

人工リーフ上における波頂前面砕波の内部流速特性

斎藤 武久*・石田 啓**・大平 英継***

1. 緒 論

天端および法面上の強制砕波によって波浪を減衰させる人工リーフでは、発生する砕波形態の詳細な把握、それらの砕波の発生機構と波浪減衰特性の考究および砕波に伴う周辺流体場への影響の解明といった検討が必要不可欠である。これらに関して、最も基本的な形状の矩形潜堤の場合には既に多くの知見が得られている(例えば、片野ら, 1992; 滝川ら, 1995; 安田ら, 1997)。しかし、実際には法面勾配を有する人工リーフの場合、例えば、宇多ら (1988) による室内実験や清水ら (1993) による現地観測を挙げることはできるが、上述の検討課題に関しては、必ずしも十分な研究は行われていない。

このような観点から、著者ら (石田ら, 1999; Saitoh and Ishida, 2001) は詳細な室内実験結果に基づいて人工リーフ上の砕波形態の分類を行った結果、人工リーフ上では波頂前面から砕波が生じる特異な砕波形態 (波頂前面砕波) が存在することを明らかにした。

本研究では、さらに PIV および LDV を用いた波頂前面砕波の内部流速場の詳細な計測を行い、法肩から法面部で計測した速度ベクトル場の時間変化から、波頂前面砕波の発生機構と波浪減衰特性を考究する。また、底面付近の質量輸送流の空間分布および岸・沖方向への加速度の変化から、法先での洗掘現象に及ぼす波頂前面砕波時の周辺流体場の基本特性を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

図-1 に実験装置の概要を示す。実験には両端に吸収式造波装置を有する、長さ 14 m、高さ 1 m、幅 0.8 m の両面ガラス張りの 2 次元造波水槽を用いた。人工リーフの法面勾配には最も施工頻度の高い 1:3 (浅川ら, 1988) を採用し、堤体高は 20 cm とした。なお、人工リーフの模型は骨格のみ鋼製とするアクリル製とした。流体場へのレーザーシートの照射は、水槽中央底部に設けた 50 cm×50 cm の観測窓および人工リーフの天端と法面部

を通して行った。入射波は、波高 H が 2.0~10.0 cm で周期 T が 1.0~2.0 s の規則波を用い、水深 h を変化させることによって天端水深 R を変化した合計 200 ケースについて実験を行った。

本研究では、砕波変形過程の撮影には高速度ビデオカメラ (Kodak 社製) を用い、内部流速特性の計測には PIV (TSI 社製) および LDV (TSI/Aerometrics 社製) を用いた。ただし、PIV システムの計測時間間隔は 15 Hz (石田ら, 1999) が最小値であるため、砕波変形時における内部流速ベクトル場の時間変化特性の把握には PIV 計測を適用し、質量輸送流の空間分布、内部流速および加速度の時間変化特性の検討には LDV 計測を適用した。

実験に用いた LDV (4 W アルゴンレーザーを使用) は、水平および鉛直流速の同時計測が可能である。ただし、水平方向流速が卓越する底面付近では、水平および鉛直方向流速のサンプリング周波数を同時に 400 Hz 以上 (榊山・Liu, 2000) に保持することは困難なため、計測は卓越している水平方向流のみとし、水槽側面より 5 cm 離れた鉛直断面を対象に計測を行った。なお、PIV の構成および計測原理と手法に関しては、石田ら (1999) を参照されたい。

実験は、造波開始から 100 秒経過後の 100 s 間を対象とし、高速度ビデオカメラの撮影では、撮影時間間隔を

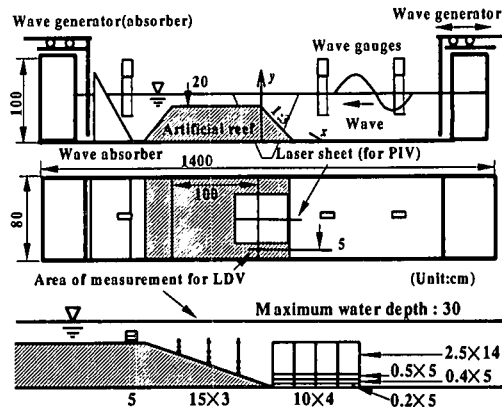


図-1 実験装置

* 正会員 博(工) 金沢大学講師 工学部土木建設工学科
** 正会員 工 博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
*** 修(工) 名古屋市

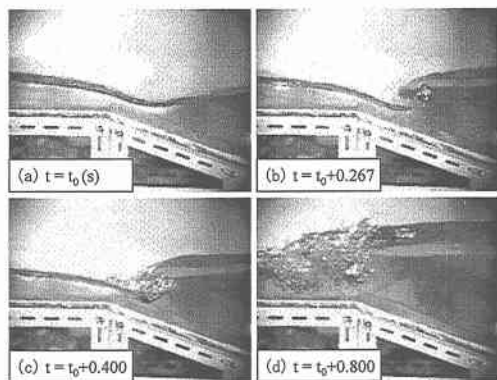


写真-1 波頂前面砕波の砕波変形過程
($H/h=0.27$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

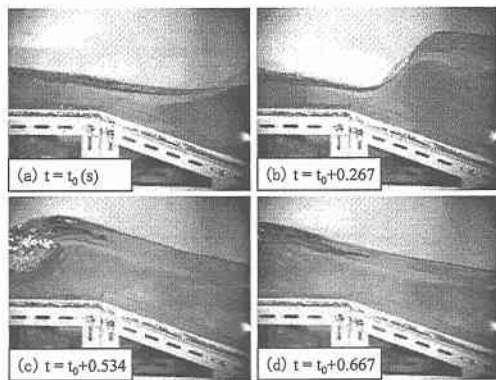


写真-2 巻き波砕波の砕波変形過程
($H/h=0.37$, $h/L=0.219$, $R/h=0.33$)

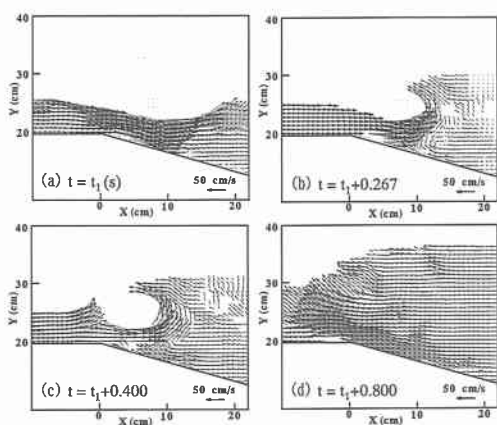


図-2 PIV による波頂前面砕波時の法肩部の速度ベクトル場 ($H/h=0.25$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

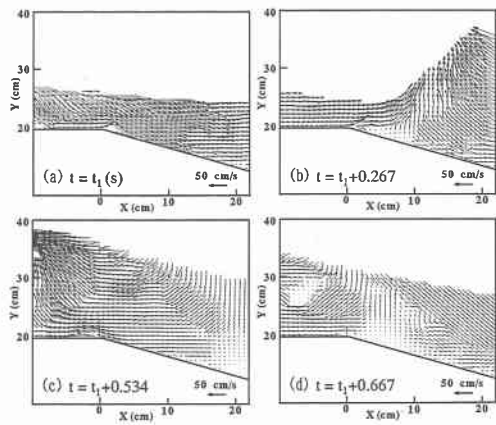


図-3 PIV による巻き波砕波時の法肩部の速度ベクトル場 ($H/h=0.37$, $h/L=0.219$, $R/h=0.33$)

1125 コマ/sとして2周期分の画像を取得した。PIV 計測では、計測開始から約2秒間で、16組32枚の画像データを取得し、相互相関法(Adrian, 1991)を用いて速度ベクトル場を算定した。また、LDV 計測では、不等間隔に計測されたデータを100 Hz 間隔のデータとなるように内挿し、流速および加速度の時間変化、さらに、質輸送流の算定を行った。なお、LDV 計測では、計測対象とする鉛直断面内において、計測点の鉛直位置を底面より1 cm までは2 mm 間隔、1~3 cm までは4 mm、3~5 cm までは5 mm、5 cm 以上は2.5 cm 間隔で設け、水平位置を法肩から法先を含む1.1 m の範囲で10点とし、各入射波ごとに、合計184点(図-1 参照)で計測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 波頂前面砕波の砕波変形課程

本研究で対象とする波頂前面砕波の一例を写真-1 に

示す。写真より、(a) 波峰部が法面へ進入した後、(b) 波頂前面から巻き波砕波が発生し、(c) 気泡を含んだボアが形成され、(d) 波頂部がボアを天端上へ押し上げて行くことが分かる。このように、波頂前面砕波では、波頂前面からの砕波に続き、波頂部が砕波することなく天端上へ進行する特徴がある。さらに、PIV 計測により取得された速度ベクトル場の時間変化を図-2 に示す。(a) 引き波時に法肩から法面に沿って強い沖向き流れが発生し、(b) 波頂前面部に巻き込みが形成され、(c) 波頂前面から砕波に至る。(d) 波頂部は法面へ進入する以前の流速分布を保ちながら天端上へ進行していることが分かる。なお、波頂前面砕波時における波頂前面からの砕波は、写真および速度ベクトル図に示された巻き波砕波に限らず、崩れ波砕波が発生する場合も確認されている(石田ら, 1999)。

写真-2 および図-3 に、波頂前面砕波の場合との比較のため、巻き波砕波時の砕波変形過程および速度ベクトル

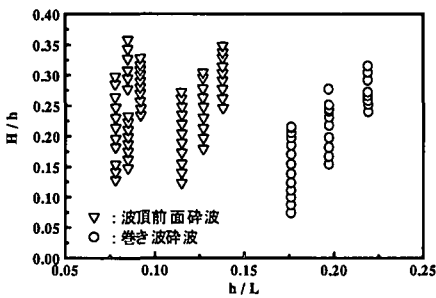


図-4 波頂前面砕波の発生条件

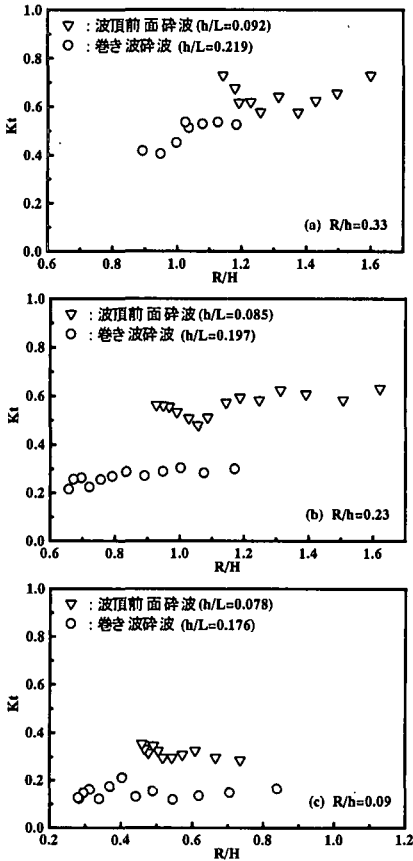


図-5 波頂前面砕波の透過率

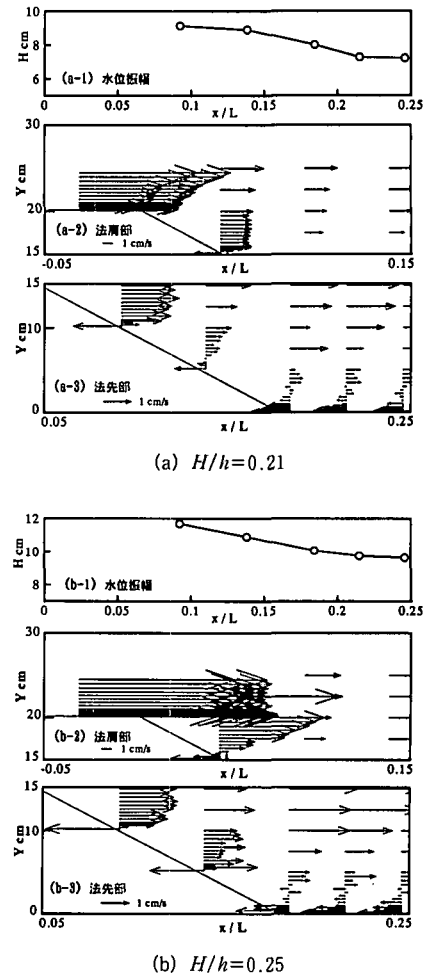
ル場を示す。波頂前面砕波の場合と同様に、引き波時に、法肩から法面に沿って冲向き流れが発生するが、巻き波砕波の場合、人工リーフ法面に波峰部が進入した後、波頂部が先鋭化し、波頂部からジェットが放出していることが分かる。

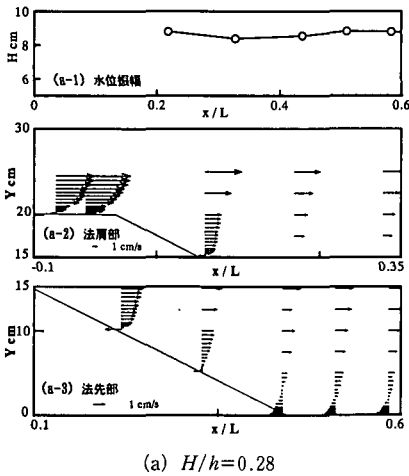
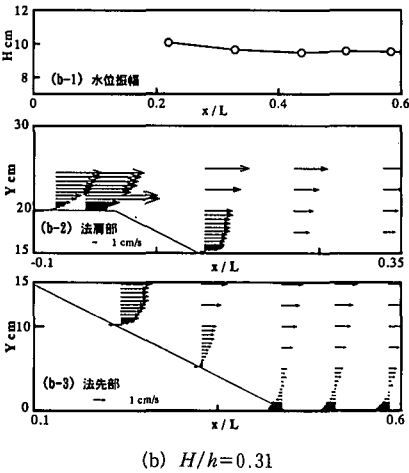
3.2 波頂前面砕波の発生条件および波浪減衰特性

図-4 に波頂前面砕波の発生条件を、巻き波砕波の場合と共に示す。図より、本研究の実験範囲では、波頂前面砕波の発生は相対水深 $h/L < 0.15$ になる。なお、入射

波の波高水深比が同じ場合、相対水深の減少に伴い法肩からの冲向き流速は増加することが石田ら (1999) により確認されている。このため、波頂前面からの砕波の発生の一因として、法肩から法面に沿った冲向き流速の増加が考えられる。

図-5 に波頂前面砕波および巻き波砕波時の波浪減衰特性を天端水深と水深の比 R/h ごとに示す。図より、 R/h が 0.23 を超える場合、波頂前面砕波時の透過率は 0.6 を上回る大きな値となることが分かる。なお、天端水深が大きい場合、巻き波砕波時の透過率も大きくなっているが、本研究で対象とした実験範囲においては、波頂部が砕波せず天端上へ伝播する波頂前面砕波の場合、透過率が極めて高くなり、結果として十分な波浪減衰効果が期待できないことになる。これに対して、天端水深小さい場合、巻き波砕波時の透過率は 0.2 を下回る極めて小さい値となり、波浪減衰効果が高いことが分かる。

図-6 波頂前面砕波時の LDV による質量輸送流の空間分布 ($h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

(a) $H/h=0.28$ (b) $H/h=0.31$ 図-7 巻き波砕波時の LDV による質量輸送流の空間分布 ($h/L=0.219$, $R/h=0.33$)

3.3 波頂前面砕波の質量輸送流および加速度特性

図-6 に, $h/L=0.092$, および $R/h=0.33$ の場合で, 波頂前面砕波発生時の質量輸送流の空間分布を示す. 図中の横軸は水平距離を入射波の波長で無次元化した値を示しており, $x/L=0.0$ が法肩の位置を表す. なお, 図の上

段が水位振幅の空間分布を表し, 中段および下段が法肩および法先付近の質量輸送流の空間分布を表す. 水位振幅の空間分布図より, 人工リーフ沖側では法肩部を腹とする部分重複波が形成されていることが分かる. さらに, 質量輸送流の空間分布の特徴として, $H/h=0.21$ および 0.25 の場合共に, 法肩付近の天端上において, 沖向きの強い質量輸送流が発生している. これは, PIV 計測で確認された引き波時に生じる強い沖向き流速に起因するものと考えられる. また, 法先および法面の底面付近では, 質量輸送流に岸向きの層が確認できる. この層は, 底面から離れた主流部とは異なった質量輸送流の逆転層になっている. なお, このような逆転層は, 直立堤前面における完全重複波のもとで, 底面付近に発生することが入江ら (1984) により指摘されているが, 砕波を伴う人工リーフ法先部においても同様な逆転層の発生が, 本研究により明らかになった. さらに, この逆転層の特徴として, 波高水深比の増加に伴って, 逆転層の層厚は増加することが分かる. このことは, 完全重複波の場合 (入江ら, 1984) と同様な傾向を示すものである.

砕波形態の違いによる質量輸送流の空間分布の違いを比較するため, 巻き波砕波時 ($h/L=0.219$, $R/h=0.33$) の場合を図-7 に示す. 図より, 巻き波砕波の場合, 図-6 に示した波頂前面砕波の場合よりも波高水深比は 0.28 および 0.31 と大きくなっているが, 波頂前面砕波の場合に比べ, 法肩付近の天端上で発生する沖向きの質量輸送流は極めて小さくなっている. さらに, 法面および法先部では, 質量輸送流の逆転層は発生しているが, 波頂前面砕波時の場合に比べて逆転層内の質量輸送流および層厚共に極めて小さいことが分かる.

次に, 波頂前面砕波発生時に上述の逆転層内における流速および加速度の時間変化を図-8 に示す. 図は, 鉛直位置を底面より 2 mm とし, 法先から沖方向に設けた 3 点の計測結果である. 図中において, 速度および加速度は, 岸向き方向 (波の進行方向) を正とし, 沖向き方向を負とした. 図より, 3 計測点共に加速度の最大値 (絶対値) は沖向き方向へ発生している. 結果として, 法先か

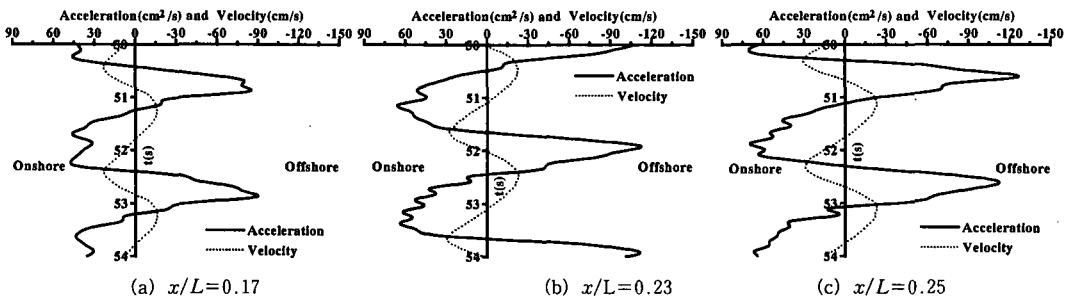
(a) $x/L=0.17$ (b) $x/L=0.23$ (c) $x/L=0.25$ 図-8 波頂前面砕波時に底面付近の質量輸送流逆転層内における流速および加速度の時間変化 ($H/h=0.25$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$, $y=0.2\text{ cm}$)

表-1 波頂前面砕波時に底面付近の質量輸送流逆転層内における加速度の最大値 ($h/L=0.092$, $R/h=0.33$)
(a) $H/h=0.21$

	$x/L=0.17$		$x/L=0.20$		$x/L=0.23$		$x/L=0.25$	
	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向
$y=1.0$	44.6	-75.4	50.2	-86.5	57.0	-92.3	62.5	-97.3
$y=0.8$	46.5	-78.0	51.9	-88.4	56.9	-92.9	63.8	-97.2
$y=0.6$	48.5	-76.8	50.2	-87.9	58.1	-91.9	63.3	-98.0
$y=0.4$	46.1	-74.1	52.6	-87.2	57.5	-93.6	64.0	-97.4
$y=0.2$	51.5	-78.4	57.4	-92.5	60.6	-98.4	60.6	-103.3

(b) $H/h=0.25$

	$x/L=0.17$		$x/L=0.20$		$x/L=0.23$		$x/L=0.25$	
	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向	岸方向	沖方向
$y=1.0$	53.7	-89.2	64.7	-103.5	68.5	-112.3	75.2	-116.1
$y=0.8$	57.0	-90.9	62.8	-103.9	65.7	-110.2	73.6	-118.8
$y=0.6$	52.5	-92.1	66.1	-105.7	68.3	-112.7	73.5	-116.6
$y=0.4$	57.9	-99.1	62.7	-104.2	72.9	-113.8	76.0	-120.6
$y=0.2$	73.1	-106.4	69.0	-109.1	78.6	-116.1	71.9	-122.5

(単位: cm/s^2)

ら $x/L=0.25$ の範囲の底面付近では、質量輸送流が岸向き方向へ発生するが、加速度の最大値の方向は逆転することが分かる。また、加速度の最大値は、法先から離れるほど値が大きくなっている。

さらに、図-8 に示した質量輸送流の逆転層内における加速度の最大値の空間分布特性を表-1 に示す。なお、表中の最大加速度の値は、計測時間内に求められたそれぞれ1波ごとの岸向き方向加速度（正）および沖向き方向加速度（負）の最大値（絶対値）の平均値を表している。表より、法先付近法先 ($x/L=0.17$) から $x/L=0.25$ の範囲では、計測位置が底面に近いほど、かつ法先から離れるほど沖向き方向加速度の最大値は増加することが分かる。

本研究で計測された、波頂前面砕波時の内部流速特性の範囲から、人工リーフ法面から法先部における底質の移動特性を議論することは今後の研究課題である。ただし、堤体上で砕波を伴う人工リーフ法面および法先部において、直立堤の場合と同様な質量輸送流の逆転層が存在すること、さらに、逆転層内において質量輸送流とは逆向きに加速度の最大値が作用することは、人工リーフ法先洗掘機構を考究する上で、極めて重要であると考えられる。

4. 結 論

本研究では、波頂前面砕波の内部流速場の詳細な計測をPIVおよびLDVを用いて行い、波頂前面砕波の発生機構と波浪減衰特性、さらに、法先での洗掘現象に及ぼす波頂前面砕波時の周辺流体場の基本特性を明らかにし

た。その主要な結論は以下のようにまとめられる。

1) 波頂部が法面へ進入する以前の流速分布を保ちながら天端上へ進行して行く波頂前面砕波の場合、人工リーフによる波浪低減効果が期待できない。

2) 波頂前面砕波時における質量輸送の空間分布から、法肩付近の天端上で沖向きに強い質量輸送流が発生し、底面付近では、底面から離れた主流部とは異なり、質量輸送流に岸向きの逆転層が発生する。

3) 波頂前面砕波時に底面付近で発生する岸向きの質量輸送流（逆転層内）において、加速度の最大値は沖向き方向に発生する。さらに、底面に近いほど、かつ法面から離れるほど沖向き加速度の最大値は増加する。

最後に、本研究を行うに際し、貴重な助言を頂いた京都大学防災研究所の間瀬肇助教授に深甚なる謝意を表す。また、終始助力を惜しまなかったジェイアール西日本コンサルタンツ（株）の森井靖博氏（当時、金沢大学大学院生）、石川県の河合勇人氏（当時、金沢大学4年生）、三谷商事（株）の宮下由実子氏（当時、金沢大学4年生）、金沢大学大学院生の村田康友氏、柴田律雄氏に厚く謝意を表す。なお、実験装置の作製には金沢大学技術支援センター諸氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 浅川 勉・佐藤弘和・ロノ町誠・野口正昭 (1992): 人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 656-660.
- 石田 啓・斎藤武久・大平英継 (1999): PIVによる人工リーフ上砕波時の速度ベクトル場に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 297-302.
- 入江 功・澁岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, pp. 3-52.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, pp. 38-62.
- 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 646-650.
- 橋山 勉・Liu, L.-F. P. (2000): 消波ブロック被覆堤による乱れに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 881-885.
- 清水琢三・今井澄夫・寺田賢二 (1993): 人工リーフ建設に伴う地形変化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 546-550.
- 滝川 清・山田文彦・松本健作 (1995): 潜堤上砕波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 66-70.
- 安田孝志・陸田秀実・小笠原敏記・多田彰秀 (1997): リーフ上のクノイド波の砕波特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 56-60.
- Adrian, R. J. (1991): Particle-image techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. J. Fluid. Mech.*, Vol. 23, pp. 261-304.
- Saitoh, T. and H. Ishida (2001): Kinematics and transformation of new type wave front breaker over submerged breakwater, *The 4th Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, ASCE, accepted.