

港内波高分布の計算

高山 知司*・菊地 治**

1. ま え が き

新しい港の建設や既存の港の拡張あるいは改良の際に港湾技術者が常に関心を注ぐ問題の一つは、港内に十分静穏な水域が確保できるか否かということである。ここでいう「静穏な水域」とは、船舶が安全に避泊・係留することができ、かつ荷役作業を支障なく実施できる水域を意味する。しかし、水域の静穏には波ばかりでなく風や流れ、さらには対象船舶の諸元など非常に数多くの要素が複雑にからみあって影響する。例えば、同一諸元の波であっても船舶の大きさによって動揺の度合いが異なり、荷役に影響を受ける船もあればそうでない船もある。港内静穏度を判定するためには、このように複雑にからみあった要素を解きほぐし、一つ一つの要素の影響度を算定した上で総合的に評価することが必要であるが、ここでは港内静穏度の判定に最も重要な要素となる港内波高についてその計算法を提示する。

港内波高を算定する手法としては、数値波動解析法¹⁾や積分方程式による解法²⁾、折返し回折図法^{3), 4)}などがある。前二者は規則波を対象とした計算法であり、海の波のような不規則波に対して適用できるようにはなっていない。また、折返し回折図法は、不規則波の回折図を用

いることによって不規則波に対する港内波高を計算することができるが、港内の形状によっては適用困難な場合が生じる。本計算法は、従来の計算法の問題点を克服すると同時に、任意の港内形状に対しても計算できるようになっている。桑島⁵⁾も任意形状港内の波高を計算する手法を提案しているが、岸壁等による反射波をどのように計算しているのか不明である。

2. 計算方法

(1) 港口部からの侵入波

港口部からの侵入波の計算は、著者の一人が提案した方法^{6), 7)}を用いることにした。この方法によると、防波堤の港内側の面で反射された波が港内に侵入する場合や二次回折が起る場合についても計算できる。さらにこの計算法は単一方向不規則波を用いた水理模型実験結果とも実用上十分な精度で一致することが確かめられている。

(2) 岸壁等による反射波

港口部から侵入してきた回折波は岸壁によって反射される。また、岸壁による反射波は再度他の岸壁によって再反射される場合もある。この岸壁による反射波の計算としては、岸壁を一つの島堤と考えて、次式で $p(x, y)$ 点の反射波を計算する。

$$\begin{aligned} \phi(x, y, f_n, \theta_m) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r_1 \cos(\alpha_1 - \theta_m) + \frac{\pi}{4} - \frac{k_n B}{2} \cos \theta_m \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{K_r}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r_1 \cos(\alpha_1 + \theta_m) + \frac{\pi}{4} - \frac{k_n B}{2} \cos \theta_m \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r_2 \cos(\pi - \alpha_2 - \theta_m) + \frac{\pi}{4} + \frac{k_n B}{2} \cos \theta_m \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{21}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{21}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{K_r}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r_2 \cos(\pi + \alpha_2 - \theta_m) + \frac{\pi}{4} + \frac{k_n B}{2} \cos \theta_m \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{11} &= \sqrt{4k_n r_1 / \pi} \cos \frac{\alpha_1 - \theta_m}{2} \\ \gamma_{12} &= \sqrt{4k_n r_1 / \pi} \cos \frac{\alpha_1 + \theta_m}{2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{21} &= \sqrt{4k_n r_2 / \pi} \cos \frac{\pi - \alpha_2 + \theta_m}{2} \\ \gamma_{22} &= \sqrt{4k_n r_2 / \pi} \cos \frac{\pi + \alpha_2 - \theta_m}{2} \end{aligned} \right\}$$

$C(\gamma)$, $S(\gamma)$ は Fresnel 積分, k_n は成分波の周波数 f_n に対応する波数, K_r は島堤の反射率, θ_m は成分波の入射角, α_1 や α_2 , r_1 , r_2 は 図-1 に示す値である。ただ

* 正会員 港湾技術研究所海洋水理部

** 港湾技術研究所海洋水理部

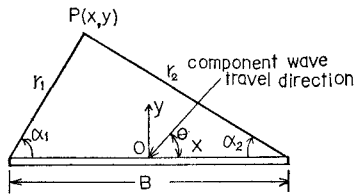


図-1 島堤による回折計算の記号説明図

し、この式(1)は Mathieu 関数を用いた厳密解ではなく、半無限堤の解の重ね合わせで求めた近似解である⁶⁾。

また、式(1)は島堤へ入射する成分波を取り除いた後の反射波と散乱波を示している。この式を用いれば、反射波の周波数スペクトル $S_d(f_n)$ は

$$S_d(f_n) = \sum_m S(f_n, \theta_m) \phi(x, y, f_n, \theta_m) \phi^*(x, y, f_n, \theta_m) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となるから、入射波に対する反射波の波高比 K_d は

$$K_d = \sqrt{\sum_n S_d(f_n) \delta f_n / \sum_{n,m} S(f_n, \theta_m) \delta f_n \delta \theta_m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で求まる。ここで $S(f_n, \theta_m)$ は岸壁に入射する波の方向スペクトル、 $\phi^*(x, y, f_n, \theta_m)$ は $\phi(x, y, f_n, \theta_m)$ の共役複素数、 δf_n および $\delta \theta_m$ はそれぞれ周波数および波向の分割幅である。式(4)でわかるように、計算を実行するためには岸壁に入射する波の方向スペクトル形を求めておかなければならない。しかし、一度回折を受けた波あるいは反射された波の方向スペクトル形は求められないので、ここでは周波数スペクトル形としては岸壁前面における入射波の有義波高、周期の平均値から求めた Bretschneider 型のスペクトルを用い、方向分布形としては図-2で示すように岸壁の中心 o' と港口部の中心 o とを結んだ線方向 θ_0 を主方向に持ち、 o' と防波堤先端 a, b を結んだ線の間の角 θ を波向範囲とする光易型方向分布関数を考えた。

岸壁による反射波が再度他の岸壁で反射される場合には、周波数スペクトルは上記と同じ方法で求め、主方向

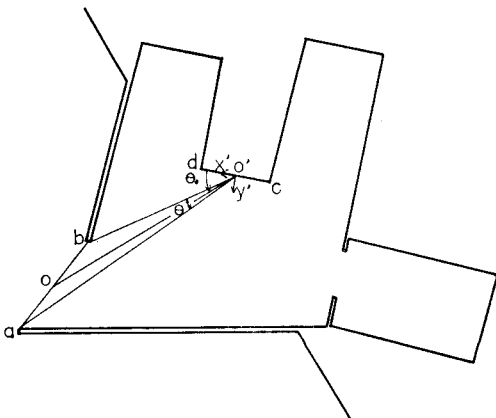


図-2 岸壁による反射

は岸壁の中心同志を結んだ方向、方向角の範囲は再反射岸壁の中心ともう一方の岸壁の両端とを結んだ線の間の角度とした。

(3) 岸壁による回折波

港口で回折された波が岸壁と港内の突堤などで遮られて直接到達できない領域が存在する場合がある。このような場合には、岸壁や突堤を半無限堤とみなして回折計算を行うことにした。図-3はこのような場合の例を示したものであり、 cd を半無限堤とみなしている。このような場合については次式で計算する。

$$\begin{aligned} \phi(x, y, f_n, \theta_m) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r \cos(\alpha - \theta_m) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \\ &\times \left[\left\{ C(\gamma_1) \pm \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_1) \pm \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{K_r}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k_n r \cos(\alpha + \theta_m) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \\ &\times \left[\left\{ C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right\} \right] \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{4k_n r / \pi} \cos \frac{\alpha - \theta_m}{2} \\ \gamma_2 &= \sqrt{4k_n r / \pi} \cos \frac{\alpha + \theta_m}{2} \end{aligned}$$

式(5)の右辺第1項で $\alpha < \theta_0 + \pi$ のとき $-$ 、 $\alpha > \theta_0 + \pi$ のとき $+$ となる。 α, θ_0 は図-3に示してある。この式を用いて岸壁による反射波の場合と同様の計算を行えばよい。

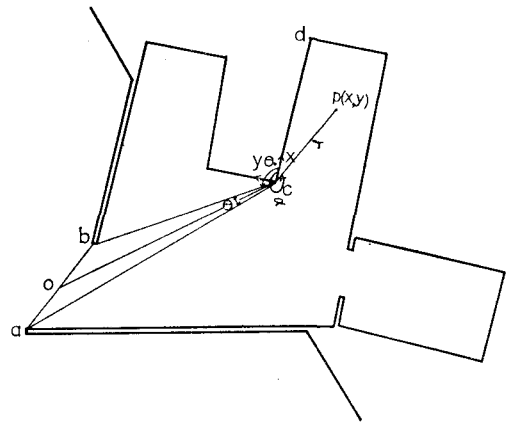
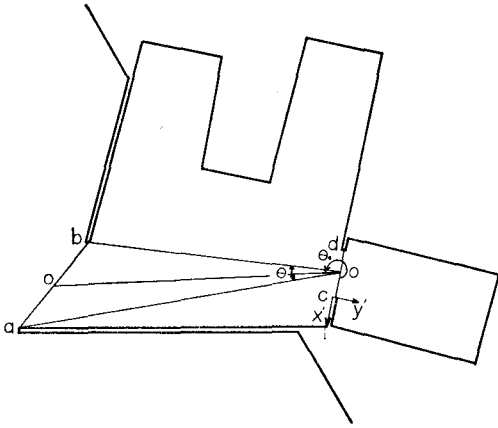


図-3 岸壁による回折

(4) 港内開口防波堤による回折

港によっては港内に旧港があって、その旧港が防波堤で遮蔽されている場合がある。このように港内に開口防波堤が存在する場合には、港口からの回折侵入波を再度回折させることが必要となる。このような場合を示したのが図-4である。この場合は、図-4に示された θ_0 を



図—4 港内開口部による回折

波の主方向, θ を波向の範囲とする。

(5) 合成波の計算法

(1) から (4) の方法で求めた i 番目の波群の有義波高を H_i とすると, 港内波高比 K_a は各波高のエネルギー合成によって次式で求める。

$$K_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N H_i^2} / H_{1/3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, N は港口侵入波や岸壁等による反射波などの波群の数, $H_{1/3}$ は港口入射波の有義波高である。

合成波の周期比 K_{ar} は Rice の理論を応用して

$$K_{ar} = \sqrt{\sum_{i=1}^N H_i^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{H_i^2}{T_i^2}} / \bar{T} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で求める。ここに, $\bar{T}$ は港口入射波の平均周期, T_i は各波群の平均周期である。

3. 模型実験結果との比較

本計算法によって任意形状の港内の波高分布が計算できるが, 計算結果がどの程度の精度を示すものか検討しておく必要がある。そこで, 本計算法の精度を検討するために単一方向不規則波を用いて行われた模型実験結果と比較を行ってみた。しかし, この比較には次のような問題がある。模型実験では海底地形変化に伴う波の変形が再現できるが, 本計算法では一様水深として計算しなければならぬため, 海底地形変化に伴う波の変形は計算できない。しかし, 港内の海底地形が変化する実際の港に本計算法を適用することを考えると, このような模型実験と比較を行なって, その精度を検討しておくことは非常に意義があるものと思われる。

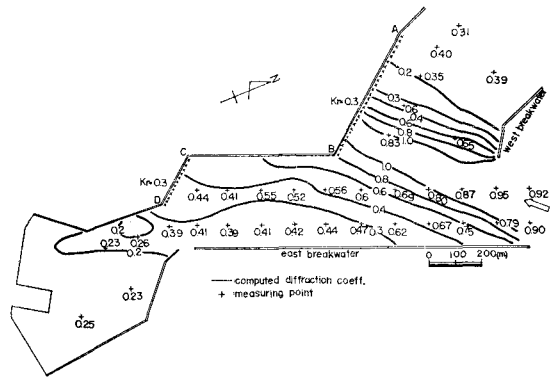
(1) 御前崎港の模型実験との比較

本模型実験は, 静岡県南端にある御前崎港の拡張計画に際して適切な防波堤配置を決定するために行われたものである⁹⁾。この実験では各種の防波堤配置について行われているが, ここでは比較を行ったケースのうち2ケースについて示す。御前崎港の水深は港口で -12 m ,

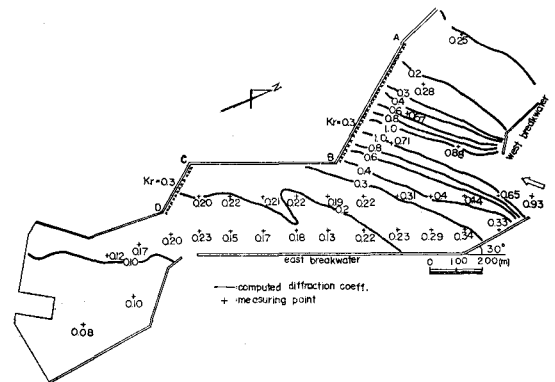
港奥で -5.0 m 程度であるが, 計算では港内を -10 m の一様水深とした。実験は有義波周期 8.6 sec の単一方向不規則波が用いられているので, 計算でも同じ不規則波を用いた。図—5, 6における AB, CD の護岸は消波構造になっているが, その反射率が不明であるので計算では一応その値を 0.3 とした。

図—5 は, 東防波堤が NNE 方向に真直ぐ延びている場合で, NE 方向から入射する波について計算値と実験値とを比較したものである。図中の + 印での数値は実験値, 実線は計算値の等波高比線である。この図からわかるように, 防波堤開口部から波が直接侵入するような領域では計算値は実験値より大きく, 実験値の 1.2 倍程度である。一方, 港内奥深く入るにしたがって計算値は実験値より小さくなり, 港奥の東防波堤付近では実験値の 0.8 倍程度となる。ただし, 西防波堤背後で計算値が実験の半分以下になっているのは, 西防波堤が実験では島堤となっているのに対し, 計算では半無限堤としたためである。

図—6 は東防波堤の先端から 300 m 入った地点で 30° 西側へ防波堤を傾けた場合である。この場合も図—5 と同じ傾向を示し, 港口部で計算値は実験値より大きく, 港奥で小さい。誤差も図—5 の場合とほぼ同じ程度であ



図—5 御前崎港における計算値と実験値との比較



図—6 御前崎港における計算値と実験値との比較

る。西防波堤背後は図-5の場合と同じ理由で計算値は特に小さい。

(2) 田後港の模型実験との比較

鳥取県の東端に位置する田後港は防波堤および岸壁等の整備にもかかわらず港内静穏度については未だ十分でない。そのため、将来5カ年計画において港内静穏度向上のための改良工事が行われようとしている。本実験は5カ年計画完了時にどの程度静穏度が向上するかを調べたものである¹⁰⁾。

実験では単一方向不規則波を用いているので、計算でも同じものを用いた。田後港港外の海底地形は非常に複雑であるため、港口入射波は屈折の影響を受けて複雑な波向になっていると考えられる。そこで、計算においては港口部における波向として屈折後の平均波向を用いた。港内水深は、大きな変化はなく、平均で5m程度である。図-7, 8において×印で示されている消波岸壁の反射率として計算では0.5とした。これらの図中の実線は計算値、破線は実験値を示している。

図-7は現在の防波堤を延長すると同時に、海岸線の一部に消波岸壁を設けた場合である。港口部付近では計算値は実験値の1.5~2.0倍程度大きい。港口部でのこの差は、計算では入射波の波高および波向が一様であるとしているのに対して、実験では波高および波向が屈折の影響で大きく変化していることに起因しているものと思われる。一方、港奥では計算値は実験値より30%程

度小さい。

図-8は防波堤をさらに延長し、波除堤と岸壁の一部を消波構造にした場合の結果である。この図では、計算値と実験値の等高波比線が複雑に入り組んでいてははっきりしないが、全体的に計算値が大きくでているようである。誤差値の誤差は30%程度と推察される。

(3) 計算値の精度

御前崎港と田後港の模型実験値と計算値とを比較した結果では、計算値は場所的に2倍程度の大きな誤差があるにしても、かなりの程度まで実験値を再現しているように思われる。また、計算値は御前崎港で約20%、田後港で約30%の誤差であるから、本計算法は30%程度の誤差を含むとみなしてよいであろう。

4. 実際の港への適用例

図-9は、周期6.5secの風波がほぼSSEの矢印の方向から入射してきた際の東京港内の波高分布を示したものである。入射波としてはBretschneider・光易型の方向スペクトルを持つ不規則波を考え、方向集中度を示すパラメータ S_{max} は10とした。図中の実線部分の岸壁は反射率をすべて1.0として反射あるいは回折を計算した岸壁を示し、破線は反射率を0とした岸壁で、計算では岸壁による反射あるいは回折を考えなかった部分を示している。水深は-12mの一樣水深とした。東京港の西側港内では、反射率1.0の岸壁で挟まれているため波高減衰は小さく、波高比0.6の線がかなり港内の奥深くまで入り込んでいる。また、東側港内では港内侵入波が港口前方の岸壁で反射されるため、0.6の波高比線がSWの方向に延びている。両港口部の間の埋立地背後では、両側の港口から侵入してきた波が廻り込んで入ってくるものの波高は小さく、波高比にして0.2以下である。

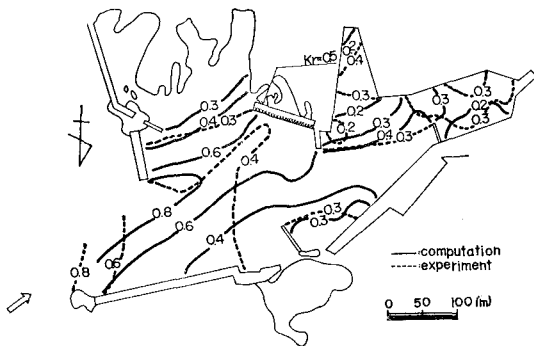


図-7 田後港における計算値と実験値との比較

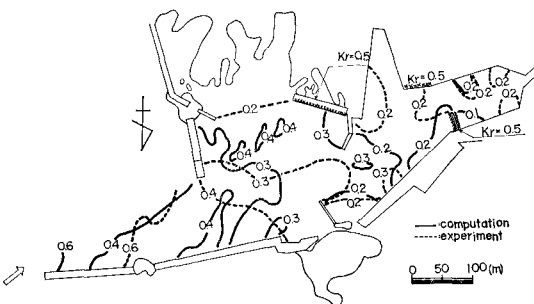


図-8 田後港における計算値と実験値との比較

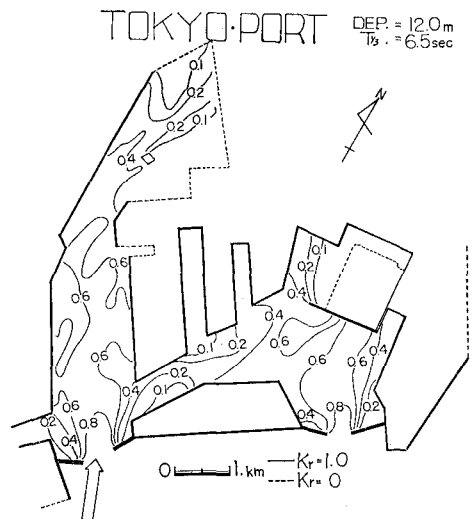
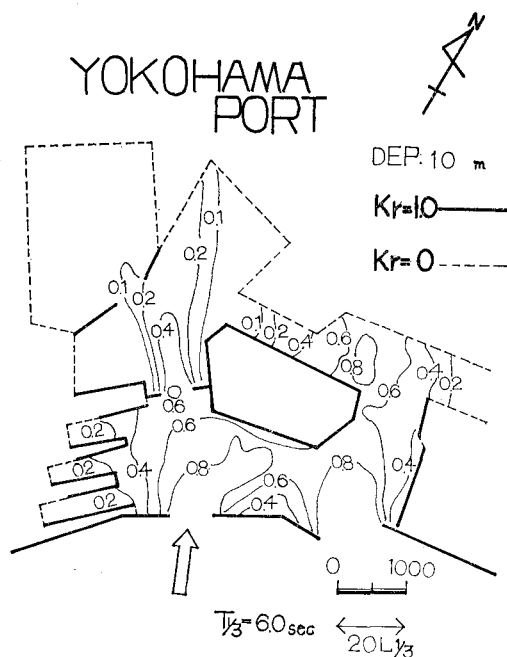


図-9 東京港内の波高分布



図—10 横浜港内の波高分布

図—10 は、周期 6.0 sec の風波がほぼ SSE の方向から入射してきた場合の横浜港内の波高分布を示している。ここでも東京港と同じ方向スペクトル形を有する波を用いている。東京港の場合と同様に、図中の実線部分の岸壁はすべて完全反射として反射波あるいは回折波を計算するのに用い、一方破線は反射率を 0 とした岸壁で、計算には関係しない岸壁である。水深は -10 m の一様水深とした。横浜港の場合、港内に開口防波堤が存在し、そのため回折侵入波および岸壁反射波が再度港内開口部で回折されることになる。このため、港内開口部で回折された波は、この開口部で 0.6 もあった波高比を開口部付近を除いて 0.4 以下に下げている。両港口部間の島堤背後では埋立地の岸壁による反射波のために波高比はそれほど小さくならず、小さい部分で 0.4 程度である。東側港内の奥で 0.8 の波高比線が現われているが、これは港口侵入波や岸壁反射波が集中するために生じたものと推定される。

本計算法は、東京港や横浜港のような非常に複雑な港内の波高分布の計算にも十分適用できる。しかし、方向スペクトルを有する波に対して本計算法がどの程度の精度を持つかは方向スペクトルを持つ波による回折実験ができないことや実際の港の中で波高測定された例が少ないこともあって明らかにできない。ただ、前章における模型実験との比較で得られた誤差程度であろうと考えている。

5. あとがき

本論文では、任意形状の港内における波高分布計算法を提案し、単一方向不規則波を用いて行われた模型実験結果と比較することによってその精度を検討した。その結果では、計算値はほぼ 30% 程度の誤差を持つことがわかった。これらの誤差の中には、計算では取り入れられない海底地形変化によって生じた誤差も含まれている。しかし、この程度の誤差は実用上許容できる範囲と考えられる。方向スペクトルを有する不規則波を用いて東京港および横浜港内の波高分布を計算してみた。しかし、方向スペクトルを有する波に対する港内波高測定データがないこともあって、このような波に対する本計算法の精度については調べることはできなかった。そのため、計算の前提となる仮定の妥当性を検討することはいうまでもなく、今後は実際に港内波高を測定し、本計算法の精度を検証したいと思っている。

最後に、本研究を遂行するに当たり、終始有益な助言をいただいた海洋水理部長合田良実博士およびデータ整理や計算を手伝っていただいた杉浦秀之氏（東亜建設工業株式会社）に深く感謝するものである。

参考文献

- 1) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 2 号，pp. 35-58, 1975.
- 2) 山本隆一・横田基紀・滑川伸孝：数値波高シミュレーションについて，第 22 回海岸工学講演会論文集，pp. 259-263, 1975.
- 3) 佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾，彰国社刊，pp. 72-77, 1972.
- 4) 奥山育英，他：折り返し回折計算プログラムの開発，港湾技術研究所資料，No. 288, 1978.
- 5) 桑島 進：港内進入波の計算について，日本航海学会論文集，pp. 83-91, 1975.
- 6) 高山知司・神山 豊：不規則波の回折計算，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 112-116, 1977.
- 7) Takayama, T. and Y. Kamiyama: Diffraction of sea waves by rigid or cushion type breakwaters, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 16, No. 3, pp. 3-37, 1977.
- 8) 合田良実・吉村知司・伊藤正彦：島堤による波の反射および回折に関する研究，港湾技術研究所報告，第 10 巻，第 2 号，pp. 3-52, 1971.
- 9) 服部典節・吉村知司：御前崎港の遮蔽実験について—不規則波による実験例—，港湾技術研究所資料，No. 134, 1972.
- 10) 合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉：不規則波を用いた港内静穏度解析，港湾技術研究所資料，No. 271, 1977.