波浪計測用ブイシステムの開発研究

正員 小寺山 亘* 正員 中村 昌彦*
 正員 池 渕 哲 朗** 正員 高 津 尚 之***
 藤 井 智 史**** 佐 藤 健 治****

A Study for Development of a Wave Observation Platform

by Wataru Koterayama, *Member* Masahiko Nakamura, *Member*
 Tetsuro Ikebuchi, *Member* Naoyuki Takatsu, *Member*
 Satoshi Fujii, Kenji Sato

Summary

A wave observation buoy has been developed, which uses a system where incident wave height in the ocean can be obtained from the heave motion of the buoy measured using a gyro system and the heave response function determined through theoretical calculations and model experiments.

The accuracy of the theoretical calculation of the response function of the buoy motion was first confirmed by model experiments in a wave tank. Next, the validity of the method was verified by comparing the time series of irregular wave profiles measured with a wave height meter fixed in the wave tank and a reproduced series using the heave motion of the buoy model measured with a motion sensor and the response function.

A real buoy was designed and constructed based on these studies and has been moored in the sea near Ishigaki Island since March of 2001.

Finally, the wave data obtained using the above method were compared with those directly obtained from motions measured with a gyro and the relative wave height measured with a wave sensor fixed to the buoy, and the results were discussed.

1. 緒 言

地球環境の把握のためには人工衛星を始めとして、各種リモートセンシング手法が極めて有効であることは言うまでも無い。海洋においても、人工衛星の利用による海表面水温、風速、海流、波高、クロロフィルなどの

計測手法が開発されつつある。人工衛星による観測はその広域性と同時性に優れているが、間接測定である以上、その精度を検証する努力も必要である。このため、音響トモグラフィーや海洋レーダによる観測も広域性においてやや劣るが、より直接的な観測手段として同時に精力的に開発されつつある。これらもまた較正のための手段を必要とする状況にある。

海洋工学研究者はこれらの先端的技術分野であるリモートセンシング手法の開発とともに較正に必要な各種計測ロボットやブイシステムを開発することを期待されている。これらは船舶海洋工学分野における従来技術の延長上にあり、主体的に取り組むべきである。著者の一部は海洋波と表層流れを計測する遠距離海洋レ

- * 九州大学応用力学研究所
- ** 川崎重工業（株）技術研究所
- *** 川崎重工業（株）船舶事業部
- **** 通信総合研究所 沖縄亜熱帯計測技術センター

原稿受理 平成 14 年 1 月 9 日
 春季講演会において講演 平成 14 年 5 月 15, 16 日

ーダを開発中であるが同時に、その精度確認のための波浪計測ブイの開発を行っている。

従来から波浪計測のためのブイとして小型ウエーブライダー式のブイが市販されている。これらのブイは小型であるため、手軽で、価格も安く、小さな波にも良く追従する反面、台風時のように大きな風波がきた場合には風・波による漂流力によって海面下に没してしまい計測不能となることが避けられなかった。大水深域では平穏な海象であっても係留ラインに加わる引き込み力に耐えられず、他の浮力体の助けなしには使用は不可能である。

一方大型ブイを外洋で波浪計測に用いた場合、北太平洋のような厳しい環境でも従来予測されていたような大きな波が計測されず、係留ラインの張力によって拘束され、波面に追従していないのではないかの疑問があった。

本論文では大水深・大波高で使用可能な 70 トンクラスの大型ブイの開発を行う過程で行った模型実験・理論計算・実海域計測について述べ、波浪観測における大型ブイの問題点について考察する。

2. ブイシステムの概要

ブイシステムの設置海域は Fig.1 に示すように、石垣島と与那国島の間の海域である。遠距離海洋レーダが独立行政法人通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センターによって開発中であり 2001 年 3 月から、これらの島に設置されている。計測可能範囲は 200km に及ぶ。台風時の波浪の正確な計測は沿岸域を除いてこれまで多くないので、貴重な知見が得られるものとして期待されている。このシステムは 2 次元平面内の波高分布を計測するためには 2 方向からの電波を必要とし、観測区域は図に示すようにこれらのレーダが重複してカバーするエリアである。ブイはこの扇状の重複した海域の要の位置に係留されており、海洋レーダの計測結果の精度確認と風速の計測を主なミッションとしている。

Fig.1 Location of moored point

Fig.2 にブイの概念図と主要寸法を示す。直径 9 m で自重が約 50 トン、係留系の引き込み力を加えると排水量は約 70 トンとなる。海面から上のデッキまでの高さは 8 m である。風速計は海面上約 9 m で固定されており国際標準規格の 10m に足りないが換算法が確立しているので計測には差し支えない。計測機器としては風向風速計、潮流計、位置を計測するための GPS、6 自由度運動計測のためのジャイロシステム、波高計測法の検証のための容量式相対波高計である。これらの機器によって得られたデータはオープンコム衛星を通じて、実時間で沖縄亜熱帯計測技術センターへ送られる。ただし 2 時間毎の定時観測の結果は通常モードでは統計処理後の有義値が送られてくる。時系列データはセンターからのデマンド信号に応じて送られてくるシステムになっている。計測に必要な電源は太陽電池から供給される。

Fig.2 Figure and principal features of the buoy system

係留は Fig.3 に示すように、ブイ直下から 48mm のダブルチェーンを 15.78m、46mm チェーンを 180m、37.5mm のワイヤー 1190m、さらに海底部は 56mm のチェーン 300m、44mm のチェーン 290m である。全長 1976m で水深 1450m に対して約 1.36 倍である。この種の係留としてはかなりの緊張係留となっているが、ブイの大きさに比較してチェーンが重く、後の計算 (Fig.16) で示すように通常時はほとんど鉛直に垂れ下がっている。

また風速 60m、有義波高 12m、潮流 3ノットと風による吹送流を考えてもアンカー点から係留ラインを直接持ち上げることはない。さらにアンカー重量は 5 トンであり、水平把持力は 20 トンと見込んでいるので最大張力は 30 トン強であり、さらに強い流れが来た場合はラインは切れることなく走錨する設計となっているが、2001 年 7 月に近くを通過した台風 8 号の際にも走錨しなかった。係留ラインの破断張力はワイヤーが最も小さく約 120 トンであり、予想される最大張力に対して、3 倍以上の安全率がある。図中の番号をつけた黒丸は後に述べるランプドマス法による計算点である。

Fig.3 Principal feature of mooring line

3. 模型実験

三次元特異点分布法¹⁾で求めた運動応答関数の計算精度を確認するために、実験水槽内で 1/12 模型を使用して、波浪中の運動応答実験を行った。

Table 1 に模型の主要寸法を示す。係留系の自重を模擬するために Fig.4 に示すように重りを吊り下げた。水深 1000m 以上の海域にブイを係留する場合、模型実験において完全に幾何学的相似性を保つことは不可能である。すなわちブイ模型はさまざまな計測器を搭載する必要から、直径数十センチ以下にすることは難しい。したがってブイの場合は縮尺比は高々 1:10 前後である。係留ラインにこれを適用すると水槽の深さは数十メートル必要となるので、一般の水槽では実験が不可能となる。

著者等はこれに対して、係留ラインが合成繊維索のよ

うに重量が小さく伸び率がおおきい場合はコイルばねで置き換えることを提案した²⁾。今回のように係留ラインの重量が極めて大きい場合は、重量を重錘で置き換えることを提案する。この方法では係留ラインの抗力成分は模擬できないが、質量成分は表現できる。本実験の場合、模型の自重の 1/2 弱も係留ラインの引き込み力があり、これを無視すると喫水が調整できず、実験が成り立たない。模型に重りを積み込めば喫水は合わせられるが、GM や慣動半径が合わず縦揺れに大きな影響が生じる。重りを吊り下げることによってこれらの問題を解決できる。このようにしても係留ラインの減速効果は表せられないが、一般に波周期運動に対するこの効果は小さい。また一点係留の場合は長周期運動は、ほとんど現れないので問題はない。

Table 1 Principal dimensions of model

Weight (kg)	26.17
Displacement with hung weight (kg)	39.73
Draft with hung weight (m)	0.405
Radius of gyration (m)	0.323
GM (m)	0.356
GM with hung weight (m)	0.362
Natural period of heave with hung weight (sec)	1.01
Natural period of pitch with hung weight (sec)	1.00

Fig.4 Conceptual view of model experiment

Fig.4 に示すようにブイ模型は運動を拘束しないようにコイルバネを使用して波上側に引っ張られ、風や潮流などの定常力を模擬するために重量 800 g の重錘により波下側に引っ張られている。Photo.1 に模型実験の様子を示す。

Photo. 1 Model experiment

計測項目は波、ブイの運動（静止水面位置における前後揺 X 、上下揺 Z 、縦揺 θ ）であり、波は模型より 2.371 m 波上側で容量式波高計で計測した。次節に示す運動の解析結果の位相は模型の漂流量を計測し、波高計からの距離を使って模型位置での波の位相を求め、それを基準にして示してある。解析結果の表示に使用した座標系は Fig.4 に同時に示されている。

ブイの排水量が 40kg 程度で小さく、通常の機械式運動計測装置は使用することが出来ないため赤外線式無接触変位計を用いた。また実機でブイの運動計測に用いるジャイロ (MRU-6) の検定を兼ねて、模型にこのジャイロを搭載して、同時に運動を計測した。MRU-6 は光ファイバージャイロと高精度加速度計からなる 6 自由度の運動計測装置である。内部にフィルターと演算装置を内蔵しており、海洋構造物や船舶の運動計測のために開発されたものである。したがって十分長い時間平均すれば運動の平均値は 0 となることを前提としたアルゴリズムを使っているため、計測対象の運動周期によって最適なフィルターを選ばなければならない。模型と実機では当然フィルターを変えなければならない。計測原理上ジャイロでは模型の漂流量は計測できないため、漂流量の計測は赤外線式無接触変位計のみで行い、位相修正に使用した。得られたデータはサンプリング周波数 25Hz で AD 変換し収録した。

3.1 規則波中模型実験結果

規則波中模型実験より得られた前後揺、上下揺、縦揺周波数応答を Fig.5 から Fig.7 に示す。白抜きの記号は赤外線式無接触変位計による計測結果、黒で塗りつぶした記号はジャイロによる計測結果、実線は理論計算結果を表している。計算に際して簡単のために、重りを吊り下げているライン張力の影響について簡易化している。流体力係数と波浪外力については喫水ベースに考

えるので問題はない。上下揺の場合はライン張力は上下揺れ加速度に比例して常に働いているとする。これは重りがブイに乗っていることと等価である。本研究での係留ラインが非常に重く、通常時は Fig.16 に示すように、ほとんど鉛直に垂れ下がっていることから言えることであり、極端な高周波数運動以外は問題がない。

縦揺については GM に関しては考慮する。したがって GM は重りを吊り下げた状態の傾斜実験で求めている。また減衰力も自由動揺実験で求めているので考慮されている。前後揺については張力の影響は入れない。したがって前後揺の場合は問題を生ずる可能性がある。正確にはランプドマス法で計算できるが、波浪計測には上下揺が重要であり、前後揺はほとんど必要がないので、このように簡単化した。

Fig.5 Surge response function obtained from model experiment and calculation

Fig.6 Heave response function obtained from model experiment and calculation

Fig.7 Pitch response function obtained from model experiment and calculation

横軸はブイの直径 ($B = 0.75$ m) を使用した無次元周波数 ξ_B である。波傾斜については 1/30, 1/40, 1/52, 1/60 の 4 種類について実験を行ったが、実験結果に対する波高影響はほとんど見られない。ジャイロによる計測結果はどの運動モードに対しても赤外線式無接触変位計とよく一致しており、ジャイロによるブイの運動計測に問題がないことが検証された。また、ブイの運動から波浪を計算する際に使用される上下揺の応答関数は実験と計算で非常によく一致している。実機の場合にも計算結果を使用して問題ないことが確認できた。また縦揺についても計算は実験と良く一致している。固有周期も良く一致しており、重りを吊り下げる方法が実用的であることが証明された。

一方前後揺は低周波域で計算は実験とかなり異なる。やはりラインの影響を入れる必要があると思われる。このことは実機の場合も同様であると考えられるので、前後揺をデータとして使用する際はランプドマス法などを用いて再計算する必要がある。

3.2 不規則波中模型実験結果

模型ブイの上下揺周波数応答が波

$$\zeta_r = \zeta_a \sin(\omega t) \quad (1)$$

に対して

$$Z = Z_a \sin(\omega t + \varepsilon_z) \quad (2)$$

で表されているとする。

計測された模型ブイの上下揺の時系列 $Z(t)$ (146 秒間) を FFT 解析し、フーリエ成分の実部、虚部を $X_{\theta}(\omega)$, $X_{\phi}(\omega)$ ($j = 0, 1, 2, \dots, N$) とすると、模型ブイの上下

揺より再現される不規則波は

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^{N/2} \sqrt{\frac{X_{\theta}^2(\omega_j) + X_{\phi}^2(\omega_j)}{Z_a(\omega_j) / \zeta_a(\omega_j)}} \cos(\omega_j t + \delta_j - \varepsilon_z) \quad (3)$$

$$\delta_j = \tan^{-1}(X_{\phi}(\omega) / X_{\theta}(\omega)) \quad (4)$$

で求められる。さらに、再現された不規則波 $\zeta(t)$ のパワースペクトルを計算し $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ とすると、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波周期 T_{01} は次式で得られる。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (5)$$

$$T_{01} = 2\pi(m_0 / m_1) \quad (6)$$

$$m_0 = \int S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$m_1 = \int \omega S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega \quad (8)$$

Fig.8 Comparison of time series of measured wave height in model experiment and reproduced one

Fig.9 Comparison of wave spectrum of measured wave and reproduced one in model experiment

以上の方法を用いて求めた不規則波と波高計で計測した不規則波の時系列とパワースペクトルの比較例をFig.8、9に示す。ブイの運動（上下揺）を使用して再現した不規則波時系列、パワースペクトルは波高計で計測したものに波高、位相ともに、よく一致している。有義波高、平均波周期の異なる3種類の不規則波についての実験を行ったがいずれも同様の結果であった。また、パワースペクトルから計算された有義波高、平均波周期の値も数パーセントの違いしかなく、ブイの運動（上下揺）を使用して波浪を計測する手法の精度が模型実験により確認された。

4. 実海域実験

Photo.2 に洋上に設置されたブイを示す。作業船上の作業員と比較すれば、ブイの大きさが実感できる。全工程の内、係留系の基本設計と並んで設置作業がもっとも経験を要する部分であるが、著者等の一部はすでに同程度の規模のマグロ用の浮き漁礁を開発し、沖縄近海に十数基設置した経験を有している。現在これらのブイは観測のためにも多目的に用いられており、有効利用されている³⁾。

Photo. 2 Buoy system on the sea surface

相対水位計をブイの上下揺から波浪を再現する手法を実機の場合で検証するために設置した。したがってブイの運用開始直後検証データを得るためだけのものであり、長期にわたる計測が可能なものではない。ブイの上下揺応答関数から入射波高を求める手法の精度は模型実験では水槽に設置した波高計による計測結果と比較する事で容易に検証できた。大水深の実海域では

本手法に匹敵する計測精度を保証できる手段は他になく、検証することは非常に難しい。そこでブイに相対波高計を設置して検証した。ブイの運動はジャイロシステムによって直接計測されており、これに相対波高計によるデータを加えることで、波高の直接計測を行っていると考えている。ただし、ジャイロと波高計の誤差の他に、ブイからの反射波が誤差要因になることも注意する必要がある。また、ここで検証しようとするものは計測機器の誤差ではなく、上下揺応答関数を使って入射波を計測しようとする計測原理そのものであることにも注意する必要がある。ジャイロに関する計測精度の検証は模型実験で既に行っており、相対波高計は独立に較正を十分に行っている。

相対水位計を用いた解析方法は以下のとおりである。

$$\zeta_c = -Z(t) - b \sin \varphi(t) + h(t) \cos \varphi(t) \cos \theta(t) \quad (9)$$

但し、 φ はブイの横揺れ、 θ はブイの縦揺れ、 h は相対水位計指示値、 b はブイの中心から相対水位計までの距離(m)である。

実海域で得られたデータを模型実験の場合と同様の手法で解析して得られた再現波浪とブイに設置された相対水位計と運動を用いて直接解析した波浪 (Direct measurement) の時系列とパワースペクトルの比較をFig.10 ~ 13に示す。ブイの上下揺から応答関数を用いて再現した波浪と相対水位計を用いて解析した波浪 (Direct measurement) は時系列・パワースペクトルともによく一致していることがわかる。スペクトル解析の図中に参考までに上下揺のスペクトルを同時に示しているが、再現波浪のスペクトルと完全に一致しており、大きな波の場合はこの程度の大きさのブイは完全にウェーブライダーブイと言っても良いとわかる。

この2例は2001年3月に設置してから11月までの期間の最も大きい波のものである。7月の台風8号はかなり勢力の強い台風であり、またブイ設置点のすぐ東側を通過したがそれほど大きな波は計測されていない。11月のデータは通常の移動性低気圧によるものであるが、このときの方が波高が大きい。台風の中心が東側を通過したこともあるが、強風の持続時間が大きな要素であることを示している。

2例とも良い結果が得られているがデータを詳細に検討すると少し異なった傾向がある。Fig.10の台風時の時系列では再現波浪と計測値は特にピークが良く一致しており、Fig.11のスペクトル解析でもピークが完全に一致している。また再現波浪の方が計測値よりも有義波高が4%高い。Fig.12の11月のデータの場合再現波のピークが計測値よりも低く、したがってFig.13の再現

波高の有義波高が8%程度低い。この誤差は模型実験における誤差範囲よりも僅かであるが大きい。誤差要因として計測誤差によるものか、従来言われている係留ラインによるものかは、この例だけでは分からないので、今後観測を続ける必要がある。また係留ラインの引き込みを相対水位計の平均値から調べてみたが、大きな波が来たときに特に引き込み量が大きくなる傾向は見られなかった。

この他のデータを調べてみると、一般的に有義波高が小さい場合には一致度が悪くなる。計測誤差が相対的に大きくなること、波高の小さい領域はまた高周波数領域であることが多く、プイの応答関数に含まれる誤差が相対的に大きいこと、相対水位計に及ぼすプイからの反射波、側壁影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

Fig.10 Comparison of wave time series obtained from direct measurement and reproduced one using response function and measured heave
(Data from Typhoon No.8 of July, 2001)

Fig.11 Comparison of wave spectrum obtained from Direct measurement and reproduced one using response function and measured heave (Data from Typhoon No.8 of July, 2001)

Fig.12 Comparison of wave time series obtained from direct measurement and reproduced one using response function and measured heave
(Data from November 2001)

Fig.13 Comparison of wave spectrum obtained from Direct measurement and reproduced one using response function and measured heave
(Data from November 2001)

Fig.14 ～15 は時系列解析を行ったすべてのデータについて有義波高、平均波周期を比較したものである。

Fig.14 が有義波高についての比較、Fig.15 が平均波周期についての比較である。相対水位の計測にも誤差が含ま

れている可能性があるため、模型実験の場合のような正確な検証とは言えないが、ブイによる上下揺応関数を用いた波浪計測システムはほぼ満足できる性能を備えていることがわかる。ただし直線からのバラツキを誤差の範囲と考えると波高が小さい場合には計測値に対して相対的に誤差が大きく、大型ブイの場合には波高が小さい場合は問題があると言える。従来言われていたように、波高が大きくなってくると係留ブイによる観測では計測値が過小になると言う傾向は今回の観測範囲の有義波高 5 m 以内では見られなかった。さらに極限的な海象の場合にどうなるかは今後の観測に待たねばならない。

Fig.14 Comparison of significant wave height obtained from direct measurement and reproduced waves

Fig.15 Comparison of average wave period obtained from direct measurement and reproduced waves

以上のようにブイの上下揺を用いての入射波の推定については十分の精度があることが立証できたので、Fig.10 の台風 8 号時の観測データに基づき、入射波を再現し、ブイの運動の計測結果と計算結果の比較を Fig.16, 17 にしめす。計算に用いた粘性減衰力係数以外の流体力係数、波浪外力はすべて特異点分布法による計算値を用いた。縦揺減衰力係数は模型の自由動揺実験から、その他の減衰力係数は円柱と半球の定常流中の抗力係数から推定した。またこれらの値は簡単のために周波数によらず一定として、波のピーク周波数の値に固定して計算を行った⁴⁾。係留ラインの運動と張力はランブドマス法⁵⁾によって計算した。マスの分布は Fig.3 に番号を付けた黒丸で示している。計算に使用した係留ラインの抵抗係数、付加質量係数は著者等が以前に実験で求めたものを使用した⁶⁾。また係留ラインの挙動とブイの運動は連成して数值的に時間領域で解いた。

潮流の海面での値はブイに搭載した潮流計で観測した値 (0.37m/sec) を用い、鉛直方向の分布⁵⁾を仮定して計算したが、波周波数域の計算結果には影響なかった。

Fig.16 は潮流及び周期、波高が入射波の平均波周期、有義波高と同じ規則波の定常漂流力のみを考えた場合の静的計算である。係留ラインはほとんど真下に垂れ下がっており、上下揺の場合は模型実験の場合の重りによる表現が適切であることを示している。

Fig.17 の前後揺 X 、上下揺 Z 、縦揺 θ の図中の実線はジャイロによる計測値、破線は計算値である。波の主方向は横揺が最も小さくなる方向に選んだ。

Fig.16 Static profile of mooring line
(current velocity : 0.37 m/sec)

Fig.17 Time series of incident wave, surge, heave, pitch and tension obtained from measurement and calculation

上下揺に関しては計算と実験は非常に良く一致しており、理論計算で求めた応答関数が係留ラインの影響を含めて妥当であったことを示している。前後揺と縦揺もほぼ満足できる精度で一致している。係留ライン張力は計測値がないが、計算値をみる限り設計時に予測した30トン強に収まっている。またこの程度の張力であれば、係留ラインは海底に残っており、アンカーを直接持ち上げることはない。

最後に計測された海洋波の方向スペクトルについて述べる。海洋波の方向スペクトルの推定法については、これまでに種々の方法が提案されている。ここでは橋本らにより開発された最大エントロピー原理による方法⁷⁾を用いた。この方法の特徴は一方向波浪のみならず、風波とうねりの混在するような二方向波浪の識別が可能なる点にあり、台風の通過が多い地点での観測には適した手法として選定した。また、解析に必要な3成分観測データとして上下揺及び縦揺、横揺を用いたが、これらは水面変動及び2方向の水面勾配の近似値である。

推定結果を3次元曲面図としてFig.18に示す。図中の波方向の0度は北からの波を示しており、本結果では0度にピークがあって波主方向が北であることがわかる。また、南方向からの波があることも分かる。

以上報告したようにブイシステムは初期の設計性能を十分に発揮している。今後も引き続き観測を続け、極限波高時の挙動の研究などを行いたい。

Fig.18 Bird's-eye view of contour curves of directional function (Data from Typhoon No.8 of July, 2001)

5. 結 言

波浪観測用大型ブイの開発のために、模型実験と理論計算を行い。さらに観測データと比較することにより、以下の結論を得た。

1. 三次元特異点分布法による理論計算で求めた上下揺の応答関数は模型実験と良く一致し、これを用いた実機のブイの運動から求めた再現波浪は相対波高計と運動から直接求めた波高と良く一致する。
2. 有義波高5mまでの範囲では大型係留ブイによる波浪計測値が過小となる傾向は見られなかった。
3. 係留ラインの引き込み力が排水量に比べて無視できないとき水槽実験の際に集中的な重りを吊り下げること、現象を模擬できる。
4. 採用したジャイロは十分な精度を有しており、波浪計測に使用できる。

謝 辞

海上実験を遂行するにあたって、川重テクノ(株)の喜多氏と九州大学応用力学研究所の稲田技官の支援を受けました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 根間清、山上順雄、清水穂高、大西登喜夫：軸対称

- 物体に働く流体力の計算法、関西造船協会誌第 196 号、pp. 59-69、1985.
 - 2) 小寺山亘、中村昌彦、池淵哲郎、高津尚之、日下部正志：大気海洋環境総合観測ブイの運動・係留と波浪発電性能、日本造船学会論文集第 188 号、pp.257-269、2000.
 - 3) W.Koterayama, H.Mizuoka, N.Takatsu and T.Ikebuchi : Field Experiments and Numerical Prediction on Dynamics of a Light Floating Structure Moored in Deep Ocean, Int. J. of Offshore and Polar Engineering, Vol.7, No.4, pp.255-261, 1997.
 - 4) 中村 昌彦、小寺山 亘、経塚 雄策：係留鎖に働く抗力の海洋構造物長周期動揺への影響 日本造船学会論文集第 166 号、pp.163-172、1989.
 - 5) W.Koterayama, S.Mizuno, K.Marubayashi and M.Ishibashi : Dynamics of deep sea surface buoy system for ocean mixed layer experiment, J of La mer, Vol.30, No.3, pp.127-138, 1992.
 - 6) 栖原寿郎、小寺山亘、肥山央、古賀洋治：振動する繫留鎖の挙動と張力（Ⅱ）、日本造船学会論文集第 152 号、pp.503-513、1982.
 - 7) 橋本典明、小舟浩治：最大エントロピー原理（MEP）を用いた方向スペクトルの推定、港湾技術研究所報告、第 24 巻、第 3 号、PP.123-145、1985.
-