普通写真による波浪観測について

鬼 沢 洋 一

I 序

波浪観測対象としての波素には，到来方向（Ｄ），波高（Ｈ），波速（Ｖ），周期（Ｔ），波長（Ｌ）等があり間接的な量としては波令（β），峨度（δ）がある。そして観測法も色々で，原理的には目視，光学的，音響学的，水力学的，空気力学的，熱力学的，電気的，電子工学的等各方法が考えられる。此の中目視は最も原始的且つ，平易な方法であるが精度の点に於いて劣り，他の方法にも一長一短ある。此処では昭和１９年神戸海洋気象台の瀬木隆氏が日本学術振興会の援助により研究された普通カメラによる観測法を紹介すると共に，当所で実施するに便利な様又，精度を上げる意味で幾分拡大解釈を試みた。この方法はカメラの可搬性をいかして随時に何処でもそして簡単に比較的精度の高い記録をとることが出来，その上経費が少くて済むという特徴がある。一般に運動しているものを観測するとか，逆に観測者自身が運動しているとか，或いは両者共に運動しているとかいう場合は観測が更に難かしくなつてくるのであるが，何れにしても上記の方法では相対的に動きを止めて位置関係を固定し之から幾何学的解析が出来るというのが骨子となつている。この方法のアウト・ラインを述べてみると陸上の高所から撮影する場合と海上の船舶上から撮影する場合とでは幾分趣きを異にするが，先ず得られた印画から，水平線に対するカメラの傾き（正確には印画面の傾き）即ち機角（ω）を求め，次に各波頂点や波底点からの入射角（θi）を測つて三角法によりＬとＨを求めるのである。もし観測対象が沖波であれば写真観測結果からＴやＶを知ることも出来る訳で，以下その原理と実際的方法について述べることにする。

II 原　　理

(1) 機角ωの求め方

先に相対的に動きを止めて，位置関係を固定するということを述べたが，之を更に判り易くいえば，印画面からみた水平線とカメラとの動きは互に負の関係にあり，水平線の絶体位置を利用してカメラの動揺による影響を無くするということである。従つてこの観測法では水平線の撮影は絶体不可欠のものであり，水平線が見えないか，かすんで明らかでない場合は観測出来ないことになる。（海上では船舶が動揺するので無理であるが陸上では写真経緯儀を使えばωを直読出来るので水平線が見えなくても差支えない。尚赤外線撮影のことも考えられるがまだ実験して見ない。）さて機角ωを求める前にカメラの水平線に対する俯角（dip of horizon）を求めておかなければならない。才１図に於いて地球の半径をr，カメラの標高をh，そして水平線の位置をＤとすれば，求める地平俯角（地平線低下は考慮しないことにする）は∠ＤＡＥであり，之は図から明らかな様に∠ＤＡＥ＝∠ＡＣＤとなる。従つて∠Ｒ△ＡＣＤに於いて∠ＡＣＤを求めればよいことになる。∠ＡＣＤ＝$\Delta\beta$とおくと $\tan\Delta\beta=\frac{AD}{CD}$ となる。

此処でAC＝AB＋BC又，$AD^2 = AC^2 - CD^2 =$
$(h+r)^2 - r^2 = 2hr + h^2$ であるから

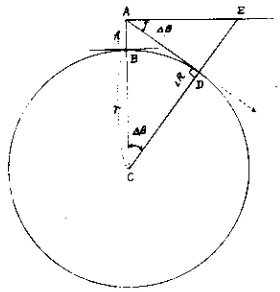
$$AD = \sqrt{2hr + h^2}$$

$$\therefore \tan \Delta\beta = \frac{\sqrt{2hr+h^2}}{r} = \sqrt{2\frac{h}{r} + \frac{h^2}{r^2}}$$

$\frac{h^2}{r^2}$ は極めて小さな値であるから之を省けば

$$\tan \Delta\beta \doteqdot \sqrt{2\frac{h}{r}}$$

となる。



オ1図

次に印画面が鉛直線となす角をξとすれば$\omega = 90° \pm \xi$となり，ωを求めるには三つの場合がある。即ち(イ)水平線が印画の中央より上にくる場合，(ロ)水平線が印画の中央にくる場合，(ハ)水平線が印画の中央より下にくる場合であり，作図上は上下の関係が逆になることを一応注意しなければならない。

先ず(イ)の場合をオ2図について考えてみよう。Oはカメラのレンズ，SS′は影像面，PはSS′の中点，そしてOPを光軸とすると

$\xi = \beta\infty + \triangle\beta$ となり

$\therefore \omega = 90° - \xi = 90° - (\beta\infty + \triangle\beta)$

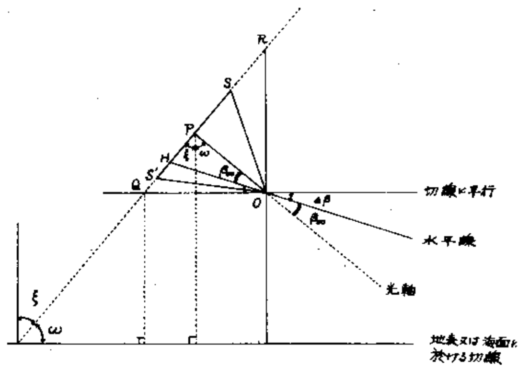
となる。

(ロ)の場合は$\beta\infty = 0$となるから

$\xi = \triangle\beta$

$\therefore \omega = 90° - \triangle\beta$

となる。



オ 2 図

更に(ハ)の場合は図を省略するが

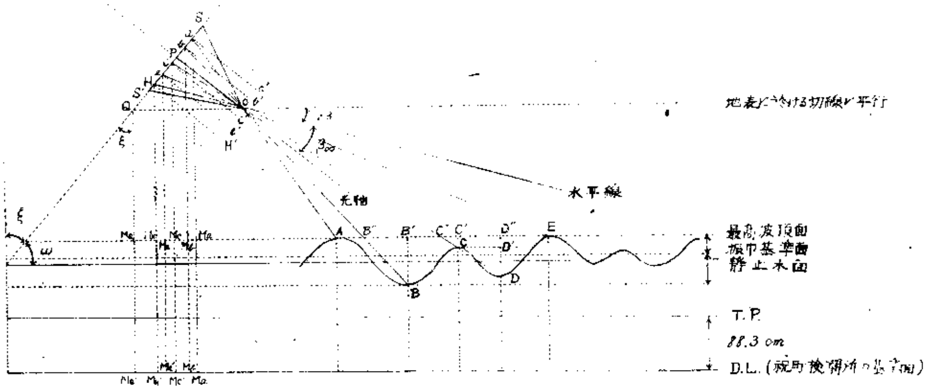
$\xi = \beta\infty - \triangle\beta$ $\therefore$ $\omega = 90° + \xi = 90° + \beta\infty - \triangle\beta$ となる。然しこの(ハ)の場合は印画面の$\frac{1}{2}$以上が空間になつてしまうので観測には不向きである。実際に撮影するのは(イ)の場合が普通で稀に(ロ)の場合があるかも知れない。

(2) 入射角θi の求め方

この様にしてωがわかれば次に各波頂点や波底点からの入射角βi（i＝a，b，c‥‥）を求め，更に入射光線が入射点に於ける鉛直線となる角θi つまり $\theta i = \omega \pm \beta i$ を算出しなければならない。

之等の関係を(イ)の場合を例にあげてオ3図に示す。前にも述べた様に撮影は陸上と海上とで行なう場合があり，計算上基準となるカメラの高さの求め方も幾分異なるが，何れにしても最高波頂面からカメラまでの高さを基準とする。

オ3図に於いてA，B，C，D，E‥‥は波頂点や波底点又，之等からの影像面に於ける入射点をa，b，c



才　3　図

d，e，‥‥H（此の図ではC，Dが重なつてしまつて印画面ではdはわからない），OP及びその延長線を光軸，a，b，c，e，‥‥Hの各点から SS' にたてた法線を aa'，bb'，cc'，ee'，‥‥HH' 同様に最高波頂面及びDL面におろした垂線を M_a, M_b, M_c, M_e, ‥‥M_H；M_a'，M_b'，M_c'，M_e'，‥‥M_H' とすると $aM_a=bM_b=cM_c=eM_e$‥‥$HM_H=h$，$M_aM_b=M_bM_c=M_cM_e=M_eM_H=0$ とみなすことが出来る。従つて船舶上から撮影する場合には，なるべく視界のよくきく高所を選び最高波と思われる波頂点に来た場合にカメラを波峯線に直角に向けてシヤツターを切る。カメラの基準高としては前のhを使えばよく，之は吃水線からカメラまでの高さを予め実測しておけばよいと思う。さて図を見れば明らかな様に $\angle a'aM_a=\angle b'bM_b=\angle c'cM_c=\angle e'eM_e=\angle H'HM_H=\omega$ 又 $\angle a'ao=\angle aop$，$\angle b'bo=\angle bop$，$\angle c'co=\angle cop$，$\angle e'eo=\angle eop$，$\angle H'HO=\angle HOP$，そして $\angle a'ao=\beta a$，$\angle b'bo=\beta b$，$\angle c'co=\beta c$，$\angle e'eo=\beta e$，$\angle H'HO=\beta\infty$ とおけば $\angle aop=\beta a$，$\angle bop=\beta b$，$\angle cop=\beta c$，$\angle eop=\beta e$，$\angle HOP=\beta\infty$ となり更に $op=f$ とすれば $\tan\beta a=\dfrac{ap}{f}$，$\tan\beta b=\dfrac{bp}{f}$，‥‥‥ $\tan\beta\infty=\dfrac{HP}{f}$ となる。即ち βi（$i=a, b$‥‥）は印画面上で各波頂点や波底点から center line（面を上下に分ける二等分線）までの距離をレンズの焦点距離（印画が引伸ばしてあれば引伸倍率を乗じて補正する）で割り，三角函数表から求めることが出来ることになる。次に θi であるが入射点が印画面上で center line より上にあれば $\theta i=\omega+\beta i$ となり，下にあれば $\theta i=\omega-\beta i$ となる。以上で波長や波高計算の基準となるh，ω，βi そして θi が求まる訳である。

(3)　波長Lの求め方

才3図に於いて AC'，$C'E$ ‥‥が求める波長であるが充分に発達した（fully arisen state）波浪では隣合う波の高さは殆んど等しいため，cc' はhに比較して無視することが出来るのでcからの入射光

線は c' からのものとして取扱つても実用的には大きな誤差を生じないと思われる。まして陸上の高所からの場合は尚更である。此処で前の $M_aM_b = M_bM_c = M_cM_e = M_eM_H = 0$ を引用すれば，$AC' = M_iC' - M_iA$，同様に $C'E = M_iE - M_iC'$ となる。即ち $M_iC' = h\tan\theta c$，$M_iA = h\tan\theta a$

$\therefore\ AC' = h(\tan\theta_c - \tan\theta a)$ 又 $M_iE = h\tan\theta e$ であるから $\therefore\ C'E = h(\tan\theta_e - \tan\theta c)$

従つて之等の式から印画面で波長を算出する場合，入射点 a，b，c・・・・の代りに印画の下から順に１，２，３・・・・と番号付けをしていけば，一波長遠い波頂（波底の番号を一つとばすことになる）の $\theta i+2$ から手前の波の θi を差引きするという様な考え方の演算を行なえばよいことがわかる。

即ち一般的に

$$L(i\sim i+2) = h(\tan\theta_{i+2} - \tan\theta_i)$$

で現わすことが出来る。但し之は印画面上で波頂点と波底点が重なるが，波底点が手前の波にかくされてわからなくてもその波底点に番号付けをしたものとして扱う場合である。

(4) 波高Hの求め方

波長の場合と同様才３図に於いてBB′，DD′，・・・・が求める波高であるが，この図ではDはCに重なっていてわからない。さて充分に発達した波浪に於いてはCC′＝0つまりC′C″＝0とみなしても実際には差支えないから $AB' = \frac{AC'}{2}$ となり，AC′は前述の通り $AC' = h(\tan\theta c - \tan\theta a)$ である。

従つて $M_iB' = M_iA + AB' = M_iA + \frac{AC'}{2}$ 即ち

$$M_iB' = h\tan\theta a + \frac{h(\tan\theta c - \tan\theta a)}{2} = \frac{2h\tan\theta a + h\tan\theta c - h\tan\theta a}{2} =$$

$$\frac{h\tan\theta a + h\tan\theta c}{2} = \frac{h(\tan\theta a + \tan\theta c)}{2}$$ 又 $M_iB'' = h\tan\theta b$，

$$B'B'' = M_iB' - M_iB'' = \frac{h(\tan\theta a + \tan\theta c)}{2} - h\tan\theta b =$$

$$\frac{h(\tan\theta a + \tan\theta c) - 2h\tan\theta b}{2} = \frac{h(\tan\theta a + \tan\theta c - 2\tan\theta b)}{2}$$

そして $\angle B'BB'' = \theta b$ であるから

$$\therefore\ BB' = \frac{B'B''}{\tan\theta b} = \frac{h(\tan\theta a + \tan\theta c - 2\tan\theta b)}{2\tan\theta b}$$

一般に i 点を波底とする波高 H_i は

$$H_i = \frac{h(\tan\theta_{i-1} + \tan\theta_{i+1} - 2\tan\theta_i)}{2\tan\theta_i}$$

とおける。この場合は明らかな様に $i-1$ 及び $i+1$ は i を挟む波頂点となる。

(5) 陸上の高所から撮影する場合

当所（那珂湊気象観測所）の様に海岸近くの高所から撮影した場合，基準高 h の定め方について考えてみよう。当所の標高は２０.３ｍ之は勿論ＴＰを基準にしているものであり，又，当所で色々と資料を

利用している祝町検潮所のＤＬはＴＰ－0.８８３ｍとなつている。海面の高低は波浪や潮汐現象等によつて変化するが之等はこのＤＬを基準として決められるので，先ずＤＬからのカメラの高さを調べてみると一般に我々がカメラのファインダーをのぞいて構えた場合，地上高は約1.5ｍであるからＤＬからの高さは才３図では標高＋カメラの地上高＋0.８８３　即ち２0.3＋1.5＋0.８８３≒２２.7（ｍ）となる。そして波浪もなく異常気象潮もないとすれば或る時刻に於けるＤＬから静止水面までの水深，つまり潮位は推算値（又は実測値）から得られる。又波浪がある場合の振巾基準面と静止水面とは一致せず前者の方が幾分高くなるが実用的には，一致しているとみなし，最大波高を目測してその振巾（$\frac{波高}{2}$）を静水面に加えればＤＬから最高波頂面までの高さが一応得られる。従つて或る時刻の基準高は

$$h \doteqdot 22.7-（潮位＋波の目測最大振巾値）$$

として取扱えば，之からくる誤差を一応小さくとどめることが出来るものと思う。

Ⅲ　印画の実際的処理について

先ず撮影場所の如何に拘わらず，その場所に於ける$\varDelta\beta$を求めておかなければならない。$\varDelta\beta$は気層による光の屈折のため水平線低下の現象を起して変化するものであるが，之を考慮すると問題がかなり複雑になるし，その影響も実用上は無視することが出来る程度であると思われるので省略する。こうすると$\triangle\beta$はⅡの(1)で述べた様に簡単に$\tan\triangle\beta \doteqdot \sqrt{\frac{2h}{r}}$となり，式中ｒは極半径を用いても，赤道半径を用いても大差はないので平均値の6,３７１Kmを用いる。さて，水平線の明瞭な日に当所の露上から３５㎜カメラ（焦点距離５０㎜）で海面を撮影し，水平線を印画の center line の上方に入れた場合を例にあげて説明しよう。当露上の標高は２0.３ｍ尚カメラの地上高を1.５ｍとすればｈ＝２0.3＋1.5＝２1.8(m)となり，之から$\varDelta\beta$を算出すれば$\varDelta\beta=0°09'$となる。次にネガの一サンプルのサイズを測つてみたところ縦２４㎜，横３７㎜又，それを任意の倍率（手札版位が手頃かと思う）に引伸した印画のサイズは横１１9.6㎜，縦７8.7㎜であつた。そして之から算出した引伸倍率は小数一位の桁で縦，横一致し3.2倍となつた。次に焦点距離も倍率を乗じて補正しておかなければならない。即ち５０㎜×3.2＝１６0.0㎜となる。此処で注意しなければならないことは引伸ばした印画は決してトリーミングしてならないことでもしトリーミングすると引伸倍率を求めることが出来なくなつてしまう。

従つて出来上つた印画は黒枠のものでなければならない。次に印画面に center line を引き更に画面をよく見て一連した波頂や波底がよくわかるような処を選び center line に直交する直線（縦線）を引く。そしてこの直線上に波頂点，波底点及び水平線の位置をマークし，それ等に番号を印画の下から順につけて行く。

もし，波底点が波頂点に重なるか，かくれてわからない或いは又波底点をとりにくい様な場合は次の波頂点は前の波頂点をiとすれば$i+2$の番号を附しておく。今手許にある印画では center line から水平線までの間でしか番号附けが出来ないが（ center line より下は陸地になつているため）才１波頂点を１

として1,2,3,5,7,8,9, 10, 11, 13, 15 Hとなつた。此処で4,6, 12, 14がぬけているが之等は前記の波底点となる訳である。15〜Hは距離が遠いため測定出来ない。之はたとえマークすることが出来たとしても，式から明らかな様に測定誤差は $\tan\dot{\theta}_i$ に比例して大きくなり信頼度はかなり落ちてしまうので θ_i の大きい水平線近くのものは採用しない方がよいと思う。之等の一連番号からみて波の箇数は7ヶ位とれることになる。さて印画面上で center line から各入射点までの距離を測つた結果才1表の様になつた。そして才2図から明らかな様に

$$\tan\beta\infty=\frac{HP}{OP}=\frac{\text{center line から水平線までの距離}}{\text{焦点距離×引伸倍率}}=\frac{31.3}{160.0}=0.1956$$

$$\therefore\ \beta\infty=11°04'$$

此処ではIIの(1)の(イ)の場合を例にあげているのであるから

$\xi=\beta\infty+\triangle\beta=11°04'+0°09'=11°13'$ $\therefore$ $\omega=90°-\xi=90°-11°13'$ $=78°47'$ となる。同様にして βi を求めれば $\tan\beta_1=\frac{9.5}{160.0}$, $\tan\beta_2=\frac{12.0}{160.0}$ …… $\tan\beta_{15}=\frac{31.3}{160.0}$ となり更に此の場合 $\theta i=\omega+\beta i$ であるから之等の計算結果を一括して示すと才2表の様になる。

i	距　離 mm
1	9.5
2	12.0
3	15.8
4	
5	17.6
6	
7	19.1
8	20.0
9	22.2
10	22.5
11	24.3
12	
13	26.0
14	
15	26.8
H	31.3

才 1 表

i	$\tan\beta i$	βi	$\theta i=78°47'+\beta i$
1	0.0594	3°24′	82°11′
2	0.0750	4°18′	83°05′
3	0.0988	5°39′	84°26′
4			
5	0.1100	6°17′	85°04′
6			
7	0.1194	6°49′	85°36′
8	0.1250	7°08′	85°55′
9	0.1387	7°54′	86°41′
10	0.1406	8°00′	86°47′
11	0.1518	8°38′	87°25′
12			
13	0.1625	9°14′	88°01′
14			
15	0.1675	9°31′	88°18′

才 2 表

次に才2表のデーターを用いて波長を求めてみよう。波長計算の一般式は

$$L(i \sim i+2) = h(\tan\theta_{i+2} - \tan\theta_i)$$

であるが先ずhを明らかにさせなければならない。hはⅡの(5)で述べた様に$h \fallingdotseq 22.7-$(潮位＋波の目測最大振巾値)であるから，今潮位を1.0 m，波の目測最大振巾値を0.6 mとすれば$h \fallingdotseq 21.1$(m)となる。従つてiが1～3についてL(1～3)を求めれば

$$L(1\sim3) = 21.1(\tan 84^\circ 26' - \tan 82^\circ 11') = 21.1(10.260249 - 7.284418)$$

$$\fallingdotseq 62.8\ (\mathrm{m})$$

以下同様にしてL($i \sim i+2$)を算出すればよい。

次に波底 i に於ける波高H_iを求めるには先ず一般式は

$$H_i = \frac{h(\tan\theta_{i-1} + \tan\theta_{i-1} - 2\tan\theta_i)}{2\tan\theta_i}$$ であるからH_2については

$$H_2 = \frac{21.1(\tan 82^\circ 11' + \tan 84^\circ 26' - 2\tan 83^\circ 05')}{2\tan 83^\circ 05'}$$

$$= \frac{21.1(7.284418 + 10.260249 - 2 \times 8.243449)}{2 \times 8.243449} = \frac{22.3189259}{16.486898} \fallingdotseq 1.4(\mathrm{m})$$

以下同様にしてH_iを求めればよい。波高を目測した場合1 m位の誤差があつても之によるHiの計算誤差はせいぜい0.1 m以下であろう。勿論之は観測点から波浪までの水平距離によつても異なるが，試みに前例によりH_{10}を求めてみると，目測最大振巾値が0.6 mでは$H_{10} = 2.27$ mとなる。

つまり約$\frac{1}{2}$に見積つてしまつた訳であるが，最大振巾値を1.1 mとすれば$h \fallingdotseq 22.7-(1.0+1.1) \fallingdotseq 20.6$(m)之より$H_{10}$を求めれば$H_{10} = 2.22$となる。よつて誤差は$2.27 - 2.22 = 0.05$(m)となり，実用上之位の誤差は無視することが出来る。即ち目測による波高誤差の計算結果に及ぼす影響は実用上支障のない程度なので余り心配はないと思う。

Ⅳ 結　　び

以上述べてきた計算順序を箇条書的に列挙すれば次の様になる。

(1) hを明らかにし，之より$\triangle\beta$を求める。

(2) 更にhを求める。

(3) 印画面に center line を引き入射点をマークし更にそれ等に番号附けをする。

(4) 引伸倍率を求める。

(5) $\beta\infty$を求める。

(6) ξを求め更にωを算出する。

(7) βi を求め更にθi を算出する。この場合βi が＋になるか－になるか注意すること。

(8) L（i ～i ＋２）を計算する。

(9) Hi を計算する。

(10) 沖波を撮影した場合には $L=\frac{gT^2}{2\pi}$ の関係から周期Ｔ及び波速Ｖも算出する。

又，この方法による観測をルーチン化する場合には適当な計算シートを作つておけば便利である。然し波浪観測は一回の観測時間が２０分間，波の箇数にして１００ヶ位をサンプリングするのが普通であるが，此の方法では一枚の引画からせいぜい５～１０ヶしかえられないので 少なすぎるきらいがある。

然し之は目的に応じて撮影枚数を増せばよいと思う。とにかく更に検討の余地はあるが一枚の印画からでも大体の海面状態や波素を掴むことが出来，この方法もかなり役に立つと思われるので海洋観測の一助にでもと紹介した次才である。大方の御指導を戴ければ望外の喜びである。

参考文献

(1) 海と空 VO1．24 No. 8 （昭和１９年８月）……海洋気象学会発行

(2) 応用水理学Ⅱ 石原藤次郎編 （昭和３３年４月）……丸善株式会社発行

(3) 気象学ハンドブック 気象学ハンドブック編集委員会 （昭和３４年１月）……技報堂発行

(4) 球面星学 川畑幸夫著 （昭和１６年８月）……地人書館発行

(5) 理論気象学（中） 岡田武松著 （昭和１８年６月）……岩波書店発行