

砕波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の 細部構造に関する実験的研究

岩田好一朗*・川崎浩司**・亀崎大輔***

1. 序 論

潜堤は、波浪制御のみならず海域の景観を損なわないなど優れた機能をもつ海岸構造物であるが、最近潜堤を藻場の造成場所として、また魚介類などの集魚機能など合わせて具備することが強調されるにつれて、砕波に伴う潜堤周辺の流速場の細部構造を明らかにすることが重要になってきた。3次元波動場について、潜堤による砕波後の波形や流速場の特性は明らかにされつつあるが(例えば、信岡ら、1993;青野ら、1995)、流速場の内部構造に関しては不明点が多く、研究の余地を多く残している。

本研究では、詳細な水理実験を行い、3次元波動場に設置された潜堤による砕波の3次元特性および砕波後の潜堤周辺における波の挙動特性と水粒子流速場の細部構造を、入射波および潜堤の幾何スケール比と関連づけて考究することを目的とする。

2. 水理実験と解析方法

名古屋大学の平面波浪水槽(長さ28 m, 幅11 m, 深さ0.8 m)を用いて、水槽内の水平床に不透過矩形型潜堤を設置し、砕波限界、砕波形式、砕波位置(実験I)、砕波後の波形の変化(実験II)および流速場の内部特性(実験III)の3種類の水理実験を行った。実験では、潜堤の堤幅 B と堤高 D をそれぞれ $B/L_i=0.3$, $D/h=0.6$ (L_i :入射波長, h :静水深)と固定し、潜堤の堤長 W のみを5種類($W/L_i=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$)変化させ、静水深を40 cmと一定に保った。作用波は、すべて潜堤前面に対し直角入射する規則波であり、周期 T を0.8, 1.2, 1.68 sの3種類とした。なお、実験IIとIIIでは、入射波高 H_i を非線形パラメータII(合田, 1983)が0.08, 0.09となる2種類を採用した。水位変動の計測を、波進行方向に対し潜堤前面から約2.0波長、潜堤の中心線から波進行直角方向に対し約1.5波長の領域内で、0.1波長間隔で設けた合計約300地点で電気容量式水位計を用いて詳細に行っ

た。同時に、砕波状況を8 mmビデオカメラを用いて撮影した。また、流速の時間変化を、水位変動の計測範囲とほぼ同範囲において約120地点、水深方向に対し静水面から0.3 h 間隔で設けた3地点、合計約360地点で電磁流速計を用いて詳細に計測した。

計測された水位と流速の時間変動を0.04 sで離散化し、ゼロ点とデータ間の位相のずれを補正して解析を行った。解析対象とする波は、造波板や消波装置などからの反射波の影響がなく波形が定常状態に達している3波である。その3波に対し、波高 H , 平均水位 $\bar{\eta}$, x と y 方向の定常流 $\bar{u}$, $\bar{v}$, 渦度 ω_z を式(1)より求めるとともに、FFT法を用いてスペクトル解析を行った。また、撮影した映像を30コマ/秒ごとにモニターに写し出し、砕波限界、砕波位置、砕波形式、砕波持続領域などを読みとった。

$$\bar{Q} = \frac{1}{3T_i} \int_{\tau}^{\tau+3T_i} Q dt, \quad \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q は水位変動 η および x と y 方向の流速 u, v を表し、 τ は3波目の最初の時間である。

次元解析によれば、本実験条件において、潜堤による砕波特性と砕波後の波挙動およびその内部特性は、相対波高 H_i/R , 水深波長比 h/L_i , 無次元堤長 W/L_i の3つの量に大きく支配されるので、これらの効果についても考察する。

3. 砕波特性

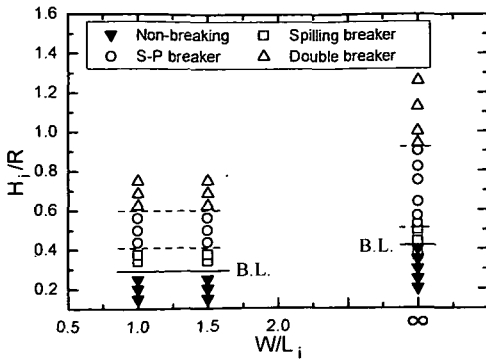
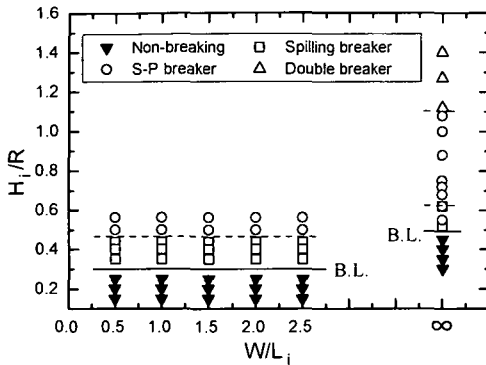
3.1 砕波限界と砕波形式

図-1は、潜堤による砕波限界および砕波形式と H_i/R (R :天端水深)および W/L_i の関係を示し、(a)と(b)はそれぞれ $h/L_i=0.2, 0.4$ の場合である。また、 $W/L_i=\infty$ は、岩田ら(1996)が行った2次元の実験結果である(以下、同様とする)。なお、本研究では、波面が不連続となった時を砕波と定義した。図-1から、本実験の範囲では砕波限界(図中のB.L.)に対する W/L_i の影響はあまり確認できないが、2次元の場合($W/L_i=\infty$)と比較すると、3次元の方が小さくなっている。3次元波動場の場合、潜堤両端部で、水深急変部での波の屈折や潜堤による散乱波の影響から、局所的に波高が増大する

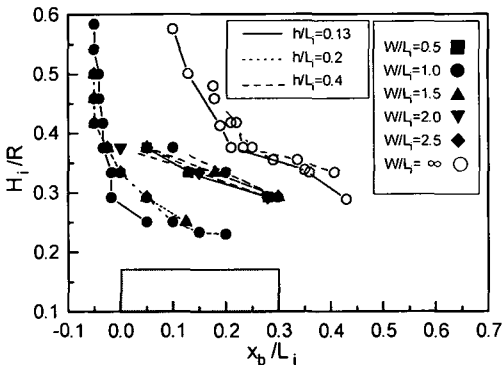
* フェロー 工博 名古屋大学教授 土木工学教室

** 学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*** 工修 東亜建設工業 大阪支店土木部設計概算課


 (a) $h/L_i = 0.2$

 (b) $h/L_i = 0.4$

図一 破波限界と破波形式



図二 波破位置

ことをビデオ解析から観察しており、そのため3次元の方が砕波しやすいと考えられる。

つぎに、砕波形式であるが、本研究では、Spilling型砕波(図中の□印)、Spilling型砕波とPlunging型砕波の中間の性質をもつS-P型砕波(図中の○印)、片野ら(1992)が観察した、引き波時に生じる戻り流れの効果から潜堤前面でさらに潜堤上で砕波する二段砕波(Double breaker, 図中の△印)の3種類に分類され、 H_i/R が大

きくなるにつれてSpilling型砕波、S-P型砕波、二段砕波へと変化していくことが判明した。なお、図中の▼印は非砕波を表す。また、2次元の場合(岩田ら, 1996)と同様、3次元の場合も、 H_i/R は砕波限界と砕波形式を支配する重要なパラメータのひとつであることが確認できる。そして、砕波形式は、砕波限界と同様、本実験の範囲では W/L_i が変わってもあまり変化しないが、2次元の場合と比較すると、3次元の方が砕波規模が大きい。 h/L_i による違いについてみると、砕波限界および各砕波形式へ移行するときの H_i/R の値は、 $h/L_i = 0.2$ より、 $h/L_i = 0.4$ の方がわずかに大きく、 h/L_i が大きくなると、進行波は深海性を帯び潜堤による影響の度合いが若干小さくなるためと考えられる。

3.2 砕波位置

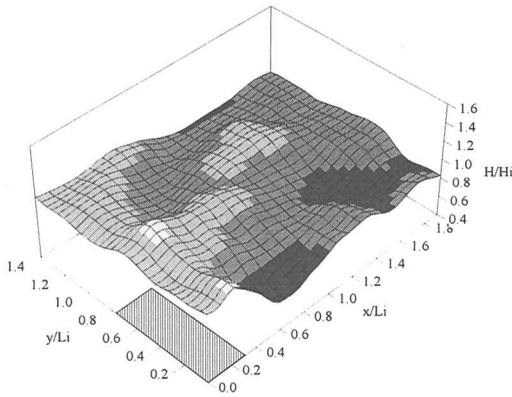
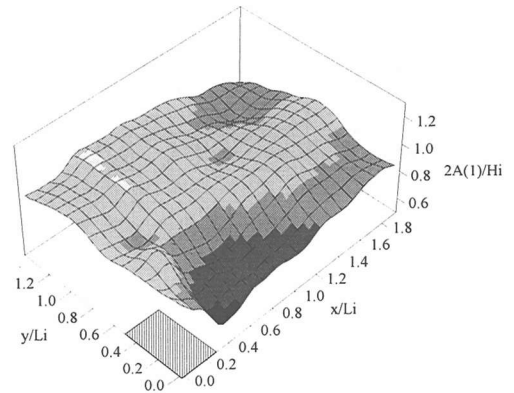
ビデオの写真解析から、砕波限界より少し大きい入射波高の場合、進行波は潜堤端部付近でのみ局所的に砕波するが、入射波高がさらに大きくなると、砕波する範囲が潜堤中央まで広がり、特に大規模の砕波の場合、潜堤端部から中央にかけてほぼ同時に砕波することが認められた。図-2は、 W/L_i をパラメータとする無次元砕波位置 x_b/L_i と相対波高 H_i/R の関係を図示したものである。ここで、 x_b は潜堤沖側端部から砕波点までの距離、図中の実線、点線、破線はそれぞれ $h/L_i = 0.13, 0.2, 0.4$ である。同図より、本実験の範囲では砕波位置に対する W/L_i の影響はあまり認められない。 H_i/R の増大に伴い、砕波位置は沖側方向へ移動し、 $H_i/R \geq 0.5$ になると、入射波と潜堤からの反射波の干渉による部分重複波の影響から、 $x_b/L_i = -0.05$ とほぼ一定になり潜堤前面で砕波する。また、3次元の場合、2次元と比べて x_b/L_i は沖側に移動しており、前述したように潜堤端部付近で局所的に波高が増大し、砕波しやすくなるためと推察される。水深波長比別にみると、 h/L_i が大きくなると、進行波は深海性を帯び潜堤との干渉が弱くなるため、砕波位置は潜堤岸側に移動する。

4. 破波後の波の挙動特性

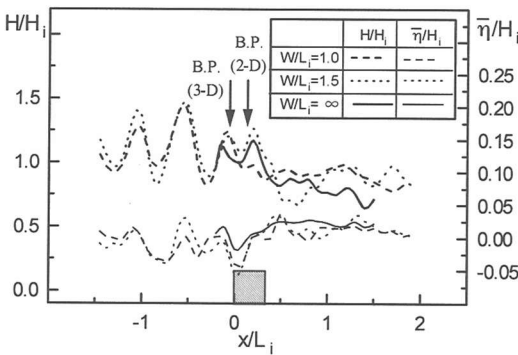
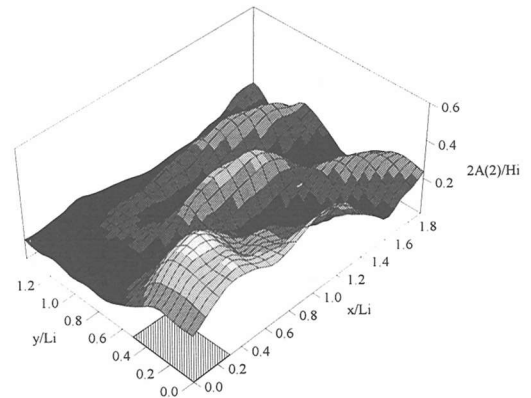
4.1 波高と平均水位

図-3に一例として示すように、砕波に伴う潜堤周辺の波高は、水深急変部で波と潜堤の非線形干渉が強まるため、潜堤上で入射波高より大きく、特に潜堤端部付近で局所的な波の屈折や潜堤による散乱波の影響から、より大きくなる。また、潜堤岸側背後で波高の低減、潜堤周辺で回折波が明瞭にみられる。

図-4は、潜堤の中心線($y/L_i = 0$)での波高 H と平均水位 $\bar{\eta}$ を同時に示したものである。潜堤前面では入射波と潜堤からの反射波の相互干渉から約 $L_i/4$ 間隔ごとに腹と節が交互に現れる部分重複波の形成が認められる。

図-3 波高分布 ($\Pi=0.08$, $W/L_i=1.5$)

(a) 基本周波数

図-4 波高と平均水位の空間分布
($y/L_i=0$; $h/L_i=0.2$, $\Pi=0.08$)

(b) 2倍周波数

図-5 潜堤周辺の無次元波高スペクトル
($h/L_i=0.2$, $W/L_i=1.0$, $\Pi=0.08$)

潜堤上と潜堤岸側背後では、2次元の方が波高の低減が大きいことがわかる。これは、3次元の場合、潜堤両端部付近で波高が急激に増大し最初に砕波するため、後述するように、潜堤端部付近を中心とした円筒状に広がる高周波成分の自由波が新たに発生している可能性があり、これと砕波後再び波として形成される再生波が干渉し合い、2次元と比べて波高の低減が小さくなったと推測される。つぎに、平均水位は、砕波点(図中のB.P.)付近まで静水面より低下し、砕波点以降上昇し静水面より高い水位になることがわかる。また、2次元と3次元を比較すると、3次元では、砕波後波エネルギーが多方向に分散されるため平均水位の上昇は2次元に比べてやや小さい。

4.2 スペクトル解析結果

図-5は、無次元波高スペクトル $2A(f)/H_i$ ($A(f)$: 振幅スペクトル, f : 周波数) の鳥瞰図であり、(a) と (b) はそれぞれ基本、2倍周波数成分の場合を表す。潜堤背後領域において、基本周波数成分が減少している領域と波と潜堤の非線形干渉の影響から2倍周波数成分が増加

している領域は概ね一致しており、基本周波数成分の波エネルギーが高周波数成分へ移行していることがわかる。しかし、再生波形成後 ($x/L_i \geq 1.6$), 再び基本周波数成分は増大し、2倍周波数成分は変動しながら減衰する。潜堤背後領域以外では、2倍周波数成分は潜堤岸側端部を中心として周期的に変動している。2次元波動場で非砕波の計算を行った Massel (1983) によると、波と潜堤の非線形干渉から高次の周波数成分の自由波が発生し、2倍周波数成分は潜堤背後で周期性をもって変動すると述べている。本実験は砕波の場合であるが、上述した傾向とほぼ同様な傾向を示し、2倍周波数成分の自由波が発生している可能性があると考えられる。また、3倍周波数成分についても、2倍周波数成分と同様な傾向が認められたがその値は小さかった。紙面の制約上図示できないが、 $h/L_i=0.13$ の場合、 $h/L_i=0.2, 0.4$ と比べて、進行波は浅海性を帯びるため波と潜堤の干渉が強く、基本周波数成分は顕著に回折波がみられた。2倍周波数成分については、図-5(b) に示すようなピークを打つ波

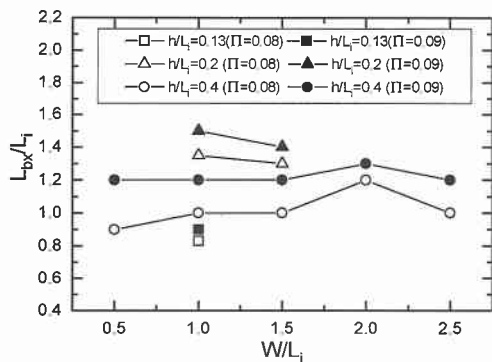
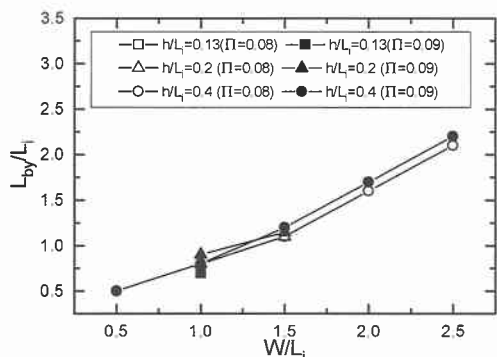

 (a) x 方向の最大破波持続距離

 (b) y 方向の最大破波持続距離

図-6 最大破波持続距離と堤長の関係

形が確認できなかった。

4.3 破波持続領域

図-6(a)と(b)は、それぞれ x, y 方向の無次元最大破波持続距離 $l_{bx}/L_i, l_{by}/L_i$ と W/L_i の関係を示したものである。図-6より、 W/L_i の増加に伴い、 l_{bx}/L_i はあまり変動していないものの、 l_{by}/L_i は潜堤背後領域が広がるため増加し、その増加率はほぼ一定である。また、 Π の値が大きくなると、 l_{bx}/L_i は増大するが l_{by}/L_i はあまり変化がない。このことは、入射波高の増加に伴い x 方向にのみ碎波の影響が持続することを意味している。そして、 h/L_i の違いによる l_{by}/L_i の影響はあまり認められず、 l_{bx}/L_i の場合 $h/L_i=0.2$ のとき最も大きくなっている。これは、この場合の碎波形式はS-P型碎波で最も碎波規模が大きかったためである。なお、ビデオの写真解析によると、 l_{bx}/L_i の生じる地点は、 W/L_i が大きくなるにつれて潜堤の中心線から潜堤端部の方にずれることが認められた。

5. 潜堤周辺の流速場

図-7(a), (b)は、それぞれ $z/h=-0.3, -0.9$ での潜堤周辺における定常流を示したものである。なお、定常流

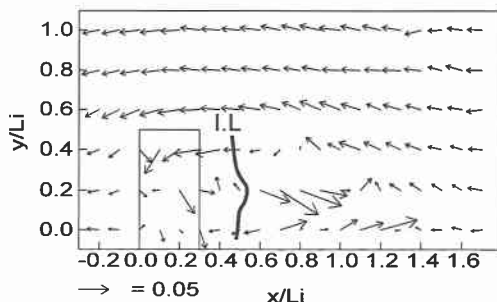
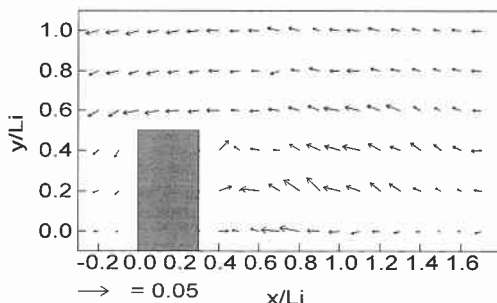

 (a) $z/h=-0.3$

 (b) $z/h=-0.9$

図-7 潜堤周辺における定常流

($h/L_i=0.2, \Pi=0.08, W/L_i=1.0$)

の流速は $\sqrt{gh}$ (g :重力加速度, h :静水深)によって無次元化している。図-7(a)から、潜堤の側方端部付近では、潜堤の中央部に比べて定常流の流速が大きく、潜堤中央に向かう定常流が発生しており、この流れは水深急変部での波の屈折や波と潜堤の干渉によって生じた散乱波の影響によるものと推察される。また、波頂部から飛び出した水粒子が、進行波前面に衝突する突込み線(図中のI.L.)以降で、強い岸向き流れが発生している。潜堤から離れた側方では、沖向き流れが卓越しており、この流れは碎波による岸向きへの質量輸送を補う補償流と考えられる。信岡ら(1993)は、小型平面水槽に矩形潜堤を設置し、水表面にフロートを浮かべることにより自由表面付近で循環流が発生することを観察している。信岡らの観察結果と本実験で得られた定常流特性をまとめると、3次元波動場の場合潜堤周辺の自由表面付近で平面2次元的な循環流が生じていると判断できる。次に、図-7(b)より、底層付近において $y/L_i=0.0\sim0.2$ の範囲でみられる戻り流れは、潜堤側方を通して沖側方向に出ていない。2次元波動場に設置された潜堤周辺の流速を計測した岩田ら(1996)によると、潜堤背後において、自由表面付近では強い岸向き流れ、中層および底層付近では沖向き流れとなる鉛直2次元的な循環流が発生すると報告しており、本実験においても、 $x/L_i=0.4\sim1.2, y/L_i=0.0\sim0.2$ の範囲で鉛直2次元的な循環流が発生

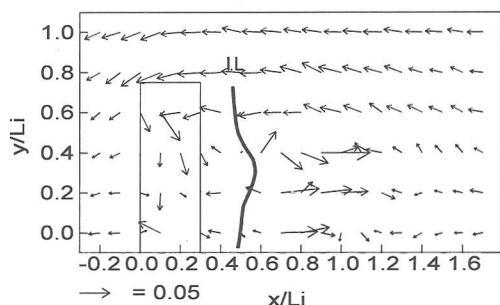


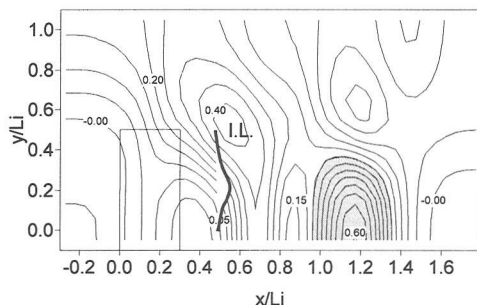
図-8 潜堤周辺における定常流
($h/L_i=0.2$, $\Pi=0.08$, $W/L_i=1.5$, $z/h=-0.3$)

していると考えても間違いなさそうである。図-8は、図-7(a)と比べて、 $W/L_i=1.5$ と異なる場合の定常流場を示したものであり、 $x/L_i=0.7\sim 1.2$, $y/L_i=0.0\sim 0.4$ の領域において岸向き流れが卓越している。また、 $W/L_i=1.0$ の場合の定常流特性と同様、潜堤周辺で平面2次元の循環流が形成されている。信岡ら(1993)の観察結果をみると、 $W/L_i=0.6$ の場合で、強い岸向き流れは潜堤中央で認められるが、本実験結果(図-7(a)と図-8)では、潜堤端部から中央に約 $0.35 L_i$ の位置で生じている。したがって、循環流の岸向き流れの卓越する位置は W/L_i に支配されると考えられ、 $W/L_i \leq 0.7$ の場合潜堤中央で生じると予想される。次に、図-9は、図-7と同条件下で、潜堤周辺の定常流の渦度を示したものである。なお、定常流の渦度 $\bar{\omega}_z$ は、定常流に対し式(1)を使って求めた。図-9(a)をみると、潜堤岸側端部付近で隅角部による影響から比較的規模が大きい渦が認められる。図-9(a)と(b)から、砕波形式がS-P型砕波であるこのケースでは、突込み線の背後において、図中の網掛け部で示す $x/L_i=0.9\sim 1.4$, $y/L_i=0.0\sim 0.4$ の領域(図-9(a))と $x/L_i=0.5\sim 1.0$, $y/L_i=0.0\sim 0.3$ の領域(図-9(b))で $\bar{\omega}_z$ が大きく、大規模渦が顕著に認められ、さらに $z/h=-0.3$ と -0.6 でその発生領域が異なっているため3次元性を帯びていることがわかる。

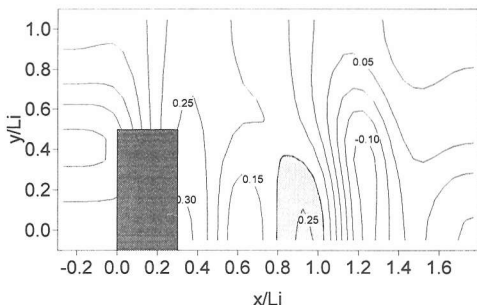
6. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 3次元波動場の場合、潜堤による砕波限界と砕波位置は、 $0.5 \leq W/L_i \leq 1.5$ の範囲で、 H_i/R と h/L_i でほぼ支配され、砕波形式は、 H_i/R の増加に伴い、Spilling型砕波、S-P型砕波、二段砕波へと移行する。
- 2) 波と潜堤の非線形干渉により、潜堤両端部を中心として円筒状に進行する高次の自由波が発生すると考えられる。
- 3) 砕波に伴い潜堤周辺で、潜堤岸側中央部で岸向き



(a) $z/h=-0.3$



(b) $z/h=-0.6$

図-9 潜堤周辺における定常渦度
($h/L_i=0.2$, $\Pi=0.08$, $W/L_i=1.0$)

流れ、潜堤側方部で冲向き流れとなる平面2次元の循環流と自由表面付近では強い岸向き流れ、中層および底層付近では冲向き流れとなる鉛直2次元の循環流が発生する。

- 4) 最も強い岸向き流れは、潜堤端部から中心方向に向かって約 0.35 波長付近で生じると判断される。

最後に、本研究を行うにあたり水理実験等に協力して頂いた名古屋大学大学院博士課程前期課程1年の新美達也君と安藤敏宏君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 青野利夫・Eric. C. Cruz・大中 晋・後藤智明(1995): 人工リーフ上の波と流れの現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 761-765.
- 岩田好一朗・川崎浩司・安藤敏宏(1996): 潜堤による砕波特性とその内部機構に及ぼす波と潜堤の幾何スケール比, 海洋開発論文集, Vol. 12 (印刷中).
- 合田良実(1983): 波浪の非線形性とその記述パラメーター, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 39-43.
- 信岡尚道・村上啓介・入江 功・松永厚彦・木原康成・牛房幸光(1993): 潜堤構造物の海浜流制御と海岸保全機能, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 261-265.
- Massel, S. R. (1983): Harmonic Generation by Waves Propagating over a Submerged Step, Coastal Eng. Vol. 7, pp. 357-380.