報　告

和歌山大学地上局による 国際宇宙ステーション放出衛星「RAIKO」(雷鼓)観測実験

Report of the Observation for Cube-Sat RAIKO with the Wakayama Ground Station

佐藤 奈穂子[1]，小谷 朋美[1]

[1]和歌山大学宇宙教育研究所

和歌山大学では，UNIFORMプロジェクトにおける，地上局設備の研究開発を行っており，直径12mおよび３mのパラボラアンテナの整備を行っている。３mアンテナを用い，ISS放出衛星RAIKOの初期運用観測に参加をし，東北大局，福井工大局と共に観測を行った。その結果，2012年10月6日の観測で信号の受信に成功した。

キーワード：超小型衛星　地上局　S帯電波通信

1．背景

1.1 UNIFORM

和歌山大学宇宙教育研究所が代表機関となった，「日本主導の超小型衛星網UNIFORMの基盤技術研究開発と海外への教育貢献」が文科省超小型衛星研究開発事業に採択され，2010年より，５年計画にて事業を実施している。この事業を，衛星網の名前を取って「UNIFORMプロジェクト」と呼ぶ。

この事業の目的は，超小型衛星のコンステレーション（複数衛星による協調観測）による高頻度な地球観測の実現に向けた研究開発を，アジアなどの宇宙新興国との協力によるキャパシティ・ビルディングと組み合わせた実施を目指すものである。なお，キャパシティ・ビルディングとは，途上国の課題対処能力が，個人，組織，社会などの複数のレベルの総体として向上していくプロセスを指す。

和歌山大学では，本事業における超小型衛星による高頻度観測の実施に必要な信頼性の高い人工衛星バスシステムの開発の一環として，地上局設備の研究開発を行っている。具体的には，直径12mおよび３mのパラボラアンテナの整備を行っている（巻頭写真「電波観測通信施設」参照）。これは，2013年に打上がきまったUNIFORM-1衛星の地上局として，運用準備を進めている。

1.2 RAIKO

RAIKO（らいこ）は，東北大学が開発を行っているキューブサットで，先に東北大学で製作された小型衛星RISING（雷神）の持つ「雷鼓」にちなんで命名された（巻頭写真「超小型衛星RAIKO」参照）。また，RAIKOは，UNIFORMプロジェクトで開発される一連の衛星に対する先駆的な位置付けとして，東北大学と和歌山大学，東京大学とが連携して製作・試験・運用を行う衛星である。

なお，キューブサットとは，大学の研究室などが製作する小型人工衛星で，一辺が10cmの立方体を基本的な大きさの単位（1U）とする。また，相乗り衛星として打ち上げられる事を前提として開発を行う。RAIKOの緒元を表１に示す。

2011年６月RAIKOは，宇宙航空研究開発機構（JAXA）からの公募である，国際宇宙ステーション放出衛星のミッションに採択された。このミッションは，従来はロケットで軌道上に運ばれている人工衛星を，国際宇宙ステーション（ISS）の「きぼう」日本実験棟から船外に直接放出して軌道に乗せるという，世界初の試みである。小型衛星放出機構で打ち出される衛星は，ロケットで直接打ち上げられる衛星に比べて，「打上げ環境条件（振動等）が厳しくない」「打上げ機会が多い」などのメリットを持つ。このミッションにより，より

表１　衛星緒元

衛星名	RAIKO（雷鼓）
サイズ	２U（100×100×200mm）
重量	2.6 kg
周期	90 min.
軌道寿命	半年～１年

メリットが高い小型衛星放出機構の実証が可能である。

一方で，RAIKOからの信号を，和歌山大学に設置されるUNIFORM地上局設備を用いて受信を行う。このRAIKO衛星初期運用に参加する事により，UNIFORM衛星運用のための実衛星を用いた通信試験や実運用のチャンスという得難い経験を積む事が期待できる。和歌山局は，UNIFORM地上局の整備のひとつのステップとして，RAIKO受信を取り扱う。

2．観測実験について

2.1 RAIKOについて

軌道上でのRAIKOは，魚眼カメラによる地球撮像や，ISS放出時のインターバル撮影，Ku帯ビーコン電波による測軌道決定など，さまざまな新しい実験[1)]を行う。衛星運用期間中は，これら一連のミッションを実施し，最後は，膜展開による軌道降下によって大気圏に突入し，燃え尽きる予定である。

RAIKO衛星初期運用には，東北大学，和歌山大学，鹿児島大学，福井工業大学の４局が参加する。東北大局および鹿児島局でコマンド送信を行い，東北大局，和歌山局，福井工大局で，テレメトリ受信を行う。鹿児島局は，Kuビーコンの受信も行う。

また，初期運用においては，RAIKOが日本上空を通過する毎パスごとに地上局からコマンドを送信し，RAIKOに搭載されたテレメトリ送信機がオンになる手順を踏んで，RAIKOからの画像や情報のデータが電波で地上へ届けられる。

2.2 和歌山局について

和歌山大学では，UNIFORMプロジェクトにおけるUNIFORM衛星の地上局として，直径３mおよび12mの整備を進めている。これらのアンテナは，UNIFORM衛星の運用時において，３mアンテナは衛星へのコマンドのアップリンク送信とバスHKデータのダウンリンク受信を行う。今回の実験で用いた３mアンテナの緒元を表２に示す。

表２　和歌山局　３mアンテナ緒元

口径	3.00 m
鏡面精度	～13 GHz
半値幅（S帯）	3 deg
駆動方式	経緯台方式
最大駆動速度	18 deg/sec
駆動範囲	高度３deg以上
設置場所	和歌山大学構内
	北緯　34°16′04″
	東経　135°09′01″

3．放出および和歌山での結果

3.1 放出・初受信まで

RAIKOは，2012年６月25日に製作を完了してJAXAに引渡した後，７月21日に鹿児島県の種子島宇宙センターから打ち上げられた宇宙ステーション補給機「こうのとり」３号機（HTV-3）によってISSへ運ばれた。そして，2012年10月４日23時37分（日本時間），ISSに滞在中の星出彰彦宇宙飛行士が操作するロボットアームによって，RAIKOはISSより宇宙空間へ放出された。

そして，10月６日19時30分頃からの可視時間帯において，東北大学・和歌山大学・福井工業大学の３局において，RAIKOからの試験電波信号の受信に成功した。東北大学では信号の解析が行われ，RAIKOの動作状況が確認された。これは，国内のキューブサットとして，初のS帯9600bpsダウンリンク通信の成功となる。

3.2 和歌山での観測

和歌山大学では，構内に設置されている３mアンテナを用いて，RAIKOの初期運用観測に参加した。

RAIKO観測は，３mアンテナ焦点部に設置したダウンコンバータを用い，IFをVHF帯として信号を観測室へと引き込み，信号の様子をスペクトルアナライザで表示した。受信結果は，ビデオカメラを用いて記録を行った。

和歌山局では，他局からのRAIKOへのコマンドの

表 3　和歌山局での観測計画とその実施結果

観測日 2012年		開始時刻 [hh：mm：ss]	終了時刻 [hh：mm：ss]	観測時間 [sec]	最大高度 [deg]	和歌山局 実施結果	備　考
10/05	#1	20：16：31	20：25：26	535	44.8	○	
	#2	21：55：10	22：02：59	469	16.4	○	
10/06	#1	19：28：38	19：37：02	504	23.3	◎	受信成功
	#2	21：05：12	21：13：48	516	26.2	○	
10/07		20：16：39	20：23：04	385	48.2	○	
10/12		－	－	－	－	●	ソフトウェアバグ
10/16	#1	16：01：02	16：07：29	387	47.3	○	
	#2	17：38：46	17：43：20	274	17.0	○	
10/17		15：11：26	15：16：53	327	23.2	○	
10/18		－	－	－	－	●	アンテナトラブル
10/19		15：06：38	15：13：19	401	76.3	○	

アップリンク送信が計画されているパスのうち，和歌山から観測可能な条件の良いパスについて，テレメトリ受信の観測を行う事とした。結果，2012年10月５日から10月18日の間の８日間において，計11回のパスでRAIKOの観測が計画された。表３に詳細を示す。表の時刻は，衛星高度が３deg（または10 deg）をまたぐ時刻を表し，最大高度が高いパスほど，観測可能な時間が長くなり，条件が有利となる。これら11回の観測のうち，アンテナが正常に駆動し，観測が実行されたのが９回であり，和歌山局のアンテナ等トラブルにより観測実行に至らなかったものが２回あった。なお，RAIKOへのコマンド送信が成功し，RAIKOからのダウンリンク電波の受信に成功したのが，10月６日の１回目のパスである。

3.3 和歌山での受信結果

和歌山局にて受信に至った10月６日１回目の結果を，以下に記述する。

まず，RAIKOに搭載されたテレメトリ送信機の詳細を表４に示す。送信機は，S帯周波数を用い，BPSK変調でデータ送信を行う。また，ISSと同じく高度400 km付近を周回しており，地上から観測される最大ドップラ偏移周波数は，58 kHzと計算される。

次に，和歌山地上局での受信設備の設定を表５に示す。これらの機器を用いて受信されたスペクトルのスクリーンショットを図１に示す。

信号補足時の信号は，-65 dBm程度の強度で，ドップラ効果により，＋50 kHzの周波数偏移を示した。その後，信号強度の増加と共に偏移周波数の減少が見られた。信号強度は，受信の間，最大-60 dBmから-80 dBmまで，ゆっくりと20 dB程度の変化を示した。これは，衛星のタンブリングにより姿勢が変化し，衛星搭載の送信アンテナと地上局との位置関係が変化する事により起こる変化であると考えられる。また，周波数偏移は，＋50 kHzから減少を続け，-30 kHzで信号損失となった。RAIKOの衛星軌道から計算される最大ドップラ偏移量は58 kHz（EL＝０degにおい

表 4　RAIKOの初期運用時の仕様

送信周波数	2285 MHz
送信出力	100 mW（２分配出力）
送信アンテナ	パッチアンテナ
変調方式	BPSK方式
送信ビットレート	9600 bps
軌道高度	400 km
速度	7.7 km/sec
最大ドップラ偏移	±58 kHz

表 5　和歌山地上局受信機器の設定

受信周波数	2285 MHz
中間周波数	425 MHz
スペクトルアナライザ設定	
X軸：	RBW＝3 kHz
	VBW＝100 Hz
	Span＝300 kHz
Y軸：	dB/div

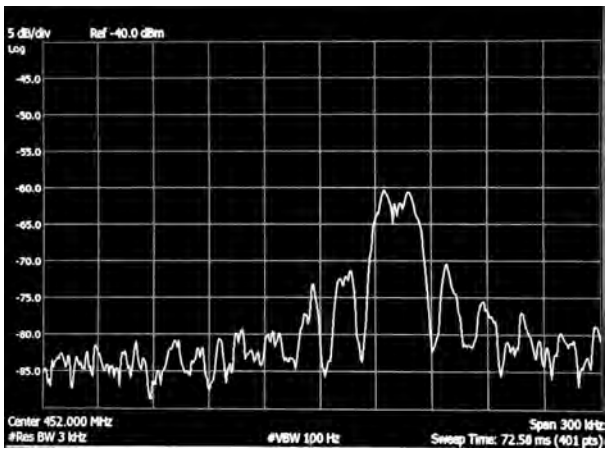

図１　受信スペクトル（詳細は表５参照）

て）であり，衛星高度とともに減少する観測値は計算とよく一致する。また，信号捕捉時から信号損失時まで，トータルで290秒程度の受信時間であった。

3.4 和歌山局での初期運用成果

和歌山局は，2013年冬に予定されているUNIFORM衛星の本運用へ向けて，地上局設備の整備・調整を進めている途上である。この初期運用を通して，多くの貴重な経験を得た。

現状の和歌山局のアンテナ運用方法では人が介在する必要のある場面が多く，実際の運用時は，オペレータの疲労や効率を考え，もっと効率的な自動化・遠隔操作化を強化すべきと考えた。今回，11回の観測のうち２回も観測トラブルが発生しているが，これらの機能の強化と丁寧な運用訓練によって克服できると考える。また，遠隔地にいる協力者と，共同で観測オペレーションを行う際，メールやチャットなどの意思疎通や，観測データ共有の方法に，特に工夫が必要との認識を得た。また，衛星製作に取り組み，同時に衛星オペレータでもある東北大学の学生達が，自主的に動けるよう環境を整備し，モチベーションを引き出すマネジメントが，今回のRAIKOの成果につながっていると感じた。

なお，RAIKOのプロジェクトは現在も，様々な新しい挑戦に挑み，重要な成果を次々と上げている[2)]。

4．まとめ

和歌山大学では，UNIFORMプロジェクトにおける，地上局設備の研究開発を行っており，直径12mおよび３mのパラボラアンテナの整備を行っている。

この３mアンテナを用い，ISS放出衛星RAIKOの初期運用観測に参加をし，東北大局，福井工大局と共に観測を行った。その結果，2012年10月６日の観測で信号の受信に成功した。

このRAIKO衛星初期運用を通して，UNIFORM衛星へとつながる多くの経験を得る事ができた。今後，2013年冬に予定されているUNIFORM衛星の本運用へ向けて，地上局設備の整備を進めたい。

謝辞

まず，今回の実験にあたり，RAIKOのプロジェクトを統括し，和歌山局での受信に関しても，様々な方面でのご協力を頂いた東北大学の坂本先生に敬意を表します。

また，実際の観測実験にあたり，お手伝い頂いた皆様に感謝の意を表します。林さんをはじめとするIfESのスタッフには，夜遅くまで観測のお手伝いを頂き，大変ありがとうございました。また，和歌山大学シニアアドバイザーの下代さん，岸裏さん，森田さんには，豊富な無線通信の経験に基づいたサポートを頂き，大変助けとなりました。最後に，夜遅くにRAIKOに興味をもって見学に来られた学生の皆さんにも，ワクワクドキドキする瞬間を共有できた事を感謝致します。

引用・参考文献

１）国際宇宙ステーション放出衛星「RAIKO」（雷鼓）
URL：http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/RAIKO/

２）RAIKO_CUBESAT
URL：https://twitter.com/raiko_cubesat