

都市を対象とした3次元高精度・低計算負荷 放射解析モデルの提案

3-DIMENSIONAL RADIATION MODEL FOR URBAN CANOPY

河合徹¹・神田学²
Toru Kawai, Manabu Kanda

¹学生員 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 (〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1)

Numerical simulations of canopy albedo for 3 dimensional model cities are performed using the Simple Urban canopy Model for Meso-scale simulation (SUMM). The algorithm of the SUMM is described in this study. Model parameters and analytical conditions appropriate for validation studies are examined, and then the simulation results are compared with the experimental data. The model results agree fairly well with experimental results, even though slight disagreements exist especially for low solar angles. Both the simulations and experiments demonstrate that urban geometries significantly influence canopy albedos.

Key Words : SUMM, Canopy Albedo, Scall Model, Short wave radiation

1. 序論

(1) はじめに

メソスケール気象モデルの底面条件として平板を仮定した場合、様々な条件下で誤差を生ずることが知られている。植生地に対してはSIB等の植生モデルが確立され、使用されている。一方、都市部におけるキャノピーモデルの報告例は非常に少なく3次元都市を表現するには不十分なものが多い。現在提案されている都市キャノピーモデルとしてはMASSON(2000)¹⁾によるTEB、KUSAKAら(2001)²⁾のモデルがあり、徐々に使用され始めている。しかしこれらは無限に長いストリートキャニオンを仮定した2次元モデルであり、3次元都市を表現するにはあまりに簡略化されすぎている。そこで我々は3次元の都市を対象とした、簡易都市キャノピーモデルSUMM(Simple Urban canopy Model for Meso-scale simulation)の構築を目指している。本論ではその前段階として、SUMMにおける放射解析モデルを検証する。放射解析の精度が悪いと、熱収支構造の解析にも系統的な誤差が含まれてくる。それゆえ、放射を厳密に再現することは非常に重要である。SUMMの放射解析モデルは、目的に応じて厳密解法、簡易解法の2種類の解法を用意している。厳密解法は解像度が密で、熱収支解析に用いる各要素面の正味放射を厳密に与えることを目的に構築されている。このた

め熱収支解析に用いる他にも各種の感度分析に適応できる。一方、簡易解法は解像度が粗で、都市キャノピーモデルへの直接的な導入を前提とした非常に計算負荷の小さなモデルとなっている。本論ではこのうち厳密解法のみを絞って、シミュレーション結果をキャノピーアルベドでまとめる。厳密解法のアルゴリズムを紹介した後、シミュレーション結果を模型都市実験による実験結果と比較し、厳密解法の精度を検証したい。

(2) 既往のアルベド研究と本論の新規性

放射解析モデルの検証用に用いられる、3次元アルベドのデータベースは、模型都市実験によりAIDA(1982)³⁾、勝山ほか(2001)⁴⁾が構築している。放射解析モデルは、前述したように、2次元のものはほぼ完成している(例えば^{3),5),6)})。3次元都市を対象としたものは計算負荷が膨大ながらも、本論と類似の研究が報告されている(例えば^{7),8)})。しかし、これらの放射解析モデルのうち、模型都市実験による実験結果を用いて系統的に検証し、良好に再現したものはない。例えば、モンテカルロ法等の膨大な計算負荷を要する3次元モデルは、要素面アルベド等のモデルパラメーターの設定に難があるため、特に低太陽高度時の再現性が悪い。前述した2次元のTEBによる検証も行われているが、これは検証用に条件の限られたAIDAのものが用いられているだけであり、またその再現性も思わしくない。

以上を踏まえた上で、本論には以下の3つの面目があ
る。第一に、本論は3次元アルベドの広範なデータベ
ースを用いて検証を行い、これを良好に再現した初の研究
であること。第二に、本論は従来の3次元放射解析モデ
ルに比べて形態係数のデータベース化の工夫を用いて計
算負荷を格段に低減させたこと。第三に、直散分離計算
を用いて要素面アルベドの入射角依存性を的確に与えた
ことである。以上により、従来の3次元放射解析モデル
に比べて良好な再現性を示すことができた。

2. 模型都市実験

模型都市実験の概要を記す。図-1に示した様に、コン
クリート素材のブロック、平板を用いて3次元模型都市
を作成した。規格等の詳細は、勝山ほか(2001)⁴⁾を参照
されたい。本論では、実験結果を放射解析モデルの検証
用にのみ引用した。

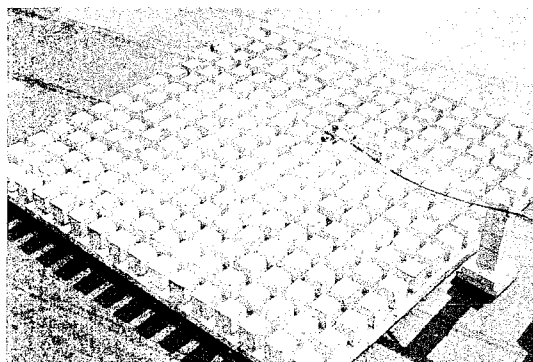


図-1 模型都市の概要

3. 放射解析モデル(厳密解法)

(1) 放射解析モデルの概要

前述したように、SUMMの放射解析モデルには厳密解法
と簡易解法の2種類の解法が用意されている。両者の基
本方針は同じだが、解像度と計算負荷が大きく異なっ
ている。厳密解法は、キャノピーの各構成面をグリッド分
割し、その小グリッド全てについて放射計算を行うもので
ある。このため、日陰面の特定や鏡面反射成分の追跡が
可能である。一方、簡易解法は、都市の最小構成単位と
して、屋根面、各壁面、床面の各代表面を与えている。
これにより、計算負荷は格段に小さくなるが、解像度か
らの制約条件として鏡面反射成分の追跡が不能となり、
各要素面はランバート面が仮定されている。このうち本
論では厳密解法のみを紹介する。

(2) 都市のモデル化と計算領域

都市のモデル化は、図-2に示したように、模型都市実

験と同様な、規則的な幾何構造を持つ都市を設定してい
る。2重線で囲まれた部分を計算単位領域とし、これを
10×10に配置した領域を全計算領域としている。

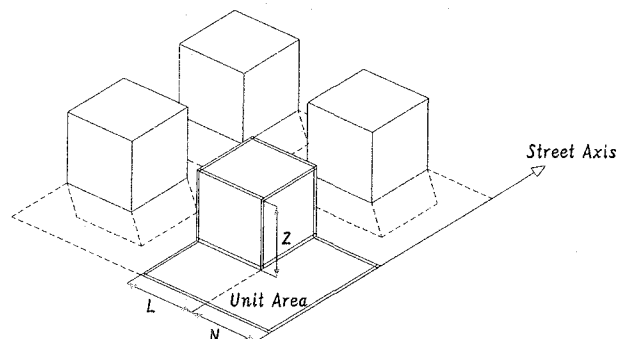


図-2 モデル都市の概要

(3) 計算格子系

図-3に示した様に、キャノピーの構成面を正方グ
リッドで細分割し、その一つ一つの小グリッド全てにつ
いて放射計算を行う。単位領域内の小グリッドには連続
的な通し番号*i*が付されている。格子の一边の長さは、
建物床面幅の十分の一である。

各々の単位領域は完全に相似なので、周期条件を課せ
られる。つまり、実際の計算領域は、100個の単位領域
からなるが、中心部の一つの単位領域内の小グリッドに
ついてのみ放射収支計算が行われる。周囲の99の単位領
域は、放射追跡のためだけに利用される。

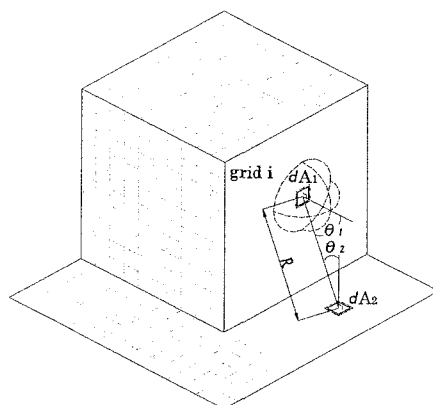


図-3 格子分割

4. 形態係数の計算とデータベース化

(1) 形態係数の計算とデータベース化

放射収支計算を行う前に、形態係数の計算が行われる。
格子分割法による放射計算の場合、計算時間の約90%が
形態係数の算出に用いられる。しかし、直達光に対する
形態係数以外はキャノピーの幾何形状にのみに依存し、
環境条件によらない。そこで、SUMMでは図-3に示した
小グリッドどうしの形態係数に関するデータベースを作
成し、指定された幾何条件に対応する形態係数を計算開

始時に読み込むことにより計算負荷を大幅に軽減させている。

(2) 散乱光及び等方反射に対する形態係数の計算

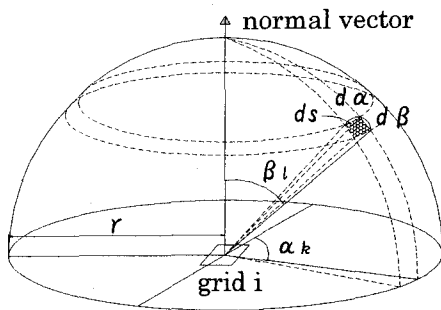


図-4 形態係数の計算

まず、図-4に示した様に、格子表面の垂直ベクトルが天頂方向に一致するように格子iの表面上に、半径rの半球を想定する。今、格子iの中心から、極座標における半球の微小面積dsに対する形態係数 $F_i(\alpha_k, \beta_l)$ を考えると、式(1)のように表される。

$$F_i(\alpha_k, \beta_l) = \frac{\cos \alpha_k \sin \alpha_k}{\pi r^2} ds = \frac{\cos \alpha_k \sin \alpha_k}{\pi} d\alpha d\beta \quad (1)$$

$$\alpha_k = (k-1) \times d\alpha \quad k = 1, 2, 3, \dots, k_{\max} \quad k_{\max} = 360/d\alpha$$

$$\beta_l = (l-1) \times d\beta \quad l = 1, 2, 3, \dots, l_{\max} \quad l_{\max} = 90/d\beta$$

ここに、

α_k : 方位角 (rad)、 β_l : 天頂角 (rad)

である。

本論では、 $d\alpha$ 、 $d\beta$ を 0.1° とし、図-4の半球上に、 $k_{\max} \times l_{\max} = 3600 \times 900 = 3240,000$ 個の微小部分dsを想定している。格子iの中央から、 (α_k, β_l) の各々の方向へ、微小変移DSで、線ベクトルをトレースすることによって、格子iから、どこを見ることができるのかを決定する。ここで、DSは、格子分割幅DLの十分の一である。つまり、 $DL \times DL$ から成る格子は、さらに100分の1の大きさに分割され、この分割された微小部分の形態係数を格子内で積算することにより格子対格子の形態係数を計算する。

以上の過程で、計算で考慮される中心部の単位領域内の格子iからトレースされる線ベクトルがこの単位領域の境界に接した場合、周期条件にしたがって、反対の境界の相当する場所へと線ベクトルが置換される。同様の手順が、線ベクトルが他のグリッドに接するか、計算領域外へと抜けるまで繰り返される。線ベクトルが、格子jに接した場合、このときの形態係数 $F_i(\alpha_k, \beta_l)$ は、格子iに対する格子jの形態係数 $F(i, j)$ に積算される。線ベクトルが計算領域外に抜けるときは、形態係数

$F_i(\alpha_k, \beta_l)$ は、格子iの天空率 $F(i, \text{sky})$ に積算される。

(3) 直達光に対する形態係数の計算

水平単位面あたりの直達光 RT_s (wm^{-2})に対する格子iの形態係数 $F(i, \text{sun})$ は、式(2)のように表される(Monteith, 1973)⁹⁾。

$$F(i, \text{sun}) = 1 \quad (\text{屋根面、床面の日向部})$$

$$F(i, \text{sun}) = \left| \frac{\cos \phi}{\tan(90 - \theta)} \right| \quad (\text{北面、南面の日向部}) \quad (2)$$

$$F(i, \text{sun}) = \left| \frac{\sin \phi}{\tan(90 - \theta)} \right| \quad (\text{東面、西面の日向部})$$

ここに、 ϕ と θ はそれぞれ図-5に示した様に、地表面を中心とした極座標における太陽の方位角(deg)と太陽高度(deg)である。直達光に対する日陰部分の格子の形態係数は当然0である。鏡面反射に対しては、計算を簡略化するために、全ての対になっている格子表面間の形態係数を1.0と想定している。つまり、ある格子表面で反射された鏡面反射放射は、ただ一つの格子表面に届き、二つ以上の格子表面で共有されない。

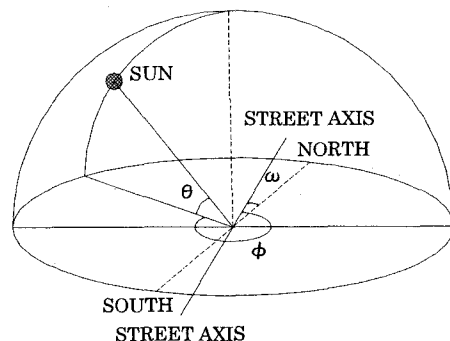


図-5 太陽位置の設定

5. 放射計算

(1) 直達光起因の多重反射過程

直達光起因の多重反射過程は、以下のa)～c)の手順を経て計算される。

a) 日向、日陰部分の判別

各格子が日向か日陰か判別する。これは、形態係数の計算と同様、格子iの中心から太陽に向かって線ベクトルを射出することにより行う。線ベクトルが、計算領域の外に至る前に他の格子に接すれば、格子表面は、日陰と判別される。そうでなければ日向である。日向、日陰部の情報を記憶するために、数値フラグ $IFLG_s(i)$ を使用する。それぞれ、

$IFLG_s(i) = 1$ (日向)、 $IFLG_s(i) = 0$ (日陰)、である。

b) 直達光の鏡面反射過程の追跡

格子*i*が、直達放射を受けていると判別されたとき、格子*i*によって反射される短波放射の鏡面反射成分を受け取る格子番号は、鏡面反射の法則にしたがう。反射された放射が計算領域の外部に抜けない限り、多重反射によって、同様の手順が、 $M_{\max}$ 回繰り返される。格子*i*が、格子*j*から*M* 回目に反射された放射を受け取るとき、数値フラグ $IFLG_T(i, M)$ には、格子番号*j*を与える。鏡面反射成分をどこからも受け取らない場合、フラグは0を与える。

c) 直達光の吸収

天空から直接格子*i*に至った直達光 RT_s は、次の3つの成分に分配される。吸収、鏡面反射、等方反射である。

$$RT_{ab}(i, 1) = IFLG_s(i) \times (1 - a_{dir}(\beta(i, 1))) \times RT_s \times F(i, sun) \quad (3)$$

$$RT_{rt}(i, 1) = IFLG_s(i) \times a_{dir}(\beta(i, 1)) \times RT_s \times F(i, sun) \times q_{mirror} \quad (4)$$

$$RT_{rd}(i, 1) = IFLG_s(i) \times a_{dir}(\beta(i, 1)) \times RT_s \times F(i, sun) \times (1 - q_{mirror}) \quad (5)$$

ここに、

a_{dir} : 直達光に対する要素面アルベド

RT_s : 単位水平面積当たりの直達光 (Wm^{-2})、

$RT_{ab}(i, 1)$, $RT_{rt}(i, 1)$, $RT_{rd}(i, 1)$: 格子*i*の単位面積当たりの直達光の吸収、鏡面反射、等方反射 (Wm^{-2})、

$\beta(i, 1)$: 格子*i*における直達光の入射天頂角、

q_{mirror} : 等方反射における鏡面反射率、

である。

鏡面反射率は、すべての格子表面で同一で、入射天頂角*β*によらないものと仮定する。

同様に、*M* - 1 回目に格子*j*で反射され*M* 回目に格子*i*に至る直達光起因の鏡面反射、及び、その他あらゆる面からの*M* - 1 回目の等方反射が存在する。格子*j*は前述したフラグ $IFLG_T(i, M-1)$ によって特定される。それらは、以下の3成分に分配される。

$$RT_{ab}(i, M) = (1 - a_{dir}(\beta(i, M))) \times RT_{rt}(j, M-1) + (1 - a_{dif}) \times \sum_{S=1}^{S_{\max}} RT_{rd}(S, M-1) \quad (6)$$

$$RT_{rt}(i, M) = a_{dir}(\beta(i, M)) \times RT_{rt}(j, M-1) \times q_{mirror} \quad (7)$$

$$RT_{rd}(i, M) = a_{dir}(\beta(i, M)) \times RT_{rt}(j, M-1) \times (1 - q_{mirror}) + a_{dif} \times \sum_{S=1}^{S_{\max}} RT_{rd}(S, M-1) \quad (8)$$

ここに、

$RT_{ab}(i, M)$, $RT_{rt}(i, M)$, $RT_{rd}(i, M)$: 格子*i*単位面積当たりにける直達光起因の*M* 回目反射の吸収、鏡面反射、等方反射 (Wm^{-2})

である。

(2) 散乱光起因の多重反射過程

天空から格子*i*に届く散乱光 RD_s は、吸収と等方反射に分配される。

$$RD_{ab}(i, 1) = (1 - a_{dif}(i)) \times F_i(i, sky) \times RD_s \quad (9)$$

$$RD_{rd}(i, 1) = a_{dif}(i) \times F_i(i, sky) \times RD_s \quad (10)$$

ここに、

a_{dif} : 散乱光に対する要素面アルベド

RD_s : 水平面単位面積あたりの散乱光 (Wm^{-2})

$RD_{ab}(i, 1)$, $RD_{rd}(i, 1)$: 格子*i*単位面積当たりの散乱光の吸収、等方反射 (Wm^{-2})

である。

同様に、*M* - 1 回目に格子*j*で反射され*M* 回目に格子*i*に至る散乱光起因の等方反射が存在する。

$$RD_{ab}(i, M) = (1 - a_{dif}(i)) \times \sum_{j=1}^{j_{\max}} \{F_i(i, j) \times RD_{rd}(j, M-1)\} \quad (11)$$

$$RD_{rd}(i, M) = a_{dif}(i) \times \sum_{j=1}^{j_{\max}} \{F_i(i, j) \times RD_{rd}(j, M-1)\} \quad (12)$$

ここに、

$RD_{ab}(i, M)$, $RD_{rd}(i, M)$: 格子*i*単位面積当たりの散乱光起因の*M* 回目反射の吸収、等方反射 (Wm^{-2})

である。

(3) キャンノピーアルベドの計算

計算で考慮する多重反射回数 $M_{\max}$ 回の後、格子*i*における正味の直達光起因の放射吸収量 $RT(i)$ と散乱光起因の放射吸収量 $RD(i)$ は以下のように表せる。

$$RT(i) = \sum_{M=1}^{M_{\max}} RT_{ab}(i, M) + \varepsilon_T \quad (13)$$

$$RD(i) = \sum_{M=1}^{M_{\max}} RD_{ab}(i, M) + \varepsilon_D \quad (14)$$

ここで、 ε_T , ε_D は多重反射回数 $M_{\max}$ 時における残差成分であり、吸収されと考え残すか、天空に抜けるとするか ($\varepsilon_T = \varepsilon_D = 0$)、により最終的な短波放射の吸収量が変わる。

単位領域における全短波放射吸収量は以下となる。

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} (RT(i) + RD(i)) \times (DL)^2 \quad (15)$$

これより、単位領域での短波反射量を逆算することで、キャンノピーアルベドが求められる。

Canopy Albedo =

$$\frac{(RT_s + RD_s) \times (N + L)^2 - \sum_{i=1}^{\max} (RT(i) + RD(i)) \times (DL)^2}{(RT_s + RD_s) \times (N + L)^2} \quad (16)$$

6. 解析条件の設定

(1) 要素面アルベドの設定

a) 全天日射アルベド関数形の同定

前記したように、SUMMに用いる要素面アルベドは、直達光アルベド(a_{dir})、散乱光アルベド(a_{diff})が必要である。しかし、これらを観測から直接求めることは難しい。本論ではまず、観測が容易な全天日射アルベドの太陽高度に関する関数形を同定する。コンクリート素材の場合、同一太陽高度で同一のアルベドが与えられると仮定できる。本論では通年を通した複数日の観測データから全天日射アルベドを太陽高度 η の関数として同定した。すなわち、 $a_{all} = g(\eta)$ である。これより後述する方法により、直達光アルベド $a_{dir} = f(\eta)$ を分離する。直達光アルベドが求まれば、以下の式(17)より散乱光アルベドは理論的に計算される。(Monteith, 1973)⁹⁾

$$a_{diff} = 2 \int_0^{\pi} f(\eta) \cdot \cos \eta \cdot \sin \eta d\eta \quad (17)$$

b) 直達光アルベドの分離計算

まず、水平面において以下の関係が恒等的に成り立つ。

$$a_{all} = \frac{RT_s}{R} \times a_{dir} + \frac{RD_s}{R} \times a_{diff} \quad (18)$$

式(18)の左辺は、観測値から同定された関数形 $g(\eta)$ が与えられる。太陽天頂角 η の時の散乱比を $K(\eta)$ とすると、式(18)は、式(17)を用い、次のように書き換えられる。

$$g(\beta) = (1 - K(\beta)) \cdot f(\beta) + K(\eta) \cdot 2 \int_0^{\pi} f(\eta) \cdot \cos(\eta) \cdot \sin(\eta) d\eta \quad (19)$$

ここで $K(\eta)$ の値が与えられると、式(19)の積分方程式を数値的に解くことができる。

散乱比 $K(\eta)$ は通常の観測では得られないことが多いため、既存の直散分離モデルを用いて決定する。詳細は参考文献¹⁰⁾を参照されたい。

(2) その他の解析条件

その他の解析条件は、表-1に示したとおりである。このように設定した妥当性については感度分析で検証されている。ここで、とりわけ気象条件に関しては注意する必要がある。気象条件の変化はキャノピーアルベドに非

常に敏感に影響をもたらしている。このため、ここに示した解析条件以外の気象条件では、解析結果は完全に適応性を失うことに留意されたい。

表-1 その他の解析条件

散乱比	0.2
鏡面反射比率	0
多重反射回数	3回($\varepsilon_T = \varepsilon_D = 0$)
気象条件	年平均的な日照率1.0

7. 解析結果とモデル検証

ここに解析結果と観測値の比較の一例を示す。図-6は7月10日の建蔽率0.25、図-7は9月26日の建蔽率0.25、図-8は9月24日の建蔽率0.44、図-9は12月9日の建蔽率0.44、共に建物は立方体の場合である。図の実線が厳密解法による解析結果を表している。参考までに、簡易解法による解析結果(点線)、直達光アルベド(a_{dir})、散乱光アルベド(a_{diff})、全天日射アルベド(a_{all})も併記されている。

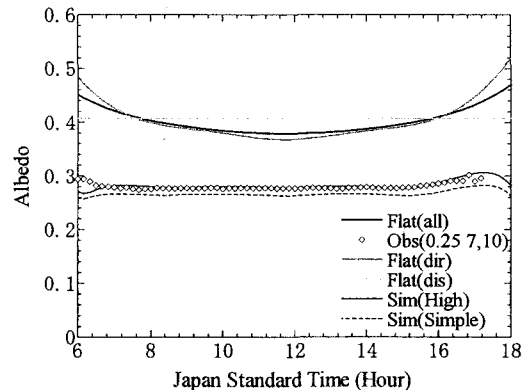


図-6 解析結果 (7月10日 建蔽率0.25)

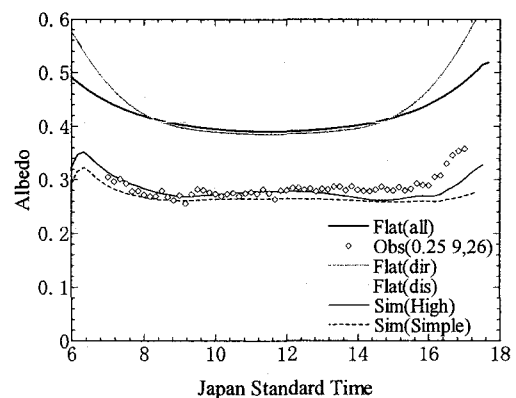


図-7 解析結果 (9月26日 建蔽率0.25)

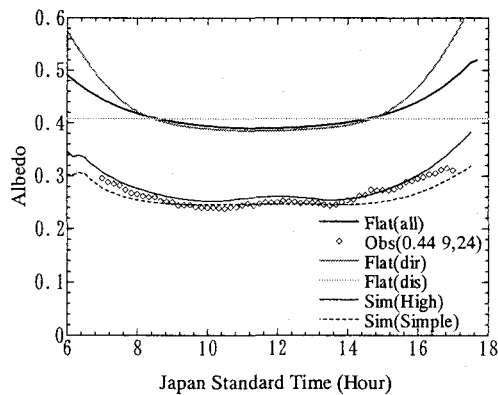


図-8 解析結果 (9月24日 建蔽率0.44)

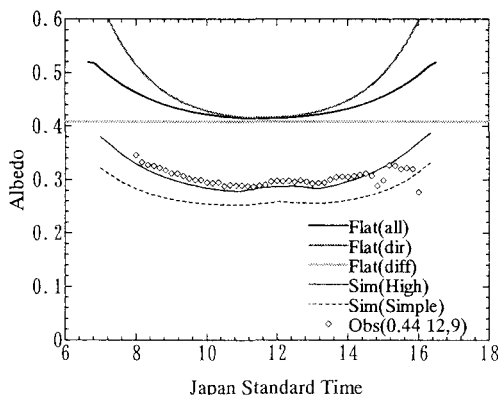


図-9 解析結果 (12月9日 建蔽率0.44)

図-6～図-9では共に、厳密解法による解析結果が、キャノピーアルベドの大きさ、時間変動を非常に良く再現性している。前述したように、既存の2次元モデルの3次元への拡張や、要素面アルベドの入射角依存性を考慮しない3次元モデルは3次元アルベドを的確に再現していない。3次元アルベドを良好に再現したのは本論が初めてである。しかし、細部に注目すると、若干の不一致が見られる。これらは以下のa)～d)である。ここに示した4種の検証結果のみから明確な考察を行うことは難しいが予測される誤差要因を記しておきたい。

a) 低太陽高度時の不一致

低太陽高度時に、観測値が解析値に比べて低くなる場合がある。

誤差要因：放射計の感度、低太陽高度時の散乱比の増加

b) 瞬間的なアルベドの低下

瞬間的にアルベドが低下することがある。

誤差要因：瞬間的な全日射量の減少

c) 午前、午後の非対称性

午前に比べて午後のほうが、観測値が解析値に比べて相対的に大きい。

誤差要因：観測場所の傾き

d) 建蔽率の増加に伴うアルベドの低下

建蔽率が増加するにしたがって、観測値が解析値に比べて相対的に低下する。

誤差要因：放射計の設置位置

8. 結論

以上において、厳密解法による解析結果は模型都市実験の実験結果を概ね良く再現した。したがって、SUMMの厳密解法は、3次元都市を構成する各要素面の放射過程を十分な精度を持って解析しうると言える。

謝辞：本論では文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B)

(2) (課題番号：12450197)、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (代表：神田 学) による財政的援助を受けました。また、本論を完成させるにあたって、上越教育大学、中川清隆教授より多くの有益な意見をいただきました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) Masson, V. (2000): A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorology*, 94, pp. 357-397
- 2) Kusaka, H., Kondo, H., Kikigawa, Y. and Fujino, K.: A simple single-layer canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, *Boundary-Layer Meteorology*, 101, pp. 329-358
- 3) Aida, M. and Gocho, K. (1982): Urban albedo as a function of the urban structure - A two dimensional numerical simulation, *Boundary Layer Meteorology*, 23, pp. 415-424.
- 4) 勝山滋郎・神田学・河合徹・中川清隆 (2002): 3次元都市キャノピーモデルのスケールモデル実験, *水工学論文集*, 46, pp. 85-90.
- 5) Arnfield, A. J. (1982): An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities, *Physical Geography*, 3, pp. 2, 97-122.
- 6) 田中賢治・池淵周一 (1994): 都市域水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, *京大防災研究所年報*, 73 B-1, pp. 299-313.
- 7) Iino, A. and Hoyano, A. (1996): Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data, *Energy and Buildings*, 23, pp. 199-205.
- 8) Kondo, A., Ueno, M., Kaga, A. and Yamaguchi, K. (2001): The influence of urban canopy configuration on urban albedo, *Boundary Layer Meteorology*, 100, pp. 225-242.
- 9) Monteith, J. L. (1973): *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold.
- 10) Paltridge, G. W. and Platt, C. M. R. (1976): *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*, New York, Elsevier

(2002. 9. 30受付)