

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

高山知司*・吉岡 洋**・山元 淳史***
西田善道****・鳥井正志*****

1. はじめに

近年、外洋に面した海域においても海域の多目的有効利用の観点から多点係留ブイバースが導入されるようになり、風や波によるタンカーの動揺とそれに伴う係留力の大きさを正確に見積もることが重要課題になってきた。1995年の12月、岩手県久慈港の多点係留ブイバースで実施された原油緊急積み出し訓練の機会を利用して、係留タンカー（東雄丸10万トン）の動揺と係留索張力の現地観測を行ない、観測の概要と統計的な解析結果を前回報告した（高山ら1996）。本研究では、さらにスペクトル解析等を行って、外力、船体の動揺及び係留力の周波数特性を調べて、それらの変動特性を明らかにした。

2. 観測方法および観測条件

2.1 観 測 方 法

久慈港の国家石油備蓄基地の沖合い2 km の水深24 m の地点に多点係留ブイバースがあり、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る。観測は12月6～7日（ケース1）と17～18日（ケース2）の2回の係留期間中に実施した。船上における風速・風向、波浪観測ブイによる波浪と流れ、GPSによる船上2点（GPS-A、GPS-B）の位置、およびタンカー船尾部2点のブイに対する係船索張力（Tension-A、Tension-B）を測定し、タンカーの喫水および潮位データを収集した（図-1）。

風向・風速は船に相対的な値となるが、船が常に東向きに係留され動揺の影響は微小なので、船首方向の風を東西風（U）、舷側方向の風を南北風（V）とみなす。船体の動揺を船体重心における6種類の運動（サージング、スウェーイング、ヨーイング、ヒービング、ピッチング、ローリング）で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2点で計測したため、

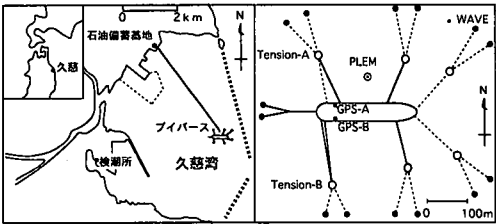


図-1 多点係留ブイバース位置図

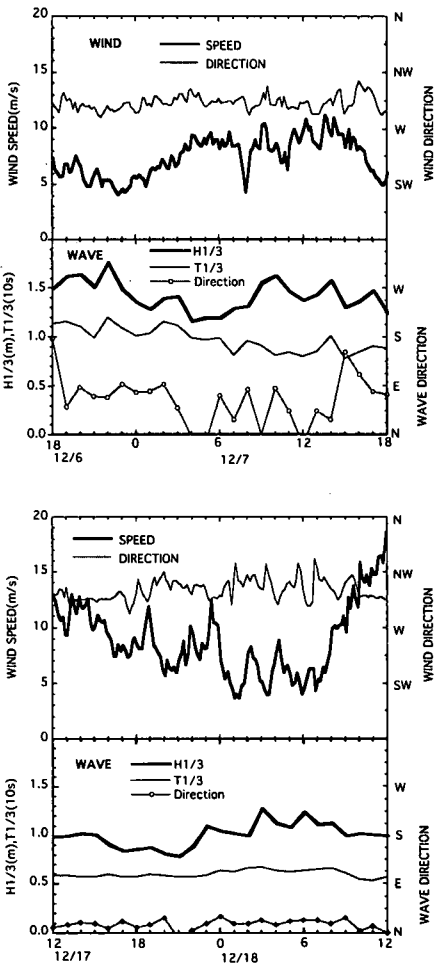


図-2 ケース1（上段）、ケース2（下段）の海気象条件

* 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 出光興産(株)北海道製油所 工務課
**** 正会員 工修 住友金属工業(株)建設エンジニアリング事業部
***** 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

ピッチングとヒーピングとが分離できなかった。

2.2 外力（風および波）の統計的特性

図一2に観測期間中の風速、風向、有義波高・周期、波向を示す。ケース1では、最大風速12 m/sの西風が連吹し、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た。ケース2では、最大風速18 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の風波が湾口北よりから来襲した。18日12時頃、風が最大になるにもかかわらず、波高は高くならなかった。この西よりの陸風による湾内の風波は、フェッチが2 km程度なのでせいぜい0.5 m以下の有義波高しかないのに、実際には有義波高は1 mを越し、波向きは湾口北よりである。従って、風波といっても湾外で発達したものが湾内に回折してきたものであり、湾内の強風は湾内に進入してきた風波の逆風となり、湾内で波高を減衰させている。

3. スペクトル解析結果

3.1 スペクトル解析の方法

風、GPSおよび係留力のデータはサンプリングインターバル1 sで観測期間中ほぼ連続に取られているが、外力である風や波の定常性が期待できるのはせいぜい1時間くらいである。そこで、1時間毎に2048個(約34分)の時系列データをつくり、トレンドを除去してFFTでパワースペクトルを求めた。一方、波は測器の時間応答特性が30 sより長周期域で悪いので、30 sから1 sまでの周期帯のパワースペクトルを利用した。

3.2 パワースペクトルの例

図一3は6日21時の風速、波、タンカーの動揺及び係留力のスペクトルを表す。平均風速は3.7 m/s、有義波高は1.6 mであった。波のスペクトルには、周期12 sに大ピーク、周期6 sに小ピークがあり、風波よりうねりが卓越している。図一4に17日13時のスペクトルを表す。平均風速は9 m/s、有義波高は1.1 mであった。波のスペクトルには、周期6 sに大ピーク、周期12 sに小ピークがあり、うねりより風波が卓越している。

両ケースを通じて、各スペクトルピーク周波数を整理すると、サージングは300 s以上の長周期成分が卓越しているが、うねり周期にごく小さいピークがある。スウェーイングも300 s以上の長周期成分が主であるが、短周期領域の周期10 sにもピークがある。ヨーイングも100 s以上の長周期成分が卓越しているが、うねり周期にも小さいピークがあり、風波周期のピークはさらに小さい。一方、ヒーピングとピッチングは短周期が主成分でうねり周期に顕著なピークがある。ローリングも短周期が主成分で、うねり周期の他に周期10 sに顕著なピークがある。係留力には長周期にも短周期にも顕著なピークがみ

られ、長周期ではヨーイングやスウェーイングの周期に近く、短周期ではうねり周期より風波周期で卓越している。

風は100 s以上の長周期成分が卓越している。波は通常10 s付近の短周期帯で卓越している。そこで船の動揺や係留力の長周期変動は風の影響であり、短周期変動は波の影響であると言える。すなわち、サージング、スウェーイング、ヨーイングは風の影響が強く、ヒーピングとピッチング、ローリングは波の影響が強いといえる。

3.3 パワースペクトルについての考察

両ケースを通じ、スウェーイングとローリングだけが周期10 sにピークを持ち、波のピークからずれている。船が横揺れを起こすときは、ローリングとスウェーイングが連成運動を起こす。東雄丸の横揺れの固有周期が10 s程度とすれば、うねりや風波によって10 sの横揺れ連成運動を起こしていると考えられる。船首方向(サージングとピッチング)にも同様に連成運動が考えられるが、その固有周期は波浪周期よりもずっと長いので波浪外力ではほとんど生じなかった。

係留力の短周期のピークは風波周期が卓越していた。うねりの影響はヨーイング、ヒーピングとピッチング、ローリングには見られるけれども、係留力には見られなかった。言い換えれば、周期6 sの風波では船体が波長より十分大きいので船の挙動には影響しないが、ブイに動揺を与えて大きい係留力を発生させる一方、周期12-14 sのうねりは船体にも動揺を与えているが両者を繋ぐ係留力には逆に影響が小さくなっている。このことは、うねりが湾口すなわち船首方向(X軸)から来ているので、Y軸方向の係留力におよぼす効果が小さいけれど、周期6 sの風波は北より(Y軸)に寄せてきて、ブイの振動が効果的に係留力に影響したのであろう。

4. 有義値による解析

4.1 有義値の定義

波浪のパワースペクトルを全周波数域で積分した値は、波浪の全スペクトルエネルギーであり、水位変動の二乗の平均であり、有義波高はその平方根の4倍である。

$$m_0 = \int_0^{\infty} P(f) df = \overline{\eta^2}$$

$$H_{1/3} = 4.00 \times \sqrt{m_0}$$

そこで波に限らず変動量のパワースペクトルの積分値の平方根の4倍をその有義値と呼び、積分の上限と下限を選んで、長周期成分と短周期成分の有義値を求めた。

波は周期10 s以上のうねりと周期が6 s程度の風波が卓越していたので、周期9 sをうねり成分と風波成分の境界とした。風、GPSおよび係留力においては、主に風に対応している長周期成分と波に対応している短周期成分の境界として周期20 sを選んだ。

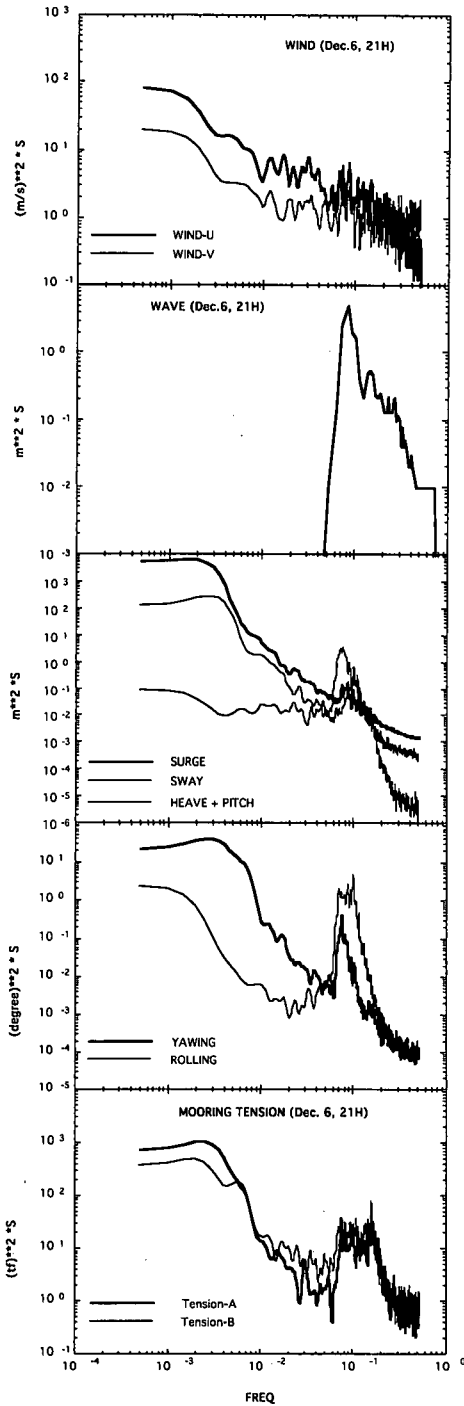


図-3 12月6日21時のパワースペクトル

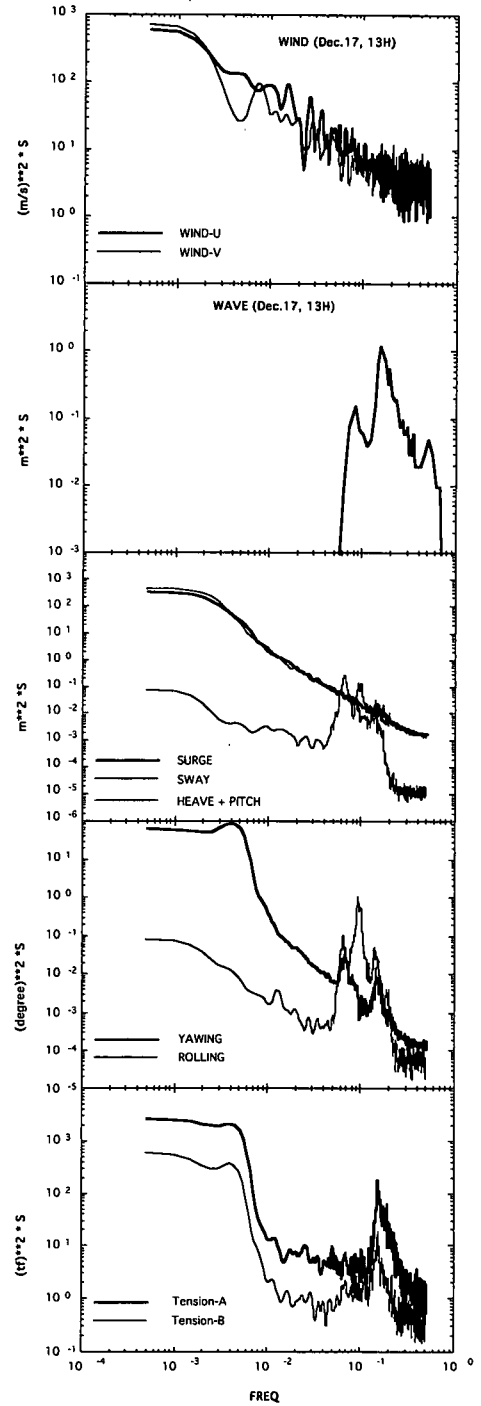


図-4 12月17日13時のパワースペクトル

4.2 風及び波の有義値変動

図-5 および 6 はケース 1 および 2 での風速の舷側方向成分 (V), 波, 船体動揺(サージング, スウェイング, ヨーイング, ヒーピングとピッチング, ローリング), 係

留力 (Tension-A, B) の有義値の全周期成分 (TOTAL), 長周期成分 (LONG), 短周期成分 (SHORT) 及び長周期成分と短周期成分の比 (L/S) である。風の長周期成分と短周期成分は同程度で, 平均風速にほぼ比例して変化

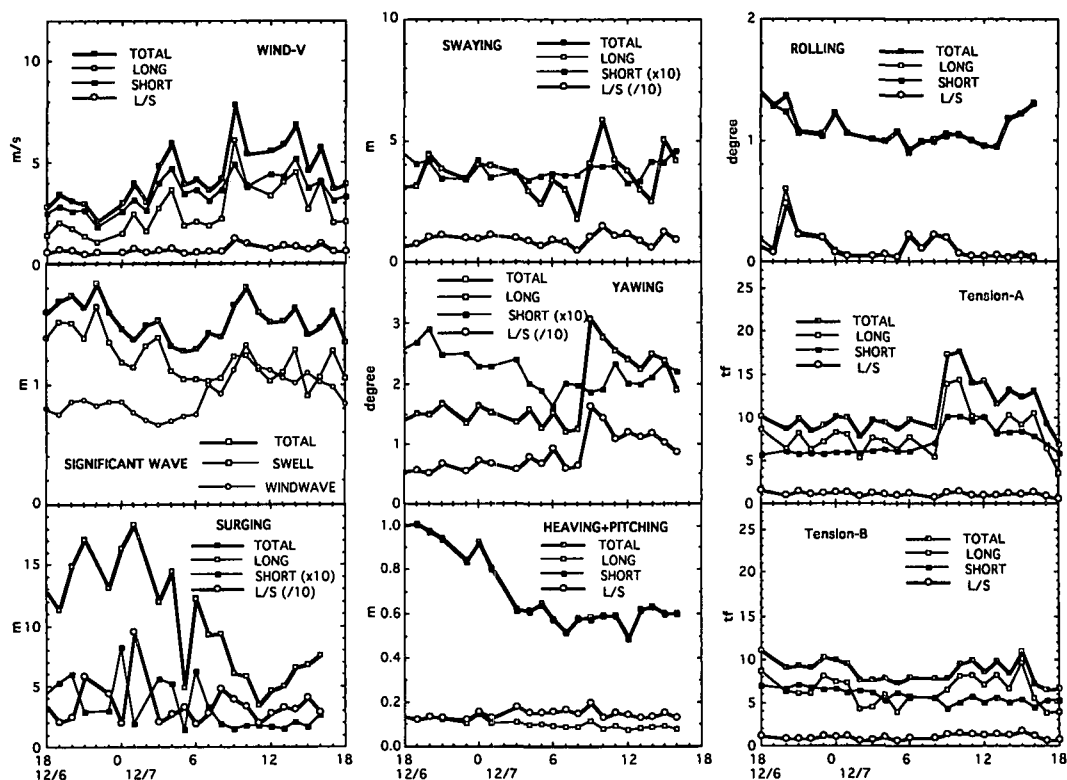


図-5 ケース 1 における有義値の変化

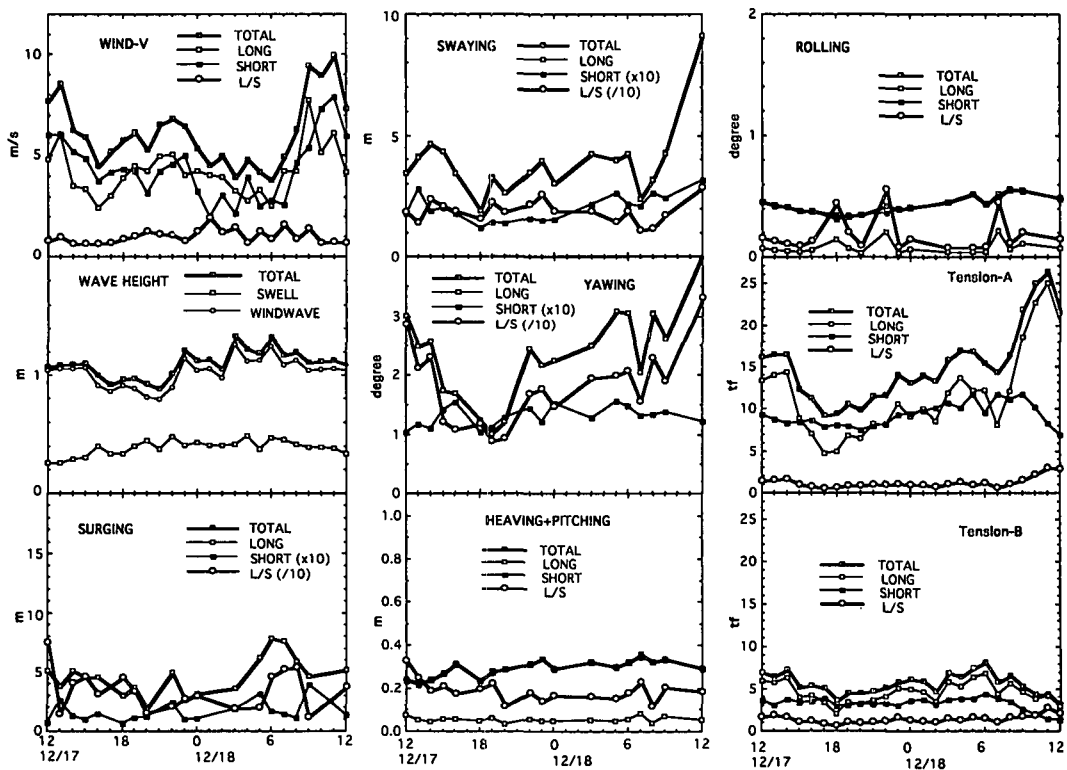


図-6 ケース 2 における有義値の変化

した。ケース1では7日9時には V の上昇が著しい。ケース2では18日12時過ぎには最強風が吹いた。波の方は、ケース1では、うねり、風波とも1m前後と大きい。時間とともにうねりは少し弱まっているのに対し、風波は7日9時に風速 V の上昇と対応して大きくなっている。ケース2では、うねり成分は0.2~0.5mと小さいのに対して風波成分は0.7~1.3mと大きい。18日12時に最強風が吹いているにもかかわらず、波高は減少している。

4.3 船体動揺の有義値変動

サージング、スウェイング、ヨーイングは長周期成分に比べ短周期成分が小さいので、全体の有義値が長周期の有義値に重なり、短周期成分は10倍で表記している。ヒーピングとピッチング、ローリングは短周期成分の方が大きい。これは、船長に対して船幅が短いと考えられる。ケース1の6日21時と7日13時の波はほぼ等しく、舷側にあたる風速変動 V は後者の方が大きいのに、スウェイングは前者の方が大きい。また船首にあたる風速変動 U も後者の方が大きいのに、サージングは小さい。喫水は前者の7.8mが後者で11.0mである。すなわち喫水が上昇し風の受圧面積が減少したため、風が強くなったのに船体動揺は小さくなった。同様にケース2の17日13時と18日7時の波はほぼ等しく、風は前者が大きいにもかかわらず、サージング等の船の動揺は後者の方が大きい。前者の喫水は12m以上あり、後者は8.3mであり、やはり喫水の変化に伴う風の受圧面積の変化が船体動揺に効いている。

4.4 係留力の有義値変動

ケース1では7日9時にTension-Aの上昇が長周期・短周期成分ともに著しく、風速有義値 V の上昇に一致している。この時Tension-Bには著しい変化は見られない。ケース2では、Tension-Aが18日11時に有義値が26tf程になり、Tension-Bが18日13時に有義値が11tf程になった。この時の平均係留力はそれぞれ25tfおよび5tfであった。ケース2はケース1と異なり、風速 V が上昇する時の対応が長周期成分にしか見られない。係留力の短周期変動は風波によって作られており、ケース1では風と波の発達が一致したが、ケース2では波が発達しなかったためである。

Tension-A、Tension-Bとも長周期と短周期の比は1.0前後であり、風の影響も波の影響も同程度に効いている。張力計は船尾 Y 軸方向につけられているので、ローリング、ヨーイング、スウェイングが係留力に影響すると考

えられる。事実、両ケースの長周期有義値において、ヨーイングとスウェイングはTension-Aとよく対応しているが、ローリングはケース2の短周期有義値で対応がみられる。7日9時のヨーイング3度、ローリング1度が船尾付近で起こす水平移動は、それぞれ8mおよび35cmと見込まれる。この時スウェイングは6mであり、ローリングに伴う水平移動は非常に小さい。ケース2でローリングと係留力が短周期成分で対応がみられたのは、風波によって船はほとんど動揺しなかったが、ブイが動揺したためである。

Tension-AがTension-Bに比べ風とよく対応するのは、風が左舷側から吹いて、ワイヤーは定常的にTension-A側で張りつめ、Tension-B側で緩んでいたためである。ワイヤーが張りつめていると船の短周期変動が敏感に係留力変化をもたらす。

5. あとがき

スペクトル解析によって得られた久慈湾多点係留ブイバースの周波数特性を要約すると、

(1) ヒーピング・ピッチングは、うねりの周期で運動するのに対し、ローリングは、うねりと風波の周期でも運動するが、固有周期(10s)の運動の方が卓越する。

(2) 風は100s以上の長周期成分が卓越し、サージング、スウェイング及びヨーイングの運動に影響する。サージング、ヨーイングはうねりの周期でも運動するが、風による長周期運動に比べはるかに小さく、喫水が浅いほど風の影響は強い。スウェイングも風による長周期成分が主だが、うねりが来襲する場合、連成運動によってローリングと同じ周期で短周期運動も起こす。

(3) 係留力については長周期成分は風による船体運動(スウェイング、ヨーイング)と関係が深い。短周期成分はうねりより風波との関係が深い。係留力の短周期成分においては風波がブイを動揺させて影響を与える。

本実測結果は数値モデルの検証に適用され、良い一致を得た(鳥井ら1997)。

参考文献

- 高山知司・吉岡 洋・関田欣治・鳥井正志・山元淳史・岩井 卓(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.
鳥井正志・高山知司・吉岡 洋・関田欣治・山元淳史・原 正典(1997): 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, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 866-870.