特集論文

地球観測衛星ALOSシリーズの 防災への貢献

大野新樹*

中村聖平* Shohei Nakamura

藤井康隆* Yasutaka Fujii

Contribution of Advanced Land Observing Satellites to Disaster Reduction

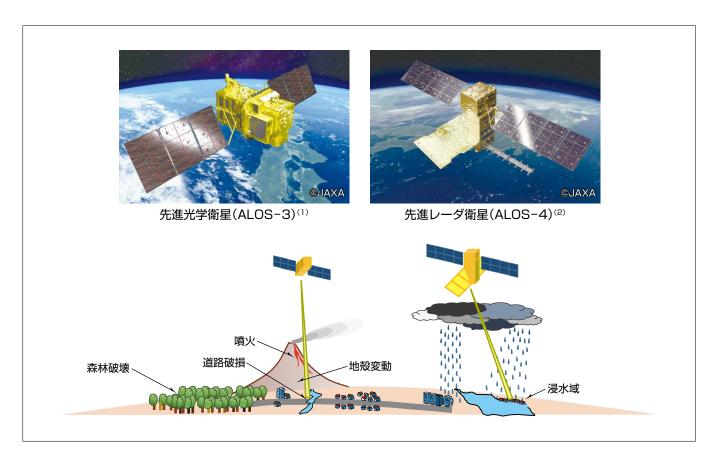
要旨

人工衛星による地球観測は、陸域、海洋、大気、気候・気象監視、災害監視、地図作成等の分野で行われており、これら宇宙からの情報は、安心・安全・快適な社会の創生に大きく寄与している。近年の著しい気候変動によって、地震、噴火や津波、及び河川の氾濫による浸水害等が頻発しており、国民の生活基盤となる家屋、財産はもとより、尊い生命までも脅かす災害が発生している。各省庁及び行政機関では、これらの災害に対してハザードマップの作成や適時情報開示等による防災・減災の活動に取り組んでおり、人工衛星からの情報は必要不可欠であり、より詳細で、かつ高頻度な情報提供が求められている。

三菱電機では、現在2機の地球観測衛星の開発を進め

ている。一方は先進光学衛星(ALOS(Advanced Land Observing Satellite)-3)であり、大型化・高性能化した光学センサを搭載し、広観測幅かつ高分解能を可能にし、クリアな可視画像の取得を実現する。もう一方は、先進レーダ衛星(ALOS-4)であり、全天候観測可能なフェーズドアレー方式Lバンド合成開口レーダ(PALSAR-3)を搭載し、広観測幅での陸域・海上の観測を実現する。

これら2機の衛星から得られる観測情報は、地殻変動の モニタリング、ハザードマップの作成、避難計画の策定等 による防災・減災への活用はもとより、災害発生時の発生 地点の特定、災害状況確認、及び救援部隊への情報提供等 に活用されて二次災害の発生抑制にも貢献する。



ALOSシリーズによる地球観測のイメージ

ALOSシリーズによる地球観測は、光学衛星とレーダ衛星との併用による災害発生時の昼夜・天候を問わない観測が期待されている。また、災害発生時だけでなく、平時のベースマップ作成や危険地域のモニタリング活動を通じて、防災・減災に貢献していく。

1. まえがき

人工衛星による地球観測は、陸域、海洋、大気、気候・気象監視、災害監視、地図作成等の分野で行われており、観測で得られた情報は、安心・安全・快適な社会の創生に大きく寄与している。例えば、地球観測衛星としてよく知られている気象衛星"ひまわり"は、雲、海氷分布、及び地面・海面温度の観測を行い、台風やゲリラ豪雨の予測等の日常生活だけでなく、治水、農作物の生育、漁獲高予測等へも広く利用されており、人工衛星による観測は必要不可欠なものになっている。近年の著しい気候変動によって地震、噴火、津波や河川の氾濫による浸水害等の発生が以前に比べ増大しており、大規模・広範囲な災害が発生していることから、人工衛星からの情報の重要性は高まりつつあると同時に、より詳細で、かつ高頻度な情報提供を必要としている。

当社が開発を進めている2機の地球観測衛星(ALOSシリーズ)は、光学センサ、及び電波センサによる国内・海外問わず全地球規模での可視及び電波による広観測幅、高分解能、及び高頻度を実現する。表1にALOS-3とALOS-4の主要諸元を示す。これらの観測衛星から得られた情報は、平時では全地球規模でのベースマップの作成、危険地域のハザードマップの作成、活火山のモニタリング、

表 1. ALOS-3とALOS-4の主要諸元

	ALOS-3	ALOS-4
ミッション機器	広域・高分解能光学センサ ・パンクロマチックバンド 地上分解能:0.8m 観測幅:70km ・マルチバンド(カラー) 地上分解能:3.2m 観測幅:70km	Lバンド合成開口レーダ ・スポットライトモード 分解能:1.0m 観測幅:35km ・高分解能モード 分解能:3.0m 観測幅:200km ・広規観測モード 分解能:25.0m 観測幅:700km
サイズ	$5.0 \times 16.0 \times 3.5 (m)$	$10.0 \times 20.0 \times 6.4 (m)$
質量	約3t	約3t
設計寿命	7年	7年
運用軌道	太陽同期準回帰軌道 高度:669km 回帰日数:35日 降交点通過地方太陽時:10:30	太陽同期準回帰軌道 高度:628km 回帰日数:14日 降交点通過地方太陽時:12:00

地殻・地盤の変動観測,及び土木インフラの変化確認等の防災情報として活用される。また,災害発生時には,道路・鉄道・橋・建物等の被災状況,河川の氾濫域の確認はもちろん,平時のデータと比較することによる地滑り・噴火による地形変化,地震による地殻変動観測等を行い,災害発生状況の早期確認,更なる災害の発生リスクの把握や地域の安全確保等の情報提供に活用される。

本稿では、先進光学衛星(ALOS-3)及び先進レーダ衛星(ALOS-4)の概要と搭載されるセンサの特長に加え、防災への適用例について述べる。

2. 先進光学衛星(ALOS-3)

2.1 光学センサ(広域・高分解能センサ)

ALOS-3に搭載される広域・高分解能光学センサは、 防災・減災利用に資する広観測幅と高空間分解能を併せ持 つことを最大の特長とする可視近赤外域の光学センサであ る。表2に広域・高分解能センサの観測性能を示す。

広観測幅と高空間分解能の両立性を表す指標として、観測幅を空間分解能で割った値である瞬時観測点数を考える。 図1に近年開発された他の地球観測衛星に搭載された光学

表2. 広域・高分解能センサの観測性能

21 1-11	
項目	諸元
撮像方式	TDI撮像方式
分光方式	焦点面分光方式
観測バンド構成	パンクロマチック(Pa) : 1 バンド マルチスペクトル(Mu) : 6 バンド
	Pa: 0.52~0.76μm
観測波長域	Mu パンド1:0.40~0.45µm パンド2:0.45~0.50µm パンド3:0.52~0.60µm パンド4:0.61~0.69µm パンド5:0.69~0.74µm パンド6:0.76~0.89µm
観測幅(注1)	70km
空間分解能(注1)	Pa: 0.8m/Mu: 3.2m
MTF ^(注2)	Pa: 0.1以上/Mu: 0.2以上
S/N ^(注2)	200以上
量子化ビット数	11bit
(Y-1) + Y	COL 1 2 0 = = = = = = (1 = 1 = 1 = 1 = 1 = 1 = 1

(注1) 軌道高度669kmからの直下撮影時(ノミナル値)

(注2) 性能を規定する観測条件で MTF: Modulation Transfer Function

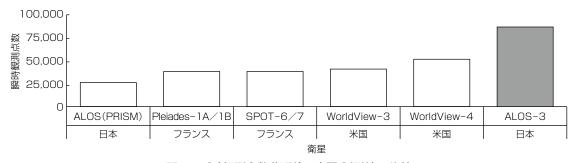


図1. 瞬時観測点数(観測幅/空間分解能)の比較

センサと広域・高分解能センサのPaバンドの瞬時観測点数の比較を示す。広域・高分解能センサの瞬時観測点数は、海外の一線級の地球観測衛星と比較しても多いことが分かる。広域・高分解能センサは世界最高レベルで広観測幅と高空間分解能を両立させる光学センサである。

広域・高分解能センサでは、大口径な集光光学系によって信号光量を稼ぐとともに、TDI(Time Delay Integration) 撮像と呼ばれる新しい撮像方式を適用することによって、高い取得画像品質(S/N)の下で、高空間分解能を実現している。TDI撮像とは、衛星進行に伴う光学センサの視点移動に同期して、検出器内で信号電荷を転送・加算し、設定したTDI段数分だけ信号電荷を増加させて出力する技術である。広域・高分解能センサでは、Paバンドで最大128段、Muバンドで最大32段の信号加算を行うことが可能であり、高空間分解能でありながら、S/N比(Signal to Noise ratio)の高い高品質な画像を提供することができる。

TDI撮像では、光学センサの視点移動と検出器内での信号電荷の転送を精密に同期させる必要がある。ALOS-3では、衛星の姿勢制御にTDI適合型3軸駆動制御方式(TPC:TDI Pointing Control)を適用し、衛星と広域・高分解能センサが協調した撮像制御を行うことでこれを実現する。さらに、TPCを用いることで、衛星の進行方向と異なる方向にセンサの視点を移動させて撮像を行うことも可能である(方向変更観測)。図2に南海トラフ地震発生時を想定した観測シミュレーション結果を示す。また、図3に陸域観測技術衛星"だいち"(ALOS)による取得画像と広



(a) ALOSの取得画像



(b) ALOS-3のシミュレーション画像図3. ALOSとALOS-3の画像比較(1)

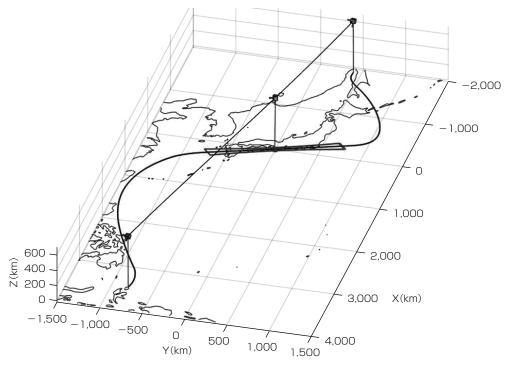


図2. 観測シミュレーション結果(方向変更観測)

三菱電機技報・Vol.94・No.2・2020

域・高分解能センサのシミュレーション画像の比較を示す (共にパンシャープン(高解像度白黒画像と低解像度カラー 画像を合成処理した)画像)。

南海トラフ地震が発生した際には関東地方から東海・近畿・太平洋沿岸地域を一度に観測して早急な情報収集を行うことが望まれている。広観測幅と高空間分解能を併せ持つ光学センサを用いて、TPCによる自由度の高い観測を行うことで、広範囲にわたる災害状況を正確に把握できる質の高い画像情報を効率的に取得することが可能になる。

2.2 集光光学系(3)

光学センサが広観測幅と高空間分解能を両立させるためには、視野が広く、かつ大口径・長焦点距離の集光光学系が必要になる。広域・高分解能センサでは、曲面鏡4枚を組み合わせた軸外しタイプの反射光学系によって、この集光光学系を実現している。TMA(Three-Mirror Anastigmat)をベースとした上で、曲面鏡を1枚多く用いた設計を採ることによって、コンパクトな全長ながら、広い視野全域にわたって高い結像性能を得ることができている。軸外しタイプであることから、多くの反射光学系に見られる中心遮蔽は存在せず、明るくシャープな画像が得られる。図4に広域・高分解能センサの集光光学系のプロトフライトモデルを示す(各鏡の鏡面に保護カバーが取り付けられている)。

2.3 検出器と焦点面構成部

光学センサが広観測幅と高空間分解能を両立させるためには、高精細な検出器の画素を観測幅方向に多数配列した焦点面構成部が必要になる。広域・高分解能センサでは、検出器に高精細なTDI型長尺検出器を採用し、この検出器を観測幅方向に多数スタガ配列することによって、この焦点面構成部を実現している。検出器の画素ピッチはPa

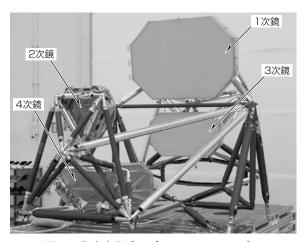


図4. 集光光学系のプロトフライトモデル

バンド: 8 μm/Muバンド: 32 μmであり、観測幅方向に 配列される総画素長は750mm以上に及ぶ。

3. 先進レーダ衛星(ALOS-4)

3.1 SARセンサ(PALSAR-3)システム

ALOS-4に搭載されるSAR(Synthetic Aperture Radar) センサ(PALSAR-3) は、"だいち 2 号" に搭載された前号機であるPALSAR- $2^{(4)}$ からの機能を継承しつつ、性能の飛躍的な改善を実現している。**表 3** にPALSAR-3の観測性能を示す $^{(5)}$ 。

PALSAR-2と同様にSARアンテナは、アクティブフェーズドアレーアンテナを採用して二次元の電子ビーム走査が可能である。これによって、高分解能化に特化したスポットライトモード、スキャンSAR方式を用いた広域観測モードなど、多様なニーズに対応した観測を可能にする。また、PALSAR-3では、新規にデジタルビームフォーミング技術を導入することによって、分解能及び画質を維持したまま200kmの観測幅(PALSAR-2に比べて最大4倍)を実現する。200km観測幅を観測した場合の画像例を図5に示す。1回の観測幅を拡大することで、観測頻度の向上などミッションに必要な性能を実現する。

3.2 SAR画像を用いた防災への貢献事例

PALSAR-2は、一度に広域な領域を高精度に観測することが可能であり、干渉SARと呼ばれる技術の有効性が

表3. PALSAR-3の観測性能

項目		内容	備考	
周波数		L带	1,257.5MHz(中心)	
帯域幅		84MHz(最大)		
入射角		8~70度		
観測モード		スポットライトモード		
		高分解能(ストリップマップ)モード		
		広域観測モード		
分解能		3 × 1 m	レンジ×アジマス	
		3 × 3 (m) 6 × 6 (m) 10×10(m)		
		25×25(m)		
観測幅		35×35(km)	ALOS-2: 25×25(km)	
		100~200km	ALOS-2: 50~70km	
		700km	ALOS-2: 350km, 490km	
画質	NESZ	-20dB以下	- 観測モードによる	
	S/A	15dB以上		
観測方向		右方向及び左方向		
偏波		単偏波/2偏波/4偏波		
SARアンテナ		アクティブフェーズドアレーアンテナ		
		3.6(エレベーション)×10(アジマス)(m)		

NESZ: Noise Equivalent Sigma Zero S/A: Signal to Ambiguity ratio

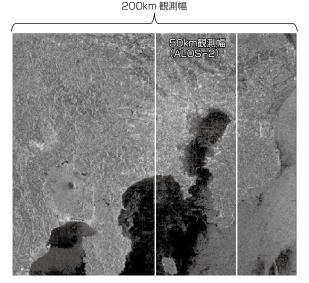


図5. 200km観測幅のSAR画像例(PALSARのデータを基に作成)

実証されている。干渉SARとは、2回の異なる時刻に取得したSAR画像の比較を行い、数cmオーダー級の変化の検出を可能にする技術であり、災害リスクや災害発生後の被災状況の把握等に強く期待されている。

図6に、SAR画像を用いた災害領域の観測結果の一例を示す。この画像は2019年10月に発生した台風19号による千曲川(長野県)の堤防決壊の様子とそれに伴う浸水被害をALOS-2搭載PALSAR-2の高分解能モード(3m分解能)で観測した結果である。図6では、防波堤の決壊箇所を詳細に捉えている。また、住宅街での浸水エリアでは、千曲川から流入した水が地表面を覆ったことで、レーダの観測信号を受信した信号の強さが変化しており、周囲の領域と比較して画像の強度が低下している様子が確認できる。

これらのようにレーダ画像を用いることで、災害発生箇所の特定などを迅速に行うことが可能である。ALOS-4搭載のPALSAR-3では、一度に観測可能な領域がALOS-2から約4倍に拡大しており、広域災害や複数の地点で同時に災害が発生した場合でも、観測頻度を下げることなく観測することが可能であり、ALOS-4打上げ後の災害監視に多くの期待が寄せられている。



図6. ALOS-2による千曲川観測結果(JAXA/EORC解析結果)(6)

4. む す び

開発中の2機の地球観測衛星(ALOSシリーズ)の概要,及び特長について述べた。これらの衛星は、高度約600kmから常時全地球規模の観測による地上の変化をモニタリングすることによって、我々の日常生活を脅かす、地震・噴火・及び水害等の被災状況の早期取得、並びに防災・減災に必要不可欠な情報を取得することで、安心・安全・快適な社会の創生に貢献する。

参考文献

- (1) JAXA:先進光学衛星(ALOS-3) http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos3/index_j.html
- (2) JAXA: 先進レーダ衛星(ALOS-4) http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos4/index_j.html
- (3) 阿波祐二,ほか:先進光学衛星の目的と技術,三菱電機技報, 91, No.2, 108~111 (2017)
- (4) 針生健一,ほか:陸域観測技術衛星2号(ALOS-2) ―最先端LバンドSARによる高精度な地球観測を目指して―, 三菱電機技報,85, No.9,521~524 (2011)
- (5) Motohka, T., et al.: STATUS OF THE ADVANCED LAND OBSERVING SATELLITE-2 (ALOS-2) AND ITS FOLLOW-ON L-BAND SAR MISSION, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2427~2429 (2017)
- (6) JAXA/EORC: 記録的な被害をもたらした台風19号の脅威 https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2019/tp191028.html

三菱電機技報·Vol.94·No.2·2020 17(115)