

近年の土佐湾海風の変化

—約18年前との比較—

千葉 修*・倉掛 容子**

要 旨

黒潮の影響を強く受け高知平野に隣接する土佐湾の水温が、局地風である海風に及ぼす影響を調べるために、ヒートアイランドの影響の小さい高知県の3か所のアメダス地点（安芸、日章、後免）を選んで、2003～2007年の5年間の気象データ解析を行った。これらの近年の結果と約18年前（1989～1990年）高知大学で観測したソーダデータに、その期間の安芸、後免のデータを付加して求めた過去の結果とを比較した。その結果、海風進入時刻について、近年の5年平均値の方が過去に比べ平均で約21分遅くなっていた。海風の進入速度については、近年は3.1 km/hで、過去（約18年前）は2.9 km/hで大差はなかった。

1. はじめに

地球温暖化に伴う大気環境の変化が種々のシグナル（例えば気温の上昇や降水量の増加）として散見されるようになった。温暖化による気候変化が総観規模のスケールを持つ変動のみならず、沿岸大気や海陸風のような局地気象にも影響を与える可能性が高い。黒潮流軸に接する土佐湾の年平均水温が1960年以後0.5～1.0°C上昇したことが指摘されており（大野2007）、土佐湾沿岸域の海陸風の挙動にも影響を与えていると予測される。そこで1989～1990年に高知大学大気境界層観測所（略称 ABO）の音波レーダ（ソーダ）と安芸、後免のアメダスデータから得られた海風の進入時刻、および進入速度と、近年の2003～2007年にわたる海岸部に近い3か所（安芸、日章、後免）のアメダスデータの解析を行い、その結果と比較した。なお、ここでの解析は一般に100年程度のデータ解析を必要とする気候変化（気候変動）には言及していない。いわば気候変化に関する長期間の全記録を取得し

ていないことから、1989～1990年（過去）と2003～2007年（近年）の二つの期間を抽出して解析したものである。つまり約18年の間において海風の挙動を比較したことを付記する。

2. 解析データの説明

2.1 使用データ：

使用データは土佐湾の海岸線に近い安芸、1.5 km 内陸にある日章、そして6.4 km 内陸に位置する後免の3地点の2003～2007年の気温・風向値（10分値）である（第1図を参照）。いずれも高知市郊外にあり都市部と郊外の温度差をもたらすヒートアイランドの影響が小さい地域である。なお、日章は高知空港滑走路の中央部付近にあり、2003年1月1日より気象要素の10分値データが配信されている。アメダスデータの他に、安芸の海岸から約50 km 沖合の土佐湾中央部にある黒潮牧場12号（第1図の★点で示す33°07.16'N, 133°37.17'E）にある浮き漁礁ブイ（高知県水産試験場2008）で観測された2003～2007年の表層水温値（海面下2 m 深、1時間毎）を用いた。なお、水温センサーは白金測温抵抗体で、測定範囲-5～45°C、精度±0.02°C、応答速度0.25秒である。

2.2 使用データの採用基準：

海風進入日とその進入時刻を決定するために、大規

* 高知大学大学院総合人間科学研究科黒潮圏総合科学専攻。chibaosa@kochi-u.ac.jp

** 高知大学理学部。

—2008年6月4日受領—

—2009年2月12日受理—

模な大気擾乱（台風や低気圧，前線など）や他の風の影響が少なく，局地風である海風の特徴が強く反映されているデータを選択する必要がある．Alpert and Rabinovich-Hadar (2003) を参考に，以下のような採用基準を考慮した．すなわち，海風の進入時の特徴は，①風向シフト，②気温の上昇停止または降下，③風速の増加，④相対湿度の増加にみられるが，この研究ではアメダス風速の分解能が1 m/s と粗いこと，上記3地点の相対湿度の取得が不可であることから，①と②に注目し，海風進入時刻を求めた．特に海風前線（海風の先端部）と海風（本体）の進入時刻を識別するために，千葉ほか（1990）及び Chiba（1993）にならない，風向が北から移り始める時刻を前線の進入時刻，そして風向が北寄りから南よりに変化し終わって定常状態になった時刻を海風の進入時刻とした．

解析の手順としてまず，

(1) 気象庁の「日々の天気図」から，西日本が太平洋高気圧か，あるいは移動性高気圧に覆われ，天候が概ね晴れの日を選択した．

(2) さらに地域特性も考慮し，アメダス3地点（安芸，日章，後免）の10分値データから以下のような判断基準を設定した．

- a. 1日の中で海風と陸風の交代がみられること．つまり，海陸風が卓越していること．
- b. 3地点の0時から海風進入時までの風向が北寄りで，一般風の影響が強いこと（風速が5 m/s以下とする）．
- c. 千葉ほか（1993）によると，卓越風向は安芸は

南南西，日章は南，後免も南である．この3地点の主風向の変化幅が $\pm 22.5^\circ$ 以内（例えば，主風向が南なら南南東～南南西）で1時間程度持続すること．

- d. 高知地方気象台のデータから先ず無降水の晴天の日を選ぶ，あるいは極端に相対湿度の高い日は主観的な判断で除いた．
- e. 過去の海風進入時刻（月平均値）と比較し1時間以上差がないこと．

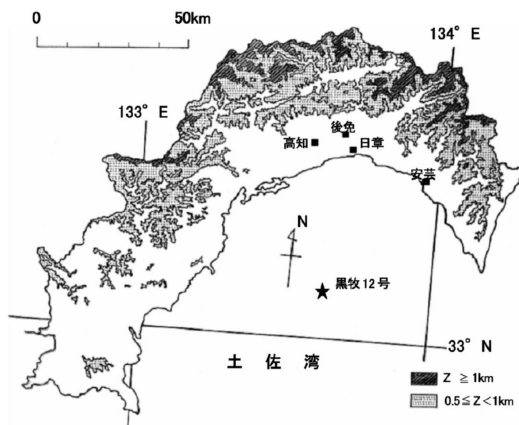
このような基準を満たしたデータを厳選し解析対象になる海風進入日として使用した．最後に土佐湾の海風は海岸線に近い安芸，平野部の日章，山手の後免の順に進入することを考慮して各地の海風進入時刻の再吟味をした．

3. 解析結果

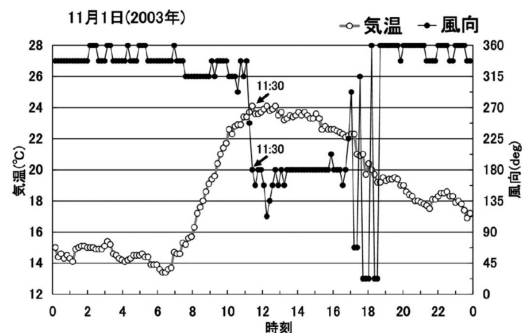
3.1 事例

第2図は日本の東海上の高気圧に覆われ概ね晴れて，日章で海風進入のあった観測事例（2003年11月1日）である．気温上昇が停止（または降下）し，風向シフト（11時10分）の後の11時30分が海風進入時刻（矢印で示す）である．

2.2節の手順で評価した各年の各アメダス地点での海風進入時刻（月毎の年平均値と5年平均値）を地点毎に第1表の(a)～(c)にまとめた．アメダス地点への海風進入日の解析日数は，2003年から2007年まで，それぞれ37，47，53，47，51日で，合計235日であり，その中で夏季（7～9月）の日数が80日で全体の34.0%を占める．ちなみに2003～2007年の上記3地点の海風の風向は，安芸では南（ 180° ）～南西（ 225° ）の範囲に96.6%が，日章では南に91.1%が，



第1図 高知県の地勢と観測点．■印はアメダス観測地点で★印は黒牧12号．



第2図 2003年11月1日の日章のアメダスデータ（気温，風向の各10分値）の時間変化．

第1表 2003-2007年の海風進入日のアメダスデータから得られた各地点 ((a) 安芸, (b) 日章, (c) 後免), 各年の海風進入時刻についてのまとめ.

海風進入時刻 (月毎の年平均時刻)

(a) 安芸

年	2003	2004	2005	2006	2007	5年平均値	5年間の総数(月毎)
1月	11:30	11:50	12:05	11:55	10:55	11:39	9
2月	10:55	11:17	11:30	10:45	10:26	10:58	14
3月	10:05	9:50	9:48	9:50	10:00	9:54	17
4月	9:30	9:35	9:21	9:22	9:13	9:24	28
5月	8:56	9:22	9:08	9:16	9:04	9:09	23
6月	8:45	9:02	8:53	8:35	8:42	8:47	18
7月	8:36	8:50	8:42	8:45	8:33	8:41	21
8月	8:20	8:36	8:31	8:54	8:21	8:32	41
9月	9:20	9:15	9:15	9:40	9:23	9:22	18
10月	10:16	10:16	10:30	9:56	10:17	10:15	15
11月	11:13	11:05	10:42	10:40	11:13	10:58	20
12月	11:40	12:05	12:10	11:16	11:16	11:41	11
海風進入日数(年毎)	37	47	53	47	51		

(b) 日章

年	2003	2004	2005	2006	2007	5年平均値
1月	13:30	12:40	12:35	12:30	12:45	12:48
2月	12:05	11:45	12:20	12:15	12:03	12:05
3月	11:30	11:30	10:57	11:17	11:07	11:16
4月	10:53	10:27	10:00	10:46	10:38	10:32
5月	9:56	10:02	9:48	10:36	9:54	10:03
6月	9:25	9:48	10:00	10:25	9:57	9:55
7月	10:20	9:37	9:25	9:57	9:36	9:47
8月	9:32	9:43	9:41	10:04	9:35	9:43
9月	10:52	10:15	9:55	10:10	10:26	10:19
10月	11:30	11:10	11:50	11:30	11:30	11:30
11月	11:46	12:00	12:08	11:56	11:40	11:54
12月	13:00	12:25	12:50	12:16	12:03	12:30

(c) 後免

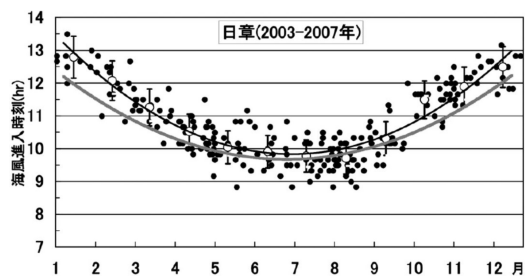
年	2003	2004	2005	2006	2007	5年平均値
1月	13:50	13:55	14:05	14:05	14:00	13:59
2月	13:20	13:17	13:16	13:25	13:56	13:27
3月	12:15	12:15	12:16	12:07	12:17	12:14
4月	11:10	11:12	11:15	11:10	11:26	11:14
5月	11:06	11:05	11:20	11:30	11:16	11:15
6月	10:55	10:58	10:56	11:17	11:20	11:05
7月	11:16	10:37	10:45	10:45	10:36	10:47
8月	10:43	10:51	10:53	10:40	10:43	10:46
9月	11:30	11:10	11:13	11:23	11:10	11:17
10月	12:23	12:10	12:30	12:16	12:07	12:17
11月	12:33	12:45	12:45	12:40	12:43	12:41
12月	13:20	13:15	13:40	13:20	13:16	13:22

そして後免では南南東 (157.5°) ~ 南南西 (202.5°) に92.3%が分布していた.

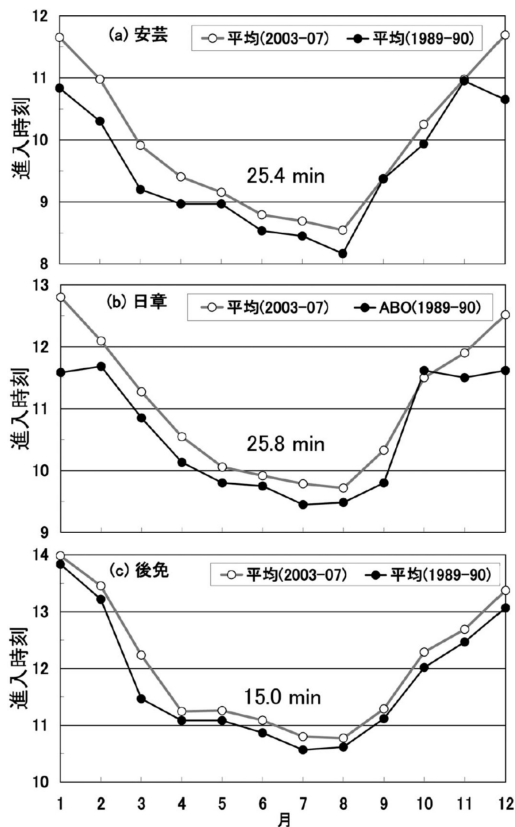
3.2 過去の研究例との比較

千葉ほか (1993) は1989~1990年の ABO でのソーダ観測 (高度60 m) から海風進入時刻 (151日分) が季節変化, つまり, 総じて夏季に早く冬季に遅い傾向を示し, 進入日数は夏季の方が冬季より頻度が高いことを報告した. 一方, 2003年1月から2007年12月の5年間のうち235日分の日章のデータから得られた海風進入時刻の年変化が第3図に示される. 夏季に早く冬季に遅い傾向は変わらないが, ABO で得られた過去の変化曲線 (灰色太線) と2003~2007年の5年分の傾向を示す月毎平均曲線 (黒実線) と比較すると, 後者の海風進入時刻が遅れている傾向を示す.

月毎の年平均値として求めた3地点の海風進入時刻の過去 (1989~1990年) と近年 (2003~2007年) の比較を第4図 (a) - (c) に示す. なお, 過去のデータは, この当時観測値の無い日章に代わって ABO のソーダデータを, それ以外は1989~1990年の安芸と後免のアメダスデータを使用した (つまり, 印字紙記録の10分毎の値を使用). 各々の地点で近年の方が遅く, 5年平均値として安芸では25.4分, 日章では25.8分, そして後免では15分の時間の遅れを示し, 総じて過去に比較して15~26分 (平均で21分) 遅くなっている. 山手の後免は他より遅れが小さいが, Asai and Mitsu moto (1978) が平野部背後に斜面がある場合に海



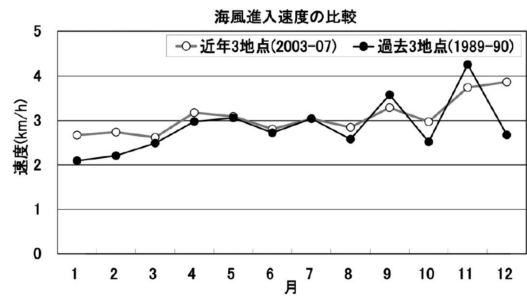
第3図 2003~2007年に日章に進入した海風の進入時刻の個々のデータ (小さい●印) と月毎平均値 (○) に適合させた近似式 (黒実線). 灰色太線は ABO の観測値 (月毎平均値) の近似式. 新年 (1月1日) からの日数を X , 時刻 (hr) を Y , それらの相関係数を R とすると, 黒線は $Y = 1.119 \times 10^{-4} X^2 - 4.168 \times 10^{-2} X + 13.70$ ($R = 0.981$), 灰色太線は $Y = 8.353 \times 10^{-5} X^2 - 3.023 \times 10^{-2} X + 12.42$ ($R = 0.895$).



第4図 1989-90年と2003-2007年の期間、月毎平均値として求めた3地点((a)安芸, (b)日章, (c)後免)の海風進入時刻の年変化。

風が増幅されると指摘しているように平地—山地間の谷風が海風より早く発生し、その動きを追走するように海風の進入が促進され、安芸(海岸部)や日章(平野部)よりも海風が加速したと思われる。

3地点への海風の進入は当然、海岸部の安芸が早く、それに約1時間遅れて日章へ進入し、さらに約2時間程度で後免に達する。そして、千葉ほか(1993)では、土佐湾の海風が円弧状の海岸線から進入するとして、6か所の観測点(安芸, ABO, 後免, 高知, 大栃, 本山)の海風進入時刻と、各観測点の海岸線から距離を考慮して海風進入速度を7 km/h (=1.9 m/s)と求めた。しかし今回の解析では、都市化の影響が大きい高知や、山間部に位置して加速した海風の通過が想定される大栃, 本山を除いた沿岸部の3地点(安芸=0 km, 日章=1.5 km, 後免=6.4 km)を対象に海風進入速度を求めた。その年変化が第5図に示され



第5図 3地点の海風進入時刻と海岸線からの距離の関係から求めた過去(1989-1990年; ●印)と近年(2003-2007年; ○印)の海風進入速度の年変化。

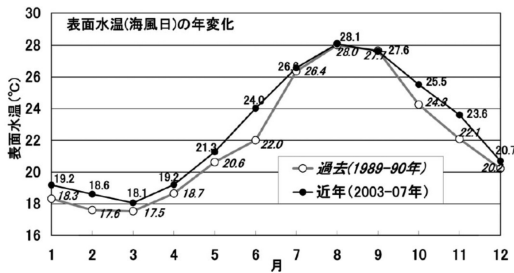
る。結果として3地点から求めた値(月毎年平均値の5年平均値)は3.1 km/h (=0.86 m/s)であった。これは過去(1989-1990年)の3地点のアメダスデータ(ただし、日章データはABOのソーダデータで代替)を基にして求めた海風の速度2.9 km/h (=0.81 m/s)と明瞭な差はない。

3.3 水温変化

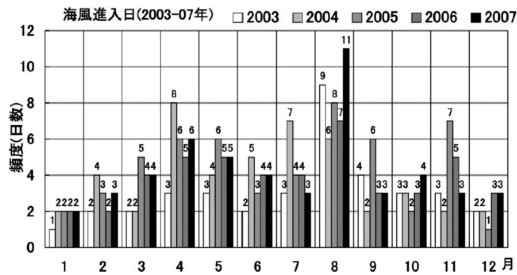
気象庁(2008 a)によると、四国・東海沖北部領域では、1900年から現在までの100年間に水温上昇率($^{\circ}\text{C}/100\text{年}$)は、 $1.26 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ と推定されている。また気象庁(2008 b)によれば黒潮大蛇行は1965年以降5回発生し、最近では2004年~2005年8月にみられた。蛇行時にも土佐沖の黒潮流軸は大きく偏らず、その主軸の平均的な位置は足摺, 室戸の両岬から約46 kmに位置している(宮田ほか 1980)。一方、坂本(1981)は1965~1976年の高知県水産試験場が実施した土佐湾表面水温観測結果から、土佐湾の水温が外洋水の影響を強く受け、特に8月が顕著であることを報告しているが、近年黒潮の挙動がどの程度土佐湾の水温変化に関係したかについては今後の課題である。

ここでは海風進入日の土佐湾の水温がどのような状況になっているかということに関心を持ち、海風が進入した日の過去(1989-1990年)と近年(2003-2007年)の土佐湾表層水温(月毎平均の年平均値)を比較した(第6図)。年間を通じてみると近年の水温が $0.1 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ の幅で過去より高い。夏季(7月~9月)にほとんど差はないものの、秋の10月から冬を経て、6月頃まで $0.5 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 近年が高温になっている。

2003~2007年の海風進入日数の月毎の頻度分布(第7図)をみると、4月と8月に多く、特に2007年の8月は11日あり、近年では極大であった。これは8月が



第6図 海風進入日の過去(1989-1990年;○印)と近年(2003-2007年;●印)の土佐湾表層水温(月毎平均値)の年変化。数値は温度(°C)。



第7図 2003-2007年の海風進入日数の頻度の年変化。各々の柱頭の数値は頻度(日数)。

太平洋高気圧の勢力が強く、全国的に記録的な高温になったこと(気象庁観測部統計室 2007)や、日章の海風進入日の平均気温(22.8°C)や土佐湾の平均水温(26.5°C)が他の年に比べ高く、黒潮という暖流に接する沿岸域や平野部に水温上昇の影響が及んだものと考えられる。

4. 考察とまとめ

黒潮流域の影響を受ける土佐湾の水温が経年的に上昇していることから、土佐湾沿岸域のヒートアイランドの影響の少ない3アメダス地点の近年の気象データ解析結果と約18年前の海風進入時刻と進入速度を比較検討した。結果として近年は過去の海風進入時刻に比べ、3地点の平均として21分の遅れを示した。この理由の一つとして、海水温上昇のため海上気温が上がり、陸上気温が海水温(または海上気温)を上回る時刻が遅れたためと考えられる。一方、進入速度の違いはわずかであった。

海風の遅れに関して山本(2003)は大阪平野の例をあげ、都市域の加熱によって海風循環が変形し、海風

の進入が遅れている(Yoshikado 1992)と言及している。しかし、今回の解析は都市化が進む人口約34万人(2008年現在)の高知市のデータではなく、土地改変の少ない郊外の人口約5万人以下の市町村に存在する観測点(安芸, 日章, 後免)でのデータを使用したもので都市化の影響は小さい。

遅れた原因として最も可能性が高いのが黒潮の水温上昇による大気環境の変質である。黒潮流域に接する土佐湾中央部(黒潮牧場12号)での2003~2007年の表層水温は、7月から9月にかけての時期を除いて全体に上昇傾向にあることを示す。このような土佐湾海風の進入時刻の遅れが黒潮の水温上昇と密接な関係にあると推測されるが、他の要因とも考えあわせ総合的な研究を進めることが重要である。

謝辞

高知県水産試験場主任研究員の山本 順氏には黒潮牧場の水温センサーについての資料を頂いた。また2名の査読者からは有益なコメントを頂いた。あわせてそのご好意に感謝致します。

参考文献

Alpert, P. and M. Rabinovich-Hadar, 2003: Pre- and post-sea-breeze frontal lines — A meso- γ -scale analysis over south Israel. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2994-3008.
 Asai, T. and S. Mitsumoto, 1978: Effects of an inclined land surface on the land and sea breeze circulation: A numerical experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 559-570.
 Chiba, O., 1993: The turbulent characteristics in the lowest part of the sea breeze front in the atmospheric surface layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **65**, 181-195.
 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.
 千葉 修, 金堂由起, 川村学史, 1993: 高知県における海風の特性. *天気*, **40**, 109-117.
 気象庁観測部統計室, 2007: 2007年8月の日本の天候. *天気*, **54**, 907.
 気象庁, 2008 a: 海面水温の長期変化傾向(四国・東海沖北部). http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kobe/kobe_warm/kobe_warm_areaN.html#title (2008.12.24閲覧)
 気象庁, 2008 b: 気象統計情報. 海洋の健康診断表(海洋の総合情報), 総合診断表, 2.2.2. 黒潮 <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/sougou/html/>

- 2.2.2.html (2008.12.24閲覧)
 高知県水産試験場, 2008: 高知県漁海況ホームページ.
<http://www.suisan.tosa.pref.kochi.lg.jp/> (2008.12.24
 閲覧)
 宮田和夫, 坂本久雄, 百田方子, 1980: 土佐湾の海洋構造
 について—I 土佐湾の潮流. 南西海区水産研究所研究報
 告, **12**, 115-124.
 大野正夫, 2007: 地球温暖化と海の砂漠化. 山崎伸道編:
 水 その不思議な世界, 高知新聞社, 79-81.
 坂本久雄, 1981: 土佐湾の海洋構造について—II 表面水
 温. 南西海区水産研究所研究報告, **13**, 29-40.
 Simpson, J. E., 1994: *Sea Breeze and Local Winds*.
 Cambridge Univ. Press, 234 pp.
 山本勝彦, 2003: 都市温暖化が大坂平野における都市気象
 に与える影響に関する一考察. 大阪府環境情報センター
 所報, **23**, 29-33.
 Yoshikado, H., 1992: Numerical study of the daytime
 urban effect and its interaction with the sea breeze. *J.*
Appl. Meteor., **31**, 1146-1164.

Recent Change of the Sea Breeze over the Coastal Area of the Tosa Bay
 —Comparison of the Recent and Previous Data
 Analysis of About 18 Years Ago—

Osamu CHIBA* and Yoko KURAKAKE**

* *Graduate School of Kuroshio Science, Kochi University, Akebono-cho 2-5-1, Kochi 780-8520, Japan.*

** *Faculty of Science, Kochi University, Akebono-cho 2-5-1, Kochi 780-8520, Japan.*

(Received 4 June 2008 ; Accepted 12 February 2009)

Abstract

In order to investigate the effects of the sea surface temperature (SST) of the Tosa Bay being influenced strongly by the Kuroshio on the behavior of sea breeze over the Kochi plain, 5 years weather data collected from 2003 to 2007 at three AMEDAS observation points of Aki, Nissho and Gomen having least influences of a heat island effects were analyzed. These recent results were then compared with the past sodar observation data made about 18 years ago (1989 to 1990) at the ABO (Atmospheric Boundary-Layer Observatory) observation point of Kochi University, as well as additional comparisons with the data of Nissho and of AMEDAS at Aki and Gomen. As a result, the intrusion of sea breeze delayed about 21 minutes on average in recent 5 years compared to the past averages, although the intruding speed of sea breeze did not show any significant difference such as 3.1 km/h in recent years compared to 2.9 km/h in 18 years ago.
