

研究種目：基盤研究 C
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560524
 研究課題名（和文） 斜面に連続的に作用する内部ケルビン波により誘起される水平循環メカニズムの解明
 研究課題名（英文） Mechanisms of horizontal circulation induced by breaking of internal Kelvin waves over a slope
 研究代表者
 中山恵介（Keisuke Nakayama）
 北見工業大学・工学部・教授
 研究者番号：60271649

研究成果の概要（和文）：

東京湾などに代表される閉鎖性内湾では、日射の影響、淡水の流入により成層が発達し易い環境にある。成層が発達し、風などによる外力が与えられると、表面からは想像もできない振幅を持った内部波が発生することが知られている。その内部波は、地球自転の力を受けて変形し、内部ケルビン波として進行し、斜面などの浅水域では砕波する。しかし、内部ケルビン波による砕波の影響に関して、これまで十分な研究が行われていない。そこで本研究では、内部ケルビン波の斜面上での砕波による影響評価を室内実験、数値計算を用いて行った。その結果、内部ケルビン波が斜面上で砕波する際、砕波領域に向かう流れが発生することが示された。コリオリ力を考慮しない場合には発生しない流れであり、本研究での大きな成果である。また、その流れが反時計回り（北半球では）の循環を生むことが確認された。

研究成果の概要（英文）：

In general, stratification appears in an enclosed bay, such as Tokyo Bay, due to fresh water input from rivers and solar radiation during summer. When external force is given in a stratified flow field, larger amplitude internal waves are induced compared to water surface waves. The internal waves are likely to be deformed and to become internal Kelvin waves due to the Coriolis effect, which break over a slope in a shallow water region. However, the influence of internal Kelvin waves has not been revealed in the previous studies. Therefore, this study aims to clarify the influence of internal Kelvin waves on a stratified flow field by using laboratory experiments and numerical analysis. As a result, flow toward the breaking zone is induced by the breaking of internal Kelvin waves, which does not occur without the Coriolis effect. The flow toward the breaking zone is also found to drive cyclonic horizontal circulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：成層場，碎波，コリオリ，物質輸送，水平循環

1. 研究開始当初の背景

一般的に、沿岸域における閉鎖性内湾や湖沼では、少なくとも一年のある期間、温度成層もしくは淡水流入による成層が形成される。成層状態が発達すると、水表面の変化からは想像できないような、巨大な振幅を持った内部波がしばしば発生する。その巨大な振幅は、上下層の密度差が水と大気との密度差に比較して非常に小さいことに起因しており、内部波の大きな特徴であると言える。そのような大きな振幅をもつ内部波が斜面に対して進行してゆく場合、下層水深の減少により底層に大きな流速を生み出し、底層に蓄積された物質を巻き上げ輸送する。また、表面波のビーチへの進行と同様に、斜面上を進行する内部波の界面は不安定となり碎波するため、その乱れによっても物質の巻き上げ、輸送が発生する。そのようにして発生する物質輸送は、残差流として長期的な物質の輸送を支配しており、水質環境を把握、改善してゆく上で緊急に解決されなくてはならない問題であると言える。

2. 研究の目的

内部波は様々な要因により誘起されており、その多くは潮汐、風により発生する。沿岸域の閉鎖性内湾や陸域の湖沼では、潮汐はもちろん、風もある卓越周期（例えば1日周期）により変化していることが多く、連続的に内部波が形成されている。そのような長周期の内部波が発生する場合、内部波の波速は数10cm/s以下であるため、地球自転の効果（コリオリ効果）により内部ケルビン波となって進行する。多くの閉鎖性内湾や湖沼では斜面が存在するため、北半球では内部ケルビン波は右に壁をみて進行し、斜面上で碎波する。そのため、内部ケルビン波が碎波した後、碎波によって生じる **set-up** が斜面に向かって右側で卓越して発生し、その **set-up** が水平面内での傾圧エネルギーの差を生み出し、水平面内における特殊な循環を発生させると考えられる。

これまで多くの研究が、斜面上に作用する内部波に関して行われ、碎波によりどのような流れが誘起される可能性があるかが解明されてきた。しかし、多くの研究ではコリオリ力が無視されている場合が多く、コリオリ力を考慮している場合でも、内部ケルビン波の斜面上での碎波による物質輸送機構を解明しようとするものは少ない。そこで本研究で

は、コリオリ力を考慮して、連続的に斜面上に内部ケルビン波を進行させ、斜面上で碎波することで、どのような水平循環が発生し、どのような物質輸送メカニズムが存在するのかを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

回転水槽を用いて実験を行う。事件水槽は、長さ6m、幅0.4m、であり、2成層システムを作成する場合、界面厚さ約1.5cmの成層場を作成することが出来る。水槽の回転速度はコントロールされており、5秒から300秒で1回転させることにより、コリオリ力を考慮することが出来る。最初の実験は、上下層の密度差比を0.02とし、1回転30秒を与え、上層下層の厚さそれぞれ0.15mとする。上下層の厚さを同じで与えることにより、内部波が水平な底面上を進行する場合、内部波のKdV方程式で発生するような非線型な効果を抑えることが出来るため、水平な底面上を進行する内部ケルビン波の取り扱いが容易となる。また、1回転30秒とすることにより、水槽のおよそ半分の幅の内部回転半径をもった内部波を形成することが出来る。

これまで、水平な底面上を進行する内部ケルビン波の特性については、運動エネルギーの減衰、理論解の適用性について議論し、検討が終了している(Nakayamaら: Stratified Flow, 2006)ので、斜面上での内部ケルビン波の碎波と水平循環のメカニズム解明に力を注ぐ。まず、内部ケルビン波が斜面上を進行した場合に、斜面上の界面付近でどのような密度フラックスが発生しているのかを測定する。測定には、超音波流速計(200Hz)と電気伝導度計(50Hz)を用い、50Hzで密度フラックスを測定する。この計測により、水平循環を生んでいると思われる碎波による密度輸送を確認することが出来る(Nakayamaら: Stratified Flow, 2006)。

続いて、連続光Yagレーザ(600mW)と、PCでコントロールされたカメラ(DALSA, 15コマ/秒)を用いたPIVによる可視化を界面付近と上層において行う。その際、これまでの経験から、80 μ mの粒子を用いる(Nakayamaら: Stratified Flow, 2006)。また、内部ケルビン波の振幅の大きな右壁付近における鉛直断面のPIVによる可視化も試みる。鉛直断面内では水平断面と異なり、比較的大きな流速・乱れが発生している可能性が高く、15コマ/秒では高精度に撮影することが出来な

いことが予想される。そこで、首都大学の
新谷哲也氏の協力の下、ダブルパルスレーザを
利用し、高速カメラによる可視化も試みる
(清水ら：海岸工学論文集, 2005；梅山ら：
土木学会論文集, 2005；Umeyama&Shintani：
JWPCO-ASCE, 2004)。

室内実験で得られる成果・条件を用いて、
数値モデルによる再現計算を試みる。まずは、
これまで多くの内部波の計算に適用されて
きた LES モデル(Okada&nakayama: JEE-ASCE,
2006；Nakayama：International Journal for
Numerical Methods in Fluids, 2006；Nakayama
ら：Estuarine, Coast and Shelf Science,
2005)を用いて水平循環の再現を試みる。水
平循環の再現による計算結果を確認した後、
鉛直断面における砕波による乱れの発生、
密度フラックスの解析を行い、何が水平循環
にもっとも寄与し、どのようなメカニズムで
水平循環が発生、発達、減衰するかを解析する。

4. 研究成果

コリオリ力を考慮しないで、内部イリバ
ン数および本研究で提案する砕波限界振幅
を利用した、内部波の砕波に関する体系化を
試みた。体系化は、一定勾配の斜面上へ、波
長と周期を変化させることにより種々の実
験条件を与えて行われた。実験の測定には、
伝導度計を用いた密度測定、および PIV 計測
が利用された。その結果、本研究で提案して
いる砕波指標を用いることにより、ある程度
の体系化が可能であり、特に、その指標を利
用することにより、長期の物質輸送に重要な
役割を果たしている残差流に関する分類分
けを行うことが可能であることが示された。

その後、コリオリ力を考慮した実験も行っ
た。その際、コリオリ力を考慮することによ
り発生する、3次元性の卓越を示す横断方向
の流れを確認することが出来た。その流れが、
特に、上層における水平循環を生み出してい
る可能性があり、長期における物質輸送に重
要な役割を果たしている可能性が示唆され
た。

さらに、内部波の砕波による物質輸送機構
解明のため、現地観測、室内実験、数値計算
を行った。現地観測では、海水の影響により
明確な2成層が形成される網走湖を対象とし
た計測を行った。網走湖では、塩水と淡水の
境界面の厚さ(界面厚さ)が50cm程度であ
るため、塩分水温計を界面を中心として50cm
間隔で10ヶ配置し、時間変化を計測した。
その結果、内部ケルビン波の1次モードの波
長である8時間程度の波が卓越していること
を観測することができた。それ以外の波の影
響は少ないことが分かったが、より高周波な
波に着目すると、5分程度の周期の内部ソリ
トン波が存在していることが示された。その
5分周期の波の計測を試みたが、計測器の容

量の問題から、残念ながら計測することがで
きなかった。

網走湖で見られた内部ケルビン波の影響
を調べるためには、コリオリ力が存在しない
場における現象の把握を行わなくてはなら
ない。そこで、本研究で提案された砕波指標
を利用して体系だった内部波の砕波と残差
流について検討した。砕波形態について検討
した結果、Collapsingタイプの砕波が卓越し
ており、Plungingタイプは存在しにくいこと
が示された。また、数値計算モデルを用いた
検討を行い、砕波指標を利用した残差流によ
る物質輸送の定量的な評価を可能とした。

最終年度は、線形なケースでない場合、つ
まり上下層厚比が異なる場合における検討
を行うこととした。室内実験に用いた水槽は、
全長5m、奥行き0.4mである。斜面勾配3/20
の1様斜面勾配とし、斜面長は2mとした。
比較のため、層厚は上下層の厚さをそれぞれ
0.15mの層厚が等しい場合、上層を0.06m、
下層を0.24mの層厚が異なる場合の2種類の
層厚を用いることとした。検討には、数値計
算も利用した。層厚が同じ場合、内部波が斜
面上で砕波することによりダウンドラフト
が発生し、その影響により海面下において貫
入する残差流が発生することが知られており、
本研究の実験においても同様な結果が得ら
れた。一方、層厚が異なる場合の残差流で
は、界面下における貫入が界面付近の岸向き
の流れに比較して小さいことが確認された。
同様な結果が数値計算によっても確認され、
層厚が異なる場合、残差流は小さくなる傾向
が示され、その結果、水平循環も小さくなる
可能性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に
は下線)

[雑誌論文] (計12件)

- (1) Maruya Y., K. Nakayama, T. Shintani and
M. Yonemoto, Evaluation of entrainment
velocity induced by wind stress in a two-layer
system, Hydrological Research Letters, in
revision, 2010.
- (2) Nakayama K., Y. Maruya, T. Shintani, K.
Shimizu, Y. Yonome and M. Yonemoto,
Influence of internal waves on interfacial
level in Lake Abashiri, International
Symposium on Ecohydraulics, accepted,
2010.
- (3) 中山恵介, 柿沼太郎, 及川正行, 辻英一,
丸谷靖幸, 内部ソリトン波の3次オーダー
解による再現性の検討, 海岸工学論文集,
第57巻, accepted, 2010.
- (4) 中山恵介, 丸谷靖幸, 新谷哲也, 柿沼太
郎, 中内勲, 米元光明, 塩水遡上へ与える
ストークスドリフトの影響評価, 海岸工
学論文集, 第57巻, accepted, 2010.

- (5) 中山恵介, 角谷和成, 新谷哲也, 清水健司, 福岡将太, 東京湾を対象とした内部ケルビン波の発生と碎波に関する検討, 海洋開発論文集, 第 26 卷, accepted, 2010.
- (6) Nakayama K. and J. Imberger, Residual circulation due to internal waves shoaling on a slope, *Limnology and Oceanography*, Vol. 55, pp.1009-1023, 2010, DOI: 10.4319/lo.2010.55.3.1009.
- (7) 丸谷靖幸, 中山恵介, 堀松大志, 鰐目淑範, 米元光明, 網走湖における密度界面に対する風応力と河川流入の影響評価, 水工学論文集, 第 54 卷, pp.1393-1398, 2010.
- (8) Nakayama K. and T. Kakinuma, Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.62, 5, pp.574-590, 2010, doi: 10.1002/flid.2037.
- (9) Simanjuntak M. A., J. Imberger and K. Nakayama, Numerical wave drag due to stair-step topography in a geophysical flow model, *Journal of Geophysical Research*, 114, C12, doi:10.1029/2008JC005051, 2009.
- (10) 堀松大志, 中山恵介, 岡田知也, 古川恵太, 鰐目淑, 東京湾スケールの流動が京浜運河に与える影響評価, 海洋開発論文集, 第 25 卷, pp. 1041-1046, 2009.
- (11) 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, 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 卷, pp.1285-1290, 2009.
- (12) 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碎波形態と物質輸送, 水工学論文集, 第 53 卷, pp.1321-1326, 2009.

〔学会発表〕(計 7 件)

- (1) 尾形尚紀, 中山恵介, 新谷哲也, 東京湾におけるオブジェクト指向型流体モデルの適用, 土木学会北海道支部論文報告集, B-42, 2010.
- (2) 福岡将太, 中山恵介, 新谷哲也, 角谷和成, コリオリを考慮した斜面上での内部波の碎波について, 土木学会北海道支部論文報告集, B-53, 2010.
- (3) 佐久間慎雄, 中山恵介, 柿沼太郎, 新谷哲也, 網走川において風波が塩水浸入に及ぼす影響評価, 土木学会北海道支部論文報告集, B-52, 2010.
- (4) 中山恵介, 角谷和成, 柿沼太郎, 丸谷靖幸, 大振幅内部ソリトン波に関する検討, 土木学会年次講演会, 2009.
- (5) 中山恵介, 堀松大志, 丸谷靖幸, 徐乃丹, 米元光明, 2006 年 10 月の洪水時における網走湖内の流動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, B-39, 2009.
- (6) 丸谷靖幸, 中山恵介, 堀松大志, 大田見定, 2007 年~2008 年における網走湖の観測結果について, 土木学会北海道支部論文報告集, B-38, 2009.

- (7) 中山恵介, 堀松大志, 角谷和成, 丸谷靖幸, 早川博, 網走湖を対象とした風応力の内部ケルビン波と物質循環への影響評価, 2008 年度水文水資源学会発表講演要旨集, 2008.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 取得年月日 :
 国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山恵介 (Keisuke Nakayama)

研究者番号 : 60271649

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :