

斜面を伝播する内部波の PIV 計測及び 瞬間速度と一周期平均輸送速度の数値計算

清水良平*・新谷哲也**・梅山元彦***

緩勾配斜面上を伝播し、変形・砕波する内部波によって引き起こされる流動構造を PIV 法を用いて計測した。実験では、トレーサー粒子の沈降による粒子数の減少を補う工夫をしながら、画像の高精度化を試みた。また、瞬間流速ベクトルの他に、オイラー・ラグランジュ法を用いて一周期平均輸送速度の空間分布を求めた。その結果、斜面上での内部波の流動構造が実験的に明らかとなった。さらに、実験と同一条件で数値計算を行った結果、瞬間流速の数値計算は実験結果を比較的良好に再現していることがわかった。また、一周期平均輸送速度の空間分布からは質量輸送及び戻り流れが斜面上で層状に重なり合いながら蛇行していることが明らかとなった。

1. 緒 言

成層海域を伝播する内部波は、沿岸域の斜面上を遡上し、砕波することによって成層水塊の鉛直混合及び堆積物の巻き上げを引き起こすと考えられている。実際に、多くの研究者達によって海洋における鉛直混合の一部が内部波の砕波に起因するものであると推測され、それを裏付ける現地データも収集されてきている (Ledwell ら, 1993; Polzin ら, 1997)。また、内部波波群が斜面上へと伝播し、砕波する過程において、水面波と同様に質量輸送及び戻り流れが生じることが、中山・Imberger (2003) 及び梅山ら (2004) によって確認されている。これらの混合や流動が実海域におけるプランクトンや栄養塩の水平輸送に関与し、海岸域における生態系に大きく影響を与えていることは容易に想像できる。これまで内部波の実験的研究としては、主に密度境界面の時空間波形変化に関して行われてきており、非線形性 (例えば Thorpe, 1969; Umeyama, 2002) や浅水変形 (梅山・新谷, 2001; Umeyama・Shintani, 2004) について詳しく検討が行われてきた。しかしながら、実際に巻き上げ及び鉛直混合現象の解明において重要となる内部波内部の空間的な流動構造についての計測例は少なく、内部ソリトンに対する Michallet・Ivey (1999) の PIV 法を用いての実験がある程度である。このことは、内部波の流動計測において PIV 法の適用が、成層の作成時間、粒子の密度、レーザーの密度境界面での反射などの問題があるために困難であり、しかも結果の評価が難しいためである。

本研究では、これらの問題点を克服しながら PIV 法による内部波内部の流動形態を明らかにすると共に、計

測した瞬間流速から一周期平均輸送速度の分布を求め、内部波の伝播・砕波に伴う正味の物質輸送構造についての考察も行う。また、同時に CIP 法を用いた鉛直 2 次元数値計算を行い、実験結果との比較による計算精度検証を行う。そして、実験では計測できなかった部分の流動についても計算結果を基に検討する。

2. 室内水槽実験

(1) 実験概要

実験は図-1 に示すような、長さ 600 cm (造波機部分を含めると 657 cm)、幅 15 cm、高さ 35 cm の 2 次元内部波造波水槽を用いて行った。造波にはフラップ式造波装置を用い、この装置の反対側から底部にかけて、勾配 18/500、厚さ 1 cm の透明アクリル製斜面を取り付けた。これによって、水槽内は一定水深部 100 cm、斜面部 500 cm という底面形状となった。計測場所を指定するための座標として、斜面と静止時の密度境界面の交点を原点とし、水平右方向を x 軸、鉛直上向き方向を z 軸とした。従って、座標の原点は水槽の左端より 83.3 cm の場所に位置することになる。実験は、すべて上層 15 cm、下層 15 cm で全水深 30 cm の 2 成層状態で行った。成層作成には、下層の塩水を先に水槽内に注入し、その後、発泡スチロール製のフロートを用いて上層の淡水を上側から注入した。上下層の密度差はすべての実験ケースで 0.024 g/cm^3 とし、内部波の造波周期は $T=5.2$ 秒, 7.2 秒, 10.2 秒の 3 ケースとした。

(2) PIV 計 測

本実験では、内部波が斜面上で浅水・砕波変形する際の流動に着目しているため、斜面上の一部領域を選んで計測を行った。計測には解像度 1008×1018 ピクセルの CCD カメラ (ES1.0, KODAK) を用いたが、内部波が変形する水平方向に細長い領域をこのカメラで一度に撮影すると、計測領域の空間解像度が非常に低下してしまう。そこで本研究では計測領域を図-1 内に示すような

* 修(工) (株)建設技術研究所

** 正 会 員 修(工) 首都大学助手都市環境学部

*** 正 会 員 Ph. D. 首都大学教授都市環境学部

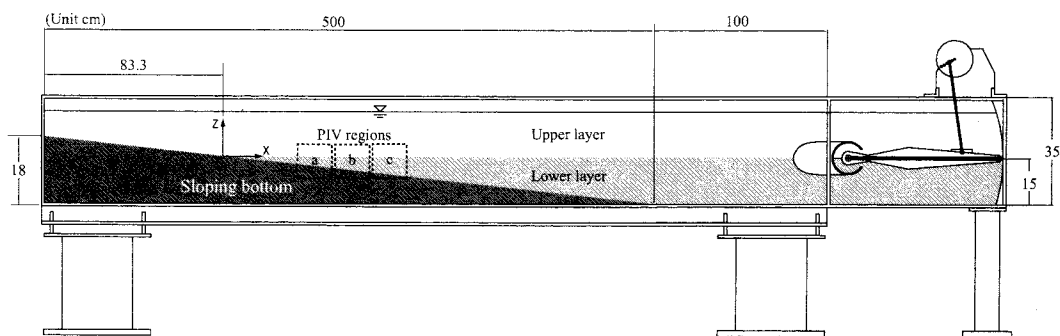


図-1 2次元内部波造波水槽

正方形3領域 (a, b, c) に分けて撮影を行った。このことによって、各領域の空間解像度を40 pixel/cm以上とすることができる。表-1にこれら3領域の座標を示す。しかしながら、1回の計測で上下層が混合してしまうために、各実験ケースに対して3回ほど成層を再作成しなければならず、その結果、全部で9回の実験を行った。また、トレーサー粒子としてはコントラストの良い画像を得るために直径2 mm、比重1.02のダイヤイオン (DK-FINE, HP 20) を用いた。CCDカメラの静止画像の取得時間間隔は0.1秒、シャッタースピードは0.01秒に設定した。

表-1 PIV 計測領域

計測領域	水平方向 (cm)	鉛直方向 (cm)
a	$x = 44.5 \sim 68.5$	$z = -6.5 \sim 17.5$
b	$x = 62.0 \sim 86.0$	$z = -6.5 \sim 17.5$
c	$x = 76.5 \sim 100.5$	$z = -6.5 \sim 17.5$

成層実験でPIV計測を行う上では、トレーサー粒子の沈降や浮上が問題となってくる。今回の実験で2成層場を水槽内に作成するには3～4時間の時間を要する。そのため、トレーサー粒子をあらかじめ上下層に混入したのでは、実験前に大部分の粒子が沈降してしまう。これらのことをできる限り起こらなくするために以下のような方法を用いた。まず、粒子を入れずに2成層状態を通常通りに作成する。その後、粒子と比較的密度差が小さい下層 (塩水) に対しては、実験開始直前に粒子を混入した塩水をビニールチューブで計測領域周辺の下層に混入させた。この結果、実験開始時に下層において大部分の粒子が中立的に浮遊した状態を保つことができた。一方、上層では、下層と異なり粒子と淡水の密度差が非常に大きいため、下層で行った方法と同様な方法では、実験中に粒子数が減少してしまい可視化ができない。そこで、上層に対しては、実験中に徐々に水面付近から粒子を補給する方法で行った。具体的には図-2に示すよ

うに、リザーバタンクに淡水と粒子を混ぜた流体を貯留し、少しずつ水槽内の計測領域周辺に供給した。この際、リザーバタンク内でも粒子は沈降するため、小型攪拌機を用いて常に粒子が沈降しない状態を保った。上層の粒子は、実験中に徐々に沈降するために、鉛直方向の速度を持つが、その沈降速度は、密度境界面前後では内部波の粒子運動にくらべて無視できる程度である。次に、トレーサー粒子を照射するためのレーザーシートを透明アクリル斜面の裏側から挿入したが、この方法ではレーザーシートの密度境界面及び水面への進入角度が浅くなるために、レーザーが密度境界面と水面で乱反射して良好な画像の取得が不可能であった。そこで、水面の変動・乱れが非常に少ないことを考慮して、真上から水面を通してレーザーシートを照射することにした (図-2)。これにより、密度境界面及び水面におけるレーザー光の乱反射を押さえることに成功した。

(3) 流速の算出

CCDカメラで取得した連続画像からの流速算出には、直接相互相関法を用いた。算出の際に得られる誤ベクトルは、閾値を設定して空間平均と時間平均を用いて取り

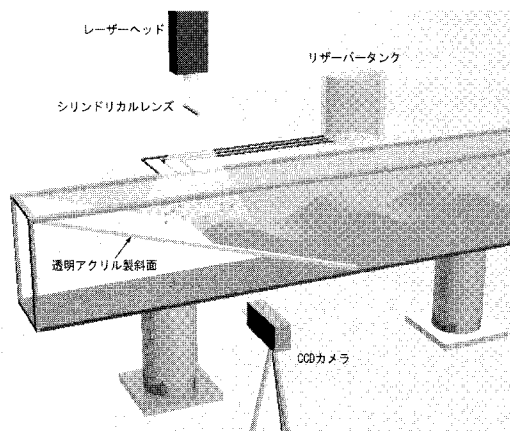


図-2 PIV 計測の概要

除いた。次に、内部波による正味の物質輸送速度を求めるために、一周期間の瞬間速度を用いて粒子追跡を行い、一周期平均輸送速度を求めた。この輸送速度を求める手法として、オイラー・ラグランジュ法を用いた。この際、個々の波を正確に抽出する必要があるために、計測領域内の一点における鉛直流速の時系列を取得し、ゼロダウンクロス法を用いて波を分離した。

3. 数値計算

(1) 基礎方程式

本研究では、内部波の浅水・碎波変形時の内部流動を定量的に評価するために鉛直 2 次元の数値計算を行った。水槽内の内部波の挙動を支配する方程式は、質量保存式、運動方程式、密度の保存式である。非圧縮及び、対象領域内の密度差が非常に小さいことを考慮してブーシネスク近似を仮定すると基礎方程式はテンソル形式で次のように示される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\rho - \rho_1}{\rho_1} g \delta_{i2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu}{S_c} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 u_i は x_i 方向の速度成分であり ($i=1, 2$)、 x_1 は水平方向、 x_2 は鉛直方向の座標軸である。ただし、重複する添え字に対しては総和規約が適用されるものとする。 p は圧力、 ρ は密度、 ρ_1 は上層の初期密度、 ν と ν_t はそれぞれ動粘性係数と渦動粘性係数、 δ はディラックのデルタ関数であり、 S_c と σ_t はそれぞれシュミット数と乱流シュミット数である。渦粘性係数を算出するための乱流モデルとして、標準型 $k-\epsilon$ モデルを用いている。

(2) 離散化手法

本研究では、基礎方程式をデカルト座標スタッガード格子に基づいて離散化を行った。この離散化された基礎方程式に 2 段階準陽解法である Fractional step 法を適用した。また、収束解を求めるための圧力補正值の Poisson 方程式解法には、SOR 法を内部ソルバーとした残差切除法を用いた。数値計算において密度境界面の非定常運動を適切に再現するためには、支配方程式の移流項に数値拡散の少ない高精度の風上差分を用いる必要がある。本研究では、Yabe・Aoki(1991)によって開発された CIP 法(Cubic-Interpolated Propagation scheme)を運動方程式と密度輸送方程式の移流項に適用した。計

算グリッドは、水平方向に対して鉛直方向の分解能を上げるために水平 1 cm × 鉛直 0.25 cm の長方形セルを用い、水槽内を 600 個 × 120 個のセルで離散化した。境界条件としては、固体壁においてノンスリップ条件、水面においてはノンスリップのリジッド・リッド境界とした。また、造波境界では造波板の動きに対応するような周期的なフラックスを与えた。境界条件の詳細については新谷・梅山(2004)を参照されたい。

4. 実験結果と考察

(1) 瞬間流速分布

図-3 は、周期 $T=5.2$ s の内部波が斜面上の 3 領域(a, b, c)を通過している際の瞬間流速分布である。上側の図が数値計算結果、下側の図が PIV 計測で得られた実験結果を示している。数値計算結果には密度境界面(上下層の平均密度の等値線)のコンタを描き加えてある。実験結果から、内部波は谷の部分で反時計回りの渦、そして峰部分で時計回りの渦を形成していることがわかる。さらに、流速の絶対値は上層部分よりも下層の底付近で大きくなっていることがわかる。数値計算結果は、上層流速の絶対値が実験よりも若干大きく再現されているが、ほとんどの部分で実験で得られた流速及び渦構造を良好に再現できている。

図-4 は、周期 $T=7.2$ s のケースに関する同様の比較結果を示したものである。実験結果と計算結果の適合は、周期 $T=5.2$ s の場合と同様に良好であることがわかる。最大流速は底面付近に生じており、内部波の伝播によって強い剪断力が底面に作用していることがわかる。また、この流速ベクトルの分布から、峰前面の下層部において流れの収束と上昇が起こり、峰の背面において流れの分岐と下降が生じていることが明確にわかる。このことから、斜面上に堆積物があつた場合、それは内部波の前面に集められ、その後上層へ運ばれる可能性があることが予測できる。

図-5 は、全ケース中最も波長の長い周期 $T=10.2$ s の場合での計算結果と実験結果の比較を示している。両結果の対応は良好であり、前の 2 ケースに比べると峰における渦が非常に扁平した形となっていることがわかる。波の峰直下の流速は他のケースに比べ速く、底面付近でもこの傾向は変わらない。最後に、底面に作用する剪断力について考察してみる。波速は斜面付近で急激に変化するので剪断力も著しく増大し、しかも、剪断力が底面に対して一方向に作用する継続時間は周期が長いほど長くなるので、堆積物の巻き上げにも影響を与え易くなると考えられる。

(2) 一周期平均輸送速度分布

図-6 は、周期 $T=5.2$ s のケースに関する一周期平

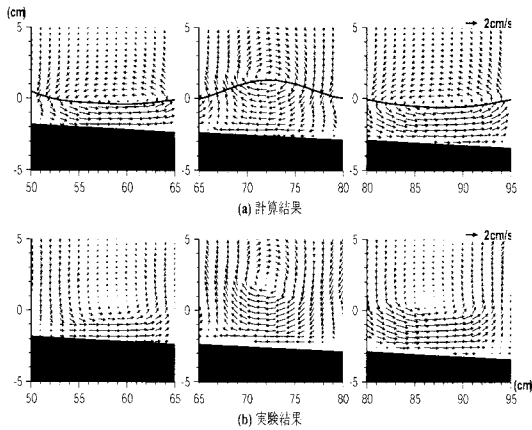


図-3 瞬間流速ベクトル(a)計算結果, (b)実験結果
($T=5.2$ s)

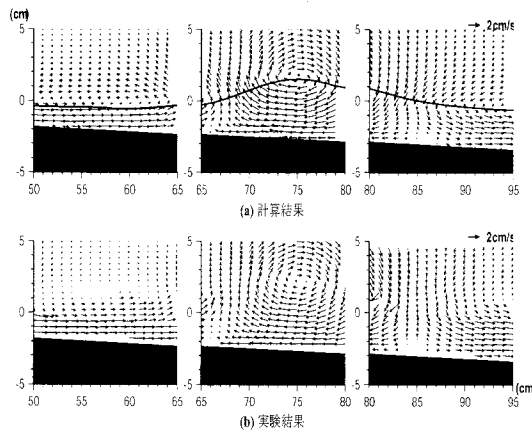


図-4 瞬間流速ベクトル(a)計算結果, (b)実験結果
($T=7.2$ s)

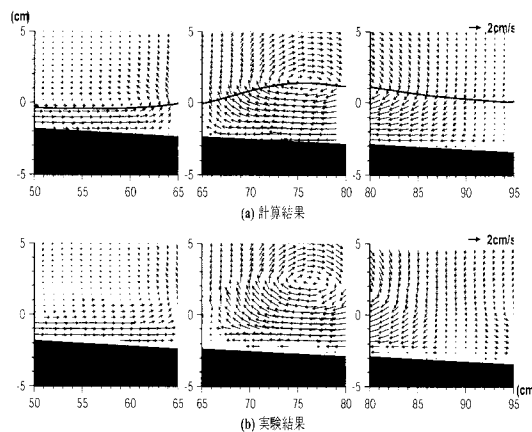


図-5 瞬間流速ベクトル(a)計算結果, (b)実験結果
($T=10.2$ s)

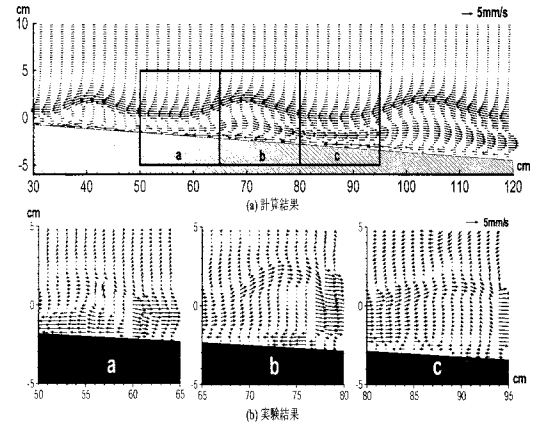


図-6 一周期平均輸送速度(a)計算結果, (b)実験結果
($T=5.2$ s)

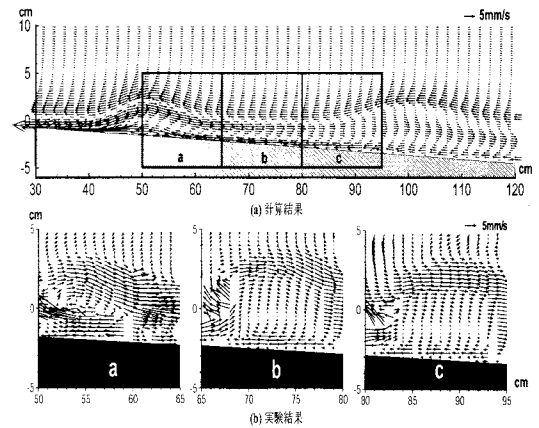


図-7 一周期平均輸送速度(a)計算結果, (b)実験結果
($T=7.2$ s)

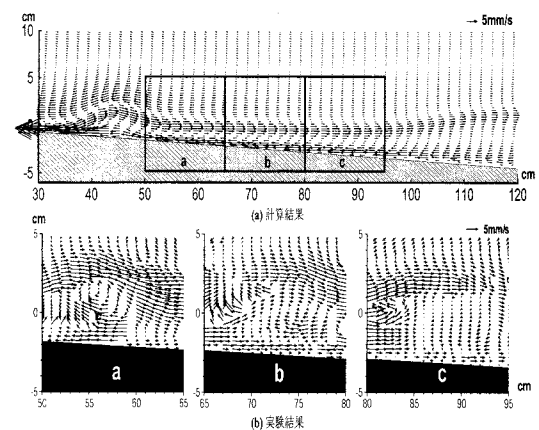


図-8 一周期平均輸送速度(a)計算結果, (b)実験結果
($T=10.2$ s)

均輸送速度の計算結果と実験結果を比較したものである。計算においても実験と同様にオイラー・ラグランジュ法を用いて一周期間における輸送速度を求めた。計算結果は、流動をより把握しやすくするために実験結果よりも広い範囲を表示している。また、計算結果には実験結果に対応する部分 (a, b, c 領域) を実線の枠で示してある。実験結果を見ると、全体的にかなり乱れた速度分布となっているが、底面付近には沖から岸に向かう流れ (質量輸送) があり、その上方には蛇行した岸から沖へ向かう流れ (戻り流れ) が存在することがわかる。実験では、すべての画像 (周期 $T=5.2$ s の場合は 52 枚の画像) で完全にノイズのないデータを取得することが困難であったために、粒子追跡計算結果にはノイズも含まれている。一方、計算結果では、計測 3 領域の底面付近に沖岸方向の流れ、その上側には岸沖方向の流れ、さらにその上側に沖岸方向の流れと 3 層構造になっており、上側 2 層は実験結果と同様に蛇行している。この蛇行した輸送速度分布は、実験及び計算ともに時間と共に移動せず、ほぼ定定的に存在している。実験で得られた 2 層構造の流れは、計算では 3 層構造になっていることなど、相違点は幾つか存在するが、実験結果と計算結果に類似した流動構造があることがわかる。

図-7 は、周期 $T=7.2$ s のケースに関して同様な比較を行った結果である。実験結果は、このケースにおいても多くのノイズ成分を含んでおり、流れも前ケースと同様に蛇行して層状になっていることがわかる。計算結果においても蛇行する流れが確認できる。しかしながら、内部波の周期が増加したことによって、蛇行流の波長も長くなっており、この点については実験と計算で傾向が異なっている。

図-8 は、周期 $T=10.2$ s のケースに関する結果を示している。計算結果ではさらに蛇行流の波長は増大し、計測区間ではほぼ直線の流れとなっている。実験結果には、岸沖方向の流れに蛇行が見られ、その存在位置も計算結果とは多少異なるが、蛇行する戻り流れの幅 (約 1.7 cm) やその流速 (約 5 mm/s) など一致が見られる。

5. 結 論

本研究では、緩勾配斜面を伝播し、変形する内部波の内部流動構造を PIV 法によって計測した。また、その実験結果を同一条件の数値計算結果と比較し、検討を行った。実験では、成層実験に起因する PIV 計測の問題点を克服することによって良好な瞬間流速の空間分布を

得ることができた。内部波の内部では、峰部分に時計回りの渦、谷部分に反時計回りの渦が存在すること、最大流速が底面付近で生じていることが確認できた。この結果は、内部波の斜面上への伝播が堆積物の巻き上げ及び輸送に深く関わっていることを示唆するものである。また、瞬間流速を用いて一周期間の粒子追跡計算を行うことで、正味の一周平均輸送速度を求めた。その結果、沖岸方向の流れ (質量輸送) と岸沖方向の流れ (戻り流れ) が、蛇行しながら層状に重なり合っていることが確認できた。CIP 法を用いた乱流数値計算では、すべての実験ケースにおいて、瞬間流速の空間分布を非常に高い精度で実験を再現することができた。また、一周平均輸送速度の計算結果では、実験結果と同様に蛇行して重なり合う流れを確認することができた。また、実験よりも広範囲の流動分布を考察することで、周期によって輸送速度の空間分布に違いがあることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 梅山元彦・新谷哲也 (2001): 斜面を遡上する内部波の変形・碎波に関する可視化実験と $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値解析, 海工論文集, 第48巻, pp. 136-140.
- 梅山元彦・新谷哲也・中山恵介 (2004): 緩勾配斜面を伝播する内部波の可視化実験と浅水・碎波域での物理現象に関する理論的考察, 海工論文集, 第51巻, pp. 16-20.
- 新谷哲也・梅山元彦 (2004): 斜面を遡上する内部波の数値計算と可視化実験, 土木学会論文集, No. 768/II-68, pp. 79-88.
- 中山恵介・Jorg Imberger (2003): 斜面に連続的に作用する内部波の碎波と残差流, 海工論文集, 第50巻, pp. 141-145.
- Ledwell, J. R., A. J. Watson, and C. S. Law (1993): Evidence for slow mixing across the pycnocline from an openocean tracer-release experiment, *Nature*, Vol.364, pp. 701-703.
- Michallet, H. and G. N. Ivey (1999): Experiments on mixing due to internal solitary waves breaking on uniform slope, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, pp. 13467-13477.
- Polzin, K. L., J. M. Toole, J. R. Ledwell and R. W. Schmitt (1997): Spatial variability of turbulent mixing in the abyssal ocean, *Science*, Vol.276, pp. 93-96.
- Thorpe, S.A. (1969): On the shape of progressive internal waves, *Philos. Trans. R. Soc. London*, Vol.263A, pp. 563-614.
- Umeyama, M. (2002): Experimental and theoretical analyses of internal waves of finite amplitude, *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, ASCE, Vol.128(3), pp. 133-141.
- Umeyama, M. and T. Shintani (2004): Visualization analysis of runup and mixing of internal waves on an upper slope, *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, ASCE, Vol.130(2), pp. 89-97.
- Yabe, T. and T. Aoki (1991): A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation. I: One-dimensional solver, *Comput. Phys. Commun.*, Vol.66, pp. 219-232.