

陸棚における津波のソリトン分裂

**** 土屋 義人・安田 孝志
** 山下 隆男・芝野 真次

1. 緒言

日本海中部地震による津波によって、わが国では、死者・行方不明者 100 名に及ぶ犠牲と港湾構造物など大きな被害を受けた。このとき、能代沖に來襲した津波が浅海において数個の短周期波に分裂したことが多くの人びとによって目撃され、また撮影された¹⁾。また、能代海岸においては、來襲した津波が反射し、それが進行波と下渉したり、屈折して、さらに数多くの短周期波に分裂したらしいことも観察されたようである。これらの現象は、いずれも遠浅な陸棚における津波の非線形挙動として理解すると、きわめて興味深いものであるし、またこのことは浅海における津波の特性を知るうえにおいても重要なことと思われる。

本研究では、このような遠浅な陸棚における津波の挙動を究明する第一歩として、津波の先導波がなぜ陸棚で短周期波に分裂するかを非線形波動の変形特性として考察する。すなわち、現象を一次的に取扱ひ、傾斜海浜上における KdV 方程式を用いて、既知の条件を与えて、その空間発展形の方程式の数値解を求め、能代沖のような遠浅な陸棚において果して津波がソリトン群に分裂するかどうかを検討する。

2. 基礎方程式

陸棚上における津波の 1 次元変形を理論的に取扱うために、ここでは傾斜海浜上における KdV 方程式を用いることにする。その空間発展形の方程式を示し、その計算法について述べる。

1) 空間発展形の KdV 方程式

傾斜海浜上における KdV 方程式は、すでに角谷²⁾によって導かれ、また著者ら³⁾によってその高次項の導入が行なわれている。図-1 によって記号を定義すれば、著者らにより減縮摂動法によって導かれた基礎方程式は、次式で表わされる。

$$\eta_{\tau} + \frac{3}{2c_0^3} \eta \eta_{\xi} + \frac{c_0}{6} \eta_{\xi\xi\xi} - \frac{B^*_{\tau}}{4c_0^2} \eta = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\eta = z'/h$, $x^* = x/h_1$, $t^* = t\sqrt{g/h_1}$, $\tau = \varepsilon^{3/2} x^*$, $\xi = \varepsilon \sqrt{2} (\int dx^*/c_0 - t^*)$, $c_0 = \sqrt{h/h_1}$, および $B^* = B/h_1$ である。ただし、 ε は展開パラメータであって $\varepsilon = (h_1/L_1)^2 \ll 1$ である。

いま、図-1 に示すように、座標原点における波高を H_1 、陸棚の勾配を $\tan \vartheta$ とし、かつ $\eta' = z'/H_1$ として表わせば、式(1)は次のように変形される。

$$\eta'_{\tau} + \frac{3U_{\tau} c^*}{2c_0^3} \eta' \eta'_{\xi} + \frac{c_0}{6} \eta'_{\xi\xi\xi} - \frac{\tan \vartheta}{4\varepsilon^{3/2} c_0^2} \eta' = 0 \quad (2)$$

ここに、 $U_{\tau} = H_1 L_1^2 / h_1^2$ で定義される Ursell

**** 京都大学教授，防災研究所

*** 岐阜大学助教授，工学部

** 京都大学助手，防災研究所

* 京都大学大学院学生

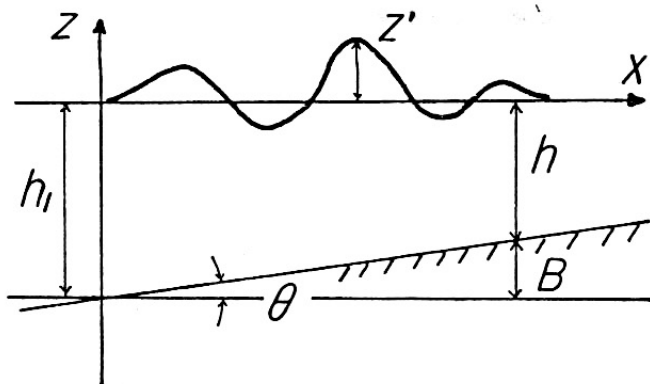


図-1. 座標系と記号

数である。

式(1)あるいは式(2)は、いずれも時間発展形の方程式であるので、周期Tが保存されるとして $\xi' = c^* \xi$ を用い、空間発展形の方程式に変換すれば、次のように表わされる。

$$\eta_{\xi'}^2 + \frac{3 U_R c^*}{2 c_0^3} \eta' \eta' \xi' + \frac{c_0 c^{*3}}{6} \eta' \xi' \xi' \xi' - \frac{\tan \vartheta}{4 \varepsilon \nu^2 c_0^2} \eta' = 0 \quad (3)$$

したがって、沖波としての津波波形を与えて陸棚の先端における諸条件を shoaling として計算し、これを式(3)の境界条件として与えれば、陸棚上における津波の非線形挙動、すなわち任意地点における時間波形を計算することができる。

2) 数値計算法

式(3)の数値計算に当っては、周期条件のもとに陰解法を用いて、次のように差分表示することにした。ただし、式(3)における η' および ξ' は η および ξ と表わす。

$$\begin{aligned} & \frac{\eta_j^{n+1} - \eta_j^n}{\Delta \tau} + \frac{U_R c^*}{4 c_0^3 \Delta \xi} (\eta_{j+1}^{n+1} - \eta_{j-1}^{n+1}) \\ & (\eta_{j+1}^n + \eta_j^n + \eta_{j-1}^n) + \frac{c_0 c^{*3}}{12 (\Delta \xi)^3} (\eta_{j+1}^{n+1} \\ & - 2 \eta_{j+1}^{n+1} + 2 \eta_j^{n+1} - \eta_{j-2}^{n+1}) \\ & - \frac{\tan \vartheta}{4 \varepsilon \nu^2 c_0^2} \eta_j^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち、未知数 η_j^{n+1} ($j=1, 2, \dots, 4$) の連立1次方程式として、 $n, n+1, n+2, \dots$ と逐次数値計算によって求めることができる。

3. 津波のソリトン分裂

前述した基礎方程式を用い、浅海における津波の非線形挙動として、能代沖で目撃されたように、発生した津波が果して短周期波に分裂するかどうかを数値計算によって考察する。

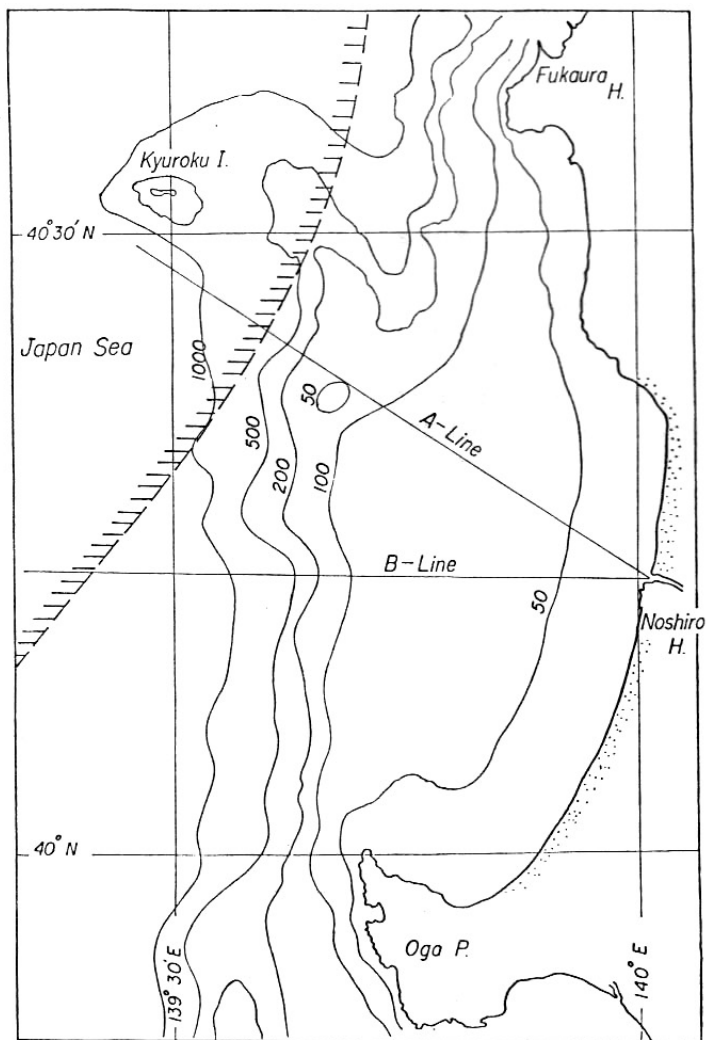


図 - 2. 能代沖の海底地形

1) 対象海域

この数値計算において対象とした海域は、図-2に示すように、能代海岸からその陸棚の海域である。図中には、推定された津波の波源の東端部を点線で示してある。この海域において、能代港より波源に直角な方向および東西方向の2測線（それぞれA-line およびB-line）における海底地形の断面を示すと、図-3のようになる。これらからわかるように、この海域は非常に遠浅で、離岸距離約30 km までは平均勾配約1/400程度で、陸棚の先端の水深は100m程度であり、それより急深している。また、より浅海部では、海底勾配は1/50程度となっている。したがって、本数値計算では、陸棚の先端における水深を100mとし、水深20mまで勾配1/425とし、それ以浅では勾配1/50とする。

2) 数値計算の条件

発生した津波の特性として既知なものは、次のようである。まず、津波の入力波形は、先導波を対象として、簡単のために正弦波とする。その周期は、津波スペクトルの一例を図-4に示すように、7 min から8 min程度であるが、波高または振幅については不明であるから、ここでは能代港における津波の最大偏差および最高潮位を比較の対象とする。しかし、能代港では検潮記録の一部が欠測していたが、港湾技術研究所⁴⁾によれば、第1波の最大偏差は1.94mで最高潮位は2.08mと見積られている。したがって、本数値計算においては、周期を7 min および8 min とし、入射波の沖波波高を適当に変えて、能代港付近において、前述した最大偏差および最高潮位の値になるような場合に、果して津波が短周期波に分裂するかどうか、また分裂した場合の個数などを確かめることにする。

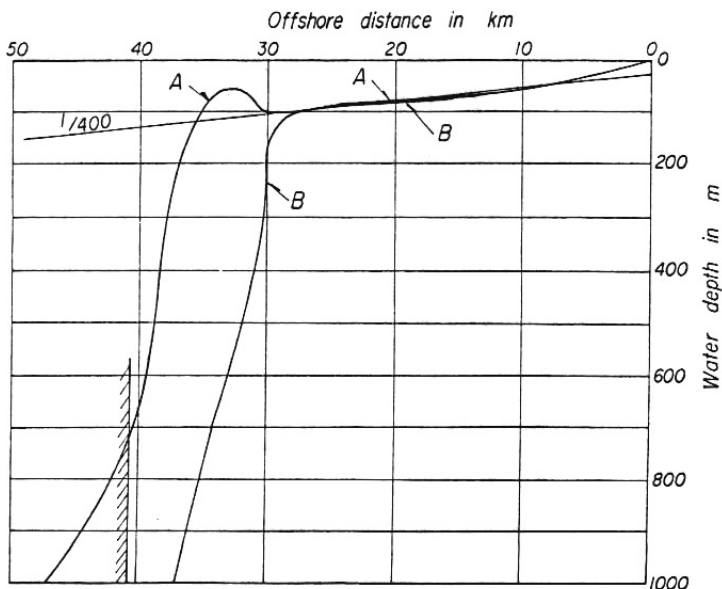


図-3. 能代沖の海底断面形状

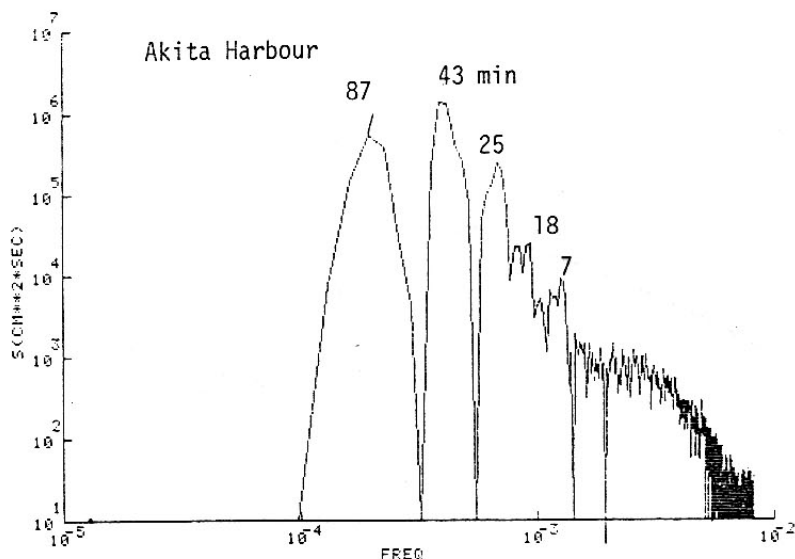


図-4 秋田港における津波のスペクトル

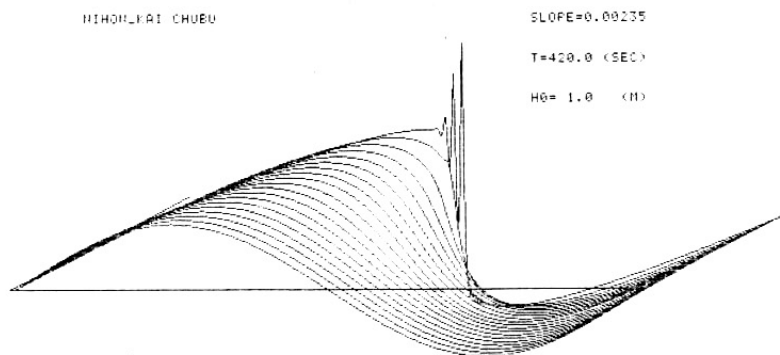
3) 数値計算の結果

前述した条件によって数値計算した結果の数例を図-5および6に示す。図-5は周期7 minで、沖波の入射波高を1 mおよび2 mとした場合であり、また図-6は周期8 minの場合である。ただし、これらの図における初期波形は陸棚の先端におけるものであり、そこから50 ステップごとに逐次 $\bar{x} = x/h_1$ ($h_1 = 100$ m) の距離における波形を示している。

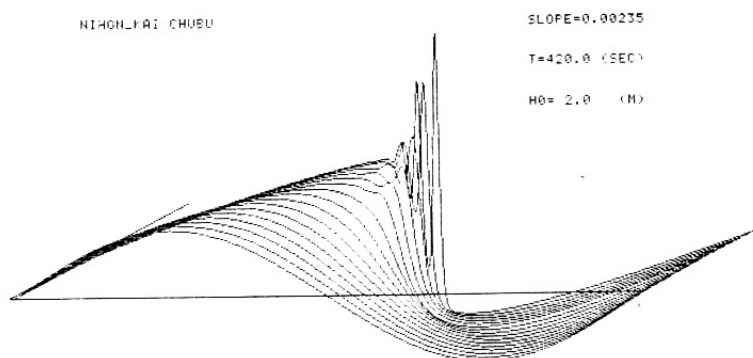
これらの結果によると、いずれの場合にも、津波は伝播し、非線形が卓越するに従って、波高が増大し、波の峰部の曲率が大きくなっていくが、あるところで見掛上短周期波と思われるようにソリトン群に分裂することがわかる。そして、分裂したソリトン群は3個または4個程度で、見掛上の周期は5 sec から12 sec 程度である。これらのうち、周期7 minおよび8 minで波高1 mの場合には、陸棚の先端における shoaling factor はそれぞれ約3.3および3.4となっているので、ソリ

トンに分裂したときの平均水位に相当する偏差はそれぞれ2.2 mおよび2.3 m程度と推定される。したがって、このまま能代港に進入したとすれば、これらの値は前述した能代港における津波偏差と一対比できるものであることがわかる。また、これから推定される最高潮位も、日本海沿岸における潮位偏差が小さいことを考慮すれば、能代港における前述した実測値と対比できるものと思われる。これらのことを総合すれば、能代沖の陸棚においては、今回の地震津波がその非線形挙動として3個程度のソリトン群に分裂したことをある程度裏付することができるであろう。

一方、今回の津波の非線形挙動に関して、港湾技術では、縮尺1/200の水理模型実験を実施して、短周期波への分裂のみならず、反射波との干渉によってさらに数多くの短周期波に分裂することを確かめている。ただし、海底勾配は1/200であって、前述した数値計算の条件とはかなり異なるが、発生したソリトン群の大きさについて比較してみると

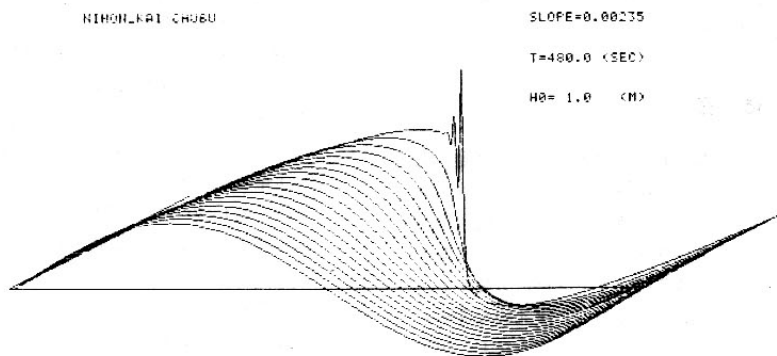


(a) 波高 $H_0 = 1$ m の場合

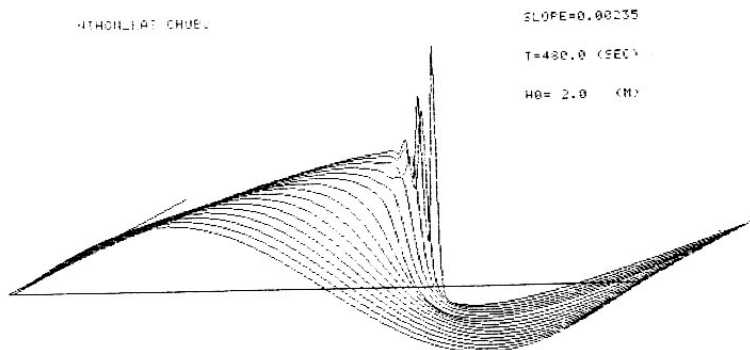


(b) 波高 $H_0 = 2$ m の場合

図-5. 周期 7 min の津波のソリトン分裂



(a) 波高 $H_0 = 1$ m の場合



(b) 波高 $H_0 = 2$ m の場合

図-6. 周期 8 min の津波のソリトン分裂

は興味がある。すなわち、初期波形と海底勾配が異なるので、直接の比較はできないが、発生したソリトンの特性はかなり実験結果と対比できるものとなっている。

4. 結 語

以上、陸棚における津波の非線形挙動を傾斜海浜上におけるKdV方程式によるソリトン分裂として取扱い、能代沖のような遠浅な陸棚に今回のような周期の短い津波が来襲すると、その先導波はソリトン群に分裂する可能性のあることを示した。2次元的な非線形挙動のみならず、海底摩擦の導入など、根本的に検討すべきことが多いけれども、津波のソリトン分裂の現状の一端を理解することができたと思っている。

津波の非線形挙動に関するこの小文が、東北大学工学部津波防災実験所の発展に、いささかでも寄与することができれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会東北支部日本海中部地震調査委員会：日本海中部地震報告，土木学会誌，1983年8月号，1983，pp. 67-78.
- 2) 角谷典彦：分散性媒質中の非線形波動—Korteweg-de Vries 方程式を中心として—，Nagare, Vol. 3, No.2, 1971, pp.5-26.
- 3) 土屋義人・安田孝志：浅海における波の変形—特に soliton の発生について—，第20回海岸工学講演会論文集，1973，pp.397-401.
- 4) 谷本勝利・高山知司・村上和男・村上 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No.470，1983，299p.