

構造物前面海域での入射波の多方向性の影響

Effect of the multi-directionality on the wave field in front of structure

目見田 哲※ 酒井 哲郎※※

Tetsu Memita and Tetsuo Sakai

The effects of the multi-directionality on the wave field in front of a long straight breakwater are discussed based on experimental results in a wave basin. When the waves don't break, the multi-directional waves don't generate a clear coexistence wave field of the oblique incident and reflected waves. When the waves break in front of the breakwater, the multi-directionality have no significant effect. This is because the wave breaking decreases the degree of the wave reflection from the breakwater.

Keywords: multi-directionality, reflected wave field, wave height

1. まえがき

構造物周辺海域の波浪場の評価時に入射波の多方向性を考慮することの必要性については、従来より指摘されているが、多方向不規則波を用いた水理模型実験による検討は多くは実施されておらず、実験手法および評価方法も確立していない。特に、一様勾配斜面などでない複雑な地形モデルでの多方向不規則波を用いた水理模型実験については、高山ら(1990)、平石ら(1994)による実施例はあるものの実施例が少なく、さらには実地形モデルかつ構造物周辺海域といった入射波と構造物からの反射波、回折波が共存する複雑な波浪場について検討した例はほとんどみられない。

実地形モデルでの多方向不規則波を用いた水理模型実験については有効造波領域の問題があり、造波水槽に再現した全海域にわたって、目標の方向関数を有する多方向不規則波を造波し、定量的な評価をすることは困難であるが、多方向不規則波と単一方向不規則波との波浪変形特性の違いの把握を目標とした定性的な評価レベルでの検討を実施していくことは可能であるといえる。

著者ら(1995)は、すでに実地形モデルでの入射波と構造物からの回折波が共存する波浪場を対象として、水理模型実験を実施し、波高、海浜流に及ぼす入射波の多方向性の影響についての検討を実施した。当研究では、それに引き続き、実地形モデルにおいて、防波堤に対して斜め入射波(60°程度)が作用する際の波浪場、つまり入射波と構造物からの反射波が共存する構造物前面海域の波浪場を対象とする。多方向不規則波、単一方向不規則波を用いた水理模型実験を実施し、斜め入射波と反射波の合成による波高増加、斜め入射波の反射などの波浪場特性について検討し、入射波の多方向性の影響について評価する。

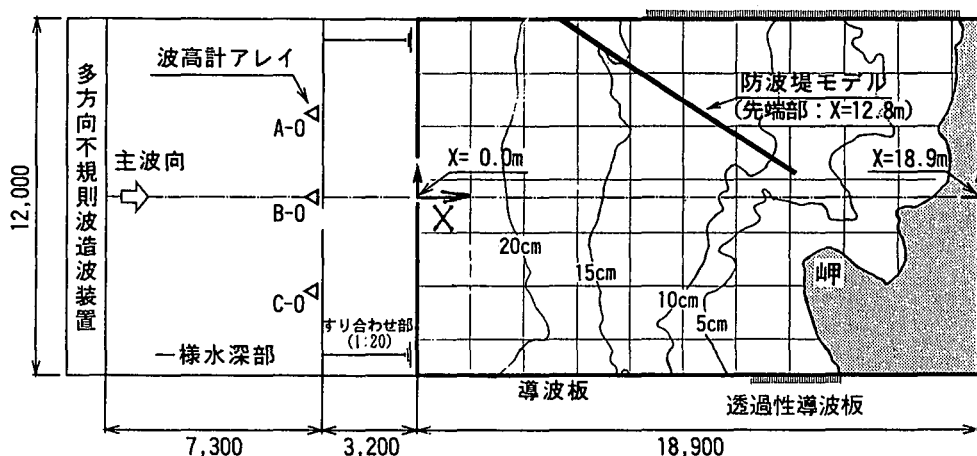


図-1 地形と防波堤の模型平面図

※ 正会員 関西電力(株) 総合技術研究所 (661 尼崎市若王子3-11-20)
 ※※ 正会員 京都大学工学部土木工学科

2. 実験装置と条件

2.1 実験装置と模型

対象海域は水深、汀線が複雑に変化し、入射波と防波堤からの反射波が共存する海域である。

地形と防波堤の模型平面図を図-1に示す。

平面水槽内には40枚の造波板（幅30cm/枚）から成る多方向不規則波造波装置が設置されている。造波装置前面より約10m離れた地点から12m×19mの範囲に地形モデルを設置したが、入射波が地形モデルに到達するまでにエネルギーが拡散することを防止するため、造波機の両端から岸方向に向かって導波板を設置している。但し、防波堤モデルからの反射波が導波板で再反射することの防止、および岬に沿って発生する海浜流の存在を考慮し、岸に近い部分については透過性導波板とする。

また、防波堤は入射波の主波向方向と約30°傾斜させた角度で設置し、防波堤前面は直立壁とし、天端高については、今回の波浪条件において越波現象が生じない高さとした。

2.2 波浪条件

波浪条件を表-1に示す。

実験波については、多方向不規則波（ケース1M、2M、3M）、および有義波高、有義波周期、（主）波向の一致する単一方向不規則波（ケース1U、2U、3U）を用いる。周波数スペクトルはBretschneider-光易型とし、多方向不規則波の方向関数は光易型（ $S_{max}=25$ ）とする。

実験波の砕波位置について目視で確認したところ、ケース1M、ケース1Uにおいては防波堤に沿った海域での砕波は発生せず、砕波帯は水深5cm付近の海域であった。一方、ケース2M、ケース2Uにおいては、防波堤に沿った海域では水深15cm付近において砕波が発生した。また、ケース3M、ケース3Uにおいては、防波堤に沿った海域では防波堤先端部付近において砕波が発生していることを確認した。

2.3 造波した実験波の検証

造波した実験波を検証するために、地形モデル開始部付近に造波装置中心を含む3箇所に波高計アレイ（A-0、B-0、C-0；図-1参照）を設置し、波高、周波数スペクトル、方向スペクトルを算定した。

方向スペクトルを解析するための波高計アレイの形状は正三角形であり、三角形の頂点および中心の4点に容量式波高計を取り付け、同時に水面変動を計測した。

多方向不規則波（ケース1M）について、ベイズ法によって解析した方向スペクトルを図-2に示すが、地形モデル開始部付近において、目標とする実験波が造波できていることが確認できる。

また、他の波浪条件についても、同様に、目標の実験波が造波できていることを確認した。

2.4 測定項目

対象海域の波浪場特性を把握するために波高分布を計測した。実験では、容量式波高計によって波高を計測した。尚、計測時間は約5分、サンプリングタイムは0.02sec間隔とした。

表-1 波浪条件

ケース	1M	1U	2M	2U	3M	3U
波の種類	多方向 不規則波	単一方向 不規則波	多方向 不規則波	単一方向 不規則波	多方向 不規則波	単一方向 不規則波
S_{max} ; 方向関数パラメータ	25	∞	25	∞	25	∞
有義波高 (cm)	2.0		7.0		3.7	
有義波周期 (sec)	0.82		1.14		1.14	

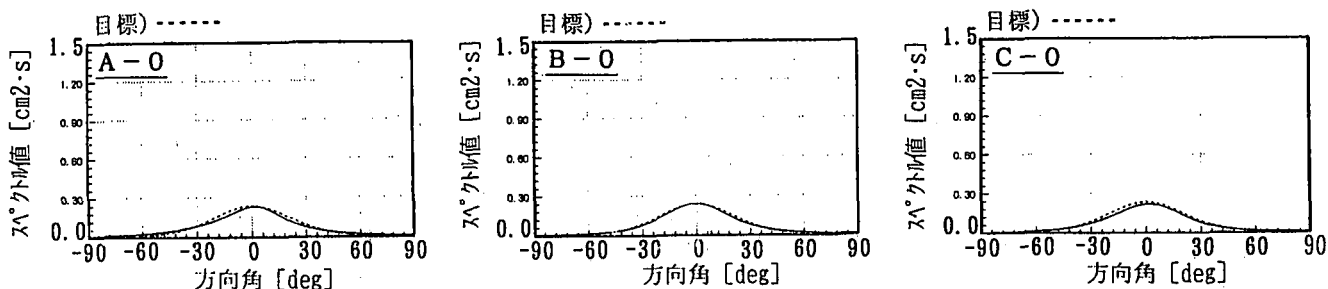


図-2 地形開始部での方向スペクトル (ケース1 M)

3. 実験結果

ケース1, 2について、防波堤のない場合、防波堤のある場合の多方向不規則波、単一方向不規則波での波浪場特性 (波高分布) を示す。

3.1 波高分布特性

(1) 防波堤のない場合

各波浪条件での波高比分布図 (図中、太線は1.0) を図-3, 図-4に示す。尚、波高比は地形開始部での波高との比率で表す。

まず、入射波高が小さく、水深5 cm付近まで碎波が発生しないケース1 M (多方向不規則波; $S_{max}=25$) とケース1 U (単一方向不規則波) について検討する。

ケース1 Uにおいては、図-1に示した等深線形状からも予想できるとおり、屈折現象により岬先端付近の海域に波が集中していく傾向がみられ、その海域では波高比が1.1-1.2に増加する。また、ケース1 Mにおいても、岬先端付近の海域に波が集中する傾向が弱まるものの、ケース1 Uとほぼ等しい波高比分布を示す。

次に、入射波高が大きく、沖で碎波が発生するケース2 M (多方向不規則波; $S_{max}=25$) とケース2 U (単一方向不規則波) について検討する。

これらのケースでは入射波が沖で碎波することによって、浅い海域の波高比分布は汀線に平行ななだらかな形状を示す。また、ケース2 Mとケース2 Uはほぼ等しい波高比分布となる。

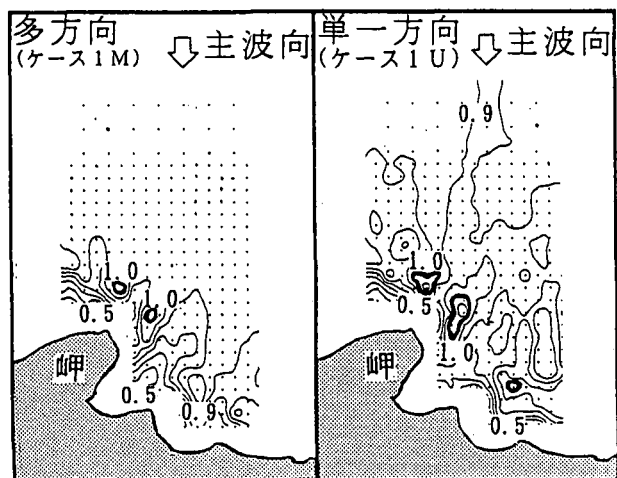


図-3 波高比分布図 (波高2.0 cm, 周期0.82sec)

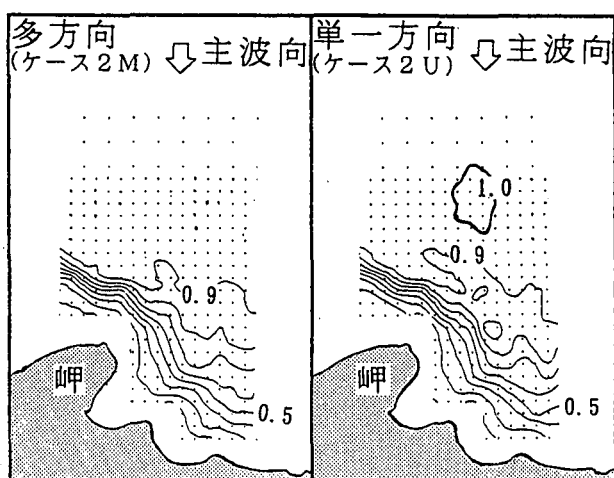


図-4 波高比分布図 (波高7.0 cm, 周期1.14sec)

(2)防波堤のある場合

防波堤のない場合と同一の波浪条件での波高比分布図（図中、太線は1.2, 点線は1.5）を図-5および図-6に示す。

まず、防波堤に沿った海域での碎波が発生しないケース1 M（多方向不規則波； $S_{max}=25$ ）、ケース1 U（単一方向不規則波）について検討する。

ケース1 Uにおいては、防波堤前面海域において波高が大きく増加し、波高比が1.6～1.7に増加する海域もみられる。これは、入射波と防波堤からの反射波が合成されたことによる波高増加といえる。防波堤に沿った海域での波高の変化が激しいことから防波堤から反射波が発生し、波のじょう乱が著しくなっていると考えられる。また、防波堤先端部付近海域での波高が最も大きくなることは、等深線形状および反射波の伝播方向の影響によるものと考えられる。ケース1 Mをケース1 Uと比較すると、入射波の方向分散性、防波堤からの反射波の方向分散性が大きいことによって、防波堤前面海域での波高増加がケース1 Uほどには顕著にみられず、波高比の最も大きくなる防波堤先端部付近の海域においても波高比が1.2～1.3までしか増加しない。

次に、入射波高が大きく、防波堤に沿った海域での碎波が発生するケース2 M（多方向不規則波； $S_{max}=25$ ）、ケース2 U（単一方向不規則波）について検討する。

これらでは、波高比分布形状がケース1 M、ケース1 Uと異なっており、防波堤前面海域の波高増加は若干みられるものの、波高増加の海域が沖の海域に限定されて波高比も小さい。防波堤に沿った海域での波高の変化が比較的なだらかなことから防波堤からの反射波が低減されていると考えられる。

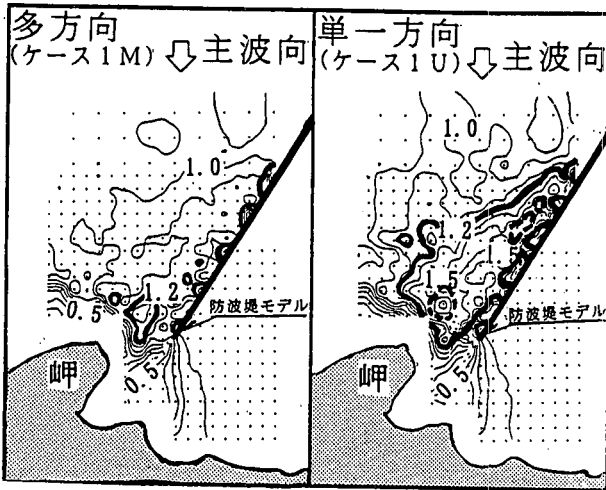


図-5 波高比分布図（波高2.0 cm, 周期0.82sec）

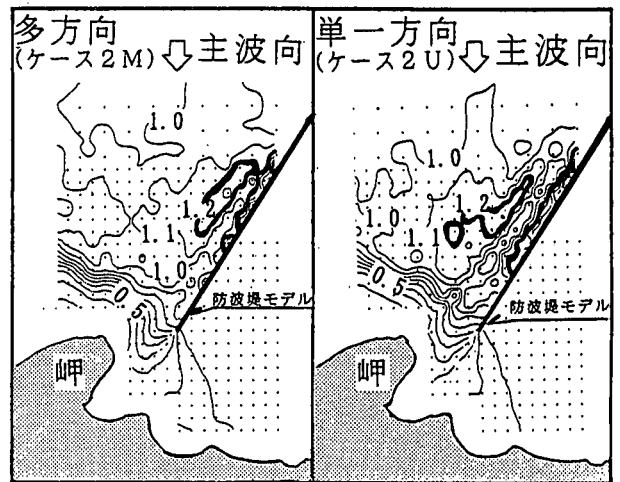


図-6 波高比分布図（波高7.0 cm, 周期1.14sec）

3.2 測線上の波高比変化

多方向不規則波と単一方向不規則波の波高比分布についてさらに比較検討するために、造波装置中央部における造波装置と直角方向の測線上での波高比変化を検討する。

ケース1 M（多方向不規則波）、ケース1 U（単一方向不規則波）についての結果を図-7に示す。

防波堤がある場合、単一方向不規則波では、防波堤前面海域で波高が急激に増加し、防波堤先端部付近（ $X=12\text{m}$ 付近）よりも浅い海域で急激に低下する。これに対し、多方向不規則波においても傾向は一致するものの、波高増加、低下ともにゆるやかになりピーク値も小さい。

一方、同一の波浪条件での防波堤がない場合は、多方向不規則波、単一方向不規則波ともに測線方向の波高比変化はゆるやかで、両ケースともほぼ等しい波高比分布となる。 $X=12\text{m}$ 付近での波高増加は屈折現象の影響であるが、この海域は、防波堤がある場合に波高がピーク値となる海域とも対応している。

次に、ケース 2 M（多方向不規則波）、ケース 2 U（単一方向不規則波）についての結果を図-8に示す。防波堤に沿った海域での砕波が発生するケース 2 Mとケース 2 Uについては、 $X = 9 \text{ m}$ 付近の海域で波高がピーク値を示すが、波高の急激な増加、低下がみられず、両ケースの差は小さい。また、防波堤がない場合においては、両ケースともほぼ等しい波高比分布となる。以上、波高比分布図での検討と同様な結果がここでも確認できる。

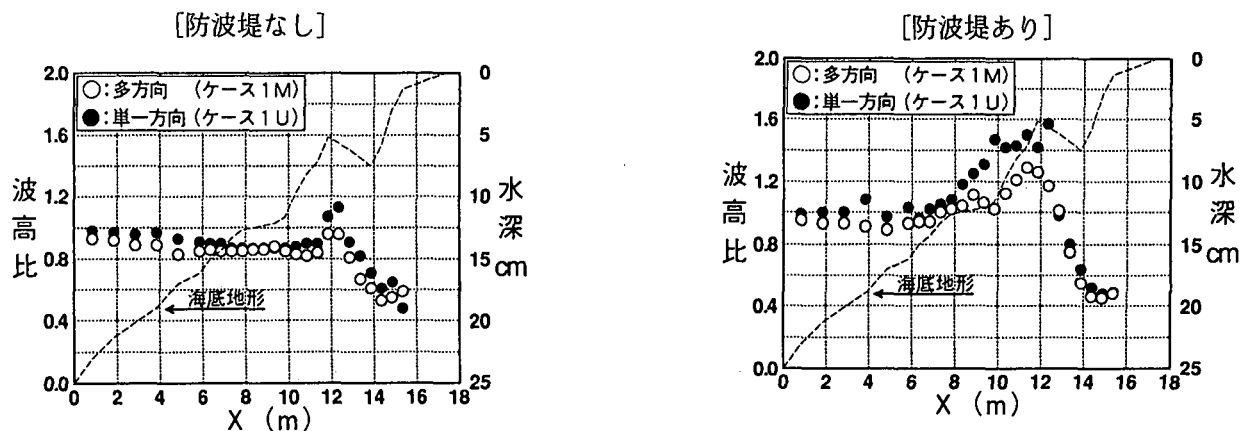


図-7 測線上の波高比変化（ケース 1；波高 2.0 cm，周期 0.82 sec）

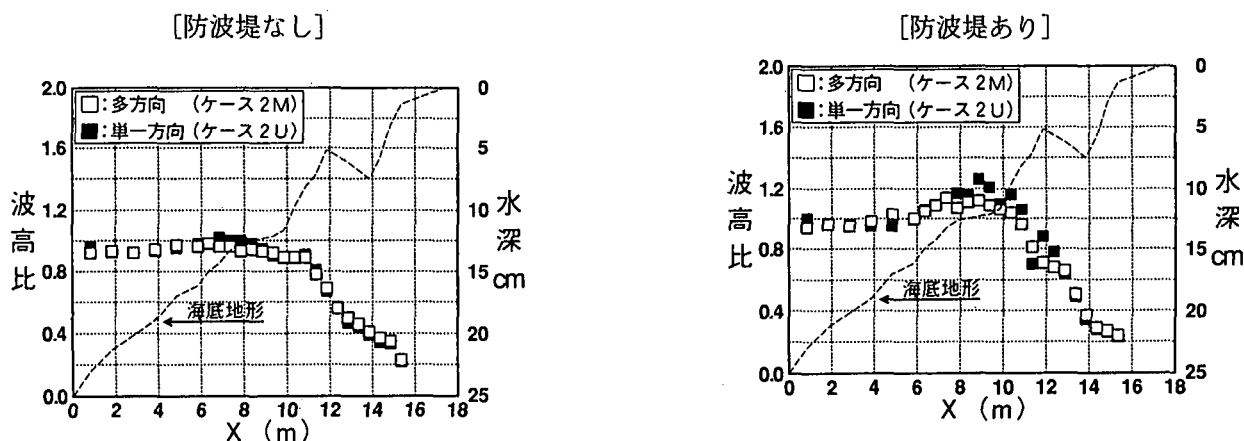


図-8 測線上の波高比変化（ケース 2；波高 7.0 cm，周期 1.14 sec）

4. 考察

入射波の多方向性の影響

防波堤がある場合、波浪条件によって入射波の多方向性の影響が異なる傾向を示す。

斜め入射波と防波堤からの反射波が合成されることによって防波堤前面海域での波高が増加する波浪場（ケース 1 M，1 U）においては、入射波の多方向性の影響が大きくあらわれる。これは多方向不規則波のケースでは、入射波と同様、防波堤からの反射波の方向分散性が大きいことによって、防波堤前面海域での波高増加が単一方向不規則波のケースほどには顕著にみられないためと考えられる。

一方、防波堤がある場合でも、防波堤に沿った海域で砕波が発生し、防波堤前面海域での波高増加が顕著にみられない波浪場（ケース 2 M，2 U）においては、防波堤からの反射波が低減されるために防波堤のない場合の波浪場（図-4 参照）に近い特性となり、入射波の多方向性の影響が小さくなるものと考えられる。

斜め入射波の反射特性

ケース 2 M，2 U では、ケース 1 M，1 U と比較すると反射波による波高増加が低減される結果が確認できた。防波堤からの反射波が十分に形成されず低減された要因としては、斜め入射波の砕波現象が考えられるが、それ以外の要因として、周期の長い波が構造物に平行に近い角度で入射されると反射波が十分に形成されずに構造物沿いに波が盛り上がり走る現象（合田，1990）が関連している可能性も考えられる。

最初に、砕波による防波堤からの反射波の低減について検討するために、規則波を用いて波高比分布を検討した。不規則波の有義波高、有義波周期、主波向と同じ波高、周期、波向を有する規則波での波高比分布を図-9（図中、太線は1.5）に示す。その結果、防波堤に沿った海域での砕波が発生しないケースでは防波堤からの反射波による前面海域での波高増加が顕著にみられるのに対して、防波堤に沿った海域での砕波が発生するケースにおいては反射波があまり形成されず大きな波高増加がみられない。この現象が不規則波での実験結果よりもさらに明確に確認でき、砕波が反射波の低減に関連していることが再確認できる。

次に、周期の長い波が構造物に平行に近い角度で入射する場合、反射波が十分に形成されない現象について検討する。周期がケース2M、2Uと等しいが、波高が小さく、防波堤に沿った海域での砕波は発生しないケース3M（多方向不規則波）、3U（単方向不規則波）の波浪場を検討する（図-10参照）。ここでは、防波堤前面海域での波高増加および入射波の多方向性の影響がケース1M、1Uと同様、顕著に確認できる。

これらの結果を併せて考えると、ケース2M、2Uにおいて反射波が低減される現象には斜め入射波の砕波現象が関連しているものと考えられる。

ちなみに、斜め入射波、特に、周期が長い斜め入射波において反射率が低下する例が現地観測データとして検討されているが（永井ら、1995）、ここでは砕波の有無については述べられていない。

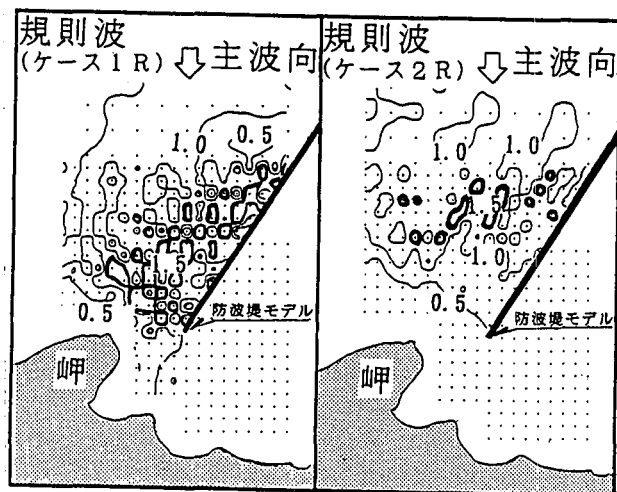


図-9 波高比分布図（規則波）
（左図；波高2.0 cm, 周期0.82sec 右図；波高7.0 cm, 周期1.14sec）

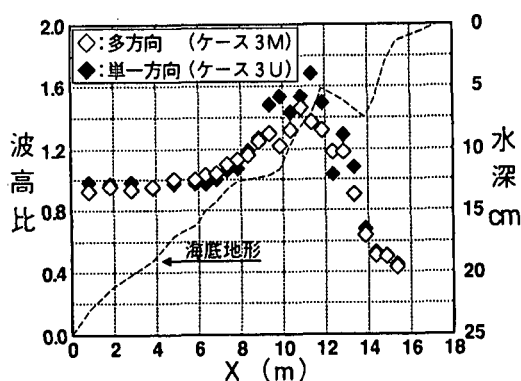


図-10 測線上の波高比変化（防波堤あり）
（ケース3；波高3.7 cm, 周期1.14sec）

5. あとがき

今回、斜め入射波が作用する構造物前面海域の波浪場を対象とした水理模型実験を実施し、波浪条件の異なる際の波高分布結果を比較することによって、入射波の多方向性の影響、斜め入射波の反射特性について検討した。今後、実地形部での方向スペクトル形状、および数値解析（エネルギー平衡方程式）による波高分布を併せて検討することによって、斜め入射波が作用する構造物前面海域の波浪場特性（反射波の低減特性、伝播特性、方向スペクトル特性）、そこでの入射波の多方向性の影響について発表する予定である。

最後に、計測にあたっては(株)日本工業試験所 内西 博氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 高山知司・池田直太・小杉宣史(1990)：多方向不規則波を用いた波浪変形実験，海岸工学論文集，第37巻，pp. 155-159.
- 平石哲也・田端竹千穂(1994)：上部斜面堤からの越波が離島港湾の静穏度に与える影響，海岸工学論文集，第41巻，pp. 701-705.
- 目見田哲・酒井哲郎(1995)：実地形モデル（湾内地形）における多方向不規則波の波浪変形特性，海岸工学論文集，第42巻，pp. 196-200.
- 合田良實(1990)：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－，鹿島出版会，pp. 70-71.
- 永井紀彦・橋本典明・清水勝義・戸引勲・伊藤一教・東江隆夫・小林昭男(1995)：沖合い防波堤の反射特性に関する現地調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 741-745.