

数値シミュレーションによる係留船舶の 長周期動揺の評価に関する考察

AN ESTIMATION OF LONG-PERIOD OSCILLATIONS OF MOORED SHIP BY
NUMERICAL SIMULATION

白石悟¹・米山治男²・佐藤平和²・笹健児³

Satoru SHIRAISHI, Haruo YONEYAMA, Hirakazu SATO and Kenji SASA

¹正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

It is important in berth planning and port operation to be accurately familiar with moored ship motions correctly in especially long period component, especially at ports facing the open sea. The phenomenon of moored ship oscillations has been studied for decades by model experiments, field observations and numerical simulations. This paper shows the comparison of numerical simulation result and field observations to discuss how we get more accurate result by the numerical simulations, on ship motions. Major unknown factors for surging in the numerical simulations are the condition of mooring ropes and damping factor. Then, we discuss on the effect of the characteristics of mooring system and surge damping factor.

Key Words : moored ship, long-period oscillation, long-period waves, mooring system, damping numerical simulation, field observation, model experiment

1. 概要

外洋に面した港湾においては長周期波の影響により係留船舶の長周期動揺が励起され、これによる荷役障害や係留索の切断事故が発生している。このような荷役上の問題を解決するための具体的対策を検討する際には、現地における係留船舶の長周期動揺を可能な限り正確に予測することが必要になる。本稿では、過去に実施された船体動揺の現地調査結果とシミュレーション結果との比較を行い、シミュレーション手法の精度について述べる。また、評価の際に問題となる留意事項（減衰係数の設定、係留索の変位復元力特性の設定など）を考察する。

2. 研究の方法

本稿では以下の二つの方法により係留船舶の長周期動揺についての考察を加えている。

① 動揺シミュレーション

過去に観測された事例について動揺シミュレーションを実施して観測値と実測値を比較して数値シ

ミュレーションの精度に与える諸要因を分析した。

② 船舶の粘性減衰力測定実験

船舶の長周期動揺に対する減衰定数は、これまでほとんど計測された事例がない。そこで強制動揺実験および自由振動実験を行って長周期動揺に対する粘性減衰力を評価した。

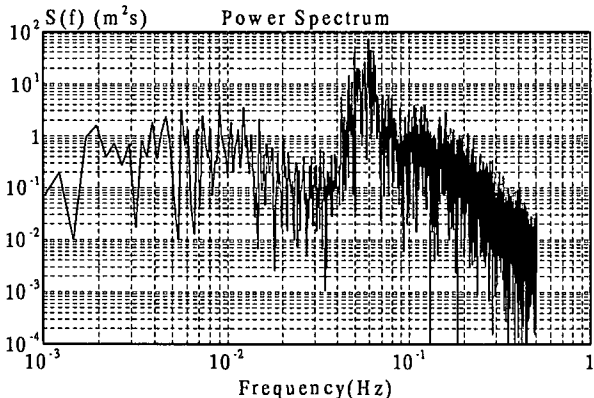
3. 係留船舶の動揺の観測事例およびそれに対する評価

(1) 概要

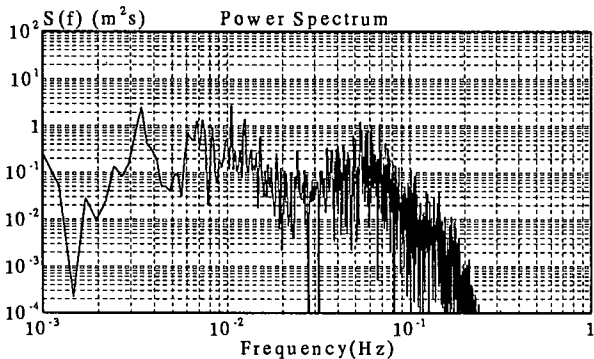
係留船舶の動揺の観測事例およびその動揺シミュレーションによる評価事例としてT港、N港、H港の事例を紹介する。T港、N港の事例は観測中に長周期動揺が観測された事例である。これに対して、H港の事例は長周期動揺が観測されなかった事例である。これらの観測と対比するために実施した動揺シミュレーションの事例を紹介する^{1), 2)}。これらの観測事例について動揺シミュレーションを行った結果より長周期動揺の評価の精度および動揺シミュレーションにおける減衰係数の設定³⁾、係留索の変位復元力特性の評価について考察する。

(2) 事例1 (T港)

外洋に面したT港で60,000DWT石炭運搬船(垂線間長215.0m, 船幅32.3m, 型深さ18.2m, 観測時喫水7.28m)の長周期動揺が観測された事例についての検討である。動揺観測は1994年9月17日~18日に実施された。台風は日本の東南方海上をゆっくりと北東進し、台風そのものは上陸していないが、台風の暴風域を源とするうねりが当該港湾に来襲していた。図-1(a)および(b)が港外および港内の波浪スペクトルである。船が緊急離棧する直前の9月18日の午前7時には港外波は有義波高2.3m, 有義周期16.6sで、これに加えて周期100~200sの長周期波のエネルギーが大きくなることがわかる。港内においては、短周期成分は大きく減衰しており有義波高は0.4mであるので、現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説で示されている中・大型船に対する荷役限界波高0.5mよりも小さい。しかしながら、長周期波の影響により船体は大きく動揺し、サージングの有義振幅は6.3mであった。このときの周波数スペクトルを見ると、港内の長周期波成分のエネルギーは港外のそれと比べ、エネルギーレベルについてほとんど変化が無いことがわかる。過去の研究においても当該港湾では長周期波が係留船舶の長周期動揺に大きな影響を及ぼしていると指摘されている。



(a) 港外における波浪のスペクトル



(b) 港内における波浪のスペクトル

図-1 波浪のスペクトル(1994年9月18日7:00-8:00)

図-2はサージングの実測値と計算値の時系列波形の比較である。運動方程式の時系列積分法および流体力算定法は以下の各手法とした²⁾。なお、サージ

ングおよびスウエイングの減衰係数は久保らの実測値³⁾を参考に設定した。

- ① 遅延関数法(三次元領域分割法)
- ② 遅延関数法(三次元特異点分布法)
- ③ 一定係数法・有義周期法(多重極展開法)
- ④ 一定係数法・固有周期法(多重極展開法)

また、表-1は各計算値の有義振幅を比較したもので時刻ごとに対比している。この場合、サージングについては各計算法による相違は比較的少ない。また、5~6時、6~7時の計算において計算値は実測値よりも大きく計算されている。ここでは詳細に分析していないが計算で仮定した係留系の特性の相違の可能性はある。

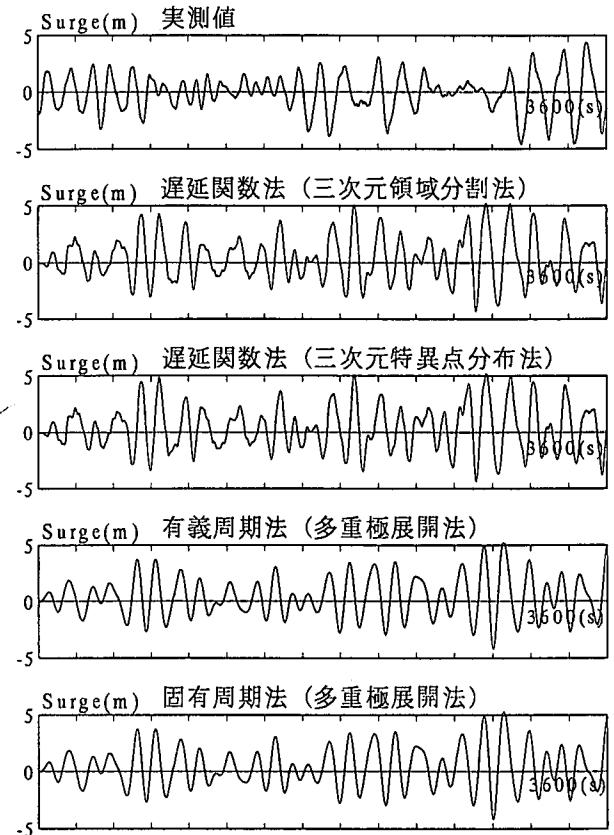


図-2 サージングの実測値と計算値の比較(1994年9月18日7:00-8:00)

表-1 サージングの実測値と計算値

時間	実測	①	②	③	④
4~5	2.18	3.12	3.23	3.44	3.40
5~6	3.43	5.26	5.34	6.57	6.52
6~7	3.28	5.11	5.12	-	-
7~8	6.33	5.91	5.97	4.38	4.38
		7.66	7.87	6.67	6.65
8~9	6.86	6.62	6.44	-	-

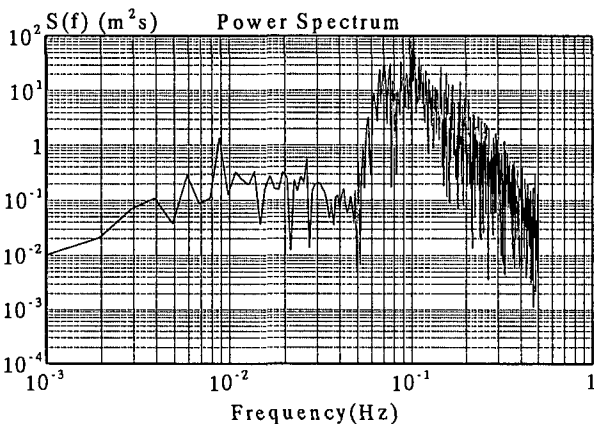
(単位・m), ①~④は解析手法を示す。

(注) 7~8時の上段は初期張力を作用させた状態での計算値, 下段は初期張力をゼロとしたときの計算値

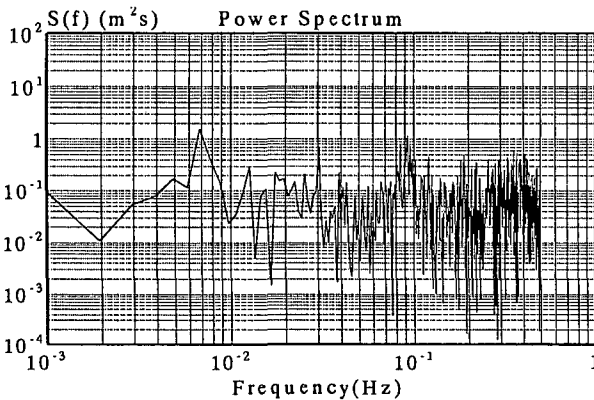
(3) 事例2 (N港)

外洋に面したN港で船舶の動揺を観測した事例についての検討である⁴⁾。観測は1995年1月31日に実施された。このときは冬季の低気圧による荒天時で港外の有義波高が最大で5mに達し、かつ強風が作用していた。観測の対象船舶は90,000DWT石炭運搬船(垂線間長231m, 型幅43.0m, 型深さ43.0m, 観測時喫水9.33m)である。

図-3(a)および(b)は港内外の波高のスペクトルを示す。港内では波周期10s付近のエネルギー低減が大きなことがわかる。一方、波周期20s以上のエネルギーは港内でも低減していない。また、港内のスペクトルにおいて0.007Hz(146s)付近にエネルギーの高い周波数帯がある。これはこの港の副振動モードの一つとも一致する。



(a) 港外の波浪のスペクトル



(b) 港内の波浪のスペクトル

図-3 波浪のスペクトル

(1995年1月31日16:00-16:20)

本船の係留ではヘッドラインとスターンラインについて係留索はナイロンとテトロンダイニーマの合成索になっており、ナイロンロープは索の剛性を調整するためのテールロープとして使用されている。

図-4は係留索の特性としてナイロンの初期の特性を用いて合成したものである。しかしながら、実際に観測された張力を用いて船体動揺から推定された係留索の変位復元力特性を検討すると張力の特性は当初の仮定よりも硬化していたと考えられた。そこで

図-5に示すナイロンロープの特性硬化を考慮した特性で再計算した。

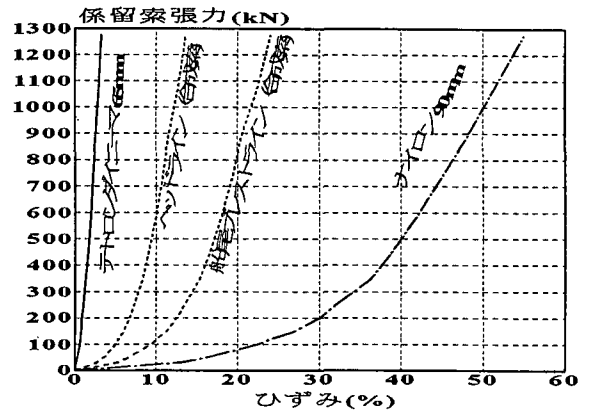


図-4 係留索の変位復元力特性(初期特性)

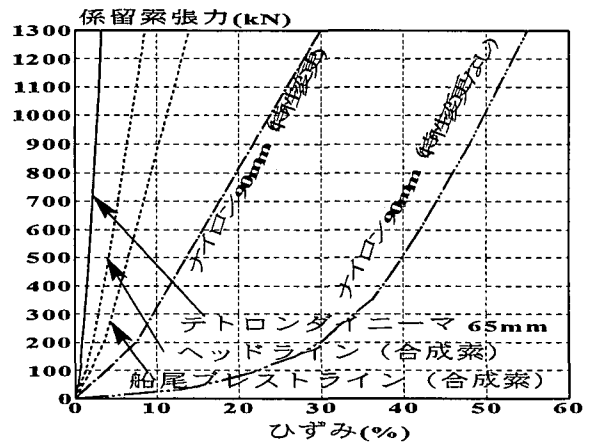


図-5 係留の変位復元力特性(特性硬化を考慮)

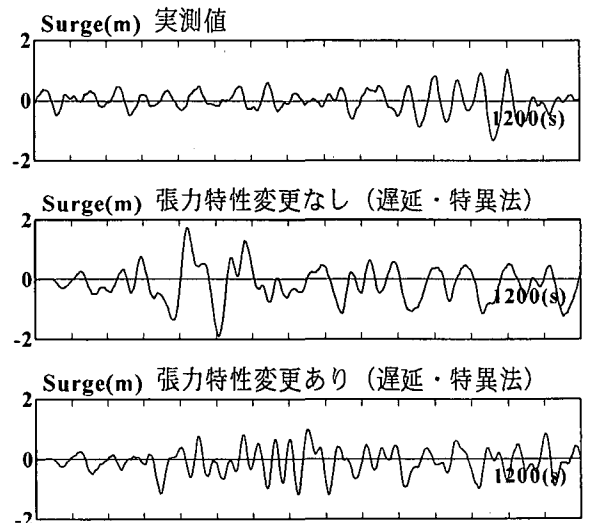


図-6 係留索の特性の変更によるサージングの動揺への影響

図-6はサージングの動揺の時系列を、表-2はその有義振幅と有義周期を示す。この結果より特性変更

を行ったケースの方が実測値に近いことがわかる。このように係留索の繰り返し使用による硬化の影響を考慮した方がサージングの動揺の再現性が向上できる可能性があると言える。

表-2 サージングの実測値と計算値の比較

	実測値	特性変更前	特性変更後
有義振幅(m)	1.46	2.49	1.62
有義周期(s)	57.6	97.7	55.3

(4) 事例3 (H港)

外洋に面したH港で船舶の動揺を観測した事例についての検討である。観測対象としたバースは水深-14m、バース延長280mである。ガントリークレーンを搭載した多目的バースであり主としてコンテナ船が係留される。観測は2001年2月8日(第1回)および2月16日(第2回)に実施されたが、ここでは動揺量が比較的大きかった第1回の観測値とシミュレーション計算結果を比較する。このときは7:30にバースに接岸し、8:45から荷役が開始され10:25に荷役を終了、10:38に離岸した。北風(埠頭側から作用)の影響でコンテナが振られて、やや荷役が手間取った状況も観察された。船体動揺については長周期波の影響によるサージングよりも短周期成分のヒービングあるいはローリングの影響が顕著であった。

図-7は沖波(港外の波高観測点)とバース近傍の波のスペクトルを比較したものである。バース近傍の波では、周期100s(0.01Hz)付近のエネルギーは港外のそれとほぼ同一のエネルギーレベルであるのに対し、周期10s(0.1Hz)付近のエネルギーレベルは大幅に減衰していることがわかる。

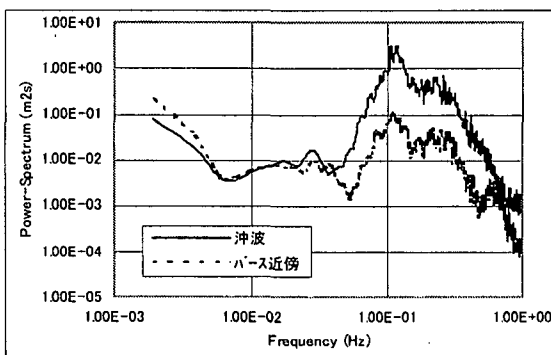


図-7 港内外の波高のスペクトルの比較

船舶の係留位置では波高の実測値が無かったため港外の観測点での波高の時系列を与えてブシネスクモデルで波浪変形計算を行い対象バース前面の波高の時系列を求めた。図-8は動揺シミュレーションに用いた波の周波数スペクトル(計算値)とバース近傍における波浪スペクトル(観測値)を比較したものである。観測値と計算値は位置が異なるが0.1Hz

付近の短周期成分および0.01Hz付近の長周期波成分のいずれについても、おおむね同じエネルギーレベルであることが解る。なお、波浪変形計算では波周期5s以下の成分は動揺に与える影響が小さいので計算していない。

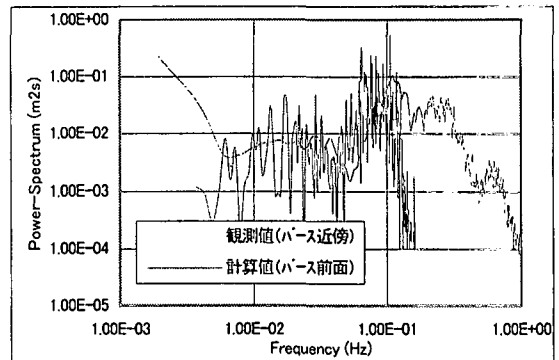


図-8 計算に用いた波スペクトルと近傍の観測値の比較

図-9は計算に用いた係留索の特性を示す。事例2でも述べたように係留索の特性は繰り返し使用することにより硬化し、かつ強度が低下することが一般に知られている。しかしながら、そのようなデータは非常に少ない。ここでは、第一ステップとしてカタログに記載されている強伸度曲線を用いて計算したが計算による固有周期と観測したサージングの周期が一致しなかった。したがって、係留索特性を初期のばね特性の5倍とした計算を追加して試みた。

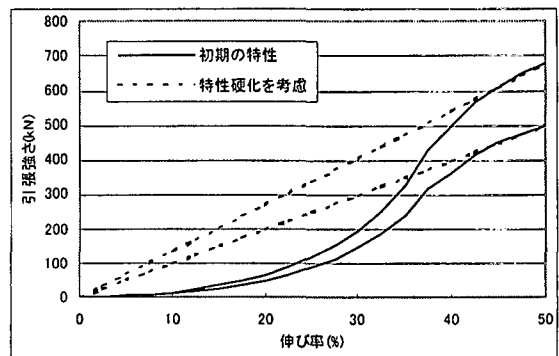
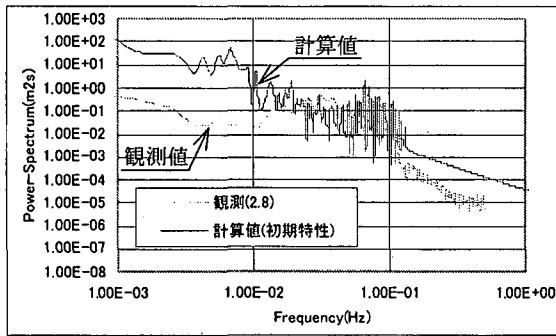
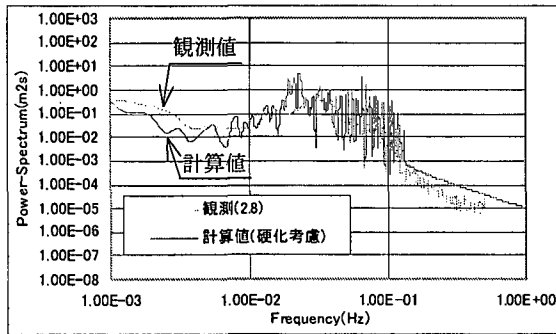


図-9 係留索の変位復元力特性

図-10(a)および(b)はサージの動揺量の実測値と計算値を比較したものである。図-10(a)では係留索について初期の特性を入力したものであるが、計算値については150~200s付近にエネルギーの高い所があるのに対して計算値では50s付近のエネルギーが高く、スペクトル特性が実測値と計算値において一致していない。これに対して係留索の硬化を考えた図-10(b)ではスペクトルの形状がおおむね一致していることがわかる。このことから係留索の特性については、その使用状況を十分に考慮して入力しなければならないことが改めて確認された。



(a) 初期の強伸度特性で入力した場合



(b) 硬化を考慮した場合

図-10 サージングの動揺特性の比較

図-11は上下動の計算値のスペクトルを実測値と比較している。上下動については係留索の特性の影響が小さいので特性の相違による比較はここでは示していない。計算値と観測値においてスペクトルのピーク周期が異なるのは、ローリングの固有周期が計算と実測で異なる影響と思われる。これはメタセンター高さが実船では不明であったので、その推定誤差によるものと考えられる。

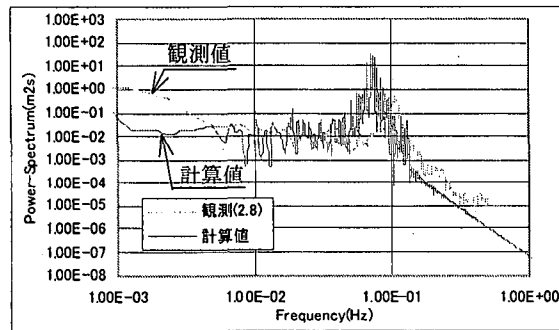


図-11 上下動の動揺特性の比較

4. 長周期動揺に対する流体力の評価

(1) 概要

長周期動揺を予測する際にはサージングの減衰係数の評価が重要であるが、これに関するデータが、これまで非常に少なかったことから静水中で強制動揺実験および自由動揺実験を行いサージングおよびスウェイグに関する減衰定数を推定した。実験に

用いた船舶はフェリー（垂線間長120m、幅20m、喫水5.34m）の1/50模型である。強制動揺実験における実験条件は、実船状態で動揺周期60s、120s、180s（サージング振幅：5m、10m、スウェイグ振幅：2.5m、5m）である。自由振動実験における動揺周期は実船状態で動揺周期60s、120s（サージング振幅：10m、スウェイグ振幅：5m）である。ここで得られた減衰係数より動揺シミュレーションにおける長周期動揺成分についての減衰係数の設定について考察する。

(2) 実験の手法

①強制動揺実験

水槽の曳航台車に設置した強制動揺試験装置に検力計を介して模型を設置する。強制動揺試験装置により所定の周期と振幅で模型を前後方向あるいは左右方向に正弦運動させ、この時の動揺変位および動揺方向の反力（強制力）を計測した。動揺変位と動揺反力は、動揺計測装置のポテンショメータと検力計で計測した。

②自由動揺実験

図-12に示すように水面上に浮かべた模型をスプリングを有したワイヤーで前後方向あるいは左右方向に係留し、前後方向または左右方向に初期変位を与えて自由動揺させたときの模型の動揺変位を計測した。

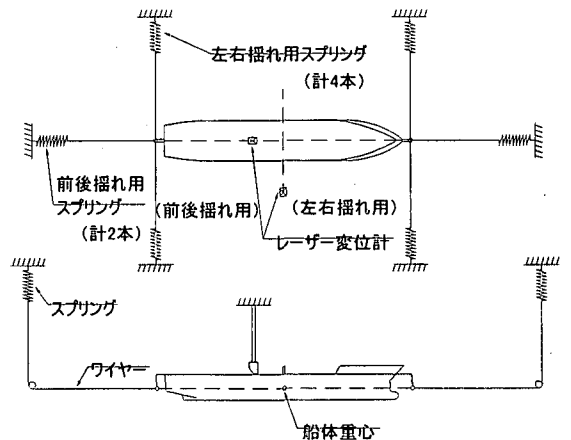


図-12 自由振動実験模型

(3) 解析の方法

①強制動揺実験

模型の動揺変位を基準として動揺反力をフーリエ解析して動揺速度に比例する力である減衰力を求めた。線形減衰係数 B_1 と非線形減衰係数 B_2 は動揺反力の1次と3次の振幅 F_1 、 F_3 と位相 ϵ_1 、 ϵ_3 より式(1)および式(2)で求められる。ここに X_A は動揺振幅(m)、 ω は角速度(rad/s)である。

$$B_1 = (-F_1 \sin(\epsilon_1) + 5F_3 \sin(\epsilon_3)) / \omega X_A \quad (1)$$

$$B_2 = (-15\pi F_3 \sin(\epsilon_3)) / 8\omega^2 X_A^2 \quad (2)$$

② 自由振動実験

自由振動波形より揺れ数ごとに動揺振幅 X_n を求め、平均動揺振幅量 $X_n = (X_n + X_{n+1}) / 2$ および動揺振幅の減衰量 $\Delta X = X_{n+1} - X_n$ を計算する。平均動揺振幅に対して振幅の減衰量を図示した減減曲線を求めてその最小自乗近似により式(3)に示す減減係数 a 、 b を求めた。1次の係数 a が線形減減係数、2次の係数 b が非線形減減係数に対応する。

$$\Delta X = a X_n + b X_n^2 \quad (3)$$

(4) 計測結果

表-3は強制動揺実験の結果を示したものである。表には周期、振幅、減衰力係数、付加質量係数を示している。

表-3 強制動揺実験結果
(サージング)

周期 (s)	振幅 (m)	B_1 (kNs/m)	B_2 (kNs ² /m ²)	付加質量係数
60.0	5.0	53.8	43.4	0.20
119.9	5.0	37.0	52.5	0.22
179.8	5.0	34.2	19.4	0.16
60.1	10.0	32.0	51.8	0.19
120.2	10.0	32.2	34.5	0.21
180.3	10.0	31.6	9.7	0.10

(スウェイング)

周期 (s)	振幅 (m)	B_1 (kNs/m)	B_2 (kNs ² /m ²)	付加質量係数
60.0	2.5	285.7	170.1	0.90
120.1	2.5	103.3	205.0	0.89
179.7	2.5	76.6	148.6	0.86
60.0	5.0	329.3	178.5	0.87
120.1	5.0	143.3	142.9	0.88
180.1	5.0	98.3	139.8	0.83

表-4は自由振動実験の結果得られた減減係数である。自由動揺実験は各ケースとも3回繰り返し行っており初期変位の方向が2種類(例えば船首側と船尾側)あるので、各々6回実施しており、その平均を示している。表には $b=0$ とした a 係数の値も示している。

(5) 考察

久保ら³⁾の実船実験のデータを用いて減衰力係数を算定すると強制動揺試験を行った船舶では周期120sの場合には125kNs/mとなる。久保らのデータでは非線形減減係数に相当する項はゼロとしているので、表-3に示した強制動揺実験の結果から動揺周期120sについて減衰力を線形化すると動揺振幅5.0mおよび10.0mに対して、それぞれ50.7および50.3kNs/mとなる。この数値は久保らの実船実験のデータと比較すると約40%に相当する。

一方、事例1および事例2における固有周期付近における三次元特異点分布法による減衰力係数と久保らによる実験値から求めた減衰力係数の比は0.03~0.18であった。久保らの実船測定は500GT船であり直接比較するには船型の差が大きすぎるが、実船における減衰の寄与は係留索等の非線形性やヒルテリシスに起因するもの、非線形の流体力に起因するもの、ポテンシャル理論による船形流体力の順に大きいものと思われる。しかしながら、既存のデータはあまりにも少なすぎ今後の検討が必要である。

表-4 自由振動実験の結果得られた減減係数
(サージング)

周期 (s)	振幅 (m)	a 係数	b 係数	a 係数 ($b=0$)
60.0	10.0	0.0612	0.0021	0.0817
120.0	10.0	0.1233	0.0033	0.1535

(スウェイング)

周期 (s)	振幅 (m)	a 係数	b 係数	a 係数 ($b=0$)
60.0	5.0	0.2217	0.0173	0.3095
120.0	5.0	0.3669	0.0283	0.5060

5. 結論

- 1) 係留船舶の動揺観測例に基づき、係留船舶の動揺を予測する際の留意事項を整理した。シミュレーションの精度向上には流体力係数の評価、係留系の変位復元力特性の評価が重要である。
- 2) サージングおよびスウェイングについて長周期動揺の周期帯で強制動揺実験および自由動揺実験を行った。実験と理論計算の比較の結果、長周期動揺成分に対する減衰は主として係留系に起因する減衰力と非線形流体力であることが確認された。既存のデータは少ないので、動揺量の推定精度向上のためには長周期動揺成分の減衰係数の設定について、今後もデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 白石悟, 久保雅義, 榊原繁樹, 笹健児: 長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, 1999. 11, pp. 861~865
- 2) 笹健児, 白石悟, 榊原繁樹: 係留船舶の各種数値計算法による再現性に関する比較検討, 港湾技研資料, No. 931, 1999. 3, 80p.
- 3) 久保雅義, 今枝彬郎, 奥村宗行: 長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について, 神戸商船大学紀要, 第2類, 第28号, 1980, pp. 289-298
- 4) 白石悟, 久保雅義, 上田茂, 榊原繁樹: 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, 1995. 11, pp. 941-945