

日本海中部地震津波の分裂に関する数値計算

岩瀬浩之*・見上敏文**・後藤智明***

1. はじめに

1983年5月26日正午, 北秋田県沖マグニチュード7.7の地震に伴って発生した日本海中部地震津波は日本海北部一帯の沿岸域に甚大な被害を及ぼした。この津波の大きな特徴の1つに浅海域で観測されたソリトン分裂波が挙げられる。峰浜村沿岸域では4トンもの波消ブロックを散乱させるなど, ソリトン分裂波には秘めたる流体力の存在を示している。津波伝播に伴うソリトン分裂は浅海域における非線形性と波数分散性の相互作用によって発生し, その伝播変形は深海域からの入射条件によって大きく異なることが知られている(藤井ら, 1996; 岩瀬ら, 2001a)。したがって, 津波の波源域から沿岸域まで一貫して波数分散効果を考慮できる計算モデルが必要とされ, 数値計算モデルの支配方程式に非線形分散長波式(Boussinesq式)を利用することが求められる。

非線形分散長波式を津波の平面伝播解析に適用した既往の計算モデルとして, 佐藤(1995)は1993年北海道南西沖地震津波を対象に, ごく限られた単一領域に関して実施した例があるのみで実用性のある計算モデルが存在しているとは言えない。また, 数値計算の効率を考えれば領域結合型の計算モデルが望ましい。しかしながら, 高階の微分項を含む支配方程式では計算の安定化を図るために陰差分式を解く必要があり, 計算領域境界上の未知数の取り扱いが問題とされている。この問題に対する1つの解決方法として岩瀬ら(1998a)は, 2段階混合差分法を提案している。

そこで, 本研究では2段階混合差分法を計算方法とし, 非線形分散長波式を支配方程式とする多領域結合型の津波数値計算モデルの開発を行い, 日本海中部地震津波を対象とした平面伝播解析の結果から開発された計算モデルの妥当性を検証する。また, 非線形長波式(浅水方程式)の計算結果との比較を通じ, 本地震津波の波数分散効果の影響について考察する。

2. 数値計算方法

(1) 支配方程式

使用する支配方程式群は, 積分表示による Madsen-Sørensen の式 (Madsen et. al, 1992) を基本とする。分散関係が広い周波数帯で微小振幅波理論に良く一致しており, 深海域における津波伝播を精度良く再現できるためである(見上ら, 2000)。また, 浅海域の碎波に伴う運動量散逸効果を計算する碎波減衰は, 佐藤(1995)の碎波モデルにならって加味する。よって, 本研究で使用する支配方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{2}{5} h^2 \left(\frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 N}{\partial t \partial x \partial y} \right) + \frac{1}{15} g h^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ + \nu_b \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \frac{2}{5} h^2 \left(\frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x \partial y} + \frac{\partial^3 N}{\partial t \partial y^2} \right) + \frac{1}{15} g h^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right) \\ + \nu_b \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで, η は水位, M, N はそれぞれ x および y 方向の流量フラックス, h は静水深, $D (= \eta + h)$ は全水深, g は重力加速度, $\nu_b (= 0.23 \sqrt{gD} \eta)$ は渦動粘性係数, $n (= 0.025 \text{ m}^{-1/3} \text{ s})$ はマンニングの粗度係数である。

(2) 計算方法

計算はスタッガード格子による2段階混合差分法を用い, 陸上への津波遡上計算は行わない。計算領域境界に隣接する計算格子や, 分散項の計算に必要な計算諸量が確保できない計算格子の流量フラックスは分散項を除く非線形長波式で計算を行う。移流項の差分は風上差分を基本とするが, 分散項が計算可能な場合は, 各方向の微分演算子で記述される移流項のみを対象に中央差分化して2段目に組み込む。

* 正会員 東海大学技術員 研究推進部技術支援課
 ** 正会員 (株)アルファ水工コンサルタンツ 課長
 *** 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科

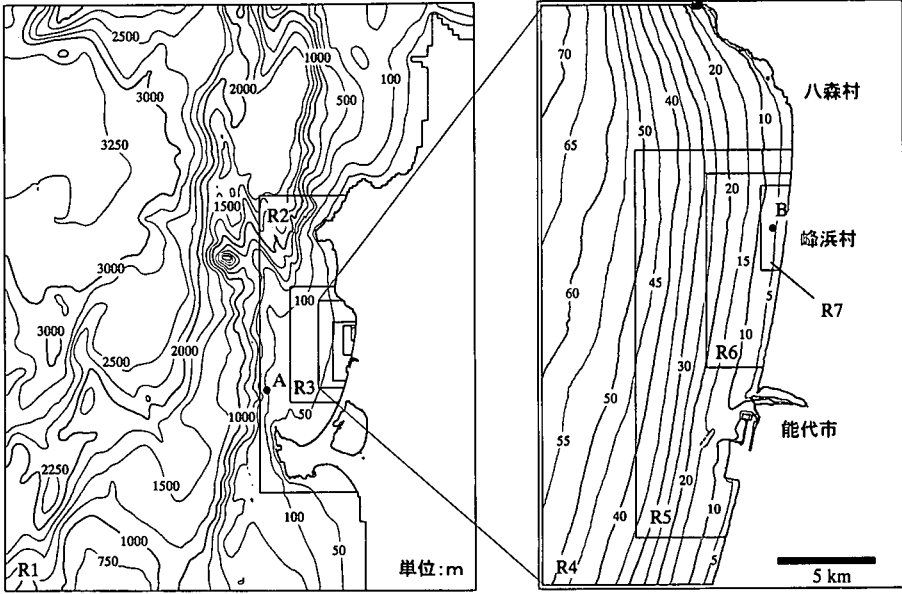


図-1 計算領域と水深分布

分散項の計算が可能な場合の x 方向を例とした差分式表示を示すと以下の通りになる。

[1 段目]

$$\frac{1}{\Delta t}(M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i+1/2,j}^k) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) \Big|_{F.D.} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{F.D.} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

[2 段目]

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} [M_{i+1/2,j}^{k+3/2} - M_{i+1/2,j}^k] \\ & + \frac{1}{4\Delta x} \left[\left(\frac{M}{D} \right)_{i+3/2,j}^{k+1/2} M_{i+3/2,j}^{k+3/2} - \left(\frac{M}{D} \right)_{i+3/2,j}^{k+1/2} M_{i-1/2,j}^{k+3/2} \right] \\ & + \frac{1}{4\Delta x} \left[\left(\frac{M}{D} \right)_{i+3/2,j}^{k+1/2} M_{i+3/2,j}^{k+1/2} - \left(\frac{M}{D} \right)_{i+3/2,j}^{k+1/2} M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right] \\ & = \frac{2h^2}{5\Delta t \Delta x^2} [M_{i+1/2,j}^+ - M_{i-1/2,j}^-] + \frac{2h^2}{5} \frac{\partial^3 N}{\partial t \partial x \partial y} \Big|_{F.D.} \\ & + \frac{1}{15} gh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{F.D.} \\ & + \frac{\nu_B}{2\Delta x^2} [M_{i+1/2,j}^+ + M_{i-1/2,j}^-] + \nu_B \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \Big|_{F.D.} \\ & + \frac{1}{2} [M_{i+1/2,j}^{k+3/2} + M_{i+1/2,j}^{k+1/2}] \cdot \frac{gn^2}{D^{2/3} \sqrt{M^2 + N^2}} \Big|_{F.D.} \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 $|_{F.D.}$ は既知量による差分式を表し、
 $M_{i+1/2,j}^+ = M_{i+3/2,j}^{1/2} - 2M_{i+1/2,j}^{1/2} + M_{i-1/2,j}^{1/2} \dots\dots\dots (6)$
 である。式 (5) は、 $M^{k+3/2}$ に関する 3 行対角行列の陰差分式となり、トーマスアルゴリズムによる高速な演算が可能である。

砕波減衰項の渦動粘性係数 ν_B は、岩瀬ら (2001b) の方法に従い、 x, y 方向のそれぞれに対して流速波速比が

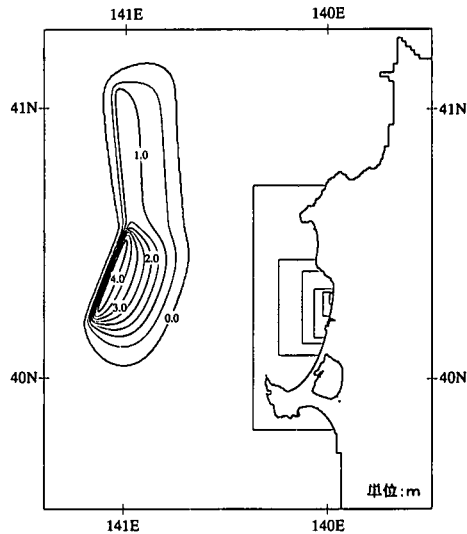


図-2 初期水位分布

0.59 を越える波峰点から前後の波谷までの範囲に空間分布として与える。

3. 日本海中部地震の数値計算

(1) 再現計算の領域と条件

開発した計算モデル (以下本モデル) の検証を目的に、日本海中部地震を対象とした再現計算を行う。図-1 は、計算対象領域の水深分布と結合領域の位置を示したものである。同地震津波では、深海域における波数分散効果

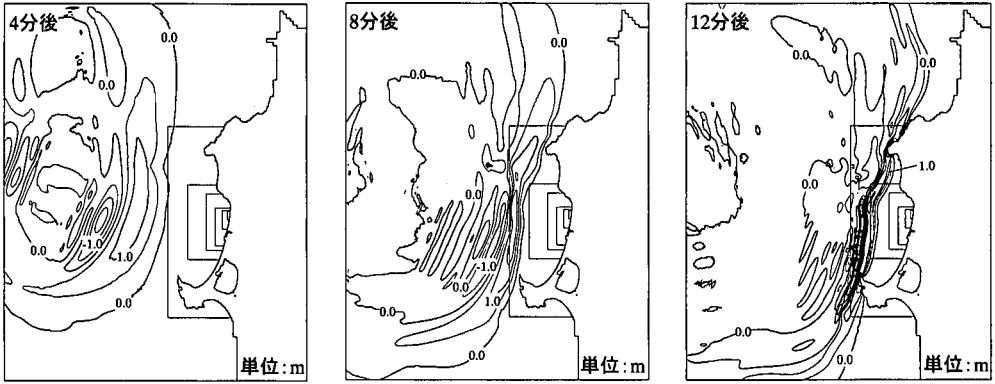


図-3 非線形分散長波式による深海域の津波伝播

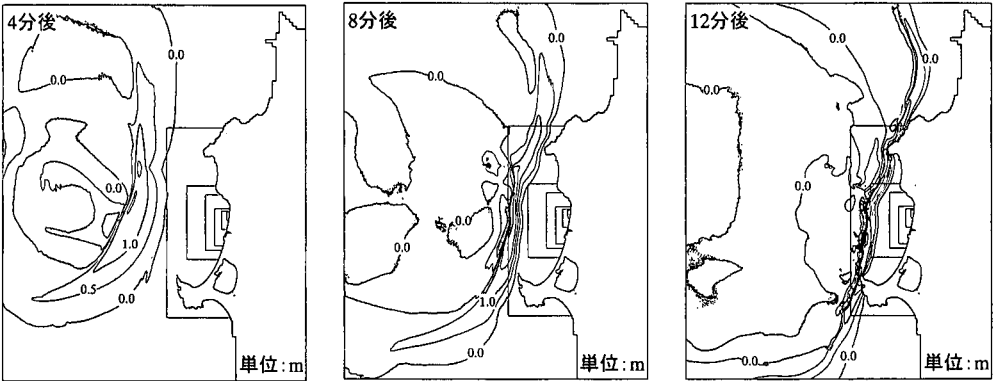


図-4 非線形長波式による深海域の津波伝播

も無視できないことを岩瀬ら (1998b) は示している。そこで、津波の波源を含む外洋計算格子 (領域 R1) は、波数分散効果による分散波を再現できるように計算格子サイズを 400 m とし、同地震津波で最大遡上高を記録した秋田県北部の峰浜村沿岸部まで 7 つの領域 (領域 R1 以下それぞれ R2: 200 m, R3: 100 m, R4: 50 m, R5: 25 m, R6: 12.5 m, R7: 6.25 m) に分割して各計算格子を 1/2 間隔で結合する。また、同図中の点 A (領域 R2: 100 m 水深) および点 B (領域 R7: 6 m 水深) は、時間水位の出力点を示す。なお、計算における時間間隔は、領域 R7 の格子間隔と最大水深による安定条件から $\Delta t = 0.2$ s とする。また、沖側境界は特性曲線法による自由透過処理を行い、水深が 5 m 以下の水深領域は全て水深を 5 m と設定する。

図-2 は、津波初期水位分布を示したものである。初期水位は、相田 (1984) による断層パラメータ (Aida 10 Model) から得られた海底地盤変位量をそのまま水位置として与える方法を用いる。ただし、同波源モデルでは深海域の波数分散効果や浅海域のソリトン分裂による水位の増幅および砕波は考慮されていない。そのため、本モデルに対し同波源モデルを適用することには多少の問

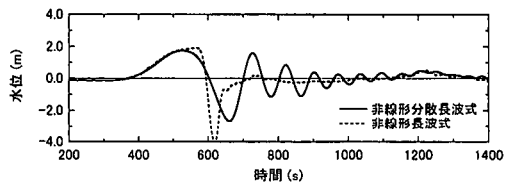


図-5 点 A (100 m 水深) における時間水位の比較

題が残るが、本研究では非線形分散長波式との比較を通じて波数分散効果による津波伝播への影響を考察する。

(2) 深海域での津波伝播

図-3 および図-4 は、それぞれ本モデルと非線形長波式による津波水位分布の計算結果を示したものである。波数分散効果による分散波の生成が確認し易いように、50 cm 間隔の等水位線で描いている。深海域における波数分散効果は波源短軸方向で強く作用し、生成された分散波は男鹿半島に向かい伝播する様子が確認できる。また、同図より各領域境界上における水位・流量フラックスの連続性にも大きな支障は見られず、非線形分散長波式を支配方程式としても領域結合が問題なく可能であることが確認できる。

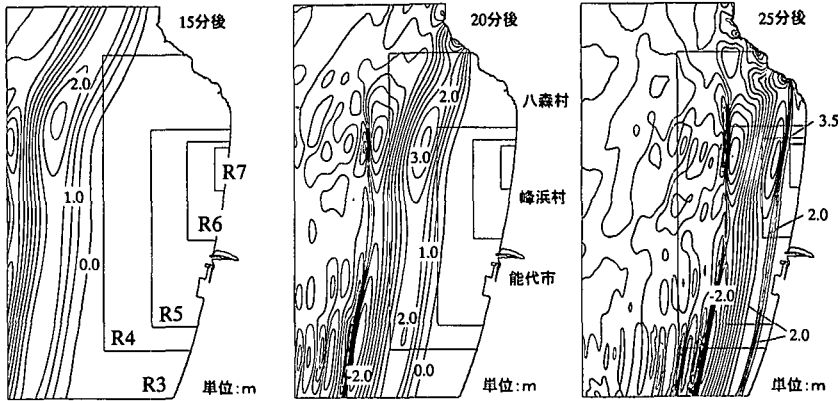


図-6 非線形分散長波式による浅海域の津波伝播

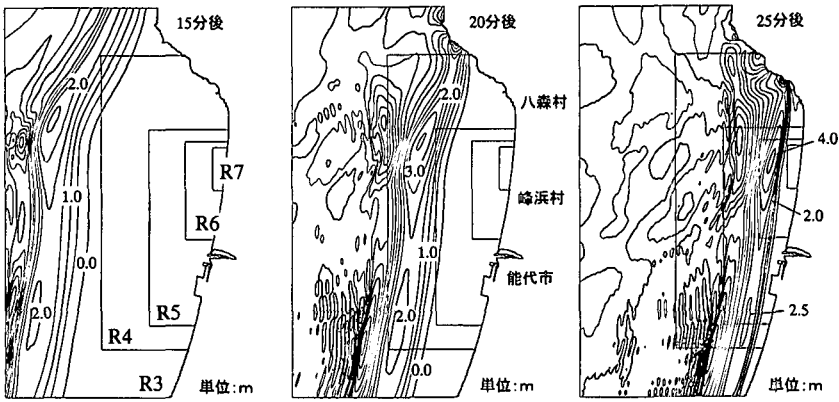


図-7 非線形長波による浅海域の津波伝播

図-5は、同地震津波の指向性が最も大きい方向に位置する男鹿半島先端付近、R2領域の水深100m地点に位置する出力点A(図-1参照)における本モデルと非線形長波式による計算結果の時間水位を比較したものである。波数分散効果により、本モデルにおける津波第1波の水位は非線形長波式による計算結果にくらべ減衰し、波長は伸長した結果となる。しかしながら、非線形長波式の計算結果では津波波峰が1つであるのに対し、本モデルの計算結果では、深海域における波数分散効果の影響から第1波に後続する分散波列によって複数の波峰が確認できる。特に、第2波目の水位は第1波目の水位をほぼ同じ大きさとなり、深海域における波数分散効果の影響は、同津波地震津波の伝播において重要であり無視できない要因であると言える。

(3) 浅海域での津波伝播

図-6および図-7は、計算領域R4以下における本モデルと非線形長波式による計算結果を示したものである。地形のレンズ効果によって津波は峰浜村沿岸域へ集中する(長谷川ら, 1986)。深海域で波数分散効果による

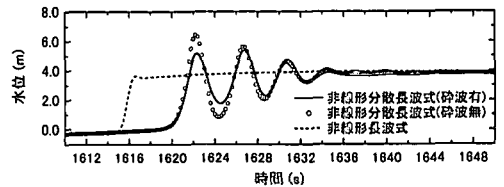


図-8 点B(6m水深)における時間水位の比較

波高減衰のため、本モデルの水位は非線形長波式の結果に比べ、全体的に低い水位分布となる。また、八龍町付近の沿岸域に、深海域で発生した分散波列が伝播する様子が確認できる。

本計算結果では、水深約8m付近から津波が分裂を起こす。図-8は、峰浜村沿岸部付近、R7領域の水深6mに位置する出力点B(図-1参照)における時間水位を比較したものである。本モデルによる計算結果(実線)では、ソリトン分裂が生じ、非線形長波式の計算結果(破線)にくらべ分裂の影響により高い水位が再現される。また、本モデルの砕波による波高の減衰が再現されてい

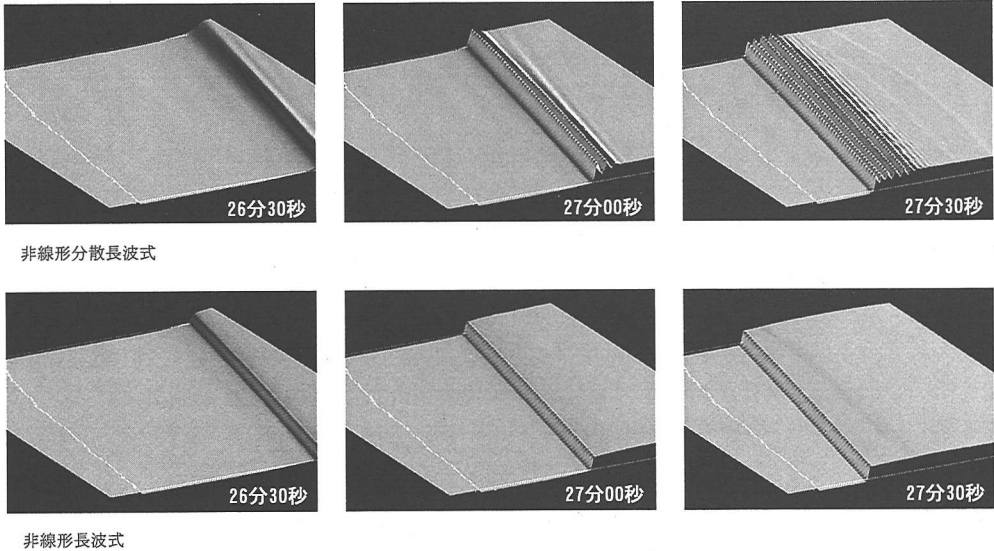


図-9 領域 R7 における水位鳥瞰図の比較

ることが、同図中に示した砕波を考慮しない計算結果(白丸)との比較から確認できる。

また、図-9は、領域 R7 の一部(1875 m×1875 m)を拡大して描いた本モデルおよび非線形長波式による津波水位の鳥瞰図の示したものである。図中に示した時間は、津波発生後の経過時間を示している。同図から、浅海域においてソリトン分裂波が再現され、本モデルの妥当性が示されたとともに、複数の分裂波と砕波を伴って沿岸部へ伝播する様子が計算可能である。

4. おわりに

非線形分散長波式を支配方程式とする多領域結合型の津波数値計算モデルを開発した。日本海中部地震津波の再現計算を行い浅海域でのソリトン分裂波を再現することができ、本計算モデルの妥当性を示されるた。よって、津波の波源域から沿岸域までの一貫した津波伝播を非線形分散長波式を支配方程式とする多領域結合型モデルで計算することが可能となった。

また、非線形長波式による計算結果との比較から、日本海中部地震津波を対象とする津波の伝播解析では深海域および浅海域で波数分散効果の重要性が再確認された。今後は陸上遡上まで計算可能なモデルの開発および、波数分散効果を考慮した津波波源の検討を行ってゆく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、岩手県立大学の首藤伸

夫教授から多くの助言を頂いた。また、本研究の一部は科学研究補助金基盤研究 (C) (2) (代表：後藤智明，課題番号：12650520) により行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 相田 勇 (1983): 1983 年日本海中部地震津波の波源数値モデル，地震研究所集報，Vol. 59, pp. 93-104.
- 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明 (1998a): 非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル，土木学会論文集，No. 600/II-44, pp. 119-124.
- 岩瀬浩之・後藤智明 (1998 b): 津波の波数分散効果に関する考察，月刊海洋，Vol. 15, 海洋出版社，pp. 99-104.
- 岩瀬浩之・後藤智明・藤間功司・飯田邦彦 (2001a): 深海域における波数分散効果が近地津波の伝播に及ぼす影響に関する考察，土木学会論文集 (投稿中).
- 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明 (2001b): ソリトン分裂の砕波変形に関する水理実験と数値計算，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 306-310.
- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と砕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.
- 長谷川賢一・鈴木孝夫・稲垣和夫・首藤伸夫 (1987): 津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究，土木学会論文集，No. 381/II-7, pp. 111-120.
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進 (1996): 津波の流速計算に関する研究，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 291-295.
- 見上敏文・岩瀬浩之・藤間功二・後藤智明 (2000): プシネスク方程式のソリトン解について，第 47 巻，pp. 21-35.
- Madsen, P.A. and Sørensen O.R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.