

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT, JAPAN

No.1000 June 2001

回折を考慮したエネルギー平衡方程式による  
波浪変形計算の適用性の検討

田 中 良 男  
平 石 哲 也

国土交通省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 波浪変形計算法	4
2.1 従来のエネルギー平衡方程式	4
2.2 エネルギー平衡方程式への回折項の導入	4
2.3 数値計算法	5
3. 計算の適用性の検討	7
3.1 開口防波堤背後の計算結果の比較	7
3.2 A港の現地観測結果および高山法との比較	10
3.3 B港南沖防波堤の水理模型実験結果との比較	13
4. 結論	18
5. あとがき	18
参考文献	19
記号表	19

# Applicability of Wave Transformation Model by Energy Balance Equation with Diffraction Term

Yoshio TANAKA\*

Tetsuya HIRAISHI\*\*

## Synopsis

A steady numerical computation of random wave is important to the safe and economical design of a port structure. The energy balance equation is widely used as fundamental equation for the numerical computation of the random wave transformation. This method is applied in the relatively small harbor with uniform water depth. Recently, the research considering the effect of wave diffraction in the energy balance is proposed.

The applicability of the calculation by the energy balance equation with diffraction term is investigated with the experiments on the transformation of directional random wave in model harbor and with the field survey results.

The main conclusions are as follows:

- 1) When the directional distribution of wave energy in the numerical scheme becomes significant, numerical errors may be reduced by applying the diffraction term in energy balance equation.
- 2) The wave height observed in a small harbor of which the water depth varies in the range on its mouth to innermost part of harbor agrees with the estimated wave height in the newly developed energy balance equation.
- 3) The experimentally obtained wave height behind breakwaters agrees with the estimated wave height except of the points along the breakwater back side. The disagreement is indicated to the reflection wave break into back side. The good agreement demonstrates that the energy balance equation with diffraction term is applied to the prototype harbor design.

**Key Words:** Wave Transformation, numerical simulation, diffraction, multi-directional wave

---

\* Trainee of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division (Tokyo Kyuei Co.,Ltd.)

\*\* Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445010 Fax : +81-468-413888 e-mail:hiraiishi@cc.phri.go.jp

# 回折を考慮したエネルギー平衡方程式による 波浪変形計算の適用性の検討

田中 良男\*  
平石 哲也\*\*

## 要 旨

港湾構造物を設計する際には、沖合から進行してきた波が対象とする地点に到達するまでにどの様に変形するかを正確に把握することが安全かつ経済的な設計をするために非常に重要である。従来のエネルギー平衡方程式による波浪変形計算は回折の効果を考慮していないので、その影響の小さい領域で実務上よく用いられている。最近、波動方程式を基にエネルギー平衡方程式に回折を取り入れた研究が発表されており、水深変化のある港内の設計等、実務への展開が望まれている。

本研究では回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算の適用性を現地実測結果や水理模型実験結果などから検討した。その結果、以下のような主要な結論が得られた。

- 1) 方向分散効果が大きいときには従来の計算結果と大きな差は無いが、一方向性の強い波では防波堤背後に回り込むような回折の効果が確認できた。
- 2) 本来、回折の影響が無い直接波が入射する部分で、計算の際の離散化に起因する誤差が回折項の導入によるエネルギーの分散効果により緩和される。
- 3) 港口部に大きな水深変化がある場合、屈折を考慮しないモデルで計算すると港奥部の波高を小さく見積もってしまう可能性がある。しかし、屈折を考慮できるモデルであるエネルギー平衡方程式に回折項を導入したものは、より精度良く波高分布を計算できることがわかった。
- 4) 水理模型実験結果と比較して、防波堤背後の重複波の影響が大きい場所以外は水理模型実験結果と計算結果は良く一致しており、回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算が港内の波浪変形計算に対して有効であることがわかった。

キーワード：波浪変形，数値シミュレーション，回折，多方向不規則波

---

\*水工部波浪研究室研修生(株式会社東京久栄)

\*\*水工部波浪研究室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省港湾技術研究所  
電話：0468-44-5010 Fax：0468-41-3888 e-mail:hiraiishi@cc.phri.go.jp

## 1. まえがき

港湾構造物を安全に、しかもできるだけ経済的に設計するためには波の予測の精度を十分に保つことが必要不可欠である。沿岸域においては水深が大きく変化するため、屈折、浅水変形、砕波などにより、海の波は大きく変形することになる。また、防波堤などの港湾構造物の先端では回折が起こり、構造物前面では反射が起こることにより、波が大きく変形する<sup>1)</sup>。以上のようなさまざまな効果をすべて考慮すれば正確な波浪変形予測ができることになるが、現在、これらすべてを同時に取り扱うことは困難である<sup>2)</sup>。

エネルギー平衡方程式は波を位相的に平均し、エネルギーの連続を基本式として定常解を求めるモデルであり、波による水位の変化を直接解く訳ではないので比較的大きな格子間隔で計算することができる。このため、計算時間も少なく済み、かなり広い範囲を計算できるといふ利点を持つ。本来のKarlsson<sup>3)</sup>によって示されたエネルギー平衡方程式による多方向不規則波の波浪変形計算には、屈折、および浅水変形のみが取り込まれている。高山ら<sup>4)</sup>はこれにエネルギーの消散項を導入し砕波の効果を取り入れた。さらには計算を岸側から逆向きに進めることによって沿岸から沖向きに反射する1次反射波の効果を取り入れた。しかし、エネルギー平衡方程式では、本来、式の中に回折を考慮する項がなく、回折は考慮されない。それにもかかわらず、多方向不規則波の方向分散効果と計算に伴う数値分散効果により、あたかも回折が起こったように障害物背後にも波のエネルギーが伝播することも報告されている。ただし、この波の回りこみは厳密な意味での回折の効果ではない<sup>5)</sup>。これに対し間瀬ら<sup>6)</sup>は放物型波動方程式を基にした回折項を定式化し、エネルギー平衡方程式に導入し、理論解、および、楕円浅瀬での模型実験と比較し、その有効性を示している。

現在、実務上はエネルギー平衡方程式で回折の影響が小さい港の入り口までを計算し、水深変化の少ない港口部から港内は高山の方法<sup>7)</sup>（以下、高山法と称する）で回折のみを計算するという方法が盛んに用いられている。高山法は港内の波高分布を求めることを想定し、多方向不規則波の多重反射と回折を計算するモデルであり、水深の変化に伴う屈折や浅水変形の効果は計算できない。

近年、港湾の大規模化や沖防波堤の設置など、港湾区域の拡張に伴い、港内で水深変化が大きくなっており、もはや水深一様として回折のみを考慮すると、波高の計算結果に誤差が含まれる。そこで、回折の効果と水深変化に伴う屈折や浅水変形の効果と同時に考慮できるモデ

ルの必要性は高まってきている。間瀬ら<sup>6)</sup>が提案した回折を考慮したエネルギー平衡方程式はその両方を取り入れることが可能であり、港湾構造物の設計等の際に計算される波高分布の計算精度の向上に有効であると考えられる。ただし、間瀬ら<sup>6)</sup>は計算モデルの提案と単純な形状を有する地形上の変化しか検討していない。数値計算モデルを設計等の実務に使用する場合は理論的な検討だけでなく、現地実測結果等との整合性を確認し、そのモデルの特性と適用範囲を十分に把握しておくことが必要である。また、複雑な地形を有する模型実験での比較も必要である。本研究では、間瀬ら<sup>6)</sup>が提案した回折を考慮したエネルギー平衡方程式の適用性を、従来のエネルギー平衡方程式による計算結果、高山法による計算結果、現地実測結果、および複雑な浅瀬と防波堤を有する現地地形を再現した水理模型実験の結果を用いて検討し、その適用性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 波浪変形計算法

### 2.1 従来のエネルギー平衡方程式

定常な波浪場を想定し、微小領域内に流入するエネルギーフラックスの連続と波の屈折による波向き変化に伴うエネルギーフラックスの連続を仮定し、さらに砕波によるエネルギー減衰を加えたエネルギー平衡方程式は以下のように表される<sup>4)</sup>。

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = -\varepsilon_b S \quad (1)$$

ここで、

$$(v_x, v_y) = (C_g \cos \theta, C_g \sin \theta) \quad (2)$$

$$v_\theta = \frac{C_g}{C} \left( \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (3)$$

であり、 $S$ は波の方向スペクトル、 $\varepsilon_b$ は砕波によるエネルギー減衰係数、 $C_g$ は波の群速度、 $C$ は波速、 $\theta$ は $x$ 軸の正方向から反時計回りに測った波向角を表わす。

成分波はすべて沖から岸に向けて進行するという条件を設定すると、 $v_x > 0$ となり、境界条件として沖側境界の方向スペクトルを与えると沖側から逐次解いていくことができる。

### 2.2 エネルギー平衡方程式への回折項の導入

間瀬ら<sup>6)</sup>は放物型波動方程式を基にした回折項を定式

化し、エネルギー平衡方程式に導入している。以下にその方法を示す。

基本的な波動方程式は次のように表わされる。

$$2ikCC_g A_x + i(kCC_g)_x A + (CC_g A_y)_y = 0 \quad (4)$$

ここで $k$ は波数であり、 $A$ は複素振幅 $A'$ と次の関係で表わされる<sup>2)</sup>。

$$A' = A e^{i(k_0 x - \int k dx)} \quad (5)$$

式(4)に $A$ の共役複素数を乗じたものと式(4)全体の共役複素数に $A$ を乗じたものを加えると、

$$(C_g |A|^2)_x - \frac{i}{2\omega} \{ (CC_g |A|^2)_y - 2CC_g A_y A_y^* \} = 0 \quad (6)$$

となる。この式が成り立つためには

$$(C_g |A|^2)_x = 0 \quad (7)$$

$$(CC_g |A|^2)_y - 2CC_g A_y A_y^* = 0 \quad (8)$$

となる。

波のエネルギー $E$ は $|A|^2$ に比例するので式(7)および式(8)の左辺第1項は $E$ で表現できるが、式(8)の左辺第2項の $A_y A_y^*$ は $E$ で表現できない。そこで $A_y A_y^*$ を $E_{yy}/4$ と近似すると、

$$(CC_g E_y)_y - CC_g E_{yy} / 2 \cong 0 \quad (9)$$

となる<sup>6)</sup>。式(7)の左辺が式(1)の左辺と比べてエネルギー $E$ を方向スペクトル $S$ とみなし、ほぼ0である式(9)の $E$ を $S$ として式(1)の右辺に加えると、モデル方程式として次式が得られる。

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon_s S \quad (10)$$

ここで、 $\kappa$ は回折項に関する影響係数で、間瀬ら<sup>6)</sup>は予備計算の結果から $\kappa=2.5$ と設定している。式(10)の右辺第2項は左辺の $S$ と連成するため、拡散項の役目を果たし、波の伝播方向に対し垂直な方向に回折効果を導入することができる。

### 2.3 数値計算法

図-1に示すような座標系で、格子 $(i, j)$ において式(10)を差分化すると次のようになる。

$$A_1 S_n^{ijk} + A_2 S_n^{i(j-1)k} + A_3 S_n^{i(j+1)k} + A_4 S_n^{ij(k-1)} + A_5 S_n^{ij(k+1)} = -BS_n^{(i-1)jk} \quad (11)$$

ここに、

$$A_1 = v_{x_n}^{ijk} / \delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \{ (CC_g)^{i(j+1)k} + (CC_g)^{ijk} - (CC_g)^{i(j+1/2)k} \} \cos^2 \theta_k + \begin{cases} v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases} + \begin{cases} v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ (v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - v_{\theta_n}^{ijk}) / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k + \begin{cases} -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ 0 & (v_y < 0) \end{cases} \quad (13)$$

$$A_3 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{i(j+1)k} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k + \begin{cases} 0 & (v_y \geq 0) \\ v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases} \quad (14)$$

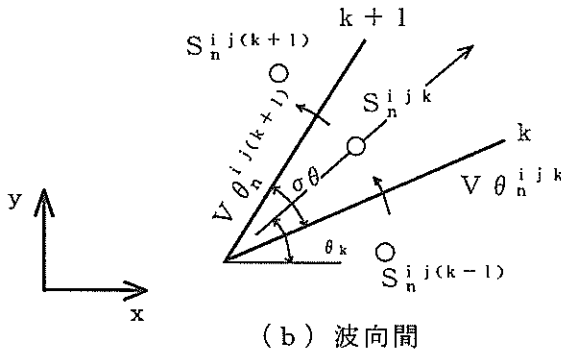
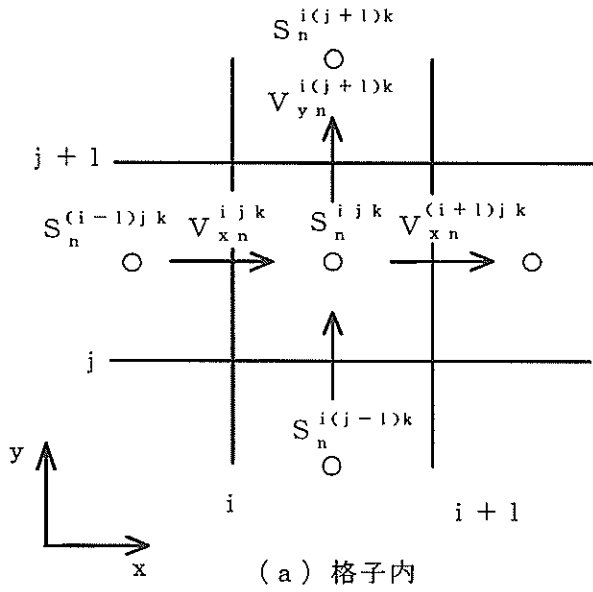


図-1 成分波のエネルギー流出入

$$A_4 = \begin{cases} -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (15)$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (16)$$

$$B = -v_{x_n}^{ijk} / \delta x \quad (17)$$

である。ここで、 $\delta x$ および $\delta y$ はx軸およびy軸の格子間隔、 $i$ および $j$ はそれぞれx軸およびy軸方向の格子番号、 $n$ は周波数分割した成分ごとの順序番号、 $k$ は方向分割した成分ごとの順序番号である。

$i$ 番目の格子列に対して式(11)の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であるので、 $j=1 \sim J$ 、 $k=1 \sim K$ の $J \times K$ 個の連立方程式を解くことにより $S_n^{ijk}$ を求めることができる。これを周波数分割成分の個数分、 $N$ 回解くことにより $i$ 番目の格子列の方向スペクトルを求めることができる。一番沖側の格子に沖波条件として方向スペクトルを与え、順次前進的に計算を行って計算領域全域の方向スペクトルを求める。計算された方向スペクトルから有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、平均波向き $\bar{\theta}$ を次の式によって求める。

$$H_{1/3} = 4.0\sqrt{m_0} \quad (18)$$

$$H_{\max} = \min\{H_b, 1.8H_{1/3}\} \quad (19)$$

$$T_{1/3} = T_0\sqrt{m_0/m_2/\bar{T}_0} \quad (20)$$

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \theta_k S_n^{ijk} / m_0 \quad (21)$$

ここで

$$m_i = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K f_n^i S_n^{ijk} \quad (22)$$

である。 $T_0$ は沖波の有義波周期、 $\bar{T}_0$ は沖波の平均周期を表わし、入力した沖波の方向スペクトルから次のように計算した。

$$\bar{T}_0 = \left[ \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_0(f, \theta) df d\theta \right] / \left[ \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^2 S_0(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2} \quad (23)$$

$H_b$ は砕波波高を表わし、合田<sup>8)</sup>の提案した砕波指標から次の式によって計算する。

$$H_b = A_b L_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \beta^{4/3}) \right] \right\} \quad (24)$$

ここで、係数 $A_b$ は合田が提案している $A_b=0.17$ をそのまま用いた。また、 $\beta$ は海底勾配で、 $x$ 軸の正方向から反時計回りに測った平均波向き $\bar{\theta}$ を用いて次式で与えた。

$$\beta = \beta_x \cos \bar{\theta} + \beta_y \sin \bar{\theta} \quad (25)$$

ここで、 $\beta_x$ および $\beta_y$ はそれぞれ $x$ 軸および $y$ 軸方向の海底勾配である。

陸上境界や防波堤などの構造物での反射については高山ら<sup>4)</sup>に従い、1次反射までを考慮する。その概要を以下に示す。

$y$ 軸に垂直な境界で反射された波は反射後も $x$ 軸の正方向、すなわち岸方向に進んでいくので、計算に直接取り込むことができる。反射前と反射後の波の方向は反射面に対して対称となるので、反射面をはさんで陸(または構造物)側の格子座標 $(x, y + \delta y)$ に次式で表わされる方向スペクトルを与えて計算することにより反射を考慮したことになる。

$$S(x, y + \delta y, f, \theta) = K_{ry}^2 S(x, y, f, -\theta) \quad (26)$$

ここで、 $K_{ry}$ は反射面の反射率である。

$x$ 軸に垂直な境界での反射では、波は進行方向とは逆方向、すなわち沖向きに進むことになる。エネルギー平衡方程式による計算法では成分波はすべて $x$ 軸の正方向、すなわち沖から岸に向けて進行するという条件のもとで解いているため、 $x$ 軸に垂直な境界での反射は直接計算できない。そこで、一度 $x$ 軸の正方向に計算を行い、反射のある境界ではその座標と方向スペクトルを記憶させておく。 $x$ 軸の正方向の計算が終わった後、記憶させた座標において次の式で表わされるように方向スペクトルを与え、 $x$ 軸の負の方向に計算を行うことにより反射波を求める。

$$S(x, y + \delta y, f, \theta) = K_{rx}^2 S(x, y, f, 2\pi - \theta) \quad (27)$$

ここで、 $K_{rx}$ は反射面の反射率である。

### 3. 計算の適用性の検討

#### 3.1 開口防波堤背後の計算結果の比較

従来のエネルギー平衡方程式による波浪変形計算では、計算値は波が直接入射する部分で大きくなる傾向があり、幅方向(波の伝播方向に対し垂直な方向)へのエネルギーの広がりが小さく、特に防波堤背後では波高が小さくなる<sup>4)</sup>。これに対し間瀬ら<sup>6)</sup>は回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いて開口防波堤背後の波高分布を計算し、Sommerfeldの理論解と比較している。その結果、従来の計算結果では比較的開口幅が狭い場合に計算結果と理論解との差が大きくなるが、回折を考慮した場合は開口幅が狭い場合でも理論解とかなりよく一致することを示している。図-2、図-3に間瀬ら<sup>6)</sup>による $S_{max}=25$ の場合でのSommerfeldの理論解と回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果の比較を示す。なお、 $S_{max}$ は方向集中度パラメータで、合田<sup>1)</sup>によると構造物の設計のときには、風波では $S_{max}=10$ 、減衰距離の短いうねり(波形勾配が比較的大)では $S_{max}=25$ 、減衰距離の長いうねり(波形勾配が比較的小)では $S_{max}=75$ が目安とされている。

図-4は図-2に比べて広い計算範囲を設定し、波長と比較して開口幅が比較的狭い、開口幅が波長の2倍の条件で従来のエネルギー平衡方程式と回折を考慮した場合の比較である。計算条件は方向分割数が37、周波数分割数が10で、入射波向きは開口部に対し垂直とし、水深は計算領域全域にわたって一様としており、水深変化に伴う屈折や浅水変形、および砕波は起こらないように設定している。(a)は波の方向分散性が強い $S_{max}=10$ 、(b)は一方向性が強い $S_{max}=150$ の計算結果である。

開口部近辺に注目すると、防波堤背後において、方向分散性が強い場合は両者の差はほとんど見られない。しかし、一方向性の強い場合は回折を考慮したほうが波の進行方向に対し横方向へのエネルギー拡散が大きく、回折項を導入したことによる効果が現れていることが確認できる。次に、回折の効果とは直接関係のない場所である開口部から波が直接入射する部分に注目すると、従来のエネルギー平衡方程式で計算した場合に開口部から離れるにしたがって、水深などの変化が無いにもかかわらず、開口部正面に沿って不自然なエネルギー集中が起こっており波高分布が滑らかにならない。これは計算を行う際に方向について離散化したことに起因する誤差によるものと考えられる。回折を考慮した場合は導入した回折項が波の進行方向に対して垂直に横方向へのエネルギーの平滑化を生み、波高分布が滑らかに変化している。以上の結果、方向分散性の強い波の場合、回折項を導入した



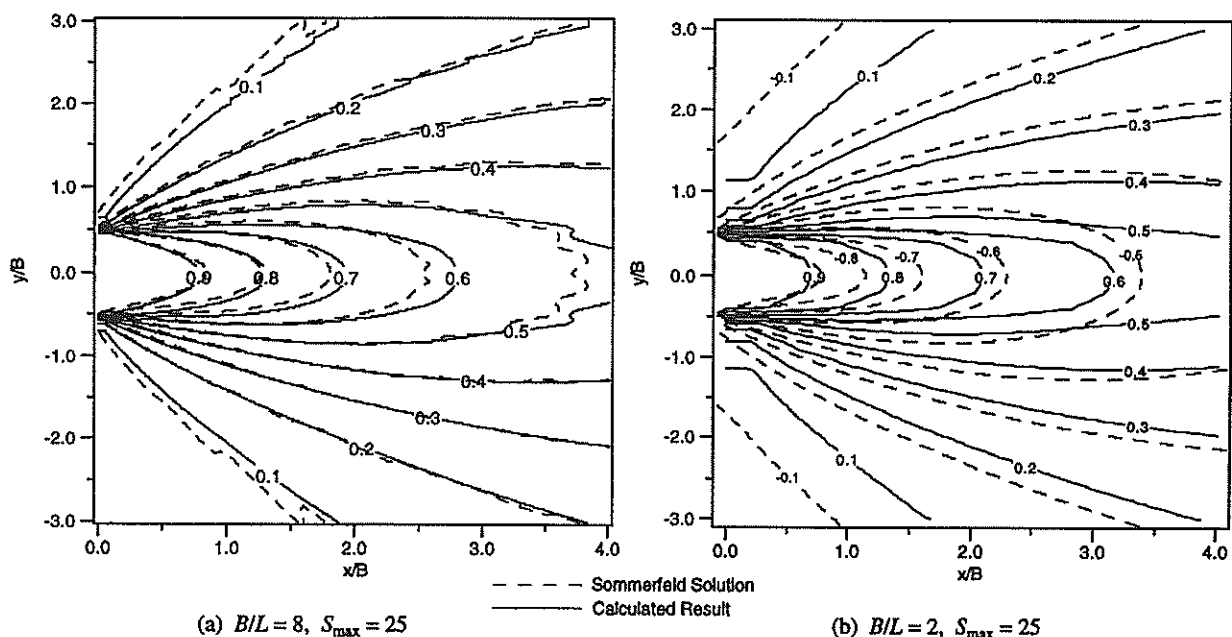


図-2 従来のエネルギー平衡方程式と Sommerfeld の理論解との比較(間瀬ら<sup>6)</sup>による)

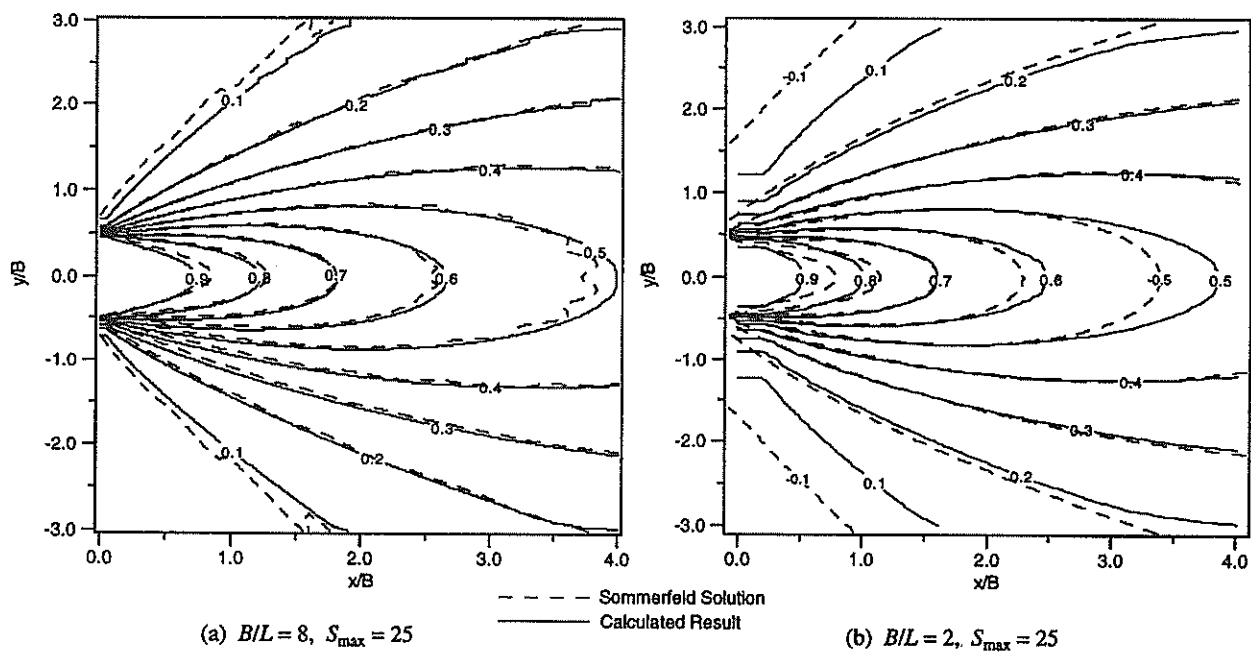
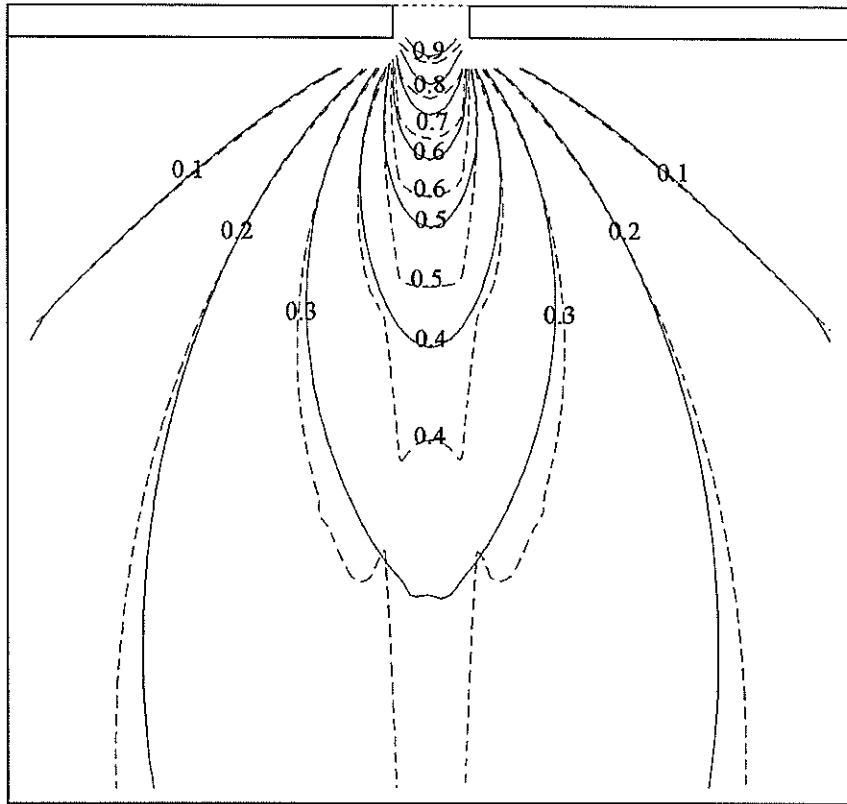


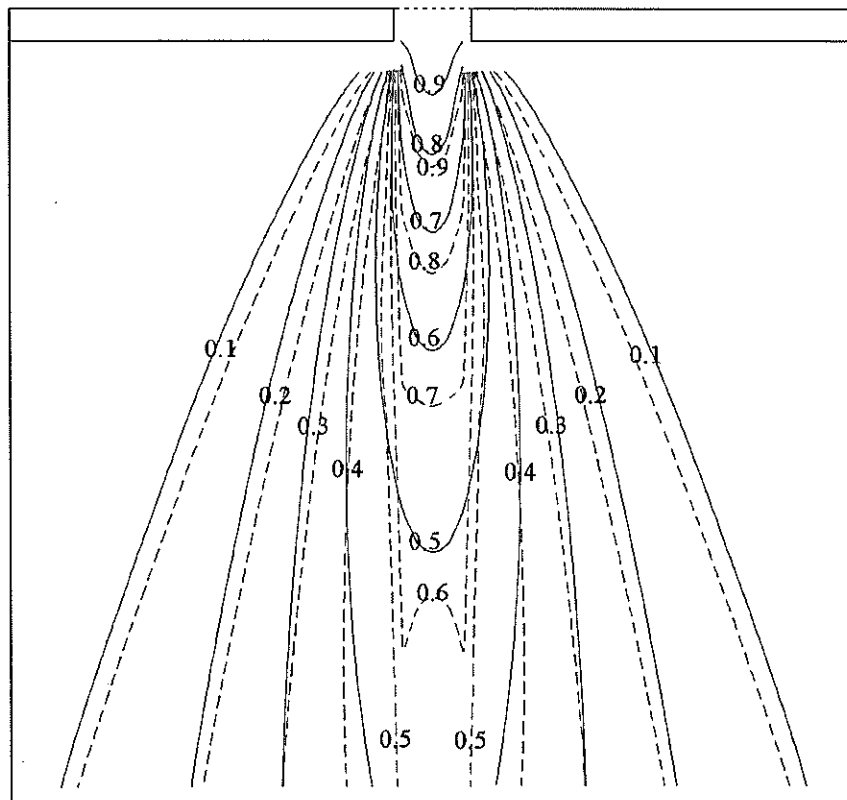
図-3 回折を考慮したエネルギー平衡方程式と Sommerfeld の理論解との比較(間瀬ら<sup>6)</sup>による)

ことによる回折の効果は計算結果に大きな差となって現れず、従来のエネルギー平衡方程式で計算した場合と大きく変わらないが、回折とは直接関係の無い開口部正面でも波の進行方向に対して垂直な方向へのエネルギー分散効果を持つことにより、方向について離散化したこと

に起因する誤差を分散させ、より現実的な波高分布が計算できることがわかった。また、従来のエネルギー平衡方程式で計算した場合に波が直接入射する部分で計算値が大きくなる傾向があるという高山ら<sup>4)</sup>の指摘も解消しているものと考えられる。



(a)  $S_{\max}=10$



(b)  $S_{\max}=150$

図-4 従来のエネルギー平衡方程式と回折を考慮した場合の比較  
(実線：回折を考慮した計算，点線：従来の計算)

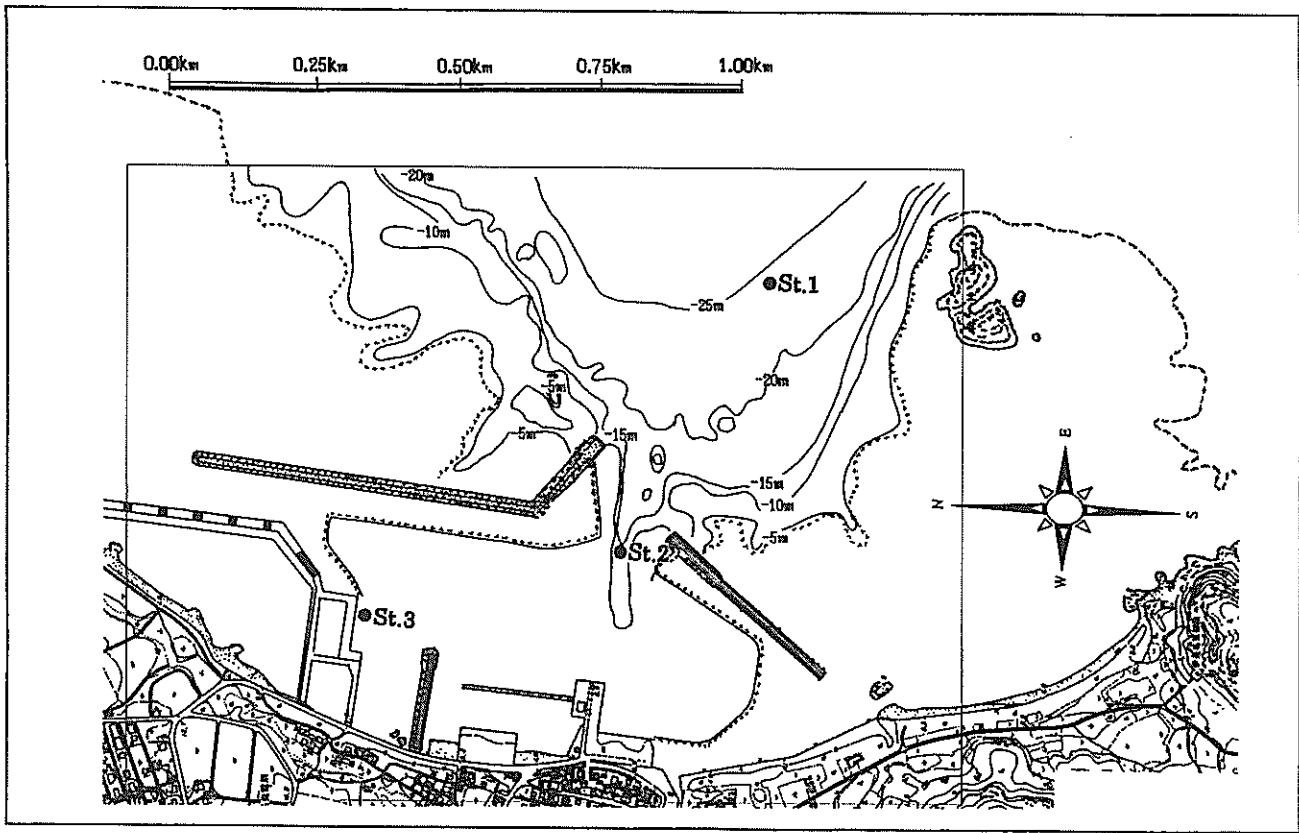


図-5 A港の地形と波浪観測点および計算範囲

### 3.2 A港の現地観測結果および高山法<sup>7)</sup>との比較

A港は図-5に示すように港口部で比較的水深変化の大きい港であり、港内の静穏度調査のため、港口部から約500m沖、港口部、港奥の岸壁前の3点で圧力式波高計を用いて波高が測定されている。そこで、この現地実測結果を用いて回折を考慮したエネルギー平衡方程式の現地適用性を検討した。また、港内の波高分布を求めるとして実務上よく用いられている高山法で港内波高分布を計算し、その結果と比較した。

波浪の実測値は平成11年10月13日から12月20日まで、約2ヶ月間にわたり行われた観測によるものであり、2時間ごとに40分間、0.5秒ピッチでデータが取得されている。なお、計算結果との比較に使用したデータはA港においては観測期間中の平均的な波浪状況である。表-1に各測点での有義波諸元を示す。エネルギー平衡方程式による計算は図-5に示す範囲で行い、入射波条件はSt.1で実測結果に合うように、沖側境界で、 $H_{1/3}=0.94\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9.4\text{s}$ と設定し、方向分割数は35、周波数分割数は10、計算格子

表-1 実測有義波諸元

	Significant wave height $H_{1/3}$ (m)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)
St. 1	0.91	9.4
St. 2	0.25	5.2
St. 3	0.16	5.8

間隔は10m、多方向波の方向集中度は周期と波形勾配から判断して $S_{\max}=75$ とした。また、反射については1次反射を考慮することとし、反射率は構造物や海岸の地形ごとに、合田<sup>1)</sup>に基づいて設定した。計算に用いた反射率を図-6に示す。高山法では、港口部の波浪状況を境界条件として与えるので、今回は港口部までのエネルギー平衡方程式による計算結果から $H_{1/3}=0.70\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9.4\text{s}$ と設定した。計算条件としては、港内の平均水深は6.5m、反射は3次までを考慮した。反射率はエネルギー平衡方程式による計算と同様に図-6に示すとおりである。

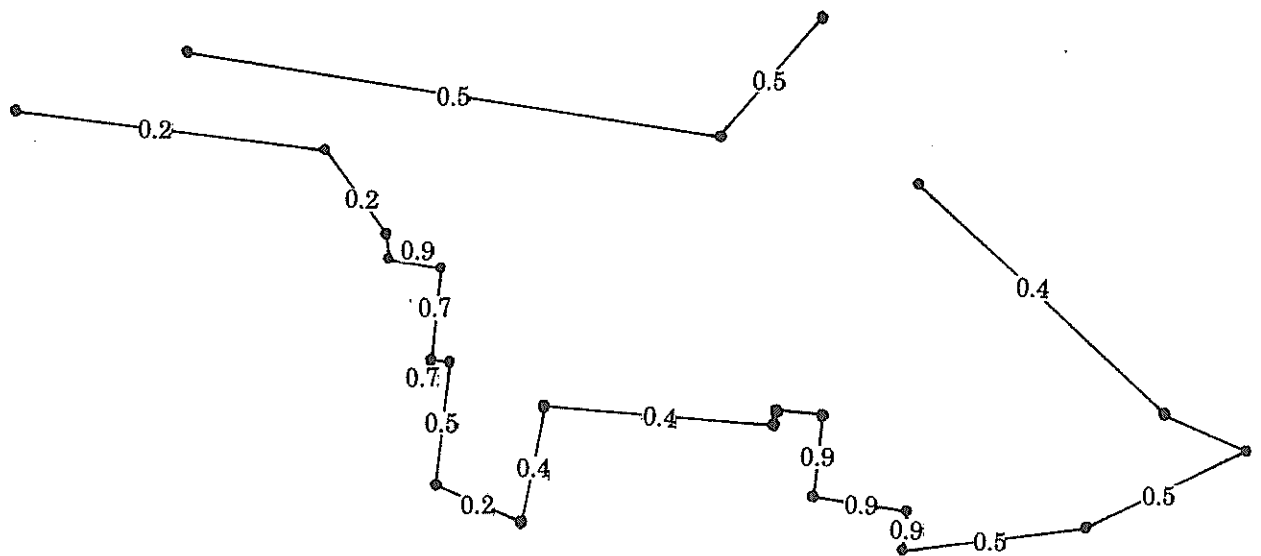


図-6 A港の計算に用いた反射率

回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果を図-7に、従来のエネルギー平衡方程式による計算結果を図-8に、高山法による計算結果を図-9に示す。また、実測値と計算値の比較を表-2に示す。

表-2 実測値と計算値との有義波高の比較

	St.1	St.2	St.3
実 測 値	0.91 m	0.25 m	0.16 m
回折を考慮	0.91	0.47	0.19
回折を考慮しない	0.91	0.50	0.16
高 山 法	—	0.53	0.10

実測値と計算値を比較すると、港口部のSt.2では実測値に比べて計算値が約2倍程度大きくなっている。しかし、港奥部では実測値と計算値は、ほぼ同程度となっている。St.2はさんご礁があり、非常に複雑な地形をした水深急変部にあたるため、圧力波高計により測得されたデータ自体に問題があるかもしれない。湾奥のSt.3での値を比較すると、3次まで反射を計算した高山法の結果が最も小さく、実測値との差が最も大きい結果となった。これはA港

の港口部北側部分が浅くなっており、その場所で屈折が起こって港奥のSt.3へ波を導いているため、この屈折の効果を計算しない高山法の計算結果が小さくなったことによるものと考えられる。図-7と図-9を比較すると、波高分布形状に大きな差が現れている。これは、港口部付近の水深変化による屈折効果が港内の波高分布に大きな影響を与えており、屈折を計算するエネルギー平衡方程式による計算結果と屈折を計算しない高山法の間大きな差が生じたものと考えられる。図-7と図-8を比較すると、従来のエネルギー平衡方程式による計算結果では港口部正面港内側に方向を離散化したことに起因する計算誤差によるエネルギー集中が見られているが、回折を考慮した場合にはそれは解消されている。以上の結果より、港口部で大きな水深変化があり屈折の効果が大きい場合、高山法では港奥部の波高を小さく見積もりすぎることがあり、実測値との間に差が生じることがあるが、回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算では水深変化に伴う屈折の効果を計算するため、高山法に比べて精度良く港内の波高分布を求めることができることがわかった。ただし、実測点の数が少ないため、計算値と実測値の波高分布形状が一致するかを確認するまでには至らなかった。

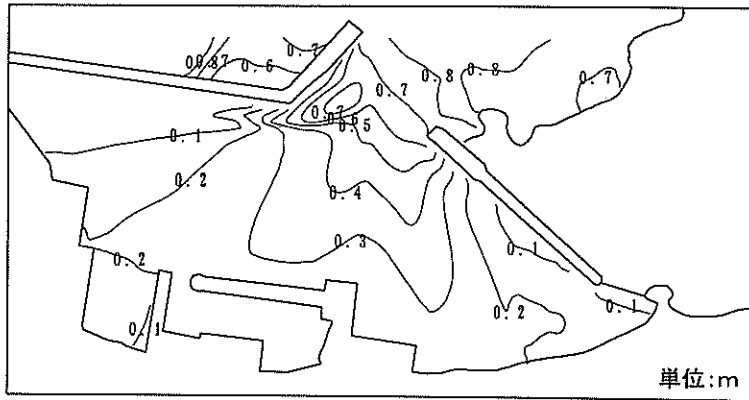


図-7 回折を考慮したエネルギー平衡方程式により計算した波高分布

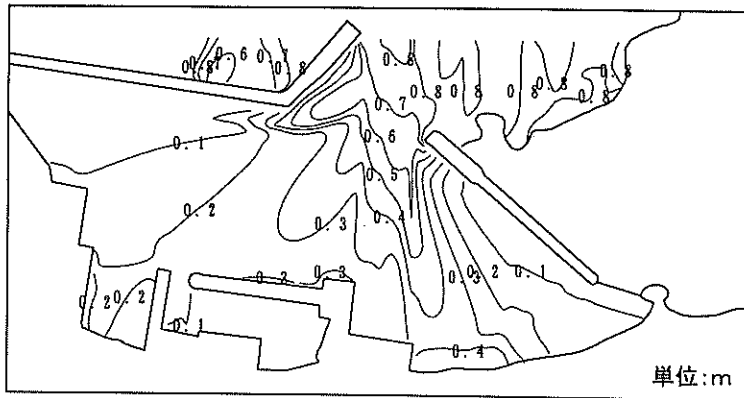


図-8 従来のエネルギー平衡方程式により計算した波高分布

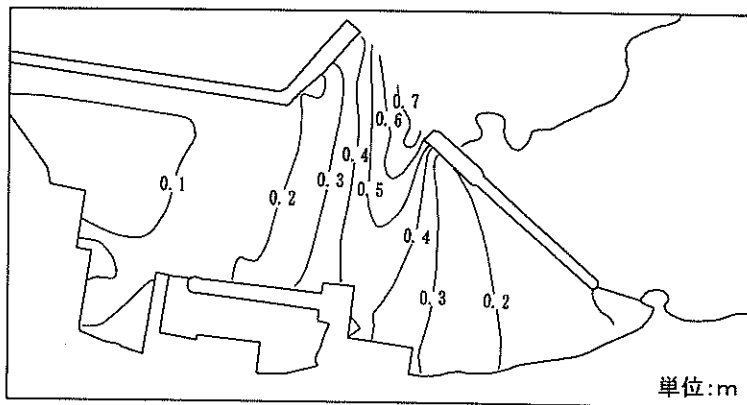


図-9 高山法により計算した波高分布

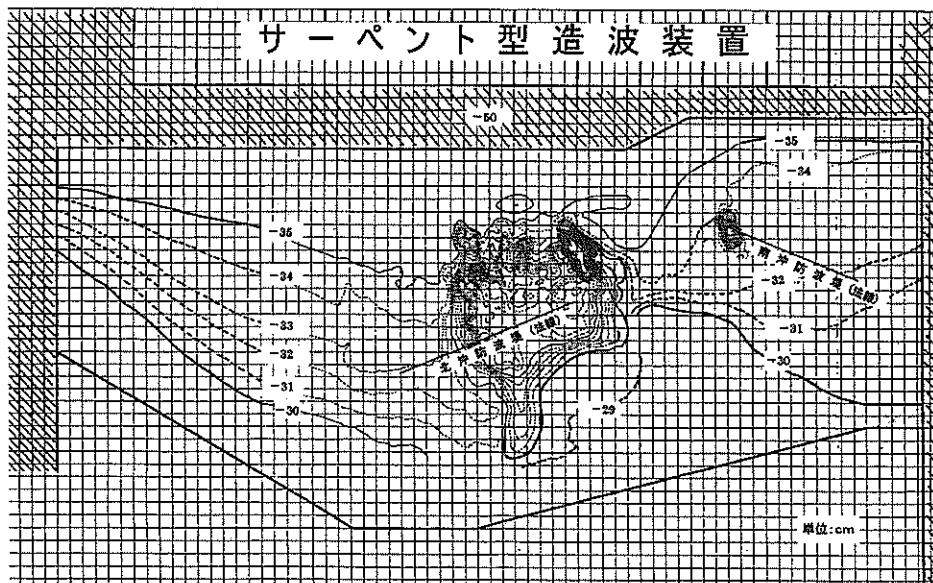


図-10 B港水理模型実験に用いた模型地形

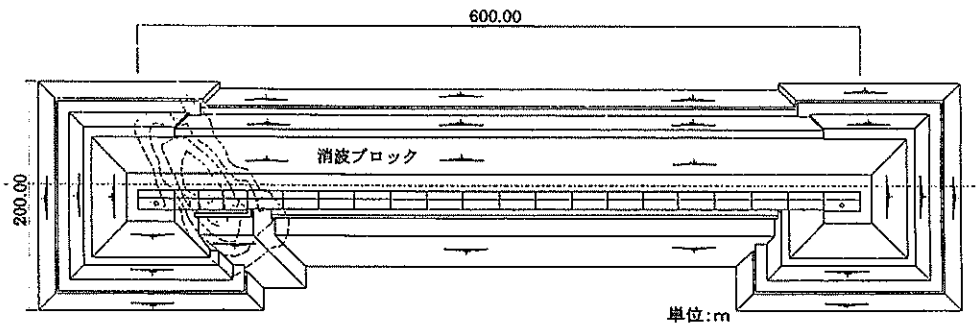


図-11 B港南沖防波堤平面図

### 3.3 B港南沖防波堤の水理模型実験結果との比較

B港では30mを越える大水深の場所に南沖防波堤を設置することを想定して、南沖防波堤の消波ブロックやケーソンなどの構造物の波に対する安定性を水理模型実験を用いて検討しており、防波堤周りの波高分布を詳細に計測している。そこで、この実験結果を用いて回折を考慮したエネルギー平衡方程式の適用性を検討した。水理模型実験は図-10に示すような模型床を作成し、サーペント型造波装置を用いて多方向不規則波で実験を行った。模型縮尺は実験水槽の大きさと対象とする地形範囲を勘案して1/100とした。また、模型床では港内側奥は陸になっているが、実際の地形では海が続いている。したがっ

て、できるだけ反射の影響を少なくするために、水深30m以浅の部分は、すりつけ斜面とし、岸近くにはヘチマロンをステンレス製のかごに入れた消波材を配置した。南沖防波堤は図-11に示すように、現地スケールで幅200mのマウンドの上に幅約20mのケーソンが設置されており、その延長が600mという、非常に大きな構造物である。波高計測点を図-12に示すように南沖防波堤を囲むように24点配置し、容量式波高計を用いて波高の計測が行われている。造波した波の諸元は多方向不規則波で、造波装置前面での波高が現地スケールで $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.5\text{sec}$ 、多方向波の方向集中度は $S_{\text{max}}=10$ とした。なお、波高は防波堤で越波が起こらないように設定している。周波数ス

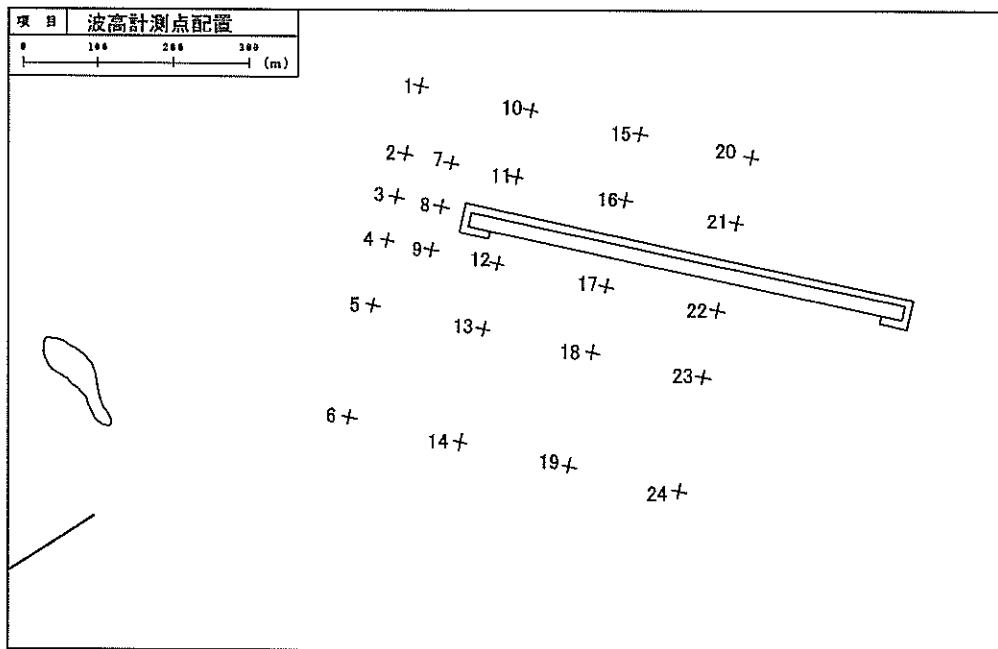


図-12 波高計配置

ベクトルは修正Bretschneider光易型<sup>9)</sup>を用い、造波信号波数は約200波とし、1ケースあたり2波群について実験を行った。波形のデータ収録間隔は1波あたり平均して20分割できる程度に0.07秒とし、得られた波形の時系列データからゼロアップクロス法により各測点の有義波高を計算した。

エネルギー平衡方程式による計算では地形条件としては図-13に示すように水理模型実験で作成した模型床地形を現地スケールに直したものをを用い、模型床と同様に水深30m以浅は、すりつけ斜面とした。入射波条件は水理模型実験に合わせて造波装置前面位置で、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.5\text{sec}$ と設定し、方向分割数は35、周波数分割数は10、計算格子間隔は25m、多方向波の方向集中度は $S_{\text{max}}=10$ とした。また、反射については1次反射を考慮することとし、反射率は合田<sup>1)</sup>にしたがって、防波堤の消波ブロックがある部分では0.4、直立壁の部分では0.9と設定した。また、港内側の消波材を設置した陸地境界では0.3と設定した。

図-14は回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果の波ベクトルである。南沖防波堤のマウンドによる屈折と防波堤自体による回折の効果により防波堤背後に波が伝播している様子がうかがえる。波高分布は図-15に示すとおりであり、防波堤背後では防波堤に近づくにしたがって波高が小さくなっている。水理模型実験結果と波高計測点での計算結果を図-16に示す。また、実験結果と計算結果の比較のため、各測点ごとに実験値

と計算値の比をとったものを図-17に示す。全体的には実験値と計算値はよい対応を示しており、ほとんどの測点で20%以内の差におさまっている。しかし、測点17と測点22だけは実験値が計算値の3倍程度にまで大きくなっている。これらの測点は防波堤背後の堤体直近の場所であり、また、その部分には消波ブロックが無い。そのため、水理模型実験では波が堤体でほぼ完全反射しており、堤体近くの測点17と測点22では重複波が発生して波高が増大したものと考えられる。それに対し、エネルギー平衡方程式による計算では反射を1次までしか考慮していないため、一度岸側の陸地境界で反射した波は防波堤背後の堤体では反射しない。したがって、重複波の再現はできず、計算値と実験値の間に大きな差が生じてしまったものと推察される。

従来のエネルギー平衡方程式による計算と回折を考慮したものと比較するために実験結果の平均値と計算結果との比をとったものを図-18に示す。また、それぞれの波高分布の比較を図-19に示す。回折を考慮した場合のほうが防波堤背後へのエネルギーのまわりこみが大きく、実験値により近い結果となっていることがわかる。以上の結果、防波堤背後で2次反射に起因する重複波が発生する一部分では計算値と実験値の間には大きな差があるものの、それ以外の部分では実験値と計算値の整合性は良く、2次反射や重複波の影響の小さい部分では港内の波浪変形計算に十分適用できると判断できる。

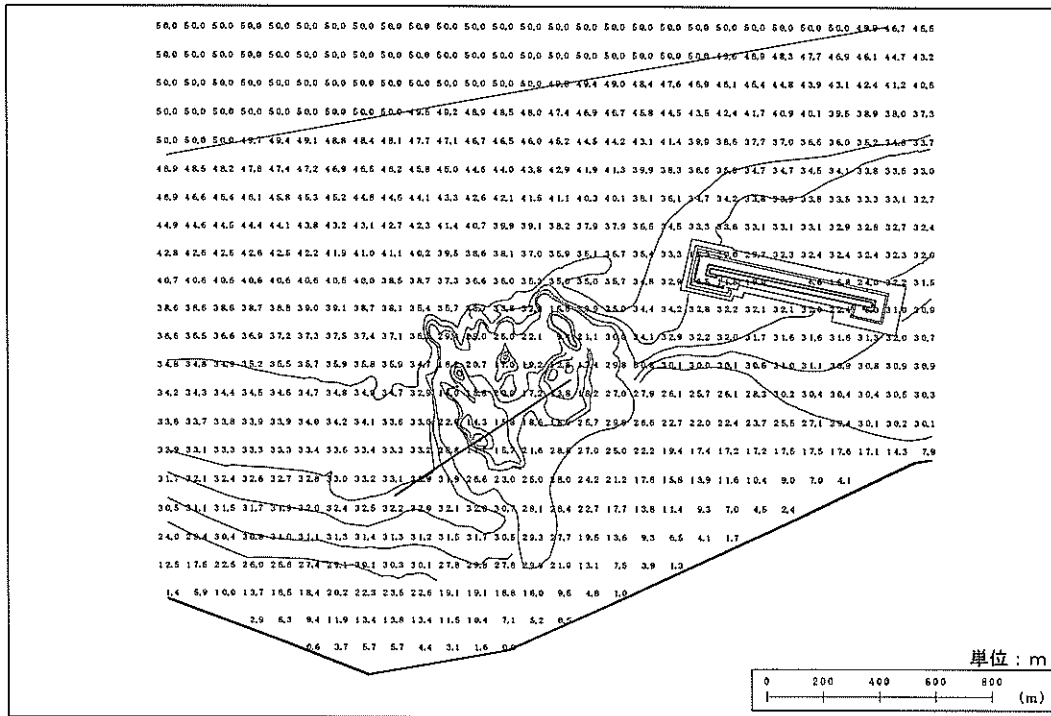


図-13 計算に用いた水深

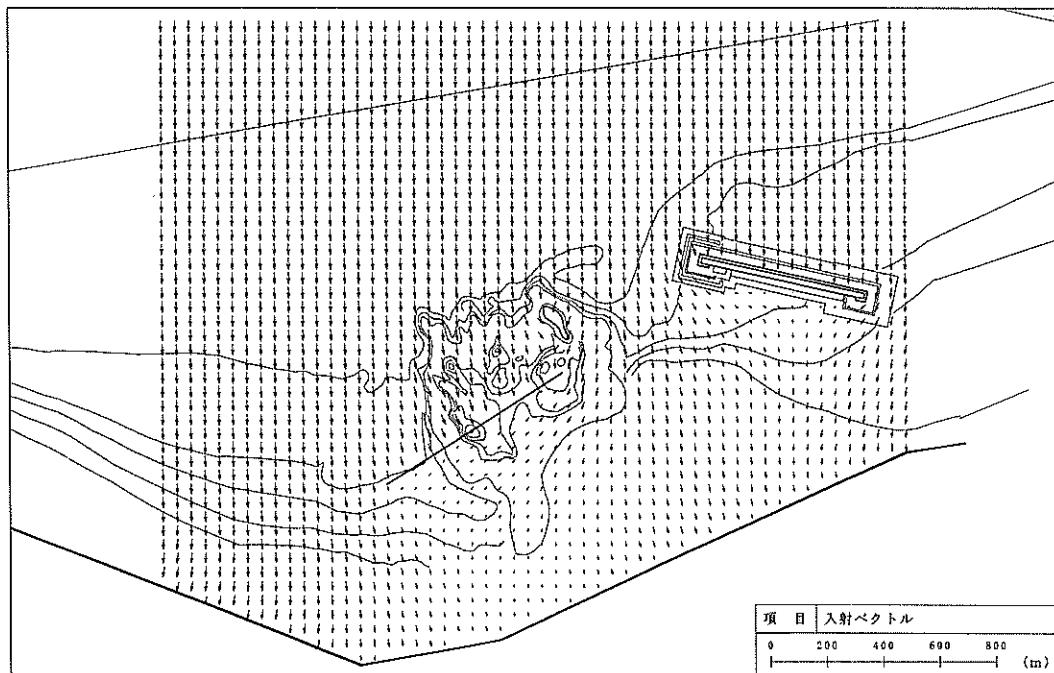


図-14 回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果 (波ベクトル)



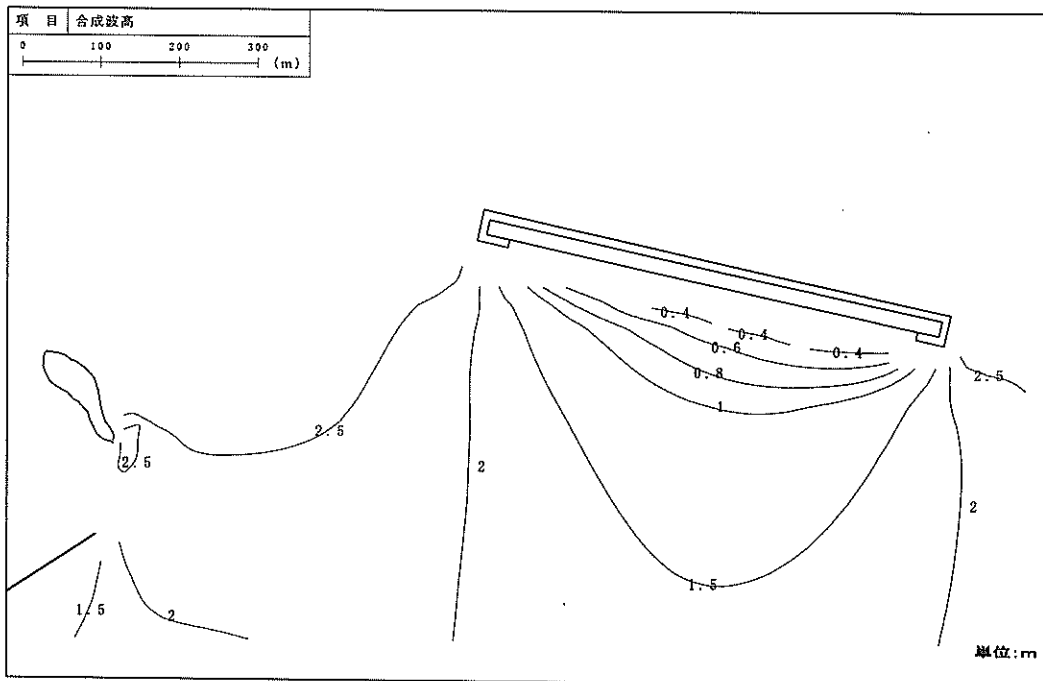


図-15 回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果 (波高分布)

**波群 1**

波向主方向 (SE)	南沖防波堤堤頭部からの距離 (m)					
	-100	-40	0	+50	+200	+350
入力波高	3.0					
150m堤前	2.9 (3.1)			2.9 (3.2)	3.2 (3.2)	3.2 (3.1)
5H1/3沖 (60m)	2.8 (3.0)	3.1 (3.2)		2.3 (3.2)	2.3 (3.0)	2.3 (3.0)
法線上	2.6 (2.9)	3.4 (3.0)	南沖防波堤			
5H1/3背後 (60m)	2.6 (2.7)	2.7 (2.6)		1.7 (1.1)	1.5 (0.5)	1.4 (0.4)
150m背後	2.6 (2.5)			2.1 (1.7)	1.1 (1.1)	1.0 (1.0)
300m背後	2.5 (2.4)			2.0 (2.0)	1.9 (1.6)	1.7 (1.4)

波高分布  $H_{1/3}$  上段実験値、下段カッコ内計算値

**波群 2**

波向主方向 (SE)	南沖防波堤堤頭部からの距離 (m)					
	-100	-40	0	+50	+200	+350
入力波高	3.0					
150m堤前	3.2 (3.1)			2.8 (3.2)	3.2 (3.2)	3.1 (3.1)
5H1/3沖 (60m)	3.0 (3.0)	3.2 (3.2)		2.4 (3.2)	2.3 (3.0)	2.2 (3.0)
法線上	2.7 (2.9)	3.5 (3.0)	南沖防波堤			
5H1/3背後 (60m)	2.7 (2.7)	2.9 (2.6)		1.7 (1.1)	1.5 (0.5)	1.4 (0.4)
150m背後	2.5 (2.5)			2.1 (1.7)	1.2 (1.1)	1.1 (1.0)
300m背後	2.6 (2.4)			2.0 (2.0)	2.0 (1.6)	1.7 (1.4)

波高分布  $H_{1/3}$  上段実験値、下段カッコ内計算値

図-16 水理模型実験と回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果の比較

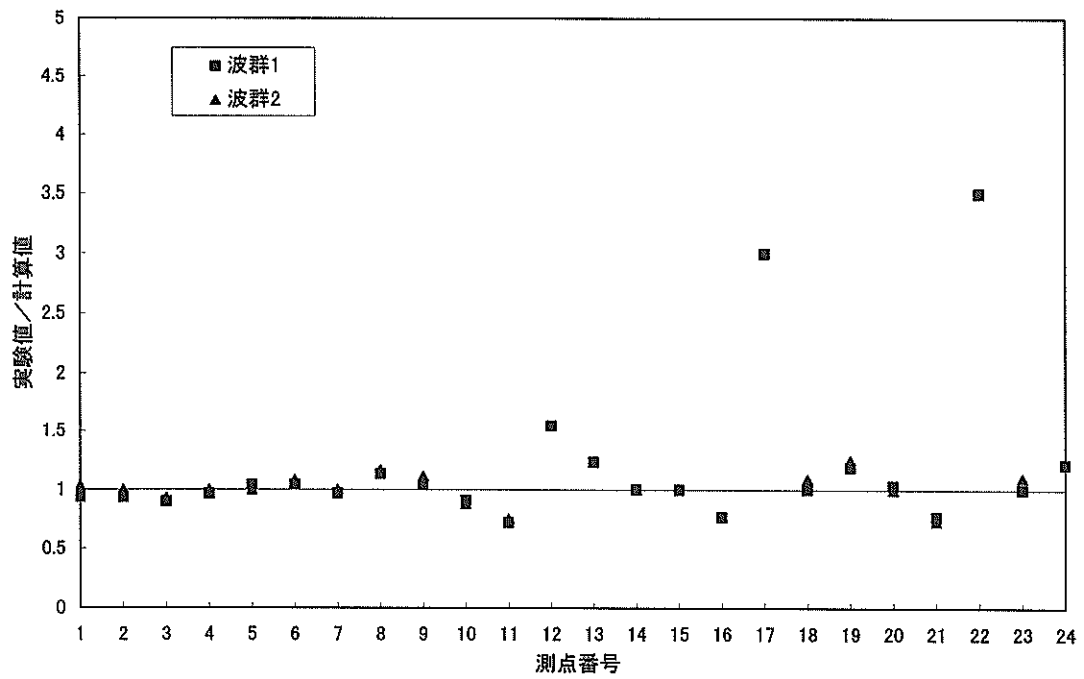


図-17 水理模型実験結果と回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算結果の比

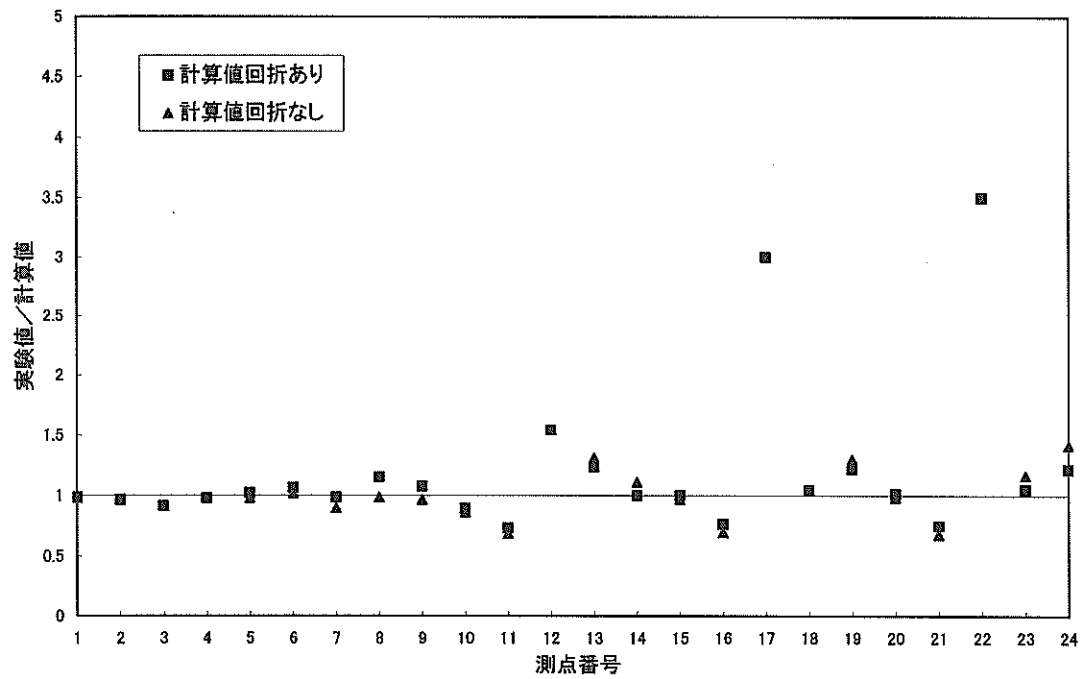


図-18 水理模型実験結果とエネルギー平衡方程式による計算結果の比

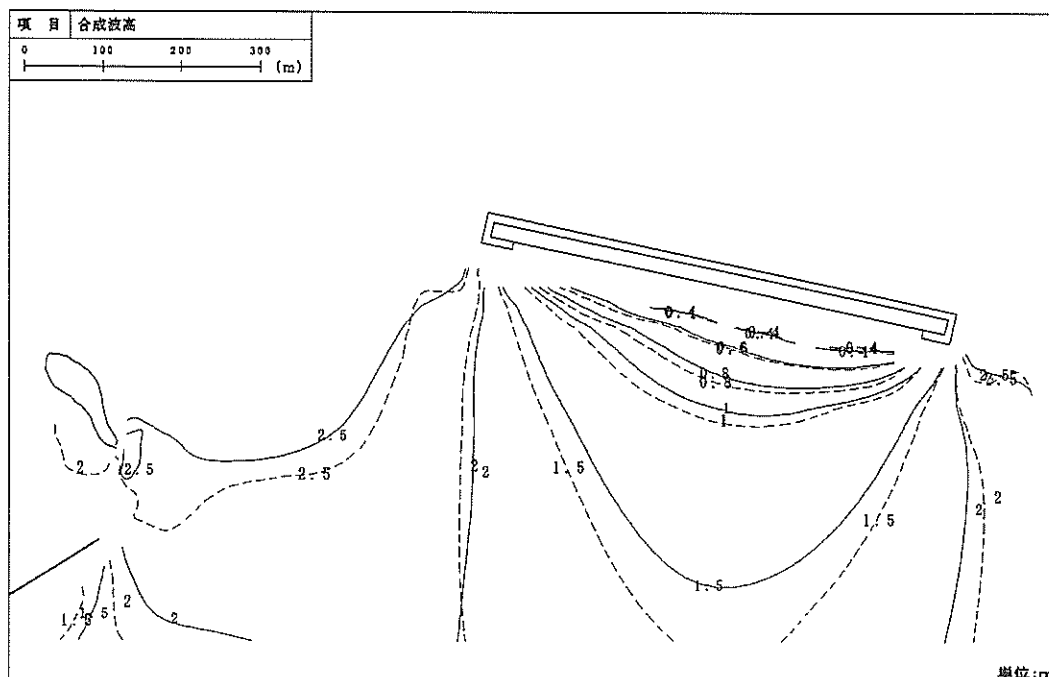


図-19 従来のエネルギー平衡方程式と回折を考慮した場合の計算結果の比較  
(実線：回折を考慮した計算，点線：従来の計算)

#### 4. 結論

本研究では間瀬ら<sup>9)</sup>の回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算について、従来のエネルギー平衡方程式による計算結果、現地実測結果、高山法による計算結果、および水理模型実験結果と比較することにより、その適用性の検討を行った。その結果得られた結論は、以下のように要約される。

- ① 従来のエネルギー平衡方程式による計算結果に比べ防波堤背後では波向きに対して横方向へのエネルギー伝播が大きくなり、回折に相当する効果を取り入れられていることが確認できた。
- ② 従来のモデルでは回折の影響の無い、直接、波が入射する部分で方向を離散化したことに起因する不自然なエネルギー集中が起こっていた。それが回折項を導入したことによるエネルギーの分散効果によって緩和されることが明らかになった。
- ③ 港口部で水深変化が大きく、屈折の影響が大きい港の場合、高山法では屈折を計算しないため、港奥の波高を小さく見積もってしまう場合がある。そこで、屈折が考慮されるエネルギー平衡方程式に港口部で発生する回折の効果を導入したものを用いればより精度

良く港内の波高を予測することができると考えられる。しかしながら、エネルギー平衡方程式では2次以降の反射波を計算できないため、その影響が大きい場合は適用が困難である。

- ④ 水理模型実験結果と比較して、防波堤直近の一部分を除きエネルギー平衡方程式による計算結果は実験結果と良く一致しており、回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算は港内の波浪変形計算に対しても有効である。

#### 5. あとがき

回折を考慮したエネルギー平衡方程式による計算が、実際の港湾などで行われるとき、どのように適用できるか、具体的に検討した。従来のエネルギー平衡方程式にも回折の効果がまったく含まれていなかったわけではなく、計算結果の比較に回折の効果が“0 or 1”というようにはっきりした差にはならないが、現実的に計算する際の適用性は改善されていることを示した。しかし、エネルギー平衡方程式による計算では波はx軸の正方向のみ進むとしているため、x軸に垂直な成分のある壁面での反射を計算する場合、その次数を上げれば計算が煩雑に

なるのと、波の進む向きがx軸に平行でなくなるため、誤差が大きくなるという弱点も残っており、多重反射の影響が大きい港湾には適用できない。これは今後の大きな課題である。

本研究を進めるにあたり、有益なコメントをいただきました海洋環境部水理研究室橋本典明室長、日頃から様々な貴重な議論とアドバイスをいただきました水工部波浪研究室平山克也研究官に心から感謝する次第である。なお、本研究は、著者の一人である田中が港湾技術研究所水工部波浪研究室に受託研修生として在籍している間に行われたものであることを付記する。

(2001年2月14日受付)

#### 参考文献

- 1) 合田良実：港湾構造物の耐波設計(増補改訂版)，鹿島出版会，1990年，333p.
- 2) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー委員会：海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用解析法】，1994年，520p.
- 3) Karlsson,T.：Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc.ASCE, Vol.95, No.WW4, 1969, pp.471-490.
- 4) 高山知司・池田直太・平石哲也：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，1991年，pp. 21-67.
- 5) 西村仁嗣：エネルギー平衡方程式の積分に伴う数値分散について，第34回海岸工学講演会論文集，1987年，pp. 11-15.
- 6) 間瀬肇・高山知司・国富將嗣・三島豊秋：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 628/II-48, 1999年，pp. 177-187.
- 7) 高山知司：波の回折と港内波高分布に関する研究，港湾技研資料，No. 367, 1981年，140p.
- 8) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，1970年，pp. 39-49.
- 9) 合田良実：数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質，第34回海岸工学講演会論文集，1987年，pp. 131-135.

#### 記号表

$A$	: 波の振幅
$A_b$	: 合田の砕波波高計算式中の係数
$C$	: 波速
$C_g$	: 群速度
$E$	: 単位面積あたりの波エネルギー

$f$	: 波の周波数
$H_b$	: 砕波波高
$H_{max}$	: 最大波高
$H_{1/3}$	: 有義波高
$h$	: 水深
$i$	: x軸方向の格子番号
$j$	: y軸方向の格子番号
$K$	: 方向分割数
$K_{Rx}$	: x軸に垂直な壁面での反射率
$K_{Ry}$	: y軸に垂直な壁面での反射率
$L_0$	: 沖波波長
$N$	: 周波数分割数
$S$	: 波の方向スペクトル
$S_{max}$	: 方向集中度パラメーター
$T$	: 波の周期
$T_{1/3}$	: 有義波周期
$T_0$	: 沖波周期
$\overline{T_0}$	: 平均沖波周期
$v_x$	: x軸方向の郡速度成分
$v_y$	: y軸方向の郡速度成分
$v_\theta$	: 波向き方向の郡速度
$x$	: 岸方向の平面座標
$y$	: 岸方向と直行する方向の平面座標
$\beta$	: 海底勾配
$\beta_x$	: x軸方向の海底勾配
$\beta_y$	: y軸方向の海底勾配
$\delta_x$	: x軸方向の格子間隔
$\delta_y$	: y軸方向の格子間隔
$\varepsilon_b$	: 砕波によるエネルギー逸散の割合
$\theta$	: 波向き
$\overline{\theta}$	: 平均波向き
$\pi$	: 円周率

港湾技研資料 No.1000

2001.6

編集兼発行人 国土交通省港湾技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 アベイズム株式会社

Copyright ©独立行政法人港湾空港技術研究所 2001

本報告書の転載・複写を希望される場合は、港湾空港技術研究所企画課へご連絡をお願いします。