

斜面上における不規則波の碎波変形と 底面流速に関する実験的研究

佐藤 慎司*・福濱 方哉**・堀川 清司***

1. 緒 言

斜面上における不規則波のもとでの底面流速変動の特性を理解することは現地海岸での砂移動現象を解明するうえで極めて重要である。不規則波のもとでの漂砂現象に関しては、二次元造波水槽を用いた大塚ら¹⁾、入江ら²⁾の研究や振動流装置を用いた佐藤ら³⁾の研究が行なわれ、底面近傍の水理特性と底質の移動機構との関係が議論されてきた。しかし、漂砂現象の直接の外力となる底面流速変動に関しては、定常流成分の特性や波の非線形性の影響の評価法など未だ不明確な部分が多い。

傾斜海岸における不規則波浪にともなう流速場に関しては、堀川ら⁴⁾、磯部ら⁵⁾、Guza・Thornton⁶⁾らによる電磁流速計を用いた現地観測により内部機構の解明が進められてきた。流速場の予測に関しても、小山ら⁷⁾、磯部・大中⁸⁾による線形フィルターや流れ関数法に基づくものや、Elgar・Guza⁹⁾による非線形波動理論に基づく研究などによりその予測手法の改良が進められてきた。一方、室内実験による研究例としては、超音波流速計による Iwagaki et al.¹⁰⁾ の研究、レーザ・ドップラ流速計による Vis¹¹⁾、Anastasiou et al.¹²⁾ の研究などがあり、また、これらの報告をもとに Dean・Perlín¹³⁾ は種々の波動理論の適用性を検討している。しかし、傾斜海岸上の不規則波浪場においては碎波に伴う種々の現象が複雑に重合しており、その特性を解明するためには今後も現地観測と詳細な室内実験を平行して継続していく必要がある。

本研究では、斜面上における不規則波のもとでの底面流速変動の特性を明らかにすることを目的として、二次元造波水槽に規則波とそれに対応する条件の不規則波を発生させ、碎波帯外から汀線近傍までの広い範囲にわたって水位変動と底面流速変動を詳細に測定した。そして、波の不規則性が斜面上における波・流れの諸特性に及ぼす影響を考察するとともに、底面流速変動の合理的な評価法について検討した。

2. 実験方法および実験条件

実験には図-1に示すような長さ 23.6 m、幅 0.8 m、深さ 1 m で一端にピストン型の不規則波造波装置を有する二次元水槽を用いた。水槽内に 1/20 勾配のステンレス製斜面を設置し、規則波および不規則波を発生させて実験を行なった。なお、波形の二次元性が保てるように汀線近傍の一部の区間には水路の中央に合板製の仕切り板を置いた。一様水深部の水深は 40 cm とし、碎波帯外から静水汀線に至るまでの長さ 4.75 m の区間内の 15 点において水位変動と底面上 5 mm の点の流速変動を同時に測定した。水位変動は容量式波高計で測定するとともに、ビデオカメラで碎波の形式を記録した。さらに、測定地点を通過する波が碎波している時にはパルス信号を発生させ同時に記録することにした。なお、一様水深部には 2 本の波高計を設置し、反射率の測定も行なった。底面流速変動は水平・鉛直成分を二成分レーザ・ドップラ流速計 (DISA 社製) を用いて後方散乱方式で測定した。十分な強度の散乱光を得るために水中に少量の白色ペイントを混入し、レーザの出力は最大の 4 W で使用した。各測定器からの出力はサンプリング間隔 0.02 s で AD 変換し、磁気テープに記録した。各測定点における測定時間は規則波条件においては 60 秒間、不規則波条件においては 360 秒間である。

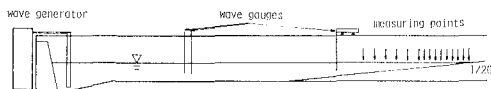


図-1 実験装置

規則波は関数発生器から正弦波を入力することにより発生させた。不規則波条件に対しては水位変動が Bretschneider・光易型のスペクトル特性を有するように電子計算機で信号を作成し、それを DA 変換してデータレコーダに記録したものを全ての実験で繰り返して使用した。実験は周期が同じで波高の異なる 3 種類の規則波と、それぞれに対応する条件の不規則波とした。各ケースにおける一様水深部における有義波周期 $(T_{1/3})_i$ 、水深 h_i 、有義波高 $(H_{1/3})_i$ 、碎波点における有義波高

* 正 会 員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 正 会 員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表-1 実験条件

ケース	$(T_{1/3})_t$ (s)	h_t (cm)	$(H_{1/3})_t$ (cm)	$(H_{1/3})_b$ (cm)	x_b (cm)	備考
1	1.21	40.0	8.6	9.8	325	不規則波
2	1.21	40.0	6.5	7.4	275	
3	1.20	40.0	5.1	5.6	175	
4	1.18	40.0	9.9	11.6	286	規則波
5	1.18	40.0	8.0	9.8	227	
6	1.18	40.0	6.1	8.0	181	

$(H_{1/3})_b$ と碎波点位置 x_b をまとめて 表-1 に示す。ここで、不規則波条件における碎波点とは、有義波高が最大となる地点としている。なお、不規則波による実験では、測定点を移動するごとに水槽内の水が静水状態に戻るまで十分に待ち、さらに造波開始から測定開始までの時間を一定に保つことにより、各測点での測定をできるだけ同一の条件で行なえるようにした。斜面による反射率は 5%~8% 程度であり、碎波形式はすべてのケースで spilling と plunging の中間型となることが多かった。なお本論文では、水平流速成分は岸向きを正とし、 x 軸は静水汀線から沖向きにとることとする。また紙数の制約上ケース 2 とケース 5 における水位変動と水平流速成分の測定結果を中心に考察を加える。

3. 水位変動と流速変動のクロススペクトル

図-2 はケース 2 における記録のスペクトル解析例で、上から順にパワースペクトル、伝達関数、位相差、コヒーレンスを示している。ただし、流速変動のパワースペクトルは g/d で、伝達関数は $\sqrt{g/d}$ で除して描い

ている。ここで g は重力加速度、 d は平均水深である。また、伝達関数の図中破線は線形理論による理論値を示している。

碎波がほとんど生じていない $x=275$ cm では水位・流速ともにエネルギーはピーク周波数付近に集中している。また伝達関数は線形理論値にはほぼ一致し、両者のコヒーレンスも極めて高い。碎波している波の割合が 30% 程度となる $x=150$ cm の地点では、波の非線形性と碎波の影響により、流速変動には特に長周期成分が顕著となり、また倍周波数成分にもスペクトルのピークがあらわれている。水位と流速の線形性は崩れてくるが、ピーク周波数付近における両者のコヒーレンスは高い。これに対し、ほとんどの波が碎波している $x=75$ cm の地点では長周期成分と高周波数成分がますます卓越し、スペクトルのピークが不明確となってくる。伝達関数の値は線形理論値より全般に 20~30% 程度小さくなり、ピーク周波数付近においてもコヒーレンスの低下が認められる。周波数が 0.1 Hz 以下の長周期成分は、水位と流速の位相差がほぼ $-\pi/2$ で安定しており、この周波数帯においては斜面上における重複波成分が卓越していると考えられる。

以上のスペクトル特性をもとに、斜面上における不規則波浪場の水位変動と底面流速変動は、定常成分、岸に近づくにつれ卓越してくる長周期成分、入射波のエネルギーが集中しているいわゆる波動成分、碎波の影響等で顕著となる乱れ成分に分離して取り扱うのが妥当であると考え、今回の実験条件に対しては 図-2 の解析結果

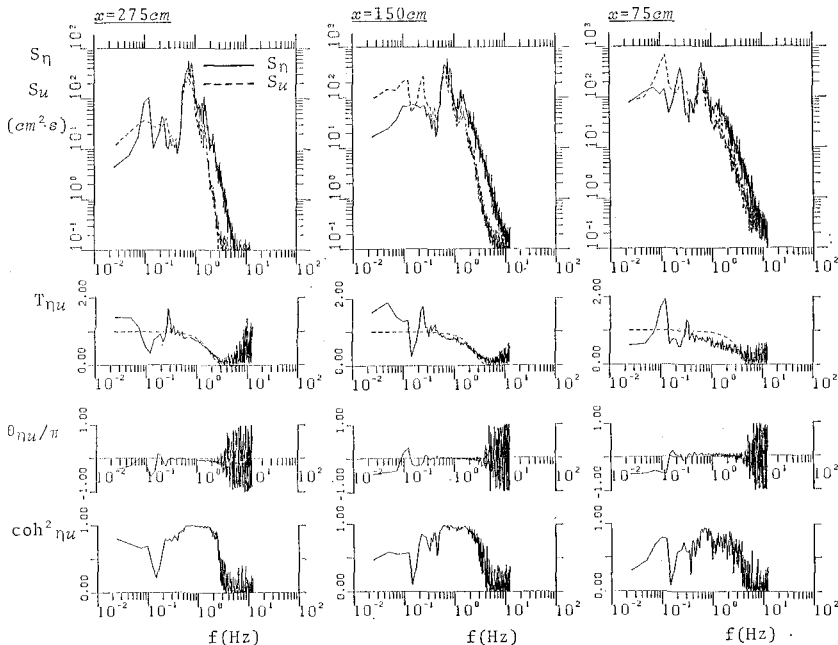


図-2 水位変動と底面流速変動のクロススペクトル (ケース 2)

をもとに周波数が 0.25 Hz から 5 Hz までの成分を波動成分とみなして以下の議論をすすめることにする。

4. 斜面上における底面流速変動の代表値の特性

底面流速変動の評価法を考察する前に、今回の実験条件における不規則波とその内部流速場の 2, 3 の特性を規則波条件の結果と比較しながら述べておく。図-3, 4 はそれぞれ平均水位と定常流速の分布を示したもので、左図が不規則波、右図が規則波に対するものである。横軸は碎波点位置の座標 x_b で無次元化して描いてある。碎波帯外では平均水位は低下し、定常流速は岸向きとなっている地点が多いが、いずれもその絶対値は小さい。碎波帯内では平均水位は汀線に向かって上昇を続けるが、定常流速は沖向きの最大値をとったあとと減少していく。規則波と比較すると不規則波では平均水位・定常流速ともにその絶対値は小さい。また不規則波では、平均水位は碎波点からゆるやかに上昇し、汀線近傍で急勾配となるのに対し、規則波では碎波点付近で急激な変化がみられる。定常流速も同様で、規則波では碎波直後に最大値をとるのに対し、碎波率が 60% 程度となる $x/x_b=0.3$ 付近で最大となるのが不規則波の特徴である。

次に、図-5, 6 はそれぞれ有義波高 $H_{1/3}$ と平均水深 d の比、有義波動流速全振幅 $\hat{u}_{1/3}$ と $\sqrt{gd}$ の比を示したものである。 $H_{1/3}$ と $\hat{u}_{1/3}$ はそれぞれ水位変動と流速変動の記録に、0.25 Hz から 5 Hz までの変動成分を通過させるバンドパスフィルターをかけた後、ゼロダウンクロス法で解析して求めた。今回の実験条件に対しては H/d と $\hat{u}/\sqrt{gd}$ はともに、不規則波では汀線に近づくにつれて徐々に上昇し続ける傾向がある。これは、波の不規則性の他に汀線近傍で顕著となる長周期変動の存在にも起因する不規則波浪場の特徴と考えられるが、その機構の解明と定量化については今後もさらに広範な条件に対して詳細な検討を続けてい

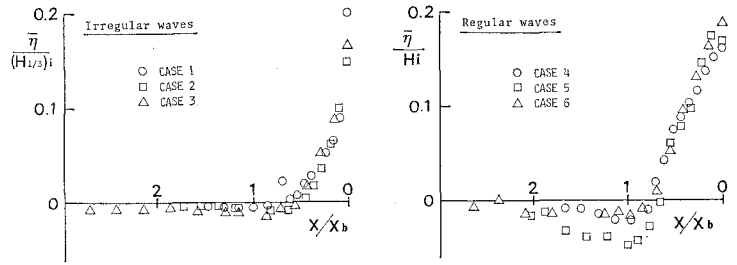


図-3 平均水位の分布

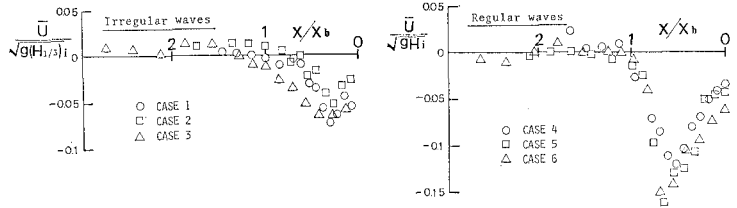


図-4 定常流速の分布

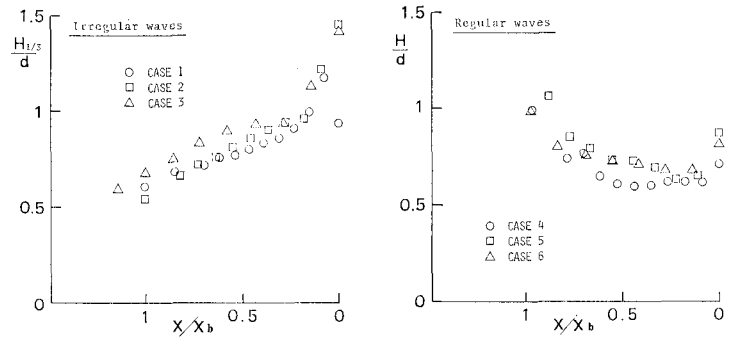


図-5 波高水深比の分布

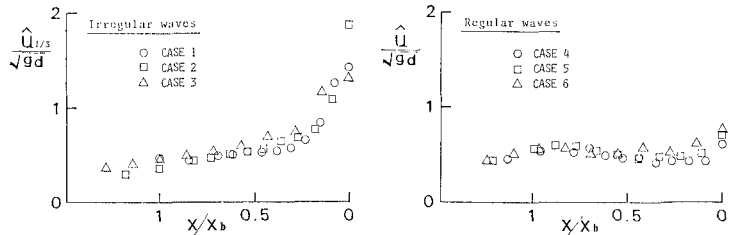


図-6 無次元流速全振幅の分布

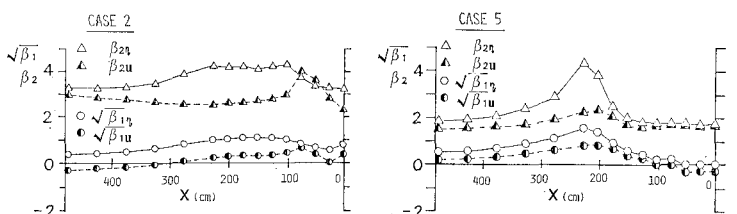


図-7 水位変動と流速変動のひずみ度および尖鋭度

くことが必要である。

漂砂の移動方向を考えるうえでは底面流速変動の非対称度を評価することも重要である。図-7 は流速波形の歪み度 $\sqrt{\beta_1}$ と尖鋭度 β_2 を表面波形のそれらとともに示したものである。それぞれのケースにおける碎波点はケース 2 では $x_b=275$ cm, ケース 5 では $x_b=227$ cm である。歪み度、尖鋭度ともに流速波形より表面波形の方が大きくなる傾向が認められる。また不規則波の底面流速波形は、規則波と異なり、碎波帯外では歪み度が負、尖鋭度が 3 より小さくなる傾向があり、また碎波帯内においては歪み度、尖鋭度ともに汀線極く近傍で最大値をとる。このように流速変動の非対称度や先述の定常流速の分布などは規則波と不規則波で分布特性がかなり異なるため、海浜変形過程を解釈する際にもこれらの特性の違いに起因する砂移動機構の変化を考察することが重要であると考えられる。

図-8, 9 はそれぞれ有義波高, 碎波率, 平均水位の分布と底面流速の有義全振幅と定常流速の分布を示したものである。図中には、各点における実測波高をもとに評価した諸量の計算値も合わせて示してある。

図-8 において平均水位の計算値 (●印) は、最も沖側の測定値を境界条件として与え、radiation stress を根自乗平均波高 H_{rms} をもとに評価することにより計算した。計算値は不規則波では碎波帯内の上昇量をやや過大評価するものの良好な評価が行なえているのに対し、規則波では碎波点付近でその変化量を過大評価する傾向がある。ただし、規則波の場合に対しても碎波帯内における分布特性はある程度再現されており、碎波点よりやや

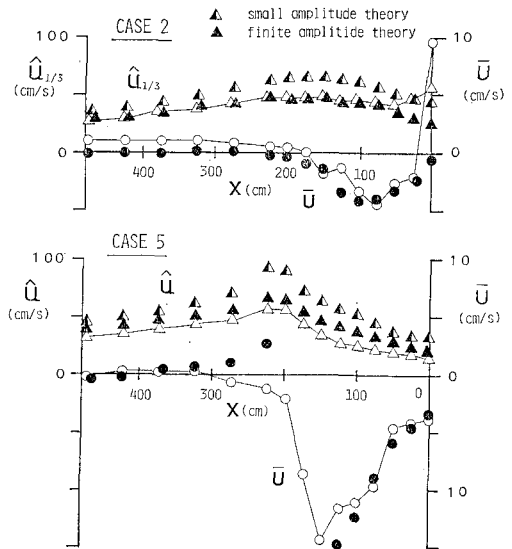


図-9 流速全振幅と定常流速の分布

岸側で境界条件を与えて計算すればさらに精度良く評価できると考えられる。

図-9 において流速全振幅は、不規則波の汀線極く近傍を除いて、実測された有義波高と有義波周期を用いて保存波の有限振幅波理論をもとに精度良く評価することができる。ただし、計算には条件に応じてストークス波の第 5 次近似解とクノイド波の第 3 次近似解¹⁴⁾を用いている。これに対し線形理論による計算値は約 20% 過大評価となる。また定常流速成分の計算値 (●印) は、波による質量流束を補償する沖向き流れと底面層流境界層外縁でのオイラー的な質量輸送速度とを線形理論をもとに計算し、さらに、碎波に起因する戻り流れを加え合わせるにより評価した。碎波による戻り流れはボアの断面積が波高の 2 乗に比例すると仮定することにより、次式で評価した。

$$U_b = -A \frac{H^2}{d \cdot T} \quad (1)$$

ここで、 $A (=5.6)$ は勾配 1/20 の斜面上の規則波に対する実験データ^{15), 16)}をもとに決定した無次元定数である。なお、できるだけ簡単な方法で計算を行なうため不規則波条件に対する計算の代表波高には H_{rms} を用い、さらに碎波による戻り流れに関しては式 (1) にその点における碎波率を掛け合わせるにより評価できると考えた。図-9 に示されている実測値 (○印) と計算値 (●印) とを比較すると規則波の碎波点付近を除いてほぼ良好な評価が行なえていることがわかる。

最後に水位変動の時系列データをもとに底面流速変動を評価する方法について考察する。図-10 は線形フィルターにより水位変動から底面流速変動を計算した一例である。下段のパルス信号はその時刻の波が碎波してい

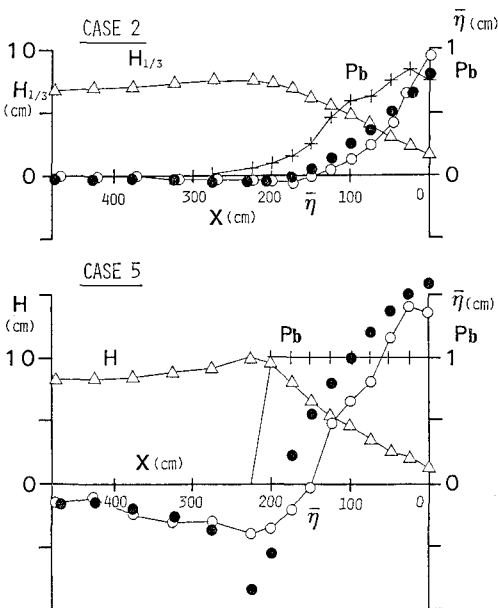


図-8 波高, 碎波率, 平均水位の分布

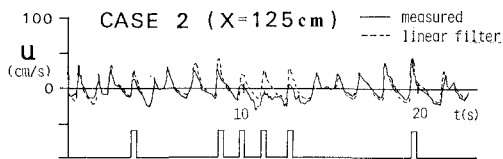


図-10 線形フィルタによる底面流速変動の評価

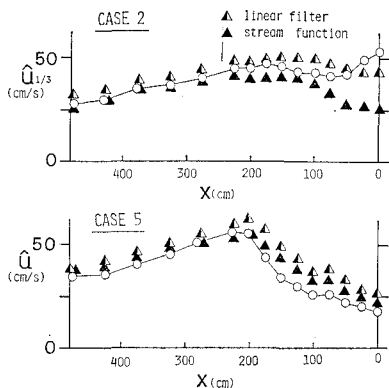


図-11 線形フィルタ法と流れ関数法の比較

ることを示している。砕波が連続する区間を除いて線形フィルタにより良好な評価ができていていることがわかる。さらに汀線近傍では長周期成分が卓越するため流速波形の一致度は悪くなるが、0.25 Hz から 5 Hz までの周波数成分に対しては、若干過大評価するものの線形フィルタによりほぼ良好な評価が行なえることがわかった。図-11 は線形フィルタ法と流れ関数法により計算される底面流速変動の全振幅を比較した結果である。砕波点直前までは不規則波・規則波ともに流れ関数法が高精度の計算値を与えている。砕波帯内では、線形フィルタ法は若干過大評価となるのに対し、流れ関数法は不規則波ではかなり過小評価、規則波ではやや過大評価となることがわかった。他の条件の結果も合わせて検討したところ今回の実験条件の範囲では、不規則波の底面流速は砕波点付近では流れ関数法、それ以外では線形フィルタ法を用いて評価するのが妥当であることがわかった。

5. 結 語

本論文では、斜面上における規則波とそれに対応する不規則波に対して砕波変形と底面流速変動を詳細に測定し、それらの諸特性を明らかにするとともに水位変動から底面流速変動を評価する手法の適用性について考察した。不規則波浪場においては、代表波高が最大となる点から岸に向けて砕波が逐次的に起こるため、水位や流速の定常成分が対応する規則波のものより小さくなるうえ、その分布特性も規則波のものとはかなり異なる。ま

た、汀線近傍で顕著となる長周期成分が波動成分の特性にも大きな影響を与えているものと考えられる。今後は広範囲な条件に対する実験データを蓄積しさらに詳細な検討を行なうとともに、これらの底面流速変動の諸特性をもとに不規則波のもとの底質移動量の評価法を考察していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 大塚行則・三村信男・渡辺 晃: 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325, 1984.
- 2) 入江 靖・柴山知也・渡辺 晃: 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 316~320, 1985.
- 3) 佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃: 不規則振動流下における砂澱形状と漂砂量, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232, 1986.
- 4) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 46~50, 1979.
- 5) 磯部雅彦・水口 優・堀川清司: 砕波帯付近の波にともなう流速場に関する現地観測, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 148~152, 1980.
- 6) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Local and shoaled comparisons of sea surface elevations, pressures, and velocities, J. Geophys. Res., Vol. 85, No. C3, pp. 1524~1530, 1980.
- 7) 小山裕文・岩田好一郎・布藤省三: 修正伝達関数法による水粒子速度の一算定法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 59~63, 1984.
- 8) 磯部雅彦・大中 晋: 砕波帯付近における不規則波の水粒子速度の計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 39~43, 1984.
- 9) Elgar, S. and R. T. Guza: Shoaling gravity waves: comparisons between field observations, linear theory, and a nonlinear model, J. Fluid Mech., Vol. 158, pp. 47~70, 1985.
- 10) Iwagaki, Y., T. Sakai and H. Ishida: Correlation of water particle velocity with water level variation for irregular waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 16, pp. 19~28, 1973.
- 11) Vis, F. C.: Orbital velocities in irregular waves, Proc. 17th ICCE, pp. 173~185, 1980.
- 12) Anastasiou, K., R. G. Tickell and J. R. Chaplin: Measurements of particle velocities in laboratory-scale random waves, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 233~254, 1982.
- 13) Dean, R. G. and M. Perlin: Intercomparison of near-bottom kinematics by several wave theories and field and laboratory data, Coastal Eng., Vol. 9, pp. 399~437, 1986.
- 14) 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司: 保存波の振動解の波高による表示, 第33回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 760~761, 1978.
- 15) 岡安章夫・柴山知也・堀川清司: 砕波帯内二次元定常流速場の推算に関する考察, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1986.
- 16) 嶋田昌義: 不規則波による底面流速変動に関する研究, 東京大学工学部卒業論文, 116 p., 1982.