

して、Bretschneider- 光易型を有する単一方向不規則波と多方向不規則波とした。有義波高 $H_{1/3}$ を 5, 8, 10 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ を 0.9, 1.0, 1.1 s とそれぞれ 3 段階に変化させ、それらを組み合わせたものを用いた。多方向不規則波は、光易型の方向関数を持つものとし、合田・鈴木 (1975) が提案した方向集中度パラメータ S_{max} を 10, 25, 75 に変化させた。なお、以下の図において、 $S_{max} = 999$ は単一方向波のケースであることを示す。主波向は、全ケースとも造波機面に対して直方向である。また、本実験では、各ケースについて 2 種類の波群を作用させ、その解析結果の平均値を各ケースの測定結果とした。図-3 および図-4 は、それぞれ実験波の周波数スペクトルと方向分布関数を示す。方向関数の解析はベイジアンモデル (橋本, 1992) に従った。図-3 に示すように、水槽内の実験波の周波数スペクトルは、ピークの値が目標値より高いものの、全体として形状が相似しており、目標とする周波数スペクトルが再現されている。黒丸で示す単一方向波のスペクトルと白丸で示す多方向波のスペクトルはよく一致しており、単一方向波と多方向波のエネルギーの周波数分布には違いは見られない。図-4 は、ピーク周波数近傍の周波数帯における方向関数の分布形で、各図の下段に、 S_{max} として、造波信号作成時に入力した方向集中度パラメータを示す。各図の縦軸が方向関数の値、横軸は角度で、 90° が造波機面に対して直方向を示す。各図の細実線は $S_{max} = 10 \sim 100$ に対して計算される理論方向関数分布形である。 $S_{max} = 999$ の場合、造波された波の方向集中度は高く、分布形は、 $S_{max} = 100$ の理論値より鋭くなっており、水槽内に正確に、単一方向波が造波されていることがわかる。 $S_{max} = 10 \sim 75$ で示された多方向波の実験結果は、目標とする理論分布と、ほぼ一致しており、水槽内において、目標とする多方向不規則波が精度よく造波されていることがわかる。なお、ピークの角度が、数度ずれているのは、波高計アレイ設置時の誤差によるものと思われる。

表 1 実験条件

波の種類	単一方向不規則波 多方向不規則波
周波数スペクトル	Bretschneider—光易型
方向関数	光易型 ($S_{max} = 10, 25, 75$)
水深	60 (cm)
波高	5, 8, 10 (cm)
周期	0.9, 1.0, 1.1 (s)

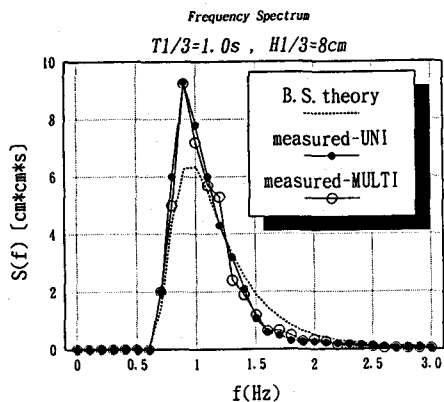


図-3 周波数スペクトル

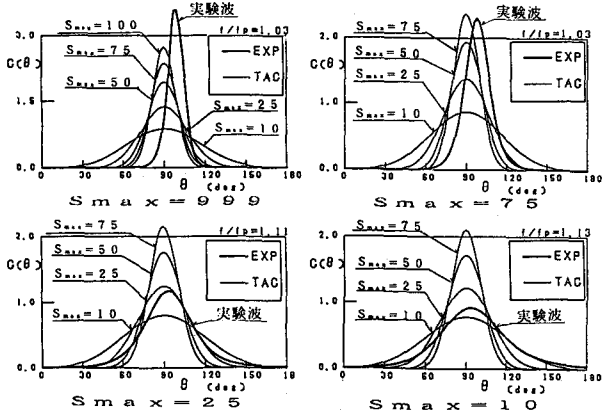


図-4 実験波の方向分布関数

図-5 は、測定した波力変動の時系列を示し、上段は作用波形、中段および下段はそれぞれ F_x , F_y の波力の変動を示す。図からわかるように、大きな波が作用すると同時に大きな波力が作用している。実験データの解析にあたっては、変動波力の正側のピーク値のみを整形し、大きい順に並べたもののうち、上から $1/3$ に含まれるピーク値の平均値を有義波力 $F_{x1/3}$, $F_{y1/3}$ としてまとめた。そして、これらの解析結果を、単一方向波と多方向波の場合で比較し、多方向波力の特性を調べた。

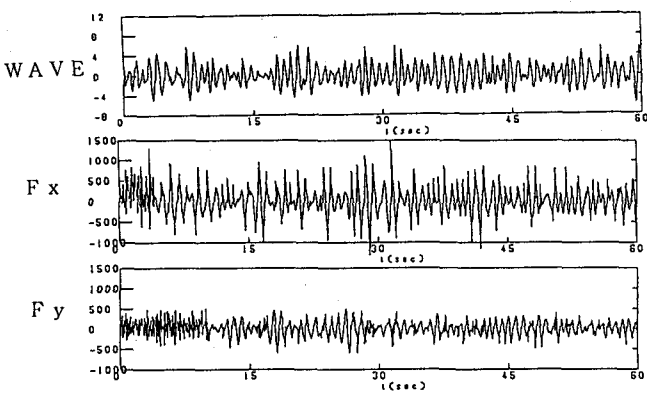


図-5 実験波形図

(2) 多方向波による波力の特性

波力を解析したところ、全ケースとも、波群 1 と波群 2 の 2 回の測定値の差が小さかったので、波群 1 および波群 2 における計測値の平均値をケースの代表値とした。図-6 の (1) および (2) の図はそれぞれ F_x および

F_y の有義値を、波高と円柱直径で無次元化して示したものである。図-6は、有義波周期 $T_{1/3}=1.1s$ の結果を示し、波力は、 $H_{1/3}\rho g D^2$ で無次元化している。波高が大きくなっても、無次元波力はほとんど変化せず、波力は、波高とほぼ線形の関係にあり、波高で無次元化することがわかる。モリソン式中の波力のうち、慣性力は波高に比例するから、本実験条件は、ほぼ、慣性力が卓越する領域に含まれており、波高に対して、線形化できる。

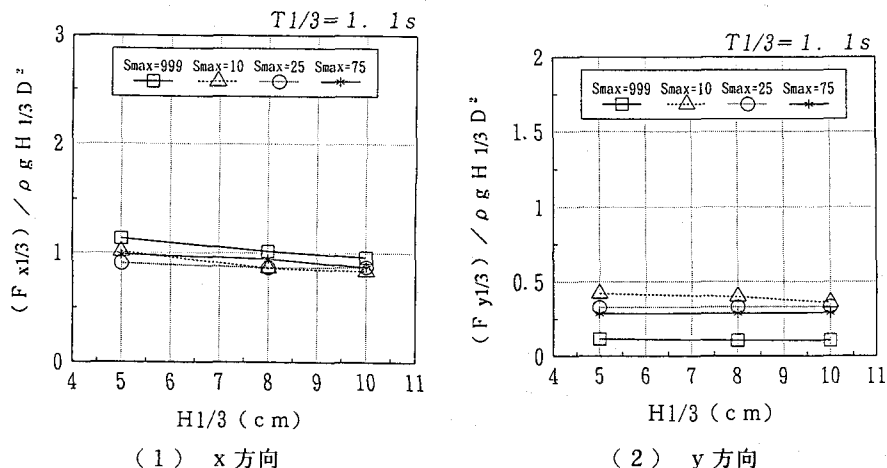


図-6 波高に対する無次元波力の変化

図-7は、波高レベルの異なる実験結果を平均して、 F_x および F_y の方向集中度に対する変化を示したものである。本実験の場合は、周期が異なっても波力に大きな変化はなく、周期の変化幅が小さいので、周期による波力の差が生じなかったためと思われる。主波向方向 F_x は、波の方向集中度が高くなると、徐々に増加し、 $S_{max}=10$ のときには、無次元波力が0.9であったものが、単一方向波になると1.1になる。一方、 F_y は、方向集中度が増加するのに従って減少し、 $S_{max}=10$ の場合には無次元波力が0.4程度であるが、単一方向波の場合に、0.15程度になる。周期の変化による差が小さいため、周期が異なる実験結果を平均して、方向集中度と波力の差を検討した。

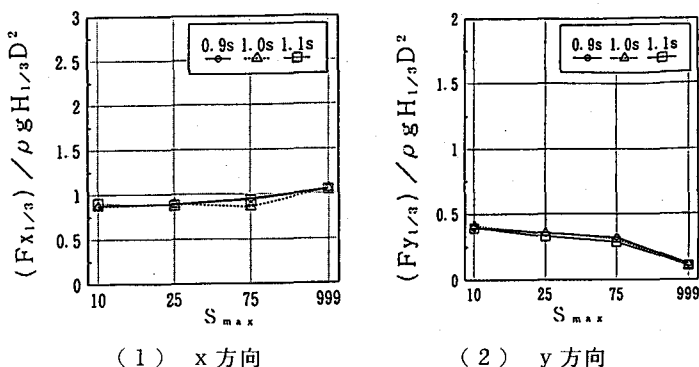


図-7 方向集中度に対する波力の関係

図-8は、平均的な方向集中度と波力の関係を示したものである。 F_y は、方向集中度が高くなるに従って、減少していくのに対して、 F_x は、増加していく。したがって、単一方向波の場合には、主波向方向の波力だけが卓越して作用しており、横方向の力を考慮する必要はないが、波の多方向性が強くなると、横方向の波力、すなわち F_y が増加していき、主波向以外の方向の波力についても検討する必要があることがわかる。なお、杭などの円柱については、全波力が設計に用いられることが多い。図-9は、各タイムステップにおいて、波力計のxおよびy方向の計測値の2乗和の平方根をとり、統計処理をして求めた合力の実験結果である。合力の有義値は、方向集中度が高くなるとわずかに増加する傾向を示す。したがって、単一方向波の方が全波力はわずかに大きくなるので、現行の波力算定法を用いると、多方向波力については、若干過剰になっていると思われる。

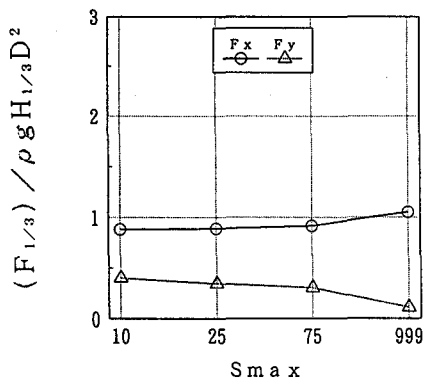


図-8 方向集中度と波力の関係

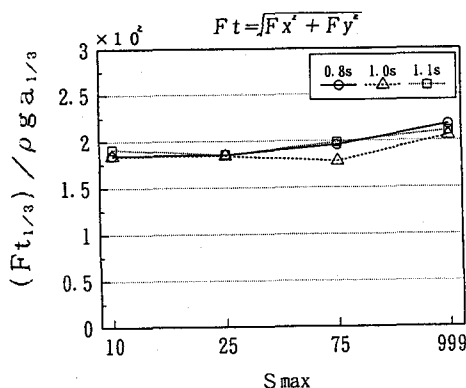


図-9 方向集中度による合力の変化(実験値)

3. 波力算定法とその妥当性

(1) 計算法

小口径の直立円柱単位長さあたりに作用する抗力 F_D' と慣性力 F_I' は次式で示される。

$$F_D' = \frac{dF_D}{dz} = C_D \frac{\rho D}{2} \left(\frac{H\sigma}{2} \right)^2 \left[\frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \right]^2 \cos \sigma t |\cos \sigma t| \quad (1)$$

$$F_I' = -\frac{dF_I}{dz} = C_M \frac{\rho \pi D^2}{2} \left(\frac{H\sigma^2}{2} \right) \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin \sigma t \quad (2)$$

水平方向の波力は、式 (1) および (2) を水深方向に積分して、次式のように表される。

$$\left\{ \begin{aligned} F_T &= \int_{-h_0}^{\zeta} (dF_D + dF_I) = F_D + F_I \\ F_D &= \rho g \frac{C_D}{2} \rho D \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{gkh}{\sinh 2kh} \cos \sigma t |\cos \sigma t| \\ &\quad \times \left[\frac{1}{2kh} \{ \sinh 2k(\zeta+h) - \sinh 2k(h-h_0) \} + \frac{\zeta+h_0}{h} \right] \\ F_I &= -C_M \rho g \frac{\pi D^2 H}{4} \frac{\sin \sigma t}{\cosh kh} [\sinh k(\zeta+h) - \sinh k(h-h_0)] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

ここで、 F_D と F_I はそれぞれ円柱に作用する全抗力と全慣性力である。 $H, \sigma, \rho, \zeta, k, h$ はそれぞれ波高、角周波数、水の密度、静水面を 0 としたときの水面変位、波数および水深である。 D は円柱の直径で、 h_0 は円柱の設置水深である。通常、 h と h_0 は一致しているが、波力センサー面が海底面に設置しておらず、海底面から離れているので、センサー設置水深 h_0 から上方の波力だけが測定される。 C_D および C_M はそれぞれ抗力および慣性力係数で、ここでは、現行の設計 (日本港湾協会, 1989) にしたがって 1.17 および 2 を用いる。多方向不規則波は、シングルサンメーション法 (高山・平石ら, 1989) によって異なる振幅、周期および波向を持つ成分波を、 N_s 個重ね合わせて作成できるものとする。 i 番目の成分波の波向を θ_i とする。波向 θ_i の成分波による x 軸方向の波力成分のうち、抗力によるものは次式で示される。

$$F_{Dxi} = \beta_i a_i \cos \theta_i (\cos^* \sigma_i t) \quad (4)$$

ここで、

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_i &= \rho g \frac{C_D}{2} D a_i \frac{k_i h}{\sinh 2k_i h} \left\{ \frac{1}{2k_i h} (\sinh 2k_i(\zeta+h) - \sinh 2k_i(h-h_0)) + \frac{\zeta+h_0}{h} \right\} \\ \cos^* \sigma_i t &= \cos \sigma_i t |\cos \sigma_i t| \end{aligned} \right. \quad (5)$$

慣性力によるものは、次のようになる。

$$F_{Ixi} = \alpha_i a_i \cos \theta_i (-\sin \sigma_i t) \quad (6)$$

ここで、

$$\alpha_i = C_M \rho g \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{\cosh k_i h} \{ \sinh k_i(h+\zeta) - \sinh k_i(h-h_0) \} \quad (7)$$

実験条件においては、抗力は慣性力に比べて小さいので、 $\cos^* \sigma t$ を $\cos \sigma t$ で近似すると、 i 番目の成分波による x 軸方向の全波力は次式で表される。

$$\left\{ \begin{aligned} F_{Tx_i} &= F_{Dxi} + F_{Ixi} = \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} a_i \cos \theta_i \sin(\sigma_i t + \epsilon^*_i) \\ \epsilon^*_i &= \arctan(-\beta_i / \alpha_i) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

同様に、 i 番目の成分波による y 軸方向の全波力は次式で表される。

$$F_{Ty_i} = F_{Dyi} + F_{Iyi} = \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} a_i \sin \theta_i \sin(\sigma_i t + \epsilon^*_i) \quad (9)$$

式 (8) および (9) に示されるように、波力振幅は波振幅に比例するものと近似できるので、波力振幅の x および y 軸方向の有義値は次式で表される。

$$\left\{ \begin{aligned} F_{x1/3} &= \left[\sum_{i=1}^{N_i} \frac{S(f_i) \Delta f_i}{m_0} \hat{\alpha}_{xi}^2 \right]^{1/2} \frac{H_{1/3}}{2} \\ F_{y1/3} &= \left[\sum_{i=1}^{N_i} \frac{S(f_i) \Delta f_i}{m_0} \hat{\alpha}_{yi}^2 \right]^{1/2} \frac{H_{1/3}}{2} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

ここで、 f_i および $S(f_i)$ は i 番目の成分波の周波数および周波数スペクトルである。また、

$\hat{\alpha}_{xi} = \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} \cos \theta_i$, $\hat{\alpha}_{yi} = \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} \sin \theta_i$ である。波力振幅の最大値は、水位上昇とが上昇したときに

に生じるため、 α_i および β_i の計算において、ピーク周波数近傍の周波数帯に含まれる周波数を有する成分波においては、 ζ を $H_{1/3}/2$ で代表させた。は、次式で考慮した。ピーク周波数 f_p 近傍とは、波の全エネルギーの 80% が含まれる $0.8 f_p \sim 1.65 f_p$ に相当する。多方向不規則波をシミュレートする場合には、成分波の位相および波向を決定するための乱数列の種類および重ね合わせる成分波数の数によって計算結果が異なる可能性がある(高山・平石ら, 1989)。そこで、上記に示した計算を、異なる乱数列を用いて行った。図-10 は、乱数列を3種類に変化させ、各乱数について、成分波数 N_s を 100 から 1000 まで変化させた場合について、波力振幅の有義値を半波高で除した値 F_{bx} および F_{by} を示したものである。なお、図の計算においては有義波周期 $T_{1/3}$, h および h_0 は、それぞれ 1 s, 60 cm および 40 cm とした。方向集中度パラメータ S_{max} は 25 で、円柱の直径 D は 10 cm である。図において、 r は乱数の種類を示したもので、1 から 3 まで 3 種類を比較した。縦軸に波力応答係数 F_{bx} および F_{by} を示した。図に示すように、成分波数が 200 程度であれば波力応答係数は変動しているが、成分波数が 500 以上になると、波力応答係数は、成分波数によらず一定である。また、乱数列が変化しても、応答係数の値は、成分波数が 500 以上であればほとんど変化しない。そこで、シミュレーションに用いる成分波数 N_s を 500 としておけば、乱数列を任意に与えることができる。

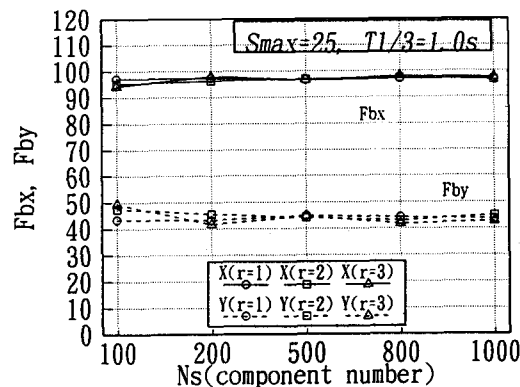


図-10 成分波数による波力応答係数の変化

(2) 計算値と実験値の比較

図-11 は合力 F_t に関する計算値と実験値の比較を示す。縦軸は、合力 F_t の有義値を有義波高の半分 ($a_{1/3}) \times \rho g$ で無次元化したものである。計算値は、方向集中度パラメータ S_{max} が変化しても一定になり、その大きさは実験値とよく一致する。図-12 は、合力 F_t の有義値に対する、 x および y 方向の有義波力の比を示したものである。方向集中度パラメータ S_{max} が大きくなり、波の方向集中度が高くなるにつれて実験値および計算値ともに同じ傾向を示し、 $F_{x1/3}$ は増加する。主波向に対して横方向になる y 方向の有義波力 $F_{y1/3}$ は、方向集中度が高くなると、小さくなり、計算値は実験値とよく一致する。なお、 $S_{max} = 9.99$ すなわち単一方向不規則波の場合には、計算では、 $F_{y1/3}$ は 0 になるが、実験では 0.1 程度の値を示す。実験値が 0 にならないのは、平面水槽内では、単一方向波を起こしても、波向以外の方向へも、エネルギーが分散するためである。このように、シングルサンメーション法によって、成分波による波力を線形に重ね合わせると、多方向波による水平波力を推定できる。

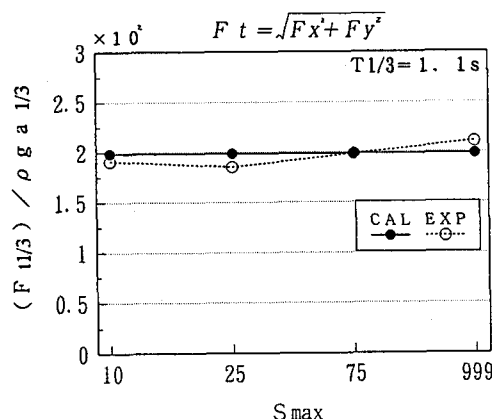


図-11 全波力における計算値と実験値の比較

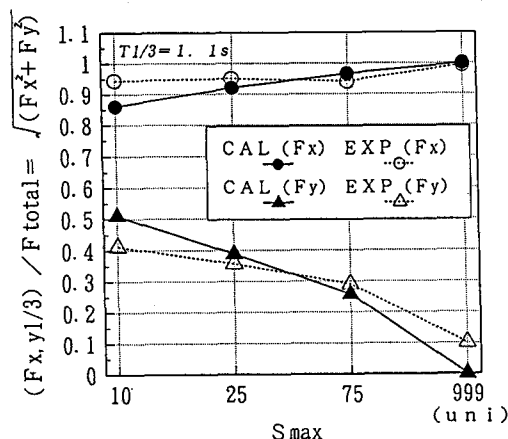
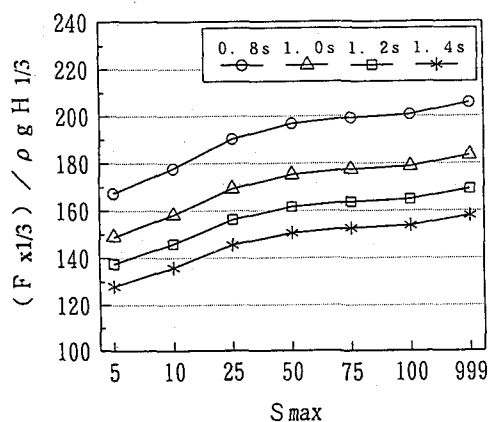


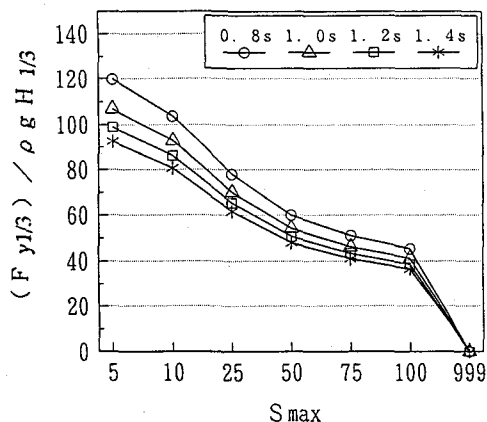
図-12 水平2成分波力における計算値と実験値の比較

図-13 (1) および (2) は、周期および方向集中度の変化に対する、 x 方向および y 方向の有義波力の計算値を示したものである。縦軸は、有義張力を $\rho g H_{1/3}$ で除した値である。ここでは、円柱は水底面に設置されており、円柱直径および水深は 10 cm および 60 cm とした。周期 0.8 ~ 1.4 s のいずれの場合にも波の方向集中度が高くなると F_x は徐々に増加し、 $S_{max} = 5$ の場合と、単一方向波の場合を比較すると x 方向すなわち主波向方向の波力は 2 割程度増加している。したがって、主波向方向の波力については、単一方向波が最も厳しい条件となる。図-13 (2) の y 方向の波力を調べると、波の方向集中度が高くなるにしたがって主波向に対して直角方向の波力成分は急激に減少する。単一方向波では、 y 方向成分は 0 であるのに対して、 $S_{max} = 5$ の場合に

は、90～120程度になる。したがって、多方向不規則波が作用する場合には、主波向方向の波力だけでなく、主波向に対して直角方向の力を考慮しておく必要がある。また、y方向成分は方向集中度によって大きく変化するので、海域における波の多方向性を正確に推定しておく必要がある。



(1) x 方向



(2) y 方向

図-13 方向集中度に対する円柱波力の計算値の変化

4. あとがき

本実験では、多方向不規則波中に設置された円柱に作用する水平力を測定し、多方向不規則波中においては、主波向方向の波力成分だけでなく、主波向に対して横方向へも波力成分が生じることを明らかにした。そして、それらの波力成分の大きさを推定する手法を提案し、それが妥当性を有することを示した。今後は、本実験および計算で得られた知見を実際の構造物の設計へ適用していくつもりである。たとえば、釜石港に建設されている湾口防波堤は開口部の水深が60mであり、作用する波は多方向波であると考えられる。また、使用しているケーソンはスリット式であり、スリット部材に作用する波力の検討が必要である。そこで、開口部の堤頭面のスリット部にの設計においては、多方向不規則波を作用させて部材波力を測定し、波の多方向性が波力に及ぼす影響を検討しておくなければならない。

〈参考文献〉

- 合田良美・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.
 日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), pp.136-138.
 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, Vol.36, P.153-157
 橋本典明 (1992): 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料 No.722, 118p.