

入力データおよび地表面パラメータの変化に対する 領域気象モデル WRF の感度実験

——夏季晴天日の関東平野を対象として——

秋本祐子*・日下博幸**

(* 筑波大学大学院生, ** 筑波大学生命環境科学研究科 (計算科学研究センター))

領域気象モデル WRF の入力データ (大気・土地利用・海面水温・地形), および地表面パラメータ (粗度・アルベド) の変化に対する感度実験を行い, それらが地上気温の再現精度に与える影響を定量的に比較した. 結果は以下の通りである.

デフォルトの設定による計算では, 日最高気温・日最低気温がともに関東平野全域で過小評価される. 大気の入力データとして, デフォルトのデータの代わりに気象庁のメソ客観解析データを用いると, 前述した地上気温の過小評価が改善される. 土地利用データとして, デフォルトのデータの代わりに国土数値情報の土地利用データを使用すると, 熊谷を含む郊外の中小都市の存在が識別できるようになる. その結果, 関東平野の北西部で気温が上昇し, 地上気温の過小評価が改善される. 海面水温データ・地形データの変更, および地表面パラメータの変更は, 地上気温の計算結果に大きな影響を与えないことが分かった.

キーワード: WRF, 感度実験, 土地利用, 関東平野, 小気候

I はじめに

気象学・気候学の分野では, 近年, 気象モデルを用いた研究がさかんに行われている (Kusaka 2008). 特に, 小気候の分野では, 領域気象モデルの一つである Weather Research and Forecasting model (WRF) (Skamarock et al. 2008) が有効な解析ツールとして注目を集めている. WRF は, 世界最大級のユーザーを持つ Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) の後継モデルで, 世界中で利用され始めている (日下 2009). 日本地理学会においても, WRF を用いた数値シミュレーション研究が多く見られるようになってきており (たとえば, 渡来ほか 2008; 高根ほか 2008; 日下ほか 2008; 浜田ほか 2008), WRF は, 局地風や都市気候などを対象とした小気候の研究で, 今後ますます重要な役割を果たすと期待されている.

WRF を使用する際には, 気象データ (大気・海

面) と土地被覆データ (土地利用・地形) を入力し, 地表面パラメータ (粗度・アルベドなど) を設定する必要がある. 一般的なユーザーは, デフォルトとして与えられている入力データを使用し, 地表面パラメータもデフォルトの計算設定のまま利用している. したがって, 現時点で, デフォルトの計算設定での WRF モデルの再現精度を十分把握しておく必要がある. 同時に, 計算設定を変更することでモデルの再現精度がどの程度改善されるかを定量的に把握しておく必要がある.

海面水温データの違いが, WRF の再現精度に影響を与えることは最近の研究で指摘されており (小田ほか 2008), 精度の良い入力データを用いれば, モデルの計算精度が向上すると予想されている. 海面水温以外の入力データについても, データの精度を向上することで, 同様の効果をもたらすことが期待できる.

大気データについては, 気象庁がメソ客観解析

データ (MANAL, Meso-Scale Analysis) (気象庁 2007) を提供しており, 日本付近を対象とした計算を行う際は, デフォルトで与えられている米国環境予測センター (National Center for Environmental Prediction, NCEP) の客観解析データ (Global Final Analyses, FNL) (Stunder 1997) の代わりに気象庁の MANAL を用いることができる. MANAL は日本およびその周辺の大気を対象とした気象庁のメソ数値予報モデル (Meso-Scale Model, MSM) ¹⁾ を用いて作成されており, その水平格子間隔は 10 km と, FNL の水平格子間隔 1° (約 100 km) に比べると細かい. また, 日本では, 土地被覆データ (土地利用・地形) についても整備が進んでいる. 国土地理院 (Geographic Survey Institute, GSI) は, 地図の作成過程で精力的な現地調査を行っており, それに基づいて作成した土地被覆データを提供している (国土計画局). 米国地質調査所 (United States Geological Survey, USGS) の 30 s グリッドは GSI の 3 次メッシュと水平格子間隔はほぼ等しく約 1 km であるが, 日本国内における土地利用区分は GSI の方がはるかに現実的である. これらの入力データを用いることで, WRF の計算精度もさらに高まる可能性がある.

同様に, 地表面パラメータも地上気温の計算結果に重要な影響を与える可能性がある ²⁾. デフォルトとして用意されている土地利用データは, USGS によって作成されており, 地表面パラメータは米国の土地被覆を想定して設定されている. したがって, これらのパラメータの値を, 計算領域に応じて再設定する必要がある. これまで, さまざまな分野で, アルベドや粗度長など地表面パラメータの推定が精力的に行われてきた (中川・大井 1992; Sugawara 2001 など). これらの成果を WRF に組み込むことで, 地上気温の再現精度の向上が期待できる.

このように, 入力データや地表面パラメータの違いが, WRF の再現精度に少なからず影響を及ぼす

ことが予想される. したがって, 今後の WRF を用いた数値シミュレーション研究に先駆けて, 各入力データと地表面パラメータが WRF の再現精度に与える影響を定量化しておく必要がある. このことは, 別の見方をすると, 各因子が地上気温に与える影響を定量的に評価することになるため, 都市気候の基礎研究を進める際にも有用な情報になると思われる.

しかしながら, 実際に, 入力データの変更, または地表面パラメータの再設定によって, WRF の地上気温の再現精度がどの程度向上するのかを定量的に評価し, それぞれの変化に対する感度を総合的に比較した研究はまだ行われていない.

そこで, 本研究では, WRF の入力データ (大気・海面水温・土地利用・地形) ³⁾, および主な地表面パラメータ (粗度・アルベド) ⁴⁾ の変化に対する感度実験を行うことにより, それらが地上気温の計算精度に与える影響を評価する.

II 数値実験の概要

1. 対象期間

本研究では, 高気圧に覆われた夏季南風晴天日を対象とする. 計算対象期間は, 晴天日が続いた 2007 年 8 月 9 日 9 時 (日本標準時; Japan standard time, JST) から 15 日 24 時 (JST) までとし, そのうち, 2007 年 8 月 10 日 0 時から 15 日 24 時までの 6 日間を解析対象期間とする. この期間中, 関東平野は連日高気圧に覆われ, 熊谷などで猛暑日が続いた. 計算精度, および感度の議論には, 対象期間の平均値を用いる.

2. 対象領域

基準実験で用いる計算対象領域を図 1 に示す. 日本全土を含む 2400 km×2400 km の領域 (図 1 の全体) を親領域とし, 太平洋・中部山岳・関東平野・日本海を含む 484 km×484 km の領域 (図 1 の内側の枠線内) を子領域とする ⁵⁾. 親領域の側方境界値

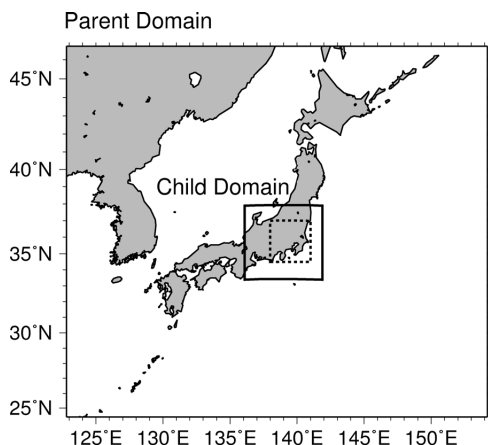


図1 計算対象領域

図は、CASE1の親領域を示している。図中の実線枠内はその子領域、点線枠内は解析対象範囲を示している。

Fig. 1 Domains for numerical experiments

This figure shows the area of the parent domain of CASE1. The solid box indicates the area of the child domain. The dashed box indicates the target area of analysis.

はFNLデータから与えられ、子領域の側方境界値には親領域で計算したWRFの結果が用いられる。一方、感度実験では、図1の内側の枠線の領域のみが計算対象領域となる。この領域の側方境界値は、MANALから直接与えられる⁶⁾。

3. 計算設定

数値実験では、WRF-ARW Ver.3.0.1.1を使用する。WRFの計算設定を表1に、実験の概要を表2に示す⁷⁾。はじめに、基準実験(CASE1)を行う。CASE1では、デフォルトで与えられている入力データを用いる。具体的には、大気データと海面水温データにはFNLを、土地利用データと地形データにはUSGSのデータを用いる(Row et al. 1995)。地表面パラメータについても、デフォルトの値を使用する。

次に、入力データの変化に対する4種類の感度実験を行う(CASE2~5)。入力データの変更に対する感度は、使用するデータによって異なる。本研究で

は、日本を対象領域に含むデータの中で、三つの点(精度・解像度・普及度)において評価の高いものを感度実験に使用する。CASE2では、大気データの変化に対する感度を調べる。具体的には、大気データをデフォルトとして与えられているFNLからMANALに変更する。CASE3では、海面水温データの変化に対する感度を調べる。具体的には、海面水温にNCEPが1日ごとに作成している水平格子間隔0.5°(約50 km)の海面水温データ(Real Time Global Sea Surface Temperature Analysis, RTG-SST)(Gemmill et al. 2007)を使用する。CASE4では、土地利用データの変化に対する感度を調べる。具体的には、土地利用データをGSIの3次メッシュ(水平格子間隔約1 km)の土地利用データに変更する(図2)。ただし、USGSの土地利用データは24分類なのに対し、GSIの土地利用データは11分類と、両データは土地利用区分方法が異なるので、表3のようにGSIの土地利用分類をUSGSの土地利用分類に対応づけた⁸⁾。CASE5では、地形データの感度を調べる。具体的には、地形データをGSIの3次メッシュの標高データに変更する。

最後に、地表面パラメータの変化に対する感度を調べる(CASE6)。ここでは、近藤(2001)、Sugawara(2001)を参考にして、都市の地表面パラメータのみを表4のように変更する⁹⁾。

III 数値実験の結果

1. 地上気温の水平分布

図3に、解析対象領域である関東平野(図1の点線枠内)に位置する地域気象観測システム(Automated Meteorological Data Acquisition System, AMeDAS)の代表地点を示す。本節では、この領域内を対象として、WRFによる地上気温の水平分布の再現精度を確認する。

図4に、AMeDAS観測値、およびWRFの計算値(CASE1, 2, 4の計算結果)から作成した6日間平

表 1 WRF モデルの計算設定
Table 1 Configuration of the WRF model used in the present study

水平格子間隔 (CASE1)	20 km (親領域)・4 km (子領域)
水平格子間隔 (CASE2~7)	4 km
水平格子数 (CASE1)	120×120 (親領域) 121×121 (子領域)
水平格子数 (CASE2~7)	121×121
鉛直層数	31
初期時刻 (積分時間)	2007 年 8 月 9 日 9 時 JST (192 時間)
雲微物理	WSM3 (Hong et al. 2004; Hong and Lim 2006)
放射 (短波)	Dudhia (Dudhia 1989)
放射 (長波)	RRTM (Mlawer et al. 1997)
大気境界層	Mellor-Yamada-Janic (Mellor and Yamada 1982)
地表面過程	Noah-LSM (Chen and Duhia 2001)

表 2 数値実験の概要
Table 2 Description of numerical experiments

ケース名	調査内容	大気	海面水温	土地利用	地形	地表面パラメータ
CASE1 基準		FNL	FNL	USGS30 s	USGS30 s	デフォルト
CASE2 大気データの変化に対する感度		MANAL	FNL	USGS30 s	USGS30 s	デフォルト
CASE3 海面水温データの変化に対する感度		MANAL	RTGSST	USGS30 s	USGS30 s	デフォルト
CASE4 土地利用データの変化に感度		MANAL	RTGSST	GSI 1 km	USGS30 s	デフォルト
CASE5 地形データの変化に対する感度		MANAL	RTGSST	GSI 1 km	GSI 1 km	デフォルト
CASE6 地表面パラメータの変化に対する感度		MANAL	RTGSST	GSI 1 km	GSI 1 km	修正
CASE7 対象地点 (熊谷) 直下の土地利用の影響		MANAL	RTGSST	GSI 1 km (熊谷を含む 1 格子のみ土地利用を 草地へ変更)	GSI 1 km	デフォルト

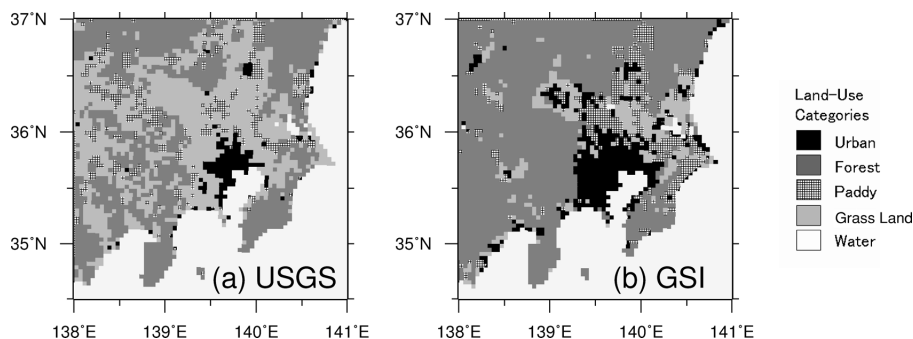


図 2 関東平野の土地利用分布

それぞれ、(a) USGS の土地利用データ、(b) GSI の土地利用データから作成した。濃淡は、濃い方から都市、森林、田、草地、水域を意味している。ここでは、簡単化のため、表 3 中の土地利用区分のうち、1 番を都市、11~15 番を森林、3 番を田、2, 5~8, 10 番を草地、16, 17 番を水域として表示している。その他の番号 (4, 9, 18~24 番) は、この領域には存在しない。

Fig. 2 Land-use maps over the Kanto plain created using (a) the USGS and (b) the GSI datasets

The five gray-scale gradations indicate urban area, forest, paddy fields, grassland, and water surface as shown in the legend. For simplification, land-use category number 1 in Table 3 is classified as urban; 11~15 as forest; 3 as paddy fields; 2, 5~8, and 10 as grassland; and 16 and 17 as water surface. The other land-use category numbers (4, 9, 18~24) do not occur in the area.

表3 WRF の土地利用区分ごとの地表面パラメータ
Table 3 Surface parameters of each land-use for the WRF

no	土地利用分類 USGS	GSI	アルベド [%]	射出率 [%]	粗度 [cm]
1	都市	建物用地 幹線交通用地 その他の用地	15	88	80
2	乾燥した耕作地と放牧地		17	98.5	15
3	灌漑された耕作地と放牧地	田	18	98.5	10
4	2 と 3 の混在		18	98.5	15
5	耕作地と草原の混在	荒地	18	99	14
6	耕作地と森林の混在		16	98.5	20
7	草原	その他の農用地 ゴルフ場	19	96	12
8	低木地		22	93	5
9	低木地と草原の混在		20	95	6
10	サバナ		20	92	15
11	落葉広葉樹		16	93	50
12	落葉針葉樹		14	94	50
13	常緑広葉樹		12	95	50
14	常緑針葉樹		12	95	50
15	混合林	森林	13	97	50
16	水面	河川・湖沼 海浜 海水域	8	98	0.01
17	草本性の湿地		14	95	20
18	木本性の湿地		14	95	40
19	不毛または疎らな植生荒地		25	90	1
20	草本性のツンドラ		15	92	10
21	木本性のツンドラ		15	93	30
22	20 と 21 の混在		15	92	15
23	裸地ツンドラ		25	90	10
24	雪または氷		55	95	5

表4 地表面パラメータ（都市）
Sugawara (2001)・近藤 (2001) を参考に設定した。
Table 4 Urban surface parameters used in the
WRF model in the present study
These parameters were set referring to Sugawara (2001) and
Kondo (2001).

ケース	アルベド [%]	粗度 [cm]	射出率 [%]
WRF モデルのデフォルト	15	80	88
CASE6	13	100	88

均の地上気温の水平分布図を示す¹⁰⁾。

AMeDAS 観測値を見ると、平均気温が 30℃ を超える領域が関東平野の中南部から北西部にまつま

て分布していることが分かる（図 4a）。関東平野の南部の高温域の中心は、海岸付近に位置する都心（大手町付近）ではなく、そこから 15 km 程度内陸に入った都市域の周縁部（練馬付近）に見られる。基準実験（CASE1）は、地上気温の分布パターンの特徴をおおよそ再現しているものの、全体的に地上気温を過小評価している（図 4b）。特に、関東平野の北西部（熊谷・館林・伊勢崎付近）でその傾向が顕著であり、AMeDAS 観測値が 30℃ 台であるのに対して CASE1 の計算値は 27℃ 台にすぎず（たとえば、熊谷は 27.2℃：表 5）、地上気温を約 3℃ 低く見積もっている。

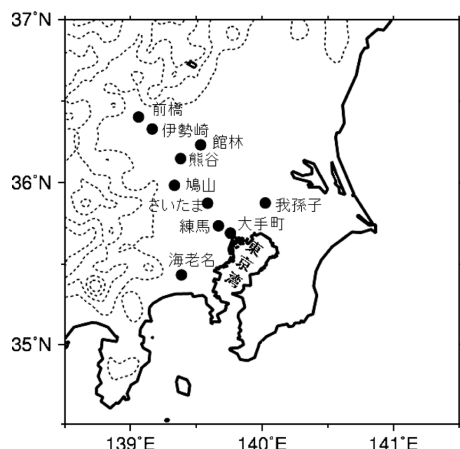


図3 関東平野の地形と主な AMeDAS 地点
破線は等高線を表しており、その間隔は 500 m である。
Fig. 3 Topography and key AMeDAS stations over the Kanto plain
Broken lines indicate elevation with contour intervals of 500 m.

大気データに MANAL を用いると (CASE2), 地上気温の過小評価は全体的に改善される (図 4c). ただし, 関東平野の北西部では, 依然として地上気温が 2°C 程度過小評価されている (たとえば熊谷は 28.5°C : 表 5).

海面水温データとして空間分解能の高い RTG-SST を用いても (CASE3), 地上気温の分布に大きな変化が見られない (図省略). 熊谷では, CASE2 と CASE3 の間に全く差がなく (表 5), 大手町に至っては, 6 日間平均気温が -0.1°C 下降している (表 6).

土地利用データに GSI の土地利用データを使用すると (CASE4), 主に都市域で地上気温が上昇する (図 4d). 特に, 関東平野の北西部 (熊谷・前橋付近) などでは顕著な気温上昇が見られる. そのため, 地上気温の過小評価が改善されている. たとえば, 熊谷では, CASE4 の結果は CASE3 より 1.8°C 上昇し, AMeDAS 観測値との差は -0.3°C まで縮まっている (表 5). この結果, WRF の計算値は観測された地上気温の分布の特徴をさらによく再現するよう

になる. ただし, 関東平野南部の都市域の北縁部 (さいたま付近) および, その西縁部 (海老名から鳩山にかけてのエリア) では, この顕著な気温上昇の結果, 地上気温が過大評価されている (図 4d). この要因については, IV 章で考察する.

地形データ (CASE5), 地表面パラメータ (CASE6) の変化に対する感度実験では, 地上気温の計算結果に大きな違いは認められない (表 5, 6).

これらの特徴をさらに定量的に把握するために, 図 5 に, 関東平野に位置する AMeDAS 地点の 6 日間平均地上気温の観測値と計算値の散布図を示す. 図 5a (CASE1) を見ると, 計算値は全体的に観測結果よりも低い値を示しており, 関東平野では全域的に地上気温が $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 過小評価されていることが分かる. 二乗平均平方根誤差 (the root mean squared error, RMSE) は 2.1°C である. 図 5b (CASE2) は, 図 5a に比べて計算値が全体的に大きくなっており, RMSE の値が 1.0°C 小さくなっている. このことから, 大気データの変更によって, 気温の過小評価が改善されていることが分かる. 図 5c (CASE4) は, 図 5b と全体的な分布は大きく変わらないが, いくつかの地点で計算値が大きくなっている. 図 6 に, CASE4 の計算値と CASE5・6 の計算値を比較した散布図を示す. これを見ると, CASE5 と CASE6 の両方のケースにおいて相関係数が 0.99 を超えており, ほとんど傾き 1 の直線上にのっている. したがって, CASE4 とこれらの計算結果の差異はほとんどないことが分かる.

2. 地上気温の日変化

熊谷を関東平野の内陸部に位置する都市の代表地点, 大手町を沿岸部かつ都心部に位置する都市の代表地点とし, それら 2 地点における地上気温の日変化の WRF による再現精度を検討する.

熊谷における地上気温の AMeDAS 観測値と WRF 計算値の 6 日間平均の日変化を図 7a に示す¹¹⁾. 熊

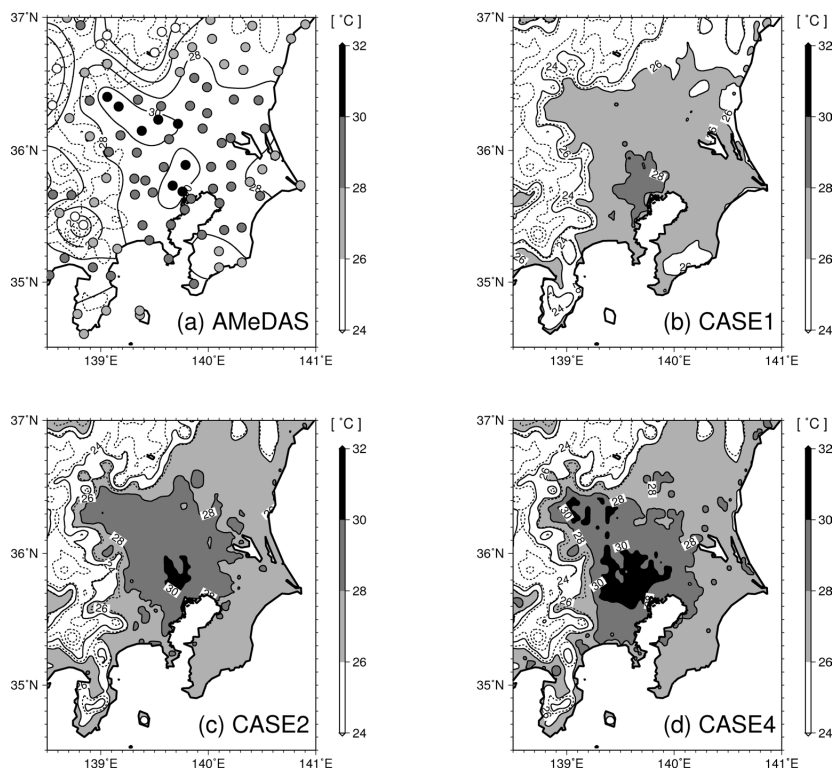


図4 関東平野における6日間平均の地上気温の分布図

それぞれ、(a) AMeDAS 観測値、(b) CASE1、(c) CASE2、(d) CASE4 の計算値。実線は地上気温の等温線を表しており、1°C 間隔に引かれている。破線は等高線を表しており、その間隔は 500 m である。

Fig. 4 Horizontal spatial distribution of six-day mean surface air temperatures over the Kanto plain, observed from (a) AMeDAS and calculated from (b) CASE1, (c) CASE2, and (d) CASE4

Solid lines indicate the surface air temperature with intervals of 1°C. Broken lines indicate elevation with counterintervals of 500 m.

表5 熊谷における地上気温の計算結果
括弧内の値は観測値との差を意味する。

Table 5 Simulated results for surface air temperature at Kumagaya
The values in the brackets indicate the differences between simulations and observations.

ケース名	土地利用	平均気温 [°C]	最高気温 [°C]	最低気温 [°C]	RMSE
AMeDAS	乾燥した耕作地と牧草地	30.6 (—)	36.4 (—)	25.8 (—)	
CASE1	乾燥した耕作地と牧草地	27.2 (−3.4)	32.5 (−3.9)	23.4 (−2.4)	3.6
CASE2	乾燥した耕作地と牧草地	28.5 (−2.1)	34.5 (−1.9)	23.5 (−2.3)	2.5
CASE3	乾燥した耕作地と牧草地	28.5 (−2.1)	34.5 (−1.9)	23.5 (−2.3)	2.5
CASE4	都市	30.3 (−0.3)	36.2 (−0.2)	25 (−0.8)	1.0
CASE5	都市	30.2 (−0.4)	36.3 (−0.1)	25 (−0.8)	1.0
CASE6	都市	30.3 (−0.4)	36.2 (−0.2)	25 (−0.8)	1.0
CASE7	草原	28.8 (−1.8)	34.7 (−1.7)	23.7 (−2.1)	2.2

表6 大手町における地上気温の計算結果
Table 6 Same as Table 5, but for Ohtemachi

ケース名	土地利用	平均気温 [°C]		最高気温 [°C]		最低気温 [°C]		RMSE
AMeDAS	都市	30.4	(—)	34.1	(—)	27.8	(—)	
CASE1	都市	28.0	(−2.4)	31.9	(−2.2)	24.8	(−3.0)	2.6
CASE2	都市	29.0	(−1.4)	32.7	(−1.4)	25.7	(−2.1)	1.7
CASE3	都市	28.9	(−1.6)	32.6	(−1.5)	25.5	(−2.3)	1.9
CASE4	都市	29.2	(−1.2)	33.1	(−1.0)	25.8	(−2.0)	1.6
CASE5	都市	29.2	(−1.2)	33.2	(−0.9)	25.8	(−2.0)	1.9
CASE6	都市	29.2	(−1.2)	33.1	(−1.0)	25.9	(−1.9)	1.6
CASE7	都市	29.2	(−1.2)	33.1	(−1.0)	25.8	(−2.0)	1.6

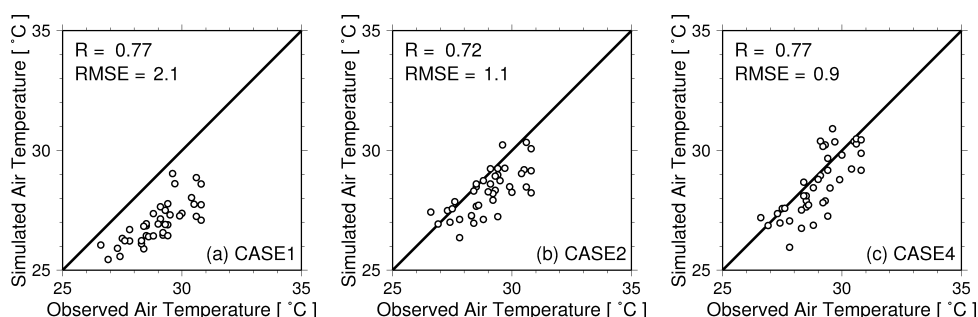


図5 関東平野の各 AMeDAS 地点で観測された地上気温と WRF の計算値の比較
横軸は AMeDAS 観測値，縦軸は WRF 計算値 ((a) CASE1, (b) CASE2, (c) CASE4)．図中の R は相関係数，RMSE は二乗平均平方誤差を意味する．

Fig. 5 Comparison of surface air temperatures from observations and numerical experiments: (a) CASE1, (b) CASE2, and (c) CASE4 over the Kanto plain

Temperature values are six-day averages. R indicates the correlation coefficient, and RMSE indicates the root mean square error.

谷における AMeDAS 観測値は，午前 6 時頃から上昇し始めた後，15 時頃にピークを迎え，その後ゆるやかに低下している．日平均値は 30.6°C で，日較差は 10.6°C である（表 5）．基準実験（CASE1）は，このような日変化傾向をおおよそとらえており，日較差は観測値とほぼ一致する．しかしながら，昼夜を通して地上気温を過小評価している．この過小評価は，日平均気温で 3.4°C となっている（表 5）．大気データを変更した CASE2 では，日平均気温が上昇しており，再現精度が向上している．この傾向は，日中に顕著に見られる．しかしながら，それでもなお，1 日を通して地上気温を過小評価しており，日平均気温が約 2.1°C 低い値となっている（表 5）．

また，日没後の冷却率を過大評価している．このため，夜間の気温を 2°C 程度過小評価している．土地利用データを変更すると（CASE4），さらに気温が上昇し，その日変化は観測値とよく一致するようになる．

これらの特徴をさらに定量的に把握するために，図 7b~c に，観測値と計算値（CASE1, 2, 4）を比較した散布図を示す．図 7b（CASE1）を見ると，計算値は，観測値との相関係数は 0.95 と高いものの，全体的に低温側に分布しており，地上気温を過小評価していることが分かる．図 7c（CASE2）を見ると，CASE1 に比べて気温の分布が高温側に遷移しており，過小評価が緩和されていることが分かる．

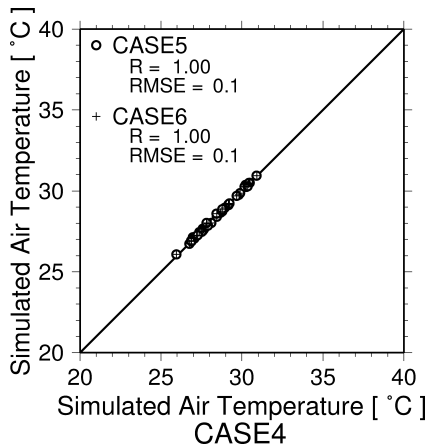


図6 関東平野の各 AMeDAS 地点における CASE4 の計算結果と CASE5 および CASE6 の計算結果の比較

横軸は CASE4 の計算結果、縦軸は CASE5、CASE6 の計算結果である。図中の R は相関係数、RMSE は二乗平均平方誤差を意味する。

Fig. 6 Scatter diagram of simulated surface air temperature from CASE4 versus those from CASE5 and CASE6 over the Kanto plain

R indicates the correlation coefficient, and RMSE indicates the root mean square error.

特に、観測値が 35°C 以上の領域でその傾向が顕著に見られる。また、RMSE が 3.6°C から 2.5°C へ減少しており、このことから再現精度が向上していることが分かる。図 7d では、その分布はきれいに直線に沿っており、RMSE は 1.0°C と小さい。CASE4 がこの三つの感度実験の中で最も観測値をよく再現していることが分かる。以上のことから、熊谷では、大気データ、土地利用データが、地上気温の再現精度に対して特に大きなインパクトを持っていることが分かる。

最後に、大手町の地上気温の日変化の再現精度を確認する。観測事実として、海岸付近に位置する大手町では、海岸からの距離が大きい熊谷に比べて、日最高気温の出現時刻が 2 時間程度早いことがこの図から読み取れる (図 8a)。また、日較差は 6.3°C で、上記 2 地点に比べて小さい (表 6)。基準実験 (CASE1) は、日変化の傾向をおおむね再現してい

るものの、夜間を中心に地上気温を過小評価している。計算値と観測値の差は、日最高気温で 2.2°C、日最低気温では 3.0°C であり、日較差が過大評価されている。大気データを変更すると (CASE2)、日最低気温が 0.9°C 上昇し、再現精度の向上が認められる。それでもなお、観測値よりも 2°C 程度低い値となっている。土地利用データを変更しても (CASE4)、ほとんど変化は見られない。大手町で夜間の気温が過小評価される要因に関しては、IV 章で考察する。図 8b~d は、観測値と計算値 (CASE1, 2, 4) を比較した散布図である。これからも前述したような傾向がよく分かる。

IV 考察

領域気象モデル WRF の入力データおよび地表面パラメータの変化に対する感度実験を行い、それらのインパクトを評価した。

大気データに MANAL を用いることで、関東平野全域で地上気温の過小評価が改善された。この要因の一つは、大気データの変更に伴う、子領域の境界付近の大気下層の気温上昇であると考えられる。図 9 に、基準実験で計算された親領域の地上気温と MANAL の地上気温の分布図とその差分を示す。これを見ると、MANAL の方が子領域の境界付近の地上気温が基準実験の親領域の計算結果に比べて 1~2°C 程度高いことが分かる。MANAL を用いた場合、基準実験よりも暖かい大気が境界から流入し、それが関東平野に移流することによって、関東平野全域で地上気温が上昇したと考えられる。

GSI の土地利用データを使用することにより、関東平野の北西部で見られた地上気温の過小評価が改善された。USGS の土地利用区分では、日本の首都圏における都市の面積が、GSI のそれに比べ、3 分の 1 程度しかなく、熊谷 (人口約 20 万) などの中小規模の都市は表現されていない (図 2a)。土地利用データに GSI の土地利用データを使用すると

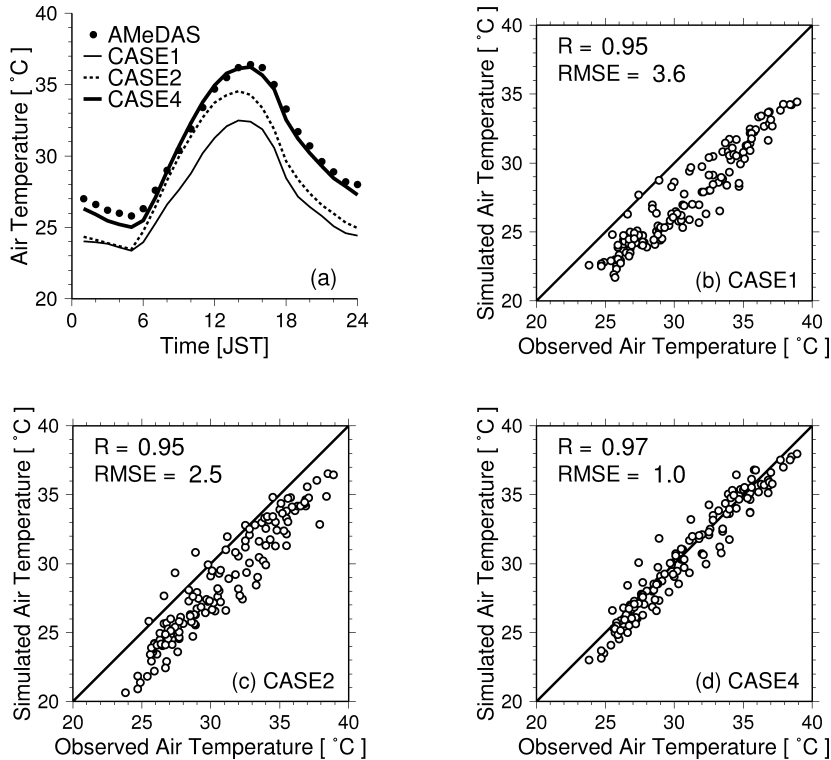


図7 熊谷における AMeDAS 観測値と WRF 計算値の比較

(a) 地上気温の日変化。黒丸は AMeDAS 観測値、細実線は CASE1 の計算結果、破線は CASE2 の計算結果、太実線は CASE4 の計算結果である。それぞれ、6 日間 (2007 年 8 月 10 日～15 日) の平均値から作成した。(b)～(d) 地上気温の散布図。横軸は AMeDAS 観測値、縦軸は WRF 計算値 ((b) CASE1, (c) CASE2, (d) CASE4)。図中の R は相関係数、RMSE は二乗平均平方誤差を意味する。

Fig. 7 Comparison of surface air temperature from observations and numerical experiments at Kumagaya

(a) Diurnal variations in surface air temperatures from observations and WRF outputs. Solid circles indicate observations. Thin solid, dashed, and thick solid lines indicate CASE1, CASE2, and CASE4, respectively. Temperatures are six-day averaged values from 00:00 JST on August 10, 2007, to 24:00 JST on August 15, 2007. (b)–(d) Scatter diagrams of observed surface air temperature versus simulated surface air temperatures from (b) CASE1, (c) CASE2, and (d) CASE4. R indicates the correlation coefficient, and RMSE indicates the root mean square error.

(CASE4), 関東平野南部の都市域が拡大し、さらに、今まで草地として分類されていた熊谷が都市として認識されるようになる (図 2b)。このことから、熊谷での気温上昇の主な原因は、土地利用変化 (草地から都市) に伴う地表面からの顕熱フラックスの増加と関東平野南部の都市域の拡大に伴う熱の移流の増加であると考えられる。そこで、両者を比較す

るために、CASE4 の GSI の土地利用データのうち熊谷を含む 1 格子のみを草地に変更した追加実験を行った (CASE7, 表 2)。図 10 に、CASE4 と CASE7 で計算された熊谷の地表面熱収支各項の日変化、図 11 に AMeDAS 観測値および CASE2, 4, 7 の計算値による熊谷の地上気温の 6 日間平均の日変化を示す。CASE7 では、熊谷における日中の顕熱

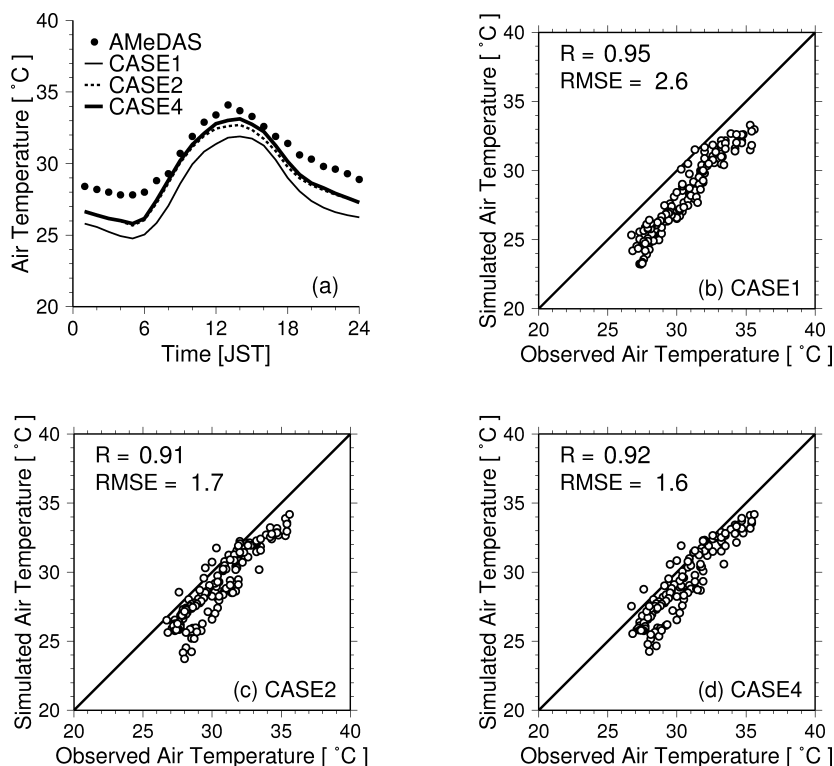


図8 図7と同じ。ただし、場所は大手町
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for Ohtemachi

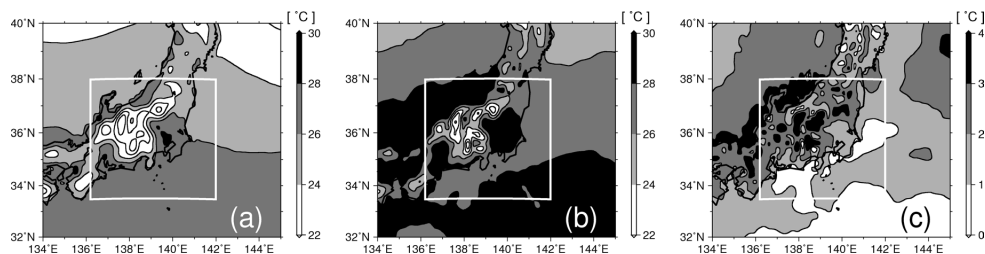


図9 MANAL の地上気温と CASE1 で計算された親領域の地上気温の比較
(a) CASE1 で計算された親領域の地上気温, (b) MANAL の地上気温, を解析対象期間 6 日間で平均した値を示している. (c) は (b) から (a) を差し引いた値を示している. 図中の実線枠は, 図1 中の子領域を示している.
Fig. 9 Comparison of surface air temperatures simulated by CASE1 in the parent domain and MANAL

(a) Six-day mean surface air temperature calculated for CASE1 in the parent domain. (b) Same as (a), but simulated using MANAL. (c) Values of (b)–(a). Solid boxes indicate the area of the child domain in Fig. 1.

フラックスが CASE4 の計算値の半分程度に減少している。これは、CASE4 ではほぼゼロであった潜熱フラックスが、CASE7 では顕熱フラックスの3 倍以

上の大きさで推移するためだと判断される (図10)。また、CASE7 の地上気温は、日中、CASE4 の計算値をおよそ 1.5°C 程度下回っており、むしろ USGS

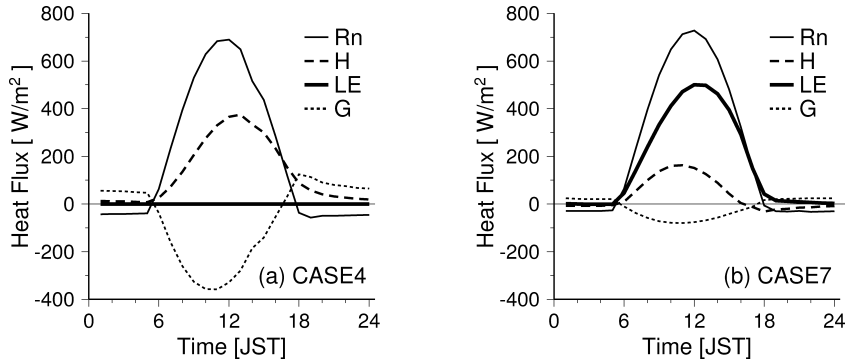


図 10 熊谷における熱フラックスの日変化

(a) CASE4, (b) CASE7 の計算結果。熊谷の土地利用は、それぞれ、(a) 都市、(b) 草地に区分されている。細実線は正味放射、破線は顕熱フラックス、太実線は潜熱フラックス、点線は地中熱流量を示している。

Fig. 10 Diurnal variations in six-day averaged surface heat flux (a) CASE4 and (b) CASE7 at Kumagaya

Thick solid, broken, thin solid, and dashed lines indicate net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and ground heat flux, respectively.

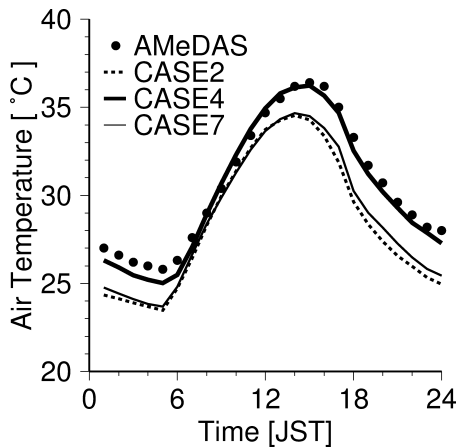


図 11 CASE2, CASE4, CASE7 で計算された熊谷の地上気温の 6 日間平均日変化の比較

黒丸は AMeDAS 観測値、破線は CASE2 の計算結果、太実線は CASE4 の計算結果、細実線は CASE7 の計算結果を意味する。

Fig. 11 Comparison of diurnal variations in six-day averaged surface air temperatures at Kumagaya for CASE2, CASE4, and CASE7

Black circles indicate observations. Dashed, thick, and thin solid lines indicate CASE2, CASE4, and CASE7, respectively.

を使用した場合の計算結果 (CASE2) と近い値を示している (表 5, 図 11)。これらの結果から、土地利用データの変化に対する感度実験で熊谷の地上気温の上昇をもたらした主要因は、全体的な都市域の拡大に伴う熱の移流の増加ではなく、熊谷での土地利用変化に伴う地表面からの顕熱フラックスの増加であると考えられる。なお、大手町では、土地利用データを変更しても地上気温の計算結果にほとんど変化が生じなかった。これは、大手町は USGS と GSI のどちらの土地利用データでも都市として認識されているためだと考えられる。

海面水温データとして空間分解能の高い RTG-SST を用いても (CASE3)、地上気温の分布に大きな変化は見られなかった。これは、本研究で用いた二つのデータ (RTG-SST と FNL の海面水温) は、どちらも人工衛星で観測されたデータで、両者の差が小さかったためと思われる (図 12)。なお、東京湾の海面水温として詳細な観測データを用いると、WRF モデルの地上気温の再現精度が向上したとの報告もある (小田ほか 2008)。

地形データの変更も地上気温の分布にほとんど影

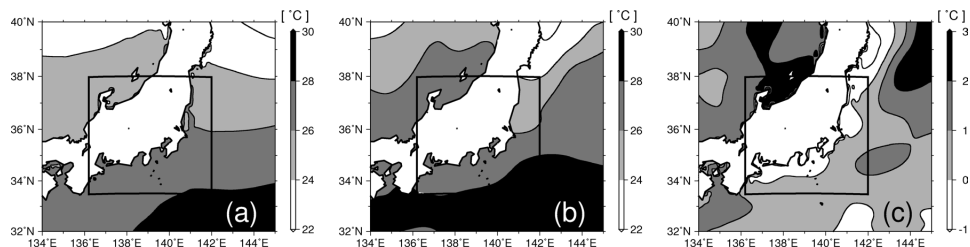


図 12 FNL と MANAL の海面水温の比較

それぞれ、(a) FNL の海面水温、(b) RTGSST を解析対象期間 6 日間で平均した値を示している。(c) は (b) から (a) を差し引いた値を示している。図中の実線枠は、図 1 中の子領域を示している。

Fig. 12 Comparison of the six-day mean sea surface temperatures of FNL and RTGSST
(a) and (b), Distributions of SST of FNL and RTGSST, respectively. (c), Values of (b)–(a). Solid boxes indicate the area of the child domain in Fig. 1.

響を与えなかった。これは、USGS 地形データと GSI 地形データの差がきわめて小さいためと考えられる (図 13)。

地表面パラメータの修正が気温に与える影響は、大気データや土地利用データを変化させた場合に比べて小さかった。WRF モデルでは、地表面パラメータを用いて、地表面で発生する顕熱・潜熱フラックスを計算し、地上気温や相対湿度などを求める。地表面パラメータは、土地利用ごとに固定されているため、土地利用が変化することで、地表面パラメータの値は大きく変化する。地表面パラメータの修正に対する熊谷の地上気温の感度が、土地利用データの変更に対する感度よりも小さかったのは、パラメータ修正よりも土地利用の変化（草地から都市）の方がアルベドと粗度の値を大きく変化させたためだと考えられる (表 3)。

入力データやパラメータの精度を向上させることで、WRF モデルは関東平野における夏季晴天日の地上気温の日変化をより精度よく再現できることが分かった。しかしながら、1) 大手町における夜間の地上気温の過小評価や、2) 関東平野南部の都市域の西縁部と北縁部（さいたま付近）における日中の地上気温の過大評価などの問題も見られた。

1) の問題は、本実験で都市のキャノピーと人工排熱の影響を考慮しなかったために生じたと考えら

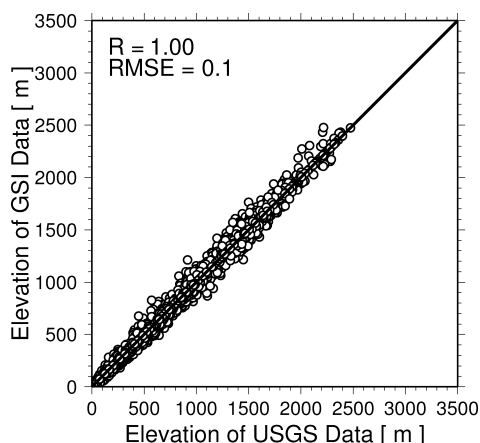


図 13 地形データの比較

図 1 の子領域内の標高の散布図。横軸は USGS の地形データ、縦軸は GSI の地形データ。図中の R は相関係数、RMSE は二乗平均平方誤差を意味する。

Fig. 13 Scatter diagrams of the elevation of USGS topographic datasets versus GSI topographic datasets in the child domain of Fig. 1

R indicates the correlation coefficient, and RMSE indicates the root mean square error.

れる。WRF モデルには、単層都市キャノピーモデル (Kusaka et al. 2001) が装備されている。このモデルを用いることで、夜間の地上気温の過小評価の改善が期待できる。しかしながら、都市キャノピーモデルを用いると、計算に必要な都市の地表面パラメータの数が増加する。現在、それらのパラメータを精度よく見積もるために、精力的な観測が行われ

てきており、こうした観測データの蓄積が待たれる。

2) の問題については、詳細な調査が必要であろう。高温域の分布がずれることの要因の一つとして、海風の収束域のずれが考えられる。しかしながら、それだけでは関東平野南部の都市域の西縁部や北縁部での最高気温の過大評価は説明できない。その他の要因として、都市の効果が過大評価されていることが考えられる。この問題は、都市を0か1かで与えるのではなく、各土地利用種の割合を考慮したパラメタリゼーション（たとえば、Kimura 1989）を適用すること、水平解像度を上げて多摩川や荒川の冷却効果を考慮することなどで、改善される可能性がある。最近では、東京の詳細な人工潜熱・廃水蒸発量の分布などを加味した研究が行われ始めている（神田 2009）。これらの研究に期待したい。

V おわりに

領域気象モデル WRF の入力データ（大気・海面水温・土地利用・地形）および主な地表面パラメータ（粗度・アルベド）の変化に対する感度実験を行い、それらが地上気温の再現精度に与える影響を定量的に比較した。結果は以下の通りである。

1) デフォルトの計算設定では、日最高気温・日最低気温が関東平野全域で過小評価される。特に、平野の北西部（熊谷・館林・伊勢崎付近）でその傾向が顕著となる。

2) 大気データに MANAL を用いると、関東平野全域で地上気温の過小評価が改善された。

3) GSI の土地利用データを使用すると、熊谷などの中小都市の存在が識別できるようになった。

4) その結果、関東平野の北西部で見られた地上気温の過小評価が改善された。

5) 海面水温や地形データの変更、地表面パラメータの修正は、地上気温に影響を及ぼすものの、それらを変更したことによる気温変化は、大気データや土地利用データを変化させた場合に比べて小さかつ

た。

以上の結果から、大気の入力データの精度と土地利用データの精度が、地上気温の再現精度に特に大きな影響を与えることが分かった。したがって、WRF の予報精度や領域気候の将来予測の精度を向上させるためには、全球気候モデルを用いた研究と同様に、過去の土地利用の復元や将来の土地利用変化の予測といった人文地理学分野の研究との連携も重要である。

本研究で行ったような入力データ・地表面パラメータの感度実験の結果は、対象とする季節や地域に依存することが予想される。したがって、季節性や地域性を考慮した、さらなる研究が望まれる。

本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費（S-5-3）の支援により実施された。作図には汎用地図作成ツール（The Generic Mapping Tools, GMT）を用いた。

（投稿 2009 年 3 月 6 日）

（受理 2009 年 12 月 12 日）

注

- 1) ここで言う MSM とは、2004 年 9 月から運用されている気象庁の非静力学モデル（Non-Hydrostatic Model, NHM）のことを指す。それ以前まで使用されていたメソスケールの数値予報モデル（Meso-Scale Spectral Model, MSM）と略称は同じだが異なるモデルである。
- 2) WRF モデルでは、地表面パラメータの値を用いて、地表面で発生する顕熱・潜熱フラックスを求め、地上気温や湿度などを計算する。したがって、地表面パラメータも地上気温や地上風の計算結果に重要な影響を与える可能性がある。
- 3) WRF を使用する際には、前述した四つの入力データのほかに土壌のデータが必要である。土壌水分量は、地上気温の計算結果に大きく影響すると予想されるが、関東平野全域での詳細な観測データはない。また、土壌水分量は空間的な非一様性が大きいので、少数の観測地点で関東平野全域を代表させることは難しい。したがって、本研究では土壌データの変化に対する感度実験は行わないことにする。
- 4) WRF モデルでは、土地利用ごとに五つの地表面パラメータ（アルベド、蒸発効率、粗度、射出率、熱慣性）を設定する必要がある。本研究では、地表面モデルに Noah-LSM を用いることから、前述したパラメータのう

ち三つ（アルベド、粗度、射出率）のみが計算に使用される。このうち、アルベドや粗度についてはこれまで精力的に観測が行われてきたが、射出率に関しては、観測例があまり見られないため、妥当な値を設定することが困難である。したがって、地表面パラメータの変化に対する感度実験では、アルベドと粗度のみを変化させることにする。

- 5) 本研究では、関東地方を対象として解析を行うため、関東平野の気象に影響を与える太平洋や中部山岳が含まれるように計算領域を設定した。水平解像度が粗いデータを側方境界値として利用する際に生じる問題を避けるため、まず親領域（水平格子間隔 20 km）で計算を行い、その結果を子領域（水平格子間隔 4 km）の側方境界値にして子領域で計算を行うというネスティング手法を採用した。
- 6) MANAL データは、気象庁の全球モデル GSM の予報値（水平解像度 20 km）を側面境界値にして、気象庁のメソ気象モデル MSM で細かく計算し、その出力結果（水平解像度 5 km）を利用して作成された客観解析データであり、データセットの水平解像度は 10 km と高い。そのため、MANAL を用いる場合はネスティングを行わずに計算を実施した。CASE1 から CASE2 への変更の際には、大気データの違いによる影響に加えて、ネスティングの影響も含まれるが、大気データの変更による影響に比べて十分小さいと考えられる。
- 7) 本研究では、感度実験を行う際にモデルの再現精度の向上も視野に入れているため、基準実験（CASE1）に計算条件の変更を追加していく方法を採用している。今回採用した方法では、数値モデルが持つ非線形性により個々の影響を完全に比較することはできないが、地上気温に対する（条件の重ね合わせに伴う）非線形性の影響はそれほど大きくないと考えられる。
- 8) 国土数値情報の各土地利用種を USGS の土地利用種のうち熱収支が似ていると考えられるものに対応づけた。表 3 の対応表に空欄があるのは、USGS の土地利用カテゴリーが 24 種なのに対して、国土数値情報のそれが 11 種しかないためである。
海浜については、USGS の土地利用分類に適当な種類がないため、本稿では海に対応づけた。このため、海岸付近の熱収支に変化が生じる可能性があるが、この影響を受けるのは海岸付近のごく小さな領域のみであり、本稿の議論には大きな影響は及ぼさないと考えられる。
- 9) 地表面パラメータの推定に関する研究は、パラメータの不確実性の高い都市域で多く行われている。そのため、本研究では、都市の地表面パラメータの変更を行う。
- 10) 本研究では、AMeDAS の観測値（地上 1.5 m）との比較には、WRF で計算された地上 2 m の気温を使用している。高度補正等を行っていない。これ以降の解析でも

同様の方法を用いている。

- 11) ここでは、前節で特に顕著な変化が見られた 3 ケース（CASE1, 2, 4）の結果のみを示している。

文 献

- 小田僚子・神田 学・森脇 亮 2008. 直接観測に基づく東京湾海面温度が都市の気温へ及ぼす影響. 水工学論文集 52: 283–288.
- 神田 学 2009. WRF の都市気象研究への応用. ながれ 28: 21–28.
- 気象庁編 2007. メソ客観解析データ 2007 年 8 月. (財) 気象業務支援センター.
- 日下博幸 2009. 領域気象モデル WRF について. ながれ 28: 3–12.
- 日下博幸・木村富士男・川口 純 2008. やませ卓越時の北上盆地での南風の解析. 日本地理学会発表要旨集 74: 122.
- 国土計画局 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (アクセス日時: 2008/03/01).
- 近藤裕昭 2001. 『人間空間の気象学』朝倉書店.
- 高根雄也・日下博幸・原 政之・足立幸穂・木村富士男 2008. 熊谷猛暑の形成メカニズム. 日本地理学会発表要旨集 74: 48.
- 中川清隆・大井裕成 1992. 新潟県長岡市街地およびその周辺における LANDSAT/MSS 波長域地表面アルベドの分布とその季節変化. 地理学評論 65A: 769–790.
- 浜田 崇・渡来 靖・中川清隆・榊原保志 2008. 長野市裾花川谷口ジェットの WRF モデルによる予備の数値シミュレーション. 日本地理学会発表要旨集 73: 88.
- 渡来 靖・中川清隆・福岡義隆・細矢明日佳 2008. WRF モデルシミュレーションにおける 2007 年 8 月 16 日猛暑時の最高気温起時の空間的特徴. 日本地理学会発表要旨集 74: 47.
- Chen, F. and Dudhia, J. 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.* 129: 569–585.
- Dudhia, J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.* 46: 3077–3107.
- Gemmell, W., Katz, B. and Li, X. 2007. Daily real-time global sea surface temperature: High resolution analysis at NOAA/NCEP. *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Office Note* 260: 1–39.
- Hong, S.-Y. and Lim, J.-O. J. 2006. The WRF single-mo-

- ment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.* 42: 129–151.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.* 132: 103–120.
- Kimura, F. 1989. Heat flux on mixtures of different land-use surface: Test of a new parameterization scheme. *J. Meteor. Soc. Japan* 67: 401–409.
- Kusaka, H. 2008. Recent progress on urban climate study in Japan. *Geogr. Rev. Japan* 81: 361–374.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer model and slab model. *Bound.-Layer Meteor.* 101: 329–358.
- Mellor, G. L. and Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20: 851–875.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* 102 (D14): 16663–16682.
- Row, L. W., Hastings, D. A. and Dunbar, P. K. 1995. *Terrainbase worldwide digital terrain data-documentation manual*. Boulder, Colorado: National Geophysical Data Center.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G. 2008. A description of the advanced research WRF version3. *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-475+STR. 1–113.
- Stunder, B. J. B. 1997. NCEP model output-FNL archive data. Tech. Rep. TD-6141, Air Resour. Lab., Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md. (Available at <http://www.arl.noaa.gov/ready-bin/fnl.pl>)
- Sugawara, H. 2001. *Heat exchange between urban structures and the atmospheric boundary layer*. PhD thesis, Tohoku University.

Sensitivity of the WRF Regional Meteorological Model to Input Datasets and Surface Parameters for the Kanto Plain on Fine Summer Days

AKIMOTO Yuko* and KUSAKA Hiroyuki**

(*Graduate Student, University of Tsukuba, **University of Tsukuba Graduate School of Life and Environmental Sciences/Center for Computational Sciences)

The Weather Research and Forecasting (WRF) model has been developed as the next-generation model after the widely used the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). The number of climatologists who use the WRF for local climate study has recently been increasing. Therefore, it is important to investigate the performance of the WRF with the default settings and to estimate how the forecast accuracy of the WRF can be improved by resetting the parameters and altering the input data. However, these sensitivities have not been compared synthetically in past studies.

In this study, we quantitatively estimated the sensitivity of the WRF for surface air temperature to the input datasets and surface parameters. Furthermore, we determined the most sensitive factor.

The results showed that with the default settings, the WRF tends to estimate surface air temperature to be lower than observations throughout the day, particularly in the northwestern parts of the Kanto plain. The results of the sensitivity experiment indicated that the atmospheric datasets and land-use datasets have the most impact on simulated surface air temperature. Sensitivities of the WRF for surface air temperature to the surface parameter and other datasets are less than those to the above two datasets.

These results indicate that further studies integrated with land-use management and other disciplines within the field of human geography will be important for improving the WRF repetitive precision and increasing accuracy in local climate prediction.

Key words: WRF, sensitivity experiments, land-use data, Kanto plain, local climate