

気候緩和評価モデルの開発とPCシミュレーション

井上君夫¹・木村富士男²・日下博幸²・吉川 実³・後藤伸寿³・
菅野洋光⁴・佐々木華織⁴・大原源二⁵・中園 江⁵

目 次

I はじめに	2	1. シミュレーション結果の検討	8
II 気候緩和機能(効果)の定義	3	2. 見沼田圃の気候緩和効果に関する モデル実験	12
III 気候緩和評価モデルの開発	3	3. 熱い気塊と海風前線に関する モデル実験	14
1. TERC-RAMSの概要	3	4. 土地利用の改変と気温変化に関する モデル実験	15
2. 植生群落サブモデルの概要	3	5. 果樹栽培と温暖化に関するモデル実験	17
3. 単層の都市キャノピーモデルの概要	4	6. 都市の温暖化に関するモデル実験	20
4. 気候緩和評価モデルの構成	4	まとめ	22
5. PCによるシミュレーション実験	4	謝辞	23
6. モジュールとファイル構成	5	引用文献	23
7. 各種のデータベース	6	Summary	25
8. ネスティング手法とGUIによる 計算実行	6		
IV 結果と考察	8		

要 約

農業がもつ気候緩和機能を高精度に評価できる最新の気候緩和評価モデル(領域気候モデル)を開発した。本モデルが使えるパソコンのOSはMicrosoft Windows XP(Microsoft Windows 2000でも可能)であり、計算から結果出力までの作業過程は全てGUIを介して行うことができる。

最初に、モデルの推定精度と操作性を検証するため、つくば市真瀬の水田における微細気象観測データおよび対象とする計算領域におけるアメダスデータとの比較が風速ベクトル、気温分布、および熱収支配分等について行われた。種々の気象条件および水稲の栽培期間において、大小の時空間スケールをもつ気象環境がネスティング手法を用いたモデルで

よく再現できること、土地利用の改変に伴う温熱環境の影響評価等の問題に適用できることが示された。また、GUIの機能と操作性を全ての作業過程において確認した結果、農業、気象、環境、教育等の多分野で利活用できるツールであることがわかった。

つぎにモデルシミュレーションの結果について考察したところ、特に土地利用の改変が著しい埼玉県吉川・三郷市周辺の温度上昇を1987年と2007年の土地利用の下に、夏季晴天日における同気象条件下で比較してみると、正午の時間帯で約0.7℃の温度差が認められるなど、この地域の温度は確実に上昇している。また、関東地方における都市気候の再現

平成20年4月30日受付 平成20年10月7日受理

¹ 中央農業総合研究センター
² 筑波大学大学院
³ みずほ情報総研
⁴ 東北農業研究センター
⁵ 中央農業総合研究センター 農業気象災害研究チーム

実験や山梨における果樹地帯の温暖化対策としての盆地気象予測、都市化が顕著な福岡県の局地的温暖化予測等の問題にも適用され、それらに対するモデルの有用性と具体的なシミュレーション結果が多数

提示された。

キーワード：数値実験，気候緩和，土地利用，群落微気象モデル，TERC-RAMS

I はじめに

わが国の農業は営農という生産活動を通して食料、環境、そして経済に大きく貢献してきた。この農業の生産主体は適地適作を基本とする露地栽培であり、そこにはわが国の風土認識が連綿と息づいている。これはWTOにおいて論議されている農業がもつ多面的機能の精神に合い通じるものであり、そのひとつに水田等がもつ気候緩和機能がある。最近、これが温暖化やヒートアイランドの対策技術として注目されてきている。一方、農地の気候緩和機能が1980年代以降の土地利用の大規模な改変、休耕地や遊休地の増大から衰退してきていると危惧されているが、その科学的証明が充分になされていない現状にある。

気候緩和機能は地表面（陸域）状態と密接に関係した局地気象現象として発現することが多くの研究から明らかとなっている。たとえば、都市上空に形成される熱いプルームが航空機の温度観測によって確認されているが（Holmes, 1970）、そのような都市境界層内では熱収支学的には顕熱フラックスが卓越し、相対する森林境界層内では潜熱フラックスが卓越する結果、それぞれに特有の温度分布や湿度分布が成立する（斎藤・新田, 1981）。この顕・潜熱フラックスの比で表されるボーエン比は地表面の湿潤状態を表す指標といわれ、水田や市街地のボーエン比の平均値は各々固有の値を示すと考えられている。井上（2008d）は水田、畑地、市街地等において夏季晴天日のボーエン比を測定したところ、水田<畑地<市街地の大小関係にあって、ボーエン比が大きくなると昼間の平均気温も高くなることを明らかにした。

このように地形や土地利用に強く依存する局地気象は、1990年代以前は観測を主体とする実験的手法によって明らかにされてきたが、それ以降はLCM（Local Circulation Model）を用いた数値実験的手法が主流となってきた（Kimura・Arakawa, 1983；Yamada・Bunker, 1988；Pielke et al., 1992）。

木村らはPielkeらの開発したLCMであるRAMSに放射・乱流・降水のサブモデルの改良と都市キャノピーモデルの導入を図り、様々な局地気象現象に適用できる信頼性の高いモデル（TERC-RAMS）へと発展させた（Sato・Kimura, 2003；Kusaka・Kimura, 2004）。

神田・日野（1990）は二次元のNEO SPAM（大気-植生-土壌系モデル）を用いた植生の気候緩和機能に関する数値実験を行い、植生の面積と配置によって気候緩和効果が異なることなどを明らかにした。土地利用に関して、木村らは一連の研究において、最新の都市キャノピーモデルを導入したLCMで土地利用形態の変遷が首都圏の海風と日中のヒートアイランドに及ぼす影響を明らかにした（Kusaka et al., 2000, 2001；Kusaka・Kimura, 2004）。井上ら（2004）はKimura・Arakawa（1983）のLCMに風速・乱流場の特徴をもつ群落微気象モデルを導入することによって、温熱環境に及ぼす植生の気候緩和効果を土地利用別に明らかにした。これらは局地気象研究への貢献だけでなく、三菱総研（2001）が行った農業の多面的機能の貨幣評価やIPCCの第4次評価報告書（気象庁, 2007）に関連した研究と位置づけることができる。

従来、大規模数値計算が必要であったLCMは計算科学の進歩からパソコンで計算可能な高精度の局地気象モデルへと発展してきたことで、農業環境等の分野に応用できる身近なツールとなりつつある。しかし、このLCMを土地利用改変等による局地的な気候緩和機能の評価に適用するためには、パソコンのOS Windows上で簡単に使えるようにすること、温度等の空間分解能を1km以下とすることが大きな課題であった。

本研究では、これらの課題解決を目指し、パソコンでシミュレーションが実行できる高精度の領域気候モデル（気候緩和評価モデル）の開発、および農業や都市問題へのモデルの適用性とその有用性につ

いて検討することを目的とした。たとえば、水田等の減少と気候緩和効果との関係や冷害時の低温・寡照と作物被害との関係がシミュレーション実験から

定量的に明らかにできれば、局地気象研究としての学術的評価のみならず、今後の農業の活力と意義の高まりに貢献できることは確かである。

II 気候緩和機能（効果）の定義

気候緩和効果を文字通りに解釈すれば、気候を改良（穏やかに）する効果である。気候とは1年を周期として毎年繰り返される、最も出現確率の高い大気の状態（気象とはそれより短い大気の状態）をいうが、実際には地表面付近の気温、風速の日変化や大気乱流の変動特性、あるいは幾つかの要素の組み合わせによる種々の指標の創出といったことが研究対象とされる。この場合に種々の気象情報が必要となるが、特に農業分野の関係者が身近な農耕地の気象情報をパソコンの画面上で可視化できれば、農地がもつ気候緩和効果の理解等に役立てることができる。そのようなツール開発に対する期待が研究的にも、社会的にも高揚してきている。

そこで、中央農研、筑波大学、みずほ情報総研、東北農研（気候緩和研究グループ）は、平成16年から農林水産省の農林水産研究高度化事業において、パソコンで使える気候緩和評価モデルの開発を

推進してきた。はじめに、気候緩和評価モデルのシステム開発にあつて、気候緩和効果とは本来、裸地に植林するといった土地改良によって恒久的な気候改善が期待できる効果、また気候緩和指数とは気候改善効果を大気・植生・土壌等の要因・要素を用いて指標化したものと定義した。これは単に気候緩和効果を瞬間的な温度差だけで扱うのではなく、日平均値や月平均値といった長い時空間スケールで気象要因を捉えて議論すべきであるとの認識に立っている。

すなわち、水田と都市の気温が様々な気象条件で違ってくことは定性的に予測できても、その定量的な予測と物理的解釈は簡単ではない。また、水田が他に転用された場合の気候緩和効果への影響を知ることが大型計算機による数値計算でなければ極めて困難であった。これらの問題に科学的に応えられるツールとしてのモデル開発が本研究の目的である。

III 気候緩和評価モデルの開発

気候緩和評価モデルの開発は、トータルシステムの設計、各種データベースの整備、大気-都市-植生-土壌システムモデルの開発と改良、パソコンのOS Windows上でのプログラム統合、数値計算における演算速度の高速化とモデルパラメタのチューニング、トータルシステムの検証と改良という手順で進められた。はじめに、最も重要なコアモデルと都市・植生サブモデルの概要について述べる。

1. TERC-RAMS の概要

気候緩和評価モデルのコアモデルは筑波大学大学院の木村グループが開発したTERC-RAMS（筑波大学陸域環境センター領域大気モデリングシステム）である（Yoshikane et al., 2001; Sato・Kimura, 2003）。RAMSはPielke et al. (1992)が開発した領域大気モデルであり、これに簡易都市サブモデルの導入と放射、降水、乱流の各サブモデルの改良を加

えたシステムモデルがTERC-RAMSである。

その基本的な特徴はSato・Kimura (2003)の表1に整理されている。基礎方程式はCompressive non-hydrostatic equations（圧縮性・非静力学方程式系）、大気乱流サブモデルはTurbulent closure model (level 2のクロージャモデル)、降水サブモデルはBulk-type cloud microphysics（バルクタイプ雲物理モデル）、日射サブモデルはNakajima radiation scheme (Nakajima et al., 2000)、座標系は非直交座標系 (Z^* 系)のTerrain-following system、地表面温度はForce-restore method（強制復元法）、鉛直格子数は38などである。初期値はNCEPのGPVから内挿し、海面水温はmonthly mean Reynolds SST dataから推定される。

2. 植生群落サブモデルの概要

このモデルは井上 (1985, 1990) の水田微気象モ

デルと畑地モデルから構成されている。各サブモデルの方程式系は井上ら (2004) の報告のとおり、群落内外の温度・湿度場は8層の熱収支式系からなり、水田水温は灌漑用水を考慮した平衡水温モデル、土壌水分は Philip (1957) の未飽和土壌水分モデル、群落および接地境界層内の大気乱流はレベル2の Closure model である (Inoue, 1981)。土地利用は水田、畑地、草地、森林、河川、湖沼、工場、住宅、ビルに分類し、計算に必要なパラメータである土地利用毎の表 (葉) 面積分布と日射減衰関数、および等価粗度長、等価地面修正量、等価表 (葉) 面積指数は既往の研究成果等から与えられた。

3. 単層の都市キャノピーモデルの概要

モデルは1枚の平板状のキャノピーモデルで表現され、大気とキャノピーと地面との間の熱・放射収支式系から屋根の温度や壁の温度が決定されるアルゴリズムとなっている。

太陽放射は直達と散乱に分けてランバートの式から計算され、道路・壁・屋根等の放射フラックス収支はステファン・ボルツマンの法則から計算される。View factor は Kusaka et al. (2001) と同様与えられた。種々のパラメータは Kusaka・Kimura (2004) の表1に整理されているが、たとえば体積熱容量は $2.01 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ 、熱伝導率は 2.28 W/mK 、スタントン数は6等である。

この他に都市キャノピーモデルの構築において、家庭や自動車からでる人工排熱を考慮しなければならないが、これを全国的に数値化することは现阶段で難しいと判断して考慮しなかった。

4. 気候緩和評価モデルの構成

先に述べたとおり、気候緩和評価モデルのコアモデルである TERC-RAMS は、Pielke らの RAMS のもつ乱流や放射等のサブモデルに改良が加えられたシステムモデルであり、都市と郊外における気温の日変化特性や地表面蒸発に伴う小積雲群の発生・消滅といった大気境界層の水熱環境に地表面熱収支がよく反映した性能と分解能を有していることが、木村らの一連の研究で明らかとなっている (Kusaka et al., 2000; Sato・Kimura, 2003; Kusaka・Kimura, 2004)。

この開発の方向は、本研究の方向とも合致するこ

とから、これをコアモデルとすることとした。しかしながら、本研究の目的である水田を含む農地の気候緩和機能の定量的評価には、更なる改良が必要であった。主な改良点は①簡易都市モデルを精密な都市モデルとする、②植生モデルには水田が含まれていないことから新たに導入する、の2点である。

すなわち、本研究で開発する気候緩和評価モデルは本章1の TERC-RAMS の植生モデルと簡易都市モデルに、本章2の植生群落サブモデルと本章3の都市キャノピーモデルに変えてやることによって、わが国のような住宅地の周辺に広がる水田や畑地といった混在する小規模農地の持つ気候緩和機能の緻密な評価に適用できるようになる。気候緩和評価モデルの土地利用分類は、図2のとおり、国土地理院の地図情報等を参考に、水田 (Rice)、畑地 (Field)、果樹 (Orchard)、森林 (Forest)、草地 (Grass)、低層ビル (Bldg-B)、高層ビル (Bldg-A)、河川 (River)、海・湖沼 (Sea・Lake) に分類したが、その中の水田、畑地、果樹、草地については井上ら (2004) のサブモデルが用いられた。

5. PC によるシミュレーション実験

前項に述べたとおり、この気候緩和評価モデルはたとえば気象庁の局地気象モデル (気象庁, 2007) と同程度の性能を持っているが、これを農業から環境、教育等に携わる技術および行政担当者が使える操作性の高い実用モデルとするためには、(a) 利用者は個人のパソコン OS Windows を使って、全国を対象としたシミュレーション計算ができること (b) シミュレーションの実行時に必要な初期条件や境界条件の設定から結果表示まで、GUI の誘導による簡単操作を実現すること (c) パソコンによる処置演算速度の高速化を図ること (d) 加工処理データの出力を含むシミュレーション結果の可視化と data base の整備を図ること (e) 水平解像度を 500m 以下とすること等が解決すべき課題とされた。

ここで、(a) の PC シミュレーションと (c) の高速化、(e) の高解像度の解決に3年間の研究期間 (2005～2007年) の大半が費やされた。(e) の空間解像度に関しては、LCM の水平格子間隔を 1km 以下とすると、たとえば水田を都市に変更した場合、変更した都市の周辺以外にも温度が上がったり、下

がったりするなど、ランダム性の高いカオスと呼ばれる現象が表れる。この処理にはアンサンブル平均をとる手法もあるが、それをパソコンで行うことはほとんど不可能である。

そこで、他のモデルと同様に、本モデルに線形熱拡散モデルを導入することとした。すなわち、3段階目ネスティングの分解能3kmの風速場等をそのままにして、それ以下の時空間の温度を線形熱拡散モデルで推定する方法である。厳密には、温度の微小変化が3kmの風速・乱流場等に反映されないことから、温度誤差等の生じる可能性はあるが、その誤差は無視できる程度である(木村ら, 2006)。

6. モジュールとファイル構成

気候緩和評価モデルは4つのモジュールと1つのユーザインタフェースから構成されている(図1)。計算モジュールには実行ファイル TERC-RAMS / win32e.exe, Data Base モジュールには土地利用データと地形・海岸線データ, 大気海洋データが格納され, 可視化モジュールと出力モジュールには可視化ソフトである既存の GrADS, および画像データ(jpeg, postscript, png 形式)と処理加工用の数値(テキスト)データ txt. が格納される。

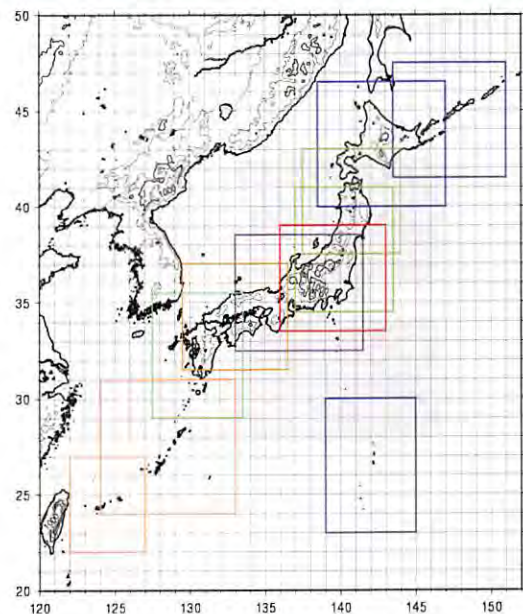
計算可能期間は1982年1月1日から2004年12月31日まで可能である。この期間内の計算は年月日を指定すれば実行できる。つぎに用意されている土地利用は都道府県によって多少時期が異なるものの、基本的に1976年, 1987年, 1991年, 1997年が整備されている。それ以降のデータについては、データを追加しなければならないが、たとえば1997年の土地利用を一部変更する方法で現況の土

地利用にある程度対応させることはできる。本モデルの GUI を用いると、ピクセル単位あるいは領域単位で土地利用を容易に変更することができる。

計算領域は北海道から沖縄まで自由に指定することができる。図2には全国をあらかじめ11区分した一番外側の領域(第1段階目のネスティング)を示した。計算領域の中心位置の緯度・経度を与えると、図2の中から最も近い領域が選択され、つぎの計算日の指定へ進む。全ての作業はGUIを使って「計算条件設定」と「計算表示条件設定」からシステムの内容等を全く意識することなく実行できる(図4, 参照)。

計算時間は、例えば Dell PrecisionT3400, 2GB, RAM, 2.99 GHz のパソコンで、第2段階目のネスティングが 25km × 25km (水平解像度 1km) の場合、1日分の計算に約1時間54分を要する。

全国版気候緩和評価モデル(11区分)



土地利用分類

- Rice ■ Field ■ Orchard ■ Forest
- Grass ■ Bldg-A ■ Bldg-B ■ River
- Sea · Lake

図2. 対象とする領域の緯度・経度を入力すると、最も近い1段階目ネスティングの領域が11区分の中から選ばれる。欄外には9区分された土地利用分類を示した。

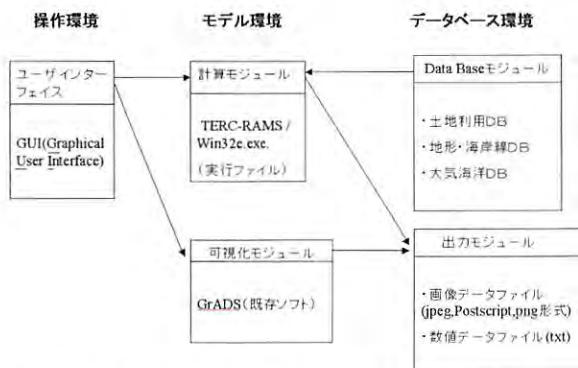


図1. 気候緩和評価モデルのユーザインタフェースとモジュール構成

7. 各種のデータベース

従来のシミュレーションモデルの場合には、プログラムが与えられるだけで、計算に必要な初期条件や境界条件はそのたびに利用者が作成しなければならなかった。これでは誰でも使えるシミュレーションモデルとはいえない。本研究では、これらを解決するために、計算に必要なデータ（土地利用データ、再解析値 GPV (Grid Point Value) 等) は自動作成される。すなわち、本システムは外付けのハードディスク (400GB, USB2.0) に一括格納されており、これを自分のパソコンにインストールすれば全ての準備は完了し、計算が開始できる。システムの実容量は約 270GB であるが、システムのディスクコピーには 400GB のディスク容量が必要である。

本評価モデルが使用している海面水温データは NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration US Department of Commerce: 米国海洋大気庁) の NOAA-CIRES (Climate Diagnostics Center が提供している海面水温データ NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2 を、評価モデル用に変換した。計算に必須の

GPV データは、NOAA-CIRES が提供している再解析データ NCEP/NCAR Reanalysis 1 DATA を本評価モデル用に変換した。井上 (忠) (2008) は気象庁のメソ客観解析データ GPV を用いても同等の推定精度の得られることを明らかにした。

土地利用データは、国土交通省国土計画局が提供している土地利用データ国土数値情報「土地利用メッシュデータ」を評価モデル用に変換・加工した。

8. ネスティング手法と GUI による計算実行

図3は93冷害で記録的な低温となった8月下旬のシミュレーション結果の例示であり、1段目ネスティング (水平解像度 = 15km)、2段目ネスティング (3km)、および4段目ネスティング (250m) によって得られた3つの気温分布である。図示していないが、3段目ネスティングは 1km の水平解像度を持っている。解像度を高めていくと、地形や土地利用と温度との関連がより鮮明となる。

図示したとおり、93冷害時であれば海からの湿った冷気が三沢や六戸の沿岸部に進行する様子、ある

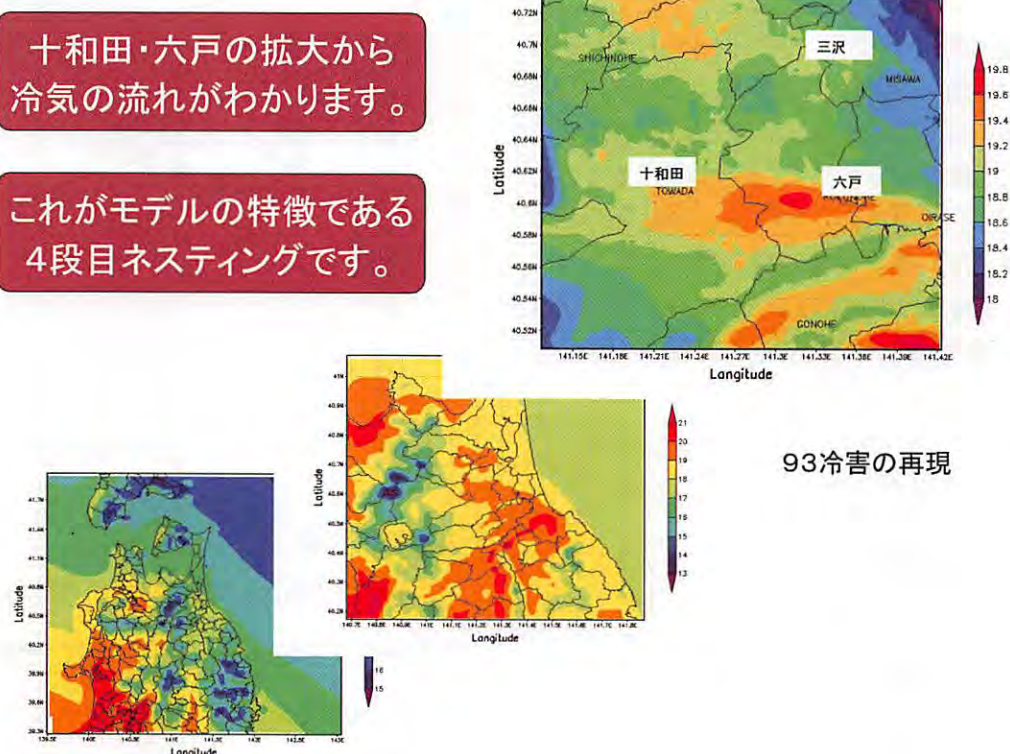


図3. モデルがもつネスティング手法のイメージ図 (93冷害の再現). 左下から1段目ネスティング, 2段目ネスティング, 右上が250mの土地利用を用いた4段目ネスティングの気温分布である.

いは標高の低い谷筋や水田地帯から内陸に進行する様子が詳細に再現できることから幼穂形成期の冷温による被害面積の推定やアメダスが設置されていない地点のメッシュ気温データの推定手法として活用できる(井上, 1994)。

図4は計算の実行手順である。気候緩和評価モデルが収納されている外付けハードディスク(容量約270MB)をパソコンに接続し、システム中のINSTALLをクリックすると、図4の最初の画面が立ち上がる。なお、電子マニュアルは同システムに収納されているので、必要に応じて参照することができる。ここで、「計算条件設定」をクリックすると、2番目の画面が表示されるので、タイトル名、緯度・

経度、計算領域、水平解像度を指定して「次の設定」に進む。遂次、このような方法でシミュレーションの実行まで進むことができる。シミュレーションが終了したら、終了ボタンをクリックすると、最初の画面に戻る。

つぎに「結果表示条件設定」をクリックすると、4番目の画面が表示される。ここで、気温などをクリックして、出力ファイル名とjpeg等の形式を入力すると、最後の気温分布図が作成される。この結果はwin32eのホルダー上に作成されるので、再計算することなく、いつでも結果を見ることができる(井上, 2007a)。

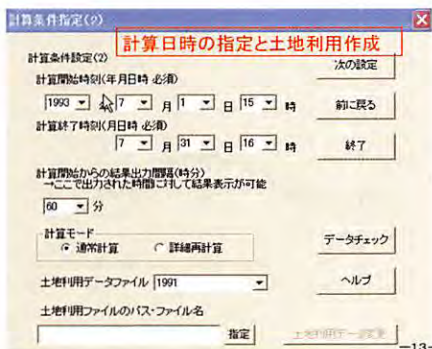
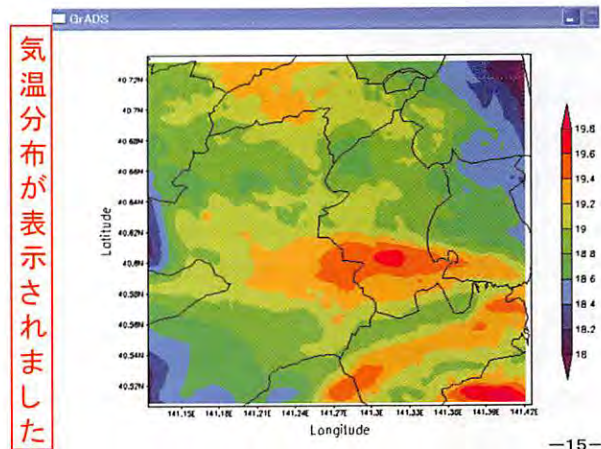
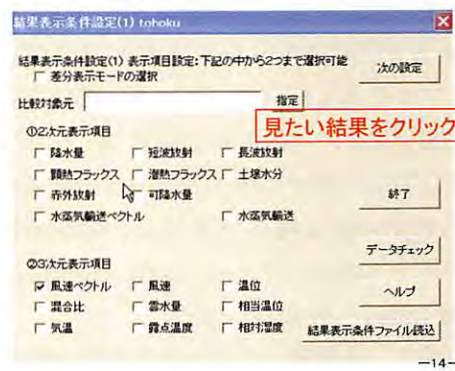
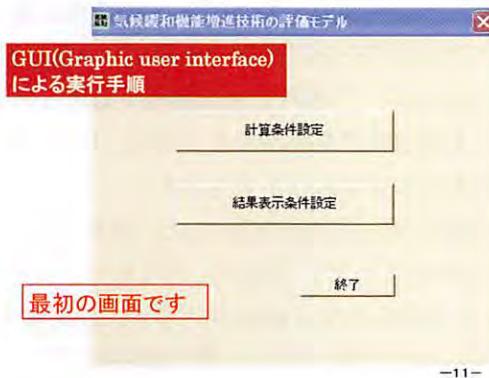


図4. 気候緩和評価モデルの計算から結果までの主な実行手順。システムをインストールすると、最初の画面が現れる。

IV 結果と考察

1. シミュレーション結果の検討

モデル開発では、コーディングされたプログラムソフトによる感度試験等のシミュレーション結果を用いて、予想どおりの推定精度や操作性となっていることの検証が最初に行われる。さらに、問題があればモデルに feedback をかけて修正や改良を図るのが一般的な開発プロセスである。

本評価モデルに関しても、様々な気象条件下における気象要素の推定精度の検証や種々のパラメータの組み合わせによる感度試験を実施することが望ましいが、このような大規模な局地気象モデルにあっては実際には極めて困難であることと、既にコアモデルである TERC-RAMS および導入前の都市キャノピーモデルや植生群落モデルについては十分な検討と考察が行われ、それぞれが都市のヒートアイランド現象の解明や様々な植生群落内外の微気象環境の予測に利用可能な精度であること等が報告されている (井上, 1985; 井上ら, 2004; Kusaka・Kimura, 2004; Sato・Kimura, 2003)。

これらを前提に、本研究では統合後の気候緩和評価モデルの GUI による操作性、および土地利用と気温分布や熱収支配分に関する検討、Philip の改良型土壌水分モデルに関する検討を行った。

図5は猛暑年といわれた2004年8月18日における気温と風速に対する東京管区気象台(大手町)のアメダス値と計算値との比較である。8月17日から19日にかけて関東地方の天候は、強い日射が降りつけるとともに、暖かく強い南西風が入る典型的な真夏日であった。この真夏日の気温の日変化(図5上)をみると、昼間の気温はほぼ一致しているが、早朝の最低気温には1.5℃程の開きがみられる。この他に多くの事例について検討を行ったところ、つぎのような傾向が明らかとなった(井上, 2007a, 2007b, 2008a, 2008c)。昼間の予測気温はアメダスの気温とよく一致するが、予測値の最高気温は観測値を下回り、また夜間から翌朝にかけての最低気温は予測値が観測値を上回るケースが多かった。

推定精度の定量的評価には、異なる手法との比較が最も適当である。これに関して、大原・井上(2008)はメソ解析値における空間補間値の気温推

定値と気候緩和評価モデルによる予測値(毎正時出力)を全てのアメダス点を対象に評価した結果、2006年8月の月平均気温で平均偏差0.57℃、標準偏差0.58℃、2007年1月が0.58℃、0.84℃、2007年8月が0.54℃、0.60℃であることを示した。これは平均的にみて、モデルの気温の予測精度はメソ解析値(観測値による内挿値)と同等であることを示す結果である。

風速については、図5(下)に同日の日変化を示した。風は標高や地表面粗度の局所的影響を強く受けるため、予測精度は気温を下回るのが一般的であるが、18日は比較的良好に予測されている例である。風速の予測精度が十分に検討できる数の事例は蓄積されていないが、つぎのような傾向が認められる。アメダスの風速の日変化が大きい場合には、図5のように日変化の予測値は平滑化される。また、弱風よりも強風の予測精度が高かった。後者の傾向は長期間の予測でも認められる。すなわち、2004年8月の1か月間の結果を越谷のアメダスと比較すると、気温はほぼ予想していたが、風速はアメダスよりも高めに予想するケースが多かった(井上君夫,

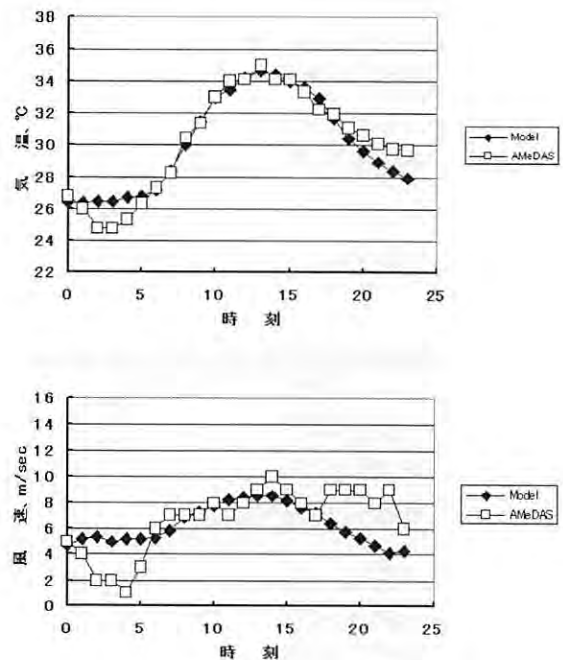


図5. モデルによる気温と風速の予測値とアメダス値(大手町)との比較. 計算は夏季晴天日の2004年8月18日である。

2007b, 2008c).

つぎに気温以外の水田の熱収支フラックスについてモデルと微気象観測との比較について述べる。比較には Nagai et al. (2007) が2002年につくば市真瀬で観測したデータを使用した。シミュレーションは田植直後から刈取後を対象に35日間行ったが、その中から田植え直後の5月5日、出穂期頃の8月1日、および刈り取り直前の9月20日を抽出して

図6に示した。気象要素は気温、下向き全短波放射フラックス、潜熱・顕熱フラックスである。まず、5月5日についてみると、気温は約4℃以内、全短波放射フラックスは約12%以内、顕熱・潜熱フラックスは観測値が振れていることから直接的な比較は難しいが、水稻群落内外の微気象環境はモデルによってほぼ再現できることが確認された。

つぎに8月1日については、顕熱フラックスを除

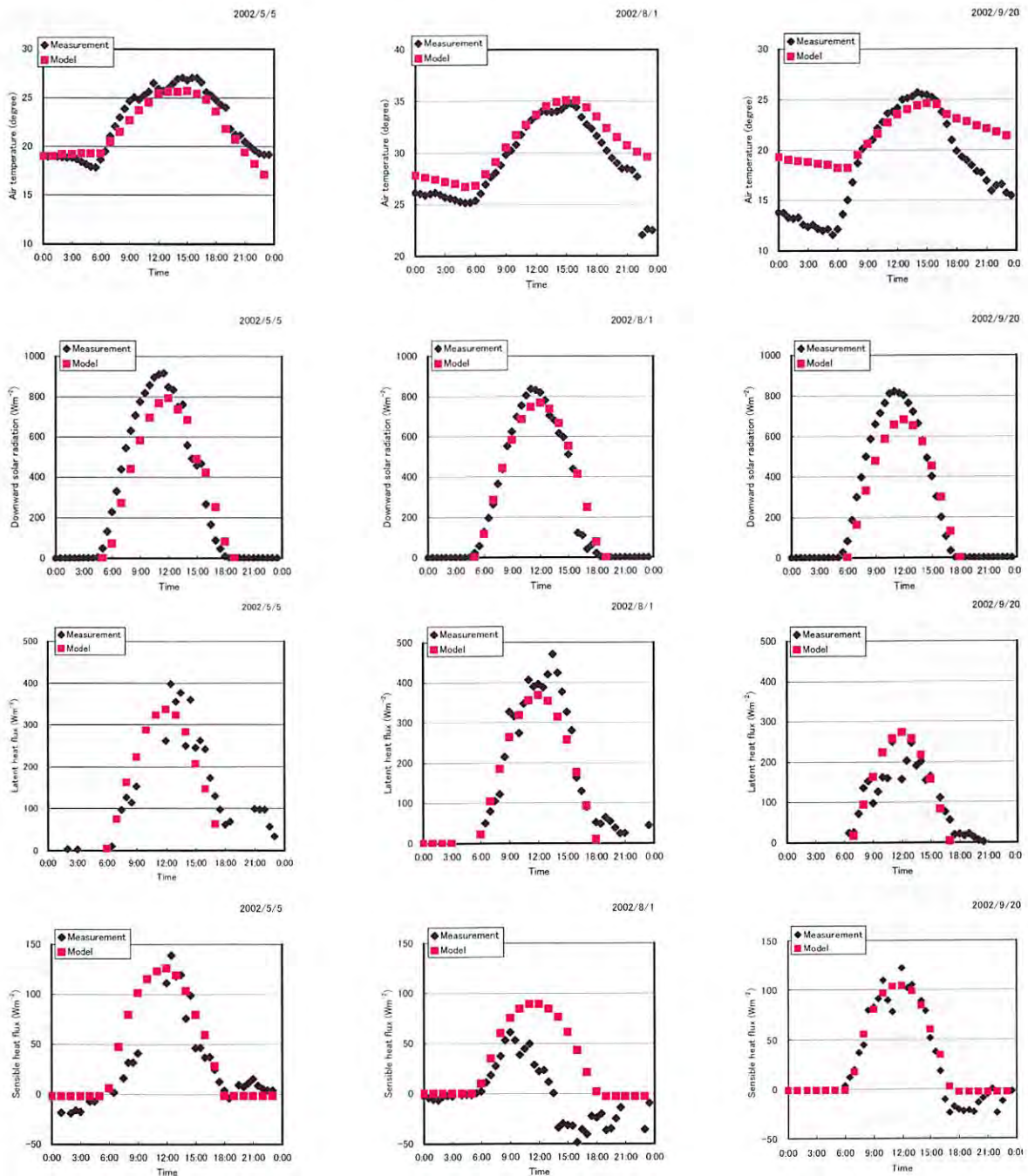


図6. 茨城県つくば市真瀬の水田地帯における気温、全短波放射フラックス、潜熱フラックス、顕熱フラックスの測定値とモデルによる予測値との比較。図示したのは2002年5月5日(田植直後)、8月1日(出穂期頃)、9月20日(刈取直前)の3つの生育ステージである。

けば、精度よく予測されている。顕熱フラックスの観測値は9時頃から急激に減少し、昼過ぎには負に転じて、熱が大気から水田に供給される流れとなっている。このような現象は上層に乾いた暖気が侵入したときに起こる強制蒸散 (forced transpiration) の現象と類似している。そこで、真瀬周辺の下妻、館野のアメダスと中央農研の谷和原観測露場の気象データを調査したところ、3地点ともに同様の気象経過を辿っている。すなわち、8月1日の7時頃まで吹いていた北東風が2~4m/secの南西風になると、8時の気温が30℃を超える等、気温の観測値は予測値と同様に急上昇する。このときの中央農研・谷和原露場の大気湿度は7時で89%、8時81%、9時76%、15時の最低湿度が53%と減少するが、極端に下がってはいない。

これらの観測事実から推察できることは、午前中に発生した都市部の熱い気塊が南西風に乗って北関東に進行した結果、気温上昇の鈍い田園部では接地逆転が起き、熱が大気から水田内に流れたと推測される (井上, 1985)。しかしながら、空気が比較的湿潤で、風が弱かったことから、水蒸気 (潜熱) フラックスが顕熱フラックスを補償する量にならなかったと考えられる。それ故、補償されなかった熱 (残差) はイネ体の昇温、地中温度の上昇、および水田水温の上昇等に使われたと推察されるが、それらを裏付けるデータは示されていない。

9月20日については、特に夜間から早朝の気温が観測値と大きく異なっていた。前に引用した谷和原の気象観測でもアメダスに近い値が得られていることから、モデルの予測値が観測値を大きく上回ったものと思われる。その理由は不明であるが、理論的には予想した有効 (夜間) 放射フラックスが小さかったか、観測値が水田地帯の低温域であった可能性、あるいは北東風を予測できていたかどうかである。

第1に、前者の有効放射説については、約6℃の温度差は放射冷却で説明できる大きさを遥かに超えていると考えられるので、この可能性は無いと思われる。第2に低温域が形成されていたかどうかをアメダスの観測値で調べてみると、20日の5時から6時に出現した最低気温は館野11.2℃、水戸12.4℃、宇都宮12.9℃、土浦13.2℃、越谷13.9℃、東京17.3℃であった。特につくば周辺の気温が周辺より

低い傾向は認められる。しかし、モデルの予測値は5時で18.2℃、23時で21.3℃であり、この値は東京の17.3℃、22℃と最も近かったことなどを総合すると、真瀬では実際に気温が11℃付近まで下がったのに対して、モデルはそれよりも約6℃ほど高い気温を予測したと推察される。

このような温度差となったのは、第3の理由である冷たい北東気流の内陸部への進入が十分にモデルで予測されなかったためと思われるが、その原因究明には再解析値 GPV の精度検証や総観解析等による詳細な検討が必要である。これは風速場が正確に予測できなければ、温度場の予測精度が低下することを意味している。先に述べたとおり、気候緩和機能やヒートアイランドの研究に用いるモデルは、関東平野であれば午前中に東京湾付近に出現して内陸部に侵入する海風や午後に鹿島灘から入る北東気流といった地域特有の局地風循環が再現できなければならない。

以上の図5、6は気候緩和評価モデルによる予測値と実際の観測値等との比較検証であったが、つぎにモデルに組み込まれているサブモデルについて考察する。地表面の熱収支は温熱環境を左右する重要な物理量であることから、この熱収支配分と土地利用との関係について検討する。

図7は同じ夏季晴天日の気象条件下で、ほぼ等温分布を呈していた北関東の平坦地約50km四方を対象に行った実験結果である (厳密には対象地域や気象条件によって、少し異なってくる)。対象地域を単一の水田、都市、森林に改変した場合の潜熱フラックスと全短波放射フラックスの日変化が示されている。顕熱と潜熱の配分比 (ボーエン比) は地表面付近の気温分布を決める重要な要素であり、大きい潜熱フラックスを示す森林や水田は高い気候緩和効果をもち、結果的に温度上昇が抑制される。

図7の結果をみると、潜熱フラックスは森林>水田>畑地>都市の順序であり、森林のボーエン比は水田より小さかった。同様の実験が吉川ら (2006) によって、2003年7月1日の夏季晴天日を対象に行われたが、この場合には森林は示されていないが、潜熱フラックスは水田>草地>畑地>都市の順に高いことが示された。井上 (2008d) がボーエン比法で求めたボーエン比および既往成果を中心にとりまとめた結果によれば、都市・住宅地が0.8、畑・

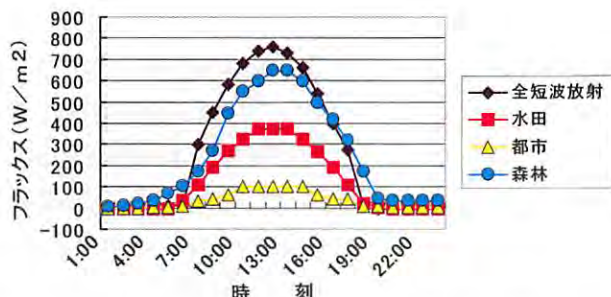


図7. 均一な水田，都市，森林を仮定した場合における夏季晴天日の潜熱フラックスと全短波放射フラックスの日変化

森林 0.29, 水田 -0.31, 裸地 0.71 等であった。森林でも 0.1, 0.2 という値が観測されているが、図7の森林の潜熱フラックスは過大評価され、結果的に気候緩和効果が過大評価される可能性がある。これは元々の RAMS の森林サブモデルに改良すべき点があることを示唆しており、この点に関してはわが国の森林に適したものに改善していかなければならない。

つぎに土壌水分のシミュレーション結果が図8に示されている。土壌水分は農業全般、特に作物栽培にとって重要な気象要素であるが、RAMS に使われている Philip (1957) の不飽和土壌水分モデルには降水が考慮されていなかった。そこで、RAMS の土壌水分モデルと降水バケツモデルを結合した改良型土壌水分モデルが開発され、気候緩和評価モデルに導入された。

図8は導入前の改良型土壌水分モデルによる降雨実験の結果である。乾燥した土壌に雨を降らせ、土壌表面がほぼ飽和に達したら中断し、その後は蒸発によって乾燥化が進むという実験である。土壌水分の初期値 (0-0h) は土壌表面の $0.25\text{cm}^3/\text{cm}^3$ から深さ 70cm (下限) の土壌水分 $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^3$ まで指数的に減少する分布を仮定した。図8によると、降雨がはじまると、まず表面が湿潤となり、水分量は最大の $0.55\text{cm}^3/\text{cm}^3$ (1-8h) まで増大する (これを超える水は系外に流出されると仮定)。湿潤層の水は次第に下層に移行するが、このときに表面と深さ 10cm に大きなコントラストが形成される。つぎに降水を中断すると、表面蒸発がはじまり土壌水分は減少するが、深さ 10 ~ 15cm の土壌水分は time lag により増大を続ける (2-14h)。表面の土壌水分が約 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 以下になると、下層の土壌水分も減少

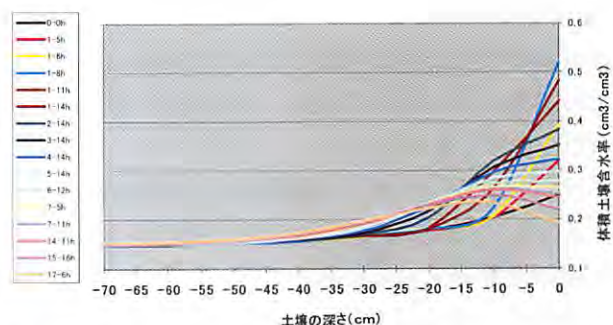


図8. 改良型土壌水分モデルによる降水現象を伴う土壌水分の経時的な深度分布. ここで、0-0h は初日の0時で初期分布を表し、1-8h は2日後の8時、17-6h は18日後の6時を表している。

に転じる (5-14h)。

地表面蒸発に関して、Philip モデルでは土壌空隙内の水蒸気 (vapor moisture) と水 (liquid moisture) が平衡状態にあるときの空気の相対湿度と吸湿水のポテンシャルの関係式から地表面の相対湿度が決定される。これは大循環モデル等で広く用いられる方法であるが、本モデルのように領域気候モデルで、かつ地表面蒸発の時間変化が要求される場合には応答が緩慢であることから適当でないと判断された。そこで、地表面の土壌水分 (S) は蒸発散量 (ETP) の一次関数と定義した (奥山, 1988)。

$$S(t + \Delta) = S_t - 0.005ETP(t + \Delta).$$

ここで、 S_t (cm^3/cm^3) は時刻 t の土壌水分、 ETP_t ($\text{ly}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$) は時刻 t の蒸発散量、 $(t + \Delta)$ は Δ 後の土壌水分および蒸発散量、右辺第2項の数値は経験常数である。

上式を用いると、図8に示すとおり、土壌水分の深度分布は実際の水分環境をよく表現しているように思われる。しかしながら、これらと照合できる詳細な測定データはなく、本格的な検討はこれからである。特に、モデルでは畑土壌と森林土壌を同様に扱うなど、土壌物理のパラメータについては改良が必要であると考えている (井上, 2008a)。

この他に、都市気候モデルの熱収支に関しては、地中伝導フラックスが水田等と比べて大きく、大量の熱エネルギーが道路や建物に貯留され夜間から翌朝にかけて、大気中に放出されてくる特徴がある (斎藤・新田, 1981; 気象庁, 2007)。すなわち、都市気候モデルの開発では、都市キャノピーへの貯留熱、

上向き長波放射, ストリートキャニオン内の風と局地風循環等が正確に再現できなければならないが, この議論については Kusaka・Kimura (2004) らの報告を参照されたい。

以上とおり, 本項では観測値と予測値の比較やシミュレーション実験の結果の検討を行い, 気候緩和評価モデルの特徴と改良すべき点等について述べた。さらに井上 (1985) や木村ら (2006), Kusaka・kimura (2004) らの既往報告等を踏まえると, つぎのように結論づけることができる。本気候緩和評価モデルは大気-植生-土壌システムに関する物質・エネルギーの輸送・拡散過程が適切に表現された結果, 気象やモデルの専門家でなくても自分のパソコンを使って知りたい場所の気温分布や風速分布, 土地利用を変えた場合の気候緩和効果の変化等を正確に, かつ容易に知ることができ, 微細気象や局地気象の調査研究に用いることができる科学的なツールであるといえる。

2. 見沼田圃の気候緩和効果に関するモデル実験

江戸時代の見沼田圃は現在の埼玉県さいたま市と川口市にまたがる約 1,260ha に広がっていたが, その田圃は次第に畑地へと変えられ, 現在では畑地が花木や野菜等の生産地となっている。この地域の防災機能とアメニティ機能について吉田 (1999) が, ヘドニック法により便益額を評価したところ, 防災機能の年間約 91 億円に対してアメニティ機能は 182 億円と推定している。

気候緩和機能と類似するアメニティ機能が防災機能を上回ったのは受益者数の違いによると分析している。気候緩和に関しても評価手法や受益者の算出方法によって公益額が大きく異なってくることが予想される難しい問題であるが, ここでは単純に温度差やポーエン比に注目して気候緩和機能を考察する。

図 6 や図 7 の熱収支配分から明らかなどおり, 1970 年代の斜面林を含む広大な見沼田圃は大きな気候緩和効果を有していたと思われる。そこで, 過去と現在の土地利用の違いによる気温分布への影響を気候緩和評価モデル (空間分解能 1km) から推定する。図 9 a. 上段の左は現在の土地利用で, 右はほぼ 1970 年代の水田地帯を親水化した土地利用図である。下段はそれぞれの土地利用に対する二次元

気温分布である。親水空間とは, 遊水池や小川等の水辺の空間を指し, 親水化とは水田や湖, 河川のような水のある場所とし, 具体的には左側の以前に水田地帯であった地域を, この場合には右側の水色の Lake に改変した。欄外に示すとおり, 親水空間としてこの他に河川や水田を選択することもできる。なお, 図中の Bldg-A と Bldg-B は高層ビルと低層ビルを表している。

まず, 過去のアメダスデータから夏季晴天日を抽出 (7 事例) して計算した結果, 晴天日の気温分布は何れも図 9 a. の下段 (1987 年 7 月 24 日) に類似していた。すなわち, さいたま市から川口市にかけて高温域が形成され, その東側の見沼田圃から岩槻の水田地帯に低温域が形成される。この高温域は図には表われていないが, 和光, 川口, 越谷, 練馬に連なっていることから風上にあたる都市周辺から流れてきていると考えられる。図 10 には, 日付は 2001 年 7 月 12 日と異なるものの, 同じ夏季晴天日における関東地方の気温分布が示されており, そこには都心から上尾, 鴻巣に伸びる高温域を確認することができる。これが上述のことを物語っている。つぎに同図の低温地帯に注目すると, この見沼田圃よりも岩槻の水田地帯の気温が低くなっている。これは僅かに標高の低い岩槻の大規模水田の気候緩和効果に見沼田圃のそれが加わることでより発揮されたものと推測される。

さらに, それよりも大きな気候緩和効果を発揮しているのが河川敷を含む荒川, 入間川とその周辺に広がる水田地帯である。このことは空間分解能を 250m に上げて計算した図 9 b. によく表われており, 改変前 (左側) の温度の低い帯状 (30℃程に低下) がそれを示している。さらに, 改変後においては約 0.6℃上昇するものの, その上昇率は市街地の約 1.5℃, 見沼田圃の約 0.8℃より低いことがわかった。日没後になると, この冷気が大宮・浦和周辺に流出するために, 大宮周辺の気温が急速に低下する。さらに, 経時的な二次元気温分布から, 大宮周辺の高温域が岩槻方面に移動することも明らかとなった (井上, 2007b)。

河川の気温低減効果について, 山田 (1993) は埼玉県栗橋町を流れる利根川河川敷の影響は基本的に堤防内に留まっていたことを観測から明らかにしている。しかし, 1990 年 8 月 8 日 14 時の気温分布を

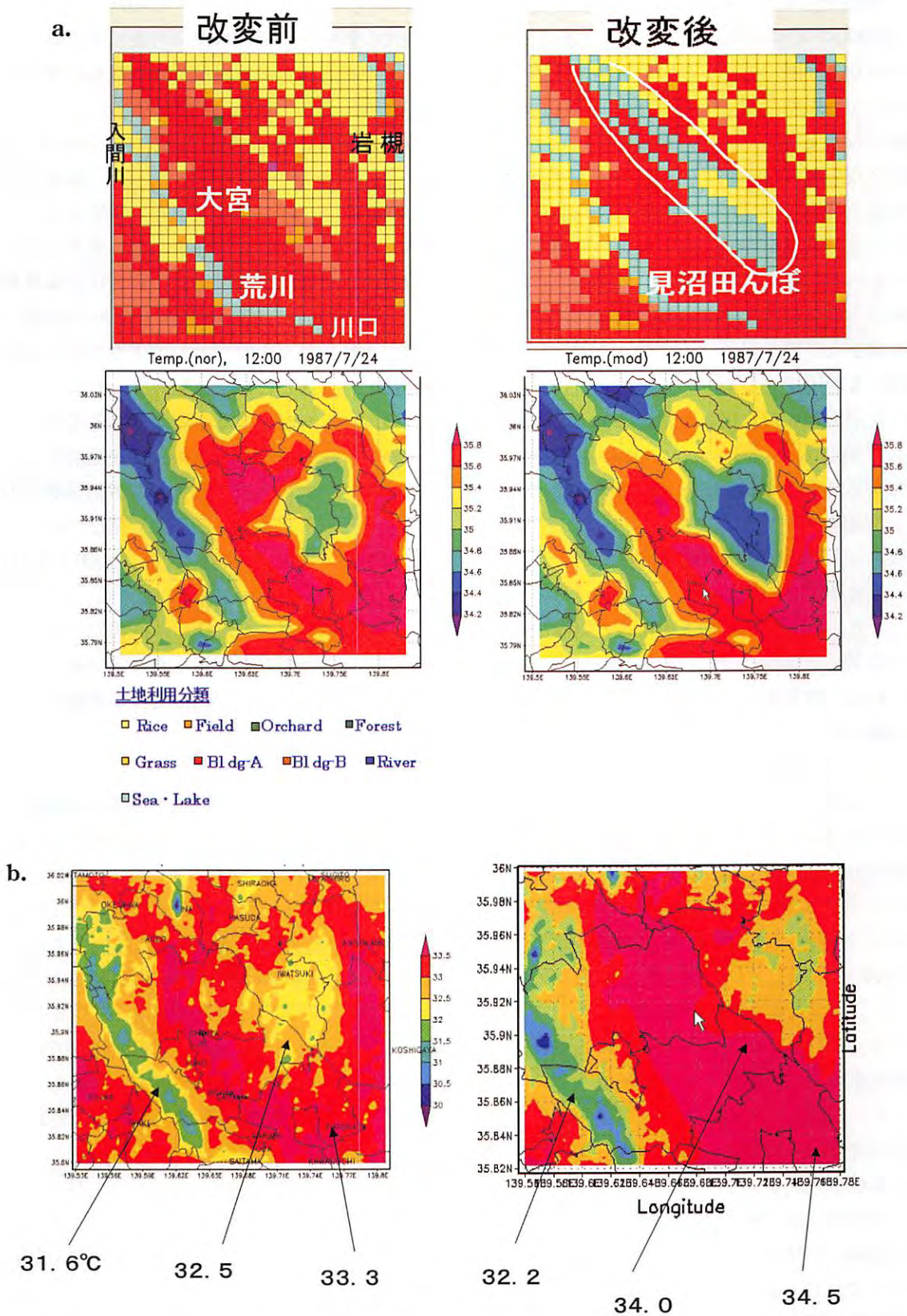


図9. a. 見沼田圃一帯を親水化した場合（右）とそれ以前（左）における夏季晴天日の12時の二次元気温分布（1987年7月24日，空間分解能1km），b. 見沼田圃一帯を宅地化した場合（右）とそれ以前（左）における夏季晴天日の12時の二次元気温分布（2001年7月21日，空間分解能250m）．両図の温度バーは共通である．

みると、利根川河川内の気温は約 32.5°C であるのに対して、栗橋町の気温は約 35°C とその温度差は 2.5°C に及んでおり、周囲に広がらないのは高い堤防のためではないかと思われる。一方、井上 (2006) は荒川河川敷から鴻巣市内、郊外の水田地帯において気温の同時定点観測 (2005 年 7~9 月) を行った結果、幅約 2.8km の荒川河川敷内の気温は水田よりも低く、さらにその冷気が周囲に流出している可能性が明らかとなった。モデル実験では、堤防を設けるなどの実験は今のところできないが、将来的には林立するビル群や大規模な堤防 (防波堤) を仮定したモデル実験にも適用できるようにしていきたい。

つぎに見沼田圃を親水化した場合の気温分布について詳しく検討する (図 9 a)。一般に水田や森林から消失する蒸発散量は約 5~10mm/日 で、これが大きな冷却効果を生むことはよく知られている。図 9a. (右) の水色の部分が親水化を仮定した領域である。気象条件は同様に 1987 年 7 月 24 日の夏季晴天日とした。その結果、地表面付近の気温分布には明らかな違いが認められ、その差は 0.2~0.4°C と予想される。親水化によって、大宮周辺の高温域が僅かに縮小することもわかる。

このように土地利用が数キロ単位で変更されると、そこには明らかな温度変化が現れるが、画面上で確認できるのは大体 1km 四方以上である。それ以下の 250m については、txt ファイルに掃きだされたデジタルデータによって、その差異を知ることができるが、神田・日野 (1990) が二次元の NEO SPAM で論じている緑地帯の配置やスケールメリットに関する情報は得られなかった。これらに関しては、木村ら (2006) が本モデルの地表面の温度分解能を高めた熱拡散モデルの多重ネスティングによって、水田と住宅との境界に発達する温度境界層の再現実験に成功している。今後、本モデルにおいても多重ネスティング手法の導入を図っていくことと、本質的には、例えば構造物の周囲における乱流場が正確に予測できるようにしなければならない。そのためには Large Eddy Simulation のような高次乱流拡散モデルの導入と圧縮性・非静力学方程式系の理論的検討が必要である。

一方、図 9 b. は見沼田圃を住宅地に変更した場合の結果である。気象条件は夏季晴天日の 2001 年 7 月 12 日である。さいたま、浦和の中心部の昇温

程度は約 1.5°C、荒川河川敷で 0.6°C 上昇するなど、宅地化の影響は広範囲に及ぶ可能性がある。このように土地利用に対する温度分布を直ちに可視化できるのが本モデルの最大の特徴である。

本数値実験に用いた夏季高温年の 2001 年や 2004 年を上回ったのが 2007 年であった。気象庁は同年 8 月の関東地方および近畿地方で発生したヒートアイランドについて速報を発表した。それによると大都市およびその周辺の都市化の影響による典型的なヒートアイランドが領域気候モデル (LCM) により再現され、都市化要因として土地利用の変化が多く占めているなどとした (気象庁, 2007)。

この内容は対象とする年度が異なるものの、本モデルのシミュレーション結果と現象論的に一致するものであり、土地利用の変化が都市気候現象のひとつであるヒートアイランドと強く結びついていることは明らかである (Kusaka et al., 2000; 井上君夫, 2007b; IPCC, 2007)。しかしながら、ヒートアイランドを地球レベルの温暖化に直接結びつけるところまでには至っておらず、それゆえ気候シナリオのダウンスケーリング研究の重要性が指摘されるようになってきた。

3. 熱い気塊と海風前線に関するモデル実験

2004 年 7 月 23 日から 24 日は全国的に晴れて気温が上昇する特異日であった。特に 23 日は札幌で 31.9°C を記録、埼玉県春日部では強いフェーンが吹き、井上 (2008d) の現地観測においても春日部市内で 32°C から 35°C の気温が観測された。このように各地で都市の昇温に地形性のフェーンが加わって最高気温が更新される事態 (気象庁 2007) が増えていると思われるが、その実態をパソコンによるシミュレーション実験で確かめることは到底できなかった。

しかしながら、既に述べたとおり、パソコンに気候緩和評価モデルをインストールして、GUI を操作することで簡単に、その正体ともいえる熱い気塊の挙動が図 10 のように確認できるようになった。熱い気塊は都市のヒートアイランドともいえるが、ここでは単に熱い気塊と呼称する。

この気塊は海風前線が明確に現れる気象条件で発達すると予想されることから、2001 年 7 月 12 日から 13 日の気象条件の下にシミュレーションを行っ

た。アメダス観測によると、大手町では11日から13日にかけて終日7~8m/secの南西の風が吹き、12日の最高気温は13時で35.7℃、一方熊谷では12日の日中は3~6m/secの南南西の風が吹いていたが、夜間から翌朝になると、1~2m/secの弱い西風に変わっている。すなわち、この日は海陸風が発達したものの、夜間の陸風は弱かったことがわかる。12日の最高気温は15時で38.2℃を記録している。

このような気象条件下におけるシミュレーション結果が図10である。図10に2001年7月12日の07h, 09h, 14h, 21hの気温分布と風速分布を示す。図中の高温域は朱色に、低温域が紫色に塗りつぶされている。この朱色の部分（ここでは熱い気塊と呼称する）に注目してみると、この熱い気塊が時間帯によって移動している。午前7時の気温分布をみると、川口、越谷付近に28.5℃を越える昇温域が現れ、9時になるとそこを中心に周辺の気温は31.5℃以上に跳ね上がり熱い気塊が形成される。同時に領域全体の気温が2.5℃から3℃上昇するが、海風の入る東京湾から品川や浦安の地域、あるいは八王子や青梅の郊外、足利や田沼の栃木北部、岩瀬や真壁の茨城北西部の気温は中心部より明らかに低くなっている。

風は139.3Eを境に西側で弱い、東側では南から南南西の比較的強い10m/sec前後の風が吹いており、風向はアメダスとほぼ一致しているが、風速はアメダスを上回っている。ただし、図示した風速ベクトルは正確には最下層(0~14m)の値である。

さらに14時になると、35℃以上の気塊は強化され、34℃以上の気塊も拡大しながら関東北部へと広がっていく。これには南西の強い風が関係しているように推察される。この傾向は日没後の21時になるとよりはっきりと現れ、加須、幸手、藤岡、古河付近の気温が29℃以上であるのに対して都心はそれよりも2℃以上低い27℃まで下がっている。風は139.3Eを境に西側で弱い、東側では南から南南西の風に変わりはなく、栃木や茨城の北部では北東風が強まってくる。13日の翌朝には、熱い気塊は消えて、新たに都心付近に高温域が現れるようになる。この日の熊谷のアメダスでは22時頃から弱い陸風が観測されているが、予想した最下層(0~14m)の風向は依然として海風であった。

また、気象庁は都市部のヒートアイランドがフェーンによって強化されることを指摘している。これに関して、菅野・佐々木は本モデルによる2004年7月23日のシミュレーション実験において札幌市周辺の気温と相対湿度の鉛直分布から上層風の下降に伴う断熱昇温の可能性を示唆しており、極めて興味深い。このように本モデルは高層気象観測データ等と一緒に用いれば、気象庁(2007)のローカルモデルと同様にフェーン現象の把握に利用できるであろう(井上, 2007a)。

4. 土地利用の改変と気温変化に関するモデル実験

関東地方でも埼玉県は都市開発によって大きな変貌を遂げてきた地域である。特に高速道路や新幹線の整備に伴い1987年から1997年の約10年間に、水田地帯が畑地化されて、そこには人工構造物が建設されてきた。そこで、急速な発展を遂げた大宮、浦和周辺を対象に土地利用に対する気温変化を予測したのが図11 a, b.である。1987年7月24日の夏季晴天日を対象にシミュレーションを実行すると、図11 a.の上図のとおり、都市部の大宮、浦和、川口は33℃以上の高温域に塗りつぶされる一方、見沼一帯から岩槻、および上尾周辺の気温は低温域の31℃から29℃に止まっている。しかし、10年後の1997年の土地利用で計算した結果(図11 b.)と比較すると、大宮、浦和、川口は高温域が強化されると同時に、大宮の見沼一帯、岩槻、上尾の低温域は消滅して昇温に転じるようになる。この傾向は他の晴天日でも同様であることから、土地利用の変化が局地気象にも確実に影響していることがわかる。図11 b.の上方に位置する上尾で3℃から4℃の大きな気温上昇となったのは、上尾が大宮や浦和の風下側にあるためと考えられる。これは地方都市の拡大が首都圏の熱波をより内陸部へと進行させる方向に働くことを暗示している。

図12は同じ埼玉県の吉川市から三郷市を対象に、過去4回の土地利用の変化に伴う気温を予想した結果である。約30年前と現在の土地利用を比較して大きく変わったのはやはり道路網の整備・拡張と住宅地の増大と考えられる。これを物語るように、両市の気温は確実に上昇し続けているように推察される。特に、見沼と同様に、吉川・三郷市における1987年から2007年の20年間の気温上昇は12時の

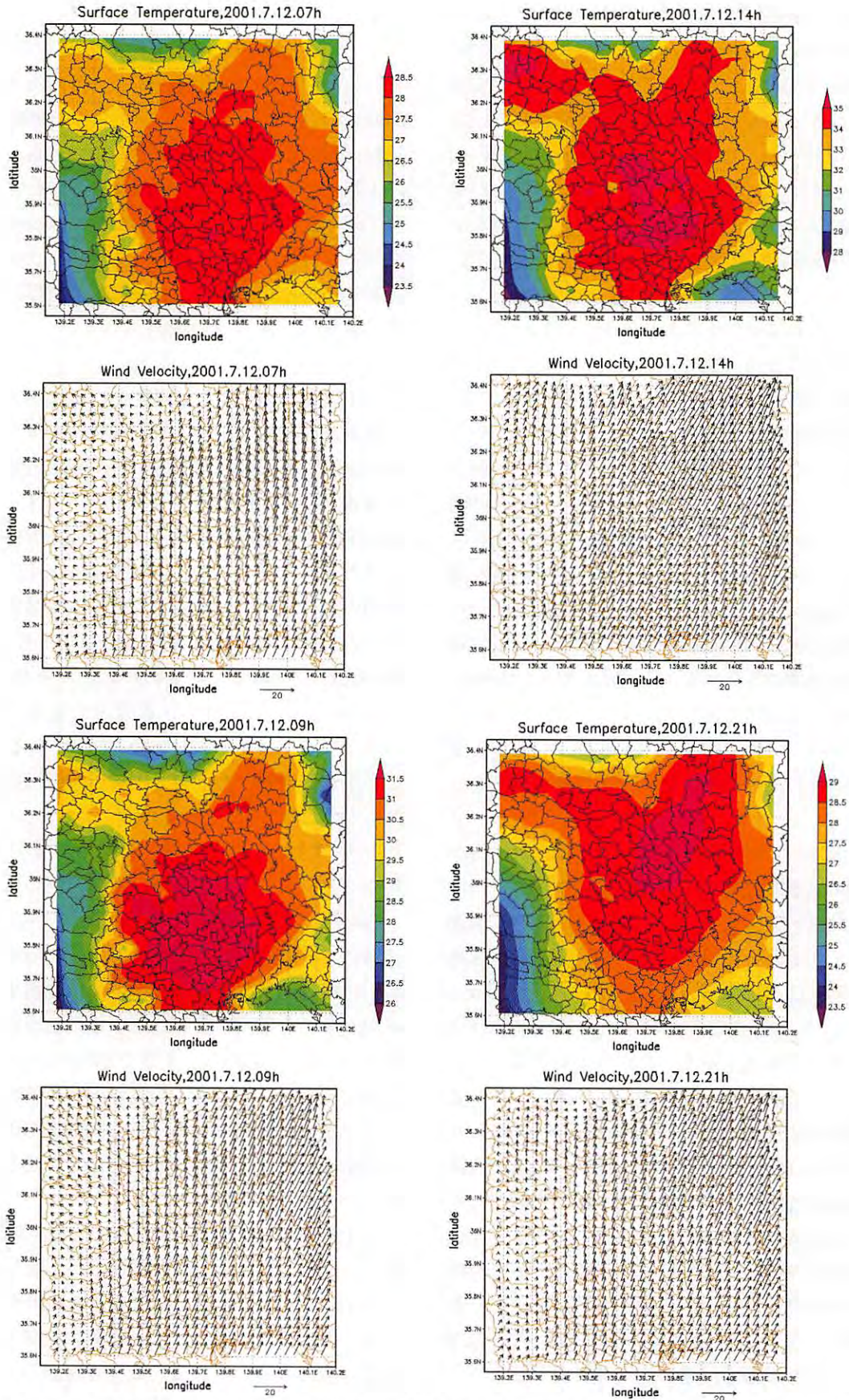


図10. 関東地方における夏季晴天日(2004年7月12日:07h,09h,14h,21h)の気温分布と風速分布。風速分布の枠外の矢羽は20m/secを表す。四隅の地点は右下が東京湾、千葉、右上が岩瀬、筑波山、左上が前橋、左下が高尾山、藤野である。

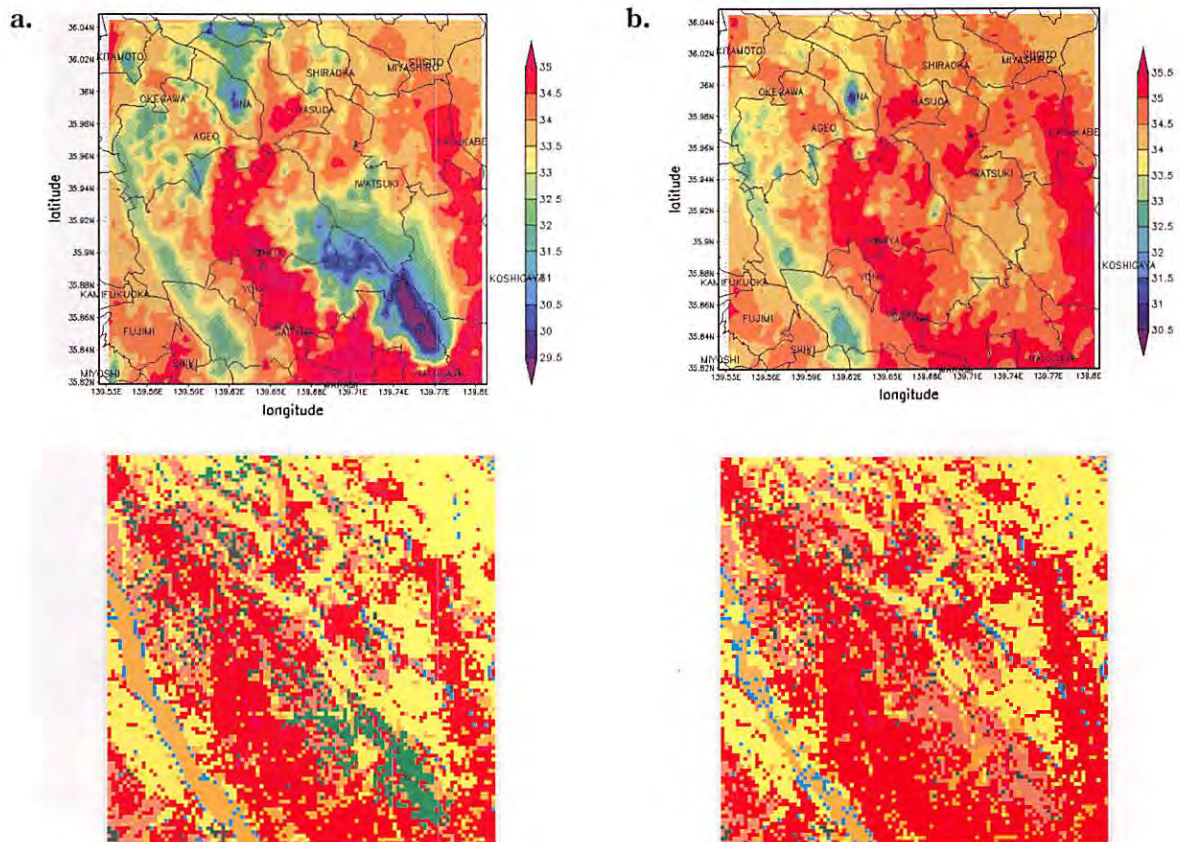


図 11. 大宮、浦和、岩槻一带の気温分布と土地利用変化. 左図 a. が 1987 年の土地利用と同年 7 月 24 日の気象条件下における 12 時の気温分布, 右図 b. は同気象条件下で, 土地利用が 1997 年の場合である. 地名および土地利用は図 9 を参照のこと.

時点で評価すると, 夏季晴天日で約 0.7°C の上昇となっている.

5. 果樹栽培と温暖化に関するモデル実験

わが国の農業の現場にも, 地球温暖化の影響が現れてきているとの指摘がある. この事態を深刻に受け止めているのが永年作物の果樹産地である. 果樹の休眠覚醒の遅延, 開花の前進・遅延, 凍害・晩霜害の増加, 果実着色の不良, 蜜りんごの減少等が既に顕在化していると報告されている (羽山, 2007).

その対策が容易に見つかるとは考えられないが, 先に指摘した果樹の諸現象は地上気温だけで引き起こされるのではなく, 日射量, 地温, 土壌水分といった多くの地象と気象に関係していると考えられる. そこで, 地形の影響を強く受ける山梨の盆地気象と海陸風の影響を強く受ける岡山の沿岸気象 (図, 省略) に注目してシミュレーションを行ったので, その結果を以下に述べることとする (井上, 2007b).

まず, 山梨のモモは主に塩山市, 一宮市, 御坂町といった標高約 250m 以上の東西斜面で栽培されている. 盆地気象の特徴は斜面日射が豊富であることと, 斜面高度によって温度が大きく異なることである. 後者の斜面高度によって温度が変化の様子を明らかにするために, 甲府の 4 月上旬の最高気温 19.3°C (平年値) を大幅に上回った 1994 年 4 月 2 日から 7 日について計算を行った. 何れの日も晴天で, 風向は南西の風で, 弱風であったことから気温分布等の計算結果は極めて類似していた.

図 13 に示したのは, その中から 4 月 6 日の最高気温 (15 時) の水平分布 a., 同時刻の風速ベクトル b., 16 時における南北・東西断面の気温分布 c., d., 5 時における最低気温分布 e., 15 時における土壌水分分布 f. である. ただし, 計算結果の出力は 1 時間毎であることから, 厳密な最高気温等の出現時刻とは異なる可能性がある. なお, 結果出力間隔は 5 分, 10 分, 15 分, 30 分, 60 分, 120 分等と変え

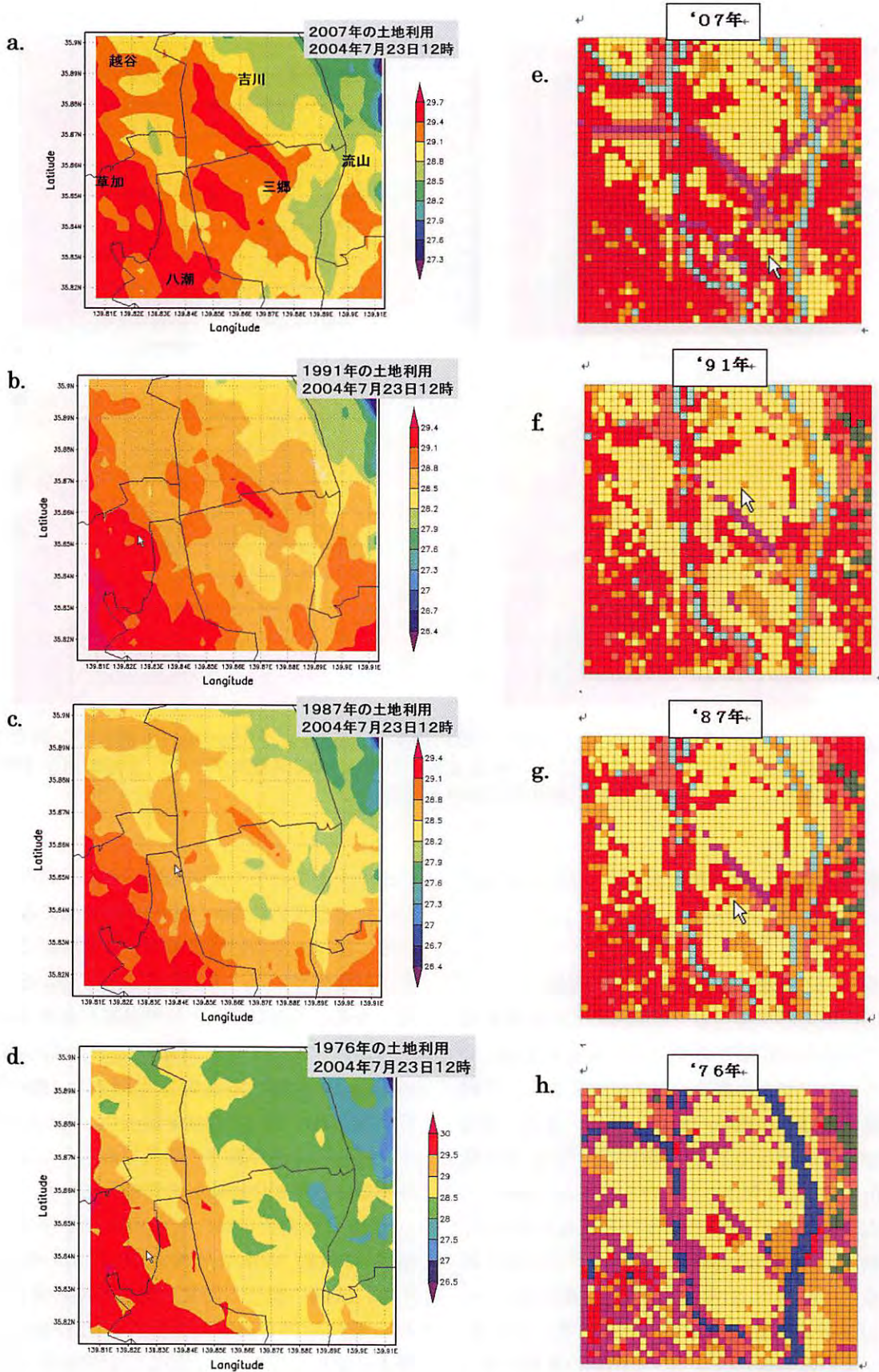


図 12. 三郷市、吉川市周辺の過去から現在までの土地利用に対する夏季晴天日（12時）の気温変化。左図の4枚（a, b, c, d）は気温分布で、右図の4枚（e, f, g, h）がそれぞれの土地利用図である。土地利用分類は図2を参照のこと。気象条件は何れも夏季晴天日の2004年7月23日である。

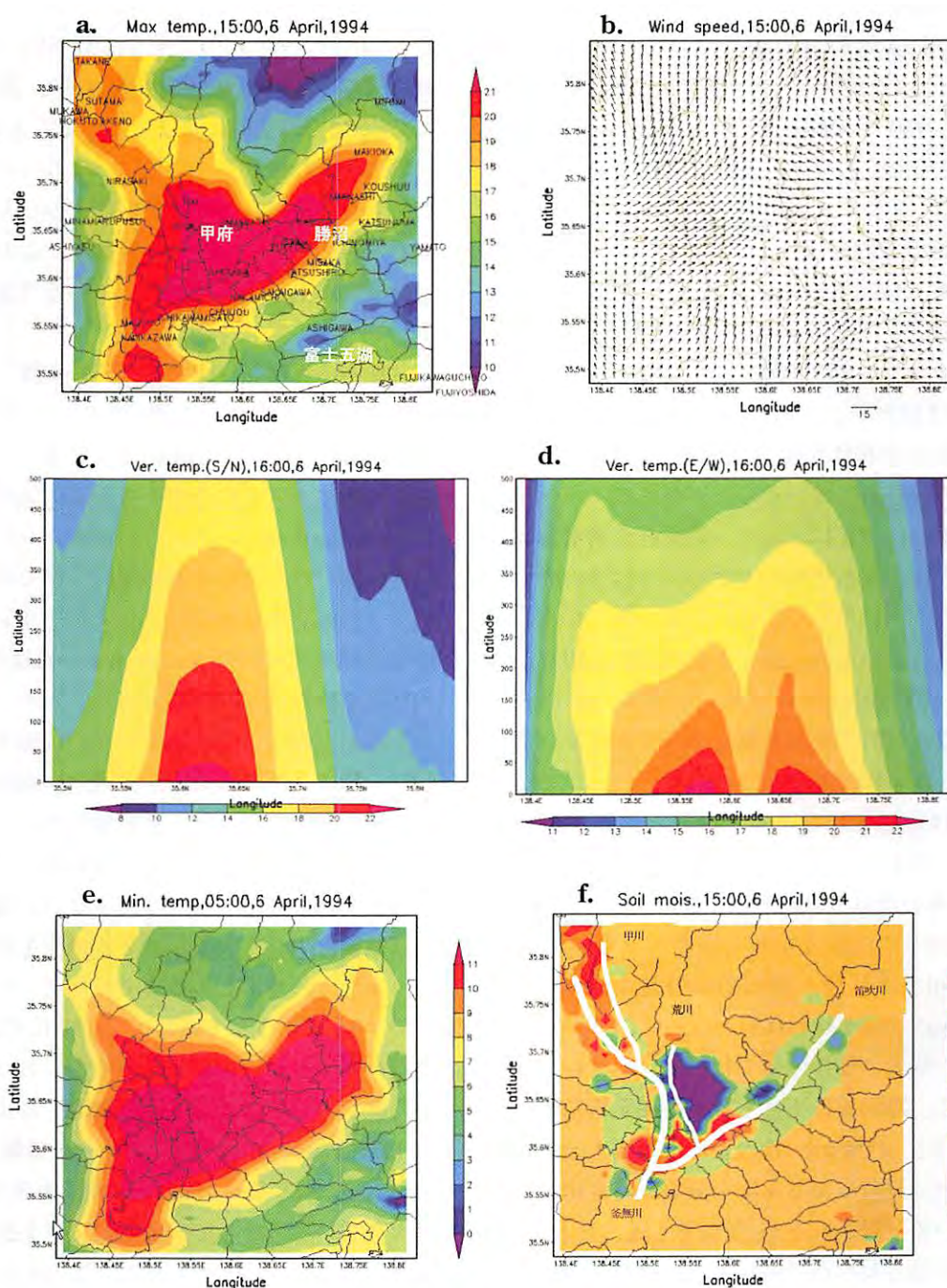


図 13. 山梨の気温が平年より高かった 1994 年 4 月上旬の気象環境 (a. 最高気温 15:00 b. 最高気温と同時刻の風速ベクトル (風速分布の枠外の矢羽は 15m/sec を表す) c. 気温の南北断面 d. 気温の東西断面 e. 最低気温 05:00 f. 土壌水分). 南北断面および東西断面の中央に甲府市が位置する。

ることができる。またⅢ 1 項で述べたとおり、縦座標は地表面に沿った Z* 系を採用していることから、たとえば最下層 (0 ~ 14m) の高度は標高に伴って変化する。

したがって、晴天日の最高気温は一般に標高の高い斜面が低く、低い盆地内部が高く表示される。この事に留意しながら最高気温分布 a. と風向分布

b. をみると、先ず 20℃ 以上の高温域は甲府市、昭和町、竜王町、若草町、勝沼町といった標高の低い地域と重なる。また、この地域には釜無川、笛吹川、荒川の 3 本の大きな川が流れている。この時の風系は複雑であるが、一部を除けば風が弱く風向も定まらない。一方、5m/sec 前後と比較的に強い風が東西および南斜面から盆地中央に向かい、さらに韮崎、

須玉方面と山梨，牧丘方面に向かっていた。

甲府上空にある約20℃の気塊の高さは南北断面c. でみると最大約200m，東西断面d. でみるとそれよりも低く150～200mと予想される。d. の東西断面に注目すると，経度138.57Eの底部（甲府市の標高約270m）で22℃を超える気温が138.45E（韮崎市湯船付近の標高約420m）では17～18℃まで低下している。最高気温の平年値21℃を超えていた盆地底部の気温は標高が150m程上がることによって，平年値を3～4℃下回ることが期待できる。最低気温e. は日出前の5時頃に出現し，盆地内の中心地に位置する甲府市周辺の気温は標高の高い周辺よりも高めに経過していることがわかる。

つぎに果樹の開花にとって，降雨と土壤水分はその時期を大きく左右する。土壤水分は盆地の底や河川沿いで高く，日当たりの良い斜面で低くなることが予想されるが，その実態を土壤観測から明らかにすることは簡単ではなかった。しかし，図13f. のような土壤水分の二次元分布を本モデルにより予想することが簡単にできるようになった。ここで示す土壤水分は体積土壤含水率で図8と同様に単位は cm^3/cm^3 である。

甲府の中心部は $0.25\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 以下の乾燥土壤であるが，図中に白線で示した笛吹川と釜無川沿いは赤く飽和土壤状態，周囲の森林地帯は0.4から $0.45\text{cm}^3/\text{cm}^3$ とほぼ飽和状態となっている。この他に北海道の帯広の畑作地帯で行ったシミュレーションにおいて，降雨後に土壤水分が増加する結果を得ている（井上，2008a）。このように土壤水分モデルは，降雨や蒸発散による土壤水分の経時変化をよく再現していると思われるが，前項でも述べたとおり，厳密な検討はこれからである。

以上の結果から推察されることは，たとえば温暖化等によって平均気温が上昇した場合のひとつの対策として，更新時の苗木はいまよりも高い斜面に植えつけることで気候を緩和できる可能性がある。実際に，現地の生産者はそのような対策を始めている。

山梨と並んで岡山も日本有数の果樹地帯である。そこで，岡山を中心とする40km四方を対象に2004年7月23～24日の気象条件で，最新の土地利用（1997年）と約30年前（1978年）の土地利用の下にシミュレーションを実施した。そのシミュレーション結果は省略するが，その特徴について

述べる。井上（2008b）が報告したとおり，現在と約30年前の土地利用に対する夏季晴天日における最高気温の温度差は最大で約0.2℃，最低気温が最大で約0.1℃の上昇に止まっていることがわかった。工業化が進む中都市としては，これらの温度差は予想を下回る値であるが，その理由のひとつと考えられるのが瀬戸内の海陸風の影響，すなわち日中の海風の侵入が気温上昇を抑制している可能性がある。

6. 都市の温暖化に関するモデル実験

IPCC第4次評価報告書（2007）に盛られているとおり，温暖化は確実に始まっており，人類がこのまま温暖化ガスを放出するならば大気温度は急上昇すると指摘されている。この地球レベルの温暖化が局地気候レベルに与える影響については，その手法開発（気候シナリオのダウンスケーリングが可能な局地気候モデルの開発）が始まったばかりであり，本格的な検討はこれからである。しかしながら，その影響が実際の気象観測データには確実に表われており，特に大都市の東京，大阪，福岡の温度上昇は世界でも突出していることが報告されている。

現在の気候緩和評価モデルは気候シナリオに基づく将来予測にこのままでは使えない。現在，本モデルに気候シナリオ実験ができる機能を追加中であるが，本稿にとりまとめるまでには至っていない。そこで，つぎのような方法による温暖化実験を試みた。福岡を対象とし，福岡管区気象台における1月の月平均値である平均気温，最高気温，および最低気温を1976年から10年毎に整理した結果，1975年～1984年と1985年～1994年の間に後者が1℃以上高くなっている。そこで，前者の気象条件に最も似ている日として1983年1月12日，後者の日として1988年1月30日を選んでシミュレーションを実行した。選定された日は図14の欄外に示したシミュレーション実験である月平均気温，最高気温，最低気温が1月の月平均値に最も似ている日である。シミュレーションを1カ月間実行して得られる最高気温や平均気温とそれぞれの代表日について行ったシミュレーション結果とは厳密には異なるが，ほぼ近い結果が得られることは経験的に知られている。

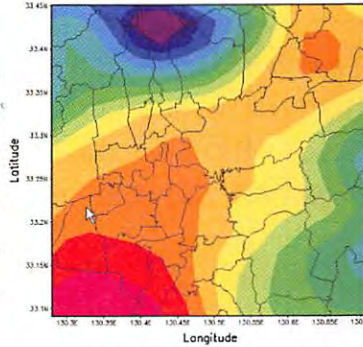
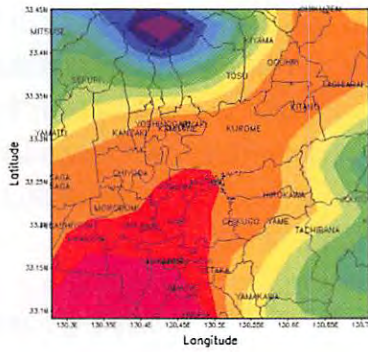
図14は最低気温の出現時刻（8時），最高気温の出現時刻（16時）および気温の日較差出現時（DTR，20時）における気温分布である。図中の低温域（上

- 1985-1994年間の1月平均気温=6.85℃、最高気温=10.25℃、最低気温=3.7℃
- シミュレーション実験：1988年1月30日、土地利用1987年版、日平均気温=6.6℃、最高気温=10.1℃、最低気温=3.7℃

- 1975-1984年間の1月平均気温=5.63℃、最高気温=8.93℃、最低気温=2.48℃
- シミュレーション実験：1983年1月12日、土地利用1987年版、日平均気温=5.6℃、最高気温=8.7℃、最低気温=2.3℃

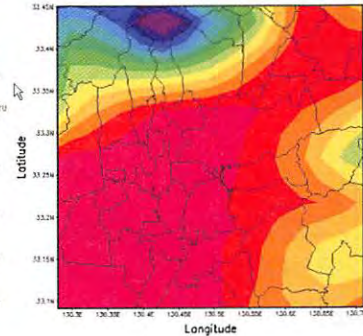
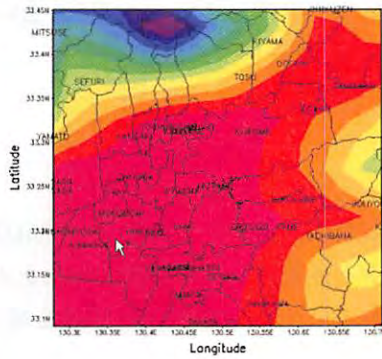
10年前の1月、Tmin.(08h)

20年前の1月、Tmin.(08h)



Tmax.(16h)

Tmax.(16h)



Tdiff.max(20h)

Tdiff.max(20h)

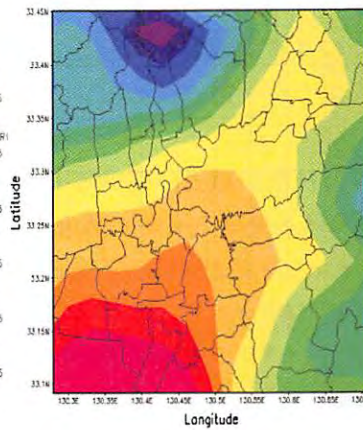
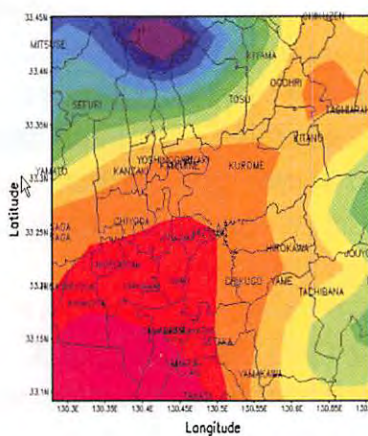


図 14. 都市温暖化に伴う福岡周辺の気温分布（最高気温時，最低気温時，気温の日較差（DTR）出現時）。

方の濃紺色)は博多湾で、温暖域(下方の朱色)は有明海である。最低気温のシミュレーション結果を比較すると、両者の気温分布は酷似しているが、たとえば20年前の城島、三島の4.5~5℃に対して10年前は5.5~6℃と約1℃上昇している。同様に、最高気温のシミュレーション結果を久留米、小郡で比較してみると、20年前の6~6.5℃に対して10年前は7.5~8℃と約1.5℃の上昇となっている。これらは図14の欄外に示した1月の最高・最低気温およびシミュレーション実験条件とした最高・最低気温の日較差に近い値を示しており、シミュレーション結果の信頼性の高さがわかる。

つぎに気温差(DTR)が最大となる20時に注目すると、大川で10年前の6.5~7℃に対して20年前が3.5~4.5℃、八女が同様に5~6℃に対して2.5~3.5℃と2.5℃から3℃の上昇となっている。これらは上述した最低気温および最高気温の上昇量を明らかに上回っている。日没後の20時頃に、都市と

郊外の気温差が最大となるのは都市気候のひとつの特徴といわれているが、そのような傾向を示す結果である(Kusaka・Kimura, 2004;井上, 2006)。

本項で述べた擬似温暖化実験の結果について整理すると、10年前、20年前に対する最高気温や最低気温の分布は非常に似かよっており、それによると気温は有明海側で高く、博多湾および八女や黒木の中山間地で低くなる。日変化をみると、日没後の20時頃が市街地と郊外との気温の日較差(DTR)が最も大きくなる。これらの結果は気候シナリオ実験の結果と矛盾しないことから、温暖化が進んだ場合の局地気候への影響は基本となる温度場の上昇(気候シナリオ)に依存すると推察される(IPCC第4次評価報告書SPM, 2007)。さらに、現在開発中の気候シナリオ対応の気候緩和評価モデルを用いた実験を積み重ねることによって、多くの知見が得られるものと期待される(井上, 2007a, b, 2008a, b, c, d)。

まとめ

高い性能と操作性を有する最新の気候緩和評価モデル(領域気候モデル)が開発された。モデルの特徴、操作性、精度検証およびモデル実験に関して、つぎの知見が得られた。

- (1) 都市モデルと植生モデルを組み込んだ最新の気候緩和評価モデルが開発された。本システムをパソコンのOS WindowsXP (Windows2000でも利用可能)にインストールするだけで、エンドユーザはインターフェイスGUIを介して全国どこでも、計算から結果表示までの一連のシミュレーション実験ができるようになった。
- (2) 気候緩和評価モデルの精度が過去の夏季晴天日、冷害年、猛暑年における気温や風向・風速、熱収支配分のシミュレーション結果を用いて検討された。数多くの予測気温はアメダスとほぼ一致するが、風速は予測値がアメダスを上回る場合が多かった。熱収支項の潜熱フラックスは森林>水田>畑>都市の順に高く、土地利用別の熱収支特性がよく再現されていると判断されたが、森林のボーエン比は従来の結果よりも小さく、RAMSの森林サブモデルの改善が必要である。

水田群落を対象として、つくば市真瀬の水田観測データと比較検討した結果、本モデルは最低気温や潜熱フラックスで観測値と異なる場合もあったが、本モデルは田植から刈取りまで生育全般に適用できることがわかった。

- (3) 土地利用と気候緩和機能に関しては、水田の宅地化や畑地化に伴って、特に最低気温の上昇と高温域の拡大が予想され、気候緩和機能に明らかな低下が認められた。

交通網や道路網の整備が著しい埼玉県のさいたま市、吉川市、三郷市の周辺地域の温熱環境は1987年以降、確実に悪化し、それが首都圏で発生した熱い気塊を内陸部まで容易に進行させる可能性が示唆された。

- (4) 本モデルが関東地方における熱い気塊(高温域)の発消長と海風前線との関係、山梨の果樹地帯における温暖化対策としての盆地気象の利用、温暖化が顕著な福岡の局地気象への影響評価等に適用され、モデルの有用性と具体的成果が過去の観測事実や関連する既往報告等との関連において考察された。

謝 辞

本事業の推進において、農林水産省農村振興局資源課と関東農政局農村計画部資源課の皆様からフィールド観測での御支援と有意義なコメントを頂

戴した。また、筑波大学大学院木村研究室の学生諸君にはフィールド観測等で御協力を頂戴した。これらの方々に心より謝意を表す。

引用文献

1. 羽山裕子 (2007) 地球温暖化が我が国の果樹栽培に及ぼす影響. 中央果実基金通信, 78, 18-26
2. Holmes R.M. (1970) Meso-scale of agriculture and a large prairie lake on the atmospheric boundary layer. *Agronomy J.*, 62, 546-549
3. Inoue K. (1981) A model study of microstructure on wind turbulence of plant canopy flow. *Bull. Natl. Agric. Sci.*, A27, 69-89
4. 井上君夫 (1985) 水田微気象環境のシミュレーションモデル. *農業気象*, 40, 353-360, 1985
5. 井上君夫 (1990) 作物群落の微気象モデルとその応用. *水文・水資源学会誌*, 3, 14-20
6. 井上君夫 (1994) 北日本のヤマセのメソ気象的特徴. 平成の大凶作, 日本農業気象学会編, 13-21
7. 井上君夫 (2006) 気候緩和機能に関する調査報告書. 平成 17 年度 多面的機能維持増進調査, 中央農研編集, pp.43
8. 井上君夫・中園 江・川方俊和 (2004) 温熱環境に及ぼす植生の緩和効果に関する数値実験. 中央農研研究報告, 5, 1-21
9. 井上君夫 (2007a) 気候緩和評価モデルでここまで解かる. 農林水産研究高度化事業成果集, 中央農研編集, 52p
10. 井上君夫 (2007b) 農地の気候緩和効果. *E-Journal*, 関東の農業気象, 4, 10-13
11. 井上君夫 (2008a) パソコンで分かる, 気温を下げる農地の効果. *農家の友*, 2, 46-47
12. 井上君夫 (2008b) 気候緩和評価モデルによる地域気象の変動予測. *果樹日本*, 63, 10-15
13. 井上君夫 (2008c) 農業のもつ多面的機能—モデルによる気候緩和効果の定量的評価. *農業技術大系, 土壌と活用VI (追録 19 号)*, 28-41
14. 井上君夫 (2008d) 夏季晴天日における農地の気候緩和指数としてのポーエン比測定. *農業気象* 64(3), 157-166
15. 井上忠雄 (2008) 高度利用した気候緩和評価モデルへのメソ解析値の導入効果. 平成 19 年度 共通基盤農業気象部会講演会資料, 中央農研編集
16. IPCC 第 4 次評価報告書 SPM (2007), 第 1 作業部会報告書政策決定者向け要約 (翻訳 気象庁). pp.24, 2007
17. 神田 学・日野幹雄 (1990) 大気—植生—土壌系モデル (NEO SPAM) によるシミュレーション (2) 植生の気候緩和効果の数値実験. *水文・水資源学会誌*, 3, 47-55
18. Kimura F. and S. Arakawa (1983) A numerical experiment on the nocturnal low level jet over the Kanto plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61, 5, 848-862
19. 木村富士男・井上忠雄・井上君夫 (2006) 高解像度・長期シミュレーションが可能な線形化都市気象モデル. 日本気象学会 2006 年度秋季大会発表
20. 気象庁報道発表資料 (2007) 2007 年 8 月の関東地方及び近畿地方におけるヒートアイランドについて (速報)
21. Kusaka et al. (2000) The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *J. meteor. Soc. Jpan*, 78, 4, 405-420
22. Kusaka H. et al. (2001) A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models. *Boundary-Layer Meteor.*, 101, 329-358
23. Kusaka H. and F. Kimura (2004) Coupling a single-layer urban canopy model with a simple

- atmospheric model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 1, 67-80
24. 三菱総合研究所 (2001) 地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価に関する調査研究報告書
 25. Nagai H. et al. (2007) Variability of annual energy and water budgets an single rice cropping paddy (投稿中)
 26. Nakajima T., Tsukamoto M. and Tsushima Y. (2000) Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model. *App. Opt.*, 39, 4869-4878
 27. 大原源二・井上君夫 (2008) 気象庁 GPV データを導入した気候緩和評価モデルの普及. 平成19年度共通基盤農業気象部会試験成績概要書
 28. 奥山富子 (1988) 畑土壌水収支の年変化と気候条件. *農業気象*, 44(1), 27-31
 29. Philip, J.R. (1957) Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *J. Meteor.*, 14, 354-366
 30. Pielk R.A. et al. (1992) A comprehensive meteorological modeling system RAMS meteor. *Atmos. Phys.*, 49, 69-91
 31. Sato T. and F. Kimura (2003) A two-dimensional numerical study on diurnal cycle of mountain lee precipitation. *J. Atmos. Sci.*, 60, 15-16, 1992-2003
 32. 斎藤直輔・新田 尚 (1981) 境界層の気候 (共訳). 朝倉書店, 324p
 33. 山田宏之 (1993) 埼玉県栗橋町における都市気温分布と緑地の気温低減効果について. *造園雑誌*, 56(5), 331-336
 34. Yamada T. and S. Bunker (1988) Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT brush creek data simulation. *J. Appl. Meteorol.*, 27, 5, 562-578
 35. Yoshikane T., Kimura F. and S. Emori (2001) Numerical study on the Baiu front genesis by heating contrast between land and ocean. *J. Meteor., Japan*, 79, 2, 671-686
 36. 吉川 実ら (2006) TERC-RAMS に群落微気象と都市気象モデルを導入した気候緩和評価モデルによる数値実験. 日本農業気象学会 2006年春季大会, p.29
 37. 吉田謙太郎 (1999), 都市近郊農地の防災・アメニティ機能ー埼玉県見沼田圃ー. 「農村アメニティの創造に向けて」, 大明堂, 89-102

Numerical Experiments for Climate-moderating Function of Agricultural Land Using a Coupled Model on Land-Atmosphere Interactions

Kimio Inoue¹, Fujio Kimura², Hiroyuki Kusaka², Minoru Yoshikawa³, Nobuhisa Goto³, Hiromitsu Kanno⁴, Kaori Sasaki⁴, Genji Ohara¹ and Kou Nakazono¹

Summary

Recently, a model has been developed for evaluating agriculture's potential for easing human effects on the climate (the regional climate model), which provides highly accurate evaluation. The software for applying this model is run on a Microsoft Windows XP (or Windows 2000) operating system (OS) environment. All steps of the model's application, ranging from initial calculations to final conclusions, are mediated by a graphic user interface (GUI).

First, this model's accuracy of estimation and ease of manipulation were assessed. Data on wind direction, wind velocity distribution, atmospheric temperature distribution, thermal balance characteristic, etc., obtained with this model were compared with the AMeDAS data and rice field detailed weather data at Mase, Tsukuba City. Weather environments on various spatio-temporal scales were well reproduced using the model in varying weather conditions and throughout the paddy rice cultivation season, suggesting its applicability to attempts at modifying land utilization and for other purposes. It was confirmed that the GUI functioned satisfactorily and was easy to manipulate throughout all steps of use.

Next, the scope of the model's applicability was evaluated. According to estimation with this model, the degree of temperature rise at noon on a fine summer day in areas around Yoshikawa and Misato City in Saitama Prefecture (areas undergoing marked changes in land utilization) was about 0.7°C. The model was also applied to predicting the appearance/disappearance of the heat island phenomenon in Kanto District, predicting the weather in the Yamanashi Basin (for the purpose of coping with warming tendencies in areas where fruit trees are cultivated) and predicting local warming in Fukuoka Prefecture (where there has been intense urbanization in recent years). These applications yielded concrete data and supported the wide applicability of the model.

Key Words : Numerical Experiments, Climate modification, Land-use, Canopy model, TERC-RAMS

Received 30 April 2008 ; Accepted 7 October 2008

¹ National Agricultural Research Center

² University of Tsukuba

³ Mizuho Information and Research Institute

⁴ Tohoku Agricultural Research Center