

荒天時におけるSALM型ブイの運動と係留張力の特徴

運輸省港湾技術研究所 正会員 高山知司
運輸省港湾技術研究所 正会員 平石哲也
三井海洋開発(株) 佐尾邦久

1. まえがき

石油消費量の99.8%を輸入石油に頼っている我が国では、過去の石油ショックのときのような混乱を避けるために、大型の石油備蓄基地の建設が進められている。国家石油備蓄基地の第1号としては、青森県上北郡六ヶ所村にむつ小川原石油備蓄基地が完成され、続いて、福井県福井臨海工業地帯に福井石油備蓄基地が建設された。これらの備蓄基地では、陸上施設として、それぞれ、約500万klおよび340万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、水深約45mの沖合地点に原油受け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、一般に、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。一点係留ブイ方式としては、さらに、CALM型(Catenary Anchor Leg Mooring)型とSALM型(Single Anchor Leg Mooring)型に分けられる。両基地の場合、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と比較的大水深であることを考慮して、SALM型一点係留ブイシステムが採用された。

SALM型一点係留ブイシステムは、ブイを一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、波の作用時においても常にブイには余剰張力が働くようにしているシステムである。タンカーは、係船索を用いて、ブイに船首単点係留される。このような係留では、係留タンカーは風や潮流及び波浪などの外力を受けて、数分から数10分の長い周期で動き回る現象を起こす。この現象は、振れ回り運動と呼ばれている。なお、一点係留ブイに係留されたタンカーは、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。

このようなSALMブイシステムの設計にあたっては、次の様な2種類の検討をしておかなければならない。その1つは、タンカー係留時の、タンカーの振れ回り運動とそれによるタンカー係船索およびブイ係留チェーンに働く長周期の変動張力の検討である。もう1つは、タンカー非係留時に作用する大波浪によってSALM型ブイ本体に働く外力と、その外力によるブイの運動およびブイ係留チェーン張力の変動特性の検討である。

SALM型ブイに係留されたタンカーの運動と係船索張力の特徴については、筆者等は、むつ小川原石油備蓄基地において現地観測を行い、現地における特性を明らかにするとともに、大型タンカーの振れ回り運動および作用張力が、数値計算によってシミュレートできることを示した。¹⁾

ブイ単体の運動については、著者の一人である佐尾²⁾が、大波高時の運動を求める数値計算法について検討を行っている。また、前述のむつ小川原における現地観測においては、タンカーに係留していないときのブイ単体の運動を測定しているが、作用した波高が小さいケースが多く、ブイの運動を十分に観測することができなかった。さらに、その時の現地観測ではブイ係留チェーン張力を測定していなかった。本報告では、福井石油備蓄基地において、SALM型ブイを用いて、荒天時におけるブイの運動と係留チェーン張力に関して観測を行い、それらの変動特性について検討を行った。さらに、現在提案されている数値計算法を用いてブイの運動を求め、数値計算法の現地に対する適用性を検討した。

2. 現地観測の内容

(1) 観測地点とSALM型ブイの概要

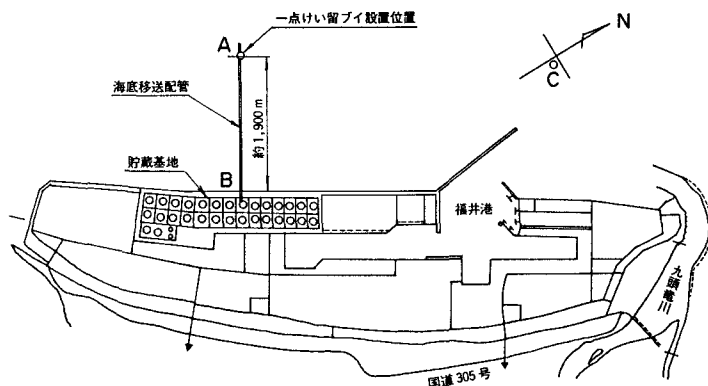


図-1 観測地点平面図

福井臨海工業地帯は福井県九頭竜川河口部の左岸に位置しており、日本海に直接面している。

図-1 に、SALM型ブイ設置点周辺の位置関係図を示す。図中の点Aは、水深 45 m のSALM型ブイ設置点である。地点Bは陸上の管理室を示し、そこではブイに取りつけられた計測器をテレメーター制御している。また点Bの屋上では、風向・風速・気温・気圧を測定している。図中の点Cは、第一港湾建設局が所有する水深 21.3 m の超音波式波高計 (U.S.W.)

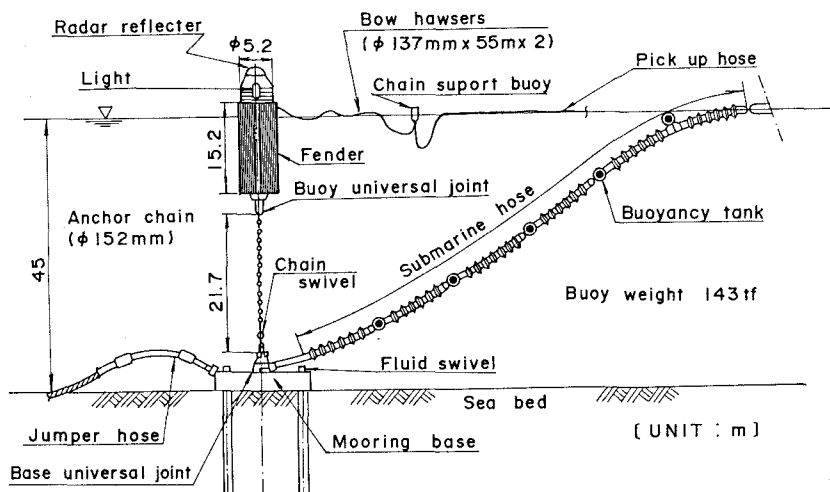


図-2 SALM型一点係留ブイシステム

の設置地点で、定常的に波浪観測が行われている。図-2 は、A 点に設置されたSALM型一点係留ブイシステムを示す。SALM型ブイは、1本のチェーンによって海底の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、本ブイの場合約 160 tf である。この過剰浮力によって、ブイの運動中においても係留チェーンは緩むことがなく、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、チェーンスイベルが取り付けられており、軸回りのブイの回転によるチェーンのねじれが生じないようにしている。ブイの直径は 5.2m で、側面には防舷材が取り付けられている。ブイ上面の一端にはタンカー係留用の係船索（ホーサー）が取り付けられており、このホーサーは、タンカー非係留時でも取り外されない。

(2) 観測項目と観測日時

現地観測では、1) 海気象条件 2) ブイに取りつけた計測器によるブイの2方向傾斜角、3) ブイ係留チェーン張力 を測定した。

海気象条件のうち、波浪については、図中C点で第一港湾建設局が2時間毎に20分間 U.S.W. を用いて定常観測を行っているため、その観測結果を用いた。ただし、A点の水深が45mであるのに対して、C点の水深は21.5mである。波周期を9.5sとしてC点及びA点における浅水係数 K_s を求めると0.91および0.95であり、大きな差はない。また、現地の海底地形は比較的単調な地形であり、屈折による影響は少ないとして、C点で観測された波浪を、A点のSALMブイ型ブイに作用する波浪として考えた。風速および風向は、B点の管理室屋上で毎正時に観測された10分間平均値を用いた。

図-3 は、SALM型ブイに取り付けられた計測器のブイ上面における配置を示す。図-3 に示すようにブイ中心を原点とし、係船索取り付け点をx軸の正方向としたブイ固定座標系 X_B-Y_B を設定した。ブイ上面に設置された方位計は、ブイ軸回りの回転角、すなわち X_B 軸の磁北からの方位角 α を測るのに用いた。またブイ側面には2方向の傾斜計が取り付けられており、 X_B 軸方向および Y_B 軸方向の2方向の傾斜角が測れるようになっている。ブイ下端のチェーン取り付け点には4枚の歪みゲージを取り付けており、取り付け点の歪みによって作用張力を測定している。2方向傾斜計、方位計および歪みゲージの測定データはテレメーターによって管理室へ送信し、1s間隔でデジタル化してフロッピーディスクに記録した。現地観測は、タンカーによる石油受け入れを開始した1986年6月から、1987年2月まで断続的に行った。本報告では、その中で最も海気象条件が厳しかった1987年2月3日13:30～2月4日3:10の約14時間に観測したデータを検討の対象とした。

2月2～4日には、東シナ海で発生した低気圧が、日本海上で発達しながら太平洋に抜け、それによって、

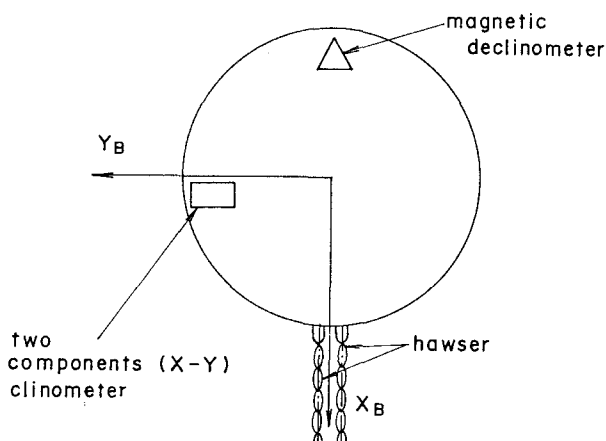


図-3 ブイ上の計測器取り付け点

風雪が強まった。この観測期間にC点で観測した波、およびB点で観測した風の条件を表-1に示す。表では、20分間の最高波高 H_{max} 、有義波高 $H_{1/3}$ 、最高波周期 T_{max} 、有義波周期 $T_{1/3}$ および平均風向と10分間平均風速 U を示した。 $H_{1/3}$ は、観測期間を通して、ほぼ3.2~4.4mと大きく、2月3日22:00が最大で4.4mであった。この時の H_{max} は6.88mであった。平均風速は、6:00を除くと約10m/sで、風向はほぼ北であった。

表-1 観測時の海象条件

CASE				H max	T max	H 1/3	T 1/3	W. D.	U
N O.	年 月 日	時 刻		[m]	[sec]	[m]	[sec]		[m/s]
1	87/2/3	14:00		5.61	9.0	3.73	8.1	SW	12.2
2	"	16:00		6.32	8.3	3.49	8.1	ESE	1.6
3	"	18:00		5.12	7.9	3.26	8.2	ENE	0.8
4	"	20:00		7.86	11.4	4.31	9.6	NE	3.7
5	"	22:00		6.88	9.9	4.40	9.5	N	17.3
6	"	24:00		7.59	8.5	4.34	9.4	NNW	17.4
7	87/2/4	2:00		5.69	9.8	3.53	8.9	N	15.0

傾斜角、方位角および張力のデータは連続して記録したが、解析にあたっては、波浪と同様に2時間毎20分間のデータを1ケースとして、case 1~7に整理し、それを用いて検討を行った。

3. 現地におけるブイの運動とブイ係留チェーン張力の特性

(1) ブイ傾斜角と傾斜方位角の定義

ブイ傾斜角は、ブイ軸上に固定した座標系における傾斜を示し、方位角はブイ固定座標系自体の磁北からの回転角を示す。ブイの運動を空間に固定した座標系で表すには、ブイ軸と直角に交わる平面の傾斜角とその傾斜している方向（傾斜方位角）を求める必要がある。図-4はブイ傾斜角と傾斜方位角の関係を示した図である。ブイ上面の傾斜角 δ は δ_x および δ_y を用いて次式で表すことができる。

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

ブイ傾斜角 δ の方位 θ_N は次式で求められる。

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

ここに、 θ は、ブイ傾斜角までの $X_B - Y_B$ 平面上の回転角であり、次式で計算できる。

$$\theta = \pm \cos^{-1} \left(\frac{\cos \delta_x \cos[\tan^{-1}(\delta_x/\delta_y)]}{\cos \delta} \right) \quad (\delta_x \geq 0 \text{ のとき正； } \delta_x < 0 \text{ のとき負}) \quad (3)$$

また、係数 C は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} |(\alpha + \theta)| &> \pi/2 && \text{のとき} && C = \pi \\ -\pi/2 \leq (\alpha + \theta) < 0 && \text{のとき} && C = 2\pi \\ 0 \leq (\alpha + \theta) \leq \pi/2 && \text{のとき} && C = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(2) ブイの運動と係留張力の変動特性

図-5は、2方向傾斜計で測定された傾斜角 δ_x および δ_y 、方位計で測定された X_B 軸の方位 α 、傾斜角 δ 、傾斜方位角 θ_N および係留チェーン張力の変動値 T_c の時間変動を示した図で、2月3日22:00のcase 5を示した。 δ_x および δ_y は0を中心として振動しており、周期数秒~10s程度の、波による短周期運動が顕著に現れている。方位角 θ_N は全方位に変動しており、ある方位を中心にした変動はしていない。一方、 α は、20分間では、北~南~北と変動しているものの、短周期の変動量は小さく、ブイが数秒周期で傾きながら頭を振って運動していてもブイ自身の軸回りの回転量の角速度は小さく、数秒間にはほとんど回転していないことがわかる。傾斜角 δ は0にはならずほぼ 10° 程度で短周期で変動している。したがって、ブイは傾いたままで回転しており直立の姿勢に戻ることはないようである。ブイ軸回りの回転運動が長周期で、短周期では変化しない原因としては、タンカー係留用のホーサーがタンカー非係留時でも取り付けられているため、ブイ軸回りの回転がある程度拘束を受けることが考えられる。

張力変動においても短周期の振動が顕著に現れており、波による影響が大きいことがわかる。変動張力の平均的な値は負となっている。これは、本観測期間の平均潮位が、ブイを設置した1986年6月の平均潮位に、比べると10cm程度低くなったので、初期張力が少し小さくなったためと思われる。

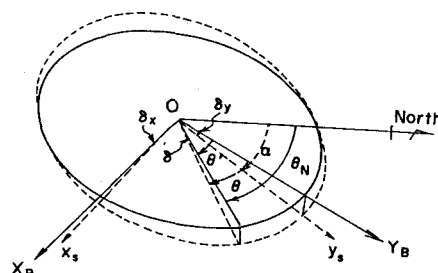


図-4 ブイ傾斜角と傾斜方位角の関係

表-2 は、 δ_x 、 δ_y および T_c の変動データを用いて、波データと同様に、ゼロアップクロス法によって求めた変動振幅の有義値及び最大値を示したものである。 δ_x と δ_y の統計量を比較すると、 δ_y の方が大きい。たとえば、case 5 の場合には δ_y の有義値は 32.17° であるが、 δ_x の有義値は、 23.15° である。したがって、本ブイでは Y_B 軸方向への傾斜量が大きくなる。これは、前述したように、 X_B 軸方向にはホーサーが取り付けられているので、 x_B 軸方向の傾斜運動がある程度拘束を受けるためと思われる。

また、変動張力 T_c の有義値は、5~6 tf であり、最大値で 7~9 tf 程度であった。ブイ係留チェーンに作用している初期張力が 160 tf であるので、それと比較すると、変動量は小さく 10% 以下である。したがって、張力の変動量は初期張力に比べると非常に小さく、荒天時においても、チェーンに衝撃的な力が作用することはなく安全な係留ができるものと考えられる。なお、変動張力の変動周期は、傾斜角の変動周期に比べると短い。ブイが完全に二次元的に運動した場合には、変動張力の変動周期は、運動周期の 1/2 になるので、本観測においても張力変動の周期がより短くなったものと思われる。

図-6 は、case-4 の δ_x 、 δ_y 、および T_c の変動量の周波数スペクトルを示したものである。図の太い実線は同時に観測された作用波のスペクトルである。 δ_x と δ_y のスペクトル形を比較すると δ_y のエネルギーレベルのほうが大きく、スペクトル形からも本ブイは Y_B 軸方向に大きく傾斜することがわかる。

δ_x と δ_y のスペクトル形を見ると、共に 2 つの顕著なピークを持つ。1 つは、 $f = 0.1$ Hz 程度のピーク（第 1 ピーク）で、この周波数と波のスペクトルのピーク周波数とは等しい。もう一つの顕著なピーク（第 2 ピーク）は $f = 0.23$ Hz 程度に生じている。この周波数における波のエネルギーは小さくピークは現れていない。したがって、このピークはブイの固有振動との共振によってブイの運動が増大して生じたものと推測できる。本ブイの設計時に行われた模型実験結果³⁾によると、SALM 型ブイシステム単体の固有振動モードは 2 つあり、その固有振動数は、長周期モードが $f = 0.04$ Hz、短周期モードが $f = 0.25$ Hz である。本ブイの観測スペクトルに示された第 2 ピーク周波数は、模型実験で示された短周期モードの固有振動周波数とはほぼ等しい。したがって、現地においても、短周期モードの固有振動が波との共振によって増幅されて、エネルギー Spektrum に第 2 ピークが現れたものと考えられる。0.04 Hz の長周期モードの固有振動について調べると、 δ_y のスペクトルには、0.04 ~ 0.05 Hz に低いピークがみられるが、そのエネルギーレベルは第 1 および 2 ピークに比べると小さく顕著ではない。 δ_x には、長周期モードの固有振動周波数に相当する明瞭なピークはみられず、0.03 Hz 程度で小さなピークが生じている。これは、 X_B 軸方向の傾斜はホーサーによって拘束を受けているので、ブイの長周期の固有振動モードはその影響を受けて変化し、その固有振動数が変化したためと思われる。したがって、今回観測されたような荒天時においても、ブイの傾斜角の変動成分には、ブイの固有振動と波との共振による変動が顕著に現れ、ブイの固有振動モードに対する検討が、ブイの設計には、重要になってくることがわかる。

T_c のスペクトルは、長周期成分のエネルギーレベルが大きくなっているが、これは変動値が負側ヘシフトしているためである。 δ_x 、 δ_y のスペクトル形に比較すると、そのピークが明瞭ではない。ブイの運動が 2 次元的であれば、変動張力のスペクトルは、運動のスペクトルのピーク周波数の 2 倍の周波数でピークを持つと思われるが、現地での運動は 3 次元的であるので明瞭なピークが生じにくい傾向にある。

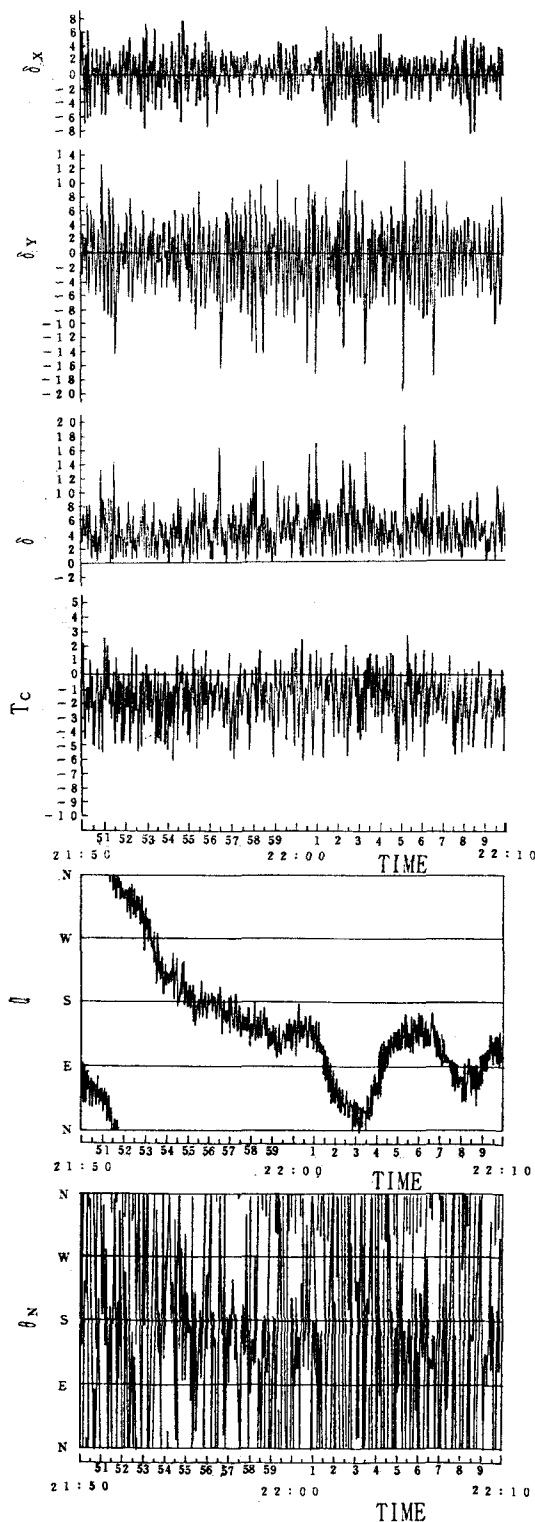


図-5 観測データの時間変化
(CASE-5)

表-2 観測値の統計量

CASE		average	significant amplitude	maximum amplitude	significant period
1	δ_x δ_y T_c	0.0 deg -0.6 deg -1.4 tf	9.1 deg 16.6 deg 5.0 tf	15.7 deg 34.6 deg 7.0 tf	7.3 s 7.3 s 6.1 s
2	δ_x δ_y T_c	0.2 -0.7 -1.3	9.6 16.4 5.1	14.0 31.5 9.2	8.1 7.7 7.3
3	δ_x δ_y T_c	0.4 0.0 -1.6	8.9 10.4 5.3	14.2 19.2 7.9	8.1 8.1 6.7
4	δ_x δ_y T_c	0.2 -1.3 -1.0	11.9 26.7 5.6	18.8 52.9 8.6	9.1 9.7 7.7
5	δ_x δ_y T_c	-0.1 -1.0 -0.8	17.6 32.2 6.0	27.9 61.2 8.5	11.2 11.0 8.8
6	δ_x δ_y T_c	-0.1 -1.4 -1.3	14.3 23.7 5.5	34.1 45.1 7.6	9.0 8.9 8.2
7	δ_x δ_y T_c	-0.0 -1.1 -1.6	10.8 22.4 5.7	15.2 46.5 8.7	8.9 8.9 8.5

4. 観測値による数値計算法の適用性の検討

(1) 数値計算法の概要

SALM型ブイのような係留浮体の波浪中における動揺については、従来から多くの研究が成されている。著者⁴⁾も、任意形状の軸対称浮体の運動に関して領域分割法を応用した解析法を示した。本計算法では、微小振幅の仮定を用いるが、浮体の運動速度に比例する非線形の抗力も導入している。本SALM型ブイの場合には、1本の係留チェーンで緊張係留された円筒浮体として、ある周期の規則波に対する変動量を計算して、作用波浪に対する応答関数を求めることができる。

図-7 は、数値計算で求めたSALM型ブイの応答関数を示す。図の横軸には、作用させた規則波の周期、縦軸には、作用波の振幅を1mとしたときのブイの傾斜角 δ_s および作用張力 T_{cs} を示した。非線形抗力係数 C_d の値については文献⁴⁾は0.5を採用しているが、現地ではブイ側面の防舷材の影響でブイの抗力係数が大きくなる可能性がある。また、計算では、水平、鉛直および傾斜変動量に比例した張力の成分が、それぞれの運動に対する拘束力になるとして計算しているので、ブイが水平方向にだけ振動する場合も生じる。しかし、SALM型ブイの場合には、係留力が非常に強いので、水平運動だけが起こる可能性はない。そこで、ここでは水平および傾斜運動に対する抗力係数を0.5~5.0に変化させた。図に示すように抗力係数 C_d によって応答関数の値は変化し、 C_d が大きくなると、 δ_s のピーク値は小さくなる。 T_{cs} は、 C_d が変化しても、ほとんど変化しない。 $C_d < 2.0$ 以下では傾斜角は $f = 0.1$ Hz付近で顕著なピークを持つが、模型実験ではこの周期での固有振動モードは現れなかった。そこで、抗力

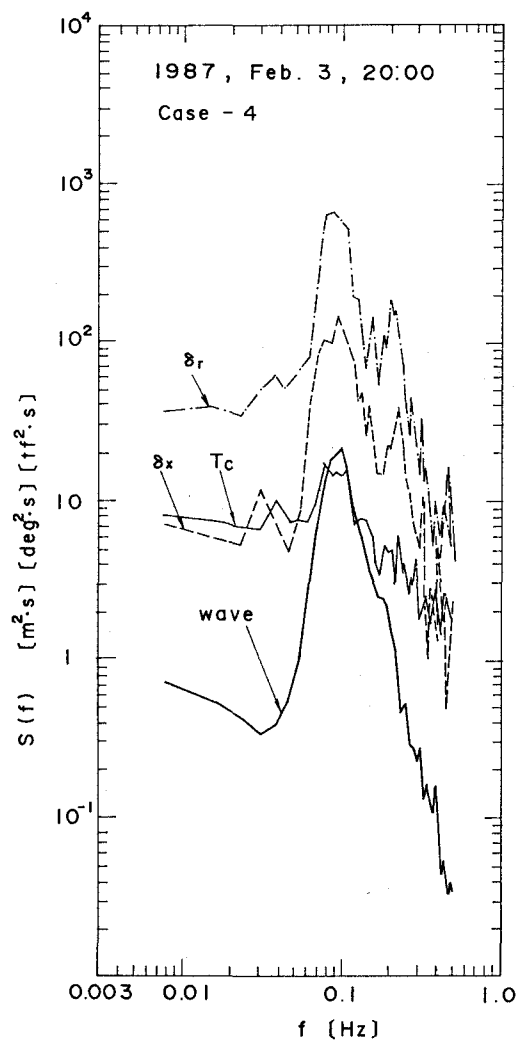


図-6 傾斜角および変動張力のスペクトル

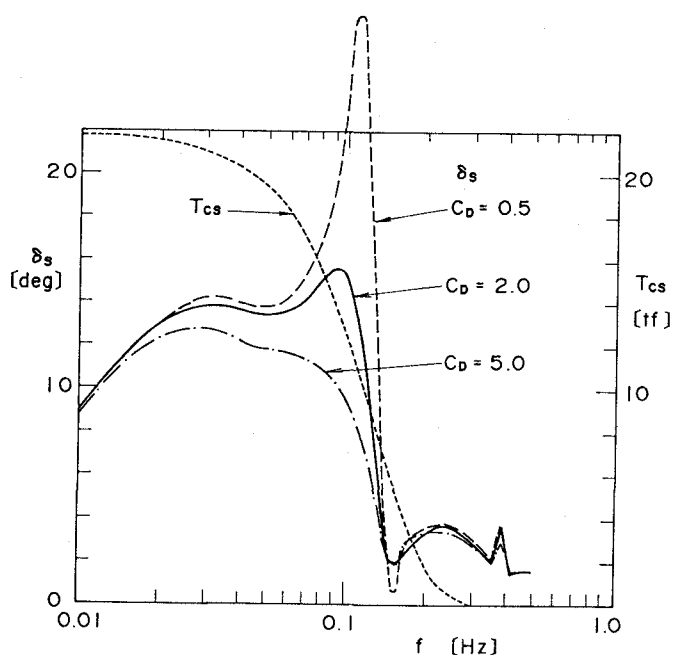


図-7 傾斜角の応答関数

係数の値としては大きいですが、本計算の場合 $C_d = 5.0$ を採用した。

(2) 数値計算と観測値の比較

ここでは、図-7に示した応答関数の値の2乗を作用波のスペクトルに乗じて、傾斜角の計算スペクトルを求め、観測したスペクトルと比較した。ただし、数値計算では、ブイの運動は二次元であり一方向にしか傾斜しないのに対して、現地では、傾斜方位角が 360° の範囲で変化する3次元的な運動を行っている。そこで、 δ_x と δ_y のエネルギーレベルの差が最も大きく、 δ_y 方向へ傾斜が卓越しているようなケースに限って比較を行った。図-8は、case-4における計算値と観測値のスペクトルを示す。図-8において第1ピークの場合は、計算値が観測値より大きくなっているが、全体的なスペクトル形状はよく一致している。しかし、短周期の、共振による第2ピークは、計算値では顕著に現れていない。効力係数を小さくして0.5にすると、第2ピークにおける計算値と観測値の値を一致させることができたけれども、第1ピークの値が大きく異なり、計算値が観測値の数十倍になってしまう。

したがって、本数値計算法のような二次元的な運動を対象とした数値計算法では、ある程度まで現地におけるブイの運動特性を表すことができるけれども、完全に再現することは困難である。今後は、現地での運動を再現できるように、波の方向分布性を考慮した3次元的な計算法を検討する必要がある。

5. あとがき

本報告では、主に荒天時におけるSALM型ブイの運動と張力の変動特性について、検討した。その結果、主に 1) ブイに取り付けられたタンカー係留用のホーサーの影響により、ホーサーの取り付け点の方向にはブイは傾斜しにくく、それと直角の方向の傾斜が卓越する； 2) 変動張力の振幅は初期張力に比較すると10%以下で小さく、この程度の荒天時には衝撃的な力がブイ係留チェーンに作用することはない； 3) ブイの運動には、固有振動モードの影響が大きく、荒天時においても共振によって固有振動モードの運動が顕著になる；等の結論を得た。

最後に、本現地観測に対するご支援をいただいた福井石油備蓄株式会社ならびに運輸省第一港湾建設局の関係者の方々に深い感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高山知司 他4名：一点係留ブイの運動と係船索張力に関する現地観測，港湾技研資料，No.542, 1985, 38p.
- 2) 佐尾邦久 他2名：一点係留システムの解析法（その1）－基礎方程式とSALMブイの運動－，日本造船学会論文集，Vol.162, pp.257~266, 1987.
- 3) 三井海洋開発株式会社：一点係留ブイバース動的模型実験報告書，1981.
- 4) 高山知司，諸石一幸：波浪中における軸対称浮体の動揺計算，第30回海岸工学講演会論文集，pp.425~429, 1983.

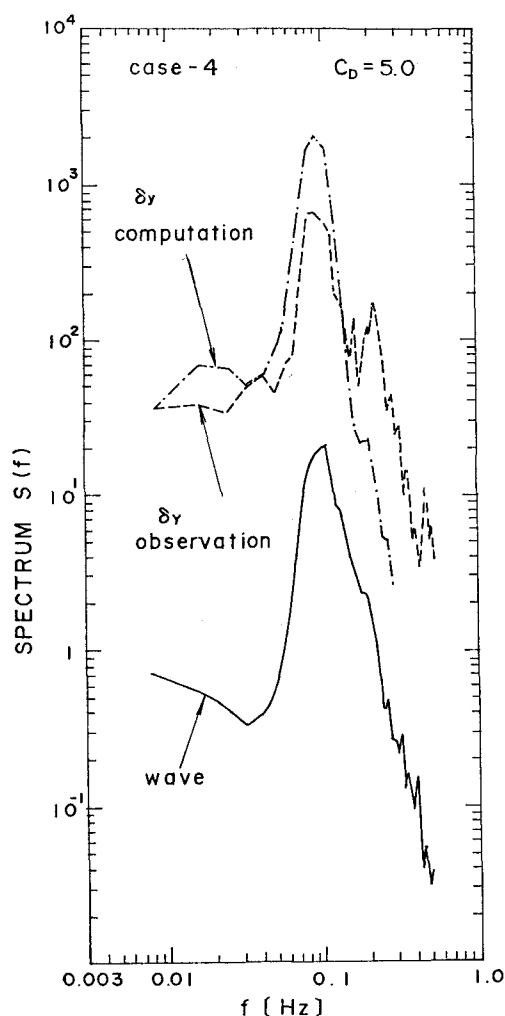


図-8 計算スペクトルと観測スペクトルの比較