

図-3と4は、実験に用いた堤体を示す。図に示すように、堤体は基礎捨石マウンドの上に直立部（以後、ケーソンという）を設置した混成堤タイプである。模型の縮尺は1/50であり、水深は-120cm（現地換算で-6.0m）、ケーソン設置水深は-54cm（現地換算で-2.7m）である。

図-5は消波スリット部の詳細図、図-6は波圧計番号図を示す。図に示すように波圧計はスリットの2段目と3段目に全部で27個取付けている。矢印は波圧計の受圧面の向きを示している。スリット2段目の波圧計の番号をP1～P14、3段目の波圧計の番号をP15～P27とする。なお、波は図の左下方向から入射している。

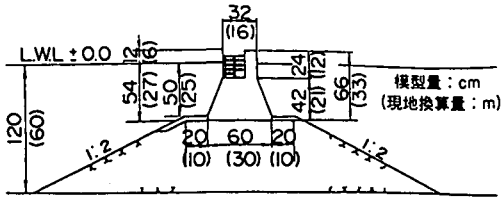


図-3 堤体模型断面図

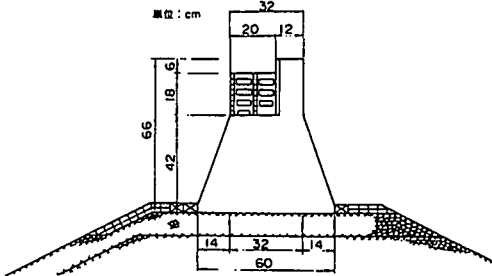


図-4 ケーソン断面図

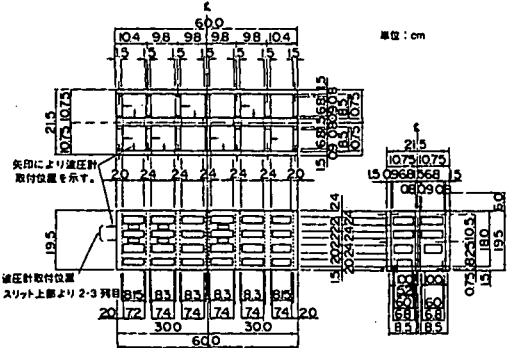


図-5 スリット部詳細図

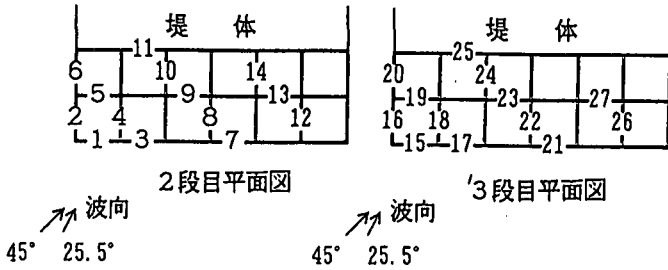


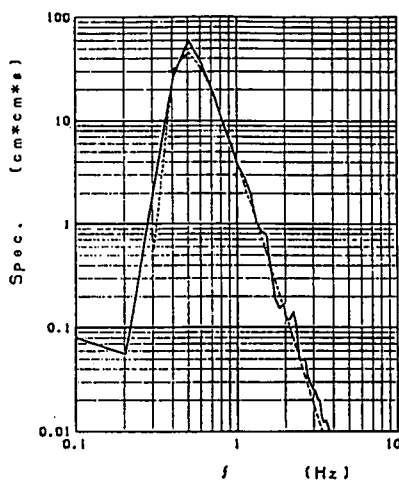
図-6 波圧計番号図

2. 2 実験の内容

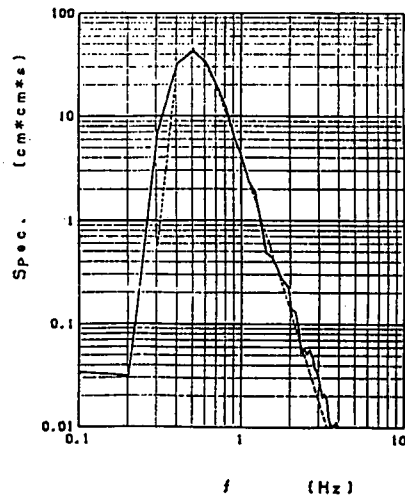
表-1に実験ケースを示す。“側壁あり”とはスリット部の1函分の両端に側壁を設けたもので、スリット部がケーソン1函ごと側壁で区切られた状態であることを示す。これは、現地での施工性を向上させるために考案されたものである。有義波高は7.4mと8.0mで、有義周期は13秒と14秒とした。波の入射角は堤頭函のスリット前面のラインの法線方向を0°とし、この法線との成す角として定義した。したがって入射角45°は造波機面に対して90°に相当する。入射角25.5°は設計波の波向で現地ではENE方向に相当する。周波数スペクトルはBretschneider・光易型スペクトルを目標とし、2種類の波群を作用させた。また、多方向不規則波の造波ケースについては、光易型の方向関数を用い、合田・鈴木(1975)が提案した方向集中度パラメータ S_{max} を10とした。図-7は一方向不規則波で波向45°および多方向不規則波で主波向45°の波高計No.1の周波数スペクトルを示す。図中の破線は目標としたBretschneider・光易型のスペクトルであり、今回の実験においては目標値とほぼ一致している。図-8は、ピーク周波数 f_p 近傍の周波数帯における方向関数の分布形を示す。方向スペクトルは、方向スペクトル計測用アレイの波高計No.1～4により測定し、解析はベイジアンモデル（橋本，1990）を用いた。図中の太線が実測方向関数、細線が方向集中パラメータ $S_{max}=10, 25, 50, 75, 100$ に相当する理論値を示す。図の横軸は造波機面の法線方向を90°として定義された角度である。一方向不規則波の図においてピーク出現時の角度が90°よりやや小さいのはアレイの設置角度の誤差であると考えられる。一方向不規則波の場合、実測方向関数は $S_{max}=100$ の理論値よりも大きく、単一方向不規則波が造波されている。また、多方向不規則波で主波向が45°の方向スペクトル図では、実測方向集中度はおおむね $S_{max}=10$ に近い。したがって、両ケースとも目標とした方向分布特性が得られていると判断できる。

表-1 実験条件

波の種類D	①一方向不規則波（堤頭面に対して45°で入射）	
	②多方向不規則波（ $S_{max}=10$ 、主波向45°）	
	③多方向不規則波（ $S_{max}=10$ 、主波向25.5°）	
有義波高H	現地	①7.4 ②8.0 (m)
	模型	①14.8 ②16.0 (cm)
有義周期T	現地	①13.0 ②14.0 (s)
	模型	①1.84 ②1.98 (s)
繰返しR	乱数初期値2種類（20, 50）	
側壁	2種類（無し、有り）	

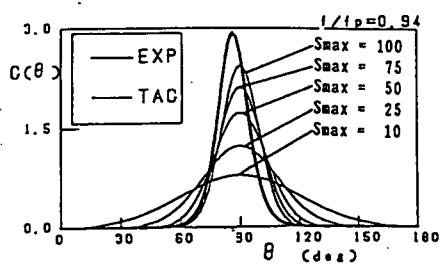


一方向不規則波波向 45°

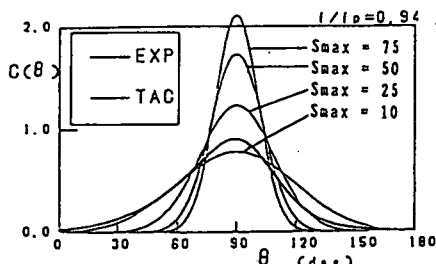


多方向不規則波主波向 45°

図-7 周波数スペクトル図



一方向不規則波波向 45°



多方向不規則波主波向 45°

図-8 方向スペクトル図

3. 波の作用状況とスリット部材に働く波力の特性

3.1 波の作用状況と記録した波形

写真-1に、波の作用状況を示す。図-9は波圧計で測定した波形を示したものである。今回作用させた波は水深が深い領域での波であるため、波圧波形のピークは丸みを帯び、衝撃的な波圧は作用していないことがわかる。この傾向はすべての実験ケースにおいて同様である。

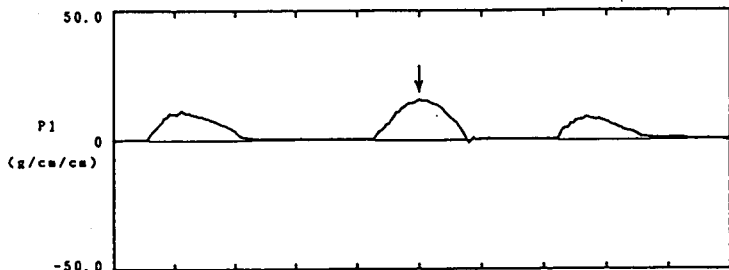


図-9 波圧波形図

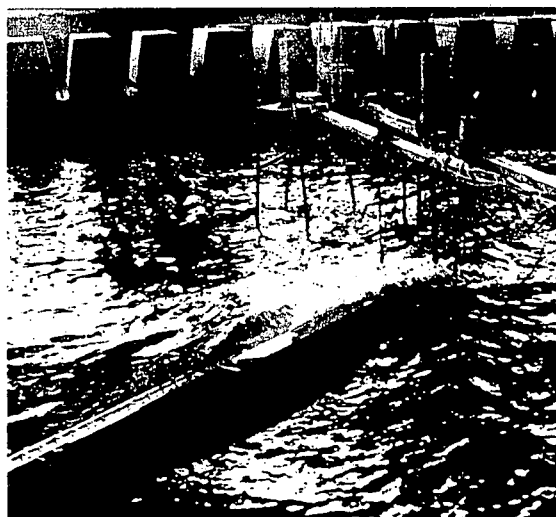


写真-1 波の作用状況

3.2 堤頭函付近の流れの状況

(1) 流速の大きさの分布

図-10は一方向不規則波と多方向不規則波で $H_{1/3} = 7.4 \text{ m}$, $T_{1/3} = 1.3 \text{ s}$, 側壁なしの場合の堤頭函付近の最大流速および有義流速を示したものである。最大流速を比較すると、流速計No.8の地点では波向方向の流速は、一方向不規則波で波向 45° と多方向不規則波で主波向 45° のケースでは顕著な差がみられないが、波向の法線方向では一方向不規則波の場合+側と-側の振幅の合計が 7.4 m/s であるのに対し、多方向不規則波の場合は 4.9 m/s となり、一方向不規則波の方が約5割大きくなっている。消波スリット前面の流速計No.9の地点においては、いずれのケースもほとんど差がみられない。防波堤開口部に設置した流速計No.10では、開口部の通過方向の流速の差についてはケースによる差はみられないが、横断方向の流速は一方向不規則波の場合+側、-側の振幅の合計が 10.4 m/s であるのに対し、多方向不規則波では 5.1 m/s となり一方向不規則波の方が2倍以上大きくなっている。したがって、一方向不規則波の場合には最大流速が波向の法線方向に大きな傾向を示すことがわかる。なお、有義流速においてはいずれの流速測定地点においても顕著な差がみられなかった。

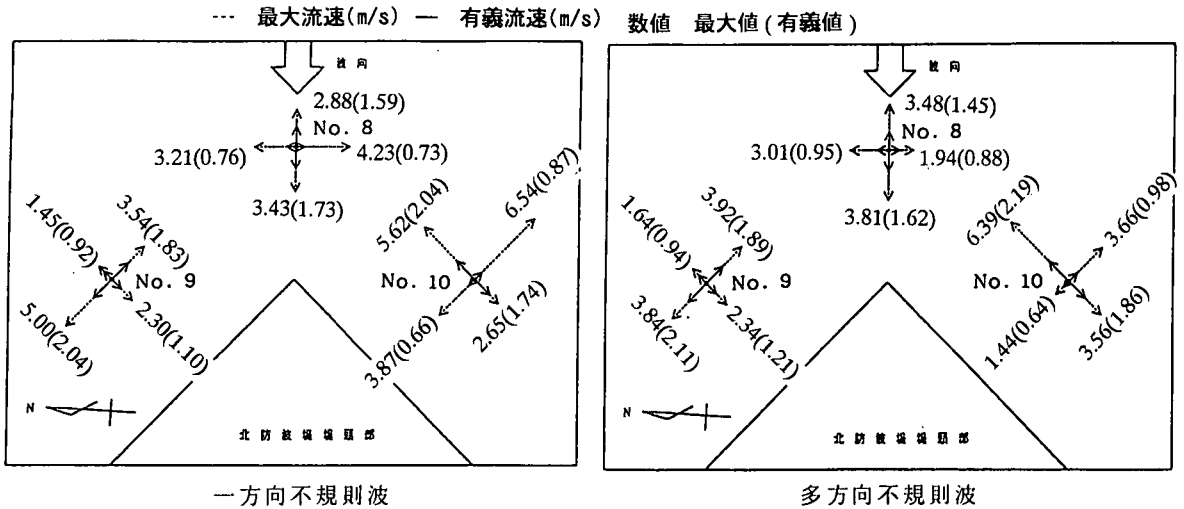
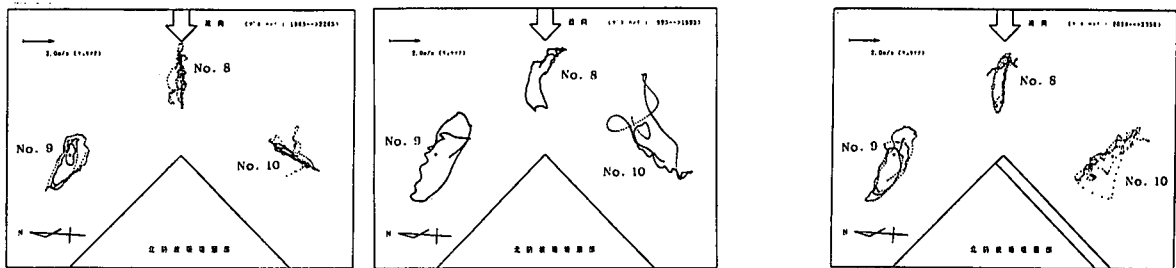


図 - 1 0 流速の大きさの分布

(2) 3 周期間の流れの向きの変化

波が3周期分通過する間に堤頭函付近の流れがどのように変化するかを解析した。図-11は $H_{1/3}=7.4$ m, $T_{1/3}=1.3$ sで、側壁なしの場合の3周期間の流れの向きの変化を一方向不規則波と多方向不規則波で比較したものである。流速計No. 8, 9および10のいずれの地点でも多方向不規則波では流れの向きが波向の法線方向にややふくらんでいる。また、図-12は、スリット部に側壁を設けたときの流れの変化を示す。No. 8, 9の流れは側壁なしの場合と同様な傾向を示しているが、防波堤開口部の流速計No. 10においては、側壁なしの場合流れの向きは通過方向であるのに対し、側壁がある場合は横断方向に流れが生ずる。これは、側壁により波が反射されるためであると思われる。したがって、ケーソンに側壁を設けると、横断方向の流れが速くなることがわかる。この傾向は多方向不規則波でも同様であった。



i) 一方向不規則波

ii) 多方向不規則波

一方向不規則波

図 - 1 1 3 周期間の流れの向きの変化 (側壁なし)

図 - 1 2 3 周期間の流れの向きの変化 (側壁あり)

3. 3 各部材に作用する無次元波圧の特性

波圧の解析においては、堤前波高で無次元化し、異なる波群の波圧を平均したものを用いた。まず、一方向不規則波による波圧と多方向不規則波による波圧の差を検討するため、スリット横部材とスリット縦部材に分けて議論することにする。図-13は、 $H_{1/3}=7.4$ m, $T_{1/3}=1.4$ sの場合の i) 一方向不規則波で波向 45° 、ii) 多方向不規則波で主波向 45° 、iii) 多方向不規則波で主波向 25.5° の波による無次元最大波圧の分布を示す。スリット横方向の部材については一方向不規則波と多方向不規則波における波圧の分布に差が見られない。スリット縦部材について、波圧の最大値と最小値を、i) のケースと ii) のケースで比較すると、一方向不規則波での最大値が0.98 (部材番号14)、最小値が0.45 (部材番号16)、差は0.53であるのに対し、多方向不規則波での最大値は0.80 (部材番号4)、最小値は0.59 (部材番号16) であり、差は0.21程度となる。つまり、一方向不規則波と多方向不規則波によるスリット部材波圧を比較すると、一方向不規則波では部材位置により最大波圧のばらつきが大きい、多方向不規則波では、ばらつきが小さくなる。また、各部材に発生する最大波圧の最大値も一方向不規則波ではほぼ1.0であるのに対し、多方向不規則波では0.8であることから多方向不規則波による最大波圧の方が小さくなる。このケース以外の場合においても同様の傾向が得られた。

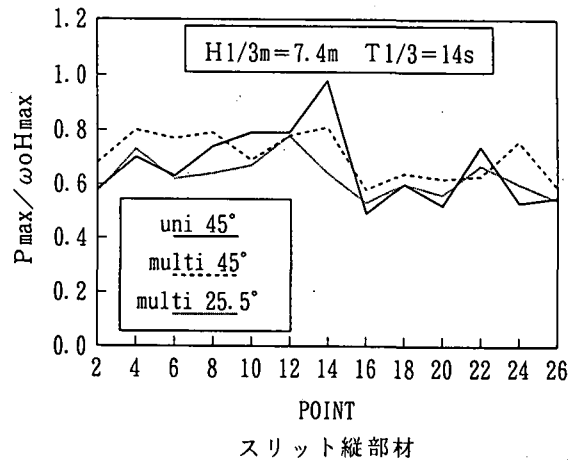
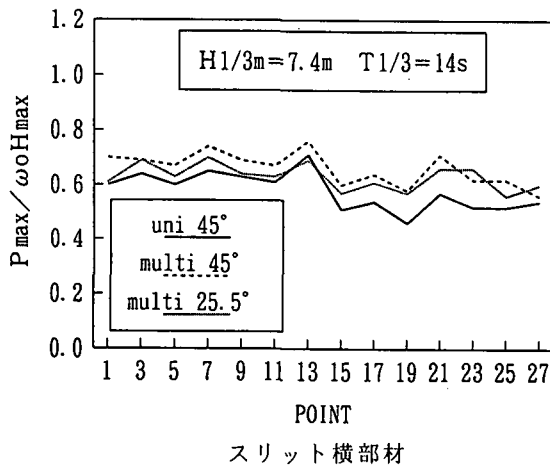


図-13 無次元最大波圧の分布

図-14は、i)一方向不規則波で波向 45° 、ii)多方向不規則波で主波向 45° およびiii)多方向不規則波で主波向 25.5° で $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14\text{s}$ の波を作用させたときの波圧の有義値をスリット横部材と縦部材について示したものである。図に示すように、一方向不規則波と多方向不規則波ではほとんど差がみられない。

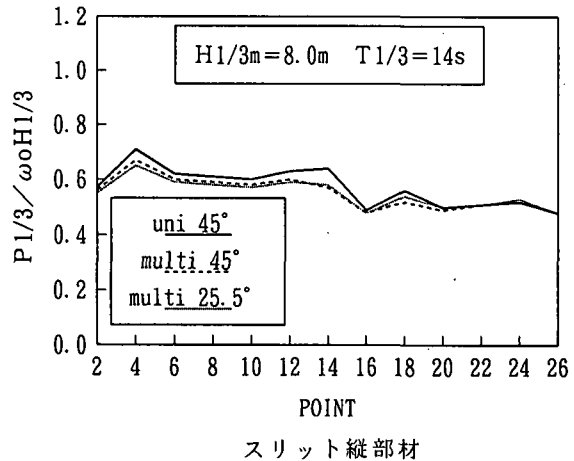
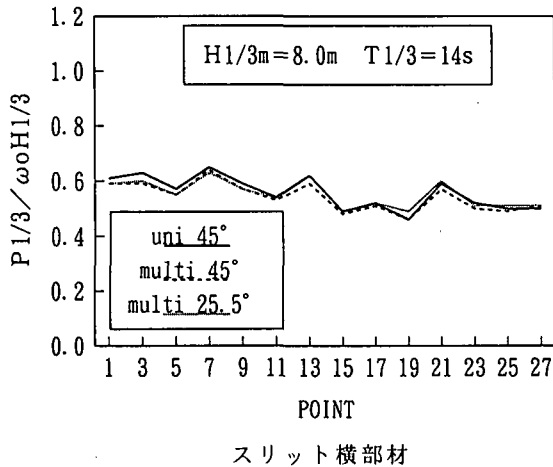


図-14 無次元有義波圧の分布

谷本ら(1988)が2次元水路においてスリット部材の波圧を測定した結果によれば、ひずみゲージによる波圧で最大が $0.7\omega H$ 程度であった。また、波圧計で得られる波圧はひずみゲージの値の1.5倍であることから、最大波圧の最大値は $0.7 \times 1.5 = 1.05$ 程度となる。これまでの設計においては一方向不規則波での最大波圧をもとにしており、今回の実験においては多方向不規則波の方が最大値が小さいことから、多方向性が卓越する大水深域に設置されるスリット部材に対する現在の設計法は安全サイドではあるものの波圧を過大に見積もっている可能性がある。

3.4 側壁なしと側壁ありの比較

今回側壁を設置した個所の部材番号はスリット2段目が2と6、スリット3段目が16と20である。図-15は、一方向不規則波で波向 45° の場合の側壁なしとありの実験結果の比較を示す。スリット横部材については、側壁の有無とスリット部材に作用する波圧に差は見られない。スリット縦部材では、側壁ありの場合、番号2または6の部材に最大波圧が生ずる。また、側壁なしの場合、番号4の部材に最大波圧が生じている。以上のことから、番号2、6の部材については側壁があるため、スリットの無い時に通過していた波の影響が加わることで非常に大きな波圧が生じていることがわかる。また、番号4の部材は側壁ありなしに関わらず波圧が大きくなる傾向が現れた。この傾向は多方向不規則波でも同様であった。

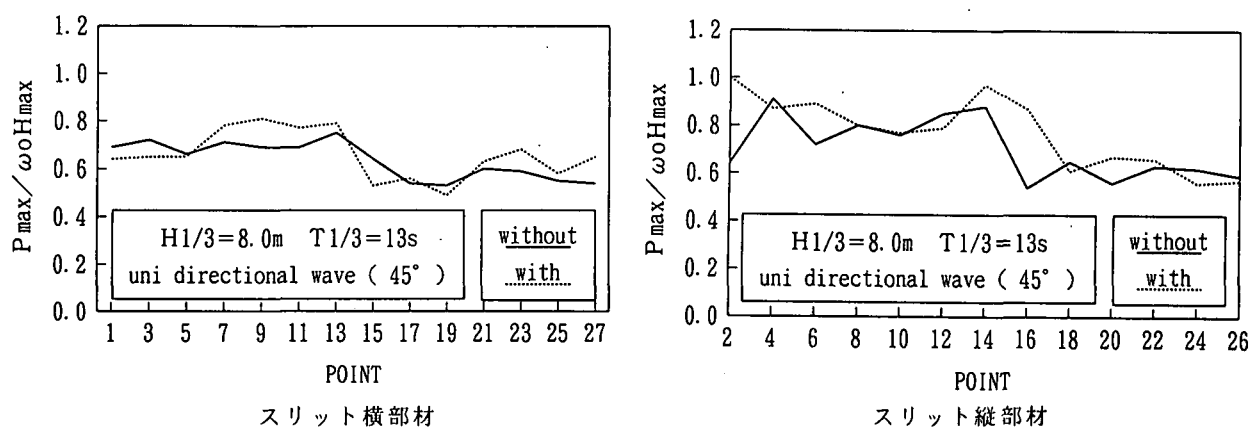


図-15 無次元最大波圧の分布

4. あとがき

本実験で得られた主な結論をまとめると以下のとおりとなる。

(1) 堤頭函付近の流速

一方向不規則波と多方向不規則波の場合を比較すると多方向不規則波の方が全般的に流速が小さい。また、側壁がある場合とない場合を比較すると側壁がない場合は流れの向きが開口部を通過する方向であるのに対し、側壁がある場合は開口部の横断方向になる。

(2) 一方向不規則波による波圧と多方向不規則波による波圧の比較

一方向不規則波では最大値、最小値のばらつきが大きく、多方向不規則波の場合には、ばらつきが小さくなる。また、多方向不規則波での最大波圧は一方向不規則波の場合と比べて小さくなることから、現在の設計法は安全サイドにある。

(3) 側壁ありとなしの部材波圧の比較

一方向不規則波と多方向不規則波の場合のいずれにおいても、側壁ありとなしの場合の明確な相違はない。したがって、施工性を向上させるために側壁を設けてもスリット部材に対する影響は小さい。

最後に、本研究において、運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室 河合弘泰研究官より統計解析プログラムについての協力を得た。ここに記して、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 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.155, 33p.
- 鈴木康正・藤咲秀可・河合弘泰・平石哲也 (1995) : 防波堤スリット部材に作用する多方向波力に関する模型実験, 港湾技研資料, No.795, 46p.
- 谷本勝利・小島朗史・鈴木論司 (1982) : 二重横スリット消波ケーソンの部材に働く波力について, 港湾技研資料, No.416, pp.3-29.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988) : 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究 (第1報) - 台形型直立部に働く波力および滑動安定性 -, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.1, pp.3-19.
- 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, Vol.26, No.2, pp.97-125.