

II-75

苫小牧東港における船体動揺特性の検討

北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所 正員 松良 精三
渥美 洋一
正員 菅沼 史典

1. まえがき

港湾利用船舶の停泊、荷役が安全かつ迅速に行われるためには、泊地の十分な静穏度が確保されなくてはならない。この際、泊地の静穏度は係船岸前面において、ある一定以上の稼働率が得られることを原則としており、泊地内の波高をもって評価するのが通例である。しかしながら、全国のいくつかの港湾では海表面が比較的静穏な状態であるにもかかわらず、係留大型船舶が大きく動揺するという現象が報告されている。

苫小牧東港においても関係者の間で「底うねり」と称される類似な現象が報告¹⁾されており、このような船体動揺による障害として、係留索の切断、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があげられる。

そこで本研究では、この船体動揺現象の原因を明らかにするために波浪、流況、船体動揺の現地観測と船体動揺シミュレーションによる数値解析を行った。

2. 現地観測

(1) 観測方法

現地観測の調査位置図を図-1に示す。観測は1993年9月から12月の90日間において、港外で超音波式波高計による常時波浪観測を、港内の東水路地区3地点では電磁流速計付水圧式波高計による波浪および流況の連続観測を行った。また、船体動揺時には動揺状況を把握するため、ビデオ撮影を行った。

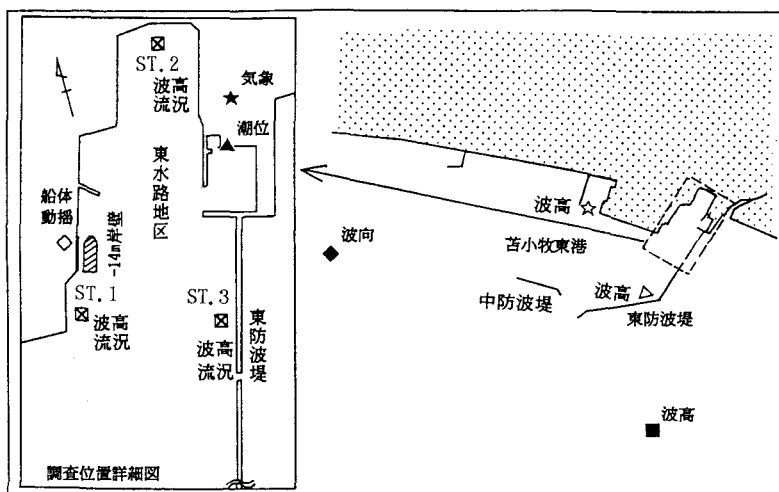


図-1 調査位置図

現地観測期間中の1993年10月9日に東水路地区-14m岸壁に係留中の定期石炭運搬船「札幌丸」(10/7入港、10/11出港、総トン数48,844t、船長240m)で船体動揺現象が発生した。船体の動揺は8日の深夜頃から始まり、9日早朝の5:40には荷役の中止を余儀なくされ、その後、9日の深夜まで動揺が続いた。以下にこの時の観測データの解析結果について述べる。

(2) 観測結果

1) 船体動揺量

ビデオ撮影ケースは、ケース1として岸壁から船長軸方向に対し垂直に撮影することにより、SurgeおよびHeave方向の運動を記録し、ケース2として船上から海面に対し鉛直下方に向かって撮影することにより、Surgeおよび

The Examinations of the Properties of Ship Motions at Tomakomai East Port
by Seizo MATSURA, Youichi ATSUMI and Fuminori SUGANUMA

Sway方向の運動を記録した。なお、ケース1とケース2は異なる時間に撮影を行っている。ここでいうSurge方向とは船長方向、Heave方向は鉛直方向、Sway方向は船長軸に対して垂直な方向を指す。

表-1に船体動揺量の解析結果を示す。各方向の最大動揺量は、Surge方向ではケース1で振幅が264cm、周期が95.0s、ケース2で振幅が390cm、周期が146.0s、Sway方向は振幅が161cm、周期が63.0sであり、それぞれ長周期の運動となっている。また、Heave方向は振幅が50cm、周期が15.0sとなっており、短周期の運動となっている。

表-1 船体動揺量

運動方向	動揺量			
	最大動揺量		有義統計量	
	振幅	周期	振幅	周期
Surge [ケース1]	264cm	95.0s	90cm	49.2s
	390cm	146.0s	251cm	102.5s
Sway [ケース2]	161cm	63.0s	43cm	13.3s
Heave [ケース1]	50cm	15.0s	8.2cm	8.1s

図-2および図-3に船体動揺量のスペクトル解析結果図を示す。両図より、各方向とも12sといった短周期の卓越周期がみられる。また、Surge方向については124sおよび100s、Sway方向については75sといった長周期の卓越周期がみられ、これらのスペクトル密度は12sといった短周期成分のものより大きくなっている。一方、Heave方向では44s、12sの卓越周期がみられ、これらのスペクトル密度は同程度となっている。

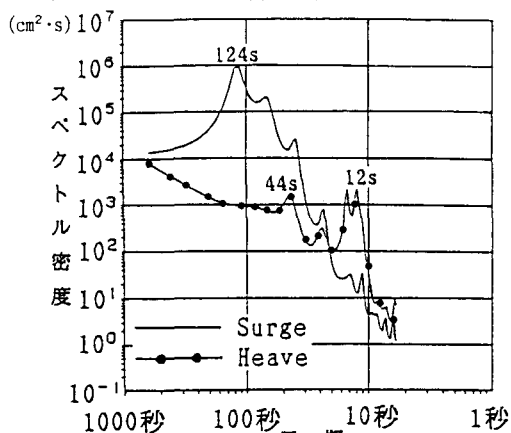


図-2 船体動揺スペクトル図 (ケース1)

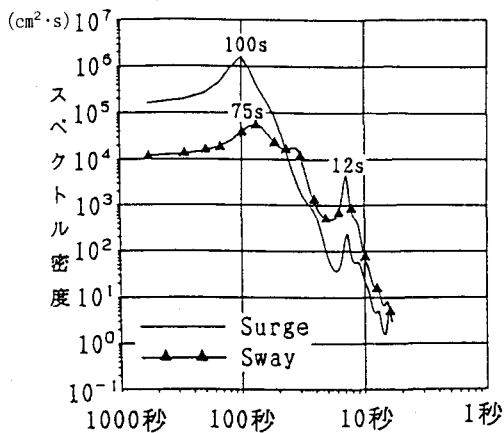


図-3 船体動揺スペクトル図 (ケース2)

2) 波浪および流況観測結果

船体動揺現象が発生したこの時期の苫小牧海域は、台風19号および20号からと思われるうねりが10/8後半頃より来襲したため、港外における $T_{1/3}$ は長くなる傾向にあり、8日夜半から9日午前にかけて $T_{1/3}$ は10~14s程度で、その後急激に $T_{1/3}$ は短くなっている。この期間の $H_{1/3}$ は増大する傾向にあり、最大で2m程度であった。また、同期間における風向はNW-SEで、風速は2~5m/s程度であった。

港内における波高は、港外波に比例して大きくなるものの $H_{1/3}$ の最大値はST.1で30cm、ST.2で14cm、ST.3で48cm程度であった。港内における $T_{1/3}$ は港外に比べて長く、15~40s程度であった。

船体動揺が発生した10/9の17:00-18:00と、発生し

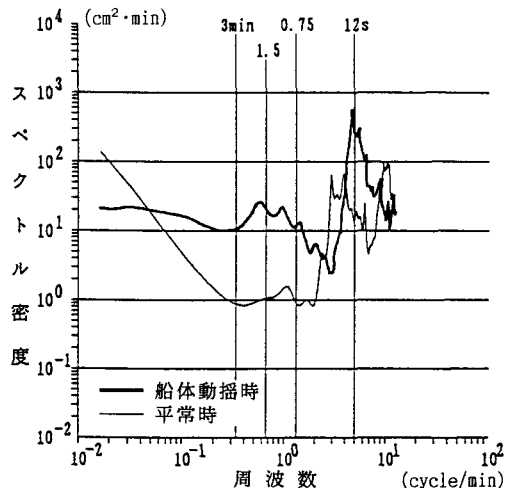


図-4 港外波浪スペクトル図

なかった前日の10/8の13:00-14:00における港外波浪のスペクトル解析結果を図-4に示す。同様に、ST.1における波浪および流況のスペクトル解析結果を図-5、図-6に示す。

港外波のスペクトル図より、平常時には周期数sの風浪成分が卓越しているが、船体動揺時には12s程度のうねり成分が卓越しており、1〜3分程度の長周期成分のスペクトル密度も大きくなっている。

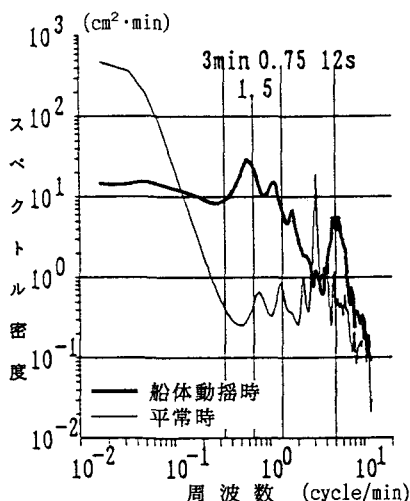


図-5 港内波浪スペクトル図 (ST.1)

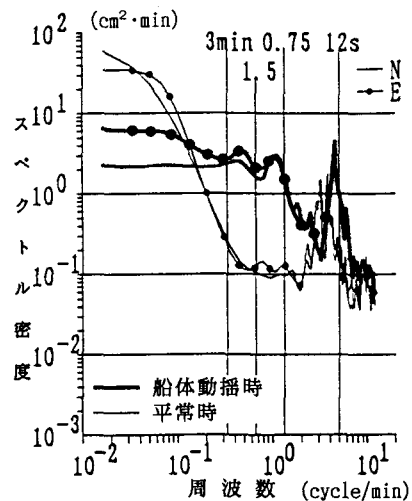


図-6 港内流況スペクトル図 (ST.1)

港内においても港外波と同様に、平常時に比べ船体動揺時には12s程度のうねり成分と1〜3分程度の長周期成分が卓越している。しかしながら、12s程度のうねり成分のスペクトル密度が港外に比べてかなり小さくなっているのに対し、1〜3分程度の長周期成分のスペクトル密度は港外と同程度となっており、減少していない。また、流況スペクトルも波浪スペクトルと同様に、船体動揺時には1〜3分程度の長周期成分が平常時に比べて大きくなっている。

以上のような傾向は、港内における他の2地点 (ST.2、ST.3) でも同様に得られた。

上記の長周期成分波が港内で発生しているのか、港外で発生しているのかを明らかにするため、1〜3分の長周期成分を観測波浪データから抽出し、長周期成分波高と増幅率を算定した。この結果を図-7に示す。

図より、平常時の10/8には港外、港内とも長周期成分波高は10cm以下と小さく、増幅率はほとんど1.0以下となっており目立った傾向は見られない。しかし、船体動揺が始まった10/8の深夜頃から港外の長周期成分波高は急増し、それに比例して港内の長周期成分波高も増大しており、この時の増幅率も他の期間に比べて大きくなる傾向がみられる。このことから、1〜3分の長周期成分波は港外から直接侵入してきており、港内で増幅されている可能性があるものと思われる。

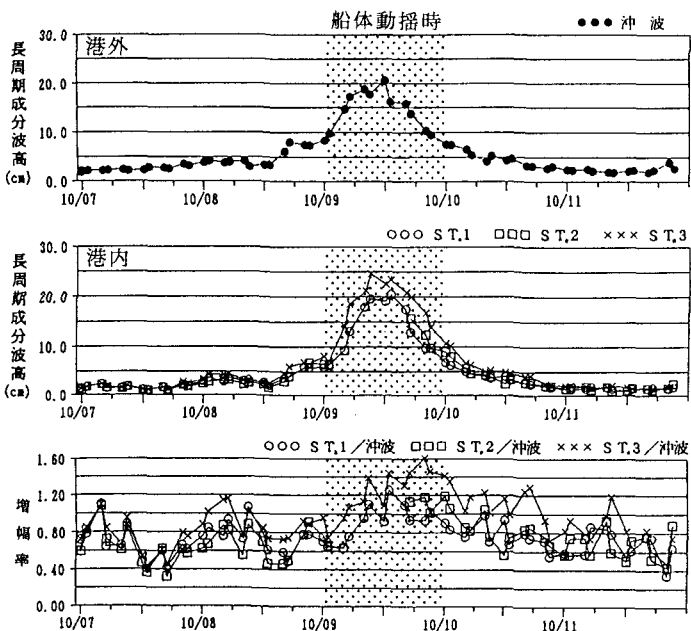


図-7 長周期成分波解析図

3. 船体動揺シミュレーション

船体動揺現象の現況再現と長周期成分による影響を明らかにするため、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」²⁾を用いてシミュレーション解析を行った。³⁾

(1) シミュレーション手法

今回行った船体動揺シミュレーションは、不規則な風と波の作用を受ける非線形な系に係留された船舶を対象としたモデルである。計算の流れとしてはまず、船舶諸元、係留条件、風、波浪等の各種入力条件を設定し、波力と風圧力による外力計算および船体動揺に伴って起因する流体力の計算を行う。その後、運動方程式を数値積分で解くことによって船体の動揺量を算定するものである。

(2) シミュレーション条件

シミュレーションの対象船舶として、1992年10月7日に船体動揺現象が発生した石炭運搬船「POLAR STAR」(総トン数37,401t、船長227.65m)を用いた。この船体動揺時には-14m岸壁前面で水位観測を行っており、得られた水位観測データをスペクトル解析して4個のピーク周期(①147s、②81s、③41s、④12.5s)を抽出した。そして、各ピーク周期をもつ標準スペクトルを求め、それぞれを組み合わせた合成スペクトルの成分波(周期、波高、初期位相)を入力波浪条件とした。ここでは、図-8に示すように4個の成分波①~④を合成した現況再現ケースとしてケース1、それと比較して図-9に示すように長周期成分の影響を明らかにするために成分波①のみを入力波としたケース2について報告する。

また、入力波向としては90°、120°、150°、180°の4方向とし、風条件として風向S、風速3m/sとした。なお、波向は図-10に示すように船首方向から右回りの角度で、波向90°は船に対して真横から、波向180°は船尾方向からの波となる。

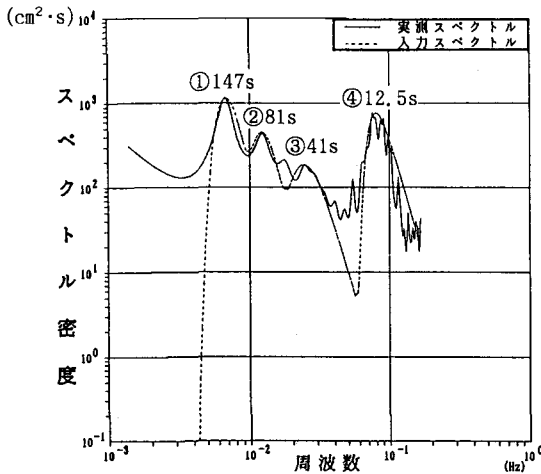


図-8 入力波スペクトル図(ケース1)

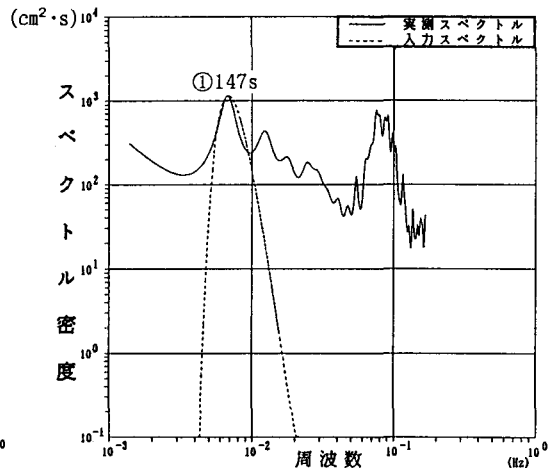


図-9 入力波スペクトル図(ケース2)

(3) シミュレーション結果

船体動揺量はビデオ画像解析により、Surge方向で最大両振幅が176.5cm、周期が131s、Heave方向で最大両振幅が15.1cm、周期が15sであった。また、着岸時には目視観測により、Surge方向で最大7m程度、Sway方向で数10cm、Heave方向で10cm程度の動揺があったと報告されている。ここではシミュレーションによって得られた計算結果のうちSurge、SwayおよびHeave方向の最大両振幅および周期について述べる。それぞれの結果を図-11、図-12、図-13に示す。

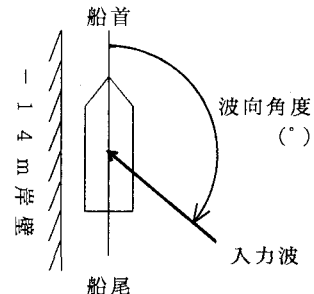


図-10 入力波向角度

1) Surge方向 (図-11)

図より、現況再現のケース1および長周期成分のみのケース2とも波向150°で最大両振幅は最大となり、5m程度となっている。波向180°になると最大両振幅は減少しているが、これは岸壁による反射波がないため船体に作用する外力が減少したためと考えられる。

また、ケース2の最大両振幅はケース1に比べて、入力波のエネルギーが小さいにもかかわらず、大きくなっている。船舶諸元および係留系から求めたSurge方向の動揺固有周期は約136sであり、ケース2の入力波周期である147sと近い値であることから、入力波のエネルギー成分よりも周期成分の方が船体動揺に影響を与えているものと思われる。

画像解析により得られた最大両振幅は176.5cm、周期は131sとなっており、着岸時に目測で7m程度の動揺量が観測されていることから、ケース1による計算値は観測値とほぼ近い値となっている。

2) Sway方向 (図-12)

図より、ケース1の最大両振幅は3~40cmで波向が大きくなるにしたがって小さくなっており、この最大両振幅は、現地で観測された目測動揺量(数10cm)と同程度の結果となっている。また、周期は20~100sで、波向が大きくなるにしたがい周期は長くなっている。

しかし、ケース2では最大両振幅は70~460cmと大きく、Surge方向の傾向と同様に波向150°で最大となっている。周期も170~450sとケース1に比べて長くなっており、波向180°で最長となっている。

このことから、Sway方向の動揺現象には長周期成分のみでなく、短周期成分も寄与しているものと考えられる。

3) Heave方向 (図-13)

図より、ケース1、ケース2とも波向にほとんど関係なく最大両振幅は小さく、その大きさは5~30cm程度となっている。この値は、画像解析により得られた最大両振幅15.1cmとほぼ近似した値となっている。

また、ケース1の周期は10~80sで、画像解析値の15sとほぼ同程度となっている。ケース2の周期は波向にかかわらず131sの1周期となっており、入力波の周期にほぼ対応した変動を示している。

以上のことから、各方向ともシミュレーションによる現況再現は概ね妥当なものと思われる。また、Surge方向の動揺現象には、船舶諸元および係留系から求められる固有周期に近い水位変動の長周期成分が大きな影響を与えているものと考えられる。

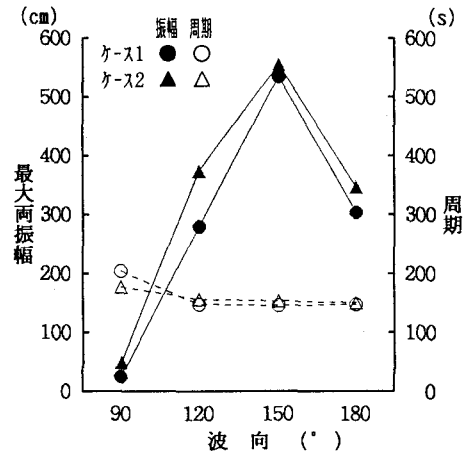


図-11 Surge方向シミュレーション結果図

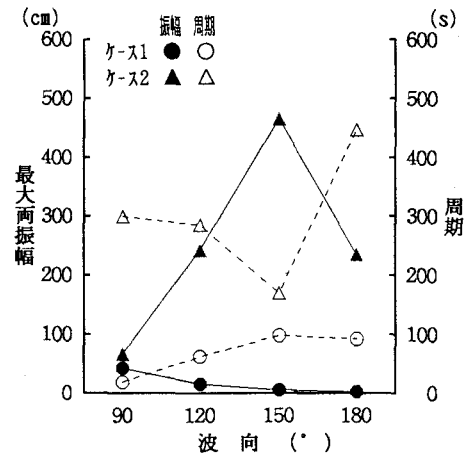


図-12 Sway方向シミュレーション結果図

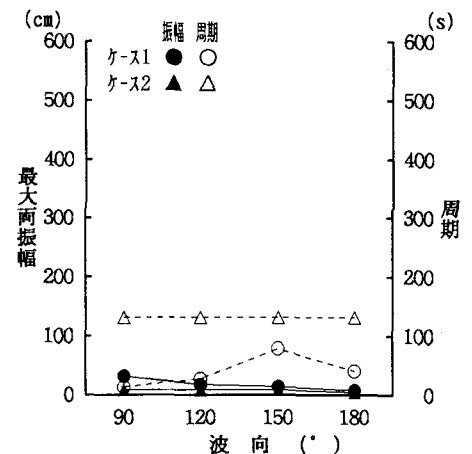


図-13 Heave方向シミュレーション結果図

4. おわりに

本調査で得られた主要な結果は以下の通りである。

- ①船体動揺時における動揺卓越周期は、Surge方向で124s、100s、Sway方向で75s、12s、Heave方向で44s、12sであり、特にSurge方向では長周期の動揺が卓越していた。
- ②船体動揺時には、港外において12s程度のうねり成分と1～3分程度の長周期波の卓越がみられた。これらのうち、うねり成分のエネルギーは港内で減衰しているものの、1～3分の長周期波のエネルギーは港外と同程度となっていた。
- ③船体動揺時の水位変動を入力条件とした船体動揺シミュレーションにより、動揺現象は概ね再現できているものと思われる。また、Surge方向の動揺には、長周期成分が大きな影響を与えていることが分かった。

以上のことより船体動揺現象は、港外から侵入してきた1～3分程度の長周期波成分と係留船舶の固有周期との同調作用によるものと思われる。今後、港外における長周期波の発生要因を明らかにし、船体動揺現象の予測手法および対策工の検討を行っていく予定である。

最後に、本調査において谷野賢二北海道開発局開発土木研究所水産土木研究室長を委員長とする苫小牧港海域調査検討委員会の多大なる御指導と御協力を受けたことに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 苫小牧港湾建設事務所(1992)：平成3年度苫小牧東港静穏度調査業務報告書
- 2) 上田 茂(1984)：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究、港湾技研資料、N0.504
- 3) 松良精三・根本任宏・深海正彦(1993)：苫小牧東港における船舶動揺特性の検討－第1報－、第36回北海道開発局技術研究発表会講演概要集(4)、pp.237～242