

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

終了時評価報告書（平成30年度）

「オンデマンド即時観測が可能な
小型合成開口レーダ衛星システム」

平成31年2月12日

P M 名：白坂 成功
PM補佐名：唐原 健
：中村 信乃夫
：久保 秀之

1. 研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

① 解決すべき社会的課題

自然災害の発生等の緊急対応をするためには、周辺領域を含めた状況の把握が必要であるが、現在は情報収集能力が十分であるとは言いがたい。

大規模災害の発生においては、通信の途絶や道路の分断等により、現地情報の直接の収集が困難となる。また、従来の航空機や衛星による観測では、被災地上空に到達し観測を実行するまでに時間を要する上、夜間や雨天・強風等の場合は観測そのものが実行できなくなることがある。被災地が広域にわたる場合には、一度の観測エリアが限られる航空機では、適時・的確な状況把握に困難を來してしまう。

国民の安全をより確かなものとするために、夜間や悪天候でも、自然災害等の緊急対応時に、被災地周辺領域を含めた状況を速やかに把握可能な能力を持つことが必要である。

② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想 i) 社会課題を解決する変革の構想

災害が発生するタイミング（時間）と場所（空間）は予測も制御もできないことから、時間に対しては「悪天候・夜間対応」と「即時性」が必要であり、場所に対しては「広域災害対応」と「周辺領域同時観測性」が必要である。



図 1. (1)-1 災害発生時の緊急対応必要性要求

この 4 つの要求を満たすために、本プログラムではオンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ（SAR : Synthetic Aperture Radar）衛星システムの研究開発を実施する。本研究開発のコンセプトを図 1. (1)-2 に示す。

災害状況把握のリクエストから
即時に衛星打上げ・観測を実施

光学カメラでは実現不可能な
全天候対応・昼夜問わない観測が可能

オンデマンド即時観測 が可能な 合成開口レーダ 衛星システム

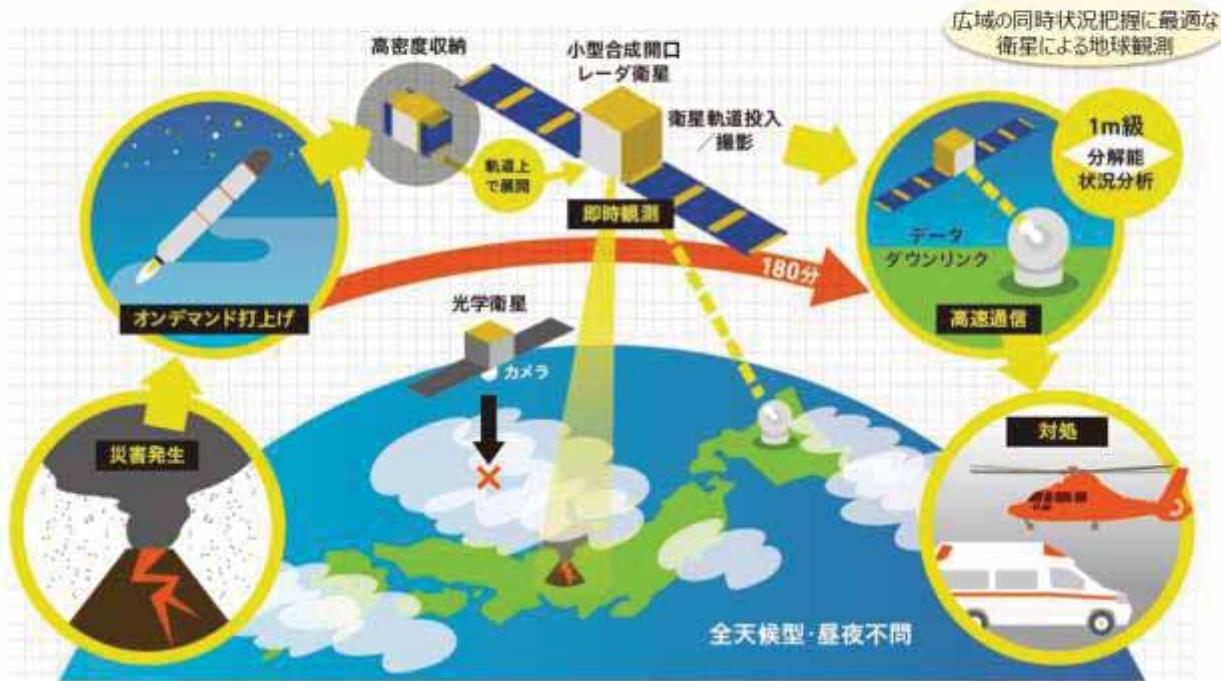


図 1. (1)-2 オンデマンド即時観測可能な小型 SAR 衛星システムのコンセプト

「悪天候・夜間対応」は合成開口レーダで実現し、「即時性」と「広域災害対応」はオンデマンド即時観測で実現し、「周辺領域同時観測性」は人工衛星で実現する。本衛星システムを構築することで、必要時に必要な観測地点を観測できるように打上げ、夜間や悪天候時でも確実に、即時に対象の観測が可能となる。

災害等の緊急時は、状況把握のリクエストがあってから、状況判断に使える情報をユーザーに供するまでの時間をいかに短くするかが重要である。この中で本プログラムが開発する衛星システムの役割は、ユーザーからの観測要求を受けて、速やかに観測を実施し、その観測データを地上におろすまでの時間を短くすることである。その目標として、打上げ後1周回目（90分程度）で観測、2周回目（180分程度）で観測データのダウンリンクの実現をめざす、現在、打上げから利用開始まで数日～数ヶ月かかるものを劇的に短縮する必要がある。

また、緊急時に求められる細かな情報を認識可能とするため、小型衛星でありながら、従来の大型・高性能 SAR 衛星の性能に比肩する 1m 分解能の高い観測性能を目標とする。

オンデマンド打上げにおいて、ロケットの打上げに係る時間を短くするためには、地上での保管や取り扱いが容易な小型固体ロケットの利用が必須だが、本ロケットは衛星収容サイズや輸送効率等の点で劣るため、衛星の小型・軽量化が必要である。従って、本プログラムの SAR 衛星システムの開発目標としては、小型固体ロケットへの搭載が可能となる、重量：100kg 以下（実用時）、収納時体積：1m 立方以下を目指す。従来、SAR の小型・軽量化は困難と言われているが、この常識を破る世界的にも例を見ない高密度収納・軽量の SAR を目指す。

本プログラムが開発する小型 SAR 衛星システムは、自然災害や人為災害等において懸念される甚大な被害の抑制や、その後の迅速な災害復旧において大きな効力を発揮する。言わば、緊急時に即時に必要な「安心の目」となる新たな社会インフラになり得るものであり、この革新的な衛星システムにより、世界の安心・安全に貢献する。

ii) 産業面に起こす変革の構想

小型 SAR 衛星システムは、上述の災害対応用途以外にも、そのコンステレーション（図 1. (1)-4 参照）が実現する「全地球規模・常時観測システム」によって、産業面においても大きな変革をもたらすことが可能である。

コンステレーションとは、多数の衛星を予め軌道上に打上げておき、それらを連携させて常に地球上の広範囲の地表面をカバーするものである。これを夜間・悪天候でも観測が可能な SAR 衛星を用いて構築することで、好きな時間に地球上の好きな場所の状況が把握できる「全地球規模・常時観測システム」となる。

なお、コンステレーションは、多数の衛星を軌道上に配備することから、衛星 1 機当たりの配備に係るコスト（製造コスト、打上げコスト）を大幅に抑制する必要がある。従って、オンデマンド打上げへの対応と同様に、衛星の小型・軽量化および低コスト化は必須となる。



図 1. (1)-4 小型 SAR 衛星コンステレーションのイメージ

この新しい観測システムである「全地球規模・常時観測システム」は、特に、被雲率が高い地域への適用が有効である。例えば、東南アジアは熱帯気候のためほぼ通年で雲に覆われており、光学衛星では定期観測は困難であるが、一方で、シンガポールやインドネシアなど、これから大きな経済発展が期待される新興国が多く所在する。「全地球規模・常時観測システム」は、これらの国々に対し、既存にはない新しい情報ソリューションサービスを提案するものである。

これらの国々は、インフラ整備の遅れや、森林伐採に係る環境問題、違法操業など、地域毎に様々な社会課題を抱えている。「全地球規模・常時観測システム」がもたらす世界各地の逐次の情報を、大量のデータから任意の情報を抽出することに優れた「機械学習」にかけることで、世界各地の社会課題を解決する「高価値の情報」を識別し、顧客に提供することが可能になる。

この新しいサービスのマーケットは、東南アジアを中心として、今後世界規模で飛躍的に拡大するポテンシャルを有すると考える。各地における社会課題を解決する革新的な「キラーアプリ」を創出すれば、即ちビッグビジネスの開拓ともなり、我が国産業の国際競争力強化という点においても目指す価値があるものである。

本プログラムの小型 SAR 衛星システムが、これまでにない特性を持ったこれまでにないデータを生み出すことで、新たな産業を生む出すプラットフォームとなり、より持続可能な社会・産業の実現に貢献する。

③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

本項では、本プログラムの開発成果を社会実装に繋げるための出口目標とそのロードマップ等を以下の順で解説する。

- ・ ImPACT 後の事業化に当たっての方針
- ・ 持続可能な事業発展に向けて力点を置くポイント
- ・ 想定する事業化ロードマップ

i) ImPACT 後の事業化に当たっての方針

ImPACT により小型 SAR 衛星システムの開発が完了した後は、本システムを用いて事業化・ビジネス化を行う民間企業に事業移管し、開発成果の具体的な社会実装を進めていく。以下に想定するビジネス形態について示す。

オンデマンド打上げによる即時観測は、災害発生時に見たいところをピンポイントで狙って打上げて観測し、その情報を防災ユーザーにいち早く届ける手段としては極めて有効である。一方で、災害などの異常状態は常時継続するものではなく、また用途が災害対応利用となる場合、ユーザーは地方自治体などの官公庁にほぼ限られ、商用マーケットへの広がりに期待を持てない。このような環境下において、事業主となる民間組織が常時利益を生み続け、自立的に持続しうる事業運営は行っていくことには高いハードルがある。

そこで、事業化に当たってのポイントは、災害などの緊急時以外、つまり平時でも民間ベースで自立的に持続しうる事業形態を構築することと考えた。これには、上述の全地球規模・常時観測システムを活用した民間商用のビジネスをベースラインとして事業運営を進めることが最適と考える。

コンステレーションによる全地球規模の常時システムは、上述の通り世界中の様々な社会課題が解決可能であることから、商用利用において多くのニーズが期待できる。実際に、本プログラムにおいて東南アジア数カ国を訪問し、現地で活動する機関等にニーズ調査を行ったところ、彼らが抱える課題を解決する手段として本プログラムのコンステレーション構想は有効という声を多く聞いた（一部の機関からはパイロットプロジェクトの立ち上げを打診されている状況）。

つまり、図1.(1)-6に示すとおり、事業のベースラインとしてはこのような商用ニーズに対応するビジネスを展開し、災害等の緊急時にはスポット的にオンデマンド打上げ対応をする、といった形態であれば、民間事業者でも安定的、持続的な運営が可能と考えられる。従って、本プログラムの出口目標として、このような形態の事業の構築を目指すこととした。

全地球規模の常時観測システムを導入しオンデマンド観測と組合せた利用

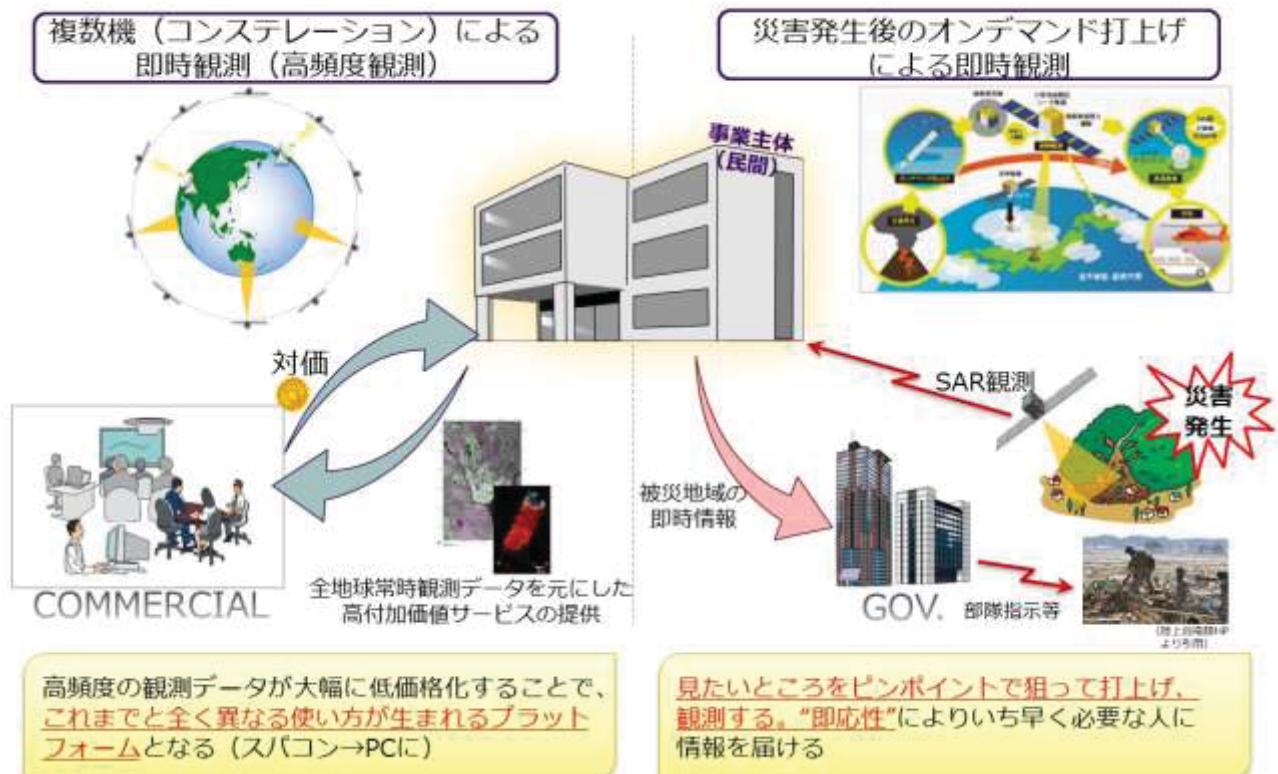


図1.(1)-6 ImPACT後に想定するビジネス形態

ii) 持続可能な事業発展に向けて力点を置くポイント

図1.(1)-6に示した民間の事業運営主体は、小型SAR衛星の開発および保有・運用も行うが、事業における力点は「SARデータを活用した情報ソリューションサービス」に置いた事業展開を想定している。

具体的には、SARコンステレーションにより得られたビッグデータを機械学習／ディープラーニングにかけることで高価値の情報を抽出する手法を確立する。これにより、物流、金融等といったこれまで衛星データがあまり活用されてこなかったビジネス領域で有効なソリューションを生み出し、新しい顧客、マーケットを獲得することを狙う。

更に、ビッグデータのデータソースをSARデータに限らず光学衛星や地上センサ等の様々なデータを融合したものとすることで、ディープラーニングの効果がより高まり、「超高価値」の情報の創出が期待できる。

iii) 想定する事業化ロードマップ

次に、ImPACT 後に想定する事業化のロードマップについて説明する（図 1. (1)-7 参照）。

まず、ImPACT 後の民間主体の事業を本格的に稼働させる前に、本プログラムが開発した小型 SAR システムが実環境（宇宙空間）でも正しく動作するか検証を行う必要がある。そのためには、ImPACT で製作した SAR をバス部（衛星を動作させるための電源や通信などの基本機能を具備したシステム）と組み合わせて、フルの衛星システムとして打上げ可能な状態にする必要がある。

従って、ImPACT 後もこの開発を継続する。目標としては、この衛星化開発を 2019 年内に行い、2019 年度中にはこれを「実証衛星 1 号機」として打上げて宇宙空間で実証実験することを目指す。

更に、2020 年度中には実証衛星 2 号機と合わせて、小型 SAR ビジネスの本格的なサービスインとなる実用衛星 1 号機を打上げる。これ以降は、数年をかけて数機～数十機のコンステレーションを完成させ、SAR データプラットフォームを盤石なものにし、安定的・持続可能なビジネスを確立する。



図 1. (1)-7 ImPACT 後に想定するロードマップ

小型 SAR 衛星システムの社会実装の計画を以下に示す。

- ・ 実証機（1号機）を 2019 年度中に打上げ
- ・ 2022 年にはアジアの主要 88 都市を定期観測が可能なコンステレーション（6 機体制）を構築
- ・ 2020 年代のうちに全世界の主要 292 都市を定期観測が可能なコンステレーション（25 機体制）を構築
- ・ 以降、コンステレーションを継続的に維持増強

④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

本プログラムの中核となる技術は「合成開口レーダ（SAR : Synthetic Aperture Rader）」である。この SAR を徹底的に小型・軽量化することが本プログラムのメインゴールである。

SAR は、いわゆる光学カメラと呼ばれる太陽等の可視光の反射波を受光することで画像化するセンサとは異なり、人工衛星から地上に向けて照射したマイクロ波の反射波を受けることで地表面を観測するタイプのセンサである。マイクロ波は可視光より波長が長く、雲を透過するため、雨天時等の雲の下にある地表面も観測することができる。また、衛星自身がマイクロ波を照射するため、太陽光のあたらない夜側の地表面も観測することが可能となる。つまり「常時観測性」という指標においては、地表面がどのような状況下でも観測が可能な SAR は光学カメラより格段に優れたセンサと言える（図 1. (1)-9 参照）。

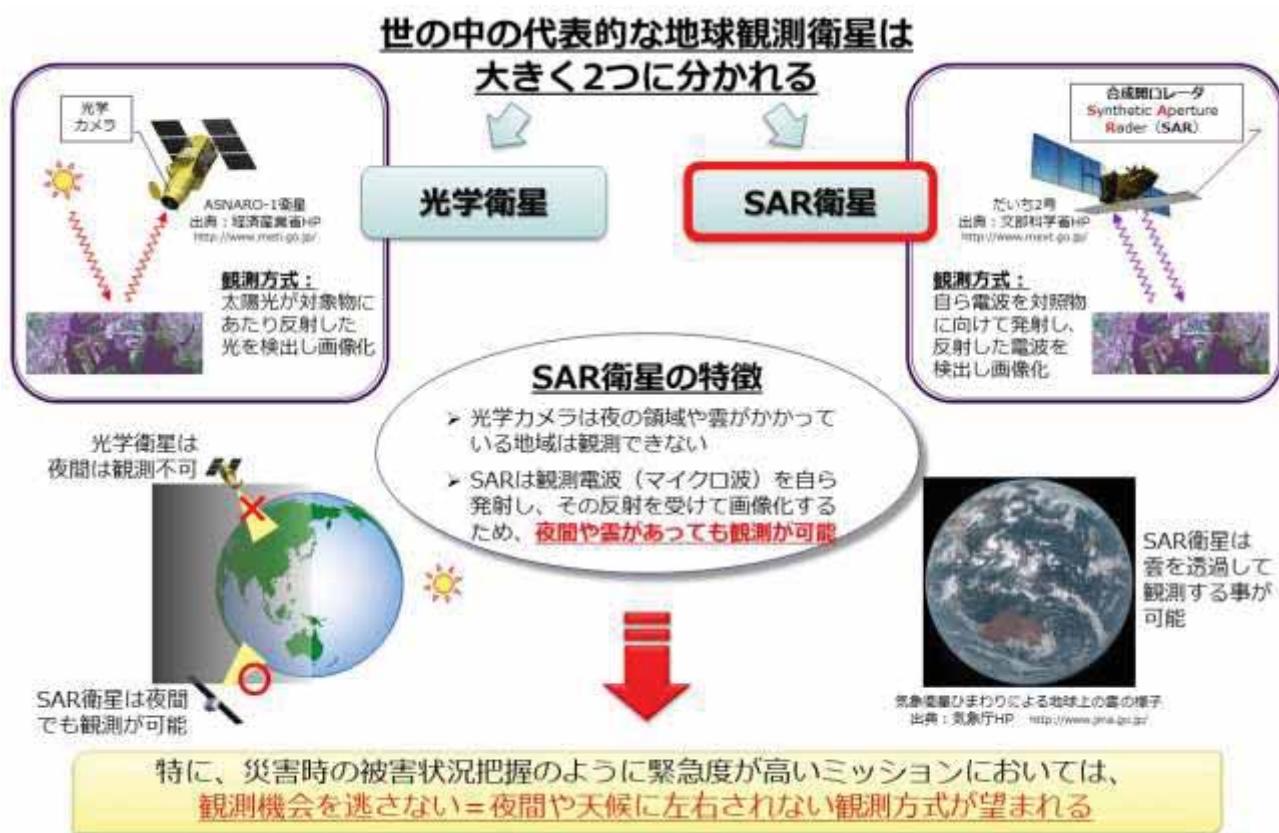
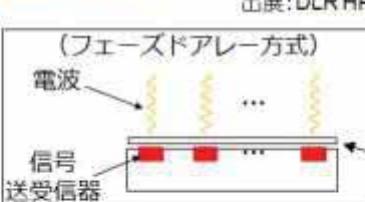


図 1. (1)-9 SAR衛星の利点

このような利点があるにもかかわらず、現状としては全世界で見ても SAR 衛星の機数はなかなか増えていない。理由は、SAR 衛星は小型化の流れが進んでおらず、特に配備コストの点で難があるためと考えられる。

特に、精度の高い観測が要求されるほど衛星が大きく・重くなる傾向に拍車をかける（図 1. (1)-10 参照）。例えば、2007 年にドイツが打上げた世界初の商用 SAR 衛星 TerraSAR-X はアクティブフェーズドアレーと呼ばれるアンテナ方式を採用したものであるが、1.2 トンを超える重量級の衛星である。同じ X バンド SAR 衛星でも、パラボラ方式を採用した TecSAR は、比較的軽量ながらも 300kg ほどの重量となり、ロケット収納サイズは数 m ほどもある。

衛星の重量やサイズが大きくなると、製造コストが 100 億円クラスの高額になり、更に、打上げに当たっては大型ロケットが必要になるため打上げ費用も高額になる。つまり、衛星の大型化は製造・打上げに係るコスト負担が巨額になるため、配備に当たっての大きな障害となる。

TerraSAR-X (ドイツ)  出展: DLR HP	TecSAR (イスラエル)  出展: IAI Ltd, HP	
(フェーズドアレー方式)  電波 → 信号送受信器 → アンテナ	(パラボラアンテナ方式)  電波 → アンテナ → 信号送受信器	
TerraSAR-X	TecSAR	
分解能	1m	1m
衛星質量	1,230kg	300kg
コスト	100億円 以上	100億円 以上
サイズ	Φ2.5m×5m (収納不可)	収納時Φ1.5m×3m 展開時Φ3m×3m

- TerraSAR-X : 高性能な大型衛星。最も主流のフェーズドアレー方式を採用し、アンテナの裏面に信号送受信器を多数配置。
- TecSAR : 小型化を目指した衛星。収納可能なパラボラアンテナを採用も、収納時は長さ方向で 3m のサイズとなる。

図 1. (1)-10 世界の主要な X バンド SAR 衛星

SAR の小型化が進まない理由は、以下の通り SAR の原理上の問題にあると考えられる。

上述したとおり SAR の原理は、衛星から目標物に向けてマイクロ波と呼ばれる「信号波」を送信し、その反射波を受信することで画像化を行うものである。この「信号波」は、進行する過程において、大気中の透過や反射等の影響を受けることでそのエネルギーが徐々に失われる性質をもつ。宇宙空間にある衛星から地球の表面を観測する場合は、波の進行する経路が非常に長くそのエネルギーは微弱なものとなり、結果として衛星側で受信する信号の電力レベルが規定値を下回った場合、SAR の画像化が出来ない状況に陥る。

この「信号波」の性質を補うため、SAR 衛星は「マイクロ波の送受信アンテナを出来るだけ大開口」にし、更に「送信信号を出来るだけ大電力」にする必要があるが、これらはいずれも衛星を大型にすることによって達成が容易になる。つまり、言い換えると、SAR 衛星の小型化を進めるためにはこの 2 点が主な技術課題となる。

産業・社会に変革を起こすという志の高い目標を達成するため、本プログラムでは上記の課題を克服し、「SAR 衛星は小型・軽量化できない」というこれまでの常識を打ち破る。また、これと合わせて、オンデマンド即時観測を実現する「人工衛星の自動運転」という前例のない衛星の高度化にもチャレンジを行っていく。

以上の背景から、本プログラムの研究開発において達成すべき革新的なブレークスルーの主要ポイントとして、以下の 3 点を設定した。

- ・ロケット打上時の収納性が高く、画像性能を左右する面精度の高い超薄型の平面スロットアレーインテナ方式の開発
- ・小型・軽量ながら高出力な電力増幅技術及び熱制御技術の開発
- ・「人工衛星の自動運転」を実現する高度自律化技術の開発

上記の開発内容について、以下に詳細を示す。

i) ロケット打上時の収納性が高く、画像性能を左右する面精度の高い超薄型の平面スロットアレーアンテナ方式の開発

従来の SAR 衛星のアンテナ方式としては、図 1. (1)-10 に示した「アクティブフェーズドアレーインテナ方式」と「パラボラアンテナ方式」にほぼ二極化している。これらのアンテナは実用化では先行しているが、その構造上、小型・軽量化には限界がある。そこで本プログラムでは、第三のアンテナ方式として「平面スロットアレーアンテナ」という独自方式を開発した。

本方式は、自動車のカーナビなどに用いられている車載用アンテナの技術を応用したもので、小型・軽量化がしやすい点が特徴である。本アンテナ方式を衛星 SAR に用いた過去の例はなく、本プログラムが独自に生み出したアンテナ方式である。

平面スロットアレーアンテナは、ハニカム材を 2 枚のアルミ平板で挟み込んだシンプルな構成となっており、軽量・薄型、かつ低コストに製造できる点で優れています。合計 7 枚のアンテナパネルは、衛星打上げ時はコンパクトに折りたたまれて、小型ロケットのフェアリングにも収まるサイズ（1m 立方以下）になる。衛星が周回軌道に載った後、アンテナは自動的に展開し、長さ約 5 メートルの大型パネルアンテナとなり、高分解能観測が可能となる。つまり、画像性能と小型・軽量化を両立する画期的な SAR アンテナ技術である。

本アンテナ方式の主な特徴を以下に示す。

- ・宇宙空間での展開時は長さ 5m の大開口アンテナを、打上時には厚さ 15cm (片翼) にまで超コンパクト収納を実現
- ・アンテナ展開時の面精度 1 mm RMS 以下に押さえ込むことで高周波 X バンド SAR と可能になり、高性能 SAR 観測（空間分解能 1m）を達成
- ・トーナメント方式の導波管およびパネル間は非接触対向給電（特許申請）による 0.6dB 以下の極めて低損失な給電系を実現
- ・熱制御の困難さのため大型衛星では前例のない、アンテナ裏面への太陽電池セル貼付けによるチャレンジングな太陽電池パドルレス化

ii) 小型・軽量ながら高出力な電力増幅技術及び熱制御技術の開発

上述したように、小型の衛星でありながら高性能 SAR 観測を実現するためには「送信信号を出来るだけ大電力」にする必要がある。このため本プログラムでは、小型衛星でも 1kW 級の大電力信号の送信が可能な独自技術を開発した。

本プログラムが採用した大電力増幅技術の主な特徴を以下に示す。

- ・ 単位重量当たりの RF 出力電力を世界最高水準の高性能・大型 X バンド SAR 衛星 TerraSAR-X と比較して約 5 倍にまで向上した、小型衛星ながら 1kW 級大電力信号出力を実現する大電力増幅器の開発に成功
- ・ 独自開発した機器は、その重量を衛星総重量に対して 5% 以下まで徹底的な軽量化
- ・ 小型衛星ではクリティカルとなる大電力信号送信に伴う高発熱を「蓄熱」によりコントロールし、小型衛星ながら世界の高性能・大型 SAR 衛星と肩を並べる連続観測時間 5 分間を達成

以上の i)、ii) に示した SAR システムに関する技術的ブレークスルーを導入することで、小型・軽量、低コストでありながら、その画像性能は世界最高クラス（1m 分解能）を達成する小型・高性能 SAR 衛星が実現可能となる（図 1. (1)-13 参照）。

本プログラムのSARアンテナは主流の既存方式ではなく独自方式を採用
⇒ 大型アンテナの超コンパクト収納・軽量化を実現

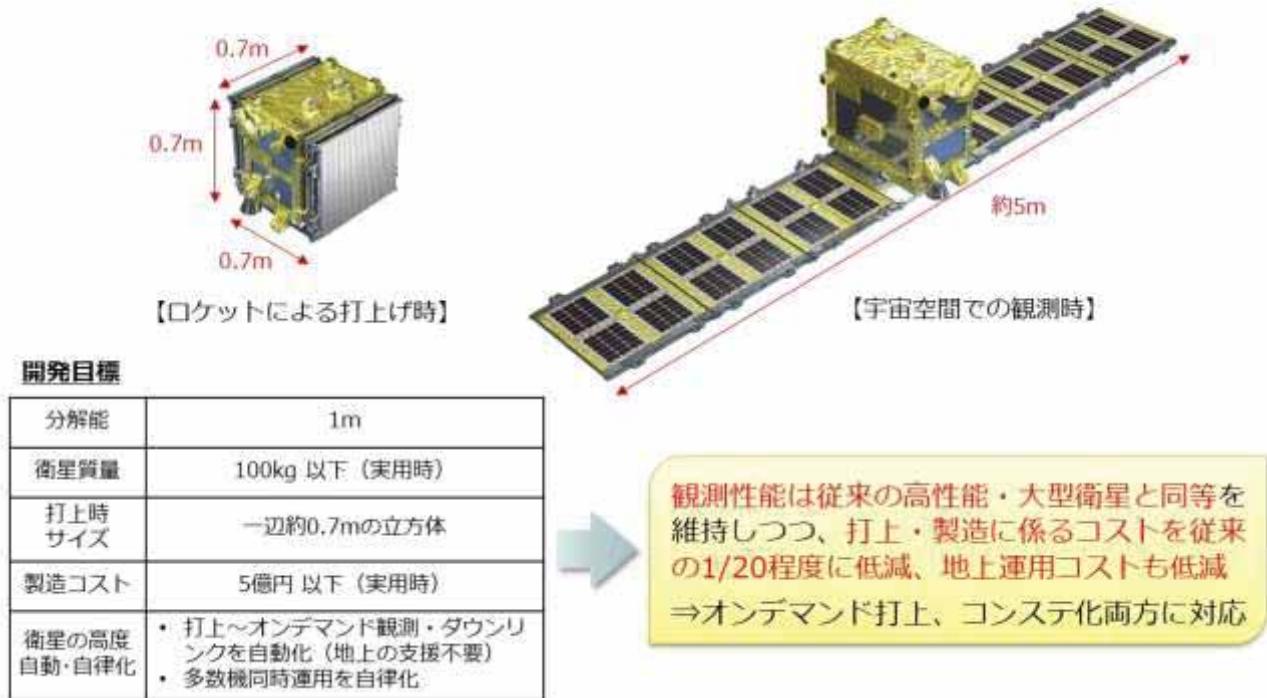


図 1. (1)-13 ImPACT 小型 SAR 衛星の特徴

iii) 「人工衛星の自動運転」を実現する高度自律化技術の開発

SAR システムの小型・軽量化以外の主なブレークスルーは、衛星バスシステムにおける革新技術となる「衛星の自動・自律化機能」である。以下に詳細を示す。

基本的に人工衛星は、観測等の動作をさせたい際には、地上から衛星に対し指示を与え、その指示に従って衛星が必要な挙動を行うように設計されている。例えば、地表面の観測やデータダウンリンク等のミッションを行いたい場合には、地上から衛星に対して逐次必要な指示を与える必要がある。一方で、地球の周りを高速に周回している衛星と地上の間で交信できるチャンスは一日にせいぜい数回程度である。地上を観測したい際に、その度にリクエストを地上から送っていたのでは、即応的なオンデマンド観測・データダウンリンクを行うことは困難である。

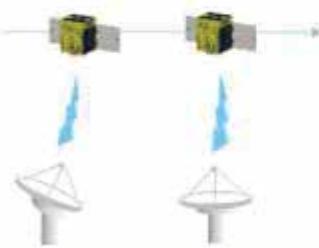
そこで本プログラムでは、人工知能技術を用いることにより衛星を高度に自律化させ、「車の自動運転」と同様に衛星自身の判断で動作を決定可能とする自動・自律化機能を導入することとした（図 1. (1)-14 参照）。

本機能を導入することにより、地上からの逐次の指示が不要となって即時観測が可能となる上、衛星運用に係る地上人員の手間を大きく減らすことにも繋がる。特に、コンステレーションの場合は多数機の衛星を同時に運用することから、運用に係る人員コストの省力化は大きな課題となる。本機能を衛星に実装することで、地上側は少人数でも多数機の衛星の同時運用を維持することが可能になる。

本機能は、小型 SAR 衛星システムへの適用に先駆けて、東京大学が開発するキューブサット（重量が数 kg ほどの超小型衛星）に実装し、平成 30 年 2 月に宇宙空間での実証実験を行った（図 1. (1)-15 参照）。本実験にて、本機能が宇宙空間において有効に動作することは実証済みである。

オンデマンド即時・短期ミッション = 打上後の観測準備作業を短期間で実施する必要性

現状課題1：全ての作業ステップを逐一
地上が計画して通信で指示



現状課題2：地上との通信機会は1日数回、
待機している時間が長い



解決策：衛星の自動運転技術



人工知能技術の活用により、状況を認識し、危険回避・復帰等不確実な事態に
対処しつつ、オンデマンド即時撮影を達成する衛星の自動運転を実現

図 1. (1)-14 衛星の自動運転技術のコンセプト

【CubeSatを用いた技術実証】

CubeSat を用いた、オンデマンド観測の技術実証に成功（18年2月）

- 地上局との通信機会の直前に地球を撮影、地上局へ写真を転送
- 一連の動作を軌道1周回(約90分以内)に自動で実施



18年2月に実施した軌道上実証成果を発展させて、小型SAR衛星に適用
多数機コンステレーションのロバストな自動制御を実現する

図 1. (1)-15 キューブサットを用いた自動運転技術の実証実験

(2) 研究開発プログラムの達成目標

本プログラムにて、スタート当初掲げていた小型 SAR 衛星システム研究開発の達成目標は以下の通りである。

- ・ SAR の分解能 : 1m 級
- ・ 重量 : 100kg 級
- ・ コスト : 20 億円
- ・ 即時利用性 : 打上後、数十分～数時間で利用（性能維持）

プログラムのスタート当初は、本プログラムの主要な開発要素である「オンデマンド即時観測」は、「オンデマンド打上げ」のみに対応する前提で上記の達成目標を掲げていたが、研究開発の過程で ImpACT 有識者から示された以下の指摘を受け、プログラム内容の見直しを行うこととした。

- ・ 国際的に衛星の小型化競争が進む中、搭載する機能やコスト面での優位性が発揮できるように研究開発を進める必要。また、スピード感も重要。
- ・ 防災分野に加え、商用利用の側面からも重要なプログラムであるため、そのような観点から戦略の強化が必要。

上記の指摘に答えるためには、オンデマンド打上げ対応と共に、商用利用において爆発的なニーズ発生が見込まれる小型 SAR 衛星システムによる「コンステレーション」の対応が必要と判断、その 2 つをプログラム目標の両輪とするよう見直しを行った。このプログラム内容の見直しを受けて、平成 29 年 8 月に以下の通り達成目標の変更を行った。

- ・ SAR の分解能 : 1m 級 ⇒ 1m 級（性能維持）
- ・ 重量 : 100kg 級 ⇒ 100kg 以下／量産時
- ・ コスト : 20 億円 ⇒ 5 億円 以下／量産時
- ・ 即時利用性 : 打上後、数十分～数時間で利用（性能維持）、
多数機の衛星を同時運用するシステムの導入（追加）

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

本プログラムは、「衛星システムプロジェクト」、「SARシステムプロジェクト」、「総合システムプロジェクト」の3つのプロジェクトから構成されている。各プロジェクトの個別の研究開発内容は以下の通りである。

「衛星システムプロジェクト」では、オンデマンド即時観測の実現のためのオンデマンド化（自動・自律）機能の研究開発と、それら機能を有し、小型 SAR を搭載する衛星バス部の実現に必要な新技術開発及び地上実証を実施する。

「SARシステムプロジェクト」では、高密度収納可能で、小型軽量な SAR システムの実現に必要な研究開発を実施し、必要な機能・性能を有したフライト可能なレベルの SAR システムを実現し、地上実証を実施する。

「総合システムプロジェクト」では、目的が果たせるシステムを実現するために、小型 SAR 衛星システムと、地上システムや利用想定ユーザーからのニーズ調査を含めた全体のデザイン、プラットフォーム化研究開発、評価システムの研究開発を実施する。

本プログラムの研究開発の全体構成を図 1. (3)-1 に示す。

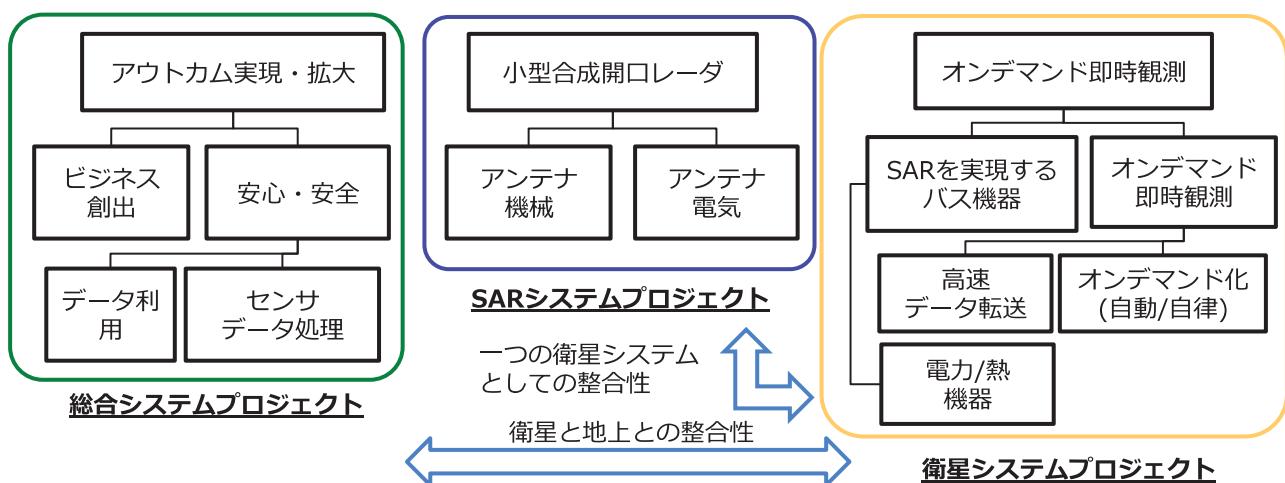


図 1. (3)-1 白坂プログラムの研究開発の全体構成

(4) 具体的な取組

上述した3つのプロジェクトの取り組み内容を以下に示す。なお、上述したプログラム内容の見直し（平成29年8月に実施）に伴い、各プロジェクトの研究開発では、「オンデマンド打上げ対応」に加えて「コンステレーション対応」に関する検討を追加することとしている。

① 衛星システムプロジェクト

i) 研究開発の概要

オンデマンド即時観測の実現のためのオンデマンド化（自動・自律）機能の研究・開発と、小型SARを搭載する衛星バス部の実現に必要な新技術開発及び地上実証を実施する。

ii) 成果目標

SARシステムを実現するために研究要素のある機器については、設計検証モデルを作成し、地上で実証をおこなう。オンデマンド化（自動化/自律化）については、シミュレーションを活用して、地上で実証する。即時化のための高速データ通信については、地上で実証する。可能であれば、外部機関と連携して軌道上実証を目指す。オンデマンド化については、1周回目で撮像が可能となり、2周回目でダウンリンク可能となるオンデマンド機能の実現を目指す。また、高速データ通信については、通信速度1.5Gbps以上を目指す。SARシステムプロジェクトと協力し、衛星システムとして100kg級（実用時100kg以下）を目指す。

② SARシステムプロジェクト

i) 研究開発の概要

小型SARシステムの実現に必要な研究開発を実施し、必要な機能・性能を有したSARシステムを実現する。

ii) 成果目標

フライタブルモデルを作成し、衛星システムプロジェクトで研究・開発を実施したSAR衛星を実現するために必要なバス機器を統合して、地上で実証する。SARの分解能としては1mを目指す。また、衛星システムプロジェクトと協力して、衛星システムとして100kg級（実用時100kg以下）を目指す。

③ 総合システムプロジェクト

i) 研究開発の概要

目的が果たせるシステムを実現するために、小型SAR衛星システムと、地上システムや利用ユーザーとを含めた総合システムの設計をおこなうとともに評価システムを検討する。

ii) 成果目標

総合システムとしての成立性及び設計の妥当性を、モデルを活用して地上で実証する。

(5) 研究開発プログラムの全体ロードマップ

本プログラムの全体ロードマップを図 1.(5)-1 に示す。これは、平成 29 年 8 月に ImPACT 有識者会議で報告した計画（スケジュール）に対し、現時点の最新ステータスを反映したものである。

プログラム開始時に設定した主要マイルストーンである平成 28 年度中の概念設計結果の確認（PDR 相当）は、外部有識者 20 名超によるレビュー ボードを組成し、約 1 ヶ月以上をかけて設計の妥当性評価を綿密に行った。これに加え、平成 29 年度には同ボードによる詳細設計の確認（CDR 相当）を実施、更にプログラム終了時においても同ボードによる最終成果の確認（総合試験結果の確認含む）を行っている。これにより、当初目標を上回る成果が、段階的に着実に得られていることを、第三者評価の観点からも確認している。

また、ImPACT 後の社会実装に向けたマイルストーン設定については、以下の通りプログラム開始当初より大きく進化させている。

ImPACT 後の直近で最も重要なイベントとなる実証衛星 1 号機の打上げは、プログラム開始当初より ImPACT 終了から 2 年後である 2020 年度を想定していたが、小型 SAR 衛星開発に関する世界との最新の競争状況を勘案し、更に現在進捗している開発工程を精査した結果、実証 1 号機の打上げを当初予定より 1 年早めることを判断した。

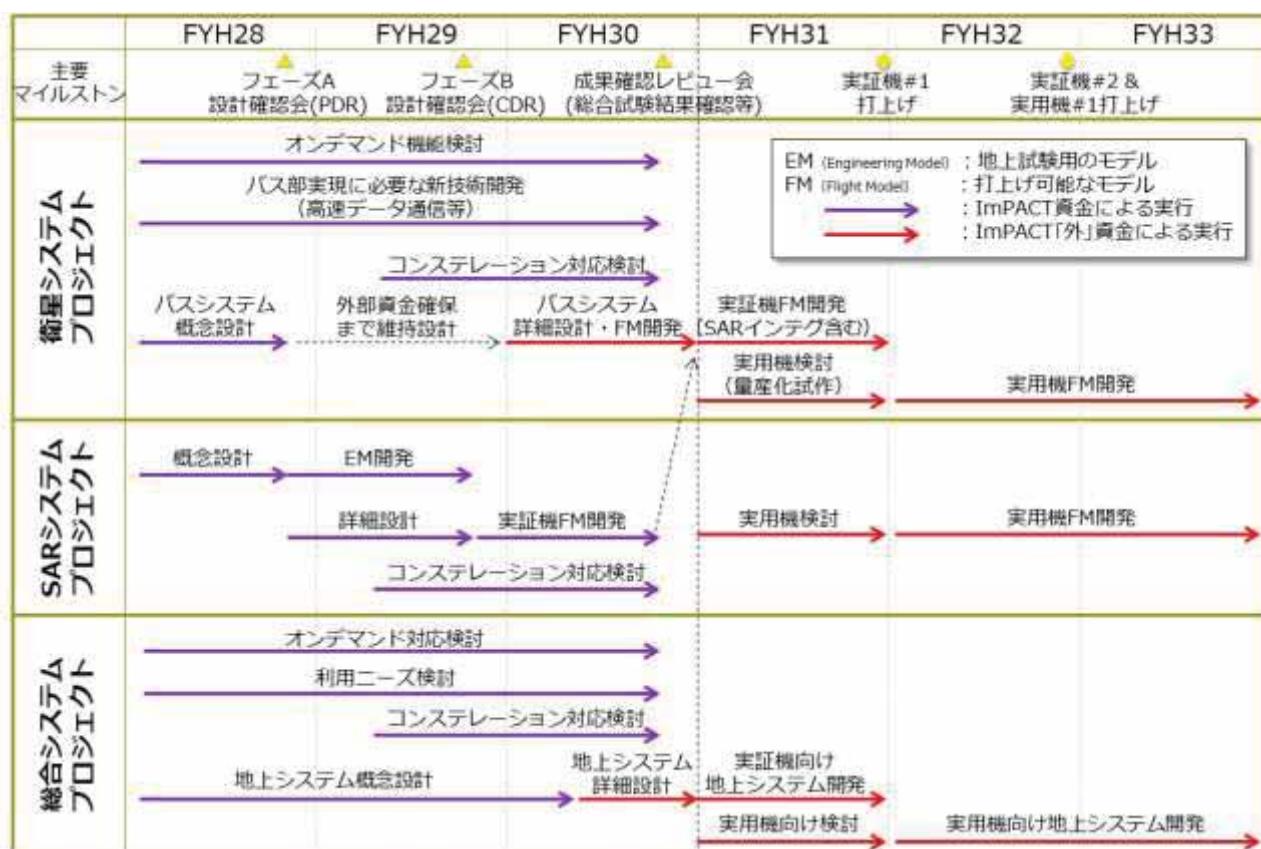


図 1. (5)-1 白坂プログラム研究開発の全体ロードマップ

(6) 研究開発プログラムのマイルストーン

プログラム開始当初の計画通り、平成 28 年度に PDR (Preliminary Design Review : 基本設計審査) を実施し、システム全体の成立性評価を行った。また平成 30 年度には、SAR システムプロジェクトで開発した SAR と、衛星システムプロジェクトで開発したバス機器を接続して総合試験を実施することで SAR システムの衛星システムとしての成立性を確認した。

更に、総合システムプロジェクトでの設計結果と、衛星システムプロジェクトで設計開発したオンデマンド化のシミュレーション結果を統合することで、総合システムとしての成立性を確認した。

(7) 研究開発プログラム実施期間

平成 28 年 1 月 1 日から平成 31 年 3 月 31 日まで (3 年 3 ヶ月)

2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) 衛星システムプロジェクト

① プロジェクトの計画

衛星システムプロジェクトでは、以下 i) ~ iv) に示す 4 項目の研究開発を計画した。

i) オンデマンド即時観測機能の開発

通常の衛星は、打上げ後、数週間の初期運用を経て基本機能を順々に確認しつつミッションを実施するが、オンデマンド打上げによる即時観測の場合は、打上げた最初のパスで観測を実施し、地上局とのリンクが取れるできるだけ早いタイミングでそのデータをダウンリンクする必要がある。これを実現するには、衛星はロケットから分離した直後に自己診断を実施し、健全性を確認した後は速やかにアンテナの展開（太陽電池セルによる発電）、姿勢の捕捉等を行って、観測したい地点の上空に来たときには既に観測の準備が整っている必要がある。この作業は地上から運用者が衛星の状況を見ながらアップリンクで一つ一つ確認しつつ実施するのではなく、衛星側で自律的に行うことが求められる。

このオンデマンド即時観測を実現する衛星の自動・自律化機能を開発し、最終的にソフトウェア化を行い、シミュレータを用いた地上検証にて設計妥当性を確認する。

ii) 小型 SAR システムを収容可能とする衛星全体システムの概念検討

一般的に、高機能かつ多大のリソースを必要とする SAR システムは大型衛星バスとの親和性が高く、収容能力が限定される小型衛星バスへの搭載は難易度が高い。しかし、衛星全体として小型・軽量化を果たすためには SAR のみの検討では不十分であり、バス部も含めた全体システムでの実現を目指す必要がある。

今回小型 SAR を搭載する衛星のバスは、内閣府 FIRST プログラムで研究開発した実績のある「ほどよし衛星バス」をベースとするが、高機能な SAR の小型バスへの搭載化を果たすため、従来の「ほどよし衛星バス」に対し、いくつかの先進技術（次項に示す）を取り入れる。これら新しく導入する要素技術を踏まえ、衛星システム全体としての概念設計検討を行い、小型 SAR 衛星システムの実現性を総合的に評価する。

iii) 小型 SAR を搭載する衛星バス部の先進的な要素技術開発

SAR を搭載することによりバス部に新たに必要となる以下の要素技術の開発を行い、機器の EM 開発と地上試験、あるいはシミュレーションによる実証を行う。

- ・大型衛星用を含め世界最高クラスの高速ダウンリンク X バンド送信機
- ・小型で低コストな高速通信・大容量データレコーダ
- ・SAR 観測に必要な大電力・急速充放電対応型の小型電源系
- ・任意の地点の高分解能 SAR 観測を可能にする高精度姿勢制御系

iv) 小型 SAR 衛星コンステレーションの検討（※プログラム見直しに伴う追加）

オンデマンド即時観測以外の SAR 衛星活用方法として、コンステレーションによる高頻度観測がある。小型 SAR 衛星のコンステレーション実現のためには、iii) に示した衛星バス要素技術の開発に加えて、以下の要素技術の検討を行う必要がある。

- a) 量産化プロセスと設計の検討
- b) 衛星システム軽量化の検討
- c) 推進系、光衛星間通信の検討
- d) コンステレーションに対応する高度自律化の検討

a)はコンステレーションとして効率良い多数機製造を実現するにあたり、従来の個産を前提としたプロセスやシステム設計ではなく、量産を考慮したプロセスとシステム設計に変更する必要がある。そのため、量産に適した民間技術の分析及び衛星製造への応用検討と、その結果に基づく量産化に対応した衛星システム設計の検討を実施する。b)は多数機同時打上げに対応したバス・SAR システムの軽量化を目指し、搭載機器の軽量化を検討する。c)はコンステレーションの長寿命化のために、小型衛星に搭載可能な推進系の概念検討を実施する。また、データ即時入手性向上のための光衛星間通信の検討を実施する。d)は多数機運用時の衛星管制運用負荷軽減のため、衛星システムに対する自律化機能の要求定義及び搭載ソフトウェアーキテクチャ検討を実施する。

② プロジェクトの体制

衛星システムプロジェクトは、東京大学中須賀教授を中心とした体制を構築し、研究開発を推進した。

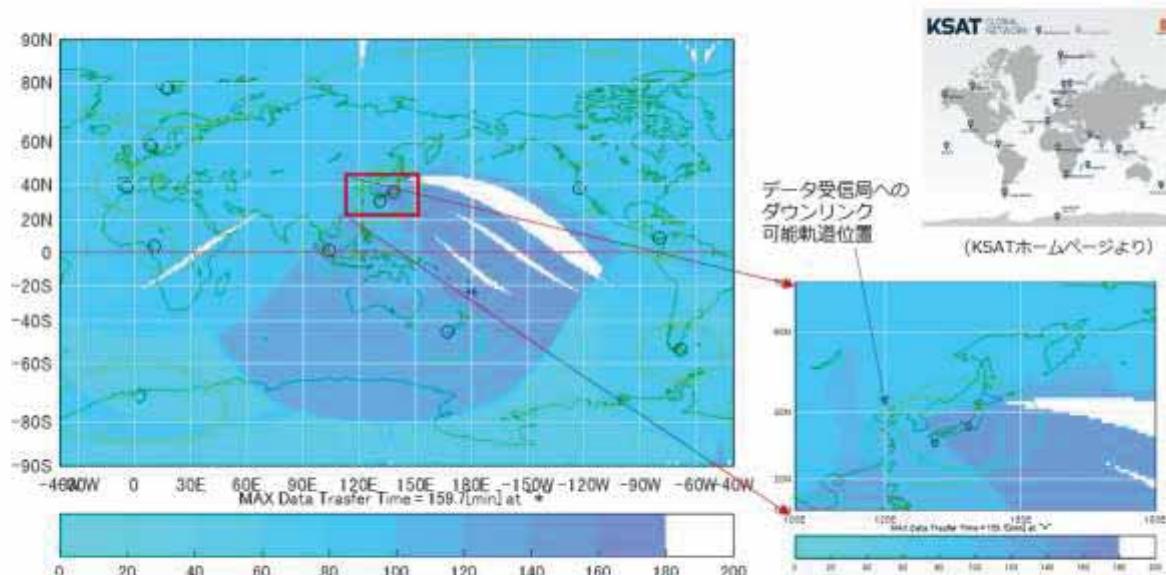
③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

衛星システムプロジェクトにて行った、本節①で示した4つの研究開発に関する主要成果を以下に示す。なお、本項では成果概要のみを記述し、個別の技術の詳細説明は各プロジェクトの報告資料による。

i) オンデマンド即時観測機能の開発

オンデマンド即時観測を実現する衛星の自動・自律化機能については平成29年度中に設計を完了、衛星搭載ソフトウェア環境においてシミュレータを用いた地上検証（1000ケース以上）を行った結果、その設計の妥当性を確認した。本機能を衛星に実装することにより、本プログラムの達成目標の一つである「打上後、數十分～数時間で利用」を満足する、「打上げから90分以内（軌道1周回）の観測、180分以内（軌道2周回）のデータダウンリンク」が実現することを観測性・ダウンリンク性解析にて確認した（図2.(1)-2参照）。

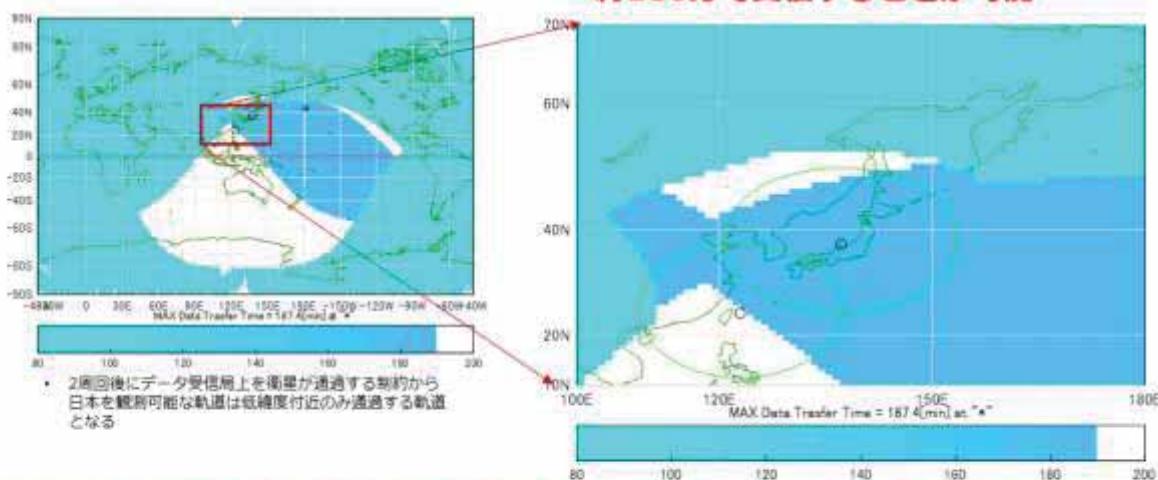
- 【観測可能領域及びダウンリンクまでの時間の検討】：日本打上げ、軌道高度300km
 色付き領域：観測データを打上後180分以内にデータ受信局で受信可能な観測領域
 色グラデーション：打上げからデータ受信までの時間
 ●データ受信局を日本局（内之浦、臼田）+ KSAT商用地上局としたケース



海外商用局を使用することで、目標の180分以内にほぼ地球全域を観測し、データ受信局へ伝送することが可能。

- 【観測可能領域及びダウンリンクまでの時間の検討】：日本打上げ、軌道高度300km
 色付き領域：観測データを打上後約180分でデータ受信局で受信可能な観測領域
 色グラデーション：打上げからデータ受信までの時間
 ●データ受信局を日本局（与那国、能登）としたケース

日本の任意地点の観測データを約180分で受信することが可能



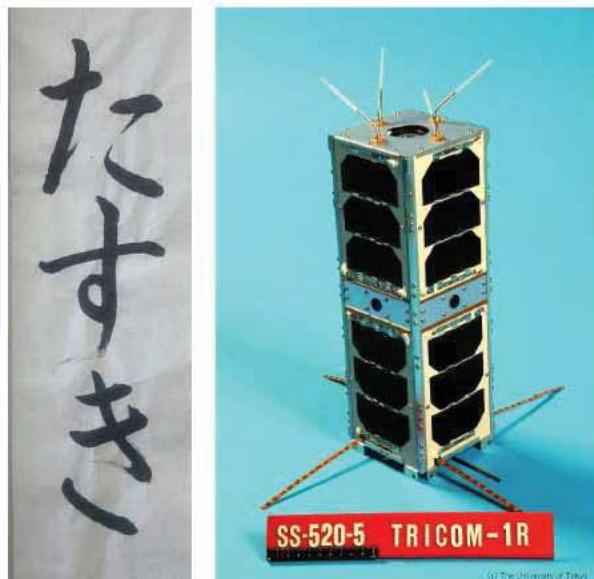
日本打上げ・日本データ受信局だと約180分で日本全域の観測・データ受信局への伝送が可能。

図 2. (1)-2 観測性・ダウンリンク性の解析結果

更に、開発が予定より早く順調に進捗したため、ImPACTにて開発した自動・自律化ソフトウェアを実際に打上げる衛星の搭載コンピュータに実装し、宇宙空間における軌道上実証試験を行った。

2018年2月3日に小型固体ロケットSS-520-5で打上げた東京大学開発のキューブサット「たすき」(図2.(1)-3参照)に当該ソフトウェアを実装し、自律化機能により衛星が以下の通り動作することを確認した。これにより、実際に宇宙空間でも自動・自律化が想定通りに機能することを確認できた。【エクストラサクセス】

- ・2月3日 第一可視時：オンデマンド機能の正常動作を確認
 - 電源系エラーが発生し、カメラがONできない事象が発生
 - 自律化機能により、カメラ電源ONを継続
- ・2月11日：オンデマンド観測シーケンスの正常動作を確認
 - 軌道上の位置情報により観測地点上空近傍にてカメラの自動ONを実施
 - 自動で観測を実施後、カメラOFFを実施



衛星	TRICOM-1R (たすき, TASUKI)
軌道投入日時	2018/02/03 14:10:30
軌道	近地点高度 : 183 [km] 遠地点高度 : 2010 [km] 離心率 : 0.1222 軌道傾斜角 : 30.785 [deg] 昇交点赤経 : 260.877 [deg] 近地点引数 : 77.311 [deg] 平均近点離角: 15.716 [deg]
寸法	116 × 116 × H346 mm ³
重量	3.2kg
姿勢制御	•姿勢センサ: 3軸地磁気センサ, 3軸MEMSジャイロ, 3軸高精度地磁気センサ, GNSS受信機 •アクチュエーター: 3軸磁気トルカ, デスパン用ホイール(1軸)
電源	ボディマウント4面 二次電池: Li-Ionバッテリ (2並2直, 5.8Ah)
通信	通信周波数: UHF帯 通信速度: コマンド: 1.2 kbps (GFSK), テレメトリ: 1.2kbps – 38.4kbps(GFSK)

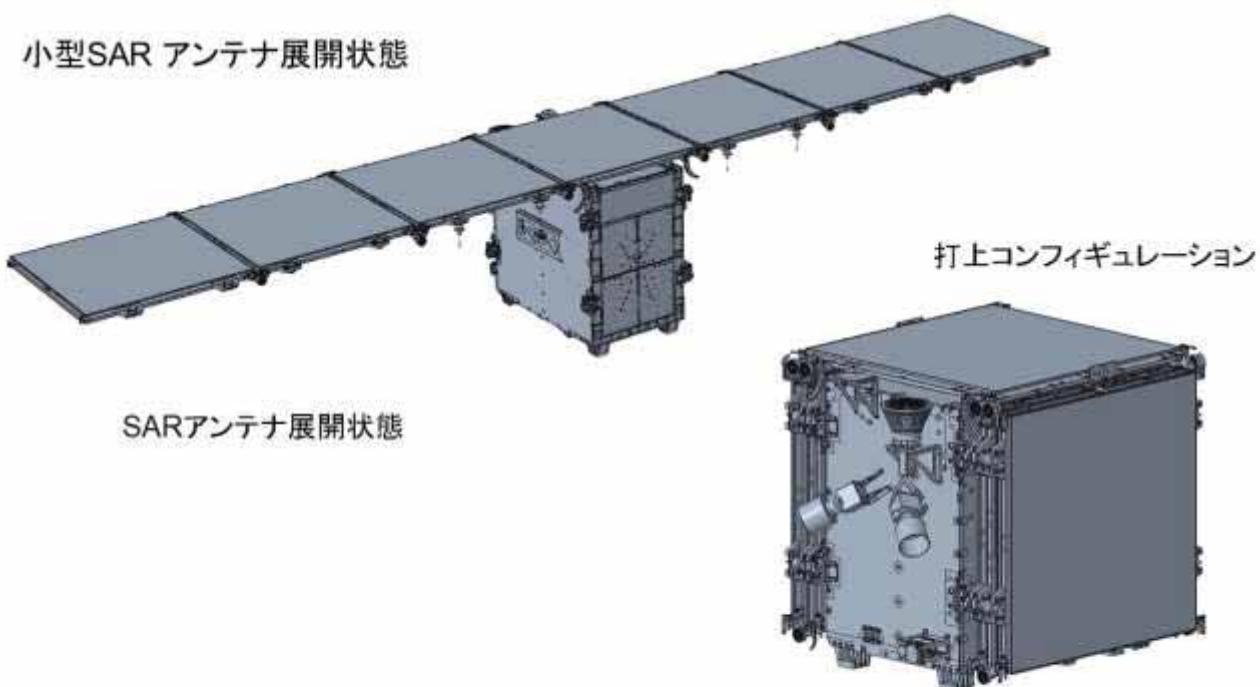
図2.(1)-3 自律機能を実装した東京大学のキューブサット「たすき」

ii) 小型 SAR システムを収容可能とする衛星全体システムの概念検討

衛星システムプロジェクトについては、バス部の一部のハードウェア開発について、開発進捗が一時停滞した時期があったが、PM の主導で人員強化等を行った結果、急速にキャッチアップが進んでいる状況である。現時点で、衛星全体システムの詳細設計及び EM 検証が完了し、実証衛星のフライトモデルの製造に着手している。

また、衛星システム全体としての小型化の達成状況は次の通りである。

実証衛星1号機については、展開時全長5mのSARアンテナを含む衛星全体が収納時は70~80cm立方程度に収まるよう機械・構造設計が完了し、EM構体にて評価した結果、ハードウェアとして設計が妥当であることは確認済み(図2.(1)-5参照)。従って、小型・高収納性は計画通り実現出来ている。なお、軽量化の状況については、本節iv)に示す。



**大型のSARアンテナをコンパクトに収納し、100kg級の小型衛星として開発。
観測時高発熱や多様な姿勢変更を熱設計及び外部機器配置の工夫で実現。**

図2.(1)-5 小型 SAR衛星 機械・構造設計結果 三次元 CAD図

iii) 小型 SAR を搭載する衛星バス部の先進的な要素技術開発

新規機能である「高速ダウンリンク X バンド送信機」、「高速通信・大容量データレコーダ」、「大電力・急速充放電対応型小型電源系」、「高精度姿勢制御系」については、当初計画通りに ImPACT での開発を完了した。

このうち顕著な成果としては、データ送信速度「2.54Gbps」を達成した高速ダウンリンク X バンド送信機の地上送信実験の成功が挙げられる。このデータ送信速度は、宇宙空間で実現すれば小型衛星としては世界最高性能を更新するもので、大型衛星含めても最高峰の高速ダウンリンクが実現できることになる。本プログラムにおいて開発した送信機のうちの一機は、JAXA が本年 1 月 18 日に打上げた小型実証衛星 1 号機 (RAPIS-1) に搭載されており、近々宇宙空間から地上局へのダウンリンク通信実験が予定されている。

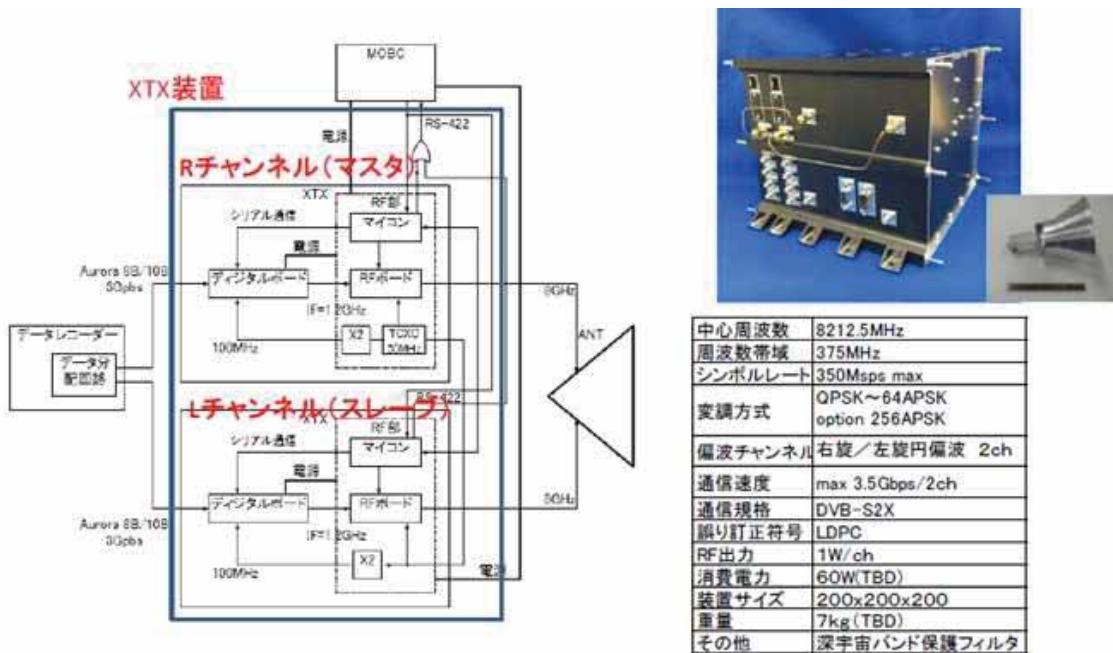


図 2. (1)-6 ImPACT で開発した高速ダウンリンク X バンド送信機

iv) 小型 SAR 衛星コンステレーションの検討

4 項目の研究開発テーマ毎の成果のサマリを以下に示す。製造コストと重量に関する詳しい評価は 3. (1) 節を参照。

a) 量産化プロセスと設計の検討

実証衛星 1 号機の製造コストは、最終的に 9.4 億円となる見積りである。

実用機（量産機）においては、更にミッション機器のコスト低減と量産効果によって、目標を超える製造コスト約 4 億円／機を実現する（製造コストのより詳しい評価は 3. (1) を参照）。

b) 衛星システム軽量化の検討

プログラム終了時の実証衛星 1 号機設計で衛星重量は 139.4kg となった。これは、打上げスケジュール前倒しやコスト制約を優先したため、不確定性分の設計マージンや既存品流用を取り入れざるを得なかつたことが大きく影響している。

実用機（量産機）においては、これらの本来不要なマージン分等は削減可能であり、更に CubeSat 技術の適用による機器軽量化等を加えることで、100kg 以下を達成する見通しである（重量の詳しいより評価は 3. (1) を参照）。

c) 推進系、光衛星間通信の検討

小型 SAR 衛星に適用可能な推進系の選定により、高度低下による軌道上寿命を 1 年以上延長可能。

また、小型 SAR 衛星に適用可能な光衛星間通信機器の選定により、データ即時入手性が 15 分～30 分短縮可能になるか、地上局を海外に配置することなく、10 時間以内にユーザーに画像データを提供可能。

d) コンステレーションに対応する高度自律化の検討

多数機コンステレーション運用に対応するため、状態遷移モデルを用いた自律化機能を開発。異常発生時にもロバストに観測運用が実現可能。

CubeSat の運用例で評価すると 74% の運用異常に対応可能。

v) TRL 評価

衛星システムプロジェクトにおいて研究開発した主要な技術について、TRL 評価を行った結果を以下に示す。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時の TRL	プロジェクト終了時の TRL
<p>●オンデマンド即時観測（自動・自律化） TRL=2 プログラム開始時は、技術的な概念モデルは示されているが、本格的な研究開発は未着手の状態であった。</p>	<p>●オンデマンド即時観測（自動・自律化） TRL=7 衛星の自動・自律化機能の実証モデルが東京大学のキューブサットに搭載され、宇宙空間にて機能検証が実施された（平成 30 年 2 月）。</p>
<p>●高速ダウンリンク X バンド送信機 TRL=3 プログラム開始時は、技術的な概念モデルが定量的に検討されていたが、実証モデルの開発は未着手の状況であった。</p>	<p>●高速ダウンリンク X バンド送信機 TRL=6～7 実証モデルの地上試験が終了し、JAXA の革新的衛星技術実証 1 号機に搭載され打上げられた（平成 31 年 1 月 18 日）。現在、宇宙空間での機能検証の実施を待っている状況である。</p>

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

他機関の研究開発等とのベンチマーク比較を行った結果として、特筆すべき衛星システムプロジェクトの成果を以下に示す。

＜獲得成果の革新性＞

●高速ダウンリンク Xバンド送信機

IMPACTで開発したXバンド高速送信機は、平成30年11月に実施した地上実証試験にて2.54Gbpsの送信速度を達成した。これは、世界の大型・高性能SAR衛星の先駆けであるTerraSAR-Xの送信速度300Mbpsや国内最高水準のSAR衛星であるASNARO-2、ALOS-2の送信速度800Mbpsの数倍を記録し、更に現時点で商用において世界最高分解能31cmを誇る超大型光学衛星WorldView-3の送信速度1.2Gbpsをも上回るものである。

本性能が宇宙空間で実証された場合、低軌道衛星搭載用マイクロ波送信機の分野では、大型衛星用含めても世界最高水準となる。

＜獲得成果の独創性＞

●オンデマンド即時観測機能の開発（衛星の自動・自律化）

国内外の宇宙開発関係者の間では、宇宙機の自動・自律化の重要性・意義を唱える研究者は多いが、現実には殆ど採用が進んでいない。宇宙開発プロジェクトは極めて高コストであるケースが多いため、新しいチャレンジングな技術を取り入れた影響でミッションが失敗するリスクを避けたい心理が働くためである。

実際、米国NASAジェット推進研究所(JPL)では、惑星探査などのサイエンスマッisionにおいて宇宙機の自動・自律化は極めて効果が高いことは分かっているが(深宇宙ミッションは宇宙機と地上の間のデータ通信遅れが大きく、更に通信途絶も頻発)、自律機能に万一誤判断が生じた等のためにミッション失敗となる場合の影響(開発費として数Mドルの損失)を考慮すると、実用化に踏み込めていないのが現状とのことである。

当プログラムでは、低コストの衛星を高機能化することで同種のリスクを最小化するという新しい発想を取り入れ、米国の名だたる研究機関でも踏み込めないチャレンジを現実のものに出来ている。

(2) SAR システムプロジェクト

① プロジェクトの計画

SAR システムについては、以下 i) ~ iii) に示す要素技術の開発を行い、小型 SAR 衛星システムの詳細設計およびフライト可能モデルの製作を行う計画とした。また、衛星重量 100kg 以下（実用時）を実現するための小型・軽量化の追加検討を行うこととした。（※プログラム見直しに伴う追加）

i) 収納体積が小さく、軽量で低価格な観測アンテナの開発

展開式構造の平面スロットアレーアンテナを電気、熱、構造設計を総合的に取り入れて開発する。従来の合成開口レーダ用の搭載アンテナとしては、収納体積が大きく高価な展開式のアクティブフェーズドアレーアンテナやパラボラアンテナ、また、数平方メートルに及ぶ大型衛星構体の表面にアンテナの実装するボディマウントアンテナなどが用いられていた。

本研究では、収納体積が小さく（収納時衛星サイズ約 70cm 立方）、軽量で低価格な展開式のハニカム構造スロット平面アレーアンテナを開発する。

ii) 小型で軽量、低価格なマイクロ波大電力増幅器の開発

近年、技術進展が著しい窒化ガリウム（GaN）半導体を用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT）を複数個利用し、これを電力合成する導波管共振器型合成器を新規開発し、高出力のマイクロ波パルスを得る大電力増幅器を開発する。

従来の衛星搭載の高出力マイクロ波増幅器としては、電子管の一種である進行波管増幅器が用いられていたが、高電圧が必要、かつ大型で取り扱いが難しいという欠点があった。

今回の研究開発では、平面向路上の 6 個の HEMT 増幅器からのマイクロ波出力を直接導波管共振器に入力して 6 電力合成を行い、矩形導波管に出力する方式を採用する。これにより小型・軽量で取り扱いが容易ながら 1kW 級の電力増幅を実現する X バンド大電力増幅器を開発する。

iii) 小型で軽量、低価格な信号発生・処理装置の開発

近年、技術的な進展が著しい小型衛星搭載の電子機器や小型航空機搭載の合成開口レーダ電子装置の技術を、小型衛星用合成開口レーダの電子装置に適用して開発する。

衛星バス機器まで含めたシステム全体のアーキテクチャを見なおして、小型衛星のリソースに適合した小型合成開口レーダ装置を開発する。

② プロジェクトの体制

SAR システムプロジェクトは、JAXA 宇宙科学研究所 斎藤宏文 特任教授を中心とした体制を構築し、研究開発を推進した。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

SAR システムプロジェクトにて行った、本節①で示した 4 つの研究開発に関する主要成果を以下に示す。なお、本項では成果概要のみを記述し、個別の技術の詳細説明は各プロジェクトの報告資料による。

i) 収納体積が小さく、軽量で低価格な観測アンテナの開発

ロケットへの収納時は約 70cm 立方、宇宙空間でのアンテナ展開時は長さ約 5m になる平面スロットアレーアンテナのフライト可能なモデルを開発した。現物を図 2. (2)-2 に示す。本アンテナモデルを用いた電気試験等を京大の設備等で行っており、本ハードウェアとしては所定のアンテナ性能を達成することを確認している。

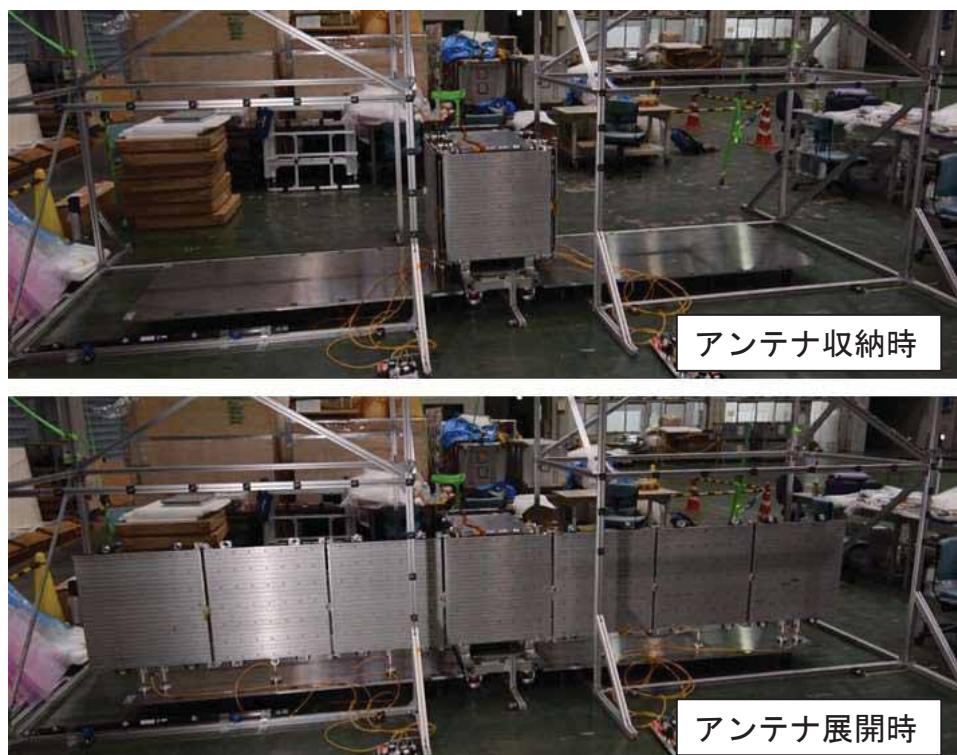


図 2. (2)-2 ImPACT で開発した平面スロットアレーアンテナのフライト可能なモデル

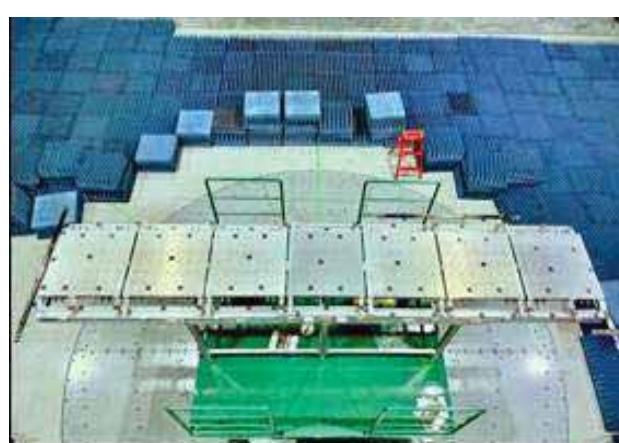


図 2. (2)-3 京都大でのアンテナ電気試験（近傍界計測）の様子

ii) 小型で軽量、低価格なマイクロ波大電力増幅器の開発

小型で軽量ながら、1kW 級の電力増幅を実現するマイクロ波大電力増幅器のフライト可能なモデルを開発した。本モデルを用いた電気試験や宇宙空間を模擬した熱サイクル・真空状態下での試験を行っており、最大電力にして「1350W」の大電力増幅を達成している。

iii) 小型で軽量、低価格な信号発生・処理装置の開発

航空機搭載用であった SAR 電子装置を小型・軽量にし、更に宇宙の過酷な環境でも使用可能とする開発を実施した。元々の重量は 20kg 程度だった機器を約 10kg まで大幅な軽量化に成功した。

iv) SAR システム総合動作検証試験

上記を含む SAR の全ての構成機器を組み上げて、SAR の全体システムとしての総合動作検証を平成 30 年 11~12 月の期間で行った。試験の様子を図 2. (2)-6 に示す。



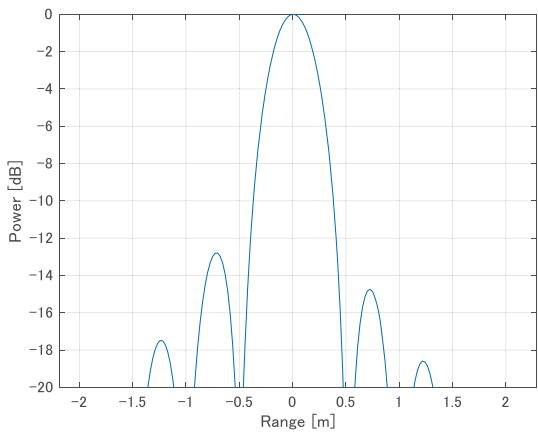
図 2. (2)-6 SAR システムの総合動作検証試験の様子

本動作検証において、本プログラムの主要な達成目標の一つである画像分解能の評価を行った結果、以下の値が得られた。この通り、ImPACT で開発した SAR システムのハードウェアが目標である 1m (以下) を達成することを確認した。

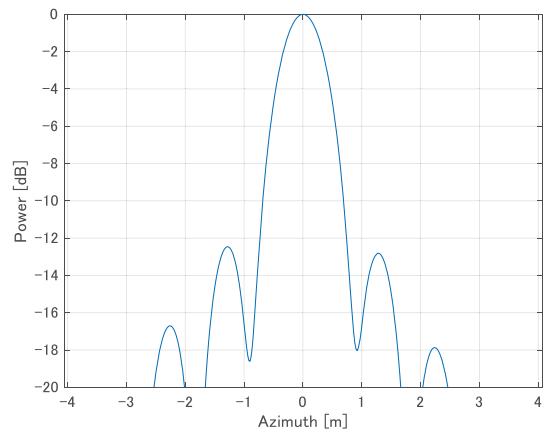
- ・グランドレンジ方向 : 0.86m
 - ・アジマス方向 : 0.81m
- (※図 2. (2)-7 参照)

なお、上述の分解能目標値である「1m」は、オンデマンド打上げを想定して軌道高度 300km からの観測を前提として設定したが、本開発の結果で得られたアンテナ性能（アンテナ効率、給電損失、等）が期待を大きく上回ることが判明し、再評価したところ、分解能の条件が非常に厳しくなる軌道高度 600km 相当でも上記の観測性能を達成可能である見通しが得られた 【エクストラサクセス】。

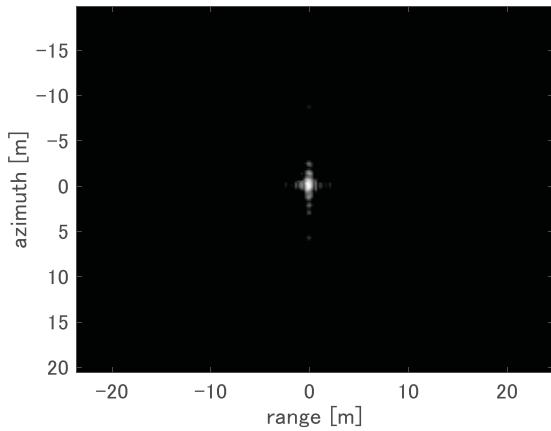
従って、本年に打上げる実証衛星 1 号機（500~600km 高度に投入予定）においても、分解能 1m を目指した観測実験を行う計画としている。



(a)レンジプロファイル



(b)アジマスプロファイル



(c)2次元画像(スラントレンジ面)

点像応答評価結果(スライディングスポットライトモード PRI=4.42kHz)

図 2. (2)-7 SAR 観測性能（分解能）評価結果

v) TRL 評価

SAR システムプロジェクトにおいて研究開発した SAR システム技術について、TRL 評価を行った結果を以下に示す。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
TRL=4 プログラム開始時は、個々の要素技術は実験室レベルで検証されていたが、システムとしての実証モデル開発は未着手の状況であった。	TRL=6 SAR システムの実証モデルの製造が完了し、地上試験が終了した。

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

他機関の研究開発等とのベンチマーク比較を行った結果として、特筆すべき SAR システムプロジェクトの成果を以下に示す。

＜獲得成果の革新性＞

●平面スロットアレーアンテナ方式

図1.(1)-10に示したとおり、SAR アンテナの主流である「アクティブフェーズドアレーアンテナ方式」や「パラボラアンテナ方式」では、サイズや重量、コストの観点で多大なリソース（数メートル、数トン、100 億円以上）を要する点が積年の課題であった。

本プログラムで開発した平面スロットアレーアンテナ方式は、低リソース（衛星重量 100kg 以下、コスト 5 億円以下）でありながら高性能の X バンド SAR 観測を実現する革新的な技術である。

＜獲得成果の独創性＞

●1kW 級大出力増幅器

SAR の送信信号に用いる電力増幅は、最も主流のアクティブフェーズドアレー方式の場合、一個あたり数十 W 程度の低出力の電力増幅器を数百個ほどアンテナ上に配置することで送信信号の大電力化を実現しているが、この方式だと衛星が大型になりコストも極めて高くなる。他の手法として、単体の増幅器で高出力を得たい場合は、TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) と呼ばれる進行波管アンプを用いるのが一般的であるが、TWTA は取り扱いが難しい上にサイズ・重量・コストなどのリソースも大きくなる傾向に有り、やはり小型衛星には不向きである。

そこで本プログラムでは、取り扱いが容易な SSPA (Solid-State Power Amplifier) と呼ばれる固体増幅器に着目し、これをベースに民生の最新デバイスを駆使することでコンパクトかつ軽量な機器開発に成功、数 kg の重量ながら 1kW 級の高出力送信信号を実現する。これは、単位重量辺りの RF 出力電力を世界最高水準の高性能・大型 X バンド SAR 衛星 TerraSAR-X と比較すると、約 5 倍の性能を誇る。

また、更なる高出力化を求めて、1kW 級の出力電力を 3kW 級まで性能向上する方式を開発し、試作試験により実現性に目処を得た。これを実用衛星に取り込めば、SAR 観測の分解能性能にしてサブメートル級の高性能化が達成可能である。

(3) 総合システムプロジェクト

① プロジェクトの計画

衛星システムと地上システムを統合した総合システムは、いわゆる System of Systems タイプのシステムであり、そのデザイン方法論は確立されていない。従つて本研究開発では、オンデマンド即時観測可能な小型 SAR 衛星への適用をテーマとして総合システムデザイン方法論の構築を試みる。

また、これとあわせて、オンデマンド観測運用と利用のプラットフォーム化の検討を実施する。オンデマンド観測運用と小型 SAR 衛星の利用はそれぞれ別の System of Systems であるが、小型 SAR 衛星を共有することで関連している。これら全体を統合的に扱うとともに、それぞれのプラットフォーム化を検討することで、システムのレジリエンス及び拡張性を確保できるようにデザインする。

最終的にこれらの検討結果を元に、目指すべき実利用を踏まえたシステム設計の実例として、小型 SAR の実証衛星向け総合システムの概念設計を検討する。また、総合システムプロジェクトでの設計結果と、衛星システムプロジェクトで設計開発したオンデマンド化のシミュレーション結果を統合することで、総合システムとしての成立性を確認する。

上記については、オンデマンド即時観測だけでなく、コンステレーション形態も含めて検討を実施する。(※プログラム見直しに伴う追加)

② プロジェクトの体制

総合システムプロジェクトは、慶應義塾大学 白坂成功教授（ImPACT プログラム・マネージャーとクロスアポイントメントによる兼任）を中心とした体制を構築し、研究開発を推進した。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

総合システムプロジェクトにて、本節①で示した研究開発を行った結果として得られた代表的な成果、及びプログラム目標達成への貢献度を以下に示す。なお、本項では成果概要のみを記述し、個別の技術の詳細説明は各プロジェクトの報告資料による。

i) 総合システムの概念設計

オンデマンド即時観測を実現する小型 SAR 衛星を運用するための総合システム設計の方法論等を構築し、実ケースとして実証衛星向け総合システムの概念設計検討を行った（図 2. (3)-2 参照）。現時点で SAR のオンデマンド即時観測に対応可能な同種のシステムは存在しないため、本プログラムの試みが初の取り組みとなる。2019 年度に打上げ予定の実証衛星 1 号機では、この概念設計結果をベースに地上の運用システム等を構築する予定である。

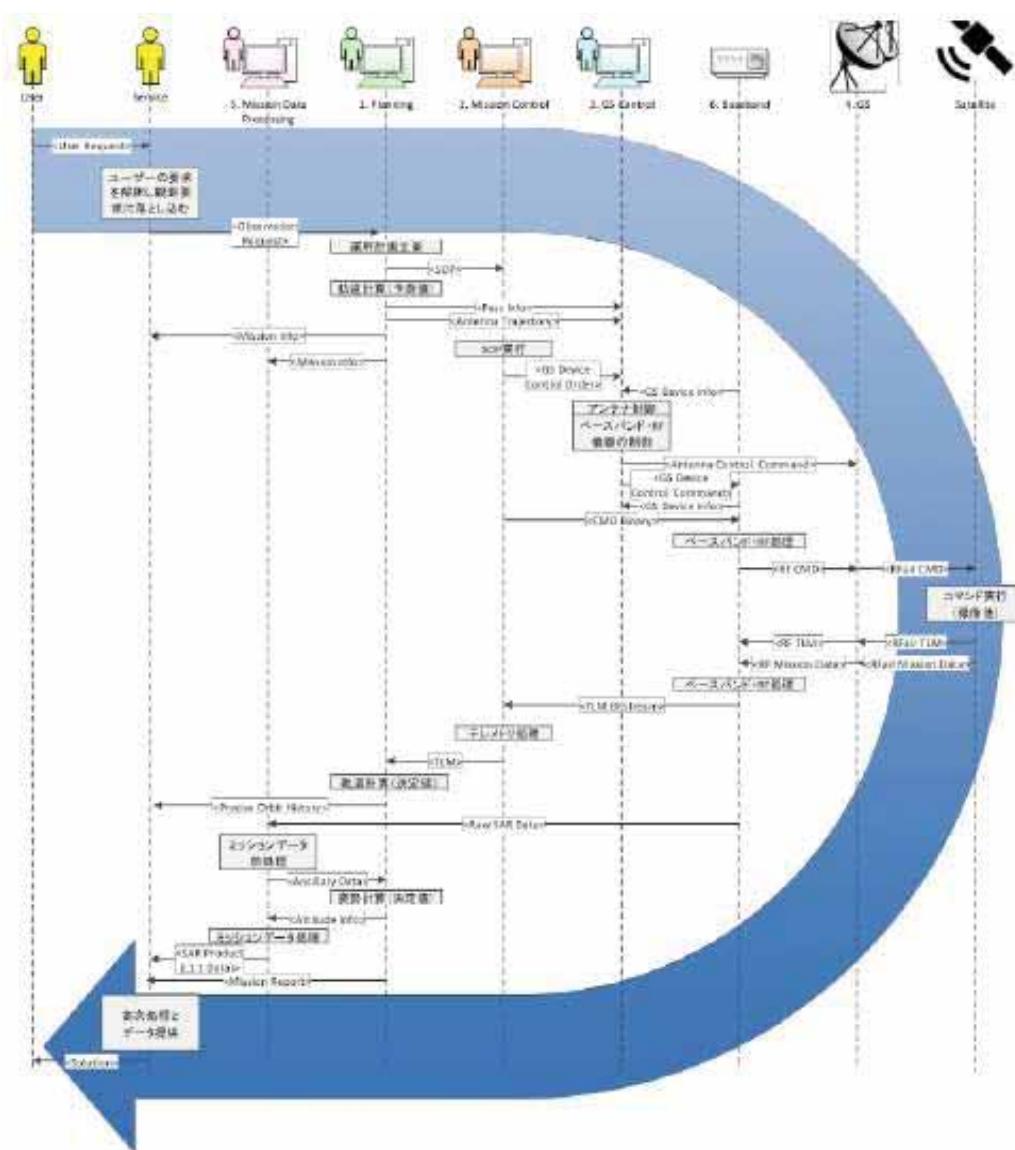


図 2. (3)-2 ImPACT で設計を行った総合システムのターンアラウンド概念図

また、本プロジェクトにて設計した総合システムと、衛星システムプロジェクトで開発したオンデマンド機能のシミュレーション結果を統合した結果、図2.(3)-3に示すようなオンデマンド即時観測シーケンスが構築可能であり、これにより総合システムとしてプログラム目標である以下の即時利用性能が成立することを確認した。

- ・即時利用性 : 打上後、數十分～数時間で利用、
多数機の衛星を同時運用するシステムの導入

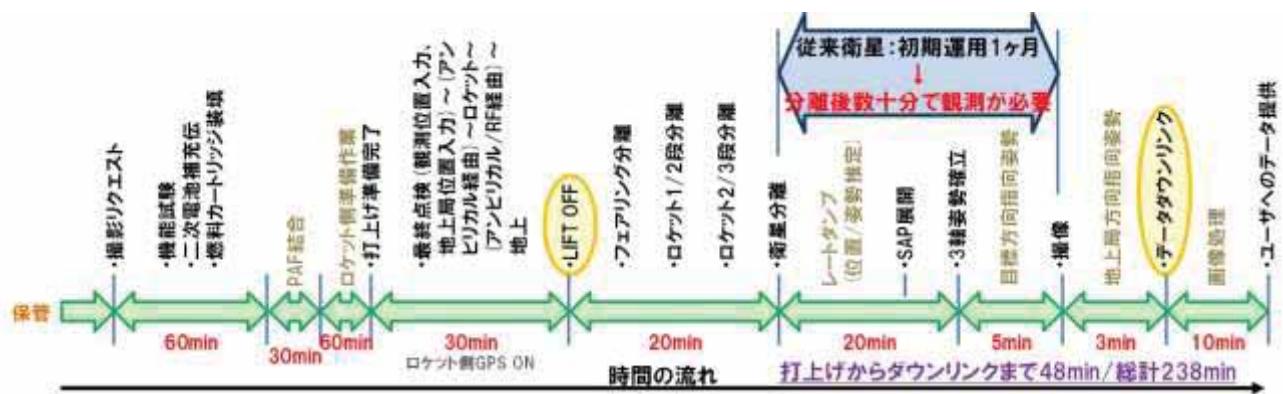


図2.(3)-3 オンデマンド即時観測シーケンス

ii) SAR データの新しい利用手法の検討と次世代総合システム検討

総合システムプロジェクトでは、総合システムの概念設計以外にも、SAR データ利用に関わる新しい手法の開発や、次世代の総合システムビジョンの構築なども実施した。以下にその概要を示す。

●ビッグデータ × 機械学習とユーザー業界の知見との融合

SAR データの利用手法については、大量の画像データ（ビッグデータ）から高価値の情報のみを選別し抽出することに優れた機械学習／ディープラーニングを取り入れることをいち早く決め、2017 年度から研究開発に着手した。現在、ディープラーニングの技術者に、実際のデータユーザーとなる建設、防災等の業界の専門家を加えた検討チームを組成し、キラーアプリ・ソリューション等を創出する検討を行っている。

●新しいデータ利用のアイデアを創出する手法の開発とワークショップ開催

SAR データの爆発的なニーズを引き出すには、データ利用について既存にはない新しいアイデアが必要である。今までのように衛星データ利用の専門家が、限られた知識範囲の中で知恵を絞ってアイデアを出すやり方では、非連続イノベーションに繋がるような革新的なアプリケーションを生むことはなかなか難しい。多様な価値観をもつ人々を集めて、そのバラエティに富んだアイデアを、きちんとデザインされた思考過程に乗せることで、新しい SAR データ利用形態のアイデアを生み出すことが可能となる。

本プロジェクトでは、この衛星データ利用に係る新しいアイデアを創出する手法を開発し、これに係るワークショップを行った。この詳細は、6. (1). ②項で示す。

●次世代総合システムの戦略検討

ImPACT 後の次ステップで実現すべき総合システムデザインの戦略検討を行い、『次世代総合システム』として構想を纏めた。概要を図 2.(3)-5 に示す。

防災分野等の衛星データユーザーの旺盛なニーズに、適時・的確に対応するためには、更なる即時性の向上する努力が求められる。そのために目指すべき次世代のオンデマンド即時観測システムとしては、以下に示すような、既存にはない要素技術を導入し、これらを融合することで状況の自動認識スピードを格段に向上させる必要がある。この研究開発を進めるための計画構想を立案し、実現性検討 (FS) に着手した。

- ・従来地上で行っていたディープラーニング処理を衛星に搭載化 (On-board Deep Learning)、これにより大量の画像データを地上に送ることなく、衛星が自律的に必要な情報のみ抽出し、即時に地上に伝達することが可能となる。
- ・地上に配した多数の IoT センサと衛星のデータ通信を自動化、これにより現場のリアルタイム情報に基づいたよりタイムリーな自動観測が可能となる。
- ・「人」というセンサが集めた社会のリアルタイム情報を SNS 解析にかけることで、即時の現地状況把握が可能となる。

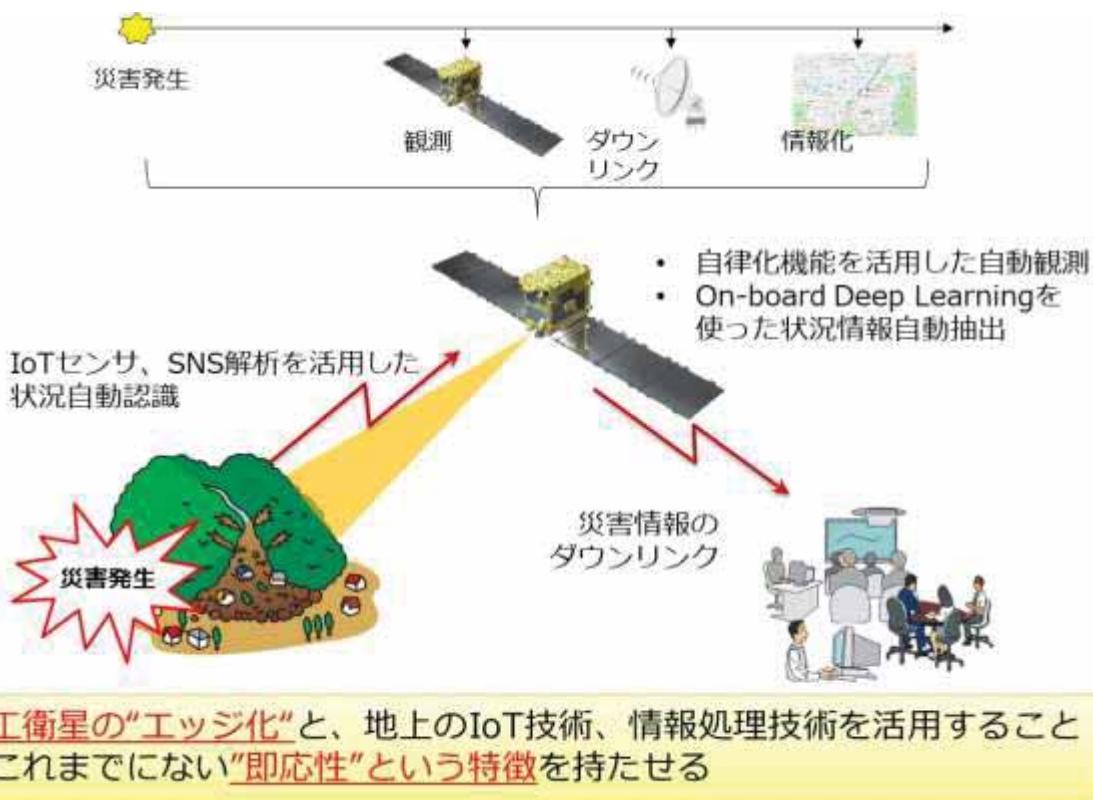


図 2.(3)-5 次世代総合システムによる即時性の更なる向上のイメージ

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

他機関の研究開発とのベンチマーク比較を行った結果として、特筆すべき総合システムプロジェクトの成果を以下に示す。

＜獲得成果の革新性＞

●更なる即時性向上を目指した次世代総合システムの構想

通常は地上で行う処理と考えられているディープラーニングを衛星側に機能化する技術や、地上の IoT センサと衛星の通信を自動化する手法、また SNS 解析などの最新技術と衛星技術との融合など、いずれも世界を見渡しても例がない先進性が高いものである。実現すれば産業・社会に更なる大変革が起きるポテンシャルを有した革新性のある構想と考える。

＜獲得成果の独創性＞

●SAR のオンデマンド即時観測に対応可能な独自の総合システム

現時点では、SAR のオンデマンド即時観測に対応可能な、衛星・地上含めた総合システムは存在せず、その構築は初めての試みとなる。本プログラムでは、小型 SAR 実証衛星に適用可能なオンデマンド即時観測対応の総合システムの概念設計を完了しており、この時点で世界唯一のシステムと言える。

また SAR のデータ利用について、大量のデータから高価値の情報を抽出することに長けている機械学習／ディープラーニングを 2 年前にいち早く導入することとした。SAR データの処理にディープラーニングを用いることは、当時世界でもまだ本格的に行われておらず、さらにそれを搭載化するというコンセプトは、世の中の先を行く着想である。

更に、実際のデータユーザーを内部に積極的に抱え込んで SAR データの実利用を考える開発手法などは独自性があると考える。

3. 研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況（目標達成できた場合の要因分析、目標達成が困難となった場合の原因分析も記載）

プログラムの達成目標として掲げた4項目について、その達成状況等を評価した結果を示す。

●SAR の分解能：1m 級

本書 p. 40 に示した通り、0.86m（グランドレンジ方向）、0.81m（アジマス方向）の画像分解能を達成することを地上検証試験にて確認した。実際に宇宙空間での性能検証は実証衛星1号機の打上げを待つ必要があるが、実現に当たっての技術的な課題はなく現時点ではフルサクセスの状況である。

達成可能となった要因としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・高分解能な X バンドによる SAR 観測を可能にする高い面精度を誇る平面スロットアレーアンテナ方式の開発に成功した。
- ・小型衛星でも高出力の送信信号を可能にする 1kW 級の大電力増幅器の開発に成功し、良好な S/N が確保可能となった。

●重量：100kg 以下（量産時）

本書 p. 33 に示した通り、実証衛星1号機の重量としては現時点で約 139kg となっている。プログラム開始当初は重量目標を 100kg 級と設定し、平成 29 年 8 月までその前提で開発を進めていたため多少高めの結果となっているが、目標見直し以降の 1 年半の間に約 10kg もの軽量化に成功している。

また、1号機についてはスケジュールを当初予定より 1 年早めたためロケットによる振動環境等の前提条件が未確定の状況で設計を進める必要があったことや、1号機向けに確保できた予算に限りがあり、一部の調達機器は十分な軽量化対策が実施できない状況にあったこと等も影響している。実用衛星では対策可能と判断しており、この分で約 15kg の軽量化が可能との見積りである。

更に、CubeSat 技術の適用による約 22kg の削減、計装系（ハーネス等）の最適化により約 3kg 削減が可能であることはフィージビリティ検討にて確認している。最終的に、量産時にはノミナル重量は約 99kg 程度になると考えられ、目標は達成可能との見通しを得ている。

●コスト：5億円以下（量産時）

本書 p. 33 に示した通り、実証衛星 1 号機の製造コストは、最終的に約 9.4 億円／機となる見積りである。プログラム開始当初は製造コストの目標を 20 億円と設定し、平成 29 年 8 月までその前提で開発を進めていたため多少高めの結果となっているが、それでも初期のコスト目標からは既に半分以下に抑制できている。

また、1 号機向けに確保できた予算に限りがあり、一部の調達機器は十分な低コスト化対策が実施できない状況にあったこと等も影響している。実用衛星ではコスト低減対策について製造メーク含めて調整を行った結果、実用機ではリピート製造効果により 3～4 億円程度のコスト抑制が可能との見積りである。

更に、実用機では機数増加に対応するため、量産化とサプライチェーンマネジメント（調達品のまとめ買い含む）の強化を図ることにしており、これにより約 30% のコスト抑制が可能と試算している。これにより、製造コストは最終的に約 4 億円／機になるとの見通しを得ている。

●即時利用性：打上後、數十分～数時間で利用、多数機の衛星を同時運用するシステムの導入

本書 p. 27～28 に示した通り、衛星の自律的判断により観測・データダウンリンクを自動実行する自律化機能の搭載ソフトウェア開発に成功しており、これにより「打上げから 90 分以内（軌道 1 周回）の観測、180 分以内（軌道 2 周回）のデータダウンリンク」が実現可能であることを解析により確認している。

また、本書 p. 29、33、46 に示した通り、多数機の衛星の同時運用を可能にする自律化機能の構築も完了している。実際に打上げた衛星（東京大学のキューブサット）に搭載し、宇宙空間での機能実証を行った結果、衛星運用時に発生する異常の 74% は自律化機能にて対応可能との結果を得ており、運用コストの大幅な低減が可能な見通しを得ている。

(2) 参考指標

① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

本プログラムでは、スタート当初に民間企業とのマッチングの方針についてプログラム内で検討を行った結果、以下の見解に至った。

- ・本プログラムの技術を習得するには、高度な専門性と技能を要するため多数の企業とマッチングして成果の普及拡大を進めるやり方に適していない
- ・産業への成果の橋渡しは、当該能力を有する特定の組織を見極め、その組織に本プログラムで作り込んだ技術を継承していくことが望ましい

従って、本プログラムにおける民間企業とのマッチングの方針については、マッチングそのものの数よりも、本プログラムで進める技術の専門性を有し、更に本研究開発の強い推進力（ブースター：booster）となる特定の企業と強固な関係を築く点を重視している。なお、企業との調整に当たっては、PM自らが各社事業部とのトップ会談で直接調整を行うことで、信頼関係の醸成に努めた。

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
企業の研究者数	20	—	17	21	24	34 (34)
協力企業数 ※	4	—	1	3	3	5 (5)

注：（ ）は見込み数

※ 研究開発に参画する企業だけでなく、研究成果の展開に意欲を示し、ImPACT で得た機密情報を開示する秘密保持契約等を具体的に結んだ企業の数

② 論文

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	5 件/年	—	0	7	9	4 (4)
うち IP ファクター 10 以上	—	—	0	0	0	0 (0)

注：（ ）は見込み数

③ 学会発表

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	20 件/年	—	2	48	21	30 (30)
学会賞等の受賞数	斜線	—	0	1	0	0 (0)

注：（ ）は見込み数

④ 国際学会における招待講演

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	1 件/年	—	0	0	0	0 (0)

注：（ ）は見込み数

⑤ 特許出願件数

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
国内	—	—	0	1	0	0 (0)
海外	—	—	0	1	0	0 (0)
合 計	—	—	0	2	0	0 (0)

注：（ ）は見込み数

⑥ 知財・標準化等の取組状況

本プログラムの知財活動として、本プログラムの研究開発内容に関連する技術の世界中の知財状況を調査・分析し、事業化後に採るべき知財基本戦略および知財活動計画の検討を行った。

⑦ アウトリーチ等の状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
アウトリーチ回数	9	—	0	1	2	9 (10)
新聞、TV等の報道数		—	0	0	0	2 (2)

注：() は計画数

⑧ その他特筆すべき取り組み

ImPACT 最終年度である平成 30 年度は、白坂プログラム研究成果の成果普及としてアウトリーチ活動に力を注いだ。

具体的には、小型 SAR 衛星システム研究開発の事業内容を紹介する広報ビデオやポスター・パンフレット、また小型 SAR 衛星の実物大モックアップやスケールモデル等を制作し、関連分野において世界先端の研究者・関係者が集う以下の国際会議に出展を行い、世界中に対して本プログラムの成果をアピールする、「世界広報キャンペーン」を展開した。

本キャンペーンにおいて、広報を直接的に行った人数は約 1000 人に上る。本キャンペーンを行った反響は大きく、世界の同分野関係者に強烈かつ効果的なアピールとなった（図 3. (2)-2～3 参照）。

表 3. (2)-1 本年度に研究開発成果のアウトリーチ活動を行った学会一覧

学会名（開催地、期間）	学会の特徴
SPACETIDE 2018 (@東京、2018/5/10)	新しい宇宙ビジネスの日本国内関係者が一堂に会する国内最大級の宇宙ビジネスイベント（来場者数約 600 人）
4S Symposium (@イソレント、2018/ 5/28～6/1)	小型衛星に関する世界先端の研究活動成果が報告される欧州の学会
IGARSS 2018 (@西バレンシア、2018/ 7/22～27)	衛星データ利用等のリモセン分野で世界最大級の国際学会（来場者数 2000 人超）
32 nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites (@米ローガン、2018/8/4～9)	小型衛星の分野で世界最大級の学会（来場者数 1000 人超）

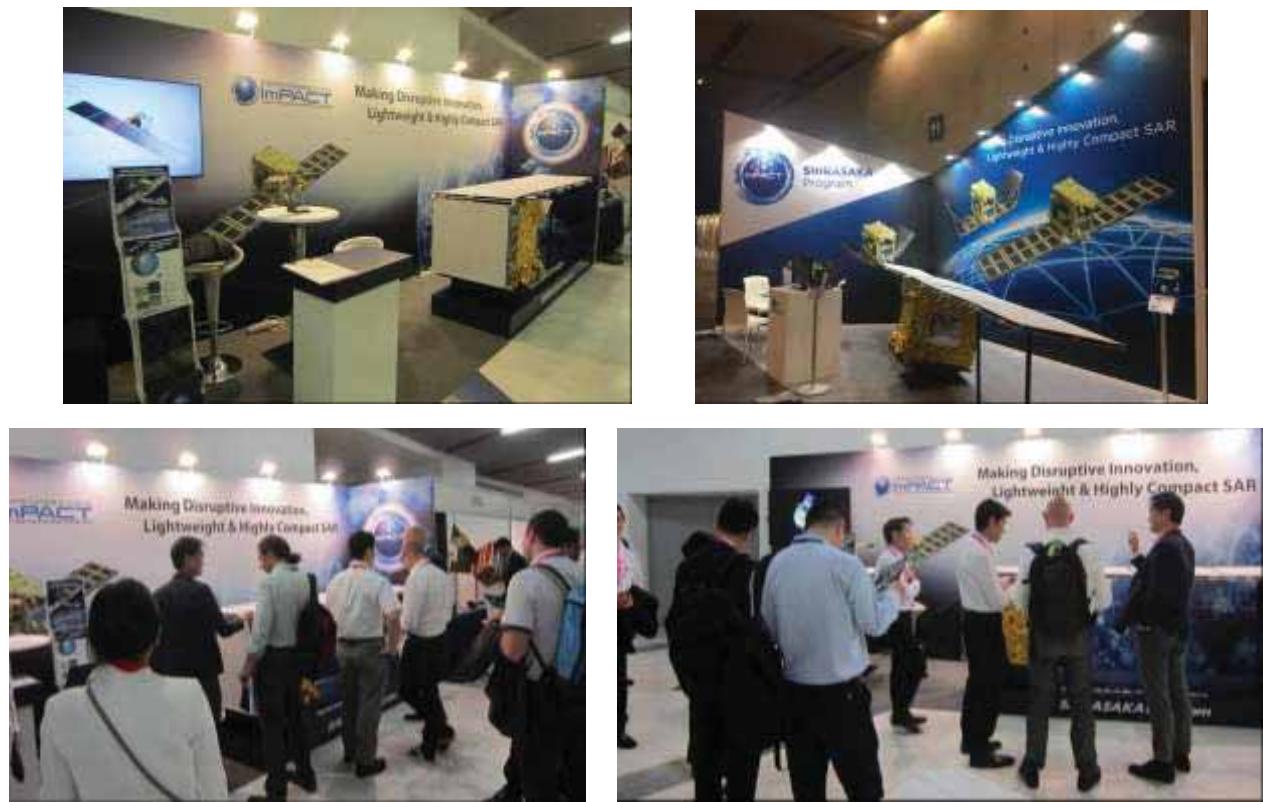


図3.(2)-2 4S Symposium、IGARSS2018 出展の様子
(下段の写真は白坂 PM 自らブース来場者の対応をしている様子)



図3.(2)-3 Small Satellite Conference 出展の様子

また、本アウトリーチ活動の集大成として、平成 30 年 11 月 8 に開催されたSTS フォーラム（科学技術と人類の未来に関する国際フォーラム）の安倍首相スピーチにおいて、我が国を代表するイノベーション R&D プログラムの事例として白坂プログラムが取り上げられ、製作した広報ビデオにて、世界中の先端科学者・研究者に対しその活動内容が紹介された（図 3. (2)-4 参照）。



図 3. (2)-4 STS フォーラムにおける安倍首相スピーチの様子
(バックは本プログラムで製作した広報ビデオ)

参照リンク https://www.kantei.go.jp/jp/98_abe/statement/2018/1007sts.html

4. 研究開発プログラム予算の推移

本プログラムの研究開発予算の推移を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発予算推移（単位は千円）

	H27	H28	H29	H30	合計
衛星システムプロジェクト	12,300	185,200	154,723	94,855	447,078
SAR システムプロジェクト	36,000	393,000	393,000	565,922	1,387,922
総合システムプロジェクト	5,000	20,000	33,000	97,000	155,000
プログラム総予算					1,990,000

5. 研究開発プログラムの推進体制

本プログラムの研究開発推進体制を図 5-1 に示す。

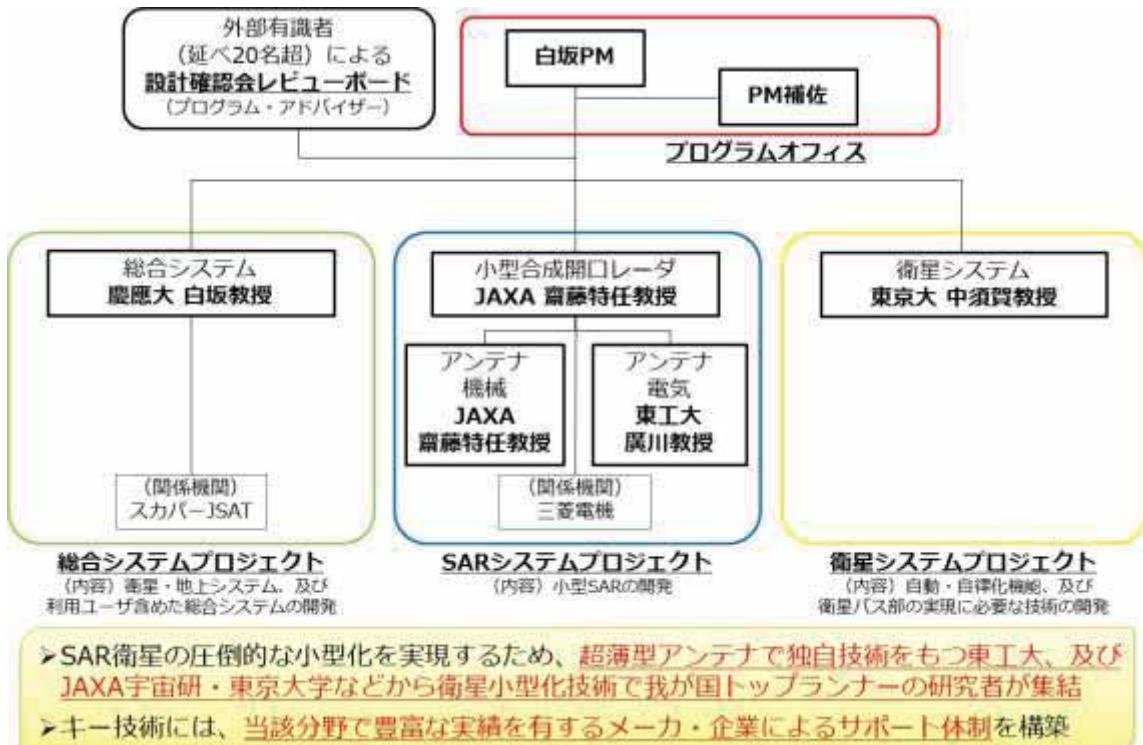


図 5-1 白坂プログラムの研究開発体制

6. 研究開発プログラムの実施管理状況

(1) 研究開発プログラムのガバナンス

① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議等の開催数	一	1	67	53	30
研究開発機関等の訪問回数	一	21	276	264	264

進捗状況の把握及び指導・管理について行った、2つの特筆すべき事項を以下に示す。

i) 各種定例会議の開催

効果的、かつ確実な進捗等の管理のため、以下の会議構成にてプログラムマネジメントを推進した。

- プログラム運営面の会議
- 運営会議：必要に応じて適宜開催
 - 3月25日 第一回運営会議開催
 - 知財運用会議：必要に応じて適宜開催
 - 事業化推進会議
 - 本プログラム成果の活用を推進する為の会議。（シンポジウム等含む）
 - 研究推進のための会議
 - 全体月例会議
 - 各参加研究開発機関の進捗状況の報告会
 - 頻度：月に1回
 - SAR幹事会
 - プログラムオフィスマンバ及びSARプロジェクト主要メンバで開催
 - バス幹事会
 - プログラムオフィスマンバ及び衛星バスプロジェクト主要メンバで開催
 - 総合プロ幹事会
 - プログラムオフィスマンバ及び総合プロジェクト主要メンバで開催総合
 - バスミッションI/F調整定例会

技術面の会議

プログラム開始時は、月に1回の頻度でPM、PIと主要な研究者が集まって月例会を実施し、プログラムの方向性の摺り合わせを行った。プログラムの運営方向性が定まった段階から、より高い頻度の定期会議をプロジェクト毎・間で開催、特に重要なSARシステムの関係者は週に1回の頻度でPM補佐と研究者全員が集まって進捗管理を行った。

また、研究開発が佳境となるImPACT最終年度は、PM補佐1名を主要研究機関（JAXA宇宙研）に常駐させ、PMが研究開発状況の変化をタイムリーに把握でき、更にPMの指示が現場に適時・的確に伝わるようマネジメント体制を強化した。

ii) 外部有識者による開発レビュー計画

本プログラムでは、研究開発の内容が適切・妥当に進捗していることを第三者の目からも確認するため、研究開発の区切りのタイミングで設計確認のための第三者レビュー会を行った。本プログラムで採用した第三者レビュー計画を図 6. (1)-1 参照に示す。

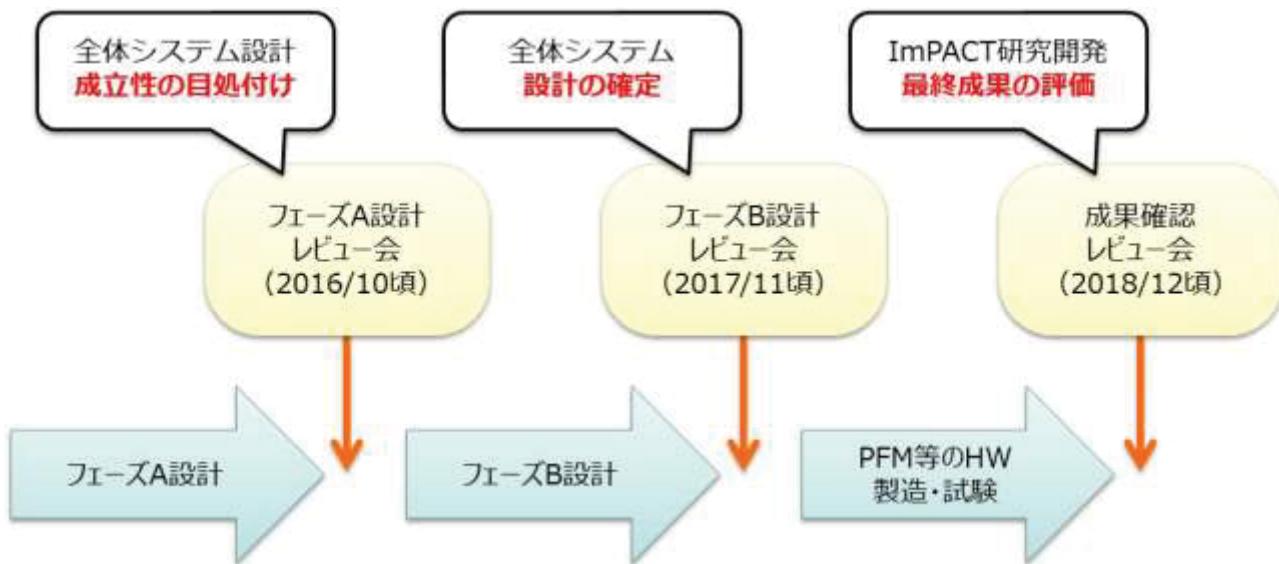


図 6. (1)-1 外部有識者による設計レビュー計画

本レビュー会は、表 5-1 に示す外部有識者 20 名超で構成されるレビューボードにより行った。レビューボードのメンバーは、基本的に学界の研究者で構成するが、民間の知見も取り入れるためメーカー経験のある企業OB を複数含め、更に一部は JAXA の知見も活用した。なお、有識者は全てプログラム・アドバイザー委嘱を行い、情報保全について慎重な取り扱いを確約した上で実施している。

各レビューにおいては、図 6. (1)-2 に示すように、各システムの開発要素毎の小規模な個別レビューを複数回実施するキャンペーン形式で実施した。これにより、多数の委員による「一方通行的な審査」のような会議体になることを避け、外部専門家と細やかな意見交換ができる本質的な技術相談の場となるよう、運営上配慮を行った。

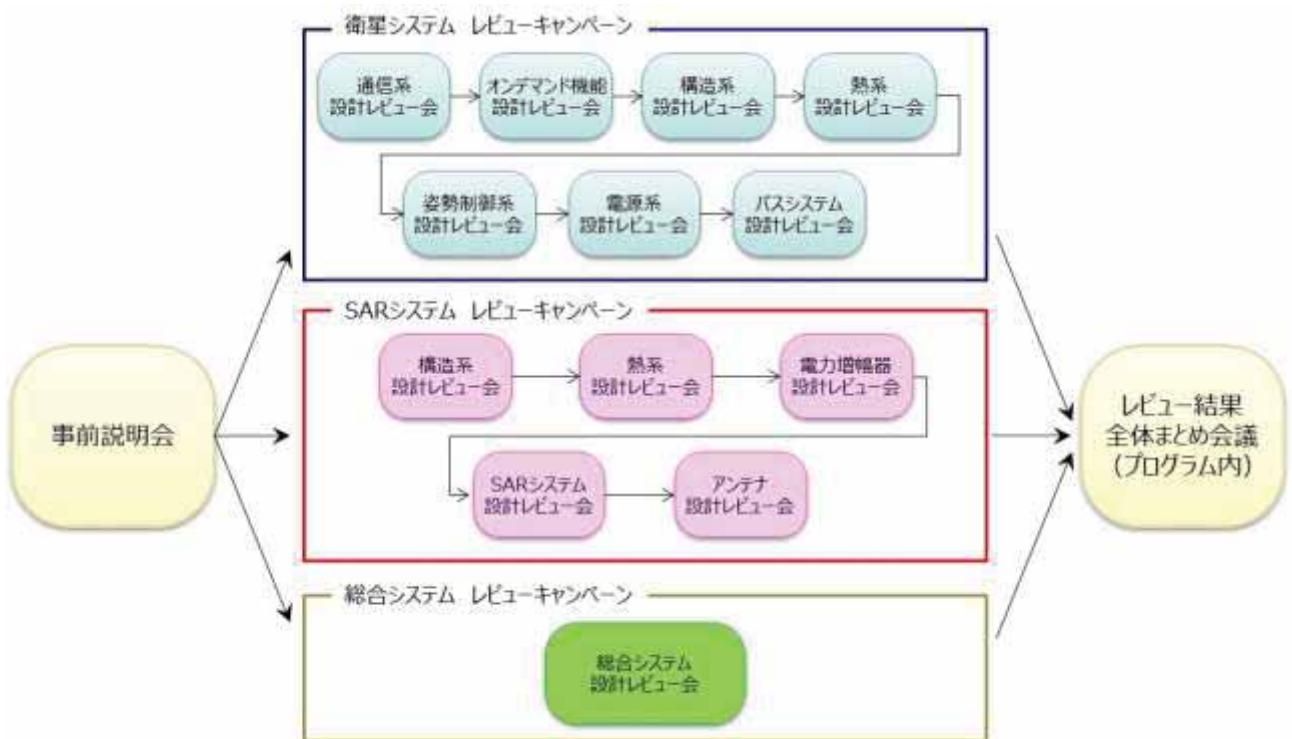


図 6(1)-2 設計レビュー会実施フロー

- ② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む。）に関する取り組み
2. (3). ③項に示した、総合システムプロジェクトの取り組みの中で述べたように、SAR データの爆発的なニーズを引き出すには、衛星データ利用について既存にはない新しい新しいアイデアを創出することが必要である。

慶應大学システムデザイン・マネジメント研究科では、多様な価値観をもつ人々を集めて、そのバラエティに富んだアイデアを、きちんとデザインされた思考過程に乗せることで、新しい衛星データ利用形態のアイデアを生み出す手法を開発した。その手法の概要を図 6. (1)-4 に示す。

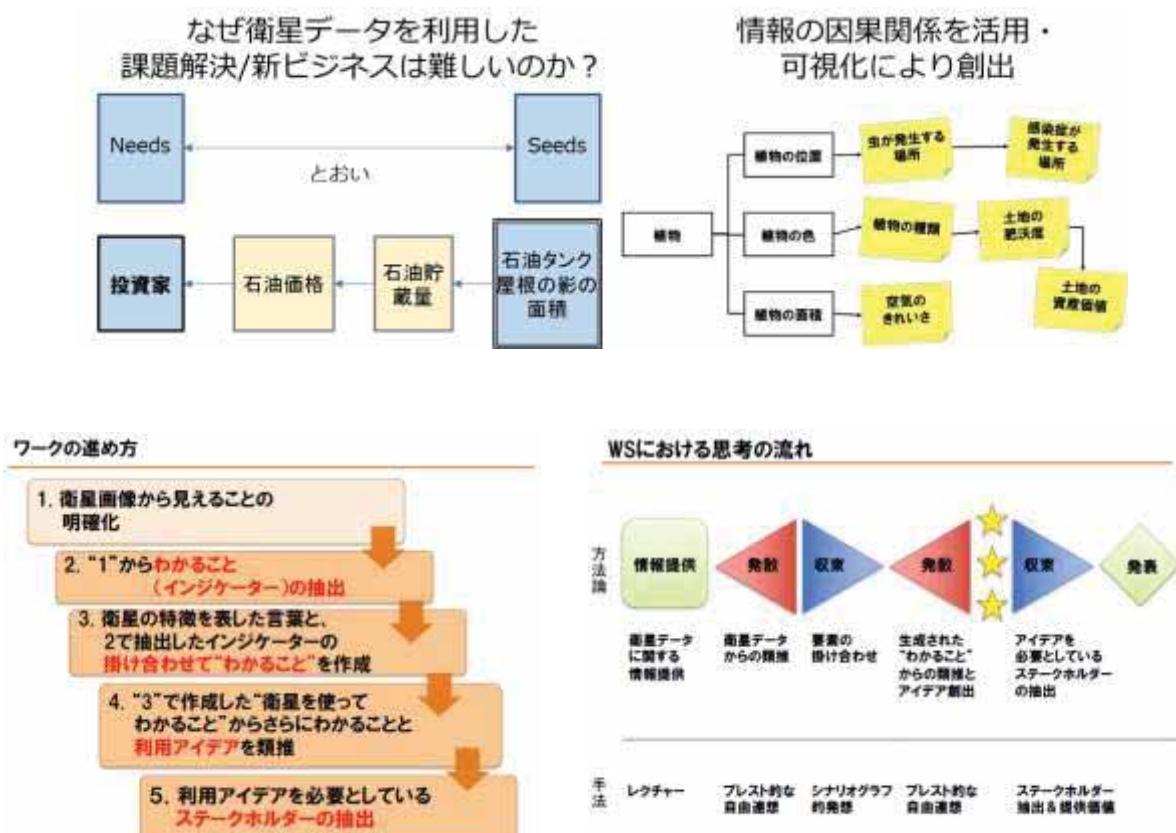


図 6(1)-4 衛星データ利用の新しいアイデア創出手法

この手法は、様々なバックグラウンドを持つ人々で構成されるチームに、検討のテーマを与え、そのテーマについてチームで協力して一つのアイデアを練り上げるアプローチを探っている。参加者の構成としては、宇宙分野以外、例えば IT エンジニアやスポーツメーカーの営業といった不特定ジャンルの社会人、また学生なども含め、幅広い多様な観点が取り込まれるようにしている。

実際にこの手法を用いたワークショップ（図 6(1)-5 参照）を、内閣府が主催する S-NET（※）や地方自治体などとも連携し、全国各地で計 10 回、200 名ほどの参加者を集めて行った。このような取り組みにより、衛星データ利用の斬新的なアイデアの芽出しを得ている。



図 6(1)-5 衛星データソリューション アイデア創出ワークショップの様子

（※）S-NET（スペース・ニューエコノミー創造ネットワーク）：

内閣府宇宙開発戦略推進事務局が 2016 年 3 月 22 日に立ち上げた、「宇宙」をキーワードに新産業・サービス創出に関心をもつ企業・個人・団体などの活動を支援・創出するネットワーキング活動。

③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

	26 年度	27 年度	28 年度	29 年度	30 年度
参画研究機関数	—	4	4	4	4
参画研究者数	—	43	43	60	63
うち中止（解任）	—	—	0	6	20
追加（新任）	—	—	0	23	23

④ 「選択と集中」に向けた取り組み

本プログラムでは、「選択と集中」に向けた取り組みとしては、次のようなことを実践した。

プログラム開始当初の予算配分としては、本研究開発の根幹となる SAR システムを急ぎ仕上げる観点で、SAR システムプロジェクト（JAXA 宇宙研）に重点配分していた。その後、バス部を含めたフルの衛星化のために衛星システムプロジェクト（東大）に予算を追加する必要があったが、一時得られなかつたため、平成 29 年 8 月に東大作業を必要最小限まで縮小し、その分 SAR システム開発をより一層充実化させてプロジェクトを加速するため、JAXA 宇宙研に予算を積み増す判断を行った。

これについては、最終的なフルの衛星化が遅れ実証衛星打上げスケジュールの遅延に繋がるリスクがあったが、その当時 JAXA 宇宙研の作業が佳境に入った状況であり、これに加えて東大も作業飽和することで結果として共倒れすることを防ぐ狙いもあった。

半年後、バスシステム開発のための予算が獲得できたため衛星システムプロジェクトの作業の立て直しを図ったが、先行して SAR システムを選択的・集中的に加速させたおかげで、JAXA 宇宙研の作業は既に収束してきており、JAXA 宇宙研が作業過多になってきた東大側のサポートに入ることが可能となった。

結果としてこれが功を奏し、実証衛星打上げのスケジュールを当初より 1 年前倒せることに繋がっており、選択と集中がうまく機能した判断と考える。

(2) 研究成果の展開に向けた取り組み

① これまでの取り組み

本研究開発の成果である小型 SAR 衛星システムの社会実装は下記方針に則って事業主体を構築する。

- ・ 様々なビジネスモデルを検討した結果、確実な事業成長・拡大を見込むためには利益を生み出す SAR データ利用の「既存にはない新しい手法（ディープラーニング等）」による事業展開を柱とすべき、また将来的な目標として地上処理だけでなく衛星側にも機能化する、つまり衛星・地上両方の能力を併せ持つ必要がある。
- ・ 世界の宇宙ビジネスの主役は、大手メーカーから、急激に変化するビジネス環境に柔軟に対応可能なベンチャーに確実にシフトしている（代表例：SpaceX、Planet Labs、OneWeb、等）。
- ・ 本事業の展開は、SAR データ利用が有望な東南アジアの新興国などの海外マーケットが主なターゲットになるため、国際関係に強く、機動性に富んだ組織化が必要。

② 今後の方針と具体的な取り組み計画

以下に、今後の具体的な取り組みの計画と課題について示す。

i) 今後の具体的な取り組み

ImPACT 後も、図 1. (1)-7 に示した計画に基づいて、小型 SAR 衛星システムの社会実装を進めていく。

ii) 今後の課題

事業立ち上げに当たっての短期的課題、事業を安定軌道に乗せるための中長期的課題、事業を将来発展させるための長期的課題の3つの分類とし、その中で主要なものを以下に示す。

・短期的課題：地上システム（衛星データ受信施設）の整備

今後、小型SAR衛星を打上げて運用を行っていくに当たり、衛星からデータを受信する地上局アンテナ（特に高速Xバンド通信）を初めとする地上施設を整備する必要がある。

現在、受信局ネットワークを有する海外の通信サービス企業と調整を行っているが、運用コストを抑制する観点で克服すべき課題があり、今後検討が必要である。

・中期的課題：キラーアプリの開発と顧客開拓

現在、SARデータとディープラーニングを活用した情報ソリューションサービスの立ち上げに注力している。短期的には顧客の要求に応じたサービス・ソリューションを開発し提供できればビジネスは進んでいく見込みであるが、ビジネスを安定軌道に載せるためには強み・コアとなるキラーアプリとそれを実現する独自のデータ処理技術の保有が必要と考えている。

・長期的課題：次世代オンデマンド即時観測システム構想の実現

2.(3).ii)項に示した、即時性を更に向上させた次世代のオンデマンド即時観測システムは、本事業に圧倒的な革新性をもたらし、優位性を不動なものとするポテンシャルがあり、将来的に重要な研究開発と考えている。現時点で、本研究開発の遂行に必要となる予算が十分確保できていないため、今後資金立てを検討する必要がある。

7. PMの自己評価

(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

- ① 産業や社会のあり方の変革（漸進的でなく、非連続的なイノベーション）をもたらす見通しは得られたか。以下の視点を踏まえて記載すること。

No.	評価の視点	PM 評価 (※ 括弧内は本報告書内の記載箇所)
1	将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果が獲得されたか。	<ul style="list-style-type: none"> ・プログラム開始当初に掲げた目標を達成する、オンデマンド即時観測が可能な小型 SAR 衛星システムのための技術開発に成功した (p. 50~51)。 ・本プログラムが開発した技術を活用した小型 SAR 衛星システムは、従来の SAR 衛星と比べて大幅な小型・軽量化と低コスト化を実現し、更に高い観測性能も併せ持つこれまでの SAR 衛星の常識を超えるものである (p. 31、p. 50)。 ・また、オンデマンド即時観測を実現する衛星の自動・自律化機能も開発し、観測リクエストから極めて短時間で観測データをユーザーに届けることが実現可能となった (p. 51)
2	産業や社会のあり方変革に向けた戦略が具体的かつ明確となつたか。	<ul style="list-style-type: none"> ・本プログラムの小型 SAR 衛星は、「オンデマンド打上げ」に対応することで、災害等の緊急時に必要な情報を、確実かつ極めて短時間にユーザーに届けることが可能。「安心の目」として社会に変革をもたらす不可欠なインフラとなる (p. 1~3)。 ・同時に、「コンステレーション」にも対応することで全地球規模・常時観測システムを構築可能となり、産業面でも変革を起こす道筋が得られた (p. 4~5)。 ・上記の二つを両立する出口目標として、平時は「コンステレーション」によるビジネス展開、緊急時にスポット的な「オンデマンド打上げ」を行う小型 SAR 衛星の運用形態について、明確かつ具体的なビジョン、戦略、方針が描けている (p. 6~10)。
3	戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか。	<ul style="list-style-type: none"> ・既に、課題が現実の問題として徐々に見えてきている。課題は、短期的、中期的、長期的に分類して明確に整理され、リスク管理は厳重に行われている (p. 70~71)。
4	技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的な	<ul style="list-style-type: none"> ・大型アンテナのコンパクト収納は、平面スロットアレーランテナ方式をベースに導波管トーナメント回路による低損失給電系等を実現することで成し遂げている。本方式は本プログラムが独自に開発した SAR アンテナ方式である (p. 14~15、35)。

	サプライズは存在したか。	<ul style="list-style-type: none"> 世界の著名な宇宙機関も実現していない衛星の自動・自律化 (p. 27~29、35) や、世界一の速度を誇る高速ダウンリンク送信技術 (p. 32、35)、独自方式による大電力增幅技術 (p. 39、42) など、多くの技術的サプライズが本研究開発により現実のものになった。
5	戦略の実現に向けた道行き（ロードマップ）が適切に描けたか。	<ul style="list-style-type: none"> 本プログラムで開発した小型 SAR 衛星システムを社会実装することで、オンデマンド即時観測システムを社会インフラ化する計画を立案した (p. 6~10)。 明確かつ具体的な戦略を構築済み。(68~71)。
6	戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し等が行われたか。	<ul style="list-style-type: none"> 民間企業とのマッチングについては、プログラムスタート時に方針の明確化を行い、その結果、研究開発の推進力（ブースター）となる企業との関係強化に重点を置くこととした。本方針に基づき、産業界との連携は適切に行われた (p. 52)。
7	知財・標準化戦略は明確かつ適正か。	<ul style="list-style-type: none"> 競合リスク等の評価分析を行った (p. 54)。 一連の知財調査・評価分析結果に基づいて、今後の知財戦略や知財活動計画を明確なものとして立案している (p. 54~55)。

- ② 上記①以外の派生的な効果（派生的に生み出された成果、新たな学術的知見の創出、失敗から得られた知見等）として、どのようなものが得られたか。

本プログラムの研究開発は、SAR というハードウェアを高性能化することがメインテーマであり、いわゆる技術シーズをボトムアップさせるタイプの研究開発である。一方、当然ながらシーズはユーザー（社会）のニーズと結びついて（マッチして）始めて、社会の課題解決等に貢献することが可能になる。いくらイノベーションの可能性を秘めた素晴らしい技術シーズであっても、ニーズとの結びつきを真剣に考えなくしては社会実装に至らせることができない。

上記のような思考を行った結果として、シーズそのものだけではなく、ニーズとの結びつきを如何に実現するかを本プログラムの派生的に重要なテーマととらえて、総合システムプロジェクトにおいて以下 2 点の取り組みを行った。

- ・ SAR に限らず、衛星データを利用した新ビジネスがなかなか起こりづらい現状について分析を行った。その結果、「衛星から見えることと解決する課題が遠いため、簡単に結びつかない」、「可視化して、結びつけることを支援する手法があれば有効である」という結論に至り、そのための手法を開発し、ワークショップによる実践を行った。（p. 47、p. 65～66）
- ・ 卫星データのよりユーザーに近い側にある技術として、高価値の情報を抽出可能な機械学習・ディープラーニング技術に着目して事業化に向けた検討を行った。更に、その構想をより進化させた「ディープラーニングの衛星搭載化技術」などの研究開発にも着手した。（p. 47～48）

(2) PM自身の活動（プログラム・マネージメント）に関する評価

- ① <目標設定>産業や社会のあり方変革を目指した研究開発プログラムとして、目標設定の水準は妥当であったか。
- ・プログラム開始時に、その時点において小型 SAR 衛星システムで世界トップとなる目標設定を行ったが、めまぐるしく変わる情勢・環境に対応するため、プログラムの途中で達成目標を上方修正することを判断した (p. 20)。
 - ・その結果、世界の最新状況に照らしても、小型・軽量と高性能を併せ持った世界最高峰の小型 SAR 衛星システムを構築できた (p. 35、42、49)。
 - ・時々刻々変化する状況に柔軟に対応し、適切な目標水準を設定できたものと評価する。
- ② <作り込み>トップ研究者の採用や異分野研究者との融合、外部専門家からの助言聴取など、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を推進できたか。また、研究開発の実施体制は適切であったか。
- ・本プログラムには、SAR 衛星の圧倒的小型化を実現するため、超薄型アンテナで独自技術をもつ東工大 廣川教授や、衛星小型化技術で多くの実績を挙げている JAXA 宇宙研 斎藤特任教授や東大 中須賀教授など、我が国トップランナーの研究者が集結 (p. 60)。
 - ・また、外部の優れた助言を多く取り込むため、ImPACT のプログラム・アドバイザーリスト制度を活用して、20名を超える外部有識者による第三者レビュー ボードを組成。研究開発の節目のタイミングで綿密な設計レビューを実施した (p. 61、63~64)。
 - ・SAR データ利用手法の開発において、異分野の研究者が本研究開発に参加するための働きかけや、新しいアイデアを創出するため手法開発・ワークショップの開催など、斬新なアイデアを取り込むための各種取り組みを行った (p. 47、65~66)。
 - ・上記の観点から、研究開発体制は適切であったと評価する。
- ③ <進捗管理>研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速、減速、中止、方向転換等を果敢に行うことができたか。
- ・研究開発の進捗状況・妥当性を的確に把握するため、定期会議の設定や、第三者設計レビューの適宜開催、PM 補佐の研究機関常駐などを行い、適切な進捗管理および状況把握を行った (p. 62~64)。

- ・研究開発の進捗状況の変化や、研究機関の作業負荷の状況、研究開発予算の動向などに応じて、選択と集中により各プロジェクトの研究開発の加速（打ち上げスケジュールの1年前倒し）・減速等の調整を行った（p. 67）。
- ・上記のマネジメントを行った結果、研究開発は概ね成功を収め、更に ImPACT 後の出口の加速まで果たすことが出来たため（p. 23）、進捗管理は適切であったと評価する。
- ・めまぐるしく変わる情勢・環境に対応して、プログラムの途中で達成目標の上方修正をおこなった（p. 20）。

④ <関係者の巻き込み> 研究開発に関連する産業界を巻き込み、それら関係者の自発的な研究開発投資を誘導することはできたか。

- ・本研究開発を着実に進めて行くに当たって、推進力（ブースター）の効果が期待できる適切な企業を ImPACT 外部機関として取り込むことに成功、PM 自らがトップ会談を行うことで当該企業とは強固な信頼関係を構築できた（p. 52）。
- ・これらの企業から、合計 30 名を超える研究者・技術者が共同研究者として本研究開発に参画した（p. 53）。
- ・上記の観点から、民間企業等からの関係者の巻き込みは、効果的にできたと評価する。

⑤ <成果の展開> 得られた研究成果の産業界への橋渡しや将来的な実用化・事業化に向けた戦略（知財及び標準化を含む。）及び体制が構築できたか。

- ・将来的な実用化・事業化に向けて具体的な戦略立案（p. 6～10、p. 69～71）、知財戦略・活動計画（p. 54～55）、体制の構築（p. 68～69）は概ね完了している。
- ・上記に加えて、ImPACT 後の政府サイドからの支援についても調整しており（p. 69～70）、先々を見据えた上で、確実な成果の展開が行えている。

⑥ <PM 支援機能の活用> PM 補佐や JST、外部支援の活用など PM 支援機能を有効に活用できたか。

- ・PM 補佐については、宇宙開発のマネジメント経験が豊富な研究開発担当 2 名と JST の運営補佐を含め 3 名体制とした。PM が各補佐の役割分担を明確化することで、PM の目が行き届かない細やかな部分まで対応可能なマネジメント体制を構築した。

- ・具体的には、研究機関現地での技術マネジメントや、CSTI 向けレビュー会対応、予算対応、アウトリーチ・広報対応、外部調達対応など、業務別に担当を指名し、それぞれに一定の「責任」と「裁量」を与えた。これにより、PM が PM 補佐からタイムリーに状況報告を受けて研究機関等に直接指示を下すことに加え、現場判断でも柔軟に指示・指導が行えるよう配慮した。
- ・また、ImPACT の「プログラム・アドバイザー制度」を活用して、20 名を超える外部有識者を本プログラムの外部有識者として招聘した。
- ・上記の観点から、PM 補佐やプログラム・アドバイザーなどの PM 支援制度は有効に活用できたと評価する。

⑦ <アウトリーチ>アウトリーチ活動等が積極的に行われ、研究開発の意義・重要性等に関し、関連する産業界や一般の理解が深まったか。

- ・ImPACT の開発成果が目に見えてきた最終年度はアウトリーチ活動に注力し、国内外の主要学会において実物大の衛星モックアップ（模型）を展示するなど、印象的・効果的なアピールを行った。ブース来場者は、直接説明を行った相手だけでも約 1000 人にも上り、大きな反響が得られていることを肌で実感出来た（p. 56 ~57）。
- ・広報活動で蓄積した財産の一つである、プログラム内容を紹介する広報ビデオは、STS フォーラムにおける安倍首相スピーチにも取り上げられ、全世界の先端科学者へ本プログラムを印象強くアピールできることにも繋がった（p. 58）。

⑧ <人材育成>若手や女性を含め研究人材の育成にどの程度貢献できたか。また、基礎研究からイノベーションを生み出す取り組みに関する参画研究者の意識改革がどのように進んだか。

人数は多くはないが、参加した若手研究者が、研究成果を社会実装することをおこなうようになってきた。実際に、本プログラムに参加した若手研究者が、今後の開発の中心的な役割を担っている。衛星開発の取りまとめをおこなっているのは、東大で衛星システムの研究を進めていた研究者である。また、同様に SAR データを活用したサービス開発を行なっているのは、慶應大學で総合システムの研究をおこなっていた研究者である。

⑨ <全体>更なる研究開発の発展や、我が国の産業競争力の強化、困難な社会課題の解決に向け、どれほどの貢献ができたか。

- ・ ImPACT 後の更なる研究開発の発展について、本プログラムでは、ユーザーの旺盛なニーズに応えるべく即時性の更なる向上を目指した、次世代のオンデマンド即時観測のあり方やその構想を立案し、実現性検討に着手した。今後の実現に向けて、PM としての活動を継続していく (p. 48)。
- ・ また、本事業の成果が最終的に目指すところは、世界中の各地に根ざす社会の諸課題の解決に資することである (p. 5)。将来的には、持続可能な開発目標 (SDGs) 等にも貢献する事業に結実すべく、努力を行っていく。
- ・ 現在、防災 SIP にて、今回の Deep Learning の搭載化などの新技術の活用について、新たなワーキンググループを立ち上げ、白坂 PM がそのハンドリングをおこなうことが検討されている。このように更なる研究開発の発展につながっている。
- ・ 内閣府宇宙開発戦略推進事務局が 2017 年 5 月に定めた「宇宙産業ビジョン 2030」でも「我が国の中でもある重要技術」として「小型 SAR」が明記された。また、河村建夫座長による自民党「衛星データ利用促進懇談会」報告書においても、「衛星データ利用促進に向けた具体的な施策」の「主な利用軸の設定」において「国内的には、内閣府 ImPACT プログラムにおいて小型 SAR の開発が進められており、小型 SAR の活用も今後の取り組み軸として重要である」と明記がされた。これらは、本研究が、我が国の中でもある重要技術として、我が国が宇宙産業の強化に貢献したこと示しているといえる。

⑩ <全体>目標通りの成果が得られなかった事例等の原因分析や解析が適切に行われ、そこから得られた知見や教訓を次の挑戦に活かすことができるか。失敗を通して次の挑戦につながる道筋は描けたか。

本プログラムでは全般的にほぼ目標通りの成果が得られたため、技術面では大きな失敗はなかったと判断しているが、プログラムマネジメント面においては以下のようないい反省がある。

白坂プログラムは、複数のプロジェクトを競わせながらステージゲートでしづつていく戦略的プログラムマネジメントではなく、全てのプロジェクトの成功が必要なオペレーション型のプログラムマネジメント形態をとった。これは、宇宙開発のための研究は、部品等についても費用がかかり、複数を競わせるだけの予算が確保できないためである。ImPACT は、PM を頂点として、各研究機関が個別プロジェクトとしてその下にぶら下がる形のマネジメント体制をとるが、この各研究機関におけるプロジェクトマネジメントは、各機関の規則（管理要領、指揮系統、等）に従った運営形態で進められる。

PMとしては、基本的に、各機関におけるマネジメントは「適切に機能する」ことを前提に全体統括する立場をとるが、各機関のプロジェクトマネジメントは必ずしも適切に機能するわけではないため、ImPACTのようなマネジメント形態を採る場合は、プログラム作り込みに当たっては、本件も含めた考慮が必要であるし、万一そのような事態になることを想定したリスク対策が必要である。

(3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

ImPACT プログラム全体に対し、大変効果的であり、継続して欲しいと考えるところと、今後よりやるといいと考える点がある。

効果的であった点として、大きく3点あげられる。

i) 中堅研究者に PM の機会を与えられた

これまでの大きな国プロでは、すでに高い実績を上げた研究者が PM になる傾向がある。ImPACT では、PM をさせていただくことにより、自分より実績のある研究者/実務者に複数集まってもらい研究を推進することができた。これは、研究者にとって、大変大きな経験となった。また、内閣府のプログラムであるということで、多方面からの支援をえることができた。複数の省庁に話を伺ったり協力をしていたり、、有識者議員の多方面からのコメント/支援をいただいた。また、多くの外部有識者の方々も積極的に支援をしてくれたため、大変いいフィードバック機会を得ることができた。また、内閣府/JST のサポートの大きかった。

ii) PM 経費の存在

研究費とは別枠の PM 活動費があることで、PM 補佐を雇用することができます、ベンチマーキングや知財関連など、外部の専門家の活用が可能となった。これまでの多くのプロジェクトでは、このような予算がなく、研究を優先してしまうことが多かった。

iii) 体制/予算の自由度が高い

周辺環境が変化する中で、対応のための組織や予算利用用途の変更が必要ことが発生する。ImPACT はプログラム途中の体制変更や予算変更が認められていたため、新たな取り組みをすることができた。

今後よりやるといい点として2点あげられる。

i) 社会実装強化のためのシステム技術評価

白坂プログラムでは、プログラム途中で、ImPACT 発ベンチャーによる社会実装という形式をとった。しかしながら、ImPACT 予算内では、新技術開発のみにしか資金を使えなかった。新規技術開発のみだと、実装につながりにくく、それを活用した“システム”として実装せざるを得ない。こういった“システム技術”に対する評価を少し強化していただけると、より社会実装が進む研究が増えると考える。

ii) PM 育成のエコシステム構築

今回 PM として大変いい経験をさせていただいた。これをいわゆるプログラムマネジメント知識体系に反映し、研究型プログラムマネジメントの体系を構築することが必要と考える。また、PM が出口まで経験後、メンターや教育などの育成に貢献するなどエコシステム化をし、継続していくことができれば、PM 人材の育成に貢献できるようになると考える。