チリ地震津波をめぐって IV*

三 好 寿**

On the Tsunami of May 24, 1960 (IV)

Hisashi MIYOSHI

Abstract: The areas which should be watchful against the tsunamis are (1) the V-shaped or U-shaped bays, (2) the tied islands, and (3) the areas which lie between the points and the roots of the headlands. The highest wave in Hokkaido (Japan) attacked western side of Erimo Headland on May 24, 1960. The distributions of energies along the coast of a headland being attacked by the tsunamis of various directions of advances, can be analysed by the calculus of variations. With the developments (the increases of the populations) of the areas around the headlands, this investigation should be pushed.

1. 緒 言

1961年4月神戸における海洋学会で紹介した霧多布の復興の模様***のつけ足しとして発表した、岬のつけ根と先端の中間の区域に波のエネルギーが収斂するという事実について述べる。これは今後解析を充分に進めて、「岬と津波」という題(仮題)で英文をもつて執筆する予定でいる。

2. 津波に対して警戒すべき地域

チリ地震津波に対してもそうであつたが、津波に対して警戒すべき地域は、

- (1) U字型, V字型の湾の湾奥。
- (2) 陸繋島(北海道で1, 2番目に被害の大きかつた霧多布, 函館は何れも陸繋島の上に発達した街である)。
- (3) 岬のつけ根と先端の中間の区域。

である。(3)が(1), (2)に比べて目立たないのは人口が少なく, また常々しけの脅威にさらされていて抵抗力を持つてゐるからである。今後鉄道

の敷設などに伴ない, この地域も(1), (2)と並んで注目されなければならない。筆者らはこういつた観点から, 襟裳岬の, 特に西岸の調査に力を注いだ。その結果, チリ地震津波が北海道で一番強く来襲した地域はこの地域であることが判明した。

3. 津波の高さの表現法

こうした事情を定量的に説明するのに, 1つ指摘しなければならないことがある。それは来襲した津波の高さの表現法である。筆者らの作製した報告書では最高水位を東京湾中等潮位から測つた高さだけをしるしている。しかしこの方法だと, たとえば満潮時に海面が東京湾中等潮位から 1.5 m あつたところへ 0.1 m の津波がやつてきたとすると, 1.6 m の津波がやつてきたとされるわけである。もう1つの表現の仕方は最大増水高すなわち推算潮位に加わつた増水高をあらわすことである。これだと, たとえばAの津波の平均2倍の高さの津波Bがやつてきた場合どうなるかという研究の際に, Aの場合の波高分布の各値を2倍して見れば目安がつく。さらに襟裳岬沿岸の各点にどのようにエネルギーが分布したかを見る際, 後者の表現方法だと単に波高を自乗して, その値の分布を見ればよい。両者の表現方法による2つの値を併記しようという気象庁の案を全面的

* 1961年4月海洋学会(神戸)にて講演。1961年5月2日受理。

** 東京水産大学物理学教室。Tokyo University of Fisheries

*** 同じ陸繋島の Talcahuano (チリ) が津波対策として非常に不十分な防潮堤を計画しているので, この霧多布の防潮堤計画を大きく印刷し, 英文の論文として Talcahuano に送付する象定でいる。

Fig. 1. The Tsunami of May 24, 1960, attacking Shoya which lies on the eastern side of Erimo Headland (Hokkaido, Japan).

に支持する以所である。同様なことは最低水位、最大減水高についてもいえるが、これは住民の証言の信頼度がきわめて低い。

さて筆者がこれから行なう予定の研究は当然最大増水高をもつて表現されなければならないが、ここでは科学研究費によつて行なわれた踏査の速報に示された最高水位をとりあえず引用する。

西岸の波高分布に目を通すと、ニカンベツ川口(岬の先端より直線距離で 25 km 弱)で最高値 (5.0 m) を示している。東岸では測点密度が小さいが、庶野(岬の先端より直線距離で 15 km)で最高値 (3.7 m) が現われている。西岸で 15 km のところは幌泉であるが、ここでは津波は弱い。すなわち東西両岸の波高分布に非対称が見られる。これは津波が東南からきたことを考えるとむしろ当然予想されることである。(筆者が東南から一様な強さの波がきたとして画いた refraction diagram† では ray がニカンベツ川口と庶野に集中することが示された。) したがつて西南からくる(三陸)津波の場合には、この非対称が逆に現われるであろうことおよび真南からくる津波では平均の現象が現われることも当然想像されるのである。

こうした理論は警報を出す際に役立てなければ

† 紛失。

ならないので、数理的な解析がどの程度この間の消息を表現するか追求して見たいと思う。

4. 解析 I

まず xy 座標を取り、半直線 Oy をもつて岬とする(第2図参照。以下同様)。 x 軸は当然東方を向き、やつてくる津波の波面は

$$y = mx - b \quad (1)$$

であるとする。この直線は x 軸と θ ($\tan\theta = m$) なる角度で交わつていているとする。

つぎに海の深度分布であるが、第1, 4象限では

$$\text{depth} = k|x| \quad 0 < |x| < a \quad (2)$$

$$= K|x| + B \quad a < |x| < A \quad (3)$$

$$= H \quad A < |x| \quad (4)$$

がそれぞれ、大陸棚、大陸棚斜面、大洋底をあらわすものとする。当然 $k < K$, $ka = Ka + B = h$, $KA + B = H$ とする。

また第2, 3象限では極座標をもつてあらわし

$$\text{depth} = kr \quad 0 < r < a \quad (2')$$

$$= Kr + B \quad a < r < A \quad (3')$$

Fig. 2. The figure showing a headland and the refracting rays of the tsunami. Oy shows the headland. I, II and III are the rays of the tsunami. And the broken lines are the depth contours.

$$\text{depth}=H \quad A < r \quad (4')$$

がそれぞれ、大陸棚、大陸棚斜面、大洋底をあらわすとする。

そして左右対称の現象であるから、 $\theta=0\sim\pi/2$ の範囲の研究をすればよい。まず原点 O から波面直線に下した垂線は明らかに 1つの ray であつてこれを I と呼ぶ。また点 $(A, 0)$ から下した垂線は $(A, 0)$ をこえて曲線となり、 S 点 $(0, y_1)$ で岬の東岸にはいる。この ray を III と呼ぶ。この 2本の ray の間にはさまれた ray を一応研究して見る。いま簡単な場合として、 $k=K$ すなわち $B=0$ の場合を扱つて見る。

今 I, III の間にある ray を II として、II が $r=a, y=0, x=0$ なる 1 円周、2 直線と交わる点をそれぞれ $P(A, -\theta_0)$ (極座標)、 $Q(x_0, 0), R(0, y_0)$ とする。

そうすると、 $(A, 0)$ をこえた III の曲線部分および Q をこえた II の曲線部分をあらわす方程式は一括して

$$\int \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{g \cdot \text{depth}}} dx \rightarrow \min. \quad (g \text{ は重力加速度}) \text{ より}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial}{\partial y'} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{\text{depth}}} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{y'}{\sqrt{1+y'^2} \sqrt{\text{depth}}} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\therefore \frac{y'}{\sqrt{1+y'^2} \sqrt{\text{depth}}} = L \quad (6)$$

$$y' = \frac{-L\sqrt{kx}}{\sqrt{1-L^2kx}} = -u \quad (7)$$

$$\therefore y = \frac{1}{L^2k} \left(\frac{u}{1+u^2} - \tan^{-1} u \right) + M \quad (8)$$

ray III については、 $x=A, y=0$ で $y'=-1/m$,

$y=0$ であることから

$$L = \sqrt{\frac{1}{H(m^2+1)}} \quad (9)$$

$$M(=y_1) = \frac{H(m^2+1)}{k} \tan^{-1} \frac{1}{m} - \frac{Hm}{k} \quad (10)$$

を得る。

5. 解析 II

つぎに ray II については、さらに $\widehat{PQ}$ の方程式は曲座標を用いて

$$\int_{x_0}^A \frac{\sqrt{1+r^2\theta'^2}}{\sqrt{kr}} dr \rightarrow \min. \quad \text{より}$$

$$\frac{1}{\sqrt{kr}} \frac{r^2\theta'}{\sqrt{1+r^2\theta'^2}} = N \quad (11)$$

$$\therefore \theta' = -\sqrt{\frac{N^2k}{r^3 - N^2kr^2}} \quad (12)$$

$$\theta = -\int \frac{\sqrt{N^2k}}{\sqrt{r - N^2k}} \frac{dr}{r} + \theta_1 \quad (13)$$

$\sqrt{r - N^2k} = w$ とすれば

$$\begin{aligned} \theta - \theta_1 &= -\int \frac{2\sqrt{N^2k}}{w^2 + N^2k} dw \\ &= -2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{r - N^2k}}{\sqrt{N^2k}} \end{aligned} \quad (14)$$

を得る。したがつて

$$r = N^2k \sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2} \quad (15)$$

(8) 式と (15) 式をつないで見よう。まず (15) 式の曲線が P 点 $(A, -\theta_0)$ を通るには (15) 式は

$$r = A \frac{\sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2}}{\sec^2 \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}} \quad (16)$$

でなければならない。つぎにこの曲線が P 点で $-1/m$ なる方向係数を持つためには

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(r \sin \theta)}{\Delta(r \cos \theta)} &= \frac{\frac{\Delta r}{\Delta \theta} \sin \theta + r \cos \theta}{\frac{\Delta r}{\Delta \theta} \cos \theta - r \sin \theta} = \frac{\sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2} \tan \frac{\theta - \theta_1}{2} \sin \theta + \sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2} \cos \theta}{\sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2} \tan \frac{\theta - \theta_1}{2} \cos \theta - \sec^2 \frac{\theta - \theta_1}{2} \sin \theta} \\ &= \frac{\cos \left(\frac{\theta - \theta_1}{2} - \theta \right)}{\sin \left(\frac{\theta - \theta_1}{2} - \theta \right)} = \cot \left(\frac{\theta - \theta_1}{2} - \theta \right) = -\cot \frac{\theta + \theta_1}{2} = -\frac{1}{m} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\therefore \left[\frac{\theta + \theta_1}{2} \right]_{\theta = -\theta_0} = \theta \quad (18)$$

したがって $\theta_1 = 2\theta + \theta_0$ (19)
これより (16) 式は

$$r = A \frac{\sec^2\left(\frac{\theta - \theta_0}{2} - \theta\right)}{\sec^2(\theta + \theta_0)} \quad (20)$$

となる。これと (8) 式をつなぐには、 Q の位置の x_0 とそこにおけるこの曲線の方向係数を 出さねばならない。

(20) において $\theta = 0$ として

$$x_0 = A \frac{\sec^2\left(\frac{\theta_0}{2} + \theta\right)}{\sec^2(\theta_0 + \theta)} \quad (21)$$

また方向係数は同じく $\theta = 0$ として

$$\begin{aligned} \frac{d(r \sin \theta)}{d(r \cos \theta)} &= -\cot \frac{\theta + \theta_0}{2} \\ &= -\cot\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

$\therefore$ (7) 式より

$$\begin{aligned} \frac{L\sqrt{kx_0}}{\sqrt{1-L^2kx_0}} &= \cot\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) \\ \therefore L &= \frac{\cos\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right)}{\sqrt{kx_0}} \end{aligned} \quad (23)$$

また (8) 式より、 R 点の座標は

$$\begin{aligned} y_0 (=M) &= \left[\frac{1}{L^2 k} \left(\tan^{-1} u - \frac{u}{1+u^2} \right) \right]_{x=x_0, u=\cot(\theta+\theta_0/2)} \\ &= A \frac{\sec^4\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right)}{\sec^2(\theta + \theta_0)} \left[\frac{\pi}{2} - \theta - \frac{\theta_0}{2} - \sin\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) \cos\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

となり、(24) において $\theta_0 = 0$ とおけば、(10) 式にひとしくなることはいうまでもない。

6. 結 び

これで 1 本の ray に対して襟裳岬東岸の 1 点を対応させることができたわけである。以上は解析だけであるが、すでに筆者は襟裳岬に対して refraction diagram を画いているので、それを追求するに要する解析方法をここに示すのは意義

あることと信じる。当然この解析は襟裳岬西岸にもあてはめられ、かつ $k < K$ の場合に拡張されなければならない。これは他日示すことにする。また大陸棚斜面における波の反射* を考えなければ、途中の曲線の形は考えなくてよく、(24) 式のみでエネルギー分布の大局をつかむことができる。

文 献

- 1) 坂井英太郎 (1943): 変分法, 共立出版株式会社

* これはほぼ一様と見てよく、エネルギー分布の形には大きな影響を持たない。