

第2章 瀬戸内海の海陸風の特徴と局地気象現象*

2.1 瀬戸内海の内陸風の特徴

2.1.1 1980年度観測

瀬戸内海地域において1980年のパイロットバルーンの観測網はかつてない密度の高いものであった。観測期間中の海風と陸風の発達した状態を示す風の分布図が図2.1、2.2に示されている。両図と

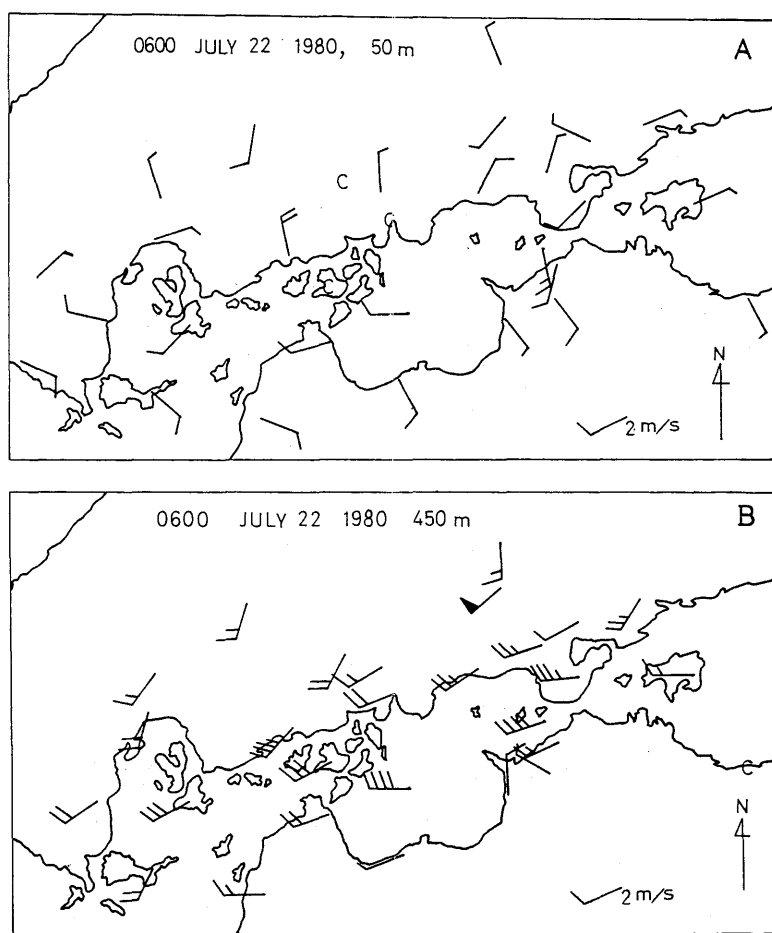


Fig. 2.1 An example of the wind distribution in the case of land breeze (0600JST 22nd July 1980). The upper and lower figures belong to the altitude of 50 m and 450 m respectively. A half barb is equivalent to 1 m/s in the following of this report.

* 鈴木彌幸・吉川友章・小出 孝：応用気象研究部

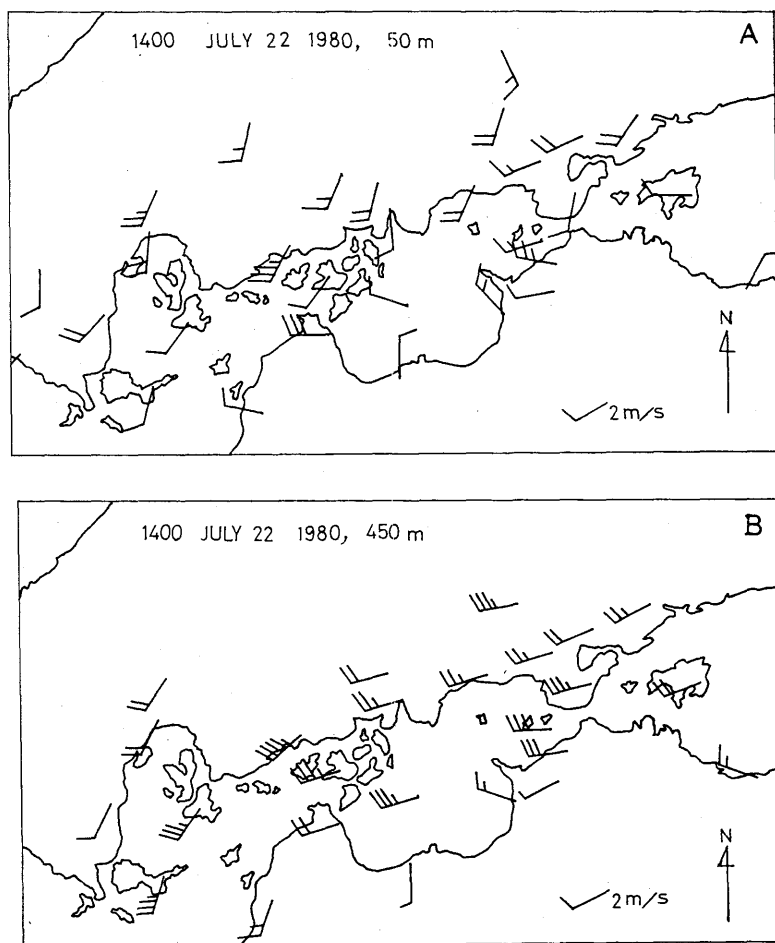


Fig. 2.2 An example of the wind distribution in the case of sea breeze (1400JST 22nd July 1980). The upper and lower figures belong to the altitudes of 50 m and 450 m respectively.

も、450 mの高度では瀬戸内海の海域をほぼ西南西から東北東に向かって5~8 m/sの風が吹き抜けている。その下の50 mの高度では、日中には陸へ向かう流れが、また早朝には海に向かう流れがある。これはそれぞれ海風、陸風に対応している。この地表付近の海陸風の上には、図 2.3 に見られるように四国側の新居浜では顕著な反流がみられる。しかし、中国側には海風の反流は明瞭でない。日中の局地循環は四国側でより顕著に現れていることが分かる。

夏の瀬戸内海の風系の特徴として、下層にジェット状況の強風域が発生することがある。図 2.4 にその一例が示されている。破線で囲まれた部分に10 m/s を越す西~南西の強風域がある。これは、この観測では瀬戸内海の北岸にみられる。類似の現象には宮田 (1976) の指摘があり、また第 7 章で述べる数値シミュレーションでも指摘される。

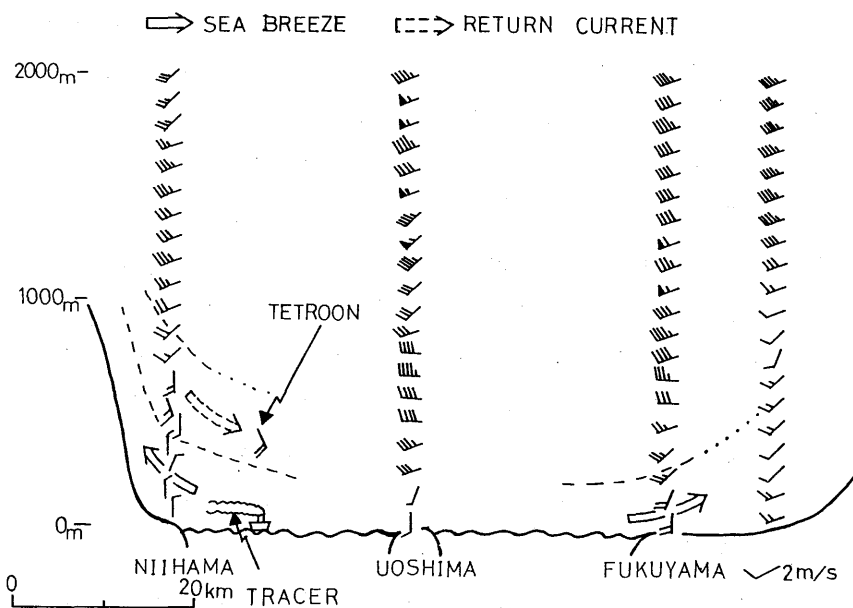


Fig. 2.3 A model of local circulation in the daytime of summer on the north-south cross-section through the Hiuchinada with the actual winds at 1400JST 22nd July 1980.

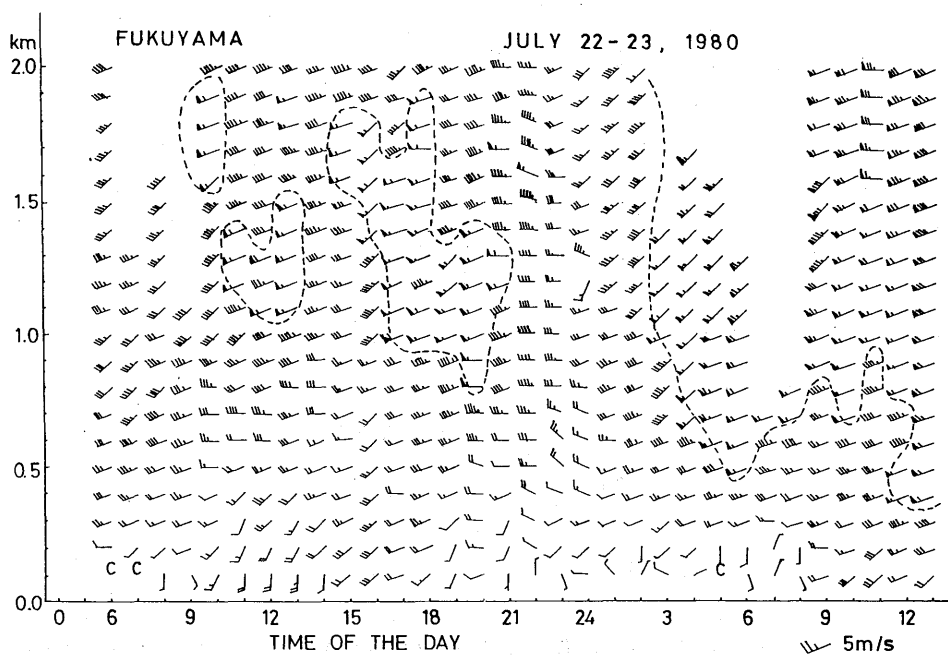


Fig. 2.4 A time-altitude cross-section in Fukuyama. The winds within broken lines are strong.

もう一つの特徴は、瀬戸内海を通り抜ける一般流と、一般流が弱く局地循環がより顕著に発達する地域の分布である。図2.1 (B) では、燧灘の北半分は瀬戸内海をほぼ西から東へ吹き抜ける風の通路となっているが、南半分の海域は東西風成分の弱い地域となっていることが分かる。これはトレーサー実験、ノンリフトバルーンの追跡においても確認されている。

2.1.2 1981年度観測

1981年の観測では、高さ1,500 mではほぼ東南東4 m/s 程度の風が吹いていた。海風の例として19日15時瀬戸内海中部の南北断面を図2.5に示す。低層では海より陸の方が高温であり、海風が吹いている。図2.6等の上層風の分布図を見ると、瀬戸内海北部を東西に走る線から風が南北に吹き出している。鞆では高さ650 m、別子では高さ350 m で海風の反流が認められる。瀬戸内海が狭くなっている三崎半島付近では風が強く、高さ650 mでは6 m/s の風が吹いている。陸風の例として20日3時の瀬戸内海中部の南北断面図が図2.7に示されている。低層では海より陸の方が低温である。図2.8の上層風の分布図を見ると、高さ100 mでは(A) 瀬戸内海と中国地方は北風、新居浜、今治では弱い南風が吹いており、春風丸付近をほぼ東西に走る線に風が南北から集まってきている。瀬戸内海上層では東寄り2~10 m/s の風が吹いており、四国北岸の観音寺、新居浜、別子、春風丸の上層では弱い南風が吹いている(B)。

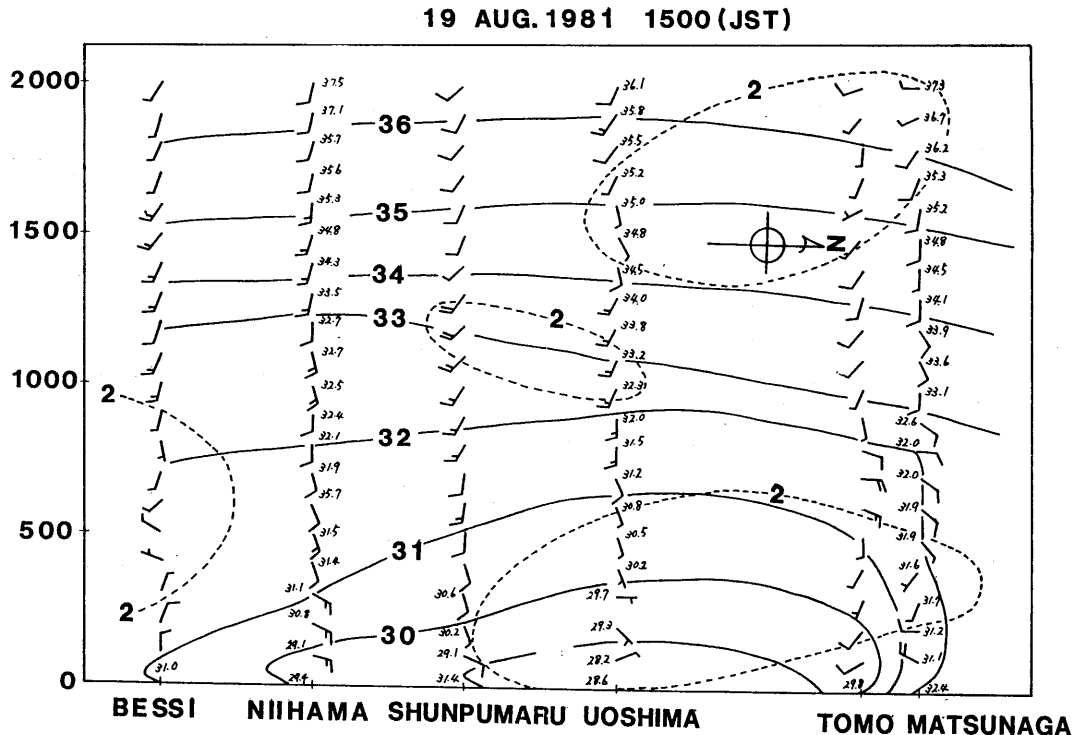
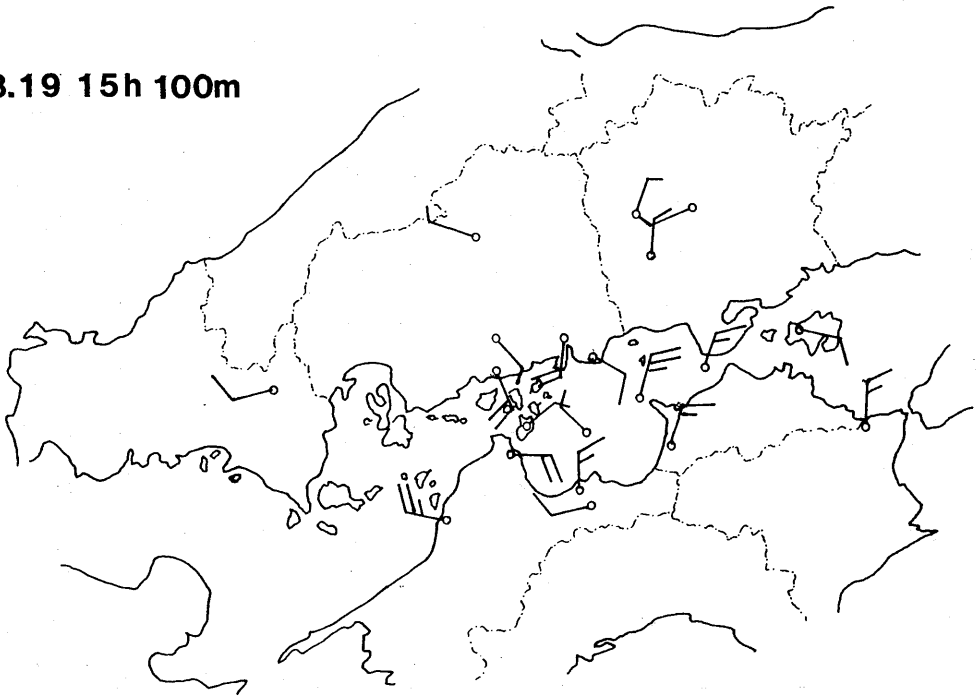


Fig. 2.5 The north-south cross-section through the Hiuchinada (1500JST 19th August 1981).

8.19 15h 100m



8.19 15h 500m

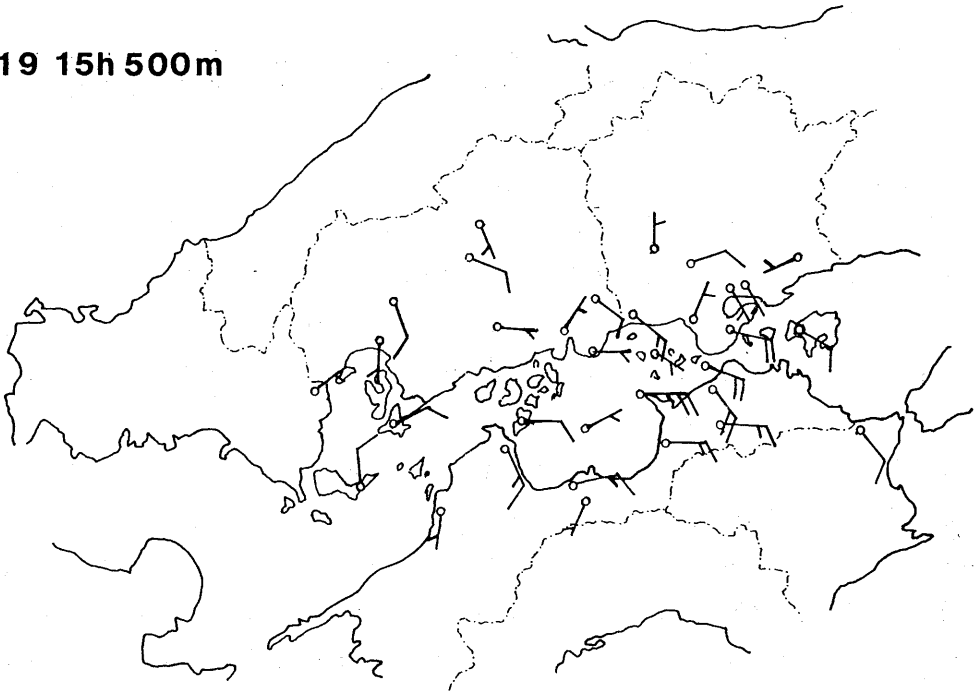


Fig. 2.6 An example of the wind distribution in the case of sea breeze (1500JST 19th August 1981). The upper and lower figures belong to the altitudes of 100 m and 500 m respectively.

20 AUG.1981 0300 (JST)

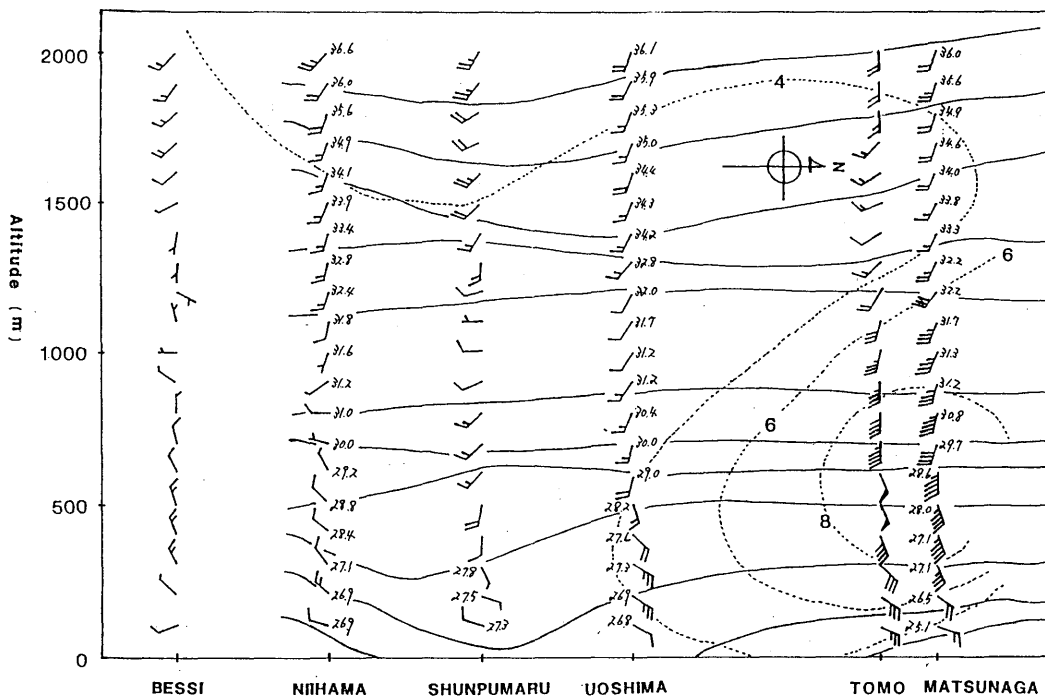
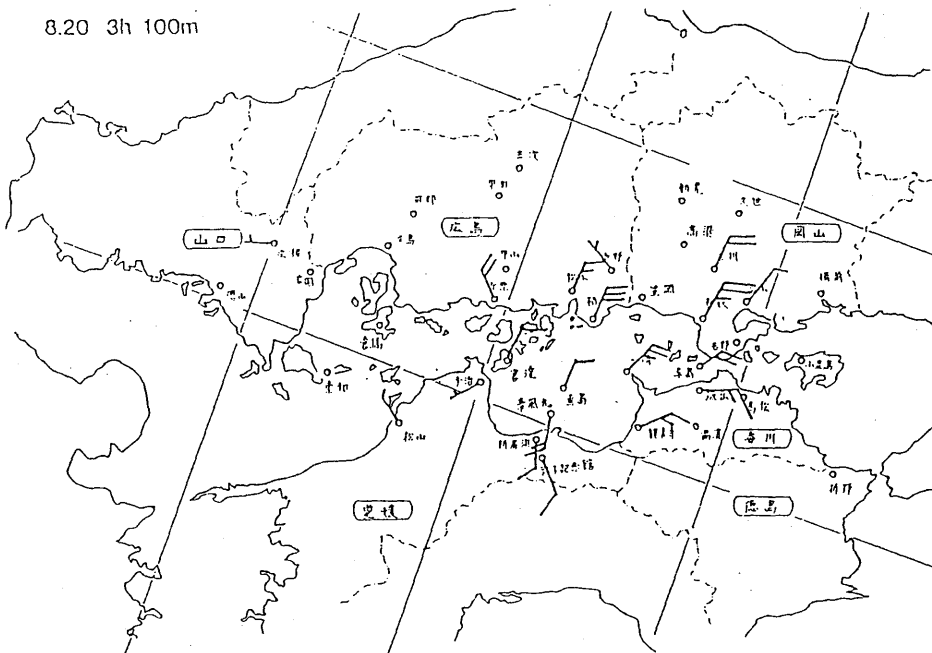


Fig. 2.7 The vertical cross-section of wind, potential temperature and dew-point temperature on the north-south line through Niihama (0300JST 20th August 1981).

図 2.9 は、船上で、高さ11 mの風速計、高さ 6.8 mの温湿度計、深さ 3 mの水温計の資料を用いて求めた熱と水蒸気のフラックスである。顕熱と潜熱のフラックスは平均53 ly/日、47 ly/日、早朝最大それぞれ、325 ly/日、210 ly/日、Bowen ratio はほぼ 1.1であった。蒸発量にすると平均 0.8 mm/日、最大 3.6 mm/日であった。顕熱、潜熱のいずれのフラックスの変化も風速の変化とよく似ているが、19日から20日にかけて潜熱のフラックスが最大になった後で顕熱のフラックスが最大になっており、差が認められる。

図 2.9 にはフラックス計算に用いた水温、気温、風速のほか、係留気球によって観測した高さ 100 m と 200 mの気温の変化も示す。水温は 28.3℃～27.1℃で18時頃が高く、6時頃が低い。海面近くの気温は26～30℃で気層は午前中は不安定、午後は安定である。図 2.10に係留気球によって観測した温位と混合比を示す。20日の両者の最大値の起時にはやはり 3～6時間程度の差が認められる。これは夜半に水面温度と気温がほとんど同じで海面から空気への熱の輸送がなかったことによるのだろう。

A 8.20 3h 100m



B 8.20 3h 400m

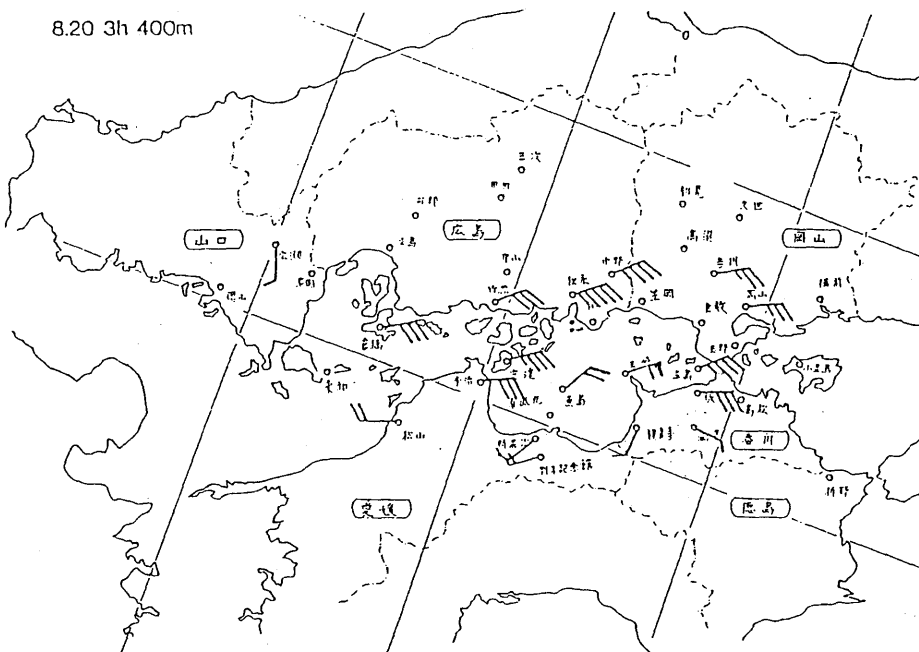


Fig. 2.8 The wind distribution in the case of land breeze (0300JST 20th August 1981).
The upper and lower figures belong to the altitude of 100m and 400m respectively.

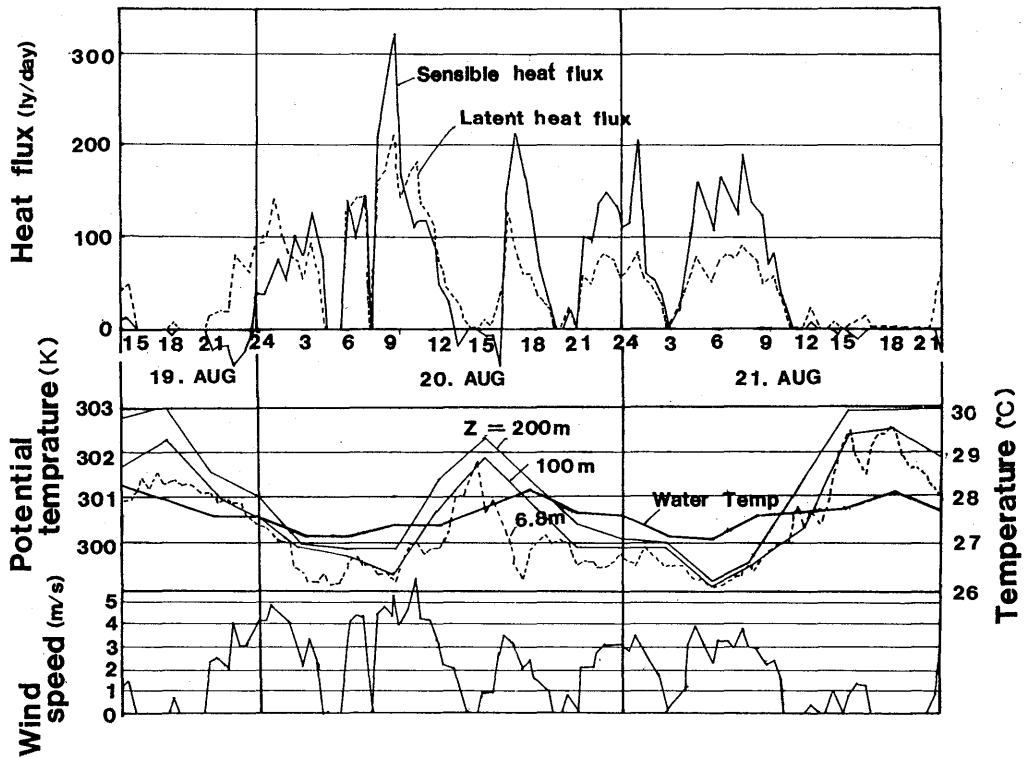


Fig. 2.9 The data observed on the ship off Niihama (19th-21st August 1981).

2.1.3 1982年度観測

1982年の観測から、海風の例を29日12時の南北断面として図2.11 (A) に示す。海上すなわち与島の上には温位28℃、海水温と同じ程度の冷たい空気が溜っている。倉敷は別として、そのほかの場所では海風が吹いている。陸風の例として29日6時の南北断面を図2.11 (B) に示す。中国地方の24℃程度の冷たい空気が陸風により海上に流れ出している。図2.12に与島の温位の鉛直分布の日変化を示す。温位28℃線付近は温位線が混んで気温は逆転している。この逆転層は、夜間は高くなって日出頃最高500mくらいに達し、日中は低くなって15時頃には地表面近くに達する。

上層風を調和解析し日変化を求めた。4日分の上層風の観測データから長期トレンドを差し引き、1～24時間の各時刻に対し平均の風を求めた。さらに東西成分、南北成分のそれぞれについて調和解析を行い、1日周期成分を求め、合成して風のホドグラフ (図2.13) を描いた。ホドグラフの回転方向は、800mより上層では、全観測点で時計廻りで慣性振動の回転方向と合うが、下層では満濃だけが時計廻りで、他の観測点では反時計廻りであった。ホドグラフの楕円の長軸は地表に近いところでは等高線に直交しており、局地的な海陸風、山谷風を示している。また財田、坂出、与島の高さ600～1200mで夜間、風が強い。この低層の強風の成因には、中規模スケールのじょう乱が関係しているようである。

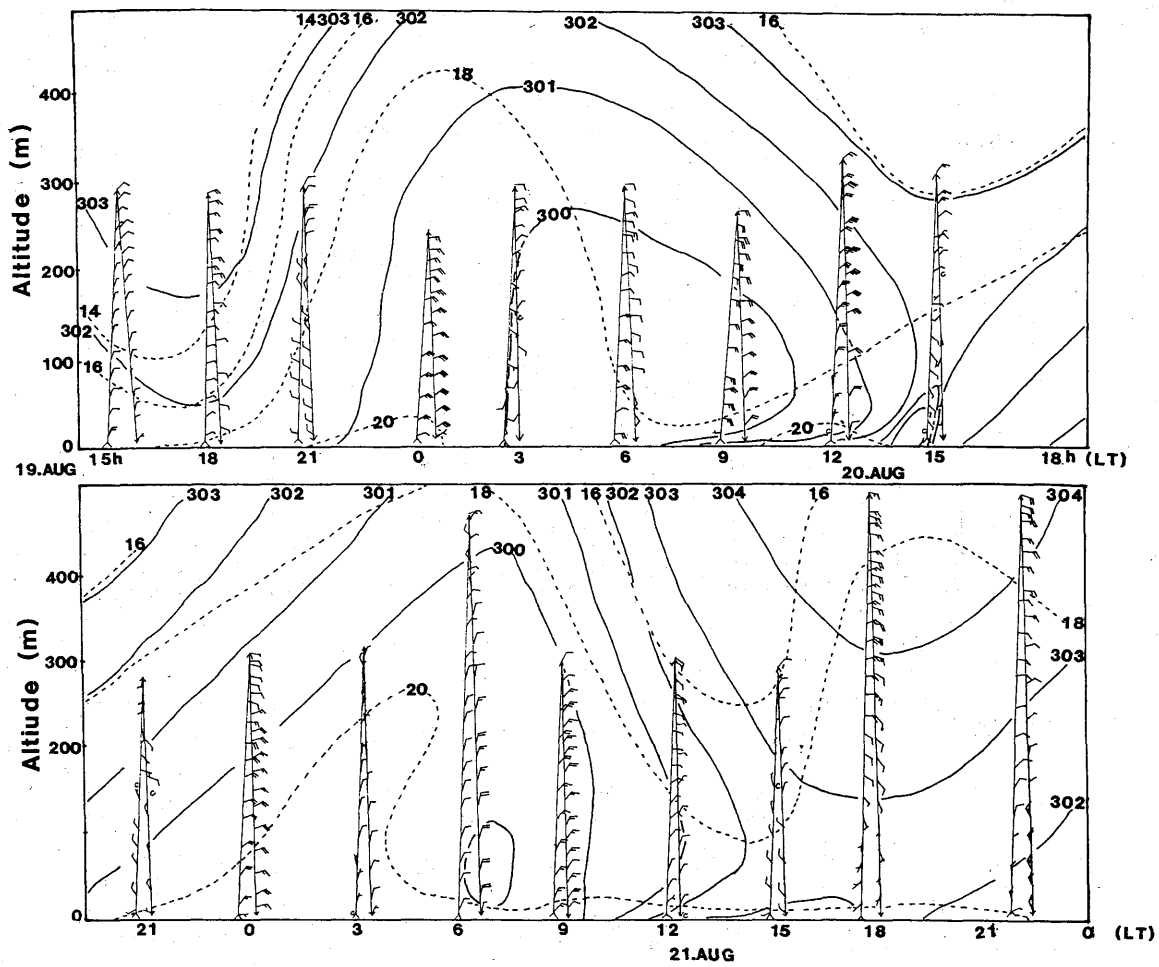


Fig. 2.10 Potential temperatures (K, solid lines) and mixing ratios (g/kg, broken lines) observed by tethered balloon (19th-21st August 1981).

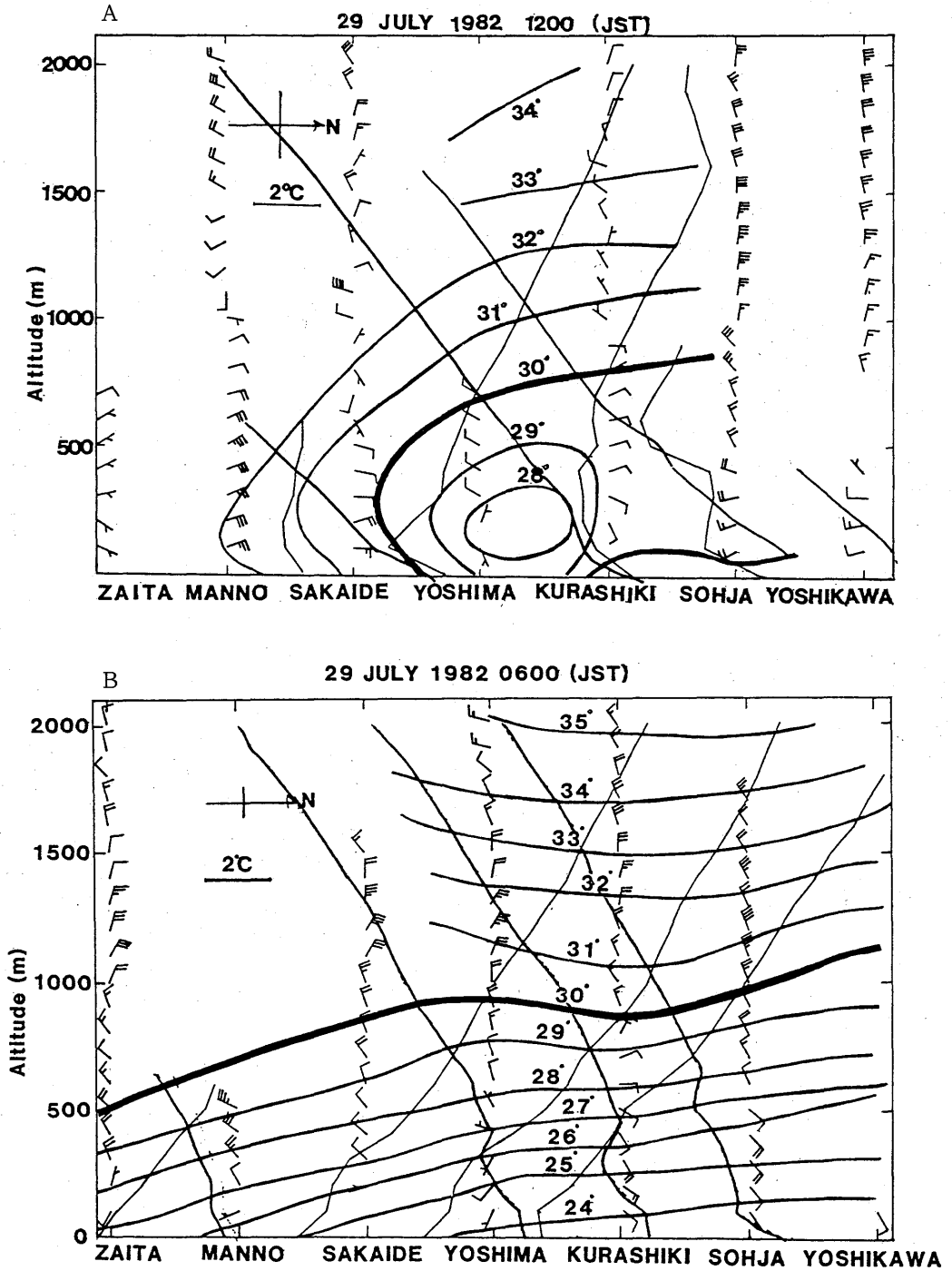


Fig. 2.11 Cross-sections through the Bisanseto (29th July 1982). A belongs to 1200JST, B belongs to 0600JST. The distance between the left and right ends is about 70 km. The ordinate is altitude (m). Broad lines are isentropes. Narrow lines show the vertical profiles of potential temperatures.

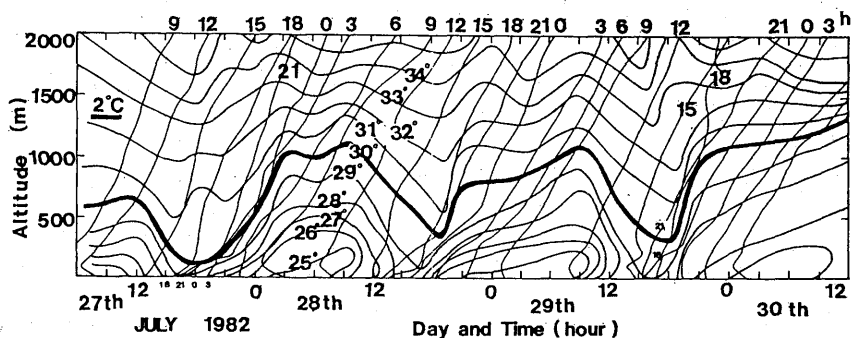


Fig. 2.12 The diurnal variation of the potential temperature vertical profile in the Yoshima (July 1982). The abscissa is the time and date and the ordinate is the altitude (m). Broad lines are isentropes. Narrow lines are vertical profiles of potential temperatures. Intersections of the 30° line and vertical profile lines pass through equivalent time lines. The times of vertical profile lines are also identified by numbers at the tops of the vertical profile lines. The scale of temperature is shown in the left upper corner.

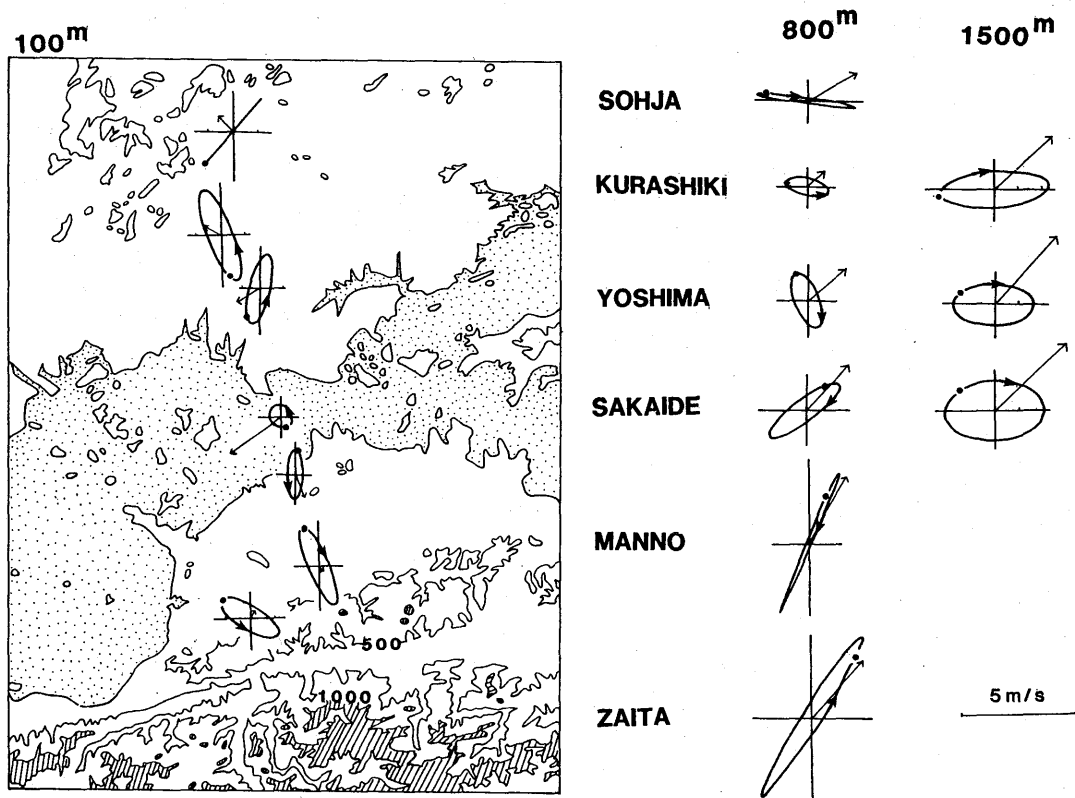


Fig. 2.13 Hodographs of the diurnal wind variations and average wind vectors for July 27-30 1982. Large dots indicate midnight. Direction of time lapse is shown by arrow marks on the ellipse. On the left areal distribution of hodographs at an altitude of 100 m is shown. On the right those at 800 m and 1500 m are shown.

2.2 風速分布

(1)瀬戸内海では一般流として、東西方向の風が吹き易く、これに東西方向の海陸風が重合する。この中でも急峻な四国山脈に囲まれた燧灘は一般風が弱いため、海陸風と山谷風が重なった形で明瞭に検出され、発生頻度が高い。

(2)夏の晴天日の地表と海表上の風の水平分布は、日中の海風と夜半前の陸風が明瞭に認められるが、夜半から早朝にかけてはアメダスの測定では 1m/s 以下を無風とするため無風域が多く、風系が定まらないことがある。しかしパイボールの 100m の風では夜半～早朝の陸風がはっきりしている。

(3)日中の海風の吹きだしは、西部では瀬戸内海の中国ないしやや山陽よりにのびる発散線、東部では中央ないし四国よりに位置する発散線から起る。発散線は海狭部ではほとんど一定の位置に停っているが、燧灘では時間によって中央～北部を振動する。

これに対し海風の先端部は中国側の海岸部で早朝に陸風との収束線を形成し、昼前に岡山県の内陸山地に侵入する。広島県では広島湾から北東に吹き込む海風が急速に中国山地の稜線まで達して、海陸風収束線を東西に分断することがある。中国山地中部はなだらかな丘陵地で稜線がいくつもあするため、日中の内陸収束線は異なる谷の谷風や日本海側からの海風が関係して、何本も形成されながら全般には内陸に集まる。中国山地西部では、収束線は山脈の稜線付近で振動している。四国側は山が急峻なため、海風と谷風は短時間で稜線に達し、西部では主稜線で太平洋側からの海風とバランスする。東部では吉野川沿の東よりの谷風が入り、瀬戸内海からの風および太平洋からの海風との間で収束線が分岐して持続する。

(4) 100m 上空のパイボールデータでは、早朝あるいは夕方に収束線が山陽地区沿岸にかかったとき、広島湾、児島湾等で収束線が折れ曲がり、低気圧性のうずを生ずることがある。

(5)風の鉛直分布は $200\sim 300\text{m}$ より下層に海陸風、その上方に一般流が吹く例が多い。一般流と海陸風が逆方向のところでは、間に 100m くらいの転移層ができることが多い。新居浜上空では一般流が東西で、四国沿岸に北よりの海風が吹くとき南東の反転流がみられた。

2.3 混合層

新居浜上空のパイボールによる風のプロファイルと低層ゾンデによる気温の状態曲線を測定時刻に従って並べ、風と気温の不連続に注目して成層状態を解析した(図2.14)。図中Hと書かれた実線は地表に接した不安定層と上空の中立層の境界を、気温減率と風向に注目して引いた線で、混合層上面とみなされる。夜間は反転流上面と一致しているが、日中は鉛直拡散や対流による一般流へのエントレイメントのため、一般流の中まで侵入している。下層には海陸風や反転の層がみられ、それぞれの境界と気温減率の変異点が一致する。

パイボールとゾンデのデータを用い、グリッドごとのリチャードソン数により安定条件を表現し、

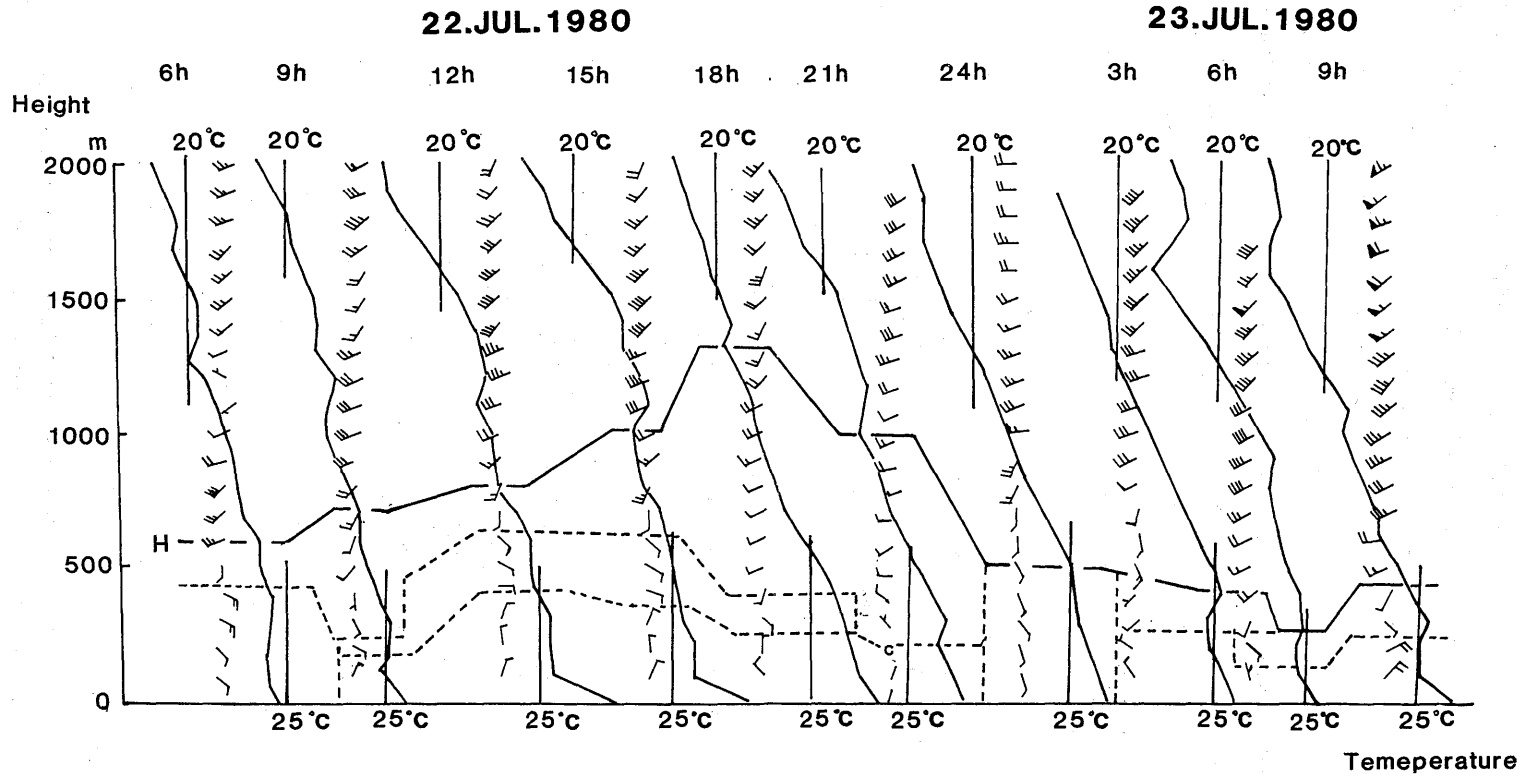


Fig. 2.14 Mixing layer (depth H is shown, with real line) and local wind system (divided with dotted lines) over Niihama for July 1980, analyzed with pibal and radio-sonde data.

これを含む鉛直拡散係数 K_z を求めた (図 2.15)。算定式は第 5 章末尾の付録 1 に示されているものを用いた。図中 H を付記した点線は混合層上面を示す。一般に K_z は昼過ぎから夕方にかけて全層で大きくなるが、混合層上面付近では夜中から早朝にかけても団塊状に大きな値を示すことがある。

H によって高度を無次元化した混合層内の K_z の各時刻プロファイルの事例 (図 2.16) では、 K_z は早朝に混合層上面の直下でやや大きく、9 時は接地層内のみがやや大きい。12~15 時は接地層でやや大きいほかに、中層~上面に最も大きな部分ができる。18~21 時は全層で値が小さい。これを海風、陸風、反流、一般流の 4 つの風系に分類し、無次元高度と K_z の値の分布域を示すと図 2.17 のようになる。中層以上の傾度風域では拡散パラメータの変動が大きく、反流内では $8 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下、海風では $4 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下、陸風では $2 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下となっている。 K_z の時間変動をみると (図 2.18)、日中の熱的な効果が顕著に現われている。

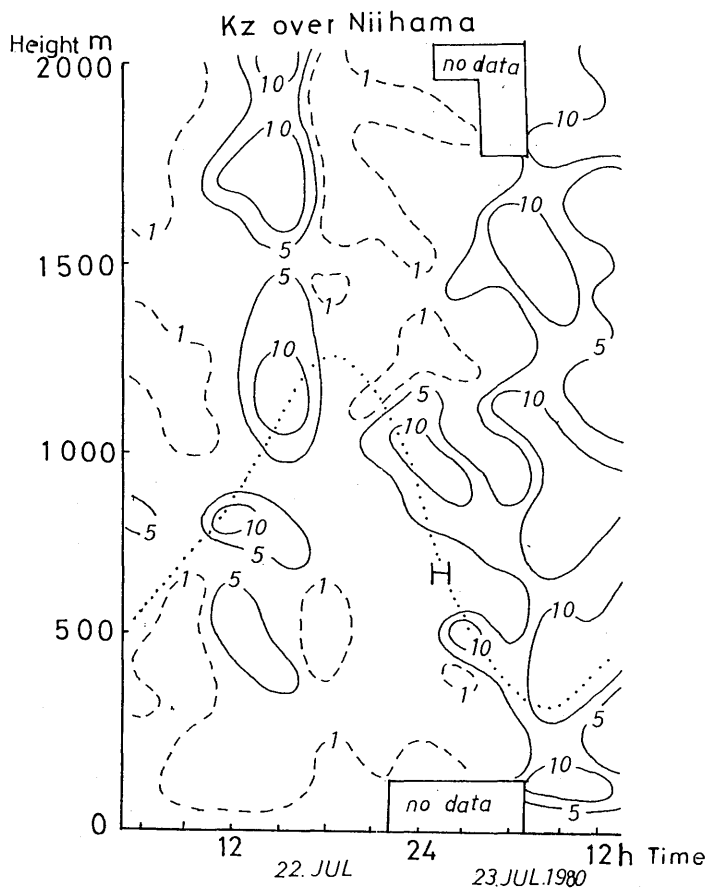


Fig. 2.15 Vertical diffusion coefficient K_z over Niihama, estimated from pibal and radio-sonde data for July 1980 (dotted line is the mixing depth.).

22.JUL.1980

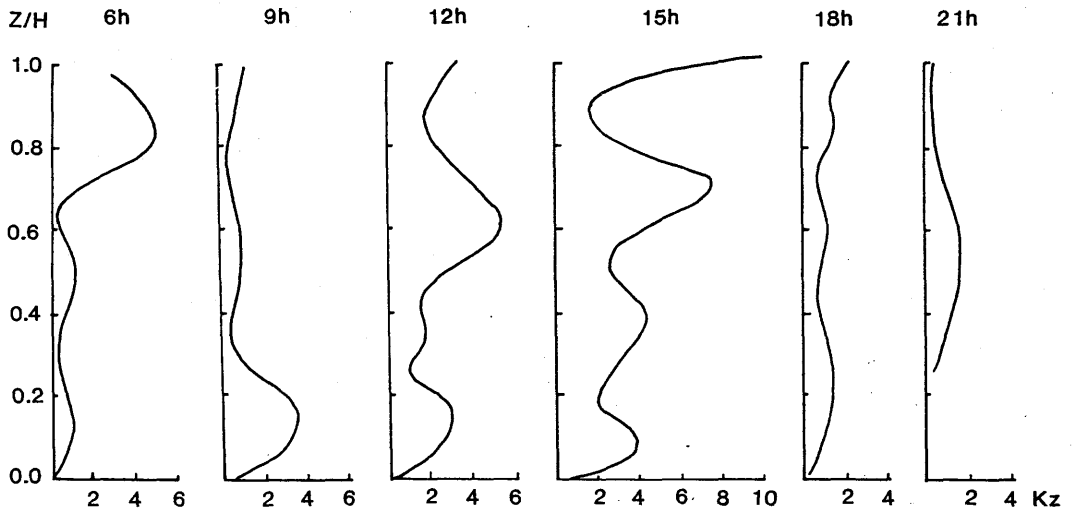


Fig. 2.16 Time-height cross-section of vertical diffusion coefficient K_z for July 1980, normalized with the mixing depth.

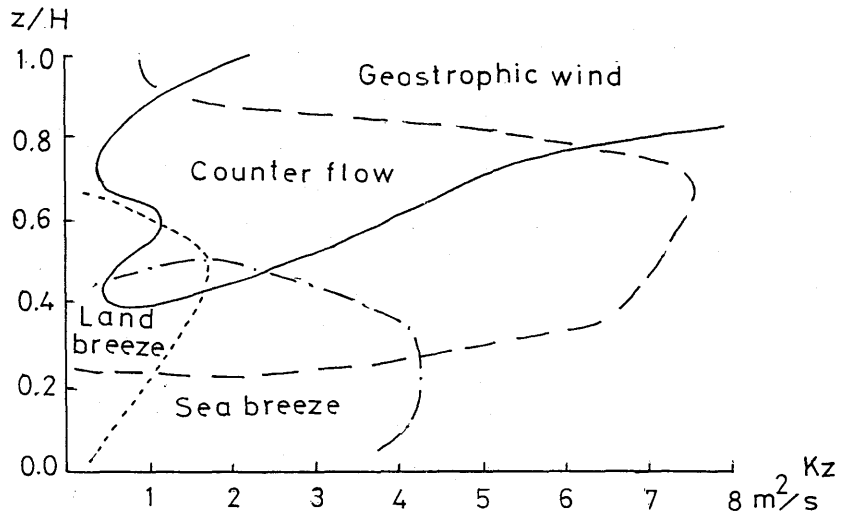


Fig. 2.17 K_z distributions in each wind system for July 1980.

2.4 Kzの地点別特性

パイボールとゾンデのデータから求めた燧灘をはさむ中国側（松永）、海上（魚島）および四国側（新居浜）の地上～1,500 m上空のKzの時間断面〔図 2.18 (a～c)〕をみると、1981年は安定した夏晴れでなかったため、上空では必ずしも日中に乱れが大きいわけでなく、シノプティックスケールのシャーラインに対応して、時刻を問わず全層にわたり、乱れが大きくなっている。19日夕方～20日は松永と魚島で共通する2回の乱れがみられ、新居浜では20日の分のみ遅れて起こっている。20日夜～21日午前の乱れは松永で長時間にわたって著しく、これが魚島では20日夜と21日早朝の2回に分かれた。新居浜では21日早朝の分のみ見られる。21日夜から22日午前にかけても、2回にわたる乱れがあり、中国側で著しい。これを求めた1981年夏の観測期間は19日早朝のみ西よりの風で以後は一般流が台風外縁の東よりの風であり、台風のアウターバンドと思われるにわか雨や雷雨を伴ったシャーラインが西進し、山陽側に直接的に侵入した。新居浜では四国山脈や三崎半島にのびる丘陵の陰になって、東からシャーラインが届かなかったり、到達が遅れたりした。

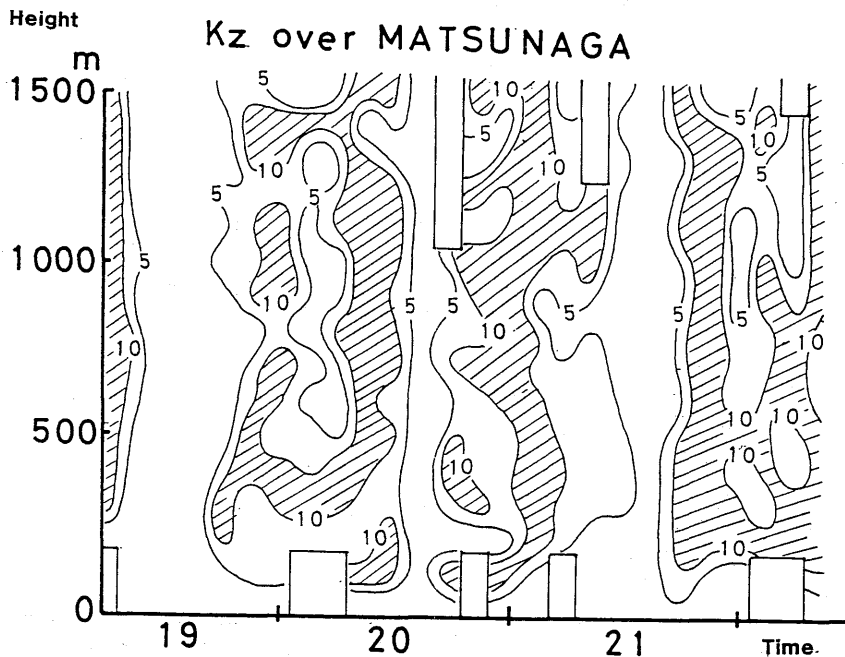


Fig. 2.18 (a) Kz over Matsunaga for Aug. 1981, estimated from pibal and radiosonde data.

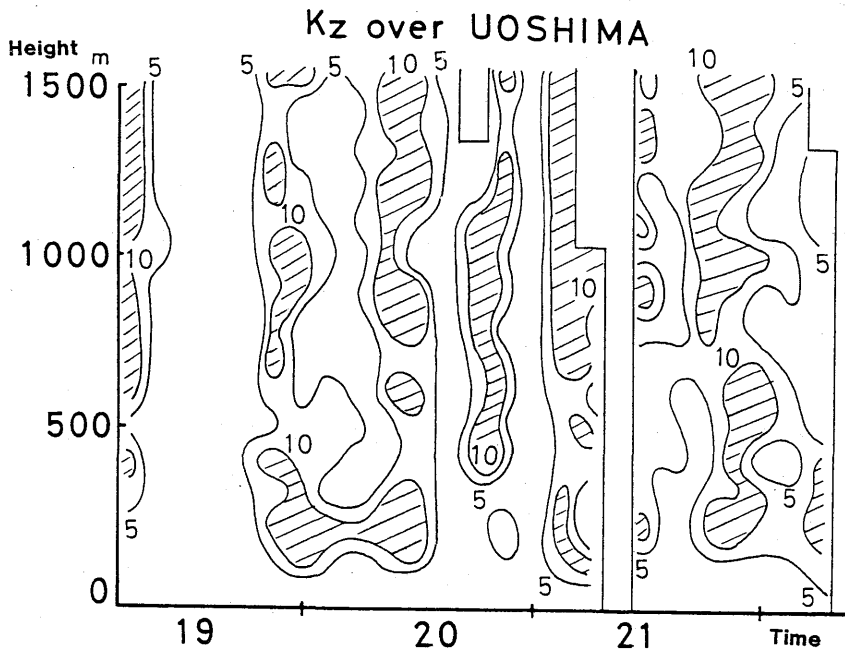


Fig. 2.18 (b) The same as Fig.2.16 (a) except over Uoshima.

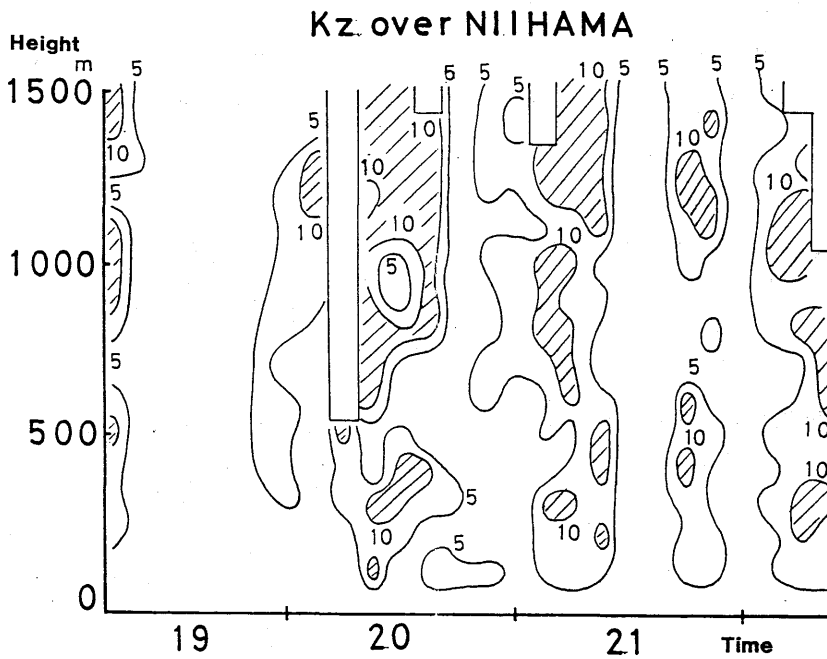


Fig. 2.18 (c) The same as Fig.2.16 (a) except over Niihama.

2.5 瀬戸内の局地気象現象

(1) 海陸風に伴う発散・収束線の分布

1980年7月22日を例に瀬戸内地域の特別観測、アメダスデータを合わせて流線図(図2.19)を描いた。日中は瀬戸内に発散域、山陽と四国の山地に収束域がみられる。瀬戸内の海風発散線は燧灘では中央～北部の間で振動するが、備讃、来島等の海峡部分では定常状態にある。海風・谷風の収束は、四国側では山地急峻で稜線がはっきりしているため、特に西部で稜線に対応して停滞する。四国東部では吉野川ぞいの東風が入ることもあって、収束線が北東と南に分岐することが多い。また分岐点のすぐ西側では南北への移動が激しい。

中国側では、海風初期には内陸からの陸風も残り、収束線は沿岸にあるが、日中になると海風が前進し、収束線は中央丘陵地に分布する。ただし広島北東部では陸風の残りが強く、海風の収束線を南に湾曲させているのに、日中は海風が内陸深く侵入し、収束線を東西に分断することが多い〔図2.19(a)、(図2.20(a-1~c-2))〕。

夕方の海風から陸風への転換は瀬戸内発散線が分断されて瀬戸内西部と中国山地に残り、四国山地の収束線が四国沿岸に下りてくる形で始まる。このため広島湾から北東へ侵入する海風と、来島海峡から四国西部へ侵入する海風が20時ころまで残ることになり、夜半は全域で微弱な風(アメダスでは1 m/s 以下無風扱いのため)となり、風系の検出ができにくくなる〔図2.19(b)、図2.20(d~g))〕。

(2) 朝夕の海陸風反転時の局地低気圧性ボルテックス

早朝、地上では無風が多く、陸風の分布はわからないが、パイボールの100m上空の風では中国沿岸に収束線が検出される。その際、広島と岡山の海岸部に収束線の屈曲の低気圧性のうずが認められる〔図2.20(a-2)(b-2))〕。

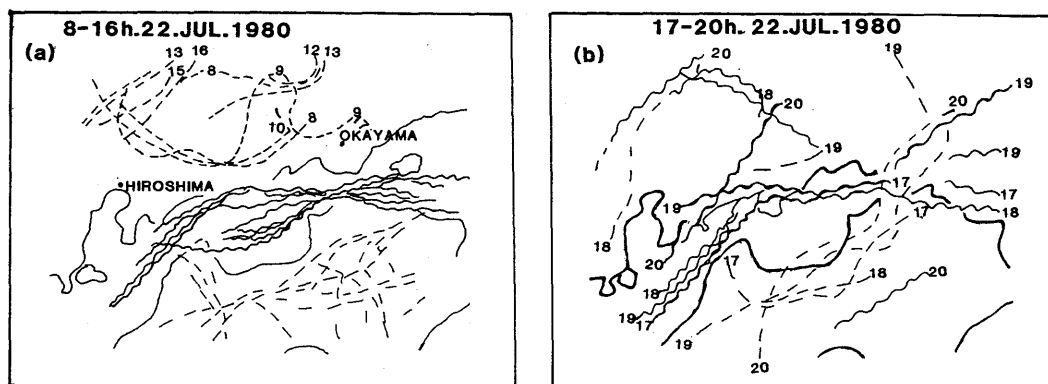


Fig. 2.19 Movement of convergent and divergent lines in connection with the land-sea breeze around the Inland Sea for July 1980.

一方、夕方の海風から陸風に移行するときにも、広島、三原、岡山南岸あたりにうずがみられ、岡山付近の沿岸ぞいに東北東へ移動してるらしい。これらのうずの生因として、地形と海陸風の相互作用のほか、都市や工業地の熱効果も考えられる〔図 2.20 (f-2、g-2)〕。

参 考 文 献

宮田 賢二、1976：瀬戸内海沿岸付近における海陸風、天気、23、205-206

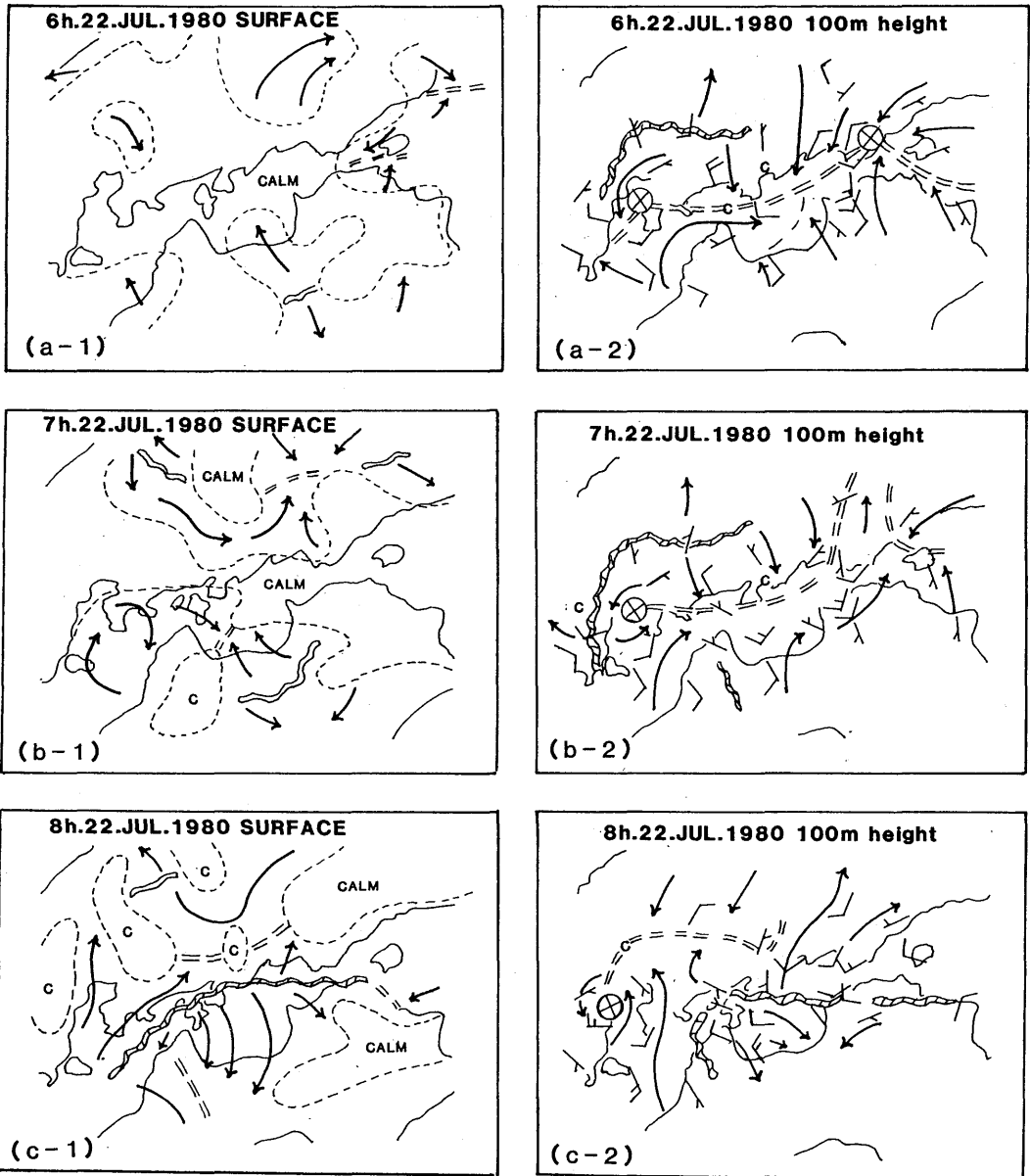


Fig. 2.20 The same as in Fig. 2.19 but for each time. The left and right figures belong to the ground surface and altitudes of 100 m respectively.

