

非静力数値気象モデルへの 詳細な陸面過程モデルの導入

COUPLING AN ADVANCED LAND SURFACE PROCESS MODEL WITH A NONHYDROSTATIC ATMOSPHERIC MODEL

相馬 一義¹・田中 賢治²・中北 英一³・池淵 周一⁴

Kazuyoshi SOUMA, Kenji TANAKA, Eiichi NAKAKITA and Shuichi Ikebuchi

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒 606 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 京都大学助手 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 京都大学大学院助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー 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 study we have coupled land surface process model(SiBUC: Simple Biosphere Model including Urban Canopy) into nonhydrostatic atmospheric model(ARPS: Advanced Regional Prediction System) developed by CAPS(Center for Analysis and Prediction of Storms). Preliminary test simulation was carried out by ARPS-SiBUC coupled model and ARPS within and surrounding area of the Lake Biwa Basin during the intensified observation period of the Lake Biwa Project 2001. We compare the simulation results of the two models paying attention to the accuracy of the land surface flux and the local circulation within the Lake Biwa Basin.

Key Words : *nonhydrostatic atmospheric model, land-surface process, SiBUC, local circulation, the Lake Biwa Project*

1. 序論

近年 1998 年 8 月に発生した那須豪雨や 2000 年 9 月に発生した東海豪雨のような集中豪雨による被害が目立つようになった。集中豪雨は短時間に発生発達するため、台風など他の気象災害に比べて予測が困難であり、そのため貯水池操作や警報の発令などの対策をとる時間的余裕を確保するのが困難となり大きな被害をもたらす原因となっている。

集中豪雨に対して対策をとるためには空間スケールとしては各河川の流域スケールで、時間スケールとしては 6 時間程度先まで予測精度を確保できるような予測手法を用いる必要がある。その要求を満たす予測手法としては、従来の数値気象モデルよりも空間スケールの細かい地形を考慮でき、積雲が発生し雨が降る過程をより詳細に考慮した非静力数値気象モデルを用いた予報が現在もっとも有望であると考えられる。

気象庁では現在集中豪雨を含むメソ β スケールの気象現象の予測精度の向上を図るために、非静力学モデル (MRI/JMA-NHM) を予報業務に導入することを検討している。

同時に気象モデルに対して下側境界条件を与える陸面過程モデルについての研究も盛んに行われており、特に大気大循環モデルに関しては SiB¹⁾、ISBA²⁾ 等様々

なモデルが開発され使用されている。先に述べた集中豪雨を含むメソ β スケールの気象現象を表現できる非静力気象モデルについても Pleim et.al (1995)³⁾、Chen et.al (2001)⁴⁾ 等、現在進行形ですすめられている。

一方、近年 Shinoda et.al (2002)⁵⁾ が中国南部の水田の存在による潜熱フラックスの増加が梅雨前線への水蒸気の供給源及び梅雨前線南側での深い対流の発生の原因になっている可能性を指摘した事例等、アジアモンスーン地域に特徴的な土地利用である水田がメソ β ~ γ スケールの降水を伴う気象現象に少なからず影響を及ぼしていると考えられる事例が報告されている。

また、神田ら (2000)⁶⁾ が行った数値シミュレーション等、都市の存在によるヒートアイランド現象が積雲の発生に与える影響も指摘されている。

以上より、メソ β スケールの降水予測に使用可能な非静力数値気象モデルについても地表面状態をどの程度詳細に表現する必要があるか、特に従来の陸面過程モデルでは十分に考慮されてこなかった水田や都市の影響をどこまで組み入れる必要があるのかについて検討していくことが必要となってくると考えられる。

田中ら (1998)⁷⁾ は JSM(Japan Spectral Model) にそのような水田や都市の存在を考慮できる陸面過程モデル SiBUC (Simple Biospher Model including Urban

Canopy)⁸⁾⁹⁾を導入したモデルを構築したが、JSMは静水圧の仮定を用いた静力学モデルであり、メソβスケール以下の降水予測には適していない。

以上をふまえて本研究では非静力数値気象モデル ARPS (Advanced Regional Prediction System)¹⁰⁾に陸面過程モデル SiBUC を導入し、水田や都市を含む地表面状態の不均一性を従来のモデルよりも忠実に再現できる非静力数値気象モデルを構築する。さらに同モデルを様々な陸面水文過程を含んでおり、気象庁のルーチン観測のデータに加えて琵琶湖プロジェクトの常設観測/集中観測データを得ることができる琵琶湖流域に適用し、夏季晴天日の大気場を再現しその精度を検証する。

2. モデルの概要

(1) 非静力数値気象モデル ARPS の概要

本研究で大気モデルとして使用する ARPS は、オクラホマ大学のストーム解析予報センター CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storms) で開発された非静力数値気象モデルである。

オリジナルの ARPS では大気下面の境界条件を与える陸面過程モデルとして ISBA (Interactions between the Soil Biosphere and Atmosphere)²⁾を基に CAPS で開発されたモデル³⁾を用いることができる。ISBA は植生地モデルのみで構成され、土壌の熱容量、土壌水分、植物による降水の遮断、接地境界層における空気力学的輸送過程を取り扱っている。また、ISBA では水田や都市の存在は考慮されていない。

(2) 陸面過程モデル SiBUC の概要

SiBUC は、1つのグリッドの中を都市域、水体、植生地に分類しそれぞれの領域でフラックス計算をし、その合計(面積割合で加重平均)を大気側に渡すモザイクモデルになっている。その結果、従来の陸面過程モデルでは植生地に対して面積率が小さいため十分に考慮されてこなかった都市域や水体の影響を反映することができる。植生地モデルは Sellers らによって開発された SiB(Simple Biosphere Model)¹⁾に、水田モデルを加えたものになっており、アジアモンスーン地域における陸面過程をより忠実に再現できると考えられる。

(3) ARPS への SiBUC の導入

ARPS で使用されている ISBA は、図-1 に示すように地表面フラックスの計算を行う sfcflx の下の2つのサブルーチン(soilebm、soildiag)で構成されている。これら2つのサブルーチンの代わりに SiBUC を呼び出す。その際、田中ら(1998)⁷⁾に従い、GIM(Grid Information Manager)を用いて、グリッドについての状態量やグリッド情報(土地利用面積率や植生タイプ)等の入力情報を SiBUC へ渡し、SiBUC は一次元の陸面過程について計算を実行し、地表面フラックスや更新された予報変数(地温・土壌水分等)を SiBUC から受け取る構成をとる(図-1)。

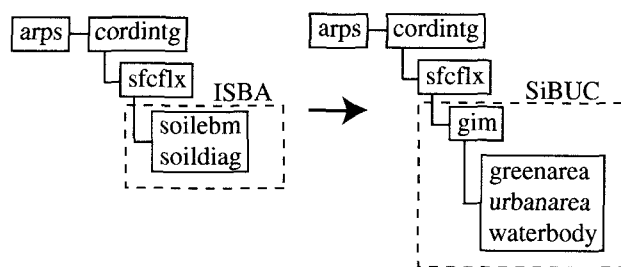


図-1 ARPS への SiBUC の導入

3. 再現計算の設定及び使用したデータ

(1) 再現計算の設定

再現計算は、琵琶湖プロジェクト集中観測が行われた2001年8月14日について03:00JSTから15:00JSTにかけて行う。

本研究では RSM 上層と RSM 地上の GPV データを内挿して初期値、境界値を与えて計算を行い、One-way nesting を用い対象とする領域(68×68、1km 間隔)まで絞り込んでいくこととする。また、ADAS(ARPS Data Assimilation System)¹⁰⁾を用いてアメダス、地上気象観測、高層気象観測によって初期値を修正する。設定した領域及び領域内の観測点を図-2 に示す。

ARPS のオプション設定は基本的に CAPS が推奨するものを用い、放射過程と SiBUC 導入前の地表面フラックス及び陸面過程については最も厳密に扱うように設定する。

(2) 陸面過程モデルの設定

初期の陸面温度については気温と同じとして与える。海面温度については NOAA/ NASA AVHRR Oceans Pathfinder SST data の一ヶ月平均値を用い、琵琶湖の水温については琵琶湖プロジェクト常設観測点(湖面)による水温の観測値を一ヶ月平均して与える。

初期の土壌水分量は、ISBA、SiBUC それぞれについて琵琶湖プロジェクト常設観測点(森林)における観測値を気象強制力として、土壌水分量の初期値を飽和度で0.5~0.7まで0.01ずつ変えて陸面過程モデルのみの計算を行い決定する。8月14日は欠測であったため、2001年8月のなかで異常値がなく日中の純放射フラックスが高かった8月24日の3時から15時までの観測値を用いて計算を行い、顕熱及び潜熱フラックスの観測値に対する RMSE ができるだけ小さくなる初期値(飽和度で0.56)を採用する。ただし、SiBUC で土地利用が水田に分類されるグリッド、ISBA で耕作地に分類されるグリッドについては飽和度で1.0に設定する。

土地利用面積率、植生タイプの情報としては国土数値情報(KS-202)(空間分解能約100m)を利用し、土壌タイプの情報としては、FAO の Digital Soil Map of the World のデータ(空間分解能約10km)を使用する。

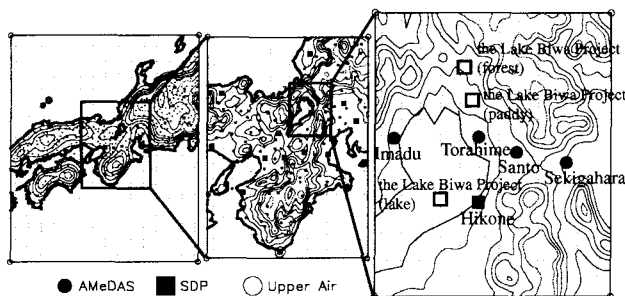


図-2 対象領域 (● AMeDAS 観測点、■ 地上気象観測点、○ 高層気象観測点、□ 琵琶湖プロジェクト常設観測点)

4. 地表面フラックス観測データとの比較

以下に地表面フラックスの再現性を、水田、湖面及び森林の琵琶湖プロジェクト常設観測点における観測値と比較して検討する。観測点の位置は図-2に示す。地表面フラックスの観測値は水田、森林の観測点ではボーエン比熱収支法、湖面の観測点ではパルク法を用いて求められている。

琵琶湖プロジェクト常設観測点（水田）の観測値と比較すると、ISBA、SiBUCとも純放射フラックスとして受け取ったエネルギーの大部分が潜熱フラックスとして放出される状況を再現できている（図-3）。差が顕著に表れないのは本研究のような十数時間の短期の計算では表層の土壌水分量が長期にわたる計算ほど失われなため、水田操作を行わなくても計算期間中に表層が乾燥した状態にならないためと考えられる。

琵琶湖プロジェクト常設観測点（湖面）の観測値と比較すると、ISBAでは純放射フラックスが観測値に比べて小さいが、ISBAでは水温を予報せず初期値で固定しているため潜熱、顕熱フラックスの再現性に影響を与えない。ISBA、SiBUCとも潜熱、顕熱フラックスはほぼ妥当な値を示しているため、今回の再現計算では水体の表現の違いは大きな影響を与えないと考えられる（図-4）。

琵琶湖プロジェクト常設観測点（森林）については8月14日が欠測なので8月24日のデータを参考値として比較する。陸面過程モデルのみの計算で顕熱、潜熱フラックスがこの参考値に合うように土壌水分量の初期値を決定したが、気象モデルと結合した計算では参考値と合わなくなっている。これは、8月24日と14日とで大気の状態が違っていること、また大気モデルの予報誤差によるものと考えられる。図-5を見ると、SiBUC、ISBAの両モデル間の差は小さく、どちらも参考値と比べて純放射フラックスに対する顕熱フラックスが小さく、潜熱フラックスが大きくなっている。

5. 気象観測データとの比較

(1) 琵琶湖流域における局地循環の再現性

琵琶湖流域では一般風の弱い晴天日中には湖風と山谷風が組み合わさった局地循環が発達することが知られており、枝川ら（1981）^{13）}等により地上観測データを用いた研究が行われている。

この局地循環の発達には、風向の変化と、熱の水平方

向の輸送による気温の変化をもたらし、後に地上観測と比較して評価する再現計算の精度に少なからず影響を与えていると考えられる。

以下では既往の研究に従って観測データに見られる琵琶湖流域における局地循環の特徴をあげ、それが再現計算でどの程度表現できているかを検討する。

a) 観測データに見られる局地循環

枝川ら（1981）^{13）}の判定基準に従って彦根、今津、土山におけるアメダス観測データの風向の変化から琵琶湖流域での湖陸風および琵琶湖東部の山地での山谷風の発生を判定すると、再現計算を行った8月14日は湖陸風の発達は見られたが、琵琶湖東部の山地では山谷風の発達が見られない状況（II型）であった。

このII型の局地循環は一般風の風向が南東である場合に多く現れることが指摘されている^{13）}が、本研究の状況はそれに当てはまり、琵琶湖東岸では明け方に南東からの一般風と陸風による東よりの風が卓越し、日中に湖風の発達とともに西よりの風に変化する様子が見られる。

また、8月14日に琵琶湖プロジェクト常設観測点（水田）付近で行われた3時間ごとのラジオゾンデ観測データにも局地循環の特徴が現れている。8月14日3:00JSTから15:00JSTまで3時間ごとの温位の鉛直プロファイルを見ると、藤野ら（1998）^{14）}が解析した1996年の琵琶湖プロジェクト集中観測時（7月29日）に同地点で行われたラジオゾンデ観測と同様に、正午頃には顕熱の乱流輸送によって地表面から発達する下段の混合層と、Kimura et.al（1995）^{15）}が理想的な盆地循環のシミュレーションによって指摘した局地循環の反流によって加熱された上段の準混合層が見られる。また、15時以降には地上から2000m付近にかけて2段の混合層が合わさったと考えられる大きな弱安定成層が見られることも藤野ら（1998）^{14）}の解析と同様である。

以下では観測データに見られた2つの特徴

- 琵琶湖東岸における風向の変化
- 温位の鉛直分布に見られる混合層

に注目して再現計算と観測データを比較し、琵琶湖流域における局地循環の再現性を検討する。

b) 琵琶湖東岸における風向の変化

彦根の地上気象観測点における風向の観測値と、SiBUC導入前後の解析値を図-7に示す。図-7から、ISBA、SiBUCとも観測値よりも一時間ほど遅れるが、どちらも琵琶湖東岸において北西あるいは西（16方位で12）の風に風向が変わる特徴を捉えている。しかしどちらも観測値と比べて風向の逆転が遅れており、局地循環が現実より弱いと考えられる。

c) 温位の鉛直分布に見られる混合層

局地循環の鉛直構造がよく現われている彦根付近の東西方向鉛直断面を示し、局地循環の発達の程度を検討する。図-9、図-12は12:00JST、図-10、図-13は15:00JSTにおける彦根付近で切った東西方向鉛直断面であり、矢印で風速ベクトル（東西方向、鉛直方向成分）を、コンターで温位（K）を書いている。図中の実線

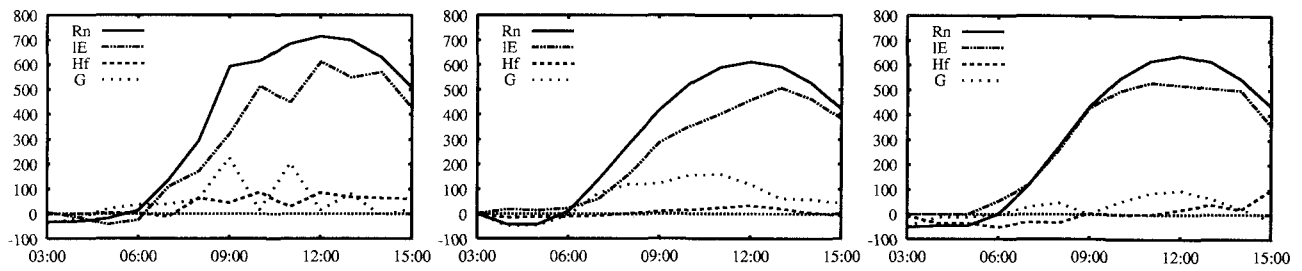


図-3 水田における純放射フラックス (Rn)、潜熱フラックス (IE)、顕熱フラックス (Hf)、貯留熱 (G)(W/m^2)

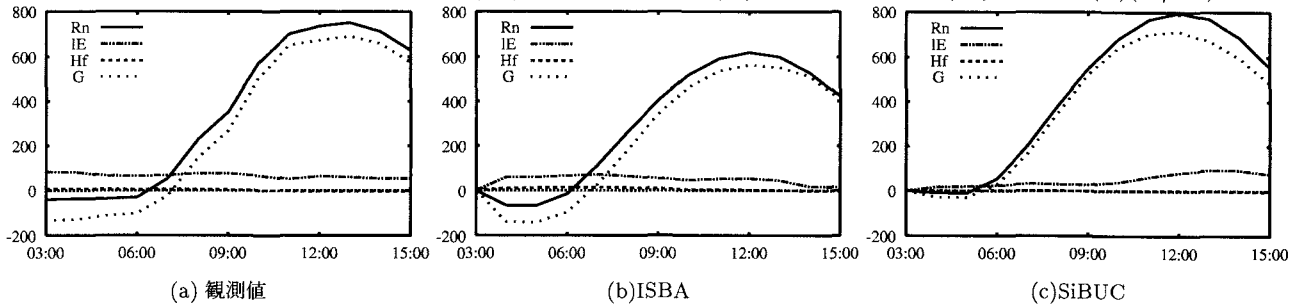


図-4 湖面における純放射フラックス (Rn)、潜熱フラックス (IE)、顕熱フラックス (Hf)、貯留熱 (G)(W/m^2)

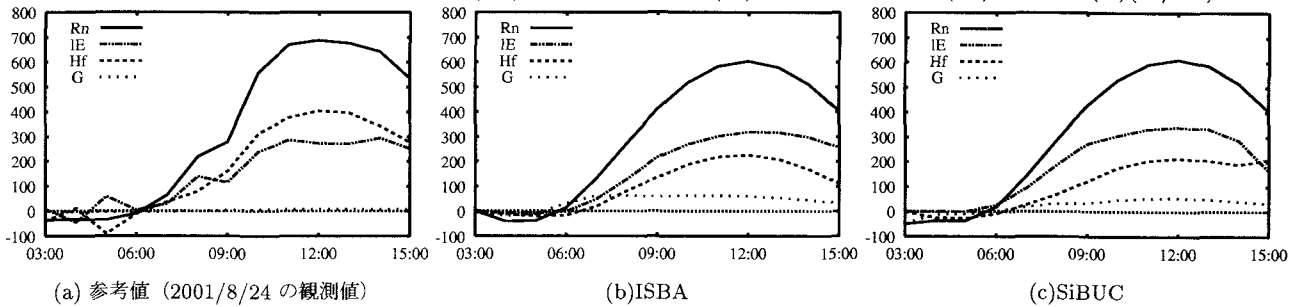


図-5 森林における純放射フラックス (Rn)、潜熱フラックス (IE)、顕熱フラックス (Hf)、貯留熱 (G)(W/m^2)

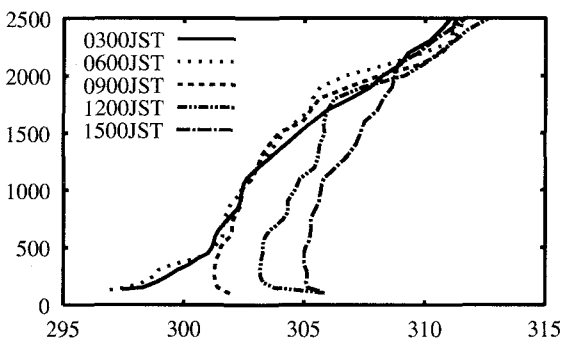


図-6 ラジオゾンデ観測による温位の鉛直プロファイル

は彦根の地上気象観測点から鉛直に引いたものであり、図-8、図-11はこの点における温位の鉛直プロファイルで横軸が温位 (K)、縦軸が高度 (m) となっている。

東西方向鉛直断面を見ると、まず琵琶湖東岸では琵琶湖の方から発達してくる局地循環が東から吹いている一般風とぶつかり、湖風前線を形成していることがわかる。この状況は枝川ら (1981) ¹³⁾ の、II 型の局地循環は湖風や山谷風が南東よりの一般風の影響を受け、山谷風が抑えられた結果現れるという解釈と一致している。図-9、図-10、図-12、図-13 の破線は風速ベクトルから判断した湖風前線の位置をあらわす。

図-8、図-11を見ると、彦根の観測点が琵琶湖のすぐそばにあるため 12:00JST では 300m 程度まで湖風の影響と思われる温位の低い層が見られ、下段の混合層は

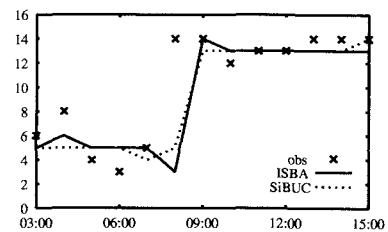


図-7 風向の変化 (彦根)

見えにくくなっているが、ISBA、SiBUC とも 1500m 弱程度まで上段の準混合層が見られる。また 15:00JST では 2 段の混合層が合わさったと考えられる大きな弱安定成層が ISBA、SiBUC とも見られる。ISBA では 1500m 強、SiBUC では 2000m 弱と SiBUC 導入後に混合層の高さが観測値 (図-6) に近づいているが、ISBA、SiBUC とも混合層の温位は観測値と比べて全体的に低く、局地循環が観測値と比べて弱くなっている。また、図-9、図-10、図-12、図-13 をみると、湖風前線の位置には 12:00JST、15:00JST とも ISBA と SiBUC の間で明確な違いは見られないが、SiBUC の方で 15:00JST での盆地底の温位がより高くなっており、SiBUC 導入後に局地循環が強まりより多くの熱が斜面から盆地底へ運ばれている様子が現われている。

d) 局地循環の再現性についての検討

以上から、ISBA、SiBUC とも局地循環が観測値で見られるよりも若干弱い、観測値に現われる局地循環

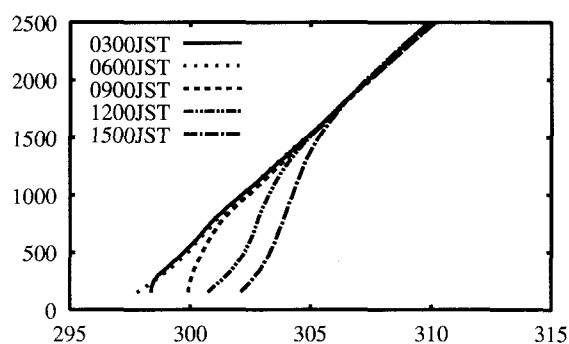


図-8 温位の鉛直分布 (ISBA)

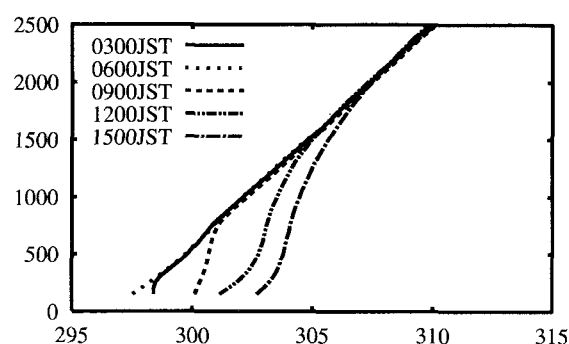


図-11 温位の鉛直分布 (SiBUC)

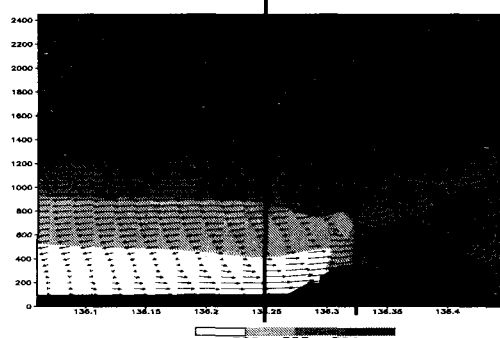


図-9 12:00JST(ISBA) 東西方向鉛直断面 (温位、風ベクトル)

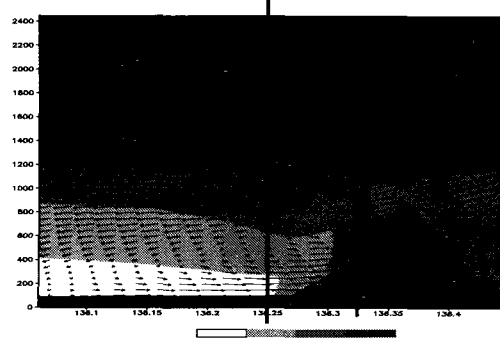


図-12 12:00JST(SiBUC) 東西方向鉛直断面 (温位、風ベクトル)

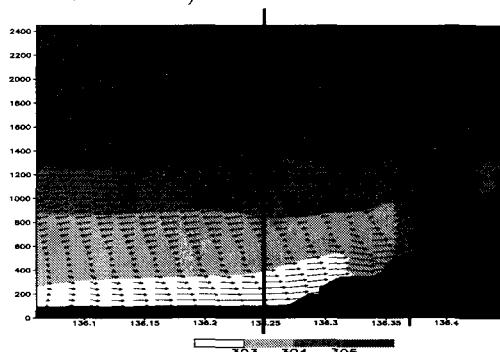


図-10 15:00JST(ISBA) 東西方向鉛直断面 (温位、風ベクトル)

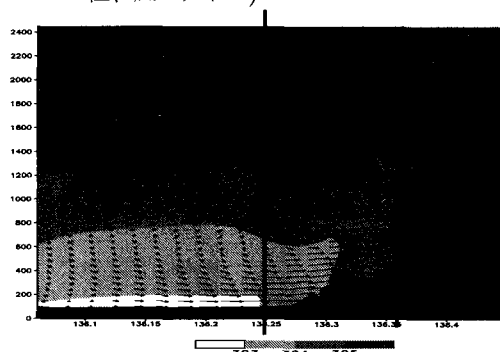


図-13 15:00JST(SiBUC) 東西方向鉛直断面 (温位、風ベクトル)

の特徴をよく表しているといえる。また SiBUC 導入によって温位の鉛直分布は観測値に近づくが、1 時間毎の風向では ISBA との顕著な差が見られない。

局地循環は、日中琵琶湖上の空気よりも陸域上の空気がより暖められることが原因で発達し、湖面と陸域の顕熱フラックスの差が大きいほど強く発達する。8 月 14 日 13:00JST の顕熱フラックスについて SiBUC の結果から ISBA の結果を引いた差を図-14 に示すが、琵琶湖東岸の平野部で SiBUC 導入後に顕熱フラックスが大きくなり、湖面と山岳域では ISBA と SiBUC の間に大きな差がない。平野部の顕熱フラックスが SiBUC で大きくなるのは、SiBUC に都市モデルが組み込まれていること、モザイクスキームによって水田の面積率が大きなグリッドでもその他の植生の効果が現われることによるものであり、局地循環を強化する方向に働くと考えられる。しかし、本事例で SiBUC と ISBA とで局地循環の再現精度の違いが顕著にあらわれないのは、本事例においては山岳域に多い森林の顕熱フラックス

の再現精度がより大きく局地循環に影響していることを示していると考えられる。

全体的に局地循環が弱い理由として、土壌水分量の初期値が大きかったことが考えられ、今回土壌水分量を領域全体に一樣に分布させたこと、8 月 14 日が欠測で、24 日の観測値を代わりに土壌水分量の決定の際に用いたことが影響している可能性がある。再現精度の向上を図るにはより適切な初期土壌水分量分布を与える方法を検討する必要があると思われる。

(2) RMSE による気温、風速の再現精度の評価

地上気象観測データとの気温、風速の比較は田中ら (2002)¹¹⁾ と同様にモデル地表面から高さ 10m の解析値を、近藤ら (1994)¹²⁾ による大気不安定度を考慮した対数則を適用して求めて行く。

気温、風速について、対象領域内の AMeDAS・地上気象観測点及び琵琶湖プロジェクト常設観測点 (図-2 に示す 8 地点) について、全地点、全時間で積算して RMSE を求めたところ、気温について SiBUC 導入に



図-14 13:00JST 顕熱フラックスの差 (SiBUC ISBA)(W/m^2)

よる精度の向上がみられた(表-1)。SiBUCの都市モデルによる市街地近くの観測点における顕熱フラックスの精度向上と、SiBUC導入後に若干ではあるが局地循環の再現精度が向上したことによる水平方向の熱輸送の精度向上が理由として考えられる。

表-1 地上観測との比較(RMSE)

	ISBA	SiBUC
風速(m/s)	1.06	1.06
気温(°C)	1.9	1.7

6. 結論

本研究では水田及び都市を含むアジアモンスーン地域の地表面状態を再現できる陸面過程モデルSiBUCを非静力数値気象モデルARPSに導入した。

さらに、夏季晴天日の琵琶湖流域で同モデルとISBAモデルが組み込まれたオリジナルのARPSとを用いて再現計算を行い、地表面フラックス観測との比較、局地循環の再現性に注目した地上気象観測との比較を行った。その結果、両モデルで観測値に現われる特徴がよく再現され、また若干ではあるがSiBUC導入によって再現精度が向上することが示された。SiBUC導入による効果が顕著に現われなかった理由は、局地循環の再現性が、琵琶湖東岸の平野部の彦根市や長浜市等の都市があまり大規模でないため、山岳域の森林の影響により強い影響を受けるためと思われる。

本研究の結果は、ARPSにSiBUCを導入したモデルは今後降水予測にどの程度陸面過程を詳細に組み込んでいくかを検討するために使用する上で十分な精度を持っていることを示していると考ええる。

本研究で残った課題として、土壌水分量の初期値を琵琶湖プロジェクト常設観測(森林)でのフラックス観測値を基に決定し、対象領域内で一様として与えたが、それが妥当であるかという問題がある。より現実的な土壌水分場を設定するためには、今後衛星リモートセンシングを用いた土壌水分データ同化システムを構築し、利用していくことが望まれる。

謝辞：本研究で使用した琵琶湖プロジェクト常設観測点(森林)のデータは愛媛大学農学部の戒信宏助教授から、GPVデータは日本気象協会関西本部の山路昭彦氏から提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A., A simple biosphere model(SiB) for use within general circulation models, J. Atmos. Sci., 43, 505-531, 1986
- 2) Noilhan, J. and Planton, S.: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., 117, pp.536-549, 1989
- 3) Pleim, J.E. and Xiu, A.: Development and Testing of a Surface Flux and Planetary Boundary Layer for Application in Mesoscale Models, J. Appl. Meteor., 34, pp.16-32, 1995
- 4) Chen, F. and Dudhia, J.: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, Mon. Wea. Rev., 129, pp.569-585, 2001
- 5) Shinoda, T. and Uyeda, H.: Effective Factors in the Development of Deep Convective Clouds over the Wet Region of Eastern China during the Summer Monsoon Season, J. Meteor. Soc. Japan, 80-6, pp.1395-1414, 2002
- 6) 神田学・井上祐史・鶴野伊津志: "環八雲"の数値シミュレーション, 天気, 42, pp.83-96, 2000
- 7) 田中賢治・中村忠則・山本卓生・椎葉充晴・池淵周一: SiBUC-JSM88 結合モデルのテストラン, 京都大学防災研究所年報, 第41号B-2, pp.486-493, 1998
- 8) 田中賢治・中北英一・池淵周一: 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 土木学会水工学論文集, 第42巻, pp.79-84., 1998
- 9) 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
- 10) Xue, M., Droegemeier, K.K., Wong, V., Shapiro, A. and Brewster, K.: Advanced Regional Prediction System(ARPS) Version 4.0 User's Guide, 1995
- 11) 田中賢治・相馬一義・中北英一・池淵周一: ARPSによる琵琶湖プロジェクト集中観測時の大気場の再現, 京都大学防災研究所年報, 第45号B, pp.657-676, 2002
- 12) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支, pp.261-280, 1994
- 13) 枝川尚資・中島暢太郎: 琵琶湖流域における湖陸風の研究, 地理学評論, 54A-10, pp.545-554, 1981
- 14) 藤野毅・浅枝隆: 長浜市のヒートアイランド特性について—琵琶湖プロジェクト96より—, 琵琶湖プロジェクト報告-プロジェクト'95、'96、'97報告と今後の展望-, pp.347-360, 1998
- 15) Kimura, F. and Kuwagata, T.: Horizontal heat fluxes over complex terrain computed using a simple mixed-layer model and a numerical model, J. Appl. Meteor., pp.549-558, 1995

(2003. 9. 30 受付)