研究報告

洋上風況観測のためのドップラーソーダ水平保持装置における動揺安定化 Sway stabilization of Doppler Sodar Isolator for Offshore Wind Observation

比江島 慎二^{*1} 小銭進司^{*2}

Shinji HIEJIMA, Shinji KOZENI

SUMMARY

In order to observe offshore wind with Doppler sodar on oscillating boats, the pendulum-type isolator to keep the horizontal state of the Doppler sodar was developed. The oscillation of the isolator pendulum itself was attempted to be suppressed by attaching additional masses to decrease the natural frequency of the pendulum and installing a damping system to dissipate the oscillation energy. As a result, the pendulum oscillation was suppressed sufficiently when the additional masses were attached above the rotation center of the isolator pendulum. In addition, the friction damper using sponge-like material suppressed the pendulum oscillation effectively. The offshore wind observation using the Doppler sodar with the developed isolation system verified that the vertical profiles of the observed wind speeds follow the power law or logarithmic law. In addition, the wind speeds and wind directions observed by the Doppler sodar have good correlations with those of the cup anemometer & wind vane at the onshore site.

Key Words: Doppler sodar; Offshore wind observation; Pendulum-type isolator; Wind energy

1. はじめに

地球温暖化の根本原因は化石エネルギーに依存した現代文明にあり、化石エネルギー依存からの脱却は人類にとっての最重要課題である。さらに、近年、これまで拡大を続けてきた世界の石油生産量がついに減少に転じるという石油ピーク¹⁾の到来が危ぶまれている。それにも関わらず、新興国の台頭などで世界のエネルギー需要は増大の一途をたどっており、いったん石油ピークを迎えた後は加速度的な資源の枯渇が生じ、激しい資源争奪が世界中で繰り広げられると予想される。主要国の多くは自国のエネルギー確保のために石油代替エネルギーの導入や普及に積極的であるが、わが国

では原子力の安全性に対する不安や遅々として普及の進まない自然エネルギーなど、世界の流れから大きく後れを取っている。エネルギーの実に96%を海外からの輸入に頼っているわが国にとって、エネルギー安全保障上、極めて憂慮すべき状況である。

わが国は四方を海に囲まれ、ロシアにつぐ海岸線総延長を有しており、洋上風力、潮力、波力、海洋温度差などの様々な海洋エネルギーは無尽蔵・無料・純国産の石油代替エネルギーとして極めて有望である。特に、ヨーロッパなどでも導入が進む洋上風力は、わが国周辺においてもその膨大なエネルギー賦存量が期待できる。われわれは、わが国において特に洋上発電に

*1 岡山大学大学院環境学研究科 准教授
Associate Professor, Graduate School of Environmental Science, Okayama University

*2 岡山大学大学院環境学研究科 大学院生
Graduate Student, Graduate School of Environmental Science, Okayama University
(原稿受理年月日: 2009年6月22日, 採用決定: 2009年12月25日)

適した広大な浅海域が広がる瀬戸内海に着目し、その洋上風力の賦存量を試算した。その結果、定格出力1500kWの風車を想定した場合、瀬戸内海全体で中国地方の電力消費量の4倍もの膨大な風力エネルギーが埋蔵され、水深、平均風速、国立公園などの制約条件を考慮して対象地域を絞り込んだ場合でも、中国地方の電力消費量の6割を賄えることなどを明らかにしている^{2), 3)}。これらの結果を踏まえ、著者らは単なる地球温暖化防止策としてだけではなく、化石資源に依存した産業構造から脱却することによって将来の道州制の実現をにらんだ地域活性化・地域独立と密接に結びつけた分散型・地産地消型のエネルギーへの転換をめざす「瀬戸内海洋上ウィンドファーム構想」^{2), 4)}を提唱している。

洋上風力発電の導入には、陸上の場合と同様に現地観測による風況精査が重要となる。風況精査は通常30m～50m程度の高さの観測塔に風向風速計を設置して行われる。しかし、洋上観測塔の設置はコストが高く、航路や漁業区域などでは設置自体が困難な上、設置許可にかかる時間や労力は多大である。これに対して、船舶を用いた風況観測システム⁵⁾などが提案されている。われわれは、特に小型で扱いやすいドップラーソーダをボートに搭載することで、洋上の任意地点で容易に観測可能な手法を開発し、低コストで機動性の高い風況精査の実現をめざしている。ところが、ドップラーソーダはその測定原理上、装置本体の姿勢を水平に保つ必要がある一方、洋上では波によるボート動揺のため水平姿勢を保持するのが難しい。これに対して、動揺するドップラーソーダで測定したデータをソフトウェア的に動揺補正する手法⁶⁾などが検討されている。それに対し、われわれは、波で動揺するボート上でドップラーソーダの姿勢を水平に維持するための水平保持装置を用いることにより、ハードウェア的に動揺を吸収することで、補正を必要とせず直接的に洋上風を測定する手法の開発をめざしている。

本研究では、水平保持装置の開発の第一段階として、波との共振により本装置のジンバル構造に生じる振動現象の対策に焦点を絞り、免振機構や減衰機構を導入して振動を軽減するとともに、その効果を水上における加振実験により検証している。さらに、水平保持装置の洋上風況観測への適用可能性を把握することを目的として、実際の洋上において概略的な風況観測を実施した。

2. 水平保持装置とその振動対策

2.1 ドップラーソーダ水平保持装置の概要

波で動揺するボート上でドップラーソーダの姿勢を水平に維持するための水平保持装置を製作した。水平保持装置はFig. 1に示すように、水平面内で直交する2軸の振り子から成るジンバル構造で、内側振り子と外側振り子が動揺に伴う装置全体の傾きを吸収し、内側振り子上に置かれたドップラーソーダの水平状態が常に維持される。装置全体をアルミ製の棒部材で構成し、振り子の回転軸は摩擦の少ないボール軸受けを用いている。また、ドップラーソーダは水平状態を保持すると同時に、常に一定方位を保持する必要がある。そこで、水平保持装置の底部に車輪を取り付け、潮の流れなどで時々刻々と変化する船位に対して装置全体を水平面内で手動回転させて一定方位を保持する。

ところが、この水平保持装置を小型ボートに搭載して洋上における予備実験を行ったところ、ボートの動揺に対して振り子が共振し、水平を保持できず、振り子自体の何らかの振動対策が必要であることが明らか

(a) 寸法図

(b) 全体写真

Fig. 1 ドップラーソーダ水平保持装置
Doppler sodar isolator

となった。この振動は、振り子の回転中心がボートの回転中心よりも上方に離れているため、ボート動揺時に振り子の回転中心が水平方向に強制変位させられ、それによって振り子に水平方向の慣性力が生じるのが原因である。特に、振り子の固有振動数とボートの振動数が近いと共振して振動が大きくなる。そこで、振動対策として付加質量により振り子固有振動数を下げ、免振する方法と振り子に減衰を付加する方法による2種類の対策を検討することにした。

2.2 付加質量を用いた免振による振動軽減対策

ボートは波浪や気象条件により複雑な振動性状を示すが、洋上で実測したところ、およそ0.70Hzと0.60Hz付近に卓越振動数が見られ、それぞれボートの rolling と pitching に対応すると思われる。これらは水平保持装置の振り子の固有振動数の実測値 0.73Hz に近い (Table 1)。

水平保持装置の振り子を Fig. 2 のような剛体振り子と仮定して固有振動数を算定すると式(1)のようになる。この式に、振り子の回転中心とドップラーソーダも含めた振り子の重心との距離 $L = 6\text{cm}$ 、内側振り子の幅 $B = 52\text{cm}$ 、内側振り子の高さ $H = 20\text{cm}$ 、重力加速度 $g = 980\text{cm/s}^2$ とすると $f = 0.71\text{Hz}$ となり、Table 1 の実測値とほぼ一致した。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{12} \left\{ (B/L)^2 + (H/L)^2 \right\} L} \frac{g}{L}} \quad (1)$$

次に、振り子の固有振動数をボート振動数より下げ、免振するため、付加質量を与えることにした。振り子の直下に回転中心からの長さ ℓ 、質量 m の付加質量を設置したモデルを Fig. 3 に示す。このモデルの固有振動数は式(2)のように表される。このとき、 $m' = m/M$ 、 $\ell' = \ell/L$ 、 $B' = B/L$ 、 $H' = H/L$ とし、ドップラーソーダを含む振り子の質量 $M = 32\text{kg}$ である。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + m'\ell'}{1 + \frac{1}{12} (B'^2 + H'^2) + m'\ell'^2} \frac{g}{L}} \quad (2)$$

式(2)について、質量比 $m' = 0.5 \sim 2.5$ ($m = 0 \sim 50\text{kg}$) の付加質量を想定し、固有振動数 f の変化を腕長さ比 ℓ' に対して示したのが Fig. 5 である。付加質量がないときの $f = 0.71\text{Hz}$ よりも固有振動数を下げるためには、いずれも $\ell' > 8.0$ ($\ell > 48\text{cm}$) にする必要があるのが分かる。しかし、今回作成した水平保持装置の振り子直下にはちょうど $\ell = 50\text{cm}$ 程度のスペースしか確保できないため、この付加質量モデルによる免振化はほ

Table 1. 水平保持装置とボートの振動数の実測値
Natural frequency of Doppler sodar isolator and boat

水平保持装置	ボート (rolling)	ボート(pitching)
0.73 Hz	0.70 Hz	0.60 Hz

Fig. 2 水平保持装置の剛体振り子モデル
Rigid body pendulum model of Doppler sodar isolator

Fig. 3 付加質量モデル（直下型）
Additional mass (Right-beneath-pendulum type)

Fig. 4 付加質量モデル（やじろべえ型）
Additional mass (Obliquely-extended type)

んど期待できない。

そこで、別の方法として Fig. 4 のようなやじろべえ型の付加質量について検討した。このときの固有振動数は $\ell'_1 = \ell_1/L$ 、 $\ell'_2 = \ell_2/L$ として式(3)のように表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + 2m'(\ell'_1 \sin \phi_1 + \ell'_2 \sin \phi_2)}{1 + \frac{1}{12} (B'^2 + H'^2) + 2m'(\ell'^2_1 + \ell'^2_2)} \frac{g}{L}} \quad (3)$$

式(3)によれば、水平からの付加質量の取り付け角度 ϕ_1 、 ϕ_2 を負の値、すなわち振り子の回転中心よりも上側に付加質量を設置した“逆やじろべえ”にすれば確実に固有振動数を下げられることが分かる。実際の観測時にドップラーソーダ周囲に取り付ける遮音壁等の設置スペースの確保を考えて、 $\ell_1 = 26.4\text{cm}$ 、 $\ell_2 = 82.1\text{cm}$ 、 $\sin \phi_1 = -0.188$ 、 $\sin \phi_2 = -0.060$ を想定した。こ

Fig. 5 付加質量モデル (直下型) の固有振動数
Natural frequency of Doppler sodar isolator with additional mass (Right-beneath-pendulum type)

Fig. 6 付加質量(やじろべえ型)を付けた水平保持装置
Doppler sodar isolator with additional mass
(Obliquely-extended type)

のとき $m > 10\text{kg}$ では式(3)の平方根の中が負となり不安定になってしまうが, $m = 2.5\text{kg}$ とすれば $f = 0.28\text{Hz}$ となり, Table 1 の振動数に対して十分な免振効果が期待できる。実際にこの条件で水平保持装置に付加質量を取り付けて実測したところ (Fig. 6), ほぼ理論値に近い固有振動数 0.29Hz が得られた。

2.3 減衰付加による振動軽減対策

付加質量による免振対策に加え, さらなる振動抑制策として減衰装置の適用を検討した。ただし, 過大な減衰は免振効果を低下させるため, 適度な減衰付加が必要である。減衰装置として Fig. 7 に示す 3 つの方式を試みた。

鉛ダンパーは, Fig. 7(a)のように水平保持装置の振り子とそれを支える外枠との間に縦 150mm , 幅 100mm , 厚さ 0.5mm の鉛シートを湾曲させて張り渡し, 振り子振動時の鉛シートの曲げ変形で減衰を付加するもので

(a) 鉛シートを用いた鉛ダンパー

(b) 鋼球を用いたインパクトダンパー

(c) スポンジ材を用いた摩擦ダンパー

Fig. 7 減衰装置
Damping systems

ある。振り子と外枠との間に 2 ヶ所設置して自由振動させたところ, 減衰効果が強く過減衰状態になった。そのため, 洋上実験で付加質量による免振装置と同時に用いたところ, 過大な減衰によって免振効果が低下してしまう傾向が見られた。

インパクトダンパーは, Fig. 7(b)のように質量 30g , 直径 20mm の鋼球を複数入れた金属容器 4 つを水平保持装置の振り子下部の四隅に設置したものである。1 つの金属容器に 16 個ずつの鋼球を入れたときの振り子の自由振動時の減衰定数の測定値は 0.005 となり, インパクトダンパーを設置しないときの減衰定数 0.004 とほとんど違いがなかった。鋼球の個数を様々に変化させたが, いずれも同様な結果であった。振動時の鋼球の動きを観察したところ, 金属容器の底面角部が丸みを帯びているため, 容器の壁際に沿ってすべての鋼球がそろって一方向に周回運動してしまい, 容器壁面への衝突や鋼球どうしの衝突がほとんど生じてい

ないことが明らかとなった。また、洋上実験では、振り子が傾いた際に鋼球がすべて金属容器内の片側に偏ってしまい、その重みで振り子が傾いた状態になり、鋼球が全く動かなくなってしまう現象なども見られた。

摩擦ダンパーは、Fig. 7(c)のように振り子底部から突き出した金属製の腕の先端にスポンジ材を取り付け、振り子の振動時に、スポンジ材が水平保持装置の土台底面部と擦れるようにしたものである。摩擦ダンパーを取り付けた振り子の自由振動時の減衰定数は 0.182 となり、取り付けないときの 0.004 に比べて高い減衰効果が得られた。洋上実験で試したところ、付加質量による免振効果を損なうことなく、さらに高い振動抑制効果が得られた。よって、この摩擦ダンパーを採用することとした。なお、水平保持装置の土台底面部へスポンジを押し当てる力の強弱により、摩擦ダンパー

の摩擦力は変化すると考えられる。さらに、水平な土台底面部に対して摩擦ダンパー先端は振り子運動により円弧状の軌道を通るため、摩擦力に振幅依存性が生じると予想される。これらのパラメータを様々に変化させて最適な摩擦力を得ることが望ましいが、次節の検証実験で示すように、振動軽減機能は主に付加質量による免振機構が担っており、摩擦ダンパーはあくまで補助的な制振機能であることから、摩擦ダンパーの特性について本研究ではこれ以上の詳細な検討は行っていない。

2.4 免振および減衰機構の検証

免振および減衰機構による振動軽減効果を定量的に検証するため、小型ボートに水平保持装置を搭載して屋外の河川において加振実験を行った。河川は流れの緩やかな波のない静水面で、水面に浮かべた小型ボー

Fig. 8 付加質量および摩擦ダンパーによる免振・減衰効果
Isolating and damping effects of additional mass and damping system

トを人力により強制加振して rolling 振動させた。内側振り子の回転軸をボートの rolling 軸に合わせ、内側振り子に加速度センサー（Crossbow 製 CXL02LF1Z）を設置して内側振り子上のドップラーソーダの動揺を計測するとともに、比較のため、内側振り子の加速度センサーと隣り合わせてもう 1 つの加速度センサーを水平保持装置外枠上に設置した。水平保持装置外枠上の加速度センサーはボートの rolling に追従して動くため、ボート自体の動揺を捉えることになる。2 つの加速度センサーの設置位置を Fig. 1(a)に示す。

2 つの加速度センサーが捉えた振動加速度のパワースペクトルを Fig. 8 に示す。いずれも 0.9Hz の加振振動数付近に複数のピークが見られるが、不安定な水上における人力加振であるため単一振動数・一定振幅で加振できていないこと、あるいは浮力にもとづく復元力の振幅依存性などに起因した非線形性等が原因と思われる。Fig. 8(a)は付加質量と減衰装置を取り付けずに、ドップラーソーダだけが水平保持装置の振り子に載っている状態の結果であるが、ボートよりもドップラーソーダの方が大きく振動している。これに対して、付加質量による免振対策を施した結果が Fig. 8(b)である。ドップラーソーダの振動がほぼ消滅して水平を保ち、ボートだけが振動しているのが分かる。Fig. 8(c)は、免振対策は行わず摩擦ダンパーによる減衰装置のみを施した結果であるが、免振のような低減効果は得られず、対策無しのとときと同様にボートよりも振動が大きくなっている。ただし、このような定常的な波を想定した強制加振では減衰の効果が現れにくいものの、一過性の大きな波による衝撃的な外力が作用した後の自由振動に近い動揺に対しては、前述の減衰定数に応じた減衰効果が発揮されると考えられる。免振と減衰の両対策を施した結果が Fig. 8(d)であるが、減衰が免振効果を損なうことなく、Fig. 8(b)と同様、高い水平保持効果が得られている。

3. 洋上風況観測への適用可能性

振動抑制対策を施した水平保持装置について洋上風況観測への適用可能性を検証するため、水平保持装置に装着したドップラーソーダ（Scintec 社製 SFAS）を小型ボート（アカシヨット社製 EMK330M）に搭載し、岡山県瀬戸内市の海水浴場の沖合 50m ~ 100m 程度の洋上地点で風況観測を行った（Fig. 9, Fig. 10）。ドップラーソーダは重量 11.5kg の小型で可搬性の高いフラットアレイ型ソーダである（Fig. 1）。送受信機は 64 個

Fig. 9 洋上観測地点付近の地図
Map around offshore observation site

Fig. 10 観測装置と観測風景
Observational equipment

Fig. 11 矢羽根風杯型風向風速計の設置状況
Installation of cup anemometer & wind vane

(8×8) のスピーカから構成され、音波は東西南北にそれぞれ 24°と 19°の 2 方向に加えて鉛直方向の計 9 方向に約 2 秒ごとに発射される。

3.1 洋上風況観測の概要

観測期間は 2008 年 11 月中の 6 日間にわたり、1 日数時間程度実施した。小型のボートを使用しているため、荒天での観測は困難であり、波浪が比較的穏やかな状況で観測している。水平保持装置を用いない場合は、波によるドップラーソーダの動揺が原因で測定データ自体が取得できないか、あるいは取得できたとし

Fig. 12 洋上観測時における風向出現率
Appearance probability of wind direction

でも明らかに実際とは異なる風速値しか得られない不安定な状態であったが、水平保持装置を用いることにより、継続的に安定した測定データが得られることを確認した。

さらに、ドップラーソーダによる洋上観測値と比較検証するため、Fig. 9 に示すように、洋上観測地点と同じ海岸に面する陸上地点の建物屋上において、矢羽根風杯型風向風速計（Davis 社製 Weather Wizard III）による観測も同時に行った。矢羽根風杯型風向風速計は Fig. 11 に示すように、2 階建ての建物屋上の海に面した南東端に設置した。海面からの高さは 10m～15m 程度になると思われる。2m 高さの低いポールを使った簡易設置であり、屋上北側には 1 段高くなった突起構造などがあるため、特に北寄りの風は建物形状の影響を受ける可能性がある。今回の観測データの 8 割近くが西寄りの風であったため（Fig. 12）、北寄りの風ほどの強い影響は受けないものの、建物により多少の影響は受けると考えられる。風速計の設置条件として精度的に不安な面はあるが、開発したドップラーソーダ水平保持装置の概略的な性能を検証する限りにおいては十分であると判断した。風況観測精度などに関するより詳細な検証は今後の課題である。

3.2 陸上に設置した風向風速計との相関

ドップラーソーダ洋上観測地点と同じ海岸に面する 2 階建ての建物屋上に設置した矢羽根風杯型風向風速計（海面高さ 10～15m 程度）の観測データとの相関性を検証した。10 分間ごとの平均を取った観測データについて、高度ごとに風速と風向の相関係数を求めたのが Table 2 である。いずれも観測期間を通してデータ取得数が 100 個を超えた高度について示している。その中で特に風速の相関が高い高度 35m のときの風速・風向の相関散布図を Fig. 13 に示す。低い高度では相関が

Table 2. ドップラーソーダと矢羽根風杯型風向風速計の風速・風向の相関係数

Correlation coefficient of wind speed and wind direction between Doppler sodar and cup anemometer & wind vane

高度(m)	風速の相関係数	風向の相関係数
15	0.685	0.621
20	0.785	0.762
25	0.837	0.775
30	0.851	0.779
35	0.868	0.776
40	0.858	0.770
45	0.835	0.797
50	0.817	0.810
55	0.796	0.811
60	0.786	0.844

(a) 風速

(b) 風向

Fig. 13 高度 35m の風速・風向の相関性
Correlation of wind speed and wind direction at 35m height

Fig. 14 高度 15m の風速・風向の時刻歴
Time history of wind speed and wind direction at 15m height

低下するものの、両者の間に相関係数 $0.7 \sim 0.8$ 程度の相関性が見られることから、水平保持装置が洋上において適切に機能しており、比較的良好な洋上観測が実現できていると考えられる。Fig. 14 には、陸上に設置した矢羽根風杯型風向風速計の高さに近い高度 15m の風速・風向について、観測期間全体にわたる時刻歴を示している。ドップラーソーダの方が変動がやや大きい、全体的な傾向はよく一致している。

なお、今回の観測は短期間のものであり、比較的穏やかな波浪条件の下で行っている。今後は、長期にわたり様々な波浪や気象条件の下で観測するとともに、より高精度な陸上観測との比較などを実施して、洋上での動揺が観測精度に与える影響等についてより詳細に検証していく必要がある。また、水平保持装置はボートの rolling や pitching による傾きは吸収できるが、鉛直方向の上下振動は吸収できない。今回の観測のような穏やかな波浪条件の下では、ボートの上下振動は rolling や pitching に比べて小さいが、うねるような大波の下では無視できない可能性がある。ただし、そのような荒れた気象条件では、ボートによる観測自体が困難である。

本研究における観測手法では、いわゆる観測塔に設置した風速計のような長期の連続した観測ではなく、

Fig. 15 水平方向風速の鉛直分布
Vertical profile of horizontal wind speed

あくまで断続的かつ短期の洋上観測を主眼とする。別途、洋上観測と同じ時刻の周辺陸地の気象官署等における観測値との相関関係を求めれば、その相関式を使って、気象官署の連続した長期観測値をもとに洋上観測地点の長期風況を予測できると考えられる。このように、短期間の断続的なドップラーソーダ観測値と周辺気象官署の観測値との相関関係からドップラーソーダ観測地点の長期風況を予測する手法については、陸上でのドップラーソーダ観測により、その有効性をすでに検証しており、周辺気象官署の風速に加え、気温差や気圧傾度も考慮した重回帰分析を用いれば平均風速や風力発電可能量を数パーセント範囲の誤差で予測できることを明らかにしている⁷⁾。

3.3 風速の鉛直分布

ドップラーソーダによる 10 分間平均風速の観測値を高度ごとに平均してプロットしたのが Fig. 15 である。ドップラーソーダの高度分解能は 5m 間隔であり、図には 5m 間隔で各高度の平均値を示している。観測期間が短かったため、全体の観測データ数は多くないが、比較的なめらかな鉛直分布が得られている。

Fig. 15 には、鉛直分布にべき乗則と対数則を当てはめた回帰曲線も示している。べき乗則と対数則の回帰曲線から求めたべき指数 p と粗度係数 z_0 はそれぞれ $p = 1/2.5$ 、 $z_0 = 3.0$ であり、穏やかな海面というよりも粗面に近い値となった。観測地点周辺は、Fig. 9 に示すように、西側や北側に 100m 程度の低い山が海岸に迫った地形となっているが、Fig. 12 に示したように今回の観測データの 8 割近くが西寄りの風であったため、

それらの地形の影響を強く受けていると考えられる。Fig. 15の50m付近の高さで少し風速が弱まっているのも、このような周辺地形が関係している可能性がある。Table 2においても、高度45m付近を境にして上層と下層で風向の相関が系統的に異なっているように思われ、地形の影響の関与が示唆される。しかし、いずれにせよ、今回の観測データの数では粗度の影響などを風向別に検証することができず、詳細については明らかではない。

4. まとめ

小型ドップラーソーダを小型ボートに搭載し、簡便に洋上の任意地点の風況観測が可能な低コストで機動性の高い洋上風況観測手法を実現するため、波で動揺するボート上でドップラーソーダの姿勢を水平に維持する水平保持装置を提案した。そして、水平保持装置の開発の第一段階として、装置の主要構造となるジンバル部における、波の動揺による共振問題に焦点を絞り、その対策として免振・減衰機構を導入するとともに、加振実験によりその効果を検証した。また、装置の概略的な性能を検証するための洋上観測なども行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 2軸振り子から成るジンバル構造で水平保持装置を構成した。水平保持装置外側から加わる静的傾きに対して、内側振り子に載せたドップラーソーダは水平姿勢を保持することができたが、振り子固有振動数が洋上でのボート振動数と共振してしまう現象が確認された。
- (2) 水平保持装置振り子とボートとの共振を避けるため、振り子に付加質量を設置して免振化を図った。振り子をモデル化して解析的に検討したところ、付加質量を振り子直下に設置する方法では振り子固有振動数を低下できないことが明らかとなった。振り子から腕を伸ばして振り子回転中心よりも上側に付加質量を取り付けた逆やじろべえ方式により、振り子固有振動数を低下させ、免振機能を得ることに成功した。
- (3) さらに振動抑制効果を上げるため、減衰ダンパーの設置を検討した。鉛ダンパー、インパクトダンパー、摩擦ダンパーを実際に設置して試したところ、スポンジ材を用いた摩擦ダンパーにより、免振機能を損なうことなく適度な減衰を付加することができた。
- (4) 水平保持装置の性能を検証するため、静水面上で

小型ボートに装置を搭載して人力加振による振動実験を行った。その結果、免振機構が極めて良好に働き、ほぼ完全にドップラーソーダの水平状態が保たれることを定量的に確認することができた。

- (5) 免振機構と減衰ダンパーにより改良した水平保持装置の洋上風況観測への適用可能性を検証するため、実際の洋上でボートによる風況観測を実施した。水平保持装置を用いないときは波による動揺により、ほとんど測定不能か、測定できたとしても明らかに実際とは異なる測定値しか得られない不安定な状態であったが、水平保持装置を用いることにより、ほぼ継続的に安定したデータが得られるようになった。

- (6) 洋上観測は短期間の限られた条件下での観測であったが、べき乗則や対数則にほぼ従う比較的滑らかな風速鉛直プロファイルが得られた。また、同時に洋上観測地点近くの陸上で矢羽根風杯型風向風速計により観測した風況データと比較したところ、10分間平均の風速および風向について、相関係数0.7~0.8程度の相関性が確認された。以上のことから、水平保持装置が有効に機能し、洋上観測に十分適用可能であることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（萌芽研究 No.18656127）により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 林, “石油ピークが来た”, 風力エネルギー, Vol. 31, No. 4, pp. 3, 2007.
- 2) 比江島, “瀬戸内海洋上ウィンドファーム構想実現に向けての風力発電賦存量の試算”, 日本風工学会論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1 - 9, 2009.
- 3) 比江島, 中元, 田中, 鈴木, 山本, “瀬戸内海洋上の風力発電賦存量”, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp. 115 - 120, 2006.
- 4) 比江島, “瀬戸内海ウィンドファーム構想”, 風力エネルギー, Vol. 28, No. 1, pp. 99 - 101, 2004.
- 5) 林, “緊急を要する洋上風況観測システムの開発”, 風力エネルギー, Vol. 32, No. 1, pp. 91 - 96, 2008.
- 6) 井上, 上田, 永井, “浮体式洋上風況調査システムの開発”, 石川島播磨技報, Vol. 46, No. 4, pp. 171 - 175, 2006.
- 7) 樋吉, 比江島, “ミニドップラーソーダを用いた相関法による風況予測”, 第20回風工学シンポジウム論文集, pp. 145 - 150, 2008.