外乱を受ける係留船舶の挙動と索張力の関係について

井関 俊夫*・大津 皓平*
水野 弘之**・玉井 勝也**

A Study on the Relationship between Mooring Forces and Ship Motions in Rough Condition

Toshio ISEKI, Kohei OHTSU,
Hiroyuki MIZUNO and Katsuya TAMAI

Abstract

The forces in the mooring cables and displacement of ship motions were measured in order to analyze the relationship between themselves. The ship is a berthed LNG carrier with 270m length. Results of this kind of measurement for the large ships have never been reported.

AR modelling procedure was taken for the spectral analysis and power spectra of fluctuating tension in the mooring cables were examined in detail. And, applying the power contribution analysis, the effects of ship motions upon the power spectrum of fluctuating tension were investigated. Furthermore, a computer simulation program for a moored ship was developed and applied to this measurement in order to examine the reliability of itself.

In this paper, the outline of these analysis are described and a few problems are discussed.

1. 緒 言

荷役作業中の船舶は複数の係留索とフェンダーによって岸壁に固定されているが、その係留索の張り方は荷役による喫水の変化や潮汐による水位の変化に応じ、各張力が常時適切な範囲内に収まるように留意されなければならない。しかしながら、近年、外洋に面した海域に港灣が建設されるようになり、船舶の大型化も相まって、激しい自然環境に基づく過大な外力、即ち冬季の風や波浪によって荷役作業に支障を来したり係留索の切断事故等を起こすケースが増えている。このような問題を解決するために、理論計算に基づくシミュレーション計算法^{(1)~(4)}が幾つか開発され、その手法を用いた総合的な係留問題の研究が現在精力的に進められている⁽⁵⁾。

ところで、実船の係留索に働く張力を測定することは困難な場合が多く、実際に計測・解析された例⁽⁶⁾は非常に少ない。したがって、上述のシミュレーション計算法の検証は模型実験によってなされているものがほとんどであり、Lppが200mを越えるような大型船の係留問題については、寸法比から来る模型材質等の問題により、その適用において若干の検討の余地が残されていると思われる。

そこで本研究では、大型係留船舶の動揺とその係留索の張力の関係を明らかにするために、実際に稼働中のLpp=270mのLNG船を供試船として、船体の動揺量と係留索の変動張力の現地計測を行った。得られた時系列に対してARモデルを用いたスペクトラム解析を行い、係留索の変動張力のパワースペクトラムを詳細に検討した。さらに、多次元ARモデルを用いたパワー寄与率を計算することにより、船体の動揺量が係留索張力に与える影響の解析を試みた。また、係留船舶の動揺シミュレーションプログラムもあわせて

* 正会員 東京商船大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

**正会員 (株)エム・オー・マリンコンサルティング (〒108-0022 東京都港区海岸3-18-1)

作成し、シミュレーション計算によってどの程度実際の現象を再現できるのかを検討した。本報では、解析の結果得られた若干の知見と問題点について報告する。

2. 計測の概要

計測は平成9年2月16日から17日にかけて、A港のLNGバースにおいて荷役前のアームクールダウン中と荷役終了後の2回にわけて行われた。供試船B丸は125,000m³型LNG運搬船であり、供試船の船体主要目ならびに計測時の喫水等は表1に示すとおりである。計測時の気象海象条件は表2に示すように、南西～西南西の風が観測されていたが、風浪が発達する風向ではなかったために港内の平均波高は27cmと低いものであった。供試船は24本の係留索と7つの係留ドルフィンによって棧橋に繋がれており、それぞれの係留索の配置は図1に示すとおりであった。

A港LNGバースでは各係留ドルフィン上にクイックリリース付きテンションメータが設置されており、このクイックリリースに繋がれた各係留索の張力は電気信号に変換され、棧橋上監視室内のファクトリーコンピュータに集められるようになっている。ファクトリーコンピュータの画面上では各係留索の張力変動を常時監視することができ、そのデータは30秒毎にハードディスクに記録されるようになっている。今回の計測では供試船B丸を繋いでいる24本の係留索すべての張力を記録した。

船体動揺の計測は船橋に設置された動揺監視装置(TOKIMEC:SMM-100)と棧橋からのビデオ撮影によって行った。しかしながら、前述のように計測時の港内波高は非常に小さく、変動風のみが船体動揺の起振力であったために船体動揺は微小振幅かつ長周期となり、動揺監視装置の計測分解能を下回ってしまい、有効なデータを得ることはできなかった。一方、ビデオカメラによる船体動揺の撮影・計測は、図2に示すように、一定間隔でマス目を描いたマグネット付きリノリウム製計測板を船体側面に貼り付け、棧橋からプレゼンテーション用レーザーポインタを用いてレーザー光を計測板に照射し、船体動揺によって相対的に計測板上を移動する輝点を撮影することによって行った。したがって、船体動揺量は撮影された輝点の上下左右の移動量で計測されるが、今回の港内波高では船体上下動は起こりにくいと考えられるので、このビデオ撮影によって船体の前後動と横揺れが計測されているものと思われる。

風向・風速の計測は供試船船橋および棧橋監視室において行った。供試船船橋では本船装備の風向風速計を用いて30秒毎に記録し、棧橋監視室においてはターミナル本館屋上設置の風向風速計および棧橋設置の風向風速計を用いて記録した。また、棧橋に設置してある波高計からのデータも同時に記録した。

3. シミュレーションプログラムの概要

計測された係留索張力の変動と船体動揺の相関を調べるにあたり、コンピュータによってどの程度実際

表1 供試船の主要目

船種	125,000 m ³ 型LNG運搬船
全長(LOA)	283.50 m
垂線間長(LPP)	270.00 m
型幅	44.80 m
型深さ	25.00 m
総トン数	102,511 G/T
夏季満載喫水	11.52 m
最大機関出力	29,433 kW(89 RPM) 40,000 HP
船首喫水	9.60 m
船尾喫水	9.60 m
船体中央左舷	9.50 m
船体中央右舷	9.50 m
排水量トン数	83,877 ton
正面受風圧面積	1,619 m ²
側面受風圧面積	8,013 m ²

表2 気象海象の観測結果

対象船舶		125,000m ³ 型LNG運搬船	
船橋	日時	2/17	02:30~03:00
	風向	230° ~250°	
	最大風速	時刻	2:49:00
	最小風速	風向・風速	245° 17.5m/s
		時刻	2:58:30
	平均風速	風向・風速	240° 11.3m/s
		時刻	15.1m/s
	日時	2/17	02:30~03:00
	風向	220.5° ~265.2°	
	最大風速	時刻	2:45:30
気象・海象	棧橋	風向・風速	248.2° 18.8m/s
		時刻	2:37:30
		風向・風速	247.3° 10.7m/s
		時刻	14.7m/s
	本館	波高	0.27m
		周期	303sec
	本館	日時	2/17 02:30~03:00
		風向	255.7° ~268.2°
		最大風速	時刻 2:30:00
		風向・風速	268.2° 8.0m/s
	平均風速	時刻	2:48:00
		風向・風速	264.4° 5.7m/s
		時刻	6.9m/s

図1 係留索配置と相対風向

の現象を再現できるのかを検討するために、係留船舶の動揺シミュレーションプログラムを作成し、計測結果との比較を行った。係留船舶の動揺シミュレーション法については多くの論文が出されており、計算アルゴリズムの骨格部分は既に確立されていると思われるので、ここでは今回作成したシミュレーションプログラムの概要と、他の論文の計算アルゴリズムと異なる点についてだけ述べる。

通常、係留船舶の動揺シミュレーションプログラムは大きく分けて2つの部分から構成される。第1はstrip法等を用いて船体に加わる流体力を計算する部分であり、第2は係留系を含んだ船体運動方程式を時間積分して時々刻々の船体動揺量や係留索張力を求める部分である。

第1の流体力計算は、時々刻々のシミュレーション計算に先立って行われるデータベース作成作業を意味し、計算対象の係留船舶が遭遇しうるあらゆる出会い角・あらゆる周波数の波について波浪強制力やラディエーション流体力を求めておくものである。本計算では、船体各断面の2次元流体力を船長方向に

図2 核橋からのビデオカメラによる船体運動計測状況

積分して全体の流体力を求めるstrip法の一つであるNSM(New Strip Method)⁽⁷⁾を用いている。一般に港湾内の係留船舶を取り扱う場合、流体力学的現象は浅水問題として捉える必要があるが、本プログラムの2次元流体力計算ではこの水深影響を考慮するために有限水深のGreen関数⁽⁸⁾を用い、船体形状を正確に考慮するためのClose-Fit法⁽⁹⁾を併用している。ただし、このClose-Fit法における計算ではIrregular frequencyを避ける⁽¹⁰⁾ために境界要素法の直接法によって速度ポテンシャルを解く方法をとっている。また、定常波漂流力は船体各断面のコチン関数を用いたFaltinsenの計算式⁽¹¹⁾を用いている。

シミュレーションプログラムの第2の部分、すなわち係留系を含んだ船体運動方程式の時間積分では、まずDavenportの変動風スペクトラムとISSCの波スペクトラムを用いて不規則変動風と不規則波浪の2つの外力の時系列を発生させ、これらの外力を船体運動方程式の右辺として、Wilson- θ ⁽¹²⁾法によって時々刻々時間積分する手法をとっている。ここで、運動方程式の係数は簡単のためConstant Coefficient法⁽¹³⁾を採用しており、変動波漂流力の計算はHsuの方法⁽¹⁴⁾を採用している。

本動揺シミュレーションプログラムの特徴としては、上述の船体運動方程式の時間積分を始める前に係留系の力学的釣り合いの状態を正確に求めている点にある。一般に、ヘッドライン、ブレストライン、スプリングライン等はそれぞれ複数の係留索から構成されており、それぞれの係留索には数トンから数十トンの初期張力がかかけられている。これらの初期張力を同種の係留索の中で統一することは実際上困難であり、通常、数トンから10数トンのばらつきがあるのが実状のようである。鋼製ワイヤーロープとナイロン製テールロープで構成される大型船の係留索では、バネ定数は強い非線形性を示すとともに、その係留索の繰出し量によってもバネ定数は異なったものとなる。したがって、係留索の破断等の極限状態をシミュレートする場合には各係留索の初期張力を正しく考慮する必要があると予想される。このような理由により、本動揺シミュレーションプログラムでは初期張力を正しく計算に取り込むようにしている。

4. 解析結果および考察

ここでは、今回計測された係留索張力の時系列データに対してARモデルを用いたスペクトラム解析⁽¹⁵⁾を行い、各係留索の特徴や平均張力の差がパワースペクトラムに与える影響について調べた結果を示す。さらに、係留索張力と船体動揺の時系列データに対して多次元ARモデルを用いたパワー寄与率の解析を行い、係留索張力と船体動揺の相関を調べた結果を示す。

4.1 ARモデルを用いたスペクトラム解析結果

図3に計測された係留索張力の時系列の一例を示す。図は4本のアフターブレストラインの張力の計測結果であり、サンプリング周期30秒で30分間計測したデータを滑らかに結んだものである。この図から各係留索の張力の時系列はほぼ同じ波形を有しているものの、平均張力では10トン以上の差があり、かなりばらついていることが良くわかる。また、大型船の場合の初期張力はかなり大きな値をとっていることがわかる。ここで、この計測結果は30秒という比較的長いサンプリング周期をとっているため、実際の変動張力の波形はさらに短い周期の成分を含んでいると考えられ、スペクトラム解析を行った場合エイリアシングを起こす可能性が十分考えられる。したがって、以下のスペクトラム解析の結果では単独のパワースペクトラムから有意な結論を導き出すことを避け、スペクトラム同士の比較から、周波数特性ならびにスペクトラムのパワーに関する結論を導き出すことに重点を置くことにする。

図4(a)から図4(f)に、ヘッドライン、フォワードブレストライン、フォワードスプリングライン、アフターブレストライン、アフターブレストラインおよびスターンラインの変動張力のパワースペクトラムを示す。それぞれの図にはほぼ同位置に取り付けられた複数の係留索の変動張力のパワースペクトラムが重ねて示してある(図1参照)。これらの図が

図3 係留索張力の時系列の一例 (After Breast Lines)

図 4 (a) 変動張力のパワースペクトラム
(Head Lines)

図 4 (b) 変動張力のパワースペクトラム
(Forward Breast Lines)

図 4 (c) 変動張力のパワースペクトラム
(Forward Spring Lines)

図 4 (d) 変動張力のパワースペクトラム
(After Spring Lines)

図 4 (e) 変動張力のパワースペクトラム
(After Breast Lines)

図 4 (f) 変動張力のパワースペクトラム
(Stern Lines)

らわかるように、それぞれの変動張力のパワースペクトラムは複数のピークを持っており、その外形は同一種類の係留索でほぼ一致している。しかしながら、それぞれのスペクトラムの面積には大きな差があり、スペクトラムの面積が時系列の分散に等しいことを考慮すれば、各係留索の変動張力の有義値を検討する場合には注意が必要であることがわかる。また、図 4 (a) から図 4 (f) のスペクトラムのピーク位置を比較してみると、係留索の取り方によってスペクトラムのピーク位置が異なることがわかる。特にこれらのスペ

図5(a) 船体前後方向移動量のパワースペクトラム

図5(b) 船体上下方向移動量のパワースペクトラム

クトラムの中でフォワードスプリングラインとスターンラインのスペクトラムは0.01Hz付近にピークを持っており、他の係留索のスペクトラムと違った傾向が見受けられる。これらのピーク位置が一致しない理由としては、それぞれの係留索が6自由度の船体運動の中のどの運動にもっとも強く影響を受けるかということが大きく関係しているものと思われる。

図5(a)と図5(b)には、ビデオで撮影された船体動揺の前後方向移動量のスペクトラムと上下方向移動量(横揺れ)のスペクトラムを示す。これらの図から、船体動揺のスペクトラムも係留索張力のスペクトラムと同様に複数のピークを持つことがわかる。また、これらの船体動揺のスペクトラムのピーク位置と係留索張力のスペクトラムのピーク位置の比較から、船体動揺がどの係留索の張力に影響を与えているかある程度推定することができる。

4.2 多次元ARモデルを用いた解析結果

係留索張力と船体動揺の相関を調べるために、多次元ARモデルを用いてパワー寄与率⁽¹⁵⁾の解析を行った。図6(a)から図6(c)には、係留索の変動張力に対する船体前後方向ならびに上下方向の移動量のパワー寄与率を示している。それぞれのグラフには“Noise from itself”、“x-displacement”および“y-displacement”の3つの領域が示されており、それらの領域はそれぞれ当該係留索自身のノイズ、前後方向移動量からのパワーおよび上下方向移動量からのパワーを意味している。なお、それぞれの領域の区別がつきやすいよ

Forward Breast Line 3-E

図6(a) 変動張力のスペクトラムに対するパワー寄与率 (Head Line & Forward Breast Line)

図 6 (b) 変動張力のスペクトラムに対するパワー寄与率 (After Spring Line & After Breast Line)

図 6 (c) 変動張力のスペクトラムに対するパワー寄与率 (Forward Spring Line & Stern Line)

うに、前後方向移動量からのパワーのみにハッチングを施している。図からわかるように、6本の係留索に対するパワー寄与率のパターンは大きく3つのグループに分けることができる。すなわち、1つめのグループはヘッドラインとフォワードブレ스트ラインのグループであり、図6(a)に示されるように高周波側での船体上下方向移動量(y-displacement)の寄与率が他のグループに比べて有意な値をとる傾向を示している。2つめのグループはアフタースプリングラインとアフターブレストラインのグループであり、図6(b)のように高周波側で船体前後方向移動量(x-displacement)の寄与率が他のグループと比べて大きな値をとる傾向を示している。最後のグループは、フォワードスプリングラインとスターンラインのグループであり、前節のパワースペクトラムの比較において他の種類の係留索と違った傾向を示したものである。このグループの特徴は図6(c)に示されるように、0.06Hzを中心とした周波数帯で船体上下移動量(y-displacement)の寄与が他のグループと比較して大きくなることである。以上のように、船体動揺が係留索の張力変動に与える影響は単純に幾何学的・力学的に推定することは困難であり、周波数帯によって相関の度合いが異なることが良く分かる。

4.3 シミュレーション結果と実験結果との比較

本研究で作成した係留船舶の動揺シミュレーションプログラムを用いて、実験状態とできるだけ近い条件でシミュレーション計算を行った。図7は本プログラムによって発生させた変動張力の時系列をスペクトラム解析した結果であり、図4(a)と同様に5本のヘッドラインの変動張力のパワースペクトラムを表している。図4(a)と比較すると、0.03Hz付近のピークの現れかたや各パワースペクトラムの面積が係留索に

よって異なる様子が良く再現されていることがわかる。ほぼ同じ位置に張られた係留索であるにも拘らず、変動張力のパワースペクトラムの面積が異なる原因はそれぞれの係留索の平均張力(初期張力)の違いに起因しており、その様子は図8(a)および図8(b)から容易に理解することができる。

図8(a)および図8(b)は各係留索の平均張力と変動張力の有義値の相関を24本のすべての係留索について調べたもので、図8(a)は実験結果をもとにした散布図であり、図8(b)はシミュレーション結果をもとにした散布図である。ここで、変動張力の有義値とはスペクトラムの面積から計算された1/3最大平均値を意味しており、スペクトラムの面積を m_0 とすると $4\sqrt{m_0}$ で求められる量である。実験結果の図8(a)の散布図を見ると全体的に右上がりの傾向が見受けられ、係留索の平均張力が大きくなると変動張力の有義値も増大することがわかる。すなわち、平均張力が大きな係留索は張力の変動が大きく、過酷な気象・海象条件の下では破断する可能性が高いことが理解できる。図8(b)のシミュレーション結果は図8(a)の傾向を良く再現しており、本シミュレーションプログラムによる結果が変動張力の推定に対して有用性のあることを示している。

5. 結 言

本報告では、大型係留船舶の動揺とその係留索の張力の関係を明らかにするために、 $L_{pp}=270\text{m}$ の実船を供試船として、船体の動揺量と係留索の変動張力の現地計測を行った。計測された時系列に対してARモデルを用いたスペクトラム解析を行い、それぞれの係留索について変動張力のパワースペクトラムを詳細に検討した。さらに、多次元ARモデルを用いたパワー寄与率を計算することにより、船体の動揺量が係留索張力に与える影響を明らかにすることを試みた。また、係留船舶の動揺シミュレーションプログラムを作成し、シミュレーション計算によってどの程度実際の現象を再現できるのかを検討した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

1. 係留索の変動張力の時系列をスペクトラム解析した結果、ヘッドライン、ブレストライン等の係留索の種類によってスペクトラムのピーク位置が異なることがわかった。
2. 変動張力のスペクトラムピーク位置の比較、ならびにパワー寄与率の解析結果より、各係留索は幾つかのグループに分けることができる。
3. 平均張力の大小は、変動張力スペクトラムのピーク位置に影響を与えないが、変動張力の有義値に大きな影響を与える。
4. 係留船舶の動揺シミュレーション計算を行う場合には、各係留索の平均張力を正しく考慮する必要がある。

図7 シミュレーションから得られた変動張力のパワースペクトラム (Head Lines)

図8(a) 変動張力の有義値と平均張力の相関(実験結果)

図8(b) 変動張力の有義値と平均張力の相関 (シミュレーション効果)

謝 辞

係留索張力の現地計測に際して、LNGターミナルならびに実験供試船関係各位から快いご承諾とご協力を賜りました。心から感謝の意を表します。また、本論文の作成に当たりご協力下さいました織田美千子さんに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 小林正典・島田 潔・藤平 徹：複合外力下における係留浮体の応答シミュレーションプログラム，三井造船技報，第125号，pp.10-18，1985.
- (2) 久保雅義・斎藤勝彦：岸壁に任意の角度で係留された浮体式係船岸の動揺特性，日本航海学会論文集，第84号，pp.75-84，1991.
- (3) 斎藤勝彦・J.M.A. Spencer・久保雅義：係留船の長周期動揺に関する数値シミュレーション，日本航海学会論文集，第93号，pp.131-139，1995.
- (4) R.Natarajan & C.Ganapathy：Analysis of a Berthed Ship, Marine Structures 8, Elsevier Science LTD, 1995.
- (5) 久保雅義・津金正典・笹健 児・榊原繁樹：外洋に面した海域に立地する港湾の係留問題について，日本航海学会論文集，第96号，pp.259-267，1997.
- (6) 新井信一・高梨清一・平山 久：岸壁係留時の挙動に関する実船実測，海岸工学論文集，第38巻，pp.741-745，1991.
- (7) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学，成山堂，1982.
- (8) 一色 浩・前田久明：周期的吹き出しの公式とその数値計算法，関西造船協会誌，第157号，pp.73-82，1975.
- (9) 前田久明：任意船型におよぼす波の強制力について，日本造船学会論文集，第126号，pp.55-83，1970.
- (10) 別所正利・経塚雄策：水の波の理論における内部問題について，西部造船会々報，第57号，pp.37-52，1978.
- (11) Faltinsen, O.M., Michelson, F.C.：Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp.91-106, 1974.
- (12) 戸川隼人：微分方程式の数値計算—有限要素法と差分法—，オーム社，1973.
- (13) 高木又男・斎藤公男・大久保寛・平島充男：非周期的造波問題の周波数領域での取り扱い(第6報)，関西造船協会誌，第191号，pp.121-127，1984.
- (14) Hsu, F.A., Blenkarn, K.A.：Analysis of Peak Mooring Forces by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas, OTC paper No.1159, pp.1135-1146, 1970.
- (15) 山内保文監修：船舶・海洋技術者のための不規則現象論，海文堂，1986.

質 疑 応 答

斎藤勝彦(神戸商船大学)：上下変位量のスペクトラムをみると定常成分が卓越していますが、実験中の潮汐、荷役による喫水変化の影響があるのですか。

井関俊夫：計測は荷役開始前と荷役終了後に行っていますので、計測中の喫水変化はありません。潮汐の変化については詳しく計測しておりませんが、30分の計測中に風力が若干落ちてきておりましたので、その影響が支配的ではないかと思えます。

久保雅義(神戸商船大学)：流体力係数を一定にすることは長周期波運動に大きな影響を与えるので注意すべきだと思いますが、いかがでしょうか。

井関俊夫：ご指摘のとおりだと思います。ただ、今回の計測ではほとんど船体動揺はありませんでしたのでシミュレーション結果に対するConstant Coefficient法の影響は小さいのではないかと思います。