建築外部空間の熱放射環境が ダイレクトゲインシステムの性能に及ぼす影響の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS ON THE EFFECT OF THE OUTDOOR THERMAL RADIATION ENVIRONMENT ON THE PERFORMANCE OF A DIRECT GAIN SYSTEM

河合 英徳*, 浅輪 貴史**, 梅干野 晃***

Hidenori KAWAI, Takashi ASAWA and Akira HOYANO

This study presents a simulation method to predict the effect of the outdoor thermal radiation environment on the performance of a direct gain system. As a result of error analyses for the calculation of incident solar radiation on internal surfaces and room air temperature, the error range derived from mesh resolution is revealed. Also, the numerical experiments show that this method is applicable to the examination of the performance of a direct gain system, taking into account the effects of the position and size of trees and thermal storage mass.

Keywords : Direct gain system, Passive design, Heat transmission analysis, Outdoor and indoor spaces,
Thermal radiation environment, Building heat load

ダイレクトゲインシステム, パッシブデザイン, 伝熱解析, 建築内外, 熱放射環境, 建物熱負荷

1. 研究の背景と目的

環境配慮型建築への要請の高まりを受け, 快適な室内気候の形成と省エネルギーの性能向上の両立を図る手法として, 日射熱を有効に利用するパッシブソーラーシステムが注目されている。特に日射熱を蓄熱部位に蓄えるダイレクトゲインシステムはその最も直接的な熱利用の形態の一つであり, 冬季において有効な手法であるため数多くの研究例がある。近年では技術開発が進み, 潜熱蓄熱材¹⁾による蓄熱性能の向上や床暖房等の補助設備との併用²⁾も可能である。

ダイレクトゲインシステムの大面积の開口部は熱環境以外の視点からも建築外部空間に対して開放的なデザインとしても有効である。その反面, ダイレクトゲインシステムの性能は建物の日射熱取得に依存することから, 実際の市街地や住宅地では隣棟建物や既存の樹木等による日射遮蔽の影響を受け, 冬季には十分な室温上昇効果が得られないことがありうる。また, 大面积の開口部を有することから夏季には樹木等により開口部に入射する日射を遮蔽するための対策が求められる。そのため, 冬季と夏季の両時期において建築外部空間の影響を検討できることが重要であり, それには数値シミュレーションによる検討が有効といえよう。

筆者らはこれまで熱的に快適な屋外生活空間の形成のために熱放射環境の重要性に着目し, 建築外部空間の熱収支シミュレーションにより樹木の配置や形状, 樹種や建築外部空間の空間形態・構成材

料が熱放射環境に及ぼす影響を予測可能なツールを開発してきた³⁾。ダイレクトゲインシステムの性能の予測に関しても建築外部空間の空間設計と形成される熱放射環境を考えながら, 各時期の日射熱取得と室温, 熱負荷について検討できることが重要と考える。

そこで本研究では, 樹木によって形成される建築外部空間の熱放射環境を考慮したダイレクトゲインシステムの性能予測方法を示し, 樹木の配置や樹高, 落葉の有無がダイレクトゲインシステムの室温に及ぼす影響を明らかにする。

2. 建築外部空間の熱収支シミュレーションと連係したダイレクトゲインシステムの性能予測方法

2.1 本研究におけるダイレクトゲインシステムの性能予測の要件

建築外部空間の熱放射環境を考慮してダイレクトゲインシステムの設計及び性能評価を行うには, 冬季の日射熱取得と夏季の日射遮蔽を両立する視点から, 以下の要件が求められる。

- 1) 隣棟建物や塀などの構造物の日射遮蔽の影響を考慮しながら樹木の有効な配置や樹種を検討できること。
- 2) 樹木や隣棟建物といった建築外部空間の構造物による日射遮蔽の影響を考慮しながら日射熱取得のための開口部を配置できること。
- 3) 蓄熱部位の配置, 構成材料の決定において, 室内への日射の入射量及び蓄熱部位における受熱日射量の分布を考慮できること。

* 東京工業大学大学院 大学院生・修士(工学)
(日本学術振興会 特別研究員 DC)

** 東京工業大学 准教授・博士(工学)

*** 放送大学 教授・工博
(東京工業大学 連携教授)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
(JSPS Research Fellow DC)
Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., The Open University of Japan, Dr. Eng.
(Visiting Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.)

まず、室温、熱負荷の予測については小玉ら⁴⁾や長谷川ら⁵⁾のダイレクトゲインシステムにおける性能予測、SMASH⁶⁾やEnergyplus⁷⁾等の汎用的な熱負荷計算ツールによる室温、熱負荷の予測が挙げられる。以上の手法における建築外部空間の扱いに着目すると、ダイレクトゲインシステムにおける性能予測については建築外部空間の構成物や樹木による日射遮蔽によって形成される熱放射環境が開口部の集熱性能や蓄熱部位の蓄熱性能に及ぼす影響については示されていない。また、汎用的な熱負荷計算では建築外部空間の取り扱いに関して隣棟建物との距離や高さ等を簡易なパラメータで扱うものと、投影図的な解析を行うものがみられる。これらの手法では、樹木のような複雑な形状や日射透過性を有する構成物に関する扱いは示されていないこと、遮蔽物の影響を考慮した日射量を建物熱負荷計算のモデルの外表面毎に平均化して入力していることから、樹木の日射遮蔽の影響を含めた室内の透過日射量の分布の考慮が課題といえる。

一方で、樹木を含めた建築外部空間の熱放射環境を考慮した建物熱負荷計算手法として、樋口ら⁸⁾が日射遮蔽の影響と長波長放射を考慮した熱負荷計算手法を提案し、樹木の配置、形状、日射透過率の違いが建物熱負荷に及ぼす影響を示している。また、筆者らは建築外部空間の表面温度計算を行う熱収支シミュレーション(3D-CAD 対応熱環境シミュレータ⁹⁾)と建物熱負荷計算の連成手法の開発を行っている⁹⁾。この連成手法では建築外部空間の全表面をメッシュ分割したうえで熱収支計算に基づき、外表面の吸収放射量を算出し、建物熱負荷計算の面毎の平均値を建築外表面の面毎にその平均値を境界条件として与えて熱負荷計算を行うことにより、建築外部空間の熱放射環境を考慮した建物熱負荷を算出する。しかし、いずれの手法も蓄熱部位の配置や仕様が室温変動に及ぼす影響を予測することは対象としておらず、室内に透過した日射の取り扱いが課題である。

2.2 性能予測方法のアルゴリズム

本研究では、樹木の配置、樹種や開口部、蓄熱部位の配置を検討することから、既往の熱収支シミュレーションと建物熱負荷計算の連成手法⁹⁾のアルゴリズムにおいて、建築外部空間の全表面で行っていたメッシュ分割を室内の壁、天井、床(蓄熱部位を含む)の表面についても同じ空間分解能で行い、建築外表面の日射量分布や表面温度分布に加えて、室内表面の直達日射量分布を算出するように改良を行う(図1)。室内については日射熱取得と蓄熱部位の吸収日射量が室温、熱負荷に及ぼす影響を予測することを目的とするため、従来の建物熱負荷計算と同様に各室を一質点として扱う。具体的なアルゴリズムについては以後に示す。

(1) 建物外表面の吸収放射量と表面温度算出

既往の熱収支シミュレーション⁹⁾による表面温度の算出アルゴリズムと同様に、3次元の形状を再現した建物、樹木、屋外構造物及び2次元の地表面の全表面をメッシュ分割し、外表面の熱収支解析を行う。熱収支解析では各メッシュの質点において建築外部空間の表面の熱収支計算(直達日射、天空日射、反射日射、大気放射、周辺地物との長波長放射の授受^{注1)}、対流熱伝達、潜熱輸送、式①)と各面断面方向の1次元非定常熱伝導計算を行う。本研究ではこの熱収支解析で得た建物外表面の吸収放射量(式②)を建物熱負荷計算の境界条件として用いる。

$$I + R_0 + R_1 + Q_H - Q_E - Q_G = 0 \quad \dots \text{式①}$$

$$q(t, m, j) = I + R_0 + R_1 \quad \dots \text{式②}$$

t : 建物番号, m : 面番号, j : 質点番号, $q(t, m, j)$: 建物 t , 外表面 m , 質点 j における吸収放射量[W/m²], I : 吸収日射量 [W/m²], R_0 : 大気放射量[W/m²], R_1 : 長波長放射量[W/m²], Q_H : 対流熱伝達量[W/m²], Q_E : 潜熱輸送量[W/m²], Q_G : 伝導熱量[W/m²]

(2) 室内表面の吸収日射量の算出

既往の建物外表面における熱収支計算のアルゴリズムを室内まで拡張し、室内表面の各メッシュの中心から太陽方向へのレイトレーシングにより室内に入射する直達日射量の分布を算出する。隣棟建物の日射遮蔽だけでなく、樹木の複雑な形状による日射遮蔽や樹冠内の日射透過距離の違いも考慮可能としている。算出した直達日射量の分布は可視化することで、蓄熱部位の配置等について検討することもできる(図9, カラー頁)。なお、直達日射の室内への透過についてはガラス窓面における指向透過特性を計算に組み込んでいる。

図1 本解析のフロー

図2 室内表面の吸収日射量の算出

本方法では、最終的に多数室の建物熱負荷計算において各室を一つの質点として扱うことから、計算負荷削減のため、壁、天井、床（蓄熱部位を含む）の直達日射量の分布は熱負荷計算の面毎に平均化し、一質点化する。さらに、算出した各面毎の直達日射量は、室内表面を拡散面と仮定し^{注2)}、Gebhart の放射吸収係数法（式③）により相互の多重反射を考慮したうえで他の面に分配する（図2、式④）。

$$R_{ij} = (1 - \rho_j)ID_j + \sum_{k=1}^N R_{kj} \rho_k ID_k \quad \dots \text{式③}$$

$$JD_m = (1 - \rho_m)ID_m + \sum_{k=1}^N R_{km} \rho_k ID_k \quad \dots \text{式④}$$

JD_m : 室内表面 m の吸収日射量（直達日射に由来する成分）[W/m²]、 ID_m : 室内に透過し m 面に入射した直達日射量 [W/m²]、 R_{ij} : 面 i からの放射量のうち面 j で吸収される割合、 F_{ij} : 面 i から見た j の形態係数、 ρ_j : 面 j の日射反射率

室内に透過する天空日射量については天空率が周辺建物や樹木によって著しく減少する場合にその影響を考慮する必要があり、直達日射量と同様のレイトレーシング法による算出方法も想定できる。しかし、天空の全方向（立体角 2π ）へのレイトレーシングを行う場合、1 メッシュあたりの探索線の本数が増大すること、また室内に透過する全日射量に占める割合が小さいことから、天空から開口部への入射量（(1)で算出、天空率を考慮）に日射透過率を乗じた透過量を Gebhart の放射吸収係数法で他の室内表面に分配することとする（図2、式⑤）。反射日射量についても室内に透過する全日射量に占める割合は相対的に小さいと考え、天空日射と同様の手法とする。

$$JS_m = \sum_{k=1}^N R_{km} \rho_k IS_k \quad \dots \text{式⑤}$$

JS_m : 室内表面 m の吸収日射量（天空・反射日射に由来する成分）[W/m²]、 IS_k : 窓面 k から透過した天空日射量、反射日射量 [W/m²]

(3)室温・熱負荷の算出

(1)(2)での建物外表面の吸収放射量、室内表面の吸収日射量の算出結果を室温、熱負荷計算に反映させるため、壁体の熱伝導計算において建物外表面側の境界条件については、(1)の解析で得たメッシュごとの受熱放射量を面毎に平均化した値（式⑥）を、室内側の吸収日射量については(3)で算出した値（式⑦）を時系列で入力して多数室熱負荷計算を行う（図3）。壁体や屋根、床の熱伝導については1次元非定常熱伝導方程式を後退差分法により解く。本手法では熱伝導を1次元として扱い、蓄熱部位と床の境界における熱移動については扱わないこととする。さらに室温・熱負荷の算出に関しては空間毎に一つの質点を設定し、室数の次元の連立方程式を立てて多数室計算を行う（式⑧）。換気量は換気回数法により与える。また、ダイレクトゲインシステムを考える場合、吹抜けのある居室に大面積の開口部を配置して2階からも日射を得る方法も想定できるが、上下温度分布を考慮した計算が課題であり、本研究では単一階の居室を性能予測の対象とする。

図3 本方法における室温・熱負荷の算出

$$Q_{out}(t,m) = \left(\sum_{j=1}^{L(t,m)} q(t,m,j) \right) / L(t,m) \quad \dots \text{式⑥}$$

$$Q_{in}(t,m) = JD_m + JS_m \quad \dots \text{式⑦}$$

$$Mr_j \frac{d\theta_j}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{wj}} \alpha_{c(1)ij} A_{wij} (\theta_{1,ij} - \theta_j) + C_{py} Q_{oj} (\theta_a - \theta_j) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^{N_r} C_{py} Q_{rj} (\theta_n - \theta_j) + Lc_j - H_j \quad \dots \text{式⑧}$$

Nr : 建物の室数、 N_{wj} : j 室の室構成壁面数、 $Q_{out}(t,m)$: 建物 t 、外壁面 m において平均化された吸収放射量[W/m²]、 $Q_{in}(t,m)$: 建物 t 、室内表面 m において平均化された吸収日射量[W/m²]、 $L(t,m)$: 建物 t 、外壁面 m における全質点数、 Mr_j : j 室の熱容量(空気+家具)[J/K]、 θ_j : j 室の室温[°C]、 $\alpha_{c(1)ij}$: j 室 i 壁面の1内側表面对流熱伝達率[W/m²]、 A_{wij} : j 室 i 壁の面積[m²]、 $\theta_{1,ij}$: j 室 i 壁の表面温度[°C]、 C_{py} : 空気の容積比熱[J/m³・K]、 Q_{rj} : n 室から j 室に流入する空気量[m³/s]、 θ_{rn} : n 室の温度[°C]、 Q_{oj} : j 室の外気流入量[m³/s]、 θ_a : 外気温度[°C]、 Lc_j : j 室の室内発熱の対流成分[W]、 H_j : j 室の除去熱量[W]

3. 性能予測方法の誤差要因がダイレクトゲインシステムの室温変動に及ぼす影響

本研究では今回改良した部分における計算上の誤差要因を明らかにしたうえで、その室温への影響を明らかにする。本方法では、開口部を透過し、室内表面に入射する日射量をメッシュに分割して計算していることから、計算精度が空間分解能に依存し、誤差要因として挙げられる^{注3)}。空間分解能については、既往の熱収支解析では建物廻り～街区レベルのスケールの建築外部空間の熱放射環境の予測・評価を対象としていることから、200-500mm の空間分解能として解析してきたが、内壁で仕切られた室レベルのスケールの室温・熱負荷の予測に対して、この空間分解能による誤差が解析結果に及ぼす影響は大きいと予想される。

しかし、室内の放射解析の空間分解能を向上させることは建築外部空間の熱放射環境の評価における計算負荷を増大させるため、両者のバランスを考え、空間分解能によって生じる誤差がダイレクトゲインシステムの室温に及ぼす影響を予め把握することが必要であ

る。よって、この空間形態の再現性に起因する誤差要因が室温の解析結果に及ぼす影響を感度解析により示す。

感度解析では室の日射熱取得を左右する庇、開口部、蓄熱部位、隣棟建物の再現性が解析結果に及ぼす影響が顕著であることから、それぞれの局所的な誤差が解析結果に及ぼす影響を要素別に明らかにする。さらに、各要素の組み合わせによって生じる複合的な影響による誤差を、空間分解能を変化させて確認する。

3.1 解析条件

解析対象とする建物の基本型は日本建築学会の戸建住宅の標準問題¹⁰⁾に基づき作成し(図4)、ダイレクトゲインシステムの日射熱取得を想定した改良点として、居室には南に面した大面積の開口部と蓄熱部位を配置する。居間については日射熱取得の誤差が室温に及ぼす影響の生じやすい場合を想定し、居間の床面の南西側4分の1に蓄熱部位を配置している。蓄熱部位はコンクリートとし、その厚さは既往研究⁹⁾で示されている値を参考に150mmとした。建物周辺の地表面の材料は乾燥裸地とし、日射反射率は0.2と設定した(表1)。気象条件は冬季晴天日として標準気象データ(空気調和・衛生工学会、空調設備基準委員会作成)の東京のデータより、標準年1月23日のものを用いる。また、晴天日が連続し、蓄熱が室温変動に与える影響が顕著な状態を仮定し、計算は4日間助走計算させ、5日目の結果を周期定常解として採用している。内部発熱は上記の標準問題の計算条件と同様とする。また、換気回数も上記の標準問題の計算条件に基づき各室に終日0.5回/hを設定した。

3.2 感度解析の結果

(1) 開口部、庇、蓄熱部位、隣棟建物の再現性が室内の透過日射量と室温に及ぼす影響

開口部、庇、蓄熱部位については空間形態の再現性に局所的な誤差が生じた状況として、建物の基本型を200mm、100mmの空間分解能で解析する計算ケース(N-200, N-100)に対して、開口部の幅庇の出、蓄熱部位の設置面積が空間分解能に応じて異なる計算ケース(図5(A), (B), (C)のN-E200, E100, Win200, Win100, AC200, AC100)を設定し比較した。また、隣棟建物については比較のため計算ケースとして隣棟がある状況を想定し、100mmと200mmでの計算を行い(図5(D)のAD-100, AD-200)、その次に隣棟建物の高さが各々の空間分解能に応じて異なる計算ケース(図5(D)のAD-H100, AD-H200)を設定し、比較を行った。解析対象日において隣棟建物の影の端が開口部に到達するよう、隣棟建物との距離を南北8m、東西5mとし、解析対象の建物の周囲に配置する。

表2に各誤差要因が室内の透過日射量、蓄熱部位の吸収日射量、室温に及ぼす影響を示す。まず200mmで計算を行った場合、基準となる計算ケース(N-200, AD200)と開口部、庇、蓄熱部位の形状が異なる計算ケース(N-E200, N-Win200, N-AC200, AD-H200)とを比較した際の室温差は最大で0.4℃～1.1℃となる。同様に100mmの場合は0.2℃～0.6℃となる。このうち室温差への影響が大きいものは庇と隣棟建物であり、空間分解能200mmにおける室内に透過する直達日射量の差の最大値がそれぞれ332W、452Wと開口部の幅の違いに比べて相対的に大きい。この傾向は空間分解能100mmの場合も同様である。

図4 感度解析に用いる建物の基本型の平面図

表1 建物および地面の断面構成と熱物性値

部位	構成材料 (室内側から)	熱伝導率 [W/m・K]	容積比熱 [kJ/m³・K]	日射反射率 [-]	長波長放射率 [-]	断面厚 [mm]
外壁	石膏ボード	0.17	1030	0.4	0.95	12
	断熱材	0.04	20	-	-	100
	空気層	R=0.09m²K/W	-	-	-	30
	合板	0.19	715	-	-	9
	モルタル	1.51	1600	0.2	0.9	30
屋根	石膏ボード	0.17	1030	0.4	0.95	12
	断熱材	0.04	200	-	-	100
	空気層	R=0.09m²K/W	-	-	-	140
	合板	0.19	715	-	-	12
	スレート	1.2	1830	0.2	0.9	12
開口部	透明ガラス	0.17	1910	0.08	0.94	3
	空気層(複層ガラス)	R=0.05m²K/W	-	-	-	6
蓄熱部位	透明ガラス	0.17	1910	0.08	0.94	3
	タイル	1.4	2000	0.2	0.9	5
1階床	コンクリート	1.5	1940	-	-	150
	ポリスチレンフォーム	0.04	40	-	-	50
	土	1.05	3340	-	-	400
2階床	床板(合板)	0.16	800	0.4	0.9	10
	合板	0.19	715	-	-	12
	断熱材	0.04	200	-	-	45
	空気層	R=0.09m²K/W	-	-	-	400
	土	1.05	3340	-	-	400
2階床	カーペット	0.07	171	0.4	0.9	60
	合板	0.19	715	-	-	12
	空気層	R=0.09m²K/W	-	-	-	45
	石膏ボード	0.17	1030	0.4	0.95	400
地面	裸地(乾燥状態)	1.6	3340	0.2	0.9	1000

図5 誤差要因が室内の透過日射量・室温に及ぼす影響に関する感度解析のための計算ケース

(2) 空間分解能が室内の透過日射量と室温に及ぼす影響

図 5(E)に示すように、空間分解能を 200mm, 100mm としたとき (N-200, N-100) の室内の透過日射量の計算の誤差が室温に及ぼす影響を示すため、空間分解能がより詳細な 50mm, 20mm の計算結果 (N-50, N-20) との比較を行う (表 2, [D])。

200mm の空間分解能で計算した N-200 では、室内に透過した直達日射量は空間分解能 20mm の N-20 に比べ、最大 352W 大きく、室温は最大 0.6℃高い。一方で 100mm で計算した場合には 20mm で計算した場合との差の最大値は、直達日射量が 242W、室温は 0.3℃であった。また、解析対象日が晴天日であり直達日射量に対する天空日射量の割合が小さいこと、建築外部空間の日射反射率が小さいことから、室内に透過する天空日射、反射日射に生じる差は合計値で直達日射量の 10 分の 1 以下となっている。

以上の感度解析より、200mm の計算では室温の結果に最大で 1℃以上の影響を及ぼす場合のあることが確認できる。100mm の計算では、それが 0.6℃以内にまで抑えられるため、以後の解析では、これをメッシュ分割に伴う誤差範囲と位置づけ、空間分解能は 100mm として計算を行うこととする。

ただし、室の容積に対して開口部の面積が大きく空間分解能によって生じる誤差が顕著となる場合は 100mm 未満の分解能での計算や、直達日射計算の空間分解能を天空日射、反射日射より細かくし、異なる分解能で計算負荷を抑えた解析を行うことも想定される。

4. 建築外部空間の樹木がダイレクトゲインシステムの室温変動に及ぼす影響

本性能予測方法により、樹木の配置、樹高、落葉の有無の違いがダイレクトゲインシステムの性能に及ぼす影響を分析する。ここでは、南鉛直面からの日射熱取得量が大きく、蓄熱部位への日射の照射に対する樹木や隣棟建物からの日射遮蔽の影響が顕著で、室内の広範囲に及ぶ冬季晴天日を対象とする。また、樹木の配置や樹高と、蓄熱部位の配置の組み合わせによって蓄熱部位の受熱日射量が異なることから、室内の蓄熱部位の配置にパターンを設定し分析を行う。

4.1 解析条件

樹木を建物の南面に配置したモデルを設定し、樹木の樹高 (5m, 10m) に応じて図 6 のパターン T5d, T5e, T10 を作成する。T5d, T5e は室内への透過日射が樹木によって遮られる状況を想定し、樹高 5m の樹木を 3 本配置している。T5d については樹木の配置、形状による影響が顕著となる状況として常緑樹を想定したパターン、T5e は T5d と樹木の配置・形状は同一であるが冬季の日射熱取得を考慮し、落葉樹を想定している。T10 は南側の開口部に対して冬季の日射遮蔽の影響が少なく、夏季にできるだけ広範囲の建築外部空間に日射遮蔽を行うための樹木として、樹高 (10m) と葉張り(7m) の大きい常緑樹を想定している。なお、樹木の日射透過率は筆者らの既往研究⁹⁾や樋口らの研究⁸⁾における設定を踏まえ、常緑樹 0.1、落葉樹 0.8 とした。

建物の基本型については先の感度解析と同様の理由から、日本建築学会標準問題に基づいた計算ケースとした。ただし、室内の蓄熱部位の配置のパターンとして図 6 の A0~A3 を設定する。A1 は蓄熱部位を床全面に配置しているパターンで、A2, A3 は蓄熱部位の面積の違いが室温変動に及ぼす影響を確認するためのパターンである。

蓄熱部位の位置の影響を確認するために、A2 は南半分への配置、A3 は西半分への配置としている。A0 は比較用のパターンで蓄熱部位を配置していない。

本研究では樹木の配置、樹高、落葉の有無の異なる N, T5d, T5e, T10 のそれぞれに対して、室内のパターンを組み合わせた 16 個の計算ケースを作成し比較する。個々の計算ケースの記号は N・A1 のように示す。気象条件は冬季晴天日で、樹木による日射遮蔽が室温変動に及ぼす影響の大きいと想定される日として、標準気象データ (空気調和・衛生工学会, 空調設備基準委員会作成) の東京のデータより、標準年 1 月 23 日のものを用いる。内部発熱は戸建て住宅の標準問題¹⁰⁾に基づき設定した。また、換気回数は各室に終日 0.5 回/h を設定した。

表 2 誤差要因が室内に透過する日射量・室温に及ぼす影響の感度解析結果

[A]底の出、開口部の幅の違い

	室内に透過する 直達日射量の差		室内に透過する 天空・反射日射量の差		室温の差	
	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[℃] (時刻)	平均 [℃]
[N-E200]-[N-200]	-332 (13:00)	64	-13 (11:45)	4	-1.1 (14:15)	0.6
[N-E100]-[N-100]	-195 (12:45)	37	-8 (11:30)	2	-0.6 (14:30)	0.3
[N-Win200]-[N-200]	-209 (14:15)	47	-11 (12:30)	3	-0.6 (15:15)	0.4
[N-Win100]-[N-100]	-96 (14:45)	15	-1 (10:45)	0.1	-0.4 (15:00)	0.2

*平均はそれぞれの差の絶対値に対する平均値

[B]隣棟の高さの違い

	室内に透過する 直達日射量の差		室内に透過する 天空・反射日射量の差		室温の差	
	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[℃] (時刻)	平均 [℃]
[AD-H200]-[AD-200]	-452 (12:15)	48	-6 (13:45)	0.8	-0.9 (14:45)	0.4
[AD-H100]-[AD-100]	-308 (11:30)	38	-3 (14:00)	0.4	-0.6 (13:15)	0.3

*平均はそれぞれの差の絶対値に対する平均値

[C]蓄熱部位の大きさの違い

	蓄熱部位の 吸収日射量の差		室温の差	
	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[℃] (時刻)	平均 [W]
[N-AC200]-[N-200]	230 (11:30)	48	-0.4 (14:00)	0.3
[N-AC100]-[N-100]	98 (11:45)	20	0.2 (5:45)	0.1

*平均はそれぞれの差の絶対値に対する平均値

[D]空間分解能の違い

	室内に透過する 直達日射量の差		室内に透過する 天空・反射日射量の差		室温の差	
	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[W] (時刻)	平均 [W]	最大[℃] (時刻)	平均 [℃]
[N-200]-[N-20]	-352 (13:45)	49	-21 (11:45)	6	-0.6 (16:15)	0.3
[N-100]-[N-20]	-242 (12:00)	31	-7 (11:45)	2	-0.3 (10:15)	0.1
[N-50]-[N-20]	-136 (12:30)	16	-4 (11:45)	1	-0.1 (12:45)	0.01

*平均はそれぞれの差の絶対値に対する平均値

図6 建築外部空間と室内の蓄熱部位の配置の組み合わせによる計算ケース

表3 各計算ケースと建築外部空間のパターン、室内の蓄熱部位の配置パターンの対応関係

計算ケース名	建築外部空間のパターン	室内の蓄熱部位の配置パターン
N-A0 N-A1 N-A2 N-A3	N(樹木無)	A0(蓄熱部位無) A1(蓄熱部位床全面) A2(蓄熱部位南半分) A3(蓄熱部位西半分)
T5d-A0 T5d-A1 T5d-A2 T5d-A3	T5d(樹高5mの樹木3本, 日射透過率0.8)	A0(蓄熱部位無) A1(蓄熱部位床全面) A2(蓄熱部位南半分) A3(蓄熱部位西半分)
T5e-A0 T5e-A1 T5e-A2 T5e-A3	T5e(樹高5mの樹木3本, 日射透過率0.1)	A0(蓄熱部位無) A1(蓄熱部位床全面) A2(蓄熱部位南半分) A3(蓄熱部位西半分)
T10-A0 T10-A1 T10-A2 T10-A3	T10(樹高10mの樹木1本, 日射透過率0.1)	A0(蓄熱部位無) A1(蓄熱部位床全面) A2(蓄熱部位南半分) A3(蓄熱部位西半分)

図7 各計算ケースにおける外表面の日積算入射日射量と冬季晴天日10時の表面温度分布

図8 建築外部空間の樹木が室温の変動に及ぼす影響

図9 室内に入射する直達日射量の日積算値分布(冬季晴天日)

4.2 樹木による日射遮蔽が室温に及ぼす影響の解析結果

樹木の配置、樹高、日射透過率の違いが室温変動に及ぼす影響を示す。図7はN-A1、T5d-A1、T5e-A1、T10-A1の表面温度分布と外表面における入射日射量分布（日積算値）を、図8は各計算ケースの室温変動を示している。

まず、建物外表面の受熱日射量分布と表面温度分布に及ぼす影響に着目すると、樹高5mの常緑樹が3本あるT5e-A1は日射遮蔽の影響を午前中に受け、10時にはその影響が南側壁面の約半分及び、外壁の表面温度は最も低い場所で気温と同等になっている。一方で、落葉樹を想定し、日射透過率を0.8としたT5dでは、南側壁面の10時の表面温度は日射遮蔽の影響が最も顕著な外壁表面においても気温より15℃高い。また、樹高が10mあり、樹冠下高さを高くしたT10-A1では、日射遮蔽の影響が2階の南側壁面と屋根の広範囲に及び、10時の表面温度は日射遮蔽の影響が最も表れている建物西側上部で、気温相当となっている。

次に樹木の配置、樹高、日射透過率の違いによる居間の日射熱取得の違いが室温に及ぼす影響に着目すると、T5e-A1は常緑樹の日射遮蔽により居間の開口部の東側半分で日射遮蔽の影響が顕著であるが、樹木のないN-A1に比べて開口部の日射熱取得の減少は日積算で23%であり、室温は最大で4℃低下している。一方で、室温が最小となる朝7時に着目すると、T5e-A1、T5e-A2、T5e-A3では常緑樹の日射遮蔽により、樹木のない場合に比べ室温は1℃低い。また、蓄熱部位の配置のないT5e-A0と比べて2～3℃高い。樹木の日射透過率の高いT5d-A1や樹冠下高さの高いT10-A1では、N-A1に比べてそれぞれ開口部の日射熱取得は日積算で4%、8%の減少にとどまり、室温の低下も日中に最大で1、2℃である。

4.3 蓄熱部位の配置・面積が室温に及ぼす影響の解析結果

図9は樹木のないN-A2と樹高5mの常緑樹を配置したT5e-A2における室内表面に入射する直達日射量の分布である。図10は各計算ケースの室温の最小値、平均値、最大値と蓄熱部位の吸収日射量（日積算値）の関係を示している。

まず、室内へ入射する直達日射の分布に着目すると、図9に示すようにN-A2に入射する直達日射量は床の南側の中央部において6 MJ/(day・m²)以上となる。その結果、N-A2はN-A1に比べて蓄熱部位の面積が半分であるが、その吸収日射量の日積算値は居間の日射熱取得の45%で、床全面に蓄熱部位を配置したN-A1の78%となる。一方で樹木が配置されたT5e-A2の直達日射の入射量の分布に着目すると、床に入射する直達日射量が東半分で最大1.7 MJ/(day・m²)減少し、図10に示すT5e-A2の蓄熱部位の吸収日射量はN-A2に比べ19%減少している。

以上を踏まえ、蓄熱部位の面積が室温変動に及ぼす影響に着目すると、床全面に蓄熱部位を配置したN-A1は、蓄熱部位を配置していないN-A0に比べ室温の変動幅が11℃小さい(図10)。N-A2は蓄熱部位を床全面に配置したN-A1に比べて蓄熱部位の面積が半分であるが、日射の当たりやすい南半分の配置であることから室温の変動が抑制され、N-A0と比べた室温の変動幅の差は8℃となる。この傾向は樹木が配置された場合でも同様であり、T5e-A1、T5e-A2の室温の変動幅は、蓄熱部位を配置していないT5e-A0に比べ室温の変動幅が7～9℃小さい。

図10 各計算ケースにおける室温の最大、平均、最小値、蓄熱部位の吸収日射量（日積算値）

次に、蓄熱部位の配置の違いが室温変動に及ぼす影響に着目すると、西半分に蓄熱部位があるN-A3と南半分に蓄熱部位のあるN-A2の2つの計算ケースにおける蓄熱部位の吸収日射量の差は16MJ/dayであり、N-A3の室温の変動幅はN-A2に比べて2℃大きい。それに対し、樹木が配置されたT5eの場合、室内の東側の床面が日射遮蔽され、蓄熱部位の配置A2とA3の吸収日射量の差が10MJ/dayと減少する。樹木のない場合に比べて吸収日射量が小さくなったことで、T5e-A2とT5e-A3における室温の変動幅の差もより小さくなり、1℃となる。以上から、樹木と蓄熱部位の配置の違い及び、その組み合わせによる室温への影響がメッシュ分割による誤差範囲より大きいことがわかり、本手法によってダイレクトゲインシステムの性能の検討が可能なが示された。

5. 結論

既往の建築外部空間における熱収支シミュレーションと建物熱負荷計算との連成手法において、室内への透過日射の取り扱いを改良することにより、樹木によって形成される建築外部空間の熱放射環境を考慮したダイレクトゲインシステムの性能予測方法を示した。

また、本性能予測方法において、改良を行った室内表面に入射する直達日射量の解析に含まれる空間分解能に起因する誤差要因を示し、0.6℃を空間分解能100mmのメッシュ分割における誤差範囲として位置づけた。さらに、本性能予測方法の有効性を示すために、樹高、配置、落葉の有無の異なる樹木によって形成される熱放射環境が冬季のダイレクトゲインシステムの性能に及ぼす影響として以下の結果を得た。

- ・ 樹木の樹高、配置、落葉の有無の異なる計算ケースにおいて日射熱取得が室温に及ぼす影響を解析した結果、樹木の日射遮蔽による室温への影響は1～4℃となった。樹木の樹高が高い常緑樹を想定した計算ケースでは、日射遮蔽の影響が2階から屋根までの広範囲に及び、表面温度が気温相当となる部分も見られるが、落葉樹を想定した計算ケースでは表面温度への日射遮蔽の影響は小さい。
- ・ 開口部の南側に樹高の低い常緑樹が配置された状況において蓄熱部位を配置した場合、室内の日射熱取得量の減少による居間

の室温の低下は最大で4℃であり、朝方における室温の低下は最大で1℃にとどまる。

- 蓄熱部位を日射の照射位置に応じて南半分に配置することで、居間の室温変動幅は蓄熱部位を全面に配置した場合に比べて3℃の増加にとどまる。これは蓄熱部位を配置しない場合に比べて7~9℃小さい。
- 室内に入射する直達日射量の分布を踏まえ、蓄熱部位を南半分に配置した場合、西半分に配置した場合に比べていずれの樹木のパターンでも蓄熱部位の吸収日射量が増加し、室温の変動幅が1~2℃小さくなった。

以上のように、本方法によって、樹木の日射遮蔽を受ける状況での蓄熱部位の配置がダイレクトゲインシステムの性能に及ぼす影響を検討できることを示した。

今後は冬季とともに夏季の日射熱取得と室温に及ぼす影響についても検討し、夏季と冬季の両方に適した樹木配置と形状を明らかにする。また、建物に関しては吹抜を有する居室でのダイレクトゲインの性能予測を行うため、上下温度分布を考慮した室温の予測モデルや、潜熱蓄熱材や床暖房に対応した伝熱モデルを適用し、本方法の適用範囲を広げていく予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費（課題番号 24・9196）の支援を受けた。また、本研究の一部は馮新淇君（当時、東京工業大学大学院生）の修士論文の一環として実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 例えば、近藤武士，射場本忠彦ほか：潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システムに関する研究 潜熱蓄熱ボードの性能把握および適用効果の検討，日本建築学会計画系論文集，No.540，pp.23-29，2001.2
- 金秀耿，河野良坪，佐藤誠，金田一清香，赤嶺嘉彦，前真之，坂本雄三：日射ダイレクトゲインとヒートポンプを利用した蓄熱式床暖房システムの省エネルギー性能，第1報 実験システムの紹介と取得日射量の検証，日本建築学会環境系論文集，No.660，pp.169-176，2011.2
- 梅干野晃，浅輪貴史，中大窪千晶：3D-CADと屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール 日本建築学会技術報告集 第20号，pp.195-198，2004.12
- 小玉祐一郎，武政孝治：設計支援を目的としたパッシブソーラーシステム予測技法，日本建築学会計画系論文報告集，No.374，pp.44-53，1987.4
- 長谷川房雄，吉野博，石川善美，松本博：パッシブソーラーシステムの直接熱取得方式における各種要因の数値シミュレーションによる分析—気候条件および断熱，集熱，蓄熱条件の冬期の室温への影響—，日本建築学会計画系論文報告集，No.383，pp.8-14，1988.1
- 例えば，坂本雄三，暖冷房消費エネルギー評価プログラム・SMASH，IBEC，No.49 pp.25-29
- US Department of Energy：Energy Plus Engineering reference <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>，2013.1.31 参照
- 樋口佳樹，宇田川光弘，佐藤誠，木村建一：建築屋外における日射と長波長計算のモデル—周囲環境を考慮した住宅の熱負荷シミュレーションに関する研究 その1—，日本建築学会環境系論文集 No.544，pp.9-15 2001.6
- 浅輪貴史，梅干野晃：屋外の空間形態と構成材料を考慮した建築伝熱シミュレーションモデルの開発 日本建築学会環境系論文集 第578号，pp.47-54，2004.4
- 宇田川光弘：標準問題の提案 住宅用標準問題 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム資料，pp.23-33，1985.9
- 中大窪千晶，梅干野晃，浅輪貴史，深澤英之：屋外熱収支シミュレーションにおける建築材料の日射特性を考慮した放射伝熱計算モデルの導入，日

本建築学会環境系論文集，Vol.73，No.625 pp.275-282，2008.3

- 12)一ノ瀬雅之，石野久彌ほか：指向特性を考慮した放射伝熱計算法，IBPSA-Japan 講演論文集，2005

注

- 注 1) 建築外部空間の熱放射解析については直達，天空，反射日射はレイトレース法により算出し，反射日射については鏡面・拡散成分とも1次反射まで考慮している。長波長放射については①建物などの周辺地物の表面温度を気温同等とみなして第1次の熱収支計算を行い，表面温度の近似値の時系列変化を得る②得られた表面温度の近似値を利用し，各メッシュから周辺に向け探索線を射出し，到達地点の表面温度値を取得し，周辺メッシュからの長波長放射の時系列変化を得る。
- 注 2) 建築材料の日射反射の指向性については中大窪ら¹¹⁾，一ノ瀬ら¹²⁾の実測によって物性が確認されているが現状では建築材料の日射反射の指向性に関する情報については十分に整備されていない。床面での反射日射を想定すると反射日射の照射面において，反射面での入射角，鏡面反射率，形態係数が乗じられること，本計算ではその照射量が熱負荷計算の面で平均化されること，鏡面反射の照射時間が一時的であることを想定すれば，室温変動への影響は小さいと考える。
- 注 3) 他にも既往手法^{3),9)}との相違として，室内表面に入射する直達日射の探索の始点が異なる（既往手法：外壁等の外表面，本手法：床等の室内表面）であり各室の日射熱取得の値に差が生じることが挙げられる。この差を解消するためには本手法で算出した日射熱取得を外表面の受熱日射量に基づき算出された日射熱取得量（既往手法）で補正することも考えられる。補正を行った場合，室温の最大値について空間分解能200mmで0.3℃，100mmで0.1℃程度，最小値については空間分解能200mm,100mmいずれの場合でも0.1℃未満の差が生じることを確認している。本研究では室温に与える影響は小さいとし，補正しない値で解析を行う。

（2013年4月10日原稿受理，2013年7月29日採用決定）