

下向き長波長放射観測への障害物の影響について

廣瀬 保雄*・本田 耕平**

Evaluation of the Influence of Obstacles on Downward Long-wave Radiation Measurement

Yasuo HIROSE and Kohei HONDA

Abstract

This paper describes a trial method for evaluating measurement error induced by surrounding surface obstacles such as buildings or vegetation in downward long-wave radiation measurement utilizing the Moderate-Resolution Transmittance Code (MODTRAN) for four standard model atmospheres. The geometrical distance distribution of the obstacles viewed from the sensor is an important factor in estimating the influence of obstacles on DL measurement. Diagrams were constructed for this purpose. A series of evaluating procedures was applied to an existing urban sky, providing a good reference relation between the obstacle condition and the influence.

1. はじめに

放射観測では周囲の建物や植生の影響を受けない開けた観測環境が求められる。しかし、測器保守が容易なことも重要な条件であり、諸々の制約の中で理想的な観測環境を確保することは実際にむずかしい。周囲の建物等による放射の遮蔽、反射、射出などが考えられる条件のもとでやむを得ず観測を行う必要がある場合は、観測結果が正しく利用されるように、観測環境の状況を記録するとともに、それらの障害物による影響を見積もることが必要となる。

放射観測環境における障害物の影響評価について、短波長放射(太陽放射)の場合は比較的簡単な方法が CIMO Guide(WMO : 2006)に述べられている。たとえば直達日射成分に対する遮蔽物の影響は、快晴下の遮蔽前後の連続記録から内外挿により推定される。また散乱日射成分の場合は、天空の放射輝度が一様であると見なし、遮蔽立体角から影響の大きさを計算できる。

一方、長波長放射(地球放射)の場合、天空の放射輝度は天頂角に依存しており(Philipona : 2001)、大気中における放射伝達も吸収と射出によって行われる。このため、同じ観測環境でも障害物から受ける影響は長波長と短波長で大きく異なると考えられる。長波長放射への障害物の影響は一般化しにくい面があり、CIMO Guideにも評価方

法は述べられていない。しかし、ある程度まで実際に近い条件を設定し、見込まれる影響を推定する方法があれば、既存の観測環境が測定値に与える影響評価や新しい観測地点の選定に有効に活用できる。

本稿では、周囲の障害物が下向き長波長放射に与える影響を評価する方法について、大気放射伝達モデルを用いたシミュレーションにより検討した結果を述べる。用いた放射伝達モデルは MODTRAN4 である。なお、ここでは天空を覆う障害物の影響を評価することが目的であるため、下向き放射成分についてのみ論じる。

2. 影響評価の方法

大気中の長波長放射伝達はSchwarzschildの方程式で表される。それを光路始点での境界条件を与えて解くと、光路終点における放射輝度が求まる。詳細は会田(1982)等を参照されたい。また、放射用語の定義は廣瀬・下道(1996)に説明されている。いま、光路に沿って始点をS1、終点をS2とし、Schwarzschildの方程式の解を簡略に表現すると(1)式となる。

$$L_{\lambda}(S_2) = L_{\lambda}(S_1) \times T_{\lambda}(S_1, S_2) + L_{\lambda}(S_1, S_2) \quad (1)$$

ここに

λ : 波長

*高層気象台 観測第三課 **気象庁 環境気象管理官

$L_{\lambda}(S_1)$: 始点S1における放射輝度
 $L_{\lambda}(S_2)$: 終点S2における放射輝度
 $T_{\lambda}(S_1, S_2)$: 光路に沿った大気の透過率
 $L_{\lambda}(S_1, S_2)$: 光路に沿った大気射出による放射輝度である。

(1)式の右辺第一項は始点からの射出が光路途中の大気を透過してS2に到達する分を、第二項は途中の大気自身の射出と吸収の結果S2に到達する分を表す。

次に、光路の始点を大気上端(∞)、終点を放射計(O)、放射計を原点とした光路の方向を (θ, ϕ) とすると、大気上端における放射輝度はゼロであるから

$$L_{\lambda}(\theta, \phi; O) = L_{\lambda}(\theta, \phi; \infty, O) \quad (2)$$

となる。途中の点Sに障害物があった場合は

$$LB_{\lambda}(\theta, \phi; O) = L_{\lambda}(\theta, \phi; S) \times T_{\lambda}(\theta, \phi; S, O) + L_{\lambda}(\theta, \phi; S, O) \quad (3)$$

と表される。ここに $L_{\lambda}(\theta, \phi; S)$ は点Sの障害物が放射計側に向ける表面の放射輝度である。放射輝度を波長について積分した値を、それぞれの記号から添え字 λ を外し、以後 $L(\theta, \phi; O)$, $LB(\theta, \phi; O)$ と表すことにする。

さて、障害物の影響を放射照度の単位($W \cdot m^{-2}$)で表すことが目的であるが、以下の議論を進めやすくするために放射輝度の代わりに有効温度を用い、障害物の表面を温度 T_w の黒体として扱う。有効温度は等しい放射輝度を与える黒体の温度と定義される。一般に温度 T の黒体表面の放射発散度 M は Stefan-Boltzmann 定数 σ を用いて σT^4 と表される。また、等方性発散面の放射輝度 L は M/π である。いま、放射計を中心とする天球上に放射源を投影し、その有効温度を考えると、天空の場合は

$$T_s(\theta, \phi) = \left[\frac{\pi}{\sigma} L(\theta, \phi; O) \right]^{1/4} \quad (4)$$

であり、障害物に対応する天球部分は

$$T_B(\theta, \phi) = \left[\frac{\pi}{\sigma} LB(\theta, \phi; O) \right]^{1/4} \quad (5)$$

となる(Fig.1)。このように、障害物に対応した温度分布を持つ天球を考え、そこからの放射照度を計算すれば、障害物の影響を評価することができる。放射照度で表した影響の大きさ δ は(6)式で表される。ここに積分領域 Ω は障害物が占める立体角領域である。天空の有効温度は快晴時に最低となるから、 δ は快晴時に最大となる。

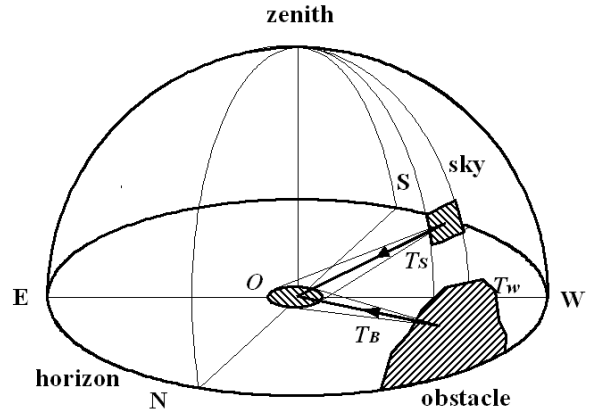


Fig. 1 Sky and surrounding obstacles projected on the celestial sphere as downward long-wave radiation sources. Temperature on the celestial sphere is represented by effective blackbody radiation temperature of atmosphere and obstacles viewing from the sensor (O).

$$\delta = \left(\frac{\sigma}{\pi} \right) \int_{\Omega} (T_B^4 - T_s^4) \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (6)$$

MODTRAN4 では、一定の大気モデルを与えて天空の特定方向の放射輝度 $L(\theta, \phi; O)$ を求める。また、ある距離だけ離れた表面温度 T_w の障害物に対して、その方向の放射輝度 $LB(\theta, \phi; O)$ を求める。これらは(4)、(5)式により有効温度 $T_s(\theta, \phi)$, $T_B(\theta, \phi)$ に変換される。

3. MODTRAN によるシミュレーション

3.1 天空の有効温度分布

MODTRAN4 では 6 種類の大気モデルが標準で用意されている。ここでは熱帯(15°N)、中緯度夏(45°N, 7月)、1976年米国標準大気、中緯度冬(45°N, 1月)の 4 種類について放射輝度を計算し、有効温度の天頂角分布を求めた(Fig.2)。積分波数範囲は 4~4000 cm^{-1} (波長 2.5~2500 μm)、波数分解能は 1 cm^{-1} である。Fig.2 に示された天空の有効温度は快晴時のものであり、方位角には依存しない。また、天頂角 90°の値は地上気温に等しい。上記の大気モデルについて放射輝度を半球領域にわたり積分した下向き長波長放射量は、順にそれぞれ 396, 350, 287, 224 $W \cdot m^{-2}$ である。

3.2 障害物の表面温度

障害物に対応する天球の有効温度を求める前にその表面温度 T_w を推定する必要がある。建物や植生の表面温度は気温、風速、日射吸収量、周囲の物体との放射による

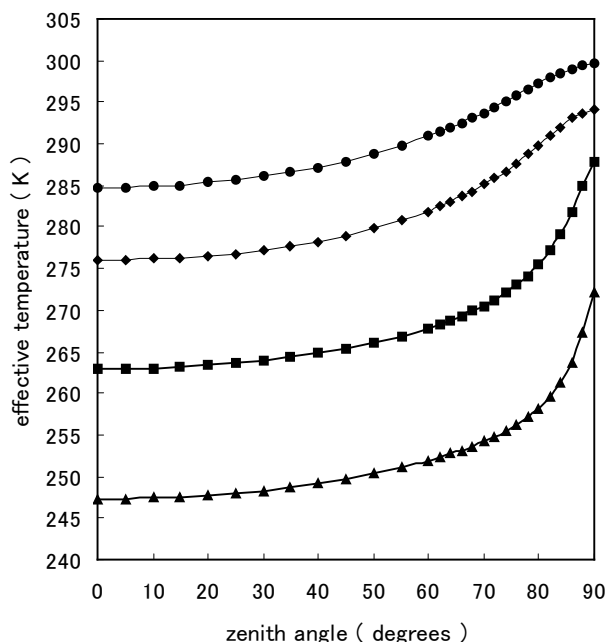


Fig. 2 Angular distribution of effective temperature for clear sky calculated by MODTRAN4. Each curve corresponds to the model atmosphere of tropical (top), mid-latitude summer (upper middle), US standard atmosphere 1976 (lower middle), and mid-latitude winter (bottom), respectively.

熱交換など、様々な要因によって影響されると考えられる。市街地で建物外壁温度を測定した報告がいくつかあり(小島ほか：2004, 木村ほか：2005), ピーク値で気温より約 8~11℃高い。一方, 都市部における温熱環境シミュレーション例(陳ほか：2005)では, 太陽高度角 45°, 気温 32℃, 風速 3 m/s, 直達日射量 765 W・m⁻², 散乱日射量 136 W・m⁻² という条件のもと, 太陽に面したコンクリート外壁で気温より約 20℃高い値が示されている。また樹木の葉表面温度については, 気温より最大約 10℃高いという測定例(萩島ほか：1999)もある。

3.3 障害物の有効温度

これらの結果を考慮し, 以下では影響のほぼ最大値を推定する観点から, 障害物の表面温度を気温より一律に 20℃高いものとする。なお, 障害物表面の高温状態は一般に昼間の特定時間帯に限定されるので, その影響が日積算量に占める割合はさらに小さくなることに留意する必要がある。

障害物の表面温度を気温より 20℃高いとしたが, 対応する天球の有効温度は, (3)及び(5)式で示したように, 放射計からの距離の関数となる。いま, 測器を高さ 10 m の建物屋上に設置し, そこから障害物表面までの光路長を変えて有効温度を求めるものとする。その場合, 光路長

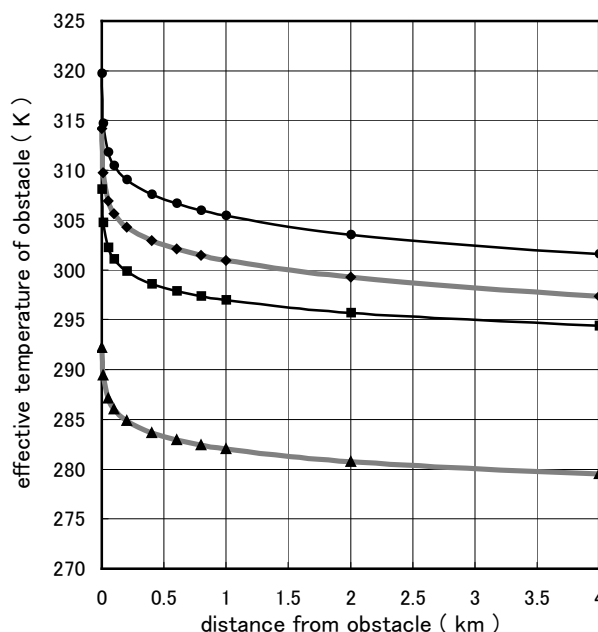


Fig. 3 Effective temperature of obstacle viewing from the sensor as function of the distance from obstacle. Temperature of obstacle is assumed to be 20℃ higher than air temperature in each case of model atmospheres. The notation of curves are the same as Fig.2.

と仰角を指定しないと光路が決まらないので, 障害物の高さを 300 m までとし仰角の範囲を制限した。この計算を 4 種類の大気モデル(3.1 参照)につき距離 10 km (最大仰角 1.66°)まで行った結果の一部を Fig.3 に示す。

大気による吸収・射出のため, 障害物の有効温度は距離の増加とともに気温に近づく。特に距離 200 m 付近までの変化が顕著で, 熱帯大気は 10℃以上, 中緯度冬大気は 7℃以上の有効温度の低下が起きる。また, 距離 10 km では熱帯大気はほぼ気温に等しく, 中緯度冬大気は約 15℃低下する。したがって, 障害物の影響評価ではそれらの距離分布を考慮する必要がある。

4. 影響評価

以上の準備にもとづき, 実際の評価手順について検討した。まず, 放射計から周囲を見たとき, 水平距離 D の位置に下から仰角 a まで, 温度 T_w の垂直壁が全方位ぐると取り囲んでいるものとする。このとき垂直壁の各部分の有効温度は D と壁の各部の高さによって決まる距離に応じた値を取る。(6)式における T_s と T_b は方位角に依存しないので, 積分は天頂角 θ につき仰角 a の位置まで行う。得られる結果は一種の規格化された影響量で, これを $\delta_0(D, a)$ と表す。この $\delta_0(D, a)$ を D と a を変えながら各大気モデルについて求め, 図表を作成する。

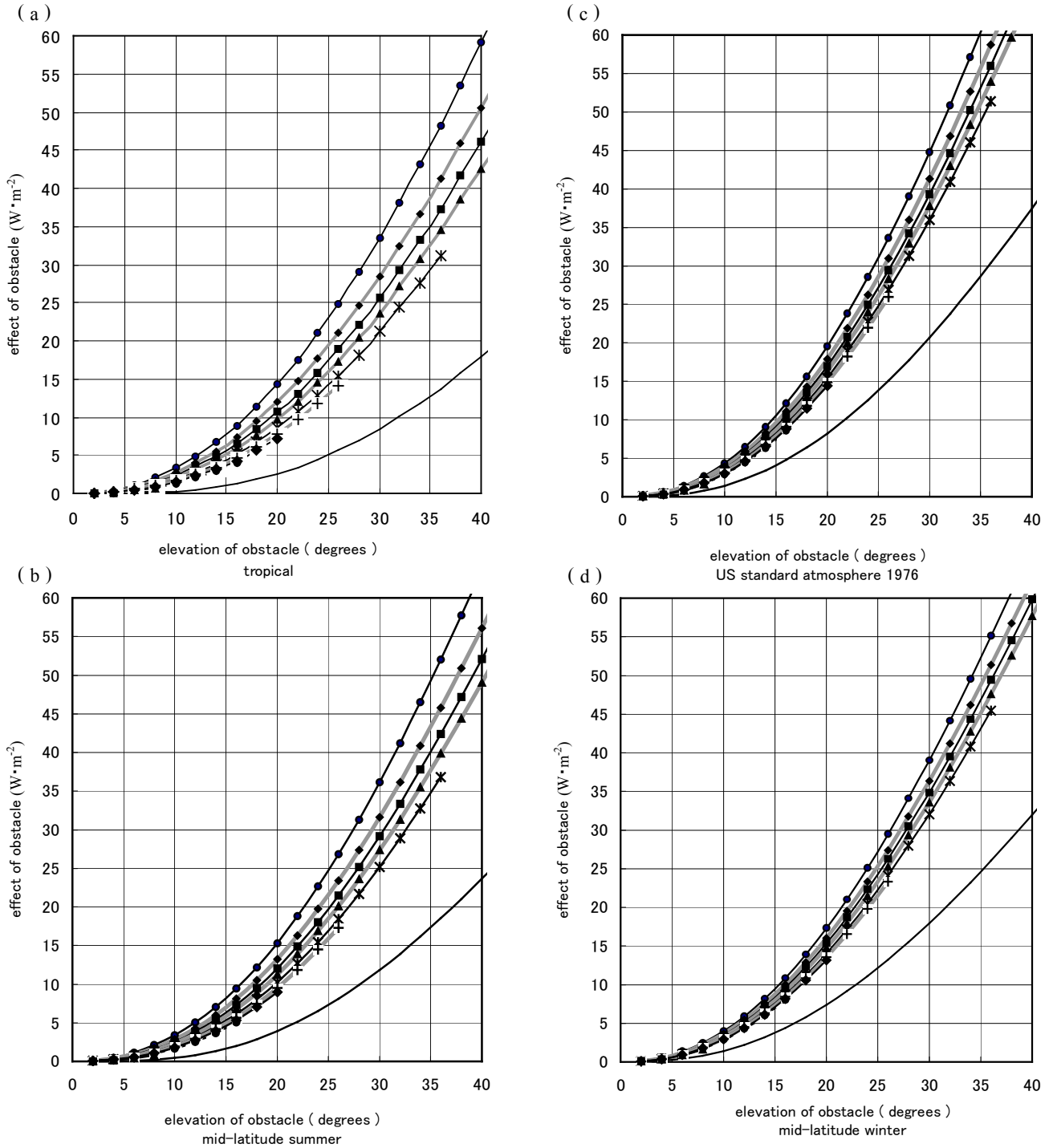
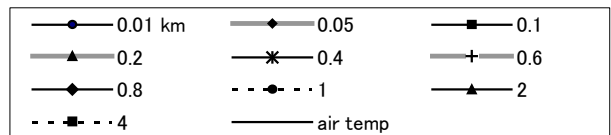


Fig. 4 Effect of obstacle on downward long-wave radiation calculated for model atmospheres. Sensor is surrounded by circular wall located at horizontal distance D and rising up to the elevation expressed by abscissa. The maximum height of wall is about 300 m. Distance D runs from 0.01 to 4 km where the influence of obstacle becomes practically negligible. The wall is assumed to be at ambient surface air temperature plus 20°C in each case. Solid curve with no marker corresponds to the wall at the same temperature as ambient air.



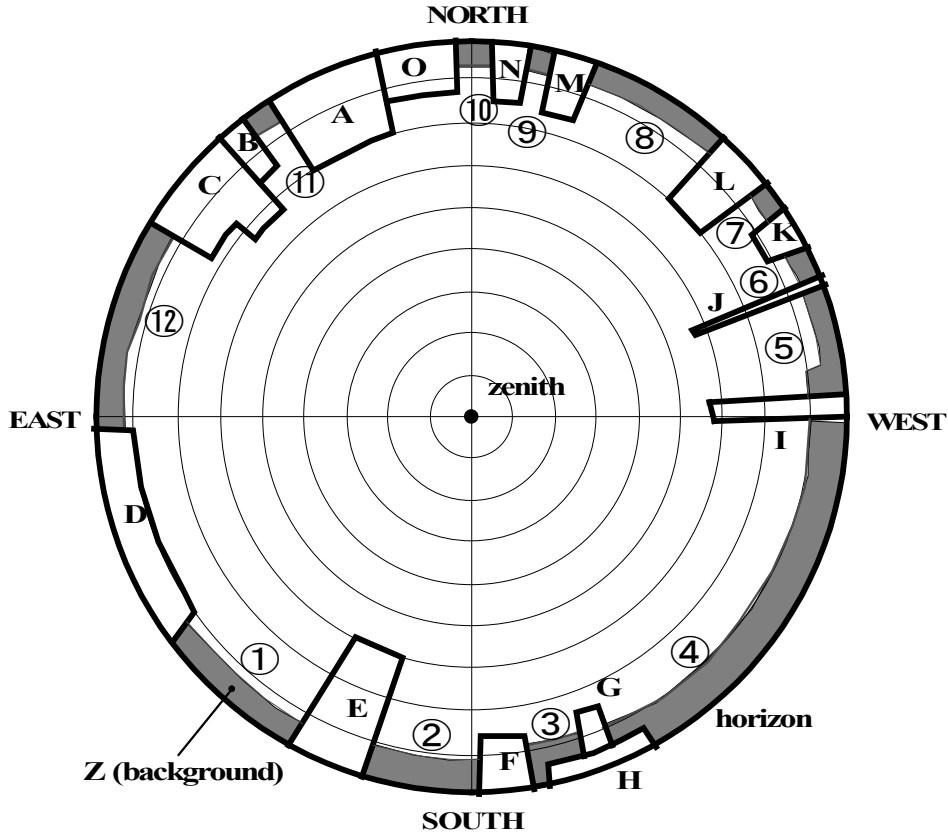


Fig. 5 Schematic image of an urban sky viewing from the sensor. Each block has its horizontal distance, top elevation, and azimuth range, respectively. Here, the distance of the background obstacles (shaded blocks) are assumed to be 4 km apart from the observer.

以上の手順で求めた結果を Fig.4 に示す。計算では天頂角 2° ごとの T_s と T_b を求め、数値積分した。障害物の高さを 300 m までとしているため、水平距離の増大とともに障害物の最大仰角は小さくなる。距離 4 km で障害物の影響は実質的になくなる。同図には、障害物の表面温度が気温に等しい場合の曲線も無印実線で示している。この場合、影響量は距離に依存しない。

Fig.4 の利用の仕方は、以下のとおりである。

- 手順 1) 放射計から見た地平線地形を描く。
- 手順 2) 障害物を距離と仰角によって区分し、 N 個のブロックに分ける。

ブロック j : 水平距離 D_j

仰角 a_j

方位角幅 $\Delta\phi_j$ (度単位)

- 手順 3) 適切な大気モデルの図表を選び、各ブロックについて $\delta_0(D_j, a_j)$ を読み取る。

- 手順 4) 以下により、影響量 δ を求める。

$$\delta = \sum_{j=1}^N \delta_0(D_j, a_j) \times \frac{\Delta\phi_j}{360} \quad (7)$$

なお、各ブロックは下から仰角まで連続している必要がある。したがって、部分的に別の物体の背後にある障害物に対しては、(7)式の適用に際して適宜差し引き項を加える。

5. 影響評価の適用例

前節で述べた手順の適用例を述べる。Fig.5 はある地方都市の実況にもとづいて作成した模式的な障害物の様子を表す。障害物はブロックとして表され、それぞれが観測者から見た水平距離、仰角、方位角幅を持っている。背景は建物の壁面や植生などが混在しており、水平距離も一様ではないが、ここでは水平距離を全て 4km とした。各障害物の分布状況を Table 1 に示す。

Table 1 の第 5 列に示す規格化された影響量は、Fig.4 (c) の米国標準大気 1976 にもとづいている。ここでは同図の元になったデータから直接求めているので、少数第 2 位までの値を記入した。また、ブロック G の負の方位角幅は、ブロック H と重複している部分を差し引いている分に相当する。背景(Z①~Z⑫)の影響量は $0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、それを除いた障害物(A~O)の影響量は $5.65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ となり、そ

Table 1 Parameters of each obstacle block illustrated in Fig. 5. Normalized and actual infrared effects by each block are also shown in irradiance. Actual effect is the normalized irradiance multiplied by the fraction of the azimuth range. Estimation is based on the US standard atmosphere 1976.

block	distance(km)	elevation(deg)	azimuth range(deg)	δ_0 ($W \cdot m^{-2}$)	δ ($W \cdot m^{-2}$)
A	0.07	20	16	17.53	0.78
B	0.12	15	4	9.06	0.10
C	0.15	23	9	22.40	0.56
	0.15	17	8	11.75	0.26
D	0.08	10	32	3.79	0.34
E	0.10	30	12	39.31	1.31
F	0.10	14	9	7.81	0.20
G	0.10	15	4	9.14	0.10
	0.10	5	-4	-0.82	-0.01
H	0.07	5	17	0.85	0.04
I	0.08	32	4	45.54	0.51
J	0.03	33	2	51.46	0.29
K	0.12	11	6	4.58	0.08
L	0.06	20	9	17.71	0.44
M	0.10	16	10	10.47	0.29
N	0.10	15	5	9.14	0.13
O	0.10	13	13	6.68	0.24
Z①	4.00	7	23	1.00	0.06
Z②	4.00	9	15	1.72	0.07
Z③	4.00	10	3	2.15	0.02
	4.00	10	7	2.15	0.04
Z④	4.00	10	6	2.15	0.04
	4.00	10	56	2.15	0.33
Z⑤	4.00	10	5	2.15	0.03
	4.00	6	12	0.70	0.02
Z⑥	4.00	6	5	0.70	0.01
Z⑦	4.00	6	6	0.70	0.01
Z⑧	4.00	6	21	0.70	0.04
Z⑨	4.00	7	4	1.00	0.01
Z⑩	4.00	7	4	1.00	0.01
Z⑪	4.00	6	5	0.70	0.01
Z⑫	4.00	7	32	1.00	0.09
sum					6.45

れぞれ全影響量($6.45 W \cdot m^{-2}$)に占める割合は約 12%及び 88%である。主要な障害物は A, C, E, I であり、これらの合計は全影響量の約半分を占める。この大気モデルの下向き長波長放射量(3.1 参照)が $287 W \cdot m^{-2}$ であることから、ここで考察した観測環境においては最大で 2%程度の影響があるものと推定される。

6. まとめ

観測環境が下向き長波長放射観測に与える影響量を見積もる場合、障害物の距離分布が重要であるため、短波長放射のように地平線地形のみを考慮する場合に比べて煩雑である。しかし、いくつかの大気モデルと大気放射伝達モデルを用いて、数値的に評価する手順を示した。また、ある地方都市の実況を模した環境にこの手順を適用して得られた結果から、最大で 2%程度の影響があるこ

とが分かった。本稿では、実際に近い条件を考慮したとはいえ、仮定された障害物の表面温度や大気の状態には当然ながら誤差が含まれる。また、日中と夜間では条件が異なるため、積算量での評価はここで述べた瞬間値の評価と必ずしも同じではないことに注意を払う必要がある。

謝 辞

本稿を草するに際し、気象研究所物理気象研究部第三研究室長の青木輝夫氏には、大気放射伝達モデルの使用法について貴重な教示を賜った。また、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付輻射係長の中村雅道氏には大気放射伝達モデルの使用に関して便宜を図って頂いた。これらの方々に感謝を申し上げる次第です。

引用文献

- 会田 勝(1982): 大気と放射過程. 東京堂出版, 280pp.
- 陳 宏・黄 弘・大岡龍三・中嶋まどか(2005): 建物壁面からの顕熱放散や建物の人工排熱の屋外温熱環境に関する影響度の研究(その 1), 屋外温熱環境への影響度の概要と均一市街地への適用. 空気調和・衛生工学会学術講演論文集 2005, 2197 - 2200.
- 廣瀬保雄・下道正則(1996): 日射計. 気象研究ノート, **185**, 73 - 104.
- 木村 聖・萩島 里・谷本 潤・成田健一・菅原広史(2005): 2次元都市キャノピー空間の気流性状及び熱収支に関する屋外観測, 第1報 気流分布及び気温分布. 日本建築学会大会学術講演梗概集 2005, D - 1, 759 - 760.
- 小島 弘・加藤伸介・原山和也・李 海峰・大森敏明・大岡龍三・黄 弘・鳴海大典・市川 徹(2004): 実測とシミュレーションによる新宿地域冷暖房周辺地区の温熱環境評価(その 1), 地域冷暖房大型冷却塔周辺の温熱環境実測. 日本建築学会大会学術講演梗概集 2004, D - 1, 649 - 650.
- 萩島 理・片山忠久・林 徹夫・谷本 潤(1999): 樹木の放射温度分布に関する実測, 街路樹のある街路の温熱環境予測 その 1. 日本建築学会計画系論文集, 516, 79 - 86.
- Philipona, R.(2001): Sky-scanning radiometer for absolute measurements of atmospheric long-wave radiation. *Appl. Opt.*, **40**, 2376 - 2383.
- WMO(2006): Guide to meteorological instruments and methods of observation, preliminary seventh edition. *WMO*, **No.8**, I.7-15 - I.7-16.