

# 気象と海況に関する研究—Ⅲ

## 那珂川河口の波浪とその予報 第3報

On the waves and its forecasting method at the mouth of River Naka

鬼 沢 洋 一

### I 序

才2報に於いては若干統計的事項について記したが、本報告では河口に於ける河川流速の影響、特に opposing current (向い流れ) が波高の増加に与える影響について考察することにする。或る程度のウネリがあつても河川流が全然ないか、或いは緩やかな場合は、ウネリの間隔を縫つて航行出来ることもあるが偶々 opposing current の速度が大きいと波高は高まり、海面が乱れて小型船等の航行は不可能になる場合が多い。従つて河口に於ける航行の安全度の目安を握むためには単にウネリの観測や予報ばかりではなくこの opposing current の影響を加味しなければならぬ訳である。Yi—Yuan—Yuによれば波高比を河川流速対波速比の函数として一義的に与えているが、此処では河川流に関するデータが手許にないので之は一応割愛し、波速について調査の結果を述べ予報手順について触れてみた。

### II 波速について

#### (1) 相関について

既に才1報で述べた通り観測場所は動流堤突端附近北側で河口とは幾分条件を異にするが、海岸附近に於ける波速の一般的性質を知るためには差支えないものと思う。深海波の波速即ち  $V_0 = \frac{gT_0}{2\pi}$  の考え方によれば河口附近に於ける波速も一応  $T_0$  と何等か関係あるものと考えられるが、一見  $V$   $T$  図表 (省略) からは両者の間に余り密接な関係はない様に見える。即ち  $V$  は寧ろ定常的でもあり、そのバラツキの  $\alpha$  は季節により異なり (才2報参照) 周期以外の因子の影響をうけている様である。其処で、先ず  $V$  と  $T$  の関係を明らかにするため、相関係数を算出すると各季節才1表の様になつた。

尚之等を  $\chi^2$  分布により検定すると  $0.30 < \alpha$

才 1 表

0.50 で仮説は棄却出来ないから各季節間の有意差及び  $V$   $T$  間の相関は殆んどないと認める方が妥当の様である。次に考えられる相関量として波高  $H$  がある。才2表に  $V$  と  $H$  の相関係数を示す。

	4 <sup>①</sup> ~5月	6 <sup>②</sup> ~7月	8 <sup>③</sup> ~10月	11 <sup>④</sup> ~2月
r	-0.180	-0.001	+0.004	-0.194
n	61	59	90	54

前と同じように $\chi^2$  検定をしてみると0.95

オ 2 表

	4 <sup>①</sup> ~5月	6 <sup>②</sup> ~7月	8 <sup>③</sup> ~10月	11 <sup>④</sup> ~12月
r	-0.037	-0.020	-0.085	+0.096
n	61	59	90	54

$\alpha < 0.98$ でやはり季節的有意差及びVH間の相関は認められない。之については若干疑問があるので後述する。従つて河口附近の波浪のVのメカニズムを決定するためにはT

やH以外の factor が考えられなければならない。以上大変まわりくどい考え方をしてきたが、之は一応VがTやHと関係あるらしく思われたため結局は水深h等が有力なものとなつてくるらしい。然しhは潮汐や漂砂等の状態によつて変化する量であり用いたデータの観測時刻が観測期間を通して一定、しかも一日一回だけであるので潮汐によるか漂砂によるか之等の影響をはつきり分離して判別することは困難である。その他h以外の如何なる factor があるかは目下の処わからない。

(2) 季節的变化について

次にVの季節別頻度分布図をみてみると一見各季節特徴ある分布型を示している様に思われる。若し各季節間に有意な差があるとすれば季節のもつ気候的特性よりVを支配する間接的な因子を見出すことが出来るかも知れないのでVの平均値や分散について季節差があるかどうか調べてみることにした。

先ず平均値間の有意差検定のためには分散が同一でなければならないという条件があるので之をWelchの $L_0$  を用いて検定してみた。即ち

$$\log L_0 = \log N - \frac{1}{N} \sum_k n_k \log n_k + \frac{1}{N} \sum_k n_k \log \theta_k - \log \sum_k \theta_k$$

で計算の結果は $L_0 = 0.1279$  今 $k=4$ ,  $n=60$ とおくと $L_{0.01} = 0.953$

$\therefore L_{0.01} > L_0$  となるから、この帰無仮説  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$  は棄却される。つまり季節①~④の $\sigma$ 間に有意差ありと認められる。更に $\sigma$ の差の一見顕著な季節②と④について之を $F_0$ 分布により調べてみると

$$F_0 = \frac{U_4^2}{U_2^2} = 9.64$$

今 $n_4 = \infty$ ,  $n_2 = 60$ とおけば  $F_{0.01} = 1.60$ であるから  $\therefore F_{0.01} < F_0$  となり両者の差も有意であることがわかる。以上の結果からも当然、平均値 $\bar{V}$ 間にも有意差のあることを察することが出来るが一応之も調べておく。処が上述の様に各季節夫々分散を異にするので級間内の検定は難しいが季節②と④についてt分布により、one tail testを行なつてみると基準tは

$$t = \frac{t_1 U_{\sqrt{2}}^2 + t_2 U_{\sqrt{4}}^2}{U_{\sqrt{2}}^2 + U_{\sqrt{4}}^2} = 2.617$$

但し、有意水準を1%とおく。

$$t_0 = \frac{V_2 - V_4}{\sqrt{U_{V_2}^2 + U_{V_4}^2}} = 4.11$$

∴  $t_0 > t$  従つて②と④の平均値  $\bar{V}$  についても有意差が認められる。以上で  $\bar{V}$  と  $a$  について季節差があり特に②と④に於いてはその差が大きいことがわかつたが、之のみでは季節のもつ如何なる因子が如何なる形でその様な結果をもたらすのかはわからない。其処で  $V$  の日々変化を図表からみると、 $V$  が毎日同一時刻に観測されたものとはいえ、潮汐変化にくらべて変化が激しく、此の点潮汐変化の影響は少くとも同一時刻に於ける隣接せる2,3日の値をくらべた場合には、余り大きくはない様に思われる。従つて  $V$  の変化には他の因子、即ち現在の段階では前述の様に水深  $h$  が有力と考えられるわけであるが、之を満干時に於ける一連の観測値から確かめてみることにした。荒天時でない一観測日内の漂砂移動量は無視することが出来るものと思われるので、その日に於ける水深の変化は波高と潮位によつて決まってくるが、前述の様に  $V$  と  $H$  の間には一応相関はないと認められておるので波高には触れないで、其処で  $V$  と  $h$  の関係を見るための簡単な観測を1960年3月14日に行つた。満潮時は、16<sup>h</sup>40<sup>m</sup>~17<sup>h</sup>00<sup>m</sup>の20分間HWの推算値(当所では検潮業務を実施していないので実測値はわからないが余り大差はないものと思ふ)は16<sup>h</sup>50<sup>m</sup>で108cm、最大波高1.5m又は以上、最大周期11~13sec、又干潮時は10<sup>h</sup>40<sup>m</sup>~11<sup>h</sup>00<sup>m</sup>の20分間、LWの推算値は10<sup>h</sup>52<sup>m</sup>で25cm、最大波高1.0~1.5m、最大周期11~13secで観測箇所は何れも50、観測法は動流堤突端から導標燈の西側縁辺まで25mの直距離を通過する波頭を透視してストップ・ウォッチにより所要時間  $t$  を計測した。

$V \propto \frac{1}{t}$  であるから  $t$  のまま計算結果を示すと才3表の様になつた。

尚才1図に頻度分布を示す。

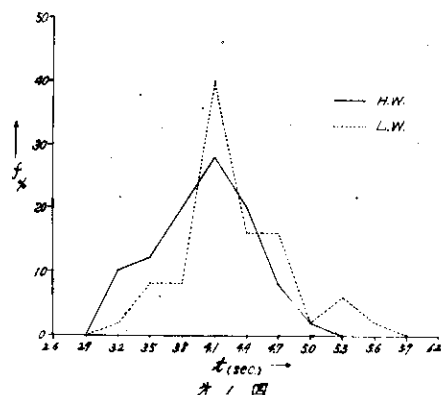
才 3 表

この分布は大體正規型をしているからHW時とLW時に於ける  $t$  の平均差を  $t_0$  分布により検定してみると

潮位	統計量	$\bar{t}$ (sec)	$a_t$	max	min	n
H.W		3.99	± 0.44	5.1	3.1	50
L.W		4.25	± 0.49	5.5	3.3	50

$$t_0 = \frac{\bar{t}_L - \bar{t}_H}{\sqrt{\frac{n(\sigma_L^2 + \sigma_H^2)}{n_L + n_H - 2} \left( \frac{1}{n_L} + \frac{1}{n_H} \right)}} = 2.77$$

此処で  $f_d = 9.8$  であるから  $0.01 > a > 0.001$  となるが之は one tail test であるから  $a$  を  $\frac{1}{2}$  即ち  $0.05\% < p < 0.5\%$  となり、この一小実験例でもHWの場合の方がLWの場合よりつまり水深がより深い方が波速が大きいということが出来る。ではこの場合(推算による満干差=



83cm) どれ位の波速差になつているかという上記の夫々の  $\bar{t}$  と  $h$   $V_H = 6.3 \text{ m/sec}$ ,  $V_L = 5.9 \text{ m/sec}$  となり  $0.4 \text{ m/sec}$  程の差を生じた。即ちHWの場合の方が  $0.4 \text{ m/sec}$  速くなつている。次に河口附近の波浪になると沖から到来するウネリ等は一応長波の状態と見做せるから  $V = \sqrt{gh}$  を用いて  $h$  を求めてみると,  $h_H = 4.0 \text{ m}$ ,  $h_L = 3.4 \text{ m}$  となり, 推算潮位によれば  $HW = 1.1 \text{ m}$ ,  $LW = 0.3 \text{ m}$  であるからDLから海底(勿論平均的なものである)まではHWの場合より求めれば  $4.0 - 1.1 = 2.9 \text{ (m)}$ , 同様にLWの場合より求めれば  $3.4 - 0.3 = 3.1 \text{ (m)}$  となり  $3.1 - 2.9 = 0.2 \text{ (m)}$  の差で大体一致することがわかる。又之は隣接日に於ける突測値とも大体台り様である。0.2 mの差の原因は色々考えられるが実用的には無視しても良いと思われるので之以上のことは省略する。尚潮差は83cmであるが計算値によれば  $4.0 - 3.4 = 0.6 \text{ (m)}$  で之も大体一致する。従つて河口附近に於いて波速を問題にする場合はTLH等を考慮する必要がなく予報上  $V = \sqrt{gh}$  として, ただ単に  $h$  のみの函数として取扱えばよいことになる。

以上で  $h$  が  $V$  に与える影響は極めて大きく, この  $h$  は潮汐の影響を除けば大方漂砂移動によつて決定されることが推察出来るが漂砂移動のメカニズムは未だ明らかにされていない。間接的ではあるが  $V$  の変化に対応して, 天気図的に何らかの関係のあるパターンを求めてみたが余り密接な関連性を見出し得なかつた。然し之は6~7月の梅雨期(NE気流が定常化して卓越する時期)の  $V$  が他の季節, 特に11~12月の寒候期より大きく又,  $\sigma$  が小さくなつてゐることから詳細に調べてみなければ, はつきりしたことはわからないが, 漂砂移動に風や降水による河川流量が大きな役割を果していることは確からしく思われる。

とにかく  $V$  が正しく観測されるならば之が変化する時(潮差を無視し得る場合に限る)は漂砂移動により水深に変化を来したものと見做して差支えないと思われる。漂砂移動については今後の研究課題として残したい。此の様に一応  $V$  を知ることが出来れば河川流速と波速比から河川流による到来波高の変化を予測し得るわけであるが, 此処でとりあげている河口附近の波高に対しては先ず, 沖波の波高  $H_0$  に浅海効果を加味したものを考えなければならぬ。次に此の点について若干触れてみることにする。

### III 浅海効果について

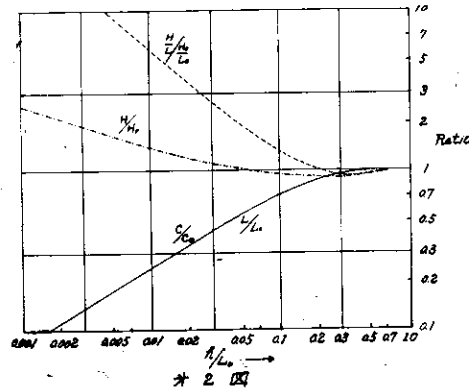
海岸附近で波高が変化する場合は  $T$  が一定(厳密にはスペクトルの部分波の  $T$  のみを考える)又エネルギーの保存性から屈折等の影響を考えなければ次の式が導かれる。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{L}{L_0} = \tanh h \frac{2\pi h}{L} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{E}{E_0}} = \sqrt{\frac{V}{V_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4\pi h}{L \sinh \frac{4\pi h}{L}}} \dots \dots \textcircled{2}}$$

然し②式中には浅海に於ける未知因数  $L$  があるので之等兩式を反覆法により 相対水深  $h/L_0$  の函数として取扱い 才2図に示した図表から浅海効果を算 出する。

此の図表については各実測値がない のでチェックすることも出来ないが、 Iversen によれば  $\delta$  の大きい場合や  $h/L_0$  の小さい時は、有限波の非線



型理論を問題にしなければ実測値と一致しないとのことであるが、此处では予報のためのルーチン・ワー クの便宜上浅海効果による波高比の変化に対してはこの図表を適用し波速に関しては上述の長波の考え方 と、この図表の波速比を比較検討しながら使用していくことにした。尚図表中  $h/L_0 \div 0.06$  より大きい 方で  $H/H_0 \leq 1.0$  になる或る範囲のあることは注目しておかなければならない。之で河口に到来する波高 (破碎のことは考慮していない) は一応求める訳であるが次に opposing current による影響を考えてみよ う。

#### N opposing current の波高に及ぼす影響について

河口に於いては、航路上周期の短い風波は大して問題ではなく、ウネリが大きな影響を与える。

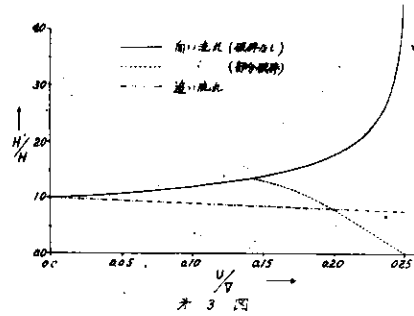
従つてウネリのように波長の長いものは海岸効果による屈折が大きく、遂には汀線に平行に到来するの で那珂川のような河口に於いては、波峯線は河川流の方向に対して一応直角と見做して差支えないものと思ひ。 この様な時に向い流れがあると両者の速度比の或る範囲内では高周波域が破碎してスペクトルに変型を生 じ、低周波域にエネルギーの増大があつて波高が高まり、次々に周波数域が狭くなつて波は整形される。 (※最大エネルギー周期は変らない) 即ち Yi-Yuan-Yu によれば上記の速度比が  $\frac{1}{7}$  以下では破碎起 らず、波高は増加し  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{4}$  では部分破碎を起して波高は漸次減少、そして  $\frac{1}{4}$  以上では完全に破碎して しまう。もし破碎が起らないとすれば到来波の波高  $H$  は次の式で現わすことが出来る。変化をうけた波高 を  $H'$ 、河川流を  $U$  とすれば

$$\frac{H'}{H} = \sqrt{2/m(1+m)} \dots\dots\dots ①$$

但し 
$$m = \sqrt{1 \pm 4(U/V)} \dots\dots\dots ②$$

②式の根号内で一符号が向い流れ、+符号が追い流れの場合である。上式を図表化したものを才3図に示 す。この理論によれば追い流れのある場合は  $H'/H$  は減少する。そして又、向い流れによる波高の増加は

最大で約3割位であることも知っておきたい。  
 尚図表中点線で示した部分的破碎による波高減少は理論値がないので実験値を採用した。次に問題となることは浅海効果と向い流れによる効果の合成を如何にするかということであるが一応破碎を無視すれば、之は両者の相乗積で現わしてよいものと考えられるが、詳細はわからず今後研究を要する処である。破碎についてはMunkによれば



$$\frac{H_B}{H_0} = \frac{1}{3.3 \sqrt[3]{H_0/V_0}}$$

$$\frac{h_B}{H_B} = 1.28 \text{ 宮崎の非線型理論 (無渦を仮定す) では } \frac{h_B}{H_B} \neq \text{const, で沖波の峻度 } H_0/L_0 \text{ の函}$$

数型になつており、その他多くの研究者の研究結果もあるが、未だ確定的な理論付けがされていないので之以上の発展は出来ない。借河口に於ける波浪予報のルーチン・ワークとしては大変粗雑であるが一応前述の様な考え方、即ち、

- (1) PNJ法により沖波の  $T_0, H_0$  を知り、更に  $T_0$  から  $L_0$  を求める。
- (2)  $H_0$  の浅海効果による影響、即ち  $H/H_0$  を  $h/L_0$  の函数として図表より求める。
- (3) 更に向い流れの影響があれば  $Y_i - Y_{uan} - Y_u$  の理論を適用する。
- (4) (1)と(3)の効果を合成する。
- (5) 破碎は(1)と(3)の計算過程に得られる。

に従い、今後は予報値と実測値の比較チェックをしてその不備を改めて行きたいと思つている。

## V 波浪予報の総括

才1報以来述べてきた当所に於ける波浪予報についてその概略をまとめてみると、次の通りである。

### (1) 予報海域 (Forecasting service area)

- (1) 三浜沿岸 (2) 那珂川河口 (3) 三浜20NM沖合 (4) 外洋

### (2) 予報法 (Forecasting Method)

#### (1) PNJ法

(1)の(1)~(4)の何れにも必要な基礎的方法で波浪の発達、減衰の予報共に可、そしてfilterの選択によりstormの距離的制限をうけない等の長所がある。又(1)と(2)についてはⅢ~Ⅳに於いて述べ

た操作を行なう。技術的に困難な点としては広範囲且つ正確な天気図を必要とし、storm areaの決定は正しくなければならない。尚計算手順も少々厄介である。

(四) 統計より作図した沿岸波浪予報図による法

(1)の(イ)に用いて簡単で有効である。(同じく(ロ)の場合も之に準じてよいが補正を必要とする)之は図表上の簡単な操作で波高が浅海効果を含めて益的に一応明らかになる長所を有するが、予報のためのparameterとして現地の風(風速と吹続時間)だけを用いるので当該海域がstorm areaのfetch内にあることが必要である。之を天気図より判断しておかなければならない。従つて遠方洋上にある他のstormの影響が入ってくる場合は予報が出来なくなる欠点をもっている。

(五) Darbyshierの波浪予報図による法

(1)の(イ)に於いて離岸風が吹続し、しかもfetchが短く制限されている場合に有効である。又之は海陸風の場合にも適用される。

## VI 結 び

引用した理論が大分仮定のもとに立つている。

仮えば周期が一定であるとか、エネルギーが保存されるとかいうので実際より稍かけ離れており、又求めた統計結果についても若干疑問がもたれる。即ち

(イ) 古いデータを用いたものなので、その観測法の詳細も知らず、得られた観測値の代表性も疑わしいものがある。(各波高は観測時に於ける最大値と記録されているが)

(ロ) 高い波高の場合(22例)に波速の非常に小さいものが12例、此の中には大波のため、海面混濁として正確な波速を観測出来なかつたらしく思われるものが若干ある。之は又、水深の影響かどうかは、わからない。

(ハ) (ロ)とは逆に波高の非常に小さい場合(41例)に波速の大きいものが16例あるが之も水深の影響かどうかわからない。

従つて波高と波速の間に相関がないとは断言出来ず、遷移長波海域の波速は $V = \sqrt{g h}$ とすべきか $V = \sqrt{g h (1 + \frac{\delta}{h})}$ を採用した方がよいかも明らかでない。この様に見てくると該報告に於いて述べた事柄は波浪予報のための一時しのぎの目安を与えたものにすぎず、今後は周到な計画のもとに観測され統計され、そして分析が行われなければならないと考えている。以上大変乱雑な調査報告であるが大

方の御叱正と御指導を戴ければ望外の喜びである。

追記

(イ) 各季節毎に波速の偏差比が $\geq \pm 1.0$ になつた回数を波高別(前後の日の波高と比較して)に示すと下の表のようになる。(偏差比の符号は偏差値が平均値より大きければ+小さければ-とする。)

$\chi^2_0$  分布により属性テストをしてみると  
 $\chi^2_0 = 0.244, 0.50 < P < 0.70$ となつて波高と波速の間に関係は認められない。之は先の相関係数の結果とも一致している。

偏差比 \ 波高別	高	低	計
$\geq + 1.0$	10	16	26
$\geq - 1.0$	12	25	37
計	22	41	63

- (ロ) IIの(1)でVとHの相関の場合Hの位相を一日位進めると少しは高い相関ができるかも知れない。というのは高い波浪により海底に擾乱を引起し、漂砂移動のため水深に変化をおこすものと思われるからである。勿論漂砂現象は之だけでは説明出来ない。
- (ハ) Vが一応長波の式で現わすことが出来れば才1報で述べた $\beta$ は無意味になつてくる。
- (ニ) IVの②式中のUとして如何なる層の流速を用いてよいのか不詳である。