

夏季の東京湾海表面温度変化と都市気温の関係 —東京湾は都市の気温上昇を抑制するか?—

IMPACT OF SEA SURFACE TEMPERATURE VARIATION OF TOKYO BAY ON
URBAN AIR TEMPERATURE IN SUMMER: DOES TOKYO BAY HAVE A
COOLING EFFECT ON URBAN AIR TEMPERATURE?

小田僚子¹・神田学²
Ryoko ODA and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻・日本学術振興会 特別研究員
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 I4-9)

²正会員 工博 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 准教授 (同上)

We examined how Tokyo Bay reduces urban air temperature in summer, by analyzing data from in-situ observation network of sea surface temperature (SST) and air temperature (Ta) in Tokyo Bay together with the data of Japan Meteorological Agency observation network in Tokyo Wards. The strong southwesterly wind over the bay decreases the SST due to increasing turbulent mixing at the water surface. The cooling effect of sea breeze on urban air temperature is significant in coastal region (Shin-Kiba). The effect gradually decreases with distance from the coast and almost diminished at about 20km inland (Nerima). Therefore, with increasing wind velocity, the horizontal air temperature gradient from the coast is intensified.

Key Words : Tokyo Bay, Sea surface temperature, Air temperature, Sea breeze,
Seasonal variation, Diurnal variation

1. はじめに

気候変動を捉える鍵となる大気-海面相互作用を理解するうえで最も重要なパラメータの一つは、海表面温度 (SST) である。近年になって、衛星観測や現場観測結果から、沿岸域において5°Cを上回るSST日較差が報告されるなど^{1), 2)}, SSTの日変化が大気に及ぼす影響について注目されている³⁾。しかしながら、例えば気象庁現業数値予報モデルの計算において衛星観測から得られる日変化一定の水温を導入しているなど、SST日変化と大気との結びつきは、今日まで詳細には理解されてこなかった。そのような背景の中、Kawai et al., (2006)⁴⁾は日本の陸奥湾を対象に、SST日昇温が局地大気循環に与える影響について検証し、モデルにおいてSST日昇温を考慮した場合、海陸温度差が弱まることで地上気温が高くなることを示し、SST日変化を考慮することが沿岸部の気温予測にとって重要であることを明示した。一方で、ヒートアイランドや集中豪雨といった大気環境問題が顕在化している首都圏においても、隣接する東京湾が海陸風循環を通して都市気象に影響を及ぼしていることが指摘され

ている^{5), 6)}が、これまでSST日変化と大気との関係については言及されていない。近年深刻化する大気環境問題に対し、東京湾が持つ機能を把握することは重要であると考える。そこで著者らは、東京湾SSTと周辺大気との関係を調べるため、東京湾内の14箇所においてSSTと気温 (Ta) を連続的に直接測定する観測網を構築し、約1年に渡って時空間的に高解像度データを得ることに成功した。これまでに、著者ら (2008)⁷⁾は観測により得られた東京湾SSTをメソ気象モデルWRFに導入した結果、衛星観測から得られる客観解析SSTを用いた場合と比較して、夏季においては海上の顕熱放出量の変化により東京の気温が約0.1°C上昇することを示し、沿岸域における都市気象を取り扱う場合には実際の沿岸域SSTをモデルに導入することの必要性を示唆した。本稿では、海風の侵入が認められる夏季日中に着目し、南よりの風が強まるほど海中の成層化が弱まり、SSTが低下し、東京湾が大気の熱を吸収する方向に働くこと、さらに、湾上の冷涼な海風は沿岸域 (新木場) の気温上昇を効率的に抑制するが、内陸へ侵入するにつれてその効果は減少していき、約20km内陸 (練馬) までには及んでいないこと、そのため、風速の増加に伴い沿岸からの水平気温勾配が強まる

ことを、現地観測の結果から明らかにした。

2. 現地観測

(1) 観測地点

東京湾は、房総半島、三浦半島および首都圏臨海部に囲まれた、南北約50km、東西約20kmの半閉鎖性水域であり、指定特定重要港湾（東京港・横浜港）、特定重要港湾（川崎港・千葉港）、重要港湾（横須賀港・木更津港）を含む、日本を代表する国際海上輸送網の拠点である。横須賀市観音崎と富津市富津岬を結ぶライン以北を内湾、そこから三浦市剣崎と館山市洲崎を結ぶラインまでを外湾と呼んでいる。内湾面積は約960km²、内湾の平均水深は約15mで、湾口に向かって徐々に深くなり湾口部では50m以上に達する。

本観測では、内湾部を対象として、14地点において水温・気温の直接観測を実施した。図-1に観測地点を示す。なお、本論文においては、内湾をさらに湾奥（no.1-5, 14）、湾中央（no. 6-8, 12, 13）、湾口（no. 9-11）に分けて議論する。

(2) 観測方法・データ処理

東京湾に既存の灯標、灯浮標および海上構造物の計14地点において水温計（HOBO U22 Water Temp Pro v2, Onset Computer Corporation製）と気温計（HOBO H8 Pro Temp, Onset Computer Corporation製）を設置し、2006年11月から2007年9月までの11ヶ月に渡って長期連続的な直接測定を実施した。水温計は、複雑な海面変動に対応して一定の水深を保てるよう小型のフロートに取り付け、海表面から約1cmと約20cmの2箇所での測定を行った⁷⁾。

SSTの評価に関しては、cool-skinやwarm layerの存在が指摘されており^{8), 9)}、実際のSSTを測定することは極めて困難である。本観測により得られた1cm深水温(SST_{1cm})と20cm深水温(SST_{20cm})の差は、冬季にSST_{1cm}がSST_{20cm}よりも低く、夏季はその逆となり、さらに日中ほど両者の差が大きくなる傾向を示すが、それらの差は測器の公称精度(±0.2℃)内であった。なお、Kawai and Kawamura(2000)¹⁰⁾は、platform effectを検証し、現場水温測定においてはブイ自身によって誘発される乱れのためにブイの近くでは水温が一定になり得ることを指摘しており、本観測において上下水温計の差が小さいのは、上記のことが一因であるかもしれないが、ブイ自身の加熱がSST変動に及ぼす影響などを含めてplatform effectの機構は複雑であり、さらなる検討が進められている段階である¹¹⁾。また、湾奥のno.14においては平均海面上12.8mの高さに放射収支計（CNRI, Kipp&Zonen製）を設置しており、赤外放射により算出した海表面温度(SST_{IR}: 射出率0.98)と実測値とを比較した結果、SST_{IR}が平均0.03℃（標準偏差0.95℃）低い傾向を示したが、これも測器の

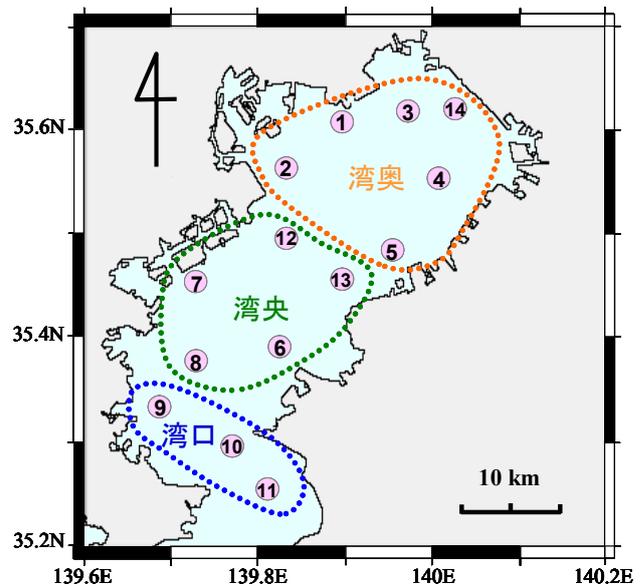


図-1 観測地点

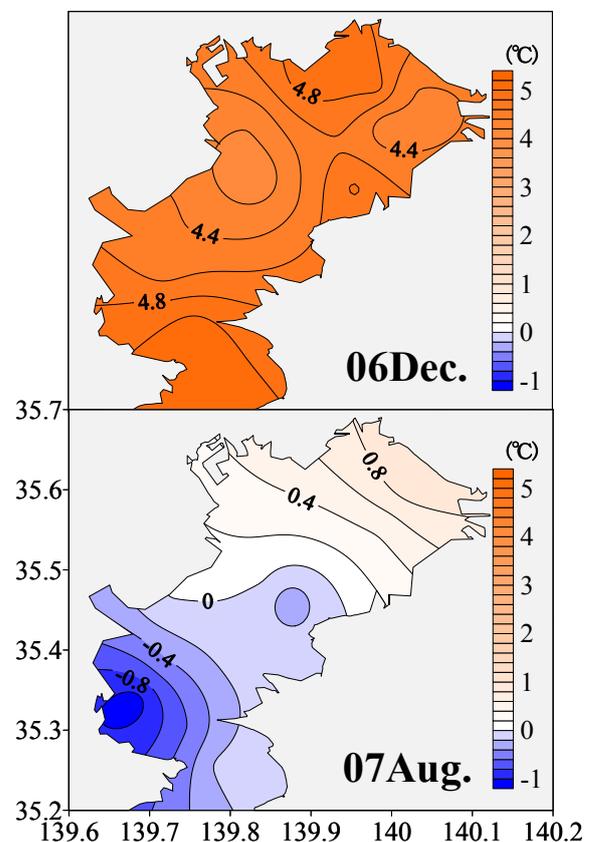


図-2 [SST-Ta] の空間分布図 (2006年12月, 2007年8月)

推定誤差±20Wm⁻² (5Wm⁻²で約1℃の相違) を考慮すると評価が難しい。以上より、本研究においては、SST_{1cm}をSSTとし、SST_{1cm}が欠測の場合はSST_{20cm}を代用した。

気温は、Kondo(1975)¹²⁾に従い、中立を仮定して10m高度の値に補正した。また、海上風速については湾中央のno.13で測定されている42.5m高度における風速¹³⁾を気温と同様に10m高度に補正して用いる。

なお、水温および気温は10分間隔の瞬間値として計測

しているが、本研究では観測データを1時間平均値の統計量として扱っている。

3. 観測結果

(1) [SST-Ta]の季節変化

SST, Taともに、冬季は相対的に湾奥が低く、湾口が高い。そして4月頃を境に、夏季に向かってその傾向は逆転する⁷⁾。図-2は、東京湾を囲む4箇所の気象官署（東京・横浜・千葉・木更津）で日降雨量0mmのときの、2006年12月および2007年8月における[SST-Ta]の月平均空間分布を示したものである。冬季の東京湾は全体的に熱のソースとなっており、この傾向は11月から3月にかけて見られる。また、5月以降の夏季には湾口側において熱のシンクとなる。ここで、SSTとTaそれぞれの季節変動に着目すると、Taの変動幅（-0.3~35.1℃）はSSTのそれ（9.3~33.1℃）よりも大きい、空間分散は小さい傾向にある。このため、SSTに比べてTaは、冬季には湾全体的に低下するがSSTは湾口部で高く、結果として[SST-Ta]は湾口部で大きくなるのがわかる。夏季はその逆である。SST, Ta自体の季節変動では湾口における変動幅が最も少ないが⁷⁾、海面熱収支に寄与する[SST-Ta]の値は、湾口部で最も大きいことがわかった。

(2) SSTとTaの相関関係

図-3に時間降雨量0mmのときにおける湾全体平均のSSTとTaの相関関係を示す。これらの関係は、Taに対してSSTの大きい”Winter mode”(11~2月)、TaとSSTがほぼ一対一の関係にある”Summer mode”(5~9月)、それらの遷移領域でありSSTがほぼ一定でTaの変動が大きい”Transient mode”(3~4月)の3つのmodeに大別できると考える。Winter modeでは、外洋からの熱供給により上層が冷たく下層が暖かい不安定状態となり、上下混合が盛んとなるためにSSTの低下が抑制される。一方、Summer modeでは成層化により大気から供給された熱量がほぼ温度躍層上の表層混合層内に留まることで、水平熱輸送がSST変化に及ぼす影響が小さく¹⁴⁾、陸域と同様

にはほぼ鉛直一次元的な熱収支でSSTが決定されると考えられる。また、Transient modeでは、SSTは冬季と同様な温度のままであるが、Taは約1.8℃上昇する。これは、大気と海の熱容量の違いに因ると言える。以上より、地表面温度変化とは異なり、SSTは表面熱フラックスだけではなく、海中の安定度にも大きく依存することが確認された。なお、SST変化は日射強制力とともに風速にも依存することが指摘されている¹⁵⁾が、SSTと風速との関係は4. (1)で述べる。

(3) 湾奥・湾央・湾口におけるSST日変化

3. (2)で示した3つのmodeに対する湾奥・湾央・湾口に分類した場合のアンサンブル平均SSTの日変化を図-4に示す。3. (1)で述べたように、winter modeでは湾口が高く、湾奥が低い水温分布であるが、Transient modeではその傾向が徐々に逆転し湾全体に渡って水温較差（空間分散）が小さくなり、Summer modeではWinter modeとは逆の水温分布となる。日最低水温は午前5~6時頃、日最高水温は午後1~2時頃現れる。また、SST日較差は、年間を通して湾奥が一番大きく、Summer modeでは約1.2℃になる。これは、湾奥ほど水深が浅く熱容量が小さいためだと言える。本観測で確認された最大日較差は、7月24日に湾奥のno.4で観測され、その値は5.5℃に達し

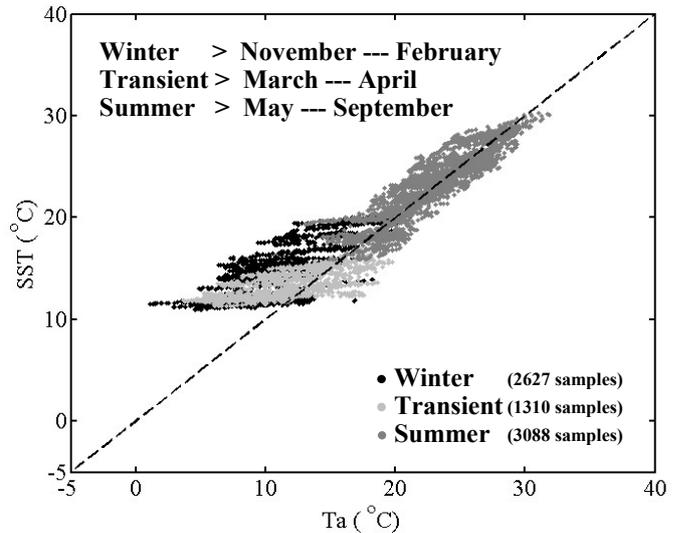


図-3 SSTとTaの相関関係

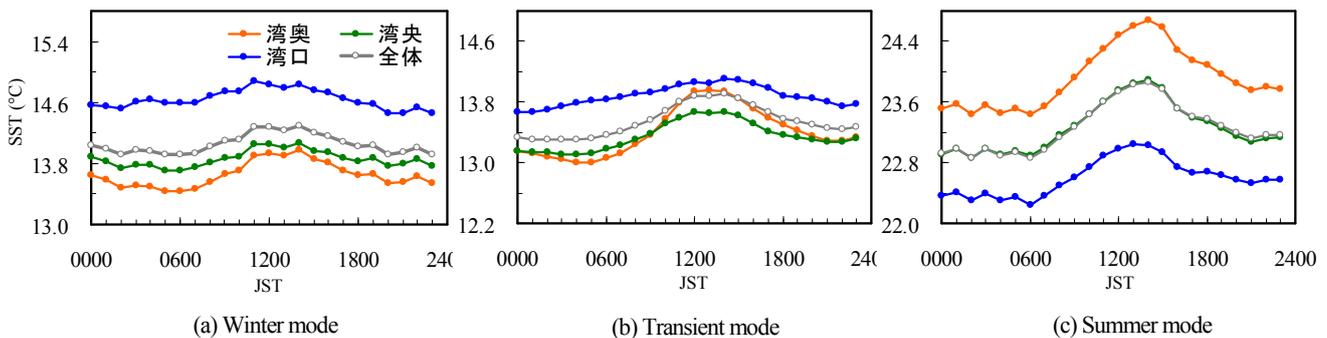


図-4 湾奥・湾央・湾口および湾全体におけるSST日変化

た。この日は、東京において日照率（日照時間の可照時間に対する比）が94.1%であり、前日まで曇りや雨が続けていたが急激に晴れて真夏日（最高気温31.5℃）となった日である。湾全体での最大日較差は、同日に記録した2.9℃であった。降水による海表面への淡水流入に加えて日射による加熱が加わったことでより強い密度成層が生じて¹⁶⁾、非常に大きな日較差が観測されたと考えられる。近年になって、沿岸域などにおいて、本観測のように5℃以上にも及ぶSST日較差が報告されており¹⁾、沿岸域SSTの日変化が周辺大気に及ぼす影響をより詳しく検証していく必要がある。そこで、以下の章において、SST日較差と都市大気の関係について考察する。

4. 夏季における東京湾の気温と海表面温度および陸上気温の風速依存性

(1) 風速変動に伴うSSTとTaの関係

SSTが上昇するのは、海中が成層化し、日射強制力の大きい夏季の日中である。そのため、Summer modeを対象に、SSTの風速依存性を調べた。夏季の日中（1100～1500 JST）で時間降雨量0mm、海上風向が南～南西風（157.5～247.5°；北を0°として時計回り）のときにおける、湾全体平均の[SST-Ta]の風速依存性を近似直線とともに図-5に示す。これより、風速が強いほど[SST-Ta]が負になる傾向が見られる。つまり、南よりの風が増すほど顕熱が負（下向き）となり、大気の熱を吸収する方向に働くことがわかる。また、図-6にSSTとTaそれぞれのアンサンブル平均日変化を示す。風速が概ね5ms⁻¹を超えると、日昇温の減少¹⁶⁾や表皮層が崩れる¹⁷⁾という報告があることから、日中の海上風速が5ms⁻¹未満を弱風日、5ms⁻¹以上を強風日と定義し、海上風が南よりで晴れの日（日照率60%以上、日降水量0mm、海上風向が南～南西風（157.5～247.5°））を抽出した。SST平均日較差は、弱風日に約1.8℃、強風日に約0.8℃であり、風速が大きいほど日較差は小さい。さらにTaもSSTと同様に強風日ほど日較差が小さくなることから、風速が強まるほどTaが暖かくなって顕熱が負になるということは考え難い。風速が増すことで海中の成層化が弱まり、海表面に入射した熱量が海中へと効率よく運ばれるようになりSSTが低下することが要因であると考えられる。夏季に強い南風が吹くと、東京湾のSSTが下がり、大気の熱を吸収する方向に働くことが示唆された。

(2) 風速変動に伴う海上気温と陸上気温の関係

夏季に南よりの風が卓越するとき、陸上の気温はどのように変化するかを確認するため、陸上の気象官署のうち新木場・東京・練馬の3地点¹⁸⁾（図-7参照）に着目して、陸上気温の風速依存性を調べた。図-8は陸上の各地点における気温(Ta_land)と東京湾上の平均気温

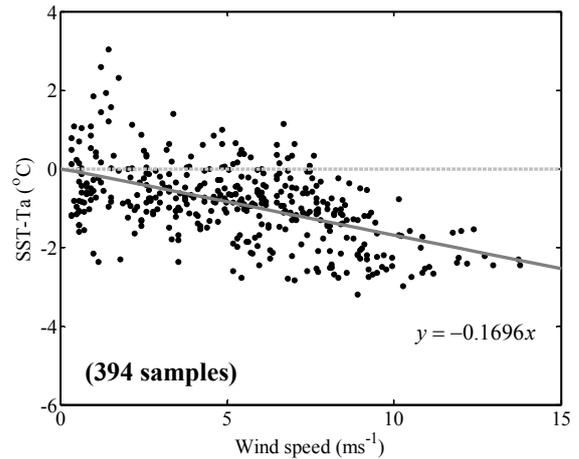


図-5 [SST-Ta]の風速依存性

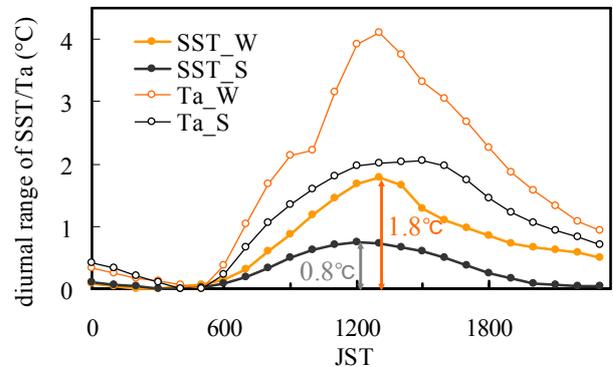


図-6 Summer modeにおけるSSTとTaの平均日変化
日中の海上風速が5ms⁻¹未満をW、5ms⁻¹以上をSとする。抽出条件は、日照率60%以上、日降水量0mm、海上卓越風向が南～南西より。

(Ta_bay)との差の風速依存性を示したものである。ここで対象データは、陸上で海風モードであるデータを抽出するため、Summer modeのうち日中（1100～1500 JST）で時間降雨量0mm、海上風向が南～南西（157.5～247.5°）かつ陸上における各地点の風向が南東～南（135～180°）であるときを用いた。三上ら(2004)¹⁹⁾が指摘するように、陸上で南東～南風るとき、沿岸部の新木場から都北西部の練馬に向かって気温偏差が増大している。また、この気温偏差は風速が増すほど大きくなる。風速が増して海風が内陸へ侵入するほど、陸上気温が海上気温に近づくわけではなく、沿岸部の新木場では風速に依存せずほぼ一定で、東京や練馬ではむしろ差が大きくなっている点は興味深い。これは、以下に記すように、各地点において風速増大に伴う気温日変化の変動が異なるためだと考えられる。図-9に弱風日（海上風速5ms⁻¹未満）と強風日（5ms⁻¹以上）における新木場(a)、東京(b)、練馬(c)および湾上気温の平均日変化を示す。抽出条件は図-6と等しい。また表-1には図-9に対応する日較

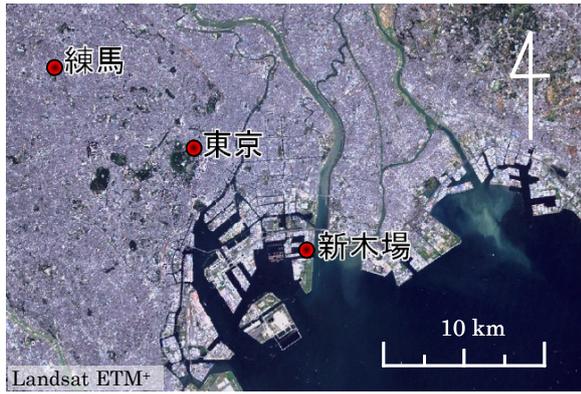


図-7 新木場・東京・練馬の位置図

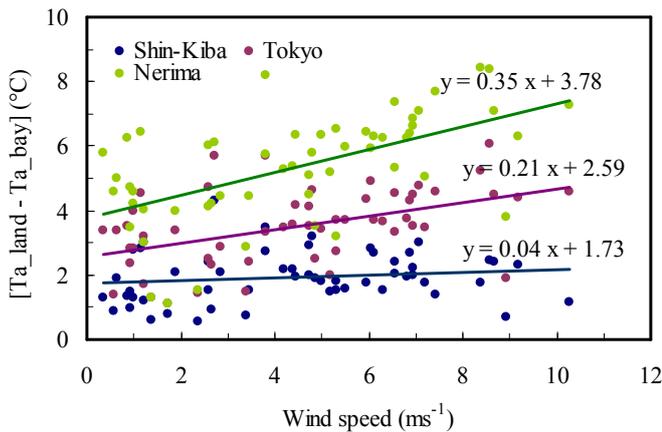
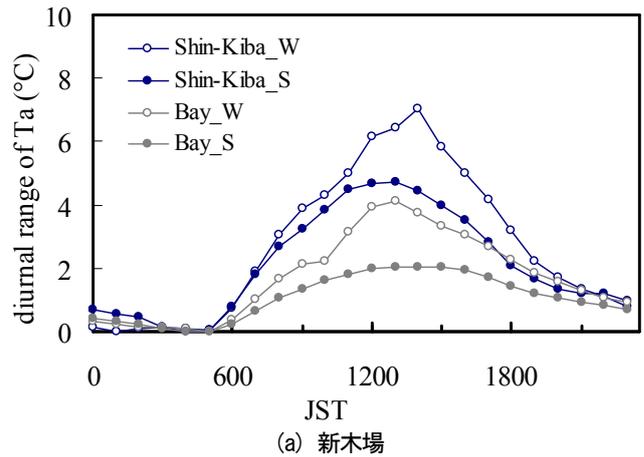


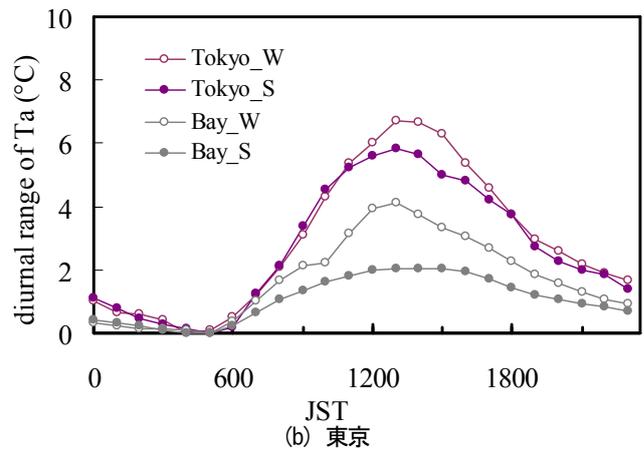
図-8 Summer modelにおける[Ta_land-Ta_bay]の風速依存性

差(ΔTa)を示す。海上気温については4. (1)でも述べたが、風速が強いほど ΔTa は小さくなり、弱風日と強風日の ΔTa 差は 2.0°C である。同様に、練馬を除く陸上気温も風速が強いほど ΔTa は小さくなり、その差は、新木場で 2.3°C 、東京で 0.9°C となる。新木場の ΔTa 差は東京湾におけるそれと大差なく、そのため図-8に示されるように[Ta_land-Ta_bay]が風速に依存せずほぼ一定となるものと考えられる。一方、東京では東京湾と比較して、風速が増したときの ΔTa の低下度は小さく、風速が増すほど[Ta_land-Ta_bay]が大きくなるという結果になる。練馬に至っては、 ΔTa の風速依存性は示されず、海風侵入による気温低減効果は見られない。

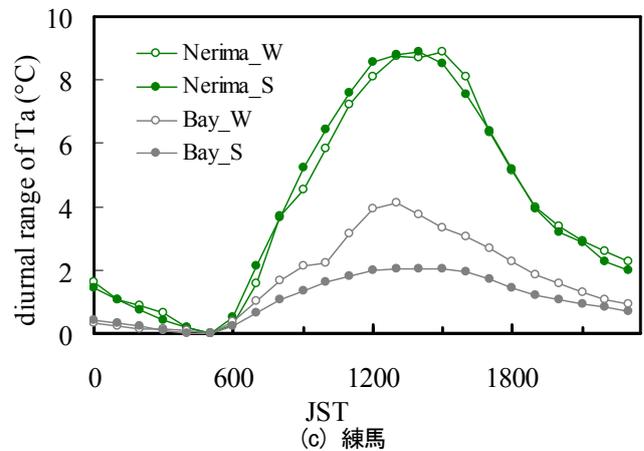
4. (1)で述べたように、夏季に南よりの風が強まるほど、東京湾SSTが低下し、大気熱を吸収する方向(顕熱が負)に働くことで、海上気温の上昇が抑制される。その冷涼な海風が内陸へ侵入することで、沿岸域の気温上昇は効率的に抑制されるが、沿岸から離れるにつれて陸面加熱の影響により徐々に海風冷却効果が減少し、沿岸(新木場)から約20km内陸の練馬では、その効果が及ばないことが示唆された。



(a) 新木場



(b) 東京



(c) 練馬

図-9 Summer modelにおけるTa_landの平均日変化

(a)新木場, (b)東京, (c)練馬.
各図中にはTa_bayの平均日変化も示す。
(記号の説明, 抽出条件は図-6と同じ)

表-1 図-9に対応した日較差 ΔTa

	ΔTa		[weak ΔTa - windy ΔTa]
	weak	windy	
Tokyo Bay	4.11	2.05	2.06
Shin-Kiba	7.06	4.72	2.34
Tokyo	6.70	5.85	0.85
Nerima	8.88	8.88	0.00

5. 結論

2006年11月から2007年9月の11ヶ月に渡って東京湾内の14地点において観測されたSSTおよびTaの直接連続測定結果から、海風の侵入が認められる夏季日中において、東京湾SSTとTaとの関係およびそれらが陸上大気に及ぼす影響を検討した。その結果、風速に依存して、以下のようなメカニズムで都市気温が変化することが考えられる。

- 1) 夏季に南よりの風が強まるほど、海中の成層化が弱くなり、東京湾SSTが低下する。
- 2) 東京湾が大気の熱を吸収する方向（顕熱が負）に働き、海上気温の上昇が抑制される。
- 3) 陸上と比較して冷涼な海風により、沿岸域の気温上昇が、海上気温の気温低減率と同程度に抑制される。
- 4) 内陸へ侵入するにつれ、陸面加熱の影響により徐々に海風冷却効果が減少し、その効果は、沿岸（新木場）から約10km内陸の東京では認められるが、約20km内陸の練馬までは及んでいない。
- 5) 結果として、風速が強まるにつれて沿岸からの水平気温勾配が強まる。

本研究により、東京湾海面温度変化が夏季日中の都市気温を低減させるうえで重要な要素であり、東京湾は沿岸部から約20km内陸の範囲において都市の気温上昇を抑制する効果を持つことが、現場観測結果より明らかとなった。

謝辞：本研究の実施にあたり、新日本環境調査(株)、第三管区海上保安部、東京湾アクアライン管理事務所、千葉港湾事務所にご協力頂いた。また、本研究は独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（代表：神田学）及び特別研究員奨励費（課題番号：19009173）による助成を受けた。記して深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) Flament, P., Firing, J., Sawyer, M. and Trefois, C. : Amplitude and horizontal structure of a large diurnal sea surface warming event during the Coastal Ocean Dynamics Experiment, *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, pp.124-139, 1994.
- 2) Yokoyama, R., Tanba, S. and Souma, T. : Sea surface effects on the sea surface temperature estimation by remote sensing, *Int. J. Remote Sens.*, **16**, pp.227-238, 1995.
- 3) Kawai, Y. and Wada, A. : Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: a review, *J. Oceanogr.*, **63**, pp.721-744, 2007.
- 4) Kawai, Y., Otsuka, K. and Kawamura, H. : Study on diurnal sea

surface warming and a local atmospheric circulation over Mutsu Bay, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, pp.725-744, 2006.

- 5) Yoshikado, H. : Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze, *J. Appl. Meteorol.*, **31**, pp.1146-1164, 1992.
- 6) 藤部文昭, 坂上公平, 中鉢幸悦, 山下浩史 : 東京23区における夏季高温日午後の短時間強雨に先立つ地上風系の特徴, *天気*, **49**, pp.395-405, 2002.
- 7) 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.
- 8) Fairall, C. W., Bradley, E. F., Godfrey, J. S., Wick, G. A., Edson, J. B. and Young, G. S. : Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature, *J. Geophys. Res.* **101**, pp.1295-1308, 1996.
- 9) Robinson, I. S. : Measuring the oceans from space: The principles and methods of satellite oceanography, Springer, 2004.
- 10) Kawai, Y. and Kawamura, H. : Study on a platform effect in the in situ sea surface temperature observations under weak wind and clear sky conditions using numerical models. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, pp.185-196, 2000.
- 11) Kawai, Y., Kawamura, H., Tanba, S., Ando, K., Yoneyama, K. and Nagahama, N. : Validity of sea surface temperature observed with the TRITON buoy under diurnal heating conditions, *J. Oceanogr.*, **62**, pp.825-838, 2006.
- 12) Kondo, J. : Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-Layer Meteorol.*, **9**, pp.91-112, 1975.
- 13) 環境省 : 気象観測データ (風速, 風向 ; 海ほたる), 2006年11月-2007年9月.
- 14) 八木宏, 灘岡和夫, 内山雄介, 日向博文 : 長期連続観測に基づく東京湾・鹿島灘・霞ヶ浦の表層水温年間変動特性の比較解析, *土木学会論文集*, No.656/II-52, pp.239-254, 2000.
- 15) Price, J. F., Weller, R. A., Bowers, C. M. and Briscoe, M. G. : Diurnal response of sea surface temperature observed at the long-term upper ocean study (34°N, 70°W) in the Sargasso Sea, *J. Geophys. Res.*, **92**, pp.14,480-14,490, 1987.
- 16) Soloviev, A. and Lukas, R. : Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool, *Deep-Sea Res. I*, **44**, pp.1055-1076, 1997.
- 17) Konda, M., Imasato, N., Nishi, K., Toda, T. : Measurement of the sea surface emissivity, *J. Oceanogr.*, **50**, pp.17-30, 1994.
- 18) 気象庁 : 気象庁月報 CD-ROM, 2007年5月-9月.
- 19) 三上岳彦, 安藤晴夫, 横山仁, 山口隆子, 石井康一郎, 塩田勉, 森島濟, 小島茂喜, 泉岳樹 : 東京都区内における夏季のヒートアイランドの時空間変動, *東京都環境科学研究所年報*, pp.11-17, 2004.

(2008. 9. 30受付)