

「白鳳丸」 EqPOS 航海におけるゾンデ観測の実施

稲飯洋一^{*1,*2}、青木周司^{*1}、本田秀之^{*3}、長谷部文雄^{*4}、植松光夫^{*5}

Operation of sonde observations based at R/V Hakuho Maru in the “EqPOS” cruise

By

Yoichi INAI^{*1,*2}, Shuji AOKI^{*1}, Hideyuki HONDA^{*3}, Fumio HASEBE^{*4} and Mitsuo UEMATSU^{*5}

Abstract

Aerological observations were conducted in the eastern Pacific equatorial region during the period from February 2 to February 7, 2012 using rubber balloons based at R/V Hakuho Maru. The total number of soundings is six. One of the main aim of these soundings was to survey upper-atmospheric meteorological conditions in the same period when stratospheric whole air samplings were conducted using newly developed compact cryogenic air samplers. Another was to investigate stratosphere-troposphere exchange of mass and chemical species, especially, the dehydration processes in the tropical tropopause layer. Vertical profiles up to approximately 29 km for ozone and water vapor mixing ratios and those up to approximately 8 km for carbon dioxide concentration were measured by these soundings.

概要

2012年2月2日から2月7日にかけて、東部太平洋赤道域において海洋研究開発機構（JAMSTEC）学術研究船「白鳳丸」から合計6回のゾンデ観測が実施された。これらは、同じく「白鳳丸」で実施された4回の大気球を用いた小型クライオサンプラーによる成層圏大気採取実験時の高層気象データを取得するために、そして上部対流圏/下部成層圏の物質交換過程、特に熱帯対流圏界面における大気脱水過程について調査する目的で実施された。これらのゾンデ観測により、地表から高度29 km程度までのオゾン、水蒸気鉛直分布、地表から高度8 km程度までの二酸化炭素鉛直分布等が測定された。

1. はじめに

2012年2月2日から2月7日（現地時間）「白鳳丸」船内生活で実際に使用されていた時刻。以降 local time (LT) と表記）にかけて、東部太平洋赤道域において KH 12-1 航海、通称 Equatorial Pacific Ocean and Stratospheric/tropospheric atmosphere study (EqPOS) 航海中の海洋研究開発機構（JAMSTEC）学術研究船「白鳳丸」をプラットフォームとしてゴム気球ゾンデによる高層大気観測を実施した。これらの観測は、同じく「白鳳丸」で実施した小型クライオサンプラー（森本ら、2009）による成層圏大気採取実験と合わせて実施したものである。4回の成層圏大気採取実験により採取された成層圏4高度の大気は実験室に持ち帰った後、種々の大気微量成分濃度や同位体比が精密に測定された。この大気採取が行われた高度は19 km から30 km まで間の4高度域に限られる。本稿にまとめるゾンデによる観測は、これを補完する地表から高度30 km 程度までの連続的なオゾン、水蒸気の鉛直分布と、対流圏における二酸化炭素の鉛直分布を明らかにするために実施した。全ゾンデ観測の放球日時、測定される物理量については、表1にまとめた。以降、2節では、本観測領域における気象場について、3節では、受信系設備の設置とゴム気球放球場所について、4節では、使用された観測機器と観測経過について記述し、そして5節で全体をまとめる。

^{*1} 東北大学大学院理学研究科（Graduate School of Science, Tohoku University）

^{*2} 現在は京大生存圏研究所（Now at Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University）

^{*3} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency）

^{*4} 北海道大学大学院地球環境科学研究院（Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University）

^{*5} 東京大学大気海洋研究所（Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo）

表 1 ゴム気球ゾンデ放球の日時と場所および観測項目。それぞれ、放球時間（世界標準時刻；UT）、放球時間（LT）、放球経度、放球緯度、測定される物理量（T: 気温、RH: 相対湿度、GPS: ジオポテンシャル高度、東西風速、南北風速、気圧、H₂O: 露点・霜点温度、O₃: オゾン分圧、CO₂: 二酸化炭素分圧）、主目的とする観測データの取得の成否（success/false; S/F）を示す。また本リストには記載しないが、大気球で飛揚される小型クライオサンプラーには明星電気 RS-06G GPS ゾンデ（4.1 節参照）が搭載された。

Launch time (UT)	Launch time (LT)	Longitude	Latitude	Sensors	S/F
16:12, Feb. 2, 2012	09:12, Feb. 2, 2012	95.501degW	0.032degN	T, RH, GPS	S
17:56, Feb. 3, 2012	10:56, Feb. 3, 2012	100.035degW	0.005degS	H ₂ O, O ₃ , T, RH, GPS	S
00:30, Feb. 6, 2012	17:30, Feb. 5, 2012	110.009degW	0.016degN	CO ₂ , T, RH, GPS	F
00:14, Feb. 7, 2012	17:14, Feb. 6, 2012	115.000degW	0.000deg	CO ₂ , T, RH, GPS	S
20:37, Feb. 7, 2012	13:37, Feb. 7, 2012	115.021degW	0.023degN	H ₂ O, O ₃ , T, RH, GPS	S
00:29, Feb. 8, 2012	17:29, Feb. 7, 2012	115.010degW	0.022degN	CO ₂ , T, RH, GPS	S

2. 観測期間の気象場

気球観測を実施する場合、気球へのヘリウムガス充填作業や放球作業において気象状態、特に風の影響を強く受ける。そこで最初に「白鳳丸」をプラットフォームとした気球観測が実施された領域における気象場を示す。図 1 は、気球観測が本格的に開始された 2012 年 2 月 3 日における、地表付近（1000 hPa 面）の気温、水平風を示している。データは European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) の ERA-Interim 再解析データを使用している。また同日における対流活動を把握するため、図 2 に衛星観測された外向き赤外放射 (Outgoing Long-wave Radiation: OLR) の水平分布を示す。OLR の値は地表または光学的に厚い雲の雲頂からの赤外放射強度を示しており、小さい値ほど低温であることを示す。対流圏においては基本的に高度に伴い気温が低下するので、より小さな OLR 値を示す領域ほど、より背の高い積乱雲が存在していると判断できる。図 2 によれば、インドネシアからメラネシアそして西経 120 度南緯 30 度付近にかけての南太平洋収束帯 (south Pacific convergence zone: SPCZ) や、南米大陸の南半球部に背の高い積乱雲が発達している事が分かる。「白鳳丸」における気球観測が行われた東部太平洋赤道域上空に注目すると、その北側に熱帯収束帯 (inter-tropical convergence zone: ITCZ) の雲が存在するが西経 90 度から 100 度付近は雲が途切れていることが確認できる。一方、図 1 の水平風に注目すると、特に中部太平洋域で東よりの貿易風が卓越しているが、東部太平洋赤道上においては、ごく弱い南風であったことが示されている。この東部太平洋赤道上における水平風が微弱な状態は「白鳳丸」乗船中にも実際に体感しており気球観測が終了する 2 月 7 日以降まで継続した。このことは、厳しい時間的制約の中、気球放球作業が非常に順調に実施できた大きな要因であった。

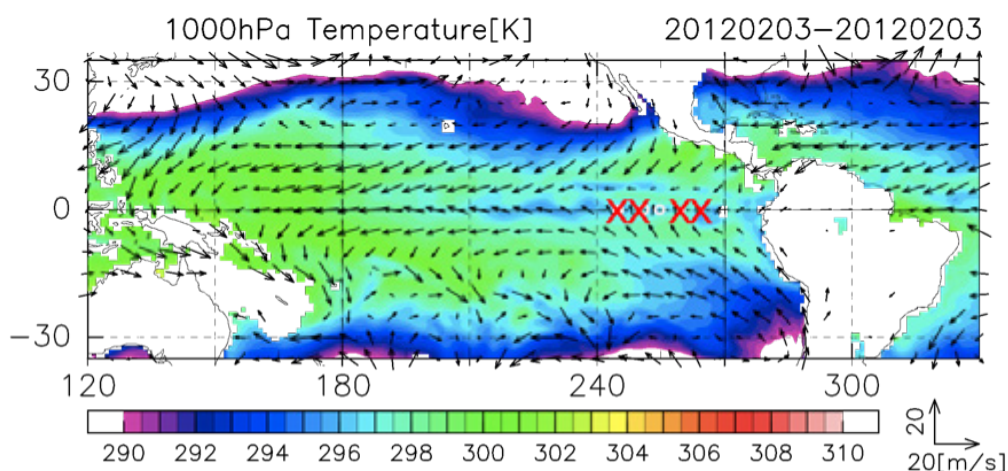


図 1 第 1 回目の水蒸気ゾンデ、オゾンゾンデ、GPS ゾンデによる観測が行われた 2012 年 2 月 3 日の 1000 hPa 面における日平均気温（カラーバー）と水平風（矢）。気象場の作成には ECMWF ERA-Interim 再解析データを使用し、図中赤 x は白鳳丸における全ゴム気球放球地点を示す。

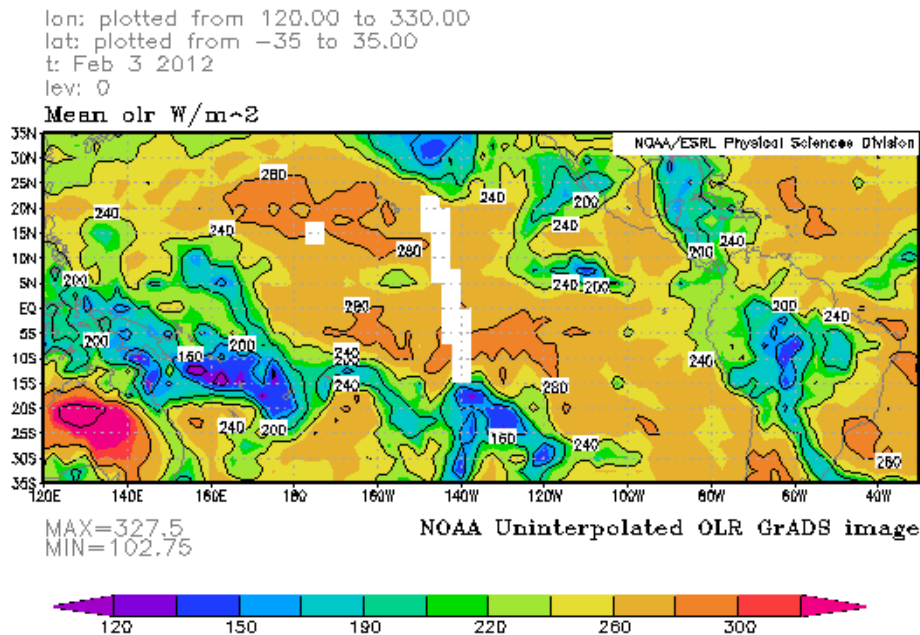


図2 2012年2月3日における外向き赤外放射(OLR)の水平分布。(http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.uninterp_OLR.htmlより取得。)

3. 受信系設備の設置と気球放球場所

気球によるゾンデ観測に先立ち、データ受信のための機材の設置、気球へのヘリウム充填作業と放球を行う場所の選定、および作業手順の段取りが行われた。本節ではこれらについて記述する。

3.1 受信系設備の設置

受信系設備は、アンテナ、プリアンプ、同軸ケーブル、受信機、専用のソフトウェアがインストールされたデータ処理用のPCなどで構成される。本ゾンデ観測においては、明星電気のシステム(明星電気株式会社 RD-08AC 簡易 GPS ゾンデ受信システム)が利用された。使用される周波数帯は400MHzから406MHzである(この範囲内で使用周波数をGPS ゾンデの起動時に設定できる)。受信機とPCは後部甲板より1層上階の3 DECKにある第3研究室の卓上に設置した。そこから船外へ同軸ケーブルを引き、アンテナとプリアンプを「白鳳丸」のメインマストの基部の手摺りに固定した(図3)。



図3 白鳳丸メインマスト基部の手摺りに設置されたブラウンアンテナ。写真では支柱に塩化ビニールパイプを使用しているが、観測開始前に、より高強度で高剛性な木製棒に交換した。

陸上基地におけるゾンデ観測では、より微弱な信号でも受信可能で指向性のある（よって他の電波源からの干渉を軽減できる）八木アンテナが使用されることが多い。しかし、船上における観測では船自体が移動や回頭を行う。このため指向性のあるアンテナでは、頻繁にアンテナの向きを修正する必要がある。その場合、これを適切に行わなければ重大なデータの欠損を招く恐れがある。そこで、本観測においては、これによるデータ欠損の危険性を回避できることと、作業の簡素化を図るため、無指向性のブラウンアンテナを使用することにした。

アンテナで受信した信号はプリアンプにより信号強度を増幅した後、同軸ケーブルで受信機まで伝達される。今回の観測においては、1本のブラウンアンテナからプリアンプを介して受信卓まで1系統の同軸ケーブルを敷きプリアンプ給電ユニットに接続し、そこからT字3股ジャックに短い同軸ケーブルを3本接続したものを取り付け、受信信号を2系統に分岐することにした。分岐された信号はそれぞれ異なる受信機へ入力され、両方の受信機でデータ受信を行った。このように2系統の受信機を用いて観測を行ったのは、互いにバックアップを行うという事に加えて、今回の観測は非常にひっ迫した放球スケジュールになる事が予想されたので、状況によっては周波数をずらした2つのゾンデによる同時観測を可能にするためである。

本来であれば、アンテナから同軸ケーブル、受信機、データ受信PCまで全てにバックアップを準備することが望ましい。また受信機に入力される信号強度の観点からも、独立な2本のアンテナを設置し、それぞれ独立なプリアンプと同軸ケーブルを使用した方が望ましい。しかし今回は、使用可能なアンテナを1本しか準備できなかったこと、アンテナから受信機までの距離が長く、準備していた15mの同軸ケーブル1本では長さが不足したため2系統分2本の同軸ケーブルを連結し長さ30mの1本のケーブルとして使用せざるを得なかったことから、上記のようなケーブル接続となった。

3.2 気球放球場所

全ての観測について、気球へのヘリウム充填作業および放球は「白鳳丸」の後部甲板で行われた。この甲板は木製であり、ささくれて棘状になっている箇所が多数存在していた。そこで気球へのダメージを避けるため、白鳳丸に装備されている畳大のプラスチック製の板を数枚敷き、その上で気球へのヘリウム充填作業を行った。ゴム気球に充填するヘリウムは、小型クライオサンプラー用のプラスチック製大型気球充填のために後部甲板船首側右舷に設置されたヘリウムカードル（図4の左部、銀色の遮光シートが被せられている）の一部から供給した。

前述のとおり本観測は非常にひっ迫したスケジュールで実施されたので、相対風が微弱ではない状況においても放球作業を行わざるを得ない事態も想定された。そのような状況に対応するため、以下のような放球の段取りを考えた。1)「白鳳丸」船尾部の門型フレームを船首側に倒し込む。2) 後部甲板中央船尾付近で放球袋を使用して気球へのヘリウム充填を行う。3) 放球直前に船首が風上に向くように操船する。4) 放球袋を脱がせ船尾から放球する。しかし、2.1節に記述したように幸運にも観測期間全てにわたり地表風が微弱であったため、2月6日の観測以降は門型フレームは船尾側に倒した状態（図4、図5の状態）で、後部甲板上の任意の場所において放球袋を使用せずに気球へのヘリウム充填作業、放球が行われた。



図4 ペルー、カヤオ港出港直後の「白鳳丸」後部甲板の様子。後部甲板船首側から船尾方向を撮影した。右舷側に設置されているのがヘリウムカードルであり、日射による昇温を軽減するため銀色の遮光シートが掛けられている。船尾の門型フレームは船尾方向に倒されている。



図 5 気球観測の行われた KH12-1 航海を終え、KH12-2 航海に向けホノルルから東京に向け出港する白鳳丸。荒天に備えるためヘリウムカードルは後部甲板船首側中央部に移動されている。

4. 使用した観測器と観測経過

ゾンデ観測に使用した測器は、明星電気 RS-06G GPS ゾンデ、Cryogenic Frostpoint Hygrometer (CFH) 水蒸気ゾンデ (Voemel et al., 2007)、Electrochemical Concentration Cells (ECC) オゾンゾンデ、明星電気・名古屋大学共同開発の二酸化炭素 (CO_2) ゾンデ (明星電気株式会社 MCD-10 CO_2 Sonde) の 4 種類である。これらは、観測の目的に応じて以下の小節に記すの 3 つの構成で飛揚された。それぞれの目的や観測経過の詳細について記述する。

4.1 GPS ゾンデによる観測

放球日時：2 月 2 日 9 時 12 分 (LT)

使用気球：TOTEX TA300

ヘリウム充填量：約 $1.3 \text{ m}^3/47 \text{ L}$ シリンダー 1 本 1 次圧 2.7 MPa 分

GPS ゾンデは今日一般に高層気象観測に用いられている基本的な測器であり、地表から高度 30 km 程度までの気温、気圧、水平風速と主に対流圏における相対湿度を測定する。本観測で使用された明星電気 RS-06G GPS ゾンデの重さは約 150 g である。また以下に挙げる全ての構成にこの測器が含まれている。その理由は「白鳳丸」で実施されたゾンデ観測のすべてが、この測器を介してデータの送信を行っていることによる。このゾンデは電波を発するためラジオゾンデとも呼ばれる。この GPS ゾンデ単体による観測は、本観測において以下の目的を持って実施された。

- 1) 設置した受信系設備で問題なくデータ受信可能かを他の特殊な測器を用いた観測を開始する前にチェックする。
- 2) 使用するゴム気球はヘリウム充填完了時で直径 1 m 程度と比較的小さなものであるため、ヘリウム充填および放球作業が簡単である。そこでまずは放球手順の確認を行いながら作業を行い、同時に気球放球作業を補助してもらう予定のメンバーにゴム気球観測についてのレクチャーを行う。
- 3) ゾンデ観測と同期間に行われる小型クライオサンプラーによる成層圏大気採取実験は、サンプラーを回収する事が必須である。このため、事前にサンプラーの航跡予測を行い、サンプラーが回収可能な地点に着水するかどうかを確認する必要がある。今回の「白鳳丸」実験において、航跡予測は気象庁予報部数値予報課提供の全球モデルデータ (水平解像度 20 km) および米国環境予測センター (NCEP) から無償ダウンロードすることのできる Global Forecast System (GFS) データ (水平解像度 0.5 度) を用いて宇宙科学研究所大気球実験室の支援により実施される。この気球航跡予測は中高緯度においては十分な実績があるが、赤道域における実験は今回が初めてであり、赤道域においても十分な精度で予測できるかどうか確認する必要がある。そのため、予測航跡と GPS ゾンデの実際の航跡とを比較して、サンプラー回収に必要な航跡予測精度を発揮できるかどうかを確認する。

上記のような目的のため、本観測においては、本来は行うべきである放球前の測器のグランドチェック（主として湿度センサーの精度の確認を行う）は、オペレーション簡素化のため行っていない。飛揚後、データの受信は順調に行われ高度約 22 km までの気温、ジオポテンシャル高度、気圧、東西風、南北風、相対湿度を観測する事ができた。同時に GPS による位置情報も得られ、航跡予測が赤道域においても十分高い精度を保つ事が確認された（図 6）。

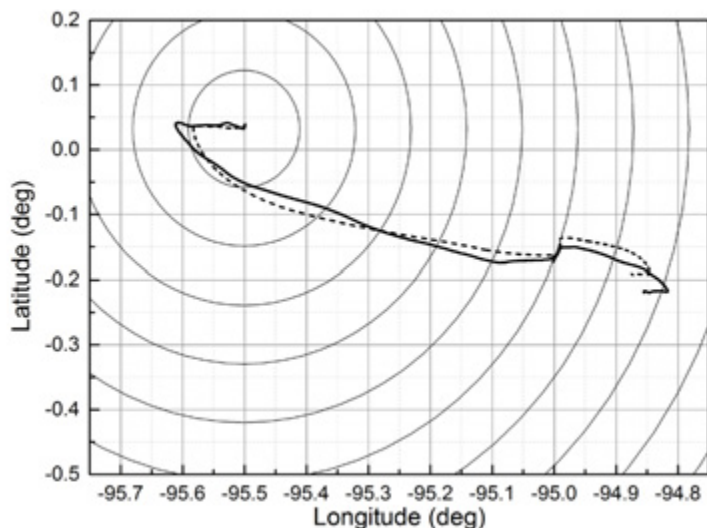


図 6 航跡予測（破線）と実際のゾンデ航跡（実線）の比較。航跡予測には NCEP による放球前日 2 月 1 日 6 時（UT）の解析値を初期値として計算された 2 月 2 日 18 時（UT）における予測値を使用。同心円は 10 km 間隔で放球地点が中心である。

4.2 CFH 水蒸気ゾンデ+ ECC オゾンゾンデ+ GPS ゾンデによる観測

放球日時：2 月 3 日 10 時 56 分（1 回目）、2 月 7 日 13 時 37 分（2 回目）（LT）

使用気球：TOTEX TA1200

ヘリウムガス充填量：約 $5.6 \text{ m}^3/47 \text{ L}$ シリンダー 1 本 1 次圧 12 MPa 分（1 回目）、および約 $5.2 \text{ m}^3/$ 同 11 MPa 分（2 回目）。

2 回実施されたこの構成による観測は、熱帯域における水蒸気・オゾン同時観測を継続している Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region（SOWER：Fujiwara et al., 2010, Hasebe et al., 2013, Inai et al, 2013）プロジェクトの一環として実施された。一般に水蒸気は対流圏で多く成層圏では微量であり、オゾンは対流圏より成層圏に多量に存在する。この両者を観測する事で、対流圏-成層圏間の物質輸送・混合過程を明らかにする手掛かりとなる。

CFH 水蒸気ゾンデは、コロラド大学、アメリカ海洋大気局（NOAA）により、成層圏における水蒸気量を測定するために開発された鏡面冷却型水蒸気センサーである。この測器は、地表から成層圏までの全ての高度域について露点あるいは霜点温度を高い精度で測定することが可能である。測定原理を以下に記述する。1) 冷媒により鏡面を冷却しその鏡面に露/霜を付着させる。2) 鏡面に生じた露/霜の量は鏡面に反射させた光の反射強度によりモニターされる。3) デジタルコントローラー制御のヒーターにより、鏡面の露/霜の量が一定に保たれるように鏡面の温度が調節される。つまり鏡面の温度は気相-液相/気相-固相の相平衡温度、すなわち露点/霜点温度に保たれる。4) 露点/霜点温度は大気の水蒸気分圧に依存するため、経験的換算式（例えば Goff and Gratch, 1946; List, 1984）により大気中の水蒸気量が算出される。測定精度については、 $\pm 0.5 \text{ K}$ 程度で、水蒸気混合比に換算すると、水蒸気が最も少なく相対的に誤差の大きくなる高度 17 km 付近において約 9% である（Voemel et al, 2007）。

ECC オゾンゾンデは、濃度の異なるヨウ化カリウム水溶液の入った 2 つの化学セルと、大気を吸引し一方のセル内に外気を導入するためのポンプで構成される。これらは保温のため発泡スチロール製の筐体に収められている。吸引された大気中に含まれるオゾン分子はセル内のヨウ化カリウムと化学反応し起電力を発生させる。この時発生した電流の値を測定する事で、吸引した大気中に含まれるオゾン分子の数を算出するという仕組みである。観測精度は上部対流圏/下部成層圏領域で約 10% である（Smit et al., 2007）。

CFH 水蒸気ゾンデと RS-06G GPS ゾンデを組み合わせる場合の問題として、CFH に搭載された鏡面ヒーターコイルにより発生していると思われる電波が GPS ゾンデの GPS アンテナに干渉し、GPS 信号を受信できなくなる事例が事前に報告されていた。この問題を回避するために、CFH と GPS ゾンデを出来るだけ遠ざけるように配置した（図 7; CFH ヒーターコイル部と GPS ゾンデの距離は 70 cm 程度である）。ECC オゾンゾンデは通常、前日までにすべき準備の他に、観測本番に使用するヨウ化カリウム水溶液の注入など観測当日に行うべき準備がある。「白鳳丸」における 2 回の観測については、観測当日の作業の簡素化を図るために前日の夜に、本来観測日にすべき ECC の準備、GPS ゾンデへのケーブル接続、CFH 水蒸気ゾンデも合わせたパッキングと全センサーの動作確認を行った。

CFH 水蒸気ゾンデ観測には冷媒（ CHF_3 ）を使用する。この冷媒は室温で気体（1 気圧における沸点は約 -80°C ）であり、「白鳳丸」観測においては小型のシリンダー（直径 10 cm 長さ 40 cm 程度）2 本（合わせて観測 2 回分）に封入し、船内に持ち込んだ。液体状態の冷媒を CFH に注入するためには、事前に -80°C 程度まで冷却しておく必要がある。そのためには、 -79°C 程度であるドライアイスにより冷却する方法もあるが、「白鳳丸」では、以下のような手順で冷却を行った。1) 乗船後すぐにシリンダーを -20°C の冷凍庫に格納し予冷した。2) さらに観測前日の夜に -80°C の超低温冷凍庫に格納し目的の温度まで冷却した。この際、熱容量の大きな -20°C の冷媒を超低温冷凍庫に格納することで、一時的に庫内を昇温させ超低温保管された各試料やドライアイスに悪影響を与える事が心配されたが、そのような影響は実質的に見られなかった。冷媒の CFH への注入については、気球へのヘリウム充填完了後、シリンダーの栓を開け、事前に規定注入量である 300 cc の箇所印を付けておいた真空断熱容器に注ぎ入れ、真空断熱容器から CFH に注ぎ入れた。

冷媒を CFH 水蒸気ゾンデに注入した後は、放球前最終のデータチェックを行い、速やかに放球した（図 8）。1 回目、2 回目観測ともに概ね良好なデータを取得できたが、高度 20 km 以上で霜点温度データに大きな機械的ノイズが見られた。この原因はコントローラーの不調によるものと思われるが詳細は不明である。

4.3 CO_2 ゾンデ+ GPS ゾンデによる観測

放球日時：2 月 5 日 17 時 30 分（1 回目）、2 月 6 日 17 時 14 分（2 回目）、2 月 8 日 17 時 29 分（3 回目）（LT）

使用気球：TOTEX TA1200

ヘリウムガス充填量：約 5.6 m^3 / 浮力錐を用いて純浮力 1200 g 分（3 回全て）。

CO_2 ゾンデは二酸化炭素による吸収線のある $4.3 \mu\text{m}$ と吸収線のない $4.0 \mu\text{m}$ の 2 波長を用いて光学セル内に導入された空気に含まれる二酸化炭素分子の数密度を測定する測器である。この光学センサーに導入される空気は電磁バルブにより、予め濃度測定された高濃度標準ガス、外気、同じく低濃度側標準ガス、外気と 40 秒毎に切り替えられ、このサイクルを繰り返す。高濃度側、低濃度側それぞれの標準ガスはアルミ製テドラバッグに 8 L 封入される。このうち、4 L 程度は放球前の試運転などで消費され、放球時には 3.6 – 4 L 程度の標準ガスが搭載される仕様になっている。ゾンデの

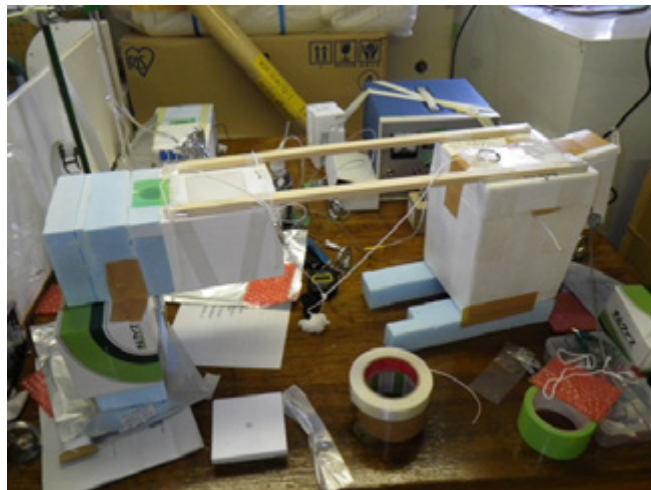


図 7 組み立て途中の CFH 水蒸気ゾンデ（左側）と ECC オゾンゾンデ。オゾンゾンデの右側には GPS ゾンデが仮付けされている。CFH の白色発泡スチロール部が鏡面冷却用冷媒容器となっている。

上昇に伴う気圧の低下で標準ガスが膨張するため、放球時の標準ガス搭載量と上昇速度を規定通りに調整する事が重要である。なお上昇速度は 3 m/s 程度である事が望ましい。高濃度側、低濃度側、2つの標準ガス濃度は東北大学で検定され、濃度はそれぞれ 404.44 ppmv と 384.32 ppmv であった。標準ガスが封入されたテドラーバッグは発泡スチロール製の容器に収納され、同じく発泡スチロール製筐体に格納されたセンサー部と一緒に飛揚される（図 9）。

1 回目の観測について、放球直後からデータ不良となり、観測は失敗に終わった。その原因としては、光学センサー部の不具合または光学センサーに空気を導入するホースの接続不良の可能性が考えられる。

2 回目の観測については、CO₂ ゾンデは正常に働いたが、放球直後に GPS センサーが明らかに誤った位置情報を示すようになり、地表から高度約 7400 m までのジオポテンシャル高度、気圧、東西風速、南北風速のデータを取得する事が出来なかった。それ以上の高度については GPS センサーの機能が正常に回復し GPS によるデータを取得する事ができた。GPS データ異常時のデータについては以下のように復元した。まず、高度 7500 m に達するまでにかかった時間から、放球直後から高度 7500 m までの気球上昇速度を、暫定的に 2.6 m/s で一定と仮定し高度データを復元した。次に、大気のスケーラハイトを 7684.7 m の一定値と仮定することで気圧データを復元した。以上により、GPS データ不良時の二酸化炭素混合比の鉛直プロファイルを復元することができた。

3 回目の観測については、全て正常に動作し地表から高度 8000 m 程度までの二酸化炭素濃度鉛直プロファイルを得る事ができた。



図 8 CFH 水蒸気ゾンデ+ ECC オゾンゾンデ+ GPS ゾンデ放球直前の様子。放球は現地時間で 2012 年 2 月 7 日 13 時 37 分に行われた。



図 9 放球直前の CO2 ゾンデ。標準ガスコンテナ（下部の大きな発泡スチロール製箱）の上面に CO2 ゾンデ本体と GPS ゾンデが取付けられている。

5. まとめ

2012年2月2日から2月7日にかけて、東部太平洋赤道線上においてEqPOS航海中の「白鳳丸」をプラットフォームとした合計6回のゾンデ観測が実施された。これらは、同期間に「白鳳丸」にて大気球を用いて行われた4回の小型クライオサンプラーによる成層圏大気採取実験時の気象学的データを取得する目的で実施された。一部の機器の不調による観測の失敗もあったが、オペレーション自体はほぼ完遂する事ができた。観測船では同じ航海中に様々な大気・海洋観測が並行して実施される場合が多い。今回の観測経験から、船上における気球観測では、同乗の研究者や船の乗員と積極的に意見交換し、他の観測との兼ね合いを事前によく吟味しておく事が非常に重要であった。これを行う事で、別の観測にシブタイムが割り当てられている期間においても、その観測がゴム気球放球と干渉しないものであれば、人員さえ工面すれば気球放球が可能になり、観測機会を大幅に増やす事ができる。本観測により、複数の大気微量成分がほぼ同時期に現場観測された。今後、今回得られた各微量成分濃度すなわち化学的な知見と各種客観解析データから得られる力学的場を合わせて解析する事で、赤道域対流圏および成層圏における大気輸送過程の解明に貢献できると考えられる。

謝辞

本気球観測実施にあたり、非常に過密な船舶運航スケジュールの中、最大限の成果が得られるようにスケジュールを調整していただきました東京大学大気海洋研究所古谷浩志博士と、水蒸気ゾンデの冷媒冷却のため超低温冷凍庫を使用させていただきました北海道大学大学院地球環境科学研究院亀山宗彦助教に感謝します。清野船長をはじめ、ヘリウム充填装置のホースの延長工作をしていただきました機関長、アンテナの設置や放球の段取りなどについて助言・助力をいただきました一等航海士など「白鳳丸」乗組員の皆様、そして自身の観測で忙しい中、積極的に本観測作業に参加していただきました研究者、学生の皆様に感謝します。CO₂ゾンデ観測については名古屋大学松見豊教授、同じく大内麻衣氏にサポートしていただきました。OLR dataはNOAA web page、ERA-interim dataはECMWF web pageより取得しました。図1の作図にはGFD-DENNOU Libraryを使用しました。「白鳳丸」観測中の気球航跡予測にはクライオ気球実験に対する協力依頼により気象庁予報部数値予報課から全球モデルデータを提供していただきました。図6は宇宙科学研究所大気球実験室井筒直樹助教に提供して頂きました。匿名の査読者2名から有益で建設的なコメントを頂きました。

Reference

- Fujiwara, M., H. Voemel, F. Hasebe, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K. Shimizu, E. Nishimoto, J. M. V. Canossa, H. B. Selkirk, and S. J. Oltmans: Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne cryogenic frost point hygrometers, *J. Geophys. Res.*, 115, D18304, doi:10.1029/2010JD014179, 2010.
- Goff, A. J. and Gratch, S.: Low-pressure properties of water from -160 to 212 ° F, *Trans. Amer. Soc. Heat. Vent. Eng.*, 52, 95-122, 1946.
- Hasebe, F., Y. Inai, M. Shiotani, M. Fujiwara, H. Voemel, N. Nishi, S.-Y. Ogino, T. Shibata, S. Iwasaki, N. Komala, T. Peter, and S. J. Oltmans, Cold trap dehydration in the tropical tropopause layer characterized by SOWER chilled-mirror hygrometer network data in the tropical Pacific, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 4393-4411, doi:10.5194/acp-13-4393-2013, 2013.
- Inai, Y., F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, N. Nishi, S.-Y. Ogino, H. Voemel, S. Iwasaki, and T. Shibata, Dehydration in the tropical tropopause layer estimated from the water vapor match, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8623-8642, doi:10.5194/acp-13-8623-2013, 2013.
- List, R. J.: *Smithsonian Meteorological Tables*, 5th edition, Smithsonian Institution, Washington, DC, 1984.

明星電気株式会社 MCD-10 CO2 Sonde, http://www.meisei.co.jp/english/products/meteo/mcd10_co2_sonde.html

明星電気株式会社 RD-08AC 簡易 GPS ゾンデ受信システム, <http://www.meisei.co.jp/products/meteo/rd08acgps.html>

森本真司, 山内恭, 本田秀之, 青木周司, 中澤高清, 菅原敏, 石戸谷重之, 飯嶋一征, 吉田哲也: J-T クーラーを用いた小型成層圏大気クライオサンプラーの開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-08-001, 63-74, 2009-02, 2009.

Smit, H. G. J., W. Straeter, B. J. Johnson, S. J. Oltmans, J. Davies, D. W. Tarasick, B. Hoegger, R. Stubi, F. J. Schmidlin, T. Northam, A. M. Thompson, J. C. Witte, I. S. Boyd, and F. Posny: Assessment of the performance of ECC-ozonesondes under quasi flight conditions in the environmental simulation chamber: insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE), J. Geophys. Res., 112, D19306, doi:10.1029/2006JD007308, 2007.

Voemel, H., D. David, and K. Smith: Accuracy of Tropospheric and Stratospheric Water Vapor Measurements by the Cryogenic Frost Point Hygrometer: Instrumental details and observations, J. Geophys. Res., 112, D08305, doi:10.1029/2006JD007224, 2007.