

ISSからの放出衛星（EGG）の搭載機器の動作確認及び 運用確認試験（B-EGG）の報告

JAXA/ISAS：土屋直大、山田和彦

東京大学新領域：鈴木宏二郎

日本大学：今村幸、松丸和誉

東京工業大学：秋田大輔

岡山大学：永田靖典

東京農工大学：森吉貴大、金丸拓樹

東京理科大学：荒谷貴洋

MAAC研究開発グループ

1. はじめに

展開型柔軟エアロシェルを用いた大気圏突入システムの開発の一環として、ISSからの衛星放出の機会を利用し、実際にエアロシェルを搭載した小型衛星による大気圏突入の実証試験が計画されている¹⁾。この実験のために開発を進めている衛星が図1に示すEGG（re-Entry satellite with Gossamer aeroshell and GPS/Iridium）であり、地球低軌道から大気圏突入までの領域におけるエアロシェルの挙動及び、空力加熱等のデータ取得や、次のステップにて必要となる要素技術の軌道上実証を行う事を目的としている。ミッション概要を図2に示す。特に、EGGにおいて採用している民生品の宇宙用GPS受信器による位置測位とイリジウム衛星経由のSBD（Short Burst Data）通信によるミッション中のフライトデータのダウンリンク及び、地上からのコマンド送信は運用上、今後のキーとなる技術である。そこで、小型衛星EGGのフライトに先立って、今回の気球実験の機会を利用し、搭載機器のエンジニアリングモデルを小型気球で成層圏まで飛翔させて、動作確認及び、運用の手法の確認を行った。本稿では、その結果について述べる。

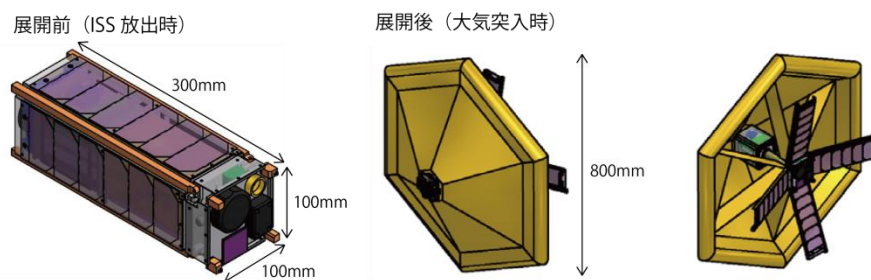


図1. 柔軟エアロシェル実証超小型衛星EGGの概要図

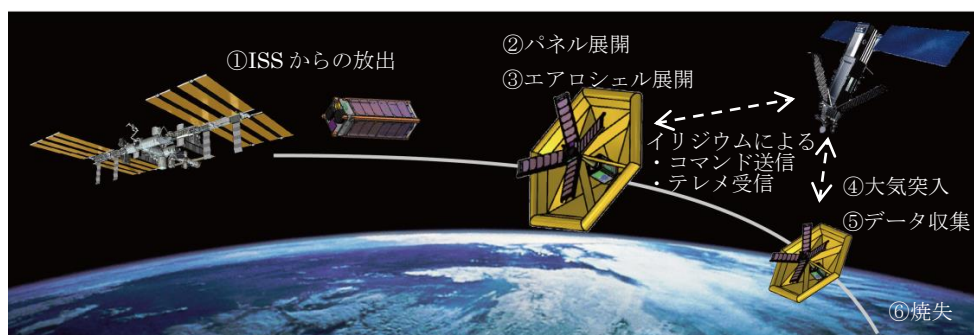


図2. EGGミッション概要

2. B-EGGと本気球実験の目的

B-EGGはEGGの開発にあたり必要な知見を得るために製作したEM(エンジニアリングモデル)でありFM(フライトモデル)のEGGとほぼ同等の機能を有している。今回の実験では、このB-EGGを気球に搭載し長時間、長移動距離、高高度の環境を利用して、以下の点について検証を行う事を目的としている。

1. EGG衛星搭載品及びシステムの健全性
2. イリジウム衛星のSBD通信による運用手法

特に、イリジウム衛星による通信は、間欠的かつ送受信共にタイムラグが存在するため、運用にあたり確実に実験シーケンスを実行することや、間欠的なデータから機器の状態を把握する事は、EGGミッションの成否に直結する重要な技術課題であるため、今回の実験により実運用性について確認を行った。

3. フライト結果

3.1. イリジウム通信

B-EGGには上面と下面に独立したSBD通信用のアンテナが配置されており、2系統とも同じデータを送信する冗長構成となっている。今回の実験における放球後の各アンテナの通信状態を表1に示す。上面アンテナは全体を通して30秒以下に1回の間隔で通信に成功しており、フライト全体で308件のデータを受信することができた。一方で下面アンテナはフライト全体を通して57件と通信成功回数が少ないが、これはアンテナが下向きであったため、自身が陰となり視野内にイリジウムの衛星をとらえにくかったためと考えられる。下降中において下面アンテナの通信間隔が改善したのはB-EGGの姿勢が変動したために通信衛星とのリンクが確立しやすくなったためと考えられる。また、地上からB-EGGへの通信回数はフライト全体で45件、コマンドにすると92件の指示を送信する事に成功し、平均1分以上の通信遅延が存在したものの、ほぼ全ての実行を確認する事ができた。

表1. フライト中のSBD通信状態

(a) B-EGGからの送信データ

アンテナ位置	総送信数	送信数		平均通信間隔	
		上昇中	降下中	上昇中	降下中
上面	308	195	113	27.4	24.4
下面	57	33	24	97.8	60.9

(b) B-EGGへのコマンド送信

アンテナ位置	総送信数	送信数		通信遅延 ^{*1}	
		上昇中	降下中	平均[s]	最大[s]
上面	44	26	18	76	248
下面	1	0	1	N.D ^{*2}	N.D ^{*2}

*1. コマンド実行履歴から算出できるモノだけを抽出(全45件中25件の値を利用)

*2. 実行予約コマンドのため受信時刻不明により算出不可

3.2. フライト中の運用

SBD通信のようなデータの送受信が間欠的かつ時間差が生じる通信による運用を行うため、B-EKGは事前に6個までコマンドを予約しメインカウンタをトリガとして指定時刻にコマンドを実行できるようになっている。本実験においても、実験シーケンスのような重要なコマンドは予約コマンドとして事前に登録しておき、指定時刻が過ぎた後に、テレメータデータにより正常に実行されたかどうかを確認する運用を行った。今回の実験では、1. 高度が15000m以上、2. バッテリー温度が-10degC前後、の2点をシーケンスの開始目安とした。

表2にフライト中の主な運用状況をまとめた。今回の実験では、フライト時間2時間19分の中で、全ての搭載機器の起動を遠隔で行い、ほぼ全ての機器の正常な動作を確認する事ができた。特に、懸案事項であったSBDによる実験シーケンスの実行も、予約コマンドが実行され、各部が動作する過程のデータも取得でき運用上問題が無いことが示された。

表2. フライト中の主な運用状況

時刻	運用	コマンド	説明
	放球前	BAT2を負荷から切断 GPS FireFlyモード	電池を温存するためにB系を負荷から切断 GPS受信器を小リソースの宇宙用GPSに設定
5:02	放球		天候:小雨 風速:15 m/s 気温:17.8degC
	搭載機器動作確認 撮影	CAM6、CAM4撮影	センサ及び搭載カメラの動作を確認 下方向3枚、側面1枚の写真を撮影
5:43	予約コマンド送信	BAT2を負荷に接続 クリティカル許可 パネル展開 CO2ボンベ開封	温存したバッテリーを接続 コマンド許可フラグをON 展開機構解除系：A系5秒動作、B系3秒動作 ボンベ開封用SMA：ヒーター150秒間 ON
5:56	実行確認		上記の予約コマンドの実行及び動作を確認 シーケンス開始時の高度：約19.7km バッテリー温度：A系-6.2degC、B系-9.8degC
6:01	予約コマンド送信	電磁弁 ON	エアロシェル展開用の電磁弁1秒 ONを6回
6:04	実行確認		配管圧の低下から電磁弁の動作を確認
	撮影	CAM2、CAM3、 CAM4撮影	側面3枚の写真撮影
6:28	最高点到達		高度31.7km
	撮影	CAM1撮影	上方向1枚の写真撮影
6:50	GPS切り替え	GPS NoVatelモード	高機能の宇宙用民生GPSに切り替え
	撮影	CAM5撮影	側面1枚写真撮影
7:07	GPS切り替え	GPS FireFlyモード	小リソースの宇宙用民生GPSに切り替え
	撮影	CAM1,CAM6撮影	上方向1枚、下方向1枚の写真撮影
7:17	着水		

3.3. 飛行状態

ここではSBD通信により取得できた飛行状態について示す。

前述したとおり、下方のイリジウム通信状態が想定より悪く、事実上SBDが1系統での運用となってしまったため、写真転送時のバッファ送信モードなど位置情報を送らない運用期間中やGPSモジュールを切り替えていた間など、位置情報が取得できない時間も存在してしまいましたが、飛行中に取得できた位置情報は合計194件（上面アンテナ：193件、下面アンテナ：57件、重複データ有り）であった。その経路を図3に示す。放球後、ほぼ真東へ飛行しており、取得できたデータのうち、最高地点は、06:31の高度30.16km（北緯42.6255805、東経144.1189842）であった。また、最終点は07:17の高度107m（北緯42.4210151、東経144.3102512）であった。

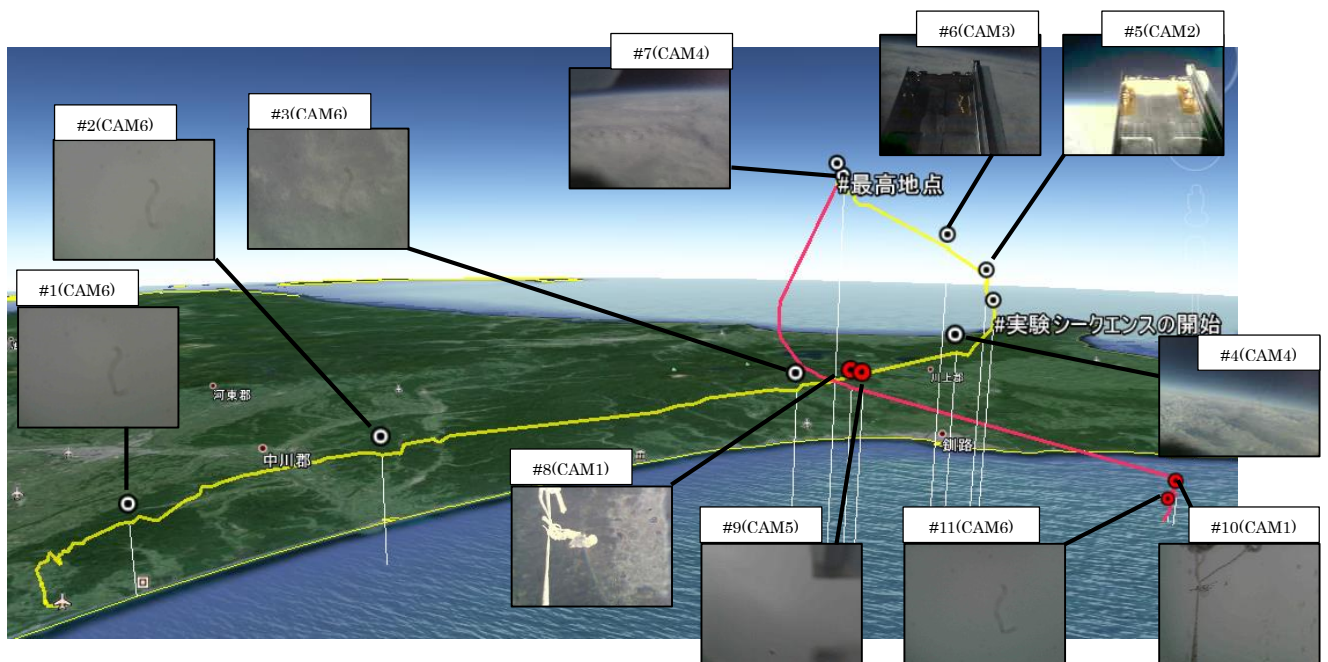


図3. B-EGGの飛行経路と主なイベント

4. まとめ

今回の気球実験では、高高度、長時間におけるEGG搭載品の動作試験及びSBD通信を用いた運用手法の確認を大きな目的として実験を行った。搭載品は約2時間20分のフライト時間の間にほぼ全ての機能が正常に動作する事を確認する事ができ、EGGの開発に向け大きな前進となった。

また、実際にフライト中のB-EGGの情報を確認しながら予約コマンドにより実験シーケンスを実行する運用手法により、間欠的かつ遅延の大きいSBD通信であっても十分運用できる事が示された。ただし、今回の実験で下面のSBDの通信状況が悪かったように、イリジウム衛星の位置やB-EGGの姿勢によっては2系統のSBDをうまく活用できず、データの欠落が多くなるなどの課題も明らかとなった。今後、B-EGGにより得られた知見を生かしEGGの開発を進める予定である。

参考文献

- 1) Kazuhiko Yamada, et al., "Development of Re-entry Nano-Satellite with Gossamer Aeroshell and GPS/Iridium deployed from ISS" 30th ISTS papar, 2015-f-61.