

斜面上における多方向不規則波の砕波変形と流速場に関する実験的研究

Experimental Study on Breaking Wave Deformation and Current of Short-Crested Waves on the Slope

池野正明*・鹿島遼一**・窪 泰浩***

Masaaki Ikeno, Ryoichi Kajima and Yasuhiro Kubo

Shoaling deformation of short-crested waves acting on the slope is investigated experimentally. Power and directional spectra, wave height and steady current velocity on the slope are compared among regular, uni- and multi-directional irregular waves. The application of the conventional formula proposed based on long-crested wave experiments is also discussed.

Keywords: short-crested waves, breaking wave deformation, hydraulic model tests

1. はじめに

多方向不規則波実験の場合、所定の特性を有する波浪場が造波できるのは水槽内のある範囲内に限られる。このため、一様な波浪場を水槽内の広い範囲にわたって造波することが必要となる実験を行うことは難しく、一様斜面上での砕波変形や円形リーフ上での波浪変形実験に関する平石（1992）の研究、現地地形上での波浪変形に関する高山ら（1991）の研究など実験例は比較的少ない。

本研究は、一様斜面上における多方向不規則波の砕波変形や砕波帯内の定常流速場の特性を把握し規則波や単一方向不規則波の場合との差異を検討するとともに、従来の提案式の適用性を検討することを目的とし、波浪変形実験を実施した結果をとりまとめたものである。

2. 実験方法および実験条件

本水理模型実験には、図-1に示す幅40cmの低反射制御方式ピストン型造波機48台を備えた、長さ35m、幅45m、深さ1.1mの平面造波水槽を用いた（平口ら、1990）。水槽内の造波機前面岸方向に5.5mの地点から、2mの区間に勾配1/10の一様斜面を、さらに18mの区間に勾配1/50の一様斜面を設置した。造波機設置地点の水深は所定の波が造波しやすいように52cmとした。この場合、有限な長さの造波機で造波した入射波は、単一方向であっても、伝播に伴いそのエネルギーが周囲に拡散してしまう。そこで、本研究では、これを防ぐため、造波機の両端から斜面上に導波板を配置した。実験波は、規則波、単一方向不規則波および多方向不規則波を用いた。単一方向波の波向きおよび多方向波の主波向きは斜面上へ直方向（0°）とした。規則波の沖波波高 H_0 と周期 T は（8.1cm, 0.8s）、（4.2cm, 1.1s）、（10.9cm, 1.3s）、（6.6cm, 1.5s）の4種類とした。不規則波の諸元は平均周期と沖波波高の2乗平均値が規則波と等しくなるように設定し、沖波有義波高 $H_{0.1\%}$ と有義波周期 $T_{1\%}$ を（9.8cm, 0.9s）、（6.1cm, 1.2s）、（15.6cm, 1.4s）、（9.3cm, 1.6s）の4種類とした。不規則波の周波数スペクトルはBretschneider-光易型、方向関数は光易型を用い、方向集中度パラメータの最大値 S_{max} を25（多方向不規則波）と ∞ （単一方向不規則波）の2種類に設定した。不規則波の造波信号はエネルギー等分割のダブルサンメーション法により周波数512個×波向き90個の成分波を合成して計算した。

斜面上の測定範囲は、図-1に示す実験座標軸に従い、 $X=10m$ 、 $X=7m$ および $X=13m$ の3測線を対象とし、汀線（ $Y=0m$ ）から沖へ10m（ $Y=10m$ ）の区間を50cm間隔で測定することにした。この場合、各測定地点において、容量式波高計により水面変動を、電磁流速計により砕波帯近傍の流速を底面上2cmから鉛直上方向に6箇所測定した。

不規則波については、上記の3測線における水面変動と流速の測定の他に、図-1に示すように、造波機中心軸上岸方向に4m離れた水深52cmの水平床上に、星型アレーを配置し、発生波の方向スペクトルの検定を行った。つぎに、不規則波の方向分布特性が、砕波帯直前の浅海域に達するまでの間に屈折によってどのように変化するかを調べるため、汀線（ $Y=0m$ ）から造波機中心軸上沖へ9m（ $Y=9m$ ）の斜面上水深18cmの地点に、図-1に示す直線アレーを造波機に平行に配置し、方向スペクトルを推定した。直線アレーの配置地点は、入射波の砕波帯より沖になるように選定した。方向スペクトルは、星型アレーを構成する4台の波高計データあるいは直線アレーを構成する7台の波高計のうち、互いの間隔が1:2:3となる4台の波高計データを使用し、ベイズ型モデル（橋本、1987）および最尤法（磯部ら、1984）により解析した。

* 正会員 （財）電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 （270-11 我孫子市我孫子1646）

** 正会員 （財）電力中央研究所 我孫子研究所 特任研究員

*** 正会員 東京電力株式会社 原子力建設部 土木建築課

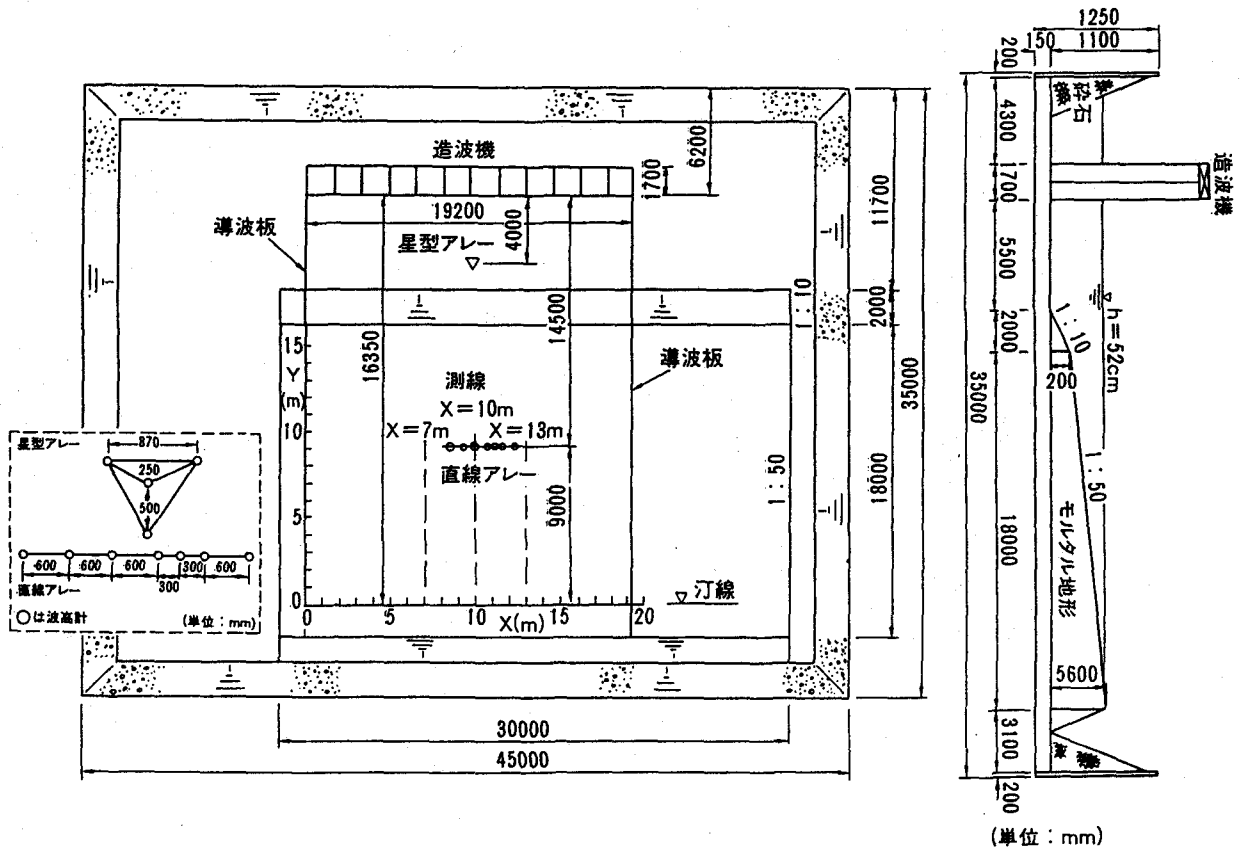


図-1 平面水槽と測定器の配置

なお、規則波実験では、0.06s刻みで1024個のデータを、不規則波実験では0.06s刻みで8192個（300波～540波分に相当）のデータを計測した。

3. 実験結果と考察

①多方向不規則波の方向分布特性

まず、造波機前面の水深52cmの地点における多方向不規則波の方向関数の特性を議論する。図-2は、星型アレーで計測した発生波のピーク周波数 ($f/f_p=1.0$) における方向関数の推定値を目標値と比較したものである。図中の実線が目標値、破線がベイズ型モデル (BDM) による推定値、点線が最尤法 (MLM) による推定値に対応する。図中の3曲線は、目標値の方向関数の最大値が1.0になるように、目標値の方向関数の最大値 G_{Tmax} でわり算して表示している。図-2によると、BDMによる推定値と目標値はほぼ一致している。また、MLMによる推定値は、主波向き0°付近で目標値より低い値に推定されている。BDMによる推定値と目標値がほぼ一致していることから、ピーク周波数付近について、ほぼ目標どおりの多方向不規則波が造波されているものと判断できる。図-3は、星型アレーで計測した発生波の方向関数の推定値コンター図を目標値と比較したものである。3つの図面は、各々目標値、MLMによる推定値、BDMによる推定値に対応する。図-3によると、MLMとBDMの推定結果とも1.5Hz以上の高周波数帯では、造波機のパフォーマンス限界に近いので、発生波の再現性が良くないが、ピーク周波数が存在する1.5Hz以下の周波数帯では、方向関数の概略値の再現性が良好である。

つぎに、斜面上の水深18cmの地点における多方向不規則波の方向関数の特性を議論する。水深52cmの地点で造波された多方向不規則波の周波数・波向き成分波が相互干渉を起こすことなく、各々独立に屈折変形すると仮定すれば、各成分波について屈折計算を行い、線形重ね合わせ法によって変形後の波を算定することができる（合田・鈴木、1975）。図-4は、直線アレーで計測した斜面上の多方向不規則波のピーク周波数 ($f/f_p=1.0$) における方向関数の推定値を目標値と比較したものである。図中の実線が屈折変形計算による目標値、破線がBDMによる推定値、点線がMLMによる推定値に対応する。実線の目標値の方向集中度はSに換算すると50程度となった。図中の3曲線は、目標値の方向関数の最大値が1.0になるように、目標値の方向関数の最大値 G'_{Tmax} でわり算して表示している。図-4の方向関数の目標値とBDMによる推定値を比較すると、BDMによる推定値と目標値との対応は良好である。また、MLMによる推定値はBDMよりも全般的に低い推定値となっている。図-5は、直線アレーで計

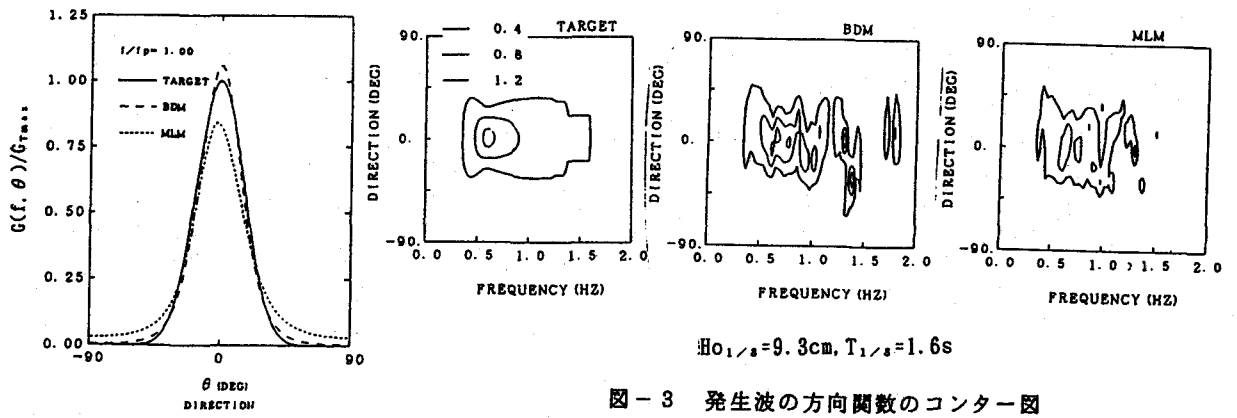


図-3 発生波の方向関数のコンター図

図-2 発生波のピーク周波数における方向関数

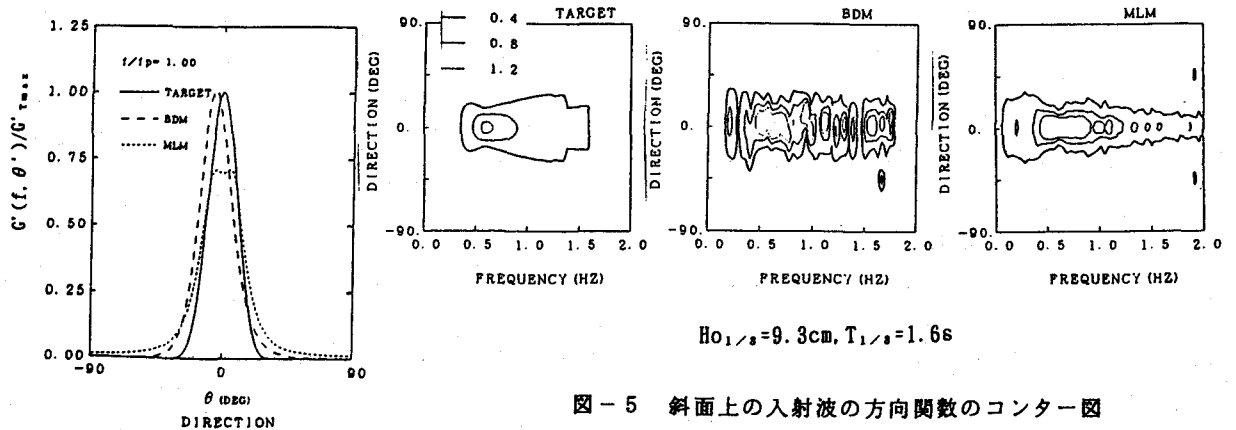


図-5 斜面上の入射波の方向関数のコンター図

図-4 斜面上の入射波のピーク周波数における方向関数

測した斜面上の多方向不規則波の方向関数の推定値コンター図を目標値と比較したものである。3つの図面は、各々屈折変形計算による目標値、MLMによる推定値、BDMによる推定値に対応する。図-5の屈折変形後の方向関数の目標値と、図-3に示した発生波の方向関数の目標値とを比較すると、屈折変形により波向きが集中し方向集中度が高くなっている。図-5の方向関数の目標値と推定値を比較すると、方向集中度が高くなる傾向をMLM、BDMによる推定結果とも再現しているが、両方の推定値には、低周波数側と高周波数側で、目標値のピーク周波数以外にいくつかのピークが認められる。これは屈折変形の理論値には考慮されていない碎波の影響であると考えられる。

②碎波帯内外の波高の岸冲断面分布

規則波の場合：まず、規則波を対象として、碎波帯内外の入射波の波高の変化を議論する。図-6に波高の岸冲断面分布を示す。図中の実験値は4種類の沖波波形勾配 Ho/Lo に対応している。また、図中の2種類の曲線は、4種類の Ho/Lo のうち最大値と最小値に対応した木村（1992）の実験式による結果である。本来、木村（1992）の式は、不規則波の碎波変形の実験結果から提案されたものであり、しかも対象とする水深の定義を、ゼロダウクロス波による波高中分点より水底までとしている。このため、厳密な意味では規則波の本実験結果に適用できないが、この実験式以外にshoaling, plunging, bore過程まで含めて推定できる適当な提案式が見あたらないため代用している。図中の実験値と木村の式とを比較すると、比較的岸側で碎波する $Ho/Lo=0.020, 0.024$ の場合に、碎波直後のplunging領域において、碎波減衰波高の実験値と木村の式とで若干ずれが生じ実験結果の方がやや岸で碎波しているが、概略的には実験結果と木村の式との対応は良好である。

単一方向不規則波の場合：つぎに、単一方向不規則波を対象として、碎波帯内外の入射波のゼロアップクロス法による1/3最大波高の変化を議論する。合田（1975）は、レーリー分布に従う不規則波の波高が、碎波限界波高を越える部分がエネルギー逸散して波高の小さい波に再生されると仮定して、単一方向不規則波の波高変化を推定する理論モデルを掲示している。さらに、合田（1975）は、この理論モデルに基づき簡便な1/3最大波高の計算式を提案している。図-7にゼロアップクロス法による1/3最大波高の岸冲断面分布を示す。図中の実験値は4種類の沖波波形勾配 Ho/Lo に対応し、図中の2種類の曲線は4種類の Ho/Lo のうち最大値と最小値に対応した合田の不規則波による碎波変形モデルの簡略式による結果である。図中の実験値と合田（1975）の式とを比較すると、有義波周期が最も短く比較的沖波波形勾配が大きい $Ho/Lo=0.078$ の場合の実験値が、不規則波の碎波率が増大し1/3

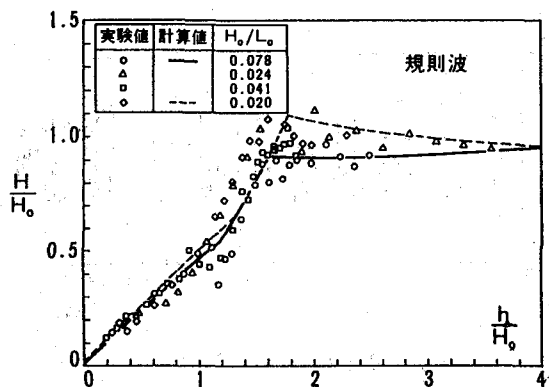


図-6 砕波帯内外における規則波の波高変化

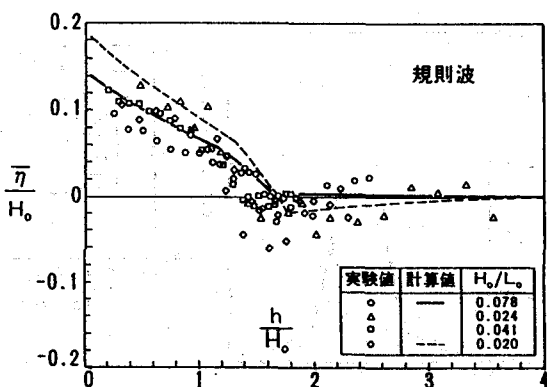


図-9 砕波帯内外における規則波の平均水位上昇量の変化

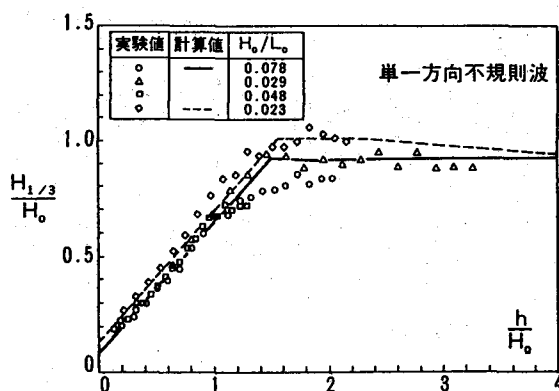


図-7 砕波帯内外における単一方向不規則波の波高変化

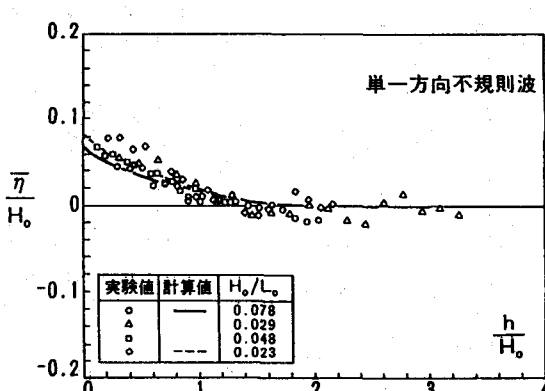


図-10 砕波帯内外における単一方向不規則波の平均水位上昇量の変化

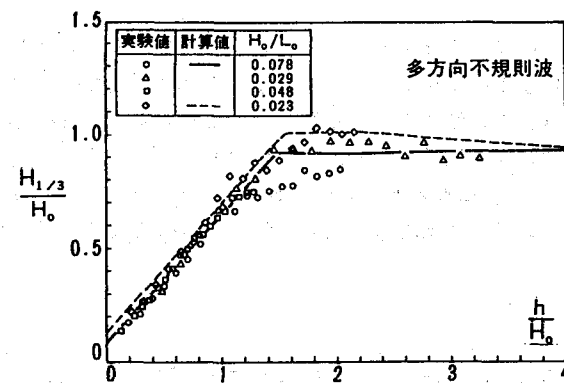


図-8 砕波帯内外における多方向不規則波の波高変化

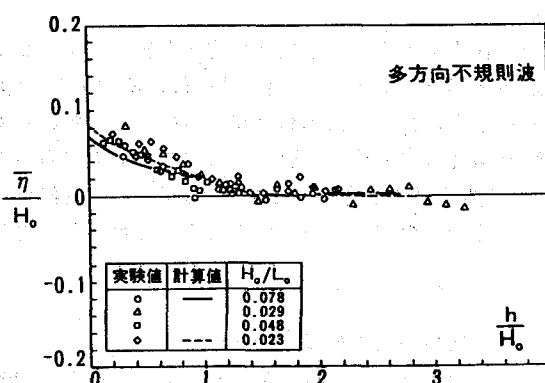


図-11 砕波帯内外における多方向不規則波の平均水位上昇量の変化

最大波高が減少し始める領域で合田の計算値を下回るが、その他の実験値と両者の合田の計算値との対応は良好である。

多方向不規則波の場合：つぎに、多方向不規則波を対象として、砕波帯内外の入射波のゼロアップクロス法による1/3最大波高の変化を議論する。図-8にゼロアップクロス法による1/3最大波高の岸沖断面分布を示す。図-8の多方向規則波の場合と図-7の単一方向不規則波の場合の実験値を比較すると、両者の間に顕著な差は認められない。また、図-8中の実験値と合田（1975）の式との対応は単一方向不規則波の場合と同様である。従って、 $S_{m,x}=25$ 程度の多方向不規則波が斜面上に入射しても、不規則波の砕波率が増大し1/3最大波高が減少し始める地点付近では、浅水・屈折変形により方向集中度 S が50以上に増加し、単一方向不規則波に近くなるため、合田（1975）の単一方向不規則波による砕波変形モデルが実用上適用可能であると判断できる。

③ 砕波帯内外の平均水位上昇量の岸沖断面分布

規則波の場合：まず、規則波を対象として、砕波帯内外の時間平均水位上昇量の変化を議論する。図-9に平均水位上昇量の岸沖断面分布を示す。図中の実験値は4種類の沖波波形勾配 H_0/L_0 に対応している。また、図中の2種類の曲線は、4種類の H_0/L_0 のうち最大値と最小値に対応した平均水位上昇量の計算式（合田、1975）による結

果である。なお、計算に用いる波高値は木村（1992）の式により算出している。図中の実験値と平均水位上昇量の計算値とを比較すると、計算値は岸方向へ進行するに従い、水位が砕波点で一旦低下して極小となり、砕波帯内で次第に水位が上昇する傾向の概略をよく再現している。

単一方向不規則波の場合：つぎに、単一方向不規則波を対象として、砕波帯内外の時間平均水位上昇量の変化を議論する。図-10に平均水位上昇量の岸沖断面分布を示す。図中の実験値は4種類の沖波波形勾配 H_0/L_0 に対応し図中の2種類の曲線は4種類の H_0/L_0 のうち最大値と最小値に対応した平均水位上昇量の計算式（合田、1975）による結果である。なお、計算に用いる波高値としては、合田（1975）の計算式により算出した1/3最大波高に砕波帯内の係数0.56を乗じて平均波高に換算した値を採用した。図-10の単一方向不規則波の場合の実験値と図-9の規則波の場合の実験値とを比較すると、不規則波では1波毎の砕波点移動するため、平均水位の極小点も規則波ほど明確に認められない。図-10中の実験値と平均水位上昇量の計算値とを比較すると、不規則波の砕波率が増大し1/3最大波高が減少し始める地点の沖側では、水位上昇の計算値は0に近いが、水位上昇の実験値は0の周りに若干変動している。また、この地点の岸側では、全般的に計算値は次第に水位が上昇する傾向の概略をよく再現している。

多方向不規則波の場合：つぎに、多方向不規則波を対象として、砕波帯内外の時間平均水位上昇量の変化を議論する。図-11に平均水位上昇量の岸沖断面分布を示す。図-11の多方向不規則波の場合の実験値と図-10の単一方向不規則波の場合の実験値とを比較すると、多方向不規則波の場合の平均水位の上昇量が単一方向不規則波の場合よりも若干小さいようにも見受けられるが、顕著な差とは言い難い。

④斜面上の不規則波のパワースペクトルの変形特性

単一方向不規則波の場合：まず、単一方向不規則波を対象として、斜面上の伝播に伴う水面変動のパワースペクトルの変形特性を議論する。図-12は、岸沖方向4箇所の地点における水面変動のパワースペクトルを比較したものである。図中、4つの曲線は、各々水深52cm（造波水深）、水深15cm、水深10cm、水深5cmの地点に対応する。図-12によれば、単一方向不規則波は斜面上を伝播するに従い、入射波のピーク周波数のエネルギー密度が低下すると同時に、高周波数側と低周波数側のエネルギー密度が増加するものの、合田（1975）が指摘しているように、主ピークが低周波数側と入れ変わるほどではなく、2次元造波水路を用いた実験と本平面実験との違いであると考えられる。

多方向不規則波の場合：つぎに、多方向不規則波を対象として、斜面上の伝播に伴う水面変動のパワースペクトルの変形特性を議論する。図-13は、岸沖方向4箇所の地点における水面変動のパワースペクトルを比較したものである。図中、4つの曲線は、各々水深52cm（造波水深）、水深15cm、水深10cm、水深5cmの地点に対応する。図-13の多方向不規則波の場合と図-12の単一方向不規則波の場合とを比較すると、斜面上を伝播するに従い、入射波のピーク周波数のエネルギー密度が低下すると同時に、高周波数側と低周波数側のエネルギー密度が増加する傾向が、多方向不規則波の場合は、単一方向不規則波の場合ほど顕著に現れていない。

⑤砕波帯内外の定常流速の岸沖断面分布

規則波の場合：まず、規則波を対象として砕波帯内外の定常流速（時間平均流速）の鉛直分布の特性を議論する。図-14に定常流速の岸沖断面分布を示す。図-14によると、岡安ら（1889）の研究と同様に、砕波点bp近

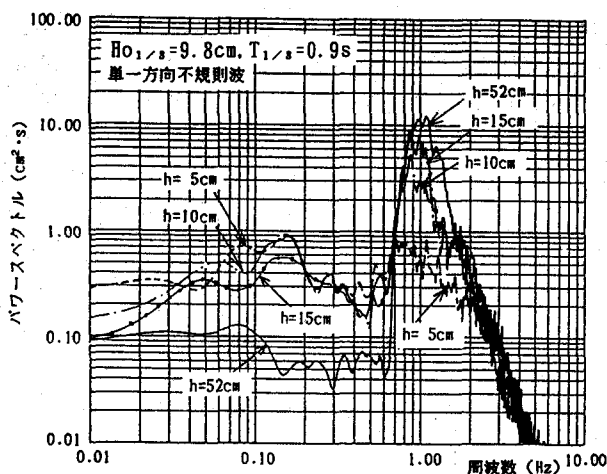


図-12 斜面上における単一方向不規則波の水面変動のパワースペクトルの変化

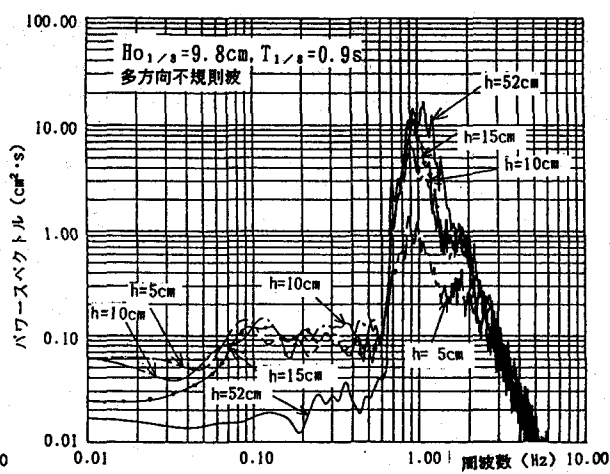


図-13 斜面上における多方向不規則波の水面変動のパワースペクトルの変化

傍で顕著な戻り流れが生じており、特に底面近くに冲向きの比較的大きな流速が認められる。また、鉛直方向に顕著な流速分布が認められる。

単一方向不規則波の場合：つぎに、単一方向不規則波を対象として、砕波帯内外の定常流速の鉛直分布の特性を議論する。図-15に定常流速の岸沖断面分布を示す。図-15の単一方向不規則波の場合と図-14の規則波の場合とを比較すると、単一方向不規則波の場合は、岡安ら(1991)が指摘しているように、1波毎の砕波点が前後に移動するために現象が平滑化され、規則波の場合と比べて、鉛直分布の変化が穏やかであり定常流の大きさも規則波の場合の8割程度に小さくなっている。

多方向不規則波の場合：つぎに、多方向不規則波を対象として、砕波帯内外の定常流速の鉛直分布の特性を議論する。図-16に定常流速の岸沖断面分布を示す。図-16の多方向不規則波の場合と図-15の単一方向不規則波の場合とを比較すると、両者の間に定常流として顕著な差は認められない。

4. おわりに

以上、本研究では、一様斜面上における多方向不規則波の砕波変形や砕波帯内の定常流速場の特性を把握し規則波や単一方向不規則波の場合との差異を検討するため、一様斜面上における波浪変形実験を実施した。その結果、沖で $S_{m,x}=25$ の多方向不規則波が斜面上を伝播し砕波帯直前の浅海域に達すると、方向集中度が $S_{m,x}=50$ 以上に方向集中度が増大し、単一方向不規則波としての性質に近くなること、そのため、多方向不規則波による1/3最大波高や平均水位上昇量の岸沖断面分布の実験値は、単一方向不規則波による実験値と顕著な差異は認められず、合田の砕波変形モデルで実用上適用可能となること、規則波による砕波帯内外の定常流速の岸沖断面分布の実験値は、砕波点近傍で顕著な戻り流れが生じ、鉛直方向に顕著な流速分布が認められるが、単一方向不規則波および多方向不規則波の場合には、鉛直分布の変化が穏やかであり定常流の大きさも小さくなることが明らかとなった。

本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものであり、土木学会原子力土木委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授)、同耐波浪設計WG(主査 西村仁嗣筑波大学教授)の各位には多くの御助言を賜りました。(株)土木技術開発下田隆男氏、(株)CRS下村 一氏、田山英樹氏、(株)電力計算センター岡本直樹氏には図面作成に協力して頂きました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司(1984)：方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張，第31回海岸工学講演会論文集，pp.173-177。
 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃(1989)：砕波帯におけるエネルギー収支ともどり流れのモデリング，海岸工学論文集，第36巻，pp.31-35。
 岡安章夫・片山裕之・古永 充(1991)：不規則波による砕波帯内定常流速と長周期成分の鉛直分布，海岸工学論文集，第38巻，pp.81-85。
 木村 晃(1992)：斜面上における不規則波高の確率特性の変化モデル，土木学会論文集，第443号/11-18，pp.65-72。
 合田良実(1975)：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp.59-106。
 合田良実・鈴木康正(1975)：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，No.230，45p。
 高山知司・池田直太・小杉宜史(1991)：多方向不規則波を用いた波浪変形実験，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，pp.69-136。
 橋本典明(1987)：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，港湾技術研究所報告，第26巻，第2号，pp.97-125。
 平石哲也(1992)：多方向不規則波の発生とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.723，176p。
 平口博丸・清水隆夫・池野正明・田中寛好(1990)：多方向波造波システムの効率化とその造波特性，海岸工学論文集，第37巻，pp.140-144。

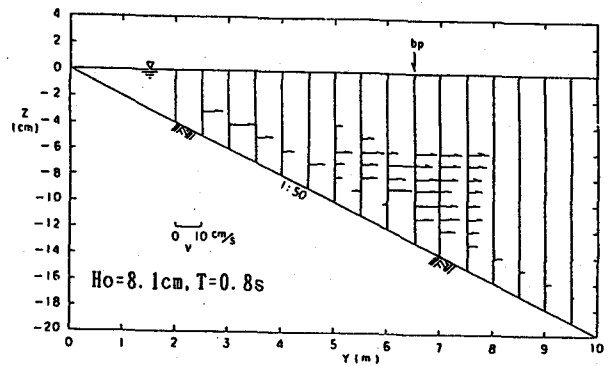


図-14 規則波の定常流速の岸沖断面鉛直分布

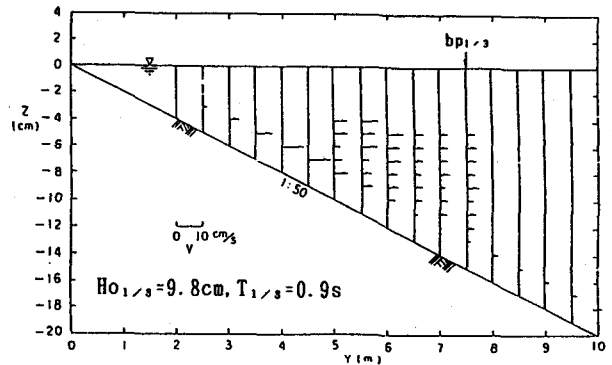


図-15 単一方向不規則波の定常流速の岸沖断面鉛直分布

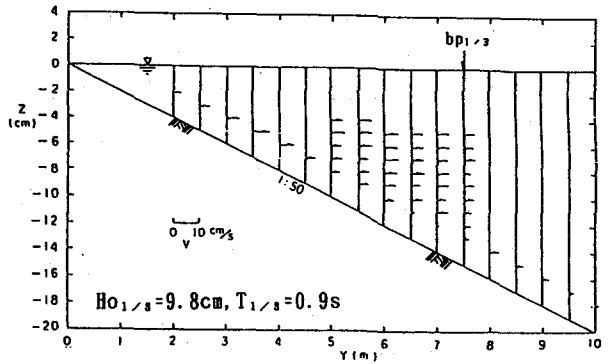


図-16 多方向不規則波の定常流速の岸沖断面鉛直分布