

いつでもどこでも宇宙から撮像 ——リアルタイムアースイメージ——

Real-time Earth Imaging

齋藤宏文 金岡充晃

A bstract

現在では、インターネット上で、人工衛星から撮影した地表の画像が見られる。しかし、その撮像時期には大きな遅延があり、「今の画像が欲しい」という人々やビジネスの要望に答えられていない。近年、100 kg 以下の小型衛星が数億円で開発できるようになったため、これを多数機打ち上げて、数時間以内に、地球上のあらゆる場所の光学画像を低コストに提供できるサービスが進んでいる。光学画像に加えて、常時撮像が可能なマイクロ波による地球撮像が、実現しつつある最新の状況を解説する。

キーワード：地球観測、小型衛星、光学望遠鏡、合成開口レーダ、高頻度観測

1. はじめに

現在、地球周回軌道から撮像された地表の撮像画像は、インターネット上でも自由に見られるようになってきており、人々の生活に親しみのあるものになってきている。しかし、その撮像時期には大きな遅延があり、「今の画像が欲しい」という人々やビジネスの要望に答えられていない。その原因は、観測衛星と打上げコストが高く、少数の衛星しか軌道上で動作していないために、地球上のある地点を観測できる間隔が数週間以上となっているためである。

近年、100 kg 以下の小型衛星が数億円で開発できるようになった。これを多数機打ち上げて、数時間以内に、地球上のあらゆる場所の光学画像を低コストに提供できるサービスが、米国で進んでいる。これによって、

人々の暮らしに新しい影響が及び、新しいビジネスも生まれてこよう。本稿では、人工衛星からの光学観測とマイクロ波観測による、「いつでもどこでもアースイメージング」ができるようになる最新の状況を解説する。

2. では、小型衛星と光学イメージングの技術について概観する。3. では、小型衛星群による光学アースイメージングミッションの現状について紹介する。4. では、夜間と曇天を問わずマイクロ波で撮像できる合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) を小型衛星に搭載する開発について概説する。5. では、光学撮像とマイクロ波撮像を共に組み入れた、「いつでもどこでもアースイメージング」が可能になる近未来の状況を予測して、結論に代える。

2. ここまで来た小型地球観測衛星の技術

地球観測衛星は、近年、著しく小型化されてきている。図1は、光学地球観測衛星を、衛星重量と地上分解能の図にプロットしたものである。1,000 kg 程度の大型衛星の開発コストは数百億円と推定され、100 kg 以下の小型衛星のコストは数億円である。100 kg 以下の小型光学観測衛星を10~20機、総コスト数十億円で生産して打ち上げ、「いつでもどこでもアースイメージング」が、現実のものとなりつつある。

ではなぜ、小型衛星で、比較的高い分解能の光学撮像が可能になってきたのであろうか。最近の技術を紹介し、表1にその概要をまとめる。

本会誌では、①文部省(文部科学省)学術用語集電気工学編、②本会編の改訂電子情報通信用語辞典、③本会編のエンサイクロペディアハンドブックに基づき用語を統一している。本稿中の「小型」「大型」は上記②に従う。「小形」「大形」であるが、ここでは「小型」「大型」で掲載した。

齋藤宏文 正員 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
E-mail saito.hirobumi@jaxa.jp
金岡充晃 シー・エス・ピー・ジャパン株式会社航空宇宙政策・産業グループ
E-mail kaneoka@csp.co.jp
Hirobumi SAITO, Member (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara-shi, 252-5210 Japan) and Mitsuteru KANEOKA, Nonmember (Aerospace Policy & Industry Group, CSP Japan, Inc., Tokyo, 100-0011 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.97 No.7 pp.576-581 2014年7月
©電子情報通信学会 2014

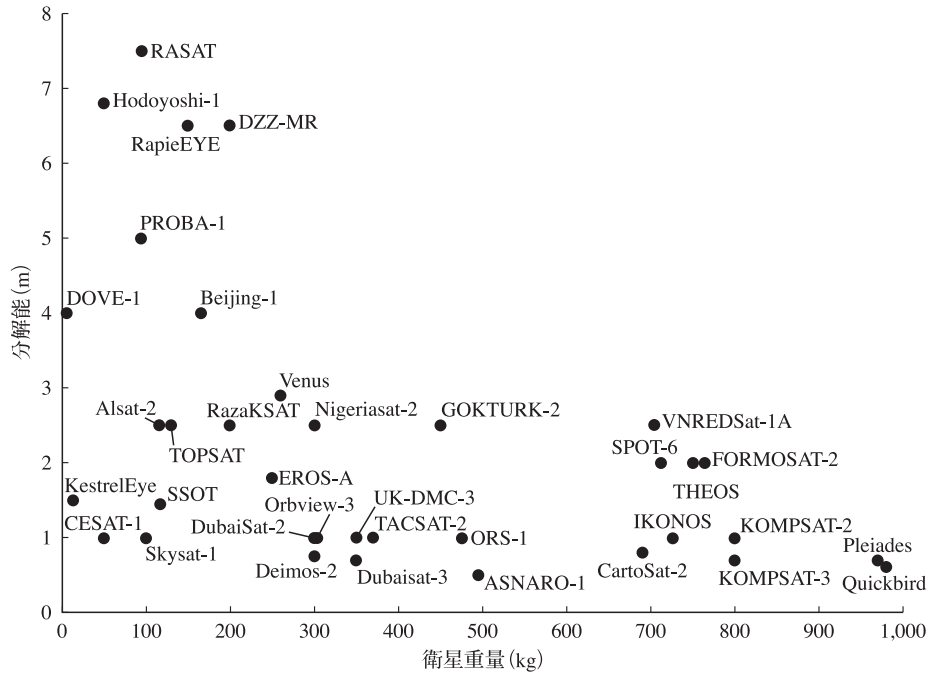


図1 光学観測衛星の重量と地上分解能

2.1 光学センサの小型化

100 kg の重量の小型衛星の典型的なサイズは、1 辺 0.7 m 程度である。これに十分搭載できる光学センサとして、口径 0.2 m のものを考えると、例えば高度 680 km ではその地上分解能 R_g は、光の回折限界の原理から約 2 m となる。焦点距離 f は、光学系の明るさ、画像ひずみ、ピクセルサイズの要請から $f=1.6\sim 3$ m となる。約 0.7 m のサイズの小型衛星にこの光学系を搭載するためには、望遠鏡の光学路を反射鏡で数回程度折り返して、小型衛星に収納する手法が用いられる。

空気のない宇宙空間での光学系のもう一つの問題は、各部の温度不均一による熱変形である。小型衛星では、熱伝導性が高く、熱膨張率が小さい炭化けい素材で光学系を作成することで口径 0.2 m の望遠鏡重量では 13 kg 程度に軽量化されている⁽¹⁾。

検出器には、素子数 1 万程度の一次元電荷結合素子を用いる。装置重量は数 kg 程度となる。

3. に述べる更に先端的な、地上分解能 1 m を狙う小

用語解説

パルス圧縮 パルス波形の電波を用いるレーダでは、そのパルス幅時間のうちに電波が進む距離の 1/2 が距離分解能に相当する。しかし、距離分解能を向上させるためには、送信パルスを極短パルス化する必要があり、困難が伴う。このため、極短パルスは広域な周波数成分を持つことを利用して、広帯域な周波数を含む長パルスを送信し、周波数軸上での演算処理を行い距離分解能を向上させる手法を、パルス圧縮と呼ぶ。パルス期間内に周波数を連続的に掃引するチャープ方式が広く用いられる。

表 1 地上分解能 2 m の 100 kg 級小型光学観測衛星の代表的な性能

機能	重量/性能	技術特徴
衛星システム	120 kg	標準バス 多数機生産
光学望遠鏡	13 kg 分解能 2 m	口径 0.2 m, $f=3$ m 折返し光学系 炭化けい素材
光学検出装置	5 kg	一次元 CCD, 1 万素子
データ蓄積	4 kg 200 GByte	フラッシュメモリ 誤り訂正符号
データ送信	2 kg 300 Mbit/s	位相振幅多値変調 窒化ガリウム増幅器
姿勢制御	15 kg 精度 0.003°	ホイールじょう乱管理
電源供給	20 kg 180 W	高効率太陽電池 リチウムイオン電池

型光学衛星の詳細は不明な点が多いが、衛星サイズを最大限に利用して望遠鏡口径を 0.3~0.4 m に大きくとり、更に焦点距離を 3 m 以下に抑えて、光学系の折返しを行い、衛星サイズに収納できるようにしているようである。

2.2 データ蓄積伝送

典型的な衛星からの画像データのデータ量は 1 枚当たり数 Gbit 程度である。画像データは、データレコーダに蓄積され、衛星が地球局上空に来た際に再生されて伝送される。メモリ素子には最近ではフラッシュメモリが用いられているが、宇宙空間での放射線粒子の飛来により、保持されている電荷が変化して、ビット反転する可

性能がある。これに対しては、適切に誤り訂正符号を付加することにより、民生用の最新のフラッシュメモリなどのメモリデバイスが宇宙で使用可能である。数百枚の画像データが蓄積できる、データ容量数十～百 GByte、装置重量数 kg のデータレコーダが実現されている

観測データの地球局への伝送には、現状では X 帯 (8.025～8.4 GHz) が用いられる。この周波数帯域で高速な通信速度を実現するために、1 シンボルに 3～4 bit の情報を載せる 8 PSK (8 Phase Shift Keying) や 16 QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) などの振幅位相変調方式を利用して、数百 Mbit/s のデータ伝送が行われている。また、筆者らにより、窒化ガリウム電力増幅器を利用して、小型衛星にも適合する消費電力 20 W、重量 1.4 kg の 300 Mbit/s の 16 QAM 送信機が開発されている⁽²⁾。

2.3 姿勢制御，画像位置決定

観測したい地表地点を撮像するには、望遠鏡の視野角にターゲット地点が含まれ、撮像期間内に有害な姿勢の変動がないよう、姿勢制御精度 0.005°、姿勢安定度 0.02°/s 程度の三軸姿勢制御が必要である。衛星の姿勢制御は、衛星内部のモーメントホイールと呼ばれるモータ駆動の回転体の回転速度を制御する装置により、角運動量保存則を利用して衛星の姿勢を制御する。衛星の慣性空間における姿勢は、複数の星の測角を行うことで決定される。100 kg 級の小型衛星において、このような姿勢系搭載機器の重量は、約 15 kg 程度で実現できるようになっている。

更に、観測画像の利用を考えると、衛星からの画像を地図上に重ね合わせる必要がある。観測された画像上の点の位置が 5 m 程度の精度で取得できると、地図情報と重ねられることが経験的に知られている。しかし、このように精密な精度になると、光学系の熱構造ひずみによる光学軸のずれが問題となってくる。このためには、あらかじめ地表に目標となる基準点を設置して、打上げ後に光学軸のずれを推定することが行われている。

2.4 小型衛星の低コスト打上げ手段

小型衛星の製造コストとともに、打上げ手段の低価格化も重要な問題である。ピギーバック打上げと呼ばれる、大型衛星の打上げの際の余剰打上げ能力を利用して小型衛星をロケットに搭載する方法が、各国で行われている。また、小型衛星打上げ専用の小型ロケットも、地上からの発射型のものとしては、アメリカのトラス、ロシアのドニエプロロケット、飛行機から発射されるものとしては、アメリカのペガサスなどがある。国際的な打上げ標準価格は、衛星 1 kg 当り 100～300 万円程度である。100 kg の衛星では、1～3 億円が国際的な相場である。

3. 小型衛星群による光学アースイメージング

小型衛星技術の発展により、100 kg 以下の小型衛星でも高分解能画像・映像を撮像できるレベルに到達しつつあることから、民間投資や政府支出による小型衛星群プロジェクトが進められてきている⁽³⁾。

3.1 世界初の商用動画像観測衛星

米国シリコンバレーの Skybox Imaging 社は、2009～2012 年にかけてシリコンバレー投資家から約 91 億円を得て Skysat 衛星を開発した。1 号機の Skysat-1 は 2013 年 11 月 21 日に打ち上げられた。図 2(a) にその外観を示す⁽⁴⁾。Skysat 衛星では、動画像 (HD ビデオ) 撮影を行っており、衛星写真及び映像のデータ配信サービスを計画している。更に、2018 年までに同衛星を 18 機数打ち上げることで、撮像頻度を 1 日数回にまで高めるという小型衛星群体制も計画されている。現在では 1 画像 20 万円以上する撮像権 (シャッター権) も、劇的に下がることも期待されている。

更に同社は、データの安価提供だけでなく利便性向上戦略を発表している⁽⁵⁾。同社の分析によれば、現存の同業他社の衛星画像配信システムには、データ配付までに時間を要し、データを分析するには高いスキルと高価なソフトウェアが必要になる問題があるとしている。同社は、これを解決するために、顧客が望む処理を行っ

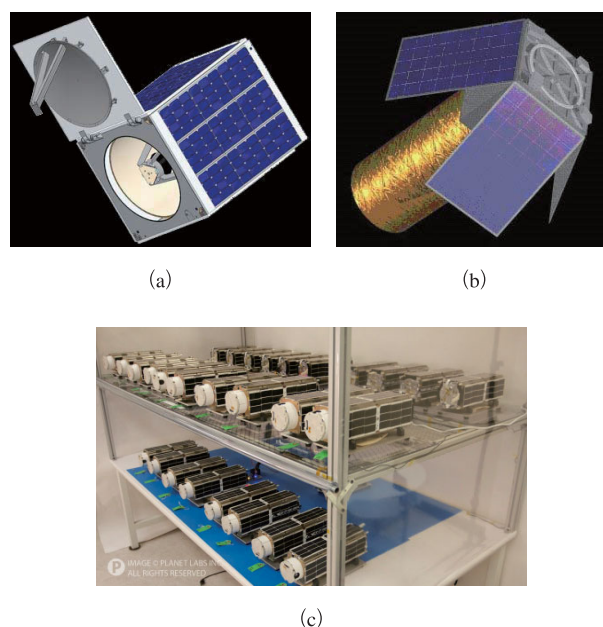


図 2 米国で開発されている小型光学観測衛星 (a) Skysat 衛星の外観。分解能 1 m。光学系口径は 0.3～0.4 m と推定される。24 機打ち上げられる計画。(b) Kestrel Eye 衛星の外観。衛星重量 30 kg、分解能 1.5 m、光学系口径は 0.3 m と推定される。30 機打ち上げられる計画。(c) 28 機打ち上げられた Flock 衛星。衛星サイズ 10×10×30 cm、分解能 3～5 m。(出典：(a) Skybox, (b) Andrews Space, (c) Planet Labs inc.)

た画像を準リアルタイムで配信し、顧客が Web アクセスで閲覧できる環境の整備を計画している。いずれ、朝のニュース番組で、数分前に撮影した衛星動画画像が報道される時代が訪れるかもしれない。

また、米国 Andrews Space 社が陸軍から受注して開発中の Kestrel Eye-2 衛星（重量 30 kg、分解能 1.5 m を目標、2015 年に初号機打上げを計画、図 2(b)にその外観を示す）のように、安全保障利用で培った技術で商用衛星の受注につなげている⁽⁶⁾。

2013 年には民間企業から小型光学衛星を 3 機受注した。高度 450~500 km に 1 m 分解能の光学衛星を重量 50 kg で製造し、1 回の撮像で 4×6 km の画像を取得でき、契約額は 1 機当たり約 5 億円以下と報道されている。

3.2 片手サイズの中分解能光学衛星群

光学衛星群の計画は片手で持てるサイズの衛星（Cubesat）の世界でも広がっている。画像分解能は数 m 程度であるが、Cubesat の製造コストは、数千万円と推定されるため低価格な観測システムが構築できる。米国 Planet Labs 社は、募集して得た約 65 億円の資本金を基に、中分解能の光学衛星群を計画している。同社は、僅か 10×10×30 cm のサイズの Cubesat に、口径 0.1 m 弱、分解能 3~5 m の中分解能光学センサを搭載し、環境破壊や大規模自然災害などの地球の変化画像を、迅速に配信する計画である。軌道高度を 400 km 程度に低くとり、画像分解能を上げ、加えて大気圏再突入までの期間を短くし宇宙ごみの問題への対策としている。2013 年には DOVE と呼ばれる 4 機の試験機を打ち上げて機能試験を行い、2014 年 1 月には Flock と名付けた運用衛星 28 機を打ち上げた。

NASA、低コストロケットメーカーである米国 SpaceX 社、大型衛星メーカーである米国 Space System Loral 社、情報配信会社 Google 社などから、これらの新規分野に人材移動があり、新規参入企業でも高い技術を手に入れることができている。

4. 合成開口レーダ搭載の小型衛星

2., 3. で述べてきたように、小型衛星による光学的な地球観測は成功を収めてきている。しかし、太陽光が利用できない夜間、降雨や雲で覆われた天候時には、光学観測は行えない。この光学センサの欠点を補うものとして、降雨や雲を大きな減衰を受けずに透過できるマイクロ波を利用した SAR（合成開口レーダ）がある。

図 3 には、衛星に搭載された SAR の概念を説明している。軌道運動をする人工衛星から進行方向に対して横下方方向にマイクロ波パルスを周期的に放射し、地表からの後方散乱波を受信する。地表における、衛星の進行方向をアジマス方向、進行方向に垂直な方向をレンジ方

向と呼ぶ。レンジ方向分解能を得るためにはパルス圧縮^(用語)方式を利用する。アジマス方向については、アンテナのアジマス方向のビーム幅により、地表観測点は時刻 t_1 から t_2 まで観測される。この間に人工衛星は $L=(t_2-t_1)v$ だけ移動している。ただし、 v は衛星の速度である。反射受信波信号を地上で処理することで、等価的に L のサイズの仮想的な大型のアンテナによる角度分解能に対応した、数 m の地上分解能を得られる。

衛星搭載 SAR センサでは、500 km 以上の高度からマイクロ波を放射して地表からの微弱な受信信号を受信するために、kW 程度の送信 RF 電力と、数 m 以上のアンテナが必要となる。このため、従来から、SAR センサによる地球観測ミッションは、1 t 以上の重量の大型衛星を用いて達成してきた。図 4 には、既に打ち上げられた、あるいは開発中の SAR 観測衛星の分解能と衛星重量を示す。光学観測衛星についての図 1 と比較してみると、300 kg 以下の SAR 衛星が非常に少ないことが分かる。また、実用化されている SAR 観測衛星のコストは最低でも 100 億円程度である。

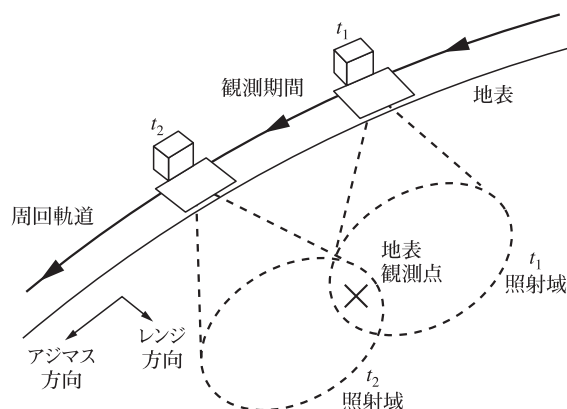


図 3 合成開口レーダの原理

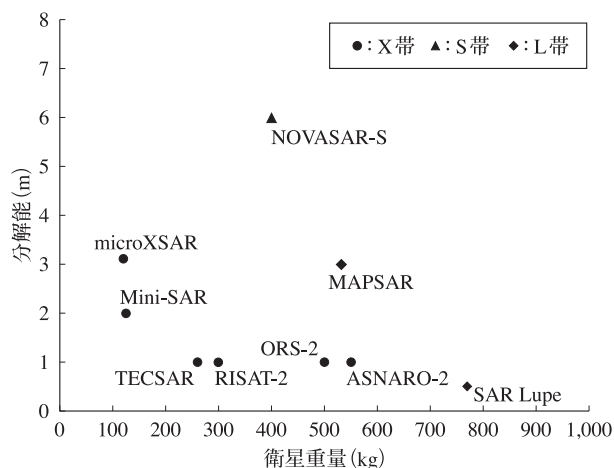


図 4 合成開口レーダ衛星の重量と地上分解能 観測周波数は、X 帯 (9 GHz) ●, S 帯 (3 GHz) ▲, L 帯 (1 GHz) ◆。

従来の SAR 衛星の外観，特に送受信アンテナを見てみよう．図 5(a)には TecSAR 衛星（重量 300 kg，分解能 1 m），図 5 (b)には TerraSAR-X 衛星（重量 1,200 kg，分解能 1 m）の外観を示す．マイクロ波送信と受信のためのアンテナサイズとしては数 m が必要であり，TecSAR 衛星では開傘式のパラボラアンテナを，TerraSAR-X 衛星では衛星構体表面に実装された能動的アレーアンテナを利用している．これらの方式では，衛星構体は数 m のサイズが必要であり，小型化は困難である．そのほか，展開式の能動的な展開式アレーアンテナパネルを利用している ALOS, RadarSAT などの衛星もある．この方法では，展開平面パネルに送信受信モジュールを実装する必要があり，1 枚のパネル厚が 10 cm 程度になり，収納時の小型化が困難である．また，アンテナパネルが電気，構造，熱的な実装が複雑であり，低コスト化に不向きである．

このような SAR 衛星の現状を改善して，小型光学衛星に準ずる，重量 100 kg，コスト 10 億円程度で製造できる状況が望まれる．これが可能になれば，10~20 機の SAR 衛星群による観測が実現し，光学観測衛星と協調した昼夜全天候に対応できる「いつでもどこでもアースイメージング」ができる世の中になろう．

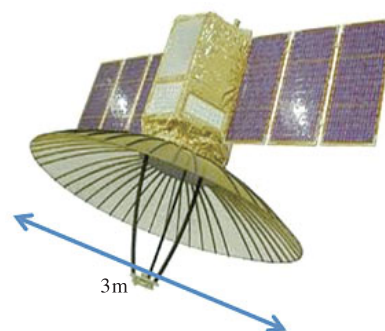
筆者は，現在，このような世の中を実現することを目標にして，100 kg 級の小型衛星に地上分解能 3~10 m の SAR を搭載する開発を行っている⁽⁷⁾．目標価格を 10~20 億円に設定している．その外観を図 5(c)に示す．観測周波数は，アンテナの小型化に適し，材料損や降雨損が小さい X 帯（9 GHz）を選定している．送受信アンテナとしては，アンテナパネルに電子装置を持たない，ハネカムパネルを利用した受動的スロットアレーアンテナを，パネル展開式にする．ハネカムパネルを成形する際に，給電回路，アンテナスロットが一体成形することで軽量化と低コスト化ができる．

レーダ送信出力は 600 W 程度に抑え，高効率な窒化ガリウムの高周波増幅器を利用する．レーダ送信のための大電力は，アンテナパネルの裏面にフレキシブル太陽電池シートを貼ることで電力を確保する．SAR 観測は 5~10 分程度に集中して行うが，急速な放電が可能なオレビン酸系リチウムイオン電池から電力供給を行う．

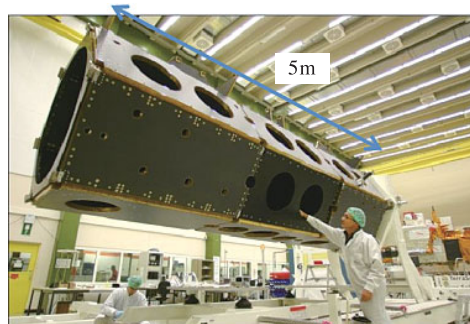
以上のような先進的な技術を投入して，世界に類を見ない，ビジーバック打上げが可能な 100 kg 級の小型衛星で分解能 3~10 m の SAR 観測を行うシステムが実現できると考えている．

5. おわりに代えて

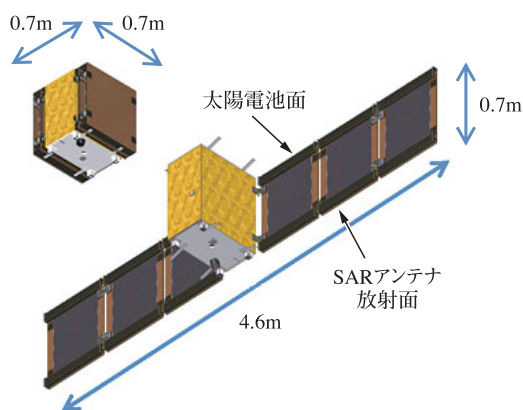
光学衛星データ販売市場は 2020 年には年間 1,500 億円に成長すると言われており，3. に述べたように米国ではビジネス化を見据えた開発投資が行われている．こ



(a) TecSAR



(b) TerraSAR-X



(c) microXSAR

図 5 合成開口レーダ衛星の外観 (a) TecSAR (イスラエル) 重量 300 kg, 分解能 1 m, (b) TerraSAR-X (ドイツ) 重量 1,200 kg, 分解能 1 m, (c) microXSAR (日本, 開発中) 重量 100 kg, 分解能 3~10 m.

れら光学衛星マーケットのみならず，将来は光学衛星の弱点である悪天候時や高湿度地域，及び夜間時の観測ができる SAR 衛星群のニーズが見込まれる．5~10 億円程度の SAR 衛星が製造される時代となれば，小型 SAR 衛星群によるサービスも登場する可能性が考えられる．

また，海洋や港湾の数時間ごとの画像は，海洋船舶や物流状況の監視管理に利用できる．海洋状況や気象状況は海運会社にとって貴重な情報であり，気象情報を提供する企業はこのような衛星画像を購入するであろう．一例として，極東と欧州を結ぶ海路として，北極海の利用

が検討されている。そのために北極海の夏の海水状況を、光学画像やSAR画像で監視する計画もある。もし、衛星自身が低コスト化すれば、自社で小型撮像衛星を数億円で購入する時代が来よう。既に、日本のある気象情報会社は、日本の小型衛星製作企業に小型光学衛星を発注しており、2013年に打ち上げられた⁽⁸⁾。

国土が広く、地上インフラが整備されていないアジア、アフリカ、南米の国々では、国土保全や農業・林業管理のために、頻度が高い画像が必要になる。経済力が小さいこのような国々には、低価格な小型撮像衛星への要望が高く、先進国からの国際協力あるいはビジネスの機会となろう。更にこれら小型衛星技術による「ミッションコストの削減、衛星群の構築と衛星販売、サービスの拡充、規制緩和」が起これば、衛星画像・映像を1枚ごとに支払う「Pay/Viewの時代」から「一定の料金で自由に撮像できる時代」となり、いつでもどこでもアースイメージングを利用できる時代がやってくるだろう。この時代へ対応できる技術開発が求められる。

一方で、マーケット拡大を阻む要素としては、国家安全保障への懸念から政府が民間企業へ配布規制をかけることにある。しかし、全体のトレンドとしては緩和の方向で進んでいる。アメリカでは高分解能な光学衛星の画像販売が、1mから50cmへと緩和され、近年では50cm以下の高分解能販売を認めるよう産業界から要望する声が上がっている。また、撮像後24時間以内は配布禁止だったが、その制限も現在では撤廃された。また、SAR衛星画像については、SARahという大型SAR衛星計画がドイツにあり、取得される分解能0.25mのSAR画像が商業販売される見込みであることから、データ販売規制が緩和されるという報道がある。

小型衛星は「大学のおもちゃ」と思われていたのは一昔前のことであり、社会を変える可能性を秘めた分野となってきた。一方、小型衛星を用いて高分解能画像撮像を可能にするためには、搭載機器の小型化、光学系、アンテナ、高周波機器のかなり高度な技術が必要である。そのためには、経験豊富な技術者が、新しい企業活動を開始する新規参入企業に積極的に参画する必要がある。また、その国の宇宙機関は、直接関与しないまでも技術協力や資金協力していくことが期待される。3.に述べてきたように、欧米ではその二つがうまく機能しており、小型衛星活動に成功している。一方、我が国の

状況を見ると、技術者の流動性が乏しい風土があり、また、台頭する小型衛星コミュニティと宇宙機関の間には、協調的な関係がまだ形成されてはいない。両者が互いの立場を理解した上で和解と融和を行って、日本社会を活性化していくことを希求しつつ、本稿の結びとする。

文 献

- (1) P. Luquet, A. Chikouche, A.B. Benbouzid, J.J. Arnoux, E. Chinal, C. Massol, P. Rouchit, and S. de Zotti, "Naomi instrument : A product line of compact & versatile cameras designed for high resolution missions in earth observation," ICSSO-7th International Conference on Space Optics Toulouse, France, Oct. 2008.
- (2) H. Saito, N. Iwakiri, A. Tomiki, T. Mizuno, H. Watanabe, T. Fukami, O. Shigeta, H. Nunomura, Y. Kanda, K. Kojima, T. Shinke, and T. Kumazawa, "High-speed downlink communications with hundreds Mbps from 50 kg class small satellites," Int. Astronautical Congress 2012, no. IAC-12-B2.3.1, Napoli, Italy, Sept. 2012.
- (3) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/vnredsats-1>
- (4) 経済産業省平成24年度中小企業支援調査、米国における宇宙分野の新興企業の動向報告書、シー・エス・ピー・ジャパン株式会社、平成25年1月。
- (5) O. Guinan, "Commercial imaging constellation meets cloud computing," Ground System Architecture Workshop, 2013, Kestrel Eye, <http://www.smdc.army.mil/FactSheets/KestrelEyeTC0112.pdf> 2012, <http://www.bizjournals.com/seattle/news/2013/08/06/andrews-space-lands-contract-to-build.html>
- (6) <http://www.spacenews.com/article/financial-report/37529news-from-the-64th-international-astronautical-congress-andrews-space>
- (7) H. Saito, J.T.S. Sumantyo, P.R. Akbar, T. Ohtani, K. Nishijo, J. Hirokawa, and M. Ando, "Synthetic aperture radar compatible with 100 kg class piggy-back satellite," Asia-Pacific Region Synthetic Aperture Radar Conference, no. TU2. R1. 4, Tsukuba, 2013.
- (8) <http://weathernews.com/wnisat/index.html>

(平成26年1月29日受付 平成26年2月28日最終受付)



さいとう ひろふみ
齋藤 宏文 (正員)

昭51東大・工・電気卒。昭56同大学院博士課程了。同年宇宙科学研究所助手。以来、惑星探査機、小型衛星の研究に従事。小型衛星いめい開発を主導。現在、JAXA宇宙科学研究所教授。工博。平24文部科学大臣表彰、平23航空宇宙学会技術賞各受賞。



かねおか みつてる
金岡 充晃

平11日大・生産工・機械卒。平13同大学院修士課程了。平11~13宇宙科学研究所特別共同利用研究員。平13からシー・エス・ピー・ジャパン株式会社航空宇宙政策産業チームに勤務。以来、航空宇宙の技術・政策・法規制に関する調査コンサル業務に従事。