

# 苫小牧東港における船体動揺に関する現地観測

Field Observation on Ship Oscillation Phenomenon in Tomakomai East Port

神谷昌文\*・渥美洋一\*\*・菅沼史典\*\*\*・小泉信男\*\*\*\*

Masahumi Kamiya, Youiti Atumi, Huminori Suganuma and Nobuo Koizumi

In Tomakomai East Port, though in calm, a moored ship has often been oscillated with long period of a few minutes. That ship oscillation called "Soko-Uneri" has often terminated cargo handling and caused break of mooring ropes. In this study, according to the simultaneous observation of ship oscillation and wave motion, it is shown that long period waves enter the harbor and cause the resonance behavior of the moored ship. The properties of such long period waves are also discussed with relation to wave setdown.

Keyword: (Ship oscillation, Long period wave, Wave setdown)

## 1. はじめに

港湾の最も重要な機能として、利用船舶の係留および荷役を安全かつ迅速におこなうことがある。このためには、港内で十分静穏度が確保される必要があり、一般には、この静穏度は港内の波高で与えられている。しかしながら、近年いくつかの港湾で海表面が比較的静穏であるにもかかわらず係留船舶が大きく動揺する現象が報告され、このような船体動揺によって、係留策の切断、船体損傷、岸壁設備および荷役装置の損傷、船舶運航計画の変更等、利用上著しい障害となっているケースがある。そこで、本報では、苫小牧東港地区で「底うねり」と呼ばれる係留船舶の長周期動揺について動揺発生時の動揺量観測と港外・港内の波浪観測を実施し、動揺特性とその支配要因について検討した。

## 2. 観測体制の概要

苫小牧東港地区でみられる船体動揺現象は太平洋南方海上を低気圧が通過する9～11月にかけて発生することから、現地観測は、平成5年および平成6年の同時期に港外では波高計による、港内では波高計と流速計（水平2成分）による同時波浪観測を実施した（図-1参照）。観測期間中平成5年10月9日に石炭運搬船「札幌丸」（総トン数48,844t、船長240m）で船体動揺が発生し、観測データを得た。また、船体動揺時には動揺量を定量的に把握するため、図-2に示すようにビデオ撮影をおこなった。平成6年9月18日には、石炭運搬船「Energy Pioneer」（総トン数36,493t、船長225m）において動揺発生時から離岸に至るまでの船体動揺のビデオ撮影に成功し港内外波浪と船体動揺量の同時観測データを得た。そこで、本報では、この2つのケースの長周期動揺の観測について報告する。

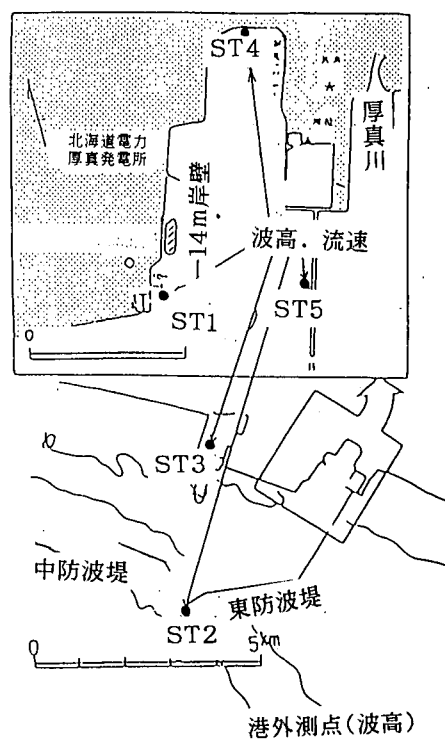


図-1 調査位置図

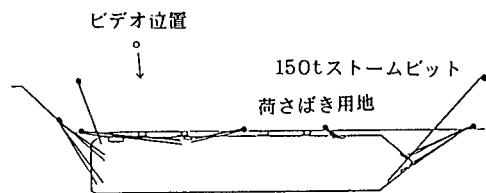


図-2 対象船舶係留及びビデオ撮影位置

\* 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第2計画課  
 \*\* 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第2計画課  
 \*\*\* 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第2計画課長  
 \*\*\*\* 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所長

(〒053 苫小牧市末広町1-1-1)

### 3. 船体動揺発生時の波浪動揺発生時の波浪・動揺特性

#### (1) 動揺発生時の波浪・動揺特性

平成6年度9月のケースの船体動揺量の経時変化を図-3に、動揺前後の波高・周期の変化を図-4に示す。

図-4中には、斜線で動揺発生期間を示した。

船体動揺は、9月17日深夜から発生し、動揺は最大でサージング両振幅で8m程度に達し、係留策の破断等の被害が生じた。この間、18日午前3時30分に荷役中断、8時30分に係留索を解いて離岸している。この時の港外の有義波高は1m程度から最大5m程度まで発達したが、係留時の最大有義波高は3m程度であった。また、岸壁前面のST1においては、有義波高は0.3mから最大0.7m前後に増加し、有義周期については発生前後から10数秒を超えているのが特徴的である。

次に、図-5に平成6年9月のケースの動揺発生時から係留不可能となり離岸するまでの港内外の主要な波浪スペクトルの経時変化図を示す。動揺発生時の港外波浪には10数秒付近にエネルギーピークがみられ、動揺量が増加する9月18日早朝にかけて更にピーク付近へのエネルギー集中がみられる。同時に30秒程度以上の長周期のエネルギーの増大がみられる。また、港内のスペクトルでも10数秒付近にピークがみられるが、エネルギーレベルは、港外に比べはるかに低く短周期の波浪成分は港内で減衰している。一方、30秒以上の長周期では、あまり減衰していない。また、図-6に示す平成5年10月のケースでも、10月9日早朝にかけて増大したエネルギーが港内に進入する過程で短周期側では減衰するものの長周期側ではあまり減衰せず平成6年9月のケースと同様の傾向を示した。

●サージ最大 ▲サージ有義

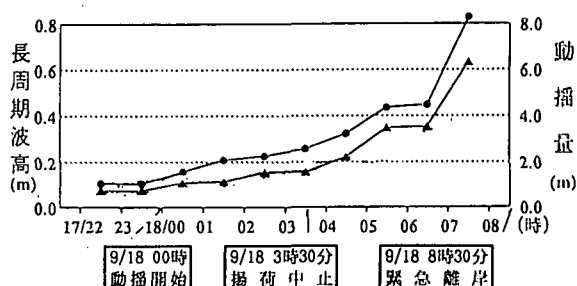


図-3 動揺量の経時変化

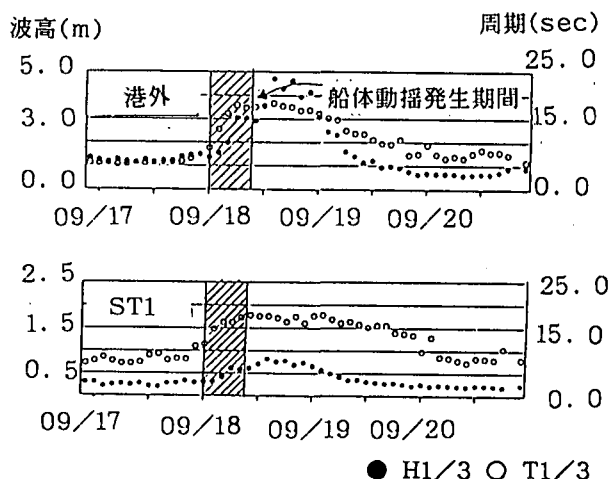


図-4 有義波高、有義周期の経時変化

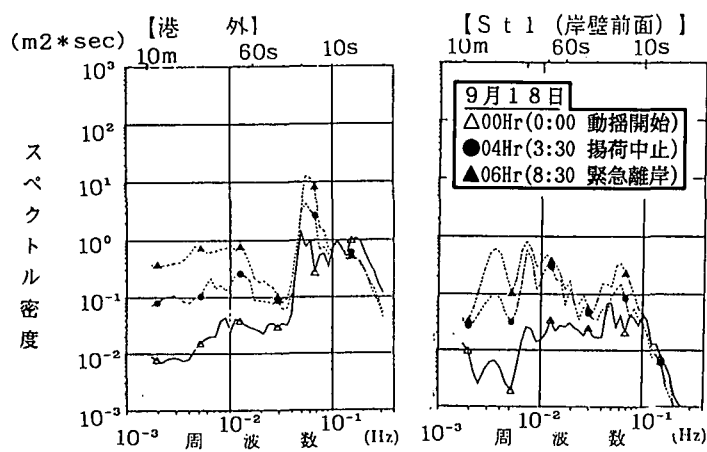


図-5 実測波高のスペクトル解析結果  
(平成6年9月のケース)

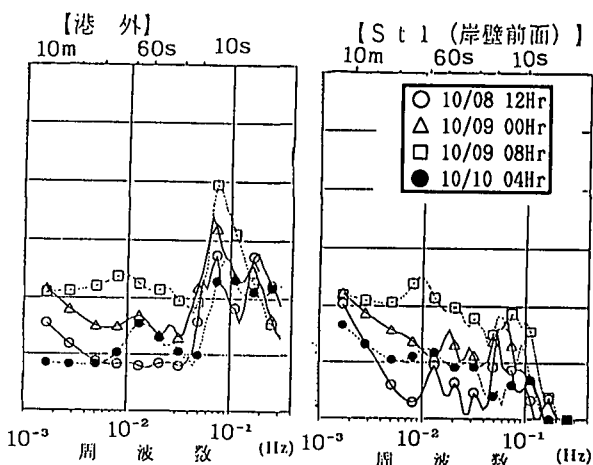


図-6 実測波高のスペクトル解析結果  
(平成5年10月のケース)

一方、9月17日深夜から18日早朝にかけておこなった船体動揺のビデオ撮影解析により得た実測動揺スペクトルを図-7に示す。ヒーピングのスペクトルは、形状が図-5に示す着岸地点ST1の波浪スペクトルと極めてよく似ていることから、ヒーピングは波浪の上下動に対応する応答を示していると考えられる。これに対して、サージングは短周期ではピークをもたず30秒以上でエネルギーが非常に大きく、90秒～3分付近に強いピークを持つ非常に周期の長い動揺を示すことがわかる。また、このピーク周期は、図-5のST1の30秒以上でのピーク周期とほぼ一致し顕著な応答を示すことからサージングの長周期動揺は、長周期成分が関与し、船体と係留系の固有振動モードとの共振により増幅されていると考えられる。

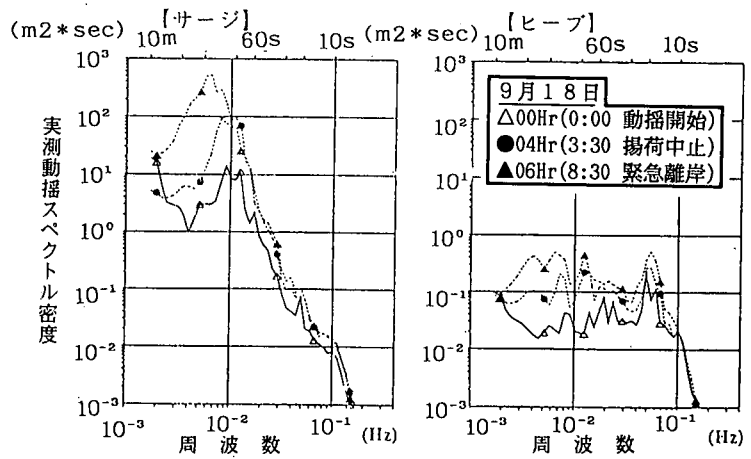


図-7 実測動揺スペクトルの解析結果

### (2) 長周期動揺を特性づける波浪指標

長周期動揺が長周期の波浪成分と密接に関連すると推察されることからサージング動揺量と長周期の波浪成分の絶対値を比較するために、波高スペクトルより30～600秒の長周期成分をとりだし、これを積分し波高に換算した値を長周期波高 $H_L$  ( $H_L = 4.0 \times \int_{30}^{600} S(T) dT$  S(T):波高スペクトル)とし、平成6年度の動揺期間の長周期波高とサージング動揺量の経時変化で比較したものを図-8に示す。長周期波高の経時変化は、サージング動揺量の経時変化とよく対応しており長周期成分と船体動揺発生時の動揺量の変化との関係がある程度定量的に把握できた。次に、平成6年9～12月の期間について港外測点と港内のST1の長周期成分波高を算定し両者の相関をとったものを図-9に示す。港外と港内の長周期成分の波高は非常に相関が高くその比がほぼ1であることから港内波浪の長周期成分は、港外から進入してくる可能性が高いと考えられる。

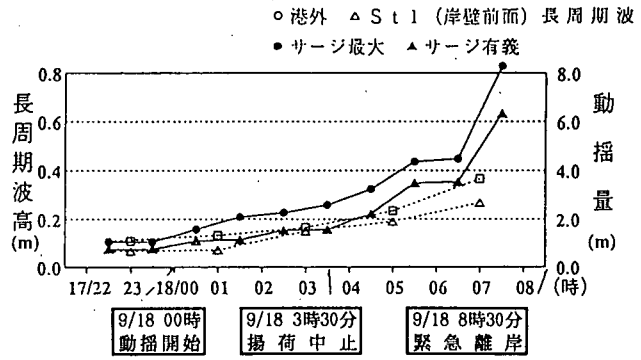


図-8 長周期波高とサージングの経時変化

以上の結果より、港外でみられる長周期エネルギーがあまり減衰することなく港内に進入し、係留船舶の長周期動揺を引き起こしている可能性が高いと考えられる。

### (3) 数値シミュレーションによる船体動揺特性の評価

船体動揺現象の長周期の波浪成分による影響を検討し、現況再現をおこなうために運輸省港湾技術研究所が開発した「浮体動揺解析プログラム」を用いて船体動揺の数値計算を実施し、実測の動揺スペクトルと比較した。入力条件は、平成6年9月18日(0～2時、4～6時、6～8時)のST1の実測波高スペクトルをFFTにより48成分に分割したものを入力波とし、波向に関しては、計算では単一方向からしか与えられないため最もサージングに影響を与えられとされる船首方向に対して170°方向から与えた。また船舶諸元等の計算条件の詳細は表-1に示す。

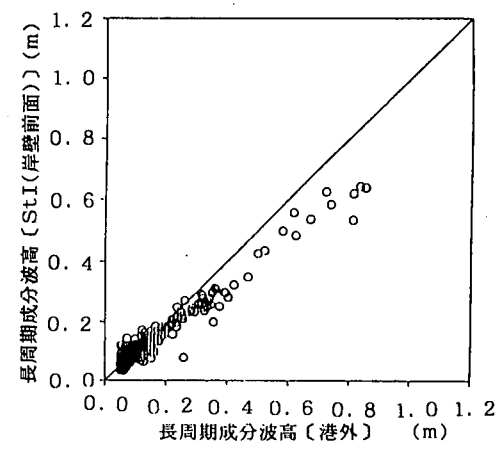


図-9 長周期成分波高(港外とST1)

| 表-1 計算条件表                 |                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------|
| 入力波条件                     | 2時間の実測データを48成分にFFTにより分割したもの<br>波向は、サージングに最も影響のある170° |
| 船体諸元<br>ENERGY<br>PIONEER | 総トン数 36,493 t G. T                                   |
|                           | 重量トン数 69,234 t D. W                                  |
|                           | 積載荷重 62,787 t                                        |
|                           | 船 長 225.0 m                                          |
|                           | 船 幅 32.3 m                                           |
|                           | 満載喫水 12.5 m                                          |
| 計算条件 半載(喫水9.6)            |                                                      |
| 入力風条件                     | 実測データ(動揺期間中の風速は3～5 m/s)                              |

図-10は、実測と計算の伝達率の比較であるが、サージング、ヒーピングともスペクトルの分布形状はほぼ再現された。特に、サージングについては、係留系による固有振動モードとの同調作用によると考えられる長周期側での伝達率の増大が再現され、サージングの長周期動揺には長周期波成分が大きく関与していることが確認された。一方、動揺量については、図-11の経時変化において計算値がやや過小に評価され、動揺量の絶対値としては再現されなかった。これは、実際には係留船舶の係留状況は時事刻々変化することや入射波の与え方の単一性あるいは長周期漂流力をモデルとして考慮していないためと考えられる。

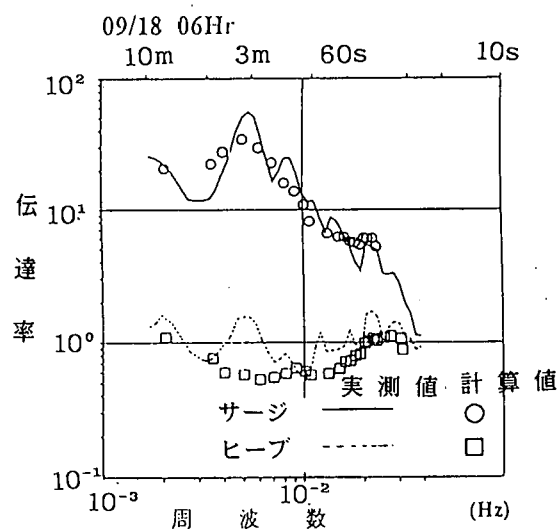


図-10 伝達率スペクトルの解析結果

#### 4. 長周期波の成因と増幅特性

##### (1) 長周期波の成因

船体動揺時には、長周期波が卓越し、同時に有義周期が数10秒と長くなることから、この長周期波がうねり性の波浪と関係すると予想される。そこで、波浪の波群指標として永井ら(1994)にならい図-12で定義される波群指標を求め、長周期波高の経時変化とともに図-13に示す。ただし、波高の閾値としては平均波高を用いている。これによると、長周期波の発達とともに波群周期が長くなり船が離岸した9月18日8時頃には、70秒から80秒程度になっている。この値は図-5の港外波高スペクトルで30秒以上の長周期波成分のエネルギーピーク周期とほぼ一致することから、長周期波がうねりの波群性と関連すると推察される。そこで、図-14のように、波群に拘束されたセットダウン波形を永井ら(1994)と同様にラディエーション応力に基づく方法で算定し、長周期波高と比較をおこなった。平成6年9月、平成5年10月のケースともセットダウン波は、長周期波に比して小さくなっている。このことから、セットダウン波を成因とする長周期波の他にも、長周期波は存在すると思われる。また、図-15に、平成5年と平成6年の観測全期間のセットダウン波と長周期波の波高相関を示す。台風が苫小牧海域の極近傍に接近し、風浪が大きくセットダウン波が発達した状態では、両者はほぼ1:1の対応を示し、長周期波はセットダウン波によって形成されているといえる。しかし、動揺期間を含め全体的にはセットダウン波の方が若干小さめとなり、全期間を通して、セットダウン波からなる長周期波以外にも長周期波が存在することが確認された。

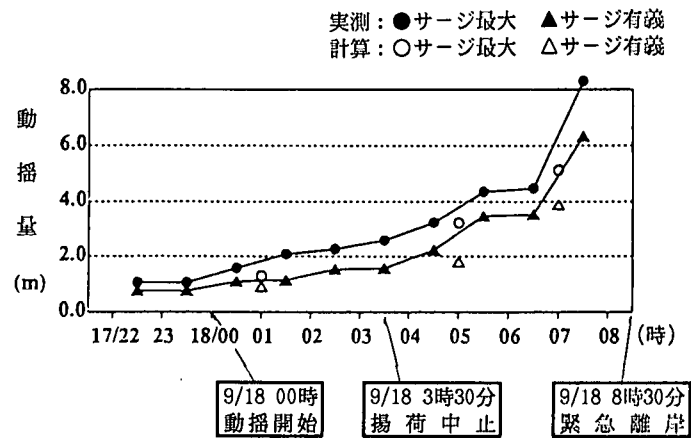


図-11 実測・計算動揺量経時変化比較

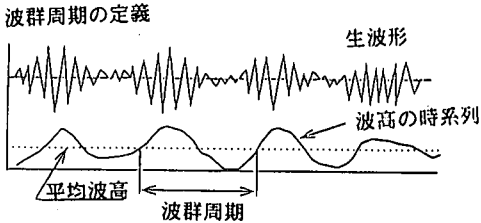


図-12 波群周期の定義

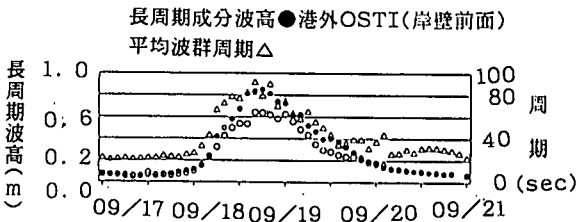


図-13 平均波群周期と長周期波高の経時変化

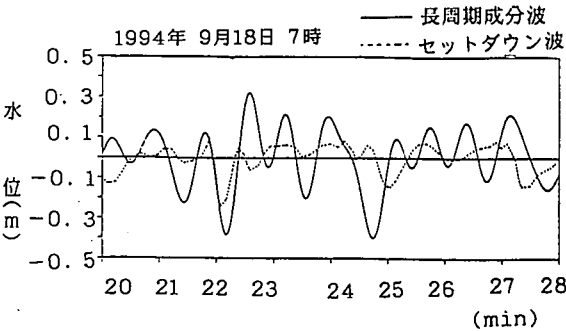


図-14(a) セットダウン波と長周期成分波形 (平成6年9月のケース)

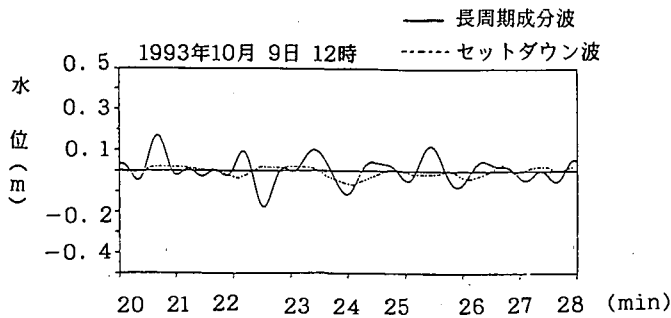


図-14(b) セットダウン波と長周期成分波形  
(平成5年10月のケース)

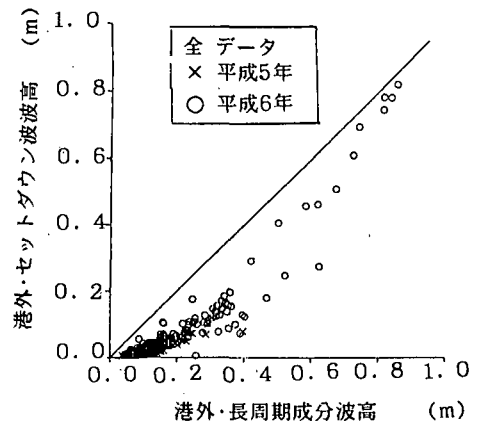


図-15 長周期成分波高とセットダウン波波高

## (2) 港内波高増幅特性

船体動揺を引き起こす要因としては、船舶と港内長周期波の共振による直接的な動揺増幅の他に、長周期波の港内増幅による動揺量の増加といった間接的な動揺増幅も考えられる。そこで、港内波高増幅率を港内の港外に対するエネルギースペクトル比の平方根として定義し、波高増幅率を検討した。図-16は港内各点の波高増幅率であるが、全観測地点において10数秒以下の短周期成分は、増幅率は1以下で大幅に減衰していることがわかる。周期1~10分付近において、係留岸壁前面のST1では1分近くで若干増幅率が增大しているが、各時刻とも著しい増幅はみられない。また、東水路奥のST4、東水路入口付近のST5では、いくつかのピークがみられ、周波数によっては数倍程度増幅されていることから、今後、港内での増幅率の空間分布について波向等の変化も考慮した検討をおこなう必要がある。

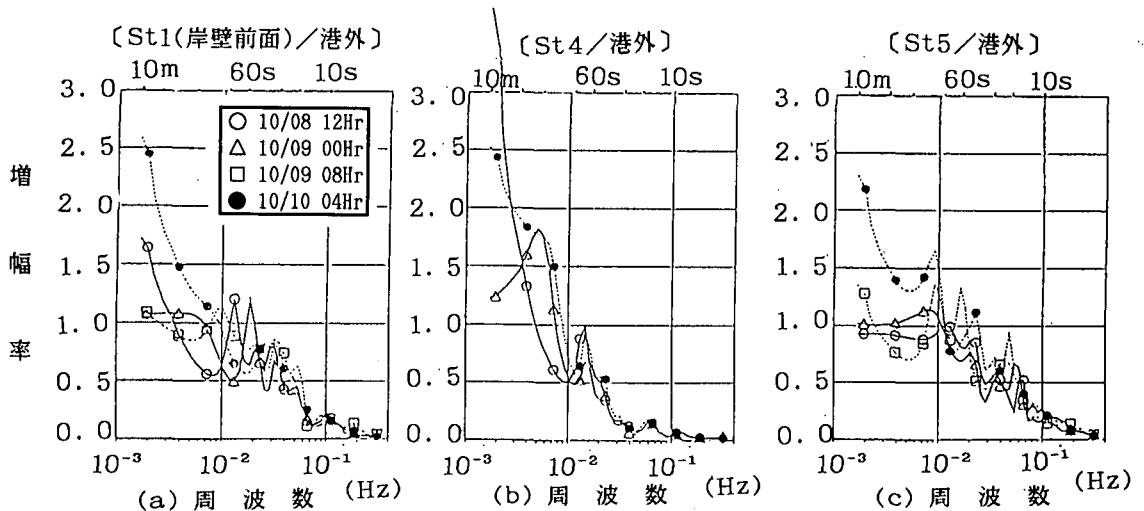


図-16 船体動揺期間の増幅率

## 5. おわりに

本報告で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- ① 苫小牧東港におけるサージングを主体としたいわゆる「底うねり」現象は、港外からの来襲波に含まれる長周期波成分と密接に関係することが確認できた。
- ② 波浪長周期成分から長周期動揺へのエネルギー伝達は、動揺シミュレーションでも再現できたが、動揺量の絶対値については計算が過少で更に検討を要する。
- ③ 動揺の要因となる港外の長周期波成分の1つとして波群性のうねりに含まれるセットダウン波が考えられるが、セットダウン波からなる長周期波以外にも長周期波が存在することも確認された。
- ④ 港内では、周期によっては、波高増幅が存在するが、東水路の入口および奥の地点でも顕著な増幅は確認されなかった。

最後に、観測・解析を進めるに当たり「苫小牧東港静穏度対策検討委員会（委員長・上田茂 鳥取大学工学部教授）」で審議いただき、ご意見・ご指導を賜った。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

（参考文献）

喜岡 渉・飯田耕三・水谷隆夫(1990)：離岸堤まわりの長周期水位の変動の変形特性，海岸工学論文集，第37巻，pp.609-613

上田 茂（1984）：係留船舶の動揺解析手法とその応力に関する研究，港湾技術研究所N0.504

永井紀彦・橋本典明・浅井 正・戸引 勲・伊藤一教・東江隆夫・小林昭男・柴田孝雄(1994)：波群特性を考慮した港内静穏度指標について，第12回海洋工学シンポジウム論文集，日本造船学会

松良精三・渥美洋一・菅沼史典(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，第41巻，pp.71-75

渥美洋一・神谷昌文・菅沼史典(1995)：苫小牧東港における船体動揺特性の検討－第3報－，北海道開発局技術研究発表会発表概要集（4），pp.201-206