東京－熊谷間における 夏期東京湾海風進入時間の長期年代変化

THE INTERANNUAL VARIATION OF THE SEA BREEZE ARRIVAL TIME AT TOKYO AND KUMAGAYA IN SUMMER

寝占祐太¹・神田学²・仲吉信人³
Yuta NEJIME, Manabu KANDA, and Makoto NAKAYOSHI

¹ 学生会員 東京工業大学 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 正会員 工博 東京工業大学教授 理工学研究科工学専攻 (同上)

³ 正会員 工博 東京理科大学講師 理工学部土木学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

The impact of urbanization to sea breeze behavior has been one of the emerging topics due to its mitigation effect on urban heat island. This research is focused on the long term change of sea breeze arrival time during 1960s and 2000s by using regular observation records from Japan Meteorological Agency. The study areas are Otemachi and Kumagaya. We tried to analytically separate the synoptic/global scale effect and urban/local scale effect on the sea breeze arrival time as mentioned below.

First, the sea breeze arrival time was successfully predicted by using multiple regression in which only the synoptic scale factors were used as explanatory variables. Then, the regressed coefficients were expected to mostly reflect the urban/local effect. By exchanging the regressed coefficients between 1960s and 2010s with the identical synoptic scale input of 1960s or 2010s, or by exchanging the synoptic scale inputs between 1960s and 2010s with the identical regressed coefficients of 1960s or 2010s, it was revealed that the synoptic effect (global warming) accelerated the sea breeze while the urbanization delayed it.

Key Words : Sea breeze approach time, Regular observation, Interannual variation, Multiple regression

1. はじめに

近年、埼玉県熊谷市や群馬県館林市等の関東内陸地において、夏場に最高気温の更新や猛暑日が続くことが問題視されている。その要因の一つとして、首都圏の開発により、海風の内陸進入が遅れ、海風による冷却効果が効きにくくなってきている可能性が指摘されている。

海風進入挙動と都市化の関係については、観測や実験により様々な議論がある。蒲生¹⁾は、地点管轄データの気温上昇停止線から海風前線位置の特定を行い、神田²⁾や Kitayama, H³⁾は、風向や気温の変化から海風が内陸へ進入していく様子を確認している。大和⁴⁾は、海風の内陸への進入による気温の変化から、都市効果に伴う内陸地の高温化を議論している。そして、蒲生⁵⁾は都市上空での強い混合層による“海風ブロッキング”効果から、都市上空

での海風遅延を指摘し、Yoshikado, H.⁶⁾は、数値解析から都市部の高温低圧化による海風遅延を指摘している。さらに仲吉⁷⁾は、雲画像から海風前線を同定する手法より、Kusaka⁸⁾や神田⁹⁾はシミュレーションの結果より、都市上空での海風遅延を指摘している。一方で仲野¹⁰⁾は、都市高温化による海上との気温差の増大が、むしろ東京湾沿岸部における海風進入を早めている可能性を示唆している。

ところで、海風は都市影響だけでなく、地球温暖化といった総観場の気候変動影響も受けているはずであるが、既存の研究はいずれも対象とするある年代の海風挙動に対する都市影響の可能性を指摘しているだけであり、海風進入挙動の長期年代変化について議論がされていない。また、長期実測データから海風進入挙動が把握できたとしても、そこから、同時進行している気候変動と都市化の寄与を分離することは容易ではない。

海風挙動に及ぼす気候変動と都市化の影響を分離

する上で、シミュレーションは強力な手段の1つであるが、まずは長期データ解析により実態把握を行うことが重要であろう。

そこで本論の目的は2つである。第1に、1960年代と2010年代の観測記録から、東京ー熊谷間の夏季東京湾海風進入時刻の年代変化を把握することである。第2に、重回帰分析により海風進入時刻の定量化を行い、それを利用して都市化（地表面影響の年代変化）と気候変動（総観気象条件の年代変化）の海風への影響を分離して議論することである。

2. 解析手法

(1) データ諸元

本研究では、気象庁の観測データを用い、大手町と熊谷での海風進入時刻に関して議論した。解析対象期間は、1965年～1976年と2002年～2013年の7月～9月である。大手町に限っては、十分な解析対象日があったため、1965年～1969年と2009年～2013年の夏季5年のみ用いた。以後、過去の解析対象期間を1960年代、近年を2010年代と称す。なお、1960年代のデータは自記記録データであるため（図1）、解析に先立ち自記記録線の位置情報を数値情報へと変換した。両年代の代表的な気象条件を表1に表しておく。変数の詳細は3.3章に記載している。

(2) 海風進入特定方法

まず、海風が発生しやすい日を抽出した。抽出条件は1)日照時間が7時間以上、2)降雨無し、3)日最大平均風速発生時間の風向が、大手町で南東～南南西・熊谷で東南東～南南東、である。

次に海風進入時刻を特定するパラメータとして、蒲生⁵⁾や神田ら²⁾を参考に、風速・風向・気温・比湿を用いた。比湿の上昇時間に着目し、その時における風向や風速上昇、気温上昇の低減等を参考に、海風進入時刻を決定した。図1は自記記録データの風向記録である。9時から16時まで南南西を中心とする風が吹いている事がわかる。

図ー1 1960年代の自記記録データ（風向）

3. 結果

本章では、まず大手町と熊谷における海風進入時刻の年代差について考察し、続いて海風進入に及ぼす要因について議論する。更に、海風進入時刻の定量化を行い、それを利用して、都市化（地表面条件の年代変化）と気候変動（総観気象条件の年代変化）の海風への影響を分離して議論する。統計的有意性についてはF検定・T検定を用いて確認をした。

(1) 海風進入時刻

2.2章の手法を基に大手町と熊谷の海風進入時刻を特定した。午前中に大手町で海風進入が認められた場合のみを解析対象日として抽出した。大手町で海風進入が特定された日数は、2010年代に123日、1960年代に69日であった。熊谷では、2010年代に52日、1960年代に61日であった。図2は、両年代の大手町における海風進入時刻の頻度分布である。分散はあるが、概ね9時から11時の間に海風進入が発生していることが分かる。2010年代では8時代の早い時間にも海風進入が発生している。但し、平均海風進入時刻は2010年代が10時で、1960年代が10時1分とほぼ変わらないという傾向が見られた。

図3に、両年代の熊谷における海風進入時刻の頻度分布を示す。1960年代は14時前後に、2010年代は15時前後に山のピークがあることが分かる。海風の平均進入時刻は、1960年代が14時10分、2010年代が14時45分である。つまり、2010年代は1960年代に比べて海風進入が30分程度遅くなっている傾向にあり、T検定の両側検定で危険率2.3%の統計的有意差も確認されている。

具体的にどのくらい海風遅延が発生しているのかを表したグラフが図4である。図4は、熊谷に海風進入が認められた日において、海風が大手町から熊谷までの進入に要した時間の頻度分布を表したものである。図4より2010年代は1960年代に比べて、海風進入が遅くなっている傾向が見て取れる。平均時間は、2010年代が4時間31分、1960年代が4時間9分と、2010年代は1960年代に比べて平均して20分ほど海風が進入に時間を要している結果になり、危険率2.5%でその統計的有意差も確認されて

表ー1 総観気象条件（気候）の比較
{地衡風南東成分(U)に対応する気圧勾配、日平均気温(T_{ave})、気温の日変化量(ΔT)、全日射量(Q)}

	$U(\text{hPa})$	$T_{ave}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$Q(\text{MJ}/\text{m}^2)$
1960年代	0.052	24.79	5.81	17.28
2010年代	0.066	26.26	5.94	22.64

図-2 大手町における海風進入時刻の頻度分布

図-3 熊谷における海風進入時刻の分布

図-4 大手町ー熊谷間の海風進入の時間差

いる。これらの結果より、現代において海風遅延が発生しているということが明確になった。

(2) 海風進入時刻と気象要因

海風は、地表面温度と海表面温度の差によって生じる気圧差により発生している事は既知の事実である。太陽による地表面加熱効果、すなわち全天日射量が多い程海風を強め、内陸への進入を早める駆動力となっているのではないかと考えた。

図5は、大手町における海風進入時刻と日全天日射量を示したものである。両年代ともに全天日射量が多い程、海風進入時刻を早める傾向があるように見て取れる。図6は、熊谷まで海風が進入に要した時間と日全天日射量を示したものであるが、2変数の間に特徴的な傾向は見られない。従って全天日射増加による圧力低下は、都市部への海風進入時刻を早める可能性があるが、都市部（大手町）における大きな人工排熱の存在は、都市部と内陸部（熊谷）の圧力勾配を弱めて海風を都市部に留めようとするため、熊谷への海風到達を早めるものではないという可能性が示唆される。

図-5 大手町の海風進入時刻と日全天日射量

図-6 大手町ー熊谷間の海風進入時間差と日全天日射量

また中川らは、海風進入時刻を決定する大きな要因の1つとして地衡風を挙げている．そこで地衡風影響が海風進入時刻に対してどのように影響しているのか、本論でも議論する事とした．熊谷における東京湾海風の進入方角が南東であるため、南東から北西に向けて気圧勾配が負の傾きを取るように取ったもの地衡風南東風成分(U)とした．気圧勾配は3点の気象官署（網代・銚子・前橋）の海面更正気圧を用いて、その単位距離 (km) 当たりの気圧場 (hPa) より算出した．図7に、大手町における海風進入時刻と U を示す． U が大きい程海風進入時刻を早める傾向が見られる．一方熊谷までの海風進入時間と U を比べると、2010年代において、 U が大きい程、海風が早く熊谷まで進入する傾向にある可能性が指摘される．

(3)重回帰分析による比較

海風遅延に対する都市化の影響を調べるために、それぞれの年代において重回帰分析を行った．中川ら¹⁾を参考に、説明変数として総観気象条件を代表するような、① T_r ：日出時刻、② U ：地衡風の南東成分に対応する気圧勾配 (hPa)、③ T_{ave} ：日平均気温(℃)、④ ΔT ：気温の日変化量(℃)、⑤ Q ：1日の積算全天日射量(MJ/m²)、⑥ R ：前日降雨量(mm)を用いた．日平均気温、気温の日変化量に関しては、都市影響が含まれないよう、勝浦と銚子の地方気象台データを、全天日射量に関しては、東京管区気象台のデータを用いることとした．なお、海風進入時刻は日出時刻による効果大きいという事を中川ら¹⁾が示しているので、本論では海風進入時刻と日出時刻の差を被説明変数として重回帰式の係数 a_n と切片 c を導いた(表2)．重回帰式を次のように表す．

$$T_p = T_r + a_1 \times U + a_2 \times T_{ave} + a_3 \times (\Delta T) + a_4 \times Q + a_5 \times R + c$$

実際の海風進入時刻は、都市条件や総観気象条件により決定されるため、重回帰式から推定される海風進入時刻(T_p)も同様に、都市条件と総観気象条件により決定されると考えられる．重回帰分析により、様々な総観気象条件パラメータを説明変数とした重回帰式が決定された．そのため、重回帰式における各係数は、都市条件の影響が反映されたもので

図ー7 大手町における海風進入時刻と地衡風 (U)

図ー8 大手町ー熊谷間の海風進入時間差と地衡風 (U)

あると考えることができる．

従って、一方の年代の気象データを両年代の重回帰式に代入することで、海風進入時刻に対する都市影響が抽出される．つまり、海風に対する都市化の影響のみの議論が可能となる．逆に、一方の重回帰式に対して両年代の総観気象データを代入することで、海風に及ぼす気候変動影響を比較することが出来る．

a) 大手町の場合

図9は、都市影響を比較したものである．1960年代の海風進入日の総観気象条件を、両式(1, 2)に代入して推定される海風進入時刻を縦軸に、実際の海風進入時刻を横軸にとった．また青点や青線は、それぞれ1960年代の推定海風進入時刻とその傾向をとったもので、赤点・線はそれぞれ2010年代のものである．図9における点線に着目すると、1960年代の

表ー2. 重回帰式における各係数

	式番号	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	c
大手町(1960s)	1	-3.8×10^{-1}	-5.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	8.3×10^{-4}	-4.8×10^{-4}	3.3×10^{-1}
大手町(2010s)	2	-2.1×10^{-1}	-6.9×10^{-3}	5.2×10^{-3}	2.4×10^{-4}	6.5×10^{-4}	3.7×10^{-1}
熊谷(1960s)	3	1.1×10^{-2}	-7.1×10^{-3}	-3.8×10^{-3}	-8.4×10^{-4}	3.3×10^{-3}	6.1×10^{-1}
熊谷(1960s)	4	8.2×10^{-2}	-4.3×10^{-3}	1.4×10^{-2}	-2.9×10^{-3}	3.5×10^{-4}	4.8×10^{-1}

図-9 1960年代の観測値を両年代の回帰式に代入して推定される海風進入時刻と観測時刻との比較（大手町）
（都市影響の比較）

図-11 1960年代の観測値を両年代の回帰式に代入して推定される海風進入時刻と観測時刻との比較（熊谷）
（都市影響の比較）

気候条件において、2010年代の都市条件であると仮定した場合の海風進入時刻（赤）は、1960年代の都市条件における海風進入時刻（青）よりも、平均的に遅くなる傾向にある事が分かる。2010年代の気候条件でも同様の傾向が見られ、危険率 1%以下の統計的有意差も確認された。つまり、都市化によって海風進入が遅くなる傾向にある事がわかる。

一方で図 10 は、気候変動を比較したものである。1960年代の都市条件（式 2）において、両年代の海風進入日における総観気象条件から推定される海風進入時刻を縦軸、両年代の実際の海風進入時刻を横軸にとったものである。図 10 の点線に着目すると、1960年代の都市条件における 2010年代の気候条件での海風進入時刻（赤）は、実際の海風進入時刻よりも早まる傾向にあるといえる。1960年代の都市条件においても同様の傾向が見られ、危険率 1%以下の統計的有意差も確認された。つまり気候変動によって海風進入が早められる傾向にある事がわかる。

以上のことから、大手町において、気候変動による海風進入が早まる事と都市化による海風遅延の両

図-10 両年代の観測値を 1960 年代の回帰式に代入して推定される海風進入時刻と観測時刻との比較（大手町）
（気候変動の比較）

作用が起こっていることが分かった。そして両方が作用した結果、両年代の平均海風進入時刻に差が見られなかったという事が考えられる。

b) 熊谷の場合

熊谷にも大手町と同様の手法を用いて議論する。

図 11 は都市影響を比較したもので、1960年代の気象観測データを、両年代の回帰式(3, 4)に代入して推定された海風進入時刻と実際の海風進入時刻をプロットしたものである。大手町において都市影響を比較した図と同様に 2010年代の海風進入時刻（赤）は 1960年代（青）に比べて遅くなる傾向にある事が分かり、危険率 1%以下の統計的有意差が認められた。1960年代の観測データを両式(3, 4)に代入したのも同様の傾向であった。従って、都市化により海風遅延が起きているといえる。

一方で気候変動を比較したものに関しては、危険率 5%以下の統計的有意差が確認出来なかった。

また、図 9 と図 11 の 2010年代の都市条件により推定される推定海風進入時刻の傾向（赤線）に着目すると、大手町（図 9）に比べて熊谷（図 11）では海風遅延が大きくなっていることが分かる。以上の点から、熊谷のような関東内陸部における海風進入時刻は、気候変動の影響をあまり受けず、海風の進入過程における都市化の影響が大きく寄与しているということが分かった。

4. 議論

本論では、観測記録から海風進入時刻の年代変化について把握し、都市化と気候変動に分けて、1960年代と 2010年代の海風進入時刻の違いについて論じてきた。ここでは気候変動（総観気象条件の年代変化）と都市化（地表面影響の年代変化）の 2つの要因について焦点を当て議論していくことにする。

表－3 重回帰式の各変数の t 値

	大手町		熊谷	
	2010s	1960s	2010s	1960s
$U(\text{hPa})$	-2.1	-2.8	0.41	0.09
$T_{ave}(\text{℃})$	-3.2	-2.5	-1.5	-1.9
$\Delta T(\text{℃})$	1.3	0.74	2.2	-0.95
$Q(\text{MJ/m}^2)$	0.18	0.52	-1.1	-0.40

まず気候影響について議論する．表 3 は重回帰式における各変数及ぼす海風進入時刻への寄与度を表したものである．大手町において両年代ともに地衡風と日平均気温の寄与が大きいことが分かる．また，重回帰式における係数(表 2)を見てみると，地衡風が大きい程，また平均気温が高いほど海風進入時刻が早められる傾向にある事が分かる．熊谷においても日平均気温の寄与が大きく，1960 年代に比べ 2010 年代では 1.5 度程度の平均気温の上昇が見られる(表 1)．即ち，地球温暖化が海風進入時刻を早める傾向にあるといえる．

一方で都市化により海風遅延が確認されたが，都市化による影響として大きく 2 つが考えられる．都市開発に伴う土地利用の変化と人工排熱の増大である．既存の研究でも指摘されている通り，前者は Kusaka ら⁸⁾や神田⁹⁾の土地利用パラメータの違いによる感度分析により，後者は蒲生⁵⁾の“海風ブロッキング”効果である．とりわけ Kusaka ら⁸⁾の，同一気候条件の下で異なる年代の土地利用データを用いたシミュレーションでは，関東内陸部で海風進入遅延が 2 時間という大幅な遅延が確認されている．だが，本研究の観測データ解析によると，平均して 30 分程度の遅延であった．これらの事から，海風に対する都市影響を議論する際には，都市化による影響（地表面影響）だけに着目するのではなく，総観場の気候の影響も考慮する事の必要性が確認された．

5. 結論

本研究の結論は以下の通りである．

- (1) 1960 年代と 2010 年代の気象観測データを解析することで，海風進入時刻の年代変化が特定できた．それにより，海風に対する都市化の影響の議論を明確に行うことを可能とした．
- (2) 大手町における海風進入時刻はほぼ変化していなかったが，熊谷では 1960 年代に比べ 2010 年代で 30 分程の遅延が見られた．
- (3) 海風進入時刻に対し重回帰分析を行う事で，海風に対する都市化の影響と気候変動影響を分離して議論することを可能にした．
- (4) 大手町では，気候変動で海風進入が早まる傾向と都市化による海風遅延が見られた．海風進入

を遅らせる作用と早める作用の両影響が拮抗し合い，実際の海風進入時間に差が見られなかった可能性が推測される．

- (5) 熊谷では，都市化に伴う海風遅延は見られたが，海風への気候変動影響は確認できなかった．

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）」，及び，科学研究費補助金 基盤研究 (A)（課題番号：25249066）による支援を受けた．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，pp.31-39，1991．
- 2) 神田学，西村修，福田忠弘，竹内邦良，清水源治：河川に沿った海風フロントの侵入挙動，土木学会水工学論文集，vol.40，pp.243-248，1996．
- 3) Kitayama, H., Katayama, T., Hayashi, T., Tsutsumi, J. and Ishii, A.: Statistical analysis of the sea-land breeze and its effect on the air temperature in summer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.38, pp.93-99, 1991
- 4) 大和広明，三上岳彦，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
- 5) 蒲生稔：混合層と海風域の境界，公害，vol.23，pp.37-46，1988
- 6) Yoshikado, H.: Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with sea breeze, Journal of Applied Meteorology, vol.31, pp.1146-1164, 1992
- 7) 仲吉信人，大久保洸平，Varquez, A.C.G., 神田学，藤原忠誠：東京一練馬一埼玉ラインに見られる海風よどみ領域，土木学会水工学論文集，vol.69，pp.1741-1746，2013．
- 8) Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H. and Mizutori, M.: The effect of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area, Journal of the Meteorological Society of Japan, vol.78, pp.405-420
- 9) 神田学：都市型集中豪雨シミュレーションと対策，日本気象学会 2011 年度秋季大会シンポジウム 理学と工学が切り開く新しい都市環境学，pp.27-34，2011
- 10) 仲野久美子，仲吉信人，Varquez, A.C.G., 神田学，足立幸穂，日下博幸：最新の都市パラメタリゼーションを導入した集中豪雨シミュレーション，土木学会水工学論文集，vol.69，pp.355-360，2013
- 11) 中川清隆，立川洋，山田敬一，阿部信貴，永井克行：海風進入時刻の変動と気象条件の統計的關係，日本気象学会大会講演予稿集，vol.83，pp.135，2003

(2014. 9. 30 受付)