

トライトンブイと「みらい」での海上気象観測の相互比較結果(Ⅱ)

川原 幹雄*¹ 黒田 芳史*² 牛島 憲文*³ 安藤健太郎*²
曾野 和彦*⁴ 高槻 靖*² 中村 亘*³ 長濱 徹哉*⁴

西太平洋赤道海域に設置した海洋観測ブイ「トライトンブイ」の海上気象観測により良質の観測データが得られることを確認するために、ブイ設置直後に設置点近傍にて、海洋地球研究船「みらい」による海上気象観測を実施した。

第一報では、「みらい」観測航海MR98-02におけるブイ4基の設置直後の海上気象観測データを用いて、ブイと「みらい」の観測結果を相互比較した。気象データを比較する際、両者の観測高度の違いを考慮し、同一高度の補正値を用いた。その結果、気温、相対湿度(比湿)、気圧については、両者のデータは良い一致を示した。しかし、風速は、センサーの公称精度よりも両者の値に大きな違いが認められたが、「みらい」のドリフト情報が不足していたため、さらに詳細な解析ができなかった。

本稿では、1999年2月から3月のMR99-K01における9基のブイの設置直後に実施した海上気象観測結果を基に、ブイと「みらい」の観測データを同一高度の補正値に直して相互比較を行った。今回、比較項目として新たに風向を追加し、本船のドリフト速度を考慮し、より定量的な風速と風向の比較を行った。その結果、気温、湿度、気圧については、両者の観測の違いがセンサー公称精度の2倍程度で一致することを確認した。風については両者に大きな違いが見られることから、その原因を考察した。風向計の精度を向上させるために、新たに風向計の検定設備を整備し、測器の検定方法を改善することにした。

キーワード：海上気象観測、高度補正、トライトンブイ、みらい

Intercomparison of sea surface meteorological observation between TRITON buoy and R/V MIRAI (Part Ⅱ)

Mikio KAWAHARA*⁵ Yoshifumi KURODA*⁶ Norifumi USHIJIMA*⁷ Kentaro ANDO*⁶
Kazuhiko SONO*⁸ Yasushi TAKATSUKI*⁶ Toru NAKAMURA*⁷ Tetsuya NAGAHAMA*⁸

To validate the surface meteorological data on the TRITON buoys deployed in the western tropical Pacific Ocean, we performed the onboard meteorological observation on R/V MIRAI at each deployment site.

In our first report, we reported the result of intercomparison between the meteorological data obtained from each of four TRITON buoys and R/V MIRAI equipped with the same sensors during the MR98-02 cruise. The comparison of the meteorological data was carried out after correcting the effect of the difference of their observation height. It was concluded that the TRITON meteorological data except the wind speed data agreed with the MIRAI data. There were significant differences on the wind speed data between TRITON and MIRAI, but we could not analyze them in detail, due to the lack of the ship movement information during the observation.

In this report, we compared the corrected meteorological data of each nine TRITON buoys and R/V MIRAI during

*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 研究業務部

*4 (株)マリン・ワーク・ジャパン

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

*6 Ocean Research Department

*7 Research Support Department

*8 Marine Works Japan Ltd.

the MR99-K01 cruise from February to March, 1999. We added the wind direction as the comparison parameters, and performed quantitative comparison on the wind direction and speed between TRITON and MIRAI taking account of the ship movement.

As a result, the difference of the air temperature, relative humidity and air pressure data between on TRITON buoys and R/V MIRAI were less than twice of the nominal accuracy of each sensor. As for the wind data, there were the significant differences. To improve the accuracy of the wind direction measurements, we built the new facility for the calibration of the wind direction sensor and improved the calibration method.

Keywords : surface meteorological observation, altitude correction, TRITON buoy, R/V MIRAI

1. はじめに

エル・ニーニョに代表される大気・海洋相互作用の研究のために、西太平洋赤道海域に展開している海洋観測ブイ「トライトンブイ」(以下ブイと呼ぶ)のデータは、エル・ニーニョの監視や日々の天気予報にも用いられている。ブイの気象測器は、常に風や波により動揺する厳しい観測環境にあることから、ブイの海上気象観測データの品質を管理し、良質のデータを取得することは、研究を進める上でも重要である。

1998年3月「みらい」観測航海(MR98-02)では、海洋地球研究船「みらい」にブイと同型の気象センサーを設置し、西太平洋赤道海域にブイ4基の設置直後、ブイ近傍にて24時間海上気象観測を行った。ブイと「みらい」では、観測高度が異なるため、風速、気温、相対湿度(比湿)、気圧の観測値を同一高度に補正し、補正値を相互比較した。その結果、気温、比湿、気圧の気象要素については、両者のデータは良く一致することを確認した¹⁾。風速については、センサー公称精度よりも大きな風速差がみられたが、本船のドリフト速度に関する情報が不足していたため、それ以上の定量的な比較ができなかった。

この結果をふまえ、1999年2月～3月の「みらい」観測航海MR99-K01において、図1の観測地点に9基のブイを設置した直後に、前回同様の24時間海上気象観測を実施するとともに、観測中の詳細な船位情報を取得した²⁾。

本稿では、MR99-K01航海で実施した比較観測のうち、風速、風向、気温、相対湿度(比湿)、気圧について相互比較した。風については、船のドリフト速度を考慮し、新たに風向を比較項目に加え、前回よりも定量的な比較を行った。また、2000年3月MR00-K02観測航海における、1年後のブイ回収時にも同様の海上気象観測を実施し、その観測結果を比較した³⁾。観測誤差の原因となる気象測器自体が持つ器差、及び1年係留後に生じたオフセット値については、ブイ設置前と回収後に実施したセンサーの事前・事後検定結果から調べた。

2. 方法

MR99-K01観測航海において西太平洋赤道海域に設置するトライトンブイによる海上気象観測の観測データの品質

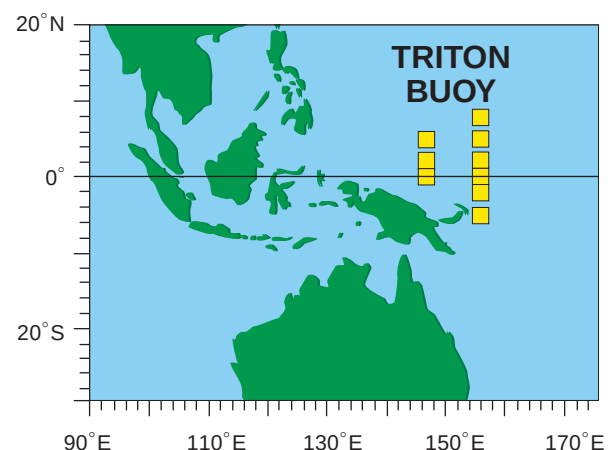


図1 1999年2月-3月「みらい」航海によるトライトンブイの設置場所
Fig. 1 Deployed buoys sites during R/V MIRAI cruise from February to March 1999

を評価するため、ブイを設置した直後、各ブイ設置点近傍に停船し、「みらい」による海上気象観測を行った。表1に、海上気象観測の実施期間をまとめた。可能な限り理想的な条件となるよう、船体の影響を最小限に抑えるために、船首中央より前方に約7 m伸ばしたブームの先端にブイと同型の気象センサー(風向風速計、気温湿度計、日射計)を設置し、各ブイにつき原則として24時間、船首が常に風上に向くよう操船しながら、気象観測を行った。ブイと「みらい」で使用した気象センサーの設置場所、設置高度等を、それぞれ表2、表3にまとめた。また、ブイの気象センサーの仕様を表4に示した。なお、表3は、「みらい」に船体付けの総合気象観測装置とは別に新たに設置したブイ同型の気象センサーの仕様について示した。

「みらい」は、気象観測中、海流や風の影響によりブイ設置地点から流されていく。同一の気象観測場を得るため、ブイと「みらい」との距離が10 km以内を保つよう、観測期間中、「みらい」をブイ近傍へ移動させた。図2は、気象観測期間中の「みらい」の船速およびブイと「みらい」間の距離の時系列を示す。

「みらい」の船上観測では、ブーム上に搭載した風向風速計は、海上の自然風“真風ベクトル”と船のドリフト速度ベ

表1 ブイの設置位置および気象比較観測の実施期間

Table 1 TRITON buoy location and intercomparison period

Buoy ID	Buoy location	Start time (UTC)	End time (UTC)	Weather
07001	5N147E	1999/02/16 07:00	1999/02/17 07:00	Fine/Cloud
08001	2N147E	1999/02/18 07:00	1999/02/19 07:00	Fine
09001	0N147E	1999/02/20 03:00	1999/02/21 03:00	Fine/Rain
01002	8N156E	1999/02/25 03:00	1999/02/26 03:00	Fine/Cloud/Rain
02002	5N156E	1999/02/27 02:00	1999/02/28 02:00	Fine
03002	2N156E	1999/03/01 02:00	1999/03/02 02:00	Fine
04002	0S156E	1999/03/03 02:00	1999/03/04 02:00	Fine
05001	2S156E	1999/03/05 02:00	1999/03/06 02:00	Cloud/Rain
06001	5S156E	1999/03/07 02:00	1999/03/08 01:00	Cloud/Rain

※ Local Standard Time (LST) = Coordinated Universal Time (UTC) + 10 hr

表2 トライトンブイの気象センサー

Table 2 List of sensors equipped on TRITON buoy

Sensor	Type	Manufacture	Equipped location	Height or Depth
Anemometer	ASIMET, 7050-A (with R.M. Young, 05103)	WHOI	Top of buoy's tower	3.5 m
Thermometer and hygrometer	ASIMET, 7030-A (with Rotronic, MP-101A)	WHOI	Lower part of buoy's tower	2.2 m
Barometer	DIGIQUARTZ, MET 1-485	Paroscientific, Inc.	Lower part of buoy's tower	2.0 m
Rain gauge	ORG-115 (mini-ORG)	Scientific Technology, Inc.	Upper part of buoy's tower	3.0 m
Short wave radiometer	ASIMET, 7070-A (with Epply Precision Spectral Pyranometer)	WHOI	Upper part of buoy's tower	3.0 m
Thermometer	MicroCAT, SBE37-IM	Sea Bird Electronics	Under sea	Under water 1.5m

WHOI : Woods Hole Oceanographic Institution.

表3 「みらい」に設置した気象センサー

Table 3 List of meteorological sensors equipped on R/V MIRAI

Sensor	Model	Serial No.	Equipped location	Height
Anemometer	ASIMET, 7050-A	WND327	MIRAI bow boom	10.7 m
Thermometer and hygrometer	ASIMET, 7030-A	MHRH326	MIRAI bow boom	10.5 m
Short wave radiometer	ASIMET, 7070-A	SWR322	MIRAI bow boom	10.3 m
Barometer	Yokogawa, F-451	(Shipboard)	MIRAI captain deck	13 m

表4 トライトンブイに使用した気象センサー仕様

Table 4 Specifications of meteorological sensors on TRITON buoy

Sensor	Range	Resolution	Nominal accuracy
Wind speed	0~60 m/s	0.1 m/s	0.3 m/s
Wind direction	0~360 deg	1 deg	2 deg
Air temperature	-20~+55 deg-C	0.01 deg-C	0.1 deg-C
Relative humidity	0~100 %RH	0.1% RH	2 % RH
Air pressure	800~1100 hPa	0.0038%	0.01%
Sea surface temperature	-3~+33 deg-C	0.0006 deg-C	0.002 deg-C

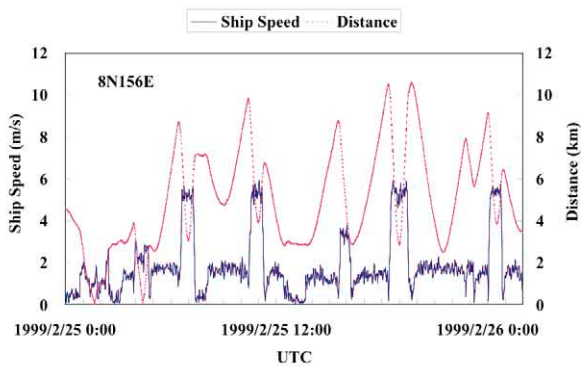


図2 船速とブイの距離

Fig. 2 Time series of ship speed data (solid line) and distance between buoy and ship (block line)

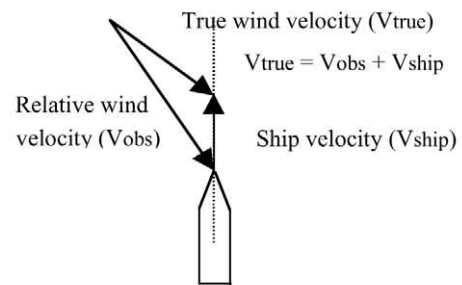


図3 船上で観測される風

Fig. 3 Wind observed on the ship

クトルを合成した“視風ベクトル”を計測する(図3)。一方、係留されたブイは、船舶のようにドリフトしないため、“真風ベクトル”を計測する。このため、比較に先だって、「みらい」の航海計器(GPS)による船位信号と「みらい」ブームで観測される“視風ベクトル”を合成し、ブームにおける“真風ベクトル”を求めた。

ブイと「みらい」では、気象測器の設置高度が異なるので、ブイと「みらい」の各気象要素の1時間平均値を求め、表5の物理関係式^{4) 5)}を用いて同一高度の値に補正した。

ブイの気象観測データは、周辺海域の気象を代表するものでなければならない。今回の気象観測は、ブイと「みらい」とも同型の気象センサーを用いているが、観測するプラットフォームの違いや両者の距離が最大10 km程度離れている影響等をすべて含んだ上で、ブイが「みらい」と同等の良質のデータが得られることを確認することを目的とした。そのため、「みらい」の1時間平均値はブイのサンプリング方式に揃えず単純に1分値60個を平均して求めた。

ブイは1年間の長期観測を行なうために、バッテリー容量等の制約があり、また米国のTAOブイと互換性を持たせるよう以下のようなサンプリング方式をとっている。ブイは10分毎に直前および直後の1分値を2回計測し、それらを平均し10分平均値とする。ブイの1時間平均値は、10分値6個を平均した値つまり1分値12個から求める。風は特に時間変

表5 気象要素の高度補正に適用した物理関係式および補正高度

Table 5 Correction method for meteorological parameters

Parameter	Correction method	Corrected height
Wind speed	Bulk Method	10 m
Air temperature	Monin-Obukhov similarity theory	10 m
Specific humidity	Monin-Obukhov similarity theory	10 m
Air pressure	Reduction to mean sea level	0 m

動が大きい気象要素であるので、3.1.3(6)節にて、「みらい」の風データを用いて1時間平均値の作成方法の違いを評価した。

3. 結果

ブイと「みらい」の観測結果について1時間平均値を基に比較した。表6及び表7に、気象観測比較結果を高度補正の有無に分け、ブイ値と「みらい」値の差の平均とその標準偏差を示した。なお、本稿の図表の時刻はすべて協定世界時(UTC)に統一した。観測海域の地方標準時は、UTC プラス10時間となる。

表6 トライトンブイと「みらい」による気象観測の観測結果の比較
Table 6 Differences between TRITON and MIRAI meteorological data

Buoy ID		Air temperature (deg-C)		Relative humidity (%)		Specific humidity (kg/kg)		Atmospheric pressure (hPa)	
Buoy location		raw	corrected	raw	corrected	raw	corrected	raw	Sea level
07001	Ave.	0.2	0.1	0.3	-0.8	0.0003	0	0.3	0.5
5N147E	S.D.	0.2	0.2	0.9	0.9	0.0002	0.0002	0.1	0.1
08001	Ave.	0.2	0.1	0.4	-2.1	0.0004	-0.0004	0.2	0.5
2N147E	S.D.	0.1	0.1	1.2	1.2	0.0003	0.0003	0.1	0.1
09001	Ave.	0.2	0.1	-0.5	-1.7	0.0001	-0.0003	0.2	0.4
0N147E	S.D.	0.3	0.3	1.8	1.8	0.0003	0.0004	0.1	0.1
01002	Ave.	0.3	0.1	0.6	-1.7	0.0005	-0.0003	0.2	0.4
8N156E	S.D.	0.2	0.2	1.5	1.6	0.0002	0.0003	0.1	0.1
02002	Ave.	0.1	0	2.4	-0.1	0.0007	0	0.2	0.4
5N156E	S.D.	0.3	0.3	1.6	1.7	0.0003	0.0003	0.1	0.1
03002	Ave.	0.1	0	1.3	-1.2	0.0004	0.0004	0.2	0.4
2N156E	S.D.	0.1	0.1	0.9	0.9	0.0001	0.0001	0.1	0.1
04002	Ave.	0.1	0	1.5	-1.5	0.0004	0.0004	0.2	0.4
0S156E	S.D.	0.1	0.1	0.7	0.8	0.0001	0.0001	0.1	0.1
05001	Ave.	0.2	0.1	2.5	0	0.0008	0.0001	0.2	0.4
2S156E	S.D.	0.3	0.3	1.2	1.4	0.0004	0.0004	0.1	0.1
06001	Ave.	0.2	0	-0.2	-1.3	0.0001	-0.0002	0.2	0.4
5S156E	S.D.	0.3	0.3	2.0	2.0	0.0003	0.0003	0.2	0.2
Total	Ave.	0.2	0.1	0.9	-1.2	0.0004	0	0.2	0.4
Average	S.D.	0.2	0.2	1.3	1.4	0.0003	0.0003	0.1	0.1

※ Difference = TRITON - MIRAI, S.D. (Standard Deviation)

3.1. 風速・風向

ブイを設置した赤道海域では、この期間は東よりの貿易風が卓越していた。熱帯特有のスコールを伴う雨雲が「みらい」に接近した際、風速の増加および風向の急激な変動がみられた。

表7に「みらい」の視風と真風（高度補正なし・あり）の3通りについて、ブイ値とみらいとの残差平均および標準偏差をまとめた。ブイと「みらい」の視風と真風および船速の1分値の時系列を図4に示す。

3.1.1. 風速

バルク法で高度補正した10m高度値の1時間平均値の時系列を図5に示す。なお、「みらい」の1時間平均値を求める際、1分値の風速が30 m/sを超え、かつ前後1分値の変化量が20 m/sを超えたものは誤データとみなし、1時間平均値を求める際には用いなかった⁶⁾。

図4bをみると、2N156Eと0S156Eでは、「みらい」の船速が大きいほど、「みらい」の真風速はブイと大きくずれている。そこで、海流は2m/s以下であるので、船速が3 m/s以上である時は移動中とみなし、風のデータセットから除き、表7と同様の比較結果を表8に示す。

表7では、「みらい」とブイ9基分との風速差の平均は、高度補正なし-0.2 m/s、高度補正あり0.5 m/sとなり、高度補正値の風速差が高度補正をしない場合よりも大きくなった。

表8の結果も同様に、高度補正を行なったことにより、両者の値の差がもっとも大きくなったことを示している。

表8では、9基のブイを平均した高度補正値の風速差0.9 m/sは、センサーの公称精度の3倍と大きくなったが、ブイと「みらい」の観測誤差の要因については、3.1.3節において別途詳細に考察する。

3.1.2. 風向

本稿における風向の方位は、北を起点に風が吹いてゆく方向（風下側）に時計回りにとる。この方位の取り方は海潮流の流向に合わせている。一般に、風向は北を起点に風の吹いてくる方向（風上側）を示す。それゆえ、一般の風向とは角度が180°異なる。

ブイと「みらい」の風向の時系列は図4に示されている。図4では、風が強く風向の時間変動が少ない時間帯は両者の風向は定性的に良く一致するが、風速が4m/s以下の弱風時には風向がずれる傾向がみられた。風速と同様に、「みらい」の移動時には両者の風向がずれる傾向を示した。

表7、表8では、9基のブイの風向差を平均した値は良い一致を示すものの、ブイ毎の平均値は大きく異なる。「みらい」に搭載し比較用に使った風向計は、事後検定の結果からは良好である。一方、ブイに搭載した風向計が最大9°もともずれていた可能性があるが、これだけでは、ブイと「みらい」の風速差を説明することができない。また、風向

表7 トライトンパイと「みらい」の風の比較

Table 7 Differences between TRITON and MIRAI wind data

Buoy ID Location		Wind speed (m/s)			Wind direction (deg)	
		Relative	True raw	True corrected	Relative	True
07001 5N147E	Ave.	-0.4	-0.5	-0.2	-3.8	-0.5
	S.D.	0.7	1.5	1.5	64.0	78.6
	Min.	-1.7	-4.5	-4.3	-195	-202
	Max.	0.9	1.3	1.6	139	198
08001 2N147E	Ave.	-1.2	-0.2	0.5	0.9	0.1
	S.D.	0.8	1.0	1.0	18.8	17.4
	Min.	-1.9	-2.0	-1.5	-43	-34
	Max.	2.2	3.1	3.8	31	33
09001 0N147E	Ave.	-0.7	-0.6	-0.4	-11.4	10.3
	S.D.	1.2	1.2	1.3	100.1	40.5
	Min.	-3.3	-3.7	-3.5	-219	-111
	Max.	2.2	1.8	2.3	178	110
01002 8N156E	Ave.	0.1	-0.1	1.0	-1.3	-1.5
	S.D.	1.4	1.5	1.5	6.0	6.2
	Min.	-3.1	-4.8	-3.7	-14	-13
	Max.	1.9	2.1	3.4	7.8	9.5
02002 5N156E	Ave.	0.2	0.2	1.1	-14.8	-14.3
	S.D.	1.6	1.5	1.5	7.1	7.3
	Min.	-2.9	-4.4	-3.5	-30	-29
	Max.	4.9	4.3	5.8	-2	1
03002 2N156E	Ave.	0	0.1	0.7	-18.8	-16
	S.D.	1.4	2.8	2.7	6.1	18.3
	Min.	-3.7	-9.1	-8.5	-30	-36
	Max.	1.3	2.5	3.1	-5	53
04002 0S156E	Ave.	0.1	-0.2	0.7	-21	-20.9
	S.D.	1.6	2.3	2.2	7.8	10.8
	Min.	-3.5	-8.6	-7.5	-34	-44
	Max.	1.9	2.3	3.2	-6	12
05001 2S156E	Ave.	0.2	0	0.9	7.8	6.3
	S.D.	1.5	0.9	0.9	5.0	4.4
	Min.	-3.5	-3.4	-2.5	-6	-9
	Max.	2.0	0.9	1.9	19	15
06001 5S156E	Ave.	-0.5	-0.3	0.0	0	5.3
	S.D.	1.0	0.4	0.5	19.0	16.1
	Min.	-3.2	-1.3	-1.2	-39	-29
	Max.	1.1	0.4	0.8	73	45
Total	Ave.	-0.1	-0.2	0.5	-6.9	-3.5
Average	S.D.	1.2	1.4	1.5	26.0	22.2

※ Difference = TRITON - MIRAI, S.D. (Standard Deviation)

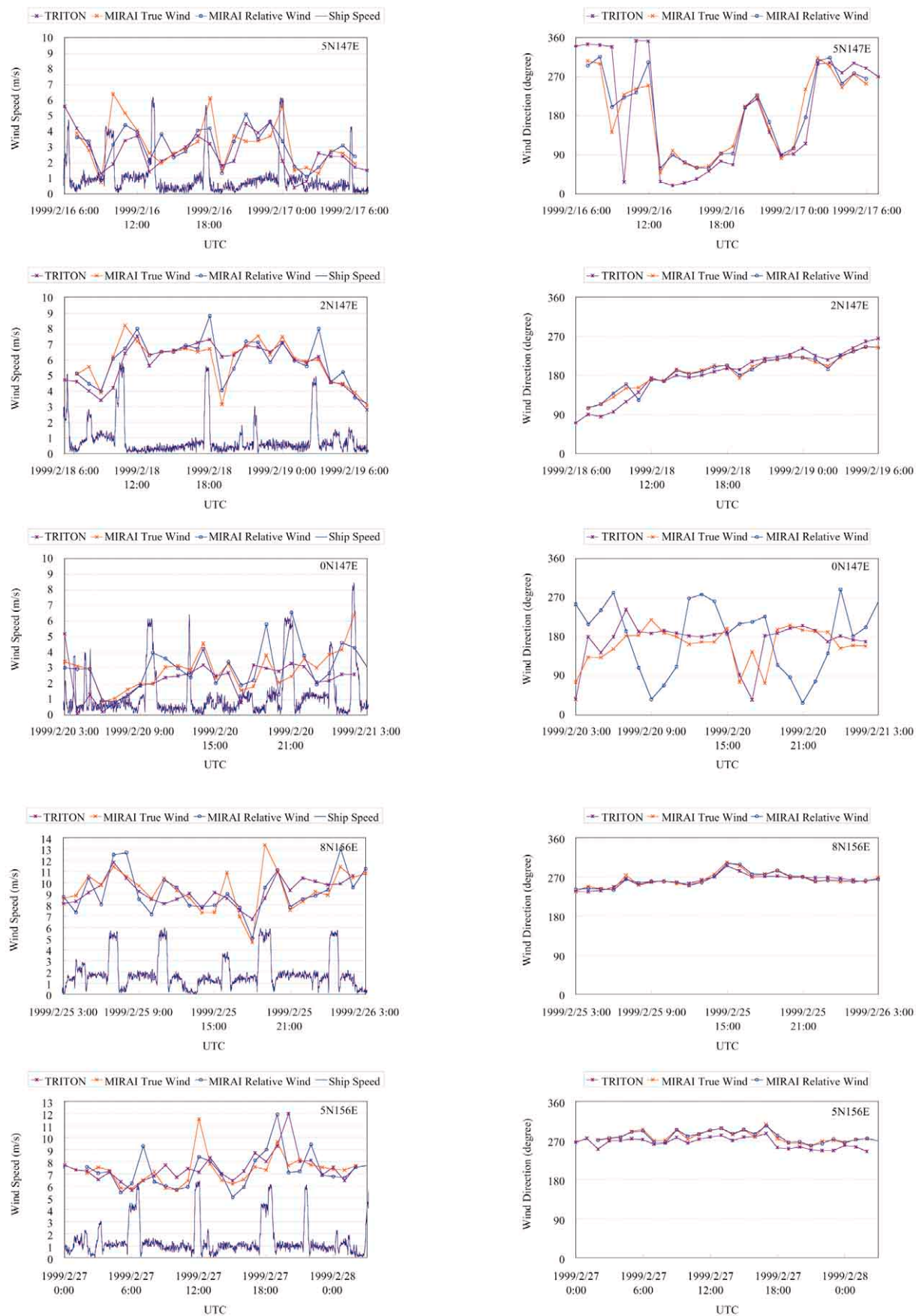


図4a プイと「みらい」の真風と視風および船速の時系列
Fig. 4a Time series of true and relative wind, and ship speed

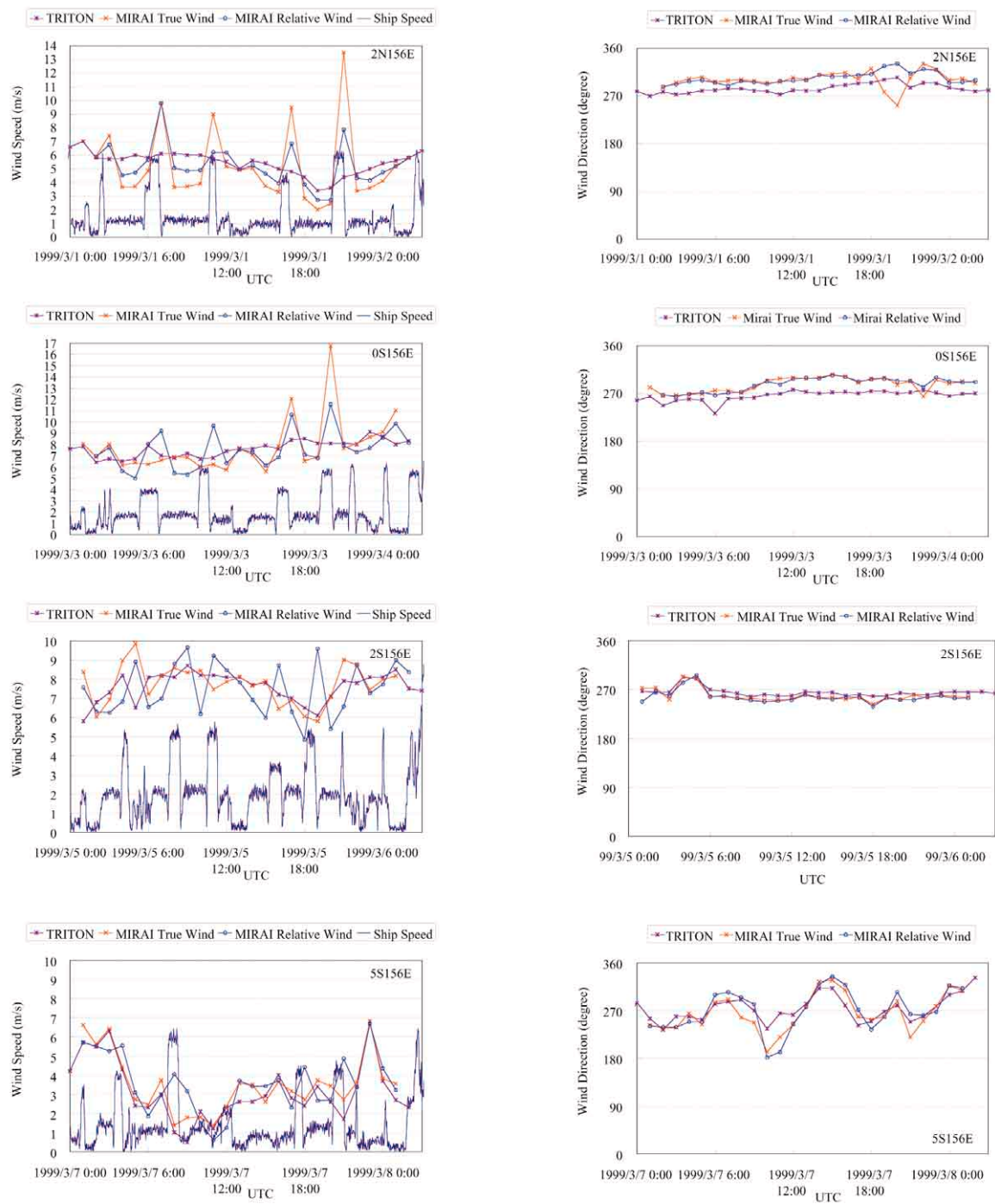


図4b プイと「みらい」の真風と視風および船速の時系列
Fig. 4b Time series of true and relative wind, and ship speed

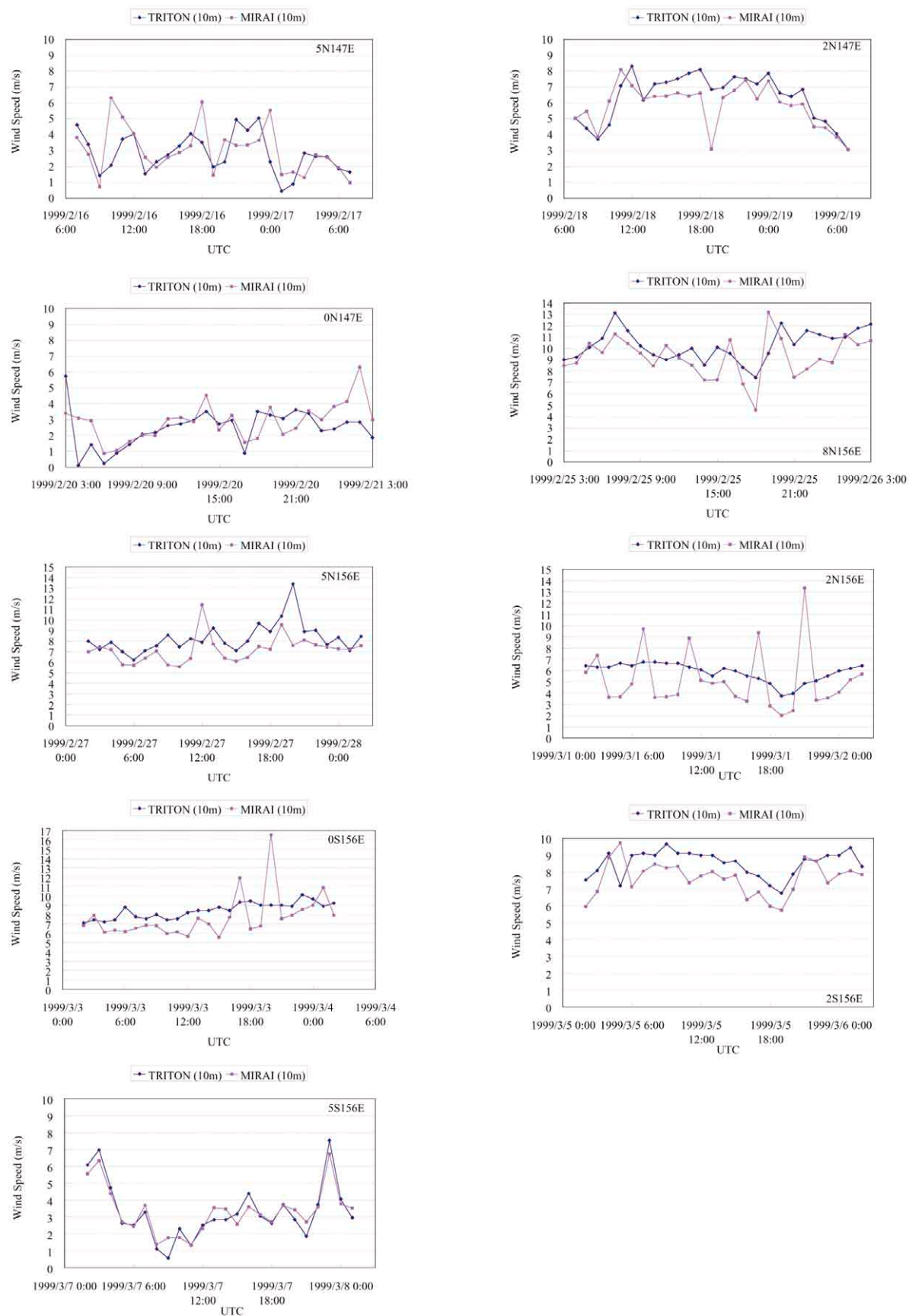


図4 プイと「みらい」の 10m 高度の風速の時系列

Fig. 5 Time series of wind speed data of TRITON and MIRAI corrected to 10m height

表8 船速が3 m/s 以下の時のトライトンブイと「みらい」の風の比較

Table 8 Differences between TRITON and MIRAI wind data.

The data were omitted when ship moved over a speed of 3 m/s.

Buoy ID Location		Wind speed (m/s)			Wind direction (deg)	
		Relative	True raw	True corrected	Relative	True
07001 5N147E	Ave.	-0.2	-0.1	0.2	7.2	12.6
	S.D.	0.6	0.9	1.0	52.0	70.2
	Min.	-1.3	-1.8	-1.4	-60.2	-125.0
	Max.	0.9	1.3	1.6	139.0	197.8
08001 2N147E	Ave.	0.0	0.0	0.6	2.3	2.0
	S.D.	0.7	0.8	0.9	18.1	17.6
	Min.	-0.8	-1.	-1.1	-42.6	-33.6
	Max.	2.2	3.1	3.8	31.0	33.3
09001 0N147E	Ave.	-0.5	-0.4	-0.2	-22.8	10.5
	S.D.	1.2	0.9	0.9	103.1	44.3
	Min.	-2.8	-1.7	-1.4	-219.1	-110.9
	Max.	2.2	1.8	2.3	125.5	109.6
01002 8N156E	Ave.	0.4	0.4	1.5	-0.4	-0.5
	S.D.	1.2	1.0	1.0	5.0	5.5
	Min.	-2.3	-1.5	-0.3	-7.8	-12.4
	Max.	1.9	2.1	3.4	7.8	9.5
02002 5N156E	Ave.	0.8	0.5	1.4	-14.3	-13.5
	S.D.	1.2	1.2	1.3	7.0	7.6
	Min.	-0.5	-1.0	-0.2	-29.6	-28.7
	Max.	4.9	4.3	5.8	-1.7	0.9
03002 2N156E	Ave.	0.6	1.3	1.8	-19.1	-15.7
	S.D.	0.5	0.8	0.8	5.9	20.5
	Min.	-0.7	-0.1	0.6	-30.2	-36.1
	Max.	1.3	2.5	3.1	-9.0	52.5
04002 0S156E	Ave.	0.9	0.5	1.5	-22.4	-21.8
	S.D.	0.7	0.8	0.9	6.5	7.1
	Min.	-0.6	-0.5	0.3	-32.4	-33.3
	Max.	1.9	2.3	3.2	-9.5	-9.1
05001 2S156E	Ave.	0.9	0.0	1.0	8.2	6.8
	S.D.	0.9	0.5	0.5	4.5	6.1
	Min.	-0.9	-1.0	0.0	-1.9	-8.9
	Max.	2.0	0.9	1.9	13.3	13.2
06001 5S156E	Ave.	0.1	-0.3	0.1	0.3	2.7
	S.D.	0.6	0.4	0.5	27.7	19.3
	Min.	-1.1	-1.0	-0.7	-38.8	-28.7
	Max.	1.1	0.4	0.8	73.3	44.8
Total	Ave.	0.3	0.2	0.9	-6.8	-1.9
Average	S.D.	0.8	0.8	0.9	25.5	22.0

※ Difference = TRITON - MIRAI, S.D. (Standard Deviation)

計の事前と事後の検定結果が大きく異なることから、まずは風向計の検定方法および調整方法を検討し、それらを改善することにした。具体的には、建物の磁場の影響を避けるため新たに屋外に風向計の検定設備を整備し、観測前と観測終了後の検定方法や検定時における調整およびメンテナンス方法を改善することにした。

3.1.3. ブイと「みらい」の海上風を比較する上での問題点

ブイと「みらい」の風には大きな違いが見られるが、その原因として両者のデータには次のような誤差を含んでいることが考えられる。

(1) 使用した風向風速計の器差

気象測器を使用する際、その特性を把握することは重要である⁷⁾。気象センサーには個体差(器差)があるので、ブイ設置前と回収後に行った風向風速計の検定結果に基づき、センサーの器差を調べた。

風速計の検定では、センサー内部の計測部がプロペラの回転軸の回転に比例して発生するパルスを正確にカウントすることを確認した。その誤差は風速10 m/s時で0.3 m/s程度であった。また、起動風速および風速変化に対する追従性の指標となるプロペラトルクを計測し、その値が許容範囲内に収まることを確認した。風速測定において風程(空気の移動距離)に影響を与えるプロペラの形状については、目視にてその形状に変化がないことを確認したが、さらに高精度の検定には風洞を用いた性能試験が必要となる。

風向計の検定結果は表9となった。測器自体の固体差が大きいので、前述の通り、風向計の検定方法を改善することになった。

(2) バルク法による誤差

バルク法による風速の高度補正において、観測値から求めた海面の「風速分布に対する空気力学的粗度」は 10^{-4} 程度と見積もったので、10m値に補正すると、ブイは観測値(3.5m)と比べ約8～10%程度大きく、みらいは観測値

(10.7m)より約2%小さい値に補正されることになる。

風速の高度補正に用いたバルク法は、大気の状態が中立(温位の鉛直勾配が小さい)であることを前提条件としているのに対し、熱帯の海洋上では、海面水温と気温の温度差は1～2℃と大きく、特に微風時では大気の状態が不安定となり、自然対流に近くなる。このような状況下では、観測高度による風速の違いは見られず、海面近くの風速は高さ方向に対数分布とはならない⁸⁾。このため、大気の状態が不安定でかつ微風時では、風速のバルク法による高度補正は正しくない。

(3) 風の局地性

観測期間中、ブイと「みらい」の距離は最大10km程度離れる。晴天であれば、風は周辺海域で一様に吹いていると考えられるが、スコールの降り始めなど気象が急変する時は、10kmの距離が離れていると気象条件が大きく異なっていることも考えられる。

(4) 設置環境による影響

海上風の観測は、他の気象要素よりも周辺環境の影響を受け易い。風車型風向風速計で正しい測定値を得るためには、風に対して常にプロペラが正対していることが条件となる。例えば、水平方向の風速が10 m/sの時、風速計が15°傾斜しているとすると観測値は0.34m/s小さくなり、その値は20°では0.6 m/s、30°では1.3 m/s程度となる。

海上では波や風の影響で測器が常に動揺しており、動揺が激しい場合は観測データの品質が低下することが予想される。また、海流などの影響により、ブイがある特定方向に傾斜している場合は、風速計のプロペラの軸と風向との角度のズレ(偏角)により、風速の測定値に誤差が生じると考えられるが、9基のブイの観測結果からは、流れの強い海域で特に風速差が大きいということとはなかった。ブイの浮体部分の傾斜に影響を与える流速とブイと「みらい」の風速値のズレとの相関は特にみられなかった。

表9 風向計の検定結果

Table 9 Calibration result of wind direction sensor

Buoy ID	Location	Serial No.	Pre calibration		Post calibration	
			Date	Result	Date	Result
07001	5N147E	WND98316	1998/12/2	2.8°	2000/3/29	3.5°
08001	2N147E	WND98322	1998/12/2	0.2°	1999/8/18	-4.5°
09001	0N147E	WND98325	1999/1/26	6.6°	—	—
01002	8N156E	WND98315	1998/12/2	2.2°	—	—
02002	5N156E	WND98321	1998/12/2	1.8°	1999/8/18	-8.8°
03002	2N156E	WND98317	1998/12/2	5.3°	—	—
04002	0S156E	WND98318	1998/12/2	2.9°	1999/10/10	6.5°
05001	2S156E	WND98319	1998/12/2	0.7°	2000/5/16	4.0°
06001	5S156E	WND98320	1998/12/2	9.0°	2000/3/29	2.3°
MIRAI	(boom)	WND97327	—	—	1999/10/10	0.5°

(5) 低風速時の影響

風向計の起動風速以下や低風速域では、尾翼部が風向に追随しないため、風向の観測誤差が大きくなる。海上での気象観測は、うねりや波の影響で測器が動揺するため、低風速時では特に測器の動揺の影響を強く受け、観測誤差が増大すると考えられる。観測結果からも、風が弱い時には、ブイと「みらい」の風速および風向がずれる傾向がみられた。

(6) 1時間平均値の作成方法の違いによる影響

ブイと「みらい」では、前述の通り、1時間平均値の作成方法が異なる。ブイの1時間平均値は、平均に用いるサンプル数が12個と少ない。風は絶えず変動しており、風速変動の激しい状況下では、サンプリング方法の違いにより、風速の平均値が異なることが予想される。

そこで、風向と風速に関して、「みらい」の風データ(1分値)を用いて、次の2つの計算方式で1時間平均値をそれぞれ求め、その結果を表10に示す。

1分値60個用いて1時間平均値を求める。

ブイと同様の方式で、直前の1分値2個より10分平均値を作成した後、1時間平均値を求める。

表10より、1時間平均値の作成方法により値が異なり、その残差はかなりばらつきがあることが分かった。しかし、9基のブイとの比較観測期間全体を平均すると、平均値の作

成方法による値の違いが、風速0.1 m/s程度、風向1°程度となった。この結果より、風は時間的変動が大きい気象要素であるが、1時間平均値の作成方法の違いは、1日平均をとると、その影響は十分に小さいことが分かる。

以上の誤差要因から総合的に判断すると、表7、表8に見られるブイと「みらい」の風速の違いは、「みらい」の“真風”の精度や風速の高度補正に適用したバルク法の計算誤差を含み、ブイと「みらい」の距離を10km以内に保ったものの海上風に局地性があることなどの影響を受けていると考えられる。また、風向についても事前検定の結果では説明がつかず、これは、海上風の局地性とあわせ、低風速時の観測誤差が大きいものと考えられる。

3.2. 気温

10m高度に補正したブイと「みらい」の気温および海水温の時系列を図6に示す。海面付近の気温は、海水温と比べ日変化が大きい。

気温の時系列の傾向はよく一致する。ブイ9基と「みらい」との気温差の平均は、補正なし0.2℃、補正後0.1℃となった(表6)。補正後の気温差はセンサーの精度±0.1℃と同程度であり、標準偏差も0.2℃と小さいので、ブイと「みらい」の気温が十分に良く一致することを確認した。

ブイ設置前とブイ回収後に行った気温計の検定結果では、事前・事後検定共に、ブイに搭載した気温計が検定装置のバス温度に対する誤差が±0.1℃以内であることを確認した。この検定結果は、観測期間を通して気温計がその性能を維持したことを示している。

表10 平均方法の異なる風速(a)及び風向(b)の1時間平均値の違い

Table 10 Differences of 1 hour averaged wind speed (a) and direction (b) data between two sampling modes

(a)										
Buoy ID	07001	08001	09001	01002	02002	03002	04002	05001	06001	Total
Location	5N147E	2N147E	0N147E	8N156E	5N156E	2N156E	0S156E	2S156E	5S156E	average
Average	-0.4	0.1	0.0	-0.5	-0.3	0.0	-0.1	0.2	-0.1	-0.1
Standard deviation	1.4	0.5	0.3	1.4	1.8	0.5	1.5	1.5	0.5	1.0
Minimum	0	0	0	0.5	0	0	0	2	0	-
Maximum	-6.2	-1.1	0.8	-6.0	-6.9	1.3	6.2	5.5	1.2	-

(b)										
Buoy ID	07001	08001	09001	01002	02002	03002	04002	05001	06001	Total
Location	5N147E	2N147E	0N147E	8N156E	5N156E	2N156E	0S156E	2S156E	5S156E	average
Average	-9	2	4	0	0	-3	1	8	3	1
Standard deviation	32	8	20	19	37	20	51	51	28	30
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-
Maximum	89	34	71	52	129	-58	217	174	87	-

※ Difference = ' hourly value of 60 data averaged over every minute' - ' hourly value of 12 data averaged over before and after one minute every 10 minute'

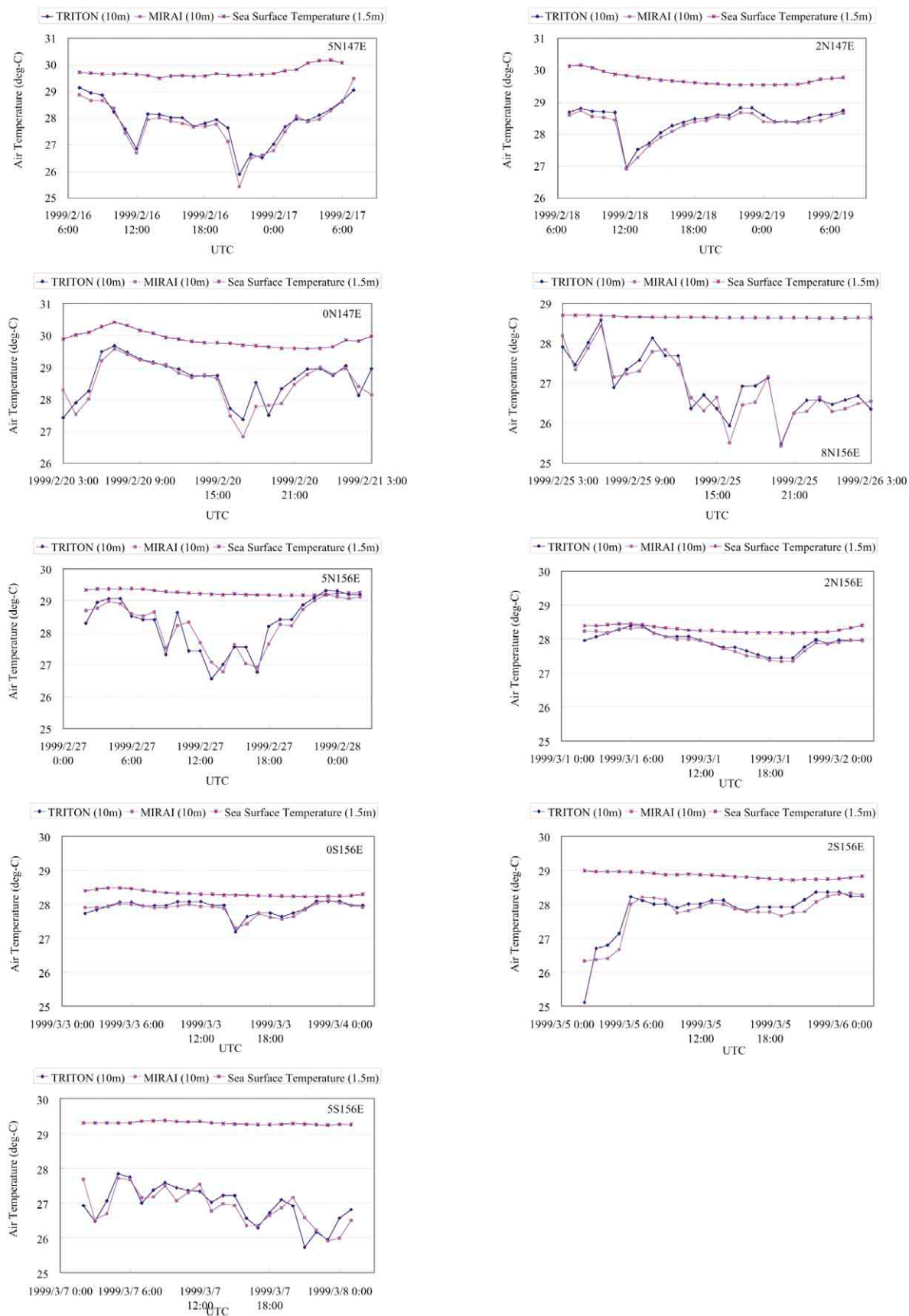


図6 プイと「みらい」の 10m 高度の気温および海水温の時系列

Fig. 6 Time series of air temperature data of TRITON and MIRAI corrected to 10m height and sea surface temperature

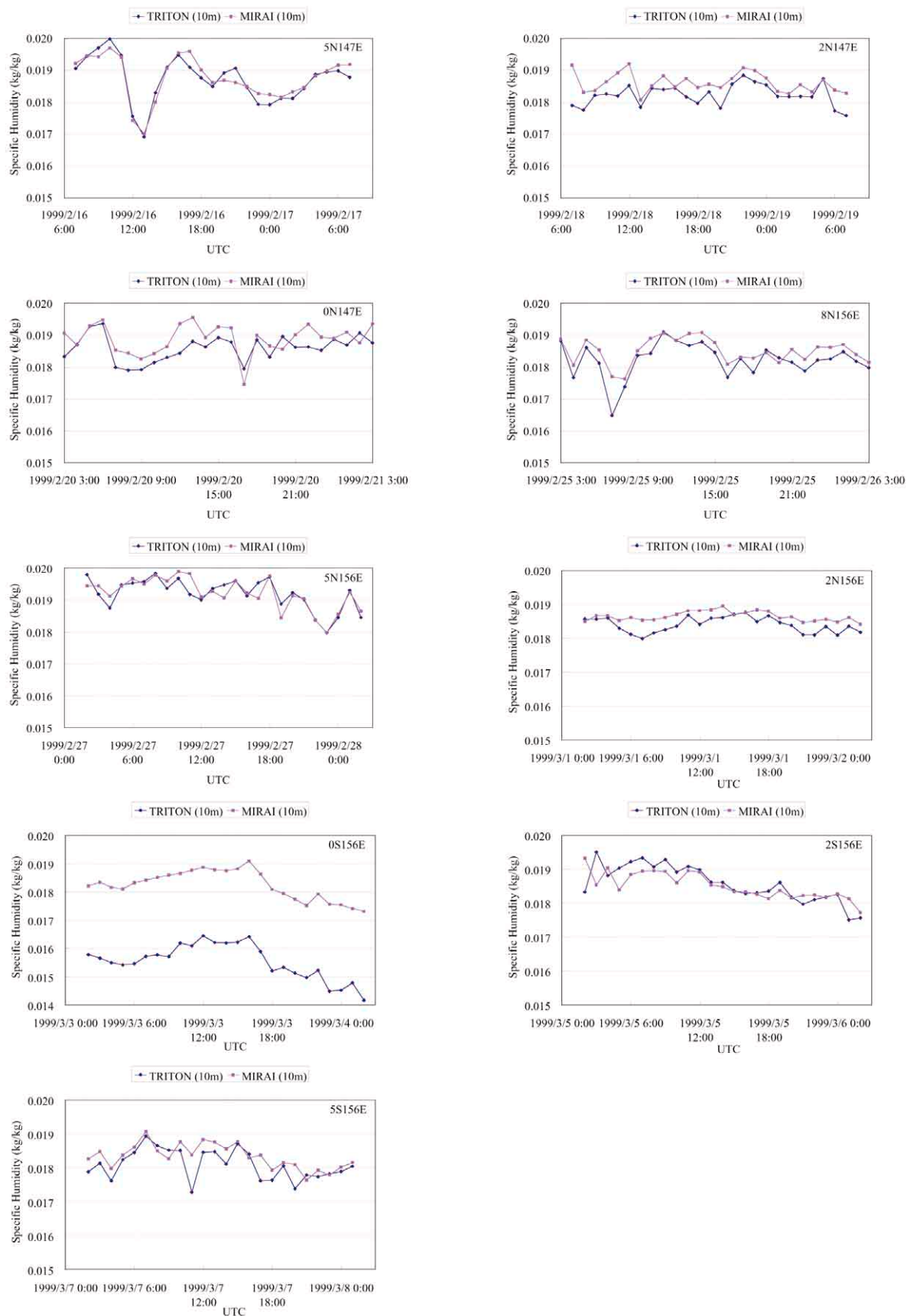


図7 高度補正を行って得られたブイと「みらい」の 10m 高度の比湿の時系列
 Fig. 7 Time series of specific humidity data of TRITON and MIRAI corrected to 10m height

3.3. 湿度（比湿）

ブイと「みらい」とも相対湿度を測定しているが、ここではより定量的な比較を行うため、湿度の代わりに、湿潤空気塊1kgに含まれる水蒸気量を示す比湿を同一高度に補正し比較した。比湿は現場の湿度と気温、気圧等の気象要素から計算した。ブイと「みらい」の10m高度に補正した比湿の時系列を、図7に示す。

OS156Eの結果を除いて、ブイと「みらい」の比湿は傾向がよく一致する(図7)。OS156Eについては両者の観測結果が定性的にずれており、事前事後検定の結果から、ブイに使用した湿度センサーがもともと約-8%Rhだけ基準器とずれていたことが判明した。そこで、約-8%Rhオフセットし修正した結果を、図8に示す。ブイと「みらい」の湿度および比湿はよく一致した。

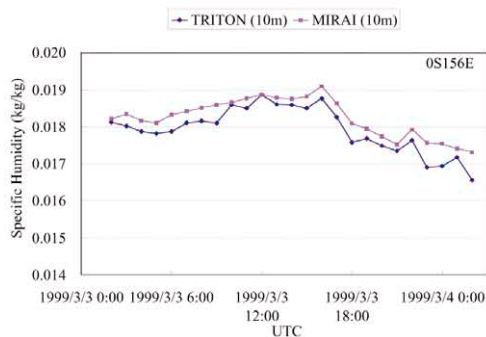


図8 湿度センサーの検定結果から修正した OS156E のブイと「みらい」の 10m 高度の比湿の時系列

Fig. 8 Time series of specific humidity data of TRITON at OS156E and MIRAI. The values were corrected based on postcalibration result.

表6の通り、9基のブイと「みらい」の比湿の残差の平均は、補正なし0.4 g/kg、補正済み0.1 g/kg以下となった。なお、表6では、OS156Eのブイ値はオフセットした修正値を用いた。湿度計のセンサー精度 $\pm 2\%$ から換算した比湿の精度は約0.4 g/kgであることから、両者の高度補正後の比湿は、センサー誤差と同程度で良く一致する。

湿度計の検定においては、ブイに搭載した湿度計は基準器に対し、事前検定では誤差2%RH以下、事後検定では5%RH以下であった。事後検定において、基準器との誤差が大きくなった原因は、観測期間中にブイのセンサー感部の塩化リチウム溶液が塩分で汚れたためによると推察される。

3.4. 大気圧

「みらい」では海面補正済みの海面気圧が得られるが、ブイは現地気圧を示すため、海面更正により海面気圧を求めた。海面更正の方法は、観測地点の気温と湿度を用いて鉛直分布が平均的状态にあると仮定し、観測した現地気圧に観測地点から平均海面までの鉛直気柱の重さを加えて、海面気圧とした。

図9に、ブイと「みらい」の海面気圧の1時間平均値の時系列を示す。

気圧の時系列の傾向は良く一致する。気圧は、1日に2回昇降する特徴的な日変化として、現地時間の3時、15時に極小、9時と21時に極大となることが知られている。この原因は大気潮汐に伴う半日周期の規則的な気圧変化として、赤道付近において特に顕著である。今回の観測結果からも、この気圧の日変化が顕著にみられ、その日較差は最大約4 hPaとなった。

ブイの海面気圧と「みらい」との差は0.4 hPaとなり、「みらい」が若干高い値を示した。この原因として、「みらい」は船体付けの船内に設置された気圧計の器差だと推察される。ブイ設置前とブイ回収後に行った気圧計の検定結果では、ブイに搭載した気圧計は基準器に対して誤差が0.01hPa以内であることを確認した。1年後に回収したブイの気圧計の事後検定結果でも、ブイに使用した気圧計が基準器と良い一致を示すことから、1年間の観測期間を通じて気圧計がその性能を維持していたと考えられる。

4. ブイ回収時の気象観測の比較結果

2000年2月～3月の「みらい」観測航海MR00K02において、6ヶ所のブイ設置地点で新しいブイと入れ替えを行った。MR00K02では、MR99K01で設置したブイ9基のうち4基を回収した。この4基がトライトンブイで初めて一年間の長期観測を終えたことになる。

ブイの気象データを評価するため、これまで同様の海上気象観測をブイの設置直後と回収前に行なった。航海スケジュールに余裕がなかったため、各ブイにつき気象観測の時間を原則3時間とし、船首を風上に向けて、ブイと「みらい」の距離を1 km以内に保ちながら気象観測を行った。

1年間の観測を行った4基のブイのうち1基は通信不良のため観測データを得ることができなかった。3基のブイと「みらい」との気象観測の比較結果を表11にまとめた。表11より、風速は高度補正をしない方が良く一致し、風向は3基のブイとも 12° 以上、「みらい」の風向と比べ大きくずれた。このずれの大きさは、事後検定の結果で説明がつかず、時間の制約によりサンプリングが適当でなかった可能性がある。気温は $\pm 2^\circ$ 以内で良く一致するが、湿度は最大5%程度ずれていた。大気圧は、両者の値の差は、0.1hPa以下であった。

1年間の係留後のセンサー評価については、事前事後検定のデータ数を増やし今後も検討を続ける必要がある。

5. まとめ

ブイと「みらい」の気象観測結果に関して、定量的な相互比較を行った。

その結果、代表性の高い気象要素である気温、湿度（比湿）、気圧については、ブイと「みらい」の高度補正値の差がセンサー公称精度の2倍程度以内となることを確認した。風に関しては、本船のドリフト速度を考慮した詳細な解析を行った結果、ブイと「みらい」の風速差はセンサー公称精

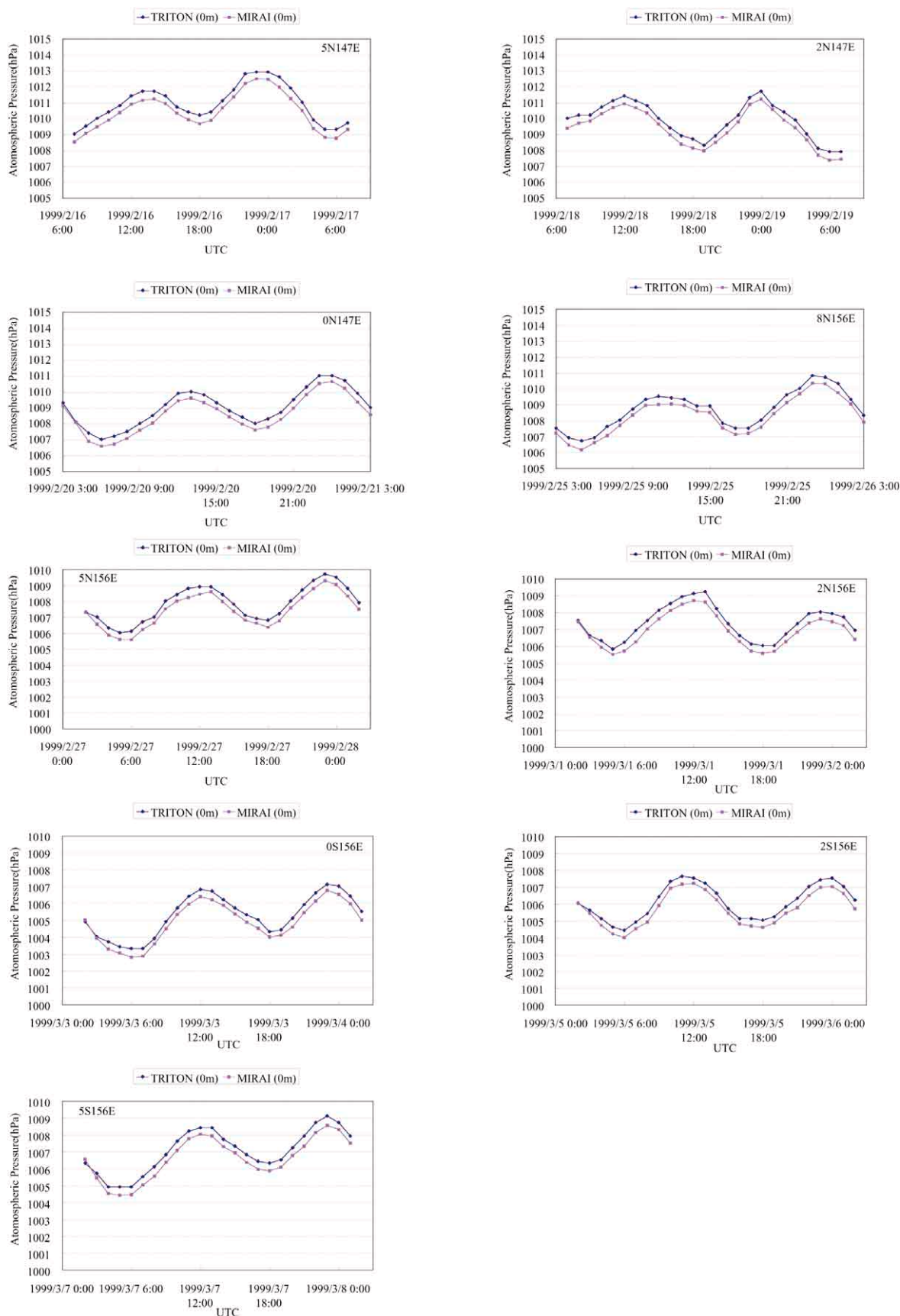


図9 プイと「みらい」の海面気圧の時系列

Fig. 9 Time series of sea level pressure data of TRITON and MIRAI

表11 1年後のブイ回収時に行った気象観測のトライトンブイ値と「みらい」値との差の平均

Table 11 Differences between TRITON and MIRAI meteorological data before buoy recovery operation which moored one year

Location	Wind speed (m/s)		Wind direction (deg)		Air temperature (deg-C)		Relative humidity (%)		Specific humidity (kg/kg)		Atmospheric pressure (hPa)	
	raw	corrected	relative	true	raw	corrected	raw	corrected	raw	corrected	raw	sea level
5N156E	0.1	1.0	23.3	23.1	0.4	0.2	-0.3	-2.4	0.0004	-0.0003	0.2	0.0
2S156E	-0.3	0.0	40.5	39.3	0.1	0.1	0.5	-1.0	0.0003	-0.0002	0.2	0.0
5S156E	0.0	0.6	13.3	14.0	0.2	0.1	-2.2	-5.1	-0.0003	-0.0012	0.2	0.0

※ Difference = TRITON - MIRAI

度の2倍以内であるが、風向については、ブイにより両者の風向差のばらつきが大きかった。

比較観測の結果および事前検定の結果から、ブイに搭載した風向計に個体差が大きいことが判明した。そのため、風向の検定を目的に、新たに屋外に検定設備を整備し、検定時における調整方法およびメンテナンス方法などを改善することにした。

謝辞

海上気象観測およびデータ解析を実施するにあたり、「みらい」赤嶺船長をはじめ乗組員の方々、(株)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から、操船や観測機器の設置回収、関連データ提供など多岐に渡りご協力頂きましたことを、ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 川原幹雄, 中村亘, 牛島憲文, 曾野和彦, 安藤健太郎, 黒田芳史, “トライトンブイと「みらい」での海上気象観測の相互比較結果”, 海洋科学技術センター試験報告書, 第40号, p125-135. (2000)
- 2) Tropical Ocean Climate Study, "R/V Mirai Cruise Report MR99-K01", JAMSTEC, Kanagawa (1999)
- 3) Tropical Ocean Climate Study, "R/V Mirai Cruise Report MR00-02", JAMSTEC, Kanagawa (2000)
- 4) 近藤純正編著: “地表面付近の風と乱流” p93-127. In: 水環境の気象学, 朝倉書店, 350pp. (1994)
- 5) Nobuhisa Yasuda: Modification of Kondo's Formulas on the Bulk Transfer Coefficients of Turbulent Fluxes over the Ocean. Tohoku Geophys.Journ.Vol.28, Nos 3-4, pp. 131-142.(1981)
- 6) 気象庁編, “観測結果の品質管理” p69-74. In: 気象観測の手引き, (財)気象業務支援センター, 84pp. (1998)
- 7) 横田良夫・増田良一: “風向風速計”, p37-52. In: 気象研究ノート第185, 日本気象学会, 155pp. (1996)
- 8) 竹内清秀・近藤純正, “接地層の構造” p1-41. In: 大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226pp. (1981)

(原稿受理: 2001年1月15日)