

港 湾 技 研 資 料

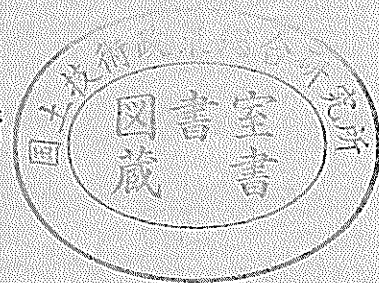
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 271 Sept. 1977

不規則波を用いた港内静穏度解析

合 田 良 実
鈴 木 康 正
蜂 須 賀 和 吉

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 静穏度実験における不規則波の導入効果	4
3. 不規則波による港内静穏度実験例	6
3.1 田後港静穏度解析の目的	6
3.2 田後港静穏度実験	8
4. 港内波高比の算定法	22
4.1 港口からの進入波による波高比の推定法	22
4.2 越波による伝達波の推定法	26
4.3 計算による港内波高比の推定値の精度の検討	26
4.4 方向スペクトルを持つ波に対する港内波高比の推定法	27
5. 港内波高超過出現率の推定法	35
6. あ と が き	37
参 考 文 献	37
付 録 (田後港静穏度実験における等波高比線図)	39

The Analysis of the Calmness in a Harbour with Irregular Waves

Yoshimi GODA*

Yasumasa SUZUKI**

Kazuyoshi HACHISUKA**

Synopsis

Up to this time, the model test to estimate the calmness in a harbour has been carried out by using the regular waves. But problems were encountered in the reproducibility because of the regular waves, and it was found that they would often vastly exaggerate resonance effects and regular reflection patterns, although similar effects were found in the real harbours. Then, we carried out wave disturbance tests with regular and irregular waves to compare each result and obtained conclusions as follows.

- 1) The variation of wave heights along the wharf is much smaller in the case of irregular waves than with regular waves.
- 2) The results from tests with regular waves yielded much higher or lower local wave heights than the tests with irregular waves. And it would be supposed that the latter represents a good reproduction of the prototype.

It may be concluded from these tests that irregular wave models may provide reasonably reliable results in the wave disturbance tests. And, we described concretely a procedure of a model test, following the example of Tajiri Port.

It is fairly difficult to estimate quantitatively the degree of the calmness in a harbour and there have been few attempts to do so. Here, as an index of a calmness in a harbour, we tried to use a probability that wave heights in a harbour exceed any value. In order to presume the wave heights of sea waves in a harbour, we used a hydraulic model test, a computation of the diffraction coefficients by a digital computer and solution by a diagram.

* Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

不規則波を用いた港内静穏度解析

合 田 良 実*
鈴 木 康 正**
峰 須 賀 和 吉**

要 旨

従来、静穏度実験は規則波を用いて行なわれることが多かった。しかし、規則波では実際の海の波の状態を再現できないこと、また、規則波を用いた実験結果では波高の場所的な変動が大きくなるなどの問題点があった。そこで一方向スペクトルを持つ不規則波に対する港内波高を測定し、規則波による測定結果と比較したところ次のような結論を得た。

- i) 不規則波を用いるとその平均化効果のために波高の場所的な変動が小さくなる。
- ii) 不規則波と規則波では、同一地点で波高が大きく異なる場合があるが、不規則波による実験結果の方がより実際の海の値に近いと考えられる。

以上のことから、静穏度実験には不規則波を用いることが望ましいことがわかった。そこで、不規則波を用いた静穏度実験の具体的な手順を田後港の場合を例にとり示した。

また、港内の静穏度を定量的に評価することはなかなか困難であり、現在まではあまり試みられなかった。本資料ではその一手法として、港内波高超過出現率によって静穏度を評価する方法を用いた。そのためには港内の波高を推定する必要があるが、ここでは水理模型実験、電子計算機による回折計算および折返し回折図法を用いて、より海の波に近い方向スペクトルを持つ波に対する港内波高を求める方法を示した。さらにその結果から、港内の各地点の波高超過出現率を算定する方法を具体的に述べた。

1. ま え が き

港湾構造物の配置計画および建設にあたっては、港内の静穏度を確保することが第一義的な問題となる。この港内静穏度の要因としては、まず港内の波高および周期などの物理的な要因がある。我が国においては、従来、静穏度は港外の波高に対する港内の波高比を基準にして評価されることが多かった。これは港湾の遮蔽効果という面からすれば有用な判定法である。しかしながら、実際問題としては沖波に対する波高比よりも、港内波高の絶対値が問題になることが多い。たとえば、港内の波高比が大きく遮蔽効果が悪い港であっても港外の波高が小さければ港内は静穏であるといえ、逆に波高比が小さい港でも、波高の大きい波がたびたび来襲し港内波高が大きくなるときには静穏度が良くないという場合もあり得る。これは、港湾の機能面から考えた場合に、静穏度が

究極的には船舶の動揺および係留力の問題と強い関連性を持っていると考えられるからである。したがって静穏度を評価する場合には、港湾を利用する船舶の大きさその他を考慮した上で、波高の絶対値を用いることが望ましい。

さらに、船舶の動揺および係留力の観点からすれば、港内における波の周期も静穏度の大きな一要因であるといえる。現在までのところ我が国では、港内静穏度を考える際に波の周期はそれほど重視されなかった。これは、一つには係留船舶の動揺特性があまり良く判っていないことにもよるものと思われるが、最終的には、対象泊地の波高および周期を求め、これに対する船舶の動揺や係留力から静穏度の評価がなされるものと考えられる。

また、港内の静穏度は以上に述べた物理的な要因の他に、港口から出入船する際の操船の難易度、荒天時の避泊の限界条件などが問題となり、さらに荷役作業の可能

* 海洋水理部 波浪研究室長

** 海洋水理部 波浪研究室

な日数などから決まる経済的な要因も関係することになる。

このように考えてくると、港内静穏度の意味付けやその評価はなかなか困難であることが判る。このため、静穏度を定量的に評価する試みは現在までほとんど行なわれなかったが、本資料はその一試案として、港内波高超過出現率によって静穏度を評価しようとするものである^{1) 2)}。

港内静穏度を評価するためには、まず港内の波高を推定する必要がある。ここではその推定法として、水理模型実験および折返し回折図法による方法について述べる。水理模型実験は、周辺地形および港の形状が複雑な場合、また特に港内に反射性構造物が多い港に対して有効であり、実験の精度を高めることにより推定値の精度を高めることができる。現在までのところ静穏度実験には規則波が用いられることが多かったが、各地の水理実験場では不規則波実験が行なえる体制が整いつつある。そこで不規則波および規則波による実験結果を比較し、両者の優劣について検討した。その結果に基づき、ここでは不規則波を用いた静穏度実験の手法について述べることにする。ただし、現在のところ実験に用いることのできる不規則波は、波向は一方向で波高と周期がランダムに変化するいわゆる一方向スペクトルを持つ不規則波である。一方、実際の海の波は波向についてもさまざまな方向の波を含んだ方向スペクトルを持つ波であるので、実験に用いる不規則波はまだ現地の海の波とはかなりかけはなれてはいるが、従来の規則波による実験よりも一歩進んだ実験法であるといえる。

また、港内の波高比は計算によっても求めることができ、本資料では折返し回折図法を用いた。折返し回折図法とは、回折計算で求めた港内の波高比に、さらに港内の反射性構造物による反射の効果も考慮して港内の波高比を求めるものである³⁾。回折計算には、沖波として方向スペクトルを持つ不規則波を取り入れることができ、その意味ではより現実に近いが、港内の水深変化や海底摩擦等による波の変形を考慮しにくいなどの短所も持っている。したがって、図式解法は模型実験結果と対比してその精度を確認しながら用いる必要がある。

以上述べたことから、港内の沖波波高比は、水理模型実験および図式解法を兼ね合わせ、両者の短所を補ない合って求めることが望ましいと言える。

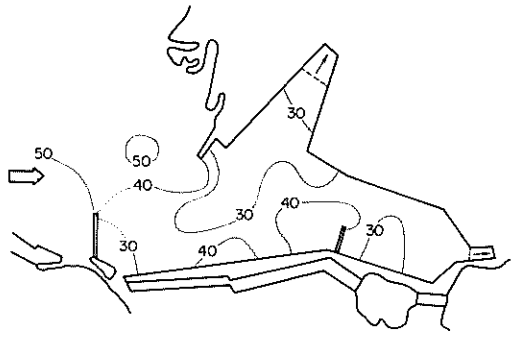
なお、波浪研究室では先に鳥取県の委託により田後港の静穏度向上に関する模型実験および静穏度解析を行なった⁴⁾。本資料ではそれを具体例として用いながら記述する。

2. 静穏度実験における不規則波の導入効果

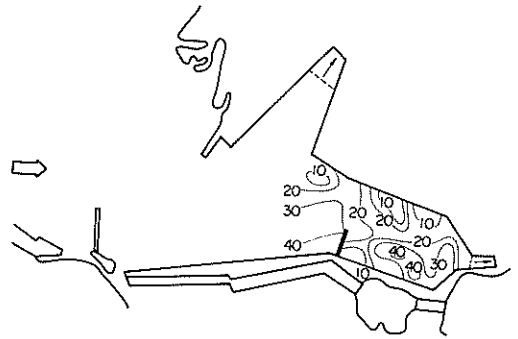
まえがきにも述べたとおり、従来の静穏度実験は規則波を用いて行なわれることが多く、不規則波を用いた例は我が国では御前港⁵⁾とN港⁶⁾がある程度である。これは不規則波を起こせる造波機が一般に普及しておらず、また不規則波を測定し解析する機器が揃っていなかったことも一因であると思われる。しかし実際の海の波はさまざまな波向、波高、周期を持った波が重ね合わさった不規則な波であり、規則波による実験では実際の現象を正確には再現できないことから、最近では不規則波を用いた実験の必要性が徐々に認識されつつある。このことを反映して、現在では海岸工学関係だけでも全国10ヶ所以上の実験施設に不規則波の造波装置が設置されるに致している。これと同時に、実験装置⁷⁾、実験手法⁸⁾などで新しいものが次々に開発されており、不規則波を用いた実験も種々行なわれるようになった。

水理模型実験における不規則波の導入効果については、防波堤の安定性に関する実験⁹⁾、護岸等の越波に関する実験¹⁰⁾、混成堤等の反射特性の実験¹¹⁾、および漂砂実験¹²⁾において確かめられている。一方、静穏度実験についてはデンマークの水理研究所において規則波と不規則波の実験結果が比較されている例¹³⁾があるが、それほど詳細に検討されたものではないので田後港の実験において検討を加えた。

図-1-1(1)は不規則波に対する港内波高比、また図-1-1(2)は多重反射が起きていると考えられる田後港の港奥に設けた測点1~11(後出の図-10参照)における波高比を規則波に対して求め、等波高比線図を描いたものの一例である。また図-2-1(1)~(3)は、後出の表-8の各波について各測点の波高比を求め、横軸に測点番号をとってプロットしたものである。ただし規則波の場合には図-10の測点の間でも波高を測定し、規則波の波高と周期は、不規則波の有義波高と有義波周期を用いた。また、模型形状は田後港の現況模型を対象とした。これらの図を見て明らかなのは、規則波を用いた場合には波高比の場所的な変動が大きいのに対し、不規則波ではその平均化効果のために変動が小さくなっていることである。規則波の波高がこのように場所によって大きく変動するのは、入射波と岸壁等の反射性構造物からの反射波が重なり合って重複波を形成することによる。すなわち、測点が重複波の腹に当たる部分にあるときには波高が大きく、また節では小さく測定されることになるからである。したがって、港内における多重反射が問題

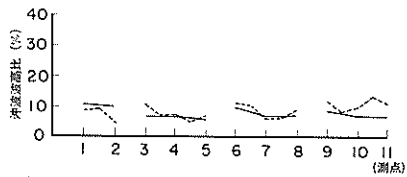


(1) 不規則波による等波高比線図(%)

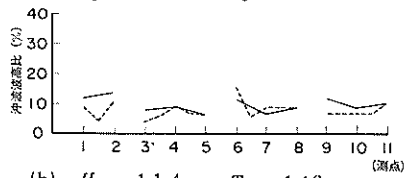


(2) 規則波による等波高比線図(%)

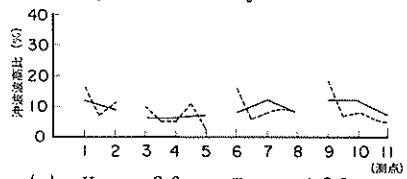
図-1 不規則波と規則波による港内波高比



(a) $H_0 = 14.3\text{ cm}$, $T_0 = 16.7\text{ sec}$

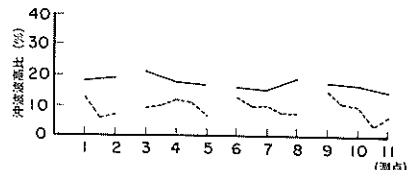


(b) $H_0 = 11.4\text{ cm}$, $T_0 = 1.43\text{ sec}$

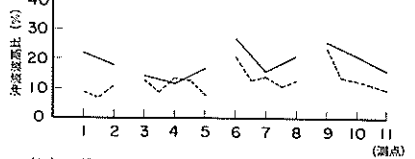


(c) $H_0 = 8.6\text{ cm}$, $T_0 = 1.20\text{ sec}$

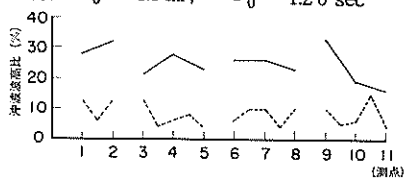
(1) 沖波向NW



(a) $H_0 = 11.4\text{ cm}$, $T_0 = 1.43\text{ sec}$

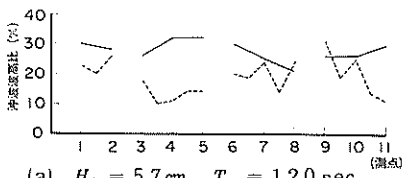


(b) $H_0 = 8.6\text{ cm}$, $T_0 = 1.20\text{ sec}$

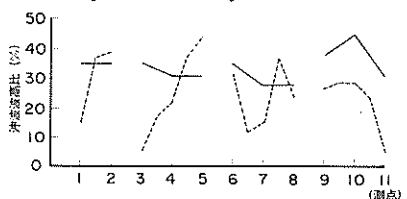


(c) $H_0 = 5.7\text{ cm}$, $T_0 = 0.96\text{ sec}$

(2) 沖波向N



(a) $H_0 = 5.7\text{ cm}$, $T_0 = 1.20\text{ sec}$



(b) $H_0 = 2.9\text{ cm}$, $T_0 = 0.96\text{ sec}$

(3) 沖波向NE

図-2 波高比の場所的変動

になっている港ほどこの影響を強く受け、場合によっては規則波を用いると等波高比線図を描くことが困難になる。一方、不規則波ではさまざまな波長の波が含まれているために重複波の腹と節の位置がそれぞれ異なり、また波高も変化するので、全体として場所的な波高の変動が小さくなるわけである。

また図-2-(2)にみられるように、規則波と不規則波による実験結果に大きい差が現われる場合がある。これは、波が遮蔽物の裏側に回り込む度合は波長によって異なるが、規則波の波高と波長が一定であるのに対し、不規則波では両者がともに変動することが主たる原因であると考えられる。デンマークの水理研究所の報告¹³⁾では不規則波を用いた水理模型実験結果と現地の観測値とを比較したところ、両者が良く一致したという例が紹介されている。

以上述べてきた二点、すなわち不規則波による静穏度実験では、場所的な変動の少ない平均的な波高を求めることができ、しかも現地の波高に近い値が測定可能であるということから、静穏度実験には不規則波を用いることが望ましいと言える。

3. 不規則波による港内静穏度実験例

不規則波を用いて静穏度実験を行なう場合には、次のような手順で作業を進めるのが良いと思われる。

- 1) 港外波浪・風の把握
 - a) 波高、波向、周期の結合分布表の作成
 - b) 港外における波浪出現率表の作成
 - c) 風の出現率表の作成
- 2) 静穏度実験に用いる波および潮位の選定
- 3) 実験の対象とする模型形状の選定
- 4) 実験ケースの選定
- 5) 模型範囲、模型縮尺、模型配置、造波機の位置の決定
- 6) 模型製作
- 7) 模型実験
 - a) 造波機駆動用信号テープの作製
 - b) 沖波々高の検定
 - c) 港内波高の測定
- 8) データ整理
 - a) 等波高線図、等波高比線図の作成
 - b) 港内各領域ごとの平均波高比の計算

田後港の静穏度実験の場合を例にとり、以上の手順を具体的に追っていくと次のようになる。

3.1 田後港静穏度解析の目的

静穏度実験を実施するに当たっては、対象とする港の自然条件や地理的条件、現況における静穏度上の問題点およびそれに対処するために立てられている港湾計画を把握し、静穏度実験の目的について充分知っておく必要がある。

田後港は鳥取県の東端、兵庫県との県境に位置する港で、その港湾区域は東西約1.8km、南北約0.8kmである。(図-3)。昔から避難港として大きな役割を果たしてきている。日本海ではN~NW方向から来襲する冬期波浪の波高が大きいので、この波から港を遮蔽するために港口はほぼNE方向に開いているが、約2.5km沖に津崎があり、NE以南の波を防ぐ自然の沖防波堤となっている。

本港は従来から防波堤および岸壁等の整備がなされてきたが、港内の静穏度はまだ充分ではなく、また第1~3防波堤(図-4参照、今後はB.W.①~③と略記する)からの越波がひどいときは物揚場が使用できなくなるなどの問題があった。そこでこれらを改良するために第5次港湾整備5か年計画において鶴島までの第4防波堤の延伸(今後は第4防波堤をB.W.④、延伸部分をB.W.④'と略記する)およびB.W.⑤、⑥前面への消波工の設置が予定されており、その効果が期待されている。

田後港の港内静穏度が充分でない原因としては、NE寄りの波に対する遮蔽が充分でないこと、港内の岸壁がすべて直立岸壁であるために波の多重反射が起り、波のエネルギーがなかなか消えないこと、またB.W.④からの越波による伝達波が存在すること等が考えられる。特に港内における波の多重反射については、港内が整備され岸壁が整ってくるに従って港内が荒れてきたという皮肉な現象もみられたようである。したがって、今後は他港の港内整備に当たっても、自然海浜をできるだけ残し、岸壁は消波構造にするなどの配慮が必要になってくるものと考えられる。

田後港静穏度実験の目的は、5か年計画実施時にどの程度港内静穏度が向上するかを把握すると同時に、B.W.④、④'からの越波による伝達波によって港内が荒らされないようにするには、その天端高をいくらにすれば良いかを検討することであった。また、静穏度向上のための構想として、鶴島からさらに沖へ防波堤を延長すること(B.W.④'')および港内の各種改良工事(後出の図-7参照)が考えられる。そこでこれらの効果についても模型実験を実施して検討を加えた。

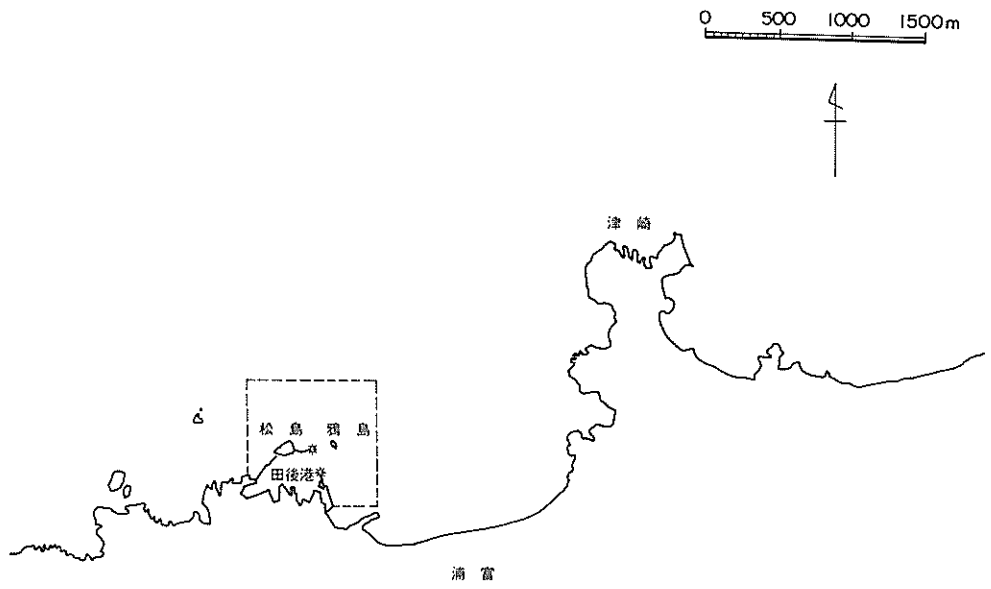


图 - 3 田後港周辺図

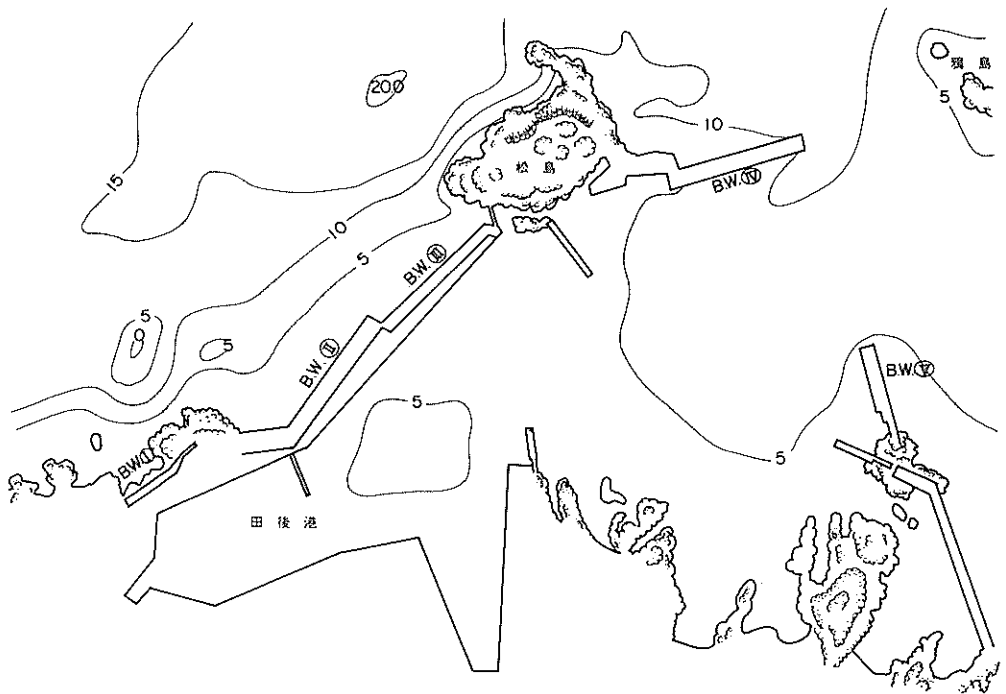


图 - 4 田 後 港

3.2 田後港静穏度実験

1) 港外波浪・風の把握

静穏度解析に用いる波および風のデータは、現地で観測が行なわれ、しかも測得率が良好であるなどデータとして用いるのに適当なものであるならば当然それを使用する。しかし、現地における観測結果がまったくないか、あるいはあったとしても良好なデータでない場合には、解析の対象としている港付近の、同じような自然条件および地形条件を備えた港のデータを用いることになる。この場合には、他の港のデータをそのまま使うのではなく、沖にある島などの影響および地形による変形等を考慮して、対象とする港に來襲する波や風を推定することが望ましい。

田後港における波浪観測は、昭和36年から44年にかけて行なわれたことがあるが、測得率が悪く波のデータとして用いるのには不適當であった。また田後港の西約10kmに位置する鳥取港においても波浪観測が行なわれたが測得率は50%以下である。鳥取港より西へ約120kmの地点にある中国電力鹿島原子力発電所では、昭和42年9月以来波浪観測が行なわれており、測得率もかなり高いので、それを参考にして田後港付近の波を推定することにした。

表-1~4は、鹿島における波のデータをもとに鳥取港における波を推定した結果¹⁴⁾から、全年における波向、

波高、周期の間の結合分布および季節別の波向と波高の結合分布を求めたものである。なお表中の波向(⊙)、(⊗)は、波向が不明確な波について東寄りの波であるか西寄りの波であるかを表わしている。これらの表から、N~NWに波高が大きく周期の長い波が多いこと、またNNE~NEからも波高は小さいが波が來襲していることが判る。表-1から各波向ごとの波高出現率を求めると表-5のようになる。港外の波高の出現率は、この表のように各波向を100%として計算しておいた方が、確率紙にプロットした場合に細かい部分まで読み取ることができて便利である。ただし全方向に対する出現率を求める際には、各波向の全方向に対する出現率を掛ける必要があることは言うまでもない。

田後港に來襲する波は、鳥取港の波からさらに屈折効果、地形の影響等を考慮して推定する必要がある。しかし田後港と鳥取港とは地理的に近く、また自然条件もほとんど等しいと考えられること、さらに田後港に対する情報が少なく田後港の波を推定するのに必要なデータが得られないことなどから、不本意ながら上記の鳥取港の波のデータをそのまま田後港のデータとして用いることにした。

海の波は風によって起こされるものがほとんどであるから、來襲する波の性質を知る上で風のデータが参考になることが多い。また異常波浪時に波高計の故障などによって波のデータが得られていない場合には、その時の気象データを基に波浪推算を行なって異常波浪を推定す

表-1 波向と波高の結合分布 (日最大有義波 昭和44.5~45.4 昭和48.1~12)

波向 波高 (m)	(⊙)	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	(⊙)	静穏	計
静 穏									178	178 (26.3)
0.01 ~ 0.99	54	4	11	6	3	3	8	12		101 (14.9)
0.5 ~ 0.99		13	29	12	10	7	32			103 (15.2)
1.0 ~ 1.99		6	58	20	13	18	40			155 (22.9)
2.0 ~ 2.99		3	33	11	11	4	9			71 (10.5)
3.0 ~ 3.99			17	15	7	1	2			42 (6.2)
4.0 ~ 4.99			6	5	2					13 (1.9)
5.0 ~ 5.99			5	4	1					10 (1.5)
6.0 ~ 6.99			1	1	1					3 (0.4)
計 (%)	54 (8.0)	26 (3.9)	160 (23.7)	74 (11.0)	48 (7.1)	33 (4.9)	91 (13.5)	12 (1.8)	178 (26.3)	676 (100.0)

表-2 波高と周期の結合分布 (日最大有義波 昭和44.5~45.4 昭和48.1~12)

周期(sec) \ 波高(m)	5.49	5.5 6.49	6.5 7.49	7.5 8.49	8.5 9.49	9.5 10.49	10.5 11.49	11.5 12.49	12.5 13.49	静穏	計
静 穏										178	178 (26.3)
0.01 ~ 0.49	5	39	32	16	6	3					101 (14.9)
0.5 ~ 0.99	1	13	36	29	18	6					103 (15.2)
1.0 ~ 1.99		8	38	55	41	10	2	1			155 (22.9)
2.0 ~ 2.99		1	3	9	30	23	4	1			71 (10.5)
3.0 ~ 3.99				4	11	16	5	5	1		42 (6.2)
4.0 ~ 4.99						4	7	2			13 (1.9)
5.0 ~ 5.99						6	2	1	1		10 (1.5)
6.0 ~ 6.99							2	1			3 (0.4)
計 (%)	6 (0.9)	61 (9.0)	109 (16.1)	113 (16.7)	106 (15.7)	68 (10.1)	22 (3.3)	11 (1.6)	2 (0.3)	178 (26.3)	676 (100.0)

表-3 波向と周期の結合分布 (日最大有義波 昭和44.5~45.4 昭和48.1~12)

波向 \ 周期(sec)	⊙	WNW	NW	NNW	N	NNW	NW	⊙	静 穏	計
静 穏									178	178 (26.3)
~ 5.49	3				1			2		6 (0.9)
5.5 ~ 6.49	23	4	6	5	5	4	9	5		61 (9.0)
6.5 ~ 7.49	17	12	22	11	8	5	31	3		109 (16.1)
7.5 ~ 8.49	7	8	39	13	9	11	24	2		113 (16.7)
8.5 ~ 9.49	3	2	49	19	7	8	18			106 (15.7)
9.5 ~ 10.49	1		33	13	11	4	6			68 (10.1)
10.5 ~ 11.49			8	6	6	1	1			22 (3.3)
11.5 ~ 12.49			3	5	1		2			11 (1.6)
12.5 ~ 13.49				2						2 (0.3)
計 (%)	54 (8.0)	26 (3.8)	160 (23.7)	74 (10.9)	48 (7.1)	33 (4.9)	91 (13.5)	12 (1.8)	178 (26.3)	676 (100.0)

表 - 4 波向と波高の結合分布 (季節別) (日最大有義波 昭和 44.5 ~ 45.4)
春 (3, 4, 5月) 昭和 48.1 ~ 12

波高(m) \ 波向	⊙	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	⊙	静 穏	計 (%)
静 穏									61	61(35.1)
0.01 ~ 0.49	12	1		1		1	1	6		22(12.6)
0.5 ~ 0.99		1	4	2	2	1	8			18(10.3)
1.0 ~ 1.99		1	15	6	5	6	16			49(28.2)
2.0 ~ 2.99		1	8	2	4		2			17(9.8)
3.0 ~ 3.99			3	2	1					6(3.5)
4.0 ~ 4.99				1						1(0.6)
5.0 ~ 5.99										
6.0 ~ 6.99										
7.0 以上										
計	12	4	30	14	12	8	27	6	61	174(100)

(欠測10回)

夏 (6, 7, 8月)

波高(m) \ 波向	⊙	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	⊙	静 穏	計 (%)
静 穏									82	82(49.4)
0.01 ~ 0.49	30	2	5	2	2	2	1	1		45(27.1)
0.5 ~ 0.99		7	1	4	5		11			28(16.9)
1.0 ~ 1.99			2		1	4	3			10(6.0)
2.0 ~ 2.99					1					1(0.6)
3.0 ~ 3.99										
4.0 ~ 4.99										
5.0 ~ 5.99										
6.0 ~ 6.99										
7.0 以上										
計	30	9	8	6	9	6	15	1	82	166(100)

(欠測18回)

秋(9, 10, 11月)

波高(m) \ 波向	⊙W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	⊙E	静 穏	計 (%)
静 穏									25	25(15.2)
0.01 ~ 0.49	12	1	4	2	1		6	5		31(18.8)
0.5 ~ 0.99		2	11	1		4	12			30(18.2)
1.0 ~ 1.99		2	6	5	3	5	18			39(23.6)
2.0 ~ 2.99			11	2	4	1	5			23(13.9)
3.0 ~ 3.99			5	3	3	1				12(7.3)
4.0 ~ 4.99			1		2					3(1.8)
5.0 ~ 5.99			2							2(1.2)
6.0 ~ 6.99										
7.0 以上										
計	12	5	40	13	13	11	41	5	25	165(100)

(欠測17回)

冬(12, 1, 2月)

波高(m) \ 波向	⊙W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	⊙E	静 穏	計 (%)
静 穏									10	10(5.9)
0.01 ~ 0.49			2	1						3(1.8)
0.5 ~ 0.99		3	13	5	3	2	1			27(15.8)
1.0 ~ 1.99		3	35	9	4	3	3			57(33.3)
2.0 ~ 2.99		2	14	7	2	3	2			30(17.5)
3.0 ~ 3.99			9	10	3		2			24(14.0)
4.0 ~ 4.99			5	4						9(5.3)
5.0 ~ 5.99			3	4	1					8(4.7)
6.0 ~ 6.99			1	1	1					3(1.8)
7.0 以上										
計		8	82	41	14	8	8		10	171(100)

(欠測9回)

表 - 5 沖波波高超過出現率

(1) 波向 WNW

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	26	22	9	3	0				
出現率(%)	100.0	84.6	34.6	11.5	0				

(2) 波向 NW

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	160	149	120	62	29	12	6	1	0
出現率(%)	100.0	93.1	75.0	38.8	18.1	7.5	3.8	0.6	0

(3) 波向 NNW

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	74	68	56	36	25	10	5	1	0
出現率(%)	100.0	91.9	75.7	48.6	33.8	13.5	6.8	1.4	0

(4) 波向 N

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	48	45	35	22	11	4	2	1	0
出現率(%)	100.0	93.8	72.9	45.8	22.9	8.3	4.2	2.1	0

(5) 波向 NNE

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	33	30	23	5	1	0			
出現率(%)	100.0	90.9	69.7	15.2	3.0	0			

(5) 波向 NE

波高	0 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上	6 m 以上	7 m 以上
出現回数	91	83	51	11	2	0			
出現率(%)	100.0	91.2	56.0	12.1	2.2	0			

表一 6 風向，風速別出現頻度

鳥取空港

風速 \ 風向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
10 kt 以下	653 992%	609	278	89	65	175	446	352	134	83	153	237	195	246	378	417	4510
11kt~21kt	94 1.43	272 4.13	319 4.85	24 0.36	1 0.01	2 0.03	29 0.44	191 2.90	39 0.59	2 0.03	13 0.20	119 1.81	180 2.74	222 3.37	108 1.64	104 1.58	1719 2613
22 kt 以上	6 0.09	14 0.21	15 0.23	1 0.01	1 0.01	1 0.01	1 0.01	1 0.01	10 0.15	1 0.01	1 0.01	1 0.01	18 0.27	20 0.30	27 0.41	28 0.42	140 2.13
計 (%)	753 11.44	895 13.60	612 9.30	114 1.73	66 1.00	178 2.70	475 7.22	553 8.40	173 2.63	85 1.29	166 2.52	356 5.41	393 5.97	488 7.42	513 7.80	549 8.34	6369 96.81

静穏95回(1.44%)，風向不明115回(1.75%)

昭和42.8~44.7

表一 7 季節別，風向別出現頻度 (22kt以上)

鳥取空港

季節 \ 風向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
春 (3~5月)	2 1.43		1 0.71					10 7.14					8 5.71	5 3.57	9 6.43	3 2.14	38 27.14
夏 (6~8月)	1 0.71		2 1.43													1 0.71	4 2.86
秋 (9~11月)	3 2.14	14 10.00	6 4.29										3 2.14	2 1.43	4 2.86	8 5.71	40 28.57
冬 (12~2月)			6 4.29	1 0.71		1 0.71							7 5.00	13 9.29	14 10.00	16 11.43	58 41.43
計 (%)	6 4.29	14 10.00	15 10.71	1 0.71		1 0.71		10 7.14					18 12.86	20 14.29	27 19.29	28 20.00	140 100.00

昭和42.8~44.7

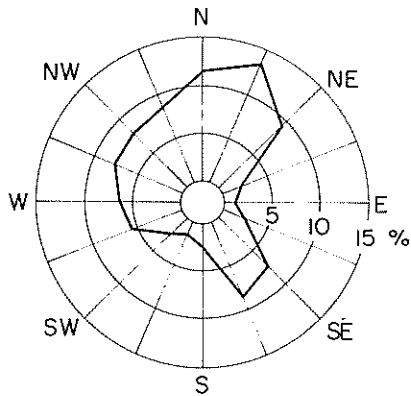


図-5 風配図(鳥取空港)
昭和42年8月~44年7月(9回/日観測)

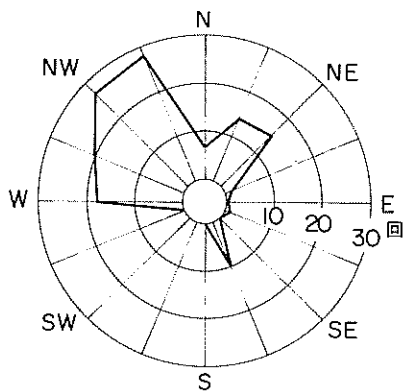


図-6 風配図(鳥取空港, 22 kt以上)
昭和42年8月~44年7月(9回/日観測)

ることもしばしば行なわれる。田後港の風については、その位置からして鳥取空港における風の記録が参考になる。表-6, 7および図-5, 6は、鳥取空港における風向, 風速を表わしたものである¹⁴⁾。これらの図表から、22 kt以上の風速は、全年を通してはNNW~WNWが圧倒的に多く、次いでNNE~NEに多いこと、また季節別に見ると NNW~WNW の風は秋から春にかけて多いことが判る。これと表-1および表-4と比べてみると、風と波の性質が良く似ていることが判る。

なお、港内の面積が広く港内発生波が問題となる港では、それを考慮して静穏度解析を行なう必要がある。しかし田後港の場合には、長さが約700mと比較的小さい

港であるので、港内発生波は考慮する必要がないものと考えられる。

2) 静穏度実験に用いる波および潮位の選定

実験に用いる波の種類は、多ければ多いほど望ましいと言える。しかし波の種類が多くなるとそれに比例して実験時間が長くなるので、現実には実験にかけられる時間によって波の種類もある程度制限されることになる。一般的には、表-1~3のような波のデータから、波向として2~3方向、それぞれの波向について適当な波高と周期の組合せを2~3組選定するのが普通である。田後港の静穏度実験には、表-8の8種類の波を用いることにした(なお、模型縮尺は5)で述べるとおり1/70である)。これらのうち、特に波向NWの波の波高が波のデータからすると大きいのが、これは防波堤の形状から考えてNWの波に対する遮蔽効果が大きく、小さい沖波波高を用いると港内の波高が小さくなりすぎ、実験の精度が悪くなることを考慮してやや大き目に決めたものである。

表-8 実験波の諸元

実験波	波向	$H_{1/3}$		$T_{1/3}$	
		模型	現地	模型	現地
波 a)	NW	14.3 _{cm}	10 _m	1.67 _{sec}	14 _{sec}
波 b)	NW	11.4	8	1.43	12
波 c)	NW	8.6	6	1.20	10
波 d)	N	11.4	8	1.43	12
波 e)	N	8.6	6	1.20	10
波 f)	N	5.7	4	0.96	8
波 g)	NE	5.7	4	1.20	10
波 h)	NE	2.9	2	0.96	8

一方、潮位としては高潮位(H.W.L.)で静穏度実験を行なう場合が多い。これは、潮位が高いと波高の高い波が砕波せずに港口まで到達することなどから、港内の波高が高い状態を実験で再現できるためである。田後港の実験でも、H.W.L. = 0.6mを潮位として用いた。

3) 実験の対象とする模型形状の選定

一般に、静穏度実験は多大の金額、時間および労力を要するものであるが、それらの許す限り多くの模型形状を実験に取り入れ、さまざまな角度から港内の静穏度を

表 - 9 模 型 形 状

模型番号	模 型 形 状
I	現 状
II	B.W. (IV)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波
III	B.W. (IV)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波 + B.W. (IV), (IV)' のかさ上げ
IV	B.W. (IV); (IV)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波
V	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波
VI	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C), (D) + 波除堤 (K)' + B.W. (II), (III) の前面消波 + 波除堤 (M) の両面消波
VII	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C) + 波除堤 (K)' + B.W. (II), (III) の前面消波
VIII	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波 + 波除堤 (M) の両面消波
IX	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C), (D) + B.W. (II), (III) の前面消波
X	B.W. (IV); (IV); (V)' + 消波岸壁 (C) + B.W. (II), (III) の前面消波 + 波除堤 (M), (N) の両面消波

検討する際の資料を得るようにすることが望ましい。

港内静穏度実験は、まったく新しく建設される港に対して行なわれる場合と、田後港のように静穏度をさらに向上させるために行なわれる場合とがある。前者の場合には、新しい港の港湾計画に基づいて模型形状を選定し、いくつかの模型形状に対する実験結果を比較検討して、

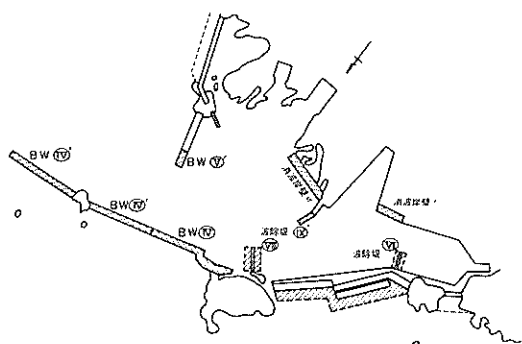


図 - 7 模 型 形 状 図

各計画案の優劣を判定することになる。一方、後者の場合には、現状における港内波高が港湾計画実施後の静穏度を評価する際の基準となる。そこで、田後港の実験では表-8の波に対して、現状模型における港内波高を測定した。次に、静穏度向上のための防波堤の建設および港内消波等について、具体的な計画がたてられているならばその効果を検討するために、当然それに対応する模型を作製することになる。また、具体的な計画のほかに、港内の静穏度向上のために有効と思われるものについても実験を行ない、その効果を確認するようにする。

田後港の静穏度実験においては、表-9に示す10種類の模型形状を対象とした。図-7の斜線部分が現況に対し改造する部分を示している。(なお、これらの模型形状には、鳥取県から委託を受けたもののほかに、

波浪研究室が自主的に実験に取り入れたものも含まれている。) 模型番号のII, IIIが5か年計画で実施が予定されているものに対応している。模型番号のIIIはIIと形状は同じであるが、越波による港内伝達波の影響をみるためにB.W. (IV), (IV)'の天端高を2.5mかさ上げし+7.5mとしたものである。また表中の消波岸壁(C)とは、B.W. (IV)を延長する際に使用するためのケーソンヤードの前面岸壁であり、模型においては図-8に示すような縦スリット型消波構造を用いた。また模型番号IV~Xは、さらに港内静穏度を向上させるための種々の構想について、その効果を検討するためのものである。このうち消波岸壁(C)は、消波岸壁(C)と同様の縦スリット型消波構造を用いた(図-8)。また波除堤(M), (N)の消波工は1t程度の消波ブロックを想定し、模型においては模型縮尺に合わせた重量の砕石を用いた。

4) 実験ケースの選定

実験波と模型形状を組合わせて実験ケースを選定することになる。その際ただ機械的に組合わせるのではなく、各波向に対する港の特性および各工事の難易度、経済性

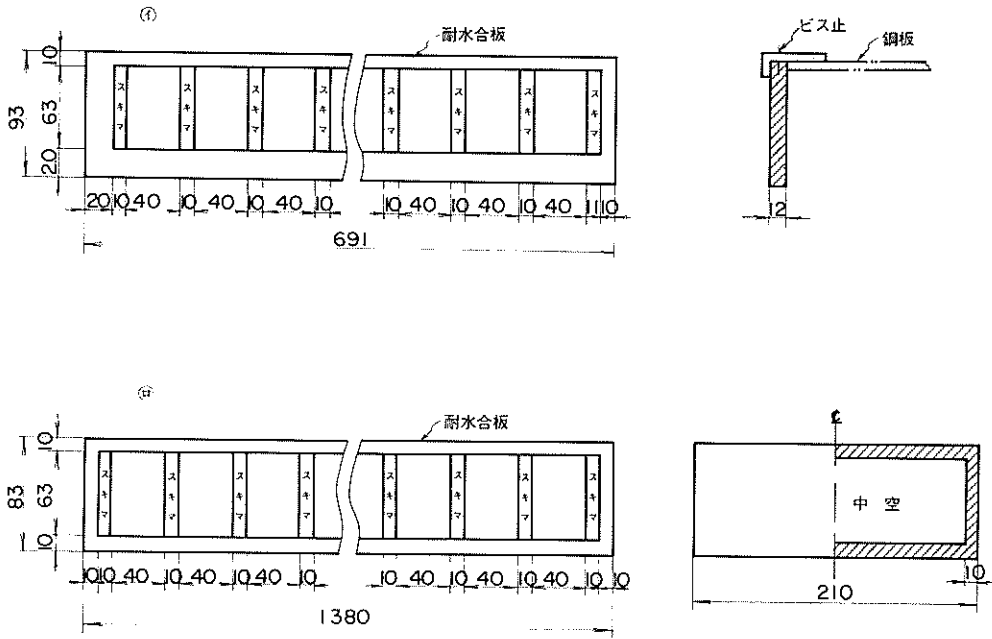


図 - 8 消波岸壁構造図

等を考慮しながら、必要かつ最小限の実験ケースを選定する。例えば田後港においては、現況ではその防波堤の配置からしてN~NEの波向を持つ波に対する静穏度が問題となると考えられるのに対し、5か年計画実施時にはNの波については静穏度がかなり向上し、NEの波が最も重要となるものと考えられる。したがって実験に際しては、NEの波に対して模型形状をさまざまに変えて各種の改造部分の効果について検討してみる必要があることになる。また、B.W. (Ⅳ), (Ⅳ)'にはほぼ直角に入射するN方向の波のうち波高の最も大きい波④については、防波堤天端高のかさ上げ効果について検討するために、模型形状Ⅱ, Ⅲにおける港内波高を測定しておく必要がある。以上のことなどを考慮し、田後港実験では表-10の29ケースを実験ケースとして選んだ。

静穏度実験では、実験を進めて行くにしたがって当初の予定にはなかった実験ケースを取り入れる必要が生じる場合がある。例えば、静穏度向上のために有効と考えられる新たな港内改造点を発見したり、防波堤法線を変更したりする場合である。そのような場合には、でき得る限り実験ケースに取り入れていくようにすることが望ましい。

5) 模型範囲, 模型縮尺, 模型配置および造波機位置の決定

模型範囲, 模型縮尺, 模型配置および造波機の位置は、既設の水槽を使用する場合にはその水槽, また新たに水槽を作製するのであれば、その敷地の大きさおよび形状によって規定される。

模型の対象とする範囲はできるだけ広くとることが望ましいが、水槽の大きさ等を考慮して、港の外郭施設の幅の2~3倍とすることが多い。また、波が港口に達するまでの屈折が重要な問題である場合には港外の海域を広く実験範囲にとり入れ、逆に港内における回折, 反射等が問題となっている港では港内を主とした模型を作製する。田後港の実験では、図-3の点線内の海底地形を模型に再現し、その外側に1/10~1/5勾配の様な斜面を設けて水深40cmの水槽床に造波機を設置した。

模型縮尺は水槽および模型範囲の大きさによって決まるが、標準的には長さの縮尺が $l_r = 1/50 \sim 1/150$ の歪なし模型とする。この場合、周期の縮尺は $\sqrt{l_r}$ となるが、実験波の有義波周期 $T_{1/3}$ が約1秒以下では波高減衰が著しく大きくなるので、そのようにならないように注意して縮尺を決める。田後港の実験では $l_r = 1/70$ とした。

表-10 実験ケース

実験ケース	波 向	実 験 波	模型番号
①	NW	a	I
②			II
③			III
④			I
⑤			I
⑥	N	d	I
⑦			II
⑧			III
⑨			IV
⑩			VI
⑪			I
⑫			II
⑬			VI
⑭			I
⑮			II
⑯	VI		
⑰	NE	g	I
⑱			II
⑲			IV
⑳			V
㉑			VI
㉒			VII
㉓			VIII
㉔			IX
㉕			X
㉖			I
㉗			II
㉘			IV
㉙			VI

また模型縮尺が決まると実験波の波高が定まるが、使用する造波機の能力でそのような波高を出せるかどうかチェックしておく必要がある。その際、ピストン型かフラップ型の造波機の場合には次式を目安とすることができる。

$$H^2 \leq \frac{W_{\max} \eta T}{6.67 LB} \left(\frac{1}{2} + \frac{kh}{\sinh 2kh} \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 H : 波高 (m)
 W_{\max} : 造波機最大出力 (HP)
 T : 周期 (sec)
 L : 波長 (m)
 B : 造波板幅 (m)
 k : 波数 ($k = 2\pi/L$)
 h : 水深 (m)
 η : 機械効率 (0.7程度)

H と T は、規則波のときは実験に用いる波高、周期を与えれば良いが、不規則波の場合には $H = H_{\max} \approx 1.6 H_{1/3}$ 、 $T = T_{1/3}$ として計算する。

模型の配置は、水槽の形状、造波機の設置場所等を考慮して決める。この際、場合によっては模型の左右を逆にして裏返しのような形にした方がおさまりが良いときもある。このときには、当然のことながら造波機の方向もそれに応じて変わってくることになる。田後港の実験においても、現地々形を裏返しにして模型を配置した。

港内の静穏度は波向によって大きく影響を受けるので、造波機を設置する場合にはその向きに充分注意することが必要である。実験範囲の沖側水深が実験波の波長の $1/2$ 以上ある場合には、その位置に造波機を設置する。このときは造波板の位置で模型波は深海波となり、水底の影響を受けないので、実験波の波向をそのまま造波板の方向とすれば良い。しかし、一般には田後港の実験で用いた模型のように、模型範囲の外側に斜面を設けて造波板位置における水深を確保することが多い。この場合には模型範囲の一番外側の地点における波向を現地々形の屈折図から求めておき、実験波の波向がそれに合うように造波板の向きを調整することが必要である。厳密には、この調整は波の周期ごとに異なるが、実際には代表的な周期に対するもので代用して良い。

6) 模型製作

5) の各項目が決まるといよいよ模型の製作にかかる。一般に、模型製作には以下のような図表が必要になる。

- i) 模型水槽平面図
- ii) 模型の代表的横・縦断面図
- iii) 防波堤等の構造図
- iv) 材料表、積算書

まず模型水槽平面図は、模型を製作する上で最も重要な図面であるので、正確にわかり易く描いておく必要がある。この図には、水槽の外壁、等高線、防波堤および物揚場等の天端高や長さなどを記入し、模型に合わせて 50cm 間隔程度の格子線を入れておく。模型を製作する

場合には、模型の一番低い部分（一般には造波機の設置位置）に高さの基準点を設けることが多いので、図面には等深線ではなく、基準点を0とし模型の高さに合わせた等高線を入れておいた方がよい。また水槽の床に図面の格子線に合わせて格子線を描き、等高線や防波堤等の位置を決めていくが、この場合平面図からmm単位程度まで細かく読み取る必要がある。したがって模型水槽平面図は、模型寸法に対し切りの良い縮尺で描き、スケール等で読み取り易いようにしておいた方がよい。また、新たに建設する防波堤等がある場合など、模型を加えたり取りはずしたりする必要があるときには、その旨記入しておく。この場合、模型の着脱はなるべく容易にできるように工夫する。

模型の横・縦断面図は模型の構造を理解させるためのもので、1～2断面でよい。

防波堤、岸壁等については現地の図面を参照し、模型用の詳細図を作製する。この場合、機能的には模型波に対する反射率および越波による港内への波高伝達率だけが問題なので、適当に簡略化する。また消波工を設置する場合にはその設置断面図、消波構造の防波堤や岸壁を用いるときはその構造図が必要になる。このほか、導波板等を使用するときはそれらの製作図面を作成する。

以上の図面を基に、模型製作に必要な木材量、中詰砂量、コンクリート量、モルタル量、砕石量およびブロック個数等を計算して材料表を作成し、積算を行なう。

これらの図表を用いて模型を製作するわけであるが、具体的な手順については文献15)に詳しく述べられているので参照されたい。

7) 模型実験

i) 造波機駆動用信号の作製

不規則波によって模型実験を行なう場合には、まず造波機を駆動させるための不規則波信号を作製する必要がある。田後港の実験では文献16)に従い、Bretschneider型の周波数スペクトルを持つ波を不規則波発生装置から発生させ、データレコーダーに記録した。

ii) 沖波々高の検定

静穏度実験では、港内各地点の沖波々高比を求めることが重要であるので、沖波の波高は正確に測定しておく必要がある。

データレコーダーの不規則波信号を造波機に入力し波を起こす際に、データレコーダーの出力レベル調整つまみあるいはデータレコーダーと造波機の間接続した増幅器によって造波機への入力信号の強さを調整し、沖波

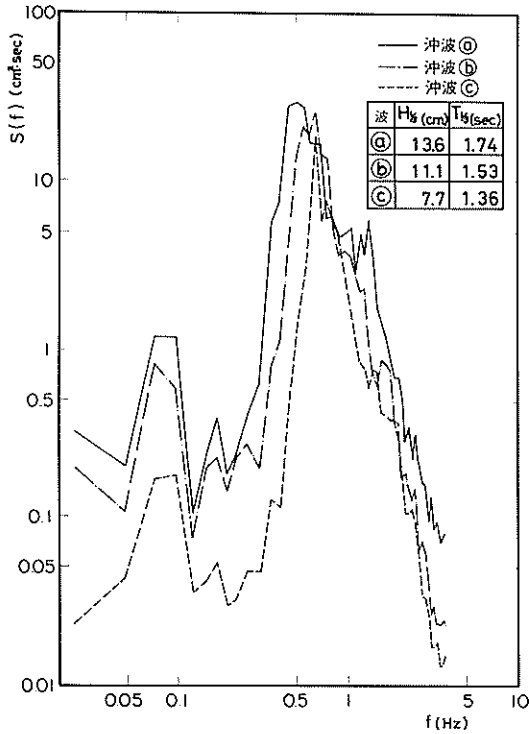
の波高が実験波の所定の値になるようにする。この場合データレコーダーのレベル調整つまみでは細かい調整ができず、またそのレベル値が表示されないものが多いので、増幅率が正確に表示されるような増幅器を用いた方がよい。

まず所定の波高の前後3種類程度の波高になるように増幅率を設定して波高を測定する。その結果を基に、増幅率と波高の関係を求めて所定の波高に対応する増幅率を推定し、その増幅率で実際に波を起こして波高を測定する。これで所定の波高にほぼ等しい値が得られればその増幅率を用いて実験を行ない、まだかなり差があるときにはさらに増幅率を変えて所定の波高に近づける。

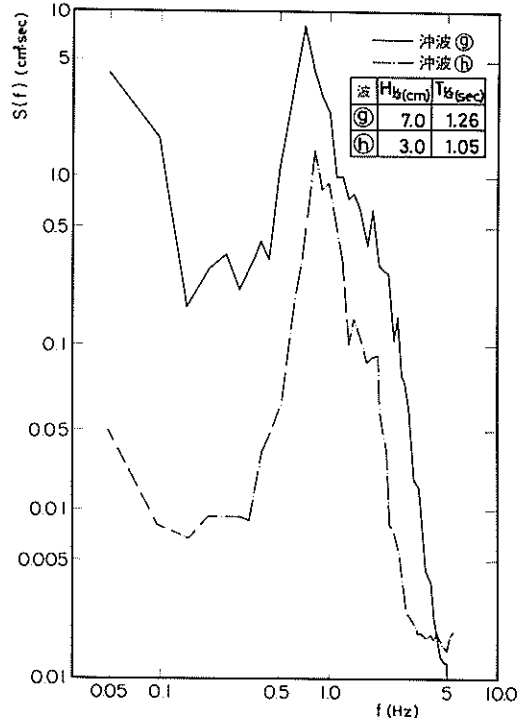
なお、田後港模型実験では、波高の測定は有義波高指示計⁷⁾を用いて行なった。この測定器は、電気的信号に変えられた水位変動から不規則波の有義波高および平均周期をデジタル表示するもので、不規則波実験においては非常に便利な機械である。しかしこの種の機械では波の詳細な部分は判らないので、本実験を始める前に沖波をデータレコーダー等に記録し、電子計算機によって波の統計解析を行ない、計算によって得られた波高、周期と、有義波高指示計による値とを比較すると同時に、スペクトルの形が所定のものになっているかなどをチェックしておく必要がある。

図-9-(1)~(3)は、田後港実験に用いた沖波をデータレコーダーに記録し、電計算機によってスペクトルを計算したものである。これらのスペクトル図で気付くことは、波①~③(図-9-(1))で所定のピークの他に $f = 0.8 \text{ Hz}$ 付近に大きいピークが存在すること、波④(図-9-(3))で低周波数側にかなり高いエネルギーが存在することである。波①~③の低周波数側のピークについては、NW方向の波はB.W. ①、②にほぼ直角に入射するために反射が大きく、また波の進行方向の両側を導波板でさえぎられているために共振現象が起きたためと考えられる。水槽の共振周波数を概算してみると 0.07 Hz となり¹⁷⁾、 $f = 0.08 \text{ Hz}$ にほぼ一致した。一方、波④では周期の長い水位変動があったことが判り、その原因として模型水槽の水面の共振等が考えられるが、その詳細は不明である。

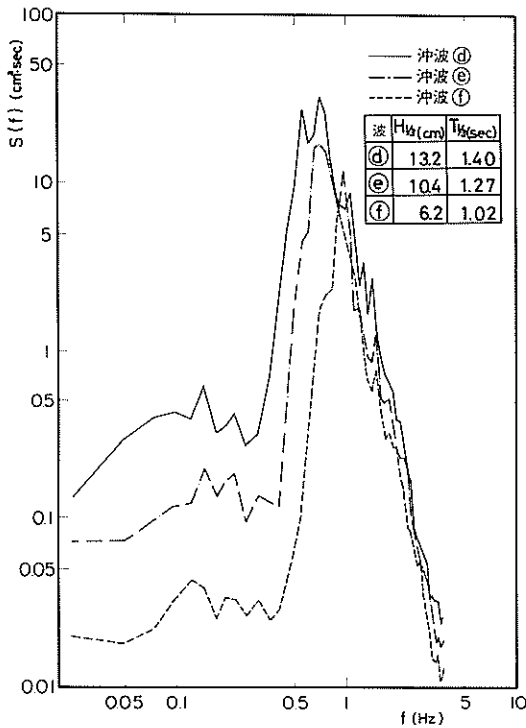
また表-11は、ゼロアップクロス法による沖波の有義波高と有義波周期である。表-11と表-8とを比べてみると波高について最大で20%程度の差がみられ、予想していたよりは大きい差であった。この原因としては、電子計算機による計算値が約7分間の比較的長いデータを用いているのに対し、有義波高指示計の測定時間



(1) 沖波向 NW



(3) 沖波向 NE



(2) 沖波向 N

図-9 沖波のスペクトル図

表-11 有義波高と有義波周期の測定値

波	$H_{1/8}$ (cm)	$T_{1/8}$ (sec)
(a)	13.6	1.74
(b)	11.1	1.53
(c)	7.7	1.36
(d)	13.2	1.40
(e)	10.4	1.27
(f)	6.2	1.02
(g)	7.0	1.26
(h)	3.0	1.05

は2分間を標準としたために波高の時間的な変動の影響を受けたこと、また計算値はゼロアップクロス法による波高である一方、有義波高指示計は η_{rma} を基にして波高を計算していること、さらに有義波高指示計では平均水位の変動による測定誤差が大きいのがこれを補正でき

なかったことなどが考えられる。田後港の実験では、実験の手順から電子計算機によるデータ解析が実験の最後になってしまったため、以上のことを検討することができなかった。できれば有義波高指示計による沖波々高の測定と同時に電子計算機による統計解析を行ない、両者に大きな差が認められる場合にはその原因を確かめて、前もって何らかの方策を講じることが望ましい。なお前にも述べたように、田後港の波高比の計算には、有義波高指示計を用いて測定した港内波高を基としており、沖波々高と測定条件を同じにするという意味から、表-8の値を沖波々高とした。

iii) 港内波の測定

以上のようにして沖波々高の検定が終了すると、港内波高を測定するという作業に移る。不規則波を用いると第2章で述べたようにその平均化効果のために、港内の波高の場所的な変動は規則波の場合のようには大きくなる。しかし静穏度実験では正確な等波高線あるいは等波高比線を描くことが重要である。したがってそれに必要なだけの測点を設けて波高を測定しなければならない。この場合、測点はただ慢然と港内の各地域に平均的に設けるのではなく、実験の目的を考慮して重要な地域ほど密にする。また測定上のことから言えば、何点かの測点が直線上に並ぶようにした方が測定はやり易い。

田後港では、港奥が物揚場および船溜りとして重要であり、かつ静穏度上も問題であった。そこで、この領域に数多くの測点を設けるようにし、全体としては、図-10の52点および沖波を測定するための造波板前面の2点の合計54点を測点とした。

実験は、造波信号の強さを調整するための増幅器の増幅率を所定の値に合わせ、データレコーダーの信号を造波機に入力して波を起こすことから始まる。波高の測定は、波を起こし始めてから約10分間程度待って、水槽内が定常状態になってから開始する。ただし、少なくとも1日に1回は港内波高を測定する前に沖波々高をチェックし、所定の波高になっているかどうかを確認しておくことが望ましい。これは、機械の調子その他により、同じ増幅率で波を起こしても波高が違ってくる可能性があるからである。

港内波高の測定時間は、100波程度の波が入るように決める。測定時間があまり短いと、波高の時間的な変動の影響を受けて測定値の精度が悪くなる。田後港実験に用いた有義波高指示計は、測定開始から40秒ごとにそれまでの有義波高を表示するようになっている。そこで3回目の表示、すなわち120秒間の水位変動による

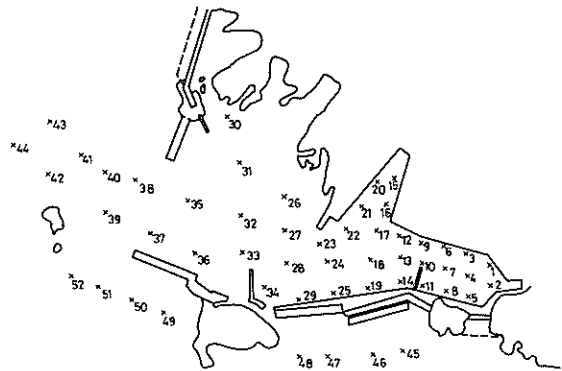


図-10 測点

計算値を測定値とすることにした。また平均水位の変動に対する補正回路が内蔵されていないので、次の測点に移動したときには、指示計の水位変動の表示計を見ながら針の振れがほぼ左右対称になるように0レベルを調整した。

なお静穏度実験では一般に副振動が、また不規則波を用いると特にサーフビートによる長周期の水位変動が問題となる場合がある。これらの現象が起これると、波高の測定法によっては測定結果が変わってきってしまうことがある。例えば田後港実験に用いた有義波高指示計のように、 σ_{rms} から有義波高を求めると測定値は過大な値となる。このような場合には、波高の測定時間内の水位変動から平均水位を求め、その平均水位からの変動を用いて波高を計算するようにすることが望ましい。

8) 実験結果の整理

前節で述べたようにして各測点における波高が求まると、港内の等波高線図および等波高比線図を描くことができる。この場合、等波高線図は現地波高に換算した値で描いておくようにする。また本資料で述べるような波高超過出現率の算定には、等波高比線図が主として使われる。田後港静穏度実験により求めた等波高比線は、付図-1~29のようになった。

このようにして求めた等波高線図および等波高比線図を用いて港内の静穏度について検討していくわけであるが、この場合、測点ごとの値を比較しても全体的な傾向がつかみにくいので、港内をいくつかの領域に分け、各

領域の波高あるいは波高比の平均値を求めておくことと便利である。領域の分け方としては、港口、航路、船溜り、物揚場のように、各機能別に分けるようにする。田後港では、図-11のような8地域に分けて平均波高比(K_H)を求めた。表-12がその結果である。表の右方向へ行くほど港の奥の領域における波高比を表わしているの、各領域の波高比を比較することができる。また上下方向を比べれば、港の各形状における静穏度について検討することができる。

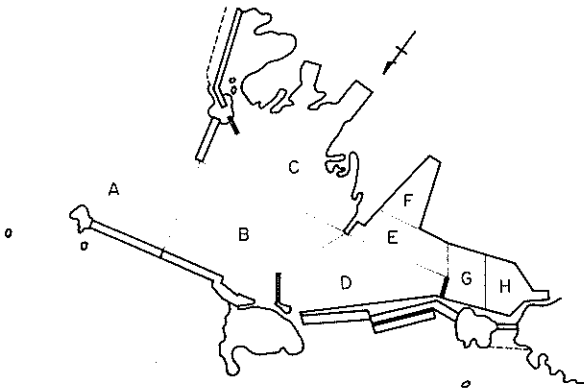


図-11 田後港々内領域分割図

なお、不規則波はその波高が時間的に変動するので、その変動の幅がどれくらいあるのかを確認し、波高比で何%差があれば静穏度の良否の判定ができるのかを検討しておく必要がある。そのためには、データレコーダーで連続的に波を起こしながら、港内波高の測定時間(田後港実験の場合は120sec)に合わせて連続的に沖波々高を測定しその変化を見れば良い。田後港実験に用いた実験波④($H_{1/3} = 5.7$ cm)についてこのような測定を行なったところ、有義波高の平均値5.8 cm, 標準偏差0.29 cmという結果を得た。この結果から、沖波々高は±5%程度の時間的な変動があることが判り、港内波高についてもこの程度の変動があることが推測できる。いま港内のある領域の平均波高比をn個の測点における波高の測定値を用いて求めたものとすれば、平均値の変動は各測点の変動幅の $1/\sqrt{n}$ 倍となる。したがって、例えば田後港の領域Hには5点の測点が入っているの、波④に対する平均波高比は±5/√5=±2.24%の時間的な変動をすることが推定できる。さらに、2種類の異なる模型形状における波高比を比較する場合には、測定値の差の分布の標準偏差は各模型形状における測定値の√2倍となることも考慮する必要がある。したがって、

実験波④に対する領域Hの静穏度を平均波高比によって検討する場合、各模型形状に対する平均波高比の差が±2.24×√2=3.17%以内であるときには、それがはたして模型形状の差によるものなのか波高の時間的な変動によるものなのかは判らないということになる。

また、実験において、防波堤からの越波およびサーフビート等の現象が起きていと認められたときには、その地点における水位変動をデータレコーダーに記録し、解析を行なっておくと後で参考になる。田後港の実験では、波向および波高によっては港口のB.W.④からの越波が見られ、また港奥でサーフビートによると見られる長周期の水位変動が観察された。図-12は、実験波④に対し越波の影響を顕著に受けると考えられる測点33と36の中間地点、およびサーフビートが見られた測点16の水位変動を現状模型において記録し、スペクトル図を求めたものである。この図から、測点33と36の中間地点の波は越波による伝達波によって波が割れて周期が短くなり、周波数の高い領域でも大きなエネルギーを持っていることが判る。

一方、測点16では低周波数側のエネルギーが大きく、

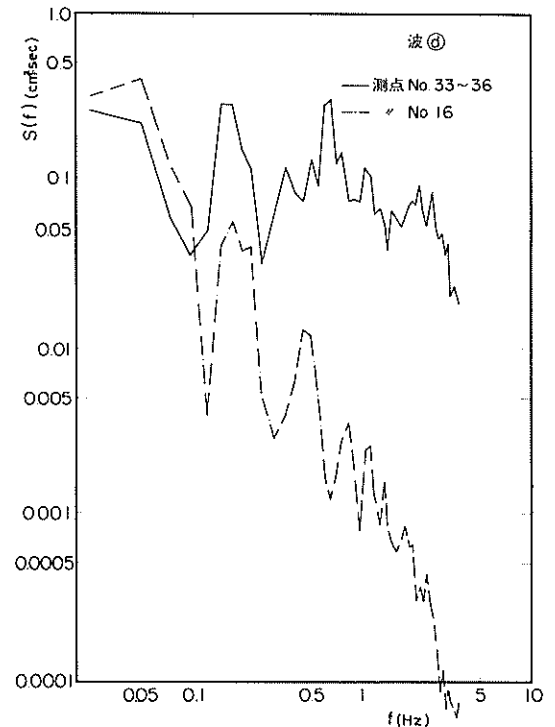


図-12 港内波のスペクトル図

表-12 港内平均波高比の測定値 ($\overline{K_H}$)。

実験 ケース	波 向	波	模 型 番 号	平 均 波 高 比 (%)								
				A	B	C	D	E	F	G	H	
①	NW	a	I	41.7	18.3	13.0	9.9	10.3	9.8	7.7	8.2	
②			II	22.0	9.7	5.6	6.7	6.8	7.0	7.3	6.6	
③			III	19.0	8.7	7.0	6.9	5.0	5.8	7.7	9.4	
④		b	I	48.9	22.5	15.7	11.2	10.5	12.3	10.0	10.0	
⑤		c	I	53.7	19.0	12.3	11.2	10.3	8.0	9.8	8.0	
⑥	N	d	I	63.0	34.3	47.0	20.3	15.2	17.3	16.8	18.6	
⑦			II	46.7	22.0	19.7	14.3	12.8	12.8	15.5	14.0	
⑧			III	42.3	18.3	15.0	12.3	10.8	13.8	10.8	10.2	
⑨			IV	25.6	16.0	14.7	11.9	11.0	11.8	10.8	10.6	
⑩			VI	20.4	13.8	9.0	8.3	7.8	10.0	10.8	12.4	
⑪		e	I	81.1	41.5	31.0	19.3	17.0	22.3	21.5	12.2	
⑫			II	53.1	27.8	21.0	15.8	14.5	12.0	16.0	14.8	
⑬			VI	30.6	21.7	19.7	14.2	12.8	16.0	12.2	15.6	
⑭		f	I	78.7	51.0	43.3	29.0	26.5	34.5	29.0	26.2	
⑮			II	58.4	27.5	26.3	15.4	14.8	17.0	19.0	18.2	
⑯			VI	35.4	19.0	14.3	9.7	12.0	11.5	7.2	10.2	
⑰			NE	g	I	84.9	41.7	44.0	27.8	25.5	36.0	26.3
⑱		II			76.1	39.2	31.7	31.2	25.0	33.3	31.0	30.0
⑲		IV			63.6	36.8	27.3	29.3	28.3	30.3	25.5	25.4
⑳	V	59.7			36.3	21.0	29.7	24.3	29.5	25.8	29.2	
㉑	VI	61.7			35.5	22.3	25.9	20.8	22.5	18.5	19.2	
㉒	VII	-			-	-	21.7	18.0	26.0	19.7	21.8	
㉓	VIII	-			-	-	27.2	22.0	26.3	23.0	26.8	
㉔	IX	-			-	-	28.2	24.0	30.8	22.0	22.4	
㉕	X	59.1			35.0	19.3	23.7	20.0	29.0	22.5	23.0	
㉖	h	I			86.9	51.2	43.7	38.1	31.0	28.5	34.2	33.4
㉗		II	88.9	52.8	39.0	38.2	28.5	33.0	30.7	37.4		
㉘		IV	61.6	26.5	23.3	23.3	12.8	14.5	17.3	17.2		
㉙		VI	59.6	25.8	17.0	20.3	8.5	10.3	9.7	7.4		

サーフビートのような長周期の水位変動があったことが、スペクトル図の上からも確認することができる。

4. 港内波高比の算定法

4.1 港口からの進入波による波高比の推定法

第3.2節の2)で述べたように、静穏度実験は代表的

な波向、波高、周期を持つ波についてだけ行なわれることが多いが、港内の静穏度は、実験に用いた以外の波浪条件も考慮し総合的に評価しなければならない。さらに、実験に用いることのできる波は現在のところ一方向スペクトルを持つ波だけであり、実験結果からさらに実際の海の波のように方向スペクトルを持つ波に対する港内静穏度を推定する必要がある。港内の波高は、港口からの

進入波および防波堤等からの越波による伝達波によって決まるが、本節ではこのうちの港口からの進入波による港内の波高比の推定法について述べる。

港口からの進入波の波高比の推定法として、数値波動解析法、近似造波板方式等が開発されているが、折返し回折図法が使われることが多い。折返し回折図法は、港の防波堤などの外郭施設によって回折され港内に進入した波が、港内の反射性構造物によって反射する場合に港内の波高比を求める図式解法である。この方法はイッペンの教科書¹⁸⁾に紹介されているカーの提案に基づき、波高比の計算ができるように著者の一人が改良したもの¹⁹⁾で、次のような仮定に基づいている。

- i) 港口からの回折波は各方向へ直進する。
- ii) 反射性構造物に波がぶつかると、波は入射角に等しい角度で反射され、反射波の波高は入射波高に反射率を掛けた値となる。
- iii) 反射波の伝播状況は、入射波（港口からの回折波）の伝播状況を、反射面を鏡の面として折返したもので近似される。
- iv) 相異なる方向からの二つ以上の波が合成されたときの波高は、各波高の二乗和の平方根に等しい。

折返し回折図法は、防波堤による港内の回折係数を求めることから始まる。半無限堤あるいは両側の防波堤が直線上に配置されたものについては、標準的な回折図が出されている²⁰⁾。しかし、一般に現地の港では防波堤の形状は複雑であり、また波向によっては二次回折が問題になる場合もある。したがって、回折係数は電子計算機によって求めるのが普通である。港内の回折係数が求まったならば、それを用いて折返し回折図法によって港内の波高比を推定する。

田後港の解析では、現状および5か年計画実施後における港の形状を対象にした。港内波高比の計算地点は、模型実験における波高の測点と同一地点としても良いが、必ずしもそのようにする必要はなく、反射面で港の地形を折返したときに計算地点が反射波の領域に入るようにすることなどを考慮して決めれば良い。田後港の波高比計算地点は、図-13に示す41点とした。

反射面と考える部分としては、一般に港内の防波堤、波除堤および岸壁等がある。この場合、延長距離の短いものなどあまり細かい部分まで考慮する必要はなく、担当者の判断によって重要と思われる部分を反射面として採用すれば良い。田後港において反射面と考えたのは、

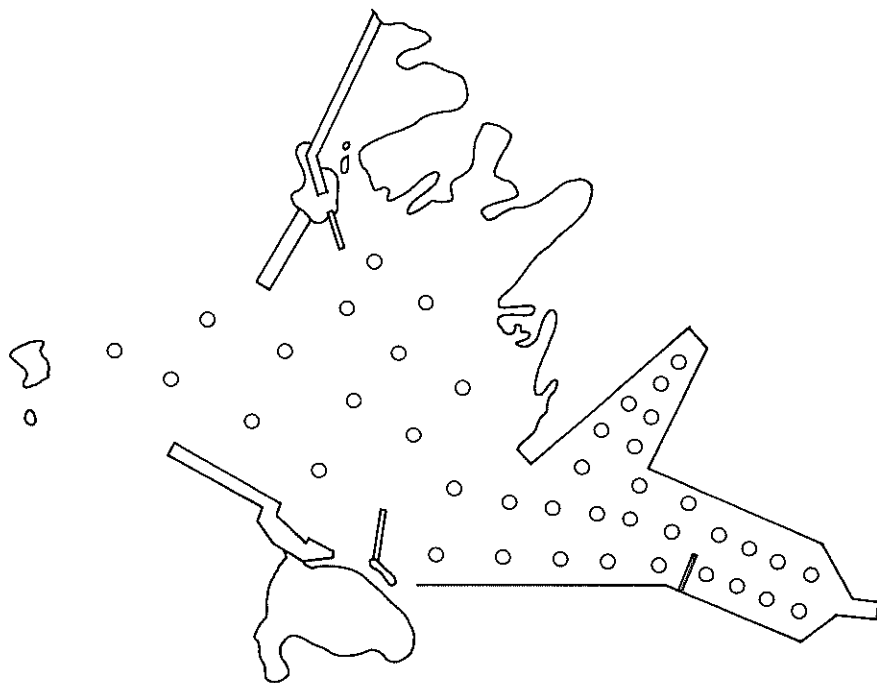


図-13 折返し回折図法における港内波高比の計算地点

図-14の斜線部である。波がこの反射面から反射したあとの波高分布は、仮定のⅡ)およびⅢ)を用いて求めるわけであるが、回折図を折返すという方法は、波向、周期によって回折図が異なるためその都度折返さなければならず、大変な作業量となる。したがって、反射面を鏡面として港の形状を折返した図面をトレーシングペーパーに描き、それを回折図の上に当てて回折係数を読取るという方法が一般的である。例として、田後港における反射面①、②の折返し図を図-15-(1)、(2)に示した。図中の黒丸印は、図-13に示した港内の波高比計算地点の各反射面を鏡面とする鏡像である。

電子計算機による回折計算のラインプリンターへのアウトプットは、1メッシュの大きさが約1.27cmの長さで打出される。そこで、図-13、15をそれに合わせた縮尺で描いておけば、計算機のアウトプットの上に当てることによって、各計算地点および反射面の鏡像地点

における波高比を直接読むことができ便利である。ただし仮定Ⅱ)から、反射率が1.0以下の反射面に対しては、このようにして読取った波高比に反射率を掛けた値を反射波の波高比とする。直立壁の反射率はほぼ1.0であるが、波の干渉や海底摩擦その他による減衰の影響を加味して、0.7~0.8程度に見込むのが妥当と思われる。また、消波構造を持つ岸壁、消波工を施された防波堤等に対しては、各種の反射率測定結果などを考慮して反射率を適宜選定する。

折返し図法では、ある反射面で反射した波がさらに次の反射面で反射するというように、2~3回の反射まで考慮するのが普通である。その場合には、図-15をさらに図-14の鏡面で反射させた図面を描いておき、波高比を読取れば良い。しかし作業量は、反射を考慮する回数に比例して増大していくことになり、港の形状や波の種類が多くなると全体としては膨大な作業量となる。田後港の解析では、反射を考慮する回数は一回だけとし、そのかわりに直立壁の反射率を1.0として反射波高を算定した。

なお、港口から見て防波堤や波除堤等の裏側になる領域には直接波は到達せず、回折現象によってまわり込んで行く。したがって、このような領域の波高比は、港内防波堤等による回折を考慮して求めなければならない。そのためには、それらに対する回折計算をさらに行うか、あるいは一般に公表されている回折図のうちから適当なものを選んで使用する。この際、波向としては外郭防波堤の開口部の中央点と、港内防波堤等の先端を結ん

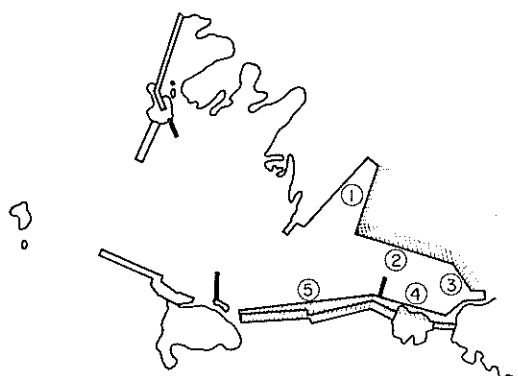
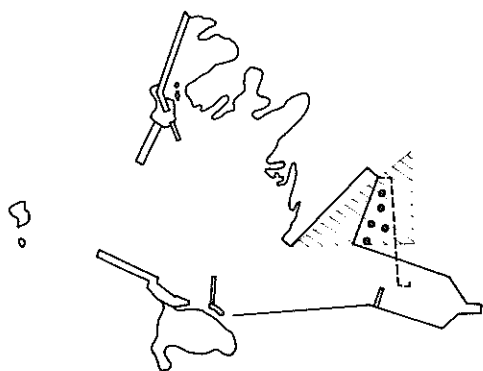
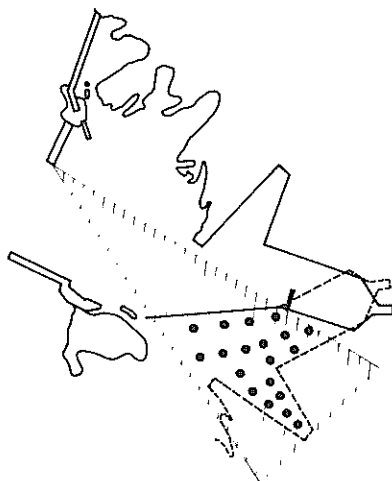


図-14 反射面



(1) 反射面①



(2) 反射面②

図-15 折返し図

だ方向にとるのが妥当と思われる。港内防波堤等の裏側の波高比は、その先端における回折係数にさらに以上のようにして求めた港内防波堤等による回折係数を掛けて求める。

また、反射波の影響を考慮する範囲は、港口からの進入波が直接当たる部分にはiv)の仮定を用い、港内防波堤等の陰になる領域では、回折波は防波堤の先端から同心円状に進行することなどを考慮して決める。田後港の解析では、図-15の斜線部分を反射波の影響範囲と考えた。

図-16は、表-8の波④に対する現況の田後港の電子計算機による回折計算結果である。計算には、実験と同じ方向スペクトルを持つ波を用いた。また、防波堤に対する波の入射方向は、模型の海底地形について屈折図を描き、防波堤先端における波向を求めた方向を用いている。図-7を見ると判るように、波除堤(Ⅶ)、(Ⅷ)、(Ⅸ)の裏側が港口から見て陰になるので、文献20)の半無限堤による回折図を用いて、例えば波除堤(Ⅸ)による波高比を求めると図-17のようになる。文献20)の回折図は方向スペクトルを持つ波に対するものであるが、

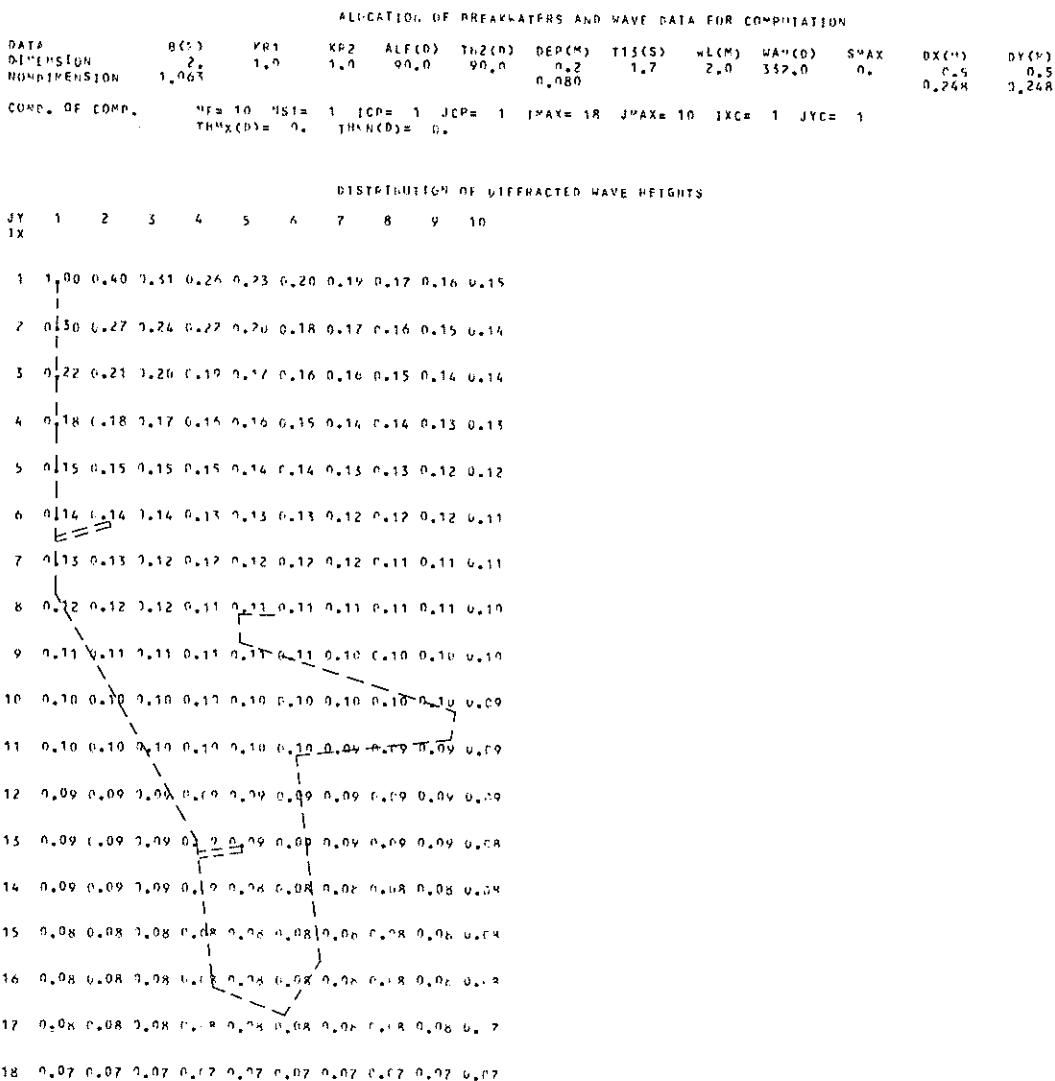


図-16 回折計算結果(波④, 現状)

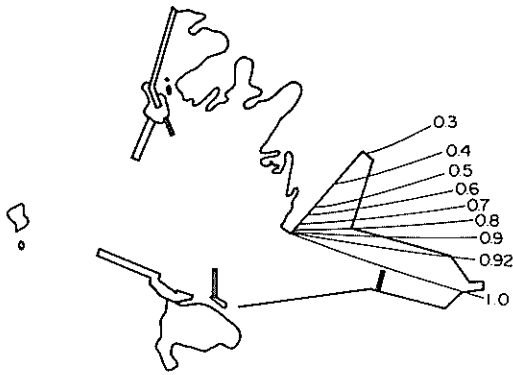


図-17 港内の波除堤(Ⅷ)による回折図
($T_{1/3} = 1.43 \text{ sec}$)

波向に対する波のエネルギーの集中度が高い $S_{\max} = 7.5$ の図を用いれば、一方方向スペクトルの波による回折図とそれほど大きな差はないと考えられるので、そのまま用いることにした。図-16, 17 から各計算地点の波高比を読み取り、二つ以上の波が重なる場合には仮定(Ⅳ)を用いて各波高比の二乗和の平方根をとれば、港口からの進入波の港内波高比を求めることができる。

なお、沖波は港口に到達するまでに海底地形の影響を受けて、屈折および浅水効果等によって変形し、波高も変化する。折返し回折図法によって求められる港内波高比は、港口における波高に対するものなので、沖波に対する波高比は、港口に達するまでの波高の変化を考慮して計算する必要がある。

4.2 越波による伝達波の推定法

防波堤等からの越波によって港内が荒らされるような場合には、前節で求めた港口からの進入波による港内波高比のほかに、越波による伝達波の影響も考慮しなければならない。

越波による防波堤背後の伝達波の算定法としては、実験データを基にしたいくつかの方法が提案されている(22) (23)。ここでは、著者の一人が提案した次式を紹介しておく。

$$(K_T)_0 = 0.5 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2.2} \frac{R}{H_I} \right] \quad (2)$$

ここで、 $(K_T)_0$: 防波堤背後の波高伝達率
 R : 防波堤の天端高(m)
 H_I : 入射波高

ただし式(2)は防波堤に波が直角に入射する場合の算定式であり、斜め方向から入射する場合には文献(24)などの実験結果を参考にし、また実験中に越波状況を観察しながら、適切な値を用いることが望ましい。

田後港では、波向Nの波がB.W.(Ⅷ)にほぼ直角に入射し、波高が大きい波④ではかなりの越波が見られた。表-12の実験ケース番号⑦, ⑧で港内の各ブロックごとの平均波高比を比べてみると、B.W.(Ⅷ)の天端高が低い模型形状Ⅱでは明らかに波高比が大きくなっており、防波堤からの越波による伝達波が港内の静穏度に影響を及ぼしていることが判る。そこで、N方向の波に対する港内の波高比を算定する際には、越波による伝達波も考慮することにした。一方、N方向から45°傾いたNWの波については、表-12の実験ケース番号②, ③を比べてみると判るように、天端高の違いによる港内波高比の差がほとんどないことから、越波による伝達波は考慮しないことにした。またNEの波についてもB.W.(Ⅷ)の天端高を上げて検討してみたところ、NWの波と同様の傾向が見られたので、やはり越波による影響は考慮しないことにした。

越波によって防波堤背後に発生した伝達波は、港内へ伝播して行く。伝達波の伝播の仕方はまだはっきりとは判っていないが、一つの方法としては、越波が起きている防波堤を仮定の開口部と考え、回折計算を行なって港内の波高を算定するということが考えられる。しかし、田後港では港の形状からして越波しているB.W.(Ⅷ)を仮定の開口部としたときの回折計算を行なうのが困難なこと、また越波はB.W.(Ⅷ)の先端部すなわち港口部で大きかったことから、第4.1節で求められた折返し回折係数を越波による伝達波の港内への伝播係数として用いることにした。

4.3 計算による港内波高比の推定値の精度の検討

第4.1節, 4.2節で述べた方法によって、港口からの進入波および防波堤からの越波による伝達波の港内波高比が求まると、それらが合成されたときの沖波々高比 K_H は次式で計算される。

$$K_H = [K_d^2 + (K_T)_0^2 \times (K'_d)^2]^{1/2} \times K_r \quad (3)$$

ここに、 K_d : 港口からの進入波の折返し回折係数
 $(K_T)_0$: 防波堤背後の波高伝達率
 (K'_d) : 越波している防波堤を仮定の開口部としたときの、越波による伝達波の

折返し回折係数

K_r : 屈折係数

しかし、計算による波高比の推定値は実験値より精度が落ちるので、計算値を実験値と比較してその精度について検討しておくと同時に、計算値に対する補正係数を求めておく必要がある。

計算値と実験値を比較する際は、当然のことながら計算には実験に用いたと同じ方向スペクトルを持つ波を用い、また屈折係数としても模型水槽の等深図から求めた値を使う必要がある。したがって、式(3)の屈折係数 K_r は、一方向スペクトルの波に対応した値となるが、有義波と同じ諸元を持つ規則波の屈折係数を用いてもそれほど大きな差はないものと考えられる。

田後港の実験では、代表的な模型形状として現状および5か年計画実施後の形状における港内波高比を求め、図-11の各ブロックの平均波高比 $(\overline{K_H})_1$ を計算した。前節で述べたように、越波による伝達波はN方向の波についてだけ考慮したが、港口からの進入波との合或波高を求める際に、田後港の実験の範囲では両者の二乗平均よりも単純に加え合わせた方が実験値に近かったので、その方式をとることにした。図-18-(1)、(2)は、測定結果と実験結果を比較したものの一例である。港口付近で差が大きくなっているが、港内では両者がほぼ一致していることが判る。

以上のようにして求めた計算値 $(\overline{K_H})_1$ と表-12の実験値 $(\overline{K_H})_e$ との比 $(\overline{K_H})_e / (\overline{K_H})_1$ を求めると表-13のようになる。この表から、次のようなことが言える。

- i) 全般的に見ると、計算値と実験値にはそれほど大きな差はないと言える。

- ii) ブロックのFでは、すべてのケースに対し他のブロックに比べて計算値が小さくなっている。

- iii) $T_{1/3} = 0.96 \text{ sec}$ の波(⑦)、(⑧)では、他の実験波の場合に比べて港内の全域にわたって測定値が大きい。

ブロックのFで計算値が小さいのは、図式解法では一回の反射しか考慮していないのに対し、実験では多重反射およびエネルギーの集中が起こり、波高が高くなっているためであろうと考えられる。次にiii)については、波向NWには $T_{1/3} = 0.96 \text{ sec}$ の波が実験ケースに入っていなかったが、港内の約20点で $T_{1/3} = 0.96 \text{ sec}$ の波に対する波高比を測定してみたところ、他の周期の場合よりもやはり大きな目の値であった。このことから、 $T_{1/3} = 0.96 \text{ sec}$ の波では港の副振動等の影響により平均水位が変動し、その影響を受けて波高の測定値が実際の値よりも大きくなっている可能性がある。

以上のようにして計算値と実験値を比較しておき、次節で述べる方向スペクトルを持つ波を用いた港内波高比の計算結果に対する補正を行なうわけである。

4.4 方向スペクトルを持つ波に対する港内波高比の推定法

港内の静穏度は、実験に用いた代表的な波向、波高および周期を持つ波以外の波浪条件も考慮し、さらにより実際の海の波に近い条件を計算にとり入れるという意味で、方向スペクトルを持つ波の港内の波高比を推定してその良否を判断する必要がある。

一般に、波浪条件は16方位の波向を考え、各波向についてそれぞれ適当な波高と周期を選定する。田後港では、表-1~3の波のデータを基に、表-14の波を計算の対象とした。表中の波高と周期は有義波のものであ

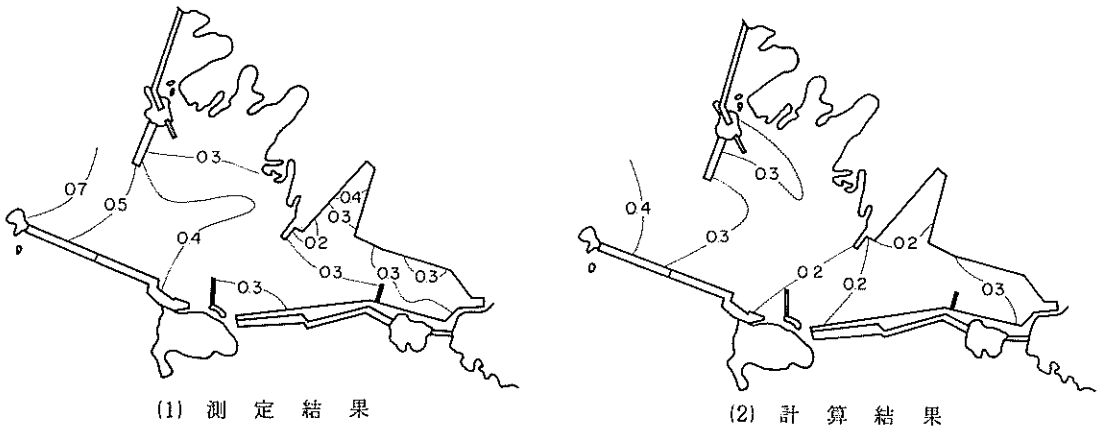


図-18 港内波高比(波④, 5か年計画実施時)

表-13 実験値と計算値の比

1) 現 状

波 向	NW			N			NE	
波 ブロック	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ	Ⓕ	Ⓖ	Ⓗ
B	1.141	1.364	1.377	1.062	1.330	1.421	0.782	1.076
C	1.083	1.246	1.118	1.506	0.937	1.305	0.696	0.683
D	0.825	0.889	1.109	1.109	1.103	2.069	1.011	1.179
E	1.030	0.981	1.120	0.831	1.090	1.818	0.876	1.574
F	1.126	1.577	1.455	1.341	1.906	3.333	1.545	2.051
G	0.802	1.031	1.181	0.971	1.378	2.025	0.929	1.736
H	0.854	1.031	0.870	1.075	0.782	2.357	1.017	1.511

(2) 5 年計画模型

波 向	NW			N			NE	
波 ブロック	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ	Ⓕ	Ⓖ	Ⓗ
A	1.250	—	—	1.730	2.004	2.988	1.874	2.469
B	0.942	—	—	1.177	1.503	1.814	1.447	2.286
C	0.675	—	—	1.255	1.346	2.010	1.136	1.512
D	0.651	—	—	0.917	1.033	1.969	1.419	2.183
E	0.660	—	—	0.821	1.021	1.839	0.984	1.629
F	0.972	—	—	1.153	1.200	2.692	1.871	2.750
G	0.709	—	—	1.000	1.053	1.719	1.183	1.583
H	0.505	—	—	0.849	0.914	1.583	1.014	1.842

るが、今まで述べてきた波とは異なり、方向スペクトルを持っている。

方向スペクトルとは海の波の表示法の一つであり、ある波向および周期を持つ成分波がどれくらいのエネルギー（波高の二乗に比例する）を持っているかを表わすものである。一見したところ、海の波は非常に複雑な形をしており、何の法則性も持っていないように思われるが、数多くの現地観測の結果から、ある程度の標準的な方向スペクトルの形が求められている²⁵⁾。一方、現在では方向スペクトルを持つ波の回折計算を電子計算機で行なえるようになってきている。したがって、前節までに述べて来たのと同様の方法によって、式(3)から方向スペクトルを

持つ波による港内の波高比を推定することができる。

ただし、この場合どのような方向スペクトルを持つ波を計算に用いるかが問題となる。方向スペクトルは、周期に対する波のエネルギー分布を表わす周波数スペクトル（あるいは一方向スペクトルと呼ばれる）と、波向に対するエネルギー分布を表わす方向関数の積として表わされるのが普通である。このうち周波数スペクトルは、光易の修正による Bretschneider 型と呼ばれる関数形によって標準化され、その妥当性もほぼ確認されている。一方、方向関数として現在のところ最も信頼性の高いと考えられるものに光易型方向関数がある。したがって、両者の積として表わされる光易型方向スペクトル²⁶⁾を

表-14 計算の対象とした波

波 向	波 高 (m)	代表周期 (sec)	波 向	波 高 (m)	代表周期 (sec)
WNW	1	8	N	1	8
	2			2	
	3	10		3	10
	4			4	
NW	1	8		5	12
	2			6	
	3	10		7	14
	4			8	
	5	12	NNE	1	8
	6			2	
	7	14		3	10
	8			4	
NNW	1	8	NE	1	8
	2			2	
	3	10		3	10
	4			4	
	5	12			
	6				
	7	14			
	8				

用いるのが妥当と思われる、田後港の計算においてもこれを使って回折計算を行なった。光易型方向スペクトルは、沖波の有義波周期 ($T_{1/3}$)₀ および波のエネルギーの方向的な集中度を示す S_{max} をパラメーターとして持っている。このうち ($T_{1/3}$)₀ は現地の波のデータから選定することができるが、 S_{max} は現地の地形等を考慮して適切な値を選定しなければならない。というのは、沖波の方向スペクトルに対する S_{max} の値は波形勾配からある程度推定することもできるが、沖波が港口に達するまでは水深変化によって屈折し、沖波とは異なったスペクトル形を持つようになるためである。屈折によって、成分波の波向は徐々に等深線に直角になるため、全体としては港口における波のエネルギーの方向的な集中度は沖波よりも高まることになる。厳密に言えば、方向スペクトルを持つ沖波の屈折計算を行なって港口における波の方向スペクトルを求め、それを用いて回折計算を行なう必要がある。しかしそれでは煩雑になるので、文献20)

に載っている平行等深線海岸における S_{max} の変化図を参考にするなどして推定すればよい。

田後港の実験に用いた表-8の波の沖波々形勾配はいずれも0.03程度であり、文献20)の S_{max} の推定図を用いると $S_{max} \approx 20$ となる。港口付近の波の S_{max} の値の目安を得るために、やはり文献20)の平行等深線海岸における屈折による S_{max} の変化図を参考にすると、 $S_{max} = 130 \sim 160$ となる。しかし、田後港の沖合の海底地形は浅瀬等があって複雑であり、その影響を受けて波向はかなり分散されるものと考えられる。したがって、エネルギーの方向別の集中度は平行等深線海岸の場合よりも小さくなると推測されることから、田後港の回折計算には $S_{max} = 100$ の光易型方向スペクトルを用いた。

方向スペクトルを持つ波の港内波高比を式(3)から求める場合、港口からの進入波による波高比は第4.1節で述べた折返し回折図法で求められるが、越波による伝達波および屈折係数をどのように算定するかが問題となる。越波による伝達波を方向スペクトルを持つ波に対して測定した例はほとんどなく、現在までのところ式(2)を用いて推定する以外にないようである。一方、方向スペクトルを持つ波の屈折係数は電子計算機によって計算することもでき、海底地形が複雑で通常用いられる波向線法が適用できない海岸に対しても有効である。

ただし、等深線に対する入射角が $\pm 60^\circ$ 以内のときには、方向スペクトルを持つ波と規則波の屈折係数は大差ないので²⁷⁾、規則波に対する値を用いることもできる。

このようにして求められた波高比は、前節で述べたような方法で実験値と計算値を比較検討した結果を基に、補正する必要がある。補正は、各測点ごとではなく、港内の各領域の平均波高比に対して行なえば良い。補正法は、何を基準値にとるかによって大きく二種類に分けることができる。まず、測定値を基準値とする場合には、修正波高比 $(\overline{K_H})_I$ は次式によって計算される。

$$(\overline{K_H})_I = (\overline{K_H})_e \times \frac{(\overline{K_H})_f}{(\overline{K_H})_I} \quad (4)$$

ここで、 $(\overline{K_H})_e$: 各領域の波高比の測定値の平均値
 $(\overline{K_H})_f$: 方向スペクトルを持つ波の波高比の各領域での平均値
 $(\overline{K_H})_I$: 一方向スペクトルを持つ波の波高比の各領域での平均値

この方式は、方向スペクトルを持つ波と一方向スペクトル

ルを持つ波に対して計算した波高比の比を補正係数とし、一方向スペクトルを持つ波による実験値を補正するという考え方に基づいている。次に、方向スペクトルを持つ波に対する計算値を基準値とする場合の波高比 $(\overline{K_H})_{II}$ は、次式のようになる。

$$(\overline{K_H})_{II} = (\overline{K_H})_{方} \times \frac{(\overline{K_H})_e}{(\overline{K_H})_I} \quad (5)$$

これは、一方向スペクトルを持つ波の測定結果と計算結果の比を波高比の計算法に対する補正係数と考え、方向スペクトルを持つ波に対する計算値にその補正係数を掛けて補正するという方法である。式(4)と(5)を見ると判るように、各波について各領域ごとに補正するのであれば、 $(\overline{K_H})_I$ と $(\overline{K_H})_{II}$ は等しくなる。しかし、実験値がさまざまな原因でばらつくことを考えると、補正係数は何らかの方法で平均化した値を用いた方が良いと思われる。このように平均化した補正係数を用いると、式(4)と(5)による結果は異なる値を与える。また、式(5)の方式において、補正係数の平均化の方法として、例えば各波向ごとの平均値を用いるとすると、波高あるいは周期の違いによる波高比の差が計算結果に表われなくなってしまふ。したがって、実験において砕波等による波高減少が顕著に見られ、実験波の波高の違いが実験結果に大きく影響を及ぼすような場合には、式(4)による補正を行なうことが望ましい。

田後港の実験で、一方向スペクトルの波の波高比の測定結果と計算結果を比較した表-13を見ると、波向N

およびNEで波高の小さい波①および⑤の実験値と計算値の比が大きい波高のものに比べて大きく、上に述べたような砕波による波高減少の影響が現われているようにも見える。しかし、実験中に波の状態を観察してみた結果では、表-13に見られるほど極端に砕波の影響が現われるようには思われないうこと、また波①、⑤はともに $T_{1/3} = 0.96$ secの波であり、前節で述べたようにこの周期の波では波高が実際に高かったというよりも副振動等の影響によって測定値が大きくなったということも考えられる。そこで、田後港の実験では砕波による影響はわずかであると考え、補正法としては式(5)の方式を用いることにした。また、前節で述べたような各ブロックごとの傾向および波の周期による影響等を考慮し、表-14の各波向に対して各模型形状ごとに平均した表-15の補正係数を用いることにした。

なお、港の周辺の地形によっては、それによる波高の減少等を考慮する必要がある場合がある。例えば、港の近くに半島が突き出しているときや、沖合に大きな島などがある場合である。沖波のエネルギーは半島や島の陰になる部分がカットされるため、その分だけ波高が減少することになる。第3.1節で述べたように、田後港のNE方向には津崎があり、ほぼNE以南の波はカットされるものと考えられる。図-19は $S_{max} = 100$ の光易型方向スペクトルを持つ波の方向別エネルギー累加曲線であり、これを用いて波のエネルギーがどれくらいカットされるかを求めることができる。田後港のB.W.④の先端および鶴島から津崎の先端を結んだ線の方角は、

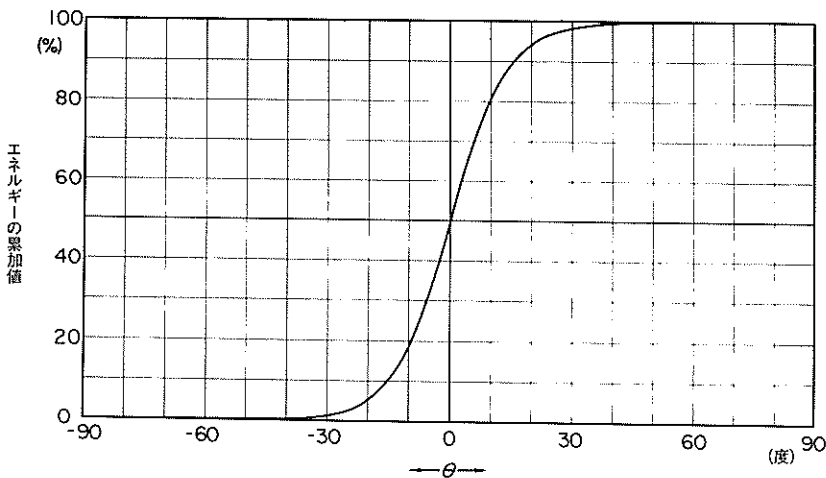


図-19 波の方向別エネルギー累加曲線 ($S_{max} = 100$ の光易型方向スペクトル)

それぞれN49.5°E, N47.5°Eである。したがって、例えばB.W.⑩の先端に到達する波向NEの波では49.5°-45°=4.5°より大きい部分の波のエネルギーは消されてしまうことになる。残った波のエネルギーがどれくらいあるかを図-19のθ=4.5°のときの値から読取ると66%となり、港口に到達した波の波高は√0.66=0.81倍に減少する。同様にして、NEの波では5か年計画実施時には0.77倍、NNEの波では現状で0.986倍、5か年計画実施時には0.984倍、その他の波向では波高は減少しないことになる。

以上述べたことにより、方向スペクトルを持つ波の港内波高比は次式で計算されることになる。

$$\overline{(K_H)} = \overline{(K_H)}_{\text{方}} \times C \times P \times (K_r)_{\text{方}} \quad (6)$$

ここで、P：波高の減少率

C：平均化された補正係数

(K_r)_方：方向スペクトルを持つ波の港口における屈折係数

田後港における港内波高比のうち、港口からの進入波の波高比、すなわち、

$$\overline{(K_H')} = \overline{(K_d)}_{\text{方}} \times C \times P \times (K_r)_{\text{方}} \quad (7)$$

ここで、(K_d)_方：方向スペクトルを持つ波の折返し回折係数の各領域の平均値

で表される波高比を求めると表-16のようになる。

一方、越波による伝達波は、前節で述べたように、田後港の実験ではN方向の波では越波が港内の静穏度に影響を及ぼしていることが認められたが、これより45°傾いたNWおよびNE方向の波では越波の影響が見られなかった。そこで、N方向の波では防波堤背後の波高伝達率を式(2)で求め、NNWおよびNNEでは式(2)の値の1/2、その他の波向では0とした。すなわち、越波による港内の波高比は次式で算定することにした。

表-15 補正係数
(1) 現状模型

波向 ブロック	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE
A	—	—	—	—	—	—
B	1.268	1.295	1.246	1.196	0.989	0.782
C	1.026	1.149	1.186	1.222	0.959	0.696
D	0.786	0.941	1.024	1.106	1.059	1.011
E	1.025	1.044	1.025	0.961	0.919	0.876
F	1.164	1.386	1.505	1.624	1.585	1.545
G	0.846	1.005	1.090	1.175	1.052	0.929
H	0.847	0.918	0.924	0.929	0.973	1.017

(2) 5か年計画実施時

波向 ブロック	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE
A	0.793	1.250	1.559	1.867	1.871	1.874
B	0.580	0.942	1.141	1.340	1.394	1.447
C	0.316	0.778	1.040	1.301	1.219	1.136
D	0.415	0.651	0.813	0.975	1.197	1.419
E	0.461	0.660	0.791	0.921	0.953	0.984
F	0.777	0.972	1.075	1.177	1.524	1.871
G	0.475	0.709	0.868	1.027	1.105	1.183
H	0.461	0.641	0.762	0.882	0.948	1.014

$$\overline{(K_H'')} = \alpha \times (K_r)_0 \times \overline{(K_d)}_{\text{方}} \times C \times P \times (K_r)_{\text{方}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\alpha = \begin{cases} 1 & (\text{波向N}) \\ 0.5 & (\text{波向NNW, NNE}) \\ 0 & (\text{その他の波向}) \end{cases}$

表-17は、式(8)によって求めた田後港における越波による伝達波の港内波高比である。

式(6)によって表される合成波の波高比は、波のエネルギーからすれば式(7)、(8)の二乗和の平方根として、

$$\overline{K_H} = [(\overline{K_H'})^2 + (\overline{K_H'')}^2]^{1/2} \quad (9)$$

表-16 港口からの進入波の港内波高比 ($= (\overline{K_d})_{\text{方}} \times C \times P \times (K_r)_{\text{方}}$)

(1) 現 状

波 向	周 期 (sec)	ブ ロ ッ ク							
		A *	B	C	D	E	F	G	H
WNW	10	0.430	0.190	0.113	0.086	0.092	0.070	0.076	0.076
	8	0.377	0.165	0.103	0.071	0.082	0.058	0.068	0.068
NW	14	0.537	0.259	0.184	0.141	0.136	0.139	0.121	0.110
	12	0.489	0.233	0.172	0.122	0.125	0.111	0.111	0.101
	10	0.417	0.207	0.149	0.113	0.104	0.097	0.101	0.092
	8	0.380	0.181	0.138	0.094	0.094	0.069	0.090	0.083
NNW	14	0.668	0.287	0.249	0.174	0.154	0.181	0.153	0.129
	12	0.638	0.274	0.225	0.154	0.144	0.151	0.142	0.120
	10	0.591	0.249	0.213	0.143	0.123	0.120	0.120	0.102
	8	0.552	0.237	0.190	0.123	0.113	0.090	0.109	0.092
N	14	0.809	0.365	0.403	0.232	0.182	0.227	0.206	0.163
	12	0.787	0.347	0.391	0.210	0.163	0.195	0.188	0.149
	10	0.765	0.335	0.379	0.188	0.144	0.162	0.176	0.139
	8	0.630	0.311	0.367	0.166	0.125	0.130	0.153	0.121
NNE	10	0.805	0.409	0.510	0.240	0.190	0.234	0.707	0.201
	8	0.729	0.390	0.510	0.209	0.172	0.203	0.186	0.172
NE	10	0.704	0.348	0.400	0.229	0.213	0.275	0.211	0.255
	8	0.683	0.335	0.417	0.213	0.170	0.213	0.181	0.198

* ブロックAの値は、測定値をもとにして推定した値である。

によって算定すべきであるが、前にも述べたように田後港の実験では単純和の方が実験値に近かったので、方向スペクトルを持つ波の波高比を求める際にもその方式によることにした。

表-16 (2) 5か年計画実施時

波 向	周 期 (sec)	ブ ロ ッ ク							
		A	B	C	D	E	F	G	H
WNW	10	0.127	0.052	0.022	0.033	0.037	0.039	0.038	0.037
	8	0.095	0.041	0.019	0.029	0.032	0.031	0.033	0.032
NW	14	0.250	0.113	0.070	0.072	0.073	0.078	0.078	0.071
	12	0.225	0.104	0.062	0.065	0.066	0.068	0.071	0.064
	10	0.200	0.085	0.062	0.052	0.053	0.058	0.057	0.058
	8	0.165	0.075	0.054	0.046	0.046	0.049	0.050	0.051
NNW	14	0.359	0.160	0.114	0.106	0.095	0.097	0.104	0.099
	12	0.327	0.137	0.104	0.098	0.087	0.086	0.095	0.091
	10	0.281	0.126	0.094	0.081	0.071	0.065	0.078	0.076
	8	0.249	0.103	0.083	0.073	0.063	0.054	0.069	0.069
N	14	0.513	0.241	0.182	0.166	0.147	0.124	0.180	0.154
	12	0.467	0.214	0.169	0.146	0.129	0.106	0.154	0.132
	10	0.429	0.188	0.156	0.127	0.111	0.094	0.134	0.121
	8	0.373	0.161	0.143	0.107	0.092	0.071	0.103	0.097
NNE	10	0.575	0.281	0.234	0.195	0.156	0.176	0.191	0.173
	8	0.503	0.241	0.210	0.173	0.128	0.132	0.159	0.146
NE	10	0.561	0.296	0.224	0.228	0.172	0.218	0.216	0.200
	8	0.479	0.253	0.215	0.197	0.144	0.191	0.181	0.170

表-17 越波による港内波高伝達率

(1) 現 状

波 向	波 高 (m)	ブ ロ ッ ク							
		A	B	C	D	E	F	G	H
NNW	1 λ 4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	-	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	6	-	0.011	0.009	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005
	7	-	0.018	0.015	0.011	0.009	0.011	0.009	0.008
	8	-	0.024	0.021	0.015	0.013	0.015	0.013	0.011
N	1 λ 4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	-	0.010	0.012	0.006	0.005	0.006	0.006	0.004
	6	-	0.027	0.031	0.017	0.013	0.015	0.015	0.012
	7	-	0.045	0.049	0.028	0.022	0.028	0.025	0.020
	8	-	0.061	0.068	0.039	0.031	0.038	0.035	0.027

(2) 5 か年計画実施時

波 向	波 高 (m)	ブ ロ ッ ク							
		A	B	C	D	E	F	G	H
NNW	1 λ 4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0.005	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
	6	0.013	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.005	0.005
	7	0.022	0.010	0.007	0.006	0.006	0.006	0.008	0.008
	8	0.030	0.013	0.010	0.009	0.008	0.008	0.011	0.011
N	1 λ 4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0.014	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.005	0.004
	6	0.037	0.017	0.013	0.012	0.010	0.008	0.012	0.010
	7	0.063	0.029	0.022	0.020	0.018	0.015	0.022	0.019
	8	0.086	0.040	0.031	0.028	0.025	0.021	0.030	0.026

5. 港内波高超過出現率の推定法

静穏度を定量的に評価する際に一つの基準となる港内波高超過出現率は、以下の手順によって求めるのが良いと考えられる。

- i) 沖波の波高超過出現率曲線を描く。
- ii) 港内波高を、沖波の波浪出現率の波高階級ごとに各波向について計算する。
- iii) 港内波高超過出現率曲線を描く。

この手順を、田後港の場合について述べると以下のようになる。

沖波の波高超過出現率曲線は、表-5を正規確率紙にプロ

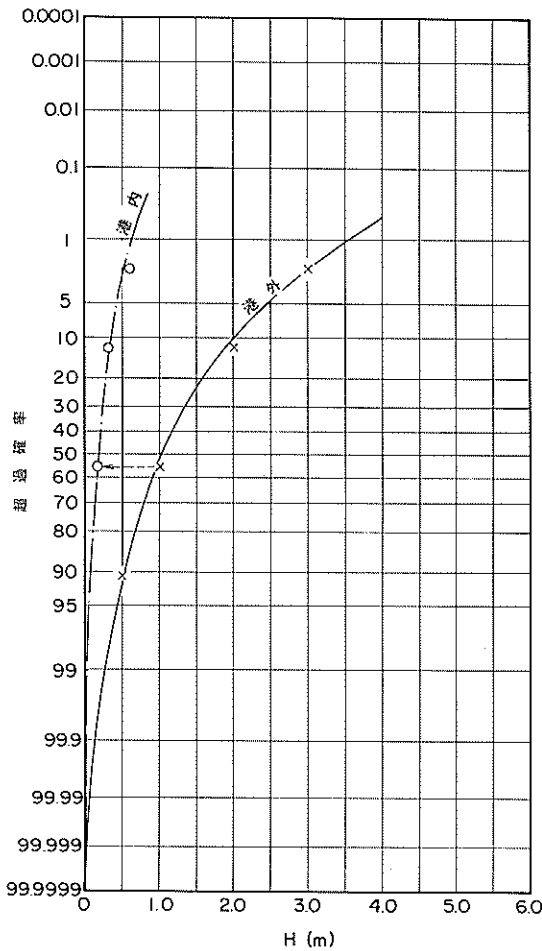


図-20 波高超過出現率曲線
(現状, 波向NE, ブロックE)

ットすれば描くことができる。例として波向NEの波の曲線を描くと図-20の実線のようにになる。

次に、港内波高を計算するには、表-14と表-16、17を用いる。表-16の波の周期は代表周期であり、各周期に対する波高比は表-14の各波の波高に対応している。したがって、表-16、17の波高比に、各周期に対応した波高を掛ければ港内波高が求まる。例えば、NEの波に対する現状における港内のブロックEの港内波高は表-18のようになる。

表-18 港内波高の計算例
(波向NE, ブロックE, 現状)

沖波波高 (m)	1	2	3	4
代表周期(sec)	8		10	
港内波高比	0.170	0.170	0.213	0.213
港内波高 (m)	0.170	0.340	0.639	0.852

図-20の沖波々高超過出現率曲線と表-18の港内波高から、例えば港外で1mの波高の波は港内のブロックEでは波高が0.17mになるので、図-20の点線のように移動させる。同様にして2、3mの港外波高の点を移動させると図-20の白丸印のようになり、これらを滑らかに結べば港内波高超過出現率曲線(図中の一点鎖線)を描くことができる。これから、田後港のブロックEでは、波向NEに対し0.5m以上になる確率が約3%であることが判る。同様な操作を各波向および各ブロックについて行なえば、港内の各領域の各波向に対する波高超過出現率を求めることができる。このようにして求められる出現率は、各波向を100%としたときのものであるが、全波向を100%としたときの波高超過出現率は、各波向における超過出現率にその波向の全波向に対する出現率を掛ければ計算できる。例えば、NEの波の全方向に対する出現率は、表-1によると13.5%であるので、ブロックEではNEの波が来襲するときに波高が0.5m以上になる確率は $13.5 \times 0.03 = 0.41\%$ と求められる。他の波向に対しても同様にして波高が0.5m以上になる確率を求めて加え合わせれば、ブロックEで波高が0.5mを超過する確率を計算することができる。

田後港における各波高の超過出現率を求めると表-19-(1)~(3)のようになる。表-19-(1)は現状、(2)は5か年計画実施時(B.W. ④、⑤)の天端高は+5.0m、

表-19 全方向の波高超過出現率

(1) 現 状

(%)

ブロック	0 m 以上	0.25 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上
A	100	58.2	45.0	20.8	5.5	1.5	0.6	0
B	100	45.6	21.6	4.2	0.5	0		
C	100	43.4	21.4	4.3	0.3	0		
D	100	24.0	6.4	1.4	0			
E	100	19.5	4.5	0.5	0			
F	100	21.9	5.6	0.6	0			
G	100	20.4	4.9	0.5	0			
H	100	20.1	4.0	0.2	0			

(2) 5 か年計画実施時 (天端高 + 5.0 m)

(%)

ブロック	0 m 以上	0.25 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上
A	100	44.5	21.7	6.8	1.2	0.2	0.1	0
B	100	21.3	5.9	0.8	0			
C	100	14.5	3.4	0.2	0			
D	100	11.3	2.2	0.1	0			
E	100	8.8	1.5	0.1	0			
F	100	10.2	1.9	0.04	0			
G	100	13.6	2.9	0.1	0			
H	100	10.3	2.2	0.1	0			

(3) 5 か年計画実施時 (天端高 + 7.5 m)

(%)

ブロック	0 m 以上	0.25 m 以上	0.5 m 以上	1 m 以上	2 m 以上	3 m 以上	4 m 以上	5 m 以上
A	100	44.5	21.7	6.7	1.1	0.1	0	
B	100	21.3	5.9	0.8	0			
C	100	14.5	3.4	0.1	0			
D	100	11.3	2.2	0				
E	100	8.8	1.5	0				
F	100	10.2	1.8	0				
G	100	13.6	2.8	0				
H	100	10.3	2.1	0				

(3)は5か年計画実施時にB.W. ④, ⑤の天端高を+7.5mにかさ上げたときのものである。(1)と(2)を比べてみると, 5か年計画実施時には現状に比べて港内の各ブロックとも波高超過出現率が下がり, 港内の静穏度はかなり向上することが判る。また, (2)と(3)を比較すると, 小さい波高に対する超過率はほとんど変化しないものの, (3)では大きい波高の出現率が下がっている。これは, B.W. ④, ⑤を2.5mかさ上げたために越波が起りにくくなったためである。このように, 港内の波高超過出現率を算定しておけば, 静穏度向上のための改造計画の効果が一目瞭然であり, また静穏度を定量的に評価することができる。さらに, 表-19の波高超過出現率に365を掛ければ一年間での波高の超過日数を求めることができ, 荷役作業の可能な日数を算定する際の資料ともなる。ただし, 波高何mに対する超過出現率あるいは超過日数によって静穏度を評価するかは, その港の特性を考慮して適切な波高を選定しなければならない。

なお, 異常波浪時の港内波高も, 港内における船舶の避泊に関連して重要となる。その時の波高は, 表-16, 17を用いて次のように求めることができる。いま, 田後港における異常波浪として波向NW, 波高10m, 周期14secの波を考える。この波向では越波による波高伝達率は考慮しなくても良いので, 港口からの進入波の波高比を表-16から読み取ると, 例えばブロックのEでは, 現状で0.141, 5か年計画実施時(B.W. ④, ⑤の天端高+5.0m)では0.072となる。したがって波高は, それぞれの場合に対し, 1.41mおよび0.72mと計算することができる。

6. あとがき

本資料では, 静穏度実験において規則波と不規則波を用いた場合の実験結果を比較検討したところ, 不規則波の方が規則波に比べて優位であるという結論を得た。また, 港内静穏度を定量的に評価するための一手法として, 港内波高超過出現率および波高超過日数による方法について述べ, 具体的な手順を田後港の場合を例にとって示した。本資料が静穏度の定量的評価のための基盤作りに役立てば幸いである。

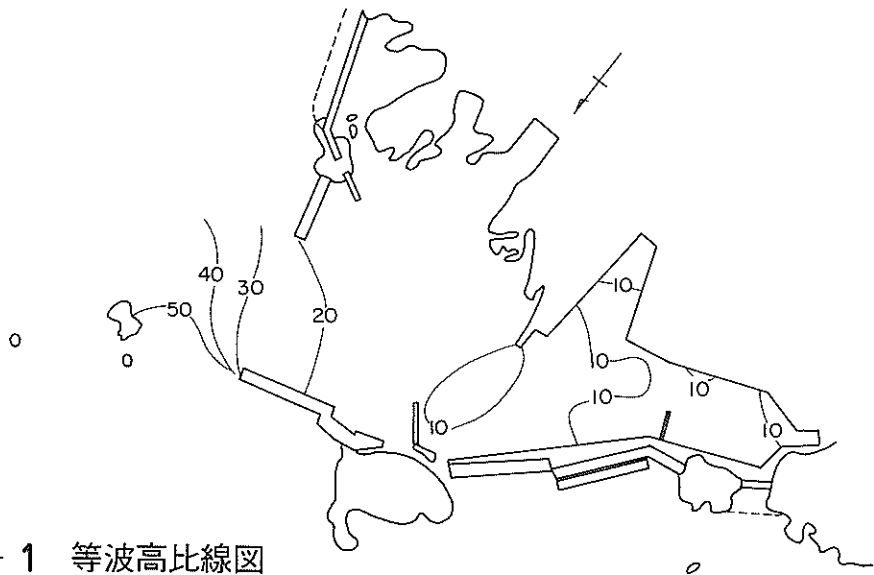
なお, 本文は波浪研究室長合田良実の指導のもとに鈴木がとりまとめたものであり, データ整理および図面作成は蜂須賀が担当した。また同研究室菊地治技官には, 電子計算機によるデータ解析に協力して頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

電子計算機は, 当研究所TOSBAC-5600を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 研究協議会(防波堤の設計法に関するワーキンググループ): 防波堤の設計法に関する調査活動とその成果について, 第27回直轄技術研究会報告資料, 1976年10月, pp.65-73.
- 2) 合田良実: 「不規則波に対する港湾構造物の設計法」講座, 第5回, 港湾, 第53巻11号, 1976年11月, pp.53-61.
- 3) たとえば, 佐藤昭二・合田良実: 海岸・港湾, 彰国社, 1972年, pp.72-77.
- 4) 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室: 田後港々内静穏度向上に関する模型実験報告, 波浪研究室資料, No.12, 1977年3月, 125p.
- 5) 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 -, 港湾技研資料, No.134, 1972年3月, 24p.
- 6) 服部典節: N港の静穏度に関する受託試験報告, 1975年12月, 港湾技術研究所(部内資料).
- 7) 合田良実・高山知司・岸良安治: 有義波高指示計の理論およびその実用化について, 港湾技研資料, No.238, 1976年6月, 12p.
- 8) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 1976年12月, 24p.
- 9) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄: 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻 第14号, 1966年9月, 134p.
- 10) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻 第4号, 1970年12月, pp.3-41.
- 11) 谷本勝利・原中裕人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男: 各種ケーン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港湾技研資料, No.246, 1976年9月, 38p.
- 12) 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室: 須磨海岸における養浜の安定性に関する移動床模型実験報告, 1977年3月.
- 13) Sorenson, T.: Model testing with irregular waves, The Dook & Harbour Authority, May, 1973.

- 14) 日本港湾コンサルタントK.K.: 鳥取港波浪調査報告, 1975年3月, 161p.
- 15) 運輸省港湾技術研究所: 波浪に関する水理模型実験, 港湾土木技術者研修用テキスト, 1975年12月, 115p.
- 16) 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室: 不規則波の発生方法と波形記録の解析法について, 波浪研究室資料, No. 12, 1976年3月, 36p.
- 17) 前出文献3), pp. 77~81.
- 18) Ippen, A.T. (Ed.): Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw - Hill, 1966, pp. 318~322.
- 19) 前出文献3), pp. 72~77.
- 20) たとえば, 合田良実・鈴木康正: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 1975年12月, 45p.
- 21) Takayama, T. and Y. Kamiyama: Diffraction of sea waves by rigid or cushion type breakwaters, Report of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 16, No. 3, Sept. 1977, pp. 3~37.
- 22) 合田良実: 防波堤の伝達波高に関する実験値の再整理について (英文), 港湾技術研究所報告, 第8巻第3号, 1969年9月, pp. 3~18.
- 23) 近藤淑郎・佐藤 功: 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第117号, 1964年, pp. 1~15.
- 24) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所: 安全港湾対策に関する防波堤の諸問題について (Ⅱ), 第14回管内工事報告会, 1976年2月, 67p.
- 25) 前出文献20)
- 26) “
- 27) 永井康平: 不規則な海の波の屈折および回折計算, 港湾技術研究所報告, 第11巻 第2号, 1976年6月, pp. 47~119.

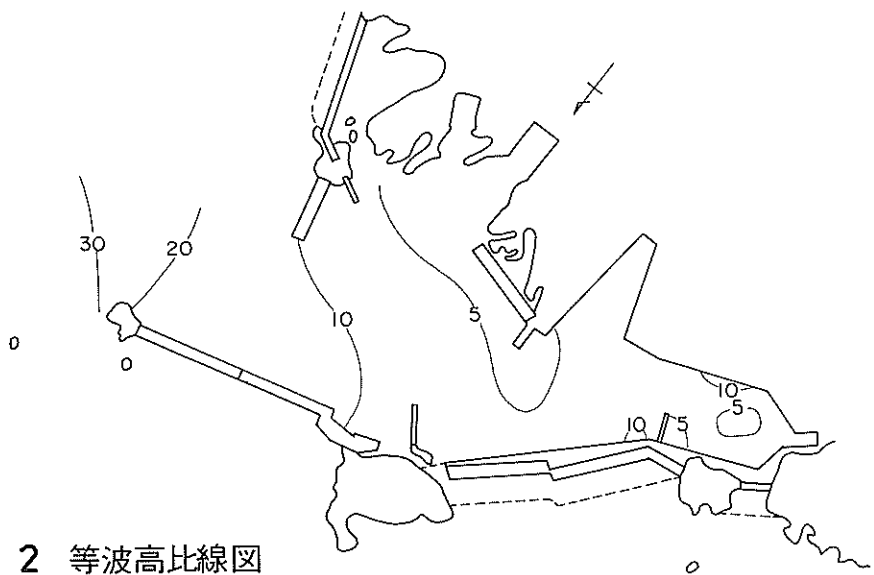


付図-1 等波高比線図

波向 NW

波①($H_{1/3}=14.3\text{cm}$, $T_{1/3}=1.67\text{sec}$)

模型形状-I



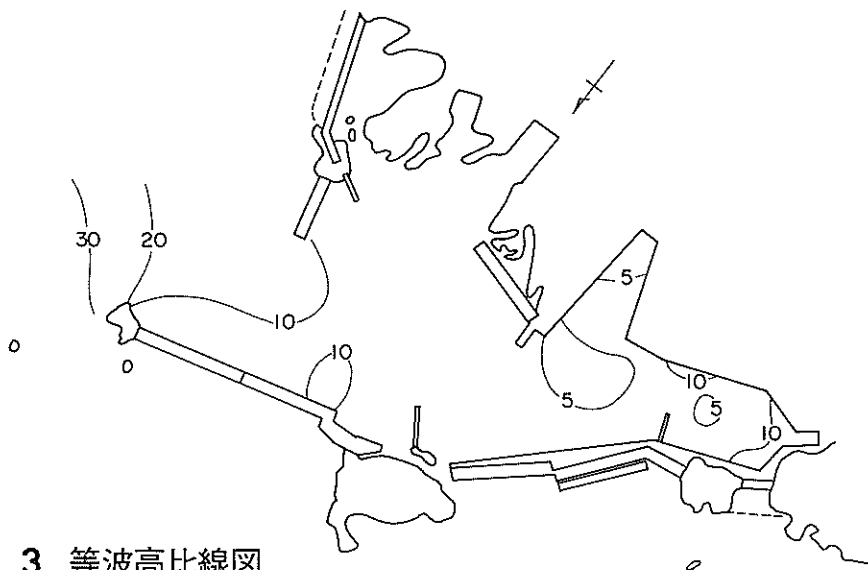
付図-2 等波高比線図

波向 NW

波①($H_{1/3}=14.3\text{cm}$, $T_{1/3}=1.67\text{sec}$)

模型形状-II



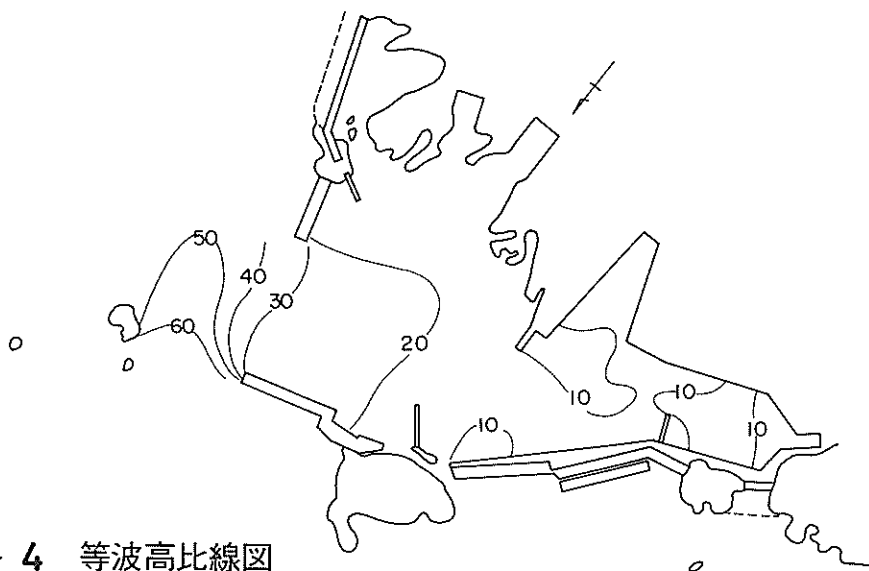


付図- 3 等波高比線図

波向 NW

波①($H_{1/3}=14.3\text{cm}$, $T_{1/3}=1.67\text{sec}$)

模型形状-III



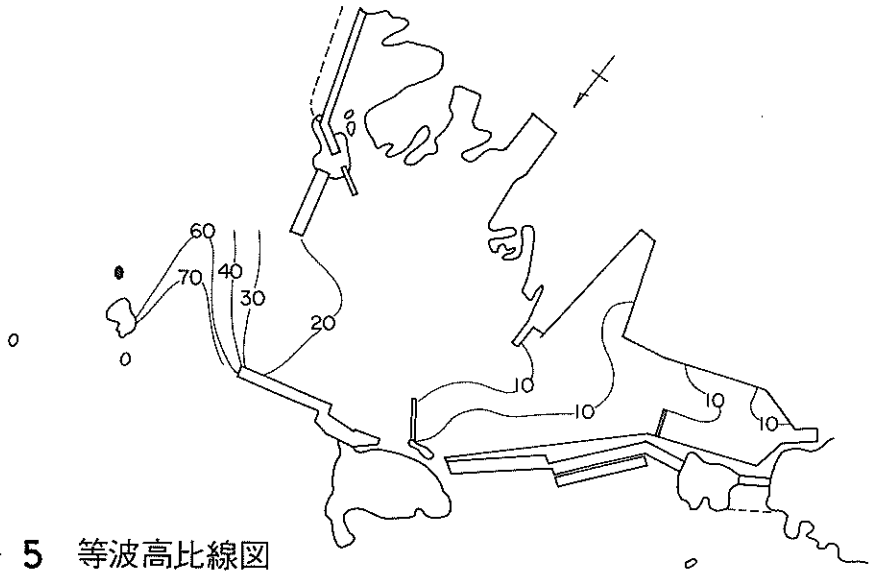
付図- 4 等波高比線図

波向 NW

波①($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{sec}$)

模型形状-I



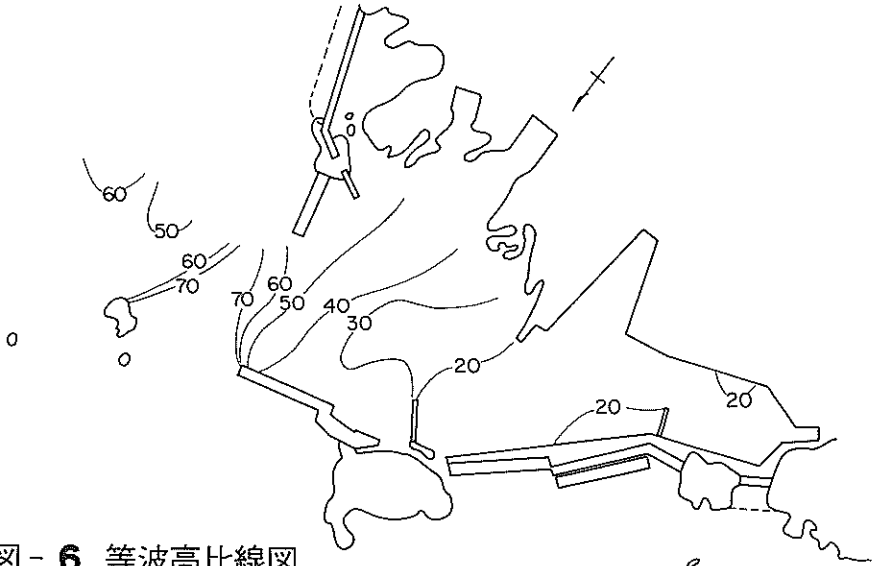


付図 - 5 等波高比線図

波向 NW

波③ ($H_{1/3}=8.6\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 - I

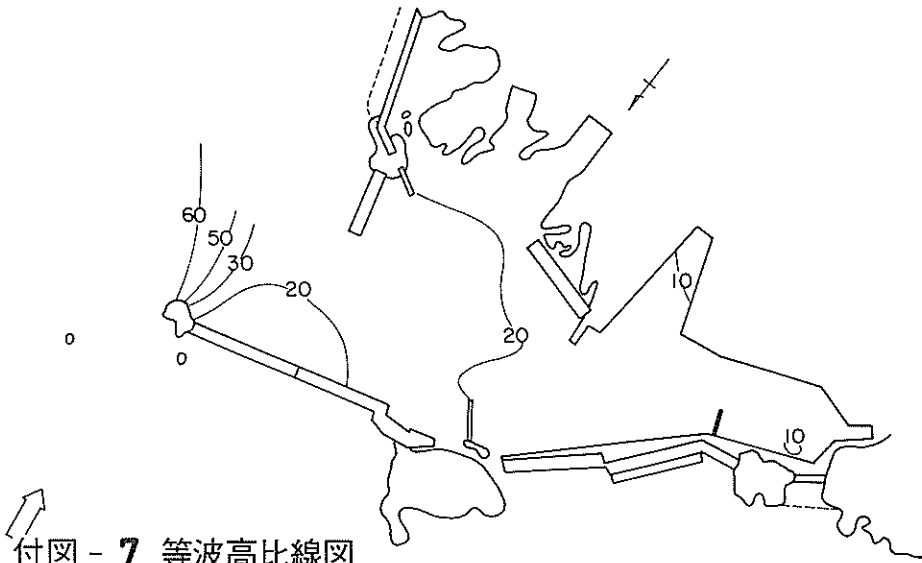


付図 - 6 等波高比線図

波向 N

波④ ($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{sec}$)

模型形状 - I

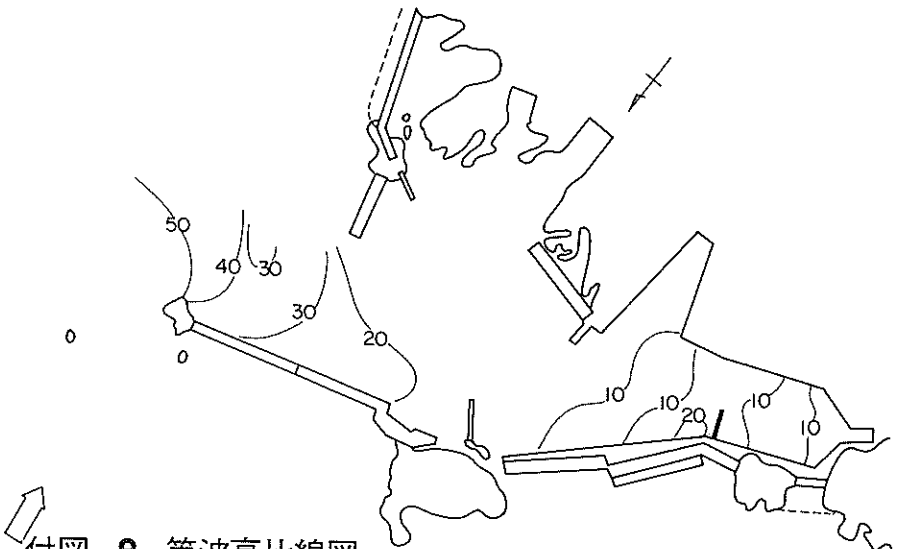


付図 - 7 等波高比線図

波向 N

波①($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{sec}$)

模型形状-II

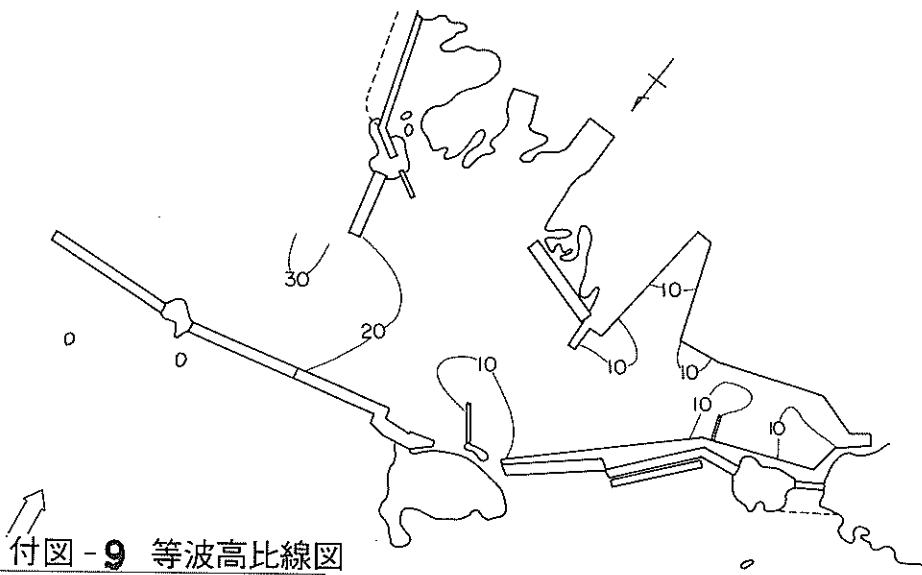


付図 - 8 等波高比線図

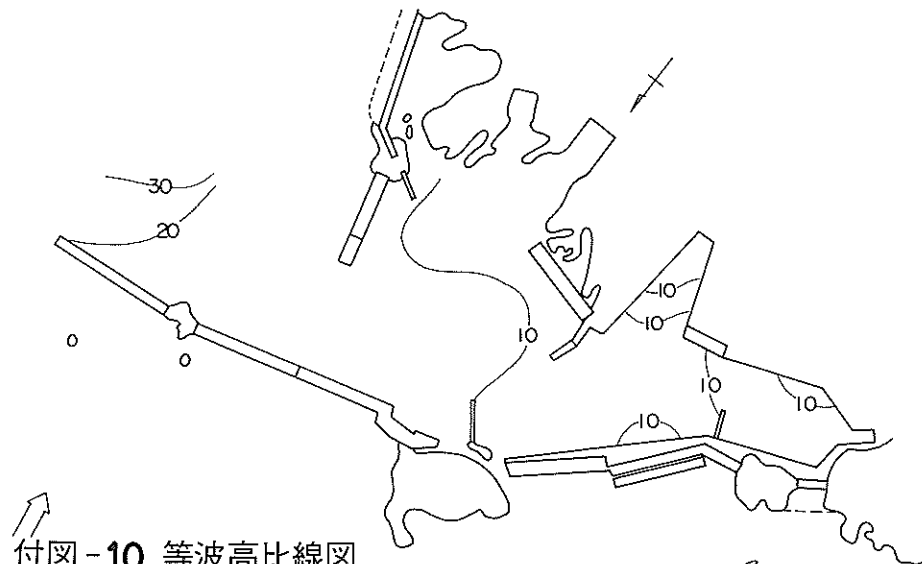
波向 N

波①($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{cm}$)

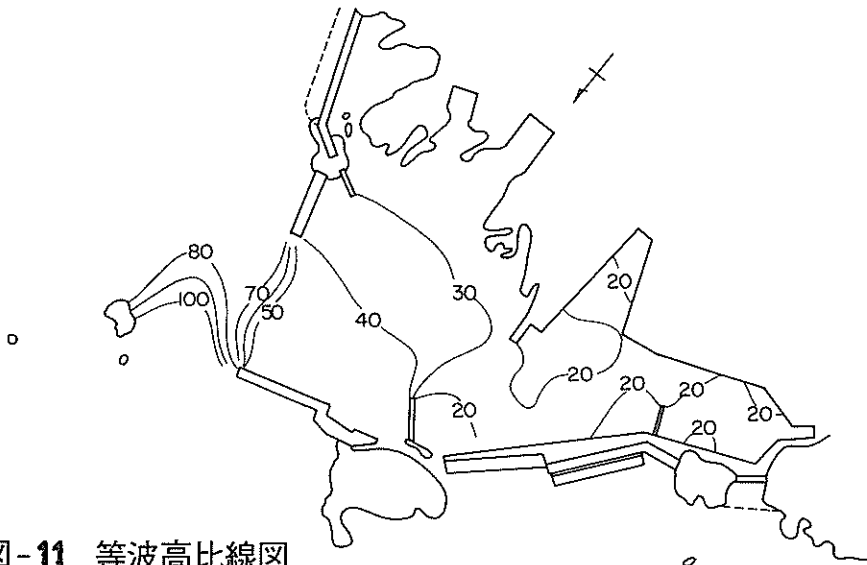
模型形状-III



付図-9 等波高比線図
 波向 N
 波①($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{cm}$)
 模型形状-IV



付図-10 等波高比線図
 波向 N
 波①($H_{1/3}=11.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.43\text{sec}$)
 模型形状-VI

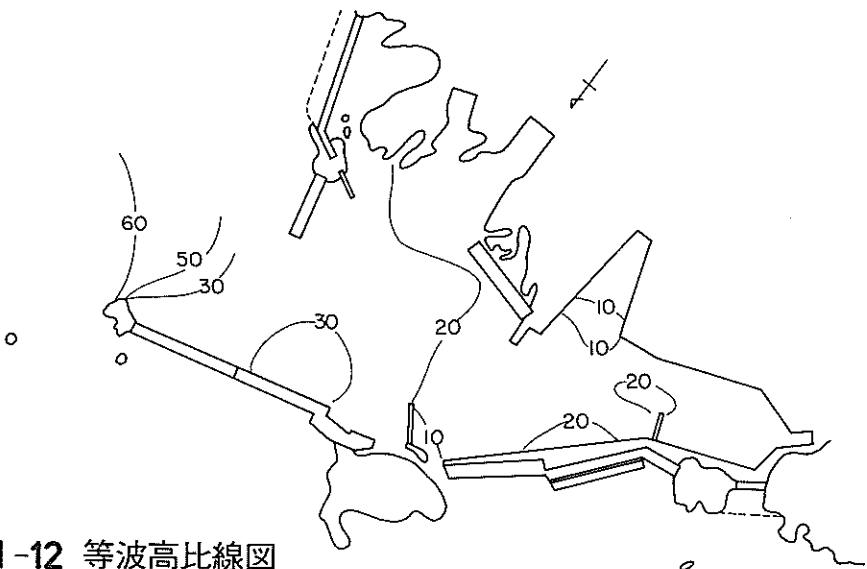


付図-11 等波高比線図

波向 N

波②($H_{1/3}=8.6\text{cm}, T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-I

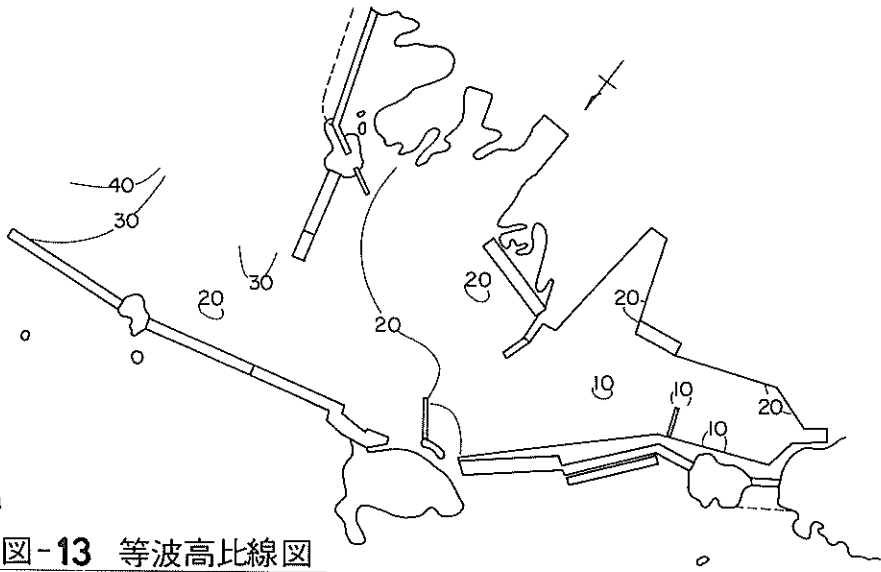


付図-12 等波高比線図

波向 N

波②($H_{1/3}=8.6\text{cm}, T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-II

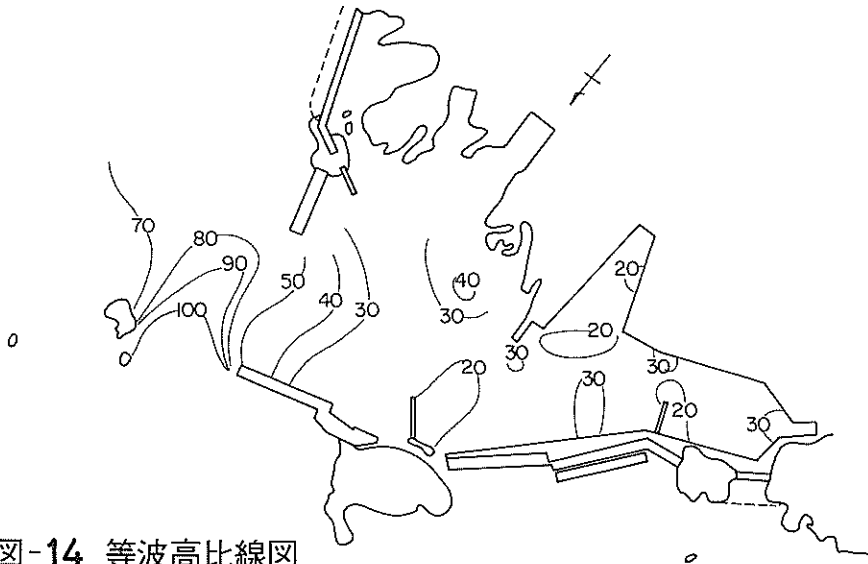


付図-13 等波高比線図

波向 N

波⑥ ($H_{1/3}=8.6\text{cm}, T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-VI

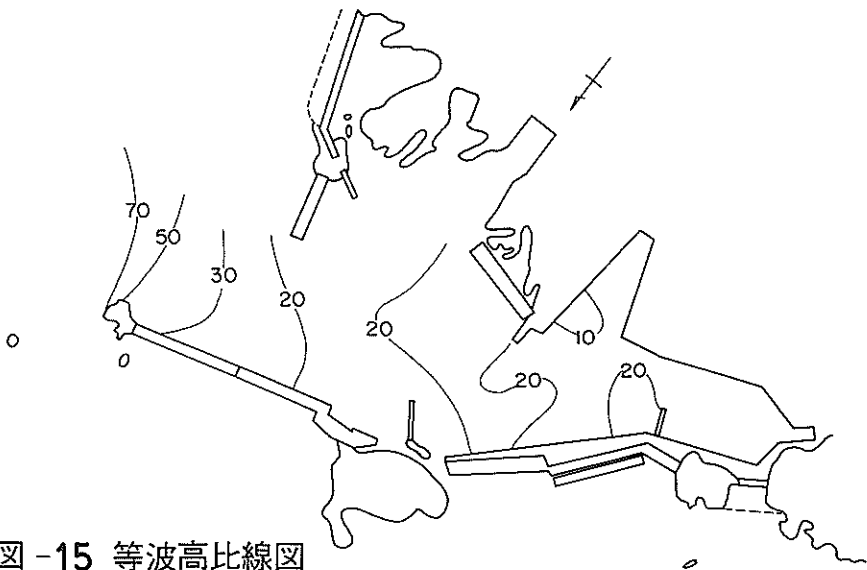


付図-14 等波高比線図

波向 N

波⑦ ($H_{1/3}=5.7\text{cm}, T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状-I

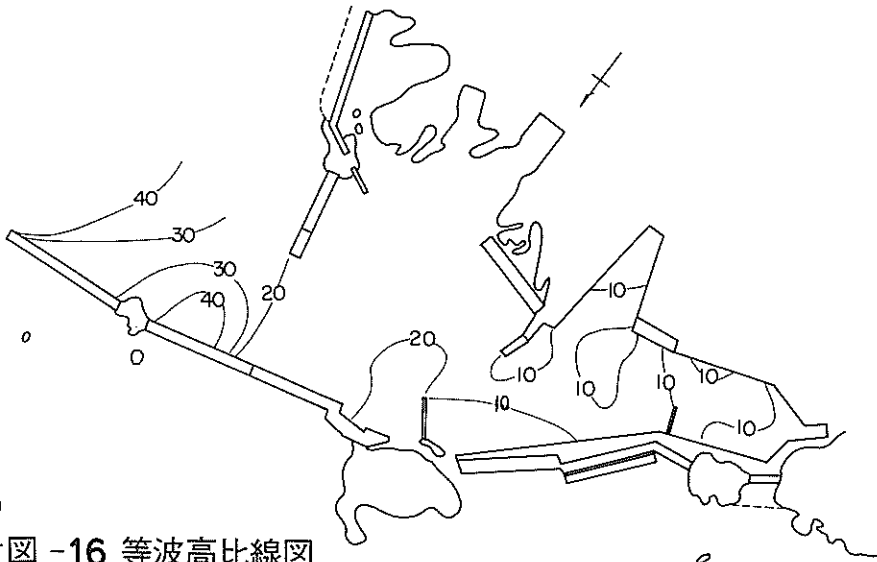


付図-15 等波高比線図

波向 N

波 ① ($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状-II

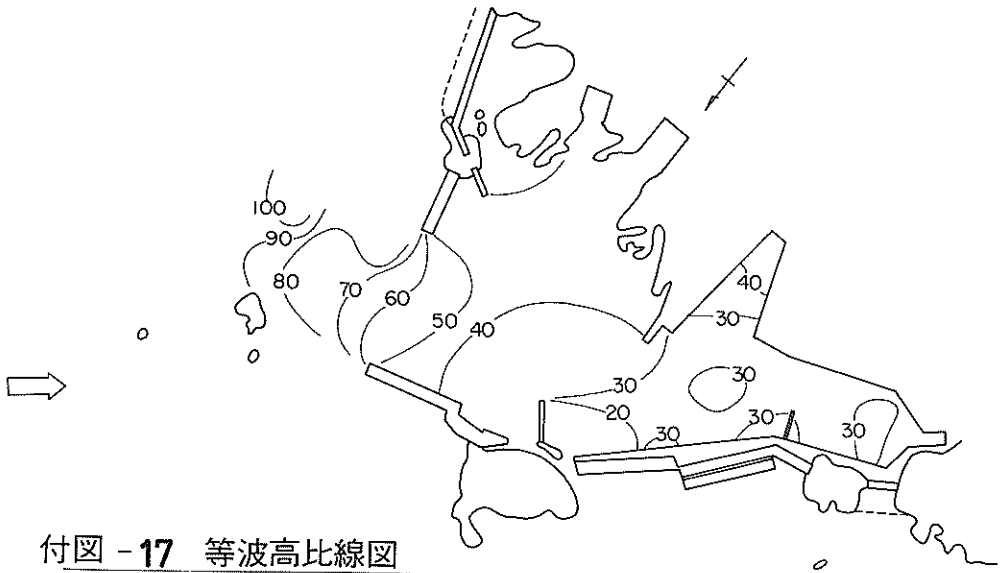


付図-16 等波高比線図

波向 N

波 ② ($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状-VI

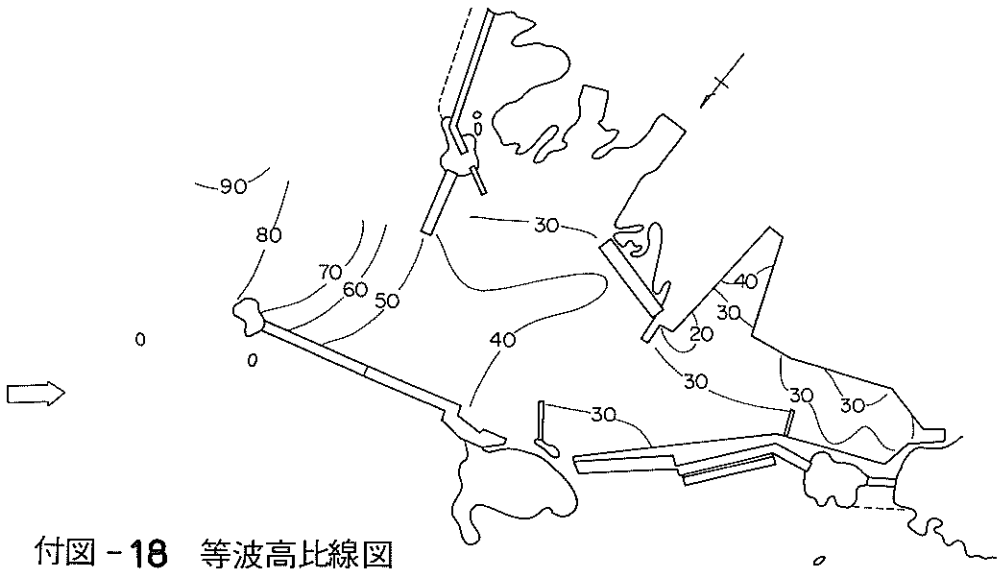


付図 - 17 等波高比線図

波向 NE

波①($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 - I

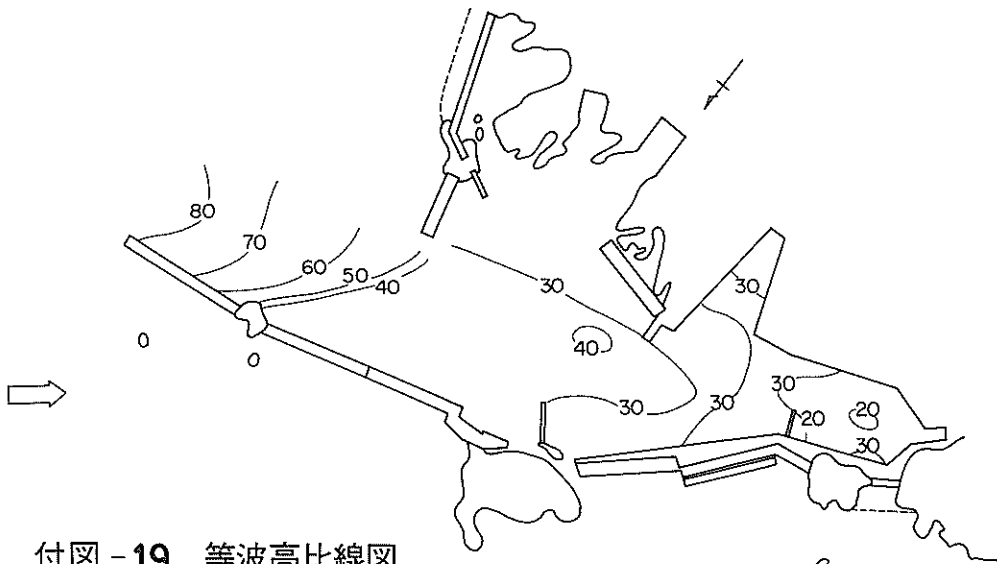


付図 - 18 等波高比線図

波向 NE

波①($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 - II

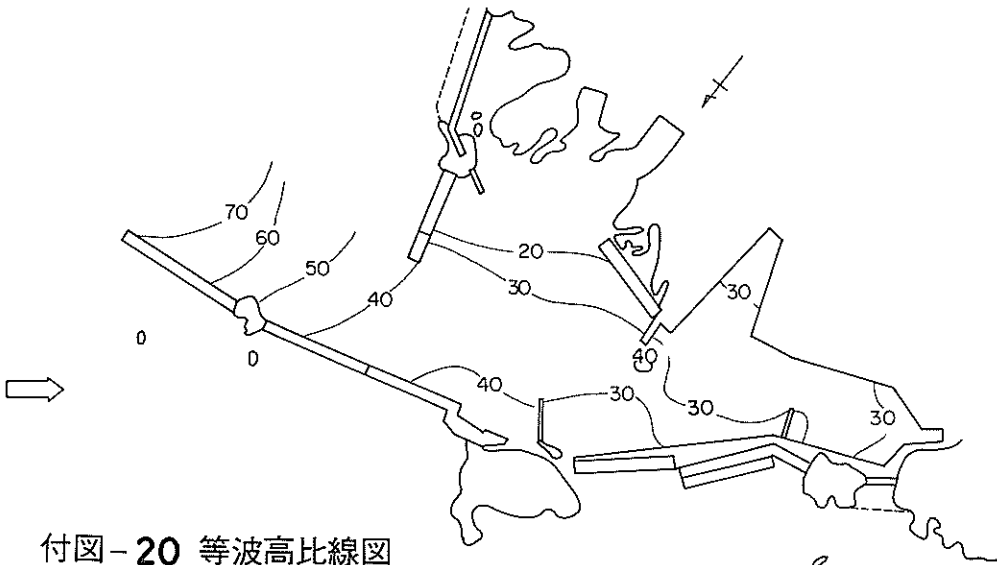


付図-19 等波高比線図

波向 NE

波④($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 -IV

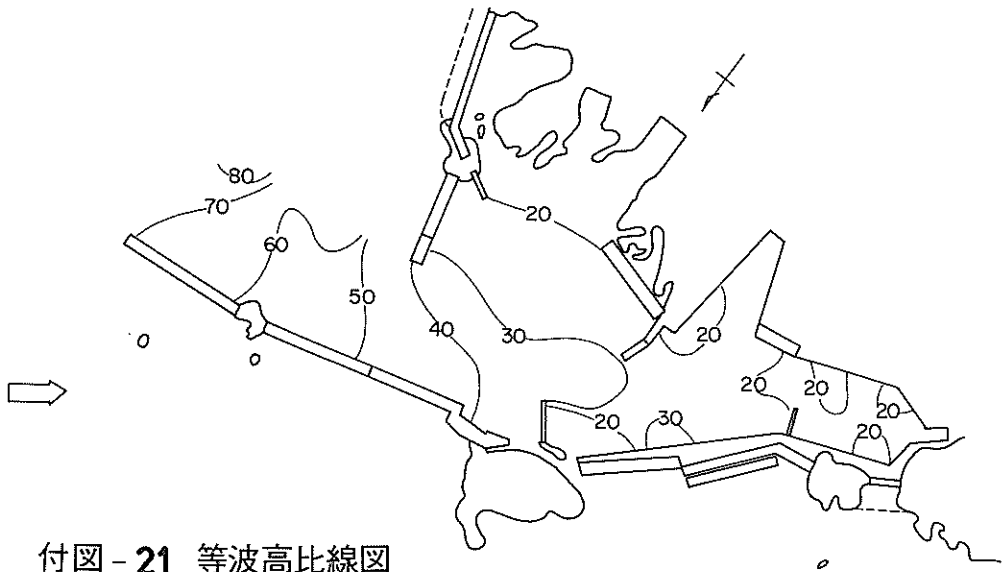


付図-20 等波高比線図

波向 NE

波④($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 -V

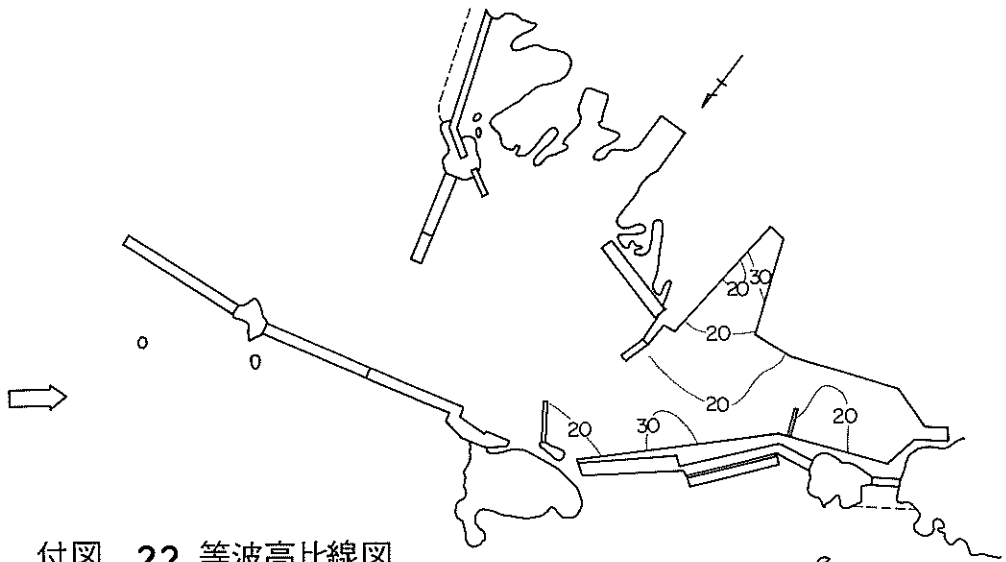


付図 - 21 等波高比線図

波向 NE

波⑨($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 -VI

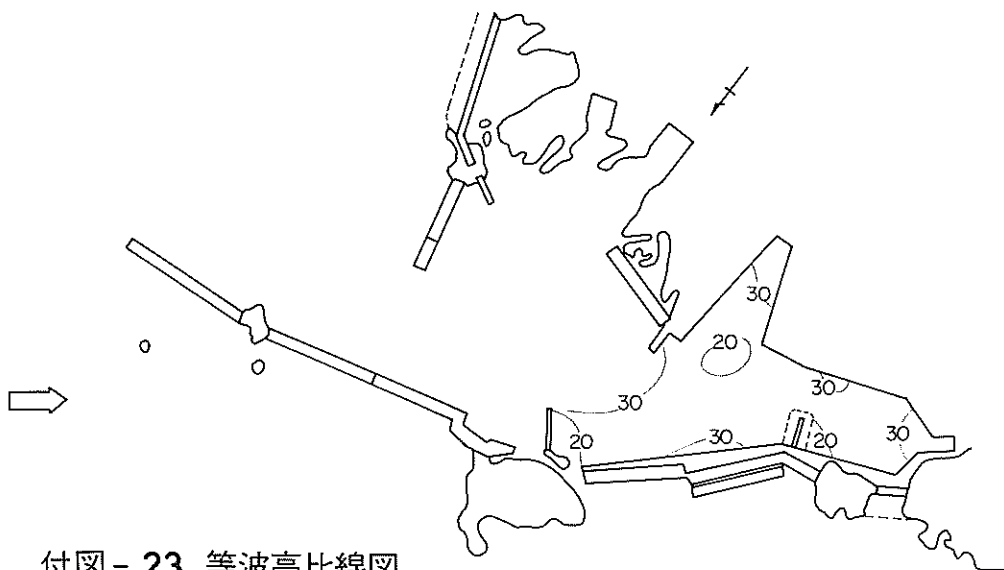


付図 - 22 等波高比線図

波向 NE

波⑨($H_{1/3}=5.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状 -VII

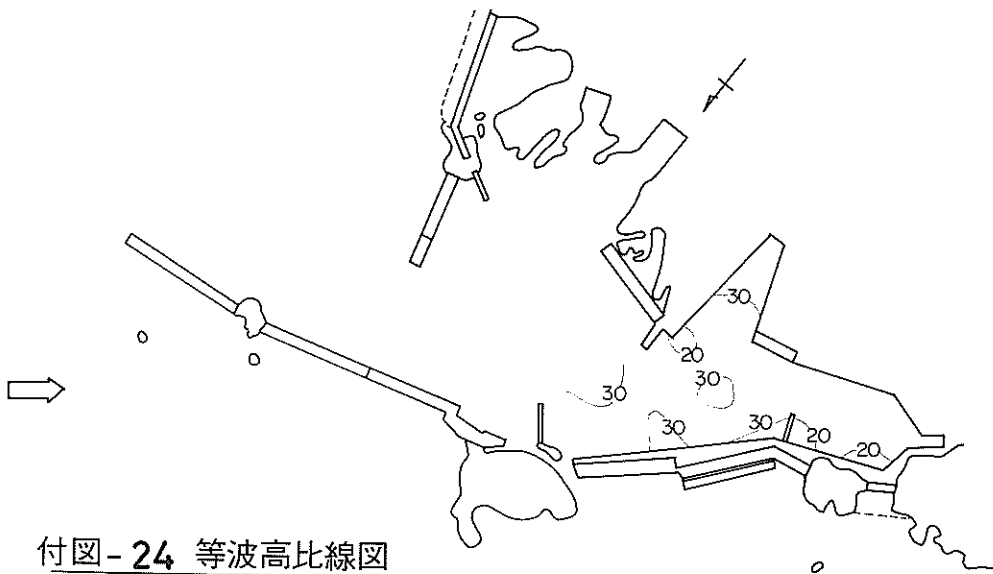


付図-23 等波高比線図

波向 NE

波⑨($H_{1/3}=5.7\text{cm}, T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-VIII

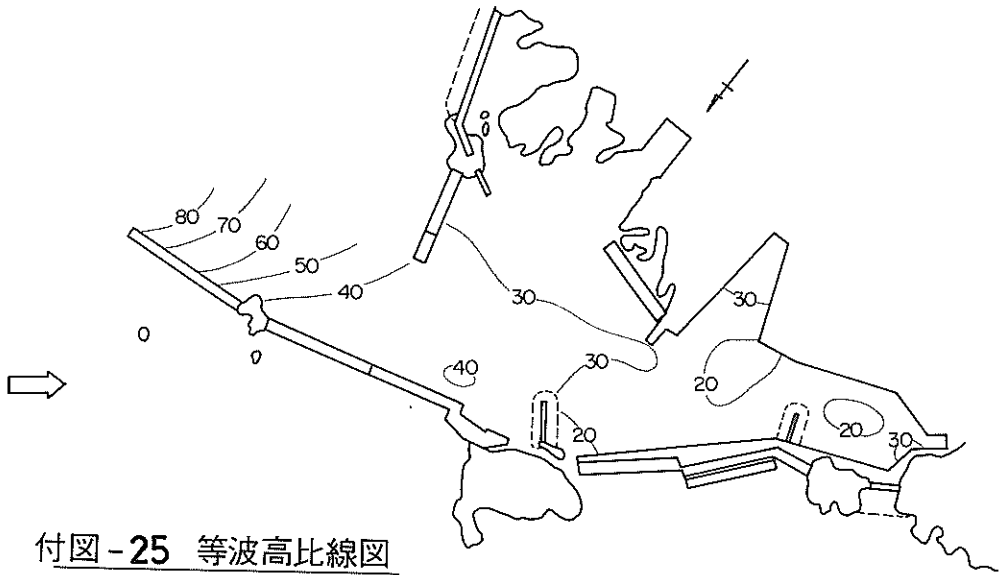


付図-24 等波高比線図

波向 NE

波⑨($H_{1/3}=5.7\text{cm}, T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-IX

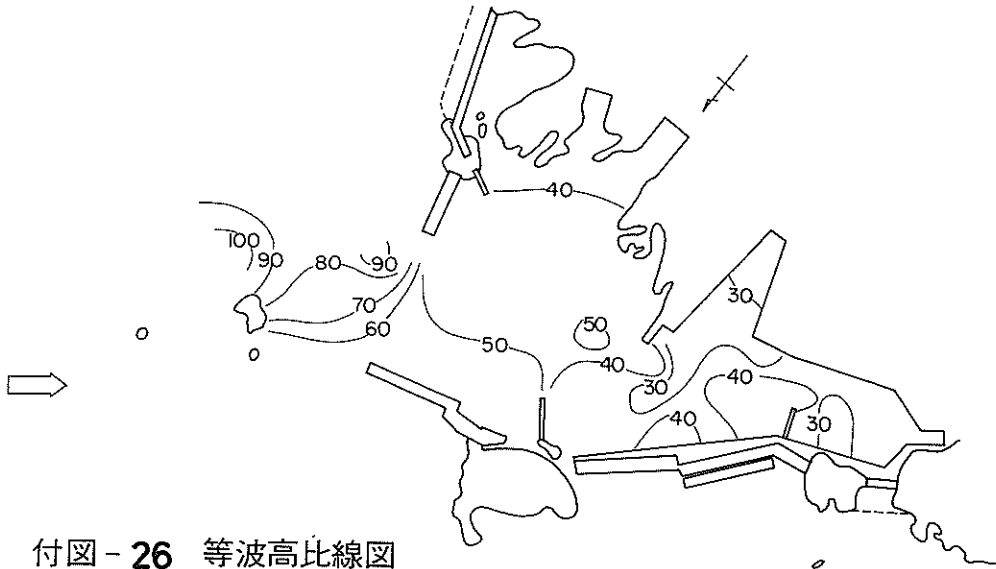


付図-25 等波高比線図

波向 NE

波㊸($H_{1/3}=57\text{cm}$, $T_{1/3}=1.20\text{sec}$)

模型形状-X

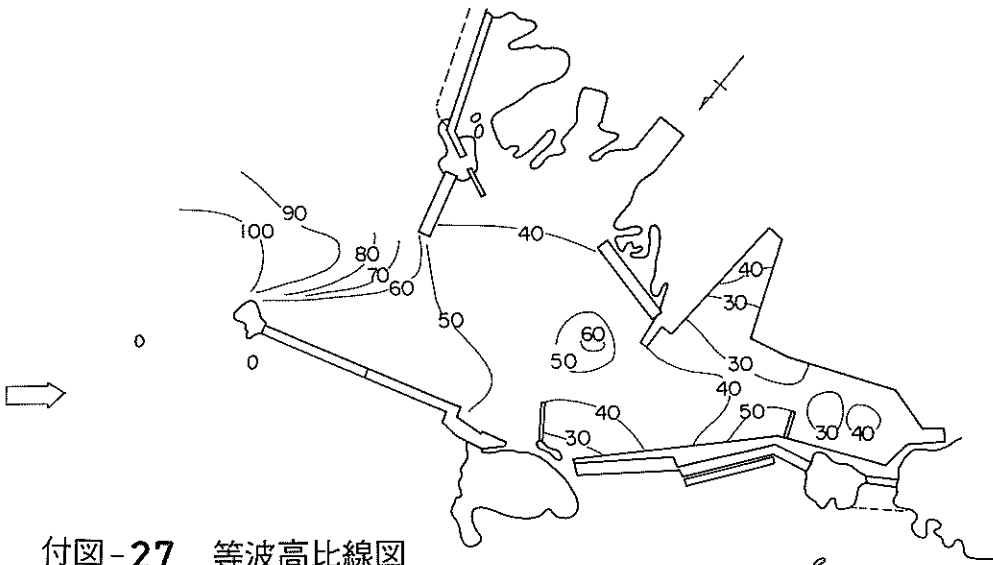


付図-26 等波高比線図

波向 NE

波㊹($H_{1/3}=29\text{cm}$, $T_{1/3}=2.96\text{sec}$)

模型形状-I

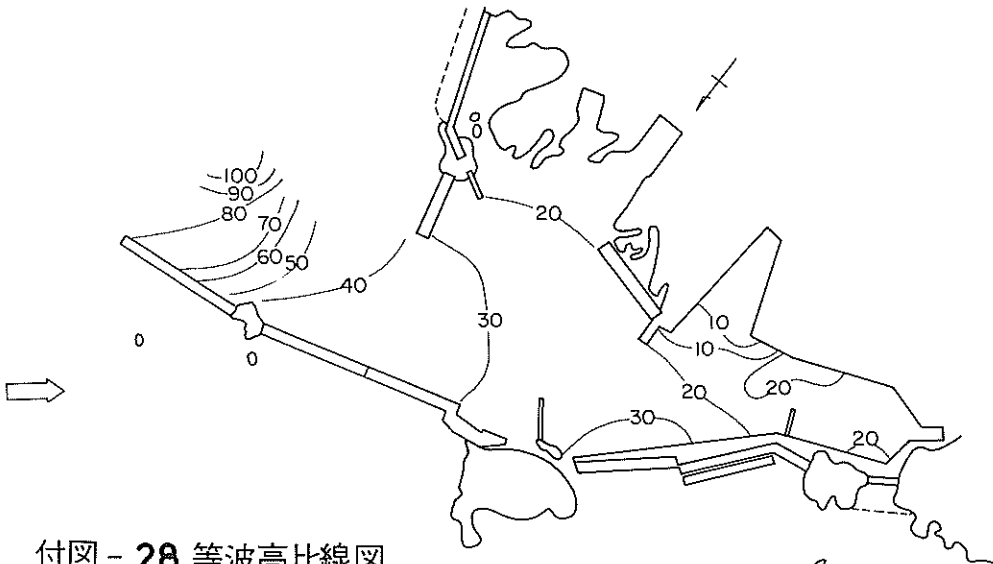


付図-27 等波高比線図

波向 NE

波⑤ ($H_{1/3}=2.9\text{cm}$, $T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状 -II

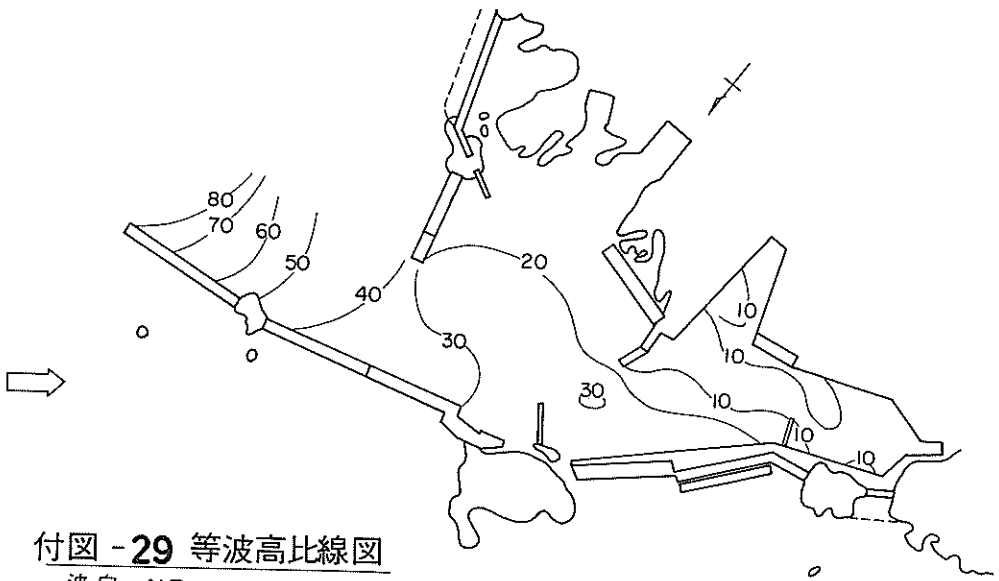


付図-28 等波高比線図

波向 NE

波⑤ ($H_{1/3}=2.9\text{cm}$, $T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状 -IV



付図 -29 等波高比線図

波向 NE

波⑥($H_{1/3}=2.9\text{cm}$, $T_{1/3}=0.96\text{sec}$)

模型形状 -VI

港 灣 技 研 資 料 No.271

1 9 7 7 · 9

編集兼發行人 運輸省港湾技術研究所

發 行 所 運輸省港湾技術研究所
 橫須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.