

福岡市における海風侵入の挙動

BEHAVIORS OF SEA BREEZE ABOVE FUKUOKA CITY

福田和代¹・松永信博²・酒井聡一郎³

Kazuyo FUKUDA, Nobuhiro MATSUNAGA and Soichiro SAKAI

¹ 学生会員 工修 九州大学 総合理工学研究科 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

² 正会員 工博 九州大学助教授 総合理工学研究科 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

³ 学生会員 九州大学 総合理工学研究科 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

Behaviors of sea breeze above Fukuoka City have been investigated on the basis of AMeDAS data and field observations. The land and sea breeze is influenced strongly by the topography near Fukuoka City and blows steady along the northwest-southeast line. Sea breeze observations performed by using a doppler sodar have revealed the existence of a coherent structure consisted of a pair of ascending and descending currents. The cross-correlation coefficients between horizontal and vertical velocities vary with 30 min period and take a value nearly equal to zero when the time lag is 0. Therefore, it is concluded that the coherent structure may be due to the internal wave motion induced by the shear instability.

Key Words : sea breeze, field observation, Doppler sodar, shear instability

1. はじめに

都市域における地表面被覆の変化や人間活動による熱の排出は、都市上空の気温を上昇させ、ヒートアイランドを形成する原因となっている。著者ら¹⁾は、福岡市の気象要素も、最近の 50 年間における急速な都市化の進行に伴い、1945 年を境に変化していることを示した。その中でも、平均気温の上昇率は 1945 年以前において $0.006^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であったが、1945 年以降は $0.026^{\circ}\text{C}/\text{年}$ と 4 倍に増加しており、都市化による気温の上昇が認められることを指摘した。一方で、海風によるヒートアイランドの緩和を目的とした都市計画も提案されており、都市域における海風の挙動を調べることは、都市大気の大気環境を理解し制御する上で重要であると考えられる。日本の沿岸都市における海陸風の特徴は堤²⁾らによって調べられており、特に福岡市は他の都市と比較して夏季における海陸風出現日数が多いことが明らかにされた。図-1 に示すように福岡市は東西を 1000m 級の背振、三郡山系に囲まれ北側が海に面した人口約 130 万人の都市である。南側には筑紫平野が広がり、地形による海陸風の風向の固定化や風の収束・発散のため、福岡市上空で形成される海陸風は都市化による気温上昇をかなり緩和するものと期待される。

本研究では、月別の平均的な海風の挙動に関する解析結果と海風侵入に関する野外観測の結果について報告し、海風の侵入特性を明らかにする。はじめに、1992 年か

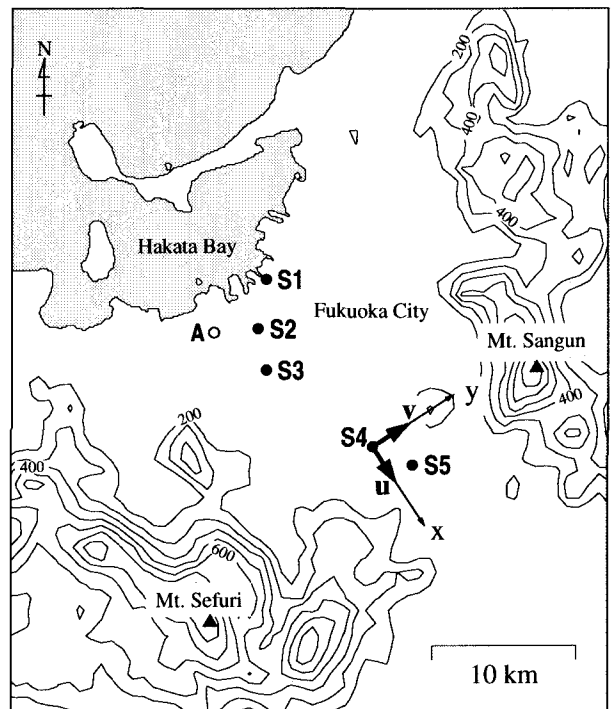


図-1 福岡市周辺の地形と観測地点

ら 1996 年のアメダス観測データを用いて行った月別の平均的な海陸風の挙動について述べる。次に、福岡市とその周辺部において行われた海風侵入の観測結果にもとづいて、海風侵入速度と海風侵入時の気温低下について述べる。また、同時に行われたドップラーソーダ観測が

ら得られた風速データを用いて、高度約 400m 以下における風速の時間-高度断面図を示し、海風侵入前後の大気の構造について議論する。

2. 年間を通した平均的な海風の挙動

(1)解析データ

解析に用いたデータは、アメダス観測年報 CD-ROM1992～1996 年版に収録された福岡局の風向、風速、日照時間および降水量の特別値である。アメダス福岡局は図-1 中の A に位置する。

(2)解析方法および解析結果

海陸風出現日における風速ベクトルの月別日変化について述べる。海陸風出現日の判定は伊藤ら³⁾を参考にして、以下の①～③の条件に従った。①1 日を通して降水量が 0mm である。②9～15 時の日照時間の合計が 4.8 時間以上である。③6 時に陸からの風、15 時に海からの風が吹き、陸からの風と海からの風がそれぞれ4 時間以上吹いている。本研究では、福岡局のデータが①～③の条件を全て満たす日を海陸風出現日とした。図-2 に上記の条件を用いて 1992 年から 1996 年にかけてまとめられた月別海陸風出現日数の平均値を示す。図-2 から冬季に関しては季節風が卓越するため海陸風が出現する日が減少すること、また、6 月においては梅雨のため日照時間が減少し、海陸風出現日数も減少することがわかる。また、4、5 月および9 月は1 か月に7 日以上海陸風が出現していることがわかる。図-3 に海陸風出現日における風向・風速を月毎に平均して求めた風速ベクトルの月別日変化を示す。いずれの月においても、地形の影響によって南東寄りの陸風と北西寄りの海風が安定して形成される。また、海風の風速は夏季に強く 4m/s 程度であり、4 月から9 月にかけては9 時間以上海風が継続して吹いていることがわかる。

3. 海風侵入に関する野外観測

(1)観測概要

著者らは、海風侵入時の風速変動と気温変動を調べるため、福岡市とその周辺部において 1998 年 5 月から風向・風速と気温の連続観測を行っている。観測地点は図-1 の S1～S5 に示されており、ほぼ海風の風道に沿ったライン上の 5 地点が選ばれた。風の観測は S1, S2, S3 および S5 においてプロペラ式風向風速計を用いて行われ、5 分毎に風向・風速データが記録された。S4 においてはドップラーソーダを用いて風速の鉛直プロファイルが求められている。ドップラーソーダ観測では、地上 45m から 425m までの計 15 高度における水平風速成分と鉛直風速成分の 1 分平均値が 1 分間隔で得られた。水平

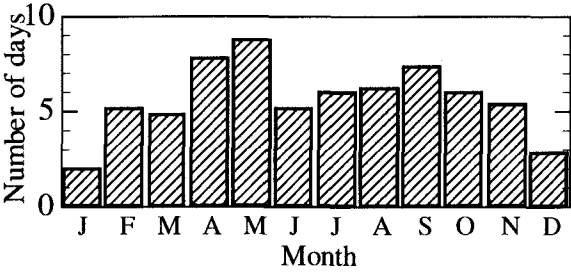


図-2 海陸風の月別出現日数 (1992 年～1996 年の平均値)

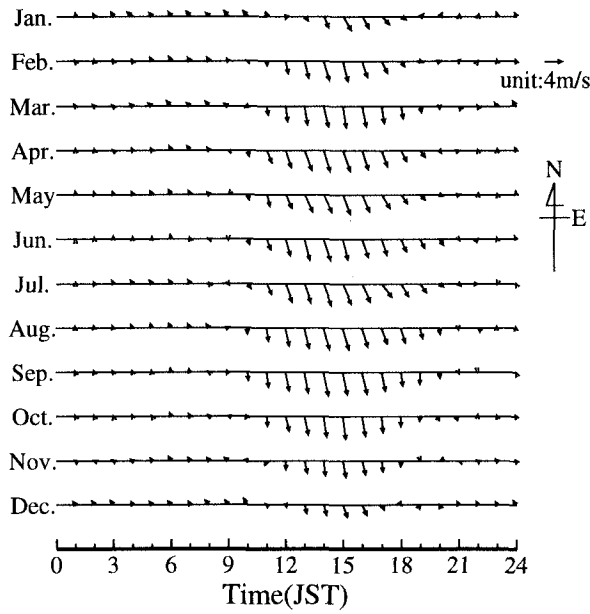


図-3 月別風ベクトル図 (1992 年～1996 年の平均値)

風速成分を定義するため、図-1 に示すように海風の主流方向(風向 327 度ライン)に x 軸をとり、それと直交する方向 (風向 237 度ライン) に y 軸を選んだ。x, y 軸方向に沿う水平風速成分をそれぞれ u, v で表し、鉛直風速成分を w で表すことにする。S1～S5 においては、白金測温抵抗体を用いて気温の観測も行われ、そのデータは 5 分毎に記録された。

また、観測当日の気象概況を知るために、福岡管区気象台 (図-1 A) の地上気象観測データと高層気象観測データを利用した。

(2)観測結果

以下では、1998 年 7 月 6 日の観測データを例に挙げて、福岡市における海風侵入時の大気の特性について述べる。

観測当日の福岡地方は太平洋高気圧に覆われ、日最高気温が 32.3℃まで上昇した真夏日であった。図-4 に観測地点 S1～S5 における風速の時系列変化を示す。図中の矢印は、各観測地点における海風の侵入を示す。なお、S4 における風向・風速データとして、ドップラー

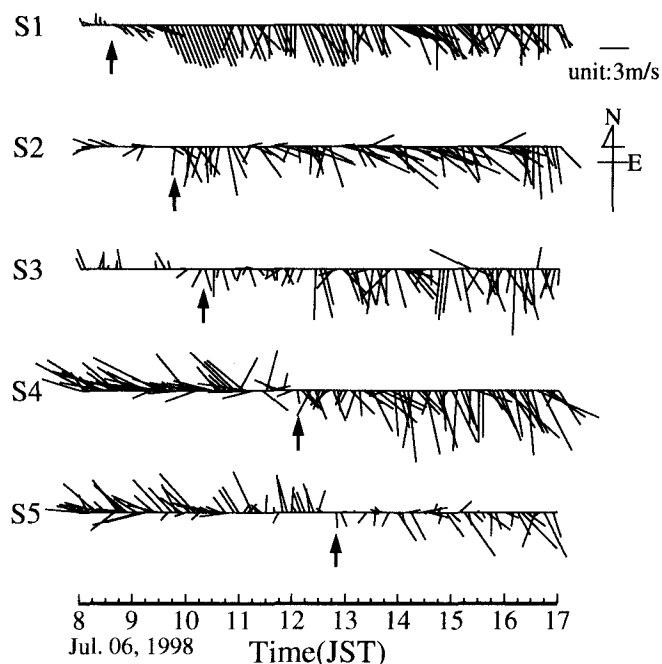


図-4 風速の時系列

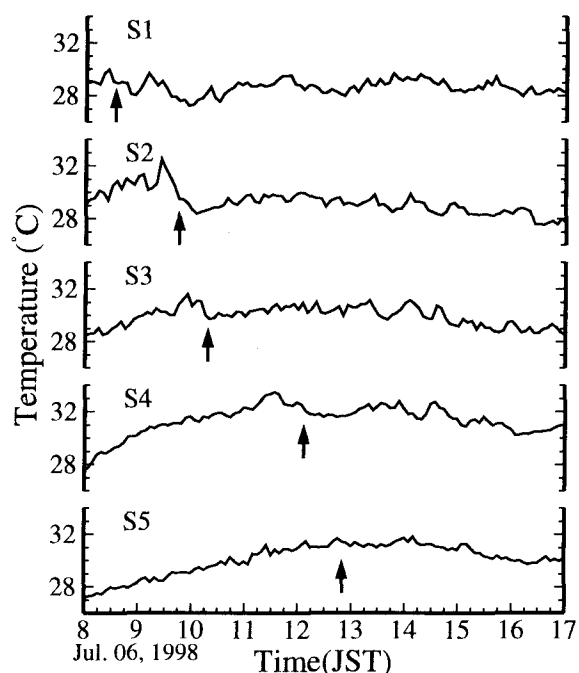
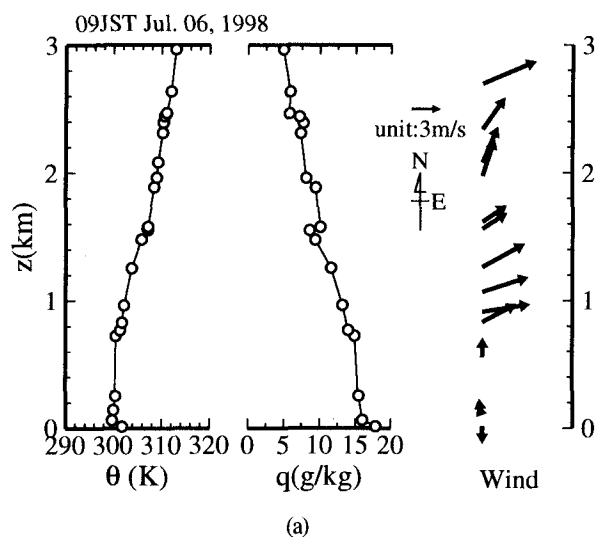
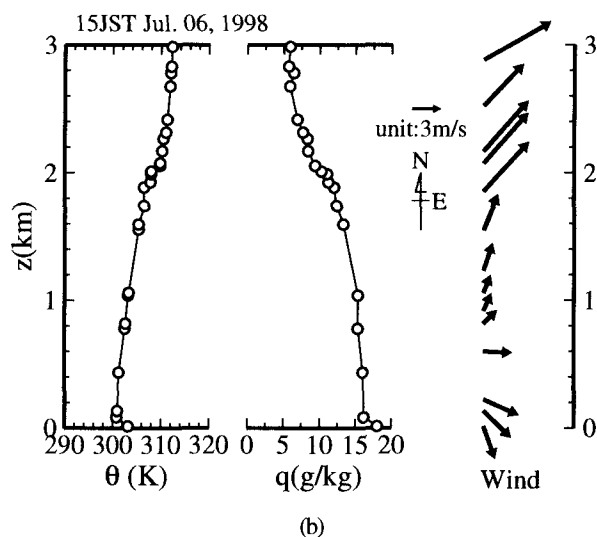


図-5 気温の時系列



(a)



(b)

図-6 温位 θ 、比湿 q および風速ベクトルの鉛直プロファイル

(a)1998年7月6日9時 (b)1998年7月6日15時

ソーダ観測で得られた高度 $z=55\text{m}$ の 5 分毎の値を用いた。各地点における風向・風速の変化をみると、海岸に近い S1 においては 8 時 30 分に海風が吹き始め、内陸部の S5 においては 12 時 50 分に海風が到達したことがわかる。両地点の海風侵入方向の距離は 17km であるので、海風の侵入速度は 1.1m/s であったと見積もられる。また、各観測地点において海風侵入後に約 1 時間周期の風速変動がみられる。図-5 に観測地点 S1～S5 における気温の時系列変化を示す。図中の矢印は、図-4 と同様に海風の侵入を示す。各地点において、海風侵入直後の気温が $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ の範囲で低下し、その後の時間帯も気温の上昇が抑えられていることがわかる。

次に、海風侵入に伴って変化する大気の鉛直構造について述べる。図-6(a)と(b)にそれぞれ 9 時と 15 時の高層気象観測から得られた温位 θ 、比湿 q および風速ベクトルの鉛直プロファイルを示す。ここで z は地表面からの高さを表す。図-6(a)に示される θ の鉛直分布から 9 時において $z<100\text{m}$ で $d\theta/dz = -4.4\times 10^{-3}\text{K/m}$ の不安定層が形成され、 $100\text{m}<z<700\text{m}$ の範囲で $\theta=300\text{K}$ の一様な混合層が形成されていたことがわかる。 q の鉛直分布においても $100\text{m}<z<700\text{m}$ の範囲で $q=15\text{g/kg}$ の一様な層がみられる。また、この時刻は海風が吹き始めた直後であるため、風速ベクトルの鉛直分布において明瞭な海風フロントの通過は認められない。これらの観測結果が

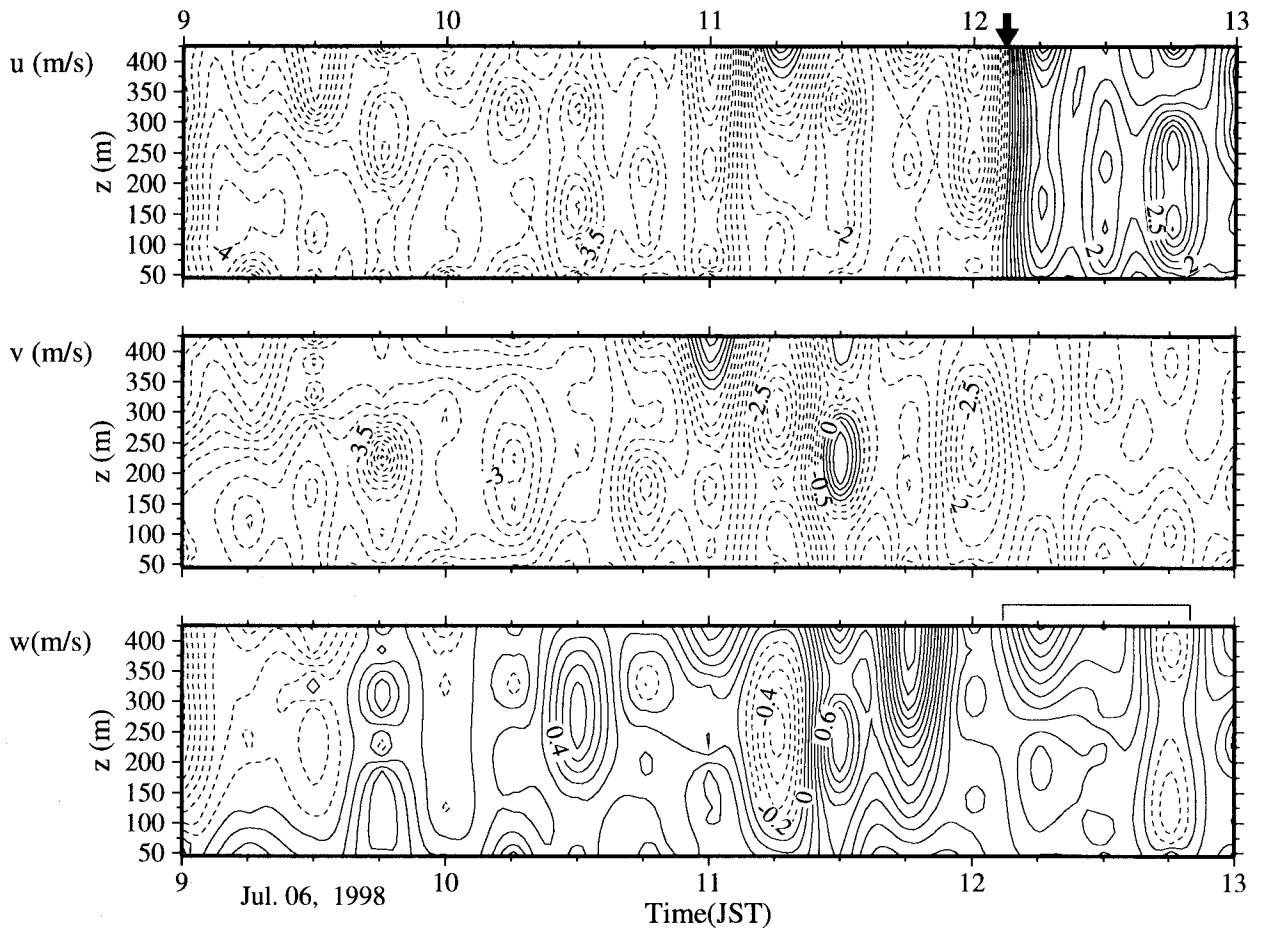


図-7 水平風速成分 u, v と鉛直風速成分 w の時間-高度断面図 (a)1998 年 7 月 6 日 9 時～13 時

ら、9 時の福岡市上空では、地表面からの加熱により $z=700\text{m}$ まで混合層が発達していたことがわかる。また、海風が吹き始めた直後であったために、海風の形成された高度が低く、海風による上空の大気に対する冷却効果は認められない。

図-6(b)に示されるように 15 時においては、 θ の分布から $z<100\text{m}$ では $d\theta/dz = -3.4 \times 10^{-2} \text{K/m}$ の不安定層が形成されているが、その上部 $100\text{m}<z<2\text{km}$ における大気は $d\theta/dz = 3 \times 10^{-3} \text{K/m}$ で安定成層していた。比湿に関しては、 $100\text{m}<z<500\text{m}$ において $q \div 16\text{g/kg}$ の一様な層が形成され、 $z=2\text{km}$ まで緩やかに減少していた。これは、 $z<0.5\text{km}$ の範囲において海からの湿った空気が移流したためだと考えられる。また、風速ベクトルの鉛直分布から、風向が $z=600\text{m}$ を境に北西から南西に変化していたことがわかる。比湿と風速ベクトルの分布から、海風の発達した高度は $z=500\sim 600\text{m}$ であったと推測される。図-6(b)から、15 時においては地表面付近の大気は地表面からの加熱によって不安定となっているものの、海風による冷気移流によって対流混合層は発達が抑制され、 $0.1\text{km}<z<2\text{km}$ では海風によって大気の安定層が形成されたことがわかる。

図-7 にドップラーソーダ観測で得られたデータを 5 分平均して求められた水平風速成分 u, v および鉛直風速

成分 w の時間-高度断面図を示す。(a)と(b)はそれぞれ 9 時から 13 時までの時間変化と 13 時から 17 時までの時間変化である。図中において実線は正の値を、破線は負の値をそれぞれ表す。風速分布から u は 12 時 10 分(図中に矢印で示されている)を境にして全層にわたって負から正と変化し、この時刻において明瞭なフロントをもつ海風が侵入したことがわかる。また、海風侵入前の 11 時 45 分には、 $w>1.0\text{m/s}$ 以上になる領域が $z>300\text{m}$ で見られる。これは、海風フロント前面で起こる強い上昇流をとらえたものである。海風侵入直前においては、 v においても急激な風速の変化があり、 $200\text{m}<z<300\text{m}$ において $v<-2.5\text{m/s}$ となる領域が見られる。これらの結果から、海風侵入前には $z>200\text{m}$ の大気層において強い上昇流が起き、海風進行方向と直行する風速成分が一時的に増大したことがわかる。

海風侵入直後における w の分布をみると、対になった上昇流と下降流がみられる。(図中「」で示されている。)これらの上昇・下降流は 12 時 15 分から 13 時にかけて起こった後、13 時 30 分から 14 時 30 分において約 30 分周期で上昇・下降流が生じていることがわかる。ひきつづき、14 時 30 分から 16 時 30 分においては約 1 時間周期で上昇・下降流が起こっていたことが確認される。また、 u の時間変化をみると、上昇流が生ずる時間

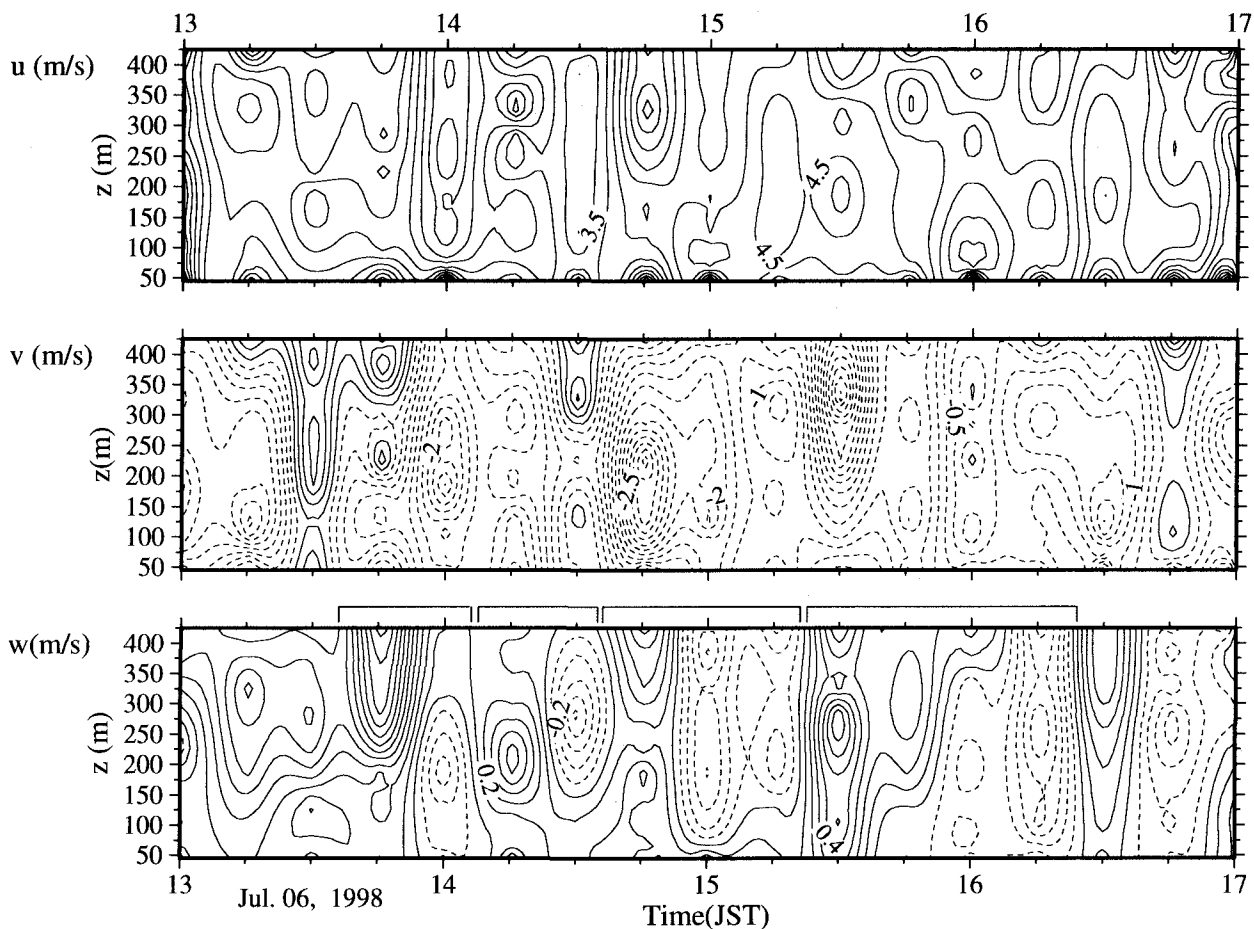


図-7 (b)1998年7月6日13時~17時

とほぼ同じ時間帯に $w > 3\text{m/s}$ となる領域がみられる。このような晴天日の大気において大規模な上昇・下降流が対となって生ずる原因としては、地表面加熱によって接地層の大気が不安定状態となり、対流混合が発生するケースか、あるいは波動を伴って海風が侵入するケースが考えられる。この観測ケースの場合、高層気象観測から得られた温位分布が $z > 100\text{m}$ において安定である（図-6(b)参照）ことから、 $z > 200\text{m}$ の高度において、熱対流による上昇・下降流が活発であったとは考えにくい。それゆえ、この観測ケースにおける上昇・下降流を、海風が侵入する際に海風の層とその上部の大気層の風速シアによって起こる波動現象ととらえ、以下のような解析を試みた。

海風侵入後の30分から1時間の周期を持つ風速変動に着目して水平風速成分と鉛直風速成分の相関を求め、観測された風速変動が波動の性質を持つことを調べた。まず、三角フィルターを用いて、相関を求めるために必要な周期変動を持つ風速成分の時系列を抽出した。図-8に $z=225\text{m}$ における水平風速成分と鉛直風速の時系列を示す。ここで、 u, w は1分平均値を表し、 $\tilde{u}, \tilde{w}$ と $\bar{u}, \bar{w}$ はそれぞれ底辺20分と底辺60分の三角フィルターを施した値を表す。これらの値を用いて、相関を求めるために必要な風速変動成分 $u' = \tilde{u} - \bar{u}, w' = \tilde{w} - \bar{w}$ を抽出し

た。図-9に u' と w' の時系列変化を示す。次に、 $R = \{u'(t)w'(t+\tau)\} / (\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2})$ で定義される相互相関係数を求めた。ここで、 τ は遅れ時間である。図-10に R と τ の関係を示す。 $\tau=30, 60, 90\text{min}$ において R の明確なピークがあり、位相遅れ τ_0 は $\tau=30\text{min}$ の約1/4の7minとなっている。また、 $\tau=0$ において $R=0$ であることから、 u' と w' との間に相関はなく、相関係数 R は波動現象の特性を表しているといえる。したがって、観測で得られた30分~1時間の周期を持つ上昇・下降流は、地表面加熱による熱対流現象ではなく、海風の層とその上部の大気層における風速のシアによって引き起こされた不安定波をとらえたものとするのが妥当である。

4. おわりに

福岡市における海風の侵入挙動を調べるため、月別の平均的な海風の挙動に関する解析結果と1998年7月6日の海風侵入に関する観測結果を示した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

1) 海陸風出現日における風速ベクトルの月別日地変化から、いずれの月においても、地形の影響によって南東寄りの陸風と北西寄りの海風が安定して形成されることが確認された。

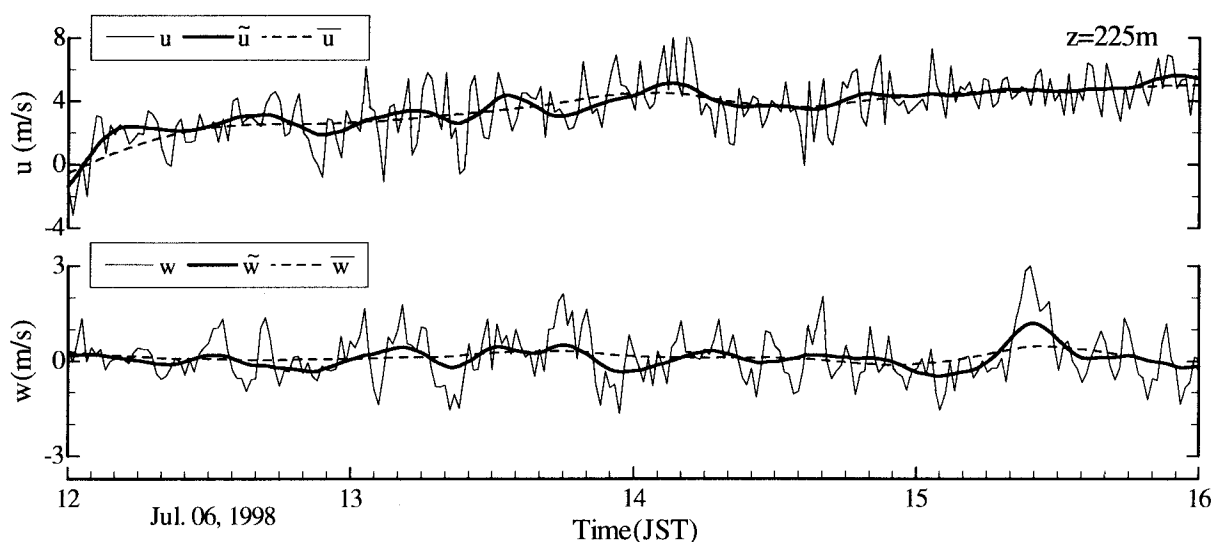


図-8 $z=225\text{m}$ における水平風速成分と鉛直風速成分の時系列

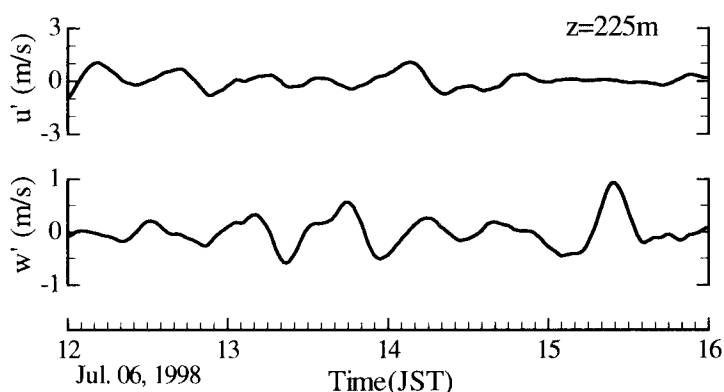


図-9 $z=225\text{m}$ における u' と w' の時系列

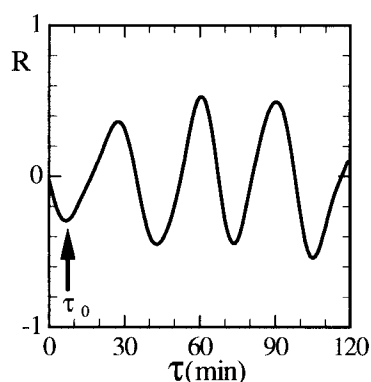


図-10 相互相関係数

2) 5 地点における海風侵入時の風と気温の観測結果から、海風の侵入速度は 1.1m/s であり、海風侵入による気温の低下は $1\sim 3^\circ\text{C}$ であった。

3) 高層気象観測で得られた温位、比湿および風速ベクトルの鉛直プロファイルから、15 時における高度 100m 以上の大気は、海風によって混合層の発達が抑制されたため、温位勾配が $3\times 10^{-3}\text{K/m}$ の安定成層をしていたことがわかった。

4) ドップラーソーダ観測から得られた鉛直風速成分の時系列に 30 分から 1 時間の周期を持つ対になった上昇・下降流がみられた。この周期をもつ水平風速成分と鉛直風速成分を用いて求められた相互相関係数は、波動の特性を持つことが認められた。したがって、上昇・下降流は海風とその上部の大気層における風速のシアによって引き起こされた不安定波をとらえたものであると考えられる。

謝辞：観測を行うにあたり、運輸省第四港湾建設局博多港空港工事事務所、株式会社電気ビル、東和大学、福岡県保健環境研究所には観測機器設置の便宜をはかって頂いた。また、運輸省第四港湾建設局博多港空港工事事務所と九州大学総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻修士課程の月松孝司氏には観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福田和代，松永信博：福岡市における海陸風の挙動，九州大学大学院総合理工学研究科報告，第 20 巻，第 4 号，pp.335-339，1999
- 2) 堤純一郎，片山忠久，石井昭夫，西田勝，林徹夫，北山広樹：気象データの統計解析による海岸都市における海陸風の特性に関する研究，風工学シンポジウム，pp.43-48，1988
- 3) 伊藤久徳・川添俊弘：和歌山県における海陸風，天気，Vol.30，pp.151-159，1983

(1999. 9. 30 受付)