

兵庫県神戸市における海陸風の統計的解析

瀧 本 家 康*

1. はじめに

日本の大都市の多くは海に面して発達しており、都市の環境は海風の影響も含めて考える必要がある。近年都市域では人工排熱の増加等によるヒートアイランド現象が顕著となっているが、その抑制策の一つとして、海風を都市部へ積極的に取り込むことが考えられている (Masuda *et al.* 2005)。このようなヒートアイランド抑制の観点から、海風など地域特有の風がもたらす都市大気のコールド効果やヒートアイランド現象と海風の相互作用を検討した研究例は多い (たとえば、境田ほか 2011; 清田・清田 2005など)。竹林・森山 (2005) は大阪府で暖候期に気温の長期観測をおこない、海風の影響を受けた日中の地表付近の気温分布は海岸からの距離によってほぼ説明されることを指摘している。

神戸市における気温については、宮崎 (2005) が、2004年夏季に神戸市内31の小学校の百葉箱に温度計を設置し、真夏日の延べ時間数は中央区以東臨海都市街地で高い分布を示すことを指摘し、当該地域の日中の卓越風向が西であることから、高温部が東に移動する傾向があることを示唆している。

神戸を含む瀬戸内海のコールド風についての研究は多く (大阪管区気象台 1971, 1972; Mizuma 1995など)、播磨平野の風に関しては、北林 (1976) が大気汚染監視測定局のデータを用いて海陸風の進入時刻について調べている。また、河野・西塚 (2006) が、1年分のデータについて統計的解析を行い、海風の頻度は春から夏にかけて多く、その理由は陸上の日最高気温が春から初秋は海面水温を上回るためと指摘している。さ

らに、海陸気温差と姫路市の風向の時刻別変化を解析し、両者が良く対応していることを示している。

しかし、神戸市周辺における都市スケールでの海陸風や山谷風に関する統計的な解析例は少ない。根山 (1982) は、神戸における8月の15時と03時における平均風速と最多風向を解析し、15時には南西、03時には東北東の風が卓越することを示している。また、5月と8月に最も典型的な海陸風が現れ、海風が最も強くなるのは12時から15時であり、陸風が最も強くなるのは21時から24時であることを示している。

日本建築学会 (2000) は、神戸市等の常時大気測定局の風データを用いて、1990年から92年の夏季晴天日の平均の風の変化を調査し、昼間と夜間の風配図分布を示している。しかし、昼間を06時から18時、夜間を19時から05時までと定義しており、海陸風の日変化についてその開始や終了時刻に関する十分な知見は得られていない。

そこで、本研究では晴天静穏日を対象として、神戸市域に形成される海陸風の日変化について統計的な解析を行った。

2. 方法

2.1 観測対象地域の概要

本研究の対象地域である神戸市は、2013年12月1日現在人口154万人を超え、近畿地方の拠点都市のひとつとして発展を続けている。都心の市街地は北方の六甲山 (標高931 m) を含んだ六甲山地と南方の大阪湾に挟まれた東西方向に伸びた狭い領域に展開している (第1図)。六甲山地の北側にはニュータウンが拡大しつつあり、大阪湾にはポートアイランドや六甲アイランドといった海上都市が建設されている。

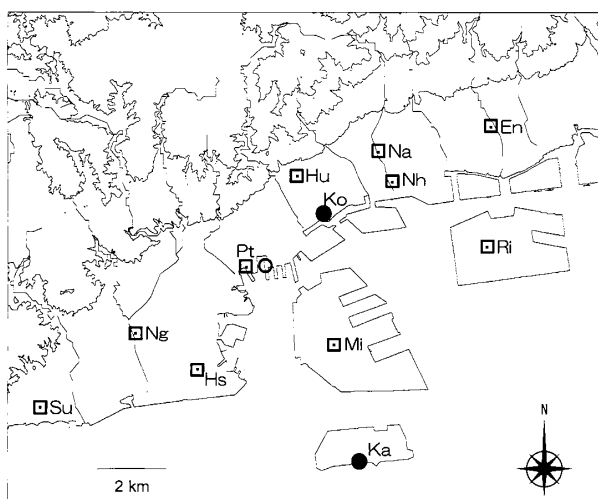
2.2 解析対象日の抽出方法

解析には第1図に示す神戸市所管の常時大気測定局

* Ieyasu TAKIMOTO, 神戸大学附属中等教育学校。

ieyasu@port.kobe-u.ac.jp

© 2014 日本気象学会



第1図 神戸市の地形および気温観測点の分布。等高線は0, 100, 300, 500 mのみ示す。●はアメダス, ■は常時局, ○は海面水温測定位置を示す。

10地点（東灘，六甲アイランド，灘浜，灘，葺合，港島，兵庫南部，長田，須磨，ポートタワー），アメダス2地点（神戸，神戸空港）および海上保安庁第五管区海上保安本部の神戸港における海面水温（水面下1 m）のデータを用いた。なお，常時大気測定局およびアメダス観測点の周辺は，東灘が50～100 m程度南西側に高層ビルがある以外は，いずれも局地的な風に影響を及ぼすような環境ではなかった。

解析に用いたデータの観測期間は，常時大気測定局のデータ整備が終わり1年分を使用できる最新の年度である2011年度とした。なお，常時大気測定局の測定

は超音波式風向風速計により行われており，0.1 m/s から0.1 m/s きざみで記録されている。また，風向は風速が0.2 m/s 以下の場合にはCALM，0.3 m/s 以上を16方位で記録している。

熱的循環である海陸風は，一般的に春から秋にかけての暖候期に発達する（吉野ほか 1973など）。そこで本研究における解析対象日を以下の手順で抽出した。

①日本周辺の気圧配置が西高東低の冬型が顕著となる時期を除いた暖候期とその前後の月を含めた3月から11月を対象期間とした。

②土田・吉門（1995）を参考に，神戸の日照時間を用いて日積算日照時間が6.0時間以上の日を晴天日として抽出した。

③松江における850 hPa の風速が，7 m/s 以下である日を静穏日として抽出した。ここで，7 m/s という基準を使用したのは，一般風速が7 m/s 以上の場合形成される局地風系は一般風の地形による偏向としての風系であり，7 m/s 以下であれば海陸風などの熱的循環が目立ってくるからである（河村 1977）。

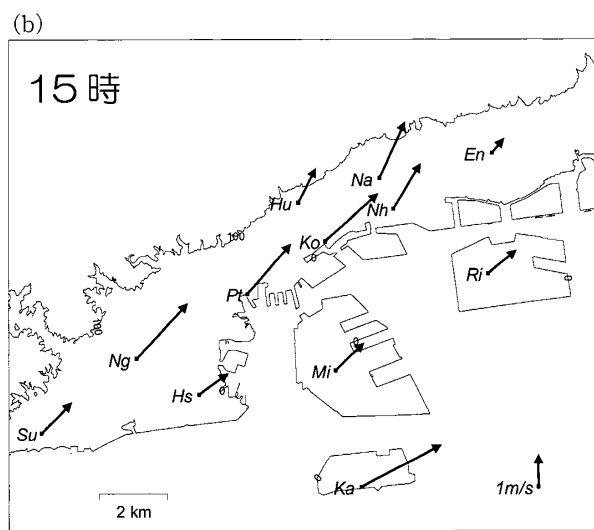
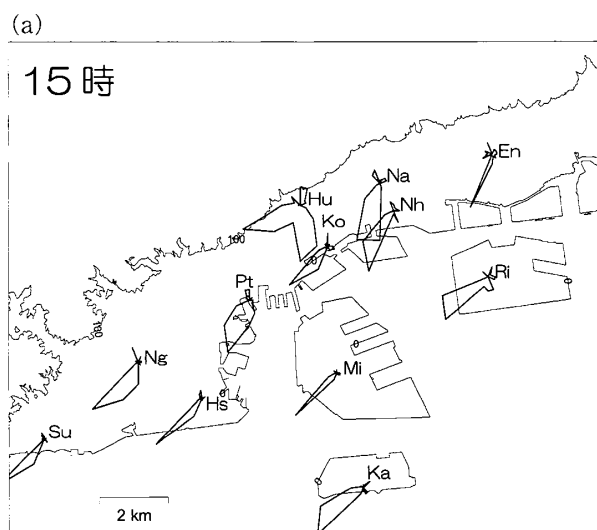
④天気図上で対象地域周辺に低気圧等の総観規模擾乱が存在する日を除外した。

以上の結果，最終的な対象日は53日となった。

3. 結果と考察

3.1 15時と03時の風配図とベクトル平均風分布

熱的循環である海風は15時ころに最も発達する（森ほか 1994；Mizuma 1995；澤田・川村 2010；大橋・川村 2006；瀧本・境田 2012など）。そこで各地点の15



第2図 (a)各地点の15時の風配図。全風向の合計が100%。(b)15時のベクトル平均風分布。等高線は0, 100 mのみ示す。

時と03時における卓越風向とベクトル平均風を解析した。

第2図aに示す15時の各地点の風配図を見ると、全地点で南西寄りの風向が顕著に卓越していることがわかる。全12地点中7地点で卓越風向は南西を示し、次に多い南南西も含めると12地点中11地点を占めている(第1表)。唯一、葦合では卓越風向が1方向ではなく南と西南西の2方向に生じている。

第2図bに示す15時のベクトル平均風分布図を見ると、第2図aに見られた各地点の特徴とともに、長田、ポートタワー、神戸、灘浜、灘、神戸空港で風速が大きく、神戸空港で最大の2.7 m/sを示している。一方、東灘では0.6 m/sであり最も風速が小さ

い。これは前述のように東灘の南西側近くに観測高度よりも高いビルが位置し、その影響を受けたことによる可能性がある。

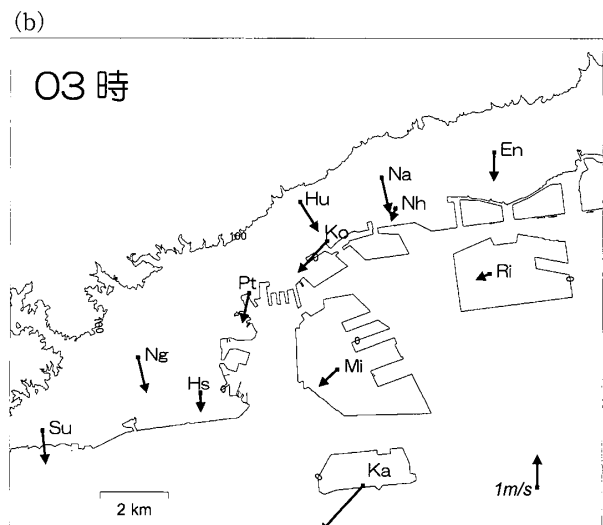
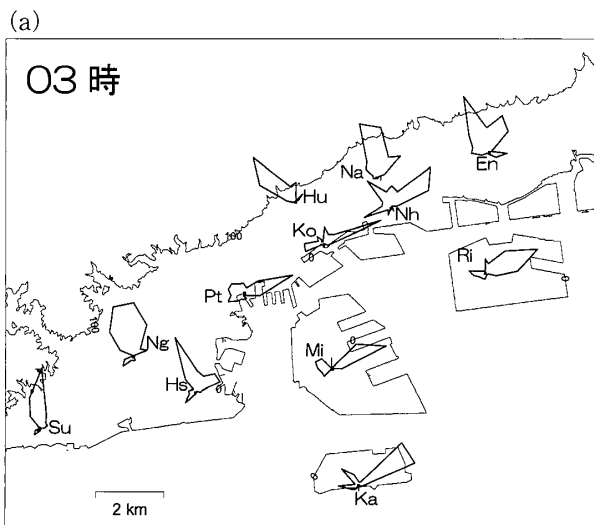
第3図aに示す03時の各地点の風配図を見ると、15時の風向と大きく異なり、卓越風向が北から北西寄りを示す地点と北東寄りから東を示す地点がある。各地点の卓越風向と地形との関係を見ると、六甲山地に近い地点では北から北西寄りの風向を示し、沿岸部や人工島部の地点では北東寄りから東の風向を示す傾向がある。

第3図bに示す03時のベクトル平均風分布図を見ると、北から北西寄りの風を示す須磨、長田、葦合、灘、東灘における風速は概ね1 m/sである。長田や灘から1～2 km程度海側に位置する兵庫南部、灘浜では風速が小さくなっている。

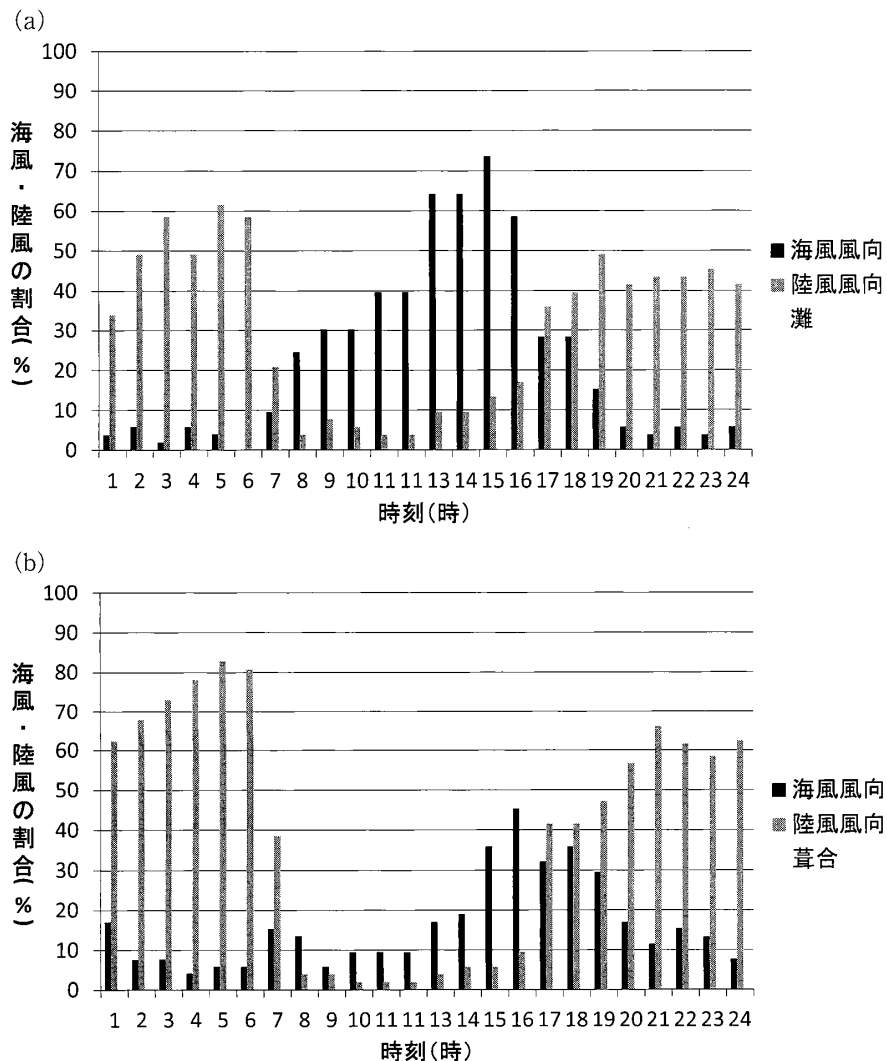
以上のように15時と03時では各地点において風向・風速に大きな変化が見られた。神戸市周辺は広く大阪湾に面している。そのため晴天静穏日には熱的循環である海陸風や山谷風、あるいはその両者が相互作用した結果としての局地風が発達すると考えられる。日本建築学会(2000)は、神戸

第1表 各地点の03時と15時における卓越風向と風向測定高度(風向頻度の高い方位が複数みられた地点については副卓越風向も示した)。

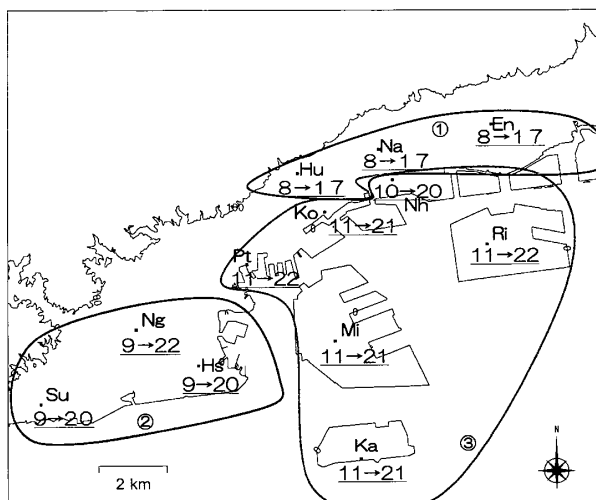
観測地点名	図中記号	測定高度	15時風向		03時風向	
			主	副	主	副
東灘局	En	32m	南南西		北北西	北北東
六甲アイランド	Ri	10m	南西		東北東	
灘浜	Nh	15m	南南西		北東	
灘	Na	21m	南南西		北北西	
葦合	Hu	20m	西南西	南	北西	
港島	Mi	13m	南西		東北東	
兵庫南部	Hs	11m	南西		北北西	
長田	Ng	46m	南西		北	北北西
須磨	Su	15m	南西		北	
ポートタワー	Pt	100m	南南西		東北東	
A神戸	Ko	16m	南西		東北東	
A空港	Ka	10m	南西		東北東	北東



第3図 (a)各地点の03時の風配図。全風向の合計が100%。(b)03時のベクトル平均風分布。等高線は0, 100 mのみ示す。



第4図 解析対象日平均の灘 (a) と葦合 (b) の海風と陸風の時刻別割合.



第5図 各地点の海風と陸風の入替わる時刻 (図中○→△は○が開始, △が終了時刻, ①~③は本文に対応). 等高線は0, 100 mのみ示す.

のホドグラフから夜間は北東風が, 日中は南西風が卓越することを示し, 1日を通して風向が右回りに変化することを指摘している. そしてこのような変化が生じる理由として, 海風ははじめ海岸線に対して直角方向に吹き込むが, 大阪湾から大阪平野へ向かって吹く大きなスケールの海風の影響を受けて西寄りの風になるため, 神戸では午前中の南風から午後には南西風になることを指摘している. また, 昼間 (06時~18時) と夜間 (19時~05時) の神戸市域の風配図分布を示し, 昼間は海風がほぼ全域を支配しているが, 夜間には大阪平野から大阪湾に吹く大きなスケールの陸風だけでなく, 六甲山の谷間から吹く山風が顕著にみられる地点があることを指摘している. 本研究の結果は, 日本建築学会 (2000) の結果と整合的であり, 15時に

見られた南西風は大阪湾から大阪平野へ向かって吹く大きなスケールの海風の一部と考えられる. また, 03時に見られた六甲山地に近い地点での北から北西寄りの風は六甲山地からの山風と考えられる.

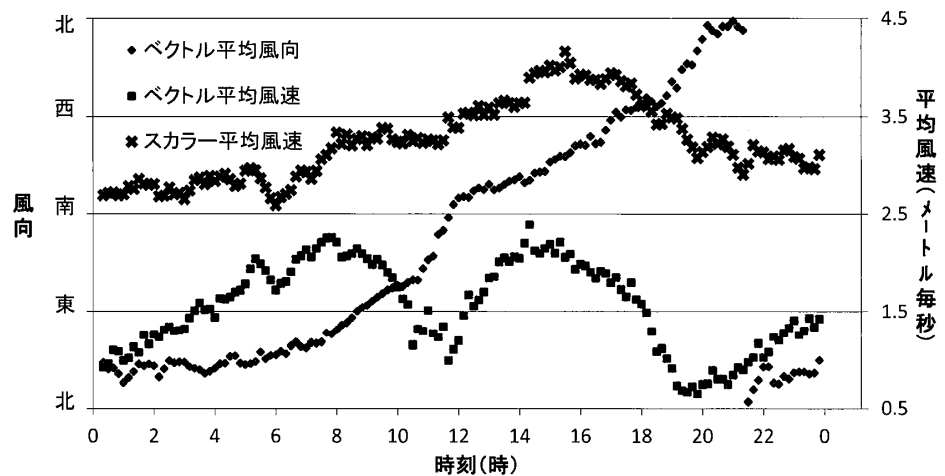
3.2 海陸風の日変化

前項の結果から, 各地点において海陸風の入替わりが顕著に見られた. そこで各地点における海風と陸風の割合を時刻別に解析し, より詳細な日変化を調査した. ここでそれぞれの地点における海風と陸風は, 15時と03時の最卓越風向 (16方位) ± 1 方位の風向と定義した. その結果, 葦合以外の地点では海風と陸風の割合が日中と夜間で明瞭に入れ替わっていた. 第4図aに海陸風の入替わりが典型的な例として灘の結果を示す. それに比して葦合では日中の海風の割合が小さいことが他地点とは異なる特徴である (第4図b).

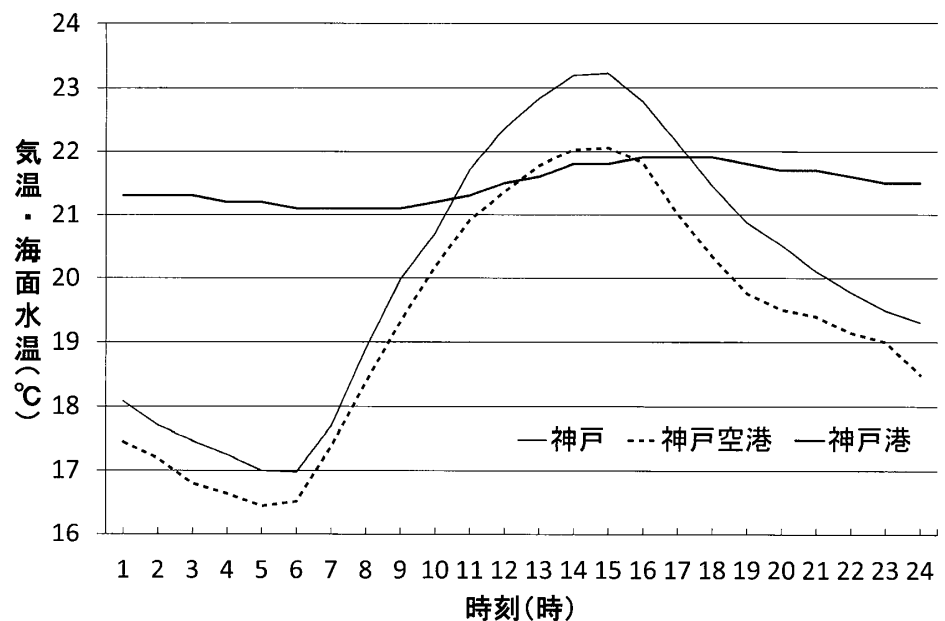
次に、それぞれの地点における海風と陸風が入れ替わる平均的な時間を調査するため、海風の開始を海風の割合が陸風の割合を上回った時刻、終了をその反対と定義し解析した。すなわち、灘の場合であれば、海風の割合が陸風の割合を上回る08時を海風開始時刻、そして陸風の割合が海風の割合を上回る17時を海風終了時刻と定めた。その結果を第5図に示す。これを見ると、地点によって海風の開始・終了時刻に特徴があり、その特徴から神戸市を大きく3つの領域に区分できる。すなわち、①海風の開始・終了時刻がともに早い地点（葺合、灘、東灘）、②海風の開始は早いが終了が遅い地点（須磨、長田、兵庫南部）、③海風の開始・終了がともに遅い地点（ポートタワー、港島、神戸空港、神戸、灘浜、六甲アイランド）である。ここで前項で得られた結果と比較すると、①②が夜間に六甲山地からの山風が示唆された地点であり、③が夜間に北東から東寄りの風を示した地点に対応している。

次に、アメダス神戸の10分値データを用いて、対象日平均の気温とベクトル平均風の風向・風速について日変化を解析し、より詳細な海陸風の挙動を調査した。ベクトル平均風向と風速およびスカラー平均風速の日変化を第6図に示す。これを見ると08時ころまでは北東風が安定して吹いており、その後は徐々に風向が右回りに変化していることがわかる。また、10時～12時ころにかけて風向が東南東から南南西に大きく変化している。ベクトル平均風速は08時前と14時過ぎころに最も強まり、11時ころと20時ころに最も弱まるのが特徴的である。11時以降の風速の強まりは、同

時に風向の大きな変化も伴っていることから海風の開始・発達を表し、第5図で示した神戸の海風開始時刻と整合的である。そして、スカラー平均風速が最も大きくなる14時から15時ころに海風が最盛期となることがわかる。また、08時前に見られるベクトル平均風速のピークについては、風向が北東寄りであることから陸風の最盛期を示していると考えられる。この結果は根山（1982）が示した陸風の強まる時間（21時～24時）とは異なっている。しかし、根山（1982）は陸風の最盛期の風向として5月は北から北北西を、8月は西北西を示しており陸風風向が本研究の定義と異なっている。また、根山（1982）が示す風の日変化を見る



第6図 神戸における対象日平均のベクトル平均風向・風速、スカラー平均風速の日変化。



第7図 神戸、神戸空港、神戸港の対象日平均の気温と海面水温の日変化。

と、06時や09時においては本研究の結果と整合的な北東風が21時や24時の風速と同程度あるいはそれ以上で生じている。したがって根山（1982）と本研究の結果の相違は陸風方向の定義の違いによるものである。

一方、15時以降ベクトル平均風速は再び弱体化し20時ごろに最も弱まる。風向は15時以降も右回りの変化を続けるが、22時以降になると北東寄りで安定することがわかる。このことから、陸風は20時ごろから吹き始め22時以降に安定することが推察される。

以上の結果から、晴天静穏日における神戸では風向が時間とともに右回りに変化していることがわかり、このことは溝本・石原（2009）やSakazaki and Fujiwara（2008）の結果と整合的である。溝本・石原（2009）は、風データを回転スペクトル解析することにより神戸では年間を通して風向の変化は右回転成分が卓越しており、特に6、8、9月にその傾向が顕著であると指摘している。

根山（1982）では、神戸の風の日変化を解析し、5月や8月は09時から12時の間に風向が東から南に、18時から21時の間に南西から北西に大きく変わることを示している。本研究の結果も同様の傾向を示しており、この風向の大きな変化はそれぞれ陸風から海風、海風から陸風への入れ替わりと対応している。

海陸風の入替わりはスカラー平均風速の日変化に比して、ベクトル平均風速の日変化に明瞭に現れており、第6図では11時ごろと20時ごろに風速が最も弱まっていた。したがって、神戸においては海風と陸風の入替わる時間は11時ごろと20時ごろであると推察され、この結果は井野・根山（1973）や根山（1982）とも概ね対応している。そのため第5図で示した海陸風の入替わる時間は多少の差異はあるが概ね妥当であると考えられ、神戸市周辺における海陸風の入替わる時間は地域ごとに特徴がある可能性が示唆された。一方、スカラー平均風速からは風向が安定している時間帯における陸風と海風の強さが読み取れ、陸風が約2.6～2.7 m/s程度、海風が約4.0 m/s程度であることがわかる。この結果は、根山（1982）の解析とも整合的である。

3.3 海上と陸上の温度の日変化

前項の結果から神戸市周辺における海陸風の入替わる時間は地域ごとに特徴があることが示唆された。そこで海陸風の日変化を海陸の温度差から検討するために神戸、神戸空港の気温と神戸港の海面水温（水面下1 m）を用いて対象日平均の気温と海面水温の日変

化を解析した。その結果を第7図に示す。これを見ると海上人工島である神戸空港の気温が一日を通して神戸よりも低いことがわかる。その差は最高気温を示す14時～15時ごろに最も大きくなり神戸の方が1℃強高温を示す。また、神戸港の海面水温の日変化は気温に比べて小さく一日を通して21～22℃である。神戸の気温、神戸港の海面水温を比較すると、神戸の方が高温となるのは10時すぎから17時すぎまでである。中田（1985）は瀬戸内海西部における海面付近の気象状況を調査し、海風開始前後の海陸の気温差は0.5℃程度であることを示している。神戸周辺においても同程度の海陸気温差で海風が顕在化すると仮定すると、前項で得られた③地域の実験開始時刻と本項の結果は整合的である。海風開始時刻が上記の地点より早い地点は六甲山地までの距離が近い傾向がある。したがって、それらの地点では日の出後に局地的な谷風の影響を受けることで他地点に比して海風風向の風が早く吹き始めている可能性がある。根山（1974）は広島県呉市において、海陸風とその背後の山腹における斜面風との関係を調査し、沿岸の呉において陸風が吹いているときでも、山腹では斜面風が吹き始めている事例もあることを示している。神戸市においては海と山地までの距離が呉市以上に小さいため、海陸風と山谷風の相互作用がさらに大きい可能性がある。

一方、海陸温度差が逆転する時刻と①地域の海風終了が概ね一致している。しかし、それ以外の地点では海陸温度差が逆転した後も海風が吹走し続けている。このことから神戸市周辺の海陸風の入替わりについては、神戸市付近の海陸気温差だけではなく、日本建築学会（2000）が指摘しているような大阪湾と大阪平野の大きなスケールの海陸気温差も関係している可能性がある。

4. まとめ

2011年の晴天静穏日（53日）を対象として神戸市域に生じる海陸風の日変化について統計的な解析を行った。主な結果は以下の4点である。

（1）15時の卓越風向は主として南西寄り、03時の卓越風向は主として北から北西寄りあるいは北東から東寄りであった。海陸風の入替わりに対応する風向の大きな変化が見られ、六甲山地に近い地点では夜間においては六甲山地からの北から北西寄りの山風が卓越することがわかった。

（2）海風と陸風の割合を時刻別に解析するとほとん

どの地点で明瞭な日変化が見られた。また、海風と陸風が入れ替わる時間は地点により特徴があり、それにより対象地域を3つに区分できた。六甲山地までの距離に近い地域では日の出後に局地的な谷風の影響を受けることで他地域に比して海風風向の風が早く吹き始めている可能性がある、

(3) 神戸の10分値データを用いて、ベクトル平均風向・風速、スカラー平均風速の日変化を解析した結果、風向は一日を通して右回りに変化していた。ベクトル平均風速の日変化には海風と陸風の入れ替わりやそれらの最盛期が明瞭に現れていた。また、スカラー平均風速の日変化から海風と陸風の風速がそれぞれ約4.0 m/s, 約2.6~2.7 m/sであることがわかった。

(4) 対象日平均の神戸、神戸空港の気温、および神戸港の海面水温の日変化と各地点の海陸風が入れ替わる時刻を比較した結果、海岸近くの地点では海風開始時刻と海陸温度差の日変化に良い対応が見られた。しかし神戸周辺の高陸気温差だけでは海陸風が入れ替わる時刻を説明することができない地点もあり、大阪湾から大阪平野の大きなスケールの海陸気温差も関係している可能性が示唆された。

本研究では、解析したデータが1年であったため、さらに長期間のデータを用いて同様の解析を行うことにより広域な大阪湾から大阪平野スケールの気象状況が神戸市周辺の海陸風循環に与えている影響を調査することが今後の課題である。

参 考 文 献

- 井野英雄, 根山芳晴, 1973: 広島湾の海陸風について (その1) 海陸風の循環特性. 天気, 20, 547-555.
- 河村 武, 1977: 全国地上風分布図. 気象庁技術報告, (91), 76pp.
- 河野 仁, 西塚幸子, 2006: 播磨平野 (姫路) の海陸風の統計的解析—海面水温との関係. 天気, 53, 701-706.
- 北林興二, 1976: 海陸風の統計的解析. 公害, 11, 288-306.
- 清田忠志, 清田誠良, 2005: 夏季の広島市広域圏における海陸風が気温に及ぼす影響に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, (587), 45-51.
- Masuda, Y., N. Ikeda, T. Seno, N. Takahashi and T. Ojima, 2005: A basic study on utilization of the

- cooling effect of sea breeze in waterfront areas along Tokyo Bay. J. Asian Archit. Build. Eng., 4, 483-487.
- 宮崎ひろ志, 2005: 神戸地域における都市ヒートアイランド実態調査: 小学校百葉箱を利用した夏季気温測定. 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, 711-712.
- 溝本 悟, 石原正仁, 2009: 回転スペクトルによって調べた大阪湾周辺における左回転する海陸風の地域特性と季節変化. 天気, 56, 769-774.
- Mizuma, M., 1995: General aspects of land and sea breezes in Osaka Bay and surrounding area. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 1029-1040.
- 森 博明, 小川 弘, 北田敏廣, 1994: 濃尾平野における海陸風の特徴と広域海風の出現条件. 天気, 41, 379-385.
- 中田隆一, 1985: 海風循環の発生時の一形態. 天気, 32, 167-173.
- 根山芳晴, 1974: 海陸風と山谷風との相互作用について. 天気, 21, 587-589.
- 根山芳晴, 1982: 瀬戸内の海陸風について. 天気, 29, 653-668.
- 日本建築学会編, 2000: 都市環境のクリマアトラス. ぎょうせい, 113pp.
- 大橋喜隆, 川村隆一, 2006: 中部日本の夏季静穏日におけるGPS可降水量の日変化. 天気, 53, 277-291.
- 大阪管区气象台, 1971: 近畿の風. 170pp.
- 大阪管区气象台, 1972: 瀬戸内海の高陸風. 186pp.
- 境田清隆, 江越 新, 倉持真之, 2011: 仙台のヒートアイランドと海風の影響. 地学雑誌, 120, 382-391.
- Sakazaki, T. and M. Fujiwara, 2008: Diurnal variations in summertime surface wind upon Japanese plains: Hodograph rotation and its dynamics. J. Meteor. Soc. Japan, 86, 787-803.
- 澤田岳彦, 川村隆一, 2010: 北海道の夏季静穏日におけるGPS可降水量の日変化. 天気, 57, 305-314.
- 竹林英樹, 森山正和, 2005: 海風の影響を受けた都市ヒートアイランド現象. 日本建築学会技術報告集, (21), 199-202.
- 瀧本家康, 境田清隆, 2012: 暖候期静穏日における東北地方の高陸風出現に関する気候学的研究. 季刊地理学, 64, 1-11.
- 土田 誠, 吉門 洋, 1995: 東京湾岸の冬季の高陸風. 天気, 42, 283-292.
- 吉野正敏, 工藤剛彦, 星野光子, 1973: 日本海岸の高陸風について. 地理学評論, 46, 205-210.