

秋田海岸における波浪推算の一例

岩垣 雄一*・柿沼 忠男**

1. 緒 言

近年、不規則波のエネルギー スペクトルに関して、より詳細な研究がなされるようになり、波浪予知法の一つである PNJ 法が注目されてきている。こうした波浪スペクトル法やその他、有義波法による推定結果は、実際の波浪資料とよく一致する場合もあるが^{1),2)}、多くの場合あまりよく合わない³⁾⁻⁵⁾。PNJ 法においては、基礎となる Neumann スペクトルの妥当性に関して、まだ何らかのあいまいさがふくまれているためでもあるが⁶⁾、少なくともこうした実測値との差異をもたらす原因として、風の速度および風域を決定する方法の不確定さと、それらが時間的、場所的に変化するということがあげられる。

この研究は、有義波法および波浪スペクトル法を日本海に適用して、秋田海岸における波浪の推定を行ない、昭和36年12月上旬に京都大学防災研究所が波浪観測を実施した際¹⁰⁾の石油資源開発 KK の波の観測資料と比較検討して、天気図からどの程度の精度で波が予知できるかを調べたものである。

2. 資料の整理

(1) 海上風の推定

海上においては、風の資料がないのが普通であるから、天気図によって風速および風向きを推定しなければならない。すなわち、天気図に示された気圧場に対応する傾度風の場を算定し、それに海面の摩擦効果を考慮して海面上の高さ 10 m における海上風を推定するわけである。傾度風と海上風との関係については、まだ理論的には解決はなされておらず研究の大部分は風速 10m/sec 程度またはそれ以下の実測にもとづくものである¹¹⁾。

傾度風速 V_{gr} は次式によって与えられる。

$$V_{gr} = \pm r \left(\sqrt{\omega^2 \sin^2 \phi \pm \frac{G}{\rho r}} - \omega \sin \phi \right) \quad (1)$$

ここで、 r : 等圧線の曲率半径、 ω : 地球自転の角速度、 ϕ : 緯度、 ρ : 空気密度、 G : 気圧傾度である。上式中、+は低気圧帯への風、-は高気圧帯からの風である。こうした傾度風から海上風を推定するわけであるが、著者らが推定しようとする領域は、昭和36年12月上旬の日本海側のもので、北緯36~44°にあるので、北緯40°対

する海上風と傾度風との間の経験的な関係¹²⁾を適用した。すなわち、海上風の傾度風に対する風向偏角は 17°であり、風速比は 0.67 であるとしたわけである。

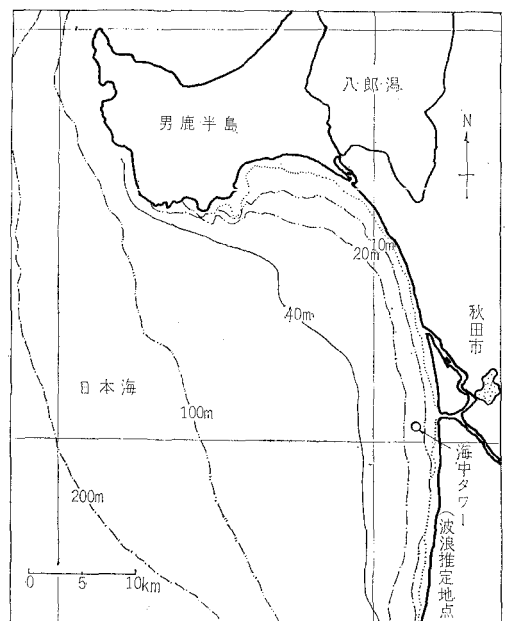
使用した天気図は中型天気図(3時, 15時)、日刊天気図(6時)および極東天気図(II)(9時, 12時, 21時)の昭和36年11月29日3時より12月4日21時までのものである。推定しようとする領域における気圧はほぼ(1020±10)mbであり、気温はほぼ(0°±10°)Cであるが、 ρ としては便宜上、25°Cで950 mbにおける値、 1.3×10^{-3} gr/cm³を採用した。なお、傾度風の算定には、天気図より式(1)中の G および r を求め、 $\phi = 40^\circ$ として Humphrey の数表¹³⁾を使用した。

(2) 波浪実測値

昭和36年12月上旬、著者らは秋田海岸(北緯40°, 東経140°)において、海底摩擦による波高減衰の実態を調査する目的で波浪観測を実施した¹⁰⁾が、この海岸の水深約15 mのところ、石油資源開発 KK の石油採掘用海中タワーがあり(図-1)、それにとりつけてある水圧式波高計による波浪記録(水圧式波高計による記録を16 m 撮影機で波高の校正をしたもの)を利用することにする。

この資料における波は、周期が6~9 sec であって、

図-1 秋田海岸付近図



* 正員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正員 理修 京都大学助手 防災研究所

水深は15 m のところのものであるから浅海波であるが、その周期のままで伝播してきたとすれば、ほぼ 6 km はなれた、水深が約 40 m のところで、沖波が浅海波に変わったことになる。すなわち、水深 40 m 程度のところから浅海波として海中タワーまで進行してきたわけであるが、その間の水深は比較的大きいので、屈折や水深の変化による効果および海底摩擦による波高減衰効果¹⁴⁾はきわめて小さく、その量はたかだか5%と見積られる。このことから、この資料は沖波の資料とみなしてよい。

3. 推算方法

波浪スペクトル法は、不規則かつ複雑な自然の波の状態を、物理的な意味で忠実にとらえようとしているわけであるが、風波の発達については、有義波法も数多くの資料(気象条件の詳細な資料をとまなっているのはわずかでであるが)にもとづいて確立されつつある。しかも、風速および風向きが一樣でないような移動性風域に対しても便宜的ではあるが、二、三の予知法が提案されている^{15), 16)}。一方、うねりの深海における減衰に関しては、有義波法はまだわずかの資料しかないために、今後修正されねばならないという現状である。

ここでは、有義波法による風波の発達とうねりの深海における減衰の推算法として、それぞれ、岩垣および柿沼による修正 Wilson 法¹⁶⁾と Bretschneider 法を用い、さらに波浪スペクトル法は PN J 法を適用する。

(1) 有義波法

有義波法においては、種々の地点から波浪推定地点をむすぶ線にそって、詳細な距離-時間風域図を知ることが必要であるが、都合上つぎのように仮定した。すなわち、風速および風向きは 2. でのべたものを用い、Wilson にしたがって、考えている波の伝播方向への風速の分値が、その方向に伝播する波の発達に寄与する。また、風域は風速 4 m/sec 以上のものを対象とし、2 m/sec 間隔の等風速線によって描くものとする。

(a) Wilson 法¹⁵⁾ Wilson は定常状態に関して、つぎのような関係式を沖波推定曲線として与えている。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.26 \tanh \left[\frac{1}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{c}{U} = 1.40 \tanh \left[\frac{4.36}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 F : 吹送距離、 g : 重力加速度、 U : 風速、 H : 有義波の波高、 c : 波速である。これらの式によって示される沖波推算曲線は SMB 曲線¹⁷⁾と少し異なっているが、定常状態においてどちらがより正確であるかを判定することは困難である。

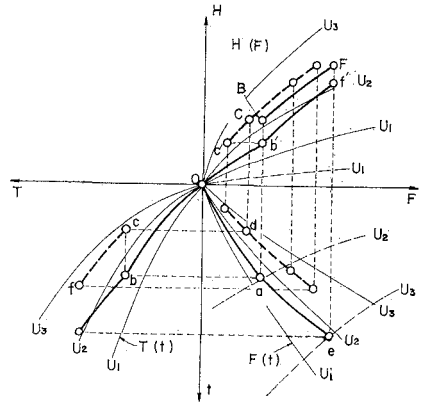
また、次式が成立する。

$$\frac{dF}{dt} = c_G = \frac{c}{2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 t : 吹送時間、 c_G : 沖波の群速度である。Wilson

は式(2)、(3)、および(4)から風速 U をパラメータとして、波高、時間、距離、周期の関係を示す $H-t-F-T$ 図を作り、これを用いて風速と風向きが距離や時間とともに変わる移動性風域において発達する沖波を関式的に推算する方法を提案している。図-2 はその方法を

図-2 Wilson 法



示したもので、いま原点 O から出発する特性曲線(この場合、距離-時間曲線を特性曲線とよぶことにする)を考えよう。風速 U_1 上にある原点 O から出発する境界の影響(攪乱)は風速 U_1 と U_2 の平均風速 $(U_1+U_2)/2$ ($\equiv U_i$) に対する特性曲線 $F(t)$ にそって進み、風速 U_2 の等風速線との交点 a に達する。同一時間間隔において有義波の周期は U_i に対する周期-時間曲線 $T(t)$ にそって線分 Ob にしたがって増大する。 a に到達したか乱くは、さらに風速が U_2 から U_3 に変わる領域を進行する。 a から e までの特性曲線は風速 U_2 と U_3 の平均風速 $(U_2+U_3)/2$ ($\equiv U_j$) に対応するものであるが、線分 Oa の a におけるこう配(切線のこう配)と同一こう配、すなわち同一の群速度で a から出発しなければならないとしている。この風速 U_i から U_j への遷移点 a において群速度を等しくするという目的のために、つぎの操作をする。まず一定の周期を示す垂直線 bc を引き、 U_j に対する $T(t)$ との交点を c とする。さらに水平線 cd を引き U_j に対する $F(t)$ との交点を d とする。 d を通って引いた U_j に対する特性曲線 $F(t)$ は a における曲線 Oa のこう配と d において同一のこう配をもつはずである。深海においては、群速度は周期に比例するからである。つぎに d から出発する特性曲線 $F(t)$ に平行に ae を描き、 Oa に ae を接続させる。このような方法によって、風速 U_3 の等風速線上に点 e をきめる。

同様な理由から、 U_j に対する $T(t)$ の c からの曲線を下方へ平行移動し、 b において Ob に接続させ、さらに特性曲線上の e に対応する点 f の位置をきめる。有義波の周期に関する最終的な曲線は Obf である。

対応する有義波の波高の増大を示す関式解法もまた上

述と同じように取り扱う。風速 U_1 から U_2 までの領域における曲線 Ob' は a を通る垂直線との交点 b' までが U_1 に対する波高一距離曲線 $H(F)$ となる。風速 U_2 から U_3 までのつぎの領域における波高の増大は b' におけ波高と同一の波高から出発する U_3 に対する $H(F)$ と接続しなければならないとして、 c' からの U_3 に対する曲線 $H(F)$ を水平方向に移動し、 b' 点で Ob' に接続する $Ob'f'$ を得る。 f' は特性曲線上の e に対応する点である。有義波の波高に関する最終的な曲線は $Ob'f'$ である。

以上が Wilson の方法であって、風速が不連続的に変化する遷移点 a において群速度を等しくするということから、周期一時間曲線上で b から c を導き、そして $F(t)$ 上に d を求めているが、このとき波高は d を通る垂直線 dC と U_3 に対する $H(F)$ との交点 C のもつ値を示すはずである。したがって、 U_3 に対する C からの曲線 $H(F)$ を平行に移動させ、点 C を点 B (a を通る垂直線と C を通る水平線との交点) までもってくる。点 e に対応する点が F であるから、 BF が ae に対応する波高の増大を示すことになるはずである。したがって、周期と波高をべつべつに求めた Wilson の方法は、用いようとした基礎曲線のもとになっている波形こう配と波令との相関関係をみずから放棄したことになる。

結局、異なった風速 U_1, U_3 による風波の発達状態が同等であるという意味を、Wilson が主張するようにそれぞれの風波の群速度が等しいということにすれば、波高の最終的な曲線は Wilson の方法による $Ob'f'$ でなく、 Ob', BF となり、点 b' で不連続となるのが正しいということになる。このことから Wilson の方法はその考え方と図式的な取り扱い方に統一がない。

(b) 著者らによる修正 Wilson 法¹⁰⁾ 一般に、波の伝播にもなって、その方向に波のエネルギーが輸送される。すなわち、エネルギーが輸送される速度は群速度 c_g に等しいから、 E を波のもつ単位面積あたりの平均エネルギーとすれば、エネルギーが単位幅の垂直面を単位時間に横切って輸送される量は $c_g E$ に等しい。したがって、有義波の発達は $c_g E$ の増大によって規制されると考えてよい。すなわち、異なった風速によっておこされる風波の発達状態が同等であるということは、それぞれの風波のもつ $c_g E$ が等しい状態であると考えてよいであろう。こうした立場から、著者らは風速と風向が距離や時間とともに変わる移動性風域において生ずる沖波を推算しようと試みたわけである。沖波に対しては、 $c_g = c/2 = (g/2\pi)T$ であり、また $E = (1/8)\rho g H^2$ であるから、 $c_g E$ は $H^2 T$ に比例する。したがって、Wilson が風速変化時の波浪特性を接続する条件として c_g すなわち T を等しくするかわりに、著者らの方法では $c_g E$ すなわち $H^2 T$ を等しくすることになる。

図-3 $H^2T-H-t-F-T$ 図

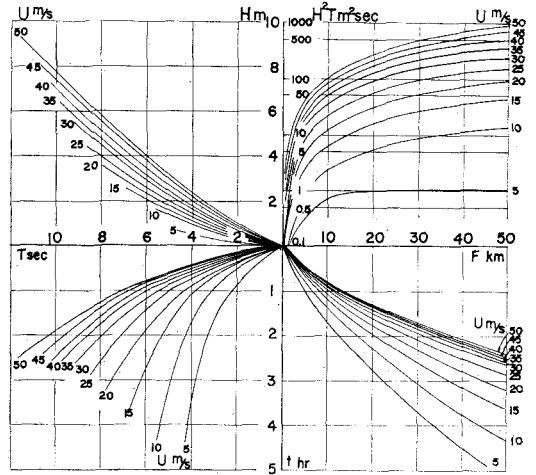


図-4 著者らによる修正 Wilson 法

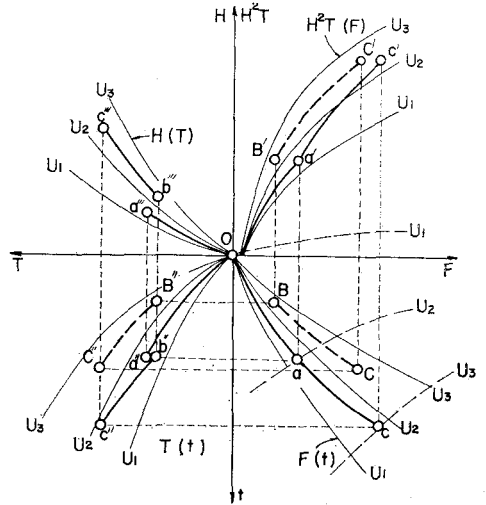


図-3 は定常状態に関して Wilson が見出した関係式 (2) と式 (3)、および式 (4) から風速 U をパラメーターとして描いた $H^2T-H-t-F-T$ 図である。図-4 はこの図を用い移動性風域において発達する沖波を図式的に推算しようとする著者らの方法を示したものである。いま、Wilson の方法で説明したように、原点 O から特性曲線が出発するものとする。風速 U_1 の等風速線上にある原点 O から出発したかく乱は風速 U_1 から U_2 までの領域を、平均風速 $(U_1+U_2)/2 (\equiv U_i)$ に対する特性曲線 $F(t)$ にそって進み、風速 U_2 上の点 a に達する。同一時間間隔において、 H^2T, T 、および H はそれぞれ U_i に対する曲線 $H^2T(F), T(t)$ 、および $H(T)$ にそって $a', a'',$ および a''' に達する。 a に到達したかく乱は風速 U_2 から U_3 までの領域へ進行し、平均風速 $(U_2+U_3)/2 (\equiv U_j)$ に対応する線分 ac を作る。すなわち、 U_i から U_j への遷移点 a において H^2T が等しいという条件を満たすために、 $H^2T \sim F$ 平面において水平線 $a'B'$ を引き、

U_j に対する $H^2T(F)$ との交点を B' とし、さらに垂直線 $B'B$ を引くことにより、点 B を U_j に対する $F(t)$ 上に求める必要がある。この $F(t)$ は曲線 Oa が a においても H^2T と同一の H^2T を B においてももつことになる。したがって、 a から BC に平行に ac を描き、風速 U_3 の等風速線との交点を c とすれば、 U_j に対する特性曲線が求められる。この場合点 a では曲線が折れる。すなわち Oa と ac の両曲線の a におけるこう配は等しくない。

対応する有義波の周期の増大に関しては、水平線 BB'' と U_j に対する曲線 $T(t)$ との交点 B'' を求め、 B'' から始まる U_j に対する曲線 $T'(t)$ を下方へ平行に移動させ、 $b''c''$ を描くことにより点 b'' と点 c'' の位置が決められる。 b'' は水平線 ab'' と垂直線 $B''b''$ との交点であり、 c'' は水平線 cc'' 上にある。したがって、有義波の周期に関する最終的な曲線は Oa'' 、 $b''c''$ である。また、 a'' まで増大した波高は風速 U_2 から U_3 までの領域においては、 U_j に対する $H(T)$ の線 $b'''c'''$ にそって増大する。点 b''' 、 c''' はそれぞれ垂直線 $b''b'''$ および $c''c'''$ と U_j に対する $H(T)$ との交点である。したがって、有義波の波高に関する最終的な曲線は Oa''' 、 $b'''c'''$ である。

以上のことから、著者らによる修正 Wilson 法によって、移動性風域における沖波の発達を推算しようとするわけであるが、 H^2T は F が大きくなると一定値になり、風速が大きいほどその値は大きい。したがって、風速が U_1 から $U_2 (U_1 > U_2)$ に変わるような風域下を進行する波を考えれば、解析例によっては、風速 U_1 下で発達し風速 U_2 への遷移点に到達した波のもっている $(H^2T)_1$ の値が、風速 U_2 によって発達しうる波のもつ最大の H^2T の値より大きい場合が生ずる。こうした場合には、波はこの遷移点からは発達せず、減衰し始めることになるであろう。著者らは、このような減衰域においては、Bretschneider のうねりの深海におけ減衰推定曲線を用いて解析した。ただし、この場合、遷移点での周期 T_F と減衰域終端での周期 T_D から便宜的に求まる周期 $(T_F + T_D)/2$ に対応する群速度でかく乱は伝播するものとして、波浪推定地点に到達する時刻を推定した。

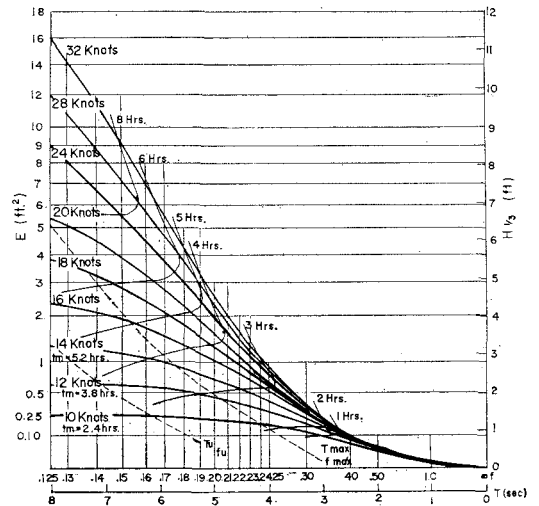
(2) PNJ法¹⁸⁾

PNJ法は波浪観測の結果によってえた Neumann スペクトルを用い、さらに Longuet-Higgins が理論的に見出した波高分布にもとづいて、波高および周期を推定しようとするものである。すなわち、風波の発達に対しては、吹送距離あるいは吹送時間と風速とをパラメーターとした Neumann スペクトルにもとづく co-cumulative power spectra によって E (これは波浪記録上、等時間間隔にとった数多くの値の分散 (variance) の2倍として定義される量で、単位面積あたりの波の全エ

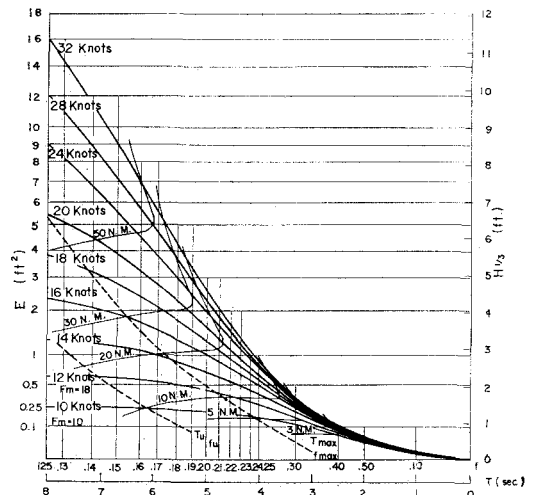
ネルギーに比例し、また波高の二乗に比例するものである) を決定し、波浪特性を見出だそうとするわけであり、うねりの減衰に対しては、こうして求まった E が、種々の周波数に対応する群速度が異なるために生ずる速度分散 (dispersion) と発達域における波が種々の方向へ伝播するため生ずる方向分散 (angular spreading) とによってどのように減少するかを明らかにし、それから波浪特性を見出そうとするわけである。

(a) 風波の推算 図-5 (a) および (b) は C.C.S. 曲線の一例を示したもので、それぞれ吹送時間および吹

図-5 C.C.S. 曲線
(a) 吹送時間グラフ



(b) 吹送距離グラフ



送距離を与えることによって、風波の特性がわかる。十分には発達していない風波に対しては、まず、吹送時間 (あるいは吹送距離) 線と C.C.S. 曲線との交点の E の値および周波数 f_i (周期 T_i) を読みとる。この E の値が求めるもので、有義波高 $H_{1/3}$ は $2.83\sqrt{E}$ ft として求

まる。つぎに、こうした E の値の 3% を示す直線と C.C.S. 曲線との交点に対応する周期 T_e を求める。また、周波数 f_i から、 $f_u = 0.85 f_i$ なる周波数 f_u (周期 T_u) を求める。こうして求めた T_e と T_u が有意な周期範囲の下限および上限である。しかし、この補正は、 f_i がエネルギー密度の最大に対応する周波数 f_{max} に等しいか大きい場合のみ適用される。この風波の平均周期 T は $T = 0.285 U \varphi (3.03/f_i U)$ (ここで、 U : knot で表わした風速、 φ : $f_i U$ の関数)、あるいは $3.03/f_i U < 0.5$ の場合には、近似的に $T = 0.77 T_i$ と与えられる。なお吹送距離と吹送時間とがともに制約されている場合には、こうして求まる二つの E のうち、小さい方の値をとらなければならない。一方、十分に発達した風波に対しては、与えられた風速に対する C.C.S. 曲線において見出される最大の E の値から、 $H_{1/3}$ が求められる。有意な周期範囲はこの E の値の 95% および 3% に対応する周期によりはさまれた範囲であり、平均周期は $T = 0.285 U$ (ここで、 U : knot) と与えられる。

なお、異なった風速によって発達する風波の発達状態が同等であるということは、それぞれの風波のもつ E が等しい状態であるとしている。

(b) うねりの推算 うねりの推算の際に用いるフィルターについては、storm の型によって I~IV に分類され、それぞれ 図-6 に示す速度分散図の中の距離や時間の 2 とおりの選び方が定められている。したがって、この図から周波数 f の上限と下限が求められ、これらの f に対応する C.C.S. 曲線の E の値の差 ΔE が見出される。図-7 は θ_3 および θ_4 の定義を示したものである。風域の両側端 DA および CB はできるだけ卓越風の風向に平行になるようにする。図-8 は方向分散係数を

図-7 θ_3 および θ_4 の定義

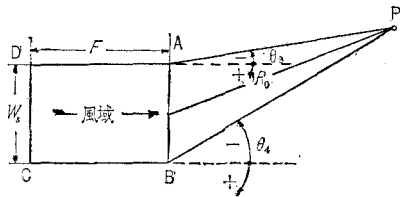
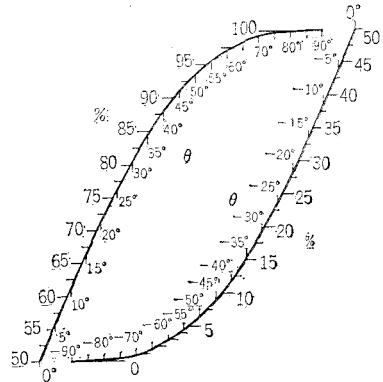


図-8 方向分散係数



ける E の値を与えることになる。

4. 推算結果

有義波法による場合は、図-1 からわかるように、NNW 方向から波浪推定地点へ向けて進行する波は、男鹿半島で遮断されるので、NW 方向と WNW 方向での時間-距離風域図を作製したが、WNW 方向では、風速 4 m/sec 以上の風域はきわめて小さいので、NW 方向のみについて有義波法を適用した。また、PNJ 法による場合は、推算しようとする波に大きく寄与した風域は 12 月 3 日 3 時のものと考えられた。これは天気図を総合してくわしく検討したあとの結論であって、その詳細については省略する。すなわち、12 月 3 日 3 時から

図-6 速度分散図

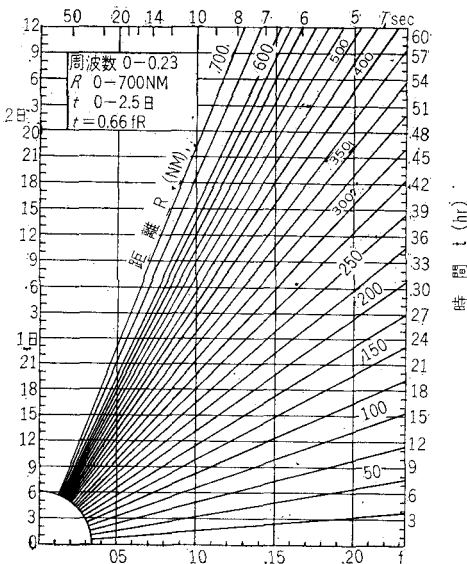


図-9 波高の推定値と実測値との比較

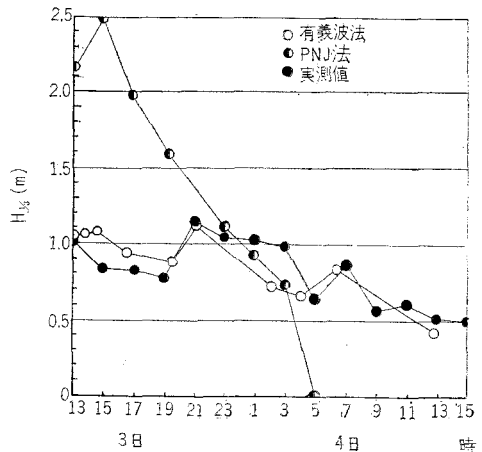
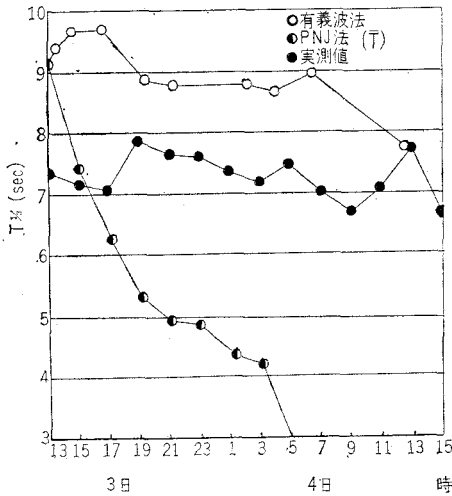


図-10 周期の推定値と実測値との比較



ねりを filter III を用い推算した。

図-9

および10は、それぞれ、波高と周期について上述の有義波およびPNJ法による推定値と実測値と

を比較して示したものである。これらの図から、有義波法では、波高に関しては、実測値と比較的よく合っているが、周期の方はかなり大きな値を示し、一方、PNJ法では波高についても、周期(PNJ法では平均周期を推算した)に関しても、その値のみならず変化の傾向すら合っていない。

5. 結 語

以上、著者らは、有義波法による風波の発達とうねりの深海における減衰の推算法として、それぞれ、岩垣および柿沼による修正 Wilson 法と Bretschneider 法を用い、さらに波浪スペクトル法は PNJ 法を適用して、秋田海岸における波浪を推算し、実測資料と比較検討した。その結果、そうした有義波法においては、波高についてはよい一致が見られるが、周期は全般的に大きな値を示すことがわかり、また、PNJ法においては、波高についても周期についても満足すべき結果はえられなかった。今後、こうしたことの生ずる原因をよく究明し波浪予知法の合理化と精度向上に努めたいと考えている。

最後に、この研究を進めるにあたり、計算や図面の作製に助力を頂いた川崎製鉄KKの浜田敏之介氏と防災研究所の人見哲夫氏に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Rattray, M. and W.V. Burt: A Comparison of Methods for Forecasting Wave Generation, Deep-Sea Res., Vol. 3, 1956, pp. 140—144.
- 2) Pierson, W.J.: A Study of Wave Forecasting Methods and of the Height of a Fully Developed Sea on the Basis of Some Wave Records Obtained by the O.W.S. Weather Explorer during a Storm at Sea, Deutsche Hydrographische Z., Vol. 12, 1959, pp. 244—259.
- 3) Kaplan, K. and T. Saville, Jr.: Comparison of Hindcast and Observed Waves along the

Northern New Jersey Coast for the Storm of Nov. 6~7, 1953, Bulletin, Beach Erosion Board, Vol. 8, 1954, pp. 13—17.

- 4) Dearduff, R.F.: A Comparison of Deep Water Wave Forecasts by the Pierson-Neumann, the Darbyshire and the Suerdrup-Munk-Bretschneider Methods with Recorded Waves for Point Arguello, California, 26—29 Oct. 1950, Bulletin, Beach Erosion Board, Vol. 9, 1955, pp. 5—13.
- 5) Saville, T.: Wave Forecasting, Proc. 1st Conf. Ships and Waves, Hooken, N.J., 1954, pp. 78—91.
- 6) Walden, H.: Methods of Swell Forecasting Demonstrated with an Extraordinarily High Swell off the Coast of Angola, Proc. Symposium, Behavior Ships in Seaway, Wageningen, Netherlands, 1957, Wageningen 1959, Vol. I, pp. 427—438.
- 7) Roll, H.U.: Some Results of Comparison between Observed and Computed Heights of Wind Waves. Proc. Symposium, Behavior Ships in Seaway, Wageningen, Netherlands, 1957, Wageningen, 1959, Vol. I, pp. 418—426.
- 8) Francis, J.R.D.: Wind Action on a Water Surface, Proc. I.C.E., Vol. 12, 1959, pp. 197—216.
- 9) Neumann, G. and W.J. Pierson: A Detailed Comparison of Theoretical Wave Spectra and Wave Forecasting Methods, Deutsche Hydrographische Z., Vol. 10, 1957, pp. 73—146.
- 10) 岩垣雄一・樋口明生・土原義人・吉田幸三・柿沼忠男・井上雅夫: 秋田海岸の波浪観測について, 第9回海岸工学講演会講演集, 昭.37.10, pp. 75—80.
- 11) 山元竜三郎・光田寧: 台風域内の風の分布の推算法, 京都大学防災研究所年報第5号A (10周年記念号), 昭.37.3, pp. 139—146.
- 12) 井島武士: 海岸・港湾測量, 昭.35, p. 13.
- 13) Humphreys, W.J.: Physics of the Air, 1920, 655 pp.
- 14) 岩垣雄一・柿沼忠男: 秋田海岸の海底摩擦係数について, 第9回海岸工学講演会講演集, 昭.37.10, pp. 81—84.
- 15) Wilson, B.W.: Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 73, 1955, pp. 1—31.
- 16) 岩垣雄一・柿沼忠男: 海岸波浪の予知に関する研究 (第1報) —伊勢湾台風時における沖波の推算—, 京都大学防災研究所年報第5号A (10周年記念号), 昭.37.3, pp. 284—295.
- 17) Bretschneider, C.L.: Revision in Wave Forecasting; Deep and Shallow Water, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 30—67.
- 18) Pierson, W.J., G. Neumann, and R.W. James: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H.O. Pub. No. 603, 1955, pp. 1—284.