

水位計を用いたトライトンブイの喫水量測定

細田 滋毅^{*1} 小山 登^{*2} 水野 恵介^{*3} 鷺尾 幸久^{*1}

トライトンブイの喫水量(乾舷)が、海流および海上風によってどのくらい影響を受けるかを、西太平洋に展開されているトライトンブイ12号機(2°N, 138°E)の浮体に水位計を取り付けることによって見積った。トライトンブイに設置されている気象・海洋センサーと、水位計で得られた観測データとを比較した結果、水位計のトラブル等によって短期間のデータしか得られなかったものの、表層の流速変化と水位変化との関係がある程度明らかになった。さらに、係留索シミュレーションソフトを用いて、観測された海流の強さを与えた場合の浮体の水位変動についてシミュレーションを行った。両者を比較すると、流れと水位の関係は定性的には良く一致していた。ただし、流速が増加した場合に浮体の沈み込む量は観測データの方がシミュレーション結果よりも大きく、海上風も考慮したシミュレーションでは、その差は小さくなったものの、若干観測値の方が大きかった。今回水位計の特性や解析法が明らかになったことにより、今後さらに長期間のデータを蓄積することでブイシステムの挙動を明らかにでき、係留索シミュレーションソフトの改善に貢献できることが期待される。

キーワード：水位計, トライトンブイ, 喫水量, シミュレーション

Measurement of the Draft Variation of the TRITON Surface Float Buoy using a Depth Recorder

Shigeki HOSODA^{*4} Noboru KOYAMA^{*5} Keisuke MIZUNO^{*6} Yukihiisa WASHIO^{*4}

We try to measure the draft variation of TRITON buoy due to ocean current and surface wind using a simple depth recorder with pressure sensor attached to No.12 TRITON buoy (2°N, 138°E) in the western equatorial Pacific. Obtained pressure data is corrected with the TRITON air pressure and SST data and converted to the draft depth. Although the pressure sensor obtained only early data for 80 days because of water leakage, relationship between the draft variation and current speed is demonstrated. The draft variation is also simulated using a mooring simulation software, and compared to the observed data. The simulated draft variation forced by observed current data is consistent to the observed data qualitatively, but the observed draft is significantly deeper. Therefore, another simulation including surface wind effect is conducted. It makes the difference smaller, but the observed draft is still slightly deeper. In this experiment, we are able to find a relevant method of data treatment and analysis of pressure sensor for the draft measurement. Repeating the experiment, adequately long time series data will be available, then the nature of draft variation of TRITON buoy forced by ocean current and surface wind will be revealed in detail, and more reliable evaluation of simulation will be conducted.

Keywords : Pressure sensor, TRITON buoy, Draft variation, Simulation

*1 海洋科学技術センター

*2 海洋科学技術センター 現所属：国際気象海洋(株)

*3 海洋科学技術センター 現所属：独立行政法人 水産総合研究センター 遠洋水産研究所

*4 Japan Marine Science and Technology Center

*5 Japan Marine Science and Technology Center Present affiliation: International Meteorological & Oceanographic Consultant Co., Ltd.

*6 Japan Marine Science and Technology Center Present affiliation: Fisheries Research Agency, National Research Institute of Far Seas Fisheries

1. はじめに

トライトンブイは海上気象と海中の観測データをリアルタイムに通報する係留系システムであり、米国のTAOブイとともに太平洋の熱帯海洋全域に配置されエルニーニョの監視のための重要な観測網を担っている。このブイは海底のシンカーから海面の浮体まで1本の係留索でつながった固定ブイで、海中の水温・塩分データを取得するため、上層の係留索には所定の深度にセンサーが取り付けられている。これらのセンサーではほぼ同深度の水温・塩分時系列データを得られるように、係留系はほぼ直立した状態に緊張係留されている。ただし、係留索は流れの抵抗を受けることによって若干傾斜し、極端に速い流れの下では傾斜のため海面の浮体が水没する可能性もある。係留系は係留索等の抵抗を抑えつつ浮体には十分な浮力を持たせるよう設計されている。設置前にはその場所の最大の流れを推定し、それ以上の強い流れの条件を与えて係留系がどのような状態になるかについて、トライトン係留索シミュレーションソフトを用いて解析を行い、浮体が十分な乾舷を維持できることを確認している。

過去数年の赤道帯におけるトライトンブイの経験では、幸い浮体が水没するような事態には遭遇していない。一般に赤道帯は流れの速い海域であり、特に最近係留を開始したインド洋や西太平洋の西岸付近は、インド洋ジェットやミンダナオ海流などの強い流れが発生する場所であると考えられている。よって、ブイの安全性を一層確保するために、このシミュレーションの信頼性を高める必要がある。このためには以下の2つの条件が必要である。

- ① 設置海域の流れ、特に最大流速を精度良く予測できること。
- ② このシミュレーションが現場の状況を正確に反映していること。

上記①は、既往データやモデルを参照して最大流速を推定しているが、既往データが少なく、与える最大流速は不確定性をまぬがれない。また、数値モデルの結果も、特に表層では流速値が過大値をとる場合もある。最大流速を安全サイドに取って、あまり過大な流速を与えれば、実際の係留はほとんど不可能になる。今のところ正確な海流の推測には観測を積み重ねるしか方法がない。一方、②に関しては、これまで実際の海流に対するトライトンブイの乾舷および喫水量変化を測定したデータはなく、シミュレーションの信頼性は検証されていない。

よって、ここでは②の問題に取り組むこととし、その手始めにトライトンブイ浮体の喫水量変化を測定する方法を開発することを目標とした。なお、トライトンブイには10m深に超音波式流速計(SonTek社製 Argonaut ADCM)が取り付けられており、これで表面付近の流れを知ることができる。また、今回水位計を設置したブイの近傍にはADCP係留系が設置されており、約300mより浅い部分での流れの鉛直プロファイルが得られる。よって、喫水量の測定ができれば、流れの鉛直プロファイルと組み合わせて、シミュレーションの精度の検証を行うことが可能になる。本報告では、水位計を用いて喫水量を測定する方法を考案し、実際にブイに装着して測定を行ったので、その結果や問題点について論じる。

2. 実験方法と測定機器

実験は、2001年の"みらい"航海(MR01K05)で西部太平洋熱帯海域に設置した2°N 138°Eのトライトンブイ12号機の点(図1)で行われ、水位計はブイ下の脚の部位に取り付けた(図2)。平均的なブイの喫水量では、およそ水深1.5mの位置に相当する。

また、サンプリング間隔は10分に設定した。この水位計は、翌年の"みらい"航海(MR02K04)で回収して、この間のデータを取得した。実験場所・期間を表1に示す。

また、使用した水位計は離合社製 RMD-5225A水位計である。これは、半導体圧力センサーを使用して圧力を計測している。その構造と仕様をそれぞれ図3、表2に示す。トライトンブイの乾舷は通常は50cm程度を維持している。よって、それより少なくとも1桁下の精度で測定を行う必要があるため、この要求に耐えうる本機を選定した。

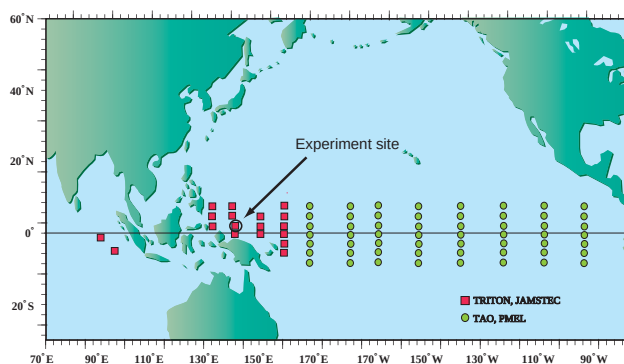


図1 水位計を取り付けたトライトンブイの位置(2°N,138°E)。

Fig. 1 Location of the TRITON buoy with the pressure sensor (2°N, 138°E).

表1 実験概要

Table 1 Summary of experiment.

Location	No.12 TRITON buoy (2°04'N, 138°04'E)
Period	Sep. 30, 2001 – Jul. 7, 2002
Data sampling interval	10 min.
Position of pressure sensor	Bottom of TRITON buoy (About 1.5 m draft)

表2 水位計の仕様(離合社製RMD-5225A)。

Table 2 Specification of the pressure sensor (Rigoshia Co.,Ltd.; RMD-5225A).

Size	50mm (diameter) × 185mm (length)
Weight (air)	430g
Battery	DC6V
Memory	128KB (65534 data)
Data sampling interval	2~127 sec. or 1~127 min. (Not averaging)
Range	0~5m
Accuracy	± 0.2%F.S
Resolution	3.3mm

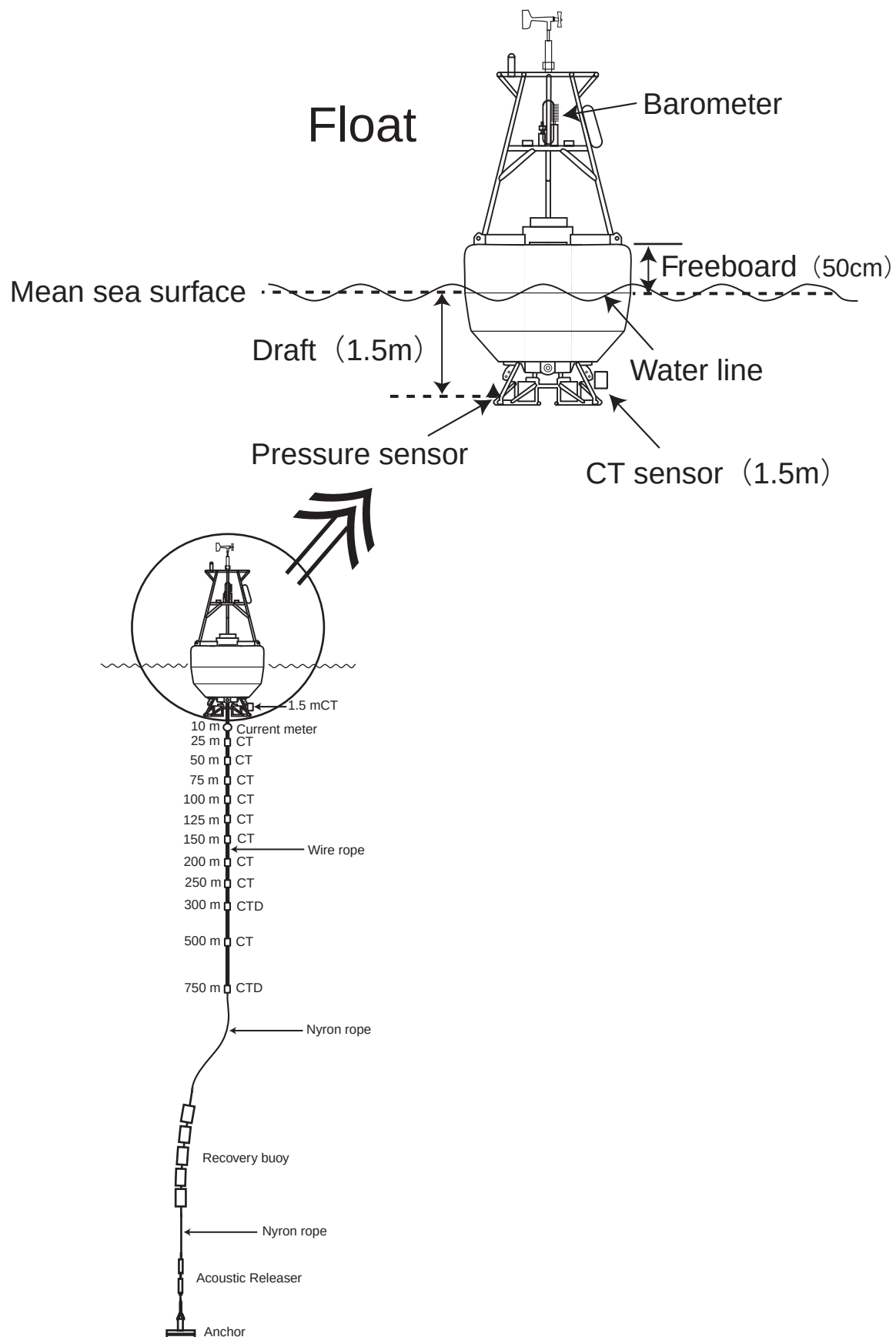


図2 トライトンブイ係留系と今回水位計を取り付けた位置。

Fig. 2 TRITON buoy mooring system and position of the pressure sensor.

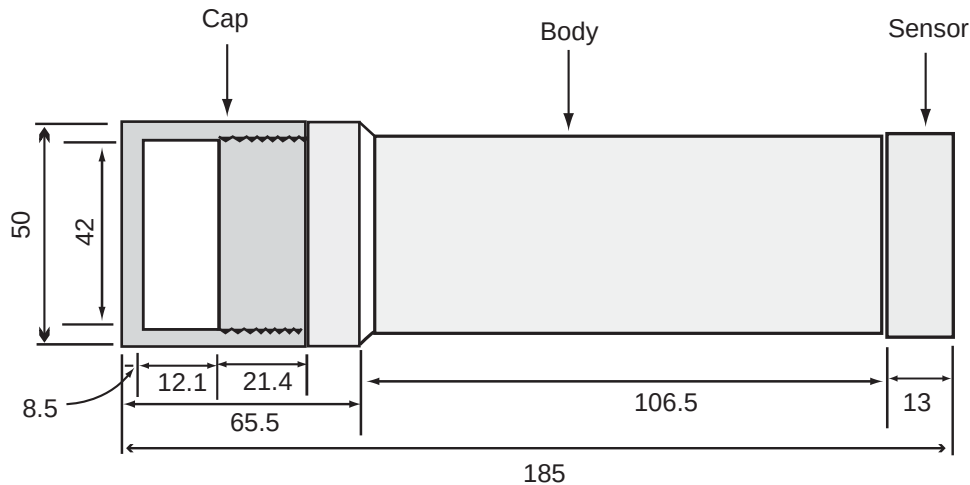


図3 水位計本体(離合社製 RMD-5225A)の構造と寸法 (mm)。

Fig. 3 Sketch of the pressure sensor (Rigosh Co.,Ltd.; RMD-5225A) and size (mm).

3. 取得データの補正方法

この水位計は半導体圧力センサーを用いており、半導体が圧力で変形すると電気抵抗が変化する性質を利用するものである。動揺するブイに取り付けられた圧力センサーが検出する水圧は、ほとんど水位とみなして問題ない(付録参照)。ただし、このセンサーが水圧として感知するのは、実際には外圧(大気圧+水圧)と内圧(容器内の圧力)との差である。すなわち、 P_a 、 P_w 、 P_i 、 P_o をそれぞれ、大気圧、水圧、容器内圧力、水位計で観測される圧力とすれば、

$$P_o = P_w + P_a - P_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成り立つ。

本水位計は、通常は水位計容器内を大気に開放した状態で使用することが多い(水中の水位計につないだホースを海面上に出す)。この場合は、(1)式の P_a と P_i が打ち消し合うので、 $P_o = P_w$ となるから直接水圧が計測できる。しかしながら、今回は外洋での計測であることから水位計を密閉状態にして使用したため、観測値 P_o と同時刻の各項のデータが必要となる。このうち P_a はトライトンブイの気圧計で10分ごとにデータが得られている。一方、 P_i は容器を密閉した時点の値があれば以後は容器内の温度のみで決る。すなわち、密封後の容器の体積変化は無視できる(容器材質の硬質塩化ビニルの体膨張率は $1.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)から、密封後の P_i と容器内の温度 T を時間 t の関数と考え、密封時を $t=0$ にとると、ボイル＝シャルルの法則から、

$$P_i(0)/T(0) = P_i(t)/T(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つ。 $T(t)$ は水位計が設置されている場所の海水の温度を用いればよく、水位計の直近にトライトンブイ脚部に取り付けられたCTセンサー(Seabird社製SBE37 IM MicroCAT)があり10分間隔で観測されている。よって、容

器密封時の内圧 $P_i(0)$ と温度 $T(0)$ が得られれば、全観測期間の P_i を計算できる。

容器はブイ設置以前のセンサーが空中にある時($P_w(0)=0$)に密閉されるから、

$$P_o(0) = P_a(0) - P_i(0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、観測値 $P_o(0)$ 、 $P_a(0)$ から $P_i(0)$ が求まる。ただし、実際にはセンサーのゼロ点のバイアスがあるのが普通で、これは容器を大気に開放したとき($P_a(0) = P_i(0)$)に P_o が示す値で、このバイアスを B とすれば真の P_o は $P_o - B$ となる。この実験では電源投入、サンプリング間隔設定直後に密閉されたのでバイアスは不明である。また、密閉時の $P_o(0)$ は水位計の蓋をねじ込んで密閉するから空気が圧縮されて大気圧よりも高まるはずである。この実験時は密閉時の $P_o(0)$ 、すなわち $P_a(0) - P_i(0)$ は水位換算で -70cm であった。大気圧 P_a は 1000hPa 程度だから P_i は 1070hPa 程度となり、バイアスを無視すれば圧縮された体積は 7% 程度と計算できる。このことについては、同じ型式のセンサーによりバイアスを考慮して室内実験による追試を繰り返して行っても、多少のばらつき(閉め方に依存)はあるもののほぼ同様な圧縮率($\pm 1\%$)が得られることを確認した。よって、この実験でのバイアスは水位換算で大きくとも $\pm 10\text{cm}$ 以内と推定できる。

バイアスを考慮すると(3)式は、 $P_i(0) = P_a(0) - (P_o(0) - B)$ で、(2)式に代入すると、

$$P_i(t) = (P_a(0) - P_o(0) + B)T(t)/T(0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となるので、バイアス B は時間的に一定とすれば、これを(1)式に代入して整理すると、

$$P_w = (P_o - P_a) - (P_o(0) - P_a(0)) + (P_a(0) - P_o(0) + B)T(t)/T(0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ただし、 $T'(t) = T(t) - T(0)$ で、密閉時の温度との差である。 $T(t)$ はこの海域では28～30℃、 $T(0)$ は密閉時の船内室温25℃(293K)程度だから $T'(t)/T(0)$ は2%以下となり、上式第3項の B の寄与は水位換算で1cmよりも十分小さく無視できる。よって、水位 P_w は

$$P_w = (P_o - P_a) - (P_o(0) - P_a(0)) - (P_o(0) - P_a(0))T'(t)/T(0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表され、バイアスを考慮する必要がない。各測定値の精度に関しては、 P_o は前節表2から水位換算で1cmであり、 P_a はトライトンブイの気圧計の精度から0.1cmの精度である。(6)式第3項は温度変化による測定値の変化補正分であるが、 $(P_o(0) - P_a(0)) \sim -1070\text{hPa}$ 、 $T(0) \sim 298\text{K}$ だから1℃の温度変化は水位換算で3.6cm程度の変化を生じる。 T は同ブイのCTセンサーの精度で0.1℃より良いため(6)式第3項は十分良い精度で得られる。

この実験の場合 $P_a(0)$ の記録はなく、 $T(0)$ は船内の温度計によるものである。 $T(0)$ の精度はほとんど問題にならないが、 $P_a(0)$ なしでは P_w は決定できない。ブイの設置・回収時の乾舷(標準的なブイの喫水線の下を黄・青色で塗り分けている)

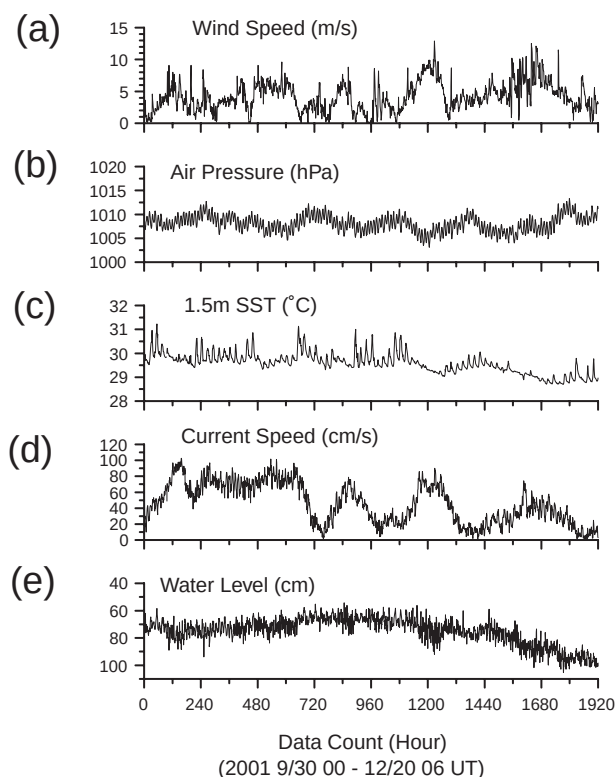


図4 水位計データが有効である期間での、トライトンブイに設置されている(a)海上風(m/s)、(b)流速計(cm/s)、(c)水温計(CTセンサー;℃)、(d)大気圧(hPa)、および(e)水位計で得られた水位(cm)の時系列データ。

Fig. 4 Time series of surface wind (a), current (b), water temperature at surface (c), air pressure (d) on the TRITON buoy and water level obtained with the pressure sensor (e).

の測定は目視による確認以外方法がないため、正確な見積もりは困難であるが、標準的な値は0.5mでありそこから大きく外れていたという報告はない。そこで水位計の位置を水面から1.5m程度と推定し、設置中の水位の全平均を $P_w \cong 150\text{cm}$ として、 P_o 、 P_a 、 $T(t)$ の全平均から $P_a(0)$ を決定した。これを用いて(6)式から設置期間中の水位を求めることができる。ただし、これには±5cm程度の一定誤差を伴うであろう。

4. 水位の変化

取得された約1年間の水位データは観測途中より異常なデータとなっていた。水位計回収後にこの原因について調べたところ、センサー側からの漏水によるものであった。しかし、どの時点からを異常なデータとなったかを厳密に決定する手立てはないので、全期間のデータのうち図4に示す初期の80日程度は正常とみなし、これを解析の対象とした。図4に、トライトンブイデータから得られた(a)海上風、(b)大気圧、(c)1.5m深の海面水温、(d)10mでの表面流速および(e)水位計のデータの時系列を示す。これらの値から前節で示した方法によってデータの補正を行った。

この80日間のデータに対して、スペクトル解析を行った結果を図5に示す。この図から、潮汐に起因すると考えられる12時間(0.087)と24時間(0.044)に強いピークが存在する。このことから浮体は潮汐のような短周期の変動の影響を受け、それに伴って水位計の測定値が変動していることが分かる。

図4の海上風と流速データに対する水位計データの比較を行うと、観測開始より約1ヶ月を過ぎた頃から水位データが徐々に深くなる傾向を示しているが、海上風と流速データからはそのような変動を起こすことは考えにくい。水位と流速データの関係を図6の散布図に示すと、25日以前までのデータ(■印)に対してそれ以降のデータ(●印)は、はずれていて、なおかつ流速が小さいにもかかわらず水位が大きくなっているという特徴がはっきりしており、25日以降の観測データは異常値であることは明らかである。このことから以降の解析には、図7の矢印に示す通り、約80日間のうち約25日間の

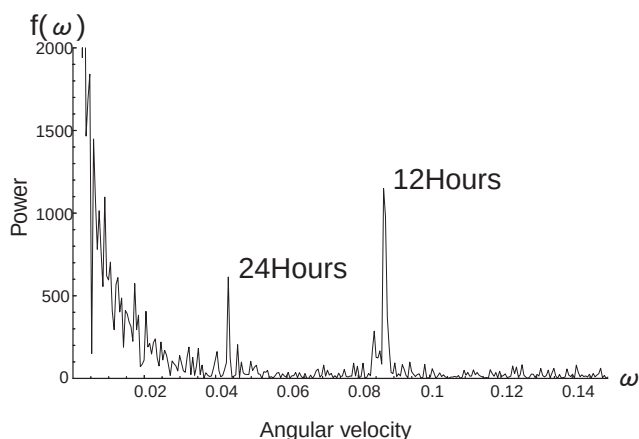


図5 約80日間の水位データから得られたスペクトル分布。

Fig. 5 Power spectrum of water level variation based on initial 80 days data.

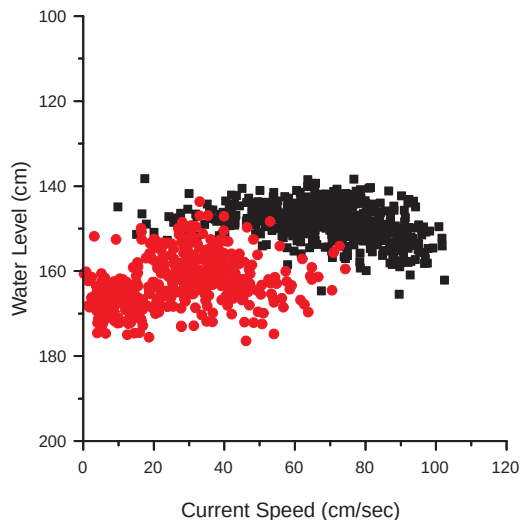


図6 流速と水位データとの関係。■印がはじめの25日間、●印がそれ以降80日までのデータ。

Fig. 6 Relation between current and water level data. Black square is data before 25 days, red circle is data after 25 days.

データを使用することとする。また、10分間隔のデータに対して1時間の移動平均を施した。

5. 水位と流速の関係

トライトンブイの水位と流れの関係を調べるために、水位とトライトンブイに設置されている流速計のデータとの関係を図8の散布図に示す。また、このデータを指数関数にフィッティングさせたものを赤線で示す。この図から、ある一定の値より強い流れの場においては、水位計の値が大きくなる、すなわち乾舷が小さくなる関係にあることが分かる。さらに、係留索のシミュレーションを行い、シミュレーションソフトの結果との比較を行った。今回行ったシミュレーションの条件は、ロープ長や太さ、配置等の係留システムについては今回水位計を設置したトライトン12号機の設計と同一のものとした。また、流速の深度分布は、深度0～20mを0.1～1.5m/secの0.1m/sec刻みとし、50m以深は0m/secに固定し、その間を線形補間で与えた。

上記条件にてシミュレーションを行ったところ、流速が0.6 m/s程度までは、ほぼ一定の水位を保っている。しかし、それより流速が大きくなると水位が増加していることがわかる。観測値は一定の誤差を伴うため水位の絶対値では比較はできないが、変化のパターンは比較できる。これは定性的には良く一致しているが変化量はやや異なっている。流速のみ変動させた結果によると(図8 ●印)、流速1.0m/secで、低速時の安定な水位よりも4cm沈んでいるが、観測された水位計データでは約9cmとなっており、観測値の方が約2倍大きくなっている。この原因の1つとして、風によるブイ本体が流される効果が考えられる。図9は、トライトンで得られた流速と風速の関係であるが、風速が大きくなると流速も大きくなる指数関数的な関係があった。そこで、この関係を用いて風速の大きさの変動を加味したシミュレーションも行った

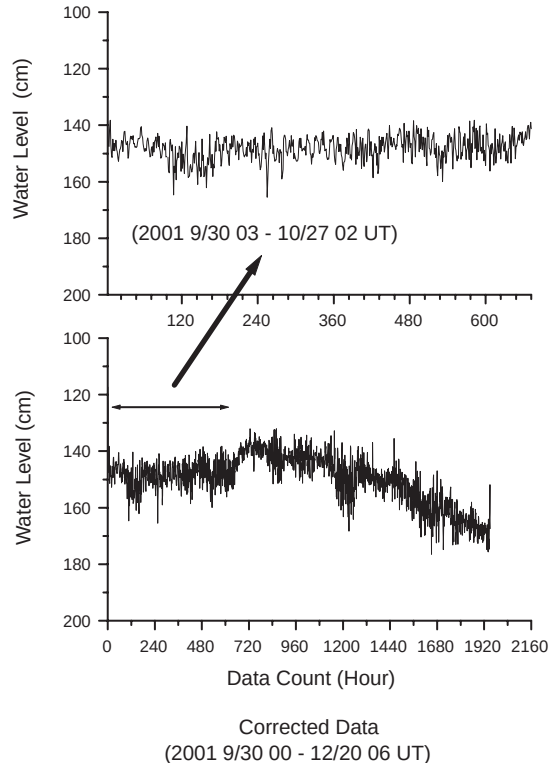


図7 解析に用いた水位データ時系列(上图)。下图は有効な全期間のデータに対して解析に用いたデータの期間(矢印)。

Fig. 7 Time series of analyzed data of water level (upper) and total data for about 80 days (lower).

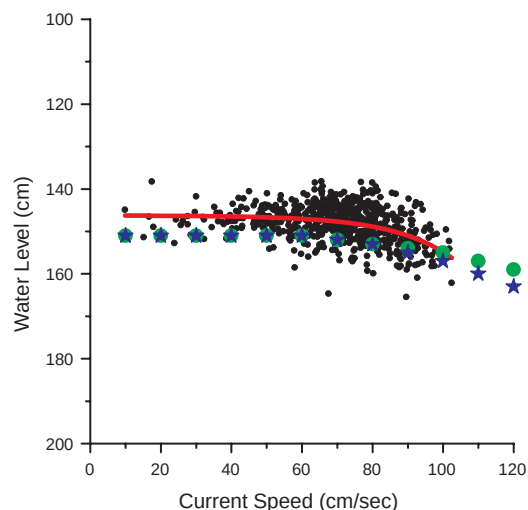
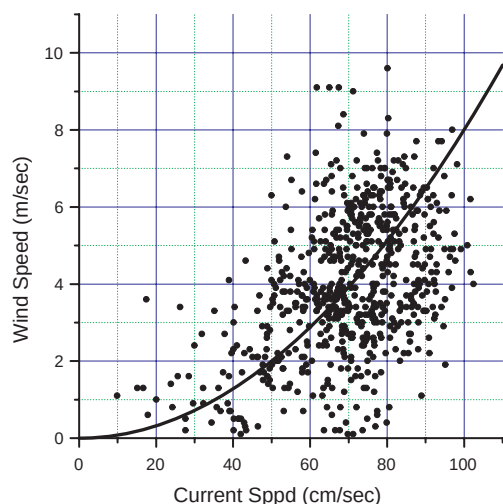


図8 観測された水位と流速との関係(黒点)と指数関数のフィッティング曲線(赤線)。●印は風速を考慮しない場合、★印は風速も考慮した場合の水位のシミュレーション結果。

Fig. 8 Relation between water level and current (black dot) and those exponential fitting curve (red line). Results of the simulations without/with surface wind effect are shown by filled green circles/filled blue stars.

(図8 ★印および表3)。その結果、流速1.0m/secでブイの乾舷は6cm沈み、風の効果を考えない場合よりも約2.0cm/s見積もり値が大きくなった。しかし、それでも実測値の方がやや大きい傾向にあった。



$$\text{Wind Speed} = 0.0008 * (\text{Current Speed})^2$$

図9 トライトンブイの風速計データと流速の大きさとの関係(黒点)およびフィッティング曲線(黒線)。

Fig. 9 Relationship between surface wind and current on the TRI-TON buoy (black dots) and the fitting curve (black line).

6. 結論

半導体圧力センサーを持つ水位計を、(2°N, 138°E)に設置してあるトライトン12号機のブイの浮体下部に取り付けて、トライトンブイがどの程度海面より沈むかを定量的に見積った。トライトンブイは外洋の、波浪の影響が比較的大きい海域に設置しているため、波浪によって発生する圧力の影響がどの程度生じるかを理論的な考察によって見積もった結果、波浪の影響はほとんど無視でき、水位計によって計測された水位が浮体の喫水量を十分表せることが分かった(付録参照)。そこで、海洋科学技術センターの海洋地球研究船"みらい"でトライトンブイ設置作業を行った際、水位計をトライトン浮体下部に取り付け、約1年間の測定を試みた。水位計のトラブルにより短期間のデータしか取得出来ず、解析可能なデータは1ヶ月弱しかなかったが、水温および圧力の補正を行うことで有効な水位データが得られ、浮体の乾舷の変化を検知出来ることがわかった。検知されたデータに対してスペクトル解析を行った結果、潮汐による影響と思われる12時間および24時間周期の変動が強く現われ、浮体が潮汐の影響を受けていることが明らかになった。さらに、この水位データとトライトンブイに設置されている流速計のデータとの比較から、浮体の喫水量と流速の関係も有意であることが示された。しかし、係留索シミュレーションソフトによるシミュレーションの結果と比較したところ、量的にはややシミュレーションの方が浅めに出るものの、0.6m/s程度よりも流速が大きくなると急速にブイの水深が深くなる、という定性的な結論についてはほぼ一致した。このことから、より長期間のデータが取得でき、シミュレーションを行う際により深い部

表3 係留系シミュレーションの結果。

Table 3 Result of mooring simulation software.

Surface current (m/s)	Freeboard (m)	Wind speed from Fig. 9 (m/s)	Freeboard with surface wind effect (m)
0.1	0.49	0.08	0.49
0.2	0.49	0.32	0.49
0.3	0.49	0.72	0.49
0.4	0.49	1.28	0.49
0.5	0.49	2.00	0.49
0.6	0.49	2.88	0.49
0.7	0.48	3.92	0.48
0.8	0.47	5.12	0.47
0.9	0.46	6.48	0.45
1.0	0.45	8.00	0.43
1.1	0.43	9.68	0.40
1.2	0.41	11.52	0.37
1.3	0.39	13.52	0.33
1.4	0.36	15.68	0.29
1.5	0.34	18.00	0.24

分の流速情報を与えることが出来れば、トライトンブイの喫水量変化に対する海流や海上風の影響を正確に見積もることが出来ると考えられる。

7. おわりに

今回実海域において実験を行った結果、本水位計によってトライトンブイの喫水量変化の見積もりが可能であることがわかった。ただし、設置する際に計測しておく必要のある情報がいくつかあることが明らかになった。それは、①水位計の蓋を密閉する際の気温および気圧、②使用前・使用後における大気開放時のデータ値、の2点である。①は、密閉時の内圧の見積もりに必要であり、②は、センサーのドリフト量および密閉時の内圧を補正するために必要な情報である。この実験では、回収時にセンサーはすでに作動不良であったためバイアスを一定としてドリフト量をゼロと仮定せざるを得なかった。

今回の実験から水位計の特性の把握が十分出来たものの、観測期間中の流速が比較的小さく、短期間の測定であったため、今回の結果のみではシミュレーションの検証は困難である。また、上層の流速のみを入れたシミュレーションであるために、ブイの沈込みが実際より小さくなっていることも考えられるので、さらに深い部分の流速も考慮してシミュレーションを行う必要がある。いずれにせよ、今後同様な観測を長期間行うことが出来れば、より正確な検証が可能となり、シミュレーションソフトの改善にも役立つことが期待される。

8. 謝辞

本研究にあたり、水位計メーカーの杉寄登央氏からは、水位計の構造および使用例に関する有益な情報を提供していただいた。また、当センターの長谷英昭研究員からは、水位計設置・回収ならびに解析に有効なアドバイスを、当センターの黒田芳史副主幹にはトライトンブイに関するアドバイスならびに原稿校閲をしていただいた。さらに、マリンワーク・ジャパン(株)の観測技術員の方々には、水位計の取付作業をしていただいた。これらの方々に感謝いたします。

9. 参考文献

- 1) 鳥羽良明編, "大気・海洋の相互作用"(東京大学出版会, 東京, 1996), p.336.
- 2) H. U. Sverdrup, M. W. Johnson, and R. H. Fleming, "The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology", Englewood Cliffs N. J. Prentice-Hall, p.1042 (1942).
- 3) Y. Toba, "Local Balance in the Air-Sea Boundary Processes - I. On the Growth Process of Wind Waves", J. Oeangr. Soc. Japan, 28(3), 109-120 (1972).
- 4) 旭化成ホームページ, 旭化成ポリカーボネートシートライブラリ, "技術データ5, 熱的特性", (<http://www.agc.co.jp/polycarbonate/tech5.html>).

付録: 浮体固定の圧力計による水位計測の妥当性の検討

浮体は緊張係留されているとはいえ、係留索(ワイヤー及びロープ)は多少の余裕を持たせてあるので海面の波の影響を受けて上下する。よって浮体とともに運動する水位計自体も加速度を受けるので、計測した圧力は水位を正しく示すか検討する必要がある。

これは、以下のような理論的考察により、計測した圧力はほとんど水位を表していることを確認できる。水面波の振幅 ξ_s を以下のような簡単な場合について考えると、

$$\xi_s = A \cos(kx - \omega t) \quad \dots\dots\dots (A1)$$

ここで A は波の振幅、 k は空間方向 x の波数、 ω は角振動数、 t は時間である。また、 $x-z$ 面におけるある点での水面の鉛直運動 w は、

$$w = d\xi_s / dt = \partial \xi_s / \partial t + u \partial \xi_s / \partial x \quad \dots\dots\dots (A2)$$

であり、さらにこれを t で微分すると加速度が得られる。 g を重力加速度、 ρ を海水密度として、

$$\begin{aligned} \partial w / \partial t + u \partial w / \partial x + w \partial w / \partial z \\ = -\frac{1}{\rho} \partial p / \partial z - g. \quad \dots\dots\dots (A3) \end{aligned}$$

波の振幅 A が波長 $2\pi/k$ に対して十分小さいと仮定すると、線形波が仮定でき、

$$w = \partial \xi_s / \partial t \quad \dots\dots\dots (A2')$$

$$\partial w / \partial t = -\frac{1}{\rho} \partial p / \partial z - g. \quad \dots\dots\dots (A3')$$

一方で、(A1)式を(A2')、(A3')式にそれぞれ代入すると、

$$w = \omega A \sin(kx - \omega t) \quad \dots\dots\dots (A4)$$

$$\begin{aligned} \partial w / \partial t = -\omega^2 A \cos(kx - \omega t) \\ = -\frac{1}{\rho} \partial p / \partial z - g \quad \dots\dots\dots (A5) \end{aligned}$$

であるので、(A5)式を z で積分をして圧力 p の式にすると、

$$p = p_0 + \rho \int_0^z \omega^2 A \cos(kx - \omega t) dz - \rho \int_0^z g dz \quad \dots\dots (A6)$$

ここで、 p_0 は大気圧、また $\rho=1$ を仮定して、

$$p = p_0 + \int_0^z \omega^2 A \cos(kx - \omega t) dz - \int_0^z g dz \quad \dots\dots\dots (A7)$$

上の(A7)式の右辺第2項が波による圧力変化、第3項が静水圧を表す。従って、この右辺第2項と第3項を評価することによって、センサーから得られたデータが何を示しているかを知ることが出来る。

さて、(A7)式について、波による圧力が最大になる場合

を考えればよいので、 $\cos \theta = 1$ とすると(ここで $\theta = kx - \omega t$)、

$$p = p_0 + \int_0^z \omega^2 A dz - \int_0^z g dz. \quad \dots\dots\dots (A8)$$

ここで、第2項について考える。該当する波が風波であるとすると、Toba (1972)によれば、波高 H^* は経験的に、

$$H^* = 0.062 T^{*3/2} \quad \dots\dots\dots (A9)$$

という関係がある。ここに、 T^* は周波数、 H_s 、 T_s はそれぞれ有義波高、有義波周期で、両者の間には、

$$H_s = 0.062 g^{1/2} u^{*1/2} T_s^{3/2} \quad \dots\dots\dots (A10)$$

の関係がある。ここで、 $u^* = (\tau / \rho)^{1/2}$ で表わされ、 τ は摩擦速度で流速の鉛直シアや海上風などを含むパラメータである。従って、 H^* 、 T^* はそれぞれ、

$$H^* = g H_s / u^{*2}, \quad T^* = g T_s / u^* \quad \dots\dots\dots (A11)$$

と表すことが出来る。 $T^* = 2\pi / \omega$ 、かつ $H^* = 2A$ と置き換えると、

$$A = \frac{H^*}{2} = 0.062 (g u^*)^{1/2} T_s^{3/2} / 2 \quad \dots\dots\dots (A12)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T^*} = \frac{2\pi u^*}{g T_s} \quad \dots\dots\dots (A13)$$

従って波の加速度は、 $\omega^2 A$ に代入してやると、

$$\omega^2 A = \left(\frac{2\pi u^*}{g T_s} \right)^2 0.062 (g u^*)^{1/2} T_s^{3/2} / 2 \quad \dots\dots\dots (A14)$$

(A8)式の結果から、波によって生じる加速度(A14)と、重力加速度とを比較することによって、(A14)式の値を考慮する必要があるかどうかはわかるのだが、有義波高 H_s 、有義波周期 T_s および u^* との関係を求めることは非常に難しい。Sverdrup *et al.* (1942)によれば、有義波高が0.25m, 1.0m, 2.0mであった場合に有義波周期はそれぞれ2, 4, 6秒であるという経験値が存在する。これより(A10)式から u^* を求めると、それぞれ1.43, 2.02, 2.20であった。これらの値と重力加速度 $g = 9.8 \text{m/s}^2$ として計算した波による加速度は、有義波高が0.25m, 1.0m, 2.0mであった場合、それぞれ0.16 m/s^2 , 0.11 m/s^2 , 0.09 m/s^2 となり、重力加速度と比較して十分小さいことがわかる。従って、波による圧力変化はほとんど無視でき、重力加速度による静水圧のみを考慮すれば、水位計によって浮体の喫水量(乾弦)を測定することが十分可能であることがわかる。また、サンプリング間隔も1分以上あれば問題ないこともわかる。

(原稿受理：2002年12月27日)