

# 越波を考慮した港内波浪場の計算法

鈴木通仁\*・横木裕宗\*\*・藤田 龍\*  
渡辺 晃\*\*\*・磯部雅彦\*\*\*

## 1. はじめに

港湾内の静穏度を計算する際に、波の屈折、回折などの波浪変形に加えて、越波も考慮すべき重要な要素である。最近では低天端高の防波堤が建設されるようになり、高波浪だけでなく、常時波浪においても越波の港内波浪場への影響が増大してくると考えられる。越波伝達波に関しては過去に多くの実験が行われ、入射波が規則波の場合でも高周波数成分が発生すること、入射波が単一方向の波であっても越波伝達波は大きな方向分散性を持っていることなどが指摘されている。また、越波による伝達波の港内波浪場の計算には、従来は越波部分の防波堤を仮定の港口として波の回折計算を行う方法がとられ、平口ら（1991）によって新たな計算方法が提案されている。しかし、いずれも十分な精度を有するとは言えない。そこで本研究では、越波による伝達波を考慮したより精度の高い港内波浪場の計算法を提案することを目的とし、その計算結果と平面水槽における実験結果とを比較して、本計算法の妥当性を検証した。

## 2. 数値計算法

本研究では、平面波浪場の計算法として非定常緩勾配方程式を用いる方法を採用した。そして防波堤などの境界における越波を越波境界における線流量の境界条件として表現した。境界条件は線流量 $Q$ で与え、防波堤前面での線流量を $Q_f^i(x_0, y_0)$ 、背面での線流量を $Q_b^i(x_0, y_0+B)$ とする。

$Q_b^i(x_0, y_0+B)$ は越波成分 $Q_b^t(x_0, y_0+B)$ と背面での反射波成分 $Q_b^r(x_0, y_0+B)$ からなっており、次式で表される。

$$Q_b^i(x_0, y_0+B) = Q_b^t(x_0, y_0+B) + Q_b^r(x_0, y_0+B) \quad \dots\dots\dots (1)$$

以下越波成分と反射波成分を分けて考える。

### (1) 越波成分について

有義波高（規則波の場合は波高） $H_i$ 、有義波周期（規

則波の場合は周期） $T_i$ の波が $x$ 軸に平行で堤体幅 $B$ を有する防波堤に入射し、越波が起こる場合の境界条件を考える。この時入射波のスペクトルが $S(f|T_i, H_i)$ 、波高伝達率が $K_T$ であったとする。

既往の断面二次元の結果からも明らかなように越波による伝達波には2倍、3倍の高周波数成分が含まれることを考慮して、スペクトル $S_T(f)$ を次式へと変形させる。

$$S_T(f) = K_{E1}S(f|H_i, T_i) + K_{E2}S(f|H_i, T_i/2) + K_{E3}S(f|H_i, T_i/3) + \dots\dots\dots (2)$$

ここで $K_{E1}$ 、 $K_{E2}$ 、 $\dots$ は、有義波周期 $T_i$ の入射波から有義波周期 $T_i$ 、 $T_i/2$ 、 $\dots$ を持つ、越波によって新たに発生した基本周波数および高周波数成分へのエネルギー伝達率であり、波高伝達率 $K_T$ との間には次式の関係がある。

$$K_T = \sqrt{K_{E1} + K_{E2} + K_{E3} + \dots\dots\dots} \quad (3)$$

式(2)の第2項以下が越波によって新たに生成する波のスペクトル成分である。ここで、越波による伝達波に大きな方向分散性があり、また高周波数成分が防波堤遮蔽域に回り込むという特徴（平口ら、1991）があることから、式(2)の第2項以下を卓越した方向成分を持たない散乱波であると考えた。すなわち、

$$\text{越波伝達波} = \text{透過成分} + \text{散乱成分} \quad \dots\dots\dots (4)$$

として、このことを反映するように境界での線流量を規則波、不規則波それぞれの場合について求めていく。

a) 規則波の場合 入射波が規則波の場合でも高周波数成分は発生し、それぞれの成分波の入射波に対する波高伝達率は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} K_{T1} &= \sqrt{K_{E1}} \\ K_{T2} &= \sqrt{K_{E2}} \\ K_{T3} &= \sqrt{K_{E3}} \\ &\vdots \end{aligned}$$

はじめに入射波成分（基本周波数成分）から考える。周期が入射波と同じ越波成分は $K_{T1}$ の透過率を持った境界を通過したと考えることができるので、任意透過率境界を用いると次式で与えられる。

$$Q_{t,r,l}^i(x_0, y_0+B) = \frac{K_{T1}}{1-K_{R1}} \hat{Q} \sin(\chi - \sigma_1(t-\tau)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

\* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻

\*\* 正会員 博(工) 茨城大学講師 工学部都市システム工学科

\*\*\* 正会員 工 博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

ここで、 $K_{R1}$ は防波堤前面での反射率、 $\tau$ は堤体幅 $B$ による位相の遅れで、波速 $C$ および入射角 $\alpha$ を用いると

$$\tau = B \frac{\cos \alpha}{C} \dots\dots\dots (6)$$

である。また、 $\bar{Q}$ および $\chi$ は $(y_0 + B - \Delta y, t)$ および $(y_0 + B - \Delta y, t - \Delta t)$ における $Q$ から計算される(堀川編, 1985)。次に前述の通り $i$ 倍( $i=2, 3, \dots$ )の周波数を持つ成分は散乱波成分であると考え、新たに $n$ 通りの防波堤の向きに依存する角 $\beta$ を導入して方向分散性を持たせた。

$$Q_{i,y,t}^{(i)}(x_0, y_0 + B) = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{K_{Ri}}{1 - K_{R1}} \cdot \bar{Q} \sin(kx \sin \beta + ky \cos \beta - \sigma_i t) \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\sigma_i$ は $i$ 倍の周波数に対応する角振動数である。角 $\beta$ は後述のように $n$ 通りに変えてそれぞれ計算する。そして、基本周波数成分および高周波数成分のすべてをエネルギー合成して波高分布を求める。

b) 不規則波の場合 入射波が不規則波の場合は、周波数成分ごとに波高伝達率を変えることで、スペクトルの形状の変化を表現する。つまり高周波数成分に対しては大きい波高伝達率を与えることにする。

まずある周波数成分 $f_i$ に着目すると伝達波の周波数スペクトルの値は

$$S_T(f_i) = K_{E1} S(f_i | H_i, T_i) + K_{E2} S(f_i | H_i, T_i/2) + K_{E3} S(f_i | H_i, T_i/3) + \dots\dots\dots (8)$$

となっている。これよりある周波数 $f_i$ での線流量の越波成分が以下のように計算される。

伝達波のうちの一部は透過伝達成分で、残りはこの周波数より小さな周波数の越波によって起こされた高周波数成分と考え、散乱波として扱う。それぞれの入射波に対する伝達率 $K_{T1}$ 、 $K_{T2}$ は式(8)より次のように計算される。

$$K_{T1} = \sqrt{K_{E1}} \dots\dots\dots (9)$$

$$K_{T2} = \sqrt{\frac{K_{E2} S(f_i | H_i, T_i/2) + K_{E3} S(f_i | H_i, T_i/3) + \dots}{S(f_i | H_i, T_i)}} \dots\dots\dots (10)$$

また、散乱波の伝達成分の波向きは広がりをもって与えるということで、全体として卓越する波向きがなくなるようにした。以上より不規則波の周波数 $f_i$ の成分波の越波成分は次式のように与えられる。

$$Q_{yi}^{(i)}(x_0, y_0 + B) = \frac{K_{T1}}{1 - K_{R1}} \bar{Q} \sin(\chi - \sigma_i(t - \tau)) + \frac{K_{T2}}{1 - K_{R1}} \bar{Q} \sin(kx \sin \beta + ky \cos \beta - \sigma_i t) \dots\dots (11)$$

ここで $\sigma_i$ は、周波数 $f_i$ に対応する角振動数である。

## (2) 反射波成分について

防波堤背面での反射波に起因する線流量成分 $Q_R^{(i)}(x_0, y_0 + B)$ を求める。まず、防波堤背面側への入射波の線流量 $Q_R^{(i)}(x_0, y_0 + B)$ は背面での反射率 $K_{R2}$ を用いて以下のよう

$$Q_R^{(i)}(x_0, y_0 + B) = Q_R^{(i)-r}(x_0, y_0 + B + \Delta y) = Q_R^{(i)-r}(x_0, y_0 + B + \Delta y) - Q_R^{(i)-r}(x_0, y_0 + \Delta y) = \bar{Q}_2 \sin(\chi_2 - \sigma(t - \tau_2)) \dots\dots\dots (12)$$

ここで $\bar{Q}_2$ および $\chi_2$ は $\bar{Q}$ および $\chi$ と同様に求め、 $\tau_2$ は次式を満たす。

$$\tan \sigma \tau_2 = \frac{1 + K_{R2}}{1 - K_{R2}} \tan(k \Delta y \cos \alpha_2) \dots\dots\dots (13)$$

$\alpha_2$ は防波堤背面への入射波の波向角である。

よって任意反射率 $K_{R2}$ に対して

$$Q_R^{(i)}(x_0, y_0 + B) = A \bar{Q}_2 \sin(\chi_2 - \sigma(t - \tau_2)) \dots\dots (14)$$

となる。

ここで $A$ は以下のように表される。

$$A = \frac{1 - K_{R2}}{\sqrt{1 + K_{R2}^2 - 2K_{R2} \cos(2k \Delta y \cos \alpha_2)}} \dots\dots (15)$$

## 3. 数値計算結果および考察

本研究では、計算結果を検証するために、池野ら(1991)の実験結果との比較を行った。この実験は平面水槽内に防波堤を設置しその一部で越波を起こしたものである。入射波には規則波と一方向不規則波を用いている。そこで計算条件を実験条件と合わせ、規則波と不規則波の両方の場合で計算を行い、結果の検証をした。規則波については有義波高分布、不規則波については有義波高分布に加えて有義波周期分布の比較も行った。

### (1) 有義波高分布の比較

有義波高分布の計算については境界条件の与え方を以下のように変えて行った。

(I) 越波によって発生する高周波数成分は考慮に入れず、基本周波数成分波を透過波とする(図-3, 図-7, 図-10)。

(II) 基本周波数成分波に加えて、高周波数成分波を散乱波とし、方向分散を与える(図-4, 図-8, 図-11)。

#### a) 規則波

規則波の計算条件は表-1の通りである。波高伝達率は0.26、散乱波の角度 $\beta$ は $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ の7通りとした。また高周波数成分を考慮した計算では伝達波のうちの各周波数成分のエネルギーの比は実験結果と照らし合わせて $K_{E1} : K_{E2} : K_{E3} = 1 : 1 : 1$ として数値計算に用いた(図-1)。

入射波が規則波の場合の実験結果と計算結果を比較し

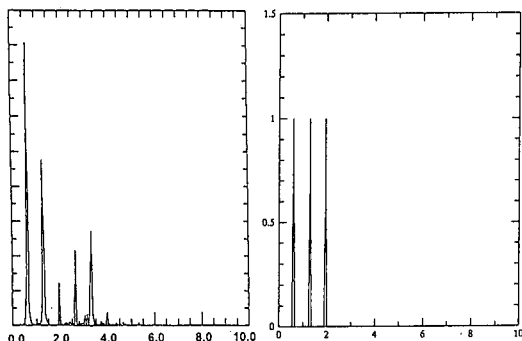


図-1 周波数スペクトル形状の比較 (規則波)

表-1 規則波の越波の平面実験の実験条件・計算条件

|        |                            |
|--------|----------------------------|
| 入射波周期  | 1.5 s                      |
| 波高     | 7.0 cm                     |
| 波向     | 0°                         |
| 水深     | 21.5 cm                    |
| 防波堤形式  | 前面消波ブロック被覆                 |
| 防波堤天端高 | 2.5 cm                     |
| 防波堤形状  | 中央部 4 m (入射波長の 2 倍) の範囲で越波 |

表-2 不規則波の実験条件及び計算条件

|            |                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|
| 入射波有義波周期   | 1.5 s                                              |
| 周波数スペクトル形状 | Bretschneider-光易型                                  |
| 有義波高       | 7.0 cm                                             |
| 波向         | 0°                                                 |
| 水深         | 21.5 cm                                            |
| 防波堤形式      | 前面消波ブロック被覆                                         |
| 防波堤形状      | 防波堤の中央部 4 m で越波<br>中央部 2 m が開口部で、その両<br>側角 3 m で越波 |

て、次のことがいえる。

従来の回折計算と同様に越波を単純な透過波として扱って、高周波数成分を取り入れなかった計算結果 (図-3) では、波高の大きい部分が入射方向に卓越している。高周波数成分を散乱波と考え、方向分散を与えた境界条件で計算した場合 (図-4) は、実験結果 (図-2) と方向分散の傾向が似ており、波高比 0.07 の等高線が港奥まで広がっている。

#### b) 不規則波

不規則波を用いた実験では、一部で越波が起こるケースに加えて開口部を持つ防波堤形状での実験も行われている。この実験条件は表-2 の通りである。

波高伝達率を 0.26 とし、計算における入射波の周波数スペクトルは実験条件とあわせて次式に表される Brets-

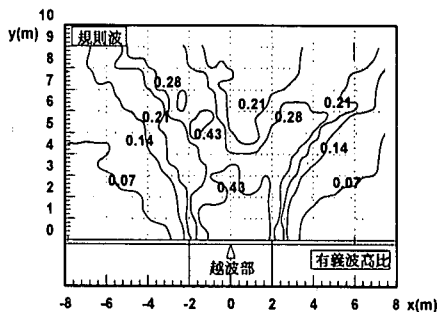


図-2 規則波の有義波高分布 (実験結果)

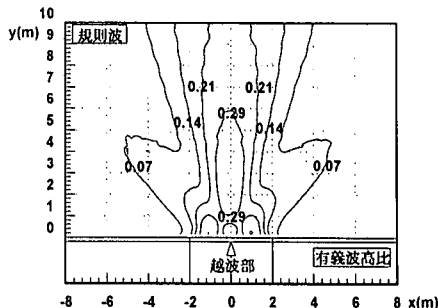


図-3 規則波の有義波高分布 (計算結果 I)

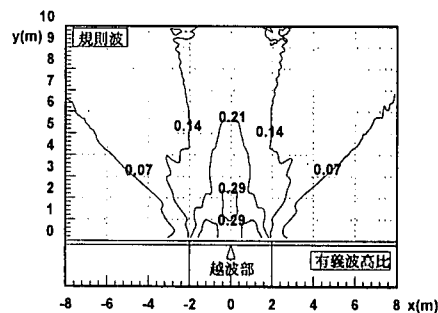


図-4 規則波の有義波高分布 (計算結果 II)

chneider-光易型スペクトルを用いた。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad \dots\dots\dots (16)$$

越波伝達波の周波数スペクトルは実験での越波部背後での伝達波のスペクトル解析 (図-5) から、次式で表される関数形になっているとした。

$$S_T(f) = \frac{K_E}{2} \left[ 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] + 0.257 H_{1/3}^2 \left( \frac{T_{1/3}}{2} \right)^4 f^{-5} \exp \left[ -1.03 \left( \frac{T_{1/3}}{2} \right)^{-4} \right] \right] \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、波高伝達率から推算されるエネルギー伝達率  $K_E$  は 0.04 である。

この周波数スペクトルの低周波数側 0.5% と高周波数側 0.5% のエネルギーをカットしたのち等エネルギーで

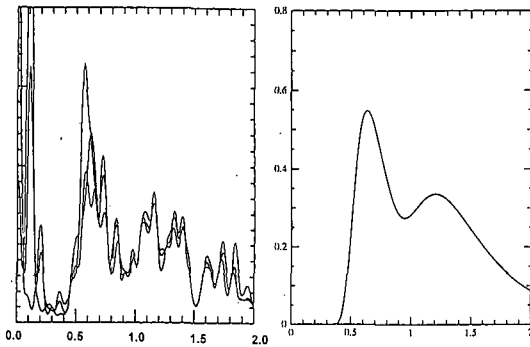


図-5 周波数スペクトル形状の比較 (不規則波)

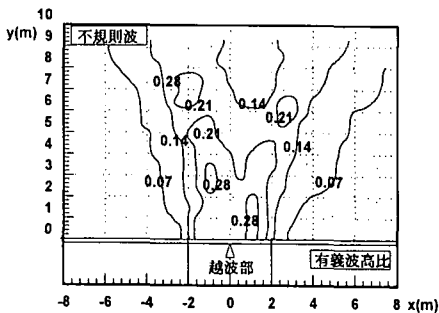


図-6 不規則波の有義波高分布 (実験結果, 開口部なし)

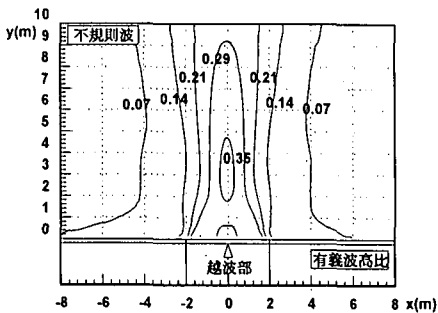


図-7 不規則波の有義波高分布 (計算結果 I)

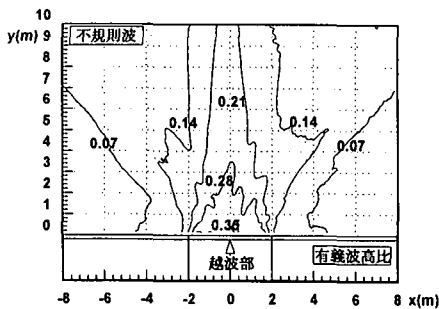


図-8 不規則波の有義波高分布 (計算結果 II)

99 分割し、それぞれの周波数成分でのエネルギー伝達率から波高伝達率を求めて計算した。すなわち全エネルギーの 99% を計算していることになる。

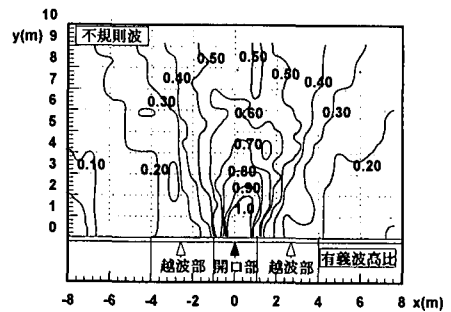


図-9 不規則波の有義波高分布 (実験結果, 開口部有り)

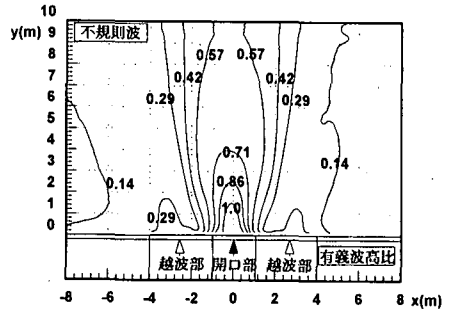


図-10 不規則波の有義波高分布 (計算結果 I)

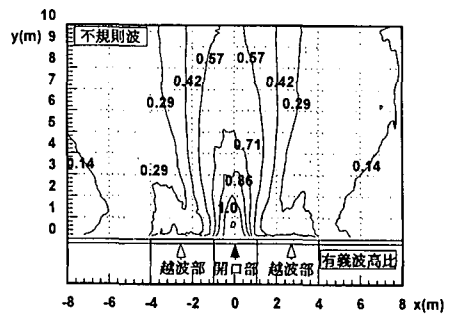


図-11 不規則波の有義波高分布 (計算結果 II)

また散乱波の角度  $\beta$  は  $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$  の 7 通りとした。

不規則波の越波伝達波の波高分布に関しても規則波と同様に、越波伝達波に強い方向分散性が見られる。よって、越波を単純な透過波として扱って方向分散性を考慮しなかった計算 (図-7) では、波高の大きい部分が入射方向に卓越している。越波によって発生する高周波数成分を散乱波と考えて境界条件を与えて計算した場合は、実験結果と同様に波高分布に大きな方向分散性がみられる (図-8)。

開口部を持つ防波堤での計算では、波高分布は回折の影響が強く、越波部の境界条件を変えてもそれほど差は見られなかった。しかし図-11 で波高比 0.1-0.2 の等波高線を見ると越波の持つ方向分散性が現れており、越波による防波堤背後の波高分布が実験結果 (図-9) に近

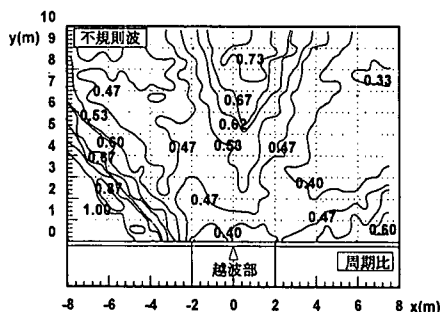


図-12 有義波周期分布 (実験結果, 開口部なし)

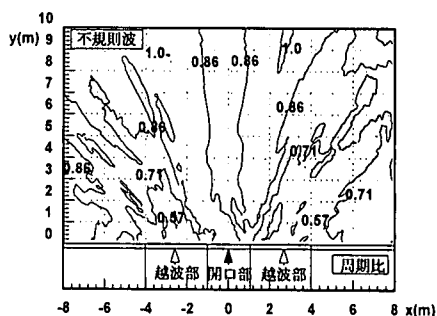


図-15 有義波周期分布 (計算結果, 開口部有り)

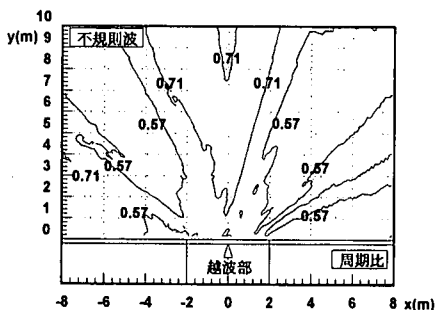


図-13 有義波周期分布 (計算結果, 開口部なし)

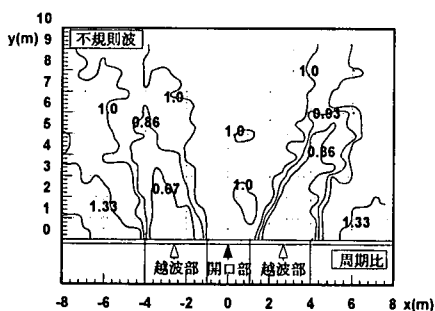


図-14 有義波周期分布 (実験結果, 開口部有り)

い。

これらの結果から規則波、不規則波共に実験結果に見られる越波伝達波の方向分散性が本手法により適切に再現されているといえる。

## (2) 有義波周期分布の比較

次に本計算法による不規則波の有義波周期分布の実験結果との比較を行った。図-12、図-14に防波堤に対し波が直角に入射する場合についての実験結果を示した。計算上の有義波周期には周波数スペクトルから周波数の重心を計算し、その逆数をとった値を用いている。こうした結果、計算値の有義波周期は実験値よりも多少短くでている。

不規則波の有義波周期分布は、実験結果とかなり傾向が一致していた。図-13では、越波部背後の周期の短い

領域がY字型に広がっていく様子が再現されており、実験の分布と一致している。また、開口部を持つ場合は越波部背後に周期の短い領域ができ、これが左右に広がっていくという様子が計算結果(図-15)にも現れている。

これより越波伝達波の作る強い方向分散性は越波によって発生する高周波数成分波によって作られていると考えられる。

## 4. おわりに

本研究では、越波によって発生する高周波数成分を散乱波と考え、これに方向分散性を与えるということで越波の持つ方向分散性を表現した。その結果、有義波高、有義波周期の分布は共に実験とほぼ一致した。またこのことから越波の持つ方向分散性には高周波数成分が深く関わっていることがわかった。

本研究に残された問題として以下のことが挙げられる。

- ・今回の研究では越波伝達波を線形波の重ね合わせで表現した。しかしながら越波は本来、非常に非線形性の強い現象であり線形理論の非定常緩勾配方程式では十分には表現しきれない。
- ・平面実験のデータが少なく、実験との整合性が部分的にしか確認できなかった。

## 参考文献

- 池野正明・平口博丸・阿部宣行 (1991): 防波堤越波により生ずる伝達波を考慮した港内波浪算定手法の開発, 電力中央研究所報告, 依頼報告 U90519, pp. 2-46.
- 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.
- 平口博丸・池野正明・井上繁行・柏木洋之・阿部光信 (1991a): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 531-535.
- 平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久 (1991b): 防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 506-510.
- 堀川清司編 (1985): 海岸環境工学, pp. 231-233.