

# 港 湾 技 研 資 料

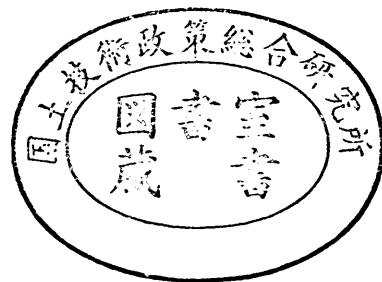
TECHNICAL NOTE OF  
THE POPT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 542      Dec. 1985

一点係留ブイの運動と係船索張力に関する現地観測

高	山	知	司
平	石	哲	也
古	川	正	美
佐	尾	邦	久
立	野	信	一 郎

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 観測概要 .....	4
2.1 観測地点 .....	4
2.2 S A L M型一点係留ブイおよびタンカー .....	5
2.3 観測項目と観測日時 .....	6
3. 現地におけるブイの運動と係船索張力の変動特性 .....	7
3.1 ブイ傾斜角および傾斜方位角の算定法 .....	7
3.2 タンカー非係留時のブイ運動特性 .....	8
3.3 タンカー係留時のブイ運動と係船索張力の特性 .....	14
4. 観測値による数値計算法の検討 .....	24
4.1 数値計算の方法 .....	24
4.2 計算の条件 .....	29
4.3 計算値と観測値の比較 .....	32
5. 結 論 .....	35
6. あとがき .....	35
参 考 文 献 .....	36
記号一覧表 .....	36

# Field Observation of Motions of a SALM Buoy and Tensions of Mooring Hawsers

Tomotsuka TAKAYAMA\*  
Tetsuya HIRAISHI\*\*  
Masami FURUKAWA\*\*  
Kunihisa SAO\*\*\*  
Shinichiro TACHINO\*\*\*

## Synopsis

Single point mooring buoys are constructed as the berthing facilities for large tankers in an ocean. However, the characteristics of the motions of the buoy and the tensions of the mooring hawsers are not well known because of very few field observations. Therefore, we carried out the field observations for the SALM (single anchor leg mooring) buoy installed at 45m deep off Mutsu-Ogawara Port in the northern part of Japan.

The present paper describes the field characteristics of the buoy motions and the mooring hawser tensions, and discusses the applicability of the numerical simulation for the horizontal motions of the tanker moored to a buoy. The following main conclusions are drawn in the study:

- 1) When a tanker is not moored to the buoy, the excited motions of the buoy are predominant for the attacks of large waves, but the induced resonant motions appear significantly for the attacks of small waves.
- 2) When a tanker is moored to the buoy, the variations of the buoy motion and the hawser tension clearly consist of the undulations with the long period of 5 to 20 min and with the short period of less than 20 sec.
- 3) The long period undulations of the hawser tension are aroused by the horizontal motions of the moored tanker due to winds and tidal currents and the short period ones are done by the buoy motions induced by the waves.
- 4) The mooring hawser tension obtained by the numerical simulation for the horizontal motion of the tanker moored to a single point mooring buoy shows best agreement with the observed one when the value of 0.3 is adopted as the value of the drag coefficient for the current.
- 5) The period of the long period undulations for the hawser tension simulated differs from the observed one by about 20%.

---

\* Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of the wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\* Mitsui Ocean Dev. and Eng. Co., Ltd.

# 一点係留ブイの運動と係船索張力に関する現地観測

高山知司\* ・平石哲也\*\*  
古川正美\*\* ・佐尾邦久\*\*\*  
立野信一郎\*\*\*

## 要 旨

外洋における大型タンカー原油受払い係留施設として、一点係留ブイがある。しかし、係留時および非係留時における一点係留ブイの運動および係船索張力については現地で観測された例がほとんどない。そこで、むつ小川原石油備蓄会社のSALM型一点係留ブイを用いて、現地観測を実施した。そして、タンカー係留時および非係留時における一点係留ブイの運動および係船索張力の特性を調べるとともに、数値シミュレーションを行い、現地観測データとの比較によって数値計算法の妥当性について検討した。

本研究によって得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) タンカー非係留時における一点係留ブイの運動については、来襲波の波高が大きい場合、波による運動が卓越し、波高が小さい場合、ブイの固有振動モードによる運動が顕著になる。
- 2) タンカー係留時には、ブイの傾斜角および係船索張力の変動は、周期5~20分の長周期成分と周期20秒以下の短周期成分とはっきり分けることができる。
- 3) 係船索張力の短周期成分は、波によるブイの短周期運動によって生じ、長周期成分は、風などによる係留タンカーの長周期運動による。
- 4) 係留タンカーの平面運動に関する数値シミュレーション結果では、流圧力係数を  $C_u=0.3$  としたときに、数値シミュレーションによって得られた係船索張力は観測値によく一致した。
- 5) 数値シミュレーションによって求めた係船索張力の長周期変動周期は、観測値の変動周期に対して20%程度の差があった。

## 1. ま え が き

むつ小川原石油備蓄基地は、国家石油備蓄基地の第1号として、青森県上北郡六ヶ所村に建設された<sup>1)</sup>本基地には、陸上施設として、約500万klの石油備蓄能力を持つタンク群が建設され、海上施設として、沖合3kmの水深約45mの地点に原油受払い用の大型タンカー係留施設が建設されている。そして、海陸の両施設は海底パイプラインで結ばれている。

大型タンカー用の荷役施設としては、ドルフィンタイプの固定式、多点係留浮標式、一点係留ブイ方式のものがあるが、本基地の場合、外洋に面しており、うねりや

大波浪が来襲する可能性が強く、また、水深が45mもあることから、一点係留ブイ方式が採用された。

一点係留ブイ方式は、大別すると、CALM(Catenary Anchor Leg Mooring)型とSALM(Single Anchor Leg Mooring)型に分けることができる。CALM型方式は、ブイを複数本のチェーンで弛く係留し、ブイの変位に伴うチェーンの懸重力の変化で外力を吸収しようとするものである。一方、SALM型方式は、ブイを1本のチェーンで係留し、チェーンにはブイの過剰浮力による初期張力を与えておいて、ブイに働く外力をこの過剰浮力で吸収しようとするものである。そのため、前者の方式では十分な重量と長さのチェーンが必要で、後者の方式で

\* 海洋水理部 波浪研究室長

\*\* 海洋水理部 波浪研究室

\*\*\* 三井海洋開発株式会社

は係留チェーンが弛まないように十分な過剰浮力を与える必要がある。むつ小川原石油備蓄基地では、ブイに船舶が衝突するなどの予想し得ない外力で被災した場合の漏油に対する安全性などを考慮して、SALM型方式を選定している。

一点係留ブイ方式の特徴は、タンカーがブイに船首単点係留するため、風や潮流、波浪によって生じる外力の最大作用方向を避けて、タンカーがブイの回りを動き回ることができることである。しかし、タンカーは平衡状態の位置に留まることはなく、数分から数10分の長い周期で動き回る現象を示す。この現象は振れ回り運動と呼ばれている。振れ回り運動は、船舶が一点係留ブイに係留しているときだけに起きる現象ではなく、アンカーで単点係留している場合にも起きることが知られている。船体の振れ回り運動は、あたかも魚が尾びれを振りながら流れに逆って泳いでいる状態によく似ていることから“fishtailing”とも呼ばれる。このような振れ回り運動は風が主要な発生要因であるといわれており、風のみを作用させた模型実験でも生じることが確認されている<sup>2)</sup>。

一点係留ブイに係留したタンカーは、海気象条件がある程度以上に厳しくなると、荷役を中止して、ブイから離脱するように規定されている。そのため、一点係留ブイの設計では、大波浪時にブイ単体に働く外力より、タンカー係留時に上記の振れ回り運動によって生じる力が設計外力になることが多い。

一点係留ブイの係留チェーンや係船索の設計外力は、

水理模型実験結果や模型実験から得られた経験式によって算定されてきた。最近においては、設計外力を数値シミュレーションによって推定する試みもなされるようになってきている。しかし、複雑な実際の海域において、ブイや船体の運動、ブイ係留チェーン張力および係船索張力がどのような特性を示すかについては、現地観測例が乏しく、よくわかっていない。そのため、数値シミュレーションの現地への適用性についても検証できない状態にある。

そこで、むつ小川原沖合に設置されたSALM型一点係留ブイを用いて、昭和58年から2か年に渡って現地観測を行った。現地観測で測定した項目は、波、風および潮流などの海気象条件とブイ2方向傾斜角、ブイ方位角、係船索張力である。観測は、タンカー係留時と非係留時について行った。

本報告は、観測によって得られたブイの運動と係船索張力の特性および数値シミュレーション法の現地への適用性について検討している。

## 2. 観測概要

### 2.1 観測地点

SALM型一点係留ブイ設置地点および海気象観測地点の平面配置を図-1に示す。図中A地点は、一点係留ブイシステムの安全操業のために必要な海象条件（波高、周期、波向、流速、流向、水温）を観測するために、球形波浪観測ブイとストリーマ流向流速計が設置されてい

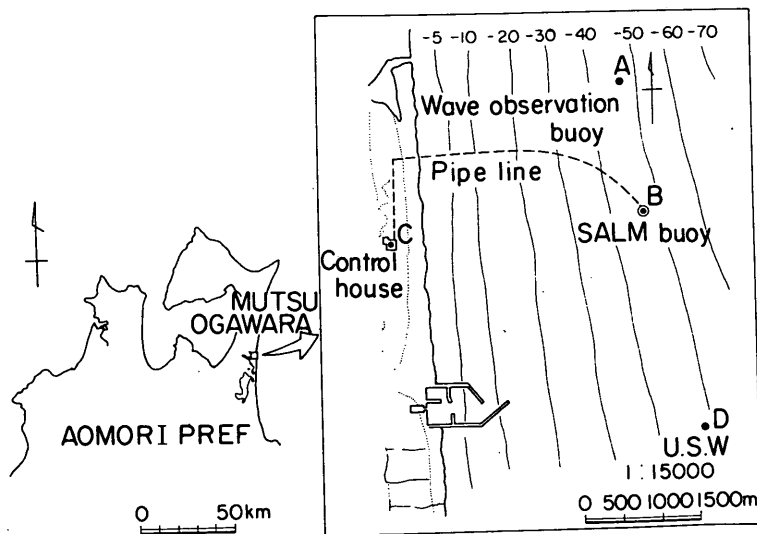


図-1 観測地点平面図

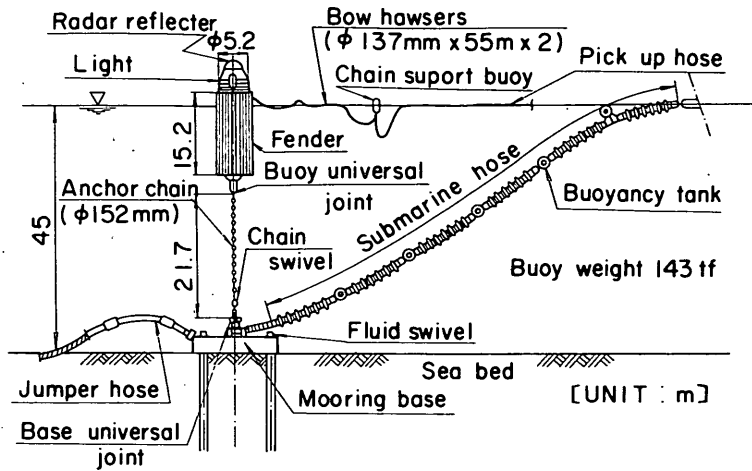


図-2 SALM型一点係留ブイシステム

る地点である。このブイによって観測された海象データは、C点の陸上管理室へFMテレメータで送信される。B地点はSALM型一点係留ブイ設置地点で、ブイには係船索張力計および標識灯等の付帯設備が装備されており、C点の管理室からのテレメータ制御により起動する。図中の破線が海底パイプライン配管経路を示す。陸上C地点においては管理棟屋上で気象条件(風速, 風向, 気温, 気圧等)が観測されている。また、D地点では運輸省第二港湾建設局が超音波式波高計(U. S. W)を用いて定期的に波浪観測を行っている。

## 2.2 SALM型一点係留ブイおよびタンカー

SALM型一点係留ブイシステムおよびおもなブイ諸元を図-2に示す。図-2に示すようにSALM型一点係留ブイは、1本のチェーンによって海底係留ベースに

係留されている。ブイ係留チェーンには、ブイを強制的に沈めることによって生じる過剰浮力が常時作用しており、その力は約143tfになる。この過剰浮力によってブイの運動中においても、ブイ係留チェーンは弛むことなく、チェーンに衝撃的な力が生じないように設計されている。また、ブイ本体とブイ係留チェーンおよびブイ係留チェーンと係留ベースは、ユニバーサル・ジョイントで接合されている。このため、外力に対してブイは、自由に運動ができるようになっている。さらに係留チェーンには、チェーン・スィベルが取り付けられており、軸回りのブイの回転によってチェーンにねじれが生じないようにしている。図-2に示すように送油ホースは、係留ベースに取り付けられたフルード・スィベルを介して海底パイプラインと繋がれているので、送油ホースは

表-1 観測時に係留されていたタンカーの諸元

タンカー船名	K 丸	N 丸	T 丸	S 丸	
観測日 年月/日	83. 12/13~14	84. 2/21~22	83. 11/25	83. 10/12	
載荷重量 トン DWT	270000	240000	270000	240000	
船長 $L_{PP}$ (m)	344.42	324.00	337.05	324.00	
型幅 $B$ (m)	51.86	53.00	54.50	54.00	
型深 $D$ (m)	26.51	25.00	27.00	26.40	
平均吃水	満載 $d_F$ (m)	20.76	19.45	21.03	20.02
	軽荷 $d_E$ (m)	3.06	2.76	2.83	2.85
満載排水量 DT (t)	308105	272088	312325	276766	
載貨容積 $V$ (m <sup>3</sup> )	322291.5	282663.5	319938.3	296125.7	

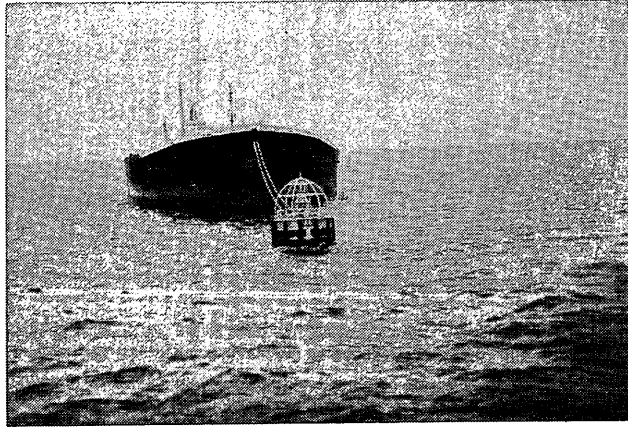


写真-1 タンカー係留状態

ブイの回りを自由に回転できる。このような送油方式は一般に浅水型と呼ばれている。送油機構とブイ本体が切離されているため、タンカーがブイに衝突して、ブイが破損したとしても漏油が生じないシステムになっている。

本一点係留ブイは、100,000～275,000 DWTのタンカーを係留対象にしており、タンカーは、ブイ側で保有している長さ5.5 m、径138 mmの2本のナイロンロープで係留されている。観測時に係留されていたタンカーは、VLCC型タンカーで、表-1におもな諸元を示す。VLCC型とは、200,000～300,000 DWT級のタンカーを意味する。写真-1は、現地観測時に一点係留ブイに係留されていたタンカーの係留状態を示している。

### 2.3 観測項目と観測日時

タンカー係留時におけるおもな観測項目は、1)海気象条件、2)係船索張力、3)ブイの2方向傾斜角と方位角、4)原油送油量などである。タンカー非係留時の観測項目は上記1)、3)である。

海気象条件としては、図-1に示したA、CおよびD地点の観測値を用いた。A地点およびC地点の海気象条件は、管理室内の計算機で統計処理され、計算機端末に表示されるとともに、日報として1日分の統計量がプリンターに出力されたものを用いた。D地点における波浪の観測は、当研究所水工部海象観測研究室で統計処理されたものを用いた。

ブイデッキ上には、係船索の端部を固定する装置が取り付けられている。そして、そこには係船索の安全性を直接確認するために張力計が設置されており、タンカー係留時には常時係船索に作用する張力が測定されている。測定された係船索張力は、C点管理室へテレメータ送信され、管理室内にデジタル表示されると同時に、アナログ

記録も行われている。現地観測では、測定された係船索張力のデジタル値を直接データレコーダーに収録した。

ブイ本体には、本現地観測のために2方向傾斜計と方位計が付設してある。2方向傾斜計は、係船索取付点の設置方向へのブイ傾斜角と、それと直交する方向への傾斜角が測定されるように設置してある。傾斜角の測定範囲は、一方向で $\pm 3.5^\circ$ で、その分解能は約 $0.27^\circ$ である。方位計は、磁北からのブイの軸回りの回転角を測定し、その分解能は約 $2.8^\circ$ である。2方向傾斜計と方位計は、管理室からのテレメータによって起動され、係船索張力とともに、1秒間隔でデジタル化してデータレコーダーに収録した。

タンカーの吃水を推定するために、送油量を記録した。また、管理室には、安全操業のためにレーダー装置が装備されており、このレーダー装置を用いるとタンカーの平面配置がわかるため、レーダーのスクリーンを写真に撮った。

タンカー係留時における観測は、第1回目が昭和58年9月2日、第2回目が11月24日、第3回目が12月13～14日および第4回目が昭和59年2月21～22日の合計4回行った。

第1と2回目の観測では、2方向傾斜角と方位角および係船索張力を1時間測定した。第1回目は、試験的に観測を行ったため、観測項目4)の原油送油量を記録しなかった。第2回目は、天候がよく観測時の平均風速も $1.1 \text{ m/s}$ と非常に小さかった。このため、第1と2回目の観測については、詳細な解析を行わなかった。

第3回目の観測では、12月13日の13時39分と16時1分および12月14日の9時29分と13時25分からそれぞれ1時間、合計4ケース観測した。観測期間中、風速が徐々に

大きくなり、14日の13時25分の観測では、平均風速が10 m/sに達した。

第4回目の観測では、2月21日の13時29分と15時28分および2月22日の10時15分と13時58分からそれぞれ1時間、合計4ケース観測した。

SALM型一点係留ブイからのタンカーの離標条件は、有義波高2.5 m、風速20 m/s、潮流0.75 m/sである。タンカーの荷役条件は、有義波高1.5 m、風速15 m/sであり、これ以上になると送油中のタンカーは、送油を中止し離標準備を開始しなければならない。なお、この場合の風速は、10分間平均風速を示している。

このような条件で操業されているタンカーの荷役記録の中から、係船索に比較的大きな張力が作用した昭和58年10月12日の10時から14時、11月25日の4時から8時における係船索張力のアナログ記録を用いても解析を行った。このときの海気象条件は前者で風速10 m/s、有義波高0.6 m、後者で風速9.5 m/s、有義波高1.1 mであった。

以上の観測期間中ブイに係留していたタンカーのおもな諸元は表-1に示している。表-1中のT丸については、8時に一時離標している。

タンカー非係留時における観測は、波浪条件の悪い日を選んで観測した。観測は合計4回行った。1回目の観測は、昭和59年3月23日10時、2回目が7月21日16時、3回目が8月13日15時、4回目3回目と同じ日の16時である。観測はそれぞれ1時間行った。第1回目の観測における波高が最大で、有義波高で3.9 mあった。

非係留時におけるSALM型一点係留ブイの設計条件は、有義波高7.8 m、風速35 m/s、潮流0.75 m/sである。

### 3. 現地におけるブイの運動と係船索張力の変動特性

#### 3.1 ブイ傾斜角および傾斜方位角の算定法

##### (1) 座標系

ブイ本体に設置した2方向傾斜計は、係船索張力計設置方向の傾斜角と、その方向と直交する傾斜角を測定する。また、方位計は、磁北から軸回りのブイの回転角を測定する。そこで、図-3に示すような座標系にとる。ブイ断面の中心を原点とし、2方向傾斜計の設置方向へのブイ固定座標系を $x_B-y_B$ とし、ブイ固定座標の原点を通る水平面への $x_B$ と $y_B$ 軸の投影をそれぞれ $X_B$ と $Y_B$ 軸とする。ただし、 $y_B$ 軸に係船索の取り付け点がある。

2方向傾斜計で測定される傾斜角は、 $X_B-O-x_B$ のなす角 $\delta_x$ と、 $Y_B-O-y_B$ のなす角 $\delta_y$ になる。 $\delta_x$ と $\delta_y$ は、 $X_B$ と $Y_B$ 軸から $x_B$ と $y_B$ 軸がそれぞれ時計回りに回転した場合を正の傾斜角とする。

ブイ方位計で測定される方位角は、磁北から $y_B$ 軸の正方向までの $x_B-y_B$ 平面上の回転角 $\alpha$  ( $-\pi < \alpha \leq \pi$ )である。

##### (2) ブイ傾斜角と傾斜方位角

ブイ傾斜角 $\delta$ は、2方向傾斜角 $\delta_x$ 、 $\delta_y$ を用いて次式で計算できる。

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (1)$$

$y_B$ 軸の正方向から、ブイ傾斜角までの $x_B-y_B$ 平面上の回転角 $\theta$ は、次式で計算できる。

$$\theta = \pm \cos^{-1} \left( \frac{\cos \delta_x \cos \theta'}{\cos \delta} \right) \quad (-\pi < \theta \leq \pi) \quad (2)$$

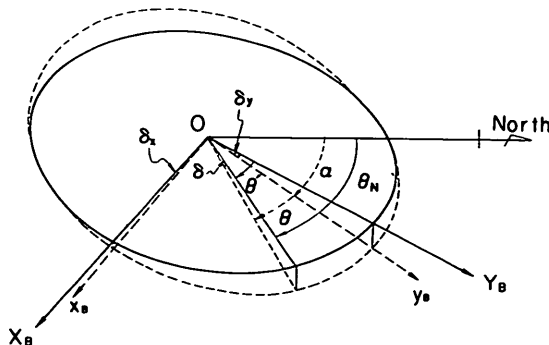


図-3 ブイ傾斜角と傾斜方位角の関係



ここで、 $\pm$ は $\delta_x \geq 0$ の場合が正で、 $\delta_x < 0$ の場合が負とする。なお、 $\theta'$ は次式で与えられる。

$$\theta' = \tan^{-1} \left( \frac{\delta_x}{\delta_y} \right) \quad (-\pi < \theta' \leq \pi) \quad (3)$$

磁北からブイ傾斜角までの $x_B - y_B$ 平面上の方位角は磁北から $\alpha + \theta$ となる。 $\alpha + \theta$ を $-\pi < (\alpha + \theta) \leq \pi$ とすると、磁北からのブイ傾斜角までの $X_B - Y_B$ 平面上での方位角 $\theta_N$ は、次式で計算できる。

$$\theta_N = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(\alpha + \theta)}{\cos \delta} \right) + C \quad (0 \leq \theta_N < 2\pi) \quad (4)$$

ここで、 $C$ は定数で以下の値を示す。

$$\begin{aligned} |(\alpha + \theta)| > \pi/2 & \text{ のとき } C = \pi \\ -\pi/2 \leq (\alpha + \theta) < 0 & \text{ のとき } C = 2\pi \\ 0 \leq (\alpha + \theta) \leq \pi/2 & \text{ のとき } C = 0 \end{aligned}$$

なお、 $\delta_x, \delta_y$ が共に0の場合は除く。

### 3.2 タンカー非係留時のブイ運動特性

#### (1) 観測時の海気象条件

タンカー非係留時における観測は、悪天候の日を選んで4ケース行った。各ケースの観測日時と海気象条件(波高、周期、波向、流速、流向、風速、風向)を表-2に示す。

表-2には、AおよびDの両地点で観測された有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ を載せている。Case3-1と3-2で波浪の諸元が同じなのは、波浪観測が毎偶数時に測定されており、両ケースの場合ともに16:00の観

測値を用いたためである。波向についてはA地点の観測値で、10成分波の周波数に対するそれぞれの波向が統計処理で求められており、エネルギー密度の最も大きい周波数成分の波に対する平均波向を代表波向として表-2に示した。

潮流は、A地点の水面下-10と-30m地点で観測されており、このうち、ブイに対して最も影響が大きいと推定される-10m地点のものを示した。流向は北を $0^\circ$ 、時計回りを正とする $360^\circ$ 表示で示した。

風は、陸上部のC地点における管理棟屋上で観測された値を示した。

Case1-1は、観測ケース中一番波高の大きいケースで、有義波高はD地点の観測値で $H_{1/3} = 3.9$  mに達している。このときの気圧配置は冬型で、風はWNWからの陸風で平均風速は4.3 m/sとさほど大きくはなかった。Case2-1および3-1と3-2では、有義波高はD地点の観測値で $H_{1/3} = 0.78$  および1.54 mとなっており、Case3-1と3-2では多少大きいけれども、Case1-1の $H_{1/3} = 3.9$  mと比べると小さい。風はE方向からの陸風である。

#### (2) ブイ傾斜角と傾斜方位角

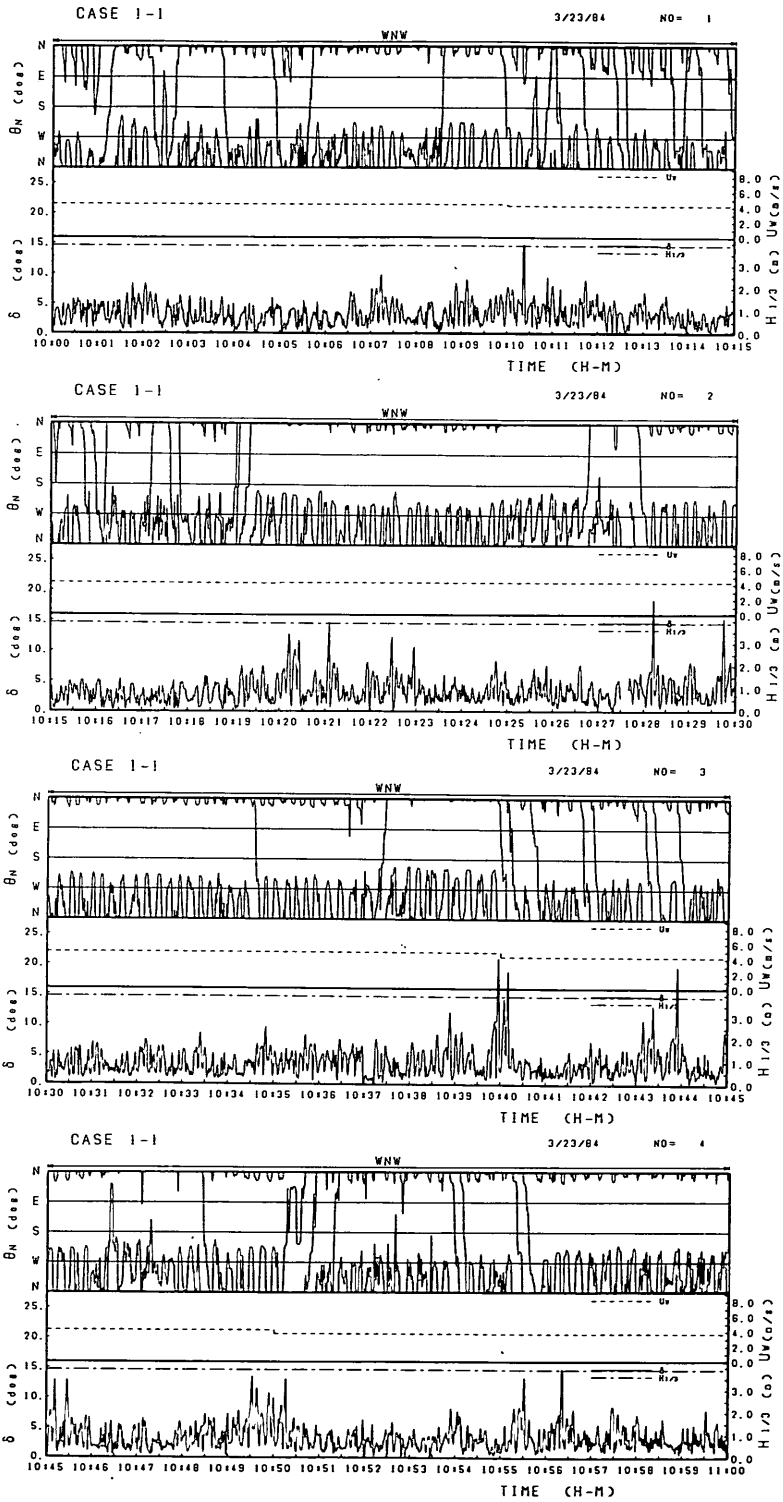
3.1で述べた手法を用いて、ブイ傾斜角 $\delta$ と傾斜方位角 $\theta_N$ を求めた。求めた $\delta$ と $\theta_N$ の時系列波形と海気象条件を図-4に示す。図-4(a)および(b)は、それぞれCase1-1とCase3-1の観測結果を示している。

図-4(a)および(b)ともに、No=1から4の4枚の図で1時間観測の時系列を示している。図中の上段欄外には、10分間における最多風向を示す。図において上から $\theta_N$ の時系列波形を実線で、10分間平均風速 $U_W$ を破線で、有義波高 $H_{1/3}$ を一点鎖線で、 $\delta$ の時系列波形を実線で示している。横軸には観測時刻を示した。

表-2 タンカー非係留時の海気象条件

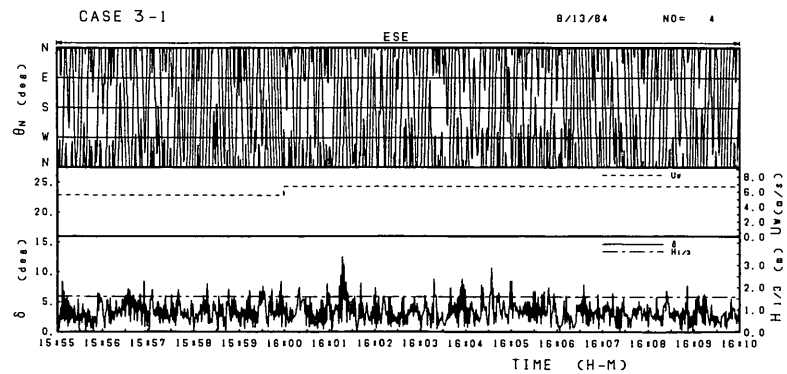
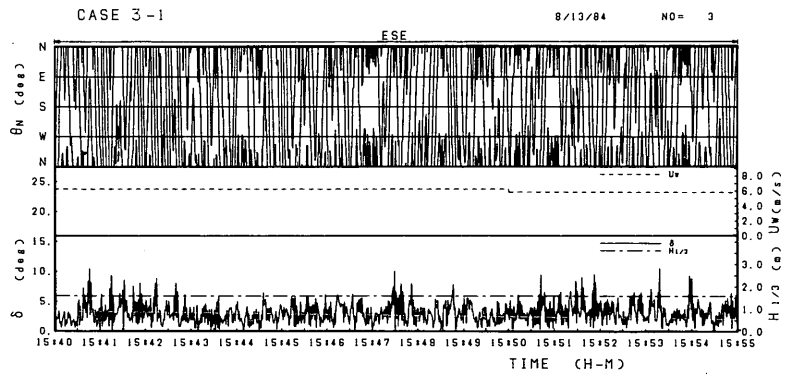
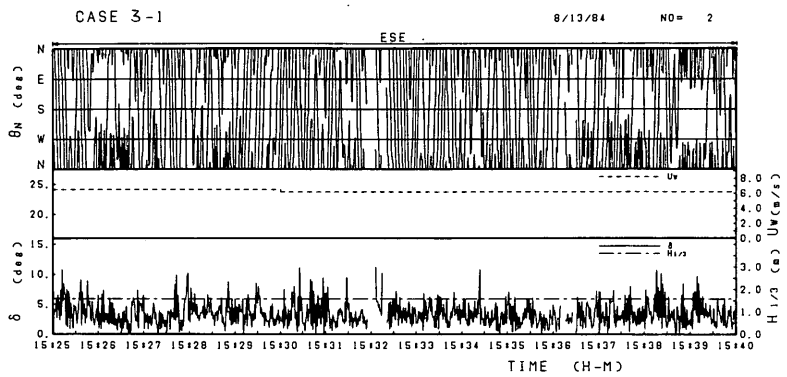
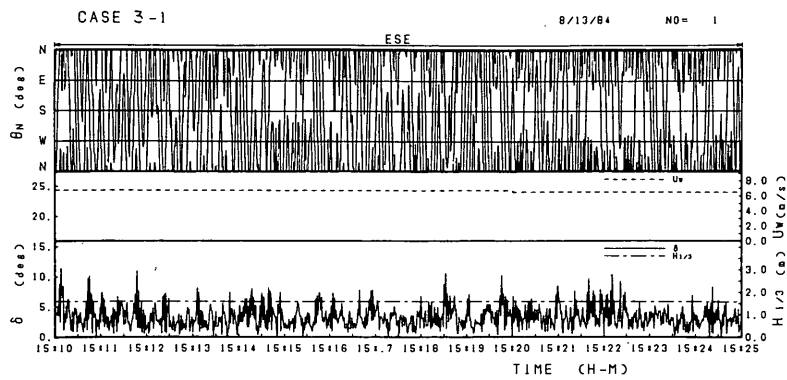
観測	タンカー非係留時		波 浪				潮 流		風		
	地 点		A		D		A		C		
	年.月/日	時 刻	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	波 向* (deg)	流 速 $\vec{V}_C$ (m/s)	流 向* (deg)	風 速 $\vec{U}_W$ (m/s)	風 向
1-1	84.3/23	10:00 ~11:00	3.0	14.4	3.9	14.9	54.8	0.05	35	4.3	WNW
2-1	84.7/21	16:09 ~17:09	0.7	7.5	0.78	7.9	145.6	0.28	343	3.7	ENE
3-1	84.8/13	15:10 ~16:10	1.8	6.0	1.54	6.1	123.5	0.20	171	6.2	ESE
3-2	84.8/13	16:11 ~17:11					123.5	0.24	173	6.5	ESE

\*波向、流向は北を $0^\circ$ 、時計回りを正とする。



(a) Case 1-1

図-4 ブイ傾斜角と傾斜方位角の時系列波形図



(b) Case 3 - 1

図-4(a)のCase1-1の $\theta_N$ の時系列波形から、ブイはほとんどNW方向へ傾斜した状態で、NNEとSWの方向に振動をしていることがわかる。風向がWNWの方向であるため、この振動は風による影響とは考えにくい。波向はほぼNE、流向はNNE方向に近いため、ブイの運動は波と潮流によって起されたものと考えられる。

$\delta$ の時系列波形には、10数秒の顕著な短周期成分がみられる。最も大きなブイ傾斜角は $20^\circ$ を越している。

図-4(b)のCase3-1における $\theta_N$ の時系列波形からブイは、図-4(a)の場合よりも $360^\circ$ 各方向へ傾斜していると推測される。Case3-1の $\delta$ の時系列波形は、図-4(a)の場合と同様に短周期成分が顕著であり、最大値は図-4(a)の場合より小さく $10^\circ$ 程度である。

$\delta$ の時系列波形について、観測開始後2000秒から3024秒間の波形を用いて統計処理を行い、 $\delta$ の $1/3$ 最大値 $\delta_{1/3}$ を求めた。その結果を表-3に示す。ただし、表-3中の $\delta_{max}$ は、1時間観測期間中における $\delta$ の最大値を示している。また、方位計によって測定される、磁北から $y_B$ 軸方向までの方位角 $\alpha$ の値も表-3に示している。 $\alpha$ は各ケースとも $98 \sim 124^\circ$ であった。波高が最も大きかったCase1-1では、 $\delta_{1/3}$ の値が $7.98^\circ$ と最も大きく、 $\delta_{max}$ の値は $21.13^\circ$ にもなっている。来襲波高がほぼ同じである。Case3-1と3-2の場合について $\delta_{1/3}$ の値を比べてみると、Case3-2の場合が多少大きい。一方、 $\delta_{max}$ の値は両者の間で $1^\circ$ 程度の差である。Case3-1と3-2で $\delta_{1/3}$ の値が異なったのは、来襲波の大きさが違っていたのではないかと考えられる。つまり、表-2に示されている波浪諸元は、どちらのケースでも16:00の観測値であるが、時間が経つにつれて波浪が増大してCase3-1の観測時よりCase3-2の観測時の波浪が大きくなったためではないかと考えられる。このことは、風速をみても、Case3-1では $6.1 \text{ m/s}$ であったものが、Case3-2では $6.5 \text{ m/s}$ に増大しており、風向もESEで外洋から風が吹くことになり、来襲波を増大させる方向にあること

表-3 ブイ傾斜角の統計量

観測 ケース	ブイ傾斜角		方位角 $\alpha^*$ (deg)
	$\delta_{max}$ (deg)	$\delta_{1/3}$ (deg)	
1-1	21.13	7.98	98 ~ 124
2-1	5.14	2.46	
3-1	10.62	5.22	
3-2	11.57	5.47	

$\alpha^*$ は北を $0^\circ$ 、時計回りを正とする。

からも推測できる。

### (3) ブイ傾斜角の短周期変動成分の特性

3.2(2)で述べたように、ブイ傾斜角 $\delta$ の変動には短周期成分が卓越しており、この変動は波によって起こされたのではないのかと考えられる。そこで、ブイの傾斜角 $\delta_x$ および $\delta_y$ の測定値を用いてスペクトル解析を行い、そのときの来襲波のスペクトルと比較した。図-5(a)と(b)には、それぞれ前述の図-4(a)と(b)に対応するCase1-1と3-1について、 $\delta_x$ と $\delta_y$ の1024秒(1024個)のスペクトルとD地点における波の周波数スペクトルを示している。図-5において細実線が波、太実線が $\delta_x$ 、細破線が $\delta_y$ を示す。

図-5(a)のCase1-1の場合、 $\delta_x$ と $\delta_y$ のスペクトルピーク周波数は、波のスペクトルピーク周波数とよく一致している。このことは、ブイの運動が波によって起されていることを示している。 $\delta_x$ と $\delta_y$ のスペクトルにおいて、エネルギー密度に大きな差が現れているのは次の理由によるものである。

傾斜角 $\delta_y$ は前述のように $y_B$ 軸の水平面からの傾斜角であり、 $y_B$ 軸は表-3に示すように磁北から $98 \sim 124^\circ$ の方向にある。一方、傾斜角 $\delta_x$ は $y_B$ 軸に直交する方向の傾斜角を示しているため、 $\delta_x$ は磁北から $8 \sim 34^\circ$ あるいは $188 \sim 214^\circ$ の方向の傾斜角になる。一方、波向は表-2に示すように磁北から $55^\circ$ の方向であるため、波向と $\delta_x$ の傾斜角の方向とのなす角は、波向と $\delta_y$ の場合よりも小さくなる。これによって、 $\delta_x$ の傾斜方向にブイは大きく傾くことにより、その結果、 $\delta_x$ のスペクトル密度が $\delta_y$ のものより大きくなったと推定される。一方、図-5(b)のCase3-1では、 $\alpha$ が $98 \sim 124^\circ$ で、波向が $1235^\circ$ であることから $\delta_y$ のエネルギー密度が大きくなっている。

図-5(b)における $\delta_x$ と $\delta_y$ のスペクトル形には、3つの明りょう(瞭)なピークが存在し、ピーク周波数はそれぞれ約0.04、0.13、0.25Hzである。0.13Hzは、波のピーク周波数に一致していることから、この周波数付近のブイ運動成分は波によって生じていることがわかる。0.04と0.25Hzにおける波のエネルギー密度は小さく、波自体によってブイが動かされているのではなく、この周波数がブイの固有振動数に一致し、波との共振現象によってブイの運動が励起されたと考えるのが妥当のようである。模型実験<sup>3)</sup>によると、本システムにおける一点係留ブイには、図-6に示すような2種類の振動モードをもち、長周期の振動モードであるMode1の固有振動数は約0.04Hz、それより短周期のモードであるMode2の固有振動数は約0.29Hzであると報告されている。これらの周波数に対するブイの振動は、ブイと波とによる共振現象によって生じたも

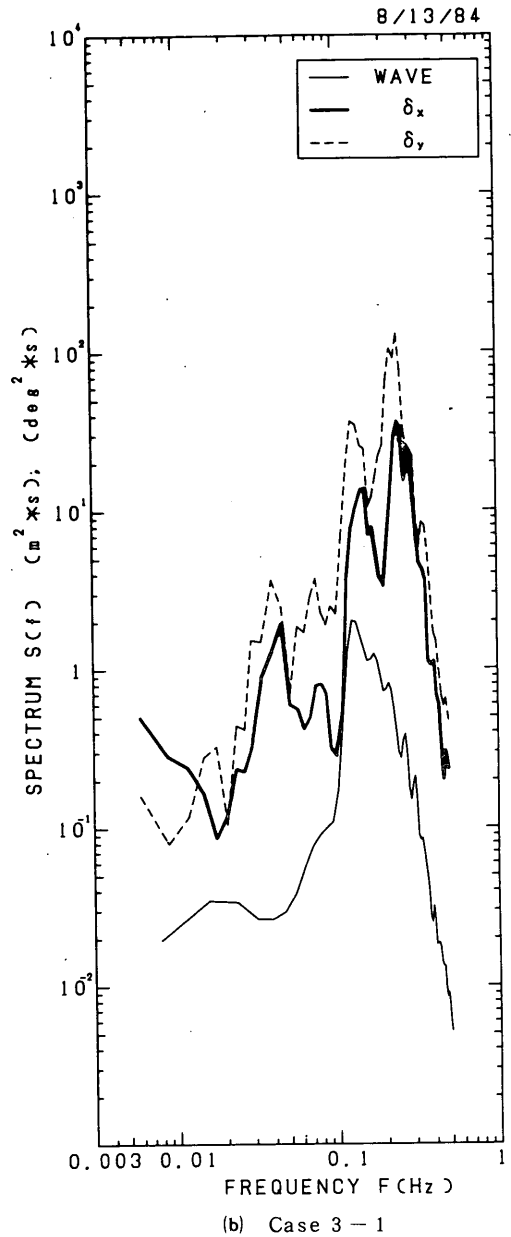
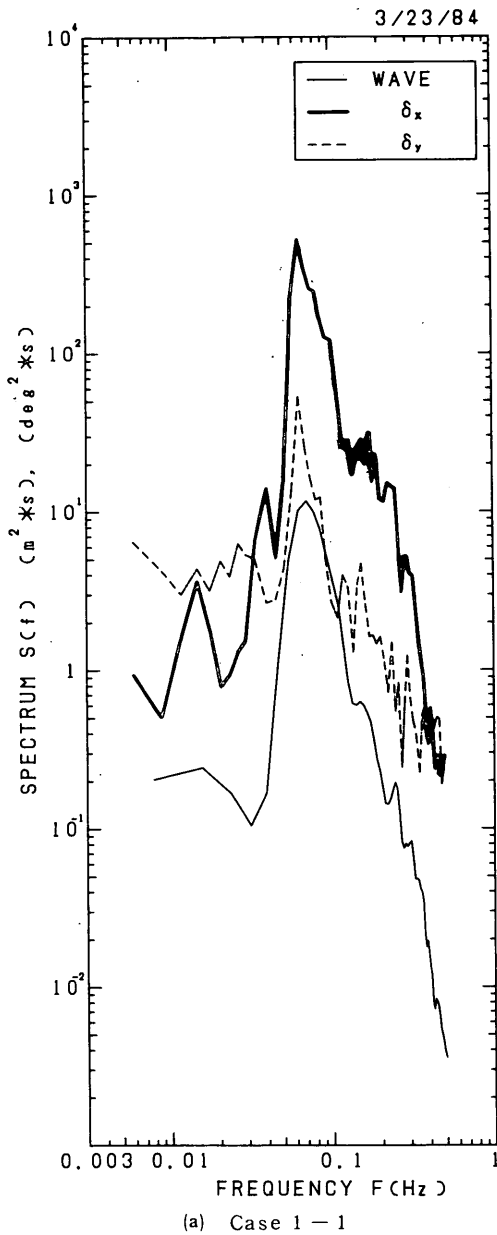


図-5 波とパイ傾斜角のスペクトル

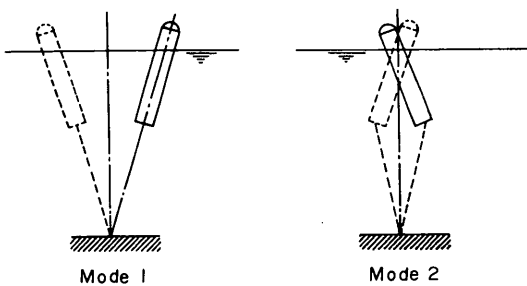


図-6 一点係留パイシステムの固有振動

のと断定することができる。なお、Mode2において模型実験結果と観測値とで多少の周波数のずれが生じているが、実機と模型の縮尺の誤差によるものと思われる。このようなパイの共振モードは、Case 2-1および Case 3-2においても現れていた。

前述の図-5(a)の Case 1-1 の  $\delta_x$ 、 $\delta_y$  のスペクトルには、パイの固有振動モードに対応する周波数で明りょうなピークが現れていない。しかし、 $\delta_x$  および  $\delta_y$  のスペクトル

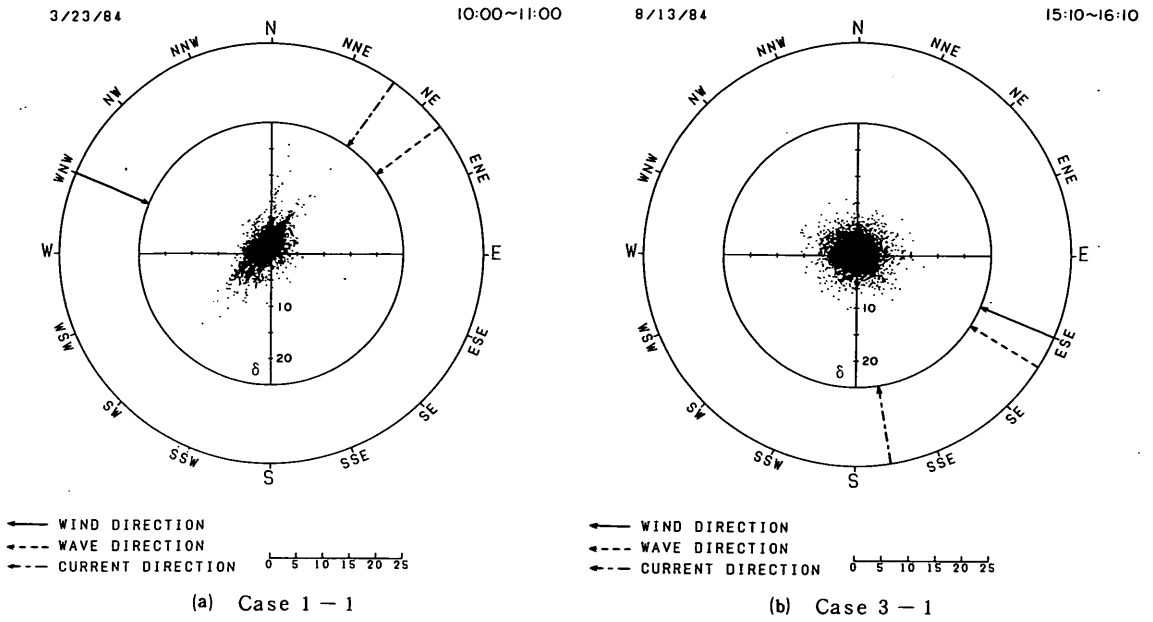


図-7 ブイ傾斜角と傾斜方位角の極座標表示

を詳細にみても、これらの固有振動モードの周波数で小さなピークが見られる。このように、Case 1-1の場合にブイの固有振動数付近で明りょうなピークが現れなかったのは、この場合来襲波高が  $H1/3 = 3.9 \text{ m}$  と非常に大きく、波による運動があまりにも卓越しすぎて、固有振動モードの運動があっても相対的に小さくなり、波による運動の陰に隠れてしまったためだと考えられる。

(4) ブイ傾斜角と傾斜方位角によるブイ傾斜主方向と分散

図-4 (a)および(b)の Case 1-1 と Case 3-1 について、 $\delta$  を動径、 $\theta_N$  を偏角とする極座標  $(\delta, \theta_N)$  として、ブイ傾斜角  $\delta$  と傾斜方位角  $\theta_N$  の時系列をプロットしたのが図-7 (a)と(b)である。図-7 には、内側の円内に  $(\delta, \theta_N)$  のプロット点を示し、外側の円内には、前記表-2の海気象条件の1時間平均最多風向、1時間平均波向、流向を示した。風向を実線、波向を破線、流向を一点鎖線で示した。

図-7 (a)でわかるように Case 1-1 の場合、ブイは中心から少しNW方向に傾いた状態で単振動しているのがよくわかる。波向がNE方向であるためこの振動は、来襲波によって生じていると推定される。ブイは風の吹送方向とは逆の方向に傾いた状態で運動していることから、ブイの運動に対する風の影響は小さいと推定される。

一方、図-7 (b)の Case 3-1 の場合には、 $(\delta, \theta_N)$  の点はブイの中立点を中心に360°の全方向に一樣に分布

表-4 ブイ傾斜主方向と分散

観測ケース	$\theta_P^*$ (deg)	$r$
1-1	34.58	0.47
2-1	28.71	0.78
3-1	106.21	0.87
3-2	167.27	0.82

$\theta_P^*$  は北を0°、時計回りを正とする。

しており、卓越した振動方向はない。プロットされた  $(\delta, \theta_N)$  の点の分布から、ブイ傾斜主方向  $\theta_P$  と分散  $r$  を統計的に求めてみた。図中においてN方向をX軸、W方向をY軸として、両軸の交点を原点とする空間固定座標系  $X-Y$  を考える。点  $(\delta, \theta_N)$  の極座標は直交座標  $(X_S, Y_S)$  に次式を用いて容易に変換できる。

$$\begin{aligned} X_S &= \delta \cos \theta_N \\ Y_S &= \delta \sin \theta_N \end{aligned} \tag{5}$$

$(X_S, Y_S)$  の値を用いて  $\theta_P, r$  を以下の式<sup>4)</sup>で求め、結果を表-4に示した。

$$\theta_P = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{S_{12}}{S_{11} - S_{22}} \right) \tag{6}$$

$$r = \frac{(S_{11} + S_{22} - \sqrt{(S_{11} - S_{22})^2 + 4 S_{12}^2})^{1/2}}{(S_{11} + S_{22} + \sqrt{(S_{11} - S_{22})^2 + 4 S_{12}^2})^{1/2}} \quad (7)$$

ここに  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  および  $S_{12}$  は、

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \sum_{i=1}^n (X_{S_i} - \bar{X}_S)^2 \\ S_{22} &= \sum_{i=1}^n (Y_{S_i} - \bar{Y}_S)^2 \\ S_{12} &= \sum_{i=1}^n (X_{S_i} - \bar{X}_S)(Y_{S_i} - \bar{Y}_S) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

である。また、 $(X_{S_i}, Y_{S_i})$  は  $(\delta, \theta_N)$  のそれぞれに対応する直交座標で、 $\bar{X}_S, \bar{Y}_S$  は  $X_{S_i}$  および  $Y_{S_i}$  の平均値である。式(6)中の  $\theta_P$  は N 方向を  $0^\circ$  とし、反時計回りを正、時計回りを負の角度で示される。しかし、 $\theta_P$  の場合  $180^\circ$  異なる方向の区別は困難である。表-4 で  $\theta_P^*$  は、北を  $0^\circ$ 、時計回りを正と改め、 $0 \leq \theta_P^* \leq 180^\circ$  の値を示した。ブイ傾斜の分散  $r$  は、 $0 \leq r \leq 1$  の範囲を示し、一方向の分布の場合が  $= 0$  で、全方向に様に分布している場合が  $= 1$  となる。つまり、 $r$  の値が小さいほど、ブイは一方向の運動をするようになる。

波向と  $\theta_P^*$  の関係を調べてみると、波高の大きい Case 1-1 では、両者の間に約  $20^\circ$  のずれが見られるが、大まかに見れば  $\theta_P^*$  は波向に一致しているといえる。なお、波向としては A 地点で観測された 10 成分波の波向のうちで、最も大きいエネルギー密度を有する成分波の平均波向を採用しており、一方、ブイの運動は波の周期やブイの固有

振動にも関係して、その応答が異なる。そのため、波向と  $\theta_P^*$  の間に約  $20^\circ$  の差が生じたのではないかと考えられる。

他のケースでは、波向と  $\theta_P^*$  の間に明りょうな関係は見られない。 $r$  の値をみても、Case 1-1 では  $r = 0.47$  と比較的一方向性が高いのに対して、他のケースでは  $r = 0.78 \sim 0.87$  と  $r$  の値が大きく、ブイの傾斜が多方向に分布することを示している。このことは、前述の図-7 から明らかである。このように、Case 2-1, 3-1, 3-2 でブイが多方向に傾斜して、来襲波の波向と相関がなかったのは、これらのケースでは来襲波の周期が  $6.0 \sim 7.5$  秒と短く、波高も小さいためブイの運動において、波による振動よりブイの固有振動によるものが卓越したことが原因だと考えられる。

潮流が観測ケース中一番大きい Case 2-1 においても、 $\theta_P^*$  に対して流向が約  $45^\circ$  異なっており、ブイ運動に対する潮流の影響は少ないと考えられる。Case 1-1 で  $\theta_P^*$  と流向が一致しているが、流速が  $0.05 \text{ m/s}$  と小さいので、潮流の影響とは考えにくい。この場合、たまたま流向が  $\theta_P^*$  と近かったと考えられる。

### 3.3 タンカー係留時のブイ運動と係船索張力の特性

#### (1) 観測時の海気象条件

タンカー係留時における観測は、2.3 で述べたように合計 4 回、10 ケースについて行ったが、第 1, 2 回の 2 ケースはタンカー送油量を観測しなかったため、参考程度にとどめ、本資料では、第 3, 4 回に観測した 8 ケースについて調べた。

各ケースの観測日時と海気象条件(波高, 周期, 波向, 流速, 流向, 風速, 風向)を表-5 にとりまとめている。

表-5 タンカー係留時の海気象条件

タンカー係留時			波				潮流		風			
観測	地点		A		D		A	A	C			
	年.月/日	時刻	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波 $T_{1/3}$ (sec)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	波向* (deg)	流速 $V_C$ (m/s)	流向* (deg)	風速 $U_w$ (m/s)	最大風速 $U_{wmax}$ (m/s)	風向
K-1	83.12/13	13:39 ~14:39	0.5	6.0	0.60	5.6	12	0.13	10	2.5	4.4	WSW
K-2	83.12/13	16:01 ~17:01	0.5	8.0	0.45	6.1	27	0.13	8	4.8	5.1	W
K-3	83.12/14	9:29 ~10:29	0.75	5.6	0.73	5.8	353	0.13	3	5.5	7.0	WNW
K-4	83.12/14	13:25 ~14:25	0.7	4.6	0.59	4.6	348	0.13	7	10.0	10.7	WNW
N-1	84.2/21	13:29 ~14:29	0.75	16.0	0.70	11.3	329	0.22	7	6.9	8.3	W
N-2	84.2/21	15:28 ~16:28	0.8	19.4	0.63	11.5	331	0.16	353	6.1	7.5	WNW
N-3	84.2/22	10:15 ~11:15	1.5	12.6	0.65	5.9	12	0.09	205	5.6	6.4	WNW
N-4	84.2/22	13:58 ~14:58	1.2	7.9	0.67	4.9	3	0.05	248	5.4	5.6	W

\* 波向, 流向は北を  $0^\circ$ 、時計回りに正とする。

Case K-1 ~ K-4 の観測時には、27万DWTのタンカー-K丸が係留されており、Case N-1 ~ N-4 には、24万DWTタンカー-N丸が係留されていた。KおよびN丸のおもな諸元は、表-1に示している。表-5において、波高、周期は、AとD地点で観測された有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の値を示し、解析には、波形データの得られるD地点のものを用いた。波向についてはA地点の観測値で、波のスペクトルのピーク周波数に対する成分波の平均波向を波向として示している。

潮流は、A地点の水面下-10と-30mの2点で観測されており、タンカーとブイに対して影響が大きいと推定される-10mの点の1時間平均流速、流向を示した。風は、C地点における観測値で、10分間平均風速の1時間平均風速 $\bar{U}_w$ と10分間平均風速の最大値 $U_{wmax}$ および1時間最多風向を示した。各観測地点A、C、Dは2.1で述べた地点である。

Case K-1 ~ 4の観測において、Case K-1の観測時には $\bar{U}_w = 2.5$  m/sと小さかったが、タンカーが空載状態になるにつれて風速が大きくなり、Case K-4の観測時点では、 $\bar{U}_w = 10$  m/sに達した。風向はW方向の陸風である。Case K-1 ~ 4の有義波高 $H_{1/3}$ はほぼ0.5 ~ 0.7 mで、有義波周期 $T_{1/3}$ はほぼ4.5 ~ 6秒であった。流向はほぼNからS方向へ流れ、流速はほぼ一定で0.13 m/sであった。

Case N-1 ~ 4の観測において、風速はほぼ7から5.4 m/sとCase N-1からCase N-4の観測に移るにつれて小さくなった。風向はW方向の陸風である。波浪については、Case N-3とN-4の場合にAとD地点で観測された有義波高、有義波周期に大きな差がみられ、A地点の観測値がD地点のものより約2倍大きくなっている。

Case N-3およびN-4の観測時における目視観測によると、波高は約0.7 mとなっていることから、A地点の波浪観測ブイにトラブルが起こっていたと考えられる。そこで、解析には、D地点の波浪観測値を用いることにした。Case N-1とN-2では有義波高 $H_{1/3}$ がそれぞれ0.7、0.63 m、有義波周期 $T_{1/3}$ がそれぞれ11.3、11.5秒と他のケースに比べて長い。また、潮流は、流速が0.22、0.16 m/sと他のケースより大きく、流向はほぼNからS方向へ流れている。Case N-3とN-4では、有義波高 $H_{1/3}$ がそれぞれ0.65、0.67 mで、有義波周期がそれぞれ5.9、4.9秒であった。また、潮流は、流速が0.09、0.05 m/sと小さく、方向はほぼSWからNE方向へ流れていた。

## (2) ブイ傾斜角と傾斜方位角および係船索張力

前節3.1で述べた手法を用いて、ブイ傾斜角 $\delta$ と傾斜方位角 $\theta_N$ を求め、 $\delta$ と $\theta_N$ および係船索張力 $T_R$ の時系列波形と海気象条件を図-8に示す。図-8(a)は観測ケー

ス中風速が一番大きいCase K-4を、図-8(b)は流速の大きいCase N-1を示している。

図-8(a)および(b)ともに、No=1から4の4枚の図で1時間観測の時系列を示している。図中上段欄外には、10分間における最多風向を示す。図において上から $\theta_N$ の時系列波形を実線で、有義波高 $H_{1/3}$ を一点鎖線で、 $\delta$ の時系列波形を実線で、10分間平均風速 $U_w$ を破線で、 $T_R$ の時系列波形を実線で示した。横軸には観測時刻を示した。タンカーは、2本の係船索で係留されているので、張力の測定は2本の索それぞれについて行っている。図-8における係船索張力 $T_R$ は同時刻において測定された2つの張力を合成した値を示している。

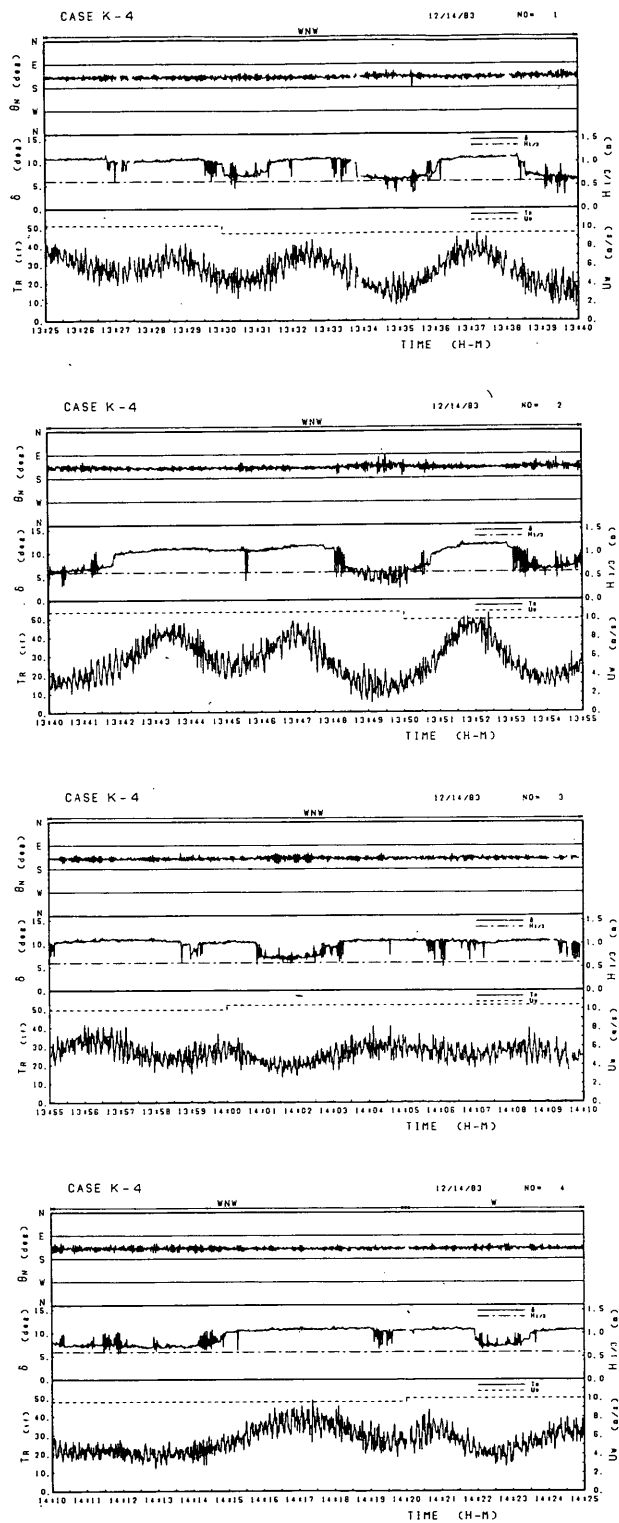
図-8においてCase K-4とN-1ともに傾斜方位角 $\theta_N$ は、短周期変動成分を無視すると観測期間中はほぼ一定でSE方向を示している。レーダー観測によると、タンカーは常に係船索の方向を向いており、タンカーの船軸方向と係船索の方向とがずれることはなかった。係船索に張力が働いているときは、短周期の変動成分を除いたブイの傾斜方位角 $\theta_N$ は常に係船索張力の方向、つまり、係船索の方向にあると考えることができる。このことから、タンカーの船首から船尾に向う方位は、短周期の変動成分を除いた $\theta_N$ に一致していると推定される。

このように考えると、Case K-4で、 $\theta_N$ がSE方向になったのは、風向がWNWであるのに対して、潮流がNからS方向に流れているため、潮流によってタンカーの船尾方向への軸がS方向に傾き、SE方向を向いたためだと推測される。Case N-1の場合も、風向がWとCase K-4とわずかに異なっているけれども、潮流の方向は同じであり、Case K-4と同じ現象が生じたものと考えられる。

風向に対するブイの傾斜方位角 $\theta_N$ のずれは、Case N-1の場合よりCase K-4の場合が小さい。これは、Case K-4では、風速がCase N-1の場合より大きく、タンカーが空載状態に近くて吃水が浅いため風荷重を受けるタンカーの受圧面積が大きくなって、流圧力より相対的に風圧力が大きくなり、タンカーがブイを風下方向に引張ったためである。さらに、Case N-1の場合、流速がCase K-4より大きく、タンカーが満載状態に近く吃水が深いため流圧力を受けるタンカーの受圧面積が大きく、それだけCase K-4の場合より流向方向へタンカーが傾き、その方向にブイが引張られたと考えられる。このように、係留時のブイの平均的傾斜角の方向は、タンカーが係留している場合、風と潮流の速度および方向とタンカーの載荷状態が大きく影響している。

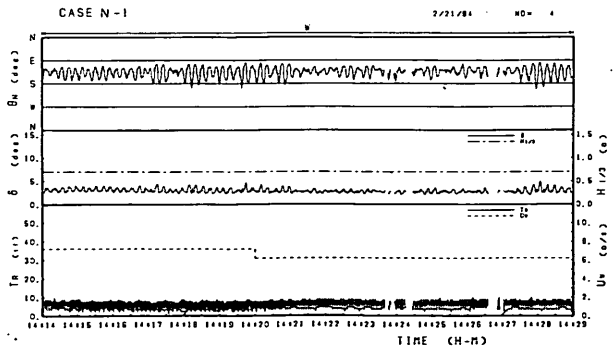
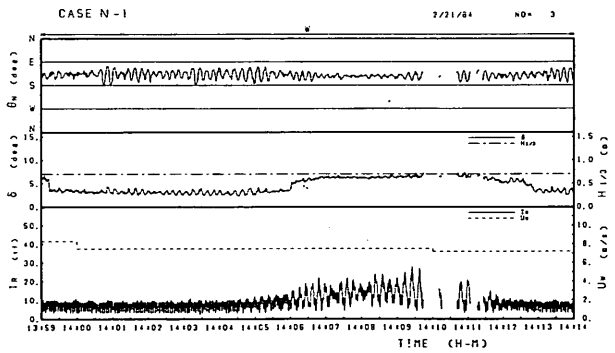
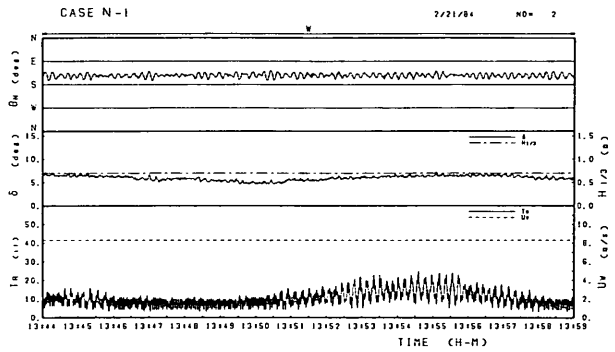
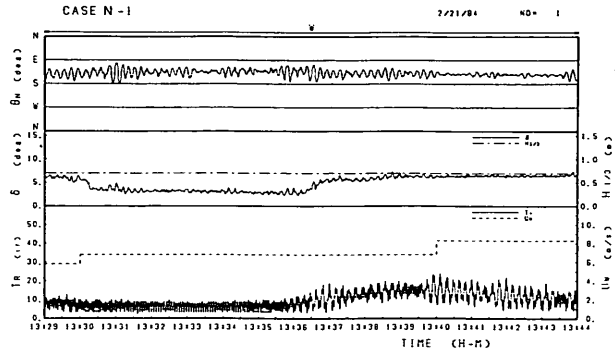
傾斜方位角 $\theta_N$ は、短周期の変動成分を除けばほぼ一定





(a) Case K-4

図-8 ブイ傾斜角と傾斜方位角および係船索張力の時系列波形図



(b) Case N-1

値であることから、タンカーは大きな振れ回り運動を起していないと推定される。

図-8(a)のCase K-4におけるブイ傾斜角 $\delta$ と係船索張力 $T_R$ の変動をみてみると、 $T_R$ が約20tf以上では、 $\delta$ の短周期変動振幅は非常に小さく、 $\delta$ は10~12°を中心に2°程度であるのに対し、 $T_R$ が約20tf以下では、 $\delta$ は5~6°を中心に5°程度の変動振幅が生じている。これは、 $T_R$ が大きい場合には、ブイ係留チェーンと係船索による大きな力でブイが抱束され、そのためブイが運動しにくいのに対して、 $T_R$ が小さい場合これらの張力が小さくなり、抱束が弱くなってブイが運動しやすくなることによる。

一方、図-8(b)のCase N-1では、 $T_R$ が小さな値であっても $\delta$ の短周期変動振幅は2~3°とCase K-4に比べると小さい。また、 $\delta$ の短周期変動の周期もCase K-4の場合に比べると長くなっている。Case N-1におけるこのような $\delta$ の短周期変動の特性は、来襲波の周期が11秒とCase K-4の場合より2倍程度長いことによっている。これについては、次項(3)で詳しく検討する。

図-8の係船索張力 $T_R$ とブイ傾斜角 $\delta$ の時系列波形には、Case K-1の場合に4~5分、Case N-1の場合に、10~20分の長周期変動成分が含まれている。係船索の設計時には最大係船索張力 $T_{Rmax}$ が重要である。そこで、 $T_{Rmax}$ の値において長周期変動と短周期変動成分のどちらが支配的になるかを検討した。長周期変動成分を取り出すため移動平均によって $T_R$ の短周期変動成分を除去した。移動平均は61個のデータを平均する操作を2回繰り返すことよって行った。

$\bar{T}_{Rmax}$ は移行平均値すなわち長周期変動成分の最大値として、 $\bar{T}_{Rmax}$ と $T_{Rmax}$ の比を計算し、最大係船索張力に対する長周期成分の占める割合を調べて結果を表-6

に示す。表中の $T_R max$ および $\delta max$ は1時間観測値における最大値である。また、表中の $T_{R1/3}$ および $\delta 1/3$ は、短周期変動成分における1024個のデータから算定した $T_R$ と $\delta$ の1/3最大値である。方位角 $\alpha$ は、ブイに設置した方位計によって測定された値で、磁北から係船索の方向までの角度であり、 $\alpha$ は各ケースとも大きな変動はなかった。

表-6において、Case K-1からK-4に観測時刻が移るにつれて $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ の比は0.6~0.8と大きくなる。これは、表-5に示しているように、10分間平均風速の最大値 $U_{wmax}$ が4~10m/sと大きくなると同時にタンカーの吃水も浅くなり、それだけタンカーに大きな風圧力が働くためである。波浪も観測時刻が経つに従って、Case K-1で0.5mであったものがCase K-4で0.75mに増大しているが、タンカーの吃水が浅くなるため、波力の変化はあまりなかったと推定される。

一方、Case N-1からN-4に観測時刻が経つに従って、 $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ の値は0.5~0.65と大きくなっているが、 $U_{wmax}$ は8.3~5.6m/sと逆に小さくなっている。これは、観測時間が経つに従ってタンカーの吃水が浅くなり、風荷重の受圧面積が大きくなって、風速の減少による風圧力の減少より受圧面積の増大による風圧力の増大が大きかったためである。波浪については0.7m程度の波高でほとんど変化していないので、波浪は $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ の比にはあまり影響しなかったと推定される。このように風速と受圧面積つまり風圧力の大きさによって左右される。

$\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ に対する潮流の影響を調べるために、流速が0.22m/sと大きく吃水も深いCase N-1と流速が0.05m/sと小さく吃水の浅いCase N-4の場合について比較

表-6 ブイ傾斜角と係船索張力の統計量

観測 ケース	係船索張力				ブイ傾斜角		方位角 $\alpha^*$ (deg)
	$T_{Rmax}$ (tf)	$T_{R1/3}$ (tf)	$\bar{T}_{Rmax}$ (tf)	$\frac{\bar{T}_{Rmax}}{T_{Rmax}}$	$\delta max$ (deg)	$\delta 1/3$ (deg)	
K-1	17.00	5.74	10.48	0.62	5.50	2.69	146
K-2	13.00	5.94	7.39	0.57	4.53	1.40	
K-3	38.00	9.45	21.13	0.71	7.44	2.39	
K-4	53.00	14.30	42.50	0.80	12.49	3.91	
N-1	28.00	9.69	15.70	0.56	7.46	0.99	155
N-2	39.00	7.11	19.69	0.50	7.53	1.40	
N-3	29.00	9.56	19.14	0.66	8.93	2.07	
N-4	22.00	7.88	13.39	0.61	8.97	2.46	

$\alpha^*$ は北を0°、時計回りを正とする。

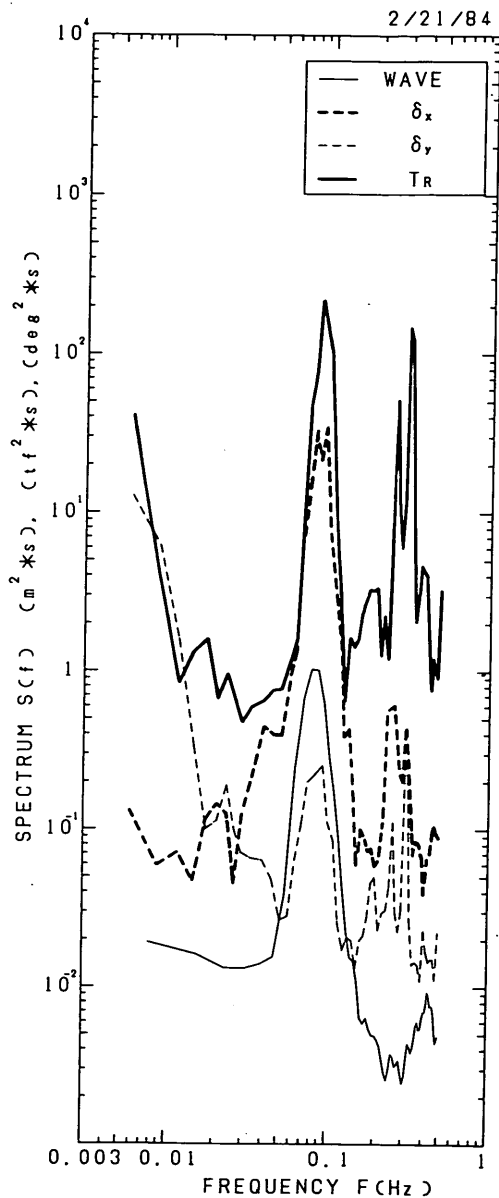
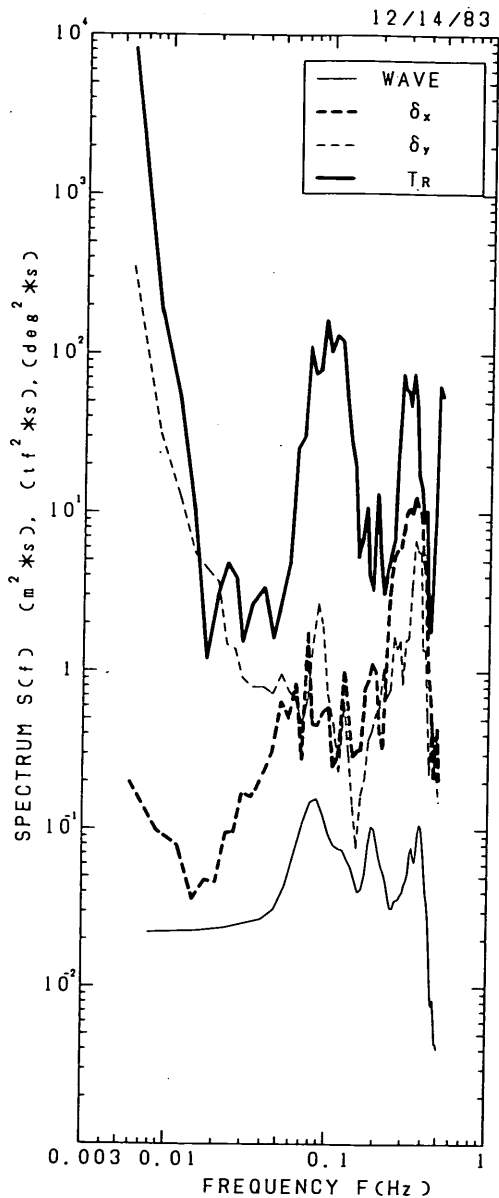


図-9 波とブイ傾斜角および係船索張力のスペクトル

を行った。 $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ の値は両者ともほぼ等しくなっており、このことは、流圧力より風圧力が $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ の比に大きく影響することを示している。

以上のことから、 $T_R$ の長周期成分はおもに風によって起こされ、タンカーの吃水も大きく影響することがわかった。また、風速が大きく、吃水が浅い場合には係船索に最も大きな力が働き、短周期成分より長周期成分が支配的になることも判明した。このことは、係船索およびブイ係留チェーンの設計においては、風による張力の長

周期変動に十分配慮しておくことが必要であることを示している。

(3) ブイ傾斜角および係船索張力の短周期変動の特性  
ブイ傾斜角 $\delta_x$ と $\delta_y$ および係船索張力 $T_R$ の短周期変動の特性を調べるために、スペクトル解析を行った。図-9(a)および(b)は、それぞれ図-8の(a)および(b)のCase K-4とN-1に関する $\delta_x$ 、 $\delta_y$ と $T_R$ のスペクトルを示している。図-9には、そのときの来襲波のスペクトルも載せてある。 $\delta_x$ 、 $\delta_y$ および $T_R$ のスペクトル解析は、1時間分

の観測値の中から、1024秒(1024個)のデータを用いて行い、波浪スペクトルは、時刻13:50~14:10間においてD地点で観測されたデータから求められたものを行っている。図-9において細実線が波、太破線が $\delta_x$ 、細破線が $\delta_y$ 、太実線が $T_R$ のスペクトルを示す。

図-9(a)のCase K-4の波のスペクトルには、約0.08, 0.18, 0.34, 0.38Hzにピーク値が存在しており、3つの波群の波が来襲していると考えられる。

$\delta_x$ のスペクトルには、波のピーク周波数にほぼ対応した約0.08と0.18および0.34Hzでピーク値がみられる。

これらの周波数付近におけるブイ運動成分は、波によって起こされたものと考えられる。 $\delta_y$ のスペクトルでも、波のピーク周波数に対応する約0.08と0.34Hzでピークがみられ、これらの運動成分は、 $\delta_x$ と同様に波によって生じたと考えられる。しかし、 $\delta_y$ のスペクトルでは、波のピーク周波数のうち0.18Hzに対応するピークは存在していない。

一点係留ブイは、3.1(3)で述べたように、2種類の振動モードを持つ。Mode1の固有振動は、ブイ係留点を中心とした振り子のような運動で、固有振動数は約0.04Hzである。また、Mode2の固有振動は、ブイの重心回りの回転運動で、固有振動数は約0.25Hzである。

これらの固有振動モードの発生について調べてみると、0.04HzにおけるMode1の運動は、 $\delta_x$ および $\delta_y$ ともに現れていない。Mode1の固有振動は、係船索で抱束されているため、ブイの運動に現れなかったものと推定される。また、0.25HzにおけるMode2の運動は、 $\delta_x$ および $\delta_y$ ともにこの固有周波数より少し高い0.28Hzにおいて少し生じている。

$\delta_x$ 、 $\delta_y$ のスペクトルを比較してみると、0.08Hz付近で $\delta_y$ が大きく、それより高周波数側では $\delta_x$ が大きくなっている。この原因を調べるために、波向と磁北からの方位角 $\alpha$ との関係を調べてみた。波向と $\alpha$ の値については、それぞれ表-5および表-6に示されている。ただし、表-5に示す波向は、波のエネルギーが最も大きい成分波の方向を示しているため、この場合0.08Hzの波向となる。

これらの表によると、波向は348°方向で、 $\alpha$ は146°となっており、波は $\alpha$ 方向から時計回りに22°ずれた方向から来襲していることになる。 $\delta_y$ の値は、方位角 $\alpha$ 方向の傾斜角を示しているため、波向となる0.08Hzの来襲波と $\delta_y$ が近いから、0.08Hzで $\delta_y$ が大きくなったと考えられる。0.08Hzより高周波側で $\delta_x$ が $\delta_y$ より大きくなった原因としては、Case K-4では、係船索に1/3最大値で41.12tfの大きな張力が作用したため、係船索張力が作用す

る方向へブイは強く抱束されるのに対して、直角方向(傾斜角 $\delta_x$ の方向)は、ブイが比較的運動しやすいことによると考えられる。

$T_R$ のスペクトルは、波のピーク周波数0.08, 0.18および0.34Hzに対応する周波数でピークが存在する。また0.28Hzでもピークが存在している。0.28Hzにおけるピークは、Mode2のブイの固有振動が発生しているものと考えられる。 $T_R$ のスペクトルは、係船索の方向が $\delta_y$ の傾斜を起す方向にあたるため、 $\delta_y$ のスペクトルとよく似た形を示している。

図-9(b)のCase N-1の場合波のスペクトルには、約0.08Hzに明りょうなピークと0.43Hzの高周波数側にもピークが存在しているが、高周波数側のピークは非常に小さく、ほぼ山型スペクトルとみなすことができる。 $\delta_x$ のスペクトルには、波のピーク周波数に一致する0.08Hzとそれより高周波数側の約0.25と0.3Hzにピークが存在している。0.25Hzの周波数は、Mode2の固有振動周波数に一致しており、Mode2の運動が生じていることがわかる。0.3Hzの周波数の運動成分は、タンカー非係留時には現れず、タンカー係留時のみ現れている。この運動成分は他のケースでも見られる。 $\delta_x$ のスペクトルは1024秒(約17分)間の観測データから算定しているため、係船索張力が小さいときと大きいときの両方のデータが含まれている。そのため、同じMode2の運動でも係船索張力が小さいときは、非係留時の固有振動数と同じになり、大きいときには係船索張力による抱束で多少固有振動数が高くなったものと推定される。 $\delta_x$ 方向は、係船索張力の作用方向と直交しているため、Mode2の0.25Hzが生じやすく、そのため、0.25Hzにおけるスペクトルが0.3Hzのものより大きくなったものと思われる。また、 $\delta_x$ の場合にはMode1の固有振動も係船索が小さい場合に生じやすく、0.04Hzに小さなピークが見られる。 $\delta_x$ のスペクトルは、 $\delta_x$ と一致した周波数でピークがみられる。 $\delta_y$ の場合と同様に、波とMode2の運動によるものである。 $\delta_y$ 方向は係船索張力の方向にあり、張力の影響が強くなるため、0.3Hzにおけるスペクトルは、0.25Hzにおけるものより大きくなったと考えられる。 $\delta_y$ の場合Mode1の固有振動は、係船索張力によって運動が抱束されるため生じていない。

波のピーク周波数付近で $\delta_x$ 、 $\delta_y$ のスペクトルに大きな差がみられ、 $\delta_x$ のスペクトルが $\delta_y$ のものより非常に大きい。この差は、波向によって生じたと考えられる。そこで、前述の図-9(a)の場合と同様に波向と方位角 $\alpha$ の関係を調べた。波向が330°方向で $\alpha$ が155°であることから、 $\alpha$ 軸上から時計回りに5°ずれた方向に波向が存在していることになる。 $\alpha$ 軸方向は $\delta_y$ の傾斜方向であるため、波は

$\delta_y$ を大きくするはずであるが、実際には $\delta_x$ が大きくなっている。これは、3.3(1)で述べたように、Case N-1~4の場合のA地点の波浪観測値は、D地点のものとかんがわりずれており、信頼性が乏しく、そのため、A地点で得られた波向も信頼性が乏しいと考えられる。また、Case N-1の場合の来襲波は、うねり性の波であるため、外洋側から来ると予想されるが、前述のように波向は $330^\circ$ と西側、つまり陸側から来襲することになり、これからも波向の信頼性が乏しいことがわかる。Case N-1~4を観測した2月21日~22日はオホーツク海低気圧が発達しており、この低気圧によって発生された波がうねりとなって到達したとすると、波はNE方向から来襲したことになる。この方向は $\alpha$ 軸に対して直角方向つまり $\delta_x$ 方向から波が来襲したことになる。このように波向を考えると、 $\delta_x$ のスペクトルが $\delta_y$ のものより大きくなったことの説明がつく。

$T_R$ のスペクトルは、 $\delta_y$ のスペクトルと類似の形を示し

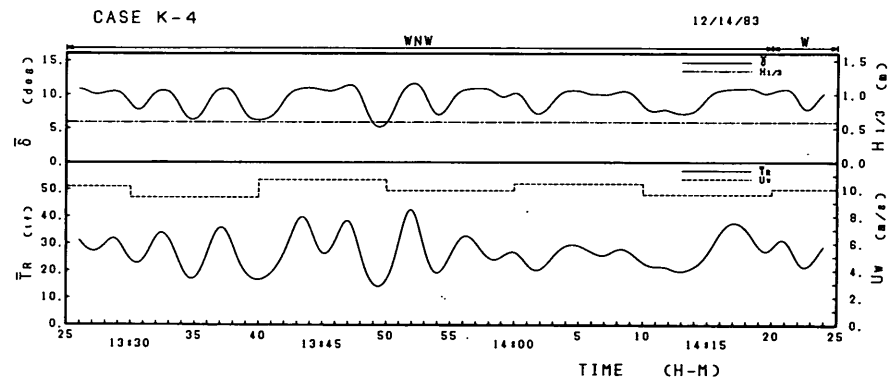
ており、周波数0.08, 0.25および0.3Hzでピークを持つ。このように、 $T_R$ の短周期変動はブイの運動のうち $\delta_y$ の方向の運動で生じていることがわかる。

Case K-4およびN-1のどちらにおいても0.02Hz以下の低周波数側で、 $T_R$ と $\delta_y$ のスペクトルは共に非常に大きくなっている。この低周波数のエネルギー密度は、タンカーの長周期運動によって生じてきたものである。

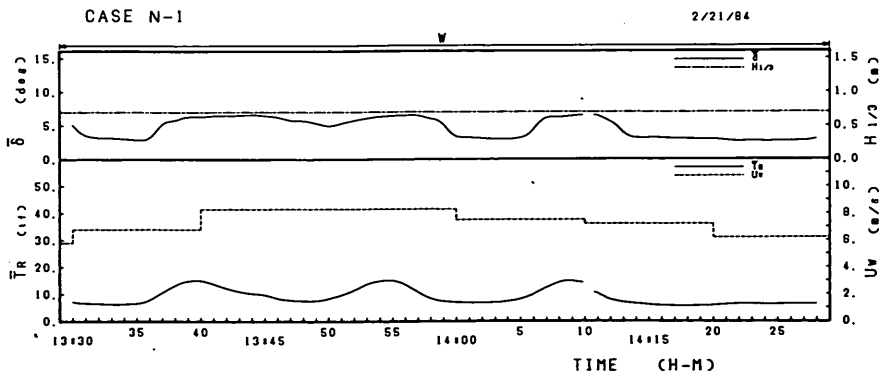
図-8に示したブイ傾斜角 $\delta$ の時系列波形において、Case N-1での短周期変動の周期がCase K-4の場合より長くなったのは、図-9でわかるようにCase N-1の場合、0.08Hz付近における波によるブイの運動が卓越するのに対し、Case K-4の場合、0.25Hzあるいは0.28HzにおけるMode2のブイの運動が卓越することによっている。

(4) ブイ傾斜角と係船索張力の長周期変動成分の特性

図-10は、3.3(1)で述べた移動平均によって、ブイ傾斜角 $\delta$ と係船索張力 $T_R$ の時系列波形から短周期変動成分



(a) Case K - 4



(b) Case N - 1

図-10 ブイ傾斜角と係船索張力の移動平均時系列波形

を除去した長周期変動成分の  $\bar{\delta}$  と  $\bar{T}_R$  を示している。図-10(a)および(b)は、それぞれ図-8(a)および(b)の長周期波形を示している。

図-10において図の上段欄外には、10分間における最多風向を示す。図中には  $\bar{\delta}$  と  $\bar{T}_R$  の長周期変動の時系列波形を実線で示し、有義波高  $H_{1/3}$  を一点鎖線で、10分間平均風速  $U_w$  を破線で示した。横軸には観測時刻を示した。

図-10(a)の Case K-4 では、 $\bar{T}_R$  の変動周期は 4~6 分、変動幅は 12~25tf 程度である。 $\bar{\delta}$  は  $\bar{T}_R$  が大きくなると大きくなり、 $\bar{\delta}$  の変動は  $\bar{T}_R$  の変動によく対応している。しかし、時刻 13:45 付近のように  $\bar{T}_R$  が約 25tf 以上になると、 $\bar{T}_R$  の変動ほどには  $\bar{\delta}$  は変動しておらず、 $\bar{\delta}$  は 10~12° 程度で、ほぼ一定値になる。なお、時刻 14:00 以前は  $\bar{T}_R$  の変動幅は 12~25tf と大きい、時刻 14:00 以降、10分間平均風速  $U_w$  は以前と同じく約 10m/s であるのに対し、変動幅が 5tf 以下になっている。この原因としては、波浪の変化が考えられるが、2時間ごとのデータしかないので詳細は不明である。

図-10(b)における Case N-1 の場合には、 $\bar{T}_R$  の変動周期は 15~20 分で、変動幅は 10tf 程度である。Case K-4 に比べ変動周期が長く  $\bar{T}_R$  の変動もかなり小さい。

$\bar{T}_R$  および  $\bar{\delta}$  の長周期変動の原因として、タンカーが振れ回り運動を行っていないことから、一点係留ブイ全体をバネとするタンカーのサージング固有周期によると推定される。そこで次式<sup>5)</sup>を用いてサージング固有周期を求めた。

$$T_L = 2\pi \sqrt{\frac{(M_S + M_{zz})}{K_L}} \quad (9)$$

ここに、

$T_L$  : サージング固有周期

$M_S$  : 船の質量 (表-8 参照)

$M_{zz}$  :  $x$  軸(船軸)方向の船体の付加質量 (表-8 参照)

$K_L$  : 一点係留ブイシステム全体のバネ係数 (図-22 参照)

Case K-4 では、 $T_L=312$  秒と観測値とよく一致した。Case N-1 では、 $T_L=536$  秒と観測値より短くなった。他のケースについても比較を行った結果、観測値の  $\bar{T}_R$  の変動周期とサージング固有周期がほぼ一致した。このことから、 $\bar{T}_R$  の変動は、サージング固有周期に近い周期で変動しており、外力として風や潮流が挙げられる他に波浪による長周期変動も若干含まれると考えられるが、どの程度影響しているかは明らかでない。

27万 DWT のタンカー T 丸が荷役しているときに、天候の悪化で荷役を中断して離標することが起こった。図-11はこのときにタンカーの係船索に発生した張力のアナログ記録を、離標前約 10 時間にわたって示したものである。タンカーは 2 本の係船索で係留されているので、図-11には左右の係船索それぞれにかかった張力が示されている。ただし、実際のアナログ記録では短周期の変動成分が入っているが、図-11ではこの短周期変動成分は除いている。

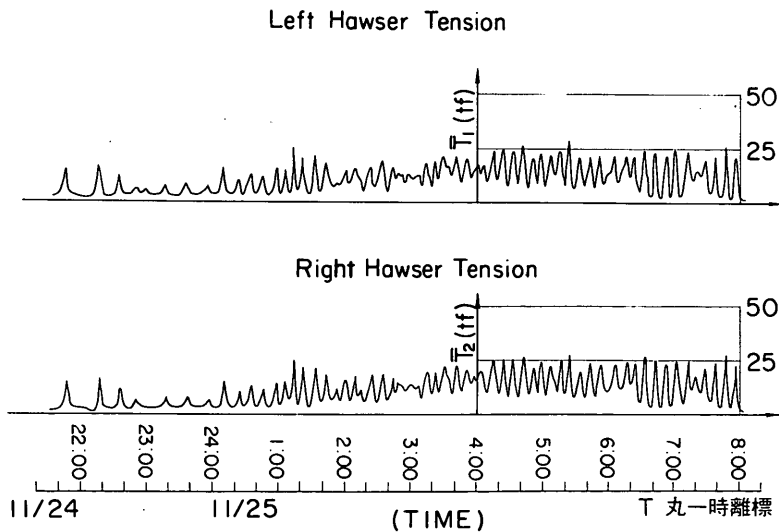


図-11 左右係船索張力の長周期変動波形

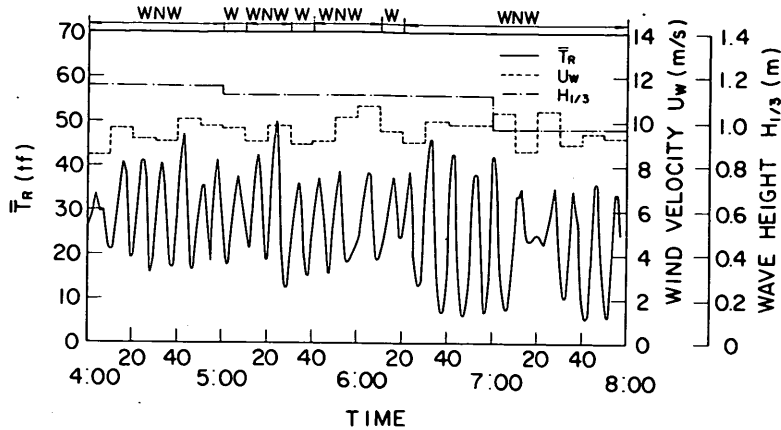


図-12 左右あわせた係船索張力の長周期変動波形

昭和58年11月24日22時に風速が6.6m/s、有義波高が0.7mであったものが、明るる日の11月25日2時には風速が9.2m/s、有義波高が1.1m/sさらに、同じ日の6時には風速9.2m/s、有義波高1.0mとなって、天候の悪化でさらに風速が大きくなると考えられたので、25日8時にはタンカーは一時離標した。

図-11から、左右の係船索張力にどちらもほぼ同じ最大張力が働き、その値は、11月24日22:00~24:00で17tf、11月25日0:00~4:00で25tf、4:00~8:00で27tfであった。

図-12は、タンカー離標直前のAM4:00~8:00までの4時間における左右の係船索張力 $T_1$ と $T_2$ の合成張力 $T_R$ と海気象条件を示している。図の上段欄外には、10分間における最多風向を示す。図中には、係船索張力 $T_R$ を実線で示し、10分間平均風速 $U_w$ を破線で示し、有義波高 $H_{1/3}$ を一点鎖線で示した。横軸には観測時刻を示した。

表-7には、4:00~8:00における波浪、潮流、風の平均諸元およびこの時間内の最大係船索張力 $T_{Rmax}$ と1/3最大張力 $T_{R1/3}$ を示している。

図-12において、 $T_R$ の変動幅は10~40tfになっており、風速がほぼ10m/sと等しかった前述のCase K-4の変動

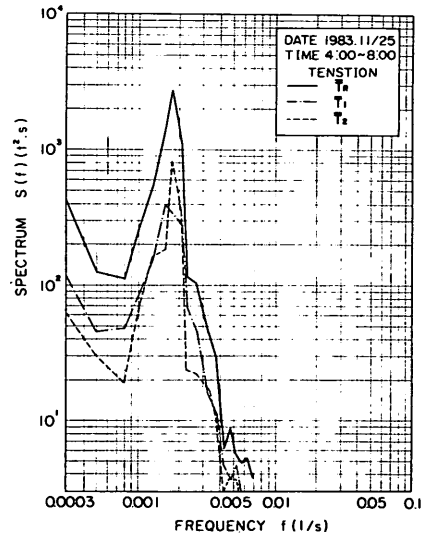


図-13 係船索張力のスペクトル

表-7 タンカー係留時の海気象条件

タンカー係留時		波 浪				潮 流		風		係船索張力	
観 測	地 点 項 目	A		D		A		C		B	
		有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	流 速 $V_c$ (m/s)	流 向* (deg)	風 速 $U_w$ (m/s)	風 向	最大値 $T_{Rmax}$ (tf)	1/3最大値 $T_{R1/3}$ (tf)
ケ-ス	年.月/日 時刻										
T	5811/25 4:00~8:00	1.1	8.4	1.08	9.3	0.30	354	9.5	WNW	50.49	44.71

\* 流向は北を0°、時計回りを正とする。



幅12~25 tfより大きな変動を示している。また、このときの最大係船索張力 $\bar{T}_{Rmax}$ は505 tfに達している。Case Tの係船索張力がCase K-4の場合より大きくなったのは、潮流および波高ともCase K-4の場合より約2倍程度大きくなっているためだと考えられる。

図-13には、4:00~8:00における $\bar{T}_R$ および左右の係船索張力 $\bar{T}_1$ と $\bar{T}_2$ のスペクトルを示している。図-13で $\bar{T}_R$ を実線、 $\bar{T}_1$ を一点鎖線、 $\bar{T}_2$ を破線で示す。図-13において、 $\bar{T}_R$ 、 $\bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_2$ のどのスペクトルにおいても、周波数0.0018Hz、周期約9分に明りょうなピークが存在している。周期特性から、タンカーのサージング運動の固有周期に近く、風や潮流および波浪が外力となって生じたものと推定される。

#### 4. 観測値による数値計算法の検討

##### 4.1 数値計算の方法

3.3で示したように、 $T_R$ と $\delta$ の変動は、波とブイの固有振動によって生じる短周期変動成分と、風と潮流によって生じる長周期変動成分から成っており、風速が強くなると長周期変動成分が顕著になる。したがって、ブイの係留チェーンおよび係船索の設計においては、係船索張力の長周期変動を検討しておくことが重要となる。そのためには、風および流れの中での係留船舶の運動およ

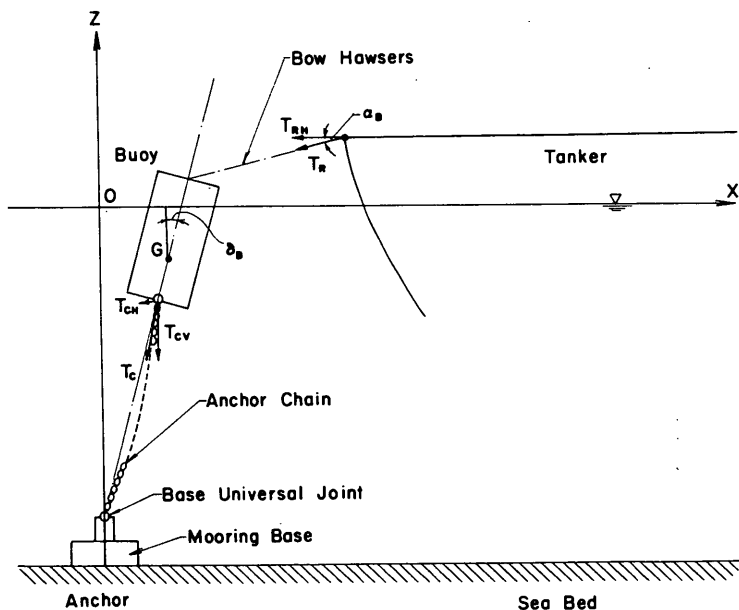
び係船索張力の計算法を開発することが必要である。

船舶の水平運動および係船索張力を求める計算法はいくつかあるが、本章で検討した計算法は鈴木ら<sup>2)</sup>が開発し、著者ら<sup>6)</sup>が一部修正したものである。この計算法については、鈴木らが、一樣風のみを作用させた室内実験でその妥当性を検討しているが、風が一樣でなく、流れの影響も受ける現地では、その妥当性を検証していない。そこで、本章では、3.3で述べた観測結果と数値計算結果とを比較して、数値計算法の適用性およびその問題点等を調べた。

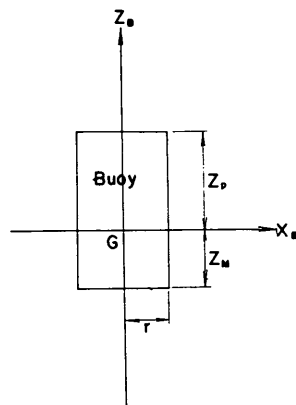
##### (1) 係船索張力とブイ変位との関係

数値計算の手法は、前記の文献2), 6)において詳述されているので、ここでは、その概略および、最終的な計算式のみを記述する。

まず、船体にかかる外力のうちで、係船索張力については、船体における係船索の取り付け点の水平変位と係船索張力との関係をあらかじめ求めておかなければならない。船体が動揺し係船索の取り付け点が移動すると、係船索には張力が働く。この張力によって一点係留ブイは変位と回転を起こす。そのため、係船索張力は係留ブイにかかる静水圧的復元力、ブイ係留チェーン張力および係船索張力との間の釣り合い方程式を解くことによって算定することができる。



(1) 空間固定座標



(2) ブイ固定座標

図-14 ブイ変位を求める座標系

ブイ変位を定める座標系を図-14のように設定する。係船索張力でブイが引張られると、ブイは係船索張力の方向に傾くと仮定する。座標系としては、ブイ係留チェーンのアンカーを通る鉛直軸と静水面との交点を原点として、水平方向をX軸、鉛直上方をZ軸とする空間固定座標系X-Zと、ブイ重心を原点として、ブイ底面に平行方向を $x_B$ 軸、中心軸の上方を $z_B$ 軸とするブイ固定座標系 $x_B-z_B$ をとった。図-14において、 $T_R$ が係船索張力、 $T_C$ がブイ係留チェーン張力を示す。また、係船索はブイ上面中央部、ブイ係留チェーンはブイ底面中央部に取り付けられるものとし、ブイ上面とブイ重心との距離を $z_P$ 、ブイ底面とブイ重心との距離を $z_M$ とした。また、ブイの半径を $r$ とした。さらに、係船索が水平方向となす角を $\alpha_B$ 、ブイの鉛直方向からの傾きを $\delta_B$ 、ブイ係留チェーン張力の水平成分、鉛直成分をそれぞれ $T_{CH}$ 、 $T_{CV}$ 、ブイの質量を $M_B$ とする。そして、ブイに作用する静水圧的復元力のブイ固定座標方向の成分を $F_x$ 、 $F_z$ 、ブイ重心まわりの静水圧によるモーメントを $M_y$ で表すと、ブイに関する釣合い方程式は次式ようになる。ここで角度はすべて反時計回りを正としている。

$$T_R \sin(\alpha_B + \delta_B) + F_z = M_B g \cos \delta_B + T_{CH} \sin \delta_B + T_{CV} \cos \delta_B \quad (10)$$

$$F_x + T_{CH} \cos \delta_B = T_R \cos(\alpha_B + \delta_B) + M_B g \sin \delta_B + T_{CV} \sin \delta_B \quad (11)$$

$$M_y + T_R z_P \cos(\alpha_B + \delta_B) - T_{CH} z_M \cos \delta_B = -T_{CV} z_M \sin \delta_B \quad (12)$$

ブイにかかる静水圧的復元力やモーメントは、鈴木ら<sup>2)</sup>によると、ブイの上面が完全に水表面上にある場合、ブイの上面の一部が水没している場合およびブイの上面がすべて水没している場合の3種類に分けて、以下のように求められている。なお、式中の $\theta_B$ は、図-15に示したブイ上面の水没面積を表す角度である。また $\rho_w$ は海水

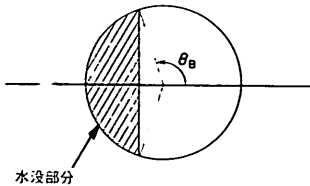


図-15 半没水ブイの上面

の単位体積重量:  $Z_{GB}$  はブイ重心のZ座標である。

(i) ブイの上面が完全に水面上にある場合

$$F_x = -\rho_w g r^2 \left( \frac{Z_{GB}}{\cos \delta_B} + z_M \right) \sin \delta_B \quad (13)$$

$$F_z = -\rho_w g r^2 \left( \frac{Z_{GB}}{\cos \delta_B} + z_M \right) \cos \delta_B \quad (14)$$

$$M_y = -\frac{1}{2} \rho_w g r^2 \left( \frac{\cos^2 \delta_B + 1}{4 \cos^2 \delta_B} r + \frac{Z_{GB}^2}{\cos^2 \delta_B} - z_M^2 \right) \sin \delta_B \quad (15)$$

(ii) ブイの上面の一部が水没している場合

$$\begin{aligned} F_x = & \rho_w g r \left[ r \left\{ z_P \left( \frac{\pi}{2} + \theta_B \right) - z_M \pi \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{Z_{GB}}{\cos \delta_B} \left( -\frac{\pi}{2} + \theta_B \right) \right\} \sin \delta_B \right. \\ & \left. - \left\{ z_P (2Z_{GB} + z_P \cos \delta_B) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{4Z_{GB}^2 + 3r^2 \sin^2 \delta_B}{4 \cos \delta_B} \right\} \cos \theta_B \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} r \left( z_P + \frac{Z_{GB}}{\cos \delta_B} \right) \sin \delta_B \sin 2\theta_B \right. \\ & \left. + \frac{r^2 \sin^2 \delta_B}{12 \cos \delta_B} \cos 3\theta_B \right] \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_z = & \rho_w g r^2 \left[ \left\{ z_P \left( \frac{\pi}{2} + \theta_B \right) - z_M \pi \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{Z_{GB}}{\cos \delta_B} \left( \frac{\pi}{2} - \theta_B \right) \right\} \cos \delta_B - \frac{2r}{3} \sin \delta_B \cos^3 \theta_B \right. \\ & \left. + \frac{z_P \cos \delta_B + Z_{GB}}{2} \sin 2\theta_B \right] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_y = & \rho_w g r^2 \left[ \frac{r}{2} \left\{ \left( z_P^2 - \frac{r^2}{2} \right) \left( \frac{\pi}{2} + \theta_B \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - \left( z_P^2 - \frac{r^2}{2} \right) \pi \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{4Z_{GB}^2 + r^2 \sin^2 \delta_B}{4 \cos^2 \delta_B} \left( \frac{\pi}{2} - \theta_B \right) \right\} \sin \delta_B \right. \\ & \left. - \left\{ \left( z_P^2 - \frac{r^2}{2} \right) Z_{GB} + z_P \left( \frac{2}{3} z_P^2 - \frac{r^2}{2} \right) \cos \delta_B \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{4Z_{GB}^2 + 9r^2 Z_{GB} \sin^2 \delta_B}{12 \cos^2 \delta_B} \right\} \cos \theta_B \right. \\ & \left. - \frac{r}{4} \left( z_P^2 - \frac{3Z_{GB}^2 + r^2 \sin^2 \delta_B}{3 \cos^2 \delta_B} \right) \sin \delta_B \sin 2\theta_B \right. \\ & \left. - r^2 \left( \frac{Z_{GB} \sin^2 \delta_B}{12 \cos^2 \delta_B} - \frac{z_P \cos \delta_B + Z_{GB}}{6} \right) \cos 3\theta_B \right. \\ & \left. - \frac{r^3}{16} \left( \frac{\sin^2 \delta_B}{6 \cos^2 \delta_B} - 1 \right) \sin \delta_B \sin 4\theta_B \right] \quad (18) \end{aligned}$$

(iii) ブイの上面がすべて水没している場合

$$F_x = \rho_w g r^2 (z_P - z_M) \sin \delta_B \quad (19)$$

$$F_z = \rho_w g r^2 (z_P - z_M) \cos \delta_B \quad (20)$$

$$M_y = -\frac{1}{2} \pi \rho_w g r^2 (z_p^2 - z_M^2) \sin \delta_B \quad (21)$$

式(13)~(20)で示した左辺の復元力は  $Z_{GB}$  と  $\delta_B$  の関数である。ブイ係留チェーン取り付け点の空間固定座標における座標を  $(X_C, Z_C)$  とすると、 $Z_{GB}$  は次式で示される。

$$Z_{GB} = Z_C - z_M \cos \delta_B \quad (22)$$

したがって、 $F_x, F_z, M_y$  は、 $Z_C$  と  $\delta_B$  の関数となる。またブイ係留チェーン張力  $T_{CV}, T_{CH}$  は、 $(X_C, Z_C)$  からカタナリー理論によって計算できるので<sup>7)</sup>、 $X_C, Z_C$  の関数となる。さらに、係船索の傾き  $\alpha_B$  は、係船索の船首取り付け点の座標を  $(X_{SR}, Z_{SR})$ 、ブイ取り付け点の座標を  $(X_{SB}, Z_{SB})$ 、係船索長を  $l_R$  とすると次式で与えられる。

$$\alpha_B = \sin^{-1} \left( \frac{Z_{SR} - Z_{SB}}{l_R} \right) \quad (23)$$

ここで、 $X_{SB}, Z_{SB}$  は、 $X_C, Z_C$  の関数として

$$X_{SB} = X_C - (z_p + z_M) \sin \delta_B \quad (24)$$

$$Z_{SB} = Z_C + (z_p + z_M) \cos \delta_B \quad (25)$$

で示される。 $l_R$  は、係船索自体の伸び特性が判明しているものとすれば、 $T_R$  によって定まる。船首の沈み込みを無視すると、 $Z_{SR}$  は一定となるので、 $\alpha_B$  も  $Z_C$  と  $\delta_B$  の関数となる。以上のことから、釣り合い方程式(10)~(12)において、 $M_B, z_p, z_M, T_R, g$  を既知数とすると、未知数  $F_x, F_z, M_y, T_{CH}, T_{CV}, \alpha_B$  はすべて、 $(X_C, Z_C)$  および  $\delta_B$  のみの関数となる。そこで、まず、 $T_R$  の値を与えて、釣り合い方程式の誤差が許容値より小さくなるように、 $X_C, Z_C, \delta_B$  の最適解を繰り返し計算によって求める。 $T_R$  に対する  $X_C, Z_C$  および  $\delta_B$  の関係が求まると、未知数  $F_x, F_z, M_y, T_{CH}, T_{CV}, \alpha_B$  がすべて求まることになる。

その結果、船首の係船索取り付け点からアンカー点までの水平距離  $X_{SR}$  は次式で求められ、 $T_R$  に対する  $X_{SR}$  の関係が定まる。

$$X_{SR} = X_{SB} - l_R \cos \alpha_B \quad (26)$$

## (2) 船舶の振れ回り運動の計算方法

文献<sup>6)</sup>を引用して以下に、一点係留ブイに係留中の船体の運動に関する計算法の概略を示す。

### (a) 座標系

図-16に振れ回り運動計算の座標系を示す。静水面上を空間固定座標系  $X-Y$  平面とし、アンカー設置点を原点とする。 $X$  軸の正方向としては、本計算では磁北の方向とした。図-16に示すように  $Y$  軸は  $X$  軸と直角方向にとり、 $Z$  軸は鉛直上向を正とする。空間固定座標系  $X-Y$  に対して、船舶に固定された座標系  $x-y$  を考える。原点は船体重心の静水面上への投影点とし、重心から船首への船体の軸と  $x$  軸が一致するように、 $x$  および  $y$  軸を定める。 $z$  軸は重心を通り、鉛直上方を正としている。なお、計算では、 $X-Y$  平面における変位のみを計算するため、後述の計算式のなかで  $z$  の添字が付けられたものは、船体重心を通る鉛直軸まわりのモーメントであることを示し、反時計回りを正とする。

図-16において、 $\varphi$  は  $X$  軸と  $x$  軸のなす角で、 $X$  軸から、 $x$  軸へ向かい反時計回りを正とする。 $G$  は、船体重心の  $X-Y$  平面への投影点である。

なお、計算においては、流向、風向は一定とした。

船体固定座標系における力の成分  $P_x, P_y$  および重心を通る鉛直軸まわりのモーメント  $P_z$  と、空間固定座標系における力の成分  $P_X, P_Y, P_Z$  との間には、次式の関係が成立する。

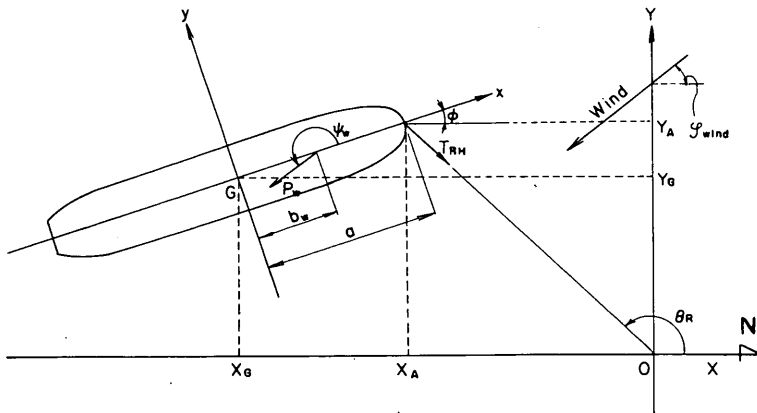


図-16 振れ回り運動の座標系

$$P_x = P_z \cos \varphi - P_y \sin \varphi \quad (27)$$

$$P_y = P_z \sin \varphi + P_x \cos \varphi \quad (28)$$

$$P_z = P_z \quad (29)$$

また各座標における速度の成分,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{\varphi}$  と  $X$ ,  $Y$ ,  $\dot{\phi}$  との関係は次のようになる。

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \quad (30)$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \quad (31)$$

$$\dot{\phi} = \dot{\varphi} \quad (32)$$

加速度の成分は, 次のようになる。

$$\ddot{X} = \ddot{x} \cos \varphi - \dot{x} \dot{\varphi} \sin \varphi - \dot{y} \dot{\varphi} \cos \varphi \quad (33)$$

$$\ddot{Y} = \ddot{x} \sin \varphi + \dot{x} \dot{\varphi} \cos \varphi + \ddot{y} \cos \varphi - \dot{y} \dot{\varphi} \sin \varphi \quad (34)$$

$$\ddot{\phi} = \ddot{\varphi} \quad (35)$$

### (b) 運動方程式

船体の質量を  $M_S$ ,  $z$  軸まわりの慣性モーメントを  $I_z$ , 空間固定座標  $X$ ,  $Y$  方向の外力成分を  $P_x$ ,  $P_y$ , 回転モーメントを  $P_z$  とすると, 空間固定座標系における船体の振り回り運動方程式は次のようになる。

$$M_S \ddot{X} = P_x \quad (36)$$

$$M_S \ddot{Y} = P_y \quad (37)$$

$$I_z \ddot{\phi} = P_z \quad (38)$$

上式に式(27)~(29)および(33)~(35)を代入して整理すると船体固定座標系における運動方程式として次式を得る。

$$M_S (\ddot{x} - \dot{y} \dot{\varphi}) = P_x \quad (39)$$

$$M_S (\ddot{y} + \dot{x} \dot{\varphi}) = P_y \quad (40)$$

$$I_z \ddot{\phi} = P_z \quad (41)$$

右辺の外力は船体に働く流体抵抗, 風圧力および係船索張力の和であり, 式で示すと次のようになる。

$$P_x = (P_{C1})_x + (P_{C2})_x + (P_{C3})_x \quad (42)$$

$$+ F_W \cos \psi_W - T_H \cos (\theta_R - \varphi)$$

$$P_y = (P_{C1})_y + (P_{C2})_y + (P_{C3})_y \quad (43)$$

$$+ F_W \sin \psi_W - T_H \cos (\theta_R - \varphi)$$

$$P_z = (P_{C1})_z + (P_{C2})_z + (P_{C3})_z + F_W b_W \sin \psi_W \quad (44)$$

$$- T_H a \sin (\theta_R - \varphi)$$

ここで,  $(P_{C1})_x$ ;  $(P_{C1})_y$ ,  $(P_{C1})_z$  は船体が静水中で周期的に運動することから生じる造波抵抗で, それぞれ,  $x$   $y$  方向の造波抵抗および  $z$  軸まわりの造波抵抗モーメントを表している。 $(P_{C2})_x$ ,  $(P_{C2})_y$ ,  $(P_{C2})_z$  は船体と水との相対速度によって生ずる流圧力の  $x$  方向,  $y$  方向成分および重心まわりのモーメントである。ただ流圧力につ

いては, 船体の真横成分が支配的であると言われているので,  $x$  方向成分  $(P_{C2})_x$  は 0 とした。 $(P_{C3})_x$ ,  $(P_{C3})_y$ ,  $(P_{C3})_z$  は船体の旋回に対する流体抵抗の  $x$  方向,  $y$  方向成分および旋回抵抗モーメントである。流圧力と同様に  $x$  方向成分  $(P_{C3})_x$  は 0 とした。

次に  $F_W$  は船体に働く風荷重であり,  $F_W$  の合力は船体重心から  $b_W$  離れた点に, 船体の  $x$  軸と  $\psi_W$  をなす方向に作用するものとする。

なお, 式(42)~(44)中の  $T_{RH}$  は船体に働く係船索張力の水平成分で,  $\theta_R$  は,  $T_{RH}$  の作用方向を示し, 図-17で示す角度である。 $a$  は船首と重心との距離である。

以上の式(42)~(44)は常微分方程式の形をとっているのだから, ルンゲ=クッタ法によって数値積分ができる。したがって, 各計算ステップごとに右辺の外力を計算すれば, その時の船体の変位を順次求めることができる。なお, 係船索張力は(1)で係船索張力とブイ変位との関係で示したように, 船首とアンカー(原点)との水平距離から求められる。そこで, 前タイムステップにおける船首位置から  $T_{RH}$  を求め, その値を, 次のタイムステップにおける計算の中で用いた。

### (c) 流体抵抗

ここで述べる流体抵抗には, 船体運動によって発生する波による造波抵抗, 船体と水との相対速度によって生ずる流圧力および船体の旋回に対する流体抵抗が含まれる。

造波抵抗は, 一般に, 連成項を無視すると次式のように表される。

$$(P_{C1})_x = -M_{xx} \ddot{x} - B_{xx} \dot{x} \quad (45)$$

$$(P_{C1})_y = -M_{yy} \ddot{y} - B_{yy} \dot{y} \quad (46)$$

$$(P_{C1})_z = -J_{zz} \ddot{\varphi} - B_{zz} \dot{\varphi} \quad (47)$$

$M_{xx}$ ,  $M_{yy}$ ,  $J_{zz}$  はそれぞれ船体の前後運動, 左右運動に対する付加質量および旋回運動に対する付加慣性能率である。 $B_{xx}$ ,  $B_{yy}$  および  $B_{zz}$  はそれぞれ  $x$  および,  $y$  方向の減衰力, 減衰モーメントの係数である。各付加質量および減衰力係数の値は静水中で行われた実験結果<sup>9)10)</sup>を基にして定めた。

流圧力については, 流れを作用させた場合も計算できるようにになっている。

いま,  $X$  軸の正方向と  $\phi_c$  という角度をなす方向から流速  $V_c$  の定常流が作用するものとする,  $x$  軸の正方向と流向とのなす角  $\phi_c$  は次のようになる。

$$\phi_c = \phi_c - \varphi \quad (48)$$

また,  $x$ ,  $y$  方向の相対流速はそれぞれ次式で表される。

$$V_{zr} = V_C \cos \varphi_C + \dot{x} \quad (49)$$

$$V_{yr} = V_C \sin \varphi_C + \dot{y} \quad (50)$$

合成流速は

$$V_T = \sqrt{V_{zr}^2 + V_{yr}^2} \quad (51)$$

となる。x 方向の流圧力成分  $(P_{C2})_x$  は 0 である。y 方向の流圧力成分は次のようになる。

$$(P_{C2})_y = -\frac{1}{2} \rho_w C_u (1 + dk_y) V_T^2 A_{SL} \sin \varphi_{Cr} \quad (52)$$

ここで、 $C_u$  : 真横からの流れに対する流圧力係数

$dk_y$  : 浅水影響係数

$A_{SL}$  : 水面下の船体の側面投影面積

$\varphi_{Cr}$  : 合成相対流速の方向

$$(\varphi_{Cr} = \tan^{-1} [V_{yr} / V_{zr}])$$

$dk_y$  の値としては、鈴木ら<sup>2)</sup>が採用した 0 ~ 0.3 を用いた。流圧力係数  $C_u$  は、従来 1.0 ~ 1.6 程度と報告されているが、今回の計算結果によると 1.0 ~ 1.6 では、観測結果とよく一致しなかった。そこで、後述するように観測結果と数値計算結果が最もよく一致する値を選んだ。

つぎに、y 方向の流圧力成分による重心まわりの回転モーメントは次式で与えられる。

$$(P_{C2})_z = (P_{C2})_y \times b_C \quad (53)$$

ここに、 $b_C$  は  $(P_{C2})_y$  の作用点の座標であり、次式から求められる。

$$b_C = \begin{cases} a - (0.2 + 0.0035 \times |\varphi_{Cr}|) \times L_{PP} & : |\varphi_{Cr}| < 135^\circ \\ a - 0.67 \times L_{PP} & : |\varphi_{Cr}| \geq 135^\circ \end{cases} \quad (54)$$

$$(55)$$

ここで、 $L_{PP}$  は船体の長さである。

最後に、船体の旋回に対する流体抵抗は、船体の各部分に作用する流体力の合力として、近似的に次式によって計算される。

$$(P_{C3})_y = - \int_{-(L_{PP}/2)}^{(L_{PP}/2)} \frac{1}{2} \rho_w C_{CR} \frac{A_{SL}}{L} \{ (\dot{\varphi}x + V_{yr}) | \dot{\varphi}x + V_{yr} | - V_{yr} | V_{yr} | \} dx \quad (56)$$

$$(P_{C3})_z = \int_{-(L_{PP}/2)}^{(L_{PP}/2)} \frac{1}{2} \rho_w C_{CR} \frac{A_{SL}}{L} (\dot{\varphi}x + V_{yr}) | \dot{\varphi}x + V_{yr} | x dx \quad (57)$$

ここで、 $C_{CR}$  は旋回抵抗係数で鈴木らが行った実験と

計算との比較から 3.0 とした。x 方向の旋回抵抗成分  $(P_{C3})_x$  は  $(P_{C2})_x$  と同様に 0 とした。

#### (d) 風荷重

風荷重の計算には「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(日本港湾協会発行)にも採用されている文献<sup>11)</sup>の結果を用いた。

まず、風荷重は次式で表した。

$$F_W = \frac{1}{2} \rho_a C_W U_{Wr}^2 (A_T \cos^2 \varphi_{Wr} + A_L \sin^2 \varphi_{Wr}) \quad (58)$$

ここで、 $F_W$  は前述したように風荷重を表す。以下

$\rho_a$  : 空気の密度 (0.00121 g / cm<sup>3</sup>)

$C_W$  : 風圧係数

$U_{Wr}$  : 船体と空気との相対速度

$A_T$  : 水面上船体正面投影面積

$A_L$  : 水面上船体側面投影面積

$\varphi_{Wr}$  : 船体の軸と風との相対角 (=  $-\varphi$ )

を示す。ここで、風速としては船が存在しない場合の風速を用い、また船体の速度は船体重心の速度で代表されるものとする。船体固定座標系における相対風速  $U_{Wr}$  の x 方向成分、y 方向成分は次式で示される。

$$U_{zr} = \bar{U}_W \cos(\varphi - \varphi_{wind}) + \dot{x} \quad (59)$$

$$U_{yr} = \bar{U}_W \sin(\varphi - \varphi_{wind}) + \dot{y} \quad (60)$$

ここで、 $\bar{U}_W$  は平均風速、 $\varphi_{wind}$  は風向と X 軸のなす角である。

したがって、合成相対風速  $U_{Wr}$  と、その方向  $\varphi_{Wr}$  は次のようになる。

$$U_{Wr} = \sqrt{U_{zr}^2 + U_{yr}^2} \quad (61)$$

$$\varphi_{Wr} = \tan^{-1} [U_{yr} / U_{zr}] \quad (62)$$

風圧係数  $C_W$  は船型と風向きとの関数であり、タンカーの場合には次式で示される。

$$C_W = 12 - 0.083 \cos 2 \varphi_{Wr} - 0.25 \cos 4 \varphi_{Wr} - 0.177 \cos 6 \varphi_{Wr} \quad (63)$$

また、船体に作用する風荷重の合力の作用点と重心との水平距離  $b_W$  は次式から求める。

$$b_W = a - (0.291 + 0.0023 \times |\varphi_{Wr}|) \times L_{PP} \quad (64)$$

一方、風荷重の合力の作用方向  $\varphi_W$  は一般には  $\varphi_{Wr}$  と一致しない。前述の「港湾施設の技術上の基準・同解説」では次式を採用している。

$$\varphi_W = \left\{ 3 - 0.15 \left( 1 - \frac{\varphi_{Wr}}{90} \right) - 0.80 \left( 1 - \frac{\varphi_{Wr}}{90} \right)^3 \right\} \times 90^\circ \quad (65)$$

ただし上式は  $\varphi_{Wr} \geq 0$  の場合で、 $\varphi_{Wr} < 0$  のときには、 $180^\circ$

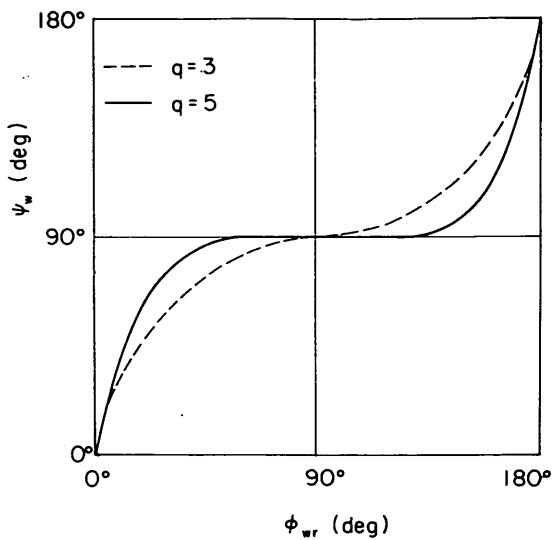


図-17  $q$  による  $\psi_w$  の変化

から右辺を引いた値になる。

しかし、この式では、(i)  $\varphi_{wr} = 0^\circ$  のとき  $\psi_w = 0^\circ$  とならない、(ii) 測定結果ではタンカーと貨物船とで差が現れているにもかかわらず式では考慮されていない、という2点で不都合な点が生じるので、鈴木ら<sup>2)</sup>は次式を  $\psi_w$  の計算式として提案している。

$$\psi_w = \left\{ 3 - \left( 1 - \frac{\varphi_{wr}}{90} \right)^q \right\} \times 90^\circ \quad : \varphi_{wr} \geq 0 \quad (66)$$

$$\psi_w = \left\{ 1 + \left( 1 - \frac{|\varphi_{wr}|}{90} \right)^q \right\} \times 90^\circ \quad : \varphi_{wr} < 0 \quad (67)$$

式(66)、(67)で示される  $\psi_w$  は図-17で示されるように、指数  $q$  の値が大きいくほど、船軸方向からずれるので、風荷重による重心まわりの旋回モーメントが大きくなる。

$q$  の値については、鈴木らが行ったナイロンロープでブイに係留された船舶の振り回り運動の実験および計算結果との比較から推測される値を用いた。すなわち、タンカーが満載状態に近い場合は、 $q = 5$ 、空載状態に近い場合は、 $q = 3$ 、半載に近い場合は  $q = 4$  とすることにした。

著者ら<sup>6)</sup>は、船舶の振り回り運動の計算において、平均風速が30m/s以上の場合について、定常風を作用させた場合と、平均風速が定常風速に等しい変動風を作用させた場合とについて計算を行い、両者の計算結果を比較した。その結果、係船索張力の最大値は、変動風が作用した場合に、定常風が作用した場合より10~30%程度大き

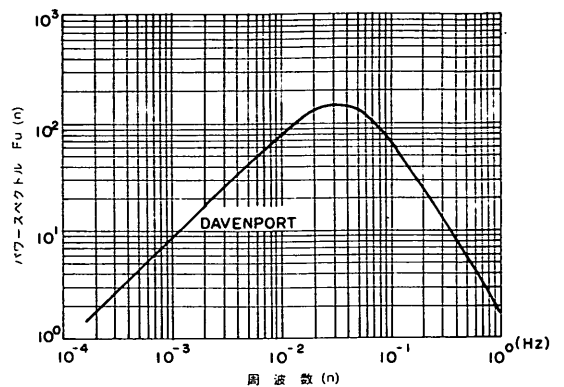


図-18 Davenport のパワースペクトル

くなることがわかった。今回の観測では、風速は30m/s以下であるが、風速が30m/s以下の場合でも、変動風を作用させないと係船索張力の値を小さく見積もってしまう可能性があるため、本計算では風は変動風とした。

変動風としては、構造物の耐風性の検討に広く用いられている Davenport のパワースペクトルをもつ風を用いた。Davenport のパワースペクトルは次式で示される<sup>1)</sup>

$$\frac{nF_u(n)}{U_{10}^2} = 2 k_r \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{4/3}} \quad (68)$$

ここで、 $X_D = 1200 n / U_{10}$

$U_{10}$ : 基準高度10mにおける平均風速 (m/s)

$k_r$ :  $U_{10}$ を用いて定義した表面摩擦係数

$n$ : 周波数

なお、 $k_r = 0.0015$ とした。図-18に Davenport のスペクトル形を示す。平均風速からの変動成分  $u(t)$  は次式で与えられる。

$$u(t) = 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{F_u(n_i)} \Delta n \cos(2\pi n_i t + \xi_i) \quad (69)$$

ここに、

$n_i$ :  $i$  番目の風成分の周波数

$N$ : 考慮する周波数領域中の周波数の個数

$\Delta n$ : 周波数のきざみ幅

$\xi_i$ :  $i$  番目の風成分の位相

である。

#### 4.2 計算の条件

##### (1) 計算ケース

計算は表-5に示すすべてのケースについて行った。計算では、係船索張力  $T_R$  と、船体の変位を求め、それぞ

れを張力計で測定された係船索張力および、レーダーで観測された船体の位置とを比較した。

計算の入力条件としては、流速、流向、風速、風向を一定値として与えなければならない。流向、流速は、観測時間中の平均値、風速は観測時間中の10分間平均風速の平均値  $\bar{U}_w$ 、風向は観測時間における最多風向とし、いずれも表-5に整理した値を用いた。ただし観測時間は1時間である。

計算では、X軸の正方向を磁北とした。また4.1(2)で示した数値計算法では、係船索張力の水平成分しか求まらない。そこで、4.1(1)に示した釣り合い式から、係船索の水平とのなす角  $\alpha_B$  を求め、係船索張力  $T_R$  を計算した。

### (2) 船舶条件

タンカーの模式図を図-19に示す。図に示したタンカーの垂線間長  $L_{pp}$ 、型深  $D$ 、型幅  $B$ 、満載吃水  $d_F$  および軽荷吃水  $d_E$  の平均吃水と載荷重量  $\text{TON DW T}$ 、満載排水量  $DT$ 、載貨容積  $V$  については表-1に示している。ここで、軽荷吃水  $d_E$  は、船舶に燃料、清水、貨物、乗組員等を含まない状態での吃水である。しかし、実際にはタンカーは、軽荷状態にはなりえない。そこで、船が最も軽い状態すなわちバラストコンディション状態での吃水を、空載吃水  $d_B$  とし、寺内・吉田<sup>13)</sup>が提案した次式に従って求めた。

$$d_B = 0.548 d_F^{0.966} \quad (70)$$

観測時には原油送油量を測定しており、測定値からタンカーの原油載荷状態が予測できる。そこで、満載時吃水と空載時吃水との間を、原油載荷容積に従って比例配分して吃水を求めた。同様に排水量(質量  $M_S$ )も原油載荷容積に従って求めた。

船体の重心を通る鉛直軸まわりの慣性能率  $I_Z$  は、実船

については明確な資料がない。そこで、鈴木ら<sup>2)</sup>がタンカー模型船について求めた値を標準値として、縮尺を考慮して実船についても採用した。

付加慣性能率および、付加質量については、相良<sup>9)9)</sup>が示した図から、実船の方形係数を考慮して求めた。

方形係数  $C_D$  は次式で与えられる。<sup>14)</sup>

$$C_D = \frac{M_S}{L_{pp} B d_S} \quad (71)$$

船首重心距離  $a$  は船長の1/2とした。

次に、船体の水中側面面積  $A_{SL}$ 、空中側面面積  $A_L$ 、空中正面面積  $A_{rl}$  は、寺内ら<sup>13)</sup>が提案した式に従って、次式で満載時と空載時の値を求め、吃水に従って、線形補間を行い補正した。

$$\text{満載時 } A_{SL} = 3.198 DW^{0.611} \quad (72)$$

$$\text{空載時 } A_{SL} = 1.629 DW^{0.610}$$

$$\text{満載時 } A_L = 4.964 DW^{0.522} \quad (73)$$

$$\text{空載時 } A_L = 5.943 DW^{0.562}$$

$$\text{満載時 } A_r = 2.666 DW^{0.478} \quad (74)$$

$$\text{空載時 } A_r = 2.485 DW^{0.517}$$

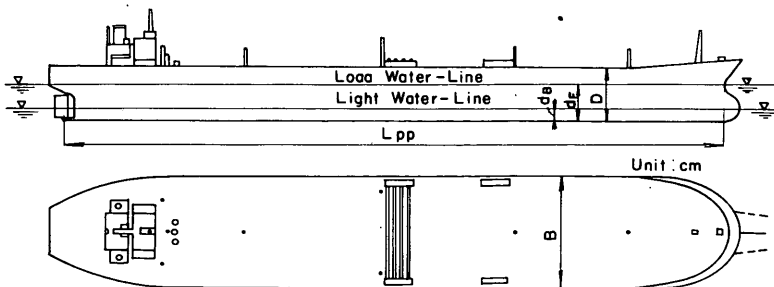
なお、DWは重量トンである。

最後に、係船索取付点の水面上の高さは、(型深-吃水)の高さに、船舶のトリムを1%程度考慮して決定した。<sup>14)</sup>

表-8に、計算に用いた船舶諸元を整理した。

### (3) 係船索張力の計算

図-20に、現地で用いられているナイロン製係船索の伸び特性曲線を示す。これは、2本合計した場合の荷重-伸び曲線である。現地に設置されているSALM型ブイの形状は、図-2に示したとおりである。このブイを数



タンカー模型

図-19 タンカーの模式図

表-8 タンカーの計算入力条件

船名	K-1	K-2	K-3	K-4	N-1	N-2	N-3	N-4
載荷量 $W$ (kl)	276921	251900	94400	84900	206906	180143	45159	40259
船長 $L_{PP}$ (m)	344.42				324.00			
型幅 $B$ (m)	51.81				53.00			
型深 $D$ (m)	26.51				25.00			
側面面積 $A_y$ (m <sup>2</sup> )	10055.68				9392.34			
質量 $M_s$ (t)	270476	249724	119098	111220	208411	185917	72459	68341
慣性率 $I_z$ (t·m <sup>2</sup> )	$2.05 \times 10^9$	$1.89 \times 10^9$	$9.03 \times 10^8$	$8.43 \times 10^8$	$1.40 \times 10^9$	$1.25 \times 10^9$	$4.88 \times 10^8$	$4.60 \times 10^8$
吃水 $d_s$ (m)	19.28	18.47	13.34	13.03	16.82	15.89	11.21	11.04
船首重心距離 $a$ (m)	17.22	17.22	17.22	17.22	16.20	16.20	16.20	16.20
水中側面面積 $A_{SL}$ (m <sup>2</sup> )	6196	5938	4321	4223	5817	5526	4059	4003
空中側面面積 $A_L$ (m <sup>2</sup> )	3860	4118	5735	5832	3574	3866	5336	5390
空中正面面積 $A_T$ (m <sup>2</sup> )	1129	1171	1437	1453	1057	1105	1347	1357
方形係数 $C_b$	0.79	0.76	0.50	0.48	0.72	0.68	0.38	0.36
チェーン取付高さ $S_R$ (m)	8.95	9.76	14.89	15.20	9.80	10.73	14.47	15.58
付加質量 $M_{xx}$ (t)	15147	13485	4288	3893	10733	9296	2282	2050
付加質量 $M_{yy}$ (t)	215028	197282	89324	81746	154224	135719	51446	49206
付加慣性率 $J_{zz}$ (t·m <sup>2</sup> )	$1.16 \times 10^9$	$1.07 \times 10^9$	$7.47 \times 10^8$	$7.60 \times 10^8$	$7.49 \times 10^8$	$7.05 \times 10^8$	$5.34 \times 10^8$	$5.43 \times 10^8$
浅水影響係数 $k_{ky}$	0.26	0.24	0.12	0.11	0.27	0.24	0.12	0.12

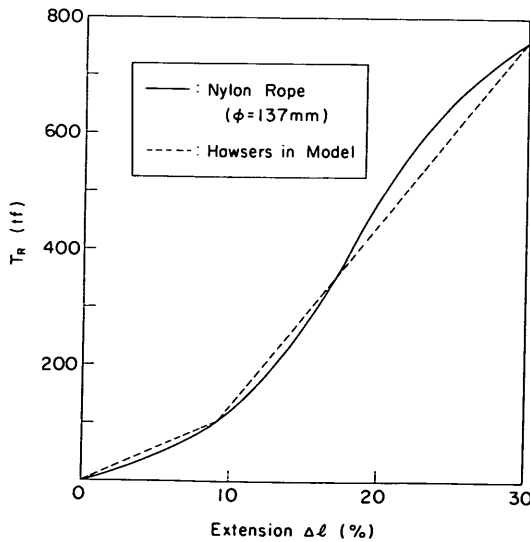


図-20 ナイロンロープの伸び特性

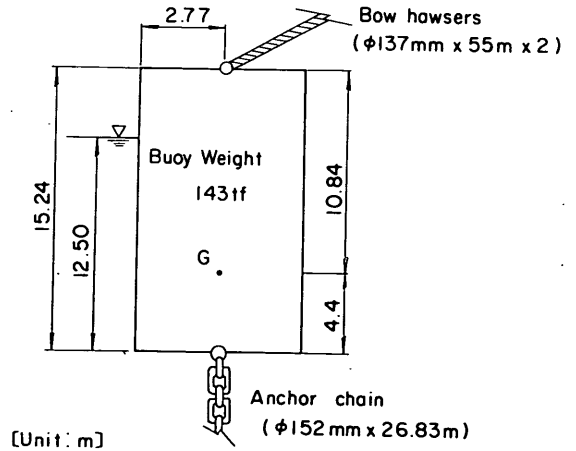


図-21 ブイの模式図

値計算用にモデル化した形状が、図-21の円筒ブイである。図-21で示したブイ形状と、図-20で示した伸び特性を入力条件として、4.1(1)で示したブイに関する釣合い方程式を解くと、船舶に作用する係船索張力の水平成

分  $T_{RH}$  と、船首のアンカー点からの水平距離の関係が求まる。図-22は、船首のアンカー点からの水平距離  $X_{SR}$  と、 $T_{RH}$  との関係を示した図で、横軸に  $X_{SR}$ 、縦軸に  $T_{RH}$  をとった。



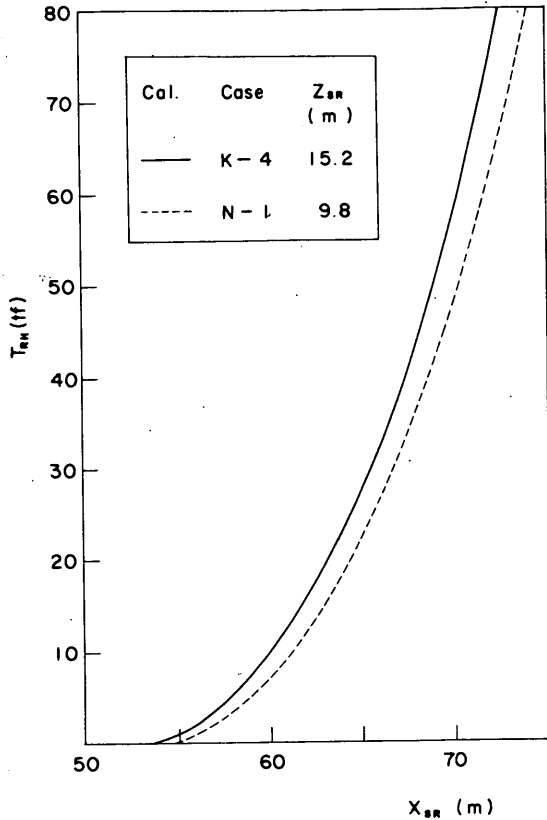


図-22 船首—アンカー距離と係船索張力の関係

### 4.3 計算値と観測値の比較

#### (1) 流圧力係数に対する考察

船体の振れ回り運動を計算するためには、流圧力係数  $C_u$ 、風圧力係数  $C_w$ 、風圧力の作用方向を決める指数  $q$ 、流圧力係数  $C_u$  の値を適切に定めなければならない。鈴木ら<sup>2)</sup> は、振れ回り運動の数値計算結果と模型実験結果とが最もよく一致するときの、風圧力係数、風圧力作用方向を決める指数  $q$  の値を示している。そこで、本計算では風圧力に関する係数の値は、鈴木らが示したものを採用することにした。しかし、鈴木らが行った実験では、流れは作用させていないので、流圧力係数の値については、今回の現地観測結果と数値計算結果とを比較することによって定めることにした。

図-23は最大係船索張力  $\bar{T}_{Rmax}$  と、平均風速  $\bar{U}_w$  との関係を示した図である。横軸に  $\bar{U}_w$  をとり、各風速に対する係船索張力の最大値  $\bar{T}_{Rmax}$  を縦軸にとった。そして流圧力係数  $C_u$  の値を変えて計算を行い観測値と比較した。白ぬきの記号は観測値を表し、□が係船索取付高  $Z_{SR}$  が14~16mと比較の高い場合、△が中程度で10~14mの場合、○はそれより取付高が低い場合を表している。観測値と

しては、10分間平均風速と10分間における最大係船索張力  $\bar{T}_{Rmax}$  の値をとった。各ケースとも1時間の連続記録を行っているので、 $\bar{T}_R$  の測定記録から6個の  $\bar{T}_{Rmax}$  を読みとることができる。図-23では、横軸が10分間平均風速  $\bar{U}_w$  を、縦軸が  $\bar{T}_{Rmax}$  を示している。

黒塗りの記号は計算値を示す。計算値は、各計算ケースにおける係船索張力  $\bar{T}_R$  の最大値をとった。

計算開始時の船軸の向きは、前述したレーダースクリーンを撮影した写真およびレーダースクリーンからの目視観測によって得られた船軸の向きと一致させた。張力の計算結果が定常になるまでに5000秒程度かかる。そこで、計算は7400秒まで行い、最大張力  $\bar{T}_{Rmax}$  は5000秒から7400秒までの最大張力として求めた。計算に用いた平均風速としては、前述のように、10分間平均風速の観測期間中における平均値を採用した。したがって、図-23は横軸の風速は計算値の場合には観測期間中の平均風速  $\bar{U}_w$  になる。

流圧力係数  $C_u$  の値については、流れが円柱の側面に作用する場合、その値が1.0~1.5程度であることが示されている<sup>15)</sup>。

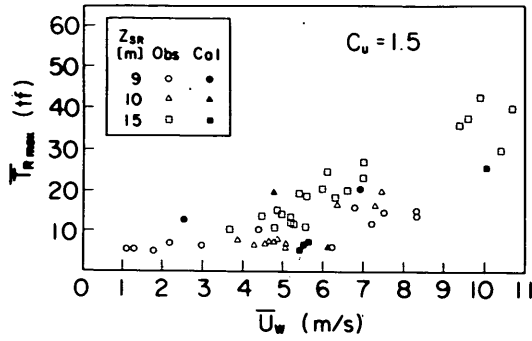
また、「海洋土木大辞典」では、立方体の場合の標準値として  $C_u = 1.3 \sim 1.4$ 、球の場合には  $C_u = 0.2 \sim 0.5$  が示されている。船体の側面からの流れに対する流圧力係数の値としては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、(水深/吃水) > 7の場合、 $C_u = 0 \sim 1.0$  の値を用いている。このような値から、今回の観測ケースの場合も、 $C_u$  の値は0.2~1.5の間にあるものと推定できる。

そこで、 $C_u$  の値を、0.2~1.5の間で、0.1ずつ変化させて計算を行い、計算結果と観測結果を比較した。図-23(a)は、 $C_u = 1.5$  の場合の比較図である。 $\bar{U}_w = 10 \text{ m/s}$  のとき、観測値の  $\bar{T}_{Rmax}$  の値は30~42 tf であるが、計算値は25 tf であり、観測値の下限より小さくなっている。

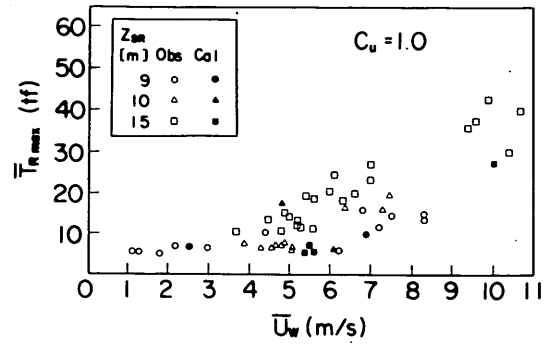
図-23(b)は  $C_u = 1.0$  の場合の比較図である。図-23(b)においても、 $C_u = 1.5$  の場合と同様に、 $\bar{U}_w = 10 \text{ m/s}$  のとき、計算値は観測値の下限より小さく、計算結果と観測結果はあまり一致していない。

図-23(c)は、 $C_u = 0.2$  の場合の比較図である。図-23(c)においては、 $\bar{U}_w = 10 \text{ m/s}$  のとき、計算値の  $\bar{T}_{Rmax}$  は64 tf になり観測値の約2倍になっている。

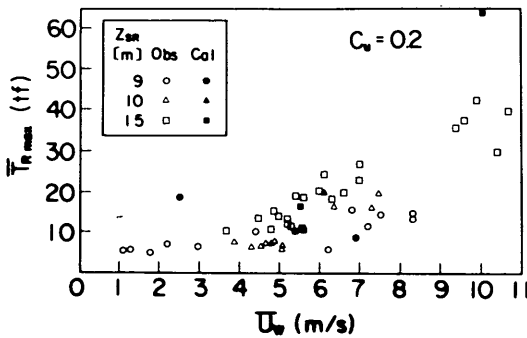
図-24(d)は  $C_u = 0.3$  の場合の比較図である。 $\bar{U}_w = 10 \text{ m/s}$  のとき、計算値は観測値の中間値にはほぼ一致しており、 $\bar{U}_w = 23 \text{ m/s}$  のときも、観測値と計算値はよく一致している。 $\bar{U}_w = 45 \sim 7 \text{ m/s}$  の場合には、若干不一致の部分もあるが、 $C_u = 0.2 \sim 1.5$  と変化させて計算した中では、図-24(d)の  $C_u = 0.3$  の場合に計算値と観測値が最



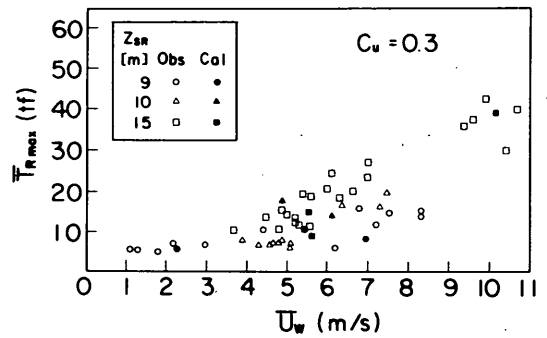
(a)  $C_d = 1.5$



(b)  $C_d = 1.0$



(c)  $C_d = 0.2$



(d)  $C_d = 0.3$

図-23 計算値と観測値との比較

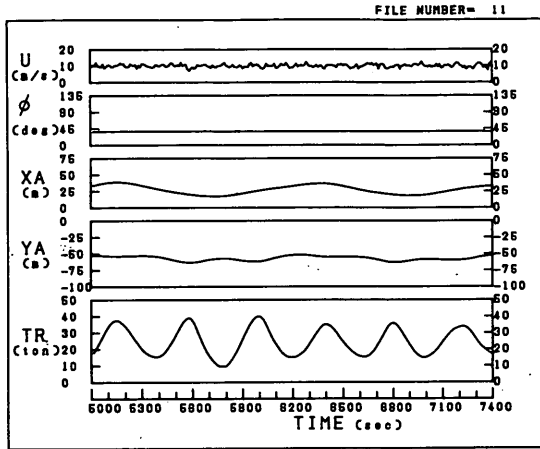
もよく一致した。そこで、本計算では、流圧力係数 $C_d$ の値として0.3を採用することにした。前に示した「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の中では、流圧力係数 $C_d$ が、船舶と流れの相対流向 $\varphi_r$ によって変化することが示されている。各観測ケースにおいて、観測中、船軸の向きは一定で、ブイの方位角とはほぼ一致していると仮定すると、前述の表-4に示されるように、船軸は磁北に対して約 $150^\circ$ 程度傾いていることになる。潮流の向かう方向は、Case N-3、N-4を除いてはほぼ南向きであるので、 $\varphi_r$ は $30^\circ$ 程度になる。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」によれば、(水深/吃水) $>25$ の海域では、 $\varphi_r = 30^\circ$ のとき $C_d$ の値としては0.5~0.6程度になる。現地観測結果から推定した流圧力係数の値は0.3であり、上記の0.5~0.6の値とは若干異なっている。

#### (2) 船体変位と係船索張力の計算結果

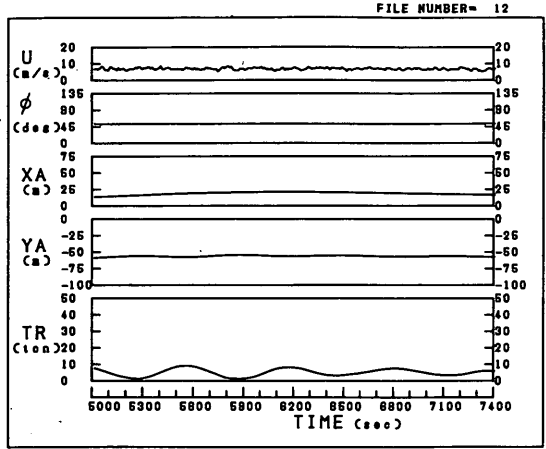
図-24(a)および(b)は、4.1で示した数値計算法を用いて、 $C_d = 0.3$ として、係船索張力および船体変位を計算した結果を示した図である。計算は表-5に示す8ケース行い、図-10には移動平均結果を示したCase K-4とCase

N-1を示す。図-24(a)がCase K-4、図-24(b)がCase N-1の計算結果を示す。図は、上から、風速 $U$ 、船軸の磁北からの傾き $\phi$ 、アンカー点を原点として磁北をX軸の正方向とした空間固定座標系における船首座標 $X_A$ 、 $Y_A$ および係船索張力 $T_R$ の時間変動を示している。図-24では、計算が定常になったと考えられる5000秒から7400秒までの結果を示し、横軸には時間軸をとった。

Case K-4とCase N-1の両ケースにおいて船軸の傾き $\phi$ は計算時間中、ほぼ一定であった。その値は、レーダースクリーンの目視観測から得られた船軸の方向と一致している。図-24(a)に示されている変動が大きいCase K-4の場合 $X_A$ の変動幅は10m程度、 $Y_A$ の変動幅は5m程度である。 $X_A$ が最大のとき $Y_A$ もほぼ最大となるので、船首の水平変動幅は最大で片側55m程度になる。したがって、船首とブイ間の水平距離を55mとしたとき、船首の水平移動により係船索の傾く角度は $5^\circ$ 程度しかならない。このように、船体の平面運動は小さく、大きな振り回り運動は起こっていない。このことは、現地観測において船軸方向と係船索の方向とがほぼ一致しているとみ



(a) Case K-4



(b) Case N-1

図-24 振れ回り運動の計算結果

なしたことが妥当であったことを示している。

図-24(a)のCase K-4では、 $\bar{T}_R$ の変動周期は、6~7分で、張力の値は最大で40tf、最小で10tf程度である。

図-10の観測結果によると、 $\bar{T}_R$ の変動周期は、4~6分程度であり、計算で求めた変動周期がやや長い。張力の値は、観測値では、15tf~40tfで計算結果とよく一致している。

図-24(b)のCase N-1の場合、計算で求めた $\bar{T}_R$ は、10分程度の変動周期をもち、その値は、0~10tf程度である。図-10(2)の観測結果によると、この変動周期は計算値より長く15分程度である。張力の値は、5~15tfで、計算値より最大値、最小値とも5tf程度大きい。

図-24に示すように、船軸の傾き $\phi$ は一定で、船首座標 $X_A$ 、 $Y_A$ が変動している。 $\bar{T}_R$ の変動は $Y_A$ の変動周期に一致していることから数値計算でもタンカーのサージング運動によって生じていると推定される。

図-25(a)のように係船索張力が最大で40tfと大きい場合には、計算値と観測値がよく一致し、図-25(b)のように係船索張力が最大で10tfと小さい場合に、計算値と観測値の間に5tf程度の差が生じた原因としては、係船索の自重によるカタナリー張力の影響ではないかと考えられる。つまり、計算では係船索の自重によるカタナリー張力を無視しているけれども、実際は係船索には自重があり、係船索にはカタナリー張力が働いているはずである。そして、係船索が大きい場合にはカタナリー張力の影響が相対的に小さく、係船索張力が小さくなるとカタナリー張力が相対的に大きくなって、この影響が顕

在化したと推定される。

そこでナイロン係船索は伸びないものと仮定して、船体取り付け点の高さを15mとしてナイロンロープの自重によるカタナリー張力を計算してみた。<sup>7)</sup> それによると、ブイと船首との距離が52m以上のときは、係船索2本によるカタナリー張力は3~5tfとなる。この値は計算値と観測値との差である5tfに近い値である。また、図-11に示したアナログ記録による張力の変動をみても、張力は0になることはなく、最小でも数トン程度である。したがって、Case N-1で、係船索張力の計算値が観測値より5tf程度小さくなったのは、主として係船索の自重によるカタナリー張力を数値計算では無視しているためだと結論できる。

$\bar{T}_R$ の変動周期は、Case K-4とN-1のいずれのケースでも、観測値と計算値は一致しない。Case K-4の場合は観測値が計算値の1.2~1.3倍となり、Case N-1の場合には逆に0.8~0.9倍になった。この理由については、はっきりしたことはわからないが、考えられる理由としては、

- i) カタナリー張力の影響を受けて、係留系が計算で求めたものと異なった伸び特性をもっていた。
  - ii) 吃水を推算式で求めたため、現地のタンカーの吃水とは若干異なる。そのため、付加質量の推定値が実際とは異なった。
  - iii) 送油量からタンカーの質量を推定しているが、この推定値が実際の値と若干ずれていた。
- などのことが挙げられる。

## 5. 結 論

本論文において得られた結論を要約すると、以下のようになる。

### タンカー非係留時

- 1) タンカー非係留時における一点係留ブイの運動については、来襲波の波高が $H_{1/3}=3.9\text{m}$ と大きい場合、波による運動が卓越し、ブイの固有振動モードによる運動は顕著でない。しかし、来襲波の波高が $H_{1/3}\leq 1.5\text{m}$ で、小さい場合、ブイの固有振動モードによる運動が顕著になる。
- 2) ブイの固有振動モードとしては、2種類のモードが存在する。一つは、ブイ係留点回りの振り子のような運動で、Mode 1の運動、もう一つは、ブイ重心回りの回転運動で、Mode 2の運動である。Mode 1および2の運動周波数は、観測されたブイ傾斜角のスペクトル解析結果によると、それぞれ0.04Hzと0.25Hzであり、実験によって得られたものをよく一致している。
- 3) 非係留時におけるブイ傾斜方位角の分布は、来襲波の波高が大きくなると、波の主方向付近に集中するが、波高が小さいと、全方向に一樣に分布する。これは、波高が大きいと、波による運動が卓越し、小さいと、ブイの固有振動が卓越してくるためである。

### タンカー係留時

- 4) タンカー係留時におけるブイ傾斜角および係船索張力の変動は、周期5~20分の長周期成分と周期20秒以下の短周期成分とははっきりと分けることができる。
- 5) ブイ傾斜角および係船索張力をスペクトル解析した結果では、来襲波のスペクトルのピーク周波数と固有振動のMode 2の周波数付近に顕著なピークが現れていた。ただし、この場合におけるMode 2の周波数は、ブイが係船索で拘束されているため、0.3Hzとなっており、係船索で拘束されていない場合より高くなっている。
- 6) ブイ傾斜角のスペクトルがピークを示す周波数では係船索張力のスペクトルもピークを示しており、係船索張力の短周期成分は波および固有振動モードによるブイの運動で起される。
- 7) 係船索張力およびブイ傾斜角の長周期変動は、係船タンカーの運動によって生じている。タンカーが空載状態に近く、風速が大きい場合に係船索張力は大きくなる。
- 8) 係船索張力の最大値において、長周期変動成分が占める割合は、風速が大きくて、係船索張力が大きくなるほど増大する。
- 9) 係船索張力の長周期変動は、タンカーと一点係留ブイ

システム全体の固有周期に近く、タンカーのサージング運動によって生じていると推定される。

### 数値シミュレーション

- 10) 流圧力係数 $C_u$ を0.2~1.5まで変化させてタンカーの平面運動において数値シミュレーションを行い、最大係船索張力について計算値と観測値を比較した結果では、 $C_u=0.3$ の場合に両者は最もよく一致した。
- 11)  $C_u=0.3$ として数値シミュレーションを行った結果では、係船索張力が40 tfと大きい場合には計算によって求めた張力は観測値とよく一致した。しかし、係船索張力が15 tf以下の場合には、計算値は観測値より5 tf程度小さくなった。これは、計算では係船索の自重によるカタナリー張力を無視していることによる。
- 12) 数値シミュレーションによって求めた係船索張力の長周期変動周期は観測値の変動周期に対して20%程度の差があった。

## 6. あとがき

むつ小川原石油備蓄基地の海上施設として、沖合3km水深45mの地点に設置されたSALM型一点係留ブイを用いて、昭和58年から59年の2ケ年に渡って現地観測を行い、その結果について本資料にとりまとめた。これによって、現地における一点係留ブイの運動および係船索張力の特性、さらには数値シミュレーションの適用性について新しい知見が得られた。しかしながら、本現地観測では、ブイ係留チェーン張力を観測していないため、係留チェーンについてはなにも考察できなかったことは残念である。

今後とも機会をとらえては、一点係留ブイの運動および係船索張力、ブイ係留チェーン張力などについて現地観測を実施し、それらの特性を調べることによって、一点係留ブイの設計に役立てたいと思っている。

本研究は、高山の全体的な指導の下に、観測機器の据付および調整、現地観測を佐尾と立野が行い、観測データの解析を古川、数値計算を平石が担当した。

本研究を遂行するに当たり、むつ小川原石油備蓄会社には、一点係留ブイの観測を快く承していただくとともに、現地観測においては施設の提供および海気象データ、係船索張力のアナログ記録、その他解析に必要な資料を提供していただいた。また、運輸省第二港湾建設局および当所水工部海象観測研究室からは波浪データの提供を受けた。上記の関係各位に感謝の意を表するしだいである。

(1985年9月30日 受付)

## 参考文献

- 1) 石油公団・むつ小川原油備蓄株式会社：むつ小川原地区石油備蓄基地海域施設基本設計(案)(設備編), 1980.
- 2) 鈴木康正・諸石風幸：ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動, 港湾技術研究所報告, 第21巻第2号, 1982年6月, pp. 107~150.
- 3) 三井海洋開発株式会社：一点けい留ブイバース動的模型実験報告書, 1981.
- 4) たとえば, 奥野忠一ほか：多変量解析法, 日科技連, 1971, pp. 323~368.
- 5) 上田茂・白石悟・柳沢雄博：超大型タンカーのけい留時動揺特性, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 602~606.
- 6) 高山知司・平石哲也・永井紀彦・古川正美：チェーンで係留された船舶の振れ回り運動の特性, 港湾技術研究資料 No. 508, 1984, 28p.
- 7) 上田茂・白石悟：カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表, 港湾技研資料, No. 379.
- 8) 元良誠三：船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて, 一其の1. 旋回に対する付加慣性モーメント, 造船協会論文集 第105号, 昭和34年, pp. 83~92.
- 9) 元良誠三：船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて, 一その2. 前後動に対する付加質量, 造船協会論文集 第106号, 昭和34年, pp. 59~62.
- 10) 元良誠三：船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて, 一その3. 左右動に対する付加質量, 造船協会論文集 第106号, 昭和34年, pp. 63~68.
- 11) 岩井聰・矢島澄夫：繫泊船に働く風圧について, 日本航海学会第26回講演会, 昭和36年, pp. 86~93.
- 12) 清宮理：海上風の性質とそれによるく(矩)形浮体の動揺解析, 港湾技術研究所報告, 第19巻第2号, 1980年6月, pp. 115~167.
- 13) 寺内潔・吉田行秀：船舶の主要寸法と力学的諸量の関係, 港湾技研資料 No. 348, 1980, 115p.
- 14) 関西造船協会：造船設計便覧(第3版), 1976, pp. 301.
- 15) 前述の13), pp. 305
- 16) 土木学会：水理公式集(昭和60年版), pp. 74, 1981, 55p.

## 記号一覧表

$A_L$	: 船体の空中側面投影面積, 式(73)
$A_{SL}$	: 船体の水中側面投影面積, 式(72)
$A_T$	: 船体の空中正面投影面積, 式(74)
$A_v$	: 船体の側面投影面積
$a$	: 船首重心間距離
$B$	: 船体の型幅
$B_{xx}$	: 船体の前後運動の減衰力係数
$B_{yy}$	: 船体の左右運動の減衰力係数
$B_{zz}$	: 船体旋回運動の減衰モーメントの係数
$b_C$	: 流圧力の合力の作用点と船首との水平距離, 式(54), (55)

$b_w$	: 風圧力の合力の作用点と船体重心との距離, 式(64)
$C_b$	: 方形係数, 式(71)
$C_{CR}$	: 旋回抵抗係数
$C_u$	: 真横からの流れに対する流圧力係数
$C_w$	: 風圧係数, 式(63)
$D$	: 船体の型深
$DT$	: 満載排水量
$DWT$	: 重量トン
$d_B$	: 空載吃水, 式(70)
$d_E$	: 軽載吃水
$d_F$	: 満載吃水
$d_S$	: 船体の吃水
$F_u(n)$	: Davenportのパワースペクトル値
$F_x, F_y$	: ブイに作用する静水圧的復元力(ブイ固定座標)
$f$	: 周波数
$G$	: 船体の重心
$G_B$	: ブイの重心
$g$	: 重力加速度
$H_{1/3}$	: 有義波高
$h$	: 水深
$I_z$	: 船体の慣性能率
$J_{zz}$	: 船体の付加慣性能率
$K_L$	: 一点係留ブイシステム全体のバネ係数
$k_r$	: 高度10mの平均風速に対する表面摩擦係数
$L_{PP}$	: 船長(垂直間距離)
$l_R$	: 係船ロープの長さ
$M_B$	: ブイの質量
$M_S$	: 船の質量
$M_{xx}$	: $x$ 軸方向(船軸方向)の船体の付加質量
$M_{yy}$	: ブイに作用する $y$ 軸まわりの復元モーメント
$M_{yy}$	: 船体の $y$ 方向付加質量
$N$	: 考慮する周波数領域中の周波数の個数
$n$	: 周波数
$n_i$	: $i$ 番目の風成分の周波数
$(P_{C1})_x$	: 船体に作用する $x$ 方向の造波抵抗力, 式(45)
$(P_{C1})_y$	: 船体に作用する $y$ 方向の造波抵抗力, 式(46)
$(P_{C1})_z$	: 船体に作用する $z$ 軸まわりの造波抵抗モーメント, 式(47)
$(P_{C2})_y$	: 船体に作用する $y$ 方向の流圧力, 式(52)
$(P_{C3})_z$	: 船体に作用する $z$ 軸まわりの流圧力モーメント, 式(53)

$(P_{C3})_y$	: 船体に作用する $y$ 方向の旋回抵抗力, 式(56)		
$(P_{C3})_z$	: 船体に作用する $z$ 軸まわりの旋回抵抗モーメント, 式(57)		
$P_x, P_y, P_z$	: 空間座標における力の成分		
$P_w$	: 風荷重, 式(58)		
$q$	: 風荷重の作用方向の計算式中の指数		
$r$	: ブイの半径		
$S_{11}$	: 平方和, 式(8)		
$S_{22}$	: 平方和, 式(8)		
$S_{12}$	: 積和, 式(8)		
$S(f)$	: スペクトル密度		
$T_{1/3}$	: 有義波周期		
$T_C$	: ブイ係留チェーン張力		
$T_{CH}$	: ブイ係留チェーン張力の水平成分		
$T_{CV}$	: ブイ係留チェーン張力の鉛直成分		
$T_L$	: サージング固有周期		
$T_R$	: 係船索張力		
$T_{RH}$	: 係船索張力の水平成分		
$T_{R1/3}$	: 係船索張力の1/3最大値		
$T_{Rmax}$	: $T_R$ の最大値		
$\bar{T}_1$	: 左艇係船索張力の長周期成分		
$\bar{T}_2$	: 右艇係船索張力の長周期成分		
$\bar{T}_R$	: 係船索張力の長周期成分		
$\bar{T}_{Rmax}$	: $T_R$ の最大値		
$U$	: 風速		
$U_{10}$	: 高度10mにおける平均風速		
$U_w$	: 10分間平均風速		
$U_{wmax}$	: 観測時間中における10分間平均風速の最大		
$U_{wr}$	: 相対風速, 式(61)		
$U_{xr}$	: 相対風速の $x$ 成分, 式(62)		
$U_{yr}$	: 相対風速の $y$ 成分, 式(62)		
$\bar{U}_w$	: 観測時間中における平均風速		
$u(t)$	: 風速の変動成分, 式(63)		
$V$	: 載貨容積		
$V_C$	: 流速		
$V_M$	: 載貨量		
$V_T$	: 合成流速, 式(64)		
$V_{xr}$	: 相対流速の $x$ 成分, 式(65)		
$V_{yr}$	: 相対流速の $y$ 成分, 式(65)		
$\bar{V}_C$	: 観測時間中における平均流速		
$X_D$	: ( $\dot{\quad} = 1200 \text{ m} / U_{10}$ )		
$X-Y-Z$	: 空間固定座標系		
$(X_A, Y_A)$	: 空間固定座標系における船首座標		
$(X_C, Z_C)$	: 空間固定座標系におけるブイへのチェーン接続点の座標		
$(X_G, Y_G)$	: 空間固定座標系における船体重心座標		
$(X_S, Y_S)$	: 空間固定座標系への( $\delta, \theta_N$ )の直交座標, 式(5)		
$(X_{SB}, Z_{SB})$	: 空間固定座標系におけるブイへの係船索接続点の座標		
$(X_{SR}, Z_{SR})$	: 空間固定座標系における船首へのロープ接続点の座標		
$x-y$	: 船体固定座標系		
$x_B-y_B-z_B$	: ブイ固定座標系		
$Z_{GB}$	: ブイ重心の $Z$ 座標		
$z_M$	: ブイの底面の $z_B$ 座標		
$z_P$	: ブイの上面の $z_B$ 座標		
$\alpha$	: 方位計で測定される方位角		
$\alpha_B$	: 係船索が水平方向となす角, 式(4)		
$\alpha^*$	: 北を $0^\circ$ とし, 時計回りの方向を正とした場合の $\alpha$ の値		
$\gamma$	: ブイの傾斜角の方向分散, 式(7)		
$\delta$	: ブイ傾斜角, 式(1)		
$\delta_B$	: 数値計算において2次元で考えたブイの傾斜角		
$\delta_{max}$	: $\delta$ の最大値		
$\delta_x, \delta_y$	: 2方向傾斜計で測定される傾斜角		
$\delta_{1/3}$	: $\delta$ の1/3最大値		
$\bar{\delta}$	: ブイ傾斜角の移動平均値		
$\bar{\delta}_{max}$	: $\bar{\delta}$ の最大値		
$\theta'$	: $x_B-y_B$ 平面上の $y_B$ 軸からブイ傾斜角までの回転角, 式(2)		
$\theta_B$	: ブイ上面の周囲と静水面との交点の $\theta$ の値		
$\theta_N$	: $X_B-Y_B$ 上における磁北からブイ傾斜角までの回転角, 式(4)		
$\theta_P$	: ブイ傾斜角の主方向, 式(6)		
$\theta_R$	: 係船索が磁北( $X$ 軸)となす角		
$\theta_P^*$	: 北を $0^\circ$ とし, 時計回りの方向を正とした場合の $\theta_P$ の値		
$\theta$	: $= \tan^{-1}(\delta_x / \delta_y)$ , 式(3)		
$\pi$	: 円周率		
$\varphi$	: 磁北( $X$ 軸)と船体の軸( $x$ 軸)のなす角		
$\phi_C$	: 磁北と流向のなす角		
$\varphi_C$	: 船軸と流向のなす角, 式(6)		
$\varphi_{Cr}$	: 相対流速の方向		
$\varphi_{wind}$	: 磁北と風向のなす角		
$\varphi_{wr}$	: 合成相対風速の作用方向, 式(6)		
$\Psi_w$	: 風圧力の作用方向, 式(55), (56), (57)		

$\Delta k_v$  : 流圧力係数の浅水影響係数  
 $\Delta l$  : 係船索の伸び率  
 $\Delta n$  : 周波数のきざみ幅  
 $\rho_a$  : 空気の密度  
 $\rho_w$  : 海水の密度

港湾技研資料 No.542

1985・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社アオイ総合印刷

Published by the Port and Harbour Research  
Institute Nagase, Yokosuka, Japan.