

土地利用スケールと広域熱フラックスとの関係

田中 賢治・田中 敬也・池淵 周一

RELATION BETWEEN LAND-USE SCALE AND REGIONAL HEAT FLUXES

By *Kenji TANAKA, Takaya TANAKA, and Shuichi IKEBUCHI*

Synopsis

In this paper, two dimensional numerical model coupling land surface processes with atmosphere is developed. SiBUC is used for the land surface processes and LCM is for the atmospheric model.

By using this model, some experiments are carried out for studying the effect of land-use scale on regional mean heat fluxes. The validity and limitation of the heat flux parameterization using fractional area are investigated, too. The periodic pattern of two land-use conditions is used for simulation domain, changing the size and combination of each land-use.

Their experimental results show that the scale effects appear differently depending on the combination of the land-use. Especially, in combination of urban area and water body, the scale effect is large, and the fractional area heat flux parameterization is not valid.

A new heat flux parameterization scheme, which can incorporate the effect of land-use scale, is proposed from the simulation results.

1. 序 論

台風や梅雨など、流域よりも大きなスケールの大気の手動が流域の水・熱循環に与える影響は大きい。地表面と大気との熱、水蒸気、運動量の交換量は、大気の運動に大きな影響を及ぼすため、これらの相互作用を解明することが、非常に重要となる。

このような大気—地表面の相互作用を調べるために、大気と地表面過程を同時に取り込んだモデルによるシミュレーションがよく行われるが、両者の時空間スケールが異なるため、モデルの結合の際には注意が必要である。わが国のように地表面条件がモデルのグリッドサイズよりも小さなスケールで変化する場を対象とする場合、グリッド領域を複数の土地条件を代表する1つのパラメータで代表させてフラックスを計算するという手法が従来から行われてきた。この手法では、グリッド平均のパラメータを設定するのが困難であり、また誤差も大きくなるため、グリッド領域平均フラックスを、グリッド内の各土地利用ごとの面積の比によって領域熱フラックスを評価する方法（以下、面積率パラメタリゼーションと呼ぶ）がKimura³⁾により提案された。しかし、この手法では、格子領域内で個々の土地利用が散在しているか、まとまって存在するかという土地利用スケールの効果を表現できなかった。

そこで本報では、地表面水文過程モデルとしてSiBUC¹⁾を、大気モデルとして2次元のLCM（局地循環モデル）²⁾を用いた数値シミュレーションにより、面積率パラメタリゼーションの妥当性と限界について調べ、次に領域熱フラックスと土地利用スケールの関係に注目して領域平均熱フラックス算定のための新しいパラメタリゼーションについて検討を行う。

2. モデルの構成

本研究では、大気の運動に LCM を、地表面過程に SiBUC を用いる。

2.1 LCM

大気モデルは、Kikuchi et al.⁵⁾、Kimura³⁾ にならって、葛葉ら²⁾が開発した局地循環モデルである。基礎式は、Boussinesq 近似、静力学平衡を仮定したもので、連続式、運動方程式、温位の式、比湿の式、静力学平衡の式からなる。座標系はデカルト直交座標系ではなく、地表面に沿った z_* 系を用いており、地面の起伏を考慮する事ができる。

側方境界条件には、同じ土地条件が周期的に繰り返されている場を想定して、周期境界条件 (periodic condition) を用いた。上端の境界条件には放射条件 (radiation condition) を用いている。放射条件の考え方は、重力波等の擾乱を境界外には通過させるが、反射は防ぐというもので、領域上端にスポンジ層等を置いて重力波の吸収を行う必要がなく、計算機の負荷が軽減される。

数値計算法は、安定性と計算速度を考慮し、空間的には中央差分、時間的には陽解法 (マツノスキーム) と陰解法 (クランクニコルソン法) を組み合わせたスキームを用いる。

2.2 SiBUC

SiBUC は、現在 GCM に取り込まれつつある SiB⁴⁾ をベースにしており、対象とする場を都市、水体にまで拡張した陸面水文過程モデルである。詳細な説明は文献¹⁾に譲り、ここでは SiBUC の大きな特徴だけを述べる。

地表面の条件は、性質が比較的似ているものをまとめて、次のように大きく3つ (小さく6つ) に分類され、各グリッドに対し、これらの面積割合 (面積率) $V_i (i=ga, ua, wb, c, g, s, uc, ug)$ が与えられる。

1. 緑地 green area

- (a) 植物キャノピー (樹木) canopy
- (b) グラウンドカバー (草) ground cover
- (c) 土壌表面 soil

2. 都市域 urban area

- (a) 都市キャノピー (ビル, 家屋) urban canopy
- (b) 都市カバー (道路等の舗装面) urban ground

3. 水体 water body

以下、添字 ga は緑地 (c はキャノピー, g はグラウンドカバー, s は土壌表面, gs はグラウンドカバーと土壌表面の両方) に関するもの, ua は都市域 (uc は都市キャノピー, ug は都市カバー) に関するもの, wb は水体に関するものを表している。

SiBUC モデルは、温度5つ (ただし、長期間のシミュレーションでは地中温度の日平均値を加え6つ)、遮断水分量4つ、土壌水分量3つの合計12個 (13個) の予報変数を持ち、運動量、顕熱、潜熱フラックスが診断的に出力される。

(1) 都市のパラメタリゼーション

都市では莫大なエネルギーが消費されており、その一部はビルや道路の温度上昇に寄与する。本モデルでは人工熱源項 Q_M を強制条件として熱収支式に与える。

SiBUC では、森林による赤外放射のトラップ効果のアナロジーから、都市キャノピー (ビル) と都市カバー (道路) の間においても、それぞれが射出している赤外放射の一部を他方が吸収するというモデルを導入した。本モデルではこの赤外放射の交換率を β というパラメータで表しており、 β は都市の熱環境を支配する重要なパラメータであることが、感度分析により明らかにされている¹⁾。以上より都市域での熱

収支は次式で表される。

$$c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = Rn_i - lE_i - H_i + Q_M \quad (i=uc, ug) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Rn_i = (1 - \alpha_{ua})R_s + R_l - \sigma T_i^4 + \beta \sigma T_j^4 \quad (i=uc, ug) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし α_{ua} は都市域全体のアルベドである。

(2) フラックスの算定法

それぞれの面からの顕熱フラックス (H_i) は、地表面からキャノピー空間までの空気力学的抵抗 (r_i) とその温度差 ($T_i - T_a$) を用いて次式で表される。

$$H_i = \rho C_p \frac{T_i - T_a}{r_i} \quad (i=c, gs, uc, ug, wb) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、キャノピー空間内 (z_a) から参照レベル (z_r) までのフラックス (H_a) は、

$$H_a = \rho C_p \frac{T_a - T_r}{r_a} \quad \dots\dots\dots (4)$$

キャノピー空間内の熱の貯留を無視すると、地表面からのフラックスは全て z_r まで輸送されることになるので、次式が成り立つ。

$$\sum_i H_i V_i = H_a = \rho C_p \frac{T_a - T_r}{r_a} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(3), (5) より T_a を診断的に求めることができるが、空気力学的抵抗 (r_i, r_a) は T_a の関数でもあるので、繰り返し計算により T_a を求めることになる。この様にして求めた T_a を式(3) に代入すると、顕熱フラックスが計算される。

潜熱フラックスについても同様に (ただし、空気力学的抵抗に地表面抵抗が加わる)、キャノピー空間内の水蒸気圧 (e_a) が診断的に求められる。

2.3 LCM と SiBUC の結合

(1) 鉛直方向の接続

SiBUC と LCM は接地境界層内の参照レベル (z_r) で接続されるので、 z_r 以下の大気の状態は SiBUC で決定される。通常の陸面過程のパラメタリゼーションでは、地表面はある粗度とゼロ面変位を持つ“平面”として扱われているので、大気モデルの下端は地表面(地面)となる。しかし、SiBUC では鉛直方向に広がりを持ったキャノピーが存在しており、地表面を“平面”として扱っていないので、キャノピーの上端が大気モデルの下端となり、キャノピー層における風速 (u_2)、気温 (T_a)、水蒸気圧 (e_a) が境界条件となる (Fig. 1)。

境界条件 (変数の受け渡し)

- ・ 強制変数

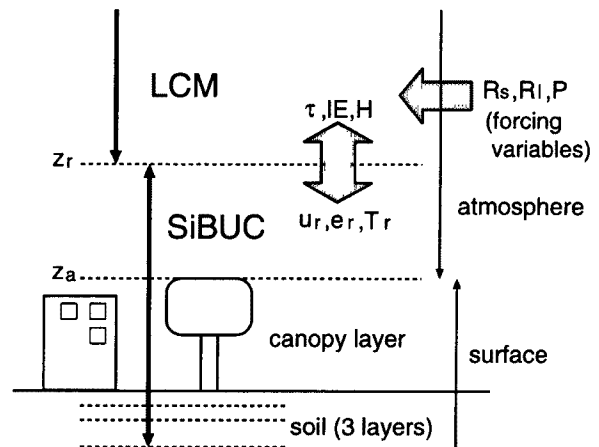


Fig. 1. Schematic image of the vertical connection between LCM and SiBUC.

- 日射, 大気放射, 降水量 (R_s, R_l, P)
- LCM \implies SiBUC
 - 風速, 気温, 水蒸気圧 (u_r, T_r, e_r)
- SiBUC \implies LCM
 - 運動量, 顕熱, 水蒸気フラックス (τ, H, E),
 - 風速, 気温, 水蒸気圧 (u_2, T_a, e_a)

(2) SiBUC と LCM の時・空間スケール

LCM では, 計算の安定条件と計算機の速度の制約から, 水平方向の格子間隔 (dx) は数 km 程度, 計算時間ステップ (dt) は数 10 秒程度が最適である。

これに対して, SiBUC は鉛直 1 次元モデルであるため, 格子点間に相互作用はなく, 格子間隔は自由に設定できる (ただし, ここで言う“自由”とは, 計算上格子間隔に制約がないという意味である)。地表面過程は大気の運動に比べて現象がゆっくり進行するので, 大気モデルと接続する場合には dt に関する制約はないといえ, 大気の計算時間間隔よりも大きくとれる。

3. 面積率パラメタリゼーション

本章では, 複合的な土地利用からなる地表からの熱フラックスを算定するための手法である, ‘面積率パラメタリゼーション’³⁾ の考え方について説明する。

この方法では, あらかじめ地表面をその熱特性によっていくつかの土地利用カテゴリーに分類する。1 つの格子点ではカテゴリー毎に表面温度の予報が行われる (1 つの格子内において, 地表面温度は同じカテゴリーの表面では一様であると仮定する)。カテゴリー i での熱フラックス ($[LE]_i, [H]_i$) は次式で評価される (大気のパラメータはグリッド全体 G で平均されていることに注意)。

$$[LE]_i = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{[e_s]_i - [e_a]_G}{r_i + r_{si}} \dots\dots\dots (6)$$

$$[H]_i = \rho C_p \frac{[T_s]_i - [T_a]_G}{r_i} \dots\dots\dots (7)$$

グリッド全体 G からの熱フラックス ($[LE]_G, [H]_G$) は, カテゴリー i の面積 V_i を用いて次式で表される。

$$[LE]_G = \sum_i \frac{V_i [LE]_i}{V_G} \dots\dots (8)$$

$$[H]_G = \sum_i \frac{V_i [H]_i}{V_G} \dots\dots (9)$$

ただし, V_G はグリッド面積である ($V_G = \sum_i V_i$)。

つまり, 大気パラメータは格子領域の代表値を, 地表パラメータは土地利用での代表値を用いて, 各土地利用ごとにフラックスを求め, その面積による重みづけ平均でその格子領域からのフラックスを評価する (Fig. 2)。SiB および SiBUC もこ

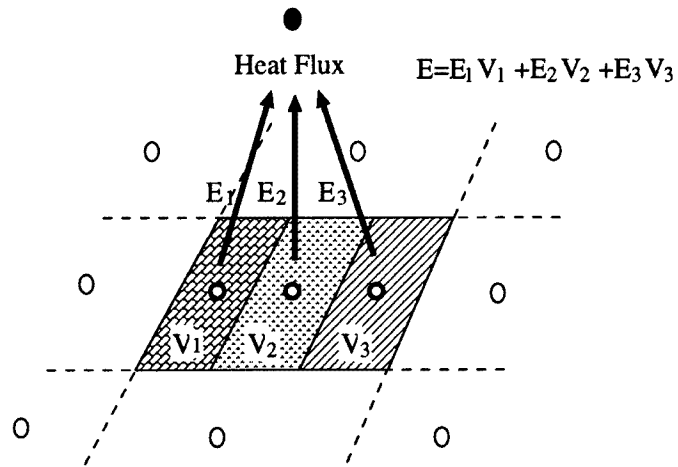


Fig. 2. Schematic image of fractional area parameterization.

れと同様の考え方で、各土地利用ごとの‘面積率’を用いて対象領域からのフラックスを算出している(式(5))。

4. 面積率パラメタリゼーションの評価

簡単な場合(陸面水文過程に SiB(UC) を用いず、かつ、地表面条件は乾燥と湿潤土壌の 2 つのみ、あるいは土壌と背の低い植生の 2 つのみ)についてはそれぞれ Kimura³⁾、田中・池淵¹⁾により、1 km 程度までの土地利用スケールにおける面積率パラメタリゼーションの妥当性が示されている。

しかしこの手法では、グリッド内の土地利用の割合が同じ場合には、それぞれの土地利用の配置とは無関係にパラメタライズされた結果は同じとなる。すなわち、土地利用がグリッドサイズよりも小さなスケールで変化している場合(あるいは、グリッドサイズを土地利用スケールよりも大きくとる場合)には土地利用のスケールが考慮されない。

そこで本章では、SiB(UC) を陸面水文過程に用いても(都市・水面が含まれる場合にも)同様に面積率で領域フラックスを評価することが可能か、またどの程度までグリッドサイズを大きくしても面積率のみでの評価が可能なのかを検討する。

4.1 計算条件

2 種類の土地利用が一組となって周期的に(無限に)繰り返す場を計算対象領域とし(Fig. 3)、土地利用の組合せを 6 通り(A-F)、土地利用スケールを 3 通り(1-3)変えて計算を行った(Table 1)。Case A, B, C は、SiB で考えられている木、草、裸地の 3 種類の土地利用について、Case D, E, F は、SiBUC で新たに取り入れられた都市と水面を含む場合についての事例である。また、それぞれの土地利用の組み合わせについて、面積率パラメタリゼーション(各グリッドにそれぞれの土地利用面積率を 0.5 ずつ与える)を用いた計算(4)を行った(Table 1)。

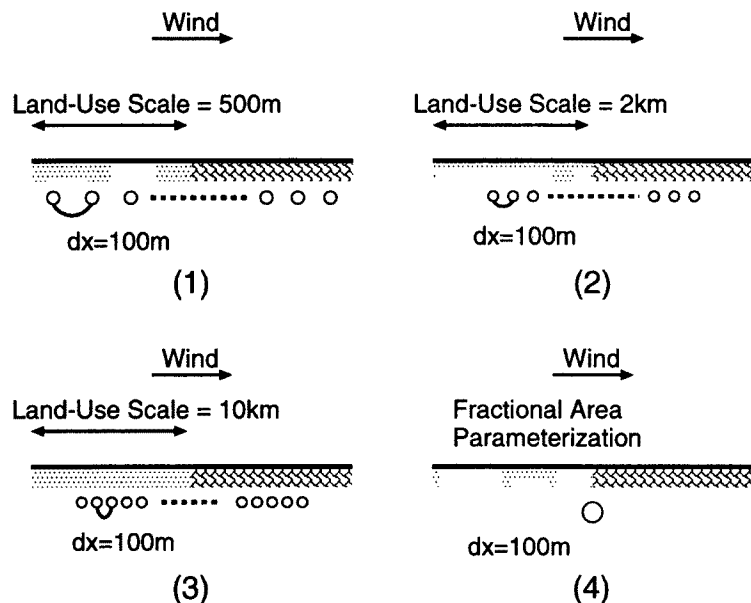


Fig. 3. Schematic image of surface conditions used in simulations.

面積率パラメタリゼーションが有効であるかを評価するためには、面積率を用いずに（モデルの格子間隔を土地利用スケールより小さくして）計算する必要がある。このため計算の時空間スケールは最小のケースに合わせて、 $dx = 100$ (m), $dt = 1$ (sec) とした。

なお、土壌（地中）の条件はいずれの場合も共通であり（土壌タイプは silt loam）、3層の土壌水分量（飽和度）の初期値はそれぞれ、0.7, 0.8, 0.9 である。主な計算条件を **Table 2** に示す。

Table 1. Surface conditions (land-use scale and combination) used in simulations. F. A. P. stands for Fractional Area Parameterization.

land-use	land-use scale			
	500 m	2.5 km	10 km	F. A. P.
tree-grass	A-1	A-2	A-3	A-4
grass-soil	B-1	B-2	B-3	B-4
soil-tree	C-1	C-2	C-3	C-4
green-urban	D-1	D-2	D-3	D-4
urban-water	E-1	E-2	E-3	E-4
water-green	F-1	F-2	F-3	F-4

Table 2. Conditions used in simulations.

grid interval (dx)	: 100 (m)
time step (dt)	: 1 (sec)
height of simulation domain	: 5500 (m)
lateral boundary condition	: periodic condition
top boundary condition	: radiation condition
thermal infrared radiation exchange coef. (β)	: 0.1
artificial heat source (Q_M)	: 30 (w/m ²)
height of urban canopy	: 10 (m)
thickness of urban ground-cover	: 0.1 (m)
leaf area index	: 8.6 (m ² /m ²)

4.2 計算結果と考察

(1) フラックスの時間変化

各土地利用からの潜熱、顕熱フラックスの時間変化をそれぞれ **Fig. 4 (a), (b)** に示す。この図をみると、Case E（都市・水面）以外は土地利用スケールの違いによるフラックスの顕著な違いはない（スケール効果は小さい）。また、Case E 以外では面積率によって各土地利用からのフラックスはかなり良い精度で評価されている。

Case E では土地利用スケールが小さくなるほど水面からの潜熱は大きく、顕熱は小さく（負の顕熱の絶対値が大きく）なっており、土地利用スケールが大きい場合ほど面積率により評価されたフラックスとの差は大きくなる。土地利用スケールが小さくなるほど潜熱が大きく（顕熱が小さく）なるのは、都市からの高温で乾燥した空気が水体の上空へ流入するためである。土地利用スケールが小さい場合は、水体の大部分がこの乾燥化の影響を受け、その結果蒸発量が促進される（オアシス効果）。

(2) 大気場の水平分布

参照レベルにおける午後3時の比湿、気温の水平分布を **Fig. 5 (a), (b)** に示す。この図では実際とは縮尺を変えて、図の半分の長さが1つの土地利用スケールに合うようにしている。

これらの図の Case E を見ると、土地利用スケールが小さな場合は、都市と水面の上空では同じような気温、比湿であるが、土地利用スケールが大きくなるにつれ、その差は大きくなっている。この傾向は Case F でも表れており、わずかであるが Case E と同様のスケール効果が表れている。

このように、スケールが小さな場合にはそれぞれの土地利用上空の大気物理量の差 ($\Delta T_r, \Delta e_r$) は小さく、領域平均的な大気場が形成されるが、スケールが大きくなるとその差は大きくなり、それぞれの土地利用に固有の大気場が形成される。

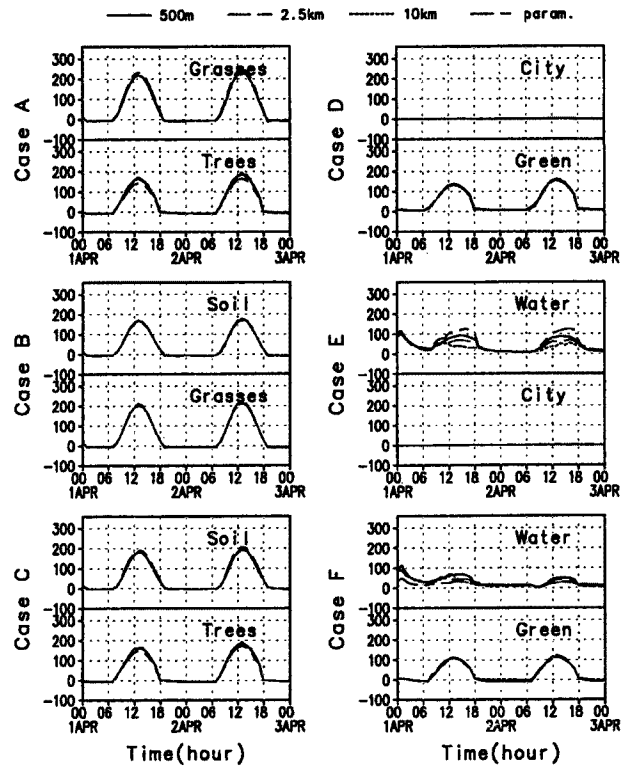


Fig. 4 (a). Time Variations of latent heat flux for each case.

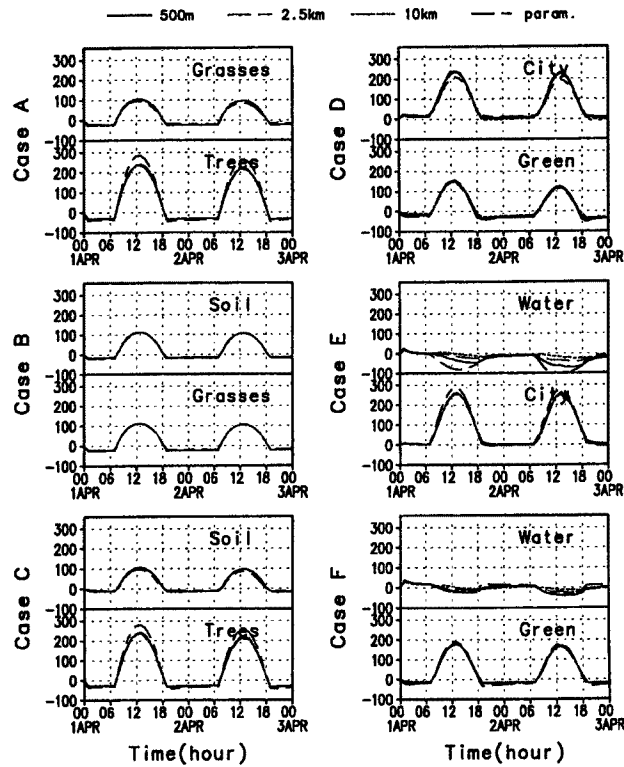


Fig. 4 (b). Time Variations of sensible heat flux for each case.

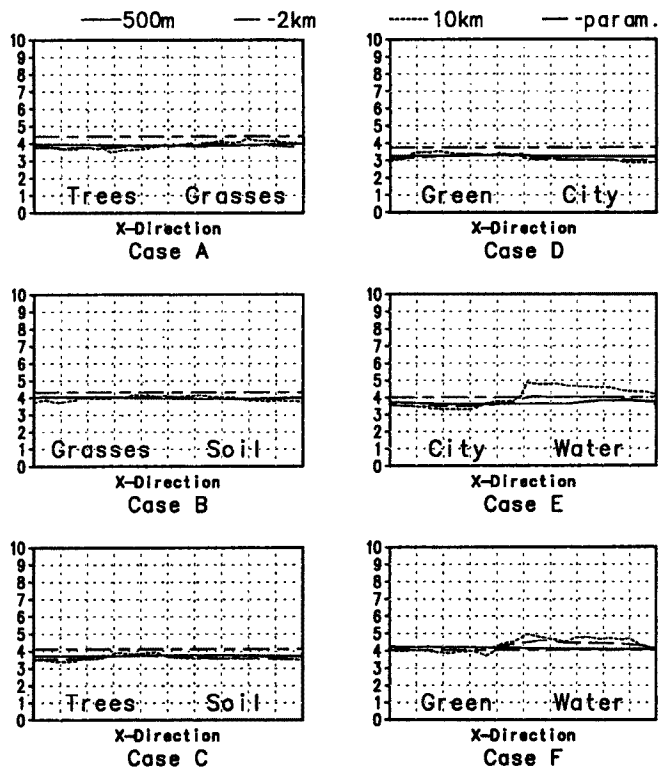


Fig. 5 (a). Horizontal distributions of specific humidity at reference level for each case.

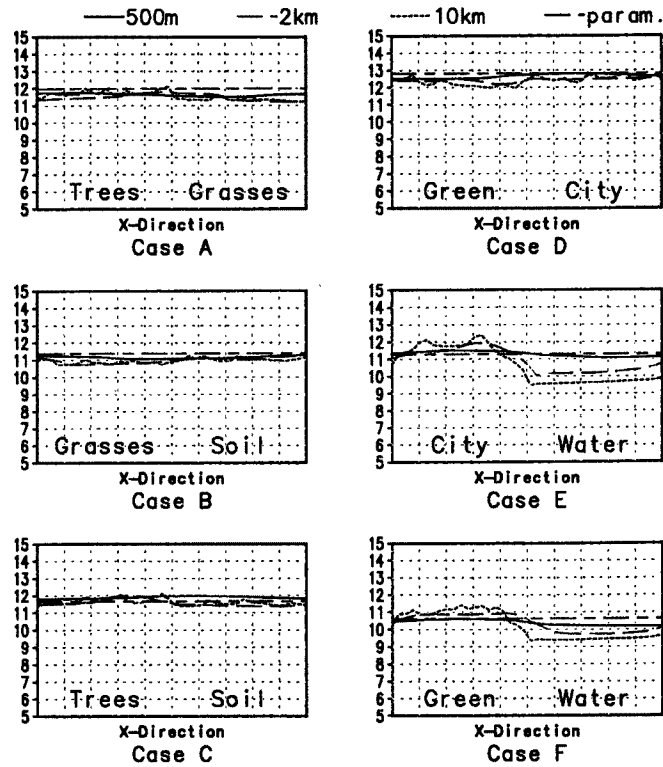


Fig. 5 (b). Horizontal distributions of air temperature at reference level for each case.

(3) スケール効果が現れる理由

地表面が吸収したエネルギーは、地表面条件（物性・植生等）と時間（季節・時刻）に依存して潜熱・顕熱・地中熱に分配される。土地利用が無限に続いている場合のこのエネルギーバランスと、その上空に形成される大気場が、その土地条件に固有（特有）のものであると仮定する。土地条件が有限の場合には風上の土地条件の影響をうけるため、ある土地条件の上流端では風上側の土地条件に固有の大気が吹きこんでくるが、風下側に流下していく間にその土地利用に固有のエネルギーバランスを保つべく大気はアジャストしていく。

土地利用スケールが大きな場合は、大気のアジャストが完了し固有の大気場に落ち着く。しかし、小さなスケールで土地条件が変化する場合には大気のアジャストが完了される前に次の土地条件が表れるため、それぞれの土地条件に固有の大気場にはならず、領域全体でそれらの平均的な状態になる。このように大気場は土地条件のスケールに依存しているといえる。それぞれの土地条件に固有な大気場の差が小さい場合には、スケール効果は表れないが（Case A-D, F）、都市・水面という極端な条件（顕熱が支配的な面と潜熱が支配的な面）の組合せの場合には、固有な大気場の特性が大きく異なるため、領域平均的な大気場になることによる効果が現れる。

Case E では、土地利用スケールが小さいほど、潜熱は大きく顕熱は小さいが、面積率を用いた場合に、最も潜熱は大きく顕熱は小さくなっている。面積率を用いた場合、全てのグリッドに都市と水面が半分ずつ含まれており、地表面は大気にとって均一な場となる。この場合、大気の物理量（気温・水蒸気圧）は、2つの土地利用に固有な値の平均的な値となり、一様な大気場になる。これは、2つの土地利用が無限小の大きさで交互に連続し、大気場がそれに全く追随できずに一様な場になる場合と似ている。したがって、面積率を用いた場合には、結果的に土地利用スケールを無限小にした場合と近似的に等しい状態になる。

ただし、同じ都市・水面の組合せでも、水体の深さによってスケール効果の大きさは異なる（傾向は同じ）。Case E は水体の熱的な深さ z_s が、1 m の場合であるが、 $z_s = 10$ cm の場合の結果を Fig. 6 に示す。 z_s が小さな場合には水体の熱容量が小さくなり、水面温度の日変化が大きくなる。このため、Case E に比べ、固有の大気場が都市のそれに近づきスケール効果は小さくなる。このように水体が浅い場合には Case A-D, F と同じように、面積率によるフラックス評価は良い精度で行われている。

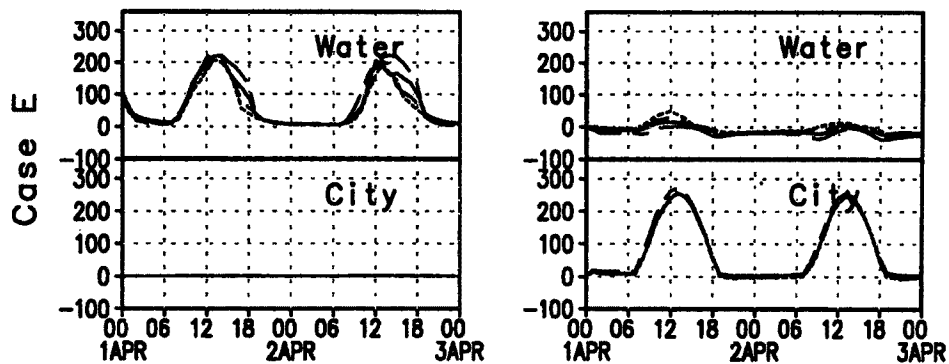


Fig. 6. Time Variations of heat fluxes. Conditions are the same as Case E, except that $z_s = 15$ cm.

5. スケール効果の導入

前章で述べたように、同じ面積率の場でもひとつの土地利用が細かく分かれて配置されている場合と、ひとつの土地利用が大きくまとまっている場合では、土地被覆の違いが大気に影響をおよぼし、フラック

すは局所的な地表面条件だけでなく、土地利用のスケールと風上の条件にも依存する。

熱収支特性が大きく異なる地表面条件ではスケール効果が現れ、土地利用スケールが大きな (~10 km) 場合には、それぞれの土地条件に固有の大気場となる。したがって、モデルのグリッドサイズがこのようなスケールよりも大きな (~100 km) 場合には、面積率パラメタリゼーションにおける重要な仮定(大気の均一性)が成り立たなくなるため、より精度良くフラックスを推定するためには、スケールの効果を導入する必要がある。

そこで本章では、土地利用スケールの効果をもっとも良く現れていた、都市・水面の場合についてさらに事例を増やし、計算結果を詳細に解析する。以下に示すのは、 $z_s = 1\text{ m}$ の場合についてのものであるが、 $z_s = 0.1\text{ m}$, 10 m の場合にも同様な傾向が得られる。

まず最初に前章で述べた固有の大気場を求めるために、無限に都市だけが続く場と、水面だけが続く場について計算を行った。次に都市と水面が交互に無限に繰り返す場合について土地利用スケールを5通り変えて計算を行った。

- 土地条件 (都市・水面)
- スケール ($\lambda = 500\text{ m}$, 1 km , 2 km , 5 km , 10 km , 無限大)

(1) 領域平均熱フラックスと Δe_r , ΔT_r の関係

2つの土地利用(都市・水面)間の参照レベルにおける平均水蒸気圧の差 Δe_r を横軸に、領域平均潜熱フラックス \overline{LE} を縦軸にとったものを Fig. 7 (a) に、平均気温の差 ΔT_r を横軸に、領域平均顕熱フラックス \overline{H} を縦軸にとったものを Fig. 7 (b) に示す。以下、物理量の添え字 r は参照レベルのもの、 a はキャノピー空間代表高さのものであることを表す。

Δe_r が小さいほど、 \overline{LE} は大きくなる (Δe_r が小さいことは、水面上の大気が風上の都市の影響を受けて乾燥していることを意味する)。ここで注目すべき点は、この関係が一次関数で近似できるということである。すなわち、 Δe_r と \overline{LE} には

$$\overline{LE}(t) = A_E(t) + B_E(t) \Delta e_r \dots\dots\dots (10)$$

という関係が成り立つ。ここで、 $A_E(t)$ は土地利用スケールが無限小の場合の潜熱フラックスであり、面積率パラメタリゼーションによるフラックスに近似的に等しい ($\Delta e_r = 0$)。

同様に、 ΔT_r と \overline{H} の関係は次式で近似できる。

$$\overline{H}(t) = A_H(t) + B_H(t) \Delta T_r \dots\dots\dots (11)$$

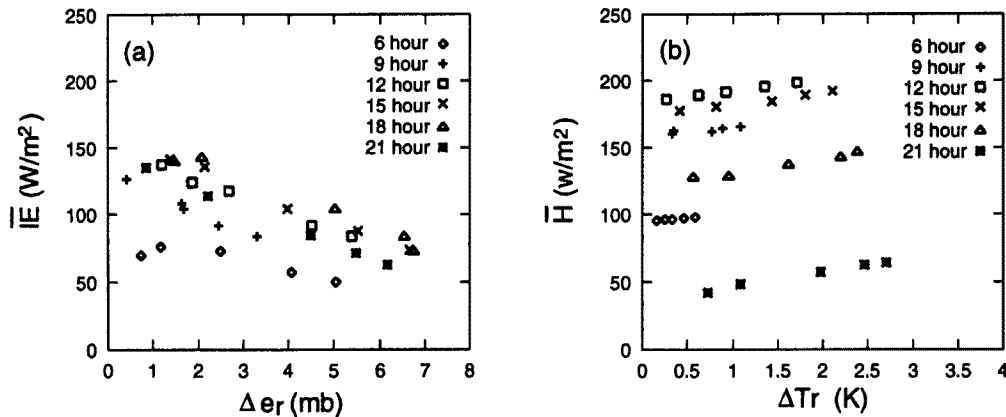


Fig. 7. Relations between (a) areal average latent heat flux (\overline{LE}) and vapor pressure discrepancy (Δe_r), (b) areal average sensible heat flux (\overline{H}) and air temperature discrepancy (ΔT_r).

ただし、 $A_H(t)$ は面積率パラメタリゼーションによる顕熱フラックスである。

(2) 土地利用スケールと Δe_r , T_r の関係

土地利用スケール (λ) を横軸に、平均水蒸気圧差 (Δe_r) を縦軸にとったものを Fig. 8 (a) に示す。 λ が大きくなるにつれ、 Δe_r は大きくなるが、その臨界値 Δe_c (1つの土地利用が無限に続く場合の結果を比較することにより得られ、横軸上 infinity の位置にプロットされている) に漸近していく。このような関数形としては $\Delta e_r / \Delta e_c = \tanh(\log \lambda)$ のようなものが挙げられる。

また、 Δe_r の勾配は時刻によって大きく変化し、フラックスの小さい夜間は小さく、フラックスの大きい昼間は大きい。すなわち、 Δe_r は λ のみでなくフラックスの大きさにも依存するので、次式で表せる。

$$\Delta e_r = f_e(\lambda, A_E(t)) \dots\dots\dots (12)$$

同様に、温度差 ΔT_r は、 λ とフラックスの大きさの関数であり (Fig. 8 (b)), 次式で表せる。

$$\Delta T_r = f_T(\lambda, A_H(t)) \dots\dots\dots (13)$$

(3) 大気の物理量の分解

大気の物理量のグリッド領域平均値から各土地利用毎の値への分解の概念図を Fig. 9 に示す。水面上の平均水蒸気圧の参照レベルとキャノピー空間での値 (e_{rw} , e_{aw}) は、グリッド領域平均値 (\bar{e}_r , \bar{e}_a) と土地利用間の差 (Δe_r , Δe_a) を用いて、次式のように表せる (都市と水面の面積比率は $1 - V_{wb} : V_{wb}$ であることに注意)。

$$e_{rw} = \bar{e}_r + (1 - V_{wb}) \Delta e_r, \quad e_{aw} = \bar{e}_a + (1 - V_{wb}) \Delta e_a \dots\dots\dots (14)$$

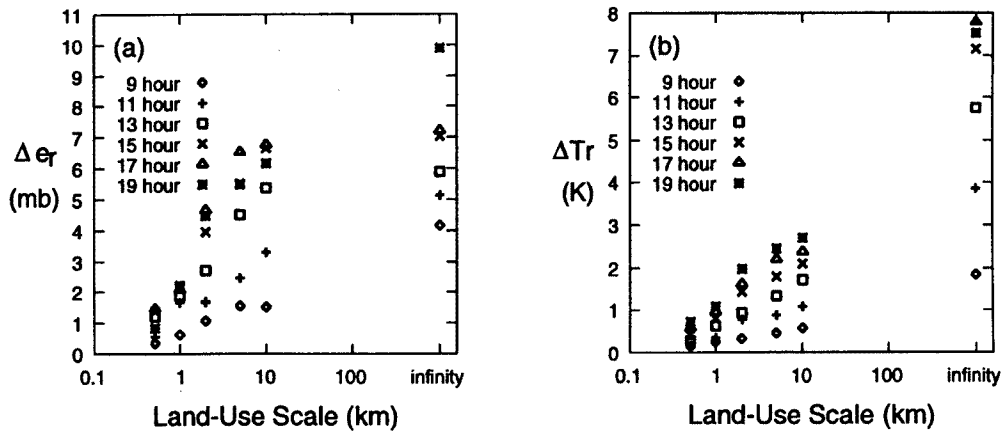


Fig. 8. Relations between land-use scale (λ) and (a) vapor pressure discrepancy (Δe_r), (b) air temperature discrepancy (ΔT_r).

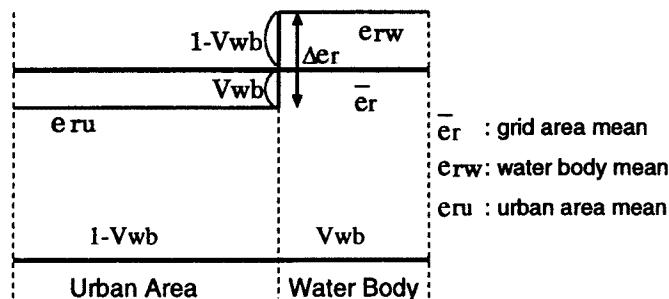


Fig. 9. Schematic image of disaggregation of atmospheric variables.

これらの式を微分すると、次の関係が得られる。

$$\frac{\partial e_{rw}}{\partial \Delta e_r} = \frac{\partial e_{aw}}{\partial \Delta e_a} = 1 - V_{wb} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial e_{aw}}{\partial e_{rw}} = \frac{\partial \Delta e_a}{\partial \Delta e_r} \dots\dots\dots (16)$$

Δe_r と Δe_a の関係が Fig. 10 (a) に示されており、これは一次関数 ($\Delta e_a \approx \frac{6}{8} \Delta e_r + 3$) で近似できる。

(4) $B_E(t)$, $B_H(t)$ の誘導

都市と水面の場合、蒸発は水面からのみ起こる (ただし、降雨直後には都市域からも蒸発が起こる)。

$$\bar{E} = lE_{wb} \times V_{wb} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e^*(T_{wb}) - e_{aw}}{r_{dw}} \times V_{wb} \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 ρ : 空気密度, C_p : 空気比熱, γ : 乾湿球定数, r_{dw} : 水面からキャノピー空間までの空気力学的抵抗である。

したがって、 $\Delta e_r - \bar{E}$ 関係の勾配 ($B_E(t)$) は次のように誘導できる。

$$\begin{aligned} B_E(t) &= \frac{\partial \bar{E}}{\partial \Delta e_r} = \frac{\partial \bar{E}}{\partial e_{aw}} \frac{\partial e_{aw}}{\partial e_{rw}} \frac{\partial e_{rw}}{\partial \Delta e_r} \\ &= -\frac{\rho C_p V_{wb}}{\gamma r_{dw}} \frac{\partial \Delta e_a}{\partial \Delta e_r} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

$\rho = 1.2$, $C_p = 10^3$, $V_{wb} = 0.5$, $\gamma = 0.662$, $r_{dw} = 30$, $\partial \Delta e_a / \partial \Delta e_r \approx 6/8$ (Fig. 10 (a)) を与えると、 $B_E(t) = -11.33$ となるが、これは Fig. 7 (a) から読みとれる値 ($B_E(t) \approx -11.96$) にはほぼ一致する。

顕熱の場合は少し複雑になるが、同様の手順で $B_H(t)$ を定式化できる。領域平均顕熱フラックス (\bar{H}) は、水面、都市キャノピー、都市カバーからのフラックスの合計で表される。

$$\bar{H} = H_{wb} V_{wb} + H_{uc} V_{uc} + H_{ug} V_{ug} \dots\dots\dots (19)$$

ただし、

$$H_{wb} = \rho C_p \frac{T_{wb} - T_{aw}}{r_{aw}}, H_{uc} = \rho C_p \frac{T_{uc} - T_{au}}{r_{bu}}, H_{ug} = \rho C_p \frac{T_{ug} - T_{au}}{r_{du}} \dots\dots\dots (20)$$

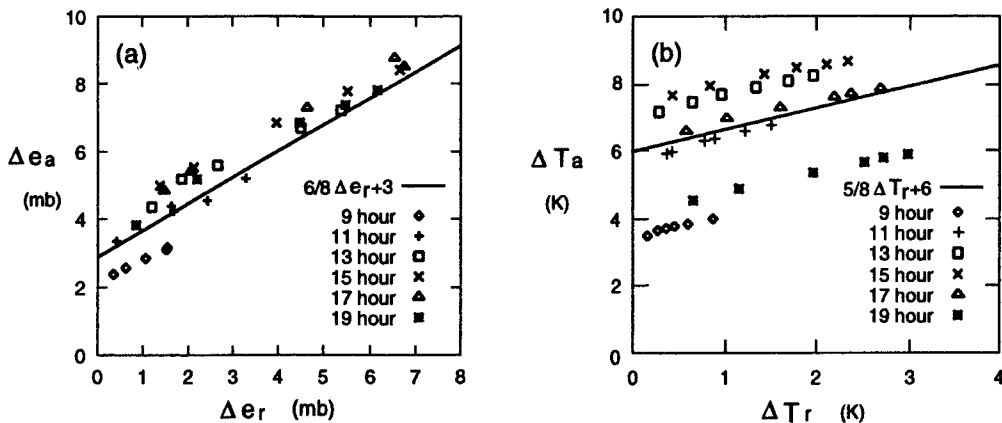


Fig. 10. Relations between (a) vapor pressure discrepancy, (b) air temperature discrepancy at reference level (Δe_r , ΔT_r) and at canopy space level (Δe_a , ΔT_a).

である。また式(14)と同様に、水面・都市の気温の値は、

$$T_{rw} = \bar{T}_r - (1 - V_{wb})\Delta T_r, T_{ru} = \bar{T}_r + V_{wb}\Delta T_r \dots\dots\dots (21)$$

$$T_{aw} = \bar{T}_a - (1 - V_{wb})\Delta T_a, T_{au} = \bar{T}_a + V_{wb}\Delta T_a \dots\dots\dots (22)$$

で表せるので、

$$\frac{\partial T_{rw}}{\partial \Delta T_r} = -(1 - V_{wb}), \frac{\partial T_{ru}}{\partial \Delta T_r} = V_{wb} \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{\partial T_{aw}}{\partial T_{ru}} = \frac{\partial T_{au}}{\partial T_{ru}} = \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} \dots\dots\dots (24)$$

が得られる。これらの関係を用いて、 $\Delta T_r - \bar{H}$ 関係の勾配 ($B_H(t)$) は次式のように誘導される。

$$\begin{aligned} B_H(t) &= \frac{\partial \bar{H}}{\partial \Delta T_r} \\ &= \frac{\partial(H_{wb}V_{wb})}{\partial T_{aw}} \frac{\partial T_{aw}}{\partial T_{rw}} \frac{\partial T_{rw}}{\partial \Delta T_r} + \frac{\partial(H_{uc}V_{uc})}{\partial T_{au}} \frac{\partial T_{au}}{\partial T_{ru}} \frac{\partial T_{ru}}{\partial \Delta T_r} + \frac{\partial(H_{ug}V_{ug})}{\partial T_{au}} \frac{\partial T_{au}}{\partial T_{ru}} \frac{\partial T_{ru}}{\partial \Delta T_r} \\ &= \frac{\rho C_p V_{wb}}{r_{dw}} \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} (1 - V_{wb}) - \frac{\rho C_p V_{uc}}{r_{bu}} \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} V_{wb} - \frac{\rho C_p V_{ug}}{r_{du}} \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} V_{wb} \\ &= \rho C_p V_{wb} \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} \left[\frac{1 - V_{wb}}{r_{dw}} - \left(\frac{V_{uc}}{r_{bu}} + \frac{V_{ug}}{r_{du}} \right) \right] \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

$\rho = 1.2, C_p = 10^3, V_{wb} = 0.5, V_{uc} = 0.25, V_{ug} = 0.25, r_{dw} = 30, r_{bu} = 30, r_{du} = 80, \partial \Delta T_a / \partial \Delta T_r \approx 5/8$ (Fig. 10 (b)) を与えると、 $B_H(t) = 1.95$ となるが、これは Fig. 7 (b) から読みとれる値 ($B_H(t) \approx 10.64$) とは大きく異なる。

しかし、Fig. 5 (b) を注意深く見ると、気温のスケール効果は水面上にしか現れず（都市上空の気温はほぼ一定である）、スケールが大きくなるにつれ、平均気温は下がっている。したがって、式(23)において、

$$\frac{\partial T_{rw}}{\partial \Delta T_r} \approx -1, \frac{\partial T_{ru}}{\partial \Delta T_r} \approx 0 \dots\dots\dots (26)$$

とすると、

$$B_H(t) \approx \rho C_p V_{wb} \frac{\partial \Delta T_a}{\partial \Delta T_r} \frac{1}{r_{dw}} \dots\dots\dots (27)$$

である。このとき上の値を与えると、 $B_H(t) = 12.50$ となり、これは Fig. 7 (b) からの値 (10.64) にかなり近い値である。

式(10) から、 $B_H(t)$ は領域平均値を用いて算定した $A_H(t)$ に対する単位温度差当たりの補正量であるといえるので、平均値を適切に分解して誘導された式(25) が、 $B_H(t)$ の本来の物理的意味を表しているといえる。

ここで注目すべき点は、土地利用スケールが大きくな ($\lambda = 10 \text{ km}$) 場合には、参照レベルの水蒸気圧 (気温) に水面と都市とで約 6 mb (3°C) の差が生じるため、領域平均水蒸気圧 (気温) を用いて潜熱 (顕熱) フラックスを算定すると、約 70 (30) Wm^{-2} の誤差につながるということである。この誤差の重要度はその目的によって変わるが、より良い精度で熱フラックスを推定するためには、土地利用間の大気物理量

の差を考慮することが必要となる。

以上、土地利用スケールの効果を取り込んだ新しい熱フラックスパラメタリゼーションを誘導した。都市・水面以外の組み合わせについても同様な手順で定式化できるが、前章の結果 (Fig. 5) の通り、これらの場合には、土地利用間の大気物理量の差 ($\Delta e_r, \Delta T_r$) が小さいため、面積率パラメタリゼーションにより十分な精度でフラックスを推定することができる (新しいパラメタリゼーションではさらに精度が上がる)。新手法を以下にまとめる。

1. 大気物理量の領域平均値を用いる面積率パラメタリゼーションから、領域フラックスの第一近似となる量 $A_E(t), A_H(t)$ を求める。
2. 土地利用スケール (λ) を用いて、 $\Delta e_r, \Delta T_r$ を計算する。

$$\Delta e_r = f_e(\lambda, A_E(t)), \Delta T_r = f_T(\lambda, A_H(t))$$

3. スケールを考慮したグリッド領域平均熱フラックス ($\overline{IE}, \overline{H}$) を次式により推定する。

$$\overline{IE}(t) = A_E(t) + B_E(t) \Delta e_r, \overline{H}(t) = A_H(t) + B_H(t) \Delta T_r$$

あるいは、これらの式を用いずに、 $\Delta e_r, \Delta T_r$ より、SiBUC に与える大気境界条件 e_r, T_r を各土地利用ごとの物理量 e_{ri}, T_{ri} ($i=ga, ua, wb$) に分解し、再度フラックスを計算し直す。

以上のようにグリッド平均の大気物理量をそのまま用いずに、各土地利用毎の値に分解してからフラックスを計算すれば、より精度良く領域フラックスを推定することができる。

6. 結 論

以上、本研究では、SiBUC-LCM 結合モデルを用いて、2つの土地利用が周期的に繰り返される仮想の場を対象としてシミュレーションを行い、土地利用スケールと領域フラックスの関係について調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- 都市・水面の組み合わせでは、スケール効果が大きい。
- 土地利用間の大気物理量の差が大きくなる場合 (熱収支特性が大きく異なり、土地利用スケールが大きな場合) には、面積率パラメタリゼーションは有効でない。
- 領域平均熱フラックスはこの差を変数とする1次関数で表せる。
- この差は土地利用スケールと面積率パラメタリゼーションによるフラックス (フラックスの第一近似) との関数で表せる。

これらの結果は、限定された条件 (土地利用が2種類だけであり、その比率が1:1) についてのものであるが、今後は、土地利用が3種類以上の場合や、面積比率が異なる場合についても検討を行い、より一般化した形でスケール効果を定式化していきたい。

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、京大防災研究所年報、第37号、B-2、299-313、1994。
- 2) 葛葉泰久・池淵周一・田中賢治：数値解析による広域場からの蒸発散量推定のための基礎的研究 (II) 京大防災研究所年報、第36号、B-2、159-171、1993。
- 3) Kimura, F.: Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **67**, 401-409, 1989.

- 4) 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.*, **43**, 505 – 531, 1986.
- 5) Kikuchi, Y., S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki and Y. Nagano : Numerical Study on the Effects of Mountains on the Land and Sea Breeze Circulation in the Kanto District. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **59**, 723 – 738, 1981.