

平成25年度
小型衛星搭載非冷却赤外放射計に関する
調査研究(その2)報告書
要約

平成26年3月

一般財団法人宇宙システム開発利用推進開発機構

調査・研究報告書の要約

書名	平成25年度小型衛星搭載非冷却赤外放射計に関する調査研究(その2)				
発行機関名	一般財団法人宇宙システム開発利推進機構				
発行年月	平成26年3月	頁数	80頁	判型	A4

[目次]

目次

事業運営組織

<総論>

1. 調査研究目的
2. 調査研究体制
3. 調査研究内容
4. 調査研究項目・スケジュール

<各論>

第1章 技術動向調査

第2章 非冷却赤外放射計の検討

第3章 小型衛星の調査・検討

第4章 まとめ

付録：海外技術動向調査【要旨】

[要約]

<総論>

1. 調査研究目的

衛星搭載赤外放射計から得られる熱赤外バンド(TIR)の地球観測データは、昼夜を問わず地表面の熱的事象の観測を可能とするため、ヒートアイランドや港湾部での工業用水の温水排出・汚染などの環境監視、山火事や火山噴火等の災害監視、石油・鉱物探査等の資源探査等様々な分野で広く利用されており、観測データの連続性及び更なる高分解能化など機能・性能の向上が求められている。また、現在 NASA の地球観測衛星 TERRA に搭載されている ASTER/TIR はミッション運用期間が14年を超えており、その後継機の開発が期待されている。現在、VNIRとSWIRの後継機としてハイパースペクトルセンサ(略称:HISUI)を開発中である。一方、TIRは資源探査、環境監視等に利用されており、さらに宇宙開発基本法の制定により安全・安心の分野での利用も期待されている。しかし、その開発コストが高く、リソースも大きいため開発には至っていない。

本調査研究は、平成24年度に実施した小型衛星搭載非冷却赤外放射計の調査研究結果を踏まえ、非冷却赤外線光検出器を用いた小型・低価格な高性能赤外放射計の実現可能性について技術の進展を踏まえた調査、画像シミュレーションを行い、衛星搭載非冷却赤外放射計の今後の開発の方向性を明らかにすることを目的とする。

2. 調査研究体制

本調査研究は図1の体制により実施した。調査研究の経緯、内容に関しては、外部有識者による委員会を組織し、その助言を成果に反映した。委員会の委員名簿を表1に示す。

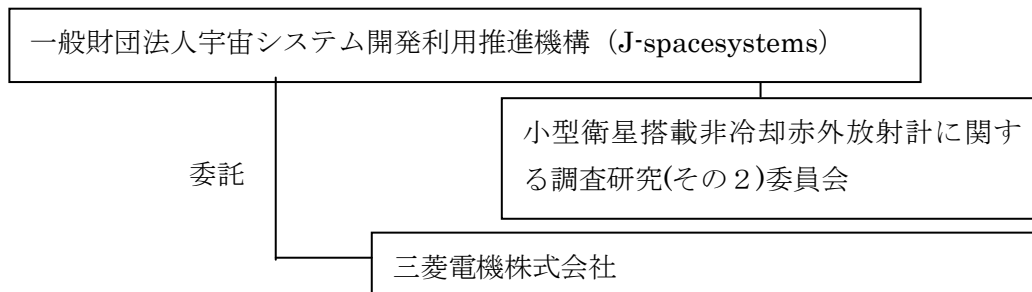


図1 平成25年度小型衛星搭載非冷却赤外放射計に関する調査研究(その2) 調査研究体制

表1. 平成25年度小型衛星搭載非冷却赤外放射計に関する調査研究委員会(その2) 委員名簿

	氏名	所属団体名	役職名
委員長	木股 雅章	立命館大学 理工学部 機械工学科	教授
委員	外岡 秀行	国立大学法人 茨城大学 工学部 情報工学科兼務 地球変動適応科学研究機関(ICAS)	准教授
	松永 恒雄	独立行政法人 国立環境研究所 地球環境研究センター 地球環境データベース推進室	室長
	今井 正	独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 第一衛星利用ミッション本部 地球観測研究センター	主任開発員
	新井 康平	国立大学法人 佐賀大学大学院工学系研究科 知能情報システム学専攻	教授

(順不同、敬称略)

3. 調査研究内容

調査研究に当たっては、業務の一部を夫々独自の衛星搭載光学センサの製造ノウハウを有するメーカーに委託し、保有ヘリテージをベースとした効率的な動向調査及びシステム検討を実施した。また、熱赤外の利用分野に精通した有識者、赤外線センサに精通した専門家等による委員会を設置し、本業務内容に関する意見を成果報告書に反映した。

(1) 技術動向調査

国内外における非冷却赤外線光検出器およびそれを用いた衛星搭載非冷却赤外放射計について最新の開発動向や技術動向の調査を実施した。

(2) 非冷却赤外放射計の検討

周回軌道から高分解能の熱赤外面像を継続取得する非冷却赤外放射計の小型・軽量化に関し、校正法も含めて今後 5～10 年間程度で実現可能なシステム構成、概略仕様等の検討および小型衛星搭載用として必要となる性能緒元、実現可能性について検討するとともに、放射計仕様に基づいて画像シミュレーション等を行い、仕様の妥当性について検討を実施した。

(3) 小型衛星の調査・検討

非冷却赤外放射計の搭載を前提に、現在開発中あるいは将来開発可能な小型衛星に関して衛星バス等について調査した。

4. 調査研究項目・スケジュール

調査研究内容の各項目について以下のスケジュールにて検討を実施した。

表 2. スケジュール

半期別・月別 項目	上半期						下半期					
	平成 25 年 ／ 4	5	6	7	8	9	10	11	12	平成 26 年 ／ 1	2	3
①技術動向調査												
②非冷却赤外放射計の検討												
③小型衛星の調査・検討												
④委員会開催												
⑤報告書作成												

海外技術動向調査は以下の学会を主たる対象とした。

(1) 学会名称: SPIE 2013 Defense, Security + Sensing

開催日時: 平成25年4月29日(月)～5月3日(金)

開催場所: 米国ボルチモア市コンベンションセンター

(2) 学会名称: SPIE 2013 Security + Defence

開催日時: 平成25年9月23日(月)～26日(木)

開催場所: 独国防レスデン市コンベンションセンター

<各論>

第1章 技術動向調査

国内外における非冷却赤外線光検出器およびそれを用いた衛星搭載非冷却型赤外放射計について最新の開発動向や技術動向の調査を行った。特に、高分解能化と高頻度化の観点から、性能、方式等の技術開発動向についての調査し整理する。調査は文献調査等を主体として行った。

(1) 非冷却赤外線光検出器の調査・検討

主として、最近5年間の SPIE 学会で発表された、非冷却赤外線光検出器の方式、仕様などの技術動向をまとめた。結果を、表1-1 に示す。技術動向としては、画素ピッチ縮小化、低コスト化及び機能付加がある。

【画素ピッチ縮小化】

画素ピッチは、製造技術の進展及びユーザ側の要求に伴って縮小化が推進されている。画素ピッチ縮小化を達成するためには、高感度化が必要となる。高感度化には、①赤外線の高吸収化、②高断熱化、③温度センサの特性向上 が必要でありそれぞれ以下のような対策がとられている。

①赤外線の高吸収化 ⇒ 赤外線吸収層の有効面積増大

②高断熱化 ⇒ 支持脚長の増大、支持脚の狭幅化・薄膜化

③温度センサの特性向上⇒ ボロメータの場合はボロメータ材料の抵抗温度変化係数向上(材料開発)、SOI ダイオードの場合はダイオード個数の増大 等

画素ピッチ 12 μ m の技術が発表され、それを可能にするボロメータの温度変化係数向上技術および高断熱化技術が報告されている。

【低コスト化】

米各社の半導体・ボロメータプロセスなど製造に係わるアウトソーシング化が促進されており、低コスト化の追求(チップスケール光学系、ウエハレベル製造)がある。また、ローエンド市場(80x80 画素, 80x60 画素への参入、低価格化推進、デュアルユース推進など)の活発化が上げられる。

【機能付加】

・プラズモニク吸収体を用い、熱型赤外線センサに波長選択機能を付加するなど新しい流れもある。

表1-1 最近5年間に SPIE で発表された非冷却赤外線光検出器の方式、仕様の比較

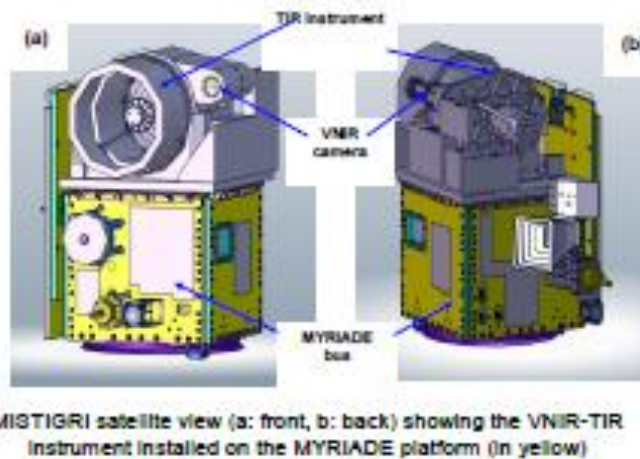
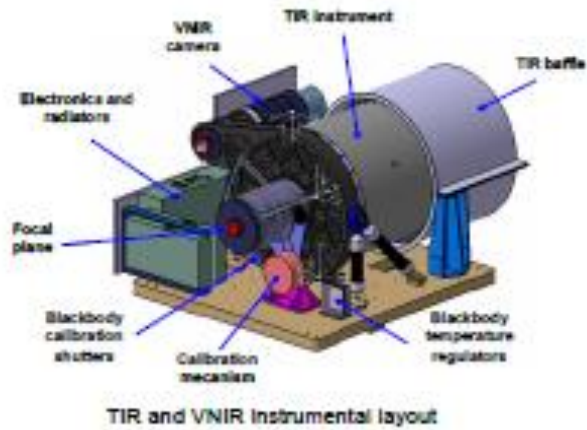
SPIE 発表年	メーカー	方式	Px μ m	画素数		NETD(f/1) mK	時定数 m秒
				H	V		
2013	NEC	VOxボロメータ	12	640	480	60	16
2013	BAE	VOxボロメータ	17	640	480	-	-
2013	東芝	SOIダイオード	22	320	240	40	16
2012	三菱	SOIダイオード	15	2000	1000	65	12
2012	ULIS	a-Siボロメータ	17	384	288	35	10
2011	東芝	SOIダイオード	22	320	240	200	16
2011	L-3	a-Siボロメータ	17	1024	768	記載なし	記載なし
2011	L-3	a-Siボロメータ	17	320	240	NETD・時定数=350mK・ms	
2010	ULIS	a-Siボロメータ	17	640	480	45	9
2010	DRS	VOxボロメータ	17	1024	768	記載なし	記載なし
2010	DRS	VOxボロメータ	17	640	480	記載なし	記載なし
2010	DRS	VOxボロメータ	17	320	240	記載なし	記載なし
2010	SCD	VOxボロメータ	17	640	480	50	記載なし
2010	BAE	VOxボロメータ	17	1024	768	35	10
2010	BAE	VOxボロメータ	17	640	480	35	10
2010	東芝	SOIダイオード	22	320	240	250	65
2009	ULIS	a-Siボロメータ	17	1024	768	40	11
2009	L-3	a-Siボロメータ	17	1024	768	50	10
2009	東芝	SOIダイオード	32	160	120	500	記載なし

(2) 非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサ

表 1-2 に非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサの調査結果を示す。今年度、新しく報告されたのは、ハワイ大学の火山噴火観測装置 SUCHI、ジョンホプキンス大学の気象観測用赤外イメージャである。図 1-1 には提案されている非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサ外観例を示す。これらの結果よりセンサの仕様、センサ撮像方式などをまとめ、赤外放射計の諸元案策定に用いた。

表 1-2 非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサの調査結果

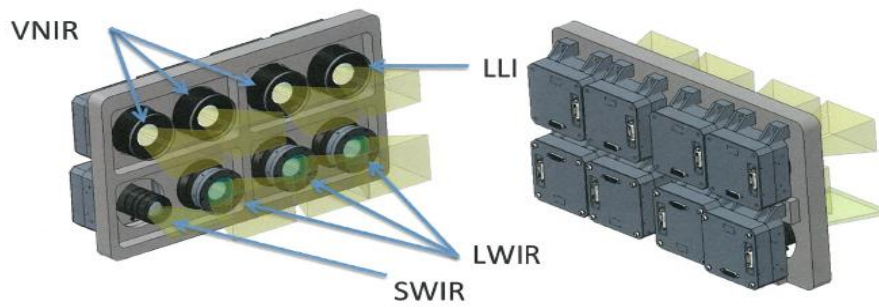
センサ名	IIR	NIRST	MSI/BBR	CIRC	MISTIGRI	Compact Terrestrial Weather Sensing	SUCHI
搭載衛星 (機関)	CALIPSO (NASA/CNES)	Aquarius/SAC-D (NASA/CSA/ARG)	EarthCARE (ESA)	ALOS-2 (JAXA)	Myriade (CNES)	(JHU/APL)	HiakaSat (Univ.of Hawaii)
打上げ (予定)	2006/4/28	2011/6/10	2015 年予定	2014 年度	2015 年予定	2015 年予定	2014 年予定
検出器 ピクセルサイズ (メーカー)	320x240 51x51 μm^2 (BOEING)	2x(512x3) 39x39 μm^2 (INO)	384x288/3x(384x16) 35x35 μm^2 (ULIS/INO)	640x480 25x25 μm^2 (MELCO)	640x480 25x25 μm^2 (ULIS)	1024x768 17x17 μm^2 (ULIS)	320x256 25x25 μm^2 (FLIR)
観測波長 (μm)	8.65-12.05	3.8,10.85,11.85	8.8,10.8,12.0	8-12	8.6,9.1,10.5,11.3	8.4, 10.8, 12.0	8.5-13
バンド数	3	3	3	1	4	3	ハイパー
GSD	1000m	350m	500m	200m	50m(supermode)	760m	230m
ミッション	雲頂温度 雲頂高度	森林火災 陸地/海面水温	雲頂温度 雲頂高度	森林火災 火山観測	灌漑域の水分蒸発 植物水ストレス	気象観測 雲、多層雲、	火山噴火
備考	フィルタホイール ポインティングミラー	MWIR 搭載	地上加算 TDI		地上加算 TDI VNIR 搭載 supermode	3カメラ方式 COTS カメラ FOV: 40° x40°	ハイパーセンサ 波長分解能:20 cm^{-1}



J.P.Lagouarde,etal: “Overview of the high spatial and temporal resolutions MISTIGRI mission in the Thermal Infrared,” Glob Temp. User Consultation Meeting ,Edinburgh, June 27-28, 2012

(a) MISTIGRI 外観

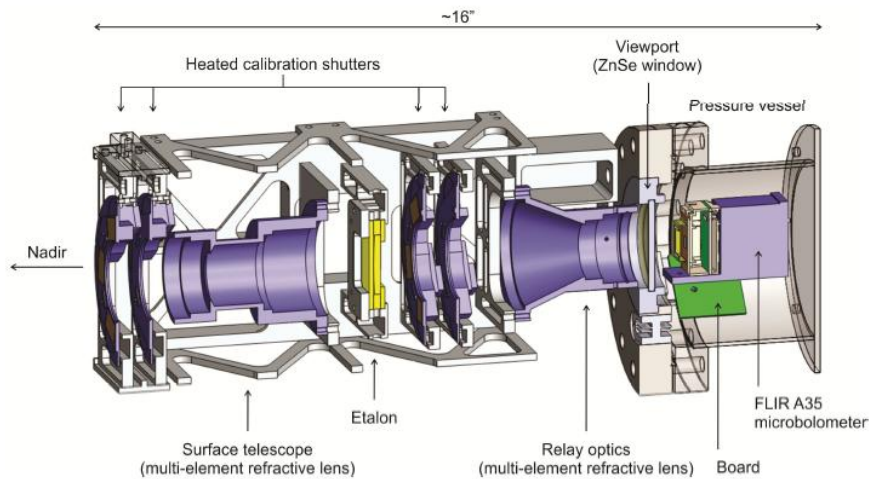
図 1-1 非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサ外観(1/3)
当初光学系は屈折型であったが反射光学系に変更



R.Erlandson,etal: “Compact Terrestrial Weather Sensing for Small Satellites and Hosted Payload Application”
 SSC13-IV-8,27th SSC13-IV-8AIAA/USUConference on Small Satellite

(b) Compact Terrestrial Weather Sensing センサ外観

図 1-1 非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサ外観(2/3)



S.T. Crites et. al :”SUCHI:The Space Ultra Compact Hyperspectral Imager for small satellites,”
 Proc. of SPIE Vol.8739,873902-1

(c) SUCHI (HiakaSat 搭載) 構成

図 1-1 非冷却赤外線光検出器を用いた地球観測センサ外観(3/3)

第2章 非冷却型赤外放射計の検討

周回軌道から高分解能の熱赤外面像を継続取得する非冷却型赤外放射計の小型・軽量化に関し、校正法も含めて今後 5～10 年間程度で実現可能なシステム構成、概略仕様等の検討および小型衛星搭載用として必要となる性能緒元、実現可能性について検討を実施した。また、仕様策定の妥当性を確認するため画像シミュレーションを行った。

非冷却方式の赤外検出器で、感度を上げるための TDI(Time Delay Integration)は原理的に困難であり、TDI を実施していると記載のある2センサについても、表 1-1 に示すように、一方は地上にて外部 TDI を実施していることが明記されており、他方についても外部 TDI 実施していると考えられる。

このため、TDI を実施する場合は、外部 TDI 採用が有望であり、衛星小型・軽量化を計ることを考えると、センサ/衛星側に搭載するよりも、リソースに余裕のある地上処理にて実施するのが適切と考えられる。ここでは、以下の方式の撮像方式について検討を実施した。

- ・ プッシュブルーム撮像方式
- ・ 地上加算 TDI 撮像方式
- ・ ステアリング撮像方式

上記のうち、プッシュブルーム撮像方式は、センサの応答速度から目標とする数 10m の GSD が達成できないため不採用とする。したがって、残り2方式から選定することになる。

地上加算 TDI 撮像方式では、MISTIGRI と同程度以下の GSD ではプッシュブルーム方式では応答速度が足りないため、地上での視線速度を落とす必要がでてくる。したがって、実際にはステアリング撮像方式と変わらなくなる。すなわち、センサでの発生データレートが大きくなり、衛星側のリソース増、衛星と地上局の間の通信回線に負担増となるので地上加算型 TDI 方式を採用せず、ステアリング方式を採用することにする。技術動向調査の結果や撮像方式の検討結果を基に、単一バンドとしたときとマルチバンドとしたときの諸元案を検討した。単一バンドについては2000x1000画素の検出器を用いることにより高分解能、広視野角を実現できる諸元を提案した。マルチバンドとしたときの非冷却型赤外放射計諸元(案)を表 2-1と表 2-2 に示す。表 2-1 はバンド毎に光学系を有する構成で、単一バンド放射計を3台ならべた形状になっている。表 2-2 は単一バンドとマルチバンド2バンドを組み合わせた構成である。

表 2-1 マルチバンド(タイプ A)非冷却型赤外放射計諸元

項目	数値/名称	備考
非冷却赤外素子	SOIダイオード方式	640x480画素
撮像方式	スキャンミラーを用いたstaring撮像方式	
校正	基準黒体、深宇宙を用いた校正	
光学系	屈折光学系	
有効開口[m]	0.15	
焦点距離[m]	0.18	
観測バンド数	3	バンド1(B12):8.5~9.0 μ m バンド2(B14):10.5~11.1 μ m バンド3(B15):11.1~11.7 μ m
GSD[m]	50	
観測幅[km]	24	
NETD	0.85K以下	300Kの対象物に対して
MTF	0.1程度	@ナイキスト周波数
カメラ寸法	200mmx600mmx450mm	1台分
放射計寸法	270mmx650mmx850mm	ステアリングミラー含む
カメラ質量	15kg	1台分
放射計質量	60kg	ステアリングミラー、黒体含む

表 2-2 マルチバンド(タイプ B)非冷却型赤外放射計諸元

項目	数値/名称	備考
光検出器	非冷却赤外検出器 (SOI ダイオード方式)	広帯域: 2000x1000 画素 x1 検出器 狭帯域: 640x480 画素 x2 検出器
撮像方式	スキャンミラーを用いたステアリング撮像	
光学系	屈折光学系	
校正	基準黒体、深宇宙を用いた校正	
観測波長域	8~12.3 μ m	
観測バンド数	3	バンド 1(広帯域): 8.0~12.0 μ m バンド 2(B14): 10.5~11.1 μ m バンド 3(B15): 11.3~12.3 μ m
GSD	広帯域: 30m 狭帯域: 60m	
観測幅	広帯域: 30km 狭帯域: 28.8km	
NETD	バンド 1: 0.5K 以下 バンド 2: 0.85K 以下 バンド 3: 0.6K 以下	温度 300K の対象物に対して
MTF	0.1 程度	
放射計質量	約 80kg(衛星質量としては 250kg 程度を想定)	ステアリングミラー、黒体含む
衛星軌道	・太陽同期軌道 ・衛星軌道高度: 500km	

NASA より無償で提供されている「MASTER」画像の原画をもとに画像シミュレーションを実施した。シミュレーション結果から、仕様策定の妥当性を確認した。

図 2-1 に一例として Phoenix(砂漠/市街地)の画像を用いてシミュレーションを行った結果を示す。単一バンドでは GSD30m、マルチバンドでは GSD50m とし RGB の擬似カラーで表示している。

表 2-3 画像シミュレーション原画(MASTER 画像)

シーン	撮像日	元画像 GSD	バンド
Mt. St. Helens (火山)	2004/10/12	10. 6m	単一バンド/マルチバンド
Witch fire (火事)	2008/4/16	7. 7m	単一バンド/マルチバンド
Station fire (火事)	2011/11/9	15. 8m	単一バンド/マルチバンド
Phoenix (砂漠/市街地)	2011/7/13	6. 8m	単一バンド/マルチバンド
Delano (畑/市街地)	2011/6/10	10. 2m	単一バンド/マルチバンド



(a) 単一バンド模擬画像 (GSD30m)

(b) マルチバンド (RGB 合成) 模擬画像 (GSD50m)

図 2-1 Phoenix(砂漠/市街地)。単一バンド及びマルチバンドの模擬画像

第3章 小型衛星の調査・検討

非冷却型赤外放射計の搭載を前提に、現在開発中あるいは将来開発可能な国産小型衛星に関して衛星バス等について昨年引き続き調査・検討した。最初に、国内外における光学式センサー搭載の小型衛星の開発動向や技術動向の調査を行った。特に、高分解能化の観点から GSD 100m 以下、小型化の観点から 500kg 未満、2006 年以降の打上げの衛星に絞って追加調査を実施した。22 衛星ほどあり、その平均的な仕様は以下の通りである。

衛星質量	平均 230kg (200kg 以下、400kg 以上の 2 極化)
衛星寿命	平均 4.3 年 (設計 3~5 年、軌道上 5~7 年目標が多い)
分解能 (パンクロマチック/刈り幅)	3m/22.2km
分解能 (マルチスペクトル/刈り幅)	14.3m/168.1km

200kg 未満の衛星が 9機/22 機、200kg 以上 400kg 未満が 3 機、400kg 以上 500kg 未満が 10 機と、小型衛星にも 2 極化の傾向が見られる。2013 年 11 月に打ち上げられた SkySat-1 は、民間の資金で運営されており、質量 100kg、衛星直下での解像度 1m 以下の小型衛星コンステレーション(最終的に 20 機以上)を目指している。高解像度の画像だけでなく、動画も取得可能である。また、近年米国を中心に Hosted Payload と呼ばれる概念のもとに、商用静止通信衛星や商用周回通信衛星に、政府系の実証機器を搭載することが検討されている。上記調査結果をもとに、非冷却型赤外放射計を搭載したコンフィギュレーションについて検討し、衛星の諸元素を

表 3-1 のようにまとめた。

表 3-1 衛星バス要求諸元

	項目	内容	備考
ミッション要求	搭載性	ミッション機器を搭載できること	
	消費電力	120W (ヒータ含む)	スラスタと同時使用しない
	打上げ性	小型ロケットによるマルチロンチ可能	
	姿勢安定度	$\pm 0.05 \text{deg/sec}$	
バス要求	発生電力	400W程度	
	サイズ	$\phi 1.9 \text{m} \times 1.2 \text{m}$ 以内 (打上げコンフィギュレーション時)	イプシロンロケットによるデュアルロンチを想定
	打上げ時質量	200kg~400kg程度	推葉含む
	通信系	Sバンド・Xバンド	
	通信レート	800Mbps(X-band)想定	使用可能地上局数および使用目的による
	データ記憶容量	Variable(120GB想定)	使用可能地上局数および運用形態による
	設計寿命	7年	

搭載を想定する非冷却型赤外線放射計のサイズおよび消費電力を考慮すると、衛星内部搭載型の設計の方が小型になりそうであることと、イプシロンロケットでのデュアルロンチ、Dnepr や Rockot での 3 機以上のマルチロンチを考慮すると、以下のようなサイズでの製造が可能である。

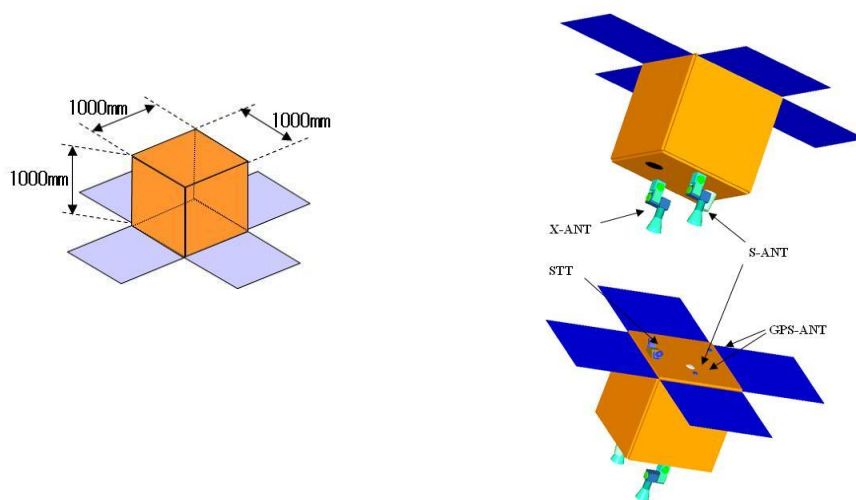


図 3-1 非冷却型赤外線放射計を搭載した小型衛星コンフィギュレーション例

第4章 まとめ

本調査・研究では、周回軌道から高分解能の熱赤外面像を継続取得する小型衛星搭載非冷却型赤外放射計に関し、国内外における非冷却赤外線光検出器およびそれを用いた赤外放射計の最新の開発動向や技術動向の調査を行うとともに、システム性能のパラメータスタディを中心とした概略方式の検討、概略仕様を実現するために必要な技術開発項目の検討を実施し、実現可能

性や開発課題を明らかにした。

技術動向調査の結果や撮像方式の検討結果を基に、単一バンドとしたときとマルチバンドとしたときの諸元案を検討した。単一バンドについては 2000x1000 画素の検出器を用いること及び軌道高度を 500km 程度とすることにより、GSD30m 級の高分解能、広視野角を実現できる諸元を提案した。マルチバンドは、640x480 画素検出器を用い光学系を観測波長帯ごとに独立させた諸元案、及び単一光学系とし、光検出器の前方に設置された波長域が異なるフィルタによりマルチバンドを構成する方式で、GSD50m 級の諸元案を提案した。また、単一バンド(GSD30m)とマルチバンド 2 バンド(GSD60m)を組み合わせた方式のセンサについても諸元案を提案した。

技術動向調査結果から、昨年度提案放射計仕様で問題ないと判断し、画像シミュレーションモデルを作成し、NASA が無償提供している「MASTER」画像を原画とした、画像シミュレーション結果を提示し、仕様の妥当性を確認した。

また、提案した非冷却型赤外放射計を搭載するための小型衛星の動向調査結果及び放射計搭載時の衛星コンフィギュレーションについて検討した。

熱赤外面像センサの早期実現のためには、本調査研究で実施した各種パラメータスタディによる概略方式や開発課題の検討を踏まえ、より具体的かつ詳細なセンサの実現性に関わるフェジビリティスタディを実施していく必要がある。また、センサの具体的な実現性検討に当たっては、搭載を想定する衛星の検討と連携しつつ進めていくことが望ましい。

非 売 品

禁無断転載

平成 2 5 年度 小型衛星搭載非冷却赤外放射計に関する調査研究(その 2)報告書 要約

発 行 平成 2 6 年 3 月

発行者 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

〒105-0011

東京都港区芝公園三丁目 5 番 8 号

電 話 0 3 - 6 8 0 9 - 1 4 1 0 (代表)