

内部ケルビン波の砕波により発生する流れに関する研究

北見工業大学大学院	学生会員	○小窪 一毅
北見工業大学	正会員	中山 恵介
首都大学東京	正会員	新谷 哲也
寒地土木研究所	正会員	大塚 淳一
国土技術政策総合研究所	正会員	岡田 知也
北海道大学	正会員	渡部 靖憲
北見工業大学大学院	学生会員	丸谷 靖幸

1. はじめに

東京湾や網走湖などの沿岸域の閉鎖性水域や汽水湖では、淡水が流入することで、約50 cmから1 mの明確な密度界面が形成されることがある。その場合2成層近似が成り立つことが知られており、明確な密度界面は水域を上層と下層に分離させ、その密度界面の変化である巨大な振幅を持った内部波により、流動・物質輸送が支配されていることが報告されている(Prison&Weyhenmeyer,1994)。水深数10 m程度で塩淡により密度界面が形成される場合、内部波の波速は数m/s程度であることから、内部変形半径は数10 kmであると考えられる。水平スケールが数10 km以上の水域においては、コリオリの影響を受けた内部ケルビン波が発生すると予想される。一般的に沿岸域では斜面が存在し、内部ケルビン波は浅水域に進入することで砕波すると考えられる。過去の研究では、斜面上で内部波が砕波することで生じる残差流について述べたものが存在する(Nakayama&Imberger,2003)。しかし、コリオリを考慮することで内部ケルビン波がどのような形態で砕波し、どのような物質輸送を発生させているのか解明されていない。そこで本研究では、3次元数値モデルを利用し、内部ケルビン波の砕波に関する解析を行い、超音波流速計(以下UVPとする)を用いた室内実験結果と比較することで、内部ケルビン波の砕波により発生する流れについて検討を行うことを目的とする。

2. 3次元数値モデルを用いた解析

内部ケルビン波の砕波により発生する流れの解析を行うために、計算領域を波の進行方向 4.5m, 奥行

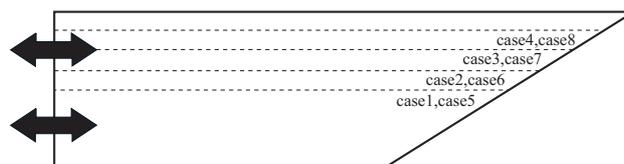


図-1 コリオリ無し・有りにおける内部ケルビン波による砕波解析の計算領域の概略図

き0.4 m, 高さ0.3 m, 斜面勾配3/20と設定し、上層の密度を1020 kg/m<sup>3</sup>, 下層の密度を1000 kg/m<sup>3</sup>とし、上下層厚が異なる4ケースを用意した(図-1)。また、それぞれのケースの下層厚は0.15 m, 0.17 m, 0.2 m, 0.24 mとし、対応するコリオリ無しの場合をcase1からcase4, コリオリ有りのケースをcase5からcase8として検討を行った。全振幅が、コリオリ無しにおいてcase1で0.01 mとなるように設定し、その他のケースでは同様なフラックスを左端の上下層に与えることで、同じエネルギーにより発生する内部ケルビン波の解析を行った。コリオリ発生のための計算領域の回転速度は2π/30 rad/sとし、内部波の周期は11 sを与えた。

3. 結果と検討

コリオリ無しおよび有りの全ケースにおける、最大遡上距離を確認したところ、コリオリ無しおよび有りの全ケースにおいて、上層厚が薄くなるほど遡上距離が小さくなる傾向があることが分かった(図-2)。これは、KdV理論より、ソリトン形状が存在しなくなるcritical levelの存在が示されており、case4,case8ではcritical levelが斜面途中に存在する条件となっていたため、case1,case5と比較して十分に浅

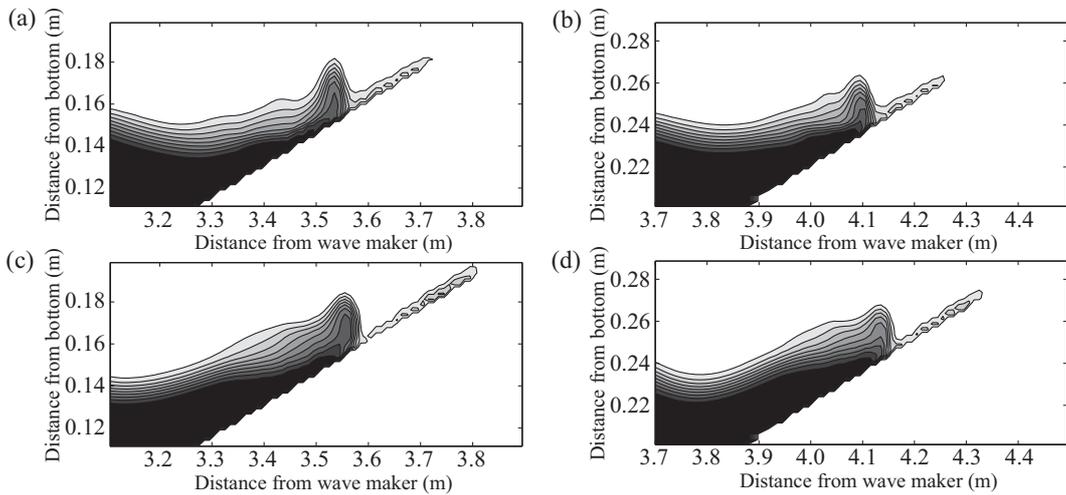


図-2 内部波砕波後の最大遡上状態. 波の進行方向右手側の側壁から 1 cm における鉛直断面. 黒色は密度  $1020 \text{ kg/m}^3$ , 白色は密度  $1000 \text{ kg/m}^3$  に対応する. 例として case1, case4 を示す. (a) case1. (b) case4. (c) case5. (d) case8.

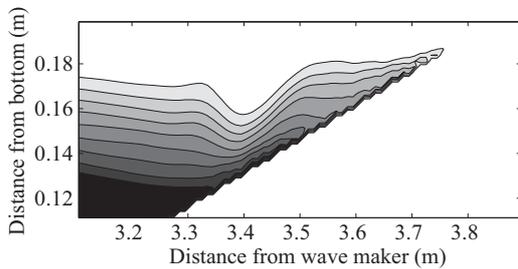


図-3 図-2(c)に対応する時間の密度の鉛直断面. 波の進行方向の左手側側壁から 1cm における鉛直断面.

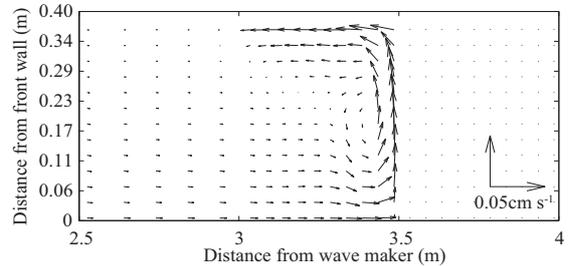


図-4 case5 における中立密度界面上の残差ベクトル.

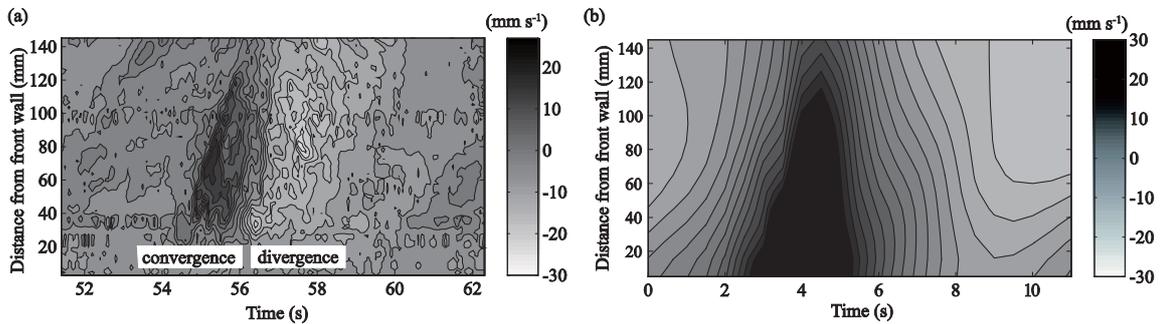


図-5 奥行き方向成分流速の時間変化. 砕波発生地点の中立密度界面位置における計測結果. (a) UVP による奥行き方向の流速成分. (b) 数値計算結果.

水変形が行われず遡上距離が小さくなったと考えられる. コリオリ無しでは3次元的な奥行き方向の流れの発生は顕著に見られなかったが, コリオリ有りの内部ケルビン波が斜面上で砕波する場合には進行方向の右手側壁側にエネルギーが集中するため, 砕波により発生した乱れが反対側の側壁付近まで輸送され, その結果, 密度界面が大きく乱されることが分かった (図-3). その輸送を支配している要因を検討するため, case5における中立密度界面上における1周期の残差を計算した. その結果, 手前から奥への明確な輸送およびそれに伴う水平循環の発生が確認された (図-4). 最後に, 数値計算結果の検証のため, UVPを利用した実験を行った. 計算領域と同ス

ケールの回転水槽を用い, case5における砕波発生地点での実験結果との比較を行ったところ, 数値計算で確認された砕波渦前後の収束と発散を確認することが出来た (図-5).

#### 4. おわりに

内部ケルビン波の砕波により発生する流れによる物質輸送を解明することを目的とし, 解析・検討を行った. その結果, 上層厚が薄くなるほど遡上距離が小さくなる傾向があることが分かった. 内部ケルビン波の砕波により物質が乱れも含み水平循環により輸送されている可能性を示した. 数値計算結果の検証のためUVPを利用した比較を行い, 収束・発散など現象の再現ができていたことが確認された.