

海風時における平均風速と 乱流特性量の鉛直分布

VERTICAL PROFILES OF MEAN WIND SPEED AND TURBULENT CHARACTERISTICS OF SEA BREEZES

福田和代¹・松永信博²・酒井聡一郎³・梅山千穂⁴

Kazuyo FUKUDA, Nobuhiro MATSUNAGA, Soichiro, SAKAI and Chiho UMEYAMA

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

⁴ 九州大学大学院 総合理工学府 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

Field observations to investigate the structure of sea breezes have been made on Fukuoka Plain. The intrusion speeds of sea-breeze front are estimated from the distributions of horizontal wind divergence. The wind velocity before and after the arrival of sea-breeze front has been measured by using a Doppler sodar, and the vertical profiles of mean wind speed, standard deviation of horizontal and vertical wind velocities and turbulent kinetic energy have been obtained. They are normalized by using the maximum wind speed and the height at a half of the maximum speed. Especially, the normalization for the wind speed profiles seems to give a good similarity.

Key Words : sea breeze, Doppler sodar, turbulence kinetic energy, gravity current

1. はじめに

海風は海上と陸上の大気温度差によって生じる気象現象としてよく知られている。沿岸部において、海風は大気汚染物質の流れに重要な役割を果たすだけでなく、都市の気温上昇を抑制する効果も期待されることから、多くの研究が行われてきた。海風フロント付近の風速と温湿度の平均値の空間分布は、航空機観測によって示された (Kraus 他¹⁾, Stephan 他²⁾。近年では、海風時の乱れ強度や乱流運動エネルギーの分布が Wood 他³⁾による航空機観測や、高木・北田⁴⁾によるソーダ観測に基づいて記述された。また、海風フロントの移動速度や形状が水槽実験で観察される重力流と比較されているが⁵⁾、フロント背後の平均風速や乱流特性量のプロファイルについては比較が行われていない。そのような見地から、福田他⁶⁾の研究で明らかにされたように、海風フロントの通過が明瞭に観測される福岡平野においてドップラーソーダを用いた海風フロント通過後の平均風速および乱流特性量の分布を測定し、データを提供することは、福岡市の風環境特性を明らかにするだけでなく、重力流の解明にも貢献するものと思われる。本研究では、観測値に基づいて、海風フロント通過後の気象要素の変化と水平風速および乱流特性量の鉛直分布の特性について述べる。

2. 観測概要

海風の野外観測は福岡平野において行われた。福岡平野は北西側に玄海灘を望み、東側と南西側を海拔 1000m 級の三郡山と脊振山に囲まれた、内陸に進むにしたがって狭まる地形である (図-1 参照)。福田他⁶⁾によって、この地域における海風の風向は地形の影響を受け、年間を通して北西寄りであることが報告されている。観測は 1999 年 5 月から 10 月にかけて行われ、そのうち、明瞭な海風フロントが確認された 6 日間について解析を行った。表-1 に観測日の一覧を示す。

観測地点を図-1 に示す。海岸線から南東方向へ約 14km 内陸に位置する地点 P にドップラーソーダ (カイジョー製 AR-410) を設置し、風向・風速、水平風速および鉛直風速の標準偏差の 1 分間平均値を 1 分間隔で求めた。観測高度を 45m から 625m に設定し、5 月から 8 月において計 19 高度、10 月において計 16 高度の観測データが得られた。同時に、プロペラ式風向風速計、温度計および露点温度計を用いて風向・風速、気温および露点温度が 1 分間隔で測定された。また、図-1 中の●で示される 13 地点において、プロペラ式風向風速計を用いて測定された風向・風速の特別値が得られた。地上気象および 900hPa の気象状況は福岡管区気象台の地上気象観測原簿と高層気象観測データを使用した。

3. 地上風の解析

海風以外の風が作用しない場において、海風フロントは、地上風速の収束線として現れる⁷⁾。そこで、海風フロント侵入の様子を調べるために、地上風速データを用いて、図-1の実線で囲まれた領域における地上付近の水平風速の収束・発散量を求めた。得られた観測データはまばらであるため、13地点で測定された風向・風速データを1×1 kmの格子データに補間した。データの補間には Goodin 他⁸⁾と同様に次式を用いた。

$$\mathbf{v} = \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i / r_i^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n 1 / r_i^2 \right)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は格子点上に補間された風速ベクトル、 $\mathbf{v}_i$ は*i*番目の観測地点における風速ベクトルの測定値、*n*は観測地点の数である。求められた格子点上のデータを用いて水平風速の収束・発散量を1時間毎に計算した。

4. 観測結果と考察

全観測日における気象状況と9時に観測された900hPa(高度約1km)の風向・風速を表-1に示す。観測日は概ね晴天であったが、上空の風向・風速は観測日によって大きく異なっていたことがわかる。

以下では5月22日を例に挙げて海風フロントの侵入の様子を説明する。図-2は海風フロントの時間変化を表したものである。等値線の正の領域は水平風速の発散を表し、負の領域は収束を表す。また、破線は海風フロントの位置を表す。12時において、収束域は海岸の近くに生じているが、明瞭な収束線は定義できない。13時において $\text{div} \mathbf{v} \leq 7.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の収束域が海岸線と平行な方向に広がっており、明瞭な海風フロントが確認できる。14時には、収束域はさらに内陸へ進み観測地点Pに達している。海風フロントの時間変化から、フロントの侵入速度は13時から14時において約1.6m/sと見積もられた。

図-3に地点Pにおける5月22日の気温T、露点温度Td、風向WDおよび風速WSの時系列を示す。14時までTは約26度から27度の間で安定しており、WDは東寄りの風向を保っている。Tdは13時から14時までの1時間で10度から7度まで緩やかに低下し、WSも5m/sから3m/sに緩やかに減少していることがわかる。14時から14時15分においては、各気象要素に大きな変化が確認できる。Tは27.0度から24.5度まで低下し、Tdは7.5度から11.0度に上昇しており、Tdの増加は湿気を多く含む海上の空気が流入してきた現象をとらえている。WSは14時に減少し始め、14時7分に0.8m/sとなり、その後14時17分には4.9m/sまで増加している。この間、WDは約90度から約330度に変化し、その後は安定

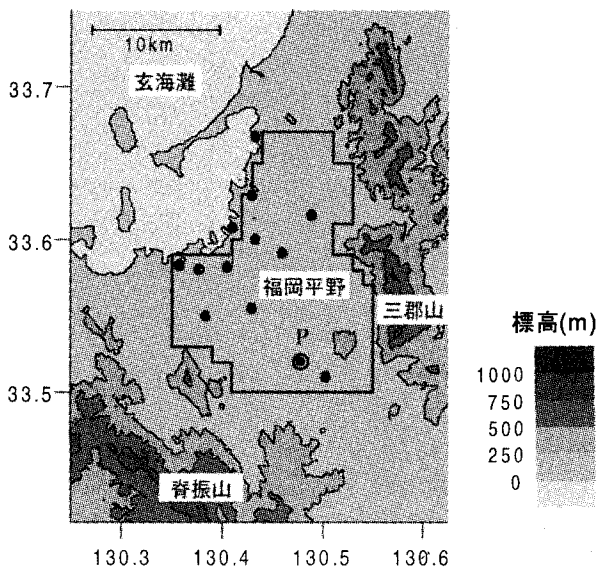


図-1 観測地点

した風向を保ち続けている。これらの気象要素の変化は、北北西から気温が低く、湿った空気を持つ海風が侵入したことを表している。

他の5日間においても、海風侵入前後における気象要素に同様の変化がみられた。以下では、全観測日における海風の侵入時刻や気温変化について調べる。海風の侵入によって気温Tと風向WDが変化し始める時刻を海風侵入時刻Aとし、海風侵入後にTとWDが安定した状態に達した時刻を海風侵入時刻Bとする(図-3参照)。次に、温度場の特徴的な値として、海風侵入時刻A直前の10分間と海風侵入時刻B直後の10分間における平均気温の差 ΔT を求めた。また、ドップラーソーダの風向・風速を用いて海風の主流風向を求めた。本研究では、海風侵入時刻Bから2時間後までの全高度における風向の平均値を海風の主流風向とした。表-1に全観測日における海風侵入時刻A・B、気温差 ΔT および海風主流風向を整理する。表-1に示すように、時刻AからBまでの時間は最小で7分、最大で16分であり、平均11分であった。この時間と上空の風向・風速に相関はみられない。また、 ΔT に関しては最小で0.3度、最大で2.7度であった。海風の風向は、上空の風向・風速の違いにかかわらず、どの観測日においても北西から北北西であったことがわかる。

次に、ドップラーソーダで観測された風速場の特徴について述べる。図-4(a),(b)および(c)は水平風速u、水平風速の標準偏差 σ_H および鉛直風速の標準偏差 σ_V の5分平均値を用いて作成された時間-高度断面図である。ここで、水平風速uの正の値は海風主流方向から吹く風を表し、zは地表面からの高度を表す。図-4(a)に示されるように、14時に全層にわたって北寄りの風である正の値に変化していることから、海風が14時頃に侵入したこ

表-1 観測パラメーター一覧

観測日	天気	900hPa の気象状況		海風侵入時刻 (JST)		$\Delta T(K)$	主流風向 (deg)	平均 U_{max} (m/s)	平均 h (m)
		風向(deg)	風速(m/s)	時刻 A	時刻 B				
5/22	曇	188	2	14:06	14:13	2.7	333	5.2	420
6/1	晴	98	2	13:38	13:50	0.3	334	5.8	493
7/13	晴	56	6	14:42	14:58	1.3	345	6.4	543
7/31	晴	180	13	15:02	15:13	1.2	329	4.2	447
8/10	晴	42	5	11:50	12:03	0.3	332	5.1	510
10/6	晴	253	5	13:12	13:20	1.0	341	4.8	428

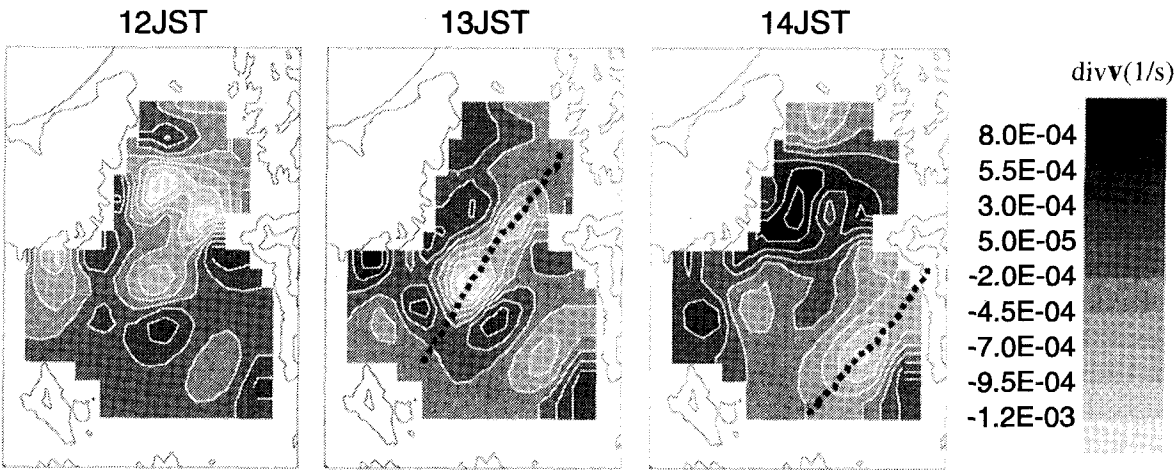


図-2 海風フロント侵入の時間変化

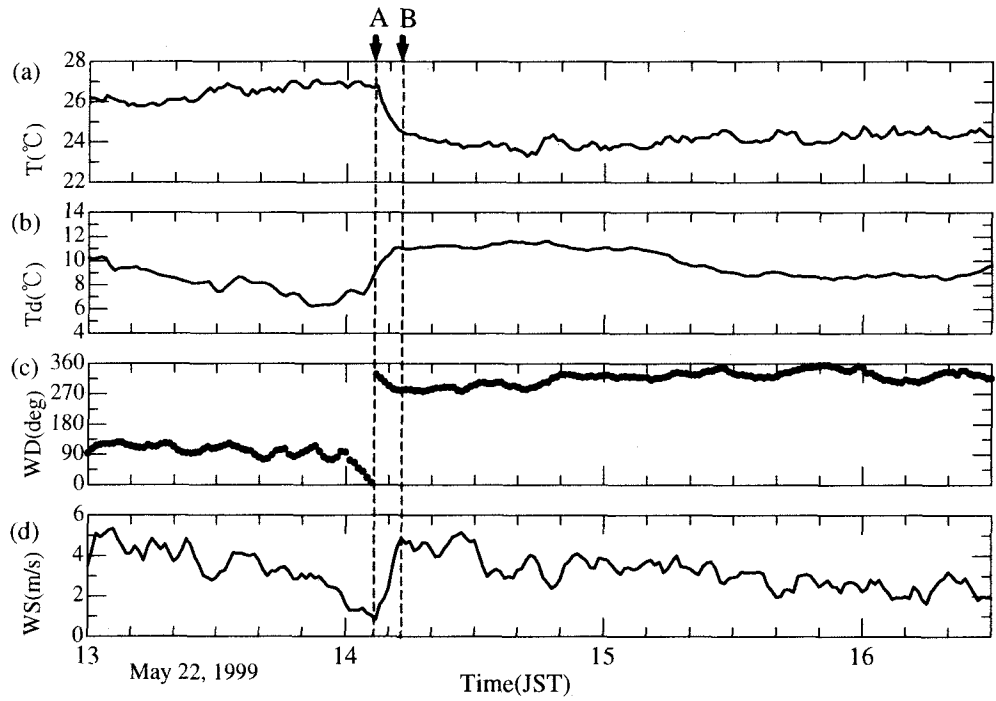


図-3 観測地点 P における(a)気温 T、(b)露点温度 Td、(c)風向 WD および(d)風速 WS の時系列

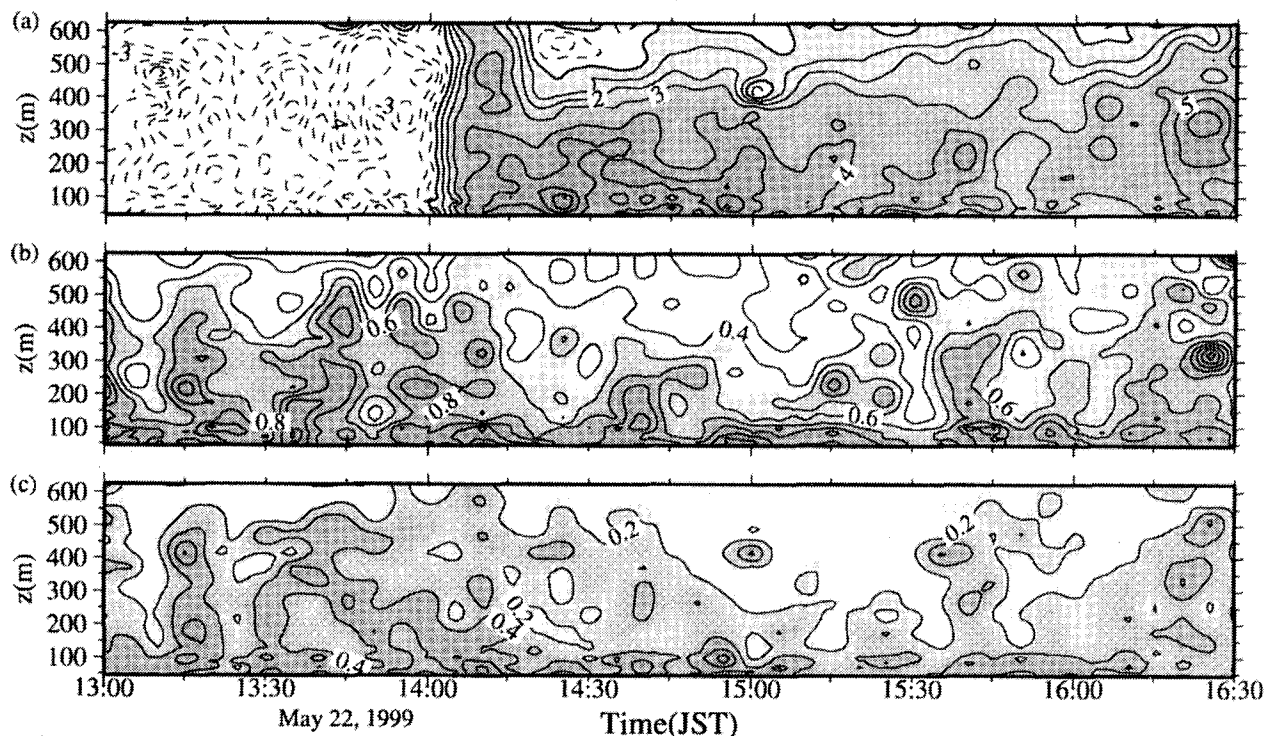


図-4 (a)水平風速 u , (b)水平風速の標準偏差 σ_H および(c)鉛直風速の標準偏差 σ_V の時間-高度断面図

実線は正、破線は負を表し、等高線の間隔は(a)において 1m/s であり、(b), (c) において 0.2m/s である。

とがわかる。 $100\text{m} \leq z \leq 200\text{m}$ 付近に最大値 $u = 5\text{m/s}$ の領域がみられ、 $z > 200\text{m}$ において u は高度とともに減少し、 $z \geq 400\text{m}$ では $u \leq 2\text{m/s}$ となっている。この風速分布は、水槽実験で観測される重力流の貫入⁹⁾に対応している。風速の標準偏差に関しては、(b), (c)に示すように、14時以前は $z \approx 400\text{m}$ に達していた $\sigma_H > 0.8\text{m/s}$ 、 $\sigma_V > 0.4\text{m/s}$ の領域が、海風の侵入した14時以降では $z \approx 100\text{m}$ まで低下していることがわかる。これは、日中の対流現象によって生じた風速の乱れが、冷たい海風の侵入によって抑えられた様子を示していると考えられる。

図-5は水平風速 u の20分平均値 U の鉛直分布であり、海風侵入から1時間後までの U の時間変化を示したものである。 U の鉛直分布は、地表面から $z \approx 100\text{m}$ において最大風速約 $U = 5.5\text{m/s}$ をもち、高度が上がるとともに風速が減少する重力流のような分布を示す。時刻B直後の1時間においては、風速分布の時間的な変化はみられない。他の5日間においても最大風速とその高度は異なるが、重力流に類似した風速分布が形成されていることがわかった。そこで、全観測日について U の規格化を試みた。本研究では、風速と高度の代表スケールとして、図-6に示すように、 U の分布を用いて最大風速 $U_{\max}$ と $U = U_{\max}/2$ となる高度 h を定義した。 $U_{\max}$ と h は海風侵入時刻B直後から1時間後にかけて20分毎に求められた。表-1に全観測日における $U_{\max}$ と h の1時間平均値を示す。 $U_{\max}$ は 4.2m/s から 6.4m/s 、 h は約 400m から 560m の範囲であることがわかる。図-7に規格化さ

れた海風の水平風速 U の鉛直分布を示す。また、水槽実験で測定された重力流の流速分布¹⁰⁾も同様に規格化し、図示する。この水槽実験は定常的に重力流ヘッドを維持するため、一方向に回転するベルト状の床面上に塩水を流入する装置を用いて行われたものである。 $U/U_{\max}$ の分布は、 $z/h \leq 0.2$ においてばらつきがみられるものの、6日間とも $z/h \approx 0.3$ で最大をとり、 $z/h \approx 1.3$ で0となる普遍形になることがわかった。また、海風の無次元風速分布は重力流の分布とはほぼ一致しており、海風の重力流的な特性を示している。海風が内陸部に侵入する現象は、加熱した床面上を重力流が貫入する現象とみなされるので、底層における風速分布のばらつきの原因としては地表面の加熱が考えられる。求められた $U_{\max}$ を決定する要因として、海風侵入前の大気と侵入後の大気の温度差が考えられる。両者の関係を調べるために、時刻B直後20分における $U_{\max}$ に関しては重力加速度 g および $U = U_{\max}$ となる高度 h_0 (図-6参照)を用い、 ΔT に関しては海風侵入前後の平均気温 $T(\text{K})$ を用いてそれぞれ規格化することを試みた。ここで、 T は時刻Aの10分前から時刻Bの10分後までの気温の平均値である。規格化された ΔT と $U_{\max}$ の関係が図-8に示される。観測日が6日間と少ないが、 $U_{\max}$ が ΔT の増加とともにわずかに増加する傾向がみられる。

図-9(a), (b)に5月22日の水平風速と鉛直成分の標準偏差の20分平均値 $\overline{\sigma_H}$ 、 $\overline{\sigma_V}$ をそれぞれ示す。 $\overline{\sigma_H}$ 、 $\overline{\sigma_V}$ の分布は、 $z \approx 50\text{m}$ において、 $1.0\text{m/s} \leq \overline{\sigma_H} \leq 1.2\text{m/s}$ 、 $0.4\text{m/s} \leq \overline{\sigma_V} \leq 0.6\text{m/s}$ をとり、 $z > 50\text{m}$ において $\overline{\sigma_H}$ 、

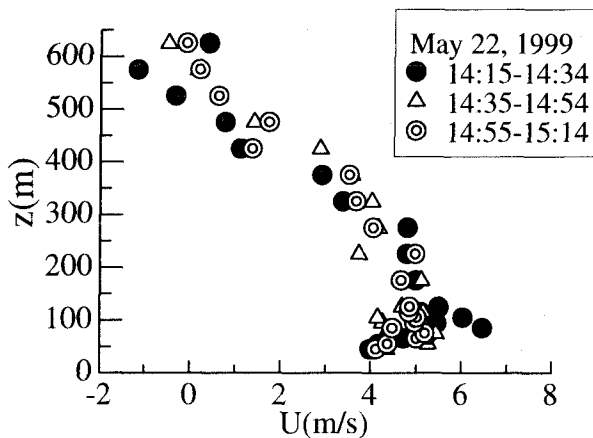


図-5 水平風速 U の鉛直分布

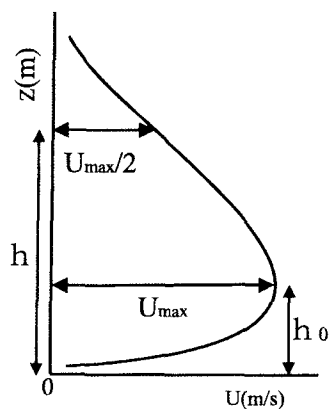


図-6 代表スケールの定義

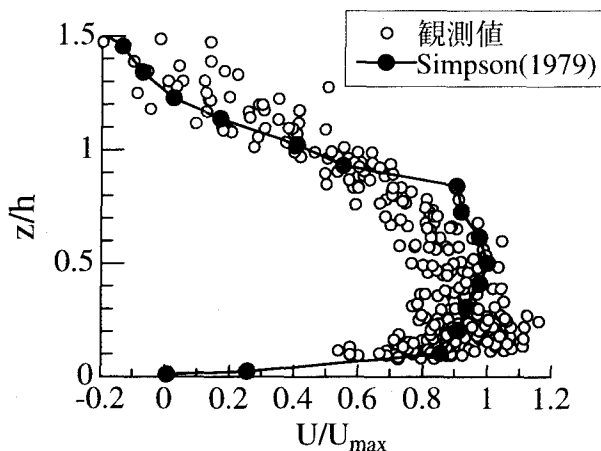


図-7 規格化された水平風速 U の鉛直分布

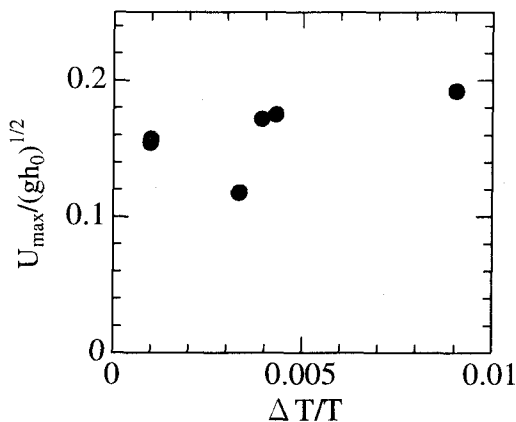


図-8 規格化された $U_{\max}$ と ΔT の関係

$\overline{\sigma_v}$ は高度とともに減少するが、 $100\text{m} \leq z \leq 250\text{m}$ においては、ほぼ一定もしくはわずかな増加がみられる。その上空において、両者とも 0 に漸近する分布を示している。(c)に乱流運動エネルギー k の鉛直分布を示す。ここで、 k は高木・北田⁴⁾の解析方法を用いて、 $k = (\overline{\sigma_H^2} + \overline{\sigma_v^2})/2$ と定義する。 k の分布は $z \approx 50\text{m}$ において $k \approx 0.9\text{m}^2/\text{s}^2$ となり、 $z > 50\text{m}$ において k は高度とともに減少し、 $z \geq 400\text{m}$ において $k \approx 0.1\text{m}^2/\text{s}^2$ まで減少することがわかる。次に、風速の規格化と同様に、 $U_{\max}$ と h を用いて規格化した $\overline{\sigma_H}$ 、 $\overline{\sigma_v}$ および k の分布を図-10の(a)、(b)および(c)に示す。 $\overline{\sigma_H}/U_{\max}$ に関しては、 $z/h \approx 0.1$ において $0.16 \leq \overline{\sigma_H}/U_{\max} \leq 0.28$ をとり、 $z/h \approx 0.4$ まで急激に減少し、 $0.4 \leq z/h \leq 0.7$ において $\overline{\sigma_H}/U_{\max} \approx 1.4$ とほぼ一定である。 $\overline{\sigma_H}/U_{\max}$ は $z/h > 0.7$ において単調に減少し、 $z/h \approx 1.5$ で $\overline{\sigma_H}/U_{\max} = 0$ となる。 $\overline{\sigma_v}/U_{\max}$ に関しては、 $z/h \approx 0.1$ において $0.05 \leq \overline{\sigma_v}/U_{\max} \leq 0.12$ をとり、 $z/h \leq 0.3$ において急激に減少し、 $0.4 \leq z/h \leq 1.0$ において $\overline{\sigma_v}/U_{\max} \approx 0.6$ とほぼ一定である。 $z/h > 1.0$ で $\overline{\sigma_v}/U_{\max}$ は緩やかに減少する。

k の分布も $\overline{\sigma_H}$ 、 $\overline{\sigma_v}$ と同じように、 $z/h \approx 0.1$ において $0.02 \leq k/U_{\max} \leq 0.05$ をとり、 $z/h \leq 0.3$ において

高度とともに急激に減少している。 $k/U_{\max}^2$ は $z/h \geq 0.3$ において緩やかに減少し、 $z/h \geq 1.0$ で 0 に漸近する。規格化した $\overline{\sigma_H}$ 、 $\overline{\sigma_v}$ および k の分布は、平均水平風速のシアの影響を受けて、形成されていると考えられる。また、 $z/h > 1$ の範囲における $\overline{\sigma_H}$ と k のばらつきは、海風フロント上端のエントレインメントによって生じた可能性がある。

5. おわりに

6 日分のドップラーソーダ観測に基づいて、海風フロント侵入後における水平風速と乱流特性量の鉛直分布について調べた。得られた結果を以下に要約する。

- 1) 海風侵入後 1 時間における平均水平風速は、高度約 100m に約 5m/s の最大値をとることがわかった。また、最大風速と風速が最大風速の 2 倍となる高度を用いて規格化した水平風速は、重力流に類似した分布を示すことがわかった。しかしながら、底層部において、風速分布のばらつきがみられた。海風は加熱された地表面上を侵入するので、このばらつきの原因としては、地表面加熱が考えられる。地表面の

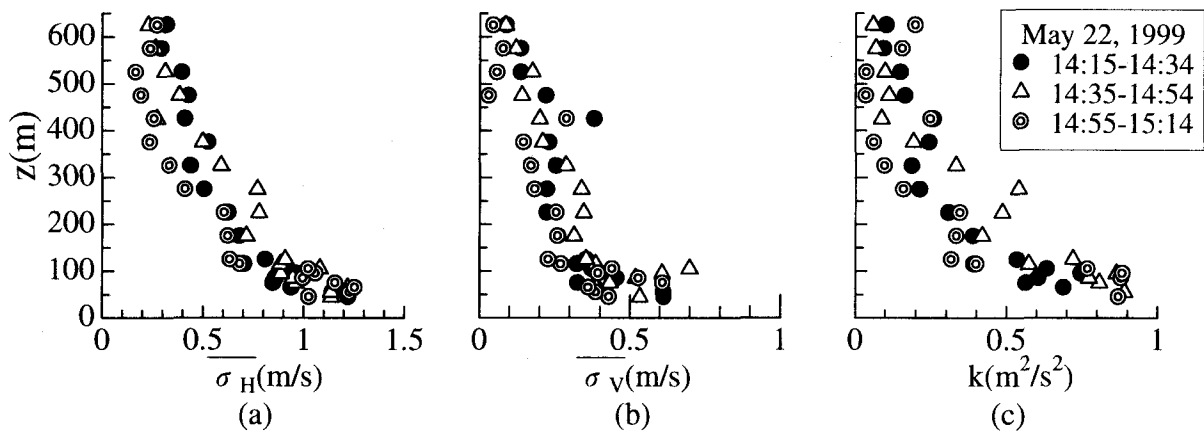


図-9 (a)水平風速の標準偏差 $\overline{\sigma_H}$, (b)鉛直風速の標準偏差 $\overline{\sigma_V}$, (c)乱流運動エネルギー k の鉛直分布

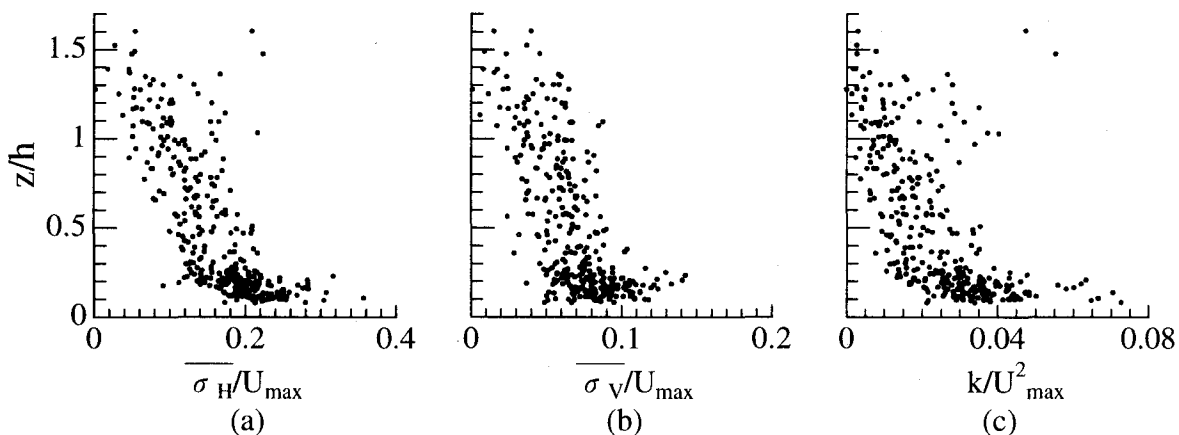


図-10 規格化された(a)水平風速の標準偏差 $\overline{\sigma_H}$, (b)鉛直風速の標準偏差 $\overline{\sigma_V}$, (c)乱流運動エネルギー k の鉛直分布

熱的条件が、海風の風速分布に与える影響については、今後の課題とする。

- 2) 海風侵入前後の気温差と海風の最大風速との関係を調べた結果、最大風速は気温差の増加とともに、増加する傾向がみられた。
- 3) 水平風速および鉛直風速の標準偏差と乱流運動エネルギーの鉛直分布は、水平風速のシアの影響を受けて形成されたと考えられる。

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、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、福岡市環境局、運輸省第四港湾建設局博多港空港工事事務所、日本道路公団、福岡航空測候所、九州大学総合理工学研究院環境エネルギー工学専攻片山研究室には観測データを提供して頂いた。また、本研究は笹川科学研究助成の補助を受けて行ったものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kraus, H., Hacker, J. M. and Hartmann, J. : An observational aircraft-based study of sea-breeze frontogenesis, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.53, pp. 223-265, 1990.

- 2) Stephan, K., Kraus, H., Ewenz, C. M. and Hacker, J. M. : Sea-breeze front variations in space and time, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol.70, pp.81-95, 1999.
- 3) Wood, R., Stromberg, I. M. and Jonas, P. R. : Aircraft observations of sea-breeze frontal structure, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.125, pp.1959-1995, 1999.
- 4) 高木久之, 北田敏廣：ドップラーソーダによる大気境界層下部の乱れの鉛直分布とその k - ϵ 乱流モデルによる解析, *天気*, Vol. 41, pp.829-846, 1994.
- 5) Simpson, J. E., Mansfield, D. A. and Milford, J. R. : Inland penetration of sea-breeze fronts, *Quart. J. R. Met. Soc.*, Vol.103, pp.47-76, 1977.
- 6) 福田和代, 松永信博, 酒井聡一郎：福岡市における海風侵入の挙動, *水工学論文集*, 第44巻, pp. 85-90, 2000.
- 7) 楠田 信, 阿部信男：大分市の夏季の海陸風, *天気*, Vol.29, pp.82-86, 1982.
- 8) Goodin, W. R., McRae, G. J. and Seinfeld, J. H. : A comparison of interpolation methods for sparse data, *J. Appl. Meteor.*, Vol.18, pp.761-771, 1979.
- 9) Simpson, J. E. : Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 213-234, 1982.
- 10) Simpson, J. E. and Britter, R. E. : The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, pp.477-495, 1979.

(2000.10.2 受付)