

東京湾奥部三番瀬周辺における熱環境特性

Environmental Impact Assessment of the Heat Characteristics of the Sanbanse Area in Tokyo Bay

矢内栄二¹・菊池知佳²

Eiji YAUCHI and Tomoka KIKUCHI

Sanbanse is a shallow coastal region consisting of tidal flats located in the inner areas of Tokyo Bay. Since most of the shallow areas in Tokyo Bay have been lost to land reclamation projects, Sanbanse is a precious example of natural tidal flats. If Sanbanse were to be reclaimed, local temperatures would likely increase due to an increase in the distance from the ocean which has a moderating effect on local climate. This study presents the findings of an environmental impact assessment of the heat characteristics of the Sanbanse area to examine the possible effects of reclamation based on field measurements, remote sensing, and numerical simulations.

1. はじめに

三番瀬(図-1)は、東京湾の最奥部に位置し、浦安市、市川市、船橋市、習志野市に三方を囲まれた干潟と浅海域である。東京湾奥部では埋立により浅海域が失われており、自然干潟が残る三番瀬は貴重な存在である。しかし1993年にこのうちの740haを埋め立て、住宅・工業用地を造成する計画が立てられた(図-1(c))。その後白紙撤回され、その後の利用方法として円卓会議、再生会議などの環境検討会議が実施されてきている。

もし、三番瀬に埋立地が建設された場合、背後の都市域は海岸線までの距離が遠のくことになり、武若ら(1995)が福岡市の埋立で指摘したような臨海都市のヒートアイランド形成を強化する気象変化が生じることが

予測される。

そこで本研究では、三番瀬の埋立が行われた場合を想定し、現地観測により検証した人工衛星データの地表面温度条件を用いて、数値シミュレーションによる熱環境影響評価を行った。さらに、埋立が行われた場合に埋立前と同等の気温低下をもたらすための海面温度を予測した。

2. 現地観測

数値シミュレーションを行うための基礎的データとして、地表面温度のグランドトゥルースデータを得るために現地観測を行い、解析対象域の熱環境を解析した。

(1) 調査日時および場所

調査概要を表-1に示す。観測日時は人工衛星LANDSAT-5号の撮影日時に合わせ、2007/8/16および2008/10/21のAM10:04とした。観測地点の位置を図-2(a)~(b)に示す。2007/8/16の観測場所は、解析対象地域内のアメダス観測所である船橋アメダス観測所付近(緑地)、芝地である船橋海浜公園、コンクリートである市川市塩焼町の3地点とした。2008/10/21の観測場所は、緑地である船橋市の県立行田公園、裸地である千葉工業大学茜浜グラウンドと、コンクリートである習志野市新習志野駅前道路、船橋市高根木戸駅前道路、市川市南行徳駅前道路の、計5地点とした。

(2) 観測項目および方法

観測項目は、菅原(2007)を参考に地上1.5mにおける風速、風向、気温、湿度と、地表面温度とした。観測機器は、表-2に示す風速計、方位磁石、デジタル温湿度計、防水型非接触温度計を使用した。また、2008年の観測では、携帯用小形熱画像カメラを用いて土地被覆の異なる場所を撮影した。

観測方法として、風速および温湿度は1.5mの高さで風速計およびデジタル温湿度計により観測した。地表面温度は、防水型非接触温度計を同じ地点の地表面に向けて観測した。また、風向は薄紙の方向から判断した。

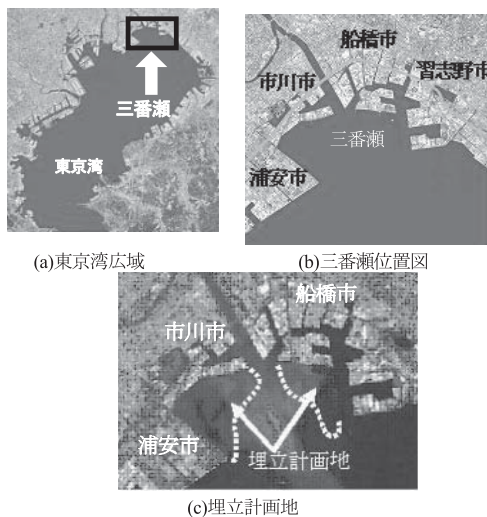


図-1 三番瀬

1 フェロー 工博 千葉工業大学教授工学部生命環境科学科
2 学生会員 千葉工業大学大学院生命環境科学専攻

(3) 観測結果

表-3に2007年の観測結果を示す。2007年の現地観測日は、全国のアメダス観測所924地点のうち、25地点で観測史上最高気温が更新された日であり、3地点とも36.6～40.2℃と気温が高い。風はおおよそ南から吹いており、風速は0.1～1.6m/sの範囲であった。風が穏やかだったこともあり、地表面温度も高くなっていることがわかる。特に市川市塩焼町(③)では地表面温度と気温に15℃以上差がある。表-4に2008年の観測結果を示す。2008年の現地観測を行った日は秋晴れで、気温は21.0～24.6℃の範囲であった。また、どの地点でも時折強い風が吹いており、風向はおおよそ北で、風速は0.4～2.5m/sの範囲であった。地表面温度は、日射が強い秋においてもコンクリートの3地点で気温との差が大きいことがわかる。コンクリート3地点の気温と地表面温度の差を比較すると、新習志野(⑥)では12.5℃、高根木戸(⑦)では6.4℃、南行徳(⑧)で7.6℃と、温度分布に幅が認められる。

3. リモートセンシング解析

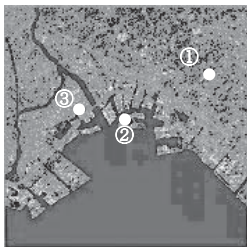
数値シミュレーションを行うための地表面温度の算出は、人工衛星データを用いたリモートセンシング解析により行った。

(1) 解析対象域および使用データ

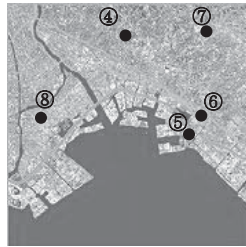
解析領域は、後に示す数値計算領域と同じ船橋海浜公園を中心とする16km×16kmとした(図-3)。データは、2007/8/16 AM10:04に撮影された人工衛星LANDSAT-5号のTMデータを使用し、解析ソフトはGeomatica 10.1

表-1 調査概要

観測日時	2007/8/16 AM10:04	2008/10/21 AM10:04
地点	① 船橋アメダス	④ 行田公園
	② 船橋海浜公園	⑤ 茜浜グラウンド
	③ 市川市塩焼町	⑥ 新習志野
		⑦ 船橋市高根木戸
		⑧ 南行徳
観測項目	風速・風向・温度・湿度(地上1.5m) 地表面温度	



(a) 2007/8/16



(b) 2008/10/21

図-2 観測場所

表-2 計測機器一覧

計測機器	形式
風速計	CW-10
デジタル温湿度計	CTH-360
防水型非接触温度計	PT-7LD
携帯用小形熱画像カメラ	CPA-B0304

表-3 観測結果(2007/8/16)

測点	①	②	③
気温(℃)	38.2	40.2	36.6
湿度(%)	55.7	59.6	52.4
地表面温度(℃)	35.0	44.2	52.1
風速(m/s)	0.5	0.1	1.6
風向	SSE	SSW	SE
土地被覆	草地	芝地	コンクリート

表-4 観測結果(2008/10/21)

測点	④	⑤	⑥	⑦	⑧
気温(℃)	21.0	24.2	23.1	24.6	22.6
湿度(%)	54.5	40.2	40.7	32.5	39.0
地表面温度(℃)	21.1	25.7	35.6	31.0	30.2
風速(m/s)	0.8	0.4	0.6	2.5	1.0
風向	NE	NW	N	NE	WNW
土地被覆	草地	裸地	コンクリート		

(PCI社)を使用した。

(2) 解析方法

地表面温度は、TMデータのBAND6を用い、Planck's lawに従って内部処理で求め、大気補正を行った。

大気補正は、大気中の水蒸気や二酸化炭素などの影響を画像データから取り除く補正であるが、大気補正を1種類とすると、地表面温度を正確に算出することができなかった。そこで、本研究では大気補正ファイルを、土地被覆状態によって複数作成した。具体的には、2007年に現地観測を行った3地点(船橋アメダス観測所、船橋海浜公園、市川市塩焼町)のグランドトゥルースデータ、および海上保安庁の千葉灯標の表層水温(2007/8/16 AM10:00)をもとに4種類(緑地、芝地、コンクリート、水表面)の大気補正ファイルを作成した。

(3) 地表面温度解析結果

三番瀬周辺の地表面温度分布を図-3に、代表的な地点の地表面温度を表-5に示す。アメダス観測所付近(緑地)の地表面温度は、35.0～39.5℃の範囲であった。船橋海浜公園(芝地)の地表面温度は、35.0～48.8℃の範囲であった。

市川市塩焼町付近(コンクリート)の地表面温度は、50.5～53.8℃の範囲であった。海面温度は、31.0～37.5℃の範囲であった。

土地被覆が緑地、芝地の地点および水表面では、地表

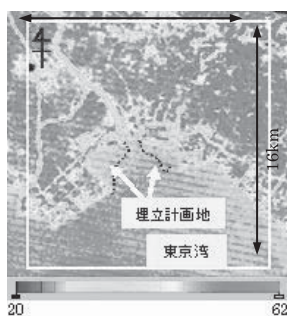


図-3 解析対象域と地表面温度

面温度の差に大きな変化はみられなかったが、コンクリートの地点では、観測地点によって最大10.0℃の差がみられた。

(4) NDVIと地表面温度特性

コンクリート地表面において、広域の温度幅が認められたことから、その特性を把握するために横山ら(1999)、西田ら(2000)と同様にNDVIと地表面温度の検討を行った。NDVI(Normalized Differential Vegetation Index)とは、植生指標のことであり、人工衛星データの近赤外と可視域の赤色域の演算によって求められる。NDVIの算出式を(1)に示す。

$$NDVI = \frac{(B_4 - B_3)}{(B_4 + B_3)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B_3 :可視域の赤色波長帯のCCT値、 B_4 :近赤外波長帯のCCT値である。

解析領域内の土地被覆状態は、航空写真およびグーグル・ストリートビューにより判別した。結果を表-5および図-4に示す。土地被覆状態によって地表面温度とNDVIにはそれぞれ特徴が認められる。緑地面では、地表面温度が最も高い船橋市藤原と、最も低い船橋市高根町で5.5℃の差があり、NDVIは最大の船橋市高根町と最小の船橋市藤原で0.13の差があった。芝地面では、地表面温度が最高の習志野市若松公園と最低の葛西臨海公園で4.5℃の差がみられた。NDVIは、最大の葛西臨海公園と最小の日本ハム鎌ヶ谷球場で差は0.11であった。コンクリートの地表面温度およびNDVIの算出結果では、地表面温度差が最大で10.5℃の違いがみられた。また、NDVIも最大で0.26という大きな差がみられ、コンクリートの場合には、NDVIと地表面温度の分布幅がともに大きくなり、コンクリートの場合には領域内の植生を詳細に調査する必要があることを示している。そのため、数値計算の初期条件で与える温度として、表-6に示すようにコンクリートについては5ヵ所(浦安市、江戸川区、市川市、船橋市、検見川浜付近)を選定し、緑地、芝地および海面温度は、それぞれ1ヵ所ずつ選定した。

表-5 地表面温度とNDVI

	地点名	地表面温度	NDVI
コンクリート	船橋緑台	60.1	-0.23
	船橋市西浦	58.9	-0.21
	⑦高根木戸	57.8	-0.15
	市川市田尻	54.9	-0.08
	葛西トラクタターミナル	52.5	-0.06
	③市川市塩焼町	52.0	-0.10
	溝江駅周辺	51.5	-0.06
緑地	船橋市藤原	36.3	0.44
	①アメダス観測所付近	35.0	0.50
	宮内庁新浜鴨場	33.6	0.52
	④船橋市行田公園	33.5	0.50
	市川市大野町	31.8	0.52
	市川市柏井町	31.5	0.53
	船橋市高根町	30.8	0.57
芝地	習志野市若松公園	46.8	0.30
	日本ハム鎌ヶ谷球場	46.1	0.28
	明海大学グラウンド	45.9	0.29
	②船橋市海浜公園	44.4	0.35
	習志野市中央公園	44.0	0.32
	江戸川区小岩緑地	43.2	0.36
	葛西臨海公園	42.3	0.39

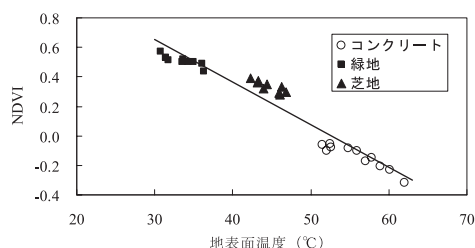


図-4 NDVIと地表面温度の関係

表-6 地表面温度と土地被覆状態

場所	地表面温度(℃)	土地被覆状態
浦安	58.50	コンクリート
江戸川	57.00	
③市川	60.25	
船橋	62.75	
検見川	54.75	
①アメダス観測所	32.75	緑地
②船橋海浜公園	44.30	芝地
⑨海面	27.5	海

4. 数値シミュレーション

(1) 基礎方程式

本研究では計算の汎用性を重視して、市販の流体ソフ

トSTREAM (クレイドル社) の温度・湿度計算機能を使用して数値計算を行った。計算では、2007年度の現地計算を再現し、その後埋立による気温変化を予測する方法とした。流体は、非圧縮流体とし、基礎方程式は質量の保存式、運動量の保存式、エネルギー保存式、 k - ε 方程式、状態保存式で表わされる。また、地表面では熱伝導の式(8)を使用した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + q_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s + G_T - \rho \varepsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \\ &+ C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho = \text{一定} \quad \dots\dots (7) \quad q = -K \frac{\Delta T}{\Delta X} A \quad \dots\dots\dots (8)$$

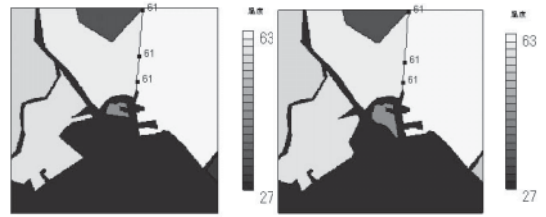
$$\text{ここで, } \mu = \mu_l + \mu_t, \quad G_s = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad R_f = -\frac{G_T}{G_s + G_T}$$

ここに、 x_i ：位置座標、 u_i ： x_i 方向の流体速度、 t ：時間、 p ：流体の圧力、 ρ ：流体の密度、 g_i ：加速度、 β ：体膨張率、 T ：流体の温度、 T_0 ：流体の基準温度、 C_p ：定圧比熱、 K ：熱伝導率、 q_0 ：発熱量、 k ：乱流エネルギー、 μ_t ：分子粘性係数、 μ_t ：渦粘性係数、 ε ：乱流消失率、 R ：ガス定数、 q ：熱エネルギーの移動量、 ΔT ：温度差、 ΔX ：2つの温度間の距離、 A ：断面積、 $\sigma_k=1$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_1=1.44$ 、 $C_2=1.92$ 、 $C_3=0.0$ 、 $C_\varepsilon=0.09$ 、 $\sigma_\varepsilon=0.9$ である。本ソフトの潜熱計算では、流体から直接熱を奪うのではなく、固体の温度 q_0 が変化して流体の温度を変化させる手法を採っている。

(2) 解析条件

解析領域は、リモートセンシング解析と同じ船橋海浜公園を中心とした16km×16km×0.1kmとした(図-3)。境界条件は、地表面を対数則境界、それ以外をフリースリップ境界とした。地表面温度と海面温度は表-6の値を用いた。気温および湿度は、2007年の現地観測で観測した3地点の平均値(気温：38.3℃、湿度：55.9%)を使



(a) 埋立前 (b) 埋立後

図-5 初期温度分布

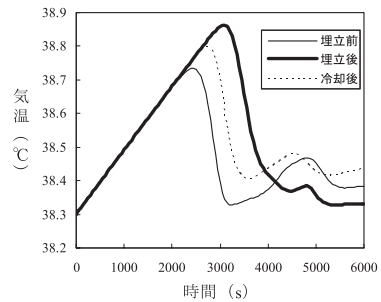
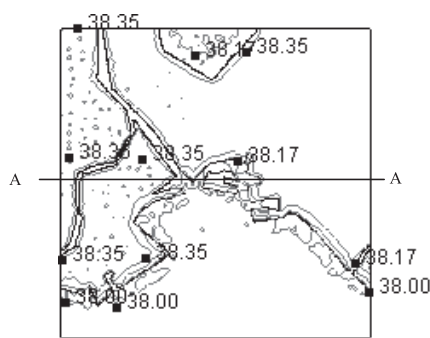


図-6 気温変化(市川市塩焼町)

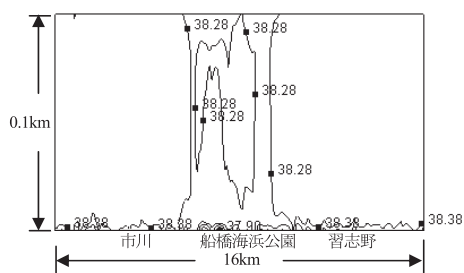
用した。また、時間間隔 Δt は0.5sとし、初期風速は、地表面温度が大気温度に与える影響を知るため無風とした。

(3) 熱環境評価

数値シミュレーションでは、図-5に示す初期地表面温度分布を与え、気温が定常状態になるまで計算した。図-6は、埋め立て地背後に位置する市川市塩焼町における地上1.5mにおける気温の時系列変化を示したものである。計算開始から徐々に解析領域内の温度が上昇し、埋立前は45分後(2,700s)に気温が38.70℃の極値となる。埋立後には気温上昇時間が延びて51分後に38.86℃まで上昇し、埋立による気温上昇の影響が認められる。定常状態では、周囲からの流入によると見られる気温の変化が認められる。図-7(a)、図-8(a)は、計算開始から3時間12分後の地上1.5mにおける気温分布を示したものである。三番瀬の埋立により沿岸地域の気温上昇が見られる。図-7(b)、図-8(b)は、市川市塩焼町を通る図-7(a)および図-8(a)のA-A断面における気温の鉛直分布図であるが、塩焼町における気温上昇の理由は38.28℃の鉛直セルの大きさが25%程度増加したことによるものであると考えられる。そこで、もし埋立が実施された場合、海水冷却により気温低下を抑制することを検討した。東京湾環境データベースによると、1993年に千葉県では冷夏となり、海水温が23.5℃が記録された。そこで、本研究では海水冷却温度として冷夏に近い水温である23℃を与えることとした。図-9(a)～(b)は、地上1.5mにおける気温分布とA-A断面での気温鉛直分布である。このときの市川市塩焼町での気温時系列変化を図-6中に示したが、0.06℃程度しか

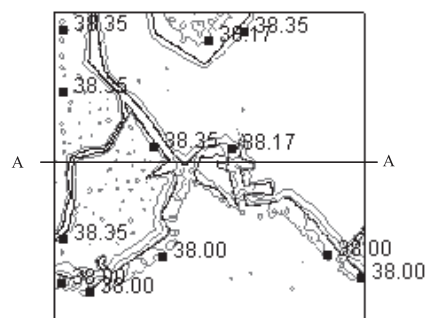


(a) 水平方向(1.5m)

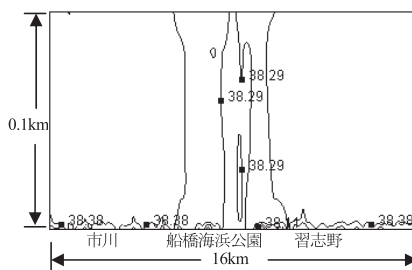


(b) 鉛直方向(A-A 断面)

図-7 埋立前の気温分布



(a) 水平方向(1.5m)



(b) 鉛直方向(A-A 断面)

図-8 埋立後の気温分布

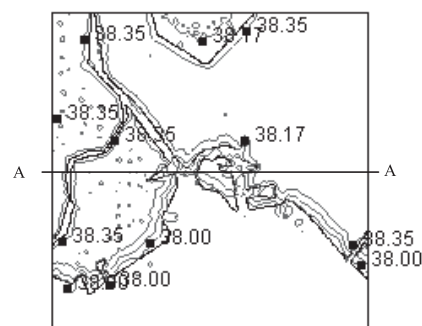
気温が低下しないことが予測され、埋立の影響は海水冷却の影響を上回ることが予測された。無風状態では海水冷却の影響があまり大きくないと考えられる。

5. 結論

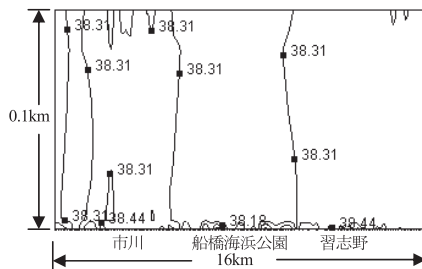
現地観測結果とリモートセンシング解析の結果から、土地被覆がコンクリート面の場合には領域内の植生を詳細に検討する必要があることがわかった。数値シミュレーション結果から、もし、埋立が行われた場合には、埋立背後の地域では気温変化をもたらす可能性が認められた。

参考文献

- 国土交通省東京湾環境情報センター：東京湾環境データベース, <http://www.tbeic.go.jp/WEBGIS/index.asp>. (2008.10.31 閲覧)
- 菅原広史 (2007)：都市気候分野における流れの野外計測, ながれ, 第26巻, No.1, pp.21-28.
- 武若 聡・草場智哉・入江 功 (1995)：海岸埋立が沿岸都市の気象に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1146-1150.
- 西田顕朗・樋口篤志・近藤昭彦・松田咲子 (2000)：分光植生指標と表面温度に基づく地表面過程のリモートセンシング手法の検討, 水門・水資源学会誌, Vol.13 No.4, pp.304-312.
- 横山慶太・日野幹雄・矢内栄二 (1999)：東京近傍関東平野における植生指標NDVIと地表温度の相関, 水文・水資源学会研究発表会講演集, pp.128-129.



(a) 水平方向(1.5m)



(b) 鉛直方向(A-A 断面)

図-9 海水冷却後の気温分布