

タンカー係留時の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*****

1. ま え が き

外洋における大型タンカーの係留用施設として、一点係留ブイがある。わが国においても、原油受払い施設として青森県むつ小川原港沖合の水深約 45 m の地点に、SALM (Single Anchor Leg Mooring) 型一点係留ブイが既に建設されており、また、福井港沖合の水深約 45 m の地点にも同種の一点係留ブイが建設されつつある。

一点係留ブイシステムにおいては、ブイにタンカーが係留しているときに最も大きな力がブイに働き、この状態における海気象条件などの外力が設計条件になる。タンカー係留状態におけるブイ係留チェーン張力やタンカー係船索張力は模型実験あるいは経験式によって算定することが多かったが、最近では数値シミュレーションによって推定する試みも行われるようになってきている。しかし、実際の複雑な海域で、タンカー係留時におけるブイの運動や係留チェーン張力、係船索張力などの現地特性については、現地観測が非常に乏しいためほとんどわかっていない。そこで、むつ小川原港沖合の一点係留ブイを用いてブイの運動および係船索張力について現地観測を行った。

本研究では、観測されたブイの傾斜角と方位角およびタンカー係船索張力と風や波浪などの海気象条件との関係で、係船索張力の変動特性およびブイ運動特性を調べている。そして、数値シミュレーションとの比較を行ない、数値計算の妥当性について検討している。

2. 観測項目の概要

(1) 観測地点

海気象条件観測地点および一点係留ブイ設置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気象条件(波高, 周期, 波向, 流速, 流向等)を観測するために、球形ブイが設置されている地点である。このブイによって観測された

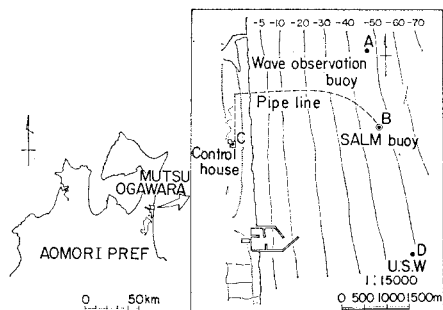


図-1 観測地点平面図

海気象データは、陸上の管理室C点へFMテレメータで送信されている。B地点は一点係留ブイの設置地点である。C地点においては管理棟屋上で気象条件(風速, 風向等)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を用いて波浪観測を行っている。

(2) 一点係留ブイおよび船舶

SALM 型一点係留ブイシステムを図-2に示す。SALM 型一点係留ブイは、図-2に示すように1本のチェーンで係留されており、このチェーンには過剰浮力による初期張力が常時作用しており、ブイの運動によって張力が0になることがないように設計されている。また、原油送油用ホースとブイ本体とは切り離されており、ブイに船舶などが衝突して破損したとしても、漏油が起らないシステムとなっている。

本システムではタンカーは、長さ 55 m の2本のナイロンロープで係留され、100 000~275 000 DWT のタンカー係留が可能である。表-1に今回観測したタンカー

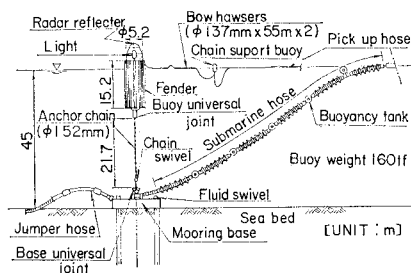


図-2 SALM 型一点係留ブイシステム

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室
**** 正会員 工修 三井海洋開発株式会社 技術本部 第二部
***** 三井海洋開発株式会社 技術本部 第三部

表1 タンカー諸元

タンカー船名	K 丸	N 丸
載荷重量トン DWT	270 000	240 000
船 長 L_{pp} (m)	344.42	324.00
型 幅 B (m)	51.86	53.00
型 深 D (m)	26.51	25.00

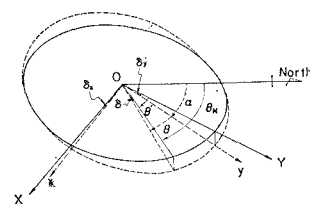


図-3 プイ傾斜角と傾斜方位角の関係

の諸元を示す。

(3) 観測日時と観測項目

観測は昭和58年12月13~14日および昭和59年2月21~22日にかけて行なわれ、1日2回、それぞれ1時間観測した。

2方向傾斜計と磁北からのプイ回転角を示す方位計を、本現地観測のために新たにプイ本体に設置した。プイ上面係船索取付点には、本システムの安全性を確認するために張力計が既に取り付けてあり、係船索張力の観測にはこれを利用した。係船索張力については、タンカー係留時中テレメータ制御により観測され、管理室にデジタル表示すると同時にアナログ記録も行われている。プイ傾斜角と方位角は管理室からのテレメータ制御により1時間起動し、係船索張力とともに1秒間隔でMT記録された。また、レーダーによってタンカーの係留方向を観測するとともに、タンカーの吃水を推定するために、タンカーからの送油量を記録した。

3. 観測値による係船索張力とプイ運動特性

(1) 係船索張力とプイ傾斜角および傾斜方位角の時系列特性

a) プイ傾斜角および傾斜方位角の算定法

プイには2方向傾斜計が設置してあり、直交する2方向の傾斜が観測できるようになっている。そこで図-3に示すようにプイ断面中心を原点にして、1台の傾斜計の方向をx軸、もう1台の傾斜計の方向をy軸としてプイ固定座標を考えると、2台の傾斜計は水平面からのx軸、y軸の傾きを測定することになる。つまり、x軸およびy軸の水平面への投影軸をそれぞれX、Y軸とすると、x軸の傾斜角 δ_x はx軸とX軸のなす角度になり、y軸の傾斜角 δ_y も同様になる。ここで、X、Y軸に対してx、y軸が時計回りに回転した場合が正の傾斜角として測定され、2方向傾斜角 δ_x, δ_y よりプイ傾斜角 δ は正の値として次式で計算できる。

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

y軸の正方向からプイ傾斜角までのx-y平面での回転角 θ は次式で計算できる。

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

ここに、 $\pm$ は $\delta_x \geq 0$ の場合+、 $\delta_x < 0$ の場合-とし、

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

である。また、プイに設置された方位計では、磁北からy軸の正方向までのx-y平面上的回転角 α ($-\pi < \alpha \leq \pi$)が測定され、磁北からプイ傾斜角までのx-y平面上的回転角は $\alpha + \theta$ となる。 $\alpha + \theta$ を $-\pi < (\alpha + \theta) \leq \pi$ とすると磁北からプイ傾斜角までのX-Y平面上的傾斜方位角 θ_N は次式により計算できる。

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

ここで、Cは係数で以下の値を示す。

$$|(\alpha + \theta)| > \pi/2 \quad \text{のとき} \quad C = \pi$$

$$-\pi/2 \leq (\alpha + \theta) < 0 \quad \text{のとき} \quad C = 2\pi$$

$$0 \leq (\alpha + \theta) \leq \pi/2 \quad \text{のとき} \quad C = 0$$

なお、 δ_x, δ_y は共に0は除く。

b) 係船索張力およびプイ傾斜角とプイ傾斜方位角

係船索張力 T_R 、プイ傾斜角 δ 、プイ傾斜方位角 θ_N および10分間平均風速 $\bar{U}_W$ 、風向、有義波高 $H_{1/3}$ の観測結果の一例を時系列の形で図-4に示す。図-4において上部のWNWが風向を示す。また、上段に θ_N 中段に δ とD地点の $H_{1/3}$ を、下段に T_R および $\bar{U}_W$ を示した。図-4は12月14日13:25~14:25の観測結果の一部で、K丸が係留されていた。

図-4でわかるように、プイ傾斜方位角 θ_N は、観測期間中、短周期の変動を無視するとほぼ一定でSEの方向を示している。風向はWNWで、流向はSであるから、タンカーは、船首がほぼ風向に一致した位置から、潮流のために若干S方向へ傾けられた位置にあることになる。これは、船舶が風圧力および流圧力によってSE方向へ押されているためで、レーダー観測によっても、このとき、船軸の船尾方向がSEになっていることが確認されている。したがって、船舶の位置は、風と潮流の影響を受けるが、主に風の影響を強く受けていることがわかる。なお、 θ_N はほぼ一定であるから船舶の振れ回り運動は小さい。図-4における δ および T_R の変動をみると T_R が約20tf以上では、 δ は短周期変動振幅が非常に小さく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、5~6°を中心に5°程

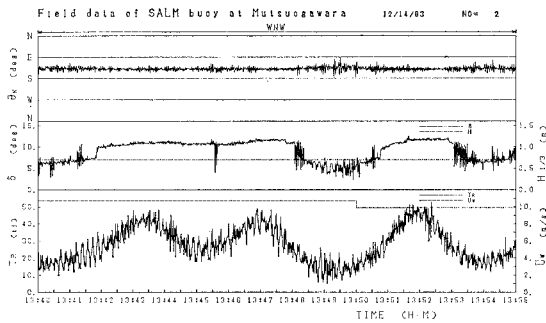


図-4 係船索張力とブイ傾斜角および傾斜方位角の時系列波形

度の振幅で短周期の変動を示す。これは、ブイ係留チェーンと係船索の大きな張力で、ブイ上端と下端が拘束されると、ブイが変動しにくくなるのに対して、拘束が弱くなるとブイが運動し易くなることを示している。

図-4の T_R の変動には、周期4～5分の長周期変動成分と、周期10数秒以下の短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} が重要であるので、長周期成分と短周期成分のどちらが支配的になるかを検討した。そのために、 T_R の移動平均を求め、短周期成分を除去した。移動平均は61個のデータを平均する操作を2回繰り返すことによって行った。

表-2は、全観測ケースについて、海気象条件と T_{Rmax} および δ_{max} を整理した表である。上段のA, B, C, Dは図-1に示した観測地点を示し、左端に船名とケース番号を示す。表中、 $\bar{V}_C$, CDは1時間平均の流速および流向、 $\bar{U}_W$ は10分間平均風速の1時間平均値で、 $\bar{U}_{Wmax}$ は10分間平均風速の最大値を示し、WDは1時間最多風向である。 T_{Rmax} は T_R の最大値、 $\bar{T}_{Rmax}$ は移動平均値すなわち長周期変動成分の最大値である。 $\bar{T}_{Rmax}$ 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割合を調べたところ、 $\bar{U}_{Wmax}=10.7\text{ m/s}$

の時には、 $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ は0.8であった。 $\bar{U}_{Wmax}=4\sim6\text{ m/s}$ では、 $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$ は0.5～0.62であるので、最大風速が大きくなると、 $\bar{T}_{Rmax}$ の T_{Rmax} に占める割合は大きくなることがわかる。 δ_{max} も $\bar{T}_{Rmax}$ と同様に $\bar{U}_{Wmax}$ が大きくなると、増加する傾向にあり、 $\bar{U}_{Wmax}=10.7\text{ m/s}$ のとき12.49°である。潮流については、1時間平均のデータしかないので、詳細な議論はできないが、Case N-1で $\bar{V}_C=0.22\text{ m/s}$ と大きい場合でも $\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}=0.56$ であるから、風に比較すると、その影響は小さいと言える。

以上のことから、長周期の変動は主に風によって起こされていると思われる。 θ_N , δ , T_R の短周期の変動は、その周期特性から、波浪によると思われるので、次節で詳しく検討する。

(2) 係船索張力およびブイ傾斜角の短周期変動成分の特性

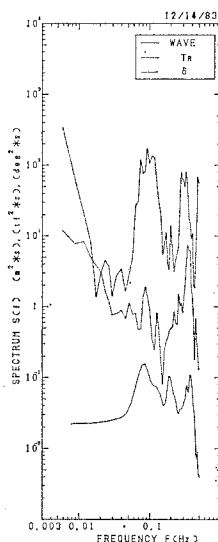
T_R および δ の短周期変動特性と波浪の相関を調べるためにスペクトル解析を行った。図-5は、図-4と同一ケースの T_R , δ , 波高 H の周波数スペクトルを示した図で、 T_R および δ については、図-4の13:40から数えて1024データ(1024秒)のスペクトル解析結果を示した。波浪スペクトルは、波形データが得られているD地点の13:50～14:10の観測値から計算した。

一点鎖線で示したブイ傾斜角 δ のスペクトル形には、2つの明確なピークが存在し、高周波数側が0.34 Hz、低周波数側が0.08 Hzである。波浪スペクトルのピークは3つあり、ピーク周波数はそれぞれ0.08, 0.18, 0.38 Hzである。エネルギーレベルを検討すると、波のスペクトルでは、0.08 Hzのピークのエネルギーレベルが卓越している。したがって、 δ の短周期変動のうち、0.08 Hzのピーク周波数を持つ変動成分は、最も大きなエネルギーをもつ波の周波数成分に対応していることがわかる。 δ の0.34 Hzの振動は、波のスペクトル

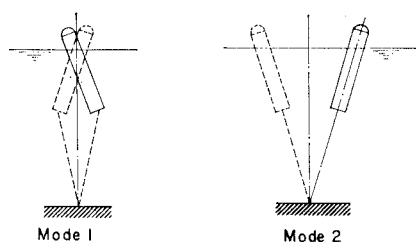
表-2 海気象条件と観測値の統計量

TANKER CASE	DATE TIME	WAVE				CURRENT		WIND			TENSION				SLOPE	
		A		D		A		C			B				B	
		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{V}_C$ (m/s)	CD* (deg)	$\bar{U}_W$ (m/s)	$\bar{U}_{Wmax}$ (m/s)	WD	T_{Rmax} (tf)	$T_{R1/3}$ (tf)	$\bar{T}_{Rmax}$ (tf)	$\bar{T}_{Rmax}/T_{Rmax}$	δ_{max} (deg)	$\delta_{1/3}$ (deg)
K-1	83 12/13 13:39～	0.5	6.0	0.60	5.6	0.13	190	2.5	4.4	WSW	17.00	8.30	10.48	0.62	5.50	3.09
K-2	83 12/13 16:01～	0.5	8.0	0.45	6.1	0.13	188	4.8	5.1	W	13.00	9.73	7.39	0.57	4.53	3.23
K-3	83 12/14 9:29～	0.75	5.6	0.73	5.8	0.13	183	5.5	7.0	WNW	38.00	20.02	27.13	0.71	7.44	5.00
K-4	83 12/14 13:25～	0.7	4.6	0.59	4.6	0.13	182	10.0	10.7	WNW	53.00	41.12	42.50	0.80	12.49	11.70
N-1	84 2/21 13:29～	0.75	16.0	0.70	11.3	0.22	186	6.9	8.3	W	28.00	17.73	15.70	0.56	7.46	7.54
N-2	84 2/21 15:28～	0.8	19.4	0.63	11.5	0.16	173	6.1	7.5	WNW	39.00	18.59	19.69	0.50	7.52	3.46
N-3	84 2/22 10:15～	1.5	12.6	0.65	5.9	0.09	21	5.6	6.4	WNW	29.00	17.73	19.14	0.66	8.93	6.03
N-4	84 2/22 13:58～	1.2	7.9	0.67	4.9	0.05	68	5.4	5.6	W	22.00	12.99	13.39	0.61	8.97	5.13

* 流向 CD は、南起方位。



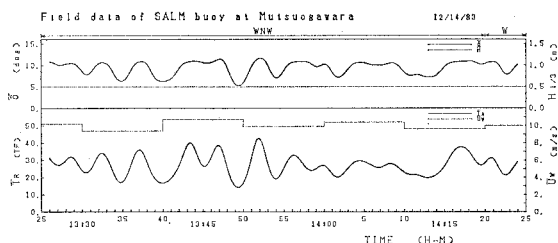
図—5 波と係船索張力およびパイ傾斜角の短周期変動成分スペクトル図



図—6 一点係留パイ固有振動

ルピーク周波数 0.38 Hz と若干ずれているが、パイ自身の固有振動数に近く、パイが波によって共振されて運動が増幅されたのではないかと推測される。模型実験⁹⁾によると、本システムにおける一点係留パイは、図—6 に示すような2種類の振動 Mode をもつ。模型実験結果では、Mode 1 の固有振動数は、約 0.29 Hz、Mode 2 の固有振動数は 0.04 Hz 程度であった。傾斜角 δ における 0.34 Hz での大きな振動は、Mode 1 の固有振動数 0.29 Hz とは周波数が若干ずれているが、パイが係船索で拘束されているため、Mode 1 の固有振動が少し高くなったことも考えられる。このように考えると、0.34 Hz における δ の大きな振動は、パイの固有振動付近で波浪外力との共振で増幅されたものと推測される。一方、Mode 2 の固有振動については、係船索によってパイが拘束されているため、 δ のスペクトルには現われていない。

図—5 の T_R の周波数スペクトルは、0.09 Hz、0.25 Hz および 0.35 Hz 付近がピーク周波数となっている。ほぼ、 δ のスペクトルのピークと対応しているが、低周波数側のピークのエネルギーレベルが卓越している。また、0.2 Hz 付近に小さいピークを持つことも δ とは異



図—7 係船索張力とパイ傾斜角の移動平均波形

なる。

(3) 係船索張力およびパイ傾斜角の長周期変動成分の特性

図—7 は、(1) で述べたような手法で T_R および δ の移動平均を求め、長周期変動成分 $\bar{T}_R$ および $\bar{\delta}$ だけを示した図である。観測ケースは、図—4、図—5 と同じ 12 月 14 日の Case K-4 で、1 時間分を示した。 $\bar{T}_R$ の変動周期は、4~6 分、変動幅は 12~25 tf 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 25 tf 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、14:00 以前は $\bar{T}_R$ の変動幅は 12~25 tf と大きかったが、14:00 以降、10 分間平均風速 $\bar{U}_W$ は以前と同じく約 10 m/s であるのに、変動幅が 5 tf 以下になっている。この原因としては、流向、流速等の変化が考えられるが、1 時間平均のデータしかないので詳細は不明である。長周期を起す原因としては (1) で述べたように風と潮流が挙げられる他に、波浪による長周期変動が考えられる。本観測の場合には、張力の長周期変動は風が主要因となっていると思われるが、波浪による影響も若干含まれていると考えられる。しかし、波浪による影響がどの程度であるかについては、明らかでない。

4. 観測値との比較による数値計算の妥当性の検討

(1) 数値計算の条件設定

3. で示したように、 T_R と δ の変動は、波とパ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支配的になる。そこで、風と流れを外力として、係留船舶の運動および係船索張力について数値計算を行った。計算は、鈴木²⁾によって開発され、著者等が一部修正した数値計算法を用いた。外力として流速は 1 時間平均流速、風速は表—2 の 10 分間平均風速の 1 時間平均値を用いた。なお、風は Davenport のパワースペクトルを持つ変動風を用いた³⁾。船体の質量は表—1 の値を、載荷状態を考慮して補正した値とし

た。係船索張力は船首とブイの位置から、のび特性を考慮して計算した。船体の流圧力係数 C_U は最大係船索張力 $\bar{T}_{R\max}$ の観測値と計算値が比較的良好に一致するものを選んだ。風圧力係数、浅水影響係数等は文献 2) に従った。

(2) 数値計算結果と観測値

図-8 は、最大係船索張力 $\bar{T}_{R\max}$ の計算結果と観測結果を示した図である。図の横軸が風速、縦軸が張力を示す。 Z_{SR} はタンカーにおける係船索取付点の水面上的高さを示し、 $Z_{SR}=19.7\text{ m}$ のときはタンカーがほぼ空載状態に、 $Z_{SR}=9.7\text{ m}$ のときはほぼ満載状態にある。白記号が観測値、黒記号が計算値を示す。張力の観測値としては移動平均した値を使用し、10 分間平均風速と、それに対応する 10 分間の最大係船索張力 $\bar{T}_{R\max}$ をプロットした。図-8 において、 $\bar{T}_{R\max}$ は、風速が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。同一風速のときは、 Z_{SR} が大きい場合、すなわち空載状態に近く吃水が浅い場合に $\bar{T}_{R\max}$ は大きくなっている。

計算において、流圧力係数 C_U を 0.2~1.5 に変化させて計算結果と観測値を比較したところ、 $C_U=0.3$ のとき最もよく一致した。図-8 は $C_U=0.3$ のときの計算値を示している。この値は、従来報告されている 1.0~1.6 よりもかなり小さい値になっている。

図-9 は、図-7 と同一ケースを対象とした船体運動

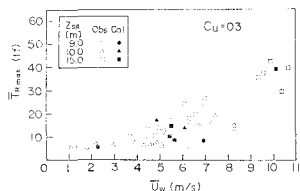


図-8 最大係船索張力と平均風速

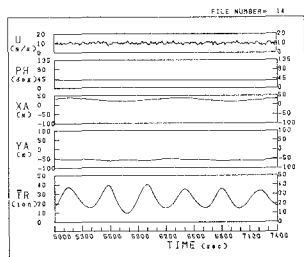


図-9 係船索張力および船舶運動の計算結果

および係船索張力の計算結果である。図-9 の最上段に風速、最下段に係船索張力 $\bar{T}_R$ の変動を示した。XA, YA は、磁北を X 軸の正として、アンカー点を原点とした空間座標系 X-Y における船首の X 座標および Y 座標である。PH は船軸と X 軸との傾きで、計算時間中一定であり、船舶は振り回り運動をしていないことがわかる。これは観測結果とも一致している。

計算された $\bar{T}_R$ の変動周期は 6~7 分で、その値は最大で 40 tf、最小で 10 tf 程度である。図-7 の観測結果では変動周期は 4~6 分程度になっており、数値計算による変動周期がやや長い。しかし、観測値は 15~40 tf であるので、計算結果はほぼ一致している。以上のことから、風および流れによる長周期の張力変動は、適切に係数の値を設定することによって数値計算で推定できることが判明した。

5. ま と め

本報告では、一点係留ブイシステムの現地観測結果を解析するとともに、数値計算の妥当性を検討した。主な結果をまとめる以下ようになる。

- (1) 現地で観測されたブイの傾斜角および係船索張力の変動は、周期 5 分程度の長周期変動成分と、周期 10 数秒以下の短周期変動成分から成っている。
- (2) 長周期成分は、主に風と潮流によって生じ、短周期成分は、波とブイ自身の固有振動によって生じる。
- (3) 風速が大きくなると、係船索張力においては、長周期変動成分が支配的になる。
- (4) 数値計算結果と観測値を移動平均した最大係船索張力結果を比較したところ、流圧力係数を 0.3 としたときによく一致した。

最後に、現地観測においてむつ小川原石油備蓄会社の多大なる協力を得たことをここに記し、感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 鈴木康正・諸石一幸：ブイ係留船舶の荒天時の振り回り運動，港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 2, 1982, pp. 107~150。
- 3) 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り回り運動の計算，第 31 回海岸工学講演会論文集，1984, pp. 466~470。