

# 河川に沿った海風フロントの侵入挙動

Characteristics of Penetration of Sea Breeze Front along a River

神田学<sup>1)</sup>・西村修<sup>2)</sup>・福田忠弘<sup>3)</sup>・竹内邦良<sup>4)</sup>・清水源治<sup>5)</sup>

By Manabu KANDA, Osamu NISHIMURA, Tadahiro FUKUDA, Kuniyoshi TAKEUCHI and SIMIZU Genji

Meteorological field observations were conducted along Sagami river basin to investigate the characteristics of penetration of sea breeze front along a river (**wind channel effect**). The meteorological observations based on the ground level show the existence of four types of local wind front. The observed speed and thickness of sea breeze agree well with theories.

The vertical structure of sea breeze are also discussed using captive baroon and Doppler Soder data.

Keywords: wind channel effect, river, sea breeze front

## 1、はじめに

河川の大気環境機能の一つとして「**風道**」効果がある。特に、我が国のように山岳地と平野部が隣接した国土では、首都圏と山岳地都市間の熱・汚染物質等の交換において河川が「風道」として重要な役割を担っていると言える。例えば、甲府のような山間部都市では、富士川や相模川などの河川沿いに首都圏や太平洋から侵入してくる局地風の挙動そのものが盆地内の環境気象に決定的な影響を及ぼすことが明らかになっている<sup>1)</sup>。首都圏平野部においても、気象分野で海陸風フロントの挙動の研究がなされているが、Amedasなど既存の気象測定局のデータを用いており、風道としての河道そのものに着目した解析例はほとんどない。

本研究は、相模川に着目し、地上気象観測・バルーン観測・ドップラーソーダ観測を併用することにより、相模湾から山岳部に至る河川道に沿った海風フロントの侵入挙動を明らかにする。河道沿いに着目するメリットとしては、1) 風道を特定しているため、河道沿いに線的に測定器を集中させることが可能で、観測の空間解像度を上げることが出来る、2) 特に山岳部河道などでは横断方向の移流を考える必要がなく解析が容易である、3) ドイツのシュツットガルトの「風の道計画」のように、河道計画・都市計画等に成果を反映しやすい、が上げられる。

---

1) 正会員 東京工業大学工学部開発システム工学科 助教授

2) 学生会員 山梨大学大学院修士課程

3) 学生会員 東京工業大学工学部土木工学科

4) 正会員 山梨大学工学部土木環境工学科 教授

5) 山梨県衛生公害研究所

2、観測方法

2・1 地上気象観測網

- (a) 観測地点 観測地点は、相模湾から山梨県内に至る全長約100km区間に10km～20km間隔で計7カ所、相模川(および桂川)沿いに設定した。7地点の位置関係を図-1に示す。表-1に相模湾からの距離を示す。
- (b) 観測期間 観測期間は1995年7月22日から8月2日までの計12日間である。
- (c) 観測項目 観測項目は温度・湿度・風向・風速の4項目である。ただし、上野原・大月・都留・富士吉田の風向・風速は上野原消防署・AmeDAS大月観測点・都留消防署・富士吉田消防署のデータを参考にした。
- (d) 記録方法 観測は24時間常時自動観測。観測間隔は1秒ごと、収録は2分平均値とした。

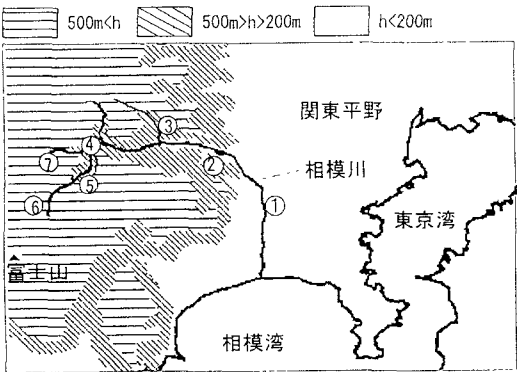


図-1 地上観測地点概要

表-1 観測点名と湾からの距離

| 地点名    | 湾からの距離 |
|--------|--------|
| ① 座間   | 19 km  |
| ② 津久井  | 39 km  |
| ③ 上野原  | 57 km  |
| ④ 大月   | 75 km  |
| ⑤ 都留   | 86 km  |
| ⑥ 富士吉田 | 97 km  |
| ⑦ 笹子   | 84 km  |

2・2 バルーンおよびドップラーソーダによる鉛直観測

- (a) 観測地点 山梨県上野原町の相模川の河川敷(図-1参照)。
- (b) 観測期間 バルーン観測は、1995年7月26, 27, 28日。ドップラーソーダ観測は、1995年7月19日～8月8日。
- (c) 観測項目 バルーン観測では、50m毎に高度550mまでの温度、湿度、オゾン濃度(半導体薄膜センサー)を1時間半毎に日中のみ観測した。ドップラーソーダとは、鉛直上空に音波を発信し、その反射波を受信することにより、ドップラー効果を利用して、風向・風速・各種乱流量を、同時に、複数の高度で測定する装置である。今回は、50m毎に高度1,000mまでの風向、風速、及び鉛直流とその乱れ強度の30分平均値を観測した(24時間常時自動観測)。

3 地上データによる海風の侵入挙動

3.1 フロントに着目した局地風のモード分類

2分間隔で得られている生データより、気温・湿度などの不連続点を定義することが出来る(図-2)。以下では、このような不連続点を、何らかの局地風フロントか通過したと見なすことにより、河川に沿った局地風フロントの伝播特性を探ることとする。図-3, 4は、1995年7月27日の各地点の気温・相対湿度の時間変動を風向・風速(1時間のベクトル平均風)とともに表したものである(見やすいよう30分の時間平均操作を施してある)。図のX軸上の矢印部分は川の downstream 方向から風が安定して吹いている時間帯を示す

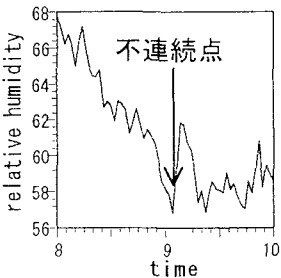


図-2 不連続点の定義

図中の・・線は、異なる地点で、対応すると思われる不連続点をつなげたものである。気温・相対湿度・風向・風速を総合的にみていくと以下のように局地風の発生にはいくつかの段階があり、次第に風が河道網を通じて各地点に侵入していくことが考えられる。図-5にその概念図を示し、以下説明していく。

(a) 極局地的谷風の発生(山間部で極めて局所的な谷風が発生する(図-5(a)))

座間のような平地では、晴天日には、主に海風にのみ支配されるので、気温は日の出から海風の吹き始める時間までほぼ直線的に上昇していく。座間以外の地点は山間部に位置し、海風以外に谷風にも影響される。そのため、気温上昇は、平野部のように直線的ではなく、いくつかの変異点を持っている。このことから、座間以外の山間部では日の出後に局地的な谷風が発生していることが分かる(図-3, 4 ①矢印)。

(b) 中規模谷風への移行(小さな谷風は次第に合流し、フロントを伴った大きな谷風となる(図-5(b)))

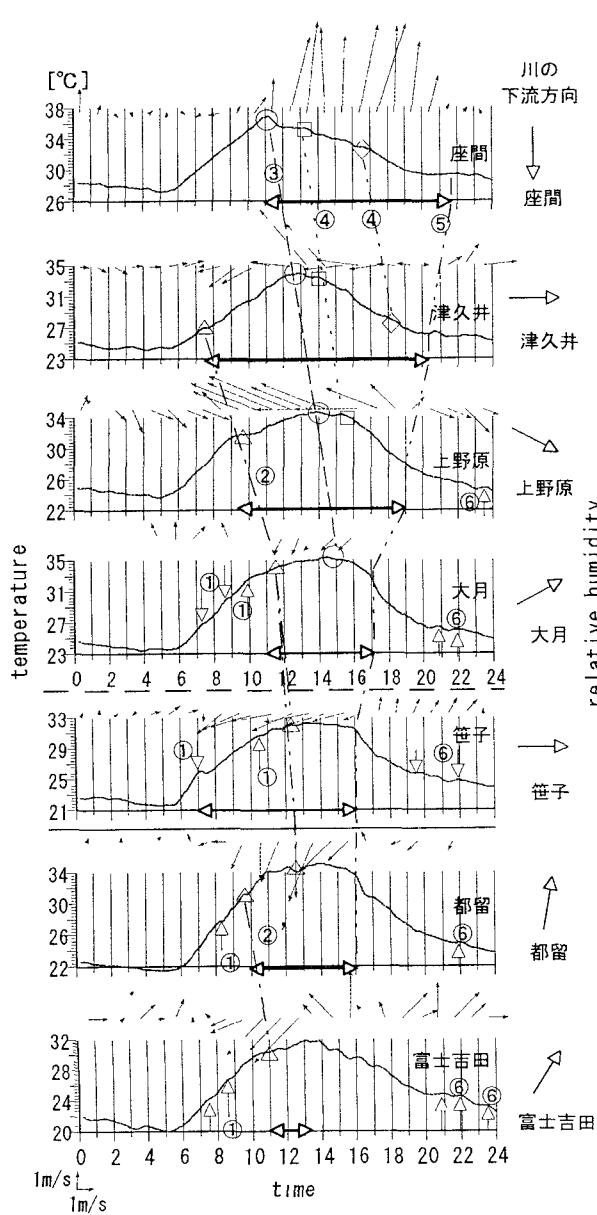


図-3 地上観測点における気温の日変化

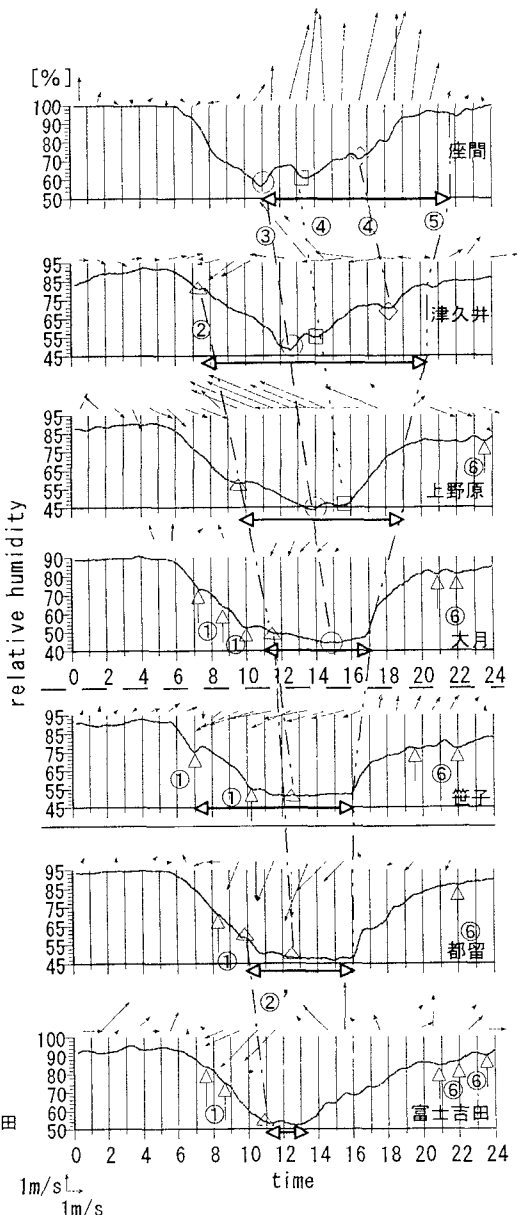


図-4 地上観測点における湿度の日変化

局地的谷風は、次第に川の下流方向からの風になる(図-3,4のX軸の矢印の始まり)。これは、座間に海風が到達する時刻より早い時間であることから谷風であることが考えられる。津久井・上野原では気温・相対湿度の変異点より、大月では相対湿度の変異点より、それぞれ谷風の進入が認められる(図-3,4△印)。都留・笹子ともに気温・相対湿度に変異点があることから、大月まで到達した谷風はさらにここで、都留・笹子へ分流していると予想される。この谷風を追ってみると図-3,4 破線②のようになり、かなり大きな谷風が発生していることが考えられる。また、笹子や都留ではこの谷風が到達する時間より早くに川の下流方向からの風が吹き始めている。笹子や都留は局地的谷風の吹く方向が川の下流方向と一致したためと考えられる。さらに都留で発生した局地的谷風は富士吉田にまで到達する中規模谷風に発達している(図-3,4破線②')。

(c) 大規模な風の循環（谷風に海風が合流する(図-5(c))）

座間では、南風の吹きはじめ、つまり海風の進入時に気温がピークを示す(図-3○印)。さらに津久井、上野原、大月の順に気温のピークを追っていくと、時間差が顕著に現れており、その時に海風がその地点に到達したと考えられる(図-3破線③)。

座間や津久井では海風フロントの通過後も湿度の大きな変異点がみられ(図-4□・◇印)、第2・第3の海風フロントが通過していると考えられる。ただし、この変異は川の上流に行くほど曖昧になってきており、川の上流部までは到達しなくなっている(図-4破線④)。このことから第2、第3のフロントは、海風フロントの後流部に内在しているロール型の熱対流との関連が予想される。

(d) 海風及び谷風の終息(図-5(d))

川の下流方向からの風が停止する時間(図-3, 4のX軸の矢印の終わり)に注目すると、川の上流から徐々に風が止むことが非常にはっきりと分かる。これは、海風が、下流方向へ徐々に終息していくことを示している(図-3, 4破線⑤)。この時、大月・都留・笹子では気温が急激に下がり、相対湿度は急増している。さらに、都留、笹子の風の終息時刻がほぼ同時刻であり、大月からの距離もほぼ同じことから、大月から風が分流していたことがかなり濃厚である。

夜間の気温・湿度は風が弱いにも関わらず、非常に多くの変異点がみられる(図-3, 4⑥矢印)。これは局地的な山風がそれぞれの地点で発生し、気温・湿度に影響していると考えられる。

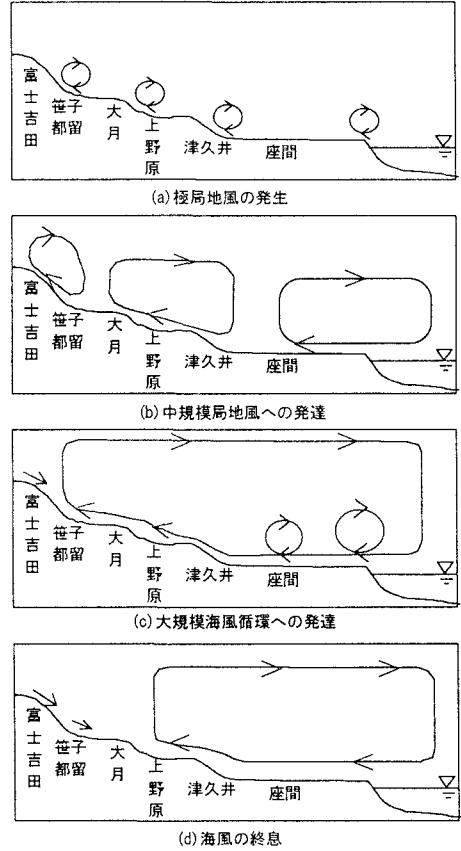


図-5 河川沿いの4つの局地風モード

3.2 海風フロントの伝播速度に関する考察

(a) フロントの伝播速度 谷風フロント(図-3, 4破線②)、海風フロント(図-3, 4破線③)、海風及び谷風の終息フロント(図-3, 4破線⑤)の伝播速度を調べるため、図-6に、相模湾からの距離とフロントの進入時刻との関係を示す。両者はほぼ直線関係となり、海(谷)風フロントがほぼ等速度で河道沿いを移動していることを示している。図-6から破線②の谷風フロントの伝播速度は、2.6(m/s)、破線③の海風フロントの伝播速度は3.6(m/s)、破線⑤の海風の終息速度は2.8(m/s)となった。

(b) 理論値との比較 海風の侵入に対する抵抗則は、内部フルード相似則で表現される重力密度

度流と異なり、密度流特有の対流不安定による乱れに支配されると想像される。石川ら<sup>2)</sup>(1986)は、この仮定に基づき海風フロントの伝播速度(V)の理論式として以下の式(1)を提案している。

$$V = K(g/\alpha\rho)^{1/4} Q_p^{1/2} \dots (1)$$

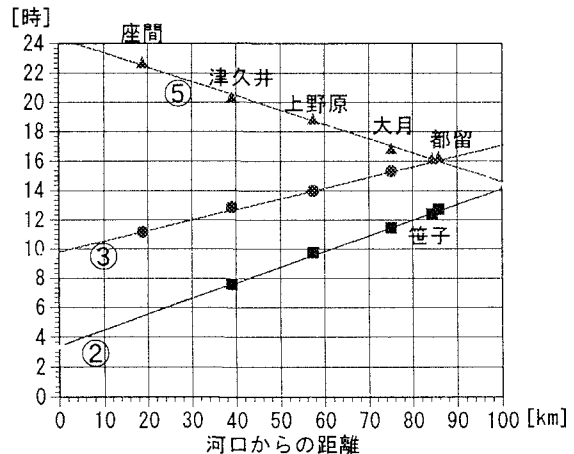


図-6 河口からの距離とフロント到達時間

ここで、 $g$ ：重力加速度( $m/s^2$ )、 $\rho$ ：大気密度( $g/m^3$ )、 $\alpha$ ：海域と陸域の密度差勾配( $g/m^4$ )、 $Q_p$ ：地上の顕熱フラックスから換算した密度フラックス( $g/m^2/s$ )。比例定数 $K$ には石川らの観測及び実験から求めた値(5.69)を用いる。バルーン観測による温位データなどから $\alpha$ (=0.025)、 $Q_p$ (=0.69)を求め、海風の伝播速度の理論値を算出した結果、 $V = 3.63(m/s)$ となり、観測値(3.60(m/s))とほぼ一致している。

### 3.3 バルーンデータによる海風の鉛直構造

(a) 温位分布の日変化 温位分布から1日の大気の静力学的安定度を考察する(図-7、温位分布)。8時の温位勾配は、約0.008(K/m)で、大気は典型的な安定成層となっている。日射による加熱により対流混合層が形成されるため、10時頃から徐々に温位が鉛直方向に一定になる。その後、日没前後の18時頃には再び、大気は安定な状態に戻っている。

(b) 河川の影響 通常、混合層が発達している日中は、地表面の加熱により地上付近で大きな不安定温位勾配が存在する。ところが観測結果では、0~50m付近で顕著な温位勾配はみられない。これは、河川近傍に河川幅スケール(約50m)の冷気境界層が形成され、地上付近の温度増加が抑えられた結果と考えられる。

(c) 谷風、海風の影響 11時から14時における温位分布が高度500m辺りて変曲している。一般に夏季の晴天日には、日中、混合層は1~2kmに発達することから、この変曲が混合層上端に対応するものとは考えにくい。既存の研究によれば、谷風や海風が存在すると、それらの厚さに対応した高さに温位勾配が変曲をもつ「準混合層」が形成されることが知られている。また、13時から14時にかけて海風の侵入に対応して500m以下の温位は一時的に下がっている。これらのことから、海風の厚さは500m程度ではないかと想像される。そこで理論と比較してみる。海風の侵入に伴い気温上昇が停止し(図-4参照)、非定常項が無視できるようになると、拡散項と移流項がバランスした熱内部境界層の半理論式として、式(2)が与えられる<sup>1)</sup>。

$$H = 1.9 L^{1/2} \tag{2}$$

ここで、 $H$ ：風の厚さ(m)、 $L$ ：海からの侵入距離(m)を表す。観測地は、およそ侵入距離が6.0 kmに位置し、この式より海風の厚さは約500 mと推定され、温位分布の変曲する高度とほぼ一致している。

### 3.4 ドップラーソーダによる海風の鉛直構造

(a) 風速の立体構造 ドップラーソーダ観測の結果(図-8、風のベクトル図)をもとに1日の風の変化を考察する。ここで、主軸の方向は、この日の水平風速分布から、軸と垂直方向の風速が最少となるように最小二乗法を使って決定した。この方向は観測地での河川の流下方向とほぼ同じになっている。プロットされていない地点は周辺の雑音による欠測の影響である。

9時半と20時で大局的に2回の風向の逆転が起きている。9時半の風向変化は、夜間の陸風が明け方頃から弱まり始め、3.1(b)の中規模谷風のフロントの通過によるものに対応している。9時半における風向・風速の鉛直分布を抜き出して図-9に示す。風向と風速が高度500mで一変しており、谷風がこの時間帯中の下層500mまで、河川沿いに侵入してきていると思われる。

2回目の逆転は、3.1(d)の大規模局地風が終息し、再び陸風が吹き始める時間帯に対応している。陸風

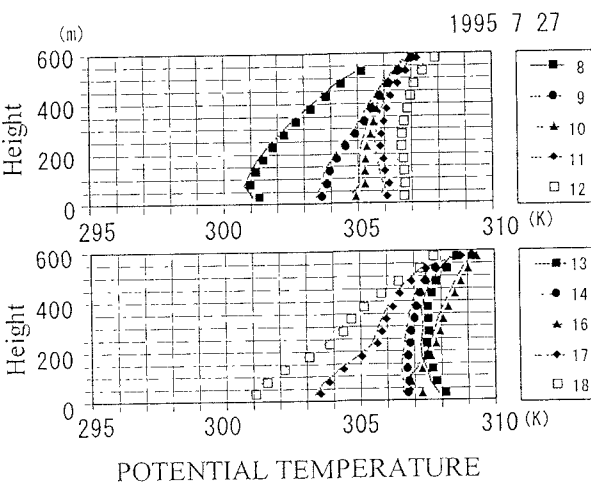


図-7 バルーン観測による温位の鉛直分布

は夜間、更に強まり安定して吹き続ける。

(b) 乱流強度の立体構造 鉛直流の乱れ強度のコンターを図-10に示す。大気が安定している夜間から明け方は、地上付近に乱れは存在しないが、日射の始まる8時頃から徐々に乱れが生じ始めている。その後、9時から15時にかけて3段階の乱れの強弱が現われている。最初のピークは8時頃安定であった大気状態から、陸風が減衰し、谷風が吹き出すことにより生じる乱れである。2番目のピークは12時頃であり、混合層内の熱対流に対応している。3番目のピークは14時頃であり、大規模海風フロントの通過によるものである。

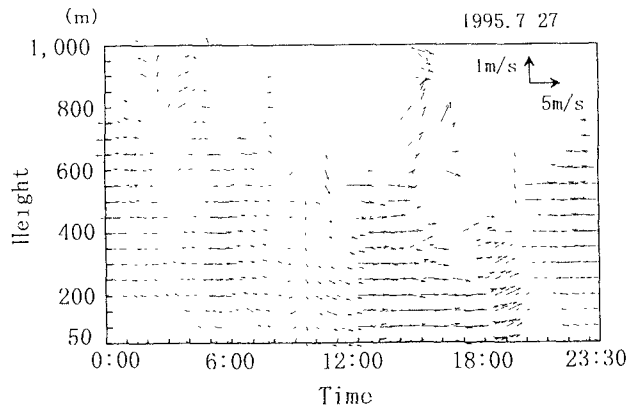


図-8 ドップラーソーダーによる風速ベクトルの時間-高度図

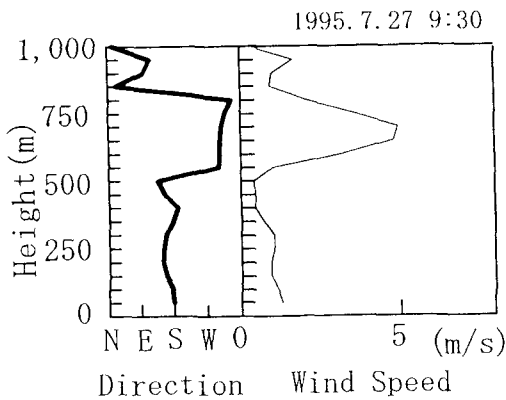


図-9 9:30における風向風速の鉛直分布

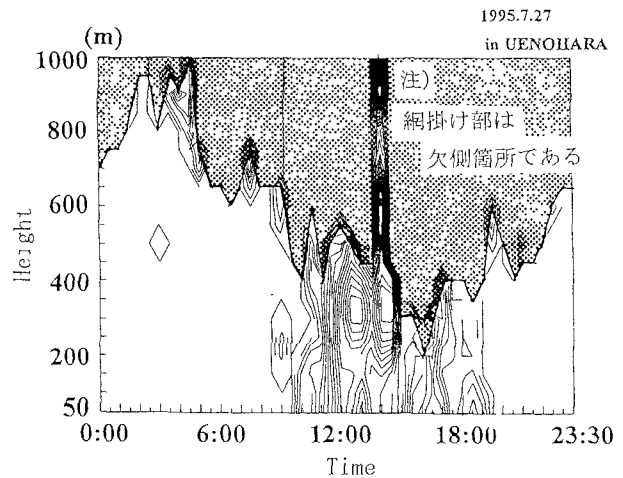


図-10 ドップラーソーダーによる鉛直流乱れ強度の時間-高度コンター図

## 5. 結論

- 1) 地上気象データより、相模川沿い4つの顕著な局地風モードが存在することを明らかにした。
- 2) 海風の伝播速度・厚さについて理論との比較を行い、良好な一致を見た。
- 3) バルーンおよびドップラーソーダによる観測により河川沿いに侵入する海風の立体構造を明らかにした。

**謝辞** 本観測は、「1995年高濃度大気汚染生成機構の解明に関する研究（代表者：若松伸司；国立環境研究所）」の一環として行われたもので、関係者の方々には多大な協力いただきました。また、平成7年度河川環境管理財団河川美化・緑化調査研究助成研究および文部省科学研究費一般C 07650594 の援助を受けました。厚く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 神田学・角井充：山梨県の夏季晴天日の風・気温場の解析、天気, Vol. 42, No. 11, 1995（印刷中）。
- 2) 石川忠晴他：海風フロントの構造と伝播特性に関する研究、土木学会論文集、375/II-6, 1986。
- 3) IIsu, S. A.: A note on estimating the height of the convective internal boundary layer near shore, boundary-Layer Meteor., Vol. 35, pp. 311-316, 1986。