

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

田中 賢治・池淵 周一

SIMPLE BIOSPHERE MODEL INCLUDING URBAN AREA AND WATER BODY, AND ITS APPLICATION TO THE BASIN OF LAKE BIWA

By Kenji TANAKA and Shuichi IKEBUCHI

Synopsis

A simple biosphere model that can be applied to complex land-use (including urban area and water body) surface (SiBUC) is presented here.

In the SiBUC model, the surface is divided into four land-use categories ; urban canopy, urban ground, water body and green area. This green area is described by the same way as the SiB model of Sellers et al. (1986)⁸⁾, and further divided into three parts ; vegetation canopy, ground cover and bare soil surface. The fractional areas of these surfaces are assigned to each grid. SiBUC has twelve prognostic physical-state variables ; five temperatures, four interception water stores and three soil moisture stores.

We tested SiBUC by using the micrometeorological data as atmospheric forcing variables, and the sensitivity of the model's output to changes in the various model parameters was examined. We applied SiBUC to the basin of Lake Biwa, and the heat balance of each land-use was well predicted.

1. 序 論

地球規模での環境問題が深刻になってきているが、特に地球温暖化、酸性雨等の問題に対処する為には、全球規模の大気（水、熱）の挙動を解明することが必要である。1つのアプローチとして、GCM（大気大循環モデル）が現在稼動中であり、そこでは、大気と地表面の相互作用が非常に重要である。

GCMの下部境界条件となる地表面からのフラックスの算定には、これまで非常に簡略化されたバケツモデルが利用されてきたが、このバケツモデルでは、植物の影響が表現できない。この問題に対し、植物の生理的機構を考慮したSiB（Simple Biosphere model）⁸⁾などの生物圏モデルが提案され、現在GCMに取り込まれつつある。ミクロスケール（～1km）の観測等から得られたにも関わらず、これらのモデルは、陸面水文過程をGCMのグリッドスケール（～100km）で表現しており、スケールアップが現在問題になっている。

そこで、著者らは陸面水文過程モデルの抱えているスケールアップの問題に取り組むために、流域スケール（～1km）から検討を始めるが、流域スケールにおいてはSiBでは扱っていなかった都市域や水体の影響は無視できないため、これらを取り込んだモデルSiBUC（Simple Biosphere including Urban Canopy）を提案する。本報で提案するこのモデルのスケールは第1段階として流域スケール（1kmメッシュ）であり、このスケールの水および熱循環過程を解明するとともに、このモデルを徐々に大きなスケールに適用し

ていくことにより、スケールアップの問題を検討していく。本モデルはそのための道具となるものである。

2. モデルの概要

まず、SiBUCモデルのベースになっているSiBモデルについて簡単にふれておく。

2.1 生物圏モデル (SiB) の概要

SiBは植生被覆の効果を考慮し、陸面水文過程の生理的・物理的本質を損なわぬパラメタリゼーションを目指しており、以下の陸面水文過程より構成される⁵⁾。

1. 葉の気孔の開閉による蒸散の抑制
2. 根からの土壤水の吸収
3. 葉による降水の補足 (降水遮断) と大気への直接蒸発 (遮断損失)
4. 土壤水の移動と流出
5. 積雪と融雪
6. アルベドの日変化
7. 葉面積・樹高等を考慮した粗度と地面修正量の計算

SiBでは植生は2層で表現されており、上層は樹木・灌木の多年生のキャノピーを、下層は草や草木種の一年生のグラウンドカバーを表す。地表面は裸地であるか草に覆われている。それぞれについて顕熱・潜熱・放射フラックスが計算され、面積に応じた重みを掛けて1格子点のフラックスが求まる。

土壤は3層よりなる。最上層は土壤水分の日変化を表し、降水強度が大きい場合の表面流出を表現するため約2cmと薄くとる。中間層は樹木または草の根が張っている。最下層には樹木の根が届いており、中間層へ土壤水を補給する、あるいは中間層からの土壤水を受け取る層である。最下層からは重力によって土壤水が流出するのみであり、地下水からの水の補足は考えていない。

Fig 1は土壤から根、導管、気孔、大気への水の輸送、顕熱・潜熱フラックスの輸送過程を示した概念図である。図中の抵抗は電気回路の抵抗と同様に考えることができ、フラックスはポテンシャル(温度・水蒸気圧)差に比例し、抵抗に逆比例する。SiBモデルには、2つの温度(キャノピー、地面)、2つの遮断水量(キャノピー、草)、3つの土壤水分量(表層、中間層、最下層)の7個の予報変数(prognostic variable)がある。SiBにとっての大気側の境界条件は、大気境界層内の参照レベル(大気モデルの最下格子点の高さであり、40m程度)における風速、温度、水蒸気圧、下向き長波及び太陽放射、降水量である。

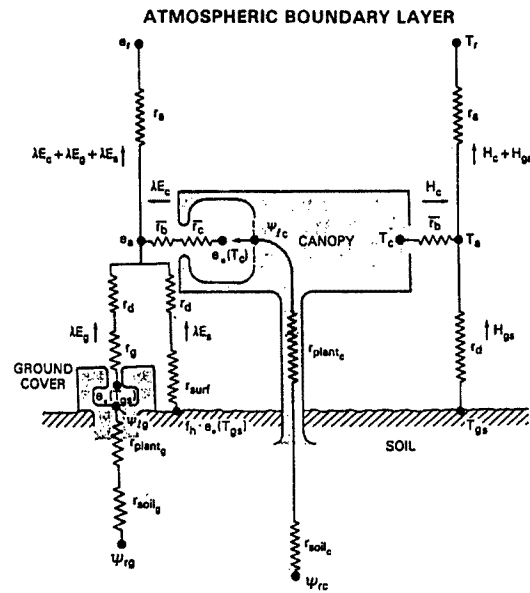


Fig. 1 Framework of the Simple Biosphere (SiB). The transfer pathways for latent and sensible heat flux are shown on the left and righthand sides of the diagram respectively. The treatment of radiation and intercepted water has been omitted for clarity.

2.2 SiBUC モデルの概要

(1) 面積率

実流域には様々な地表面条件が存在し、それらの物理的性質は大きく異なる。そこで、それら全てを分類し個々に変数を定義するのは困難であり、また計算量が増えてしまうため、SiBUC モデルでは地表面の状態を性質が比較的似ているものをまとめて、大きく次の4つに分類する (Fig 2)。

1. **都市キャノピー** (ビル, 家屋等の建物, コンクリート) Urban Canopy
2. **都市カバー** (道路等の舗装面, アスファルト) Urban Ground-cover
3. **水面** (河川, 水路, 湖沼等) Water Body
4. **緑地** (裸地, 植生地等の非舗装面) Green Area

ここで、1. と 2. は人工の不透水性の地面であり、最大貯留量 (0.1mm 程度) を超える雨は表面流出になる。また、3. と 4. は自然の透水性の地面であり、弱い雨の場合はほとんどが植物により遮断 (1 mm 程度) されるか、あるいは遮断されずに地面に達した雨も地面の浸透能までは地面に吸収される。浸透能よりも強い有効降雨がある場合あるいは表面層が飽和した場合にのみ表面流出が起こる。

各メッシュをこれらのいずれか1つで代表させるのではなく、これらの**面積率** (V_{uc} , V_{ug} , V_{wb} , V_{ga}) を各メッシュ毎に与える。この面積率はSiBUC モデルにおいて最も重要なパラメータの1つである。添字 uc は都市キャノピーに関するもの、ug は都市カバーに関するもの、wb は水面に関するもの、ga は緑地に関するものを表すことにする。上の分類の内、SiB で扱っているのは4. の緑地の部分だけである。したがって、SiB と同じように4. の緑地をさらに次のように3つに分類する。

- 4a. **植物キャノピー** (樹木, 灌木の枝葉) Canopy
- 4b. **グラウンドカバー** (草, 草木種) Ground-cover
- 4c. **土壌表面** (砂, 土) Soil

なお、これらの面積率 (V_c , V_g , $V_s = 1 - V_g$) は、緑地率 V_{ga} を1としたときの値である。添字 c はキャノピーに関するもの、g はグラウンドカバーに関するもの、s は土壌表面に関するものを表している。合成された添字 gs はグラウンドカバーと土壌表面の両方に関するものを表すことにする。

従来の研究⁶⁾において、鉛直2次元モデルではあるが、**1 km 以下のスケールの土地利用の配置の違いによる影響は、面積率の違いによる影響に比べて無視できる**ということが示されたので、本モデルを第一段階として1 km メッシュに適用する。なお、本報で用いる変数や記号の説明は **Table 1** にまとめて示す。

(2) 予報変数およびその支配方程式

SiBUC モデルには、対象とする場を広げたため、SiB よりも5個多い**12個の予報変数**が必要になる。

- 5つの温度 T_i ($i=uc, ug, wb, c, gs$)
- 4つの遮断水量 M_i ($i=uc, ug, c, g$)
- 3つの土壌水分量 W_i ($i=1, 2, 3$)

これらの変数と様々な抵抗を用いて、大気下部境界を横切る放射、顕熱、潜熱、運動量フラックスを計算

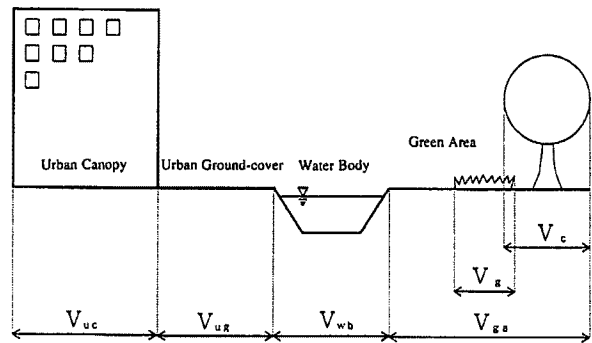


Fig. 2 Schematic image of the fractional area in SiBUC. The placement of each land-use is not described in SiBUC.

し、大気側のモデルに受け渡す。

温度 T の支配方程式 (5つ)

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = Rn_i - H_i - \lambda E_i + Q_M \quad (i = uc, ug, wb, c, gs) \quad \dots\dots(1)$$

式(1)において、都市域に対するものに人工熱源項 Q_M を加えることに注意する。

遮断水量 M の支配方程式 (4つ)

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = P_i - D_i - \frac{E_{wi}}{\rho_w} \quad (i = uc, ug, c, g) \quad \dots\dots(2)$$

土壌水分量 W の支配方程式 (3つ)

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} [P_1 - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} (E_s + E_{dc,1} + E_{dg,1})] \quad \dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} [Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{1}{\rho_w} (E_{dc,2} + E_{dg,2})] \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{2,3} - Q_3 - \frac{1}{\rho_w} (E_{dc,3})] \quad \dots\dots(5)$$

(3) 放射過程 (アルベド)

植生は可視と近赤外領域で放射特性が全く異なるため、SiBでは可視・近赤外の2スペクトル成分ごとに、かつ直達・散乱光各々、計4成分について、双流近似 (two-stream approximation) の放射伝達方程式を使いキャノピー、草・地面に吸収される太陽放射量を計算する。しかし本モデルでは、以下のような太陽光の入射角や地表面の形状・状態パラメータを取り入れた形で、全放射フラックス (4成分の合計) に対するアルベドを計算し、光の吸収を扱うことにするが、アルベドの日・季節変化のよい近似となる。

植生のアルベドは太陽光の入射角と植物の高さ (z_c) を考慮し⁷⁾,

$$\alpha = [a + b \ln(z_c)] \mu^c \quad (a = 0.158, b = -0.0193, c = -0.557) \quad \dots\dots(6)$$

ただし μ は太陽光の入射角のコサインである。

土壌のアルベドは太陽光の入射角と表層土壌水分量 (W_1) を考慮し⁷⁾,

$$\alpha = a \exp(b\mu) + 0.15(1 - W_1) \quad (a = 0.337, b = -1.602) \quad \dots\dots(7)$$

都市域のアルベドは凹凸構造と都市キャノピーの高さ (z_{uc}) の影響を合わせた形状パラメータと太陽光の入射角を考慮し²⁾

$$\alpha = \left[a + b \ln \left(\frac{z_{uc}}{V_{uc}} \right) \right] \exp(c\mu) \quad (a = 0.341, b = -0.0555, c = 0.549) \quad \dots\dots(8)$$

(4) 熱赤外放射の交換

緑地の純放射フラックスは次式で表される。

$$Rn_{ga} = \langle F_c \rangle + \langle F_{gs} \rangle - \alpha \sigma T_c^4 V_{ga} V_c - \sigma T_{gs}^4 V_{ga} (1 - \alpha V_c) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 α は熱赤外放射に対する植物キャノピーの透過率を表し、グラウンドカバーおよび地面からの熱

赤外放射の一部がキャノピーにより捕獲され、放射冷却が減少することを表している。

都市域について

$$Rn_{ua} = \langle F_{uc} \rangle + \langle F_{ug} \rangle - \sigma T_{uc}^4 V_{uc} - \sigma T_{ug}^4 V_{ug} (1 - \beta) \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 β は都市域における熱の貯留を表現するために導入したパラメータであり、都市キャノピーと都市カバーの熱赤外放射交換係数と呼ぶことにする。この変数の物理的意味としては、

- 建物（都市キャノピー）の熱放射は屋根の上からだけでなく壁面からも出てくること
- 路面（都市カバー）から放出される熱放射の一部は都市キャノピーを暖めることに利用されること
- 建物の壁面からの熱放射は路面を暖めることに利用されること

が挙げられる。都市キャノピーと都市カバーの熱的な相互作用を表現するこのパラメータは都市域の温度環境を支配する重要なパラメータであり、適切に与えなければならない。熱赤外放射の交換に関する概念図を Fig 3 に示す。

(5) 潜熱・顕熱フラックス

渦拡散係数の逆数を高さ方向に積分したものが空気力学的抵抗になる。SiBでは拡散係数が風速に比例するというパラメタリゼーションを行っており、2つの境界条件（キャノピー上端と地面）を用いて、この比例定数を収束計算により求めている。しかし本モデルではキャノピー空間内の風速を指数プロファイルで与えることにし、収束計算は行わない。

表面抵抗はSiBと同様のものを用い、気孔抵抗はPAR強度、葉面温度、大気飽差、葉の水分ポテンシャルから、土壌表面抵抗は表層土壌水分量から決定される。

各土地利用ごとに、予報変数と抵抗を用いてフラックスを求め、面積率を掛ける。SiBと同様にキャノピー内の空気の熱容量を無視、あるいはキャノピー空間内の熱の貯留を無視することにより、これらのフラックスの合計をメッシュからのフラックスとして参照レベルで大気側へ出力する。

Fig 4は潜熱フラックスの概念図であり、都市域では遮断水分の蒸発 (E_{uc} , E_{ug}) が、緑地では葉の湿った部分から遮断水分の蒸発 (E_{wc} , E_{wg})、乾いた部分からの蒸散 (E_{dc} , E_{dg})、土壌表面からの直接蒸発 (E_s) が描かれている。

なお、潜熱・顕熱フラックス、空気力学的抵抗、表面抵抗については文献^(5).8).9)に詳しく書かれており、式系は省略する。

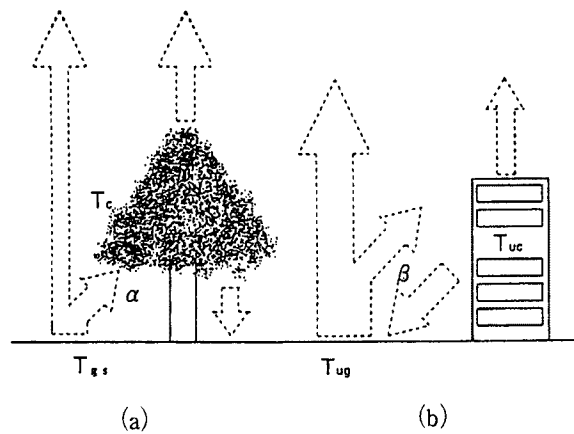


Fig. 3 Schematic image of thermal infrared radiation exchange between (a) Canopy and Groundcover, (b) Urban Canopy and Urban Ground-cover. α is canopy transmittance for thermal infrared radiation. β is urban exchange coef. for thermal infrared radiation.

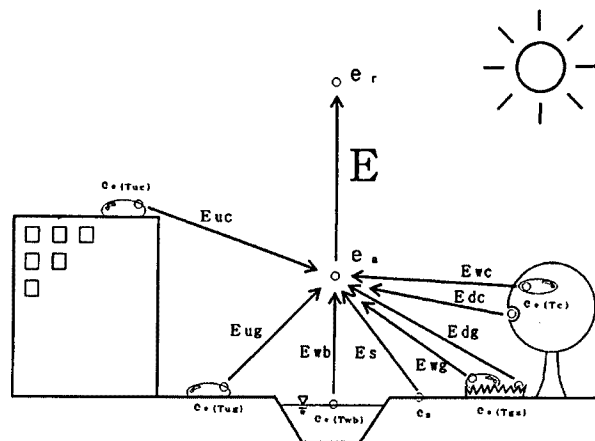


Fig. 4 Schematic image of latent heat flux in SiBUC.

(6) 降水遮断モデル

降水遮断モデルでは、それぞれの遮断水量に上限を設定しておき、遮断水量が上限値を越える場合には排水 (drainage) または流出 (runoff) が起こる。上層 (都市キャノピー, 植物キャノピー) で遮断しきれない分は下層 (都市カバー, グラウンドカバー) に落ちる。下層で遮断しきれない分は表面流出になる。都市域からの流出 (D_{ug}) と緑地からの流出 ($P_0 - P_1$) に水体に降った雨を加えるとメッシュからの流出になる。

降水遮断モデルでは各メッシュからの流出量が出力されるだけであり、河道に沿って流出量を追跡するような流出モデルを組み込むことが今後の課題である。降水遮断モデルの概念図を Fig 5 に示す。

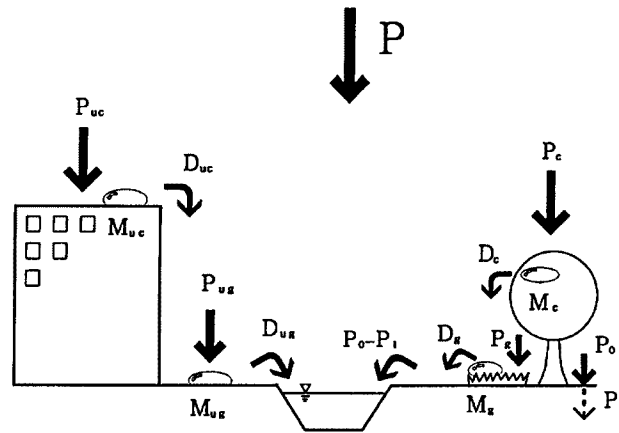


Fig. 5 Schematic image of interception of precipitation in SiBUC.

(7) 水温モデル

琵琶湖などの深い水体では、夏から秋にかけて発達した水温躍層が現れる。水温躍層は温かい表層と冷たい深層との境界に位置し、表層と深層とは画然と区分され、これら両層の間では水の混合が強く抑制される (安定成層)¹⁾。そこで、この表層から深層への熱の移動がないと仮定して、まず表層 (厚さ Z_s) の平均温度 T_s を求める。

$$\Delta T_s = \frac{\Delta t}{\rho_w C_w Z_s} (Rn - H - \lambda E_{wb} + \Delta Q) \quad \dots\dots(11)$$

ここで、 ΔQ は水の移動 (横方向の流入水や雨) にともなう熱の変化分である。

次に表層内の温度変化量のプロファイルがある関数 $\Delta T(z)$ で近似することにより、蒸発に関する表面温度 T_{wb} を求める。

$$\int_0^{Z_s} \Delta T(z) dz = \Delta T_s \times Z_s \quad \dots\dots(12)$$

$$\Delta T_{wb} = \Delta T(0) = A \times \Delta T_s \quad \dots\dots(13)$$

$\Delta T(z)$ を直線で与えると、 $A = 2$ 、2次関数で与えると、 $A = 3$ となるが、本モデルでは直線で与えることにした。 Z_s は水体の実際の深さとしてとらえるよりも、温度変化にとっての見かけ上の深さとして考える方がよい。水温モデルの概念図を Fig 6 に示す。

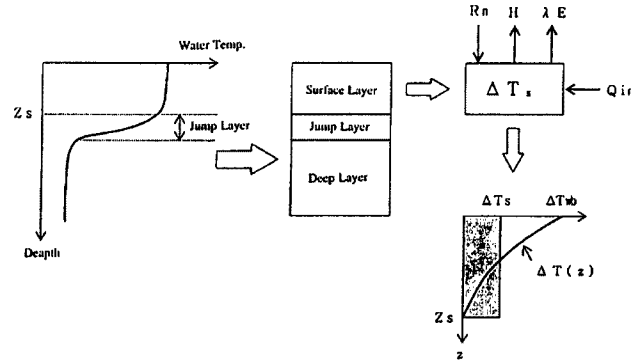


Fig. 6 Schematic image of water temperature model in SiBUC.

3. 計算手順

3.1 支配方程式の解法

温度の時定数は積分時間間隔 Δt (≤ 1 時間) と同程度である。このような方程式を時間積分する際には、時間振動をおさえるため後差分スキーム（インプリット法）を用いる必要がある。本モデルではメッシュ内あるいはメッシュ間での土地利用間の相互作用を考慮していないため、例えば植生地の温度 (T_c , T_{gs}) には他の温度 (T_{uc} , T_{ug} , T_{wb}) の影響は入らない。スケールアップをする場合には、配置の影響とともにこれらのメッシュ内あるいはメッシュ間の相互作用が重要になることが予想される。遮断水分量や土壌水分量は時間ステップ Δt よりゆっくり変化するので前方差分スキーム（エクスプリット法）を用いても十分である。遮断水分量は、時間について有限差分展開し陽解法で解くが、遮断蒸発量が遮断水分量を越えてしまわないように蒸発量を調節しながら計算する。土壌水分量も、時間について有限差分展開し陽解法で解く。水収支で土壌水分量が更新されて行くが、時間更新の間に満たすべき値として土壌水分ポテンシャルの収束計算を行う。この計算は通常 4～6 ステップ程度で収束する。

3.2 計算の手順

計算の手順を以下に示す。

1. パラメータの読み込み
2. 空気力学的抵抗の係数の計算
3. 初期条件の読み込み
4. カレンダー（月，日，時）（太陽光入射角の計算）
5. 気象条件の読み込み
6. 大気からの長波放射の計算（天気で判断）
7. 風速プロファイル，運動量フラックス，地面修正量，粗度の計算
8. 降水遮断，表面流出の計算
9. 純放射フラックスの計算
10. 空気力学的抵抗の計算
11. 気孔抵抗，地表面抵抗の計算
12. 潜熱フラックスの計算
13. 顕熱フラックスの計算

14. フラックスの温度偏微分の計算
15. 温度 (予報変数) の計算
16. 9. ~15. を2回繰り返す (仮更新)
17. 遮断水分量 (予報変数) の計算
18. 葉の湿っている割合の計算
19. 土壌水分量 (予報変数), 葉の水分ポテンシャル, 地下水流出の計算
20. アウトプット
21. 時間更新して4. にもどる

Table 1 Symbol definition.

symbol	symbol definition	unit
C_i	($i=uc, ug, wb, c, gs$) heat capacity	$Jm^{-2}K^{-1}$
Rm_i	($i=uc, ug, wb, c, gs$) net radiation flux	$W m^{-2}$
H_i	($i=uc, ug, wb, c, gs$) sensible heat flux	$W m^{-2}$
E_i	($i=uc, ug, wb, c, gs$) water vapour flux	$kg m^{-2}sec^{-1}$
P_i	($i=uc, ug, c, g$) rate of precipitation intercepted water	$m sec^{-1}$
D_i	($i=uc, ug, c, g$) water drainage rate	$m sec^{-1}$
$E_{w,i}$	($i=uc, ug, c, g$) rate of evaporation of intercepted water	$kg m^{-2}sec^{-1}$
D_i	($i=1,2,3$) thickness of i th soil layer	m
θ_s	porosity	
$Q_{i,i+1}$	($i=1,2$) flow between i and $i+1$ soil layer	$m sec^{-1}$
$P1$	infiltration of precipitation into the upper soil layer	$m sec^{-1}$
$Q3$	gravitational drainage from soil layer	$m sec^{-1}$
$E_{ab,i}, E_{dg,i}$	($i=1,2,3$) canopy, ground-cover abstraction of soil moisture by transpiration from the i th soil layer	$kg m^{-2}sec^{-1}$
$\langle F_i \rangle$	($i=uc, ud, wb, c, gs$) sum of the absorbed radiation	$W m^{-2}$
A_i	($i=1 \sim 6$) area of i th block	m^2
$Z_{s,i}$	($i=1 \sim 6$) depth of surface i th block	m^2
Hl_i	($i=1 \sim 6$) water level of i th block	m
Pl_i	($i=1 \sim 6$) precipitation in lake	$m sec^{-1}$
El_i	($i=1 \sim 6$) evaporation from lake	$m sec^{-1}$
$u*$	friction velocity	$m sec^{-1}$
$T_{in,i}$	($i=1 \sim 6$) temperature of river water into	K
$T_{i,i}$	($i=1 \sim 6$) mean temperature of surface layer	K
ρ_a	density of air	$kg m^{-3}$
ρ_w	density of water	$kg m^{-3}$
c_w	specific heat of water	$J kg^{-1}K^{-1}$
λ	latent heat of vaporization	$J kg^{-1}$
σ	Stefan Boltzmann constant	$W m^{-2}K^{-4}$

気象条件は1時間毎に更新され、この値を用いて温度は20分毎に仮更新される。3回目の仮更新の後、遮断水分と土壌水分が計算され、時間ステップを更新する。後で示す計算結果ではフラックスが乱れている

ことがある。これは時間ステップの粗さから来ているものであるが、インプットの気象条件が1時間毎にし
か得られないので、時間ステップを1分にとって計算しても乱れはなくなる。従ってこれ以上細かく時
間ステップをとる必要はないと考える。

4. 計算結果と考察

SiBUCは大気と地表面過程の相互作用を表現することを目的としたモデルであるが、本報では大気モデ
ルとの結合を行う前に、気象観測データを大気側の強制条件として SiBUC 単独でテストする。なお、計
算に用いた気象データ(風速, 気温, 湿度, 日射量, 降水量)は、琵琶湖流域湖東地区の集中観測点である
大中 (Fig 8 中★) のもので、期間は1991年7月1日~18日である。

4.1 SiBUC のテストラン

Fig 7 (a)~(e)は同じ気象条件のもとでの純放射(Rn), 潜熱(LE), 顕熱(H) フラックスの18日間の平均の日変化を表しており、それぞれ植物キャノピー, グラウンドカバー, 都市キャノピー, 都市カバー, 水面に関するものである。気象条件として雨, 気温, 日射も同時に示されている。

植物キャノピーでは日中に蒸散が起こっており、日射の影響がよく反映されているが、顕熱フラックスが朝方に負の大きな値を示し、10時ごろまで正にならない。通常日射が当たると葉面温度は(気温より早く)上昇するため、顕熱フラックスは純放射フラックスとほぼ同じ位相になる。ところが、この計算では朝方に温度が低くなったものの、夜明けとともに蒸発散が始まり、温度の上昇が遅れてしまったのであろう。朝方に温度が低くなった理由としては、降水のほとんどが夜間に起こり、通常は結露により潜熱フラックスが負になる時間帯(深夜~朝方)に遮断蒸発があり葉面の熱を奪ったことが考えられる。

グラウンドカバーでは日中ほとんど温度が上がらず(キャノピーの日傘効果)顕熱フラックスはわずかに負になっている。夜間にはキャノピーからの熱放射の影響もあり、それほど温度は下がらないため、顕熱はほとんどゼロである。朝方を除き潜熱は純放射を上回っているが、エネルギーの不足分は負の顕熱により補われている。夜間に降水があるため、グラウンドカバーにおいても潜熱は夜間でも負にならない。

都市域では位相のずれがはっきりと現れており、昼間に蓄えた(純放射より顕熱が少ない)エネルギーを夜間に放出(純放射より顕熱が多い)している。都市域では昼間に蓄えた熱が夜間の熱放射の増加をもたら

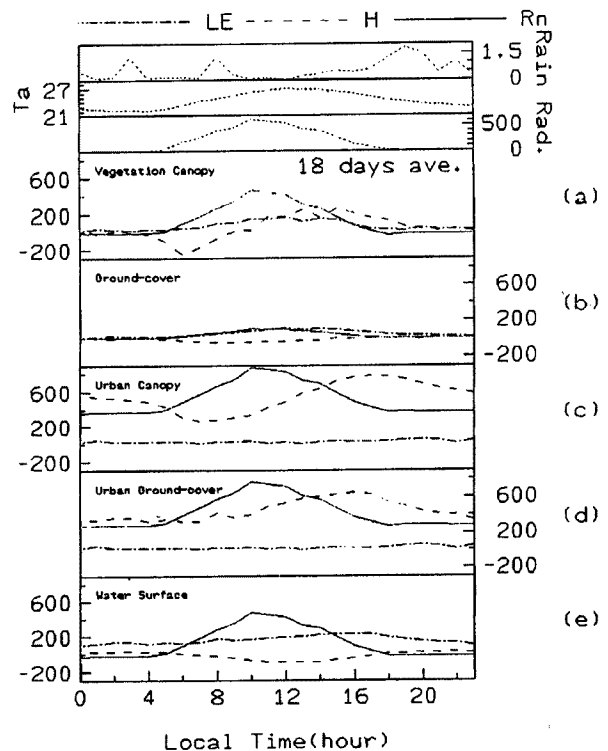


Fig. 7 Daily variation (18 days average) of net radiation (Rn), latent heat (LE) and sensible heat (H) for vegetation canopy (a), ground-cover (b), urban canopy (c), urban ground-cover (d), water surface (e). Atmospheric forcing variables (rain, solar radiation, air temp.) are also shown.

しているが、その一部を他方が受け取るという意味で導入した赤外放射交換係数 (β) はこのような都市の高温化を引き起こす要因となる。

昼間は純放射フラックスが大きく、また顕熱フラックスは負（水温が気温よりも低い）であるため蒸発のエネルギーが過剰に投入されているが、この余ったエネルギーが夜間の蒸発にまわされるため、水面では一日中蒸発が起こる。このような水面蒸発のメカニズムをよく再現しているといえる。

以上 SiBUC が出力した結果を平均的な日変化で見てきたが、植物キャノピーの顕熱が朝方に小さくなりすぎることを除けば、定性的には正しいものであるといえるだろう。SiBUC モデルの問題点については別の期間（降雨が少ない）のデータを用いて計算事例を増やし、今後も検討していく必要があり、場合によってはモデルに修正、改良を加えることになるであろう。

4.2 パラメータの感度分析

モデルの説明の際にも述べたが、SiBUC では新しい概念のパラメータをいくつか導入した。そこで本報では、SiBUC モデルに独自の5つのパラメータについて感度分析を行った。

1. 赤外放射交換係数 (β)
2. 都市キャノピーの高さ (z_{uc})
3. 都市カバーの厚さ (z_{ug})
4. 人工排熱量 (Q_M)
5. 水体の表層の厚さ (Z_s)

都市域においては遮断水分はほとんど全て蒸発してしまうが、蒸発の絶対量は少ないため（ほとんどは表面流出してしまう）、純放射エネルギーのほとんどは顕熱により消費される。そこで、都市域については温度のみを検討するだけで十分であると考えられる。水体においては蒸発量がかなり大きくなるため、潜熱・顕熱のエネルギー配分は非常に重要である。感度分析の結果を簡単にまとめる。

β は温度の位相にも変動幅にも影響を及ぼさないが、温度の高さそのものには影響を及ぼし、 β が大きくなるほど温度は高くなる。このパラメータセットに対する β の感度は、都市キャノピーに対して約 $0.9^\circ\text{C}/0.1$ 、都市カバーに対して約 $2^\circ\text{C}/0.1$ である。

z_{uc} は温度の支配方程式の熱容量に入っているため、都市キャノピーの温度の位相にも変動幅にも直接的に影響を及ぼしている。 z_{uc} の感度は位相に対して約 20 分/1m、変動幅に対して約 $0.3^\circ\text{C}/1\text{m}$ である。

z_{ug} も温度の支配方程式の熱容量に入っているため、都市カバーの温度の位相にも変動幅にも直接的に影響を及ぼしている。 z_{ug} の感度は位相に対して約 10 分/0.1m、変動幅に対して約 $0.7^\circ\text{C}/0.1\text{m}$ である。

Q_M には β と同様の効果があり、一般的に言われているように、確かに都市を暖めているが、その影響は β に比べてはるかに小さい。しかしこれは

「人工排熱が都市の温度環境にはほとんど影響を及ぼさないということを意味しているわけではなく、むしろ β はそれだけ重要なパラメータであり、慎重に決定されなければならない」

ことを示しているといえる。

Z_s が大きくなると水面温度の位相が遅れ、変動幅が小さくなるが、2m 以上ではほとんど変化はない（日変化も非常に小さい）。浅い水体において潜熱（蒸発）・顕熱ともに日中は大きくなり、逆に夜間は小さくなることは水温の変化の影響を受けたものであるが、総蒸発量はほとんど変化しないため、水収支を考える上ではこの Z_s というパラメータはそれほど重要ではないといえる。

5. SiBUC の琵琶湖流域への適用

琵琶湖流域には、かなり大きな水体（琵琶湖）が含まれ、河川や地下水の流入、湖流などの横方向の流れが存在するため、鉛直1次元的な扱いだけでは不十分であり、SiBUC をそのまま適用することは出来ない。

また、琵琶湖流域においては、琵琶湖の水位が非常に重要であるので、水位を出力できるモデル（水収支式）を加える必要がある。

5.1 琵琶湖モデル

1 km メッシュの場合、琵琶湖は641 メッシュとなり、これを3次元で計算をすると、計算量はばく大になり、また、湖の流れの様子を3次元的に追跡することは、本研究の目的からはずれる。

本研究では、琵琶湖の水位と湖面温度（蒸発）が得られればよいので、琵琶湖を Fig 8 に示すように6つのブロックに分け、それぞれのブロックの平均水位・湖面温度を、水収支・熱収支式から計算することにする。なお、このブロックは、流入河川の水温の性質や琵琶湖の形状を考慮して、分けたものである。

(1) 水収支式

水収支式は降水、蒸発、流入・流出（交換流）の全ての要素を取り込むと次式で表される。

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta t} = (P_i - E_i) + \frac{q_{in,i} + \sum q_{ji}}{A_i} \quad (i=1,6) \dots (14)$$

ここで、 q_{ij} はブロック i から j への流量と定義しており、 j から i へ流れる場合は負となることに注意する。なお、第6ブロックに対する式には瀬田川洗堰、宇治発電流量、京都疏水を合わせた琵琶湖からの流出量を加える。

(2) 熱収支式

ブロック間の交換流や流入河川の水温による熱を考慮すると、熱収支式は次式で表せる。

$$\frac{\Delta T_{s,i}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_w C_w Z_{s,i}} (Rn_i - H_i - \lambda E_i) + \frac{q_{in,i} (T_{in,i} - T_{s,i}) + \sum q_{j,i} (T_{s,j} - T_{s,i})}{A_i Z_{s,i}} \dots (15)$$

(3) 河川、地下水からの流入量 (q_{in})

SiBUC では、各メッシュからの流出量を出力するだけで、その流れは追跡していないが、各メッシュからの流出水はいずれ琵琶湖に到達することになるので、琵琶湖までの到達時間（流出遅れ時間）を各メッシュごとにあらかじめ与えておき、ある時間ステップにおける流出を、遅れ時間だけ後に琵琶湖に流入させることにする。そこで、遅れ時間が湖岸からの距離に比例すると仮定して、流出遅れ時間を設定した。

(4) 交換流量 ($q_{i,j}$)

交換流量 q は、水位差によるもの (q_{level})、風によるもの (q_{wind}) の合計で表せると仮定する⁴⁾。

ブロック i, j 間に水位差が存在する場合、ブロック間に仮想的な斜面を考え（Fig 9）、水がその斜面を滑り落ちるとすれば、重力による加速 α は、

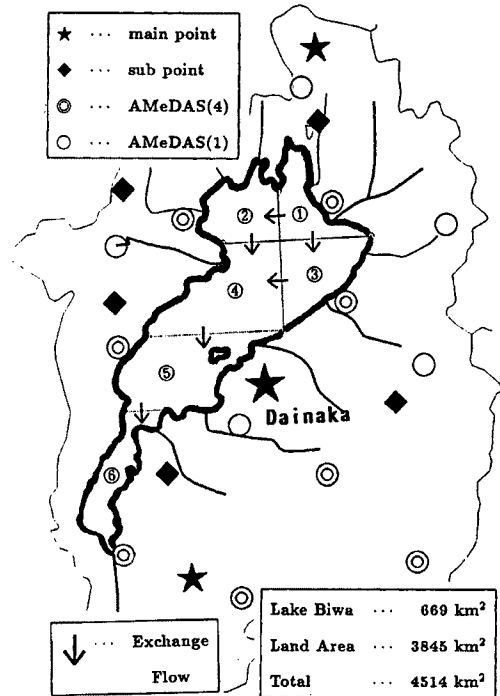


Fig. 8 Lake Biwa divided into the 6 Blocks, and main river. Arrows represent the exchange flows between each blocks. Location of observation points are also shown.

$$\alpha \propto g \sin \theta = \frac{H_i - H_j}{L_{i,j}} g \quad \dots\dots(16)$$

ただし、 $L_{i,j}$ はブロック間距離、 g は重力加速度である。

この加速度により Δt の間に流速は $\alpha \Delta t$ になるので、 i, j 境界を通過する流量は次式で表せる。

$$q_{level} = A_{i,j} \alpha \Delta t \propto \frac{A_i B_{i,j} g \Delta t}{(A_i + A_j) L_{i,j}} (H_i - H_j) |H_i - H_j| \quad \dots\dots(17)$$

ただし、 $B_{i,j}$ はブロック i, j の境界の幅である。

風によるせん断応力

$$\tau = \rho_a u_*^2 \quad \dots\dots(18)$$

により水が引きずられると考えれば、運動方程式は風による加速度を β として、

$$F \propto \rho_a u_*^2 = \rho_w A_i |H_i - H_j| \beta \quad \dots\dots(19)$$

と表される。これより、次式を得る。

$$q_{wind} \propto A_{i,j} \beta \Delta t = \frac{A_i B_{i,j} \Delta t}{(A_i + A_j)} \frac{\rho_a}{\rho_w} u_*^2 \quad \dots\dots(20)$$

以上をまとめると、交換流量は水位差の2乗に比例する成分と、摩擦速度の2乗に比例する成分の合計で表され、

$$q_{i,j} = C_{level} (H_i - H_j)^2 + C_{wind} u_*^2 \quad (H_i > H_j) \quad \dots\dots(21)$$

$$q_{i,j} = -C_{level} (H_i - H_j)^2 + C_{wind} u_*^2 \quad (H_i < H_j) \quad \dots\dots(22)$$

となる。

5.2 メッシュ情報

本研究では琵琶湖流域を南北方向に120メッシュ ($j=1\sim 120$)、東西方向に60メッシュ ($i=1\sim 60$) に分割し、北西端が $(i, j) = (1, 1)$ 、南東端が $(i, j) = (60, 120)$ に対応している。北西端を東経 $135^\circ 45'$ 北緯 $35^\circ 45'$ 、南東端は東経 $136^\circ 30'$ 、北緯 $34^\circ 45'$ とし、滋賀県外にあるメッシュは対象外にした。

(1) 土地利用分類

本モデルの最も重要なパラメータの1つである土地利用面積率は、各メッシュ毎に与える必要がある。このメッシュデータは、約100mメッシュを1つの土地利用で代表させた点だが、約1kmメッシュの中にくっ含まれているかで表現されたものを用いて、例えば、森林で代表されるメッシュが30個含まれる場合は、森林の面積率は0.3となる。なお、都市キャノピーと都市カバーを分離することは困難であるので、それらの合計である都市域の面積率を半分にした。また、水田は水面として扱うべきかも知れないが、本報では、水田も畑も全て草地(グラウンドカバー)として扱った。

(2) 水文・気象データ

気象データはできるだけ(空間的にも時間的にも)密なものを利用することが望ましいが、現在観測が行

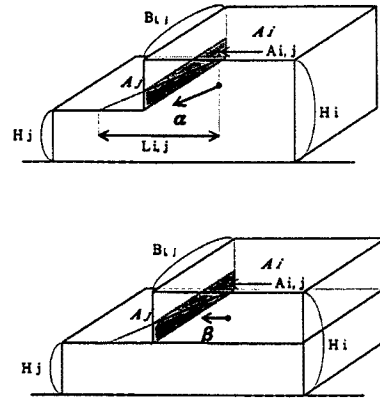


Fig. 9 Schematic image of exchange flow between i - j blocks.

われている点として本報では、アメダス（4項目8点、降水量のみ5点）、集中観測点（3点）、補助観測点（5点）の観測データを利用することができた。観測点の位置は Fig 8 に示されている。これらのデータを、各メッシュごとの値に変換する際に、各観測点からの距離の2乗に逆比例する重み付けを行った。

5.3 計算結果

(1) 琵琶湖モデルの考察

Fig 10 は琵琶湖の平均水位の観測値（点線）と計算値（実線）を比較したものであり、水位の変動パターンが比較的よく再現されているといえる。

Fig 11 の下半分は雄琴沖で観測された水温（点線）と計算されたブロック6の水温（実線）とを比較したものであり、図中点線で平らな部分は欠測である。8日以降は計算値の方が（日変化の幅よりも）高くなっているため、流出水が運び去る熱量や深層への熱の移動（復元項）を熱収支式に加えるなど、モデルの改善を行っていききたい。

図の上半分には、内挿で求められた気温と雄琴沖で観測された気温が示されており、陸域における観測値の方がやや日変化が大きくなっているが、内挿で求めた気温を計算に用いてもそれほど問題はないと考えられる。

(2) 陸域のフラックスの考察

Fig 12 は陸面の蒸発散量の分布を示したものであり、左側には土地利用図も示されている。この図のように潜熱（蒸発散量）は土地利用の影響をよく反映しており、森林では蒸発散は強く（ 3 mm day^{-1} ）、都市域では弱く（ 1 mm day^{-1} ）になっている。琵琶湖岸では非常に蒸発が強い（黒い点）メッシュがあるが、これは水面率が高くなっているためである。

この分布図は、土地利用間の違いをはっきり表しており、各グリッドを面積率のもっとも大きな1つの土地利用だけで代表させてしまうモデルでは（面積率の小さいものの影響が消えてしまうため）、スケールアップを行う際に大きな誤差を生むといえる。従って、本モデルのように、各グリッドに対し複数の状態変数を定義し、面積率を用いることにより、全ての土地利用の影響を残すというモデリングの方がスケールアップを行う際に有効であると考えられる。

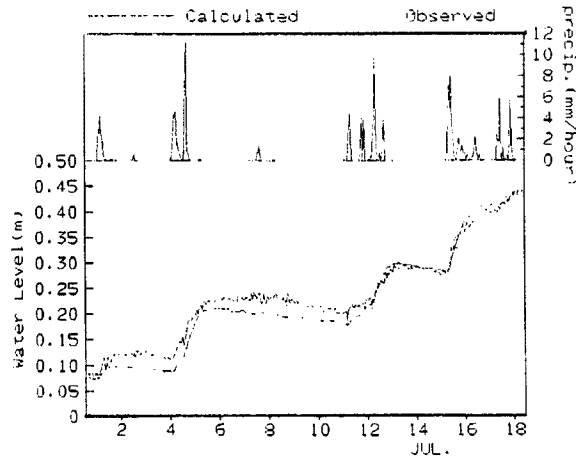


Fig. 10 Observed and calculated water level.

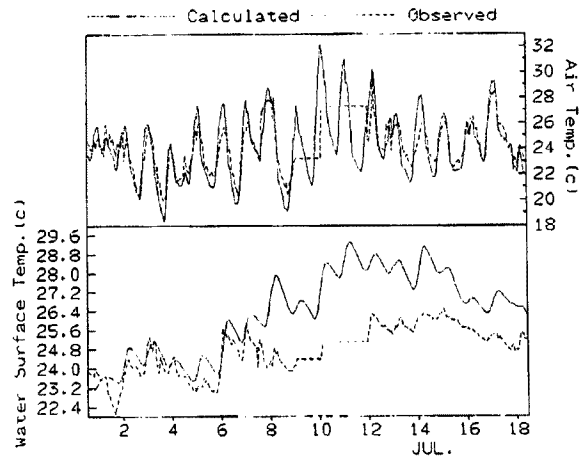


Fig. 11 Observed and calculated water surface temperature.

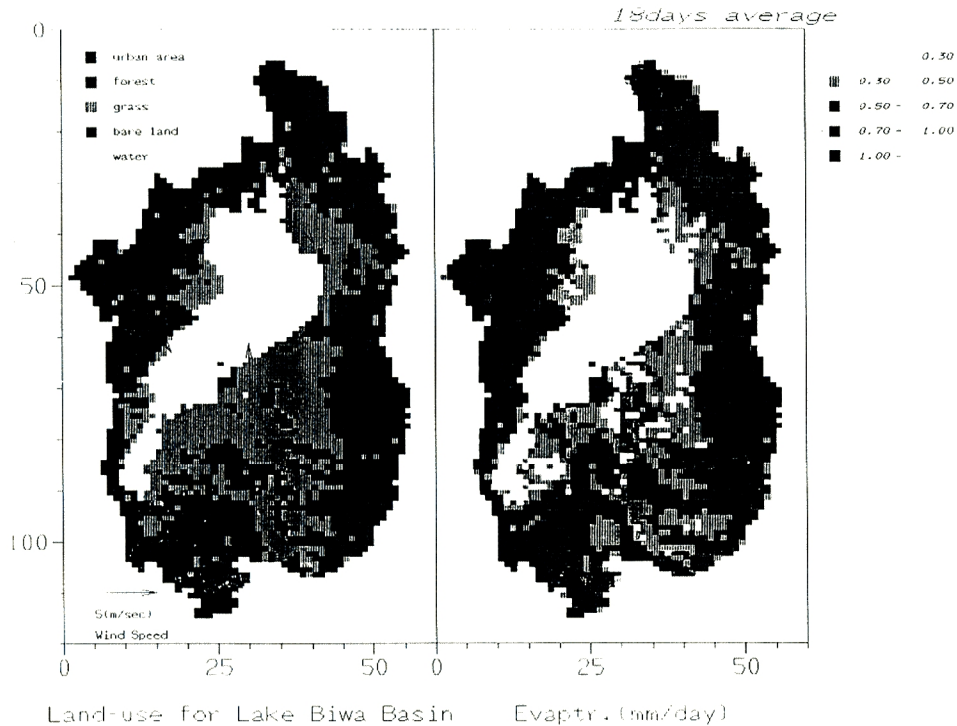


Fig. 12 Daily evapotranspiration (9 days average) from land surface of Lake Biwa Basin.

6. 結 論

本報では陸面水文過程のスケールアップの問題を検討するための道具となるべき流域スケールの蒸発散モデルを構築した。本モデルの特徴としては、

- 地表面条件を、都市キャノピー、都市カバー、水体、緑地の4つに分類し、緑地をさらに植物キャノピー、グラウンドカバー、裸地に分類して、それぞれの面積率を各メッシュに与えている。
- 地表面の凹凸や太陽光の入射角の影響を考慮したアルベドモデルによりアルベドの日変化を表している。
- 都市域において赤外放射交換係数というパラメータを導入し、都市域における熱貯留効果を表現している。
- 水体の表面温度を求める際に、日変化の影響が及ぶ深さとして表層を定義し、その表層の平均温度を熱収支式から計算した後で、その表層内の温度プロファイルをある関数（1次関数）で与えることにより、表面温度に変換している。

が挙げられる。

また、気象観測データを大気側の強制変数としてSiBUCモデルのテストランを行い、フラックスの日平均値や平均的な日変化を検討したところ、SiBUCモデルは各土地利用の熱収支の特徴をよく再現していた。

SiBUCでは新しい概念のパラメータをいくつか導入した。それらのパラメータの性質を調べるために簡単な感度分析を行った結果、都市域のパラメータは、温度を上昇させるもの（ β , Q_M ）と、温度の位相を遅らせ変動幅を小さくするもの（ z_{ur} , z_{ug} ）とに分かれ、水体のパラメータ（ z_s ）は、深い水体ではそれほど重要でないことが示された。

陸域を1 km メッシュで分割し、大きな水体である琵琶湖は6つのブロックにわけて、SiBUCモデルを実

流域である琵琶湖流域に適用したところ、琵琶湖の水位をうまく再現し、また陸域の潜熱・顕熱フラックスの分布は土地利用をよく反映したものであった。

今後は本モデルを用いて局地循環モデル等の大気モデル³⁾との結合を行い、流域スケールにおける水・熱の循環過程および大気・陸面間の相互作用について検討を行い、河道網、起伏、土地利用の配置等を考慮して陸面水文過程モデルのスケールアップを試みる。

参考文献

- 1) 岡本巖, 1992: びわ湖調査ノート—琵琶湖とともに30年の記録, 人文書院
- 2) 河村武, 1979: 都市の大気環境, 大気環境の科学3, 東京大学出版会
- 3) 葛葉泰久, 1993: 広域場からの蒸発散現象のモデル化とその時・空間平均化手法の開発に関する研究, 京都大学学位論文
- 4) 建設省土木研究所, 1986: 湖沼の総合的水管理技術の開発に関する研究
- 5) 佐藤信夫, 1989: 第1章, 生物圏と大気圏の相互作用, 数値予報課報告・別冊第35号: 力学的長期予報をめざして
- 6) 田中賢治, 1994: 都市域・水体をも考慮した流域スケールの蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学修士論文.
- 7) Dickinson, R. E., 1983: Land surface process and climate-surface albedos and energy balance. *Advances in Geophysics*, **25**, 305-353.
- 8) Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- 9) Sellers, P. J., and J. Dorman, 1987: Testing the Simple Biosphere model (SiB) with point micrometeorological and biophysical data. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**(5), 622-651.