

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	東京-練馬-埼玉ラインに見られる海風よどみ領域
Title	STAGNATION REGION OF SEA BREEZE FRONT ALONG TOKYO-NERIMA-SAITAMA LINE
著者	仲吉信人, 大久保洸平, Alvin C.G. Varquez, 神田学, 藤原忠誠
Author	Makoto Nakayoshi, kohei okubo, Alvin Christopher Varquez, MANABU KANDA
出典 / Citation	土木学会論文集B1（水工学）, Vol. 69, No. 4, pp. I_1741-I_1746
Citation(English)	, Vol. 69, No. 4, pp. I_1741-I_1746
発行日 / Issue date	2013, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2013 Japan Society of Civil Engineers.

東京一練馬一埼玉ラインに見られる 海風よどみ領域

STAGNATION REGION OF SEA BREEZE FRONT
ALONG TOKYO-NERIMA-SAITAMA LINE

仲吉信人¹・大久保洸平²・Alvin C.G. Varquez²・神田学³・藤原忠誠⁴

Makoto NAKAYOSHI, Kohei OKUBO, Alvin C.G. VARQUEZ, Manabu KANDA, and
Chusei FUJIWARA

¹正会員 工博 東京工業大学特任助教 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁴非会員 博(環境科学) 気象庁 気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

This paper analyzed the behavior of sea breeze (hereafter SB) penetration to urban area in Kanto. In order to analyze SB penetration, we proposed a new method for SB-front detection using very high-resolution-geostationary satellite images, or MTSAT-2 Rapid Scan, with 1 km-spatial and 5 min.-temporal resolution. From the images, the detailed behaviors of SB were successfully visualized. For the selected SB events, the penetrations to in-land from Tokyo bay and Sagami bay were discussed using the point data of AMeDAS and Atmospheric Environmental Regional Observation System (AEROS), and also a result from the meso-scale simulation, where the important urban effects were parameterized (e.g., actual aero-thermodynamic parameters, anthropogenic heat and vapor emission). Along Tokyo-Saitama line, SB stagnation occurred in every sea breeze event. The observed higher air temperature and convergence resulted in increased vertical mixing, leading to SB stagnation.

Key Words : Sea breeze front, Rapidscan, urban heat island, urban surface parameters,
Satellite images, Meso-scale simulation

1. はじめに

近年、東京湾海風による都市の冷却効果が期待されている。海風前線の挙動は、地表面幾何と密接に関係しており、海風侵入に及ぼす都市影響を評価することは重要と言える。

都市化と海風侵入遅延については、90年代以降、数値実験や観測から示唆されてきた。蒲生¹⁾は、大気汚染局、AMeDASの気温の上昇停止、もしくは下降時刻から海風前線位置を推定する手法を提案し、東京上空での“海風ブロッキング”効果を指摘している²⁾。Yoshikado and Kondo³⁾の観測、Yoshikado⁴⁾の数値計算も、都市による海風遅延を支持しており、ヒートアイランドに伴う都市の高温・低圧化と海風遅延の関係を考察している。都市の熱的効果に加え、近年では、下重ほか⁵⁾の数値計算に

より都市の空気力学的影響についても指摘されている。下重ほか⁶⁾は、建物GISから算出した修正粗度長を考慮した数値計算により、都市での降雨の強化を指摘し、その素過程として都市化による前線の停滞、遅延効果を指摘している。また、大和ほか⁶⁾は、AMeDAS、環境省大気汚染局物質広域監視システム(AEROS : Atmospheric Environmental Regional Observation System)、民間気象会社が観測する風向風速データを用いて海風前線を特定し、都市風下域での前線の停滞、及び前線と気温分布の関係について考察を加えている。

以上述べたように、都市化と海風挙動について、有益な知見が蓄積されてきた一方で、海風前線への都市影響を議論する上では、既往研究では以下の2点において改善を要する。

① 海風前線特定の時空間精度の向上

② 都市陸面モデルの向上を反映した数値解析

①について、AMeDASは、時間解像度は良いが（10分）、空間解像度が低い。また、AEROSは、東京近県についての空間解像度は悪くないが、時間解像度が1時間と低いため、前線同定に不確かさが残る。②に関して、Yoshikado⁴⁾の計算では2次元静水圧モデルが使用されているため、3次元の考察が十分でなく、かつ近年進展の著しい都市陸面モデルが考慮されていない。

本研究では、上記2つの問題を解消し、海風挙動と都市化の関係について、時空間的に詳細な議論を可能とする。まず、高解像度の衛星雲画像（ラピッドスキャン）を用いて海風前線を捉える手法を試みる。5-10分の時間間隔、1 km解像度というラピッドスキャンデータを利用することで海風前線の時間発展を詳細に追うことが可能となる。更に、人工排熱、運動量・熱粗度といった都市の熱空気力学的パラメータ全てを考慮し、海風前線を再現可能な都市気象モデル⁷⁾を用い、前線の遅延現象について考察を加える。また、ラピッドスキャン、最先端の都市気象モデルに加え、AEROS、AMeDASの風向風速、気温、湿度データを用いる従来の手法も利用し、都市化と海風挙動について多角的に解析する。

2. 目的とねらい

まず、観測データより、都市化と海風前線の内陸侵入の実態をより詳細に把握する。海風前線の同定には2つのアプローチを取る。一つは地上観測物理量の時系列データの変化から前線到着時刻を推定する従来の方法であり（以降、地点法と呼ぶ）、もう一つは、ラピッドスキャンによって捉えられる晴天積雲列の可視画像の時間発展から、前線位置を推定する方法を新たに試みる（以降、雲画像追跡法と呼ぶ）。両者の比較、整合性を確認した上で海風前線の時空間変動に迫る。さらに、海風前線の挙動を再現した都市気象モデルの結果を用い、その形成要因について議論する。

3. 解析手法

雲画像追跡法では、輝度値変化の大きいところを前線と捉え、各時刻の画像について前線位置を目視で同定し、その時間発展を解析する。また、上記方法で捉えた前線が、地上観測点を通過する際の風向、風速、温度、湿度の変化を調べ、地点法との整合性を確認する。

用いたデータの諸元について次節に示す。

(1) データ諸元

a) ラピッドスキャン

ラピッドスキャンは、日本付近の狭い領域をターゲッ

トとした静止衛星雲画像データであり、高い時空間解像度が特長である。5-10分の時間間隔で、1 km解像度の画像データが利用可能である。ただし、撮像時刻ごとに撮影位置にズレがあるため、解析に先立ち以下の位置補正を行った。輝度値の描画レンジを調整することで、陸と水域の境界が明確となる。陸水の境界が全画像で一致するよう位置調整し、それぞれの画像に対する調整量を、雲が明瞭に確認できるよう輝度値描画レンジを調整した各画像に適応した。

b) AMeDAS

気象庁による地上気象観測網であり、関東7都県では、気温、湿度、風向風速それぞれ、80、14、80個のデータが利用可能である。空間密度は低いが、よく管理され質の高いデータである。風速は、測定高度が統一されていないため、後述する方法で高度補正を行っている。

c) AEROS

環境省大気汚染局物質広域監視システムで統括されている地上気象データである。関東7都県で、気温・湿度、風速はそれぞれ、450、203、194個のデータが利用可能である。AMeDASに比べ高い空間解像度を有する反面、時間間隔が60分と粗い。また温度・湿度データは、欠損・異常値や、観測点周辺の局所的影響を受けていると考えられるデータが少なくない。欠損・異常データは除外し、また、周辺の局所影響を受けていると考えられるデータを棄却する目的で、以下の前処理を行っている。

- 領域を小ブロックに分割し、ブロック内のデータ数が閾値以上あれば、平均、標準偏差を計算する。
- 各ブロック内の地点データが、ブロック平均±標準偏差に含まれなければ棄却する。

ブロック平均の閾値は3を用い、海岸域を除く各ブロック内のデータ数が3以上となるようにブロックサイズを決定した（緯度経度それぞれ0.34度、0.4度）。

風速については、AMeDAS同様に高度補正を行っている（次節参照）。

(2) 高度補正

AMeDAS、AEROSの風速データは観測高度が統一されておらず、比較可能なものではない。そこで、対数則を用いた高度補正を行った(式(1))。

$$\frac{\kappa U_{ob}}{u_*} = \ln\left(\frac{H_{ob} - d}{Z_0}\right) \quad (1-a)$$

$$\frac{\kappa U_{cr}}{u_*} = \ln\left(\frac{H_{cr} - d}{Z_0}\right) \quad (1-b)$$

$$U_{cr} = U_{ob} \times \frac{\ln((H_{cr} - d)/Z_0)}{\ln((H_{ob} - d)/Z_0)} \quad (1-c)$$

ここで、 H_{ob} 、 H_{cr} はそれぞれ観測高度、補正高度を表し、 U_{ob} 、 U_{cr} は H_{ob} 、 H_{cr} での風速である。

高度補正には、Varques et al.⁷⁾により整備された1 km解像度の関東全域の運動量粗度 Z_0 、修正粗度長 d を用いた。但し、いくつかの観測点は、 H_{ob} が d よりも低いため、

対数則を適用できない．そこで，Kanda et al⁸⁾のLES計算による都市キャノピー内外の風速プロファイルを参考にし，以下を仮定した．

①対数則が成立する領域は， $10 \leq (Z - d)/Z_0 \leq 300$ ．

② $(Z - d)/Z_0$ が10未満の高度をキャノピー層高度 H とし， H 以下では風速を一定とする．

H ， H_{ob} ， H_{cr} ， Z_0 ， d の大小関係から4ケースに分類し，それぞれ下記の補正を行った．

a) ケース1： H_{ob} ， H_{cr} とも H より低い

$$U_{or} = U_{ob} \quad (2)$$

b) ケース2： H_{ob} ， H_{cr} とも H より高い

通常対数則を用いた高度補正を行う．

$$U_{cr} = U_{ob} \times \frac{\ln((H_{cr} - d)/Z_0)}{\ln((H_{ob} - d)/Z_0)} \quad (3)$$

c) ケース3： H_{ob} が H より高く， H_{cr} が H より低い

H の中では風速一定と仮定し対数則による補正を行う．

$$U_{cr} = U_{ob} \times \frac{\ln((H - d)/Z_0)}{\ln((H_{ob} - d)/Z_0)} \quad (4)$$

d) ケース4： H_{ob} が H より低く， H_{cr} が H より高い

H の中では風速一定と仮定し対数則による補正を行う．

$$U_{cr} = U_{ob} \times \frac{\ln((H_{cr} - d)/Z_0)}{\ln((H - d)/Z_0)} \quad (5)$$

本解析では， H_{cr} として25 mを設定した．関東7都県の全データについて，ケース1から4への分類個数はそれぞれ，35，321，2，143であった．図1に2011年9月14日16時の風速データについて，高度補正前後の差分を示す．高度補正により風速が強くなる地点が多い．但し，東京都はケース1に分類されるデータが多く，補正前後で風速が変化しない箇所がある．また，千葉，神奈川のいくつかの観測点では，観測高度が補正高度より高いため，補正後の風速が低下する地点が存在する．

(3) 海風事例日の抽出

ラピッドスキャンを用い，2011年7月から9月の期間の9時～17時の全画像で，東京湾，相模湾から北上する雲列が明瞭に確認できる日を海風日として抽出した．抽出された日は，7月11日，9月10日，9月14日，9月15日の4事例である．なお，蒲生²⁾を参考に，東京大手町のAMeDASデータを用い抽出した海風日に，4事例とも含まれていたことを付記しておく（東京大手町データを用いた抽出条件：降水量ゼロ，日照時間が7時間以上，日平均風速が南西から南東の間）．

4. 結果と考察

ここでは，抽出した海風日の内，2011年9月14日の事例に焦点を当て，地点法と雲画像追跡法の比較・整合性の検証，及び海風前線の時空間分布について考察を加え

る．海風前線の開始時刻，最終到達地点などは事例ごとに異なるが，以下に行う議論は，全ての事例に当てはまることを特筆しておく．

(1) 地点法と雲画像追跡法の整合性

図2に，ラピッドスキャンの雲画像，及び雲画像追跡法により同定した海風前線の時系列を示す．図2では，雲量の時間変化を比較出来るように輝度値の描画幅を揃えてある．そのため，薄雲が関東上空に懸かる12時までは前線の境界が少しぼやけている．東京湾，相模湾から北上する前線は赤線で，その他の前線については紫線で示してある．図3には，東京，練馬，埼玉のAMeDAS地点データの時系列を示す．図3の破線領域は，雲画像追跡法による海風前線がそれぞれの観測地点に到達した時間帯を示している．3地点とも，前線の到達時間帯に，温度の低下または上昇停止，湿度の上昇，風速の増加，風向の急変（南風モードへの推移）が確認される．

次に雲画像追跡法と地点法の空間的な対応について確認する．図4は，AMeDAS，AEROSの風速データに雲画像追跡法より同定した前線位置を重ねたものである．海風前線の境界付近で風向風速の明確な変化が確認される．すなわち，前線より風下では，南風モードで比較的速い風速となっているが，風上域では風速は弱く風向もバラつきが大きい．なお，前線風下域でも東京付近では常に風速の弱い領域が確認されるが，それらは高層ビル群が立ち並び運動量粗度が高い領域と対応しており，都市の空気力学的抵抗効果を表していると考えられる．関東の運動量粗度マップについてはVarquez et al⁷⁾を参照されたい．次に，絶対湿度の時間変化と海風前線位置の関係をしてみる（図5）．図5より，海風前線位置と絶対湿度の上昇地点が良く対応していることが確認される．以上より，雲画像追跡法による海風前線の同定は，地点法と何ら矛盾しないことが示された．また，地点法よりも詳細に，海風前線の時空間分布を追跡出来る雲画像追跡法の有用性が示された．

(2) 東京ー埼玉ラインでの海風遅延

雲画像追跡法の有用性が示されたことを受け，本手法

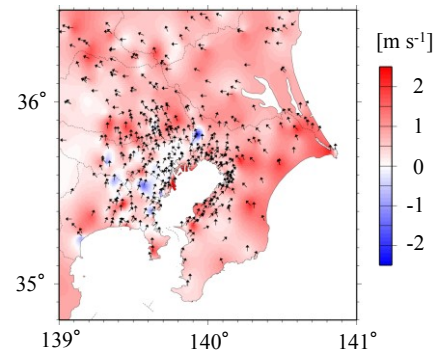


図1 AMeDAS，AEROS風速データにおける高度補正前後の差分（2011年9月14日16時）

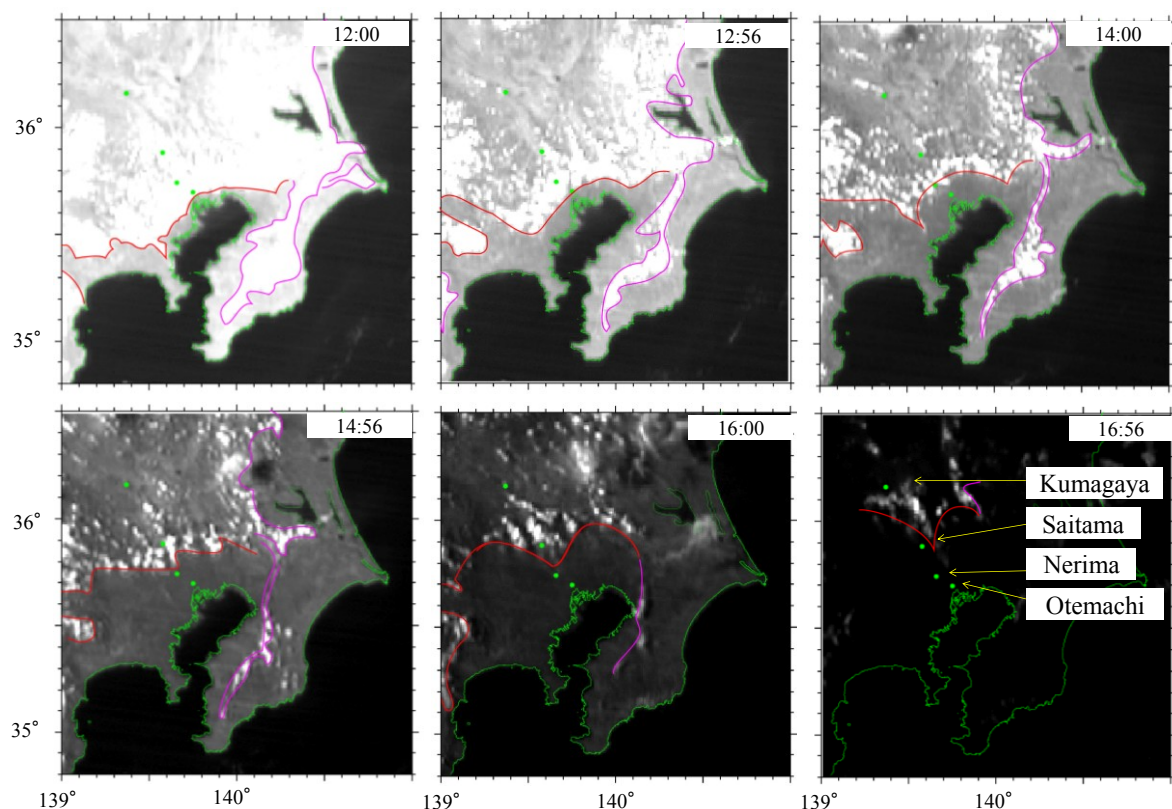


図2 雲画像追跡法より特定された海風前線位置とラピッドスキャン画像

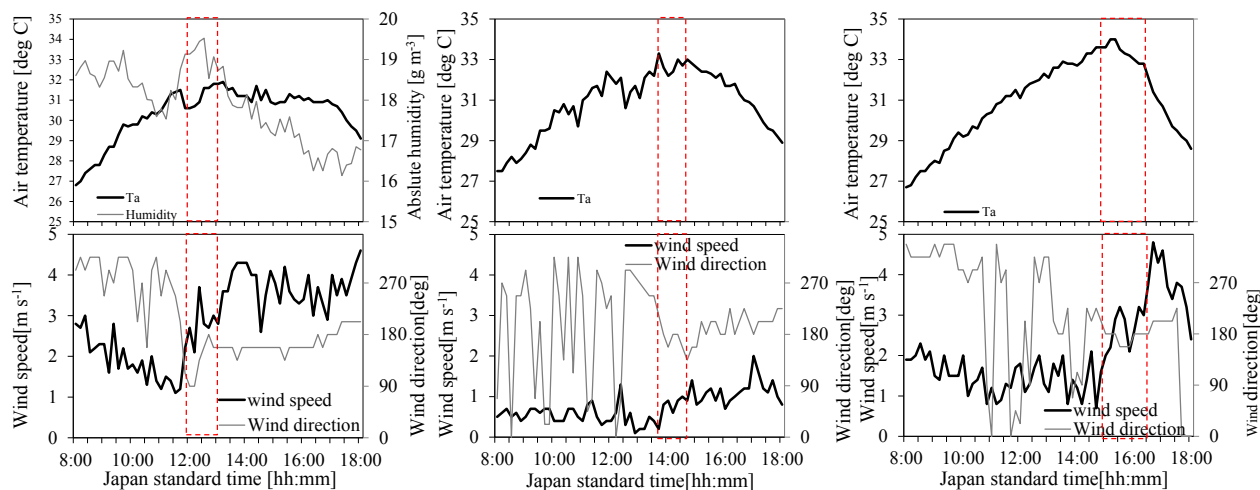


図3 雲画像追跡法より特定した前線到達時間と気温、湿度、風向、風速の変化

による前線の時空間変化について考察を加える。

図2から、12時頃に東京湾、相模湾から入ってくる海風は、時間の経過とともに内陸へと侵入している様子が確認される。相模湾海風の勢力が強いためか、15時頃には両者はほぼ横並びの侵入位置となる。その後も東京湾海風、相模湾海風ともに北上を続けるが、練馬付近では、海風前線が取り残されていく（例えば、16時の画像）。17時の時点でも、練馬、埼玉付近で海風前線が停滞し、くさび形の前線を形成している様子が確認される。練馬、埼玉付近でのくさび形前線の形成は、他の事例全てにおいて確認されている。これは、大和ほか⁶⁾が指摘した前線停滞位置とも矛盾しない。前線停滞域でのAEROS、

AMeDASの風向風速、温度分布に注目すると（図6）、くさび領域では風速低下、及び風の収束が生じ、また高温化していることが確認される。なお、14時ごろまで確認される三浦半島での前線停滞は、東京湾海風と相模湾海風の衝突により形成されるもので、本項で焦点を当てる東京一埼玉の都市影響による前線遅延とは本質的に異なることに注意されたい。

5. 議論

観測データから、東京—練馬—埼玉ラインで海風が遅

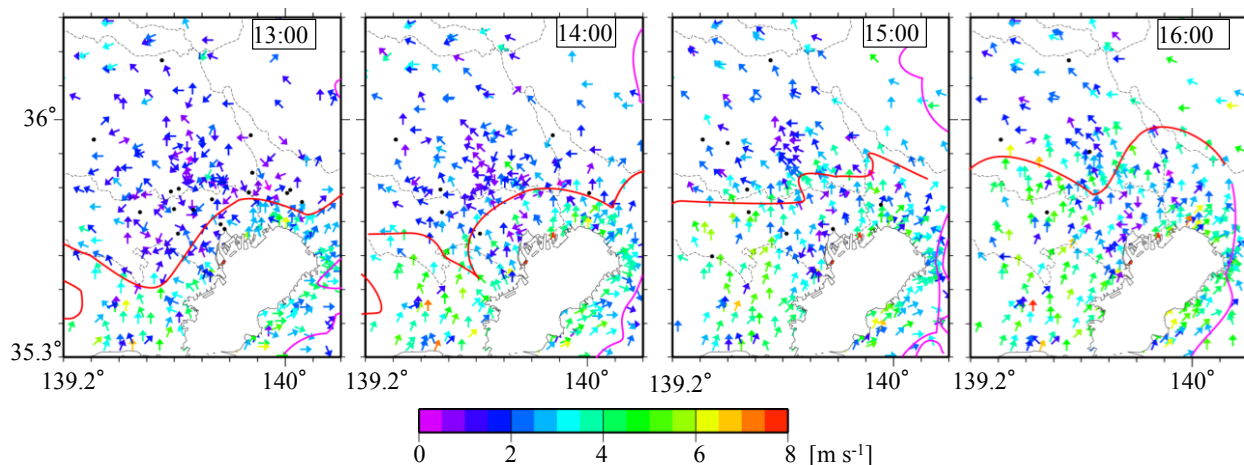


図4 雲画像追跡法による同定された海風前線と, AMeDAS, AEROS風速データ空間分布

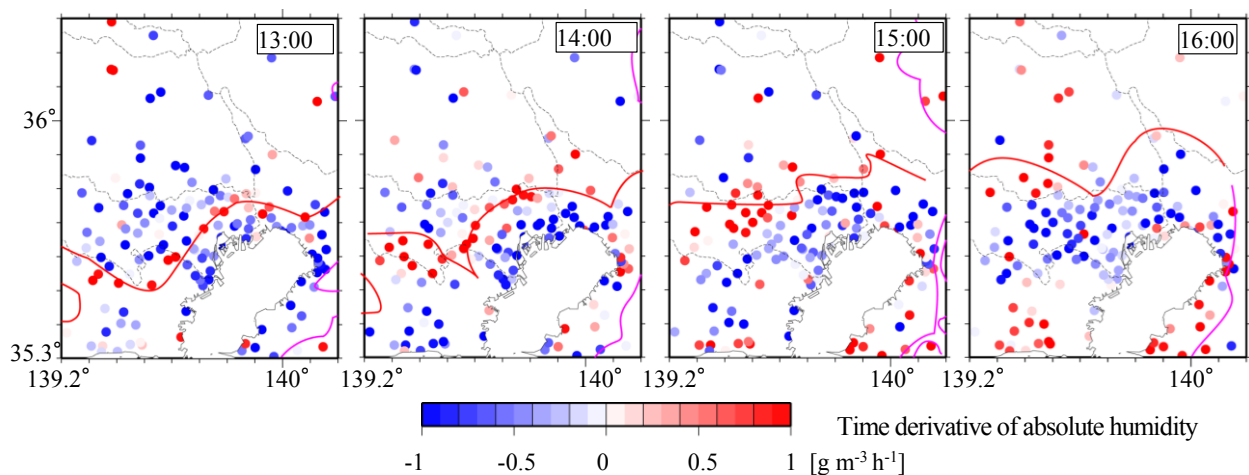


図5 雲画像追跡法により同定された海風前線と, AMeDAS, AEROS絶対湿度の時間変化

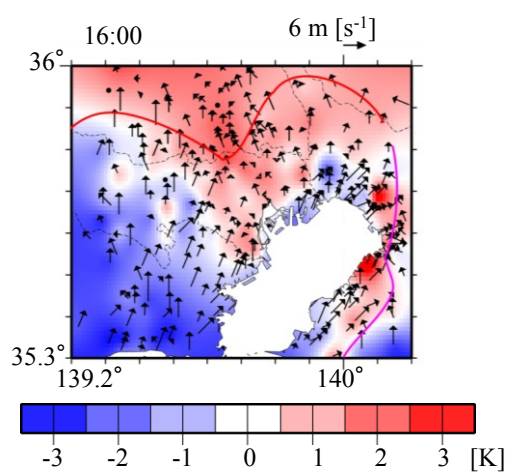


図 6 雲画像追跡法による海風前線位置と気温の空間偏差及び風速ベクトル

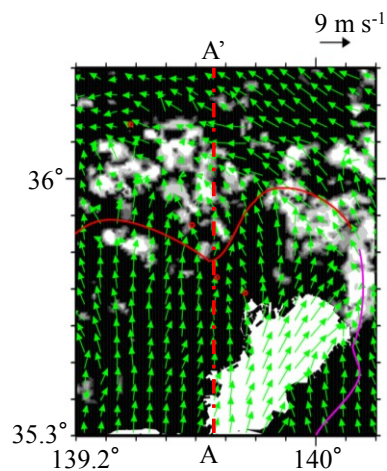


図 7 数値計算による16時時点での水平風速ベクトルと雲, 及び観測より同定した海風前線位置.

延し, くさび形の停滞領域を形成すること, そこでは, 風速低下, 風の収束, 気温が高温化していることが認められた. ここでは都市効果を考慮したメソ気象モデル⁷⁾を用い, くさび形遅延の形成要因について議論する. 使用したモデルについてはVarquez et al.⁷⁾に詳しい. 計算開

始時刻を2011年9月12日とし, 初期値境界値として気象庁メソ数値予報モデル (MSM) 出力値を使用した. 図7に, 数値計算で解像された雲列, 及び雲画像追跡法より同定した前線位置を示す. 雲マーカーとして全天日射の減衰率を用いた. 練馬, 埼玉近辺での前線停滞域を良く

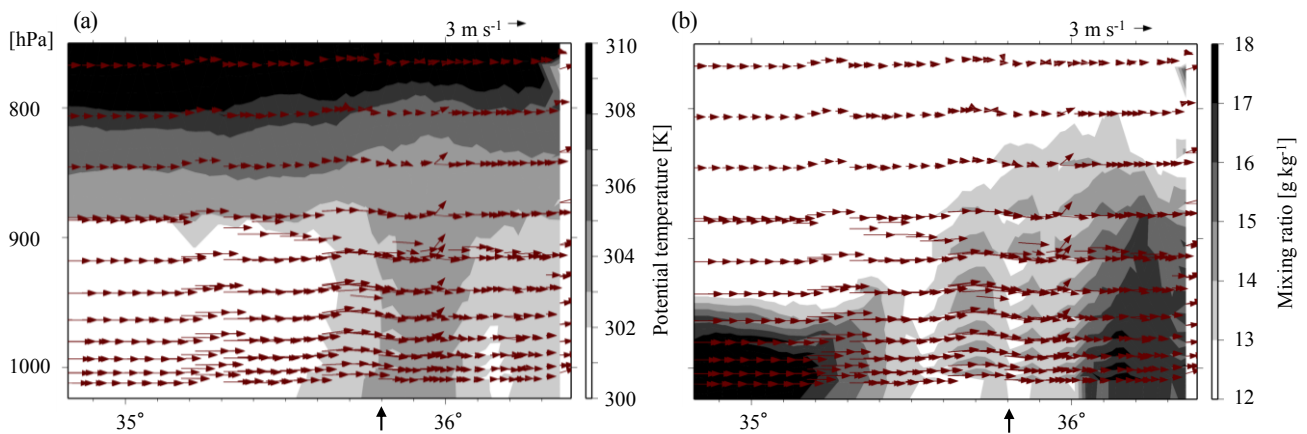


図8 図7中のA-A'断面における温位と混合比及び風速ベクトル。矢印は図5中の前線位置に対応

再現している。風速ベクトルに注目すると、前線停滞領域で収束する風系場が確認出来る。図7中のA-A'断面における温位、混合比の鉛直断面を見ると（図8(a), (b)）、前線停滞領域に対応する箇所で、800 hPa当たりまで到達する強い上昇流、2 K程度の温位上昇、大気境界層高度の上昇、前線部での混合比の不連続な変化を確認できる。以上のことより推測するに、前線停滞領域での高温化・低圧化に伴う水平圧力勾配が、水平方向の運動量を駆動し、収束域を形成する。そこでは、水平方向の運動量が鉛直混合に使用され、境界層高度を高く、また、前線を停滞させていたと考えられる。都市地表面幾何による運動量粗度の増大も、前線停滞と鉛直混合に寄与している可能性も併せて指摘する。

6. 結論

本研究の結論を以下に記す。

- (1) 高解像度衛星画像を用いた雲列の移動から海風前線を特定する雲画像追跡法を提案した。雲画像追跡法は、従来の地点法の結果と良く対応し、地点法よりも詳細な時空間情報が得られる点で、雲画像追跡法の有用性が確認された。
- (2) 東京湾海風と相模湾海風の前線の時間発展から、東京一練馬一埼玉ラインで海風がくさび形に停滞する現象を明らかにした。くさび領域では、風速低下、風の収束、気温が高温化していることを観測データから確認した。
- (3) 都市効果を考慮したメソ気象モデルの計算より、くさび型の前線停滞領域では、観測結果と同様に、気温の高温化、風の収束が生じていることを確認した。また、高温化・低圧化に伴う水平圧力勾配が水平方向の運動量を駆動し、前線停滞部で収束することで強い鉛直混合をおこし、前線を停滞させていた可能性を指摘した。

謝辞：本研究は、文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム（代表：飯塚悟）」、科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号：21360233）及び、科学技術戦略推進費「気候変動に対応した新たな社会の創出に向けた社会システムの改革プログラム」による支援を受けた。また、本研究は航空気象観測業務に資するものであり、ラピッドスキャンデータについては、気象庁から提供を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 蒲生稔, 海風前線位置を読み取る方法の比較, 公害, vol. 26, p31-39, 1991
- [2] 蒲生稔, 混合層と海風域の境界, 公害, vol. 23 p37-46, 1988
- [3] Yoshikado, H., and Kondo, H. : Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 48, pp. 389-407, 1989
- [4] Yoshikado, H.,: Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 31, pp. 1146-1164, 1992
- [5] 下重亮, 仲吉信人, 神田学: 都市要因を考慮した夏季関東における都市型集中豪雨の多事例解析, 水工学論文集, 第54巻, 349-354, 2010
- [6] 大和広明, 三上武彦, 高橋日出男, 夏季日中における首都圏のヒートアイランド現象に海風が与える影響, 地学雑誌, vol. 120, pp. 325-340, 2011
- [7] Varquez, A.C.G., Kanda M., Nakayoshi M., Adachi S., Nakano K., Yoshikane T., Tsugawa M., Kusaka H.: Tokyo localized rainfall simulation using improved urban and sea parameterized WRF-ARW. *Proceedings of the 8th international conference for urban climate*, 79 (4 pages), August 6-10, 2012.
- [8] Kanda M., Ingaki A., Miyamoto T., Cryscha M., and Raasch S.: New aerodynamic parameterization for real urban surfaces, *Boundary-Layer Meteorology*, 2012 (submitted)

(2012. 9. 30受付)