

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

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

1. はじめに

外洋に面した海域における大型タンカー係留用施設としてよく用いられる一点係留ブイバースでは、係留したタンカーが大きく振れ回るために広い占有面積を必要とする。一方、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けれども、波浪や風によって大きな係留力が発生する可能性が高い。日本地下石油備蓄株式会社は、タンカー係留海域の制限もあって、原油受け払い用の大型タンカー係留施設として岩手県久慈港の国家石油備蓄基地の沖合い2 km の水深 24 m の地点 (図-1) に、多点係留ブイバースを平成 5 年に建設した。外洋に直接面した海域に建設された多点係留ブイバースとしてはわが国最初の施設である。建設に当たって、水理模型実験や数値計算によって係留時におけるタンカーの動揺や多点係留ブイに作用する係留索張力などが詳細に調べられた (高山ら 1992, 1994) が、それらの妥当性を現地において検証することは非常に重要である。近年、位置のリアルタイム精密測量法としてキネマチック GPS が注目され、海上作業への適用方法が開発されている (浜田ら 1995)。そこで、係留タンカーの動揺と係留索張力に関してキネマチック GPS を適用した現地観測を実施した。

2. 観測条件と観測方法

現地観測は 1995 年 12 月 6-7 日 (ケース 1) と 17-18 日 (ケース 2) の 2 回に分けて、東雄丸 (10 万トン) を用いて実施した。タンカーは船首を東方の久慈湾口に向けて 6 個のブイで係留されており、船上における風速と風向、波浪観測ブイシステムによる波浪と流れ、GPS による船上 2 点 (GPS-A, GPS-B) の位置、およびタンカーの船尾側 2 点のブイに対する係留索張力 (T_h -A, T_h -B) が測定された (図-2)。その他に、タンカーの喫水およ

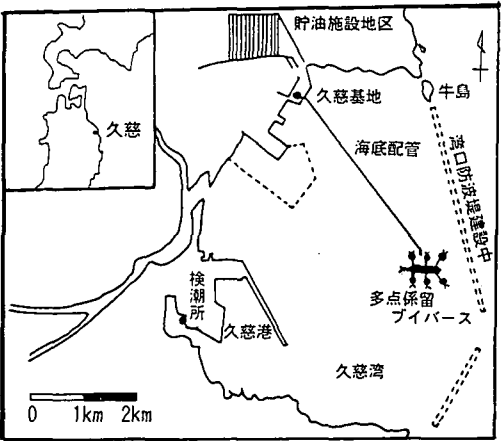


図-1 多点係留ブイバース位置図

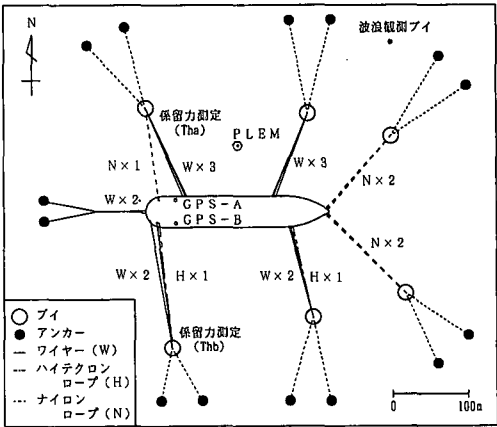


図-2 多点係留ブイバースにおける装置の配置

び潮位のデータを収集した。ケース 1 においては石油の積み込みが行われ、喫水は上昇し、ケース 2 においては積み出しが行われ喫水は下降した。喫水が小さくなれば風の受圧面積が増し、船体が軽くなることもあって、船体動揺に対する風の効果が大きくなる。

GPS の基準局を海岸 (石油備蓄基地) に、支局を船上の船尾付近の船首軸に対象な 2 点に設置し、キネマチック法により水平・鉛直 3 次元の位置をリアルタイムで 1

* 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 出光エンジニアリング(株)エンジニアリング室
**** 正会員 工修 出光エンジニアリング(株)エンジニアリング室
***** 新日本製鉄(株)鉄構海洋事業部 海洋・鋼構造エンジニアリング部
***** 正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科

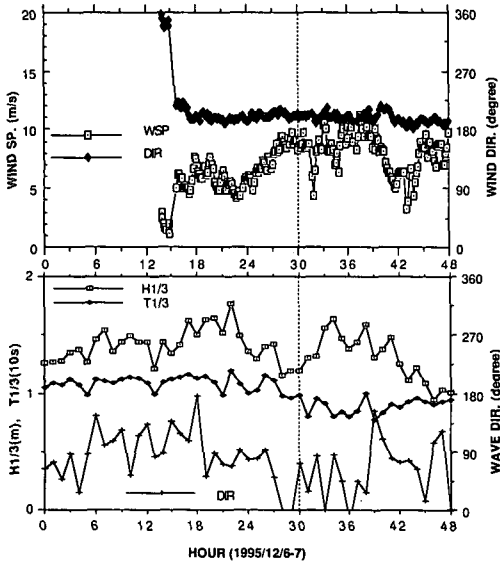


図-3 ケース1の海気象条件

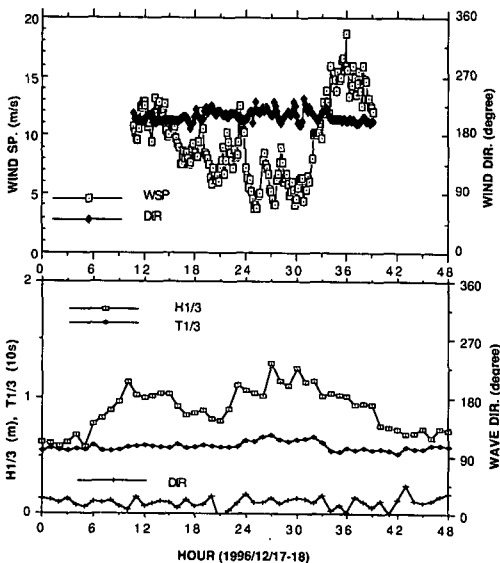


図-4 ケース2の海気象条件

秒ごとに、地球楕円体に準拠した緯度経度および高度の出力を得た。解析に当たり、それを係留バースの浮沈ホース固定点 (PLEM) を原点とする東西 (X) 南北 (Y) および標高 (H) の座標に変換した。船体の動きを完全に記述するには船上3点で位置計測しなければならないが、今回は船の電源の関係で2点で計測したため、ピッチングとヒービングとが分離できなかった。また船体重心は船首軸上 (二つのGPS測定点を結ぶ線の直角二等分線上) における最小変動点と仮定して、10分毎のGPS位置

データから最小2乗法で重心位置を計算すると、10 m のオーダーで値がばらついた。すなわち船の運動がほとんど並進運動であり、回転運動が微少なので、本方法では求められない。そこで便宜的に設計図にある中心点 (●) を重心とした。

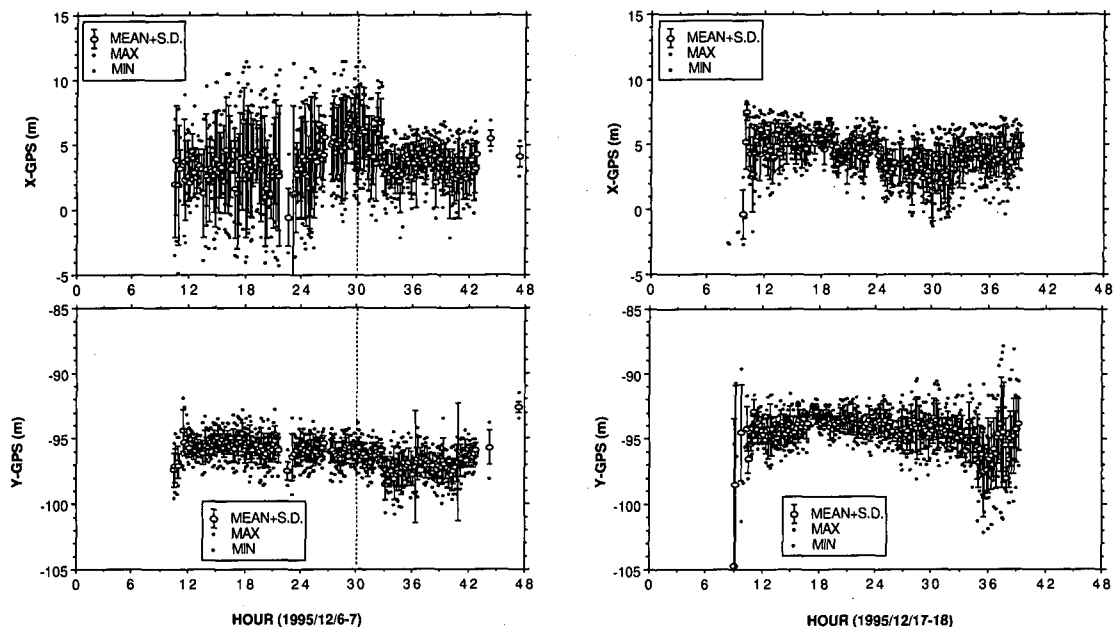
風速・風向計は船尾付近の屋上 (平均高度 23 m) に設置され、測定に対する係留船の動きの影響は微少であり、1分毎の計測値は静止座標系の値とみなしてもよい。波浪観測としては、係留船の北東約 500 m に設置されている波浪観測ブイ (ENDECO INC.) によって、毎正時に 1024 秒 2048 個のデータが得られ、波向、有義波高・周期が算出されている。波浪観測ブイの下には流速計も係留されており、毎分の流速、流向データが取られている。船体とブイとは3本のワイヤーロープおよび1本の補助ロープで結ばれていて、各ワイヤーロープの張力が一秒間に5回計測され、その最大値が1秒毎に精度1トンで出力された。本解析では補助ロープの張力は無視できるとし、3本のワイヤーロープの合張力を係留索張力とした。

図-3, 4に観測期間中の風速、風向、有義波高・周期、波向を示す。風向は船首方向から時計回りの角度で、波向は北から時計回りの角度である。両ケースとも、三陸沖に低気圧が発達した冬型気圧配置で、ケース1では、平均風速 12 m/s の西風が卓越し、最大有義波高 1.8 m、有義波周期 12 s のうねりが、湾口方向から来襲していた。ケース2では、風速 12 m/s の西北西の風が吹き、最大有義波高は 1.3 m、有義波周期 6 s の風浪が湾口北よりから来襲していた。両ケースとも流れは小さく (< 5 cm/s)、船の動揺に対するその影響はほとんどないと考えられる。風速、波高ともに時間変化が大きいため、GPS、係留力などの連続観測データを10分毎に区切り、統計処理 (平均、最大、最小、標準偏差) を行って、以下の解析に用いた。

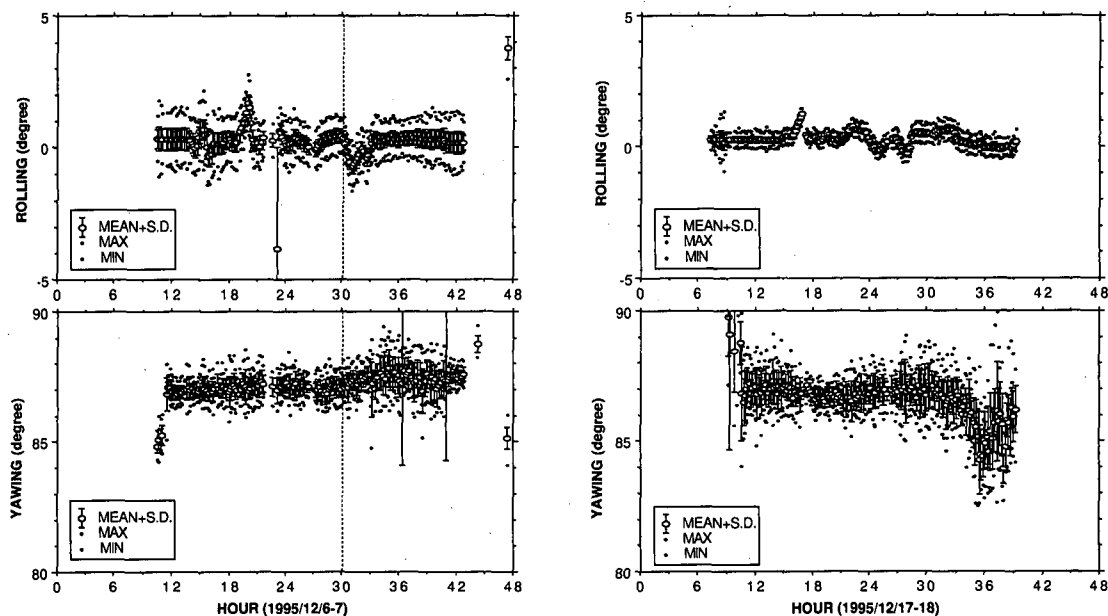
3. 観測結果と考察

図-5は重心の位置の東西および南北方向の変化を10分毎に平均値と変動分 (標準偏差・最大・最小) をプロットしたものであり、東西成分の変動分はサージング、南北方向の変動分はスウェイングによるものである。ケース1では、船首方向に数時間周期で5 m 程移動しながら、6 m 程度のサージングがみられるが、横方向の変動はその半分程度である。一方、ケース2では18日午後の強風時期をのぞき、動きは小さい。

図-6はGPS2点 (A, B) の高度差から求めた左右方向の傾き (左上がり +), および2点を結ぶ線と直行する方向 (船首方向: 北から時計回りの角度) をプロットしたものであり、前者の変動分がローリング、後者の変



図—5 船体重心の位置変動



図—6 船体左右傾斜および船首方向の変動

動分がヨーイングによるものである。両ケースとも船はほとんど水平で、ヨーイングやローリングは1度以下と微少であったが、波の卓越したケース1ではローリングが、風が卓越したケース2ではヨーイングが比較的大きくなっていた。

GPS 2点 (A, B) の平均高度の10分平均値を1時間毎にプロットすると、潮位変化から喫水変化を引いた値

とよい対応を示している (図—7)。ピッチングとヒービングが重なったものとして、ケース1では1m程度、ケース2では50 cm 程度の変動成分がみられた (図省略)。

図—8 は係留張力の変化であり、ケース1では風がやや左舷寄り船尾方向から吹いていたために、係留索張力は左舷側 (T_{ha}) で平均15トン、右舷側 (T_{hb}) で平均10

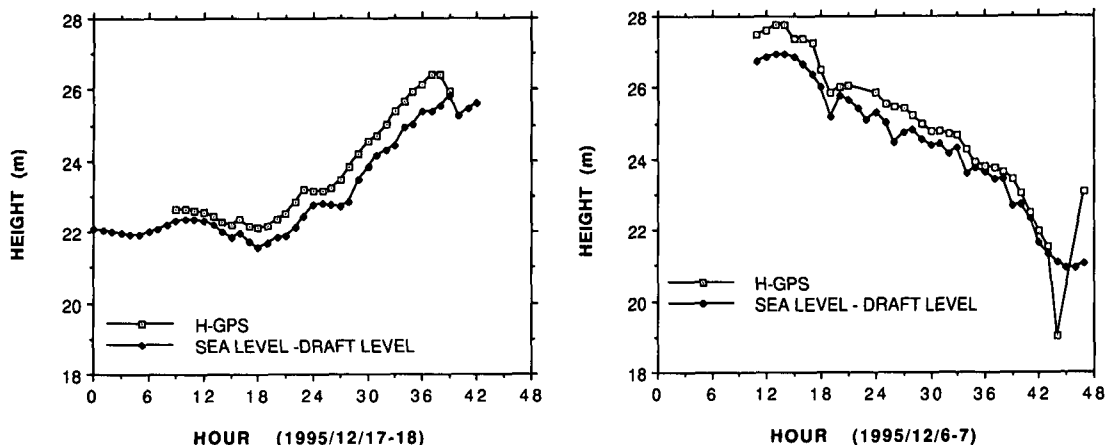


図-7 GPS 高度と潮位-喫水レベルの対応

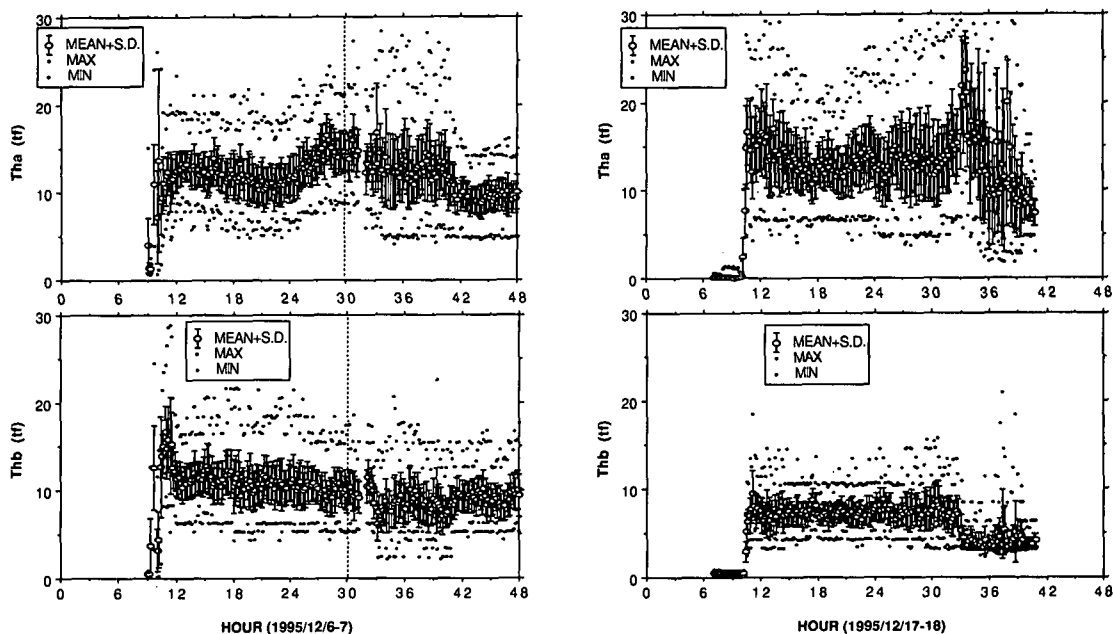


図-8 係留張力の変動

トンと、両者に差が現れている。ケース2においては左舷側で平均15トン、右舷側で7トンで、風がケース1よりさらに左舷側寄りに吹いたために、係留索張力の左右の差が大きくなった。

係留力の差 ($T_{ha} - T_{hb}$) と船の南北方向の位置 (Y-GPS) には図-9に示すように明瞭な対応が認められ、ケース1ではY-GPSが-99.5mの時、左右の張力が11トンで、またケース2ではY-GPSが-97.0mの時、左右の張力が9トンで釣り合っている。係留バース設計で用いられたカタナリーモデルによる、「係留力」と「係留点とアンカーの水平距離」の関係曲線を、上記の釣り合い関係

を考慮して係留力と位置の関係図に重ねると、図-10に示すように一部ばらつきがあるもののほとんどのデータが設計曲線に沿っている。

4. 数値計算結果と評価

係留バース設計に用いた数値計算モデルに12月7日6時の実測外力 (図-3の破線で示す時刻の値; 風速9m/s, 風向200 degree, 有義波高1.2m, 周期10s, 波向ENE) を与えて船の動揺や係留力を計算し、実測 (図-5, 6, 8の破線で示す時刻の値) と比較検証した。その際、左舷係留力 T_{ha} と右舷係留力 T_{hb} が11トンで釣り合っ

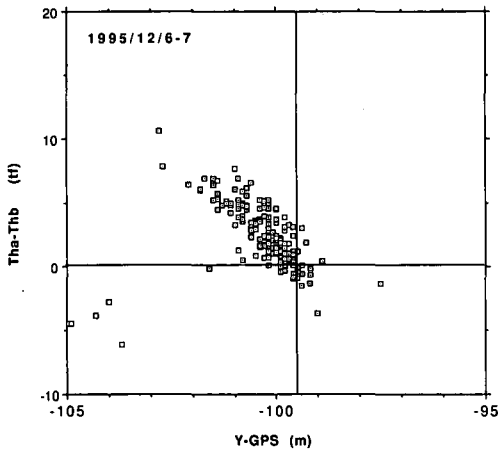


図-9 係留力差と位置 (ケース1)

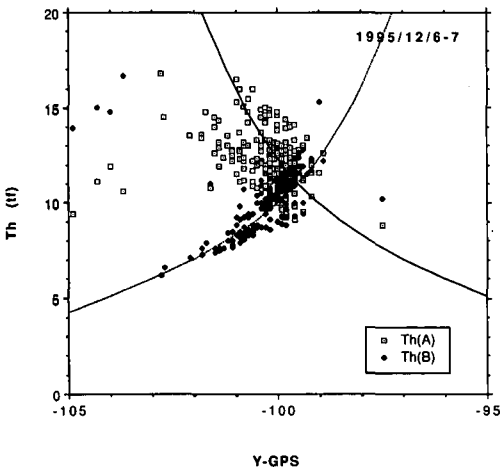


図-10 係留力と位置 (ケース1) 実線はカタナリーモデルの特性曲線

ているという観測結果 (図-10) から、妥当と考えられる初期係留索張力を設定し、また平均張力が実測値と合うように静的外力を与えた。波向きに分散があることを考慮して、波向きを実測値 (ENE) を中心に E から NE まで変えてみたが、実測値 ENE の時に動揺や係留力の変動幅は実測値と計算値がほぼ一致した (表-1)。しか

表-1 実測と計算による船体動揺と係留力変動の比較

波向き	実測	計 算		
		E	ENE	NE
サージング (m)	±3.0	±0.3	±1.0	±4.0
スウェイング (m)	±1.0	±0.02	±1.5	±5.0
ヨーイング (度)	±0.5	±0.0	±0.9	±3.4
左舷係留力 (tf)	±3	±1	±5	+37~-10
右舷係留力 (tf)	±2	±0.2	±3	+28~-6

し、変動周期に関しては、長周期変動において実測値と計算値で若干の相違があり、今後検討しなければならない。

5. あとがき

タンカーが多点係留できる限界の強風、高波浪条件のもとで、キネマチック GPS を適用して船体の動きを精密計測することができた。本論の結論は以下の通りである。

1) 船体の移動には風の影響が強く、特に喫水が浅い場合に強い。2) 係留索張力には風速と風向が大きな影響を及ぼし、風が北方向に変化すると、船体の受圧面積が大きくなり、左舷側の係留索に大きな張力が作用した。3) 船の動揺、係留力の変動幅は多点係留バース設計プログラムによる計算と一致したが、周期特性には検討が必要である。

タンカーの運動や係留力のスペクトル等についての詳細な解析は今後行っていく予定である。荒天時の困難な観測に格別の便宜を図っていただいた、日本地下石油備蓄株式会社に厚くお礼申し上げたい。

参 考 文 献

- 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.
- 浜田賢二・石崎武・三浦英夫・林忠夫・清水則一・中川浩二 (1995): 海上作業船の位置測量のためのリアルタイム GPS 測量システムの開発, 土木学会論文集, No. 510, pp. 153-163.