

概要

ラジオゾンデ観測は大気鉛直構造を調べるもっとも基本的な観測方法の1つである。観測は気圧、温度、相対湿度および風向・風速を計測するセンサーが装備された筐体をヘリウムガスを充填した気球に取り付けて放球する。センサーは上昇しながら計測し、データを船上の受信局に送信する。広く一般に行われている観測であるが、近年になって特に湿度センサーに誤差が大きいことが明らかにされた。また、船舶による海上気象観測においてはしばしば船体自身の影響がでてデータ精度を劣化させるおそれがあるので注意が必要である。本稿では海洋地球研究船「みらい」における高精度データ取得のための取り組みを紹介し、併せて海面付近のデータ補正方法についても記述する。

1. はじめに

ラジオゾンデを用いた大気観測は大気の研究や気象予報を行う上で不可欠な要素の1つである。1992年11月から1993年2月までの4ヶ月間、西部熱帯太平洋海域において実施された国際集中観測TOGA COARE (Tropical Ocean Global Atmosphere / Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) ¹⁾においてもラジオゾンデ観測は中心観測手段の1つとして多数実施された。TOGA COARE観測は同海域に関するさまざまな新しい知見を提供したが²⁾、その一方で特にフィンランド・ヴァイサラ社製のラジオゾンデのデータに著しいドライバイアス(湿度を実際より低く見積もる特性)があることも明らかになった³⁾。ヴァイサラ社のラジオゾンデは世界中で使われているがこのドライバイアス問題はTOGA COAREのデータセットに限らず現行の観測データにも認められることがわかり、解析結果に重大な影響を与える深刻な問題として認識されている⁴⁾。

「みらい」におけるラジオゾンデ観測システムもヴァイサラ社製を採用している。本システムはa.センサー(RS80-15GもしくはRS80-15GH)、b.受信機及び信号処理装置(DigiCORA MW11)、c.20ftコンテナに収納される放球装置により構成されている。表1にセンサーの基本仕様を記す。通常、ラジオゾンデはヘリウムを充填した気球に取り付けられて放球され、上昇速度約3.5m/secで平均到達高度22km付近まで観測を行う。生データは2秒毎に記録される。なお取得されたデータは研究目的以外にも観測終了直後、気象庁経由を通じて全世界の気象機関にGTS (Global Telecommunication System) 配信され、現業用データとしても利用されている。

暖水プールの存在する西部熱帯太平洋海域上空に発達する降水システムのメカニズム解明に焦点を当てた大気海洋相互作用の観測研究は「みらい」を用いた主要研究課題の1つになっている。同海域での観測では日変化の特徴を捉えることも視野に入れ、3時間毎の連続観測がしばしば実施されている。さらにこの航海ではTOGA COAREで指摘されたデータ誤差を取り除き、精度良いデータを取得するための取り組みが行われている。本稿では、2節でラジオゾンデ観測における諸問題を述べ、3節において「みらい」における観測方法を紹介し、4節では精度良い観測のための提言を、それぞれ記す。

Pressure Sensor type: Measuring range: Accuracy (repeatability):	Capacitive aneroid 1060 to 3 hPa 0.5 hPa
Temperature Sensor type: Measuring range: Accuracy (repeatability):	Capacitive bead + 60 to - 90C 0.2C
Humidity Sensor type: Measuring range: Accuracy (repeatability):	Thin film capacitor 0 to 100 % RH 2 % RH
Wind speed/direction Wind detection: Accuracy:	Measuring Doppler shift of GPS carrier 0.5 m/s RMS

表1 Vaisala RS80 GPS ラジオゾンデ仕様

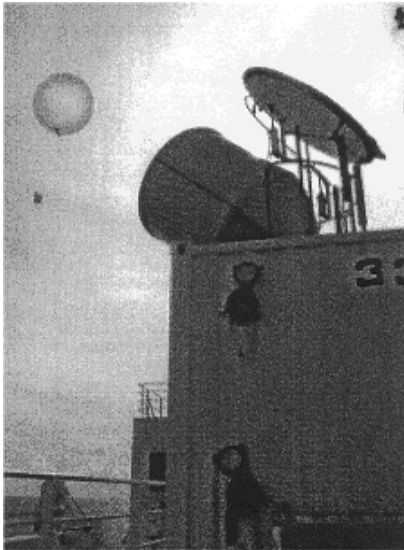


図1 みらい船上におけるラジオゾンデ放球

2. ラジオゾンデ観測における諸問題

2.1 センサーアーム過熱

TOGA COAREの湿度データセットにエラーが報告された当初、その原因はセンサーアームの過熱と空調の効いたコンテナからの放球の2つが考えられた。前者は、放球前にセンサーが長時間強い太陽放射下に置かれることにより、センサーが暖まり相対湿度（の分母にあたる気温が高くなるので）が低い値を示す。一方、いくつかの観測サイトでは空調設備のあるコンテナが放球装置として使用されたが、この場合、湿度の低い室内で長期保存、放球準備が行われ、熱帯の高温・多湿な環境と異なる条件での作業となる。この影響が放球後数秒間に残り、エラーとなる。ただし、この2種類の誤差要因に関しては第1期データセット公開時に既に認識され、修正して公開された⁵⁾。この事実は高層気象観測に対して放球サイトの環境が影響を与えてしまうことを研究者に教えることになった。

2.2 ドライバイアス問題

前述の問題点が補正されていたにも関わらず、湿度データには依然低いバイアスがあることが指摘され、しかもこの現象はヴァイサラ社製ラジオゾンデに顕著で、かつ通常業務として世界的に取得されているデータについても言える深刻な問題であるとわかった⁶⁾。その後の詳細な調査により、静電容量式湿度センサーの中の絶縁体として用いられているポリマーの化学汚染が主原因であることが判明した。この汚染は包装材やラジオゾンデ筐体の中に使用されているプラスチックやスチロフォームなどに由来していた。このためセンサー劣化の程度は古いほど酷く、センサー年齢（製造日からの日数）に依存することもわかった。このバイアスは1年以上経過したセンサーでは80%の相対湿度値において8~10%の誤差にも達する。このためこのようなセンサーの観測では湿った雲の中を通過しても95%を超えないなどの症状で確認することもできる。Guichardら⁴⁾はこのドライバイアスが熱力学及び放射特性に与える影響が極めて大きいことを指摘した。例えば、観測船Moana Waveにより得られたTOGA COAREデータを用いた有効対流位置エネルギー（一般にCAPEと呼ばれる値）の計算結果は、補正前が500~800 J/kgであるのに対し、補正後は1000~1500 J/kgにもなると算出している。

このドライバイアス除去については、現在までにいくつかの手法が提案されている。Cole and Miller⁶⁾はセンサー年齢と放球前の検定結果を用いたアルゴリズムを開発した。一方、Lucas and Zipser⁷⁾はTOGA COAREデータについて異なる手法を開発した。それによると、放球直後から700hPaまでのデータには一定の比湿値を加え、その後500hPaで加算値が0になるように線形で減らしていく。この一定値は観測サイト毎に固有の値をとる。その値はゾンデにより求められる境界層の比湿と独立に計測された地表面のデータを比較して決定される。これらの補正により良好な結果が得られていることが認識されており、同時に最近のセンサーは改良が加えられている。しかしながら、1年以上経過するような古いセンサーには依然ドライバイアスが残っていると考えられる。図2aおよび2bは西部熱帯太平洋において実施されたMR99-K06航海時に取得されたラジオゾンデ観測のセンサー年齢と放球前の湿度の検定結果である⁸⁾。古いセンサーは検定基準より乾燥した傾向を示し、劣化していることがわかる。

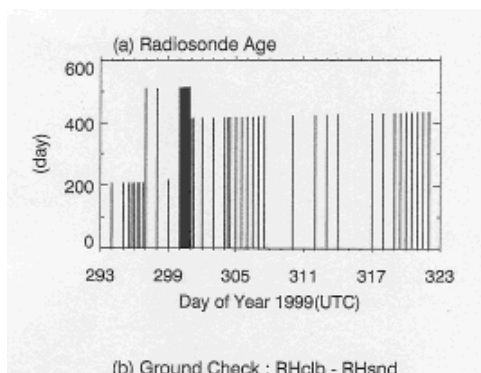
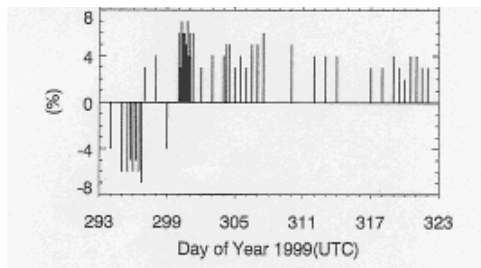


図2 (a) センサー年齢 および (b) 相対湿度の放球前キャリブレーション値 (MR99-K06)。図(b) の値は、キャリブレーション相対湿度基準（70%）に合わせるために与えたオフセット値を示す。製造後1年以上経過したゾンデは基準より低い相対湿度を示す。



2.3 船体影響

前小節までに記述されたことはラジオゾンデ観測において知られた問題であるが、それに加え、「みらい」船上での観測には他にも考慮すべき固有の問題がある。それは「みらい」の船体が大きく、かつラジオゾンデ放球コンテナは船体中央部の鉄甲板上に置かれているため（図3）、船体過熱や気流の乱れなどの影響が現われることである。図4a及び4bはMR99-K03⁹⁾の航海中の1999年6月23日の現地時間00:00（図4a）と12:00（図4b）に東経165度の赤道上で計測された気温と湿度をそれぞれ示す。この観測時期は赤道季節内振動の対流抑制期に相当し、風も弱かった¹⁰⁾。船体影響を受け気温が日中（夜間）に高く（低く）なっていることが明瞭に認められる。このことは当然相対湿度の結果にも影響を及ぼす。つまり、センサーが正確に計測をしても大気場そのものが乱されているために純粋な海洋上の値を計測することができない結果になっている。この影響の及ぶ範囲は風速、気温、センサーの応答時間、サンプリング間隔などに依存するので、これらを補正する必要が生じる。

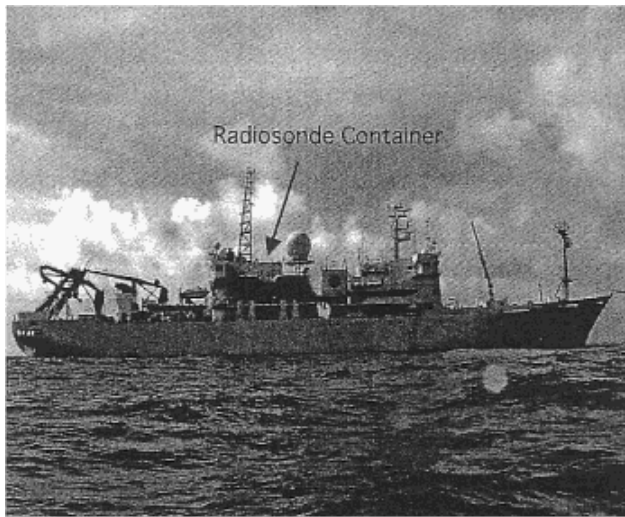


図3 海洋地球調査船「みらい」に搭載されたラジオゾンデ放球コンテナの位置

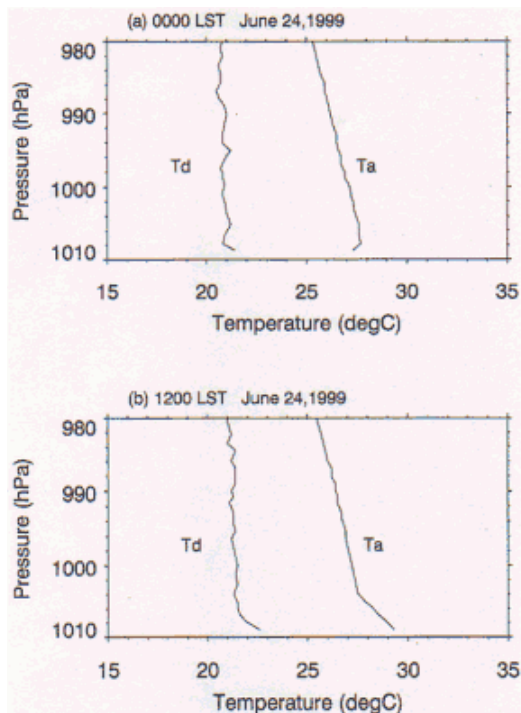


図4 1999年6月24日、(Eq,165E)における気温および露点温度。(a)現地時間 0時0分、(b)現地時間 12時0分。

3. 「みらい」におけるラジオゾンデ観測方法

前節に記述された気温及び相対湿度の誤差を可能な限り除去するため、「みらい」船上での観測では十分な注意が払われている。本節ではその手順・方法について記述する。

3.1 放球前手順

ラジオゾンデ放球コンテナ内は放球区画とデータ処理区画の2つに仕切られている。データ処理部は低湿で稼働させるのがよい反面、放球区画は放球前にラジオゾンデを周囲の環境場に十分馴染ませる必要がある。このためコンテナの放球区画部にだけ10個の通風孔を設け、コンテナ内部には扇風機が取り付けられている。ドアで仕切られたデータ処理区画には空調が装備されている。通常、放球20分前に空調を停止させ、同時に放球区画の窓を開けて換気を行っている。

ドライバイアスを除去するもっとも簡単な方法はできるだけ製造から間もないセンサーを使用することである。「みらい」観測においては、MR99-K06のような例外もあるが、原則製造後1年以上経過したラジオゾンデは使用しない方針をとっている。また雨天放球時には相対湿度が95%以上になることを適宜確認している。さらには、放球前のセンサー検定の際にヴァイサラ社の標準検定キットではなく、Digilog Instruments社製の湿度検定器（Vaporpak H-31）を用いている。前者はシリカゲルが詰められた容器の中にセンサーを入れ相対湿度0%を仮定して行うのに対して、後者は任意の相対湿度を1%の精度で設定して検定することが可能である。ラジオゾンデセンサーは品質保持のため乾燥剤とともに密閉包装され、使用時までほぼ0%に近い状態で保存されている。さらにドライバイアスは高湿度の時に顕著になる現象のため、0%での湿度検定ではドライバイアスの検出は困難である。このため放球前検定は高湿度側で実施すべきであり、「みらい」では通常熱帯環境を考慮し70%に検定器をセットして比較検定を実施している。この検定器そのものも年1度メーカーによる検定を実施して精度維持を図っている。

すべての放球準備が整った最終段階において、さらにポータブル温湿度計を用いてラジオゾンデセンサーの表示値が環境場に近いことを確認している。

なお、「みらい」には強力な電波を出すドップラーレーダーが放球コンテナのすぐ近くに位置しているため（図3）、放球時にはレーダーの運転を一時停止し、電波障害が起きないようにしている。

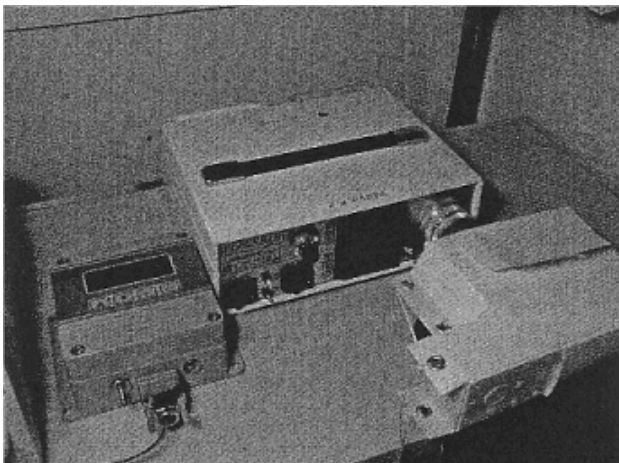


図5 基準圧力計(左)および相対湿度基準器（中央）を用いた放球前キャリブレーションの様子。

3.2 船体付近のデータ補正

図4に見られたように、ラジオゾンデ観測をどれだけ注意深く実施しても、船体そのものの過熱と冷却による影響が大気に影響を及ぼしているため、その分の補正が必要である。図4を見る限り船体影響は船の甲板から約30m程度の範囲と見積られる。このことを確かめるためMR99-K03及びMR01-K05¹¹⁾ 航海中に係留ゾンデを用いて甲板から150mの高さまで飛揚させ船体上空の気温・湿度を調べた。その結果は図6に示され、その時の海上気象の様子が表2にまとめられている。日中（夜間）に船体表面の気温が高く（低く）、相対湿度は低い（高い）ことが明瞭に認められる。船体影響であることを確認するために、さらにMR01-K05航海中に作業艇を用いて「みらい」の風上側およそ150mの位置にて同様の係留ゾンデを日中のみ行い、その結果（図7）から船上での観測データが影響を受けていることが確認された。図6と図7の比較で導き出される重要な結果は、船体影響の範囲は甲板上空40m以内であり、それより上空はほとんど影響を受けていないため、そこでの値を利用して補正が可能と判断されることである。

もっとも簡単な方法はラジオゾンデとは別に独立して取得された海上気象データと上空40mの値とを用いて内挿することである。しかしながら、両舷のデッキから3mの高さの位置についている温湿度計でも、相対風が弱かったり、むしろ艦側から風を受けた場合には値の信頼度が劣化することは避けられない。そこで、図6と図7の比較結果から、船体影響はせいぜい上空40mまでに制限されており、気温減率の線形性は実際の海面の値の第一近似とみなせると判断し、簡単な補正方法を導出する。つまり、甲板上から6hPa（高度で約50m、データ数にすると5-8個分）低い高度までの気温・湿度の値をそれより上空の14hPa分（高度で50～150m、データ数は15-20個ほど）のデータを用いて線形外挿により算出する方法である。

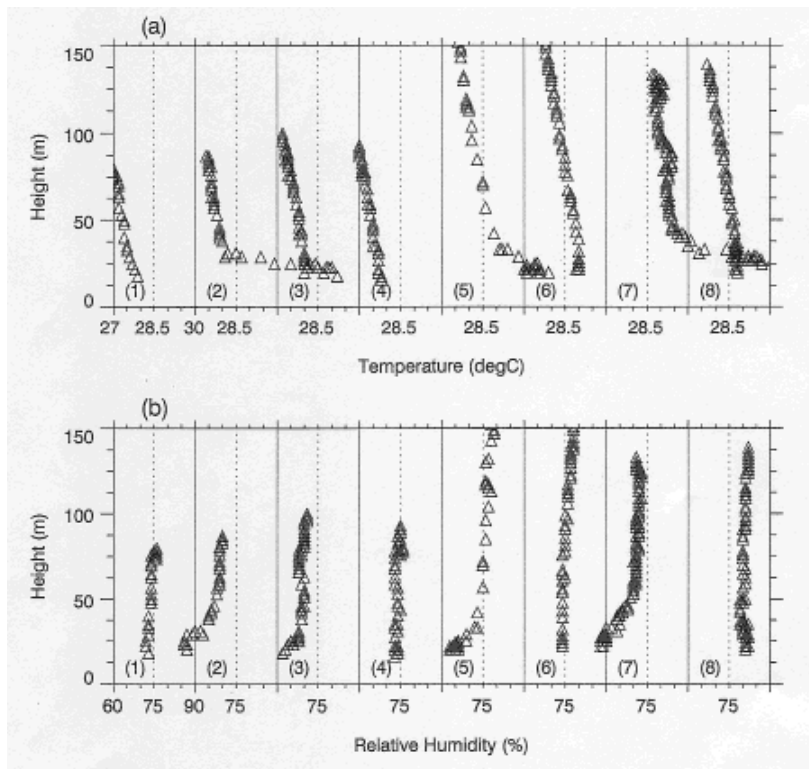


図6. 係留気球により観測された気温(a)および相対湿度(b)。観測日時は表2参照。

No.	Time (LST)	Position	Relative wind
1	Jun.25, 1999 10:45-11:05	0.01S, 165.00E	132 deg 3.2 m/s
2	Jun.25, 1999 13:46-14:04	0.02S, 165.00E	148 deg 2.8 m/s
3	Jun.25, 1999 16:45-16:53	0.02S, 165.01E	119 deg 2.8 m/s
4	Jun.25, 1999 19:41-19:48	0.01S, 165.00E	188 deg 3.1 m/s
5	Nov.13, 2001 16:50-17:03	1.78N, 138.07E	9 deg 4.0 m/s
6	Nov.14, 2001 22:54-23:08	1.92N, 137.98E	349 deg 2.5 m/s
7	Nov.26, 2001 13:52-14:07	1.90N, 138.10E	308 deg 2.3 m/s
8	Nov.26, 2001 22:50-23:04	1.93N, 138.06E	323 deg 3.3 m/s

表2 係留気球観測日時

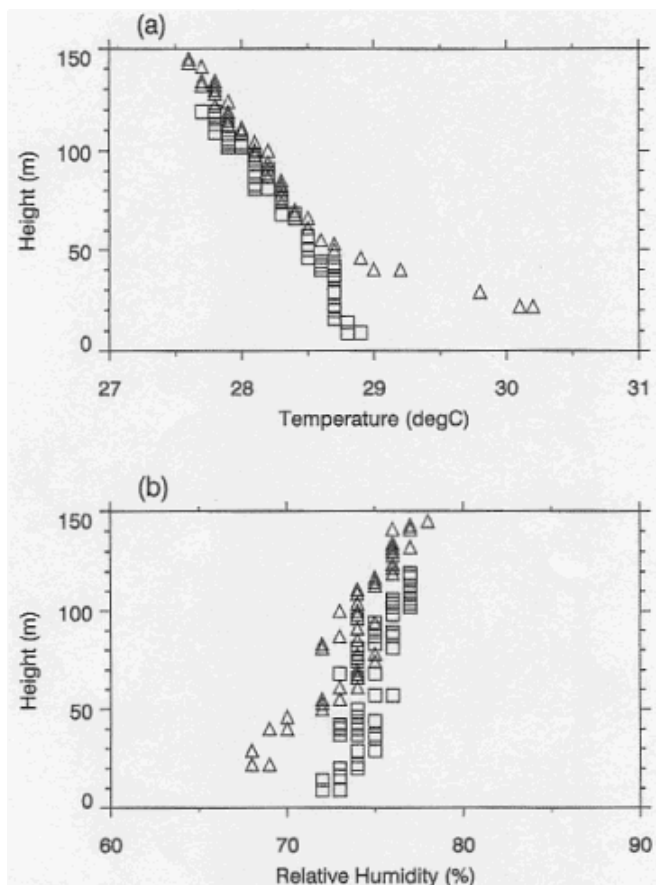


図7 みらい甲板係留気球観測とボート係留気球観測により得られた気温(a)および相対湿度(b)の比較。観測は 2001年12月1日に(2N,138E)において実施された。三角がみらい甲板係留気球観測結果(現地時間 13時30分)、四角がボート係留気球観測結果(現地時間 14時00分)を表す。

この仮定及び算出方法を用いて補正を行った例を図7に示す。この例では外挿により求められた気温と相対湿度が別に観測によって求められた気温・湿度とそれぞれ0.0℃、-1%の差であることがわかる。同じ処理をMR01-K05航海の241サンプルデータに対して適用した結果、気温・相対湿度がそれぞれ $0.14 \pm 0.36^\circ\text{C}$ 、 $0.09 \pm 3.56\%$ となり、十分再現していることが確認された。図8に例として1999年6月23日の1日分のデータに対して適用した結果を示す。図中、生データは細い実線で、補正後の値を太い実線で示している。生データを見る限り、日中は過熱側に夜間は冷却側にシフトしている様子がみられ、補正により船体影響が除去されていることが確認できる。

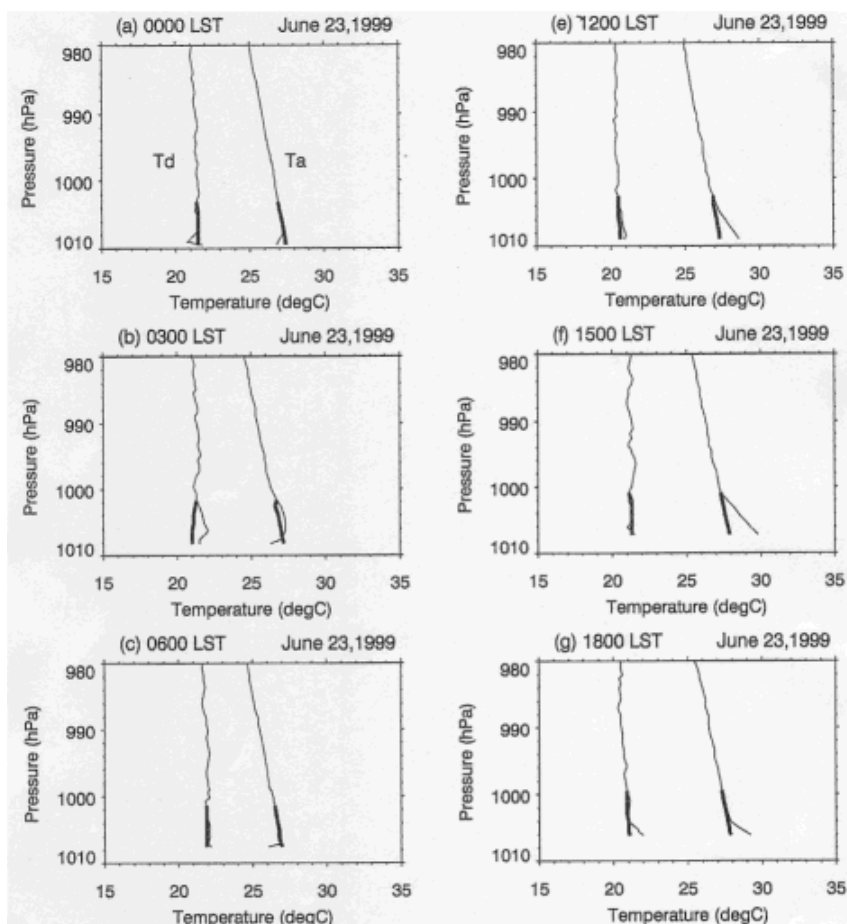
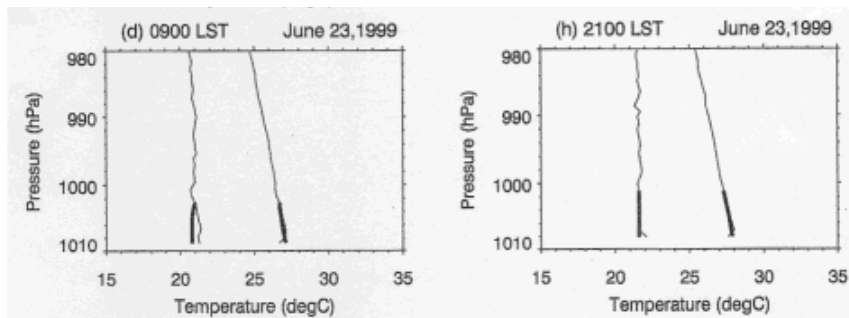


図8 気温および露点温度における船体影響補正結果。補正前(raw)を細線、補正後を太線で示す。1999年6月23日、(0,165E)におけるデータを使用した。(a)0時0分、(b)3時0分、(c)6時0分、(d)9時0分、(e)12時0分、(f)15時0分、(g)18時0分、(h)21時0分のデータを示す。



4. おわりに

本稿では、海洋地球研究船「みらい」におけるラジオゾンデ観測について、特に気温と湿度が大きく船体影響を受ける熱帯での観測において、高精度のデータを取得する取り組みについて記述した。精度よいデータ取得のための観測手順として以下のことを推奨する。

まずできる限り新しいラジオゾンデセンサーを使用することである。少なくとも1年以上経過したセンサーは使用すべきではない。次に、ラジオゾンデの保管を徹底し、放球時には外気に馴染ませることが必要である。3つめは、放球前の湿度センサーの検定は0%で行うのではなく、できる限り外気に近い状態で行うことである。これは、放球後の周囲の環境への順応時間が短縮されるだけでなく、ドライバイアスの発見・補正にも役立つ。なお、この検定結果はCole and Miller⁶⁾の補正スキームを適用する場合にも必要である。最後に、もし可能であれば船体表面近くのデータを、例えば係留ゾンデなどの方法によって調べ船体影響についていろいろな環境条件で明らかにすることが望ましい。その結果、補正が必要と判断されれば、海上気象データや船体影響を受けていない上空のデータを用いて補正を行うべきである。なお、「みらい」において取得されるデータはこれらの影響をすべて除去し、さらに5hPa間隔に補間しなおしたデータセットの利用が可能な状況になっている。

本稿では風データの取り扱いについては触れていない。1998年以降風の検出方法がGPS利用になり、改良も加えられているが¹²⁾、欠損率が高く、今後の検討課題となっていることを付記する。

参考文献

1. Webster, P. J., and R. Lukas, "TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment." Bull. Amer. Meteor. Soc., 73, 1377-1416, (1992).
2. Godfrey, I. S., R. A. Houze Jr., R. H. Johnson, R. Lukas, J.-L. Redelsperger, A. Sumi, and R. Weller, "Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE) : An interim report." J. Geophys. Res., 103, 14395-14450, (1998).
3. Zipser, B. J., and R. H. Johnson, "Systematic errors in radiosonde humidities a global problem?" Preprints, 10th Symp. On Meteorological Observations and Instrumentation, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 72-73, (1998).
4. Guichard, F., D. B. Parsons, and B. Miller, "Thermodynamical and radiative impact of the correction of sounding humidity bias in the Tropics. J. Climate, 13, 3611-3624, (2000).
5. Miller, E. R., and A. C. Riddle, "TOGA COARE Integrated Sounding System Data Report-Volume IA Revised Edition, Surface and sounding data." NCAR SSSF Rep., 6Opp. (1994).
6. Cole, H., and E. R. Miller, "Correction and re-calculation of humidity data from TOGA COARE radiosondes and development of humidity correction algorithms for global radiosonde data." Proc. WCRP COARE-98 Conf. WCRP 107, WMO/TD-940. Boulder, CO, 139-141, (1999).
7. Lucas, C., and B. J. Zipser, "Environmental variability during TOGA COARE." J. Atmos. Sci., 57, 2333-2350, (2000).
8. JAMSTEC, MR99-K06 Cruise Report. (1999).
9. JAMSTEC, MR99-K03 Cruise Report. (1999)
10. Yoneyama, K., "On the convective activity during the R/V MIRAI Nauru99 cruise." Sea and Sky. 73, 65-71, (2000).
11. JAMSTEC, MR01-K05 Cruise Report. (2001)
12. Vaisala Upper Air Division, Upper Air News, Ref.L041en (1998)