

高知県における海風の特性*

千葉 修**・金堂 由起***・川村 学史****

要 旨

円弧状の海岸線を持つ土佐湾と背後に四国山地を有する高知県には、年間を通じて海風の侵入が認められる。海風の侵入時刻は地域毎に異なり、沿岸部と平野部では顕著な年変化を示すが、それに対し山間部ではその変化は小さい。海風の風向分布解析より、土佐湾から侵入する海風と宿毛方面から侵入するものの2種類に大別される。進行ベクトル図を利用して海風侵入図を求めたところ、土佐湾からの海風の侵入線は非対称な2つコブ形を示した。そして地域別の海風侵入時刻の月平均値から求めた侵入速度は時速約7 kmであった。

1. はじめに

周囲を海に囲まれている日本では、広範囲にわたって海風が観測され、陸風も含めた海陸風の研究が盛んに行なわれている。特に都市部や内陸域への大気汚染物質の輸送やその変質過程に果たす海風の役割は重要視されており、関東平野や大阪平野そして瀬戸内海周辺地域等を対象地域として多くの研究成果が報告されている(例えば江口, 1977; 佐橋, 1978; 藤部, 1981; 栗田・植田・光本, 1988; 中西・木村, 1987; Yoshikado, 1990)。一方、海風の振る舞いに山岳や海岸線の形状が影響を及ぼすことが力学的及び熱的観点から考察されている(例えば, McPherson, 1970; Ookouchi *et al.*, 1978; Mannouji, 1982)。

このような研究成果を参考にして、北側に高さ500~1000 m程度の山地、南側に約241 kmの円弧状の海岸線を持つ高知県での海風の侵入状況と海風の地域的特性を調べた。

2. 資 料

土佐湾の海岸線から約2 km内陸にある高知大学理学部付属大気境界層観測所(Atmospheric Boundary

-Layer Observatory, ABO)(千葉その他, 1990)のドップラーソーダ(株)カイジョー, AR410-S)を使用し、高度60 mでの海風観測を実施した。平均化時間は10分で、観測期間は1989年4月29日から翌年の12月21日までである。欠測日と台風や季節風などの天気擾乱の影響が大きい日を除いてABOで捕捉した海風侵入日は151日である。

ABO以外の他地域での海風の侵入状況を調べるために151の海風侵入日に対応させて、高知県内15のアメダス観測点(第1表)での風向・風速・気温の10分値を自記紙から読み取り、解析に利用した。なおアメダス地点の中には、上記の日に欠測の日もあるので、ABOと各アメダス地点の海風日の日数が一致しないこともある。

各アメダス観測点を位置及び測定高度を考慮して、(I)沿岸部;安芸・佐賀・須崎・宿毛、(II)平野部;後免・高知・窪川・中村、(III)山間部;本川・本山・大栃・江川崎・梶原とに分けた(第1図を参照)。ところで、アメダス地点の地上風速が境界層上部の風速より小さいため、海風による大気汚染物質等の輸送を考えると地上風速の3倍値を用いた方法が適切であるという研究がある(中西・木村, 1987; 蒲生, 1988)。このため、アメダス地点の地上風速値を扱う際には、実際の海風の風速値より低くする傾向にあることに注意する必要がある。

3. 進行ベクトル図(PVD)による解析方法

(I)の地域では、各々の観測点毎で異なるものの、一地点で見ると明瞭な海風の侵入が風向の急激なシフ

* Characteristics of the Sea Breeze Penetrated into Kochi Prefecture.

** Osamu Chiba, 高知大学 理学部.

*** Yuki Kondo, (株)日立アドバンスシステムズ.

**** Gakushi Kawamura, (株)四国日本電気ソフトウェア.

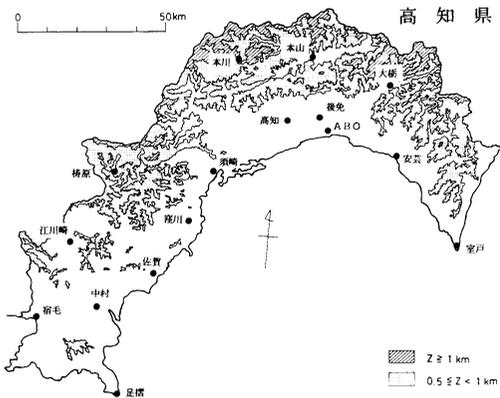
—1992年6月5日受領—

—1992年9月28日受理—

第1表 解析に利用した高知県のアメダス観測点

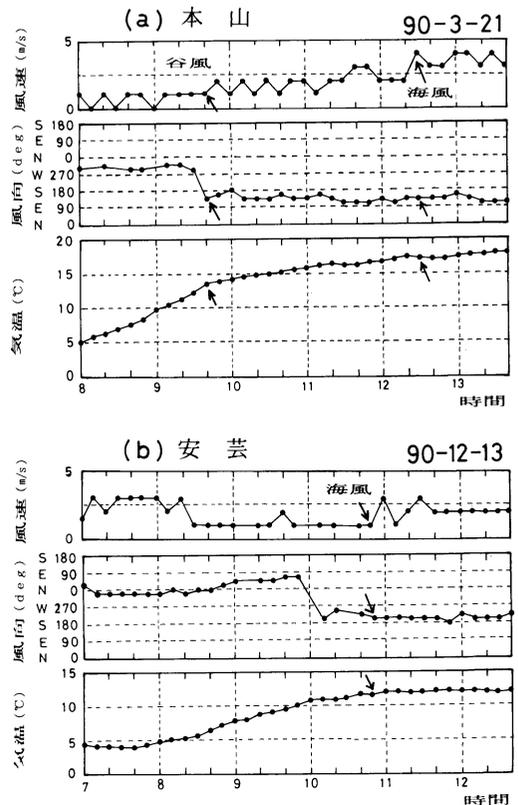
地点番号	地点名	緯度	経度	風速計高度(*1)
74056	本川	33° 43'	133° 19'	607 m
74071	本山	33 46	133 36	257
74136	大枳	33 42	133 53	217
74181	高知	33 34	133 33	16
74187	後免	33 35	133 39	17
74271	安芸	33 29	133 56	13
74296	枳原	33 23	132 56	422
74311	須崎	33 23	133 18	16
74361	窪川	33 13	133 09	217
74371	室戸岬	33 15	134 11	227
74381	江川崎	33 10	132 48	67
74436	佐賀	33 05	133 06	10
74447	宿毛	32 55	132 42	20
74456	中村	32 59	132 55	15
74516	足摺岬	32 43	133 01	45

* 1) 風速計高度 = 測定点の海拔高度 + 風速計の設置高度

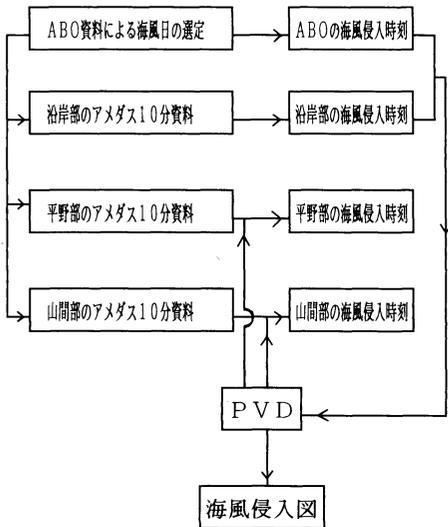


第1図 高知県の地勢と観測点分布。

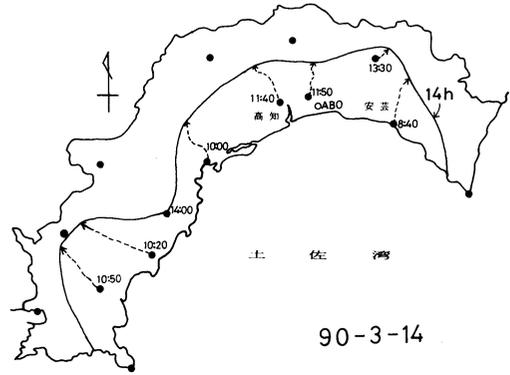
トや風速の増加, そして気温の上昇停止(蒲生, 1991)の現象にほぼ同時刻に現われる。季節的には, 夏季よりも冬季に気温の上昇停止が明確である。一例として海風の侵入が認められた地域での気象要素の変化を第2図(a), (b)に示す。沿岸部の安芸では, 南寄りの海風にシフトし終わった10時50分に風速が増加し始め, 同時に気温の上昇停止が見られる。一方, 日時は異なるが山間部の本山では, 海風の侵入前の9時40分に谷風の流入があり, その時刻後に多少の気温上昇が見られ, 停止はしていない。停止するのは2時間50分のちの12時30分であり, 同時に風速の増加が見られる。このように山間部では沿岸部・平野部に比較して風向・風速のみから海風侵入を判定することが容易でない場合がある。



第2図 アメダスデータ(風速, 風向, 気温の各10分値)の時間変化の例。(a)本山の場合, (b)安芸の場合。



第3図 解析方法の流れ図



第4図 進行ベクトル図 (PVD) による海風侵入図。

定をすることは困難である。故に、この研究では PVD だけを用いるのではなく、海風の侵入が予想される地点での時系列を併用し、綿密に検討する方法で流跡を推定した。次に PVD による解析例(1990年3月14日)を第4図で説明する。

まず10分毎の気象要素の時系列から得た沿岸部各点(例えば安芸)での海風侵入時刻(安芸では8時40分)を出発点として海風侵入の PVD を作る。それは矢印を先端に持つ破線で示される。次に、1つの内陸側の地点(例えば高知)について、PVD とその地点での時系列を突き合わせて海風到達時刻(高知では11時40分)を求め、この時刻を出発点として新たな PVD を作る。この手順を他の地点でも繰り返すことによって、平野部から山間部での海風開始時刻を順次判定していく。最終的に14時までには到達した海風の侵入線は、各点での PVD の先端を結ぶ実線によって表わされる。

4. 解析結果

4.1. 地域毎の海風侵入時刻の年変化とその特徴

ソーダで観測した高度 60 m での海風侵入時刻のデータが第5図に小さな●印で図示される。ばらつきはあるものの、月平均値(○)の振舞いに見られるように、夏季に早く冬季に遅いという明らかな年変化を示す。

海風の侵入時刻の年変化を表わす実験式は、一年周期を考慮して、

$$T = A \cdot \cos \{2\pi (D+P)/365\} + B \quad (2)$$

と与えられる。ここで、Tは海風の侵入時刻、Aは振

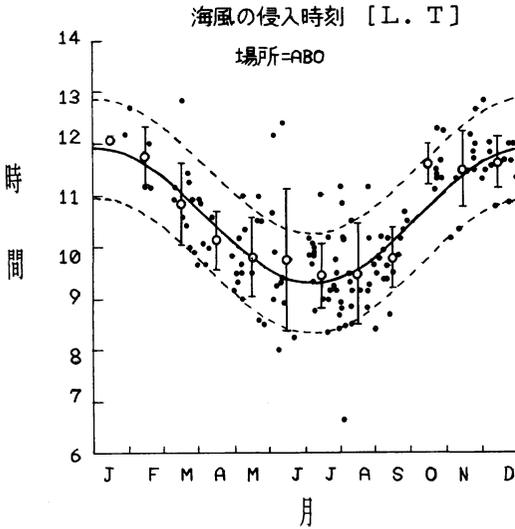
そこで第3図に示す流れ図にそって解析を行なう。まず、ABOと沿岸部では、ソーダとアメダスデータの10分毎の気象要素の時系列から各観測点での海風侵入時刻を評価する。一方、平野部と山間部では気象要素の時系列の変化と後述する進行ベクトル図(PVD)の両方から吟味する。さらに海風の内陸への侵入状況を調べるために、ABOと沿岸部の海風侵入時刻とPVDを併用して海風侵入図を求める。

PVDは、一地点でオイラー的に観測した風ベクトルを連続的につき足し距離に直したものである。そうすることによって流跡線に似た図ができ上がる。つまり、各観測点を原点として時間 $t = 0$ にそこを通過した空気塊は、 $i \Delta t$ 時間後には Δt ($=10$ 分) 毎の風ベクトル (u_i, v_i) を用いて、平面上の位置 (X, Y) にあるとする。そのとき X, Y は

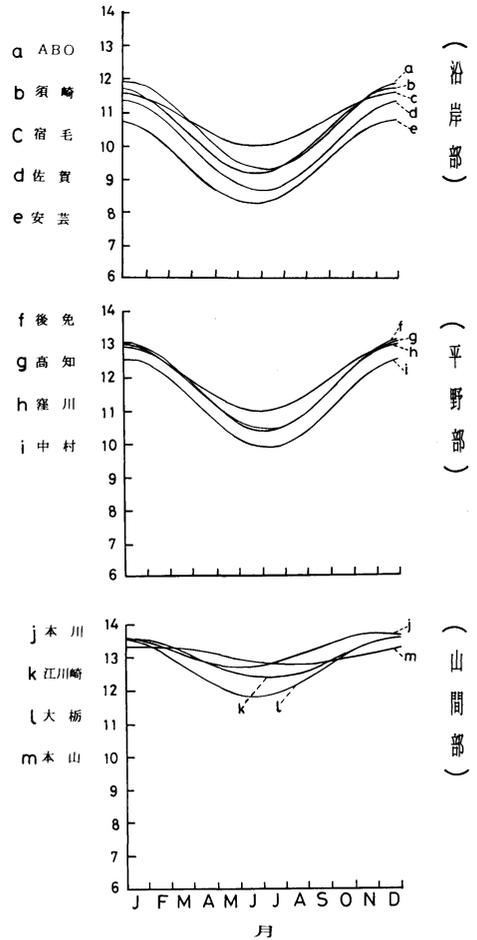
$$\begin{aligned} X(i \Delta t) &= u_i \Delta t + X((i-1) \Delta t), \\ Y(i \Delta t) &= v_i \Delta t + Y((i-1) \Delta t), \\ i &= 1, 2, \dots \quad (1) \end{aligned}$$

として表わされる。

ところで、この方法では風向風速はあくまでも一地点のものを使用するので、流れの場の非一様性(山岳などの存在)を考えると、PVDは実際の流跡でなく地点毎の風の時間的な変動に基づく空気塊の仮想的な移動距離を示す。このように正確な距離を知るには限られた地点での観測値だけでは不十分なことがある。だからといって、現実に観測点を増やし、きめ細かい測



第5図 ABO での海風侵入時刻の年変化. 破線は年平均における標準偏差, 縦のバーは月毎の標準偏差を示す.



第6図 地域毎 (沿岸部, 平野部, 山間部) の海風侵入時刻の年変化.

幅, D は新年 (1月1日) からの日数, $P \times (2\pi/365)$ は位相, B は侵入時刻の年平均値である. (2)式のパラメーター A, B, P は関数値 (T)を最小化する方法の一つであるシプレックス法 (奥村, 1986) を用いて求まる. 第5図の実線は, $A=78$ (分), $P=-4$ (日), $B=10:36$ (JST) として得られた T の実験式である.

第5図を得たのと同様に, 各アメダス地点での海風侵入時刻 T のデータにシプレックス法を適用して, 各地点での T の実験式を求め, 地域毎に分類したのが第6図に示される. なお海岸段丘である室戸・足摺の両岬は, 共に2つの海域に挟まれて, 海風そのものを見出すのが難しい. この両地点と, たった一度だけ海風の侵入が確認された愛媛県境に近い梶原は海風の侵入時刻の解析から除外した. それから大柝を除く山間部では冬季 (12~1月) に海風の侵入が確認されなかった. このため T の実験式は冬季以外のデータに基づいて導出した式である.

各地域での海風侵入時刻は沿岸部では夏季に9時頃, 冬季に11時半頃; 平野部では夏季に10時半頃, 冬季に13時頃で, おおむね夏季に早く冬季に遅い傾向を示している. そして, その年変化は約70分 (沿岸部) と約75分 (平野部) の振幅を持つ周期変化で表される.

一方, 山間部での侵入時刻は夏季に12時半頃で, 冬季は大柝を除いて不明である. 山間部では, 第2図(a)に示すように海風の侵入前に谷風の流入が見られるこ

とがある. 特に暖候期 (6, 7, 8月) に, その頻度が高く, 例えば, 大柝ではこの期間の谷風の流入が海風侵入日の87%に相当する. 谷風が海風侵入時刻とどのような関係にあるのか興味があるが, 今のところ不明である. 参考のために, 各地点での海風侵入時刻 T の実験式を第2表に整理する.

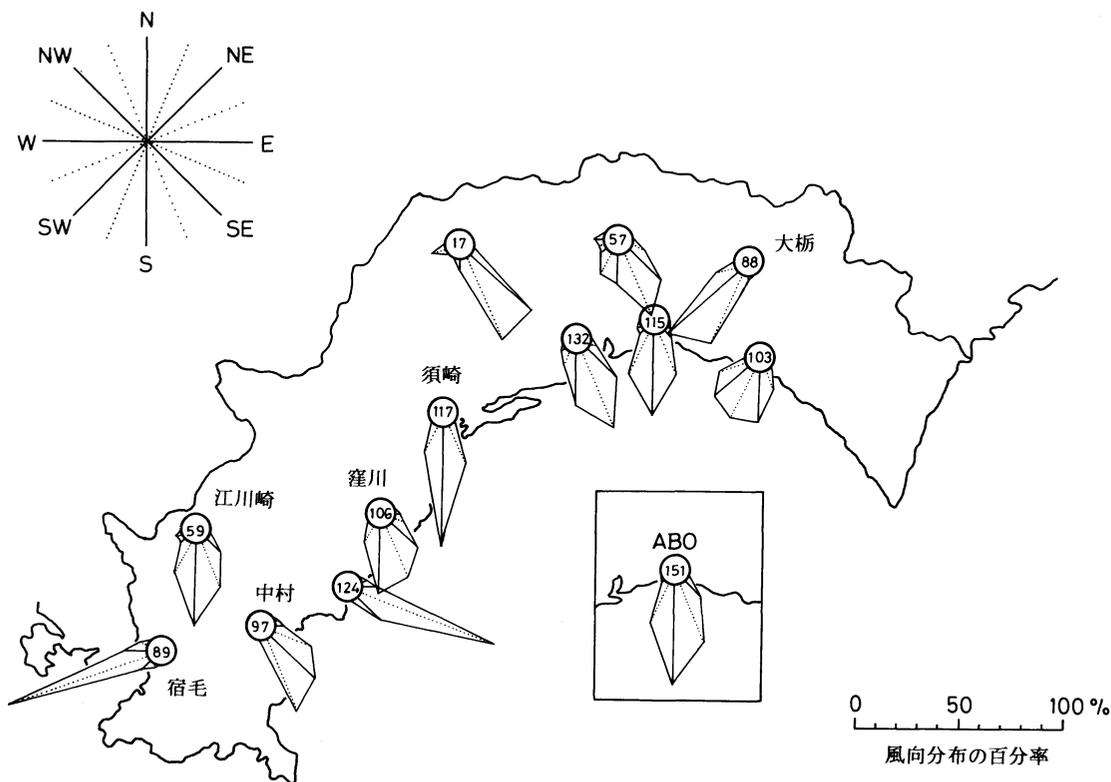
4.2. 海風の風向分布

各点 (室戸・足摺の両岬と梶原を除く) での海風侵入時刻つまり侵入直後における風向を16方位に分け, 風配図 (第7図) に示した.

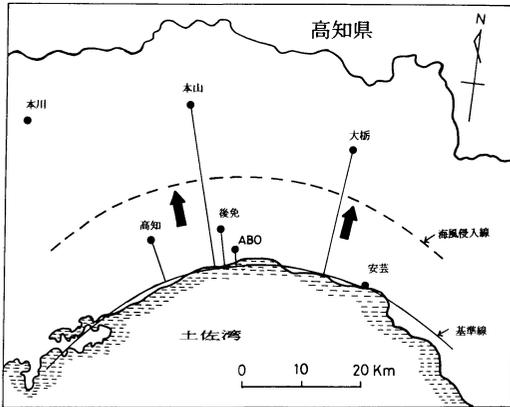
高知県内の海風は主に土佐湾からであるが, 県西部の宿毛での海風の卓越風向が西南西であることから, 豊後水道方面から侵入する海風もある. また江川崎に侵入する南寄りの海風は, 宿毛と中村での海風侵入時

第2表 各観測点での海風侵入時刻Tの実験式

場 所	海風侵入時刻T ($T = A \cdot \cos \{ 2\pi (D+P)/365 \} + B$)		
(I)沿岸部	A(分)	P(日)	B(JST)
a. ABO	78	-4	10:36
b. 須崎	76	8	10:27
c. 宿毛	47	7	10:48
d. 佐賀	80	0	10:00
e. 安芸	75	9	10:31
(II)平野部			
f. 後免	79	-3	11:44
g. 高知	79	-1	11:42
h. 窪川	58	2	11:57
i. 中村	80	-5	11:13
(III)山間部			
j. 本川	30	31	12:12
k. 江川崎	36	-4	12:58
l. 大柵	52	12	12:42
m. 本山	-17	149	13:03



第7図 海風の風配図。○内の数字は海風出現のデータ総数。



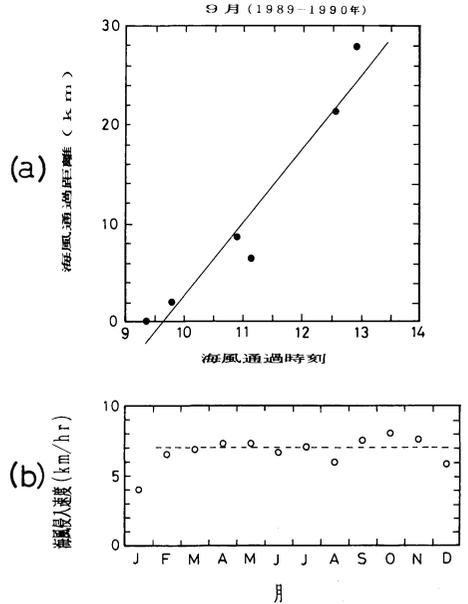
第8図 土佐湾からの海風の侵入図 (モデル)。

刻に大差のないことから、宿毛と中村の両方面からの海風が収束合流したものと考えられる。さらに県東部の大橋では、海風の卓越風向が南西(頻度48%)であり、南西に走る谷筋に沿う海風の頻度が高いことがわかる。沿岸部では海岸線にほぼ直交する形で侵入している。しかし県中部の須崎では海岸線が南西に走向しているのに64%と高い頻度で真南から侵入している。これは西隣の窪川付近の背後が海拔高度500m以上の高地である(第1図参照)ことから、この付近に侵入する海風は山岳による障壁効果を受け東西方向に分離するためであろう。

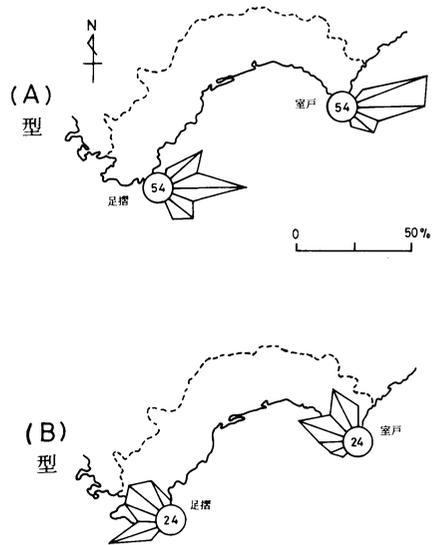
4.3. 海風の侵入速度

第8図に示すように、海岸線に最も近い安芸を通る円弧状の基準線を想定する。そこから海風が海岸線にほぼ直交する形で順次、ABO→後免→高知→大橋→本山方面に侵入すると考える。各観測点の基準線からの距離と、各点での月毎の海風侵入時刻の平均値(第2表参照。ただし本山の12~1月は除く。)との関係から月別の海風の侵入速度 V_p が評価される。一例として9月の場合(第9図(a))、最小自乗法から $V_p = 7.6 \text{ km/hr}$ (相関係数=0.97)である。そして月毎の海風侵入速度を第9図(b)に示すが、大きくずれる1月を除くと、破線で示される平均値は $V_p = 7 \text{ km/hr}$ (=1.9 m/s)である。この値は千葉その他(1990)がABOで得た海風前線の進行速度 $V_F = 1.2 \text{ m/s}$ より大きい。

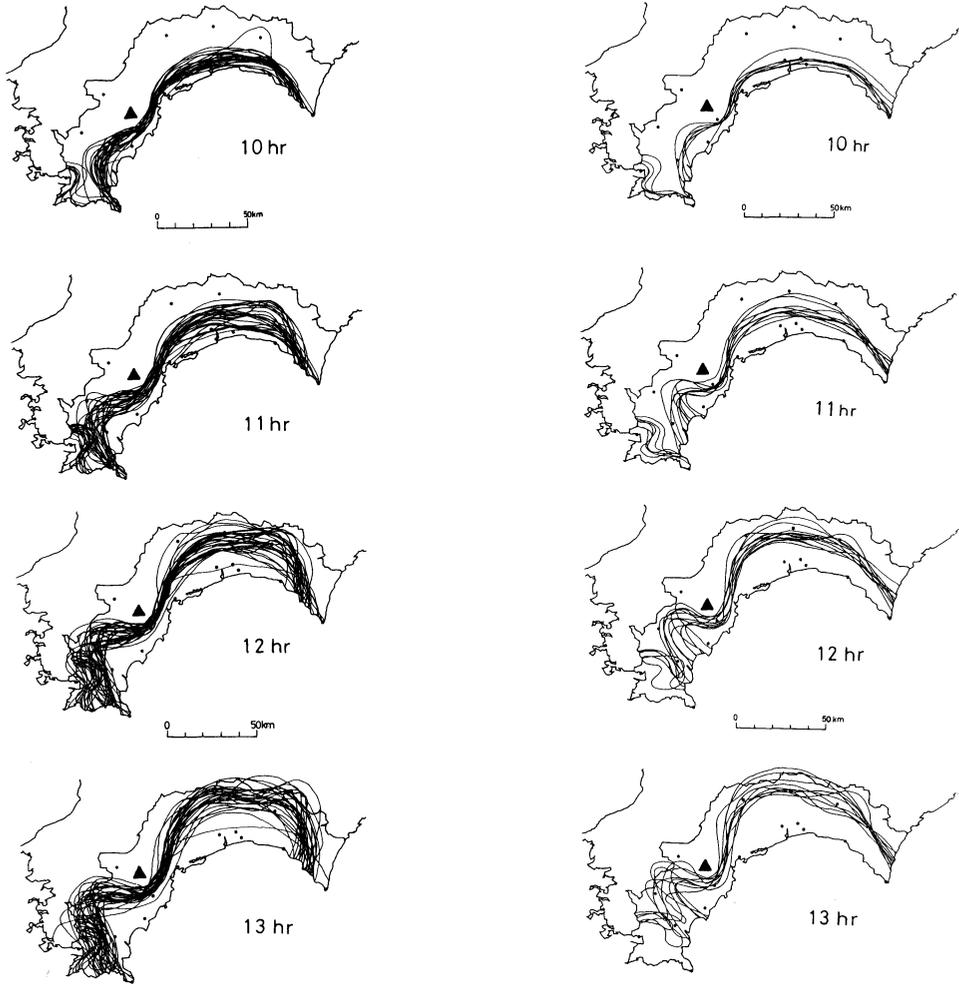
参考までに述べると、Nakane and Sasano (1986)が捕捉した鹿島灘から関東平野に侵入した海風前線の速度は3.3 m/sであり、高知の場合と比較すると大きい。この場合の海風の侵入距離は海岸線から大体 40



第9図 (a)海風通過時刻と海風通過距離の関係、(b)月毎の海風侵入速度。



第10図 室戸岬と足摺岬での地上地衝風向のパターン分類。○内の数字は地上天気図から解析した各型の該当日数。



第11図 (A)型に属する夏季(6, 7, 8月)の海風の侵入状況。

第12図 (B)型に属する夏季(6, 7, 8月)の海風の侵入状況。

～50 km で、高知の場合(～30 km)より大きい。海風の侵入速度については、海岸からの距離や地表条件の違いから海岸部で遅く、内陸部で速くなる傾向が指摘されている(Simpson *et al.*, 1977)。これらの要因に加え、高知県の海風を考える場合には、海風の速度差の生じた理由の一つとして、両地域での海上の気温の違いがあげられる。つまり、高知の場合には四国沖を流れる黒潮(表面水温は冬18°C, 夏28°C前後)が、そして関東平野の場合には鹿島灘、房総沖を流れる親潮(表面水温は3月, 13～15°C, 8月, 24～25°C)(川合, 1972)が各地域での海上の気温に影響するものと考えられる。

4.4. 海風侵入図のパターン分類

高知県内のアメダス観測点で、特に室戸と足摺の両岬の地形を考えると、その周辺の気象が陸上よりも海上の影響が強く、そのために地表面の影響よりも一般風の影響を受けやすいものと予想される。そこで、午前9時の地上天気図から両岬付近を通る等圧線の走向から求めた地上地衡風向に着目し、それを第10図に示すように2つの型に分類した。すなわち、海風侵入日の午前9時に

(A)型: 両岬の地衡風向が共に0°～180°の範囲にある場合。

(B)型: 両岬の地衡風向が共に180°～360°の範囲にある

場合。

各型の頻度は海風日 151 日の中で、地上地衡風向が求まった 127 日分のうち(A)型が 54 日、(B)型が 24 日であり、その他が 49 日であった。そして(A)、(B)各型の中で夏季(6, 7, 8 月)に含まれる海風日は各々 27 日分と 11 日分である。それらに PVD を適用して解析した結果が 10 時から 13 時までの 1 時間毎の海風侵入状況として第 11 図と第 12 図に示される。海風の侵入線は両型とも▲印で示される窪川付近を境にして非対称な 2 つコブ形の特徴を持つ。このことは高知県を含めた四国地方の風の一般的特性について調査した大阪管区気象台の解説(1985)では指摘されていない。

侵入線の形について、特に右のコブが大きいのは、窪川の背後にある高地の影響が大きい。高地或いは山岳の存在が、重力流としての海風を海岸線に平行な流れに変化させること(Simpson, 1987)、しかも高地の斜面を滑昇する海風があっても、加熱された高地上で生ずる上昇流が海風の侵入を妨げることが数値実験(Ookouchi *et al.*, 1978; Mannouji, 1982)から指摘されている。このような研究成果は土佐湾からの海風が窪川の背後に及ぶことが少ないことを示唆している。さらに 4. 2 節で述べた障壁効果と南寄りの一般風の後援を受けるためであろう。

(A)型に属する海風の場合には、気圧傾度と海風の向きは逆であり、(B)型の場合には同じ方向である。第 11 図と第 12 図の 13 時の侵入状況を比較すると、侵入形態についてはおおよそ大差がないが、細かく検討すると(B)型に属する海風の方の侵入が両岬付近を含めて、少し内陸奥部まで及んでおり、少なくとも一般風が局地的な海風の侵入や形態に影響を与えていることが理解される。

5. まとめ

高知県の海風の特徴は次のようにまとめられる。

- 1) 高知県の海風の主な侵入路は、土佐湾からと豊後水道方面からのものとに大別される。
- 2) 風向・風速・気温のアメダスデータ 10 分値の時系列と進行ベクトル図を用いることによって、高知県での海風の侵入状況を調べることができた。
- 3) 高知県の各地域での海風の侵入時刻は、沿岸部、平野部では明瞭な年変化を示すが、山間部では、その変化が小さい。
- 4) 各地域での海風侵入時刻の月平均値の地域差から求めた土佐湾からの海風の侵入速度は約 7 km/hr

である。

5) 土佐湾からの海風の侵入線は 2 つコブの形状を持つ。

6) 室戸と足摺の両岬での地上地衡風向別の海風の侵入状況を比較した結果、一般風が海風の侵入状況に影響を与えている。

謝 辞

(財)日本気象協会関西本部の大藤明克氏には、解析日に該当する高層天気図と地上天気図の資料を提供していただいた。また、安達隆史博士((財)日本気象協会中央本部)には地表風と上層風との関係について有益なコメントをいただいた。それぞれの御好意に感謝致します。

近藤正氏(日本気象協会関西本部)と明坂和幸氏には高知大学在学中、データ解析の際に御助力をいただいたことに感謝致します。

文 献

- 千葉修, 石川明弘, 広田智佳朗, 1990: 接地気層での海風前線の観測 I. 海風前線の侵入時刻と前線幅について, 天気, 37, 415-419.
- 江口恒夫, 1977: 大阪市の海陸風について—地上風データの統計解析—, 天気, 24, 739-746.
- 藤部文昭, 1981: 海陸風の季節的特性, 天気, 28, 367-375.
- 蒲生 稔, 1988: 混合層と海風域の境界, 公害, 23, 37-46.
- 蒲生 稔, 1991: 海風前線位置を読み取る方法の比較, 公害, 26, 31-38.
- 川合英夫, 1972: 海洋物理 II (海洋科学基礎講座), 東海大学出版会, P. 328.
- 栗田秀實, 植田洋匡, 木本茂記, 1988: 弱い傾度風下での大気汚染の長距離輸送の気象学的構造, 天気, 35, 23-35.
- McPherson, R. D., 1970: A numerical study of the effect of a coastal irregularity on the sea breeze, J. Appl. Meteor., 9, 769-777.
- Mannouji, N., 1982: A numerical experiment on the mountain and valley winds, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 1085-1105.
- Nakane, H. and Y. Sasano, 1986: Structure of sea-breeze front revealed by scanning lidar observation. J. Meteor. Soc. Japan, 64, 787-792.
- 中西幹郎, 木村竜治, 1987: AMeDAS データによる汚染塊の流跡線解析, 天気, 34, 467-477.
- 奥村晴彦, 1986: パソコンによるデータ解析入門, 技術評論社, P. 244.

Ookouchi, Y., M. Uryu and R. Sawada, 1978 : A numerical study of the effects of a mountain on the land and sea breezes, J. Meteor. Soc. Japan, 56, 368-386.

大阪管区気象台, 1985 : 近畿・中国・四国地方の風の一般的特性と地域気象観測所資料による府県別地域細分, 解説資料第12号, P. 176.

佐橋 謙, 1978 : 岡山周辺の海陸風について, 天気, 25, 357-363.

Simpson, J. E., 1987 : Gravity currents. Ellis Horwood

Limited, 244 p.

Simpson, J. E., D. A. Mansfield and J. R. Milford, 1977 : Inland penetration of sea-breeze fronts, Quart. J. R. Meteor. Soc., 103, 47-76.

Yoshikado, H., 1990 : Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex, J. Appl. Meteor., 29, 878-891.

日本気象学会および関連学会行事予定

行事名	開催年月日	主催団体等	場所	備考
1993年中砂漠化機構解明研究シンポジウム	1993年3月2日 ～4日	科学技術庁	科学技術庁・研究交流センター (つくば市)	Vol. 39, No. 9
第39回風に関するシンポジウム	1993年3月4日	土木学会, 日本気象学会他	土木学会・土木図書館講堂 (新宿区)	Vol. 39, No. 10
地球惑星関連学会1993年合同大会	1993年3月19日 ～22日	地球惑星関連の6学会	東京都立大学教養部 (八王子市)	Vol. 40, No. 2
日本農業気象学会1993年度大会	1993年4月1日 ～3日	日本農業気象学会	お茶の水女子大 (東京)	
「自然科学と経済における予測可能性と非線型モデリング」の国際会議	1993年4月5日 ～7日	Wageningen 農業大学	Wageningen 市国際農業センター (オランダ)	Vol. 40, No. 1
日本気象学会1993年度春季大会	1993年5月17日 ～19日	日本気象学会	気象庁, KKR 竹橋 (東京)	
第5回メソ気象研究会	1993年5月20日		気象庁第1会議室	Vol. 39, No. 12
第7回太平洋学術中間会議	1993年6月27日 ～7月3日	日本学術会議, 宜野湾市, 日本気象学会他	那覇市	
IAMAP・IAHS'93 (第6回国際気象学大気物理学協会科学会議及び第4回国際水文科学協会科学会議合同国際会議)	1993年7月11日 ～23日	日本学術会議, 日本気象学会他13学会	横浜国際平和会議場 (横浜市)	Vol. 38, No. 7 No. 9 No. 12 Vol. 39, No. 4 No. 7 No. 11
第16回極域気水圏シンポジウム	1993年8月4日 ～5日	国立極地研究所	国立極地研究所講堂 (板橋区)	Vol. 40, No. 2
IGRASS'93 地球科学とリモートセンシング国際シンポジウム	1993年8月18日 ～21日		工学院大学	リモートセンシング技術センター(本村夏彦) Tel. 03-3403-1761
第25回国際水文学会会議	1993年8月30日 ～9月3日	第25回国際水文学会会議国内組織委員会, 土木学会	京王プラザホテル(東京)	
1993年度日本雪氷学会全国大会	1993年10月18日 ～21日	日本雪氷学会	新庄市・新庄市民プラザ (山形)	