

運輸省港湾技術研究所

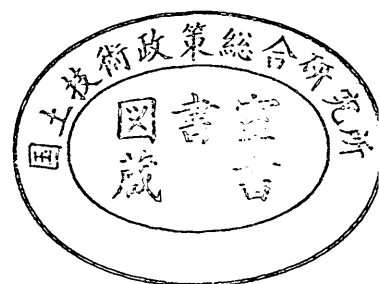
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 35 NO. 3 Sep. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第35巻 第3号 (Vol.35, No. 3), 1996年9月 (Sep. 1996)

目 次 (CONTENTS)

1. 港湾で観測された長周期波の特性
..... 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可 1
Characteristics of Long Period Wave Observed in Port
Tetsuya HIRAISHI, Atsuhiro TADOKORO, Hideyoshi FUJISAKU)
2. TSLに対応した水域施設の計画手及び入港支援システム
..... 高橋宏直・早藤能伸・酒井浩二・森満賢治・中本 隆・木阪恒彦 37
Study on Water Area Facilities Standrd and Support System of Entering
a Port for Techno Super Liner
Hironao TAKAHASHI, Yoshinobu HAYAFUJI, Koji SAKAI, Kenji MORIMITSU
Takashi NAKAMOTO, Tsunehiko, KISAKA)
3. PTK/OTF GPSによるTSL着岸システム
..... 高橋宏直・早藤能伸・酒井浩二・森満賢治・中本 隆・木阪恒彦
井潤健二・山下武広・井隼哲郎・宗円清明 73
Study on Sopport System of Berthing for Techno Super Liner
by RTK/OTF GPS
Hironao TAKAHASHI, Yoshinobu HAYAFUJI, Koji SAKAI, Kenji MORIMITSU
Takashi NAKAMOTO, Tsunehiko KISAKA, Kenji ITANI, Takehiro YAMASHITA
Tetsuro IHAYA, Kiyooki SOEN)

1. 港湾で観測された長周期波の特性

平 石 哲 也*
田 所 篤 博**
藤 咲 秀 可***

要 旨

従来から、港内が比較的静穏にも拘らず、係留された大型船が大きい水平運動を生じ、荷役が中断されたり、係留索が切断される事故が生じてきた。最近の一連の観測により、これは、港外で発達した周期1～5 minの長周期波が港内へ侵入することによって生じられる現象であることが判明している。すなわち、大型船と係留索からなる係留系の固有振動周期が、長周期波の周期と近いために共振現象が生じ、係留された大型船が大きく運動する。一方、長周期波による荷役障害が報告されていない港湾も多く、なぜ特定の港湾において長周期波による被害が生じているのか明らかではない。そこで、本研究では、長周期波の被害が生じている秋田県能代港と被害が報告されていない沖縄県那覇港の港外と港内において長周期波の観測を行い、その港内における特性を比較した。得られた主要な結論は以下の通りである；

(1) 能代港においては、周期30minの港内副振動による振動と長周期波による振動が観測された。港内の長周期波高は港外とほぼ同一で、長周期波は減衰せずに港内へ侵入している。

(2) 港外の長周期波波形は、理論的に導かれた、波群に伴われている拘束波形で近似できるので、長周期波は主に拘束波として生成される。

(3) 那覇港の内港部は、波除堤により囲まれており、これらの効果により、港外で発達した長周期波の振幅が減衰し、港内で荷役障害が生じていない。

(4) 能代港をケーススタディとして、数値計算で防波堤による長周期波の対策を検討したところ、適切に防波堤を配置すれば、ある程度長周期波高を低減できることがわかった。

キーワード：長周期波、現地観測、波群拘束波

* 水工部 波浪研究室長
** (前) 第一港湾建設局 新築調査設計事務所次長
*** 水工部 波浪研究室

Characteristics of Long Period Wave Observed in Port

Tetsuya HIRAISHI*
Atsuhiko TADOKORO**
Hideyoshi FUJISAKU***

Synopsis

Long period waves with periods of 1~5 minutes sometimes terminate the cargo handling and cause the break of mooring ropes in Japanese several ports. The reason why long period waves with small amplitudes cause such damages is the resonance with natural periods of mooring system (vessel-mooring rope). These long period waves are mainly induced by the set-down waves bounded in the grouping waves. The termination of cargo handling by long period waves becomes significant in the specified ports like Tomakomai(Hokkai-do), Kashima(Ibaragi prefecture), Noshiro (Akita), Shibushi (Miyazaki), etc. Meanwhile, such damages are not reported in the other major ports in Japan.

To compare the characteristics of long period waves in the suffered ports with those in the non-suffered ports, the field observation for long period waves are carried out in the two typical ports; one is Noshiro-port where the breaks of mooring ropes of vessels (50,000DWT) sometimes occur and another is Naha-port (Okinawa prefecture) where no accident on cargo handling has been reported. The following main conclusions are derived from the observation;

- (1) The long period waves with periods of 1~5min and the harbor oscillation with periods of 30min are observed in the inner part of Noshiro-port.
- (2) The long period wave profiles at the offshore side of Noshiro-port are almost equal to the wave profiles derived theoretically from the set-down wave bounded in the grouping wave. Therefore, the long period waves which cause the cargo handling accident are mainly induced by the offshore grouping waves.
- (3) In Naha-port, the amplitudes of long period waves are significant at the offshore area. The long period wave amplitudes in the outer region behind of the offshore breakwaters are almost equal to those at the offshore. They become very small and do not cause any damages to the mooring facilities at the inner part of Naha-port. The appropriate arrangements of the small groins and inner breakwaters are effective to reduce the long period waves.

Key Words : long period wave, field observation, set-down wave

* Chief, Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Ex-Deputy Director, Niigata Investigation and Design Office, First District Port Construction Bureau

*** Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 荷役障害を起こす長周期波の特性と各地の被害状況	7
2.1 長周期波による被害	7
2.2 これまでの観測で得られた長周期波の特性	14
3. 長周期波に関する現地観測	17
3.1 能代港における観測	18
3.2 那覇港における観測	23
4. 数値計算による対策工法の適用性の検討	28
4.1 計算法の適用性	28
4.2 対策工法の効果	31
5. まとめ	33
参考文献	34
主要記号表	35
付 表	36

1. まえがき

港湾が比較的静穏であるにも拘らず、大型の係留船舶が大きく水平に動揺して、荷役が不可能になったり、係船索が切断される事故が生じている。この原因としては、まず、もともと港湾の静穏度が十分ではなく、周期十数秒のうねりに対して防波堤の遮蔽効果が低い場合が考えられる。この場合には、防波堤を少し延長することによって、荷役障害や係船索の切断を防ぐことができる。次に考えられるものは港内副振動である。これは、洋上の低気圧によって生じられた周期十数分以上の微小な水位の擾乱が、港湾あるいは大陸棚の固有振動との共振によって増幅されるものである(高山・平石, 1988)。この場合には、湾奥で振幅数十cmの水位変動が生じる場合があるが、周期が十数分以上で長いので、大型船はゆっくりと数十cm上下動を起こすだけで、係船索が切断されるような大きな水平運動は起こりにくい。

もう一つの原因としては、周期数分の長周期波の侵入である。大型船をナイロンロープ等で岸壁に係留した場合には、船体と弾性体であるロープから成る係留系の固有振動周期が1~5min程度になる。したがって、周期数分程度の長周期波は、振幅が小さくとも、共振により大きな船体の水平動揺を引き起こすことができる。周期数分の長周期波は、英語で“infra-gravity wave”と言われ、従来からその特性が調べられている。Longuet-Higgins and Stewart (1962) は、波によるラディエーション応力の場所的な変化から、初期水面より水位が低下し、長周期の水位変動が生じることを理論的に示している。この波は、波面が初期水位より低いので、set-down wave (セットダウン波)とも言われる。Ottsen-Hansen (1978) は、不規則波を構成する成分波間の非線形干渉によってセットダウン波が形成されることを示した。Sand (1982) は、Ottsen-Hansen の解を多方向不規則波の場合に適用できるように拡張し、長周期波の方向分布特性を検討した。また、このような長周期波を実験室内で再現する試みもなされている(Ottsen-Hansenら, 1980, Mansardら, 1984)。Longuet-Higgins と Ottsen-Hansen の理論では、波群中で長周期の水位変動が形成され、波群の進行とともに長周期の水位変動が進行するため、生成された長周期波を“拘束波”ともよぶ。

我が国では、関本ら(1990, 1991)、松良ら(1994)、永井ら(1994)が港湾内外における長周期波の観測を行い、港外の長周期波形状が拘束波形状とほぼ一致し、港外では波群に伴う拘束波として長周期波が発達することを示

している。港外で発達した長周期波は、港内へ侵入すると、防波堤による回折によって拘束を解かれ(関本ら, 1991)、自由進行長波となり船舶に作用すると考えられている。

このように、港湾における大型船の荷役障害は、主に波群に伴う拘束波として発達した長周期波によって引き起こされる可能性が高く、引き続き検討が成されている。海の波は、ほとんど波群を形成しており、長周期波が拘束波として生成されるのであれば、全国すべての港湾で長周期波による被害が報告されていても不思議はない。しかしながら、現在の所、苫小牧港、能代港、仙台新港、志布志港などの特定の港湾においてのみ長周期波による被害が報告されている。被害が報告されていない港湾では、長周期波が発生していないのか、何らかの理由で長周期波が低減されているのか、あるいは、調査がされていないだけなのか、明瞭ではない。もし、何らかの抑止効果が働いているのであれば、今後の港湾計画に資することができる。そこで、本調査では、長周期波による被害が報告されている港湾と、報告されていない港湾において港内の長周期波を観測し、まず、その特性を明らかにした。そして、長周期波の低減が生じているかどうかを検討した。

最後に、長波の伝播計算法によって、港湾の長周期波を推定できることを示し、能代港をケーススタディとして、計算によって対策工の適用性を検討した。

2. 荷役障害を起こす長周期波の特性と各地の被害状況

2.1 長周期波による被害

港内が比較的静穏であっても、係留船舶が大きく水平運動を示し、荷役障害を起こしたり、係留索が切断される事故は以前から各地の港湾で報告されており(たとえば運輸省第四港湾建設局, 1987)、米国でもロングビーチ港(McGehee, 1991)などで報告されている。ここでは、最近、波高計等を組み合わせた海象条件の観測によって、詳細な調査がなされている苫小牧港と、現地でのヒアリング調査によって広範囲な被害状況が把握されている日本海沿岸と志布志港における現況を示す。

(1) 苫小牧港

苫小牧東港地区は昭和55年より一部の供用がなされている。図-1に苫小牧東港地区の平面図を示す。港湾計画上では、港内の岸壁前面で有義波高 H_k が50cm以下の期間が年間を通じて98%以上確保できるように港形が計画されている。しかしながら、東側の-14m岸壁の供用が開始されて以来、港内が比較的静穏にも拘ら

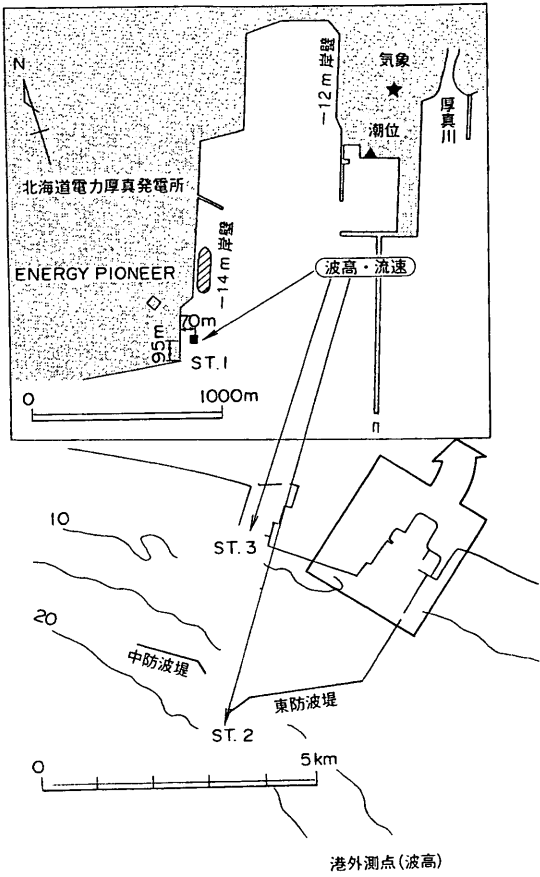


図-1 苫小牧東港平面図
(1994年の観測器の配置)

ず、係留船舶が数分近い長周期動揺を示すことが報告されるようになった。動揺振幅は、サージ方向で10m以上になる場合もあるといわれている。表-1は東-14m岸壁における被害状況をまとめたもの(北海道開発局,1995)で、年間数件の係留索の切断事故が生じている。

被害の実態と海象条件を定量的に把握するために現地観測が行われた(北海道開発局, 1995, 松良ら, 1994, 菅沼ら, 1995)。ここでは、1994年のエナジーパイオニア号停泊中になされた観測の概要を示す。図-1には、波高と流速を測定した観測点の位置 St. 1, 2, 3 を示す。図-1に示す“港外測点”は、定常観測のために設置された波高計で常時観測を行っている。図-2は船舶の係留の様子を模式的に示したものである。現地観測期間中は、図-2の‘ビデオ’の位置から、船体側面のマーカーと岸壁をビデオ撮影し、岸壁上の標尺から、船体の水平方向および鉛直方向の移動量を読みとった。なお、船体の、

岸壁に沿った縦方向の移動を‘サージ(surge)’、上下方向の移動を‘ヒープ(heave)’という。

なお、観測の詳細については前述の文献を参照されたい。

図-3は船舶係留期間中の動揺発生時前後の観測点での有義波高と有義波周期の変化を示したもので、斜線をつけた範囲が船体の動揺が大きくなった範囲である。斜線に示した期間に、最大振幅8mまで動揺が大きくなり、係留索が切断される危険性が生じたために緊急離岸を行っている。この期間に港外の有義波高は最大で3m程度に大きくなっており、有義波周期が船体動揺発生前後から10数秒を超えて、長くなっているのが特徴的である。このときの港内の St.1での有義波高は、斜線範囲では、ほぼ0.5m以下であり、技術上の基準(日本港湾協会, 1989)に定められた荷役限界波高よりも小さく、従来の考え方では‘静穏’とみなせる状態である。

1994年の観測では、岸壁側からのビデオ撮影しか行っていないため、surge と heave の動揺量のみが整理されている。図-4は、surge と heave の両振幅の有義値と最大値の変化を示したものである。図-3の斜線をつけ

表-1 -14m岸壁における被害状況

年月日	船名	総トン(DWT)	係留索切断本数
1985. 1. 28	札幌丸	48,884	1
4. 10	同上	同上	1
1986. 9. 2	NEPTUNE CANOPUS	30,703	3
1987. 6. 21	ASIAN THISTLE	37,472	4
11. 19	栄龍丸	30,767	2
1988. 11. 26	LITO	28,093	1
1989. 11. 13	札幌丸	48,884	4
1990. 1. 19	WORLD AGAMEMNON	19,264	4
11. 20	DAPHNE OCEAN	38,891	1
1991. 1. 26	宮城丸	37,582	1
10. 3	FAR EASTERN GRAIN	37,159	1
1992. 3. 31	GOLD STAR	36,264	2
5. 7	ASCEENSION	35,191	2
9. 25	ANTOINS I ANGELICOUSSIS	36,986	2
10. 26	札幌丸	48,884	2
11. 7	YOU XUAN	25,891	1
1993. 1. 29	MOZU ARROW	23,149	5
6. 4	ORIANA	36,606	3
8. 29	PEGASUS	36,764	1
9. 4	RUBIN ENERGY	36,560	2
10. 9	札幌丸	48,884	4
11. 14	同上	同上	1
1994. 3. 10	GORTYS	38,131	2
9. 18	ENERGY PIONEER	36,493	4

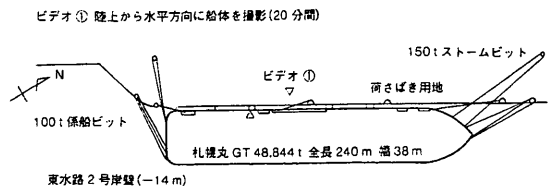


図-2 船体の係留

港湾で観測された長周期波の特性

た期間は、図-4では、1994年9月18日0:00から8:30に相当する。この間に、heaveは最大値で0.8m程度になり、surgeは最大値で8.0m程度に増加した。このとき係留索が切断される危険性が生じたため、係留を中止し緊急離岸を行った。9月18日8:30以降も波高は増加する傾向を示し、そのまま係留を続ければ、係留索が切断される可能性が高かったと思われる。

図-5は、前述の図-4において動揺を開始した9月18日0:00、荷役を中止した同日3:30および緊急避難した8:30にそれぞれ最も近い、0:00、4:00、6:00の観測値から解析した周波数スペクトルを示す。港外においては 6×10^{-2} Hzに現れた短周期側のピークが時間とともに

高くなっており、6:00におけるピーク密度の値は 10^1 程度である。港口部におけるSt.2においても短周期側のピーク値は高く、港外と同じようにそのピーク値は 10^1 程度である。一方、港外点においては 10^{-1} Hz程度になだらかな長周期側のピークが現れている。この長周期側のピークの値は時間が経つにつれて大きくなり、0:00と6:00を比較するとその密度は100倍程度に増加する。St.2においても長周期側のピークが高くなる様子が顕著であり、長周期波のエネルギーが時間が経つにつれて大きくなるのがわかる。

図-5(3)のSt.1は船舶係留岸壁における周波数スペクトル密度を示す。ここでは、短周期側のピーク値がSt.0(港外測点)やSt.2に比較すると小さく、防波堤に

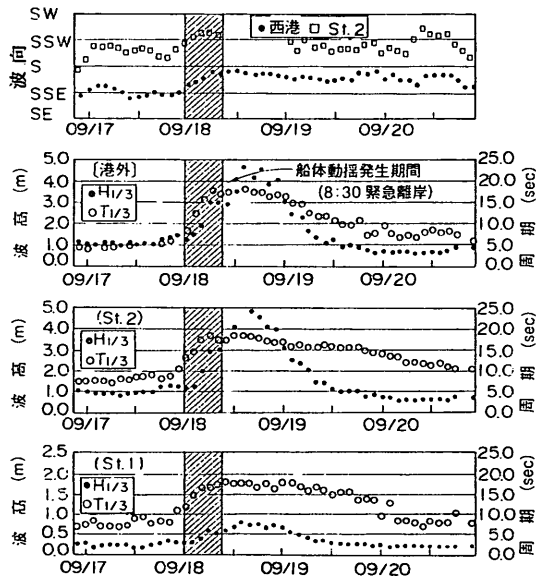


図-3 船舶動揺発生時の波高と周期の変化

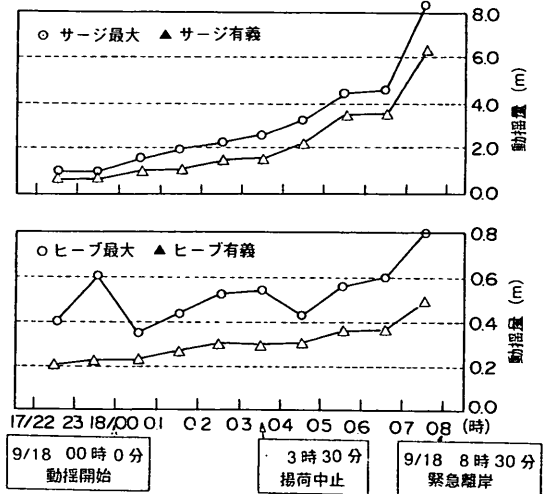


図-4 船舶動揺量の変化

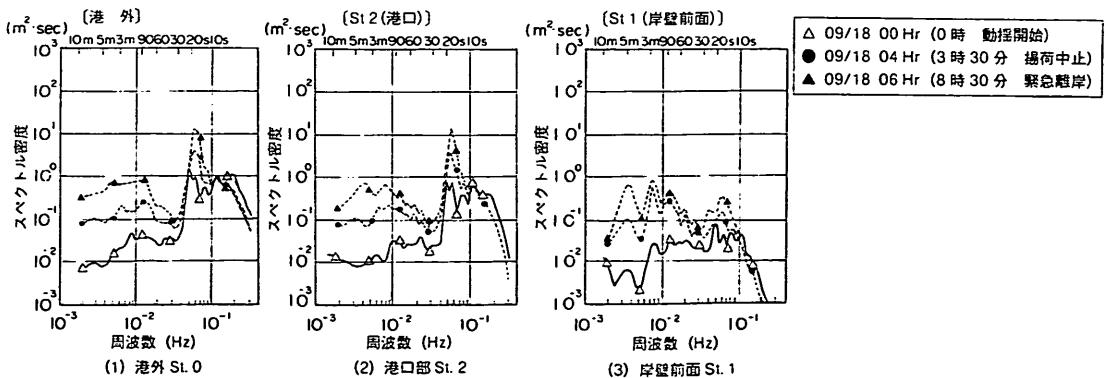


図-5 船舶動揺時の波の周波数スペクトル

よる遮蔽効果により、港外から侵入する短周期波のエネルギーが十分減衰されていることがわかる。しかし、長周期波側のエネルギーは、St.0やSt.2と大きく変化しておらず、長周期波に関しては防波堤による遮蔽効果が小さいことがわかる。0:00と6:00のスペクトルの値を比較すると、短周期波側のピークは 5×10^{-2} から 10^{-1} 程度に2倍になっているのに対して、長周期波側は、 10^{-2} から 5×10^{-1} まで10倍以上に大きくなっている。したがって、港内における船舶の動揺の増大には、長周期波の振幅の変化が大きな影響を持っていることが予想される。

図-6は、ビデオ撮影した船体運動から、サージおよび

びヒーブの時間的な変化を求め、それぞれの周波数スペクトルを求めた結果である。ヒーブのスペクトル形は、図-5(3)に示した岸壁前面における水位変動のスペクトル形とよく似ており、船体のヒーブは水面の上下動に追従した運動であることがわかる。サージのスペクトルは、 5×10^{-3} から 10^{-2} Hz程度の長周期側に顕著なピークを有し、短周期の水位変動には追従していないことがわかる。そして、このピーク周波数は、図-6に示した長周期波側のピーク周波数にほぼ一致し、荷役障害を引き起こすような大きいサージ運動が長周期波によって引き起こされることがわかる。

図-7は、図-6の船体動揺スペクトルを図-5の水

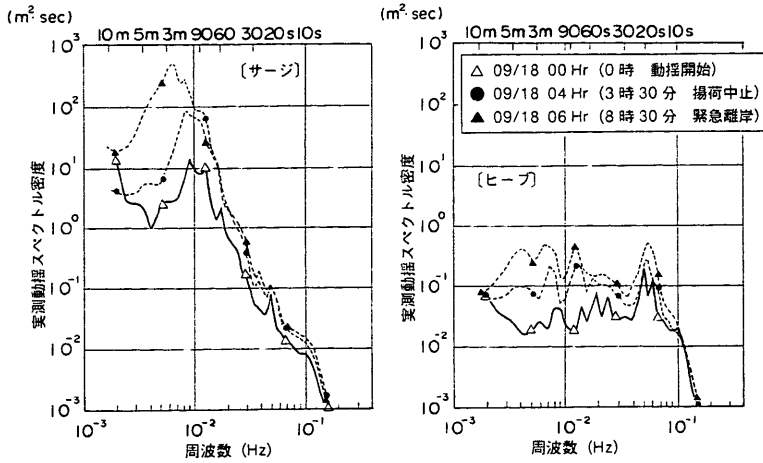


図-6 船体動揺の周波数スペクトル

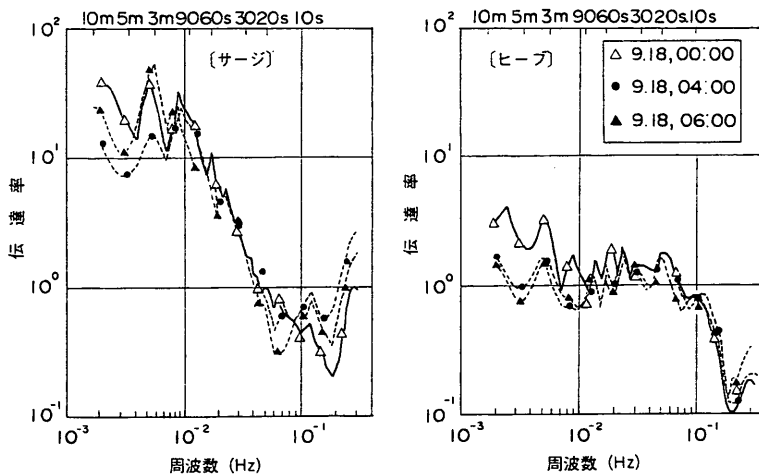


図-7 船体動揺の波に対する応答スペクトル

位変動スペクトルで除した応答スペクトルである。ヒーブの応答スペクトルは全周波数範囲についてはほぼ1であり、水位変動に追従した運動であることが明白である。サージにおいては時間によって応答スペクトルの値が大きく変化することはなく、水位変動のスペクトルの密度が増加すれば、船体の動揺量も増加する。

サージの応答スペクトルは、長周期側で大きくなり、その値は10~50程度になる。エネルギーの比が約50倍と仮定すると、1の水位変動に対してサージの振幅は7~8倍になる。このようにサージ振幅が水位の振幅より大きくなるのは、船体と係留索からなる係留系の固有振動が励起されているためと考えられる。すなわち、荷役障害を及ぼす船体の水平運動は、船体と係留索からなる係留系の固有振動が、長周期波成分との共振によって大きくなるために引き起こされると考えられる。

なお、船体と係留索によって構成される係留系の固有周期は、船体の重量、係留索の径、材質、本数によって決まり単純には求められない。ここでは概算によって固有周期を推定してみる。船体と係留ロープからなる係留系を図-8のように質点と2本のバネからなる振動系と近似する。この系の固有周期 T_0 (s)は次式で計算できる。

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{M}{2K}} \quad (1)$$

ここで、 M :質点の質量(kg)、 K :バネの伸び率(N/m)である。質量は載荷重量トン(DWT)とほぼ等しいものとし、ロープの伸び率をバネの伸び率とする。ロープの伸び率は材質と径、長さが判れば文献(運輸省港湾技術研究所・港湾局, 1985)から計算できる。いま、船舶の載荷重量トン(DWT)を50,000、係留索は船首と船尾に取り付けられ、径60mm、長さ80mのマニラ麻製ロー

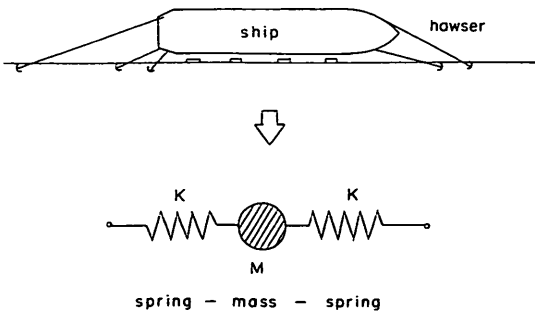


図-8 船体と係留ロープによる係留の概念

プを用いるとする。このときの固有周期は3.8min(4.4 × 10⁻³Hz)になる。載荷重量トンが10,000の場合には、固有周期は1.6min(10⁻²Hz)になり、図-7で予想したサージの固有振動周波数とほぼ一致する。

以上のことから、港湾に周期1~5minの長周期波が来襲すると、防波堤によって減衰されずに、船舶の係留岸壁に到達することがわかる。そして、大型の貨物船等の係留時におけるサージ運動の固有周期が長周期波の周期とほぼ一致するため、共振によってサージ運動が大きくなる。サージ振幅がある限界値以上になると荷役が不可能になり、さらに大きくなると係留索の切断が生じることがわかる。

長周期波による荷役障害を防止するためには、岸壁前面の長周期波高がどの程度になれば船体運動が限界値を超えるかを調べる必要がある。図-9は、船体のサージ動揺量と長周期波高の変化を比較したものである。ここでは、風波成分と同様に、周波数スペクトルから計算される長周期波成分のエネルギーと波高の2乗が比例するものと仮定して、長周期波の代表波高 H_L を次式で求めた。

$$H_L = 4.0 \sqrt{\int_{1/T_1}^{1/T_2} S(f) df} \quad (2)$$

この表現は、風波において有義波高を推定する時に用いられる関係である。ここで、 $S(f)$:周波数スペクトルである。 T_1 および T_2 は長周期波成分の最小および最大周期を示す。

前述の図-7によると、サージの応答スペクトルの値、すなわち伝達率が1以上になる周期帯は、20s以上である。一方、図-6のサージ動揺の周波数スペクトルを見ると、動揺量が最も大きくなる9月18日18:00の記録では、ピーク周期は3minで、5min以上の長周期側では、

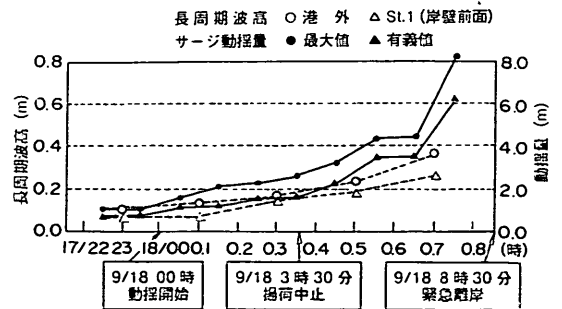


図-9 船体サージ動揺量と長周期波高の変化

動揺量が小さくなり、周期 10min に対しては、動揺スペクトル密度は、周期 3min のピークに対して、1/10 以下になる。したがって、船体動揺に影響を与える長周期波の周期範囲は、おおよそ 20s から 10min と考えられる。ただし、短周期側の風波成分の周期が長い場合には、 $T=20s$ の部分は、周波数スペクトル型において出現する短周期側の山に含まれてしまう。そこで、苫小牧のように、比較的、有義波周期 $T_{1/2}$ が大きい場合には、長周期波の範囲の下限値を 30s とした方がよい。苫小牧港における式(2)の計算では、 $T_1=30s$ 、 $T_2=600s$ としている。

図-9 に示されるように、港外と港奥の長周期波高はほとんど同じで、時間が経つに連れて増加する。緊急離岸時には、港奥で $H_s=25cm$ である。動揺が激しくなり、荷役を中止したときの H_s は 15cm 程度である。港湾の技術上の基準では、港湾の静穏度の目安となる荷役限界波高を 50cm と定めている。この値は風波に対するものであり、図-9 の結果から長周期波については、さらに小さな値を限界値として定める必要があることがわかる。しかしながら、荷役限界波高は、船舶の種類、岸壁の設備、オペレーターの技術などによって定まり、現地観測結果からだけでは設定することは困難である。

苫小牧港の東-14m 岸壁の場合には、図-9 の結果を参照にすると、長周期波の荷役限界波高は有義値で 10~15cm 程度と推測できる。

図-10 は、St.1 の長周期波高とサージ振幅の有義値を比較したもので、長周期波高の 10 倍以上のサージ振幅

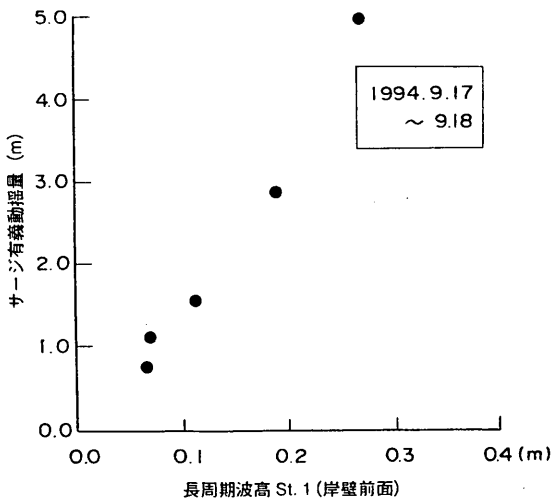


図-10 船体サージ動揺量と長周期波高の比較

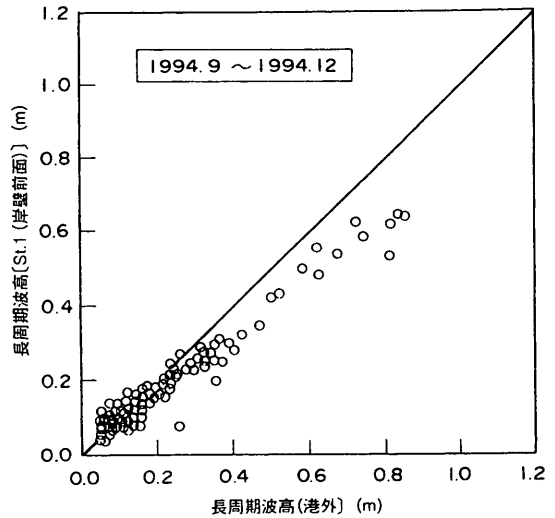


図-11 港外と港内での長周期波高の比較

が励起されることがわかる。

図-11 は港外と港内の長周期波高を比較したもので、苫小牧港においては港内の長周期波高は港外に比較するとやや小さい。特に、港外の H_s が 40cm 以上の場合には、短周期波成分に比較すると減少の度合いは小さいが、港内での H_s は港外の 70~80% になる。港内において長周期波が減衰する原因は、防波堤による遮蔽効果が考えられ、短周期波に比較するとその遮蔽効果は小さいものの、防波堤を適切に配置することによって、港外の長周期波をある程度抑止できることがわかる。

(2) 日本海沿岸における長周期波

苫小牧港における調査と同様な船体運動と長周期波高の同時観測は他の港で実施された例はなく、長周期波による荷役障害の実態を全国的に把握することは難しい。しかし、最近各地方港湾建設局により実態調査が開始されており、それらの調査の成果により、より詳細に長周期波による荷役障害の実態が明らかになるものと思われる。

第一港湾建設局によると(運輸省第一港湾建設局,1994)、富山湾の港湾においても長周期波によると考えられる荷役障害が報告されている。そこで、長周期波の波高と周期について、実態を把握するため潮位記録の収集・解析が行われた。富山港における潮位記録の収集期間は冬季季節風が強くなる以下の 2 期間である；

1992年12月~1993年2月

1993年12月~1994年2月

表-2 は、これらの期間中に収集された潮位記録から、

港湾で観測された長周期波の特性

表-2 富山港の長周期波水位変動の最大振幅

発生時刻	波高(cm)	周期(s)
①1994. 2. 3, 22:30	14	5
②1994. 2. 10, 21:00	19	5
③1994. 2. 23, 14:00	21	5

に示されるように、1本の被害が生じると、続けて他の場所の係船索が次々と切断されているようである。表-3には示されていないが、9月18日にも他のロープ切断日と同様の海象条件となったため、現場の担当者の判断で入港せずに、港外で避泊係留を行った。

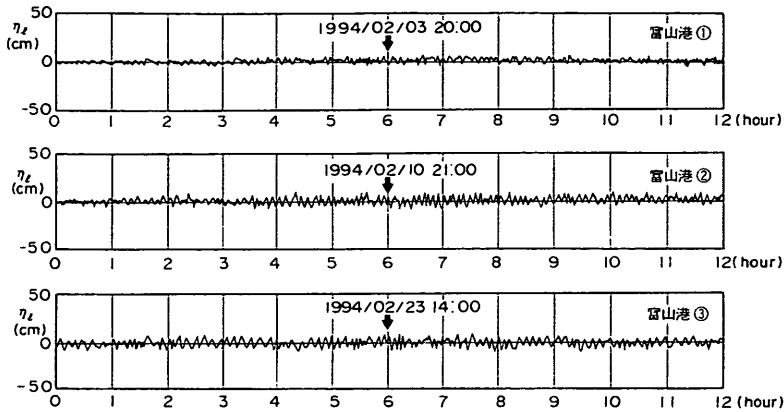


図-12 富山港の長周期の水位変動

天文潮の成分を除去した波形記録を読みとり、波高の上位3つを、示したものである。富山港では、周期5min、波高15~20cmの長周期波が発生していることがわかる。図-12は、表-2で示した最大波が発生した日の長周期波形を示したものである。これは、潮位記録から潮汐成分を除去したもので横軸の1目盛りが1時間に相当する。波形記録には、周期数分の振動が顕著に見られ、12時間の間ほぼ連続して発生していることがわかる。

(3) 志布志港における荷役障害

鹿児島県志布志港においても、係留船舶の荷役障害が報告されており(第四港湾建設局, 1987), 係船索の切断等の事故が生じている。図-13は志布志港の平面図である。係船ロープの切断が頻繁に起こっているのは、図中のSで示した全農サイロバース(岸壁水深-13m)であり、沖合を低気圧が通過したときには、港内波高が比較的小さい場合でも船体の水平動揺が大きくなり、荷役障害や係船索切断が生じるといわれている。そこで、1990年に船体動揺の記録が行われた。また1989年9月には港内において波高観測が行われている。すなわち、図-13の港内のSt.2,3および4で海底に自記式の超音波式波高計を設置し、2時間毎に20min間の観測を行った。

表-3は、1990年におけるS地点の係船索の切断被害状況をまとめたものである。係船索は主に船首位置(Head Line)のものが被害を受けており、表の四段目

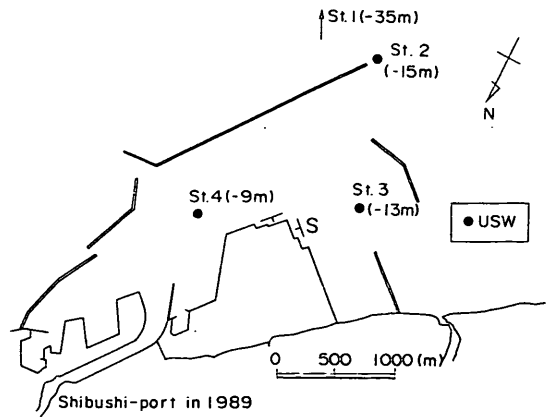


図-13 志布志港平面図

表-3 志布志港における係船索の切断被害状況

船名	ロープ切断時刻	切断箇所	本数
BUNGA KEISIDANG	1990. 4. 11, 夜	船首	3
	4. 12, 朝	船首	1
	4. 12, 夜	船首	3
	4. 13, 朝	船尾	2
CO-OP HARVES	1990. 6. 9, 4:00	船首	2
WELGAR BAY	1990. 8. 16, 13:00	船尾	2
	17:00	船尾	1
C. TAHSIN	1990. 10. 24, 2:30	船尾	1
	7:45	船首	1
	10:10	船尾	1
	10:50	船尾	1
	12:00	船尾	1

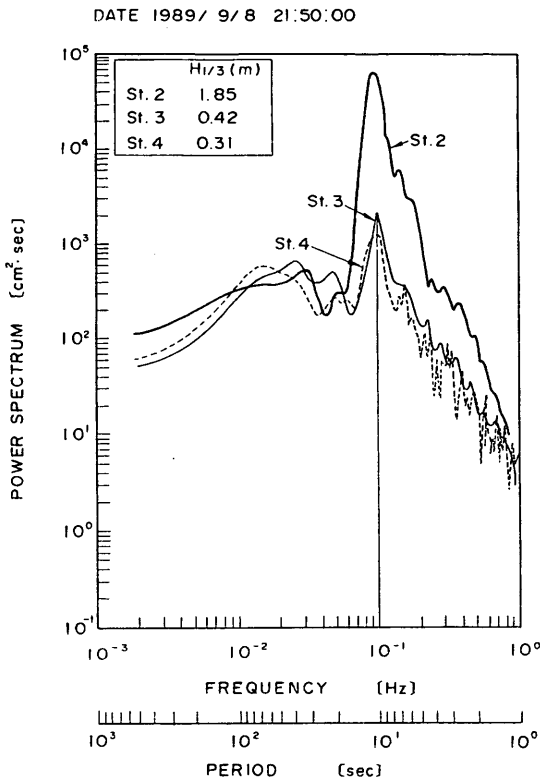


図-14 港内荷役不可能時の観測波のスペクトル

以上のような荷役不可能現象は、毎年報告されている。図-14は、1989年における港内荷役不可能時の観測スペクトルの例である。港口のSt.2における周波数スペクトルのピーク周期は10sで、港内においてもその周期は変化しない。しかし、港内においては防波堤などの遮蔽効果により、ピークの値が顕著に小さくなり、St.3と4のエネルギー密度は、St.2に対して1/100程度になる。St.2, 3, 4の有義波高 $H_{1/3}$ はそれぞれ1.85, 0.42および0.34mであり、港内においては荷役限界波高0.5mより小さくなり従来の基準に従えば、荷役は可能の範囲といえる。図-14に示されるようにスペクトル形は周期20sから1min程度に長周期波側の低いピークを持っている。この長周期波側のエネルギーレベルは港内でも減少せずに、やや大きくなっている。すなわち、沖合いで発生した長周期波は、防波堤による遮蔽を受けずに港内へ減衰せずに伝播していることがわかる。志布志港においては、船舶係留岸壁前面での波高観測記録がなく、また2時間毎の観測であるために港内の長周期波の時間変化が測定されていない。そのために、船舶の荷役障害の原因を直接長周期波と結びつけることは難しいが、長周期波の影

響が大きいことは推測できる。

巻末の付表に、前記港湾における最近のロープ切断事例およびその時の港外の波高・周期をまとめている。

2.2 これまでの観測で得られた長周期波の特性

(1) 拘束波による推定法の妥当性

第一港湾建設局における荷役障害に関するアンケート調査、志布志港における荷役不可能時の港内波のスペクトル調査などにより、船体の大きな水平運動を引き起こし、荷役障害を与える要因としては、港内へ侵入する長周期波の影響が強いことが判明した。そして、苫小牧港における船体動揺のビデオ観測結果から、係留船舶の前後揺の周期は長周期波の周期と一致し、岸壁前面における長周期の水位変動との共振が生じていることが明らかになった。この観測は連続してデータが取得できていることが貴重で、岸壁前面での長周期波の波高がほぼ10~15cm以上になると動揺が大きくなり荷役が不可能になることが判明した。ただし、この限界値は、苫小牧港の特定のバースにおいて観測されたもので、港形や船形および載荷状態によって変化するため、一般的な限界値を設定するためには、より多くの観測データが必要になる。

港外あるいは浅海域における長周期波の発生原因については従来から多くの研究が成されており、最近、水口(1994)と合田(1995)により、その詳細なレビューが成されている。それらに従うと、浅海域における長周期波の発生要因としては以下のものが挙げられる；

- (i) 不規則な波群中のラディエーション応力の変化によって、波群に拘束された長周期の平均水位変動が発生し、これが波群とともに伝播する(拘束波またはセットダウン波)
- (ii) 沖合いの低気圧の吸い上げ効果によってできる長周期の水面変動(気圧波)
- (iii) 不規則波を構成する成分波相互の非線形干渉によって生じる汀線と平行の波(エッジ波)
- (iv) 風波中の成分波が3次あるいは4次の非線形共鳴を起こして、周波数のスペクトルが徐々に長周期化することによって生じる波
- (v) 波群性が強い波の連なりが浅海域で砕波する場合には、砕波点が移動する。この砕波点の移動に伴って汀線と直角方向に長周期波が発生する。

これらの内、(v)の発生機構は浜地形あるいは潜堤地形で発生するものであり、港外における発生機構としては考えにくい。また、水口は(iii)エッジ波および(iv)の非線形干渉の影響は小さいとしている。(ii)の気圧波はもともと港内副振動を共振によって発生させる要因と

して考えられているもので、周期が数分以上の成分については適用できる。

現在のところ、船舶の荷役障害の主因となる周期1～数分の長周期波の発生要因としては、(i)の拘束波が有力である。永井ら(1994)は、仙台新港における沖波の連続観測結果から、港外の長周期波形は理論計算で求まる拘束波形で近似できることを示している。関本ら(1991)も港外の観測点における長周期波形と拘束波形を比較し、拘束波によって港外の長周期波が形成されるとしている。金山ら(1994, 1995)もブシネスク方程式を用いた計算と模型実験から、港外の長周期波が拘束波として発達することを示している。

港内においても長周期波が波群に拘束されているのであれば、港内では波高が減衰するので長周期波も減衰するはずである。しかしながら、これまでの観測では、港内における長周期波高の減衰の割合は比較的小さい。関本ら(1991)は、防波堤における回折によって波群に拘束された長周期波の拘束が解かれ、自由進行長波となって港内へ伝播すると説明している。合田(1995)も、浅海域における長周期波の大きさは拘束波だけでは説明できず、自由進行長波がかなり含まれている可能性があることを述べている。拘束されていた長周期波成分が自由進行長波になると、短周期波成分が港内で波高減衰しても、周期の長い振動成分は防波堤などの構造物によって遮蔽されにくいので、港内においても長周期波の波高は小さくなくらいに説明できる。自由進行長波は、海岸線や防波堤などによって反射され、再度沖合いへ向かうため、沖合いで観測された長周期波成分には波群に伴われた長周期波の成分と自由に進行する長波の成分が重なり合っていると考えられる。その割合は、地形によって変化し、各港で異なると考えられる。また、港内へ侵入しても拘束から解かれていない成分も残っている可能性がある。港外で観測された長周期波成分のいくらかが拘束波によるもので、どれが自由進行長波によるものかは興味ある問題である。

本論文では、港内の長周期波の観測結果を中心に扱っており、今後は、港外における複数点の長時間連続観測や流速解析などを実施し、港外における長周期波の機構解明を図っていく予定である。

ここでは、関本ら(1991)に従い、長周期波の発生要因を次のように仮定する。

(i) 港外において発生する長周期波の主な発生要因は波群性の強い波に拘束された長周期水位変動(拘束波)である。

(ii) 拘束波は、防波堤や岬における風波の回折によって解放され、自由進行長波として伝播する。

(iii) 自由進行長波として港内へ侵入した長周期波は、岸壁や海浜で反射され、一部のエネルギーは再度港外へ伝播していく。

(iv) したがって、港外の波浪観測点では、拘束波と自由進行長波が重なった波形が観測される。

波群に拘束された波(拘束波)は、Longuet-Higgins and Stewart(1962)によって、理論的にその存在が説明されている。Ottosen-Hansen(1978)は、不規則波を構成する成分波の相互の干渉を考慮して拘束波の波形を求め、実験水路で理論の検証を行っている。Sand(1982)は、多方向不規則波を対象として拘束波形を求めている。ここでは、Longuet-Higgins and Stewartに従って拘束波形の計算を行う。

(2) 拘束波の計算

長周期の拘束波の水位変動 η_s は次式で求められる。

$$\eta_s = - \frac{S_x}{\rho(g h - C_g^2)} \quad (3)$$

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

ここで、 ρ : 水の密度、 h : 水深、 a : 短周期波の片振幅、 C : 波速、 C_g : 群速度、である。

図-15は2つの成分波からなる波群に拘束された長

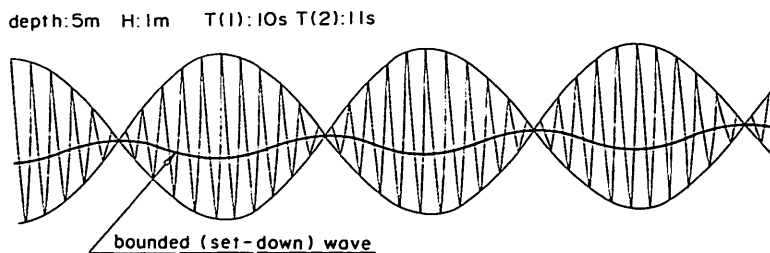


図-15 波群に拘束されたセットダウン波形

周期波形の計算例を示す。この例では、波高 $H=1\text{m}$ で周期 10s および 11s の規則波が重なり合っている波群に拘束される長周期水位変動を示す。水深は 15m で、波群の伝わる早さは C_g は 9.2m/s であるので、拘束波も同速度で伝播する。不規則波についても、式(3)を用いて、拘束波(セットダウン波)の水位を求めることができる。このときはゼロアップクロス法で定義された個々の波の周期 T および波高 H から式(3)の計算に必要な群速度 C_g などを計算し、長周期水位変動 η_e を計算する。

図-16 は、不規則波形とそれから計算される拘束波形の例を示したものである。不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ は、それぞれ 5m および 5s である。水深 h は 10m とした。

不規則波の周波数スペクトルとしては、欧米における港湾設計に広く用いられている JONSWAP 型を用いた。JONSWAP 型スペクトルは、 γ の関数として近似的に

せる(鈴木・河合,1994)ので、波群の状態を変化させ拘束波の波形を変えやすくするためには、 γ をパラメータとして用いる JONSWAP 型のスペクトル形を用いると都合がよい。そこで、ここでは周波数スペクトルとしては JONSWAP 型を用い、 $\gamma=10$ とした。

図-16 に示された拘束波形は、その値がすべて負になり、不規則波形で波高が大きい波がいくつか連なる場所では、それに対応して、負側の山の大きくなる。拘束波形は負側だけに現れるので、計算時間中の全水位変動の平均値をあらためて 0 としてゼロアップクロス法で個々の波を定義し、波高・周期を求めた。

図-17 は $\gamma=16$ の場合の拘束波と不規則波について有義波高と周期を比較したものである。拘束波の有義波高および有義波周期は $H_{e1/3}$ ならびに $T_{e1/3}$ で現されている。 $H_{1/3}$ が 3m から 7m まで変化すると、拘束波の波高もそれにしたがって大きくなり、 15cm から 85cm 程度に大

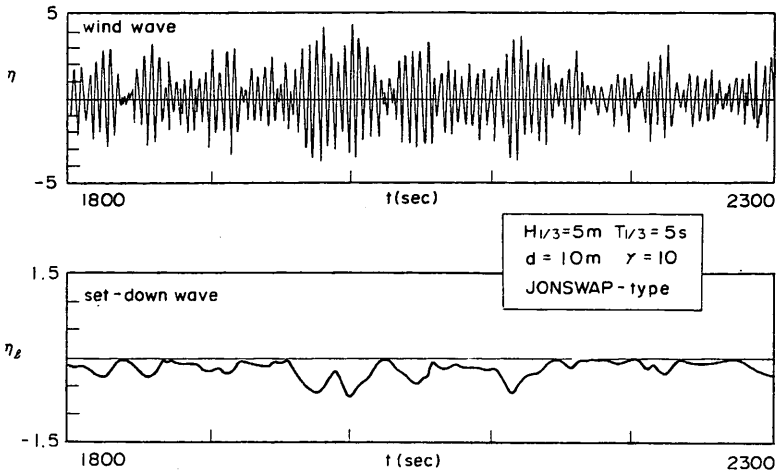


図-16 不規則波とそれに拘束された長周期波

表すと次のようになる。

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \times \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2 \sigma^2]} \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \alpha \approx \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336 \gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}}$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a: f < f_p \\ \sigma_b: f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 1 \sim 7, \sigma_a \approx 0.07, \sigma_b \approx 0.09$$

なお、 f_p はスペクトルがピークを示す周波数、 T_p は逆数である。 γ はスペクトルのピークの高さを決めるパラメータで、この値が大きくなるほどスペクトルは尖ってくる。波群の強さはスペクトル形の鋭さに大きく影響さ

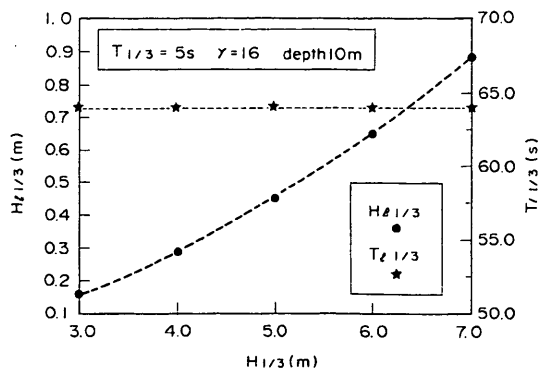


図-17 風波の波高に対する長周期波高の変化

きくなる。その大きさは風波の波高 H_K の1/10程度であり、概算的には、拘束波の波高は風波の波高の約1割として見積もることができる。周期 T_{LK} は波高 H_K が変化しても、ほとんど変化せず約65sである。

図-18は、風波の周期 T_K を変化させたときの長周期波の波高と周期の変化を示したものである。 T_K が長くなると、 H_{LK} と T_{LK} はともに大きくなり、 $T_K = 10s$ のときは T_{LK} は130sになる。すなわち、長周期波の周期は、図-18の計算条件では、 T_K のほぼ13倍程度である。計算条件が変化すると、この割合も変化すると考えられる。そこで、概算するための数値として、長周期波の周期は風波のその約10~15倍を使用できると考えられる。

なお、不規則波の周波数スペクトル形としては、港湾の設計においては以下に示す Bretschneider・光易型が一般的に用いられる。

$$S(f) = 0.257 H_K^2 T_K f^{-5} \exp[-1.03(T_K f)^{-4}] \quad (5)$$

または、次の合田(1987)による改良型が用いられる。

$$S(f) = 0.205 H_K^2 T_K f^{-5} \exp[-0.75(T_K f)^{-4}] \quad (6)$$

Bretschneider・光易型は JONSWAP型で $\gamma = 1$ とした場合に相当する。

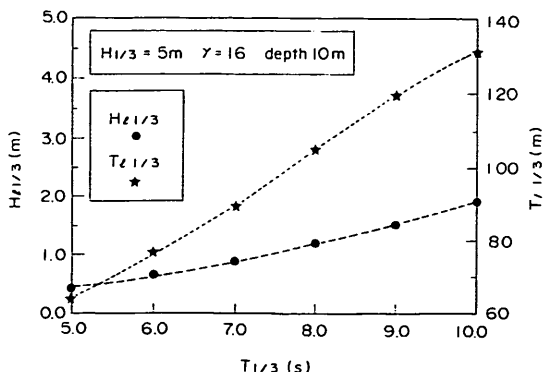


図-18 風波の周期に対する長周期波の波高と周期の変化

3. 長周期波に関する現地観測

これまでの現地調査ならびに文献調査によって、港外で発生した長周期波が港内に伝播すると、船舶と係留索からなる係留系との共振によって大きな船舶動揺を引き起こす可能性が高いことがわかった。この長周期波は主に沖合いにおける波群に拘束されたセットダウン波として生成され、港内へは自由進行長波として侵入すること

が、仮説として成り立つ可能性が高いことが判明した。自由進行長波は海岸で反射され再度沖合いへ向かうので、港外における長周期波の特性は海域の地形の形状の影響を強く受けている。しかしながら、風波の波高が大きい場合には拘束波の波高も大きくなるので、侵入する波の波高が大きい外洋に面した港湾では、常に長周期波による被害が報告されるはずである。全国的な長周期波に対するアンケート調査はなされていないので、各港の実態を正確に把握はしていないが、被害が報告されている港湾はほぼ決まっており、被害が報告されていない港湾が多い。そこで、港湾によって港内の長周期波の特性がどのように異なっているのかを、長周期波による荷役障害が報告されている港湾と、報告されていない港湾について調査し、その違いを検討した。

長周期波の被害が生じている港湾としては能代港を選んだ。能代港では、火力発電所の専用岸壁で石炭貨物船が動揺し、荷役がたびたび中止されることがわかっている(白石ら, 1995, 田端ら, 1995)。一方、沖縄県的那覇港は、東シナ海に面し、設計波が大きく比較的港外の波高が高いにも拘らず、港内において長周期波による荷役障害が報告されていない。また、港湾の近くにはリーフ地形が広がり、水深変化による長周期波の特性の変化を観測できる。以上の理由から、那覇港を被害が生じていない港湾として選択し、現地観測を行った。

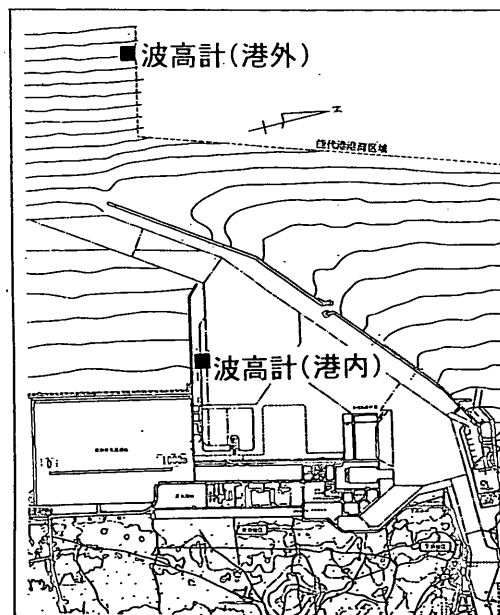


図-19 能代港における波高観測地点

3.1 能代港における観測

(1) 現地観測で得られた長周期波形

図-19に能代港における波高観測地点の位置を示す。図中の“港外”は秋田県が設置している超音波式波高計で、2時間毎に20min間の観測を行っている。“港内”では被害が生じている岸壁の前面で観測がなされている。表-4は観測期間を整理したものである。表中の“期間Ⅰ”および“期間Ⅱ”では船舶が係留されていなかったため、現地観測時から過去1年間において係船索の切断が報告されている期間を対象として、アナログ記録で保存されている港外の波形データを解析した。係留索切断時の解析ケースを表-5に示す。

まず表-5に示した係留索切断時の港外の波形記録から求めた周波数スペクトルを示す。図-20は港外観測点の周波数スペクトルを横軸をminとして表示したもの

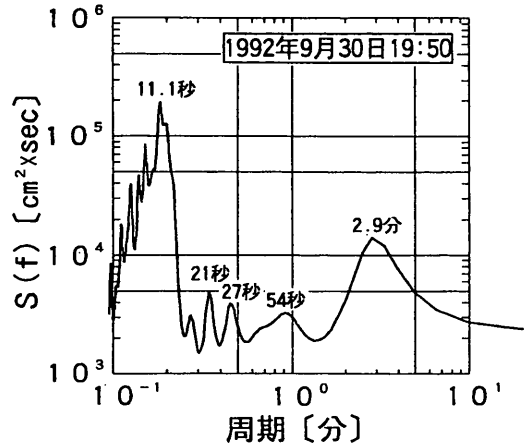


図-20 能代港内における波の周波数スペクトル

表-4 能代港における観測期間

ケース	Ⅰ	Ⅱ
期間	1993.11.18-12.18	1994.1.29-2.20
観測間隔	連続	2hr 毎に 10min (毎偶数時10分前に開始)
デジタルサンプリング間隔(s)	10	0.5

表-5 能代港における係留索切断時

番号	起時
1	1992年 9月30日 19:50
2	1992年11月 4日 1:50
3	1992年12月11日 5:50
4	1993年11月29日 9:50
5	1993年12月11日 19:50
6	1993年 3月 1日 9:50

0.5s 間隔のデジタルサンプリングデータに変換してスペクトル解析を実施した

である。図では、1992年9月30日の解析結果を示した。ピークの中で最も高い短周期側のものは、風波成分のピーク周期を示し、長周期波側では、周期1min以上に緩やかなピークが現れており、そのピーク周期は1.4~3.3 minである。苫小牧港における解析結果と同様に、長周期側の波のエネルギーが大きくなるのが荷役障害の主因となっているのではないかと考えられる。

図-21は、現地観測期間中の港内観測点における水位変動を示したものである。これは連続した長周期波形が得られるように、10s間隔で読みとったデジタル値の変動から潮汐成分とノイズを除去したものである。横軸の1目盛りが20minに相当し、1段の波形はそれぞれ4時間の記録を示す。図を見ると、12月12日の0:00から16:00までは、山と谷が明瞭な波形で表される周期の短

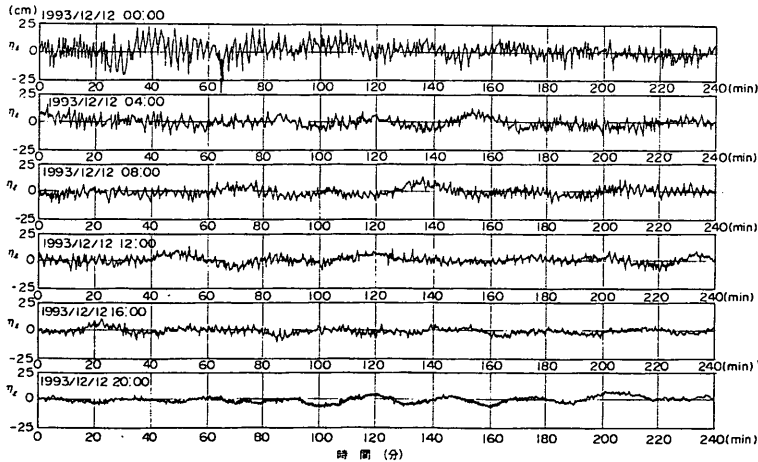


図-21 能代港内における長周期の水位変動

い振動が顕著に現れている。20min間の1目盛り間に8～10波現れるので、これは周期2min程度の長周期波を示している。周期20～40min程度の緩やかな変動は港内副振動と考えられる。

図-22 は長周期波が顕著に生じている12月12日0:00～4:00の区間について、移動平均操作で得られた港内副振動波形を示したものである。細実線で示した波形は10s間隔でデジタル化された観測水位を示している。細実線の波形から移動平均法で、周期数分以上の成分を抽出した波形が、太い実線で示したものである。なお、12月12日0:00における港外測点での有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ は、それぞれ4.0mおよび7.5sであった。港内の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は、それぞれ0.5m および4.0sであった。

図-22 から、能代港内においては周期20～40minの港内副振動と周期1～5minの拘束波に起因する長周期波が生じていることがわかる。副振動の波高は10～20cmで長周期波高は最大で40cm程度になり、苦小牧の観

じていない。港内では、最大で30cm以上の振幅が生じ、概ねその振幅が7cm以上になる場合が多い。したがって、能代港内では、港内の共振現象により顕著な副振動現象が生じているのがわかる。

ハーバービートならびに副振動の大きさを港内と港外で比較するために、港外のスペクトル密度と港内のスペクトル密度の比の平方根として、振幅比を調べた。振幅比 $A(f)$ は次式で計算した。

$$A(f) = \sqrt{\frac{S_{in}(f)}{S_{out}(f)}} \quad (7)$$

ここに、 $S_{in}(f)$: 港内測点の周波数スペクトル密度、 $S_{out}(f)$: 港外測点の周波数スペクトル密度である。

図-24 は高波が発達を始めた12月10日21:00における振幅比を示す。上段の図は、スペクトル密度を示し、下段に振幅比を示す。周期10～100minの副振動成分の振幅比は2以上で比較的大きく、周期30minでは大きなピークを有し、これが能代港の1次モードの副振動を示して

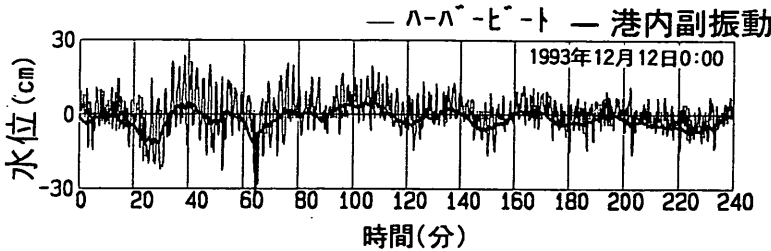


図-22 港内副振動とハーバービートの観測例

測結果から推定されている限界値15cmを越えている。これまでの、港外の長周期波を拘束波を主因とするものと表現し、港内で自由進行長波になると説明した。今後港内の長周期波については、ハーバービートと仮に記述する。

(2) 長周期波の増幅特性

図-23 は観測期間中における能代港外の有義波高 $H_{1/3}$ 、ハーバービート平均波高 \bar{H}_1 および副振動平均波高 \bar{H}_s の時間的な変化を示したものである。港外の有義波高とハーバービートの平均波高の変化を比較するとよく対応しており、港外有義波高が4m以上になる場合には、ハーバービート波高が20cm以上になる。二段目のハーバービートの波高の港内と港外の値を比較すると、両者はほぼ等しく、港外の長周期波が減衰せずに港内へ侵入していることがわかる。3段目の副振動波高を検討すると、港外では概ね5cmを越えることはなく、大きな振動は生

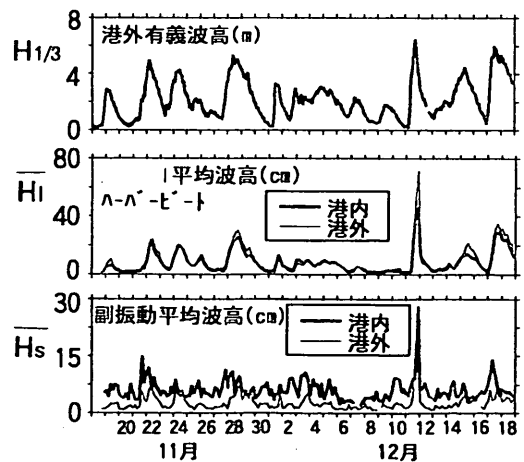


図-23 観測期間中における沖合有義波高とハーバービート波高の変化

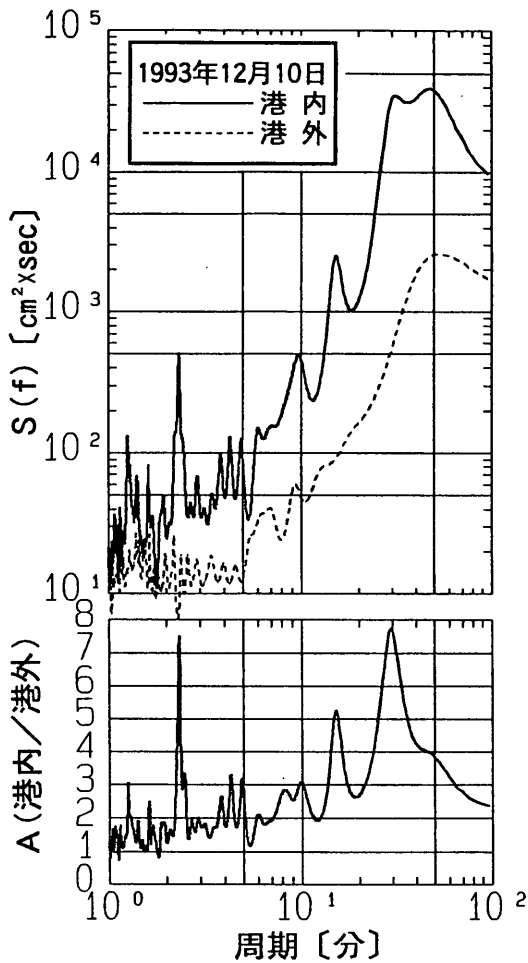


図-24 港内と港外における波の振幅の比

いる。周期1~10minのハーバービートの振幅比は最大でも3以下で、ほぼ1~2の間にある。ただし、周期2.1minで8倍の増幅を起こしており、これは、港内の近距離に位置する岸壁と防波堤背面の反射により局所的に増幅されるためと思われる。これらのピーク周期の位置は、他の観測日にも現れており、能代港の地形的な特性と考えられる。

次に、短周期の風波成分も含めた振幅比を検討した。図-25は、6s~10minの範囲の港内と港外のスペクトル密度の比を示した例である。0.2min付近の高いピークが風波成分のピークで、港外ではその値が 5×10^5 になっている。港内では、この短周期側のエネルギーは大きく減衰し、ピークの値も 2×10^3 程度になる。30sより長い成分を長周期波と考えると、港外では、そのエネ

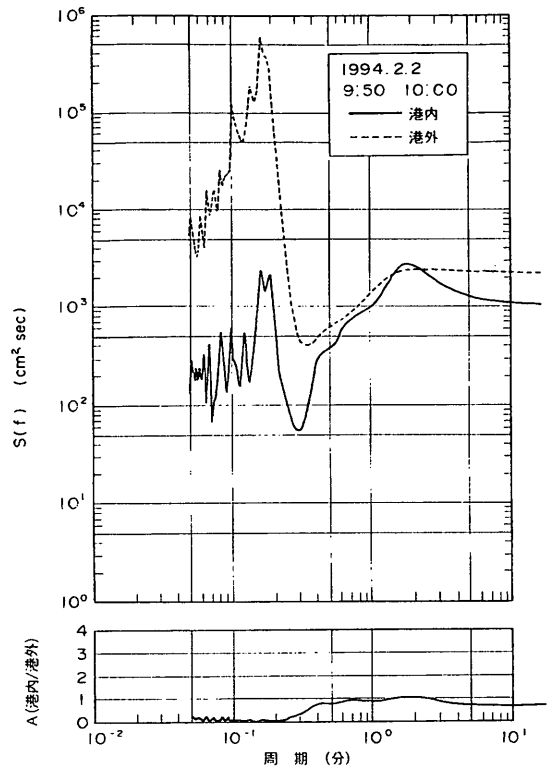


図-25 港外と港外の周波数スペクトル形の比較

ルギー密度の値は、短周期成分よりも小さく、ピークの値では、数百分の1になる。図に示すように、長周期波成分のエネルギーは港内でも減衰せず、港外とほとんど同じである。短周期波成分は港内で減衰してしまうので、港内では短周期波成分に比較して長周期波成分のエネルギーが顕著になり、係留系との共振によって荷役障害を引き起こすものと考えられる。

図の港内における長周期側波側のピークは2min前後に生じており、このピークのエネルギー密度は港外よりも大きくなっており、エネルギー密度の比の平方根として求めた振幅比も1より大きくなっている。したがって、このピークでは港内でわずかに増幅が生じており、港内の岸壁と防波堤背面間の多重反射によって局所的な増幅が生じているものと思われる。

(3) 長周期波の生成要因

次に、長周期波の生成要因を調べるために、港外の観測点における長周期波高と風波の波高を比較した。図-26に観測期間中に最大の有義波を記録した擾乱を含む8日間の有義波高 $H_{1/3}$ と長周期波の有義波高 $H_{L/3}$ を示す。 $H_{1/3}$ が大きくなると $H_{L/3}$ も大きくなり、相関が強いこと

港湾で観測された長周期波の特性

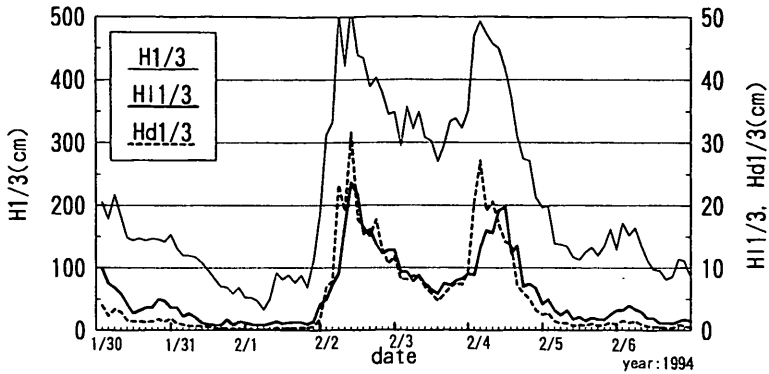


図-26 港外点における短周期および長周期波高の変化

がわかる。

H_N と H_{eN} の相関を調べたものが図-27である。図-27では横軸に H_N を、縦軸に H_{eN} を示している。長周期波高が、有義波高の2乗に比例するものと仮定して相関係数を調べると $r=0.85$ で、ほぼ高い相関を得た。前章の検討では、波群に拘束されたセットダウン波の振幅は、 H_N の2乗に比例するものとして計算できた。したがって、能代港における長周期波も拘束波と強い関係があるものと思われる。

前出の図-26では、式(3)から計算したセットダウン波の波高の有義値 H_{dN} を、破線で示した。 H_{dN} は、 H_N が大きくなると、もちろん大きくなる。図-26では H_{dN} と H_{eN} がほぼ等しく、沖合いの長周期波が主に拘束波として生成されているという仮説をほぼ裏付ける。ただし、長周期波がすべて拘束波として形成されているのであれば、自由進行波となった成分が防波堤や汀線で反射されるので、実際に観測される長周期波高は、生成された長周期波と反射波の重ね合わせとして現れるはずであるので、反射波の成分だけ、推算される拘束波より

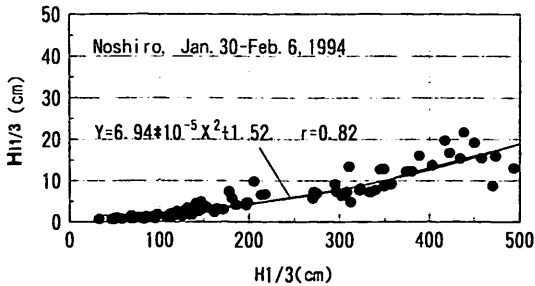


図-27 港外点における短周期波および長周期波高の相関

大きくなるはずである。ただし、拘束波成分がすべて自由進行長波となるかどうか、長周期波の反射率等については不明な点が多く、観測される長周期波と推算される拘束波の波高の比については、明瞭な回答は得られていない。したがって、図-26や27からだけでは沖合いの長周期波の生成要因をすべて確定することは困難である。

図-28は、1994年1月30日から2月6日までの能代港の観測における H_{dN} と H_{eN} の比較を示す。 H_{dN} が20cmより小さい場合には両者の相関が高く、 H_{eN} は H_{dN} として算定することが可能である。 H_{dN} が20cmより大きい範囲では、 H_{eN} は H_{dN} よりやや小さく、両者の相関は悪くなる。全体的には、両者の相関係数が0.9程度になり、波高だけの比較では、沖合いの長周期波の主成因として、波群に伴う拘束波を考えてもよいと言える。

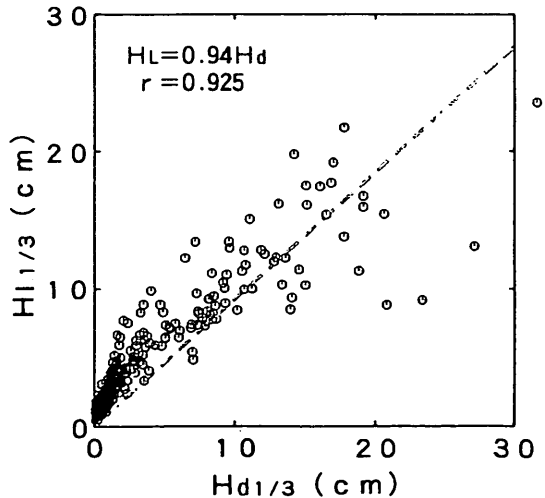


図-28 長周期波高とセットダウン波高の比較

図-29は、長周期波とセットダウン波の波形の比較を示したものである。例として、1994年2月2日9:50~10:10の場合を示す。長周期波形の山の位置にセットダウン波形の山の位置が対応しており、ある程度、両者は相関を有することがわかる。ただし、観測して8minの水位などを見ると、セットダウン波の振幅が顕著に大きくなって、両者の差が目立っている。

(4) 長周期波高の推定法

なお、能代港においては計算によるセットダウン波と長周期波がほぼ等しいので、計算によって長周期波の推定が可能である。図-30は、港外の有義波高と計算によるセットダウン波高を比較したものである。セットダウン波高の有義値は風波の有義波高の2乗に比例し、能代港の場合 $H_{d0} = 0.84 \times 10^{-2} H_1^2$ で推定することができる。港外の有義波高は定常的な観測で常時得られており、この値から長周期波をある程度推定できる。

(5) 合田式との比較

砕波帯における長周期波の観測例から導かれたサーフビート波の振幅を算定する式が合田(1975)によって導かれている。加藤ら(1989)は合田の提案式の左辺を有義値に対応する長周期波高 H_L と換算沖波波高 H_d の比で置き換えて次式を提案している；

$$\frac{H_L}{H_d} = \frac{K_A}{\left[\frac{H_d}{L_o} \left(1 + \frac{h}{H_d} \right) \right]^{1/2}} \quad (8)$$

ここで、係数 K_A は現地の地形特性等で定まる定数である。 L_o は沖波の波長である。図-31は上式による計算結果と、観測結果を比較したもので、加藤らによる波崎海岸での観測(1989)と苫小牧港外での観測(菅沼ら,1995)結果を参考として示した。係数 K_A を0.04~0.023とすると、砕波帯を対象とした加藤らの観測結果は合田の算定式とよく一致している。苫小牧における観測結果と能代港における観測結果は、その相関直線の傾きが合田式と異なり、係数 K_A を変化させても、合田式でうまく推定できないことがわかる。したがって、砕波帯における長周期波の生成要因と港外における生成要因には異なる因子が含まれており、砕波帯内における観測結果より導かれたサーフビートの算定式を直接港外における長周期波の算定に適用することはできない。

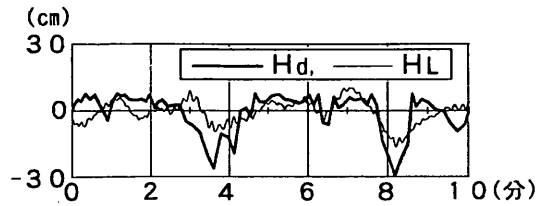


図-29 長周期波とセットダウン波の波形の比較

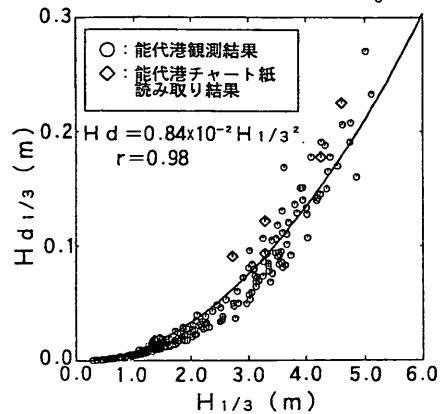


図-30 港外の有義波高とセットダウン波高の比較

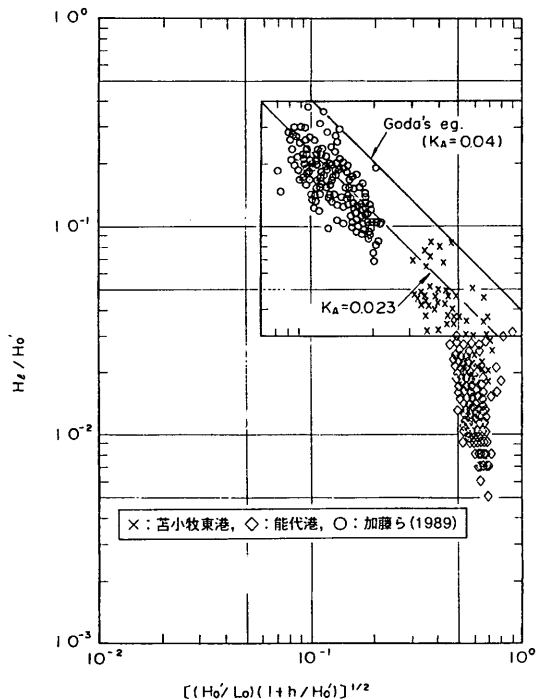


図-31 砕波帯における長周期波高推定式との比較

3.2 那覇港における観測

(1) 観測の概要

長周期波の観測は、港湾の外部にリーフが発達しており、顕著な長周期波が生じる可能性があると思われる沖縄県那覇港で行った。図-32に那覇港の現地観測地点および観測期間を示す。観測は、定常観測(永井ら,1995)を行っている港外観測地点(P.0,水深50m)と港外北側のリーフおよび港内で、1995年2~3月に行った。図に示すように、リーフ上では水深12(St.3), 5(St.2), 2(St.1)mの3地点に水圧式波高計を設置して水位変動を観測した。港内では、沖防波堤の直背後の外港部(P.2,水深18m)と内航船および作業船の船着き場がある内港部(P.1,水深17m)に2成分電磁流速計と水圧式波高計を設置して、波高と流速を観測した。観測器の台数に制限が合ったので、P.1~2とSt.1~3の観測期間はずれている。記録は毎正時20分間連続して行った。

まず、20分間の波形記録からゼロダウンクロス法で個々の波を定義し、統計解析によって観測期間中の波高および周期の最大値および有義値を整理した。図-33は、P.1およびP.2において観測を実施したときの沖波観測地点P.0における波高と周期の変化である。ほとんど欠測が

無く連続したデータが取得されており、観測期間中の最高有義波高 $H_{1/3}$ は4.1mであり、そのときの最大波高 H_{max} および有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ、6.9mおよび9.0sであった。リーフ上の観測期間(1995, 2/8-18)では沖波波高が比較的小さく $H_{1/3} = 0.4 \sim 1.9m$ であった。

(2) 那覇港に侵入する長周期波の特性

次に、統計解析で得られた結果をもとに港内観測では高波浪時のケースを抽出し、リーフ上の観測では全ケースについて周波数スペクトルを求めた。また、港内では流速記録が得られているので、拡張最大エントロピー原理法(EMEP)(橋本ら, 1993)で方向スペクトルを求めた。高波浪時の定義としては、沖波 $H_{1/3}$ が3m以上になるととした。長周期波の解析にあたっては、観測した波形を有限フーリエ級数に分解し、そのうち着目している周波数帯の成分波について部分級数を再構成し、長周期波形を求めた。そして、ピークツウピーク法で個々の長周期波を定義し、長周期波高および周期を求めた。ここでは、周期20s以上の成分波を長周期波とした。最後に、港外と港内の長周期波のエネルギーを比較するために前述の式(7)で振幅比 $A(f)$ を求めた。

図-34は、長周期波の生成要因を検討するために、

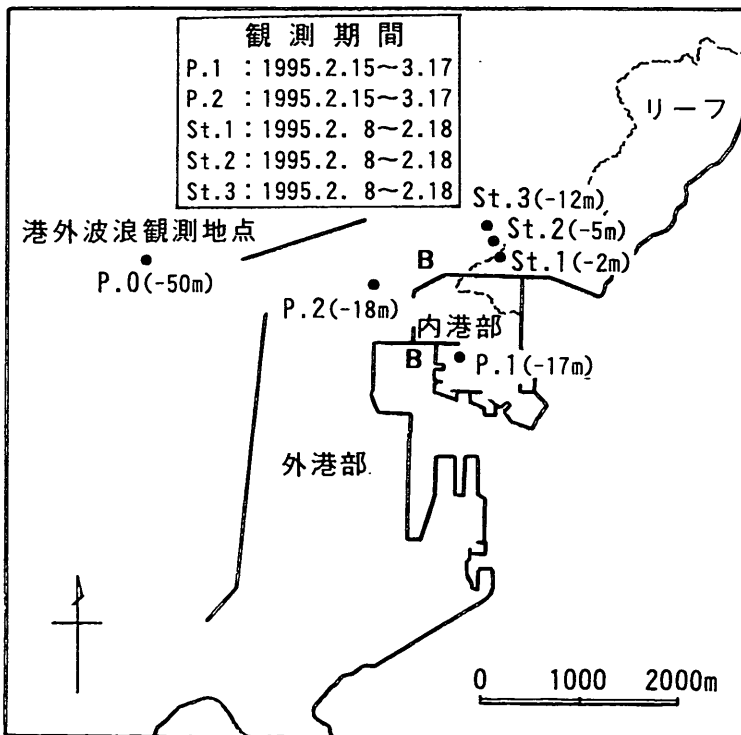


図-32 那覇港における観測地点

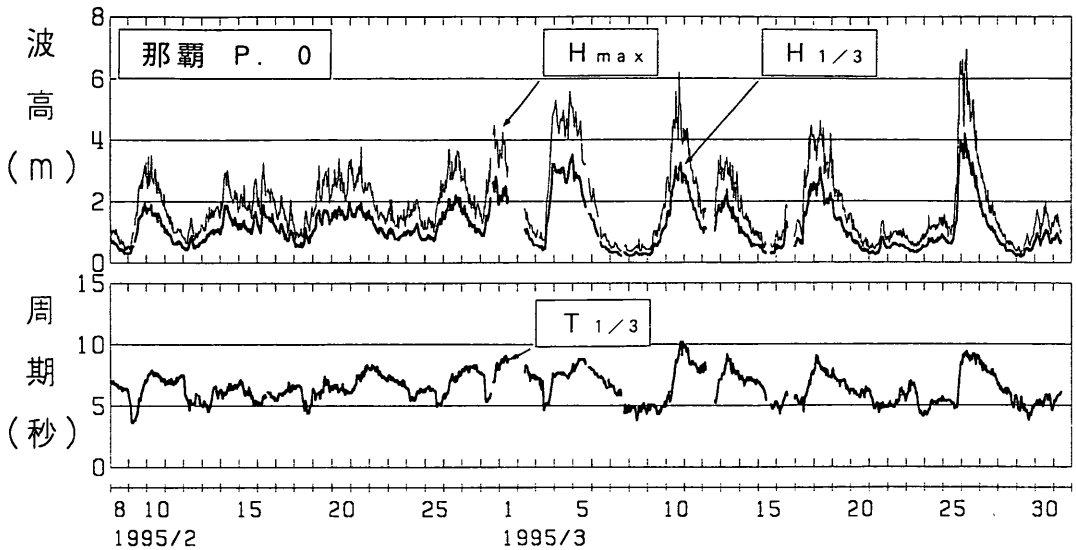


図-33 那覇港における観測期間中の沖波の波高と周期

リーフ上の観測から得られた長周期有義波高 $H_{e\%}$ と有義波高 $H_{\%}$ の相関を示したものである。P.0(-50m)では、 $H_{\%}$ が変化しても、 $H_{e\%}$ は大きく変化せず、ほぼ5~10cmである。 $H_{e\%}$ は $H_{\%}$ の2次式で近似できるものとして相関係数を求めると、St.3(-12m)およびSt.2(-5m)における相関係数が高く、それぞれ0.888および0.921である。

なお、St.1(-2m)では、干潮時には引き波時に海底が露出するため波の解析ができなかったため、St.1での解析結果の整理は示していない。

図-35は、観測期間中の長周期波高 $H_{e\%}$ の変化を各観測点で示したものである。P.0においては $H_{e\%} = 5 \sim 10$ cmで、St.3で少し小さく $H_e = 3 \sim 5$ cmになる。St.2では H_e が増大し、10cm以上になる。St.1は連続記録にはなっていないが、 $H_{e\%}$ はSt.2より若干小さく5~10cmになっている。

図-36は、短周期成分で再構成された波形からLonguet-Higgins and Stewart (1962)に従って計算したセットダウン波の平均波高 $H_{e\%}$ と $H_{e\%}$ を比較したものである。P.0(-50m)では、 $H_{e\%}$ に比較して $H_{e\%}$ が1/10以下になり非常に小さく、沖合の海域では拘束波として長周期波の生成要因を説明することはできず、より浅い沿岸から反射した長周期波が、長周期波成分の形成に大きな影響を及ぼしていると考えられる。St.3はリーフが始まる地点に近いが、砕波帯の沖側にあたる。ここでは、 $H_{e\%}$ は $H_{e\%}$ のオーダーと一致し、長周期波がセッ

トダウン波として形成されているとみなすことができる。St.2では観測期間中、 $H_{\%}$ はSt.3とほぼ同じであるが、長周期波高はSt.3に比べると増大している。ただし、その値は理論計算から導かれた $H_{e\%}$ に比べると小さい。St.2は、リーフの先端に位置し、ほぼ砕波帯に含まれている。したがって、St.3付近で拘束波として発達した長周期波の拘束が徐々に解かれ、自由進行長波が形成される地点に位置するのではないかとと思われる。そのために、短周期波成分からのエネルギーの供給が無く、拘束波として推定した理論値 $H_{e\%}$ より、実際に観測された $H_{e\%}$ は小さくなっているものと思われる。St.1においても、自由進行長波となっているので、長周期波の波高 $H_{e\%}$ はSt.2とほとんど変化していない。

長周期波の方向スペクトルは、長周期波成分の水位、水平2成分の流速波形から、短周期波成分と同一の手法で近似的に推定できる (Sekimoto, 1995)。そこで、EMEPを用いて、リーフ上に長周期波の方向スペクトルを求めた。図-37は、自由進行長波が卓越していると思われるSt.2における方向スペクトルの解析結果を示す。上段は周波数方向に積分して表示した周波数平均方向関数を示す。短周期波成分の方向スペクトルは北北西に高いピークを有する一山型であったので、図-37の北北西に現れるピークが入射する長周期波を示している。図-37では南南東に低いピークが現れている。これは陸地方向から来る成分であり、砕波帯で形成された長周期波が海岸で反射され、沖側へ向かっていることがわ

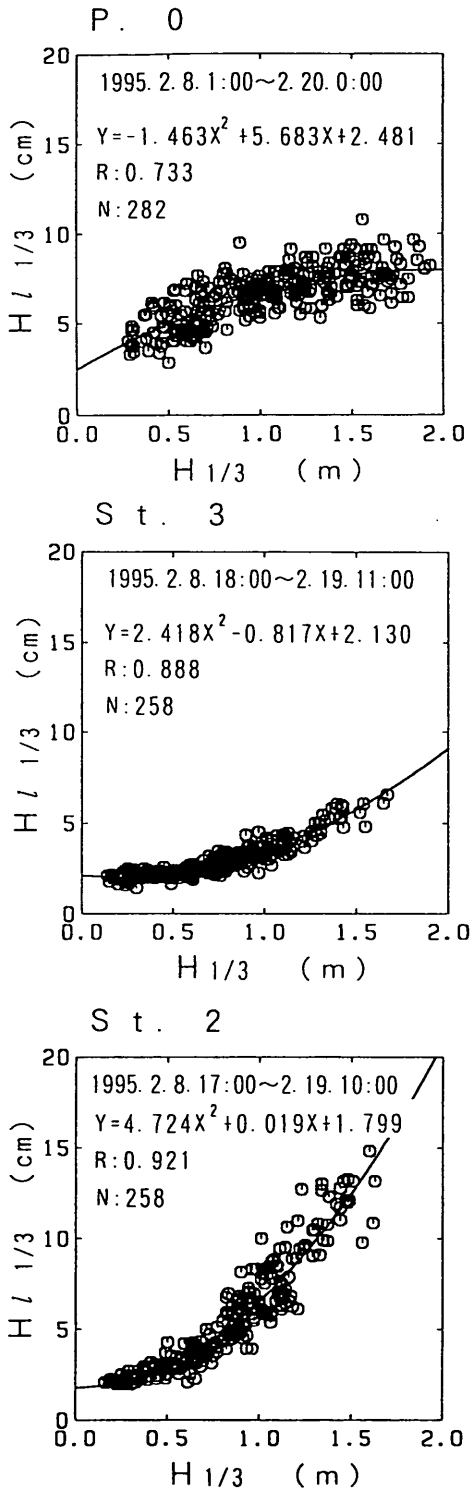


図-34 長周期波高と風波の波高の相関

かる。

以上のように、港外の波浪観測点P.0における長周期波は、拘束波を主な要因とするのではなく、沿岸で形成された拘束波が、砕波帯で自由進行長波となり、それが再度沖側へ向かったものや、他の海域で形成された長周期波が伝播し、重畳されたものとして成り立っていると考えることができる。したがって、長周期波の波向と、方向スペクトル解析から判断できる風波の波向とは一致しないことがあると思われる。

(3) 那覇港内における長周期波の特性

次に、港湾内の長周期波の特性を調べた。図-38は、那覇港の外港部P.2および内港部P.1における周波数スペクトルの解析例を示す。図では比較のために、港外のP.0で観測された周波数スペクトルを破線で示した。P.0における周波数スペクトルは、0.13Hz程度にピークを有しており、 $f < 0.05\text{Hz}$ の長周期波側のスペクトル密度は一定で、短周期波側のピーク値に比較すると、 $1/1000$ 以下である。P.2では、沖側の防波堤の効果により、短周期波側のピーク値は小さくなるが、長周期波側のスペクトル密度の値は、P.0とほとんど変化していない。内港部のP.1では、短周期波側のピーク値がP.2より小さくなるとともに、長周期波側のスペクトル密度も $1/10$ 以下に低下している。すなわち、長周期波のエネルギーは外港部においても減衰せず、港外で発生した長周期波は沖側の防波堤ではほとんど抑止されずに外港部へ侵入する。観測期間中の平均長周期波高の最大値は0.13mであったので、もし外港部に大型船が岸壁係留されておれば顕著な荷役障害が生じたものと思われる。内港部では長周期波のエネルギーは減衰しており、平均波高も2ケースを除いて0.5mを越えることはなかった。

エネルギーの増減をより詳細に検討するために港内の振幅比を求めた。図-39(1)(2)および(3)は、それぞれP.0とP.2の振幅比、P.0とP.1の振幅比およびP.2とP.1の振幅比を示したものである。図-39(1)の場合には、 $0.01 \sim 0.1\text{Hz}$ すなわち $10 \sim 100\text{s}$ の振幅比は大きく、その最大値は2.4程度である。これは、長周期波のエネルギーが若干増幅されていることを示し、この原因としては外港部における港内副振動が考えられる。図-39(2)で内港部P.1における振幅比を調べると、その値は小さく、すべての周波数帯で0.3以下である。20~100sの成分波では、振幅比は0.2程度である。図-39(3)で外港部P.2と内港部P.1の振幅比を検討すると、 $10 \sim 100\text{s}$ の長周期波側の値が非常に小さく、 $0.1 \sim 0.5$ になっていることがわかる。すなわち、長周期波は内港部で顕著に減衰し、係留船舶の荷役障害やフローティングドックの動揺を引

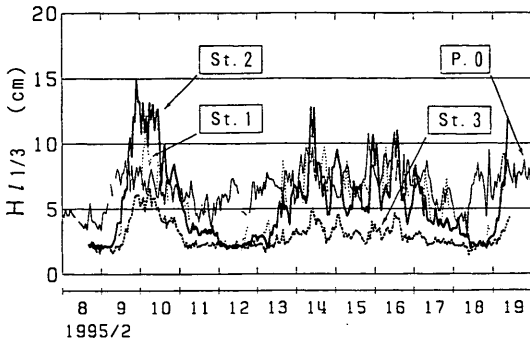


図-35 リーフ上の長周期波高の変化

き起こす危険性が小さい。現在、内港部では常に、大型貨物船が接岸したり、港湾工事が行われているが、係船障害は報告されていない。那覇港の内港部において長周期波が減衰する要因は、内港部の港口が外港部の開口部の方向を向いておらず、沖側からの長周期波が直接侵入することがないことと、図-32に示した防波堤Bが内港部を開口部を小さくしており、その防御効果が働いていることであると思われる。したがって、現在、長周期波による荷役障害が生じている港湾においても、開口部を狭くしたり、向きを変化させる、あるいは防波堤を適切に延長すれば長周期波をある程度減衰させることが可能である。

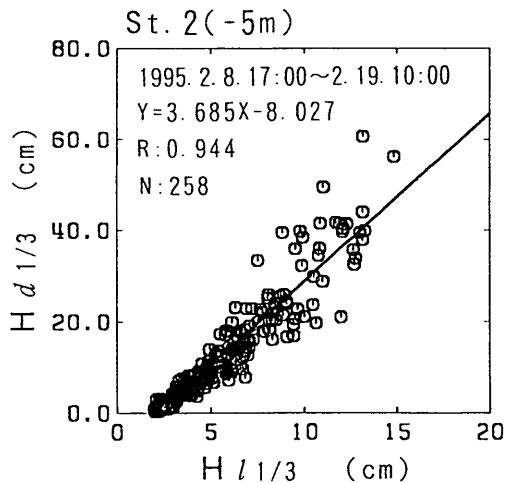
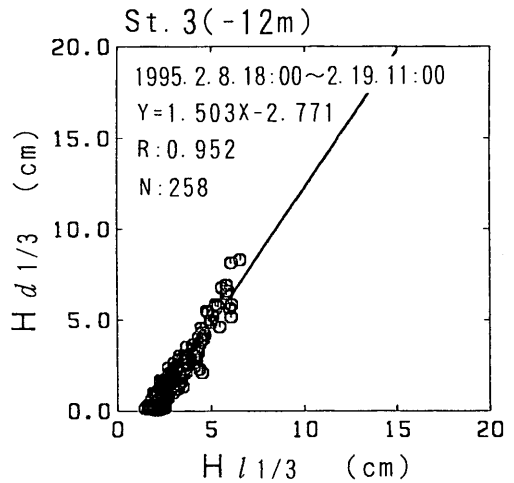
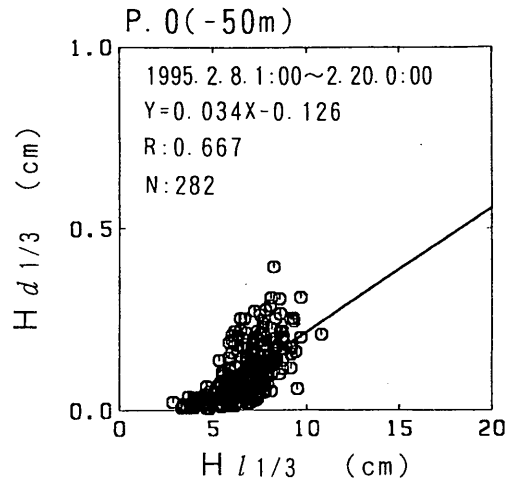


図-36 リーフ上の長周期波高とセットダウン波高の比較

港湾で観測された長周期波の特性

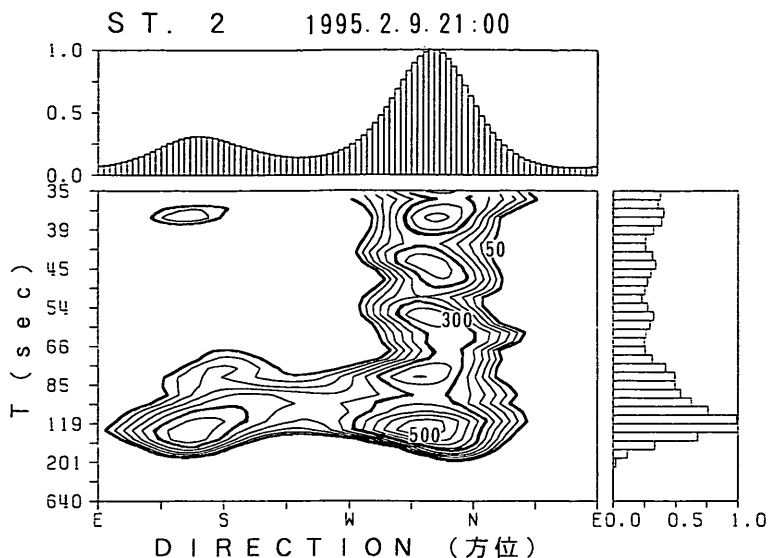


図-37 長周期波の方向スペクトル

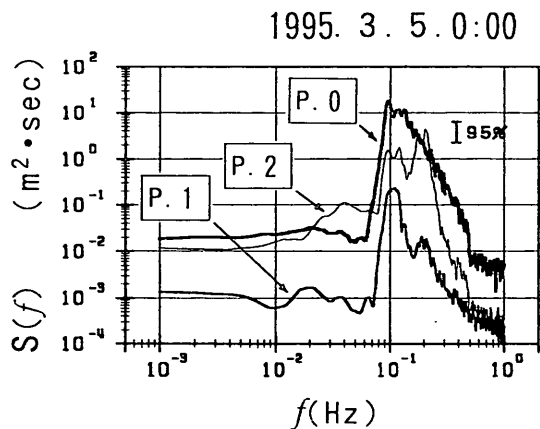


図-38 観測した港内の周波数スペクトル

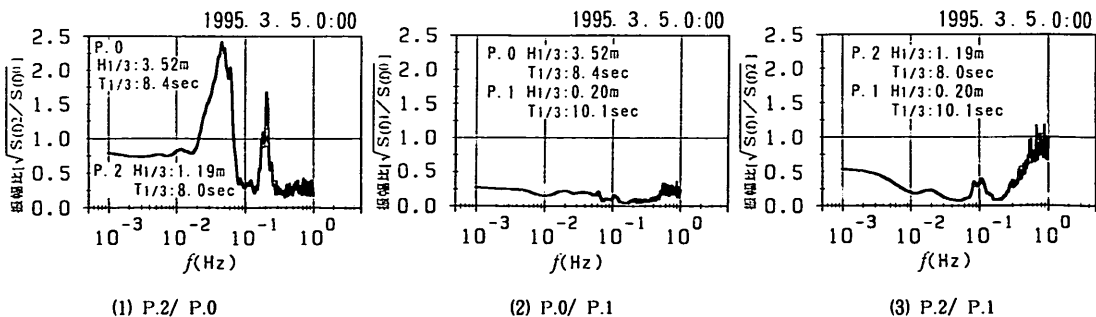


図-39 港内における振幅比

4. 数値計算による対策工法の適用性の検討

4.1 計算法の適用性

(1) 能代港における適用性

次に、港内の長周期波の増幅現象を検討し、対策工法の有効性を検討するために数値計算を実施した。3.において港外で拘束波として形成された長周期波は防波堤による回折によって自由進行長波となって港内へ侵入すると仮定した。関本ら(1991)は、現地観測によって港内の長周期波の特性を検討することによってこの説を支持している。喜岡ら(1995)は、2次のオーダーの波の伝播計算を行い、拘束波の港内での増幅を計算している。その増幅の振幅やピーク周期は、自由進行長波の伝播計算結果と大きく変化せず、近似的に港内における拘束波の増幅を線形長波の伝播式で表現できることを示している。したがって、現実には、港外において形成された拘束波成分はすべて自由進行長波へ変化することはないと考えられるが、計算上はすべて自由進行長波に変化するものとして、港内の伝播計算を実行しても構わないと考えられる。

ここでは、現地観測で明らかとなった港外の長周期波がすべて自由進行長波に変換されて港内へ侵入するものと仮定して、港内における長周期波の増幅を検討した。長周期波の港内への伝播計算法としては、港内副振動計算法として整備された高山・平石(1988)の計算法を用いた。これは沖合いで周期一定の微小振幅波を入射させ、線形長波の運動方程式と連続式を差分で近似した方程式を解いて港内での水位変動を時間領域上で求めるものである。計算法の詳細とその適用性については上記の文献を参照されたい。この計算法の特徴は、防波堤開口部におけるエネルギー損失を考慮する点である。計算では、海底摩擦と次式に示す防波堤開口部におけるエネルギー損失 $\Delta \zeta_e$ を考慮した。

$$\Delta \zeta_e = f_R \frac{u^2}{2g} \quad (9)$$

ここで、 u は港口流速、 g は重力加速度、 f_R は損失係数で、ここでは $f_R=1.5$ (伊藤ら, 1964) とした。

計算では、線形長波の連続式と運動方程式を連立させた差分近似式を各タイムステップ毎に解いて、各周波数毎に規則入射波の伝播を計算し、港内の応答関数を計算している。本計算法の適用性を検討するために、まず能代港における計算を実施した。

計算領域は、能代港とその沖合の水深 50m 以浅の海

域を含む矩形領域で、計算領域の西側から微小振幅長波が入射するものとする。計算法では、格子列で構成される外側の境界線から直角に波が侵入するものとして計算を進めている。したがって、長周期波の波向が変化した場合には、計算領域とその向きを変化させる必要がある。

図-40 は、能代港の入射長周期波の波向と計算領域を示す。能代港では、長周期波の波向が不明なので、入射波向を特定させることはできない。しかし、屈折の影響を受けて、浅海域では、波向は水深のコンターラインと直角に交わるようになるため、長周期波が水深 50m より深い海域で形成されるものとする、図の Case B のような波向で入射する可能性が高い。ただし、波向は特定できないので、Case B の波向を時計回りならびに反時計回りに 45° 傾けた Case A および Case C の波向についても検討した。

最も沖側の格子間隔は 800m であり、浅海域では順次 1/2 ずつ格子幅を分割し、能代港内では図-41 に示すように 50m 格子で地形を表した。図-41 の P.1 および P.2 が、港外および港内の現地観測地点に相当する。沖側境界の入射波の片振幅は 2 cm で一定とし、周期を 1~60 min で 1 min 毎に変化させて港内水位を計算した。

図-42 (1) は、波向 Case-B で、周期 32min の微小振幅長周期波の港内における増幅率を示す。増幅率は境界

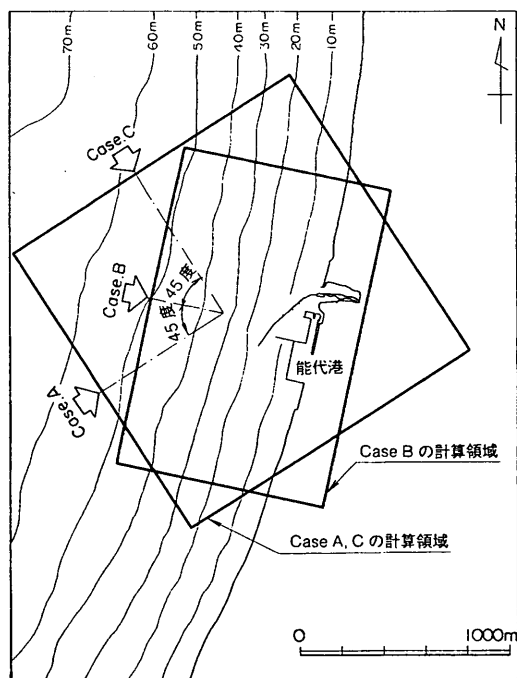


図-40 計算領域と長周期入射波の波向

港湾で観測された長周期波の特性

で入射させた波高に対する港内波高の比である。能代港内には図中のC1ならびにC2で示されるような長い水路が存在し、長周期の水位変動が増幅されやすい地形となっ

ている。周期 32min の場合には、港口部の増幅率が 1 ～ 2 程度であるのに対して、水路 C1、C2 と港奥部の増幅率が 6 以上になり、港口部を節とし、港奥あるいは水路 C1、C2 を腹とする顕著な港内副振動が生じている。観測結果を示す図-24 において、周期 30min 程度の顕著な振動が現れていた。これは、図-42 (1) の計算結果から明らかのように、能代港全体で生じている港内副振動によるものである。

図-42 (2) は、観測結果でハーバービート成分の振幅比が大きくなっていった周期 2.2min の増幅率分布を示す。海陸境界では完全反射条件を用いているため、港外では増幅率の高い部分が帯状に生じ重複波的な現象が生じている。港内では、防波堤の開開口部におけるエネルギー損失の影響もあり、増幅率は小さくなっている。ただし、観測点 P.2 において局所的に増幅率が 6 程度に大きくなっている。図では、対岸の防波堤背面 P.3 においても局所的に大きな増幅率が現れており、これは、両者間の多重反射による局所的な港内副振動現象と考えられる。すなわち、それらを腹とし、その中間を節とする振動モードによる増幅である。周期 2min はハーバービートの周期であり、港湾の地形によっては、港内に侵入した長周期波が局所的に港内副振動を励起させる可能性があることがわかる。

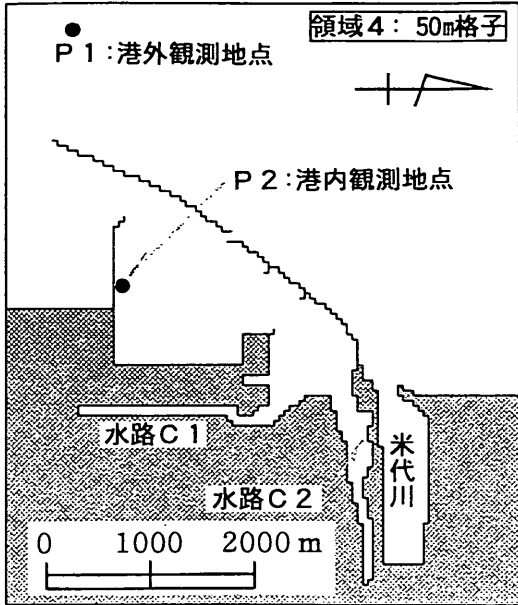
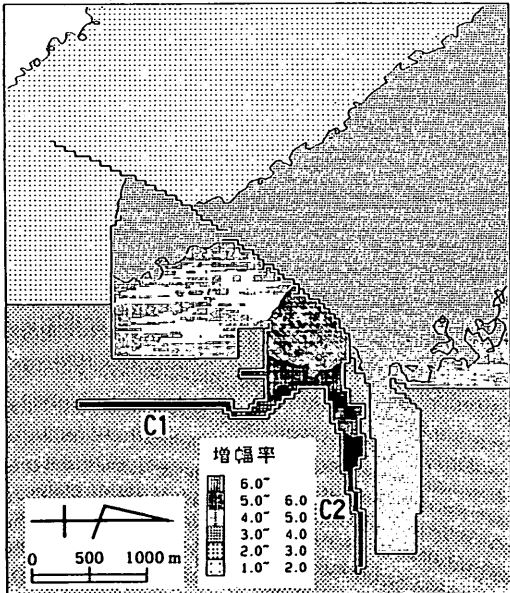
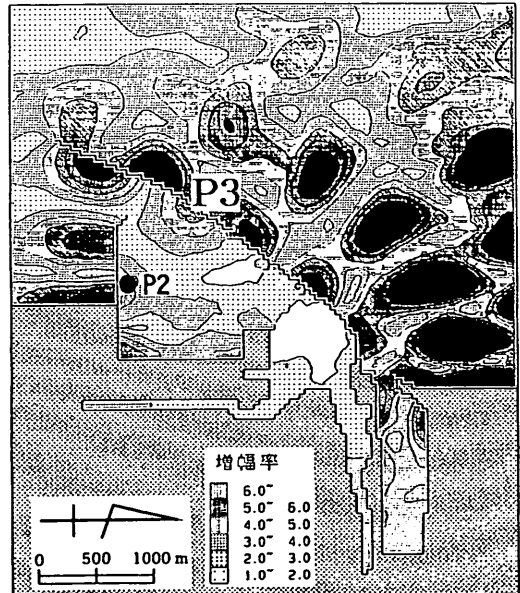


図-41 能代港内の計算地形



(1) 周期 32min



(2) 周期 2.2min

図-42 能代港内の増幅率の計算結果

なお、図-42(2)に示すように、周期2.2minの場合、港内の位置によって増幅率が変化し、使用しているバースの位置を少し変更すれば、増幅率が小さくなる。したがって、荷役障害を防止するためには、バース位置の変更が考えられる。

図-43は、港内観測点の長周期波成分の港外のそれに対する振幅比 $A(f)$ の観測結果と計算結果を比較したものである。ここでは、波向をA, B, Cの3ケースに変化させた場合の結果を示した。観測結果は、期間Iにおいて港外の有義波高が4m以上になった期間のスペクトル解析結果を平均して求めた。なお、図の横軸は、周期(min)で示している。図中の実線が計算値を示し、破線が観測値を示している。30min前後の港内副振動のピークは、計算値でも現れており、計算法の適用性は高い。周期15minおよび10minのピークは、Case B

の場合、数値計算でも正しく表現されているが、Case A および Case C では、他の周期にもピークが出現しており、計算結果と観測結果がやや異なる。Case A では、計算で周期9min程度に高いピークが生じているが、観測結果ではそれに対応するピークは生じていない。

ハーバービートが励起させた局所的な副振動現象と思われる周期2minの振動は、どのケースにおいても計算されており、計算モデルの適用性が高いことがわかる。全体的にピークの出現周期とその振幅を検討すると、Case Bの計算結果が最もよく観測結果と一致しており、波向を適切に設定すれば、港内における長周期の水位変動を数値モデルで精度よく推定できることがわかる。なお、今回の観測結果からは、Case Bの波向が妥当性を有していると言えるが、南側から長周期波が侵入する場合には、港内の振幅比が他のケースに比較して大きくな

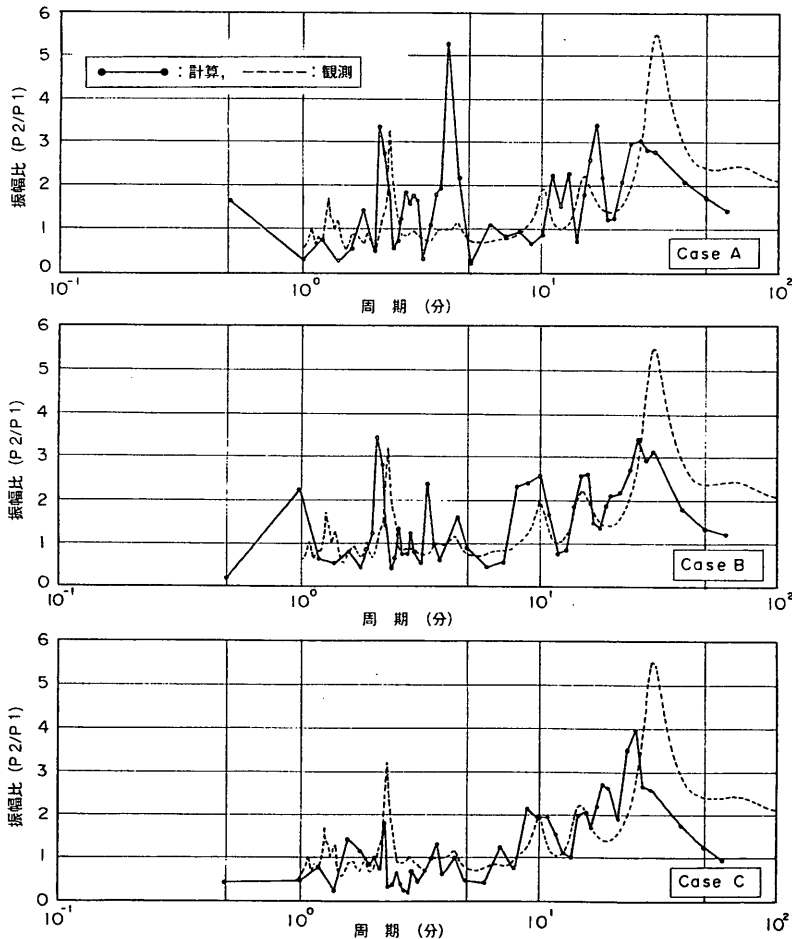


図-43 振幅比の計算値と観測値の比較

るため、荷役障害が発生しやすくなる。したがって、実設計において長周期波を考慮するときには、長期の連続観測により波向を決定すべきである。

(2) 那覇港における適用性

図-44 は、那覇港における長波の増幅計算結果で、横軸に正弦波として仮定した長波の周期、縦軸に港外P.0と内港部P.1の振幅比を示す。周期が2min以上で長くなると、振幅比は徐々に増加するものの、周期30minで約1.3にしかならない。周期1min以下の場合には振幅比が非常に小さく、0.2程度になる。周期が短くなると振幅比が小さくなるのは、港外の振幅が同一であれば周期が短くなる程、開口部流速が大きくなりエネルギー損失が増加するためではないかと思われる。周期30~60sの振幅比の計算値は、図-39(2)に示した内港部と港外の振幅比にほぼ一致しており、開口部損失を考慮した線形長波の近似計算において、現地における長周期波の減衰特性が表せることがわかった。

4.2 対策工法の効果

3.で検討したように那覇港においては、港外ならびに外港部で長周期波が発生しているにも拘らず、内港部の長周期波が減衰し荷役障害が生じていない。これは、那覇港内港部の防波堤・波除堤が長周期波の抑止効果を有しているためである。したがって、周期30sから5min程度までの長周期波の対策としては、防波堤の新設や延長が最も効果的である。この対策は現実的である反面、工費が大きいという欠点を有する。特に、既存の港湾で長周期波抑止用の防波堤を建設しようとすれば、沖合いの水深の深い場所での建設工事が必要で、工期と工事費が大きくなることは避けられない。ただし、新しく港湾

を計画する場合には、長周期波の侵入方向を検討することによって、風波に対してだけでなく長周期波に対しても大きい抑止効果を有する防波堤を計画することが可能である。防波堤の延長以外にも、防波堤開口部を狭くしたり、開口部の向きを変化させることも対策工法として有効である。

ここでは、前節で検討した数値モデルを適用して、対策工法の効果を検討する手法の実施例を示す。対策工法としては、港内の長周期波高が大きくなった能代港を例として、防波堤を延長した場合を提案し、その延長効果を示す。図-43において波向を変化させて港内の振幅比を比較したところ、CaseAにおいて港内の振幅比が最も大きくなることがわかった。そのため、本検討においては、能代港において最も危険な波向のCaseAについて、ケーススタディとしての対策工法を検討することにした。図-45は、数値計算をした防波堤形状を示す。図-45(1)は、現在の防波堤をさらに1km延長した場合で、CaseDとする。図-45(2)は、航路を塞ぐような形で長さ1kmの一文字堤を建設した場合で、CaseEとする。いずれの場合も、現実の計画には関係が無く、防波堤の配置や延長による長周期波の抑止効果を検討する目的で仮に設定したものである。

図-46に港外点P1に対する港内の対象岸壁P2の振幅比を示す。図の上段がCaseAとCaseDの比較、図の下段がCaseAとCaseEの比較を示す。CaseDの場合には、CaseAで現れた周期4minのピークが小さくなるが、周期2minの振幅比が、CaseAに比較して大きくなっている。周期が10minになると港内副振動による振動が顕著になり、港口部を少し塞いでも変化は小さく、CaseAとCaseDの振幅比は大きく変化しない。

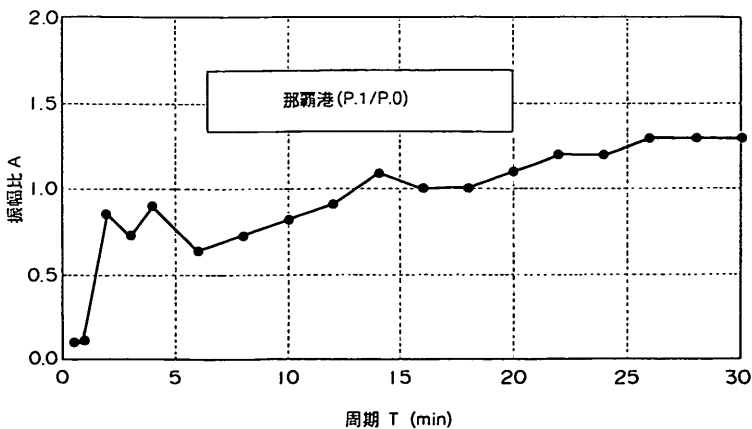


図-44 那覇港における長周期波の振幅比

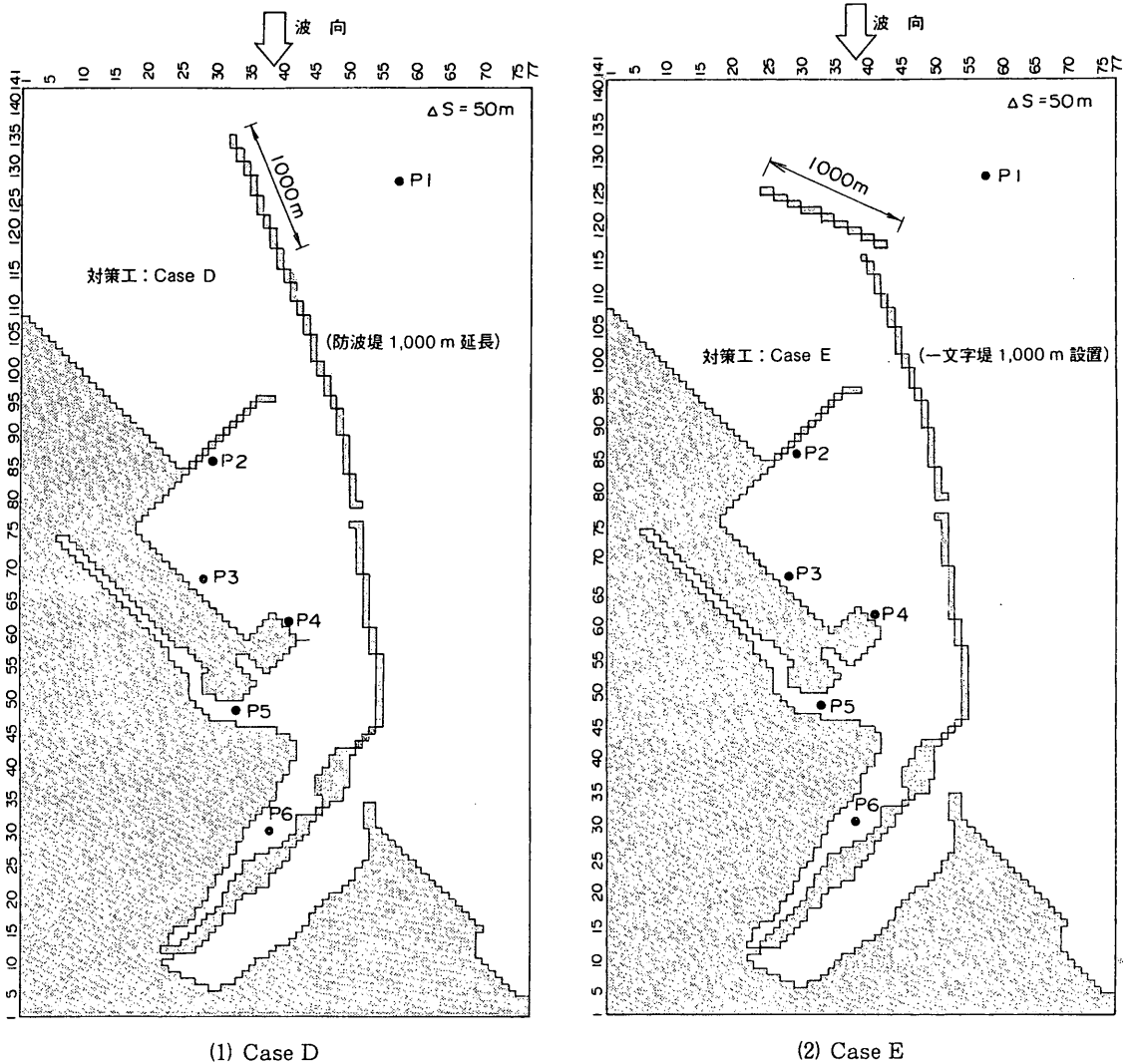


図-45 能代港における対策工の例

CaseA と CaseE を比較すると、周期10min以上の振幅比は殆ど変化していないが、周期4minのピークは、CaseE において小さくなり、その他の周期において、CaseE の場合が CaseA より大きくなる現象は現れていない。したがって、対策工法としては、CaseE が CaseD より適しており、長周期波の侵入方向に対してなるべく直角に防波堤を設置した方が効果大きい。

図-47 は、長周期波の総エネルギー m_o の変化を CaseD と CaseE について比較したものである。総エネルギーは周期 30s 以上の長周期波成分のエネルギー密度の総和として次式で求める。

$$m_o = \int_{1/T_2}^{1/T_1} S(f) df \quad (11)$$

ここで、 T_1 および T_2 は、対象とする長周期波の最小周期と最大周期で、 $T_1=30s$ 、 $T_2=30min$ とした。 m_o は、長周期波高の 2 乗に比例する量になる。図では、対策のない現状の CaseA に対する各地点のエネルギー比を示す。地点番号は図-40 と一致する。たとえば P.2 では、CaseD の場合、エネルギー比が 1 より大きくなり、対策工の効果が見えていない。CaseE では、エネルギー比が 0.8 に低下し、対策工の効果が見えている。エネルギー比が波高の 2 乗に比例すると考えると、長周期波高

港湾で観測された長周期波の特性

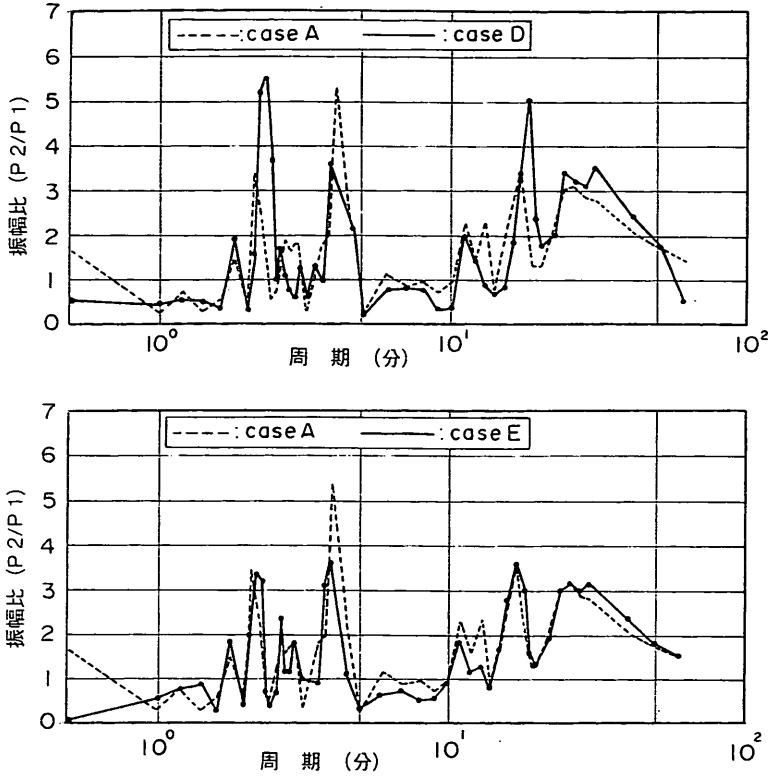


図-46 対策工による長周期振幅比の変化

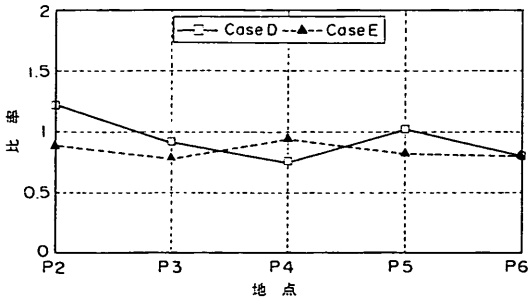


図-47 対策工による長周期波エネルギーの変化

比は約0.9になる。対策工 CaseE の場合には、他のポイントにおいても、エネルギー比が0.7~0.9となっており、港湾全域にわたって長周期波を低減できると考えられる。

なお、既存の港湾では、CaseE のような配置は直線的な航路配置を妨げることになり、航路の安全性や操船性において問題が生じる。しかし、今後新しく計画する港湾においては、風波に対する港内静穏度の確保や適切

な航路配置の確保に加え、長周期波の向きに対して効果的に防波堤を配置することにより、長周期波の侵入を防ぎ、荷役障害の発生を抑制する港湾の建設が可能である。ただし、実際の長周期波の対策の決定にあたっては、長周期波の発生条件と発生頻度を適切に把握し、防波堤建設によるバースの稼働率向上とその建設費の費用対効果を検討したり、係留系の改善等の他の長周期対策工との比較検討が必要である。

5. まとめ

本調査で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 各地の港湾で観測されたデータをまとめることにより、港内における大型船舶の荷役障害が、主に、港外から侵入する長周期波によって引き起こされることを確認した。
- (2) 能代港外の観測点における長周期波とセットダウン波の波形および波高はよく一致し、能代港外における長周期波の主な発生要因は、波群に伴う拘束波であることが確認できた。
- (3) セットダウン波高の有義値 H_{sK} は風波成分の有義波高 H_K の2乗に比例し、能代港の場合、 $H_{sK} = 0.84 \times$

$10^{-2} H\lambda$ で表される。したがって、港外の定常的な波浪観測値から港外における長周期波高を予測できる。

(4) 周期2minのセットダウン波による振動は港内で増幅され顕著になり、これが係留船舶のサージの固有周期とも一致し、荷役障害の主因となる。

(5) 那覇港において長周期波の観測を行い、2段に設けられた防波堤の配置が、港内へ侵入する長周期波を減衰させ、港外で長周期波成分が発達しているにも拘らず、港内で荷役障害を発生させていないことを明らかにした。したがって、長周期波の対策としては、防波堤を2段に配置したり、港口幅を小さくする手法が考えられる。

(6) 港内における長周期波の振幅は線形長波の伝播計算式で推定でき、その適用性を能代港と那覇港における数値計算で明らかにした。

(7) 防波堤を長周期波の侵入方向に対して直角に配置すれば、港内の長周期波を減衰させることが可能であることを計算で示した。

本報告の作成にあたっては、多くの方から懇切な御協力と御支援を受けており、ここに、深く感謝するものである。以下に、御協力を頂いた各機関を列挙させていただく。

能代港における観測：

運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所

運輸省第一港湾建設局秋田港工事事務所

株式会社エコー

那覇港における観測：

沖縄開発庁沖縄総合事務局那覇港工事事務所

沿岸海洋調査株式会社

また、本報告をまとめるにあたって、当所水工部長(前)小舟浩治博士ならびに水工部長(現)小島朗史氏より懇切な御指導を賜った。両氏に深く感謝する次第である。

(1996年6月17日受付)

参考文献

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.

Mansard E.P.D. and V.Barthel(1984): Shoaling properties of bounded long wave, Proc. I.C.C.E., pp.798-814.

McGehee, D.D.(1991): Los Angeles and Long Beach harbors model enhancement program

-measured response of moored ships to long-period waves-, Technical Report CERC-91-12,

Ottosen-Hansen, N.E.(1978): Long period waves in natural wave trains, Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Engi., Tech. Univ. Denmark, Prog. Rep. 46, pp.13-24.

Ottesen-Hansen, N.E., S.E.Sand, H.Lundgren, T.Sorensen and H.Gravesen (1980): Correct reproduction of group-induced long wave, Proc., Inter. Conf. Coastal Engineering, pp.784-800.

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

Sekimoto, T.(1995): Nonlinear effect on the estimation of directional wave spectrum, Proc. of Symposium on Wave Generation, Analysis and Related Problems in Experimental Tanks -especially on directional waves-, pp.44-59. 46p.

伊藤喜行・谷本勝利・木原 力(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.25-30.

運輸省港湾技術研究所・港湾局(1985): 浮体工法開発調査報告書, 171p.

運輸省第一港湾建設局(1994): 日本海における大陸棚セイシュ対策調査報告書, 160p.

運輸省第四港湾建設局(1987): 志布志港静穏度調査報告書, 95p.

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-長周期波に注目した現地観測-, 海岸工学論文集, Vol.36, pp.354-358.

金山 進・清水啄三・磯部雅彦(1994): プシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次計算, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.61-65.

金山 進・田口 智・清水啄三・長船 徹・植木一浩・中原和彦(1995): プシネスク方程式による港内長周期水位変動の数値計算, 海岸工学論文集, Vol.42, pp.291-295.

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, Vol.42, pp.296-300.

合田良美(1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.3, pp.59-106.

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, Vol.34, pp.131-135.

和田良美(1982):港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.17-20.

和田良美(1995):不規則波に伴う長周期波の諸研究について, 土木学会, 水工学シリーズ95-B-6, pp.B-6-1~B-6-20.

白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹(1995):係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.941-945.

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.

鈴木康正・河合弘泰・望月徳雄・松森孝弘(1994):スペクトル形状による波群特性の変化, 港湾技術研究所報告, Vol.33, No.2, pp.3-57.

関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央(1990):港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.86-90.

関本恒浩・清水琢三・鶴飼亮行・坂野雅人・近藤浩右(1991):非砕波領域におけるサーフビートの現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.91-95.

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.

田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則(1995):港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.301-305.

永井紀彦・橋本典明・浅井正 他5名(1994)現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.931-935.

永井紀彦・菅原一晃・清水勝義・橋本典明(1995):全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS1993), 港湾技研資料, No.796, 309p.

日本港湾協会(1989):港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, pp.12.

橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃(1993):海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.1, pp.3-25.

北海道開発局(1995):苫小牧東港静穏度対策検討業務報告書, 93p.

松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲(1994):波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.71-75.

水口優(1994):浅海域の長周期波について, 土木学会, 水工学シリーズ94-B-3, pp.B-3-1~B-3-15.

主要記号表

a	: 波の振幅
$A(f)$: 港外と港内における長周期波の振幅比
C	: 波速
C_R	: 群速度
f	: 周波数(1/s)
f_p	: スペクトルがピークを示す周波数(1/s)
f_R	: 損失係数
g	: 重力加速度(m/s ²)
h	: 水深
$H_{1/2}$: 有義波高
$H_{0.1/2}$: セットダウン波の有義波高
H_L	: 長周期波の代表波高
$\bar{H}_{L1/2}$: 観測長周期波の有義波高
H_L	: ハーバービート平均波高
H_{max}	: 最大波高
\bar{H}_0	: 換算沖波波高
H_s	: 港内副振動平均波高
K	: 係留索を近似したバネの伸び率(N/m)
K_A	: サーフビートに関する定数
L_0	: 沖波波長
m_0	: 長周期波のエネルギー(m)
M	: 質点の質量(kg)
$S(f)$: 周波数スペクトル密度(m ² sec ⁻²)
$S_n(f)$: 港内測点の周波数スペクトル密度(m ² sec ⁻²)
$S_{on}(f)$: 港外測点の周波数スペクトル密度(m ² sec ⁻²)
T_1	: 長周期成分波の最小周期
$T_{1/2}$: 有義波周期
T_2	: 長周期成分波の最大周期
$T_{L1/2}$: 観測長周期波の有義波周期
T_0	: 係留系の固有周期
T_p	: ピーク周期(=1/ f_p)
u	: 港口流速
γ	: スペクトルのピークの高さを決めるパラメーター
$\Delta \zeta_L$: 港口損失(m)
η	: 水面変動
η_L	: 長周期水面変動
ρ	: 水の密度

付 表

最近の係船索切断事例

港湾名 (岸壁水深)	年月日 *1	係留船舶総トン数 D. W. T.	切断ロープ数	有義波高 *2 H1/3((m))	有義波周期 *3 T1/3(sec)	平均風速 U(m/s)
志布志 (-13m)	1991. 2. 13	約60,000	1	3.84	10.0	-
	1991. 4. 26~28	約60,000	1	0.97	7.7	-
	1991. 8. 27~28	約60,000	12	2.31	7.8	-
	1991. 9. 6~10	約60,000	1	2.26	13.5	-
	1991. 9. 12~13	約60,000	1	2.08	9.5	-
	1991. 9. 17~20	約60,000	1	2.41	11.5	-
	1991. 10. 4~ 7	約60,000	2	1.39	9.2	-
	1992. 3. 2~ 5	約60,000	4	1.97	7.9	-
	1992. 4. 7~11	約60,000	2	1.71	7.8	-
	1992. 8. 3~ 6	約60,000	1	1.84	10.4	-
	1992. 8. 11~14	約60,000	1	1.43	12.7	-
	1992. 11. 7~11	約60,000	4	2.48	15.9	-
	1993. 5. 28~6.2	約60,000	2	3.70	7.8	-
	1993. 7. 28~8.5	約60,000	5	4.28	9.8	-
	1994. 3. 6~13	約60,000	6*5	3.14	14.2	-
1994. 11. 3~ 6	約60,000	*5	2.05	7.5	-	
苫小牧 (-14m)	1991. 1. 26	38,000	1	1.27	7.3	-
	1991. 10. 3	37,000	1	2.48	9.9	-
	1992. 3. 31	36,000	2	2.82	10.8	-
	1992. 5. 7	35,000	2	2.02	6.8	-
	1992. 9. 25	37,000	2	2.03	7.6	-
	1992. 10. 26	49,000	2	0.88	6.9	-
	1992. 11. 7	26,000	1	1.10	11.8	-
	1993. 1. 29	23,000	5	1.86	5.7	-
	1993. 6. 4	37,000	3	3.75	8.7	-
	1993. 8. 29	37,000	1	1.73	7.3	-
	1993. 9. 4	37,000	2	2.28	6.4	-
	1993. 10. 9	49,000	4	2.30	11.9	-
	1993. 11. 14	49,000	1	4.99	8.5	-
	1994. 3. 10	38,000	2	1.58	9.3	-
1994. 9. 18	36,000	4	3.76	16.3	-	
能代*4 (-14m)	1992. 9. 30	約60,000	4	2.97	8.6	-
	1992. 11. 4	約60,000	22	欠測	欠測	-
	1992. 12. 12~14	約60,000	18	5.26	9.5	20
	1993. 3. 1	約60,000	22	5.27	9.3	18

*1 志布志港，能代港は切断時を含む荷役期間で，苫小牧港の場合は切断日を示す。

*2 沖合波高計で得られた，上記の荷役期間あるいは切断日の最大の有義波高

*3 上記の有義波高出現時刻の有義波周期

*4 波高記録は，近傍の深浦港の記録を示す。

*5 防舷材等の岸壁施設にも破損が生じた場合を示す。