

「超小型衛星で展開する先進的理工学研究拠点の形成」の成果について

実施体制	主管実施機関	金沢大学	実施期間	平成27年度～平成29年度 (3年間)	実施規模	予算総額(契約額) 86.7百万円		
	代表者名	教授 米徳大輔				1年目	2年目	3年目
	共同実施機関	理化学研究所、若狭湾エネルギー研究センター				29.9百万円	26.9百万円	30.0百万円

背景・全体目標

2017～18年頃から本格稼働する地上の重力波観測と連携し、重力波の検出と同期したX線突発天体の発見・通報を行うことで、「重力波天文学」という新たな学術分野の創成に貢献することを理学的課題として設定する。さらにX線突発天体の発生時刻・発生方向をリアルタイムで通報するために、商用通信衛星を利用したリアルタイムパケット通信技術の実用化を工学的課題として設定する。

本研究経費の枠組みでは、以下の2点の研究開発を行う。

(1) 広視野X線観測装置のフライトモデルの開発

(2) 商用衛星を経由した小型リアルタイムパケット通信装置の開発

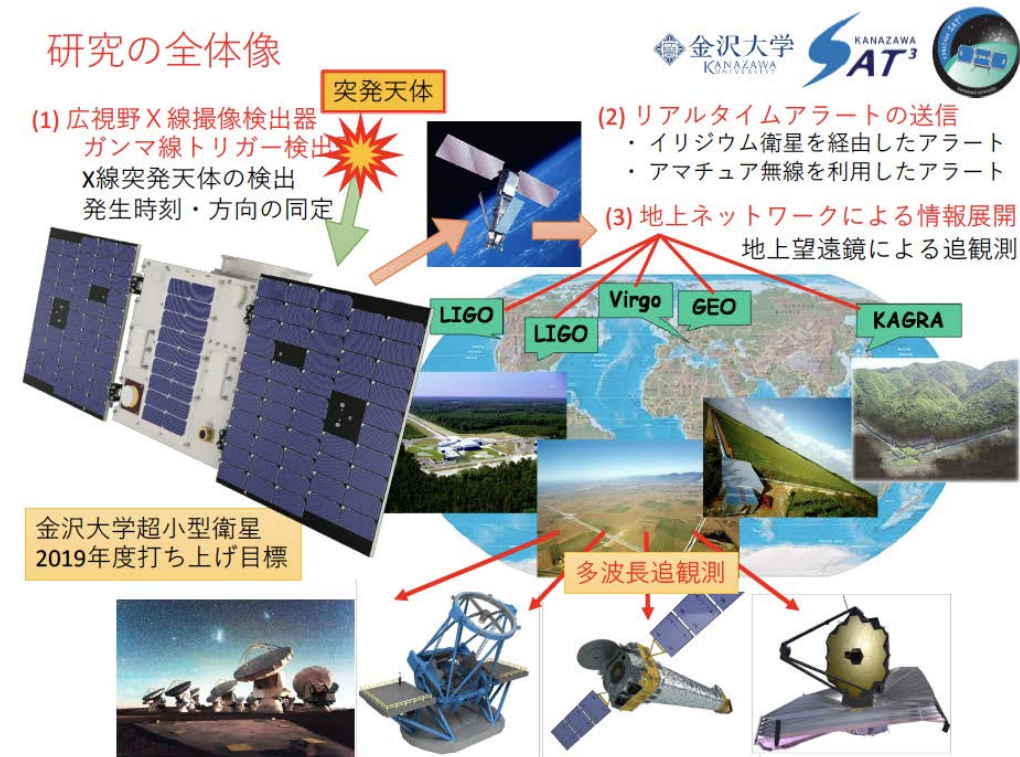
本事業により、理学的重要課題に対してタイムリーに科学観測装置を開発できる能力を持ち、世界をリードする宇宙理工学研究拠点および教育拠点を形成する。

全体概要と期待される効果

- 重力波観測に合わせたタイムリーな理学観測の実施
超小型衛星による第一級の科学成果を目指す。超小型衛星プラットフォームを用いた理学観測の位置づけを高め、宇宙科学へ大きく貢献できる可能性。
- 宇宙理工学研究拠点の形成
平成30年度より金沢大学大学院に「宇宙理工学コース」を開設することとなり、人工衛星や搭載機器の開発を題材とした、宇宙理工学研究を重点的に推進できる研究・教育体制を構築してきた。大学院における研究・教育の質的向上を確保するとともに、他の学科からも学生を受け入れることが可能な門戸の広い体制となっている。

「国民との科学・技術対話」の推進に関する取組について

- 展示による国民との対話(本事業での成果物や超小型衛星のモデルの展示と対面での説明)
MEX金沢(機械工業見本市)、サイエンスヒルズこまつ(常設展)、金沢大学祭(ふれてサイエンス&てくてくテクノロジー)にて成果物の展示
- 一般講演会や高校への出張講義等による本事業の説明と質疑応答を通じた対話
 - ・グローバルキャンパスにて高校生・保護者に対する超小型衛星プロジェクトの紹介(2016年7月30日)
 - ・日本海イノベーション会議による本事業の紹介(2016年10月1日) 米徳大輔: アインシュタインの予言から100年、重力波発見! -金沢大学衛星の挑戦-
 - ・国立天文台ワークショップにて科学館学芸員へ向けた本事業の紹介(2016年10月2日～3日)
 - ・大阪大学湯川記念講演会にて金沢大学超小型衛星プロジェクトの紹介(2016年10月9日:大阪大学) など、多数



① 広視野X線撮像検出器の開発 (1)

実施内容及び主な成果

■ シリコン半導体検出器および集積回路の開発

本事業で開発した1次元ストリップ型シリコン半導体検出器とアナログ集積回路を組み合わせてセンサー基板(フライトモデル)を開発した。集積回路は池田博一教授(ISAS/JAXA)の協力を得ることで、**高利得・低雑音な集積回路としては世界トップレベルの性能**を示すものとなっている。

(1) ベースラインオフセット

集積回路の内部回路の個性を打ち消すためベースライン電圧の調整を行った。図(B)のように、調整前の状態では0~300 ADCにわたって広く分布しているのに対して、調整後は0.1 keV程度にまで揃えられることを確認した。

(2) エネルギーとADCの線形性

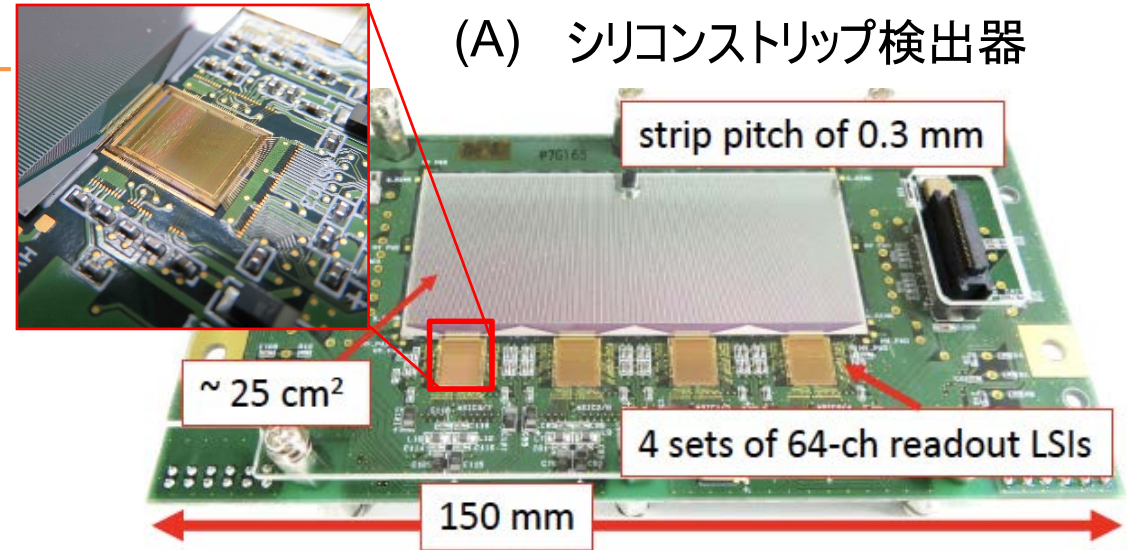
図(C)のように入力エネルギーとADC値との間の線形性は、1 keV付近での標準偏差は5%程度(0.05 keV相当)、20 keV付近での標準偏差は2%程度(0.4 keV相当)である。特にトリガー閾値を設ける低エネルギー側では、エネルギー分解能に対して十分な精度で調整することができる。

(3) エネルギー分解能

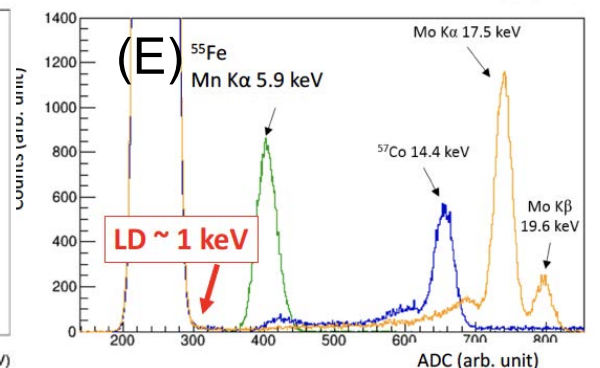
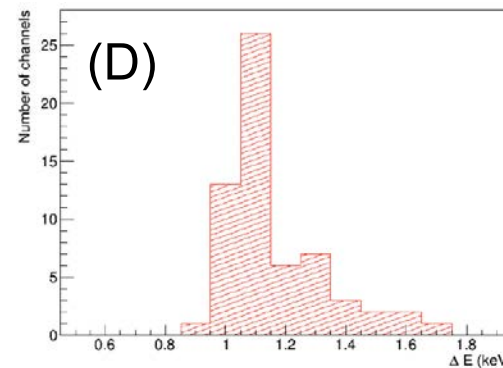
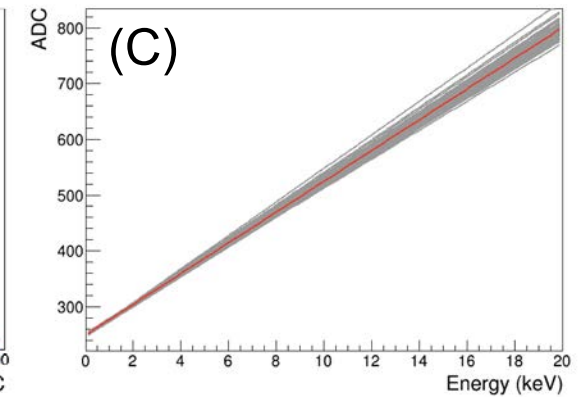
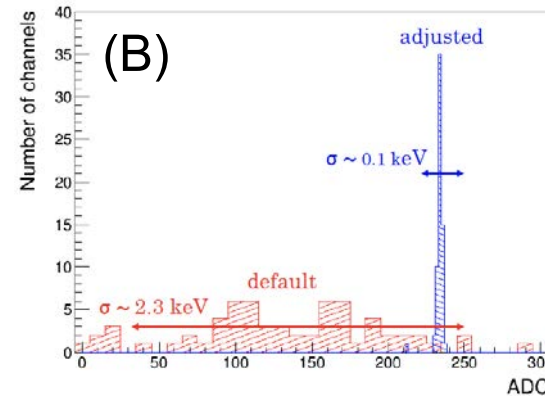
以上のような調整を行なった後に、エネルギー分解能を評価した。 -20°C の環境においてモリブデンの特性X線(17.5 keV)を用いて測定したところ、図(D)に示すように平均的なエネルギー分解能は1.1 keV程度であり、標準偏差0.2 keVで分布している。

(4) 64チャンネルのスペクトル特性

図(E)に様々な放射線源を測定した際のスペクトルを示す。検出器のエネルギー較正後の低エネルギー閾値は約1 keVであり、当初の目標としていた性能を達成することができた。



(A) シリコンストリップ検出器



①広視野X線撮像検出器の開発（2）

実施内容及び主な成果

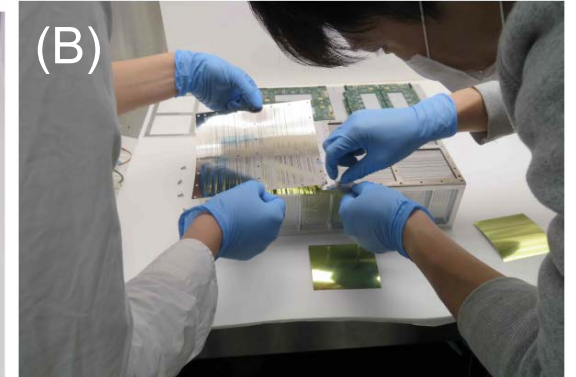
■広視野X線撮像検出器のフライトモデル

本事業で開発した広視野X線撮像検出器のフライトモデルについてまとめる。図(A)は本事業で開発した回路基板（右側がマスター、左側がスレーブ）となっており、底板の背後で電氣的に繋がっている。

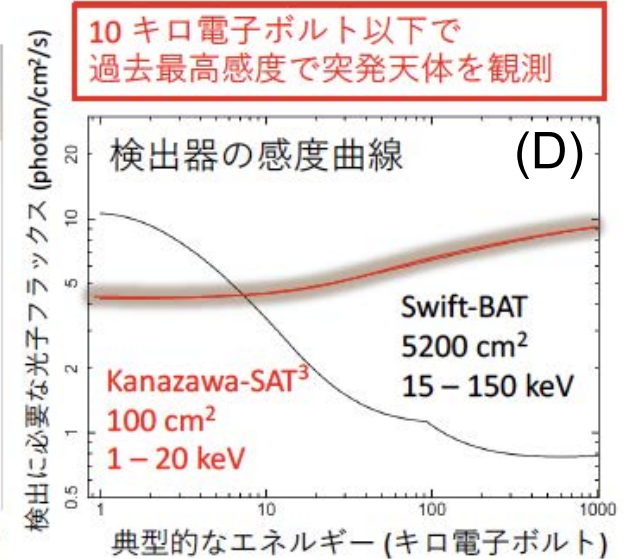
符号化マスクは厚さ $50\mu\text{m}$ ・スリット幅 $300\mu\text{m}$ のタンゲステン製のマスクであり、10,000通りの数値シミュレーションの中から、自己相関のS/Nが最も高く、偽のイメージが出にくいものを選出した。ここに厚さ $5\mu\text{m}$ の薄膜ポリイミドに、厚さ1,000オングストロームのアルミをスパッタリングした可視光反射フィルムを作成し貼り付けた（図B参照）。これは、低エネルギーのX線に対する透過率が高く、太陽光が地球に反射した光（アルベド光）等をセンサーが直接受けないように可視光は反射させるものである。

図(C)に組み上げた状態の広視野X線撮像検出器のフライトモデルを示す。

図(D)に期待される検出感度を示す。ガンマ線バーストのような突発的なX線天体のうち、典型的なエネルギーが10 keVよりも低い天体については、NASAのSwift衛星よりも高感度な観測が実現できる予定である。



広視野X線撮像検出器のフライトモデル



本事業で開発した広視野X線撮像検出器は、10キロ電子ボルトよりも低エネルギーで輝く突発天体については、NASAのSwift衛星と同等以上の性能を持つことを実証した。本研究の観測対象である中性子星連星を起源とする重力波源からは、短時間ガンマ線バーストに伴うX線超過成分が観測されるはずで、**現行の大型衛星と比肩する成果を挙げられる性能と言える。**

②小型リアルタイムパケット通信装置の開発

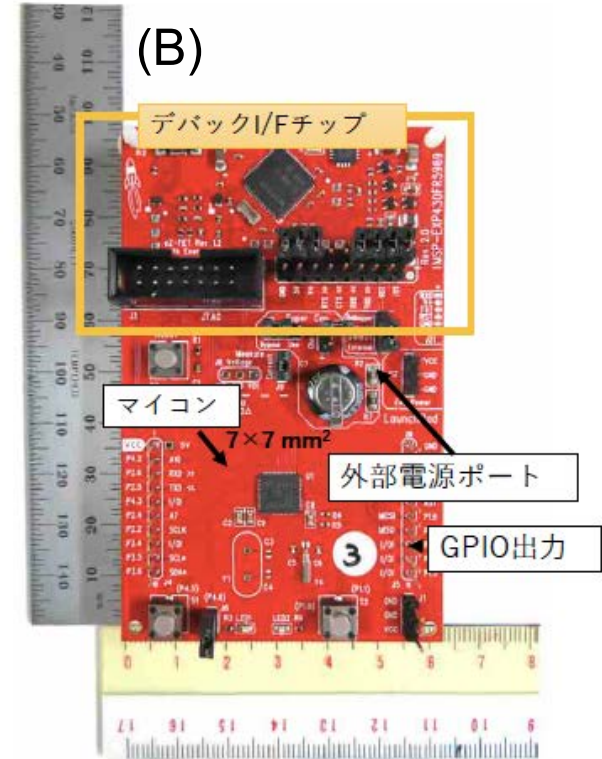
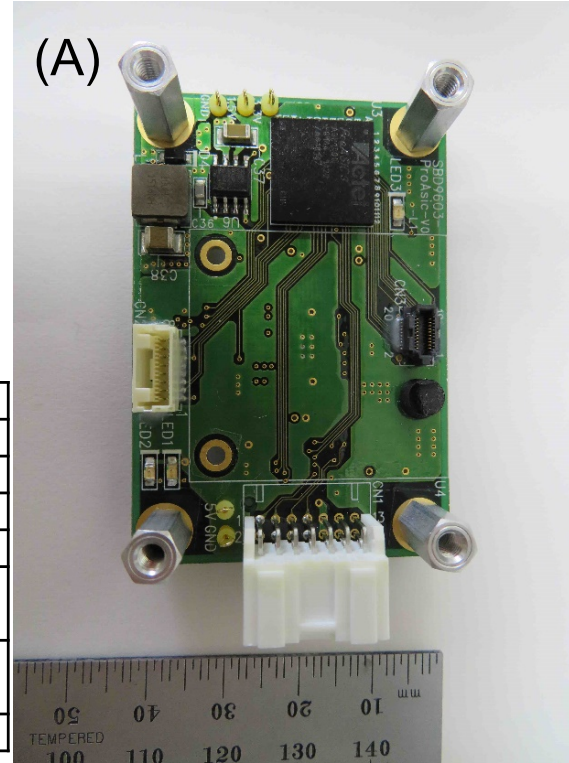
実施内容及び主な成果

■イリジウムショート・バースト・データ (SBD)

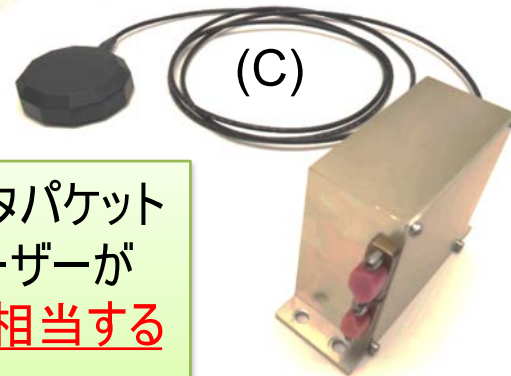
本業務で利用するパケット通信装置は、KDDI社が販売しているイリジウム衛星通信網を利用したSBD9603N型と呼ばれるもので、主な仕様は表に示す通りである。SBDをコントロールするための基板(図A)、制御用マイコン(図B)を用いて、図(C)に示すようなフライトモデルを完成させた。

図(D)に示すように放射線耐性試験を行い30 krad以上の耐性を示すことを確認し、図(E)のような単体振動試験を実施した。

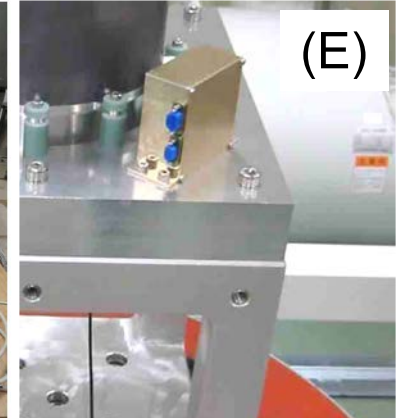
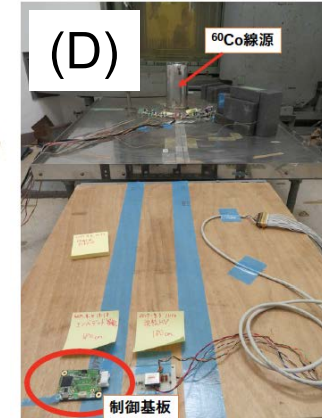
型番	SBD9603N
サイズ	31.5 × 29.6 × 8.10mm
重量	11.4g
インターフェース	RS-232C
電源電圧	5V(±0.2V)
動作温度/保存温度	-30°C~70°C / -40°C~85°C
消費電流	待機時45mA(最大195mA) 送信時190mA(最大1.5A、継続時間10ms程度)
送信/受信バイト	1パケットあたり340byte/270byte



2017年に国際宇宙ステーションより放出されたEGG衛星によりイリジウムSBDの軌道上実証が行われた。本事業では本格的な理学応用を目指した開発を行った。



広視野X線撮像検出器から出力されたデータパケットを、小型リアルタイム通信装置で送信し、ユーザーがデータを取得するという、**End-to-End試験に相当する機能検証を実施した。**



③広視野X線撮像検出器および小型リアルタイム通信装置の試験

実施内容及び主な成果

■衛星熱構造モデルを用いた熱真空試験・振動試験

図(A)に示すような金沢大学超小型衛星の熱構造モデルを開発した。寸法 50 cm 立方、重量 50 kg 級の超小型衛星であり、2014年度から受けている文部科学省の特別経費「手作り人工衛星による先端宇宙理工学教育プログラムの構築」(代表:八木谷聡、金沢大学)によって開発を行っている。

この衛星プラットフォームに広視野X線撮像検出器および小型リアルタイムパケット通信装置を搭載し、環境試験を実施した。図(B)は金沢大学衛星開発室(クリーンルーム)に設置した熱真空チャンバーを用いて熱真空試験を実施した様子。図(C)は協力企業にて振動試験を実施した様子。

■放射線耐性試験

本事業では若狭湾エネルギー研究センターと共同研究契約を締結し、回路部品に対する放射線耐性試験を実施してきた(図(D), (E))。

・広視野X線撮像検出器

「アナログ集積回路」「電圧レベルシフタ」「A/D変換素子」「計装アンプ」
「オペアンプ」「リセットIC」「電子ヒューズ」

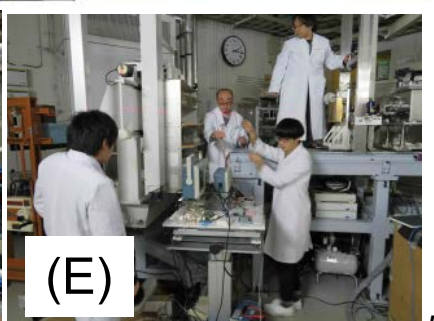
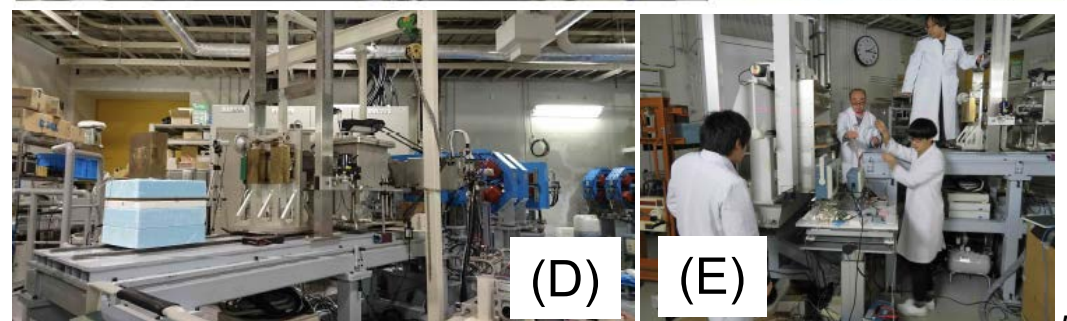
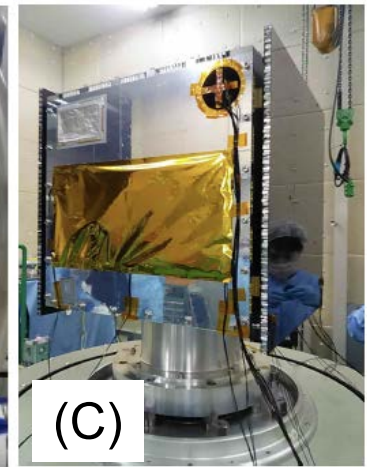
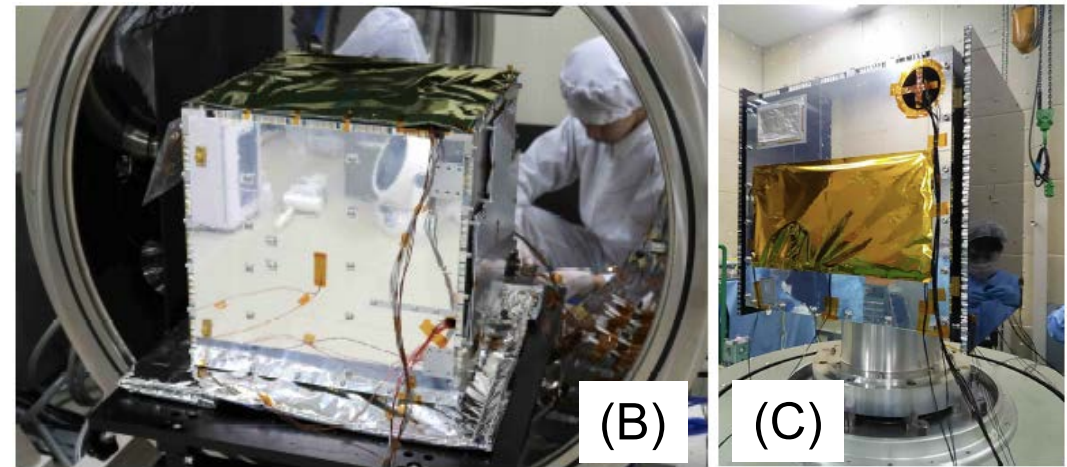
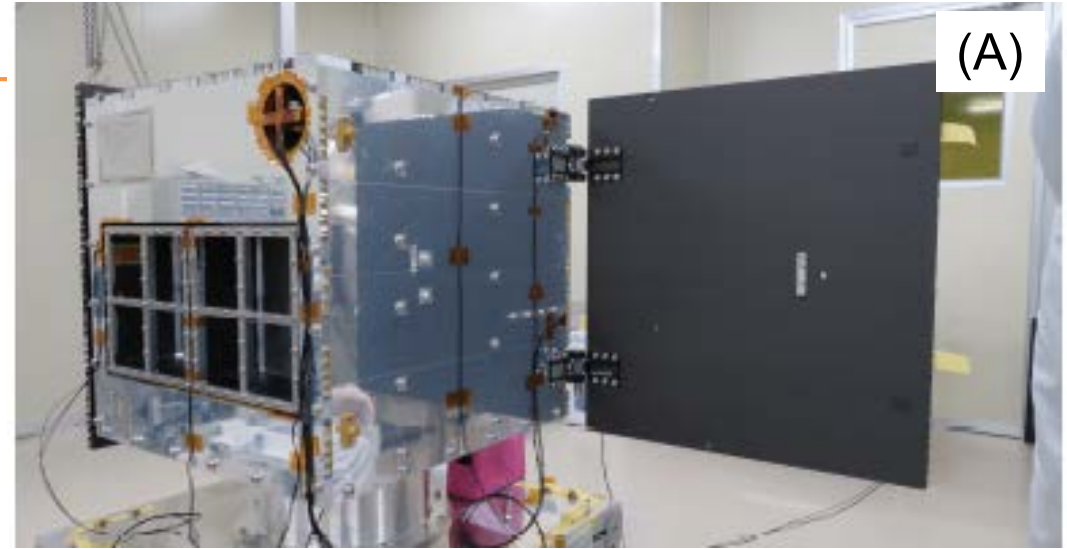
・小型リアルタイムパケット通信装置

「リチウムSBDモジュール」「制御回路基板」「マイコン基板」

などに対して粒子線ビームを照射することで、Total Ionizing Dose, シングルイベント発生率を検証した。回路部品は複数のメーカーの物を準備し、

全ての種類の素子に対して 30 krad以上の放射線耐性を示すものを選定することに成功した。

以上の環境試験・放射線耐性試験により、
広視野X線撮像検出器および小型リアルタイム通信装置の両方において、**30 krad以上の放射線耐性を有し、宇宙利用に耐えうるフライトモデルを完成することができた。**



④宇宙理工学研究拠点の形成

実施内容及び主な成果

■宇宙理工学コースの特色

以下のディプロマポリシー／アドミッションポリシーに従った宇宙理工学コースを設置

宇宙理工学コースでは、学生主体で手作り人工衛星を開発する中で、プロジェクト・マネジメント、幅広い視野での課題解決能力、異分野との協調性などの、実社会で求められるリーダーシップの醸成を目指す。

講義・実験・実習を通じて、宇宙科学・宇宙工学に関する最先端の高度な知識と技術を獲得したうえで、理工一体となって科学的課題を解決するための衛星設計・開発の実践技術を学ぶ。

今後、衛星利用が日常となる社会において、基礎科学・応用工学(技術)の両者の視野・スキルを持ち、衛星設計・開発技術を身に着けた先端的職業人としての、次世代の宇宙科学・工学を担う研究者・技術者を育成する。

- (1) 宇宙科学に関する高度な知識と科学ミッションの立案能力
- (2) 宇宙工学、特に衛星設計開発に関する高度な知識と実践的能力
- (3) 衛星システム全体を包括的に理解し、開発を主導できるプロジェクトマネジメント能力

■担当教員体制

八木谷聡	教授	電磁波工学 (プロジェクトリーダー)
笠原禎也	教授	宇宙電波信号処理 (工学系リーダー)
米徳大輔	教授	宇宙物理学 (理学系リーダー)
井町智彦	准教授	宇宙電波工学
尾崎光紀	准教授	電磁波計測工学
後藤由貴	准教授	宇宙通信工学
藤本龍一	准教授	X線天文学
有元 誠	助教	ガンマ線天文学
澤野達哉	博士研究員	放射線イメージング科学

本事業の
参画者

本事業終了後も継続的に人工衛星を題材とした宇宙理工学研究・教育を実施できる拠点を形成

2018年4月新設
金沢大学大学院自然科学研究科 (博士前期課程)
宇宙理工学コース 
～学生主体の人工衛星開発～



衛星中の金沢大学衛星初号機 (衛星初号機)
2019年夏打ち上げ予定

金沢大学大学院自然科学研究科では、博士前期課程の全専攻を統合する形で、2018年4月「宇宙理工学コース」を新設します。

宇宙理工学コースでは、学生主体で手作り人工衛星を開発する中で、プロジェクト・マネジメント、幅広い視野での課題解決能力、異分野との協調性などの、実社会で求められるリーダーシップの醸成を目指す。
講義・実験・実習を通じて、宇宙工学に関する最先端の高度な知識と技術を獲得したうえで、理工一体となって科学的課題を解決するための衛星設計・開発の実践技術を学びます。

今後、衛星利用が日常となる社会において、基礎科学・応用工学(技術)の両者の視野・スキルを持ち、衛星設計・開発技術を身に着けた先端的職業人としての、次世代の宇宙科学・工学を担う研究者・技術者を育成します。

- (1) 宇宙科学に関する高度な知識と科学ミッションの立案能力
- (2) 宇宙工学、特に衛星設計開発に関する高度な知識と実践的能力
- (3) 衛星システム全体を包括的に理解し、開発を主導できるプロジェクトマネジメント能力

■コース教員
これまで多くのJAXAプロジェクトに関わってきた、人工衛星開発の経験が豊富なスタッフが、最先端の宇宙科学や宇宙工学を指導します。

八木谷 聡	教授 (プロジェクトリーダー)	電磁波工学
笠原 禎也	教授 (工学系リーダー)	宇宙電波信号処理
米徳 大輔	教授 (理学系リーダー)	宇宙物理学
井町 智彦	准教授	宇宙電波工学
尾崎 光紀	准教授	電磁波計測工学
後藤 由貴	准教授	宇宙通信工学
藤本 龍一	准教授	X線天文学
有元 誠	助教	ガンマ線天文学
澤野 達哉	博士研究員	放射線イメージング科学

この他にも、9割から専門家を活用、より実践的な教育・研究を実施します。

■充実した設備
宇宙環境を模擬できる熱真空チャンバーを備えたクリーンルームなど、学内で人工衛星の開発ができる設備が整備されています。



クリーンルーム 熱真空チャンバー 衛星製造が可能な広大な宇宙実験室

■主な専門科目



衛星工学・制御
衛星熱・構造設計
衛星通信工学
衛星電気電子回路
宇宙工学特別講義

宇宙工学
衛星システム

宇宙科学
宇宙科学特別講義
実験・演習
衛星設計開発

金沢大学衛星プロジェクト Kanazawa SAT3
Study and Training in Space Science and Technology for Kanazawa University
プロジェクト Web サイト
<http://sat3.kanazawa-u.ac.jp/>
お問い合わせ先: 076-2344-2121



科目区分	授業科目の名称	担当	単位数		履修要件
			必修	選択	
宇宙理工学専門科目	衛星システム(16コマ)	八木谷、笠原、米徳	2		6単位 以上必修
	衛星力学・制御(集中)	外部担当者1	1		
	衛星熱・構造設計(集中)	外部担当者2	1		
	衛星通信工学A(8コマ)	笠原	1		
	衛星通信工学B(8コマ)	後藤	1		
	衛星電気電子回路A(8コマ)	八木谷	1		
	衛星電気電子回路B(8コマ)	尾崎	1		
	宇宙工学特別講義(集中)	(八木谷)	1		
	宇宙科学A(8コマ)	米徳、藤本	1		
	宇宙科学B(8コマ)	米徳、藤本	1		
実験実習	衛星設計開発A(16コマ)	井町	1		
	衛星設計開発B(16コマ)	有元	1		
	ゼミナール・演習		4		
課題研究	宇宙理工学課題研究		10		

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：0 国際：0	国内：0 国際：5	国内：42 国際：7	国内：0 国際：0	国内：2 国際：0	国内：2 国際：0
	受賞・表彰リスト					

成果展開の状況について

▶ 成果公表

- ・学術論文：計11編 (査読あり5編、査読なし6編)
- ・国内学会・研究会での発表：計42件 (2015年度 3件、2016年度 20件、2017年度 19件)
- ・国際学会・研究会での発表：計7件 (2015年度 2件、2016年度 2件、2017年度 3件)

▶ 一般向け講演会等 10件 (2015年度 3件、2016年度 4件、2017年度 3件)

- ・石川県産業展示館での実物の展示や、サイエンスヒルズこまつ(科学館)における衛星プロジェクトの展示や講演会の開催など、広く国民に活動を伝えた。

▶ 宇宙理工学コースの設置

平成30年度より金沢大学大学院に宇宙理工学コースを設置し、人工衛星や搭載機器の開発を題材とした宇宙理工学研究を重点的に推進できる研究・教育体制を構築した。大学院における研究・教育の質的向上を確保するとともに、他の学科からも学生を受け入れることが可能な門戸の広い体制となっている。

今後の研究開発計画

本事業で開発した広視野X線撮像検出器と小型リアルタイム通信装置は、金沢大学超小型衛星に搭載される。衛星システムの開発も順調に進んでいるが、H2Aロケットの相乗り公募の機会が得られていないことから打ち上げ時期は定まっていない。2020年度には実現できると想定しており、重力波源からのガンマ線バースト観測を牽引できると期待している。

本事業で開発した検出器は超小型衛星に搭載可能で、かつ低エネルギーX線に限れば大型衛星に比肩する能力を有している。重力波天文学の発展で顕著な成果を得られれば、大型化する宇宙科学ミッションの時代に一石を投じ、超小型衛星プラットフォームを用いた理学観測の位置づけを高め、宇宙科学へ大きく貢献したい。

金沢大学大学院に開設した宇宙理工学コースでは、博士前期課程の学生を毎年10名程度受け入れる予定であり、継続的に宇宙理工学研究・教育を展開していける体制を構築できた。衛星の打ち上げ時期と合わせて、重力波天文学をスペース観測から支える研究拠点を形成することも構想しており、また、金沢大学超小型衛星2号機も検討している。宇宙理工学コースを基盤として持続的にミッションを創出できるとともに、拠点の規模も成長させられると期待できる。



事後評価票

平成30年3月末時点

1. 課題名 超小型衛星で展開する先進的理工学研究拠点の形成
2. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人 金沢大学・米徳大輔 教授
3. 共同実施機関 国立研究開発法人 理化学研究所 公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター
4. 事業期間 平成27年度～平成29年度
5. 総経費 86.7百万円
6. 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 <p>2017～18年頃から本格稼働する地上の重力波観測と連携し、重力波の検出と同期したX線突発天体の発見・通報を行うことで、「重力波天文学」という新たな学術分野の創成に貢献することを理学的課題として設定する。さらにX線突発天体の発生時刻・発生方向をリアルタイムで通報するために、商用通信衛星を利用したリアルタイムパケット通信技術の実用化を工学的課題として設定する。</p> <p>本研究経費の枠組みでは衛星バス部を除く理学観測ミッション機器に関連する以下の2課題を実施し、これら2つの機器を、金沢大学が開発を進めている超小型衛星に搭載する予定である。</p> <p>(1) 広視野X線観測装置のフライトモデルの開発 1～20キロ電子ボルト帯を観測する、100 cm²の有効面積を有するX線撮像検出器のフライトモデルを開発する。ここで開発する広視野X線撮像検出器は、超小型衛星に搭載できる小規模のものであるが、過去最高の感度で観測できる仕様である。</p> <p>(2) 商用衛星を経由した小型リアルタイムパケット通信装置の開発 無指向性（もしくは弱指向性）の電波により、民間の通信衛星へパケット情報を転送し、リアルタイムで地上へ伝送するための小型の通信装置を開発する。</p> <p>衛星バスの開発にあたっては、2014年度から受けている文部科学省の特別経費（教育プロジェクト分）「手作り人工衛星による先端宇宙理工学教育プログラムの構築」（代表：八木谷聡、金沢大学）で開発するが、ここにはミッション搭載機器の開発経費は含まれていない。したがって、本課題により上記2点の開発を実施し、世界をリードする宇宙理工学研究拠点および教育拠点を形成することを目指す。</p>

◆ 達成度

本課題では以下の通り、所期の目標を十分に達成した。

(1) 広視野 X 線撮像検出器のフライトモデルの開発

超小型衛星に搭載可能な広視野 X 線撮像検出器のフライトモデルを完成させた。1次元のストリップ電極を持つシリコン半導体検出器と符号化マスクを組み合わせた撮像検出器を直交させて2台配置することで天球面上でのガンマ線バーストの発生方向を特定する構造である。

回路部品のうち、集積度の高いFPGA, CPU, SRAM や、DCDC コンバータのような基幹部に対しては宇宙用回路部品を使用した。それ以外の多数の部品は民生用半導体素子を利用することで開発コストを大幅に削減した。そのため、全ての部品に対して若狭湾エネルギー研究センターおよび東京工業大学コバルト照射室にて放射線耐性試験を実施し、すべて 30 krad 以上の放射線耐性を有する部品を選別することに成功した。従って、本課題で開発した広視野 X 線観測装置のフライトモデルは、30 krad 以上の高い放射線耐性を有し、目標とする3年のミッション期間に十分耐えうる品質となっている。

検出器の幾何学面積は約 100 cm²、読み出し閾値は1キロ電子ボルト程度であり、当初の目標として定めていた性能を達成することができている。また、シミュレーションにより撮像感度と検出感度が最適となるよう符号化マスクの設計を行った。これらの開発から、10キロ電子ボルト帯よりも低いエネルギーで輝く突発天体については、NASA の Swift 衛星と同等以上の性能であることを実証した。また、同帯域をモニターする広視野 X 線撮像検出器としては、過去最高感度に匹敵する検出器となっている。本研究の観測対象である中性子星連星を起源とする重力波源からは、短時間ガンマ線バーストに伴う X 線超過成分が観測されるはずで、現行の大型衛星と比肩する成果を挙げられる性能と言える。

金沢大学超小型衛星用に開発したオンボードコンピュータと接続し、コマンド・テレメトリの送受信や観測データの転送など、実運用で行うべき機能を全て検証した。また、本課題で開発した広視野 X 線撮像検出器のフライトモデルを、金沢大学超小型衛星の熱構造モデルと組み合わせた振動試験と、機器単体の熱真空試験を実施し、打ち上げ可能なレベルのフライトモデルを完成させることに成功した。

(2) 商用衛星を経由した小型リアルタイムパケット通信装置の開発

ガンマ線バーストを検出したことを可能な限り早く地上観測者へ伝達するために、イリジウム衛星通信網を用いた小型リアルタイムパケット通信装置のフライトモデルを開発した。通信デバイスおよび制御回路の放射線耐性も 30 krad 以上であることを確認しており、広視野 X 線撮像検出器と同様の耐放射線性を有する装置となっている。また、金沢大学超小型衛星の熱構造モデルと組み合わせた振動試験と機器単体の熱真空試験を実施している。

広視野 X 線撮像検出器から出力されたデータパケットを、本小型リアルタイムパケット通信装置により送信し、イリジウム衛星が保証する時間内（1分以内）にユーザーがデータを取得できることを確認した。超小型衛星用オンボードコンピュータを経由した、End-to-End 試験に相当する機能検証を実施できている。以上から、高い放射線耐性を有し、本ミッションの観測機器からのパケットデータを送信することのできる小型リアルタイムパケット通信装置のフライトモデルを完成することに成功した。

(3) 宇宙理工学研究拠点の形成

本課題での開発実績に基づいて、人工衛星を題材とした研究・教育を継続的に実施できるよう、平成30年度から金沢大学大学院に宇宙理工学コースを開設することとなり、その拠点形成へ向けた検討や体制の構築を行った。

このコースでは、人工衛星および搭載機器の開発に必要な知識を学び、研究課題を通して実際の開発を身につけられる具体的なカリキュラムを展開する。カリキュラムのうち、本課題における研究拠点の形成に深く関連する

- ・衛星設計開発（人工衛星の特にバスシステムの開発）
- ・宇宙理工学課題研究（人工衛星のミッション機器や、新規搭載機器の開発）

の内容を取りまとめた。

平成30年度から、これら研究開発の遂行に必要な知識を体系的に学ぶために、「衛星システム」「衛星力学・制御」「衛星熱・構造設計」「衛星通信工学」「衛星電機電子回路」および「宇宙科学（理学）」に関する講義を行い、国内外から有識者を招いた集中講義・実習を実施している。以上のようなカリキュラムにより、人工衛星を用いた宇宙理工学研究を重点的に推進できる研究・教育拠点を構築した。

「必要性」

本課題は以下の観点から、十分な必要性が認められる。

■科学的・技術的意義

金沢大学衛星は50 cm/50 kg級の衛星ではあるが、10 キロ電子ボルト以下の低エネルギーで輝く突発天体においては大型のSwift衛星に匹敵する性能を有する。これは、本課題で開発した「シリコン半導体検出器」と「高利得・低雑音なアナログ集積回路」の革新的な技術により達成したものである。また、SwiftではNASAのリレー通信衛星(TDRS衛星)を利用したリアルタイム通信を行っているため、年に数1000万円から1億程度の運用費が必要であるのに対し、本計画では商用のイリジウム衛星を利用することで極めて安価にリアルタイム送信を実現できることから、大学衛星の規模でも実装可能となる。

以上のように、本課題では、独創的な研究テーマに対して先進的な技術・方針を導入した機器を、短期間で衛星に搭載可能なフライトレベルにまで昇華させ完成させた。衛星の打ち上げはこれからであるが、大学衛星規模でも第一級の科学観測を実施できる機器を開発できたことは、今後の人工衛星を用いた宇宙科学の進め方に対して大きな意義を示している。

■緊急性の高い課題

2015年に米国の重力波観測施設LIGOが初めて重力波を直接的に検出し、2017年には中性子星連星の衝突・合体からの重力波とそれに付随する電磁波放射が捉えられた。今後、2023年頃には世界の重力波観測施設がデザイン感度に達して、本格的な重力波天文学の時代が始まろうとしている。

この重力波天文学の創成および急速な発展に対して、タイムリーに科学観測を実施できるような新規のX線衛星プロジェクトとして、金沢大学衛星は早いタイミングで実現できるプロジェクトの1つであると世界的に認識されている。緊急性の高い理学課題に対して、本課題により短期間で科学観測装置のフライトモデルを完成した。

重力波天文学と絡んだガンマ線バーストの観測は、天文学における極めて重要な課題であることから、大学等が主導する様々なプロジェクトが考えられている。イタリアの HERMES 計画や、ハンガリーの Camelot 計画などでは、3U サイズ(10x10x30 cm³)の衛星を 100 機程度展開して全方位の観測網を構築する計画が推進されている。2020 年頃から試験機を投入し、その後、順次打ち上げられていく予定であるが、開発費は試験機までに留まっている。

金沢大学衛星プロジェクトは 50 cm/50 kg 級の衛星で、先述の計画と比べて規模が大きく、観測感度も高いプロジェクトとなる。本課題費による研究開発でフライトモデルを完成することができたため、小規模なミッションを先導し、国際競争の観点でも一歩進んだ状況に到達している。

■若手研究者の育成

本課題では、PD・大学院生・学部生が開発の中心的な役割を担い、開発メーカーとの議論も共同で進めてきた。その中で、衛星搭載機器に対する考え方、管理方法、実験方法など、現場レベルの開発を十分に経験し、次世代の若手研究者・先端的職業人の育成に大きく貢献した。また、小規模な開発環境ではあるが、プロジェクトマネジメントについても事業期間3年間にわたって経験することができた。

また、本課題における研究開発や、その中で展開してきた教育を、今後も継続的に実施できる体制として、平成 30 年度から金沢大学大学院に「宇宙理工学コース」を設置したことにより、理工学が連携して、衛星バス本体および理学ミッション機器の開発が可能となる教育・研究拠点が形成された。

「有効性」

本課題は以下の観点から、十分な有効性が認められる。

■研究開発の質の向上

本課題では、若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究契約を結び、定期的にマシンタイムを確保できる体制の下、研究開発を遂行した。そのため、民生回路部品から放射線耐性が 30 krad 以上の製品を効果的に選別することが可能となり、短期間かつ安価に広視野 X 線撮像検出器および小型リアルタイムパケット通信装置のフライトモデルを完成することができた。

本課題では、若狭湾エネルギー研究センターの生物照射用ビームラインを利用してきたが、近年、衛星搭載機器や宇宙観測に絡む課題を積極的に受け入れるようになってきている。定常的に 15~18%程度は宇宙関連の課題であり、2017 年の 1 月期には 28%に達している。若狭湾エネルギー研究センターでは、本課題を始めとして大小様々な規模および産学の両方からの課題を受け入れ、本課題で獲得した放射線耐性の高い部品リストは、希望に応じて開示していることなどから、放射線耐性試験や宇宙環境を模擬した研究開発の質の向上に貢献している。

■今後見込まれる効果

近年の宇宙科学は大型化の一途を辿り、その予算規模や開発期間が増大していることは事実である。そのような中、比較的安価な超小型衛星を利用して、短期間で科学観測を実施する流れが重要視されるようになってきている。しかしながら、第一級の理学的成果を挙げた超小型衛星計画の例は極めて乏しい。

本課題で開発した広視野 X 線撮像検出器と小型リアルタイムパケット通信装置を搭載した金沢大学超小型衛星が実現すれば、重力波天文学という最重要課題に対して大きく貢献できると期待している。

実際に第一線の科学成果が得られれば、超小型衛星プラットフォームを利用した理学観測に対する意識を改革し、パラダイム・シフトにつながる可能性もある。これまでに工学的な立場で超小型衛星事業を推進してきたグループとも連携し、理学観測の立場からも大きく貢献できる可能性がある。

「効率性」

本課題は以下の観点から、十分な効率性が認められる。

■研究開発のアプローチの妥当性

本課題では、若狭湾エネルギー研究センターと共同研究を行ったことで、民生部品に対する放射線耐性の評価と選別を効果的に実施した。同センターの粒子加速器や生物実験等を専門とするスタッフと綿密な実験打ち合わせを実施することで、学際的な体制において、十分な成果が得られた。特に、宇宙用部品を多用する場合と比較して、大幅に開発費を削減した。

■計画・実施体制の妥当性

理化学研究所は平成27年度および28年度に、シリコン半導体検出器の開発と高圧電源の開発を担当した。それと並行して金沢大学では、アナログ集積回路やデジタル回路基板の開発に集中するなど、効率的に開発を進めることができた。平成29年度以降も金沢大学・理研の共同体制で試験を進めており、本課題での開発だけでなく、衛星バス系の開発や検討でも協力している。

(2) 成果

「アウトプット」

本課題における最大の成果は、広視野X線撮像検出器と小型リアルタイムパケット通信装置のフライトモデルを完成させたことである。金沢大学超小型衛星のバス部が完成すれば、すぐにでも搭載できる状況となっている。達成度の欄でも記述したように、10 キロ電子ボルト帯よりも低いエネルギーで輝く突発天体については、NASA の Swift 衛星と同等以上の性能が見込まれている。従って、観測エネルギー帯域は限られるものの、大型衛星に比肩する成果が得られると期待できる。

本課題の開発およびそれと関連する研究・開発について、以下のように成果公表を行った。

- ・ 学術論文： **計 11 件** (査読あり 5 件、査読なし 6 件)
- ・ 国内学会・研究会での発表： **計 42 件** (2015 年度 3 件、2016 年度 20 件、2017 年度 19 件)
- ・ 国際学会・研究会での発表： **計 7 件** (2015 年度 2 件、2016 年度 2 件、2017 年度 3 件)

本課題で連携した若狭湾エネルギー研究センターとは、事業終了後も共同研究契約を締結し、引き続き将来の宇宙プロジェクトへ向けた放射線耐性試験を共同で実施している。理化学研究所とは、金沢大学超小型衛星に小型のガンマ線検出器を搭載することを決定し、共同で開発を進めている。

■拠点以外の機関に所属する研究者の参画状況

本課題における開発は以下に示す拠点以外の機関と連携している。

- ・アナログ集積回路

宇宙科学研究所および東京工業大学のグループと設計情報を共有し、各機関の利用目的に応じた設計を行ってきた。また、同一の半導体プロセスをシェアすることで開発コストを抑えた。

- ・小型リアルタイムパケット通信装置

宇宙科学研究所および日本大学のグループと情報を共有して開発を行った。両グループはFPGAを用いた通信システムを開発し、本課題では放射線耐性が高いことを実証したマイコンを利用したシステムを開発した。

- ・符号化マスク：

本課題で開発した符号化マスクのノウハウを京都大学および大阪大学のグループと共有した。特にシミュレーションにより撮像能力(S/N)を最適化し、かつマスクパターンに由来する偽の像のS/Nを下げるのが重要であり、その検討方法を共有した。

■民間企業等との連携

本課題で開発した広視野X線撮像検出器の回路基板や検出器基板は、東京ドロウイング株式会社と共同で開発を行った。同社は自動車・航空機等の高信頼性が要求される分野での豊富な経験があるが、宇宙機産業については本課題が初の試みであった。金沢市近郊の企業であるため、頻繁に対面での議論を重ね、本課題の目的である広視野X線撮像検出器のフライトモデルを完成させることに成功した。同社の技術と経験は、今後の宇宙産業でも大いに活かされることと期待している。また、同社のFPGA担当者からのレクチャーや回路レビューを行う中で、学生が企業の技術や開発の進め方、管理方法などを目の当たりにし、自らの研究開発へも活かされたと言える。

さらに、テクノソルバ株式会社からは構造設計および振動試験の実施に対する助言を受け、また、合同会社TAエンジニアリングからは熱真空試験の実施にあたって環境設定についての助言を受けた。両社は金沢大学超小型衛星の開発で構造設計および熱設計を担当していることから、本課題で開発する搭載観測機器に対しても連携した。

■学際的なコーディネートの実績

若狭湾エネルギー研究センターでは、粒子加速器や生物照射を主体とする研究者と連携し、放射線耐性試験を実施した。共著論文として以下の2編を出版している。

Y. Kagawa et al. Proceedings of the SPIE, Volume 10397, id. 103970N 13 pp. (2017).

K. Yoshida et al. Proceedings of the SPIE, Volume 9905, id. 99050M 11 pp. (2016).

■一般向け講演会・高校などでの出張講義 10件（2015年度 3件、2016年度 4件、2017年度 3件）

一般向け講演や高校などへの出張講義を10件実施した。石川県産業展示館で開催されたMEX金沢（機械工業見本市）での実物の展示や、サイエンスヒルズこまつ（科学館）における衛星プロジェクトの常設展示や講演会の開催など、広く国民に活動を伝えた。

「アウトカム」 (平成 30 年 10 月末時点)

■宇宙理工学コースの教材としての活用

本課題の取組に基づいて、平成 30 年度より金沢大学大学院に宇宙理工学コースを設置し、人工衛星や搭載機器の開発を題材とした宇宙理工学研究を重点的に推進できる研究・教育体制を構築することができた。大学院における研究・教育の質的向上を確保するとともに、他の学科からも学生を受け入れることが可能な門戸の広い体制となっている。平成 30 年度は本課題に参画したグループから 5 名、それ以外から 1 名の計 6 名が本コースを選択している。今後も毎年 10 名程度を受け入れ、宇宙理工学分野の研究・教育を実施する予定である。

本コースでは、人工衛星および搭載機器の開発に必要な知識を学び、研究課題を通して実際の開発を身につけることを可能とする具体的なカリキュラムを展開している。カリキュラムのうち、本課題における研究拠点の形成に深く関連するテーマとして、

- ・衛星設計開発 (人工衛星システムの開発)
- ・宇宙理工学課題研究 (ミッション機器や、新規搭載機器の開発)

を設定し、本課題で実施したミッション機器の開発例を参考にした資料・レポート等を取りまとめ、講義の教材として利用している。例えば、集積回路を設計するためのシミュレータ環境の使い方と設計例、放射線耐性試験を実施する際の考え方と実験方法、振動試験や熱真空試験の計画・実施・評価など、実際の開発と直結する内容を学べるようにしている。さらに宇宙機システムの構造設計・構造解析や熱設計・熱解析、および姿勢制御に関して、本課題で連携した民間企業や他大学の専門家による集中講義を実施している。このように、将来の宇宙開発を担う若手の育成においても本課題の成果を展開している。

■実験・試験環境の拠点外機関の利用

本課題の成果を多数の学会・研究会で講演する中で、X線ビームラインなどの実験環境や、クリーンルーム・熱真空チャンバー・試験設備を拠点以外の機関へも開放している。

- ・X線ビームライン

本課題で利用したX線ビームラインは、約 80%という高い偏光度を有するX線光源としても活用できることから、X線・ガンマ線偏光観測を計画している山形大学・東京大学のグループが利用した実績がある。さらに、スイス・中国が検討しているプロジェクトからも設備の見学と基礎開発における利用の提案を受けており、国際協力プロジェクトへ発展する可能性がある。

- ・熱真空試験装置

京都大学の地球磁気圏観測グループが開発する観測機器の熱真空試験を実施した。実験のセットアップや熱真空試験の支援を実施した。また、福井県工業技術センターが新規に設置した熱真空チャンバーの設計支援を行い、ノウハウを展開している。

■さらに将来のプロジェクト創設へ向けて

本課題の科学的課題である「マルチメッセンジャー天文学」を本格的に推進することを目的とした将来計画のミッションコンセプト案を JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型衛星枠へ提案し、本事後評価の時点では 3 候補のうちの 1 つとして選定されている。本課題の代表者である米徳大輔が代表となり、国内外から 81 名/32 機関 (国外 14 名/8 機関) が参画するミッションで、2024 年~25 年頃の打ち上げ

を目指して検討を進めている。

本課題で開発した広視野X線撮像検出器のデジタル回路部の設計コンセプトや、小型リアルタイムパケット通信装置を採用する予定である。また、X線ビームラインや熱真空チャンバーの実験・試験環境を最大限に利用する予定であり、本課題の成果に基づいて研究開発を遂行できると期待している。

(3) 今後の展望

本課題で開発した広視野X線撮像検出器と小型リアルタイム通信装置は、金沢大学超小型衛星に搭載される。衛星システムの開発も順調に進んでいるが、打ち上げ時期は2020年度頃を想定しており、重力波源からのガンマ線バースト観測を牽引するものと期待される。

超小型衛星の規模で、第一級の理学的成果を挙げた例は世界的に見ても乏しいが、本課題で開発した検出器はそのポテンシャルを有している。重力波天文学の発展で顕著な成果を得られれば、大型化する宇宙科学ミッションの時代に一石を投じ、超小型衛星プラットフォームを用いた理学観測の位置づけを高め、宇宙科学への大きな貢献が期待される。

平成30年度より金沢大学大学院に開設する宇宙理工学コースでは、博士前期課程の学生を毎年10名程度受け入れる予定であり、継続的に宇宙理工学研究・教育を展開していける体制となっている。衛星の打ち上げと合わせて、重力波天文学をスペース観測から支える研究拠点を形成することも構想しており、また、金沢大学超小型衛星2号機も検討を開始している。宇宙理工学コースを基盤として持続的にミッションを創出するとともに、拠点自体の発展が期待される。

7. 評価点

A

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

8. 評価理由

本課題が目標としていた広視野X線撮像検出器と小型リアルタイムパケット通信装置のフライトモデルの開発は遂行され、当初の予想どおりの性能を発揮している。特に、本課題で開発した高利得・低雑音なアナログ集積回路は世界トップクラスの性能であることは特筆すべき点である。本課題における開発に関連して、学術論文11編、国内学会・研究会での発表42件、国際学会・研究会での発表7件と学術的成果を公表しているほか、市民講演会等も10件実施しており、広く成果を展開し、若手研究者の育成にも貢献している。また、本課題の成果を踏まえて、平成30年度には、金沢大学大学院に宇宙理工学コースを開設しており、理工学分野が一体となって人工衛星バスおよび搭載機器の開発研究を推

進し、先端的な宇宙理工学教育を学べる拠点が形成されている。当該コースを基盤として、継続的に宇宙科学ミッションを創成できる体制が構築されている。

以上により、本課題は相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献したと評価する。

今後は、開発した衛星による実ミッションでの成果の創出は勿論のこと、開設された宇宙理工学コースをはじめとして、本課題の成果である超小型衛星開発の拠点が持続的に発展することを期待する。