

小型飛翔体実験におけるイリジウム衛星通信の活用と データ配信システムの開発

永田 靖典（岡山大・院）

柳瀬 眞一郎（岡山大・院）

山田 和彦（JAXA/ISAS）

1 はじめに

気球やロケットなどの飛翔体を用いたフライト実験において、飛翔体と地上との間でデータを送受信するためには、電波による無線通信が必要不可欠であり、地上系として特別な装置や施設が必要である。飛翔体の位置情報や計測したデータをリアルタイムで取得するには、アンテナを設置し、飛翔体を追尾してアンテナの方向を制御し続ける必要がある。このようなシステムを構築・維持するには多大な労力と資金が必要となってしまう。特に飛翔距離が長い場合には、複数の地上局が必要となり、この問題はより深刻である。

これを解決する手段として、民間通信衛星を使ったシステムが考えられる。米国イリジウム社（Iridium Communications Inc.）は、高度約 780 [km] の低軌道にある 66 個の通信衛星で構成された通信網を用いることで、世界中どこでも通信可能なサービスを提供している⁽¹⁾。地上系の施設に関しては、衛星を運用するイリジウム社によって保守・運用されているため、ユーザは最低限の装置だけでデータの送受信を実現することが可能である。イリジウム衛星通信は世界中どこでも使用可能であるため、飛翔体が地上アンテナの視野外に行っても通信でき、その状況をモニタリングし続けることができる。また、通信経路を冗長化させることで、バックアップ用としても有効であると考えられる。

我々はこれまでに、イリジウム衛星通信と GPS とを組み合わせた位置特定システムの開発とそのフライト実証を進めており、システムの有効性を示してきた^(2,3)。ハードウェアとしての位置特定システムと共に、取得したデータをリアルタイムで配信するデータ配信システムについても開発を進めてきた。本報告では、2015 年度に実施された豪州大気球実験、B-EGG ゴム気球実験、観測ロケット S-520-30 号機実験について、搭載したシステムとデータ配信システム、および飛翔結果について述べる。

2 システムの概要

2.1 搭載システム

ここで述べる 3 つのフライト実験に搭載したシステムは、全て異なるシステムであるが、共通する構成要素は、イリジウム通信モジュールとこれを制御する FPGA コントローラ、測位用の GPS モジュール、イリジウム用アンテナ、GPS 用アンテナである。共通する機能としては、GPS による測位データなどのテレメータデータをダウンリンクするとともに、アップリンクされたコマンド内容に応じた振る舞いを行うことである。

このシステムでは、少量のパケット単位でパルス的にイリジウム衛星通信を行う、SBD (Short Burst Data) 通信⁽⁴⁾を用いている。SBD 通信では、小型の端末と通信用アンテナを用いることで、衛星通信ネットワーク、イリジウム社設備、およびインターネットを介したデータ通信が可能となる。ユーザはイリジウム社と

電子メールでやりとりすることで、SBD 通信モジュールからのテレメータのダウンリンクおよびコマンドのアップリンクを行うことができるため、インターネットに接続された PC 等の端末と QL (Quick Look) プログラムを用意するだけで地上系を構築することができる。現状の SBD 通信モジュールの場合、1 回の通信でテレメータデータを 340 [bytes] まで、コマンドデータを 270 [bytes] まで送受信できる。

2.2 データ配信システム

フライト実験では通常、不測の事態を避けるために、インターネットから隔離された PC が用いられるが、SBD 通信の場合、インターネットを介してデータの送受信が行われるため、必然的にインターネットに接続された PC を用いることになる。そのため、インターネットを介したデータ配信システムとシームレスに連携させることが可能であり、遠隔地とのリアルタイムな情報共有が容易に実現可能である。この点に着目し、搭載システム開発当初から AirMAAC (Accessible Iridium satellite system using Mini-Apparatus for Aerospace teleCommunication) と名付けたデータ配信システムを整備し、研究グループメンバー間での情報共有を図ってきた。

このデータ配信システムでは、SBD 通信で送られてきたメールを自動で取得、解析した後、データを Web サーバにアップロードする。閲覧者は、PC やスマホの Web ブラウザを用いて指定の URL を開くことで、アップロードされたデータが自動で逐次読み込まれ、画面に位置情報などが表示される。表示内容としては、Google Maps 上の飛行軌跡、高度履歴などがある。また、Google Earth 上に 3 次元的な飛行軌跡をリアルタイムで表示させることもできる。これにより、飛翔体の現在位置や軌道の様子を一目でわかるようになっている。図 1 に、AirMAAC におけるデータの流れを示す。

3 豪州大気球実験

GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) 計画の一環である 2015 年度豪州大気球実験では、気球搭載用イリジウム SBD テレコマシステム IBO-K1 (Iridium SBD telecom system for Balloon Operation ver. K1) が搭載され、SBD 通信を用いて、位置データ等のテレメータ受信とカッター動作を含むクリティカル運用のコマンド送信が行われた。本気球は、2015 年 5 月 12 日 6:00(JST) に豪州アリススプリングス気球放球基地から放球され、約 14 時間飛翔した後、アリススプリングスから東へ約 1000 [km] のクイーンズランド州ロングリーチ郊外に着地した。飛行高度は約 37 [km] である。フライト実験では、飛翔体を常にモニタリングし運用する必要があるが、豪州での気球実験では飛翔距離が長大になるため、地上局の視野外に気球が行ってしまう恐れがある。そのため、SBD 通信を用いたテレコマシステムである IBO-K1 は、豪州大気球実験において重要な役割を果

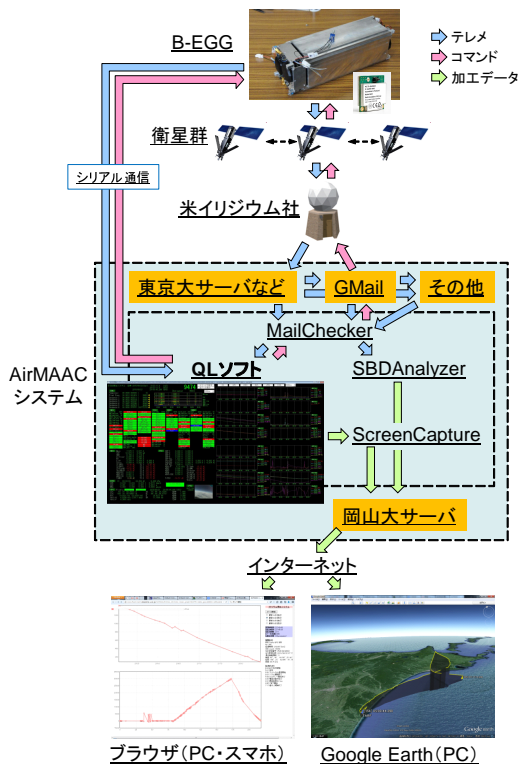


図1 AirMAACにおけるデータの流れ (B-EGG の場合)

たしている。

図2に、IBO-K1の外観を示す。IBO-K1は、SBD通信モジュールを組み込んだベースボードとGPSなど各種センサを組み込んだオプションボードとで構成されており、これにイリジウム用アンテナとGPS用アンテナが接続される。表1に、IBO-K1の主要機器を示す。ベースボード上に搭載されたFPGAは、オプションボード上のセンサ類から得られたデータをまとめ、SBD通信モジュールを操作し、テレメデータとして送信する。SBD通信モジュールがコマンドを受信した場合には、FPGAがそれを読み取り、コマンドに応じた動作を行う。テレメ送信間隔は15秒、1分、3分から選択可能であり、通信に失敗した場合には速やかに再送を行う。また、コマンドを受信した場合には、受信したことを知らせるために、速やかに次のテレメ送信を行う。

約14時間の飛行中、テレメのダウンリンクは1263回、コマンドのアップリンクは17回成功した。取得したテレメデータは現地での運用に用いられると同時に、岡山大学のWebサーバを介してデータ配信を行った。各実験隊員の持つスマホでも配信データを読覧できるため、着地点であるロングリーチで待機している隊員と円滑に情報共有ができ、運用に役立てられた。

4 B-EGG ゴム気球実験

B-EGG (Balloon experiment for re-Entry satellite with Gossamer aeroshell and Gps/iridium) ゴム気球実験は、超小型衛星EGGの予備実験として、EGG搭載品とシステムの健全性を確認するとともに、イリジウムSBD通信を使った運用手法を確立することを目的として実施された。EGGのEM (Engineering Model) を吊り下げた直径11mのゴム気球は、2015年8月22日5:00(JST)に北海道大樹航空宇宙実験場から放球され、約2時間の飛行後、沖合の海上に着水した。この

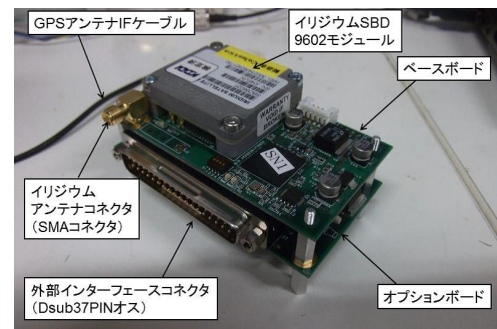


図2 気球搭載用イリジウム SBD テレコシステム IBO-K1

表1 IBO-K1 のサイズ、主要機器

基板サイズ	50×95mm (突起物含まず)
ベースボード	
コントローラ	FPGA (Xilinx Spartan6)
イリジウムモジュール	Iridium SBD 9602
オプションボード	
GPS モジュール	Garmin GPS 15x
ADC	MAX1270
気圧計	MEAS 4525 シリーズ
温度計	AD590

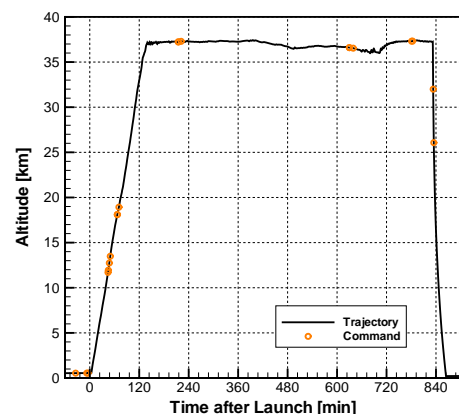


図3 豪州大気球の高度履歴とコマンド受信タイミング

間に、EGGにおいてクリティカル運用となる、ワイヤーバーナーを用いた太陽電池パネル展開、CO₂ボンベ開栓、電磁弁動作などの動作をSBD通信経由でコマンド送信して実行させ、その動作の検証を行った。また、JPEGカメラで撮影された画像データをSBD通信経由で分割して取得した。B-EGGの最高高度は31.7[km]である。

図4に、B-EGGの外観を示す。B-EGGは、システム全体を制御するMCU (Main Control Unit)、電力管理を行うPCU (Power Control Unit)、展開機構、ガス系、センサ系などで構成されており、SBD通信モジュールが組み込まれた宇宙用イリジウムSBD制御基板が2台搭載されている。それぞれのSBD制御基板には、FPGAとSBD 9603モジュールが組み込まれており、FPGAがMCUから送られてきたテレメデータを受け取り、SBD通信モジュールを操作することで、送信さ



図4 B-EGG (超小型衛星 EGG の EM)

表2 B-EGG のサイズ, 主要機器

基板サイズ	300×100×100mm (突起物含まず)
コントローラ	FPGA (Microsemi ProASIC3)
イリジウムモジュール	Iridium SBD 9603
GPS モジュール	NovAtel OEM615 センサコム firefly
JPEG カメラ	Adafruit 1386

表3 B-EGG における飛翔中の通信状況

	通信成功	コマンド受信
SBD1 (上向き)	308	50
SBD2 (下向き)	57	4
合計	365	54

れる。テレメ送信間隔は、1分、3分、および即座に次の通信を開始から選択可能であり、B-EGGでは即座に通信開始が用いられた。B-EGGには、JPEGカメラが搭載されており、撮影された画像データもSBD通信経路で取得されるが、この場合、SBD制御基板のパッファに画像データが保存され、パッファ内のデータが分割されて順次送信される。SBD通信モジュールが受信したコマンドはFPGAが読み取り、MCUに送られて、MCUがコマンドに応じた処理を実施する。コマンドには実行タイミングの情報が付加されており、MCU内部のカウントと連動して実行される。これにより、実行タイミングを細かく設定することができる。表2に、B-EGGの主要機器を示す。

表3に、飛翔中のSBD通信状況を示す。搭載された2台のSBD通信モジュールの内、アンテナが上方を向いているSBD1が全体の84%の通信を行っているが、アンテナが下方を向いているSBD2でも通信ができています。イリジウム用アンテナは無指向アンテナであるため、カバー範囲が広く、イリジウム衛星が水平線近くに見えるときに通信ができたと考えられる。図5に、SBD通信経路で得られたB-EGGの高度履歴を示す。高度データが得られていない時間帯は、JPEG画像データを取得しているタイミングであり、この間はGPS位置データを取得していない。図6は飛翔中に撮影されたカメラ画像であり、これはSBD通信19回に分割して取得された。

B-EGGでは全てのテレメデータをSBD通信を介して取得しており、データ配信によって、現場の運用担当者が得るものと同様の情報が共有された。

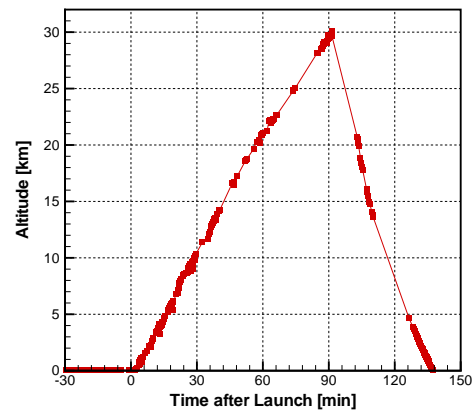


図5 B-EGG の高度履歴

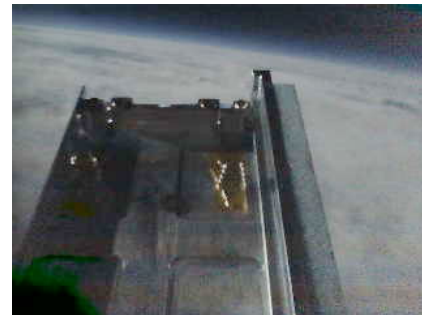


図6 B-EGG 搭載 JPEG カメラ画像 (高度約 25 [km])

5 観測ロケット S-520-30 号機実験

2015年9月11日20:00(JST)に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた観測ロケットS-520-30号機には、SCU系としてGPSモジュールとイリジウムSBD通信モジュールを組み合わせた位置特定システムが搭載された。同様のシステムは、S-310-43号機にも搭載されたが、今回はGPSモジュールとしてセンサコム社製 firefly が搭載されており、この国産GPSモジュールの観測ロケットによるフライト実証が行われた。また、SBDモジュールがS-520に搭載されるのは初めてであり、S-310よりも高高度を飛行するため、より高高度でのSBD通信の実証が図られた。S-520-30の最高高度は312[km]である。

S-520-30に搭載した位置特定システム(図7)は、S-310-41号機とS-310-43号機で実績のあるSCU基板をコントローラとし、イリジウムSBD制御基板(ICB, Iridium Control Board)とGPSモジュールで構成される。SCU基板上のFPGAでまとめられたテレメデータは、ICBに送られ、ICB上のFPGAがSBD9602モジュールを操作することで、送信される。テレメ送信間隔については、通信終了後に即座に次の通信を開始することで、最大限通信を行うようにした。SCUからのテレメデータはPI-AVIO経路でも地上に送られており、これによりSCUやGPSモジュールの細かい挙動をモニタリングできる。SBD通信モジュールが受信したコマンドはFPGAが読み取り、SCUに送られ、SCUのステータス情報が変更される。イリジウム用アンテナはノーズコーン内に設置されているため、SBD通信が成功するのはノーズコーン開頭後となる。表4に、SCU系システム(GPSR, ICB)の主要機器を示す。なお、B-EGGに搭載された宇宙用イリジウムSBD制御基板も、CANON-AVIOに組み込まれること

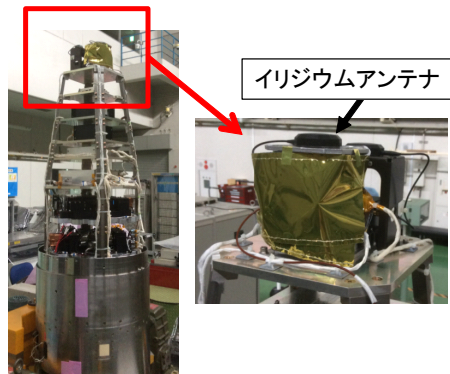


図7 S-520-30のSCU系(GPSR, ICB)

表4 S-520-30のSCU系(GPSR, ICB)主要機器

コントローラ	SCU基板 (S-310-41, S-310-43 実績品) FPGA (Xilinx Spartan6)
イリジウムモジュール	Iridium SBD 9602
GPS モジュール	センサコム firefly

表5 S-520-30における飛翔中の通信状況

試行	通信回数			通信成功率
	成功	失敗	コマンド送信	
23	10	13	2	43%

で、S-520-30に搭載された。

表5に、S-520-30におけるイリジウムSBD通信の成否をまとめ、図8に、高度履歴とSBD通信の実施タイミング、およびその成否を示す。ノーズコーン開頭後、SBD通信は連続して成功しているが、11回目以降は一度も成功していない。図9に、通信を試みたタイミングでの、S-520-30から見たイリジウム衛星位置を算出した結果を示す。これによると、南東から北東の方向にイリジウム衛星があり、この方向にアンテナが向いていれば通信できるはずである。しかし、実際にはS-520-30の姿勢は先端方向を南東から南西の方向に変化していることが、フライト後の解析で示されており、イリジウムアンテナの視野外に出てしまったため、通信ができなかったと考えられる。実績として、今回高度258[km]でのSBD通信に成功した。

S-520-30では、SBD通信で得られたGPS位置データを用いて、観測ロケットの軌道を予測し、その予測軌道もテレメータとともに配信することを試みた。図10は、配信された画面を示しており、SBD通信で取得した軌道データと予測軌道とを同時に配信されていることがわかる。

6 まとめ

2015年度に実施されたフライト実験において、SBD通信を用いた搭載システム、データ配信システムについてまとめた。情報共有を円滑に行い、運用に役立つデータ配信システムを構築した。今後は、システムの習熟を図り、確実な運用を行うための環境を整備していく。

謝辞

本実験を行うにあたり、JAXA/ISAS 大気球実験室の皆様、JAXA/ISAS 観測ロケット実験室の皆様には

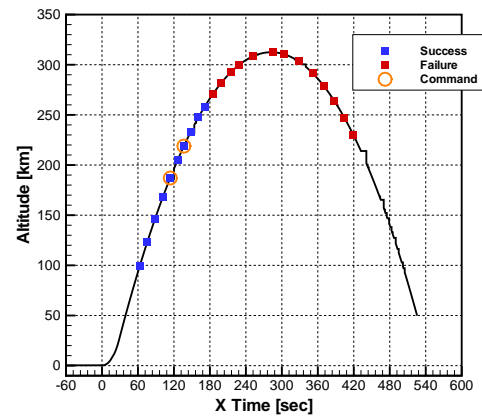


図8 S-520-30の高度履歴と通信実施タイミング、およびその成否

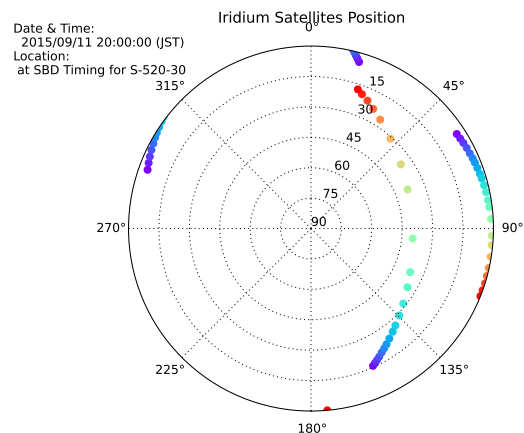


図9 S-520-30から見たイリジウム衛星の位置

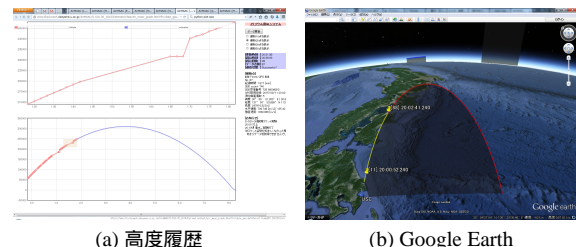


図10 S-520-30におけるAirMAACデータ配信画面

多大なるご助力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) “Manual for ICAO Aeronautical Mobile Satellite (ROUTE) Service Part 2-IRIDIUM; DRAFT v4.0,” ICAO, 2007.
- (2) 永田靖典, 本間直彦, 山田和彦, 鈴木宏二, 安部隆士, 「民間通信衛星を使った宇宙飛行体用テレメータシステムの実証実験」, 大気球シンポジウム, 2009.
- (3) 永田靖典, 山田和彦, 安部隆士, 「イリジウムSBDによる小型テレメータ・コマンドシステムの実証実験」, 大気球シンポジウム, 2012.
- (4) “9602 SBD Transceiver Developer’s Guide,” Iridium Communications Inc., 2010.