気象モデルWRFを用いた関東平野における土地利用が夏期の都市気象に与える影響

Study on Influence of Land-use on Urban Climate in summer in Kanto Plane by Meteorological Model WRF

神足洋輔[1]・村上和男[2]・伊藤一正[3]
Yosuke KOTARI, Kazuo MURAKAMI and Kazumasa ITO

[1]学生会員　武蔵工業大学大学院工学研究科都市基盤工学専攻（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤一丁目28-1）
[2]フェロー　博（工）　武蔵工業大学　教授　工学部都市工学科　（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤一丁目28-1）
[3]フェロー　博（工）　株式会社建設技術研究所国土文化研究所（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町三丁目21-1）

This paper describes the influence of the change of land-use in Kanto Plane on urban climate in summer. Numerical simulations of urban climate from Aug. 10 to 11, 2007 were carried out by using WRF meteorological model under the conditions of Present, Edo-Era, and Future.

From the computations, following conclusions are obtained. (1) The daytime temperature in Present Case is 2 to 3 ℃ higher than that of Edo-Era due to sea breeze and sensitive heat, and the nighttime temperature is also 4 ℃ higher than that of Edo-Era due to sensitive heat. (2) The daytime temperature in Future Case is 7 ℃ higher than that of Present Case in reclamation area due to reclamation land. However, the nighttime temperature in Future Case is a little bit lower than that of Present Case.

Key Words : *Urban climate, land-use, reclamation, WRF, mesosclale meteorological model, numerical simulation*

１．はじめに

都市部では，長期的な変動で見た場合に地球温暖化のペースを上回る高温化が顕著に進行しているといえ，こうした都市部の局所的な気象現象はヒートアイランド現象として問題になっている．この原因としては，都市化に伴う人工排熱の増加や，潜熱源となる水面や緑地が減少，及び地表面がアスファルトやコンクリートで被覆されることによる不透水面化ならびに蓄熱効果の高い人工的な地表面への改変などが考えられる．

そうしたなかで，本研究で取り上げる関東平野における土地利用形態の違いによる影響を検討した既往研究として，Kimura and Takahashi(1991) [1)]による湾の埋立に関する解析事例や，Kusakaら(2000) [2)] による土地利用の違いによる関東平野における夏期日中の気象場の計算など，いくつかの研究が行われているが，陸面物理過程などが改良された次世代気象モデルであるWRFを用いた数値計算の事例としては，まだ限られている．

そこで，本研究では気象場の初期条件を現在のままにして，地表面データについてのみ変更し，過去（江戸時代）・現在（1985年），それに加え，沿岸域の開発が進んだ場合の将来を仮定したケースとして東京湾を半分埋め立てるという3つの仮想状態を設定した．そして，その条件で都市気象にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする事を本研究の目的とする．

２．気象モデルWRFと初期入力データ

（１）気象モデルWRF

本研究で用いた数値モデルは，米国のNCAR（米国大気環境センター），NCEP（米国国立環境予測センター）などの研究機関が共同で2001年ごろ開発された次世代の気象モデルであるWRF(The Weather Research and Forecast)のうち，NCARが中心となって開発されたWRF-ARW(Advanced Research WRF)である．このWRFはメソスケールに関する解像度に優れているとされ，台風や前線・海陸風などを再現することが可能とされている．

（２）時空間データについて

本研究では，初期条件および境界条件として，NCEPが公開している客観解析データFNL(Final Analysis)を用いた．これは，表-1に示すようにデータの時間間隔が6

時間毎，格子間隔が約1度毎でのデータである．また，地形・標高・土地利用データとして，USGS(米国地質調査所)が公開している緯度･経度30秒毎（約0.9km）の解像度を有するGTOPO30データを用いた．

表-1 時空間データの概要

気象データ	
名称	FNL客観解析データ
発行元	NCEP（米国国立環境予測センター）
データ間隔	1度毎（約100km）
時間間隔	0:00,6:00,12:00,18:00 (GMT)
データ内容	気温･気圧・海水温・土中水分量等　全25項目
地形データ	
名称	GTOPO30
発行元	USGS（米国地質調査所）
データ間隔	30秒毎（約0.9km）

３．計算概要

（１）計算領域と計算条件

本研究では，**図-1**に示す関東平野を中心とし，中部山岳や太平洋の影響を考慮できる計算領域として東西240km×南北360km四方のdomain1を設定し，これをもとに東京湾一帯を含む東西60km×南北90kmの範囲でdomain2の計算領域を設定した．

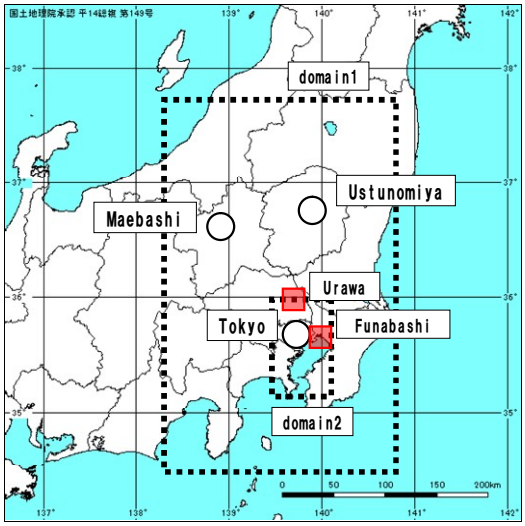


図-1　計算領域

ここでは，domain2の計算結果とdomain1の計算結果についてお互いの領域で結果をやり取りして計算するTwo-Way Nestingという方法を用いた．domain2の計算格子1kmは，都市内部の気象を捉えることが可能で，地表面データの解像度を考慮して適切なスケールであると判断した．鉛直方向について，WRFではσ座標系を用いており，domain1，domain2いずれとも28層に分割し，地表面に近いほど格子間隔を詳細に分割するよう設定した．

表-2　計算概要

計算領域	domain1	80×120×28	**格子間隔**	3km
	domain2	60×90×28		1km
Nesting	Two-Way Nesting		**座標系**	lambert
力学過程	非静水圧・非圧縮			
物理過程	**地表面スキーム**	Monin-Obukhov similarity theory		
	地表面モデル	Noah Land Surface Model		
	PBLスキーム	YSU PBL scheme		
	雲物理モデル	New Kain-Fritsch		
	Microphysics	Ferrier scheme		
	拡散モデル	2nd order diffusion on model levels		

表-3　土地利用パラメータの設定

	Urban	Cropland	Grassland	Forest	Water
albedo (%)	12	25	19	13	8
moisture availability (kg/m^3)	0.1	0.3, 0.5	0.15	0.3	1.0
roughness length (cm)	107	15, 10	6	50	0.01
thermal inertia (W/m･K)	3	4	3	4	6
heat capacity (J/K)	1.89E+06	2.50E+06	2.08E+06	2.50E+06	9.00E+25

地表面の気象条件を表現する物理モデルに関して，地表面モデルは地表面で蒸発や流出などの水分状態を設定できるNoah Land Surface Modelを用いた．さらに，Microphysicsは降水の影響を考慮でき，NCEPで数値予報に用いられているFerrier Schemeを用いた．そのほかの詳細な各物理モデルの設定に関する概要は**表-2**に示す．ここに都市モデルとしてKusaka et al[3]によって開発され，Kusaka and Kimura[4]によって改良された単層のキャノピーモデルを用いた．ただし，人工排熱の影響は考慮していない．それぞれの土地利用における地表面パラメータに関しては，**表-3**のように設定した．

（２）計算期間

計算期間は，2007年夏期の期間中に計算領域が太平洋高気圧に覆われ，晴天で大気の状態が安定した，2007年8月10日を選択し，その日を中心に含む2007年8月9日午前3時(LST)から72時間の積分計算を行った．なお，この8月10日には東北地方から九州北部にかけては晴天だった．この日の最高気温は，群馬県館林市で37.7℃，埼玉県熊谷市で37.5度を観測し，東京都内でも35.7℃だった．

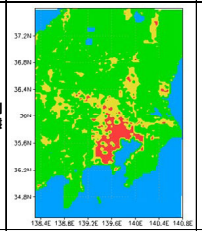
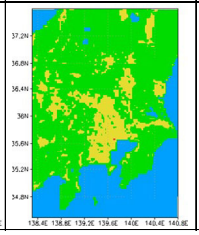
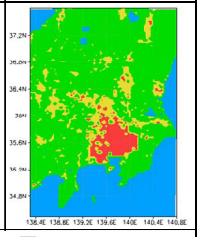
ただし，計算開始から18時間分の計算結果については，数値計算の結果が安定していない可能性があるため検討・考察の対象からは除外し，検討対象として8月10日午前0時から48時間分の計算結果を用いた．この期間で日中と夜間における計算結果について検討を行なった．

日中に関しては，熊谷や東京で日中の最高気温が観測された時刻である2007年8月10日午後3時を，夜間として，2007年8月11日午前5時を対象としてCase1からCase3における気象場の違いに関する比較を行った．Case1からCase3の詳細を次に示す．

（3）設定条件

本研究では土地利用によって気象場に与える影響について比較を行うため，表-4に示すように関東平野における土地利用形態として3つのケースを設定した．USGSの土地利用データは24カテゴリであるが，ここでは都市域(urban）など4カテゴリに大分類して示している．

表-4　各Caseにおける土地利用形態の設定

	Case1：現在	Case2：江戸時代	Case3：東京湾5割埋立
土地利用形態			
	urban　cropland　forest　water		
年代	現在（1985年頃）	江戸時代（1850年頃）	仮想ケース
水陸比	水域：18.0%　陸域：82.0%	水域：20.0%　陸域：80.0%	水域：6.3%　陸域：93.7%

Case1は1985年頃の土地利用，Case2は1850年ごろの江戸時代末期の土地利用，Case3として東京湾を湾奥から湾口方向までを1割単位で区切った場合に湾奥から5割ほど埋め立てたと仮定した場合を設定した．

Case1に関して，公開されているUSGSのデータは現代の土地利用を想定しているものの，Land-use（土地利用データ）が時代による変化に対応してないなど，いくつかの課題があるという報告もある[5]．そこで，本研究ではUSGSのデータに関して，土地利用についての過去の氷見山らによる研究例[6]などと照合し，土地利用のデータを現在の土地利用に合わせて修正した．

Case2の土地利用はGTOPO30のデータを基にして，氷見山らの研究例[6]を参考に土地利用データを変更した．基本的には，現在の都市域(urban）に関しては農耕地(cropland)という仮定をし，海岸線の位置についても東京湾沿岸に関して，明治以降の埋立地を海域に修正した．時代背景による内陸部における標高データに関しては，約1km（30秒）というデータ間隔の精度から，今回の計算に与える影響は小さいと判断した．

なお，Case3で東京湾を5割ほど埋め立てた場合を設定した理由として，既往研究のKimura and Takahashi(1991)[1]や神足(2007)[7]らを参考にして，埋立による都市気象への影響をみるために，水面と陸面の地表面特性が大きく異なる例を取り上げてみたものである．

なお，Case3において埋め立てたと仮定した地域に関しては標高1mのurbanであると仮定した．

4．モデルの検証

気象モデルWRFの再現性について，本研究の計算領域で気温と風系に関して気象庁の観測値と比較を行った．

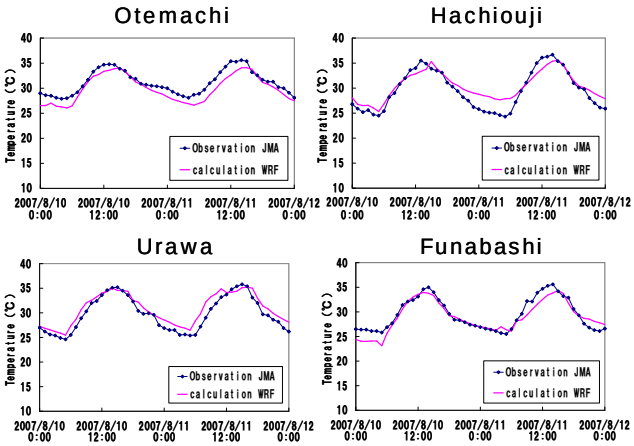


図-2　代表的な地点における気温の観測値と計算値

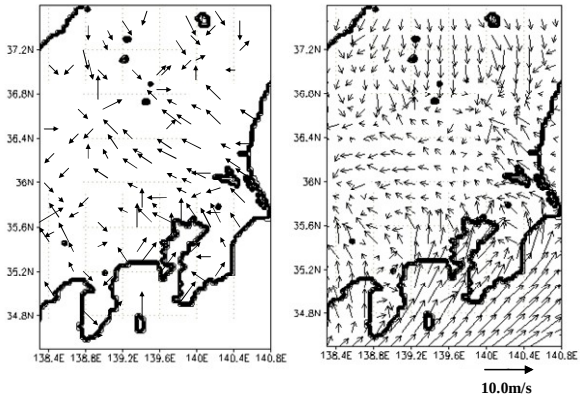


図-3　日中時の風向・風速における観測値と計算値

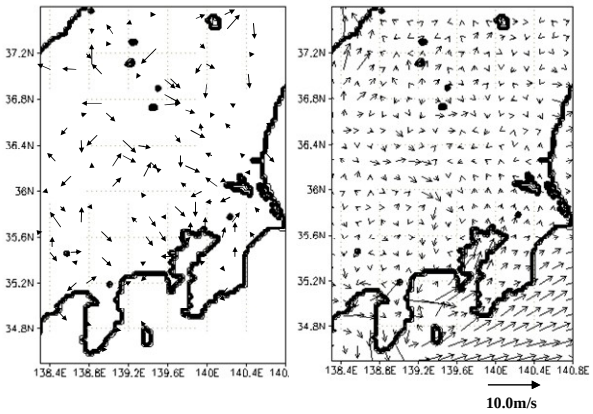


図-4　静穏時の風向・風速における観測値と計算値

図-2に示す任意の4点での気温の計算結果は，いずれの観測点とも概ね1日の傾向を再現出来ているといえる．

また，計算領域全体の風場の再現性を見るために図-3に対象時刻における2007年8月10日午後3時を，図-4に8月11日午前5時の計算領域全体の気象庁の観測値と地上10mにおける計算結果の風向・風速の分布を示す．日中の結果では，いずれの場合でも相模湾から東京湾に海陸風が進入し，関東平野中心で風が減衰している状況が確認でき，夜間では計算領域全体で風が弱くなっていることが確認できる．これより，いずれの場合でも観測値と計算値の比較から，大方合致しているといえる．

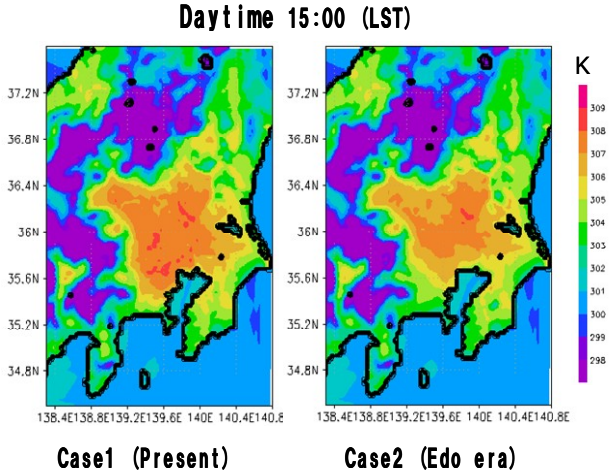


図-5　土地利用における気温分布の比較　（午後3時）

５．江戸時代と現在の気象場の比較

（１）日中の気象場の違い

図-5にdomain1における8月10日午後3時のCase1（現代）とCase2（江戸時代末期）を比較した気温分布を示す．これより，東京都西北部から内陸部ではCase1・Case2ともに高温の領域が形成されている．Case1について関東平野の北部では気温がCase2と比較した場合に約1℃ほど上昇しているが，関東平野の中部から東京都北部にかけての大部分では気温差は小さいといえる．それに対して，関東平野西南部から沿岸域にかけては，Case1とCase2の気温を比較した場合に比べて気温が2℃から3℃ほど上昇していたことが分かる．

次に，地上10mにおける風系と土地利用の関係を図-6に示す．これより，Case1とCase2では，日中に東京湾から進入する海陸風の収束域が異なり，いずれの場合でも図-5で内陸部に形成されている高温域と図-6での海陸風の収束域はほぼ一致していることが確認できた．

土地利用形態が変化した場合の風速の鉛直分布の計算結果を図-7に示す．Case1とCase2で土地利用形態が変化した船橋について，両者を比較すると，高度1km以下の地表面付近においてu成分・v成分のいずれもCase1より大幅に風速が小さくなることから，鉛直分布からも土地利用によって風系が変化することが確認できた．

さらに，図-8にCase1とCase2で地表面付近における顕熱フラックスの分布を示す．日中ではCase1での都市域の中でも関東平野西南部の東京都から神奈川県の領域で顕熱フラックスがCase2に比べて大幅に大きくなり，その地域と気温が上昇する範囲がほぼ一致している．

これより，Case2に比べ地表面の粗度が大きいCase1での風場の違いと，地表面における顕熱フラックスの影響による2つの要因によって，関東平野西南部の領域でCase1の方がCase2に比べ大幅に高温になると考えられる．

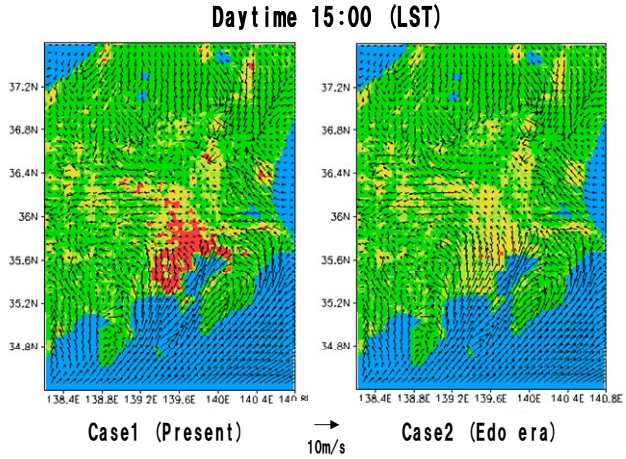


図-6　土地利用形態と風系の比較　（午後3時）

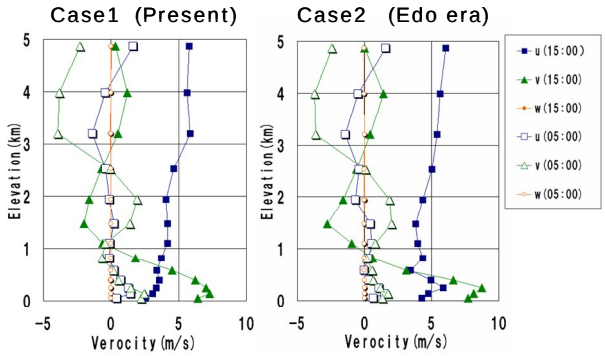


図-7　船橋における風速の鉛直分布の比較

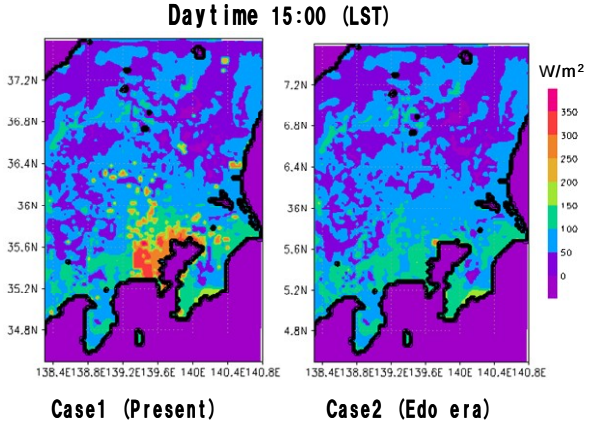


図-8　地表面の顕熱フラックスの比較　（午後3時）

（２）夜間・静穏時の気象場の違い

都市部で気温が郊外に比べて上昇するヒートアイランドが最も顕著になるのは，海陸風が弱くなる時間帯である．そこで，Case1とCase2における海陸風が弱くなった時刻で2007年8月11日午前5時のdomain1全体の気温分布を比較したものを図-9に示す．

これより，Case1ではCase2に比べて4℃以上と大幅に気温が高くなっている箇所があることが分かる．図-10に，同時刻における土地利用と風系の関係を示す．Case1とCase2で比較した場合に関東平野で風が弱くなる傾向は，両者の場合で示されており，全体として土地利

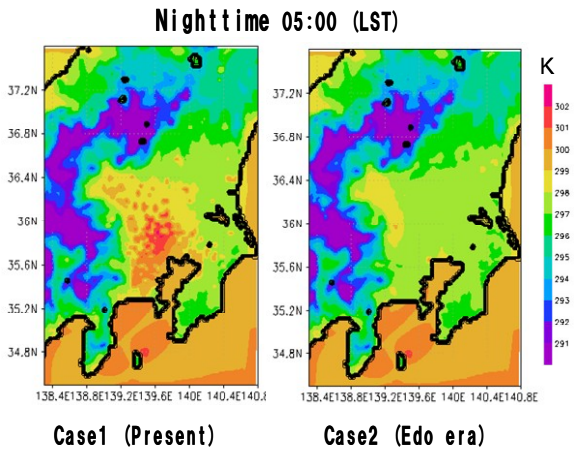


図-9　土地利用における気温分布の違い（午前5時）

用が変化したことによる風系への影響は日中に比べれば小さい．図-11にdomain1におけるCase1とCase2の顕熱フラックスの分布を示す．これより，都市域は他の地域に比べ顕熱フラックスが大きいことがわかる．ただ，日中と比較した場合に顕熱フラックスは大幅に小さい．しかしながら気温はCase1とCase2を比較した場合に日中の気温差よりも大幅に大きい(図-9).

次に，地表面における熱的な性質をより細かく検討するため，図-12に関東平野の内陸部に位置する浦和における温位の鉛直分布を示す．Case1とCase2で温位の日中と夜間の違いの特性を見ると，静穏時の地表面付近で4℃ほど異なっている．これは地表面が熱せられ，Case1のほうが早朝の静穏時でも温位が高い．日中の時間帯ではCase1での温位が鉛直方向にほぼ等しいことを考慮すると，夜間は土地利用の変化による顕熱フラックスの増加が気温に与える影響が大きいと考えられる．

６．東京湾を半分埋め立てた場合

東京湾が半分ほど埋立が行われたという仮定において，5.の場合と同様に2007年8月10日午後3時におけるCase3の気温分布を図-13の左側に示す．このとき，右図はdomain2においてCase3とCase1の気温差を示している．これよりCase3での東京湾の埋立域では，現状よりも大幅に気温が上昇し最大で7℃程度が確認でき，湾北東部ならびに北部の埋立域周辺部でも気温が0.5℃から2℃程度気温が上昇している．

次に，同様にCase1とCase3を比較した8月11日午前5時における気温分布（右図はdomain2で現状との気温差）を図-14に示す．これより，Case3はCase1に比べ船橋市付近から内陸部では気温が上昇している．その気温上昇は最大で1.5℃程度であるが，気温上昇が見られる領域は日中よりも広いことが確認できた．一方で埋立域の一部で気温がCase1より低下する箇所もあった．

Case3の埋立域やその周辺での気温変化の原因として

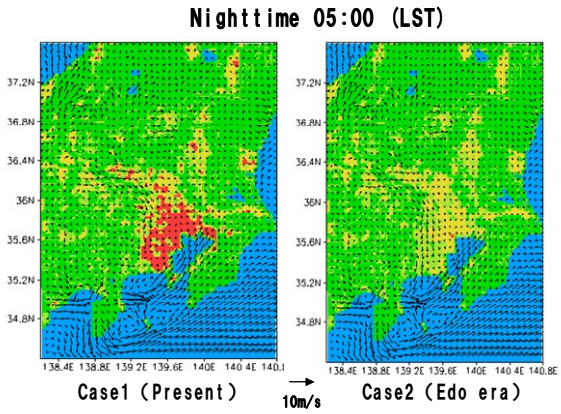


図-10　土地利用形態と風系の比較（午前5時）

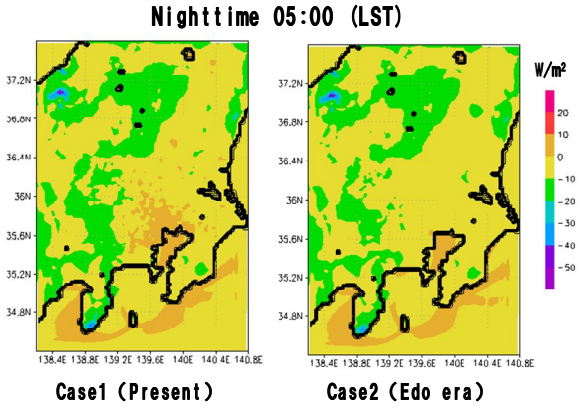


図-11　地表面の顕熱フラックスの比較（午前5時）

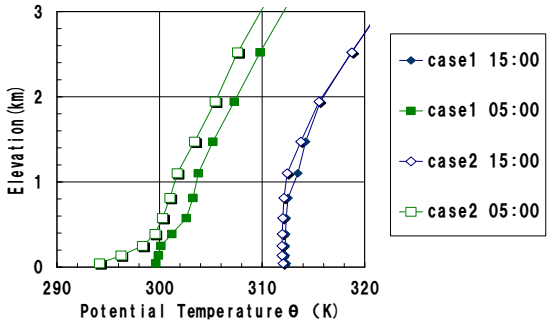


図-12　浦和における温位θの鉛直成分

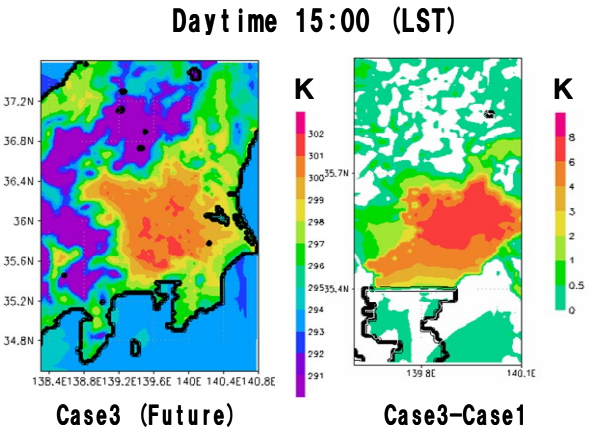


図-13　Case1とCase3の気温の比較（午後3時）

次のことが考えられる．日中では，Case1での海水域は熱容量が大きいため気温の日較差が小さいが，Case3で

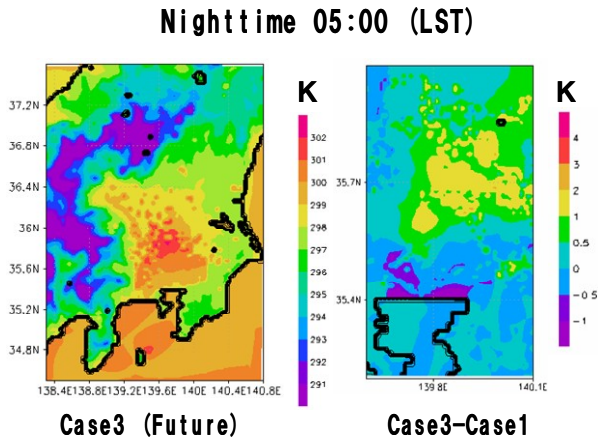


図-14　Case1とCase3の気温の比較（午前5時）

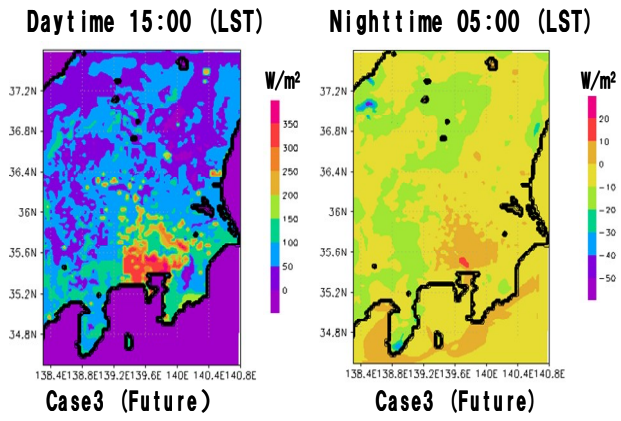


図-15　日中と夜間の顕熱フラックスの比較

陸域になることで顕熱フラックスが大幅に上昇し（図-15），また陸面になることで海風の進入が低減し，その結果埋立域で気温が上昇する．一方で夜間では，Case3で陸域に変化した場合に，蓄熱等による顕熱フラックスが生じ地表面付近の大気が加熱される．一方で，陸面に変化することで熱容量が小さくなるため放射冷却による気温低下が大きくなり，その結果として埋立域の気温がCase1より低下する領域が生じたと考えられる．

７．結論

本研究では，関東地方における土地利用の形態が都市気象に与える影響について検討を行なった．得られた主要な結論は以下のとおりである．

１）現在の土地利用を仮定したCase1と江戸時代を仮定したCase2を比較すると，日中夜間共に気温が上昇し，日中の関東平野西南部の沿岸域では，現在と江戸時代末期の土地利用で気温を比較すると，2℃から3℃ほど上昇した．その領域は都市域に分類されCase1での海陸風の収束域や顕熱フラックスが大きいことが確認できた．また，気温に関して日中では海陸風と顕熱フラックスの影響が，夜間は日中より顕著に顕熱フラックスが影響し，日中と夜間において地表面過程の気象場に及ぼす要素が異なることが確認できた．

２）東京湾を50%埋立すると仮定したCase3とCase1を比較した場合に，日中はCase1で水面の埋立地で最大7℃，東京湾岸の北部で気温が0.5℃から2℃程度上昇している．夜間では埋立地や湾北東部の周辺部で約1.5℃の気温が上昇し，その範囲は日中よりも陸域方向に広い．これらの原因として，１）に示した気温変化に影響する気象要素の日夜の違いが考えられる．また，Case3で夜間において一部の埋立地において気温が低下する原因として，熱容量の違いによる陸面温度と海水面温度の日較差の違いが考えられる．

今後の課題として，今回は考慮していなかった都市における人工排熱などに関しても考慮し，都市気象の構造を明らかにしていきたい．

謝辞：筑波大学大学院生命環境科学研究科の日下博幸講師には，WRFの計算結果などについて貴重な助言を頂いた．また，本研究では，武蔵工業大学情報処理センターのPCクラスタシステムを利用させていただき，同センターの安井浩之講師には計算機の設定などご協力いただいた．ここに感謝の意を記します．

参考文献

1) Kimura.F. and S.Takahashi：Climatic effects of land reclamation in Tokyo Bay – Numerical experiment . *Energy and Buildings*, 15/16, pp.147-pp.150, 1991.

2) Kusaka.H, Kimura.F, H.Hirakuchi and M.Mizutori：The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area, *J.Meteor.Soc.Japan*, 78, pp.405-420, 2000.

3) Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura：A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, *Boundary-Layer Meteorology*, vol.101, p.329-358, 2001.

4) Kusaka, H. and F. Kimura：Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol.82, p.67-80, 2004.

5) CF Lo, AKH Lau, JCH Fung：Impact of land surface process in MM5 over Hong Kong and Pearl River Delta, 14 th MM5 User's Workshop, Boulder, Colorado, 2004.

6) 氷見山幸夫 他：アトラス日本列島の環境変化, 朝倉書店, 1995.

7）神足洋輔，村上和男，伊藤一正：気象モデルを用いた東京湾岸の水面積変化が都市内の気象に与える影響の検討，*土木学会海洋開発論文集*，第23巻，pp.279-pp.284,2007.

(2007. 9. 30受付)