

津波の流速計算に関する研究

藤井直樹*・大森政則**・高尾 誠***・金山 進****

1. はじめに

浅海域では津波の来襲により砂移動が生じ、構造物の倒壊や港湾機能障害等の被害が発生しており、この砂移動機構を解明するには、砂移動の起因力となる水位変動ならび流速変動を精度よく把握することが必要になる(高橋ら, 1991)。

浅海域での津波は、一般的には非線形性が卓越するが、日本海中部地震津波のように海底地形などの影響により波が分裂し、砂移動や構造物の外力として分散性が無視できない場合も十分考えられる。しかし、従来の津波の数値計算法は浅水方程式による計算が一般的なため、新たに波の分裂を考慮した津波計算法が必要となる。佐藤(1995)はブシネスク方程式を用いて波の分裂と砕波を含む津波の平面2次元計算を模型実験の水位に関して比較している。しかし、流速の再現精度については、これまでに十分な検証が行われておらず、すべてこれからの問題として残されている(首藤, 1986)。

そこで本研究では、まず津波数値計算として浅水方程式に加え、分散性も考慮できるブシネスク方程式を用い、水理模型実験によって得られた水位と流速の再現性について検討した。また、津波の分裂発生条件についてブシネスク方程式による1次元計算を実施し、その結果を整理した。

2. 水理模型実験および数値計算の概要

(1) 水理模型実験の概要

津波の数値計算法の検証データを取得することを目的として、水理模型実験(模型縮尺 1/200)を実施した。実験に用いた海底地形形状は、図-1に示す3形状である。海底形状1は分裂過程が確認できる水平床形状、海底形状2は分裂・砕波・遡上への変化過程が確認できる傾斜床形状、海底形状3はさらに傾斜床の岸側に港湾の水深に相当する水平床を設けた形状である。

造波はフラップ式造波板を沖側に最大に引いた位置か

ら板が垂直になるまでの時間を半周期として駆動させた。入射波は周期 10 秒, 20 秒, 30 秒の sin 波の 1/2 とし、図中の各計測点で水位と流速を計測した。

(2) 数値計算の概要

数値計算に用いた支配方程式は、浅水方程式とブシネスク方程式である。浅水方程式による計算には、リーブフロッグ法により差分化して解く、一般的な長波の計算手法を用いた。また、海底形状2に対する遡上計算では、岩崎・真野(1979)の方法を用いた。

ブシネスク方程式による計算には、砕波も考慮した金山ら(1994)と同様の計算手法を用いた。本計算法は佐藤(1995)が津波の計算に用いた手法と基本的には同じであるが、佐藤(1995)は砕波後の渦動粘性係数の空間分布を最も深い砕波点より浅い領域では一定値として与えているのに対し、本研究では片山・佐藤(1993)による渦動粘性係数の空間分布を与える方法を用いている点異なる。ブシネスク方程式では遡上を考慮していないため、計算は海底形状1と海底形状3について行った。

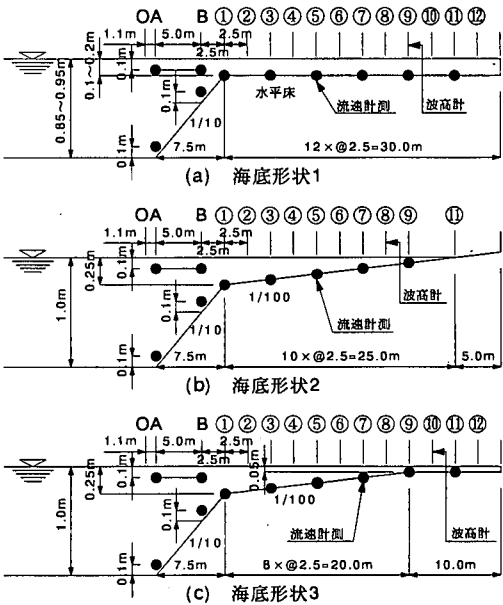


図-1 実験に用いた海底形状

・ 正会員	東電設計(株)	原子力土木部
..	東電設計(株)	原子力土木部
*** 正会員	工修 東京電力(株)	原子力技術部
**** 正会員	工修 五洋建設(株)	技術研究所

水理模型実験に対する計算格子間隔は5 cm, 計算時間間隔は0.01 秒とした。縮尺が1/200 であることから現地での格子間隔は10 m となり, 分散項を考慮した場合に必要なと言われている格子間隔(10 m 以下)は確保している。

3. 水理模型実験のシミュレーション

(1) 碎波の判定

碎波の判定は, 片山・佐藤(1993) にならい, 波峰における水表面の水粒子速度と波速の比を用いて碎波の判定を行った。すなわち, 流速波速比がある限界値を越えた時, 碎波が生じると判定した。海底形状3 に対する実験と計算との碎波位置の比較を表一1 に示す。計算では流速波速比を0.6~1.0 まで変化させ, 波速は $\sqrt{g(h+\eta)}$

表一1 実験と計算との碎波位置の比較

周期	実験での碎波位置 ①地点より	計算における碎波限界流速波速比				
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
10 秒	19.6 m	18.00 m	19.20 m	20.20 m	21.20 m	22.30 m
20 秒	26.3 m	25.70 m	26.20 m	26.70 m	27.10 m	27.65 m
30 秒	31.2 m	30.45 m	31.80 m	37.35 m	37.25 m	37.10 m

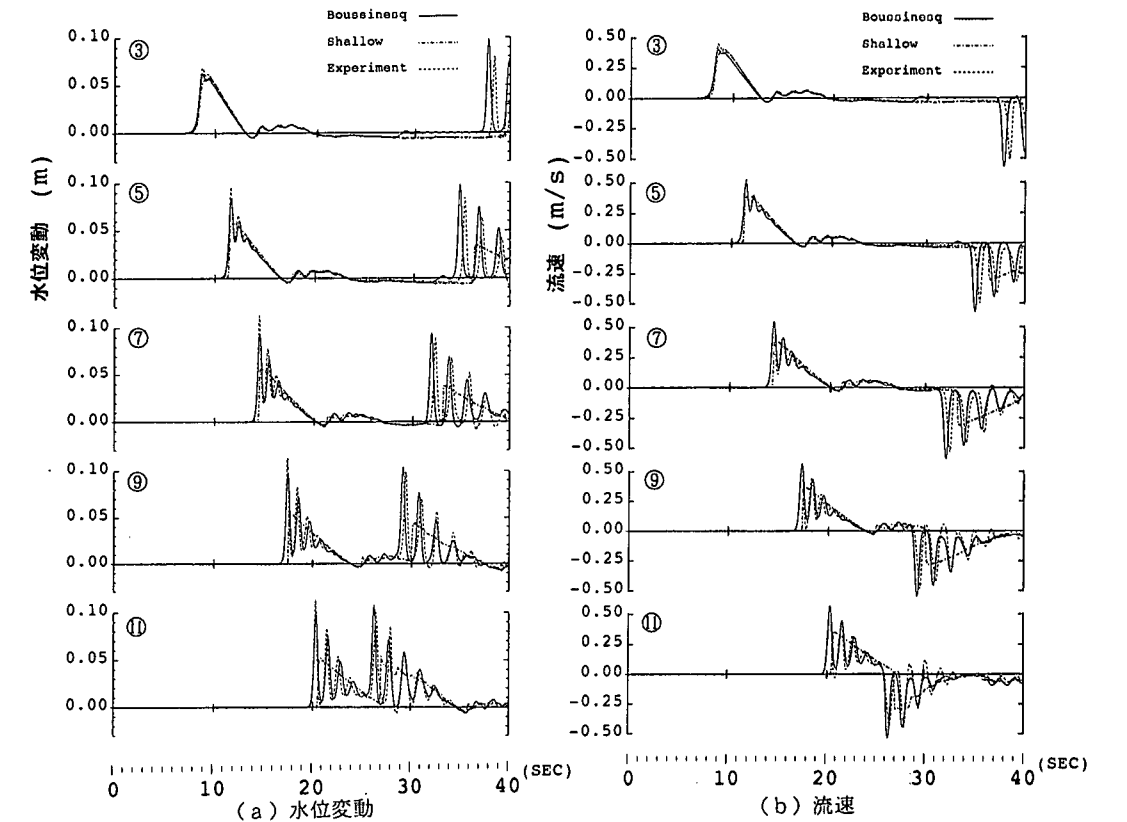
として計算した。その結果, 実験と計算の碎波位置を一致させるためには流速波速比を0.65~0.75 の範囲に設定する必要があることが判った。周期が長くなると流速波速比は若干小さくなる傾向がみられるが, 今回の結果は1つの海底形状に対して得られた結果であり, 海底形状による違いも考えられるため, 以後の計算では0.7 として計算した。

(2) 計算結果と実験結果の比較

3つの海底形状に対して浅水方程式とブシネスク方程式による数値計算を行い, 実験結果と比較した。

a) 海底形状1

図一2(a) は周期10 秒に対する水位変動の比較図であり, 今回の実験中で最も分裂が顕著で非碎波のケースである。第1 波後の小さな後続波は1/10 勾配の斜面上で反射した波が造波板に再反射した波が伝播してきた波である。実験とブシネスク方程式による計算は非常に良く一致している。異なる点は, ブシネスク方程式の反射波の水位が若干大きいため早く伝播していることである。浅水方程式の場合は分裂が生じないため波形が前傾化した状態で伝播している。従って, ピーク値は実験に比べて小さく, 伝播も遅れている。図一2(b) に流速波形を示



図一2 実験と計算の時系列の比較 (海底形状1 の場合)

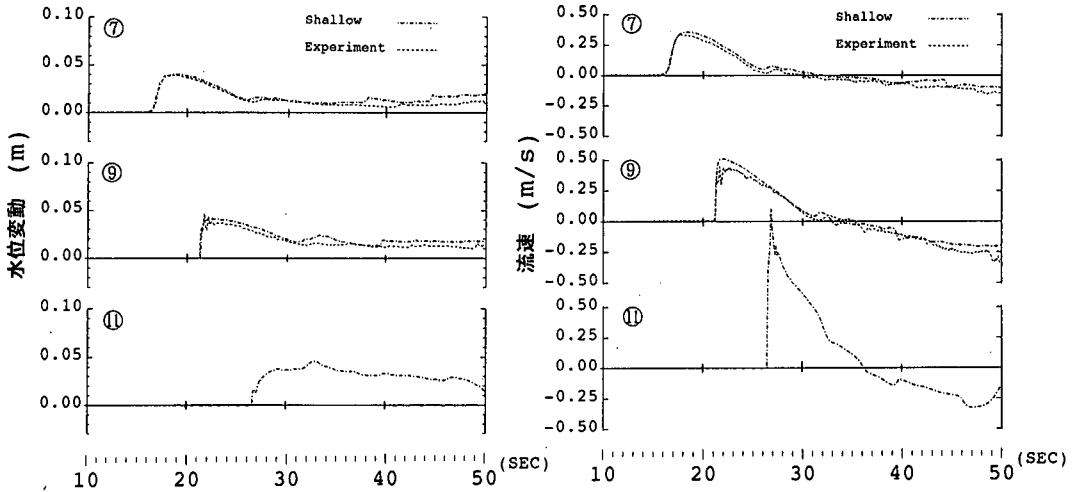


図-3 実験と計算の時系列の比較 (海底形状 2 の場合)

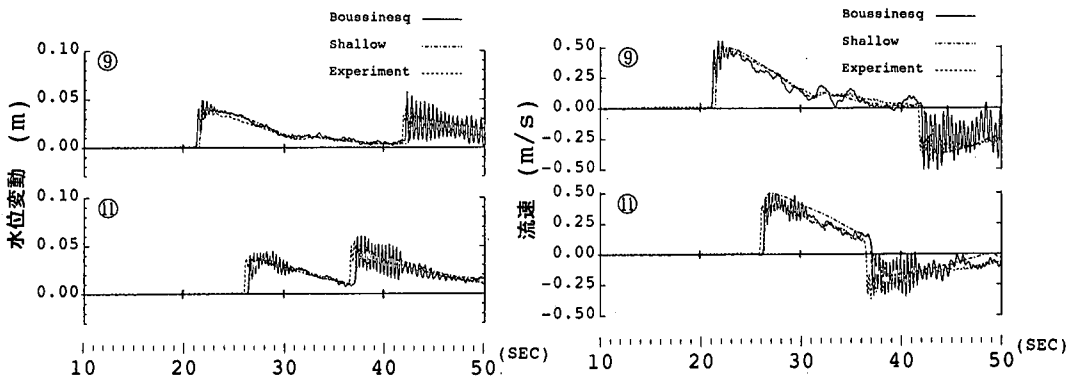


図-4 実験と計算の時系列の比較 (海底形状 3 の場合)

す。傾向は水位変動の場合と全く同様であり、ブシネスク方程式による計算は実験結果の分裂現象を良好に再現できている。

b) 海底形状 2

図-3は周期 20 秒に対する浅水方程式による比較結果であり、分裂・碎波・遡上が生じているケースである。実験結果は⑦から⑨までの間で碎波しているため計算結果より水位・流速が小さくなっている。特に流速の方が水位より差が大きい。また、⑨におけるピークの出現時刻は僅かに水位の方が早くなっている。碎波による影響と極浅い水深が関係していると考えられる。

波のエネルギーは遡上域で消散され、顕著な反射波は生じなかった。遡上域を含めた浅水方程式による計算は、実験結果を概ね再現できている。

c) 海底形状 3

海底形状 3 は⑦までは海底形状 2 と進行波に関しては同じであるため、図-4には⑨と⑪(周期 20 秒)を示す。実験とブシネスク方程式の結果は⑨で既に分裂後、碎波

しているため水位が小さくなり、浅水方程式と一致する結果となっている。⑪の水位は実験と計算で一致しているが、流速の場合は浅水方程式の結果が大きい。水位に関する限りでは、位相差はあるが概ね再現できるといえる。

実験結果は碎波により水位が小さくなり、分裂が抑制されている。ブシネスク方程式による水位も小さくなるが、分裂状況は変化していない。計算で用いている碎波モデルの適用限界を示している。

4. 分裂波に関する検討

(1) パラメタスタディ

現地の津波計算を行う場合、波の分裂を考慮した計算が必要であるかどうか事前に判断できれば、非常に便利である。そこで、分裂に関して有意なパラメタである海底勾配、入力波の波高・周期をパラメタとしたブシネスク方程式による断面 1 次元計算を実施した。図-5に海底勾配、表-2に入射波の諸元を示す。計算格子間隔は 10

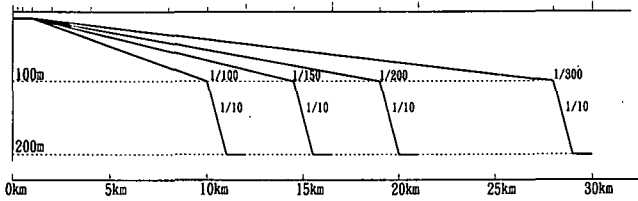


図-5 パラメタスディに用いた海底勾配

表-2 パラメタスタディに用いた入射波諸元

入 射 波 形		波 長 (km)	波形勾配 ($\times 10^{-4}$)
波高 (m)	周期 (分)		
3.0	5	13.3	2.259
	10	26.6	1.129
	15	39.8	0.753
4.0	5	13.3	3.012
	10	26.6	1.506
	15	39.8	1.004
5.0	5	13.3	3.765
	10	26.6	1.882
	15	39.8	1.255
2.0	15	39.8	0.502
3.0	20	53.1	0.565

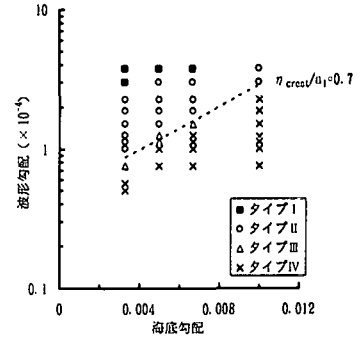


図-7 分裂状態の整理図

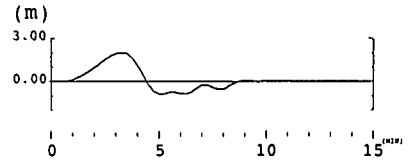


図-8 1次元計算時の入力水位波形

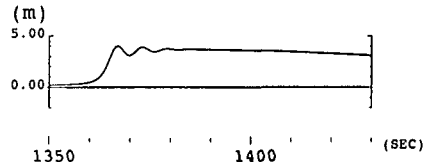


図-9 水深10m地点における出力水位波形

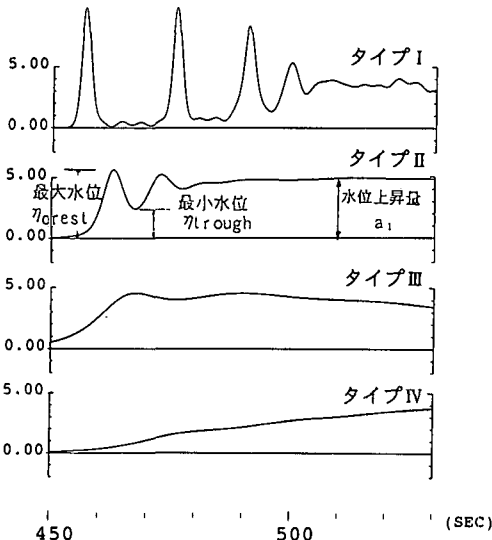


図-6 津波先端部の分裂状態の分類例

た。

(2) 分裂発生 の 推 定

計算結果から、波形勾配が同じ場合は海底勾配が緩やかなほど分裂しやすいこと、海底勾配が同じ場合は波形勾配が大きいほど分裂しやすいことがわかった。そこで、図-7に示すように海底勾配と波形勾配について整理した。図中の点線以下が分裂が見られなかった領域であり、点線より上方ほど分裂状態が顕著になることを示している。

図-7の妥当性を確認するためソリトン分裂が発生したと考えられている北秋田海岸における日本海中部地震津波の計算を行った。相田(1984)の断層モデルを用いて浅水方程式による平面2次元計算を実施し、北秋田海岸への伝播経路上の水深200m地点の波形(図-8)を、1次元のブシネスク方程式による計算の入力波とした。図-9は水深10m地点における計算結果であり、分裂が生じている。このときの水深200mでの波形勾配は 1.714×10^{-4} 、海底勾配は1/300であり、図-7からも分裂が生じたであろうことが確認できる。

次に、図-10に分裂し始める水深と海底勾配との関係を周期毎に示す。この図からも波高が大きく、海底勾配

m, 時間間隔は0.15秒とし、入射波は各周期、波高の正弦波の1/2とした。

図-6は数値計算の出力結果より汀線から1km地点(水深10m)における津波先端部の水位波形から分裂の有無や分裂の程度によって4つに分類した例である。さらに、分裂状態を定量的に評価するために分裂第1波の最大水位, 最小水位, 後続する波の水位上昇量を読みとつ

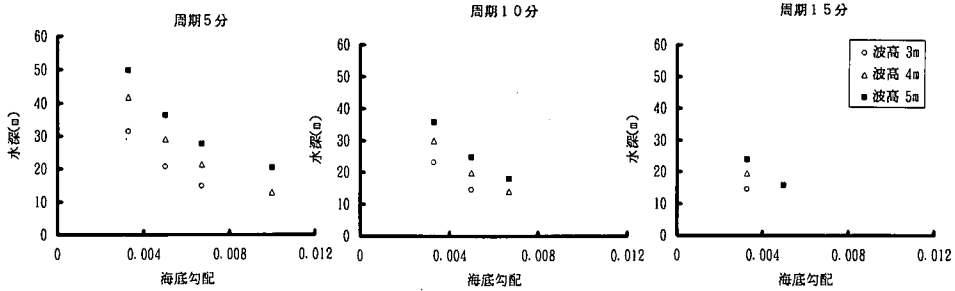


図-10 分裂発生水深と海底勾配との関係

が緩やかな場合の方が分裂を起こしやすいことがよく分かる。波によっては水深 50 m から分散項を考慮する必要がある。

このように、今回の計算の範囲では、海底勾配と入射波の波形勾配によって水深 10 m 地点における分裂状況を概ね判別することができたが、波の分裂は非線形項と分散項の相互作用によって生じるものであることを考慮して若干の検討を加える。首藤 (1976) は、移動座標系で表された非線形分散波理論のひとつである Kakutani (1971) の式を近似的に取り扱い、波形変化に対する各項の相対的な寄与率の簡便な表示を与えている。表-3 は今回のテスト計算で明確な分裂(タイプ I)を呈したケースを対象に、分裂が始まった水深における非線形項に対する分散項の比率 $q(\%)$ を示したものである。

いずれのケースも q の値は 30~40% 程度となっており、分裂の機構においてほぼ同程度の過程にあることがわかる。首藤 (1976) の検討は周期的な波を対象としたものであるのに対して今回の計算は押しの半波のみを入射した遷移的なものである点など必ずしも条件は整合しないが、分裂が生じる時は非線形項と分散項の比がほぼ同じ値になっていることが確認される。

5. おわりに

本研究で得られた主要な結果は以下のようである。

- 1) 津波の数値計算法として浅水方程式とブシネスク方程式を検討し、実験との比較から水位及び流速に関する両方程式の相連及び適用性について確認できた。
- 2) 流速波速比を 0.7 とすることによって碎波の計算が考慮でき、分裂後の波高増大の抑制が可能になった。
- 3) 分裂が顕著となる場合の海底勾配と波形勾配を整理した結果、計算に分散項を考慮すべきか否かの目安を

表-3 首藤(1976)による分散項寄与率 q との比較

入射水深	海底勾配	入射波高	周期	分裂水深	q
100 m	1/300	4.0 m	5 分	41.7 m	42%
100 m	1/300	5.0 m	5 分	49.7 m	28%
100 m	1/200	5.0 m	5 分	36.4 m	30%
100 m	1/150	5.0 m	5 分	27.6 m	35%

得た。

今後は平面的な流況に対する浅水方程式とブシネスク方程式の再現性について検討する予定である。

謝辞：本研究を行うに際し東北大学工学部の首藤伸夫教授、田中仁教授、今村文彦助教授、高橋智幸助手から貴重など指導を頂いたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 相田 勇 (1984): 1983 年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 地震研究所報 59 号, pp. 93-104.
- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 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.
- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): ブシネスク方程式を用いたサーフボート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 61-65.
- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と碎波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 376-380.
- 首藤伸夫 (1976): 津波の計算における非線形項と分散項の重要性, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 432-436.
- 首藤伸夫 (1986): 津波と防災, 土木学会論文集, 第 369 号/II-5, 1986 年 5 月, pp. 1-11.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1991): 津波による流れと海底変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 161-165.
- Kakutani, T.: Effect of an uneven bottom on gravity waves, J. Phy. Soc Japan, Vol. 30, No. 1, pp. 272-276, 1971.