

	しぎはら よしのり				
氏名	鳴原 良典				
授与学位	博士(工学)				
学位授与年月日	平成16年3月25日				
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項				
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻				
学位論文題目	非線形分散波理論の津波数値解析への適用に関する研究				
指導教官	東北大学教授 今村 文彦				
論文審査委員	主査 東北大学教授 今村 文彦	東北大学教授 池田 清宏			
	東北大学教授 田中 仁	東北大学教授 真野 明			

論文内容要旨

津波の数値計算技術は近年コンピュータの発展によって急速に向上しており、波源域での津波の発生を正確に抑えることができれば、沿岸域での挙動を高精度で予測・再現できることが知られている。津波は数 km の水深に対して波長が数十～百 km にもおよぶ長波とみなすことができるため、現象を解く場合主に線形長波理論や浅水理論が支配方程式として利用されている。しかしながら、従来の数値モデルでは再現が難しい現象、例えば 1983 年日本海中部地震津波で確認された波状段波やソリトン分裂などは、長波理論のさらなる高次近似式(非線形分散波理論)が必要となる。特に浅海域での津波の変形による効果は、時系列変化や沿岸構造物に働く流体力の評価に大きな影響を及ぼすため、このような現象を安定かつ精度高く再現し、評価できるような数値モデルの開発は、防災という観点から、津波の被害予測をする上で極めて重要な課題であるといえる。しかし、従来の非線形分散波理論を基礎方程式とした津波数値計算は陰解法で解かれているため、領域間での接続や陸上遡上の扱いが難しいことや、非線形分散波理論に適した移流項の差分方法の議論が不十分である、といった問題が残っている。そのため、1次元伝播の水理実験での波の変形を再現した例は数多くあるものの、2次元伝播問題で、かつ一度に波源域から沿岸域までを検討した例はほとんどなく、津波数値計算に適した非線形分散波理論の数値解析方法は未だ確立されていないといえる。本研究はこのような背景から、新しいアイデアに基づいた陽解法による非線形分散波理論の数値計算法を提案し、計算精度、安定性、計算時間、深海から遡上までの一括性などの項目などから、津波数値解析への適用性を総合的に評価した。まず、線形分散波理論について、線形安定性解析や数値計算結果から最も適用性の高い分散性の計算手法を明らかにし、2次元問題への拡張のために、数値分散の方向依存性を解消した数値モデ

ルを構築した。さらに、分散項と共に3次精度風上差分の移流項と運動量損失項を考慮した非線形分散波理論の数値モデルについて、水理実験結果との比較からモデルの妥当性を検証した。最後に、日本海中部地震津波の再現計算から実地形に対する適用性について従来のモデルと比較・検討し、浅水理論式では再現できなかった物理的特性を明らかにした。本研究は6章から構成されており、その主な内容を以下に示す。

第1章の序章では、線形・非線形分散波理論に関する既往の研究について記し、これまでに提案されてきた数値モデルの津波数値解析への適用性とその問題点を明らかにした。波数分散性の考慮が必要な津波の現象について分類・整理すると、遠地津波の再現には線形分散波理論で十分であり、高精度な数値モデルが確立されているが、近地津波や地滑り津波に関しては特に浅海域で非線形性の扱いが重要となり、非線形分散波理論を利用する必要がある。このような非線形分散波理論式を数値的に解くためのCrank-Nicholson法やADI法などの完全陰解法は、平面2次元の広範囲の領域を安定させて計算することは難しく、領域間の接続や陸上遡上での波先端の取り扱いなどに問題点が多いこと、また、部分的に陰的である2段階混合差分法はこれらの問題を解決しているが、移流項の適用性や差分スキームの安定性に関して詳細に検討していないことなど、非線形分散波理論の数値計算法には数多くの課題が残されていることが明らかになった。

第2章の1次元線形分散波理論の津波数値計算では、1次元問題での線形分散波理論を陽的に解くための新たな手法として、数値分散性を物理分散性として利用した計算（数値分散モデル）と、数値分散性を小さく抑え、物理分散項を導入する計算（物理分散モデル）の2つの方法を提案し、各々の適用性について検討した。孤立波伝播の数値実験結果から、提案した各数値モデルはそれぞれ理論解に一致し、演算時間については物理分散モデルが最も優れていることが分かった。また、von Neumannの線形安定性解析から、数値分散モデルは計算対象領域の空間分割に優れていることが示された。さらに、本研究で提案した数値モデルについて津波波源を含めた深海域で線形分散波計算を行う場合、津波の初期波源に対して十分な解像度を保ち、かつ数千メートル変動する海底地形に対し同一長さで空間格子を設定するためには、計算対象領域での平均水深程度の空間格子長を設定するのが望ましく、この時選択すべきモデルとしては、数値分散モデルが最も適用性が高いことがわかった。

第3章の2次元線形分散波理論の津波数値計算では、前章で検討した線形分散波理論モデルの2次元問題へ拡張し、津波数値解析への適用性について検討した。まず、物理分散モデルと数値分散モデルの支配方程式から差分方程式を導出した。次に、数値分散モデルについて、2次元問題での線形長

波理論の擬似微分方程式と線形分散波理論式との比較から、2次元問題における数値分散性は、対角方向で分散効果が小さくなる方向依存性を有することがわかった。そこで、打ち切り誤差を理論的に利用することで方向依存性を消去する方法として、運動の式の圧力項に対して他の地点の差分を利用し、重み係数を乗ずる差分計算を提案した。なお、この重み係数の調整は理論的に決定できる。この方向依存性の消去法を組み合わせることにより、2次元問題での数値分散モデルが構築される。線形安定性解析から各モデルの安定性について調べると、各モデルとも C.F.L.条件は1次元問題よりも厳しくなること、数値分散モデルは物理分散モデルよりも空間格子間隔を小さく設定することができる、すなわち高解像度で解析可能であることが分かった。最後に、提案した数値モデルに対し孤立波伝播の数値実験を行い、分散性が方向に関係なく均等に伝播し、2次元線形分散波理論の物理的挙動を精度良く再現できることを確認した。

第4章の高次精度風上差分を利用した非線形分散波理論の津波数値モデルにおいては、陽解法による新しい非線形分散波理論の数値モデルを提案し、安定性解析や数値実験による適用性の検討と、水理実験の再現計算からモデルの妥当性について検証した。まず、浅水理論の差分方程式から発生する打ち切り誤差の性質を調べ、移流項から生じる1次の数値粘性は、非線形分散波理論の数値計算を行う場合波高を低下させ、精度を低くさせる障害となることを明らかにした。そこで、従来の移流項の風上差分から生じる数値粘性を取り除くため高次精度の風上差分スキームを採用し、水平床に対する孤立波伝播の数値実験から適用性の比較を行った。その結果、3次精度の風上差分が最も高精度かつ演算時間も短く、非線形分散波理論の数値計算に適していることがわかった。次に、浅海域で考慮すべき運動量損失項（海底摩擦項、砕波減衰項）を加味した非線形分散波数値モデルを提案し、実現象の再現性について検討を行った。まず、線形安定性解析から、本数値モデルに関する安定性は主として時間間隔に依存する事が分かった。次に、Mase & Kirby (1992) の水理実験（1/20 勾配斜面に対する不規則波の伝播）の再現を行い実験結果と比較した結果、本数値モデルが良好な一致を示し、実現象での非線形性・分散性の有する波動場において適用しうるモデルであることを示した。さらに、Synolakis (1987) の水理実験（1/20 勾配斜面に対する孤立波の伝播および砕波・遡上）の再現計算から、孤立波の入射波高に対する遡上高が砕波・非砕波の算定式の傾向に定性的に一致することを示した。

第5章の1983年日本海中部地震津波を例とした非線形分散波理論の適用性の検討では、これまで提案した計算法の中で最も実地形計算へ適用性の高いモデルを利用して非線形分散波理論による日本海

中部地震津波の再現計算を行い、2次元の海底地形に対する深海域や浅海域での本数値モデルの適用性や演算時間について検討した。対象とする計算領域は北秋田海岸を含む日本海周辺部とし、7つの領域に分割して接続計算を行った。運動量損失項を加えた非線形分散波理論を支配方程式とし、分散項は数値分散モデルを、移流項には3次精度風上差分を採用した。また、計算機には共有メモリ型並列計算機を使用し、時間間隔 0.1 秒に対し再現時間 30 分とした。本数値モデルは2次元実地形での計算を安定に行え、津波発生から沿岸到達までを再現することができ、計算時間は浅水理論計算の約2倍程度であった。数値計算結果から以下の結果を得た。(1) 深海域での分散効果は波源から考慮する必要があり、津波の伝播の波形(特に主峰後方)に大きく影響する。(2) 第2波以降の波は水深 70m 以下の浅海域に達すると非線形性によって前傾化し、波高が増幅する。そして水深 30~50m と深い位置でソリトン分裂を形成する。第1波よりもこの傾向は著しい。(3) 本数値モデルにより、水深 10m 以下の浅海域において津波第1波が波状段波として沿岸部に来襲することを確認した。また、波状段波を形成するためには砕波減衰項によるエネルギー減衰の必要性を示した。以上、本数値モデルによる解析により、各領域において従来の浅水理論計算では得られなかった物理的特性を明らかにすることができた。

第6章の結論では、本研究で得られた主要な結果を示し、今後の課題と展望について整理した。

以上、本研究では非線形分散波理論の数値モデルに関して津波数値解析への適用性の検討を行うことにより、津波の発生・伝播・遡上を一括に実施でき、再現性の高いモデルを提案した。ただし、深海域では空間格子の設定に制限があるため、特に最大水深付近では分散性を十分に計算できる大きさに格子長を設定することができず、分散性は過小評価であること、また、極浅海域での砕波指標に関する条件や砕波モデルは提案されているものの未だ不明な点が多いことなどが課題としてある。今後の展望としては、長波近似(静水圧分布)で計算することが難しい領域、例えば津波波源近傍での挙動や汀線付近や陸上での砕波に関して精度良いモデルを提案する必要がある。その場合、局所的な問題には鉛直速度成分を考慮した三次元モデルとして解き、伝播に関しては長波近似による二次元モデルを接続することによって、より高精度な津波予測・評価が可能になることが期待できる。

論文審査結果の要旨

1983 年日本海中部地震津波で確認された波状段波やソリトン分裂など、従来の浅水理論による数値モデルでは再現が難しい現象例がこれまでにいくつも報告されている。特に浅海域での津波の変形による効果は、津波の時系列変化や沿岸構造物に働く流体力の評価に大きな影響を及ぼす。このため、このような現象を精度高く再現し、評価できるような数値モデルの開発は、津波の被害予測をする上で極めて重要な課題であるといえる。そこで本研究では、陽解法による新しい非線形分散波数値モデルの適用性（精度、安定性、CPU 時間）について検討し、その中で津波の発生・伝播・遡上を一括に実施でき、実用性の高いモデルを提案することを目的としている。本研究は 6 章から構成されており、その内容を以下に示す。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、1 次元の線形分散波理論数値モデルに関して、数値分散性を物理分散性として利用した計算方法（数値分散モデル）と、数値分散性を小さく抑え物理分散項を導入する計算方法（物理分散モデル）を提案した。各々の適用性について調べた結果、各数値モデルの計算結果は理論解に一致すること、また、CPU 時間に関しては物理分散モデルが最も優れており、数値分散モデルは計算対象領域での空間解像度に優れていることが明らかになった。また、本研究のモデルを利用して深海域での線形分散波計算を行う場合、津波の初期波源に対して十分な解像度を維持するには、計算対象領域での平均水深程度の空間格子長を設定するのが望ましく、この時選択すべきモデルとしては、数値分散モデルが最も適用性が高いことがわかった。

第 3 章では、線形分散波理論の計算方法を 2 次元問題に拡張し、各々の適用性について議論した。数値実験結果とモデルの適用性を考慮すると、数値分散性を利用し、方向依存性を解消した線形長波計算（数値分散モデル）が最も実用的である事を明らかにした。以上 2 章と 3 章の検討から、深海域における線形分散波理論の津波数値計算を行う際のモデル選択について重要な知見を得た。

第 4 章では浅海域での検討を行った。陽解法による砕波などの運動量損失を考慮した非線形分散波理論の津波数値モデルを提案し、その妥当性について検討した。3 次精度の風上差分を利用した移流項と、第 2 章で提案した分散性の計算により非線形分散波理論の数値モデルを構築できた。本モデルによる水理実験への再現計算の結果から、実現象での非線形性・分散性の有する波動場において適用し得るモデルであることを示した。

第 5 章では、非線形分散波理論の数値モデルによる日本海中部地震津波の再現計算を行い、2 次元の海底地形に対する深海域や浅海域での適用性について検討した。深海域での分散効果は波源から考慮する必要があるとあり、津波の伝播の波形に大きく影響すること、第 2 波以降の波は比較的深い位置でソリトン分裂を形成すること、さらに水深 10m 以下の浅海域において第 1 波が波状段波として沿岸部に来襲することを確認し、また砕波減衰項による運動量散逸効果の必要性を示した。以上、各領域において浅水理論計算では得られなかった物理的特性を明らかにすることができた。

第 6 章は結論である。

以上、本研究の検討により、非線形分散波理論に対する新しい数値モデルを提案し、かつ同モデルの津波数値解析への適用性について総合的に評価することで、津波数値解析の高精度化について重要な知見が得られた。本研究の結果は今後の津波被害予測を行う際の重要な指針となることが期待できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。