

異なる成層場における内部ケルビン波の斜面上での砕波

Breaking of internal Kelvin wave over a uniform slope in different types of stratified flow field

北見工業大学	○学生員	小窪一毅 (Kazuki Kokubo)
北見工業大学	正員	中山恵介 (Keisuke Nakayama)
首都大学東京	正員	新谷哲也 (Tetsuya Shintani)
北見工業大学	学正員	丸谷靖幸 (Yasuyuki Maruya)
国土技術政策総合研究所	正員	岡田知也 (Tomonari Okada)
北海道大学	正員	渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

東京湾や網走湖といった閉鎖性水域では、夏季の強い日射による温度成層の発生、および淡水の流入により明確な2成層が発達することがある。このような場において、風や潮汐の影響により巨大な振幅を有する内部波が境界において発生することが報告されている。この内部波は底層において大きな流速を発生させ、斜面が存在している場合には内部波の境界が不安定となり砕波を発生させ、底層に蓄積された物質の巻き上げを引き起こす。このようにして発生した物質輸送は長期的な輸送過程に影響を及ぼしており、内部波の砕波の構造と砕波による残差流を理解することは、閉鎖性水域において、水質環境を把握、改善していく上で非常に重要なことであると言える。

過去の多くの研究では、Grue¹⁾やLamb²⁾らによる内部波の一樣斜面勾配の遡上に関するもの、Silva³⁾やIvey⁴⁾、McPhee-Shaw⁵⁾による内部波の砕波による斜面付近での貫入現象や、Nakayama⁶⁾らにおける残差流^{7,8)}について述べたものが報告されている。それらの論文から、内部波の砕波により誘起される流れに関する重要な情報を得ることが出来る。しかし、これまでの多くの研究において、コリオリ力が無視されてきた場合が多く、内部波の斜面上での砕波の影響は十分に行われているとは言えない。そこで本研究では、コリオリ力を考慮し、閉鎖性水域において発生した内部波の砕波の影響を検討することを目的とし、3次元数値モデルを用いて解析を行った。

2. 3次元数値モデルを用いた解析

(1) 3次元数値モデル Fantom3D

本研究では、東京首都大学の新谷が開発したオブジェクト指向型環境流体モデル⁹⁾ (以下、Fantom3Dとする)を使用した。モデルでは、計算領域を1つの基本となるオブジェクトとして考えて計算を実施する。つまり、1つのある領域(小領域)を1つのDomainオブジェク

トとして定義し、全体領域を複数の小領域が連結した領域であると考え、各小領域毎の並列計算を実行することとなる。

さらに、各Domainオブジェクトは、複数の物理量オブジェクト(運動量、圧力、水温等)を保有する事も出来る。それぞれの物理量オブジェクトは、独自の境界条件オブジェクトを所有しており、外力(順圧・傾圧力、風応力、コリオリ力等)に関しても個々にオブジェクト化されており、それらはDomainオブジェクトへの作用素としてモデル化されている。

(2) 数値計算条件

本研究では、閉鎖性水域において発生する内部波の砕波による輸送過程を解明することが主な目的である。東京湾を例にとると、風により湾奥において内部波が発生する可能性が指摘されている。その特徴を模擬するため、長さ4.5m、幅0.4m、斜面勾配3/20、斜面長2.0mの水槽を想定した(図-1)。

本研究では2成層近似を用い、上層を淡水、下層を塩水、上下層の密度差比を0.02、水温は18°Cとした。左端から造波によって内部波を進行させ、斜面上での砕波の様子を解析することとした。また、内部波の特性の変化を考慮するため、上下層厚の異なる4ケースの計算を行った。今回はオブジェクト指向言語の利点である並列計算を利用するため水槽を合計8つのDomainに分割し、内部波が砕波する地点が細くなるようにメッシュサイズを構成して計算を行った。各Domainにおける水平、鉛直、奥行き方向のメッシュサイズを図-1に示す。さらに、コリオリ力の有無による内部波の違いを検討するため、全てのケースにおいて $2\pi/30$ [rad/s]の回転速度を与えた。周期は11sとし、計算時間間隔は0.01秒で造波開始100秒までの計算を行った。また、全てのケースで同じ内部波のエネルギーを与えるため、上層もしくは下層におけるフラックスの最大値の鉛直積分は、 0.9×10^{-3} (m²s⁻¹)とした。

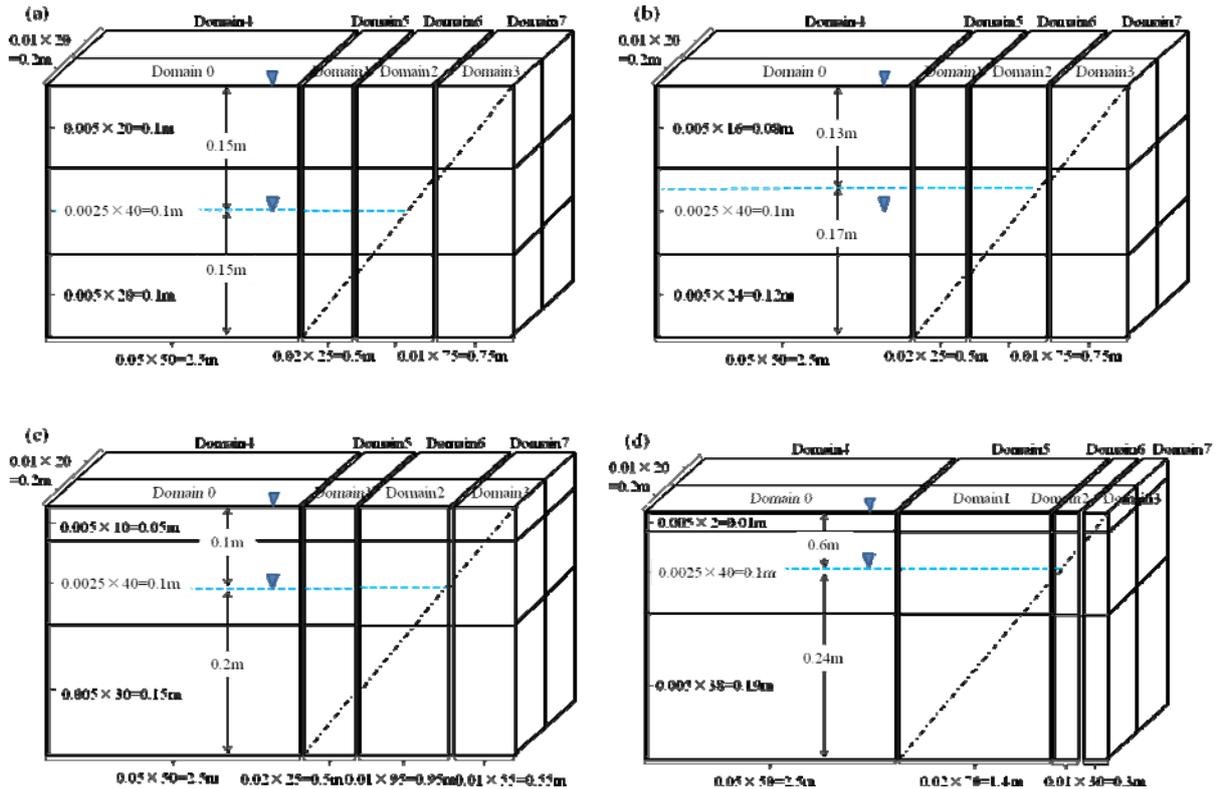


図-1 各計算条件におけるメッシュサイズ。

(a) case1 上層厚 0.15m, 下層厚 0.15m, (b) case2 上層厚 0.13m, 下層厚 0.17m,
 (c) case3 上層厚 0.10m, 下層厚 0.20m, (d) case4 上層厚 0.60m, 下層厚 0.24m.

3. 結果と検討

まず最初に、層厚が異なることによる内部波の遡上について検討した。Fantom3Dでの計算結果から、内部波が斜面上を最も遡上した際の密度分布を描いた(図-2, 図-3)。解析に用いた鉛直断面は、コリオリ力の影響が大きいと予想される一番手前のメッシュを利用した。それぞれのケースをコリオリ力の有無で比較すると、case1~case4の全てにおいて、コリオリ力があることによって遡上距離が約1.5倍となっていた(表-1)。このことからコリオリ力があることにより遡上距離が大きくなるということが分かる。コリオリ力により、エネルギーが手前側の鉛直壁に集中したためであると考えられる。さらに、表-1よりコリオリ力の有無に関わらず、下層が厚くなるほど遡上距離が小さくなっていることが分かる。

続いて、コリオリ力の有無による碎波の形状について検討した。コリオリ力なしでは遡上する塊の先端が凸になっているがコリオリ力ありではそれが見られない。コリオリ力なしでは明瞭な反時計回りの鉛直渦が形成されていたが、コリオリ力ありでは複雑な碎波状態を示していたためであると考えられる。さらに、斜面を駆け上がる層厚がコリオリ力ありの方が薄く伸びていることが分かる。これらのことからコリオリ力の有無、層厚の違いによって物質の遡上距離や運ばれ方に違いが出るのではないかと推測された。

次に、水平面内での輸送について検討するため、静止状態において界面位置が存在する水平断面での流速ベクトルを描いた(図-4, 図-5)。先ほどの検討において大きな差が示された、case1とcase4のみを抽出した。コリオリ力の有無で図を比較してみるとコリオリ力なしの場合では奥行き方向にほぼ様な変化しか生じてないが、コリオリ力ありの場合では、case1では3.5mあたりに、case4では4.0mあたりに、上から見て反時計回りの流れが発生していることが分かる。さらに、コリオリ力の有無のどちらにおいてもcase4に比べてcase1の方が流速が大きいことが分かる。これらのことからコリオリ力の有無、上下層厚の違いによって碎波形態や流速分布に違いが出るということが分かった。

4. まとめ

本研究では、閉鎖性水域において発生する内部波の碎波による輸送過程を解明することが目的とし、Fantom3Dを用いて斜面上での内部ケルビン波の解析を実施した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) コリオリ力があることにより、エネルギーが集中する側において斜面上での遡上距離は大きくなることが分かった。
- 2) 下層厚が大きくなるほど斜面上での遡上距離は小さくなった。

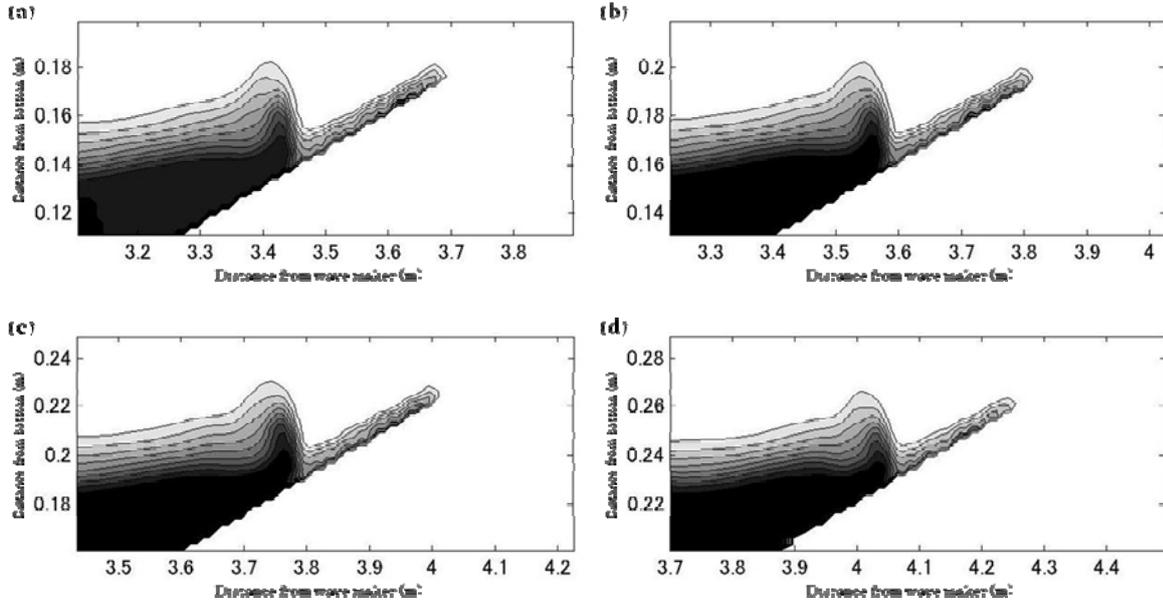


図-2 コリオリなしにおける斜面上での密度分布(1番手前のメッシュ)
(a) case1, (b) case2, (c) case3, (d)case4.

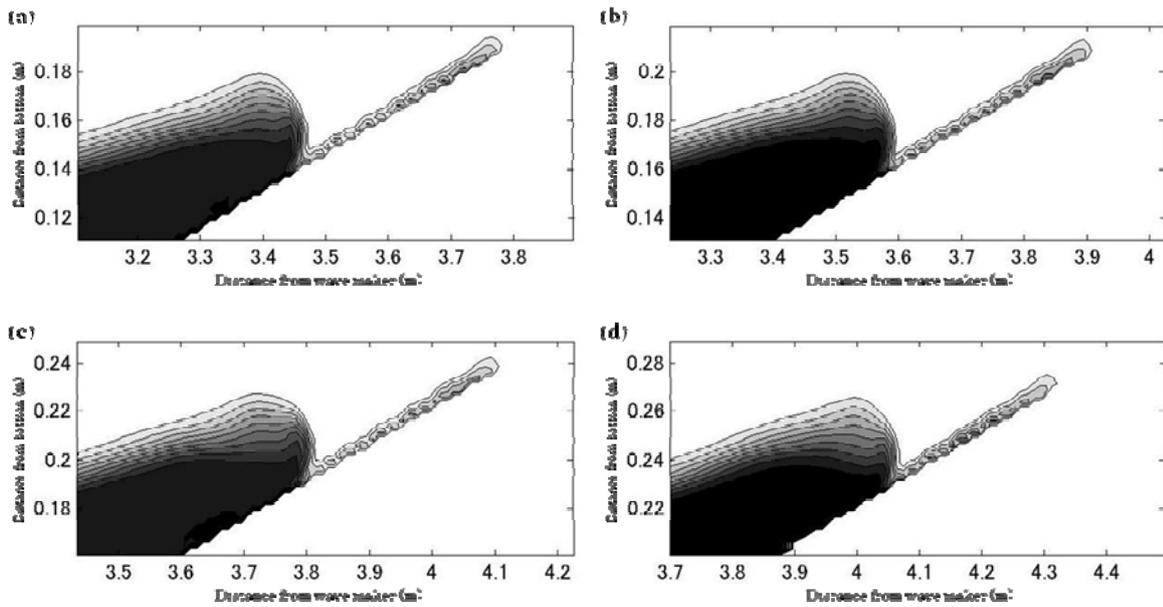


図-3 コリオリありにおける斜面上での密度分布(1番手前のメッシュ)
(a) case1, (b) case2, (c) case3, (d)case4.

表-1 各条件でのコリオリ有無による遡上距離
(1番手前のメッシュ)

	case1	case2	case3	case4
コリオリなし	0.172m	0.163m	0.161m	0.137m
コリオリあり	0.271m	0.264m	0.260m	0.202m

- 3) コリオリ力が与えられることによって、内部波の碎波の形状が3次元的波形態へと変化することが分かった。
- 4) コリオリ力が与えられることによって、界面付近に大きな渦が発生することが分かった。

参考文献：

- 1) Grue, J., A. Jensen, P. Rusas, and J. K. S. : Breaking and broadening of internal solitary waves. *J. Fluid Mech.*, 413, 181–217, 2000.
- 2) Lamb, K. G. : A numerical investigation of solitary internal waves with trapped cores formed via shoaling. *J. Fluid Mech.*, 451, 109–144, 2002.
- 3) Silva, I. P. D. D., J. Imberger, and G. N. Ivey. : Localized mixing due to a breaking internal wave ray at a sloping bed. *J. Fluid Mech.*, 350, 1–27, 1997.

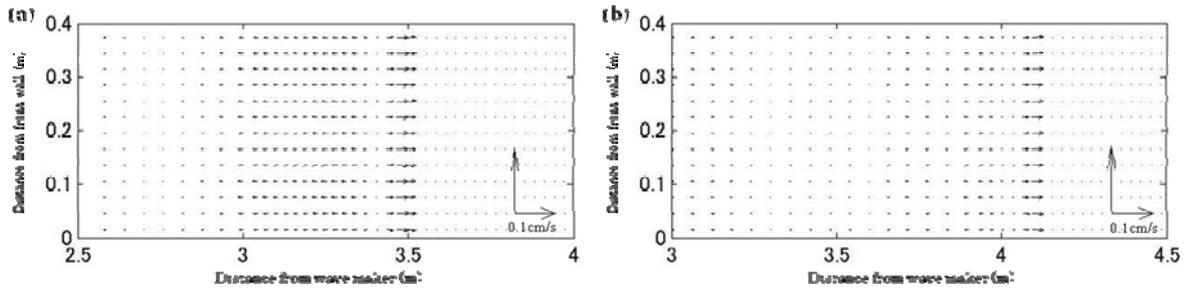


図-4 コリオリなしにおける水平断面での流速ベクトル. (a)case1, (b)case4.

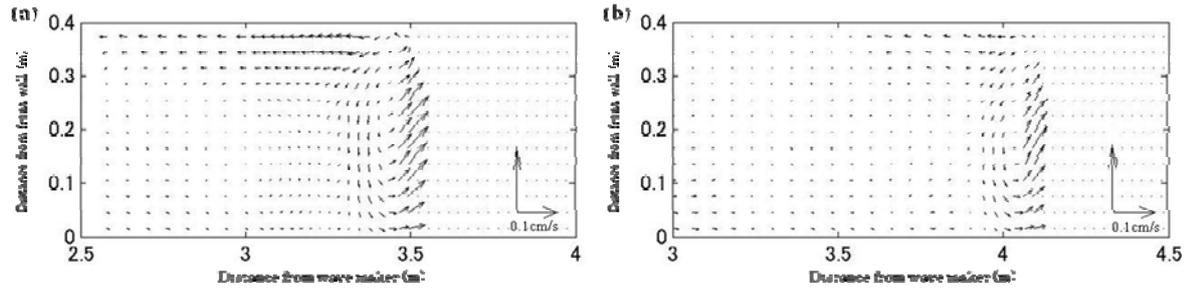


図-5 コリオリありにおける水平断面での流速ベクトル. (a)case1, (b)case4.

- 4) Ivey, G. N. and R. I. Nokes. : Vertical mixing due to the breaking of critical internal waves on sloping boundaries. *J. Fluid Mech.*, 204, 479-500, 1989.
- 5) McPhee-Shaw, E. and E. Kunze. : Boundary layer intrusions from a sloping bottom: A mechanism for generating intermediate nepheloid layers. *J. Geophys. Res.*, 107, 1-16, 2002.
- 6) Nakayama K., T. Miyazawa, Y. Yamashiki and K. Fukuzawa : Mixing due to the breaking of internal Kelvin waves on a uniform slope, *Stratified flow*, Vol.3, GFD1, pp.1-6, 2006.
- 7) 中山恵介, 宮澤功, 山敷庸介, 宮澤兼佑, 金刺俊之 : 内部ケルビン波による誘起される流れ, *水工学論文集*, 第51巻, pp.1385-1390, 2007.
- 8) Pierson D. C., Weyhenmeyer G. A. : High-resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake. *Hydrobiologia*, 284, 43-57, 1994.
- 9) 新谷哲也, 中山恵介 : 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, *水工学論文集*, 第53巻, pp.1267-1272, 2009.