

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

川原 幹雄^{*1} 安藤健太郎^{*2} 黒田 芳史^{*2} 高槻 靖^{*2}

海洋科学技術センターが西太平洋赤道海域に展開しているトライトンブイは、光学式雨量計を搭載している。本研究では、この光学式雨量計の性能を評価するため、3種類の雨量計(転倒マス型雨量計, サイホン式雨量計, 光学式雨量計)を用いて、陸上で自然降雨による雨量観測を実施し、それぞれの測器が観測した1時間雨量を比較した。その結果、転倒マス型雨量計は測器間で観測雨量のばらつきが小さく、サイホン式雨量計も測器間のばらつきが小さかった。サイホン式雨量計は、転倒マス型雨量計が観測する雨量と良い一致を示したが、転倒マス型雨量計よりも系統的に2%程度雨量を少なめに示した。一方、光学式雨量計は他の測器と比べて、測器間のばらつきが大きかった。また、光学式雨量計は、転倒マス型雨量計が観測する雨量との違いも大きく、転倒マス型雨量計よりも20~30%程度雨量を多めに示した。

キーワード：トライトン, 雨量計, 雨量, 気象観測

Land site test of optical rain gauge used on TRITON buoy

Mikio KAWAHARA^{*3} Kentaro ANDO^{*4}
Yoshifumi KURODA^{*4} Yasushi TAKATSUKI^{*4}

The optical rain gauge is used for measuring precipitation on TRITON(Triangle Trans-Ocean buoy network) buoys deployed in the western tropical Pacific operated by JAMSTEC. In this report, to evaluate the performances of this rain gauge, we carried out the rainfall observation on land using three types of the rain gauges (a tipping bucket rain gauge, a siphon rain gauge and an optical rain gauge) and compared 1 hour rainfall of the rain gauges. The result is that the instrumental differences among the tipping bucket rain gauges are small. The instrumental differences among the siphon rain gauges are also small. The siphon rain gauges indicate about 2 % lower than the precipitation measured with the tipping bucket rain gauges. While the instrumental differences among the optical rain gauges are large, and the precipitation difference between the tipping bucket rain gauges and the optical rain gauges are also large. The optical rain gauges indicate about 20 to 30 % higher than the precipitation measured with the tipping-bucket rain gauges.

Keywords : TRITON, rain gauge, rainfall, precipitation, meteorological observation

*1 (株)NYK輸送技術研究所(海洋観測研究部 研究生)

*2 海洋観測研究部

*3 NYK Logistics Technology Institute Co.,Ltd. (Ocean Research Department, Research Student)

*4 Ocean Research Department

1. はじめに

降水は、他の気象要素(気温、気圧など)と比べて時間的変動が大きく局地性がある。大雨に伴う洪水や土砂崩れなどの自然災害や、少雨・長雨など長期間の降水状況によっては渇水や農作物への被害があるため、降水の観測は、気象庁ではアメダス(地域気象観測網)により最も密な観測が行なわれている¹⁾。降水量を測定する雨量計には、貯水型、転倒マス、サイホン式、光学式などの測定方式がある。その中でも、計測原理が単純な転倒マス型雨量計は高い信頼性を得ており、気象庁のアメダスの雨量計としても用いられている。

気象観測においては、測定方式の異なる気象測器を用いると、たとえ同一地点における観測であっても異なる観測結果を得ることがある。気象測器を使用する際には、測器の測定原理や性能、特性を十分に把握した上で、測器の保守や観測環境の維持、観測データの品質管理を行い、観測精度を保たなければならない¹⁾。

現在、海洋科学技術センターが西太平洋赤道海域に展開しているトライトンブイには、光学式雨量計を搭載している。米国大気海洋庁(NOAA)太平洋海洋環境研究所(PMEL)により太平洋赤道海域に展開しているTAO(Tropical Atmosphere Ocean)ブイは、当初は光学式雨量計を用いていたが、最近サイホン式雨量計に移行している。海上では、気象測器を備えつけたプラットフォーム自体が動揺するために、転倒マス型雨量計を使用することはできない。しかしながら、転倒マス型雨量計に関する性能や特性はこれまでよく研究されている²⁾³⁾が、サイホン式雨量計や光学式雨量計に対してはあまり研究されていない。

本研究では、トライトンブイで用いられている光学式雨量計の性能を評価するため、3種類の雨量計(転倒マス型雨量計、サイホン式雨量計、光学式雨量計)を用いて、陸上で自然降雨による雨量観測を実施し、観測雨量を比較した。

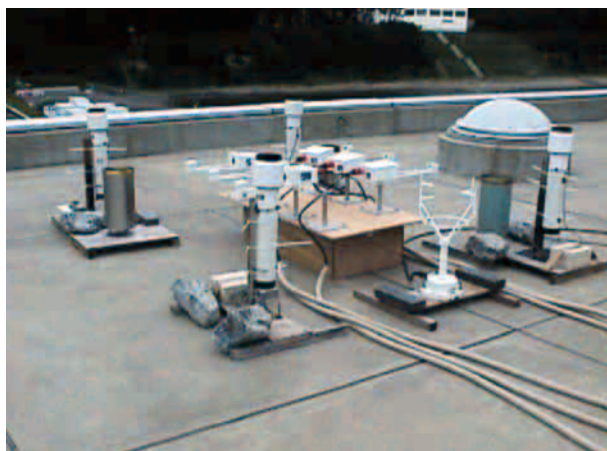


写真1 雨量計の比較試験場所
Photo 1 Test site of rain gauges

2. 方法

2.1. 観測方法

2000年7月上旬から9月下旬にかけて、海洋科学技術センターむつ研究所(青森県むつ市関根浜)敷地内にある観測機材整備場の屋上(地上高度13.2m)に3種類の雨量計(転倒マス型雨量計、サイホン式雨量計、光学式雨量計)を複数台設置して、自然降雨による雨量計の比較実験を行なった。今回の雨量観測における雨量計の配置を図1および写真1に示す。各雨量計の測定原理および一般的な特徴を表1に示した。使用した雨量計の概要を表2にまとめ、観測期間を表3に示した。なお、転倒マス型雨量計の受水口と光学式雨量計の受光部の高さは床面から約50cm、サイホン式雨量計の受水口の高さは約80cmである。実験前に個々の雨量計の動作確認を行ない、正常な結果を得た測器を使用した。サイホン式雨量計については、実験前後および実験中にメスシリンダーによる検定を実験前後および実験中に行なった。

今回の雨量計の配置に関しては、98年夏と99年秋に同じ場所で行った予備実験の結果を考慮して決めた。予備実験から、転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計では測器間の観測雨量の違いが十分に小さい結果を得た。よって、観測エリアの中央に光学式雨量計7台を設置し、その外側に転倒マス型雨量計3台とサイホン式雨量計4台を設置した(図1)。それぞれの雨量計について、転倒マス型雨量計の構造を図2に、サイホン式雨量計の構造を図3、光学式雨量計の外観を図4に示した。

建物の屋上における雨量観測は、建物の影響を受けていると考えられる。しかしながら、今回の比較実験では、雨量計を設置した観測エリア全体に対して建物の影響が一様であるならば、3種類の雨量計の比較が可能と判断した。図5は、観測エリアの最も外縁に設置した転倒マス型雨量計3台の1時間雨量の相関を調べた結果であり、転倒

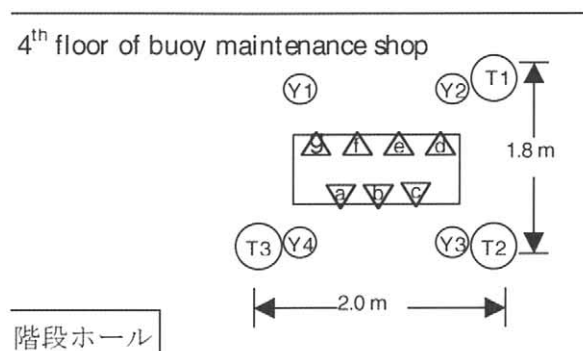


図1 雨量計の配置図

Fig. 1 Location of rain gauges.

a~g: Optical rain gauge, T1~T3: Tipping bucket rain gauge
Y1~Y4: Siphon rain gauge

表1 3種類の雨量計の特徴
Table 1 Feature of three types of rain gauges

雨量計の種類	計測原理および特徴
転倒マス型雨量計 (Tipping bucket)	口径20cmの円筒形の受水口で受けた降水は、測器内部の漏斗を通して転倒マスに注がれる。転倒マスは降水量0.5mm相当分(口径20cmでは15.7g)に達すると、その重さで転倒マスが転倒し、引き続き他方の転倒マスに注がれる。転倒マスの転倒時にリードスイッチが作動し、パルスが発生する。このパルス信号をカウントすることにより、0.5mm刻みの降水量を測る(図2)。 計測原理が単純で消費電力が少ないため、適切なメンテナンスにより、安定した雨量観測が可能である。受水口に落ち葉などが詰まって障害を起こすため定期的に清掃する。測器は水平に設置する。水平でなければ転倒機構に余計な摩擦が生じるために、測器のバランスが崩れて観測誤差が増大する。 気象庁検定では、20mm/hr以上の時に誤差が±3%以内に収まることを転倒マス雨量計の検定条件にしている。 雨量強度と転倒マスが転倒中に損失する水量を調べた実験では、降水強度の増加に伴ってほぼ直線的に転倒回数が減少し、150mm/hr以上の降水強度で、誤差が-3%となった³⁾。
サイホン式雨量計 (Siphon)	円筒形の受水口に入った降水を測器本体内の測定用のチャンバーに集め、溜まった水をサイホン管で吸い上げ静電容量式センサーにより計測する(図3)。内部のチャンバーが満水になると、サイホンの原理で水が抜けるしくみになっている。 センサーはサイホン管内の水量に比例した電圧を出力するため、出力データの形式は累積雨量となる。
光学式雨量計 (Optical)	降水量を間接的に計測することが、他の方式と異なる大きな特徴である。 測器から赤外線ビームを発し、受光部のレンズとの間を通過する雨滴粒子が引き起こす光散乱を検知し、降水強度を測定する。降水量は降水強度を積分することにより求める。降水量の出力形式は、降水強度および累積雨量となっている(図4)。 測器は機械的な可動部がなく電気的な信号のみを処理するため、測器の性能を長期間維持できる。メンテナンスは、受光部のレンズを洗浄する程度で簡易である。

表2 雨量計システムの概要
Table 2 Summary of rain gauge system

Rain gauge type	Location	1 st Period S/N.	2 nd Period S/N	Data format
Tipping bucket	T1	TB681243	TB681243	Pulse time
Tipping bucket	T2	TB681078	TB 681078	Pulse time
Tipping bucket	T3	TB974022	TB 974022	Tipping frequency per 10 min.
Siphon	Y1	Siphon842	Siphon842	Cumulative precipitation per 5 min.
Siphon	Y2	Siphon772	Siphon772	Same above
Siphon	Y4	Siphon773	Siphon773	Same above
Siphon	Y3	Siphon774	Siphon774	Same above
Optical	a	ORG3501	ORG3466	Cumulative precipitation per 10 min.
Optical	b	ORG6010	ORG3478	Same above
Optical	c	ORG3507	ORG3509	Same above
Optical	d	ORG3502	ORG3510	Same above
Optical	e	ORG6008	ORG3511	Same above
Optical	f	ORG6009	ORG3512	Same above
Optical	g	ORG3515	ORG3513	Same above

表3 比較実験期間
Table 3 Test period

	Start	End
1 st period	2000/7/8 7:00	2000/8/25 13:00
2 nd period	2000/8/25 15:00	2000/9/27 15:00

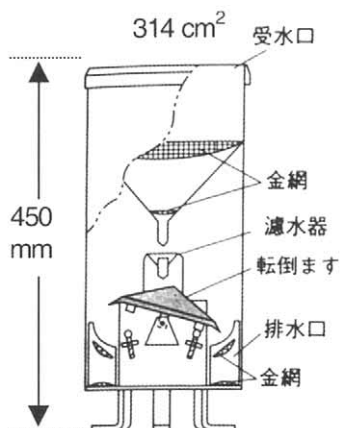


図2 転倒マス雨量計の構造 (小笠原計器 RS-102)
Fig. 2 Tipping bucket rain gauge (Ogasawara Keiki RS-102)
(出典⁴⁾ 気象科学辞典)

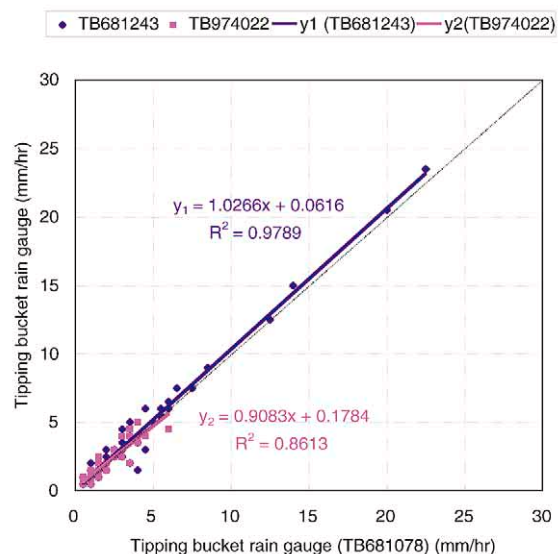


図5 転倒マス雨量計3台の1時間雨量の比較
Fig. 5 Comparison of three tipping-bucket rain gauges

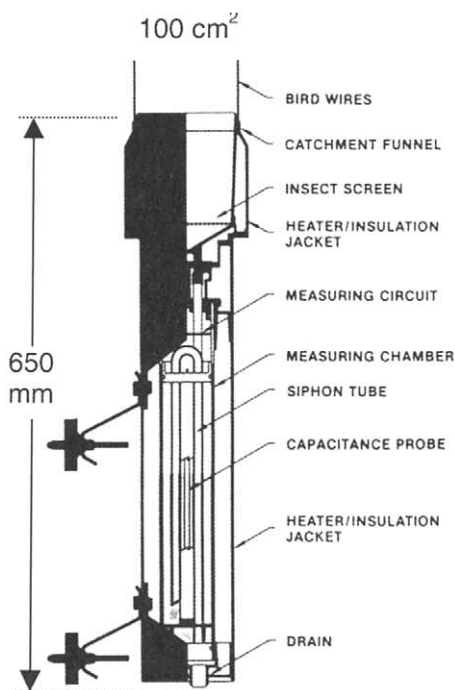


図3 サイホン式雨量計の構造 (R.M. YOUNG Model 50202)
Fig. 3 Siphon Rain Gauge (R.M. YOUNG Model 50202)

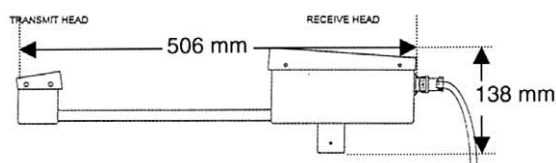


図4 光学式雨量計の外観 (SCTI ORG-115)
Fig. 4 Optical Rain Gauge (SCTI ORG-115)

マス型雨量計3台の観測値がほぼ一致した。よって、雨量計を設置した観測エリアでは、雨は一様に降っていたと考え、観測結果を解析した。

なお、転倒マス型雨量計は気象庁検定済みの測器を使用した。気象庁では、転倒マス型雨量計の検定条件を20mm/hr以上の時に誤差が±3%以内に収まることとしている。観測期間中の最大1時間雨量が22.5mm/hrだったので、転倒マス型雨量計の測定誤差は、最大でも1mm(2カウント)以下と考えられる。このように転倒マス型雨量計は測定誤差が小さいので、ここでは他の雨量計の性能を評価する際の基準器として使用した。

2.2. データ処理方法

使用した雨量計の種類によりデータの記録形式が異なるため、すべての雨量計に対して1時間雨量を求めた。雨量計の1時間雨量のデータセットを求める際には、観測データの品質管理を行なった。欠測データや不良データを含む1時間雨量をデータセットから除外した。なお、欠測データおよび不良データの除去は計算プログラムを用いて自動処理するが、念のため、削除したデータを抽出し、人間の目で前後のデータと比較し、不良かどうかを確認した。例えば、サイホン式雨量計に関しては、欠測したデータはほとんどなく、水が抜けている途中のデータを出力していないかを確認した。光学式雨量計は計測エラーによりデータを欠測した場合(全計測期間の1%程度)、欠測時のデータの出力形式が決まっているので、計算プログラムによりデータセットから除外した。サイホン式雨量計と光学式雨量計の場合、単位時間に降った雨量を求めることができない欠測直後の雨量データも不良データとして除外した。

雨量計の種類毎に、測器の特徴および雨量データの出力形式を以下にまとめた。

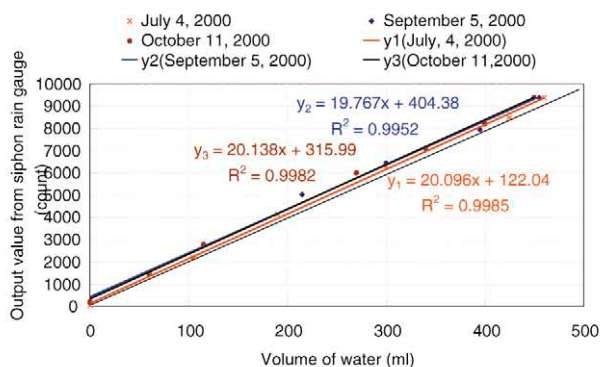


図6 サイホン式雨量計 (Siphon842) の検定結果

Fig. 6 Calibration result for Siphon0842

2.2.1. 転倒マス型雨量計

実験前に、測器内の転倒マスの清掃などメンテナンスした後、測器内の転倒マスを手で転倒させ、転倒回数とパルス数が一致することを確認した。

転倒マス型雨量計の場合、降水量の最小単位が0.5mmとなる。今回、転倒マス型雨量計の記録装置を2種類使用し、データの記録形式は、転倒マス(0.5mm相当)が転倒した時刻もしくは10分毎の転倒マスの転倒回数である。転倒回数に0.5をかけて雨量を求め、それらを足し合わせて1時間雨量を求めた。

2.2.2. サイホン式雨量計

使用したサイホン式雨量計の受水口の面積は100cm²で、受水器の最大貯水量は500mlである。満水時の雨量は50mmに相当する。サイホン式雨量計は受水口で受けた雨水を内部の計測用チャンバーに貯水し、その貯水量に応じたセンサー値を雨量に変換するため、データの出力形式が累積雨量となる。そのため、単位時間(5分)あたりの雨量を求めた後、それらを足し合わせて1時間雨量を求めた。なお、測器の仕様では、測定誤差は±1mmとなっている。

サイホン式雨量計の特徴として、長期間降水がなければ、受水器に溜まった水が蒸発により若干失われるために、累積雨量の値が減少する。また、降水がないにもかかわらず、累積雨量が一定値とならず前後に0.1mm程度変動していたが、この原因は、風の影響により受水器内の水面が揺れる

ために出力値が安定しなかったためと推察する。この変動値はサイホン式雨量計の測器の公称精度1mm以下と十分に小さく、系統誤差の要因とならないので、そのまま足し合わせて1時間雨量のデータセットを作成した。

サイホン式雨量計の受水器が満水に達すると、サイホンの原理により約30秒で受水器の水が抜ける。受水器から水が抜ける時間帯を含む雨量データは、サイホン式雨量計の単位時間当りの降水量を求める際、満水に達する50mmまでの雨量と水が抜けた後の累積雨量を足し合わせて求めた。観測期間中の最も強い雨は10分間で10.8mm降ったので、水が抜ける30秒間に観測できずにそのまま流れ出る雨量は、最大0.54mm程度と見積もられる。よって、水が抜けるときに観測できずに失う雨量は、測器の誤差1mm以下なので考慮しなかった。

観測前後と観測期間の途中に、目盛り10mlのメスシリンダーを用いてサイホン式雨量計の検定を行なった。電圧から換算したセンサーの出力値は、受水器の貯水量500mlに対して10,000カウントに対応する。サイホン式雨量計の検定結果を基に検定直線を求め、受水器の貯水量と出力値との直線性および勾配が理論値(20カウント/ml)にほぼ一致することを確認した。サイホン式雨量計の検定結果の一例として、サイホン式雨量計のSiphon842の検定直線を図6に示した。サイホン式雨量計4台とも検定直線の勾配に関しては顕著な変化は見られなかったが、受水器内の水量が0ml時の出力値は0とはならずドリフトしていた。4台のサイホン式雨量計に対する0ml時の出力値を表4にまとめた。測器毎に0ml時の出力値のドリフト量は異なり、時間が経過すると、0ml値のオフセットが増加する傾向がみられた。Siphon842の場合では、0ml時の出力値が最大198カウントとなり、雨量に換算すると約1mm相当(フルスケールで2%)の誤差要因となる。このように、サイホン式雨量計の受水器内の水が抜ける時を含むデータはこのような誤差を含んでいるので、サイホン式雨量計データの取扱いには注意が必要である。

2.2.3. 光学式雨量計

実験には、専用の検査装置を用いて動作確認を行い、良好な結果を得た測器を使用した。測器の性能仕様では、雨量測定の実誤差は5%となっている。

転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計が受水器に溜まった雨量を直接計測するのとは異なり、光学式雨量計は降雨強度を積分することにより雨量を求める。雨量データ

表4 サイホン式雨量計の検定結果—0ml時のセンサー出力値—(単位: カウント)

Table 4 Calibration results of 0 ml offset value with no water injection for siphon rain gauges (unit: count)

Calibration date	Siphon 772	Siphon 773	Siphon 774	Siphon 842
2000/2/10	10	91	8	-
2000/7/4	51	20	9	16
2000/9/5	155	92	9	176
2000/10/11	149	97	15	198

の出力形式は、降雨強度と累積雨量である。連続する累積雨量データから単位時間10分あたりの雨量を求めた後に、それらを足し合わせて1時間雨量を求めた。

3. 結果および考察

観測期間中の降雨状況として、転倒マス型雨量計 (TB681078) による日別雨量を図7に示す。また、代表的な降雨イベントの例として、7月17日と7月25日の降り始めからの累積雨量の時系列をそれぞれ図8と図9に示した。光学式雨量計は転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計に比べて雨量を多めに観測する傾向があった。降雨の状況によって違いがあり、強雨時ほど光学式雨量計は雨量を多めに示し、個々の測器の観測雨量の違いも大きかった。少雨時には、光学式雨量計と他の雨量計との観測雨量の違いはあまり見られなかった。他の降雨イベントにおいても同様の傾向が見られたが、特に、強雨時の個々の光学式雨量計について見ると、ある特定の光学式雨量計が他の光学式雨量計よりいつも大きな値を取るわけではなかった。

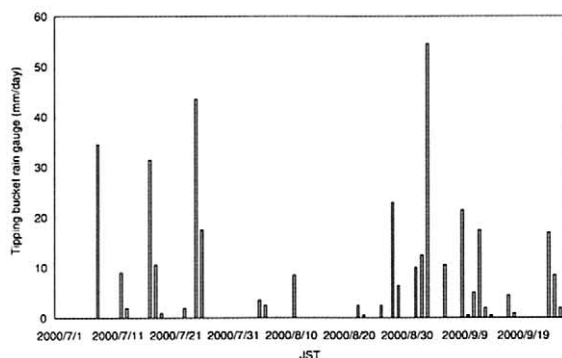


図7 観測期間中の日別雨量 (転倒マス型雨量計 TB681078)
Fig. 7 Daily precipitation during observation period (TB681078)

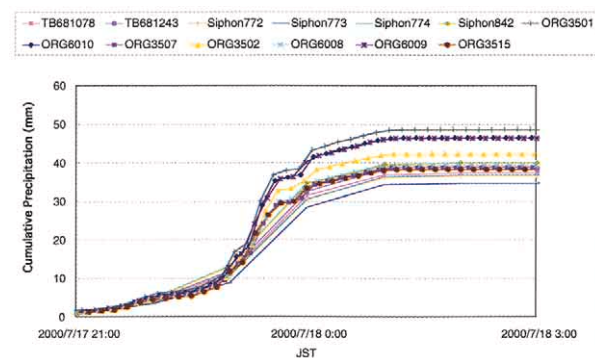


図8 2000年7月17日の降雨イベントの累積雨量
Fig. 8 Cumulative precipitation on July 17, 2000

次に、最も信頼性の高い転倒マス型雨量計を基準器として、1時間雨量を用いてサイホン式雨量計と光学式雨量計をそれぞれ比較した。

3.1. 転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との1時間雨量比較結果

全期間の1時間雨量を用いて、転倒マス型雨量計 (TB681078) とサイホン式雨量計との相関図を図10に示した。図中にサイホン式雨量計の測器毎の回帰直線も記入した。また、表5に、転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との回帰直線の式とRMS偏差および相関係数を示した。サイホン式雨量計は4台とも相関係数が約0.98と、転倒マス型雨量計の1時間雨量と強い相関が見られた。また、回帰直線を求める際、誤差評価⁹⁾を行なった。回帰直線の勾配および切片に含まれる誤差と勾配の95%の信頼区間を見積もり、表5に示した。サイホン式雨量計4台の結果を平均すると、回帰直線の勾配が0.97、切片が0.06であった。また、RMS偏差が0.65mm/hrであることから、サイホン式雨量計は1mm以内の誤差で転倒マス型雨量計との回帰直線に一致した。

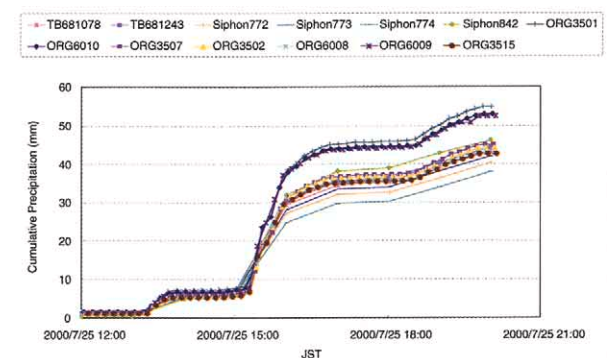


図9 2000年7月25日の降雨イベントの累積雨量
Fig. 9 Cumulative precipitation on July 25, 2000

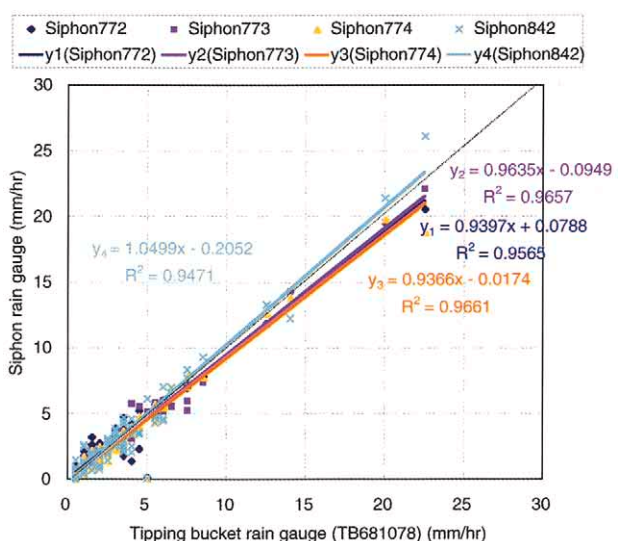


図10 転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との1時間雨量比較
Fig.10 Comparison of tipping bucket with siphon rain gauges for 1 hour rainfall

表5 転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との1時間雨量比較

Table 5 Comparison of tipping bucket rain gauge with siphon rain gauges for 1 hour rainfall

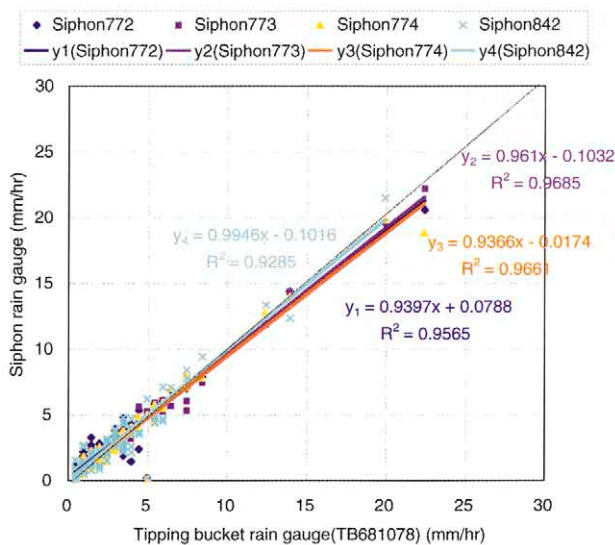
S/N	Regression Line ($y = a + bx$)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r^2)
Siphon 772	$y_1 = (0.94 \pm 0.02)x + (0.08 \pm 0.06)$	$0.91 < b < 0.97$	0.62	0.96
Siphon 773	$y_2 = (0.96 \pm 0.02)x + (-0.09 \pm 0.06)$	$0.93 < b < 0.99$	0.57	0.97
Siphon 774	$y_3 = (0.94 \pm 0.01)x + (-0.01 \pm 0.06)$	$0.91 < b < 0.97$	0.55	0.97
Siphon 842	$y_4 = (1.05 \pm 0.02)x + (-0.2 \pm 0.08)$	$1.01 < b < 1.09$	0.77	0.95
Total	$y = (0.97 \pm 0.01)x + (-0.06 \pm 0.03)$	$0.96 < b < 0.99$	0.65	0.96

RMS(Root Mean Square): 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

表6 転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との3 σ データを除いた1時間雨量比較Table 6 Comparison of tipping bucket rain gauge with siphon rain gauges for 1 hour rainfall excluded 3 σ data

S/N	Regression Line ($y = a + bx$)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r^2)
Siphon 772	$y_1 = (0.94 \pm 0.02)x + (0.08 \pm 0.06)$	$0.91 < b < 0.97$	0.62	0.96
Siphon 773	$y_2 = (0.96 \pm 0.01)x + (-0.1 \pm 0.06)$	$0.93 < b < 0.99$	0.54	0.97
Siphon 774	$y_3 = (0.94 \pm 0.01)x + (-0.01 \pm 0.06)$	$0.91 < b < 0.97$	0.55	0.97
Siphon 842	$y_4 = (0.99 \pm 0.02)x + (-0.1 \pm 0.08)$	$0.95 < b < 1.04$	0.73	0.93
Total	$y = (0.96 \pm 0.01)x + (-0.03 \pm 0.03)$	$0.94 < b < 0.97$	0.62	0.96

RMS(Root Mean Square): 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

図11 転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計との3 σ データを除いた1時間雨量比較Fig.11 Comparison of tipping bucket rain gauge with siphon rain gauges for 1 hour rainfall excluded 3 σ data

個々の測器の回帰直線をみると、切片はいずれも0.2mm以下であり、測器の精度1mmと比べて無視し得る程度である。Siphon842だけが回帰直線の勾配が1.05と1を若干上回っているが、その他3台は1以下となった。サイホン式雨量計4台を平均すると勾配が0.97となり、転倒マス型雨量計の雨量に一致する勾配1と比べて、サイホン式雨量計は系統的に転倒マス型雨量計よりも3%程度少ない雨量を示すことが分かった。

さらに、転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計の1時間雨量のデータセットに対して、データの品質管理として回帰直線から3 σ 以上外れるデータを除き、その結果を図11および表6に示した。サイホン式雨量計は転倒マス型雨量計と良く一致したので、データの品質管理を行なう前とほぼ同様の結果を得た。

サイホン式雨量計が転倒マス型雨量計と比べて観測雨量が少ない原因として、雨滴の捕捉率の違いが影響した可能性が考えられる。受水口の面積を比べると、転倒マス型雨量計314cm²に対しサイホン式雨量計は100cm²と1/3程度と小さい。そのため、サイホン式雨量計は、風の影響を受けて雨滴の捕捉率が低下し、転倒マス型雨量計よりも雨量が少なくなった可能性がある。

3.2. 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との1時間雨量比較結果

転倒マス型雨量計 (TB681078) と光学式雨量計との1時間雨量の相関図を、図12と図13に示した。それぞれ1回目と2回目の観測結果に対応する。また、転倒マス型雨量計と

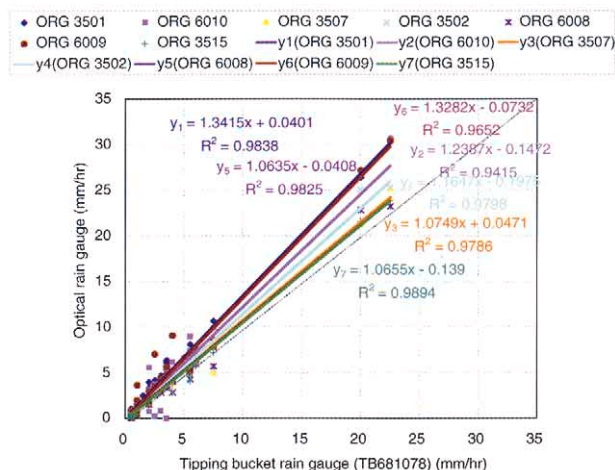


図12 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との1時間雨量比較 (1回目)

Fig.12 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 1st period

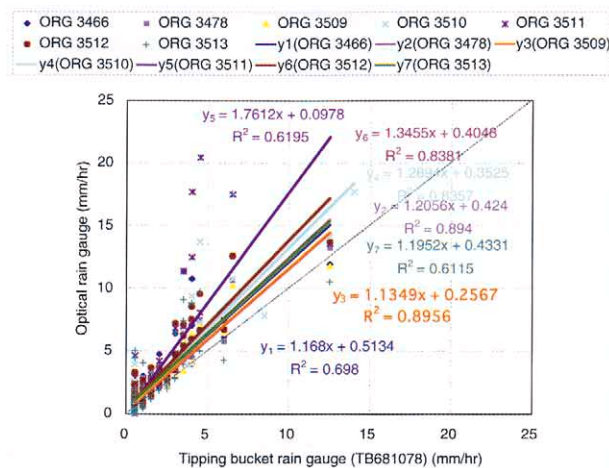


図13 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との1時間雨量比較 (2回目)

Fig.13 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 2nd period

表7 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との1時間雨量比較 (1回目)

Table 7 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 1st period

S/N	Regression Line (y = a + bx)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r ²)
ORG 3501	$y_1 = (1.34 \pm 0.02)x + (0.04 \pm 0.12)$	$1.29 < b < 1.39$	0.70	0.98
ORG 6010	$y_2 = (1.24 \pm 0.04)x + (-0.14 \pm 0.22)$	$1.15 < b < 1.33$	1.29	0.94
ORG 3507	$y_3 = (1.07 \pm 0.02)x + (0.05 \pm 0.11)$	$1.03 < b < 1.12$	0.64	0.98
ORG 3502	$y_4 = (1.16 \pm 0.02)x + (-0.19 \pm 0.12)$	$1.12 < b < 1.21$	0.69	0.98
ORG 6008	$y_5 = (1.06 \pm 0.02)x + (-0.04 \pm 0.1)$	$1.02 < b < 1.1$	0.58	0.98
ORG 6009	$y_6 = (1.33 \pm 0.04)x + (-0.07 \pm 0.18)$	$1.26 < b < 1.4$	1.06	0.97
ORG 3515	$y_7 = (1.07 \pm 0.02)x + (-0.14 \pm 0.11)$	$1.03 < b < 1.1$	0.54	0.99
Total	$y = (1.18 \pm 0.01)x + (-0.06 \pm 0.07)$	$1.16 < b < 1.21$	1.01	0.96

RMS(Root Mean Square): 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

表8 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との1時間雨量比較 (2回目)

Table 8 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 2nd period

S/N	Regression Line (y = a + bx)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r ²)
ORG 3466	$y_1 = (1.17 \pm 0.09)x + (0.51 \pm 0.21)$	$0.99 < b < 1.35$	1.37	0.70
ORG 3478	$y_2 = (1.21 \pm 0.05)x + (0.42 \pm 0.12)$	$1.11 < b < 1.3$	0.77	0.89
ORG 3509	$y_3 = (1.13 \pm 0.04)x + (0.26 \pm 0.11)$	$1.05 < b < 1.22$	0.71	0.90
ORG 3510	$y_4 = (1.29 \pm 0.06)x + (0.35 \pm 0.19)$	$1.16 < b < 1.41$	1.35	0.84
ORG 3511	$y_5 = (1.76 \pm 0.16)x + (0.1 \pm 0.39)$	$1.45 < b < 2.07$	2.55	0.62
ORG 3512	$y_6 = (1.35 \pm 0.07)x + (0.4 \pm 0.17)$	$1.21 < b < 1.48$	1.13	0.84
ORG 3513	$y_7 = (1.2 \pm 0.11)x + (0.43 \pm 0.29)$	$0.97 < b < 1.42$	1.87	0.61
Total	$y = (1.3 \pm 0.03)x + (0.35 \pm 0.09)$	$1.23 < b < 1.37$	1.56	0.72

RMS(Residual Mean Square) Deviation: 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

光学式雨量計との回帰直線の式とRMS偏差および相関係数を、表7と表8に示した。

図12と図13より、光学式雨量計は測器間で観測雨量が明らかにばらついているが分かる。転倒マス型雨量計と光学式雨量計との回帰直線に着目すると、勾配の範囲が1.06～1.76と測器間でバラツキが大きい、どの光学式雨量計も転倒マス型雨量計と比べて雨量を多めに示した。ほとんどの光学式雨量計が、転倒マス型雨量計と比べて、20～30%程度雨量を多めに示した。これは光学式雨量計が、他の雨量計と計測原理が根本的に異なることに起因すると推

察する。転倒マス型雨量計とサイホン式雨量計は受水器に貯めた雨水を直接測定するのに対し、光学式雨量計は降雨強度を積分して雨量を求める。光学式雨量計の場合、雨滴を検知するエリアが非常に小さいので、降雨によっては雨滴の粒径分布の違いが影響した可能性がある。特に強雨時では個々の測器が観測する雨滴の粒径が顕著に異なることも考えられる。しかしながら、現時点では、自然降雨における雨滴の粒径分布および光学式雨量計で検知する雨滴の粒径と出力される雨量強度との関係は分からなかった。

次に、個々の光学式雨量計に対して回帰直線から3σ外

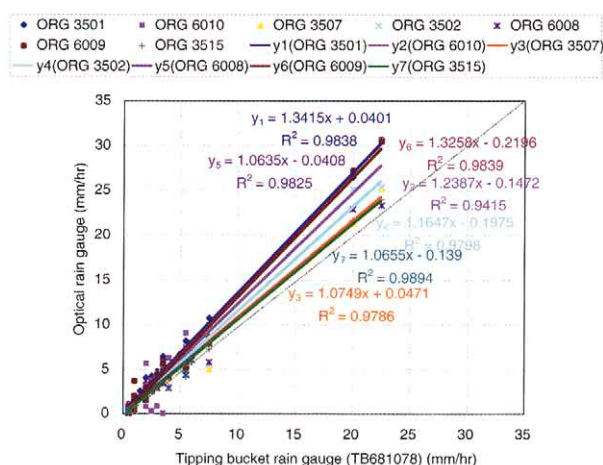


図14 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との3σデータを除いた1時間雨量比較 (1回目)

Fig.14 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 1st period excluded 3σ data

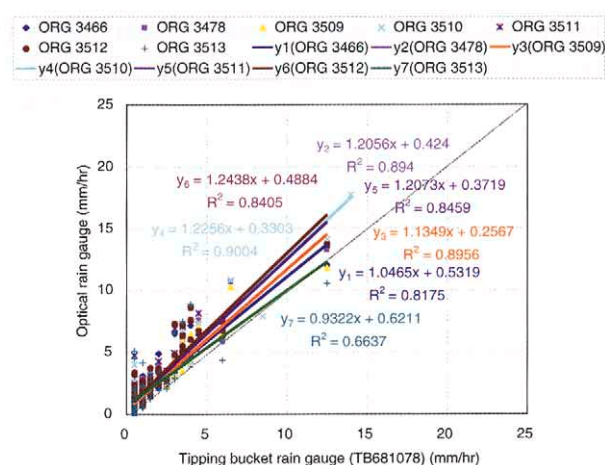


図15 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との3σデータを除いた1時間雨量比較 (2回目)

Fig.15 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 2nd period excluded 3σ data

表9 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との3σデータを除いた1時間雨量比較 (1回目)

Table 9 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 1st period excluded 3σ data

S/N	Regression Line (y = a + bx)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r ²)
ORG 3501	$y_1 = (1.34 \pm 0.02)x + (0.04 \pm 0.12)$	$1.29 < b < 1.39$	0.70	0.98
ORG 6010	$y_2 = (1.24 \pm 0.04)x + (-0.14 \pm 0.22)$	$1.15 < b < 1.33$	1.29	0.94
ORG 3507	$y_3 = (1.07 \pm 0.02)x + (0.05 \pm 0.11)$	$1.03 < b < 1.12$	0.64	0.98
ORG 3502	$y_4 = (1.16 \pm 0.02)x + (-0.19 \pm 0.12)$	$1.12 < b < 1.21$	0.69	0.98
ORG 6008	$y_5 = (1.06 \pm 0.02)x + (-0.04 \pm 0.1)$	$1.02 < b < 1.1$	0.58	0.98
ORG 6009	$y_6 = (1.33 \pm 0.02)x + (-0.22 \pm 0.13)$	$1.28 < b < 1.37$	0.73	0.98
ORG 3515	$y_7 = (1.07 \pm 0.02)x + (-0.14 \pm 0.11)$	$1.03 < b < 1.1$	0.54	0.99
Total	$y = (1.18 \pm 0.01)x + (-0.08 \pm 0.06)$	$1.16 < b < 1.21$	0.96	0.96

RMS(Root Mean Square): 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

表10 転倒マス型雨量計と光学式雨量計との3 σ データを除いた1時間雨量比較(2回目)Table10 Comparison of tipping bucket rain gauge with optical rain gauges for 1 hour rainfall during 2nd period excluded 3 σ data

S/N	Regression Line ($y=a+bx$)	Tolerance Interval 95% of regression coefficient	RMS Deviation (mm/hr)	Correlation Coefficient (r^2)
ORG 3466	$y_1 = (1.05 \pm 0.06) x + (0.53 \pm 0.14)$	$0.93 < b < 1.16$	0.87	0.82
ORG 3478	$y_2 = (1.13 \pm 0.04) x + (0.48 \pm 0.1)$	$1.05 < b < 1.22$	0.66	0.90
ORG 3509	$y_3 = (1.08 \pm 0.04) x + (0.31 \pm 0.1)$	$1 < b < 1.16$	0.64	0.90
ORG 3510	$y_4 = (1.25 \pm 0.05) x + (0.34 \pm 0.15)$	$1.15 < b < 1.34$	1.06	0.88
ORG 3511	$y_5 = (1.51 \pm 0.11) x + (0.19 \pm 0.26)$	$1.3 < b < 1.73$	1.68	0.73
ORG 3512	$y_6 = (1.28 \pm 0.07) x + (0.47 \pm 0.16)$	$1.15 < b < 1.41$	1.06	0.83
ORG 3513	$y_7 = (1.02 \pm 0.09) x + (0.61 \pm 0.23)$	$0.84 < b < 1.2$	1.48	0.63
Total	$y = (1.2 \pm 0.03) x + (0.41 \pm 0.07)$	$1.15 < b < 1.25$	1.16	0.79

RMS(Root Mean Square): 推定誤差の二乗和の平方根の偏差

れるデータを除いた結果を、図14と図15および表9と表10に示した。光学式雨量計は転倒マス型雨量計の観測雨量とあまり一致しなかったため、3 σ 除外後は、回帰直線周りのバラツキの程度を表すRMS偏差が、1.2 mm/hr以下に減少した。

5. まとめ

陸上で3種類の雨量計(転倒マス型雨量計, サイホン式雨量計, 光学式雨量計)を複数台用いて自然降雨による雨量観測を実施し、それぞれの測器が観測した1時間雨量を比較した。

その結果、以下のことが分かった。

- ・転倒マス型雨量計は、測器間で観測雨量のばらつきが小さい。
- ・サイホン式雨量計もまた測器間で観測雨量のばらつきが小さい。
- ・サイホン式雨量計は、転倒マス型雨量計が観測する雨量と良く一致し、転倒マス型雨量計よりも系統的に2%程度雨量を少なめに示す。
- ・光学式雨量計は、他の測器と比べて測器間で観測雨量のばらつきが大きい。
- ・光学式雨量計は、転倒マス型雨量計が観測する雨量との違いが大きく、転倒マス型雨量計よりも20~30%程度雨量を多めに示す。

6. 今後の課題

今回の実験により、サイホン式雨量計は転倒マス型雨量計が観測する雨量に良く一致し、光学式雨量計よりも動作が安定していることを示した。また、光学式雨量計は計測原理上連続で動作させなければならないため、電力消費量が多いのに対し、サイホン式雨量計は計測時(例えば10分毎)のみ電源を入れるので電力消費量が小さいという利点もある。これらのことから、トライトンに使用する雨量計を光学式雨量計からサイホン式雨量計に変更したほうがより良いと考えられる。しかしながら、サイホン式雨量計の性能面での優位性はあくまでも陸上実験から示された結果で

ある。サイホン式雨量計は受水器で直接雨滴を受ける方式をとり、しかもその受水口の面積が100cm²と小さいために、海上では測器が動揺することにより雨滴の補足率が低下する恐れがある。サイホン式雨量計を本格的に海上で使用するためには、あらためて風や測器の動揺による影響等を評価し、測器の性能を十分把握する必要がある。

サイホン式雨量計の検定方法に関しても、今回はメスシリンダーを用いて手作業で検定を行ったが、検定する人によらず高精度の検定を行うためには、検定方法を見直す必要がある。例えば、サイホン式雨量計の検定を機械化することにより、検定精度の向上ならびに運用面での効率向上が期待できる。

今後、サイホン式雨量計の検定方法を改善することや、トライトンを実海域に設置する際には、光学式雨量計とは別にサイホン式雨量計もブイに取り付けることにより、海上におけるサイホン式雨量計の性能を評価する必要がある。

謝辞

今回の実験を実施するにあたり、さまざまな面でご支援を頂いたマリンワークジャパンと(株)グローバルオーシャンディベロップメントの観測技術員の方々に、深謝いたします。

参考文献

- 1) 気象庁編, 気象観測の手引き((財)気象業務支援センター, 1998), p5-10, p69-74.
- 2) 鈴木宣直, “第5章 雨量計, 雪量計”, 気象研究ノート第185号(日本気象学会, 1996), p53-64.
- 3) 宮脇保彦, 白井かつ江, “二種類の新しい雨量計”, 測候時報, 60巻5号(気象庁, 1993), p255-262.
- 4) 日本気象学会編, 気象科学辞典(東京書籍, 1998)
- 5) JOHN R.TAYLOR著, 林茂雄・馬場涼記, 計測における誤差解析入門(東京化学同人, 2000), p187-213

Appendix 統計解析について

1. 直線回帰 (Regression Line)

二つの変数 x と y の間に、 $Y = a + bX$ なる直線関係がある場合、この式を x に対する y の回帰直線と呼ぶ。

この回帰直線は、推定誤差^{注1)}の二乗和を最小にするよう切片(a)、傾き(b)を求める。

注1) 推定誤差($y_i - Y$)

x_i に対する実際の観測値 y_i と、回帰直線の式で x が x_i のときの y の推定値 $Y = a + b x_i$ との差。

1-1. 回帰直線の係数の誤差

回帰直線の係数 a , b は、測定値(x , y)について明確に定義された関数を用いて求めた。この係数 a , b の誤差は、 y_1 , y_2 , y_3 , ..., y_n に含まれる誤差の伝播によって求められる。この結果は、 y の誤差はどこでも同じであり、 x の誤差は無視できるほど小さいという仮定に基づいている。もし、 y の誤差が全部同じでなければ重みつき最小二乗法を用いて求められる。

1-2. 回帰係数の区間推定 (Tolerance Interval 95% of regression coefficient)

推定誤差がお互いに独立で、いずれも平均0、分散 σ^2 の

正規分布に従う場合には、回帰直線の傾きおよび切片に関して、いずれも自由度 $n - 2$ の t 分布に従うことを利用して区間推定および検定を行う。

なお、表では、回帰直線の傾きの95%の信頼区間を記した。

1-3. RMS偏差 (RMS(Residual Mean Square) Deviation)

推定誤差($y_i - Y$)の二乗和の平方根の偏差であり、回帰直線に対する誤差のバラツキの程度。

2. 相関係数 (Correlation Coefficient)

相関係数(r)は、二つの変数の直線的な関係の強さを表す量である。よって、2次関数のような複雑な関係の強さは、相関係数では表すことはできない。

相関係数(r)がとりうる値の範囲は、 $-1 \leq r \leq 1$ となり、直線上に並ぶときは、+1あるいは-1の値を取る。

但し、二つの変数(x, y)の間の相関係数の大小は、それらの変数間の因果関係の強さを意味しない。

(原稿受理：2001年1月23日)