

船型ブイに関する模型実験と現地観測

高山知司*・平石哲也**・甲斐源太郎***

1. ま え が き

国際的な海洋開発の時代を迎えて、我国でも沿岸部より 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、精度のよい海象観測装置を設置する必要がある。

水深 100 m 以上の外洋における海象観測装置としては大型のディスクスブイが実用化されている。しかし、ディスクスブイの製作および設置には多額の費用がかかる上に、運搬にも手間がかかり、観測点を容易に変更することができない。そこで、廉価で陸上および海上での輸送が簡単な小型の海象観測装置として船型ブイを開発した。船型ブイは小型ヨット程度の大きさで船の形をしたブイで、陸上では小型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所定の海域まで曳航することができる。したがって、必要に応じて、観測地点を変更したり、観測を取りやめることが容易にできる。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いる¹⁾。

本研究は、我国において始めて試作した船型ブイの波浪に対する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、現地に対する船型ブイの適用性を調べたものである。

2. 船型ブイの概要

(1) 船型ブイの仕様と装備

船型ブイは、水深 120 m～500 m、最大平均風速 60 m/s、最大有義波高 30 m 程度の環境に耐え得るように設計した。図-1 に船型ブイの基本仕様と装備を示す。ブイは、長さ 6 m、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大型のフィンが付いている。船底から重心までの高さは 1.2 m であり、船体の傾斜角が 140° になるまで復原力

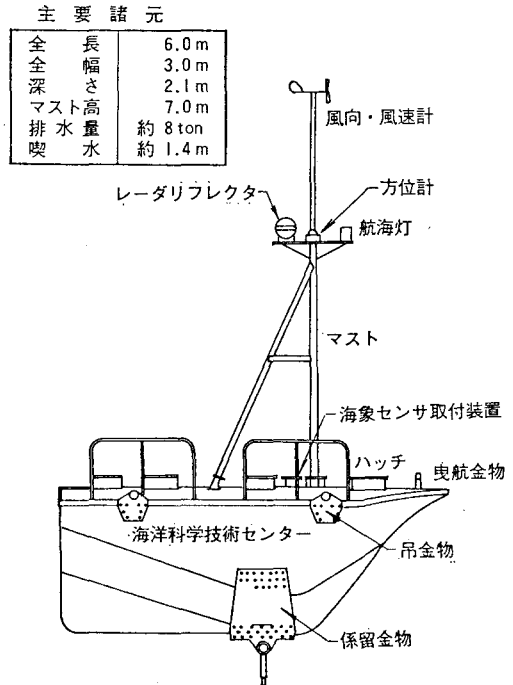


図-1 船型ブイの基本仕様と装備

を失わない安定性に優れた構造となっている。船体は FRP (Fiber Reinforced Plastic) で製作されている。

ブイは高さ 7 m のマストを有しており、マストの頂上にプロペラ式の風向・風速計、マストの中段に磁北からのブイの船首方向の傾きを測るための方位計、航海灯およびレーダリフレクタを取り付けている。ブイの内部には、ブイの動揺量を計測するピッチ・ロール・ヒープセンサーとアルカリ蓄電池を搭載した。ブイの表面には、試験的に太陽電池を取り付けたが、太陽電池の発電量が現在のところ不明なので、計測器と航海灯の電源にはアルカリ蓄電池を用いた。

ブイの両舷の下部には、薄い板状の係留金物が固定されている。2 枚の板は、ブイ横断方向を軸として回転する 1 本の鉄パイプによって連結されており、このパイプの中央部に係留索を取り付けた。ブイの船首には曳航用のフックが取り付けられており、小型船舶の所有するロ

* 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

** 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

*** 海洋科学技術センター海洋開発研究部

ープで曳航できる。

(2) 数値計算による応答特性の検討

試作された船型ブイが波高計として適用可能かどうかをあらかじめ検討するために、数値計算によってブイの動揺量を求めた。本研究では、船型ブイを細長船舶とみなして、NSM (New Strip Method)²⁾ によって波浪中におけるブイの動揺を計算した。船体断面は、ルイス・フォーム断面で近似した。そして、船体は自由振動をするものとして、周期の異なる規則波が船首、船尾および船腹方向から、それぞれ別個に作用するものとした。

図-2 は、数値計算結果の一例で、規則波が船首から作用した場合の船型ブイのサージング、ヒービングおよびピッチング振幅を示す。図では、サージング、ヒービングは両振幅を波高 H で、ピッチングは片振幅を最大水面傾斜角 θ_0 でそれぞれ除した無次元動揺量で示した。図で示されるように、角周波数 ω が小さくなると、3種の無次元動揺量は1に近づくので、長周期の波浪中では、船体は水面に追従して動くことがわかる。またサージングとヒービング振幅は1より大きくならず、ピッチング振幅の極大値は、船首以外の方向から波が来襲した場合でも1.5以下であり、共振現象のためにブイが大きく動揺する危険性は無い。船型ブイを波高計として用いるためには、ヒービングの振幅が波高と一致しなければならない。 $\omega < 1.5$ すなわち、現地で4s以上の周期を持つ波に対して、ヒービングの振幅と波高がよく一致しており、ヒービングから波高が推定できる。

ただし、数値計算では、船体が細長体であり、船体運動が線形である等の仮定を含む。また、船尾のフィンの影響や、係留による船体運動の変化などが十分に考慮できないので、模型実験を行った。

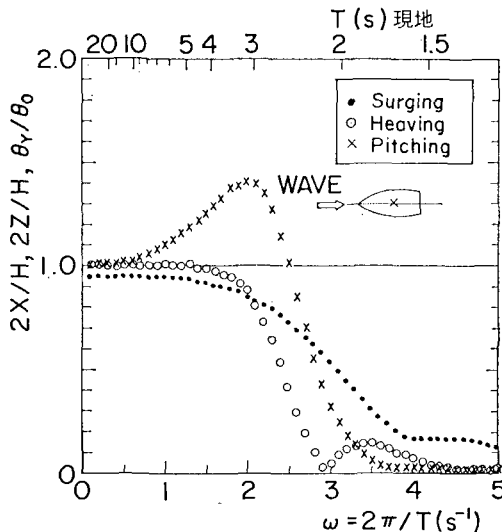


図-2 数値計算で求めた船型ブイの動揺量

3. 模型実験の方法と条件

(1) 水路実験における実験方法と条件

本研究では、実機の 1/20 縮尺の模型を用いて実験を行った。図-3 は、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行った二次元水路実験における模型と装置を示す。実験水槽は、長さ 40 m、幅 1.5 m の長水路であり、水路中央部付近の水槽壁がガラス張りになっており、水路の一端にはビストンタイプの不規則波造装置が設置されている。ブイ模型は伸びが極めて小さいナイロン製釣糸を用いて水槽中央に係留した。釣糸は水路床上の滑車を介して、水面上に設置されたバネあるいは糸ゴムの弾性体に結び、このバネあるいは糸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糸の間に超小型張力計を取り付けて測定した。ブイに作用する波の波高および周期は、ブイ設置点から 2 m 造波板側へ離れた点に容量式波高計を設置して測定した。また、ブイのマストの頂上と根元に豆電球を取り付け、水槽側面のガラス壁を通して、光点追跡装置で、この2つの電球の鉛直面内における変位を測定し、ブイの動揺量を求めた。実験では、水深を 80 cm とし、周期 0.7 ~ 2.5 s [実機で 3.1 ~ 11.2 s] の規則波および有義波周期 1.8 s [8.1 s]、2.7 s [12.1 s] の Bretschneider・光易型のスペクトル形を持つ不規則波を作用させた。各波の波高は、波形勾配が 0.02 ~ 0.04 となるように設定した。ブイの係留状態は、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種類とした。また、船体の初期状態を、船尾および船腹から波が作用するように設定した場合にはブイは急速に回転し、ほぼ波向に船首を向けたので、本実験では、初期に船首から波が作用するようにブイを設置した。

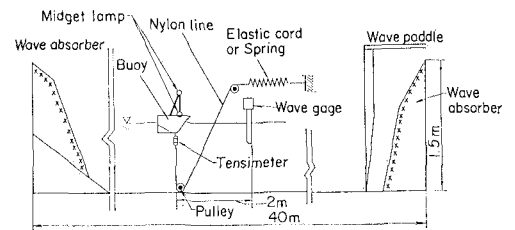


図-3 水路実験における模型と装置の配置

(2) 平面水槽実験における実験方法と条件

平面水槽実験では、風と波を同時に作用させて現地に近い状態を再現してブイの運動を調べた。図-4 は、平面実験における模型、造波装置および送風機の平面配置を示した図である。平面水槽は、長さ 35 m、幅 25 m で一方の水路壁に沿ってサーペント型造波装置³⁾が設置されており、残りの3方の側壁に消波工が設置されてい

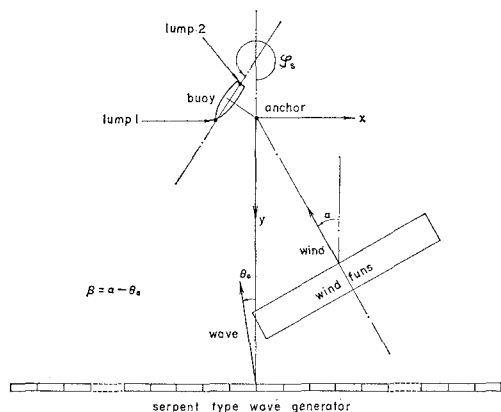


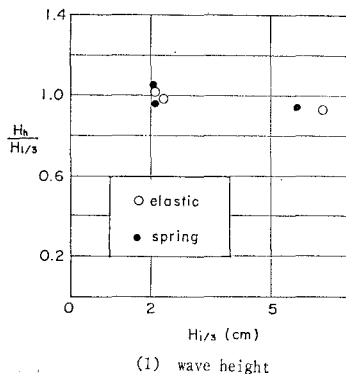
図-4 平面水槽における実験装置の配置

る。また、直径 1 m のファンを 6 台 横一列に並べた送風機を設置した。ブイ模型は、水路実験と同様の方法で、造波機前面から 6 m 離れた水槽中央部に設置した。実験では、水深を 60 cm として、ブイは糸ゴムで係留して、定常風と多方向不規則波を作用させた。実験波の有義波高 $H_{1/3}$ は 5~20 cm [1~4 m]、有義波周期 $T_{1/3}$ は 2.0~2.4 s [8.9~10.7 s] とし、Bretschneider—光易型の周波数スペクトルと方向集中度パラメータ⁴⁾で表して、 $S_{max}=25$ および 3 程度の光易型方向関数を持つ多方向不規則波とした。実験風は、ブイ設置点で 1~4 m/s [4.5~17.9 m/s] となる定常風を用いた。図-4 に示した主波向 θ_s と風向 α は、波と風の相対角 β が 0° , 30° , 60° , 90° となるように設定した。また、船首と船尾に電球をつけ、光点追跡装置を用いてブイ変位を測定した。

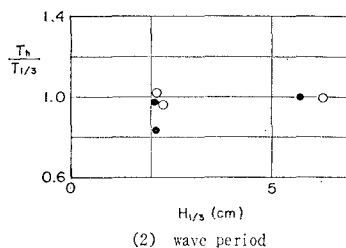
4. 船型ブイの運動特性

(1) 船型ブイの波浪応答特性

まずはじめに、自由振動実験によって船型ブイの固有振動を調べたところ、ヒープ、ロールおよびピッチの固有周期はそれぞれ 0.57 s [実機で 2.55 s]、0.78 s [3.49 s] および 0.60 s [2.68 s] であった。規則波を作用させた場合、ヒービングおよびサービング振幅の周期は波周期と一致し、係留した場合でも、ヒービングの振幅は、実機換算値で 4.5 s 以上の周期を持つ波の波高に一致した。サービングの振幅は、水粒子の水面における水平変位の振幅に一致した。図-5 は、船型ブイのヒービングから求めた有義波の波高 H_h と周期 T_h の、波高計で直接求めた有義波の波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ との



(1) wave height



(2) wave period

図-5 ヒービングから求めた波高および周期

比較を示す。作用波の波高が変化しても、 $H_h/H_{1/3}$ および $T_h/T_{1/3}$ はほぼ 1.0 で、船型ブイのヒービングから有義波の波高と周期を推定できることがわかった。

図-6 は、バネで係留した場合の船型ブイのヒービングおよびピッチングの周波数スペクトルを示したもので、破線で示したヒービングのスペクトルは実線で示した作用波のスペクトルとよく一致し、ヒービングから波の周波数スペクトルを推定することができる。一点鎖線で示したピッチングのスペクトルは、ピッチングの固有振動周波数 f_0 付近にピークを持つ。すなわち、不規則波中に含まれるピッチングの固有周期と同一周期の成分波との共振によって、 f_0 の周波数を持つピッチングが増幅され、顕著になっており、ピッチングから水面傾斜を求めることはできない。

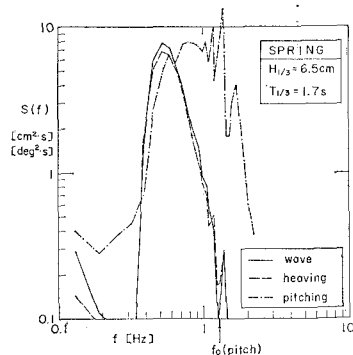


図-6 ヒービングおよびピッチングのスペクトル

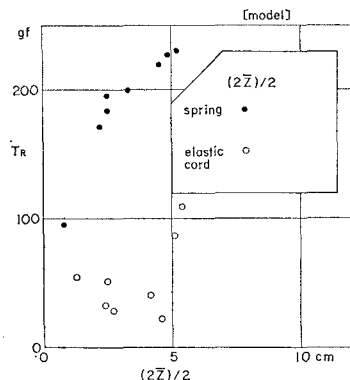


図-7 係留索に作用する張力

(2) 係留張力の変化

図-7 は、規則波を作用させた場合の係留索に作用する最大張力を示したもので、黒丸がバネ係留、白丸がゴム係留の場合を示す。横軸はヒービングの片振幅を示す。実験値には、ばらつきが大きいものの、動揺量が大きくなると、作用張力が大きくなっている。また、バネ係留の場合は、ゴム係留の場合に比べて係留張力は2倍以上になっており、バネのように伸び率の小さい係留索を用いた場合には、作用張力が大きくなる。したがって、係留索に作用する張力を小さくするためには、ゴムのように伸び率の大きい係留索を用いる必要がある。

(3) 風および波によるブイ船軸方向の変化

図-4 に示したように、ブイの船首が向く方向を、ブイ船軸方向 φ_s として定義する。図-8 は、平面水槽内におけるブイ船軸方向 φ_s の測定結果を示した図で、波向 $\theta_a=0^\circ$ 、風向 $\alpha=30^\circ$ 、相対角 $\beta=30^\circ$ の場合を示す。直線区間は、 φ_s の標準偏差、丸印は、平均値を示す。 $\bar{U}$ は作用風速、 $H_{1/3}$ は作用波の有義波高である。 $H_{1/3}=0$ 、すなわち風だけを作用させた場合には、風向に対して船軸方向は $45^\circ\sim 80^\circ$ 程度ずれており、標準偏差は 3° 程度で小さく、ブイは風に対して、ほぼ腹を向けて安定しており、動揺は小さいことがわかる。白丸で示した波だけを作用させた場合には、 φ_s は波向と $9^\circ\sim 25^\circ$ 程度ずれている。静止状態のときも、 φ_s は 20° 程

度であり、ブイに取り付けられた電球および張力計のコードの影響と、設置時の調整誤差により波向と若干ずれたものと思われる。波と風を同時に作用させた場合には、 $H_{1/3}<10\text{ cm}$ のとき、風の影響が強く、 φ_s は波向と $9^\circ\sim 25^\circ$ 程度ずれているが、 $H_{1/3}>20\text{ cm}$ で、波高が大ききときには、波向に近づく。 φ_s の標準偏差は、波高が大きくなると増加しており、波高が大きくなると船体の水平面上の変動も大きくなることが推定できる。作用波の方向集中度が変化しても、 φ_s の平均値、標準偏差に差は生じない。 α 、 θ_a を変化させたケースでも同様の結果を得た。

以上のことから、波高が小さいときには、 φ_s は風の影響を強く受け、波高が大きくなると、風と波の影響を受けるが、ばらつきが大きくなるので、船軸方向から波向を決定することは困難であることがわかった。

5. 現地観測への船型ブイの適用性

(1) 現地観測の方法

現地観測は、静岡県熱海港の 10 km 沖合の初島から北へ 5 km 離れた水深 350 m の地点において、1986 年 12 月より 1987 年 3 月まで行った。船型ブイは熱海港まで陸送し、熱海港から設置点まで小型漁船によって曳航した。現地では、船型ブイの係留用パイプにシャックルを通して長さ約 150 m、直径 20 mm のステンレスワイヤーロープをつなぎ、その先端に長さ 350 m のナイロン系のロープを結び、係留索とした。係留索の先端には、固定用にスタッド付リンクチェーンおよびアンカーを取り付けた。

観測は 3 時間毎に 20 分間行い、ブイ塔載計器で、ブイのピッチング、ヒービングおよびローリング、風向・10 分間平均風速、ブイ位置、ブイ船軸の方向、係留索作用張力を求め、ブイから数 10 m 離して、波高観測用小型ブイとして実用化されている球型ブイを設置して、球型ブイのヒービングを測定した。測定データは、0.5 s 毎のデジタルデータとしてテレメータで初島の地上局へ送信し、磁気テープに記録した。

(2) 船型ブイの適用性

船型ブイが現地でも波高計として機能することを検討するために、船型ブイのヒービングと球型ブイのヒービング振幅を比較した。図-9 は、船型ブイおよび球型ブイのヒービングのスペクトルを示したものである。球型ブイのヒービング振幅には、係留条件の影響と思われる長周期の動揺が含まれていたため、それらの長周期の変動成分を除去したスペクトル形を比較した。両者の形はよく一致し、スペクトル形から求めた $H_{1/3}$ も一致した。したがって、船型ブイが現地において波高計として機能し得ることがわかった。なお、観測期間中、船型ブイで観測された最大波は 12 月 19 日 6:00 に発生し、このと

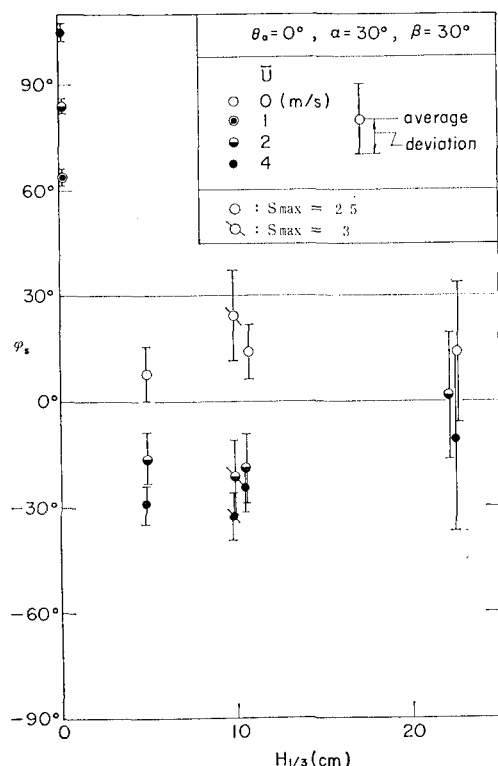


図-8 船軸方向の変化

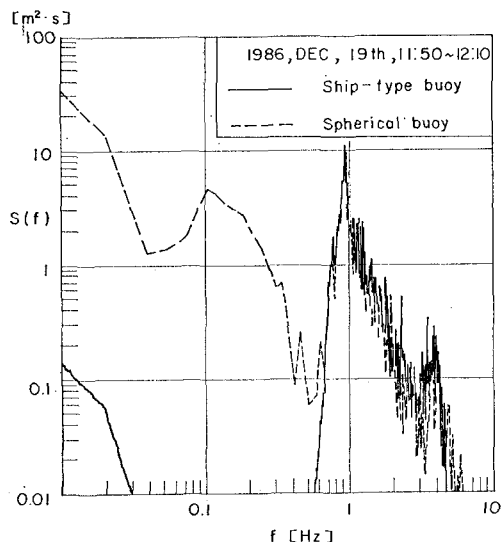


図-9 船型ブイと球型ブイの観測値の比較

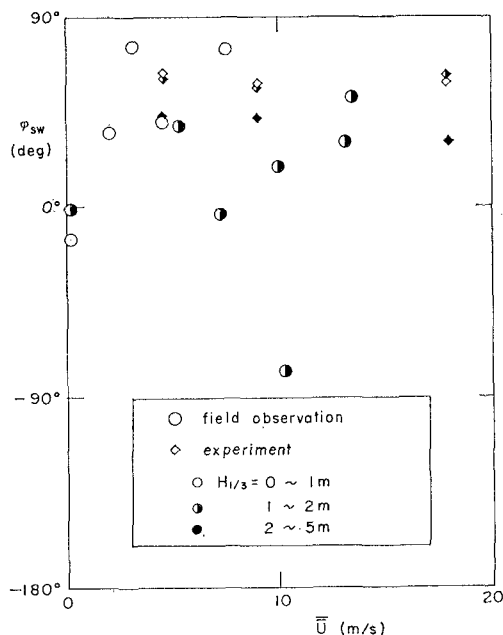
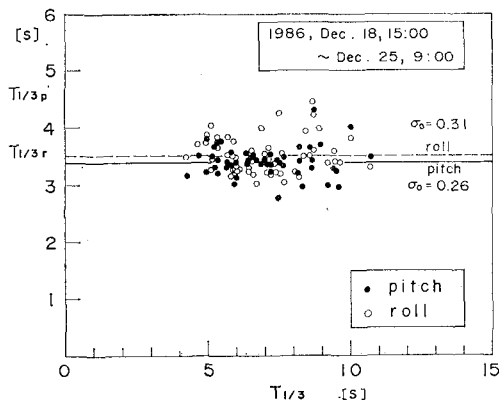
図-11 現地における船軸と風向の相対角 φ_{sw} 

図-10 ピッチングとローリングの周期

き $H_{1/3} = 2.9 \text{ m}$, $H_{\max} = 4.6 \text{ m}$ であった。

図-10 は、観測期間中のピッチング、ローリングの周期を示したものである。ピッチング、ローリングには、共振の影響が顕著に現れ、波の周期が変化しても、ピッチング、ローリングの動揺周期はほぼ一定で、固有周期に等しかった。しかし、ピッチングおよびローリング振幅が有義値で 20° を越えることはなかった。ピッチングおよびローリングがマスト頂上で測定している風速に与える誤差は、簡単な計算から推定することができ⁵⁾、その量は、瞬間風速の場合 15% 以内と推定できた。ただし、10 分間平均風速の場合には、動揺周期が比較的短いので、誤差は非常に小さい、と考えられる。

図-11 は、現地観測で求めた風向と船軸方向の相対角 φ_{sw} を示したもので、 φ_{sw} および風速 $\bar{U}$ は 1 ケースあたり 20 分間観測した 平均値である。図には、実機換算値で模型実験結果も示した。図では、波高の大きかった 12 月 18 日～20 日の観測値を示しており、波高の小

さいときには φ_{sw} は $45 \sim 80^\circ$ 程度、波高が大きくなると $0 \sim 60^\circ$ 程度になり、船軸方向は波だけでなく風の影響を強く受けることが確認できた。係留索に作用する張力は非常に小さく、観測期間中 0.75 tf [7350 N] であり、安全に係留できることがわかった。

6. あとがき

本研究では、海象観測用の小型定置ブイとして開発した船型ブイが波高計として機能し、また、現地において海象条件を精度よく測定できることを明らかにした。今後は、使用電源、メンテナンス方法についても検討し、実用化を図る予定である。

本研究は、科学技術庁の昭和 61 年～62 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

- William O. Rainnie, Jr.: Development of a value-engineered NOMAD buoy, M.C.I., 1983.
- 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, pp. 18~51, 1978.
- 高山知司・平石哲也: サーベント型造波機による発生波の特性に関する実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 3, pp. 37~83, 1987.
- 合田良実・鈴木康正: 光型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45 p., 1975.
- 高山知司・平石哲也, 他 4 名: 海象観測用船型ブイの運動特性に関する模型実験と現地観測, 港湾技術研究所報告, Vol. 27, No. 1, pp. 37~86, 1988.