

## インドネシア・ビアク島における クライオジェニックサンプラー回収気球実験

池田忠作<sup>\*1</sup>, 青木周司<sup>\*2</sup>, 森本真司<sup>\*2</sup>, 菅原敏<sup>\*3</sup>, 本田秀之<sup>\*1</sup>, 豊田栄<sup>\*4</sup>, 石戸谷重之<sup>\*5</sup>, 中澤高清<sup>\*2</sup>,  
長谷部文雄<sup>\*6</sup>, 稲飯洋一<sup>\*2</sup>, 林政彦<sup>\*7</sup>, 柴田隆<sup>\*8</sup>, 後藤大輔<sup>\*9</sup>, Halimurrahman Mukri<sup>\*10</sup>,  
Moedji Soedjarwo<sup>\*10</sup>, Ninong Komala<sup>\*10</sup>, Fanny A. Putri<sup>\*10</sup>, Thohirin Chodijah<sup>\*10</sup>, Agus Hidayat<sup>\*10</sup>,  
Afif Budiyo<sup>\*10</sup>, Thomas Djamaluddin<sup>\*10</sup>, 飯嶋一征<sup>\*1</sup>, 田村誠<sup>\*1</sup>, 井筒直樹<sup>\*1</sup>, 吉田哲也<sup>\*1</sup>

### Stratospheric Air Sampling Using a Balloon-borne Cryogenic Sampler Over Biak Island, Indonesia

Chusaku IKEDA<sup>\*1</sup>, Shuji AOKI<sup>\*2</sup>, Shinji MORIMOTO<sup>\*2</sup>, Satoshi SUGAWARA<sup>\*3</sup>, Hideyuki HONDA<sup>\*1</sup>,  
Sakae TOYODA<sup>\*4</sup>, Shigezuki ISHIDOYA<sup>\*5</sup>, Takakiyo NAKAZAWA<sup>\*2</sup>, Fumio HASEBE<sup>\*6</sup>,  
Yoichi INAI<sup>\*2</sup>, Masahiko HAYASHI<sup>\*7</sup>, Takashi SHIBATA<sup>\*8</sup>, Daisuke GOTO<sup>\*9</sup>,  
Halimurrahman MUKRI<sup>\*10</sup>, Moedji SOEDJARWO<sup>\*10</sup>, Ninong KOMALA<sup>\*10</sup>, Fanny A. PUTRI<sup>\*10</sup>,  
Thohirin CHODIJAH<sup>\*10</sup>, Agus HIDAYAT<sup>\*10</sup>, Afif BUDIYONO<sup>\*10</sup>, Thomas DJAMALUDDIN<sup>\*10</sup>,  
Issei IJIMA<sup>\*1</sup>, Makoto TAMURA<sup>\*1</sup>, Naoki IZUTSU<sup>\*1</sup>, Tetsuya YOSHIDA<sup>\*1</sup>

#### ABSTRACT

Balloon-borne cryogenic air sampling experiments were carried out at Biak island, Papua, Indonesia in February 2015 as a part of small-size project of ISAS / JAXA. Four samplers were launched using four plastic balloons to collect stratospheric air at eight different altitudes. After air sampling, the samplers parachuted down to the sea and all of them were successfully recovered by using a ship. Determination of air pressure of the collected samples showed that the stratospheric air was successfully collected at seven different altitudes from 17 up to 29 km.

**Keywords:** Scientific balloon, Cryogenic air sampling, Biak Island

#### 概要

宇宙科学研究所の小規模プロジェクトの一環として、2015年2月にインドネシア共和国パプア州ビアク島において小型のクライオジェニックサンプラーを搭載したポリエチレン気球による成層圏大気採集実験を計4回実施し、高度17 kmから29 kmまで計8つの異なる高度において大気を採集した。サンプリング終了後のサンプラー・ゴンドラはパラシュートで海上に着水し、それらはすべて船船により無事回収された。採集した大気サンプルの圧力測定から、8高度のうちの7高度において成層圏大気試料が正常に採集されていることがわかった。

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-008/0002

\* 平成28年11月28日受付 (Received November 28, 2016)

\*1 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science)

\*2 東北大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Tohoku University)

\*3 宮城教育大学 (Miyagi University of Education)

\*4 東京工業大学物質理工学院 (School of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology)

\*5 産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

\*6 北海道大学大学院地球環境科学研究院 (Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

\*7 福岡大学理学部 (Faculty of Science, Fukuoka University)

\*8 名古屋大学大学院環境学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

\*9 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

\*10 インドネシア航空宇宙局 (National Institute of Aeronautics and Space of the Republic of Indonesia)

## 1. はじめに

対流圏の大気は主に赤道上空の熱帯対流圏界層（TTL）を通して成層圏に流入するが、インドネシア上空には特に低温の TTL が位置しており、ここでの脱水過程が成層圏大気の水蒸気量に大きく影響すると考えられている。また、成層圏に流入した大気の輸送過程や化学過程の理解を深めるためには、TTL 領域から成層圏にかけての大気を直接採集し、大気中微量気体成分について精度の高い分析を行うことが有効である。

そこで、2015 年 2 月から 3 月にかけて、宇宙科学研究所の小規模プロジェクト「熱帯対流圏界層における力学・化学過程の解明－西部太平洋上の気球観測による統合的研究－」として、長年 TTL 内脱水過程の研究を続けてきた大気力学グループ（代表：長谷部文雄 北大教授）と、国内外で成層圏大気の採集と各種精密分析を行ってきた成層圏大気サンプリンググループ（代表：青木周司 東北大教授）がインドネシア・ビアク島のインドネシア航空宇宙局（LAPAN）観測所（南緯 01 度 10 分 32 秒、東経 136 度 06 分 02 秒）において集中観測を行った [1]。



図1 インドネシア地図

ビアク島はインドネシア東部の赤道直下に位置しているため、TTL 領域を対象とした観測を行うには理想的な場所であることに加えて、都市化が進んでいないため局所的な影響の少ないサンプルを採集できること、LAPAN の観測所があるため科学観測に対する様々な協力が得やすいこと、船舶密度の低い海域に観測機を降下させて回収を行えること等の利点がある。このプロジェクトは LAPAN との共同研究として行われたもので、ジュールトムソン・ミニクーラーを内蔵した小型のクライオジェニックサンプラー（以下 J-T サンプラ）による成層圏大気の採集が成層圏大気サンプリンググループにより 4 機のポリエチレン気球を用いて行われたほか、回収ゴム気球 2 機による上空のエアロゾル採集、各種ゾンデを搭載したゴム気球の飛翔による二酸化炭素、水蒸気、オゾン、雲粒子、エアロゾル濃度の測定、およびライダー観測が大気力学グループにより行われた [2, 3]。今回のキャンペーンでは上述した二つのグループが異なる手法で同時期に観測を行うため、それぞれの結果を統合的に評価することで TTL 内で進行する様々な大気化学過程や成層圏大気の輸送過程の解明が進むと期待される。今回の観測は成層圏大気サンプリンググループにとって、これまで日本、北極、南極で展開されてきた成層圏大気採集実験の延長上にあり、空白域となっていた赤道上で観測を実施した意義は大きいと、今回得られた大気試料の測定結果だけでもこれまでの測定結果と合わせて検討することで一定の成果が得られると期待される。

インドネシアにおける大気球実験は 1983 年に旧文部省宇宙科学研究所が東部ジャバ・ワトコセで実施して以来、実に 32 年ぶりであり [4]、ポリエチレン気球の飛翔に対する現地側の理解不足があったことに加え、近年インドネシアで各種許可取得が厳格化していることも影響してポリエチレン気球の飛翔許可取得や観測物資の輸送等については苦勞することになった。本稿では、ポリエチレン気球による成層圏大気採集実験に焦点を絞り、キャンペーン全体を通して現地で直面した問題と対処も含めて述べる。

## 2. 気球実験の準備作業

図2に今回実施した成層圏大気採集実験についての準備体制を示す。チーム長が代表を務めた小規模プロジェクト全体には下図以外に大気力学グループが含まれる。大気採集装置の調整やゴンドラ作成などの実験機器の準備は、プロジェクト採択が正式に決まった2014年5月に開始した。観測器の構成や受信機器類は過去のJ-T サンプラ実験 [5-7] とほぼ同じであったことから準備作業は順調に進み、予定通り2014年10月下旬には観測物資の発送準備が整った。一方でJAXAとLAPANとの間の技術協定 (Technical Agreement, TA) の締結には当初の想定より時間がかかったため、TA締結後でないといけない各種許可取得や航空当局との調整等はかなりタイトな日程で行うことになった。また、TA締結まで実験実施時期が確定できなかったため、輸送日程にも余裕を持たせることが出来なかった。現地入りしてからは航空当局との調整や貨物の引取り交渉を行う必要が生じたが、協議では英語による意思疎通が難しい場面もあった。今回LAPAN側には日本で学位を取得し、日本語に堪能なN. Komala氏がいてくれたおかげで交渉をスムーズに進めることが出来た。なお、ビアク島ではインターネット回線の通信速度が遅く、日本からデータを送付してもらう際は最小限のテキストにするなどして対処した。電力事情も良くないことが想定されたため、受信施設にはUPSを設置するなどしたが、実験中に停電が起こることはなかった。

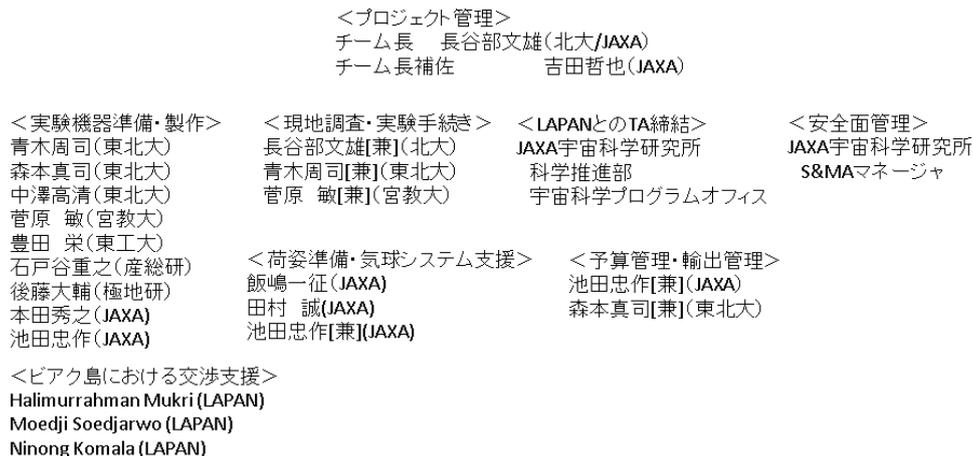


図2 成層圏大気採集実験の準備体制図

### 2.1. 実験手続き

インドネシアで調査、研究を実施するにはインドネシア研究技術省 (RISTEK) の発行する研究許可 (Foreign Research Permit, FRP) を得る必要があり、FRPの申請が受諾された上でビザ315と呼ばれる研究・調査用の一時滞在ビザを取得して入国することが定められている。FRP申請に必要な書類の中にはインドネシア国内の共同研究先と結んだ協定書の写しが含まれるため、我々のFRP申請はJAXAとLAPANとの間のTA締結を待って行うことになった。TAが締結されたのは2014年11月24日であり、直ちにFRP申請を行った。FRP申請が受理されたのは2014年12月末、ビザ315の発給許可が下りたのが2015年1月22日であり、2月の実験開始になんとか間に合わせる事ができた。一般的にはFRPの受理からビザの発行まではより長い期間かかるのが通例である。今回はFRP申請から実験開始までの日程がタイトであったため、長谷部プロジェクトチーム長がこれら手続きについての協力をLAPAN側に依頼しており、そのため通例より迅速な許可取得につながったと思われる。

ビザ315で入国した後の手続きは、まずジャカルタのRISTEK事務所にてFRP書類の受け取りとFRP申請料の支払いを行った後、警察本部で国内移動許可証 (Traveling Permit)、内務省で研究通知書 (Research Notification) を取得し、そのうえで実験実施場所を管轄する出入国管理事務所でKITASと呼



### 2.2.2. ヘリウムガス、液体窒素の輸送

J-T サンプラによる大気採集では、サンプラに内蔵する J-T クーラーにネオンガスを冷却して供給するために液体窒素を使用する。現地ビアク島では液体窒素が入手できないため、ジャカルタで充填した液体窒素容器を船便でビアク島まで輸送する必要があった。このため事前に保温性能を確認した 120 L の自加圧容器 3 本を日本から輸送し、ジャカルタにてビアク島への輸送直前に液体窒素を満充填して輸送した。充填から約 2 週間でビアク島に到着し、直ちに残量検査を行ったところ、3 本の残量はそれぞれ 70 L、60 L、および 0 L であり、一本の容器については液体窒素が完全に蒸発して失われていた。ジャカルタでの液体窒素充填時に容器一つについて充填用のアダプタが合わないという連絡を受けていたため、空になった容器については正常に液体窒素の充填が行われなかったことが推察された。残量は実験期間中に蒸発する分を考慮すると 4 機の J-T サンプラには十分ではない可能性があるかと判断されたため、急遽ジャカルタの業者に液体窒素を追加発注した。この容器については 2 月 22 日に到着し、残量は約 60 L であることが確認された。この追加分を合わせ、放球が遅延しても十分な量の液体窒素を確保することができた。

気球充填に使用するヘリウムガスシリンダ 100 本については当初インドネシア国内での調達も視野に入れていたが、期待していたインドネシア国内のヘリウムガスプラントの運用開始が遅れたため現地調達は断念し、日本国内業者との契約で調達し、ビアク島まで輸送することとなった。しかし JAXA-LAPAN 間の TA 締結を待つて実験開始時期を確定したためかなりタイトな調達日程となり、納入期限に間に合わせるためシンガポールで充填したヘリウムガスシリンダを輸送することになった。液体窒素、およびヘリウムガスシリンダのインドネシア国内での手続きと輸送に関しては Aneka Gas Industri に依頼したが、同社では副所長として日本人（石川智氏）が在籍していたため、我々の要望をスムーズに伝達することができた。ジャカルタからビアク島までの輸送は観測物資と同じ客船に積載して行った。

### 2.2.3. 空路による物資輸送

ほとんどの物資は海上輸送したものの、いくつかの物品は空路により輸送することになった。空輸した物品はロープカッターを含む荷姿類と、気球への搭載が直前まで定まらず海路輸送に間に合わなかった ATC トランスポンダ 4 式およびその付属品であった。ロープカッターは日本では火薬類取締法の適用除外品であり、安全データシート等も取り揃えてあったが、火工品のため船会社に難色を示され、最後まで船舶による輸送許可が得られなかった。最終的にこの輸送は国連規格の危険物用段ボール容器に入れて東洋トランス（株）に依頼し、ガルーダインドネシア航空によりビアク島まで輸送することになった。トランスポンダについては一般的な EMS により輸送した。いずれの貨物についてもビアク島観測所所長等に物資の内訳と輸送スケジュールを周知し、現地での通関手続き、貨物引き取りを依頼した。貨物の追跡情報によりビアク島に輸送されたことは確認できていたが、現地到着後、すべての航空便貨物が実験場に配送されていないことが明らかになった。直ちに LAPAN 職員と共に EMS については現地郵便局、危険物貨物についてはガルーダ航空のオフィスに出向いて交渉を行ったが、いずれも無税化の手続きが行われていない等の理由により受け取れないとのことであった。これらは実験実施に必須なものばかりであり、関税を支払ってでも早急に受け取りたい旨を LAPAN ビアク島観測所の所長に伝え、貨物受け取りのための交渉を依頼した。LAPAN 側は連日対応を行い、およそ一週間後に貨物を入手することが出来たが、これは必要な手続きを後回しにするという特例によるものであった。

EMS によるビアク島までの物資輸送については約 1 年前に大気力学グループが問題なく行った実績があったため、今回 EMS の受け取りにも問題が生じた原因は当初不明であった。後になって、全ての輸送物資についてのリストを輸送開始の数か月前に LAPAN の Cooperation and Public Relation Bureau に提出し、この部署を通じた無税化手続き等を行う必要があったと知らされた。日本側にはこの情報が伝わっていなかったため、LAPAN の該当部署に物資リストを提出しておらず、このため空輸貨物の無税化手続きに不備が生じたことが分かった。海路輸送が問題なく行えたのは 2014 年の 11 月に一部メンバーが LAPAN と事前の協議を行った際に参考資料として海路輸送の物資リストを手渡しており、このリストが該当部署へ回っていたためであったと思われる。なお、EMS で送付した物資の返送については帰路の海路輸送に新たに加えることが許さ

れず、復路も EMS で送付することになったが、必要な手続きはキャンペーンが終了しても終わらず、ジャカルタの Mahkota Logistik に委託することになった。結局これら貨物が日本に帰着したのは 2015 年の 10 月になってからであった。

### 2.3. 航空管制当局との調整

大気球の飛行許可の取得や航空交通管制側から搭載を要求される機器（ATC トランスポンダ等）に関しての調査は LAPAN 側に依頼して行ったが、公式な LAPAN 側からの協力は TA が締結した後でないと得られなかったため、航空当局との調整はやや不十分なまま現地入りすることになった。現地到着後に通知された大気球の飛行ウィンドウは、放球日が指定されたもので気球実験では実現困難であったため、急ぎよ LAPAN 側の担当者を交えて現地ビアク島の航空交通管制と直接協議する場を設け、最終的にはほぼ希望する放球ウィンドウを確保することができた。明確な情報が得られていなかったトランスポンダの搭載についても協議したところ、ビアク島および周辺には ATC トランスポンダ用の 2 次レーダが設置されておらず、ビアク島航空交通管制としては飛行中の気球位置を把握できないことが分かった。この結果、今回のキャンペーンに対し航空安全を確保するため航空交通管制側から以下の 2 点を要求された。

- 1) ゴム気球を含むすべての気球について、飛行中の気球の位置情報（空港から見た気球の方位角、海里表示の距離、フィート表示の高度）を放球から着水まで、数分おきにビアク島航空交通管制に無線で連絡すること
- 2) 重気球に分類される成層圏大気採集ゴンドラについてはモード C のトランスポンダを搭載すること

なお、ATC トランスポンダに設定する ATC コード（スクォーク）も放球直前に割り当てるとの回答があったが、後程それは撤回され、実験期間中は一つのコードが使用できることになった。ゴム気球を用いる軽量の GPS ラジオゾンデ（以下ラジオゾンデ）にはトランスポンダの搭載は要求されないため、管制側としては飛行中の位置情報を数分置きに把握する必要はないと思われたが、ゴム気球に関する通報を簡略化してほしいという我々の希望は受け入れられなかった。

このように、航空交通当局からの要求は日本における気球飛行より厳しいものとなったが、この背景にはビアク島上空の航空管制が約 2000 km 離れたマカサールの空港の担当であり、ビアク島管制からマカサール管制側に飛行情報を報告しなければならないという理由に加え、重気球の飛行がインドネシアでは 32 年ぶり、航空当局による気球飛行についての許可や規制などの枠組みが定まっていなかったことがあるように思われた。

通報が要求された飛行中の気球に対する位置情報は、我々の受信する気球位置情報から単位や方角を変換する必要があったため、これら情報を表示するシステムを現地で構築する必要があった。今回のキャンペーンではポリエチレン気球を含むすべての気球に明星電気製のラジオゾンデを搭載していたため、この受信機のプログラムを改修して位置情報を 1 分おきに抽出し、通報用の位置情報に変換して PC のディスプレイに随時表示するシステムを現地で構築した。また着水直前に電波が消感した際には気球上昇中の風向風速をもとに航跡予測を行い予想位置情報を示すことにした。気球飛行時の通報作業は LAPAN 職員 1 名が専従してあたり、放球から着水までの間、2~3 分おきに無線によりビアク島航空管制に連絡を入れることになった。この体制が確立してようやく気球の放球体制が整うこととなった。

### 2.4. 観測器の準備

計 4 機放球した気球（実験 ID：JTBK-A ~ JTBK-D）についての現地準備作業から放球までの作業進捗状況を表 1 にまとめた。J-T サンプラの詳細、ゴンドラの本体の基本的な構造と機能については他の文献 [5, 6, 7] に述べられているのでここでは省略する。

表1 JT サンプラの準備作業進行状況

| 日付    | サンプル関係                                 | 放球関係                                  |
|-------|--|---------------------------------------|
| 2月7日  | 気球物資ビアク島到着                             |                                       |
| 2月8日  | 物資開梱、イリジウムバイ動作確認、無線機動作確認、回収用受信機動作確認    | 液体窒素量の確認                              |
| 2月10日 | 排気装置立ち上げ                               |                                       |
| 2月11日 | サンプルの真空排気と JTBK-A の真空度チェック             | 放球場とランチャー配置の確認、邪魔な石の除去と整備を LAPAN 側に依頼 |
| 2月12日 | 受信アンテナ設置、JTBK-B の真空度チェック               |                                       |
| 2月13日 | 受信アンテナ配線、ゴンドラ搭載機器の動作確認、JTBK-C の真空度チェック | ヘリウムガスシリンダのアダプタ確認                     |
| 2月14日 | JTBK-D の真空度チェック                        | ヘリウムガスシリンダ配置、配管、リーク試験                 |
| 2月15日 | 受信機動作テスト                               |                                       |
| 2月16日 | 測風ゴム気球放球                               |                                       |
| 2月18日 | 測風ゴム気球放球                               |                                       |
| 2月20日 | 回収予備実験を実施                              |                                       |
| 2月21日 | JTBK-A の防水処理、最終噛み合わせ                   |                                       |
| 2月22日 | JTBK-A 放球、回収                           |                                       |
| 2月23日 | JTBK-B の防水処理、最終噛み合わせ                   | ヘリウムシリンダ入れ替え、配管・リーク試験                 |
| 2月24日 | JTBK-B 放球、回収                           |                                       |
| 2月25日 | JTBK-C、JTBK-D の防水処理、最終噛み合わせ            | ヘリウムシリンダ入れ替え、配管・リーク試験                 |
| 2月26日 | JTBK-C 放球、回収                           |                                       |
| 2月28日 | JTBK-D 放球、回収                           |                                       |

## 2.5. 受信設備

受信施設はビアク島の LAPAN 観測所の中の建屋に設置した。データ受信には過去の J-T サンプラ回収気球実験で使用した簡易型受信システムを使用した [5, 6]。簡易型システムは 403 MHz 受信アンテナ、N-FM 受信機、復調器、クイックルック及びデータ保存用 PC で構成されている。受信室にはこの設備を 2 式設置し UPS 配下においた。一方の受信機には八木アンテナ、もう一方には無指向性アンテナをそれぞれ接続した (図 4)。今回、受信施設をより小規模にするため自動追尾は行わず、八木アンテナはおおよその飛翔方向である西方に固定して設置したが、放球点は受信室の東方約 100 m に位置したため、フライト初期のテレメトリ受信には主に無指向性のアンテナを利用した。受信室にはこれに加えてバックアップのため搭載していた明星電気製ラジオバンドの受信システムを 2 式と、ビアク島航空管制に対する通報情報表示用 PC を設置した。

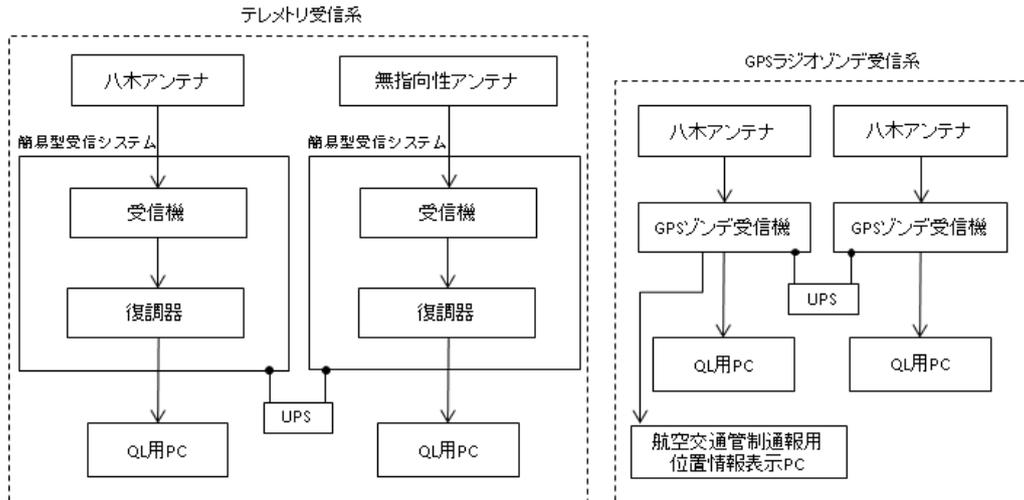


図4 受信システムブロック図

末端部 PC はすべてノートブック PC であり、内蔵バッテリーで十分な時間駆動可能であるため UPS 配下からは除いた。

## 2.6. 放球場の整備

放球場は同じ LAPAN 観測所の敷地の一角とした。実験に先立ち現地を視察したメンバーにより放球の障害となる木の伐採を依頼し、約 50 m×60 m のほぼ平坦な場所を確保した。現地到着後に残っていた小さな岩の撤去作業を行ったが、サンゴ礁が隆起した石灰質の地面であったため現地スタッフの協力により岩を人力で砕き、平滑化した。

## 3. 気球工学概要

J-T サンプラ飛行に用いた気球の諸元を表 2 に、荷姿図を図 5 に示す。気球は大気採集高度の違いにより満膨張体積 5000 m<sup>3</sup> の B5 と 9000 m<sup>3</sup> の B9 を使い分けた。観測器ゴンドラはこれまでの J-T サンプラ実験と同様、GPS 高度をトリガーとするゴンドラ搭載回路の自律動作によりサンプル採集から気球切り離しまでを行う機能を有している。飛行安全にかかわる気球切り離し機構は、搭載回路とは別に外部タイマー経由でも作動するようにして冗長性を確保している。気球の飛行位置情報、サンプリングシーケンスに関わる弁の開閉ステータス等は 1200 bps で受信室に送信された。航空安全系としてはモード C の ATC トランスポンダを搭載し、気球にはレーダー反射能をもたせたほか、閃光灯およびサイレンを装着した。今回の実験は海上回収が必須であるため、海上での位置情報発信装置として宇宙科学研究所大気球実験グループが大型気球用に開発していたものをもとにして、新規開発した小型、軽量のイリジウムブイ (図 6) をゴンドラ下部に吊り下げて放球した。このブイはイリジウム衛星通信により緯度、経度、高度の GPS 測位情報、測位時刻、および電源電池電圧の情報を電子メールで配信する機能を有し、重量 1.5 kg、高さは約 40 cm である。通信間隔は 5 分から 24 時間で設定可能で、単三リチウム電池 (saft 社 G06) 4 直列により約 800 回の通信を行うことが出来る。軽量化を図るため筐体はポリカーボネートで作られており、ベントフィルタにより容器内圧を環境圧力に一致させる構造となっている。このイリジウムブイの飛行を含む運用は今回が初めてであったため、防水加工を施したラジオゾンデを別途ゴンドラに搭載し、海上での位置情報発信に冗長性を持たせた。この防水ゾンデはベントフィルタを装着した市販のタッパーウェアに明星電気製ラジオゾンデ RS11G を入れた単純な構造であったが、防水機能に問題が生じることはなかった。なお、後述する回収リハーサルにおいてはこの防水ゾンデにフロートや錘をつけてゴム気球で飛行させたが、その際の荷姿外観を図 7 に示す。

表 2 気球諸元

| 実験 ID  | 気球 | ゴンドラ重量 (kg) | 総重量 (kg) | 総浮力 (kg) |
|--------|----|-------------|----------|----------|
| JTBK-A | B5 | 44.8        | 88.4     | 102.8    |
| JTBK-B | B5 | 44.8        | 88.9     | 103.4    |
| JTBK-C | B9 | 44.8        | 105.6    | 119.9    |
| JTBK-D | B9 | 44.8        | 106.1    | 120.4    |

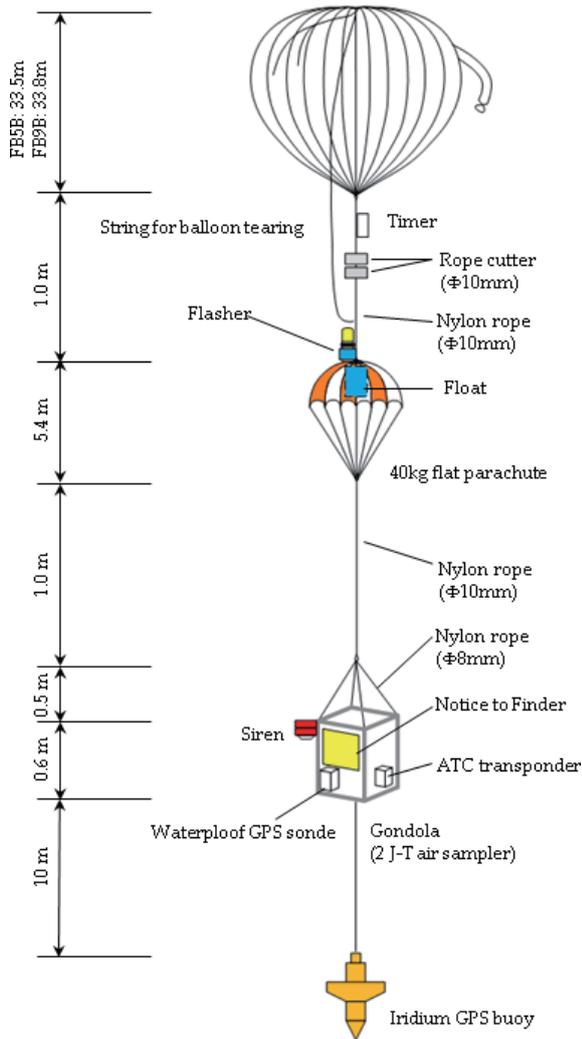


図 5 荷姿図



図 6 小型イリジウムブイの外観



図 7 回収リハーサルで使用した防水ゾンデの外観

## 4. 大気球実験の実施

気球実験の実施体制を図8に示す。放球班の日本側メンバーは過去に同システムによる気球放球経験を有するメンバーを中心に構成されたため、放球作業はスムーズに行うことが出来た。飛行中の大気採集シーケンスも予定通り行われたことが確認できたが、1機目のゴンドラでは防水処理が完全ではなく、一つの大気採集に失敗してしまった。4機目のゴンドラではパラシュートによる降下中にイリジウムブイが失われるアクシデントが発生したが、ゴンドラの回収は4機とも無事行うことが出来た。

|                           |               |                              |            |
|---------------------------|---------------|------------------------------|------------|
| 実験主任 長谷部文雄(北大/JAXA)†      |               |                              |            |
| 安全主任 森本真司(東北大)            |               |                              |            |
| <放球班>                     | <受信班>         | <回収班>                        | <航跡予想>     |
| 森本真司(東北大)                 | 豊田 栄(東工大)     | 森本真司[兼](東北大)                 | 井筒直樹(JAXA) |
| 青木周司(東北大)                 | 森本真司[兼](東北大)  | 本田秀之[兼](JAXA)                |            |
| 中澤高清(東北大)                 | 青木周司[兼](東北大)  | 稲飯洋一[兼](東北大)                 |            |
| 本田秀之(JAXA)                | 中澤高清[兼](東北大)  | 池田忠作[兼](JAXA)                |            |
| 菅原 敏(宮教大)                 | 本田秀之[兼](JAXA) | Thohirin Chodijah [兼](LAPAN) |            |
| 石戸谷重之(産総研)                | 菅原 敏[兼](宮教大)  |                              |            |
| 稲飯洋一(東北大)*                | 石戸谷重之[兼](産総研) | <ビアク島航空交通管制への通報>             |            |
| 池田忠作(JAXA)                |               | Ninong Komala (LAPAN) 他      |            |
| 林政彦(福岡大)*                 |               | 菅原 敏(通報システムの管理)[兼](東北大)      |            |
| 柴田隆(名古屋大)*                |               |                              |            |
| Thohirin Chodijah (LAPAN) |               |                              |            |
| Agus Hidayat (LAPAN)      |               |                              |            |
| Afif Budiyo (LAPAN)       |               |                              |            |
| Ninong Komala (LAPAN)     |               |                              |            |

†プロジェクトチーム長、大気力学グループ長を兼ねる  
\*大気力学グループとしてキャンペーンに参加し、成層圏大気採集実験を支援したことを示す

図8 現地での成層圏大気採集実験実施体制

受信班と回収班で重複するメンバーは4回のフライトで担当が変わったことを示す。

### 4.1. 放球作業

放球点における地上風はほぼ西風が卓越していたため、フィールドの中心からやや西側にずらした位置を放球点とした。放球場の見取り図を図9に、放球作業の一連の流れを図10に示す。気球の展開方向は卓越風方向方向でなく、南北方向に近い方向としたが、これは主にフィールドの東西方向幅が十分でなかったためである。放球に使用する跳ね上げローラーは小型のポリエチレン気球用に開発されたものを利用し、使用済みガスシリンダに固定して設置した。またアンカーにもガスシリンダ入り木箱6個をベルトで束ねたものを利用した。

放球はローラー解放後にアンカーロープをロープカッターで切断することで行った。放球作業は日本側メンバー10人とLAPAN側メンバー4~5人が協力して行い、LAPAN側メンバーは主にガス充填時のラップ操作、スプーラ操作補助、放球時のゴンドラ保持などを行った。LAPAN側には事前に放球作業の安全教育を含めた説明と訓練を行っていたため放球作業はスムーズに進めることができ、放球当日の作業開始から放球までに要した時間は1.5~2時間ほどであった。当日は放球場の境界線には警戒線を引き、放球時には関係者以外の立ち入りを禁止した。

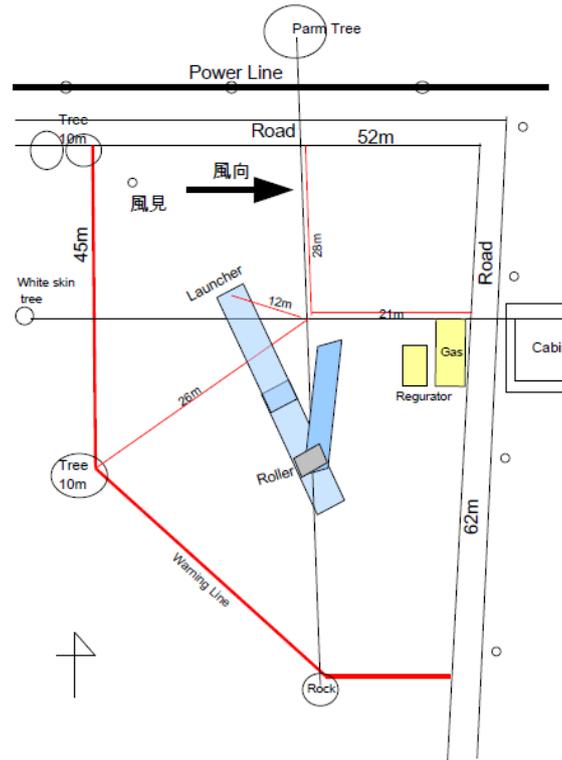


図9 放球場の見取り図  
 青色の四角が気球保護用のトラックシートを敷いた位置を示す。

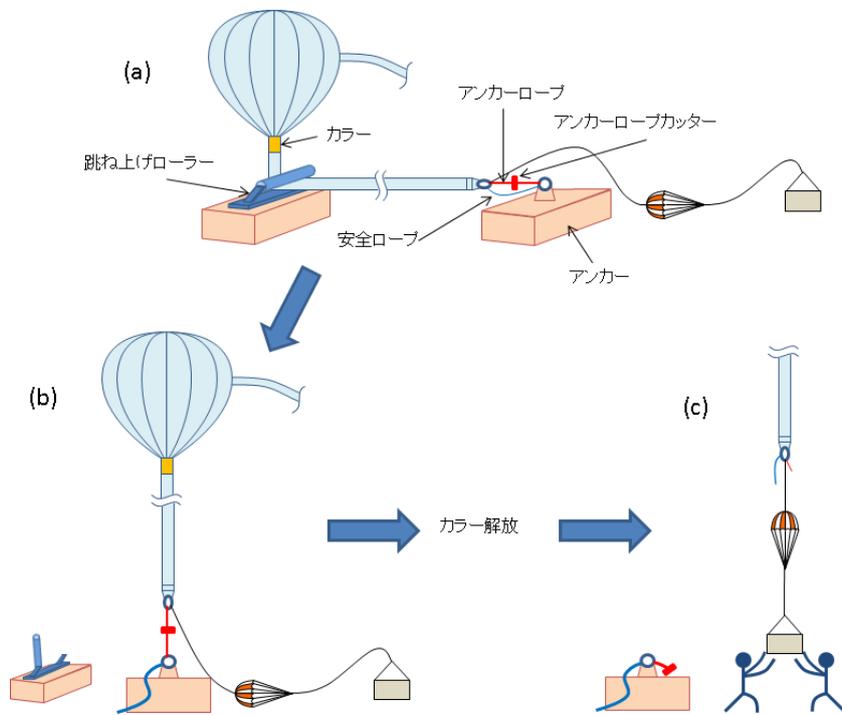


図10 放球作業の流れ  
 (a) 気球尾部をアンカーに固定し、跳ね上げローラーで気球を保持してガスを注入。(b) ローラーを開放して気球を立て上げ、安全ロープを解く。(c) カラー解放後アンカーロープをロープカッターで切断して放球。放球時、ゴンドラは4人で保持した。



図 11 放球直前の様子  
アンカーとして利用したシリンダが右側に写っている。

#### 4.2. 気球の飛翔と大気採集

放球の可否判断は、大気球実験グループが日本から毎日送付した米国海洋大気局の気象データに基づく航跡予測、実験直前の測風ゾンデ観測の結果、および地上気象により行ったが、現地地上気象についての詳細な予報データが得られなかったため、最終的な放球可否判断は当日朝に行った。気球はほぼ予定通りに 5 m/s の速度で上昇し、それぞれ放球前に設定した GPS 高度で自律操作によりサンプリングシーケンスが開始され、大気採集が実施されたこと、サンプル採集終了と同時に液体窒素の排出および気球の切り離しが行われたこと、が地上でのテレメータ監視により確認できた。ポリエチレン気球放球日時、大気サンプル採集高度等を表 3 に、飛翔時の気球の高度変化と航跡を図 12、および図 13 に示した。なお、JTBK-C および D の放球時刻が JTBK-A および B に比べて 30 分ほど早まっているのは JTBK-B の実施後にビアク島航空交通管制側から放球時刻を 30 分早めてほしいとの要請があったためである。

表 3 ポリエチレン気球の放球日時と大気サンプル採集高度、回収時刻、位置（時刻は LT）

| 放球日時          | 実験 ID  | 採集高度<br>(km)               | 採集量<br>(L <sub>STP</sub> ) | 気球切り<br>離し時刻 | 着水時刻 | 回収時刻  | 回収位置                      |
|---------------|--------|----------------------------|----------------------------|--------------|------|-------|---------------------------|
| 2月22日<br>8:10 | JTBK-A | 16.5 – 17.9<br>19.9 – 21.7 | 7.6<br>—                   | 9:18         | 9:40 | 10:40 | 1°00'42"S,<br>135°37'11"E |
| 2月24日<br>8:00 | JTBK-B | 17.7 – 19.3<br>21.1 – 23.0 | 9.3<br>6.9                 | 9:09         | 9:40 | 10:00 | 1°08'56"S,<br>135°36'50"E |
| 2月26日<br>7:30 | JTBK-C | 22.9 – 24.9<br>26.2 – 28.7 | 6.9<br>7.7                 | 8:57         | 9:30 | 10:35 | 1°12'25"S,<br>135°31'47"E |
| 2月28日<br>7:20 | JTBK-D | 24.1 – 26.4<br>27.3 – 30.0 | 7.3<br>2.0                 | 8:50         | 9:25 | 10:15 | 1°04'36"S,<br>135°35'32"E |

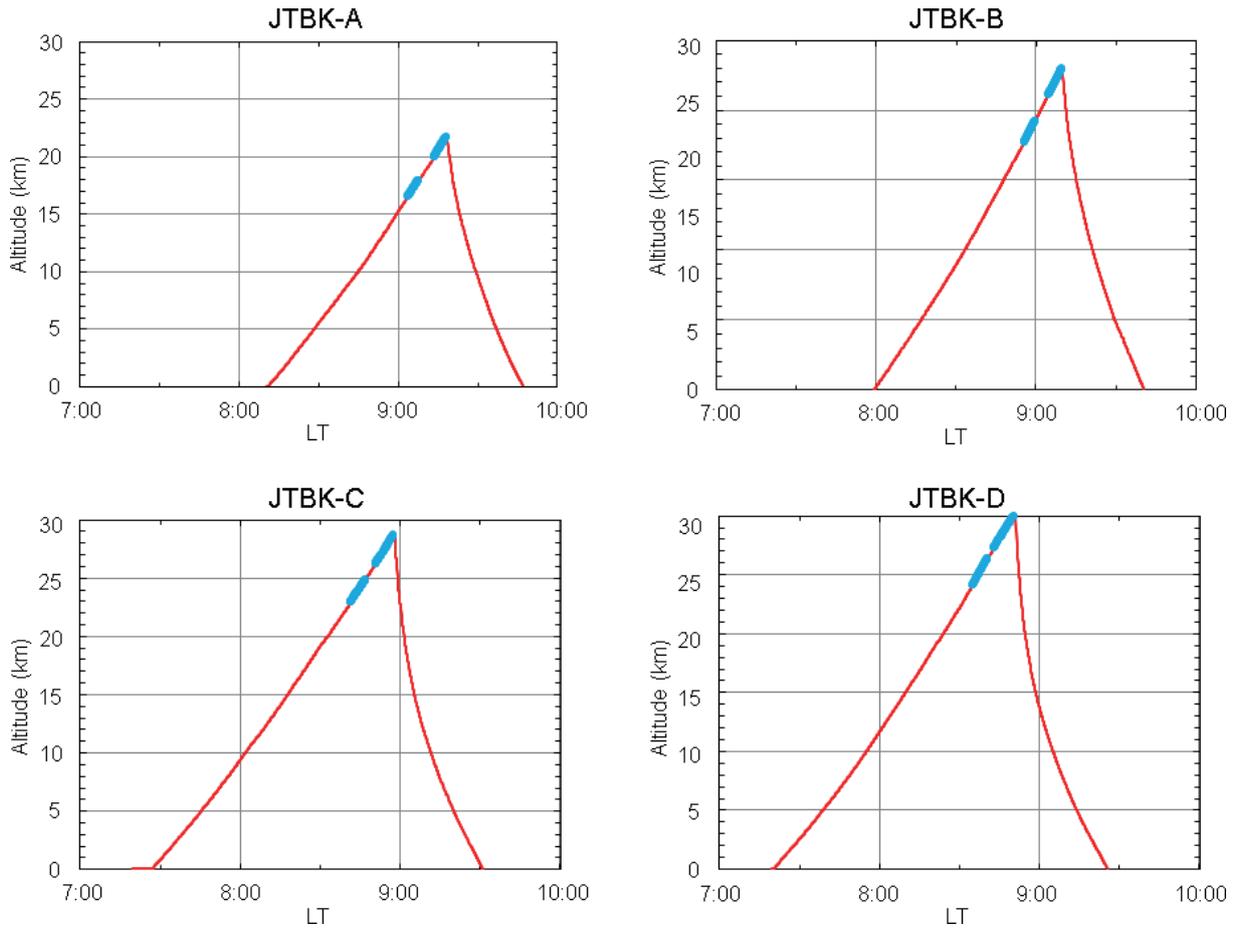


図 12 気球高度の時間変化  
大気サンプリングの高度を青色で示す。

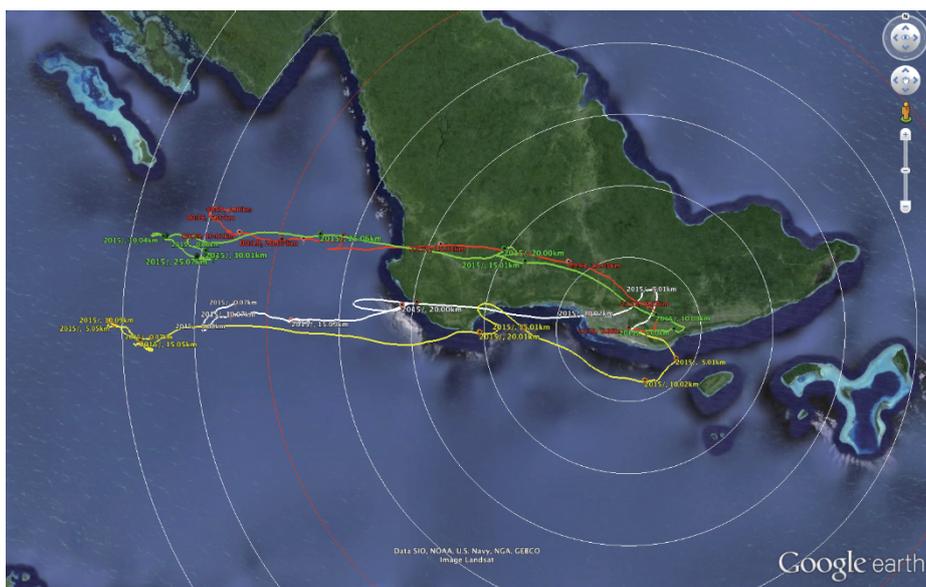


図 13 気球飛翔航跡  
JTBK-A、B、C 及び D の航跡をそれぞれ赤、白、黄色、緑線で示している。  
同心円の間隔は 10 km であり、同心円中心が放球点を示す。

採集された試料は、国内に輸送された後に産業技術総合研究所において大気サンプルの測圧・計量が行われた。その結果、計 8 個の採集試料のうち 7 個で 2.0 ~ 9.3 L-STP（標準温度標準気圧）の大気が採集されており、採集量もおおむね予想通りであることが確認できた。残る一つ（JTBK-A、採取高度 19.9 - 21.7 km）の試料については試料圧力が大気圧であったこと、ゴンドラの搭載回路に海水が浸水した痕跡があったことから、着水後の浸水により電磁弁のリレーが誤作動し、サンプルが漏洩したものと推察された。

#### 4.3. 回収オペレーション

搭載機器の回収オペレーションは現地海上警察の協力のもと、海上警察所有のスピードボート（図 14）を用いて実施した。回収船と受信室との連絡には主にインマルサット衛星携帯電話を用い、受信室から回収船には随時ショートメールにて着水予想位置情報、あるいは着水後の位置情報が送られた。また、船にもラジオゾンデ用の受信設備を設置し、回収船のみでも飛翔位置を把握可能な体制とした。回収船には海上警察のクルー 5 名に加えて日本側の実験グループから 2, 3 人、LAPAN 職員 1 人が乗船して回収作業にあたった。



図 14 回収船の様子

大気球の放球に先立ち、回収作業のリハーサルを 2 月 20 日に実施した。ゾンデ荷姿は図 7 に示したとおりである。この防水ゾンデをゴム気球で飛翔させ、回収船内に設置した受信機により飛翔中のラジオゾンデの GPS 位置情報を取得した。ただし回収船が外洋に出て船速を上げるとエンジンから発生する激しいスパークノイズによる電波干渉を受け GPS 位置情報を含むラジオゾンデデータの取得率が著しく低下した。ゾンデ着水後は海上の波による遮蔽等によりゾンデデータの取得は不可能となったが、電波の方向探知によりゾンデの浮遊する方向を同定し、無事回収することが出来た。以上のように防水ゾンデの機能確認を行うと共に回収船の運用体制と受信室からの連絡方法を確立することが出来た。なお J-T サンプラの飛翔時にはフロート等を除いた防水ゾンデ部のみをゴンドラ側面に固定して運用した。

大気球実験に際しては、回収メンバーは気球の放球作業に従事した後直ちに車で 10 分ほどのピアク港から回収船に乗船し、回収オペレーションを行った。着水地点は放球地点から西に 50 から 70 km ほどの西方海域であり、回収船は着水から 1 時間ほどで現場海域に到着した。

JTBK-A、B、C についての着水位置は着水後のイリジウムブイからの位置情報により容易に確定することができ、回収作業はスムーズに行うことができた。一方 JTBK-D についてはパラシュートによる降下中にイリジウムブイとゴンドラを連結していた索が切断され、ブイからの情報が失われるというアクシデントが発生したが、

予想着水位置の情報、ラジオゾンデによる GPS 位置情報、および回収船からの方向探知により無事回収することが出来た。

イリジウムブイはゴンドラの下部 10 m の位置に破断強度 240 kgf のテクミロンロープを用いて連結していた。破断箇所はゴンドラから約 9 m で、この付近ではゴンドラから伸ばした索をイリジウムブイから延びる 2 本の吊り紐と結束していた。索の破断箇所に傷が生じていた等の可能性も否定できないが、一般に索に結節すると強度が大きく低下することが知られているため [8]、強度の落ちた結び目付近で引きちぎられた可能性が高い。ゴンドラに搭載していた簡易カメラの動画では降下開始後もしばらくの間イリジウムブイが確認できたため、パラシュートの開傘ショックで索が切れたわけではないことが分かった。一方パラシュートによる下降中にイリジウムブイが上下左右に激しく跳ねる様子が記録されていたため、下降中にゴンドラとイリジウムブイを錘とする二重振り子運動が発生したことがわかった。このため索には瞬間的に大きな力がかかり、索が切断されたものと推察された。

## 5. まとめ

インドネシア・ビアク島においてポリエチレン気球 4 機による回収気球実験を実施し、西部太平洋赤道上空の大気を上部対流圏から下部成層圏にかけて 7 つの高度で採集することに成功した。観測器の回収には今回新たに導入した小型のイリジウムブイが大変有効であった。熱帯対流圏界層を含む大気の直接採集による観測は世界でも例のないものであり、TTL 内で進行する様々な大気化学過程や成層圏大気の輸送過程の解明に対し貴重なデータが得られることが期待される。採集された成層圏大気サンプルについてはおおむね分析が終了し、得られた値の解析を進めているところであり、詳細は別途発表される予定である。

キャンペーンの実施に当たっては現地入りした後も物資輸送や気球の飛行許可取得等で苦労することになった。インドネシア側との調整の進め方には反省も含まれるが、LAPAN 側の献身的なサポートにより施設面、物資補給面の環境が劣った場所での大気球実験を成功裏に行うことが出来た。現地での交渉では英語による意思疎通がスムーズにいかない場合もあり、LAPAN 側に日本語に堪能なスタッフがいてくれたことが問題解決に大きく貢献した。このような人材の育成は科学的成果獲得に対して重要であることが再認識された。

## 謝辞

本実験の計画、国内準備、遂行に当たり、多大なご助力を賜りました宇宙科学研究所科学推進部、宇宙科学プログラムオフィスの皆様に感謝いたします。またビアク島での実験実施に際し様々な面でご協力をいただいた LAPAN 職員の皆様、回収船運用にご協力いただいたビアク海上警察の皆様にお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 池田忠作、青木周司、森本真司、菅原敏、本田秀之、豊田栄、石戸谷重之、中澤高清、長谷部文雄、稲飯洋一、林政彦、柴田隆、後藤大輔、Halimurrahman Mukri, Moedji Soedjarwo, Nionong Komala, Fanny A. Putri, Thohirin Chodijar, Agus Hidayat, Afif Budiyo, 飯嶋一征、田村誠、井筒直樹、吉田哲也、インドネシア・Biak 島での大気観測気球実験実施報告、平成 27 年度大気球シンポジウム集録, ISAS15-SBS-018, 2015.
- [2] 長谷部文雄、稲飯洋一、柴田隆、林政彦、荻野慎也、塩谷雅人、西憲敬、藤原正智、宮崎和幸、鈴木順子、清水健作、杉立卓治、三村慧、高島久洋、澤田岳彦、Ninong Komala, Fanny A. Putri, 熱帯対流圏界層における力学・化学過程の観測的研究、平成 27 年度大気球シンポジウム集録, ISAS15-SBS-017, 2015.

- [3] 菅原敏、青木周司、森本真司、中澤高清、石戸谷重之、豊田栄、長谷部文雄、稲飯洋一、後藤大輔、本田秀之、池田忠作、飯嶋一征、田村誠、井筒直樹、吉田哲也、Fanny A. Putri, インドネシアにおける成層圏大気サンプリング気球実験の結果, 平成 27 年度大気球シンポジウム集録, ISAS15-SBS-019, 2015.
- [4] Tanabe, H., Isobe, S., Akiyama, H., Koma, Y., Okabe, Y., Nishimura, J., Maihara, T., Mizutani, K., Soegijo, J., Hariadi, T. E., Agus, S., Mulyana, W., Suroto, V. R., “Japan-Indonesia Cooperative Balloon Observation of the 1983 Solar Eclipse” 昭和 58 年度大気球シンポジウム集録, 122-124, 1983.
- [5] Morimoto, S., Yamanouchi, T., Honda, H., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Ishidoya, S., Iijima, I., and Yoshida, T., “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.
- [6] 森本真司、浅野比、青山朋樹、吉見英史、内田洋子、望月隆史、岩淵真海、水野大治、堤雅基、本田秀之、飯嶋一征、吉田哲也、山内恭、和田誠, 小型クライオサンプラーを用いた昭和基地での成層圏大気採取実験：第 49 次隊実験報告, 南極資料 53, 95-109, 2009.
- [7] 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.
- [8] 杉浦清治、加藤八郎, 繊維ロープのアイスプライス、結節強さ, 愛知県産業技術研究所研究報告, No.2, 186-189, 2003.