

人工リーフ上の波頂前面砕波に伴う質量輸送流および乱れ特性

齋藤 武久*・村田 康友**・石田 啓***

本研究では、はじめに、アーセル数を用いて人工リーフ上での波頂前面砕波の発生条件を整理する。次に、波頂前面砕波時の質量輸送流および乱れ特性を法面および法先底面極近傍を含めた詳細な LDV 計測により実験的に明らかにする。実験結果より、主流部とは逆向きで、法先底面付近で発生する質量輸送流の逆転層は、波高水深比の増加に伴い層厚が増大し極値をもつが、より大きな波高水深比の範囲では層厚は減少することが分かった。また、砕波点付近の乱れ成分は、水平流速が負から正へ変化する半周期間に大きくなること、さらに、乱れ強度は砕波巻き込み部直下で最大となるが、底面付近でも砕波帯外に比べ大きな値となることが明らかになった。

1. 緒 論

外海からの波浪を天端および法面上の強制砕波によって減衰させる人工リーフでは、発生する砕波形態の把握、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が必要不可欠である。これらに関して、例えば、宇多ら (1988) の室内実験や清水ら (1993) の現地観測を挙げることができる。確かに、これらの研究成果は、人工リーフの設計指針を与えるために極めて貴重である。しかし、上述の検討課題に対して十分なデータが獲得されているとは言い難い。このような観点から、著者ら (石田ら, 1999; Saitoh・Ishida, 2001) は 150 ケースを超える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い、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。写真-1 にその砕波形態を例示するが、(a) 波峰部が法面へ進入した後、(b) 波頂前面からジェットを伴う砕波が発生し、(c) 気泡を含んだボアが形成され、(d) 波頂部がボアを押し上げながら砕波することなく天端上へ進行していく。このため、波頂前面砕波が発生する場合、透過波高が大きく、波浪低減効果を人工リーフに期待することは極めて困難となることが指摘されている。

一方、著者ら (齋藤ら, 2001) は、波頂前面砕波時の内部流速の PIV および LDV 計測を行い、波頂前面部での砕波の発生が天端上の強い冲向き流速と関連していることを明らかにした。さらに、人工リーフ法先底面付近において、直立堤の場合 (入江ら, 1984) と同様な主流部とは逆向きの質量輸送流の逆転層が発生すること、また、逆転層内における加速度の最大値は質量輸送流の方向とは逆向きに発生することを明らかにした。

これに続き、本研究では、はじめに、前報 (齋藤ら, 2001) の結果に新たな実験結果を加え、波頂前面砕波の

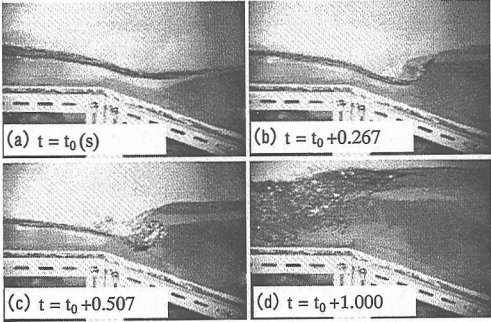


写真-1 波頂前面砕波の砕波変形過程
($H/h=0.28$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

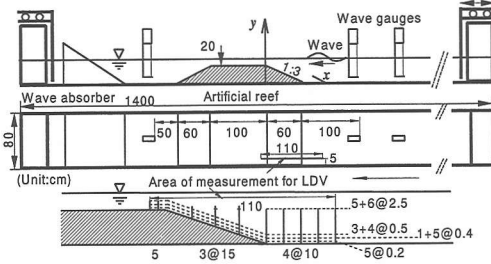


図-1 実験装置

発生条件の整理を新たに試みる。次に、人工リーフ法面から法先底面極近傍を含めた波頂前面砕波時の詳細な内部流速の LDV 計測を行い、リーフ法先部の底質移動に重要な影響を及ぼす法先底面付近の質量輸送流特性、特に、法先底面付近での質量輸送流の逆転層の特性を明らかにする。さらに、底質および浮遊砂の移動機構との密接な関係が指摘されている乱れ特性 (Ting・Kirby, 1994; 岡安, 1996; 榊山・Liu, 2000) を考究する。

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

* 正会員 博(工) 金沢大学講師 工学部土木建設工学科
** 修(工) 三井造船(株)
*** 正会員 工 博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

の法面勾配には最も施工頻度の高い1:3(浅川ら, 1992)を採用し、堤体高は20 cmとした。なお、人工リーフの模型はアクリル製とし滑面を対象とした。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 を変化させ、波頂前面砕波の発生条件に関して計105ケース(計測手法は斎藤ら(2000)を参照されたい。), 内部流速の測定に関しては計19ケースの実験を行った。なお、人工リーフ前面の2本の波高計データより入・反射波分離(合田ら, 1976)を行い、人工リーフ背後の波高計データより透過波高および水位上昇量の算定を行った。

実験に用いたLDV(TSI/Aerometrics社製, 4W アルゴンレーザーを使用)は、水平および鉛直の2方向流速の同時計測が可能である。ただし、各方向のレーザーの感度に違いがあり、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(神山・Liu, 2000)に保持することが困難であった。このため、最もサンプリング周波数が高い1方向のレーザーを用いて水平および鉛直流速をそれぞれ計測し、300 Hz以上のサンプリング周波数を維持するようにした。

LDV計測では、造波開始から100秒経過後の100 s間を対象とし、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を行い流速の時間変化を取得した。なお、計測断面は水槽側面より5 cm離れた鉛直断面を対象とし、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 波頂前面砕波の発生条件

前報(斎藤ら, 2001)では、波頂前面砕波の発生条件を波高水深比と水深波長比との関係で整理した。その結果、 $h/L < 0.15$ が波頂前面砕波の発生条件の目安となることが明らかになっている。ただし、上述の結果は、波形勾配の情報を反映しておらず、 $h/L > 0.15$ の範囲で発生していた巻き波砕波の発生条件との対比に留まっていた。そこで、ここでは前報と本研究で得られた $h/L = 0.15$ 付近での実験結果を加え、水深別に $(H/L)/(h/L)^2$ を用いて波頂前面砕波の発生条件の整理を試みた。

図-2に水深別に、 $(H/L)/(h/L)^2$ によって整理した波頂前面砕波の発生条件を示す。図中、その他の砕波形態とは、砕波が波頂部から発生する、崩れ波砕波、巻き波砕波、あるいは、崩れ-巻き波砕波(宇多ら, 1988)などを含む。図より、波頂前面砕波の発生は、 $(H/L)/(h/L)^2 > 10 \sim 15$ 、として、アーセル数を用いて整理できることが分かった。なお、人工リーフ上での砕波の場合、一樣斜面上とは異なり、同じ入射波周期の場合、波高水深比が

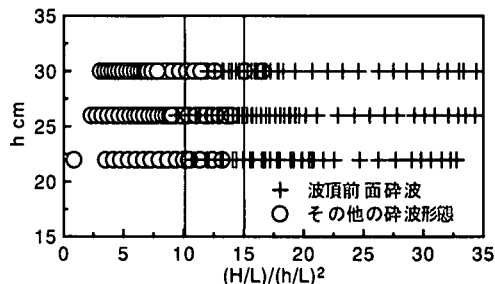


図-2 波頂前面砕波の発生条件

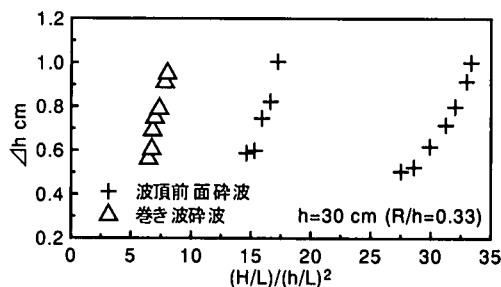


図-3 人工リーフ背後域の平均水位上昇量と砕波形態

小さいとき、つまり、波形勾配が小さい範囲において、崩れ波砕波が天端上で発生することを確認している。

ところで、波頂前面部での砕波の発生には、引き波時における天端上や法面上での強い沖向き流速の発生に強く関係することが確認されている(斎藤ら, 2001)。強い沖向き流速の発生には、人工リーフ背後域での平均水位の上昇が考えられる。このため、波頂前面砕波の発生条件を人工リーフ背後域での平均水位上昇量を用いて整理できる可能性がある。しかしながら、波頂前面砕波および巻き波砕波は、波長水深比は異なるが、ともに波高水深比が大きな範囲で発生することが確認されている(斎藤ら, 2001)。さらに、図-3に、水深 $h=30$ cmの場合で、人工リーフ背後域での平均水位の上昇量が0.5 cm以上を記録した場合の砕波形態を例示するが、確かに波頂前面砕波の発生条件を人工リーフ背後域の平均水位上昇では整理できないことが分かる。なお、本研究では、水深波長比(入射波周期)に関わらず、波高水深比の増加に伴って、人工リーフ背後域での平均水位上昇量がほぼ単調に増加傾向を示すことを確認している。

3.2 波頂前面砕波時の質量輸送流特性

人工リーフ周辺の底質移動機構を解明するうえで、質量輸送流の空間分布特性の把握は極めて重要である。図-4に、波頂前面砕波発生時($H/h=0.21$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)の質量輸送流の空間分布を例示する。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、(a)が水位振幅の空間分布を表し、(b)および(c)が法肩および法先

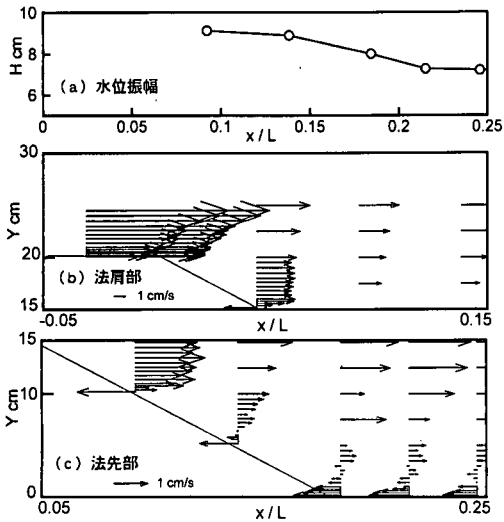


図-4 波頂前面砕波発生時の質量輸送流の空間分布 ($H/h=0.21$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

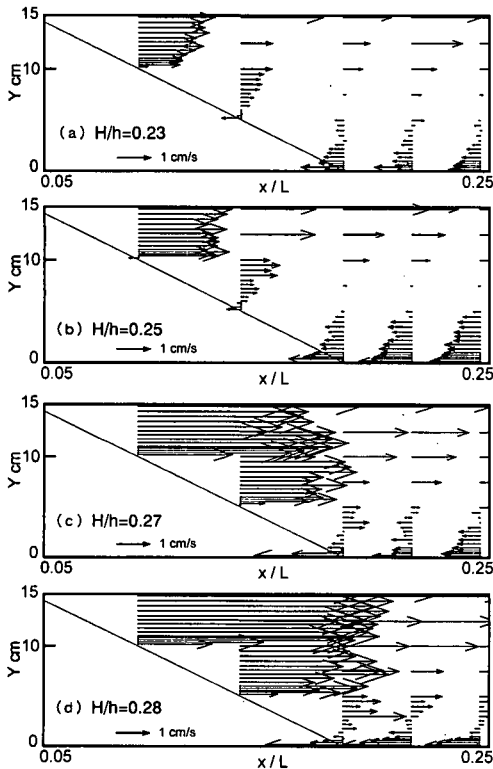


図-5 波高水深比の変化に伴う質量輸送流の空間分布

付近の質量輸送流の空間分布を表す。(a)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は、(b)より法肩付近の天端上において、冲向きの強い質量輸送流が発生していること、また、(c)より、法

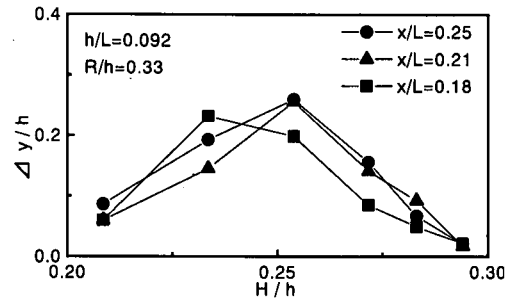


図-6 波高水深比の変化に伴う逆転層厚の変化

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。この層が、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である。直立堤前面での完全重複波のもとでは、底面付近に発生することが入江ら(1984)により既に指摘され、入射波波高の増加とともに逆転層の層厚が増大することが報告されている。これに関して、図-5に図-4の場合より(a) $H/h=0.23$, (b) $H/h=0.25$, (c) $H/h=0.27$ および (d) $H/h=0.28$ と波高水深比を増加させた場合の法先付近での質量輸送流の空間分布を例示する。図より、(a)および(b)に示すように、波高水深比が増加するとともに逆転層内の質量輸送流速および層厚は増大するが、さらに大きな波高水深比となる(c)および(d)の範囲では、逆転層内の質量輸送流速は増大しているが、層厚は減少していることが分かる。この理由の一つとして、波高水深比の増加とともに逆転層厚は成長するが、より波高水深比が大きな範囲では、天端および法面上において強い冲向きの質量輸送流速が発達し、逆転層の成長が抑制されることが考えられる。なお、図-6に法先底面付近の各計測位置での波高水深比と層厚との関係を示すが、逆転層の層厚は波高水深比が増加するとともに増大し極値をもち、さらに大きな波高水深比の範囲では減少し、計測位置に関わらず逆転層厚はほぼ同じ値に近づいていることが分かった。

3.3 波頂前面砕波時の乱れ特性

波頂前面砕波時の質量輸送流の特性に加えて、そのときの浮遊砂の移動機構を解明するためには、乱れ特性の把握が必要である。ここでは、波頂前面砕波時におけるパワースペクトル、乱れ成分の時間変化および乱れ強度についてそれらの基本特性を示す。

図-7に波頂前面砕波時 ($H/h=0.28$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$) における水平流速のパワースペクトルの空間分布特性を例示する。図中、(a)は砕波点位置 $x/L=0.046$ の砕波巻き込み部直下で、底面(法面上)より3.6 cmの位置、(b)は砕波点位置 $x/L=0.046$ の底面(法面上)近傍で、底面より0.4 cmの位置、(c)は砕波帯から沖方向に離れた $x/L=0.25$ の底面より4 cmの地点にお

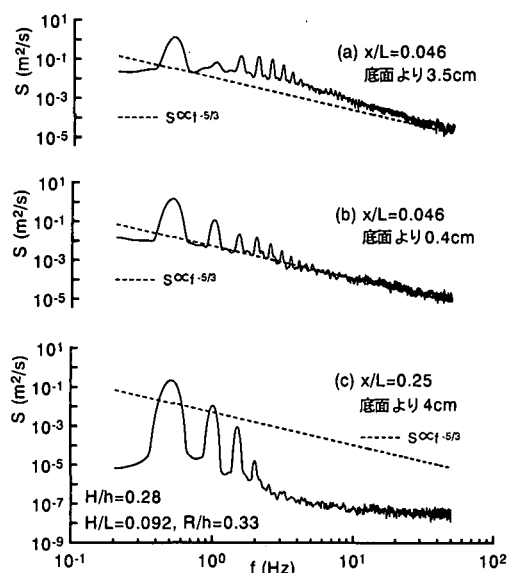


図-7 水平流速のパワースペクトル
($H/h=0.28$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

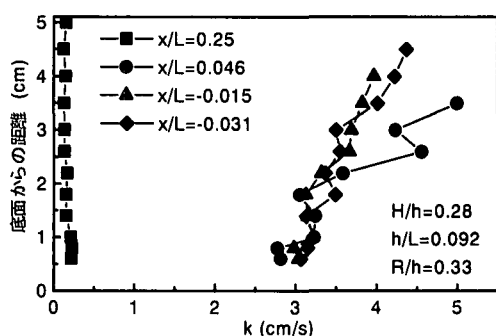


図-9 波頂前面砕波時の乱れ強度

ク被覆堤の場合(榊山・Liu, 2000), 砕波点直下ではなく, 砕波による乱れが十分発達した堤体に近い領域で確認されているが, 本研究で対象とした人工リーフ上の波頂前面砕波時には, 砕波点直下の底面付近でも慣性領域が確認された。このことは, 砕波による低周波の強い乱れは底面に向かって減衰するが, 底面付近まで乱れが十分に発達していることを示している。一方, 砕波帯から離れた(c)では, (a)および(b)で確認された砕波による低周波域での乱れは発生していないことが分かる。

次に, 波頂前面砕波に伴う乱れ成分の発生位相を明らかにするために, (a)砕波点直下の底面より1.4 cm および(b)底面近傍の底面より0.4 cm, (c)砕波帯外 $x/L=0.25$ の底面より0.4 cm の位置における水平流速の時間変化を平均流速および乱れ成分とともに図-8へ例示する。なお, 平均流速と乱れ成分を分離するためには, 様々な方法があるが, 本研究では, 榊山・Liu (2000) に倣い, 閾値の周波数として4 Hzを採用し, ローパスフィルターを用いて波動運動としての平均流速を求め, 計測データと平均流速との差を乱れ成分として定義した。図より, (a)および(b)ともに, 乱れ成分は水平流速が負から正へ変化する半周期間で大きくなることが分かる。砕波点付近では上述の位相が, 引き波時から波頂前面部における砕波時に相当する。結果として, 乱れ成分の発生は波頂前面砕波の砕波過程と強く関連することを示している。さらに, (a)の場合に比べてより底面に近い(b)の場合, 乱れ成分の大きさが減少していることが分かる。一方, 底面からの計測位置が(b)と同じで, 砕波帯外の(c)の場合, (b)で確認された乱れ成分は発生していなかった。本研究では, 底面が滑面であるため, 上述の乱れ成分は, 底面による影響ではなく, 砕波の発生によって生じていることを示していることになる。なお, 乱れ成分が底面に向かって減少する図-8の結果は, パワースペクトルが砕波点直下から底面近傍に向かって減少する図-7の傾向に一致している。

上述した乱れ成分から求めた波頂前面砕波時 ($H/h=$

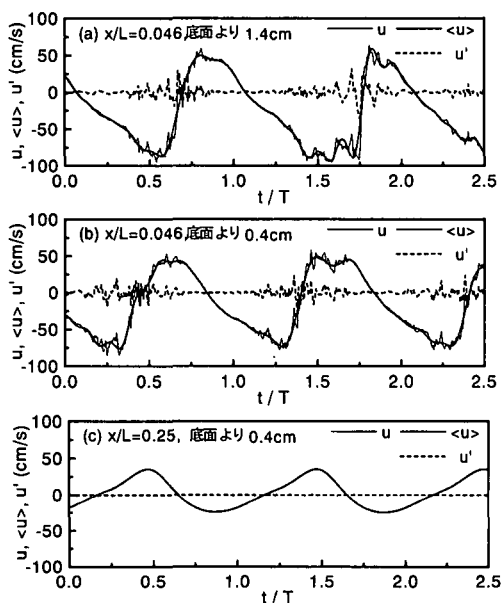


図-8 水平流速の時間変化
($H/h=0.28$, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)

ける計測結果である。図より, (a)の砕波点直下では低周波数域のスペクトルの値が相対的に大きくなり, 砕波点の底面近傍面(b)ではそのスペクトル値が減少し, 砕波による低周波の強い乱れ(岡安, 1996)が底面に向かって減衰することが分かる。また, (b)では, スペクトルが周波数 f の $-5/3$ 乗に比例する慣性領域(榊山・Liu, 2000)が確認できる。このような慣性領域は, 消波プロッ

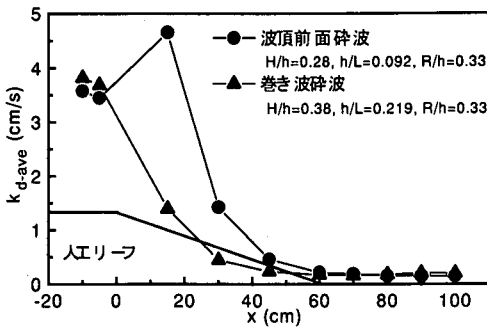


図-10 波頂前面砕波時の水平乱れ強度

0.28, $h/L=0.092$, $R/h=0.33$)の時間平均乱れ強度の空間分布を図-9に例示する。ただし、本研究では、最もサンプリング周波数が高い1方向のレーザーを用いて水平および鉛直流速をそれぞれ計測している。このため、水平乱れ強度 k_x および鉛直乱れ強度 k_y をそれぞれ水平および鉛直方向流速の乱れ成分 u' および v' の絶対値の時間平均値として定義し、両者の平均値から時間平均乱れ強度 k を定義した。なお、計測されたデータの30周期分のデータを用いて時間平均を計算した。図より、砕波点位置 $x/L=0.046$ および天端上 $x/L=-0.015, -0.031$ の砕波帯では、底面に向かって乱れ強度が減少していることが分かる。このことは、図-7および図-8に示した水平方向流速のパワースペクトルおよび乱れ成分の鉛直方向への変化特性と同様であり、砕波による乱れ強度が底面に向かって減衰することを示している。ただし、底面極近傍付近でも乱れ強度は砕波帯外に比べて10倍を超える大きな値となっていることが分かる。

さらに、図-9で定義した水平方向乱れ強度の時間平均値を水深方向に平均化した水平方向乱れ強度の岸沖分布(比較のため巻き波砕波の場合も表示)を図-10に示す。波頂前面砕波の場合、乱れ強度は法先から法面上の砕波点位置に向かって増加し極値を示した後、天端上で減少する傾向が確認できる。一方、巻き波砕波の場合、法面上では乱れ強度に極値は現れず、天端上で極値が発生していることが分かる。この違いは、それぞれの砕波形態における砕波点位置の違いに対応するものである。

4. 結 論

本研究では、はじめに、人工リーフ上における波頂前面砕波の発生条件を新たに整理した。次に、波頂前面砕波時の内部流速場の詳細なLDV計測を行い、人工リーフ法先底面付近での質量輸送流の空間分布特性および乱れ特性について実験的に考究した。その主要な結論は以下のようにとまとめられる。

1) 波頂前面砕波の発生条件は $(H/h)/(h/L)^2 > 10 \sim 15$, つまり、アーセル数を用いて整理できる。なお、人工リーフ背後域での平均水位の上昇量と波頂前面砕波の発生条件には明確な関係は認められなかった。

2) 波頂前面砕波時の人工リーフ法先底面付近では、質量輸送流に主流とは方向が異なる岸向きの逆転層が存在する。さらに、逆転層の層厚は波高水深比が増加するとともに増大し極値をもつが、さらに大きな波高水深比の範囲では、天端および法面上に発達する沖向きの質量輸送流の影響を受けて層厚は減少する。

3) 波頂前面砕波時の砕波点付近における乱れ成分は、水平方向流速が負から正へ変化する半周期に大きくなる。さらに、乱れ強度は砕波点直下で最大となり、底面に近づくほどその値は減少するが、底面極近傍でも乱れ強度は砕波帯外に比べて大きな値となる。

最後に、本研究を行うに際し、終始助力を惜しまなかった岩手県の伊香和歌子氏(当時、金沢大学4年生)、国土交通省の大橋由紀子氏(当時、金沢大学4年生)、金沢大学大学院生の柴田律雄氏に厚く謝意を表す。

参 考 文 献

- 浅川 勉・佐藤弘和・口ノ町誠・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・灘岡和夫・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一, 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.
- 岡安章夫(1996): 砕波帯における粗底面上の流速場の特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 41-45.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No. 248, pp. 1-24.
- 斎藤武久・石田 啓・大平英継(2001): 人工リーフ上における波頂前面砕波の内部流速特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 926-930.
- 柳山 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.
- Saitoh, T. and H. Ishida(2001): Kinematics and Transformation of New Type Wave Front Breaker over Submerged Breakwater, Proc. of the 4th Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, ASCE, pp. 1032-1041.
- Ting, F. C. K. and J. T. Kirby(1994): Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone, Coastal Engineering, 24, pp. 51-80.