

内外二重港口をもつ港形の計画に関する研究

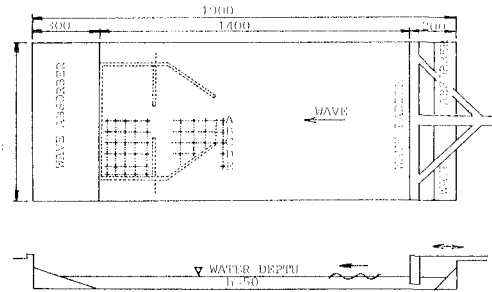
久宝雅史*・竹沢三雄**・李 弘植***

1. まえがき

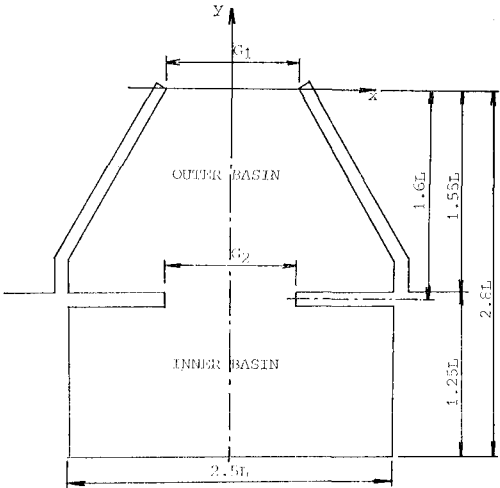
一般に港形の計画は、a) 波浪や沿岸流によって、海浜に沿って移動する漂砂や波浪などの自然条件調査による資料、b) 防波堤、埠頭などの港湾施設設置を考慮した模型実験結果、c) 港内静穏度についての数値計算結果などを総合して行なわれるものである。本論文は模型実験、数値計算を対象とした内外二重港口をもつ港形の計画についての研究で、防波堤を有する港湾を拡張するために、その外域に外防波堤を設けた場合、内外二重港口を有する港形になる。このような港形の港内は荒天時に、入射波、岸壁などによる反射波、波の回折による散乱波などによって港内波が高くなって、船舶の係留や荷物の積みおろしに支障をきたすことが多い。そこで港内の静穏を保つために、内外の港口の幅、港内港口の位置などについて検討する必要がある。本研究は実際の港湾を模式化した港形についての水理模型実験を行い、それと同じ条件のもとで数値計算を行い港内波高を求め、それらを比較検討することによって、港口幅、港形の計画について論じたものである。

2. 水理模型実験

内外二重港口をもつ港形に対する港内静穏度に関する数値計算結果を吟味するための水理模型実験は、図一1に示す長さ 19 m、幅 7 m の平面水槽で行ない、その平



図一1 実験概要 (単位 cm)



図二2 港湾模型の諸元

表一1 港湾模型の G_1 と G_2 の組み合わせ

Exp. No.	G_1	G_2	Exp. No.	G_1	G_2
No. 1	0.5L	0.5L	No. 14	1.5L	2.0L
No. 2	0.5L	1.0L	No. 15	1.5L	2.5L
No. 3	0.5L	1.5L	No. 16	2.0L	0.5L
No. 4	0.5L	2.0L	No. 17	2.0L	1.0L
No. 5	0.5L	2.5L	No. 18	2.0L	1.5L
No. 6	1.0L	0.5L	No. 19	2.0L	2.0L
No. 7	1.0L	1.0L	No. 20	2.0L	2.5L
No. 8	1.0L	1.5L	No. 21	2.5L	0.5L
No. 9	1.0L	2.0L	No. 22	2.5L	1.0L
No. 10	1.0L	2.5L	No. 23	2.5L	1.5L
No. 11	1.5L	0.5L	No. 24	2.5L	2.0L
No. 12	1.5L	1.0L	No. 25	2.5L	2.5L
No. 13	1.5L	1.5L			

$L=200$ cm (入射波波長)

面水槽の一方に造波機を、他方にコンクリートブロックで作製した 1/100 の港湾模型を設置した。模型の港形は入射波の進行方向に対称で、二重港口を有し、図二2に示すように外港口幅 G_1 、内港口幅 G_2 をそれぞれ5ケース選び、表一1に示す総計 25 ケースの港形に対して港内静穏度の実験を行った。実験に用いた港内への入射波は波高 $H_t=3.33$ cm、周期 $T=1.2$ 秒の規則波で、水深 $h=50$ cm は一定である。波長 L は微小振幅波理論によると約 200 cm に相当する。入射波高は平面水槽内に港

* 正会員 工博 日本大学名誉教授
** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科
*** 正会員 工博 (株)ジャパンテクノロジ技術部

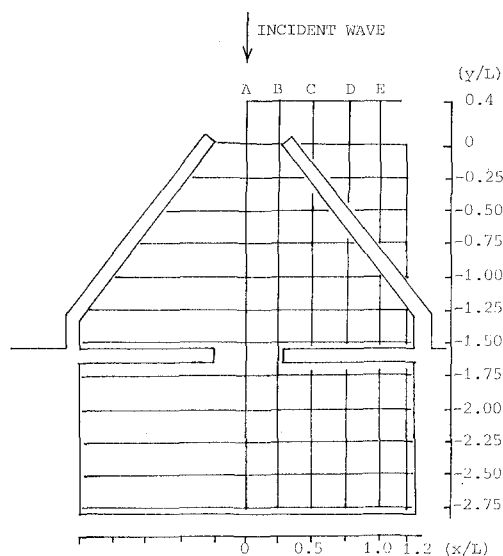


図-3 入射波高および港内波高測定地点

湾模型を設置する前に、図-1に示す港口の入射地点 A, B, C, D, E において5本の容量式波高計で測定し、その平均値 3.33 cm を用いた。港内波高の測定は、6本の容量式波高計を移動させて用い、図-3に示すように50 cm の間隔で対称軸の片側 61~72 地点で、造波後5~8波目の安定した波を対象にして測定した。

3. 港内波高に関する数値計算

本研究において用いた数値計算の方法は、Hwang と Tuck¹⁾、Lee²⁾によって示された積分方程式の変換と同様な方式を境界要素法による離散化要素に分け、その解を井島³⁾によって示された方法によって数値計算したものである。図-2に示すように静水面上で港口の中央を座標軸の原点にとり、海岸線の方に x 軸、それに沖の直角方向に y 軸を、鉛直上向きに z 軸をとる。港内における水深は一定と仮定し、底面の摩擦は無視するものとする。流体を非粘性、非圧縮性の完全流体と仮定し、流体の運動を非回転性とする、その速度ポテンシャルは、

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\sigma t} \quad \dots\dots(1)$$

で表わされ、これは Laplace の方程式

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots(2)$$

を満足する。ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T : 周期、 t : 時間である。ここで、境界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \left(\frac{\sigma^2}{g}\right)\phi = 0 \quad (\text{自由表面条件}) \quad \dots\dots(3)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \quad (\text{水底条件}) \quad \dots\dots(4)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial n}\right)_{\text{on } S} = 0 \quad (\text{不透過条件}) \quad \dots\dots(5)$$

を満足する速度ポテンシャルの一般解は、

$$\Phi(x, y, z, t) = -\frac{gH_i}{2\sigma} f(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \quad \dots\dots(6)$$

として与えられる。ただし、 g : 重力加速度、 H_i : 入射波高、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T : 周期、 $k = 2\pi/L$ 、 L : 水深 h における波長、 n : 防波堤や壁面に直角な方向の法線、 S : 境界線上の積分範囲である。また、 $f(x, y)$ は、Helmholtz の式

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} + k^2 f(x, y) = 0 \quad \dots\dots(7)$$

を満足する波動関数である。この波動関数 $f(x, y)$ を入射波 $f_i(x, y)$ 、反射波 $f_r(x, y)$ 、散乱波 $f_s(x, y)$ とし、

$$f(x, y) = f_i(x, y) + f_r(x, y) + f_s(x, y) \quad \dots\dots(8)$$

と表わすことができると仮定すると、速度ポテンシャルは入射波、反射波、散乱波のそれぞれのポテンシャルの一次形式として表現することができる。ここで、港口に x 軸と θ の角度をなして入射する波 $f_i(x, y)$ の波形を静水面からの高さ

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \cos \{k(x \cos \theta + y \sin \theta) + \sigma t\} \quad \dots\dots(9)$$

と表わすと、この波形に対応する入射波の波動関数は

$$f_i(x, y) = i \exp \{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \quad \dots\dots(10)$$

で与えられる。また、図-4に示すように、港奥部および内港防波堤前面の壁面での反射波による波動関数は

$$f_r(x, y) = i \exp \{-ik(x \cos \theta - y' \sin \theta)\} \quad \dots\dots(11)$$

のように示すことができる。ただし、

$$y' = 2\bar{V} - |y|: \left(|x| < \frac{G_2}{2}\right) \quad \text{or} \quad \left(|x| \geq \frac{G_2}{2}, |y| > \bar{V}_0\right) \quad \dots\dots(12)$$

$$y' = 2\bar{V}_0 - |y|: \left(|x| \geq \frac{G_2}{2}, |y| \leq \bar{V}_0\right) \quad \dots\dots(13)$$

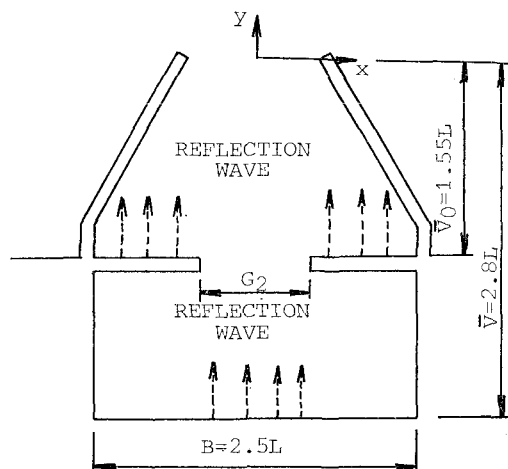


図-4 壁面による反射波の仮定

である。散乱波の波動関数 $f_s(x, y)$ は、(7) 式および Sommerfeld の放射条件を満足するものと仮定して、境界積分方程式で示すと

$$f_s(x, y) = \int_s \left\{ f_s(x_i, y_i) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) - \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) \frac{\partial}{\partial n} f_s(x_i, y_i) \right\} ds \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。ただし、 $H_0^{(1)}$: 第1種0次の Hankel 関数、 r : 港内の任意点 (x, y) から境界上の点 (x_i, y_i) との距離である。また、 $f_s(x_i, y_i)$ は境界上の点 (x_i, y_i) の値を示し、

$$f_s(x_i, y_i) = 2 \int_s \left\{ f_s(x_i, y_i) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) - \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) \frac{\partial}{\partial n} f_s(x_i, y_i) \right\} ds \quad \dots\dots\dots (15)$$

より数値解析によって求められる。本研究では、これらを井島らによって提案された離散化の方法で行い、境界面における各要素の分割間隔を $L/10$ とし、隅角部においてはその分割間隔を $L/100$ とした。以上の結果、入射波高 H_i に対する港内波高 H を回折係数 $(K_a)_e$ とすると、

$$(K_a)_e = \left| \frac{H}{H_i} \right| = |f_i(x, y) + f_r(x, y) + f_s(x, y)| \quad \dots\dots\dots (16)$$

で示される。

4. 数値計算の吟味

模型実験および数値計算に用いた港形は、図-2 に示すように港外からの入射波の波長を L として、長方形港湾部の幅を $2.5L$ および原点 0 から港奥までの奥行きを $2.8L$ といずれも同じとし、外港口幅 G_1 と内港口幅 G_2 を表-1 で示したように5種類づつ変化させ、その25種類の組み合わせ港形モデルについて、港外からの入射波高 H_i に対する港内波高 H の比を水理模型実験と数値計算と比較検討した。ただし、港内波高の測点の位置は、図-3 に示すように、 x, y 軸方向に関して、 $0.25L$ 間隔である。模型実験による入射波と港内波の波高比 $(K_a)_E$ および数値計算による $(K_a)_e$ を対比するために、それらの比

$$\xi = \frac{(K_a)_e}{(K_a)_E} \quad \dots\dots\dots (17)$$

を求め、その比の階級値を 0.2 とした場合の度数分布を、たとえば図-5 に示すように各港形ごとに示した。すなわち、各港形の模型実験値と計算値が一致している点が多ければ、度数分布図のモードが $\xi=1.0$ に近づくようになり、逆に一致しない点が多ければそのモードが $\xi=1.0$ より大きい、あるいは小さい値に近づくことに

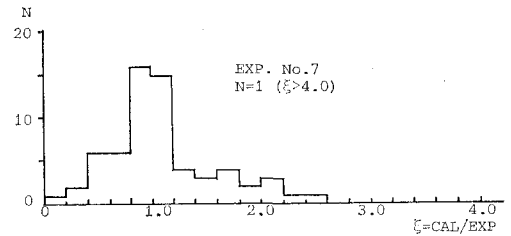


図-5 計算値と実験値の比率についての分布図例

なる。各港形に対する度数分布図から見る限りでは、度数分布のモードが $\xi=1.0$ にあり、計算値と実験値がかなり合っている個所が多いことがわかる。しかし、全体的な傾向として、港内の波高比の大きい場合には、数値計算による値の方が実験値より大きくなる場合が多く、

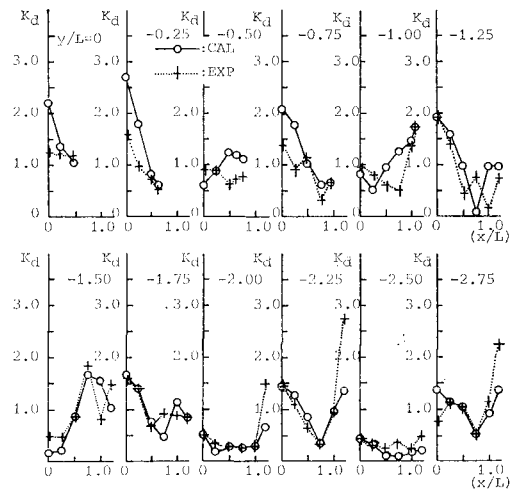


図-6 x 方向の波高分布例 (実験番号 No. 7)

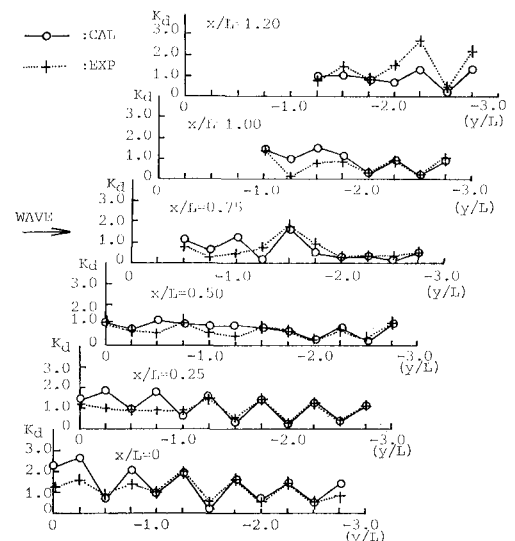


図-7 y 方向の波高分布例 (実験番号 No. 7)

港内の波高比の小さい場合にはそれらがよく一致し、数値計算による $(K_a)_c$ が実験値 $(K_a)_E$ より小さくなる場合はきわめて少ない。

図-6 は、港形モデルの y 軸に対して $0.25L$ ごとに回折係数 K_a と x/L の関係についての1例を示したもので、図中の実線は計算値、点線は実験値である。また、図-7 は港形モデルの x 軸に対して $0.25L$ ごとに、回折係数 K_a と y/L の関係を示した例で、図-6 と同様に、図中の実線は計算値、点線は実験値である。

港形モデルの25 ケースについて、図-6 および図-7 と同様な波高分布図を求め考察した結果、数値計算による $(K_a)_c$ が大きい位置では、実験値による $(K_a)_E$ も大きくなっており、全般的に実験値と計算値の K_a の分布の傾向はよく合っている。また、港口幅 G_1 , G_2 の組み合わせに関して、港口幅 G_1 および G_2 が小さくなると、計算値と実験値の差がやや大きくなるが、その分布の傾向はほぼ同じであり、港口幅 G_1 や G_2 が大きくなるにしたがって計算値と実験値の K_a がよく合っている。ゆえに、本研究の数値計算による回折係数 K_a を港形による港内静穏度の比較検討に用いることが十分可能で、模型実験による手間が省かれ、迅速で容易に種々な港形の比較ができる見込みができた。

5. 港形の選定について

入射波高 H_i と港内波高 H との比 K_a の値によって、 K_a の最も小さい港形を選定するために、25 ケースの港形モデルに対して数値計算による $(K_a)_c$ と模型実験による値 $(K_a)_E$ のうち、まず港内に防波堤のない場合 ($G_2 = 2.5L$) の5 ケースについて港内全域の平均 K_a を示すと図-8 のようになり、 G_1/L が小さいほど港内の平均 K_a が小さくなるが、部分的には、必ずしもその関係が成立しない。図-9 は、港内に防波堤のない場合 ($G_2 = 2.5L$) の5 ケースについて、平均 K_a と y/L の関係であり、港口から K_a が $0.5L$ ごとに大きくなったり、小さくなって港奥にいたる。また、図-10 は港内に防波堤のない場合 ($G_2 = 2.5L$) の $y/L = -2.75$ (港奥) と

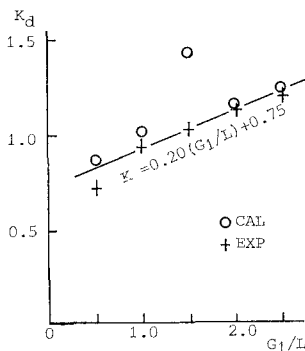


図-8 港内に防波堤のない場合の平均 K_a

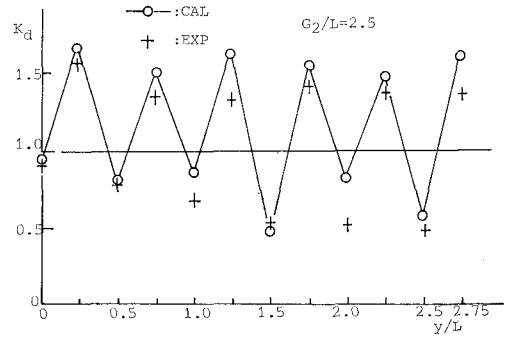


図-9 港内に防波堤のない場合の K_a と y/L の関係

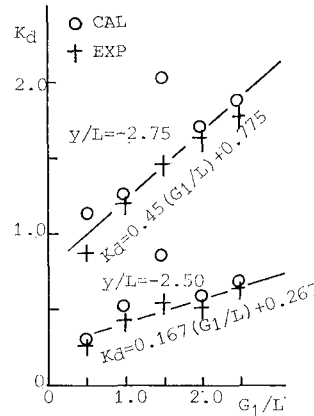


図-10 港内に防波堤のない場合の K_a と G_1/L の関係

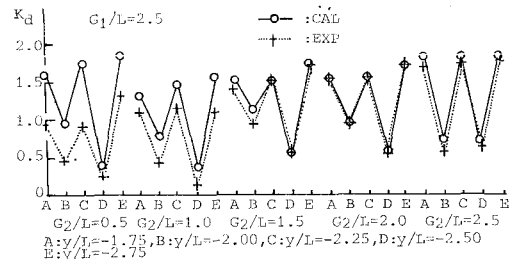


図-11 内港における平均 K_a ($G_1/L = 2.5$)

その前面となる $y/L = -2.75$ における K_a と G_1/L の関係であり、ほぼ直線関係が成立し、部分的にも港口の幅 G_1 が小さいほど K_a が小さくなる。そして、その小さくなる割合は港奥 ($y/L = -2.75$) では、その前面 ($y/L = -2.5$) より勾配が大きくなり、 G_1/L の影響を受けやすい。図-11 は、内港の K_a と内港口幅 G_2 との関係を知るために、 $G_1/L = 2.5$ の場合で、 $G_2/L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ の5 ケースの港形について、 $y/L = -1.75, -2.00, -2.25, -2.50, -2.75$ の位置の実験値と計算値の平均 K_a を示したものであり、 $y/L = -2.50$ の位置では、 G_2/L が小さいほど K_a は小さく、とくに $G_2/L = 0.5$ または 1.0 の場合がやや小さい。

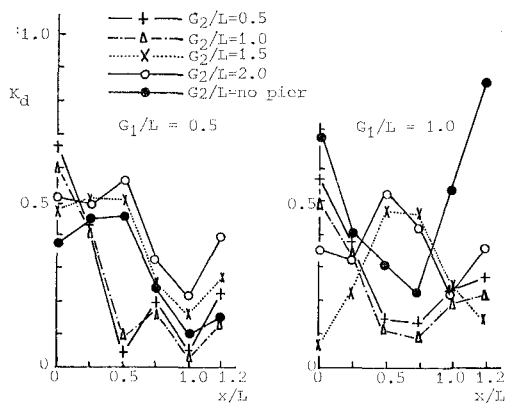
図-12 $y/L = -2.5$ における K_a の分布

図-12は、 $y/L = -2.5$ における $x/L = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.2$ の K_a について、 $G_1/L = 0.5, 1.0$ の各港形モデルの計算結果を示したもので、このうち、港内に防波堤のない場合 ($G_2/L = \text{no pier}$) が示す実線より大きい K_a の場合は、港内に防波堤がない方がよい港形と考えられ、全般を通じて比較的 K_a の変化の少ない安定した港形モデルとしては、 $G_1/L = 1.0$ 、 $G_2/L = 1.0$ を選ぶことが好ましい。

5. 結 論

本研究は港内の波高について、簡単な基本的物理模型実験と数値計算の比較によって、数値計算値の信頼性を検討した結果、本研究の数値計算法によって種々の条件のもとで内外二重港口を有する港形の比較設計ならびに港湾構造物の配置設計が模型実験の援助なく、港内静穏度に関する数値計算による近似値などを総合して行ない

得る可能性を示すことができた。主要な結論としては、

- 1) $(K_a)_E < 2.0$ の場合、計算波高と実測波高の比は $0.8 \sim 1.2$ で 1.0 が最も多い。
- 2) $(K_a)_E > 2.0$ の場合、計算波高と実測波高の比は 1.0 以上になる。
- 3) 内外二重港口をもつ港湾の港内波高は、巨視的に見て、本研究の数値計算法によって安全側に予測できる。
- 4) 内外二重港口をもつ港形の選定として、a) $G_2 = 2.5L$ の場合、 G_1 と $(K_a)_E$ 、 $(K_a)_E$ との関係、および b) $G_2 < 2.5L$ の場合、内港、外港の平均の $(K_a)_E$ についてそれぞれ検討した結果、25ケースの港形のうち、 $G_1/L = G_2/L = 1.0$ が船舶の航行と港内静穏度から好ましい。

最後に、本研究を行うに際し種々御助言賜った日本大学教授栗津清蔵博士ならびに実験の御指導を賜った日本大学専任講師清水五郎先生に深謝の意を表す。また、数値計算は日本大学理工学部電子計算センター所有のものを使用した。

参 考 文 献

- 1) Hwang, L. S. and Tuck, E. O.: On the oscillations harbours of arbitrary shape, Jour. Fluid Mech., Vol. 42, Part 3, pp. 447~464, 1970.
- 2) Lee, J. J.: Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, Jour. Fluid Mech., Vol. 45, Part 2, pp. 375~394, 1971.
- 3) 井島武士ほか: 任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱と波力, 第20回海岸工学講演会講演論文集, pp. 79~87, 1972.