

斜面上での内部波の碎波形態と物質輸送

MECHANISM OF INTERNAL WAVE BREAKING AND MASS TRANSPORT DUE TO BREAKING OVER A UNIFORM SLOPE

中山恵介¹・角谷和成²・古川恵太³・宮澤功⁴・山敷庸亮⁵・丸谷靖幸⁶
Keisuke NAKAYAMA, Kazunari SUMIYA, Keita FURUKAWA, Takumi MIYAZAWA,
Yosuke YAMASHIKI and Yasuyuki MARUYA

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

²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番地)

³正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所室長 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴学生会員 日本大学理工学部 土木工学科 (〒101-8303 東京都千代田区駿河台1-8)

⁵正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治五ヶ庄)

⁶学生会員 北見工業大学 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

Mechanism of internal wave breaking is investigated by using laboratory experiments and applying numerical computations in this study. The internal Iribarren number and internal wave breaking index are applied to categorize the type of internal wave breaking over a uniform slope. PIV technique is applied to confirm the validity of numerical computation scheme by making comparisons of residual currents. Breaking point of internal waves is clarified to appear in front of bore, which is enhanced by downdraft over a slope, from the vertical gradient of pressure adjacent to interface. Celerity and maximum velocity are also applied to find breaking point of internal waves, which agrees with the vertical gradient analysis of pressure. To understand the influence of internal wave breakings on mass transport, tracer computations are done, which shows the mass transport in a trapped core of a bore.

Key Words: *Internal wave breaking, LES model, mass transport, breaking point, two-layer system*

1. はじめに

流水や陸域などから輸送される栄養塩によって、オホーツク沿岸域では多くの水生生物や植物が生息することが出来ている。さらに、人的な影響を大きく受けておらず、世界遺産の知床やラムサール指定された騰沸湖などに見られるように豊かな自然環境が残されている。特にオホーツク沿岸周辺の汽水域では、淡水と塩水の存在により多種多様な生物が存在しており、その恩恵によって水産業が大変盛んであり、地域の経済源として重要な位置を占める。

汽水域の多くは海跡湖¹⁾であり、例えば網走湖^{2) 3) 4)}、藻琴湖などが典型的な例として挙げられ、それらの湖では約50cmから1mの厚さの密度躍層が形成されることが知られている。はっきりとした密度躍層の存在は、湖内部における上層と下層における流動、物質輸送が密度界面の変化により支配されていることを示し、成層の効果を考慮した解析が重要であると言える。

これまで著者らは、網走湖において塩分水温チェーンを配置して密度界面の変動、つまり内部波の挙動に関する研究⁵⁾を行ってきた。その中で、最大水深17mの網走湖において、内部波の振幅が最大で数mにも及ぶことが3次元数値計算を用いて示された。そのような大振幅の内部波が発生する場合、斜面上で碎波し巻上を生じさせ、その結果巻上げた粒子を輸送することが過去の研究^{6) 7) 8) 9) 10)}から推測される。

過去の研究では、斜面上で内部波が碎波することにより、結果として生じる残差流について述べたもの^{7) 8) 9)}や、ストークスドリフトを内部波に適用して物質輸送に関する考察を行ったもの¹⁰⁾が存在する。それらの論文から、内部波の碎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、それらの論文では体系だった碎波に関する考察が十分に行われておらず、いつ、どのような形態で碎波が発生するかが解明されていない。

そこで本論文では、Boegmanら¹¹⁾により提案されてい

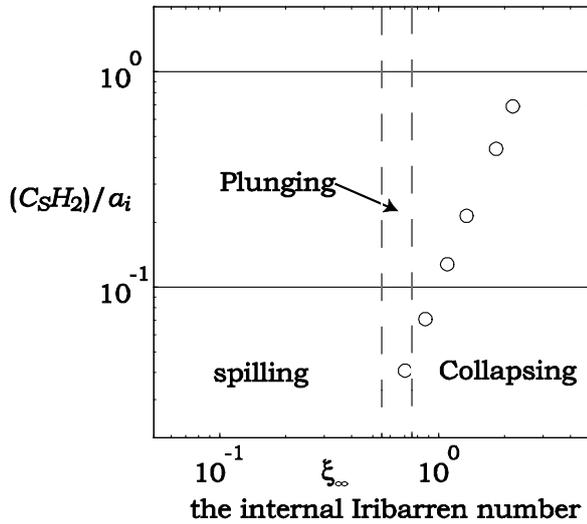


図-1 内部Iribarren数¹¹⁾と碎波指標^{6) 12)}による実験条件の分類分け。

る内部Iribarren数や、Nakayamaら¹²⁾により提案されている碎波指標を利用して、内部波の碎波形態に関する理論的な検討を行い、室内実験や数値実験^{13) 14) 15)}を通して物質輸送を含めた内部波の碎波による影響を検討することを目的とする。

2. 内部Iribarren数と碎波指標

室内実験において再現される斜面上での内部波の碎波形態の大部分はCollapsingであり、Plungingタイプの碎波の発生は非常に例が少ないことが報告¹¹⁾されている。Plungingタイプに関する研究としては、傾斜水槽を利用して低周波から高周波の内部波へと発達させ、Plungingタイプの碎波を再現したもの¹¹⁾、斜面上のある領域で結合するように振幅の異なる波を連続的に発生させて再現したもの¹⁶⁾などが存在するのみである。密度界面が水と空気である水表面と比較すると、内部界面での摩擦抵抗が大きく、波の峰における流速が十分に発達する前に他の領域において碎波が発生するため、斜面上でPlungingタイプの碎波形態を発生させるためには特殊な条件を与えなくてはならないものと考えられる。

Boegmanら¹¹⁾は、そのような困難な条件下で、傾斜水槽を用いたPlungingタイプの内部波の碎波まで含んだ指標を提案しており、本研究ではその指標、内部Iribarren数(式(1))を利用することとした。しかし、内部Iribarren数は表面波において用いられるものを内部波用に適用したものであり、内部波への適用について若干の疑問が残る。そこで本研究では、内部波の碎波が、斜面周辺の内部界面の不安定に起因することを利用した碎波指標^{6) 12)}も(式(2)(3))合わせて検討することとした。

表-1 実験条件

	周期 (s)	片振幅 (m)
case 1	15.0	0.00181
case 2	14.0	0.00239
case 3	13.0	0.00407
Case 4	12.0	0.00559
case 5	11.0	0.00809
Case 6	10.0	0.01102

内部Iribarren数：

$$\xi_{\infty} = H_2 / l_0 / (2a_i / \lambda)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 H_2 ：下層の代表水深、 l_0 ：下層における斜面長、 a_i ：内部波の振幅、 λ ：内部波の波長である。

内部波の碎波指標：

$$C_s = \left(\frac{8}{\pi B_p^5} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$B_p = \frac{2\omega_0}{f_s} = \frac{4\pi}{0.9T^*} \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_g g H_2}} \quad (3)$$

ここで、 ε_g ：上下層密度差比、 g ：重力加速度である。

室内実験で再現可能な条件を選び出し、表-1に示されるような6つの条件を与え、実験を行うこととした。共通の条件は、上下の密度差比0.02、斜面勾配1/10、斜面長2.0m、上下層厚さそれぞれ0.15m、全長5.0m、幅0.4m、深さ0.3m、造波板（全長1m）から3mの地点から斜面を設置した。本章の冒頭で示したとおり、我々が持つ実験装置ではPlungingタイプの碎波の再現は困難であるが、表-1をプロットした図-1からは、今回の実験条件がPlungingタイプの碎波を再現できるのではないかということが期待された。

内部Iribarren数と碎波指標には以下のような関係があり、ある定数を持って一対一で関係付けることが出来ない。内部Iribarren数が浅水変形により碎波が始まることをモデル化しているものであるのに対し、碎波指標が斜面上での界面不安定に基づいて導かれていることに起因する相違であると思われる。つまり、碎波点の発生箇所を特定することが出来れば、どちらの指標を用いるべきかを提案できることとなる。

$$\frac{C_s H_2}{a_i} = \frac{f_s^{5/2}}{4\sqrt{2}\pi^3} \frac{\lambda}{H_2} \left(\frac{\lambda}{l_0} \right)^{1/2} \left(\frac{H}{H - H_2} \right)^{5/4} \xi_{\infty}^2 \quad (4)$$

なお、本実験では内部Iribarren数による考察を可能とするため、傾斜水槽を用いなかったことを除くと、Boegmanら¹¹⁾が行った実験と同様な条件での検討を行ったことを記しておく。

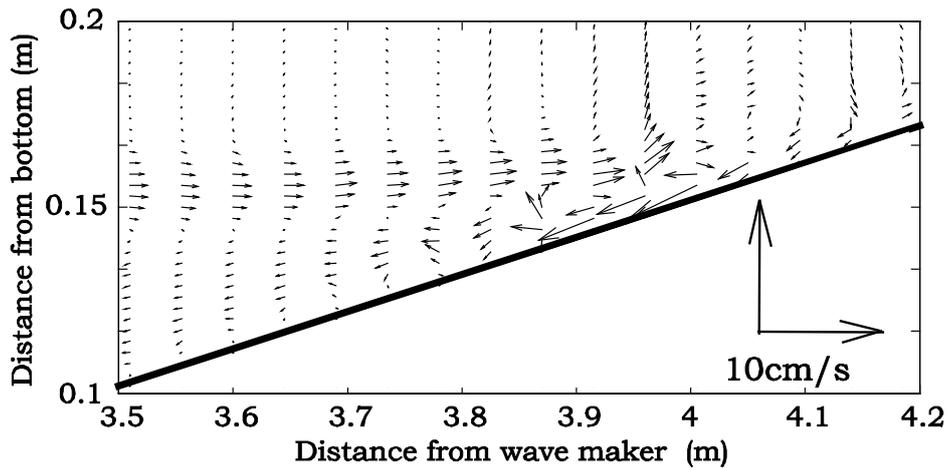


図-2 数値計算による残差流(case 5).

3. 室内実験による残差流の測定

過去の研究で用いられた実験装置^{6) 7) 8)}を用い、前章で設定した実験をcase 1からcase 6までを行い、PIVを用いて可視化し、物質の長期輸送に重要な要因である残差流を計算した。最初に、全ケースにおける砕波形態の確認を行った。内部Iribren数によるとcase 6はPlungingタイプであるが、残念ながら全ケースにおいて砕波形態はCollapsingであった。密度界面における抵抗が大きく、種々の波長の内部波の組み合わせ、もしくは内部ソリトンの発達がPlungingタイプの砕波には必要であると考えられ、本研究で用いているような造波装置では再現困難な現象であることがあらためて確認された。そこで、case 6は砕波分類の観点から不確定な要素を含むため、本研究での解析対象から外すこととし、内部波の振幅がcase 6に続いて大きいcase 5を今後、解析対象として取り扱うこととした。

これまで実験による残差流の測定には、超音波流速計もしくはレーザー流速計を用いた定点観測^{6) 8) 12)}によるものが多く、PIVを用いて空間分布を考慮したものはない。そのため、過去の研究により示されている数値計算結果の検証を行う上で、本研究成果は重要な情報を与えるものと考えられる(図-3)。中立状態における界面位置より上では、過去の研究で示されている通り、内部波の進行による斜面向きの流れが存在していることが確認された。また、界面下での貫入現象も再現されていた。

4. 数値実験による砕波点の検討

室内実験から砕波点を探り出すことは困難であるため、数値計算により砕波点の検討を行うこととした。計算に用いたモデルについては参考文献^{13) 14) 15)}を参照いただきたい。まず、室内実験により得られた残差流が、数値計算によって得られる残差流と一致するかどうかの確認を行った(図-2)。対象とした計算は、室内実験と同様に最

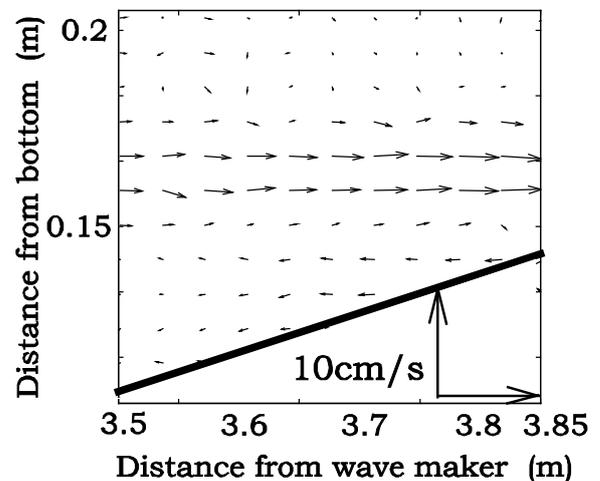
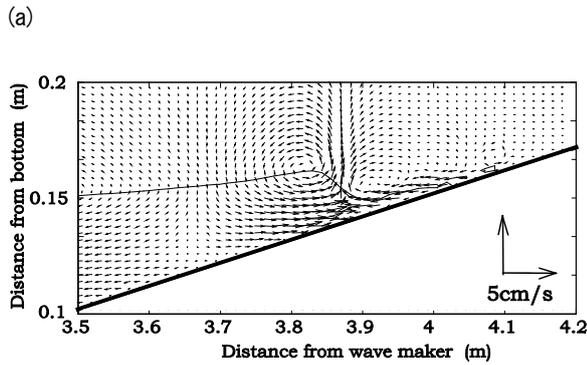


図-3 PIVを用いた流速ベクトル測定を利用して描かれた残差流(case 5).

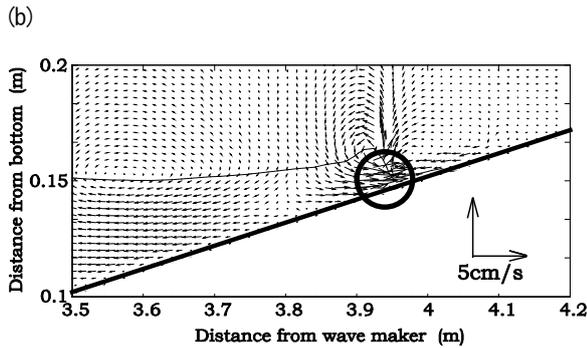
も大きな振幅を与えたものの一つであるcase 5とした。室内実験と数値実験での残差流の比較により、全域において定量的にはほぼ一致しており、数値計算結果の利用が可能であることが確認された(図-2と図-3)。具体的にみると、内部波進行方向の残差流約2cm/s(数値計算)に対して実験では約3cm/sであり、貫入部分については残差流約2cm/s(数値計算)に対して実験では約1cm/sであった。

詳細に見ると横軸の3.85m周辺では斜面付近の流速が過小評価されていた。これはPIV解析の際のウィンドウサイズが貫入現象の空間スケールよりも大きいために発生した誤差であると考えられる。今後、ウィンドウサイズを小さくしつつ高精度な流速ベクトル解析を行うことが出来るように検討を加えてゆくつもりである。

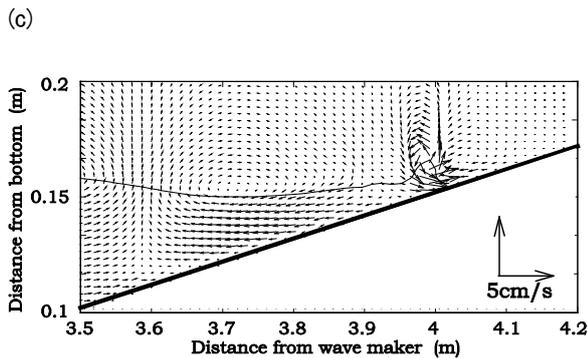
数値計算の特徴として、詳細な流速分布を得ることが出来る。そこで、後に詳細を述べるが、砕波の瞬間とその前後における中間密度位置と流速ベクトルについて検討する(図-4)。内部波が斜面上を進行してゆき、



碎波の瞬間の2.5秒前.



碎波の瞬間.



碎波の瞬間の2.5秒後.

図-4 case 5における碎波の瞬間とその前後における中間密度面位置と流速ベクトル.

Plungingタイプの碎波へと形状を変更せず、Collapsingタイプの碎波形状を示していることが分かる。この傾向は、どのケースでも同様であった。

続いて、これまで解明されていなかった碎波点に関する解析を行った。碎波点を決定するための手法は幾つかあり、そのうちで最も適当であるものとして、灘岡ら¹⁸⁾による界面において圧力の鉛直勾配がゼロとなる点を碎波点とする、という定義を適用した。図-4の(a)~(c)に対応する界面上での圧力の鉛直勾配の分布図から、(b)において圧力の鉛直勾配がゼロになり、碎波が発生していたことが確認された(図-5)。碎波の発生点における下層では密度フロント状のポアが進行しており、そのポア

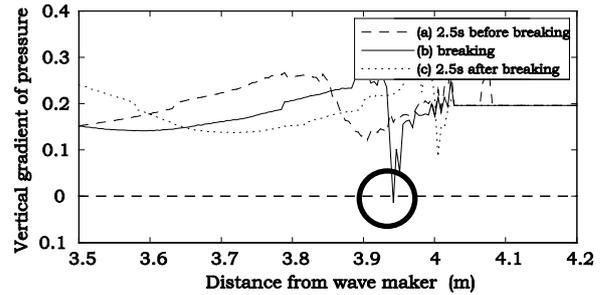


図-5 case 5における無次元化された圧力の鉛直勾配.

破線：図-4 (a)に対応する。

実線：図-4 (b)に対応する。

点線：図-4 (c)に対応する。

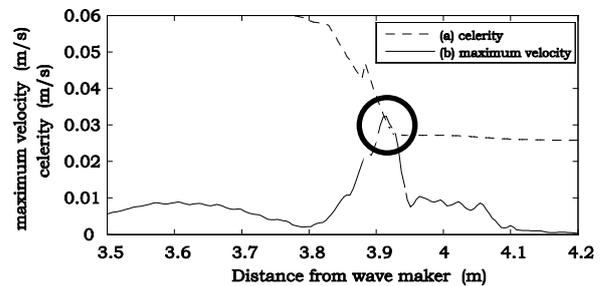


図-6 case 5における波速と下層における最大流速.

破線：波速.

実線：最大流速.

を維持する鉛直循環により発生した斜面を駆け上がる比較的大きな流速が、碎波を生み出していたことが分かった(図-4 (b)の○)。つまり、本研究で対象としている内部波の碎波は浅水変形によるものではなく、ポア前面における大きな流速を発生させている、ダウンドラフトによる界面上での不安定に起因するものであることが明らかにされた。よって、内部Iribarren数を用いた碎波形態の分類を行うよりは、斜面上での界面不安定に起因する碎波指標を用いて分類分けを行う方が良いのではないかと考えられる。

その他、碎波点を決定付ける手法として、流速と波速の比較を行うことも考えられる。流速と波速を用いる手法の利点は、観測および室内実験において、界面付近の圧力の鉛直勾配を測定するのに比較すると容易で実用性が高いためである。波速の推定には、数値計算結果から界面位置を各タイムステップで出力し、数ステップ後にその界面がどの程度移動したかを相関が最大を取る場所から推定し、解析時間間隔でその距離を割るという手法を適用した。流速は、各タイムステップの下層における最大値を抽出した。図-6に下層における最大流速が波速を超えた時の様子を示す。碎波と判断された瞬間は、圧力の鉛直勾配がゼロとした場合に選び出された瞬間と一

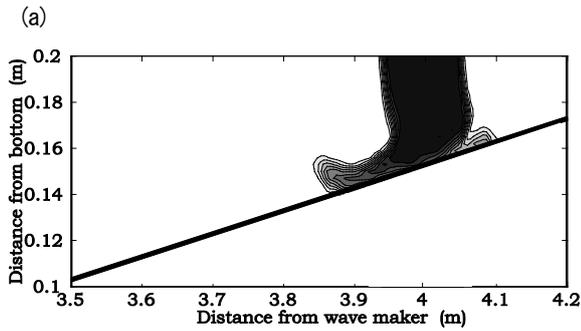


図-4 (a)に対応する。

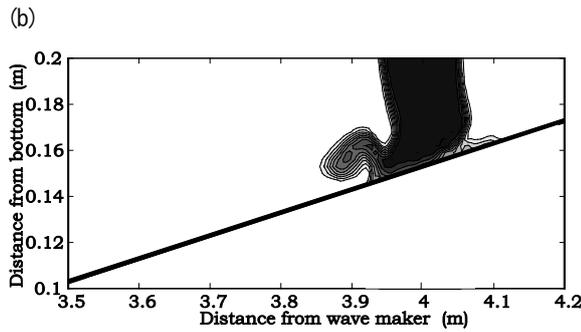


図-4 (b)に対応する。

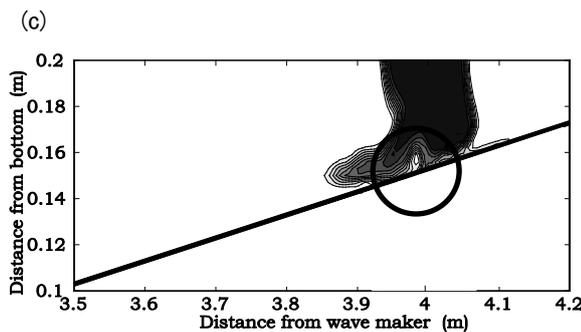


図-4 (c)に対応する。

図-7 case 5において行われたトレーサー計算。横軸で3.95mから4.05mの間に濃度1のトレーサーを置いて初期条件とした。

致しており、最大流速と内部波の波速を用いた碎波点の推定手法がよい判断基準を与えることが示された。

5. 碎波による物質輸送

前章までにおいて、内部波の碎波形態および碎波点に関する検討を行った。本章では、その碎波によりどのように物質が輸送されるかを検討することとした。まず、 $x=3.95\text{m}\sim 4.05\text{m}$ にわたり濃度1のトレーサーを初期条件として与え、斜面から4m離れた場所において内部波を造波し100秒分の計算を行い、トレーサーの輸送状態を検討した(図-7)。濃度1は任意に与えた値であり、他の領域にゼロを与えることで移流・拡散計算を行った。図

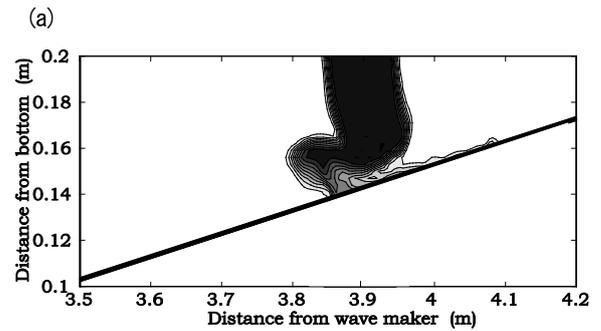


図-4 (a)に対応する。

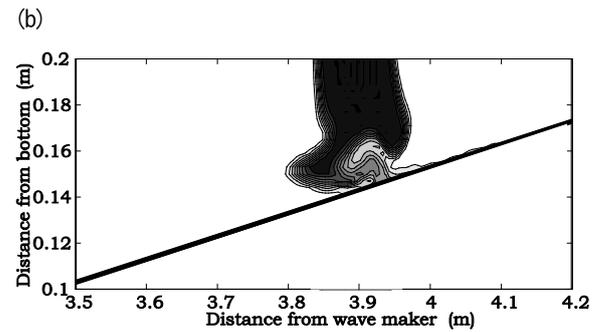


図-4 (b)に対応する。

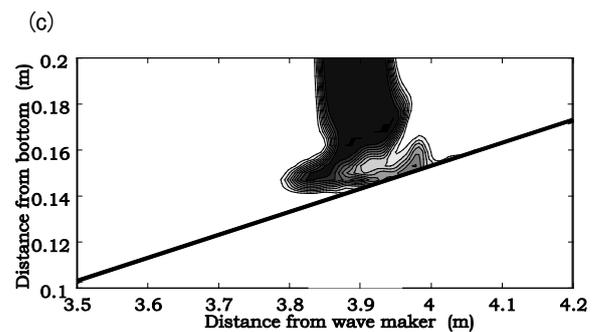


図-4 (c)に対応する。

図-8 case 5において行われたトレーサー計算。横軸で3.85mから3.95mの間に濃度1のトレーサーを置いて初期条件とした。

-7の(a), (b), (c)は、図-4における(a), (b), (c)にそれぞれ対応しており、フロントにおける循環の形成である図-7 (b), そしてその鉛直循環の斜面上の遡上によるトラップされたコア(図中○)による物質輸送を示す図-7 (c)が確認された。残差流に示されるとおり、界面下における貫入現象により、碎波帯周辺における物質が界面付近へと輸送されている様子も確認された(図-7)。

トラップされた様子をより明確に見るために、トレーサーを置く場所を $x=3.85\text{m}\sim 3.95\text{m}$ に変更した(図-8)。鉛直循環が下層の物質をボア内へと取り込み、トラップされたコアが形成されている様子が分かる。このトラップされたコアにより、下層の物質が上層まで輸送¹⁹⁾されて

おり、内部波の砕波による物質輸送の重要な機構であることが分かる。

6. おわりに

斜面上での内部波の砕波形態と物質輸送を検討し、以下のような結論を得た。

- (1) 内部Iribarren数と砕波指標を用いた砕波形態の分類を行い、両者の関係を明確にすることが出来た。
- (2) 圧力の鉛直勾配を用いて砕波点を決定し、その砕波点が、波速と下層の最大流速が一致する点と同一の点であることが分かった。これにより、内部波においても、波速と下層の最大流速を用いた砕波点決定方法も利用可能であることが分かった。
- (3) 砕波の発生は斜面を駆け上がった下層の流体によるダウンドラフトに起因しており、本研究で対象としている砕波は、浅水変形によるものではないことが分かった。
- (4) 内部Iribarren数によりPlungingタイプの砕波であると予想されたcase 6は、実際にはCollapsingタイプの砕波であった。造波方法にも大きく依存しており、内部Iribarren数による一般的な砕波形態の分類は容易でないことが分かった。
- (5) 数値実験により内部波の砕波による物質輸送を再現し、ボアにおいてトラップされたコア内の物質が下層から上層へと輸送されてゆくことが分かった。また、残差流に示されている界面付近への貫入現象も確認された。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(C)：中山恵介）および科学研究費補助金（基盤研究(C)：古川恵太）の助成を受けました。記して感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 本島翼, 早川博, 内島邦秀: 海跡湖の流況と湖沼環境に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, 第60巻, pp. 248, 2005.
- 2) 池永均, 向山公人: 汽水湖成層界面の挙動と吹送循環流の成形に関する研究, 土木学会論文集, 第614巻, pp. 77-96, 1999.
- 3) 池永均, 向山公人: 塩淡2成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発, 土木学会論文集, 第628巻, pp. 77-96, 1999.
- 4) 赤堀良介, 清水康行: 閉鎖性水域における密度流現象に関する3次元乱流モデルによる数値計算, 土木学会論文集, 第684巻, pp. 113-125, 2001.

- 5) 中山恵介, 堀松大志, 清水健司, 丸谷靖幸, 角谷和成, 岡田知也: 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, in preparation.
- 6) 中山恵介, J. Imberger: 斜面に連続的に作用する内部波と残差流, 海洋工学論文集, 第50巻, pp. 531-534, 2003.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Prison, D. C. and G. A. Weyhenmeyer: High resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake. Hydrobiologia, 284, 43-57, 1994
- 10) 梅山元彦, 新谷哲也, 中山恵介: 緩勾配斜面を伝播する内部波の可視化実験と浅水・砕波域での物理現象に関する理論的考察, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 16-20, 2004.
- 11) Boegman, L. levy, G.N. and J. Imberger: The energetics of large-scale internal wave degeneration in lakes. J. Fluid Mech. 531: 159-180.
- 12) Nakayama K. and J. Imberger: Residual circulation due to internal waves shoaling on a slope, Limnology and Oceanography, submitted, 2008.
- 13) Nakayama K.: Comparisons of using CIP, compact and CIP-CSL2 schemes for internal solitary waves, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.51, pp. 197-219, 2006.
- 14) Kakinuma T. and K. Nakayama: Internal waves induced by typhoon, Hydrological Research Letters, Vol.1, 2007.
- 15) Okada T. and K. Nakayama: Modeling of dissolved oxygen in an enclosed bay with sill, Journal of Environmental Engineering SCE, Vol.133, issue 4, pp. 447-453, 2007.
- 16) Tory, C.D, and Koseff, J.R.: "The generation and quantitative visualization of breaking internal waves," Experiments in Fluids, 38(5), May, 2005, pp. 54
- 17) Wallace, B. C. and Wikinson: Run-up of internal waves on a gentle slope in a twolayered system. J. Fluid Mech., 191, 419-442, 1988
- 18) 灘岡和夫, 大野修史, 栗原礼: 波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕葉条件, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 81-85, 1996
- 19) Helfrich, K. R.: Internal solitary wave breaking and run-up on a uniform slope. J Fluid Mech., 243, 133-154, 1992.

(2008. 9. 30受付)