

ソリトン分裂波の数値計算の高精度化に向けた文献調査と提案*

福島大学共生システム理工学類 佐藤 兼太
福島大学共生システム理工学類・福島大学環境放射能研究所 横尾 善之

1. はじめに

現在実用化されている津波の数値解析モデルは線形長波式や非線形長波式を支配方程式としている。一般に、日本近海で発生する近地津波は伝播距離が短いため分散効果を考慮しない場合が多い。首藤 (1976)は、少なくとも三陸沖で発生する津波の数値計算を行う場合、分散項を除外してもよいと述べている。しかし 1983 年日本海中部地震津波では浅海域において津波がソリトン分裂波を起こす様子が確認された。津波のソリトン分裂は非線形効果と分散効果の相互作用により生じるものであるため、非線形分散波理論を支配方程式としなければならないと後藤 (1984a)は述べている。間瀬ら (2007)は水平床を伝播するソリトン分裂波の水理実験を行い、分散性を第 4 次まで考慮した Boussinesq (1878)を用いて数値計算を行った。間瀬ら (2007)は実験結果と数値計算結果を比較したところ、ソリトン分裂過程の全体的な傾向は再現できるが詳細には両者には相違が見られることが多かったと述べている。

非線形分散波式には直接砕波による波高減衰が計算できないという問題がある。このためソリトン分裂波の砕波現象を理解し、モデルを作らなければならない。しかし砕波は流体力学的にも未解明な問題が多く、ソリトン分裂波の砕波指標は実験的に得られた指標を用いているのが現状である。このため地形や波形の影響を十分に考慮できていない。

以上のことからソリトン分裂波を高精度に数値計算を行うために解決すべき課題が残されているといえる。そこで本研究はソリトン分裂波に関する文献調査を行い、ソリトン分裂波の数値計算の高精度化に向け今後どのような方針でソリトン分裂波の研究を行えばよいかを提案するものである。

2. ソリトン分裂波の研究動向

2.1. 非線形分散波理論の研究動向

ソリトン分裂波は 1983 年日本海中部地震津波で確認されて以来、数値計算と水理実験を中心に研究が進められてきた。前章で述べたようにソリトン分裂波の数値計算には非線形分散波理論を用いなければならない。代表的な非線形分散波理論は Boussinesq (1878)の式、Peregrine (1967)の式、Kakutani (1971)の式、後藤 (1984b)のアーセル数が大きい場合の式、Madsen and Sørensen (1992)の式がある。このうち後藤 (1984b)の式以外の式は波高水深比と相対水深がともに小さくアーセル数が 1 のオーダーであると仮定して導かれている。一方、後藤 (1984)の式は波高水深比が 1 オーダーで相対水深が小さくアーセル数が大きいと仮定して導かれている。長尾ら (1985)は非線形分散波理論の精度を比較するために水理実験を行った。長尾ら (1985)が数

*A literature review and a proposal toward precise numerical simulation of soliton fission wave by Kenta Sato and Yoshiyuki Yokoo

値計算で用いた式は Peregrine (1967)の式と後藤 (1984b)の式である。この結果, Peregrine (1967)の式では波高水深比が小さいと精度よく計算できるが, 波高水深比が大きくなると波高を過大評価する。また, 波の分裂も実験値よりも早く起こる。後藤 (1984b)の式では波高水深比が大きくなっても精度よく計算できることがわかった。さらに岩瀬ら (2002)も非線形分散波理論の精度を比較するために水理実験と数値計算を行った。岩瀬ら (2002)は後藤 (1984b)の式は実験値に比べて波高が低くなると述べており, 深海域では Madesen and Sørensen (1992)の式が, 浅海域では Peregrine の式が精度よく数値計算できると述べている。ただし岩瀬ら (2002)が用いている Peregrine の式は岩瀬ら (1988)で改良した水深方向に積分した Peregrine の式であり本来の Peregrine (1967)の式ではない。岩瀬ら (2002)は Peregrine の式, Madesen and Sørensen (1992)の式は共通して第2波目以降の分裂波形および砕波直前の急激な波高増幅を再現できていないことを指摘し, 実験値と計算値の差異に関して何らかの修正モデルを検討していく必要があると述べている。

2.2. ソリトン分裂波の砕波の研究動向

非線形分散波理論は長波がソリトン分裂波に変形する過程を再現することはできるが, ソリトン分裂波の砕波変形を再現することはできない。この問題の解決に向けて佐藤 (1995)は風波の実験を元に砕波限界を求めた。岩瀬ら (2001)は水平床を伝播するソリトン分裂波の砕波指標を求め, 松山ら (2005)は緩勾配を遡上するソリトン分裂波の砕波指標を求めた。岩瀬ら (2001), 松山ら (2005)の指標は共に水理実験によって得られたものである。深澤ら (2002)は岩瀬ら (2001)が求めたソリトン分裂波の砕波指標を用いて勾配が 1/15 である陸上を遡上するソリトン分裂波の遡上実験と数値計算を行った。図-1 に深澤ら (2002)の結果を示す。

図-1 からソリトン分裂波が斜面を遡上する直前の砕波現象を高精度に計算することができていないということがわかる。この結果から深澤ら (2002)は岩瀬ら (2001)の砕波モデルを斜面を遡上するソリトン分裂波の砕波モデルとするには限界があるとし, 斜面上でもソリトン分裂波の砕波を高精度に再現できるモデルが必要であると述べている。一方, 松山ら (2005)の実験は

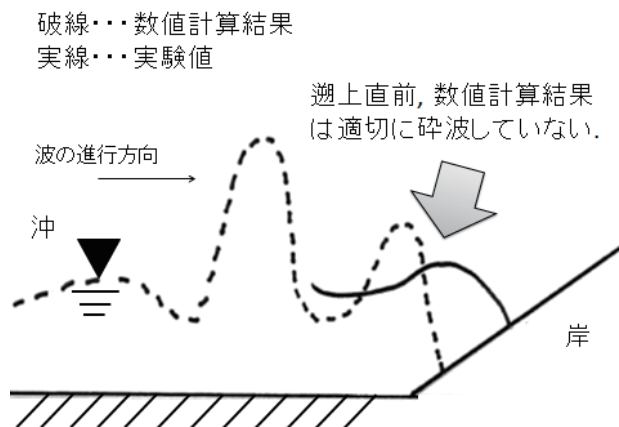


図-1 深澤ら (2002)の結果のイメージ図

実際の大陸棚を想定した水底条件の下で行った実験であるため、現実のソリトン分裂波の碎波変形に近いものである。松山ら (2006)は松山ら (2005)が求めた指標を用いて緩勾配上を遡上するソリトン分裂波の水理実験と数値計算を行い、碎波水深と碎波波高を 10%の誤差の範囲で推定できるとした。

以上の非線形分散波理論と碎波指標によりソリトン分裂波の数値計算が行われているのが今日のソリトン分裂波研究の現状である。

3. 課題と提案

ソリトン分裂波の数値計算の高精度化に向けた課題は 3 点ある。①初期波形の把握、②分散項、③碎波の改良である。この 3 点について述べる。

3.1. 初期波形の把握

最近の間瀬ら (2007)によって初期波形の違いによりソリトン分裂波の発達の様子が違うことがわかっている。このため初期波形を高精度に決定することは重要であるといえる。しかし実際は初期波形を高精度に決定するには課題が多い。

初期波形の決定の方法は 2 つある。第 1 の方法は、地震記録から地盤変化量を決める方法である。この方法は Mansinha and Smylie (1971)の結果を用いて断層近くの海底面で生じた鉛直変位の場所的分布を決め、津波の初期波形を求めるものである。しかし、この方法は地震断層モデルから計算される鉛直地盤変位がそのまま海面の変動量になると仮定しているため、計算で得られた初期波形が実際の現象とどの程度一致しているのかは不明である。さらに津波の初期波形そのものの観測例がないため、その問題が検討されていないという課題が小池ら (2001)によって指摘されている。

第 2 の方法は、津波の逆伝播図を描く方法である。この方法は海岸の各地点から様々な方向に放射する波面の位置を描き、津波到達までに要した時間の分だけ各地点から海の方に逆行させる。こうして得られた各地点からの最終波面の包絡線を波源域とする方法である。この方法では波源域はわかるが変移量の大きさを確定することはできないという問題が首藤 (1981)により指摘されている。

3.2. 分散項

分散項については、間瀬ら (2007)の実験によって実験値と計算値で波の分裂の様子が違うところが確認されており、その差異にも一貫性が見出せないという結果が得られた。間瀬ら (2007)の結果を図-2、図-3 に示す。図-2 は押し波から始まる場合の実験結果と数値計算結果である。押し波で始まる場合は第 1 波目のソリトン分裂を再現できていないことがわかる。また引き波から始まる場合は実験値に比べて計算値が過小評価された。間瀬ら (2007)の数値計算で用いられた式は分散項を第 4 次まで考慮する近似度の高い式であったがソリトン分裂が高精度に再現されないという結果が得られた。この結果からソリトン分裂波を高精度に計算するためにはさらに近似精度を上げて計算しなければならないといえる。

3.3. 碎波の改良

現在のところソリトン分裂波の碎波は実験的に得られた指標で考慮されているため、地形や波形の影響を十分に考慮できていない。岩瀬ら (2001)は水平床を伝播するソリトン分裂波の碎

破線・・・数値計算結果
 実線・・・実験値

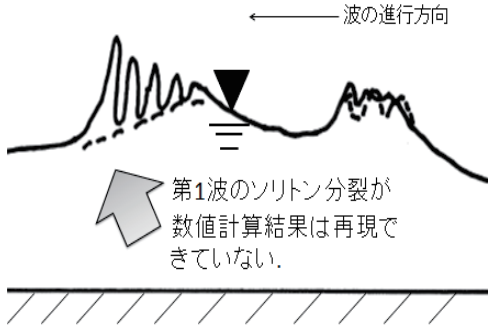


図-2 押し波ケースのイメージ図

破線・・・数値計算結果
 実線・・・実験値

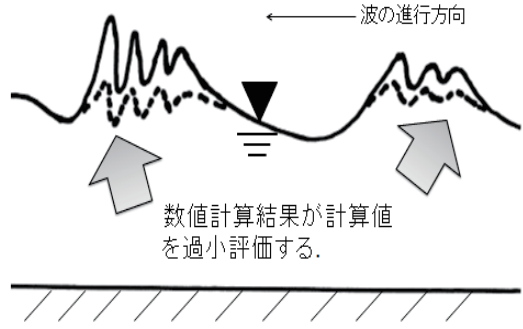


図-3 引き波ケースのイメージ図

波条件を実験的に求め、この場合の碎波条件を流速波速比が 0.59 となるとした。さらに松山ら (2005) は実際の大陸棚を遡上するソリトン分裂波の碎波条件を実験的に求め、この場合の碎波条件を流速波速比が 0.5-1.2 の間にあるとした。松山ら (2005) が求めた碎波条件は岩瀬ら (2001) が求めたソリトン分裂波の碎波条件の値よりも大きな値をとることがわかった。松山ら (2005) は岩瀬ら (2001) が求めた値よりも大きくなることについて、岩瀬ら (2001) は 3/20 勾配で急激に浅水変形させていることに対し、松山ら (2005) の実験では 1/200-1/100 という緩勾配で浅水変形させており非線形性と分散性のバランスがよく、分散波の安定性が高いためと述べている。岩瀬ら (2001) と松山ら (2005) の実験から地形の違いにより碎波条件が大きく異なることがわかった。しかし地形の違いが碎波条件に与える影響を数値上で表すことはできないのが現状である。

ソリトン分裂波の碎波変形を流体力学的に理解し、包括的にソリトン分裂波の碎波変形を説

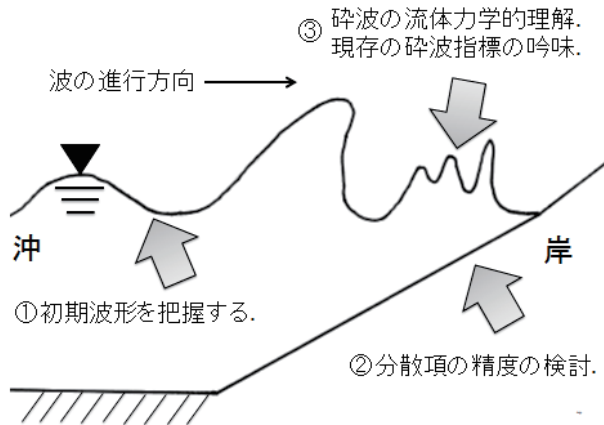


図-4 ソリトン分裂波研究の課題と提案

明できる理論が必要であるといえる。

以上の文献調査と課題の抽出のまとめとして、ソリトン分裂波研究の今後の展開についての提案を図-4にまとめた。図-4の①から③までそれぞれ別に行っている研究はあるが、3点を総合して行っている研究はまだない。3点を総合的に検討して研究を行うことがソリトン分裂波研究の今後の展開についての提案であり、ここにこの研究の新規性があるといえる。

参考文献

- Boussinesq, M.J. (1877), Essai sur la théorie des eaux courantes, *Hemo. Acad. Science.*, 2éme Sér, Tome23, No.1, pp.1-680.
- Kakutani, T. (1971), Effect of an uneven bottom on gravity waves, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol.30, No.1, pp.272-276.
- Madsen, P.A. and Sørensen, O.R. (1992), A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristic Part2. A slowly-varying bathymetry, *Coast. Eng.*, 18, pp.183-204.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971), The displacement fields of inclined faults, *B. Seismol. Soc. Am.*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- Peregrine, D.H. (1967), Long waves on a beach, *J. Fluid. Mech.*, Vol.27, part.4, pp.815-827.
- 岩瀬浩之, 深澤雅人, 後藤智明 (2001), ソリトン分裂波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.
- 岩瀬浩之, 見上敏文, 後藤智明 (1998), 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, 見上敏文, 後藤智明, 藤間功司 (2002), 津波の伝播計算を対象とした非線形分散長波式の比較, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.129-138.
- 小池信昭, 今村文彦 (2001), Wavelet 変換を用いた津波初期波形推定方法, 津波工学研究報告, 第 18 号, pp.141-150.
- 後藤智明 (1984a), 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.
- 後藤智明 (1984b), アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式, 土木学会論文集, 第 351 号, pp.193-201.
- 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.
- 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 (1981), 新体系土木工学 24 海の波の水理, 情報堂出版, pp.193-196.
- 長尾昌朋, 後藤智明, 首藤伸夫 (1985), 非線形分散波の数値計算, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.114-118.
- 深澤雅人, 岩瀬浩之, 藤間功司, 青野利夫, 後藤智明 (2002), ソリトン分裂波の陸上遡上に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.271-275.
- 間瀬肇, 安田誠宏, 加次淳一郎, 高山知司, 沖和哉, 中平順一 (2007), 津波のソリトン分裂過

程に関する実験結果と数値解析結果との比較研究, 京都大学防災研究所年報, 第 50 号 B, pp.505-513.

松山昌史, 池野正明, 榊山勉, 武田智吉 (2006), 大陸棚上における津波のソリトン分裂波に関する砕波モデル, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.226-230.

松山昌史, 池野正明, 榊山勉, 柳沢賢, 藤井直樹 (2005), 大陸棚上におけるソリトン分裂した津波の砕波に関する無ひずみ模型実験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.241-245.