

広島湾の海陸風について*

(その1) 海陸風の循環特性**

井 野 英 雄 ・ 根 山 芳 晴***

要旨

昭和46年夏季に行なった広島湾の海陸風特別観測に続いて、昭和47年秋季には湾沿岸地上観測と湾内3カ所での風の立体観測を行なった。その結果、海陸風の立体構造、一般場の相違に対する循環系の違った振舞い、流れに伴う地形の影響「出現の仕方や海・陸への及び方等」についての実態が判った。特に夕方頃の下層の強い風が湾内の限られた場所にしか現われていないことに対してもある程度の示唆を得た。また一般場が異なると、夏には海風系が秋には陸風系がともに相対的に顕著に現われたり、三層循環系の現われ方が上層で偏西風の卓越する時期の方がはっきりしていることもわかった。ただしこの事実は場所によって異なるかも知れない。さらに特定高度での海陸風に伴う流れが、湾内の小島や岬の影響を受けて鉛直運動を生じたり蛇行したりするにはある限界の速度があることも認められた。

1. は し が き

広島湾における海陸風については、昭和46年7月30日に初めて湾奥の气象台と湾入り口の島でパイボールの一点観測と定高度気球観測を行って、主として海風についての立体構造を明らかにした(井野・根山, 1972)。その時期が真夏であったために、一般流の方向と広島湾における海風向とが一致し、海陸風の鉛直循環系が必ずしも明瞭に得られなかった。この事実はかなり興味あることで、一般流と下層局地風との干渉の問題を考えるのに役立つように思える。そこで今回は、一般流が偏西風で海陸風向とは夏に比べて大きく異なっている時期をえらんで湾内3カ所で、24時間のパイボール1点観測による風の鉛直分布を調べ、さらに湾内各地で地上風の変転を観測して、海陸風の始終時の状態、そしてどのように陸地や海上に及んでいくかを究明した。また湾中央カクマ島上で定高度気球を飛ばして、海風と陸風に伴う流れが島や湾、岬などの影響を受けてどのような振舞いを見せるかを調べるためにレーダーを使って追跡観測を行った。各節では昨年度に得られた結果と比較しての相違についても述べる。

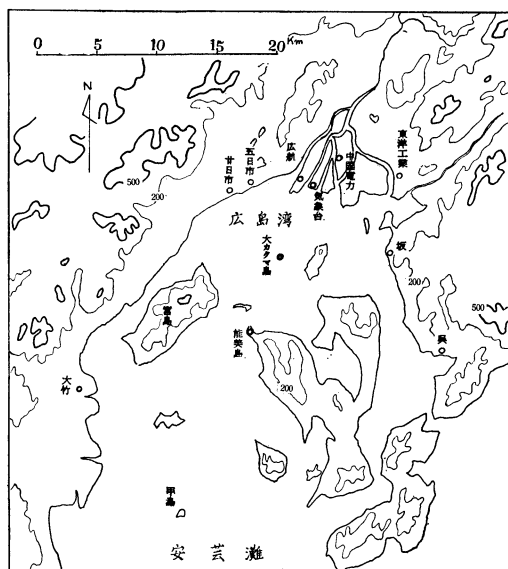
* On Land and Sea Breeze in the vicinity of Hiroshima Bay.

** (No. 1) Characteristics of Land and Sea Breeze Circulation.

*** H. Ino, Y. Neyama (広島地方气象台)
——1973年5月25日受理——

2. 観測方法と気象状況

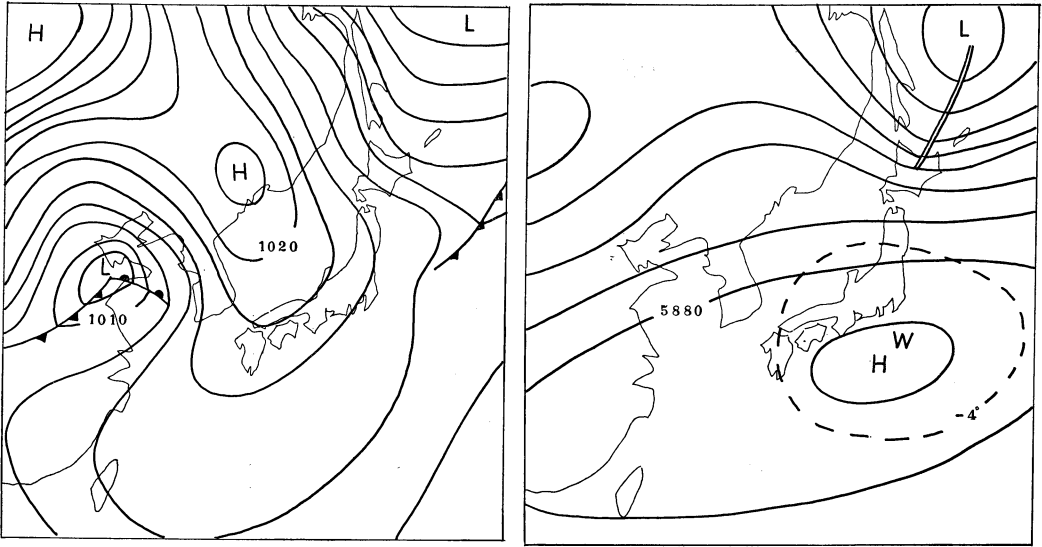
まず第1図に観測網を示してあるが、沿岸の各地点では自記風向、風速と気温の観測を行ない、气象台、カクマ島、能美島では毎時刻のパイボール1点観測を高度2000mまで昼夜とも行った。また定高度気球観測は、主として朝なご、海風、夕なごそして陸風の各時刻頃にテトルーンを300m高度で飛ばし、広島市内南部にあるレ



第1図 観測所分布

第1表 各地の風向・風速の時間変化

観測所 年 月 日	気 象 台		能 美 島		中 国 電 力		東 洋 工 業		広		航
	1971.7.30.	1972.9.2.	1971.7.30.	1972.9.2.	1971.7.30.	1972.9.2.	1971.7.30.	1972.9.2.	1971.7.30.	1972.9.2.	
要素 時刻	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速	風 向 速
6	N 4.0	N 3.8	C	ENE	NW 2.3	NNW 2.3	ENE 1.0	NNE 2.8	NE 2.5	ENE 3.3	
7	N 1.8	N 5.7	NE 1.3	NNE	NNW 1.0	NNW 2.5	ENE 1.0	N 3.0	NE 2.7	NNE 3.9	
8	NNE 2.5	N 5.7	NE 1.5	NNE	NW 1.0	NNW 2.4	ENE 1.0	NNE 0.7	NE 1.7	NNE 4.6	
9	N 0.8	NNE 4.5	NE 1.5	NNE	C	NNE 0.9	ENE 1.5	N 2.5	W 1.3	NE 3.7	
10	SSE 1.5	N 3.2	SSW 0.3	NNE 1.4	S 1.6	NE 1.7	SSE 2.0	W 1.5	SW 2.6	NNE 3.0	
11	S 2.2	SW 1.0	SW 2.5	N 0.9	SSE 2.7	E 0.6	SSW 3.0	SSW 2.5	SSW 3.9	SSW 2.4	
12	SW 2.3	SSW 2.2	SW 2.3	SE 0.8	SSE 2.5	SE 1.4	SSW 3.6	SSW 3.5	SSW 3.8	SSW 3.2	
13	SSW 2.3	SSW 1.8	SW 2.5	WNW 2.2	SSE 3.5	SE 2.3	SSW 3.0	SSW 2.7	SSW 3.6	SSW 3.5	
14	SSW 2.5	SSW 2.3	SSW 2.5	W 4.3	S 3.1	SSE 1.0	SSW 4.5	SSW 3.5	SSW 4.3	SSW 3.7	
15	SSW 2.3	SSW 1.8	SSW 2.5	W 2.3	SSE 2.8	SSE 2.3	SSW 3.0	SW 2.7	SW 5.4	SSW 3.3	
16	S 3.5	SSW 1.0	SSE 3.0	WSW 2.8	S 4.5	SSE 2.9	SSW 4.5	SW 2.0	SSW 5.7	SSW 3.0	
17	SSW 2.8	SW 1.0	SSW 1.7	WSW 3.2	SSE 3.0	SSE 1.8	SSW 5.0	SSW 3.0	SSW 4.3	SSW 3.1	
18	SW 3.0	SW 1.8	S 2.8	WSW 2.4	S 4.2	SSE 0.8	SW 3.8	SW 2.1	SW 4.8	SSW 3.0	
19	SW 2.8	SSW 2.7	SSW 2.7	SW 2.4	S 4.9	SSE 0.7	SW 4.5	C	SW 4.4	S 1.5	
20	WSW 1.9	WSW 1.7		W 1.1	SSW 2.2	N 0.5	WSW 2.5	C	SSW 3.9	W 1.1	
21		N 0.7		WNW 0.9				E 2.5		N 1.0	



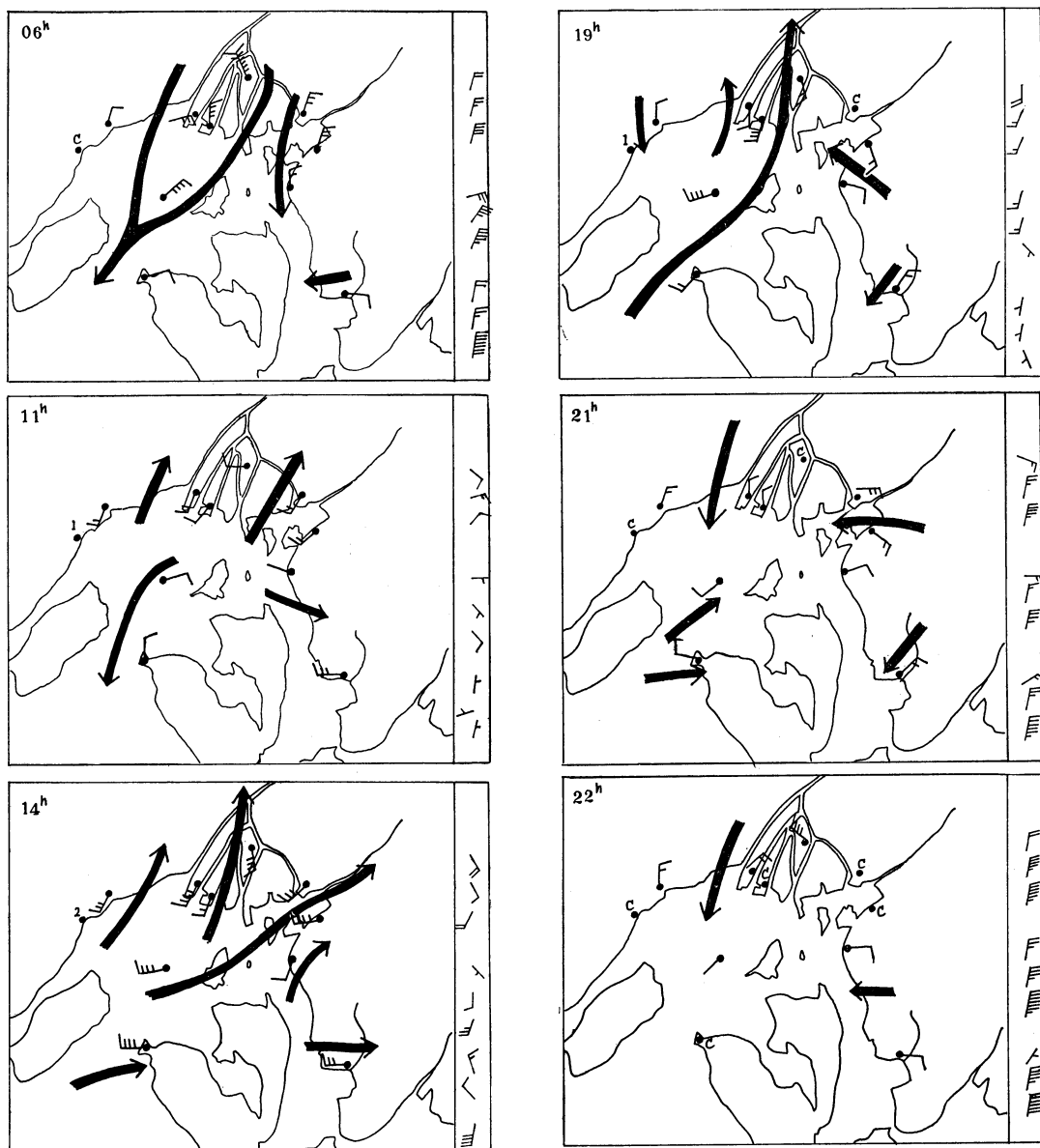
第2図 地上天気図, 1972. 9. 2. 09h
500 mb, 1972. 9. 2. 09h

ーダーで追跡し、ブラウン管上で位置を求めて気球の軌跡を得た。テトルーンの観測法は前出の論文の中に詳しく報告してあるので省略する。なお、時期は昭和47年9月1日から2日にわたっている。地上風による海陸風の始終期の各所別の模様を第1表に示してある。これによると、朝なぎの開始時期はだいたい10時から11時にわたっていて、夏に比べて1～2時間おそく現われている。夕なぎは19時から20時に見られ、この時期は早くなっている。(昭年46年夏の様子がはっきり判らないので時間差は不明である)。したがって秋のパターン時には海風の吹走時間が短くなり、陸風吹走時間が長くなっていることが判る。このことは季節の進みが太陽から地面が受ける熱量の相違に関連していることにもよっておきたものと考えられ、海陸風が第1義的には海上と陸上との水平方向の気温差によって出現する現象であることを裏書きしている。また地上風速をみると、海風は秋に比べて夏の方が相対的に強く、陸風は逆に秋の方が強くなっている。当時の気圧配置は第2図に示してあるが、地上の気圧配置はむしろ北から張り出した高気圧の中におおわれているが、850 mb (天気図省略) と 500 mb 面では共に高気圧の中に西日本が入っており、特に高気圧の中心が日本の南海上にある点が夏の状態とは大きく異なっており、上層で偏西風の卓越がみられるパターンである。

3. 地上風の地域一時間的变化

1973年10月

湾周辺の各地点で観測された地上風の時間毎の分布を夕なぎ、陸風、朝なぎ、海風の各代表時刻について図示したのが第3図である。まず21時には陸地側で陸風が初まり海上ではまだ海風が残存していたため、沿岸沖合いで地上風の収束域が見られる。1時間後の22時には海上と陸上とで無風状態が現われて、ほぼ“夕なぎ”になった。ただ湾の北西部では陸風の初まりがみられる。6時になると陸風の最盛期が現われ、湾から南西方向に開けた安芸灘に向う気流系が完成した。この時点での陸風向は湾の北東部で海岸線に平行に近い状態になっている。他はほぼ直角にまじわっている。11時の“朝なぎ”頃には、沿岸沖合いを発散域とした形で陸上と沖合に向って吹き、海上では南西に吹き出す気流系が形成され、沿岸地方では海風が現われはじめた。16時には湾の東部と西部で陸風が出現しはじめたが、特に市街地の中央部では安芸灘から湾内にほぼ真直ぐ北上する強い気流系が現われ、気象台では日中の最大風速より強い風を観測した。広島湾における海陸風もほぼ沿岸沖合いにその吹き初まりの地域がみられることは、一般的な状況と類似しているが、夕刻頃の湾の中央部を市街地に向って吹き抜ける形の気流系の出現は何によっているのか興味がまたれる。さらに夕なぎ、朝なぎ頃にみられる沿岸沖合での地上風の収束、発散といった現象は当然大気対海水の間の熱や運動量のやり取りにおいてそれぞれ異なった何らかの特性がみられるはずで、その点については「その2」



第3図 海陸風の地域一時間変化 (Sep. 1, 1972)

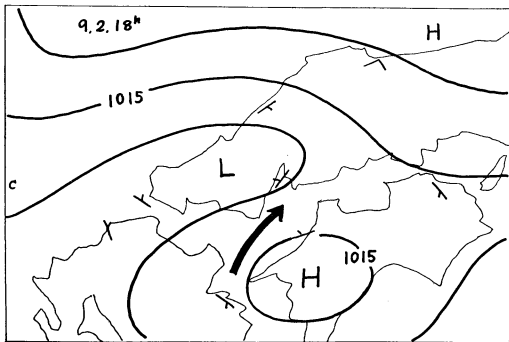
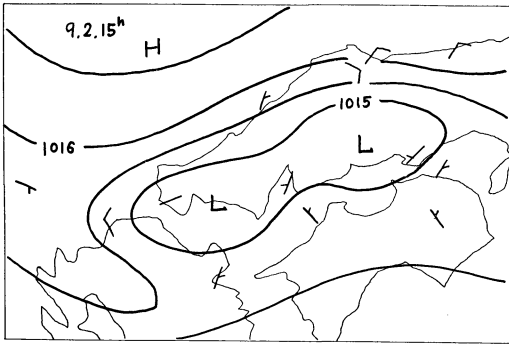
右側の風は下から300m, 500m, 700mの高度を示し、各グループは上から気象台、大カクマ島、能美島を示す。

で詳しく解析されている。

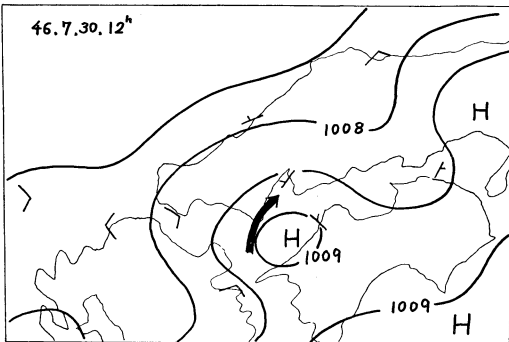
地上付近で夕刻頃に現われる強風速は、すでに米国でも多くの論文 (Fisher, 1960 etc.) で指摘されているが、一応地上風が三角形をした広島湾の北方頂点にあたる場所 (気象台) で収束したようにみえることは、まさつと気圧差による効果との差し引きによつているといわれる

直接的起因以外の作用も考えられるようである。そうだとすると、その作用源は何であるか、そして海風吹走時の夕方頃におきなければならない理由は何かという疑問に対して答えるために、地形の影響を受けるようなスケールの小さい規模であろうと考えて、局地解析を試みることにした。前述の問題となった9月2日18時頃の様子

『天気』20. 10.



第4図 局地天気図



第4'図 局地天気図

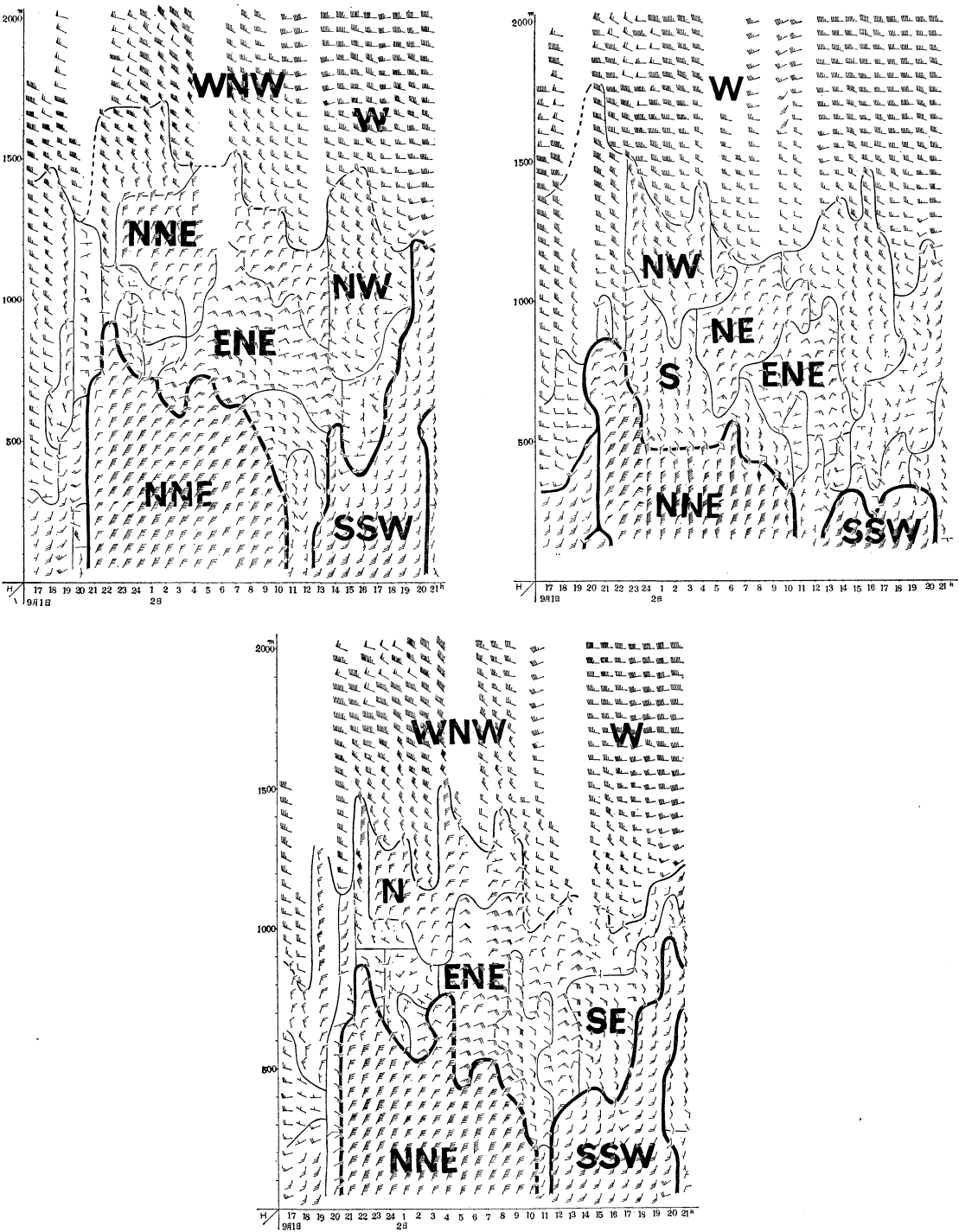
をさかのぼって順に眺めると天気図は省略したがまず1日21時から2日9時までの夜間には日本海方面に高気圧があって大きな変化は見えない。しかし12時になると、瀬戸内海を中心に熱的低気圧が出現し、15時には山陽側の陸地に北上した。18時には中国山地にまで北上したようになり、かわって四国西部に中心をもつ小規模の高気圧が出現し(第4図参照)その高気圧に伴う後面の南西風がちょうど広く湾に吹きこむ形となって海風向と一致している。その後高気圧は佐田岬から豊後水道へと中心を移して広島湾に対する南西風系は消えている。昭和46

年7月30日の例でも同じ事実がみられる(第4'図参照)ただ2回だけの結果からの推論では問題があるが、日射の影響によって島の点に在する内海で出現した局地的低気圧が、太陽高度がのぼるにつれて山地側に変位したことで、小高気圧の出現(その機構ははっきり判らない)とが相俟つて地上での強い気流系を形成したようである。それが熱的效果とまさつ効果とによるエネルギーのやり取りの残差の形で夕方頃現われ易いのであろう。したがって恐らく夕方の地上風の強化時には同じような局地解析結果がみられるものと思う。ただ夕刻頃という時期については、熱的低気圧が衰弱するところにあたるということに関連があろう。さらに広島湾では気象台周辺(湾の北の奥まった地域)でしかこの夕方頃の強い海風がみられないことも、より強く収束させる気流系の形成を考えざるを得ない。

4. 海陸風の鉛直一時間変化

第5図は風の鉛直分布の時間変化が気象台と大カクマ島、能美島について示してある。概観していえることは、海風循環系より陸風循環系の方が強く(風速が相対的に倍くらい強く、循環系上限が陸風の方が高い)、一般流(平均高度約1300m)、中間流(反対風かも知れない)と海陸風系の3層気流系が極めてはっきりしているのが特徴的である。これはいずれも夏の場合とかなり大きく異なった状態にあるが、一般場が偏西風卓越という時期には夏場の高気圧におおわれた状態よりもより3層系の気流場がはっきり現われ、それに関連して陸風系の方が強く現われている。そのことは太陽高度の季節的变化が、日中の地面付近の受熱量を少なくしているために、夏よりも海風系が相対的に弱く現われるためであろう。

まず気象台についてみると、20時頃より北北東の陸風がはじまつて10時頃まで続き、平均上限高度は500mくらいで、22時頃と3~4時頃には800mにも達している。また海風は12時から始まって20時頃まで継続している。夕方の17時頃から上限高度が上昇して20時には1000mに達しているが、面白い事実は日中の高度(400mくらい)が低くて夜に高くなっていることで、この現象は湾央の大カクマ島でも見られる。朝なぎ、夕なぎとも約1時間くらいで終わっているようで、このことも夏の場合とは大きく異なっている。反対風はほぼ東よりの風が卓越していて、海風に対してはかなり明瞭に認められる。次に大カクマ島についてみると、全般的な傾向は気象台とよく似ているが、ただ海風に対する反対風向が西よりの風で気象台とは違っている。2日間の反対風層内

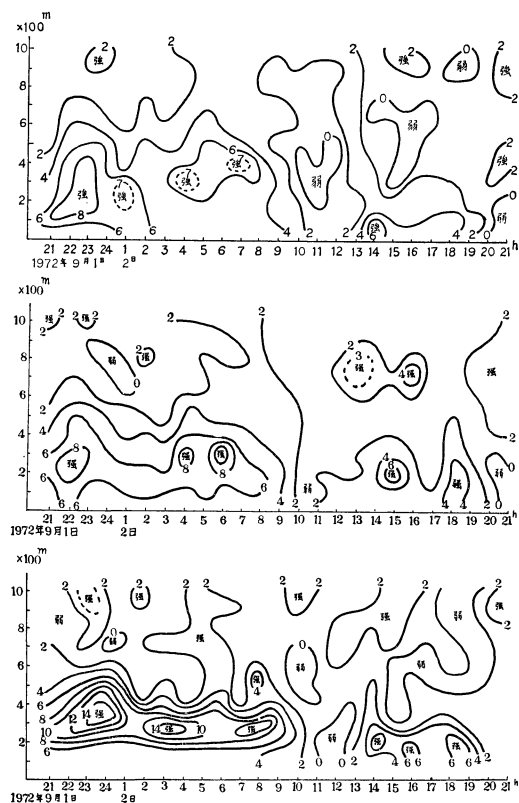


第5図 風の鉛直分布の時間変化
小さい矢羽根は0.5m/s, 大きい矢羽根は1.0m/sを示す。
(上左大カクマ島, 上右能美島, 下: 気象台)

の風の時間的変化はかなり複雑で、この点では湾入り口の能美島と類似している。また反対風層の厚さは他の2地点と大きく変わらないが、海陸風循環系の高さが2地点よりは相対的に高く、平均700mに達している。

さらに、湾の入口にある能美島では海陸風系の上限の高さが相対的に低く、海風は300mくらいでかなり低く、また湾央や湾奥のように19~20時に急に海風上限が高くなるような現象はみられない。このことは夕方すぎに海風系の強化がおきる陸地とそれに近い海上に対して大きく相違していることを示しており、このような垂直方向の強まりは沿岸海上付近に限られるようである。反対風系の時間的変化における乱れ方は、陸地や湾央に比べてさらに強くなっている。

次に風速の時間—高度変化を眺めてみよう（第6図参照）。一見していえることは、夜間の陸風速が地上200~400mの層内に最強風速が現われており、これは3地点とも海風速よりは強く、しかもその高度が海風最強風速高度（100~200m）よりも高くなっていることである。



第6図 風速の時間—高度変化

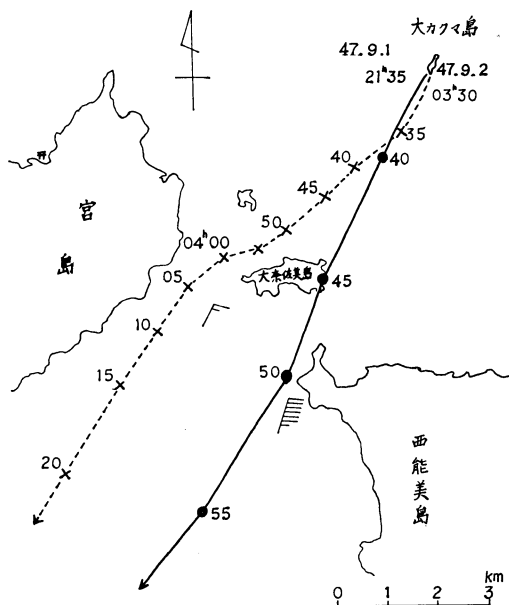
（上：大カクマ島，中：気象台，下：能美島）

また特に注目したいのは、湾の入り口付近にある能美島での陸風速が最大14m/sにも達していることである。この事実は恐らく湾奥地から広島湾を通して島と岬にはさまれた狭くなった湾口付近で収束した陸風を物語るものと思われ、地形の影響によって大きく変わる局地風の特徴であろう。この地点の観測高度は100mの岬の突端にあたっている。また夕刻ころの下層の強風が湾内の観測地点では現われていないことも興味深い。反対風速の時間変化は、700~800m高度で強風が現われている気象台に比べて、湾口、湾央では現われておらず、いろいろな高度で相対的に強い弱い風速がみられて、風向とともに反対風の振舞いはかなり複雑で、陸上とはその状態がはっきり異なっている。

以上の風速垂直分布の変化にみられる状況は、夏と大きく違っており、放熱量の増加傾向の強い秋の夜間の陸風速が夏より強いことは、広島湾という限られた局地についても海陸風の季節変化が如実にあらわれている。

5. 地形効果による気流の変化

今回も前年度と同様に、テトラーンを使って海陸風に伴う気流の様子を調べた。通常テトラーンの追跡観測を行うには、ヘリコプターによる方法、セオドライトの2点観測、レーダーによる方法などがある。前回はヘリコプターによる追跡を行ったが、飛行制限によって夜間の陸風観測ができなかったため、今回はそれを主にしてレーダーによる方法を採用した。この方法の難点は気球の高度が観測できないので鉛直運動が求められないことである。気球からの反射をとらえるのであるから気球自体にアルミ箔のようなものを張りつけるか、そのもので作った気球を使えばよいわけであるが、海陸風のようにかなり遠方まで追跡するときには、そして陸地に近い海上では小型舟や航空機の映像もブラウン管上に動く状態で現われるため見誤るおそれがあるために予備観測の経験から次のような方法を考えて使った。すなわち、気球の映像が見えたり消えたりの状態で飛んでくれれば他の動く物体と見分けがより確実にできるものと判断して、気球にメタルミー（アルミ箔）の板（縦1m、横2mのちょうど厚さのない量のようなもの）をぶらさげて飛ばした。結果は極めてうまくいき、メタルミーの板が気球の飛行とともに回転してレーダー方向に直角になったり平行になったりを繰返した。定高度は今回もほぼ平均的最強風高度である300mとして、湾内の大カクマ島で放球し、海風、陸風による気球の流れを市内南部の沿岸のレーダー基地で観測した。



第7図 陸風時の定高度気球(300m高度)の経路

第7図には同じ陸風時におけるテトルーンの軌跡を示してあるが、9月1日21時~22時と9月2日3~4時の期間中の風向はいずれも北北東であったにもかかわらず、1日の夜には大奈佐美島の東部上空を通して風向に沿った流れで南進したのに反して、2日3時30分に放球したときは大奈佐美島の北方海上で向きを西に変えて島をさけ、宮島との間の海上を通して後は南南西に進んだ。なぜ同じ陸風時に島の上空を通ったり、島をさけたりしたのか。その時刻頃の能美島付近の風は前者は6.5 m/sであったが、後者では1.5 m/sと極めて弱かった。これから推測すると、300m高度での気流は島付近でかなり異なっており、特に風の弱いときには気球を流す直角方向のフレ自体が大きくなるので地形の影響を大きく受けて乱れるようであり、ある風速以上になると陸風に伴う気流は島の影響をあまり受けないようである。このことは島や岬の複雑に入り交じっている瀬戸内海各地域での海陸風に地形の効果がいろいろな形で現われるから、風速によっては海陸風の振舞いかなり異なる可能性を十分に示唆している。また今回も島による山越え下降気流の出現がはっきり認められた。海風時にはほぼ北北東に進み、陸地にかかって高度を高めたことはあってもおおむね直線的に飛行したのは、地形の単純さによるものであろう。陸風時に海上に向かって飛んだ気球の軌跡はかなり複雑で、鉛直運動については判らないが、等

時間間隔の観測で水平運動や移動方向に島の影響を無視できないような気流系がみられ、海陸風に伴う流れの乱れ方(水平方向の風速度分布や風向の変位)は大気汚染に関連した気象現象としては局地的に重要であろう。

6. あとがき

海陸風の三次元観測と空間分布の地上観測によって得られた新しい事実を要約すると、

1. 広島湾における海陸風は、夏は海風が陸風より相対的に強く(風速も循環系の垂直範囲も)、秋は陸風の方が強い。

2. 一般流が海陸風向と異なる自由大気の偏西風卓越時の方が、海陸風、中間風(反対風)、一般流と3層構造がはっきり現われる。

3. 湾内においても海陸風の吹きはじめは沿岸海上よりおこっている。

4. 局地風として地形の影響を受け易い中で、特に三角形湾の頂点にあたる地域では海風の収束気流が現われて下層の夕方の強風がさらに強くなるようである。

5. この現象には、局地解析でのスケールの小さい高気圧の出現が寄与しているようである。これは内海という小島の点在する海上で日中熱的低気圧の出現と見掛上の山地側への変位に関連して現われるものとみられる。

6. 海陸風速の弱いときは島などの影響を受けた気流の乱れができるが、ある風速以上ではかなり定常に近い海陸風の吹走が現われるようであり、この限界風速はさらに観測を増すことによって得られるであろう。

などである。

謝 辞

この特別観測は広島地方気象台が気象研究所より研究費の助成をいただき、広島航空測候所と気象協会広島支部の各有志職員によっておこなわれ、特にレーダーの追跡観測には広島航空保安事務所の絶大なご協力を得た。また大阪管区気象台と日本気象協会関西本部からも研究費のご援助をいただいた。あわせて各位に深く謝意を表します。さらに各測器の貸与に大阪管区気象台、舞鶴海洋気象台、大阪航空測候所、広島航空測候所、岡山航空出張所、呉測候所が便誼を計つてくださったことを追記して感謝します。また島での観測のために種々ご協力いただいた第六管区海上保安本部水路部に対しまして厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Fisher, E.L., 1960: An Observational Study of the Sea Breeze. J. met., 17, 645-660.

- 2) Hass, W.A., D.H. Holcker and J.K. Angell, 1967: Analysis of Low-level Constant Volume Balloon (Tetron) Flights over New York City. Q.J.R.M.S., **93**, 483-493.
- 3) 井野英雄・根山芳晴, 1972: 海陸風の研究. 天気, **19**, 299-310.
- 4) 神戸海洋気象台, 1967: 瀬戸内海の気象と海象. 海の気象特集号, 13.
- 5) 宮田賢二・岡本雅典, 1972: 瀬戸内海の海陸風に関する研究 (1). 広島女子大学紀要, **7**, 71-88.
- 6) 日本気象協会・福岡本部, 1972: 下松市の大気環境調査.
- 7) Shih-Ang Hsu, 1970: Coastal Air-circulation System: Observations and Empirical Model. Mon. Wea. Rev., **98**.
- 8) W.M.O., 1960: The Airflow over Mountains. Technical Note. No. 34, WMO-No. 98, TP. 43.

構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム 開催と発表論文の募集

共 催 電気学会, 土木学会, 日本気象学会 (幹事学会), 日本建築学会, 日本鋼構造協会

開催期日 昭和49年12月上旬

会 場 気象庁講堂
(東京都千代田区大手町 1-3-4)

発表論文の募集

(1) 課 題

課題は次によるものとし, 論文の内容は独創性のあるものでなければならない。

- a) 自然風の性質
- b) 設計風速および風荷重
- c) 風と構造物との相互作用

d) 計測方法

(2) 応募方法

a) 論文提出希望者は49年3月末日までに所属学会, 氏名 (連名の場合は発表者に○印を付する), 勤務先, 職名, 連絡先を明記の上, 邦文 800 字以内の内容概要を所属学協会に提出する。

b) シンポジウム組織委員会は発表論文の採否を4月末日までに決定し, 応募者に通知する。

c) 原稿メ切は49年7月末日までとする (必着のこと)。

d) 執筆要領および原稿用紙は後日送付する。

以上