

港内係留船舶の長周期動揺に関する現地観測 と動揺シミュレーションの入力条件の評価

FIELD OBSERVATION ON LONG-PERIOD MOTIONS OF MOORED VESSEL AND ITS NUMERICAL SIMULATION

朝崎勝之¹・松尾憲親²・鵜飼亮行³・森屋陽一⁴・津金正典⁵

Katsuyuki ASAZAKI, Norichika MATSUO, Akiyuki UKAI, Yoichi MORIYA
and Masanori TSUGANE

¹正会員 九州電力(株) 鹿児島支店 (〒890-8558 鹿児島県鹿児島市与次郎 2-6-16)

²工修 九州電力(株) 苓北発電所建設所 (〒863-2504 熊本県天草郡苓北町年柄字苓陽 1091)

³正会員 工修 五洋建設(株) 四国支店 (〒790-0011 愛媛県松山市千船町 4-4-3)

⁴正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

⁵正会員 (株) 日本海洋科学 (〒140-0004 東京都品川区南品川 2-3-6 第7小池ビル 3F)

Field observation on wave, current and long-period motions of a moored vessel at Reihoku Port was conducted. Highly accurate data of six motions around the center of gravity of the vessel, the tension of the mooring ropes and the displacement of the fender were obtained. It was confirmed that the long-period motions, such as surging, swaying and yawing, were strongly affected by mooring system. By considering multi-directionality and frequency bandwidth of incident waves as input conditions for a numerical simulation, the calculation results of the vessel motions agree with the field observation data well.

Key Words : Moored vessel, long-period motion, field observation, numerical simulation

1. はじめに

近年, 船舶の大型化に伴い, 港内係留船舶の長周期動揺による荷役障害や係留索切断等の事故が報告され, 大きな問題として取り上げられている。現在, 係留船舶の動揺量の予測は数値シミュレーションにより行われているが, その精度は十分とはいえず, 動揺シミュレーションの予測精度を向上させるためには, 現地観測により係留船舶の長周期動揺の特性を把握する必要がある。

松良ら(1994)¹⁾は, 現地観測により港内外の波浪場と係留船舶の動揺を観測し, 係留船舶の長周期動揺の特性とその支配要因の解明を試みているが, ビデオ撮影により船体動揺の観測を行っているために, 6成分の船体重心位置での運動の評価はできない。港内係留船舶の動揺特性は, 各運動成分が係留系を介して連成するため, 外力である波浪の特性を把握するとともに, 6成分の運動を同時に精度よく観測した結果を用いて検討することが望ましい。

最近, 齊藤(1998)²⁾は港内外の波浪場とGPSを用いた船体動揺量の現地観測を行い, 精度良く船体動揺量を測定するとともに, 現地観測結果と動揺シミュレーション結果との比較も行っている。ただし,

齊藤(1998)²⁾は動揺シミュレーションとして, 代表周波数に対する流体力係数を用いて運動方程式を解く手法を採用している。久保ら(1997)³⁾が指摘しているように, 代表周波数に対する流体力係数を用いる方法では, 長周期動揺を十分な精度で評価することはできず, 特に, 波浪(短周期)成分の波が作用した際に, 係留系の非線形性によって発生する長周期動揺(サブハーモニックモーション)については, 全く評価できない。波浪成分から長周期成分まで精度よく動揺量を評価するためには, 現在のところ, 例えば久保ら(1988)⁴⁾による浮体の運動方程式にメモリー影響関数を用いて時系列的に解く方法が最も実用的であると考えられる。

本研究では, 現地観測により港内外の波浪場と同時に, 光波位置測定器と傾斜計を用いて, 港内係留船舶の重心位置での6成分の動揺量を精度良く測定すると共に, 係留索張力および防舷材変位の測定も行い, 係留船舶の長周期動揺特性について検討を行った。また, 非線形性を考慮した波浪場の数値計算により, 動揺シミュレーションの入力条件を評価し, 久保ら(1988)⁴⁾の方法により, 動揺量および係留索張力, 防舷材変位について現地観測結果との比較を行った。

2. 現地調査の概要

熊本県の最西端の天草下島に位置し、東シナ海に直接面している九州電力（株）苓北発電所専用港湾において、1996年2月23日～25日および1996年3月14日～3月17日の期間に、揚炭岸壁に係留された石炭運搬船（約69,000DWT）を対象に、船体動揺量、係留索張力、防舷材変位と港内外の水圧、流速および水位変動の連続観測を行った。写真-1に船体係留状況（1996年2月23日）を示す。また、図-1に港湾形状および波浪場の観測地点位置図を示し、表-1に船体動揺量、係留索張力、防舷材変位の観測装置一覧、図-2に設置位置を示す。

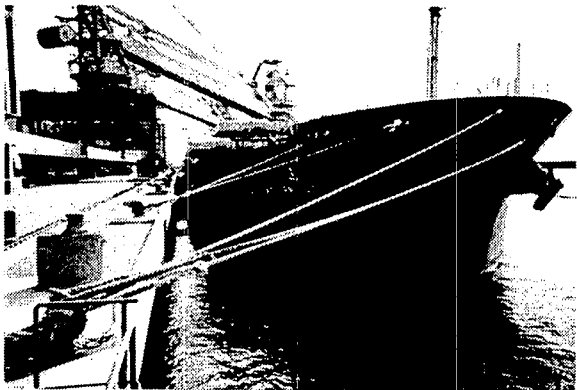


写真-1 船体係留状況

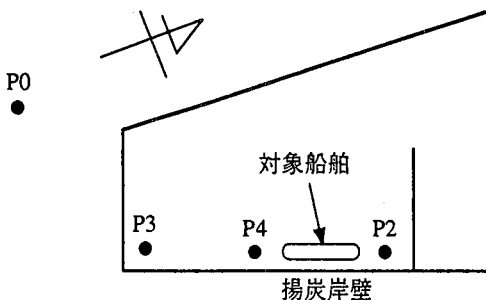


図-1 港湾形状と波浪観測地点位置図

表-1 船体動揺量等の観測装置一覧

計測項目	計測装置	装置名称	台数
船体動揺量	傾斜計	SMM-1000	1
	光波位置測定器	ジオリメタ4400	2
	ビデオ装置	8mmビデオ	2
係留索張力	鉄筋計	BF-32CT	2
防舷材変位	ワイヤー変位計	DTP-2MDS	2
波浪場	水圧センサー付	WAVE-	
	電磁流速計	HUNTER N	4
	超音波波高計	SSW-II N	2

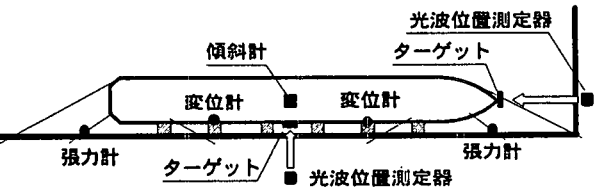


図-2 船体動揺量等の観測装置設置位置図

船体動揺量、係留索張力、防舷材変位に関しては昼間のみ2時間毎に1時間の連続観測を行った。傾斜計のデータは有線テレメータ、光波位置測定器のデータは無線テレメータ、張力計および変位計のデータは出力ケーブルにより転送し、観測室内のパソコンに収録した。傾斜計、張力計、変位計のサンプリング間隔は0.4秒、光波位置測定器のサンプリング間隔はターゲットを追いかけけているために、0.4秒以上の不等間隔になる。光波位置測定器のデータは、線形補間により0.4秒の等間隔データに変換し解析に用いている。光波位置測定器により観測された船首および船舷のターゲットの3次元座標変位には、船体回転運動成分の影響が含まれている。そこで、2台の光波位置測定器のデータと傾斜計のrollingのデータを用いて、船体重心位置での6成分の船体動揺量を求めた。

港外P0地点と港内P2、P3、P4地点では、水圧式波高計および電磁流速計によりサンプリング間隔1.0秒で水圧変動と流速変動の連続観測を行い、P0およびP2地点では、超音波式波高計によりサンプリング間隔0.5秒で水位変動の20min/2hrの観測を行った。20min/2hrで観測した水位変動データを用いて、水圧変動から水位変動に変換するための補正係数を求め、さらに、潮位の除去を行った。

1回目の観測期間（2月23日～2月25日）は非常に静穏な状況であり、有意な船体動揺を観測できなかったが、2回目の観測期間（3月14日～3月17日）には3月15日に観測地点付近を低気圧が通過し、有意な船体動揺を観測した。

2回目の観測期間中の係留船舶の船体諸元を表-2に示す。また、岸壁に設置されている防舷材はφ1600mmの定反力型防舷材であり、2回目の観測期間中の係留船舶に用いられていた係留索はφ70mmの繊維索であった。係留状況の模式図を図-3に示す。

表-2 係留船舶の船体諸元

全長	L(O.A.)	224.0m
垂線間長	L(B.P.)	215.0m
幅	B(MLD)	32.2m
深さ	D(MLD)	18.2m
喫水	Draft(MLD)	13.27m
重量トン	D.W.T.	68,636t
総トン	G.T.	36,074t
重心位置	K.G.	7.87m
平均喫水	M.D.	8.12m

K.G. およびM.Dは3月15日15時の値

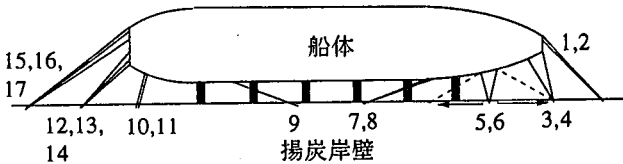


図-3 係留状況の模式図

（係留索 No. 5, 6 は3月15日14時に実線から破線のように張り替えを行った。）

3. 現地観測結果

(1) 波浪、船体動揺量の経時変化

港外および港内の水位変動のスペクトル解析結果より、波浪成分（周期 16.7 秒以下）、サーフビート成分（周期 16.7～200 秒）、副振動成分（周期 200 秒以上）を定義し、水位変動および流速変動の時系列を各成分に分離し、統計処理を行った。

図-4 に、2 回目の観測期間中の港内外の波浪成分とサーフビート成分の有義波高および波向、風向、風速の経時変化を示す。低気圧通過時（3 月 15 日）には、風速 20m/s、港外波浪成分有義波高 3m、港外サーフビート成分有義波高 0.12m を記録した。港外と港内の波浪成分有義波高の最大となる時間にずれが見られるが、これは風向の変化により風波が直接港口から入ってきたことによるものと考えられる。また、港外の波浪成分有義波高とサーフビート成分有義波高の最大となる時間はほぼ一致しているが、港外のサーフビート成分有義波高と港内のサーフビート成分有義波高の最大となる時間には、2～3 時間程度のずれがある。これは、港内での共振によりサーフビート成分が発達しているためであると考えられる。

図-5 に 2 回目の観測期間中の船体動揺量の経時変化を示す。船体動揺量は最大で片振幅 surging 約 0.9m、swaying 約 0.5m の有意な動揺が観測された。また、係留索張力は最大で 112kN (11.4tf)、防舷材変位は最大で 0.172m が観測された。

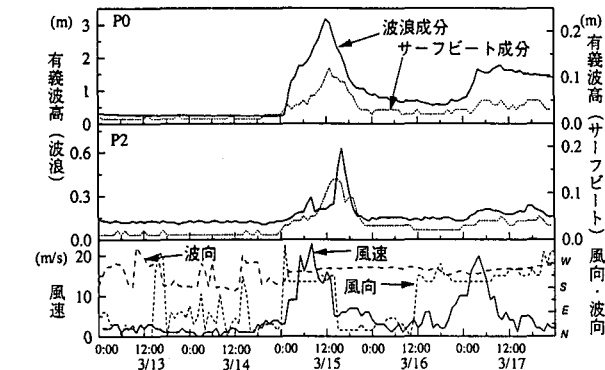


図-4 観測諸量の経時変化

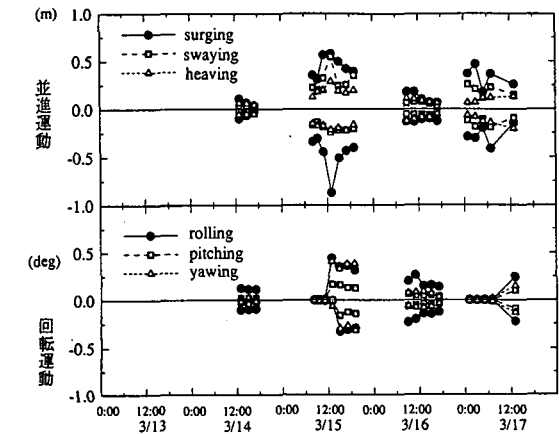
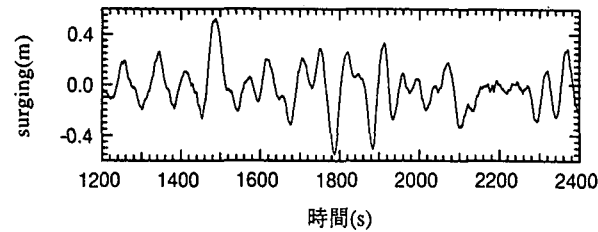


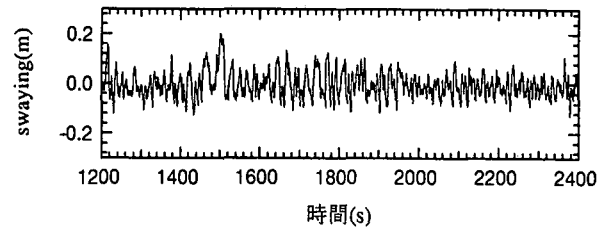
図-5 動揺量の片振幅の最大値の経時変化

(2) 観測結果の時系列

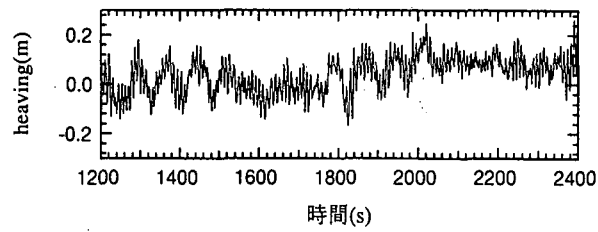
観測データの一例として、3 月 15 日 15 時 20 分からの 20 分の観測結果の時系列を示す。図-6 は船体重心位置での 6 成分の動揺量、図-7 は船首および船尾側の係留索張力、図-8 は船首および船尾側の防舷材変位のものである。



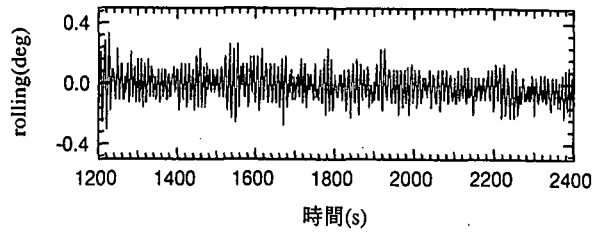
(a) surging



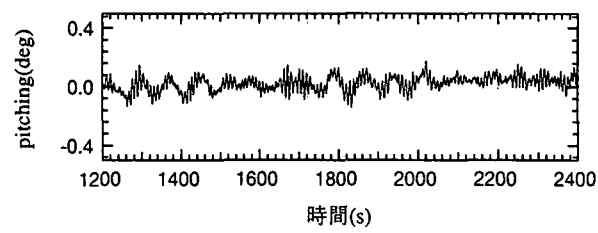
(b) swaying



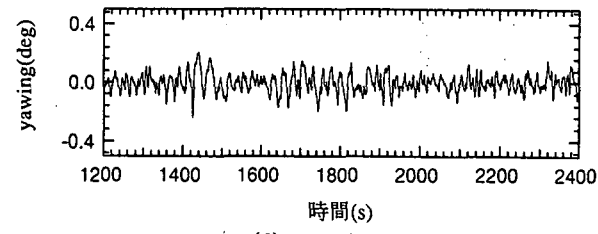
(c) heaving



(d) rolling

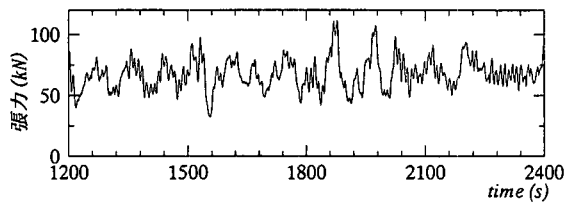


(e) pitching

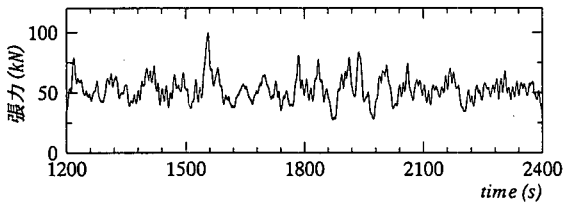


(f) yawing

図-6 船体重心位置での 6 成分の動揺量

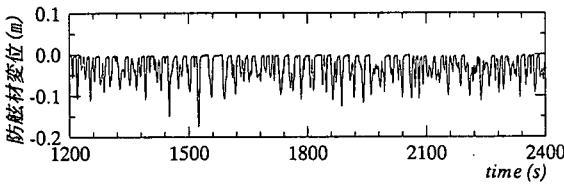


(a) 船首側

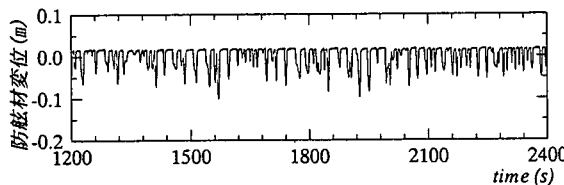


(b) 船尾側

図-7 係留索張力の観測結果の時系列



(a) 船首側



(b) 船尾側

図-8 防舷材変位の観測結果の時系列

(3) 周波数スペクトル特性

動揺量が大きかった3月15日の11時, 13時, 15時, 17時からの1時間データを対象に, 周波数スペクトル特性について検討を行った. 港内P2地点の水位変動の周波数スペクトルを図-9に示し, 図-10~15に船体重心の6自由度運動成分の周波数スペクトル解析結果を示す. 残念ながら, 13:00のデータは, 船首側の光波位置測定器のデータおよび傾斜計の yawing のデータが途中欠測になった. 欠測

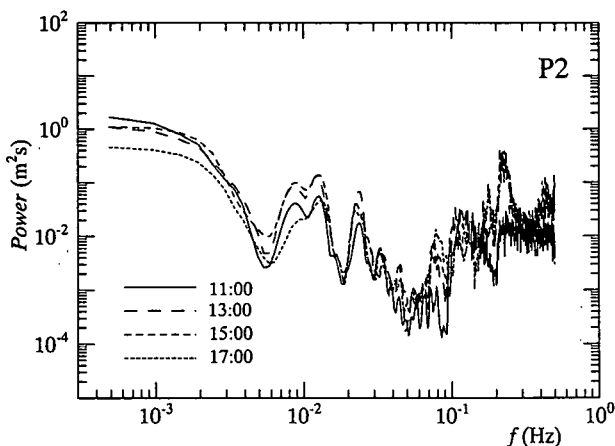


図-9 P2 地点の水位変動の周波数スペクトル

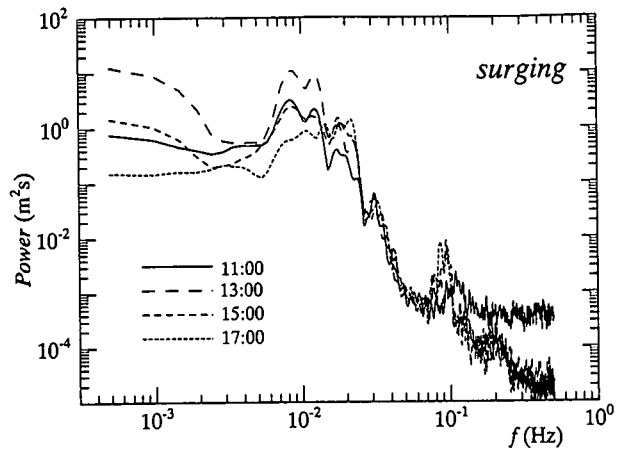


図-10 surging の周波数スペクトル

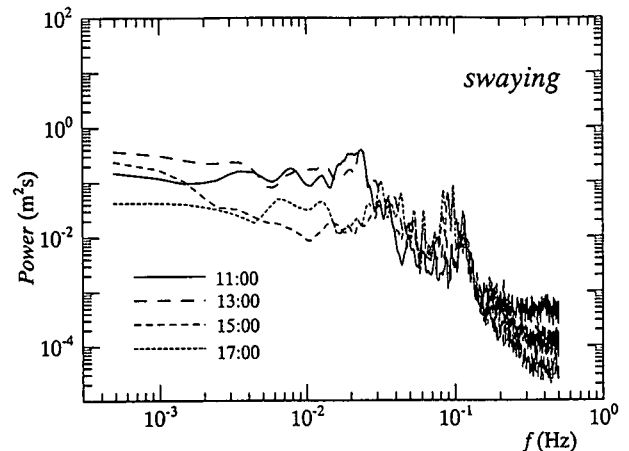


図-11 swaying の周波数スペクトル

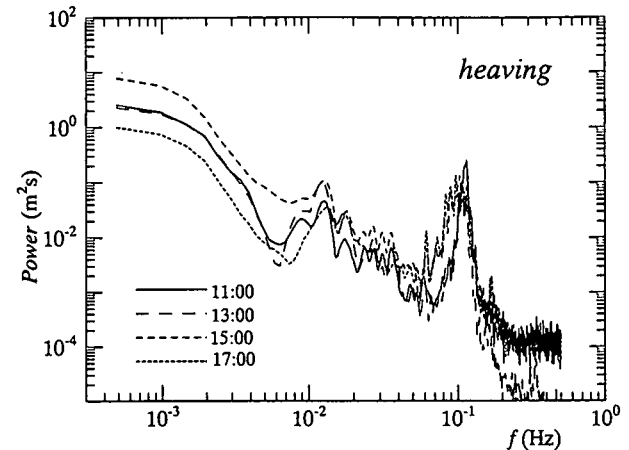


図-12 heaving の周波数スペクトル

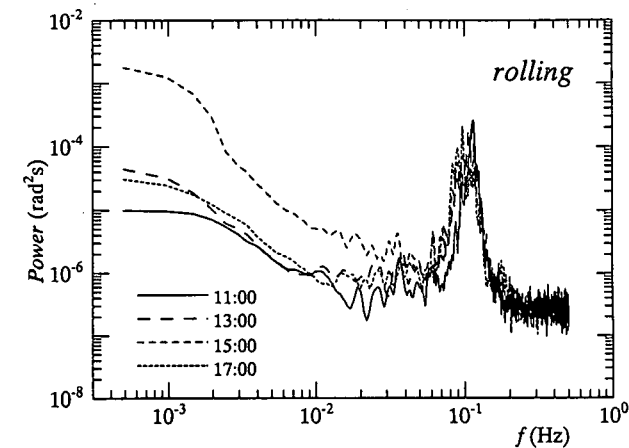


図-13 rolling の周波数スペクトル

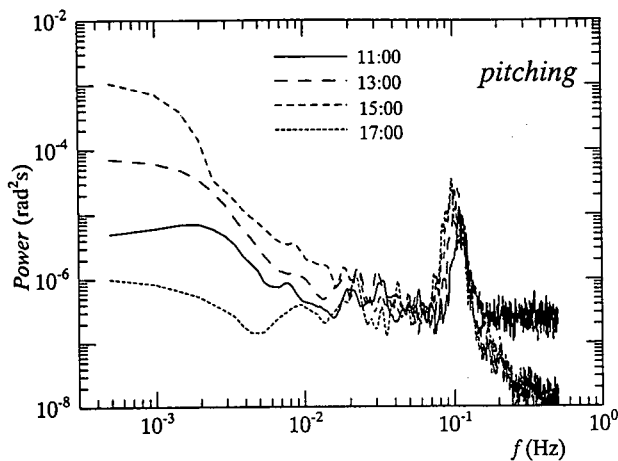


図-14 pitching の周波数スペクトル

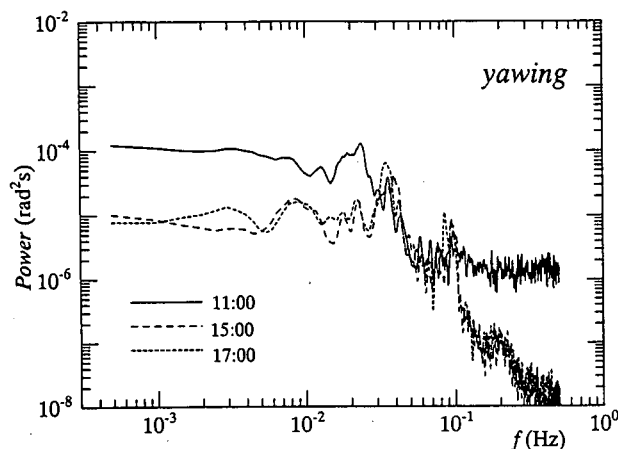


図-15 yawing の周波数スペクトル

期間を除去したデータで船体重心位置の並進運動成分を計算し、船舷側の光波位置測定器のデータとの相関を取った結果、非常に高い相関が見られたため、13:00 の並進運動は船舷側の光波位置測定器のデータ、rolling および pitching は傾斜計のデータを用いて解析を行った。

従来の研究結果と同様に、surging, swaying および yawing は長周期の動揺が顕著である。また、surging の周波数スペクトルは、100 秒付近に二山のピークが見られ、そのピークは P2 地点の水位変動の周波数スペクトルに対応している。rolling と pitching は、短周期の動揺が顕著である。heaving の周波数スペクトルは、10 秒付近と 100 秒付近にピークが見られ、P2 地点の水位変動の周波数スペクトル形状と良い対応を示している。

観測期間中、船体動揺が大きくなったため、3 月 15 日 13 時 45 分～14 時 45 分に係留索の張り替え作業が行なわれた。表-3 に係留索の張り替え作業状況を示し、図-3 に係留索の張り替え状況を模式的に示す。

係留索の張り替え前後（3 月 15 日 13 時と 15 時）で P2 地点の水位変動の周波数スペクトルには、大きな変化は見られず（図-9）、船体動揺の外力となる波浪場はほぼ等しいと見なせることがわかる。係留索の比較的緩い状態（3 月 15 日 13 時）では、surging および swaying の周波数スペクトル（図-12）を見

表-3 係留索の張り替え作業状況

13:45～14:15	Tighten all head and spring lines (No. 1～4 and 7, 8)
13:45～14:15	Two breast lines transfer to head and spring line (No. 5 and 6)
14:20～14:45	Tighten all stern lines (No. 9～14)

ると、長周期動揺が大きい、係留索を張り換え、バネを固くした状態（3 月 15 日 15 時）では長周期動揺が小さくなっている。特に、swaying では、係留索を張り換え、バネが固くなったことにより、広い周波数帯にわたって、動揺のエネルギーが減少していることがわかる。heaving, rolling, pitching については、係留索の張り替え前後で、周波数スペクトルの大きな変化は見られない。また、係留索張力の最大値は、係留索の張り替え前（3 月 15 日 13 時）は船首側 91.1kN、船尾側 91.6kN であったが、係留索の張り替え後（3 月 15 日 15 時）は船首側 111kN、船尾側 100kN となった。このことから係留船舶の長周期動揺には、係留索のバネ定数の影響が顕著に現れ、バネを固くしたことで、係留索張力が大きくなることが確認できた。

4. 船体動揺シミュレーション

動揺シミュレーションとして、浮体の運動方程式にメモリー影響関数を用いて時系列的に解く方法⁴⁾を採用し、船体動揺量について現地観測結果と動揺シミュレーション結果の比較を行った。

船体動揺量と港内の水位変動をスペクトルレベルで比較した結果、船体動揺量と港内の水位変動は広い周波数帯域で良い対応を示すことがわかった。よって、波浪成分から長周期成分まで精度よく動揺量を評価するためには、入力条件として波浪（短周期）成分の波だけでなく、長周期波も適切に評価する必要がある。そこで、Boussinesq 方程式を用いて港内波浪場の数値シミュレーション⁵⁾を実施し、船体重心位置での長周期波の不規則性および多方向性を評価することにより、入力条件に波浪成分の波だけでなく、港内副振動の影響を考慮した長周期波も与えた。係留索の初期張力はウインチで巻いているもののみ 39.2kN (4tf) を与え、外力としての風は、観測時に得られた風速 (5m/s)、風向 (WSW) の変動風を入力した。以上により、動揺シミュレーションによる不確定要素は粘性減衰係数のみとなったと考え、粘性減衰係数のパラメタスタディを行った。その結果、粘性減衰係数の値は、従来の計算に用いられてきた値 (surging 方向 0.4, swaying 方向 0.9)⁴⁾より、やや小さく surging 方向 0.3, swaying 方向 0.8 となった。

表-4 は 3 月 15 日 13 時の 6 成分の船体動揺量の最大値に関して、表-5 は係留索張力と防舷材変位の最大値に関して、現地観測結果と動揺シミュレーション結果を比較したものであり、動揺シミュレーションによりほぼ十分な精度で予測可能なことがわ

かる。図-15 は surging, 図-16 は swaying の 3 月 15 日 13 時の動揺量の周波数スペクトルについて、現地観測結果と動揺シミュレーション結果を比較したものである。

周波数スペクトルレベルでも、短周期成分、長周期成分ともに良い対応を示しており、船体動揺シミュレーションにおいて、入力条件に波浪成分の波だけでなく、港内副振動の影響を考慮した長周期波も与えることにより、十分な精度で現地観測結果を再現できることを示した。

表-4 動揺量の最大値

	Surging(m)		swaying(m)		heaving(m)	
	max	min	max	min	max	min
実測	0.557	-0.871	0.669	-0.117	0.287	-0.324
計算	0.565	-0.723	0.597	-0.084	0.098	-0.100
	rolling(deg)		pitching(m)		yawing(deg)	
	max	min	max	min	max	min
実測	0.440	-0.420	0.167	-0.173	0.408	-0.472
計算	0.536	-0.715	0.206	-0.217	0.293	-0.414

表-5 係留索張力と防舷材変位の最大値

	係留索張力(kN)		防舷材変位(m)	
	船首側	船尾側	船首側	船尾側
実測	91.1	91.6	0.129	0.103
計算	106.	89.6	0.156	0.118

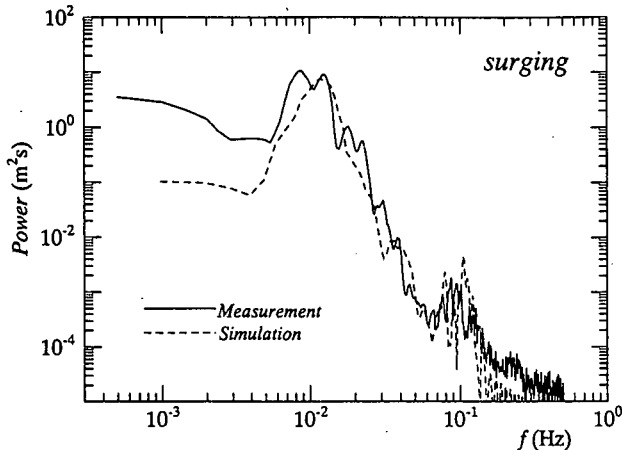


図-15 surging の周波数スペクトル

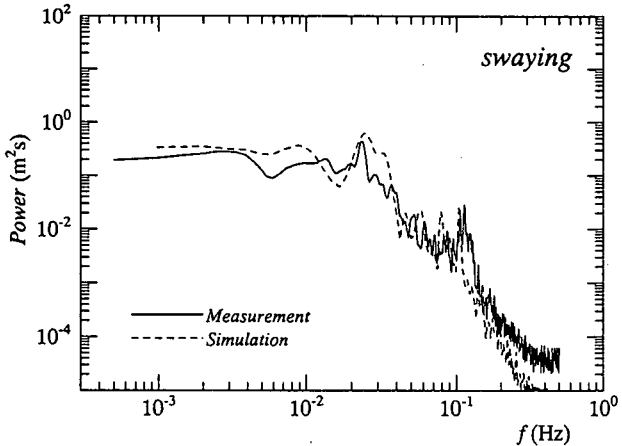


図-16 swaying の周波数スペクトル

5. おわりに

本研究により、得られた結論をまとめると、以下のようになる。

①外力となる波浪の時系列データとともに、数秒から数十分までの広帯域の船体動揺の精度良い時系列データが取得できた。

②surging および swaying は長周期の動揺が顕著である。特に、surging に関しては、波浪観測結果との相関から、港内副振動（長周期波）が外力となっていることが確認できた。

③係留索の比較的緩い状態では、surging および swaying の長周期動揺が大きかったが、係留索を張り換え、バネを固くした状態では長周期動揺が小さくなった。このことから係留船舶の長周期動揺には、係留索のバネ定数の影響が顕著に現れることが確認できた。

④浮体の運動方程式にメモリー影響関数を用いて時系列的に解く動揺シミュレーション手法⁴⁾を採用し、入力条件に波浪（短周期）成分の波だけでなく、港内副振動の影響を考慮した長周期波も与えることにより、現地観測結果を十分に再現できることを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、電力中央研究所我孫子研究所水理部の池野正明主任研究員には、数々の有益な助言をいただいた。ここに、記して感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲：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. 71-75，1994.
- 2) 斉藤直：三隅港の長周期波特性と船体動揺への影響評価，電力土木，pp. 87-91，1999.
- 3) 久保雅義・笹健児・白石悟・榑原繁樹：数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について，海岸工学論文集，第 44 巻，pp. 236-240，1997.
- 4) 久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策：岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について，第 35 回海岸工学講演会論文集，pp. 687-691，1988.
- 5) 藤畑定生・秦禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩：現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測手法に関する検討，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 306-310，1998.

(1999. 4. 19 受付)