

港湾技研資料

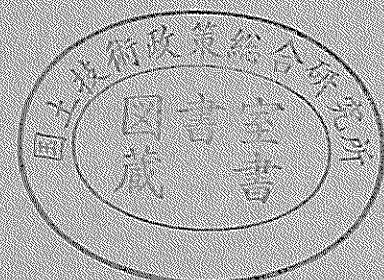
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 934 June 1999

長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定

平 石 哲 也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 観測の概要	4
2. 1 観測期間と場所	4
2. 2 観測された長周期波の特性	5
3. 長周期波の標準的なエネルギーレベル	7
4. エネルギーレベルの近似	9
5. 長周期波の発生頻度分布	11
5. 1 長周期波による荷役障害	11
5. 2 鹿島灘における長周期波の発生頻度	11
6. 港内における稼働率算定システム	14
7. まとめ	15
参考文献	16
記号表	16

Applicability of Standard Energy Spectrum Density for Long Period Waves

Tetsuya HIRAISHI*

Synopsis

Long period waves with period of 1 to about 5min sometimes cause the termination of cargo loading and unloading. The mechanism of such damage is induced by the resonance of the long period waves and the mooring system composed of the large cargo vessel and mooring ropes. The mooring ropes has been broken when the horisontal motions of vessels become large by the resonances. Several countermeasures are proposed to prevent the damage by long period waves. The extension of breakwaters, the development of new material for mooring lines, the construction of wave absorbing beach in harbor et al. are capable to be considered as the contermeasures. Meanwhile, the characteristics, especially the spectral type for long period waves become important to establish the appropriate countermeasures. In the paper, the standared energy density level of long period waves are proposed using the field data obtained in several ports. The proposed energy level is uniform in the frequency range smaller than the boundary frequency f_b .

The proposed standard long period wave frequency level is applicable to estimate the harbor tranquility for long period waves. The estimaed probability of exceedance for long period waves becomes identical to that obtained from field observation. Therefore, the proposed long period frequency level is applicable to estimate the harbor tranquility level for long period waves.

Keywords : long period wave, standard energy level, harbor tranquility for long period waves

* Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

Address :1-1,3-chome, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan

Tel:+81-468-44-5010, Fax +81-468-41-3888, E-mail:hiraishi@cc.phri.go.jp

長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定

平石 哲也*

要 旨

周期1～数分の波を長周期波と呼んでいる。長周期波が港内へ侵入すると、係船索と係留船舶で構成される振動系と共振を生じ、大きな水平運動を引き起こす。この水平運動のために、しばしば荷役が中断されたり、係留索が切断される事故が生じている。長周期波による荷役障害は、苫小牧、能代、鹿島、細島港などで報告されており、早急な対策が必要である。長周期波に対する対策としては、1) 防波堤の延伸、2) 係留索の材質改良、3) 港内の消波性能を向上させることによる長周期波の増幅防止、4) 長周期波発生時の予測による事前非難の実施、などが考えられている。これらの対策の実施にあたっては、対象となる長周期波の振幅すなわちエネルギーレベルを与える必要がある。現地観測が実施されている場合には、現地観測結果をそのまま外力として与えることも可能であるが、観測結果にはばらつきがあり、ある代表的な数値を設定しておくことが望ましい。そこで、本研究では、観測で得られたスペクトル形状を活用し、長周期波に対応する周波数スペクトルのレベルを設定した。

また、長周期波による荷役障害を定量的に表現するためには、荷役稼働率としての評価が必要である。そこで、標準的な長周期波のレベルを用いて港内における荷役稼働率を推算し、実測観測値との比較を行った。その結果、両者はよく一致し、本研究で求めた標準的なエネルギーレベルが現地に適用できることが明らかとなった。

キーワード：長周期波、荷役稼働率、現地観測、頻度分布表

* 水工部波浪研究室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1

Tel:0468-44-5010, Fax:0468-41-3888, E-mail:hiraiishi@cc.phri.go.jp

1. はじめに

台風通過後の比較的静穏な港湾において、船体のサージング動揺が大きくなり、荷役が中断されたり、係船索が切断される事故が、しばしば生じている^{1), 2)}。これは、港湾における周期数分の長周期の水位変動と船舶～係船索からなる係留系の固有振動との共振により生じるものと考えられる³⁾

長周期波の発生原因の一つとしては、不規則波を構成する成分波の非線形干渉による拘束波が有力である。ただし、砕波帯では砕波点の移動による長周期波が発生する⁵⁾。また、港口部における散乱によって、港内と港外へ向かう自由進行波が発生する⁶⁾。さらに、低気圧に伴う水面変動によっても自由進行長波が発生する。したがって、港外の沖合海域では自由進行波と拘束波が混在していると考えられることができる。

ここで、沖合の拘束波による港内における自由進行波的な重複波の増幅率を求めると、それは沖合の波をすべて自由進行長波と仮定して増幅計算をしたものと比較して、その振幅はほとんど変化しない⁷⁾ので、港外の波をすべて自由進行波として計算しても近似的には精度のよい解が得られる。なお、永井ら⁸⁾の現地観測結果によれば、沖合における長周期波に占める拘束波の割合は、荒天時に約3割で、波高が小さいときには、拘束波の占める割合は1割以下である。したがって、近似的には、沖合における長周期波をほぼ自由波とみなしても港内の振幅計算には支障が現れないことになる。ただし波向については、拘束波は成分波と同一であるが、自由波は規定できない。しかしながら、拘束波から変化した自由波成分は拘束波と同じ向きを有するので、その進行方向は近似的には短周期波と同一であるものと考えられる。

沿岸から長周期波が反射されると、その進行方向は入射する長周期波と逆になる。しかし、砂浜では長周期波のエネルギーは3割近く減衰すると言われており⁹⁾、すべてのエネルギーが反射されて沖へ向かうわけではない。そこで、長周期波の主なエネルギーの進行方向は、沖合いから入射する長周期波によって代表されるものと考えた。

一方、長周期波に対する対策としては、防波堤の延長や波除堤による長周期波の侵入防止、係船索の固有振動を変えることによる共振の防止、港内の砂浜や干潟造成による港内反射率の低減による増幅の防止、長周期波の予測による係留時期の調整などが考えられている¹⁰⁾。こ

れらの対策工法の策定にあたっては外力となる長周期波を考慮しなければならない。このとき、設計外力としては観測された長周期波を与えればよいが、現地観測から得られる長周期波の特性は観測場所や期間によって変化し、スペクトル形として汎用性があり、かつ信頼できるものが得られていない。そこで本研究では、連続的に波浪観測がなされている秋田県能代港、茨城県常陸那珂、鹿島港および沖縄県那覇港の沖合における波浪観測データから長周期波を抽出し、汎用性のある長周期波成分を含んだスペクトル形を得ることを目的とした。また、長周期波に対する港内の稼働率を算定するために長周期波の現地観測データから得られる港内の荷役稼働率と、推定したスペクトルを用いて算出した荷役稼働率を比較して、本研究で示した長周期波のエネルギーレベルの適用性を検討した。

2. 観測の概要

2.1 観測期間と場所

表-1に本研究で用いた観測データの取得位置と期間をまとめる。表中の'水深'は波高計の設置水深で、能代および那覇港では最も沖側の観測点を用い、常陸那珂では、水深の異なる沖側2点でのデータを用いた。図-1は鹿島港および常陸那珂港における設置点の位置図の例である。なお、図-2に示すように鹿島港では港外(ST.0)と港内の複数点(ST.1～4)で同時観測を行っている。

表-1の'観測時間'は、1ケースあたりのデータ長を示し、たとえば'20min/2hr.'であれば、毎偶数時の前後10min間連続して観測していることを示す。鹿島港では、1ケースあたり59min連続観測をし、1minのインターバルを記録のために取っている。

長周期波の抽出にあたっては、まず連続した波形記録から、高速フーリエ変換法で全周波数範囲における周波数スペクトルを解析した。次に、スペクトルを短周期波と長周期波の境界となる周波数 f_b より高い周波数範囲と低い周波数範囲に分割し、それぞれから逆フーリエ変換法を用いて短周期波と長周期波の波形を再構成する。なお、境界周波数 f_b は、スペクトル形に応じて $1/20$ と $1/30(1/s)$ を用いている。再構成された波形をゼロアップクロス法で解析すれば、短周期波の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、長周期波の有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ 等の統計量が求められる。

表-1 観測地点と期間

港名	水深 (m)	期 間	観測時間
能代	25	1994.1.29-2.20	20min/2hr
常陸那珂	30, 24	1994.9.17- 1996.4.17	20min/2hr
鹿島	23-9	1996.9.11-11.11	59min/1hr
那覇	50	1995.3.3-3.5	20min/1hr

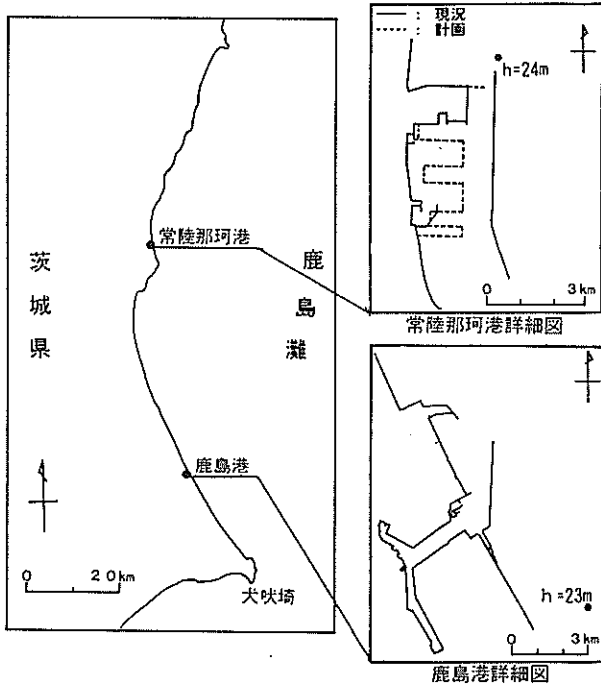


図-1 鹿島灘における観測地点

長周期波の生成要因の一つとなる波群に伴う拘束波形は、短周期波形から Longuet-Higgins and Stewart¹¹⁾にしたがって次式で推算し、同様に有義波高 $H_{d1/3}$ と周期 $T_{d1/3}$ を整理した。長周期の水位変動 η_i は次式で計算できる;

$$\eta_i = -\frac{S_x}{\rho(g h - C_g)^2} \quad (1)$$

$$S_x = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{2C_g}{C} - \frac{1}{2} \right)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 h : 水深、 a : 短周期波の片振幅、

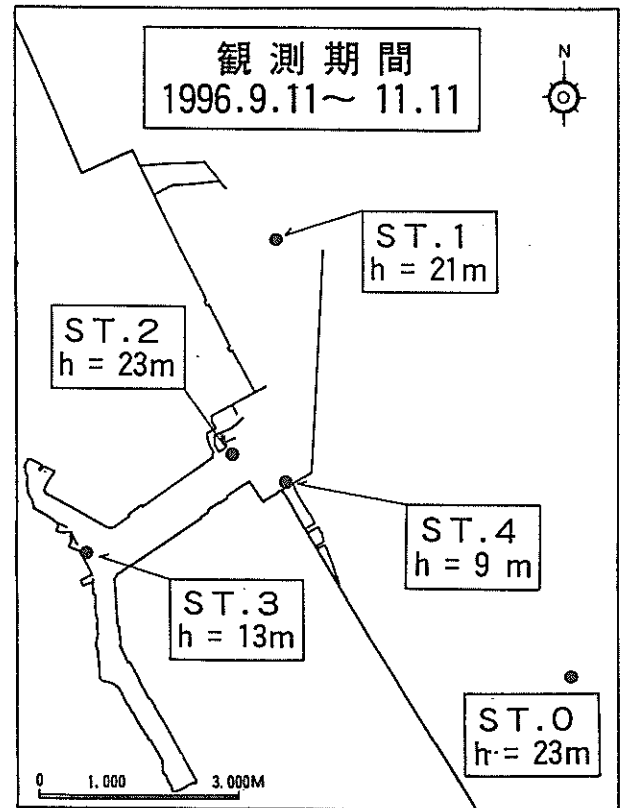


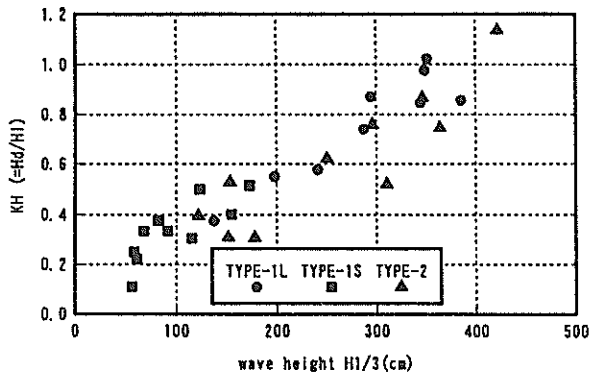
図-2 鹿島湾内における観測点

g : 重力加速度、 C : 波速および C_g : 群速度である。さらに、拘束波形からFFT (高速フーリエ変換) を用いて拘束波の周波数スペクトルを計算した。

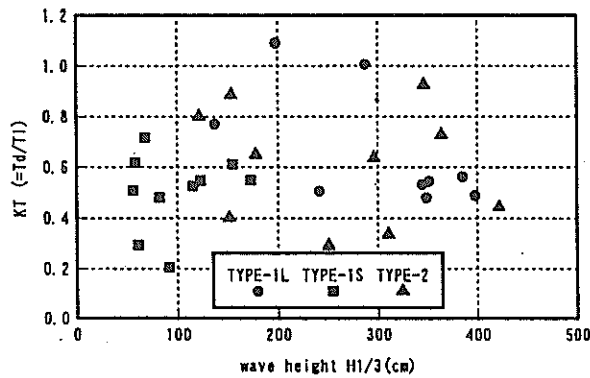
2.2 観測された長周期波の特性

港湾で観測された長周期波がすべて波群に伴われる拘束波からなっているのであれば、常時の港湾波浪観測網¹²⁾から得られる短周期波の波形記録から理論 (Longuet-Higgins and Stewart¹¹⁾, Sand¹³⁾ など) 的に推定できる。しかし、自由進行波となる沿岸からの反射波や沖合の低気圧によって生じる擾乱の影響が大きい場合には非線形干渉理論からだけでは港外の長周期波を説明できない。永井ら⁸⁾ は、非線形核関数理論を用いて合成波形に含まれる拘束波高と自由進行波を比較し、沖合の長周期波には拘束波では説明できないエネルギーの割合が多く含まれていることを明らかにしている。

ここでは、もっとも単純に観測波形から換算した拘束波の有義波高 $H_{d1/3}$ および有義波周期 $T_{d1/3}$ を求め、観測長周期波に占める割合を検討した。図-3は能代港における理論拘束波と実際に観測された長周期波の波高比 KH と周期比 KT を示したものである。横軸は短周期波高 $H_{1/3}$ である。 $H_{1/3}$ が小さい場合には KH は小さく0



(1) 波高比 K_H



(2) 周期比 K_T

図-3 長周期波の観測および理論波高・周期の比較

に近いが、 $H1/3$ が 300cm 以上になると K_H は 1 とみなすことができる。したがって、波高だけを比較すると、高波浪時には長周期波に占める拘束波の割合が大きくなっていることがわかる。しかしながら、 K_T は大きくばらついており、必ずしも拘束波周期と観測長周期波周期は一致せず、両者の周期特性が強い相関を持つとは言えない。図中のタイプ分類については後述する。

図-4 は、 K_H が 1 に近い場合のケースについて拘束波形と観測長周期波形のコヒーレンス（上段）とフェイズ（下段）を計算したものである。コヒーレンスは $f=10^0$ (1/s) 付近では 0.4 以上になっており相互相関は高いが、 $10^0 < f < 10^1$ では 0 から 0.6 まで大きく変動し、全周波数範囲で相関が高いとは言えない。フェイズは 0 を中心に大きく変動しており、位相が逆転している範囲もある。したがって、波形の比較からは現地における長周期波の要因を拘束波だけに限定することは困難である。

図-5 は、鹿島港内の多点観測結果から港内の K_H の変化を調べたものである。比較的 $H1/3$ が高いケースであるが港外 (ST.0) の K_H は 0.3 程度で、沖合長周期波の生成要因は波群拘束波だけではないことがわかる。なお、港外では K_H は 0.3 であっても、港内の ST.4、ST.2 およ

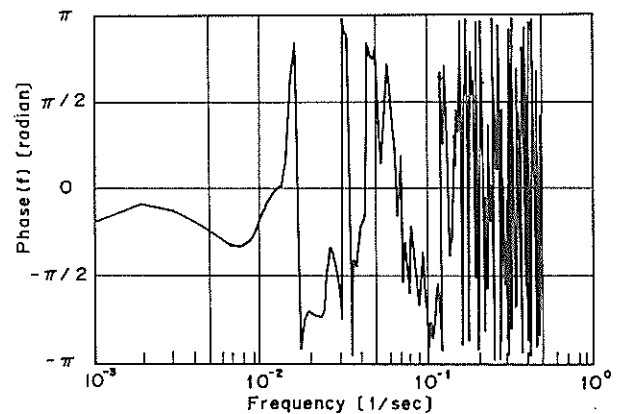
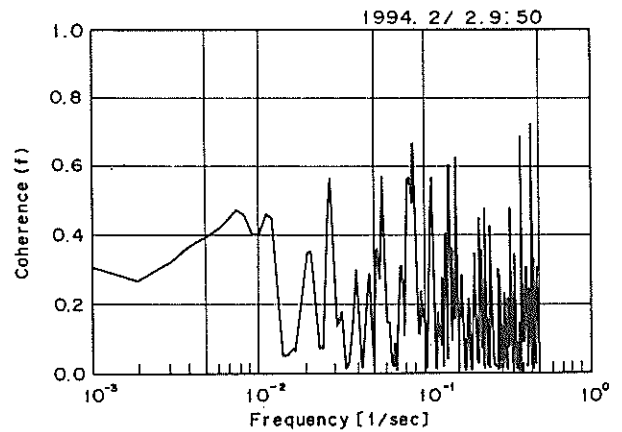


図-4 拘束波形と観測長周期波形のコヒーレンスとフェイズ

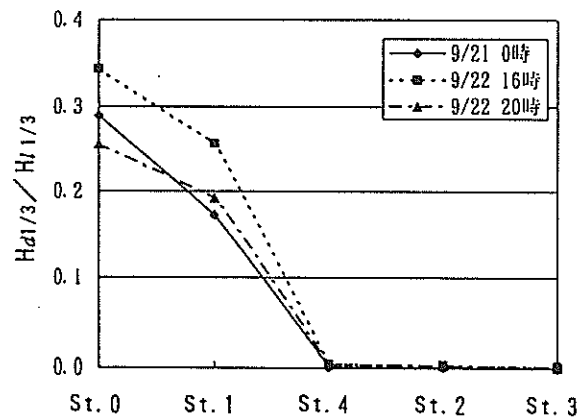


図-5 鹿島港内における拘束波高比の変化

び ST.3 では K_H は 0 に近く、港内では短周期波のエネルギーが減衰してしまい拘束波としての長周期波は存在せず、港内で増幅された長周期波ならびに港外から侵入する自由長周期波のみから成り立っていると考えられる。

3. 長周期波の標準的なエネルギーレベル

上述の考察から、港外では自由進行長波の割合が大きく、理論拘束波だけでは長周期波を表せず、観測値から長周期波の標準的なエネルギー密度を求める必要があることがわかる。そこで、まず能代港の264ケースの観測スペクトルを、長周期波側のスペクトル形状に従って分類した。図-6は、能代港で観測された264個のスペクトルを重ねて示したものである。エネルギーレベルを合わせるために、横軸を f/f_p で、縦軸を $S(f)f_p/m_0$ で無次元化して表している。ここで f_p は短周期側のピーク周波数、 m_0 は周波数スペクトルから求められる波の全エネルギーである。短周期側のピーク周辺のスペクトル形状は、すべてのスペクトルについて一致しているが、長周期波側ではピークの数と発生個所にばらつきが生じており、ほぼ以下の3タイプに分けられた。

図-7にスペクトル形状の長周期波側の代表的なパターンの種類を示す。能代港では $f_b=1/20$ とした。まず、 f_b より低い周波数帯でスペクトルのピーク位置を調べると、 $0.02(1/s)$ より低い部分と高い部分に大別できた。また双方に一つずつピークを有するものがあつた。そこで、 $f_b=1/50$ として、以下のように3タイプの分類を行った。

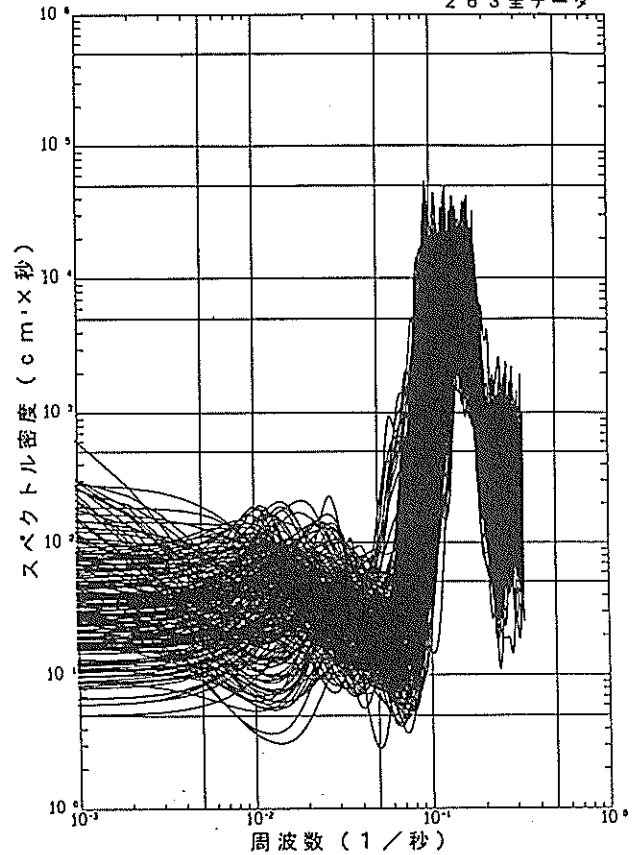


図-6 能代港における観測スペクトル

- i) 長周期波側にピークが一つ存在し、ピーク周波数は f_b より低い。これをタイプ1Lとする。
- ii) 長周期波側にピークが一つ存在し、そのピーク周波数は f_b より高い。これをタイプ1Sとする。
- iii) f_b の低周波数側と高周波数側にそれぞれ1つ、合計

の2つ長周期波のピークがあり、タイプ2とする。

各タイプ毎に、 $H/13$ が大きい順に10ケースを抽出し、スペクトル密度の平均値を計算し、代表スペクトル形を設定した。ただしエネルギー密度がばらつくので、スペクトル形から計算される総エネルギー値 m_0 から計算できる有義波高が1mとなるようにレベルを調整している。すなわち次式が成立するようにスペクトルのレベル

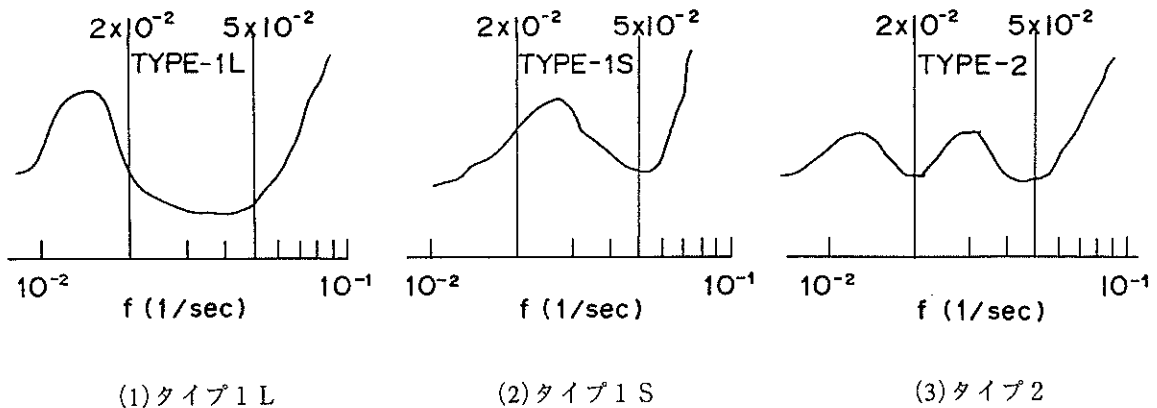
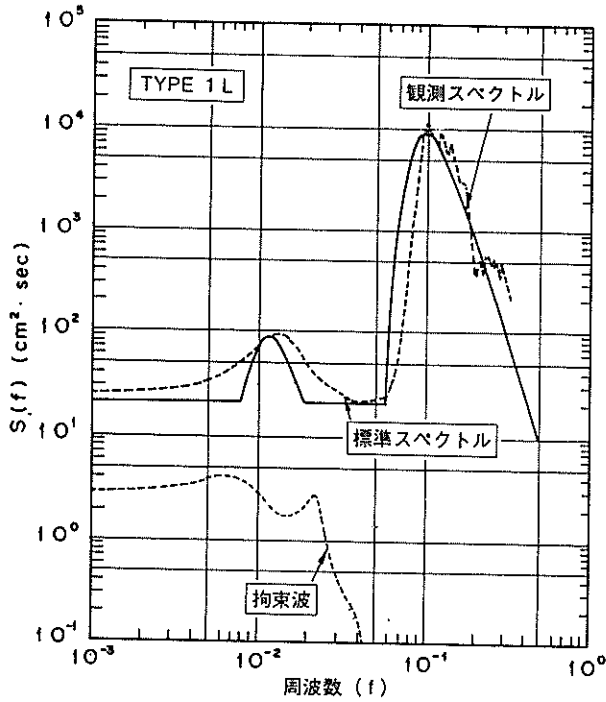
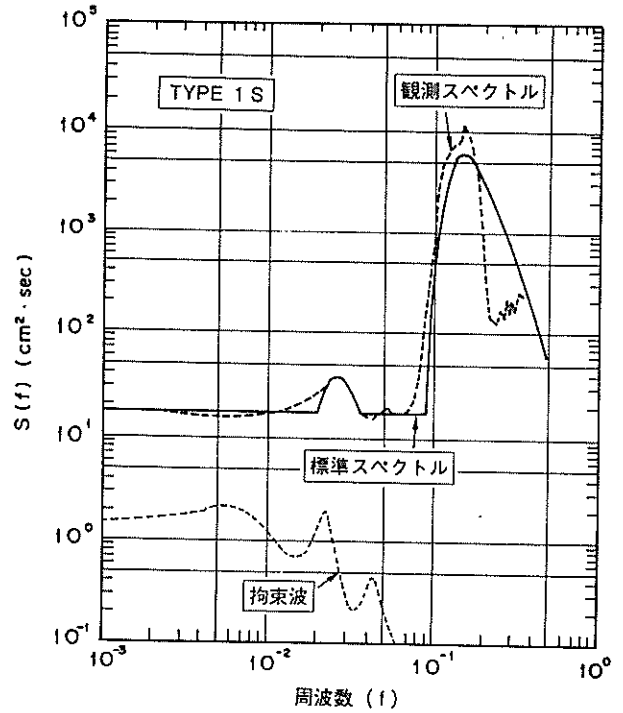


図-7 長周期波側のスペクトル形状のパターン



(1) タイプ 1 L の場合



(2) タイプ 1 S の場合

を調整している。

$$H_{1/3} = 1m = 4.0\sqrt{m_0} \quad (2)$$

図-8は、各タイプ毎の長周期レベルを示す代表観測スペクトルを示したものである。沿岸で観測される短周期波のスペクトル形は Bretschneider-光易型(BS型)で代表されているので、長周期波側も含んだスペクトル形としてもBS型を応用することにした。各タイプ毎に長周期波側のスペクトル密度を決定するにあたり、以下の3つの提案する。なお、 f_b は短周期波側と長周期波側の境界周波数で、ここでは $f_b = 5 \times 10^{-2}$ とした；

a) $f < f_b$ の短周期波側においては全タイプにおいて、以下のBS型を用いる。

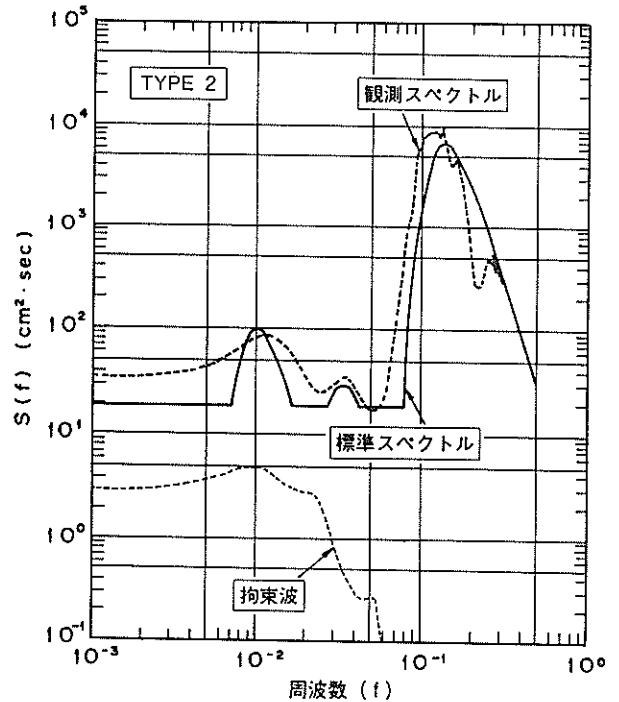
$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-3} \exp[-4.03 (T_{1/3} f)]^4 \quad (3)$$

b) $f > f_b$ の長周期波側において、

i) タイプ 1 L :

BS型の有義波高・周期の項に長周期波のそれらをあてはめて、長周期波側のスペクトル形として以下の式を用いる。

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



(3) タイプ 2 の場合

図-8 長周期波成分を含むスペクトルのタイプ

ここでは、 $H_{1/3} = \kappa_H H_{1/3}$ 、 $T_{1/3} = \kappa_T T_{1/3}$ とする。また、長周期波側では、極端にエネルギー密度が小さくなる例は無かったので、 $S(f) < 0.002S(f_b)$ の場合は、 $S(f) = 0.002S(f_b)$

(f_p)で一定とした。係数 κ_H 等は各海域毎に定まる係数で、ここでは、 $\kappa_H=1/30$ 、 $\kappa_T=8.58$ である。

ii) タイプ1S :

$S(f)$ の表示式は式(4)と同一である。ただし、 $\kappa_H=1/30$ 、 $\kappa_T=6.02$ である。また、 $S(f)<0.0015S(f_p)$ の場合に、 $S(f)=0.0015S(f_p)$ とした。

iii) タイプ2 :

$f_b'<f_c f_b$ において、 $S(f)$ を式(4)で表示する。なお、 f_b' は二つのピークを分割する境界周波数で $f_b'=5 \times 10^2$ である。ただし、 $\kappa_H=1/30$ 、 $\kappa_T=13.65$ である。また、 $S(f)<0.002S(f_p)$ の場合に、 $S(f)=0.002S(f_p)$ とする。 $f_c f_b'$ においては、 $S(f)$ を式(4)で表示する。ただし、 $\kappa_H=1/30$ 、 $\kappa_T=4.01$ である。また、 $S(f)<0.002S(f_p)$ の場合に、 $S(f)=0.002S(f_p)$ とする。

図-8では、実線で、提案した長周期波成分を含む理論スペクトルを示す。それぞれのタイプについて現地観測で得られた平均的なスペクトル形と理論式によるスペクトル形を比較している。図における比較からわかるように、短周期波側では、BS型によってピーク近傍の形状をほぼ代表させることができる。長周期波側では、観測値のなだらかな裾広がり形状は再現が困難であるが、ピークの高さはほぼ再現できており、現地の長周期波特性を各タイプ毎に表すことが可能である。細破線で示した理論拘束波のスペクトル密度は、現地観測値のそれに比較すると1オーダー程度小さくなってしまい、現地での標準形としては採用できないことがわかる。

前述の図-3(1)に各タイプの波高変化を示しており、 $H/13$ が比較的高い場合にタイプ1Lが、比較的低い場合にタイプ1Sをあてはめることができる。タイプ2は、波高レベルが両者の中間で、双方が混在している。

4. エネルギーレベルの近似

3.で示したスペクトル形では、各港およびタイプ毎に、係数 κ_H 等を設定する必要があり、実際の設計に用いる際に煩雑である。また、長周期波側のエネルギー密度の変化は緩やかで一様と仮定することができる。そこで、スペクトル形をさらに簡単な形状にした近似形を提案する。近似形では、 $f_c f_b a$ の範囲で、 $S(f)$ は一定で次式で与える。

$$S(f)=0.257H/13^2 T/13 (T/13 f_b a)^{-3} \exp[-1.03 (T/13 f_b a)]^{-4} \quad (5)$$

$f_b a$ は近似形における境界周波数であり、かつ長周期波

側のエネルギー密度を決定するもので、短周期波のピーク周波数 f_p に比例するものとして次式で設定する。

$$f_b a=(1/\alpha l) f_p \quad (6)$$

BS型スペクトルの場合には、 $f_p=1/(1.05T/13)$ として求められ、係数 αl を決めると一意的に長周期波側のスペクトル形を設定することができる。また、 αl は長周期波エネルギーと波の総エネルギーの比の平方根 R_L と相関が強い。 R_L は、次式で定義できる。

$$R_L=\sqrt{m_{0L}/m_0} \quad (7)$$

ここに、 m_0 は、波の全エネルギー、 m_{0L} は長周期波成分のエネルギーである。なお、計算では最小周波数を $f_0=1/300$ とした。

なお、合田¹⁴⁾は、実験室内において再現された波の波のスペクトルが目標値とより一致しやすくなるように次式で示す修正スペクトルを提案している。

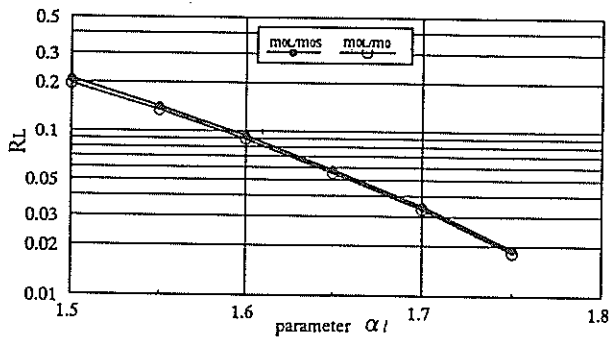
$$S(f)=0.205H/13^2 T/13^{-3} f^{-3} \exp[-0.75(T/13 f)]^{-4} \quad (8)$$

上式のスペクトルにおいては $f_p=1/1.13T/13$ の関係を有する。この式を修正BSタイプと以下に呼ぶ。

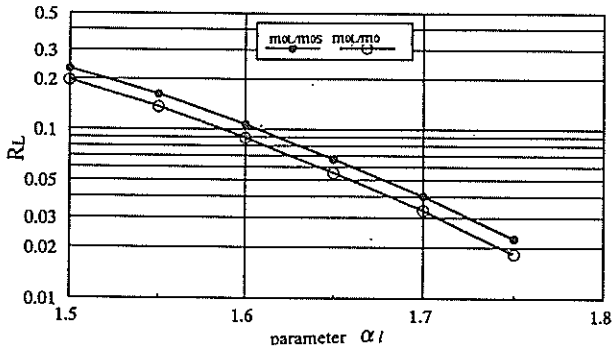
図-9は、BS型および修正BSタイプに関する R_L と αl の関係を示したものである。図-9においては、長周期波成分のエネルギー m_{0L} と短周期成分と長周期成分を含む波の総エネルギー m_0 の比とともに、短周期波成分のみしか解析されていない場合を考慮して、 m_{0L} と短周期波成分のエネルギー m_{0S} の比の平方根としてパラメーター αl を求めた場合を示している。図-9(1)に示したBS型スペクトルの場合には両者の差が小さく、どちらを用いても αl の値はほぼ一致する。図-9(2)は修正BS型に対する関係式を表す。図-9(2)の場合には両者の値に差が生じ、同一の αl に対しては、 m_{0L}/m_{0S} の方が大きい値を示す。図-9(1)と(2)を比べると、 m_{0L}/m_0 と αl の関係は同一であり、差は生じていない。

なお現地観測の値を調べると、常陸那珂港の場合 $R_L=0.04 \sim 0.1$ であり、相関図から αl はほぼ1.6~1.7とすればよいことがわかる。

図-10は、 αl に対して近似スペクトル形を示したのである。図-10(1)および(2)はそれぞれ、BS型および修正BS型に対応している。無次元スペクトル



(1) BS型の場合



(2) 修正BS型の場合

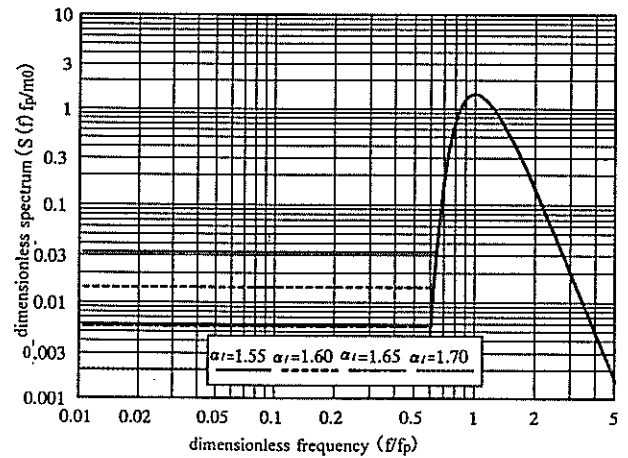
図-9 パラメーター α_l と RL の関係

で示すと、両者ともに短周期波側のスペクトル形はほぼ一致する。長周期波側の一様部分のエネルギーレベルは、 α_l が大きくなると当然低下する。BS型と修正BS型を比較すると、同じ α_l であっても、修正BS型の方が、長周期波のスペクトル密度は高くなる傾向を示す。

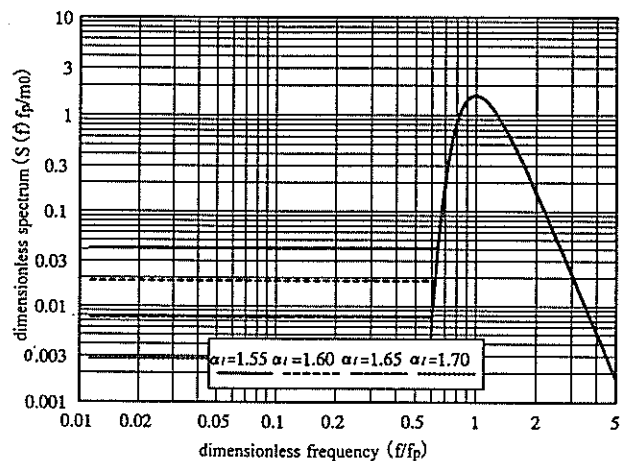
図-11は、常陸那珂港における観測スペクトルと近似形を比較したものである。周波数スペクトル形はBS型を用いており、近似形は係数 $\alpha_l=1.60, 1.65, 1.70$ について表示した。長周期波側のスペクトル密度は変化しているものの、図-11の場合は $\alpha_l=1.60 \sim 1.65$ で表される直線スペクトル形の密度レベルと一致しており、 α_l を適切に定めることにより、近似形は観測値のスペクトル形を精度よく表すことが可能であることがわかる。

図-12は、那覇港において $RL=0.031$ および 0.064 の場合について、観測値と近似形を比較したものである。両者ともに太い実線で示した近似形は、全周波数範囲にわたって細実線で表した観測値と一致しており、観測記録から得られた RL を用いて、 α_l を一義的に設定すると、 RL のレベルが異なる場合でも、現地観測スペクトルを精度よく表すことが可能である。

さらに簡単に設計スペクトルを決めるためには、各港毎に代表 α_l を一つ決めておけばよい。観測値から、 $H1/3$



(1) BS型の場合



(2) 修正BS型の場合

図-10 長周期波エネルギーレベルを一定としたスペクトル形

が300cm以上になるケースを抽出し、それらについて RL を求め、平均値として α_l を設定すると、表-2のようになる。ここでは、長周期波成分も含めた全エネルギーに対する長周期波エネルギーの比として RL を計算している。

表-2 観測値から求められる α_l

観測値	水深 (m)	α_l
那覇港	50	1.68
常陸那珂港	30	1.62
常陸那珂港	24	1.57
鹿島港	25	1.65
能代港	25	1.83

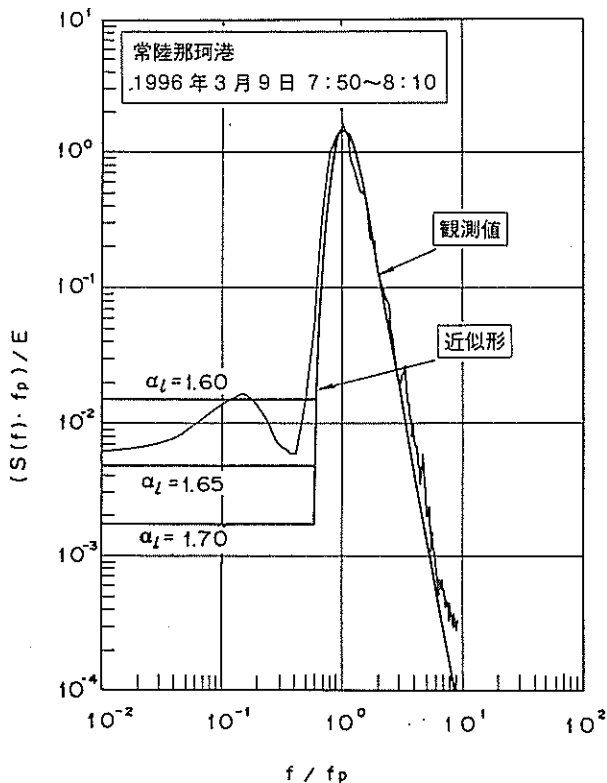


図-11 長周期波の密度レベルを一定としたスペクトル形

5. 長周期波の発生頻度分布

5.1 長周期波による荷役障害

一方、長周期波への対策が必要かどうかの判断基準となるのは船舶の荷役稼働率で、風波(短周期波)と同様に、長周期波に対する荷役稼働率を定量的に明らかにしておく必要がある。上田ら¹⁵⁾によると、長周期波によりサージ運動の振幅が顕著になり、その片方振幅が1mを越えると荷役不可能現象が生じることが報告されている。

荷役稼働率は、本来、船体動揺量で評価すべきであり港内の長周期波高と船体動揺量の関係を拡張緩勾配方程式で推定する試みを著者らは行った¹⁶⁾。その結果、長周期波高が一定であっても、排水量、係船索の初期張力等によってサージ振幅はある程度変化した。サージ振幅の限界値を1mとして、その値を超えない場合を荷役稼働率として設定する。一方、岸壁前面の波高が10cmを越えるかどうかを基準として荷役稼働率を算出すると、両者の値は概ね一致した。したがって、荷役限界波高を船体の諸条件によって変更できるように設定しておけ

ば、波高計算からだけでも港内の荷役稼働率を評価でき、どの程度の規模の対策工法が必要かを定量的に判断できる。さらに、現場で取り扱える簡易なシステムを開発しておけば、各港湾において個別の対応が可能で作業効率の上昇を図ることができる。

船舶の荷役稼働率すなわち港湾の静穏度の算定には、沖合における長周期波の年間出現頻度を基に、長周期波の港内での伝播計算を実施して、岸壁前面における長周期波高の発生頻度を求めておかなければならない。しかし、港外における長周期波の発生頻度については、長期間の解析データが無く、これまで検討されていない。そこで、比較的観測データが整備されている鹿島港と常陸那珂港を対象として、年間の長周期波出現頻度を検討した。また、長周期波の出現頻度が解析されていない港湾でも稼働率が推定できるように、従来から整理されている風波の出現頻度表から標準スペクトル型を用いて長周期波の出現頻度表を作成する手法を提案し、その妥当性を検証した。さらに、港内の任意岸壁の長周期波に対する稼働率を現場作業者が算定できるシステムを開発した。

5.2 鹿島港における長周期波の発生頻度

解析では、常陸那珂港外の水深24mおよび鹿島港外の水深23m測点の超音波波高計で観測された水位データを用い、毎偶数時20min間0.5s間隔で取得されたデータを、常陸那珂港においては1995.8.1～1997.7.31の2年間、鹿島港については1996.8.1～1997.8.31の13ヶ月間収集した。各ケースにおいて高速フーリエ変換法により、周波数スペクトル解析を実施した。周波数成分の範囲は0.0098Hzから1Hzまでである。この中から、長周期波成分(周期:30s～300s)を抽出し、逆フーリエ変換から得られた波形のゼロアップクロス法による解析から、長周期波成分の代表波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ を求め、沖合における出現頻度分布表を作成した。風波については、通常の波浪台帳作成で用いられるように、観測波形をゼロアップクロス法で解析して、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ を求めた。

図-13に観測値から直接求めた長周期波の出現頻度表を示す。これを表-Aとする。例として示した鹿島港外では、苫小牧港での荷役限界値として報告されている $H_{1/3}=10\text{cm}$ を越える回数を数えると、1112回あった。全観測値は4566回であり、荷役限界を超える頻度は、24%あることになる。港内における減衰がなければ、岸壁における荷役稼働率は短周期波に対するものよりも著しく低くなることになる。一般に、我が国の港湾は、97.5%

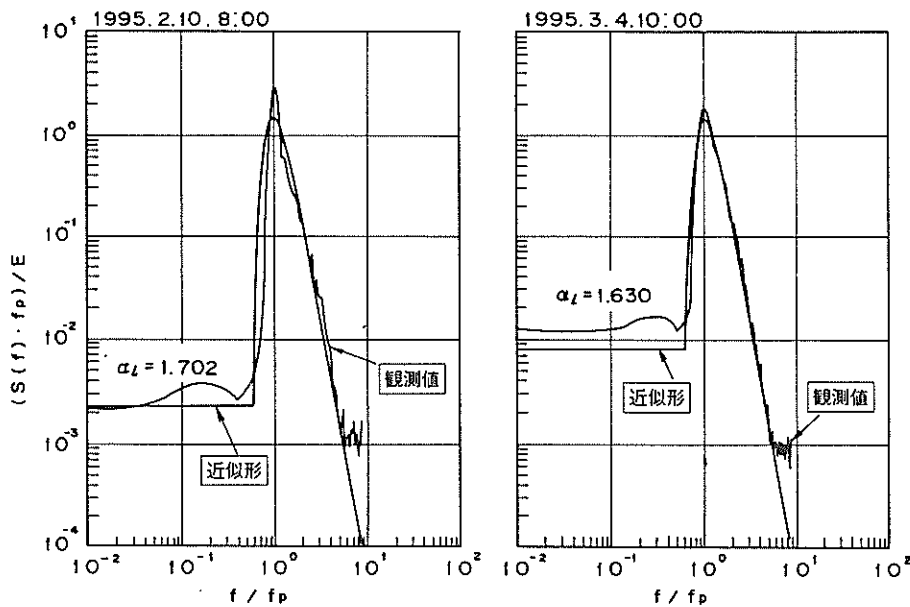


図-12 那覇港における近似値と観測値の比較

測点：鹿島港 港外

統計期間：1996年 8月 1日～1997年 8月31日22時

周期 (sec)	長周期波周期 30.0 ~ 49.9(sec)										長周期波周期 50.0 ~ 69.9(sec)								長周期波周期 70.0 ~ 121.4(sec)										
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	合計		2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	合計		4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	合計	
	波高(m)	1.9	3.9	5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.9		3.9	5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.9	17.9		5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.9	17.9			
0.00 - 0.49		1	10	26	2				39	1	17	36	5						59	1	3	1						5	
0.50 - 0.99		2	60	219	184	12			477	2	129	354	281	66	1				833	15	24	23	9					71	
1.00 - 1.49			63	198	102	14			377		107	385	344	90	1	1			938	5	15	26	14	1	1			62	
1.50 - 1.99			32	64	26	1		1	124		32	161	127	17	2				339		6	20	2	2			1	31	
2.00 - 2.49			2	29					31		4	45	7						56		2	2						4	
2.50 - 2.99				2					2			6							6										
合計		3	167	538	314	27		1	1050	3	289	997	764	173	4	1			2231	21	50	72	25	3	1	1		173	
0.50 - 0.99									1										1										
1.00 - 1.49					1		1		2		1		20	14					35	1	2	9	19	2	2			35	
1.50 - 1.99			2	3	11	7			23			19	131	102	16	5	1		274		11	40	31	14	18	5		119	
2.00 - 2.49				3	6	5			14		2	36	77	78	14	2	1		210		6	28	44	12	5	4		97	
2.50 - 2.99			1	3	4	2	1		11			14	40	25	13				92		5	8	21	7	2			43	
3.00 - 3.49					4				4			9	13	2	3				27			2	1	4				7	
3.50 - 3.99													1						1			1						1	
4.00 - 4.49					1				1																				
4.50 - 4.99						1			1																				
合計			3	9	28	14	2		56	4	79	281	221	48	7	2			640	1	24	26	116	39	27	9		302	
2.00 - 2.49													1						1			1		2	2	1		6	
2.50 - 2.99													1	10	8				19				1	10	5	3		19	
3.00 - 3.49													3	8					11				2	2	18			22	
3.50 - 3.99													1	1	1				2				1		7	1		9	
4.00 - 4.49													1	2	3	2			8						8	3		11	
4.50 - 4.99					1				1				1	1					2				1	1				2	
5.00 - 5.00																												1	
合計					1				1				2	18	21	2			43			1	5	15	41	8		70	

図-13 長周期波の観測値の出現頻度

の稼働率が確保できるように計画されており、稼働率がそれより低くなることは、所定の経済効果が得られないことを示す。

次に、短周期波の波高・周期のみの情報を用いて長周期波の発生頻度を推定することを試みる。前述のように、標準スペクトル型における短周期波成分と長周期波成分を分割し、長周期波成分のスペクトル密度を設定する周波数 f_{ba} は、パラメーター α_1 によって決める ($f_{ba} = 1/\alpha_1$)

$\times f_p$, f_p は周波数スペクトルのピーク周波数)。観測値のスペクトル形の平均値と比較して、ここでは、 $\alpha_1 = 1.65$ を採用した。長周期波側のエネルギーレベルが $H1/3$, $T1/3$ および α_1 で設定できると、長周期波成分の範囲 ($f_{min} \sim f_{ba}$) に含まれる長周期波エネルギー mOL より、 $H1/3=4(mOL)^{1/2}$ として長周期波の波高が推定できる¹⁷⁾。

風波成分の頻度分布表から間接的に求めた長周期波の出現頻度表を表-B (後述の図-19参照) とする。風

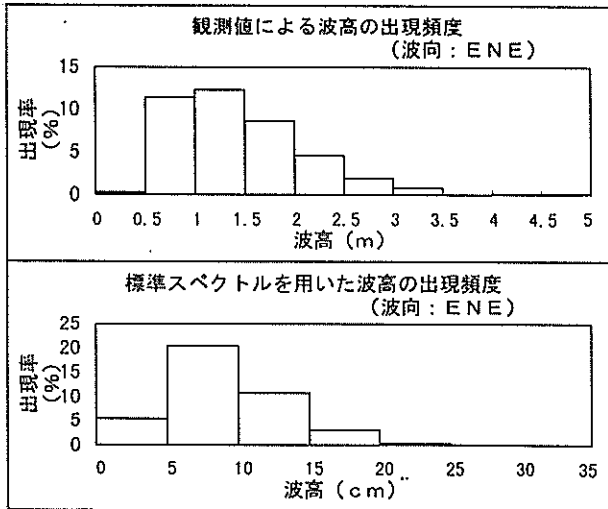


図-14 長周期波エネルギーレベルの近似値を活用して求めた長周期波頻度分布の例 (鹿島港, ENE方向)

波の頻度分布は各波向毎に作成されており、表-Bも各波向毎に求めることができる。図-14は、表-B中の鹿島港におけるENE方向の風波の頻度分布と長周期波の頻度分布をヒストグラムで示したものである。ただし、現在のところ、観測長周期波の波向は整理されていないので、比較のために表-Bについても、表-Aと同様に全方位を重ねた頻度分布表を作成した。このように、標準スペクトル形を用いると、既存の風波の発生頻度の整理表から長周期波の発生頻度を推定できるだけでなく、風波の波向と長周期波の波向を同一と仮定することによって各波向毎の長周期波の発生頻度を近似的に表すことができる。

図-15は他の波向における長周期波エネルギーレベルから求めた長周期波の発生頻度分布表を示す。

次に、すべての波向について重ね合わせた表Bの妥当性を検討するために、表-Aとの比較を行った。比較は、図-16に示すように波高の超過確率の値で行った。図は、表-Aと表-Bにおける長周期波の出現頻度を波高に対する超過確率として整理したものである。鹿島港および常陸那珂港において観測値と推定値はよく一致し、標準スペクトル型を用いて現地における長周期波の超過確率を精度よく推定できることがわかる。したがって、沖合の長周期波そのものの観測値が無い港湾においても、既存の波浪台帳などから風波の発生状況を整理して、長周期波の発生頻度を推定してもよいと考えられる。

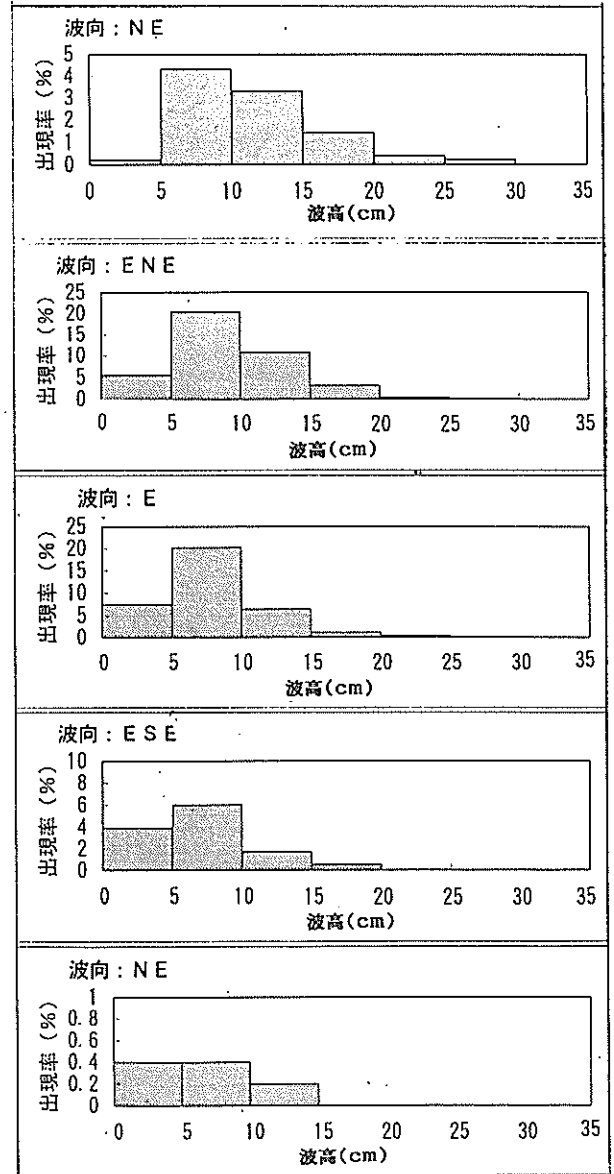


図-15 長周期波の発生頻度分布の推定値

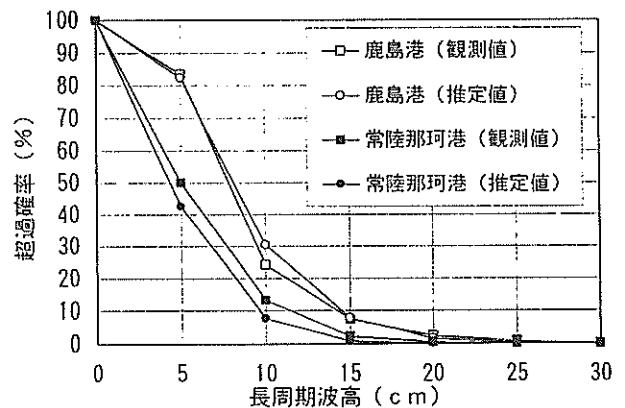


図-16 鹿島および常陸那珂港における長周期波の発生頻度分布

6. 港内における稼働率算定システム

次に、風波ならびに長周期波に対する港湾稼働率を算定するシステムを作成する。従来の港湾計画においては、担当者が港湾地形ならびに水深データを作成し、観測値から整理された波高頻度の各波高レベル毎に港内波高を計算し、あらためて対象岸壁前面の計算波高を整理して、港内における荷役稼働率を推定していた。これには、多大な労力を伴うとともに、各作業についてある程度の理解が必要で、どうしても作業者が限られてしまい、現場の事務所等で誰でも簡単に稼働率を推定することが困難であった。また、防波堤の延長や、突堤の新設に対して港内の稼働率がどのように変更するかについて短時間で結果を得ることができず、港湾計画の作成・修正に困難を伴っていた。そこで、本システムでは、あらかじめ対象港湾の平面形状、水深分布およびこれまでに整備されている港外の観測点における風波の頻度分布表(波高、周期、波向)をハードディスクに収録することにより、他港への汎用性を持たない代わりに、対象港については、算定作業を極めて簡単にするシステムの開発を目指した。

まず、風波については、あらかじめ入力された風波の頻度分布表の各項毎に、エネルギー平衡方程式¹³⁾および港内回折計算法¹⁴⁾により岸壁前面の短周期波高を計算する。

その手順を次に示す；

(1) 鹿島灘全域を含む水深データより計算対象港を含む範囲を切り取って計算データとする。図-17にシステ

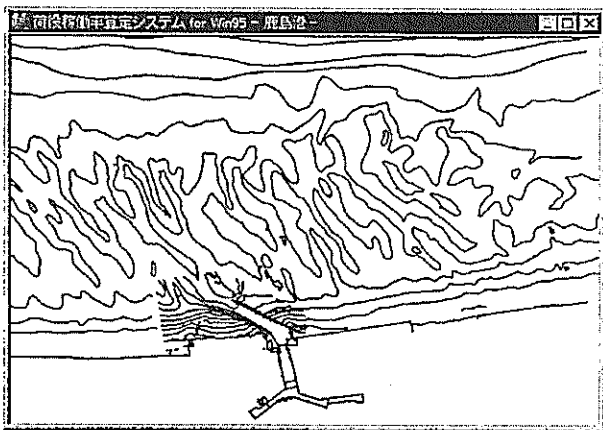


図-17 鹿島灘における水深とその出力状況

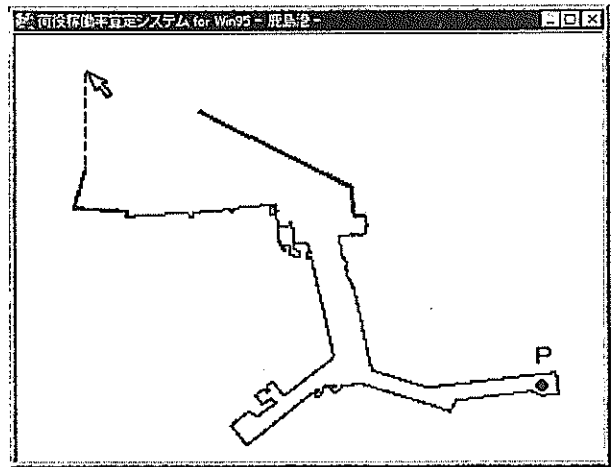


図-18 計算で用いる港内の海-陸境界

ム内にあらかじめ収録された水深情報の画像出力状況を示す。次に、計算波向を入力すると、波向に境界格子辺が直交するような格子を作成し、各格子点に計算で用いる水深を割り当てる。

(2) 図面上で沖側のエネルギー平衡方程式による浅海域波高推定プログラムの結果を港内の回折計算法の入力データとして引き移す点を設定する。

(3) 港内地形は、図-18に示す直線で囲まれたものが初期値として入力されている。もし、防波堤形状や長さに変更を加える場合は、図の破線で示したようにマウスによって直線を加えると港内地形が任意に変更できる。

また、図中のP点は稼働率を計算するために指定する点であり、稼働率を計算する岸壁前面の格子点に相当する。

(4) 以上のデータが設定できた後に計算を実行すると、指定点での波高の超過確率が出力される。

長周期波については、以下の手法で計算を行う。

(1) まず、沖合長周期波頻度分布表の確定を行う。図-19は2. で示した計算により、風波頻度分布表から標

港名: 鹿島港		波高(m)										合計
		波高(m)										合計
波高(m)	波向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	合計
0.00~0.05		0	2	481	2116	8767	6796	556	39	50	0	16791
0.05~0.10		3	15	733	2407	6282	5073	1175	35	45	1	15779
0.10~0.15		2	6	127	446	1069	765	202	7	3	0	2669
0.15~0.20		0	0	7	51	219	149	25	2	0	0	452
0.20~0.25		0	0	0	11	60	36	4	2	1	0	114
0.25~0.30		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0.30~0.35		0	0	0	2	3	9	2	0	1	0	17
0.35~0.40		0	0	0	0	9	3	0	0	0	0	3
0.40~0.45		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45~		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計		5	23	1328	5037	14430	12651	1963	82	106	1	35926

図-19 システムに設定されている頻度分布表

準スペクトル形を用いて求めて、あらかじめデータとして作成し登録した長周期波の頻度分布表である。現地観測等により、より精度の高い確定値が得られたときにはこの画面で頻度の修正ができ、また登録も実施できる。

(2) 計算領域は、風波計算で使用了ものをそのまま用いるが、港内においても水深がデータとして用意されている。沖合の長周期波から港内における長周期波を求める手法は、線形長波³⁰⁾の計算解を重ね合わせる手法を用いた。まず、長周期波成分に含まれるエネルギーを等分割し、それぞれのエネルギー $SL(f) \times df$ ($f_{min} < f < f_b$) から i 番目の成分波の振幅を、 $a_{Li} = (2SL(f)df)^{1/2}$ として求める。この成分長周期波を沖境界における規則入射波とし、長波の伝播方程式を解くと、各岸壁前面での i 番目の成分波に対する波高比 k_{Li} が出力される。合成波高比は次式で計算する。

$$K = \left(\sum_{i=1}^M k_{Li}^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

計算では、あらかじめ単位波高に対する上記の波高比を任意の波向に対して求めておき、港外における風波の頻度分布表に従って、港内の対象点における長周期波高の計算値を抽出して、頻度分布として整理した。

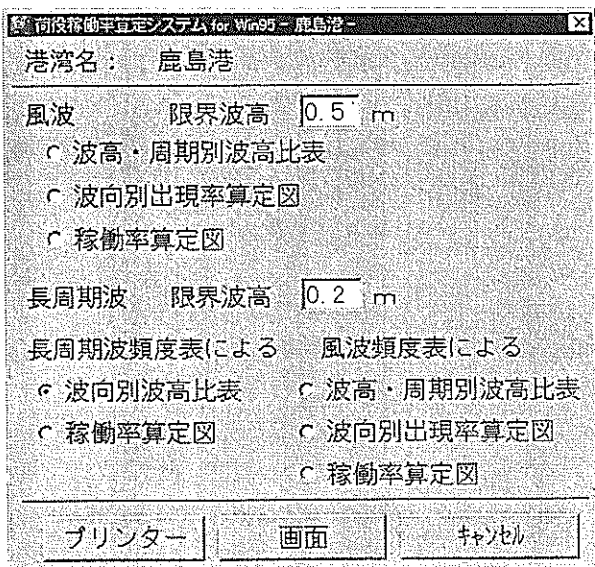


図-20 荷役限界波高の入力画面

(3) 荷役限界波高の入力は、図-20に示すように任意に行える。鹿島港においては、苫小牧港と同様に 10 ~ 15cm の数値を入力する。風波についても任意に限界値が入力できる。現行の基準では限界波高 $H_{limit}=50\text{cm}$ で

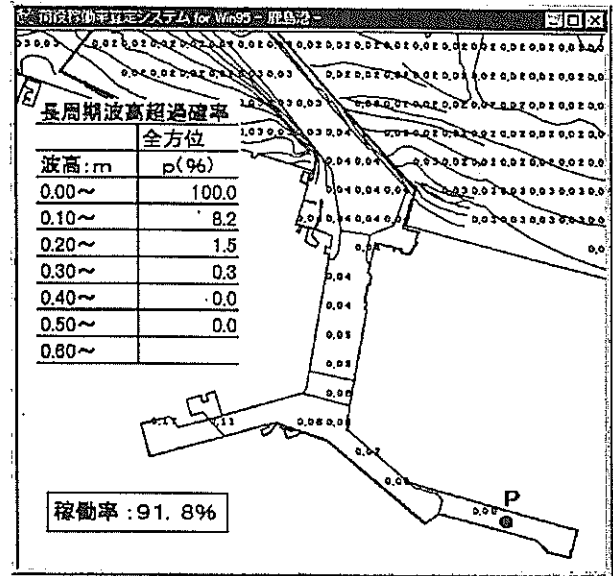


図-21 鹿島港内における計算波高比の分布とP点における長周期波の超過確率

あるが、小型客船等が着船する観光棧橋等では乗降客の安全を図るために 30cm を基準として考えることもでき

図-21は、稼働率算定システムにおける鹿島港内における SSE 波向の長周期波に対する波高比計算例である。図-21には、計算された出現頻度表も合わせて示した。苫小牧港の観測から導かれた $H_l=10\text{cm}$ を入力した場合には、長周期波稼働率 $p_M(\%)=91.8\%$ が瞬時に算定でき、現場の荷役の安全性向上に資することができる。

7. まとめ

本研究では、各地の長周期波観測データを整理して、港湾構造物の設計値として用いることができる長周期波のスペクトルレベルを定めた。その結果、長周期波パラメータ α_l を用いると適切に長周期波のエネルギーレベルを設定できることが判明した。

次に、設定した長周期波レベルと短周期波の発生頻度分布を用いて、鹿島港および常陸那珂港における長周期波の発生頻度表を作成した。超過確率の図面で比較を行うと、実際に観測された長周期波による超過確率と推定値は良く一致し、本手法が現地における荷役稼働率の推定に寄与できることが判明した。

(1999年3月31日受付)

参考文献

1) 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男(1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.951-955.

2) 土田 充・灘岡和夫・西村剛士・佐藤恒夫・山口孝市・平石哲也(1997): 多点観測による港内外の波浪特性と港内係留船舶の長周期動揺特性について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.231-235.

3) 平石哲也 他6名(1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料 No.873, 39p.

4) 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可(1996): 港湾で観測された長周期波の特性, 港研報告, Vol.35, No.3, pp.336.

5) 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良(1989): 荒天時のバーム地形の侵食-長周期波に着目した現地観測-, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.354-358.

6) 木村晃・喜田昌裕・山崎樹実也(1996): 2次長周期波による港湾の振動について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.211-215.

7) 喜岡 渉・柏原謙爾(1995): 2次長周期波の湾水振動に及ぼす来襲波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.296-300.

8) 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林昭男・東江隆夫・柴田孝雄(1997): 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.226-230.

9) 岡安章夫・鈴木康之・花田昌幸(1998): 砕波帯内長周期波の現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.286-290.

10) 平石哲也 他6名(1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料 No.873, 39p.

11) Longuet-Higgins M.S. and R.W.Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. of Fluid Mechanics, Vol.13, No.4, pp.481-504.

12) 菅原一晃・永井紀彦・橋本典明・清水勝義(1994): 全国港湾海洋波浪観測施設台帳(ナウファス施設台帳), 港湾技研資料, No.782, 326p.

13) Sand, S.E. (1982): Long waves in directional seas, J. Coastal Engineering, Vol.6, pp.195-208.

14) 合田良美(1987): 数値シミュレーションによる波浪

の標準スペクトルと統計的性質, 海岸工学論文集, 第34巻, pp.131-135.

15) 上田 茂・白石 悟・大島弘之・浅野恒平(1994): 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高及び稼働率, 港湾技研資料, No.779, 44p.

16) 土田 充・大山 巧・平石哲也・富田孝史(1998): 港内係留船舶の長周期動揺に基づく静穏度評価法について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.321-325.

17) 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可(1996): 港湾で観測された長周期波の特性, 港研報告, Vol.35, No.3, pp.3-36.

18) 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, 港研報告, Vol.30, No.1, pp.21-67.

19) 高山知司(1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料 No.367, 140p.

20) 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, 70p, 1988.

主要記号表

a	: 波の片振幅
C	: 波速
C_g	: 群速度
f	: 周波数
f_b	: 境界周波数
f_{ba}	: 標準レベルを設定する境界周波数
f_p	: ピーク周波数 (1/s)
g	: 重力加速度
h	: 水深
$H_{1/3}$: 短周期成分波の有義波高
$H_{d1/3}$: 拘束波の有義波高
$H_{l1/3}$: 長周期波の有義波高
K_T	: 観測測長周期波高の理論拘束波高に対する比
K_H	: 観測測長周期波周期の理論拘束波周期に対する比
m_0	: 波の全エネルギー
m_{0L}	: 長周期波成分に含まれる波のエネルギー
m_{0S}	: 短周期波成分に含まれる波のエネルギー
R_L	: 長周期波エネルギーと全エネルギーの比の平方根

$S(f)$: 周波数スペクトル密度
$SL(f)$: 長周期波のエネルギーレベル
$T_{1/3}$: 短周期成分波の有義波周期
$T_{d1/3}$: 拘束波の有義波周期
$T_{l1/3}$: 長周期波の有義波周期
α_l	: 長周期波のエネルギーレベルを決定するパラメーター
η_l	: 長周期波の水位変動
κ_H	: 長周期波側のスペクトル形状を設定する波高に関するパラメーター
κ_T	: 長周期波側のスペクトル形状を設定する周期に関するパラメーター
ρ	: 水の密度

港湾技研資料 No.934

1999.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社つばさ印刷技研

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

Copyright ©(1999)by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。