

海洋波の計測法の開発研究 : 2 : 海洋波の方向スペクトルについて

光易, 恒
九州大学応用力学研究所 : 教授

田才, 福造
九州大学応用力学研究所 : 教授

栖原, 寿郎
九州大学応用力学研究所 : 教授

水野, 信二郎
九州大学応用力学研究所 : 助教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743516>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 40, pp.295-329, 1973-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



海洋波の計測法の開発研究(2)

—海洋波の方向スペクトルについて—

光 易 恒* 田 才 福 造*
 栖 原 寿 郎* 水 野 信二郎**
 大 楠 丹*** 本 多 忠 夫****
 力 石 国 男*****

概 要

クローバー型波浪計を使用して、湾内ならびに外洋で計測された多量の波浪データのうち、代表的なものを解析して、海洋波の方向スペクトルの構造を研究した。この研究の結果、海洋波の方向スペクトルの形は、1つの wave system においても波の周波数成分によって異なり、パワースペクトルのピークの周波数 f_m 付近の周波数成分に対しては、非常に大きな集中度を示すが、ピークの周波数付近より離れると、高周波側でも低周波側でも急速にその集中度が低下する事が見出された。しかも、詳しくみると、比較的吹送距離の短い湾内で発生した風波、吹送距離の長い外洋の風波、あるいは発生域を離れたうねりなど波の発生条件の差によって、方向スペクトルの周波数に対する依存関係が若干異なる事が見出された。

1. 結 言

応用力学研究所においては、昭和46年度より3ヶ年計画で、「海洋波の計測法の開発研究」と名づけられたプロジェクト研究を、文部省よりの臨時事業費の援助を受けて推進している。この研究の背景ならびに目的などに関しては、第1報に詳しく述べられているが、その主要な目的をもう一度述べると次のようなものである。

- (1) 外洋のいかなる地点でも使用できる各種の高精度波浪計の開発。
- (2) 新しく開発した波浪計を使用した海洋波の研究、特にその方向スペクトルの解明。
- (3) 不規則波としての海洋波を実験水槽に力学的相似性を保って忠実に再現する、いわゆる海洋波のシミュレーション技術の開発と、シミュレートされた波を用いた波と海洋構造物との相互作用の機構の研究。

このため、昭和46年度には、海洋波の方向スペクトルを非常に高い精度で計測できる波浪計の一つと考えられるクローバー型波浪計を開発し、これを使用した第1回波浪計測を三井海洋開発KKの調査船“あおたか”に便乗して太平洋の日本近海部ならびに玄界灘において実施した。これらの結果に関しては、第1報¹⁾にまとめられている。昭和47年度には第2回波浪計測を芙蓉海洋開発KKの調査船“わ

* 九州大学教授，応用力学研究所 ** 九州大学助教授，応用力学研究所

*** 九州大学講師，応用力学研究所 **** 九州大学助手，応用力学研究所

かしお”を使用して、日向灘および南西諸島近海で、第3回波浪計測を東京大学海洋研究所の観測船“淡青丸”に乗船して、相模湾および駿河湾で実施した。また、昭和47年度にはクローバー型波浪計に比して精度の点では多少劣るけれども、取扱いの簡便なピッチ・ロール型波浪計の開発をおこなった。このピッチ・ロール型波浪計とクローバー型波浪計とを併用した第4回波浪計測は、東京大学海洋研究所の観測船“白鳳丸”に乗船して昭和48年5月現在、南西諸島海域において実施中である。

上記の波浪計測のための4回にわたる航海のほかに、「実船搭載用波浪計に関する研究」と名づけられた、日本造船研究協会のプロジェクトに参加しておこなわれた波浪計測が昭和47年1月に海上保安庁の設標船“かいおう”により玄界灘で、昭和48年2月に運輸省航海訓練所の練習船“進徳丸”により相模湾ならびに玄界灘においてそれぞれ実施された^{2),3)}。

この報告は、上記の海洋波に関する一連の現地計測により得られた波浪データのうち代表的なものを解析した結果をまとめたものである。クローバー型波浪計の構造および性能、得られたデータの解析法などに関しては、第1報において詳しく述べられているので、本報告では述べない。ただし、波浪データの解析法に関しては、後の議論の便宜上、第1報と重複するが、最少限必要な点が最初に記述されている。すなわち、本論文の構成はつぎのようになっている。

2. においては、クローバー型波浪計で得られたデータ解析の基本的な点が、圧縮して述べられている。3. においては、今回海洋波の方向スペクトルの解析のために使用する波浪データの計測時の気象、海象およびその他の一般的な条件ならびに具体的なデータの処理条件の概要などが述べられている。4. は本論文の中心で、方向スペクトルの測定結果ならびにそれに関する各種の検討とその結果が述べられている。ただし、一次元スペクトルに関しては、第1報である程度検討されているので、今回は割愛し、現在その計測の困難さのために、われわれの知識が非常に不足している方向分布関数の特性に関する議論が集中的におこなわれている。5. は結論で、現在の所、まだ定量的には不明の点がかなり残されているが、今回の研究である程度明らかにされた海洋波の方向スペクトルに関する基本的な諸特性がまとめられている。

2. 波浪データの解析法^{1),4),5)}

クローバー型波浪計で直接測定される量は、次の6個である。

波面の上下加速度： $\xi(=S_1)$

波面の勾配： $\zeta_x(=S_2)$, $\zeta_y(=S_3)$

波面の曲率： $\zeta_{xx}(=S_4)$, $\zeta_{yy}(=S_5)$, $\zeta_{xy}(=S_6)$

この他、波の絶対方位を求めるためにブイの方位角 θ が、マグネットコンパスを使用して同時に計測される。

計測された6個の量 $S_1, S_2, \dots, S_6$ を使用して、クロス・スペクトルがつぎのように計算される。

$$C_{lm}(\omega) - iQ_{lm}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_l(t) \overline{S_m(t+\tau)} e^{i\omega\tau} d\tau. \quad (1)$$

(1, m: 1, 2, …, 6)

ここに

$$\overline{S_l(t)S_m(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_l(t)S_m(t+\tau)dt. \quad (2)$$

全部で36個存在するクロス・スペクトルのうち原理的には0になるもの、相互に等しいものなどを除いた17個のクロス・スペクトル要素が計算される。Longuet-Higgins⁴⁾等により最初に示されたように、これらのクロス・スペクトル要素は、波の方向スペクトル $E(\omega, \theta)$ をフーリエ分解した係数と一定の関係を有している。ただし、 ω は角周波数、 θ は波の進行方位角である。

方向スペクトル $E(\omega, \theta)$ を

$$E(\omega, \theta) = \phi(\omega) \cdot G(\omega, \theta) \quad (3)$$

のように1次元スペクトル（パワースペクトル） $\phi(\omega)$ と方向分布関数 $G(\omega, \theta)$ とに分離して考える。ただし

$$\phi(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta, \quad (4)$$

$$\int_0^{2\pi} G(\omega, \theta) d\theta = 1 \quad (5)$$

である。

$$\pi G(\omega, \theta) = h(\omega, \theta) \quad (6)$$

なる $h(\omega, \theta)$ を導入して、これを方位角 θ に関してフーリエ分解すると次のようになる。

$$h(\omega, \theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta] \quad (7)$$

ここに

$$A_n + iB_n = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} h(\omega, \theta) e^{in\theta} d\theta. \quad (8)$$

第1報に述べられたように、このフーリエ係数 A_n, B_n とクロス・スペクトル C_{lm}, Q_{lm} との間には次のような関係がある。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{Q_{12}}{C_{11}}, & B_1 &= \frac{Q_{13}}{C_{11}}, \\ A_2 &= -\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}, & B_2 &= -\frac{2C_{23}}{C_{22} + C_{33}}, \\ A_3 &= -\frac{3Q_{25} - Q_{24}}{C_{14} + C_{15}}, & B_3 &= \frac{Q_{35} - 3Q_{34}}{C_{14} + C_{15}}, \\ A_4 &= \frac{C_{44} - 6C_{45} + C_{55}}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}}, & B_4 &= \frac{4[C_{46} - C_{56}]}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

従って、クローバー型波浪計で計測される17個のクロス・スペクトル要素より方向分布関数をフーリエ展開した係数を第4項まで求めることができ、これより方向分布関数を次のように近似的に決定する事ができる。

$$h_4'(\omega, \theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^4 [A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta]. \quad (10)$$

ただし、実際の計算においては、方向分布関数の負の値の出現を防ぐために各項に重み W_n を乗じ、次のような計算がおこなわれる。

$$h_4(\omega, \theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^4 W_n [A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta]. \quad (11)$$

ここに、

$$W_1 = 8/9, \quad W_2 = 28/45, \quad W_3 = 56/165, \quad W_4 = 14/99 \quad (13)$$

である。

この第4項で打ち切られた方向分布関数に重み W_n を乗じた $h_4(\omega, \theta)$ は、数学的には、真の方向分布関数 $h(\omega, \theta)$ に、重み関数

$$W_4(\theta) \sim \cos^{16} \frac{\theta}{2} \quad (14)$$

を乗じたものに対応する。すなわち

$$h_4(\omega, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} h(\omega, \theta') W_4(\theta' - \theta) d\theta', \quad (15)$$

である。

この $W_4(\theta)$ の形は図-1に示されている。ただし、この図には、フーリエ係数を第2項で打ち切って各項に重みを乗じたもの、すなわち

$$\left. \begin{aligned} h_2(\omega, \theta) &= \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^2 W_n [A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta], \\ W_1 &= \frac{2}{3}, \quad W_2 = \frac{1}{6} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

に対応する重み関数 $W_2(\theta)$ の形が一緒に示されている。

この $W_2(\theta)$ は、ピッチ・ロール型波浪計で計測される方向分布関数に対応するもので、具体的形は、

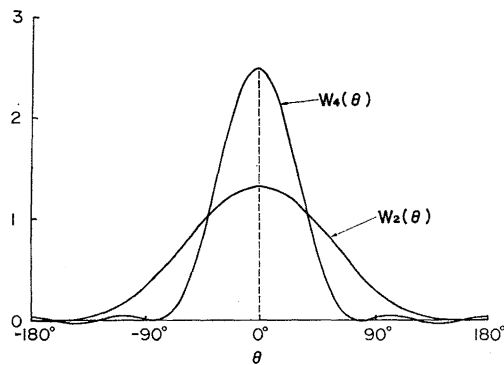


図 1 重み関数 $W_4(\theta)$ および $W_2(\theta)$

次式で与えられる.

$$W_2(\theta) = \frac{8}{3} \cos^4 \frac{\theta}{2}. \quad (17)$$

これよりピッチ・ロール型波浪計に比して、クローバー型波浪計の方が方向分解能がはるかに優れている事がわかる. しかしながら、 $W_4(\theta)$ にしても半値角度幅にして、 33.5° とかなりの幅を有しているので、海洋波の方向スペクトルに、もし方向別に細かく変化するような微細構造があったとしても、それが平滑化されて出てくるので注意しなければならない. しかしながら、たとえば比較的接近した2方向より2つの異なった wave system が来襲しているような場合をのぞけば、単純な条件で発生した風波においては、一般にあまり複雑な方向スペクトルの微細構造はないであろう. **

3. 波 浪 デ ー タ

3.1. 計 測 条 件

今回の解析に使用した波浪データは、昭和46年12月29日、太平洋で室戸岬の南約90 kmの海域において“あおたか”に乗船して計測されたデータ 213/1, 2, 3, 昭和48年1月21日、相模湾で淡青丸に乗船して、伊東の東約10 km および東北東にさらに約10 km はなれた地点でそれぞれ計測されたデータ 430/1, 2, 3, および 440/1, 2, 3, ならびに、昭和48年2月19日玄界灘で進徳丸に乗船して、玄界島の北約8 km において計測されたデータ 550/1, 2, 3 である. 各観測点の位置は図-2, 3および4に示されている. 計測された波は、いずれも冬期波浪に対応するもので N~NE 方向からの波が多い.

観測の日時、場所、船上で計測された気象条件ならびに目視による海象条件などに関しては表-1に示されている. 各観測期間中の天気図は附録に示されているが、気象の概況を述べると次のとおりである.

昭和46年12月28日朝には発達した低気圧が三陸沖にあって東北東に進行中、次第に大陸の高気圧が張り出して西高東低の冬型の気圧配置となる. 船上で計測された風は28日正午頃より約10 m/s に達し夜中まで継続し、この間風向は N→NNE とゆっくり東寄りとなる傾向がみられた. 29日には低気圧はアリューシャン方面に去り移動性高気圧が、北陸地方と朝鮮半島にあった. 船上で計測された風は、風向 NNE 風速約10 m/s が28日に引き続いて29日の正午頃まで続いた. 正午を過ぎると風は次第に低下して、3.5 m/s~7 m/s となり、夜中まで継続し、この間の風向は NNE→NE→E と変化した. したがって、波の観測がおこなわれた29日の午後までに10 m/s 前後の N~NE の風が24時間程度継続したことになる.

昭和48年1月21日は、本州は高気圧におおわれて比較のおだやかな天気となっているが相模湾の船上での風の計測によると、朝7時頃より ENE の風 5~8 m/s が吹きはじめ、次第に風向を NE に変え

* 現在、我々が使用しているクローバー型波浪計の信号のうち、上下加速度及び波面の傾斜(ピッチ・ロール)の信号を用いて解析を行なえば、当然ピッチ・ロール型波浪計に対応する結果が得られる.

** Phillips の提出した風波の発生に関する resonance theory が支配的なものであれば、可能性がない訳でもない.

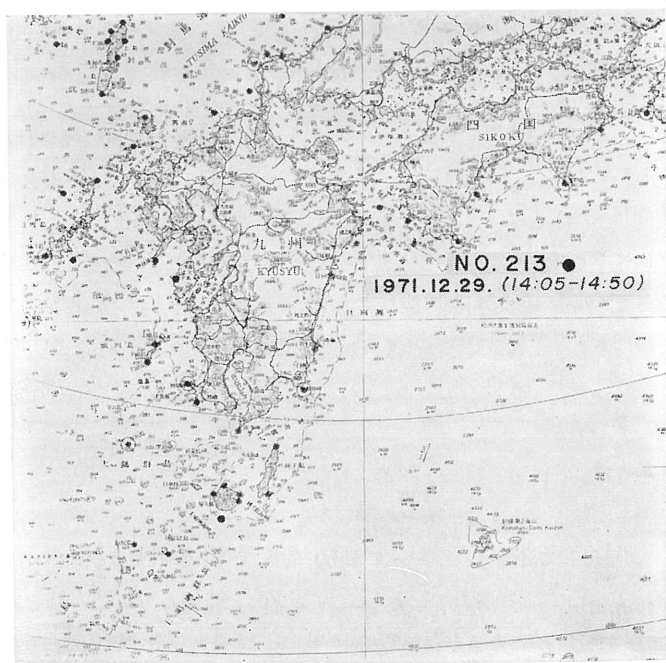


図 2 波浪観測点 (213/1, 2, 3) ●印の位置

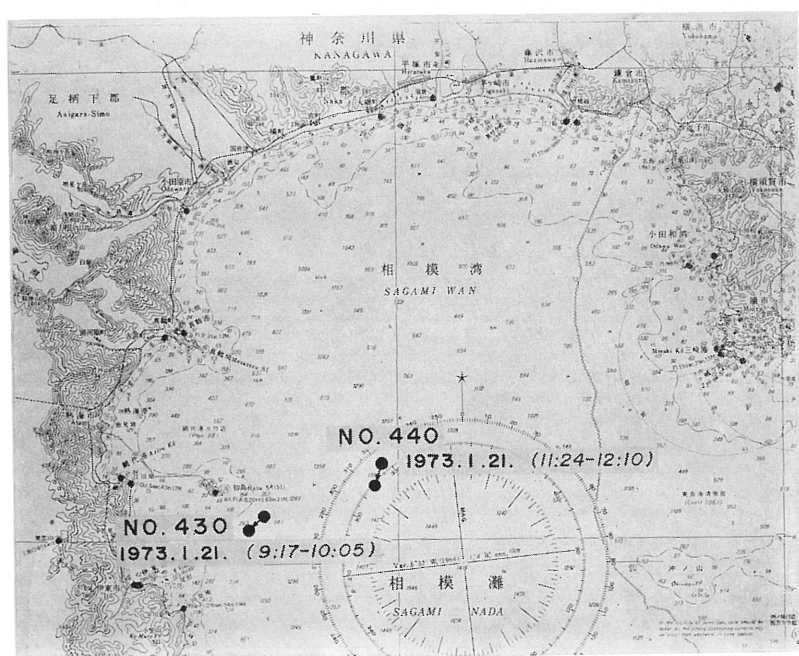


図 3 波浪観測点 (430/1, 2, 3 および 440/1, 2, 3)
●→●印の位置, 矢印は計測中における船のドリフトに対応。

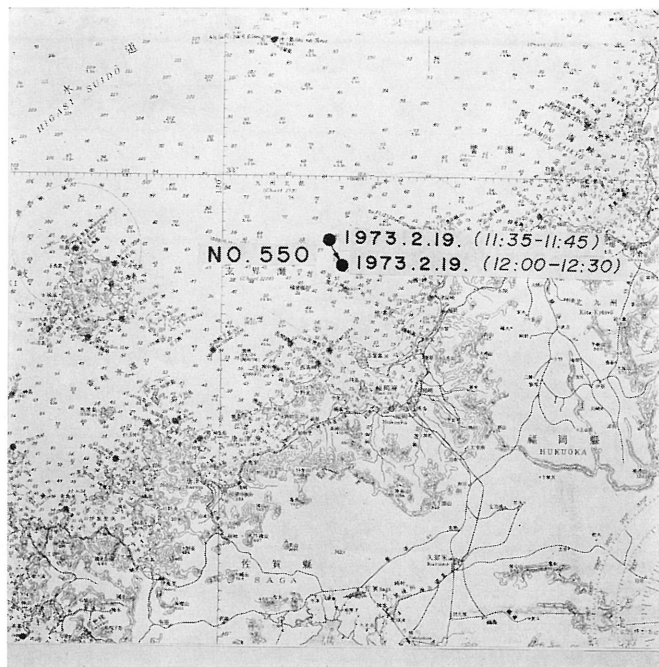


図 4 波 浪 観 測 点 (550/1, 2, 3)

●→●印の位置, 矢印は計測中における船のドリフトに対応.

て午後2時頃まで継続した。しかしながら、この日、平塚沖の海洋観測塔（防災センター所属）ならびに伊東の海洋観測塔（気象研究所所属）でそれぞれ記録された風のデータをみるといずれも船上の観測値とは、風速ならびにその変化の傾向が少し異なっているし、これら観測塔で観測されたデータ相互間にもあまりはっきりした対応がみられない。すなわち、平塚沖の観測塔で測定された風は風向は船上の観測値に近いが風速が全般的に小さく、しかも変化の傾向も少し異っている。これに反して、伊東の観測塔で測定された風については、風速は、ある時刻には船上での観測値に近いが変化の傾向がかならずしも対応せずしかも風向が少し異なっている。これらの観測塔は、いずれも大局的にみると比較的岸に近い所にあるので地形的影響を受けているのかもしれないし、あるいは海上風の空間構造自体が複雑なことを反映しているのかもしれない。

48年2月19日は、九州南岸沖に停滞している前線を低気圧が通過して、変りやすいぐづついた天気であった。船上での観測によると少なくとも朝7時頃より6~7m/sのNEの風が観測時まで吹き続いていた。しかしながら、福岡管区气象台で測定された風は19日の0時~正午間には風速2~3m/s, 風向Nで、風向はともかくとして、風速がかなり小さく、海上風と陸上風とのいちじるしい差を示している。

このように、船上で計測された観測点での海上風と、海岸に比較的近い市街地の陸上風あるいは岸に比較的近い所にある海洋観測塔で計測された海上風との間にはかなりの差があるけれども、海面状況す

表 1 観測時の気象及び海象

Data No.	213/1, 2, 3	430/1, 2, 3	440/1, 2, 3	550/1, 2, 3
観測船	あおたか	淡青丸	淡青丸	進徳丸
年月日	S 46-12-29	48-1-21	48-2-21	48-2-19
計測時刻 (自)	14:05	9:17	11:24	11:40
(至)	14:50	10:05	12:10	12:30
場所	太平洋	相模湾	相模湾	玄界灘
緯度 N	32°26.9'	35°01.1'	35°03.3'	33°46.1'
	32°26.6'	35°00.4'	35°02.3'	33°45.6'
経度 E	134°14'	139°13.1'	139°19.2'	130°07.6'
	134°15'	139°12.2'	139°18.8'	130°07.3'
風速 (船上) m/sec.	7.0	7.0~5.0	9.5~7.5	6.0~7.0
風向 (船上)	45°	45°	30°	25°
波向 (目視)	45°	30°	30°	40°(風波) 25°(うねり)
気温	14.2°	8.3°	9.4°	13.5°
水温	21.2°	12.3°	12.3°	14.0°
天候	晴	晴	晴	曇
海面状況	波は減衰中 所々砕波	湾内風波 所々砕波	同 左	少し減衰中 所々砕波

なわち、波高や周期、とくに砕波の状況などから判断すると、船上での風の観測値が、観測点附近の広い海域の風を代表するように思われた。したがって、観測船上での風のデータならびに天気図を参考に、各観測時における波の発生条件を推定すると次のようになる。

昭和46年12月28日のデータ 213/1, 2, 3, の波は、約 10 m/s の NNE~NE の風が約 26 時間吹き続いて発生した波で、観測時にはその約 1 時間前より少し風速が低下しているので、わずかに減衰気味の状態にあった波とみなすことができる。吹送距離はかならずしもはっきりしないがオーダーとしては 200 km~500 km 程度と考えられる。

昭和48年1月21日相模湾で計測されたデータ 430/1, 2, 3 の波は 6~7 m/s の NE の風が約 2 時間継続して、湾内で発生した時間的に発達過程にある風波で、吹送距離をとると約 40 km である。同日約 2 時間後に同じ湾内で約 10 km 東北東にはなれた地点で計測されたデータ 440/1, 2, 3 の波は、6~9 m/s の風が約 4 時間継続して発生した波であるが、観測時の約 1 時間前より風速が約 10 m/s に増大している。吹送距離は、対岸距離をとると、約 30 km である。これらの条件を考慮すると、ほぼ時間的発達を終り定常状態に近づいた有限吹送距離の波 fetch-limited wind-wave とみなすことができるであろう。

最後の昭和48年2月19日玄界灘で計測されたデータ 550/1, 2, 3 の波は、6~7 m/s の N~NE の風が(風速はこの間多少変動しているが)約 24 時間継続して日本海において発生した波で吹送距離は 1000 km のオーダーである。しかしながら、天気図ならびに計測された波の特性より推定すると、発生

域における風速は、もっと大きく、10~12 m/s あったのではないかと考えられる。

3.2. 波浪データの処理

各観測点では、約1時間継続して波の計測がおこなわれた。アナログ型データ・レコーダーに記録された波浪データを、津屋崎海洋災害実験所に設置された、電子計算機システム (DATAC-500 および 1500 データ集録装置ならびに FACOM 270-20 電子計算機を含む) で処理して各種の測定量を算出した。その詳細は第1報¹⁾ にのべられているので省略するが、データ処理、とくにスペクトル解析の際の条件をまとめて示すと次のようなものである。

- (1) サンプリング間隔: $\Delta t = 0.4 \text{ sec}$
- (2) データ数 (1 データあたり): $N = 2048 \text{ ケ}$
- (3) データ長 (1 データあたり): $T_N = 13.6 \text{ min}$
- (4) Nyquist 周波数: $f_N = 1.25 \text{ Hz}$
- (5) スペクトル計算: FFT 法
 - 1) 素スペクトル線の間隔: $\Delta f_0 = 1.22 \times 10^{-3} \text{ Hz}$
 - 2) フィルター (3 角形): $JJ = 20$
 - 3) フィルター等価帯域巾: $\Delta f_e = \frac{3}{2} JJ \times \Delta f_0 = 3.66 \times 10^{-2} \text{ Hz}$
 - 4) スペクトルの自由度: $\nu = 3JJ = 60$
 - 5) スペクトルの出力間隔: $\Delta f = 1.22 \times 10^{-2} \text{ Hz}$

ただし、ここに示した計算条件は、第1報にて使用したものとは若干異なっている。Data No. 213/1, 2, 3 は前回の条件で計算されたものであるが、それ以外は全部上記の条件で計算された。上記条件のうち $JJ = 20$ というのは3角形フィルターの幅がその片側半分に素スペクトル線 20 本を含むようなものである事を意味し、スペクトルの出力間隔は素スペクトル線に上記の三角形フィルターをかけて移動平均したものを出力する間隔で、実際には10本とびに出力した。

4. 結 果

4.1. 方向スペクトル

測定された方向スペクトルは、図-5, 6, 7 および 8 に一括して示されている。これらの図において、横軸に波の方向をとって、縦軸に周波数成分別の方向分布関数 $h(\theta)$ が示されている。実線はクローバー型波浪計の全信号を使用して求められる式(11)で定義された $h_4(\theta)$ を、点線は、上下加速度、ピッチおよびロールの信号を使用して求められる、式(16)で定義された $h_2(\theta)$ をそれぞれ示す。ただし、いずれも $\int_{-\pi}^{\pi} h(\theta) d\theta = \pi$ となるように規格化されている。 $h_4(\theta)$ に比較して $h_2(\theta)$ の方向分解能が劣るため点線で示された $h_2(\theta)$ が実線で示された $h_4(\theta)$ に比較してかなり平滑化されている事が分かる。ただし、 $h_4(\theta)$ にみられる小さな凹凸がすべて意味があるものかといえ、かならずしもそうは言えないであろう。隣接周波数の方向分布関数に同様なパターンがみられる場合ならびに、相次ぐ波のデータのサンプル (今回は 1, 2, 3 の 3 個) に同様なパターンがみられる場合などには、意味あるものとみ

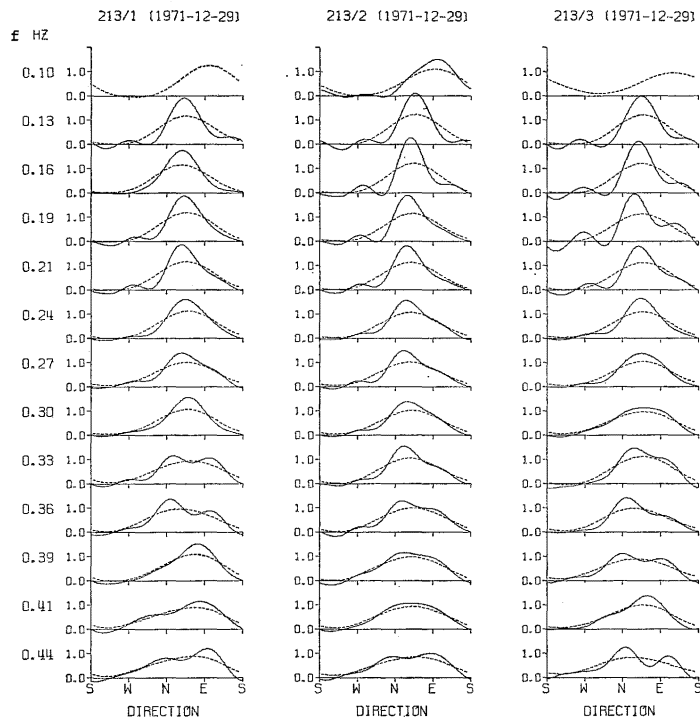
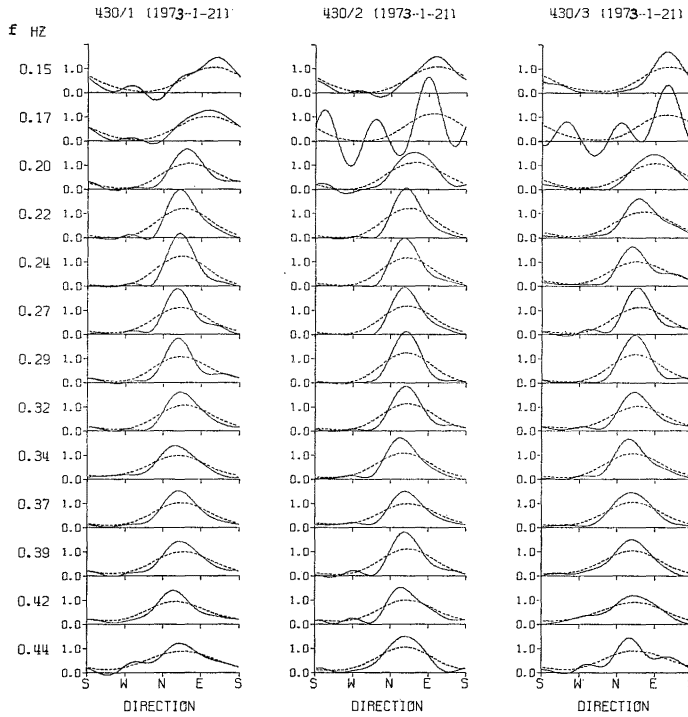


図 5 方向分布関数 $h(f, \theta)$ (213/1, 2, 3)

なし得るであろう。例えば、213/1, 2, 3 のデータのうち、0.19 Hz および 0.21 Hz における $h_4(\theta)$ で西の方位にある小さなピークは意味のあるものであるかもしれない。

図-5, 6, 7 および 8 に示された方向分布関数の測定結果より次のような点に分かる。室戸岬沖で観測された 213/1, 2, 3 のデータに関しては、大部分の周波数成分の主方向が NE であるが、低周波側の端 ($f \leq 0.11$ Hz) には、E を主方向とする周波数成分がある。これは目視観測では識別できなかったけれども、東よりうねりがきていた事を意味するものであろう。相模湾で観測された 430/1, 2, 3 のデータに関しては、大部分の周波数成分の主方向が同じく NE であるが、低周波側 ($f < 0.20$ Hz) には SSE を主方向とする周波数成分がある。これは目視観測でもみられた湾外より来襲するウネリに対応するものである。同じく相模湾で観測された 440/1, 2, 3 のデータも 430/1, 2, 3 とほぼ同様な傾向を示している。これは 430/1, 2, 3 のデータより約 1 時間半後に東北東に約 10 km 離れた点で測定されたものであり、しかも測定時間中気象条件にそれほど顕著な変化がなかったので当然な結果といえる。最後の玄海灘で観測された 550/1, 2, 3 のデータに関してはほとんどの周波数成分が NNE を主方していることが分かる。

また、一般的にいう方向分布関数の形に関しては、若干の例外を除けば大部分のものが単峰性 unimodal であること、高周波側に移るに従って、方向分布関数の集中度が低下して、平坦になってゆくことがわかる。このような方向分布関数の特性をもう少し定量的に調べるため、次の 4・2 で方向分布関数に Longuet-Higgins ら^{4), 6)} によって使用された unimodal な関数形を適合して検討をおこなう。

図 6 方向分布関数 $h(f, \theta)$ (430/1, 2, 3)

4.2. 方向分布関数の近似形

Longuet-Higgins et al.⁴⁾ ならびに Cartwright⁶⁾ は、ピッチ・ロールブイで計測された方向スペクトルの形に対して、次のような関数形を適用した。

$$E(\omega, \theta) = \phi(\omega) G(S) \left| \cos \frac{1}{2}(\theta - \bar{\theta}) \right|^{2S}. \quad (18)$$

すなわち、方向分布関数 $G(\omega, \theta)$ の形として

$$G(\omega, \theta) = G(S) \left| \cos \frac{1}{2}(\theta - \bar{\theta}) \right|^{2S} \quad (19)$$

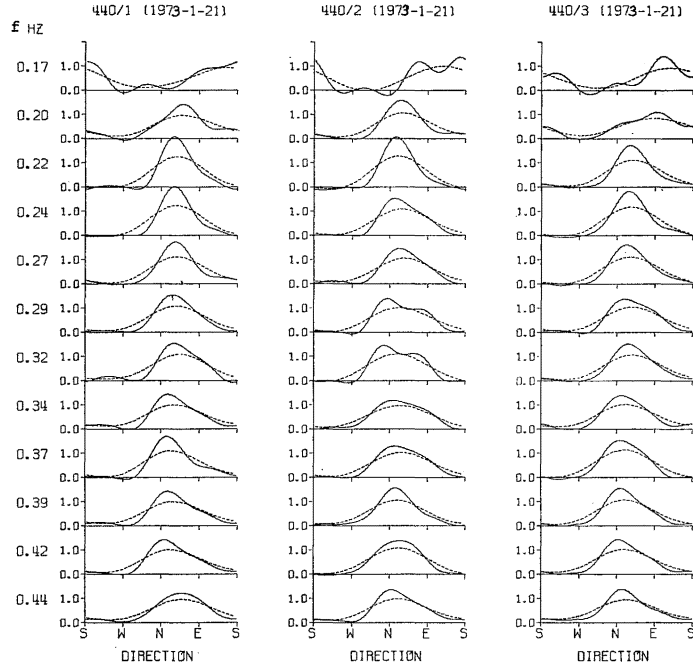
を使用した。ここに $G(S)$ は $\int_{-\pi}^{\pi} G(\omega, \theta) d\theta = 1$ とするための規格化関数で

$$G(S) = 2^{2S-1} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma(2S+1)}, \quad (20)$$

$\bar{\theta}$ は次式で与えられる波の平均方向である。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} B_1 / A_1 (= \tan^{-1} Q_{13} / Q_{12}). \quad (21)$$

ところで式(19)で与えられる方向分布関数が実測された方向分布関数に完全に一致するものとすれば、方向分布関数のフーリエ展開係数 A_n, B_n と式(19)の S との間には次のような関係が成立する。

図 7 方向分布関数 $h(f, \theta)$ (440/1, 2, 3)

$$C_n = \frac{S(S-1) \cdots (S-n+1)}{(S+1)(S+2) \cdots (S+n)}, \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (22)$$

ここに

$$C_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2}, \quad (23)$$

である.

すなわち, クローバ型波浪計の場合については

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{S}{S+1}, & C_2 &= \frac{S(S-1)}{(S+1)(S+2)}, \\ C_3 &= \frac{S(S-1)(S-2)}{(S+1)(S+2)(S+3)}, & C_4 &= \frac{S(S-1)(S-2)(S-3)}{(S+1)(S+2)(S+3)(S+4)} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

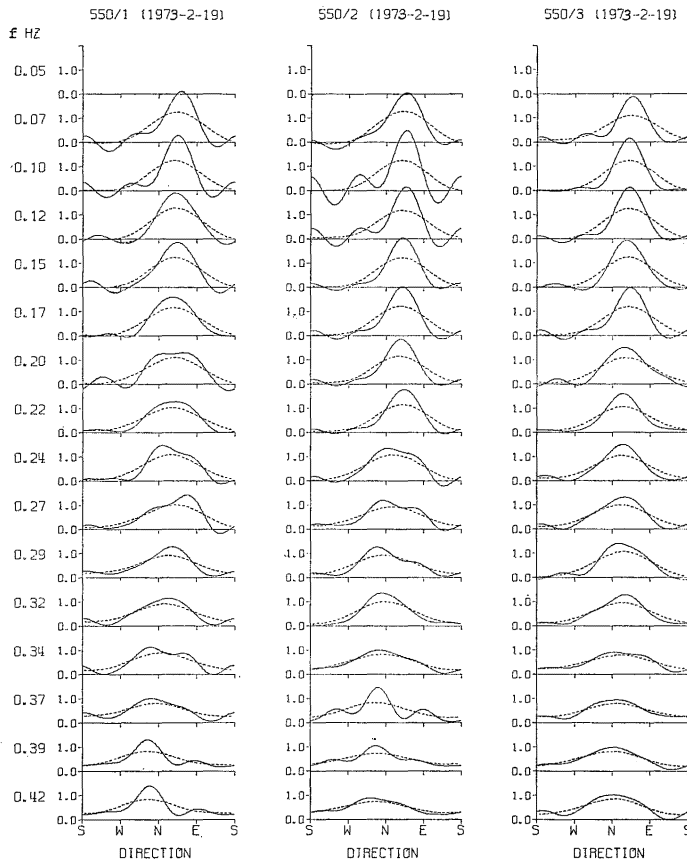
となる.

式(19)で与えられる関数は, 図-9 に示されるように S の増大とともに集中度が増大し, S の大きい所では,

$$G(\omega, \theta) = \left(\frac{\pi S}{4} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{1}{4} S(\theta - \bar{\theta})^2 \right], \quad (25)$$

すなわち, 標準偏差 $\sqrt{2/S}$ のガウス分布に漸近する. 図に示されているものは実際には, $h(\omega, \theta) (= \pi G(\omega, \theta))$ である.

一般に波の予報その他で, 方向分布関数に関する実用的な式として使用される

図 8 方向分布関数 $h(f, \theta)$ (550/1, 2, 3)

$$G(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta, \quad |\theta| \leq \frac{\pi}{2}, \quad (26)$$

は、図の幅を避けるため記入されていないが、 $h(\theta) = \pi G(\theta)$ で $h(\theta)$ に直すと図-9の $h(\theta)$ で $S=5$ としたものにほとんど一致する。

ところで、式(19)で与えられる関数形が方向分布関数に完全に一致するならば、式(22)あるいは(24)に示された関係が総て満足されるので、 C_1, C_2, C_3 および C_4 の相互間には、 S を媒介変数として一定の関係がある。この理論的關係に実測結果がどの程度合致しているか、即ち、式(19)のような仮定がどの程度妥当であるかを調べるために、 C_1 と C_2 との関係、ならびに C_1 と C_3 との関係について、実測された C_1, C_2 および C_3 をもとにして検討を行なった。結果は図-10, 11, 12, 13, 14 および 15 に示されている。点線は関数形が完全に一致した時の関係式を示し、各種の点は、実測データである。これらの図よりまず、213/1, 2, 3 のデータに関しては、 C_1 と C_2 との関係は極めて良い一致をみていることが分かる。しかしながら C_1 と C_3 との関係は必ずしも良くないこと、特に C_3 が大き過ぎることが分かる。430/1 と 440/1 とのデータは、類似しているので同一の図に記入されているが、 C_1 と C_2 との

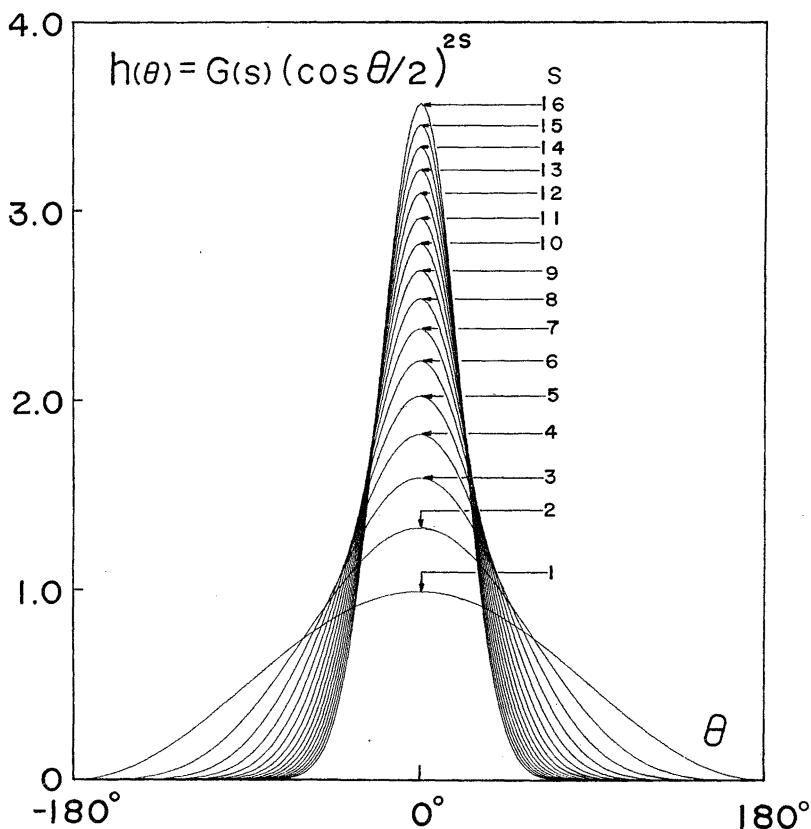


図 9 方向分布関数に対する近似関数

関係においても必ずしも一致がよくなく、 C_2 が大きすぎる傾向があること、 C_1 と C_3 との関係はさらに悪いことなどが分かる。しかしながら変化の傾向は理論的予測と全体的に似ているものといえるであろう。最後の 550/1, 2, 3 のデータに関しては、 C_1 と C_2 との関係はまずまず良好であるが、 C_1 と C_3 との関係はあまりよくない。

一般的に言って、特に C_1 、 C_2 および C_3 の小さいところ（これは波の周波数スペクトルで言えば高周波側の端の方にあたり、ここではスペクトル密度が小さい）、でデータの散乱が大きく、 C_1 : 0.8~0.9 付近（これは周波数スペクトルのピーク付近に対応）で一致がよい。同様な傾向は Cartwright⁹⁾ のデータにおいてもみられる。

次に式(24)の各式を使用して、 S の値すなわち $C_1, C_2, \dots, C_4$ に対応して $S_1, S_2, \dots, S_4$ が求められた。 S_1 と S_2 とは、 C_1 と C_2 との関係からも予想されるように、波の周波数スペクトルの主要部においてはほぼ同一の値を示した。しかしながら S_3 および S_4 は S_1 および S_2 とはかなりかけ離れた値を示した。 S の決定法として、もう 1 つの全く異なった方法を試みた。それは測定された方向分布関数 $h_4(\theta)$ に式(19)の関数形を適合して、最小自乗法的に S をきめる方法である。この場合 $h_4(\theta)$ には前に 2 で

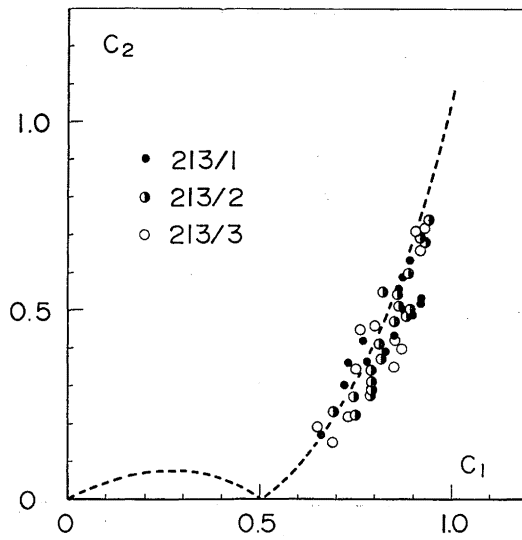


図 10 C_1 と C_2 との関係 (213/1, 2, 3)

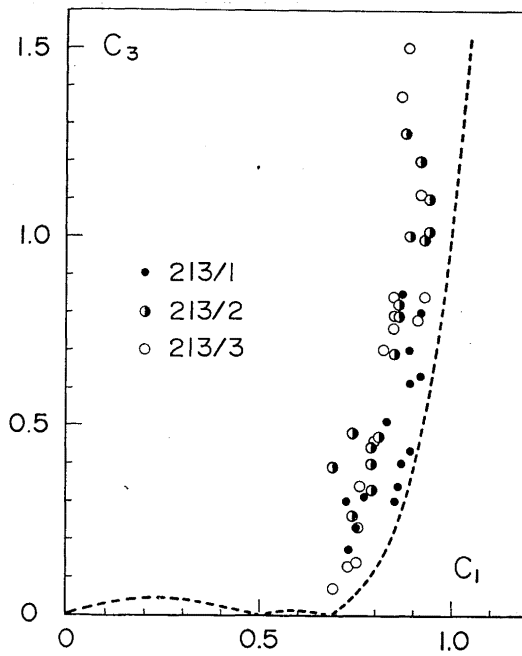


図 11 C_1 と C_3 との関係 (213/1, 2, 3)

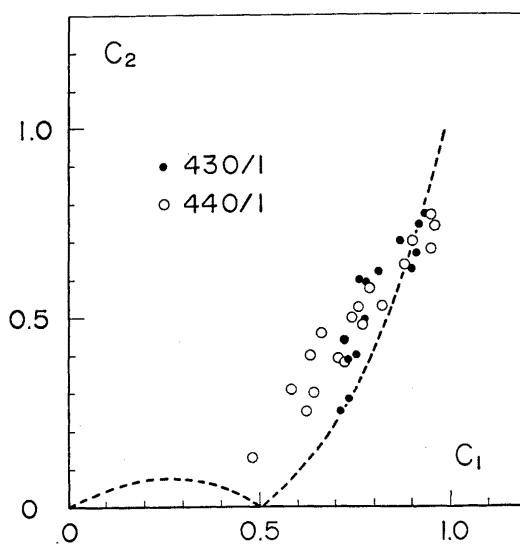


図 12 C_1 と C_2 と の 関 係 (430/1, 440/1)

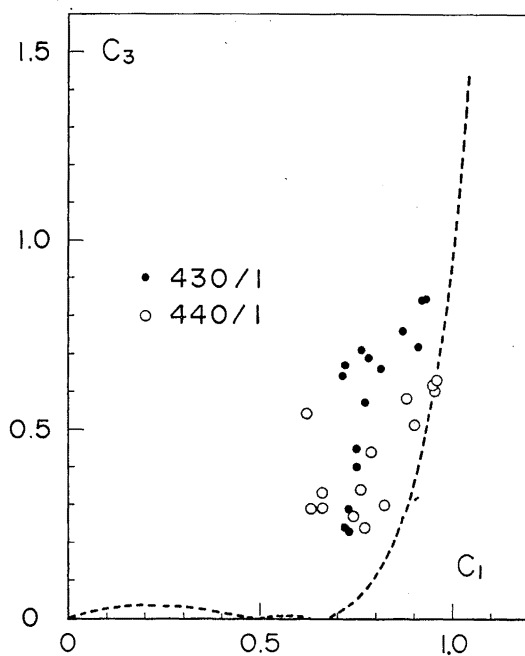


図 13 C_1 と C_3 と の 関 係 (430/1, 440/1)

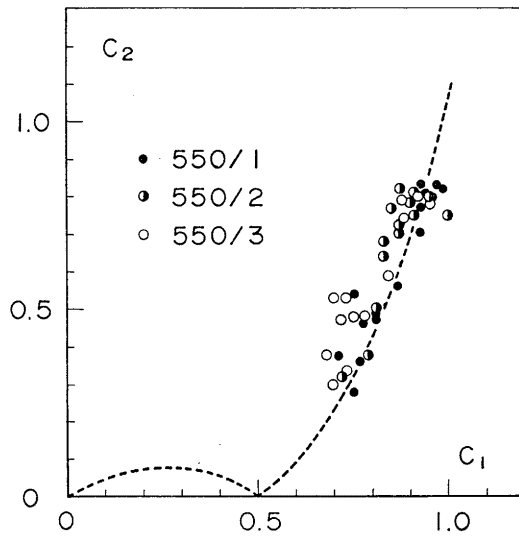


図 14 C_1 と C_2 との関係 (550/1, 2, 3)

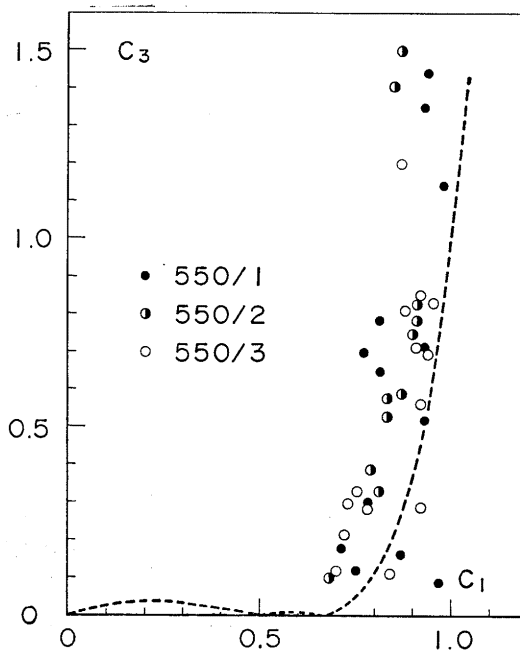


図 15 C_1 と C_3 との関係 (550/1, 2, 3)

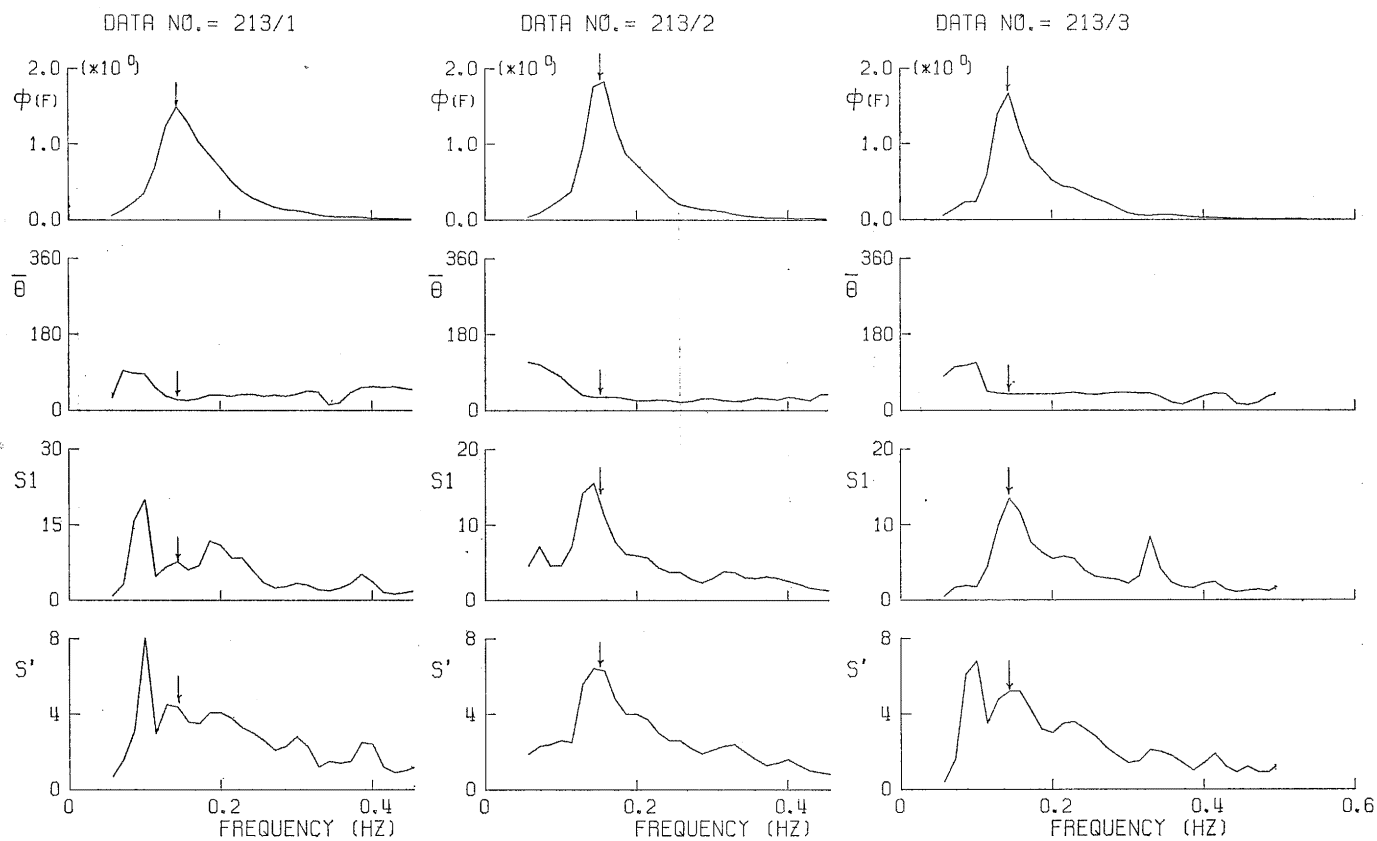


図 16 一次元スペクトル $\phi(f)$ (単位 $\text{m}^2 \cdot \text{sec}$), 平均方向 $\bar{\theta}$, 方向スペクトルの集中度パラメーター S_1 , S' (213/1, 2, 3)

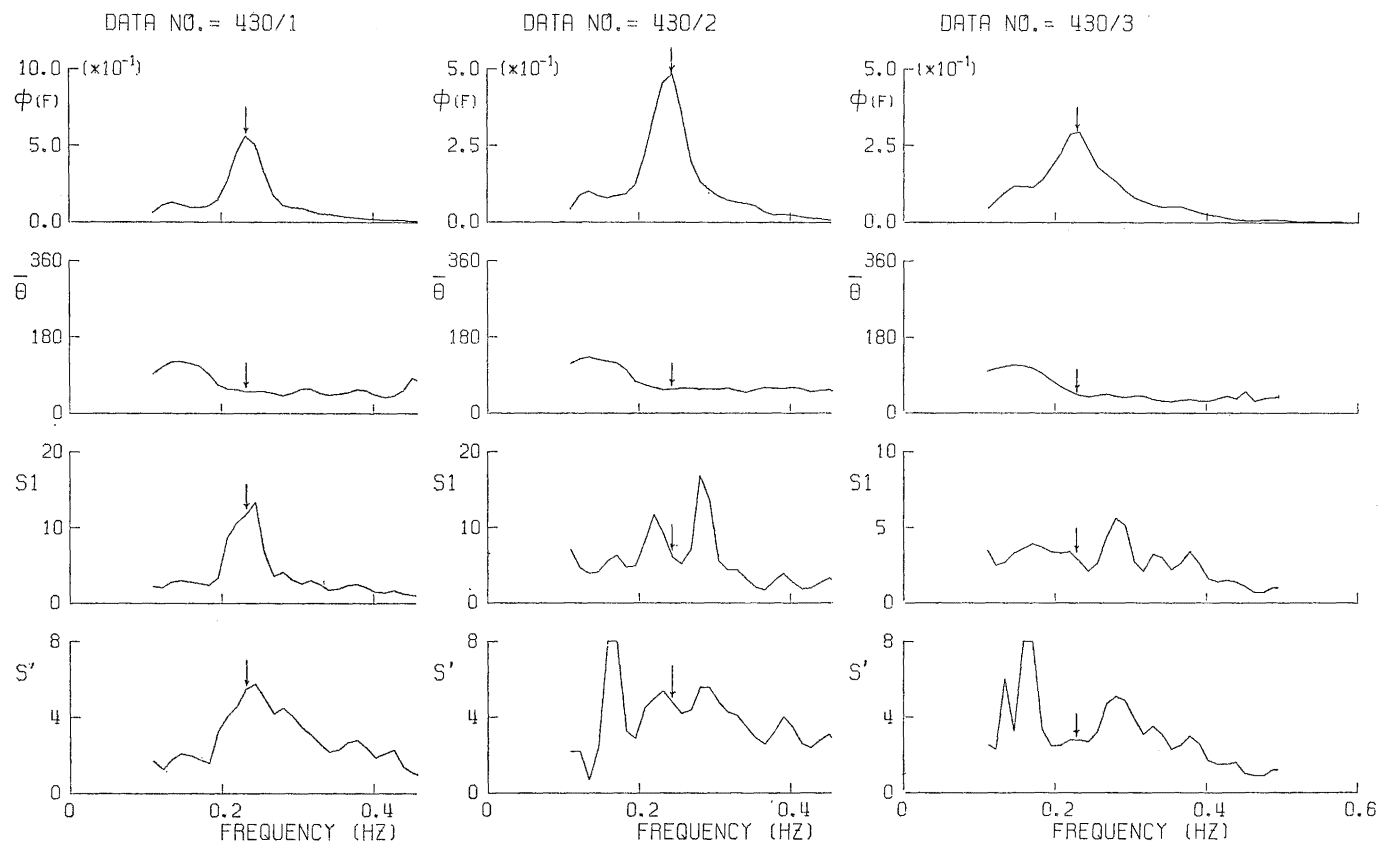


図 17 一次元スペクトル $\phi(f)$ (単位 $\text{m}^2 \cdot \text{sec}$), 平均方向 $\bar{\theta}$, 方向スペクトルの集中度パラメーター S_1, S' (430/1, 2, 3)

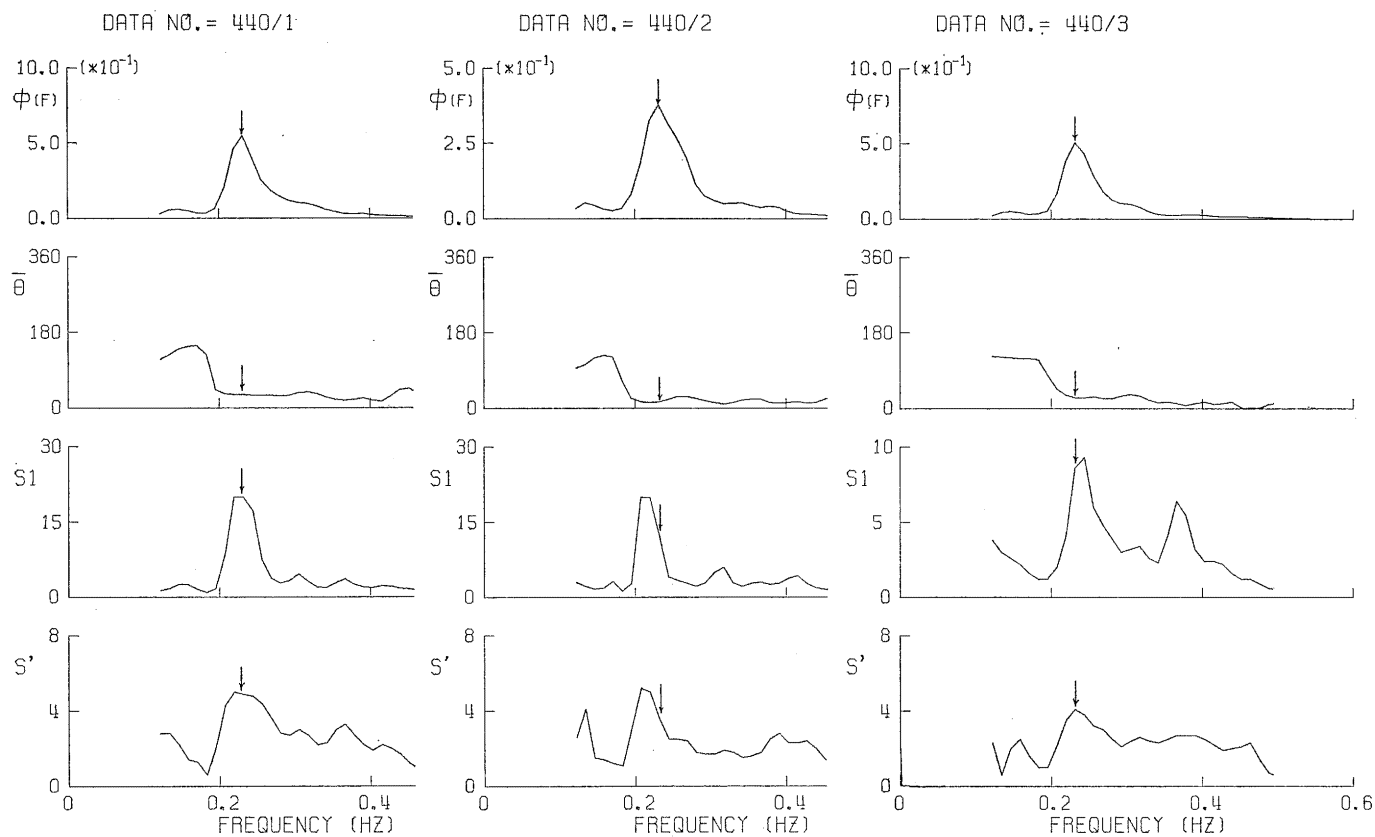


図 18 一次元スペクトル $\phi(f)$ (単位 $\text{m}^2 \cdot \text{sec}$), 平均方向 $\bar{\theta}$, 方向スペクトルの集中度パラメーター S_1 , S' (440/1, 2, 3)

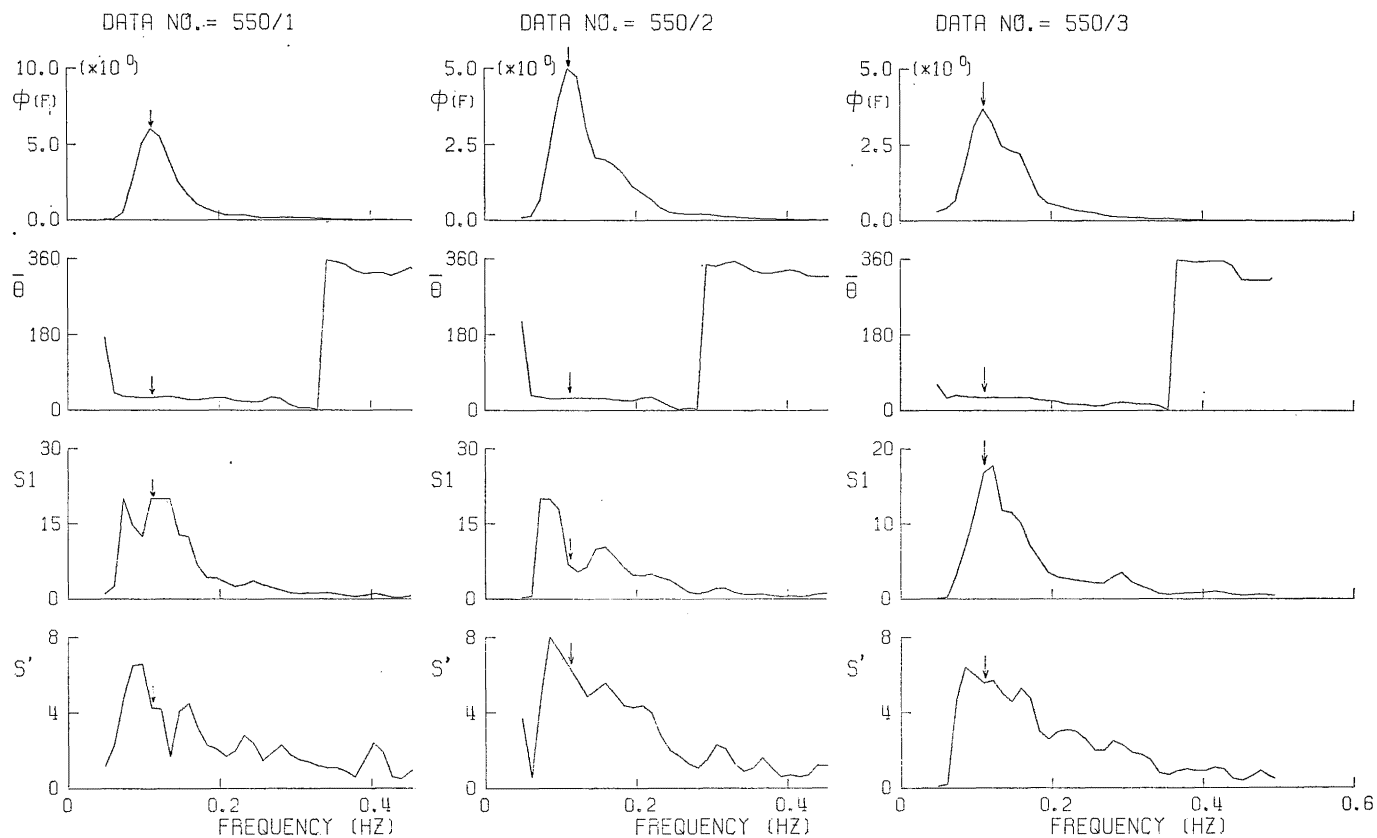


図 19 一次元スペクトル $\phi(f)$ (単位 $\text{m}^2 \cdot \text{sec}$), 平均方向 $\bar{\theta}$, 方向スペクトルの集中度パラメーター S_1, S' (550/1, 2, 3)

述べたように $W_4(\theta) \sim \cos^{16} \frac{\theta}{2}$ ($S=8$) の重み関数がかかっているの、原則とし S は 8 より大きくなり得ない。

図-16~19 には最上段に波の一次元スペクトル $\phi(f)$, 次段に式(21)で定義される波の平均方向 $\bar{\theta}$, 3 段目に C_1 より決定される S_1 , 最下段に最小自乗法的に決定された S' が, 横軸に周波数をとってそれぞれデータ別に示されている。これらの図より前に述べた波の周波数成分別の平均方向の変化が非常にはっきりと分かる。

これらの図で最も興味ある結果は, 方向分布関数の集中度を示すパラメータ S_1 が, 2~3 の例外を除いて波の一次元スペクトルのピーク付近 (矢印 $\blacktriangledown$ の所) あるいはわずかに低周波側で非常に大きな値をとり, それよりはずれると高周波側および低周波側のいずれでも急速に小さくなっている事である。このような傾向は, 重み関数がかかっているために値こそ小さいが, S' にも同様にみられる。同様な S の変化は以前に Longuet-Higgins et al.⁴⁾ あるいは Cartwright⁶⁾ により求められた結果においてもみられる。

このような結果は, 風波の主要成分は, 風向に近似的に一致した方向に伝播し, その伝播方向の広が

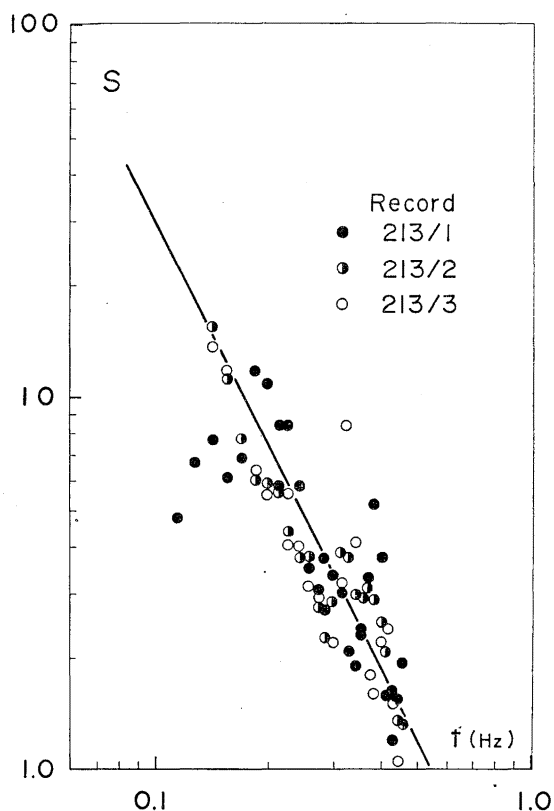


図 20 S と f と の 関 係 (213/1, 2, 3)

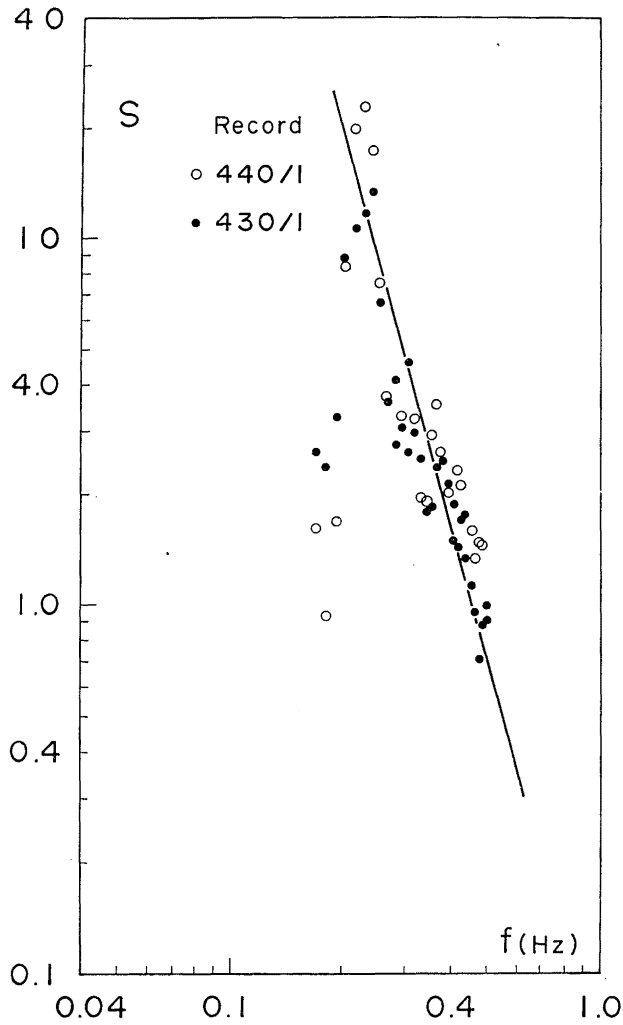


図 21 S と f と の 関 係 (430/1, 440/1)

り (方向分散) はかなり小さいが, このスペクトルの主要部 (ピーク付近) より離れた高周波成分および低周波成分は, 方向の分散角が大きい事を意味し, 興味ある結果である。

このような波の方向分布数の集中度に対する 波の周波数の影響をもう少し詳しくみるために, S_1 を波の周波数 f に対して, 両対数をとってプロットしたものが図-20, 21, 22, 23 および 24 である。図-23 は Ewing⁷⁾ の観測結果 (ウネリに関するもの) を彼の報告書の図より読み取って両対数をとってプロットし直したものである。図-24 は Longuet-Higgins et al.⁴⁾ のデータを同じく彼らの図より読み取って両対数でプロットし直したものである。ただし, Longuet-Higgins et al. のデータは横軸に, $U_1/C(U_1=u_*/\kappa, u_*$: 風の摩擦速度, κ : Kármán の常数 ≈ 0.4 , C : 波の位相速度) がとられている。

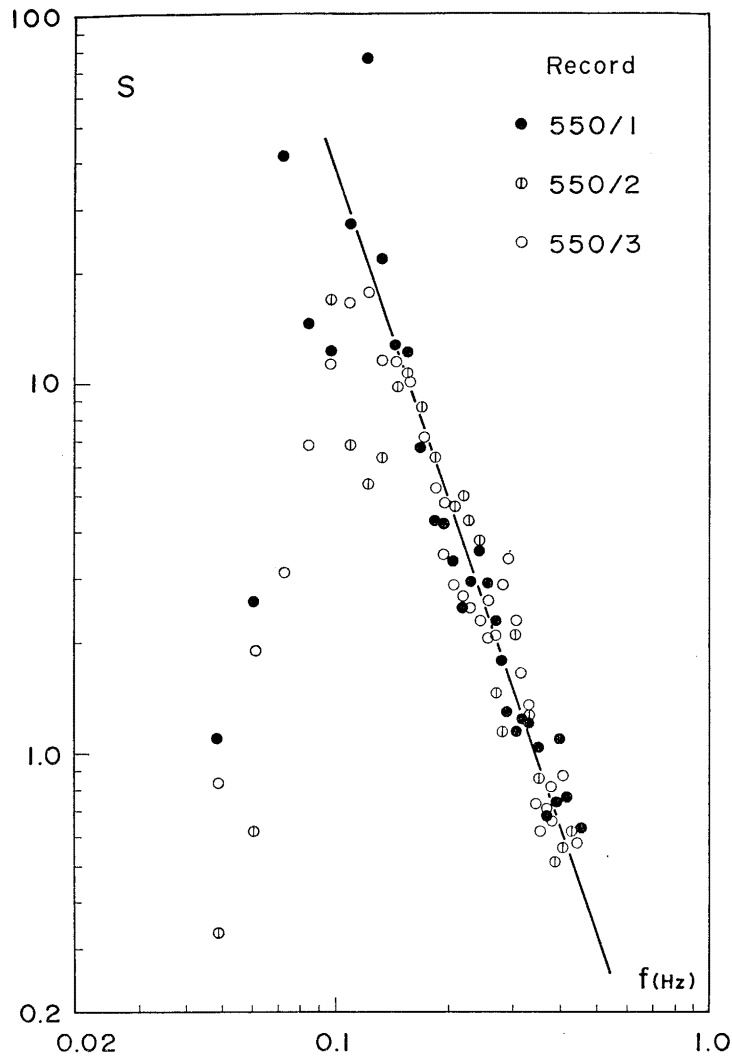


図 22 S と f と の 関 係 (550/1, 2, 3)

図-20 に示された 213/1, 2, 3 のデータに関しては、スペクトルのピークより高周波側における S と f との関係は図中の直線で近似され、次式で与えられる。

$$S = 0.30 f^{-2.0} \quad (27)$$

図-21 には、430/1 および 440/1 のデータが一緒に示されているが、図中の直線は次式

$$S = 5.4 \times 10^{-2} f^{-3.7} \quad (28)$$

で与えられ、この場合には周波数の増大による S の減少が急速に生じていることがわかる。図-22 は 550/1, 2, 3 のデータで、この場合には測定値の散乱が小さく

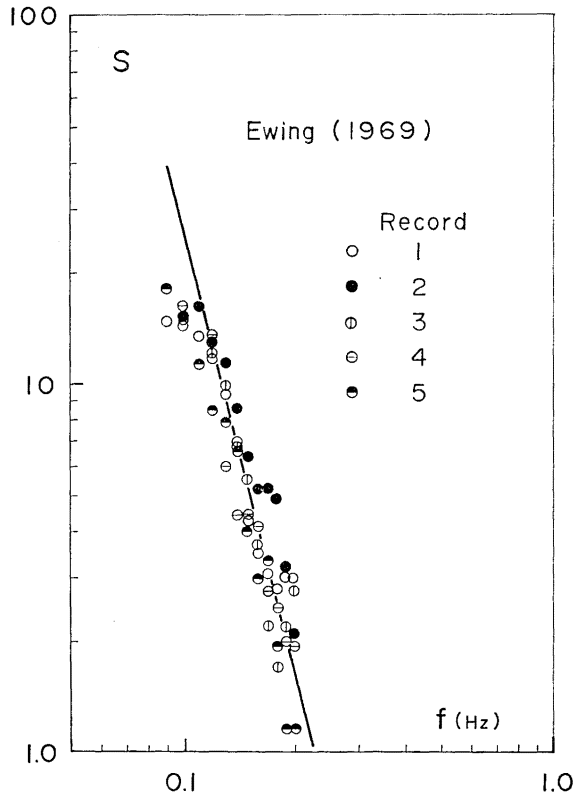


図 23 S と f と の 関 係 (Ewing の デー タ)

$$S = 4.8 \times 10^{-2} f^{-2.9} \quad (29)$$

である。図-23 に示されたものは Ewing により観測されたウネリに関するもので、図中の直線は

$$S = 2.1 \times 10^{-3} f^{-4.1} \quad (30)$$

である。最後の図-24 は Longuet-Higgins et al. により観測された発生域の風波に関するもので、測定値の散乱が大きい、目測で引いた図中の直線は

$$S = 0.10 (U_1/C)^{-2.0} \quad (31)$$

である。

ところで

$$U_1 = u_* / \kappa \doteq 2.5 u_* \doteq U_{10} / 10, \quad (32)$$

$$C = gT / 2\pi = 1.56T = 1.56/f \quad (33)$$

を考慮すると

$$(U_1/C) = (U_{10}/15.6)f \quad (34)$$

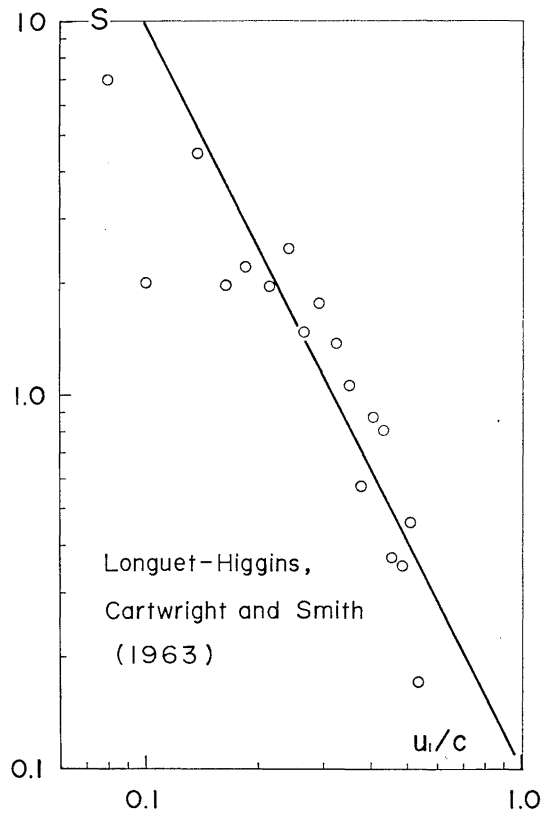


図 24 S と U_1/C との関係 (Longuet-Higgins et al のデータ)

となる。

213/1, 2, 3 のデータにおいて, $U_{10} \doteq 9 \text{ m/s}$ とすれば, 式(34)を利用して, 式(27)は Longuet-Higgins et al. の式にほとんど一致するように変形される. 波の観測時に船上で計測された風速は 7 m/s であるが, それ以前に継続して吹き続けていた風速は 10 m/s 前後であったので, $U_{10} \doteq 9 \text{ m/s}$ とする仮定はそれ程乱暴ではないであろう.

以上波のスペクトルのピークより高周波側における S の値の変化を示した 図-20~24 ならびに近似的にそれを数式化したものを通覧してわかる事は, 次の様な点である. Ewing のデータ, すなわちウネリに関しては, スペクトルのピーク付近 ($f \doteq 0.1 \text{ Hz}$) では S はかなり大きな値をとっているが, ピークより高周波側の成分に対する S の値は, 周波数 f の増大とともに急速に小さくなっている. すなわちウネリの主成分波の方向分散は非常に小さいが, 高周波成分に移行するに従って方向分散が急速に増大する. これに反して, Longuet-Higgins et al. のデータならびにわれわれの 213/1, 2, 3 のデータ, いずれも 10 m/s 前後の風で発生した外洋の風域内の波では, スペクトルの高周波側における S の減少がウネリの場合に比して, ゆるやかである. すなわち, かなり発達した外洋の波の場合には, 高周波成分の方向分散は増大するが, 主成分波に比して, 極端に大きくなる事はない. しかしながら, 相模湾で計

測された 430/1 および 430/2 の波のデータにおいてはふたたびスペクトルのピーク付近で S は非常に大きな値をとり、スペクトルの高周波側に移行するに従って、その値は急速に低下する。換言すれば、比較的吹送距離の短い風域内の風波では、主成分波の方向分散は非常に小さいがウネリの場合と同様に、高周波成分に移行するに従って、方向分散が急速に増大する。他方、比較的吹送距離の長い 550/1, 2, 3 のデータでは、スペクトルのピークより高周波側における S の減少すなわち、方向分散の増大が、吹送距離の短い相模湾の波のデータ 430/1, 440/1 に比較してゆるやかになっている。ただし Longuet-Higgins et al. のデータや 213/1, 2, 3 のデータほどにはゆるやかではない理由はいきりしない。

図-25 は、Longuet-Higgins et al. にならって、周波数 f のかわりに横軸に無次元量 U_1/C をとって S の変化を比較したものである。すなわち、式(27)、(28)および(29)において、式(34)を利用して次のように f を U_1/C に変換したものがまとめて示されている。ただし U_{10} としてはそれぞれ () 内の値が仮定されている。

$$\begin{aligned} 213/1, 2, 3, \quad (U_{10}=9 \text{ m/s}) \\ S=0.10(U_1/C)^{-2.0} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} 430/1, 440/1, \quad (U_{10}=8 \text{ m/s}) \\ S=0.46 \times 10^{-2}(U_1/C)^{-3.7}. \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} 550/1, 2, 3, \quad (U_{10}=12 \text{ m/s}) \\ S=0.22 \times 10^{-1}(U_1/C)^{-2.9}. \end{aligned} \quad (37)$$

Ewing のうねりのデータは代表風速の選びようがないので記入されていない。図中の各式を代表する各線において、線の太い部分は実験式を導く際に使用したデータの概略の存在範囲である。この図に示された結果をみると、図が両対数目盛であることにもよるが、実験式を導く際に用いた各データの散

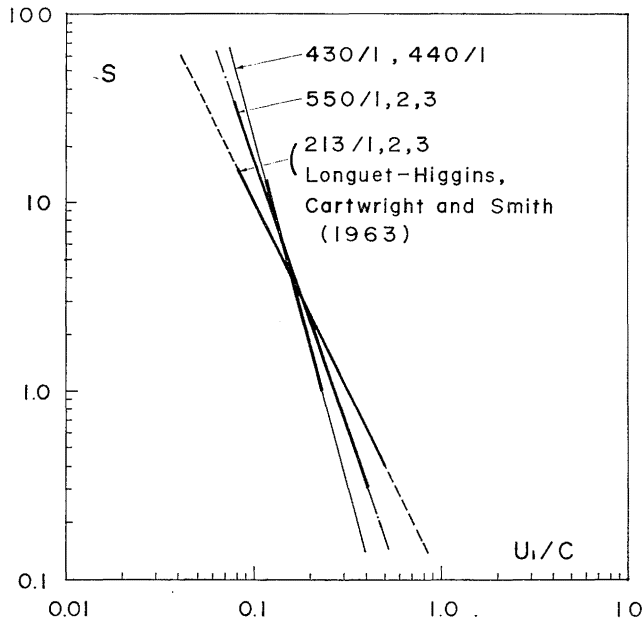


図 25 S と U_1/C と の 関 係

乱の程度を思い起すと、各式で与えられる S の値、あるいは U_1/C に対する S の依存関係が大ざっぱにみれば類似していると言う見方もできるかもしれない。データ、430, 440, 550 ならびに Ewing のデータは周波軸を適当に平行移動して S に関する元データを重ねてみると、周波数 f に対する S の変化は極めて類似している。しかしながら、われわれのデータ 230 ならびに Longuet-Higgins et al. のデータは明かにこれらのデータよりはずれている。したがって、 S と f との関係、すなわち波の方向スペクトルの集中度の波の成分波の周波数に対する依存関係に対する波の発生条件の影響に関しては詳細な点は今後の研究に残されている。

5. 結 論

今回の研究の結果明らかにされた海洋波の方向スペクトルの構造を列記すると次のようなものである。

- (1) 海洋波の方向スペクトルの平均方向は、ほぼ風向に一致している。
- (2) 海洋波の方向スペクトルの形は、近似的に単峯性 unimodal の関数形で、第 1 近似としては表現できる。
- (3) 海洋波の方向スペクトルの集中度は、波のパワースペクトルのピーク付近の周波数成分に対しては、かなり大きな値をとるが、波浪スペクトルのピークを離れると、その集中度が急速に低下する。すなわち、スペクトル密度が相対的に小さい高周波成分や低周波成分では方向分散が大きい。
- (4) スペクトルの集中度と、海洋波の周波数との間にはある一定の関係がみられるが、まだその定量的な関係式に関しははっきりした結論を見出すまでには至っていない。

謝 辞

この大型プロジェクトを遂行するにあたっては、非常に多くの方々のご助力を得た。特に応用力学研究所の江藤賢次技官は現地計測に使用したすべての機器の試験と整備を担当し、現地計測においても中心的な働きをした。田中道芳技官は、現地計測の補助をおこなう一方、莫大な量の波浪データの処理を水野信二郎助教授の指導のもとに実施した。両君の全面的な協力に対して心から感謝する次第である。

東京大学海洋研究所の観測船淡青丸による現地計測にあたっては、同研究所の竹田講師、寺本俊彦助教授、平啓介助手、杉森康宏助手、さらに淡青丸の船長をはじめとする乗組員の方々ならびに海務係の方々より、数々の援助を受けた。また、三井海洋開発株式会社の調査船“あおたか”海上保安庁の設標船“かいおう”，芙蓉海洋開発株式会社の調査船“わかしお”ならびに運輸省航海訓練所の練習船“進徳丸”などの乗船に際しては、関係各位ならびに各船の船長をはじめとする乗組員の方々より多大の助力を得た。さらにまた、計測結果の解析のため、観測時における気象データを収集するに際しては、国防防災センター平塚支所の岩田憲幸博士、運輸省気象研究所の磯崎一郎博士、ならびに福岡管区気象台、宇和島測候所ならびに延岡測候所より資料の便宜をはかって頂いた。これらの非常に多くの方々の御協力に対して心から感謝致します。また、「実船搭載用波浪計に関する研究」のプロジェクトに参加する機会を与えられた日本造船研究協会ならびに、第 132 部会の委員長田宮真博士をはじめとする委員各位に対しても感謝致します。

この研究は応用力学研究所における、海洋工学関係のプロジェクトの一環としておこなわれたもので、本研究に対して、終始御援助をかたじけなくした応用力学研究所の所長岡部淳一教授をはじめとする所員各位に対し、感謝致します。

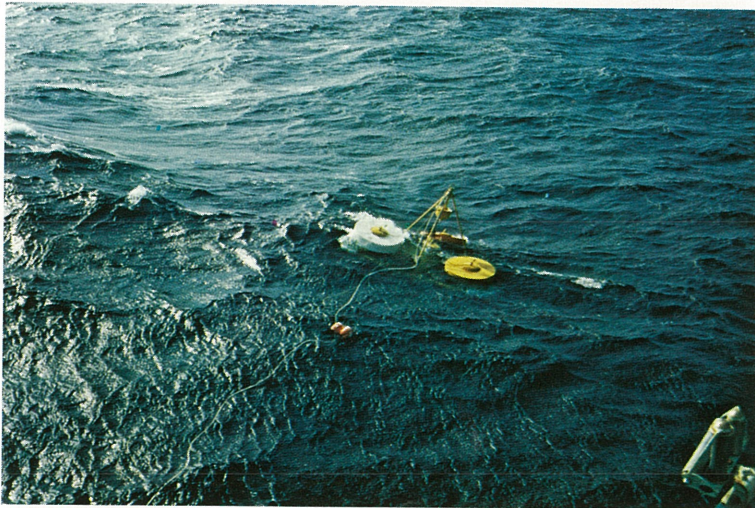
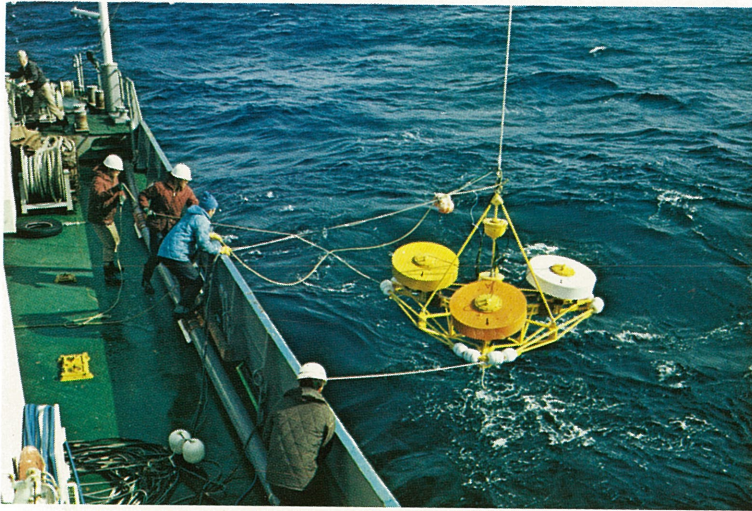
また本研究は文部省より臨時事業費の援助を受けて実施されたもので、文部省、九州大学事務局ならびに応用力学研究所事務室の関係各位の配慮に対し感謝致します。最後に、本論文の原稿作成に際し助力を得た野口佐保嬢に感謝致します。なお、本研究における波浪データの解析は、すべて、津屋崎海洋災害実験所の電子計算機システム FACOM 270-20 を使っておこなわれたことを附記する。

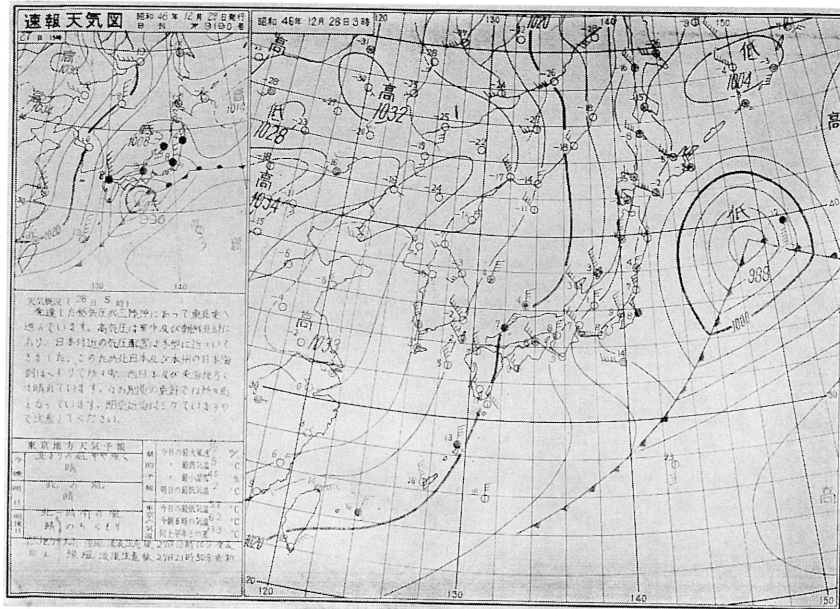
参 考 文 献

- 1) 光易恒, 田才福造, 栖原寿郎, 水野信二郎, 大楠丹, 本多忠夫, 力石国男, 高木幹雄, 肥山央, 海洋波の計測法の開発研究(1), 九州大学応用力学研究所所報, 第39号, 1973, 105~181.
- 2) 第132研究部会, 実船搭載用波浪計に関する研究, 日本造船研究協会研究資料, No. 164, 1972, p. 42.
- 3) 第132研究部会, 実船搭載用波浪計に関する研究, 日本造船研究協会研究資料, No. 177, 1973, p. 136.
- 4) Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E. and Smith, N. D., Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, *Ocean Wave Spectra*, New Jersey: Prentice Hall Inc., 1963, 111-136.
- 5) Cartwright, D. E. and Smith, N. D., Buoy techniques for obtaining directional wave spectra, *Buoy Technology*, Washington; Marine Technology Soc. 1964, 112-122.
- 6) Cartwright, D. E., The use of directional spectra in studying the output of a wave recorder on a moving ship, *Ocean Wave Spectra*, New Jersey: Prentice Hall Inc., 1963, 203-218.
- 7) Ewing, J. A., Some measurements of the directional wave spectrum, *J. Marine Res.*, Vol. 27, No. 2, 1969, 163-171.

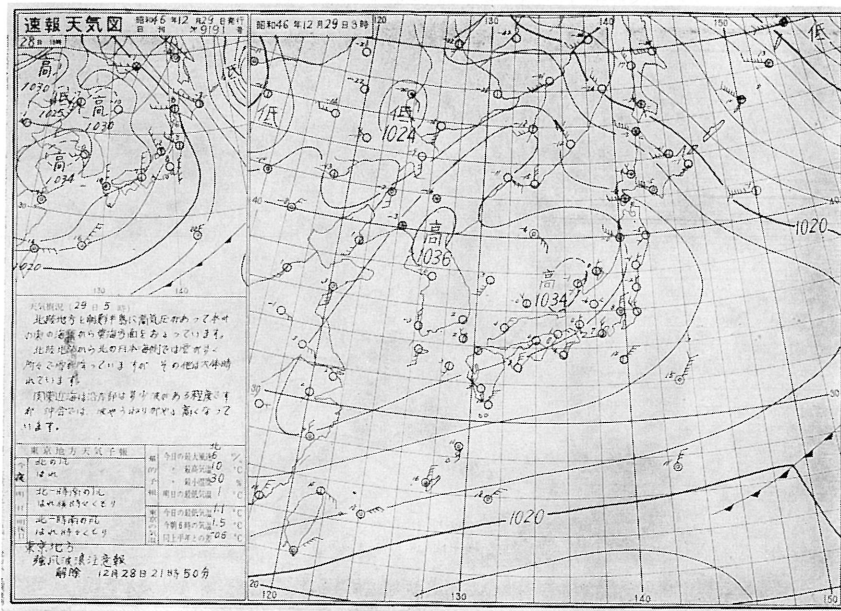
(昭和48年6月6日 受理)

写真 1 クローバ型波浪計

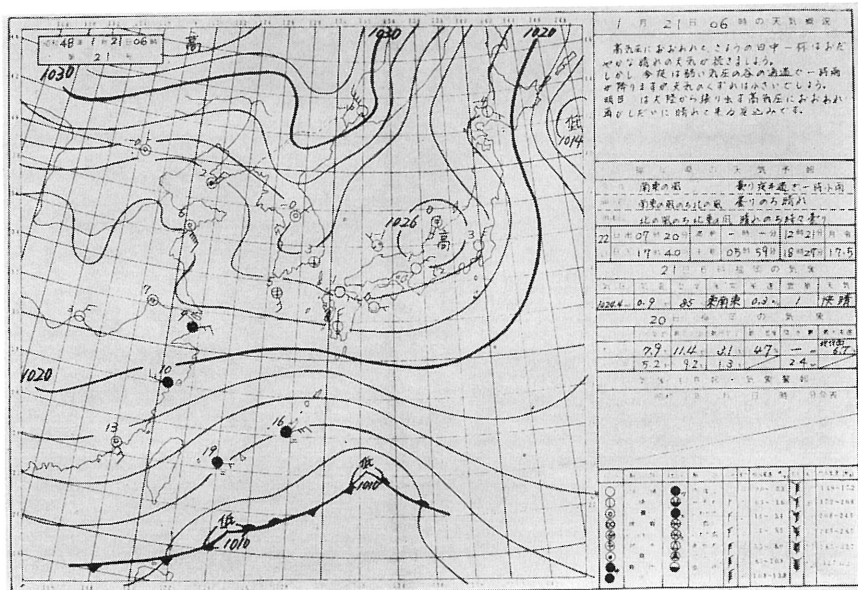




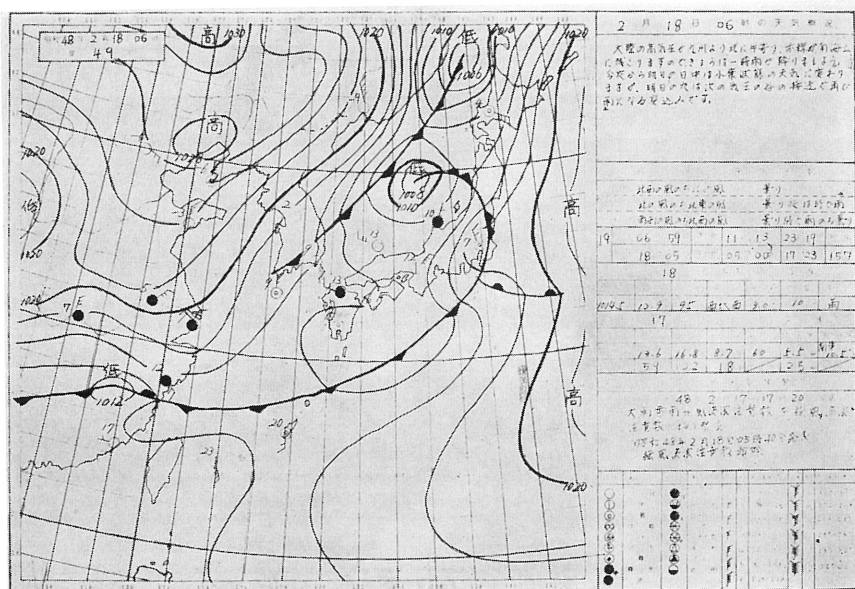
付録1 天気図 (1971.12.28)



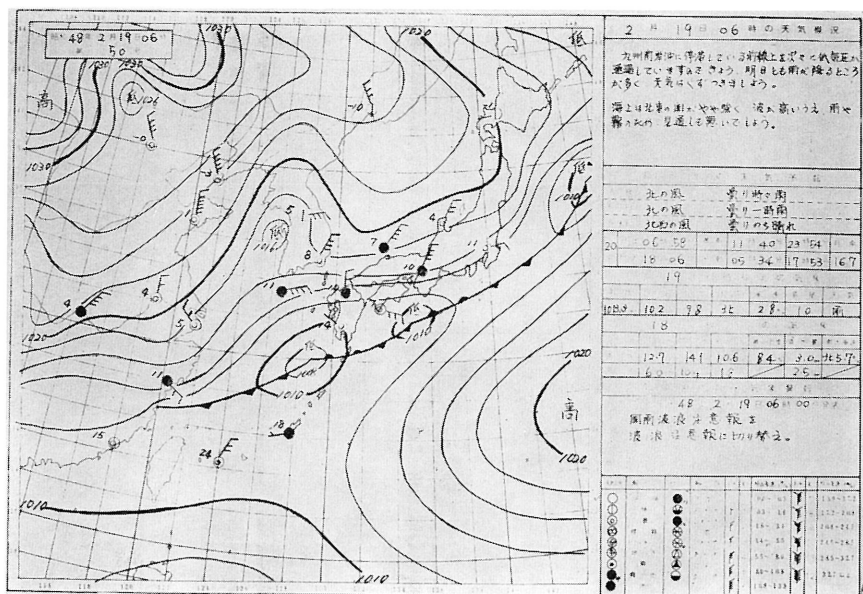
付録2 天気図 (1971.12.29)



付録3 天気図 (1973. 1. 21)



付録4 天気図 (1973. 2. 18)



付録 5 天 気 図 (1973. 2.19)