



報 告

超小型衛星 UNIFORM-1 による観測成果と 成果発信の取り組み

Observational Achievements and Data Publishing Challenges of One and Half Year Operation of a Micro-satellite “UNIFORM-1”

神山 徹¹, 加藤 創史¹, 佐藤 奈穂子², 森田 克己², 宮田 喜久子³,
福原 哲哉⁴, 中村 良介¹, 秋山 演亮²

¹ 産業技術総合研究所, ² 和歌山大学宇宙教育研究所, ³ 名古屋大学, ⁴ 情報通信研究機構

大きさ50 × 50 × 50cm, 重さわずか50kgの超小型衛星「UNIFORM-1」は, 2014年5月24日の打ち上げ後から1年半以上の期間に渡り成功裏に観測をつづけ, 搭載する可視光カメラ・熱赤外線カメラを使ってユニークな観測画像を送り続けている。UNIFORM-1では当初掲げた火災検知を実現するだけでなく, 超小型衛星の持つ機動性を生かした火山噴火活動の即時観測, および継続的モニタリングも成功させている。またこのような観測画像を誰でも入手可能なよう, 超小型衛星ミッションの中では日本で初めてFree & Openな形でデータ公開を実現した。

キーワード: 超小型衛星, UNIFORM-1, 火災検知, 火山観測, データ公開

1. 超小型衛星「UNIFORM-1」とその運用

2014年5月24日にJAXA/ALOS2(だいち2号)の相乗り衛星として打ち上げられた超小型衛星「UNIFORM-1」¹⁾は, 打ち上げ4日後のファーストライト観測(図1)から現在に至るまで可視光カメラ(VIS)・熱赤外線カメラ(BOL)による観測を続けている。ミッション目標としてUNIFORM-1では宇宙からの効率的な自然火災監視を掲げており, 熱赤外線カメラで高温の特異点(=火災)を発見した際には可視光カメラを地形ガイドカメラとして活用することで, 場所を特定した上での火災検知・火災通報を目指している^{2,3)}。

UNIFORM-1は打ち上げから3か月ほどで初期運用フェーズを完了し, 安定運用の達成と共に準定常的な熱赤外線観測を開始した。軌道上においては展開した太陽光発電パネル面を太陽に向ける姿勢をベースとし, 必要なタイミングで観測ターゲットにカメラを向ける制御を基本として観測が行われている。ミッションの代表的な観測実績としては, 2014年9月27日の御嶽山噴火に際してその翌日, 翌々日と緊急観測を実施し,

「撮りたい場所」を「撮りたい時に」撮る, という超小型衛星の強みを生かした迅速なデータ提供を行った⁴⁾。

ミッションでは運用コストの低減にも努めており, 安定運用の達成と並行して運用の省エネ化の試みを進めている。衛星と通信をする地上アンテナの制御は初期運用時から継続して和歌山大学にて行われたが, 衛星状態の把握, 衛星制御コマンドの送信等を行うオペレータは日本各地から遠隔で担当可能な体制に移行し,

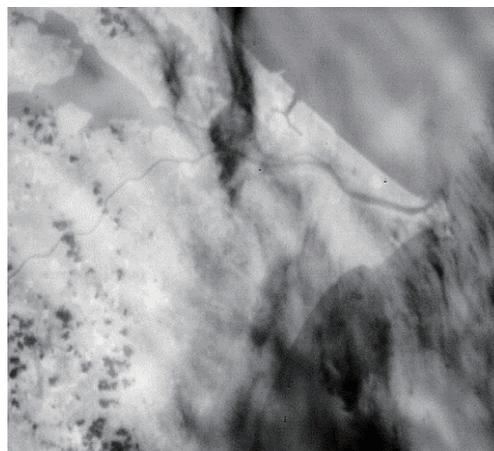


図1 UNIFORM-1/BOLのファーストライト画像。2014年5月28日, 千葉・銚子市付近。熱赤外線での相対的な明るさをグレースケールで表示。

移動の負荷を軽減させた。また運用に参加する人数も、最大でもアンテナ制御に2人、オペレータに2人というわずか4人で完了するようになった。2015年度からはアンテナ制御は和歌山大学、観測計画の立案・オペレータ業務は主に産業技術総合研究所が担当している。

打ち上げ直後の初期運用フェーズにおいては、軌道上実績のない搭載機器が多く想定外動作も多かったことから、姿勢喪失等によるバッテリー電圧の低下及びそれにもなうシステムリセットが計41回発生した。しかし低電圧からの復旧を可能としたシステム設計がうまく機能し、最終的には姿勢制御・観測実施に必要な機能を損なうこともなくその後の安定運用を迎えることができた。2014年6月13日を最後にシステムリセットは発生しておらず、その後の期間はいくつかのコンポーネントのトラブルは発生しつつもその都度復旧し、準定常的な観測を継続してきた。

しかしながら2015年11月16日ころ、搭載機器の不具合から機上での衛星姿勢決定が困難となり、結果として衛星姿勢制御機構を喪失、その後衛星は自由回転状態に陥っている。また繰り返しの復旧努力にもかかわらず現在も姿勢制御機構は回復せず、自由回転状態から復帰できていない。ただし姿勢が不定であっても通信が確立する設計になっており、また幸運にも観測機器等は正常であり、自由回転状態にありながらも可能な限り観測を継続している。

衛星設計寿命として想定されている「2年」が近づくとつれ、コンポーネント不具合に伴う様々な制限が生じてしまっているものの、打ち上げ後1年半以上が経過した現在も UNIFORM-1はその使命を果たすべく地球を周回し続けている。

2. 観測成果の紹介

2.1 活火山モニタリング

2014年9月27日の御嶽山噴火が代表的なように、2014年から2015年にかけて日本では全国的に活発な火山活動が報告された。UNIFORM-1では実際に噴火が見られた御嶽山、桜島に関して集中的な観測キャンペーンを実施し、合計で80回を超す観測に成功している。火口周辺に高温領域が見られた活発な時期からやがて高温領域が目立たなくなる沈静期への変遷を、打ち上げから1年半以上にわたる継続したモニタリングにより確認している (図2)。

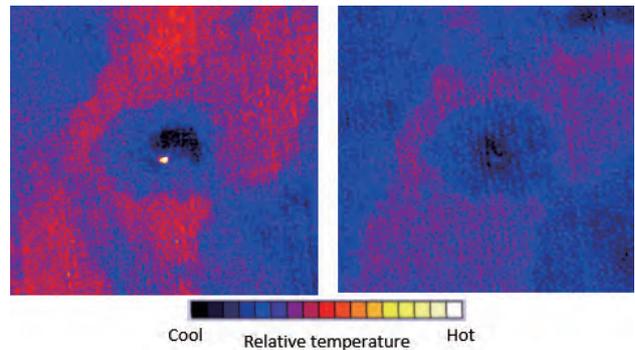


図2 桜島の熱赤外観測画像例。(左図) 2015年9月4日23時57分頃、(右図) 2015年11月15日00時15分頃取得。9月に見られた高温領域が11月には目立たなくなっている。

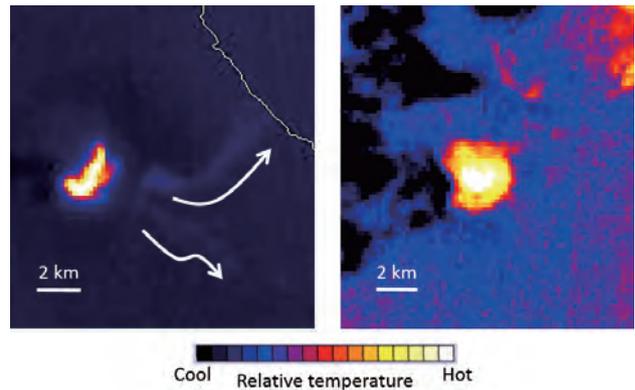


図3 海外活火山の熱赤外観測画像例。(左図) ガラパゴス諸島ウルフ火山 (2015年8月27日)、矢印は溶岩流の流れを示す。(右図) ジャワ島ラウン火山 (2015年10月18日)。

2015年はまた海外においても活発な火山活動が報告されたことから UNIFORM-1 ミッションでは海外にもその観測範囲を広げている。図3にエクアドル・ガラパゴス諸島のウルフ火山、インドネシア・ジャワ島ラウン山の巨大な噴火口を捉えた観測例を示す。

2.2 火災検知

2014, 2015年は偶然にも世界的に活発な火山活動が見られたことから観測時間の多くを火山観測に割り当てることとなったが、プロジェクトでは UNIFORM-1 が当初から持つ「宇宙からの火災検知」を目指して、大規模な自然火災が頻発すると思われる地域にも観測時間を割り当ててきた。実際に火災検知に成功した例として、アメリカ・カルフォルニア州での大規模火災 (2014年9月)、モザンビーク首都マプト市近郊での大規模火災 (2015年10月) が挙げられる (図4)。

特にカルフォルニア州での火災は UNIFORM-1 だけでなく、アメリカ地質調査所が運用する Landsat-8号機、日本とアメリカが共同で運用する Terra衛星搭載の ASTER センサにおいても観測されており、これら3

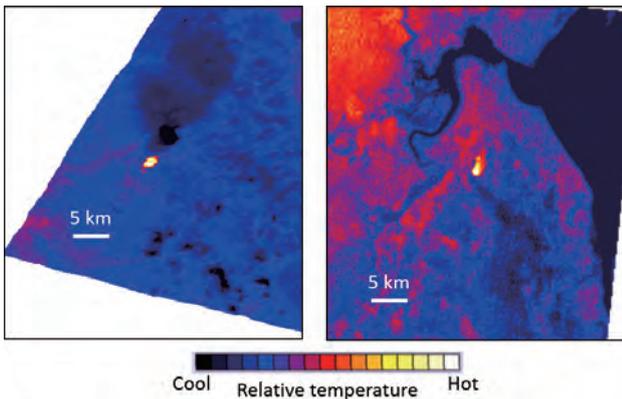


図4 熱赤外観測による火災検知例。(左図) アメリカ・カリフォルニア州での大規模火災 (2014年9月7日)。(右図) モザンビーク・マプート市近郊での大規模火災 (2015年10月8日)。

つの衛星の観測結果を組み合わせることで火災の時間変化すらも捉えることが出来た⁵⁾。この成果により超小型衛星データであっても大型衛星と同等に扱えるという重要な実績が得られたものと考えている。

2.3 月観測

UNIFORM-1が行ったユニークな観測として、月観測、および月食の観測が挙げられる。UNIFORM-1はベース姿勢のまま満月をカメラ視野に収めることが出来、比較的容易に満月画像を取得可能なことから、これまで数度の月観測を実施するとともに時には月食の観測にも成功している (図5, 6)。このような満月・月食画像は目にも楽しく広報素材として利用されたのはもちろん、画像に写る月の大きさや輪郭のシャープさを調査することでカメラ性能の評価にも利用されている⁶⁾。

2.4 温度較正のための較正観測

熱環境や放射線環境の厳しい宇宙空間では観測機器の性能が打ち上げ前と比べ大きく変化する事が知られている。UNIFORM-1では熱赤外線カメラの温度決定精度が火災検知や温度の高い領域の検出精度に直結することから打ち上げ後にも温度精度を検証することが必須であった。ミッションではUNIFORM-1と同時に同じ地点の温度を地上で観測し、両者を比較することで精度を検証する「代替較正」と呼ばれる手法を用いて温度精度を検証した。観測サイトとして、アメリカ・ネバダ州砂漠地帯の「アルカリレイク」,「レイロードバレー」, また日本の「霞ヶ浦」を利用し、地表温度、および水面温度の比較から熱赤外線カメラ

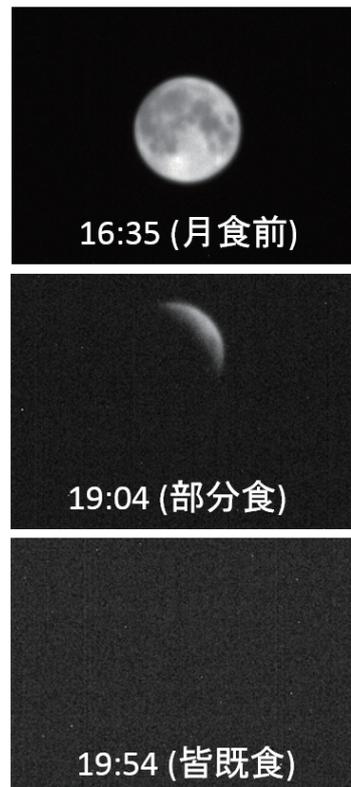


図5 月食の連続観測 (可視光画像, 2014年10月8日)



図6 2015年9月28日の月食を地球地平線と共に視野内に収めた画像。(上図) 可視光カメラ画像, (下図) 熱赤外線画像。

表1 代替較正実験のまとめ。BOLの列はUNIFORM-1搭載の熱赤外線センサが捉えた大気上端の絶対温度, Field campaign (FC) の列は現地観測での地表,あるいは水面温度 (大気上端での温度に換算) を表す

Date	Site	BOL [K]	FC [K]
2014.09.05	Alkali Lake	298.7	292.9
2014.09.06	Rail Road Valley	294.7	293.2
2014.12.15	Kasumigaura	267.7	273.6

の温度決定精度を評価した(表1)⁶⁾。

検証の結果、UNIFORM-1は宇宙空間においても対象温度を $\pm 6^{\circ}\text{C}$ 程度の精度で決定できていると考えられ、これは火災や火山噴火口が実際に他の地点より熱いことを述べるのに十分な精度である。観測的裏付けに基づく打ち上げ後のカメラ性能評価も、超小型衛星として他に例の無いユニークな活動実績になっている。

3. 成果発信の取り組み

3.1 Free & Openなデータ公開

2章で紹介したように、UNIFORM-1の運用ではまさに多彩な観測成果を得ている。また、火山観測画像や火災検知画像は広く、かつ迅速に利用されてこそ価値がある。そこでミッションではUNIFORM-1が取得した画像を誰でも利用可能なよう、Free & Openな形でデータ公開を決定し、それを実現するためのサービスの開発、および仕組みづくりに取り組んできた。

データ公開に際しては、産業技術総合研究所が所有する衛星データをWeb上で簡単に表示、検索、ダウンロードを可能にする「Landbrowser」フレームワークを活用し、UNIFORM-1観測データを公開するWebサービス「UNIFORM Browser」を立ち上げた(図7)⁷⁾。このサービスでは「誰でも・いつでも・簡単に」をテーマに利用拡大を念頭にしたもので、画像アクセスの容易さ、ダウンロードしやすさなどに工夫がなされている。

UNIFORM BrowserはUNIFORM-1の打ち上げからちょうど1年後の2015年5月24日からサービスを開始した。Free & Openなデータ公開は超小型衛星としては日本初の試みであり、衛星運用の枠組みを超えてUNIFORM-1を代表する成果の一つとなっている。

3.2 顔の見える情報発信を目指して

UNIFORM-1、およびUNIFORM ミッションの活動は様々な媒体によって発信されている。まずUNIFORM-1の最新の状況を始め、ミッション全体の活動はかねてより宇宙教育研究所のホームページから発信されてきた。これに加え2015年度からはソーシャルメディアの活用も行っており⁸⁾、UNIFORMの活動に興味を持つ利用者に衛星の状況・データの活用法やその面白さをリアルタイムに伝える試みを模索している。

運用成果の情報発信はこのようなWeb上の活動に

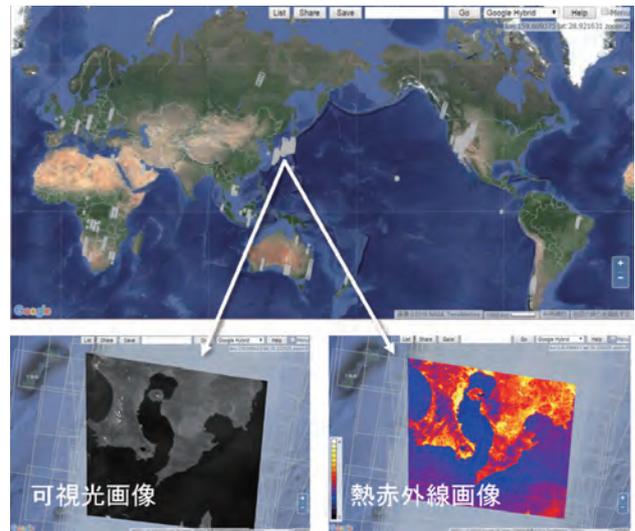


図7 UNIFORM Browserの概観



図8 UNIFORMをテーマにした講演会、見学会の例

とどまらず、国内外の学会・シンポジウムにおいても発表を行っている^{2,5,6,9,10)}。また宇宙教育研究所が共催する「宇宙カフェ」での講演、有志による講演会での登壇、宇宙開発にまさに飛び込もうとする大学生を集めての運用見学会など、データ利用者・宇宙ファン・UNIFORMファンと直接対話する機会を持つ試みが続けている(図8)。

これらの活動を通して、ミッションが掲げる目標にひたむきに頑張ることの重要さはもちろん、衛星データの利用者拡大・将来必要とされる衛星事業の実現には、社会からの期待・要請にいかに対応していくか、衛星で出来ることに何があるのか考えることも大切であると学んでいる。

4. おわりに

本年度は長年の努力が積み重ねられてきたUNIFORMプロジェクトの、その努力が成果として可視化され実りの時期を迎えた一年となった。2014年度までの衛星設計・開発の努力や地上アンテナ設備の整備努力、2014年度の運用能力獲得・省エネ化の試み、

いずれもが打ち上げ後に達成されたさまざまな成果にとってなくてはならないものであった。UNIFORM-1で得られた成果、またその成果の礎となった努力は将来の小型衛星開発や衛星利用、宇宙開発や人材育成に非常に大きな意味を持つものと考えている。

2015年度は超小型衛星にこれまでにない注目が集まった一年でもあった。ただし多くの超小型衛星が技術の検証・実証に注力する一方、実際に観測データ等が一般に届けられた例はそれほど多くない。その中でUNIFORM-1は衛星データ利用を前面に打ち出した特筆すべき衛星であると感じている。打ち上げから約1年半を迎えた際、残念ながら主要コンポーネントの一部に不具合が生じその能力を十分には発揮できない状況となったが、出来る範囲内で衛星を最大限活用できるよう慎重な運用を今後も続けていきたい。

謝辞

UNIFORMプロジェクトは、北海道大学・東北大学・東京大学・慶應大学等の参画機関、および次世代宇宙研究開発組合等の協力機関の献身的な御協力により、活動を行ってることが出来ました。また慶應大学の平松研究員・山浦研究員には緊急時の運用担当によりミッションをサポートしていただきました。関係者の皆様一人一人に、心から感謝の念を述べたいと思います。

参考文献

- 1) 秋山演亮, 平松崇, 山浦秀作, UNIFORM-1 の打ち上げ運用成果 初期報告と今後の方針, 和歌山大学宇宙教育研究所紀要, 第4号, pp. 1-7, 2015
- 2) Yamaura et al., UNIFORM-1: First Micro-Satellite of Forest Fire Monitoring Constellation Project, SSC14-VI-2, 2014.
- 3) Fukuhara et al., An application to the wild fire detection of the uncooled micro bolometer camera onboard a small satellite, ICSANE 2013, SANE2013-99, 2013.
- 4) 和歌山大学プレスリリース, 「UNIFORM-1号」による御嶽山噴火の観測結果, 2014.
- 5) 神山徹ほか, 複数機からの衛星データを利用した高い頻度での火災モニタリング, 2014年リモートセンシング学会秋季講演会集録, 2014.
- 6) 神山徹ほか, 超小型衛星 UNIFORM-1による火災検知実現への取り組み, 2015年リモートセンシング学会秋季講演会集録, 2015.
- 7) <http://landbrowser.geogrid.org/uniform1/index.html> (確認日: 2016年3月12日)
- 8) <https://www.facebook.com/>

Uniform-1-1096990516985013/ (確認日: 2016年3月12日)

- 9) Hiramatsu et al., Early Results of a Wildfire Monitoring Microsatellite UNIFORM-1, 29th Annual AIAA/USU. Conference on Small Satellites. SSC15-IX-2, 2015.
- 10) 後藤千晴, 吉住千亜紀, 宇宙カフェ継続の秘訣と展開—宇宙カフェ50回を振り返って—, 和歌山大学宇宙教育研究所紀要, 第5号, PP.51-56, 2016