

越波伝達波の方向分散特性に関する実験的研究

横 木 裕 宗*・岸 田 隆 嗣**・鈴 木 重 勝***・三 村 信 男****

1. 序 論

港内などの波浪静穏度を計算する際には、港口からの入射波に加えて越波も考慮すべき重要な擾乱となり得る。近年では防波堤建設の際のコスト削減、港内の景観・水質への配慮から従来よりより越波を許容した低天端高の防波堤が設計されるようになってきている。そのため、それほど異常といえない波浪に対しても越波の影響が増大してくると思われる。

従来から、越波量に関する研究は多くなされてきたが、平面水槽による実験、特に越波伝達波の方向分散性に関する実験は少なく、その詳細な特性はまだまづつかめていないのが現状である。そこで本研究では平面水槽において複数の波高計を用いて複数の地点において水面変動を同時に測定し、得られた波高や周波数スペクトルから、越波伝達波がどのような方向分散特性を持っているかを明らかにすることを目的とした。

越波現象に関する研究は、越波量（越波流量）に関する研究と、越波伝達波に関する研究に大きく分けられる。越波量の研究は主に断面 2 次元水路を用いて実験が行われ、様々な形態を持つ構造物を越えて内陸に進入する流量を算定することを目的に行われてきた。一例を挙げると、篠田・山本（1980）は波形勾配、相対水深などを指標とした鉛直堤の波高伝達率算定式を提案している。また、森下・綿貫（1981）は消波ブロック被覆護岸の波高伝達率算定式を提案している。また、入射波として不規則波を用いた研究もされており、例えば、谷本・大里（1979）は、不規則波と規則波で伝達波高にそれほど差がないことが示されている。さらに最近では、多方向不規則波を用いた実験も行われている（例えば、平石ら、1996）。

一方、越波伝達波に関する研究では、断面 2 次元波浪場を対象として、Cauchy-Poisson 波理論を用いて伝達波

形を計算した松井ら（1980）、倉田（1981）がある。最近では、越波直後の水塊運動をピストン造波モデルを用いてモデル化した西受・水口（1996）や、伝達波の高周波数成分波の計算精度を向上させるために、修正ブシネスク方程式を用いて計算した織田ら（1997）や、港口からの回折波も含めて計算した森屋・水口（1996）がある。いずれにしても、例えば合田・竹田（1966）が指摘しているように、入射波が規則波であっても、越波伝達波は 2 倍、3 倍周波数成分を持つ非線形な現象なので、非線形性を考慮した計算法となっている。

平面波浪場を対象とした研究としては、鈴木ら（1996）が非定常緩勾配方程式を用いて、基本周波数成分波と高周波数成分波の方向分布特性をそれぞれ考慮して、港内波高・周期分布を計算している。また、渡辺ら（1997）が、Cauchy-Poisson 波理論を平面波浪場に拡張している。平面水槽を用いた実験的研究としては、高垣ら（1985）などがあり、これらの実験では、越波伝達波の平面的な方向分散特性に着目している。その結果、入射波が単一方向の波であっても伝達波は大きな方向分散性を持つことが示されている。また、池野ら（1991）、平口ら（1991）は多方向不規則波を用いて実験を行っており、入射波の周波数成分波と越波伝達波に含まれる高周波数成分波では、方向分布特性が異なることを示している。

2. 平面水槽実験の概要

本研究の実験で用いた平面水槽を図-1 に示す。水槽は長さ 10 m、幅 5 m、深さ 1 m であり、水深は 35.4 cm とした。鉄板で製作した防波堤模型（図-2）を用いて中央で仕切り、向かって左手が港内部分、右手が港外部分となる。防波堤の模型は、中央部分（幅 1 m）において天端高を低くし、そこからのみ越波させるようにした。なお、実験は規則波を用いて行った。

実験では港内部分に波高計を配置し、複数の地点で伝達波の水面変動を同時に測定した。水面変動の測定は造波開始直前から始め、サンプリング周波数 20 Hz（サンプリング周期 0.05 s）で 5 分間測定した。後に述べる波高の計算やスペクトル解析に用いたデータは、取得したデータのうち最後の約 2 分間のデータ（2048 個）である。な

* 正 会 員 博(工) 茨城大学講師 広域水圏環境科学教育研究センター

** 学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻

*** 大東設計コンサルタント

**** 正 会 員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

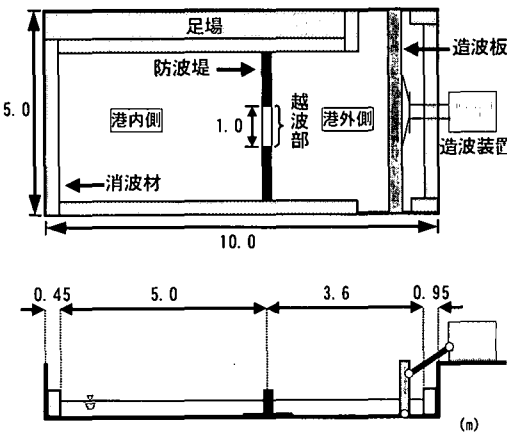


図-1 平面水槽平面図・断面図

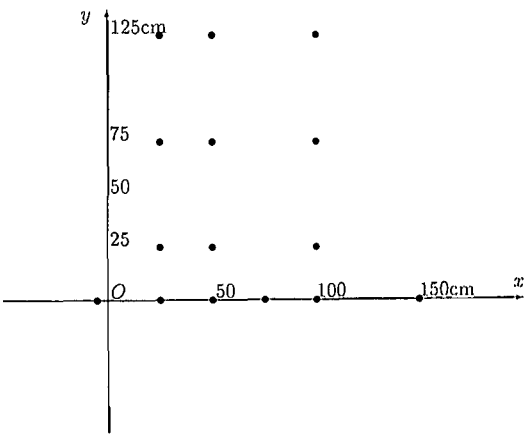


図-3 波高計の配置 (直角入射)

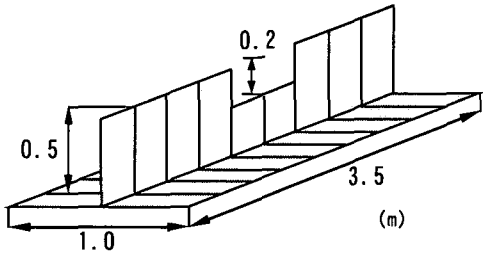


図-2 防波堤模型形状

表-1 実験条件 (直角入射)

No.	周波数 (Hz)	周期 (s)	入射波 波高 (cm)	越波量 (cm ² /s)	
N-1	0.58	1.72	5.97	1.32	越波量小
N-2	1.09	0.92	4.64	1.63	
N-3	0.90	1.12	10.59	15.69	
N-4	0.75	1.34	9.28	15.68	越波量大

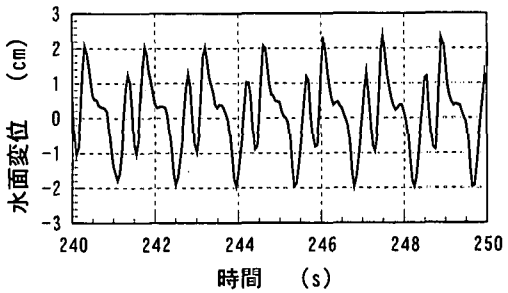


図-4 水面変動の時系列データ

お、この時間帯で波浪場は定常状態に達していた。

3. 実験結果

3.1 入射波が防波堤に直角に入射する場合

波高計の配置図を図-3に示す。図中の黒点が波高計の位置である。入射波は向かって左側 ($x < 0$) から進行し、 $-50 \text{ cm} < y < 50 \text{ cm}$ の越波部から越波して港内に入っている。この実験では、港内波浪場は中心線 (x 軸) に対して線対称となるので、波高計はすべて $y > 0$ に配置した。表-1に直角入射における実験ケースと各地点の波高などの一覧を示す。この表中の越波量 (cm^2/s) は、

(越波量(cm^2/s))

$$= \frac{((\text{防波堤上での最高到達高さ}(\text{cm})) \times (\text{港内での水塊落下幅}(\text{cm})))}{(\text{入射波の周期}(\text{s}))} \dots\dots\dots (1)$$

と定義して計算した。これは単位時間当たりの越波量に比例した量を表している。No. N-4の $(x, y) = (25, 75)$ で得られた水面変動を図-4に示す。この図より越波伝達波には基本周波数成分のほかに、2倍、3倍周波数成分が含まれていることが分かる。

a) 波高分布

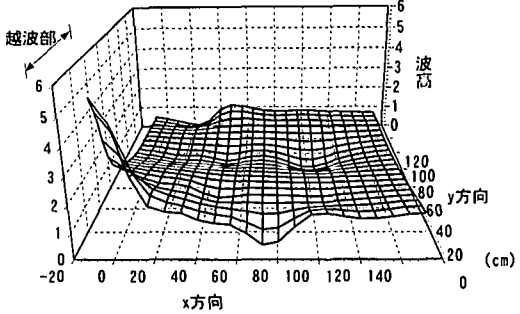


図-5 波高分布 (N-1)

越波量の小さい No. N-1 と越波量の大きい No. N-4 について、港内の波高分布を図-5 (No. N-1)、図-6 (No. N-4) にそれぞれ示す。これらの図からは、越波

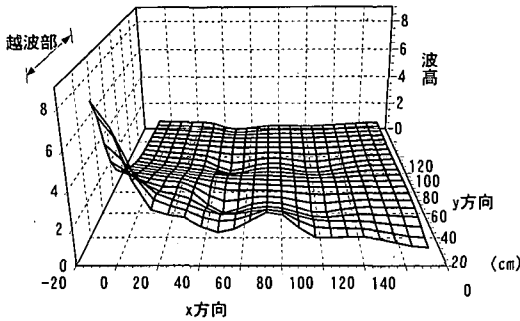


図-6 波高分布 (N-4)

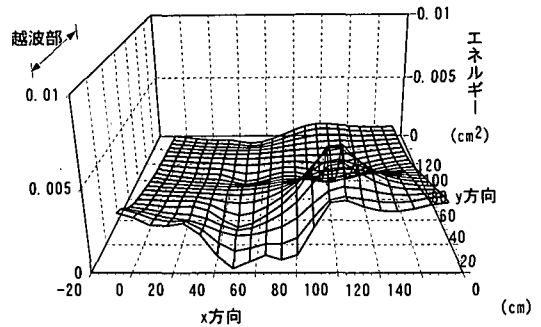


図-9 2倍周波数成分波のエネルギー (N-1)

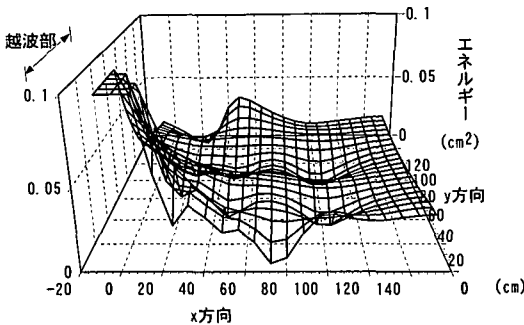


図-7 基本周波数成分波のエネルギー (N-1)

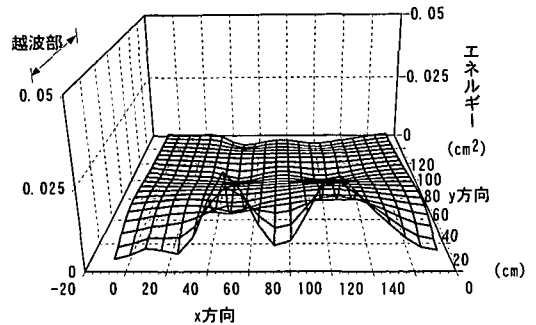


図-10 2倍周波数成分波のエネルギー (N-4)

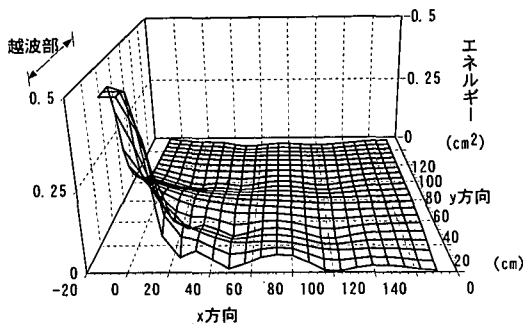


図-8 基本周波数成分波のエネルギー (N-4)

直後の波高より、やや港内側に進行した付近での波高の方が高いという傾向が見られる。これらの地点で得られた水面変動の時系列データを比較したところ、入射波の周波数である基本周波数成分波と2倍周波数成分波が重なっており、それらの成分波の位相差によって波高が変化していることがわかった。

b) エネルギーの平面分布

次に、スペクトル解析を用いて基本周波数成分と2倍周波数成分のエネルギーを抽出し、それらの平面分布を求めた。図-7, 8はそれぞれNo. N-1, No. N-4の基本周波数成分のエネルギー分布を示しており、図-9, 10はそれぞれNo. N-1, No. N-4の2倍周波数成分波のエネルギー分布を示している。

これらの図より、越波量が小さいケースでは入射波のエネルギーはほぼ基本周波数に集中しているが、越波量が大きいケースでは2倍周波数に配分されるエネルギーの割合が大きくなっていることがわかる。これは、越波量が大きいケースでは入射波の非線形性が大きくなっているからである。港内でのエネルギーの平面分布から、どちらも基本周波数成分のエネルギーに対して、高周波数成分のエネルギーが無視できないくらい存在していることが確認できた。またこれらの図より、基本周波数成分に含まれるエネルギーは、越波部分において最大となっており、港内での平面分布にそれほど差がないことがわかる。

しかし一方、2倍周波数成分に含まれるエネルギーは港内において、場所によって大きくなっていることがわかる。この2つのケースに共通していることは、越波部直後での大きなエネルギー分布が見られず、越波部より離れた位置でピークが現れていることである。

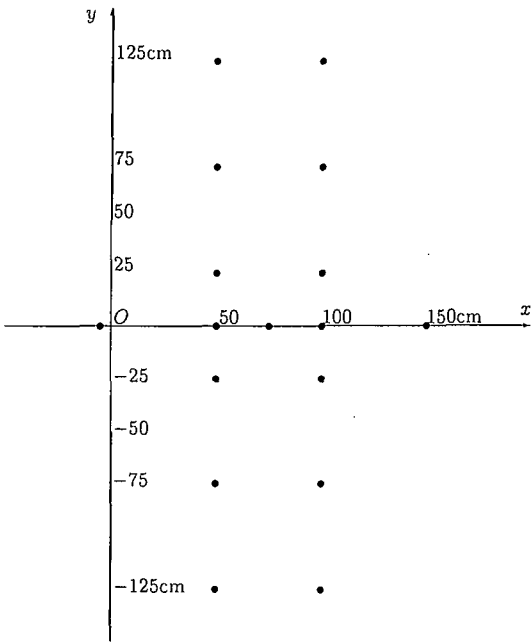
3.2 入射波が防波堤に斜めに入射する場合

次に、基本周波数成分と2倍周波数成分の方向分散特性の違いをより明確にするために、防波堤を造波板の方向に対して斜めに傾けて設置し、波が斜めに入射する条件で実験を行った。実験の条件は表-2に示した。

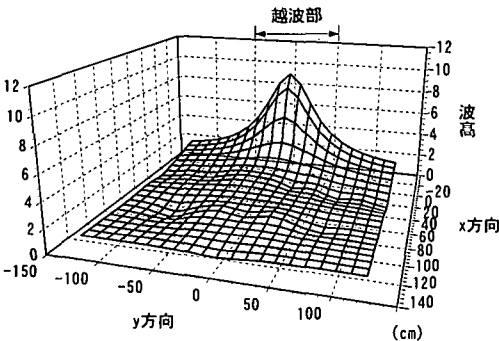
また、波高計の配置を図-11に示す。この図において、防波堤に対する波の入射角は、 x 軸から測って -30 度(ただし、反時計回りを正とする。)である。

表一2 実験条件 (斜め入射)

No.	周波数 (Hz)	周期 (s)	入射波 波高 (cm)	越波量 (cm ² /s)	
O-1	0.98	1.02	9.34	12.25	越波量小
O-2	0.83	1.20	10.82	33.62	越波量大



図一11 波高計の配置 (斜め入射)



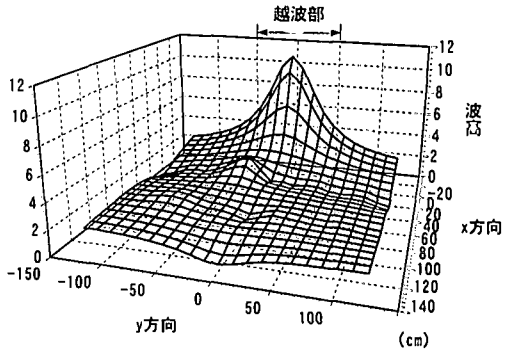
図一12 波高分布 (O-1)

a) 波高分布

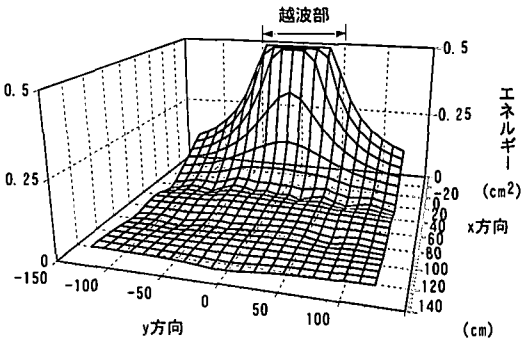
これらの実験で得られた波高の平面分布を図一12, 図一13に示す。これらの図から実験種別O-2のケースで、越波部の背後で一部波高の大きい地点が現れているほかは、港内の波高分布において場所による大きな差は見られないことがわかる。

b) エネルギーの平面分布

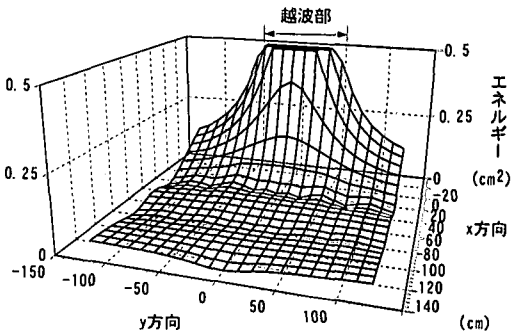
次に、直角入射の実験と同様に、基本周波数成分に含まれるエネルギーと2倍周波数成分に含まれるエネル



図一13 波高分布 (O-2)



図一14 基本周波数成分波のエネルギー (O-1)



図一15 基本周波数成分波のエネルギー (O-2)

ギーとに分けて、それぞれの平面分布を図一14から図一17に示した。このうち、図一14と図一15は基本周波数成分のエネルギー分布を示している。これらの図から波高分布と同様に港内全体にわたり均等にエネルギーが分布していることがわかる。

図一16と図一17はそれぞれNo. O-1, No. O-2での2倍周波数成分のエネルギー分布を示している。

これらの図からは、2倍周波数成分のエネルギーが入射波の方向に偏った分布となっていることがわかる。これらのことより、越波伝達波は、周波数成分毎に方向分散特性が異なり、入射波の周波数である基本周波数成分

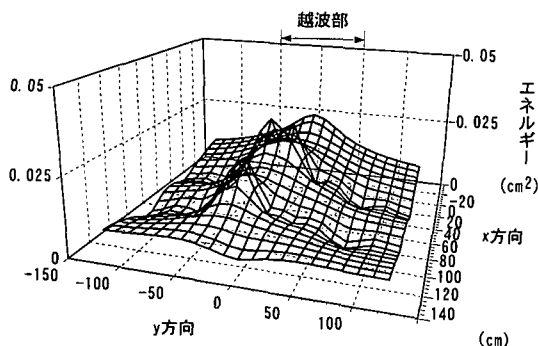


図-16 2倍周波数成分波のエネルギー (O-1)

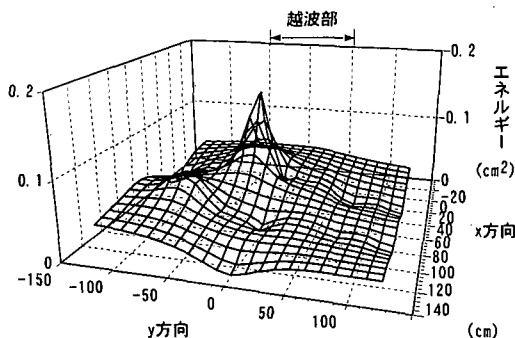


図-17 2倍周波数成分波のエネルギー (O-2)

のエネルギーは港内にほぼ一様に分散していくのに対し、2倍周波数成分に代表される高周波数成分のエネルギーは入射波の方向に集中した方向分散特性を持っていることが明らかになった。

4. 結 論

本研究では、平面水槽を用いて実験を行い、越波伝達波の周波数成分毎のエネルギーの平面分布に着目して実験結果を整理した。

その結果、直角の入射波、および斜め入射波による実験結果より、基本周波数成分のエネルギーは越波部分からどの方向に対してもほぼ均等に進行しているのに対し、高周波数成分(2倍周波数)のエネルギーは、入射波の波向き方向に比較的集中した分布形となっていることが明らかになった。また、この傾向は越波部から離れるに従って顕著になっていることがわかった。

このことから、港内波浪場において越波を考慮して越

波伝達波の計算を行ったり、越波伝達波の方向スペクトルを推定する際には、入射波の周波数成分と高周波数成分とで方向分散特性が異なることを考慮しなければならないことが明らかになった。今後は、越波伝達波の計算を行う上で、周波数毎の方向分散特性をさらに詳しく検討し、それをどのように考慮していくかということを検討していく必要がある。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり財団法人漁港漁村建設技術研究所より助成金を受けました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 池野正明・平口博丸・井上泰行・柏木洋之・樋口豊久 (1991): 応答関数を用いた不規則波による越波伝達波の算定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 526-530.
- 織田幸伸・東江隆夫・灘岡和夫 (1997): 運動量を考慮した越波伝達波の算定法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 751-755.
- 倉田克彦 (1981): 越波による伝達波高, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 339-342.
- 合田良実・竹田英章 (1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 87-92.
- 篠田邦祐・山本正昭 (1980): 越波による港内伝達波に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 406-409.
- 鈴木通仁・横木裕宗・藤田 龍・渡辺 晃・磯部雅彦 (1996): 越波を考慮した港内波浪場の計算法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 736-740.
- 高垣泰雄・清水二六・河原 進 (1985): 防波堤伝達波の平面分布特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 579-583.
- 谷本勝利・大里睦男 (1979): 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 309-313.
- 西受由裕・水口 優 (1996): 越波による伝達波について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 726-730.
- 平石哲也・金澤 剛・榎本達也・佐藤一央 (1996): 多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 716-720.
- 平口博丸・池野正明・井上泰行・柏木洋之・阿部光信 (1991): 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 第38回海岸工学講演会論文集, pp. 531-535.
- 松井政博・倉田克彦・荻野英樹・鈴木 功 (1980): 越波による伝達波特性(Cauchy-Poisson波によるモデル化), 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 410-413.
- 森下敏夫・綿貫 啓 (1981): 消波ブロック被覆堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 348-351.
- 森屋陽一・水口 優 (1996): 回折散乱波を考慮した越波問題, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 348-351.
- 渡辺 晃・藤田 龍・磯部雅彦 (1997): 越波による港内伝達波の計算法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 746-750.