

東京湾を対象とした内部ケルビン波 の発生と砕波に関する検討

INVESTIGATION ON GENERATION AND BREAKING OF AN INTERNAL KELVIN WAVE IN TOKYO BAY

中山恵介¹・角谷和成²・新谷哲也³・清水健司⁴・

福岡 将太⁵

Keisuke NAKAYAMA, Kazunari SUMIYA, Tetsuya SHINTANI, Kenji SHIMIZU,
Shota FUKUOKA

¹正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番)

²正会員 修(工) 株式会社 北海道水工コンサルタンツ 技術部 (〒060-0003札幌市中央区北3条西2
丁目1番地)

³正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市基盤環境学科 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)

⁴Ph.D., RPS MetOcean Pty Ltd. (31 Bishop St., Jolimont, WA 6014, Australia)

⁵学生会員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番)

Generation and breaking of an internal Kelvin wave in Tokyo Bay were investigated using modal analysis, laboratory experiments, and numerical simulations. Modal analysis indicated that the horizontal mode 1, vertical mode 1 internal Kelvin wave in Tokyo Bay has a period of 40 h and induces currents parallel to the major axis of the bay. To investigate breaking of this internal Kelvin wave, internal wave breaking on a slope at the end of a rotating straight tank were observed with and without the Coriolis force. The results showed an upslope flow behind the breaking Kelvin wave front, which was absent without the Coriolis force. Numerical simulations using Fantom3D successfully reproduced this flow feature. These results indicate that the Coriolis force modifies residual circulation due to breaking of internal waves, potentially affecting long-term mass transport in Tokyo Bay.

Key Words : modal analysis, internal Kelvin wave, Fantom3D, wave breaking, Tokyo Bay,
rotating tank test

1. はじめに

海洋, 沿岸域, 閉鎖性水域では, 一般的に夏から秋にかけて強い温度成層が形成される. その結果, 風応力や潮汐などの外力が与えられることにより水域内に内部波が誘起され, 沿岸域などで大きな流速が発生することが報告されている^{1),2)}. その際, 内部波が斜面上で不安定になり砕波する可能性が指摘されており, それに伴う乱れの発生はしばしば底層の細粒土砂を巻き上げ, 水中への細粒土砂の供給を促すことも知られている^{3),4)}. 内部波の砕波に伴う残差流は, 長期的な観点から考えると物質輸送に重要であると考えられており, これまでの研究では残差流によって沿岸域にある物質が成層界面付近を中心として沖側に輸送されることが明らかにされている^{5),6)}. そのため, Nakayama and Imberger (2010)⁷⁾は, 内部波の砕波によって発生する残差流と物質輸送の関係に着目して数理解析, 室内実験, 数値計算による検討を行い, 密度界面付近における物質輸送機構

を明らかにしている.

過去には, 室内実験によって内部波の砕波による高周波から低周波へエネルギーが伝搬することも確認・報告されている⁸⁾. また, Lamb (2002)⁹⁾は, 内部波が砕波することによりコアを発生させ, そのコアが物質の輸送を誘起することを明らかにした. これらの他にも, 内部波の斜面上での砕波による物質輸送に関する研究は数多く存在する^{10),11),12),13),14)}. 砕波の力学的側面に関して, Michallet and Ivey (1999)¹⁵⁾は, 斜面上での内部波の砕波によるエネルギー減衰について言及し, Wallace and Wilkinson (1988)¹¹⁾は, 内部波の砕波前のエネルギーと斜面上での駆け上がり距離について検討している. Silvia et al. (1997)¹⁵⁾, Ivey and Nokes (1989)¹⁶⁾やMcphee-Shaw and Kunze (2002)¹⁷⁾は, 内部波の砕波による貫入現象に関して実験を通じて検討を行っている.

しかし, 実現象においては地球自転によりコリオリ力が与えられるため, 内部変形半径よりも大きな空間スケールの現象であれば, 上で述べた多くの研

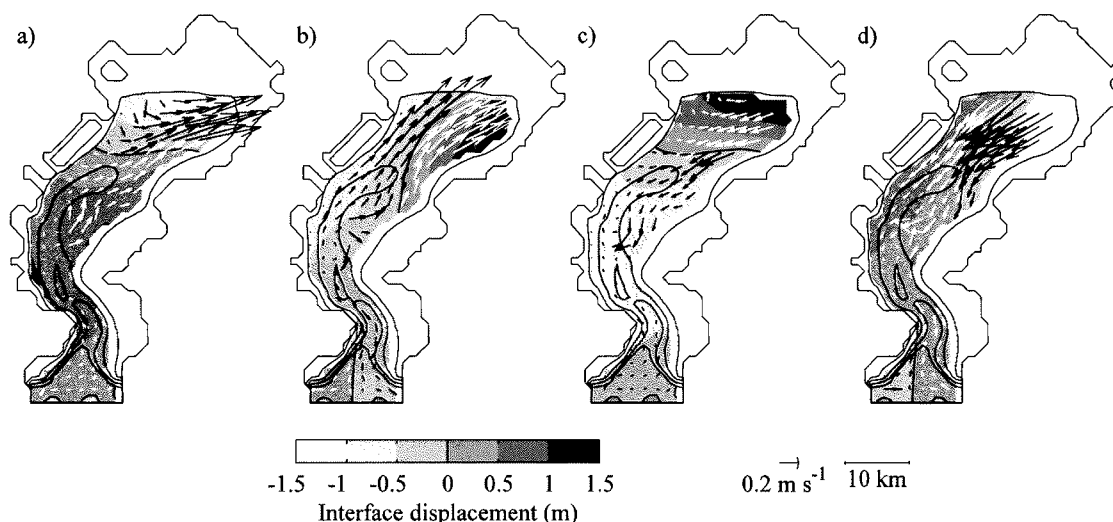


図-1 モード解析による東京湾に発生する内部ケルビン波．コンタは内部界面の相対的な振幅を，ベクトルは下層流速の相対的な分布（無次元量）を示す．(a) 位相 $2\pi/4$ ．(b) 位相 $2\pi \times 2/4$ ．(c) 位相 $2\pi \times 3/4$ ．(d) 位相 $2\pi \times 4/4$ ．

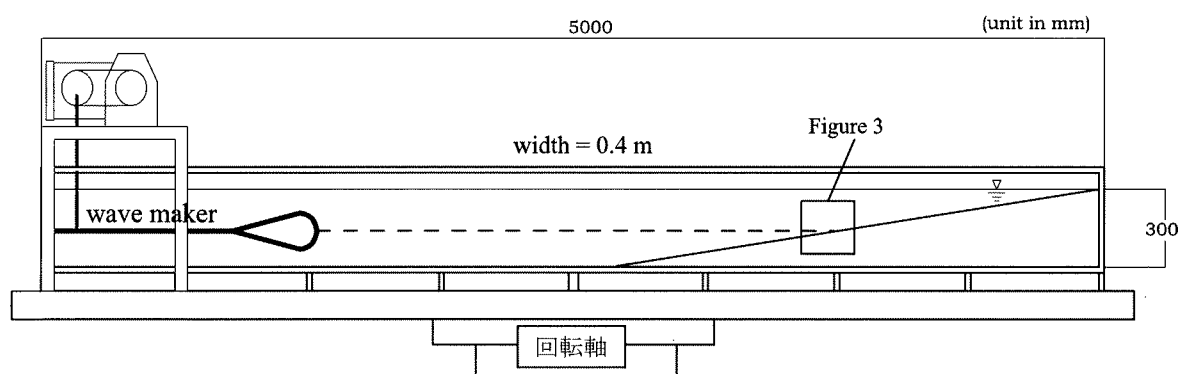


図-2 室内実験装置．左端：Thorpe式内部波発生装置．

究成果を直接利用することはできない．例えば，東京湾のような閉鎖性内湾において，内部変形半径は湾奥の幅よりも小さく，コリオリ力を無視することはできないと予想される．それゆえ本研究では，コリオリ力を考慮した場合の内部波の一種である内部ケルビン波の斜面上での砕波現象の理解を，モード解析，室内実験，数値解析を通じて検討することを目的とする．

2. 東京湾とモード解析

東京湾では，夏期における河川流量および日射量の増大により湾奥に明確な成層が発生する．上下層の密度差と下層密度の比は約0.01であり，上層厚さを10 m，下層厚さを10 mと近似して計算すると，長波近似された内部波の波速は約0.7 m/sであると推定される．地球の自転の効果を示すコリオリパラメータは 10^{-4} rad/sのオーダーであるので，内部変形半径は約7 kmであることが分かり，湾奥の幅が約

20 kmであることを考慮すると，明らかにコリオリ力の影響が発生することがわかる．そこで本論文では，東京湾におけるコリオリ力を考慮した内部波の構造について検討するために，Shimizu et al. (2007)¹⁸⁾によるモード解析を利用することとした．

モード解析の結果からは，様々な内部波モードの解が得られたが，ここでは第1モードの内部ケルビン波のみを示す(図-1)．解析結果から得られた内部ケルビン波の第1モードの周期は40 hであった．内部界面は平衡状態で水深15 mに位置しているため，地形が海岸線と異なることに注意したい．東京湾湾口付近で発生した内部ケルビン波は岸を右に見て反時計回りに進行すること，水平流速は湾の長軸方向にほぼ平行であることなどが分かる．

3. 室内実験

上述のモード解析では，内部波は砕波しないものとして解を導いている．しかし実際には，図-1(a)

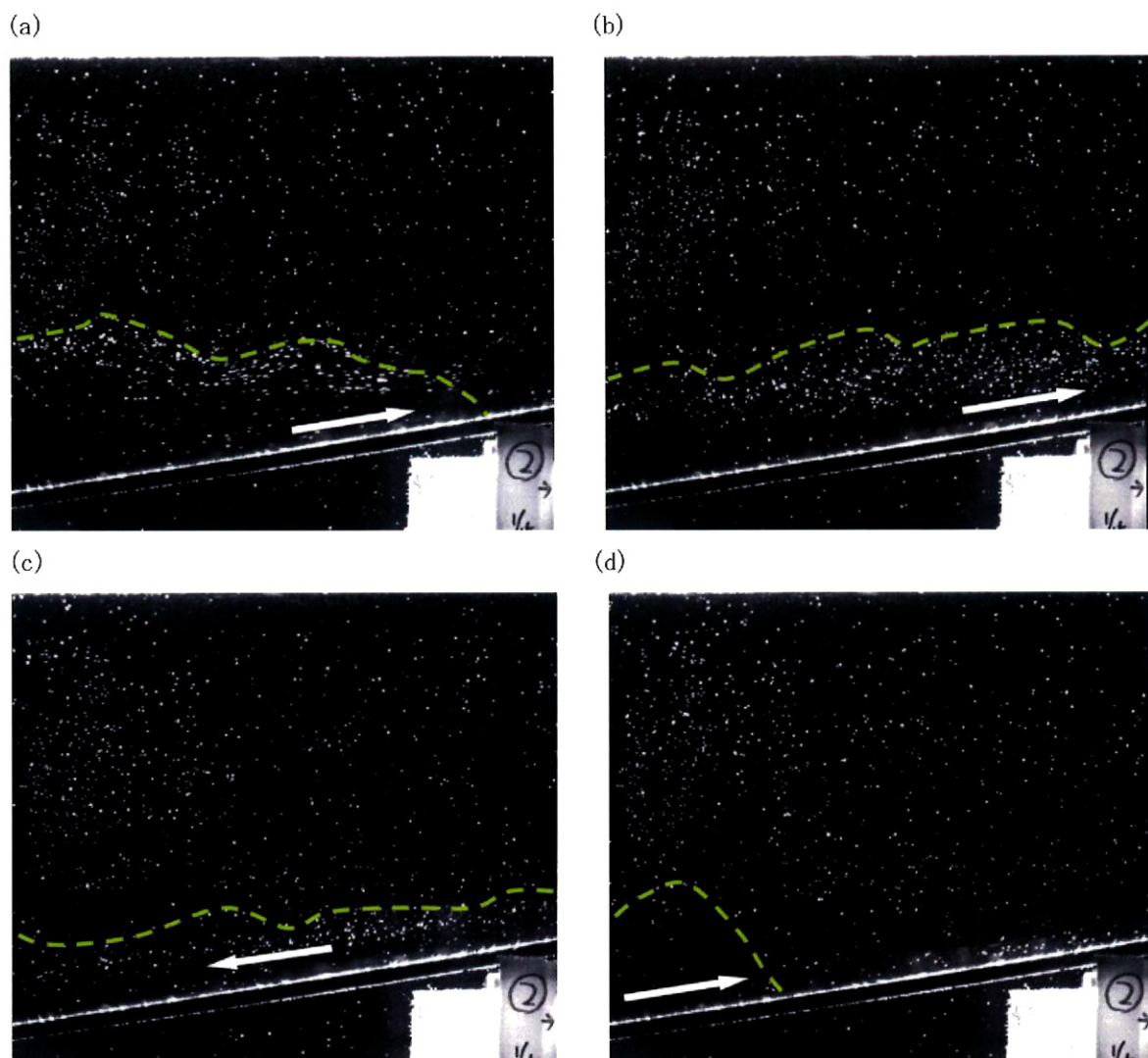


図-3 室内実験による斜面上の砕波点付近の瞬間写真。図-2の正方形において撮影。白点：中立粒子。(a) ある瞬間からの位相 $2\pi/4$ 。(b) 位相 $2\pi \times 2/4$ 。(c) 位相 $2\pi \times 3/4$ 。(d) 位相 $2\pi \times 4/4$ 。

や(b)のように内部波が斜面に進行する際には砕波し、その影響により物質の輸送形態が大きく異なることが予想される。モード解析により、東京湾に発生するケルビン波は長軸方向に平行に進行することが分かったので、本章以降では、数値実験および室内実験を利用して、東京湾を模擬した斜面を設置した直線水槽に内部ケルビン波を発生・砕波させた場合に生じる物質輸送機構の解明を行った。

室内実験には、図-2に示す回転水槽を利用した。砕波による流動機構を理解するため、図中に示す正方形の範囲においてビデオ撮影を行った。ビデオ撮影には、高速カメラシステム(Photoron, DS-21-2M30)を利用した。実験条件は、上下層の厚さをそれぞれ0.15 m、上層の密度 998 kg/m^3 、下層の密度 1018 kg/m^3 、上下層の密度差を 20 kg/m^3 とし、周期11秒の規則的な内部波を造波部から与えた。水槽の回転速度は、 $2\pi/30 \text{ (rad/s)}$ を与え、斜面勾配は $3/20$ とした。造波した内部波を長波近似して内部変形半径を計算すると29 cmとなる。しかし実際には、

波長と水深の比が15以下であり、内部変形半径はより小さい20 cm以下程度であると考えられる。東京湾における内部変形半径は約7km、幅が約20kmでありその比は約0.4であった。実験での比は約0.5以下であり、東京湾の湾奥を模擬できる状態であったことが分かる。

流れの状態をレーザーを用いて鮮明に可視化するために、水槽全体に暗幕を掛け、水槽の斜面に対して鉛直断面方向にレーザーをあてた。可視化トレーサーとして $80 \mu\text{m}$ の粒子を入れ、その直後にビデオカメラでの撮影を開始した。内部ケルビン波の振幅は図-2で示した水槽手前側面で最大となり、内部変形半径分の距離離れたところで振幅がその約35%となる。そのため、撮影は壁面から2.5 cmほど離れたダイナミックな砕波が発生しているできるだけ側面に近い断面において行われた。図-3では、破線が密度界面を示しており、図-3(a)ではフロントが斜面に接近している瞬間を示している。その後、フロントの後方にフロントと同様な厚さを持った駆け上が

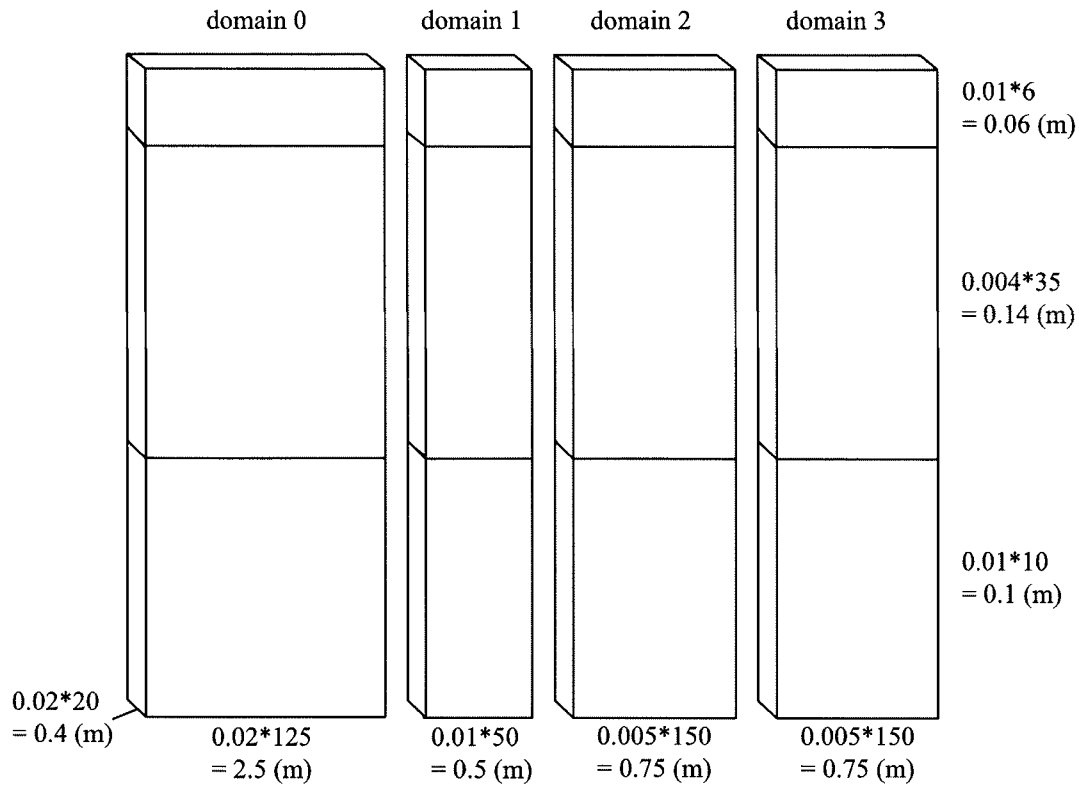


図-4 数値計算において与えたメッシュの詳細と並列計算用のドメイン。

りが続いているのが分かる(図-3(b)). そしてダウンドラフトが発生し, 再び継続する内部波のフロントが進行してきている(図-3(c)(d)). 本実験で注目すべき重要な点は, フロント後方に続いている駆け上がりの発生である. コリオリ力を考慮しない場合, このような強い駆け上がりの発生は認められず, フロント直後にダウンドラフトが発生することが確認されている⁷⁾. この点をより詳細に検討するために, 次章において3次元数値モデルによる解析を行う.

4. 3次元数値解析

(1) Fantom3D

3次元数値モデルFantom3D¹⁹⁾は, オブジェクト指向に基づいて開発された環境流体モデルである. Fantom3Dは, 海洋や湖の諸現象を解析することを主目的に構築されており, 実験室スケールの流体運動からフィールドスケールの流動まで, 特に成層運動をできるだけ容易に再現できるように設計されている. 詳細なモデルに関する情報は<http://www.comp.tmu.ac.jp/shintani/fantom.html>を参照していただきたい.

(2) 解析結果

計算条件は, 室内実験と全く同じ条件とした. 与える内部波の周期は11s, コリオリ力を考慮しない場合で8mmの片振幅の内部波が発生するような条件を

与えた. 再現時間は, 造波開始から100秒間とし, 0.5秒ごとにデータを出力するように設定した. 計算領域は, 想定した水槽を4つの領域(Domain)に分割し, 計算の高速化をするために並列化を行った. 長手方向×横断方向×鉛直方向それぞれに475×20×51のメッシュを与えて並列計算を行い, メッシュサイズは, 横断方向を0.02mとし, 長手×鉛直方向に関しては図-4に示すように与え, コリオリ有無の計算を行った. 実験では, 装置設置の制限のため壁から2.5 cmの鉛直断面における可視化を行ったが, コリオリ力は壁に近いほど大きな影響を与えることから, 数値計算ではより近い鉛直壁から1 cmにおける鉛直断面における流速ベクトル, 密度分布の検討を行い, コリオリ力の有無による砕波形態の違いについて検討を行った.

コリオリ力を考慮しない場合, 内部波の斜面上での砕波に伴いフロントが発生し, そのフロントの後方にダウンドラフトが発生していることが確認された(図-5(b)(c)). 一方, コリオリ力を考慮すると, 壁面付近で振幅が大きくなってしまったため, 砕波形態がよりダイナミックになり, コリオリ力を考慮しない場合に比較してフロントの斜面上での駆け上がり速度がより大きくなることが分かった. そこで直接比較を行うために, フロントの渦の中心がコリオリ力を考慮しない場合と一致する瞬間の断面図を抽出することとした(図-5(f)(g)). フロントに伴う渦の発生については, コリオリ力の有無による違いは

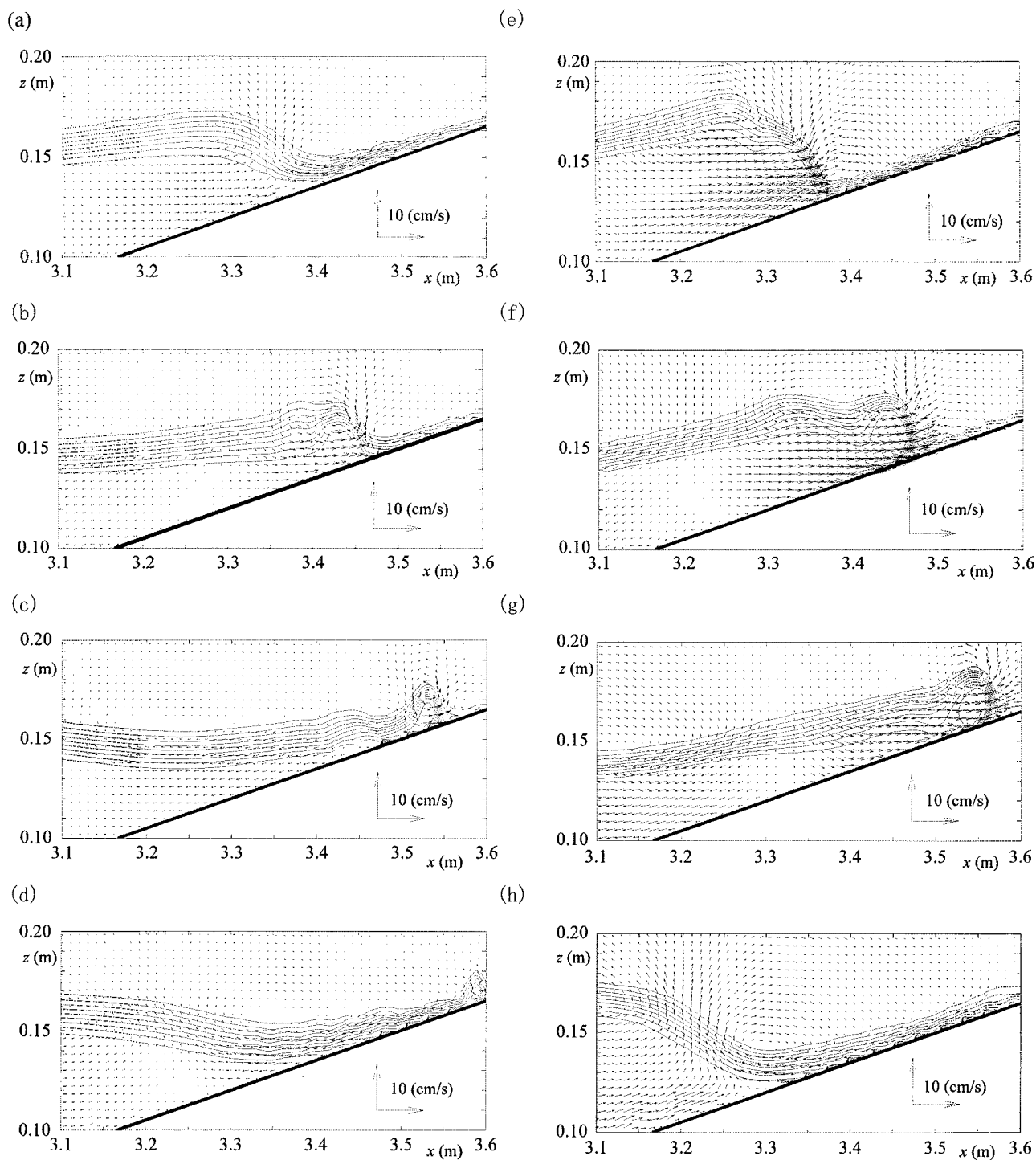


図-5 Phantom3Dにより得られた流速ベクトル図。壁から1 cmに対応する。コンタ線は 2 kg/m^3 間隔である。(a)～(d) コリオリ力なし。(e)～(h) コリオリ力あり。(a) 位相 $2\pi/4$ 。(b) 位相 $2\pi \times 2/4$ 。(c) 位相 $2\pi \times 3/4$ 。(d) 位相 $2\pi \times 4/4$ 。(e) 位相 $2\pi/4$ 。(f) 渦の中心が(b)と一致する瞬間。(b)の計算時刻の1 s前。(g) 渦の中心が(c)と一致する瞬間。(c)の計算時刻の2 s前。(h) 位相 $2\pi \times 4/4$ 。

明確には現れていない。一方、コリオリ力を考慮した場合、渦の直後に進行方向と同じ駆け上がりの流れが発生していた(図-5(g))。この駆け上がりはコリオリ力無しの場合には発生しておらず、これまでに報告されている物質輸送とは大きく異なる輸送機

構が確認された。

5. まとめ

- (1) モード解析を行うことにより、東京湾における第1モードの内部ケルビン波の周期と構造を明らかにした。
- (2) 室内実験により、コリオリ力を考慮することにより、斜面上で内部ケルビン波が砕波する際、フロント後方に駆け上がる流れが発生することが分かった。
- (3) 数値計算を行うことにより、室内実験で得られた駆け上がりを再現することが出来た。

今後、フロント後方における駆け上がりの物質輸送への寄与についてより詳細に検討していく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所に協力いただいた。ここに感謝の意を記す。また、科学研究費基盤（C）の助成を受けて実施された。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Antenucci, J. P., J. Imberger, and A. Saggio: Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.45, pp.1621–1638, 2000.
- 2) Antenucci, J. P. and J. Imberger: Energetics of long internal gravity waves in large lakes, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.46, pp.1760–1773, 2001.
- 3) Gloor, M., A. Wuest, and M. Munnich: Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches, *Hydrobiologia*, Vol.284, pp.59–68, 1994.
- 4) Pierson, D. C. and G. A. Weyhenmeyer: High resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake, *Hydrobiologia*, Vol.284, pp.43–57, 1994.
- 5) Hakanson, L.: Bottom dynamics in lakes, *Hydrobiologia*, Vol.9, pp.9–22, 1982.
- 6) Ostrovsky, I., Y. Z. Yacobi, P. Walline, and I. Kalikhman: Seiche-induced mixing - its impact on lake productivity, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.41, pp.323–332, 1996.
- 7) Nakayama K. and J. Imberger.: Residual circulation due to internal waves shoaling on a slope, *Limnology and Oceanography*, Vol. 55, pp.1009–1023, 2010.
- 8) Grue, J., A. Jensen, P. Rusan, and J. K. S.: Breaking and broadening of internal solitary waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.413, pp.181–217, 2000.
- 9) Lamb, K. G., A numerical investigation of solitary internal waves with trapped cores formed via shoaling, *J. Fluid Mech.* Vol.451, pp.109–144, 2002.
- 10) Kao, T. W., F. S. Pan, and D. Renouard: Internal solitons on the pycnocline: generation, propagation, and shoaling and breaking over a slope, *J. Fluid Mech.*, Vol.159, pp.19–53, 1985.
- 11) Wallace, B. C. and D. L. Wilkinson: Run-up of internal waves on a gentle slope in a twolayered system, *J. Fluid Mech.*, Vol.191, pp.419–442, 1988.
- 12) Helfrich, K. R.: Internal solitary wave breaking and run-up on a uniform slope, *J. Fluid Mech.*, Vol.243, pp.133–154, 1992.
- 13) Michallet, H. and G. N. Ivey: Experiments on mixing due to internal solitary waves breaking on uniform slopes, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, pp.13467–13477, 1999.
- 14) Boegman, L., G. N. Ivey, and J. Imberger: The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.50, pp.1620–1637, 2005.
- 15) 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.*, Vol.350, pp.1–27, 1997.
- 16) Ivey, G. N. and R. I. Nokes: Vertical mixing due to the breaking of critical internal waves on sloping boundaries, *J. Fluid Mech.*, Vol.204, pp.479–500, 1989.
- 17) McPhee-Shaw, E. and E. Kunze: Boundary layer intrusions from a sloping bottom: A mechanism for generating intermediate nepheloid layers, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, pp.1–16, 2002.
- 18) Shimizu, K., J. Imberger, and M. Kumagai: Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.52(6), pp.2641–2655, 2007.
- 19) 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.