(昭和 63 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究 (第 6 報)

——海域実験における緊張係留システムの動的応答——

正員 工 藤 君 明* 正員 木 下 篤**
 正員 安 田 哲 也* 本 多 牧 生*

Study on the Tension Mooring of the Floating Platform (6th Report)

——Dynamic Responses of the TLP System at Sea——

by Kimiaki Kudo, *Member* Atsushi Kinoshita, *Member*
 Tetsuya Yasuda, *Member* Makio Honda

Summary

In order to prove the tension mooring system is safe and useful, Japan Marine Science and Technology Center performed the TLP sea test by utilizing the prototype floating platform. The previous papers of this study discussed the design of the tension mooring system on basis of the results of theoretical considerations and model tests, and introduced the outline of the sea test.

This paper discusses on the measuring system and data analysis in the TLP sea test and the dynamic response characteristics of the TLP.

The tension measuring system which utilizes the combination of conventional chain-guide wheel and compressive load cell was proved to give the varying tensions about twice larger than the theoretically expected ones. The reason of this overestimation is supposed to be that under the static initial tensions, the varying tensions attenuate while going around the chain-guide wheel and then the load cell measures the larger load out of balance.

This inference was proved to be true through the direct measurement of the loads of the chain at both sides of the wheel in the second sea test (1987).

The significant values of the varying tensions are estimated and compared well with the theoretical values.

The horizontal movement of the TLP is another topic in this study. The surge/sway acceleration of the TLP were measured by utilizing the pitch/roll inclination meters. The yawing motions were measured by the monitor TV camera installed on the deck of the TLP.

1 緒 言

本研究は緊張係留方式の安全性および有用性を実海域において実証し、沖合大水深海域に緊張係留方式の海洋実験基地を建設することを目的として実施しているものである。今回の海域実験に使用した浮体の形状は将来の海洋実験基地に想定しているものとは違い、浮遊式海洋構造物の実機に近いものとして設計されたものであるが、緊張係留方式の設計手法を研究開発する第一段階として取り組んだものである¹⁾。

実海域は比較的浅海域であり、短い緊張係留索の軸

剛性を小さくするという事も考慮しながら、緊張係留索の素材としてチェーンの高張力とゴムの耐衝撃性・耐腐食性の両機能を有する複合係留索を利用する緊張係留システムを設計・製作した²⁾。

緊張係留の海域実験に先立ち、実験限界波高などの実験条件を明らかにし³⁾、これに基づき、昭和 61 年夏季～秋季にかけて第 I 期海域実験を遂行し、さらにセンサー類を整備して昭和 62 年 8 月第 II 期海域実験を行った (Fig. 1)。本論文の前報では⁴⁾、緊張係留システムを実験海域に設置・調整した工事の概要、さらに各種計測システムの構築および計測データについて紹介した。海域実験においては、自然環境条件、緊張係留索の変動張力および緊張係留浮体の動揺応答などを計測している。こ

* 海洋科学技術センター

** 日立造船情報システム (株)

Fig. 1 Plan and side view of the TLP set up at the test site.

れから得られた解析結果を水槽模型試験結果や理論解析結果と比較したところ、変動張力の計測値は理論推定値の2～3倍とかなり大きくなっていることが判明した。検討の結果、張力計測システムに問題のあることが推測されたので、第Ⅱ期海域実験ではこの点を明らかにすることも重要な課題であった。

本論文では、緊張係留索の変動張力計測手法および緊張係留浮体の動揺応答計測法、ならびに緊張係留システムの動的応答に関する検討結果について報告する。

2 動的応答の解析モデル

緊張係留システムにおける浮体動揺と緊張係留索に生ずる変動張力については、本論文の第2報にて数値解析を行い、水槽試験の結果ともよく一致することを確認している。この方法では、コラム単体の流体力を精密に計算して、これらを重ね合わせるにより全体浮体の流体力を推定しているので、短波長側、とくに波長と船長が同程度になるとコラム群の相互干渉効果を考慮できないという欠点がある。海域実験期間中においては、周期6秒程度（波長／船長＝1.9）の波浪が卓越するので、本報では全体浮体を3次元表面特異点分布法によってモデル化して数値解析を行った。要素浮体の表面のメッシュ数は60であり、その分割状況はFig. 2に示すとおりである。

縦波中および斜波中における変動張力の応答計算例を

Fig. 2 Surface subdivision of underwater part of the TLP (per one column) for calculation of hydro-dynamic forces

Fig. 3 Varying tensions of fore and aft mooring lines in head sea (model test and calculation)

Fig. 3, 4に示す。同図には、規則波中での水槽試験結果（本論文第2報で既報）を実機換算して示してある。縦波中では4本の緊張係留索ともほぼ等しい変動張力となっているが、斜波中では0.1～0.2Hz（波長／船長＝1.3～5）のとき、入射波の進行線上のもの（Fig. 4のBとD）が横側のもの（同図のCとA）よりもかなり大きくなる傾向がある。これよりも低周波数では、索の位置、波の入射方向によらず等しい変動張力を与えるようになるが、この領域では上下揺の波浪強制力が卓越しており、これが4本の緊張係留索に均等に配分されることによるものである。変動張力の解析モデルは良好であり、実際の波スペクトルが与えられれば、変動張力を正しく推定できることが期待される。

浮体は十分な余剰浮力をもって緊張係留されるので、heave, pitch, rollは無視できる程度に小さい。しか

Fig. 4 Varying tensions of mooring lines in oblique sea (model test and calculation)

Fig. 5 Surging amplitudes of TLP in head sea (model test and calculation)

し、水平面内の拘束力は小さいので、ある程度の水平動揺は許すことになる。縦波中での surge の応答計算例を Fig. 5 に示す。規則波中での水槽試験結果と比較すると、低周波領域で計算値が実験値よりも小さくなる傾向を示しているが、全般的に両者はよく一致しており、実海域の推定計算に应用可能といえる。

3 緊張係留索の変動張力計測

3.1 第I期海域実験の変動張力計測値

緊張係留索に働く張力の計測は、前報で概略を紹介したとおり (次節 Fig. 8 参照)、コラムの中を垂直に立上りがってきたチェーンをチェーン車に掛けて水平に向きを換え、チェーン車の回転軸の真下に据付けた圧縮型ロードセルによって測定するものである。この方式を採用した理由は以下のとおりである。まず第一に、係留ラインの中間に張力計を挿入する方式は、張力を直接計測できるけれども、この部分は強度的に弱くなるので安全上に問題があり、さらに実験海域における緊張係留システムの施工が容易でなくなること、また第二に緊張係留索に至ゲージを貼る方式は長期にわたる安定性に難点がある

こと、さらに第三に、本方式は従来から船舶などの係留索の張力計測に用いられてきた実績があり、緊張係留システムの安全性および設置の容易性・経済性において魅力的であると考えたためである。

前報には、このようにして得られた緊張係留索の初期張力および変動張力の計測例を紹介してある。しかし、変動張力の解析結果を詳細に検討したところ、計測値は期待される値よりもかなり大きくなっていることが判明した。第I期海域実験終了後、圧縮型ロードセルを点検したが異常は認められなかった。また、初期張力の計測値を調査した結果は Table 1 に示すとおりである。緊張係留索の固定位置を調整した後、排水したバラスト重量は 158.6ton、緊張係留索が伸びたことにより、浮体が約 80cm 浮き上がったために減小した浮力が 30ton、したがって余剰浮力は総計 128.6ton と見積もられており、圧縮型ロードセルから推定した初期張力の合計134.2

Table 1 Comparison of excess buoyancies and measured tensions

Leg	A	B	C	D	Total
Discharged ballast weight	41.4	38.6	42.6	36.0	158.6
Buoyancy decrement (draft up)	7.5	7.5	7.5	7.5	30.0
Excess buoyancy	33.9	31.1	35.1	28.5	128.6
Measured tension	24.4	44.6	23.6	41.6	134.2

(unit: ton)

Fig. 6 Wave spectrum and tension spectrum of leg A. Estimated tension spectrum is calculated from adapted JONSWAP spectrum in head sea with directional distribution and response functions

ton とはほぼバランスしており、このことからも圧縮型ロードセル自身および静的な荷重の計測方式は何ら問題がないといえる。

次に変動張力について、計測値と理論解析値を比較検討する。一例として、昭和61年10月17日17時の波スペクトルおよび緊張係留Aの変動張力スペクトルをFig. 6に示す。8分32秒間のデータをサンプリング周期0.5秒で取得し、FFTによりスペクトル解析したものである。このときの有義波高 $H_{1/3}=4.27\text{m}$ 、ピーク周期 $T_p=9.18\text{sec}$ であり、これから推定した JONSWAP の標準スペクトル⁵⁾を同図に示してある。実スペクトルの方が推定スペクトルよりも狭帯域であるが、全体としてはほぼ良好な一致を示しているので、応答解析の橋渡しをする参照スペクトルとして利用した。なお、入射波浪の方向スペクトル $S(f, \theta)$ は、以下のように仮定した。

$$S(f, \theta) = \frac{2}{\pi} S_J(f) \cos^2 \theta \quad (1)$$

ただし、 $S_J(f)$ は JONSWAP スペクトル、 θ は主方向からの角度である。入射波の主方向を縦波として、変動張力の応答関数から推定したスペクトルを同図下に計測スペクトルとともに示してある。スペクトルの面積から求めた変動張力の有義値は理論推定値が 11.23ton に対して、圧縮型ロードセルの計測値では 30.02ton と約 2.7 倍になっている。なお、長波頂の波を想定した場合の理論推定値についても同図に示しているが、上述の理論推定値と大きな差は見られない。

Fig. 7 Significant tension double amp. of leg A against significant wave heights. ('86 Oct. 1400~Nov. 0709) Estimated values are calculated by the real wave spectra and response functions in head sea

昭和61年10月14日から11月7日までに1日3回定時計測し、20分間のデータからゼロアップクロス法により統計解析した有義波高と変動張力(A索)の有義値の相関図をFig. 7に示す。同図にはまた上述の手法で求めた理論推定値もいくつか示してある。この図から、計測値は理論推定値よりも約2.6倍程度大きくなる傾向があり、しかも計測値は極めて系統的な偏りを示していることから、変動張力の計測システム自身に問題のあることが推察された。

3.2 変動張力計測法の検討

緊張係留システムの海域実験において使用した張力計測システムの荷重伝達メカニズムについて以下検討する。Fig. 8に示すように、緊張係留索の垂直方向の荷重 $P_0 + P_V$ がチェーン車を通過した後、控えの水平チェーンでは $P_0 + P_H$ になっていると仮定する。このとき、チェーン車全体の固定軸回りのモーメントの釣り合いは下記の式で示せる。

$$800R = 1187(P_0 + P_V) - 962(P_0 + P_H) \quad (2)$$

これから、圧縮型ロードセルに作用する荷重は

$$\left. \begin{aligned} R &= 0.28P_0 + R_L \\ R_L &\equiv 0.28P_L = 1.48P_V - 1.20P_H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。ここで P_0 は静的荷重である。また、 R_L は圧縮型ロードセルで直接計測される変動荷重、 P_L はこれにもとづく変動張力の推定値である。静的荷重 P_0 は初期張力と潮汐による比較的ゆっくりとした変動成分を含んでいる。この荷重はそのまま伝えられると考えて良いものである。しかし、入射波浪のスペクトル範囲にある変動成分 P_V は、チェーン車の摩擦によって減減し、控えの水平チェーンではより小さい変動荷重 P_H になっている可能性がある。チェーン車の摩擦は内力であり、直接計測することはできないが、圧縮型ロードセルの変動荷重 R_L は、両端末の変動成分 P_V 、 P_H により(3)式で表わされることになる。 P_V と P_H が等しい場合には、 P_L は真の変動張力 P_V に等しくなり、 P_L から緊張係留索の変動張力を正しく推定できることになる。

Fig. 8 Tension measuring system

$$R = 0.28P_0 + R_L$$

$$R_L \equiv 0.28P_L = 1.48P_V - 1.20P_H$$

Fig. 9 Correlation between load and strains of chain

これまで、この仮定に基づいてデータ解析を実施してきた。しかし、極端な例として、変動荷重が全く伝わらないとすると、 $P_H=0$ となるため P_L は P_V の約 5.3 倍になる。これまでの解析法では、摩擦力が、本来の変動荷重の 2～3 倍程度を推定する原因となっていたことが考えられる。

昭和 62 年 8 月に実施した第Ⅱ期の海域実験では、上述の問題点を明らかにするために、緊張係留システムを設置後、Fig. 8 に示すようにチェーン車前後のチェーンリンクに歪ゲージを貼付し、 P_V および P_H を計測することを試みた。貼付箇所はチェーンリンクの平行部、スタッドの両側とした。この箇所は、現地において作業が容易であること、広範囲の引張荷重に対してほぼ比例する歪を与えることが期待されたので、選定したものである。実験終了後、緊張係留用チェーンを回収して引張り試験を行い、引張荷重と歪の関係を求めた結果を Fig. 9 に示す。チェーン製造時に突合わせ溶接をする側は、他の側より硬く、歪は少し小さくなっているが、全般的にはほぼ線形となっていることを確認した。なお、チェーンリンクの丸棒断面積 (の 2 倍) で引張荷重を割って算出した値を参考のため同図に示してある。

3.3 変動張力の推定

海域実験では 4 本の緊張係留索とも、また垂直部分も水平部分もすべて計測する予定であった。しかし、動ひずみアンプの台数およびデータ伝送チャンネルなどの制約により、順次計測を行っていったが、実験期間中にすべてを完了させることはできなかった。また、歪ゲージ貼付後、おのおのについてバランスしていることを確認したが、計測データを解析したところ、垂直部分の歪ゲ

Fig. 10 Daily alterations of observed tension (leg A) ('87 Aug. 2319-Aug. 2813)

ージからは安定した結果を得ることができていないことがわかった。動ひずみの発生している状態でゲージを貼付することは接着不良の原因となるので、できる限りこの状態を避けるため、貼付作業は海象が穏やかな時期を選んで行っている。しかし、それでもある程度のひずみは発生しており、しかも垂直部分は水平部分よりも大きなひずみとなっているので、この部分の歪ゲージは接着不良であったものと推察しているが、正しい原因は不明である。

以上の理由により、チェーンのひずみを十分に計測できたのは、A 索の水平部分および B 索の水平部分のみであり、C 索と D 索では極く少量のデータしか得られていない。しかし、従来の経験によると、対角位置にある緊張係留索の動特性はほぼ一致することが知られているので、この場合も対角位置の特性値を用いて推定することにした。以下、A 索について得られた結果について述べる。

昭和 62 年 8 月 23 日～28 日に得られた、圧縮型ロードセルによる変動張力の推定値 P_L および歪ゲージによる水平変動張力 P_H について、両振幅の有義値の 2 時間ごとの変化を Fig. 10 に示す。両者はかなり良い相関を示しているが、海象が穏やかなときには、水平張力は比較的に小さくなる傾向を示している。この理由としては、変動張力が小さいときには摩擦が相対的に大きくなり、チェーン車を伝達しにくくなったためではないかと考えている。

変動張力が大きい値となっている 8 月 27 日 1 時の計測例を Fig. 11 に示す。 P_L と P_H の計測値は位相も含めて極めて相関の高いことがわかる。このときの有義波高は 2.2m であり、Fig. 7 に示した有義波高と変動張力理論推定値との相関から見積ると、変動張力の有義値は 6ton 程度が期待される値である。しかし、 P_L の有義値

Fig. 11 Time histories of tension (leg A) ('87 Aug. 2701)

は 18.6ton で約 3 倍, また P_H の有義値は 4.2ton で 0.7 倍程度となっている。さて, 前節の (3) 式によると, 真の変動張力は

$$P_V = 0.189 P_L + 0.811 P_H \quad (4)$$

により評価できるので, この式により P_L と P_H の計測値を合成した時刻歴を同図の一番下に示す。さらに, 変動張力のスペクトルを入射波スペクトルから推定したものと比較して Fig. 12 に示す。 P_V の両振幅有義値は約 7ton であり, 入射波の主方向を向い波としたものから

Fig. 12 Wave spectrum and tension spectrum of leg A ('87 Aug. 2701). Calculated tension spectra are derived from JONSWAP spectrum and response functions

期待される有義値は約 8ton となっており, 両者はほぼ一致していることが分かる。なお, 同図には船首より右 60° 方向からの入射波に対するスペクトルの推定値も示してある。4 章に述べる浮体の動揺から推定すると, 入射波の主方向と考えられるからである。斜波中では変動張力は大きくなる傾向があるので, 縦波中の場合よりも理論スペクトルは増大している。しかし, 当時風は 1 日の間に東から時計回りに変化して北北西になっていたことを考慮すれば, 入射波の方向分布はもっと大きく, したがって変動張力のスペクトルはより小さくなったことが推察される。なお, 長波頂の波を想定した場合の理論値と, 方向分散を考慮した場合の推定値の差は有義値にして約 1 割程度であり, 大きな差はみられない。

以上のことから, (4) 式によって正しい変動張力を推定できることが確かめられたわけであるが, 実際に P_H を計測できたのはきわめて短期間であるばかりでなく, 昭和 61 年度の海域実験も含めてほとんどのデータは圧縮型ロードセルによる変動張力に限られている。この方式による計測法はこれまで述べてきた欠点にもかかわらず, きわめて安定しており, 海域実験においてはこの安定性はきわめて重要な特長の一つとなっているものである。実験期間中に圧縮型ロードセル自身の故障により欠測が生じたことが一度もなかったことは特筆すべきことと考えている。そこで本報では P_L の計測値から直接に P_V を推定することを検討した。Fig. 10 の P_L と P_H の有義値の相関を Fig. 13 にまとめて示す。 P_L と P_H の相関は高いけれども, 相関曲線は P_L の小さいところでは 2 次曲線になっている。この理由は, 上述したとおり摩擦の影響が大きいためであると考えられ, したがって

Fig. 13 Correlation between significant tension double amp. of leg A observed by load cell and strain gauge (horizontal) ('87 Aug. 2319-Aug. 2813)

Fig. 14 Significant tension double amp. of leg A against significant wave height. Calculated values are derived from the real wave spectra and response functions in head sea

逆に変動張力が大きくなれば、この影響は相対的に低下し、 P_L は P_H に近づいていくことが期待されるので、最小二乗法により次式を内挿・外挿の推定式とした。

$$P_H^{1/3} \\ = P_L^{1/3} (0.121 + 0.00589 P_L^{1/3}) / (1 + 0.00589 P_L^{1/3}) \quad (5)$$

なお、同図には直線の最小二乗法近似式もあわせて示してある。

(4), (5) 式により、圧縮型ロードセルの計測値から真の変動張力の有義値を推定評価できることになる。8月の実験期間中に得られた、有義波高と変動張力の有義値の関係を Fig. 14 に示す。同図の破線は、有義波高に対応する波スペクトルの主方向に浮体の船首が向いているとして計算したものである。

3.4 緊張係留海域実験期間中の海象と変動張力

緊張係留システムの変動張力は、前節に述べた方法に

より、圧縮型ロードセルの計測値から推定できることがわかったので、緊張係留システムの海域実験期間中に得られたデータを整理して以下に紹介する。

Fig. 15は昭和61年10月12日～11月7日の波浪統計データである。波浪データの一部(10月15日～10月24日)は本論文の前報にも記載してあるが、今回は有義波周期 $T1/3$ も含めて長期間の日変化を示してある。これらはいずれも1日3回(1時, 9時, 17時)に各18分間計測したデータから、ゼロクロス統計処理した結果である。海象が穏やかなときには、有義波周期は5秒程度であるが、有義波高が増大するにつれて有義波周期も大きくなって、7～8秒となる。最大波高は有義波高の1.5～1.8倍となっている。10月17日および23日には有義波高4m, 最大波高7.3mがともに観測されている。

Fig. 16は、上記期間における4本の緊張係留索の変動張力の両振幅有義値を示している。各緊張係留索の初期張力は23～40tonであったが、第Ⅱ期海域実験におけるA索の初期張力は34tonであり、初期張力の差による推定誤差は比較的に小さいと考え、前節の(4), (5)式をそのまま適用したものである。なお、これらの値は入射波のスペクトルおよび変動張力の応答関数から計算した値ともほぼ一致しており、直接計測できていないので正確とはいえないけれども、実際の変動張力の良い推定値となっているものと期待している。最大波高が7.3mのとき、B索の両振幅有義値は約13tonとなっていた。最大変動張力は有義値の1.5倍程度であることが統計解析の結果得られているので、これからB索の最大変動張力の振幅は約10tonと見積られ、したがって初期張力40tonは十分に大きかったことが結論できる。

Fig. 17に昭和62年8月12日～8月31日の風・波の統計データを、またFig. 18にこの間の変動張力の推

Fig. 15 Daily alterations of maximum and significant wave heights measured by the waverider ('86 Oct. 12-Nov. 7)

Fig. 16 Daily alterations of significant tension double amp. ('86 Oct. 12–Nov. 7)

Fig. 17 Daily alterations of maximum and significant wave heights measured by the waverider and wind velocity and wind direction ('87 Aug. 12–Aug. 31)

移をそれぞれ示す。実験海域における8月中の海象は例年とも穏やかであり、この実験期間中にも最大波高 3m が数回観測された程度である。これに対応して、変動張力の両振幅有義値は 5ton 程度が得られている。

4 浮体の動揺計測

海域実験では緊張係留浮体の挙動と、その動揺の特性を把握することを目的として、浮体上に動揺の計測のためのセンサー類を設置している。また浮体は無人運転のため荒天時にはアクセスできないので、緊張係留浮体の挙動を総合的に把握できるよう、第Ⅱ期海域実験では浮体上にTVカメラを設置して、陸上基地にて監視するとともに画像を収録した。

以下に、傾斜計を使用した水平加速度の計測例と、浮

体上のTVカメラで収録した画像からの船首揺の解析例につき紹介する。

4.1 傾斜計による水平加速度の計測

浮体上にトルク平衡方式の傾斜計を設置した。このセンサーは浮体の傾斜に応じて内部の振り子型可動素子も同方向に傾き、重量不平衡によるトルクを検出するというものであり、通常は船舶の横揺や縦揺を計測するために使用されているものである。

しかし、緊張係留状態では、係留索により、上・下方向の動きが拘束されるため、縦揺、横揺は無視できる程度に小さい。

このことから、上記傾斜計を、水平加速度のセンサーとみなし、緊張係留浮体の水平加速度の計測を行った。

Fig. 18 Daily alterations of significant tension double amp.
(1987 Aug. 12-Aug. 31)

Fig. 19 Time histories of incident wave and surge/sway accelerations
Significant value ;
Wave=2.24m
Surge acc.=0.42m/sec²
Sway acc.=0.65m/sec²

強制水平動試験の結果、海域実験周波数範囲では傾斜計は水平加速度 $\ddot{\xi}$ が重力加速度 g とバランスする傾斜角 θ を出力することを確認した。

$$\theta = \ddot{\xi} / g \quad (6)$$

Fig. 19 に 8 月 27 日 (1987 年) 1 時に計測した波と、傾斜計の出力値にもとづく surge (前後方向), sway (左右方向) の加速度の波形を示す。この時の波高は有義波高で約 2.2m である。

sway の加速度が, surge の加速度の 1.5 倍程度になっていることから, 入射波の主方向は, 風の方向 (北北西: 船首方向から右舷側へ約 60 度) に近かったことが推察される。

上記加速度データのパワースペクトルを, 理論解析よ

Fig. 20 Surge/sway acceleration spectra. Estimated surge/sway acceleration spectra are derived from JONSWAP spectrum and response functions

り求めたスペクトルと比較して Fig. 20 に示す。なお, 理論解析には, Fig. 12 に示した JONSWAP スペクトルおよび (1) 式の方法スペクトルを使用し, 主方向は, 船首方向から右舷側へ 60 度の方向とした。surge 加速度のスペクトル, sway 加速度のスペクトルともに, 理論値とよく一致していることが分かる。この理論スペクトルから緊張係留浮体の水平運動の両振幅を義値を推定すると,

$$\text{surge} : 0.47\text{m}, \text{sway} : 0.70\text{m}$$

と見積ることができる。

4.2 空中 TV カメラによる船首揺の計測

浮体の動揺を直接目で観測することにより, その挙動を総合的に把握するため, 第Ⅱ期海域実験では浮体の計測室の屋上に TV カメラを設置し (Fig. 1 参照), 適宜その画像をビデオテープに収録した。

この画像をテレビ画面に再生し, マーク点の移動を追跡することで浮体の縦揺, 横揺, 船首揺を計測することが可能である。緊張係留状態では縦揺, 横揺は無視でき

Fig. 21 Time history of yaw motion

Fig. 22 Observed yaw spectrum. Natural period of yaw is about 22 sec

るほど小さいので、この手法を用いた船首揺の計測例につき、以下紹介する。

Fig. 21 に昭和 62 年 8 月 31 日 23 時の船首揺の時系列を示す。波周期 (約 10 秒) に対応した揺れとともに、20 秒以上の長周期の変動をしていることが分かる。この船首揺のパワースペクトルを Fig. 22 に示す。なお、この時点の入射波浪の計測値は収録されていなかったが、有義波高 3.7m と推定されたので、1 時間後の 9 月 1 日 0 時に計測された波スペクトル (有義波高 5.5m) から縮尺換算したものを同図に掲げてある。波周期に対応した周波数域 (0.1Hz 付近) にスペクトルのピークが見られる他、0.05Hz 以下の低周波数領域に長周期の揺れの成分が見られる。なお、緊張係留状態での船首揺の固有周期は約 22 秒である。

船首揺の時系列データから、それぞれの振幅の頻度分布を求めた結果を Fig. 23 に示す。図中の σ^2 は、頻度分布解析により求めた分散値、 m_0 は Fig. 22 に示したスペクトルの 0 次モーメント (= 分散値) である。また、 μ および ν はそれぞれ船首揺の確率分布における歪度 (skewness) および尖度 (peakedness) であり、次式で表わされる⁹⁾。

Fig. 23 Observed histogram and probability distribution of yaw motion

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x^3 p(x) dx \quad (7)$$

$$\nu = \int_{-\infty}^{\infty} x^4 p(x) dx - 3 \quad (8)$$

ここで、 x は時系列データ (ψ) をその平均値 ($\bar{\psi}$) と σ とにより下記の式で規格化した確率変数である。

$$x = (\psi - \bar{\psi}) / \sigma \quad (9)$$

同図中には、 σ^2 を用いた正規分布曲線 (一点鎖線) と、下記の確率密度関数 (Gram-Charlier 展開式) から求める確率分布曲線 (実線) を示した。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[1 + \frac{\mu}{6} H_3(x) + \frac{\nu}{24} H_4(x) \right] \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (10)$$

ただし、 $H_n(x)$ は Hermite の多項式である。Gram-Charlier の分布曲線は正規分布よりも船首揺の振幅分布を極めてよく近似していることが分かる。このことから、緊張係留浮体の水平面内の動揺のように長周期運動を含む場合には、分散、歪度および尖度を推定できれば振幅分布を予測できることが期待される。

5 結 言

海洋科学技術センターは大水深海域における海洋実験基地の実現を目的として、運輸省船舶技術研究所など多くの研究機関、民間会社の協力を得て、山形県鶴岡市由良漁港の沖合において浮体式海洋構造物による海域実験を実施している。またこの中で、浮体式海洋実験基地の係留法として有望視されている緊張係留技術の実用可能性を検討するため、緊張係留システムの海域実験を進めてきた。緊張係留システムの本格的な海域実験としてはわが国で初めての試みであり、技術的に不明な点が多く、厳しい自然環境条件、計測機器・データ収録装置の不足さらに少数研究スタッフによる遂行など、多くの制約のもとで実施してきたが、所期の目標を達成することができた。

緊張係留の海域実験は昭和61年7月～11月の第Ⅰ期に引き続いて、昭和62年度には、データ計測・通信収録・解析手法の開発、海洋実験基地の居住性に関連して緊張係留浮体の動揺特性の総合的把握、さらに緊張係留索の変動張力計測システムの検証などを主な目的として第Ⅱ期海域実験を7月～8月に実施した。本報では、海域実験で得られた緊張係留システムの動的応答に関し、水槽試験や理論解析の結果を踏まえて検討した結果について紹介した。

(1) 変動張力の計測システムに関して、従来から船舶などで使用されてきたチェーン車では、静的な荷重は正しく計測できるが、静的な初期張力が作用した状態では摩擦により、チェーン車の前後で、比較的に小さな変動張力は伝わりにくくなるという重大な欠陥が明らかになった。

(2) このため、チェーン車前後でチェーンのひずみを直接計測することを試みたが、実験期間中には一部分しか計測できなかった。しかし、上記事項を実証するとともに正しい変動張力を推定することが可能となり、変動張力に関しては理論解析結果ともほぼ一致していることが確かめられた。

(3) 緊張係留浮体の水平運動に関して、pitch/roll傾斜計をsurge/swayの加速度計として利用し、水平動揺を計測するとともに、両スペクトルのパワーの比から入射波浪の主方向が推定できた。

(4) 緊張係留浮体は海象が穏やかなときでも0.5～1度のゆっくりとした船首揺をしており、浮体上では体で感知できる程度のものであるが、方位ジャイロでは計測精度に難点があり、信頼できるデータが得られない。また、海象が悪化した場合には、浮体は無人運転となる。そこで、第Ⅱ期海域実験では浮体上にモニターTVカメラを設置して計測基地などの遠い目標を画像として記録し、画像解析により緊張係留浮体の船首揺を精密に計測することができた。なお、本装置は陸上の実験基地から自由に操作でき、また陸上で画像をモニターできるので、入射波の主方向の計測など多くの目的に利用でき

る。とくに冬季には浮体は弛緩係留状態となっており、連日海象は荒れて浮体の動揺は激しく、またアクセスできないので、モニターTVカメラによるpitch/roll/yawの計測、さらには浮体上の異常の監視に威力を発揮している。

最後に、本研究は運輸省船舶技術研究所との共同研究「浮体式海洋構造物による実海域実験」、日立造船情報システム(株)・シバタ工業(株)との共同研究「浮体式海洋構造物の係留設計技術の研究開発」によって実現できたものであることを付記して関係各位に感謝の意を表する。なお、本論文における風のデータは、運輸省船舶技術研究所の厚意により当センターが収録して平均値を解析したものである。同所海洋開発工学部安藤定雄部長はじめ多くの研究者の方々に心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) K. Kudo, A. Kinoshita and N. Ikoma : Design of the Tension Mooring System for the Prototype Floating Platform, Ocean's 86 Conference, Washington DC, (1986).
- 2) 工藤君明, 生駒信康, 荒川 仁 : 浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究(第3報)―複合係留索ラバーチェーンの設計, 日本造船学会論文集, 第159号(1986).
- 3) 工藤君明, 木下 篤, 生駒信康, 荒川 仁 : 浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究(第4報)―緊張係留実海域実験の安全性について, 日本造船学会論文集, 第160号(1986).
- 4) 工藤君明, 鷲尾幸久, 本多牧生, 生駒信康, 荒川 仁 : 浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究(第5報)―緊張係留システムの実海域実験, 日本造船学会論文集, 第161号(1987).
- 5) 日根野元裕, 山内保文 : 海洋波のスペクトル, 日本造船学会誌, 第609号別冊, 海洋構造物と海象(1980).
- 6) 高井隆三, 安藤定雄, 加藤俊司, 大川 豊 : 浮体の複数係留システムに関する研究, 船舶技術研究所報告, 別冊第6号(1985).