きさの光束を放射する「領域の広さ」を表す指標として設定した。

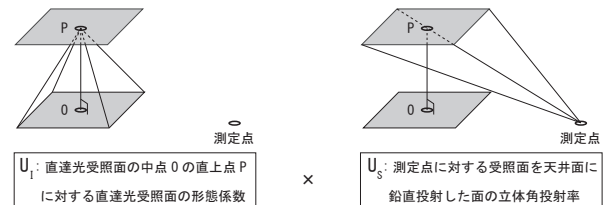
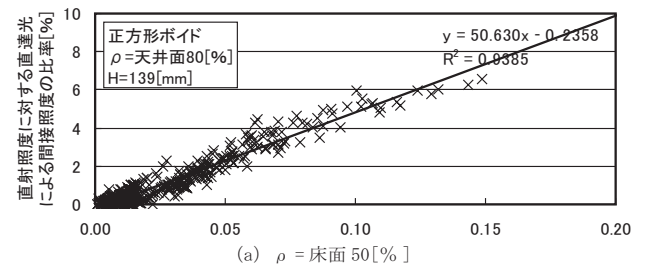
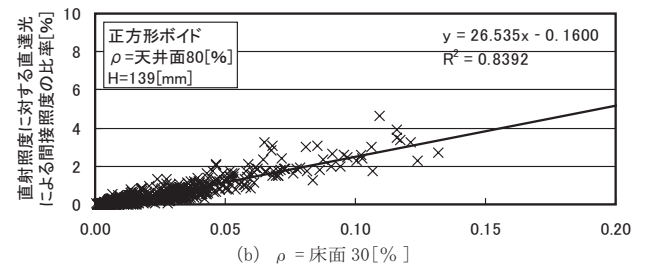


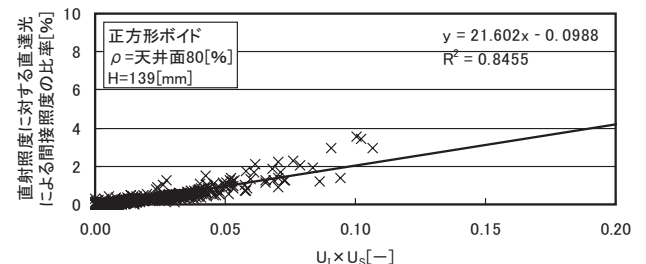
図8 直達光による間接照度に関する指標 $U_l \times U_s$



(a) $\rho =$ 床面 50[%]



(b) $\rho =$ 床面 30[%]



(c) $\rho =$ 床面 10[%]

図9 床面反射率の違いによる直射照度に対する直達光による間接照度の比率

床面反射率の違いによる直射照度に対する直達光による間接照度の比率を図9に示す。トップライト・ボイド形状や計測階高さの違いによる差異は小さかったため、正方形ボイド及び $h=139[\text{mm}]$ から判断すると、天空光とは対照的に床面反射率の違いによる変化は顕著であった。その床面反射率別の関係式を基に、新たに最小自乗近似式を作成し、任意の条件下における照度推定式を導いた。測定点の直達光による間接照度 (E'_D) [klx] は測定点に対する ρ 及び $U_l \times U_s$ を用いて算出する。

$$E'_D = E_D \rho (1.0878 U_l \times U_s - 0.0055) \quad (7)$$

3. 数値解析

3.1 汎用性の向上

トップライト型ボイド空間における入射光による各階の日射負荷を推定する上で、汎用性のある気象データ（気象庁管理の気象台データ）の日射量を使用し、時刻毎におけるトップライトからの日射負荷の内訳を明らかにしたい。先の模型実験により建物形状や壁面形状等の建物因子の中で、最も照度に影響を与えた建物因子として、床面反射率 (ρ) と立体角投射率 (U) であることが示唆された。このことを踏まえ、2つのパラメータに限定した模型実験を行った。

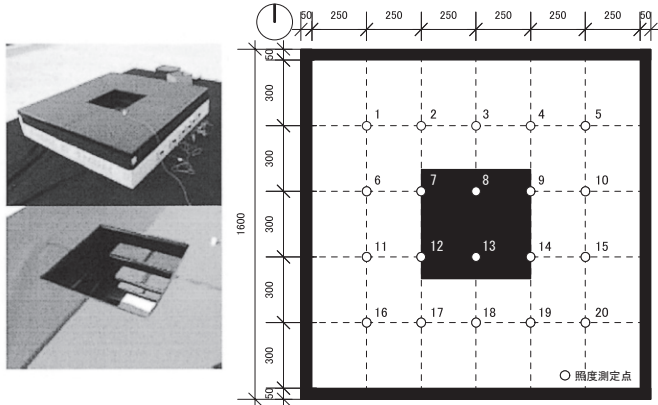
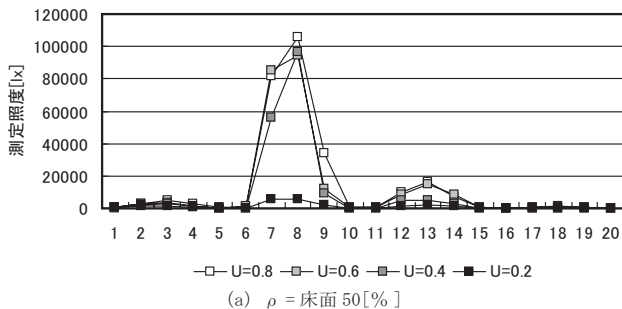
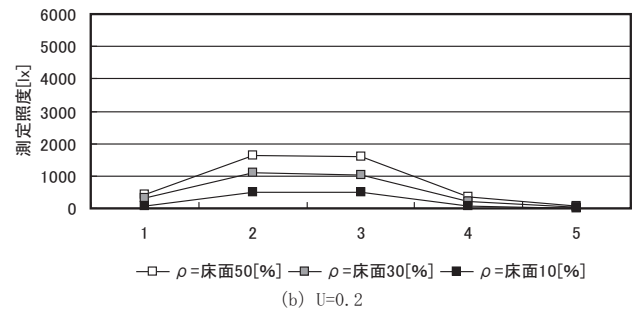


図10 計測階の平面図

写真1 模型写真

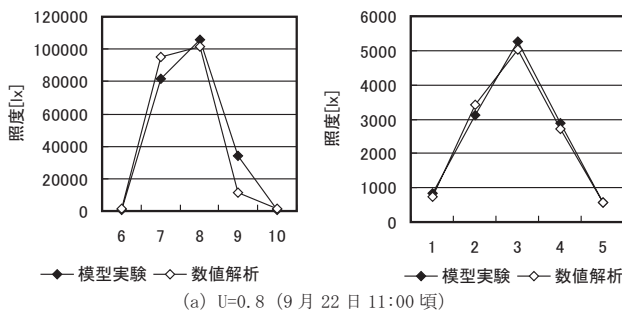


(a) $\rho = \text{床面} 50[\%]$

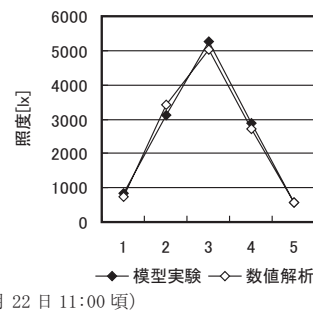


(b) $U=0.2$

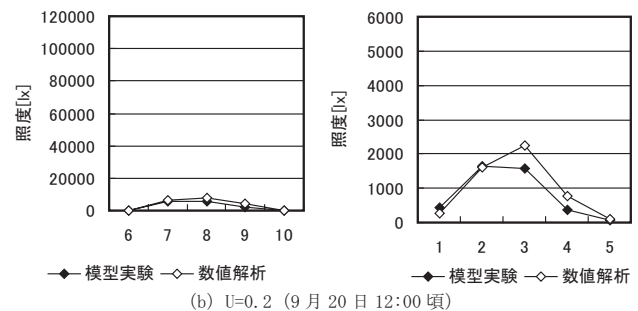
図11 パラメータ整理時の照度（模型実験）



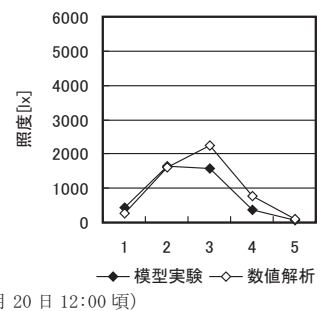
(a) $U=0.8$ (9月22日 11:00頃)



(b) $U=0.2$ (9月20日 12:00頃)



(c) $U=0.8$ (9月22日 11:00頃)



(d) $U=0.2$ (9月20日 12:00頃)

図12 模型実験と数値解析の比較 ($\rho = \text{床面} 50[\%]$)

模型写真を写真1、計測階の平面図を図10に示す。本実験は2008年9月に行われた。実験概要はほぼ共通しているが、一部変更点として、照度測定点を等間隔（計20点）にした点と、模型を傾斜させてある期間を断片的に測定する方法から、模型を傾斜させずに一定期間を連続的に測定する方法にした点が挙げられる。続いて、この模型実験と数値解析の結果を比較し、シミュレーションの信頼性を実証することにした。

3.2 信頼性の実証

3.2.1 実験結果

パラメータ整理時の照度（模型実験）を図11に示す。それぞれパラメータの変更に対応した照度の大小関係が確認され、これらの結果を参考に、シミュレーションの環境設定を行った。

3.2.2 解析概要

シミュレーションの諸条件を入力する上で、事前に汎用性のある気象データの日射量を直散分離（(1)・(2)式⁹⁾し、発光効率の式を用いた照度変換（(4)・(5)式⁹⁾により直射照度と全天空照度を算出する必要がある。因みに、信頼性の実証における模型実験と数値解析の結果を比較する際には模型屋上面の日射量を使用している。ただし、直散分離で用いられる K_{Te} は、これまでの一定値から変動値とし、 K_{Te} の条件に応じて C_{Re} を算出した。

$$K_{Te} = I_G / I_0 \sinh \quad (8)$$

$$0 \leq K_{Te} \leq 0.81$$

$$C_{Re} = 0.98965 + 0.014886 K_{Te} + 0.96096 K_{Te}^2 - 8.2762 K_{Te}^3 + 6.97074 K_{Te}^4 \quad (9)$$

$$0.81 < K_{Te} \leq 1.0$$

$$C_{Re} = 0.43438 - 0.28038 K_{Te} \quad (10)$$

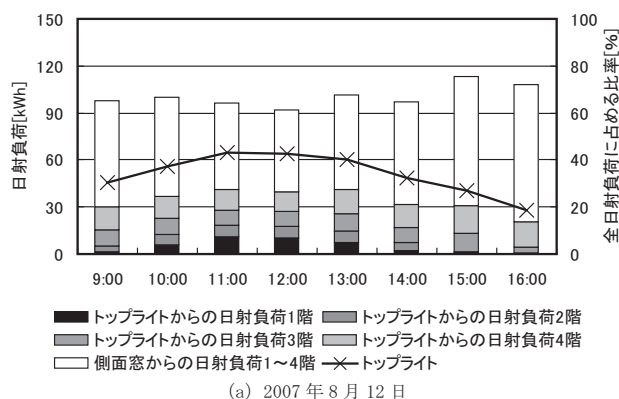
3.2.3 模型実験と数値解析の比較

模型実験と数値解析の比較（ $\rho = \text{床面} 50[\%]$ ）を図12に示す。直達光の影響が大きい測定点（7, 8）では120000[lx]、小さい測定点（1～5）では6000[lx]の範囲で比較した結果、多少の誤差を考

4.3 解析結果

水平面全天日射量と晴天指数を図16、トップライトからの日射負荷の内訳(81[m²])を図17に示す。太陽高度の高い夏期では、各階に日射負荷が分散する傾向(4階:約30[%])を示した。その一方、太陽高度の低い冬期や明方・夕方では、最上階に日射負荷が集中する傾向(4階:約60[%])を示した。

全日射負荷の内訳(81[m²])を図18、ボイド面積別の単位床面積当たりの日射負荷の内訳(4階)を図19に示す。ボイド面積:側面窓面積=約1:6の条件では、トップライトからの日射負荷の比率は40[%]以上(夏期)、30[%]前後(冬期)に達していた。また、ボイド面積を64[m²]と100[m²]に変更した場合、面積比率に応じて増減していた。晴天指数が比較的安定していた夏期では、太陽高度が低くなる14:00以降に、最上階の4階におけるトップライトからの直達日射負荷が非常に大きくなった。同時に、この時間帯の側面窓からの直達日射負荷も当然大きくなり、結果的に単位床面積当たりの日射負荷が40~50[W/m²]になることが確認された。



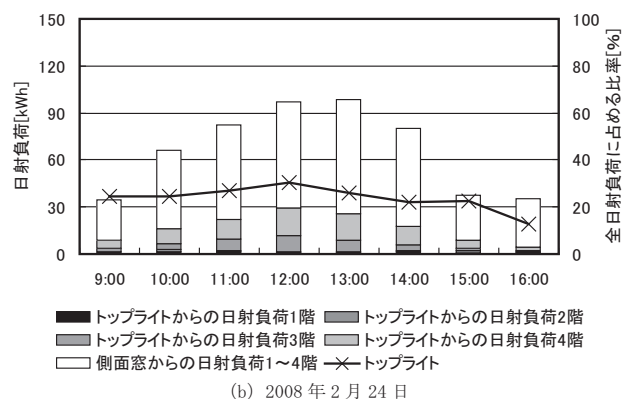
(a) 2007年8月12日

ボイド面積別のトップライトからの日射負荷の内訳(12:00)を図20に示す。ボイド面積を仮に64[m²]から100[m²]に拡大すると、下階に配分される比率が増大し、夏期では約33[%](1階)、冬期では38.1[%](3階)まで到達し、15[%]程度増加することが確認された。

5. まとめ

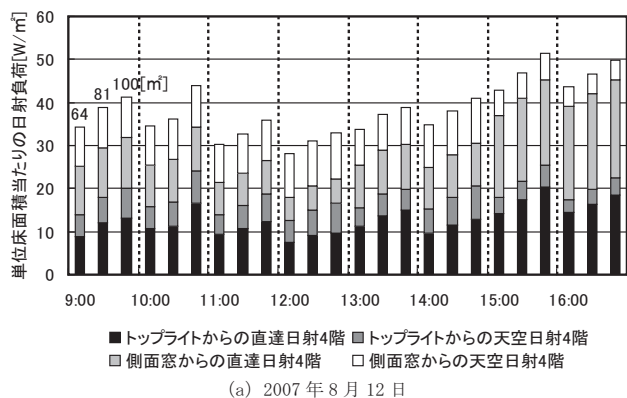
トップライト型ボイド空間における入射光による各階の日射負荷を推定した。以下に、得られた成果を簡潔にまとめる。

- 1) 照度に関する発光効率の概念を用いて、トップライトからの入射光が及ぼす光環境への影響度(各階の照度分布)から熱環境への影響度(各階の日射負荷)を推定する方法を提案した。
- 2) 模型実験により建物形状や壁面形状等の建物因子及び太陽位置や天候等の外界因子を関数とした任意の条件下における照度推定式を導き、最も照度に影響を与えた建物因子として、床面反射率(ρ)と立体角投射率(U)であることを示した。

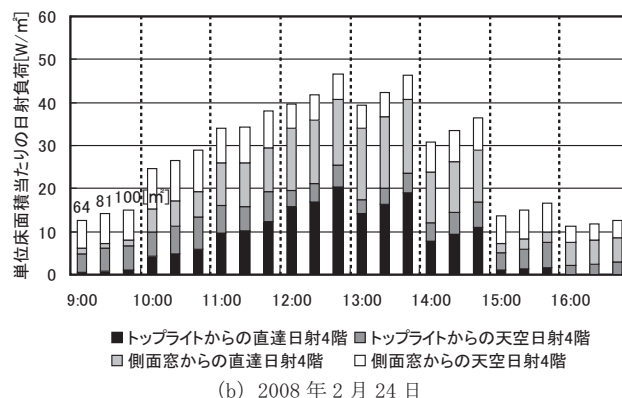


(b) 2008年2月24日

図18 全日射負荷の内訳(81[m²])



(a) 2007年8月12日



(b) 2008年2月24日

図19 ボイド面積別の単位床面積当たりの日射負荷の内訳(4階)

2007年8月12日

	797[W/m ²]	
全階	31.12 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	10.44 [kWh]	64[m ²] 33.5 [%]
3階	7.71 [kWh]	24.8 [%]
2階	6.56 [kWh]	21.1 [%]
1階	6.41 [kWh]	20.6 [%]

	797[W/m ²]	
全階	39.39 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	12.21 [kWh]	81[m ²] 31.0 [%]
3階	9.83 [kWh]	25.0 [%]
2階	7.38 [kWh]	18.7 [%]
1階	9.97 [kWh]	25.3 [%]

	797[W/m ²]	
全階	48.63 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	13.22 [kWh]	100[m ²] 27.2 [%]
3階	10.40 [kWh]	21.4 [%]
2階	8.94 [kWh]	18.4 [%]
1階	16.07 [kWh]	33.1 [%]

2008年2月24日

	647[W/m ²]	
全階	23.18 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	16.34 [kWh]	64[m ²] 70.5 [%]
3階	5.87 [kWh]	25.3 [%]
2階	0.44 [kWh]	1.9 [%]
1階	0.53 [kWh]	2.3 [%]

(a) 64[m²]

	647[W/m ²]	
全階	29.34 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	17.30 [kWh]	81[m ²] 59.0 [%]
3階	10.55 [kWh]	36.0 [%]
2階	0.65 [kWh]	2.2 [%]
1階	0.84 [kWh]	2.9 [%]

(b) 81[m²]

	647[W/m ²]	
全階	36.22 [kWh]	↓ 100.0 [%]
4階	20.35 [kWh]	100[m ²] 56.2 [%]
3階	13.79 [kWh]	38.1 [%]
2階	0.89 [kWh]	2.5 [%]
1階	1.20 [kWh]	3.3 [%]

(c) 100[m²]

図20 ボイド面積別のトップライトからの日射負荷の内訳(12:00)

3) シミュレーションの信頼性を実証した後、汎用性のある気象データの日射量を使用し、時刻毎におけるトップライトからの日射負荷の内訳を明らかにした。特に夏期の最上階における日射負荷は40～50[W/ m²] になり、ボイド面積の変更に伴い、下階に配分される比率が15[%] 程度増加し、季節間の違いも確認された。

謝辞

本研究の一部は、平成19～20年度科学研究費補助金(若手研究(B))「高断熱事務所建物に適用可能な水方式による躯体蓄熱暖冷房システムの提案・開発」(研究代表者：菊田弘輝)により行った。また、卒業生の伊藤匡貴氏(東京工業大学)には多大なご協力を頂いた。記して感謝する。

本研究に関連した既発表文献

- *1) 菊田弘輝, 羽山広文, 絵内正道, 伊藤匡貴: 断熱建物におけるトップライト型ボイド空間の熱・光環境計画に関する研究 その3 数値解析における入射光による各階の日射負荷の推定, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2009, 投稿済, 2009.11
- *2) 菊田弘輝, 羽山広文, 絵内正道, 伊藤匡貴: トップライト型ボイド空間における各階の日射負荷の推定に関する分析と評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 345-348, 2009.9
- *3) 伊藤匡貴, 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文: トップライト型ボイド空間における各階日射負荷推定手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会北海道支部 第43回学術講演会論文集, pp. 7-10, 2009.3
菊田弘輝, 泉孝典, 絵内正道, 羽山広文: 断熱建物におけるトップライト型ボイド空間の熱・光環境計画に関する研究 その2 模型実験における入射光による各階の日射負荷の推定, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2008, pp. 229-232, 2008.11
- *5) 泉孝典, 絵内正道, 羽山広文, 菊田弘輝: トップライト型ボイド空間を対

- 象とした光・熱環境計画に関する研究 その1 模型実測による各階における直達日射の挙動推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II (中国), pp. 27-28, 2008.9
- *6) 泉孝典, 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文: トップライト型ボイド空間を対象とした光・熱環境計画に関する研究 その1 模型実測による各階の天空日射負荷の推定, 空気調和・衛生工学会北海道支部 第42回学術講演会論文集, pp. 123-126, 2008.3

参考文献

- 1) 大成札幌ビル: 作品選集 2008 建築雑誌増刊, 社団法人日本建築学会, pp. 26-27, 2008.3
- 2) 北海道立北方建築総合研究所: 作品選集 2004 建築雑誌増刊, 社団法人日本建築学会, pp. 32-33, 2004.3
- 3) 社団法人日本建築学会: 昼光照明デザインガイド 自然光を楽しむ建築のために, 技報堂出版, 2007.8
- 4) 社団法人公共建築協会: 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修 建築設備設計基準 平成18年版, 財団法人全国建設研修センター, 平成19年5月
- 5) 宿谷昌則: 数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, 1993.7
- 6) 一ノ瀬雅之, 井上隆, 関佑介, 横田雄史: 建築と設備が一体化したペリメータレス空調システムの性能および省エネルギー効果の実測評価, 日本建築学会環境系論文集, No. 639, pp. 651-658, 2009.5
- 7) 吉澤望, 武田仁, 近藤純一: 日射遮蔽物の入射角特性を考慮した熱負荷計算 内付けブラインドの光学特性計算へのRadianceの適用, 日本建築学会環境系論文集, No. 640, pp. 675-684, 2009.6
- 8) 稲沼實, 武田仁: 長期観測データに基づく日射の直散分離に関する実証的研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 575, pp. 41-46, 2004.1
- 9) 稲沼實, 武田仁: 長期観測データに基づく昼光の発光効率に関する実証的研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 560, pp. 7-13, 2002.10
- 10) 菊田弘輝, 泉孝典, 絵内正道, 羽山広文: 断熱建物におけるトップライト型ボイド空間の熱・光環境計画に関する研究 その1 入射光による各階の日射負荷の推定, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2007, pp. 321-324, 2007.1

(2009年7月6日原稿受理, 2009年9月30日採用決定)