

白鳳丸における気球オペレーション

本田秀之¹⁾、青木周司²⁾、稲飯洋一²⁾、森本真司³⁾、菅原敏⁴⁾、豊田栄⁵⁾、中澤高清²⁾
植松光夫⁶⁾、古谷浩志⁶⁾、飯嶋一征¹⁾、荘司泰弘¹⁾、松坂幸彦¹⁾、井筒直樹¹⁾、吉田哲也¹⁾

1)ISAS/JAXA、2)東北大学、3)国立極地研究所、4)宮城教育大学

5)東京工業大学、6)東京大学大気海洋研究所

1. はじめに

成層圏の大気微量成分 (CO_2 , CH_4 , N_2O , H_2 , SF_6 等) や主要成分 (N_2 , O_2) の濃度および同位体の高度分布や経年変化を観測することにより、北半球中緯度成層圏における時間・空間変動を明らかにし、それらの変動を支配する過程とメカニズムを解明することを目的とし、三陸・大樹町・スウェーデンのキルナ・南極昭和基地で、クライオサンプリング装置やグラブサンプリング装置を使って成層圏大気を採取し、実験室に持ち帰って詳細な分析を行う観測を継続的に行ってきた。ここでは、長年懸案としてきた成層圏へ大気が流入する赤道上空の大気採取を行うため、東京大学大気海洋研究所が計画した研究航海 (KH-12-1) の一環として、東太平洋赤道上の白鳳丸船上からJT サンプラ[1]を搭載した大気球を計4機 (B2 および B5 を各2機) 打ち上げ、全ての成層圏大気の採取と回収に成功した。なお、本実験に至るまでの経緯や対外的な対応に関しては、別稿に述べる。[2]ここでは、船上での気球オペレーションについて報告する。

2. 白鳳丸船上での放球法の検討

白鳳丸は、全長 100m、総トン数 3991t の共同利用の学術研究船で、東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構が協力して運行にあたっている。船の構造から、気球は後部甲板から上げるしかなかったが、そこにはおよそ 7mWx20mL の平らな空間しかなく、また周辺には突起物やクレーン等の背の高い設備機器があった。特に門型クレーンが最後尾にあり、これをクリアしながら大気球を放球するためには、安全な気球の立ち上げ場所や方法、放球方向を検討する必要がある。気球グループメンバと2度の現地調査を行い、B5 気球の場合は図1のような気球の配置で放球作業を行うことにした。幸い後部甲板中央のブリッジ寄りにはウインチがあり、これを利用することができた。B2 気球の場合も方法は同じであるが、カラーは事前に取り付けておくため跳ね上げローラーの先にセットし、気球全長が短くなる分だけ気球尾部の位置を船尾側にずらして配置することにした。ガスカードルは他の観測とは干渉しない場所と確認しつつ、後部甲板の右舷奥側に配列することにした。

検討した結果の気球展開から放球までのオペレーションは、以下の通りである。気球はウインチ寄りに伸ばし、尾部をウインチロープに固定する。気球本体は船尾に固定された跳ね上げローラーを通してメインカラー取り付け位置下で折り返し、頭部を船首側に伸ばして配置する。メインのカラーとベルクロ (手動取り外し) カラー2個はこの状態で取り付ける。気球にヘリウムガスを充填しながら、また順次ベルクロカラーを外しながら気球の大きさを規制しつつ必要量のガスを充填する。必要量のガス充填が終わったことを確認後、ウインチを操作してロープを伸ばし、

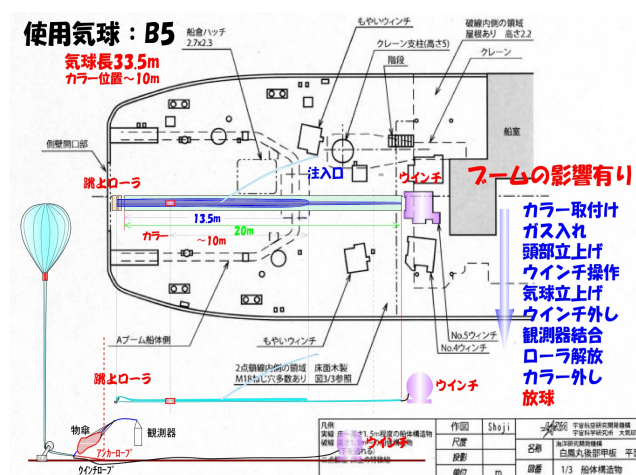


図1: 甲板上の機器配置 (B5 の場合)

跳ね上げローラー上に気球を立て上げて行く。跳ね上げローラー直前の甲板上のアンカーに気球尾部を放球ロープで固定して負荷を移し、ウインチロープを外す。その後ゴンドラを接続して結線結索を確認後、カラーカットを行い放球ロープを切って放球する。観測器は二人で支えて気球直下に移動して放す。なお、ガス充填中や放球時の風向風速が適切になる様、操船を行う。

2011年9月2日と3日、白鳳丸に乗船予定の3名は、大樹町の格納庫内で、このような機器構成と気球放球法を模擬した事前訓練を行った。

3. 観測器と自動追尾

観測器は、既に昭和基地で実績のあるJTサンブラを用いた[3]。試料容器は1セット、放球時の観測器重量は液体窒素込みで22kg（荷姿を含めると26kg）である。観測器は搭載GPSの測位情報により、全ての動作は自律的に行われるようになっている。万が一GPS測位が不調になった場合でも、タイマにより一連のシーケンスが実行されるようになっている。設定高度で開始された大気試料の採取シーケンスが終わった時点で、残っている液体窒素を排出する弁を開き、気球を切り離して観測器をパラシュート降下させる。着水と同時にミニブイが観測器から切り離され、ビーコンを発信して探索を容易にしている。荷姿を図2に示す。なお、図には示していないが、現地で観測器から5m離してGPSゾンデを取り付け、追尾のバックアップとした。

飛翔中の観測器の自動追尾のための機器は、過去に昭和基地の大気採取実験で使用した機器やソフトウェア[4]を元に、特に小型化を意識して新規に開発した。自動追尾機能は、搭載したGPS受信機の測位情報を受信することにより、船上に設置したGPSコンパスの指向方向を考慮に入れて、アンテナ指向方向を計算して実現している。アンテナ指向方向にウェブカメラを付け、受信室からフィールドの状況を確認したり、放球直後の追尾を行い易くした。

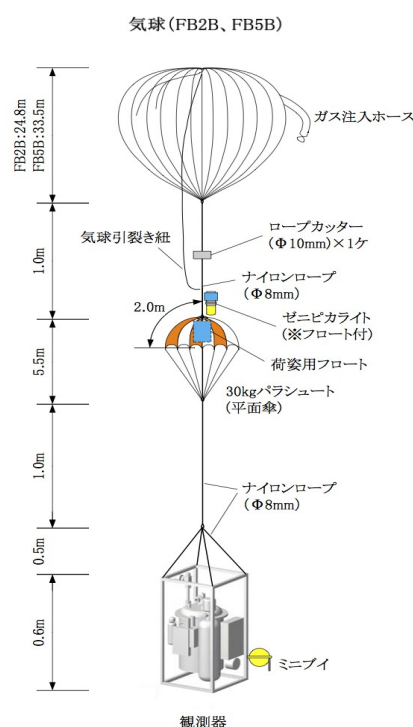


図2：荷姿

4. 気球オペレーション

4-1. 機器の設置と動作確認

2011年12月1日、白鳳丸は晴海を出航した。それに先立ち、11月24日に気球関連機材を積み込んだ。B5気球3機（予備1機を含む）を船倉内に入れることが出来なかったが、気球そのものには防湿対策が行われていたので、甲板上に防水シートをかけて木箱を固定した。また、ガスカードル10機を後部甲板右舷側に防水および遮光対策をして固定し、気球実験時にもその位置で使用した。

2012年1月27日午後（現地時刻、以下同様）カヤオ港に停泊中の白鳳丸に乗船し、28日には、右舷の伸縮ビーム付近の後部甲板の見える位置にアンテナとモニタカメラを、第3研究室（後部甲板より一つ上のフロア）に追尾受信システムをそれぞれ設置し、動作確認を行った。GPSコンパスは、この部屋の上のデッキに取り付けた。29日午後にかやオ港を出航した。同夜、船や乗船研究者に対して気球実験概要を説明し、支援を依頼した。また第6研究室（後部甲板と同一フロア）に排気セットを設置し、試料容器の健全性を確認するための排気を開始した。30日には、搭載機器との噛み合わせや搭載機器の動作試験を行って、システム全体を通して問題ないことを確認した。また、荷姿等気球関連部分の確認を行った。2月1日には、跳ね上げローラの設置、ウインチの設

定、He ガス充填系の配管および機能確認を行った。3日には風見気球の設置位置を決めるため、風見を立ち上げて後部甲板の周辺でブリッジ等の影響を確認し、右舷のガスカードル付近が最適であるとの結論になった。

4-2. ゾンデによる航跡予想精度の確認

2月2日にGPS ゾンデを放球した。この実際の航跡と国内で行った12時間前の予想風データを使った航跡予測との比較を行ったところ、良く一致していることが確認できた。さらに2月3日にゴム気球でCO₂+水蒸気ゾンデを放球したが、この時の実際の航跡と航跡予測を比較して良い一致を見ていることが再確認できた。これらのことから、12時間前の予想風を使った航跡予測を放球可否の最終判断の資料とすることにした。

4-3. 放球日時の決定

航海全体の観測計画で設定された当初の放球予定日は、運行スケジュールや他の観測との関係、気象状況で多少変更となったが、再設定された放球前日夕方に、翌日の放球可否の判断を行った。国内から送られてくる日々の航跡予測と、翌日の天候が主な検討事項であった。回収可能範囲としては、放球後から気球が飛翔している間に、白鳳丸が着水予想地点に容易に到達できる範囲（半径50～60km）を目安とした。

放球作業の開始時刻は、朝食を終えまた船員の勤務交代時刻である午前8時とすることに決まった。また観測時間として午後6時までの10時間の優先的割当を受けたが、これは着水後の探索時間が十分取れるようにとの配慮もあった。

4-4. 放球当日のオペレーション

放球作業に参加する各乗船研究者には、事前に役割を設定しておいた。また4機放球作業全体を通して基本的には変更せず、場数を踏んでより確実な作業が出来るようにした。船には操船・ウインチ操作・放球作業・回収全般の支援を依頼した。また、青木は放球作業全体の指揮を、稲飯はガス充填と放球を担当し、本田は放球作業全般と追尾受信を主に担当した。

放球当日は午前6時過ぎから観測器に液体窒素を転送し、荷姿を接続して最終的な形にした。なお、前日には搭載機器と地上システムの電波噛み合わせを済ませていた。午前8時（UTで15時）に放球作業関係者が後部甲板上に集合し、簡単な打ち合わせの後に作業を開始した。例えば、1番機である#4（B2気球）の場合では、気球にガスを注入し始めるまでの作業に約40分、ガス充填に約20分、その後放球までに15分程度で良かった。実際の放球は、午前9時31分に行われた。ガス充填中や放球時は比較的穏やかな天候であったこと、また操船によって風向や風速を適切な範囲に収めることができたため、2ゴンドラ構成（観測器およびその5m下につり下げられたGPS ゾンデ）での放球でも、ほとんど観測器を移動することもなく放球できた。しかし門型クレーンを船側に倒した状態での作業はガス充填や観測器放出にリスクを伴い、また船上風はコントロールできることが分かったので、以降3機の放球作業では門型クレーンを海側に倒した状態で行うことにした。このためおよび放球作業にも慣れてきたため、それ以降は準備開始から1時間程度で放球できるようになった。図3に気球の展開状況を、図4に放球直後の写真を示す。



図3：甲板上に展開したB5気球、右後方にヘリウムガスカードルが見える

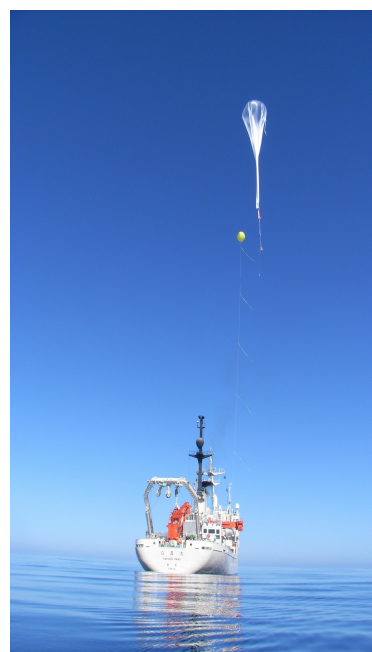


図4：上昇中の気球

4-5. 追跡と回収

放球結果を表1にまとめた。いずれの場合も、観測器は降下予想位置より手前（放球地点寄り）に降下していたので、発見までにかかる時間が短縮できたと考えられる。#4の着水予想位置は放球位置から約80km離れていたため、放球後白鳳丸は直ちに移動を開始したが、着水後1時間15分で回収まで終了した。これに力を得て翌日に#1を放球したが、上昇中に受信が不調になった上に気球が割れて急速降下した。しかし、着水間際にバックアップの受信機システムで数点GPSデータが取得できたため、それを頼りに着水地点に航行したところ観測器を発見できた。#2と#3の場合は、着水予想位置が比較的近くであったので、パラシュート降下している観測器を船上から目視できる範囲を航行することが出来た。また、飛翔中のGPSデータはほぼ全て取得できていたので、着水位置付近に容易に到達でき、ブイ受信開始と目視による観測器発見の時間差は小さかった。

観測器の回収は、船をゆっくり浮遊中の観測器に近づけ（白鳳丸は横移動可能である）、右舷甲板上からフックを投げてパラシュート等のロープを引っ掛け、容易に引き上げることが出来た。#1を除いて、観測器に特に損傷は見られなかった。#2と#3の場合は、着水から回収までの時間は30分程度であった。なお、#1の場合は、当初の着水予想位置からかなりずれたにもかかわらず80分程度であり、手前側にずれたことが幸いした。いずれの観測器の場合も、ミニブイの水に解ける紐は十分に溶けておらず、観測器のすぐ近くに浮遊していた。

表1 放球結果

装置番号	使用気球	放球日時 (UT)	放球位置 緯度経度	総重量 (kg)	総浮力 (kg)	自由浮力 (%)	採取高度 (km)	回収地点までの距離 実際 (予想) (km)	着水後回収までの 時間(HH:MM)
#4	B2	2012/2/4 16:31	N00 04', W105 16'	47.6	57.1	20.0	19.2-21.7	69.6 (82.0)	1:15
#1	B5	2012/2/5 16:05	N00 06', W109 00'	63.2	74.6	18.0	29.2-30.1	21.7 (39.7)	1:20
#2	B5	2012/2/7 15:58	N00 02', W115 04'	63.0	74.4	18.0	26.6-30.0	23.1 (27.1)	0:34
#3	B2	2012/2/8 16:01	S00 00', W115 00'	47.7	56.1	17.5	23.2-25.7	22.7 (24.5)	0:27

5. まとめ

白鳳丸船上から、JT サンプラを搭載した B2 および B5 気球各2機を放球し、全観測器を回収した。事前の模擬訓練のおかげで、現地での放球作業実施も円滑に、また微修正も行えた。東太平洋赤道上の天候は穏やかであり、適切な操船と相まって、船上の風は放球作業を難しくすることはなかった。放球12時間前の航跡予測精度は十分高く、搭載機器からのGPS測位情報も入手できていたので、海上に浮遊中の観測器の探索は思いのほか容易であった。また、観測器も小型軽量であったため、甲板からの回収作業も短時間のうちに終了した。

謝辞

本実験を実施するにあたり、東京大学大気海洋研究所、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、航空局、海上保安庁の関係者にお世話になった。また実際の放球や回収作業では、白鳳丸船員の皆さん、KH-12-1 研究航海の乗船研究者の皆さんには大変お世話になった。ここに深謝する。

参考文献

- [1]Morimoto, S., et al., A New Compact Cryogenic Air Sampler and Its Application in Stratospheric Greenhouse Gas Observation at Syowa Station, Antarctica, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**, 2182-2191, 2009.
- [2]青木周司他、白鳳丸による東部太平洋赤道上で気球を用いた総合観測、本誌掲載予定。
- [3]森本真司他、小型クライオサンプラを用いた昭和基地での成層圏大気採取実験、平成20年度大気球シンポジウム、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、109-112、2008.
- [4]南極昭和基地における成層圏大気のカリオジェニックサンプリング実験[1]、本田秀之他、宇宙科学研究所報告、特集第39号、67-86、1999.