

波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算

佐 藤 慎 司*

1. はじめに

1993年7月12日午後10時17分に北海道南西沖で発生した地震は大きな津波を引き起こし、奥尻島を中心に甚大な被害をもたらした。津波の挙動については直後の現地調査（例えば Hokkaido Tsunami Survey Group, 1993）や数値計算（例えば高橋ら, 1994；山下ら, 1994）により解明が進んでいるが、地震発生が夜であったため目撃者の情報が断片的であり、未解明の部分も多い（首藤ら, 1994）。特に被害が集中した青苗地区周辺の海底は海脚を有する特徴的なものであり、津波の伝播に伴う変形機構が問題となる。

従来の津波の伝播計算は浅水方程式を基礎方程式とするもので、そのままでは分裂や砕波現象を模擬できない。波の分裂や砕波を考慮した計算例には、後藤（1984）や南・真野（1987）の例があるが、平面的な津波の伝播に対して計算を行いその結果を検証した例はない。本研究では Boussinesq 方程式を用いて分裂と砕波を含む津波を計算するモデルを開発し、実験結果によってこれを検証する。

2. 計算の方法

(1) 基礎方程式

数値計算は、Boussinesq 方程式に砕波による運動量散散項を導入した佐藤・Kabiling（1993）のモデルを用いて行なった。基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ &= \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial x \partial y \partial t} \right) - \frac{g n^2}{d^{7/3}} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \\ &+ \nu_e \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &= \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial y^2 \partial t} \right) - \frac{g n^2}{d^{7/3}} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \\ &+ \nu_e \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 η は水面変動、 Q_x 、 Q_y はそれぞれ x 、 y 方向の線流量、 h は静水深、 $d (= h + \eta)$ は全水深、 $n (= 0.026 \text{ m}^{-1/3} \text{ s})$ は Manning の粗度係数、 g は重力加速度、 ν_e は渦動粘性係数である。計算は ADI 法を用いて行なった。入射境界を除くすべての境界は完全反射境界とし、遡上は考慮しない。入射境界では強制水位を与えた。

後藤（1984）は、水深 30 m より浅い領域でのみ分散項を考慮すれば十分であり、格子幅は 10 m 以下とすることが必要であると述べている。本研究で対象とする縮尺 1/250～1/1000 程度の条件で考えれば、模型では、水深 3 cm～12 cm より浅い領域で分散項を考慮する必要があること、また、格子幅を 1 cm～4 cm 以下とする必要があることになる。本研究では水深 15 cm 以下の浅海域で分散項を考慮し、波の分裂が問題となる領域では格子幅を最小 2 cm とした。

(2) 砕波による運動量混合

砕波による運動量の混合については、規則波に対しては佐藤・Kabiling（1993）が提案したように、エネルギー減衰係数 f_D を用いて評価した渦動粘性係数を用いれば良い。また、不規則波に対しても、個々の波の砕波を判定して渦動粘性係数の空間分布を与える方法が片山・佐藤（1993）により示されている。しかし、ここで対象としているような、分裂しながら砕波する波については、砕波条件やエネルギー減衰について不明確な点が多い。本研究ではできるだけ簡単な方法で砕波の効果を取り込むこととし、砕波の判定は、水表面における水粒子速度 u_s と波の位相速度 $C = \sqrt{g(h + \eta)}$ との比が限界値を越えた時に砕波が起こると考えて決定した。限界値については従来の研究により、0.4～0.6 程度の値となることが報告されているが、本研究では分裂波の波高が実際よりやや過小評価される傾向にあることを考慮して 0.4 とした。また渦動粘性係数は、砕波前は水の分子動粘性係数

とし、砕波後についてはその空間分布まで与えることは困難なので、最も深い砕波点より浅い領域では一定値として次式で与えた。

$$\nu_e = \alpha \sqrt{g h_{b \max}} \cdot h_{b \max} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $h_{b \max}$ はその時刻における最も深い砕波点の水深であり、 α の値は3とした。

3. 斜面上における分裂と砕波

鶴谷ら (1984) は日本海中部地震津波の伝播機構を検討するため、長さ 163 m の水路を用いて長波の分裂・砕波変形と遡上に関する実験を行なった。ここではそのうち勾配 1/200 の斜面上に周期 40 s の押し波初動の波が入射する条件に対して計算との比較を行なう。波形記録をみると、水深 50 cm の G 地点での波形はほぼ正弦波とみなして良いので、計算では G 地点を入射境界とし、そこで実験条件に対応する正弦波を与えた。

図-1 は水深 5.6 cm の C 地点における第 1 波の波形を示したものである。図中で e は造波板の片振幅 (単位 mm) である。この地点では砕波は生じていない。波高が大きくなるほどソリトンの発達が明瞭になり、分裂した波の波高も高くなっており、実験結果と良く一致している。浅水方程式で計算した結果が点線で示されており、こちらはソリトンの発達はみられない。

図-2 は、 $e=350$ の条件に対して第 1 波の波形を示し

たものである。実線は砕波を考慮しない計算結果であり、破線は砕波を考慮した計算結果を示している。砕波による運動量交換を考慮することにより、波の分裂が抑制される傾向がある。実験結果でも同条件では S 地点では波は分裂しておらず、計算との対応は良い。本モデルにより、分裂しながら砕波する非線形分散波列の伝播を精度良く計算できるものと言える。

4. 奥尻島南部における津波の伝播

田中ら (1994) は北海道南西沖地震津波の伝播機構を検討するため、30 m×35 m の水槽に奥尻島南端部付近の無ひずみ模型 (縮尺 1/1100) を設置して実験を行なった。水槽壁は完全反射と考えられるので有意なデータが得られるのは第 1 波の変形のみである。したがって計算でも第 1 波のみを対象とすることとし、奥尻島周辺の第 1 波の変形に影響を及ぼす範囲を抽出して水槽のほぼ半分の 15 m×25 m の領域を計算領域とした。実験では津波の伝播は 30 本の波高計で計測するとともに VTR カメラで記録されている。ここでは実際の条件に近いと考えられる入射波高 4 mm の波について結果を示すことにする。

図-3 に、計算領域と実験における波高計の配置を示

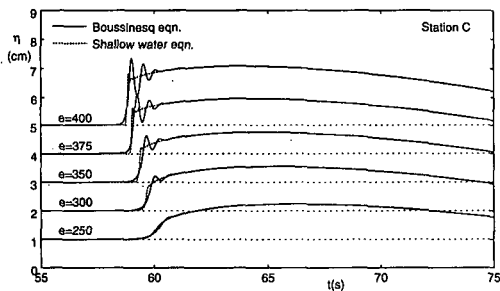


図-1 波の分裂

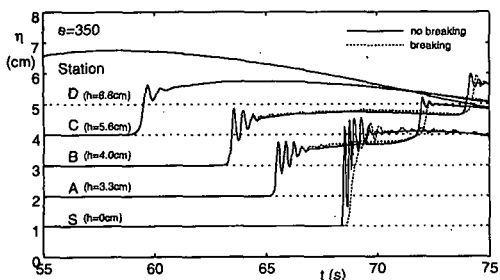


図-2 波の分裂と砕波変形

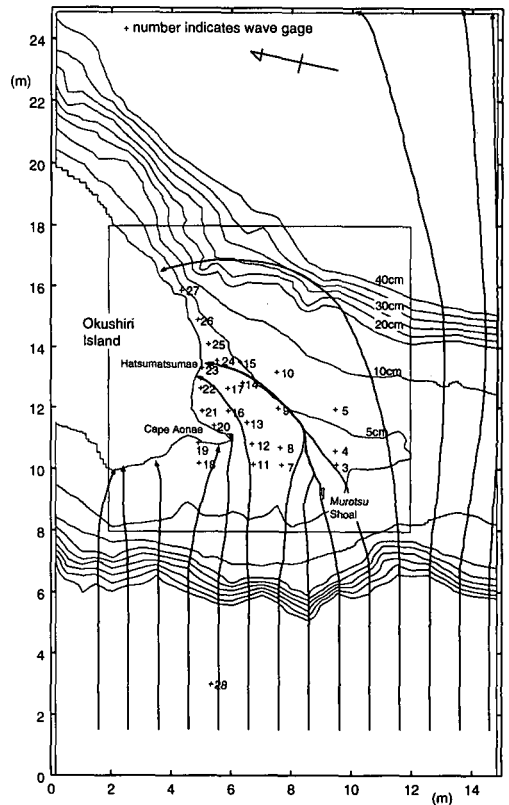


図-3 計算領域

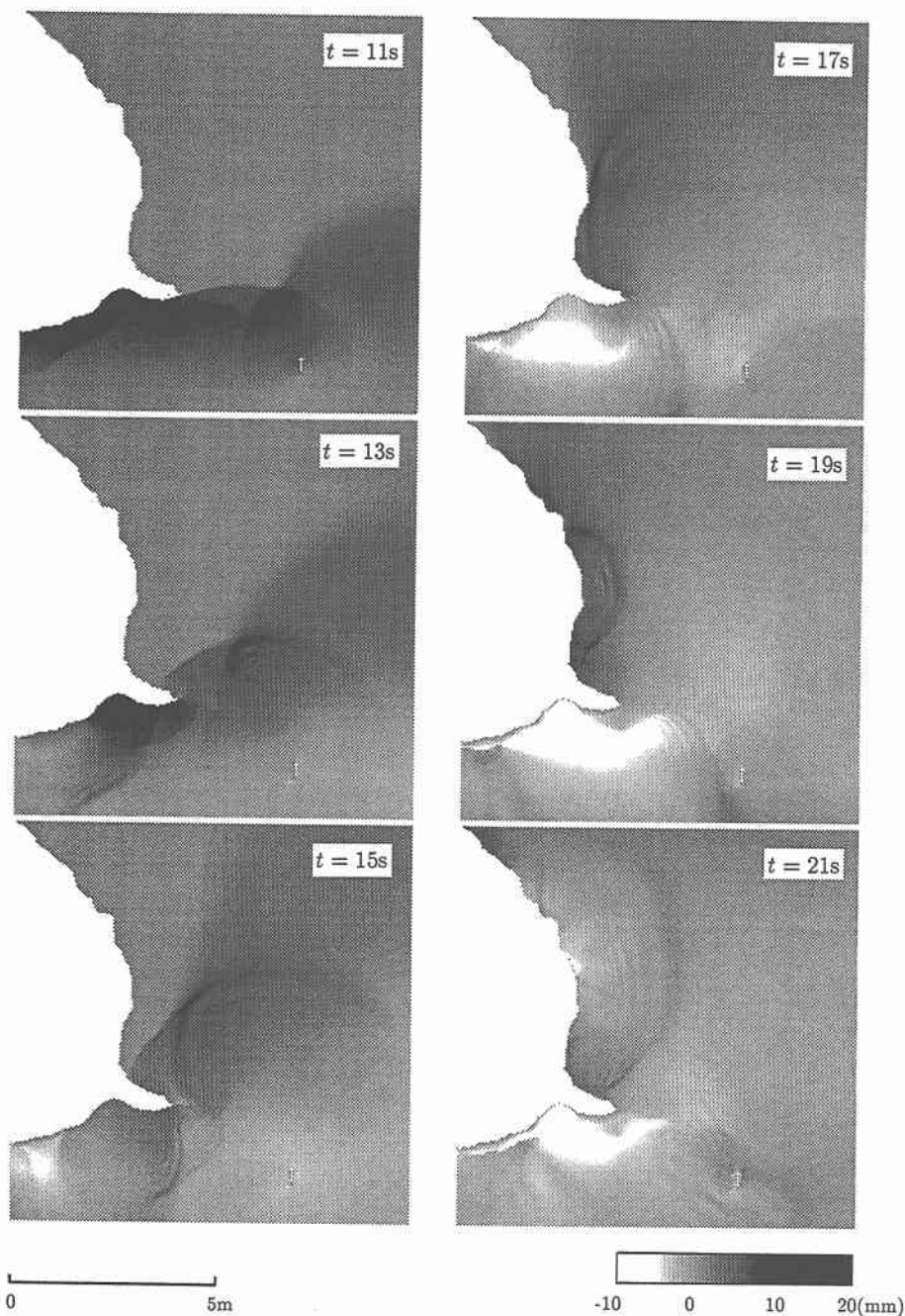


図-4 津波の伝播

す。図中の矢印は計算された波峰の伝播経路を示している。図中の島周辺の正方形領域が2 cm 格子, それ以外は10 cm 格子を基本とした。格子数は550×650である。時間ステップは分裂した波の高さが再現できるように0.01 sとした。入射波形は造波装置前面に設置したNo. 28の波高計の波形記録をもとに定めた。

図-4に津波第1波の伝播状況を示す。図はBousinesq方程式を用いた砕波を考慮しないモデルによる計算結果である。図中 t は計算開始からの時間である。まず、 $t=11s$ 付近で青苗岬西側(図では下側)で高い水位がみられる。計算では遡上を考慮していないが、実際にはこの時点で第1波が青苗岬先端を西側から襲ったもの

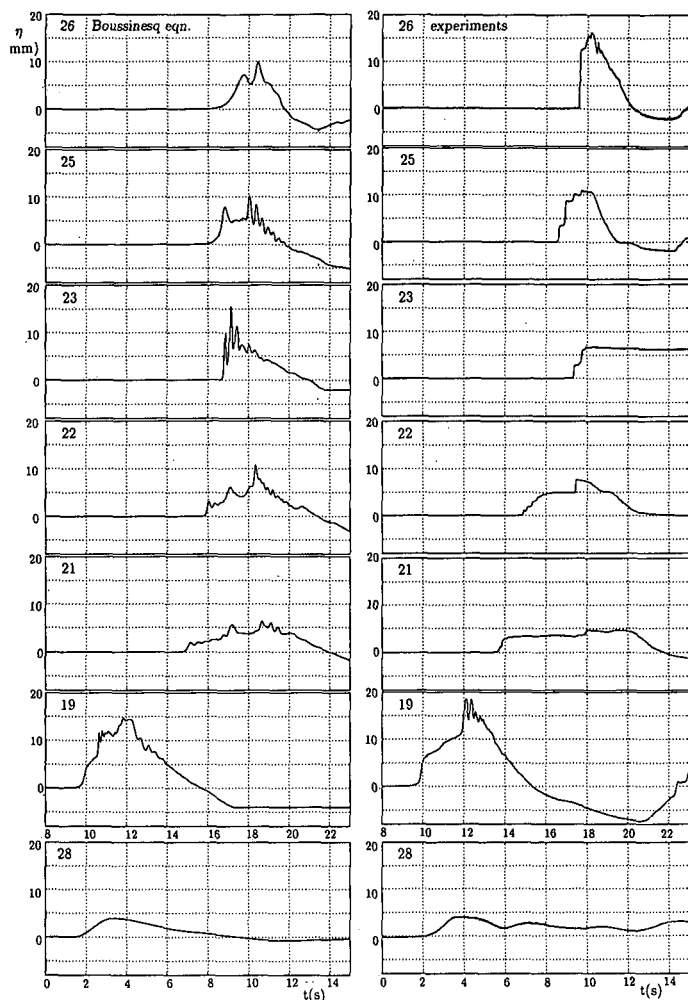


図-5 水面波形の比較

と考えられる。この時点で室津島の両側を回り込んだ波は屈折し、波峰が交差する所では高い波高となり分裂し始めている。青苗岬を回り込んだ波は岬の東側を進行し、室津島から屈折した波高の大きい波は $t=17$ s で初松前付近に到達する。初松前付近で反射した波はその後円筒波を形成し、青苗地区を東側から襲う。第1波が青苗岬先端を西から襲ってから約8 s 後（現地換算で約4分30秒後）に、第2波が岬の付け根を東から襲ったことになる。実際には首藤ら（1994）も報告しているように、奥尻島の北端から回りこんできた津波や北海道本島から反射してきた津波も影響すると考えられるが、島南端部付近の解析だけでも津波の伝播はかなり複雑であったことが確認される。

図-5は、計算された水位変動を実験と比較したものである。高い遡上高が観測された初松前付近（波高計 No. 23）では、波が分裂していることが確認できる。実験で

は No.23 の波高計が不調であったと思われる、波の分裂は捉えられていない。また、最高水位が現れる地点が No.26 の波高計付近であり、やや北側にずれている。実験結果は初期水位のわずかな違いに極めて敏感であると考えられるので、今後厳密な管理のもとでの実験結果と比較検討する必要がある。

図-6は奥尻島周辺の最高水位の分布を示したものである。実線が砕波を考慮しない Boussinesq 方程式による計算結果であり、点線が浅水方程式による計算結果である。遡上を考慮しない計算であるので、遡上高を直接議論することはできないが、分裂を考慮することにより、初松前付近の最高水位が高くなることがわかる。また、汀線に一番近い波高計の最高水位記録を結んだものと比較すると、実験では最高水位がやや遅れて現れる傾向がある。

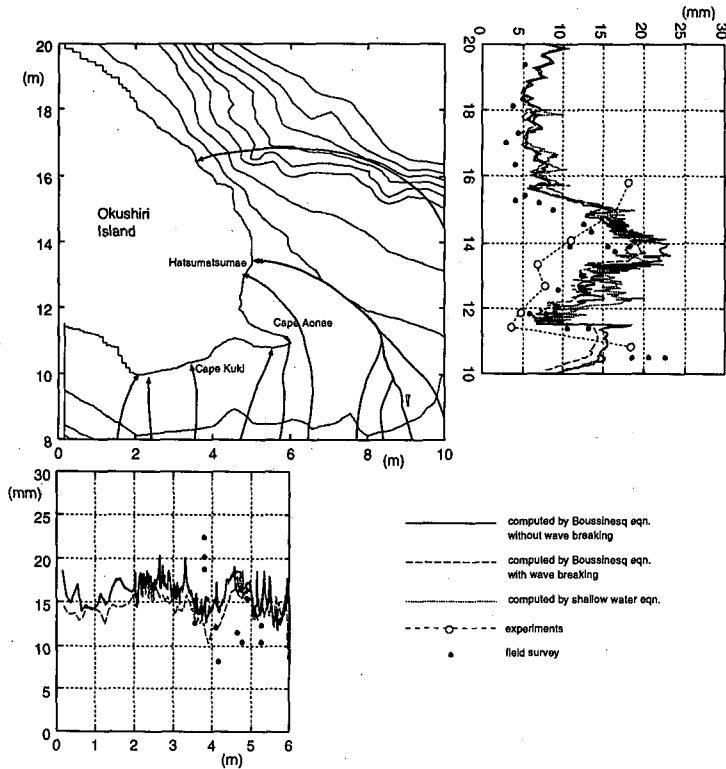


図-6 最高水位の分布

5. おわりに

波の分裂と碎波を考慮した津波の数値計算法を開発した。計算結果は、斜面上で分裂しながら碎波する津波の伝播実験結果により検証した。さらに、奥尻島南端部における模型実験結果と比較することにより、平面的な計算での適用性を検証した。提案した計算法により、津波先端部の分裂が再現できることが確認され、波の分裂が初松前付近の遡上高の増大をもたらすことが示された。また、碎波を考慮することにより波高減衰が生じ、波の分裂が抑制されることも確認された。波の遡上を含めた計算を行なうことが今後の課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり、土木研究所海岸研究室の田中茂信室長および野口賢二研究員には実験結果の解釈に関して多くの助言をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

田中茂信・佐藤慎司・野口賢二 (1994): 水理模型実験による津波の伝播現象に関する研究, 平成5年北海道南西沖地震に関する緊急研究成果報告書, 科学技術庁, pp. 120-129.

佐藤慎司・M. Kabilig (1993): Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.

片山裕之・佐藤慎司 (1993): Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・碎波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 16-20.

Hokkaido Tsunami Survey Group (1993): Tsunami devastates Japanese coastal region, Eos, Trans. AGU, Vol. 74, No. 37, pp. 417, 432.

高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・M. Ortiz (1994): 津波を説明するための北海道南西沖地震断層モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 251-255.

山下隆男・高林 努・土屋義人 (1994): 北海道南西沖地震による津波と奥尻島育苗地区での津波の氾濫解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 231-235.

首藤伸夫・松富英夫・卯花政孝 (1994): 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 236-240.

後藤智明 (1984): 北秋田海岸における日本海中部地震津波の計算に関する検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 233-236.

南 将人・真野 明 (1987): ソリトン波列の碎波後の変形過程, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 56-60.

鶴谷広一・中野 晋・一戸秀久 (1984): 浅海における津波の変形と遡上に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 237-241.