

琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング

Land-surface Parameterization in the Lake Biwa Project

田中 賢治¹・中北 英一²・池淵 周一³

Kenji TANAKA, Eiichi NAKAKITA and Shuichi IKEBUCHI

¹正会員 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611 宇治市五ヶ庄)

In this paper, we discuss the LSP(Land-Surface Parameterization) that should be used to achieve the objective of the Lake Biwa project from modelling part. One of the suitable models is SiBUC which have been developed by authors, since it can describe the heat budget characteristics of each landuse - vegetation area, urban area, and water body.

This model's output can be fitted to the observation data by adjusting some parameters in the model. By adjusting four optical parameters and two physiological parameters, heat budget characteristics of paddy field is well simulated. Some optical parameters and heat properties for urban area are also adjusted.

Key Words : LSP, parameter tuning, vegetation area, urban area

1. 序論

琵琶湖プロジェクトはこれまで、滋賀県長浜市から伊香郡木之本町にわたる約 20km × 20km の領域を対象に、1992 年から毎年共同集中観測を実施してきた。95 年度より本プロジェクトは第 2 ステージに入り、衛星・航空機・地上同期観測及び陸面過程モデル、気象モデルを用いて 20km×20km に至る様々なスケールにおける平均量としての地表面からの水・熱フラックスを推定し、20km スケールまでのスケール効果を解明しモデル化することを目的として掲げている^{2),5),6)}。

さて、ここでいうモデルとは、適切な気象条件が与えられた時に、多様な地表面からの水・熱フラックスを精度良く算定でき(気象外力に対する適切な応答)、かつ地表面の多様性による水・熱フラックスの分布が与えられた時に、適切な大気場を再現できるものでなければならない。

本論文では、琵琶湖プロジェクトの陸面過程パラメタリゼーション(LSP)に求められる条件を議論した後、その 1 つのモデルとして SiBUC (Simple Biosphere model including Urban Canopy)¹⁾を紹介し、プロジェクト対象領域に適用するにあたって「気象外力に対する適切な応答」という条件を実現するためのモデルの設定方法について検討を行なう。

2. 陸面過程パラメタリゼーション(LSP)に求められる条件

以下では、気象モデルの格子サイズよりも小さなスケール(サブグリッドスケール)の多様性を陸面が持つ場合の陸面過程パラメタリゼーション(LSP)について議論する。

多様な地表面にモデルを適用する場合、地表面の多様性をすべて表現できる程度に格子を細かく(それぞれの格子領域が均一場とみなせるようなスケールで)切って計算するという方法(これを細分法と呼ぶことにする)が考えられる。すなわち細分法とは、対象グリッド領域内の多様性を形成している個々の均一場の中で最も小さいもののスケールで表現するということである。例えば、図-1(a)のように 3 種類の土地利用からなるグリッド領域(外枠は気象モデルのグリッド)を個々の均一場で表現するために、8×8=64 個のサブグリッドで分解するのが細分法である。

また地表面の多様性をその多様性の種類(カテゴリー)と面積比率によって表現する方法(これを面積率法と呼ぶことにする)がある。図-1(b)では、気象と陸面のグリッドサイズは共通であり、1 つの陸面グリッドの中でカテゴリーの数(3 つ)だけ計算をすることを示している(このためにはカテゴリー毎に状態変数が必要)。それぞれのカテゴリーで計算されるフラックスに面積率

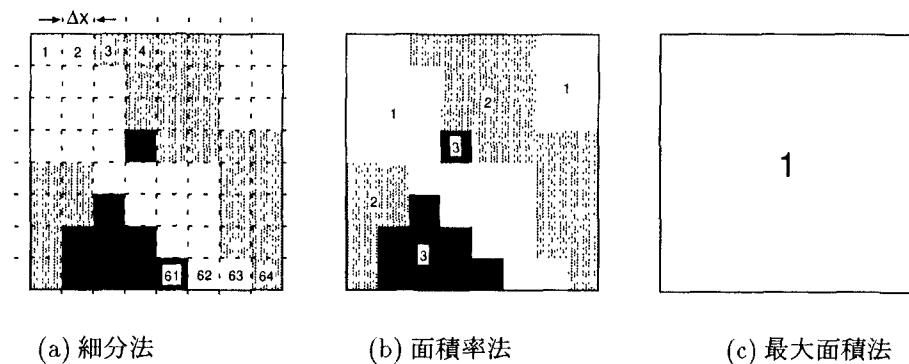


図-1 陸面過程パラメタリゼーションの例

による荷重平均をしてグリッド領域全体のフラックスとするのが面積率法である。

さらに単純な方法としては、グリッド内で占有率が最も大きなものでグリッド領域全体を代表させるもの(これを最大面積法と呼ぶことにする)がある。最大面積法は占有率が小さいものを切り捨てる方法に外ならず、切り捨てられるカテゴリーの割合が小さい(代表させるものが圧倒的に大きい)場合にのみ有効である。

さて、琵琶湖プロジェクトのモデリングで解明すべき課題は、序論でも述べた通り、20km スケールまでのスケール効果である。架空の場を対象とした数値シミュレーションで、スケール効果を地表面の多様性のスケールで表現しようという試みがなされている。ここでは、多様な地表面からのフラックスのコントラストとの相互作用の結果形成される大気場の不均一性そのものが、陸面フラックスの大きさを支配しているということが指摘されている(例えば田中ら²⁾)。その結果、スケール効果は熱的コントラストの絶対値と、コントラストのサイズで表現されており、このことを現実の場に適用したモデルで再現し、実測値で検証することがモデリングの基本的戦略となる。

このように熱的コントラストを適切に表現する必要性から、LSP としてはフラックスの算定精度が高いスキームを選ぶべきであり、計算時間の短縮効果だけを狙った最大面積法は適さない。

気象モデルをできるだけ細かいグリッド(例えば1km)で計算するとして、その陸面境界条件を細分法で計算するか、面積率法で計算するかはモデルの中で表現すべき‘多様性’の質(精度)に依存する。多様性として土地利用の違いまでを表現する(同一の土地利用に対して同一のパラメータを与える)場合には、細分法でも面積率法でも同一の計算結果となるため¹⁾、計算量が少ない面積率法で計算する。逆に同一土地利用内のパラメータの分布を与えることができる(またその必要性がある)場合には、すなわち、同じ水田という土地利

用カテゴリーに対しても、稲の発育状況の違いを表現するような場合には、細分法で計算する。リモートセンシングデータからこのようなパラメータの分布をうまく抽出できるアルゴリズムが開発されていない現在の段階では、サブグリッドスケールでパラメータを与えることはできない。

著者らが開発中の SiBUC¹⁾は、この面積率法を採用しているモデルであり、グリッド内の多様性として土地利用の違いまでを表現する場合には²⁾最適なモデルといえる。

3. SiBUC の概要

SiBUC は現在も開発中であり、従来のバージョン¹⁾からいくつか改良がなされた。特に大きな変更点は都市モデルの改良⁷⁾とキャノピー空間気温、水蒸気圧を土地利用毎に与えること(図-3、4参照)である³⁾。

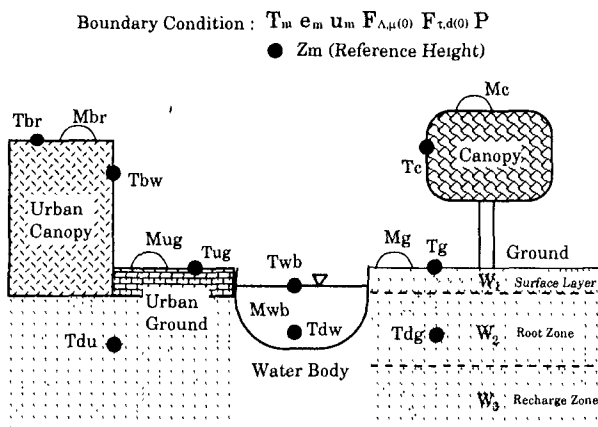


図-2 SiBUC の大気境界条件と予報変数

¹⁾ 気象外力として同じスケールの平均量を与えられるから。

²⁾ 面積率法でもグリッド間では異なるパラメータを設定することは可能であることに注意。

³⁾ 旧バージョンではグリッド内で共通としていた。

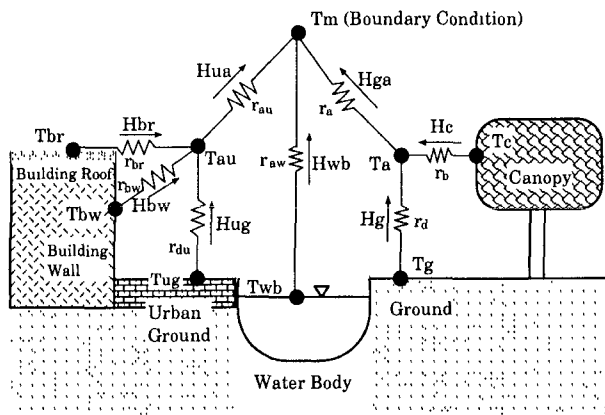


図-3 顕熱フラックスと抵抗の概念図

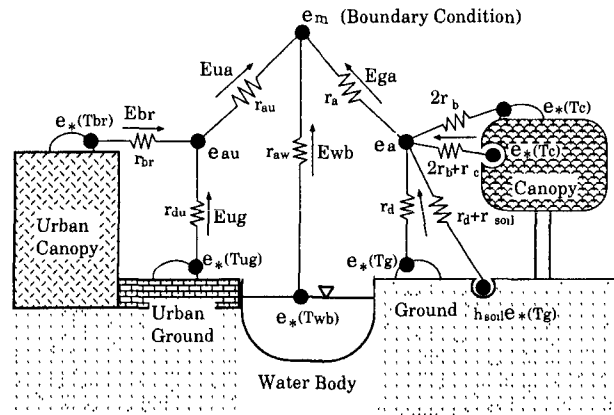


図-4 潜熱フラックスと抵抗の概念図

(1) 地表面要素と面積率

SiBUCモデルでは、1つのグリッド領域は3つの土地利用カテゴリーと6つの構成要素に分かれている。

- 緑地 (植物キャノピー、地面)
- 都市域 (屋根面、壁面、路面)
- 水体

これら3つの土地利用の熱収支特性は全く異なり、いかなる方法をもってしても集約化できないため、熱・水フラックスを精度良く算定するには、少なくともこれら3つの土地利用を扱わねばならない。そこで、これら3つの土地利用の面積率 (V_{ga}, V_{ua}, V_{wb}) とキャノピーカバー率 (V_c, V_{uc}) を各グリッドに与える。

$$V_{ga} + V_{ua} + V_{wb} = 1 \quad V_c, V_{uc} \leq 1 \quad (1)$$

土地利用カテゴリーの数はモデルの目的 (必要とされる精度) に依存して決定すれば良い。例えば、1つのグリッド内の2種類の植生 (森林、草など) をともに表現する必要がある場合には、緑地を2つに分け、それぞれの緑地に関して計算を実行すれば良いが、3つの土地利用と6つの構成要素がSiBUCの基本設定となる。

(2) 予報変数

SiBUCでは、緑地に加えて都市、水体に関する状態量も予報する (カテゴリー毎に状態量が必要)。

- 表面温度: 植物 (T_c), 地面 (T_g), 水面 (T_{wb}), 屋根面 (T_{br}), 壁面 (T_{bw}), 路面 (T_{ug})
- 地中温度⁴: 緑地 (T_{dg}), 水体 (T_{dw}), 都市域 (T_{du})
- 遮断水分量: 植物 (M_c), 地面 (M_g), 屋根 (M_{br}), 道路 (M_{ug})
- 土壌水分: 表層 (W_1), 根層 (W_2), 再補給層 (W_3)

(3) 大気境界条件

SiBUCに必要な大気境界条件はSiB¹¹⁾と同様である。

- 大気境界層内の参照レベル (z_m) における気温 (T_m), 水蒸気圧 (e_m), 風速 (u_m)
- 短波放射フラックス4成分 ($F_{\lambda, \mu(0)}$)
可視 (直達、散乱), 近赤外 (直達、散乱), 長波放射フラックス ($F_{r, d(0)}$)
- 降水強度 (P)

SiBUCの大気境界条件と予報変数を図-2に、フラックスと抵抗の概念図を図-3、4に示す。

4. 植生モデルのパラメータ調整

植生モデルでは多くのパラメータを使用しているが、それらは主に以下の3つに分類される¹¹⁾。

- 形態学的 (幾何学的) パラメータ
- 光学的パラメータ
- 生理学的 (生物化学的) パラメータ

パラメータの数が多いため、モデルの中で表現されている全ての物理過程を検証できるだけのデータセットを揃えることは事実上不可能である。現実的には、通常の熱収支観測で得られるデータのみを用いて、如何にパラメータを決定するかが問題となる。

熱収支特性として最も重要なものは有効エネルギー ($R_n - G$) の大きさと、それを潜熱と顕熱に配分する割合 (ボーエン比) である。本論文では一例として、琵琶湖プロジェクト96で得られた水田観測データ⁴⁾を用いて、

- 有効エネルギーの大きさ
- ボーエン比

を決定する手順を紹介する。

図-5は形態学的パラメータには水田の値を、光学的、生理学的パラメータには森林の値を与え (ただし土壌は水田を想定して粘性土)、観測値を気象外力としてSiBUCを実行した例である。水田では有効エネルギーの大部分 (8割以上) が潜熱に配分されているのが大きな特徴であるが、森林のパラメータを用いているため、

⁴ 各土地利用の日平均温度であり、季節変化する

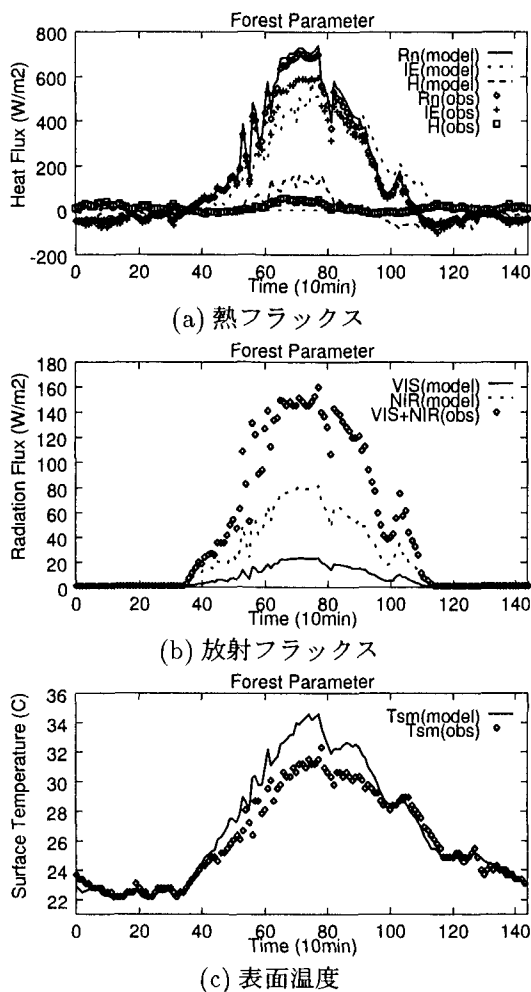


図-5 水田観測値とモデルの比較 (森林パラメータを使用)

モデルは観測値を再現することができない。また表面温度が高めに算定されていることにも注意する (後述)。

(1) 形態学的パラメータ

植物の高さ、葉の大きさ、分布形状などの形態学的パラメータは、キャノピー層内の乱流輸送特性、放射伝達特性などを支配しており、非常に重要なパラメータである。これらは植生の種類や季節 (樹齢) で決まるものであるため、観測時に直接計測することが困難な葉面積指数 (LAI) を除いて、あまりチューニングの対象とすべきではない。なお、図-5の計算で水田用に設定した形態学的パラメータの値は、キャノピー高度 ($z_c=70\text{cm}$)、葉の幅 ($l_w=1\text{cm}$)、長さ ($l_l=20\text{cm}$)、葉面積指数 ($LAI=5$) などである。

(2) 光学的パラメータ

植物の個々の葉による放射の反射、透過、吸収を考慮したキャノピー層内の放射伝達式の解¹⁰⁾は葉の量 (LAI) や葉の分布形状にも依存するが、容易にその影響が予想できるのは、やはり光学的パラメータ (反射

率 ($\alpha_{V/N}$)、透過率 ($\delta_{V/N}$)) である。

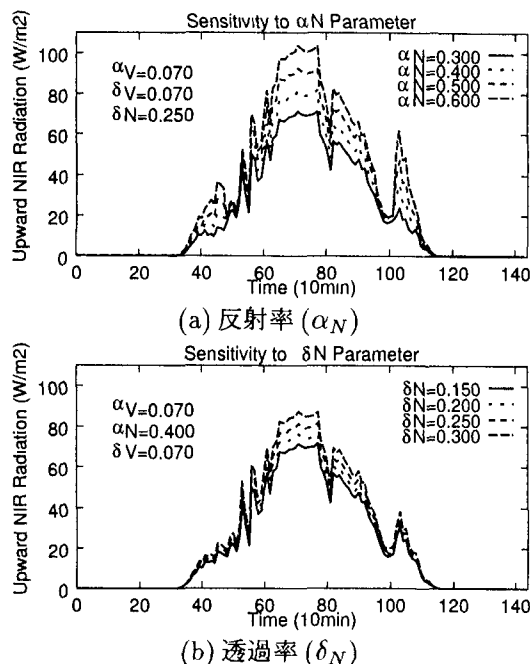


図-6 光学的パラメータ (α_N, δ_N) に対する感度

図-6は、光学的パラメータ (α_N, δ_N) に対する感度を示しており、これらのパラメータの値が大きくなるほど上向き放射フラックスは大きく、すなわち有効エネルギーは小さくなることがわかる。この性質を利用すれば、物理的意味を損なわない範囲でパラメータの値を調整し、純放射量 (R_n) を観測値に合わせることができる。図-5(a) では R_n が観測値に比べ大きめに算定されているため、水田の $\alpha_{V/N}$ や $\delta_{V/N}$ の値は森林のそれよりも大きめに設定すればよい。

(3) 生理学的パラメータ

木の葉からの蒸散には空気力学的抵抗 ($2r_b$) に加えて気孔抵抗 (r_c) がかかる (図-4参照)。個々の葉の気孔抵抗 (r_s) は次式で与えられる⁹⁾。

$$r_s = \left[\frac{a_2}{b_2 + \vec{F}_\pi \cdot \vec{n}} + c_2 \right] [f(T_c)f(\psi_l)f(\delta e)]^{-1} \quad (2)$$

ただし、 a_2, b_2, c_2 は種に依存する PAR⁵ 応答係数、 $\vec{F}_\pi$ は PAR フラックスのベクトル、 $\vec{n}$ は葉の法線ベクトルである。また $f(T_c), f(\psi_l), f(\delta e)$ はそれぞれ葉面温度、葉の水分ポテンシャル、飽差に関するストレス項である。 LAI と葉の分布関数を与えて、 r_s をキャノピー全体について積分したものがキャノピー気孔抵抗 (r_c) である。式 (2) に見られるように、生理学的パラメータ (a_2, c_2) は気孔抵抗の大きさを直接的に支配するのであり、またその値に不確実性が大きく含まれるた

⁵ Photosynthetically Active Radiation : 光合成有効放射

め¹²⁾、チューニングパラメータとして利用するのに適している。

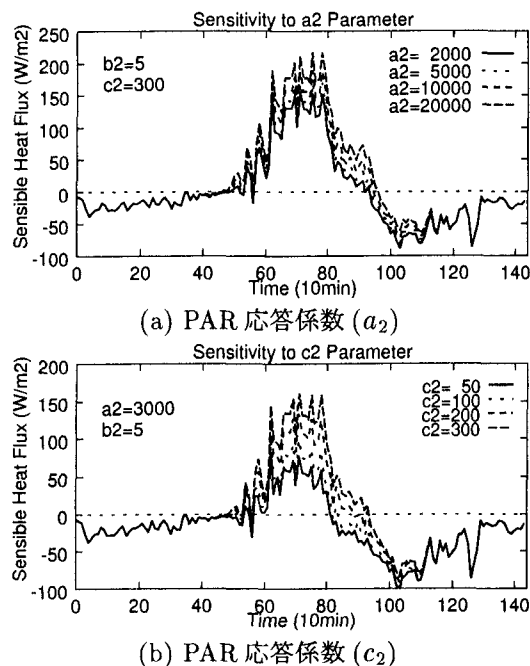


図-7 生理学的パラメータ (a_2, c_2) に対する感度

図-7は生理学的パラメータ (a_2, c_2) に対する感度を示しており、これらの値が大きくなるほど気孔抵抗の値が大きくなり、潜熱（顕熱）は小さく（大きく）なる。この性質を利用すれば、ボーエン比を観測値に合わせることができる。

図-5(a) では、ボーエン比はモデルの方が大きいため、ボーエン比が小さくなるように、すなわち顕熱が小さくなるように調整しなければならない。ボーエン比は顕熱に対する抵抗 (r_b) と潜熱に対する抵抗 ($2r_b + r_c$)⁶の比で決まるため、顕熱が小さくなるように調整するには r_b を大きく（顕熱が出にくく）するか、あるいは r_c を小さく（潜熱が出やすく）すればよい。

もし仮に r_b を大きく調整すれば、有効エネルギーが同じで抵抗値が大きくなるわけであるから、大気境界条件 (T_m, e_m) とのポテンシャル差を大きくしないと、このエネルギーを解放できず、結果として表面温度は高くなるを得ない。ところが図-5(c) では、表面温度はモデルの方が高くなっており、このような調整をすればボーエン比は合うかもしれないが、表面温度がますます観測値から外れ、適切な調整とはいえない。

したがって、ここでは後者の r_c が小さくなるような調整、すなわち a_2, c_2 が小さくなるような調整をすることになる。

これら6つのパラメータだけを調整して水田の熱収

支を再現したのが図-8である。また調整したパラメータの値を表-1にまとめて示す。

なお、ここで示したパラメータの調整法は、多数のパラメータの最適な組合せを決定するというものではなく、限られた実測値に対して、モデルの出力を合わせるものである。観測項目を増やし、さらに長い期間のデータを取得すれば、例えば日射条件がほぼ等しく、湿度条件が異なる日の観測データを比較し、飽差に関するストレス項 (式 (2) 中の $f(\delta e)$) を検討する⁷ といった、詳細な検討も可能になる。

表-1 森林と水田のパラメータ

	α_V	α_N	δ_V	δ_N	a_2	c_2
森林	0.07	0.40	0.07	0.25	3000	300
水田	0.20	0.50	0.15	0.40	3000	50

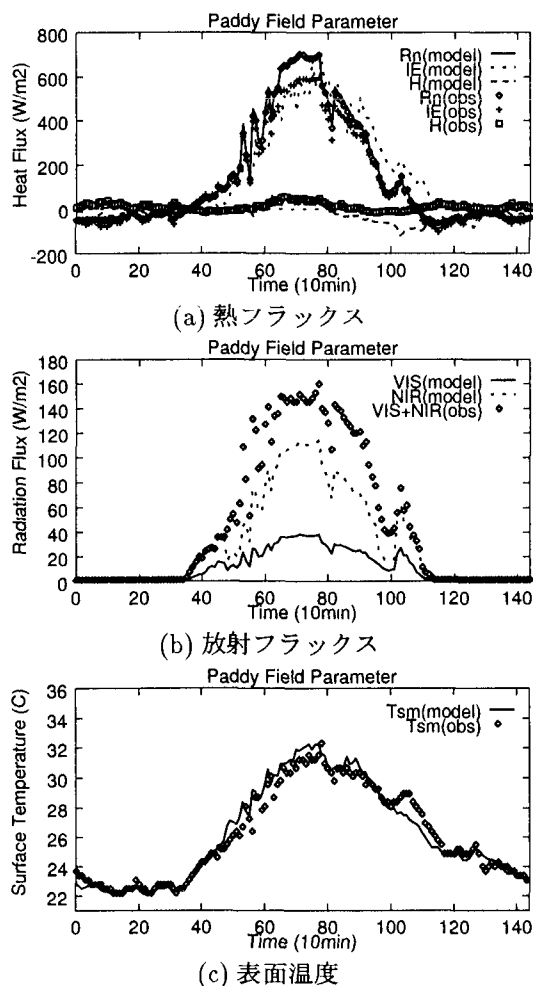


図-8 水田観測値とモデルの比較 (水田パラメータを使用)

⁶ ここでは簡単のため葉からの蒸散だけを考えている (図-4参照)

⁷ そのためには、他のストレス項 ($f(T_c), f(\psi_l)$) を分離できるようなデータも必要となる。

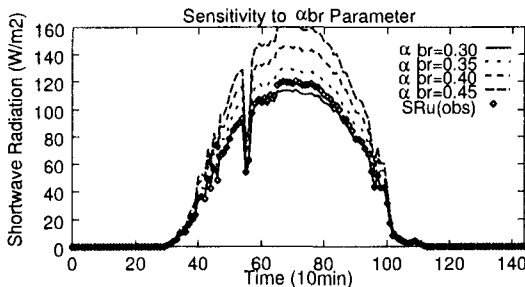
5. 都市モデルのパラメータ調整

ここでは、琵琶湖プロジェクト 96 で観測された長浜市のデータ⁸⁾を用いて都市モデルの調整を行なう。都市モデルでも多くのパラメータを使用している。

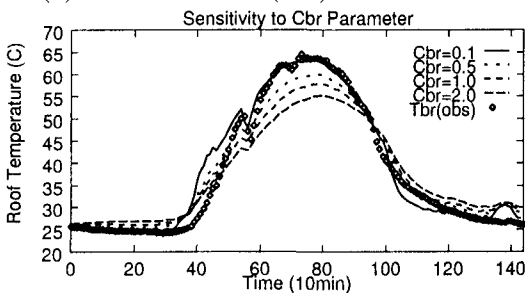
- 幾何学的パラメータ
- 光学的パラメータ
- 熱的パラメータ

植生モデルのような生理学的応答を記述するパラメータは必要ないが、人工排熱などの人為的効果を持つことや都市が多様な材質の構造物からなる集合体であることが都市のモデリングを困難にしている。SiBUC で扱う都市モデルは個々の都市キャニオンに対する放射収支をベースとしたものであるが、対象とする現象はあくまでキャニオンの集合体としての応答である。

幾何学的パラメータには建物の幅、建物階数(屋根面高度)分布、建蔽率などがあり、これらは実際の都市の状況に応じて設定すべきものである。これら都市の幾何学的構造を表現するパラメータは、都市キャニオンの集合体としての都市の熱環境を規定するものであり、その重要性は中村ら⁷⁾により指摘されている。



(a) 屋根面の反射率(α_{br})に対する感度



(b) 屋根面の熱容量(c_{br})に対する感度

図-9 都市モデルの感度

反射率などの光学的パラメータの性質は植生モデルの場合と同様である。特に都市では様々な材質の構造物が混在しており、ここでは様々な物性値を代表するような値を設定すべきである。図-9(a)は、屋根面の反射率(α_{br})に対する感度を示しており、図中四角でプロットされているのは2階建ての住宅密集地における実測値である。

また熱容量、熱伝導率などの熱的パラメータは表面温度の日変化の振幅や位相を規定するものである。これらの値が大きいほど日中の建物内部や道路への蓄熱量が大きくなり、温度の振幅は減少し、位相が遅れる(図-9(b)参照)。

6. 結論

本研究では、琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデルとして、土地利用の違いを適切に表現できるモデルであるSiBUCを採用し、プロジェクトで取得された熱収支観測データを用いて、水田、都市域のモデルパラメータの調整法を示した。今後は気象モデルとの結合モデルにより、大気場を再現し、スケール効果を議論していく。

参考文献

- 1) 田中賢治・池淵周一：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、京都大学防災研究所年報、第37号B-2, pp. 299-313, 1994.
- 2) 田中賢治・田中敬也・池淵周一：土地利用スケールと広域熱フラックスとの関係、京都大学防災研究所年報、第38号B-2, pp. 317-331, 1995.
- 3) 田中賢治・大石 哲・中北英一・池淵周一：琵琶湖プロジェクト'95における大気境界層観測、京都大学防災研究所年報、第39号B-2, pp. 285-299, 1996.
- 4) 田中賢治・前田敏彦・中北英一・池淵周一：水田におけるフラックス観測-琵琶湖プロジェクト96より-、水文・水資源学会1997年研究発表会要旨集, pp. 231-232, 1997.
- 5) 中北英一：琵琶湖プロジェクト'95報告-'95飛行船観測中間報告と今後の展望-、平成7年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A)06452274)研究報告書, 1996.
- 6) 中北英一・砂田憲吾：琵琶湖プロジェクト-その歩みと現在-、第5回水資源に関するシンポジウム論文集, pp.689-694, 1997.
- 7) 中村忠則・田中賢治・高埴琢馬：屋根面高度分布を考慮した都市域熱収支モデル、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、第2部, pp. 754-755, 1997.
- 8) 藤野毅・浅枝隆・井上雅博・坪松学・桐原博人・田中博春：湖岸の都市熱環境の観測とキャノピー内外の熱境界層について、水工学論文集、第41巻, pp. 349-354, 1997.
- 9) Jarvis, P. G. : The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. B*, vol. 273, pp. 593-610, 1976.
- 10) Sellers, P. J. : Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Int. J. Rem. Sen.*, vol. 6, No. 8, pp.1335-1372, 1985.
- 11) Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher : A Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, vol. 43, pp. 505-531, 1986.
- 12) Sellers, P. J. and J. L. Dorman : Testing the Simple Biosphere model (SiB) using point micrometeorological and biophysical data, *J. Clim. Appl. Meteor.*, vol. 26, No. 5, pp. 622-651, 1987.

(1997.9.30 受付)