

船型ブイの模型実験と現地観測

運輸省港湾技術研究所 正会員 高山 知司
 正会員 平石 哲也
 高山 優
 海洋科学技術センター 甲斐源太郎
 中埜 岩男

1. まえがき

国際的な海洋開発の時代を迎えて、我国でも沿岸より 200海里沖合までの海域の有効利用を図る必要性が高まっている。沖合の海域を有効に利用するためには、海象条件を的確に把握しておくことが重要であり、精度の高い海象観測装置を設置する必要がある。外洋における海象観測装置としては、大型のデイスカスブイが実用化されているが、製作および設置費用が高価である上に、波浪に対する安定性にも問題があり、運搬にも手間がかかるといわれている。そこで、廉価で陸上輸送が簡単な小型定置ブイとして、船型ブイが開発されてきている。船型ブイはトラックによって輸送可能であり、海上では小型船舶によって曳航することができる。米国では、すでに V.E.NOMAD と呼ばれるアルミ製の船型ブイが試作されており、種々の機能に対して試験が行われている。¹⁾ 本研究は、我国において試作された船型ブイの波浪応答特性および、波と風の作用下における運動特性を模型実験および実機を用いた現地観測によって検討し、現地に対する本ブイの適用性を調べたものである。

2. 船型ブイの概要

(1) 船型ブイの仕様

表-1 に示すように船型ブイは水深 120~5,000 m 程度、最大平均風速 60m/s、最大有義波高 30 m 程度の環境に耐え得るように設計されている。表-2 は、本船型ブイの基本仕様を示したもので、

図-1 には、ブイの外観を示している。ブイは全長 6 m、全幅 3 m のずんぐりした船形をしており、船尾にはブイの船軸の向きを安定させるために 図-1 に示されるように大型のフィンが付いている。船底からブイ重心までの高さは、1.2m であり、船体の傾斜角が 140° になるまで復原力を失わないような安定性に優れた構造となっている。また滑らかな曲面が構成できるように船体は FRP (Fiber Reinforced Plastic) で製作されている。ブイには、方位計、ブイの動揺量を計測するピッチ・ロール・ヒープセンサー、風向計、風速計が搭載され、電源には太陽電池が用いられている。ただし、太陽電池の発電量が現在のところ不明なので、アルカリ蓄電池も併用されている。

(2) 数値計算による応答特性の検討

船体の動揺量の計算には、船体横断面をルイスフォームで近似させて、ストリップ法を用いて求める方法を採用した。²⁾ 図-2 (1)、(2) は、規則波が作用したときのブイの surge、heave、pitch の振幅を計算した結果を示したもので、横軸に角周波数 ω 、縦軸に動揺量の両振幅を surge、heave については波高で、pitch については最大水面傾斜角で除した無次元動揺量を示している。図中 T は入射波周期である。図-2 (1) は波が船尾方向から作用した場合、図-2 (2) が船首方向から作用した場合を示す。図から波の周期が 4 秒以上になると、いずれの場合でも船の heave の振幅が波高と一致するようになることがわかる。したがって、周期 4 秒以上の波が作用している場合には、船の heave を正確に測定すれば波高を推定することが可能になる。

3. 模型実験の方法

(1) 断面実験における実験装置と測定方法

ブイの運動の特性をより正確に調べるために、図-1 に示した船型ブイの 1/20 の模型を FRP で製作して、模型実験によって、波および風が作用した場合の船体の運動特性を検討することにした。以下に

表 1 設計環境条件

No.	項目	条件
1	水深	120~5000 m
2	風速	平均 60 m/S
3	波高	30 m (最大有義波高)
4	波周期	25 sec (最大有義波高時)
5	海潮流	9 knot (最大、風浪による影響を含む)
6	気温	-10~50°C (室内 0~45°C、甲板上 -10~60°C)
7	海水温度	0~45°C
8	湿度	10~100% (室内 10~98%)

表 2 浮体の基本仕様

長さ (m)	6.0	浮心の前後位置 (m)	0.14
幅 (m)	3.0	メタセンタ高さ (m)	1.64
深さ (m)	2.10	方形係数	0.44
喫水 (m)	1.41	柱形係数	0.62
全容積 (m ³)	19.5	中央横断面係数	0.72
浮心高さ (m)	0.94	水線面係数	0.90

主要諸元

全長	6.0 m
全幅	3.0 m
全深	2.1 m
マスト高さ	7.0 m
排水量	約 8 ton
喫水	約 1.4 m

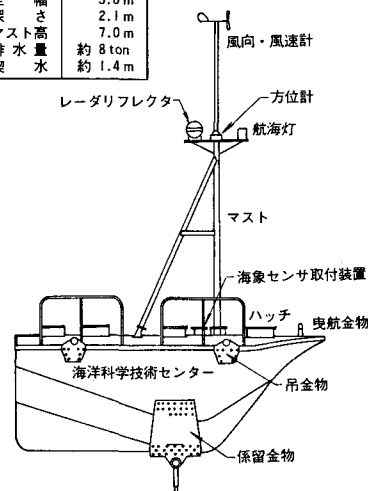


図-1 船型ブイの外観

実験条件および実験結果を示す数値は、カッコ無しのものが模型における値を示し、[] 内の数値は現地換算値を示す。

最初に、非係留、係留時の船型ブイの波浪応答特性を調べるために、長水路において2次元断面実験を行なった。図-3は、2次元断面実験における実験水路の概要と模型の配置を模式的に示したものである。水路の長さは約40m、幅1.5m、深さ1.5mであり、水路中央部付近の水槽壁がガラス張りになっており、模型の運動を水路の断面方向から観測できるようになっている。水路端には、ピストンタ

イプの不規則波造波装置が設置されており、0.7秒以上の周期を持つ波を造波することができる。もう一方の端にはステンレス切片を詰めた消波工が設置されている。ブイ模型は、伸びが極めて小さいナイロン製釣り糸を用いて、水槽中央付近に係留した。釣り糸は、水路床上の滑車を介して、水面上に設置された架台上的のバネ、ゴム等の弾性体と結ばれており、このバネあるいはゴムを変えることによって係留系全体の伸び特性を変化させた。

ブイの係留索に作用する張力は、ブイとナイロン製釣り糸の間に小型張力計をつけて測定した。ブイに作用する波の周期と波高は、ブイ設置点より2m造波板側に寄った点で容量式波高計によって測定した。また、ブイのマストの根元と頂上に豆電球をつけ、X-Yトラッカーで、この2つの光点の鉛直面内における変位を測定した。ブイの heave の振幅は、2つの光点の変位から求めた。

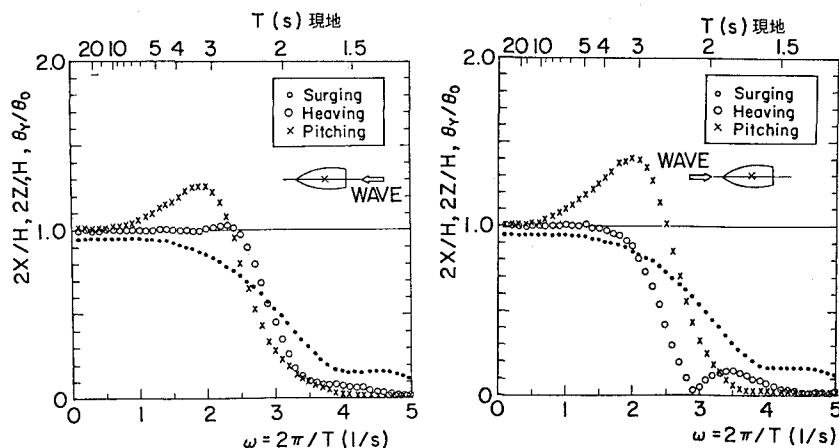
実験では、水深を80cmとして、最初に、周期0.7秒[現地3.1秒]から2.5秒[11.2秒]まで、0.1~0.2秒毎に周期を変化させた規則波を作用させた。規則波の波高は、波形勾配が0.02以下となるように設定したが、いくつかの周期については、波形勾配を0.04に設定した。次に、Bretshneider-光易型の周波数スペクトル形を持つ、目標有義波周期 $T_{1/3} = 1.8\text{sec}$ [現地8.1sec]、目標有義波高 $H_{1/3} = 3\text{cm}$ [0.6m] および 8cm [1.6m] と、 $T_{1/3} = 2.7\text{sec}$ [12.1sec]、 $H_{1/3} = 8\text{cm}$ [1.6m] の不規則波を作用させた。波群としてはそれぞれ異なる2つの波を用い、測定値としては、波群の平均値をとった。

ブイの係留状態は、係留系の相違による特性の変化を調べるために、無係留、係留力の小さいゴム係留、係留力の大きいコイルバネ係留の3通りとした。図-4は、実験で用いた糸ゴムおよびコイルバネの伸び特性を示した図である。コイルバネの伸び率は、糸ゴムに比べると1/5程度で非常に小さく、100gf以下の荷重をかけてもほとんど伸びなかった。実験では、現地での係留状態を考慮して、静水状態でブイに作用する初期張力はないものとした。

予備実験として、ブイの初期の向きを変化させて、船首方向から波が作用する、船尾方向から波が作用する、真横から波が作用する場合の3つのケースについて船体の運動を観測したところ、船尾および真横から波が作用したときには、ブイが急速に回転し、ほぼ波向に船首を向けてしまうことが明らかとなった。そこで、実験では、船首から波が作用するようにブイを設置した。

(2) 平面実験における実験装置と測定方法

平面実験では、波と風を作用させてブイの平面運動について検討した。図-5は、平面実験における模型、造波装置、送風機の平面配置を示した図である。平面水槽全体の大きさは、長さ35m、幅25m、深さ1.2mで、一端の水路壁に沿って図-5に示すサーベント型造波装置が設置されており、残



(1) 船尾より波が作用した場合 (2) 船首より波が作用した場合

図-2 ブイ動揺量の計算結果

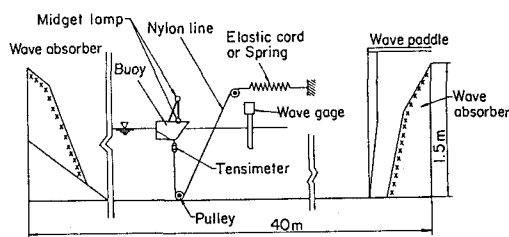


図-3 断面実験における模型の配置

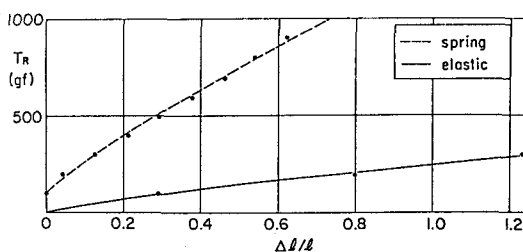


図-4 係留索の伸び特性

りの3方の側壁には、横スリットをもった階段護岸状のコンクリート製消波工が設置されている。サーベント型造波機は、造波板幅80cmのピストンタイプの造波機35台から成っており、各造波機に独立の信号を入力できるようになっているので、一方向不規則波および多方向不規則波を造波することができる。実験では、30台の造波機を用い、ブイ模型は、造波板列から6m離れた中央点に設置した。送風機は径1mのファンを6台横一列に並べたもので、ファンの回転数を調整することにより、風速の異なった定常風を発生させることができる。また、送風機の向きを移動させることによって、風向を変えることができる。

平面実験においては、波向は一定とし、風向を変えて、波向と風向のなす角 β を 30° および 60° の2種類に変化させた。実験波は、全造波板を同一の信号で運転して造波したBretshneider-光易型のスペクトルをもつ単一方向不規則波と、各造波板を独立に制御して発生させたBretshneider-光易型の周波数スペクトルと光易型の方向関数をもつ多方向不規則波を作用させた。実験波については、ブイ模型から造波板側へ2m程度離れた地点で、正三角形の3頂点および中心点に波高計を設置したアレイを使って波高を同時測定し、波高、周波数スペクトルを求めるとともに、MLM法を用いて方向スペクトルを求めた。その結果、実験波の周波数スペクトルは、ほぼ目標とするスペクトルに一致した。図-6は、方向スペクトルの解析結果の一例で、周波数スペクトルのピーク周波数における方向関数の分布形を、ピーク値が1となるように標準化して示したものである。○で示したサーベント造波機で造波された単一方向波の方向関数は鋭く

尖っておりほぼ単一方向波であると認められる。●で示した多方向波は、方向集中度パラメーター $S_{max}=10$ を目標として造波された波である。細線で示した $S_{max}=10\sim15$ の理論式から推定される値と比較するとほぼ一致しており、目標とする方向集中度を持つ多方向波が造波されていることがわかる。目標有義波高は、模型での値で、2~10cm[現地0.4~2.0m]程度とした。

風については、模型設置点において、ブイの水面上の船体の図心に近い、高さ5cmでの風速を、あらかじめ熱線風速計で測定しておいてファンの回転数と風速との相関を調べた。そして、ファンの回転数を調整して、模型での値で風速 $U=1\text{m/s}$ [4.5m/s]、 2m/s [8.9m/s]、 4m/s [17.9m/s]、の風を作用させた。ブイの係留は、断面実験の場合と同様な方法を用いたが、バネ定数の小さいゴム係留のみを採用した。またブイ模型には、船首と船尾に豆電球を光点として取り付けた。そして、ブイ模型の1.5m上方からカメラで撮影し、光点の位置をX-Yトラッカーで計測した。2光点の平面上の変位から、ブイの船軸の方向を求めることができる。実験水深は60cmとし、計測は、ブイがほぼ一定の場所で平常的な運動をしはじめてから4分間行なった。

4. 船型ブイの波浪応答特性と係留張力の推定法

(1) 船型ブイの波浪応答特性

図-7は、2次元水路で規則波を作用させたときの、船型ブイのヒーピングの振幅を示した図で、横軸に実験波の周期、縦軸にヒーピングの両振幅を波高で割った値を示している。丸印に横棒のあるケースは波形勾配0.04の波を作用させた場合であり、横棒のないケースは波形勾配0.02の波であることを示す。図に示されるように波形勾配の相違によって実験値が大きく異なることはなかった。○で示した無係留のケースでは、周期1.0秒[4.5秒]以上の波を作用させるとヒーピングの振幅は波高とほぼ等しくなり、ブイが波面に追従して運動していることがわかる。この結果は前述の数値計算結果とも一致する。●で示した糸ゴムによるゆるい係留をしたケースでは、周期1.0秒[4.5秒]のとき、振幅と波高との比 $2Z/H$ は1.3程度であるが、周期1.5秒以上では $2Z/H$ は1.0である。周期が0.7~0.9秒[3.1~4.0秒]のときには、 $2Z/H$ が0.9程度で1に近く、周期1.0秒のときだけ $2Z/H$

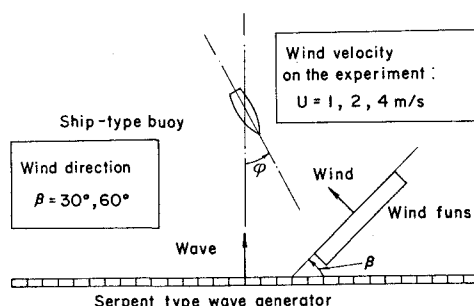


図-5 平面実験における模型の配置

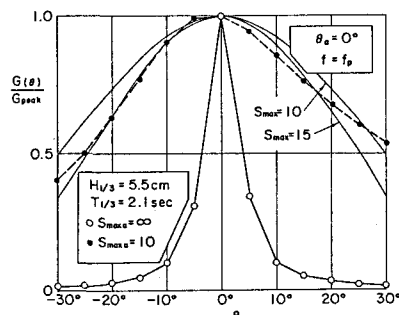


図-6 実験波の方向分布特性

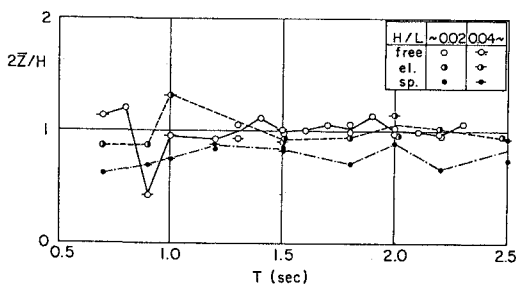


図-7 規則波に対するブイの応答特性

が1.3となり1から若干大きく離れた。この原因についてはわからなかった。●で示したバネによるきつい係留状態の場合には、 $2Z/H$ が0.8~0.9程度で、大きな係留張力により、ブイの運動が拘束されヒービング振幅が波高に比べると小さくなった。したがって、ブイのヒービングから波高を推定するためには、ブイの漂流を防止できるもので、なるべく伸び率が大きくなる係留索を用いなければならないことがわかる。

図-8 は、不規則波を作用させた場合の、ブイのヒービングから推定される有義波高 H_b と、入射波の有義波高 $H_{1/3}$ の比を示した図である。横軸に模型での有義波高を示した。無係留状態では、ブイが漂流して測定範囲を越えてしまい、不規則波の統計計算に必要な測定データ数が得られないので、ブイをゴムあるいはバネで係留したものについて解析した。図-8 に示されるように、いずれのケースにおいても H_b は $H_{1/3}$ とほぼ一致し、不規則波中においてもブイはよく波面に追従するので、ブイのヒービングから波高が十分な精度で推定できることが明らかとなった。不規則波を作用させたケースでは、バネによるきつい係留をしても、ヒービングの振幅と波高が一致したのは、不規則波の波高が小さいことによるとと思われる。

(2) 係留張力の推定法

図-9 は、規則波を作用させたケースにおける作用張力を示した図である。横軸にヒービングの片振幅、縦軸に係留系に作用する最大作用張力をとった。●および○は、実験で測定された最大作用張力であり、破線および一点鎖線は、ヒービングの片振幅に係留系の伸びと考えると、図-4 の係留系の伸び特性から推算した静的な推算作用張力である。バネで係留した場合、●の実験値は、破線で示した推算値とほぼ一致している。従って、係留系の伸び率がわかればブイに作用する最大波高とヒービングの最大振幅が一致するとして、ブイの変位を求め、最大作用張力を見積もることが可能となる。しかし、ゴムで係留した場合、○で示した実験値は、推算値より大きく、振幅が5cm程度のときには、推算値の4倍程度になった。

ヒービングの振幅から推定される張力よりも作用張力が大きくなるのは、波が作用した場合には、縦方向だけではなく水平方向にもブイは移動するので、この水平変位の影響によるものと思われる。したがって、バネ係留のように伸び率の小さい係留系を使用した場合には、水平変位も小さいので、作用する最大波高から最大張力を推定できるけれども、ゴムのよう伸び率の大きい係留系を用いた場合には、上下運動だけで係留張力が決定されるのではなくて、水平運動をも考慮しなければならないことがわかる。

5. 波と風の作用下における船型ブイの運動

図-10 は、平面水槽内におけるブイの船軸方向 φ の測定結果を示した図で $\beta=50^\circ$ および 60° の場合である。 φ は、船首が造波板の方向を向いたときを 0° として定義し、反時計回りを正とした。したがって、 $\varphi=180^\circ$ は、船尾が造波板方向を向いていることを示す。図-10 の○印および◇印は、 φ の平均値であり、直線区間は標準偏差を示す。横軸は入射波の有義波高である。 $H_{1/3}=0$ は、波を作用させずに風だけを作用させたケースで、風向 β は 30° である。このとき φ は $75\sim110^\circ$ であり、風向きに対して $45\sim80^\circ$ 程度船首方向はずれている。そして風速が大きくなるほど、そのずれは大きくなり、船体は風に対して腹を向けるようになる。ただし、実験したケースにおいては、 φ は風向 β より大きく $\beta+45\sim80^\circ$ となったが、船の初期値によっては $(\beta-45\sim-80^\circ)$ となることもあると考えられる。風が一樣風であるために、 φ の標準偏差は小さく 3° 程度であり、船体の動揺は小さいと考えられる。

○印で示した波だけを作用させた場合には、波高によって、 φ の平均値が大きく変化することではなく、ほぼ $9\sim15^\circ$ であった。したがって船首の方向は、波だけを作用させた場合でも波向とは $9\sim15^\circ$ 程度ずれていることがわかる。これは、係留系のねじれ、船体に取り付けた電球のコード等の影響によるものと思われる。

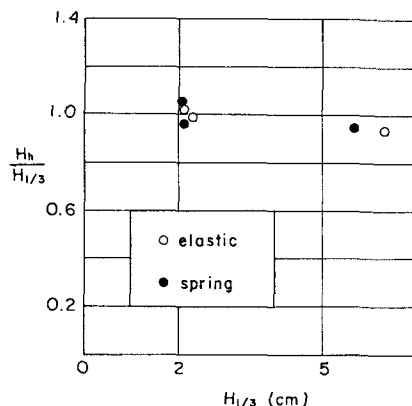


図-8 ブイ運動による推定波高と実測波高の比較

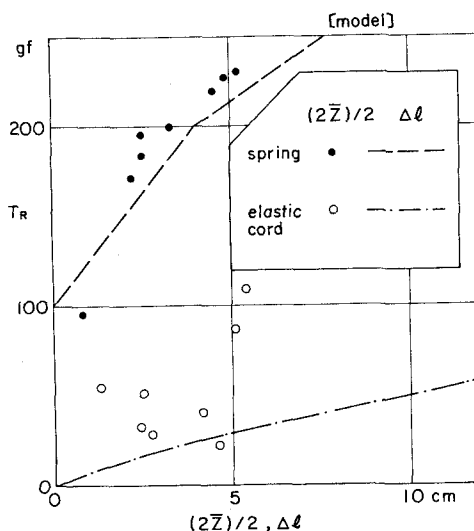


図-9 最大作用張力の推定値と実測値

波と風を作用させたとき、○および●で示した $\beta=30^\circ$ のケースにおいては、 $H_{1/3}$ が5cm [1m] 以下のとき、 $\varphi=-15\sim-30^\circ$ 、 $H_{1/3}$ が11cm [2.2m] 程度のとき、 $\varphi=0\sim-10^\circ$ となった。この理由としては、次のようなことが考えられる。前述したように風だけが作用した場合には、 φ は風向に対して $45\sim 80^\circ$ ずれる。そして、船の初期位置によって正あるいは負の方向へずれるものと考えられる。したがって、風向 β が 30° の場合には、 φ は、 $-15\sim-50^\circ$ となることも考えられる。このとき $\varphi=0^\circ$ の方向から波が作用すると、船軸は波の影響を受けて正方向へ回転し、波高が比較的小さいときは $\varphi=-15\sim-30^\circ$ に、波高が大きくなり、影響が大きくなると $\varphi=0\sim-10^\circ$ になる。

◇で示した $\beta=60^\circ$ の場合には、波高によらず φ はほぼ $0\sim 15^\circ$ である。これは、風だけを 60° の方向から作用させた場合、 φ は $15^\circ\sim 20^\circ$ になると考えられ、波が作用すると、波の影響を受けて、 $0\sim 15^\circ$ となるためと思われる。以上のことから、船体の平面運動は、波だけでなく、風、係留系のねじれ等の影響を受けるために、船軸の方向は、必ずしも波向と一致せず、船軸の方向から波向を判断することは困難であることがわかった。

φ の標準偏差は、 $H_{1/3}$ が6cm [1.2m] 以下では、 $6\sim 15^\circ$ 程度で小さいが、 $H_{1/3}$ が11cm [2.2m] 程度では、 $15\sim 20^\circ$ となり大きくなる。すなわち、波高が大きくなるほど、 φ のばらつきは大きくなっている。記号に斜め棒を引っ張った多方向不規則波のケースを、波高が等しい単一不規則波のケースと比較すると、 φ の平均値はほぼ等しい。 φ の標準偏差もほぼ等しく、差は見られないことから、ブイの平面的な回転運動の変動性は、波の方向分布性には大きく影響されないものと思われる。したがって、船首方向の変動性から波の方向分布特性を推測することは困難である。

6. 現地観測の概要と現地観測への適用性

(1) 現地観測の概要

現地観測は、静岡県熱海港の10km沖合の初島から北方へ5km離れた水深500mの地点において、1986年12月より1987年3月まで行なわれた。³⁾ 図-11は、現地における係留索の構成を示した図である。ブイにはまずシャックルを通して長さ約150m、直径26mmのステンレスワイヤーロープがつながれている。ステンレスワイヤーロープの端には、100mのテロンエイトSロープさらに250mのエスラインロープが結ばれている。エスラインロープの先端には、長さ250mのスタッドリンクチェーンおよびアンカーが連結されており、チェーンと海底面との摩擦およびアンカーの把駐力によって、ブイの漂流を防いでいる。チェーンとエスラインロープの接続部にはブイがつけられており、海底面から接続点が離れており、海底面との摩擦による切断を防いでいる。ステンレスワイヤーロープは径が小さく、テロンエイトSロープおよびエスラインロープは比重が1以下で水中では浮き上がろうとするので、静水中ではブイにかかる係留系の初期張力はほとんど0である。現地観測では、ブイの heave, pitch, roll, 船首方向、風向、風速、係留索の作用張力と、ブイから数10m離れた球形ブイによって波高および周期を測定した。測定データはテレメーターシステムによって、初島に設けられたデータ収録装置のフロッピーディスクに収納した。測定は3時間おきに20分間行なわれ、データのサンプリング周波数は4Hzとした。

なお船型ブイの設置時には、熱海港までブイを陸送し、海上では、小型漁船によって設置点まで曳航した。

(2) 船型ブイの現地観測への適用性

現地観測データを解析したところ、観測期間中、諸般の事情で観測を中断した期間を除いて、船型ブイ観測シ

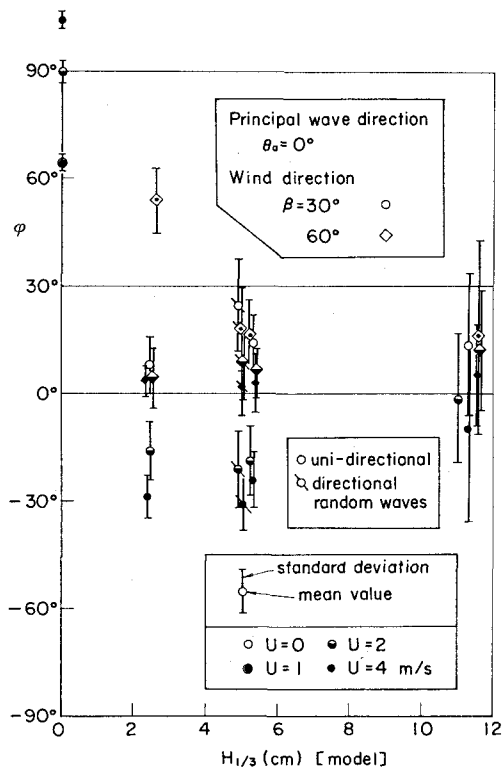


図-10 風および波によるブイ船軸方向の変化

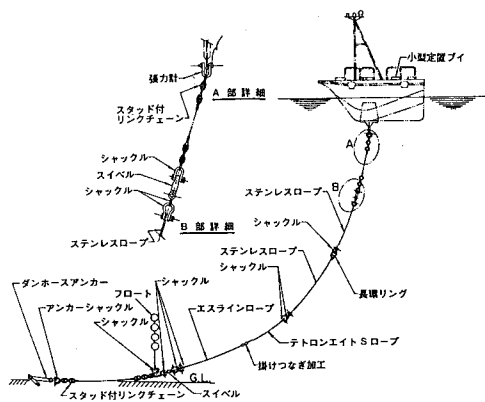


図-11 係留索の構成

表-3 船型ブイおよび球形ブイの観測結果の比較

$\Delta t = 0.25 \text{ sec}$
 $n = 1024$

	① 球形ブイによる観測値	② 船形ブイによる観測値	②/①
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	1.48	1.66	1.12
有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	4.68	4.75	1.01
平均波高 $\bar{H}$ (m)	0.97	1.07	1.10
平均周期 $\bar{T}$ (sec)	3.48	3.49	1.00
最大波高 H_{max} (m)	2.19	2.17	0.99
最大波周期 T_{max} (sec)	4.65	5.23	1.12
波 数 N	71	72	1.01

昭和61年12月19日12時

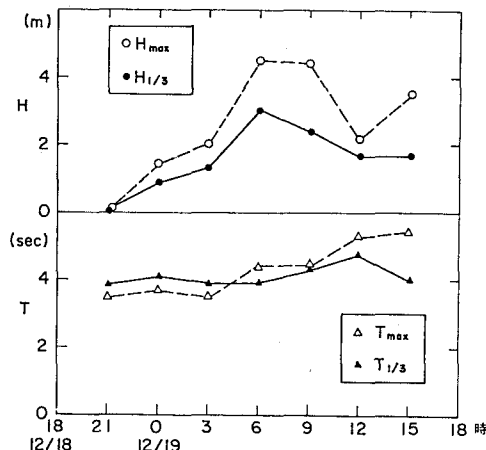


図-12 船型ブイによる観測結果

システムはほぼ良好に作動した。まず、船型ブイのヒービングから推測される波高および周期の精度を調べるために、船型ブイの heaving 運動から推定される波高と、球形ブイで観測された波高とを比較した。球形ブイで得られたデータには、ノイズが混じっていたり、大きくドリフトする場合が多かったので、良好な観測データが得られたと思われる期間について、船型ブイと球形ブイで観測した波高および周期について比較した。表-3 は、球形ブイによる観測値、船型ブイによる観測値および両者の比を示した表である。波高および周期の諸元に対する両者の比は、0.99~1.12であり、両者の値はほぼ等しいと考えることができる。したがって、船型ブイのヒービングを測定し、解析することによって、現地でも波高、周期を精度良く測定できることがわかった。図-12 は、船型ブイのヒービングから推定される最大波高、有義波高、最大波周期および有義波周期の観測結果の一例を示した図である。観測データ中、12月19日6時においては、 $T_{1/3} = 3.9 \text{ sec}$ 、 $H_{1/3} = 3.1 \text{ m}$ で、波形勾配を求めると、0.13となる。この値は波形勾配としては大きすぎるので、データの一部に何らかの異常が混入していた可能性もある。

観測された期間中、ブイに作用した係留張力は、ほぼ一定で非常に小さく1.5トン程度であった。波高が大きいケース、あるいは係留索を引張ってブイを曳航した場合においても、張力の変動はなかったので、張力計になんらかの異常があった可能性もあり、張力のデータについては、その精度を現在検討中である。

7. まとめ

本報告でまとめた模型実験および現地観測の結果から得られた主な結論をまとめると、次のようになる。

- ① 模型実験によると、現地で約4.5秒以上の周期を持つ波に対して、船型ブイのヒービングの振幅が波高と一致することが明らかとなった。
- ② 不規則波を作用させた模型実験結果から、不規則波が作用する場合でも、ブイのヒービングから有義波高および周期が推定できることがわかった。
- ③ ブイの係留には、なるべく伸び率が大きく、作用張力が小さくなる係留システムを使った方がよい。
- ④ 風と波を作用させた平面実験の結果、ブイの平面運動は、波だけではなく、係留索のねじれ、風の影響を受けるため、船軸は、波高が大きい場合を除いて、必ずしも波向とは一致しない。
- ⑤ 現地観測の結果、船型ブイは、現地においても、精度良く波高観測および周期の観測を行なうことができ、適用性が高いことがわかった。

船型ブイの平面運動は、潮流によって大きく支配されると思われるので、今後は潮流に対する考察を主に進めていく予定である。なお、本研究は、科学技術庁の昭和61年度科学技術振興調整費による「我が国周辺200海里水域における新調査システムの開発に関する研究」の一環として実施した。

参考文献

- 1) William. Hakkarinen, :The World of NOMAD-1, Marine Technology Society, Buoy Technology Conference Proceedings, March 1964.
- 2) 小林正典 他; 船舶の耐航性に関する理論計算プログラム, (その1, 理論計算式) 三井造船技報, 第82号, 1973
- 3) 甲斐源太郎; 小型定置ブイの海域試験, 海洋科学技術センターニュース「なつしま」No. 87, 1987.