

長波近似式を用いたマリーナ波高分布計算

Computation of Wave Heights in a Marina by Long Wave Approximation

平石哲也*・高山知司*・田川昌弘**

Tetsuya Hiraishi・Tomotsuka Takayama・Masahiro Tagawa

Estimation of wave heights in a marina is of great importance to mooring small leisure boats safely. Incident waves can be considered as long waves as the length of a marina is relatively small compared with wave length. This report describes a numerical simulation model for wave heights in a small marina. In the model, the approximate momentum and continuous equations for long wave are solved with the incident wave condition computed by using the energy flux equation method for wave refraction and shoaling.

Keywords: Marina, Wave height, Long wave

1. はじめに

近年の余暇時間の増加に伴い、海洋レジャー施設の拡充が急務となっている。海洋レジャー施設としては、海浜公園、水族館、海水浴場などとともに小型プレジャーボートを停泊させるためのマリーナが考えられる。マリーナ内のプレジャーボートを係留・保管する水域は、通常の港湾に比べると小さく、幅、長さともに百m程度であることが多い。また、通常のマリーナの水深は数m程度で非常に浅い。したがって、外洋に面したマリーナなどで、周期十数秒のうねりが来襲した場合には、波はマリーナ内では長波となり、津波のような長波としての取扱いをしなければならない。さらに、マリーナ内水面の固有振動周期が比較的短いため、周期十数秒のうねりであっても共振現象が生じ、開口部が狭く奥行き長い港湾でよくみられる港内副振動現象(高山・平石, 1988)に対する考慮が必要である。本報告は、外海からのうねりが来襲した場合のマリーナ内の波高分布を求める計算法を提案し、実際のマリーナの計画に適用したものである。

2. マリーナにおける波高の計算法

本計算法は、外海における波の変形計算を行い、マリーナへの入射波の波高・周期を求める沖波波浪変形の部分と、設定された入射波を用いて、長波近似式を差分法で解いてマリーナ内の波高分布を求める内水面波高計算部分に分けられる。

(1) 沖波波浪変形計算

沖波の波浪変形計算は、高山ら(1991)が提案したエネルギー平衡方程式に砕波によるエネルギー減衰率を取り入れた方程式を解いて、各格子点上の方向スペクトルの値を沖側から求めていく手法を用いた。砕波による減衰率を考慮したエネルギー平衡方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(SC_x \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(SC_y \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{SC_x}{C} \left\{ \frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right\} \right] = -\epsilon_s S \quad (1)$$

ここで、 x および y は水平面内の座標、 θ は波向を示す。 S 、 C および C_x は、それぞれ、波の方向スペクトル密度、波速および波の群速度を示す。 ϵ_s は単位時間内に砕波によって失われるエネルギー逸散率を示す(高山ら, 1991)。

計算では、沖側から岸側へ向かって順次、連立方程式(1)を解いて周波数 f 、波向 θ の成分波の方向スペクトル密度 $S(f, \theta)$ を計算する。 n 番目の代表周波数における波高 H_n は次式で計算できる。

$$H_n = \sqrt{2 \sum_{m=1}^M S(f, \theta) \delta f \delta \theta} \quad (2)$$

ここで、 M ; 波向分割数、 δf ; 周波数分割幅、 $\delta \theta$; 波向分割幅である。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部(〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** (株)日本港湾コンサルタント

(2) 内水面波高計算(高山・平石、1988)

マリーナ周辺の地形において、より小さな格子を用いて詳細な格子地形を作る。図-1に内水面の波高計算における基本座標系を示す。コリオリ力、港口部損失、底面摩擦を無視した線形の流体の運動方程式は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 u 、 v 、 ζ 、 g は、それぞれ、水平面内の x および y 軸方向の水粒子速度、水面変位および重力加速度を示す。式(3)を水底から水表面まで積分して平均して長波近似した運動方程式は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 q_x および q_y は、 x および y 軸方向への流量を示し、 h は水深である。長波近似式における連続式は次式で示される。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (5)$$

基礎式(4)および(5)を差分法で解いて、各タイムステップ毎に q_x 、 q_y および ζ を求める。対象港湾における防波堤開口部では、次式で示す開口部のエネルギー損失を考慮する。

$$\Delta \zeta_t = f_R \frac{u^2}{2g} \quad (6)$$

ここで、 f_R はエネルギー損失係数で、伊藤ら(1964)の実験結果より、ここでは $f_R=1.5$ とした。浅海部では次式で示すように底面摩擦を考慮した運動方程式を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gn^2}{(h+\zeta)^{4/3}} u|u| \quad (7)$$

ここでの n は、マンニングの粗度係数で、0.025を用いた。

図-2に、内水面計算における境界条件の定義を示す。図中、Pが対象とするマリーナを示す。 i および j は、 x および y 軸方向への格子点番号を示す。 B_1 は外境界で、周期 T 、片振幅 a の長波が境界線の法線方向から入射するものとする。図中の海-陸境界およびBWで示した防波堤などの構造物では、長波は完全反射するものとし、越波などによる流入は考慮しない。計算領域内の格子間隔は Δs とする。

海-陸境界および防波堤などで完全反射された長波は外境界 B_1 に戻って来る。そこで、外境界による反射波の再反射を防ぐために、ある無反射境界を設ける必要がある。ここでは、谷本ら(1975)が示した仮想境界法を

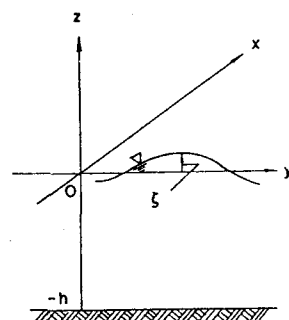


図-1 基本座標系

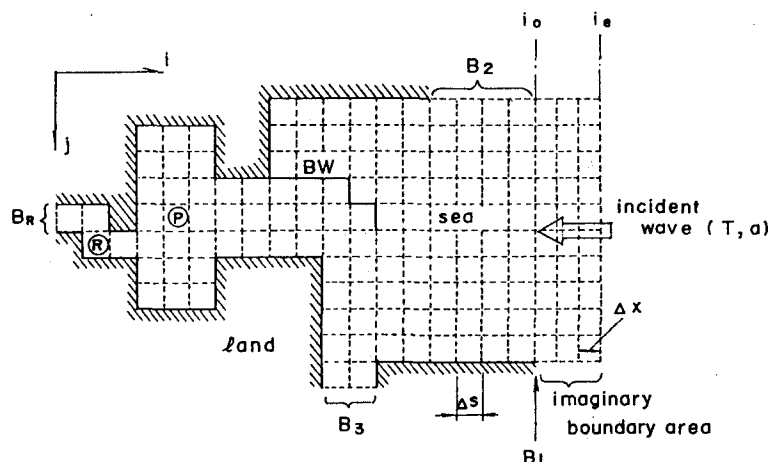


図-2 境界条件の与え方

応用する。まず、外境界の外側に、3格子幅で仮想境界を設定する。仮想境界内の水深は一樣で、外境界 B_1 上の水深 h_B とする。格子幅 Δx は、次式で与える。

$$\Delta x = \sqrt{g h_B} \Delta t \quad (8)$$

仮想境界内の最も沖側の境界 ($i = i_0$) における流量は反射波と入射波の和として計算できる。入射波の流量 q_{ix}^t は次式で与えられる。

$$q_{ix}^t = -a \sqrt{g h_B} \sin\{k(i_0 - i_0) \Delta x + \sigma t\} \quad (9)$$

反射波の流量 q_{rx}^t は1格子港内側の格子線上における全流量と入射波流量の差として計算できる。

$$q_{rx}^t = q_x^{t-\Delta t} - q_{ix}^{t-\Delta t} + a \sqrt{g h_B} \sin\{k(i_0 - i_0 - 1) \Delta x + \sigma(t - \Delta t)\} \quad (10)$$

式(9)と(10)において、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = \sigma/\sqrt{g h_B}$ である。i 方向の格子幅は、境界 B_1 において Δx から Δs に変化するの、格子線 B_1 における全流量は次式で示される。

$$q_x^t = q_x^{t-\Delta t} - q_{ix}^{t-\Delta t} + q_{ix}^{t-\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta s} (\zeta_0^{t-\Delta t/2} - \zeta_{i_0, j}^{t-\Delta t/2}) \quad (at \ i = i_0) \quad (11)$$

$$\text{ここで、} \quad \zeta_0^{t-\Delta t/2} = \zeta_{i_0, j}^{t-\Delta t/2} + \frac{\Delta s - \Delta x}{2 \Delta x} (\zeta_{i_0+1, j}^{t-\Delta t/2} - \zeta_{i_0, j}^{t-\Delta t/2})$$

計算は、入射波の先端が境界 B_1 に達したときから開始する。長波は、 B_2 で示したような側方境界からも伝播し、 B_2 および B_3 における流出入流量は、次式で示される。

$$q_x, q_y = \pm \sqrt{g(h + \zeta) \cdot \zeta^2} \quad (12)$$

ここで、符号は、計算領域内の水位が正になったときに流出、計算領域内の水面が負になったときに流入となるように決定する。本計算においては、まず沖波波浪変形計算によって、内水面計算の外境界における入射波を決定する。このとき波浪変形計算で求めた方向スペクトルから、代表周波数の数を N として、 N 個の入射波高 H_n 、周期 T_n を決定する。そして各入射波に対して、内水面の波高 $H_{L'ij,n}$ が計算できる。i j 点における合成波高は次式で計算できる。

$$H_{Lij} = \sqrt{\sum_{n=1}^N H_{L'ij,n}^2} \quad (13)$$

なお、長波近似式を用いた内水面計算においては、砕波によるエネルギーの減衰を考慮できない。したがって、計算領域内で砕波が生じる可能性がある場合には、波高を大きく見積もってしまう。そこで、以下のような手法で砕波によるエネルギー減衰を考慮する。

① 沖波変形計算における波高分布から砕波点を推定し、砕波点より浅海側に砕波減衰率計算ラインを設定する。ライン上の点における平均波高を H_B とする。内水面波高計算領域の外境界 B_1 上における平均波高を H とする。砕波によるエネルギー減衰を考慮した内水面波高 $H_{Lij,n}$ は、内水面波高計算の結果 $H_{L'ij,n}$ から次式で計算した。

$$H_{Lij,n} = \frac{H_B}{H} H_{L'ij,n} \quad (14)$$

合成波高は、 $H_{L'ij,n}$ を $H_{Lij,n}$ に置き換えて式(13)で計算できる。

3. マリーナ波高計算法の現地への適用性

(1) 計算条件

計算は、マリーナの建設が予定されている三浦半島のH地区を対象として行った。図-3に伊豆大島から相模湾一帯を含んだ沖波波浪変形計算における計算領域を示す。計算領域は設定した沖波が最も外側の格子線に対して直角に入射するようにし、最も外側の領域Iの格子間隔は1000mで、順次1/2ずつ格子幅を小さくし、三浦半島付近では62.5mの格子間隔とした。沖波の諸元は伊豆大島波布港沖の波浪観測結果から30年確率波高を計算し、波向、沖波波高 H_0 、沖波周期 T をそれぞれSW、8.9mおよび14.2sとした。

図-4は、内水面波高計算における領域を示す。領域Iの格子幅は40mとし、外境界が35mの等水深線とほぼ一致するように設定した。波は屈折によって一樣勾配等水深海岸の浅海域では、ほぼ等水深線に直角に進行するので、本計算においても内水面波高計算の外境界 B_1 を等水深線に平行になるものとした。

(2) 計算結果

図-5は、内水面波高計算領域の外境界 B_1 における沖波波浪変形計算の結果を示す。図では、計算結果として方向スペクトルが求まるので、代表周波数毎に成分波に分割して、各周波数における成分波の波高を示している。

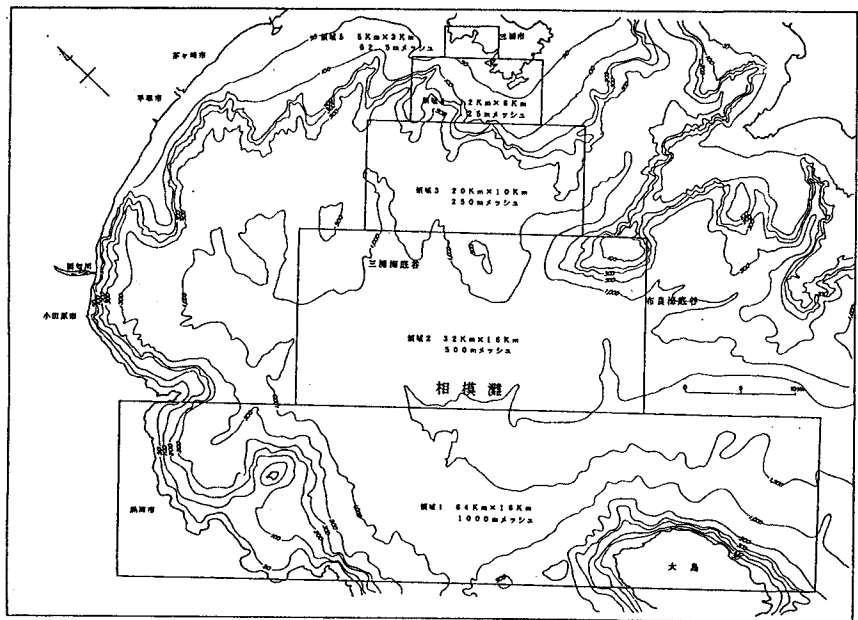


図-3 沖波波浪変形計算領域

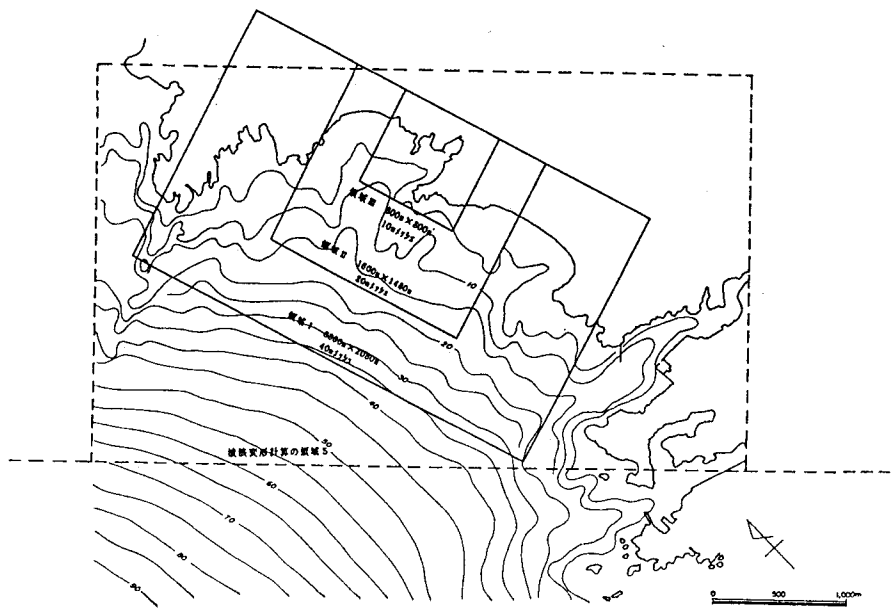


図-4 内水面波高計算領域

成分波の波高は場所毎に変動するので、外境界の北端、中央および南端における波高を抽出し、それらの平均値を内水面波高計算における入力条件とした。

図-6 は、砕波による波高減衰率を計算するための計算点を示す。図中の●点における波高を平均して H_B を求め、境界 B_1 における平均波高との比から砕波による波高減衰率を求めた。図-7 は、内水面波高計算結果の一例で、最も小さい幅 10 m 格子領域における波高分布を示す。対象とするマリーナ水域は、港口部の片側にだけ防波堤が建設されている H 地区で、マリーナの中央の水域では、波高は 2 m 以下であるが、小型船係留施設、遊歩道などの建設が予定されている陸域と接している周辺部では、護岸からの反射により波高が大きくなり、波高は 2~3 m 程

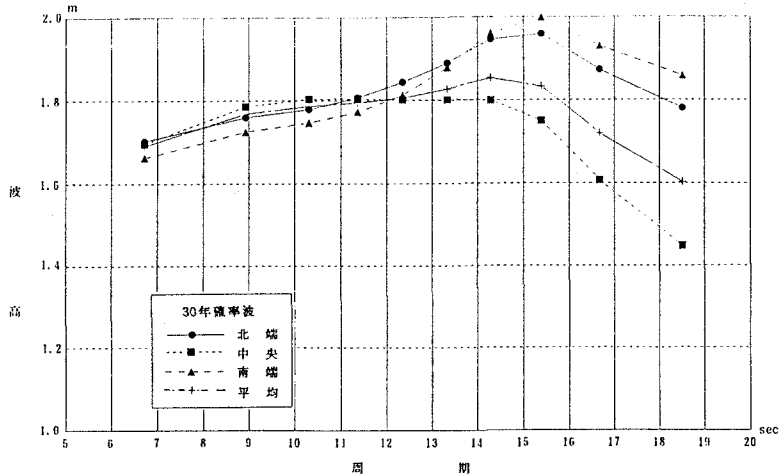


図-5 境界 B_1 における周期別入射波高

度になる。図-8は、マリーナ内の波高を低減するために、港口部の両側に防波堤を整備した場合の計算結果を示し、一部の護岸前面を除いて、マリーナ内の波高は2m未満となり、防波堤により波高が大きく低減できることがわかった。

4. あとがき

本報告では、マリーナのような狭い閉じられた水域での、長波近似式を用いた波高計算法を示した。本計算法により港内の副振動現象も考慮した波高が算定できるようになり、今後、各地のマリーナに本計算法を適用できる。

〈参考文献〉

- 高山知司・平石哲也, 1988: 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料No. 636, p. 70.
 高山知司・池田直太・平石哲也, 1991: 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, Vol. 30, No. 1, pp. 30-71.
 伊藤喜行・土岐祥介・森平倫生, 1964: 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第2報), 港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 7, pp. 123.
 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦, 1975: 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, Vol. 14, No. 3, pp. 35-58.

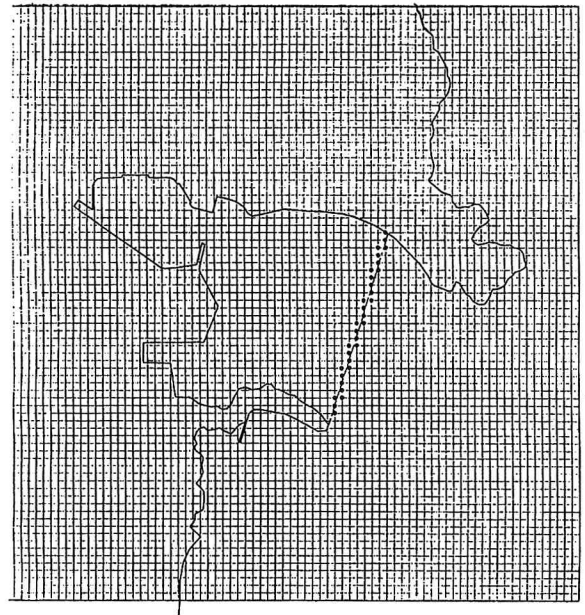


図-6 砕波波高算出点

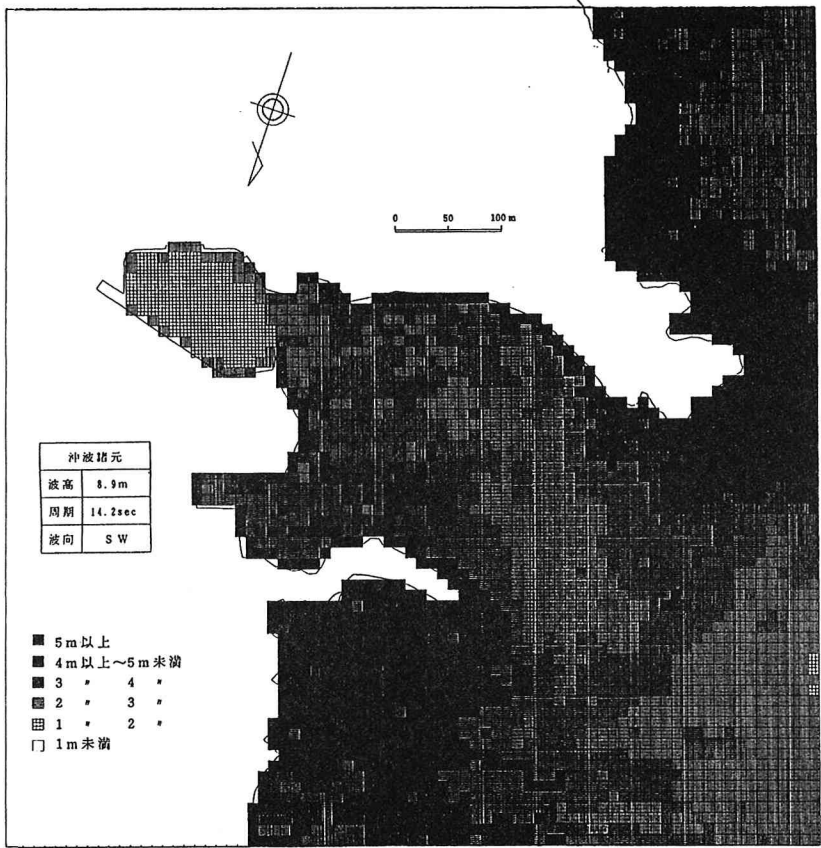


図-7 マリーナ内水面波高の分布(防波堤未整備の場合)

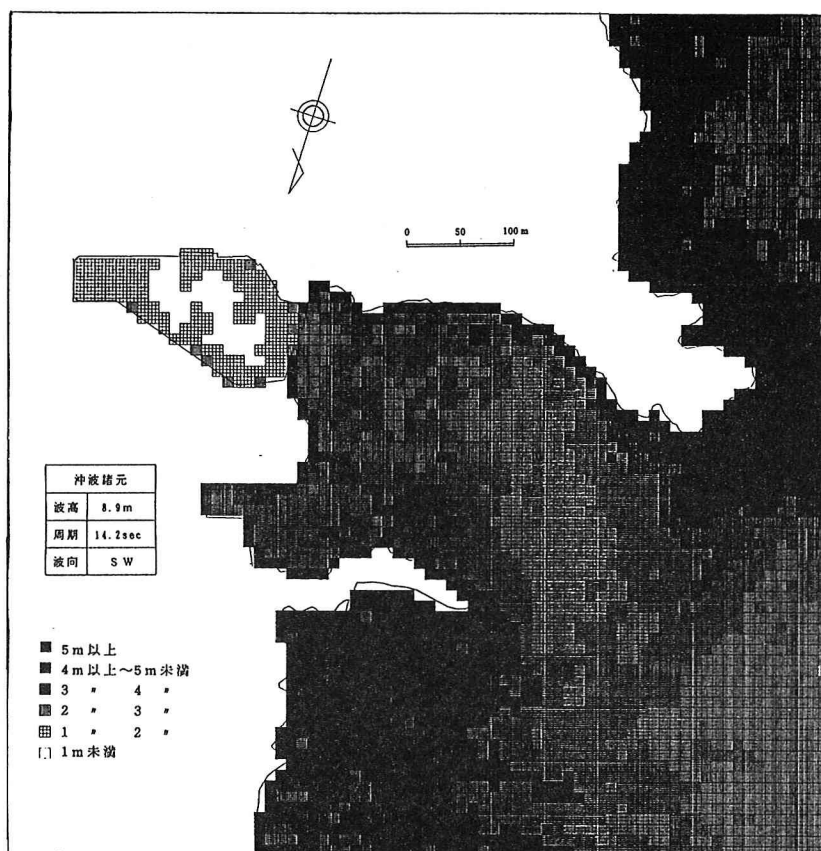


図-8 マリーナ内水面波高の分布（防波堤完成後）