

論文の内容の要旨

論文題目 浅水場を対象とした流動モデルにおける静水圧近似の適用性に関する研究

氏名 長谷部 雅伸

本研究では、浅水場(主に長波が卓越する沿岸域など)を対象とした流動モデルについて、(1)静水圧近似の適用条件に関する理論検討、(2)解の状況に応じて静水圧近似モデル/非静水圧モデルを自動的に使い分けることが可能な新たな数値モデルの開発、(3)様々な流動問題を対象とした数値シミュレーションによる本モデルの基本的性質の把握、(4)静水圧近似の具体的な適用基準値の提案、を行った。以下に概要と主要な結論を示す。

第1章 緒言: 静水圧近似モデルの発展と最近の活用例、静水圧近似モデルの課題および静水圧近似の適用性に関する既往研究をまとめ、本研究での目的を本要旨冒頭のように設定した。

第2章 大規模深層水放流の拡散シミュレーション: 深層水利用施設からの利用済み深層水放流を想定した拡散シミュレーションを行った。冬季および夏季の成層状態、海域の流れの強さの違いによって、放流された深層水の拡散の様相は様々に変化する(図1)。本解析例では、放流深層水は場の流れに直行する噴流となり、この二つの流れが干渉しあうことで放水口のごく近傍に逆回転の渦対が発生し(図2)、渦対自体が放流水とともに場の流れに従って移動することで、遠方域の拡散場が変化する(図1, 右)。さらに条件によっては放流水が分岐状に拡散する場合もあることがわかった(図1, 右)。こうした放流深層水の特徴的な挙動は、従来の静水圧近似モデルを用いた解析例では見られなかったものであり、本研究を進める強い動機づけとなった。

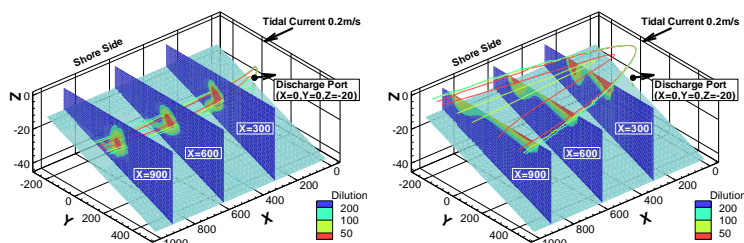


図1 放流深層水の拡散状況(左: 夏期, 右: 冬季)

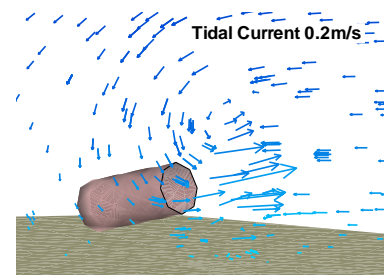


図2 放水口近傍の流れ場

第3章 静水圧近似の適用性判定に関する検討: 潮流など主に長波によって駆動される自然現象としての流れと、局所的・人為的な流れが混在する浅水場を対象として、支配方程式の無次元化により静水圧近似が適用可能となる条件を理論的に検討した。具体的には、静水圧パラメータ δ , ε をそれぞれ代表長さスケール (L , H) および代表流速スケール (U , W) の水平鉛直比によって定義し、これらパラメータを用いて支配方程式を無次元化した。その結果、 $\delta\varepsilon$ および ε^2 が十分に微小である場合には静水圧近似が適用できることが示された。

第4章 数値モデルの構築: 第3章の知見を元に、静水圧領域と非静水圧領域の接続手法のひとつとして、解析結果に合わせ時々刻々と接続境界が変化する解適合型接続法(図3)を新たに提案した。既往しばしば用いられる固定型の接続境界を用いた手法は定常性、周期性のある問題など空間スケールや流速の代表値が予め推定可能な場合に適している。これに対し非定常性が強く流れ場の様相を事前に予測することが困難である場合には、解適合型接続手法の適用が有用と考えられる。また、作成した計算プログラムについては、閉鎖性水域での副振動問題や密度流問題の一つとして知られる Lock-Exchange 問題(図4, 図5)を対象とした基本検証を行った。特に Lock-Exchange 問題では、密度フロントの進行速度について既往のいくつかの研究例と整合する結果が得られ、本モデルの妥当性が確認された(図6)。圧力の非静水圧成分に関しては、本数値モデルの特性上、鉛直方向の流速成分が卓越する部分でのみ考慮されることになる。しかし、鉛直流速が大きな部分において圧力の非静水圧成分 p_{nh} を考慮することは、浮力によって駆動される水塊の挙動を精度良く予測する上で有用であることがわかった。

第5章 鉛直密度噴流問題への適用: 潮汐を模擬した振動流の作用下における鉛直密度噴流を対象としたシミュレーションを行った(図7)。噴流近傍域における解析結果の一例を図8に示す。計算領域全体を静水圧近似モデルとした場合、噴流近傍の解析結果は明らかに現象を再現せず、遠方域での拡散場も非静水圧モデルとは異なる結果となる。固定境界型接続モデルおよび解適合型接続モデルを用いたケースでは非静水圧モデルを用いたケースと非常に近い解析結果が得られるが、非静水圧モデルとの一致度は固定境界型接続モデルの方が良い。これは解適合型接続モデルのケースでは、流れの状況によっては噴流のごく近傍にも静水圧近似が適用されることに起因するも

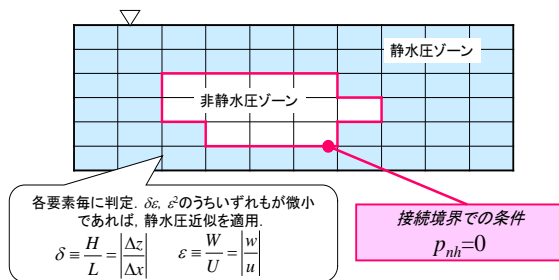


図3 解適合型接続モデルの概要

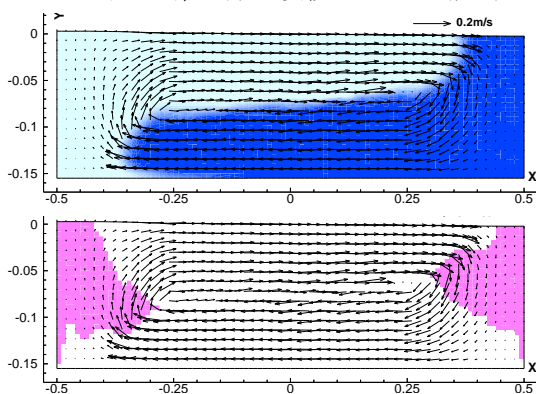


図5 解適合型接続モデルによる解析例
(上: 密度場, 下: 非静水圧モデルの領域)

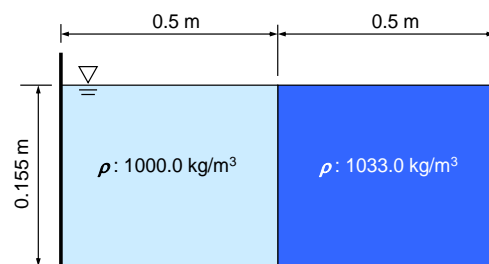


図4 Lock-Exchange 問題の解析条件

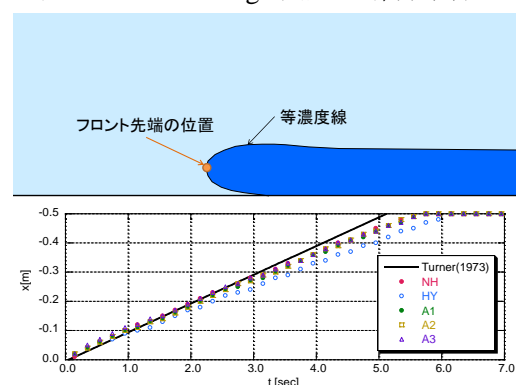


図6 密度フロントの進行速度による検証

のと考えられる。各ケースの計算時間の比較を行ったところ、固定境界型接続モデルでは非静水圧モデルの概ね半分程度であったのに対し、解適合型接続モデルではケース A3 で非静水圧モデルの計算時間を上まわった。解適合型接続モデルでは非静水圧領域が時間的に変化することで解くべき変数が増減するため、その都度方程式の係数行列を再構築する処理が必要となり、さらに係数行列の構成の変化により反復解法の収束性が低下することがあるためである。

第6章 津波伝搬解析への適用：既往の水理模型実験の再現計算を行った(図9)。実験結果との比較を図10に示すが、非静水圧モデルによる解析結果と良好な一致が確認できる。また、水平方向格子間隔 Δx を様々に変えたところ、 Δx を水深の0.6倍以下とした場合に第一波の分裂地点・分裂後の最大波高を概ね再現しうることが確認された(図11)。一方、静水圧近似モデルによる解析結果は、相対的に波形が前傾化し早い段階で分裂が発生する。これは静水圧近似においては、理論上運動量の鉛直成分が空間的に輸送されないことに起因するものである。また、水平方向格子間隔 Δx が水深の1.5倍以上のケースでは、非静水圧モデルを用いたとしても静水圧近似モデルと同様の結果となることが確認された(図12)。解適合型接続モデルによる解析では、静水圧近似を適用する基準による解析結果の差異は、水面波の分裂が発生しつつある時刻および位置から顕著に表れる(図13)。静水圧近似の適用基準値を変えることで非静水圧モデルが用いられる領域は変化するが、一連の分裂現象を精度よく再現するためには、少なくとも波峰の前後に渡る領域で非静水圧モデルを用いる必要があることがわかった(図14)。これら数値シミュレーションに加え、静水圧パラメータ δ , ε について、波動理論との比較による理論考察を行った。分散性については非線形長波理論、非線形性については本章のシミュレーション結果を踏まえ孤立波理論(クノイド波

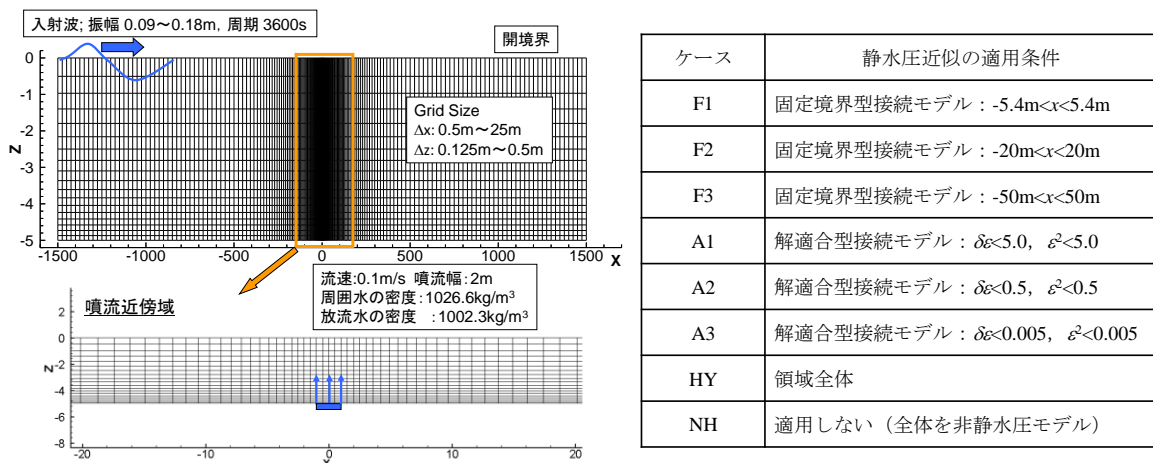


図7 解析領域と解析条件

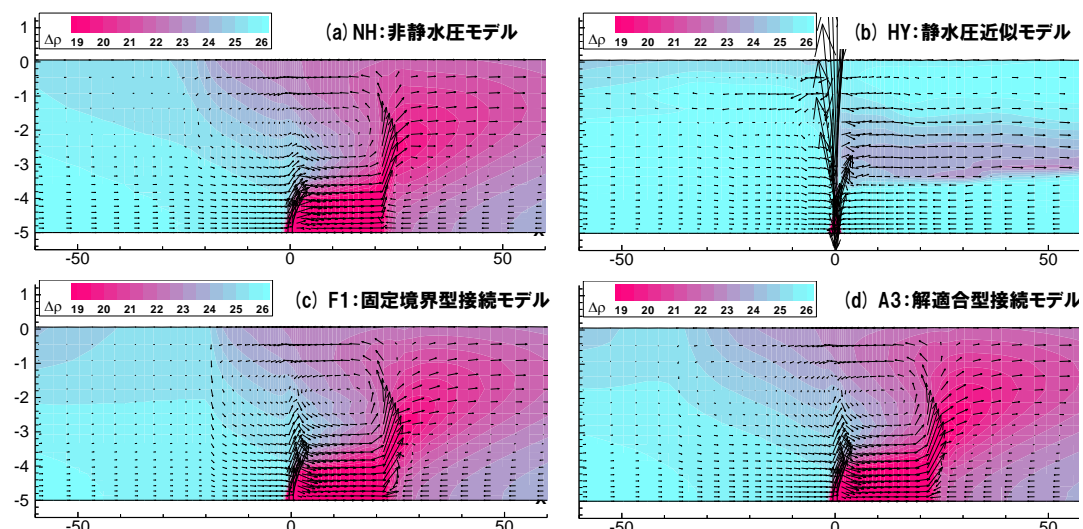


図8 解析結果の一例(時刻 $t=1,800s$ での流速, 密度場)

理論における波長無限大の極限)との対応を整理したところ、 δ , ϵ はそれぞれ波の分散性・非線形性を表わすパラメータであることが示された。さらに各波動理論の適用限界から、 $\delta\epsilon < 0.0087$ かつ $\epsilon^2 < 0.03$ という具体的な静水圧近似の適用範囲を適用し、数値解析により妥当性を確認した。

第7章 結言：本論の主要な結論をまとめ、今後の課題として(1)三次元問題への適用、(2)定式化および数値解析手法の改良と発展、(3)接続モデルの適用範囲についてのより一般的な検証、(4)例えば構造物に作用する津波荷重など現象の分散性・非線形性の影響、および計算格子の大きさが算定精度に強く表れる問題への拡張、を挙げた。

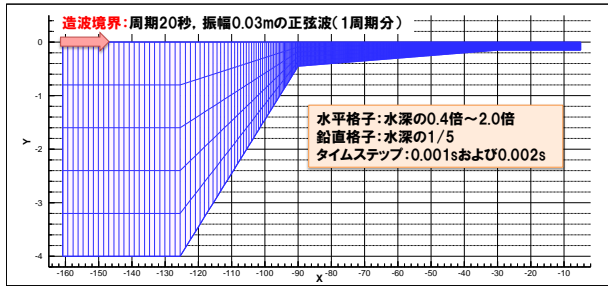


図9 解析条件

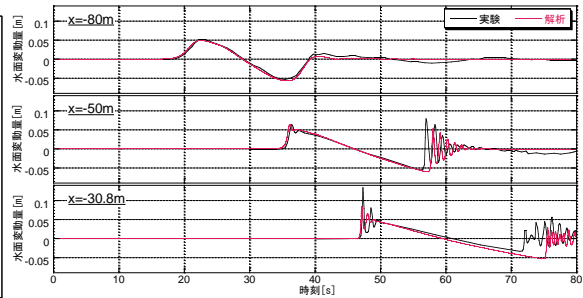


図10 実験との比較(非静水圧モデル, $\Delta x = 0.4h$)

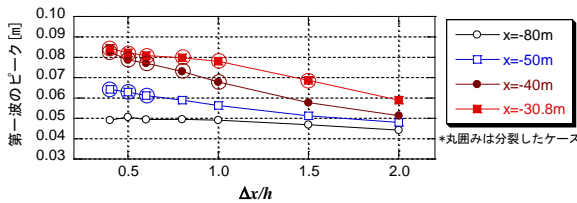


図11 Δx による解析結果の差異(非静水圧モデル)

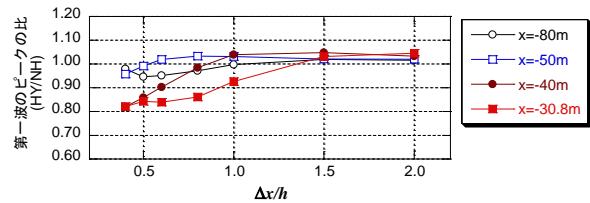
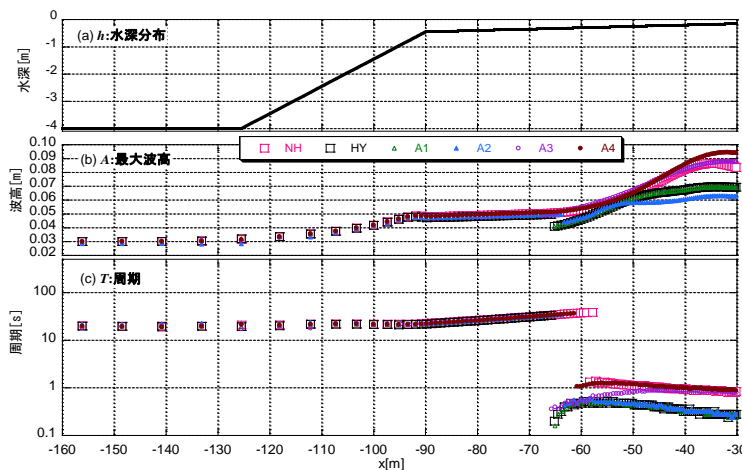


図12 非静水圧/静水圧近似モデルの比較



ケース	静水圧近似の適用条件
A1	解適合型接続モデル: $\delta\epsilon < 5.0$, $\epsilon^2 < 5.0$
A2	解適合型接続モデル: $\delta\epsilon < 0.5$, $\epsilon^2 < 0.5$
A3	解適合型接続モデル: $\delta\epsilon < 0.05$, $\epsilon^2 < 0.05$
A4	解適合型接続モデル: $\delta\epsilon < 0.005$, $\epsilon^2 < 0.005$
NH	適用しない
HY	解析領域全体に静水圧近似を適用

図13 解適合型接続モデルを用いた解析

(左図は第一波の最大波高と周期の空間分布, 周期が不連続な位置で波が分裂. 右表は解析条件.)

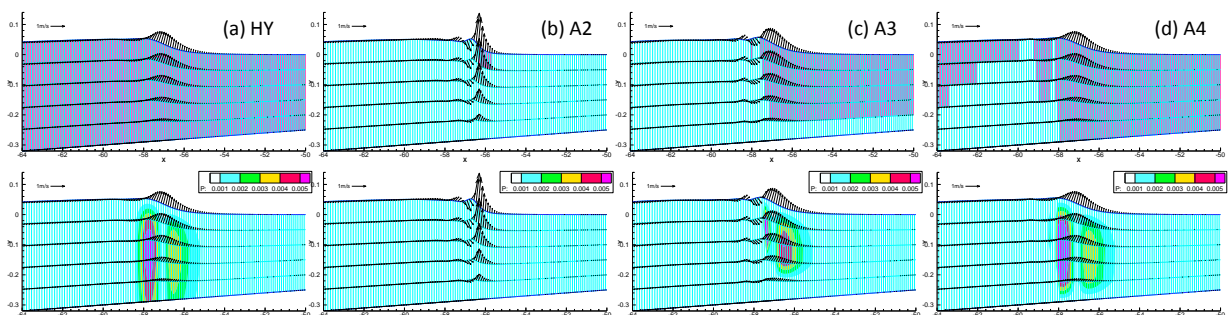


図14 非静水圧モデルの適用範囲(上)と、圧力の非静水圧成分(下): 時刻 $t=32s$