

都市気温へおよぼす大阪湾の海水温の影響

INFLUENCE OF SEA SURFACE TEMPERATURE ON URBAN AREA OF OSAKA

二宮順一¹・森 信人²・日下博幸³・重松孝昌⁴

Junichi NINOMIYA, Nobuhito MORI, Hiroyuki KUSAKA, Takaaki SHIGEMATSU

¹ 修 (工) 大阪府都市整備部河川室 (〒 540-8570 大阪市中央区)

² 正会員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³ 博 (工) 筑波大学講師 計算科学研究センター (〒 305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

⁴ 正会員 博 (工) 大阪市立大学准教授 大学院工学研究科 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

This study simulates atmospheric environments at Osaka urban area of Japan using highly accurate sea surface temperature (SST) data from the satellite. A series of numerical experiments for understanding urban heat island at Osaka area is conducted considering latest information of land use classifications, SST and an urban canopy model. The accurate daily information of SST at Osaka bay improves the daily temperature at the center of Osaka city. In addition, the one degree SST increase has impact to 0.6 degree the maximum temperature increases at the center of Osaka city.

Key Words: *WRF model, urban heat island, sea surface temperature, sea breeze, land breeze*

1. 序論

都市域ではその都市化の進行に伴いヒートアイランド現象が顕在化してきており、大阪や東京の平均気温は温暖化に伴う気温上昇を大きく上回る速度であることが知られている¹⁾。ヒートアイランド現象の主な要因は、土地利用の変化、建築物の効果、人工排熱の増加であると一般的に言われている²⁾。ヒートアイランド現象解明に関する研究は、80年代後半から盛んに行われてきており、多くの観測データの蓄積や数値計算による検証が行われてきた^{3,4)}。気象庁の観測結果⁵⁾は、1934年から2006年の間で平均気温が東京で0.83℃/50年、大阪で1.17℃/50年の上昇率であることを示している。これらの気温上昇の内訳は、数値計算結果から詳細な分析がなされ、首都圏では土地利用の変化によって最大2℃、建築物の効果によって最大2℃、人工排熱の増加によって最大0.5℃の上昇となっていることが推定されている。これに加えて、上記の三要因に対して数値計算による検討も行われている。例えば、Kusakaら⁶⁾は、関東地方の1900年と1985年の土地利用を用いたシミュレーションにより、土地利用の変化による要因が及ぼす都市の熱や風の場の変化を示している。建築物の効果による要因に対して、Kusakaら⁷⁾は気象モデルに都市キャノピーモデルを組み込み、短波・長波放射がキャニオン内部において反射を繰り返す影響を示している。そして、人工排熱の増加による要因に対して、妹尾ら⁸⁾は東京都における潜熱割合を考慮した時空間分布を推計し、その影響を評価している。

関東平野に対して大阪は、大阪湾周辺に都市域が広がる比較的狭い平野があり、これを取り囲む山地からなる複雑な地形を有している。藤部⁹⁾は、大阪平野のような広い範囲においてもヒートアイランドにより地表面における熱の交換や海風の流れに変化をもたらすことがあると報告しており、Mizuma¹⁰⁾は、アメダスの風資料から大阪湾南部沿岸では大阪湾からの海風が時間と共に紀伊水道からの海風に変わることを、大阪湾の沿岸地域では午後遅くまで南からの海風が継続することを明らかにしている。山本¹¹⁾は、大阪平野の72年から75年と91年から95年の平均風速を比較し、内陸への海風前線の到達が約1時間遅くなっていること及び、海風の吹いている時間が短くなっていることを指摘している。一方、Ohashi・Kida¹²⁾は、大阪平野背後の山地と都市の局所的な循環風について数値的に検討を行っている。また、大阪を対象とした数値計算を用いた研究例としては、鳴海ら¹³⁾が人工排熱の影響について検討を行い、人工排熱の増加によって気温が上昇することや風況に変化があることを示し、さらに気象庁⁵⁾が土地利用の影響について検討を行い、都市がない場合に比べて都市がある場合には気温が3℃上昇することが報告されているが、海域を正確に評価するという検討はされていない。大阪と海風の間接的な関係を考える上で、海域は海上風と運動量の交換を行うだけでなく、その熱容量の違いから熱のバッファとしての役割を持つことから、海域を正確に評価することは重要である。しかし、これまでの数値計算による結果は、気象モデルによって都市特有の気象の一面を再現してはいるも

の、海岸部に位置する都市気象を正確に再現できているとは言い難い。最近では、首都圏を対象として実測に基づいた海面温度を用いた数値計算がおこなわれているが¹⁴⁾、地域特性が強いと考えられる現象にもかかわらず大阪を対象とした例はない。さらに、大阪市ではヒートアイランド対策として海風の道を検討しているなど、海域を正確に評価する重要性は増している。

そこで本研究では、気象モデルを用いて海面温度が変化することによって都市熱環境に与える影響を評価する。具体的には、まず気象モデルによる現在都市気候の再現性について検討を行った後、大阪湾の海面温度が上昇した場合のシミュレーションを行い、その影響評価を行う。

2. モデルと入力データ

(1) 数値気象モデル

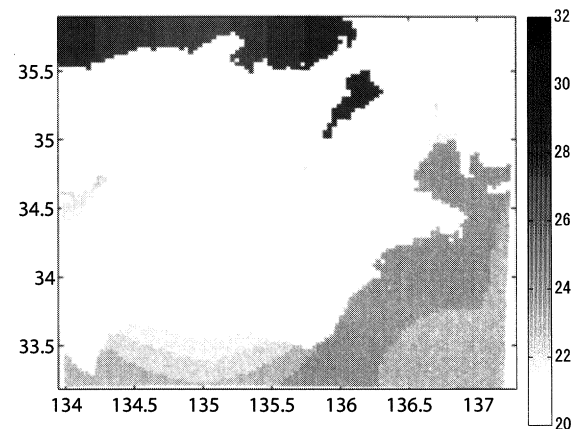
本研究では、数値気象モデルとして WRF (The Weather Research and Forecasting) を用いる。これは、米国の NCAR, NCEP, NOAA/FSL, AFWA などの研究機関が共同で開発している気象モデルである。WRF は、非静力モデル MM5 の次世代モデルと位置づけられており、MM5 (The Fifth-Generation Mesoscale Model) 同様、非静力の完全圧縮モデルである。さらに、WRF は 3 次精度のルンゲ・クッタスキームと 5 次精度の風上差分スキームといったより高精度な数値計算スキーム、最新の物理モデル、より進んだ変分データ同化システムを採用していることから、局地気象の予測と再現のための有力なツールになると期待されている¹⁵⁾。WRF の支配方程式は、水分、コリオリ力、曲率を考慮した摂動方程式の形で表現される¹⁶⁾。

本研究では、Kusaka ら⁷⁾によって開発された都市キャノピーモデルを用いる。都市キャノピーには均一な建物群を考慮しており、その中での放射・反射に対して理論的な検討を行っている。一度地面や建物壁面、建物屋根面に吸収された短波放射や長波放射は、天空率と同様の考え方をを用いて、地面に対しては壁面率、天空率を、壁面に対しては地面率、壁面率、天空率を、屋根面に対しては天空率を考慮している。このモデルによって、これまで単純にアルベドや粗度を与えられていただけのスラブモデルから、放射が上空へと逃げにくいキャノピーモデルとなっている。このモデルは、単層都市キャノピーモデルであるが、多層都市キャノピーモデルと比較して精度に大きく違いはなかったことも同時に報告されている。

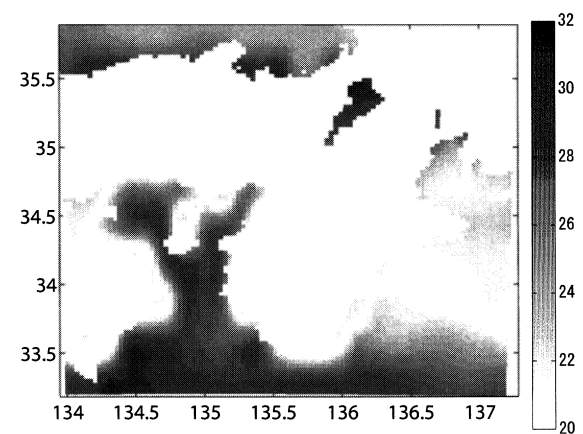
(2) 計算および境界条件

a) 気象データ

気象モデルの初期条件および境界条件として、NCEP が公開している全球客観解析データ (以下、FNL データ) を用いる。FNL データは、WMO GRIB1 のバイナリデー



(a) FNL データ



(b) Merged SST

図-1 海面温度分布

タで記録されており、データ間隔が 6 時間毎 (UTC)、格子間隔が 1 度毎 (約 100km) で、1999 年 8 月からの現在までの情報が蓄積されている。データの内容は、気温、気圧、湿度、風速など全 25 項目である。

b) 地理データ

地形・標高・土地利用データとして、USGS (U.S. Geological Survey) と国土地理院の数値データを組み合わせて用いる。USGS が公開しているデータは、緯度・経度 30 秒毎 (約 100km) の解像度を持ち (以下、USGS 土地利用) 国土地理院の土地利用データは、細密数値情報近畿圏 1996 (以下、96 年土地利用) を用いる。それぞれのデータの土地利用分類項目が異なっているため、WRF 内で地表面パラメータが設定されている USGS 土地利用に 96 年土地利用と 96 年土地利用の分類項目を合わせた。

c) 海面温度

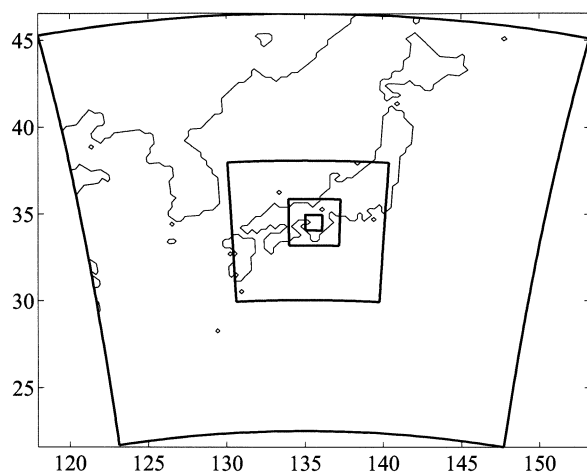


図-2 計算領域

本研究では、海面温度として FNL データ以外に東北大学が提供している外洋域新世代海面水温（以下、Merged SST）を用いる。Merged SST は、衛星搭載の赤外放射計とマイクロ波放射計から得られる海面温度を元に作成された客観解析データであり、1 日毎のデータ配信及び格子間隔 0.05 度という高解像度、高品質の外洋海面温度データである。図-1 に FNL データと Merged SST の海面温度分布を示す。FNL データと比べて、対象期間における Merged SST は大阪湾以南に 30℃を超える高温域が広がっており、FNL データに比べて最大で 3℃以上の差がある。以下では、これら SST の影響について検証する。

3. 計算条件

図-2 に本研究で設定した計算領域を、表-1 に計算領域の詳細を示す。大阪を中心として日本全土を含む広域領域をドメイン 1 とし、大阪周辺詳細領域のドメイン 4 まで two-way ネスティングを施す。鉛直解像度は上空方向に 20km を 27 層、地表面については地中方向に 2m まで 4 層を取った。計算期間は 2006 年 7 月 29 日 0 時 (UTC) から 8 月 7 日 18 時 (UTC) までとし、このうち助走期間を 7 月 29 日 0 時 (UTC) から 8 月 1 日 0 時 (UTC) までとする。また、表 2 に本研究で用いた物理スキームの設定を示す。物理スキームは計算スケールやスキームの特徴を考慮して定めた。

(1) 都市熱環境の再現性

都市熱環境の再現性について検討を行うため、土地利用、都市キャノピーモデル、SST データをより詳細なデータに置き換え、比較を行う。各計算では順に、(1) 土地利用を USGS 土地利用から 96 年土地利用に、(2) スラブモデルから都市キャノピーモデルに、(3) FNL データから Merged SST と順に高精度化していく。最終的な計算は、96 年土地利用+都市キャノピーモデル+Merged SST

表-1 計算領域の設定

domain	水平格子数	水平解像度	time step
1	99×99	27km×27km	120s
2	99×99	9km×9km	40s
3	99×99	3km×3km	40/3s
4	99×99	1km×1km	40/9s

表-2 物理スキームの設定

	物理スキーム名
微物理	WSM 3-class simple ice scheme
短波放射	Dudhia scheme
長波放射	RRTM scheme
接地層物理	Similarity scheme
地表面物理	Noah land-surface model
惑星境界層物理	Mellor-Yamada-Janjic model
雲物理	Kain-Fritsch scheme

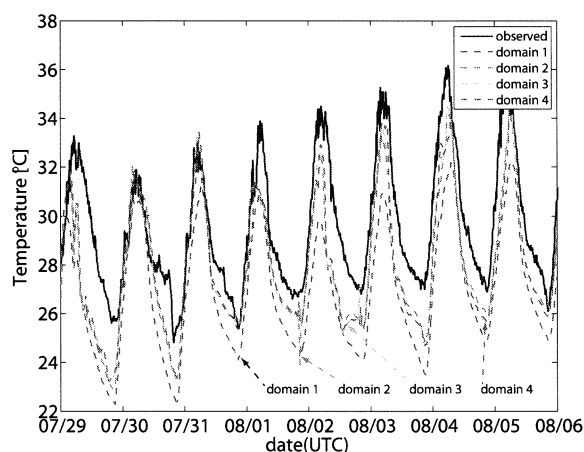


図-3 アメダスとシミュレーション結果の地上 2m の気温変化

とし、相互比較を行うことにより、各要素がおよぼす気温へのインパクトを評価する。

(2) 海面温度の影響

最後に、海面温度の変化による都市熱環境への影響を評価するため、海面温度を変えて計算を行う。海面温度には、Merged SST とこれに 1℃加えた海面温度を用いる。海面温度以外の地表面パラメータや植生パラメータなどには変更を加えずに、シミュレーション結果をもとに SST の変化が陸域の気温に与える影響について検討を行う。

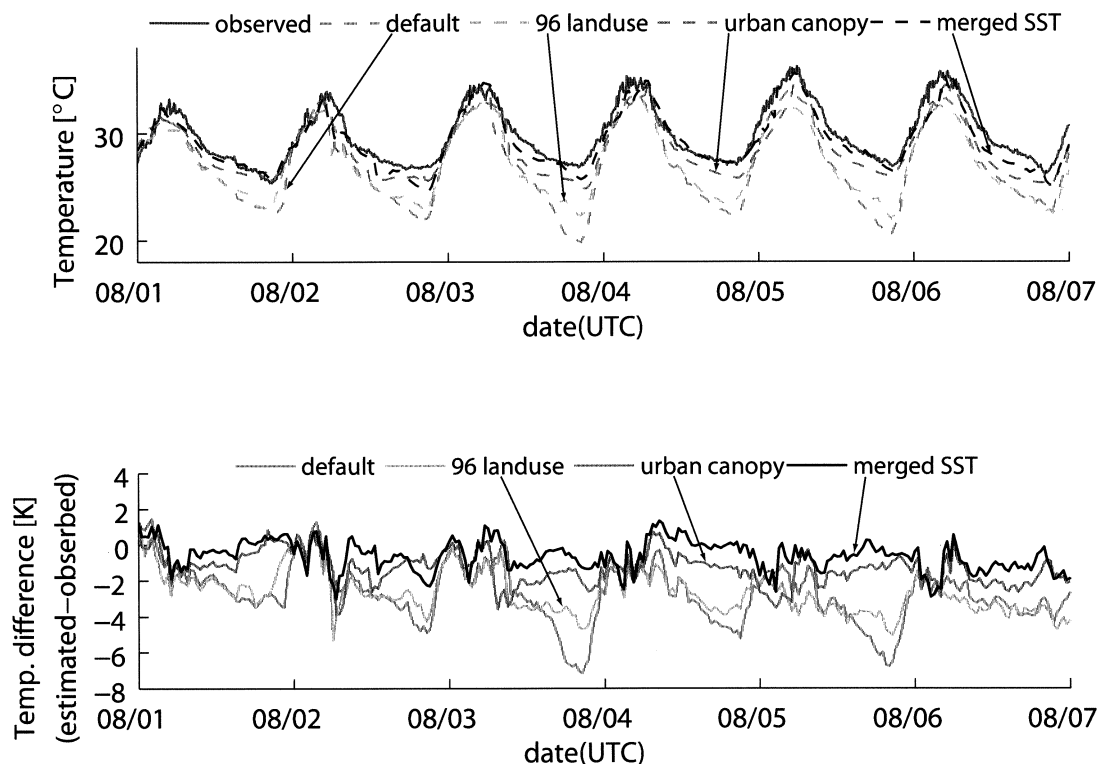


図-4 アメダス大阪地点における実測値とシミュレーション結果の地上2mの気温変化

表-3 地上気温の推定精度におよぼすドメインサイズの影響 (D1～D4は、ドメイン1～4に対応)

地点	観測平均気温	D1	D2	D3	D4
大阪	29.8	26.4	27.2	27.0	27.1
全地点	気温差	-2.6	-2.3	-2.1	-2.1
全地点	分散	1.99	0.64	0.23	0.17

4. 結果と考察

(1) 都市熱環境の再現性

都市レベルの詳細な気候を考える上では、土地利用分類を正確に与えるという観点からも空間解像度は重要なファクターである。空間解像度1kmのドメイン4程度の解像度であれば、ほぼ正確な土地利用分類を与えられるが、ドメイン1～3程度(27km～3km)での解像度では、土地利用の変化に対して不十分であるために必ずしも正確な土地利用情報が与えられない。解像度の影響は地域依存性が大きく、大阪や高野山のようにドメイン1～3を通して同一の土地利用の地点もあれば、針や奈良のように3種類の土地利用に変わる地点もある。また、神戸や和歌山のように海岸部に位置する

場合、ドメイン1～3において土地利用が海域となってしまう地点もある。図-3に大阪におけるアメダス気温とシミュレーション結果の地上2mの気温変化を示す。実線がアメダスの実測値、これ以外の破線が各ドメインの結果を表している。次に、表-3にアメダス気温とシミュレーション結果のドメイン別平均気温とその差を示す(紙面の関係上、大阪と他の12地点の平均誤差のみ示す)。解像度が高くなるに応じて計算値が実測値に近づく地点もあれば、ドメイン1～3で差が最小になる地点もあった。これは、空間解像度に応じた土地利用の変化や標高の変化などが影響しているとも考えられるが、はっきりとした傾向は見られなかった。しかし、全地点平均でのアメダスと計算結果の気温差では、空間解像度が高くなるに従ってアメダスとの差は小さくなっている。このように一般的な計算条件で夏季の地上気温再現シミュレーションを行った計算条件では、日平均で2.1℃の誤差が生じることがわかった。上記を踏まえて、以降ではドメイン4でのシミュレーション結果を対象に地上気温推定関わる要因について検討を行っていく。

図-4にアメダス大阪地点における観測値とシミュレーションを行った条件での地上2mの気温変化と、実測値とシミュレーション結果の差を示す。太さと濃さを変えたそれぞれの線が、アメダス実測値、デフォルトのシミュレーション結果、96年土地利用、都市キャノピーモデル、Merged SSTを示している。どの計算条件にお

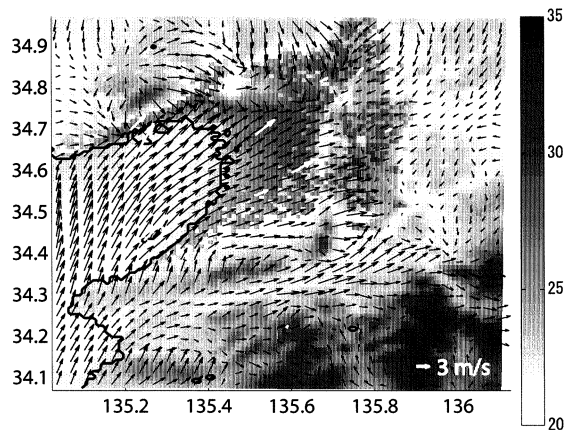


図-5 8月4日9時(UTC)の観測結果の風速とシミュレーション結果の気温・風速分布(白:観測,黒:シミュレーション,濃淡図:気温分布)

いても日周期の変動が再現されているが、夜間の気温変化に違いが大きく表れている。夜間気温の推定精度が上昇していることが特徴的で、8月1日～7日の $T_{\min}$ の平均は各シミュレーション間でそれぞれ 1.0°C 、 2.9°C 、 0.3°C ずつ上昇している。特に都市キャノピーモデル導入の有無で大きく変化していることから、昼夜の気温ピークには都市キャノピーが大きく影響していることがわかる。ドメイン4の領域内に含まれる全アメダス地点12地点を用いて比較すると、実測値と推定値の平均気温の差は、土地利用が都市に分類される8地点での平均が -0.3°C と小さく、都市以外に分類される4地点での差は平均 -1.4°C と比較的大きい推定誤差となった。この結果から、都市キャノピーモデルに定められたパラメータは日本の都市に合っているが、畑や森林などの都市以外の土地利用分類における地表面パラメータは日本には合っていないと考えられる。一方、全アメダス地点で見ると、平均気温の偏差が 0.7°C 、分散が 0.46 であった。この 0.7°C には、WRFモデル自体が持つ誤差に加えて、現在考慮されていない人工排熱の影響が含まれていると考えられる。

図-5に8月4日9時(UTC)の観測結果の風速とシミュレーション結果の気温・風速分布を示す。白色ベクトルが観測結果の風速、黒色ベクトルがシミュレーション結果の風速、濃淡図がMerged SST導入後のシミュレーション結果の気温分布を示している。大阪都市域や和歌山ではよく一致しているものの、風速の小さい奈良周辺、様々な風向が存在する京都南部においてはあまり一致していない。

(2) 海面温度の影響

図-6にアメダス大阪地点における観測 SST とこれに1度加えた海面温度上昇実験の地上2m 気温変化と前者

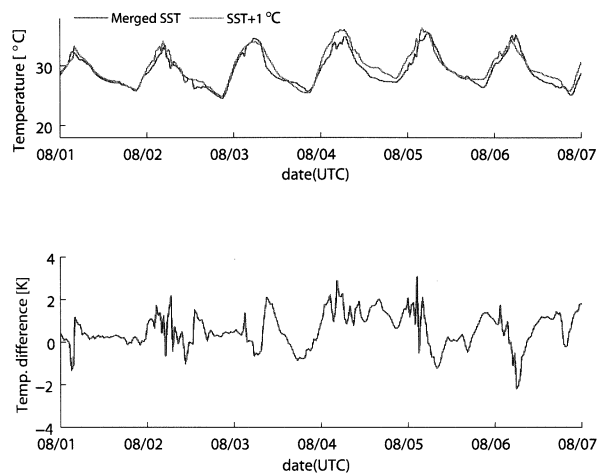


図-6 アメダス大阪地点におけるシミュレーション結果の地上2mの気温変化

から後者を引いた差を示す。海面温度の上昇に伴ってアメダス大阪地点の気温も上昇しているが、その変化は一様ではない。これは海面温度が海陸風におよぼす変化によるものであり、海水温の影響が臨海部の地上気温に複雑な影響を及ぼすことを示唆している。大阪においては、8月1日から7日までの平均気温で 0.6°C 、 $T_{\max}$ の平均で 0.4°C 、 $T_{\min}$ の平均で 0.5°C 上昇している。他のアメダス地点においても同様な比較を行ったところ、海岸付近に位置する7地点でそれぞれ 0.7°C 、 0.5°C 、 0.7°C 、内陸に位置する5地点ではそれぞれ 0.5°C 、 0.3°C 、 0.7°C の上昇であった。一方、図-7は、ある一例として8月4日14時(UTC)の両シミュレーション結果の気温差と風速分布を示す。濃淡図が海面温度を1度上昇させた場合の気温差分布を、黒ベクトルが上昇前、白ベクトルが上昇後の風速ベクトルを示している。図からわかるように、海面温度上昇による気温上昇は、海岸部に限ったことではなく内陸部にまで影響が及んでいる。風速分布は、海面温度上昇前では都市域でも海風が見られるのに対して、上昇後の結果では海風は殆ど見ることができない。この結果は、先にアメダス大阪地点の気温変化を示した図-6に見られた気温変動に対応している。つまり、海面温度の上昇により、陸域が海域に比べて高温になる時間が短くなることにより、日中の温度差が小さくなり、その結果海風の吹く時間が短く、かつ弱くなったと考えられる。一方で、日本海側からの風は大阪湾からの海風ほど弱まらず、大阪都市部にまで達している。この北からの風により、海風は弱く短くなるものの陸風は強く、長く吹くようになったと考えられる。このように、大都市沿岸部においては、海面温度と海陸風は複雑な相互作用をしており、今後のヒートアイランド対策においてもその影響評価が必要であると思われる。

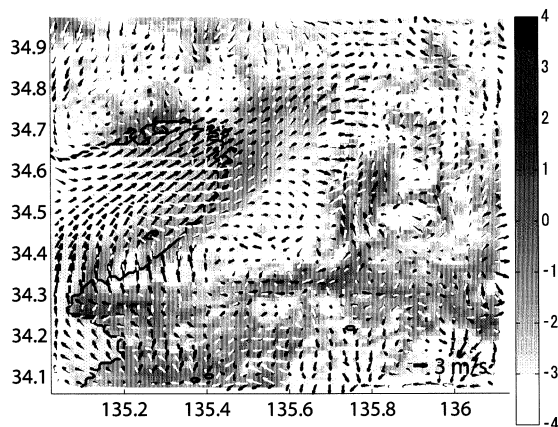


図-7 8月4日14時(UTC)のシミュレーション結果の気温差と風速分布(濃淡図:海面温度上昇後-上昇前, 黒:上昇前, 白:上昇後)

5. 結語

2006年7月29日から8月7日の夏季を対象に気象モデルによるシミュレーションを行い, 都市熱環境の再現性と海面温度が都市熱環境に与える影響について検討した。本研究の結論は以下に示す通りである。

- 気象モデルに正確な土地利用データ, 海面温度を与えたり, 都市キャノピーモデルを導入したりすることで再現性はよくなった。-0.7℃の誤差は, 考慮していない人工排熱や気象モデル自体の誤差などによると考えられる。
- 海面温度が1℃上昇することによって, 大阪周辺域では0.6℃上昇した。海面温度と陸上の気温との差の変化により, 海面温度の上昇により海風が弱く短くなる影響が見られた。

謝辞: 本研究を行う際に, 大阪市立大学工学部環境都市工学科卒業生山本有希子さんに手伝って頂いた。また, 本研究の成果の一部は科学研究費補助金によるものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁: ヒートアイランド監視報告(平成16年夏季/関東地方), <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/>, 2005.
- 2) 気象庁: ヒートアイランド監視報告(平成17年夏季/関東地方), <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/>, 2006.

- 3) Steyn, D.G. and Oke, T.R.: The depth of the daytime mixed layer at two coastal sites: A model and its validation, *Boundary-Layer Meteorology*, 24(2), pp.161-180, 1982.
- 4) Kanda, M.: Progress in the scale modeling of urban climate: Review, *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), pp.23-33, 2006.
- 5) 気象庁: ヒートアイランド監視報告(平成18年夏季-関東・近畿地方), <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/>, 2007.
- 6) Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H., and Mizutori, M.: The Effects of Land-Use Alteration on the Sea Breeze and Daytime Heat Island in the Tokyo Metropolitan Area, *J. Meteor.*, 78(4), pp.405-420, 2000.
- 7) Kusaka, H. and Kimura, F.: Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban Heat Island Simulation for an Idealized Case, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82(1), pp.67-80, 2004.
- 8) 妹尾 泰史, 神田 学, 木内 豪, 萩島 理: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と都市局地気象に対する影響, *水工学論文集*, Vol.48, pp.169-174, 2004.
- 9) 藤部 文昭: 都市化が気候を変える, *科学*, 68(3), pp.238-245, 1998.
- 10) Mizuma, M.: General Aspects of Land and Sea Breezes in Osaka Bay and Surrounding Area, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73(6), pp.1029-1040, 1995.
- 11) 山本 勝彦: 都市温暖化が大阪平野における都市気象に与える影響に関する一考察, *大阪府環境情報センター所報*, 23, pp.29-33, 2003.
- 12) Ohashi, Y. and Kida, H.: Effects of mountains and urban areas on daytime local-circulations in the Osaka and Kyoto regions, *J. Meteor. Soc. Japan*, 80(4), pp.539-560, 2002.
- 13) 鳴海 大典, 大谷 文人, 近藤 明, 下田 吉之, 水野 稔: 都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響: 都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その1, *日本建築学会計画系論文集*, (562), pp.97-104, 2002.
- 14) 小田 僚子, 神田 学, 森脇 亮: 直接測定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, pp.283-288, 2008.
- 15) 日下 博幸: 領域気象モデル WRF について, *ながれ*, 28(1), pp.3-12, 2009.
- 16) Wang, W. *et al.*: User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.0, <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/>, 2009.