

— 論文 —

トライトンプイ搭載次世代型雨量計測システムの開発*

松本 健寛[†]・勝俣昌己[‡]・安藤 健太郎[‡]・石原 靖久[†]・黒田 芳史[†]

要 旨

海洋上の降雨は、海洋表層の塩分変化や地球上の水循環を考える上で極めて重要である。とりわけ、西部熱帯太平洋および東部インド洋は降雨量が多いため、大気および海洋循環への影響が他の地域に比べて大きい。これまで、この海域で展開しているトライトンプイには光学式雨量計が装備されてきたが、検定や運用上の問題点が多く存在していた。そこで新たに、トライトンプイに最も適した雨量計として、静電容量式雨量計を用いた雨量計測システムを構築した。このシステムに新たな計測制御アルゴリズムを導入した結果、低消費電力で計測データの品質の向上を可能とするシステムの開発に成功した。開発したシステムは2006年以降、実際のブイに装着され、リアルタイムで観測データを安定的に送信している。その観測値はTRMM/PR計測値と矛盾していない。

キーワード：トライトンプイ、雨量計

1. はじめに

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では、1998年より西部太平洋赤道域および東部インド洋赤道域において、海洋観測ブイ (トライトンプイ) を展開してきた。2007年現在17基のトライトンプイを展開し、太平洋では米国大気海洋庁 (NOAA) と共同でTAO/TRITONブイ網を構築 (Fig. 1) し、エルニーニョ現象等の観測・研究を実施している。156°Eより西側の観測を受け持っているトライトンプイでは、気象観測 (風向風速・気温・湿度・短波放射・雨量・大気圧) および海洋観測 (水温・塩分・圧力・流向流速) を行っており、観測データ

をARGOS衛星によりリアルタイムで送信している。なかでも雨量の時系列計測は、海水の塩分測定と併せ、降水と海洋変動の相互作用に関する研究を進めていく上で極めて重要と考えられる。このため、ブイ開発当時において最先端機器であり、ブイ動揺の影響を受けにくいと考えられた光学式雨量計が採用された。しかし、運用を重ねていった結果、光学式雨量計は、検定が難しく、かつ故障等によりデータ取得率が75%と低いことが明らかになってきた。また、トライトンプイのシステム全体を年間駆動する電池容量15.06 kWhのうち半分以上の7.88 kWhが光学式雨量計に消費されており、運用費用面からも大きな負担となっていた。このため、雨量データを安定的に精度良く低コストで取得できる代替雨量計測システムを開発することが課題であった。本論文では、これらの課題を解決した新たな雨量計測システムに関して、技術開発の内容、及び取得データの評価について報告する。

* 2007年6月12日受領；2008年2月19日受理
著作権：日本海洋学会，2008

[†] 海洋研究開発機構海洋工学センター
(現在)(株) マリン・ワーク・ジャパン企画調整室技術開発課
〒236-0042 横浜市金沢区釜利谷東2丁目16番32号
トリアンジュ文庫4F

主著者 e-mail address : takem@jamstec.go.jp

[‡] 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

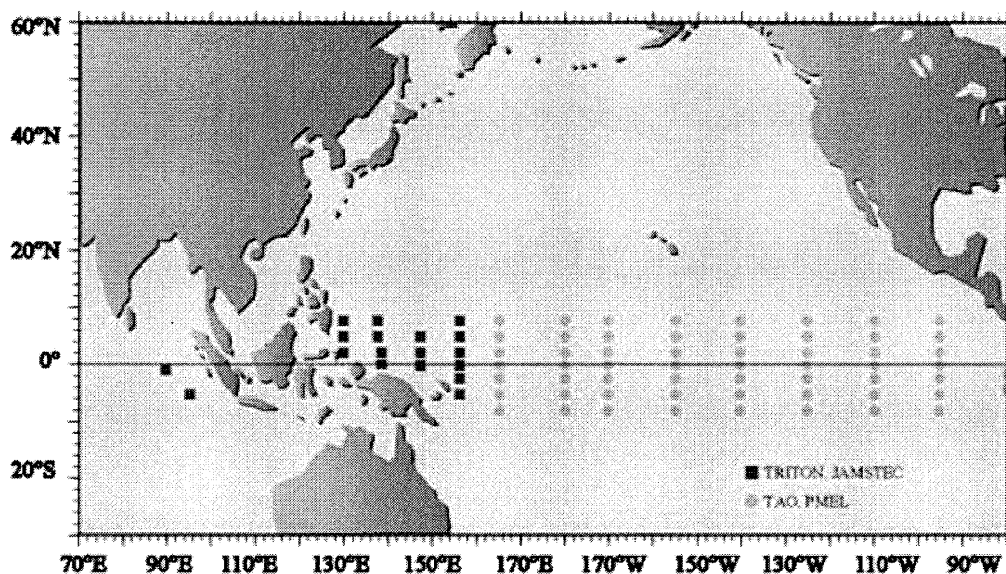


Fig. 1. TAO/TRITON array as of September 2000. The TRITON buoys are denoted by squares. (adopted from <http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON/>)

2. 代替雨量計の検討

雨量を計測する装置には様々な原理のものがあるが、広く用いられているものとして、転倒マス式、静電容量式、光学式が挙げられる。転倒マス式は、受水口で受けた雨滴を転倒マスに注ぎ、注がれた雨が一定量に達すると、その重さで転倒マスが転倒する。この転倒マスの転倒回数をカウントすることにより雨量を計測する。しかし、動揺するプラットフォームでの利用は出来ない。静電容量式は、受水口で受けた雨を本体の筒に集め、その静電容量を計測することで水量の増加を測り、雨量に換算する。従って、動揺するプラットフォーム上でも計測は可能である。光学式は、赤外線を放射しているスリット間を通過する雨滴が引き起こす散乱光を計測し雨量に換算するため、このタイプも動揺するプラットフォームで利用が可能である。

陸上では、計測原理が単純な転倒マス式雨量計がもっとも広く用いられている(例: 気象庁アメダスなど)が、前述のように洋上での利用は不可能である。一方、光学式雨量計は光学スリットを通過する雨滴を計測するが、

光学スリットが水平状態でも計測できることから、ブイ動揺の影響が少なく、雨量を高精度で測定できると考えられてきた。そのため、Scientific Technology社製の SCTI-ORG115 (以後、ORG) がトライトンブイの標準装備雨量計としてブイ開発当初に採用された。しかし、運用を重ねていく中で、検定の困難さ、故障率の高さなどの問題点が表面化してきた。このため、比較的小型軽量であり、光学式と同様にプラットフォームの動揺による影響が少ない静電容量式雨量計(R. M. Young社製 Model 50203; 以後、CRG)を代替機種候補として選択した。

2.1. 静電容量式雨量計の特徴

CRGは、主に船舶もしくは陸上の観測ステーションで用いられることが多い雨量計である。CRGは受口部の面積が 100 cm^2 で、内部に 500 ml 容量の筒があり、その筒に溜まった水の静電容量を任意の時間間隔で計測し、電圧値として出力する。出力電圧は貯水量 0 ml に対して $DC0V$ 、 500 ml に対して $DC5V$ である。また、 500 ml の貯水量は、降水量 50 mm に相当する。時

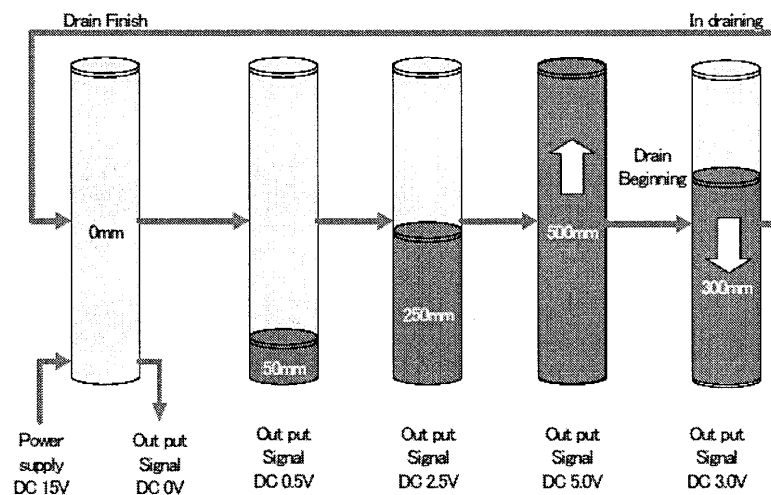


Fig. 2. Measurement scheme of the CRG. When rain drop fills the tube, the water is siphoned out from the tube.

間雨量は、出力電圧から換算される貯水量の時間差分をとることにより、算出することができる。また、筒内が水で満たされた時点で、サイホンの原理で自動的に排水され筒の中を空にする仕組みを持つ (Fig. 2)。

センサとしての最大のメリットは、雨量に対するセンサ出力値の検定のしやすさである。ORG は自然降雨でしか検定ができないのに対し、CRG は貯水量と出力電圧の関係を測定することで容易に検定が可能である。また、消費電力においても、ORG が年間 7.88 kWh の電力を使用していたのに対し CRG はわずか 0.32 kWh であるため、必要とされる電池量は大幅に軽減できるので運用費用面の利点も大きい。しかし一方で、ORG は、前述のようにブイの動揺による影響が、雨滴を捕捉するタイプの雨量計に比べ少ない雨量計であると考えられていたのに対し、CRG は捕捉する面積が小さいためブイの動揺により雨滴捕捉率が変化することが弱点として考えられた。また、ORG が RS485 のデジタル出力であったのに対し、CRG はアナログ電圧出力であったため、ブイシステム (データ収録・制御装置) までの接続ケーブル上で電気的なノイズが混入する可能性が懸念された。

3. センサ部単体 (CRG) の検証実験

CRG をシステム化しブイへの標準搭載を図る前に、センサ単体での計測値についての信頼性を確認した。川原ら (2001) は、CRG の計測値を検証するために、異なる測定原理を持つ雨量計と比較した。彼らは JAM-STECC・むつ研究所・観測機材整備場の屋上に転倒マス式雨量計 (小笠原計器 RS-102) 3 台、ORG7 台、CRG4 台を配置し、同時計測を行なった。その結果、彼らは ORG が転倒マスに比べ機器の個体差が大きいのことを示し、また ORG は検定が難しいという問題点を明らかにした。また彼らは、CRG は雨量が転倒マスより 3% 程度低く出る傾向があるものの、個体差は非常に小さく、相対的に安定した計測ができることを示した。

そこで、彼らの研究を踏まえ、本研究では、ブイの様な動揺する環境下で CRG が機能するかどうか確認するため、実海域のブイ上で ORG との比較実験を行った。比較実験は、5°N, 147°E と 5°S, 156°E の 2 点のブイで行い、両雨量計を海面から高さ約 2.4 m のブイの頂点に取り付けた (Fig. 3)。両者の観測データを 1 時間積算雨量に直し、それらと比較した。その結果、両者の相関は極めて高いが、ORG は CRG に比べ雨量が高めに計測

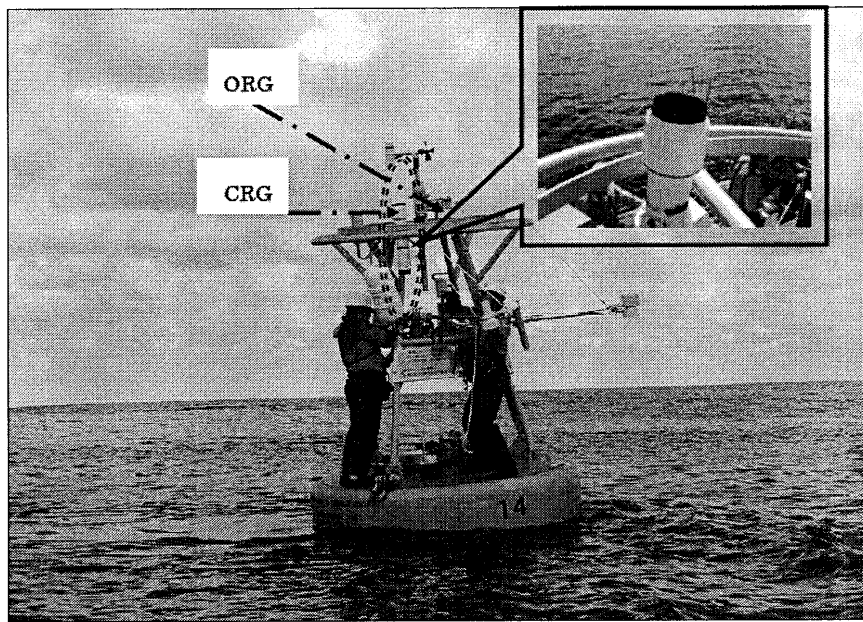


Fig. 3. A CRG on a TRITON buoy. The CRG is installed on the tower of surface buoy at the height of 2.4 m.

される傾向であった (Fig. 4a, b)。これは、動揺のない陸上での試験結果 (川原ら, 2001) と一致していた。また, Fig. 4c, d に示されるように, TRMM/PR 測定雨量とブイ上の ORG の観測データとの比較でも, ORG が高めの値を計測する傾向が見受けられた。これらの傾向は, McPhaden *et al.* (2003) による ATLAS ブイに設置された雨量計の解析結果と同様の傾向を示している。また, 川原ら (2001) の陸上試験の結果と同様に, ORG の値が機器によってばらつくことも判明した。

これら一連の陸上試験・洋上試験の結果から, CRG は ORG に比べて計測値の質が劣ることはなく, 総合的に見てブイにおける計測により適していると判断できた。

4. ブイ上での計測における問題点と必要な機能

CRG は, 容量の決まった筒の中に貯水された水の電気容量を計測する原理であるため, 筒が満水になったときに, すぐに排水する機構になっている (Fig. 2)。こ

れにより計測対象である降雨が発生している時に排水が開始されると, その間の雨水量が排水量と入水量を含んだ値となり, 排水前後の計測値から推定したとしても, 推定誤差を含んだものになってしまう。そのため, 排水前後の計測値と, 推定した値とでは, 質の異なるデータが混在してしまうことになる。しかし, この排水時の計測値を排除すると, 結果として雨量が過小評価されるという問題があることがわかった。この影響を最小化するためには, 排水前後の計測を可能な限り密な時間間隔で行い, 排除する計測値を最小限に抑えることが必要である。陸上の測候所や船舶など, 常時電力を供給できる場合には, 常時計測の間隔を 1 秒など可能な限り短く設定し, 時間的分解能を高めることで排水時の影響を緩和できると考えた。しかし, 洋上における長期間の計測は限られた容量の電池に依存しており, 常時計測間隔を短くすることは現実的ではない。そのため長期の運用においては, 消費電力を抑えつつデータの品質を向上させる工夫が必要であった。このため,

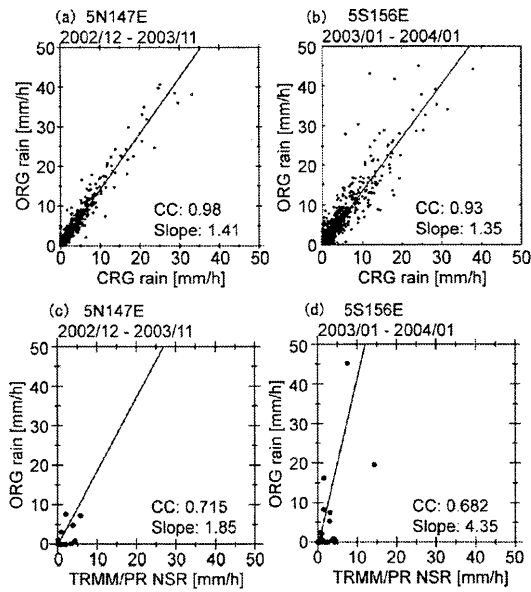


Fig. 4. Comparison between CRG and ORG measurements (a, b) and that between satellite-derived product (TRMM/PR) and ORG observation (c, d) at the points of 5°N, 147°E (a, c) and 5°S, 156°E (b, d) in the tropical Pacific Ocean. The ORG values in (c, d) are the hourly accumulated value centered at the time of TRMM over passing.

- ・排水前後の計測間隔を降雨の状態により自動的に切換える

機能も不可欠と考えられた。

同時に、ブイへ実装するためには、現存するブイの信号処理システム(以後ブイシステム)にCRGを適応させることも必要であった。トライトンブイのブイシステムはORGから直接デジタル信号で出力される雨量データを受け取り、リアルタイムでデータ送信を行うようになっているが、CRGの直接出力は貯水量に応じた電圧値でのアナログ出力でしかない。これを雨量に変換するためには、検定による貯水量と出力電圧の関係を反映した補正を行った上で、貯水量の時間差分をとり、単位時間当たりの雨量を算出する必要がある。すなわち、検定結果を反映した補正と換算をリアルタイムに行い、かつアナログ出力をデジタル出力に換算する機能が必要であった。このため、

- ・計測時に、リアルタイムで検定結果を反映できる自動計算

の機能が必要と考えられた。

また、

- ・システム全体の低消費電力化
- ・メモリーおよび電池消費防止の保護機能

といった機能も高品質な長期安定降雨データを取得するために必要と考えられた。

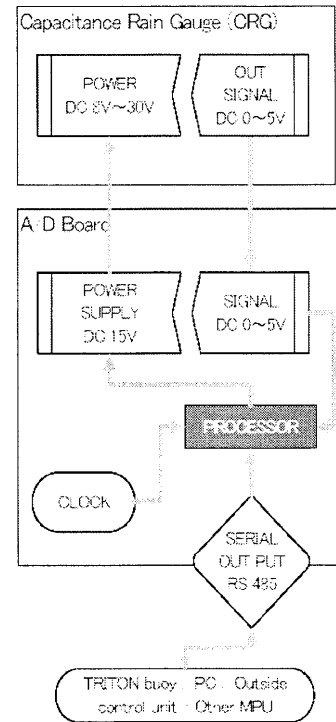


Fig. 5. Outline of the signal processing unit for the CRG system.

更に、CRGへの給電、CRGからのアナログ出力のデジタル化、トライトンブイのブイシステムへの伝送、といったトライトンブイへ適応させるための機構が必要となった(Fig. 5)。CRGで計測されたアナログ信号は、A/Dボード上でデジタル信号に変換され、クロックと同期させ、シグナルプロセッサにより、単位時間当たりの雨量に変換される。このシグナルは、RS-485により外部と通信を行うことで取り出すことができる。

更に、開発したシステムにおいては一步進め、トライオンブイのデータ処理部に限定することなく、CRGの制御をパソコン等の信号処理システムでも可能となるようにし、CRGをブイ以外の用途にも自由に運用できるように汎用性を持たせることも考慮した。

5. ブイ実装のためのシステム開発

5.1. 排水前後の計測分解能の向上

CRGの排水機能が働く時は降水イベントの最中であり、計測すべき事象そのものが発生している期間である。このため、異なる質の計測値(排水イベントを含む計測値)を最小限に抑えるために、排水前後の計測頻度を密にすることで計測の正確さを向上させた。具体的なフロー(Fig. 6)としては、CRGの規定容量(500 ml)に達するまえに、閾値監視機能を設け、450 mlを上限の閾値(UL)とすると、雨が450 ml溜まった時点で、フラッグを0→1とし、内部処理で10分間隔での計測から1分間隔での計測に自動的に切り替え、外部からのプロトコル制御の有無に関わらずシステム内部の記憶領域へ記録するようにした。規定容量に達し排水が始まり完了する直前に下限の閾値(LL)を設定する。例えばこれを100 mlとすると、水量が100 mlに達したときに、フラッグを1→0にする。この時点で、計測間隔を10分周期に戻す。つまり、フラッグが1のときは、密に計測を行い、フラッグが0のときは、通常計測を行う機能である。これにより、排水前後の不確かさを減少させ、かつ消費電力を抑えられた。なお、UL、LLは任意の値を設定できる。

5.2. 検定と実験式

CRGからの出力電圧をA/D変換する際に、検定結果で補正するための計算式を組み込んだ。物理変換する出力値に用いる検定係数は、使用者により設定可能とした。出力電圧から貯水量への変換式は、両者の関係を3次多項式

$$Y = aX + bX^2 + cX^3 + d$$

で近似した。ここで、Yは雨量換算値、Xは電圧値、a～dは、検定係数である。検定は、擬似降雨としてメ

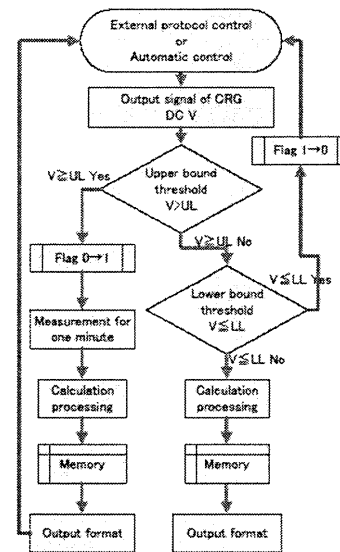


Fig. 6. Flowchart of the CRG control system. Measurement is changed automatically between a fine and a coarse time resolution mode according to the water volume in the tube.

スシリンダーで検量した水をCRGに注入して行なう。検定は、容量0 mlから500 mlまでの間の、9点(0 ml/10 ml/20 ml/100 ml/200 ml/300 ml/400 ml/490 ml/500 ml)で行う。これを3回繰り返した。注入した水量とデジタル出力値の関係から3次多項式の各係数を計算し、雨量計が持つ器差を少なくすることにした。検定結果の例をFig. 7に示す。検定ポイントでのCRGのアナログ出力を計測・平均し、メーカー推奨の1次式により雨量に換算した結果と、検定結果から導き出した係数を利用して雨量計測システム内で雨量に換算した結果を比べている。検定結果を計測値に反映する前は、2%程度(雨量換算で最大約1 mm)の誤差があったが、検定結果から導き出した係数を入力し、計測値を補正した結果、誤差を0.1%程度(雨量換算で最大約0.05 mm)にすることができた。

5.3. 低消費電力化

ORGからCRGへの変更により、消費電力は約90%以上削減することができた。また、降雨時のみ計測間

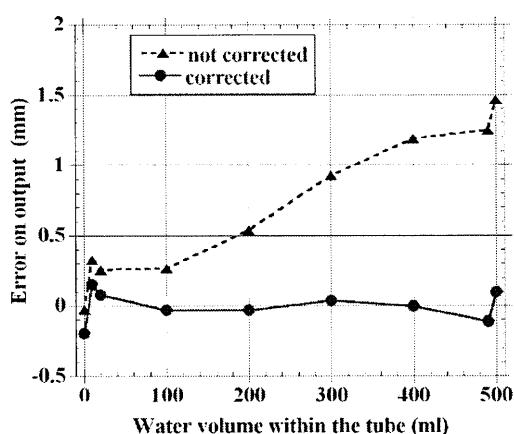


Fig. 7. Errors in the estimated water volume from the electric capacity. Dashed line indicates the error by using manufacture’s conversion equator (Not corrected). Solid line denotes that using our conversion equator (Corrected). See text for detail of the conversion equation in the present study.

隔を密 (1分間隔：それ以外は10分間隔) にする計測方法にすることで、同じCRGを使用した場合、常に1分計測する場合と比べ、消費電力を更に約70%程度削減できた。さらにハード側でもシステムの基盤に内蔵したSDカードへの書き込み回数を制限し、搭載したマイコン、各デバイスドライバー等 (RS485, SDカード, LSI等) への電源供給を適宜遮断し、システム稼働中、およびバックグラウンド監視中の消費電力を極力小さくするように設計した。なお、基板上のLSI等の電源のオン/オフによって発生する計測時のタイムラグについては、搭載したマイコンがスリープ状態からウェイクアップまでに6 μ s以下の時間しか要しないため、制御時のタイムラグは非常に軽微なものとできた。

5.4. 保護機能の追加

計測間隔が密になった状態で、降雨の停止、機器の異常などが発生した場合、計測間隔が元に戻らずメモリおよび電池が消耗する事態が想定される。具体的には、上限閾値を超え、1分計測 (任意の設定) が開始された際に、満水になり排水開始されるまでの間に降雨が停止した場合には、降雨が再開され排水が開始さ

れるまでに数日かかる場合も考えられる。このような状況を想定し電池およびメモリの消耗を防止するために、この状態が1分計測開始後、2時間以上継続した場合には、計測を10分間隔に戻す機能を付加した。また、通常通りに排水が開始された場合でも、排水口等に異物などが詰まる事により排水しなくなり、下限閾値を下回ることができなくなる可能性がある。この場合も、本来の10分計測に戻ることができず、1分計測が継続するので、電池およびメモリが消耗する。これを回避するために、排水開始から1時間以内 (任意の設定) に下限閾値に到達しない場合は、雨量計への供給電源を遮断し観測を終了する機能を付加した。

以上の機能を組み込んだシステムは、一般的な筆箱のサイズより二周りほど小さいサイズの基板 (幅: 4 cm, 長さ: 20 cm, 高さ: 1 cm) として完成した。基板の基本スペックをTable 1に記す。ブイ上での使用を想定しているため、環境条件には動揺に対する条件を組み入れ (設定値はトライトンブイシステムでの設定を用いた)、CRGの計測精度1 mmを達成するために、出力値の分解能をそれより1桁上げた。また、外部との通信はシリアル通信の中でも通信距離が比較的長いRS485を採用した。さらに、主な機能として、検定結果を反映する機能、パラレル制御ができるようにアドレス (ID) を設定する機能を持たせたほか、汎用性を持たせるために外部制御にたよらず、自立し計測を継続する自動観測モードも搭載した。この他、時間設定 (サンプリング周期, 回避時間), 閾値 (上限 [UL], 下限 [LL]) を任意に設定できるようにし、使用環境 (空間的・時間的変動スケール) に柔軟に対応できるようにした。

6. 実海域実験

ブイシステムに実装した雨量計測システム (CRGと開発したシステムをユニット化したもの) としての評価を行うことを目的とし、2006年2月から、システムのプロトタイプ基板を用いたものをトライトンブイに搭載し観測を実施した。また、実装基板を用いたものを、従来型のトライトンブイとは異なる設計のブイ (m-TRITON) に搭載し観測した。次にそれらの結果を示す。プロトタイプ基板は、保護機能、自動観測モード

Table 1. Specifications of the newly developed A/D board for CRG.

The newly A/D board	
Environmental condition	Temperature: $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ Relative humidity: 90%RH or less Gradient angle: $\pm 15^{\circ}$ Shake angle: $\pm 20^{\circ}$ Acceleration when shaking: $\pm 1\text{G}$
Signal	Range: 0-5 VDC (0-50mm) Resolution: 0.1mm Accuracy: $\pm 0.2\%$
Communication control	Formats: ASCII Type: RS485 Baud rates: 9600bps, 1200bps
Function	Time monitor with internal clock. Automatic data correction with calibration coefficients. Automatic shift to shorter sampling interval near the event of water drainage. A/D board can be controlled parallel. Sampling interval, frequency, and period can be set arbitrarily.

などを搭載していないが、検定結果の反映方法などの技術要素、部品構成は実装基板と変わらない。

6.1. 安定性の確認

2006年2月からブイに搭載したプロトタイプ基板を用いたCRGにより、約1年4か月にわたる係留期間において継続的にデータを取得できた。このブイは赤道域洋上 5°N , 156°E に展開していたブイであり、波浪による振動、熱帯特有の高温かつ湿潤な厳しい自然環境条件のもとにあった。1年を超える期間にわたって観測を継続したことで、ブイの標準的な観測期間におけるシステムの耐久性に問題がなかったことが示された (Fig. 8a)。

6.2. 精度向上の確認

プロトタイプによる観測期間のうちの一部のデータを用いて、2006年3月から4月にかけての1か月間の実観測データを例として、自動切換え機能による精度向上の検証を行った。

この期間中、排水イベントと降雨イベントが重なった

中から、一例として2006年3月14日における計測結果を取り上げた。この日の6:00 (UTC; 以降時刻はUTC) から6:40にかけて降雨が計測されており (Fig. 8b), 6:10から6:20の間に排水が行われていた。この降雨イベント40分間について、排水イベントのあった時間帯の計測値を排除して積算雨量を見積もったところ、自動切換え機能を用いた場合には 9.2 mm 、自動切換え機能がない状況をシミュレートした場合は 4.8 mm であった (Fig. 8c)。排水イベントを含む時間帯の計測値は他の時間帯と比べて、不確かさを多く含むデータであり、他の時間帯のデータと同様に扱うことができない。このため、排水イベントを含む時間帯の雨量データを排除した上で上記の観測データを時間雨量に換算した場合には、自動切換え機能がある場合は 14.2 mm h^{-1} 、ない場合は 9.6 mm h^{-1} に相当する。すなわち、時間雨量にして約32%の過小評価を、自動切換え機能を用いることによって回避したこととなる。

3月から4月にかけての1か月間において、排水イベントは計6回発生していた。排水イベントが含まれる時間帯の計測値を排除して月間雨量に換算した場合、

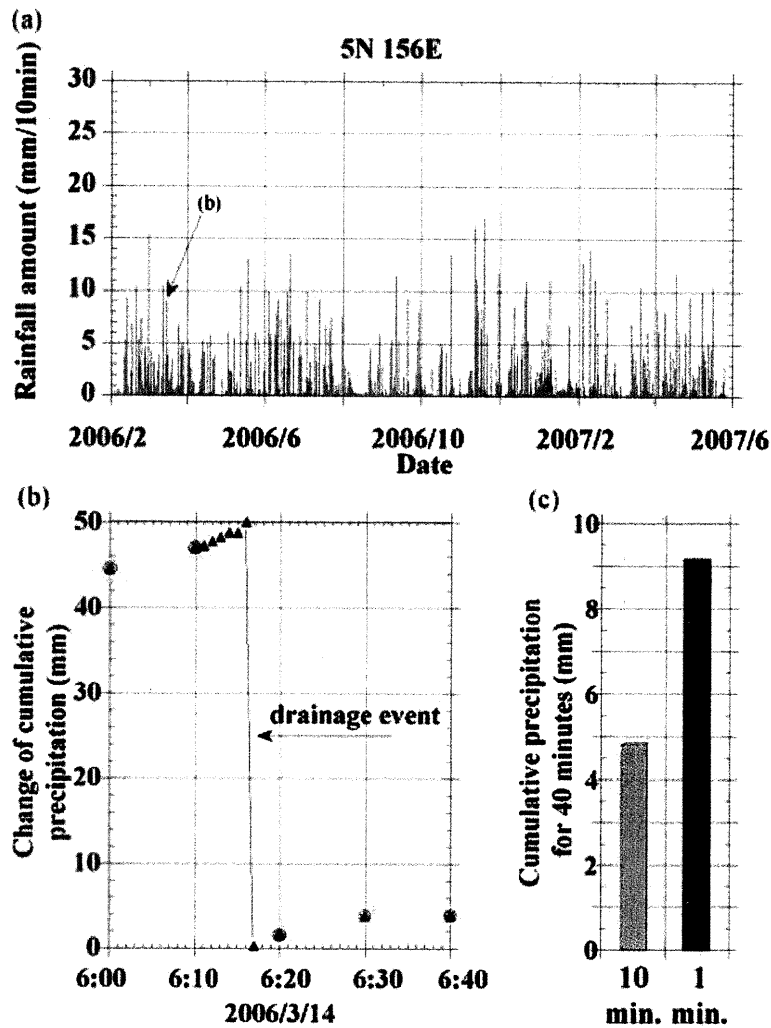


Fig. 8. (a) Time series of the rainfall observed at 5°N, 156°E by the CRG system. (b) Time change of cumulative precipitation from 6:00 to 6:40 on March 14, 2006, as indicated in Fig. 8a. Triangle indicated the recorded precipitation every ten-or one-minute. The interval was changed from ten minutes to one minute when the water volume in the gauge exceeded 450 ml and the interval came back to ten minutes after draining out the water. Circles show the values recorded every ten minutes. (c) Cumulative precipitation for the period of 40 minutes, shown in Fig. 8b, from the record with variable time interval (right hand side) and that calculated from the data with the fixed time interval of 10 minutes.

自動切換え機能を使って観測された雨量データからの換算値は約 550 mm mo^{-1} であったのに対し、自動切換え機能なしを想定した 10 分間隔計測をシミュレートした場合は約 390 mm mo^{-1} であった。すなわち、月間雨量としてみても、約 25% の過小評価となるところ

を自動切換え機能によって回避できたことになる。

これらの結果は、自動切換え機能が、CRG 特有の排水という動作によるデータの不確かさを軽減し、短時間に集中して発生する降水現象の測定において非常に有効であることを示唆している。

6.3. 衛星観測データとの比較

リアルタイムデータはトライトンブイシステムの衛星通信を介して陸に伝送されており、陸上での受信時点で1時間積算値となっている。この、時間軸上の代表性に優れたブイの雨量計測データと、空間代表性に優れた衛星による観測データとの対応関係を調べた。使用したデータは、2006年2月から12月まで観測したトライトンブイ1号基から9号基(156°Eと147°Eの観測サイト)のリアルタイムデータ(1時間積算値)と、同期間のTRMM/PR雨量データである。TRMM/PRは2A25プロダクトを用いて、各スナップショットのNear Surface Rainを各ブイの半径55 km以内(直径が緯度経度1度に相当)に平均化した。一方ブイデータは、上記TRMM/PRの観測時刻の前後12時間のデータを平均化した。これらの時間スケールはBowman *et al.* (2003)と同じものを選択した。両者の積算値をブイ毎に計算し、対応関係をプロットしたのがFig. 9である。時間的、空間的分解能は両者で大きく異なり、また、比較できたデータ数も十分ではないがBowman *et al.* (2003)と同様の傾向を示している。今後の継続したデータの蓄積が必要であることは言うまでもないが、このシステムで計測した降雨観測値は衛星観測で得られた降水パターンと矛盾しないことが示された。

6.4. 実装基板の現場運用

次に、実装基板を用いた例を示す。2006年10月末から11月末にかけて、MISMO集中観測(Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset: 中部インド洋赤道海域における海洋地球研究船「みらい」による海洋および大気集中観測、係留ブイ網による海洋観測、モルディブ諸島における大気観測の総称)が実施(Yoneyama *et al.*, 2008)され、ブイ網の一部に、第1次実装基板を搭載したm-TRITONブイシステムが展開された。その際に取得した0°N, 82°Eの雨量データを他の計測値(相対湿度・表層塩分)と比較した。観測期間内の雨量の変動と、相対湿度・表層塩分の変動が、雨が降ると塩分が下がり、相対湿度が高くなるというこれまでにブイで観測された一般的な変化と定性的に整合していることを確認した(Fig. 10)。また、セ

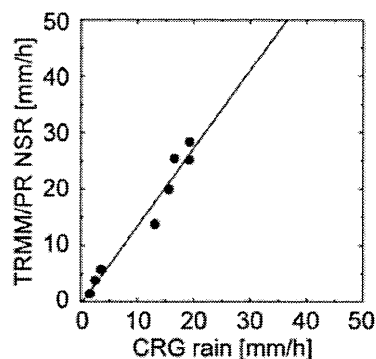


Fig. 9. Comparison of the precipitation obtained by the CRG and TRMM/PR NSR (near surface rain) on the TRITON buoy at nine sites along 156°E and 147°E. The TRMM/PR NSR values are averaged in the circular area with the diameter of 110 km centered at each buoy. The CRG values are cumulated for an hour centered at the time of TRMM over passing. Both data are averaged over the period from February to December in 2006.

ンサの経時変化を確認するため、事前検定と事後検定の結果を比較した。検定は注水量0 ml/10 ml/20 ml/100 ml/200 ml/300 ml/400 ml/490 ml/500 mlで計3回繰り返し、その平均を事前と事後で比べた。その結果、半年間で0.5 mm程度の経時変化、誤差率F.S.1% (フルスケールに対する誤差)であることを確認した(Fig. 11)。このドリフト量0.5 mmという結果は、CRG単体が持つ不確かさが1 mmであることから、CRGが持つ正確性よりも小さく、経時変化は測定上の問題とならない。現在運用している台数は少ないが、実海域での計測値にも異常がないことが確認された。

7. まとめと今後の展望

本システムは、TRMM/PRとの比較において異常な計測値が認められず、現場における他の計測項目の変動とも整合しており、計測システムの制御が安定して稼動し雨量計測装置として適当であることがわかった。本システムの経時変化も 0.1 mm mo^{-1} と少なく、トライトンブイ上での現場運用においても雨量の計測に

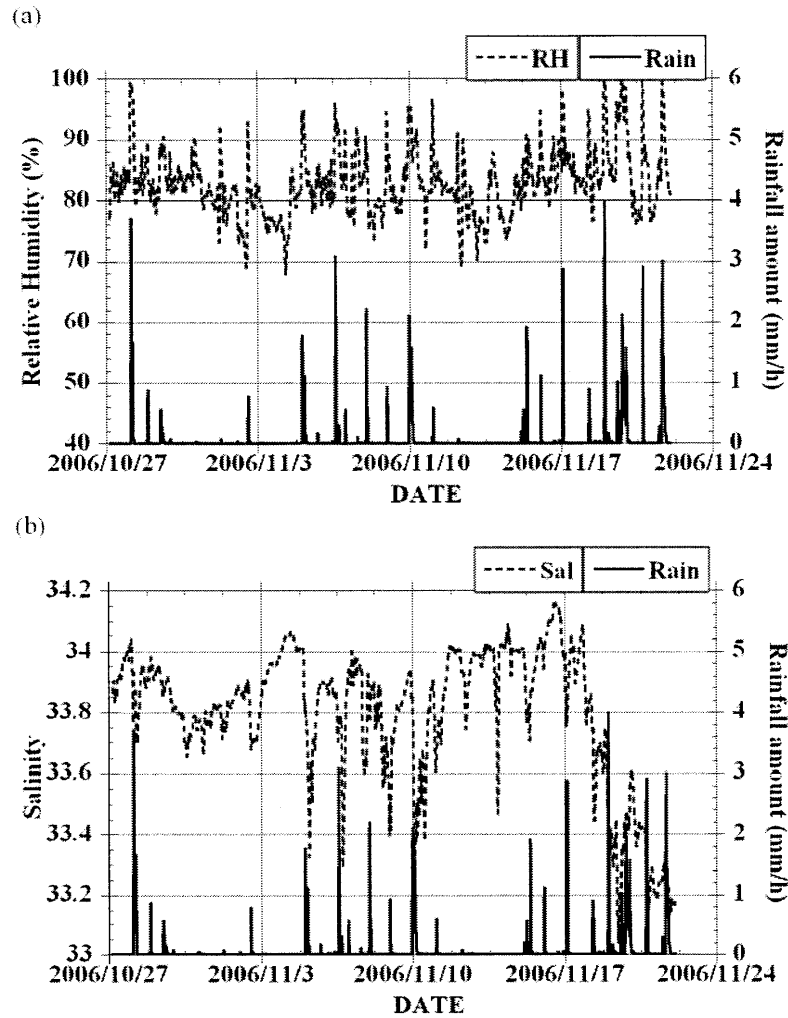


Fig. 10. Time series of the precipitation measured on the buoy deployed at 0°N, 82°E during the MISMO-Intensive Observation Period. (a) Rainfall (solid line) and relative humidity (dashed line), and (b) rainfall (solid line) and sea-surface salinity at 1 m depth (dashed line).

問題なかった。また、本システムの計測間隔の自動切換え機能により、CRG 特有の問題である排水イベントを含む観測データの割合を大幅に小さくできることが確認できた。更に、ブイに取り付けたシステムが1年4か月観測を継続できたことから、自動切換えによる1分計測での電力消費が想定範囲内に収まったことを確認した。

なお、自動切換え機能が働いた状態でも、排水イベントを含むデータは残っており、観測データ全体から見

るとなお若干の不確かさが残る。これは、3章のCRGの検証実験からも予想された事である。CRGは排水に要する時間が30秒程度であることから、本システムの自動計測の切換え機能の計測間隔を30秒未満にすることで、観測データの不確かさを更に少なくすることができると思われる。

現在、トライトンブイの雨量計測をこのシステムへ順次換装している。現段階では、データの取得率はORG使用時(75%)から他の気象センサと同等の取得率(90%)

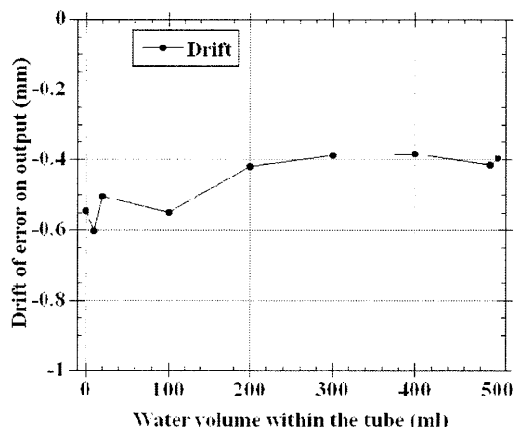


Fig. 11. Drift error in the CRG observation. The error is evaluated according to pre-post-calibrations for 6-month *in-situ* observation.

程度)に向上している。洋上のブイセンサに対しては海賊行為等による破壊および盗難があることから、この取得率は妥当であるといえる。

本システムは、検定が容易で、かつその結果をシステム単独でデータに反映させることが可能なため、高価な検定システムや特別な技能を必要としない。このため、使用者の必要に応じて使用者自身が検定を簡便に行うことが可能であり、品質の高い洋上雨量計測がより身近になったと言える。

本システムは、トライトンブイに限らず雨量計測を行う係留システムでの観測が可能であり、また離島・山岳地帯等の大型機材の輸送等が困難な地域への運搬が容易なことから、本システムを用いることで静電容量式雨量計を用いた観測の幅が広がると思われる。

今後、排水イベント時の計測値に関して、排水イベント前後の計測値を用いた推定手法などを導入し、更なる精度向上、機能向上に取り組みながら、システムの成熟をはかりたいと考えている。

謝 辞

本システムの構築にあたり、静電容量式雨量計の基礎実験、本システムの実装・試験を行うにあたり支援して頂いた多くの研究者(JAMSTEC)、観測技術員(マリン・ワーク・ジャパン むつ海洋課)、さらに開発に

おいて様々なご意見を頂いた技術者の方々へ深く感謝いたします。また、特許出願にあたり、ご尽力頂いた関係者の皆様に御礼申し上げます(特許出願中:出願番号 2007-057843)。

References

- Bowman, K. P., A. B. Phillips, and G. R. North (2003): Comparison of TRMM rainfall retrievals within rain gauge data from the TAO/TRITON buoy array. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi: 10.1029/2003GL017552.
- 川原 幹雄, 安藤 健太郎, 黒田 芳史, 高槻 靖 (2001): トライトンブイに搭載された光学式雨量計の陸上比較試験による評価, 海洋科学技術センター 試験研究報告, **43**, 25-35.
- McPhaden, M. J., and Y. L. Serra (2003): Multiple time- and space-scale comparisons of ATLAS buoy rain gauge measurements with TRMM satellite precipitation measurements. *Journal of Applied Meteorology*, **42**, 1,045-1,059.
- Yoneyama, K., Y. Masumoto, Y. Kuroda, M. Katsumata, K. Mizuno, Y. N. Takayabu, M. Yoshizaki, A. Shaareef, Y. Fujiyoshi, M. J. McPhaden, V. S. N. Murty, R. Shirooka, K. Yasunaga, H. Yamada, N. Sato, T. Ushiyama, Q. Moteki, A. Seiki, M. Fujita, K. Ando, H. Hase, I. Ueki, T. Horii, C. Yokoyama, and T. Miyakawa (2008): MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *in press*.

Development of an Advanced Rainfall Observation System for TRITON Buoy

Takeo Matsumoto[†], Masaki Katsumata[‡], Kentaro Ando[‡],
Yasuhisa Ishihara[†], and Yoshifumi Kuroda[†]

Abstract

Measuring the precipitation over the ocean is crucial to understanding the global hydrological cycle, air-sea interaction, and ocean mixed layer physics in ocean surface layer. The effects of precipitation on the ocean and the atmospheric variations are very important, especially in the tropical western Pacific and the eastern Indian Ocean where large amount of precipitation takes place. To reveal the nature of the precipitation in this region, an optical rain gauge (ORG) has been installed on each TRITON buoy since 1998. Unfortunately, the precipitation data collected by the ORG system did not meet the required precision and it often failed in observation. We therefore developed a new precipitation measurement system using a capacitance rain gauge (CRG). The CRG system, with a newly-developed measurement and control unit, improves the precision and stability of precipitation measurement with low power consumption. The system has been deployed in the western Pacific Ocean and the eastern Indian Ocean since 2006 with real-time data transmission. The new rain gauge system showed the precipitation observations in the equatorial region, which were consistent with that obtained by TRMM/PR.

Key words: TRITON buoy, Rain gauge

(Corresponding author's e-mail address: takem@jamstec.go.jp)

(Received 12 June 2007; accepted 19 February 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

[†] Marine Technology Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
Present address: Marine Technology Development Section, Marine Works Japan Ltd., 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka,
237-61, Japan

[‡] Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15
Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061, Japan