

松山港の顕著副振動*

西本洋相** 栗林逸夫***

要旨

松山港の検潮自記紙には、時々顕著な副振動が記録されている。そこで、最大全振幅 74 cm と観測開始以来最も大きい副振動の起きた1974年7月11日と、地域気象観測システムが整備され細かい気象解析が可能となった1978年5月6日の2例の検討より、松山港における顕著副振動の原因を考察した。

その結果、瀬戸内海沿岸の各港では気圧じょう乱の通過に伴う気圧振動によって副振動が発生するが、特に松山港においては、港の奥に小入江があるという特殊な地形の効果により、一層振幅が増大し、顕著な副振動となることがわかった。

1. はじめに

松山港内にある検潮所で、顕著な副振動が時々記録されている。中でも1974年7月11日には、最大全振幅 74 cm と1963年の観測開始以来最も大きい副振動が現われた。また、1978年5月6日の副振動については、地域気象観測システム (AMeDAS) の資料を用いた局地解析を行った。これら2例の解析を通して、松山港における顕著副振動の原因を考察した。

港湾の副振動については、以前から各地で調査が進められている。清水港については天野 (1962)、長崎港については寺田、安井、石黒 (1953) による模型実験の報告がある。また、副振動と湾の形状の関係については、波浮港における磯崎 (1979) の研究がある。

港湾の副振動はその地形に固有の定常振動で、外海から伝わって来る長波により誘起されると、一般に言われている。長崎港の“あびき”と呼ばれる巨大副振動の解析を行った赤松 (1980) によれば、長波の原因は気圧振動とされている。松山港においても、急激な気圧の変動を伴う一定の気象条件の下で、顕著副振動が発生することがわかった。

第1表 松山港の顕著副振動 (1963~1980年, 最大全振幅 40 cm 以上)。

Max. Amp. (cm)	Period (min.)	Date	Point
74	12	Jul. 11, 1974	Matsuyama
32	60		Uwajima
64	11	Apr. 16, 1969	Matsuyama
48	30		Uwajima
64	30	May. 6, 1978	Matsuyama
33	30		Uwajima
58	12	Jun. 28, 1974	Matsuyama
52	13	May. 14, 1979	Matsuyama
15	25		Uwajima
49	10	Jun. 25, 1967	Matsuyama
14	20		Uwajima
47	17	Apr. 8, 1964	Matsuyama
22	20		Uwajima
44	11	Jan. 11, 1965	Matsuyama
43	10	Jul. 1, 1967	Matsuyama
25	30		Uwajima
43	10	Mar. 22, 1980	Matsuyama
40	5	Mar. 27, 1964	Matsuyama

* Remarkable Secondary Variation of Sea Level at Matsuyama Harbour.

** Yousuke Nishimoto, 高松地方気象台.

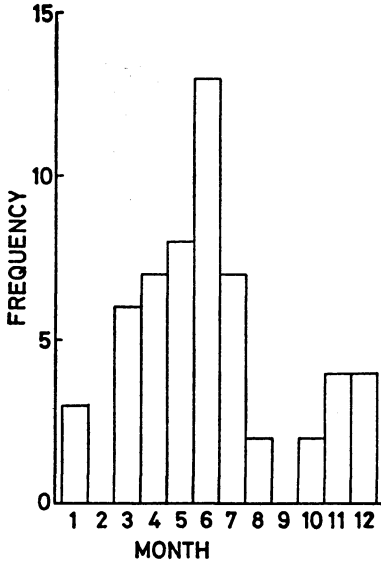
*** Hayao Kuribayashi, 松山地方気象台.

—1981年12月24日受領—

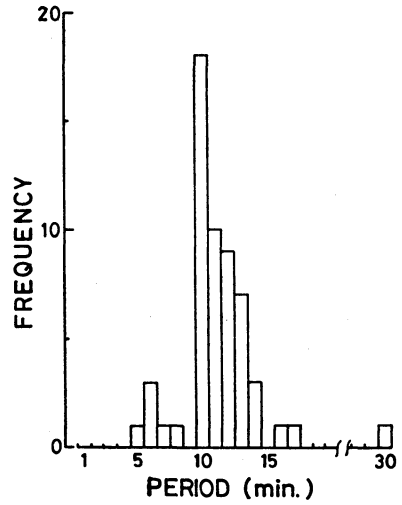
—1982年4月7日受理—

2. 事例解析

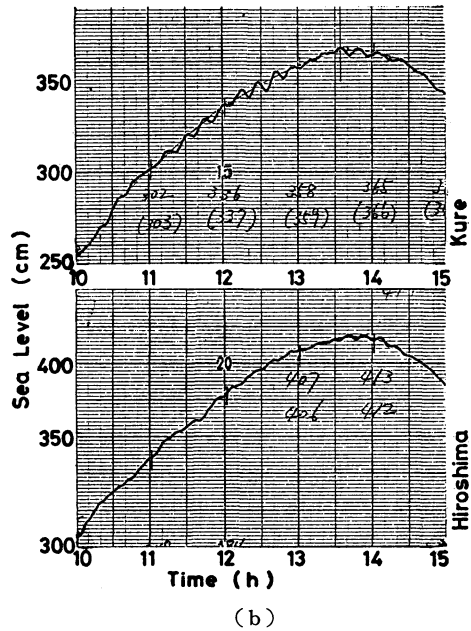
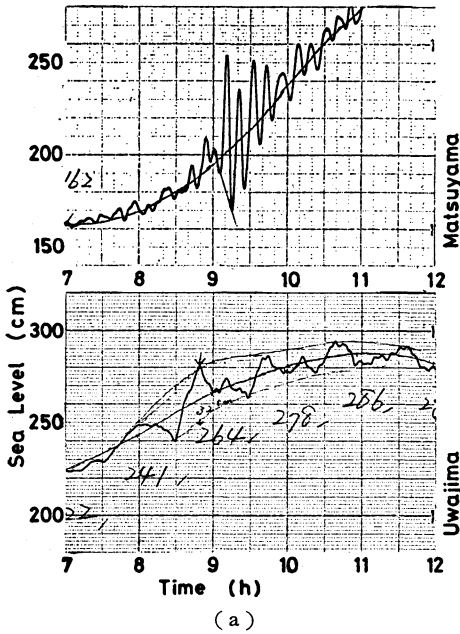
まず、1963年から1980年までの観測資料により、松山港における副振動の特徴を見ると、次のようになる。第1図は最大全振幅 30 cm 以上の副振動の月別発生回数



第1図 副振動の月別発生回数 (1963~1980年, 最大全振幅 30 cm 以上).



第2図 副振動の周期別発生回数 (第1回と同じ例について).

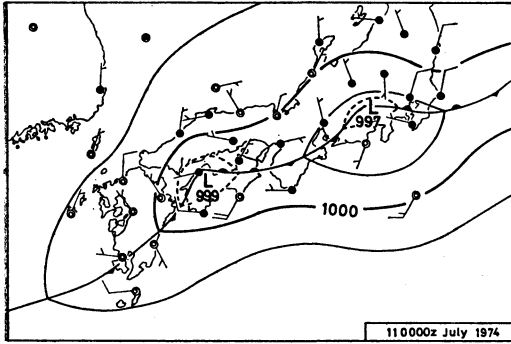


第3図 1974年7月11日の検潮自記紙.

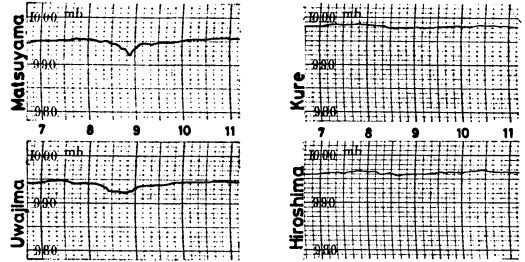
で、6月に最も多く、2・9月には全く発生していない。
 また、最大全振幅 40 cm 以上の顕著副振動は第1表のように11例あるが、いずれの場合も宇和島港に較べ松山港の振幅の方が大きいことがわかる。さらに、これら

全ての例について、松山で気圧の急変が認められ、6例については松山付近を小低気圧が通過したことが解析できた。

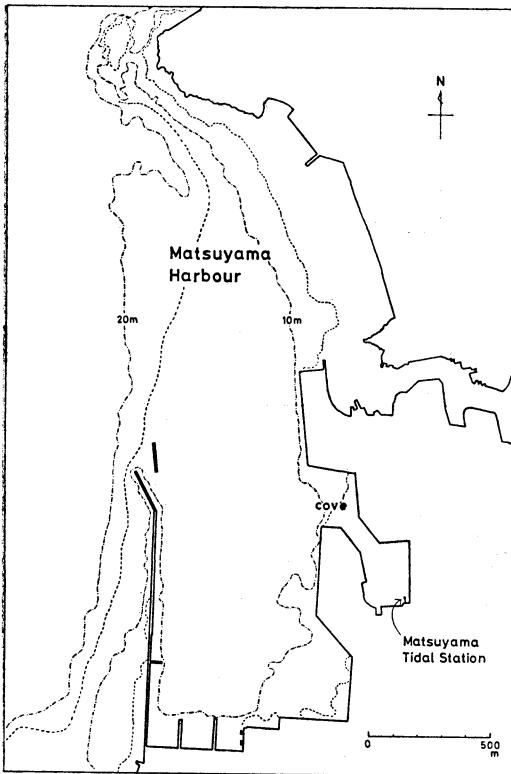
次に、周期別発生回数を第2図によって見ると、ほと



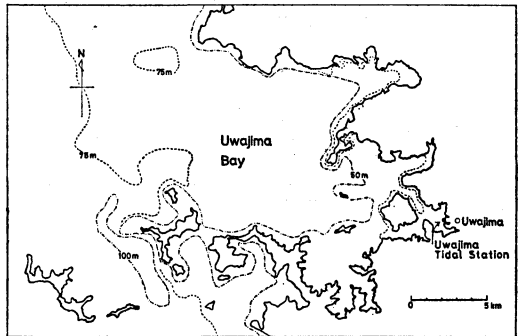
第4図 1974年7月11日9時の局地天気図.



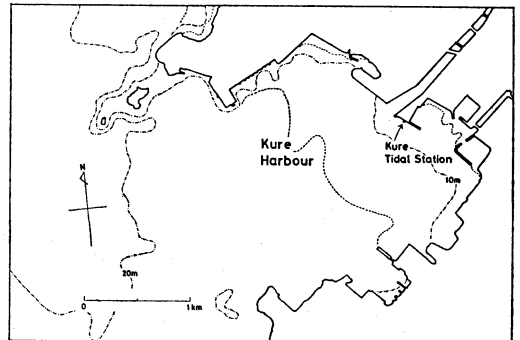
第5図 1974年7月11日の気圧自記紙.



第6図 松山港と検潮所の位置.



第7図 宇和島湾と検潮所の位置.



第8図 呉港と検潮所の位置.

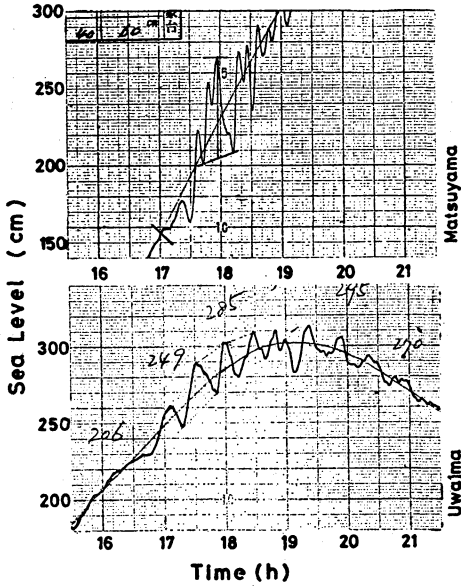
などの場合、周期は10~14分であることがわかる。すなわち、松山港での副振動は春から梅雨期にかけ、小じょう乱に伴って起こることが多く、周期は10~14分に集中しているといえる。

(1) 1974年7月11日の例

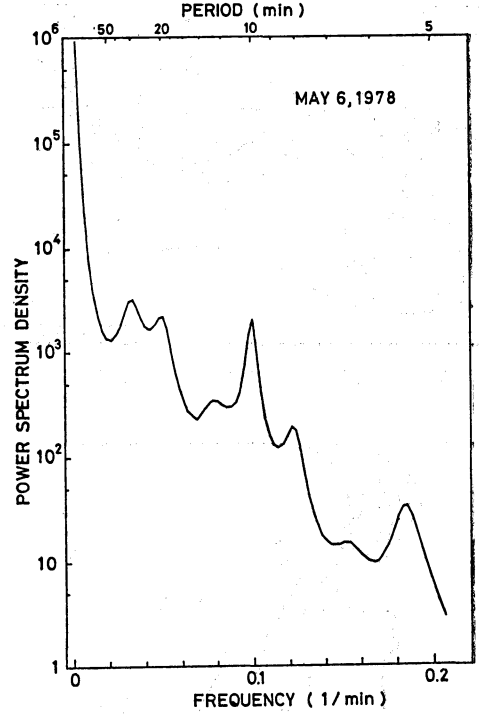
第1表に示した副振動のうちで、最も振幅が大きいのは1982年6月

は1974年7月11日の例で、周期は12分と観測された。第3図は当日の松山、宇和島、呉、広島各港の検潮自記紙で、松山港では9時頃から11時頃にかけて顕著な副振動が記録されている。各港の最大全振幅は松山で74cm、宇和島で32cm、呉で8cm、広島で3cm、であった。なお、徳山ではほとんど副振動は認められなかった。

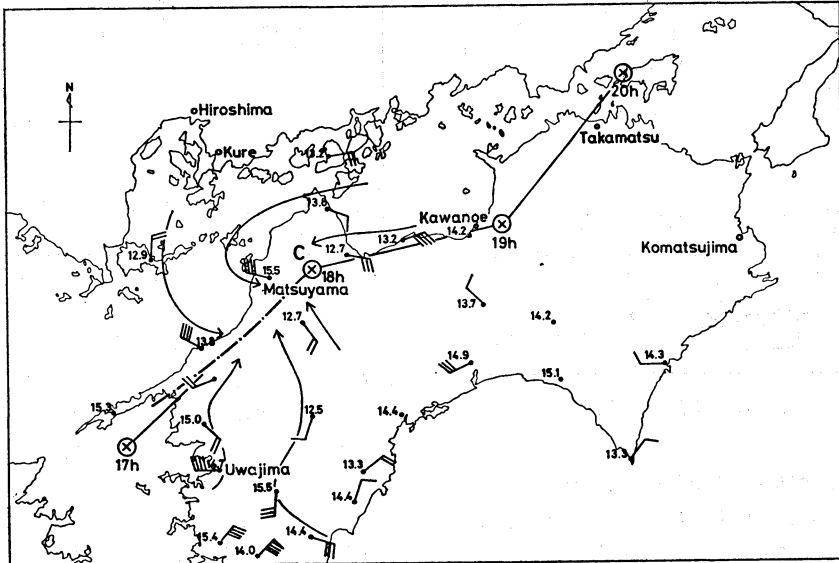
また、局地天気図(第4図)上では、小低気圧が松山付近を通過していたことが認められる。第5図は当日の各地の気圧の自記紙であるが、松山では8時55分を低極とする、35分で約3mbという急激な気圧降下が認めら



第9図 1978年5月6日の検潮自記紙.



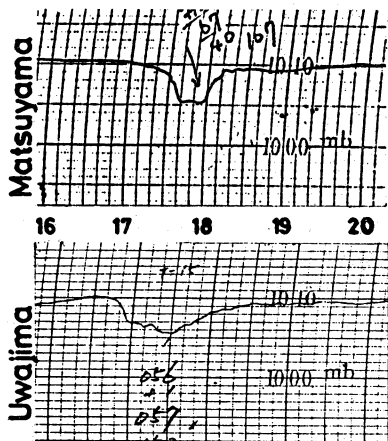
第10図 副振動のスペクトル解析 (1978年5月6日, 松山港).



第11図 小じょう乱の通過経路と18時の局地解析 (各地点の矢羽根1本が1m/s, 上の数字は気温 °C).

第2表 港湾の地形と副振動の周期 (Period-L, Period-W はそれぞれ港湾の入口から奥に向かう方向, これと直角な方向のメリアンの公式による周期, Period-Q は実測周期).

Point	Length (m)	Depth (m)	Width (m)	Period-L (min.)	Period-W (min.)	Period-Q (min.)
Matsuyama	2,000	12	900	12.3	5.5	12
Uwajima	17,000	40	11,000	57.2	37.0	60
Kure	1,700	13	2,100	10.0	12.4	10



第12図 1978年5月6日の気圧自記紙.

れた。また、宇和島では8時25分に極値に達する気圧降下が見られ、25分間ほぼ同じ低圧が続いた。呉、広島でも、それぞれ8時25分、8時15分頃わずかに気圧が下がっている。これら各地の気圧降下は、最も西に位置する広島から始まり、最も東の松山に達している。また、極値の大きさと形状からも、第5図に示されたように小低気圧が松山付近を東進し、その移動速度は約49 km/hと考えられる。そして、松山、宇和島の各港では、この小低気圧の通過直後に顕著な副振動が発生している。

次に、副振動の発生した各港付近の地形について見る。第6図は松山港の地形と検潮所の位置を示している。付近に湾はなく、比較的単純な地形である。第7図、第8図は、それぞれ宇和島湾と呉港の地形と検潮所の位置を示している。宇和島湾は港の近くには島があり、かなり複雑な地形となっているが、全般的に見れば外海に広がっている。検潮所は港の入口近くにある。また、呉港は多くの島々に取り囲まれ、狭い瀬戸を通してのみ外海とつながっている。検潮所は港の奥中央にある。

このように、各港の地形は大きく異なっており、後に

考察するように、副振動の振幅に大きな影響を及ぼしている。

(2) 1978年5月6日の例

第9図に当日の松山、宇和島両港の検潮自記紙を示す。松山港における副振動の周期は実測では30分となっているが、第10図に示したスペクトル解析からは、9.3分にも30分周期のものに近いエネルギー密度のピークが見られる。また、最大全振幅は第1表のように、松山港では64 cm、宇和島港では33 cmであった。また、同日は神戸港、小松島港でそれぞれ13 cm、15 cmの副振動が記録されている。

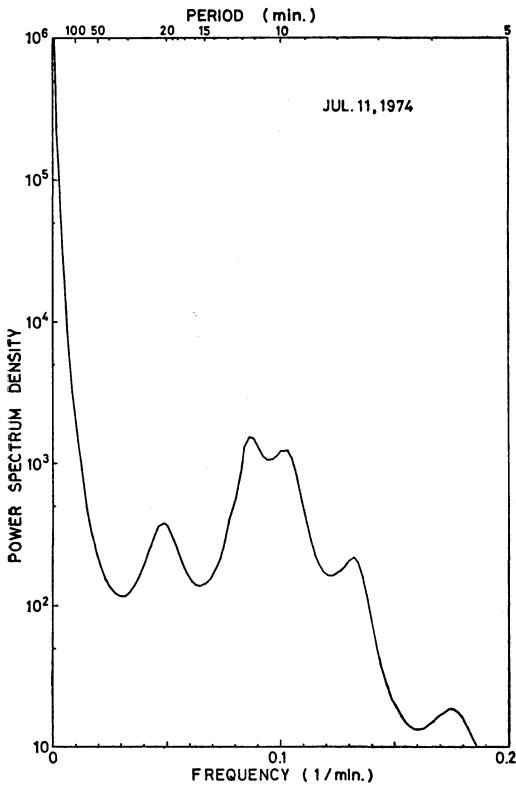
当日は宇和島で17時頃、松山で17時30分頃、共に瞬間風速9.5 m/sの強風が吹き始めている。これについては、AMeDAS (地域気象観測システム) の資料を用いた解析から、小低気圧が17時頃から20時頃にかけて四国北部を通過したことが確かめられた。第11図に18時の解析結果と小低気圧の移動経路を示した。小低気圧は17時頃宇和島にあり、約80 km/hの速度で北東進し、18時前松山付近を通り、19時川之江付近に達し、20時には備後瀬戸に達している。この小低気圧の通過に伴い潮位の変動がおき、松山、宇和島、神戸、小松島の各港で副振動が発生したと考えられる。

これら各港のうち、最大全振幅の大きかった松山、宇和島両港について、小低気圧と副振動の振幅の関係について考える。小低気圧は第11図に示したとおり、松山、宇和島両港の近くを通過しているが、第12図に示した当日の松山、宇和島の気圧の自記紙でも、これに対応した4 mb以上の気圧降下が認められる。

一方、湾内での長波の波速 C は、水深を h として、

$$C = \sqrt{gh} \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

で与えられる。①式から求めた松山、宇和島両港での波速はそれぞれ39 km/h、71 km/hとなり、小低気圧の進行速度約80 km/hは宇和島湾内の長波の波速に近い。このことは、宇和島港の副振動の振幅を相対的に大きくす



第13図 副振動のスペクトル解析
(1974年7月11日, 松山港)

る方向にはたらいたと考えられる。

気圧振動は、第12図に示したように松山の方がよりシャープであるが、両方とも4mbを越えていて、どちらの形状が副振動の振幅を増大させるか決め難い。

したがって、これだけでは松山港の最大全振幅が64cmと宇和島港の33cmに対して2倍近くになったことは説明できず、この原因については以下に述べる1974年7月11日の場合と同様であると考えられる。

3. 副振動の周期の計算

1974年7月11日の例において、副振動が観測された松山、宇和島、呉の各港については、その地形を第6, 7, 8図に示した。宇和島港を除いては比較的長方形に近い形をしているので、メリアンの公式

$$T = \frac{4l}{\sqrt{gh}} \quad \dots\dots ②$$

を用いて固有周期 T を求め、実測値と比較した。ただし、 h は水深、 l は長さである。第2表に各港湾の長さ、

水深、メリアンの公式による固有周期、実測の周期を示した。各港とも港湾の入口から奥に向かう方向での固有周期が実測に近いことがわかる。ただし、ここで用いた各港湾の水深、長さは海図上より求めたもので、潮汐、工事等により多少変化する可能性がある。例えば、松山港では1967年7月1日の副振動発生時は満潮に近く、水深は海図より約2.4m深かった。そこで、②式に

$$h \doteq 12 + 2.4 = 14.4\text{m}, \quad l \doteq 1600\text{m}$$

を代入すると

$$T \doteq 11.2\text{分}$$

となり、この時の実測10分に近い値となる。また、第1表に示した11例のうち周期10~13分の8例については、副振動発生時の潮位が高いほど実測の周期も短くなる傾向が見られた。

これらのことは、松山港のように比較的水深の浅い場合には、潮位による水深の変化により1~2分の固有周期の変化があることを示している。

以上から、第1表の顕著副振動のうち周期10~13分の8例については、松山外港の入口を節とし外港の奥を腹とした固有振動が卓越していたと考えられる。また、1974年7月11日の例について、松山港の副振動のスペクトル解析を第13図に示す。エネルギー密度のピークは11.7分であり、メリアン公式および実測による周期とはほぼ一致している。しかし、1978年5月6日の例に見られた30分周期については、これまでの解析からは説明できない。

4. 港湾内小地形の効果

事例解析によって、瀬戸内海沿岸の各港で副振動が発生する過程や副振動と港湾の地形について見てきたが、次に松山検潮所における振幅が他の検潮所より著しく大きい理由について検討したい。

第6図をよく見ると、松山検潮所は松山外港よりさらに奥まった小入江の奥にあることがわかる。この小入江の効果について考える。もし、この小入江のみでの自由振動が副振動として日記紙上に表われたとすると、その周期は②のメリアンの公式より、

$$l \doteq 600\text{m}, \quad h \doteq 4.5\text{m}$$

として

$$T \doteq 6.1\text{分}$$

となる。第10, 13図のスペクトル解析においても、周期5.4分、7.6分に1つのエネルギー密度のピークが認められるが、これは10分前後の周期のピークに較べてやや

小さい。しかし、1964年3月27日の副振動は周期5分で、この小入江での自由振動、あるいは第2表に示した東西方向の固有振動が記録された可能性がある。

次に、主な周期成分である10~13分周期、すなわち松山外港の南北方向の固有振動が小入江にある検潮所で記録されていることについては、松山外港での副振動による波が検潮所のある小入江に進入し、外港の副振動と周期の等しい入江の奥を腹とした強制振動を起したと考えられる。この強制振動による増幅について、次のように考えた。

今井(1970)によると、定常波の速度ポテンシャル Φ は

$$\Phi = ca \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \sin kx \cdot \sin \omega t \quad \dots\dots ③$$

と表わされる。ここで、 c は波速、 a は振幅、 k は波数 ω は振動数、 h は水深で、鉛直上方に y 軸をとり、水の運動は xy 平面に平行な2次元的運動とする。ここで、第14図のようなモデルを考える。ただし、小入江の追加により外港部分の運動は影響を受けないものとする。

境界条件として、外海で定常振動はないことより

$$x=-L \text{ で } \Phi=0 \quad \dots\dots ④$$

また、外港の奥で x 方向の運動はないことより

$$x=0 \text{ で } \partial\Phi/\partial x=0 \quad \dots\dots ⑤$$

さらに、小入江での速度ポテンシャルを Φ' として、小入江の奥で x 方向の運動はないことより

$$x=l \text{ で } \partial\Phi'/\partial x=0 \quad \dots\dots ⑥$$

また、小入江の振動は外港部分の振動によって強制されるのだから、小入江での振動数は外港部分の振動数 ω に等しい。そして、外港と小入江の接点である

$$x=0 \text{ で } \Phi=\Phi' \quad \dots\dots ⑦$$

となる。③式と④⑤⑥⑦の条件を用いて、外港と小入江での振幅比 a'/a を求めると

$$\frac{a'}{a} = \sqrt{\frac{H}{h}} \frac{\tanh \frac{\pi}{2L} \sqrt{Hh}}{\tanh \frac{\pi H}{2L} \cdot \cos \frac{\pi l}{2L} \sqrt{\frac{H}{h}}} \quad \dots\dots ⑧$$

となるが、 H, h に較べて L が非常に大きい場合は、近似的に

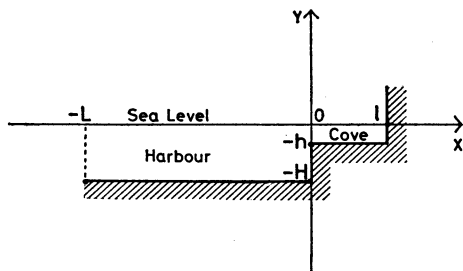
$$\frac{a'}{a} \doteq \frac{1}{\cos \frac{\pi l}{2L} \sqrt{\frac{H}{h}}} \quad \dots\dots ⑨$$

となる。⑨式に

$$H \doteq 12\text{m}, h \doteq 4.5\text{m}, L \doteq 2000\text{m}, l \doteq 600\text{m}$$

を代入すると

1982年6月



第14図 小入江を含む松山港のモデル。

$$\frac{a'}{a} \doteq 1.4 \quad \dots\dots ⑩$$

となる。ただし、⑩式からもわかるように、 l, L が一定で、潮汐により H, h が変る場合、一般に水深が深くなるほど倍率 a'/a は低くなる。例えば、1967年7月1日の副振動は、前述のように満潮時近くに発生し、水位は約2.4m高くなっていたが、この時の倍率 a'/a は1.3と計算される。

以上のことから、小入江の地形効果により、外港の副振動が増幅されること、そして倍率は水位が高くなるほど低くなることがわかった。

他の宇和島、呉港などの検潮所は松山港のような形はしておらず、港湾の固有振動がそのまま検潮所で記録されたものと思われる。

5. 考察

松山検潮所における副振動が他港に較べ著しく大きくなる原因の1つは松山港の特殊な地形にあることがわかった。顕著副振動を起す原因の1つとしては気圧振動が考えられる。しかし、第1表の1969年4月16日の例では、最大振幅64cmに達したにもかかわらず、気圧自記紙にはわずか0.2mb程度の気圧上昇しか表われていない。一方、この日、下関50cm、宇和島48cm、小松島23cm、神戸21cmなどの副振動が松山港と数時間前後して発生しており、今後さらに検討が必要だろう。

また、小低気圧との関連については、第1表に示した顕著副振動11例のうち6例については小低気圧が松山付近を通過したことが解析されているが、残る5例については資料が少なく確認できなかった。今後 AMeDAS 等を用いて時間的空間的に細かい資料を集める必要がある。

さらに、東進した小低気圧に対して西側に港湾の開いた松山、宇和島両港の副振動が大きかったことも注目され、今後検討したい。また、第2図の5~8分周期につ

いては、外港の東西方向の振動とも、小入江の南北方向の振動とも考えられるが、例数も少なく、さらに細かい観測を行わなければ区別はつけられない、30分周期の副振動についてはここでは触れることはできなかった。

6. おわりに

以上から、少なくとも瀬戸内海沿岸の各港では、主として気圧じょう乱の通過に伴う気圧振動が原因となって副振動が誘起されていること、さらに副振動は各港の地形の影響を大きく受け、特に松山港では小入江の効果によって顕著に増幅されていることが明らかとなった。

今後は前項で述べた課題の解決と共に、松山港で強風時に観測された副振動についても調査したい。

謝辞

この調査を進めるに当って、終始御指導下さった大阪

管区気象台業務課長 根山芳晴氏に深謝する。また、大阪管区気象台技術部長 小長俊二氏には本論文に対する直接の御教示を戴き謹んで感謝する。また、スペクトル解析は気象研究所の岡田正実氏にお願いした。さらに、気象大学校 金久博忠氏をはじめ多くの方々との討論は得るところ大であった。記して謝意を表する。

文献

- 赤松英雄, 1980: 長崎港の“あびき”の話, 海の気象, 25, 7-16.
 天野 充, 1962: 清水港の顕著副振動について, 東海地方気象研究会誌, 16, 20-26.
 今井 功, 1970: 流体力学, 岩波書店, 133-136.
 磯崎一郎, 1979: 波浮港のセイシュについて, The Oceanographical Magazine, 30, 31-46.
 寺田一彦, 安井善一, 石黒鎮雄, 1953: 長崎港の副振動について, 長崎海洋気象台報告, 1-73.



松野太郎・島崎達夫 著 成層圏と中間圏の大気 大気科学講座 3

東京大学出版会, 1981年10月,
A 5判, 279頁, 3,200円

新しく刊行された大気科学講座(全4巻)の第3巻としての本書は、他の巻が地上付近の気象や天気に関連した大気現象を扱っているのとは異なり、雨や雪の降らない雲の上の大気を対象にしている。それは大よそ成層圏と中間圏とを一まとめにした領域で、中層大気とよばれる空間である。ここ20年ほどの間、研究者の興味を引きつけてきたその中層大気の大気象を総括的に解説した著作が無かっただけに、待望の教科書といえる。本書はまた、2人の著者が中層大気の研究において記念碑的業績を上げてこられた研究者であるからこそ、学習という意味を越えて、研究の現場の迫力に接する著作ともなっている。

本書の構成は、1章 序説(5)、2章 中層大気の微量成分(70)、3章 温度構造と放射平衡(52)、4章 中層大気の流れと大循環の力学(41)、5章 大気の波動とそれに伴う現象(88)、6章 中層大気の数値モデル(10)のような6章から成る。ただし、上の数字は頁数を意味する。大きく分けて、4章までが前半で、5章からが後半になる。

前半において、中層大気の基本的性質が解説される。大気の状態をきめる物理量、すなわち組成や熱、運動らの要素についてそれぞれ順を追って説明し、そしてそれら

3要素が互に結合して特有の中層大気系を形成する機構が整然とまとめられている。後半では、中層大気の基本的構造が何かの乱れによって変形される状況、つまり一層実際的な中層大気の状況の理解へと解説が佳境に入る。すなわち平均場と乱れの相互作用の理論が展開される。その力学は、気象力学の中でも一大特徴を成して、大循環をはじめ成層圏の突然昇温や赤道準2年周期振動など、中層大気の運動全般を解明する鍵になっている。本書においてここに力点が置かれているのは当然であり、それは読者の期待に真正面にこたえるものである。

そもそも成層圏はどうしてできるのかという素朴な疑問についても、成層圏の発見が「実はその時には発見されたのではなかったかも知れない」というような語り口に乘せられて読み進むうちに、中層大気の特徴を把握するとともに、成層圏形成のわけをすんなりと納得させられてしまう。こういう読む楽しさが本書の全体に満ちている。

教科書であれ何であれ、著作というものはおもしろくなくてはならない。おもしろいということは分かるということである。そして分かるということは読者自身の世界がそれだけ広がるということに他ならない。そのような著作には必ず著者の独創性が静かに息づいているものだ。それにあてられて我々読者は一步前進の力を吸収することができるのである。本書はまさにそういう本である。

(木田秀次)