



ISSN 1349-1113  
JAXA-RR-08-001

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 大気球研究報告

2009年 2 月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

# 目 次

序 文 .....	
高橋忠幸	
大樹航空宇宙実験場における新しい大気球実験場 .....	1
福家 英之, 秋田 大輔, 飯嶋 一征, 井筒 直樹, 加藤 洋一 河田 二郎, 松坂 幸彦, 水田 栄一, 並木 道義, 野中 直樹 太田 茂雄, 斎藤 芳隆, 瀬尾 基治, 高田 淳史, 田村 啓輔 鳥海 道彦, 山田 和彦, 山上 隆正, 吉田 哲也	
Investigation of cultivable microorganisms in the stratosphere collected by using a balloon in 2005 .....	35
Yinjie YANG, Shin-ichi YOKOBORI, Jutaro KAWAGUCHI Takamasa YAMAGAMI, Issei IJIMA, Naoki IZUTSU Hideyuki FUKE, Yoshitaka SAITOH, Yukihiko MATSUZAKA Michiyoshi NAMIKI, Shigeo OHTA, Michihiko TORIUMI Kazuhiko YAMADA, Motoharu SEO and Akihiko YAMAGISHI	
気球搭載用水晶摩擦気圧計の開発と BU30-5 号機による性能実証試験 .....	43
栗原 純一, 村田 功, 佐藤 薫, 富川 喜弘, 阿部 琢美	
GPS 搭載型光学オゾンゾンデの開発 .....	57
村田 功, 佐藤 薫, 山上 隆正, 岡野 章一, 富川 喜弘	
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 .....	63
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	
PPB8 号機と PPB10 号機によるオーロラ X 線の同時観測 .....	75
中川 道夫, 海老原 祐輔, 江尻 全機, 福田 真実, 平田 憲司 門倉 昭, 籠谷 正則, 松坂 幸彦, 村上 浩之, 中村 智一 中村 康範, 並木 道義, 小野 孝, 斎藤 芳隆, 佐藤 夏雄 鈴木 裕武, 友淵 義人, 綱脇 恵章, 内田 正美, 山上 隆正 山岸 久雄, 山本 幹生, 山内 誠	
スーパープレッシャー気球搭載用燃料電池の実証フライト .....	91
鶴野 将年, 嶋田 貴信, 小川 啓太, 野口 大輔, 有山 裕介 福澤 直也, 内藤 均, 曾根 理嗣, 斎藤 芳隆	

## 序 文

本年度は、大気球の活動をはじめて北海道の大樹町に移して行った記念すべき年となった。これまで、長年にわたって観測実験が行われてきた三陸大気球観測所から移転し、新たな場に放球から通信、回収にいたるまでの設備を設置し、段階をふまえて立ち上げてきた作業に対する大気球実験室の皆様をはじめとする関係者各位のご努力をまずは讃えることとさせていただきたい。より迅速な実験、より大型の実験に対する要求が年ごとに高まっており、大樹町の新しい施設に対する期待、さらに、それを運用する大気球実験室に対する期待は大きい。

本年度の特集号では、大樹町の新しい気球実験場の報告を行うとともに、燃料電池や光学オゾンゾンデ、気圧計などの大気球実験に必要なコンポーネントの報告が掲載されている。大気球そのものを用いた理学、工学実験に関しては、大気球研究委員会の方針もあり、大気球を安全に放球し、確実に運用できるようにするためのアクティビティに全力を注いでいただいた。したがって、本号では、これまでに行われた実験の中から、微生物採取実験、南極で以前行われた PPB 実験でのオーロラ X 線観測、さらに JT クーラーの開発とそれを用いた南極での大気サンプリングの報告が行われた。

今後、新しい環境において、大気球プログラムを発展させ、国際的な視点にたつてよい科学的成果をあげていくための活動が急務である。また、日本で行うべき観測実験の他、ブラジル等海外で行うことが適切である実験に対しても、十分なリソースを投入していくべきであろう。宇宙航空研究開発機構として、大気球実験のアクティビティを支えていくとともに、大気球を用いて実験を行う大学コミュニティの成果創出のための支援も重要であり、今後一層発展させていくことが強く望まれる。

大気球研究委員会  
委員長 高橋 忠幸

# 大樹航空宇宙実験場における新しい大気球実験場

福家 英之<sup>1</sup>, 秋田 大輔<sup>1</sup>, 飯嶋 一征<sup>1</sup>, 井筒 直樹<sup>1</sup>, 加藤 洋一<sup>1</sup>,  
河田 二郎<sup>1</sup>, 松坂 幸彦<sup>1</sup>, 水田 栄一<sup>1</sup>, 並木 道義<sup>1</sup>, 野中 直樹<sup>1</sup>,  
太田 茂雄<sup>1</sup>, 斎藤 芳隆<sup>1</sup>, 瀬尾 基治<sup>1</sup>, 高田 淳史<sup>1</sup>, 田村 啓輔<sup>1</sup>,  
鳥海 道彦<sup>1</sup>, 山田 和彦<sup>1</sup>, 山上 隆正<sup>1</sup>, 吉田 哲也<sup>1</sup>

## New Balloon Base at Taiki Aerospace Research Field

By

Hideyuki FUKU<sup>1</sup>, Daisuke AKITA<sup>1</sup>, Issei IJIMA<sup>1</sup>, Naoki IZUTSU<sup>1</sup>, Yoichi KATO<sup>1</sup>,  
Jiro KAWADA<sup>1</sup>, Yukihiro MATSUZAKA<sup>1</sup>, Eiichi MIZUTA<sup>1</sup>, Michiyoshi NAMIKI<sup>1</sup>,  
Naoki NONAKA<sup>1</sup>, Shigeo OHTA<sup>1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>1</sup>, Motoharu SEO<sup>1</sup>,  
Atsushi TAKADA<sup>1</sup>, Keisuke TAMURA<sup>1</sup>, Michihiko TORIUMI<sup>1</sup>,  
Kazuhiko YAMADA<sup>1</sup>, Takamasa YAMAGAMI<sup>1</sup>, and Tetsuya YOSHIDA<sup>1</sup>

**Abstract:** Since 1971, numerous balloons have been launched from the Japanese balloon base, the Sanriku Balloon Center (SBC). In these 37 years, balloon technologies have been developed continuously and plenty of scientific achievements have been derived. Recently, however, we have been faced difficulties to further develop Japanese balloon activities. To solve this issue, we moved the Japanese balloon base from the SBC to the Taiki Aerospace Research Field (TARF). In FY 2007, new balloon facilities were constructed and the equipments were transferred. In 2008 summer, we carried out the first series of the balloon campaign at the TARF, and succeeded in the first launch of the stratospheric balloon from the TARF.

## 概 要

1971 年以降、日本における大気球実験は三陸大気球観測所（SBC）を拠点として推進され、幾多の気球工学技術と科学的成果を生みだしてきた。しかし昨今の様々な情勢に鑑みると、大気球実験のさらなる飛躍・発展に対する可能性という側面において、三陸大気球観測所はある種の限界に達しつつあった。そこで我々は大気球実験を一層飛躍・発展させるべく、大気球実験の国内拠点を三陸大気球観測所から大樹航空宇宙実験場（TARF）に移転した。移転は 2007 年度に実施し、新しい施設設備も整備した。2008 年度には大気球実験を実施し、大樹航空宇宙実験場での初の大気球の飛翔実験に成功した。

**重要語：**科学観測用成層圏気球、気球実験場、移転、施設設備整備、気球の放球法

## 1. はじめに — 日本の大気球実験 —

日本における大気球実験は、東京大学宇宙航空研究所に気球工学部門が発足した 1966 年以降、精力的に推進されてきた。実験の実施場所は、当初、茨城県鹿島郡大洋村（現在の銚田市）や福島県原町市（現在の南相馬市）であった

---

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部



が、大気球実験用の専門施設の必要性が高まり、1971年、岩手県気仙郡三陸町（現在の大船渡市）に三陸大気球観測所（Sanriku Balloon Center = SBC）が開設された [1, 2]。以来、SBC は、東京大学宇宙航空研究所が文部省宇宙科学研究所となった1981年、文部科学省の所管となった2001年、そして宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部となった2003年を経ても尚、日本唯一の恒久的な大気球実験場として数多くの大気球実験に活用されてきた。2007年までの36年間にSBCから放球された大気球は約400機、SBC以外の国内外での実験も含めると1966年以降の日本の大気球の実績は実に約600機に上る。この間、数多くの気球工学技術が絶えず研究・開発され、また、数多くの科学的・工学的成果が挙げられてきた。

## 2. 移転の背景

### 2.1. 三陸大気球観測所における課題

SBCの施設設備は、技術的、科学的、あるいは、時代的な背景により、様々な整備、改良、更新が逐次進められてきたが、昨今、以下に述べるような、ある種の限界に達しつつあった。

#### 2.1.1. 気球や観測器の大型化

近年、観測の高精度化に伴う観測器の大型化・大重量化が進み、飛翔高度のさらなる高高度化を望む声の高まりも相まって、気球の大型化が進んでいる（図1）。SBCの放球場は1998年に拡張された [3 - 5] もの、依然として長さは160mしかなく、諸外国の放球場に比べても決して十分に広いとは言えない（図2）。これまで、限られた敷地から大型の気球を放球する日本独自の手法が多く開発され、2003年にはB500型気球（体積50万 $\text{m}^3$ ）の放球に成功した実績がある [6]。しかし、B500を超えるような大型気球をSBCの放球場から安全に放球するには、やはり限界がある。

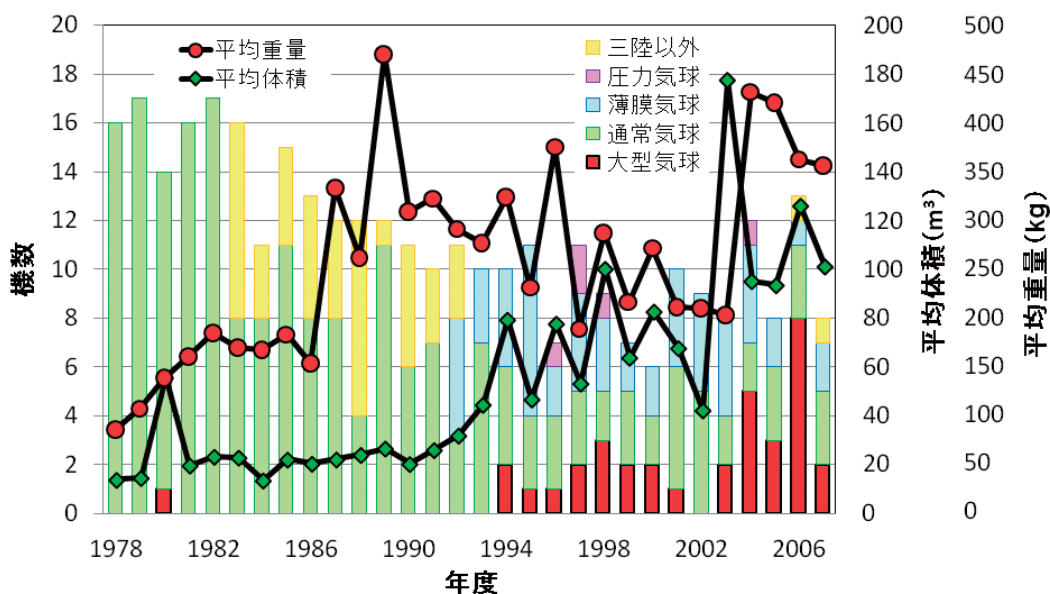


図1 過去30年間の大気球の変遷. B100（10万 $\text{m}^3$ ）以上の体積を持つ大型気球のSBCでの放球機数（赤い棒線）、通常気球（大型気球を含む）の平均気球体積（緑点）と平均観測器重量（赤点）。



図2 三陸大気球観測所の概観

### 2.1.2. ガス充填の屋内化

従来、世界的に、放球前の気球へのガス充填は屋外にて実施されている。しかし、ガス充填中の気球は形状的に不安定であり、ガス充填中に突風を受けると気球が回転したり帆を張ったりしてフィルムが損傷を受ける恐れがある。しかも、前項で述べた気球の大型化やガス浮力の増加に伴い、ガス充填に要する時間も長時間化している。ガス充填を屋内で実施すればこのリスクを抑制でき、心理的にも余裕を持てることで作業性を向上できる。また、ガス充填の屋内化により、放球に適した条件が整うまでガスを充填した状態で屋内にて待機することも可能となり、貴重な放球機会を確実に捉えることで実験日程を効率化させることも期待される。実際、SBC においては、新組立室 [3] の完成以降、小型の気球、とりわけ薄膜型の気球については、屋内でのガス充填作業が行われ、多くの成果が挙げられている [7]。この手法をより大きな気球についても適応可能とするべく、大きな室内空間と大型の扉や屋根を持つ建物を新設する案などが1996年頃から考えられてきた (図3)。しかし実際には、予算などの事情により実現できる見込みを得るに至らなかった。

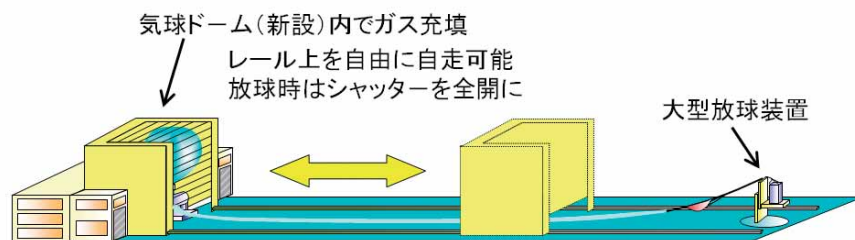


図3 1996年頃から考案されていたSBCにおける屋内でのガス充填の概念図

### 2.1.3. 気象環境

近年のSBCにおける大気球実験は原則として気球を飛翔させる成層圏高度の風が緩やかな東風となる初夏と晩夏に実施されてきた。東風が緩やかな時期を選ぶのは主に観測時間を長く確保するためである。即ち、上層風の観点からは、観測時間が短い実験に関しては夏季中のより広い期間において実施可能となる場合がある。しかし、初夏を過ぎた6月中旬から7月末にかけては例年梅雨になり地上の天気の実験に適さなくなるため、実験期間に対する制約となっていた。そのため、大気球実験は主として5月中旬から6月中旬にかけての第1次実験と8月中旬から9月中旬にかけての第2次実験という年間2度の実験期間において実施されてきた。

なお、冬季については、かつてはSBCでも実験が行われていたこともあったが、ここ10年ほどは実施されていない。冬季は成層圏風が安定するものの西風となるため観測器や気球の着水地点が沿岸から遠く離れてしまっており回収が非常に困難である。観測器の回収を必要とする実験の割合の益々の高まりや、環境保護の観点等からも回収努力が求められる昨今の状況を鑑みるに、実験に適した期間は今後も夏季に限定されるものと見込まれる。

#### 2.1.4. 地理的特性

SBC では、三陸地方の地勢のため、放球場や指令棟と受信局（受信棟、および、大窪山観測棟 [8]）とが地理的に離れており、利便性の向上が望まれていた。

また、山の中腹にある放球場と海（吉浜湾）との間には住宅・鉄道・国道などが点在するため、放球直後の気球がこれらの上空を通過することに対して安全性を確保するのに苦労があった。とりわけ、観測器重量の上限を自主的に設ける（原則として 500kg）という規制をとっていたため、実験への制約となっていた。

#### 2.1.5. 陸上回収

気球飛翔後の観測器の回収は、日本では、従来、原則として海上にて実施されてきた。回収を海上ではなく陸上で行うことが出来れば、観測器開発や回収作業に要するコストを低減するとともに観測器の再使用性を向上できると期待される。陸上回収を安全に実現するためには広くて人工物等の少ない平野部が必要である。しかし、SBC 周辺の三陸地方には平野部が殆ど無く、観測器の回収を陸上で行うことは非常に難しかった。

### 2.2. 大樹町多目的航空公園

北海道広尾郡大樹町にある多目的航空公園（Multipurpose Aerospace Park = MAP; 図 4, [9]）は、次世代の航空宇宙構想への支援を目指す大樹町が 1995 年に開園した、47ha の敷地と全長 1km の舗装滑走路を持つ町有施設であり、JAXA（3 機関の統合前を含む）を始めとする様々な研究機関や大学などによって航空宇宙関連の実験に利用されてきた。2003 年には、成層圏プラットフォーム（SPF）プロジェクトの定点滞空飛行試験 [10 – 12] の実施のため、JAXA や情報通信研究機構（NICT）によって JAXA 格納庫（2008 年 8 月以前の呼称は飛行船格納庫）、飛行管制棟、直径 140m の舗装エリア（ハンドリングエリア）、気象観測装置群などの施設設備が整備された（図 5）。SPF プロジェクトは 2004 年度末に完了したため、残された施設設備の利活用が検討課題となっていた。

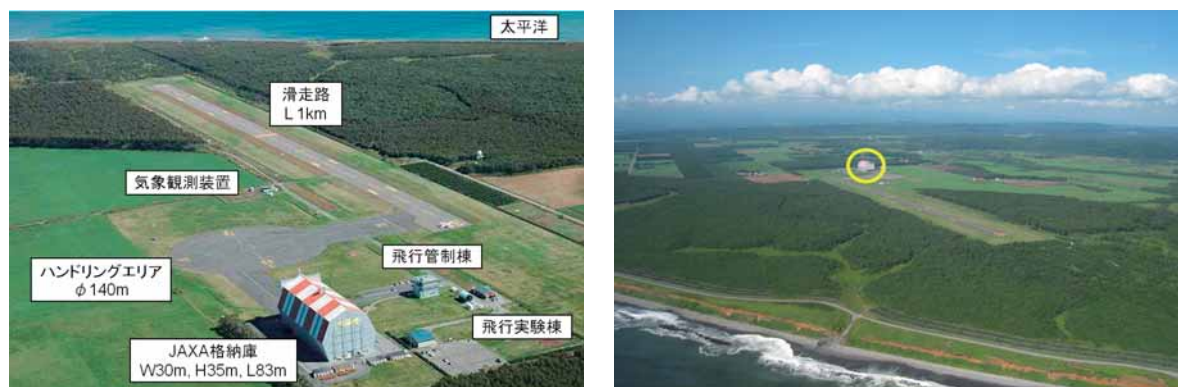


図 4 （左）：大樹町多目的航空公園の概観（2004 年時点）。（右）：太平洋側から見た多目的航空公園の全景。黄色で示した位置が格納庫。周囲には平野が広がっている。



図 5 （左）：JAXA 格納庫、（右）：飛行管制棟



### 3. 移転の経緯

#### 3.1. 大樹町多目的航空公園での大気球実験実施に関する検討

前章で述べた状況を踏まえ、大樹町 MAP にて大気球実験を行うことを想定するとどのような可能性が見込まれるかの検討が 2005 年 11 月に開始された [13].

##### 3.1.1. 気球や観測器の大型化、ガス充填の屋内化

MAP は敷地が広く既存の舗装エリアがあるため、以下で述べるように、SBC で抱えていた敷地の狭さは解消され、気球の大型化に対応可能となる。

格納庫は幅 30m、高さ 35m、奥行 83m という巨大なものであり、扉（電動シートシャッター）も幅 28m、内寸高 25m（外寸高 28.5m）と大きいので、気球へのガス充填作業を格納庫内で充分に実施できる。図 3 のような案は格納庫を前後に動かすことで実現できるが、既存の格納庫を基礎から改築することには技術的にも予算的にも困難が予想される。しかし逆に格納庫を移動させる代わりに気球を含む荷姿全体を移動させる（図 6）ことが出来れば、格納庫を移動させることと同様の効果が期待でき、しかも既存の格納庫をそのまま活用できる。

格納庫内でガス充填された気球のイメージを図 7 に示す。このように、浮力 2,500kg のガス量に対しても十分に対応可能であることが分かる。SBC では放球場の長さ（即ち気球荷姿の全長）や観測器の重量（最大 500kg）に関して制限が課せられていたのに対して、MAP 格納庫内でのガス充填においては格納庫扉の高さの故に総浮力への制限が課せられる。このため直接的な比較は難しいが、例えば B200 型気球（体積 20 万 m<sup>3</sup>）で重量 1 トンの観測器（バラスト重量 500kg を除く）を高度 32km に飛揚させることも現実的となり、観測器の大重量化に対する制約を SBC に比べて大幅に改善することができる。また、MAP の広い敷地のため、気球荷姿全長への制限は SBC の 160m から 2 倍以上に緩和され、気球の大型化にも対応可能となる。

##### 3.1.2. 気象環境

気候環境の面では、北海道は一般的に梅雨の時期が無いので、夏季の気球実験期間を拡大できる可能性がある。SBC の開設当時は冬季の寒さが厳しいという理由のために北海道は立地候補から除外されていたが、2.1.3. 節で述べたとおり近年は冬季の定常実験を行っていないので問題は無い。また、近年の地球温暖化の影響により気候等が北上する事例が一般的に指摘されており、近年 SBC では実験に適さない状態となることが見受けられたジェット気流等の気象環境が、より北方の北海道では改善される可能性がある。

##### 3.1.3. 地理的環境

大樹町 MAP は広大な十勝平野の中に位置しており比較的に見通しが効くため、送受信設備を多目的航空公園内に設置することが可能となり、2.1.4. 節で述べたように SBC では分散していた各施設を一ヶ所に集約できる。MAP は太平洋岸の直ぐ傍にあり、近隣の民家も非常に少ないため、気球が放球後に海上に飛翔するまでの間に住宅・鉄道・国道などの上を飛翔する恐れを SBC よりも軽減できる。上昇中の気球の進行方向にあたる東方は、三陸地方と同様に広く太平洋側に開けており、実験に適している。また、一般航空路も、とちぎ帯広空港の離発着便などの航空路があるものの、便数は少ないため受ける影響は限定的と見られる。

##### 3.1.4. 陸上回収

MAP の周辺地域には比較的人口密度の少ない平野が広がっており、MAP を跨ぐ南北約 100km の太平洋沿岸には陸上回収を実現できる可能性のあるエリアが点在している。各エリアの面積は数～数十 km<sup>2</sup> 程度であるため、大気球実験で従来使用されている非制御型のパラシュート（着地点の位置精度が数 km 程度）をそのまま用いて諸外国のように陸上回収を実現することには依然としてリスクが大きい。しかし、パラフォイルのような制御型のパラシュートを用いた自律飛行降下システム [14 – 16] を開発できれば、陸上回収の実現性が高まる。

##### 3.1.5. その他の可能性

MAP は滑走路を有しており、かねてより JAXA がヘリコプターや小型飛行機による航空機飛行実験に使用してきた実績もある。そのため、大気球の回収作業における回収用航空機との連携を SBC よりも一層効率的に行える可能性がある。

広大な敷地を積極的に活用することで、SBC では保安上の理由により難しかった実験を実施できる可能性も生まれ

る。例としては、一定の保安距離の確保を必要とする実験供試体を気球高度から上向きに飛翔させたり（ロクーン [17]）下向きに降下させたり（無重力実験 [18-20]）するような実験がある。

以上のように、検討の結果、大樹町 MAP にて大気球実験を実施することで様々な利点を得られる可能性があると考えられた。

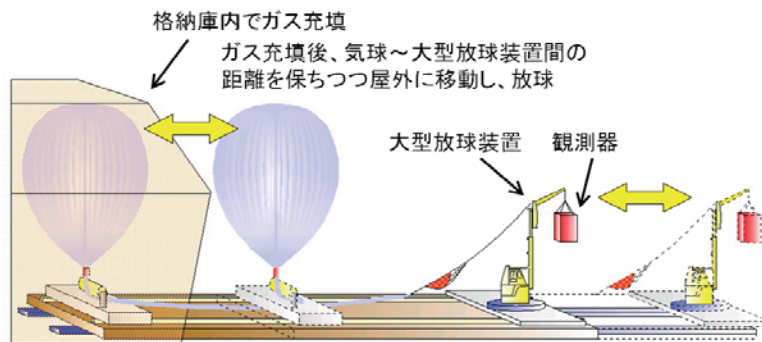


図6 屋内でのガス充填後に気球および観測器を屋外に移動して放球する案の概念図

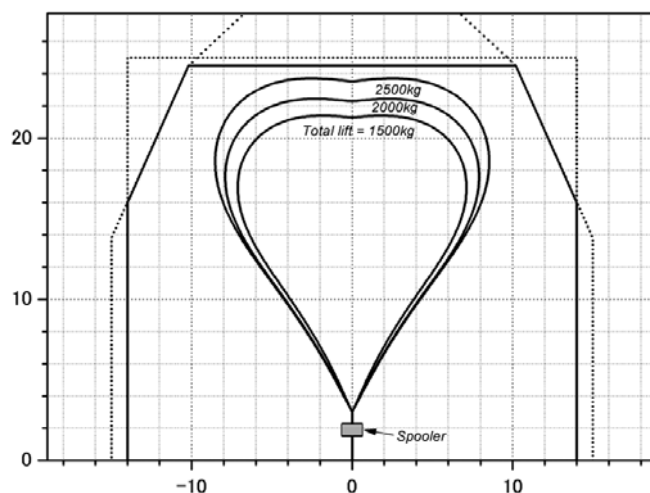


図7 格納庫内でガス充填した大気球のイメージ（総浮力が1500kg, 2000kg, 2500kgの場合）。格納庫の実効的な出入口寸法を実線で示している。

### 3.2. 提案から計画決定まで

前節で述べたとおり、大気球実験を大樹町 MAP で実施することに関する JAXA 内での検討は 2005 年 11 月に開始された。検討は、大樹町 MAP における JAXA の実験活動の活性化を目指す総合技術研究本部（現在の研究開発本部）や航空プログラムグループも交えて行われた。

12 月に宇宙科学研究本部の首脳部による検討が行われ、2006 年 1 月には JAXA 首脳部による検討も重ねられた。その結果、大気球実験場を SBC から大樹町 MAP に移転するという計画の方向性が固まった。SBC の施設設備を維持しつつ MAP でも実験を実施することは経費などの観点から現実的ではないと判断された。

対外的には、2006 年 2 月から 4 月にかけて、文部科学省、大船渡市、大樹町などに対する移転計画の説明が順次開始された。移転計画の正式な発表は、予算交付後の 2007 年 5 月に行われた。

予算的制約などにより、移転は基本的に 2007 年度の単年度で実施する計画となった [21-23]。大気球実験の効率的な運用のために必要不可欠である大気球実験の専用施設の新築工事は、2007 年度初頭から設計を開始し 2007 年度内に工事を竣工させるという短工期となった。経費抑制のため設備は原則として全て SBC から移設することとなったが、

一方で、共同利用機関としての大気球実験は継続的な実施が望ましい。そこで、2007年度の第2次実験まではSBCにて実施した後、冬期に設備の移転を実施完了させ、2008年度からは大樹町MAPで実施することとなった。

### 3.3. 三陸大気球観測所の閉所と大樹町多目的航空公園の新築工事

SBCにおける最終号機は2007年9月13日に放球された(図8)。9月29日にはSBCの閉所式が、長年に亘ってお世話になった関係者を招いて行われた(図9, [24])。SBCの跡地利用に関しては、大船渡市とJAXAとの協議が重ねられた結果、一部舗装路面を除く全ての施設設備を取壊すこととなった。吉浜地区以外(即ち大窪山地区[8]と元山中継所[25])については2007年11月から12月にかけて、また、吉浜地区(受信棟を含む)については2008年8月から9月にかけて取壊し工事が実施された。

大樹町MAPにおける新築工事は2007年7月に着工され、大気球指令管制棟は2008年1月、外構工事なども含めると2008年3月に竣工された(図10)。SBCの設備をMAPに輸送して設置する移転作業は2007年10月に開始され、2008年3月に完了した。大樹町MAPに整備した施設設備については次章で詳述する。



図8 三陸大気球観測所における最終号機となったBU30-5の放球作業



図9 三陸大気球観測所閉所式で式辞を述べる井上宇宙科学研究本部長



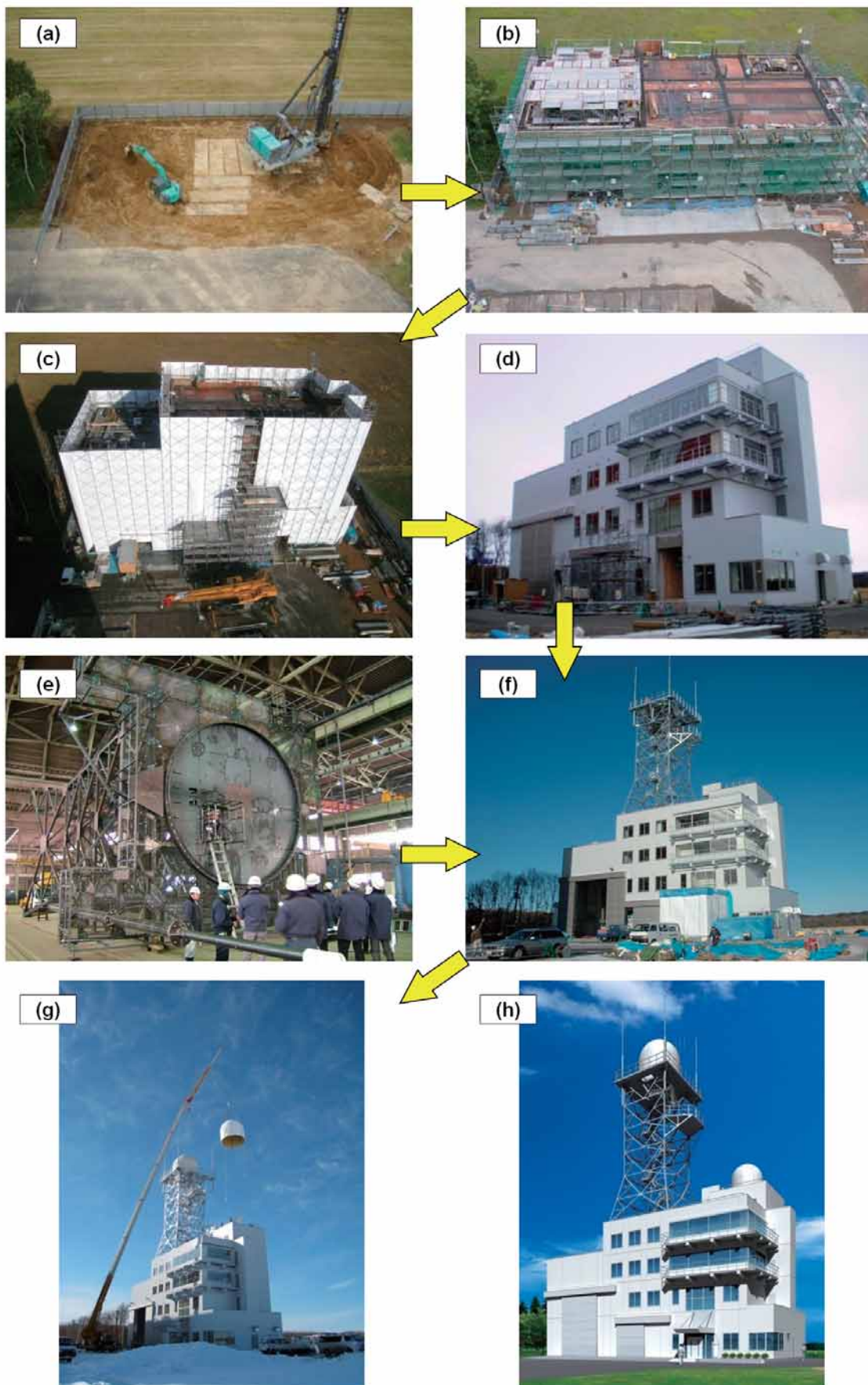


図 10 大気球指令管制棟の建設工事. (e)：工場で仮組みされた鉄塔. (h)：完成予想図.

### 3.4. 大樹航空宇宙実験場としての幕開け

前述のとおり、JAXA は以前から大樹町 MAP の利用を重ねてきた。実験用航空機を用いた航空技術の研究が1997年に開始されたほか、2004年頃には成層圏プラットフォームの試験が行われるなど、年々利用方法が多岐に亘りつつある。そして、2008年からは大気球実験が定常的に実施されることになったことから、JAXA と大樹町の連携強化が必要との判断により、JAXA と大樹町による連携協力協定が締結された。協定では、JAXA が MAP を拠点として実験などを継続的に行うことや、大樹町が推進する宇宙航空に関する教育活動などに JAXA が協力することなどが謳われている。この協定により、JAXA が MAP 内に実験施設などを保有するエリア（図 11, 12）を「連携協力拠点 大樹航空宇宙実験場」（Taiki Aerospace Research Field = TARF）と称することとなった。

連携協力拠点は JAXA の事業所ではなく自治体との連携協力に基づくものであり、JAXA が自治体とこの種の協定を締結するのは初めてである。三陸大気球観測所（SBC）が事業所であったのに対して大樹航空宇宙実験場が異なる形態となった背景には昨今の独立行政法人に対する整理合理化の流れの影響も見受けられる。

協定の調印式は5月26日に現地に実施され、JAXA や大樹町の関係者など計約200名が出席した（図 13）。式典後には大気球実験の開始を記念したセレモニーが行われ、地元の小学生約100名が宇宙への夢を記したメッセージを添えた色とりどりの風船を大空に放った（図 14）。前日の5月25日には協定締結を記念した講演会が大樹町主催で開催され JAXA 職員による講演が行われるなど、協定に謳われた宇宙教育活動も始められている。

SBC は大気球実験専用の施設であったが、大樹航空宇宙実験場（TARF）では気球以外の実験も行われ、さらに、TARF エリア外の MAP 内（滑走路など）では JAXA 外機関の諸活動も行われることから、スケジュールの調整が重要である。このため、JAXA 内での調整、および、大樹町を窓口とする対外的な調整を円滑に行うための枠組み整備が進められている。

移転に関する主な動きを表1と表2に示す。

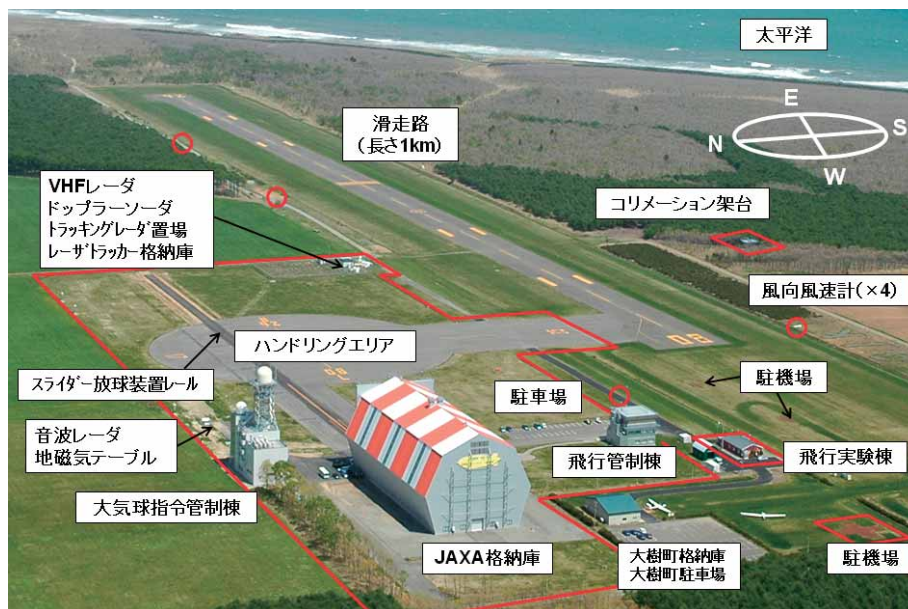


図 11 大樹航空宇宙実験場の概観（赤線で示した区域）



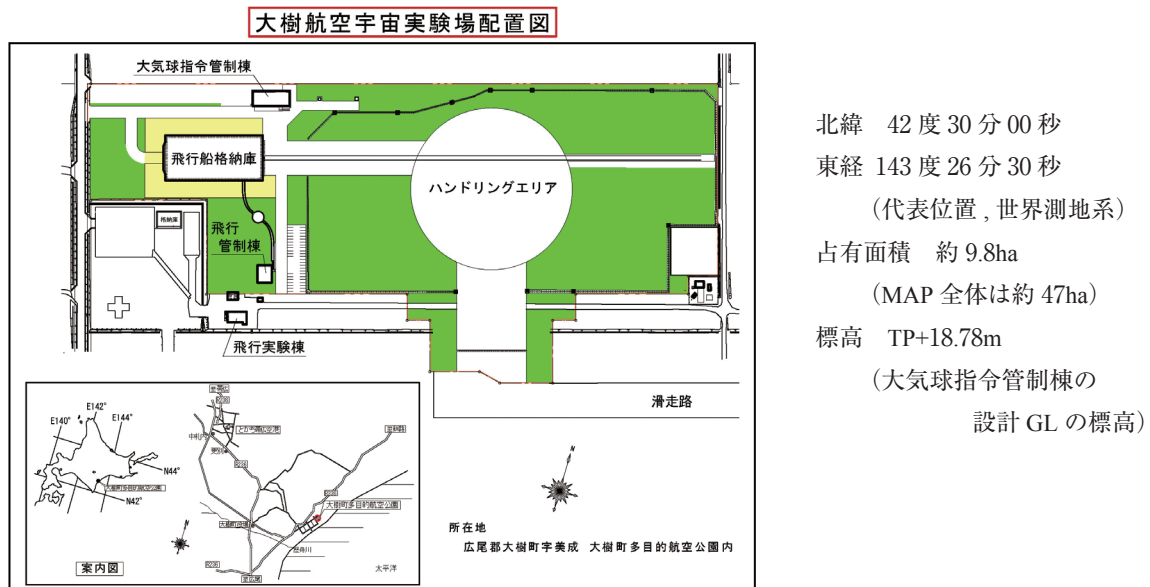


図 12 大樹航空宇宙実験場の配置図



図 13 調印式で握手を交わす立川 JAXA 理事長（中央左）と伏見大樹町長（中央右）

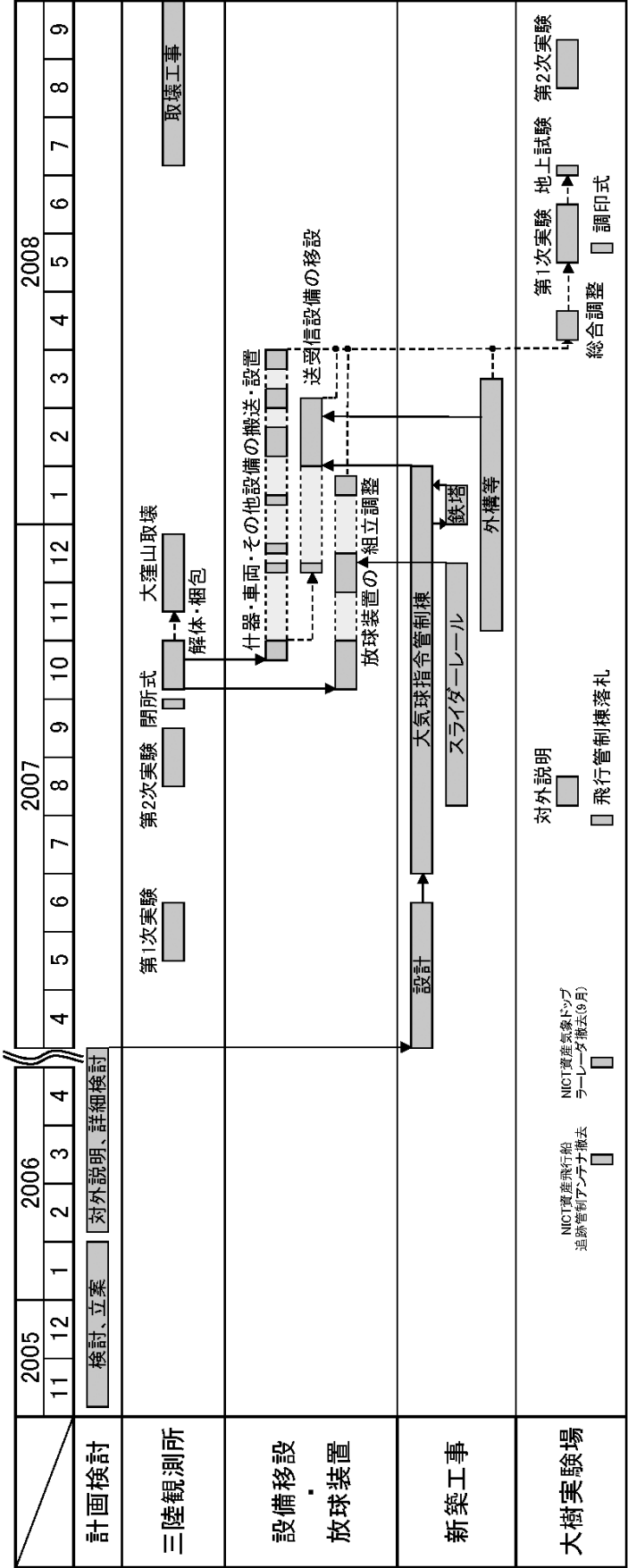


図 14 地元の小学生による大気球開始式でのバルーンリリース

表 1 移転に関する主な動き

2005 年 11 月 8 日	宇宙科学研究本部・総合技術研究本部・航空プログラムグループの関係者間協議
2005 年 12 月 21 日	宇宙科学研究本部企画調整会議
2006 年 1 月 10 日, 26 日	JAXA 役員説明 (宇宙科学研究本部・総合技術研究本部・航空プログラムグループの連名)
2006 年 2 月 8 日	文部科学省説明
2006 年 2 月 20 日	大船渡市訪問 (計画説明)
2006 年 4 月 17 日	大樹町訪問 (調査検討)
2006 年 4 月 18 日	JAXA 理事会議報告
2007 年 1 月 12 日	移転に向けた準備を本格化
2007 年 4 月 12 日	新築工事詳細設計開始
2007 年 5 月 11 日	JAXA として移転計画を初めて正式に発表 (大船渡市での記者会見)
2007 年 7 月 2 日	新築工事 (大気球指令管制棟) 着工
2007 年 8 月 6 日	新築工事 (スライダー放球装置レール) 着工
2007 年 7 月 30 日	NICT 所管の飛行管制棟を JAXA が落札入手
2007 年 9 月 13 日	三陸大気球観測所における最終号機の放球
2007 年 9 月 29 日	三陸大気球観測所閉所式
2007 年 10 月 24 日	三陸大気球観測所からの輸送の第 1 便が大樹町多目的航空公園着
2007 年 10 月 31 日	スライダー放球装置の工場検査
2007 年 11 月 6 日	新築工事 (外構工事) 着工
2007 年 11 月 26 日	大樹町多目的航空公園常駐の派遣職員着任
2007 年 11 月 14 日～12 月 25 日	三陸大気球観測所の大窪山観測棟・元山中継所の取壊し工事
2007 年 12 月 13 日	スライダー放球装置レール竣工
2007 年 12 月 18 日	大気球指令管制棟鉄塔の工場検査
2007 年 1 月 24 日	スライダー放球装置検収
2008 年 1 月 31 日	大気球指令管制棟竣工
2008 年 2 月 6 日	送受信アンテナ, 主副レドームを大気球指令管制棟に設置
2008 年 2 月 20 日	三陸大気球観測所からの輸送の最終便が大樹町多目的航空公園着
2008 年 2 月 29 日	三陸大気球観測所常駐の派遣職員任期満了
2008 年 3 月 3 日	大樹町多目的航空公園の派遣職員 2 人目着任
2008 年 3 月 5 日	送受信設備移転工事検収
2008 年 3 月 12 日	外構工事等検収
2008 年 3 月 28 日	移転作業完了
2008 年 4 月 14 日～18 日	スライダー放球装置・送受信設備調整作業
2008 年 5 月 26 日	連携協力協定調印式, 大樹航空宇宙実験場としての幕開け
2008 年 5 月 12 日～6 月 12 日	平成 20 年度第 1 次大気球実験
2008 年 7 月 3 日	地上試験
2008 年 8 月 20 日～9 月 9 日	平成 20 年度第 2 次大気球実験 (8 月 23 日 B08-01 飛翔, 9 月 5 日 B08-02 飛翔)
2008 年 7 月 8 日～9 月 30 日	三陸大気球観測所の吉浜地区 (指令棟, 放球場, 受信棟などを含む) 取壊し工事

表 2 移転に関する主な動きの相関



## 4. 新しい大気球実験場の施設設備

前章で述べたとおり、TARFにて大気球実験を定常的に実施するため、施設設備の整備を進めた。実験の準備や飛翔中の通信管制を行うため、新棟「大気球指令管制棟」を建設した。格納庫内でのガス充填を実現するため、レールの敷設とその上を走行する「スライダー放球装置」を開発・整備した。SBCで使用していた実験設備は基本的に全てTARFに搬送し、主として大気球指令管制棟内に移設した。加えて、大気球実験の一層の円滑な遂行のため、様々なシステムも新しく導入した。また、外構工事により、屋外設備の移設を含むフィールドの整備を進めた。これらの施設設備整備は、単年度の限られた予算と時間の中で実施された。

### 4.1. 大気球指令管制棟

大気球指令管制棟はSBCにおける指令棟、受信棟、大窪山観測棟の機能を併せ持つ新棟であり、鉄骨コンクリート造りの4階建て（一部は3階、一部は5階、一部は地下1階）の建屋と、その上に建つ鉄塔から構成される（図15-18）。大気球指令管制棟の建設位置は、大気球実験を効率的に運用でき、且つ、大樹町MAPで実施される他の実験や実験計画に極力影響を与えないことを考慮して決められた。

#### 4.1.1. 鉄塔

鉄塔の上面（地上35m）の上には、主系アンテナとして、大窪山観測棟からレドーム（受信アンテナを含む）と送信アンテナが移設された。鉄塔の高さは

- (1) 他の建造物、とりわけ、高さの高い格納庫がアンテナの視野に極力入らないこと、
- (2) 東方海上の気球との遠距離通信において海面反射等の影響を極力受けないこと、
- (3) 航空公園であることから避雷針を含む建築物の最上部が航空法で定められる上限の高さ以下であること、

などの条件により定まった。アンテナ位置をできるだけ高所とするため、避雷設備は短い4本の避雷針を用い、回転球体法と保護角法を組み合わせた配置設計とした。飛翔中の気球の追尾に支障をきたさないため、鉄塔はその上面の揺れが通常の気象条件下において $\pm 0.1$ 度以内であるように設計された。棟屋屋上には副系のアンテナとして、受信棟の受信アンテナとレドームが移設された。これにより、SBCでは離散していた大窪山観測棟と受信棟の送受信システムを一ヶ所に集約することが実現され、より効率的な実験の運用が可能となった。

鉄塔の中の東面には沿岸監視用の船舶レーダが移設された。レーダは9.7GHz帯を定格25kWで発してその反射波によりエコー探知を行うもので、実験時の保安確保のため、沿岸水域の船舶状況のモニターに用いる。

集約・整備した送受信システムの概要を後述する各種システムとの関連も含めて図19に示す。また、主系アンテナから見た飛翔中の気球に対する見通し範囲を図20に、TARFの大気球実験で用いる電波の一覧を図21に示す。

#### 4.1.2. 建屋概要

大気球指令管制棟の建屋内部はSBCの指令棟などに準じた思想に基づいて設計され、約20の部屋が配置された。延べ床面積はSBCの当該施設の合算値とほぼ同等の約1,200m<sup>2</sup>であるが、SBCよりも一層効率的な実験運用を目指した設計となっている。このため、実験時のデータ通信用ケーブルを予め壁の中に敷設しておいたり、SBCでは不足がちであったデスクワーク用のスペースを意識的に確保したり、空間を最大限に有効活用することを目指してOAフロア（フリーアクセスの二重床）や室内ケーブルラックを随所に取り入れたりするなどの工夫が施されている。

1階からR階（5階）まではエレベータで昇降できる。エレベータは定員15名（1,000kg）の乗用ではあるが、荷物の運搬にも耐えうるよう戸開延長ボタンや高密度型の戸先近接センサを備える。出入口寸法は幅1.1m・高さ2.1m、カゴ寸法は幅1.8m・高さ2.3m・奥行1.3mであり、機械室レスの特注タイプとなっている。

建屋内はバリアフリー仕様であり、多目的便所を備える。建屋内外要所には点字ブロックがあるほか、エレベータも車椅子用対策と視覚障害者対策を備えた仕様となっている。照明器具にタイマーセルコン型の蛍光灯を用いるなど、省エネにも配慮している。三陸地方と比べても極寒冷となる冬季においても常駐者が滞在できるようにするため、建屋内の常駐区域には極寒冷地用の空調機を用いたり屋内給水の独立な水抜き系統（ヒーターおよび電動バルブ付）を設けたりするなど、各所に極寒冷地仕様を施している。なお、極寒冷地仕様としては、建屋内外の土木建築工事においても当然、相応の凍上抑制層を確保するなどの対策が取られている。

#### 4.1.3. 建屋内の各部屋の概要

気球実験の準備作業，とりわけ観測器や気球荷姿の組立調整作業のため，建屋1階には「気球組立室」と「観測準備室」を設け，広いスペースを確保している．とりわけ気球組立室は床面積約130m<sup>2</sup>を持つ3階までの吹き抜け（天井高約12m）となっている．気球組立室と観測準備室は共に荷重2トン用のホイスト式天井走行クレーンを有しており，気球組立室には実効揚程約9.9mのクレーンが2機，観測準備室には実効揚程約3.0mの物が1機，それぞれ備えられている．また，2室は共に大型の電動扉を持ち，気球組立室は開口部幅6m・高さ8mの引分扉（両引扉），観測準備室は開口部幅4m・高さ4mの片引扉となっている．仮にこの2室ではスペースが不足していても巨大な格納庫内で同様の作業を行うことができる．ただし，格納庫は吊下げウィンチ（920kg仕様のウィンチと滑車で二重にしたロープの組合せにより使用荷重は1.8トン）を4ヶ所に有しているものの，天井走行クレーンは備わっていない（天井設備の設定耐荷重が35kg/m<sup>2</sup>しかないので天井走行クレーンは取付不可）．なお，電子回路の組立調整など広いスペースを必要としない準備作業は2階の「計測器室」にて行うことができる．

主副の受信アンテナで受信されたテレメトリ情報は4階の「受信管制室」に集約され，気球の飛翔管制に利用されるほか，観測者（PI）に提供する情報については隣の「観測データ処理室」に配信される．放球前の地上作業の指揮は3階の「指令室」にて執り行われる．放球時に必要な気象データも指令室に集約されている．受信管制室や指令室からは放球場を視認できる必要があることから，部屋の東面と南面に大面積の窓（はめ殺し）を配することで広い視界を確保している．なお，受信管制室には受信卓が，また，指令室には指令卓が，それぞれSBCから移設された．SBCで指令棟・受信棟・大窪山観測棟に分散していた受信システムは統廃合され，受信管制室内のテレメータ受信装置ラックに設置された（図18-d, 19）．

デスクワーク用スペースとしては，大小2つの会議室や，実験主任・ランチャー班・受信班それぞれの準備室が設けられている．飛行管制棟1階会議室もデスクワークに使用できる．

このほか，庶務や対外対応を行う「事務室」などの部屋や，物品を保管するための部屋，各種電気設備用の「電気室」，SBCでは別棟だった「仮眠室」などの部屋がある．また，棟内は禁煙のため，「喫煙室」を備えている．





図 15 大気球指令管制棟

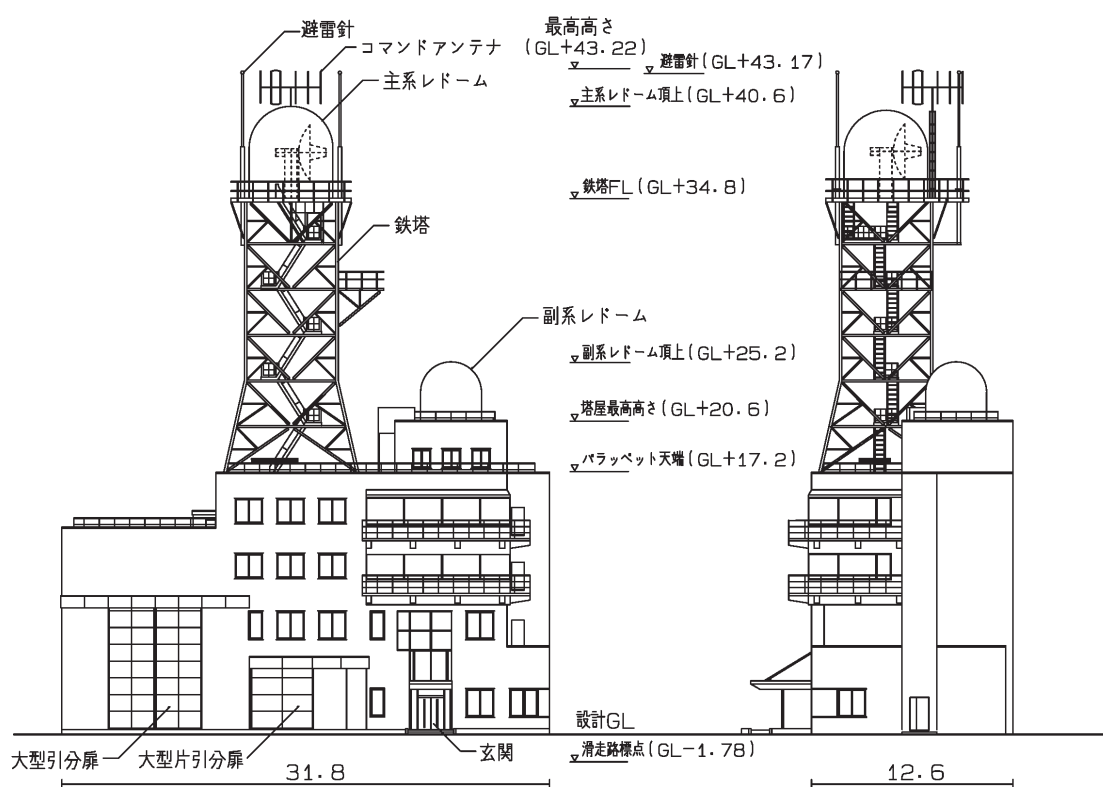


図 16 大気球指令管制棟 立面図 (長さの単位はメートル)

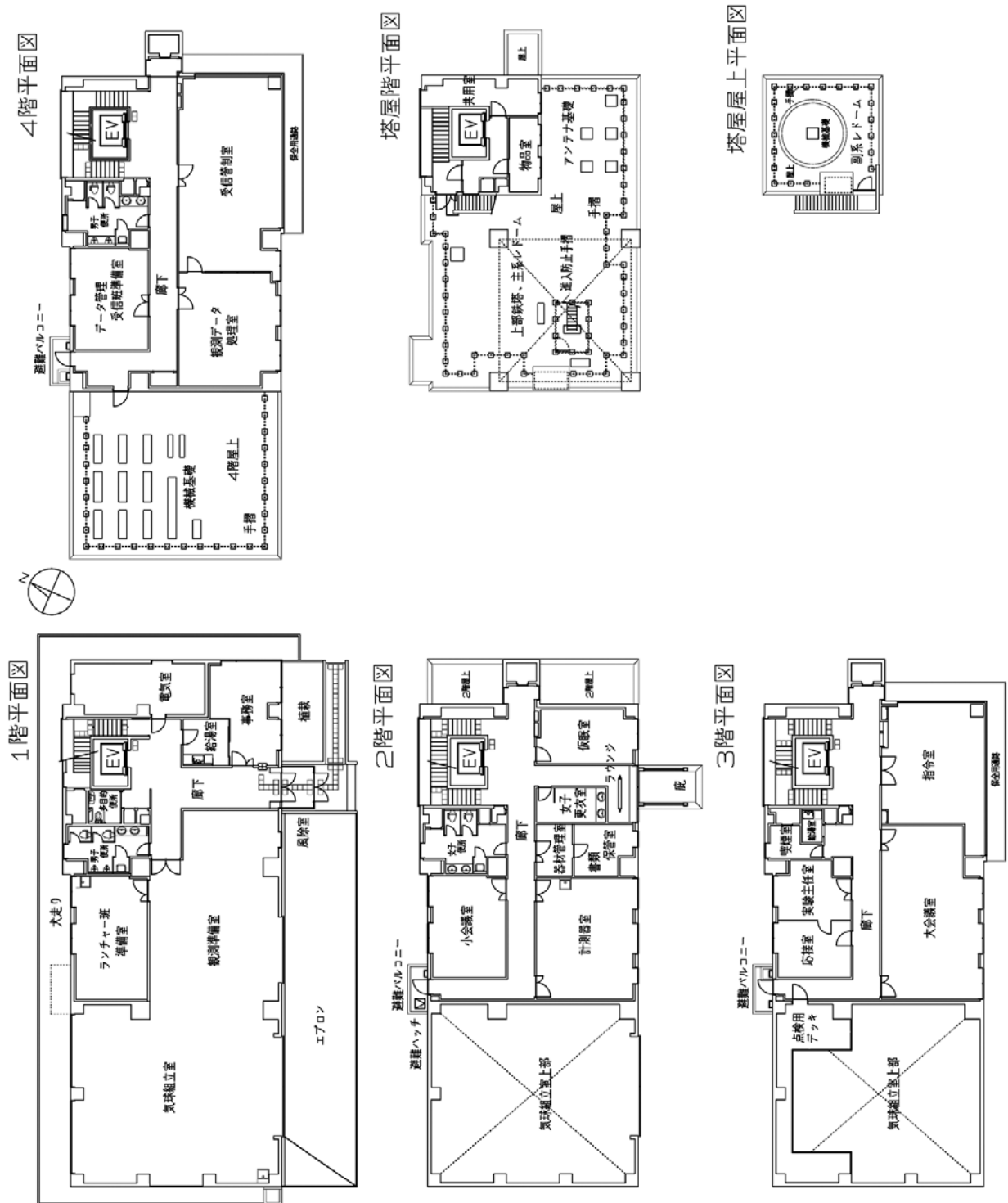


図 17 大気球指令管制棟 各階平面図



図 18(a) 受信管制室



図 18(b) 指令室



図 18(c) 受信管制室



図 18(d) テレメータ受信装置ラック



図 18(e) 観測データ処理室



図 18(f) 電気室



図 18(g) 大会議室



図 18(h) 応接室

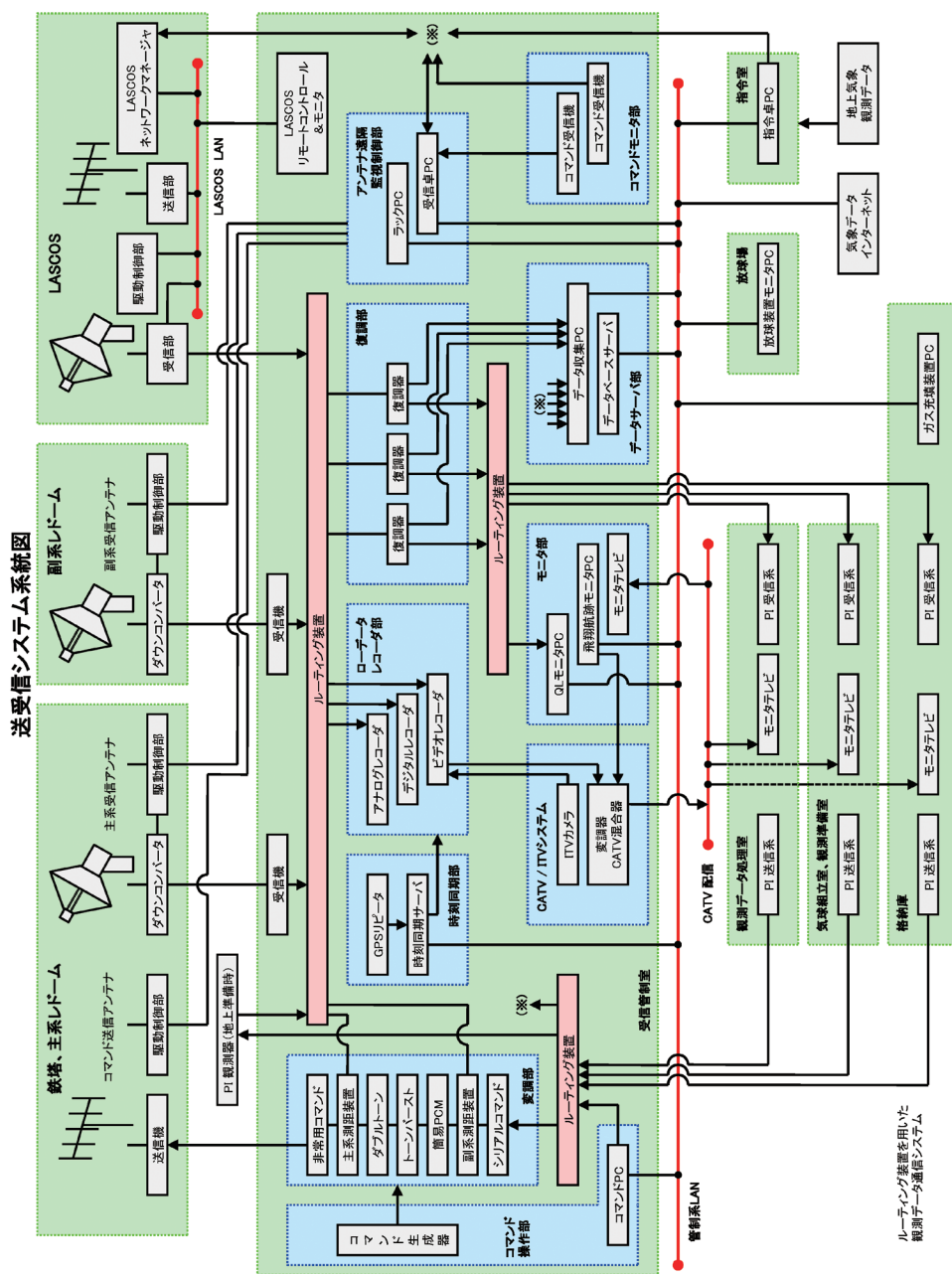




図 18(i) 便所



図 18(j) エレベーターホール



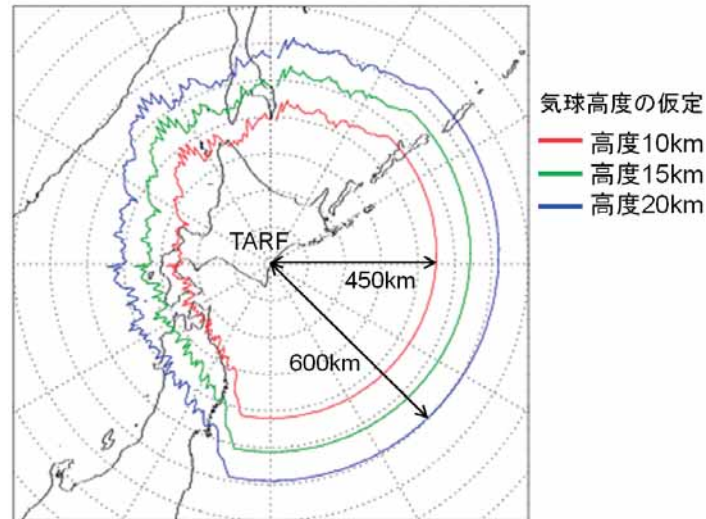


図 20 主系受信アンテナの受信（見通し）可能範囲



図 21 TARF の大気球実験で用いる電波の一覧

#### 4.2. スライダー放球装置

SBC で 1990 年代後半に開発されたセミダイナミック放球法は、B100 (10 万  $\text{m}^3$ ) 程度以上の体積を持つ気球を SBC の手狭な放球場から安全に放球する方法として開発・確立され [4, 5], 多くの成果を挙げてきた。このセミダイナミック放球法を踏襲しつつも、気球へのガス充填を格納庫内で行うように発展させるべく、スライダー放球装置を開発した [22, 26]。

スライダー放球装置は、格納庫の奥から放球場の先端まで延びる長さ 460m・幅 4m の 1 対のレールと、その上を走行する 2 台の台車、即ち「放球台車（親台車）」と「スプール台車（子台車）」から構成される（図 22 - 24）。

##### 4.2.1. 放球台車

放球台車は SBC の大型放球装置と同様に、観測器と気球荷姿の連結部を保持する役割を持つ。放球台車は、幅 8m・長さ 10m・高さ 1.5m の台車の上に、アーム部、観測器台、昇降機構、ターンテーブル部を持つ。

アームはロードセルを内蔵したリリース機構を先端に持ち、長さは 4m。吊上げ最大重量は 1.5 トン、静止保持吊上げ荷重は最大 2 トン、浮力耐荷重は 3.1 トンである。リリース機構には 90mm のストロークをもつパワーシリンダを用いている（図 23）。アームは水平方向に対して +77 度から -20 度までの範囲内で角速度 10deg/sec にて傾きを変動できる。放球直後の観測器との物理的干渉を回避するため、リリース機構の解放動作と連動してアーム角度を 77 度まで自動的に立ち上げることもできる。

観測器台は幅 4m・長さ 3m であり、最大積載 2 トンまでの観測器を設置できる。

アームと観測器台はそれぞれ昇降機構を持ち、速度 4m/min で連動または独立して昇降できる。これにより、台車上面（地上高 1.5m）を基準とした場合、アーム部の根元は高さ 5.5m ～ 8.3m、観測器台は高さ 0m ～ 4.0m の範囲内を上下することができる。

ターンテーブルはアーム、観測器台、昇降機構を搭載する直径 6m のテーブルで、約 1rpm にてエンドレスに左右両方向に回転できる。放球時のアーム角度として典型的な 60 度程度のアーム角度の場合、アーム先端のリリース機構はほぼターンテーブルの中心軸上に位置する。このため、観測器を吊り下げた状態でターンテーブルを回転させても観測器の揺れは最小限に抑えられる。

放球台車の自重は約 50 トンで、アウトリガーを四隅に持つ。アウトリガーを出さなくても、転倒耐荷重は、最高状態のアーム先端に横向き荷重が掛かるという想定でも約 7.3 トン以上あり、通常の運用には支障がない。

#### 4.2.2. スプール台車

スプール台車は、SBC で使用していた跳ね上げローラー車 [27] と同様に、気球頭部を保持する役割を持つ。スプール部は跳ね上げローラー車からスプール台車上に移設した。最大保持浮力は 3 トンであり、保持部にはロードセルを内蔵する。台車は幅 5m・長さ 6m・高さ 1m であり、自重は 17 トンである。

#### 4.2.3. 電力、制御、マンホール

2 台の台車は、共にレール上を 3m/min および 30m/min の 2 段階の速度で独立に走行でき、また、低速側の 3m/min で同期して走行することもできる。同期の制御方法としては両台車間の距離をモニターしてリアルタイム調整するような方法は採用せず、両台車の速度を単に固定値（3m/min）とするシンプルな方法を用いている。同期走行による台車間の距離の変動誤差は 30m の走行距離に対して 10cm 以下であり、実験実施に十分に支障のない精度を確保している。両台車は 1.2GHz 帯の電波により双方向通信をしており、同期走行中にそれぞれの自己モニター機能によりいずれかの台車にてエラーが検知されると台車の走行を 2 台とも非常停止する。

台車の走行動力は DC48V のサーボモーターであり、その電力はオンボードの電池により供給される。大浮力の気球荷姿を装着して同期走行する際に、2 台車間には水平方向に引き合う力が掛かる（鉛直方向の力は台車の自重が十分に大きいために抑え込める）。しかし、両台車はいずれも約 3.7 トン程度以上の力で水平方向に引っ張ってもモーターが空転したり車輪がスリップしたりせずに正常に走行できることが確認されており、最大浮力 3 トンの気球荷姿を装着しての走行に支障はない。

放球台車の走行以外の動作の電力は、レール沿いに埋設された AC3 相 200V / 40kVA の電線から供給される。放球台車は長さ 50m の電力ケーブルを持ち、それをレール沿いに 47m おきに設置されたマンホールのどれか 1 ヶ所の中の電源口に接続することで電力を得られる（図 24）。台車のバッテリー充電は、この電力ケーブルを介して、または、格納庫内の充電専用電源口から直結して、行うことができる。バッテリーの充電電流は放球台車が 30A、スプール台車が 15A である。

両台車の各動作はリモコンで操作できる。特に台車走行に関しては、有線リモコンに加え、420MHz 帯電波の無線リモコンにより操作可能である。

各マンホールには放球台車動力用の AC3 相 200V 電源に加え、観測器などへの電力供給用としての AC 単相 100V と AC3 相 200V も整備されている。また、電力線に併設して光ファイバケーブルも敷設されており、各マンホール内の接続口から LAN 情報ネットワーク（後述）に接続できる。これにより、観測器を放球場にて情報ネットワークに接続できるほか、浮力用ロードセル値などの台車のモニター情報を大気球指令管制棟内に伝送することができる。



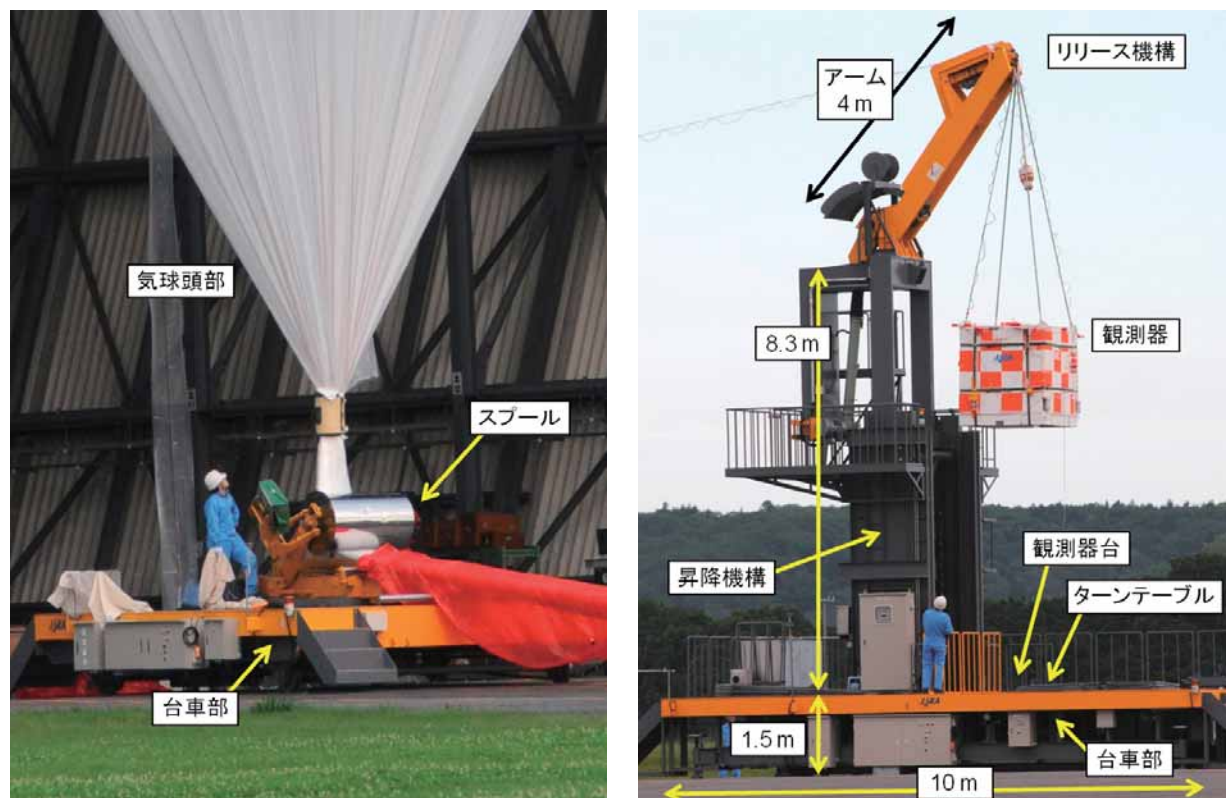


図 22 スライダー放球装置. (左): スプール台車. (右): 放球台車.

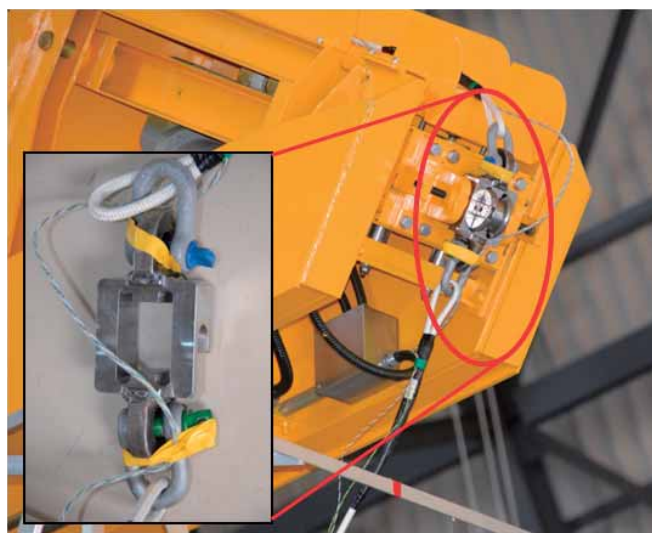


図 23 放球台車アーム先端のリリース機構

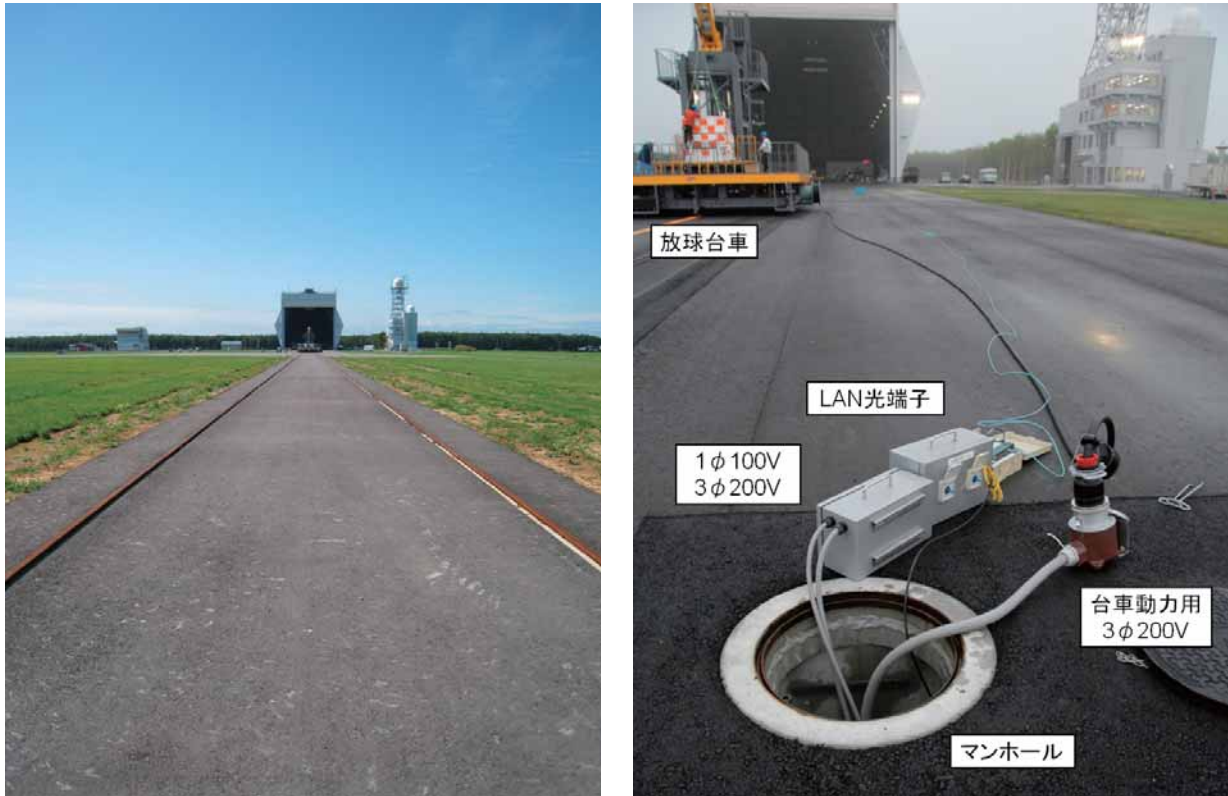


図 24 (左) : スライダ放球装置レール. (右) : レール沿いマンホールと放球台車を接続した様子.

#### 4.2.4. スライダー放球装置を用いたセミダイナミック放球法

以上で述べたスライダー放球装置を用いた放球法は以下のような手順となる (図 25).

- (1) 気球荷姿長に対応した位置に両台車を設置する. 観測器は放球台車にセットしておく. 放球台車の位置は通常, 屋外となる.
- (2) 気球をスプール台車にセットし, 気球へのヘリウムガスの充填を格納庫内で行う.
- (3) ガス充填後, 放球への条件が整った時点で, 両台車を同期走行させ, 荷姿全体を屋外に移動する.
- (4) 跳ね上げローラーを解放し, 気球を立ち上げる.
- (5) ターンテーブルを回転し, 観測器を風下側に向ける.
- (6) カラーを解放する.
- (7) リリース機構を作動させ, 観測器を含む荷姿全体を放球する.

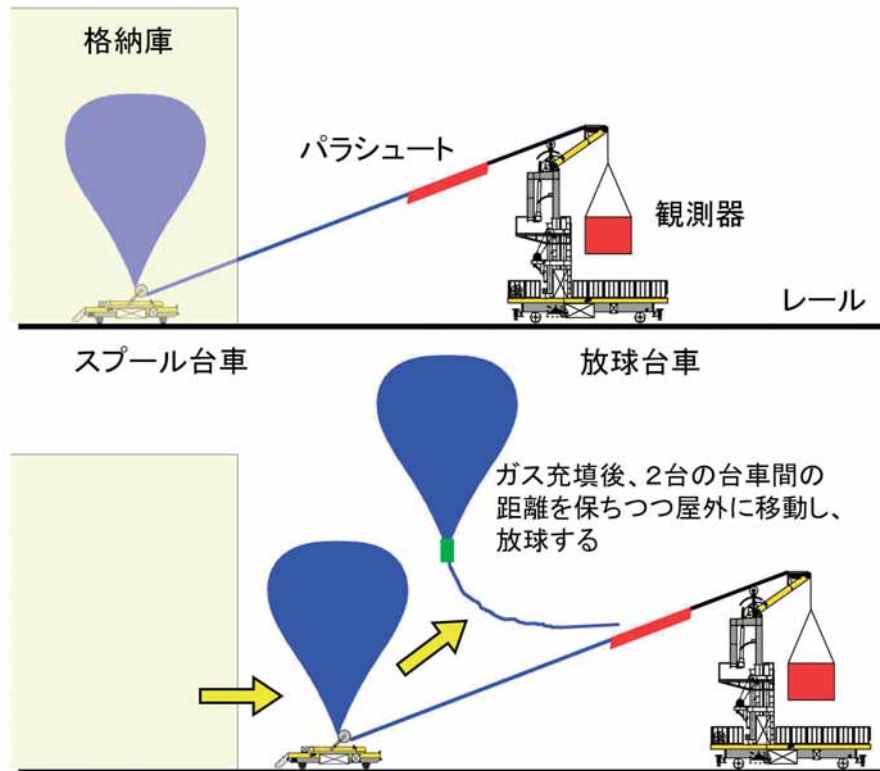


図 25 スライダー放球装置による放球方法の概念図

#### 4.3. 各種システム

大気球実験の効率的な運用，SBC よりも広い敷地，あるいは時代の要請などに応えるべく，TARF では様々な設備システムを大気球指令管制棟内外に整備した。このうち，SBC に比べて新たに導入したものや改良を図ったもの，あるいは，大樹町 MAP に既設されていた設備との融合を目指しているものなど，TARF に整備した設備システムにおける主なものを以下に列記する。

##### 4.3.1. TV カメラシステム

放球作業などのモニターのため，大気球指令管制棟内外 10 ヶ所に配備した ITV カメラにより各所のリアルタイム画像を撮影するシステムである（図 27-a）。SBC の 5 ヶ所よりも台数を倍増することで広い敷地への対応と撮影可能場所の充実化を図った。

##### 4.3.2. 無線ページングシステム

大気球指令管制棟内外に設置した PHS 準拠の無線ページング通話用アンテナ（基地局）により，作業中の多者間通話を実現するシステムである（図 27-c）。気球班と PI 班が個別に通話できるよう，独立な 2 つの通話チャンネルを持つ。広い敷地内や屋内（大気球指令管制棟内）での通話を確認するため，基地局の台数を SBC の 5 ヶ所計 12 台よりも増設して 10 ヶ所計 20 台とした。

##### 4.3.3. CATV 共聴システム

ITV カメラのモニター画像，飛翔中の受信テレメトリ画像，無線ページングシステムの音声，および，一般放送のテレビ画像を一元的に棟内各部屋に配信するため，大気球指令管制棟内に CATV ネットワークを構築した（図 27-a）。これにより，モニターテレビを壁のテレビ受信口に接続するだけで任意の画像を見られるようになり，SBC よりもモニターテレビの設置が容易になった。

##### 4.3.4. 情報システム（LAN）

大気球指令管制棟内外にギガビット・イーサネットによるブロードバンド LAN 情報ネットワークを構築した（図



27-b). 2 系統の論理的な仮想サブネットワークを設け、大気球実験運用の根幹（送受信や指令管制など）に関わる計算機群に 1 系統（「管制系」）、観測器等の PI に関わる計算機用に 1 系統（「実験系」）をそれぞれ割り当てる。これら 2 つのサブネットワークはファイアウォールにより保護されている。サブネットワーク以外の情報システムは JAXA の統一的な情報ネットワーク仕様に準拠しており、テレビ会議システムや無線 LAN も利用できる。構外とのインターネット通信は光ファイバ回線によって 5Mbps の通信が可能であり、SBC の ISDN 回線に比べて高速化された。

#### 4.3.5. 観測データ通信システム

実験準備中から実際の飛翔中に至る一連の過程において PI の観測器と地上系機器との間の通信を効率的に提供するために整備したシステムである（図 19, [28]）。実験準備を行う構内各所と PI が地上系セットアップを展開する観測データ処理室とを、受信管制室に設置したルーティング装置を介して接続することで、ルーティング装置を設定するだけで任意の情報の流れを構築できる。ルーティング装置はフライト中の送受信信号も中継できるため、PI にとっては有線・無線の区別を意識することなく観測器との通信を実現できる。観測データ処理室は最大で 3 つの PI グループが並行して作業を行うことを想定した設計となっており、1 グループ体制であった SBC に比べて作業の効率化が期待される。

また、LASCOS（図 26-g, [29, 30]）を大気球指令管制棟の東隣に駐車することを想定し、LASCOS と受信管制室を接続するためのケーブル群もこのシステムの一環として整備された。

#### 4.3.6. ガス充填装置

SBC で用いていたヘリウムガス充填装置（可搬）[31, 32] を格納庫内に移設した。SBC ではガスのモニター情報をアナログケーブルによって指令卓に伝送していたが、これを改良し、ガス充填装置内にてモニター情報をデジタル化して LAN 経由で指令卓に伝えるようにした。これにより、従来は指令卓でのみ得られていた情報をガス充填装置本体（即ち充填作業の現場）においても得ることが可能となった。

なお、SBC ではヘリウムガス設備としてヘリウムガスコンテナを備えていた [2] が、気球の大型化に伴う容量不足などに対応するため、ヘリウムガストレーラを実験の都度調達することとした。

#### 4.3.7. 気象観測システム

SBC から風車型風向風速計とドップラーソーダ [33] が移設され、既存の気象観測設備と併せることで充実したシステムとなった。

SBC から移設された風車型風向風速計（図 26-a）の地上風データは大気球指令管制棟の指令室に集約される。既設の風車型風向風速計のデータは飛行管制棟に集約される。

SBC から移設されたドップラーソーダ（図 26-b）は地上約 1km までの風プロファイルを測定するもので、測定分解能は高度分解能が 10m ～ 200m、風速は水平方向に 0.2m/s、垂直方向に 0.05m/s、風向は 3 度、時間分解能は 2 分である。10W の 2.1kHz 音波を発し大気からの反射波を利用している。

一方、既設のドップラーソーダ（図 26-c）も在り、これは 800W の 2.5kHz 音波を用いている。地上 30m ～ 400m の範囲の風プロファイルを高度分解能 30m、時間分解能 10 分の精度で測定できる [34]。

さらに高い高度の風については既設の VHF レーダが有用である（図 26-d）。46.5MHz 電波を 12kW でパルス放出し高度 300m ～ 8km の風を高度分解能 75m、時間分解能 1 分の精度で測定できる [34]。また、GPS ゾンデ用の既設の受信設備もあるため、GPS ゾンデによる風観測も可能である。

既設の気象観測装置の観測データは飛行管制棟に集約され、日本気象協会から公開される気象庁のデータも利用しながら、気象観測予測システムにより局地的な天気予報が算出される [35]。これらの観測データや局地予報は大気球指令管制棟にも LAN 経由で伝送される予定である。

日本気象協会のみならず米国の NOAA/NCEP や英国の NERC/BADC なども含め、公開気象データはインターネット経由で取得可能である。これらを気球用飛翔航跡予測システム [36] の基礎データとすることで予測精度を高め、実験運用を円滑に進めることが可能となる。

気象観測設備の概要を表 3 に示す。

#### 4.3.8. GPS リピータ

観測器に搭載される GPS 受信システムの動作を屋内でも確認できるようにするため、GPS リピータを大気球指令管制

棟の気球組立室と計測器室に設置した。また、NTP サーバやビデオタイマの時刻同期信号とするため、受信管制室にも設置した。SBC での 1 ヶ所から増設されたことになる。これら棟内 3 部屋の GPS リピータは共有の GPS アンテナを棟屋屋上に持ち、L1 信号を放射している。なお、格納庫には既設の GPS リピータがあり、L1/L2 信号を放射する。

#### 4.3.9. 地磁気回転テーブル

観測器に搭載される地磁気センサの校正のため、SBC から地磁気回転テーブル [37] を移設した (図 26-e)。角度計エンコーダを内蔵し、本体および地中基礎は、原則として非磁性材質で構成されている。

#### 4.3.10. コリメーションシステム

受信アンテナの方位校正のため、SBC からコリメーションシステム [8] を移設した (図 26-h)。設置場所は滑走路の南側に位置する既設の架台とした。この架台は SPF プロジェクトにより気象ドップラーレーダ [34] の架台として整備されたものであるが、その後レーダ関連機器は撤去され、架台のみが残っていた。

#### 4.3.11. セキュリティシステム

施設のセキュリティ確保のため、JAXA の統一的な入退室管理システムを大樹航空宇宙実験場の主要施設に導入した。非接触型の IC カードキーによる認証システムである。大気球指令管制棟内のいくつかの区域については異なる認証コードの区域を自主的に設けることで、セキュリティレベルの向上を図っている。格納庫・飛行管制棟・飛行実験棟については、テンキーによる暗証番号入力を認証方法とする既設の機械警備システムも併存している。

#### 4.3.12. 非常用発電機

大気球指令管制棟における商用電源利用は、電気室内のキュービクルにより受電・変圧され、配電される。この商用電源が気球飛翔中などに停電するという不測の事態に備えるため、SBC と同様に非常用発電機を設置した (図 26-f)。発電容量は 55kVA であり、停電から 10 秒以内に始動する。実験の運用に最低限必要な大気球指令管制棟内の設備機器は発電機を介した電力系統に接続されている。燃料は軽油（ディーゼル）であり、タンク満タンの場合、定格出力換算で 13 時間の連続運転ができる。

なお、商用電源の棟内各部屋への配電に関しては、配電盤の充実化が図られている。特に実験作業を行う各部屋については、通常の単相 100V や D 種（第 3 種）接地に加え、3 相 200V、単相 200V、および、A 種（第 1 種）接地を確保した。

#### 4.3.13. 音声（電話・拡声・集音・インターホン）システム

構内の電話設備は、SBC と同様に、電話交換機を介して必要数（複数）の局線（外線）および内線に接続可能なものとなっているほか、構内の拡声設備に接続されている。電話回線は ISDN 回線として情報ネットワーク用のバックアップ回線としても利用できる。

また、拡声設備には無線ページングシステムの音声も入力されている。指令室や受信管制室の室内音声を音声ネットワークに入力するための集音ケーブルも敷設された。

構内直通通話設備（誘導支援設備）としては、事務室内にて玄関の屋内外計 2 ヶ所とインターホンで通話可能としたほか、非常時にはエレベータ内と事務室内との通話を可能とした。

音声システムのネットワーク概念図を図 27-c に示す。

#### 4.3.14. 照明

特記事項としては、フィールド北端に設置した 4 本の照明塔 (図 26-i) を引き抜き可能なものとした。JAXA 内の気球以外の実験計画においてフィールドの平坦性が必要となる可能性があることに対応したものである。また、気球組立室屋内の天井照明灯は高所に設置されているため、メンテナンス性向上のため、オートリフター付きとなっている。

#### 4.3.15. 空気調和システム

大気球指令管制棟内各所の空調機は各部屋にて個別制御が可能であるほか、事務室内にて中央監視制御が可能なものとなっている。





図 26(a) アンテナなどが並ぶ棟屋屋上



図 26(b) SBC から移設したドップラーソーダ



図 26(c) 既設のドップラーソーダ



図 26(d) 既設の VHF レーダ



図 26(e) 地磁気回転テーブル



図 26(f) 非常用発動発電機



図 26(g) LASCOS



図 26(h) コリメーション装置



図 26(i) フィールド照明塔



表 3 気象観測設備の概要

観測装置名	観測範囲	時間分解能	観測方法	設置	データ集約場所
風向風速計 (4ヶ所)	設置点 (各棟屋上等)	数秒	直接観測	移設	飛行管制棟 気象予測システム
風向風速計 (4ヶ所)	設置点 (標準高10m)	数秒	直接観測	既設	
ドップラーソーダ	直上 高度 < 1km	2分	音波 2.1kHz / 10W	移設	
ドップラーソーダ	直上 高度 < 400m	10分	音波 2.5kHz / 800W	既設	
VHFレーダ	直上 高度 0.3 ~ 8km	1分	電波 46.5MHz / 12kW	既設	
GPSゾンデ	飛行航跡上 高度 < 20km超	飛行時 数10分	直接観測	既設 (受信局)	大気球 指令管制棟
各国気象協会 (インターネット)	全球(格子点上) 高度 < 約50km	定期的配信	衛星観測や モデル予測等	—	

## 5. 実験設備の動作実証試験

前章の施設設備整備により、大樹航空宇宙実験場（TARF）における大気球実験実施の環境が整った。そこで、大気球の飛行実験に先立ち、気球実験設備の動作確認が主に以下で述べる2つの試験により行われた。TARFにおける大気球実験は、当面、SBCと同様の時期に第1次および第2次実験として実施されることとなり、これらの動作実証試験は2008年5月からの第1次実験の中で実施された。

### 5.1. 放球設備の動作実証試験

スライダー放球装置やガス充填装置 [31, 32] などの動作確認のための地上試験が5月29日と30日に実施された（図28, [38]）。気球は丈夫で再使用し易いB15型ウレタン製気球 [39, 40] が、また、ゴンドラは一般的な観測器を模擬したものが用いられた。気球が実際に飛行することがないように荷姿はアンカーロープによって放球台車に結ばれた。2度の地上試験では総浮力が500kgと1,500kgに設定され、格納庫内での気球へのガス充填、スライダー放球装置による屋外搬出、そして放球に至る一連の手順が確認された。これにより、スライダー放球装置を始めとする放球関係設備の動作が実証された。

### 5.2. 送受信設備の動作実証試験

測風気球を用いた上空との送受信の動作確認が、5月16日に測風ゴム気球（BS08-01）、また、5月19日にBT5型測風ポリエチレン気球（BS08-03）により行われた（図29, 30）。これにより、受信アンテナが気球を正しく追尾し正しい方位を示すことや、事前の地上での試験から期待されたとおりの受信強度やコマンド通信が上空との通信においても確保できることが確認された。また、地上管制システムの動作も確認された。これにより、送受信設備の動作が実証された。なお、2機の測風気球の最大直距離は各々約141km（図29）と約114kmであった。



図 28 ウレタン気球を用いた地上試験の作業風景

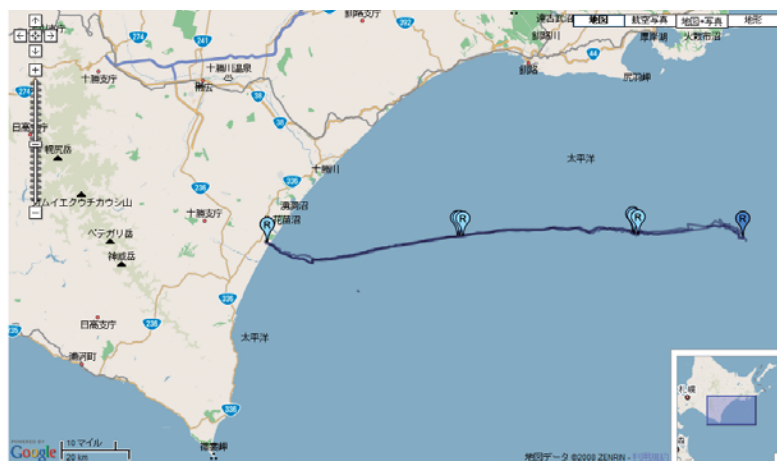


図 29 大樹航空宇宙実験場における最初の測風気球となった BS08-01 の放球風景と飛翔航跡図



図 30 大樹航空宇宙実験場における最初のポリエチレン気球となった測風 BS08-03 の放球風景

## 6. 大気球の飛翔

前章で述べたとおり気球実験設備の動作が実証されたことを踏まえ、放球・飛翔管制・回収という一連の大気球システムの検証を目的とする2機の大気球実験が計画された。回収は当面、SBCと同様に海上での回収となる。1機目の実験は6月2日に試みられたものの、放球直前に荷姿に不具合が発生し中止された。原因は移転とは無関係なものであった。原因への対策を施した上で地上試験が7月3日に実施され、問題が再現しなかったことから不具合の発生源は解消されたと判断された[41]。

大樹航空宇宙実験場における第1号機への再挑戦は8月23日に実施された。放球されたB100型の気球は放球2時間後に広尾沖東方約60kmの海上にて高度33.5kmにて水平浮遊に入った。その後、気球と切り離された観測器は襟裳北東の沖合約30kmの海上に緩降下され回収された(図31)。

続いて、第1号機よりもさらに大型の気球・大型の観測器・大きな浮力・高い飛翔高度を用いたシステム検証を目的とする第2号機のB08-02実験が、9月5日に実施された。B300型の気球は放球2時間40分後に実験場の北東約40kmの海上にて高度41.2kmで水平浮遊に入った後、大津沖東方約30kmの海上に緩降下され回収された(図32)。

以上2機いずれの実験においても、第1次実験の際に発生したような不具合もなく放球され、飛翔中の通信も問題なく実施された。飛行管制は事前の計画に沿って実施され、降下海域も事前の予想どおりであった。回収作業は航空機(ヘリコプターや小型プロペラ機)による空からの搜索支援のもと、船(地元の漁船や近港のクレーン船)によって実施された。この2機の実験は共に成功したと言える。

この2機の大気球の飛翔を通じて、大樹航空宇宙実験場における大気球の放球・管制・回収という大気球実験システムの健全性が検証され、所定の機能を有することが確認された。これにより、今後の大樹航空宇宙実験場における大気球実験の本格運用に向けた貴重な第一歩を踏み出すことができた。



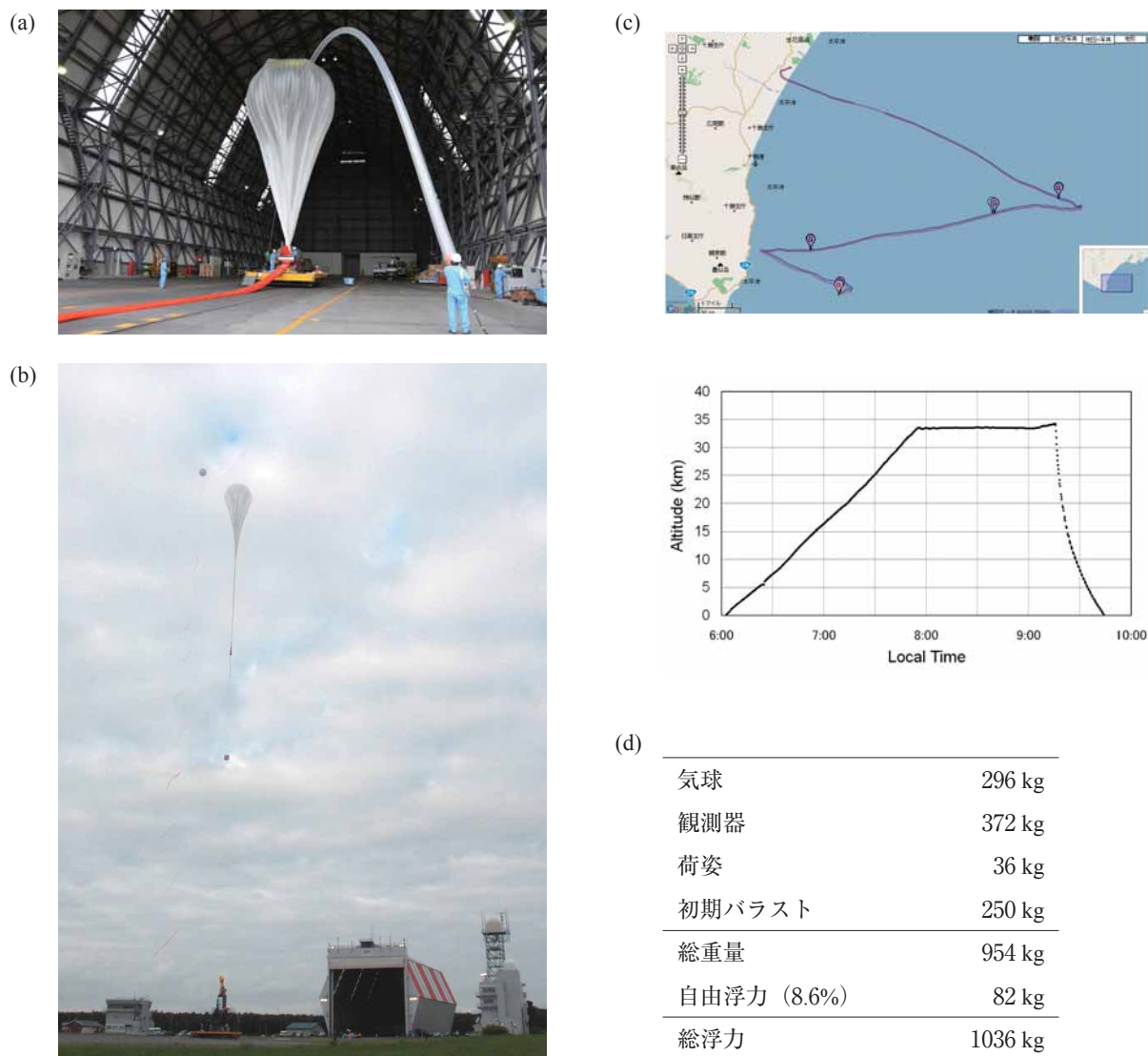


図 31 大樹航空宇宙実験場における第 1 号機の大気球 B08-01. (a) : 格納庫内でのガス充填作業. (b) : 放球直後.  
(c) : 飛翔航跡図と高度曲線. (d) : 諸元.

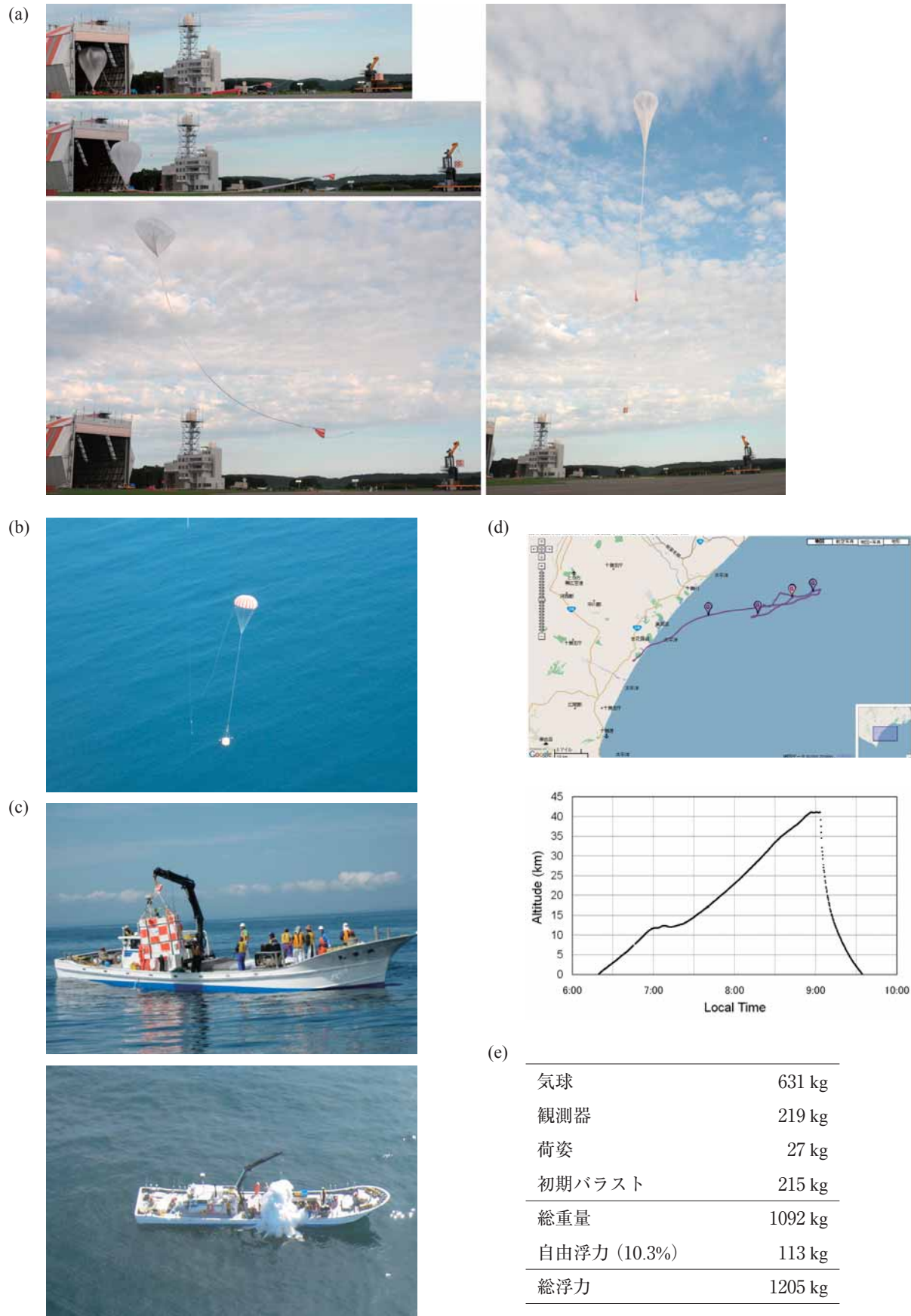


図 32 大樹航空宇宙実験場における第 2 号機の大気球 B08-02. (a)：放球風景. (b)：パラシュートで降下する観測器. (c)：回収作業. (d)：飛翔航跡図と高度曲線. (e)：諸元.

## 7. まとめ

大気球実験場を三陸大気球観測所から大樹航空宇宙実験場に移転した。移転は2007年度に実施し、2008年3月末に完了した。大気球実験用に整備された施設設備の動作実証を重ねた後、大気球の飛翔実験を実施した。第1号機と第2号機の実験に成功したことで大樹航空宇宙実験場における大気球システムを実証でき、2009年度以降の本格運用開始への扉を開くことができた。

## 謝 辞

1971年の開所以来長年に亘り、三陸大気球観測所における大気球に御支援、御協力を賜りました三陸の住民の皆様方を始めとする幾多の関係各位、関係各機関に深く感謝申し上げます。

また、大樹航空宇宙実験場への大実験場の移転、ならびに、大樹航空宇宙実験場における大気球実験の開始にあたって御支援、御協力を賜りました大樹町役場、大樹の住民の皆様方、ならびに、関係各方面の皆様方に深く感謝申し上げます。

なお、スライダー放球装置はダイコー株式会社と共同で開発を行いました。観測データ配信システムは有限会社大家システムデザインと共同で開発を行いました。

## 参考文献

- [1] 花房実 他,「大気球による科学観測の沿革」,東京大学宇宙航空研究所報告 7-1 (1971) 305 - 313.
- [2] 西村純, 広沢春任,「三陸大気球観測所施設および設備の概要」,東京大学宇宙航空研究所報告 9-1 (1973) 121 - 137.
- [3] 並木道義 他,「三陸大気球観測所放球場拡張および気球組立室増設」,大気球シンポジウム(平成10年度), 84 - 87.
- [4] 並木道義 他,「大型放球装置を使用した大気球の放球」,宇宙科学研究所報告 特集 41 (2001) 25 - 34.
- [5] T. Yamagami *et al.*, “Semi-Dynamic Launching Method for Scientific Balloons”, Adv. Space Res. **30** (2002) 1145-1148.
- [6] 井筒直樹 他,「B500 型気球の放球と飛翔」,宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-015 (2005) 1 - 12.
- [7] 斎藤芳隆 他,「超薄膜型高高度気球の開発(BT'30-1)」,宇宙科学研究所報告 特集 44 (2002) 15 - 25.
- [8] 西村純 他,「遠距離長時間観測用追尾受信装置」,宇宙科学研究所報告 特集 20 (1987) 23 - 41.
- [9] 大樹町ホームページ <http://www.town.taiki.hokkaido.jp/pages/koukuu/>.
- [10] 中館正顕 他,「定点滞空飛行試験結果」,飛行機シンポジウム(2005), 233.
- [11] M. Nakadate: Development and Flight Test of SPF-2 Low Altitude Stationary Flight Test Vehicle, AIAA 2005-7408.
- [12] 竹田繁一,「成層圏プラットフォームプロジェクトについて」,日本航空宇宙学会誌, **629** (2006) 168 - 174.
- [13] 福家英之 他,「気球実験と大樹町多目的航空公園についての考察」,大気球シンポジウム(平成 17 年度), 37 - 40.
- [14] 山田和彦 他,「パラフォイルを用いた誘導型帰還システムの開発」,大気球シンポジウム(平成 17 年度), 49 - 52.
- [15] 山田和彦 他,「パラフォイルを用いた誘導型帰還システムの開発(2)」,大気球シンポジウム(平成 18 年度), 25 - 28.
- [16] 山田和彦 他,「パラフォイルを用いた誘導型帰還システムの開発(3)」,大気球シンポジウム(平成 19 年度), 17 - 20.
- [17] 稲谷芳文 他,「ロックオン方式による有翼飛翔体の打ち上げ」,大気球シンポジウム(平成 4 年度), 30 - 33.
- [18] 澤井秀次郎 他,「気球を利用した極超音速飛翔体の技術実証構想」,大気球シンポジウム(平成 19 年度), 53 - 56.
- [19] 土屋武司 他,「高高度気球を用いた極超音速エンジン小型実験機に対する軌道最適化と概念設計」,日本航空宇宙学会誌, **629** (2006) 266 - 271.
- [20] 澤井秀次郎 他,「気球を利用した無重力実験のための機体開発とそのフライト結果」,日本航空宇宙学会誌, **654** (2008) 339 - 346.
- [21] 福家英之 他,「大樹町への気球実験場の移転」,大気球シンポジウム(平成 19 年度), 33 - 36.
- [22] H. Fuke *et al.*, “Developments of the Sliding Launcher and Related Facilities for the New Japanese Balloon Base”, Proc. of 26th ISTS (International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu 2008), (submitted to Japan Society for



Aeronautical and Space Sciences (JSASS)).

- [23] 福家英之 他,「大樹航空宇宙実験場における大気球実験の開始」,大気球シンポジウム(平成 20 年度), 25 - 28.
- [24] 吉田哲也 他,「平成 19 年度の大気球実験概要」,大気球シンポジウム(平成 19 年度), 1 - 4.
- [25] 鎌田幸男 他,「三陸大気球観測所放球場と大窪山間の無線中継アンテナの設営」,大気球シンポジウム(平成12年度), 23 - 26.
- [26] 松坂幸彦 他,「スライダー放球装置の開発」,大気球シンポジウム(平成 19 年度), 37 - 40.
- [27] 並木道義 他,「大型放球装置用跳ね上げローラー車の開発」,大気球シンポジウム(平成 13 年度), 75 - 78.
- [28] 河田二郎 他,「大樹航空宇宙実験場における観測データ配信システム」,大気球シンポジウム(平成 20 年度), 33 - 36.
- [29] 並木道義 他,「低高度宇宙通信実験システム」,宇宙科学研究所報告 特集 **37** (1998) 39 - 56.
- [30] M. Namiki *et al.*, “Low Altitude Space Communication System”, *Adv. Space Res.* **26** (2000) 1431-1434.
- [31] 松坂幸彦 他,「新しいヘリウムガス充填装置の開発」,大気球シンポジウム(平成 17 年度), 57 - 60.
- [32] 松坂幸彦 他,「新しいヘリウムガス充填装置の開発(Ⅱ)」,大気球シンポジウム(平成 18 年度), 9 - 12.
- [33] 並木道義 他,「ドップラー音波レーダー」,宇宙科学研究所報告 特集 **44** (2002) 1 - 13.
- [34] 文部科学省 第 1 回成層圏プラットフォーム研究開発に関する懇談会(平成 17 年), 配布資料1-4-1-2-別添.
- [35] 君野珠宏, 及川博史,「成層圏プラットフォーム研究開発と運用に必要な気象予測技術について」, 日本気象学会機関紙「天気」**52-10** (2005) 791 - 795.
- [36] 井筒直樹 他,「気球飛翔QLシステム」,大気球シンポジウム(平成 15 年度), 35 - 38.
- [37] 並木道義 他,「三陸大気球観測所設備の更新」,大気球シンポジウム(平成 14 年度), 17 - 20.
- [38] 高田淳史 他,「スライダー放球装置の実証試験」,大気球シンポジウム(平成 20 年度), 29 - 32.
- [39] 雛田元紀 他,「繊維強化気球の開発(Ⅲ)」,大気球シンポジウム(平成 3 年度), 27 - 33.
- [40] 藤井正美 他,「ウレタン布気球の開発」,大気球シンポジウム(平成 3 年度), 34 - 37.
- [41] 吉田哲也 他,「平成 20 年度の大気球実験概要」,大気球シンポジウム(平成 20 年度), 1 - 4.

# Investigation of cultivable microorganisms in the stratosphere collected by using a balloon in 2005

By

Yinjie YANG\*, Shin-ichi YOKOBORI\*, Jutaro KAWAGUCHI\*,  
Takamasa YAMAGAMI\*\*, Issei IIJIMA\*\*, Naoki IZUTSU\*\*, Hideyuki FUKU\*\*,  
Yoshitaka SAITOH\*\*, Yukihiro MATSUZAKA\*\*, Michiyoshi NAMIKI\*\*,  
Shigeo OHTA\*\*, Michihiko TORIUMI\*\*, Kazuhiko YAMADA\*\*, Motoharu SEO\*\*  
and Akihiko YAMAGISHI\*<sup>†</sup>

**Abstract:** Microbial sampling was conducted in the stratosphere above Pacific Ocean adjacent to Japan Main Island by using a balloon in June 2005. Air was filtrated by membrane filters during sampling. Totally 4 isolates were obtained from the membrane filters incubated on culture medium. From their morphological characteristics, UV resistance and 16S rDNA sequencing data, the isolates appeared to be endospore-forming bacteria of terrestrial origin (3 *Bacillus* strains and 1 *Paenibacillus* strain). Endospores are known to have higher UV-resistance than vegetative cells. The isolation of endospore-forming bacterial species is associated with the high UV level in the stratosphere.

**Key words:** Cultivable microorganism, stratosphere, endospore formers

## 1. Introduction

The information about microorganisms drifted in high-altitude atmosphere is not only significant for understanding possible path for microbial dispersal from one part of the earth to another (Griffin *et al.*, 2001; Dennis *et al.*, 2006) and their role in forming cloud condensation nuclei in certain regions (Vali *et al.*, 1976), but also important for testing the hypothesis of Panspermia (Horneck and Brack, 1992; Raulin-Cerceau *et al.*, 1998; Mileikowsky *et al.*, 2000; Wainwright *et al.*, 2003). The troposphere is constantly replenished by various microbiota from soil, water and other sources, while the abundance and genera of microbes in the troposphere generally decrease with increasing height (Fulton, 1966; Lighthart and Shaffer, 1995; Shaffer and Lighthart, 1997; Griffin *et al.*, 2001; Griffin *et al.*, 2003). There would be rare occasion to transport particles upward above the tropopause. However, the presence of microorganisms at stratospheric altitudes has been reported (Table 1). Fungi and endospore-forming bacteria were the majority of stratospheric microbial collection of sparse microbial surveys in USA, Russia and India regions (Table 1). In Japan, we have isolated one *Deinococcus* strain (ST0316) from dust sample collected at the bottom of stratosphere (10-12 km altitude), and one *Deinococcus* strain (TR0125), one *Streptomyces* strain, one *Bacillus* strain and one *Paenibacillus* strain from tropospheric dust samples by using an aircraft (Yang *et al.*, 2008). UVC (200-280 nm) is harmful to living organisms. High UVC<sub>254nm</sub>-resistance of the five strains suggested a possible correlation between elevated UV levels and bacterial survival in high-altitude atmosphere (Yang *et al.*, 2008).

Our aircraft isolates evidenced the presence of cultivable microorganisms in the atmosphere up to 12 km altitude. We conducted microbial sampling at 12-35 km altitudes above Pacific Ocean close to northern Japan Main Island by using a balloon. We isolated several strains and analyzed the UV resistance.

---

\* Department of Molecular Biology, Tokyo University of Pharmacy and Life Science

\*\* Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

<sup>†</sup> Correspondence: Dr. Akihiko Yamagishi (yamagish@ls.toyaku.ac.jp)

Table 1 Previous microbial samplings at high-altitude atmosphere

Year	Country	Mission	Altitude (km)	Microbial Collection	Reference
1936	USA	Balloons	11-21	<b>5 <i>Bacillus</i> sp.</b> <i>Macrosporium</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and 2 <i>Aspergillus</i> sp.	Rogers and Meier, 1936
1962, 1963, 1965	USA	Balloons	9-27	(Predominant isolates) <b>Micrococci and spore-forming rods</b> <i>Aspergillus</i> sp., <i>Alternaria</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and <i>Cladosporium</i> sp.	Greene <i>et al.</i> , 1964; Bruch, 1967
1975	Russia	Meteorological rockets	48-77	<b><i>Mycobacterium</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp.</b> <i>Circinella</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Papulaspora</i> sp. and <i>Penicillium</i> sp.	Imshenetsky <i>et al.</i> , 1976
2001	India	Balloon	41	<b>5 <i>Bacillus</i> sp. and <i>Staphylococcus</i> sp.</b> <i>Engyotontium</i> sp.	Wainwright <i>et al.</i> , 2003; Suresh <i>et al.</i> , 2004
2003	USA	High-altitude aircraft	20	<b>2 <i>Bacillus</i> sp.</b> <i>Penicillium</i> sp.	Griffin, 2005
2004	USA	High-altitude aircraft	20	<b><i>Micrococci</i>, <i>Microbacteria</i>, <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Brevibacterium</i> sp.</b>	Griffin, 2008

Bacterial species are boldfaced. Other species are fungi.

2. Materials and methods

2.1 Sampling

A sampling apparatus (Fig. 1) was designed to capture microorganisms in the high atmosphere. The apparatus has been described previously (Iijima *et al.*, 2006). Mixed cellulose ester membrane filters of 0.45-μm pore size and 90-mm diameter (Advantec MFS, Japan) was positioned in filter holders and sterilized for collection of microorganisms. Then the filter holders were assembled into the device. The components that cannot be autoclaved were thoroughly wiped with 70% ethanol before assembly. The sterilized apparatus was maintained airtight except during sampling operation. Gate valves were in closed status from assembly completion to the beginning of sampling at designed altitude. The effectiveness of sampling microorganisms using this device was confirmed under simulated high-altitude conditions (Iijima *et al.*, 2006).

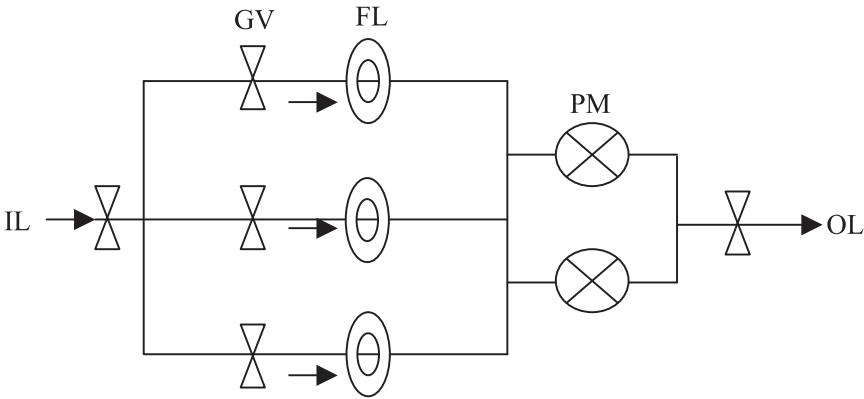


Fig.1 Flow diagram of the device used for sampling microorganisms at high altitudes. The air was taken from Inlet (IL), filtered by membrane filters (FL) on filter holders and went out from exit (OL). Flow rate of air passing each filter was controlled by pumps (PM) and gate valves (GV). It is very unlikely that any contamination occurs from the outlet sides of the filters, since airborne microbes are supposed to be collected on the filters and no microbe are expected to pass through the filters.

The device was mounted onto the gondola that hanged from a balloon and launched to the high atmosphere from Sanriku Balloon Center (Iwate Prefecture) on June 6, 2005 (Fig. 2A). Operational integrity of the sampling apparatus was tested using sampling filter No. 1 just before launch for 1 min. The volume of the filtered air was about 32 liter. The balloon flew along with natural west or east winds at different altitudes. Flight altitudes (Fig. 2B) were adjusted by exhausting of gas inside of the balloon or dropping ballast in the gondola. At 12 km altitude, sampling started by pumping and opening gate valves that allow the air filtered through the No.1 filter. It was used to clean the tubing and to collect microbes at 12 – 18 km altitude. Filtered air volume was about 18 liter at Standard Temperature and Pressure (STP). After 39 min, the pump was turned off and the valves were switched to pump air for 18 min through the No.3 filter. This filter was used to further test cleanness of the tubing and to collect microbes at 18 – 20 km altitude. Filtered air volume was about 5 liter (STP). Then the valves were controlled to pump air for about 20.5 hours through the No.2 filter. Because of the cleaning operation using the No.1 and No.3 filters, the filter No.2 is considered to be the most reliable sampling filter for upper-atmospheric microbes in this study. All gate valves were closed and the pump was turned off at 30 km altitude before balloon's landing. Total amount of air filtered was about 350 liter (STP). After landing on the sea, the sampling device was immediately recovered by using a ship and transported to the laboratory.

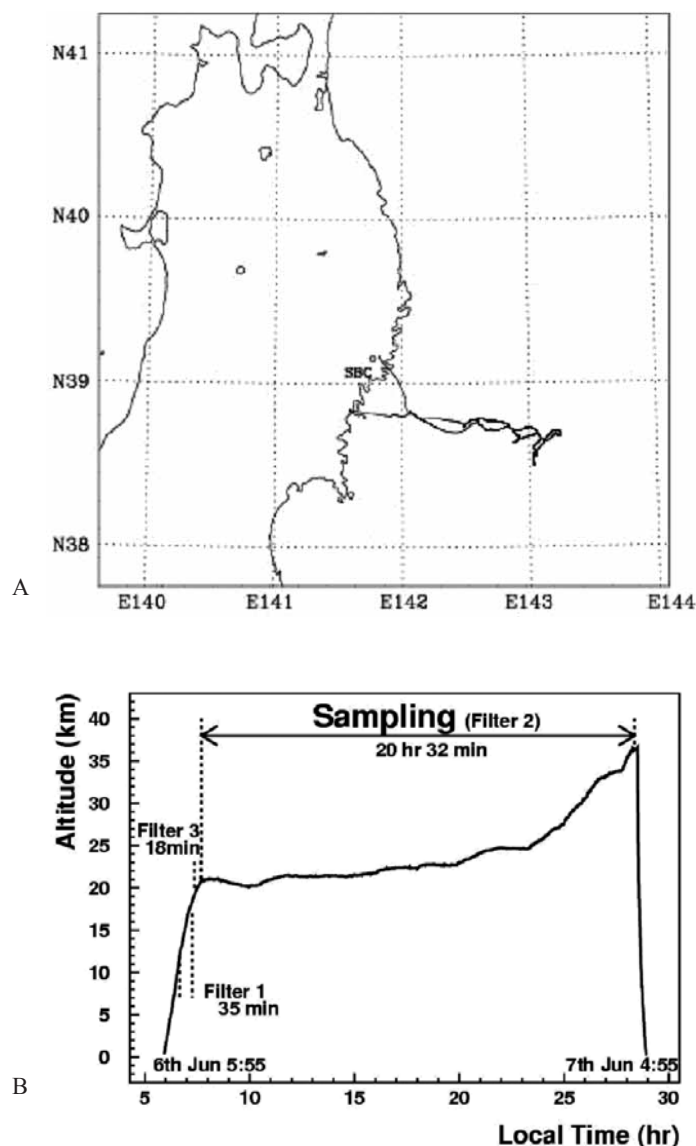


Fig.2 Trajectory of the balloon (A) and the profile of sampling altitudes (B). SBC: Sanriku Balloon Center, Iwate, Japan. 5:55; balloon launched. 6:40-7:19; pumping air through the No.1 filter. 7:21-7:39; pumping air through the No.3 filter. 7:50-4:22 (2<sup>nd</sup> day); pumping air through the No.2 filter. 4:55 (2<sup>nd</sup> day); balloon landed on the seawater.



## 2.2 Isolation and growth

Filter holders were detached from the sampling device. After the surface of the filter holders was completely cleaned by 70% ethanol, the filters were taken out in a clean bench, placed on TGE agar plates containing Bacto mTGE broth (Difco, USA) and incubated in the dark at 30 °C for 2 weeks. Bacterial colonies appeared only on the upper side of the filters on the plates. The colonies were transferred into mTGE broth medium. Except specially stated, the cultures grown in mTGE medium at 30 °C were used.

## 2.3 Isolate identification

Morphology, motility and endospore formation of the isolates were investigated by using an Olympus BX-FLA microscope (Olympus, Japan). Species affiliation of the isolates was analyzed by molecular biological methods. Following DNA extraction of each bacterial isolate, 16S rRNA gene sequence was amplified by PCR and determined by 3130xl Genetic Analyzer (Applied Biosystems, Foster, USA). The 16S rDNA sequences of the isolates were aligned with 16S rDNA sequences of the closely related species using ClustalX 1.83 (Thompson *et al.*, 1997). Well-aligned regions (654 bps) selected with Gblocks (Castresana, 2000) were used for reconstruction of neighbor-joining tree under the Kimura's 2-parameter model with PAUP 4 beta 10 (Swofford, 2003).

## 2.4 Determination of UV resistance

To determine UV resistance of the isolates (Miller, 1992; Arrage *et al.*, 1993), bacterial endospores or exponentially-grown cells suspended in 20 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> buffer (pH 7.0) were exposed to UVC light (254 nm) from a GL-15 germicidal lamp (National, Okayama, Japan) for different period. UVC intensity at specific distances from the lamp was estimated with a J-225 radiometer (UVP, Upland, USA). Percent survival was calculated from the number of colonies appeared from irradiated cells against that of non-irradiated cells. For comparison, we also tested UV resistance of two ground isolates, a spore-forming bacterial isolate *B. subtilis* strain PY79 (from Dr. W. L. Nicholson) and an *E. coli* strain MG1665 wild type.

## 3. Results

Two isolates (strain BL511 and strain BL512) were obtained from the cleaning filter (filter No.1). One colony was found on the test filter (filter No.3) but accidentally lost before sub-culturing. Two isolates (strain BL521A and strain BL521B) were obtained from the sampling filter (filter No.2). In the culture of late exponential growth, > 99.2 % cells of each isolate were in vegetative form under the microscope. The vegetative cells of all the isolates were similar in morphology being rod-shaped (1.0-5.0 µm in length). All the isolates formed abundant endospores after 1-week incubation in mTGE broth or on mTGE agar.

The 16S rDNA sequences of four isolates share more than 99% similarity to those of endospore-forming species previously recorded in public databases. The closest relatives of isolate *Bacillus* BL511 (Fig. 3) were found to be an isolate *B. altitudinis* JCM 13350 (Suresh *et al.*, 2004) from 40 km altitude and the most commonly isolated bacteria *B. pumilus* from the surfaces of spacecraft when tested for forward planetary protection program (Venkateswaran *et al.*, 2001; La Duc *et al.*, 2003; Link *et al.*, 2004). Isolate BL512 was a close relative of the reported isolate *B. sphaericus* NP71 from 20 km altitude (Griffin, 2005). Isolates BL521A and BL521B shared the highest identity to the species *B. pycnus* and the members of the genus *Paenibacillus*, respectively. Overall, three of the isolates were the strains of the genus *Bacillus*, while the fourth was a *Paenibacillus* strain.

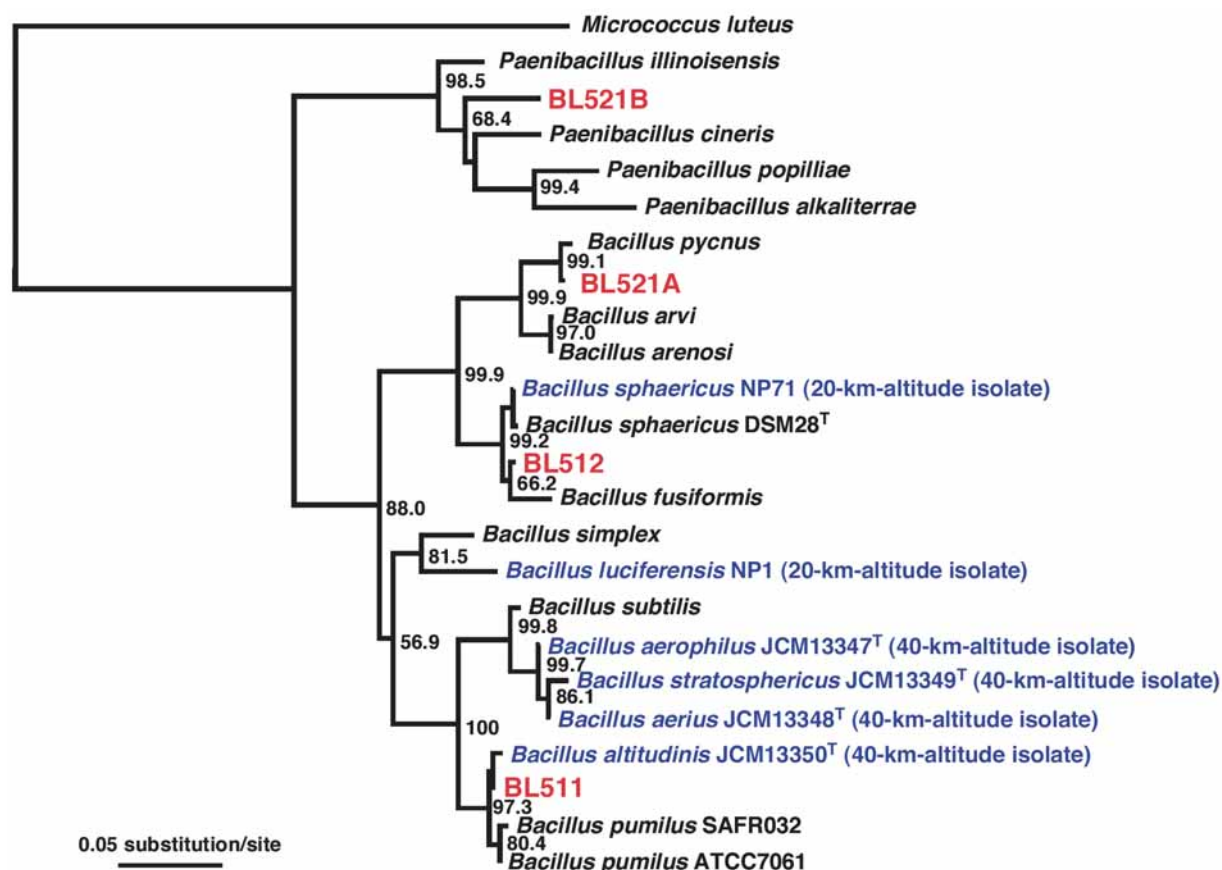


Fig.3 Phylogenetic tree showing the relationship between the isolates in this study (BL511, BL512, BL521A, BL521B) and closely related species of *Bacillus* and *Paenibacillus*. *Micrococcus luteus* (DSM 20030<sup>T</sup>) was used as an outgroup.

UVC resistance of the stratospheric isolates was shown in Table 2. Endospores of each isolate were more UVC resistant than their vegetative cells. Endospores of most stratospheric isolates exhibited UVC resistance comparable to the ground isolate (PY79) and much higher than *E. coli*. The endospores of isolate *Bacillus* BL511, exhibited much higher resistance to UVC irradiation than other isolates in this study.

Table 2 UVC resistance of the isolates

Isolates	LD <sub>90</sub> (J/m <sup>2</sup> )	
	vegetative	spore
BL511	95±19	395±30
BL512	13±10	31±9
BL521A	22±8	103±20
BL521B	32±11	73±13
PY79 <sup>wt</sup>	30±12	105±18
<i>E. coli</i>	28±10	

LD<sub>90</sub> value is the dose of UV radiation needed to give 90% killing of spores or vegetative cells in dilute aqueous solution (Mason and Setlow, 1986; Riesenman and Nicholson, 2000; Link *et al.*, 2004). Strain PY79<sup>wt</sup> is a ground isolate. Mean values from three independent measurements are indicated.

#### 4. Discussion

Possible bio-contamination before launch was a great concern for sampling microbes in the high atmosphere. It is impossible to state absolutely that the isolates are not contaminants, as long as the sampler was sent from the ground and samples were analyzed on the ground. Particularly in the study using balloons, it is unrealistic to sterilize huge balloons and keep them sterile until high altitudes. In this study, we made every effort within our resources to reduce the possibility of contamination. To the most extent, contamination was reduced by strict cleaning of sampling apparatus, starting sampling by opening gate valves at designed high altitude, proper function of the balloon and sampling parts at high altitudes, the cleaning filters, ending sampling by closing gate valves at high altitude before landing, no seawater leaking into the sampling device, and careful operation of detaching filter holders on clean bench. Since the No. 1 filter was activated on the ground to test instrumental functioning and in the upper atmosphere to clean possible contaminants in the tubing, it is uncertain that the two isolates (BL511 and BL512) from this filter are ground contaminants or collected from on-site upper atmosphere. Because of the cleaning operation using the No.1 and No. 3 filters, the two isolates from the sampling filter No. 2 (BL521A and BL521B) are very likely to be stratospheric isolates.

From the analyses of morphological characteristics, UV resistance and phylogeny, these isolates appeared to be terrestrial origin. All these isolates were identified to be bacterial endospore formers. Their morphology, UV resistance and 16S rDNA sequences were not significantly different from terrestrial endospore formers previously reported. Since endospore formers usually produce endospores when they meet unfavorable environments (Riesenman and Nicholson, 2000), endospore-formation is advantageous for their survival in stratospheric environment that is desiccated and nutrient-deplete. Higher UVC resistance of the endospores than that of their vegetative cells is also an advantage of the endospores to survive in stratosphere where UV level is higher than the ground.

Spore formers dominated in the cultivable populations in high-altitude atmosphere. Since the majority of the isolates from previous studies were also spore formers (fungi and bacteria), the predominance of spores in the high atmosphere is most likely a global phenomenon. Although physical environment experienced ranges over many harsh factors during vertical transport via various mechanisms (e.g. storm, volcanic eruption, impact events, human activities), the cultivated microorganisms from previous and current studies suggest that many spore formers are successful in surviving through the transport to the upper atmosphere. This suggests their potential on escaping the earth and the seeding of life to extraterrestrial planets. Although *Deinococcus* isolate was not obtained in the current study, previous isolation of *Deinococcus* strains from our high-altitude samples (Yang *et al.*, 2008) indicated that *Deinococcus* also have high potential in surviving harsh environment (Murray, 1992) of the stratosphere and interplanetary space. These microbes should be in the first consideration when we discuss or test the interplanetary transfer of life.

#### References

- Arrage, A.A., Phelps, T.J., Benoit, R.E., Palumbo, A.V. and White, D.C. Bacterial sensitivity to UV light as a model for ionizing radiation resistance. *J Microbiol Methods*, **18**, 127-136, 1993.
- Bruch, C.W. Microbes in the upper atmosphere and beyond. In: Gregory, P.A. and Monteith, J.L. (Eds.), *Airborne microbes: symposium of the society of general microbiology*. Cambridge University Press, London, pp. 345-373, 1967.
- Castresana, J. Selection of conserved blocks from multiple alignments for their use in phylogenetic analysis. *Mol. Biol. Evol.*, **17**, 540-552, 2000.
- Dennis, R.J., Micossi, E., McCarthy, J., Moe, E., Gordon, E.J., Kozielski-Stuhrmann, S., Leonard, G.A. and McSweeney, S. Structure of the manganese superoxide dismutase from *Deinococcus radiodurans* in two crystal forms. *Acta Crystallograph Sect F Struct Biol Cryst Commun*, **62**, 325-329, 2006.
- Fulton, J.D. Microorganisms of the upper atmosphere. 3. Relationship between altitude and micropopulation. *Appl Microbiol*, **14**, 237-240, 1966.
- Greene, V.W., Pederson, P.D., Lundgren, D.A. and Hagberg, C.A. Microbiological exploration of stratosphere: Results of six

- experimental flights. *Proceedings of the Atmospheric Biology Conference*, 199-211, 1964.
- Griffin, D.W. Terrestrial microorganisms at an altitude of 20,000 m in Earth's atmosphere. *Aerobiologia*, **20**, 135-140, 2005.
- Griffin, D.W. Non-spore forming eubacteria isolated at an altitude of 20,000 m in Earth's atmosphere: extended incubation periods needed for culture-based assays. *Aerobiologia*, **24**, 19-25, 2008.
- Griffin, D.W., Garrison, V.H., Herman, J.R. and Shinn, E.A. African desert dust in the Caribbean atmosphere: microbiology and public health. *Aerobiologia*, **17**, 203-213, 2001.
- Griffin, D.W., Kellogg, C.A., Garrison, V.H., Lisle, J.T., Borden, T.C. and Shinn, E.A. Atmospheric microbiology in the northern Caribbean during African dust events. *Aerobiologia*, **19**, 143-157, 2003.
- Horneck, G. and Brack, A. Study of the origin, evolution and distribution of life with emphasis on exobiology experiments in earth orbit. *Adv Space Biol Med*, **2**, 229-262, 1992.
- Iijima, I., Izutsu, N., Fuke, H., Saito, Y., Kawasaki, T., Matsuzaka, Y., Namiki, M., Ohta, S., Toriumi, M., Yamagami, T., Yamada, K., Seo, M., Yamagishi, A. and Yokohori, S. Development of the microbe sampling device. *JAXA Report*, 2006.
- Imshenetsky, A.A., Lysenko, S.V., Kazakov, G.A. and Ramkova, N.V. On micro-organisms of the stratosphere. *Life Sci Space Res*, **14**, 359-362, 1976.
- La Duc, M.T., Nicholson, W., Kern, R. and Venkateswaran, K. Microbial characterization of the Mars Odyssey spacecraft and its encapsulation facility. *Environ Microbiol*, **5**, 977-985, 2003.
- Lighthart, B. and Shaffer, B.T. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field. *Appl Environ Microbiol*, **61**, 1492-1496, 1995.
- Link, L., Sawyer, J., Venkateswaran, K. and Nicholson, W. Extreme spore UV resistance of *Bacillus pumilus* isolates obtained from an ultraclean spacecraft assembly facility. *Microb Ecol*, **47**, 159-163, 2004.
- Mason, J.M. and Setlow, P. Essential role of small, acid-soluble spore proteins in resistance of *Bacillus subtilis* spores to UV light. *J Bacteriol*, **167**, 174-8, 1986.
- Mileikowsky, C., Cucinotta, F.A., Wilson, J.W., Gladman, B., Horneck, G., Lindegren, L., Melosh, J., Rickman, H., Valtonen, M. and Zheng, J.Q. Natural transfer of viable microbes in space. *Icarus*, **145**, 391-427, 2000.
- Miller, J.H. A short course in bacterial genetics: a laboratory manual and handbook for *Escherichia coli* and related bacteria. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, New York, 1992.
- Murray, R.G.E. The Family Deinococcaceae. In: Balows, A., Truper, H.G., Dworkin, M., Harder, W. and Schleifer, K.-H. (Eds.), The Prokaryotes: a handbook on the biology of bacteria: ecophysiology, isolation, identification, applications. Springer-Verlag, New York, 1992.
- Raulin-Cerceau, F., Maurel, M.C. and Schneider, J. From Panspermia to Bioastronomy, the evolution of the hypothesis of universal life. *Orig Life Evol Biosph*, **28**, 597-612, 1998.
- Riesenman, P.J. and Nicholson, W.L. Role of the spore coat layers in *Bacillus subtilis* spore resistance to hydrogen peroxide, artificial UV-C, UV-B, and solar UV radiation. *Appl Environ Microbiol*, **66**, 620-626, 2000.
- Rogers, L.A. and Meier, F.C. The collection of microorganisms above 36,000 feet. *Natio Geographic Soc Stratosphere Series*, **2**, 146, 1936.
- Shaffer, B.T. and Lighthart, B. Survey of culturable airborne bacteria at four diverse locations in Oregon: urban, rural, forest, and coastal. *Microb Ecol*, **34**, 167-177, 1997.
- Suresh, K., Reddy, G.S., Sengupta, S. and Shivaji, S. *Deinococcus indicus* sp. nov., an arsenic-resistant bacterium from an aquifer in West Bengal, India. *Int J Syst Evol Microbiol*, **54**, 457-461, 2004.
- Swofford, D.L. PAUP. Phylogenetic Analysis Using Parsimony. Version 4.0 Beta 10. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 2003.
- Thompson, J.D., Gibson, T.J., Plewniak, F., Jeanmougin, F. and Higgins, D.G. The ClustalX windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools. *Nucleic Acids Res.*, **25**, 4876-4882, 1997.
- Vali, G., Christensen, M., Fresh, R.W., Galyan, E.L., Maki, R.L. and Schnell, R.C. Biogenic ice nuclei. Part II: Bacterial sources. *J*



*Atmos Sci*, **33**, 1565-1570, 1976.

Venkateswaran, K., Satomi, M., Chung, S., Kern, R., Koukol, R., Basic, C. and White, D. Molecular microbial diversity of a spacecraft assembly facility. *Syst Appl Microbiol*, **24**, 311-320, 2001.

Wainwright, M., Wickramasinghe, N.C., Narlikar, J.V. and Rajaratnam, P. Microorganisms cultured from stratospheric air samples obtained at 41 km. *FEMS Microbiol Lett*, **218**, 161-165, 2003.

Yang, Y., Itahashi, S., Yokobori, S. and Yamagishi, A. UV-resistant bacteria isolated from upper troposphere and lower stratosphere. *Biol Sci Space*, **22**, 18-25, 2008.

# 気球搭載用水晶摩擦気圧計の開発と BU30-5 号機による性能実証試験

栗原 純一<sup>1</sup>, 村田 功<sup>2</sup>, 佐藤 薫<sup>3</sup>, 富川 喜弘<sup>4</sup>, 阿部 琢美<sup>5</sup>

## Development of a balloon-borne quartz friction gauge and a performance demonstration test using the BU30-5 balloon experiment

By

Junichi KURIHARA<sup>1</sup>, Isao MURATA<sup>2</sup>, Kaoru SATO<sup>3</sup>,  
Yoshihiro TOMIKAWA<sup>4</sup>, and Takumi ABE<sup>5</sup>

**Abstract:** Pressure measurements in scientific balloon and sounding rocket experiments in the upper atmosphere are technologically and scientifically important. An onboard small pressure gauge developed in this study is the quartz friction gauge, which is based on the principle that the resonance impedance of a quartz oscillator varies with the pressure of ambient gas. The gauge has a wide measuring range ( $10^5$  -  $10^{-2}$  Pa), which corresponds to the atmospheric pressure from the ground to an altitude of about 100 km. The sensor part and data processing part weigh 100 g and 200 g, respectively. In addition, power consumption of less than 1 W is achieved with this gauge. The gauge is suited for high altitude balloon experiments because the weight of their instruments is severely limited. A tuning-fork-shaped quartz oscillator in the gauge is widely used for wrist watches and the structure has a high resistance to vibration and shock, and thus the gauge is applicable to sounding rocket experiments that require onboard instruments to have high environment resistance. In this paper, we report on a performance demonstration test of the newly developed quartz friction gauge using the BU30-5 balloon experiment.

**Key words:** Quartz oscillator, Pressure gauge, In situ measurement

### 概 要

科学気球や観測ロケットなどが飛翔する超高層大気環境における気圧の計測は、技術的にも科学的にも極めて重要である。本研究で開発した飛翔体搭載用小型気圧計は、水晶振動子の共振インピーダンスが圧力に応じて変化する原理を利用した水晶摩擦気圧計と呼ばれるもので、地表から高度 100km 付近までに相当する広い計測圧力範囲 ( $10^5 \sim 10^{-2}$  Pa) に特徴がある。また、センサ部は約 100g、データ処理部は約 200g と小型軽量であることに加えて 1 W 以下の低消費電力を達成し、特に重量が厳しく制限される高高度気球などの飛翔体への搭載に適している。腕時計などにも広く使用されている音叉型水晶振動子は耐振動・衝撃性に優れた構造を持ち、高い耐環境性能が要求される観測ロケットにも搭載可能である。本報告では、開発した水晶摩擦気圧計の性能試験結果について述べるとともに、BU30-5 号機を用いた性能実証試験についても報告する。

---

<sup>1</sup> Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

<sup>2</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

<sup>3</sup> Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

<sup>4</sup> National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems

<sup>5</sup> The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

## 1. はじめに

科学気球や観測ロケットなどが飛翔する高度 30km 以上の「超高層大気」と呼ばれる高度領域における気圧の計測には、技術的にも科学的にも極めて高いニーズがある。

科学気球にとって気圧は、気球工学における風速や温度と共に気球の運動を支配する基本的な物理量であるだけでなく、科学観測においても大変重要な観測パラメータである。例えば、気象力学の分野では基本方程式系に対して高度座標ではなく気圧座標で議論するほうが厳密かつ簡便であり、大気化学分野ではオゾンなどの微量気体の混合比を導出する上で気圧の測定精度が誤差要因となる。気球観測でしばしば用いられる静電容量式センサや半導体圧力センサは小型軽量ではあるが計測圧力範囲が狭く ( $10^5 \sim 10^3 \text{Pa}$ )、気圧が数 hPa (1hPa=100Pa) 以下になる高高度では十分な精度がない。例えば、後述する ECC オゾンゾンデ用の圧力センサは世界中で使用されている製品だが、測定範囲が 3hPa まで、その圧力での精度は 0.6hPa である。したがって気圧が 3hPa 以下となる高度約 40km 以上の高度では 20% 以上の誤差が発生するか、測定自体が成立しない可能性がある。近年、到達高度が 50km を越えるような高高度気球が日本で開発されたが<sup>[1]</sup>、日本では搭載に適した気圧計がまだ存在しておらず、諸外国においても同様の状況と推測される。

一方、観測ロケットは高度数 100km に到達可能で、背景の気圧は高真空領域にも及ぶが、実験室の真空装置で一般的に使用されている真空計をそのまま搭載することはできない。その理由はロケットの打ち上げ時に加わる数 1000Hz・数 10G の振動・衝撃に耐えられる構造を原理的に持っていないためである。細いフィラメントで構成されるピラニ真空計・電離真空計や、薄い金属膜で構成される隔膜真空計はその構造上、振動・衝撃に非常に弱い<sup>[2]</sup>。このような理由から、超高層大気の研究にとって気圧は観測することが最も難しい物理量のひとつであり、十分な観測データが得られていない<sup>[3]</sup>。

本研究で採用した水晶摩擦気圧計は、最近製品化されたばかりの比較的新しい技術である。多くの点で従来の気圧計・真空計より優れており、今後は各種真空装置でこの水晶摩擦気圧計が従来の真空計に順次置き換わっていくものと予測される。飛翔体用の水晶摩擦気圧計はまだ存在していないが、高性能、耐振動・衝撃性、低消費電力、小型軽量、長寿命などの特徴から大気球・観測ロケット搭載用気圧計として最適であると言える。さらに最大の特長として、この検出素子は計測圧力範囲が大気圧から中真空まで ( $10^5 \sim 10^2 \text{Pa}$ ) と非常に広いことが挙げられる (図 1)。

本研究の目的は、飛翔体搭載用の水晶摩擦気圧計を開発し、種々の試験を通してその性能を確認するとともに、気球に実際に搭載して実証試験を行うことである。

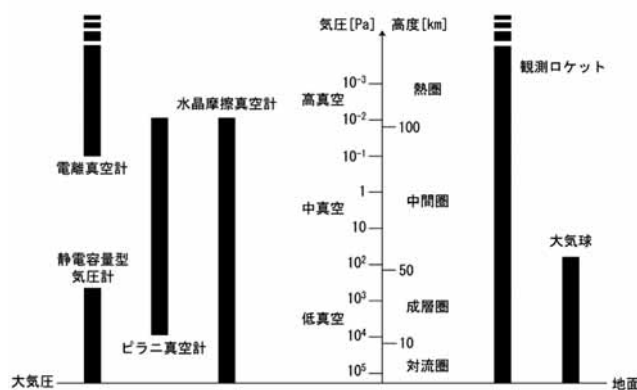


図 1 気圧と高度の対応関係と、大気球・観測ロケットの飛翔高度、および各種真空計・気圧計の計測圧力範囲

## 2. 水晶摩擦気圧計

### 2.1. 音叉型水晶振動子と水晶摩擦気圧計

水晶振動子は電圧を印加すると発振するため、時計の発振回路などに広く用いられている。腕時計にも内蔵されている「音叉型水晶振動子」(図2)は、その共振インピーダンスが気体分子との摩擦抵抗によって変化することが知られている。気体の摩擦抵抗の大きさは圧力に依存する<sup>[5]</sup>ので、インピーダンスを電圧として出力すれば、圧力が計測できる。この原理を利用したのが「水晶摩擦気圧計」である。現在、時計用に大量生産されている音叉型水晶振動子は人工水晶の水晶片(ブランク)からフォトリソグラフィ加工技術によって製造され、日本のメーカー数社が世界シェアの大半を占めている。表面には金・銀・クロム・アルミニウムなどが電極として蒸着されており、さらに金属パッケージ内に真空または不活性ガスによって気密封止されている。時計用の音叉型水晶振動子は、小型化が要求されるため大きさはパッケージを含めて1cm以下の製品が多く、発振周波数も32.768kHzが代表的である。

真空装置用に国内の真空機器メーカー数社から市販されている水晶摩擦気圧計は、やはり入手しやすい時計用の音叉型水晶振動子をセンサとして用いている。ただし、水晶振動子を気体中に露出させるため、電極には酸化に強い金・クロムの合金を用いているものが多い。真空計としての構成や仕様はどのメーカーの製品も似ており、真空装置のゲージポートやフランジに小型のゲージ部を接続し、ケーブルを介して表示器・記録計に出力を送る方式である。計測圧力も $10^{-2}$ Pa～大気圧程度のものが圧倒的に多く、これは後述するように時計用の音叉型水晶振動子を利用していることが大きな理由となっている。

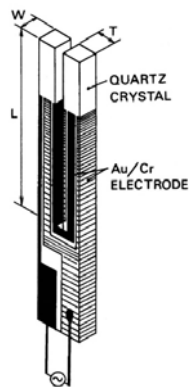


図2 音叉型水晶振動子の構造<sup>[4]</sup>

### 2.2. 水晶摩擦気圧計の原理と測定上の諸問題

水晶振動子の共振インピーダンス $Z$ は気体の摩擦抗力 $f$ に比例するが、摩擦抗力と気体の圧力 $p$ との関係は圧力領域によって異なる。音叉型振動子を球体の集合として単純化した理論モデル<sup>[5]</sup>によると、振動子が受ける摩擦抗力は、圧力の高い粘性流の領域では圧力の1/2乗に比例し、圧力の低い分子流の領域では圧力の1乗に比例し、その間の中間流と呼ばれる領域では圧力に依存しないという異なる性質を持つ。したがって、全ての圧力範囲でインピーダンスと圧力の関係を一つの理論式のみで正確にあらわすのは大変困難である。そのため一般的な水晶摩擦気圧計では、理論的・実験的に得られた複数の近似式を用いて、測定されたインピーダンスから圧力を算出している。しかし、それ以外にも以下に述べるような測定上の問題が知られている。

#### 2.2.1. 温度によるインピーダンス変化と補正方法

インピーダンスと圧力の関係の近似式の精度を除けば、水晶摩擦気圧計の最大の誤差源は温度変化による水晶振動子自身のインピーダンス変化である。時計用の水晶振動子は室温付近にインピーダンスの最小値を持つものが多く、低温や高温環境下では10℃の温度変化で0.5kΩ程度インピーダンスが変化する。一方、圧力に対するインピーダンスの変化は高真空の $10^{-2}$ kΩ程度から大気圧の10kΩ程度まで指数関数的に変化する。したがって、大気圧付近では温度変化による影響はほとんどないが、低圧領域では温度変化が大きな影響を持ち、低圧側の測定限界を決める要素のひ



とつととなっている。なお、このインピーダンスの温度変化は、水晶振動子の物性の温度変化による固有インピーダンスの変化と考えられ、被測定気体の温度変化による摩擦抗力の変化とは異なる。

上記の温度変化の影響を補正するための方法がいくつか考案されている。ひとつは温度センサを水晶振動子の近傍に設置して温度を測定し、その数値を用いて温度補正をする方法である。この方法は技術的には非常に簡便だが、厳密には水晶振動子と温度センサとを熱的に結合させる必要があり、必ずしも正確ではない。もうひとつの方法は、周波数の温度依存性を利用する方法である。よく知られているように、水晶片から水晶振動子を切り出す（カット）際に、結晶軸に対してカットする方向・角度によって水晶振動子は様々な温度特性を持ち、それが発振器としての精度を決める重要な要素となっている。それを逆に応用し、周波数の変化から温度を測定することでインピーダンスの温度補正を行うことが可能である<sup>[6]</sup>。この方法は厳密に水晶振動子の温度を知ることができるが、周波数を正確に測定する回路が必要となるという欠点がある。

### 2.2.2. 水晶振動子の形状によるインピーダンス変化

音叉型水晶振動子の形状によってもインピーダンスは異なる。音叉の腕の長さが長く、厚さの薄い、つまり腕の細長い水晶振動子ほどインピーダンスが大きくなることが知られている<sup>[7]</sup>。前述のようにインピーダンスの小さい低圧領域では温度によるインピーダンス変化が相対的に大きくなるので、より低い圧力まで測定するためにはインピーダンスの大きな細長い水晶振動子を用いることが望ましい。しかし、細長い形状の振動子は共振周波数も小さくなるので、外部振動の影響を受けやすくなることに注意が必要となる。

### 2.2.3. 気体種によるインピーダンス変化

気体種によって分子量  $M$  や粘性係数  $\eta$  が異なるため、水晶振動子が気体から受ける摩擦抗力も異なり、結果的にインピーダンスが気体種によって変化する。分子量や粘性係数の小さな気体ほどインピーダンスが小さくなることが知られている<sup>[8]</sup>。インピーダンスは、低圧の分子流領域では  $\sqrt{M}$  に比例し、高圧の粘性流領域では  $\sqrt{\eta M}$  に比例する。したがって、混合気体の圧力測定に際しては被測定気体の組成に関する情報が必要となる。地球大気の組成は地表から高度約 100km まで均質なため<sup>[3]</sup>、高度 100km までの超高層大気の観測であれば支障はない。

## 3. 飛翔体搭載用水晶摩擦気圧計

### 3.1. 要求仕様

大気球・観測ロケット等の飛翔体搭載用の水晶摩擦真空計を開発するにあたり、以下のような要求仕様を定めた。

①測定圧力範囲	④耐振動・衝撃性
大気圧（地表）～ $10^{-2}$ Pa（高度 100km に相当）	衝撃試験：40G <sup>O-P</sup> 8 ～ 10m 秒
②測定精度	振動試験：サイン波 10 ～ 35Hz      3.06mm <sup>O-P</sup>
大気圧～ $10^{-1}$ Pa：± 10% 以内（市販品と同等）	35 ～ 400Hz      7.5G <sup>O-P</sup>
10 <sup>-1</sup> ～ $10^{-2}$ Pa：± 20% 以内（市販品と同等）	400 ～ 2000Hz      15G
③温度仕様	
保存温度：-20 ～ +70℃	
動作温度：-20 ～ +60℃	

測定圧力範囲は、前述したとおり、地表から高度 100km までの超高層大気の圧力を連続的に観測できる測定器が科学的に要求されていることによる。測定精度は、その向上も今後の開発目標の一つではあるが、今回の搭載用の仕様ではすでに市販されている水晶摩擦真空計と少なくとも同等であることが望ましい。温度仕様は大気球搭載の条件を元に設定した。耐振動・衝撃性は JAXA 観測ロケット用振動衝撃単体試験規格に準拠している。

上記の仕様とは別に、大気球・観測ロケットそれぞれのインターフェースの仕様を満たす必要があるが、それにつ



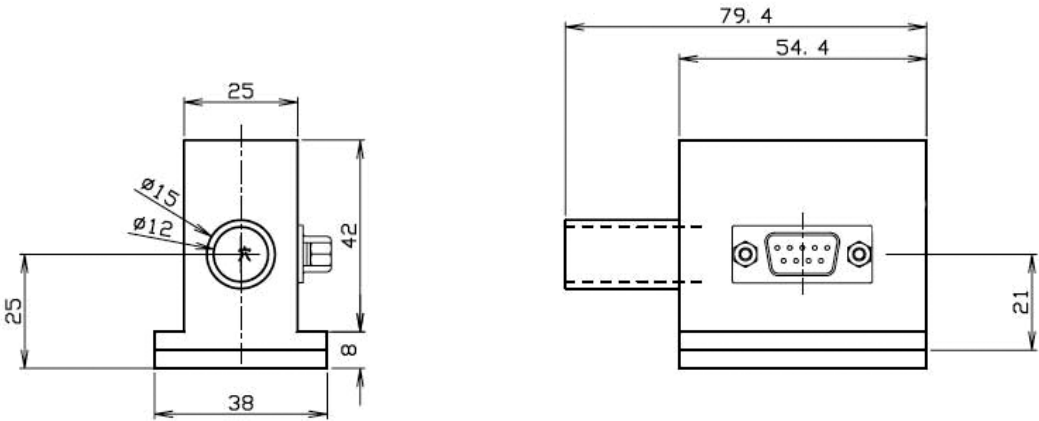


図 5 QFG センサ部外観図

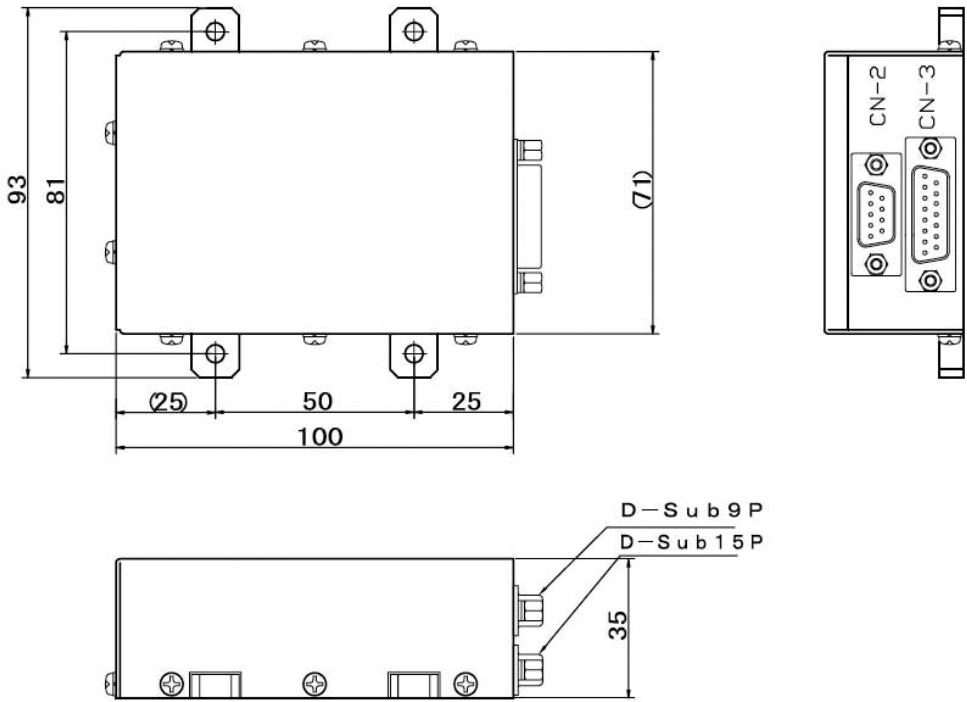


図 6 QFG データ処理部外観図

表 1 QFG の消費電力

センサ部			データ処理部			合計
+18V (12V)	10mA	120mW	+18V	25+4mA	522mW	
-18V (12V)	10mA	120mW	-18V	4mA	72mW	
+5V	1mA	5mW		※ 1		
計 245mW			※ 2 計 594mW			合計 839mW

※ 1 : 25mA は +5V 用 DC-DC コンバータ分。  
※ 2 : デジタル出力が不要の大気球用モデルでは、290mW となる。

### 3.3. インターフェース

大気球用モデルは相乗りの光学オゾンゾンデのテレメータインターフェースを利用しており、独自のインターフェースを持たない。光学オゾンゾンデ側の仕様に合わせて、出力はアナログ 0 ～ +10V の 2ch（気圧・温度データ）となっている。光学オゾンゾンデのテレメータで送信されるデータの分解能は 12bit、サンプル間隔は 1sec である。一方、観測ロケットでは、テレメータのアナログチャンネルの分解能が 8bit しかないため、観測ロケット用モデルはデータ処理部で A/D 変換を行い、デジタル 12bit の 2ch で出力している。なお、観測ロケットのテレメータのサンプル間隔は 2.5ms である。

## 4. 室内実験による性能確認試験

### 4.1. 温度試験

温度に対する出力の変化を調べる目的で恒温槽を用いて QFG の大気圧下における温度試験を行った。温度範囲は仕様で要求されている動作温度の -20℃ ～ +60℃ である。図 7 のように、温度に対して出力（インピーダンス）は 30℃ 付近にピーク（インピーダンスの極小）を持つ 2 次関数的な変化をする。温度による変化の幅はおよそ 0.1% 程度で、大気圧（1013.25hPa）では約 10hPa に相当する。この結果を用いて気圧出力の温度補正を行う。

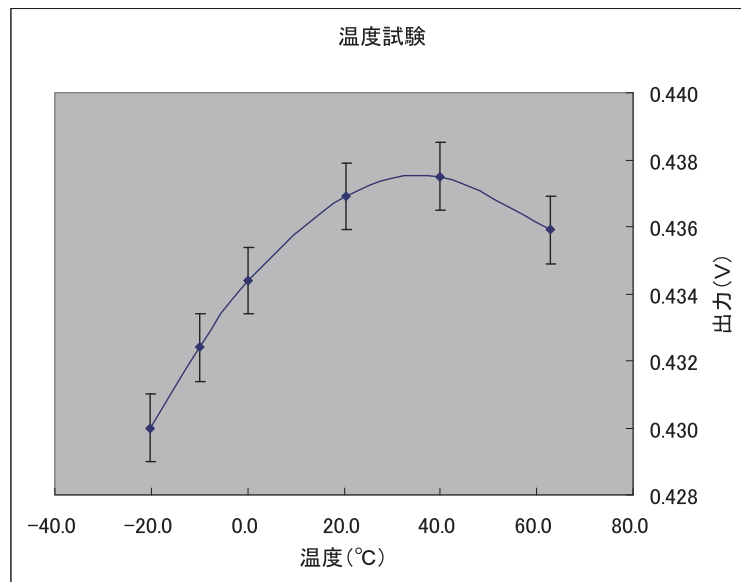


図 7 温度による出力の変化

### 4.2. 気圧較正試験

JAXA 宇宙科学研究本部・相模原キャンパスにおいて宇宙プラズマ研究系の設備を用い、QFG の気圧較正試験を行った。実験方法は、小型チェンバーのゲージポートに水晶摩擦真空計を取り付け、真空ポンプで  $10^{-2}$ Pa 以下まで真空引きをした後、乾燥空気を徐々に導入して行った。絶対圧の較正には圧力計測範囲の異なる 2 種類の隔膜真空計（キャパシタンスマノメータ）を用いた。図 8 に大気球用モデルの気圧較正試験で得られた圧力特性を示す。



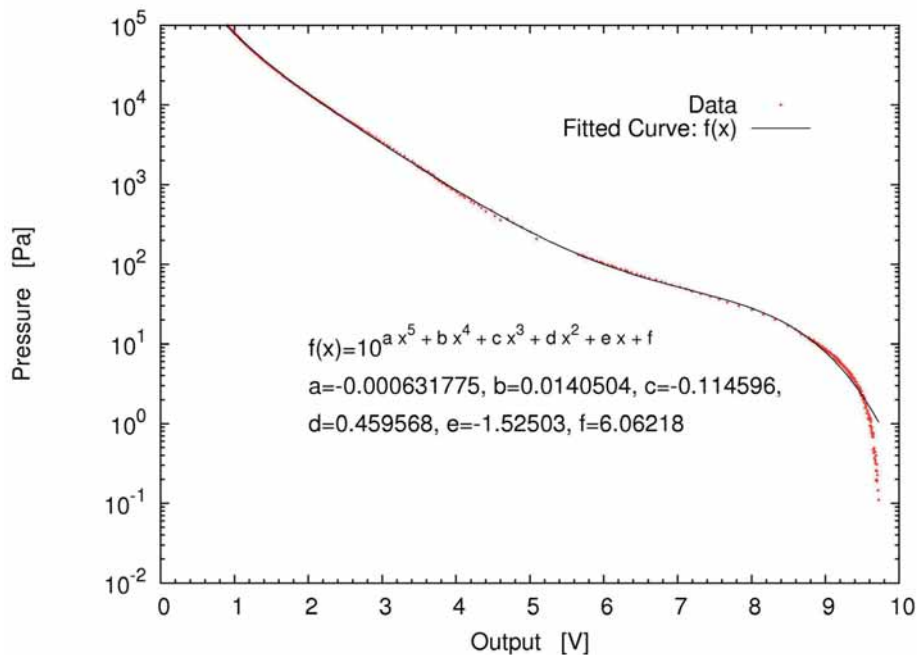


図8 気圧較正試験結果

横軸は QFG からの出力電圧 (V)，縦軸はキャパシタンスマノメータの測定気圧 (Pa) で，赤点が取得データ，黒の実線はそれらのデータ点に対してフィッティングした較正曲線を表している。地表気圧に相当する  $10^5\text{Pa}$  から，高度 90km に相当する  $10^{-1}\text{Pa}$  までの圧力に対して，フルスケール 10V で出力が得られている。較正曲線は気球実験で受信データのクイックルックを行う目的で導出したものであり，地表気圧から 10Pa までの圧力範囲でフィットするように指数部に 5 次関数を最小自乗法によって当てはめた。詳細な解析には較正曲線は用いず，データ点を元にした補間によって行う。較正曲線の再現性は極めて高く，気圧較正の誤差は前述の温度ドリフトによる誤差の範囲内である。

#### 4.3. 低温真空試験

JAXA/ISS 気球グループの恒温真空槽にて QFG の低温真空試験（搭載認定試験）を行った。気球グループから提示された試験条件は，搭載と同じ状態（後述の発泡スチロール製容器に収納した状態）で，恒温真空槽において  $-55^\circ\text{C}$ ，1mmHg (133.322Pa) 以下で 3 時間以上正常動作することであったが，出力等に異常は発生しなかった。なお，この試験において，QFG センサ部に搭載されている温度センサからのデータによると，基板上の水晶振動子の温度は仕様で定めた動作温度の  $-20^\circ\text{C}$  よりも低くなり，最低で約  $-35^\circ\text{C}$  に達したが，正常に動作することが確認された。

#### 4.4. 振動・衝撃試験

JAXA/ISS の環境試験設備を用いて振動・衝撃試験を行った。試験スペックは 3.1 に記した「JAXA 観測ロケット用振動衝撃単体試験規格」に基づいており，X・Y・Z の 3 軸に対して行った。加振中も動作をモニタしていたが，異常は全く見られなかった。

### 5. 大気球を用いた性能実証試験

#### 5.1. BU30-5 気球実験の概要と目的

2007 年 9 月 13 日に，成層圏オゾンおよび大気重力波の観測と QFG の性能実証試験を目的として，BU30-5 号機気球実験が行われた。

本実験は，東北大学が担当する光学オゾンゾンデ，東京大学・国立極地研究所が担当する ECC オゾンゾンデによる

成層圏オゾンと大気重力波の観測との共同実験であり、QFGは光学オゾンゾンデに相乗りという形でテレメータ等の機能を利用してデータを送信した。

成層圏オゾンの観測は、上部成層圏オゾンの年々変動の研究を目的として始められ、これまでの13年間の観測によって太陽活動度の11年周期変動に同期した長期変動などが検出されている。また、オゾン高度分布には毎回波長2～3km程度の波状構造が見られ、短鉛直波長の鉛直振動を伴う大気重力波や、水平風の鉛直シアーに由来する水平差分移流によるものと考えられている。大気中の温度や風、気圧、オゾン等微量成分の小規模構造については、普遍的なスペクトルを持つことがこれまでの研究によりわかってきたが、これらは主に高度30kmまでの対流圏、下部成層圏、あるいは高度60～80kmの中間圏の観測データを用いた研究である。高度30～60kmについては観測手段が限られ、ほとんど調べられていないといつてよい。そこで、高い時間分解能をもつ測定器で高度50km以上までの温度、風、オゾンデータを取得し、未知高度領域を含む地上から上部成層圏までのスペクトル構造、および、揺らぎをもたらす大気現象の物理を明らかにすることを目的としている。

これまでの観測では、光学オゾンゾンデ・ECCオゾンゾンデのそれぞれにダイヤフラム型の静電容量式気圧計を用いてきた。しかし、いずれも数hPa以下となる40kmを超えるような高度では精度が十分とは言えず、特に重力波による数%以下の微小な気圧変動を捉えるにはより高精度な圧力計が必要である。そこで、今回はQFGを組み込んで3台の気圧計による同時観測を行い、その精度と実用性の実証を行った。

## 5.2. 実験方法

BU30-5号機の荷姿を図9に示す。容積30,000m<sup>3</sup>の気球に、総重量3.6kgのECCオゾンゾンデ、遮光板、光学オゾンゾンデが搭載されている。ECCオゾンゾンデによるGPSドップラー法での風の推定が可能なこと、および遮光板による気球の目隠しが可能なことの2条件から気球とECCオゾンゾンデとの距離を放球後に巻き下げによって30m以上離す。ECCオゾンゾンデと遮光板の間は10m、遮光板と光学オゾンゾンデの間は1.0mとする。太陽高度角が十分高い日中に観測するため午前7:00～10:00の間に実験を行った。なお、気球および観測器の回収は行わない。以下に、各観測器の詳細を述べる。

### 5.2.1. ECCオゾンゾンデ

高度30km以下のオゾンの精密観測が可能な電気化学式のオゾンゾンデ。外気をポンプで取り入れ、オゾンをヨウ化カリウム溶液に反応させて流れる電流値のデータ信号を、オゾンゾンデに接続したVaisala社のラジオゾンデRS92による、GPSドップラー法による風観測データ、温度データ、気圧データと共に1秒毎にテレメータで送る。気圧センサは静電容量式センサのVaisala製BAROCAPシリコンセンサを用いている。気圧センサの仕様を表2に示す。

### 5.2.2. 光学オゾンゾンデ

光学センサ部、ゾンデ部からなる光学式オゾンゾンデ。光学センサ部では拡散板で散乱された太陽直達光のうちオゾンハートレー吸収帯の300nmの紫外線と姿勢変化補正用420nmの可視光の強度を測定する。ゾンデ部は気温、気圧、GPS測位データ（風速、高度測定用）、センサ温度、リファレンス電流信号を可視光、紫外線強度データと共にPCM化し、1秒毎にテレメータで送る。気圧センサは静電容量式センサのコバル電子製PA830-102Aを用いている。この気圧計は最高気圧が981hPaのため、海拔0m付近では使用できないという欠点がある。気圧センサの仕様を表3に示す。

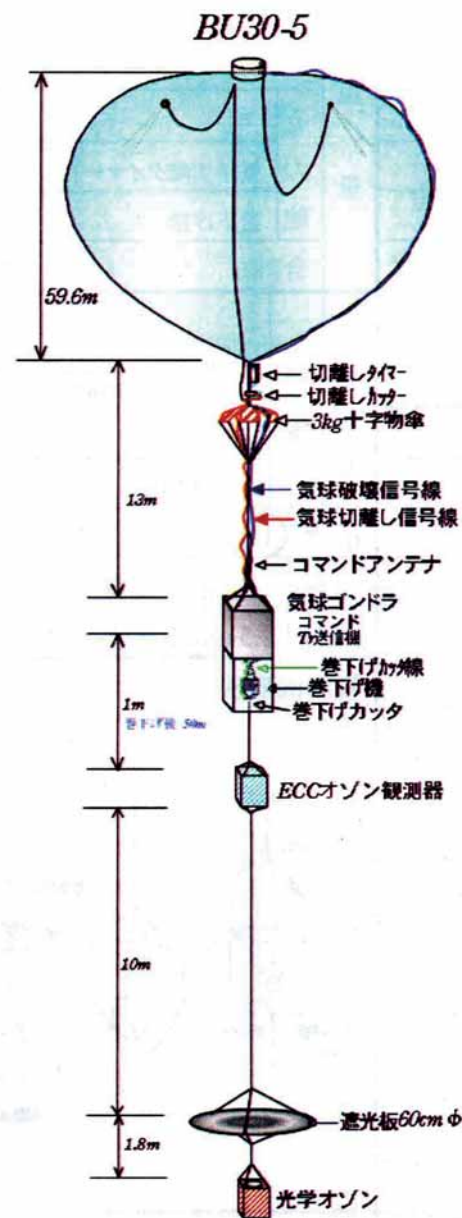


図9 BU30-5号機の荷姿

表2 ECC オゾンゾンデの気圧センサ「BAROCAP シリコンセンサ」の仕様

測定範囲	1080hPa ～ 3hPa	
分解能	0.1hPa	
精度	1080 ～ 100hPa	1.5hPa
	100 ～ 3hPa	0.6hPa

表3 光学オゾンゾンデの気圧センサ「PA830-102A」の仕様

測定範囲	981hPa ～ 0Pa
直線性	± 0.5%F.S.
温度特性	± 0.05%F.S./℃

### 5.2.3. QFG（水晶摩擦気圧計）

図 10 のように QFG のセンサ部、データ処理部、電池を共に発泡スチロール製容器に入れて光学オゾンゾンデの側面に取り付け、出力を光学オゾンゾンデ側にする。発泡スチロール容器には穴が開けられており、センサ部の外気取り入れ口を接続する。測定した気圧データ、センサ温度データは光学オゾンゾンデ側で PCM 化し、1 秒毎にテレメータで送る。

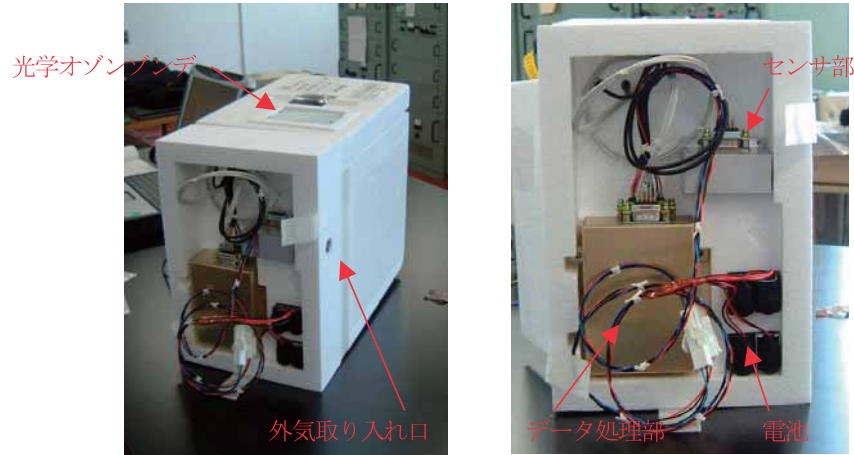


図 10 光学オゾンゾンデに組み込まれた QFG

### 5.3. 実験結果

BU30-5 号機は 2007 年 9 月 13 日 6 時 51 分に三陸大気球観測所より放球され、2 時間 35 分後に高度 49.8km の水平浮遊高度に達した後、10 時 21 分に閉伊崎東方 100km の海上に緩降下した。今回の観測では 3 つの観測器ともに正常に動作し、成層圏を超えて下部中間圏までの観測に成功した。

図 11 に QFG、光学オゾンゾンデ (BOS)、ECC オゾンゾンデによって観測された気圧の高度分布、および MSISE-90 大気モデル<sup>[3]</sup> との比較を示す。BOS の生データには大きなオフセットがあったため、頂点で ECC のデータに合せてある。ECC のデータは大気モデルと高度 40km までよく一致している。ECC はメーカーで較正済みのため、絶対値の信頼性は高い。それに対し、QFG は高度 15km 以上では大気モデルよりも 30% 近く低めになっている。この大気モデルとの差は温度の影響では説明ができない。図 7 に示したように温度変化による出力電圧の変動幅は 0.01V 程度 (30℃と -20℃ の場合の電圧差) で、図 8 の較正曲線から変換すると 100Pa 以上の気圧では数% 以下の気圧変動にしかない。

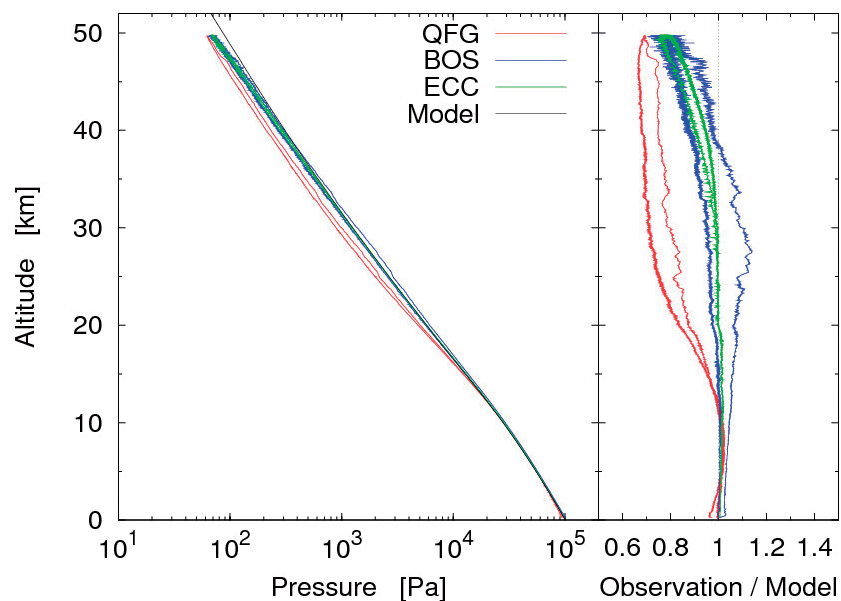


図 11 各気圧計の観測結果と平均モデルとの比較 (左)、および各気圧計の観測結果を平均モデルで割った値 (右)



この原因として、室内での較正実験の問題が考えられる。前述のように気圧較正システムには、全圧を測定するキャパシタンスマノメータを使用している。一方、QFG は圧力だけでなく気体の粘性などにも敏感であり、気体種の組成計としても使われているほどである。較正試験ではチェンバー内に清浄な乾燥空気を導入しているが、QFG がチェンバー内壁や QFG 自身からの脱ガスによって影響を受けた可能性が高い。前述のように粘性流領域ではインピーダンスは分子量の平方根に比例する。一方、インピーダンスは圧力の平方根に比例するので、一定のインピーダンスの値に対して異なる気体種では圧力は分子量に比例することになる。脱ガスの主成分は水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) であると推測されるが、仮に気圧較正システムのチェンバー内の気体が乾燥空気ではなく全て水蒸気であったとすると、較正後に圧力の計測値は真の圧力に比べて約 40% 低くなると見積もられる。それを確認するためには、真空チェンバー・真空ポンプ・ガス導入装置などからなる較正装置を今後、根本的に改良する必要がある。

また、QFG と BOS のデータには上昇時と下降時で 10% 程度の差が見られているが、ECC にはそのような差は見られていない。この上昇時と下降時の差は実際の気圧に存在する差と考えられるが、ECC で検出されていない理由については不明である。

図 12 に温度の観測結果を示す。BOS・ECC は外気の気温を測定しているが、QFG の測定値は気温ではなく、センサ部の水晶振動子の温度である。QFG センサ部は気圧を測定するために外気に晒されているが、センサ部の温度は自身の発熱と外気との熱収支によって決まっている。また、センサ部の熱容量のために外気温変化に対して応答が遅れるので、センサ部温度は上昇時と下降時で大きなヒステリシスが生じている。外気温は対流圏界面の高度 17km 付近で最低の  $-65^{\circ}\text{C}$  まで下がっているが、QFG のセンサ部温度は下降時の高度 7km 付近で  $-18^{\circ}\text{C}$  が最低値である。したがって、大気球観測においては気圧データの温度補正には外気温ではなくセンサ部温度の同時測定が必須であると言える。今回示す全ての気圧データはこのセンサ部温度データを用いて温度補正済みである。

最後に、微小な変動成分について解析した結果を図 13 に示す。各観測器が測定した気圧と気温の高度分布にそれぞれ 1km と 5km の移動平均をかけ、両者の差を 5km の移動平均で割った結果を図 4 に示す。この操作により、約 2 – 10km のバンドパスをかけた変動成分が抽出される。まず、気圧については、QFG は BOS と絶対値に多少の違いはあるものの、すべての高度で位相がよく合っており、相対的な精度は 1 % 以下であることがわかる。ECC の気圧は高度 20km 以下で BOS とよく一致するが、それ以上の高度では位相も振幅も全く異なる。一方、気温の変動成分は BOS・ECC で非常によく一致する。QFG・BOS と、ECC の高度差 (11m) は非常に短いため、両者の気圧変動成分が異なるのは ECC 側の気圧計に何らかの原因がある可能性が高い。そこで、2005 年に行われた BOS と ECC の同時観測のデータについても再解析を行ったところ、両者の気圧は高度 20km 以下でよく一致するが、それ以上では位相も振幅も全く異なるというほぼ同様の結果を得た。このことから ECC の気圧計は高度 20km 以上 (約 80hPa 以下) では微小な気圧変動を検出できないおそれがあることがわかった。ECC の気圧計は世界中で気象観測に使用されている製品だが、この事実は今回初めて明らかになったものであり、今後原因を究明する必要がある。

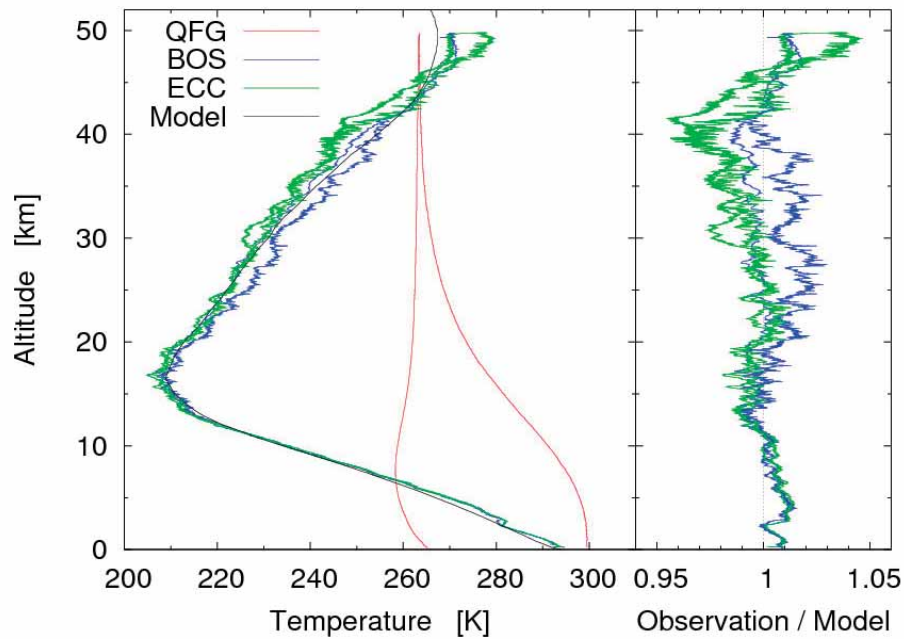


図 12 各観測器の温度観測結果と平均モデルとの比較 (左), および  
観測結果を平均モデルで割った値 (右)

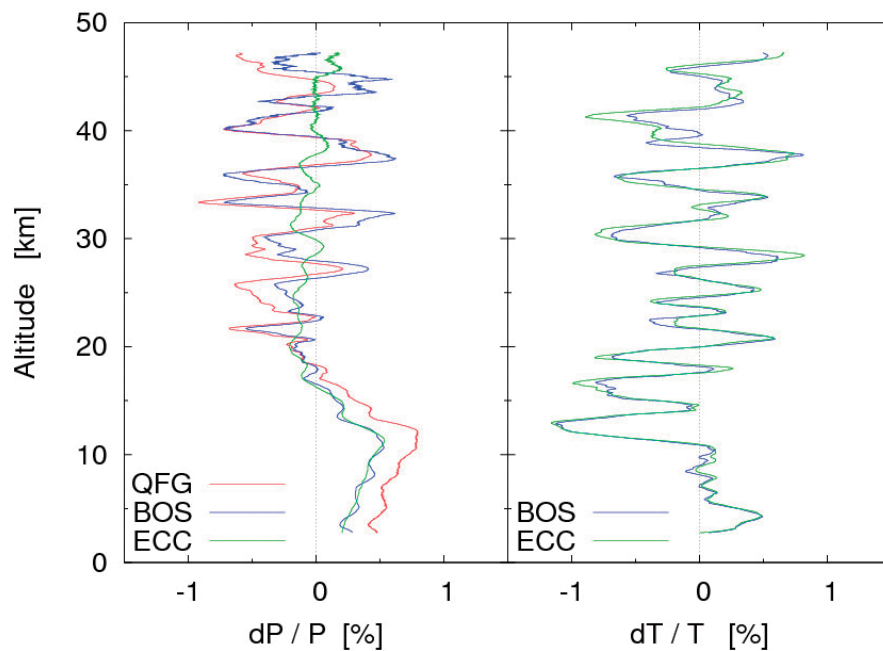


図 13 2-10km のバンドパスフィルタによって抽出された気圧と気温の変動成分

## 6. まとめ

飛翔体搭載用小型真空計として、市販されている音叉型水晶振動子を利用した水晶摩擦気圧計 (QFG) の開発に成功し、科学気球 BU30-5 号機を用いた性能実証試験を行った。QFG は搭載に要求される仕様を満たすことが室内実験による確認試験で示されていたが、実際の性能実証試験では室内実験に原因があると思われる問題がいくつか見つかった。

た。これらの問題も室内実験の較正装置・較正方法の改良によって十分に解決できると予想している。したがって、QFGの飛翔体搭載用小型気圧計としての基本的な性能は実証されたと考えている。

本測定器は小型・軽量であり、他の観測器の環境に対する悪影響もほとんどないため、他観測器との相乗りが容易である。今後は低価格化と簡便性を追求し、将来的には大気球・観測ロケットの標準搭載品として利用できるようにすることが目標である。

また、市販されている音叉型水晶振動子を利用しているために、測定精度・測定限界に大きく影響する水晶振動子のインピーダンスの大きさやそのばらつきを自由に選択することができない。水晶振動子を水晶片から加工する段階から形状を最適化し、低圧領域でもインピーダンスの温度変化が相対的に小さい水晶振動子を開発できれば、QFGの性能を大幅に向上させることが可能になると期待される。

## 参考文献

- [1] Yamagami, T., Saito, Y., Matsuzaka, Y., Namiki, M., Toriumi, M., Yokota, R., Hirose, H., Matsushima, K., "Development of the highest altitude balloon", Adv. Space Res., 33, pp.1653-1659, 2004.
- [2] 伊藤秀明, "水晶摩擦真空センサ", 日本音響学会誌, 51 巻 1 号, pp.49-53, 1995.
- [3] Hedin, A. E., "Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere", J. Geophys. Res., 96, pp. 1159-1172, 1991.
- [4] Ono, M., Hirata, M., Kokubun, K., Murakami, H., Hojo, H., Kawashima, H., and Kyogoku, H., "Quartz friction vacuum gauge for pressure range from 0.001 to 1000 Torr", J. Vac. Sci. Technol. A, 4, pp. 1728-1731, 1986.
- [5] Kokubun, K., Hirata, M., Murakami, H., Toda, Y. and Ono, M., "A bending and stretching mode crystal oscillator as a friction vacuum gauge", Vacuum, 34, pp.731-735, 1984.
- [6] Kobayashi, T., Hojo, H. and Ono, M., "Pressure measurement from 1 atm to 0.01 Pa using a quartz oscillator", Vacuum, 44, pp.613-616, 1993.
- [7] Hirata, M., Kokubun, K., Ono, M., and Nakayama, K., "Size effect of a quartz oscillator on its characteristics as a friction vacuum gauge", J. Vac. Sci. Technol. A, 3, pp. 1742-1745, 1985.
- [8] Ono, M., Hirata, M., Kokubun, K., Murakami, H., Tamura, F., Hojo, H., Kawashima, H., and Kyogoku, H., "Design and performance of a quartz oscillator vacuum gauge with a controller", J. Vac. Sci. Technol. A, 3, pp. 1746-1749, 1985.

# GPS 搭載型光学オゾンゾンデの開発

村田 功<sup>1</sup>, 佐藤 薫<sup>2</sup>, 山上 隆正<sup>3</sup>, 岡野 章一<sup>4</sup>, 富川 喜弘<sup>5</sup>

## Development of a Balloon-borne Optical Ozone Sensor with GPS receiver

By

I. Murata<sup>1</sup>, K. Sato<sup>2</sup>, T. Yamagami<sup>3</sup>, S. Okano<sup>4</sup>, and Y. Tomikawa<sup>5</sup>

**Abstract:** We have developed a new balloon-borne optical ozone sensor to measure wind speed profile by GPS receiver simultaneously with ozone, pressure, and temperature. The validation measurements with Electrochemical Concentration Cell (ECC) ozone sensors were performed between 2002 and 2007. The ozone number density and wind speed show good agreements with ECC ozone sensors and GPS radiosondes.

**Key words:** optical ozone sensor, GPS

### 概 要

GPS を搭載し、オゾン、気圧、気温の他に風速も測定可能とした光学オゾンゾンデを開発し、2002-2007 年の間に電気化学式 (ECC) オゾンゾンデとの比較検証観測を行った。オゾン濃度、風速ともに ECC オゾンゾンデ (GPS ラジオゾンデ付) とよい一致を示し、GPS 搭載型光学オゾンゾンデが十分な性能を持っていることが示された。

### 1. はじめに

東北大学では、上部成層圏のオゾンに直接観測する光学オゾンゾンデを開発し、JAXA 宇宙科学研究本部によって開発された薄型高高度気球と組み合わせて三陸におけるオゾン高度分布観測を 1994 年から 14 年連続して 8 月下旬～9 月上旬の期間に行っている [3, 4]。当初の観測の目的は、フロンやハロカーボン類から放出される塩素化合物が上部成層圏オゾンに与える影響の評価であったが、観測されたオゾンや気温の高度分布には毎回波状構造が見られ、これらは大気重力波によるものと思われる。光学オゾンゾンデは ECC オゾンゾンデの精度が落ちる高度 30km 以上で観測可能なため、両者の同時観測により広い高度領域で大気重力波の観測が可能となる。そこで、大気重力波のパラメータを観測する上で重要な風速も測定できるように、GPS を搭載した光学オゾンゾンデを 2002 年に新たに開発し、ECC オゾンゾンデとの同時観測を開始した。本論文ではその主な改良点および ECC オゾンゾンデとの比較結果について報告する。

### 2. 観測装置の改良点

光学オゾンゾンデは、オゾンハートレー帯吸収によって太陽光の 300 nm 付近の紫外線の強度が高度に対して変化する

---

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

<sup>2</sup> Graduate School of Science, University of Tokyo

<sup>3</sup> Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency.

<sup>4</sup> Graduate School of Science, Tohoku University

<sup>5</sup> National Institute of Polar Research



ることを利用してオゾン濃度の鉛直分布を得るという測定原理である [2]。ECC オゾンゾンデのように外気を取り込む必要がないため、大気の薄くなる 30 km 以上での観測精度がよいことが特徴である。受光面にはテフロン製の拡散板を用いており、これにより太陽追尾をしなくても光を観測器内部に取り込むことができる。また、内部に取り込まれた光を石英製のビームスプリッターによって分け、オゾンによる吸収を受ける太陽紫外線 (300 nm) の強度と同時にオゾンの吸収を受けない波長 (420 nm) の太陽光強度を測定することで、観測器の揺れによる入射光量の変化を補正する。このように可動部分のない設計のため、メカニカルトラブルがないことも大きな特徴である。以上の光学系は今回の改良では全く変更していない。

表 1 に旧型から新型への主な変更点を示す。風速を測定するために GPS を搭載したことと、それに伴い送信方式を FM にし、1 秒毎に全ての観測値を取得するようになったことが大きな変更点である。また、気温・気圧の観測にはこれまで明星電気のレーウィンゾンデを組み込んでいたが、送信方式の変更に伴い使用できなくなったため新たに製作した。

改良した光学オゾンゾンデの外観を図 1 に示す。本体のサイズは従来の 315 x 150 x 265 mm から 250 x 170 x 250 mm と若干小さくなったが、重量は逆に基板や送信機の変更により 1.1 kg から 2.2 kg へと増加した。

表 1. 旧型から新型への主な変更点

	旧型	新型
送信方式	AM	FM (AD:12bit)
データ取得間隔 (オゾン)	8 秒 (高度にして約 40 m)	1 秒 (同約 5 m)
風速・高度	未測定 (測距により 1 分毎 (同約 300 m))	GPS 測位により 1 秒 (同約 5 m) 毎
気温・気圧	明星電気製レーウィンゾンデを組み込み	サーミスタ温度計は明星と同部品、 気圧計は市販静電容量式圧力センサ (コバル電子 :PA-830-102A-05) (事前に恒温槽, チャンバーにて校正)

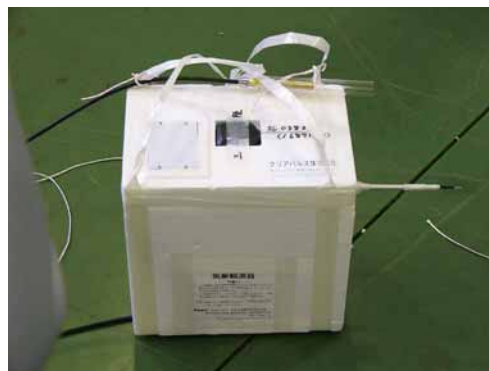


図 1. 光学オゾンゾンデ外観

### 3. ECC オゾンゾンデとの同時観測

まず新型のプロトタイプを用いて、明星電気製 ECC オゾンゾンデ (KC-96) との同時観測を 2002 年 6 月 1 日に JAXA 宇宙科学研究本部三陸大気球観測所 (39.16° N, 141.83° E) において行った。この観測では気圧計の仕様の間違っただけのものを使用してしまい、また光学オゾンゾンデ送信機からの電波が周波数ドリフトにより GPS 信号と干渉してしまい GPS 受信がうまくできなかった。そこで、気圧計は真空装置などに使われる市販静電容量式圧力センサ (コバル電子 : PA-830-102A-05, 直線性 :  $\pm 0.5\%$  F.S.) に、送信機は周波数の安定な水晶発振式のものに交換した。この改良型を用いて 2002 年 9 月 5, 7 日に旧型や Vaisala 製 ECC オゾンゾンデとの比較観測を行った。このときの結果から、温度センサの値が気温 -50℃ 以下で ECC オゾンゾンデの温度計より有意に低い値 (最大 15℃ 程度) を示すこと、AD 変換のダイナミックレンジが 12bit のため数 hPa 程度になると気圧測定値の分解能が不足すること、送信機の出力が強すぎて各デー

タにノイズが載ること、等の問題点が見つかった。気温については温度センサの信号変換回路が低温時（高抵抗時）に対応していなかったことが分かり、回路内の抵抗等を変更して $-90^{\circ}\text{C}$ まで対応したものに修正した。気圧については $32\text{hPa}$ 以下を12bitでAD変換する低気圧用チャンネルを新たに追加し、送信機については出力を弱めると共に送信アンテナを1mほど観測器から離して配置する改良を行った。以上ではほぼ問題点は解消され、2003年9月13日には旧型との比較観測、2004年以降は超薄型高高度気球を用いた高度約50kmまでのVaisala製ECCオゾンゾンデとの同時観測を3回行っている。ただし、光学オゾンゾンデをECCオゾンゾンデの上部に配置するとECCオゾンゾンデ側のGPSの受信不良が起り風速データに欠測が出るなど、両者のデータが完全にそろわない例もあったため、本論文では2007年9月13日の観測結果を例に新型の精度検証結果を示す。

表 2. 新型光学オゾンゾンデの観測概要

観測日時	同時観測	概要
2002年6月 1日 10:03JST 放球	明星電気 KC-96	最高到達高度 39.5km 気圧計及び送信機に問題、KC-96 は 28km で溶液切れ
2002年9月 5日 14:19JST 放球	旧型, Vaisala 製 ECC	最高到達高度 37.7km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低, 送信機ノイズ, 低温時気温誤差大, 低圧時気圧分解能不足
2002年9月 7日 14:07JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 38.7km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低, 送信機ノイズ, 低温時気温誤差大, 低圧時気圧分解能不足
2003年9月13日 10:33JST 放球	旧型	最高到達高度 38.3km
2004年9月 4日 9:02JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 49.8km
2004年9月 5日 13:15JST 放球		最高到達高度 42.5km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低
2005年8月28日 7:40JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 51.5km ECC GPS 受信不良（風速観測できず）
2006年9月 4日 6:28JST 放球	(B-SMILES)	観測高度 32.2km まで（バッテリー切れ）
2007年9月13日 6:51JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 49.6km

#### 4. 比較結果

図1に2007年9月13日に観測されたオゾン及び風速の高度分布を示す。左のオゾンの結果は青線が光学オゾンゾンデ、赤線が同時に観測したECCオゾンゾンデ、黒丸は気候値（CIRA96,  $40^{\circ}\text{N}$ , 9月）[1]である。なお、高度分解能は光学オゾンゾンデは1km, ECCオゾンゾンデは10m程度と異なるが、ここではそろえていない。また、両者の高度データは光学オゾンゾンデはGPS測定値, ECCオゾンゾンデはジオポテンシャルハイトであり、およそ40kmより高高度では数百メートルもずれてしまうため、ここでは縦軸に観測時刻を用いて比較し、参考までにおよその高度を合わせて表示している。光学オゾンゾンデは紫外線量からオゾンを導出するため高度20km以下の紫外線の弱い領域では精度はよくないが、20-30kmでは両者が10%以内で一致しているのがわかる。30km以上では過去の観測ではECCオゾンゾンデの値は光学オゾンゾンデより低い値を示していたが、今回の結果ではこの高度領域でも両者は比較的よく一致しており、気候値との比較でもどちらがよいとも言い切れない。ECCオゾンゾンデは30km以上ではポンプ効率が落ちるため精度が落ちると言われているが、近年改良されているのでポンプ効率の補正等で精度が向上したのかもしれない。ただし、重力波によると考えられる2-3kmスケールの波状構造に関しては、光学オゾンゾンデでは最高高度の49km付近まで見えているのに対し、ECCオゾンゾンデでは30km程度より高高度では細かい構造が見られなくなっている。これは、大気圧が下がりポンプの効率も落ちたことにより反応管内のレスポンスが下がってしまい、高度分解能が下がってしまうことが原因だと考えられる。なお、ECCオゾンゾンデの38km付近に見られる低い値は、

受信不良によるものである。これより、地上から高度 30km までの ECC オゾンゾンデの値と、高度 20km 以上の光学オゾンゾンデの値を組み合わせることで、地上から高度 50km 付近までのオゾン高度分布を精度よく観測できることが分かる。

右の風速の結果は、赤および青が光学オゾンゾンデの 1 秒毎のデータで、黒および水色が気球の揺れの影響を補正するため 20 秒の移動平均をかけたものである。また、オレンジとピンクが ECC オゾンゾンデに搭載された GPS ラジオゾンデによる結果である。光学オゾンゾンデの 1 秒毎のデータは多少ばらつきが大きいですが、20 秒の移動平均をかけたものは GPS ラジオゾンデの風速と非常によく一致する。光学オゾンゾンデでは 1 秒毎の緯度・経度の変化を単純に移動距離に変換して風速としているが、これで十分に精度よく風速が求まっていると言える。なお、グラフには高度方向に数百メートルから 2km 程度の波状構造が多く見られ、重力波等による変動と考えられる。

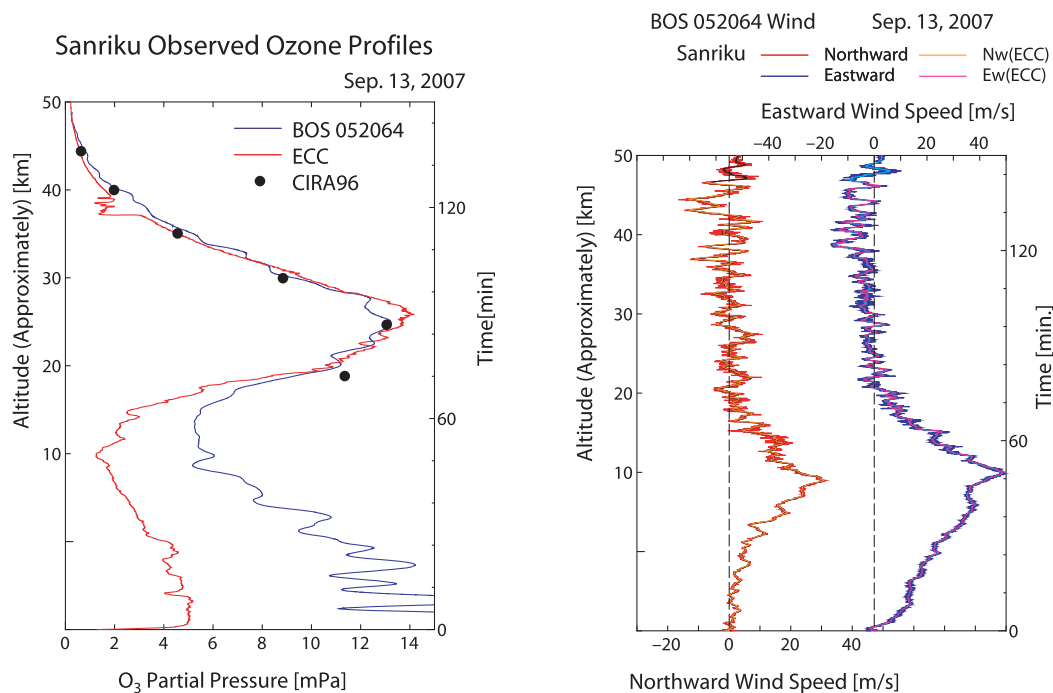


図 2. 2007 年 9 月 13 日の観測結果 (左: オゾン, 右: 風速)

なお、表 2 に示したように、2002 年 9 月 5 日、7 日、2004 年 9 月 5 日の観測では光学オゾンゾンデの観測値が低くなってしまったが、どうやら午後の放球では光学オゾンゾンデのオゾン観測結果が低くなるようである。午後の観測で午前と異なる点は時間とともに太陽天頂角が大きくなっていくことぐらいで、おそらく解析アルゴリズム上のバグと考えられるが現時点では修正できていない。ただし、現在では超薄型高高度気球を用いていることから朝風の時間の放球を基本としており、これら午前中の観測では問題は起きていない。

表 3 に光学オゾンゾンデ気温センサの恒温層における較正結果、図 3 に ECC オゾンゾンデ気温測定値との比較結果を示す。気温センサの較正はクリアパルス株式会社にて行ったものだが、 $-80^{\circ}\text{C}$ 、 $-70^{\circ}\text{C}$  で  $1, 2^{\circ}\text{C}$  高めになるものの、その他の温度では  $1^{\circ}\text{C}$  以下の誤差に収まっている。しかし、図 3 の観測時の ECC オゾンゾンデとの比較では、放球後しばらくは非常によく一致を示すものの、圏界面に近づき  $-50^{\circ}\text{C}$  を切ったあたりから光学オゾンゾンデの気温測定値が  $1, 2^{\circ}\text{C}$  高めの値を示し始め、その後成層圏に入って気温が  $-50^{\circ}\text{C}$  以上になっても最大  $7^{\circ}\text{C}$  程度の差が出ている。これ以前の観測時にも同様の傾向が見られることから、一度  $-50^{\circ}\text{C}$  以下になつてしまうと戻りにくい、あるいは日射の影響がうまく取れていないといったことが考えられる。原因としては気温センサの支持構造が考えられる。市販のラジオゾンデではセンサ周りの熱容量を小さくするために薄い支持板にセンサと配線を貼り付けているが、製作が難しいので我々は同軸ケーブルの配線を細いアルミ管で覆っている。そのため熱容量も大きく日射の影響も取り切れていない可能性があり、今後の要改良点である。ただし、数 km 以下の細かい変動に関してはよく対応しており、重力波等による気温偏差を調べるには大きな問題はないと考えられる。

表 3. 気温センサ較正結果

Temp.(Cal) [°C]	Temp.(BOS) [°C]
-80.0	-77.9
-70.0	-69.0
-60.0	-59.7
-50.0	-50.0
-40.0	-40.4
-30.0	-30.5
-20.0	-20.1
-10.0	-10.5
0.0	0.0
10.0	10.0
20.0	20.1
30.0	29.3

Sanriku Observed Temperature Profiles

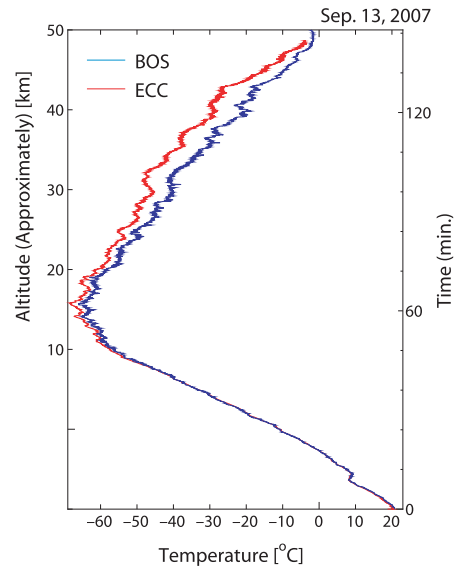


図 3. 2007 年 9 月 13 日の気温観測値の比較

図 4 に光学オゾンゾンデ気圧センサの較正結果を示す。光学オゾンゾンデの気圧センサの値はカウント値のまま表示している。気圧センサの較正は JAXA 宇宙科学研究本部の真空チャンバーにて行ったが、図 4 から分かるように非常に直線性はよい。この結果に直線フィッティングを行い、気圧較正直線を決定した。図 5 は観測時の ECC オゾンゾンデ気圧測定値との比較結果である。両者は非常によく合っている。ただし、光学オゾンゾンデ気圧センサの観測値は、このときの観測では観測後に ECC オゾンゾンデ気圧測定値に合わせてオフセットを調整している。光学オゾンゾンデ気圧センサは図 4 に示したように直線性は非常によいが、オフセットが日によって数 hPa 程度変動することがある。そのため、放球前に地上で較正用の気圧計で絶対値較正を行う。ECC オゾンゾンデ気圧計も同様に放球前に地上で絶対値較正を行っており、今回はデータ解析時に両者のオフセットのみ比較して、最終的に放球直後の値が ECC オゾンゾンデ気圧計と一致するよう微調整している。このように気圧センサに関しては放球前に地上で絶対値較正を行う必要はあるものの、それさえ行えば非常に精度よく気圧が測定できていることが図 5 より分かる。

なお、今回の観測では水晶摩擦気圧計の検証観測も行っているが、数 km 以下の細かい変動に関しては光学オゾンゾンデ気圧センサと水晶摩擦気圧計との結果は非常によく一致しており、これは光学オゾンゾンデ気圧センサが重力波等による気圧偏差を調べるのに十分な性能を持っていることを示している [5, 図 13]。

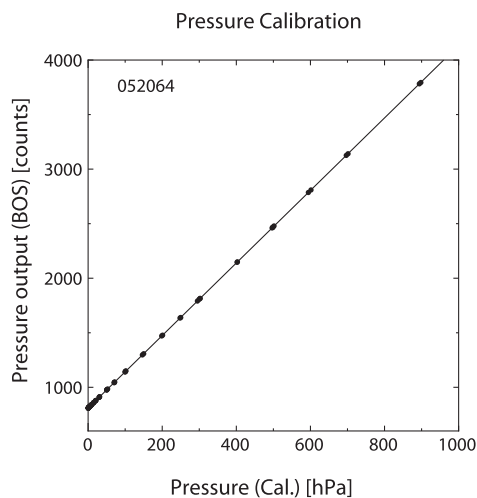


図 4. 気圧センサ較正結果

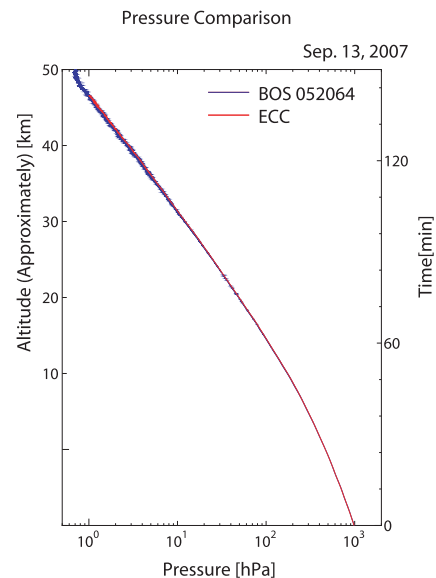


図 5. 2007 年 9 月 13 日の気圧観測値の比較



## 5. まとめ

大気重力波のパラメータを観測する上で重要な風速も測定できるように、GPS を搭載してオゾン、気圧、気温の他に風速も測定可能とした光学オゾンゾンデを 2002 年に新たに開発した。この改良では光学系は従来のものと全く同じだが、GPS を搭載したことに伴い送信方式を FM にし、1 秒毎に全ての観測値を取得できるようになった。2002–2007 年の間に ECC オゾンゾンデとの比較検証観測を行い、オゾン濃度、風速ともに ECC オゾンゾンデ（GPS ラジオゾンデ付）とよい一致を示した。気温に関しては絶対値に若干問題があるものの数 km 以下の細かい変動はよく捉えており、気圧は放球前に絶対値校正を行えば数 km 以下の細かい変動成分も含めて非常に精度よく測定可能である。これにより、GPS 搭載型光学オゾンゾンデが十分な性能を持っていることが示された。

## References

- [1] Keating, G. M., L. S. Chiou, and N. C. Shu, Improved ozone reference models for the COSPER International Reference Atmosphere, *Adv. Space Res.*, 18, 11-58, 1996.
- [2] Okano, S., M. Okabayashi, and H. Gernandt, Observations of ozone profiles in the upper stratosphere using a UV sensor on board a light-weight high-altitude balloon, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 51, 225-231, 1996.
- [3] 岡林昌宏, 田口真, 岡野章一, 福西浩, 高高度気球搭載光学センサーによる成層圏オゾンの観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第 32 号, 105-111, 1995.
- [4] 岡林昌宏, 村田功, 福西浩, 高高度気球搭載光学オゾンゾンデを用いた成層圏オゾン高度分布の観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第 40 号, 45-54, 2000.
- [5] 栗原 純一, 村田 功, 佐藤 薫, 富川 喜弘, 阿部 琢美, 気球搭載用水晶摩擦気圧計の開発と BU30-5 号機による性能実証試験, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-08-001, 43-56, 2009.

# 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

森本 真司<sup>1</sup>, 山内 恭<sup>1</sup>, 本田 秀之<sup>2</sup>, 青木 周司<sup>3</sup>, 中澤 高清<sup>3</sup>  
菅原 敏<sup>4</sup>, 石戸谷 重之<sup>3</sup>, 飯嶋 一征<sup>2</sup>, 吉田 哲也<sup>2</sup>

## Development of a compact cryogenic sampler for stratospheric air sampling using J-T mini cooler

By

Shinji MORIMOTO<sup>1</sup>, Takashi YAMANOUCHI<sup>1</sup>, Hideyuki HONDA<sup>2</sup>, Shuji AOKI<sup>3</sup>,  
Takakiyo NAKAZAWA<sup>3</sup>, Satoshi SUGAWARA<sup>4</sup>, Shigeyuki ISHIDOYA<sup>3</sup>,  
Issei IJIMA<sup>2</sup> and Tetsuya YOSHIDA<sup>2</sup>

**Abstract:** A compact cryogenic whole air sampler was developed using Joule-Thomson (J-T) mini cooler. The J-T cooler could produce cooling through the J-T expansion of high-pressure neon gas. The compact sampler used the cooling, thus produced, to collect stratospheric air samples cryogenically. Our laboratory experiments showed the compact sampler could collect air samples of 2.8 and 7.2 L<sub>STP</sub> at the sample pressures of 25 and 200 hPa, respectively, in 4 minutes, when the neon gas was supplied from a 2-L cylinder of 19.0 MPa in pressure. Concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> and carbon isotope ratio of CH<sub>4</sub> of the collected samples were confirmed to be unchanged. A balloon-borne stratospheric air sampling experiment with the compact sampler was conducted at Sanriku Balloon Center on June 4, 2007, resulting that the sampler worked as expected in the stratosphere.

**Keywords:** stratospheric air, greenhouse gas, cryogenic sampler

### 概 要

ジュール・トムソン (J-T) ミニクーラーに高圧ネオンガスを供給したときに発生する寒冷を利用して低圧の成層圏大気を固化採取する, 新たな小型クライオサンプラー (J-T サンプラー) を開発した. J-T サンプラーを用いて実験室内で低圧大気採取実験を行ったところ, ネオンガスを 19.0MPa 充填の 2L 高压容器から供給したとき 2.8L<sub>STP</sub> (試料圧力 25hPa の場合) ~7.2L<sub>STP</sub> (同 200hPa の場合) の大気試料を採取可能であった. また, J-T サンプラーで採取した大気試料の CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 濃度, そして CH<sub>4</sub> の炭素同位体比は変化しないことを確認した. 2007 年 6 月に三陸大気球観測所で J-T サンプラーの飛揚試験を行い, 本サンプラーが成層圏でも正常に機能することを確認した.

キーワード: 成層圏大気 温室効果気体 クライオサンプラー

---

<sup>1</sup> 情報・システム研究機構 国立極地研究所

<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

<sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>4</sup> 宮城教育大学

## 1. はじめに

南極域成層圏における温室効果気体・オゾン破壊関連気体の分布と変動を明らかにするために、1998年と2003-2004年の合計3度にわたって、南極・昭和基地において大気球を用いた成層圏大気クライオサンプリング実験が行われた[1][2]。すでに報告されているとおり、全ての実験で高度10-30kmの成層圏大気試料が採取され、各種気体濃度および同位体比の詳細な鉛直分布と経年変化傾向が明らかになっている。これら過去3回の実験では、国内で使用されている大型クライオサンプラーを昭和基地に持ち込み、満膨張時容積30,000m<sup>3</sup>の大型気球を用いて成層圏まで飛揚させた。大型クライオサンプラーは、試料容器を液体ヘリウムで4Kに冷却し希薄な成層圏大気を固化採取する方式であり、大量の液体ヘリウムを必要とする。これまでの昭和基地実験では、日本もしくはオーストラリアでの液体ヘリウムの調達と南極観測船「しらせ」による輸送、及び昭和基地での製造によって液体ヘリウムを確保したが、その輸送・製造に多大な労力が必要であった。さらに、サンプラーの重量が350kgであることから、大型気球による放球に気球工学専門家の助力が必要であり、かつ成層圏大気採取後のサンプラー回収も「しらせ」搭載ヘリコプターによるスリング輸送が必要である等、昭和基地で多数回の成層圏大気採取実験を継続することは困難であった。今後、南極域成層圏での温室効果気体観測を継続し、経年変化傾向を追跡するために、昭和基地現地での取り扱いが容易で小型の気球で飛揚させることが可能な、小型の大気サンプラーの開発が求められていた。

我々は、Joule-Thomson ミニクーラー（J-Tクーラー）を用いて、高圧ネオンガスを大気中に放出する際に発生する寒冷を利用してネオンを液化し、生成した液体ネオンを冷媒として成層圏の低圧大気を固化採取する小型クライオサンプラーを開発した。本稿では、開発した小型クライオサンプラーの概要と、2007年6月に三陸大気球観測所で実施した小型サンプラーによる成層圏大気採取予備実験について報告する。

## 2. J-Tクーラーを用いた小型クライオサンプラー

### 2.1 J-Tクーラーによる寒冷発生

J-Tクーラーは、熱交換器が付加された高圧ガス導入配管とオリフィスで構成され、オリフィス部でJ-T膨張によって冷却されたガスが高圧ガス配管内の膨張前のガスを交流的に冷却するために、熱効率が非常に高い素子である。J-Tクーラーでの質量バランス、エンタルピーバランスを考えると、発生寒冷量 $q$  (W)、流入ガス質量流量 $m_0$  (g/sec)、流出ガス質量流量 $m_2$  (g/sec)、高温高圧側ガスエンタルピー $H_0$  (J/g)、高温低圧側ガスエンタルピー $H_2$  (J/g)とした場合、次の式で表される。

$$m_0 = m_2, \quad (1)$$

$$m_0 H_0 + q = m_2 H_2, \quad (2)$$

(1), (2) 式より、発生寒冷量は、

$$q = m_0 (H_2 - H_0). \quad (3)$$

と表すことができる。

高圧ガスとして液体窒素温度(78K)に予冷したネオンガスを使用することにより、J-Tクーラーで発生した寒冷によって、導入されたネオンガスを液化点温度(28K)にまで冷却し液体ネオンを製造することができる。液体ネオンは水素とヘリウムを除いた大気成分の中で最も沸点が低いので、大気的全成分を捕集するための冷媒として非常に優れている。また、その蒸発熱は405cal/molと液体ヘリウムと比較して非常に大きいため、少量の液体ネオンを用いて大量の大気を採取することが可能である。図1にJ-Tクーラーの外観図を示す。オリフィス口径は0.12mmであり、流量制御用ニードルを取り外してフィクストオリフィスタイプとしてある。これは、必要寒冷が0.2W程度の少量であれば流量制御を行う必要があるが、大気採取ではできるだけ多くの寒冷を必要とし流量制御は不要となるためである。

まず J-T クーラーの特性を把握するために、J-T クーラーにネオンガスを導入したときの流量特性と冷凍能力を実験的に決定した。図 2 に試験装置の概要を示す。真空槽の内筒部分に挿入された J-T クーラーへ供給される高圧ネオンガスは、液体窒素で 78 K まで予冷され、先端の空間でほぼ大気圧まで膨張し液体ネオンが生成される。低圧となった低温のネオンガスは高圧のネオンガスと熱交換をしながら 78 K 近くまで昇温されて大気中に放出される。ネオンガスの供給圧力はボンベから供給できる最大圧力とし、圧力測定は小型圧力変換器を用いて行った。温度測定には Au/Fe-Cr 熱電対を用い、J-T クーラーの導管部（高圧高温端（J-T 熱交入口））、J-T クーラーの熱交出口（低圧高温端）、液体ネオン生成部真空側（低圧低温端）の温度を測定した。液体ネオン生成部の真空側にはマンガン線ヒーターを巻き付けて DC 電源により入力を行い、液体ネオン生成部の真空側の温度が上昇したときの入力値を冷凍能力とした。高圧ネオンガスの流路にモレキュラーシーブ（MS）吸着剤を挿入した場合としない場合の 2 種類実験を行って、ネオンガスに含まれる水分が J-T クーラーの冷凍能力に影響を与えるかどうかを確かめた。図 3 に J-T クーラーの流量特性を、図 4 に冷凍能力の測定結果を示す。もし水分の凝固があれば MS 吸着材がないときにネオンガス供給圧力の低下と共に流量の減少が見られるはずであるが、図 3 と図 4 に示されている結果にはこのような現象は見られず、水分による冷凍能力低下はないことがわかった。むしろ MS 吸着材を入れたときに高圧側で流量の減少とそれに伴う冷凍能力の低下が見られた。また図 4 には図 3 の流量測定結果を用いて J-T 熱交入口・出口温度を 80 K としたときの冷凍能力の計算値も示してあるが、測定結果と比較すると圧力が高いとき両者はほぼ一致しており、圧力が低くなるにしたがって測定値が計算値より小さな値となっている。これは、ネオンガス供給圧力が高いときには高圧高温端温度（J-T 熱交入口温度）は 80 K 程度であるが、ネオンガス供給圧力が低くなり流量が減少するにしたがって徐々に上昇（5.0MPa で 110K 程度）したこと、および冷凍能力が小さいと侵入熱の影響が大きくなることによると思われる。ここで圧力 5.0MPa、JT 熱交入口・出口温度が 110K として冷凍能力を計算すると、冷凍能力は 80K のときと比べ 0.8W 程度減少し、さらに輻射と内筒を通しての熱伝導による侵入熱が 0.5W 程度と考えられるので、これらを考慮すると計算値と測定値はさらに近づく。以上の結果から J-T クーラーの冷凍能力は MS 吸着材なしの場合で 13.5MPa のとき 22.3W であり、5.0MPa 程度まで有効に利用できる寒冷を発生していることが明らかになった。

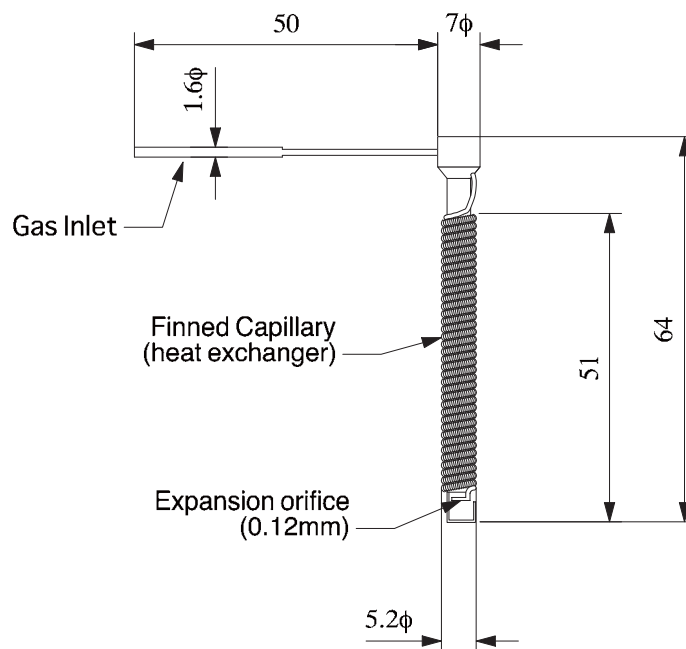


図 1 J-T ミニクーラーの外観 図中の長さは mm 単位



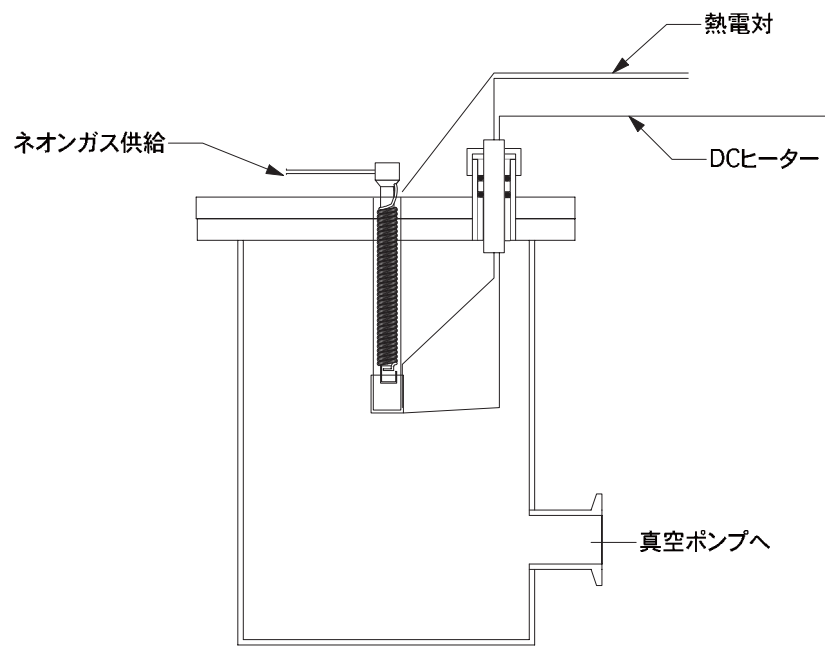


図2 発生寒冷量測定用試験装置の概要

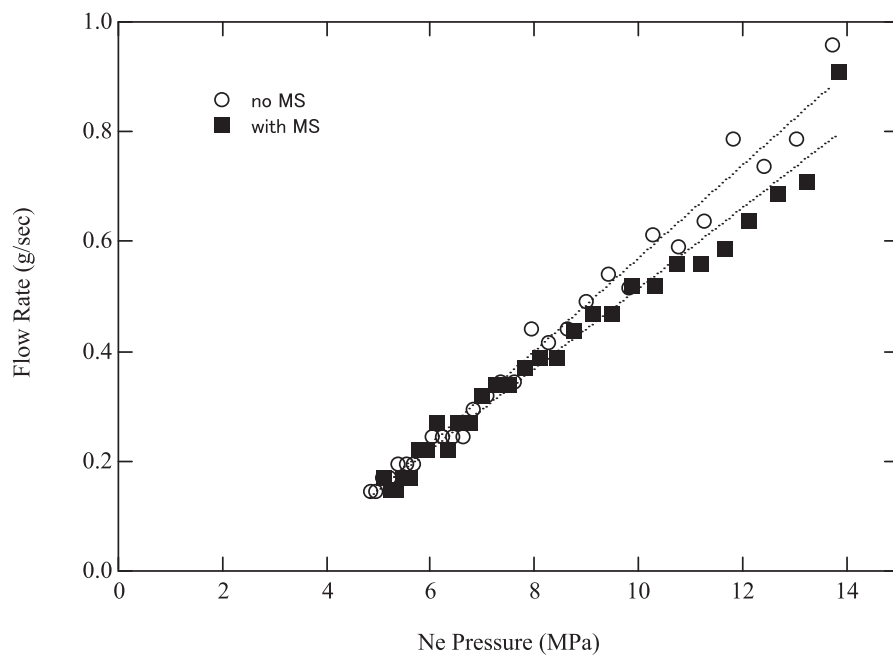


図3 J-T ミニクーラーの流量特性

白丸と黒四角はそれぞれ、ネオンガス流路にモレキュラーシーブ吸着剤を挿入しなかった場合と挿入した場合の測定値を示す。

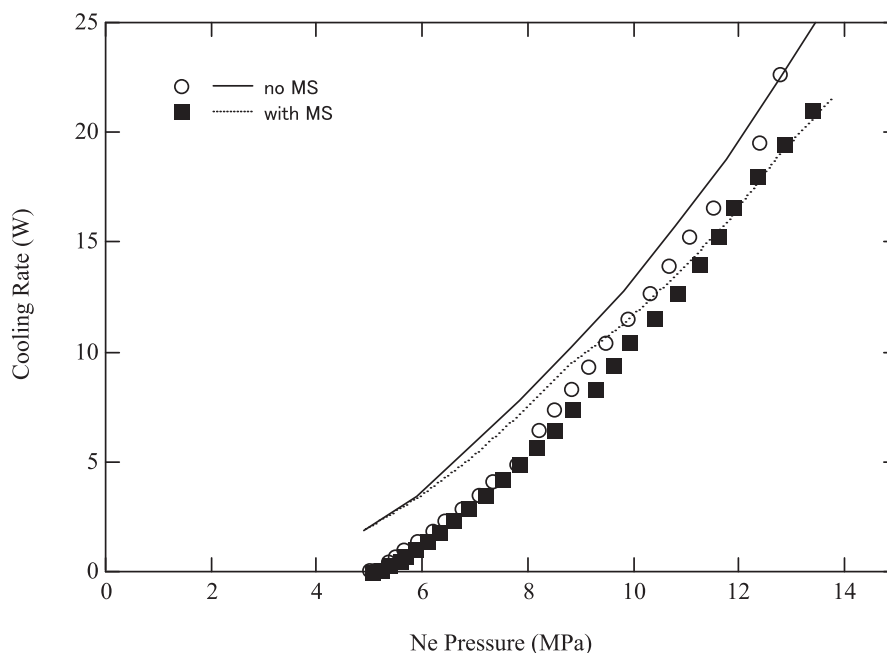


図4 J-Tクーラーによる冷凍能力

白丸、黒四角はそれぞれネオンガス流路にモレキュラーシーブ吸着剤を挿入しなかった場合 (no MS) と挿入した場合 (with MS) の測定値、実線、破線は計算値を示す。

## 2.2 大気試料採取容器と J-T サンプラー

J-T ミニクーラーで製造された液体ネオンを用いて低圧大気（成層圏大気）を効率良く採取するため、J-T ミニクーラーを組み込んだ「試料採取容器」を製作してその性能を確認した。図5に試料採取容器の断面図を示す。J-T ミニクーラーを挿入する鞘管部分は図2と同一であるが、寒冷発生部分に低温での熱伝導率のよい高純度銅（純度99.999%）製の液体ネオン溜め部（クライオヘッド）を設け、その外部に採取気体を固化・液化採取させる。採取気体とクライオヘッドとの熱伝導効率を上げるために、クライオヘッドにフィン状の突起を持たせて低温部の表面積を増加させた。また、クライオヘッドの周囲をSUS304製の真空断熱容器で覆うことで、クライオヘッドで液化・固化した大気試料が試料採取容器内に落下して再蒸発することを防いでいる。試料採取容器本体はSUS304を用いて製作し、内容積は0.8 L、耐圧性能は1.5MPaである。さらに、本試料採取容器とネオンガス予冷配管（外径1/8インチ焼きなまし銅管：2m）、大気試料取り入れ配管（外径1/2インチSUS304管：0.4m）、そして上述の真空断熱容器の真空排気用配管（外径1/4インチSUS304管）を、市販のSUS製液体窒素デューワー（太陽日酸サーモカットD6000：内容積6 L、200mm φ x 300mm）に真空フランジを溶接した容器に組み込んで一体化した（以下、D6000に組み込んだシステム全体をJ-T サンプラーとする）。このD6000に液体窒素を充填することにより、ネオンガス及び大気試料を液体窒素温度まで予冷するとともに、試料採取容器及びJ-T ミニクーラーへの放射熱侵入を低減する。ネオンガス予冷配管と大気試料取り入れ配管の長さは、それぞれ20MPa・273Kのネオンガス及び200hPa・273Kの空気を液体窒素温度（78K）まで冷却するために必要な配管長を簡単なモデル計算から求め、決定した。D6000のフランジ上部には、液体窒素の供給及び気化した窒素ガスを排出するためのポートを2ヶ所設けている。

J-T サンプラーの性能を確認するために、実験室内で低圧大気の採取実験を行った。採取実験で用いた低圧大気の圧力は、容積50 Lの真空チャンバーをロータリーポンプで真空排気すること、及び真空チャンバーに取り付けた圧力スイッチによってチャンバー内が設定圧力以下になったときに47 LボンベからCO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>濃度既知の標準ガス（空気）を供給することによって制御した。低圧大気採取実験中、真空チャンバー内圧力、低圧大気の採取速度、ネオンガス供給圧力、試料採取容器内圧力、そしてJ-T ミニクーラー先端温度の変化を、それぞれダイヤフラム式圧力計、マスフローセンサー、高圧用小型圧力変換器、小型圧力変換器、Au/Fe-Cr熱電対で監視した。実験手順の概略は以下の通

りである：1) あらかじめ J-T サンプラーの試料採取容器を  $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$  以下まで真空排気した後 D6000 に液体窒素を充填し、試料採取容器内部を十分に冷却する。2) J-T サンプラーへの高圧ネオンガス供給を開始し、その後 30 秒～150 秒間ネオンガス冷却・液体ネオン製造とクライオフィン冷却を行う。3) 真空チャンバーと J-T サンプラー間のバルブ（大気採取バルブ）を開け、240～600 秒間低圧大気の採取を行う。4) 試料採取容器を常温に戻し、容器温度と内圧から低圧大気試料の採取量を計算する。採取実験は、低圧大気試料圧力を 25, 60, 120, 200hPa に設定して行った。これらは、高度およそ 25, 20, 15, 12km の大気圧に相当する。ネオンガスは 47 L ボンベまたは 2 L ボンベから圧力制御を行わずに直接供給し、その初期圧力は 19.0MPa から 8.0MPa であった。

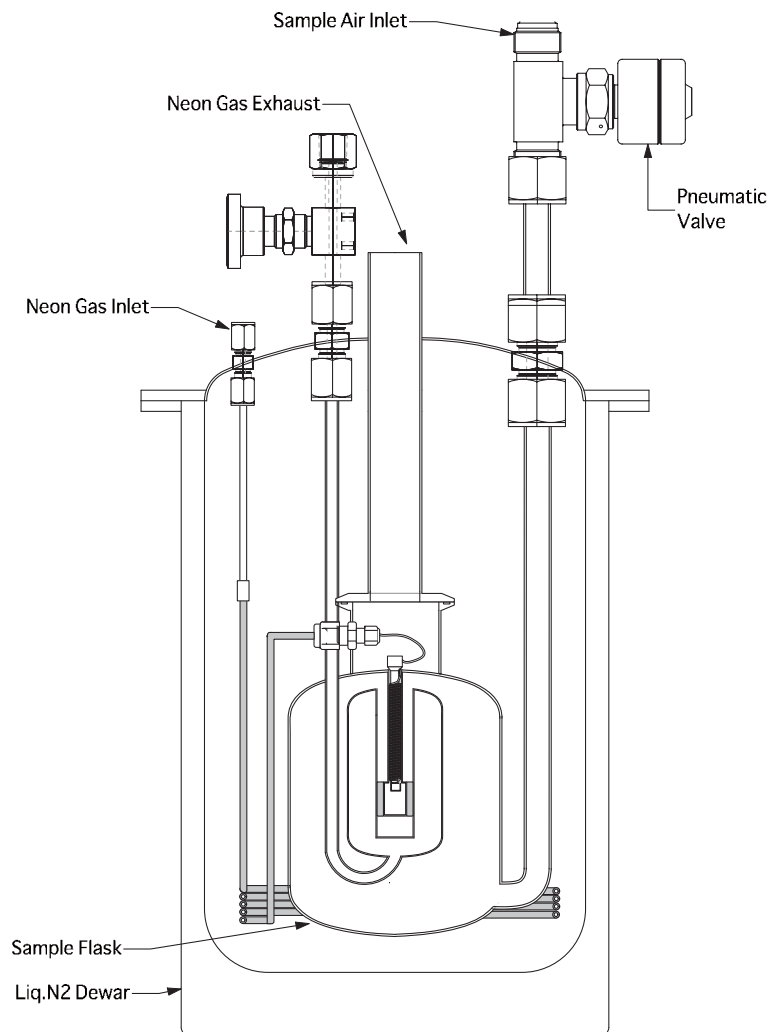


図5 「試料採取容器」の断面図

図6に、J-T ミニクーラーで発生した寒冷量と J-T サンプラーによる低圧大気採取量の関係を示す。J-T ミニクーラーによる発生寒冷量は (3) 式の時間積分によって計算した。その際、(3) 式の  $m_0$  はネオンガス供給圧力の時間変化から求め、 $(H_2 - H_0)$  は文献 [4] の数表に 2 次式を当てはめて与えた。但し、外部から侵入する熱量を見逃していることから、J-T ミニクーラーの効率を 100% と仮定していることから、計算された発生寒冷量は一種の目安として扱う必要がある。大気採取量は、試料採取容器の体積と採取した空気の圧力・温度から求めた量から容器体積と採取気体圧力の積を引いた量、つまり J-T ミニクーラーによって発生する寒冷によって採取された試料空気量を示す。図6から、試料採取量は採取気体圧力が高いほど多いこと、そして採取気体圧力が 60-200hPa の範囲では発生寒冷量が多いほど採取量

も多いが 25hPa では発生寒冷量が多くなっても採取量はそれほど増えないことがわかる。ネオンガスを 19.0MPa 充填の 2L 高压容器から供給し、30 秒間の液体ネオン製造と 240 秒間の大気採取を行う場合、大気採取に使用できる寒冷はおおよそ 4000~5000 J と計算されるので、2.8L<sub>STP</sub>（試料圧力 25hPa の場合）~7.2L<sub>STP</sub>（同 200hPa の場合）の大気試料を採取可能であると考えられる。

J-T サンプラーによって採取された大気試料の組成が変化していないことを確認するため、低圧大気採取実験後に試料採取容器内で大気試料が十分混合するまで 60 時間以上放置した後、大気試料の CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 濃度及び CH<sub>4</sub> の炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{CH}_4$ ）を、それぞれ非分散型赤外分析計（NDIR）、ガスクロマトグラフ（GC/FID）、ガスクロマトグラフ質量分析計（GCCMS）を用いて分析した [5][6][7]。その結果、それぞれの濃度・同位体比分析値は真空チャンバーに供給した CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub> 標準ガス（被採取空気）と測定精度内で一致することを確認した。

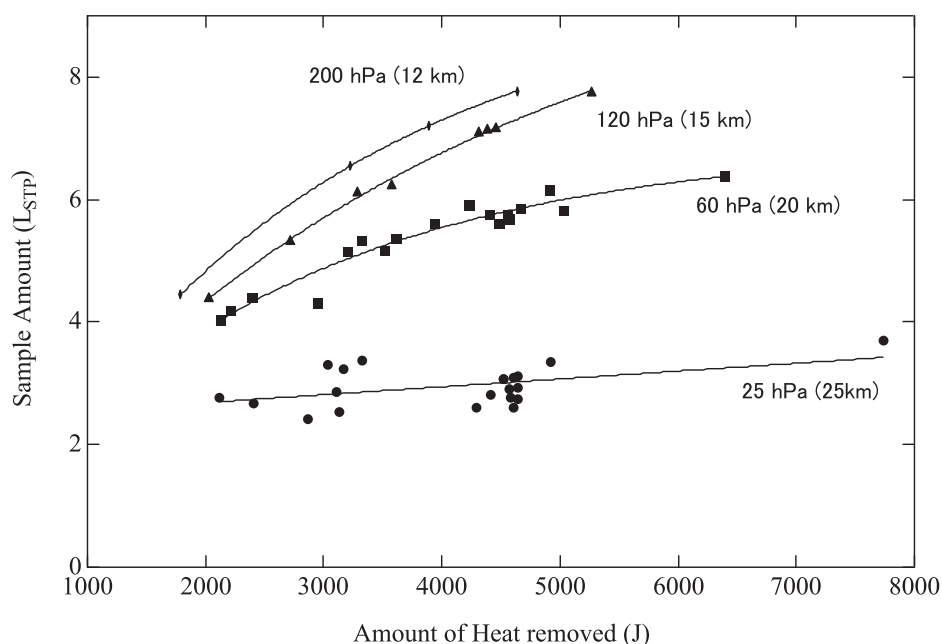


図6 実験室内での低圧大気採取実験で得られた、J-T ミニクーラーによる発生寒冷量と大気採取量の関係。実験は、大気サンプル圧力を 25, 60, 120, 200hPa に設定して実施した。図中にそれぞれの気圧に相当する高度も示した。

### 2.3 小型クライオサンプラー

J-T サンプラーを用いて成層圏大気を採取するために、J-T サンプラー、コントローラ、ネオンガス容器、テレメトリ送信機、GPS 受信機、電池等すべての構成部品を一体化した小型クライオサンプラーを製作した。小型クライオサンプラーの構成を図7に示す。本サンプラーは、南極・昭和基地での実験オペレーションを簡易にするために、搭載 GPS 受信機の高度データを参照して自律的に動作する構成とした。すなわち、サンプラーがあらかじめ設定した高度に達したときに、ネオンガスボンベのバルブを開いて液体ネオンの製造を開始し、その 30 秒後に大気採取バルブを開く。さらにその 240 秒後にネオンガスバルブ及び大気採取バルブを閉じて気球を切り離し、パラシュートで地上に降下する、という手順を自動実行する。

搭載制御回路は、過去に昭和基地上空成層圏でのグラブサンプリング実験に使用した装置 [3] を再利用した。この搭載回路は、GPS 受信機（ソニー IPS-5000U）の現在位置データを取り込み、プログラムにしたがって内蔵 photoMOS リレーを制御するとともに、逐次 GPS データと内蔵リレーの状況データ等を 0.5W 出力の FM 送信機（三協特殊無線 TM-1680）に出力するものである。地上での誤操作によってネオンガスバルブまたは大気採取バルブが開くことを防ぐために、インターロック機構として気圧スイッチ（後述の三陸予備実験用は設定圧 120hPa、昭和基地実験用は 800hPa）を使用しており、気圧スイッチが OFF の場合、つまり気圧が設定値よりも高い場合には搭載回路内蔵リレー

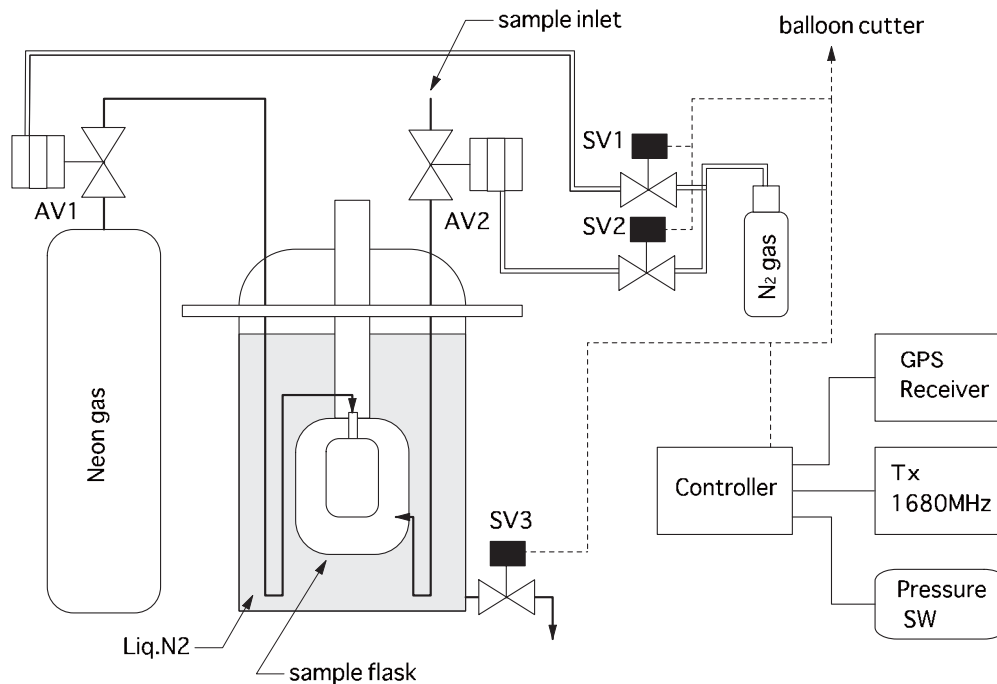


図7 J-T サンプラーを用いた小型クライオサンプラーの構成  
SV1, SV2, SV3 は電磁弁, AV1, AV2 は空気圧作動弁を示す。

がONにならないようにしている。ネオンガスバルブ及び大気採取バルブとして空気圧作動弁（ネリキ DS-3H, 及びフジキン FPr-91-9.52）を採用し、搭載回路内蔵リレーと電磁弁（CKD USG-3-6-1）によって空圧弁作動用窒素ガスの供給と排出を制御した。窒素ガスは容積 0.098 L の小型ガスカートリッジ（NTG 18.6MPa）から供給し、小型調圧器（NTG NR-18）で 2 次圧を 0.7MPa に下げて電磁弁に接続した。小型クライオサンプラーに搭載するネオンガスは、容積 2L のカーボン FRP 製高压容器（旭製作所 212C）に 19.0MPa の圧力で充填されたものを使用し、圧力調整を行わずに直接 J-T サンプラーに供給した。

J-T サンプラーに充填された液体窒素は、窒素の三重点圧力が 126hPa であるため、高度約 15km 以上で固化する恐れがある。J-T サンプラーの D6000 内圧を地上気圧程度に保ち液体窒素の固化を防ぐために、窒素ガス排出ポートにクラック圧 1030hPa のチェック弁（サークルシールズ K220-2PP-15）を付加した。また、液体窒素温度に下がっているネオンガス排出ポート内部に大気中の水蒸気が凝結しないよう、ポート出口にクラック圧 7hPa のチェック弁（サークルシールズ 264-4PP-0.1）を接続した。さらに、J-T サンプラーから排出される窒素ガス、ネオンガスが採取大気試料に混入しないよう、これらの排出ポートからの配管をサンプラー下方まで延長した。前述の通り、大気採取は気球上昇中に行うため、サンプラーの下方に排出されたガスがサンプラー上部の大気採取バルブに達することはない。

小型クライオサンプラーを構成するすべての部品に、搭載する液体窒素 4.5 L、電池類を加えた総重量は、17.0kg となった。

### 3. 三陸大気球観測所での予備実験

新たに開発した小型クライオサンプラーの成層圏での動作を確認し、昭和基地実験に向けた問題点を抽出するために、2007 年 6 月 4 日に三陸大気球観測所において昭和基地成層圏大気採取実験（小型回収気球実験）予備実験を実施した。予備実験では、成層圏大気クライオサンプリング実験（従来型の大型クライオサンプラーを使用）との合同飛揚となったため、小型サンプラーをクライオ実験ゴンドラの空きスペースに搭載し、成層圏に飛揚した。

予備実験用に準備した小型クライオサンプラーの構成を図 8 に示す。三陸大気球観測所での実験は海上回収となるため、装置全体を容積 120 L（SUS304 製 470mm φ x 700mm）、重量 19.2kg の円筒形水密容器に収納し、大気採取口



を水密容器上方に、ネオンガス・窒素ガス排出口を下方に延長した。また、小型サンプラーの動作を解析するために、アナログデータロガー（白山工業 DataMark）も搭載して、電磁弁、空気圧作動弁、ネオンガスポンプ等の温度、空気圧作動用窒素ガス圧力、ネオンガス圧力、電池電圧を記録した。同時飛揚の大型クライオサンプラーに本サンプラーからの排気ガスが影響しないよう、搭載 GPS 受信機データによる自動大気採取は行わず、大型クライオサンプラー用コマンド受信機の接点信号を借用して地上からのコマンド送信によって大気採取手順を開始する方式に改めた。さらに、大気採集後に残る液体窒素をサイホン式に排出する機構も付加した。

2007 年 6 月 4 日 0600JST に B100 型気球によって放球された大型・小型クライオサンプラーゴンドラは、高度 14-15km での約 2 時間の水平飛揚のあと、放球後約 3 時間で高度 20km に達した。0907JST（高度 20km）に地上から大気採取開始コマンドを送信し、1) ネオンガス用電磁弁 ON, 2) 大気採取用電磁弁 ON, の大気採取手順が正常に実行されたことを、地上で受信した小型サンプラーの HK データから確認した。小型サンプラーに搭載した GPS 受信機の動作にも問題はなかった。その後、高度 34.7km までの上昇中と高度 28.3km までの緩降下中に大型クライオサンプラーによる大気採取が継続され、1330JST にパラシュート降下開始、1357JST に岩手県釜石市沖 53km 付近に着水したことが確認された。同日に海上で回収されヘリコプターで三陸大気球観測所に戻ってきた小型サンプラーには全く損傷はなく、水密容器内部への海水の浸入も見られなかった。

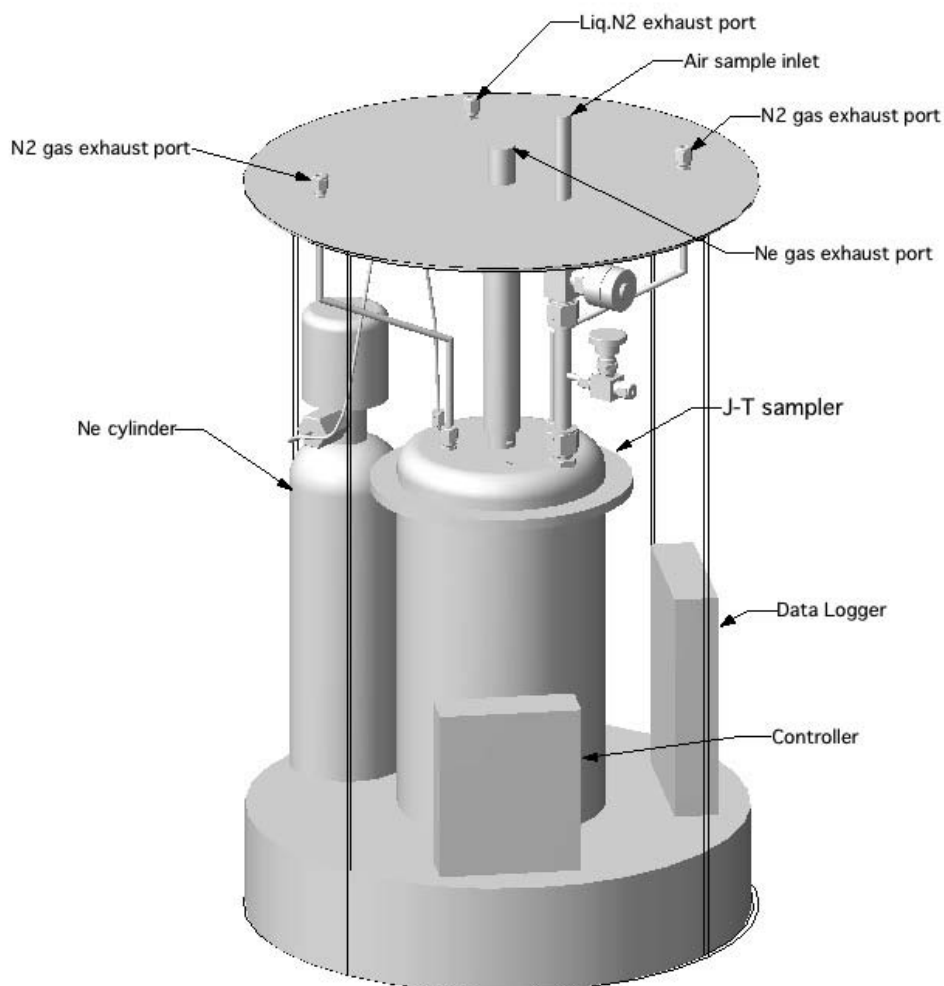


図 8 三陸予備実験用小型クライオサンプラーの構成  
全体を容積 120 L のステンレス製水密容器に納めた。

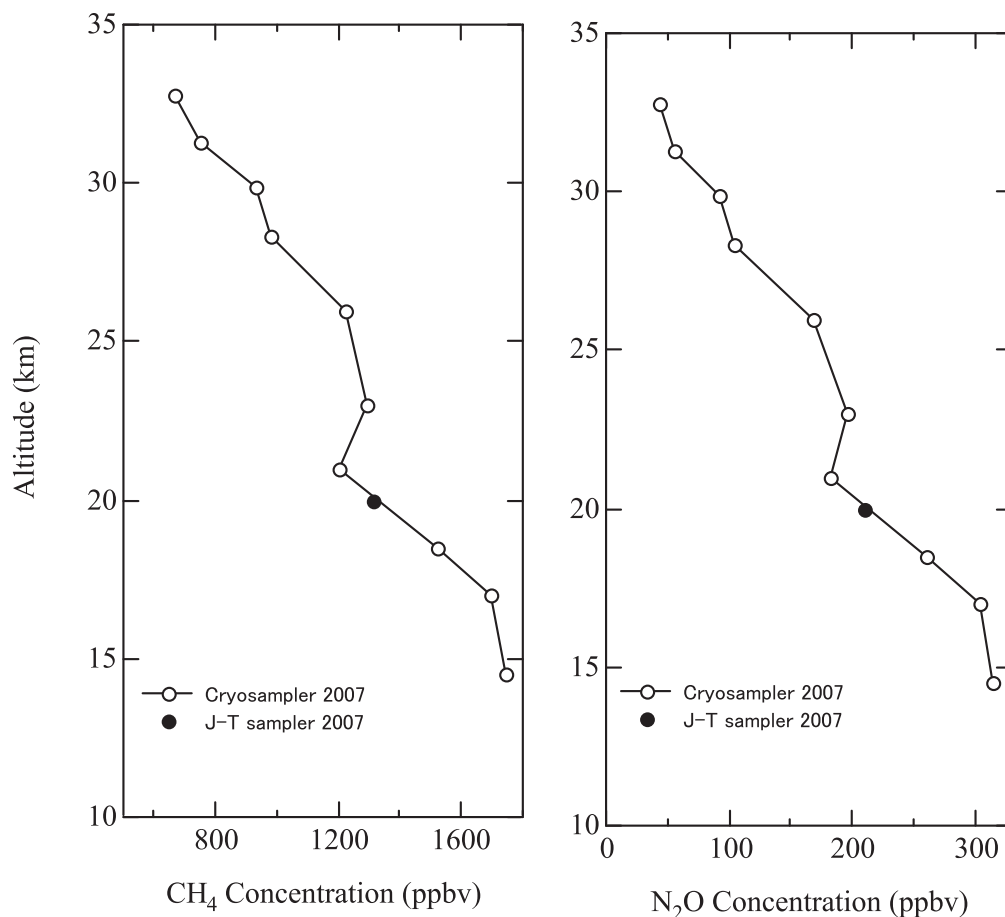


図9 2007年6月4日に三陸大気観測所上空の成層圏で採取された大気試料の分析結果

左図はCH<sub>4</sub>濃度、右図はN<sub>2</sub>O濃度、従来型クライオサンプラーによる大気試料の分析結果（白丸）とJ-Tサンプラーによる結果（黒丸）を示す。

小型クライオサンプラーの回収後、東北大学理学研究科大気海洋変動観測研究センターにおいて採取大気試料量の測定と試料の温室効果気体成分分析を行った。その結果、試料採取容器の内圧は508hPaであり、現場気圧（約60hPa）の約9倍の大気試料が採取されたことから、本サンプラーは成層圏においてクライオサンプラーとして機能したことを確認できた。採取試料量は現場気圧から期待される量に達しなかったが、その原因については後述する。図9に、大型クライオサンプラーによって採取された大気試料による成層圏でのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O濃度の鉛直分布と、本サンプラーで得られた大気試料の分析結果を示す。この図から分かる通り、本サンプラーで採取された大気試料を分析して得られたCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O濃度は、高度20kmの成層圏大気として極めて妥当な値を示している。以上のことから、開発した小型クライオサンプラーは、成層圏において大量の大気試料を採取可能であり、得られた試料の組成にも全く問題がないことを確認できた。

2.2節に述べた室内実験の結果から、J-Tサンプラーは高度20km（大気圧60hPa）において5.8L<sub>STP</sub>の大気試料を採取可能と予測していたが、実際の採取量は0.4L<sub>STP</sub>であった。採取量が少なかった原因を、地上で受信したHKデータと小型クライオサンプラーに搭載したデータロガー・データから推測した。図10a,bに、データロガーに記録された小型サンプラー各部の温度と電池電圧の変化を示す。図10aから、0650~0950JSTの間約2時間の水平飛行中に、空圧圧作動弁を駆動するための電磁弁（サンプリング用電磁弁、ネオンガス用電磁弁）温度が-25度以下まで下がり、大気採取時（高度20km）には-30度に達していたことが分かる。これは事前に検討し予測した南極実験の環境条件よりもかなり厳しいものであった。また、HKデータからは、大気採取手順開始後にインターロック用気圧スイッチがON/OFFを繰り返し、採取終了後はON状態に戻っていたことが確認された。空圧弁駆動用電磁弁は、-25度以下になるとON

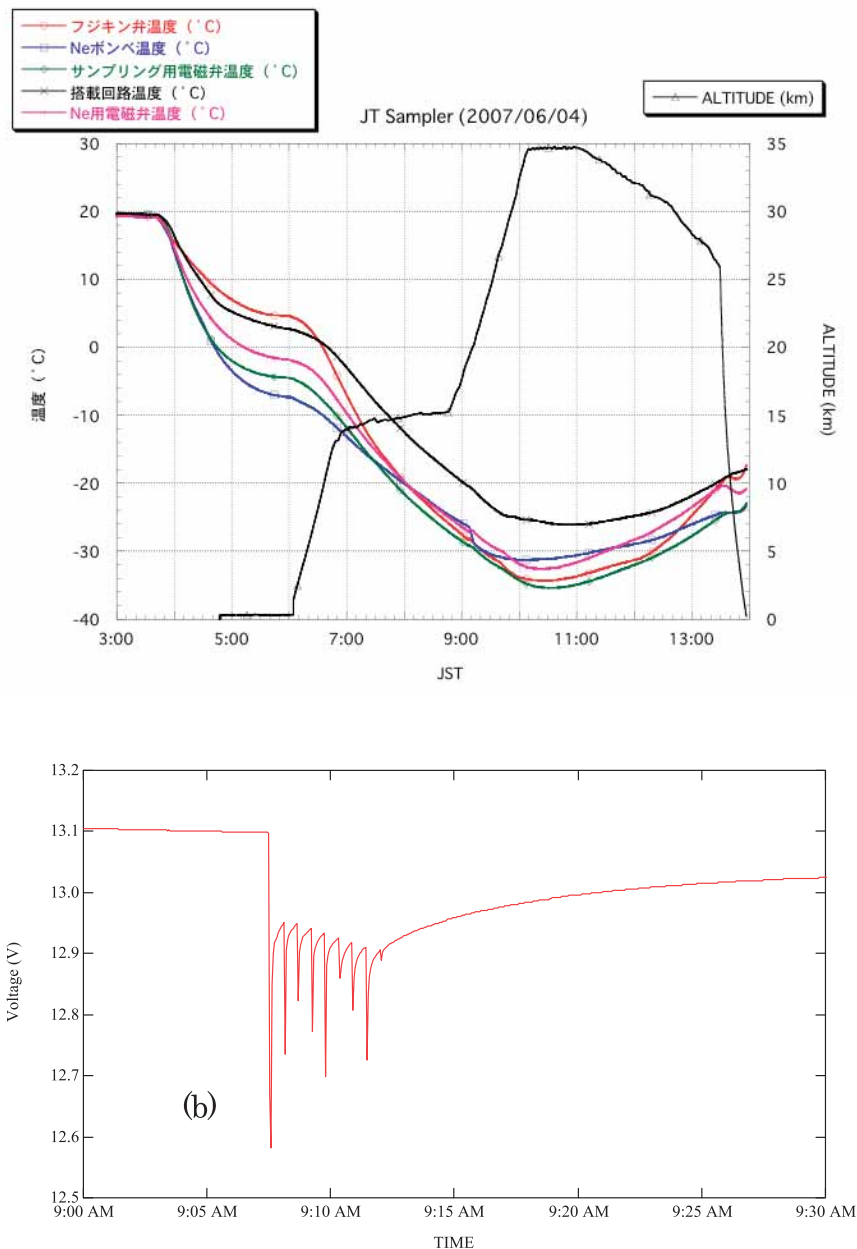


図 10 (a) 飛行中の小型サンプラー各部の温度と飛行高度の変化  
(b) 大気サンプリング開始前後の搭載電池電圧の変化

時に加圧用窒素ガスが外部にリークすることが分かっていることから、今回は、電磁弁からリークした窒素ガスが水密容器の内圧を変化させて気圧スイッチが動作し、インターロック機構が働いたために、大気採集中に電磁弁、さらにネオンガス供給弁・大気採取弁を閉じてしまったものと考えられる。図 11b には、大気採取手順が開始された後に電池電圧がノコギリ状に変動した様子が示されており、電磁弁が ON/OFF を繰り返した様子が分かる。

昭和基地用に準備する小型クライオサンプラーは水密容器に納めない開放型であるため、加圧用窒素ガスが電磁弁からリークしても上空でインターロック機構が働くことはないが、1) 電磁弁部にサーモfoilヒーター (MINCO HK51) を巻き付けて約 2 W の電力を供給、2) インターロック用気圧スイッチの設定圧を 800hPa に変更、という対策をとることにより、より確実性が増すと考えられる。

#### 4. おわりに

J-T ミニクーラーを用いた高圧ネオンガスの膨張によって液体ネオンを製造し、希薄な成層圏大気を固化採取する、小型クライオサンプラーを開発した。本サンプラーは、これまでのクライオサンプリング実験に必要であった液体ヘリウム・液体ネオンを必要としないこと、そして本体重量が17.0kg程度で小型気球による放球が可能である、という特徴を持つ。室内での低圧大気採取実験の結果は、高度25～12kmに相当する25～200hPaの低圧大気を4分間に2.8～7.2L<sub>STP</sub>採取可能であることを示している。

2007年6月4日に、南極昭和基地での成層圏大気採取実験に向けた国内予備実験として、本サンプラーを三陸大気球観測所から放球し、高度20kmの成層圏での動作確認を行った。その結果、本サンプラーはクライオサンプラーとして成層圏大気試料を採取することに成功し、採取試料中の温室効果気体濃度も成層圏試料として妥当な値であった。但し、予備実験用にサンプラー本体を水密容器に納めたこと、そして水密容器内部が想定以上の低温になったために、大気採取量が室内実験結果から予想される量よりもかなり少なかった。地上で受信したHKデータ及びサンプラー搭載データロガーによるアナログデータから採取量が少なくなった原因の究明を行い、昭和基地実験に向けたサンプラーの改良点を抽出することができた。

以下、詳細は別稿に譲るが、第49次南極地域観測隊の夏期観測の一部として、本研究で開発した小型クライオサンプラー計4機を南極・昭和基地に持ち込み、2007年12月30日と2008年1月4日に小型気球を用いて成層圏大気採取実験を実施した。これまで述べた通り、液体ヘリウムが不要であり、かつ小型気球での放球が可能であったことから、実験準備と気球放球、そしてヘリコプターによる回収オペレーションは、これまでの昭和基地でのクライオサンプリング実験と比較して非常に容易に実行可能であった。本サンプラーを用いることで、今後、昭和基地のような遠隔地における成層圏大気の直接観測をより高頻度で実行できる可能性がある。

#### 謝 辞

三陸大気球観測所での予備実験実施にあたり、大気球観測センターの皆様の多大なご協力を得たことに心より感謝いたします。本研究は、科学研究費補助金 No.07558076, No.10558086（研究代表者：山内恭）及び岩谷直治記念財団研究助成金 No.04-3114（研究代表者：森本真司）の支援を受けて実施した。

#### 参考文献

- [1] Aoki, S., T. Nakazawa, T. Machida, S. Sugawara, S. Morimoto, G. Hashida, T. Yamanouchi, K. Kawamura and H. Honda, Carbon Dioxide Variations in the Stratosphere Over Japan, Scandinavia and Antarctic., *Tellus* 55B 178-186, 2003
- [2] 菅原敏, 橋田元, 石戸谷重之, 並木道義, 飯嶋一征, 森本真司, 青木周司, 本田秀之, 井筒直樹, 中澤高浩, 山内恭, 第45次南極地域観測隊行動におけるクライオジェニックサンプラー回収気球実験, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 77-88, 2005
- [3] Honda, H., S. Morimoto, H. Akiyama, G. Hashida, S. Aoki, H. Ui, T. Nakazawa, N. Yajima and T. Yamanouchi, A newly developed grab sampling system for collecting stratospheric air over Antarctic, *Antarctic Record*, 40, 156-168, 1996
- [4] Braker, W. and A. L. Mossman, *Matheson Gas Handbook sixth edition*, Matheson NJ, U.S.A. pp.711, 1990.
- [5] Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, High quality measurements of the atmospheric carbon dioxide, *J. Meteorol. Soc. Japan* 61, 678-685, 1983
- [6] Aoki, S., T. Nakazawa, S. Murayama and S. Kawaguchi, Measurements of atmospheric methane at Japanese Antarctic Station, Syowa, *Tellus* 44B, 273-281, 1992.
- [7] Morimoto, S., S. Aoki, T. Nakazawa and T. Yamanouchi, Temporal variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric methane observed at Ny Ålesund, Svalbard from 1996 to 2004, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01807, doi:10.1029/2005GL024648, 2006

# PPB8 号機と PPB10 号機によるオーロラ X 線の同時観測

中川 道夫<sup>1</sup>, 海老原 祐輔<sup>2</sup>, 江尻 全機<sup>3</sup>, 福田 真実<sup>1</sup>, 平田 憲司<sup>1</sup>, 門倉 昭<sup>3</sup>,  
籠谷 正則<sup>1</sup>, 松坂 幸彦<sup>4</sup>, 村上 浩之<sup>5</sup>, 中村 智一<sup>6</sup>, 中村 康範<sup>1</sup>, 並木 道義<sup>4</sup>,  
小野 孝<sup>1</sup>, 斎藤 芳隆<sup>4</sup>, 佐藤 夏雄<sup>3</sup>, 鈴木 裕武<sup>5</sup>, 友淵 義人<sup>1</sup>, 綱脇 恵章<sup>1</sup>,  
内田 正美<sup>7</sup>, 山上 隆正<sup>4</sup>, 山岸 久雄<sup>3</sup>, 山本 幹生<sup>8</sup>, 山内 誠<sup>8</sup>

## The Concurrent Auroral X-Ray Observations with PPB#8 and PPB#10

By

Michio NAKAGAWA<sup>1</sup>, Yusuke EBIHARA<sup>2</sup>, Masaki EJIRI<sup>3</sup>, Makoto FUKUDA<sup>1</sup>,  
Kenji HIRATA<sup>1</sup>, Akira KADOKURA<sup>3</sup>, Masanori KAGOTANI<sup>1</sup>, Yukihiro MATUZAKA<sup>4</sup>,  
Hiroyuki MURAKAMI<sup>5</sup>, Tomokazu NAKAMURA<sup>6</sup>, Yasunori NAKAMURA<sup>1</sup>,  
Michiyoshi NAMIKI<sup>4</sup>, Takashi ONO<sup>1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>4</sup>, Natsuo SATO<sup>3</sup>,  
Hiromu SUZUKI<sup>5</sup>, Yoshihito TOMOBUCHI<sup>1</sup>, Yoshiaki TUNAWAKI<sup>1</sup>,  
Masami UCHIDA<sup>7</sup>, Takamasa YAMAGAMI<sup>4</sup>, Hisao YAMAGISHI<sup>3</sup>,  
Mikio YAMAMOTO<sup>8</sup> and Makoto YAMANOUCHI<sup>8</sup>

**Abstract:** In order to make the two-dimensional image for auroral X-rays and to obtain the energy spectrum of aurora with energy range from 30keV to 778keV, the Polar Patrol Balloons No8 and No10 (PPB#8 and PPB#10) were launched in rapid succession to form a cluster of balloons during their flight on Jan. 13, 2003 from Syowa Station. They drifted westward 0.5 circumpolar rounds over Antarctica, covering 9–12 g / cm<sup>2</sup> atmospheric depth and 55°.5–66°.4 geomagnetic latitude. From Jan. 22 to 25, 2003, several auroral events were detected by PPB#8 and PPB#10 at the same time. On Jan.23, 2003, PPB#10 and PPB#8 observed auroral X-ray events in succession. PPB#8 which was located about 650km west from PPB#10 observed auroral X-ray event after PPB#10 with delay time 218sec. It is suggested that the auroral X-ray source region moved from east to west with speed of about 3.0km/s. In this paper, we present the feature of these concurrently observed auroral X-ray events.

---

<sup>1</sup> 大阪産業大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University)

<sup>2</sup> 名古屋大学高等研究院 (Nagoya University)

<sup>3</sup> 極地研究所 (National Institute of Polar Research)

<sup>4</sup> 宇宙科学研究本部 (Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>5</sup> 立教大学理学部 (Faculty of Science, Rikkyo University)

<sup>6</sup> 名古屋大学理学部 (Faculty of Science, Nagoya University)

<sup>7</sup> 大阪信愛女学院 (Osaka Shinnai Jyogakuin)

<sup>8</sup> 宮崎大学工学部 (Faculty of Engineering, Miyazaki University)



## 要 旨

オーロラ X 線イベントの 2 次元イメージを得ることと、30keV から 778keV の領域でエネルギースペクトルを得ることを目的として、大気球を編隊飛行させ観測を行うバルーンクラスター計画の下に、2003 年 1 月 13 日に PPB8 号機と PPB10 号機の 2 機が南極の昭和基地より放球された。両機は大気深さ  $9-12 \text{ g/cm}^2$  を保ち、磁気緯度  $55.5-66.4$  の範囲を飛行し南極大陸を半周した。両機はフライト中に多くのオーロラ X 線イベントを観測した。特に、1 月 22 日から 1 月 25 日には、数例のイベントが両機で同じ時間帯に観測されている。2003 年 1 月 23 日には、始めに 10 号機、218sec. の間隔をあけて 8 号機でイベントが観測された。このとき 8 号機は 10 号機の西 650km に位置していた。このことはオーロラ X 線源が速さ約  $3.0 \text{ km/sec}$  で西に向かって移動していたことを示唆している。本論文では同じ時間帯に観測された、オーロラ X 線イベントについてその描像を述べる。

## 1. はじめに

1957 年に WINCKLER and PETERSON により発見されたオーロラ X 線は [1], 数十 keV 以上の高いエネルギーを持つ電子が大気中に降下して制動放射により発生するといわれている。大気球高度で観測されるオーロラ X 線の微分エネルギースペクトルは指数関数で近似され、観測により得られるエネルギースペクトルはそのパラメーターである  $e$ -folding energy (以下  $E_0$  と記述する。) で特徴づけられる。オーロラ X 線の広域空間分布やその時間変動、 $E_0$  に関するさまざまな知見を得ることは、高エネルギー電子の流入機構や降下原因、さらには地球磁気圏内の高エネルギー現象の解明につながるであろう。しかし、オーロラ X 線の広域空間分布やその時間変動を調べるには、オーロラ帯全域を長期間にわたって観測する必要がある。

南極域の成層圏には南極大陸に沿うように冬期には偏西風が、夏期には偏東風が安定して吹く。南極周回大気球 (Polar Patrol Balloon) 実験は、この風を利用して大気球を南極大陸に沿うように周回させ、長期間の観測を行うことを目的として計画された。

国立極地研究所 (NIPR) と宇宙科学研究所 (ISAS) が中心となって 1984 年から予備実験が行われ [2][3], その結果をもとに 1990 年から 1991 年、および 1992 年から 1993 年にかけて、第 33 次および第 34 次南極地域観測隊により第 1 次 PPB 実験が行われ、合計 6 機の PPB が南極昭和基地より放球された [4]。

1993 年 1 月 5 日に放球された、オーロラ X 線と宇宙線粒子の観測を目的とした PPB6 号機は、高度  $6-13 \text{ gcm}^{-2}$  を保ちながら西回りに 27 日間の飛行を続け、約 1 周半の周回飛行を行った。飛行した磁気緯度は  $49^\circ-81^\circ$  の広範囲に及び、さまざまな磁気地方時 (MLT), 磁気緯度においてオーロラ X 線の観測を行った。鈴木は観測された 48 例のオーロラ X 線イベントをもとにして、地磁気極座標上にオーロラ X 線の強度分布を調べて X 線オーロラ帯に相当する領域を示し、可視光オーロラの分布と大きく異なっていることを見出した。また、オーロラ X 線スペクトルの  $E_0$  の不変磁気緯度に対する依存性などから、高エネルギー電子の降下原因として、ホイッスラーモードの電磁波とのサイクロトロン共鳴の可能性を示唆した [5]。

PPB6 号機による観測はさまざまな知見を得たが、全方向に近い視野を持つ X 線観測装置を用いたため X 線の到来方向を知ることができず、また単機の観測であるため、一つのオーロラ X 線イベントをある磁気地方時と磁気緯度で捉えているが、全体像は求められなかった。

オーロラ X 線イベントの全体像を捉えるためには、狭い視野角を持った複数の X 線観測装置を搭載した複数の PPB を用いて、異なる磁気地方時と磁気緯度で観測する必要がある。

2002 年から 2003 年にかけて実施された第 2 次 PPB 実験では、「宇宙物理観測」と「地球物理観測」の 2 つのテーマのもとに、それぞれ 1 機と 3 機の大気球が準備された。「地球物理観測」の主な目的は、3 機の大気球が数百 km の距離を保ってバルーンクラスターを組み、プラズマ圏からカスプまでの領域が磁力線にそって電離圏に射影されている領域、磁気緯度で  $50^\circ-80^\circ$  の広い範囲を飛行し、磁気圏境界領域現象の時間的、空間的变化を観測することである [6]。

2003 年 1 月から 2 月にかけて行われた第 44 次日本南極地域観測隊による PPB 実験で、地球物理観測用として 3 機

の大気球 (PPB#8, PPB#9, PPB#10: 以下 8 号機, 9 号機, 10 号機と称す.) が放球された. それぞれの大気球には 5 種類の観測器, 電場観測器 (EFD), 3 軸フラックス磁場検出器 (MGF), オーロラ X 線撮像装置 (AXI), 電磁波動観測器 (EMW), 電離層全電子密度観測器 (TEC) が搭載された. 各観測器の概要を以下に記す.

EFD は, 3 対の球プローブを用いて, 水平電場 2 成分, 垂直電場 1 成分の電場観測をサンプリング時間 1 秒で行う. 分解能は水平成分 0.2mV/m, 垂直成分 0.8mV/m である. MGF は, フラックスゲート磁力計, 傾斜計, 太陽パルスセンサーからなり, 分解能 0.25nT で 1 秒毎に地磁気のベクトル計測を行う.

EMW は, V L F 帯から L F 帯の電磁波動の観測を次の 3 モードで行う.

- 1) 0.2–0.4Hz の範囲の波形観測を, 10Hz のサンプリングレートで行う.
- 2) 300Hz, 600Hz, 1.2kHz, および 2.4kHz で強度観測を時間分解能 0.5sec. で行う.
- 3) 5kHz, 0kHz, 20kHz, および 36kHz の高周波数での掃引観測を時間分解能 0.5sec. で行う.

TEC は, GPS 衛星から送出される 2 種類の異なる周波数の電波を受信し, それらの伝播遅延, 位相のずれの情報から, 伝播経路に沿った電離層の全電子数の測定を行う.

AXI による観測は以下の 3 点を目的として行われた.

1. オーロラを硬 X 線領域 (30~180keV) で 2 次元的に撮像して, その強度の空間分布および空間分布の時間変化を求めること.
2. オーロラの硬 X 線および  $\gamma$  線領域 (30~約 800keV) のスペクトルとその特徴, および強度変動を得ること.
3. 離れた位置にいる 3 機の気球のデータから, 広域空間におけるオーロラ X 線の空間分布および強度変動を得ること.

2003 年 1 月 13 日に放球された 8 号機と 10 号機は約 2 週間の編隊飛行を続けて観測を行った. 本稿では, 約 2 週間編隊飛行を行った 8 号機と 10 号機が, オーロラ X 線撮像装置によりほぼ同時にオーロラ X 線イベントを観測した時間帯の事象についてのべる.

## 2. オーロラ X 線撮像装置とデータ伝送

オーロラ X 線撮像装置 (Auroral X-ray Imager) は, 同一性能を有する 3 組が準備され, 3 機の PPB にそれぞれ 1 組搭載された. この AXI は, オーロラ X 線の撮像とそのエネルギースペクトルを得る事を目的とする 16 台の NaI(Tl) 検出器群と, オーロラ X 線の高エネルギー側のスペクトルを得る事を目的とする 1 台の BGO 検出器とで構成されている [7].

一本の NaI(Tl) 検出器の概略を図 1(a) に示す. その外形は細長い円筒状になっており, コリメーターと NaI(Tl) シンチレーター, および光電子倍增管と高電圧分配器で構成されている. NaI(Tl) シンチレーターは直径 12.7mm, 厚さ 5mm で, 光電子倍增管と光学的に一体化されており, その外側は磁気シールド材で覆われている. さらに外側から内側へ, コリメーターを兼ねた厚さが 1mm の鉛と 2mm の錫が巻かれている. コリメーターの視野角は, 直径で 30° (15° FWHM) で, 検出器の口径を考慮した幾何学的因子 ( $S\Omega$ ) は 0.07cm<sup>2</sup>sr である.

BGO 検出器の概略を図 1(b) に示す. BGO シンチレーターは直径 38mm, 厚さ 10mm で, 光電子倍增管と光学的に一体化されている. これらは, 磁気シールド材で覆われ, NaI(Tl) 検出器と同様に厚さそれぞれ 2mm と 1mm の錫と鉛からなるコリメーターを兼ねたシールドで覆われている. 視野は 155° (B to B) と広く設定して, できるだけ多くのオーロラ X 線イベントを検出できるようにした.  $S\Omega$  は 23.66cm<sup>2</sup>sr である.

16 台の NaI(Tl) 検出器は, 4 台を 1 組にして方位角 90° 毎に設置された. 各方位に設置された NaI(Tl) 検出器の模式図を図 2(a) に示す. 4 台の NaI(Tl) 検出器は図の左から順に視野中心が天頂から 10°, 20°, 30°, 40° になるよう傾けられている. 図 2(b) は NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器を配置したゴンドラの模式図で, 4 台 1 組の NaI(Tl) 検出器が各辺の中央部に設置され, ゴンドラの一辺に天頂を視野中心とした BGO 検出器が設置されている.

図 3 は AXI の視野分布で, その中心はゴンドラの天頂をあらわす. AXI はエネルギー領域 30~180keV, 時間分解能 2 秒で, ゴンドラの天頂を中心として半径 40° の円内を撮像することができる. 以下の「4. 考察」では, MGF データを用いてゴンドラの方位を決定し 2 次元イメージを得た.

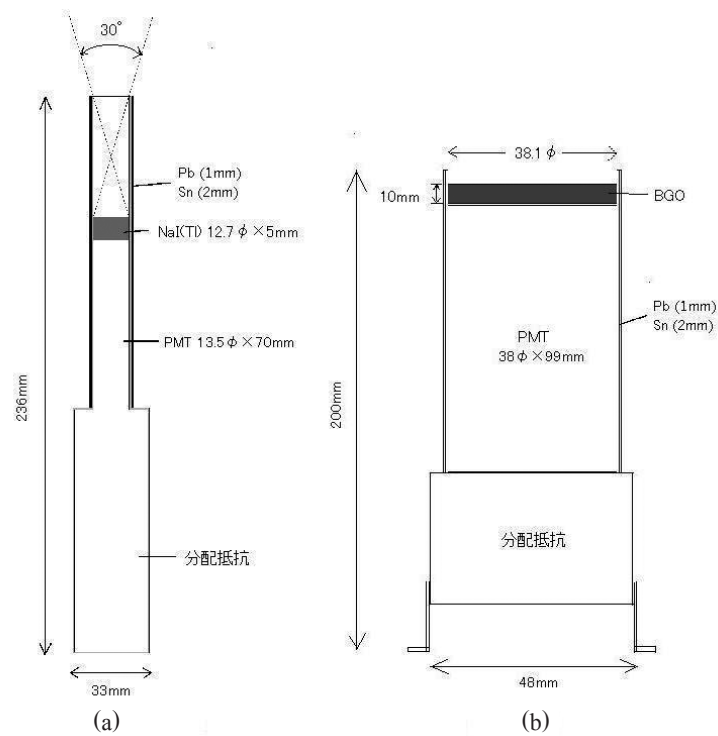


図1 検出器の概略図

- (a) NaI(Tl) 検出器. 視野角は  $15^\circ$  (FWHM),  $S\Omega$  は  $0.07\text{cm}^2\text{sr}$  である.  
 (b) BGO 検出器. 視野角は  $155^\circ$  (B to B),  $S\Omega$  は  $23.66\text{cm}^2\text{sr}$  である.

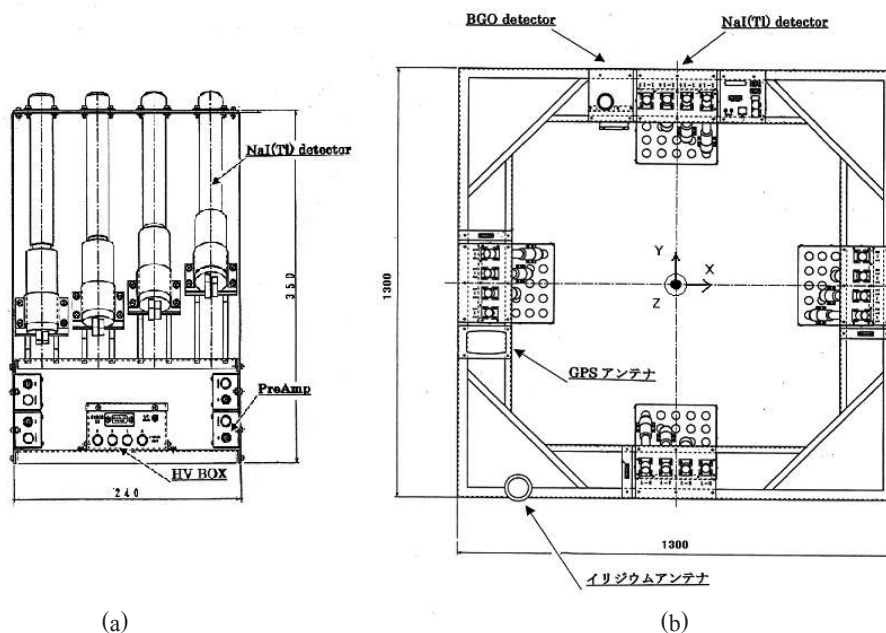


図2 NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器の配置

- (a) NaI(Tl) 検出器配置. 4 台の NaI(Tl) 検出器は図の左から順に視野中心が天頂から  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  になるよう傾けられている.  
 (b) NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器を配置したゴンドラの模式図

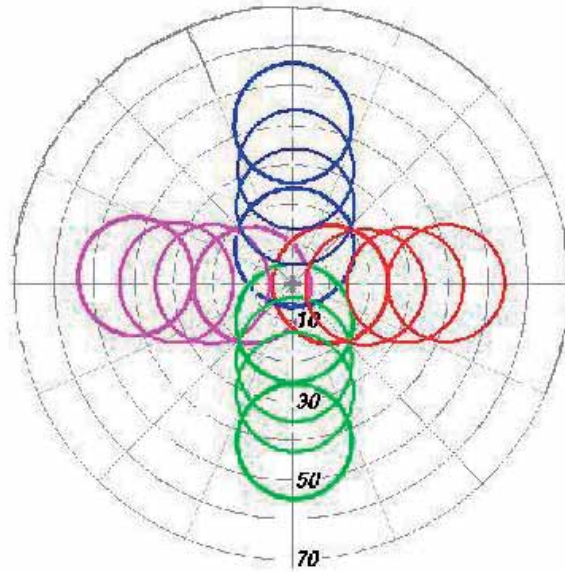


図3 オーロラX線撮像装置の視野分布

視野分布の中心はゴンドラの天頂で、円は視野角30°の各コリメーターの視野を示す。

色別を示す各方位に設置された4台のNaI(Tl)検出器の視野中心は天頂から10°, 20°, 30°, 40°傾いている。

表1 NaI(Tl)検出器のエネルギー帯

1ch	30 ~ 40keV
2ch	40 ~ 70keV
3ch	70 ~ 110keV
4ch	110 ~ 140keV
5ch	140 ~ 180keV

表2 BGO検出器のエネルギー帯

1ch	100 ~ 150keV
2ch	150 ~ 227keV
3ch	227 ~ 340keV
4ch	340 ~ 518keV
5ch	518 ~ 778keV

天頂角10°の4台のNaI(Tl)検出器から、表1に示すように30～180keVの領域を5チャンネルに分割したカウント数を20秒毎に得て、X線イメージのエネルギースペクトルを測定できるようにした。BGO検出器は2秒毎のカウント数と、オーロラX線の高エネルギー側のスペクトルを測定するために、表2に示すように100～778keVの領域を5チャンネルに分割したカウント数を20秒毎に得た。

3機のPPBは、体積が5万m<sup>3</sup>、気球を含む総重量は588kgである。その内AXIの重量は133kgである。バラストは200kg搭載されており、オートレベルコントローラによって気球高度が30～35kmを保つように制御されて、20日以上 の飛翔期間が期待された。[6]。

今回の観測では、電源供給とデータ転送に新しいシステムを初めて用いた。PPB観測は長期にわたるため、従来から用いられているリチウム一次電池では電池重量が大きくなり不都合である。今回の観測では、気球の制御にかかわ



る部分はリチウム一次電池を、PI システムにかかわる部分は太陽電池とニッケル金属水素二次電池を併用する電源供給システムを用いた[8][9].

データ転送には商業通信衛星であるイリジウム衛星を初めて用いた. 南極大陸を周回中の各気球に搭載されたイリジウム携帯端末は、毎時0分、及び30分に極地研の専用電話を呼び出し、機上に蓄積された未送信ファイルをイリジウム衛星を経由して順次地上に伝送した. データ転送の途中で回線切断が生じた場合には、再度回線を接続して途中で途切れたデータを最初から再び伝送した. 長期間飛翔した8号機、10号機は、それぞれ全通信で約1割の回線切断があったが、再送機能により、観測された全データの取得に成功した. なお、通信手段の二重化を確保するため、テレメーターによるデータ転送も行った[8][9].

イリジウム衛星によるデータ伝送ではEFD, MGF, AXI, EMW, TECの5種類の観測器から得られる10分間のデータと、ハウスキーピング(HK)データをあわせて1ファイルにし、3ファイル分すなわち30分間のデータを1回の回線接続で送信した.

AXIの10分間のデータ列には、20秒間分のデータ列を1ブロックとして30個のブロックが入っている. 1ブロックは、16台のNaI(Tl)検出器とBGO検出器の2秒あたりのカウント数がそれぞれの検出器について10個ずつ計170個と、20秒間集積したエネルギースペクトルデータとしてNaI(Tl)検出器5ch分のカウント数とBGO検出器5ch分のカウント数計10個などが入っている[10].

### 3. PPBの飛翔と観測の概略

3機のPPBは気象条件の良好な1月初旬に、南極の昭和基地(南緯69°, 東経39.6°)より9号機、8号機、10号機の順番に、短い時間間隔を置いて連続して放球される予定であった.

2003年1月6日7時35分(UT)に9号機が放球された. しかし、高度15kmで切り離しカッターが誤作動してゴンドラが切り離され、昭和基地の近くに着氷したため、この日の8号機、10号機の放球は中止された. 後日ゴンドラは回収されて、各機器は正常に動作していることが確認された.

2003年1月13日6時49分(UT)に8号機が、天候晴れ、風速1.5m/sの気象条件の下、続いて約6時間後の12時15分(UT)に10号機が、天候晴れ、風速1.2m/sの気象条件の下に放球された. 両機とも約2時間後にフライトレベルに達した後、南緯70°付近の南極周回軌道を飛翔して南極大陸を西回りにはほぼ半周した. その後風向が変わったため、1月25日頃から10号機が、1月31日頃から8号機が周回軌道を外れて北東に飛翔し、1月31日に10号機が、2月7日に8号機がそれぞれ通信を終えて本実験は終了した. この間、約2週間にわたって10号機が8号機の東側に位置する編隊飛行をしながら観測を行うことができた[11]. 周回軌道から外れるまでに飛翔した地理的緯度と磁気緯度の範囲を表3に示す. 両機はプラズマ圏が磁力線にそって電離圏に射影されている領域からオーロラ帯にかけての領域[6]を飛翔していた.

表3 8号機、10号機の飛翔した緯度の範囲

	8号機	10号機
地理的緯度	-69°.0 ~ -74°.7	-69°.0 ~ -75°.1
磁気緯度	-55°.5 ~ -65°.9	-57°.4 ~ -66°.4

図4に航跡図を示す. 赤の丸印は8号機、青の丸印は10号機である. また、それぞれ同じ色の矢印で1月24日の位置を示す.

図5に1月13日から1月31日の間の両機のNaI(Tl)検出器の計数率、HKデータ及びKp指数[12]を示す. (a)が8号機、(b)が10号機で、上から、一分毎のカウント数、気球高度、磁気緯度、MLT、Kp指数である. フライトレベルに達した後は、両機ともオートレベルコントローラによって高度31km以上を保ちながら飛行したが、8号機は1月23日、10号機は1月22日にバラストが尽きたため、その後徐々に高度が下がり、太陽仰角の変化による高度変化も



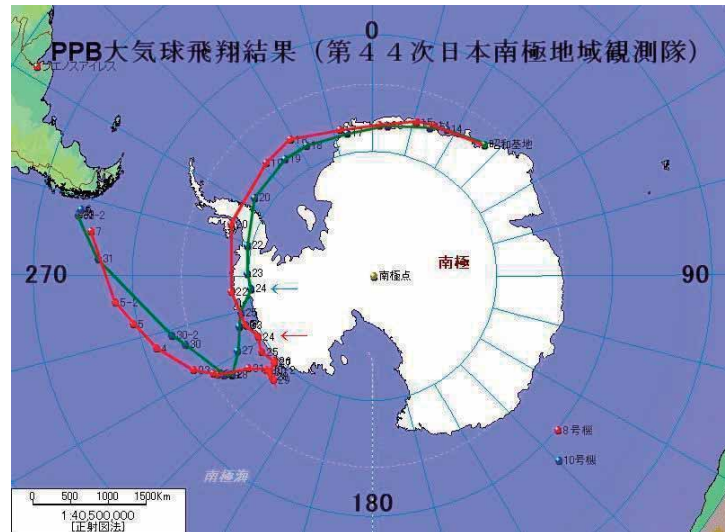


図4 全飛行期間中の航跡図

各観測日の位置を8号機は赤, 10号機は青の丸印で, また1月24日の両機の位置を8号機は赤, 10号機は青の矢印で示す。

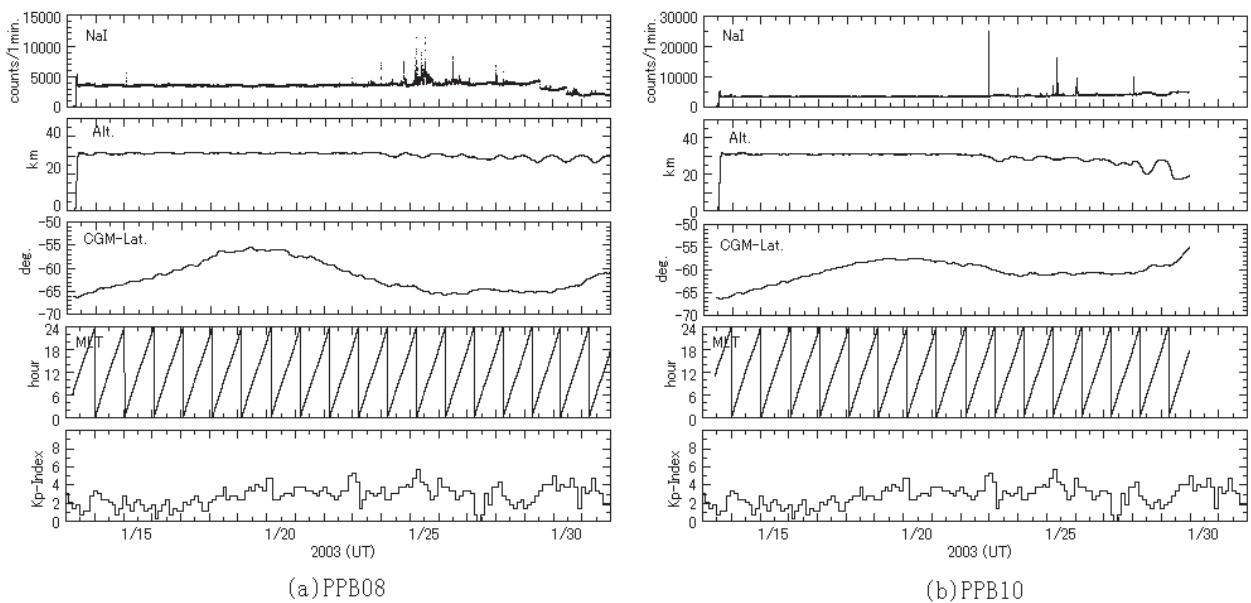


図5 1月13日から1月31日の間の1分毎のNaI(Tl)検出器のカウント数とHKデータおよびKp指数

(a)は8号機, (b)は10号機である。(a), (b)とも上から順に, 1分毎のカウント数, 気球高度, 磁気緯度, MLT, およびKp指数を示す。

次第に大きくなっていった。また, 10号機では1月24日12時30分頃にMGFデータに異常が発生し, それ以降のゴンドラの方位は不明となった[13]。

今回のPPB実験では, 両機合わせて30数例のオーロラX線イベントが観測された。図5に見られるように, 8号機ではオーロラX線イベントは, 1月15日1時40分頃に一例が観測されている。その後1月22日23時30分頃, 1月23日23時30分頃に各1例のイベントが観測され, 1月24日から1月28日にかけて断続的に数時間継続するイベントが観測されている。1月15日, 1月22日, 1月23日に観測された独立したイベントの磁気緯度はそれぞれ $63^{\circ}$ ,  $61^{\circ}$ ,  $63^{\circ}$ であり, 1月24日から1月28日にかけて観測された数時間継続するイベントでは,  $64^{\circ}$ から $66^{\circ}$ の範囲であった。

10号機では1月22日23時30分頃、1月23日23時30分頃に各1例のイベントが観測されているが、これらは8号機とはほぼ同時に観測されたイベントである。8号機と同様に1月24日から1月26日にかけて断続的に数時間継続するイベントが観測され、1月28日の0時から2時半にかけて30分ほど継続するイベントが2例観測されている。1月22日、1月23日に観測された独立したイベントの磁気緯度はそれぞれ $60^\circ$ 、 $61^\circ$ であり、1月24日から1月26日にかけて観測された数時間継続するイベントおよび1月28日のイベントでは $61^\circ$ 前後であった。2機のPPBが飛翔した磁気緯度の範囲は $55^\circ \sim 66^\circ$ であるが、イベントが観測されたのは $60^\circ \sim 66^\circ$ の範囲で、これはPPB6号機で求められたオーロラX線の広域空間分布の低磁気緯度側にあたっている[5]。

Kp指数は1月17日頃まで平均値は2程度で地磁気の活動度は低くかったが、その後は一日の平均が3-から4-と活動度は少し高くなっている。オーロラX線イベントが観測された時間帯では、1月22日、1月23日がそれぞれ5+、4-であった。1月24日は4-から4+、8号機で見られる最も活発にイベントが発生した1月25日は、5-から6-であった。1月26日以降は大きく下がっている時間もあるが、3+から4+程度であった。1月13日から1月31日の間のDst指数の変化は $-66\text{nT}$ から $23\text{nT}$ であった[14]。Kp指数及びDst指数から、1月13日から1月31日の間の平均的な地磁気活動度は低から中程度といえる。

AE指数は1月18日頃から変動が大きくなり始めていた。図6は、考察を行っている1月22日から1月25日の間のAE指数（暫定値）である[15]。1月22日以降も、AE指数は、1時間から数時間の幅を持つ最大値が $500\text{nT} \sim 800\text{nT}$ 程度の変動を繰り返し、1月25日には最大値が約 $1800\text{nT}$ の非常に激しい変動がみられた。これらは、この期間に活発なオーロラ活動が起きていたことを示している。しかし、8号機では1月24日以降に、10号機では1月25日以降に活発に活動するオーロラX線が観測されている。これは、2機のPPBが飛翔した磁気緯度がオーロラX線の広域空間分布の低磁気緯度側であること、またそれまでのオーロラ活動領域が高磁気緯度であったためであると思われる。

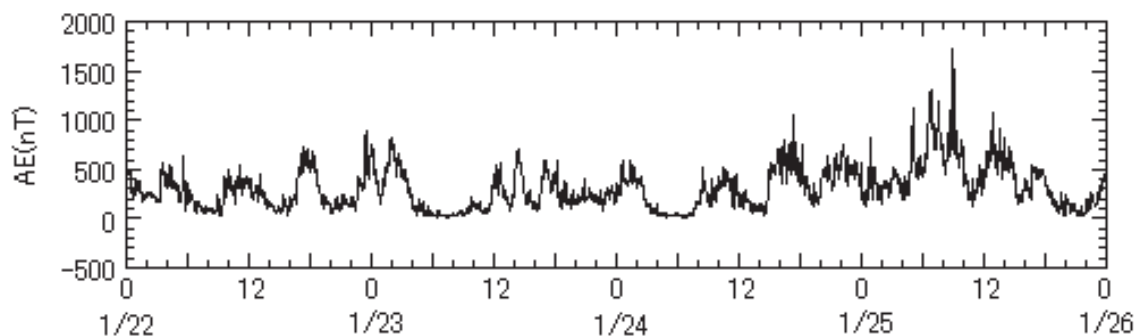


図6 1月22日から1月25日のAE指数

#### 4. 考察

前述したように、今回のPPB実験では、両機合わせて30数例のオーロラX線イベントが観測された。ここでは、オーロラX線イベントが両機ではほぼ同時に観測されている時間帯を取り上げ、その時間帯に観測されたオーロラX線イベントについて述べる。

##### (1) 1月22日23時35分から23時45分

図7は1月22日23時30分から23時50分のNaI(Tl)検出器の20秒毎のカウント数で、(a)が8号機、(b)が10号機である。MLTと磁気緯度は8号機がそれぞれ $17.7\text{h}$ と $64^\circ$ 、10号機がそれぞれ $18.5\text{h}$ と $61^\circ$ である。

10号機では23時35分頃から23時37分にかけてブロードなオーロラX線イベントが、それに続いて非常に強いイベントが23時39分頃から23時45分にかけて観測されている。このイベントとほぼ同じ時刻の23時38分から23時41分にかけて、8号機で弱いイベントが観測されている。 $E_0$ は8号機が $55.5 \pm 12.1\text{keV}$ 、10号機はブロードなイベントが $65.6 \pm 11.4\text{keV}$ 、強いイベントが $67.0 \pm 8.1\text{keV}$ である。

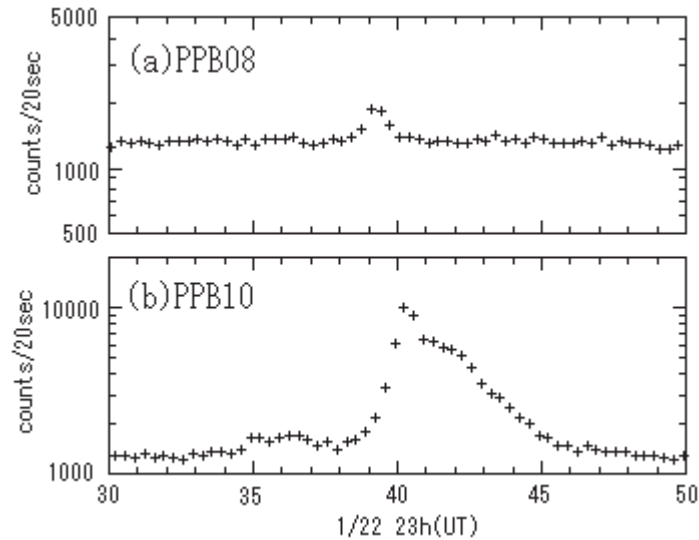


図7 1月22日23時30分から23時50分のNaI(Tl)検出器の20秒毎のカウント数.  
(a)は8号機, (b)は10号機である.

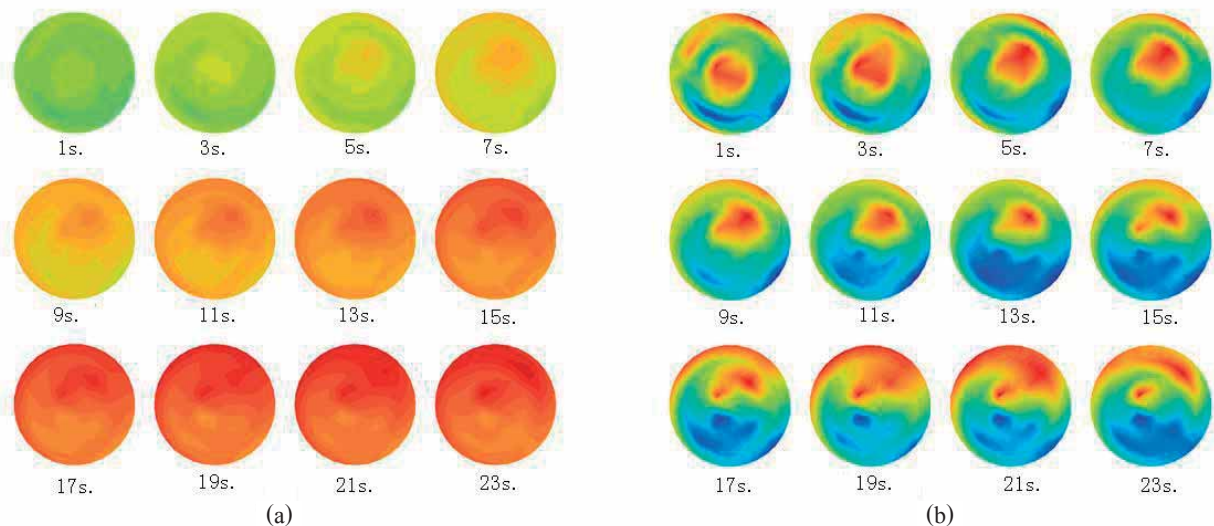


図8 1月22日23時40分01秒から23時40分23秒間の, 2秒毎のオーロラX線のイメージ.

図の上は北を指しており, その中心はゴンドラの天頂で, 半径は $40^\circ$ である. 各イメージの下は時刻(秒)である.

(a) 描画強度範囲を同一にして各イメージを描画.

(b) 描画強度範囲をイメージ毎に変えて描画.

図8は10号機の強いイベントが立ち上がった, 1月22日23時40分01秒から23時40分23秒間の, 2秒毎のオーロラX線の2次元イメージである. 図の上は北を指しており, その中心はゴンドラの天頂で, 半径は $40^\circ$ である. 図中(a)は描画するカウント数の範囲(描画強度範囲)を同一にして各イメージを描画して, X線強度の時間変化を強調しており, (b)は描画強度範囲をイメージ毎に変えて, X線強度の大きい所を強調して描画している. 各イメージの下は時刻(秒)である. オーロラX線が視野全域で強度を増しながら, 明るい領域が, 天頂方向から北東に向かって移動していくようすが見られる.

24秒間の10号機の地理的な位置は, 緯度は南緯 $74.187^\circ$ で一定であり, 一方経度は西経 $80.304^\circ$ から西経 $80.306^\circ$ に変化している. これから求められる10号機の位置の変化は西に向かって約76mであることより, AXIの視野を考えると10号機の位置の変化は考慮に入れなくてよい. また, この時間帯のゴンドラの平均回転角は $0.61(^\circ/\text{sec})$ であった.

NaI(Tl) 検出器の視野と比較すると、イメージを撮像している 2 秒間の視野の回転も考慮に入れなくてよい。したがって、イメージ上の明るい領域が移動していくようすは、実際の動きを写しているといえる。

明るい領域の、移動前後の天頂角および方位角は、23 時 40 分 01 秒では  $10^\circ$  と  $149^\circ$ 、23 時 40 分 23 秒では  $30^\circ$  と  $45^\circ$  であった。10 号機の高度は 29.7km であり、イメージを高度 100km に投影したときの移動速度は 130km/min. である。

オーロラ X 線源の明るい領域が低緯度側に向かって低速で移動する現象は、以前にも報告されている [16]。

Hirasima et al. は半導体検出器を用いた X 線撮像装置と、一直線に並べた NaI(Tl) 検出器を用いた X 線撮像装置を使って北極のオーロラ帯で観測を行なった。その結果、高度 100km に投影したオーロラ X 線の空間分布のスケールは小さく (10km)、オーロラ X 線源の領域は時間とともに現れたり、消えたりしていること、および、オーロラ X 線源の領域が速さ 50km/min. で南東に向かって移動したことを報告している。そして、局所的で、間歇的な高エネルギー電子の降下がオーロラサブストームの拡大していく中で起きていることを示唆している。

図 6 で、1 月 22 日 23 時から 1 月 23 日 1 時にかけて AE 指数が大きく変動しており、このことは今回観測された事象がオーロラサブストームの中で起きていることを示唆している。

## (2) 1 月 23 日 23 時 30 分から 1 月 23 日 23 時 40 分

図 9 は 1 月 23 日 23 時から 24 時まで 1 時間の NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数を示す。(a) が 8 号機、(b) が 10 号機である。23 時 32 分頃に 10 号機が、数分後の 23 時 36 分頃に 8 号機がオーロラ X 線イベントを観測している。MLT と磁気緯度は 8 号機が 17.4h と  $63^\circ$ 、10 号機が 18.1h と  $61^\circ$  である。

図 10 は、23 時 36 分の両機の位置とオーロラ X 線のイメージである。図中の円は高度 100km に投影したオーロラ X 線撮像装置の視野である。このとき、8 号機は西経  $117^\circ$ 、南緯  $74^\circ$ 、10 号機は西経  $96^\circ$ 、南緯  $75^\circ$  にあり、8 号機は、10 号機の西約 650km 離れた所に位置していた。高度は 8 号機が 31.6km、10 号機は 29.5km であった。

23 時 20 分から 23 時 50 分の、1 分毎のイメージを図 11 に示す。10 号機は、まず視野の東側が明るくなり次に西側が明るくなっている。8 号機は数分遅れて東側が明るくなり次に中央付近が明るくなっている。最も明るくなった時刻のイメージ内で最も明るい所の天頂角と、東から反時計回りに取った方位角は、8 号機で  $10^\circ$  と  $322^\circ$ 、10 号機は  $40^\circ$  と  $353^\circ$  であった。オーロラ X 線源の高度を 100km と仮定し、これらの値を用いて磁気緯度を推定したところ 8 号機が  $63.4^\circ$ 、10 号機が  $63.1^\circ$  であった。したがって、両機で観測されたオーロラ X 線イベントは、同じ磁気緯度帯で発生しているといえる。

図 11 によると、10 号機が 8 号機より数分早くオーロラ X 線イベントを観測し始めている。23 時 20 分から 23 時 45 分間の NaI(Tl) 検出器の 2 秒毎の合計カウント数を平滑化して求めた両機の相互相関係数が図 12 である。この図によ

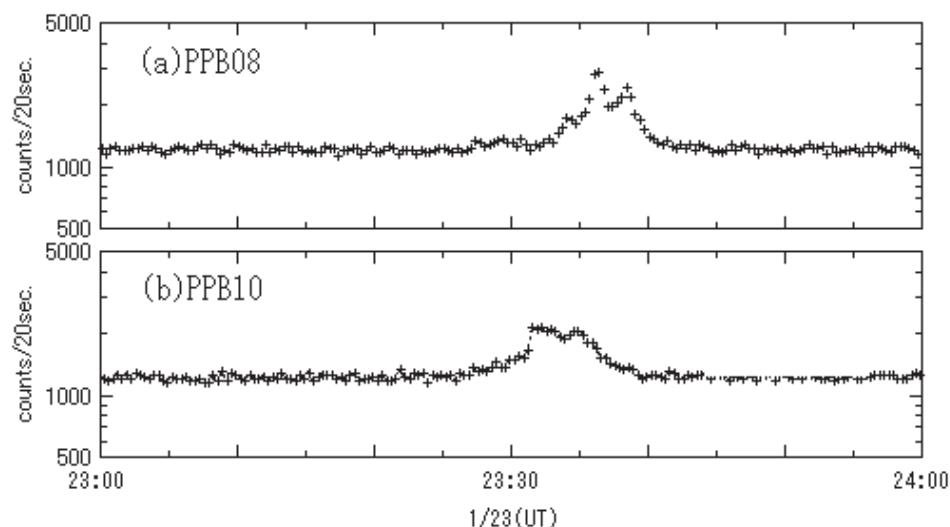


図 9 1 月 23 日 23 時から 24 時の検出器の 20 秒毎のカウント数、(a) は 8 号機、(b) は 10 号機である。



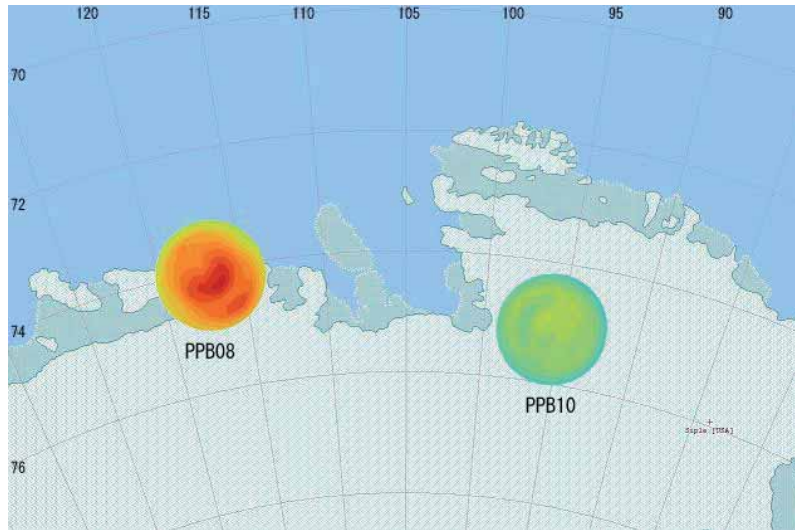


図10 1月23日23時36分の両機の位置と、高度100kmに投影したオーロラX線のイメージ  
左側が8号機、右側が10号機である。両機は約650km離れている。

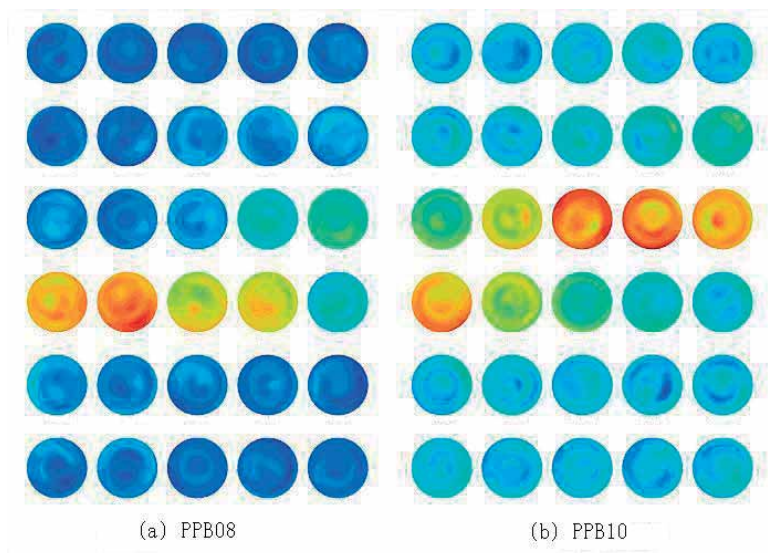


図11 1月23日23時20分から23時50分の1分毎のイメージ  
(a)は8号機、(b)は10号機である。

ると両機で観測されたイベントの時間差は218sec.である。

また、 $E_0$ は8号機が $80.5 \pm 2.8 \text{ keV}$ 、10号機が $80.0 \pm 7.9 \text{ keV}$ でよく一致していた。これらの $E_0$ で特徴づけられるエネルギースペクトルを持つオーロラX線が、空気の吸収を受けながらそれぞれの気球高度に達したときに計測されるカウント数の比を求めると、8号機は10号機の1.78倍であった。図13(b)はこの比を用いて10号機の2秒毎のカウント数を8号機の高度に補正し、さらに218sec.遅延させたものである。比較のため、8号機の光度曲線を図13(a)に示す。両パネルの光度曲線はよく似ているが、半値幅はそれぞれ180sec.と288sec.で10号機のほうが広い。しかし、750点のデータを用いて求めた相関係数は0.90で、両機の光度曲線に強い相関があることを示している。

以上の結果は、オーロラX線源の明るい領域が西に向かって速さ $180 \text{ km/min.}$ で移動したことを示唆している。図6によると、1月23日12時頃から24日4時頃にかけてAE指数は激しく変動しておりオーロラ活動も活発化していると考えられる。速さもオーダー的には一致していることから、オーロラサブストームにともなうWestward Traveling Surgeの低緯度側の動きを観測した可能性がある。



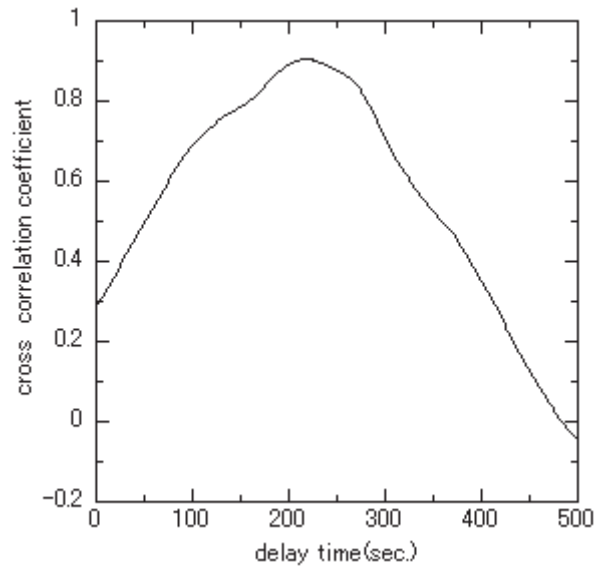


図 12 両機の AXI データの相互相関係数

23 時 20 分から 23 時 45 分の、16 台の検出器の 2 秒毎の合計カウント数を平滑化して求めている。

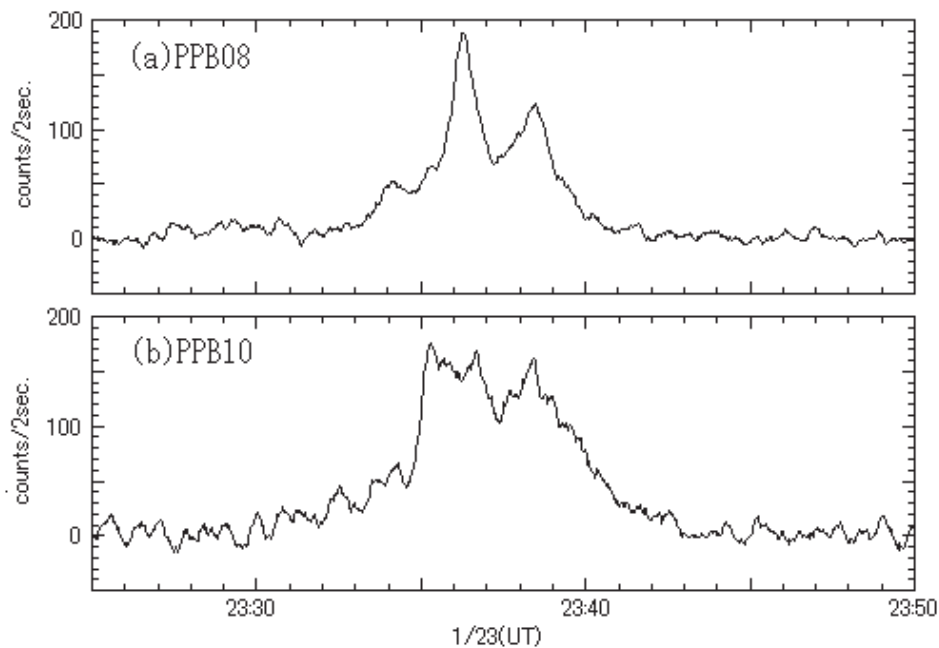


図 13 10 号機のデータを補正した後の検出器の 2 秒毎のカウント数

(a) 8 号機

(b) 10 号機のデータを 8 号機の高度に補正し、218 秒遅延させている。

### (3) 1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分

図 14 は、1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分の NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数で、(a) が 8 号機、(b) が 10 号機である。磁気緯度および MLT は 8 号機が  $64^\circ$  と 12.4h ~ 13.3h、10 号機が  $61^\circ$  と 13.0h ~ 13.9h である。8 号機では 18 時 30 分頃にカウント数が増加し、18 時 35 分頃までは 2000counts / 20sec 前後でほぼ一定値である。その後バースト状のイベントが重なるように発生している。それに対し、10 号機ではなだらかに変化するイベントが見られた。イベントの継続時間の半値幅は 8 号機が約 40 分、10 号機が約 20 分である。また、 $E_0$  の平均値は 8 号機で  $35.3 \pm 6.9 \text{ keV}$ 、10 号機で  $42.2 \pm 3.9 \text{ keV}$  であり誤差の範囲内で一致している。

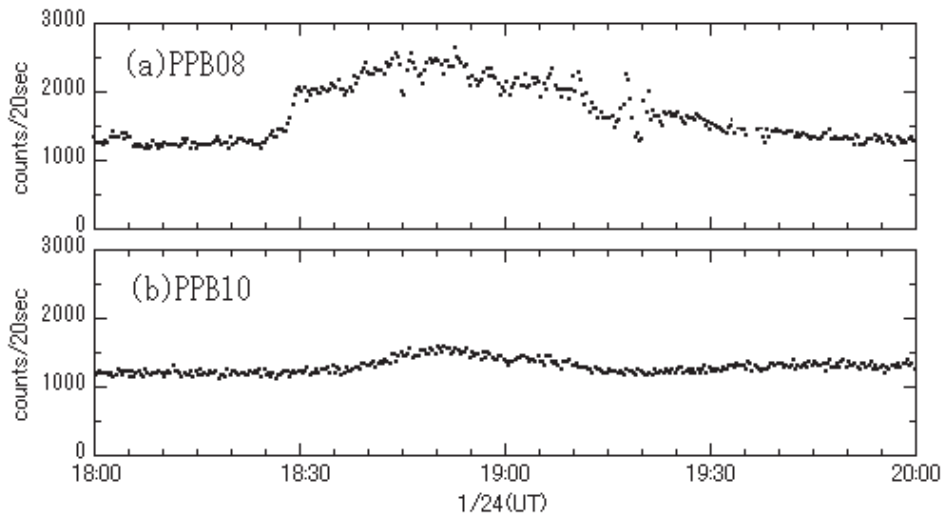


図 14 1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分の検出器の 20 秒毎のカウント数.  
(a) は 8 号機, (b) は 10 号機である.

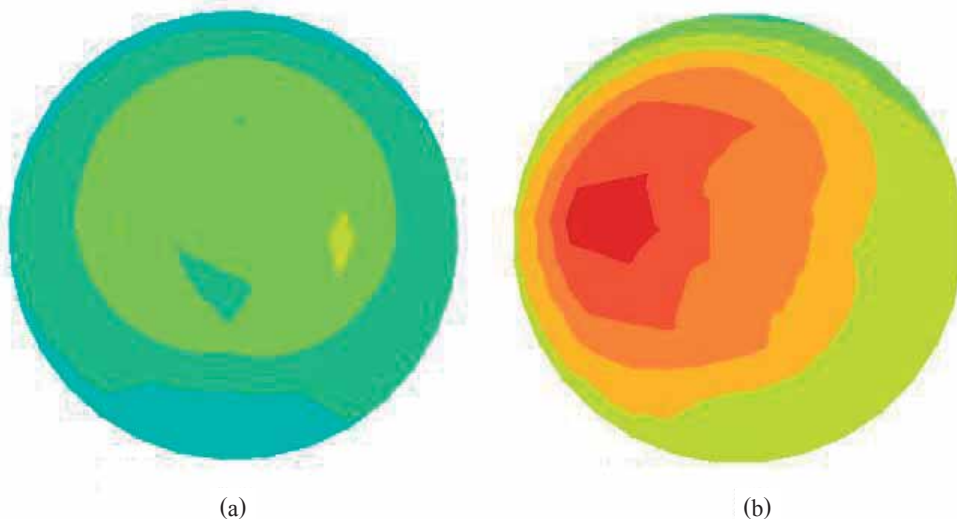


図 15 1 月 24 日 18 時 30 分から 19 時 30 分に 8 号機で観測された典型的なイメージ.  
(a) は 18 時 32 分 42 秒のイメージで, ほぼ一定値になっている時間帯.  
(b) は 18 時 44 分 14 秒でバースト状のイベントが起きているとき.

8 号機の, この間の典型的なイメージを図 15 に示す. (a) は 18 時 32 分 42 秒のイメージで一定値を取っている時間帯である. 視野全体が明るくなっており,  $E_0$  は  $34.8 \pm 3.2 \text{ keV}$  である. (b) は 18 時 44 分 14 秒でバースト状のイベントが起きているときである. 視野の西側の狭い範囲が明るくなっており,  $E_0$  は  $29.5 \pm 1.2 \text{ keV}$  である.

#### (4) 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分

図 16 は 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分の, NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数で, (a) が 8 号機, (b) が 10 号機である. 磁気緯度と MLT は, 8 号機がそれぞれ  $64.0^\circ$  と  $22.6 \text{ h} \sim 23.3 \text{ h}$ , 10 号機がそれぞれ  $60.9^\circ$  と  $23.3 \text{ h} \sim 24.0 \text{ h}$  である. Kp 指数は 5- から 6- で地磁気活動度は中程度であった.

AE 指数は前日の 1 月 24 日昼頃から変動が激しくなっており, オーロラ活動が活発化していることを示していた.

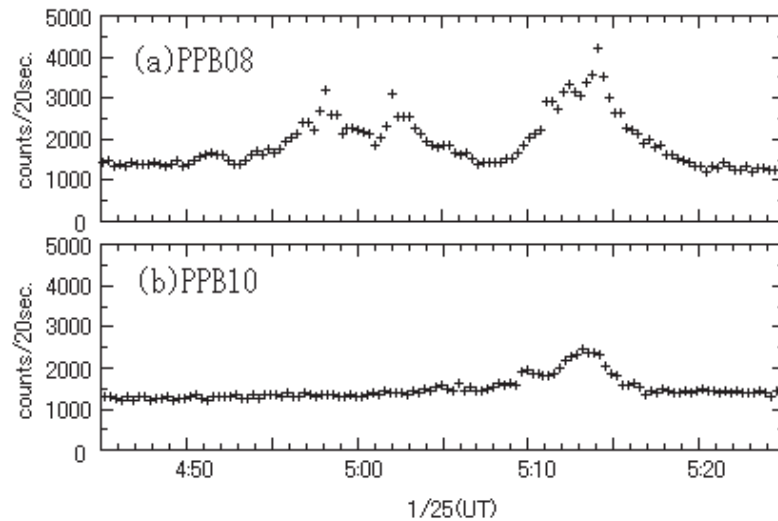


図 16 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分の検出器の 20 秒毎のカウント数.  
(a) は 8 号機, (b) は 10 号機である.

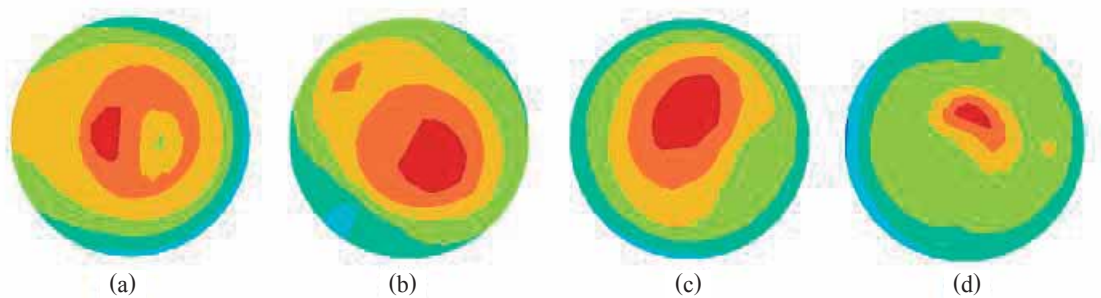


図 17 1 月 25 日 5 時前後に観測されたバースト状のイベント.  
(a) 4 時 58 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(b) 5 時 2 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(c) 5 時 14 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(d) 5 時 13 分に 10 号機で観測されたイベント.

表 3 8 号機, 10 号機の飛翔した緯度の範囲

	4 時 58 分	5 時 02 分	5 時 14 分
天頂角 (deg)	10	10	10
方位角 (deg)	169.1	319.3	71.7
気球緯度 (deg)	73.621	73.629	73.658
気球経度 (deg)	124.789	124.859	125.056

8 号機では 4 時 58 分, 5 時 2 分, 5 時 14 分に連続した 3 個のバースト状のイベントが見られる. 半値幅は, それぞれ 74sec., 110sec., 180sec. である. 半値幅内で求めた,  $E_0$  の平均値は, それぞれ  $24.1 \pm 0.4\text{keV}$ ,  $25.2 \pm 1.2\text{keV}$  と  $22.2 \pm 1.3\text{keV}$  で誤差の範囲内で一致していた. 2 秒間毎のカウント数を平滑化して求めた, これらのバースト状イベントの最も明るい時刻のイメージを図 17(a) ~ (c) に示す. 表 4 はこれらのイベントの天頂角と方位角および気球の地理的な緯度と経度である. イベントの天頂角と方位角を用いさらに気球の移動を補正して求めた, 高度 100km に投影したバースト状イベント間の距離は 1 番目と 2 番目が 24.9km, 1 番目と 3 番目が 31.7km, 2 番目と 3 番目が 17.0km であ

る。AXI の視野半径は約 58km であるので、3 個とも同じ視野内で捉えられているといえる。したがって、8 号機で観測されたイベントは、天頂方向の領域で生じている一連のバースト状の X 線イベントであると言える。

この時間帯に 8 号機は 3 例のバースト状のイベントを観測しているが、10 号機で観測されたイベントは 5 時 13 分に見られる半値幅 210sec. のイベント 1 例のみである。半値幅内で求めた、 $E_0$  の平均値は  $28.9 \pm 1.9 \text{ keV}$  である。最も明るい時刻のイメージを図 17(d) に示す。天頂角  $10^\circ$  の付近が最も明るくなっている。このイベントも、8 号機と同様に天頂方向の領域で生じているバースト状の X 線イベントであると言える。時間的にも 8 号機の 3 番目のバースト状イベントと同時に発生しており、半値幅も似た値となっている。この時間帯の AE 指数は変動が激しくなっており、オーロラ活動が活発化していることより、8 号機で 2 番目のバースト状イベントが発生した後に、オーロラの活動領域が低磁気緯度側まで広がって 10 号機でもバースト状イベントが観測された可能性も考えられる。しかし、 $E_0$  に  $6.7 \text{ keV}$  の差があり、両イベントの関連は明確でない。

## 5. まとめ

2003 年 1 月に行われた南極周回気球実験で、8 号機と 10 号機でオーロラ X 線イベントがほぼ同時に観測されている時間帯を取り上げ、その時間帯に観測されたオーロラ X 線イベントについて調べた。

1 月 22 日 23 時 40 分に、10 号機で、オーロラ X 線が視野全域で明るさを増しながら、オーロラ X 線源の明るい領域が、速さ  $130 \text{ km/min.}$  で天頂方向から北東に向かって移動していくようすが観測された。

1 月 23 日 23 時 30 分から 23 時 40 分にかけて両機で観測されたイベントでは、 $E_0$  は 8 号機が  $80.5 \pm 2.8 \text{ keV}$ 、10 号機が  $80.0 \pm 7.9 \text{ keV}$  であり、発生していると推定される磁気緯度帯も約  $63^\circ$  で一致していた。また 8 号機の X 線強度変動と高度補正した 10 号機の X 線強度変動は強い相関を持っていた。これらは、オーロラ X 線の発光領域が速さ  $180 \text{ km/min.}$  で、西に向かって 218 秒間に約  $650 \text{ km}$  移動したことを示唆している。

1 月 24 日のイベントでは、8 号機の観測から、空間的にほぼ一様に発光している領域で、よりソフトなバースト状イベントが発生していた。また、10 号機ではなだらかに変化するイベントが見られ、 $E_0$  は 8 号機と誤差の範囲内で一致していた。

また、1 月 25 日 4 時 58 分から 5 時 14 分にかけて 8 号機で連続して 3 個のバースト状オーロラ X 線イベントが見られた。それらは天頂方向の領域で生じており、 $E_0$  が誤差の範囲内で一致していることより一連のバースト状 X 線イベントであると言える。また、10 号機でも、8 号機と同様な天頂方向の領域で生じているバースト状の X 線イベントが見られた。時間的にも 8 号機の 3 番目のピークと同時に発生しており半値幅も似た値となっているが、両イベントの関連は明確でない。

## 謝 辞

2003 年 1 月から 2 月の PPB 実験を実施された第 43 次及び第 44 次日本南極観測隊の方々に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] Winckler J.R. and Peterson L. Large auroral effect on cosmic-ray detectors observed at  $8 \text{ g/cm}^2$  atmospheric depth, Phys. Rev., **108**, 903, 1957
- [2] Nagata T., Fukunishi H., Nishimura J., Kodana M. and co-members of PPB working group, Polar patrol Balloon project in Antarctica, Men. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **38**, 156, 1985
- [3] Nishimura J., Kodama M., Tsuruda K., Fukunishi H. and co-members of PPB working group, Feasibility studies of Polar Patrol Balloon, Adv. Space Res., **5**, 87, 1985
- [4] Nishimura J., Yajima N., Akiyama H., Ejiri M., Fujii R. and Kokubun S., Polar Patrol Balloon, J. Aircraft, **31**, 1264, 1994
- [5] 鈴木裕武, ポーラーパトロールバルーン (極域周回大気球) 観測によるオーロラ X 線の広域空間分布およびエネ

ルギースペクトル特性, 平成5年度立教大学学位論文, 1995

- [6] Kadokura A., Yamagishi H., Sato N., Ejiri M., Hirose H., Yamagami T., Torii S., Tohyama F., Nakagawa M., Okada T. and Bering E. A., Polar Patrol Balloon experiment in Antarctica during 2002-2003, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **16**, 157, 2002
- [7] 中村 智一, PPB8, 10号機によるオーロラX線イメージ観測, 大阪市立大学理学研究科数物系専攻2003年度修士論文, 2004
- [8] 藤井森, 笠原克昌, 齊藤芳隆, 松坂幸彦, 並木道義, 太田茂雄, 鳥海道彦, 山上隆正, 山岸久雄, 村上浩之, 内山貞幸, 紺野祐司, 南極周回気球で用いたイリジウム通信システムと電源供給システムの評価と改良, 平成15年度大気球シンポジウム集録, **59**, 2003
- [9] 藤井 森, 南極周回気球で用いられた新しいHKシステムの評価と改良, 芝浦工業大学大学院工学研究科電気工学専攻2003年度修士論文, 2004
- [10] Nakamura T., Ebihara Y., Ejiri M., Kadokura A., Matsumoto N., Matsuzaka Y., Mukai K., Murakami H., Nakagawa M., Namiki M., Oshima N., Saito Y., Sato N., Suzuki H., Takahashi W., Uchida M., Yamagami T., Yamagishi H., Yamamoto M., and Yamauchi M., Observations of hard X-rays of auroral origin with PPB No.8 and 10, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **18**, 10, 2004.
- [11] 齊藤芳隆, 松坂幸彦, 並木道義, 鳥海道彦, 太田茂雄, 山上隆正, 山岸久雄, 江尻全機, 佐藤夏雄, 海老原祐輔, 門倉昭, 片寄祐作, 富田裕基, 藤井森, 笠原克昌, 村上浩之, 内山貞幸, 紺野祐司, 南極周回気球のハウスキーピングシステムの評価, 平成15年度大気球シンポジウム集録, p55, 2003
- [12] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index-j.html>
- [13] 西尾泰穂, 東山文雄, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉昭, 山上隆正, 並木道義, 松坂幸彦, 齊藤芳隆, 南極周回気球(PPB)による高精度磁場観測, 平成15年度大気球シンポジウム集録, p83, 2003
- [14] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index-j.html>
- [15] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index-j.html>
- [16] Hirasima Y., Murakami H., Nakamoto A., Okudaira K., Suzuki H., Yamagami T., Ohta S., Namiki M., Nishimura J., Miyaoka H., Sato N., Fujii R. and Kodama M., A Balloon Observation of Auroral X-Ray Images in the Northern Auroral Zone, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **47**, 44, 1987



# スーパープレッシャー気球搭載用燃料電池の実証フライト

鵜野 将年\*, 嶋田 貴信\*, 小川 啓太\*\*, 野口 大輔\*\*\*,  
有山 裕介\*\*\*, 福澤 直也\*\*\*, 内藤 均\*\*\*\*, 曾根 理嗣\*, 齋藤 芳隆\*

## Demonstration Flight of a Fuel Cell System for Super-Pressure Balloons

By

Masatoshi UNO\*, Takanobu SHIMADA\*, Keita OGAWA\*\*, Daisuke NOGUCHI\*\*\*,  
Yusuke ARIYAMA\*\*\*, Naoya FUKUZAWA\*\*\*, Hitoshi NAITO\*\*\*\*,  
Yoshitsugu SONE\* and Yoshitaka SAITO\*

**Abstract:** Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), which generate electrical energy as long as they are supplied with fuels and oxidants, have been receiving significant attentions so that they offer higher specific energy densities than existing battery technologies in high-energy applications. We had been developing a 100 W-class fuel cell system that keeps electrolyte membrane well-hydrated without external humidification and can operate stably even under low pressure condition. The system aiming for super-pressure balloons had been tested emulating stratospheric conditions. Based on the previous works, the demonstration flight using the large balloon equipping the fuel cell system was launched to verify its performance in a practical high-altitude environment.

**Key words:** Fuel Cell, Demonstration Flight, High Altitude, Super-Pressure Balloon

### 概 要

水素と酸素の電気化学反応を利用したエネルギー変換デバイスである固体高分子形燃料電池は大電力量を必要とするミッションにおいて従来の二次電池よりも小型軽量化が図れる電源システムであるため、多方面において注目を集めている。著者らはこれまでに外部からの加湿を行うことなく電解質膜を適切な湿潤状態に維持することが可能であり、且つ低圧環境下においても安定して動作できる 100 W 級の燃料電池システムを開発し、スーパープレッシャー気球搭載を目指して成層圏環境を模擬した動作試験を行ってきた。これらの成果を踏まえ、本燃料電池システムを大気球に搭載し、実証フライトを実施することにより実環境下における特性評価を行ったので報告する。

### 1. はじめに

燃料電池は水素と酸素の電気化学反応を利用したエネルギー変換デバイスであり、水素と酸素を供給し続けることで継続的に電力を供給することが可能なため、大電力量を要するミッションにおいてリチウムイオン電池等の二次電池よりも小型軽量化が図れる電源システムである<sup>[1],[2]</sup>。小型軽量かつ長時間に渡る電力供給が必要とされるスーパーブ

---

\* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

\*\* Advanced Engineering Services

\*\*\* Hosei University

\*\*\*\* Institute of Space Technology and Aeronautics (ISTA) /JAXA

レッシャー気球において、燃料電池は特に有望な電源の候補の一つである。

一般的に、燃料電池を連続的に安定動作させるためには燃料電池内部をある程度の湿潤状態に維持する必要がある。空気を酸化剤として用いる系においてはガス組成の79%は電池反応に不活性な窒素であるため、セル電圧が低くなると共に燃料電池内部の水蒸気分圧も低下する。よって燃料電池内部の湿潤状態を維持するためには外部に加湿器が必要となるため、システムが複雑となってしまう。また燃料電池の内部の湿潤状態は圧力に大きく依存するため、安定な発電を維持するためには系内の圧力を一定範囲内に保つ必要がある。高高度を飛翔する気球や成層圏領域に滞空する飛行船、あるいは宇宙機等に適用する場合においては、高度の上昇により外気圧が低下して減圧状態となるため、地上とは動作環境が大きく異なる。

このような技術課題に対して、我々は純酸素を酸化剤として用いる系において、外部加湿器を用いず燃料電池反応による生成水のみで内部の湿潤状態を維持し、安定な発電が持続できることを見出してきた。これにより燃料電池システムの構成を簡素化し、また、外気圧の変動によらず燃料電池系内の圧力を一定以上に保つことが可能な圧力制御機能を具備した100 W級の燃料電池システムを開発し、地上試験にて成層圏環境を模擬した動作実証試験を行ってきた<sup>[3],[4]</sup>。

本実験では、将来のスーパーレッシャー気球による長時間飛翔体用電源として開発を進めてきた燃料電池を大型気球B50-50号機に搭載し、実環境での動作実証試験により各種データを取得するとともに、適用性評価を行った。

この技術開発並びに気球実証フライトにより得られた成果は燃料電池の気球への利用のみならずロケット・人工衛星等宇宙機への適用、民生品への展開を図ることができ、ジオフロントなどの閉鎖環境での適用技術にも道を開くことを期待している。

## 2. フライト実験概要

### 2.1. 燃料電池システム

燃料電池システムは大きく分けて燃料電池部、ガス供給系、電気系制御部、により構成されている。

#### 2.1.1. 燃料電池部

小型軽量化が可能であり、且つ、低温においても安定して動作する固体高分子形燃料電池を用いた。燃料電池の発電有効面積は162 cm<sup>2</sup>であり、16セル直列でスタックを構成している。セルスタックはセパレータ、MEA (Membrane Electrode Assembly)、集電用シートにより構成され、それらをエンドプレートではさみ、タイボルトで固定してセルの気密性を保っている。燃料には純水素、酸化剤として純酸素をそれぞれ使い、燃料電池内部にてガス流を対向させることにより無加湿、つまり外部加湿器なしで安定した連続運転を可能とした。

#### 2.1.2. ガス供給系

ガス供給系の系統図をFig. 1に示す。水素と酸素の高圧ガス容器には内容積がそれぞれ2.8 Lと2.0 Lのアルミ・カーボンFRP容器 (JFE コンテナ社製, ACB2.0, ACB2.8) を用いた。搭載用の高圧容器とは並列に逆止弁を介して汎用ガスボンベ (非搭載品) を接続することにより、啗合わせ試験時やフライト前の動作確認時においては汎用ボンベからガスを供給し、搭載容器内のガス消費量を極力抑えた。ガス流量の制御には真空中においても動作可能な層流差圧式質量流量コントローラ (ACE 社製, AFC-150) を用いた。ガス供給系は水素ガス供給系と酸素ガス供給系により構成されており、供給ガスのうちの未反応分はそのまま外部に排気する開放型を採用した。開放型において未反応ガスをそのまま系外に排気する場合、燃料電池は外部環境から閉鎖されていないため、高度の上昇と共に燃料電池内部の圧力は低下してしまう。燃料電池内部が真空環境にさらされるとMEA内の水分は蒸発してしまい、安定した運転の継続が困難となる。そこで飛翔時においても燃料電池内の圧力が一定以上となるよう、燃料電池の下流部に背圧弁を設けた。スタック出口から排気口までの配管には発電により生成した水が凍結するのを防止するためにヒーターとその周囲に断熱材を施した。燃料電池と高圧容器の間に設けられた電磁弁は、万が一の異常発生時に供給ガスをコマンド操作により遮断するためのものである。また高圧容器と排気口の間に設けられた電磁弁は発電終了後に容器内の残留ガスをコマンド操作により排気するためのものであり、これによりフライト終了後に燃料電池システムを海上にて回収する際に作業者の安全性を確保することができる。

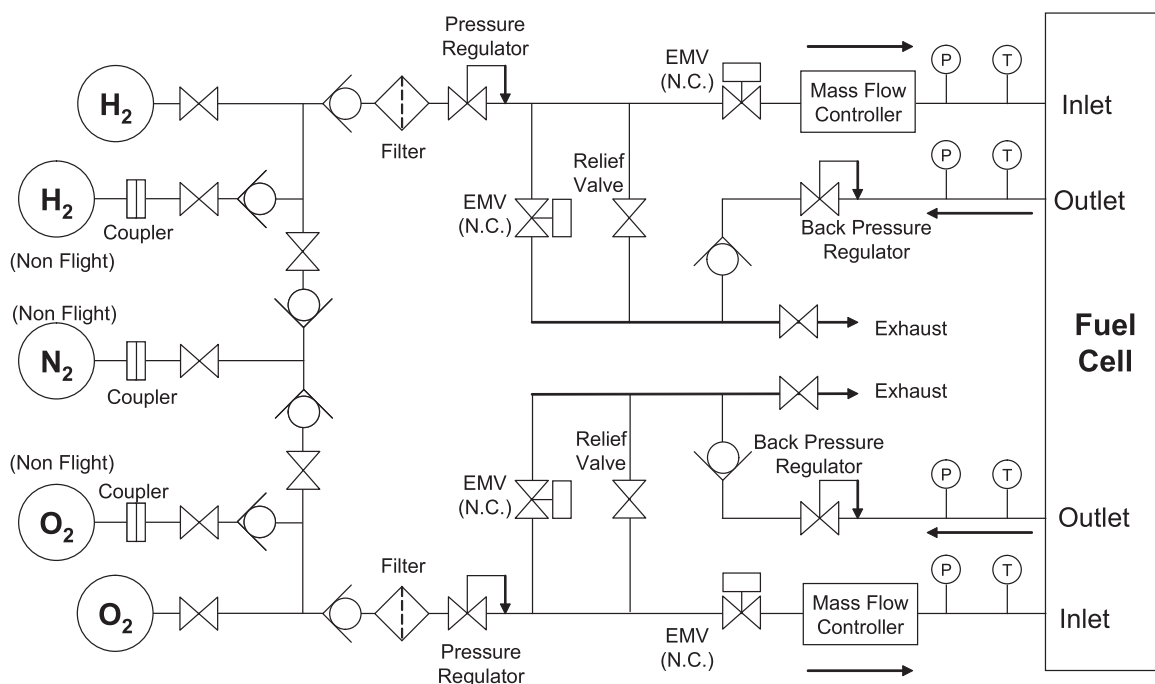


Figure 1. A gas distribution subsystem for a non-humidified fuel cell system.



Figure 2. A photograph of a fuel cell stack and a gas distribution subsystem.

燃料電池部とガス供給系が一体となったシステムの外観を Fig. 2 に示す。燃料電池部とガス供給系が一体となったシステムの寸法は  $50 \times 50 \times 60$  cm、重量は約 40 kg（燃料電池部は 18.6 kg）である。

### 2.1.3. 電気系制御部

燃料電池システムにおける電気系統図を Fig. 3 に示す。ガス流を制御する電磁弁や質量流量コントローラ、各種信号を増幅させるアンプ類、燃料電池の負荷となる電子負荷、などにより構成されている。各機器の接続には主に D-sub コネクタやプラスチックコネクタを用いた他、拡張性に富み、不具合時においても各端子を直接テスターでチェックすることが容易な DIN レールタイプの端子台を要所において採用することにより、作業の効率化を図った。

燃料電池の起動手順においては流量コントローラや電磁弁などの搭載機器を用いてガス流量ならびに燃料電池の出

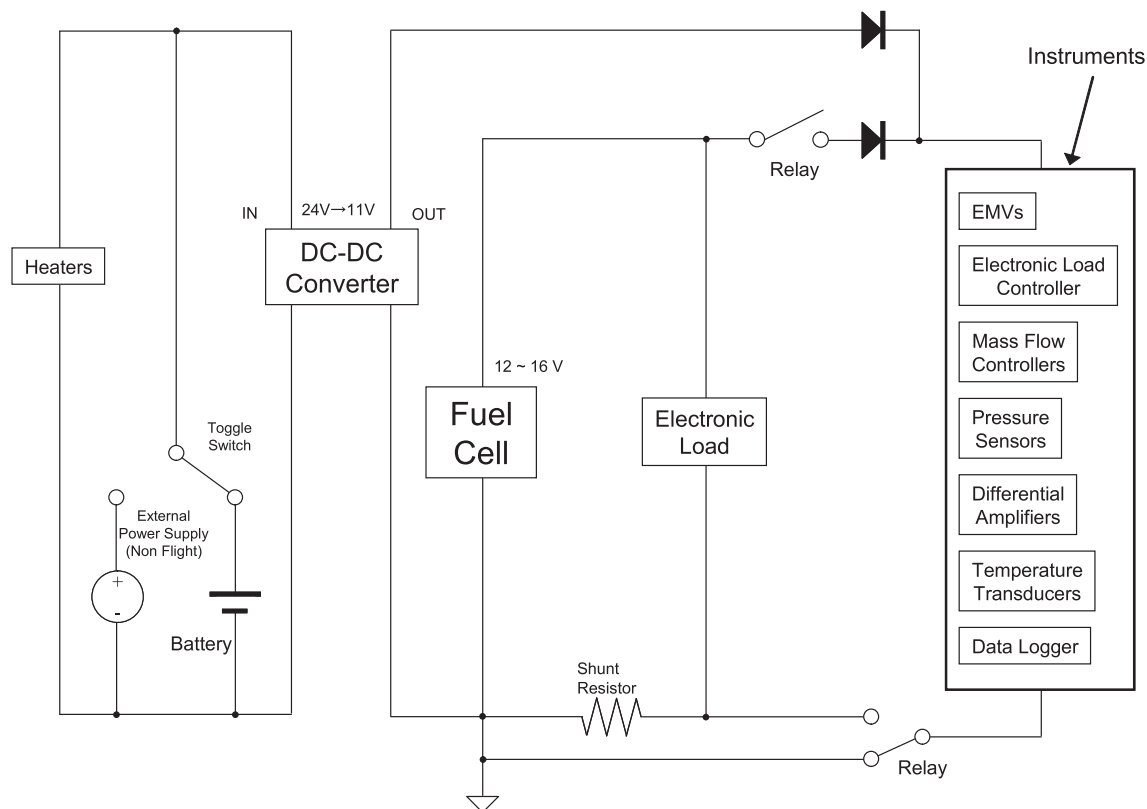


Figure 3. A schematic drawing of the electronic subsystem for the fuel cell system.

力を徐々に増加させて起動する必要があるため、燃料電池以外から搭載機器に電力を供給する必要がある。本システムでは、燃料電池の起動時においては非搭載品の外部安定化電源もしくは搭載バッテリーを用いて機器を動作させ、起動初期において燃料電池は搭載電子負荷に対して出力を行う。燃料電池の起動が完了して出力が十分得られた後はパワーリレーにより搭載機器への電力供給経路が切り替えられ、燃料電池は電子負荷と搭載機器の双方に対して電力を供給する燃料電池駆動モードに切り替えられる。この時、ヒーターを除く全ての機器の電力は燃料電池によって供給され、バッテリーはヒーターへの電力供給と搭載機器のバックアップ電源として機能する。バッテリーと燃料電池の出力はダイオードを介して並列に接続されているため、燃料電池の出力異常時においてもバッテリーと燃料電池は無瞬断で切り替えられシステムの停止には至らなくなっている。また、本システムにおいてはコマンド操作による気球バス部からの接点信号により、ガス流量の増減、負荷電流の増減、電磁弁の開閉（遮断および排気）、をそれぞれ行うことが可能である。

## 2.2. 計測項目

本燃料電池システムにおける計測項目は、セル電圧（cell 1~16）、スタック電圧、燃料電池の負荷電流、供給ガス流量、燃料電池の出入口におけるガス圧力、燃料電池温度（4箇所）、燃料電池の出入口における供給ガス温度、である。それぞれの項目は必要に応じて各種アンプにより 0~5 V の信号に変換され、搭載データロガーにより 1 秒間隔にてデータ収集を行った。

## 2.3. 運転条件

燃料電池の起動手順として、発電開始前に窒素ガスによる燃料電池内部のパージを約 5 分間行った後に水素と酸素の供給を開始した。燃料電池の開回路電圧が十分に上昇したのを確認した後、2.0 A の負荷電流にて 10 分間の発電を行い、最終的に負荷電流を 4.0 A まで上昇させた。放球後、気球が水平浮遊に移行したのを確認した後にコマンド操作により負荷電流を約 8.0 A に上昇させた。放球後の高度の上昇に伴い外気圧が低下するのを考慮し、燃料電池内の圧力は 101.3 kPa(gauge) となるよう背圧弁を調節した。背圧弁の圧力制御特性にはガス流量依存性があるため、アノード（水



素極)とカソード(酸素極)における消費ガス量の差に起因する差圧が発生しないよういずれの電流値においても水素ガス利用率は50%, 酸素ガス利用率は33%とし, それぞれの出口ガス流量が等しくなるようガスを供給した。

### 3. フライト結果

平成19年8月30日AM6:02に本燃料電池システムを搭載した大型気球B50-50号機を三陸大気球観測所より放球した。動作実証試験により得られた結果をFig. 4に示す。フライト時における燃料電池システムの起動には, 搭載バッテリーや搭載燃料の消費を極力抑えるために, 外部安定化電源ならびに汎用ガスボンベを用いた。燃料電池の起動フローとして, 地上でのシステムセットアップ後の4:57に窒素パージを開始し, パージ終了後の5:03に水素と酸素の供給を開始した。水素と酸素の供給に伴い, 燃料電池スタックの開放電圧は14.9 Vまで上昇した。開放電圧が十分安定したのを確認した後, 5:07に2.0 Aの負荷電流にて発電を開始した。5:12にはガスの供給量を増加させ, 5:17に負荷電流を4.0 Aまで上昇させた。その後, リレーを駆動させて機器への電力供給経路を切り替えることによりシステムを燃料電池駆動モードに切り替え, 定常運転状態へと移行させた。定常運転状態における発電電力は約50 Wであった。5:20頃に見られる流量や電流値の急激な変動は, 地上でのコマンド送受信の動作確認によるものである。5:24には外部安定化電源を切り離し, 搭載バッテリーによるヒーターへの通電ならびに搭載機器への電力供給のバックアップを開始し, 5:25には汎用ガスボンベを切り離して搭載容器からのガス供給を開始した。その後, 約30分間に渡る気球部へのヘリウム充填作業を経て, 6:02に本燃料電池システムを搭載した大型気球B50-50号機は放球された。放球約2時間後の8:00に流量増加コマンドを, 直後の8:03には負荷電流増加コマンドをそれぞれ送信し, ガス流量と負荷電流とともに約2倍に増加させ発電電力を増加させた。この時の発電電力は約90 Wであった。8:55には搭載容器内残留ガスの排気コマンドを送信し, 燃料電池の発電実験を終了した。

各セルの電圧は負荷電流約4 A時において0.75~0.84 V, 発電電力増加後は0.72~0.80 Vとばらつきはあるものの, 非常に安定した特性が得られた。放球後, 時間の経過とともにセル電圧の僅な低下が確認されたが, これは高度の上昇に伴い燃料電池内の圧力が低下したためであると考えられる。生成水によるフラッディングや流路の閉塞によりセル電圧が低下することが危惧されたが, このときの運転条件においては安定した発電を維持できることが確認された。セルNo.16の電圧に関してはガス供給直後の開回路電圧は他のセルとほぼ同じであるが, 電流を流すと他のセルと比較して大きく低下した。この原因として, No.16のセルはスタックの最下部に位置しているため, 生成水が蓄積しフラッディングが発生しやすく, フライトに至るまでの各種地上試験においてMEAが劣化し膜抵抗が増大したためであると考えられる。

燃料電池内の圧力は地上においては約200 kPa(abs)であり, 放球後は高度の上昇, つまり周囲の気圧が低下するとともに下がり, 高度約20 km以上においてはほぼ100 kPa(abs)で運転がなされていることから, 背圧弁が正常に動作していることが確認できた。高度の上昇と共にアノード側の圧力が比較的滑らかに低下したのに対して, カソード側の圧力はほぼ一定の周期で段階的に低下したことが確認された。この圧力変動はアノード側ではほとんど発生しておらず, カソードの入口側と出口側の両方において発生していることから, 燃料電池内部ではなく燃料電池カソードの下流部における流路の閉塞が原因であると考えられる。燃料電池の下流部には燃料電池の圧力を調節する背圧弁が設けられており, 背圧弁内部には圧力調整機構のため流路の細い部分が存在する。また, プロトン交換膜を用いた本燃料電池において生成水は主にカソードから排出される。この生成水が背圧弁内部の流路を一時的に閉塞し, 高度の上昇に伴い背圧弁の出入口の差圧が増加すると流路を閉塞している水が外に排出されることにより周期的な圧力変動が発生したものと考えられる。8:00以降にカソードの圧力が比較的激しく変動しているのは, 発電電力増加により水の生成量が増加したためであると考えられる。今回の運転条件においてはこのような圧力変動が燃料電池性能に悪影響を及ぼすことはなかったが, 圧力変動と同期したセル電圧の微小な変動が確認されていることから, 運転条件や用途によっては大きなノイズ源になりかねないと考えられる。その他, アノード/カソード間の差圧の発生や急激なカソード圧力変動によるMEAの損傷などに繋がる恐れがあるため, このような流路閉塞が発生しない運転条件や背圧弁の取り付け姿勢などを模索する必要があると考えられる。

スタック温度は反応に伴う発熱により発電開始から徐々に上昇し, 発電電力増加後の温度の上昇速度は高くなった。



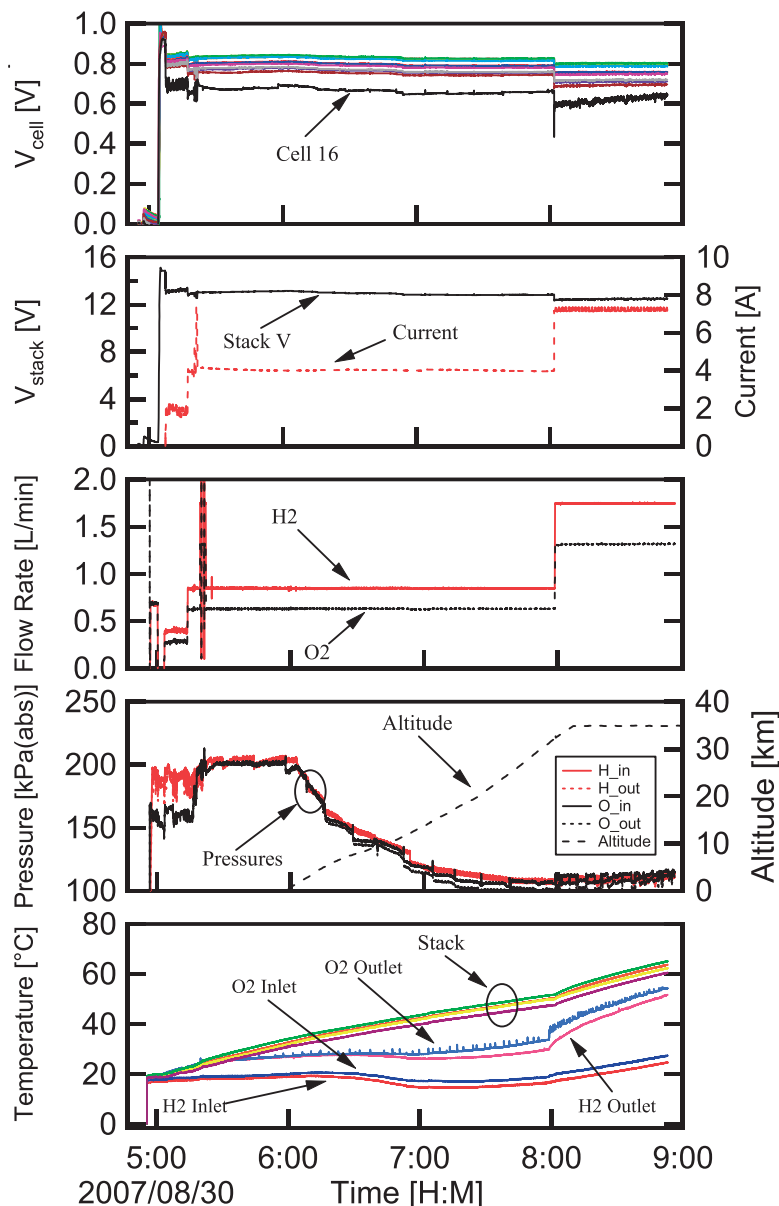


Figure 4. Performance of the fuel cell system during the demonstration flight. From the top to the bottom, cell voltage, stack voltage and load current, flow rate, pressure or altitude, and temperature are plotted.

燃料電池出口におけるガスの温度は入口における温度よりも高くなった。これは、供給ガスが燃料電池内部を通過する間に燃料電池自体の熱により暖められたためである。また燃料電池出口側のカソードにおいて微小な温度変動が確認され、発電電力増加後においては更に頻繁に発生した。これは、生成水量が多く燃料電池内部の相対湿度が高くなるような運転条件において発生する現象であり<sup>[5]</sup>、燃料電池内部に溜まった水が供給ガスにより排出される過程に起因しているものと考えられる。また、この微小な温度変動の一部は前述のカソードの圧力変動にも同期しており、出口圧力の瞬間的な低下に伴い流速が増加し、燃料電池内部で温められたガスがまとまって排出されたためであると考えられる。

#### 4. まとめ

スーパープレッシャー気球用電源として開発を進めてきた燃料電池システムの実証フライト実験を実施した。本燃料電池システムにおいて安定した燃料電池出力が得られたが、更なる出力の安定化ならびに内部の水管理のために

はシステムとしての改善や運転条件の模索などが必要であることが分かった。今後は得られたデータより実利用に向けた技術の成熟を図りつつ、ガスを系外に排出しない閉鎖型燃料電池の開発を推進していく予定である。

## 謝 辞

本研究は科学研究費補助金（基盤研究(A)、スーパープレッシャー気球による長時間飛翔システムの開発、課題番号16206081）、ならびに新エネルギー・産業技術総合研究機構（NEDO）のからの助成（宇宙及び民生展開を目指した無加湿／閉鎖環境用固体高分子形燃料電池の開発）により実施されたものである。関係各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] K. A. Burke, “Fuel Cells for Space Science Applications,” 1<sup>st</sup> International Energy Conversion Engineering Conference, AIAA 2003-5938, (2003).
- [2] F. Barbir, T. Molter and L. Dalton, “Efficiency and Weight Trade-off Analysis of Regenerative Fuel Cells as Energy Storage for Aerospace Applications,” International Journal of Hydrogen Energy, 30, pp. 351-357, (2005).
- [3] 内藤均, 曾根理嗣, 瀬上剛, 上野三司, 曾根理嗣, 岐部公一, “固体高分子形燃料電池のパッシブ温度制御下での無加湿連続運転の研究”, 第46回電池討論会, 3A-25, pp134-135, (2005)
- [4] 内藤均, 瀬上剛, 岐部公一, 曾根理嗣, 鶴野将年, 斎藤芳隆, “低圧環境下での固体高分子形燃料電池の適用性評価”, 第14回燃料電池シンポジウム, A7, pp25-28, (2007)
- [5] 福澤直也, 曾根理嗣, 内藤均, 有山裕介, 野口大輔, 須磨健太郎, 鶴野将年, M. Niklas, 新井和吉, 川上忠重, “水素／酸素を供給する固体高分子形燃料電池の無加湿運転時における出力安定性”, 第47回電池討論会, 3A-16, pp92-93, (2006)