

佐渡島の波に対するしゃへい作用

本 間 仁*・堀 川 清 司**・趙 榮 耀***

1. 緒 言

海岸の沖に島がある場合、海岸付近の波を推定するには、島の大きさや、海岸までの距離などについて直感的に判断して、島の存在を無視したり、あるいは海岸から島までの対岸距離を用いたりして推算を行なうのが一般のようである。もちろん、このような直感的な判断にはなんらの基準が無いので、波浪推算法の精度は別問題として、実際の海岸における波浪を過大、あるいは過小に推定する恐れがある。したがって海岸における波浪をより正確に推定するには、まず島の波に対するしゃへい効果を検討しなければならない。すなわち島の地形や、大きさ、海岸までの距離などの条件によって、外海から進行して来た波に与える影響を定性的または定量的に考慮してから波浪推定の方式を決める必要がある。

この論文は、新潟海岸の前面における佐渡島を例として取り上げ、二、三の角度からその波に対するしゃへい効果を考察し、新潟海岸における波浪の推定の取り扱い方について述べる。

図-1 位 置 図

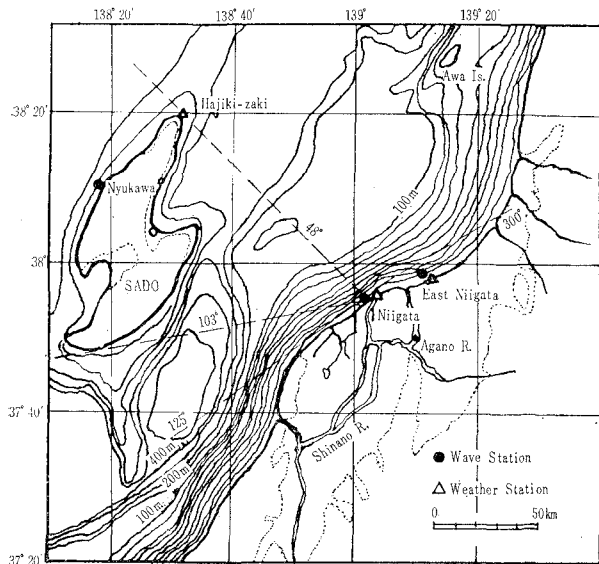
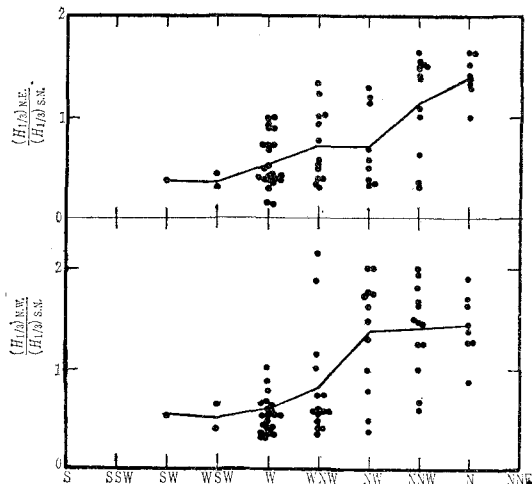


図-2 風向と波高比の関係



2. 佐渡島の波に対するしゃへい現象

佐渡島の日本海側における入川地点と新潟の西海岸および東港では、すでに長期間にわたる波浪観測が行なわれている(図-1)。波高計は何れもケーブル付水圧式で、設置水深はそれぞれ -9.5 m, -12 m と -10 m である。佐渡島の存在によって日本海から進行して来た波がいかに影響されているかを調べるために、おおざっぱではあるが上述各地点における既往の波浪および風の観測記録(ただし入川は風の観測が行なわれていないので弾崎の観測値を用いた)から、同時刻の風向が三地点はほぼ同様(45°誤差範囲内の平均値)である場合の波高($H_{1/3}$)を選び出し、新潟西海岸の佐渡入川に対する波高比 $\{(H_{1/3})_{NW}/(H_{1/3})_{SN}\}$ および新潟港の佐渡入川に対する波高比 $\{(H_{1/3})_{NE}/(H_{1/3})_{SN}\}$ を求めてみた。その結果は図-2に示しているようである。実線は各風向における波高比の平均値を示す。もし、沖波の進行方向を風向と同様であると考え、図に示しているように、点の散らばりがかなりあるが波向が北よりになるほど波高比が大きくなっている。図-1 からわかるように新潟西海岸および新港はそれぞれ、ほぼ NW~WSW および WNW~WSW の間が

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部

*** 学生員 工修 東京大学大学院 工学系研究科

幾何学的に佐渡島によってしゃへいされている。そのために 図-2 に示しているような現象が起こると推察できであろう。

3. 佐渡島の波に対する方向分散効果

周知のように風域の中の波はただ振幅および周期（あるいは波長）だけでなく進行方向も異なる無数の波の重ね合わせであって、いわゆる方向スペクトル (directional spectrum) をもった波である。すなわちこれらの成分波は主風向からの偏角に対応した方向のエネルギーを持って進行し、他の成分波と重ね合わさって、実際の海面を形成している。この主方向からの偏角に対応したエネルギーの分布は一般に波のエネルギーの方向分散 (angular spreading) と称されている。しかしながら、波の方向スペクトルまたは方向分散に関する知識はきわめて少なく、まだ定式化した理論はないようである。この問題について最初に研究を行なったのは Arthur¹⁾ のようである。彼によると、波高は主風向に対して、偏角を θ とすると $\cos\theta$ に比例して変動するといっている。すなわち、もし主風向線上の波高を 1 とすると、偏角が 30° および 45° の方向の波高はそれぞれ 0.866 および 0.707 となる。彼はこの考え方をうねりの推算に用いた。Pierson²⁾ はこの仮定を利用して、次式に示すような方向スペクトルを提案した。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} [A(\mu, \theta)]^2 d\theta = \frac{\pi}{2} \frac{C}{\mu^5} e^{-2g^2/\mu^2 v^2} \dots\dots\dots (1)$$

この式をさらに次式のように書き直すと、いっそう明白であろう。すなわち、

$$[A(\mu, \theta)]^2 = \begin{cases} \frac{C e^{-2g^2/\mu^2 v^2}}{\mu^5} (\cos\theta)^2 : & \text{ただし } \mu_1 \leq \mu < \infty, -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0 : & \text{その他の場合} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 μ は各成分波の周波数で、 $\mu = 2\pi/T$; θ は主風向からの偏角; 式 (1) の右辺は Neumann³⁾ の 1 次スペクトルで、 g は重力加速度、 v は風域内の平均風速、 C は定数で、c.g.s. 単位の場合 $C = 3.05 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-5}$ である。一方、Barber⁴⁾ は一線上に並んだいくつかの波高計の記録に基づいて統計的に解析して波の進行方向を求めようとした。また Cox と Munk⁵⁾ は sun glitter の強度を測り、その波の前面および背後の勾配における変動を Barber と同じ統計的手法を用いて解析し、波の進行方向を求めることを可能にした。続いて、Chase⁶⁾ らは海面の立体写真を

解析して、波の方向スペクトルを求めた。その後、Longuet-Higgins⁷⁾ らは、海面に設置した浮体の heave, pitch と roll の記録から方向スペクトルを求めることに成功した。最近 Mobarek⁸⁾ は風洞水槽における実験結果に基づき、方向スペクトルは circular normal distribution function で表わされ、Longuet-Higgins の観測結果とかなり一致するといっている。

新潟海岸における波を論ずるにあたっては、まず佐渡島による進入波の方向分散に与える影響を考えねばならないということは浜田⁹⁾ によって最初に提唱された。しかしながら当時の現地における波浪観測の不備のため、明確にその現象を議論することはできなかった。現在では、すでに佐渡島の入川および新潟海岸でかなり長期間の波浪観測が実施されているので、この現象の解明が若干可能になってきた。しかしながら、上にも述べたように波のエネルギーの方向分散の問題については、かなり多くの研究者の努力にもかかわらず、いまだ定式化した理論は無いようである。この問題の解明は今後の研究を待つことになるが、ここでは一応、すでに実際に P.N.J. 法¹⁰⁾ のうねりの推算に用いられた上述 Pierson の $\cos^2\theta$ の分布則を用いて、佐渡島のしゃへい作用を考察する。

P.N.J. 法では波の方向分散作用をうねりの推算に応用したが、この方向分散効果の考え方は風域内に障害物がある場合に、その障害物の背後の波の状態の推算にも応用できる。今、佐渡島を風域内の一つの障害物と考え、その波に対する方向分散効果を考慮して新潟海岸に到達する波のエネルギーを考察する。

図-3 に示しているように、風の主方向に進行する波を $\overline{AB}$ とし、 $\overline{KL}$ は佐渡波で、 P は新潟西海岸の波浪観測地点であるとする。そうすると、この場合、佐渡のしゃへいの影響で、実際に P 点に到達する波のエネルギーは $-90^\circ \sim -\theta_1$ および $\theta_2 \sim 90^\circ$ の間のものに限る。しかしながら $\theta_3 \sim 90^\circ$ の間のエネルギーは海岸線によってしゃへいされているので、結局、実際に P 点に到達した波のエネルギーは $-90^\circ \sim -\theta_1$ 、および $\theta_2 \sim \theta_3$ の間のものだ

図-3 方向分散係数の求め方

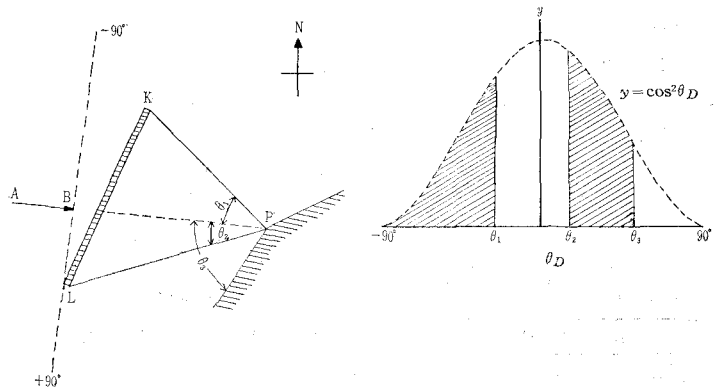
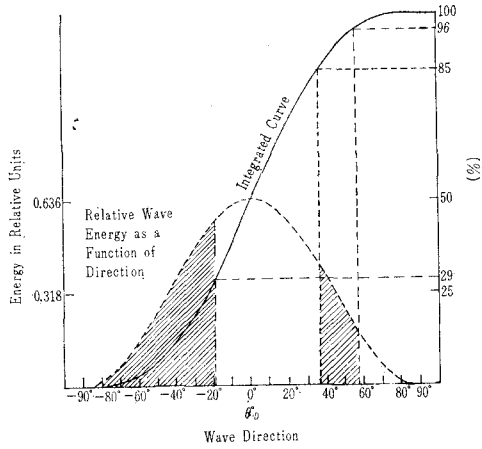


表-1 佐渡島による方向分散効果

主風向 (θ_{abs})		337.5° (NNE)	0° (N)	22.5° (NNW)	45° (NW)	67.5° (WNW)	90° (W)	112.5° (WSW)
西海岸	波向 (θ_{abs})	300°~48°	300°~48°	300°~48°	315°~ 48° 103°~125°	337.5°~ 48° 103° ~125°	0°~ 48° 103°~125°	22.5°~ 48° 103° ~125°
	$[K_A(\theta)]^2$	0.85	0.90	0.75	0.54	0.40	0.32	0.28
東 港	波向 (θ_{abs})	300°~67.5°	300°~67.5°	300°~67.5°	315°~67.5°	337.5°~67.5°	0°~67.5°	22.5°~67.5°
	$[K_A(\theta)]^2$	0.86	0.96	0.91	0.74	0.50	0.26	0.09

図-4 方向分散係数の計算例



けであり、波の進行方向の変動範囲もこの角度内に限られる。具体的な例として主風向が WNW の場合について述べる。これからは特に断わらない限り、主風向が真北 (N) の場合を 0° とし、反時計回りに角度を決め、 θ_{abs} とする。そうすると、WNW の方向の場合は $\theta_{abs} = 67.5^\circ$ である。図-1 の破線で示しているように、新潟西海岸の波浪観測地点から 48°~103° の間は佐渡島によってしゃへいされている。67.5° を $\theta_D = 0^\circ$ (図-3 右側の図) とすると $\theta_D = -90^\circ$ は $\theta_{abs} = 337.5^\circ$ に相当し、 $\theta_D = +90^\circ$ は $\theta_{abs} = 157.5^\circ$ に相当する。また、125°~300°の間では陸地と考えられるので、実際に観測地点に到達する波の進行方向は 337.5°~48° および 103°~125° の間に限られる。図-4 にはこれらの角度に対応して相対的エネルギー量の%を示している。結局、実際に観測地点に進行する波のエネルギーは全エネルギーの $29 + (96 - 85) = 40\%$ である。これをエネルギーの方向分散係数 (angular spreading factor) と呼び、 $[K_A(\theta)]^2$ で表わすこととする。このようにして、各主風向 (すなわち沖波の主方向) に対応した新潟西海岸および新港における方向分散係数を求めると表-1 のようになる。この表からわかるように主風向が N の場合 $[K_A(\theta)]^2$ の値

が最も大きく、W方向に移るにしたがってその値が小さくなる。換言すれば、N方向の場合、佐渡島のしゃへいの影響が最も小さく、W方向に変わるほど、島のしゃへい効果が大きくなっている。この表を 図-2 と対照して比較してみると、傾向的に一致している (ただし定量的に比較するには $\sqrt{[K_A(\theta)]^2}$ の値を求めてからでなければならない。

最後に、佐渡島の入川地点のしゃへい効果について考察を行なう。図-5 は入川波浪観測地点付近の海岸地形を示したもので、図からわかるように観測地点の北側の高千の所に陸地が突出しているし、海上に浅瀬が存在しているので、破線で示した方向より北よりの方向波のはしゃへいされて、観測地点に到達しないと考えられる。上に述べた方法と同じように方向分散効果を求めると表-2 のようになる。

図-5 入川海岸付近の地形

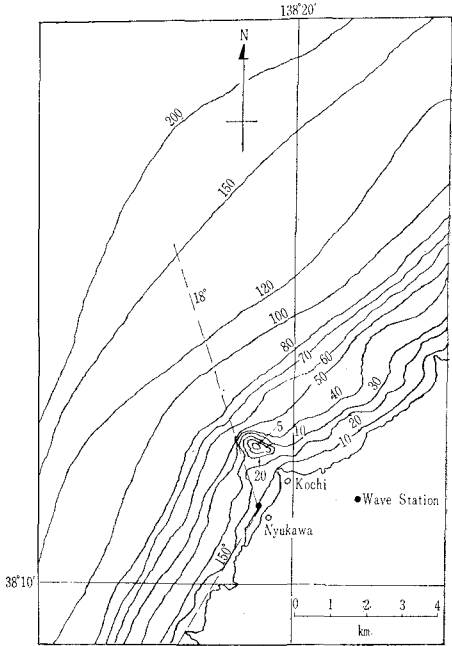


表-2 入川地点における方向分散効果

主風向 (θ_{abs})	0° (N)	22.5° (NNW)	45° (NW)	67.5° (WNW)	90° (W)	112.5° (WSW)	135° (SW)	157° (SWS)	180° (S)
波向 (θ_{abs})	18°~90°	18°~112.5°	18°~135°	18°~150°	18°~150°	22.5°~150°	45°~150°	67.5°~150°	90°~150°
$[K_A(\theta)]^2$	0.31	0.55	0.78	0.95	0.96	0.86	0.86	0.42	0.20

4. 二、三の Wave Pattern に対する考察

上に述べた方向分散効果がはたして実際の現象を説明するかどうかを確かめるために、われわれは過去の観測結果から典型的な wave pattern を3つ選び、波の計算を行ない、実測値と比較してみた。

波の推算にあたっては、P.N.J. 法を用いたが、風の資料ならびに推算方式はつぎのようにして決定した。

(1) 入川に対する風速および吹送距離の方向は、時間ごとの天気図より求めたものと、弾崎の実測値の平均値を用いた。

(2) 佐渡海峡に発生したいわゆる局地的な波は、新潟西海岸に対しては NW~WSW、東港に対しては WNW~WSW の方向の風によるものに限った。佐渡海峡の代表風向は弾崎、新潟西海岸および東港で観測された風向の平均的方向を取った。また両地点に襲来する波の推算に用いる風速は表-3のような方法によって求めた。

(3) もし入川の吹送距離の方向が N~NW~WSW で佐渡海峡の風向が新潟西海岸に対して NW~WSW であり、また東港に対して WNW~WSW であるならば、外海の波は佐渡島の方向分散効果を受け、そうして佐渡海峡の局地的風波と合成されると考える。

(4) もし入川の吹送距離の方向が N または NNW (あるいは N, NNW または NW) で佐渡海峡の風向も

表-3 佐渡海峡の風速の求め方

風 向	推 算 地 点	風 速 の 求 め 方
NW	西 海 岸	$(V_H + V_W + V_E)/3$
WNW	西 海 岸	$(V_W + V_E)/2$
	東 港	$(V_H + V_E)/2$
W	西 海 岸	$(V_W + V_E)/2$
	東 港	$(V_W + V_E)/2$
WSW	西 海 岸	$(V_W + V_E)/2$
	東 港	$(V_W + V_E)/2$

注: V_H : 弾崎の風速実測値
 V_W : 新潟西海岸の風速実測値
 V_E : 新潟東港の風速実測値

N または NNW (あるいは N, NNW または NW) ならば新潟西海岸 (あるいは東港) の波を推算する風速は $(V_S + V_N + V_W + V_E)/4$ とした。ただし、 V_S は天気図から求めた海上平均風速である。この場合は、佐渡島の方向分散効果があるのみで合成波はない。

なお、合成波を求める場合には入川地点の深海波を外海の波として、これが佐渡島の方向分散効果を受けて、さらに $R_0/(2.81 \tilde{T}_1)$ の時間を経て推算地点に到達するとする。ここに R_0 は外海推算地点までの距離 (km) で、 $2.81 \tilde{T}_1$ は波の群速度 (km/hr) である。また合成波の波高および周期はつぎの式によって求めた。

$$H_{1/3} = 2.832 \sqrt{E_1 + E_2} \quad (\text{m}) \cdots \cdots (3)$$

$$\tilde{T} = \sqrt{E_1 \tilde{T}_1^2 + E_2 \tilde{T}_2^2} / \sqrt{E_1 + E_2} \quad (\text{sec}) \cdots \cdots (4)$$

図-6(a) 昭和38年9月22~24日の風と波

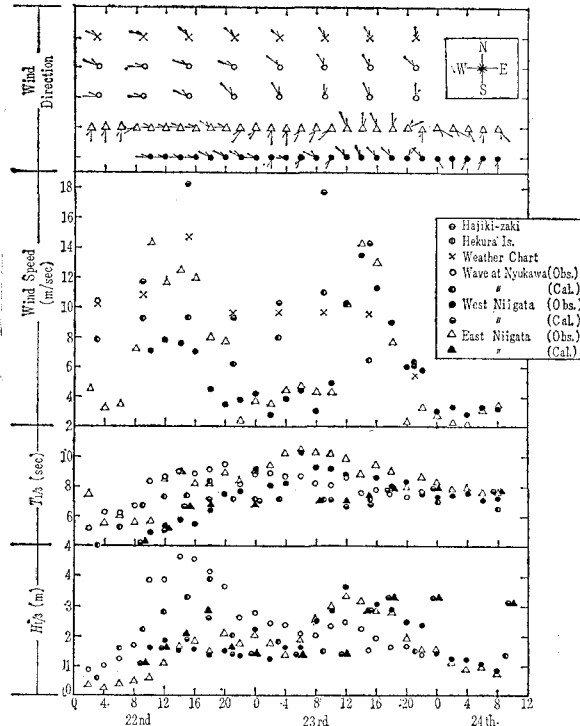


図-6(b) 昭和38年10月11~13日の風と波

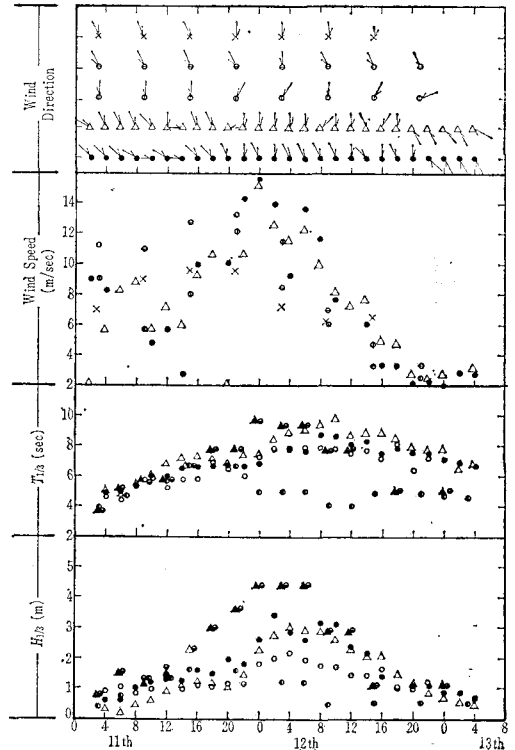
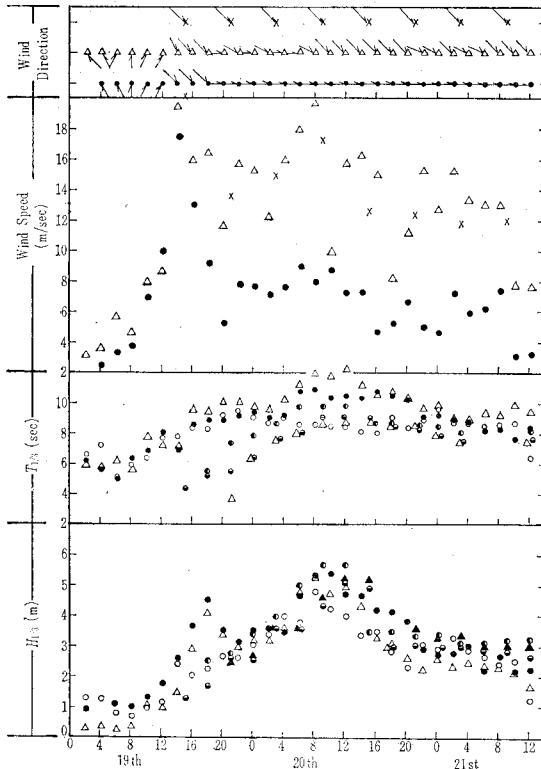


図-6(c) 昭和39年1月19~21日の風と波



$$T_{1/3} = 1.42 \tilde{T}^{1/3} \quad (\text{sec}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 E_1 , $\tilde{T}_1$ および E_2 , $\tilde{T}_2$ はおのおのの外海よりの波および佐渡海峡よりの波のエネルギーと平均周期である。実際には、このように、エネルギー量を直接加えて合成波の波高を求めることには疑問があると Walden¹²⁾ が指摘し、両成分波のエネルギー量を加える前にまず係数 0.6~1.0 を掛けなければならないと言っているが、この係数値はまだはっきりわからないので、ここでは1とした。

以上に述べた方法によって求めたエネルギー方向分散後の各地点の深海波の波高および周期と実測値との比較、ならびにその時刻の風の条件を図-6(a), (b) および (c) に示す。全般的な様子を眺めてみると、図-6(b) と 図-6(c) の場合、発達から減衰までの波高の変化は推算値の方も実測値と大体同じような傾向を示しているが、図-6(b) の新潟西海岸および東港の波高推算値は実測値よりはるかに大きい値を示している一方、佐渡入川の推算値は実測値より小さくなっている。図-6(c) の推算値は実測値に近いが、実測値の方では新潟西海岸と東港の波高が入川よりも大きい、推算値の方では逆な様子を示している。図-6(a) の場合、推算による波高の変化は実測値とかなり異なった型を示している。すなわち昭和38年9月23日の12時頃にはもう一つの peak が現われているが、推算値の方ではこのような様子

していない。

以上に述べたことから、このような取り扱い方では佐渡島による波の方向分散効果を明確に立証することができないようである。その主な理由として考えられるのは、

- 1) 波の推算に用いる風の条件の取り扱い方の問題；
- 2) 波浪推算法自体の精度；
- 3) 外海から進入した波と佐渡海峡における局地的風波の合成の問題；
- 4) 水深の変化による波高の変化、たとえば屈折および海底摩擦による変化の考慮の必要性；
- 5) 有義波として取扱ったため；

などである。したがって、より明確に佐渡の波に対する方向分散効果を検討するために、われわれは最も問題のある昭和38年9月22日~24日の波について、観測記録をスペクトル解析し、各周波数、各方向に対応する屈折効果、および方向分散効果を考慮した。すなわち入川で観測された波のスペクトルを深海の波のスペクトルに逆算し、その結果を用いて、新潟西海岸における波のスペクトルを計算して、実際に観測された波のスペクトルと比較して見た。以下においてこの取り扱い方について述べる。

5. 波浪スペクトルの方向分散効果

(1) 波のスペクトル解析

波のスペクトルの解析にあたっては赤池の方法¹³⁾にしたがった。入川および新潟西海岸の水深 -9.5 m および -12 m に設置した水圧式波高計による10分間の連続した水圧波形をそれぞれ $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$ および 0.71 sec の間隔で読み取り、読取值総数 N は 1200 および 850 で、 $\text{lag } m = 60$ および 40 まで自己相関関数値を計算して (自由度 $f = 40$) スペクトルを求めた。さらに次式を用いて水面波形のスペクトルに換算した。なお、これらの計算には東京大学データ処理センターの OKITAC 5090 を利用した。

$$\eta = n \cdot \eta_p \frac{\cosh 2\pi h/L}{\cosh 2\pi (h-d)/L} \quad \dots\dots\dots (6)$$

η : 水面波形, n : 波高補正係数, $\eta_p = 4p/\rho g$,

$4p$: 水中圧力変動, ρ : 海水の密度, g : 重力加速度, h : 水深, L : 波長, d : 波高計受圧面の深さ

式(6)を用いるにあたって最も問題になるのは波高補正係数 n である。従来 n は定数とされ、入川および新潟西海岸の現地における有義波の計算は $n = 1.3$ としている。しかしながら n 値は実際には水深および波長(または周波数)の関数であることは本間・堀川・小森^{14), 15), 16)} によって指摘されている。その結果にしたがい、入川および新潟西海岸の波高計の設置水深に応じて、それぞれ式(7), (8)のような実験式を用いた。

$$\text{佐渡入川} \quad n=1.4 \exp\{-182.0f^5\} \dots(7)$$

$$\text{新潟西海岸} \quad n=1.4 \exp\{-328.0f^5\} \dots\dots(8)$$

このようにして一応、波のスペクトルが求められるが水圧フィルターの作用のため、各種の雑音の混入により、スペクトルの高周波側で異様な現象が起こる。このような雑音を取り除くには、水圧波形の測定と同時に実際の水面波形を測定し、周波数応答関数を求めるのが望ましいが、当観測地点では水面波形の測定が行われていないので、このような作業は不可能である。したがって、ここでは一応、スペクトルの異様な部分（高周波側 $f(\text{周波数}) > 0.3(\text{sec}^{-1})$ の部分）を取り除き、残った部分の全エネルギーを求め、現地で計算された有義波高と比較しながらその妥当性を検討した。図-7は上のような考え方にしたがって求めた全エネルギー E と現地の有義波高 $H_{1/3}$ との関係を示したものである。両者の関係は次式で示される。

図-7 波の全エネルギーと有義波高との関係

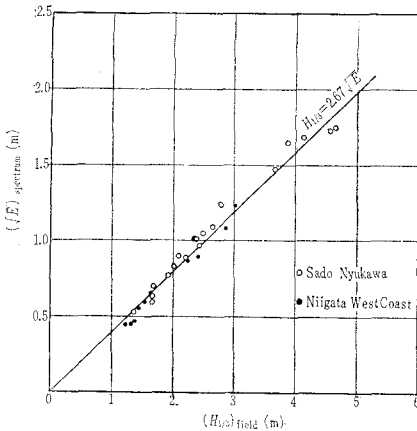
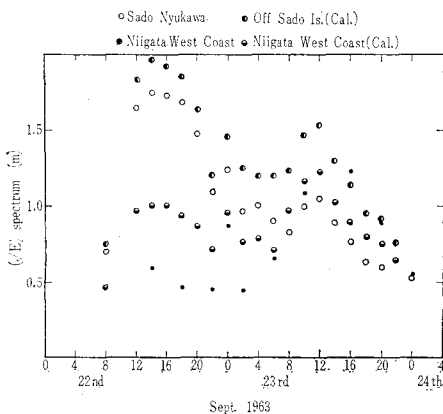


図-8 $\sqrt{E}$ の時間的変化



$$H_{1/3} = 2.67 \sqrt{E} \dots\dots\dots(9)$$

この値は Longuet-Higgins¹⁷⁾ の理論式

$$H_{1/3} = 2.832 \sqrt{E} \dots\dots\dots(10)$$

にかなり近い。さらに各時刻毎の波浪記録から求められ

た $\sqrt{E}$ の時間的变化を示すと図-8 のようである。図-8 の $\sqrt{E}$ と図-6(a) の実測有義波高 $H_{1/3}$ を時間的に対応させながら比較してみるとわかるように、その変化の様子は一致している。以上の検討から、水圧式波高計では $f=0.3(\text{sec}^{-1})$ 以上の高周波数の波に対しては記録できないと考えてよいであろう。このような取り扱い方によって求められた佐渡入川および新潟西海岸の波浪スペクトルは図-9 のようである。なお、図中に示している番号は波の観測地点と時刻を意味する。たとえば、S 2208 は佐渡入川の 22 日 8 時の波浪スペクトルで、N 2214 は新潟西海岸の 22 日 14 時の波浪スペクトルである。

(2) 波浪スペクトルの方向分散効果

この節では(1)で求められた佐渡入川における波浪スペクトルを屈折および方向分散効果を考慮して、深海における波浪スペクトルに逆算し、その結果を用いて、新潟西海岸における波を計算して実測値と比較する。計算方法は以下に述べるようである。

i) 波浪スペクトルを等周波数間隔に分割し、各間隔内のエネルギー ΔE を求める。この ΔE の両側の周波数の平均値をこの ΔE の代表周波数とする。本計算では周波数間隔が $0.0333(\text{sec}^{-1})$ で、代表周波数は $0.0666, 0.1000, 0.1333, \dots\dots\dots 0.2666(\text{sec}^{-1})$ である。

ii) 各代表周波数に対応した浅水度係数 $K_s(f)$ を計算する。

iii) 各代表周期を用い、等角度間隔の方向の屈折係数 $K_r(\theta, f)$ を求める。本計算では 22.5° の間隔を取った。すなわち、佐渡入川に対しては NNW($\theta_{abs}=22.5^\circ$), NW($\theta_{abs}=45^\circ$), $\dots\dots\dots$ SW(135°) 方向、新潟西海岸に対しては NNE($\theta_{abs}=337.5^\circ$), N($\theta_{abs}=0^\circ$), $\dots\dots\dots$ SW(135°) 方向の屈折係数を求めた。

iv) 沖波の主方向(主風向)からの偏角をほぼ等間隔に分割し、それぞれの角度の方向分散係数 $[K_A(\theta)]^2$ を 3. に述べた方法で求める。本計算では主風向が、WNW(22 日 2 時~22 時), NW(23 日 0 時~6 時), および NNW(23 日 8 時~22 時) である。

v) 次式を用いて深海または浅海における波のエネルギーを求める。

$$\Delta E_h = [K_s(f)]^2 \cdot [K_r(f, \theta)]^2 \cdot [K_A(\theta)]^2 \cdot \Delta E_0 \dots\dots\dots(11)$$

$$E_h = \sum \Delta E_h, \quad E_0 = \sum \Delta E_0 \dots\dots\dots(12)$$

ΔE_h : 水深 h のところにおけるある周波数帯のエネルギー, ΔE_0 : 深海における同じ周波数帯のエネルギー

以上に述べた方法にしたがって、水深 -9.5m における佐渡入川地点の波浪エネルギーから、佐渡沖の波浪エネルギーに換算し、さらにその値を用いて、 -12m における新潟西海岸の波浪エネルギーを計算した。その結

図-9

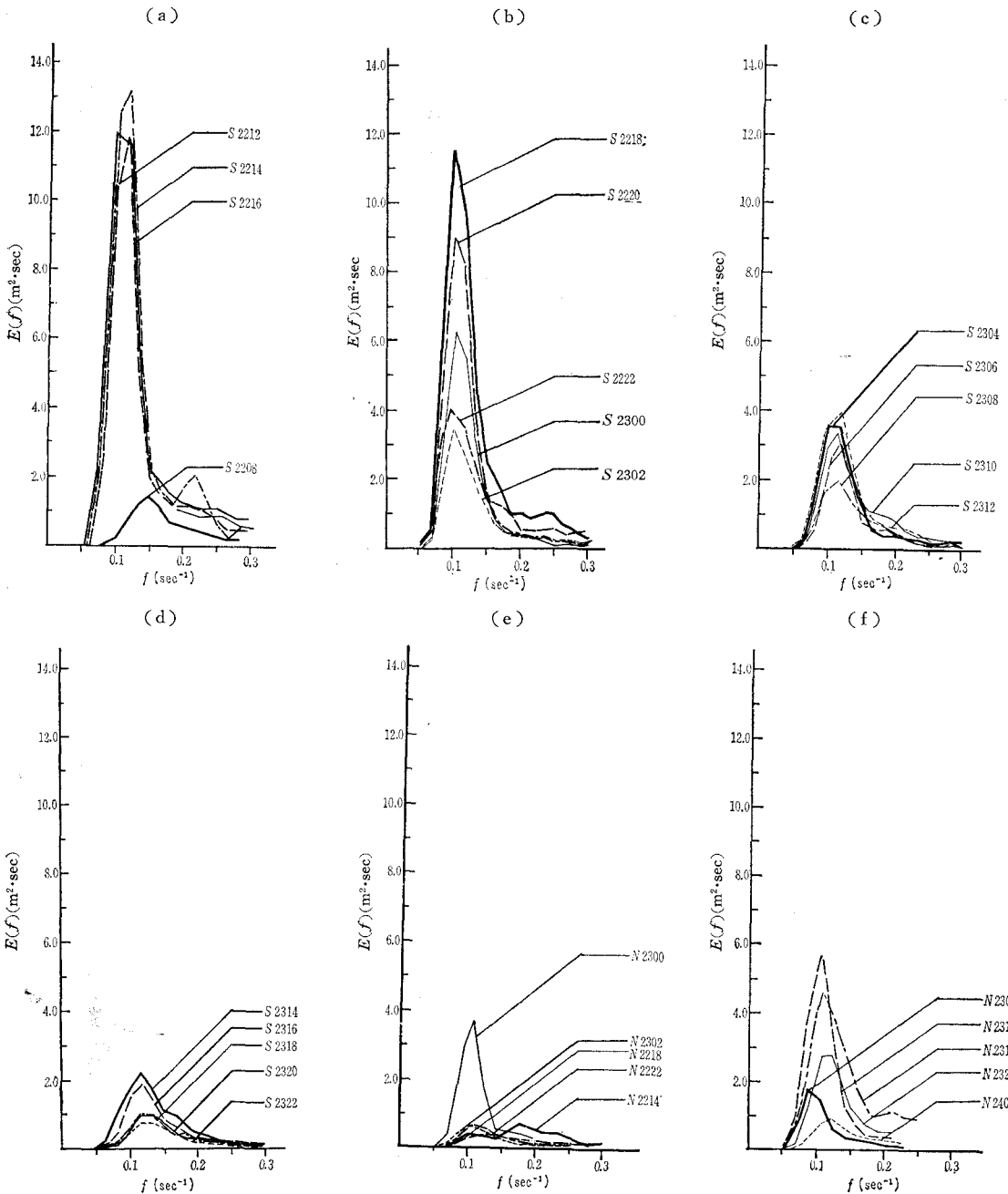
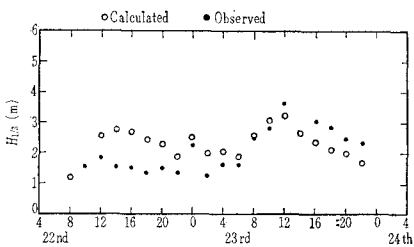


図-10 新潟西海岸における実測波高と計算波高の比較



果も図-8 に示してある。さらに式 (9) を用いて $H_{1/3}$ を求めると、図-10 のようになる。この図からわかるように、実際に新潟西海岸で観測された波高と、佐渡入川で観測された波高を、方向分散および屈折の効果を考慮にいれて求めた当海岸の波高は、図-6 (a) の結果とくらべて相対的に傾向がより一致するようになった。すなわち、図-6 (a) に現われなかった 23 日 12 時頃の peak は図-9 には明確に示されている。しかしながら 22 日 8 時～23 日 6 時の計算値は実測値にくらべてかなり大き

くなっており、一方23日10時以後は実測値の方がやや大きい。この原因は $\cos^2\theta$ 分布則の妥当性に起因する問題になる。なお、本論文の計算では波の伝達時間を考慮していないが、その必要性はあるかどうか、もし必要ならばいかにして取り扱うべきかは今後の研究の課題である。

6. 結 言

以上佐渡島のしゃへい効果を波の方向分散の観点から検討し、一応定性的に実際の現象を説明することができると思われる。実際の問題として、このように島が海岸の前面に存在している場合に、海岸の波を推算するには、まず波の方向分散や屈折の作用の観点から島のしゃへい効果を検討してから、島の存在を無視すべきか、あるいは海岸から島までの対岸距離を対象にすればよいか、あるいは外海の波と局地波の合成波を考慮すべきかを決めてから波の推算を行なった方が、より実際に近い結果が得られるであろう。

最後に、本研究を進めるにあたって、新潟県土木部信濃川工事事務所の御好意により現地観測の資料を利用して頂いた。また本研究は昭和40年度文部省科学研究費(特定研究(2)「海岸災害の総合的研究」)による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Arthur, R.S.: Variability in direction of wave travel, *Ocean Surface Waves*, Ann. N.Y. Acad. Sci. Vol. 51, Art 3, 1949, pp. 511~522.
- 2) Pierson, W.J., Jr.: Wind generated gravity waves, *Advance in Geophysics*, Vol. II, 1955, pp. 93~178.
- 3) Neumann, G.: On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea, *Tech. Memo. No. 43*, Beach Erosion Board, 1953.
- 4) Barber, N.F.: Finding the direction of travel of sea waves, *Nature*, Vol. 174, 1954, pp. 1948~1950.
- 5) Cox, C. and Munk, W.: Statistics of sea surface

- derived from sun glitter, *Jour. of Marine Res.*, Vol. 13, No. 2, 1954, pp. 198~227.
- 6) Chase, J., et al.: The directional spectrum of a wind generated sea as determined from the data obtained by the Stereo Wave Observation Project, Dept. of Meteorology and Oceanography, New York Univ., New York, 1957.
- 7) Longuet-Higgins, Cartwright, D.E. and Smith, N.D.: Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, *Conf. on Ocean Wave Spectra*, Easton, Md. 1961, pp. 111~136.
- 8) Mobarek, I. El-Sayed: Directional spectrum of laboratory wind waves, *Jour. of the Waterways and Harbors Division*, Proc. ASCE, Vol. 91, No. WW 3, 1965, pp. 91~116.
- 9) 浜田徳一: 新潟海岸欠損の諸問題について、災害とその対策、土木学会、昭和31年。
- 10) Pierson, W.J., Jr, Neumann, G. and James, R.W.: Practical method for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, U.S. Navy, H.O. Pub. No. 603, 1955.
- 11) Sibul, O.: Laboratory study of the generation of wind waves in shallow water, *Tech. Memo. No. 72*, Beach Erosion Board, 1955.
- 12) Walden, H.: An attempt of hindcasting the high waves observed by the OWS "Weather Report" at position "J" on 17, December 1959. *Deutsche Hydro. Zeit. Jahrgang 16*, Heft 1, 1963.
- 13) 赤池弘次: スペクトル推定の統計理論・スペクトル推定の実際、統計数理研究所、1964.
- 14) 本間仁・堀川清司・小森修蔵: 水圧変動波形と水面波形の相関性、第12回海岸工学講演会講演集、1965, pp 76~83.
- 15) 本間仁・堀川清司・小森修蔵: 水圧式波浪計に関する一考察(3)、第21回土木学会年次学術講演会、1966.
- 16) Hom-ma, M., Horikawa, K. and Komori, S.: Response characteristics of underwater wave gauge, *Proc. of the 10th Conference on Coastal Engineering* (in print).
- 17) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, *Jour. of Marine Research*, Vol. II, No. 3, 1952, pp. 245~266.