

隣棟の影響を考慮した短波・長波放射計算モデルの開発

岡本 孝二

1. はじめに

1.1 研究背景

快適でエネルギー消費の少ない住宅を実現するには、ダイレクトゲインによる照明負荷、暖房負荷の削減や、日射遮蔽による冷房負荷の削減が有効である。しかし、近年敷地間隔が狭い都市部では、低層住宅地であっても隣棟の影響は無視できない。夏季においては隣棟が日射遮蔽物となり、遮熱効果を発揮し冷房負荷の削減につながる場合がある。また、高層建築物において空調機器を配置するときに、どの階層までが隣棟の影響を大きく受けるのか、または影響をあまり受けないのかを考慮する必要がある。よって、隣棟の影響を考慮した熱環境解析が重要である。本研究では、建築温熱環境を解析するために THERB for HAM (以下 THERB) を開発している。既存の THERB では当該建物の庇や軒等による日影面積を考慮した入射日射量の計算は可能であり隣棟の影響による入射直達日射量の軽減は考慮されているが、地表面や隣棟からの長波放射の詳細な影響は考慮されていない。隣棟による形態係数の変化、地表面、隣棟の表面温度を考慮した長波放射の解析が課題である。

既存の THERB では、隣棟において屋根などの水平面からの形態係数をそれぞれ算出し精度を確かめ、鉛直面からの形態係数も算出してはいたが、地表面をみる形態係数は 0.5 としており、詳しく算出されていなかった。また、地表面と隣棟の表面温度は外気温のままであった。地表面の形態係数も求めるため、外壁や窓などの鉛直面からの形態係数算出方法に再検討の余地がある。さらに、このプログラムを THERB に組み込んだ際の影響についても深く考察されていない。

1.2 研究目的

本研究では、THERB 上で隣棟を考慮した形態係数算出と地表面温度の算出、隣棟の表面温度を行うプログラムを開発した。また、福岡県福岡市にある高層建築物において、地上階、中間階 (30m)、最上階 (60m) において解析を行い、形態係数、地表面温度、隣棟表面温度の影響が各階層において、どれほど影響するかを測定した。

2. 地表面、隣棟表面温度算出プログラム

2.1.1 地表面温度算出と妥当性の検証(地中温度図)

本研究に用いる地表面の温度は尹らによる既往研究で尹らりが開発したプログラムを用いて算出した。次に、地表面温度の妥当性の検証を行う。今回は地中温度が地下深くで、恒温になることを確認する方法を用いる。以下の図 1 に各月

の地中温度図を示す。

図 1 を見てみると、どの月も地中約 10m の地中温度は約 14°C となり、恒温になっていることが確認される。この結果により、算出された地表面温度は妥当であることが確認できる。

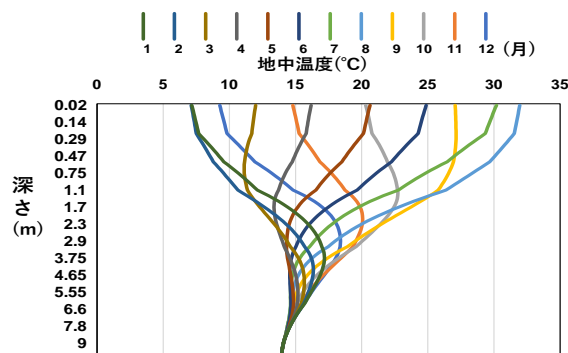


図 1 各月の地中温度(°C)

2.2 隣棟表面温度算出

今回は隣棟の表面温度を解析対象の外壁の平均温度とする。各時刻ごとに外壁表面温度の平均を算出し、次の計算時刻にその値を隣棟の表面温度として代入し計算する。なお、最初の時刻の隣棟表面温度は外気温とした。

3. 形態係数算出プログラム

隣棟を考慮した形態係数算出を行うプログラムを形態係数算出プログラムとよぶ。

3.1 概要

形態係数とはある面から放出されたエネルギーが別の面に到達する割合を示した係数である。図 2 に示す $S''/\pi r^2$ にあたる。例えば天空をみる形態係数とは、建物の外皮から法線方向を見たときに天空が見える割合である。本研究においては高層建築物の階層ごとの形態係数を算出し、その推移による拡散日射や実効放射などの影響を解析する。

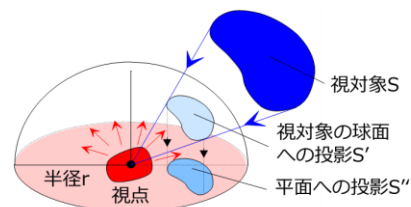


図 2 形態係数の定義

外皮から見た天空、隣棟、地面をみる形態係数をそれぞれ F_s, F_b, F_g とすると、天空による日射量 I_s 、地物反射による日射量 I_R 、外皮表面の長波放射収支 q_s は次式となる。 q_s は外皮が外気と地物から熱を受け取る方向を正としている。形態係

数算出プログラムによって、隣棟の影響を反映させた F_s, F_b, F_g を算出する。これらを次式に代入する。

$$IS = I_s F_s$$

$$IR = (I_D \cos i + I_s) \rho (F_b + F_g)$$

$$q_s = \alpha_r (T_o - T_s) - \varepsilon_s F_s J_N$$

$$+ \varepsilon_s F_b (\varepsilon_b \sigma T_b^4 - \sigma T_o^4)$$

$$+ \varepsilon_s F_g (\varepsilon_g \sigma T_g^4 - \sigma T_o^4)$$

I_s, I_D : 水平面天空、法線面直達日射量[W/m²], i : 直達入射角[°],
 ρ : 地物のアルベド[-], α_r : 放射熱伝達率[W/m²K],
 T_o, T_s, T_b, T_g : 外気、外皮、地面、隣棟表面絶対温度[K], ε_s : 外皮表面長波放射率[-],
 J_N : 夜間放射量[W/m²], σ : ステファン・ボルツマンの定数[W/m²K⁴],
 $\varepsilon_b, \varepsilon_g$: 地面、隣棟長波放射率[-]

THERB においては屋根、外壁、窓といった外皮の要素毎に熱収支を計算しており、形態係数は外皮の各要素を中心点として算出することが望ましい。そのため、形態係数は屋根などの水平面から法線方向を見た場合と、外壁や窓などの鉛直面から法線方向を見た場合に分けてそれぞれ算出した。

3.2 水平面から法線方向を見たときの形態係数算出方法

3.2.1 判定点の作成

図3に判定点の概要図を示す。外皮（屋根等）の中心点を原点とし、計算する外皮の水平面をXY平面とし、原点を中心とする半径 r の半円を作成する。半径 r の値については既往研究で最終的な結果に影響を及ぼさないと判明しているので、任意の値を用いる。次にXY平面上にある底面を奥行方向（原点からの距離）と回転方向に分割する。本研究では計算負荷と精度の面から奥行方向を100分割、回転方向を360分割し、合計36,000分割し各点にXY座標を与える。平面座標の与えられた各点に原点からの距離が r となるようにZ座標を与えてゆき、XY平面を底面とした半球を作成する。また、形態係数の算出を容易にすることを目的として、半球底面の一つ一つのマス面積は等しくした。結果、原点を中心とした点が半球状に分布する、またこれらの各点を判定点と呼ぶ。そして36000個の判定点にそれぞれ $cntg$ （地面カウント関数）、 $cntb$ （隣棟カウント関数）という関数を設け、 $cntg = 0$ なら地面なし、 $cntg = 1$ なら地面ありの判定にし、 $cntb = 0$ なら隣棟なし、 $cntb = 1$ なら隣棟ありの判定にする。次に原点座標に合わせて隣棟座標も読み込み調整する。ここで、原点を中心としてY軸上の負の方向（南）を0度とし、時計回りにX軸上の負の方向（西）を90度、Y軸上の正の方向を（北）180度、X軸上の正方向（東）を270度としてXY平面上の回転方向で変化する角度を方位角(0度から360度)と呼ぶ。原点を中心としてXY平面上を0度としZ軸上の角度を90度とする高さ方向で変化する角度を仰角(0度から90度)と呼ぶ。これまでの過程で判定点はXYZの座標が与えられているので、各判定点の方位角、仰角を求めておく。以下図3に方位角、仰角の概要も示す。次に隣棟の

座標から方位角を求め、その中から最大方位角、最小方位角を定める。また隣棟間の方位角ごとで隣棟の最も大きい仰角を $angb$ とする。ここで、最大方位角と最小方位角がY軸の負の方向をまたいでいると、計算上エラーが発生するので分けて判定する。

$Thetatheta$ =最大方位角-最小方位角

という値を設定し、各隣棟ごとに求めておく。 $Thetatheta < 180$ であればY軸の負の方向をまたがないと(A)、 $Thetatheta > 180$ であれば、またごと(B)という判定である。

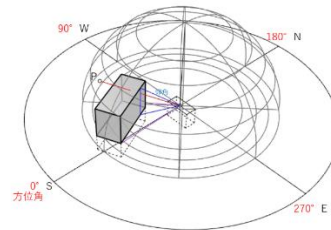


図3 水平面から法線方向を見る形態係数算出

3.2.2 水平面外皮から見た天空、隣棟、地面判定方法

$Thetatheta$ の判定(A)の場合

(1) 最小方位角 \leq 判定点方位角 \leq 最大方位角 の時
 この時判定点と原点との間に隣棟がある可能性がある。そこでさらに隣棟の仰角と、判定点の仰角を比べ、

$$0 < \text{判定点仰角} < \text{angb} \quad (a)$$

である時、原点と判定点の間に隣棟があるので $cntb = 1$ とする。そうでなければ $cntb = 0$ としこれを工程 (a) とする。

(2) (1)の時以外

この時判定点と原点の間に隣棟がある可能性がないので $cntb = 0$ とする。

$Thetatheta$ の判定(B)の場合

(1) $0 \leq$ 判定点方位角 \leq 最小方位角 の時

同様に工程(a)を行う。

(2) 最大方位角 \leq 判定点方位角 < 360 の時

同様に工程(a)を行う。

(3) (1)(2)以外の時

この時判定点と原点の間に隣棟がある可能性がないので $cntb = 0$ とする。

また、地面に関しては水平面から法線方向を見たとき、地面は見えないので判定点において $cntg = 0$ とする。これらを各隣棟ごと、全判定点で行う。天空、隣棟、地面をみる形態係数をそれぞれ F_s, F_b, F_g とすると定義上係数 F_g は0となる。形態係数は合計が1になるので、次式に表せる。²⁾

$$F_s = 1 - F_b$$

$$F_b = (\text{cntb} = 1 \text{ の判定点の合計}) / \text{半球面全判定点数}$$

3.3 鉛直面から法線方向を見たときの形態係数算出方法

3.3.1 判定点の作成

図4に概要図を示す。XYZの座標系は変えず、各壁面の方位ごとに分けて半球を作成する。例えば西側に面する壁面の形態係数を算出したい場合、壁面の中心座標を原点とし、YZ平面を底面としてX軸の負の方向に高さをもつ半径rの半球を作成する。水平面の時と同様に分割を行い、判定点を作成し、方位角、仰角を作成する。しかし、鉛直面から法線方向に半球を作成し、西面に対する値なので、方位角(0°から180°)、仰角(-90°から90°)となる。同様に各方位の壁面ごとに判定点を作成する。各隣棟座標を読み込み、最大方位角、最小方位角を求め、 θ も求める。ここで、原点から隣棟を見るときに最も大きい仰角、最も小さい仰角を求めそれぞれ、 $angb, angbg$ と呼ぶ。また、原点から地平線を見る仰角を $angg$ とし、以下の式で算出した。

$$Angg = -\text{Arccos}(\frac{\text{地球の半径}}{\text{地球の半径} + \text{計測点の高さ}})$$

3.3.2 鉛直面外皮から見た天空、隣棟、地面判定方法

先の例と同じく西面の外壁から見た場合、判定点の方位角は0度から180度であり、隣棟の最小、最大方位角がその中にあり、判定点の方位角がその範囲の時に

$$angbg \leq \text{判定点仰角} \leq angb \quad (b)$$

であれば $cntb = 1$ とする。また同じ方位角範囲において $angbg$ より判定点仰角が小さければ $cntg = 1$ とする。それ以外の方位角においては $angg$ より判定点仰角が小さければ $cntg = 1$ とする。ここまです工程(b)とし、3.2.2の(a)の代わりに(b)を行い、場合分けをして各壁面、各隣棟ごとに行う。形態係数は以下の式になる。

$$F_s = 1 - F_b - F_g$$

$$F_b = (\text{cntb} = 1 \text{の判定点の合計}) / \text{半球面全判定点数}$$

$$F_g = (\text{地面のカウンターの合計}) / \text{半球面全判定点数}$$

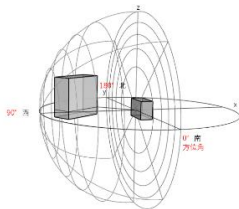


図4 鉛直面半球作成概要図(西側壁面)

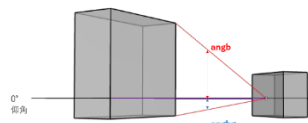


図5 $angb, angbg$ 概要図

4. 対象建物、隣棟、地面条件を考慮したパラメータ感度解析

4.1 解析条件

算出した隣棟、地面表面温度及び鉛直面外皮から見た地面の形態係数も算出できるようになった THERB を使って、直達日射量・天空日射量、地面、隣棟からの長波放射量についてのパラメータ感度解析を行う。

今回の検証は福岡県福岡市にある周囲を建物で囲まれたタワーマンションの南面の1室を地上階、中間階(地上30m)、最上階(地上60m)の3階層で行う。以下の表1-3に概要を示し、以下の図6,7に計算室、周辺モデルの概要を示し、表1,2,3

に各種条件を示す。なお、周辺の建物最大高さは37mであり、case1-4は地上階のみ、case5は地上階、中間階、最上階で解析を行う。

4.2 解析結果

4.2.1 形態係数算出結果

以下の表4に形態係数算出結果を示す。隣棟のないcase1-2は方位による形態係数の差はない。次に隣棟のあるcase3-4の地上階は隣棟を見る形態係数が高く南面においては約0.5となる。次に地面を見る形態係数が高く、最後に天空を見る形態係数が最も低い。中間階から最上階に上がるにつれて、天空を見る形態係数は高くなっていき、地面を見る形態係数は低くなっていく。隣棟を見る形態係数については各方面の隣棟高さにより変化していく。

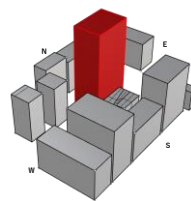


図6 解析対象、周辺建物配置

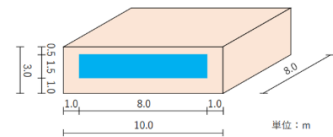


図7 解析対象室モデル

表1 計測条件1

項目	計測条件
計算期間	2020年 10月2日~10月5日
計算間隔	10分
計算項目	室温 直達日射量 天空日射量 地面表面温度 夜間放射量 隣棟から外皮に入る長波放射量 地面から外皮に入る長波放射量 (直達日射量、天空日射量隣棟地面から外皮に入る 長波放射量は南面の窓に入るものを計測し、それを正とする) (隣棟、地面から入る放射量は大気から隣棟、地面表面へ入射する 対流熱流とその表面から放散される放射熱流の差で表して)

表2 計測条件2

項目	計測条件
計算地域	福岡(北緯33度60分、東経130度22分)
計算建物	大濠付近高層建築物(60m) 地上階(0m)、中間階(30m)、最上階(60m)
外気条件	温湿度・全日射量 拡張アメダス気象データ 風速

表3 地面隣棟条件

ケース	計算条件
Case1	隣棟を配置せず地面表面温度に外気温を与える場合
Case2	隣棟を配置せず地面表面温度に計算値を与える場合
Case3	隣棟を配置し隣棟表面温度に外気温、地面表面温度に計算値を与える場合
Case4	隣棟を配置し隣棟表面温度、地面表面温度に計算値を与える場合
Case5	case4の条件で地上階、中間階、最上階で計算

表4 形態係数

case1-2	天空	隣棟	地面	地上階	天空	隣棟	地面
南壁面	0.5032	0.0000	0.4968	南壁面	0.1328	0.4886	0.3786
南窓面	0.5032	0.0000	0.4968	南窓面	0.1335	0.4954	0.3711
西壁面	0.5032	0.0000	0.4968	西壁面	0.2106	0.3215	0.4680
北平面	0.5032	0.0000	0.4968	北壁面	0.1388	0.4225	0.4387
東壁面	0.5032	0.0000	0.4968	東壁面	0.3045	0.2161	0.4794
中間階	天空	隣棟	地面	地上階	天空	隣棟	地面
南壁面	0.3841	0.4992	0.1168	南壁面	0.5067	0.4073	0.0861
南窓面	0.3864	0.4974	0.1161	南窓面	0.5067	0.4074	0.0859
西壁面	0.4797	0.3275	0.1928	西壁面	0.5067	0.3518	0.1415
北壁面	0.5034	0.3827	0.1139	北壁面	0.5067	0.4328	0.0605
東壁面	0.4888	0.2393	0.2719	東壁面	0.5067	0.2760	0.2173

4.2.2 直達日射量、天空日射量の影響

図8に室温、直達日射量、天空日射量を示す。case1-4を比較すると、隣棟のないcase1-2、隣棟のあるcase3-4で大きく

室温が分かれた。これは隣棟による日射遮蔽の有無の影響であると考える。

4.2.3 地面からの長波放射の影響

地表面温度の影響を見る図9のcase1-2を比較すると室温はほぼ等しくなった。外気温と地表面温度には差があり、外皮から地面を見る形態係数も大きいものにも関わらず、それらによる長波放射量の差は最大で約20W/m²であった。10月においては地表面温度を外気温にした場合と、算出した値にした場合ではあまり差が得られなかった。

4.2.4 隣棟からの長波放射の影響

隣棟の表面温度の影響を見る図10のcase3-4を比較すると室温はほぼ等しくなった。隣棟表面温度は解析対象の建物の外壁の全方位の平均温度なのでほぼ一定の値をとり外気温と差があり、外皮から隣棟を見る形態係数も大きいものにも関わらず、放射量の最大の差は20W/m²となりこちらも隣棟の表面温度を算出した値とした場合とはあまり差が得られなかった。

4.2.5 高層建築物において階層ごとの影響

各階層の影響を見る図11を見ると、最上階が最も室温が高く、次に中間階、最後に地上階となった。地上階が最も室温が低い理由としては、隣棟による日射遮蔽の影響であると考える。最上階が中間階より室温が高くなった原因は南面窓に到達する天空日射量の差だと考える。中間階は高さ30mの位置にあり、隣棟は最大高さ37mであるので日射遮蔽の影響はほとんど受けず、到達する直達日射量は最上階とほぼ等しいといえる。天空日射については、表4を見てわかるように最上階の方が外皮から天空を見る形態係数が中間階より大きい。それにより外皮に到達する天空日射量が多くなり室温の上昇につながったと考える。外皮から隣棟、地面を見る形態係数は中間階の方が最上階よりも大きいため、隣棟、地面に反射して外皮に到達する天空日射は、中間階の方が大きい。天空から直接外皮に到達する天空日射の方が影響が大きいため、このような結果になったと考える。

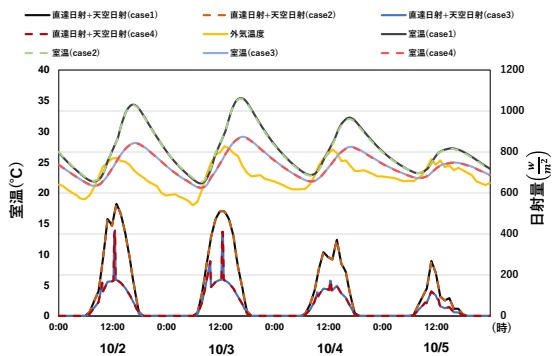


図8 case1-4 直達日射量、天空日射量合計 (地上階)

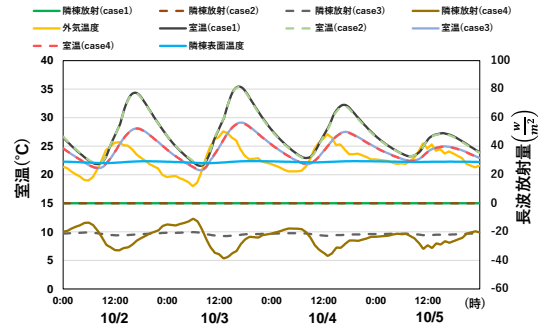


図9 case1-4 地面から外皮への長波放射量 (地上階)

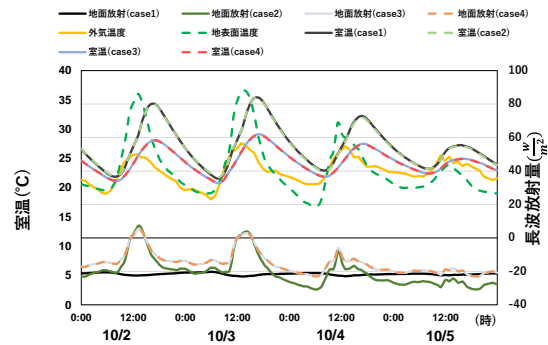


図10 case1-4 隣棟から外皮への長波放射量 (地上階)

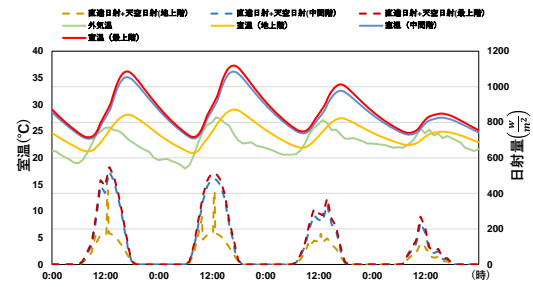


図11 case5 直達日射量、天空日射量合計

5 結び

本研究では、隣棟を考慮した外皮から見る天空、隣棟、地面の形態係数算出を行うプログラムと算出された地表面温度、隣棟表面温度を THERB に組み込み、それらの影響を解明した。隣棟、地面の表面温度は10月において室温には大きな影響を与えることがないこと、周囲を建物に囲まれた高層建築物においては階層ごとに異なる形態係数によって室温に影響を及ぼすことを確認した。今後は計算対象自身の形状による影響や季節による影響を検討していくことが課題である。

参考文献

- 1) 尹 晟敏, 佐土原聡, 尾崎明仁, 佐藤裕一, 吉田 聡, 川瀬 誠 (2016) 「数値シミュレーションによる地中温暖化の要因解析」, 『日本建築学会環境系論文集』, 第81巻 (719号), pp.111-121, 日本建築学会
- 2) 樋口佳樹, 宇田川光弘, 佐藤誠, 木村健一 (2001) 建築屋外における日射と長波長放射の計算モデル: 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, 日本建築学会計画系論文集 66巻 (2001) 544号