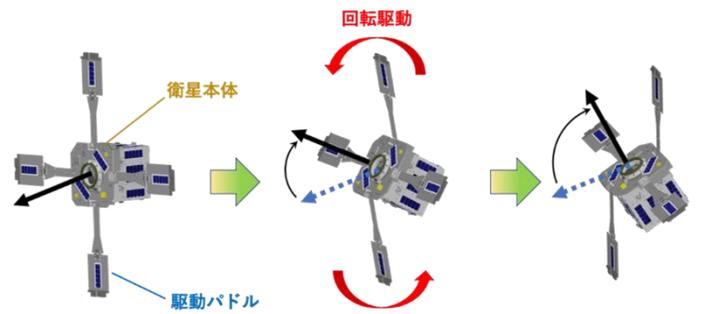


「新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関 研究代表者名	国立大学法人東京工業大学 教授 松永 三郎	実施期間	平成30年度～ 令和2年度 (3年間)	実施規模	予算総額（契約額） 142百万円		
	共同参画機関	日本大学、(株)テクノソルバ、 サカセ・アドテック(株)、(株)天の技				1年目	2年目	3年目
						47百万円	47百万円	47百万円

背景・全体目標

- 背景：これまで民間の宇宙ビジネスが広がらなかったのはなぜか？
作り手は衛星を作るのに手一杯で、使い手が喜ぶ気の利いた宇宙システムではなかった。
- 目的：
小さく、安くを実現した「ほどよし」信頼性衛星システムをさらに発展させ、**使いやすく、高付加価値の情報を生み出すスマート宇宙システム**を実現し、宇宙ビジネスを促進する。



可変形状機能を利用した姿勢制御の概念図(迅速姿勢変更)

全体概要・主な成果

- ① スマート宇宙機器等の実用化研究等
 - a 機械学習利用姿勢・観測センサ等 : 達成度100%
 - b 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等 : 達成度100%
 - c 高速通信用展開アンテナ等 : 達成度100%
- ② 可変形状機能超小型衛星システム等のスマート宇宙システムの設計・開発・評価等 : 達成度100%
- ③ 試験運用設備の利用サービスの提供等
 - a 放射線実験施設等 : 達成度100%
 - b 国内・海外地上管制運用局等 : 達成度95%
 - c 軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等 : 達成度100%
- ④ 新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等
 - a ユーザーとの将来利用要求・設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等 : 達成度100%
 - b 産学連携モデルの創出検討や課題等の外部発信に向けた新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナー等の実施等 : 達成度100%
 - c 国内外学術会議における研究成果の発表等 : 達成度100%
- ⑤ 若手研究者等の育成 : 達成度100%
- ⑥ スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示 : 達成度100%



可変形状姿勢制御実証衛星ひばりのロケット搭載

全体として、期待以上の成果が得られた。

① 「スマート宇宙機器等の実用化研究等 a 機械学習利用姿勢・観測センサ等」

実施内容・成果

- (1) 衛星画像や航空機・ドローン等を用いた画像取得・人工知能を適用に関する研究 (天の技)
- AIの学習データ取得のために航空機やドローンでデータを取得し衛星データと比較し有用性を評価
⇒ 単純なAIに頼った場合、直接比較が極めて困難であることが判明。今後の戦略検討に反映。
 - エッジAI用の専用デバイスを用いた衛星画像解析の評価⇒ **消費電力1/3, 計算速度5~10倍を実現**

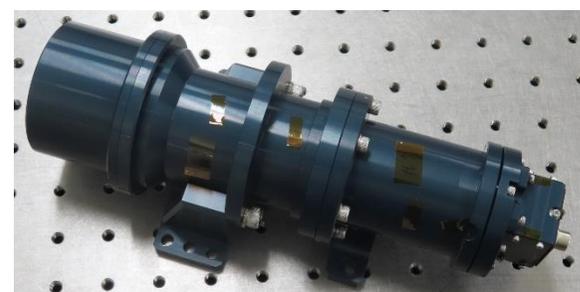


- (2) 機械学習利用姿勢・観測センサ (東工大)
- 別予算で実施した革新的衛星技術実証1号機搭載 DLASにて深層学習としては**世界初のリアルタイム**航空機からの取得データ **画像認識に成功**、さらに、画像認識により雲間から見える**陸地パターンと地図情報比較による3軸姿勢決定にも成功(世界初)**
 - これらの成果を元に、**高解像度カメラを用いた姿勢計測システム**の仕様を検討、開発を行った。⇒ **ひばり衛星に搭載**

AI用専用デバイスでの実験



DLAS/ECAMのリアルタイム画像認識実験の識別結果[別予算]



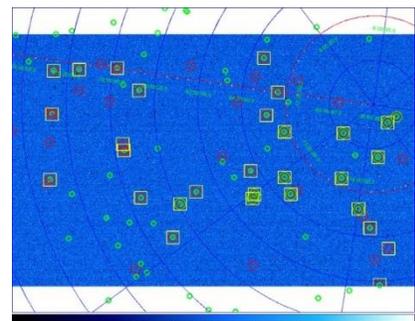
ひばり衛星搭載 画像認識姿勢計測センサ用カメラ

- (3) 超小型衛星用高性能スタートラッカー-STT用のレンズ開発 (東工大)
- 別予算で実施した革新的衛星技術実証1号機搭載 DLASにて**軌道上での星画像を2000枚取得・解析**
 - 星識別アルゴリズムの評価、宇宙線による劣化度の評価、散乱光等実運用における問題等の洗い出しを実施**
 - 実用的STT専用レンズを開発** ⇒ [波及効果] STTシステムを開発してひばり衛星に搭載

[波及効果]

本STTは姿勢計測の重要な要素技術として展開中:

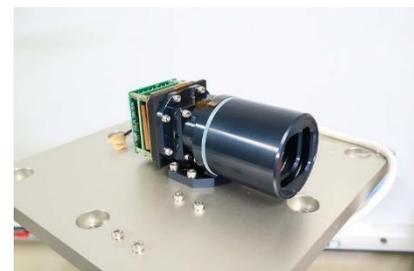
- JST R2 量子航法拠点科学技術拠点 (ジオイド計測への応用実験へ応用)
- 経産省 R2 補正宇宙開発利用推進研究開発 (小型衛星コンステレーション関連要素技術開発) にて国産基幹技術として継続して産業化を実施
- 日経エレクトロニクス誌21年11月号に掲載 ⇒ **同クラスにて世界最高レベルの精度を達成**



DLASの軌道上画像[別予算]



DLAS STT [別予算]



Hibiari STT用レンズ

① 「スマート宇宙機器等の実用化研究等 b 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等」

実施内容・成果

進展収納可能な軽量かつ高剛性なブームやアレイの開発を行い、その成果を宇宙実証機や次期計画に繋げることができた。

実用化研究の成果

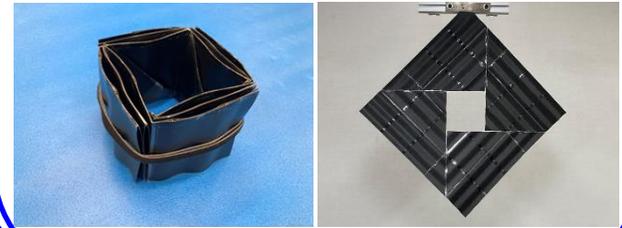
東京工業大学

波型閉断面伸展ブームを開発し、薄肉材料を用いても高収納性・高剛性を可能にした。また、展開後の良好な形状再現性を実現した。本成果は、小型衛星向け高剛性伸展ブームとしての実用化の可能性を示した。



高剛性伸展収納ブーム

波型パネル形状と折り畳みパターンを提案し、自己伸展機能を有すると共に展開後高剛性の展開構造物を実現することができた。本成果は、薄膜太陽電池アレイの開発として、次期計画に繋げるためのフロントローディング研究に役立てることになった。



伸展収納アレイ

サカセ・アドテック

ブーム材料の評価を行い、巻取り収納可能な軽量高剛性閉断面型伸展ブームの開発を行った。

本成果は、新たな方式の膜展開構造物として、JAXAの革新的衛星技術実証3号機に搭載されることが決まり、宇宙実証の機会や、JAXA宇宙研より次期小惑星探査機のサンプルリターン用展開型ターゲットマーカへの提案依頼を得ることができた。



伸展収納ブーム

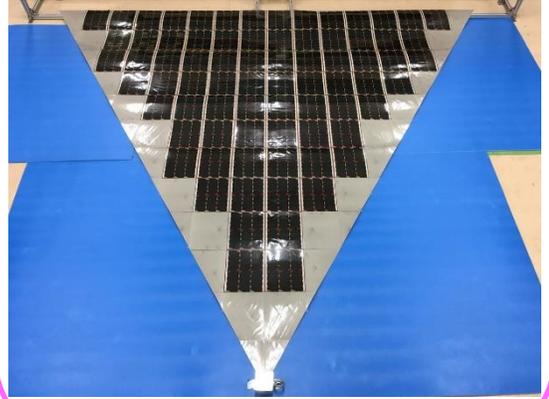
波及効果

革新3号RAIS-3搭載コンポーネント



伸展ブームによる膜展開構造物

JAXA/ISASフロントローディング研究



薄膜太陽電池アレイ

① 「スマート宇宙機器等の実用化研究等」 c 高速通信用展開アンテナ等

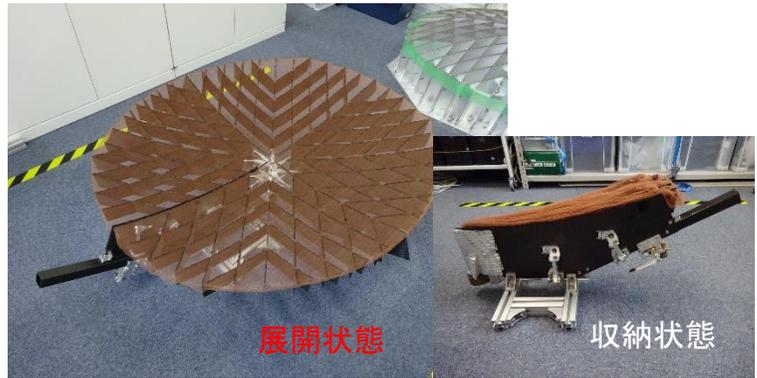
実施内容・成果

スマート宇宙研究開発拠点形成の成果を最大限に発揮すべく、単なるアンテナ開発にとどまらず、展開アンテナに必須の摺動部の潤滑の評価方法を確立しつつ、派生技術による特許出願等を実施した。

テクノソルバ JAXA (技術支援)

小型高精度展開アンテナの開発・試作

高精度の衛星搭載用のアンテナ反射鏡は通信のみならず深宇宙観測や合成開口レーダ(SAR)にも適用が可能である。通信は高速化、SARは高周波数化による小型化と高精度化の要求がある。これらを鑑みJAXAとの共同特許、研究の成果を活用しつつ、スマート宇宙機器の1つとして多用途に適用可能な小さく畳んで大きく開く高速通信用展開アンテナの開発を実施し1mの扇子型展開アンテナを試作した。試作したアンテナは展開機能の確認の他に鏡面精度測定を実施し、0.23mmRMSが達成できていることを確認した。



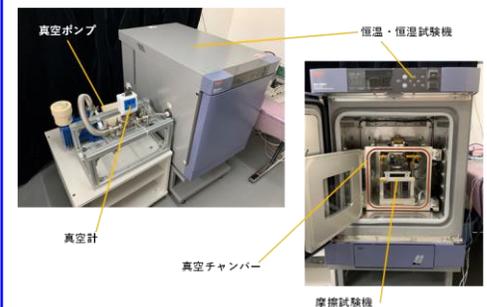
1m扇子型展開アンテナ

成果

日本大学

摺動部の摩擦評価方法確立

展開構造の展開運動に大きな影響を与える摺動部の展開性評価用摩擦試験機システムを開発し、それにより摩擦係数および摩擦度を求め、データベース化することで、今後実機における摺動部の設計の際に利用することが妥当であることを確認した。



摩擦試験機システム

波及効果

テクノソルバ

オリガミーティーエス合同会社

「月面有人と圧ローバ用太陽電池パドル及びアンテナへの適用を想定した扇子型展開機構による軽量かつ再収納可能な展開機構の研究」として研究を継続する。

JAXA

テクノソルバ

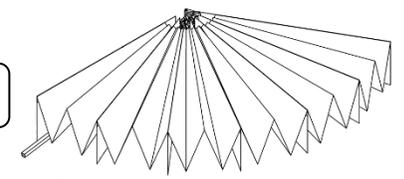
JAXAで開発中のKa帯用5m扇子型展開反射鏡への技術的な成果のフィードバックを行った。

JAXA

東京工業大学

テクノソルバ

特許出願



扇子型展開太陽電池パドル

JAXA

JAXA/ISASの戦略的基礎開発研究「探査機用機構部品のための樹脂系固体潤滑剤の開発としゅう動部の寿命予測法の構築」と連携しつつ継続し、ハンドブックを作成することを目標とする。

②可変形状機能超小型衛星システム等のスマート宇宙システムの設計・開発・評価等

実施内容・成果

超小型衛星ひばりの開発

➤ ミッション概要と意義

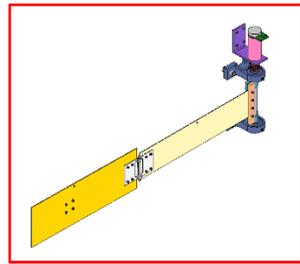
高速姿勢制御と高指向安定性の両方を実現する可変形状姿勢制御(VSAC)を実証することで、全く新しい姿勢制御方式の確立、高速姿勢変更と高指向安定性の両方が必要とされるリモートセンシング、天文学、宇宙工学などの分野で市場競争力の獲得により、超小型衛星を利用したミッションの幅を拡大し、新規市場を開拓することを目指す。

➤ BBM、EM、FM(部分的)の開発

2018年度ではミッション定義およびシステム検討を行い、BBM開発に必要なコンポーネントの購入、動作確認を行った。その後の2019年度では、BBM結合試験、ミッション部であるパドルの展開試験(a)等を実施し、BBMが問題なく機能することを確認した。2020年度は基本設計を元にEM開発を行い(b)、VSAC展開試験、EMシステム振動試験(c)、熱真空試験(d)、およびEMシステム統合試験を実施した。振動試験、熱真空試験ではいくつか問題が発生したため、その解決法をFMの設計に反映し、詳細設計審査会を行った。そして詳細設計を元に一部はFM開発を進めた。

➤ **[波及効果]** 本事業終了後、別予算で引き続きFM開発を行い、各種環境試験や統合試験を実施した後、ひばり衛星フライト品をJAXAに引き渡した。

展開パドル機構概略



(a) パドル展開試験の様子
重力補償装置

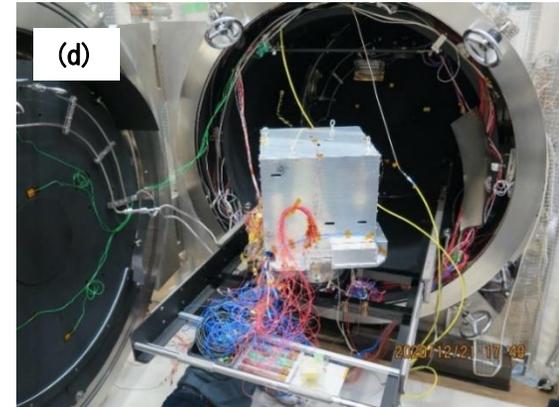


EM開発の様子
(テーブルセット)

項目	内容
衛星名称	可変形状機能技術実証衛星ひばり
質量	55kg
寸法	59 x 59 x 55cm
通信周波数帯	S帯アップリンク: 中心周波数2000MHz帯 S帯ダウンリンク: 中心周波数2285MHz Globalstar: 中心周波数1600MHz帯
電力	バッテリー: 160Wh 6.0~8.4V、最大消費電力: 46W
ミッション機器	可変形状機構, カメラ各種(紫外線, 可視光など)
ミッション期間	1年



(c) EMシステム振動試験の様子



(d) EMシステム熱真空試験の様子

③ 「試験運用設備の利用サービスの提供等」

実施内容・成果

a 放射線実験施設等

- 大学・民間共同利用の開始

我が国において共同利用可能な設備や東工大コバルト照射施設を研究実施者や協力者に周知し、後者に関しては実際の共同利用を実施するとともに、民間資本の併用による設備維持拡充の準備を進めた。
- 宇宙関連での利用実績

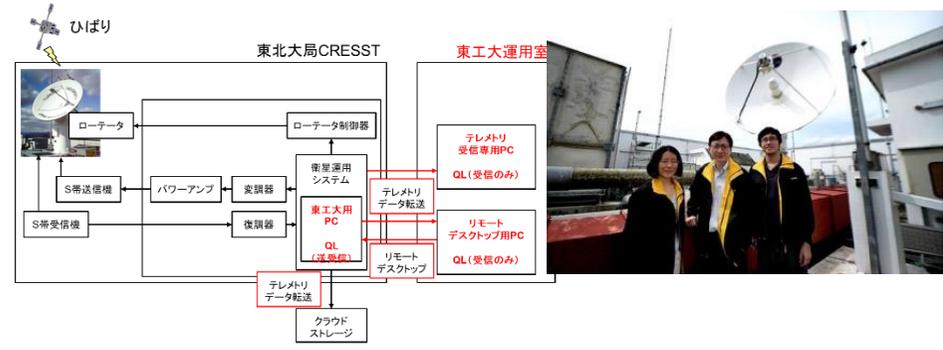
スマート宇宙システムの試験運用に係る東工大コバルト照射施設の稼働状態は、新型コロナウイルスの影響のため当初の予定よりも遅いペースであるが、増加を続けて、使用者の所属も多様になっていて、**3年間のべ利用件数は宇宙案件のみで85件に上り**、国内の主要な新規装置は東工大で放射線試験を経て宇宙へと打ち上げられている。
- 宇宙における放射線障害に関する講演等 啓蒙活動の実施

放射線実験は照射量の見積もりや実験方法にさまざまな知見があり、データの解釈も簡単ではない。スマート宇宙機器システム(研究会)では、**放射線関連の講演を4回実施**しつつ、放射線による電子部品のトラブルの原因や評価方法について、専門家を招待するなど、**放射線セミナーを2回**催した。また、本事業の参画教員が受け入れ研究員となり、JAXAや民間企業の放射線実験の技術的相談に応じるなど、**実験サポートも試みた**(宇宙科学研究所 JASMINE計画など)。

b 国内・海外地上管制運用局等

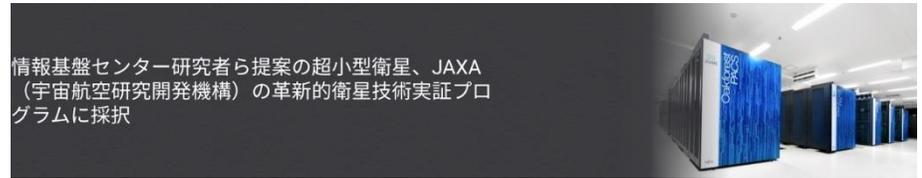
- 国内地上管制運用局として、東北大・北大局CRESSTを東工大運用室から利用する遠隔運用システムを構築した(ひばり衛星の運用に利用)。
- あわせて、東北大がスウェーデンに有する地上局を利用できる体制を構築した。
- 他に、コロナ禍のために海外出張ができず仕様検討までに留まったが、**東工大とシンガポール南洋工科大の間で**、ひばり衛星を運用するために必要な地上局の利用に関する合意を得るための手続きを進めた。
- さらに、ひばり衛星に試験的に搭載されたGlobalstar通信機によるGlobalstar衛星ネットワークを用いた速報ダウンリンクの実証の準備を行った。
- [波及効果]2021年より、ASPIRE League Partnershipにて南洋工科大と共同研究を開始**

東北大局CRESSTの遠隔運用システム シンガポール南洋工科大局



c 軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等

- 衛星データ利用について議論・検討
- うみつばめ(PETREL)衛星の学術データ利用については 東京大学 情報基盤センターと連携 (2020年6月 プレスリリース https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0310_00019.html)
- DLAS取得データについては宇宙情報監視等への応用研究をJAXAと開始



④ 「新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等」

実施内容・成果

b 産学連携モデルの創出検討や課題等の外部発信に向けた新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナー等の実施等

- ひばり衛星での産学連携**
 - ABLIC社・東工大・理での小型紫外線カメラ開発とひばり衛星への搭載
 - 共同プレスリリース** (<https://www.ablic.com/jp/semicon/news/2021/09/29/uvcam/>)
 - 今後さらにミネベアミツミと宇宙用RW開発等で連携の予定。
- 産学連携による衛星データビジネス創出プロジェクト「うみつばめ」**
 - 革新的衛星技術実証3号 うみつばめ衛星を核とした産学連携
 - 「持ち寄りパーティー方式」各社からの協力で衛星事業開発中
 - 共同プレスリリース** (<https://www.titech.ac.jp/news/2020/047297/>)
 - 2021年6月にはOPIE21にて産学連携で展示ブース出展**
- JST 共創の場 量子航法科学拠点(PI 東工大 上妻)**
 - 本事業で創出したSTTと量子航法装置を組み合わせたリアルタイム・高精度ジオイド計測技術の開発
 - 地震の予兆検知、地下水変動等の推測に応用
 - 東工大すずかけ台キャンパスに慣性航法装置開発拠点を構築中
 - 参画企業(日本航空電子, 三菱重工, 東工大ベンチャー MIZUSAQI)
 - ウェブサイト** <http://www.qnav.iir.titech.ac.jp/coi-next/coinext-index.html>
- 経産省 R2 補正宇宙開発利用推進研究開発(小型衛星コンステレーション関連要素技術開発)**
 - 本事業で創出したSTTを高性能・高信頼・高機能化
 - 衛星ユーザーに使いやすい「Smart」な装置実現をめざす。
 - 日本の基幹技術として日経エレクトロニクス誌掲載(2021年11月号)**
- JST ERATO ラインX線・ガンマ線イメージング(PI 早稲田大 片岡)**
 - 本事業で開発したバス技術と医療技術を組合わせた天文衛星計画
 - うみつばめ計画で得られた産学連携体制を活用した衛星開発・運用
 - 超小型衛星の枠を越えた第一線の科学的成果を目指す。
 - プレスリリース** (<https://www.titech.ac.jp/news/2021/062029/>)



c 国内外学術会議における研究成果の発表等

特許出願2件、査読付き投稿論文3件、研究発表95件、実用化事業10件、プレスリリース・取材 7件、展示会1件

⑤ 若手研究者等の育成

⑥ スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示

実施内容・成果

⑤ 若手研究者等の育成

- プロジェクト支援サービスを提供する拠点の形成に向け、学生や若手研究者等を対象として、スマート宇宙システムの検討等に関する技術的な検討を行う定期会議等を開催し、学生や若手研究者等による主体的研究開発や協力企業等でのインターンを通じた実践的育成のための基盤整備を行った。
- 定期会議**
スマート宇宙システムである超小型衛星「ひばり」、および姿勢センサも含めた各種サブシステムに関する詳細な技術的検討を行うために、基本的に毎週水曜日午後5時から東京工業大学・大岡山キャンパスにて定期会議を開催した。参加者は、主に、東工大・松永研、河合・谷津研の教員、学生、本事業で採用した研究員らが参加した。
- インターン**
学生や若手研究者等による主体的研究開発や協力企業等でのインターンを通じた実践的育成を行った。
MELCO、株式会社天の技、株式会社アクセルスペース、株式会社テクノソルバ、株式会社ジェネシア、株式会社アイネット、その他
- 実践的な宇宙機器・システム開発**
超小型衛星ひばりのシステム開発(BBM, EM, FM(一部)、各種性能試験、安全信頼性審査等)、うみつばめ衛星のシステム開発、STTの開発など

⑥ スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示

- ①～⑤の成果に基づき、学内及び関係機関と将来ビジョンを共有した上で、新しい宇宙産業の芽を創出するための持続可能な組織の構築を見据え、本拠点を持続可能とする仕組みを提示した。
- 優秀な人材の発掘と登用**
東工大内にて、新たに、助教ポスト1名、准教授ポスト1名を確保し、採用できた。また、日大・教授1名の追加参画を得た。
- 実際に軌道上で実証するに値する独創的で先進的な宇宙プロジェクトの継続的提案**
6件以上の宇宙実証プロジェクトを提案して、その内、3件は、実際に軌道上打上げの予定を確保
- 拠点形成維持や開発費用の資金調達案の提示**
JSTや基盤(A)などの大型外部資金を複数獲得して、事業終了後も活動を継続的に実施
- 本拠点を持続可能とする仕組みの具体例の提示**
「うみつばめ型産学連携システム」を提案：
科学とビジネスを両立するという全く新しいコンセプトに賛同した企業と連携して、各社持ち寄りで衛星を開発し、そのデータビジネスのためのデータ解析パイプラインまでを一気通貫で立ち上げている。企業はそれぞれの得意分野で衛星プロジェクトをサポートする「持ち寄りパーティー方式」の産学連携である。短期的な研究資金に集まった協力関係ではなく、それぞれの企業が自己資金で参画しているため、将来を見据えた継続的な協力関係を構築できたことが強みとなる。一方の研究者側は、学術研究を行う過程で生まれるさまざまなアイデアを提案する。企業側はその事業化を行うことで、利益を得て大学に還元するという持続的かつ発展的なエコシステムの構築を目指す。

その他の成果

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	展示会出展
	国内：2 国際：-	国内：- 国際：3	国内：79 国際：16	国内：10 国際：-	国内：6 国際：1	国内：1 国際：-
	受賞・表彰リスト		特になし			

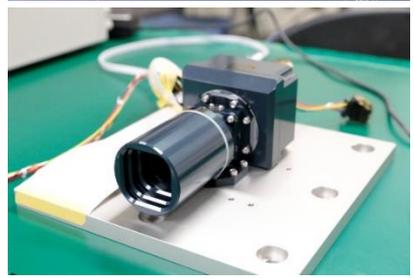
成果展開の状況・期待される効果

- スマート可変形状機能をシステムとして軌道上実証するための**ひばり衛星**は、2021年8月21日、JAXA内之浦にて引き渡し、JAXA革新2号プロジェクトとして打上予定である。東北大・北大の遠隔運用ネットワークを利用することで、軌道上で計画している様々なミッションを遂行して、世界初の成果を出したい。このひばり衛星の開発・運用知見を、JAXA革新3号プロジェクトに採用された**うみつばめ衛星**の開発に活かし、今後の高性能超小型衛星や宇宙探査機の開発にも反映する。
- スタートラッカー-STT**については、製品化ができており、既に量産体制を確立しつつある。ベンチャー・大手宇宙企業、大学、JAXA等から問い合わせ多数あり、ひばり衛星、うみつばめ衛星など既に搭載も確定している。将来的に、キューブサット用の小型化、科学衛星用の高性能化、その他較正システム、エミュレータ等を製造し、スマートな姿勢制御を実現する。現状、世界最高レベル（国内トップ）の性能を実現しており、国内シェア7割を目指す。
- 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ**の成果は、革新3号の主衛星PARIS-3の搭載機器HELIOSの開発へ、また**高速通信用展開アンテナ**の成果は、JAXAの5m級展開アンテナ開発へ反映された。



今後の研究開発計画

- コロナ禍の影響下でも極めて活発な宇宙ビジネスの最新の国際動向調査を継続し、調査結果・考察内容をコミュニティに提供し、コミュニティの維持・拡大を目指す。
- JST光格子時計・天測鉛直線偏差測定型ジオイド計測システムの研究開発（東工大、MHI、日本航空電子）
- JST ERATO ラインX線・ガンマ線イメージング（PI 早稲田大、分担：東工大）
- 基盤(A) 可変形状機能を用いた姿勢軌道制御技術の体系化研究による宇宙システムの革新（東工大）
- 基盤(A) 高精度ゴッサマー宇宙構造物システムの実現に向けた解析・設計理論構築と実験検証（日大・ISAS）
- 若手研究 超小型探査機に向けた可変形状ソーラーセイルの推進剤フリーな軌道・姿勢同時制御（東工大）
- JAXA宇宙研の次期小惑星探査機のサンプルリターン用展開型ターゲットマーカーの開発（サカセアドテック）
- JAXA宇宙探査イノベーションハブ研究提案 月面有人と圧ローバ用太陽電池パドル及びアンテナへの適用を想定した扇子型展開機構による軽量かつ再収納可能な展開機構の研究（テクノソルバ）
- JAXA宇宙科学研究所戦略的基礎開発研究 探査機用機構部品のための樹脂系固体潤滑剤の開発としゅう動部の寿命予測法の構築（日大・ISAS）
- 経産省 R2 補正宇宙開発利用推進研究開発 小型衛星コンステレーション関連要素技術開発（東工大）



事後評価票

令和3年3月末現在

1. プログラム名 宇宙連携拠点構築プログラム
2. 課題名 新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点
3. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人東京工業大学・教授 松永三郎
4. 共同参画機関 学校法人日本大学、株式会社テクノソルバ、サカセ・アドテック株式会社、株式会社天の技
5. 事業期間 平成30年度～令和2年度
6. 総経費 142百万円
7. 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」
◆ 所期の目標
近年、ほどよし信頼性に基づく宇宙機器やシステム開発が進められ大きな成果を得たが、本事業では、今後、より高機能・高性能でユーザーにとって使い勝手のよい宇宙機器・システム（スマート宇宙システム）の時代になると予見し、信頼性を確保し適切なコストでスマート宇宙システムを開発・実用化しながら、プロジェクト支援サービスを提供する拠点を形成する。目標として、高速処理・画像認識等を駆使した国産モジュールの市場提供・利用支援による裾野拡大、展開技術による大電力供給、展開アンテナ、高速通信、SAR、軌道上処理等による衛星プラットフォーム向上と利用支援、民間利用に対応した軌道上観測データ・処理技術等の共有サービス、代表者・参画者・研究協力者らによる産学連携モデルの創出・外部発信と産学ネットワーク形成、試験運用施設のサービス提供・技術交流・情報共有等を通じたユーザーによる新規事業の創出・育成支援等を実施することを目指す。
◆ 達成度
表(1)-1に、上記の目的を達成するための業務項目とそれぞれの達成度を示す。この定量的な根拠は、下記の(2)、特に、表(2)-2、表(2)-3にて詳述する。
表(1)-1 業務項目と達成度
① スマート宇宙機器等の実用化研究等
a 機械学習利用姿勢・観測センサ等 : 達成度 100%
b 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等 : 達成度 100%
c 高速通信用展開アンテナ等 : 達成度 100%

- ② 可変形状機能超小型衛星システム等のスマート宇宙システムの設計・開発・評価等
: 達成度 100%
- ③ 試験運用設備の利用サービスの提供等
 - a 放射線実験施設等 : 達成度 100%
 - b 国内・海外地上管制運用局等 : 達成度 95%
 - c 軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等 : 達成度 100%
- ④ 新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等
 - a ユーザーとの将来利用要求・設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等
: 達成度 100%
 - b 産学連携モデルの創出検討や課題等の外部発信に向けた新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナー等の実施等 : 達成度 100%
 - c 国内外学術会議における研究成果の発表等 : 達成度 100%
- ⑤ 若手研究者等の育成 : 達成度 100%
- ⑥ スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示
: 達成度 100%

「必要性」

[科学的・技術的意義]

現在、超小型衛星・宇宙機は目覚ましく発展していて、特に高度なミッションに必要な姿勢・軌道の性能要求は年々厳しくなっている。そこで、我々は宇宙システムにスマートさを導入すること、特に構造的な可変機能を積極的に付与して制御・管理することを提案した。先行研究から可変形状姿勢制御により、従来よりもエネルギー消費が少なく迅速に姿勢変更できること、適切に設計することで安定指向制御も高度に両立し得ること、等価断面積を変えられることから大気抵抗や太陽輻射圧の並進力を制御でき、実用的な軌道制御、特に推進剤の削減の可能性も十分あり得ることを解析・数値的に明らかにした。しかし、実際の機器・システムレベルでの実証はなされていない。そこで、本事業では、収納・展開可能なスマート機器として、目や頭脳に対応する a) 機械学習利用姿勢・観測センサ等 (AI 応用、スタートラッカーSTT)、手足に対応する b) 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等、c) 高速通信用展開アンテナ等の開発研究を実施した。さらに、システム全体を実際に軌道上にて実証することを目指し、可変形状機能超小型衛星システムであるひばり衛星の開発を実施した。これらはすべて極めて挑戦的な課題であり、本事業の成果として、先駆的な世界初の技術を試作・提案できた。これらの機器やシステムは、今後、宇宙実証していくための具体的な計画がある。特に、ひばり衛星は本事業を基に開発した小型高性能 STT も搭載して、2021 年 10 月以降に、イプシロンロケットにて所定軌道に投入される予定である。

[社会的・経済的意義]

超小型衛星等を利用した宇宙ビジネスが盛んになっており、日本でも多くの新規参入が期待されるが、そのためには、課題 1) 必要な信頼性を低コストで実現する考え方を継承しつつ、新規参入者の期待に応えられるような機能・性能を実現する衛星搭載機器や衛星システムを開発できるようにすること、課題 2) 新規参入者が容易に利用可能な衛星開発／運用設備を整備すること、課題 3) 新規参入者が衛星開発・打ち上げ・運用のノウハウを共有できる場をつくること、を本事業では掲げた。具体的には、課題 1) への対応として、宇宙機器・システムを「スマート」にすることで解決し、特に、スマート宇宙機器等の実用化、スマート宇宙システムのシステム設計・開発・評価の例示を行った。課題 2) への対応として、特に重要な、放射線設備と地上局設備を整備し、スマート宇宙システムの試験運用設備の整備／利便性拡充を行った。課題 3) への対応として、定期的な

研究会を開催するなど、“場”を設定するとともに、スマート宇宙システムの検討・国際情勢調査・拠点形成課題等の対話/情報公開を行った。特に、「スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）」を、本事業期間に5回行い（<http://lss.mes.titech.ac.jp/smartospace/symposiums.html>）、機器システム開発、放射線セミナー、宇宙ビジネスの国際動向調査報告、超小型衛星検討会、相互交流・意見交換会などを行った。真剣に宇宙開発、宇宙ビジネス等を目指す人たちを対象として、少数精鋭から始めたが、毎回、参加者が増加して、最後は200名を超える盛況であった。ちなみに、2019年の3月初頭の会議では、コロナ禍のために会合自体が軒並み中止となる中、いち早く完全オンライン会議として予定通り開催した。

以上より、本事業の必要性は十分あったと自己評価している。

「有効性」

[新しい知の創出]

前節で述べたように、本事業では、スマート機能として、可変形状機能を積極的に導入した機器およびシステム開発を実行し、挑戦的な世界初の成果を得るとともに、実際に、エンジニアリングモデルEM、さらには、フライトモデルFMまで結実させた。さらに、下記の（2）成果で示すように、それぞれ、多くの波及効果を得ている。

[実用化・事業化や社会実装]

下記の（2）成果で示すように、実用化実績や計画が10件ある。ここでは、特に、本事業の成果を元に、衛星制御技術の高度化の要となる高精度姿勢決定センサである世界最高レベルのスタートラッカーSTTの開発とその量産化、さらに、ひばり衛星のシステム開発の成果を元に、シンポジウム等の参加者を主体として産学連携によるマルチスペクトル分光撮像観測衛星うみつばめプロジェクトを挙げる。後者は、日本における従来の産業化プロセスとは逆に、アプリケーションオリエンテッドな方針とし、この方針に賛同した民間事業者は、各社私費によって衛星開発、データ処理システム開発等を自発的に推進する。最終的には、炭素取引ビジネスの基盤技術獲得と、地上・衛星をつないだ総合的な計測ネットワーク構築を目指すという新しい試みである。

以上から、本事業の有効性は十分あったと自己評価できる。

「効率性」

本事業で開発された技術の活用により、今後の衛星開発に係る経費を抑制できる。今回、東工大が実施した衛星開発等に要した費用は、本事業での経費を含めて1億円弱である。主として、人件費が抑えられていることにあるが、研究室内で独自開発できることが大きな要因である。同様な技術レベルの衛星開発をJAXAや宇宙関連企業が実施した場合、数倍以上の予算（3～5億円以上）が必要であろう。本事業の共同参画機関である企業においても、人件費や施設に係る費用などを自己負担しながら、大学等との定期的な研究会等での検討を通して研究課題を実施したため、国費支出の観点からは、相応の費用対効果が得られた。また、設備共同利用について、東工大設備を使うことにより、放射線試験では通常の1/5～1/20以下で試験を実施できる。この費用対効果をすべての共同利用者が享受している。さらに、国際動向調査については、通常は同様の調査に2倍程度の費用がかかり、調査結果はあまりオープンにされず、一部あるいは加工した形で公開されるのが普通だが、本事業においては、シンポジウム（研究会）にて参加費無料で一般公開した。

以上から、本事業の効率性が十分あったと自己評価できる。

(2) 成果

「アウトプット」

本活動にて得られた成果を自己評価する。その際に、機器・システム開発に関する評価指標として、NASA や JAXA などで使用されている技術成熟度 TRL を使用する（定義を表(2)-1に示す）。

表(2)-1 技術成熟度 TRL の定義

TRL1：原理の提案 TRL2：概念モデルの提案 TRL3：概念モデル定量化
 TRL4：要素モデルの地上実験 TRL5：宇宙環境模擬要素試験 TRL6：システムモデルの地上実証
 TRL7：宇宙環境模擬システム試験 TRL8：フライトモデル開発と試験 TRL9：打ち上げ・運用・実証

上記に基づいて自己評価した結果を、表(2)-2「実施項目ごとの目標・評価指標と自己評価結果」、表(2)-3「申請時に設定した個別目標・成果指標と実際の成果」に整理する。これらより、全体として、「想定以上の成果が得られた」と自己評価する。

表(2)-2 実施項目ごとの目標・評価指標と自己評価結果

実施項目	目標	評価指標（中間報告資料より）	目標達成度（サクセスレベル）と根拠
①-a) 機械学習利用姿勢・観測センサ等	機械学習・AIにより軌道上での画像認識や姿勢決定を行うことが可能な商用方法論の提案 （注意：商用センサの開発は本事業とは別の予算で実施し、本事業ではその使用を前提として商用に使用可能な具体的かつ実用的な方法を研究開発する。）	ミニマムサクセス：TRL1～2 衛星画像に関し、現在提供されているサービスや、人工知能技術の応用が実施されている例を調査し、その利活用に関する課題の洗い出し、およびそれに対する解決法の指針を示す。 フルサクセス：TRL3～5 衛星から得られた画像に対し、実際に人工知能技術を応用・実験を行い、衛星画像の産業応用もしくは衛星の運用に寄与し得る効果を示す。 エクストラサクセス：TRL6以上 衛星画像に人工知能を応用したデバイス等の宇宙実証機会の獲得、もしくは地上画像の具体的な産業応用例を発掘しその実施について検討を開始している。	サクセスレベル：エクストラサクセス TRL6 達成度 100% 根拠：超小型人工衛星や CubeSat の背景調査、および機械学習技術などの人工衛星への有用性検討、実際にそれら小規模な衛星・衛星開発に適用可能な機械学習技術や衛星画像の解析に利用可能なデバイスやアプリケーションの検討を行った。さらに、2019年に DLAS を用いて世界初の軌道上リアルタイム画像実験、および同時に搭載した STT による貴重な軌道上データから得られた知見をまとめた。前者では空間分解能が低い画像であっても色情報をベースに植生識別ができたことが重要な点であり、後継実験のためにひばり衛星用可視光メインカメラを開発した。 【アウトカム】 上記の経験を応用し、ひばり衛星で AI 識別 3 軸姿勢決定後継実験、うみつばめ衛星では AI による自律的地球撮像実験を計画している。さらに、超小型衛星用として世界最高水準の STT 製品の設計開発に着手し、ひばり衛星に搭載した。今後、うみつばめに搭載する他、市販を開始する。
①-b) 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等	熱可塑性樹脂母材の炭素繊維複合材料 (CFRTP) や熱硬化性樹脂母材の	ミニマムサクセス：TRL2～3 CFRTP の材料試作と基礎データ取得、新規伸展構	サクセスレベル：フルサクセス TRL5 達成度 100% 根拠：波型閉断面収納伸展ブーム・

	炭素繊維複合材料 (CFRTP) 等を用いた軽量で高剛性な伸展収納ブームやアレイの商用を目指した試作	造物の検討を行い、CFRTP や CFRTP 材料を用いたブームやパネルの試作と特性取得、応用範囲の明確化 フルサクセス：TRL4～5 伸展構造物の試作と伸展デモンストレーション エクストラサクセス：TRL6 以上 実際のプロジェクトへの採用を目指したシステム検討	アレイや、自己展開パネルの試作と展開デモンストレーションを実施した。 [アウトカム]革新的衛星技術実証 3号機に搭載されることが決まり、宇宙実証の機会を得ることができた。また、薄膜太陽電池アレイへの応用を目指した、JAXA 宇宙研のフロントローディング研究に採用された。さらに、JAXA 宇宙研より、次期小惑星探査機のサンプルリターン用展開型ターゲットマーカーへの提案依頼を受けることができた。
①-c) 高速通信用展開アンテナ等	小型衛星に搭載できて、Ka 帯まで使用できる高速通信可能な扇子型展開アンテナの試作開発と展開構造の展開運動に大きな影響を与える摺動部の展開性評価	ミニマムサクセス：TRL3～4 提案する扇子型展開アンテナの製造方法の確立と定量的な性能評価および展開太陽電池など他機能への応用検討。摺動部の展開性評価については、熱真空試験装置の開発と実験方法の提案。 フルサクセス：TRL5 扇子型展開アンテナの実証モデルの開発と性能デモンストレーション。摺動部の展開性評価については、評価方法の確立。 エクストラサクセス：TRL6 以上 フライトに移行できる技術の構築、実際に使用するミッションの検討	サクセスレベル：フルサクセス TRL5 達成度 100% 根拠：扇子型展開アンテナを試作し、製造方法を確立するとともに高い鏡面精度が得られ、展開機能が 1G 環境下でも問題ないことを確認した。打上に対する耐性について解析により検証した。摺動部の展開性評価について熱真空試験装置開発・実験方法提案を行い、それに基づいて摩擦・摩耗に関するデータベースをつくることで評価する方法を示した。 [アウトカム] JAXA で開発中の Ka 帯用 5m 扇子型展開反射鏡への技術的な成果のフィードバックを行った。また、扇子型展開太陽電池パドルに応用して特許出願するとともに、JAXA 宇宙探査イノベーションハブ研究提案に採択された。摩擦・摩耗に関しては、JAXA/ISAS の戦略的基礎開発研究として、継続している。
②可変形状機能超小型衛星システム等のスマート宇宙システムの設計・開発・評価等	迅速姿勢制御と高指向安定制御の両立を目指す「ひばり」衛星の軌道上実証を目指した実開発を目指す。 (注意：本事業の費用だけでは、ひばり衛星の開発費用は賄えないので、別費用も適時獲得しながらベストエフォートで開発を進める。)	ミニマムサクセス：TRL3～5 ひばり衛星の BBM 開発を終了し、基本設計審査(相当)を通過して、エンジニアリングモデル(EM)開発に実施している。 フルサクセス：TRL6～7 ひばり衛星の EM 開発が終了し、詳細設計審査(相当)を通過していること。並行して、ロケット打ち上げに関わる各種書類の提出、審査を通過している。 エクストラサクセス：TRL7 以上 フライトモデル開発に移	サクセスレベル：エクストラサクセス TRL7 達成度 100% 根拠：スマート宇宙システムとしての可変形状機能を有する超小型衛星システム設計・開発・評価として、「ひばり」衛星のミッションを定義し、BBM、EM 開発、各種試験を経て、FM 設計および開発を実施した。初年度ではミッション定義およびシステム検討を行い、BBM 開発に必要なコンポーネントの購入、動作確認を行った。その後、BBM 結合試験、ミッション部であるパドルの展開試験等を実施し、BBM が問題なく機能することを確認した。また、アンテナパターン試験を行い、回線

		行して、各種試験を実施している。	設計に反映した。試験と並行して基本設計を進め、基本設計審査会を実施した。また、BBM 試験結果を反映し、EM 開発のための機器を購入して各機器が問題なく動作することを確認した。今年度は基本設計を元に EM 開発を行い、EM システム振動試験および熱真空試験を実施した。振動試験、熱真空試験ではいくつか問題が発生したため、その解決法を FM の設計に反映し、詳細設計審査会を行った。この後、詳細設計を元に FM 開発を進めた。 [アウトカム]本事業終了後、別予算により、引き続き FM 開発を行い、各種環境試験を実施した後、ひばり衛星を JAXA に引き渡した。11 月 7 日以降に打上予定である。
③ 試験運用設備の利用サービスの提供等 a)放射線実験施設等 b)海外・国内地上管制運用局等 c)スパコン等を用いた軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等	新規の参入障壁を取り払うために、衛星開発や運用を行う上で必須な放射線施設や地上局等を整備したり、軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービスなどの利用サービスを拡充する活動を行う。	ミニマムサクセス： 共同利用可能な設備等の洗い出しや需要調査の実施を行う。また、大学設備の内共同利用の可能なものについては利用者への周知を行う フルサクセス： 実際の共同利用を 1 件以上実施する。 エクストラサクセス： 民間からの施設利用を促進し、民間資本での設備維持・拡充を行う。	サクセスレベル：エクストラサクセス 達成度 100% 根拠： 放射線試験施設については、我が国において共同利用可能な設備や東工大コバルト照射施設を研究実施者や協力者に周知し、後者に関しては実際の共同利用を実施するとともに、民間資本の併用による設備維持拡充の準備を進めた。 海外・国内地上局については、大学間の共同研究を進め、ひばり衛星の運用体制を構築したほか、うみつばめ衛星ではミッション運用を民間企業の支援で行うことで、超小型地球観測ネットワークの基盤を本事業から創出した。 データ・処理技術については、東京大学情報基盤センターと観測データの学術利用の議論を進めた。 [アウトカム] 現在、国内地上局については、ひばり衛星の S 帯運用に遠隔運用できる体制を構築している。また、国外地上局については、ASPIRE League Partnership にて南洋工科大と共同研究を開始した。また、観測データについては、DLAS 取得データの宇宙情報監視等への応用研究として、JAXA と開始した。
④ 新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等 a)ユーザーとの将来利用要求・	真剣に宇宙プロジェクトを興そうとするユーザーの開拓・参入・育成等を目指して、本拠点機関および参画機	ミニマムサクセス： 産学連携による事業形態について、この枠組で支援する際の具体的な方法を議論する。 国際情勢調査が実施さ	サクセスレベル：エクストラサクセス 達成度 100% 根拠： 国際情勢調査・将来動向予測を 3 年間、実施し、スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）

<p>設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等</p> <p>b)新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナーの実施による産学連携モデルの創出検討や課題等の外部発信に向けた準備検討等</p> <p>c)国内外学術会議における研究成果の発表等</p>	<p>関以外の機関に所属する研究者や企業関係者等に対しても情報提供をするために、新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成に関連した活動を実施する。</p>	<p>れ、将来動向予測を本拠点機関および参画機関以外の機関に所属する研究者や企業関係者等に提示される。</p> <p>具体的には、スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）を半年に1回程度行う。1回の平均参加者数が50名以上の集客。</p> <p>フルサクセス： 宇宙産業への参入を目指す企業との産学連携プロジェクトを1件以上推進すること。</p> <p>シンポジウム（研究会）の1回の平均参加者数が80名以上の集客。</p> <p>エクストラサクセス： 開発仕様書、回路図・設計図等はフライト実証後に産業利用しやすいよう、特許化、著作物として大学で管理し、企業からの依頼があれば速やかに産業利用できる状況を作る。</p> <p>本枠組みによる産学連携から実際のフライトプロジェクトを実現し、産業化すること。</p>	<p>にて提示した（5回分の平均参加者数が110名の集客あり）。今後も調査会社と連携しながら産学の交流の場を日本大学お茶の水キャンパスに設けることを検討中である。</p> <p>さらに、シンポジウム等の参加者を主体として産学連携によるマルチスペクトル分光撮像観測衛星うみつばめプロジェクトを立ち上げた。日本における従来の産業化プロセスとは逆に、アプリケーションオリエンテッドな方針とした。この方針に賛同した民間事業者は、各社私費によって衛星開発、データ処理システム開発等を自発的に推進する。最終的には、炭素取引ビジネスの基盤技術獲得と、地上・衛星をつないだ総合的な計測ネットワーク構築を目指す。</p> <p>国内外学術会議における研究成果の発表等について、特許出願2件、査読付き投稿論文3件、研究発表95件、実用化事業10件、取材・プレスリリース7件、展示会1件がある。</p> <p>【アウトカム】うみつばめ衛星プロジェクトには、本事業で開発した衛星バスやSTT、通信装置を応用しており、さらに企業からの惜しみない技術協力により、産業競争力の高い実用的地球観測衛星システムを開発している。</p>
<p>⑤ 若手研究者等の育成等</p>	<p>宇宙工学に貢献するという真剣な実践により、真に有望な若手研究者や技術者が育つという信念のもとに、研究、技術開発を実践してもらい、社会的・産業的な視点を持った人材育成を目指す。</p>	<p>ミニマムサクセス： スマート宇宙システムである超小型衛星「ひばり」、および姿勢センサも含めた各種サブシステムに関する詳細な技術的検討を行うために、東京工業大学・大岡山キャンパスにて定期会議を開催。並行して、学生のインターン活動も実施する。</p> <p>フルサクセス： ①や②等の実施項目に参加している学生が、各項目のフルサクセス達成に貢献する。</p> <p>エクストラサクセス： 将来的に本事業に参加した学生が社会に大きく貢献する。（長期的にはこのことが本文科省事業の</p>	<p>サクセスレベル：フルサクセス以上 達成度 100%</p> <p>根拠：毎週1回は定期会議を開催しながら、スマート宇宙システムである超小型衛星ひばり、および姿勢センサも含めた各種サブシステムに関するBBMおよびEM開発を行い、JAXAの安全信頼性審査を含む各種審査を通過してFM開発に移行した。この過程において、学生らが主導的に参加し、エクストラサクセス達成に大いに貢献した。</p> <p>また、本事業に参加して企業や研究機関に就職した学生を複数輩出しており、彼らの今後の活躍が大いに期待できる。</p>

		最も価値ある貢献と考える)	
⑥ スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示	①～⑤の成果に基づき、学内及び関係機関と将来ビジョンを共有した上で、新しい宇宙産業の芽を創出するための持続可能な組織の構築を見据え、本拠点を持続可能とする仕組みを検討して提示する。	<p>ミニマムサクセス： 本拠点を持続可能とする仕組みを検討して提示する。</p> <p>(1) 優秀な人材の発掘と登用 (2) 実際に軌道上で実証するに値する独創的で先進的な宇宙プロジェクトの継続的提案 (3) 拠点形成維持や開発費用の資金調達案の提示 (4) 本拠点を持続可能とする仕組みの具体例の提示</p> <p>フルサクセス： 提示した仕組みについて、本事業後でも実際に実現している事例が一つ以上ある。</p>	<p>サクセスレベル：フルサクセス 達成度 100%</p> <p>根拠： (1)について、東工大内にて、新たに、助教ポスト1名、准教授ポスト1名を確保し、採用している。 (2) 表(2)-3の目標⑤：スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点の形成に示したように、6件以上の宇宙実証プロジェクトを提案して、その内、3件は、実際に軌道上打上げの予定を確保している。 (3) 上記と同様に、JST や基盤(A)などの大型外部資金を複数獲得している。 (4) 「うみつばめ型産学連携システム」を提案して、本事業終了後も、継続して実行している。</p>

表(2)-3 申請時に設定した個別目標・成果指標と実際の成果

設定した個別目標	設定した成果指標	実際の成果と根拠
目標①: スマート宇宙機器等の実用化の方法を示す	<p>以下の3つの機器について、EM相当品(アンテナなどは経費の理由で認定試験は実施しない)を開発し、外部評価委員会を構成し、委員会にて開発物が妥当との評価結果を得ること。</p> <p>a) 機械学習利用姿勢・観測センサ b) 軽量高剛性伸展収納ブーム c) 高速通信用展開アンテナ</p> <p>さらに、その先(FM設計やFM相当品の開発、アンテナは認定試験以降)まで進んだ場合には、想定以上の成果を得られたと判断する。</p>	<p>成果： 達成度 100% a) 機械学習利用姿勢・観測センサ：FM設計まで完了 b) 軽量高剛性伸展収納ブーム：EM相当品まで完了 c) 高速通信用展開アンテナ：EM相当品まで完了</p> <p>根拠： 機械学習利用姿勢・観測センサとしての超小型衛星用STTは仕様を固め、レンズ等に関してFM設計まで完了した。 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイについては、自己展開パネルの試作と展開デモンストレーションを実施した。 高速通信用展開アンテナの詳細については、扇子型展開アンテナを試作し、製造方法を確立するとともに試作アンテナにより鏡面精度(0.23mmRMS達成)、展開機能が1G環境下でも問題ないことを確認した。打上に対する耐性については解析により検証した。</p> <p>[アウトカム] STTについては、その後、別予算にてフライト品を製造し、ひばり衛星に搭載した。うみつばめ衛星にも搭載予定である。現状、世界最高レベル(国内トップ)の性能を実現しており、ベンチャー・大手宇宙企業、大学、JAXA等から問い合わせが多数ある。 ブーム、アンテナについては、前表および下記の目標⑥等を参照。</p>
目標②: スマート宇宙システムのシステム設計・評価の例	可変形状機能超小型衛星システムのEM相当品を開発し、外部評価委員会を構成し、委員会にて開	<p>成果：達成度 100% 想定以上の成果を得た。</p> <p>根拠： 超小型衛星ひばりのBBM、EM開発を行い、その節目にてPDRおよびCDRなど外部の経験者を審査員とした審査会を開催して、結果的に、FM開発に移行できた。この過程で、将来の衛星利用に不</p>

示	<p>発物が妥当との評価結果を得ること。</p> <p>さらに、その先 (FM 設計や FM 相当品の開発) まで進んだ場合には、想定以上の成果を得られたと判断する。</p>	<p>可欠な民間通信衛星 (Globalstar) を利用したリアルタイムテレメトリ送信機についても、FM 設計まで完了し、ひばり衛星に搭載した。</p> <p>[アウトカム] 本衛星の開発は、本事業終了後も、別予算を用いて実施し、2021 年 8 月半ばに、JAXA 内之浦に、フライトモデルを引き渡した。11 月 7 日以降に、イプシロンロケット 5 号機によって、太陽同期軌道に打ち上げられる予定である。</p>
目標③:スマート宇宙システムの試験運用設備の整備/拡充	<ul style="list-style-type: none"> - 本事業終了時点で、放射線施設の稼働状態が現状の 1.5 倍以上になること - 海外地上管制局が衛星電波受信可能状態になること <p>軌道上観測データ・処理技術等の知見を新規の拠点参加登録者が共有できる仕組みを構築する</p>	<p>成果: 達成度 95% 十分な成果を得た。</p> <p>根拠: スマート宇宙システムの試験運用に係る東工大コバルト照射施設の稼働状態は、新型コロナウイルスの影響のため当初の予定よりも遅いペースであるが、増加を続けて、使用者の所属も多様になっていて、3 年間のべ利用件数は宇宙案件のみで 85 件に上り、国内の主要な新規装置は東工大で放射線試験を経て宇宙へと打ち上げられている。</p> <p>海外地上局の整備、運用準備 (コロナ禍で出張ができず自粛、ただし、共同研究 ASPIRE を締結)。国内地上局の整備、運用準備 (東北大・北大と共同)、GlobalStar 通信機を用いた速報通信技術の検討を実施した。ひばり衛星の運用にて使用予定である。</p> <p>軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービスについては、GPGPU 搭載サーバ等をローカルに立ち上げて、解析を行った。また、学術利用のためのデータ公開について東京大学情報基盤センター・スーパーコンピューティング部門と協力関係を確認した。</p>
目標④:スマート宇宙システムの検討・国際情勢調査・拠点形成課題等の対話/情報公開	<ul style="list-style-type: none"> - 「スマート宇宙機器システムシンポジウム (研究会)」を予定通り 5 回開催し、議論の結果を (知的財産権等に差支えない範囲で) 公開すること (例えば、web サイト等)。 - 活動内容 (産学連携の様子) を随時公開すること (例えば、web サイトや SNS 等) - 研究成果を各年度、学会等で発表すること <p>研究成果をオープンキャンパス等、専門家以外でも自由にアクセスできる機会にて発表する</p>	<p>成果: 達成度 100% 想定以上の成果を得た。</p> <p>根拠: スマート宇宙機器システムシンポジウム (研究会) を 5 回実施し、その結果をセキュリティ管理をしながら個別対応で公開した。</p> <p>上記 web サイトで活動内容を随時公開 (2 年半の活動期間中、24 回更新)</p> <p>研究成果を学会等で公開 (表(2)-2, ④参照)</p> <p>研究成果を東工大の web サイトで発表</p> <ul style="list-style-type: none"> - 本拠点「スマート宇宙」の web サイト: http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/ - http://www.hp.phys.titech.ac.jp/umitsubame/ - https://www.facebook.com/TokyoTechSmallSatTeam/ <p>専門家以外の国民への発表:</p> <p>https://www.titech.ac.jp/research/stories/space_and_satellite.html</p> <p>https://www.titech.ac.jp/news/2020/047297.html</p> <p>ひばり衛星関連 (JAXA 広報、東工大ニュース)</p> <p>https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/02/interview02_09.html</p> <p>https://www.titech.ac.jp/news/2021/061997</p> <p>https://www.titech.ac.jp/news/2021/061885</p> <p>うみつばめ衛星関連 (東工大、東大ニュース)</p> <p>https://www.titech.ac.jp/news/2020/047297</p> <p>https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0310_00019.html</p>
目標⑤:スマート宇宙機器・システムの研究開発拠点の形成	<ul style="list-style-type: none"> - 本事業終了時点で、拠点参加者 (大学研究者と企業) が事業開始当初 (5 研究者 3 企業) の 2 倍以上 (10 研究者 6 企業以上) となっていること - 宇宙機器/シス 	<p>成果: 達成度 100% 想定以上の成果を得た。</p> <p>根拠: [アウトカム]</p> <ul style="list-style-type: none"> - 拠点参加者として、特に、下記の衛星関連開発に緊密に参加している研究者および企業だけに限定しても、現在、研究者 20 名、企業は 11 企業。 <p>研究者: 東工大 (7 名)、日大 (2 名)、福井大 (1 名)、東大 (1 名)、名大 (1 名)、横国大 (1 名)、北大 (1 名)、仙台高専 (1 名)、東北大 (2 名)、甲南大 (1 名)、JAXA (2 名)</p> <p>企業: サカセアドテック、テクノソルバ、ジェネシア、アイ</p>

<p>テムの新たな開発計画が2つ以上立ち上がっていること</p>	<p>ネット、ウミトロン、エディックス、エム・ソフト、エイブリック、ニコン、Globalstar、C3S（ハンガリー）</p> <p>[アウトカム] 共同研究・開発計画 24件</p> <ul style="list-style-type: none"> - ニコンと東工大間での高信頼性カメラの宇宙実証に関する共同研究契約 - Globalstarと東工大間でのGlobalstarサービスに関する共同研究契約 - ジェネシア・C3S・東工大：光学設計を専門とするジェネシア社とハンガリーのキューブサット製造メーカーC3Sの3社間で、農業リモートセンシング衛星開発に関するMoUを締結 - ABLIC社と東工大での小型紫外線カメラ開発とひばり衛星への搭載 https://www.ablic.com/jp/semicon/news/2021/09/29/uvcam/ - ミネベアミツミと東工大での宇宙用RW開発等で連携予定 - 50kg級超小型衛星ひばりの開発・打上・運用（代表：東工大・松永） JAXA革新2号機相乗り衛星採択2021年度打上予定 - 50kg級衛星用高性能STT開発（東工大・東北大・ジェネシア） - 50kg級超小型衛星うみつばめの開発・打上・運用（代表：東工大・谷津、他多数） JAXA革新3号機相乗り衛星採択2022年度以降打上予定 - Society 5.0に向けた発電・アンテナ機能を有する軽量膜展開構造物の実証 HELIOS（代表：サカセアドテック、東工大、日大、JAXA、他多数） JAXA革新3号機搭載機器採択2022年度以降打上予定 - JST光格子時計・天測鉛直線偏差測定型ジオイド計測システムの研究開発（代表：東工大、MHI、日本航空電子） - 基盤研究(A) 可変形状機能を用いた姿勢軌道制御技術の体系化研究による宇宙システムの革新（代表：東工大・松永、分担：古谷、宮崎、谷津、中条、森、松下） - 基盤研究(A) 高精度ゴッサマー宇宙構造物システムの実現に向けた解析・設計理論構築と実験検証（代表：JAXA/日大・宮崎） - 若手研究 超小型探査機に向けた可変形状ソーラーセイルの推進剤フリーな軌道・姿勢同時制御（代表：東工大・中条） - JAXA宇宙探査イノベーションハブ研究提案 月面有人と圧ローバ用太陽電池パドル及びアンテナへの適用を想定した扇子型展開機構による軽量かつ再収納可能な展開機構の研究（代表：テクノソルバ・中村） - JAXA宇宙科学研究所戦略的基礎開発研究 探査機用機構部品のための樹脂系固体潤滑剤の開発としゅう動部の寿命予測法の構築（連携研究：日大・宮崎、奥山：摺動部の展開性評価用の摩擦試験器システムの活用） - ASPIRE League Partnershipにて南洋工科大と共同研究（国外地上局関連） - 経産省 R2 補正宇宙開発利用推進研究開発（小型衛星コンステレーション関連要素技術開発）本事業で創出したSTTを高性能・高信頼・高機能化。日本の基幹技術として日経エレクトロニクス誌掲載（2021年11月号） - JST ERATO ラインX線・ガンマ線イメージング（PI 早稲田大 片岡、分担：谷津、松永、協力：中条、宮本）本事業で開発したバス技術と医療技術を組合わせた天文衛星計画、うみつばめ計画で得られた産学連携体制を活用した衛星開発・運用。 https://www.titech.ac.jp/news/2021/062029 - 東京工業大学とハンガリーのブタベスト工科経済大学の間で、国際交流協定を締結するための作業が進行中。（小型衛
----------------------------------	--

		<p>星を用いた宇宙実験の促進)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 東京工業大学、東京大学 情報基盤センターと連携 (うみつばめ (PETREL) 衛星の学術データ利用) - 東京工業大学、JAXA との共同研究 (DLAS 取得データに基づいた宇宙情報監視等への応用研究) - 超小型ソーラーセイルの月-地球ラグランジュ点航行ミッション (6U、東工大・JAXA、予算申請中) - 超小型宇宙背景放射観測ミッション (6U、都市大・関学・JAXA、予算申請中) - JAXA 宇宙科学研究所における超小型天文ミッションの検討支援 (6U~数十 kg)
目標⑥:新しい宇宙産業の芽の創出	「スマート宇宙システムシリーズ」という製品ブランドを立ち上げる	<p>成果: 達成度 100% 想定以上の成果を得た。 根拠: [アウトカム] 代表的な事例: 10 件</p> <ul style="list-style-type: none"> - 超小型衛星ひばりのバス系機器 - 可変形状姿勢制御系機器 - 可視光カメラによる AI 利用 3 軸姿勢決定センサおよび搭載ソフトウェア - 50kg 級衛星用高性能 STT - 超小型衛星ひばり:革新 2 号相乗り衛星に採択 (代表:東工大・松永) - 超小型衛星うみつばめ:革新 3 号乗り衛星に採択 (代表:東工大・谷津) - 軽量膜展開構造物実証「HELIOS」:革新 3 号の搭載機器に採択 (代表:サカセアドテック) - 扇子型展開機構:JAXA 宇宙探査イノベーションハブ研究提案に採択 (代表:テクノソルバ) - 摩擦試験器システム:JAXA 宇宙科学研究所戦略的基礎開発研究と共同研究 (代表:日大・宮崎、奥山) - 自己展開パネル:JAXA 宇宙研の次期小惑星探査機のサンプルリターン用展開型ターゲットマーカーの開発 (代表:サカセアドテック)

中間報告の際のコメント「事後評価における自己点検においては、本プログラム独自の目標を検討し、本プログラムの予算に基づく活動・成果の範囲を他の予算に基づく活動・成果の範囲と明確に区別するとともに、個々の技術開発について、その重要性、新規性を的確に表現すること。」

回答: 本書類に記述しているが、特に、本事業で技術開発した 4 点について要点をまとめる。

①a) 機械学習利用姿勢・観測センサ

本予算に基づく活動・成果の範囲: 可視光カメラを用いた AI 利用検討、DLAS 軌道上解析結果を応用したひばり搭載高分解能カメラの開発および改良版 STT の光学系設計

重要性、新規性: 重要なのは AI 技術そのものではなく、衛星軌道上でも使えるという識別機の低電力化・高速化、地上での解析体制の構築、さらに学習結果の衛星への送信、軌道上コンパイルなどの、システム設計としての知見であり、それをきちんと評価して、衛星システムに組み込める形にした。特に、今まで国内になかった本格的な地球観測や天文観測などの実用衛星のために使用できる小型・高性能な STT に繋がる設計ができた。

①b) 軽量高剛性伸展収納ブーム

本予算に基づく活動・成果の範囲: 各種強化基材や各種樹脂母材による複数の薄膜 CFRP の成形方法の評価、熱可塑性樹脂母材 CFRTF の課題抽出、ブーム成形技術と数値解析用材料定数の取得、面積 2m² の CFRTF 製波形パネルを伸展長 2.2m の CFRTS 製双安定ブーム試作と展開実験、高剛性閉断面伸展ブー

ムの製作・実証、伸展・収納機構の製作、2次元自己展開パネル構造の製作・実証

重要性、新規性：一般的な CFRTS 製ブームは長さ 5m を超える長尺物の成形が難しいのが現状であるが、本事業にて技術開発に取り組んだ新規性の高い薄膜 CFRTP 製ブームは、成形方法の課題さえ解決できれば、将来的に長さ 5m を超える連続加工を実現でき、これまでにない画期的な宇宙展開構造物の実現が期待できる。また、展開構造要素として波形パネル要素の収納時弾性エネルギーを積極的に用いることを新規に提案した。これを用いることで、形状の復元性が高く展開力の大きい伸展ブームや展開パネル構造を実現でき、従来の展開構造に比して更なる軽量化と高剛性化の両立を実証した。

①c) 高速通信用展開アンテナ

本予算に基づく活動・成果の範囲：1m 級の高精度扇子型展開アンテナのコンセプト実証、メッシュ展開アンテナの小型化、バネによる展開機構や小型展開アンテナに適した保持解放機構の開発、扇子型展開太陽電パドルのコンセプトの提案

重要性、新規性：高精度の衛星搭載用のアンテナ反射鏡は通信のみならず深宇宙観測や合成開口レーダ (SAR) にも適用できる。通信は高速化、SAR は高周波数化による小型化と高精度化の要求があり、これらを実現するために、今回、新規に小型衛星向けの展開アンテナ (鏡面精度 0.23mmRMS) を開発した。

②：スマート宇宙システム：ひばり衛星

本予算に基づく活動・成果の範囲：可変形状姿勢制御実証衛星ひばりの、特に、バス系の BBM、EM、FM (部分的) の開発 (仕様定義、設計、製造、試験) と MDR、PDR、CDR などの審査。

重要性、新規性：可変形状姿勢制御は、迅速かつ高効率な姿勢変更制御と高精度な指向安定制御の両立、さらには等価断面積の変化を利用した軌道・姿勢制御を実現することを目指す極めて挑戦的な技術である。従来、衛星や宇宙機の形状を変化させることは外乱発生源と見なされてきたが、提案手法は本体変動を積極的に利用するので、従来の制御の考え方とは逆の発想である。本事業の成果を利用して、軌道上実証するための衛星システムを実現したことは特筆できる。リモートセンシング、天文学、宇宙工学などの分野で市場競争力を獲得すること、本技術を応用した高度ミッションの幅を拡大し、新規市場を開拓することが期待できる。

「アウトカム」 (令和 3 年 10 月末時点)

上記の表 (2)-2 および表 (2)-3 の中の、特に、[アウトカム] と表記した個所を参照されたい。本事業で得られた成果により、本事業後に、継続発展的に行われる共同研究、事業化等が 20 件以上ある。全体として、「想定以上の成果が得られた」と自己評価する。

(3) 今後の展望

本事業で開発したスマート機能、即ち、可変形状機能をシステムとして軌道上実証するためのひばり衛星は、本事業後も FM 開発を実施して、2021 年 8 月半ば、JAXA 内之浦にて引き渡し、JAXA 革新 2 号プロジェクトのテーマの一つとして、JAXA イプシロンロケット 5 号機にて打上予定である (実際、11 月 9 日に所定の軌道に投入された)。東北大・北大の遠隔運用ネットワークを利用することで、軌道上での初期運用に成功させ、計画している様々なミッションを遂行して、世界初の成果を出したい。このひばり衛星の開発・運用知見は、JAXA 革新 3 号プロジェクトのテーマの一つとして採用されたうみつばめ衛星の開発に活かされて、今後の高性能超小型衛星や宇宙探査機、例えば、フォーメーションフライト衛星や可変形状ソーラーセイル、JAXA 宇宙研で検討している

トランスフォーマー宇宙機等の開発にも反映する。同時に、これらの真剣な活動を通して、将来の宇宙工学を先導する優秀な人材を育成する。

スマート機器としては、a)機械学習利用姿勢・観測センサ等の成果から検討された高精度スタートラッカーSTTは、本事業後、別予算にてフライト品を製造し、現状、世界最高レベル（国内トップ）の性能を実現しており、ひばり衛星に搭載して、軌道上実証予定である。既に量産体制を確立しつつあり、うみつばめ衛星にも搭載予定である。ベンチャー・大手宇宙企業、大学、JAXA等から問い合わせが多数あり、将来的に、キューブサット用の小型化、科学衛星用の高性能化、その他較正システム、エミュレータ等を製造し、スマートな姿勢制御を目指す。また、b)軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等の成果は、JAXA革新3号の主衛星PARIS-3の搭載コンポーネントHELIOSの開発に活かされており、c)高速通信用展開アンテナ等の研究開発としての成果は、JAXAの5m級展開アンテナ開発へのフィードバックに活かされた。また、派生技術として扇子型太陽電池パドルの特許申請やJAXA宇宙探査イノベーションハブの研究提案募集に応募して採択され研究を継続するなど、活動の成果として多くの波及効果を得た。

新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等を目的に、ユーザーとの将来利用要求・設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等を行うシンポジウムを年1回程度、開催したいと考えている。特に、宇宙ビジネスの国際動向はコロナ禍の影響下でも極めて活発であるので、今後も最新の国際動向調査を継続し、調査結果・考察内容をコミュニティに提供していくことで、コミュニティを維持・拡大する。一方で、調査に必要な経費の継続的な確保が課題となる。科研等では、このような外部委託による調査費は不要な支出と見なされる傾向にあることを注意する。

8. 評価点

S

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。

9. 評価理由

本課題は、スマート宇宙機器等の実用化研究、可変形状機能超小型衛星システムの設計・開発・評価、試験運用設備の利用サービスの提供、新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成、若手研究者等の育成、研究開発拠点を持続可能とする仕組みの提示と、きわめて多岐にわたりがつ個々に高度なテーマに関して精力的/計画的に取り組み、機器や衛星開発では小型衛星を対象とする宇宙機器の開発拠点として、センサ、アクチュエータ、構造物等で実績を多数創出するなど素晴らしい成果であると言える。これらの研究開発結果を主に学会を通して発信しており、特に、システムとしても「ひばり」の打ち上げ、運用開始など50kg級の衛星を短期間で開発・運用できるのは大学としてはレベルが高く、「うみつばめ」の開発も開始している点や、優れた具体的な技術開発成果が出ており産学連携や産業振興に貢献している点、衛星に必要な部品のモジュール化と大学設備を開発拠点としてオープン化を行っている点などは高く評価できる。

以上より、本課題は、優れた成果を挙げ、宇宙航空の促進に著しく貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- 継続的な実施に向け、宇宙利用拡大の観点での効果を見据えた事業全体のロードマップを描くことが望まれる。
- 引き続き宇宙技術やシステムの基盤を強化に努めるとともに、利用の開拓についても貢献できるような人材育成拠点となることを期待する。
- 本事業での成果そのものだけでなく、それを生み出すメカニズムの見える化といった工夫により、研究室の活動としてだけでなく大学主導・民間企業主導の持続的開発拠点が形成されることを期待する。
- この事業は宇宙機・システムの研究開発拠点として多くのテーマを持っており、ハードウェア製作・購入などの資金も多く必要になると思われることから、関連企業の協力を得ながら将来の維持・発展のための枠組みが安定的に整備され研究開発拠点として継続することを期待する。