

超小型光学衛星コンステレーションとLバンドSAR衛星を用いた 福島・チェルノブイリ周辺環境変化モニタリング」（東京大学）の成果について

研究 開発 体制	主管研究機関	国立大学法人 東京大学	研究 開発 期間	平成24年度～ 平成26年度 (3年間)	研究 開発 規模	予算総額（契約額） 4.2百万円		
	共同研究機関			1年目		2年目	3年目	
						6百万円	1.8百万円	1.8百万円

研究開発の背景・全体目標

東日本大震災に起因して発生した福島第一原子力発電所の事故のため、周辺地域は拡散した放射性物質に汚染され、農業をはじめとするあらゆる分野に被害が及び、地域住民は長期間の避難をすることになった。これらの地域に対して今後、長期間・広範囲にわたって、環境とその変化を定常的にモニタリングし、さらには将来の変化を予測し、その結果を復興対策に役立てることは重要である。超小型衛星は低価格でありながら、低軌道上から十分な解像度で地球観測データを取得できることに注目し、特定の地域を多くの衛星で観測する構想は、小型化技術により可能となったものであり、今後の発展性が期待されている。平成26年度には表1に示す多くの超小型衛星が打ち上げられた。本研究では、光学観測ミッションを持つ超小型衛星を中心としてALOS-2を含む多数の衛星により避難指示区域の観測を行い、その環境変化を時系列的に解析するとともに、持続的な復興支援に利用可能な衛星ベースの環境モニタリング方法の研究開発を行うことを目的とした。

研究開発の全体概要と期待される効果

超小型光学衛星、ALOS-2を含む多数の地球観測衛星を用いて、福島周辺が原子力事故後にどのように環境変化するかをモニタリングする。これに加えてチェルノブイリ原子力発電所の前例事故の知見を調査し、これを基に福島周辺の衛星観測画像の解析を行い、災害復興に資する解析手法・システムを確立する。

福島原子炉事故地域のような人の立ち入ることの困難な場所を観測し、チェルノブイリ原発事故での経験をもとに、放射性物質の周囲への拡散を予報することは緊急性のある社会的な要請でもある。外務省が主導する日ウクライナ原発事故後協力委員会においても課題テーマの一つとして取り上げられ、相互の知見を今後の復興計画に活かすことに貢献することが期待される。

表1 平成26年度に打ち上げられた超小型衛星



衛星名	Hodoyoshi-1	Hodoyoshi-3	Hodoyoshi-4	Uniform-1	Chubusat-1	TSUBAME	QSAT-EOS	
開発組織	東京大学 次世代宇宙システム技術 研究組合 アクセルスペース	東京大学 次世代宇宙システム技術研究組合	東京大学	和歌山大学 東京大学	名古屋大学	東京工業大学	九州大学	
搭載センサ	マルチスペクトル センサ	中分解能カメラ	マルチスペクトル センサ	熱赤外カメラ	熱赤外カメラ RGBカラーカメラ	RGBカラーカメラ	2バンドカメラ	
GSD	6.8m/pixel	40.3m/pixel	6.3m/pixel	200m/pixel	150m/pixel	10m/pixel	10m/pixel	
観測幅	27.8km	80km	25.8km	128km	96km	20km	20km	
観測波長	4 バンド B1: 450-520 B2: 520-600 B3: 630-690 B4: 780-890	3 バンド B1: 520-600 B2: 630-690 B3: 730-900	4 バンド B1: 450-520 B2: 520-600 B3: 630-690 B4: 780-900	1 band of Thermal infrared	熱赤外	RGB	RGB	2 バンド B1: 450-550 B2: 780-920
投入ロケット	2014年11月 Dnepr	2014年6月 Dnepr	2014年6月 Dnepr	2014年5月 H2A	2014年11月 Dnepr	2014年11月 Dnepr	2014年11月 Dnepr	

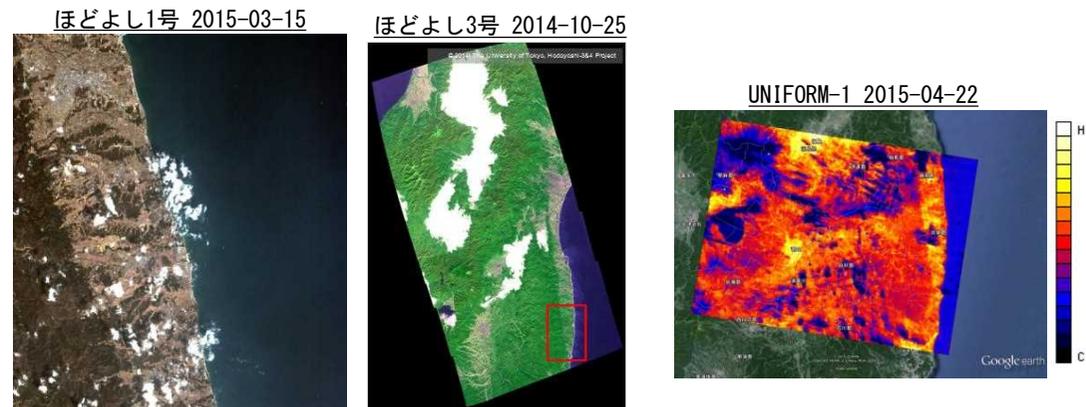


図1 超小型衛星による取得画像

① 「チェルノブイリ事故後の知見を基にした衛星観測施策の検討」

実施内容及び主な研究開発成果

チェルノブイリの事故前後において図2.1に示すように原発周辺の植生が著しく変化し、土地被覆にも変化があることが分かっている。チェルノブイリ原発事故後の衛星観測結果およびその知見を得ることは、事故後の環境変化を観測し、復興の施策に生かすうえで非常に重要である。東京大学ではウクライナ宇宙庁傘下の機関や企業と超小型衛星の利用実証に関する協力を進めている。ウクライナ立入禁止区域管理庁から、チェルノブイリにおける二次放射線拡散は、河川等による水を介した移動及び空気による拡散があったと報告されており、森林火災が発生した際に放射性物質が舞い上がり、火災の煙等によって拡散していくことがあるとの報告を受けた。これに対して、ウクライナ科学アカデミー等の協力を得て、チェルノブイリ原発事故後の衛星観測結果について議論をし、有効な衛星観測施策の検討を進め、以下のテーマを本研究で推進する衛星観測施策とした。

(1) 自然火災による二次放射線拡散危険レベルの評価

福島避難指示区域の放射線量は減少傾向にあるものの、図2.2および図2.3に示すように耕作が放棄された田畑や公園等における雑草の繁茂は続いており、これら地域の火災による二次放射線拡散が懸念される。チェルノブイリ事故後と同様にこれら地域の雑草繁茂は続いていくと予想されるため、火災による2次放射線拡散の危険度評価を経年的に続けていくことを衛星観測施策のひとつとした。

(2) 衛星を介した放射線量の遠隔計測

チェルノブイリでは放射線拡散の多くが河川等を介した拡散であり、これにより二次被害が懸念されている。特に放射線量が極端に高い「ホットスポット」は点在しており、豪雨等により山間部から移動することが懸念される。

放射線センサ等をホットスポット存在地域に設置し、放射線量データをデータ蓄積中継衛星を介して遠隔計測を行うことを衛星観測施策のひとつとした。



図2.2 福島県浪江町の圃場の様子 (左) 2013/03/01 (右) 2015/03/11

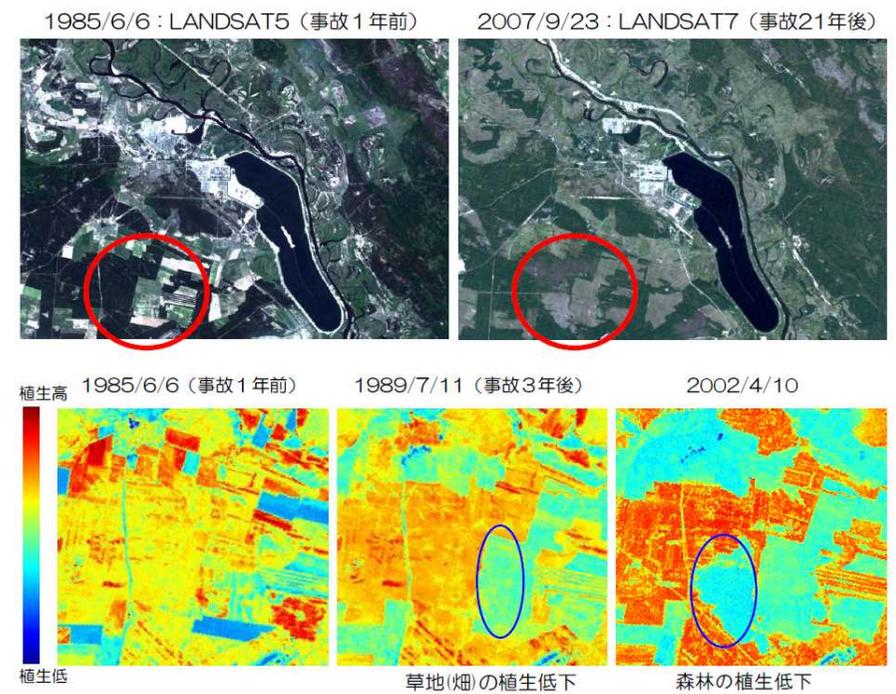


図2.1 チェルノブイリ原発事故前後の環境変化例



図2.3 原発事故後の環境変化例

② 「衛星観測データの取得、解析および現地調査」

実施内容及び主な研究開発成果

平成26年度に打ち上がった超小型衛星のうち、ほどよし1号機、ほどよし3号機、ほどよし4号機、UNIFORM-1で福島を観測を試み、LandsatおよびRapidEye等の画像との比較解析およびデータ統合を行った。ほどよし1号、4号は6m程度の地表サンプリング間隔を持っており、図3.1に示すように建屋や田畑の状態等を把握することが可能であることを示した。また当プロジェクトの成果において、超小型衛星が5～10m程度のピクセル間隔の地球観測が可能であり、広い観測幅を活かして狙った領域を観測できることを証明しており、超小型衛星画像が十分実利用に足ることを示した。また、超小型衛星の画像をLandsatの画像をテンプレートとして、マッチング処理し、地図投影画像を生成する方法を開発しており、地理情報システムに入れ込み、実利用に供給した。

さらに、ALOS-2/PALSAR-2の単偏波画像を用いて震災前後での比較解析を行った。図3.3に2時期の同偏波のPALSAR-2データを合成した画像を示す。PALSAR-2で変化抽出された箇所は除染廃棄物の仮置き場として整備が進められているエリアである

福島立入禁止区域内の浪江町の現地調査を実施し、放射線量およびグランドトゥールースデータとして森林域の分光反射率計測を行った。衛星画像から植生減少箇所を特定し、現地調査した結果、除染により木々が切り倒されており、衛星画像による植生観測は現象を良く把握できることを確認した。



図3.1 ほどよし1号の福島周辺観測画像



図3.2 ほどよし1号機画像（上段）とLandsat画像（下段）のレジストレーション結果

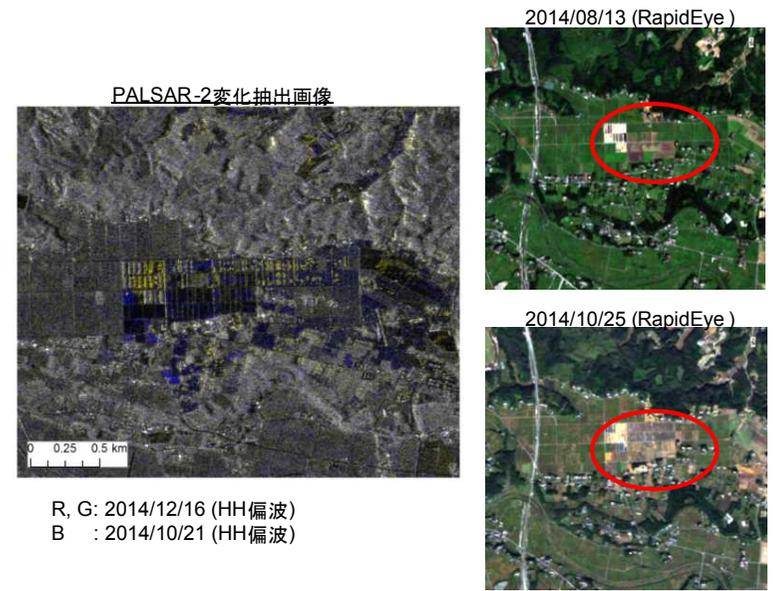


図3.3 2時期のPALSAR-2データによる変化抽出

③ 「衛星を利用した復興支援に資する環境モニタリング方法の開発(1/2)」

実施内容及び主な研究開発成果

植生区域での火災は、煙や塵による放射性物質の二次拡散を引き起こす危険性がある。また、福島避難指示区域内の特に耕作が放棄された田畑等における雑草の繁茂は続いており、これら地域の火災による二次放射線拡散が懸念される。

このように植生域で発生した自然火災による煙や塵による放射性降下物の量を図4.1に示すプロセスによる評価方法を考案した。自然火災によって放射される放射性降下物の量を、植生の放射性核種含有量、発火確率および延焼速度を用いて評価するソフトウェアフローを構築した。植生分類図はLandsat-8/OLI及び森林簿により作成し、広葉樹、針葉樹、草地、水域及び人工物で分類している。発火確率は正規化水分指数から求めた乾燥値をもとにし、延焼速度の評価には気象情報及びASTER GDEMを用いた傾斜量図を用いた。

二次放射線拡散危険レベルの評価を行った結果を図4.2に示す。算出した放射線拡散量から危険レベルを5段階に分けている。福島第一原子力発電所から北西方向の山間部が危険度が高い結果を示した。これは、放射線量の高い地域であり、また、田畑地帯も火災が起こり易いエリアであることが分かった。時期毎のデータを比較すると、8月のデータと比較し、3月の解析結果が著しく危険度が高いエリアが増えているのが分かる。2013年8月と2014年3月の浪江町近郊の田畑及び森林帯の水分指数を比較した結果を植生分類図と共に図4.3に示す。3月は8月に比べて針葉樹帯及び田畑地帯の水分指数が低い。従って、針葉樹帯及び田畑地帯は冬季の乾燥値が高く、発火確率が高いことが二次放射線拡散危険レベルが冬季に高くなる要因であると推測された。

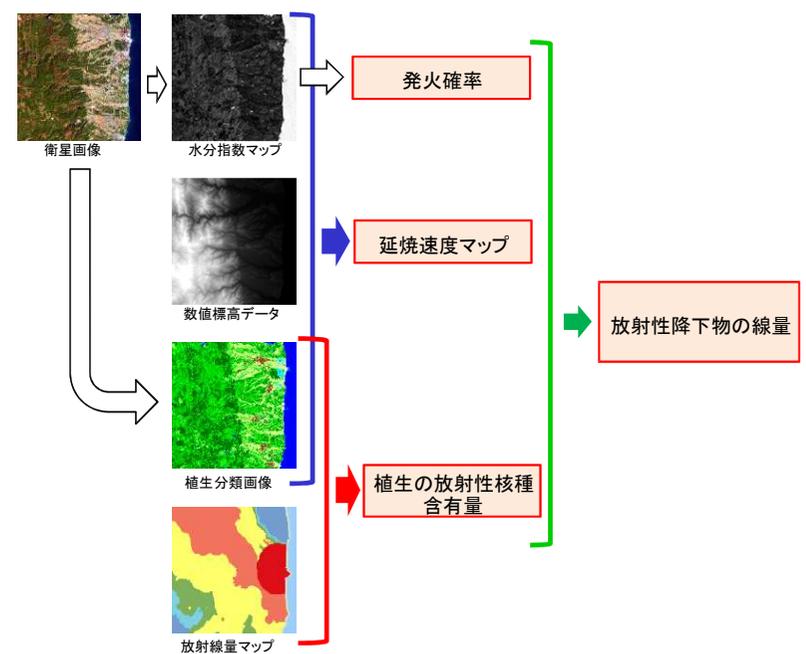


図4.1 火災による放射性降下物の予測方法の概要

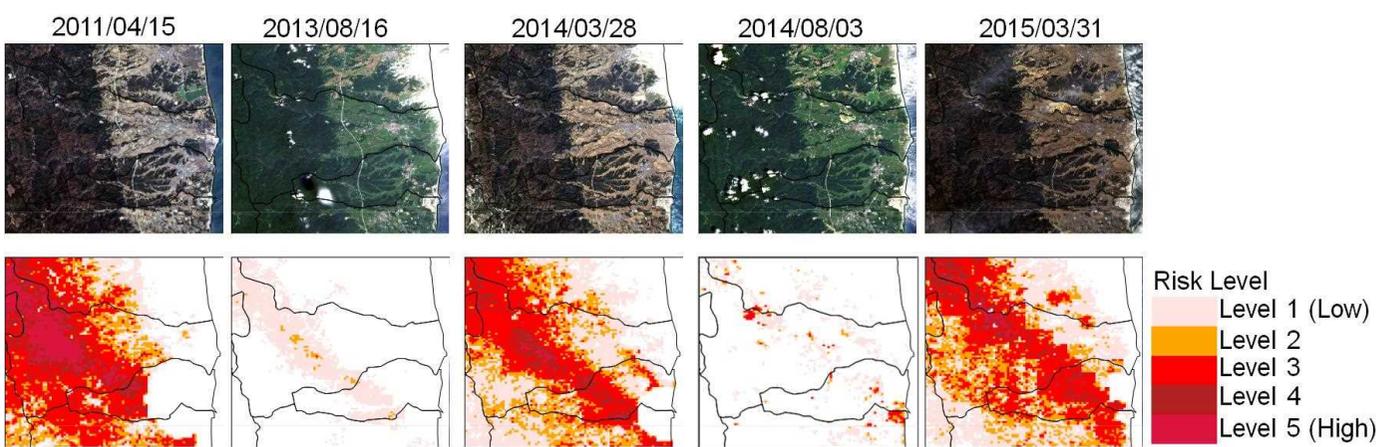


図4.2 自然火災による二次拡散危険レベルマップの例

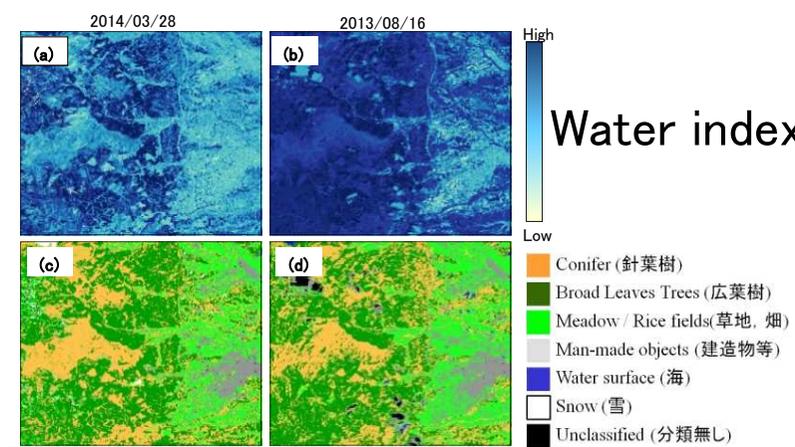


図4.3 浪江町近郊における冬季/夏季の水分指数比較
(a) 2014/03/28(水分指数) (b) 2013/08/16(水分指数)
(c) 2014/03/28(土地被覆分類図) (d) 2014/08/16(土地被覆分類図)

③ 「衛星を利用した復興支援に資する環境モニタリング方法の開発(2/2)」

実施内容及び主な研究開発成果

低軌道周回データの蓄積中継衛星を利用したセンサネットワーク(図5.1)は、携帯電話回線が使えない孤立地域におけるデータ転送に有効であり、また静止軌道衛星を使う場合と比較して地上設置センサの小電力化・小型化が可能であり、多くのセンサを密に配置し、空間的な観測分解能を向上させることができる。

本研究では、低軌道周回データの蓄積中継衛星を利用した放射線計測ネットワークの構築を検討し、まずフィジブルスタディとして、アルゴスシステムを用いた放射線計測システム(図5.2)を構築し、線量の遠隔計測が十分に可能であることを示した。

次に、超小型衛星「ほどよし3、4号」とコンプトンカメラを利用した放射線量分布計測ネットワーク(図5.3)の開発を行い、実験室内での線量計測、データ転送実験に成功している。

平成27年度11月現在において、福島避難指示区域への定常設置は無線局免許の制約のためまだ実現していないが、千葉県銚子市に定常設置している地上小型送信機から「ほどよし3号」へのデータ送信及び蓄積中継を継続的に実施している。研究成果として、衛星搭載のデータ蓄積中継装置を用いた「衛星を介した放射線量計測」の実験を行い、災害後観測の衛星利用の裾野を広げることができた。

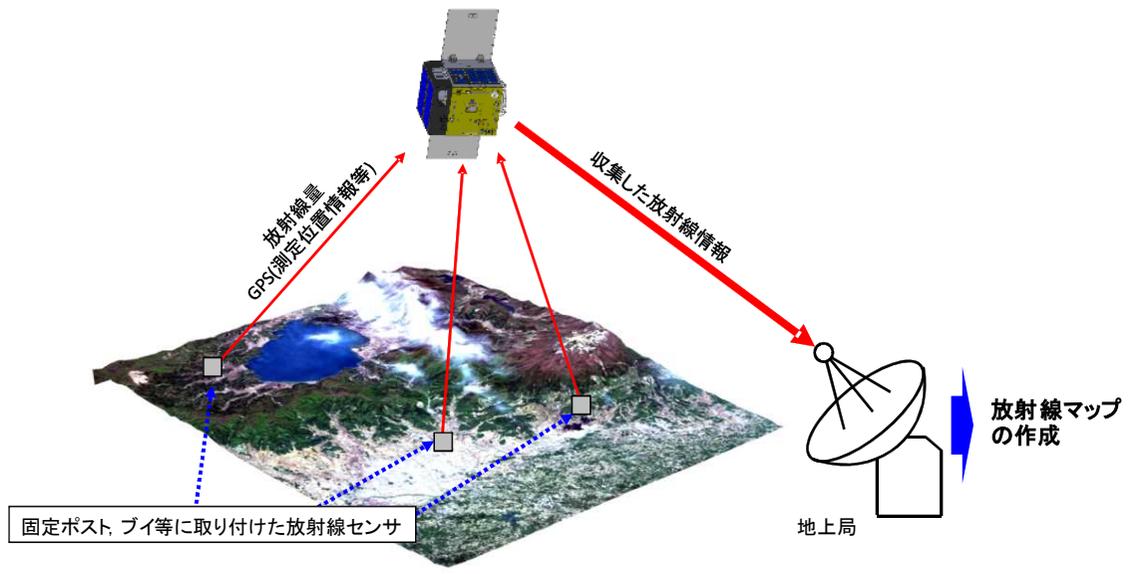


図5.1 衛星を用いた放射線計測ネットワーク

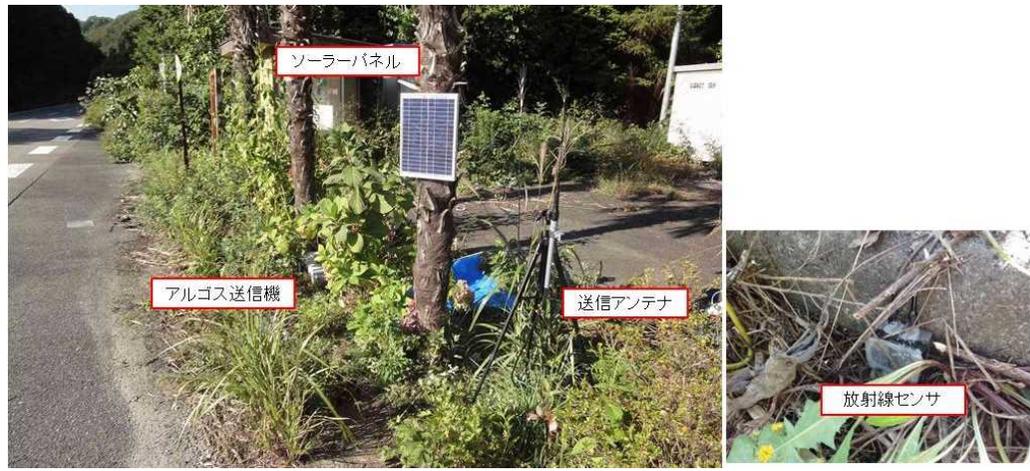


図5.2 アルゴスシステムを用いた放射線計測ネットワーク

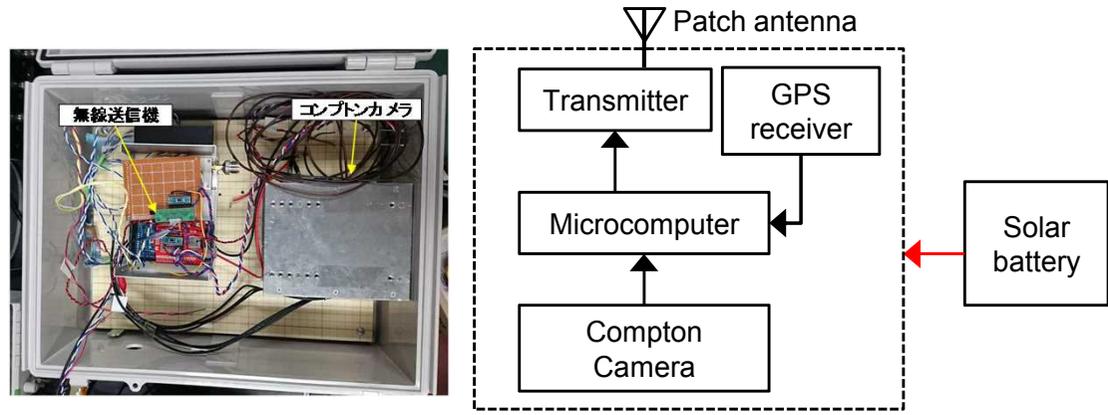


図5.3 放射線分布計測ネットワークに使用する地上送信機システムの概略

その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会展
	国内：0 国際：0	国内：0 国際：2	国内：6 国際：2	国内：0 国際：0	国内：4 国際：0	国内：1 国際：0

成果展開の状況について

超小型衛星の観測画像及びその解析結果を発信するために、図6.1および図6.2に示す「WebGISベースのデータ管理/配信システム」の構築を行うとともに、専門家以外の一般ユーザーでも簡単に閲覧可能なようにAjaxを使用したオンライン地図サービスをベースにした公開システムを構築し、これらの公開を行っている。

また、宇宙利用促進の一環として、超小型衛星の災害監視利用の実例となった。本研究は日本国および東京大学とウクライナ関連機関の協力を利用した課題であり、日・ウクライナ原発事故後協力合同委員会でも重要項目とされ、第2回（2013年7月17日、キエフ）においては両国からの歓迎が声明されるとともに、第3回（2015年11月27日、キエフ）においても本プロジェクトの成果報告を行った。世界的に見て数少ない原子力事故後の知見を得るとともに、超小型衛星と基幹衛星のコンステレーションによる宇宙利用とそれによる宇宙外交の有効性を示した。

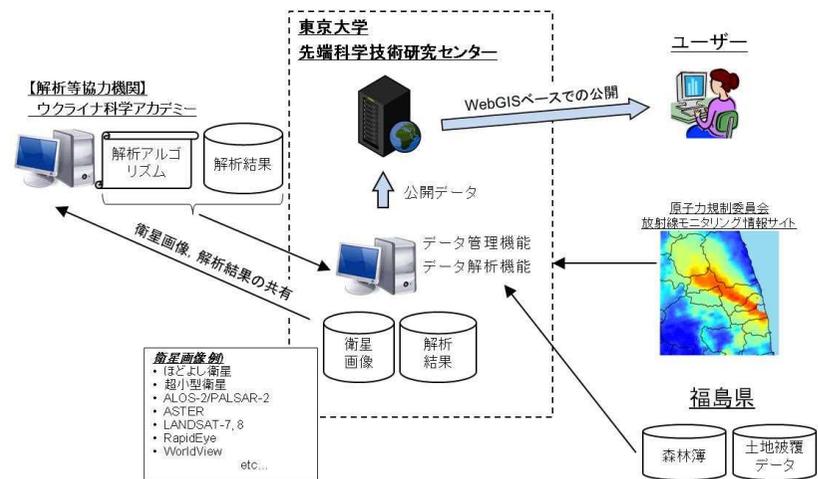


図6.1 WebGISベースのデータ管理/配信サービスの構成

今後の研究開発計画

2014年度に打ち上がった超小型衛星は現在も観測を継続しており、今後も定期的に福島避難指示区域周辺の観測を行っていくとともに、Landsatなどとあわせて観測画像の解析を引き続き行う予定である。

また、無線局免許が取れ次第、超小型衛星を利用した放射線量分布計測ネットワークを福島避難指示区域内に常設し計測を開始する予定である。

これら観測画像、解析結果は引き続き、本研究で構築したデータ配信システムにより公開を継続する予定である。



図6.2 WebGISベースの配信サービス例（火災による2次放射線リスクマップと衛星画像の比較例）

事後評価票

※「4. (2) 成果」以外については平成27年3月末現在で記載

1. 課題名 超小型光学衛星コンステレーションとLバンド SAR 衛星を用いた福島・チェルノブイリ周辺環境変化モニタリング
2. 主管研究機関 国立大学法人東京大学
3. 事業期間 平成24年度～平成26年度
4. 総事業費 42百万円
5. 課題の実施結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 8機の超小型光学衛星コンステレーションとALOS-2/PALSAR-2により取得した原子炉事故地域のデータに対し、①多種多様な観測データの効果的な解析方法を確立し、②持続的な復興支援に実用化可能な衛星ベースの環境モニタリング方法を提案することを目標とした。このうち4機の超小型衛星による観測（最高画素サンプリング間隔6.3m）とALOS-2を用いた利用方法を示した。また、ウクライナ科学アカデミーとの協力関係のもと、観測衛星LandsatやRapidEyeのデータを組み合わせることで、変化抽出や火災による放射性物質の拡散を予測するソフトウェアフローを構築した。超小型衛星によるデータをWeb上の地理情報空間サービスに適合させ、他の衛星データや解析結果と一緒に提供するシステムを開発した。さらに、地上で取得したコンプトンカメラデータを超小型衛星経由で、地上に中継するシステムを作成した。
「必要性」 超小型衛星は低価格でありながら、低軌道上から十分な解像度で地球観測データを取得することに注目し、特定の地域を多くの衛星で観測する構想は、小型化技術により可能となったものであり、今後の発展性が期待されている。衛星の数を増やすことで観測の頻度を向上させデータ提供を行うことは従来の地球観測利用ユーザの要望に合致するとともに、急速に超小型衛星の商業コンステレーションを構築しつつある米国などとの国際競争力の観点からも重要である。このことから、文部科学省の超小型衛星研究開発事業や内閣府の最先端研究開発支援プログラムとあわせて、技術開発が支援されてきた。 福島原子炉事故地域のような人の立ち入ることの困難な場所を観測し、チェルノブイリ原発事故での経験をもとに、火災などによる放射性物質の周囲への拡散を予報することは緊急性のある社会的な要請でもある。同時に、地上で取得した放射線計測データを衛星経由で中継することは、山間部の情報を得る上で重要とされ、原子力関係者からの期待も高い。また、外務省が主導する日ウクライナ

原発事故後協力委員会においても課題テーマの一つとして取り上げられ、相互の知見を今後の復興計画に活かすことにも貢献している。

「有効性」

超小型衛星から5～10m程度のピクセル間隔の地球観測が可能となること、広い刈幅（25km程度）を活かして狙った領域を観測できることを内外に示した。得られた画像の品質は良好であり、大型衛星だけでは足りない観測頻度を特定の地域に対して向上させ、相乗効果をもたらすことを明確にした。また、姿勢センサの問題があった場合にも、大型衛星が撮像したデータに基づくベースマップに対して位置合わせを行うことで、超小型衛星のデータを地理情報システムに入れ込み、大型衛星が取得したデータと同等に供給した。さらに、超小型衛星を中継して地上の孤立地域からのデータ中継の可能性を示した。類似の米国の企業活動が活発化する中、日本においてもいくつかの企業が超小型衛星を用いた地球観測ビジネスを開始しており、今後の実用化・事業化が期待される。

外務省が主催する日ウクライナ原発事故後協力委員会において、ウクライナ科学アカデミーとウクライナ立入禁止区域管理庁をカウンターパートとし、地球観測データを用いた被災地のデータ処理技術および被害予測手法について検討を行った。第2回（2013年7月17日、キエフ）においては本プロジェクトに対して両国からの歓迎が声明されるとともに、第3回（2015年11月27日、キエフ）においては両国から成果報告を行った。この委員会において、本プロジェクトは、日本とウクライナの原発事故後協力の代表的な活動として紹介された。

本プロジェクト期間中にポスドクが衛星設計・製作からデータ解析、地理情報システム構築まで一貫した利用研究を行うことでハードウェアとソフトウェアの両面から人材育成を行った。また、衛星を活用する方策として、放射線計測の専門家と共同で地上に設置したコンプトンカメラの画像を超小型衛星経由で中継するシステムを構築した。

「効率性」

本プロジェクトは衛星開発、センサ開発およびデータ解析の専門家による実施体制を組むとともに、日本において初めての事象に対処するために、チェルノブイリ原子力発電所事故の経験を有するウクライナ科学アカデミーと立入禁止区域管理庁の協力を得た。このため、超小型衛星やALOS-2の打ち上げ前から、現地調査や放射能拡散防止の観点から、ウクライナの専門家と現地調査を行うとともに、チェルノブイリ事故の知見を基にした観測計画、調査項目、被害予測モデルについての検討を開始することができた点で効率的であった。現地調査の結果により、地形や植生の観点から福島とチェルノブイリの相違点がわかり、観測データ解析手法についてモデル構築から再検討を行うことができた。

Web上の地理情報システムについては、商用ソフト（ArcGIS）およびWebサービス（Google Map）の2つの候補に対して操作性や拡張性の観点から比較検討を行い、前者は専門家向けの情報発信に、後者は広報用の情報発信に有用であることから、併用を行っている。

超小型衛星およびALOS-2ともに衛星打ち上げが最終年度になったため、1年目から現地データ取得やモデル構築を行うとともに、必要となるソフトウェアを構築した。初期検証も含めるとデータ利用を行える期間が非常に短い中で、地図と合う幾何学精度を有する衛星観測画像を実利用に供することができた。

(2) 成果

※平成27年11月1日現在

「アウトプット」

「チェルノブイリ事故後の知見を基にした衛星観測施策の検討」においては、チェルノブイリにおける二次放射線拡散が自然火災と河川等を介した移動である知見を得た。前者では、耕作放棄地の枯草などの火災発生による危険レベルを求める観測データが必要と判明した。後者は放射線量の高いホットスポットの観測データを超小型衛星経由で中継することが重要との指針を得た。

「観測データの取得、解析および現地調査」においては、高分解能センサを搭載した超小型衛星で建屋や田畑が詳細にマッピングされた。4機の超小型衛星のデータを大型衛星の画像に位置合わせし、幾何学的な性能を保証した。輝度校正機能のない超小型観測センサのデータに対し、正準相関分析で大型衛星と類似の特性に合わせこんだ。ALOS-2、Landsat および RapidEye の観測データとあわせて時系列処理を行い、2時期データによる変化抽出を可能とし、十分に実利用に足ることを示した。変化抽出結果は現地調査により、除染による森林伐採であることを確認した。

「衛星を利用した復興支援に資する環境モニタリング方法の開発」では、二次放射線拡散危険レベルを、植生の発火確率、延焼速度や放射線核種含有量の情報を元に算出した。森林簿により作成した植生分類図と、地球観測衛星により観測された植生指標、水分指標、斜面傾斜角を用いることで、ソフトウェアフローを完結した。水分指数が低い3月の危険度が高く、とりわけ針葉樹林や田畑については注意が必要であることが導かれた。次に、超小型衛星に搭載されている低電力の通信機能を用いて、地上の孤立地域の放射線測定結果を中継している。福島での定常運用には至らなかったが、災害時の情報伝達手段としての可能性を示した。以上のデータは Web 上の地理情報空間サービスによって提供している。

「アウトカム」

ウクライナ科学アカデミーとウクライナ立入禁止区域管理庁の関係者と早い段階で研究協力が合意されたことから、研究期間内に十分な議論を行い、方針を定めることができた。従って、本プロジェクトは外務省が主催する日ウクライナ原発事故後協力委員会の第2回（2013年7月17日、キエフ）および第3回（2015年11月27日、キエフ）会合において結果を発表し、二国間協力の推進に貢献した。

対象地域に立ち入るために同行した原子力関係者と、計測手法についての意見交換を進める過程で、必要とされるシーズの検討を行った。無人機を用いた計測が行われているが、補完的に画像観測および現地データの中継に関して、超小型衛星が貢献できることが判明した。前者については山間部を含む詳細な画像取得で、後者についてはコンプトンカメラ画像の中継という形で実現に至った。福島での無線局免許がおりるまでは、銚子で継続運用をしている（2015年9月～）。

招待講演やプレス発表などで、超小型衛星の能力および可能性について、社会に示すことができた。

(3) 今後の展望

2014 年度に打ち上がった超小型衛星は現在も観測を継続しており、今後も定期的に福島避難指示区域周辺の観測を行っていくとともに、Landsat などとあわせて観測画像の解析を引き続き行い、長期的にわたる植生や土地利用の変化を追跡する。

また、福島からの無線局免許が取れ次第、低電力の放射線量分布計測ネットワークを福島避難指示区域内に常設し、超小型衛星を中継した計測を開始したい。測定装置については原子力関係者と検討を進めている。

これら観測画像ならびに解析結果は順次更新し、本研究で構築した Web 上の地理情報空間サービスにより公開を継続する。

以上の研究活動は引き続き、外務省ならびに関係省庁、およびウクライナ研究機関と協力して実施していく予定である。

6. 評価点

A

評価を以下の 5 段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。

評価理由

超小型衛星 4 機に搭載した光学センサーで福島の原子炉事故地域を観測し、十分な解像度の画像を取得し、幾何学的補正を行った後、Web 上の地理情報空間サービスによる公開を行っている。あわせて、ALOS-2 をはじめとする大型衛星の画像とあわせて利用し、土地利用や植生の変化を明らかにするなど、実利用に供している。現地のデータを超小型衛星経由で中継するシステム構築も行い、実用化のめどをつけている。また、外務省の施策に貢献している。さらに超小型衛星による観測頻度を上げていくことで、データ利用者のニーズを満たすシステムになると考えられる。

東京電力福島第一原子力発電所事故等による放射線物質による汚染の経年変化と環境モニタリングを行う新たな手法の開発は有用であり、復興に向けた緊急性のある課題として、システム構築から情報公開まで対応するなど、宇宙航空利用の促進に貢献している。

なお、本課題は、安全安心に関する重要な分野であることから、より効果的な事業とするため、地上で取得したコンプトンカメラデータを超小型衛星経由で地上に中継するシステムの既存の通信手段と比較した場合の優位性を整理するなど、今後の活用と発展に期待する。