

## 学位論文の要旨

氏名

山下 啓

学位論文題目

内部波の伝播過程における非線形現象

閉鎖性の強い湾や湖沼では、密度成層が発達する。密度成層が安定すると、水温や塩分等のスカラー量の鉛直方向の輸送が抑制される。このため、水域の下層において、貧酸素化や富栄養化が促進される。こうした密度成層場において、風の吹き寄せや、潮流の通過、更には、淡水や塩水の流入といった外力が作用すると、内部波が発生する。内部波は、界面変動のみならず、界面における shear や砕波を通して、密度成層における物質循環を支配する物理現象の一つである。

ところで、沿岸域では、内部セイシュや内部潮汐といった長周期内部波のみならず、数分程度の周期を有する短周期内部波も観測される。このうち、後者の発生原因としては、水底の地形や界面の不安定性等が挙げられるが、短周期内部波の生成過程に関しては、不明な点が多い。こうした内部波は、伝播の際に、広い周波数帯域にわたる成分波間でエネルギーを交換する。そして、内部波が相対的に浅い水域に到達すると、その非線形性が次第に強まり、分裂し、また、砕波に至る。更に、短周期内部波は、砕波による上・下層水の鉛直混合を促進し、内部波の消滅過程に関係する。このように、長周期内部波のエネルギーは、内部波の非線形性及び分散性の効果により、短周期内部波へと移行し、生成した短周期内部波が砕波を伴い消滅するとき、内部波のエネルギーが散逸する。従って、内部波の消滅過程を把握するためにも、短周期内部波の生成過程を調べる必要がある。

一方、近年の観測器機の発達により、大振幅内部孤立波の存在が明らかにされてきた。こうした大振幅内部孤立波が、大小様々なスケールの内部波とエネルギーの授受を行ない、変形し、そして、沿岸域に到達する。大振幅内部孤立波は、その大振幅性ゆえに、伝播特性を詳細に把握することが困難とされている。しかしながら、こうした内部波の伝播特性を把握してこそ、水域の環境に対する内部波の影響を見積もることが可能となる。そのためには、内部波の強非線形性と強分散性の両者を考慮し、内部波の挙動を正確に把握しなければならない。

そこで、本研究では、波の強非線形性・強分散性を考慮した非線形波動方程式系を基礎方程式系とする数値解析を実施した。そして、本方程式系に対する孤立波解を求め、内部孤立波の特性を調べるとともに、大振幅内部孤立波の非線形相互作用を検討した。また、波の強非線形・強分散的な現象である、水底地形に起因する短周期内部波の発生や、砕波点近傍における内部孤立波の変形等を精度高く再現し、内部波の伝播特性に関して考究した。

本論文は、全6章で構成される。

第1章では、内部波に関する既往の研究を踏まえ、本研究の背景及び目的を示した。

第2章では、変分原理に基づく多層流体に対する非線形波動方程式系の導出に関して詳述した。そして、本方程式系を上・下面が固定水平板で挟まれた2層流体に適用した。

第3章では、鉛直断面内における内部波の運動を対象とし、差分法を用いた、時間発展解析のための数値解析手法を述べた。また、数値解析における誤差を定性的に見積もり、数値誤差を低減するための手法を提案した。ただし、本手法を用いずとも、本論文で実施した数値解析の数値誤差が無視できる程度であったため、本論文における数値解析では、数値誤差の低減手法を適用していない。次に、上・下面に固定水平板を設置した水槽や、上面が自由水面である水槽を用いて水理実験を実施した。そして、水理実験結果と、既存の強非線形モデル及び本数値解析モデルによる計算結果を比較し、本方程式系による時間発展解析結果の精度を確認した。更に、矩形格子を用いた離散化における、任意形状を有する鉛直壁のための、高精度な境界処理法を提案した。すなわち、矩形格子に対して斜めに設置された鉛直壁の位置が、格子点からずれる場合において、斜め境界を精度よく処理して、内部波の2次元伝播を正確に再現する手法を開発した。本手法は、平面2次元波動場における任意形状の鉛直壁面境界のみならず、3次元数値解析における任意形状の壁面境界並びに底面境界にも適用可能である。

第4章では、非線形波動方程式系の定常進行波解を求めるための数値解析手法を提案した。そして、本手法を用いて、表面孤立波及び内部孤立波の数値解を求めた。本手法は、Boussinesq型方程式といった、様々な非線形波動方程式系の定常進行波解を求める際にも適用することができる。まず、数値解を理論解と比較し、数値解の精度が高いことを示した。次に、表面孤立波及び内部孤立波の種々の特性に関して調べた。

第5章では、内部孤立波の伝播特性を対象として数値解析を実施した。まず、大振幅内部孤立波を含む、様々な振幅を有する内部孤立波の非線形干渉の数値解析を行なった。すなわち、異なる振幅の二つの内部孤立波の追い越しや、内部孤立波の鉛直壁への衝突を対象とした。次に、一様勾配斜面上における内部波の伝播を対象とした。その際に、水理実験では再現困難である、緩勾配斜面上における内部波も対象とした。そして、内部波の、斜面上における変形や、砕波点近傍で示す挙動を調べた。また、潜堤上を伝播する内部波の非線形現象に関して詳細に調べた。最後に、深水域である外洋から、浅水域である陸棚上に伝播する内部波の挙動を対象とした。そのために、まず、時間発展解析により、深水域における内部孤立波を求め、本数値モデルの深水域への適用性を確かめた。次に、陸棚斜面上における内部波の変形や、外洋と陸棚の間に存在する水深急変部における内部波の反射を検討した。そして、陸棚上を伝播する内部波の、短周期内部波への変遷過程を、陸棚上での界面位置とcritical levelの位置関係に着目して調べ、深水域から浅水域へと伝播する内部波のエネルギー特性に関して論じた。

第6章で、本研究によって得られた知見を総括した。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Nonlinear Phenomena in Propagation of Internal Waves

Name: Kei Yamashita

In a lake or the ocean where density stratification is well developed, not only internal long-period waves, e.g. internal seiches and tides, but also internal short-period waves are observed. The sources of the latter include bottom topography and interfacial instability. In coastal zones, internal waves play an important role in nearshore environment of nutrient salts, water temperature, etc., so that it is important to know the characteristics in the process of internal-wave propagation in consideration of both nonlinearity and dispersion of internal waves. In the present study, numerical simulation of internal waves is performed using a set of nonlinear equations based on a variational principle to examine the process of propagation of nonlinear internal waves. This dissertation consists of the following six chapters:

In Chapter 1, the background and objectives of the study are mentioned with reference to the references.

In Chapter 2, the governing equations are presented for two-layer density stratification between two fixed horizontal plates, where inviscid and incompressible fluids are assumed to be stable in still water and the fluid motion is assumed to be irrotational. The velocity potential in each layer is expanded into a power series of vertical elevation, after which the nonlinear internal-wave equations have been derived by applying the variational principle.

In Chapter 3, numerical methods are given to solve two-layer problems in vertically two-dimensional cases. The set of nonlinear wave equations are rewritten to finite difference equations, after which the time development is carried out by applying implicit schemes. The pseudo-differential equations are derived from the finite difference equations using Taylor series. The order of numerical error is estimated using the non-dimensional pseudo-differential equations, where the error is caused by numerical dispersion and viscosity due to the redundant terms of the pseudo-differential equations compared to the governing equations. Hydraulic experiments are carried out for two-layer systems, where both the top face and the sea bottom are horizontal fixed plates or the top face is a free water surface. The experimental data of surface/interface displacements are compared with the corresponding numerical calculation results using the proposed model, as well as those through the existing fully nonlinear model. A new method is proposed to describe boundary conditions at vertical walls with horizontally arbitrary shapes considering the accurate velocity at the vertical walls inside computational cells in horizontal two-dimensions. This method, where the component of fluid velocity is zero in the normal directions of vertical walls, is applied to the Mach reflection of surface waves. The present method is also applicable to boundary conditions at the sea bottom with arbitrary shapes in three-dimensional numerical calculation.

In Chapter 4, a new method is developed to obtain numerical solutions of stationary progressive water waves based on the present nonlinear wave equations, Boussinesq-type equations, etc. Advection equations are satisfied for physical quantities, i.e., surface/interface displacements, velocity, or velocity potential. In calculation

processes, the Newton-Raphson method is applied to find convergence solutions. Stationary solutions of traveling surface/internal solitary waves are obtained to be compared with the corresponding theoretical solutions, as well as numerical solutions of Euler equations, such that the accuracy of solutions through the wave equations is verified also for large amplitude internal solitary waves. The characteristics of surface/internal solitary waves are discussed with vertical distributions of velocity, transformation of wave energy, etc.

In Chapter 5, first, the nonlinear interactions between internal waves, i.e., both head-on collision and overtaking phenomena of two solitary waves, are studied using the numerical solutions obtained through the present method for stationary waves as the initial conditions including internal solitary waves with very large amplitude. Second, internal solitary waves propagating over a uniformly sloping beach are simulated especially for the cases of mild and long bottom slopes. The ratio of initial wave height to wave-breaking depth becomes larger as the bottom slope is milder and the wave nonlinearity is stronger. If the bottom slope is sufficiently mild, the wave height is restrained by wave dispersion from increasing, where the energy is provided to the following wave train from the preceding waves. Internal solitary waves traveling from offshore deeper water to shallower water over a continental shelf are also simulated, where the KdV solitons are generated due to the disintegration of the BO solitons.

In Chapter 6, the discussion is integrated to mention the conclusions of the study.