

多点ブイ係留された大型タンカーの現地観測に基づく 数値モデルの検証

鳥井正志* ・高山知司** ・吉岡 洋***
関田欣治**** ・山元淳史***** ・原 正典*****

1. ま え が き

大型タンカーの係留バースの一つである多点係留ブイバースは、タンカーの振れ回り範囲を制限し、占有海域を小さくする利点があるが、波浪や風の入射方向によっては大きな係留力が発生する。日本地下石油備蓄株式会社は、岩手県久慈港に我が国で初めて外洋に面した海域に多点係留ブイバースを平成5年に建設した。建設に当たっては、水理模型実験や数値計算によって係留タンカーの動揺や係留索張力などが詳細に検討された（高山ら1992, 1994）。その後、これらの妥当性を検証するため、同バースに大型タンカーが着桟する機会に係留タンカーについて現地観測を実施し、その動揺と係留索張力の特性を調べた。また、バース設計時の数値計算モデルを用いて計算結果とも比較した（高山ら1996）。比較の結果、タンカーの長周期動揺特性で観測値と計算値に若干の差異がある等、数値計算では十分再現されない点が課題として残された。現地観測によるデータに基づき解析精度を向上させることは、バースの安全運用や新たなバース設計に極めて重要である。本研究では、数値モデルにおける解析手法や計算上仮定している各種パラメータを現地観測データの分析結果に基づき照査・検証し、数値解析手法の精度向上について検討した。

2. 現地観測結果と数値解析モデル

(1) 多点係留ブイバースと係留タンカーの概要

バースは久慈湾の石油備蓄基地沖合2.3 km、水深23.3 m地点に設置され、6基のブイ式係留設備と1基の沈設式係留設備、および原油受・払い用海底配管のPLEM (Pipeline End Manifold) と接続する2条の送油ホースで構成される(図-1, 3)。ブイ式係留設備は係留索接続用フックを備えたブイ(直径6.6 m、深さ3.05 m)と、これを係留する1条のブイ下チェーン、中間シンカー

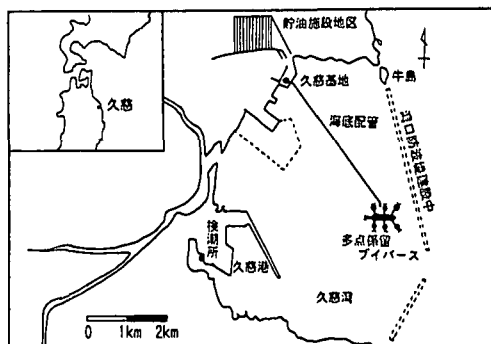


図-1 多点係留ブイバース位置図

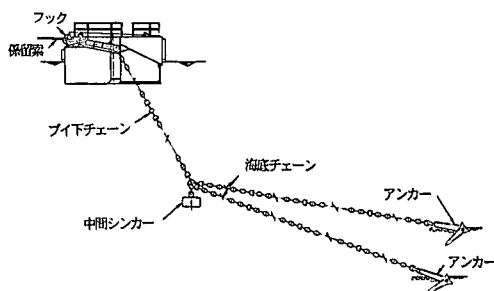


図-2 ブイ式係留設備構造図

および2条の海底チェーンとアンカーからなる(図-2)。船尾を係留する沈設式係留設備は、タンカーの離・着桟の経路上にあるためブイはなく、ワイヤーロープ、中間シンカーおよび2条の海底チェーンとアンカーで構成され、タンカー係留時のみ浮上させて使用される。

表-1に観測対象とした10万DWT級タンカー東雄丸の諸元を、また図-3にバースへの係船配置を示す。タンカーは船首を湾口方向すなわち東向きにし、2～3本のテールロープ付ワイヤーロープまたはホーサーを用いて係留設備と接続される。なお、3Sラインのみ安全のため予備索1本が追加された。

(2) 現地観測

現地観測は平成7年12月6, 7日および17, 18日の2回、東雄丸係留時に実施された。観測項目は風向、風速、波向、波高、潮流向、潮流速および潮位等の気象・海象

* 新日本製鉄(株)海洋・鋼構造エンジニアリング部
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
*** 理博 京都大学助手 防災研究所
**** 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部
***** 正会員 工博 出光興産(株)北海道製油所
***** 正会員 工博 出光エンジニアリング(株)エンジニアリング室

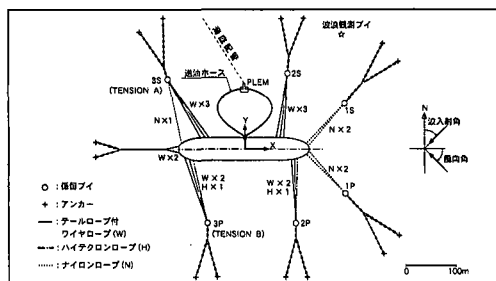


図-3 タンカーの係留配置

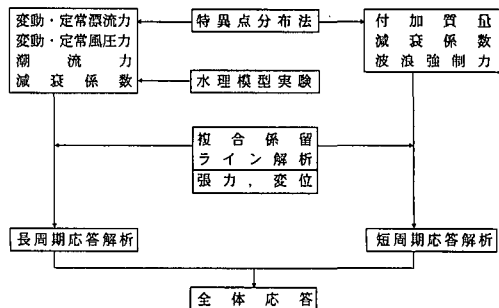


図-4 多点係留タンカーの数値解析方法

表-1 係留タンカーの緒元

船長(垂線間長)	241.780 m
型幅	42.000 m
型深	20.410 m
満載喫水	13.262 m
満載排水量	110,379(1,081,714) tf(KN)
載荷重量トン	95.843 DWT

と船体位置、係留索張力、タンカーの喫水等である。採取されたデータは統計処理され、スペクトル解析により外力、船体動揺、係留力の周波数特性が調べられた(高山ら, 1996, 1997)。観測結果の要旨は次のとおりである。①風および波のパワースペクトルを明らかにした。②船体運動と係留索張力は長周期運動と短周期運動の合成である。③長周期運動はスウェイ、ヨウ、サージが支配的であり、風の影響が大きい。④短周期運動はうねりによるヒープ、ピッチ、ロールおよびこれと連成するスウェイが主に観測された。⑤係留力は船体の長周期運動が支配的であるが、短周期成分として船体動揺より係留ブイの波浪中動揺周期に高いスペクトル密度がある。

(3) パース設計時の数値解析モデルの概要

本パース設計時の数値解析モデル(関田ら, 1993)の概要は、以下のとおりである。本パースのように弾性の大きい柔な係留系では、タンカーの運動とその係留力は周期数分で変動する長周期成分と、波の周期と同程度の周期で変動する短周期成分に分けられる。前者は風の長周期変動成分と波浪漂流力の変動成分により励起され、後者は、波の短周期成分により励起される。そこで、数値解析は、長周期荷重である変動風による風荷重と不規則波中の変動漂流力を取り扱う運動方程式と、短周期荷重である波浪強制力を取り扱う運動方程式を別々に逐次解析し、両者を加えて全体の運動および係留力応答の時刻歴を求めた(図-4)。パース設計時には、数値解析の条件、運動方程式中の流体力係数等を水理模型実験結果(高山ら 1992, 1994)をふまえて以下のように仮定した

(以下、当初の数値解析モデル)。

①短周期運動は6自由度を考慮し、長周期運動はスウェイ、サージ、ヨウの水平3自由度を考慮する。②短周期運動の運動方程式中の付加質量係数、減衰係数、波強制力は三次元特異点分布法により求める。③長周期運動の運動方程式中の付加質量係数、波漂流力は三次元特異点分布法により求める。減衰係数は静水中自由振動実験により求まる値を基準とする。④係留ラインの復元特性はチェーン、係留索の伸び、中間シンカーの海底との着底・浮き上がりを考慮して静的カタナリー解析を行い、アンカーからタンカー側接続点までを一つの非線形パネとする。⑤タンカーに作用する潮流の流圧力は定常力とし、長周期運動に考慮する。その算定は日本港湾協会の基準による。⑥タンカーに作用する風荷重は変動風とし、長周期運動に考慮する。なお、風抗力係数は実験による。⑦不規則波浪のスペクトルは Bretschneider-光易型を、また、変動風の風スペクトルは Davenport 型を使用する。⑧数値解析は、まずタンカーに外力が作用していない状態で係留ラインの初期張力を仮定し、船体座標系とパースの座標系が一致する静的平衡状態を設定する。次に、波浪漂流力と風荷重の各定常成分および潮流荷重の各定常外力が作用した状態で、外力と係留系の静的復元力が釣り合う状態を作り、これを起点として風および波の変動外力を作用させ、時間きざみ1秒で8192秒間逐次計算する。なお、計算方法は、Newmark β 法で行う。

(4) パース設計時の仮定に基づく数値計算結果と観測結果の比較

前項(3)の条件で数値解析した結果と観測結果を比較すると、以下の点が認められた。①長周期運動の各モードにおいて、船体運動の振幅および発生係留力は概ね一致したが、その変動周期は観測値が計算値より長い(表-2)。②短周期運動の動揺特性は、観測値と解析で比較的良く一致した。③観測では風波によるブイの動揺が発生すると思われる約6秒の周期の係留力変動があるが、数値解析では再現されていない。

(5) 数値解析モデルの精度向上検討

前項の数値解析モデルと観測結果の差異を検証し、計算の精度向上を図るため、以下の検討を行った。検討は波と風の両方の影響を受けている平成7年12月7日6時(ケースA)を中心に行い、その後、波の影響が卓越した12月7日13時(ケースB)と、風の影響が卓越した12月18日7時(ケースC)について検証した。各ケースにおける自然条件を表-3に示す。なお、潮流は観測期間中、高々5 cm/s程度と小さいため、本検討では影響が小さいと考え無視した。

a) 付加質量係数と数値解析の条件 数値解析において、長周期運動の変動周期は、主として各運動モードの固有周期と外力の変動周期に依存する。固有周期は各モードの運動方程式において、タンカーの質量と付加質量の平方根、および係留復元力項の係数(以下、バネ定数)の逆数の平方根に比例する。この内、タンカーの質量は喫水の計測による排水量から推定できる。一方、当初の解析モデルでは付加質量係数を三次元特異点分布法により入射波の波周期を用いて算出したが、観測された長周期運動の変動周期は200~500秒であり、角振動数 ω は0に近づく。このような運動の付加質量係数は、係留システム設計指針(1983)および藤井らの研究(1974)を参考に表-4の値として数値計算を行った。ただし、サージについては、適当な研究資料がなかったため、比較を目的に試みの値を使用した。

復元力項の係数(バネ定数)は、逐次計算の開始時点の平衡状態、すなわち係留索の初期張力および定常外力と係留系の復元力の釣り合い状態の周辺で船体動揺に伴って変動する。ここで、定常外力は観測された気象・海象データから算出されるが、初期張力は、直接観測されていない。そこで、係留荷重を計測した3P、3Sラインについては、係留力-変位の釣り合いから初期張力を推定する方法を用いる(高山ら1996)。これらのラインは2P、2Sラインと共に、船体の横方向の位置保持上で重要で、送油ホース形状を管理するため、比較的強く張ってセットされたと思われる。一方、タンカーは着岸時から西風を船尾方向より受けており、船尾の沈設式係留設備のラインは当初からこの風荷重を受け止め、船体の東方への漂流に抵抗していたと考えられる。このため、x軸方向の係留ライン(沈設式係留設備ライン)およびこれと向き合う1P、1Sラインは強く張り合わせず、外力が作用しない仮定の平衡状態では、係留索の初期張力はごく小さい値と考えられる。以上により、初期張力を表-5に示す値と仮定し数値計算を行った。

長周期運動を励起する風および波浪の変動成分は、現地観測データからパワースペクトルが求められた(高山ら1997)。図-5は波および風のパワースペクトルの現地

表-2 長周期動揺の変動周期(単位:秒)

	サージ	スウェー	ヨウ
観測値	500	300~400	200~500
当初解析	90	220	180
①付加質量修正	170	310	290
①+初期張力・風スペクトル修正	480	300	280

表-3 各ケースの自然環境条件

ケース	単位	A	B	C
月日時		12.7.06	12.7.13	12.18.07
風向	deg.	200	190	195
平均風速	m/sec	9.0	7.1	6.0
波向	deg.	70	45	25
有義波高	m	1.2	1.5	1.1
波周期	sec	10.0	8.5	7.0

表-4 付加質量・付加慣性モーメント係数

モード	サージ	スウェー	ヨウ
当初解析	0.02	0.32	0.35
今回の修正	1.00	1.20	2.00

表-5 係留索の初期張力(単位:tf(kN))

ライン	1 P/S	2 P/S	3 P/S	沈設式
当初解析	5(49)	9(88.2)	11(107.8)	10(98)
今回修正	2(19.6)	9(88.2)	11(107.8)	2(19.6)

観測値と、当初の解析に使用した各スペクトルとの比較である。同図に示すとおり、波のパワースペクトルは比較的良く一致している。しかし、風のパワースペクトルは、観測値のスペクトル密度がDavenport型より長周期側で高い値が観測されている。このため、波のパワースペクトルはそのままBretschneider-光島型を、風のスペクトルは観測結果を基にDavenport型スペクトルの主に長周期部分を修正・近似(図-5)し、変動風のスペクトルとして直接入力し数値計算を行った。なお、Davenport型スペクトルの海表面摩擦係数 K_r は0.003とした。

b) 波の方向分散 観測結果では、検討ケースの風向は比較的安定しているが、波向は大きい変動が観られる。これは、計測上の精度によるものか、湾内での波の反射等の影響が不明である。観測によれば、この時刻の波向はENEであるが、前後のデータはN方向に寄っており、安定していない。一方、数値解析では波向は一定としているため、入射波向が船体正面に寄るほど波の影響が小さい。このため、実際には波の方向分散があると考え、波向NEについても数値計算を行った。

c) プイの波浪中動揺 数値解析モデルにおいては、

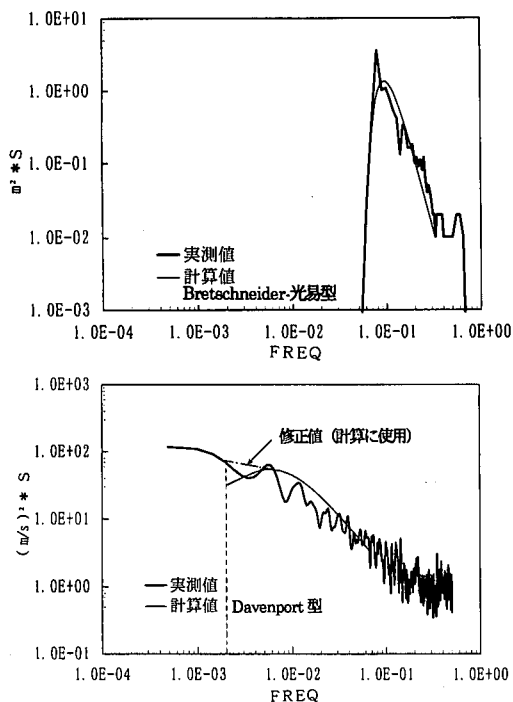


図-5 波と風のスペクトル比較

ブイを含めて係留ラインの質量、寸法は、共にタンカーのそれに比べて極めて小さい。このため当初の数値解析モデルでは、係留ラインはその復元力のみ運動方程式にて考慮した。一方、現地観測の結果からは、短周期域でブイの波浪中動揺によると考えられる周期約6秒で、係留力のスペクトルがピークを示した。タンカーの長周期動揺周期は数百秒でありブイ単独の動揺とは2オーダー相違する。このため、係留ラインの両端、すなわち海底側アンカーとタンカー側係留点を固定点で係留されるブイの波浪中運動応答を検討し、ブイが変位した場合にブイ〜タンカー間の係留索張力の変動を算定した。

d) 長周期船首揺(ヨウ)による影響 船体の長周期動揺では主に船首揺により、波、風の相対入射角は変化する。解析では、動揺振幅は微小と仮定し、流体力や風荷重を入射角一定としているが、船首揺の変位角の観測値から、角度差による影響を計算し比較した。

3. 数値解析モデルの検証結果と考察

a) 付加質量係数と数値解析の条件 表-2は長周期運動における付加質量係数を表-4により変化させた場合の長周期動揺の動揺周期を比較したものである。表からサージの動揺周期に差があるものの、動揺周期の数値計算結果がそれぞれ観測値に近づき、精度が改善された。表-4はさらに沈設式係留設備および1P、1Sの初期張力を表-3とし、かつ、現地観測結果に基づき修正した風

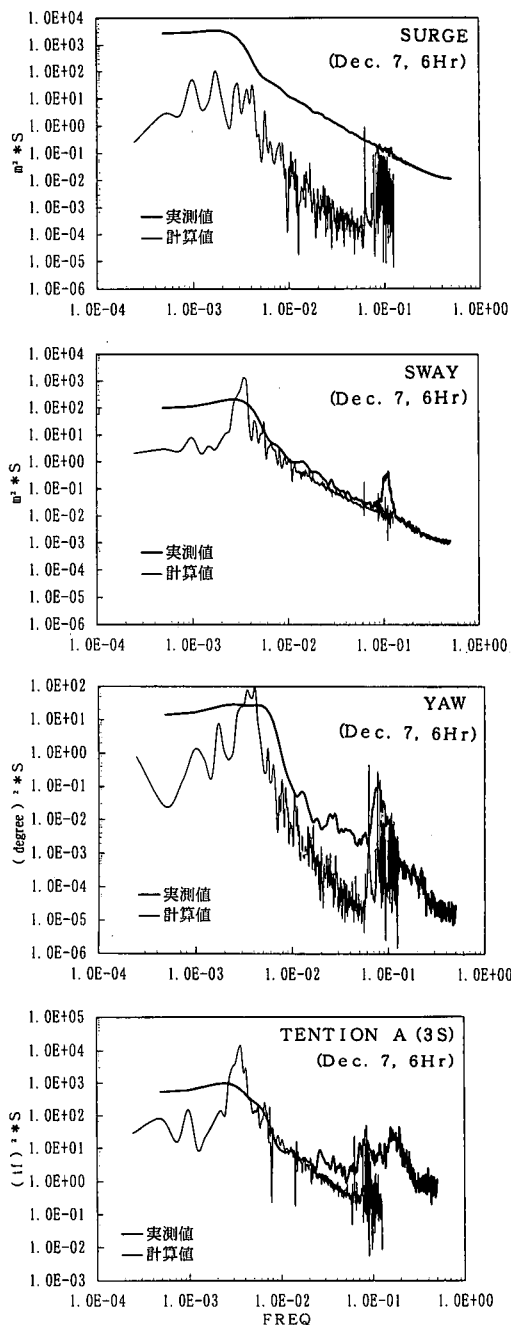


図-6 タンカーの動揺と係留力のスペクトル比較

スペクトルを入力した場合の結果も示している。結果は、若干のばらつきはあるものの長周期の動揺周期が観測値と良い一致を示している(図-6, 7)。なお、風スペクトルは主に200秒超の長周期成分を修正をしたが、修正しないDavenport型スペクトルを使用した場合に対し、動揺周期特性に改善はあるが、顕著な差はなかった。

b) 波の方向分散 観測結果(ケースA)の波向ENE

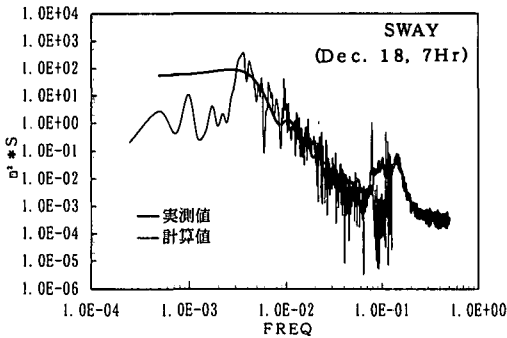


図-7 タンカーの動揺のスペクトル比較

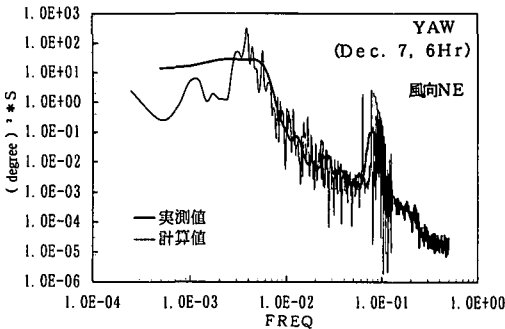


図-8 波向を変えた動揺のスペクトル比較例

に対し、波の方向分散を考慮して波向を NE とした船体動揺と係留力の計算結果の一例を図-8 に示す。波をより側方から受けるため、スウェイ、ヨウで振幅応答が大きくなり、観測値と近い応答が確認できた。これは、波の方向分散の考慮の必要性を示唆するものであるが、今後の課題である。

c) プイの波浪中動揺 係留プイはブイ下チェーンとタンカー側ロープで挟まれ、その係留バネは各々約 2 tf/m (19.8 kN/m) および約 13 tf/m (127 kN/m) である。係留力に影響の大きいライン方向の前後揺固有周期は約 5 秒であった。この係留状態のプイの不規則波中運動を斜波を考慮して解くと、発生係留力の変動成分の有義値は約 4 tf (39 kN) となり、タンカーの動揺とは別に観測された短周期域での係留力の発生が確認された。

d) 長周期船首揺 (ヨウ) による影響 観測結果では、船首揺の変位は 2-4 deg. 程度 (高山ら 1997) であった。タンカーの運動方程式における流体力係数および風荷重計算における抗力係数を比較したが、差は小さく計算精度上は問題ない範囲と考えられる。

4. あとがき

係留中タンカーについて気象、海象、船体動揺量、係留力等の現地観測結果を用いて数値解析モデルの精度向上を検討・検証し、以下の結論を得た。①弾性の大きい多点係留船の長周期運動は、運動方程式において適切な流体力係数と初期状態を評価することで、精度良く再現ができる。②短周期運動は、三次元特異点分布法や現行の諸基準を用いて十分な精度で解析でき、長周期運動の解析との重ね合わせで精度良く全体の運動を再現できる。③係留索張力には、タンカーの動揺による係留力の他に、プイの波浪中動揺による係留力が確認され、プイ単独の運動解析から評価できる。

係留タンカーの観測およびそのデータの活用に便宜を図っていただいた日本地下石油備蓄 (株) 殿に、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 関田欣治・西村一人・鳥井正志 (1994): 多点係留ブイバースの設計, 新日鉄技報, 350 号, pp. 21-26.
- 高山知司・平石哲也 (1992): 多点係留ブイバースにおける係留張力と船舶の運動に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 735, pp. 1-36.
- 高山知司・平石哲也・関田欣治・鳥井正志 (1994): 多点係留ブイバースにおける水工学的諸問題とその対策, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 956-960.
- 高山知司・吉岡 洋・山元淳史・岩井 卓・鳥井正志・関田欣治 (1996): 多点ブイ係留時の大型タンカーの動揺と係留力に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 921-925.
- 高山知司・吉岡 洋・山元淳史・西田善道・鳥井正志 (1997): 多点ブイ係留時の大型タンカーの動揺と係留力の周波数特性, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 861-865.
- 藤井 斉, 高橋 雄 (1974): 斜め波中における船体運動: 変動水圧の計算法に対する実証的検証, 西部造船学会会報第 49 号, pp. 1-16.
- 係留システム設計指針 (1983): 日本海事協会, pp. 95-113.
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社) 日本港湾協会.