

内部ケルビン波の砕波により誘起される水平循環

Horizontal circulation induced by breaking of internal Kelvin waves

北見工業大学大学院 社会環境工学専攻	○学生員	小窪一毅 (Kazuki Kokubo)
北見工業大学工学部 社会環境工学科	正 員	中山恵介 (Keisuke Nakayama)
首都大学東京 都市基盤環境コース	正 員	新谷哲也 (Tetsuya Shintani)
鹿児島大学大学院 理工学研究科	正 員	柿沼太郎 (Taro Kakinuma)
(独法) 土木研究所 寒地水圏研究グループ	正 員	大塚淳一 (Jyunichi Otsuka)
北海道大学大学院 工学研究院	正 員	渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
北見工業大学工学部 社会環境工学科	正 員	駒井克昭 (Katsuaki Komai)
CSIRO Marine and Atmospheric Research	正 員	清水健司 (Kenji Shimizu)

1. はじめに

大都市に隣接している東京湾などの閉鎖性水域では、貧酸素水塊や青潮といった水質汚濁現象が問題となっており、生態系に大きな影響を与えている。これらの水質汚濁現象の要因として、密度の成層化にともなう貧酸素水塊の形成と風による湧昇が挙げられる。東京湾を例に挙げると、5月から9月において日射の影響や淡水の流入により明確な密度成層が形成され、鉛直方向の溶存酸素の供給量が減少することで貧酸素水塊が形成されている。風に起因して上昇した密度界面は、巨大な振幅を持つ内部ケルビン波として湾奥部へ伝播し、底層付近の貧酸素水塊の湧昇を引き起こしている^{1),2),3)}。さらに、この内部ケルビン波は湾奥部の浅水域においてビーチにおける表面波と同様に砕波し、巻き上げを引き起こすことも知られている^{4),5)}。

これまでに、内部波について室内実験や数値計算を用いた研究が行われてきた。その中でも、中山らは内部ケルビン波が砕波することによって、上層においてサイクロニックな特性（反時計回り）を持つ水平循環を発生させる可能性があることを示している^{6),7)}。しかし、それらの研究では水平循環に関する考察は十分に行われておらず、水平循環がどのように発生し、発達・衰退していくかは解明されていない。そこで本研究では、回転水槽を用いた室内実験および3次元非静水圧数値モデルを利用した数値計算を行うことで、内部ケルビン波により誘起される水平循環に関して検討することを目的とする。

2. 室内実験

(1) 実験装置

本研究では、内部ケルビン波の砕波によって誘起される水平循環の発生機構、発達・減衰の解明を行うために回転水槽を用いた実験を行った。実験装置は、過去に同様な研究で用いられている長さ 5.0 m、幅 0.4 m、深さ 0.5 m の回転水槽を利用した^{5),7)}。密度成層による2成層近似を作成するため、この回転水槽を密度差が 20 kg/m³ となるように、上下層厚をそれぞれ 0.15 m ずつ淡水と塩水で満たした(図-1)。回転水槽の片側に設置している造波装置から周期 11 s の波を発生させ、水槽を 2 π /30 rad/s で回転させることでコリオリを考慮し、内部

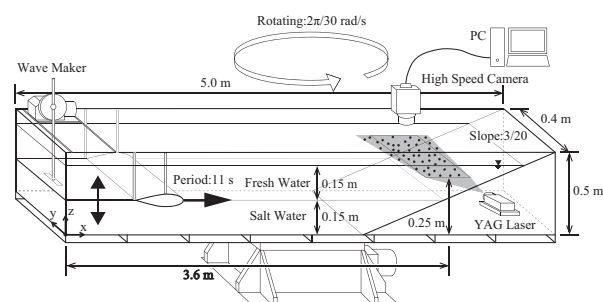


図-1 実験装置の概略図と PIV における測定箇所

変形半径と水路幅の比が東京湾と一致する条件となるような設定とした。過去の研究より、内部ケルビン波が斜面上で砕波することによって水平循環は発生するため、回転水槽の片側に勾配 3/20 となる斜面を設置し、斜面まで内部ケルビン波を進行させて斜面上で砕波させることとした。発生する水平循環の可視化のため粒径 20 μ m のトレーサー粒子を投入し、連続光 YAG レーザー (600 mw) と PC でコントロールされた解像度 1024×1024 pixel の PCI カメラ (DALSA, 20 fps) を用いて粒子画像流速測定法 Particle Image Velocimetry (PIV) による流れの可視化を行った。解析に使用した測定断面は、過去の研究により水平循環を最も明確に確認することができた x 軸方向 3.6 m を中心とする、z 軸方向 0.25 m の水平断面とした(図-1)。造波開始から 240 s 間測定を行う実験(以下、case1 と呼ぶ)と造波開始から 120 s 後に造波を停止させ、その後 120 s 間測定を行う実験(以下、case2 と呼ぶ)の2通りの実験を行った。

(2) 実験結果

まずはじめに、PIV による 2 枚の画像の時間間隔を 0.5 s として解析を行い、流速ベクトルを描いた。その結果、領域端部付近で過誤ベクトルが見られたが case1 において造波開始後 74 s、case2 において造波開始後 74.5 s にはじめて明確な反時計回りの水平循環を確認することができ、その後、両ケースともに測定終了時まで水平循環が発生していることを確認することができた(図-2, 図-3)。また、水平循環のスケールや発生箇所に違いが生じており、case2 においては水平循環は造波停止後 66 s から徐々に減衰を始めることが確認された。

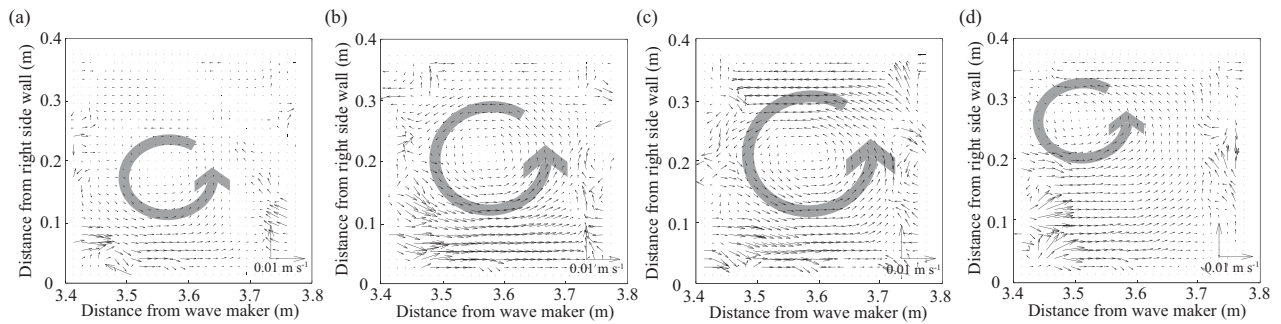


図-2 PIV を利用した case1 における z 軸方向 0.25 m の水平断面での流速ベクトル図. (a) 造波開始後 74 s, (b) 造波開始後 119.5 s, (c) 造波開始後 164 s, (d) 造波開始後 205 s

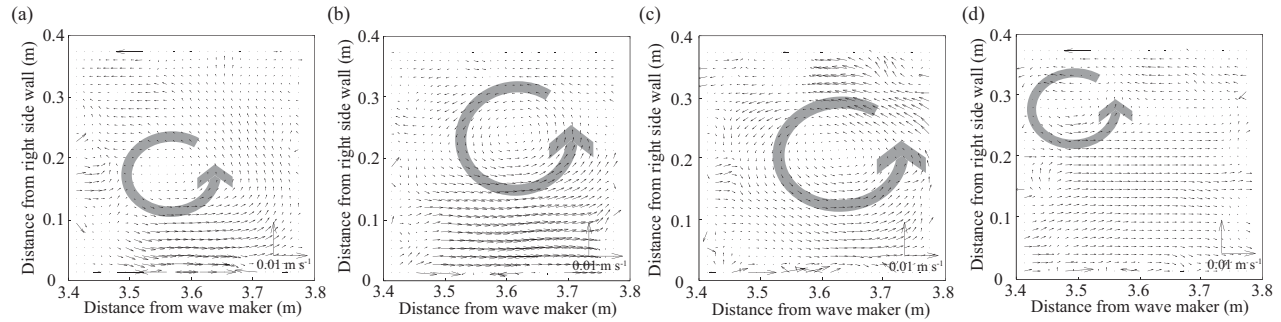


図-3 PIV を利用した case2 における z 軸方向 0.25 m の水平断面での流速ベクトル図. (a) 造波開始後 74.5 s, (b) 造波開始後 119 s, (c) 造波停止後 43.5 s, (d) 造波停止後 84.5 s

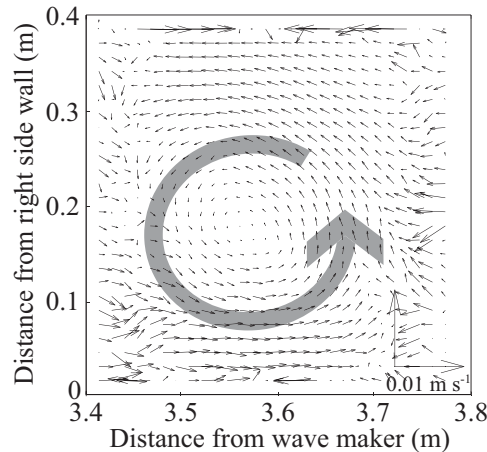


図-4 PIV を利用した case1 における造波開始後 109 s から 120 s における残差ベクトル図

このことから、斜面に到達した内部ケルビン波が砕波することによって水平循環が発生し、造波を停止させることで水平循環は減衰していくことが示唆された。次に、1 周期を利用し物質の長期輸送の重要な要因である残差ベクトルを描いたところ、長期に渡ってスケールの大きな反時計回りの水平循環が発生していることが確認できた（図-4）。このことから、水平循環は長期輸送に影響を与えている可能性があることがわかった。これは、地形性ベータ効果による長周期の変動によるものであると考えられる。

3. 数値計算

(1) 計算条件

室内実験結果を検証するため、3 次元環境流体モデル Fantom3D を利用して解析を行った^{8),9)}。Fantom3D はオ

ブジェクト指向型環境流体モデルであり、複数のオブジェクトの保有、計算領域を分割し並列計算を行うことによる処理速度の向上、様々な計算スキームの切り替えが容易であるという特徴を持つ。過去の研究において、本研究と同様な解析が Fantom3D を利用して行われており、良好な結果が得られている¹⁰⁾。計算条件は室内実験と同様となる設定とした。計算領域は、波の進行方向 4.5 m、奥行き 0.4 m、高さ 0.3 m、斜面勾配 3/20、上層の密度を 1000 kg/m^3 、下層の密度を 1020 kg/m^3 とし、上下層厚をそれぞれ 0.15 m ずつとした。最大波高が 0.04 m となるように造波のフラックスを決定し解析を行い、内部波の周期を 11 s、コリオリ発生のための回転速度を $2\pi/30 \text{ rad/s}$ として与えた。離散化条件は運動量、スカラー量を ULTIMATE QUICKEST scheme、乱流量を 1st order upwind scheme とした。メッシュ間隔は、dx は造波地点で 0.02m、砕波地点付近で 0.005m となるよう変化させ、dz は密度界面付近で 0.0025m、上下端で 0.005m となるようにし、dy は 0.005m とした。これらの条件で case1 と case2 の数値計算を行った。

(2) 計算結果

はじめに、数値計算による水平循環の確認のため、両ケースともに室内実験で測定を行った z 軸方向 0.25 m における水平断面での流速ベクトルを描いた。その結果、両ケースともに造波開始後 70 s に反時計回りの水平循環を確認することができ、その後、両ケースともに計算終了時まで水平循環が発生していることを確認することができた（図-5、図-6）。しかし、case2 においては造波停止後 60 s 以降の水平循環は安定していたが、case1 においては、造波を開始してから周期的に水平循環が不

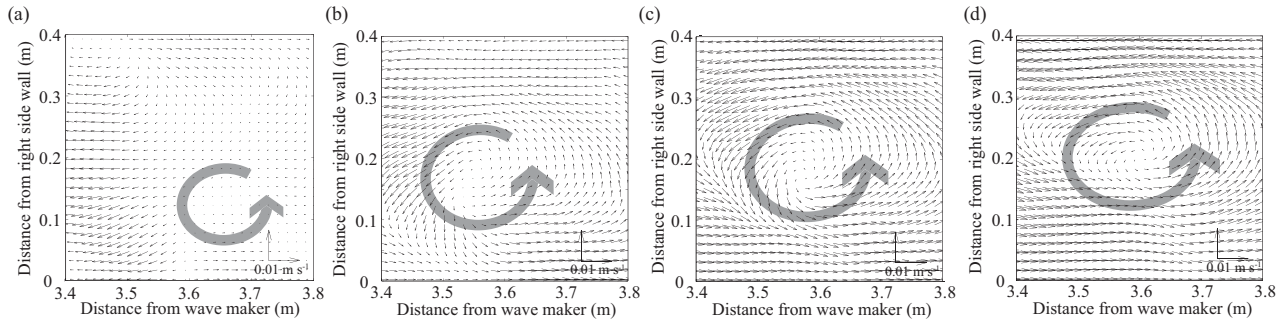


図-5 数値計算を利用した case1 における z 軸方向 0.25 m の水平断面での流速ベクトル図. (a) 造波開始後 70 s, (b) 造波開始後 137 s, (c) 造波開始後 171.5 s, (d) 造波開始後 205.5 s

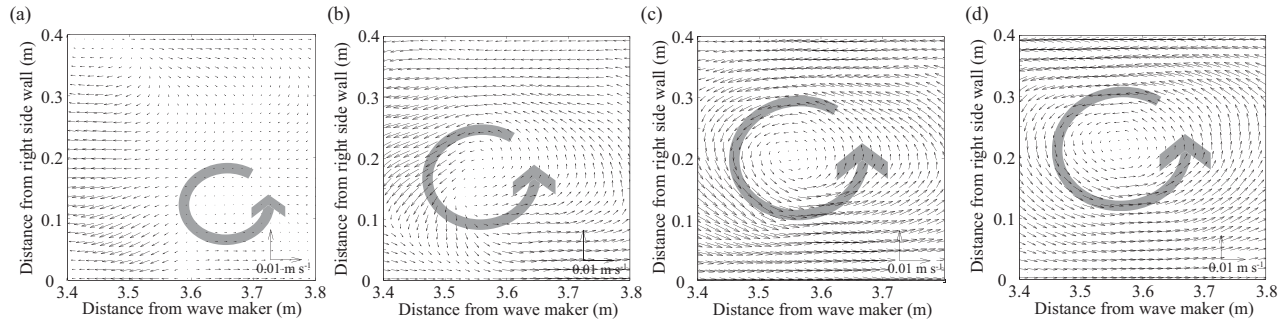


図-6 数値計算を利用した case2 における z 軸方向 0.25 m の水平断面での流速ベクトル図. (a) 造波開始後 70 s, (b) 造波停止後 17 s, (c) 造波停止後 51.5 s, (d) 造波開始後 85.5 s

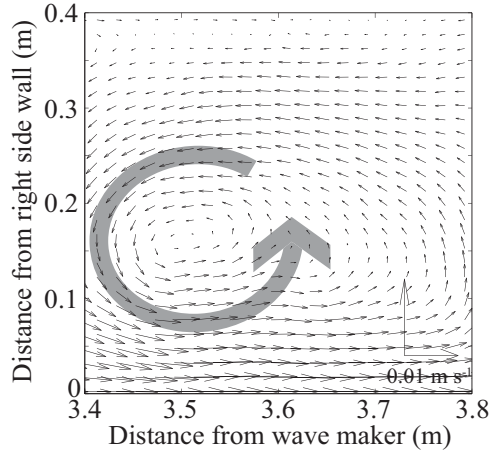


図-7 数値計算を利用した case1 における造波開始後 109 s から 120 s における残差ベクトル図

安定となることが確認できた (図-5, 図-6). これは, case1 においては波を起こし続けているため碎波によって水平循環を発生するエネルギーが与えられ続け, 水平循環が安定しないためであると考えられる. このことから, 水平循環が発生し安定するためには造波が停止し, 内部波が減衰していく必要があることが示唆された. 次に, 室内実験と同様に 1 周期を利用した残差を計算し, 残差ベクトルを描いた. その結果, 室内実験と同様に反時計回りの水平循環の残差流を長期的に確認することができた (図-7). これらから, 室内実験と数値計算を比較すると誤差が生じているが, ほぼ一致しており良好な再現結果が得られていると考える.

4. 水平循環に関する検討

(1) 発生機構の解明

2 章, 3 章で確認された水平循環の発生機構の解明の

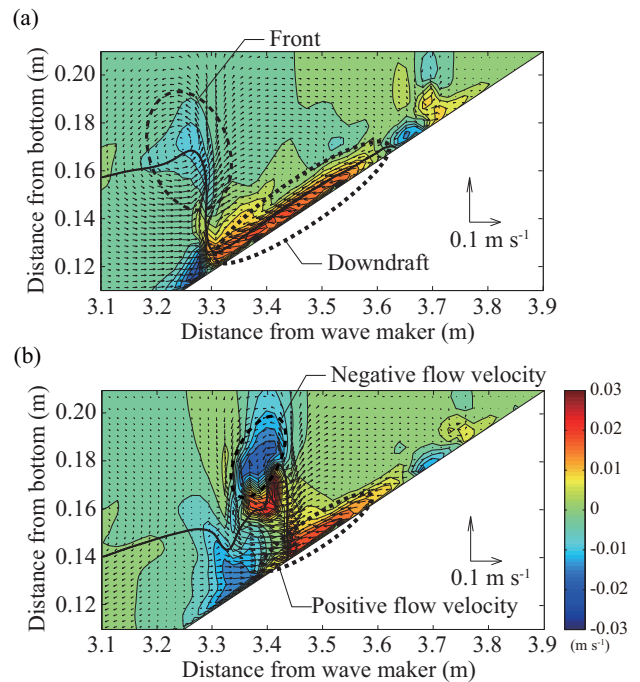


図-8 case1 における密度界面付近での y 軸方向 0.05 m における鉛直断面. (a) フロント通過前 (造波開始から 109.5 s 後), (b) フロント通過後 (造波開始から 112.5 s 後)

ため, コリオリの影響が大きいと予想される波の進行方向右手側の側壁から 0.05 m での鉛直断面において, y 軸方向 (奥行き方向を正とする) の流速をカラーコンタ, x 軸方向と z 軸方向の流速を流速ベクトル, 黒太線を密度界面として, 内部ケルビン波が碎波する密度界面付近の図を描いた. その結果, 内部波のフロント付近で反時計回りの鉛直循環に発生し, y 軸方向に負の流速が卓越

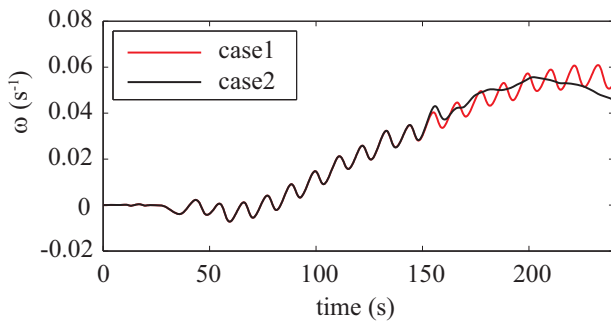


図-9 数値計算における水平断面での渦度

していることが確認できた。また、砕波により発生するダウンドラフトにおいて y 軸方向の正の流速が卓越していることが確認できた（図-8）。その流れを補償するため、フロント付近では y 軸方向に負の流速が発生したと考えられる。この流速は、内部ケルビン波のフロントにおける鉛直循環に伴って上層に影響を及ぼし、水平循環を誘起したものと考えられる。

(2) 渦度

2 章, 3 章より、造波が停止することによって水平循環が安定し、その後、減衰していく可能性があることが示された。そのため、室内実験や数値計算と同様に、z 軸方向 0.25 m, x 軸方向 3.4 m から 3.8 m, y 軸方向 0 m から 0.4 m 範囲を解析断面として渦度の計算を行い、case1 と case2 との比較を行うこととした。しかし、PIV による室内実験において過誤ベクトルが見られたこともあり、高精度な渦度の算定を行うことは困難である。そこで、数値計算により渦度の検討を行うこととした。

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

渦度の算出には式 (1) を利用し、解析断面すべてのメッシュの渦度を算出して平均化を行った。その結果、case1 と case2 のどちらにおいても造波開始後 40 s に造波の影響が出はじめ、造波開始後 70 s に渦度の値が増加しはじめている（図-9）。その後、造波開始後 160 s に case2 の渦度が case1 と比較して安定して卓越していき、200 s 後から渦度が減少していくことがわかった。case1 においては、造波開始後 200 s 以降も発達し続けている。case1 における造波開始後約 200 s において内部ケルビン波は減衰しており、密度界面はほぼ静止状態となっている。このことから、造波が停止することによって水平循環は安定して卓越していき、その後、減衰をはじめることがわかった。この水平循環の減衰を調べるため、この渦度におけるスピンドアウタイムを式 (2) を利用して算出した。

$$t_* = \frac{H}{\sqrt{\nu \cdot \Omega}} \quad (2)$$

ここで、 ν : 上層の水の動粘性係数 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) , Ω : 回転速度 ($2\pi/30 \text{ rad/s}$) , H : 上層厚 (0.15 m) である。

その結果、算出されたスピンドアウタイムは渦度が減少を始める時間と同様に約 200 s であり、コリオリを考

慮する場合に知られている通り、粘性による減衰時間よりはるかに短いことが確認された。よって、水平循環の減衰はスピンドアウンが支配的であることがわかった。

5. まとめ

本研究では、内部ケルビン波により発生する水平循環に関する検討を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 斜面上における内部ケルビン波の砕波により反時計回りの水平循環が発生することが確認された。
- (2) 室内実験と数値計算による水平循環を比較し、良好な再現性が得られていることを確認できた。
- (3) 造波を停止させる場合もさせない場合も長時間に渡って水平循環が発生することがわかった。
- (4) 渦度を利用して水平循環の発達と減衰を確認することができた。

参考文献

- 1) 宇野木早苗：東京湾の湧昇現象，日本海洋学会秋季大会講演要旨集，pp.10-11, 1990.
- 2) Farmer, D. M. : Observations of long nonlinear internal waves in a Lake, J. Phys. Oceanogr. Vol.8, pp.63-73, 1978.
- 3) Satoh C., K. Nakayama and K. Furukawa : Contributions of Wind and River Effects on Recovery of Dissolved Oxygen Concentration in Tokyo Bay, Estuarine Coast and Shelf Science, Vol.109, pp.91-97, 2012, doi : 10.1016/j.ecss.2012.05.023.
- 4) 中山恵介, 堀松大志, 清水健司, 丸谷靖幸, 角谷和成, 早川博, 岡田知也, 鰐目淑範：網走湖における内部ケルビン波と風応力の影響評価，水工学論文集，第 53 巻，pp.1285-1290, 2009.
- 5) 中山恵介, 角谷和成, 古川恵太, 宮澤巧, 山敷庸亮：斜面上での内部波の砕波形態と物質輸送，水工学論文集，第53巻，pp.1321-1326, 2009.
- 6) Nakayama, K. and J. Imberger. : Residual circulation due to internal waves shoaling on a slope, Limnol. Oceanogr. Vol.55(3), pp.1009-1023, doi:10.4319/lo.2010.55.3.1009, 2010.
- 7) 中山恵介, 小窪一毅, 新谷哲也, 大塚淳一, 丸谷靖幸, 渡部靖憲, 駒井克昭, 岡田知也：内部ケルビン波の砕波により誘起される流れ，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.926-930, 2012.
- 8) 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.
- 9) Shintani T. and K. Nakayama., An object-oriented approach to environmental fluid modelling, The 21st International Symposium on Transport Phenomena.
- 10) Nakayama K., T. Shintani, K. Kokubo, Y. Maruya, T. Kakinuma, K. Komai and T. Okada : Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, Journal of Geophysical Research, vol.117, C10002, 11pp., 2012, doi:10.1029/2012JC008155.