

無人航空機と連携したモニタリング衛星

防衛大学校 理工学研究科 航空宇宙工学専攻
修士課程1年 坂本諒太郎 麻生篤
学部4年 宮野裕貴 伊藤駿 柴原健人

1 序論

(1) ミッションの目的

日本周辺の空域・海域において衛星に搭載した合成開口レーダー (SAR) と超高感度カメラ、無人航空機に搭載したフェイズドアレイレーダーと超高感度カメラを用いて航空機、船舶をモニタリングする。モニタリングすることで、そのエリアの平和的利用及び航空機、船舶の接触事故等の防止を図るとともに、事故発生時における早期原因究明の資とする。

(2) ミッションの背景

島国である日本は、四方を海に囲まれ、海域・空域が大きな役目を果たしている。その海域・空域では、近年の輸送需要の増加、多様化する航空機及び、日本周辺の国際情勢の緊迫化により、航空機や船舶等の異常接近や接触事故といった不安要素が増えている。そのため、日本周辺の海域・空域をモニタリングする必要があると考えられる。提案するミッションの背景の概要を以下の i ~ iii にまとめる。

i 空域密度の増加

(i) 航空量の増加

人員の移動手段や貨物の輸送手段として航空輸送の低コスト化が進み、需要も増加している。

(ii) 航空機の多様化

小型機、ステルス機、飛行艇及び超音速

機等の様々な高度を飛行する航空機が開発されている。

ii レーダーによる監視・管制の限界

(i) 小型航空機・ステルス機の増加

現在、監視及び管制においてレーダーが主であるが、ステルス機や小型機はレーダーに探知されにくい。

(ii) 機種判別

可視画像ではないため、機種の判別に制限を受ける。

(iii) 低高度、特に海面付近目標の検知

レーダー特性を図 1 に、レーダー方程式 (レーダーの探知距離と高度の関係式) を下記①に、日本に設置されている航空監視レーダー覆域図を図 2 に示す¹。

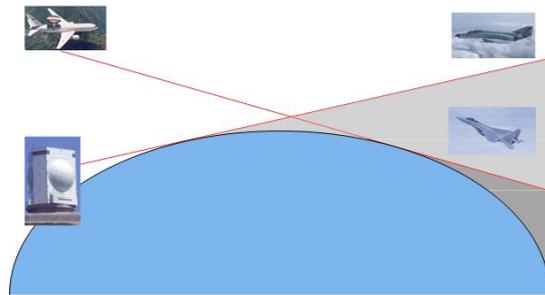


図 1 レーダー特性

$$D = \sqrt{d_1} + \sqrt{d_2} \cdots \cdots \textcircled{1}$$

D : 探知距離 [km]

d_1 : レーダー高度 [m]

d_2 : 探知目標高度 [m]

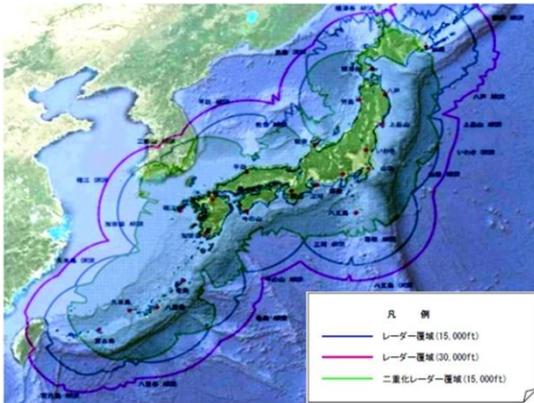


図 2 航空監視レーダー覆域図

図 1, 図 2 及び式①より, レーダーの探知距離はレーダーと探知目標の高度に依存するため, 低空目標の探知距離は短くなる。そのため, 低高度目標においては, 図 2 よりも覆域範囲は狭くなる。さらに, 海面付近の目標においては, 海面クラッタの影響により, レーダーでの捕捉が不安定になる。これを解決するために, 航空機にレーダーを取り付けた早期警戒機が運用されているが, 常時モニタリングするプラットフォームとセンサーは確立されていない。

iii 日本周辺の国際情勢

自衛隊の 25 年度の緊急発進回数を図 3 に, 領空侵犯機飛行経路例を図 4 に示すⁱⁱ。

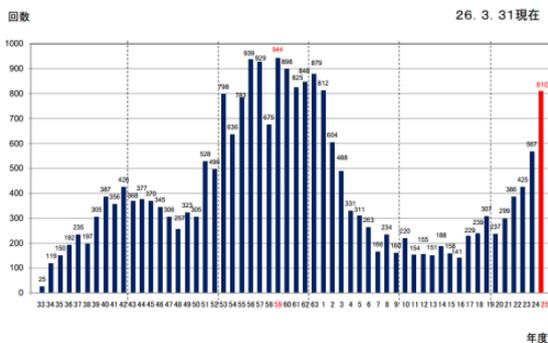


図 3 25 年度の緊急発進回数



図 4 領空侵犯機飛行経路例

図 3, 図 4 より, より緊迫化する日本海側を重点的にモニタリングすることが必要である。

2 本 論

(1) ミッション概要

合成開口レーダー (SAR) と超高感度カメラを搭載した 3 機の衛星と, フェイズドアレイレーダーと超高感度カメラを搭載した 12 機の無人航空機及び通信衛星 1 機を連携することで, 日本海周辺を航行する航空機及び船舶を連続的にモニタリングする。

衛星から広範囲なモニタリングを実施し, 無人航空機によるフェイズドアレイレーダーと照合する。識別不明な目標に対し, 無人航空機の機動性を活かし, 超高感度カメラによるモニタリングを実施する。衛星, 無人航空機から撮影された画像はそれぞれ通信衛星を経由し, 地上基地局へ送信される。図 5 にシステム概要図を示す。

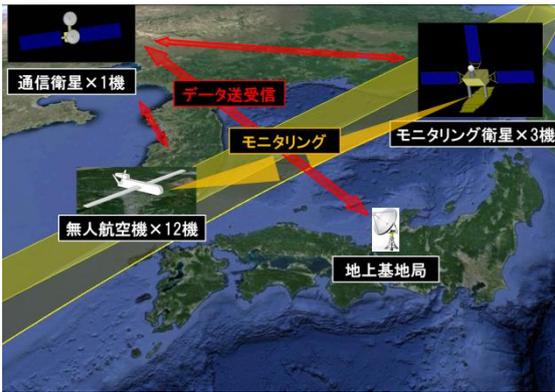


図 5 システム概要図

(2) ミッション要求

本ミッションを遂行するためには、天候に左右されずに長時間運用でき、高分解能であることが要求される。

i 分解能

本ミッションでは、航空機や船舶をモニタリングするため、最小目標を一般的に小型航空機として知られているセスナ社の航空機とする。

小型航空機（セスナ社）を図 6 に、航空機諸元（セスナ社）を表 1 に示すⁱⁱⁱ。



図 6 小型航空機（セスナ社）

表 1 航空機諸元（セスナ社）

全 長 [m]	8.28
全 高 [m]	2.72
全 幅 [m]	11.0

表 1 より、衛星から航空機を発見するためのレーダーによる分解能は、8.0 [m] 以下であれば点として認識できる。よって求める分解能を 8.0 [m] 以下とする。

ii モニタリング範囲

序論でも示したようにレーダーの覆域範囲には限界があり、日本の EEZ、識別圏内でも日本海の沿岸から朝鮮半島及び大陸付近においてはモニタリングできていないことが分かる。よって衛星のモニタリング範囲をこの一帯に設定する。本衛星がこの一帯を通過する際のモニタリング範囲を図 7 に示す。モニタリング範囲は 20 万 [km²] と見積もる。



図 7 モニタリング範囲

iii プラットフォームとセンサーの比較

(i) プラットフォーム

表 2 にプラットフォームの比較を示す。

表 2 プラットフォームの比較

	人工衛星	飛行船	航空機	ヘリコプタ	UAV
天候の影響	○無し	○無し	△有 荒天時不可	△有 荒天時不可	△有 荒天時不可
長時間運用	○不要	○不要	×必要	×必要	○不要
燃料補給	○不要	×必要	×必要	×必要	×必要
カバーエリア	○大	○大	△中	×小	△中
高 度	~ 36000 km	~ 100 km	~ 10 km	~ 2 km	~ 15 km
軌道の融通性	×固定軌道	×定位置	○有	○有	○有

表 2 より、天候に左右されず、長時間、広範囲のモニタリングに適しているのは人工衛星、高々度飛行船、無人航空機 (UAV) の順である。これに現在の開発状況を加味すると、長期間運用可能な高々度飛行船は未だ研究段階であり、運用できるとは言えない。

(ii) センサーの特徴

表 3 に各センサーの特徴を示す。

表 3 センサーの特徴

	カメラ			SAR	フェイズドアレイ レーダー
	光学	超高感度	赤外線		
画像	カラー		グレースケール		
天候による影響	大			小	
夜間撮影	不可能	可能			
目標のRCSの影響 Radar cross-section (レーダ反射断面積)	無し			有り	

表 3 より、センサーは合成開口レーダー、超高感度カメラの他に赤外線カメラ等があるが、今回は天候にも左右されず、夜間にも運用でき、さらには目標の機種や船を識別することができるように合成開口レーダー、超高感度カメラ及びフェイズドアレイレーダーを用いる。

(3) モニタリング衛星

i 衛星諸元

SAR を搭載した衛星として、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」が現在運用されている。本ミッションでは「だいち 2 号」に搭載された SAR と同等の機器を搭載することを考える。だいち 2 号のレーダー諸元を表 4 に示す^{iv}。

表 4 レーダー諸元 (だいち 2 号)

高度 [km]		628	
観測モード	スポット ライト	分解能 [m]	1.0~3.0
		観測幅 [km]	25
	高分解能	分解能 [m]	3.0~10.0
		観測幅 [km]	50 70
	広域観測	分解能 [m]	100
		観測幅 [km]	350 490
観測可能領域 [km] (首振)		2640	

だいち 2 号のレーダー諸元を参考にし、分解能を 8.0 [m] 以下で広範囲を観察することができ、日本海周辺の上空を定期的に通過するための衛星イメージを図 8、衛星諸元を表 5 に示す。

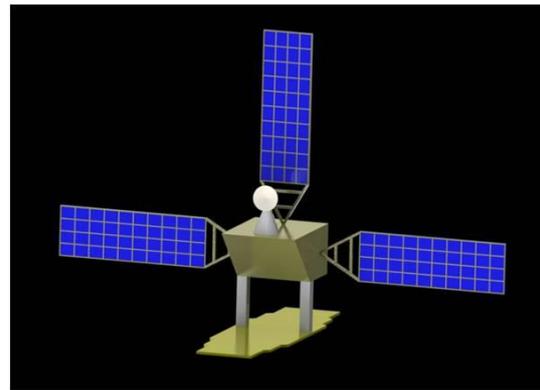


図 8 衛星イメージ

表 5 衛星諸元

姿勢制御方式		バイアス・モーメンタム	
軌道諸元	周期 [sec]	7198.9	
	遠地点 [km]	1680	
	近地点 [km]		
	離心率	0.0	
	軌道傾斜角 [deg]	50.0	
搭載センサー		合成開口レーダー 超高感度カメラ	
分解能 (レーダー) [m]		8.0	
観測幅 [km]		133	
観測可能領域 [km] (首振)		7040	

ii 衛星機数

本ミッション要求に応じるため、数多くの人工衛星を配置したいが、予算を考慮すると限界がある。衛星の機数が増えれば、それだけ大きな予算が必要になる。予算を考慮に入れ、3 機以下が現状では妥当であると考え、本ミッションは 3 機で検討する。

iii 衛星軌道

図 9 に軌道イメージ，図 10 にグラウンドトラック，図 11 にモニタリング範囲，図 12 にモニタリング周期を示す。尚，軌道計算の開始及び終了日時は 2014/9/3 03:00 ~ 2014/9/4 03:00 である。凡例として，モニタリング衛星 1, 2, 3 に関する軌道，周期は順に水色，黄色，赤色で示した。

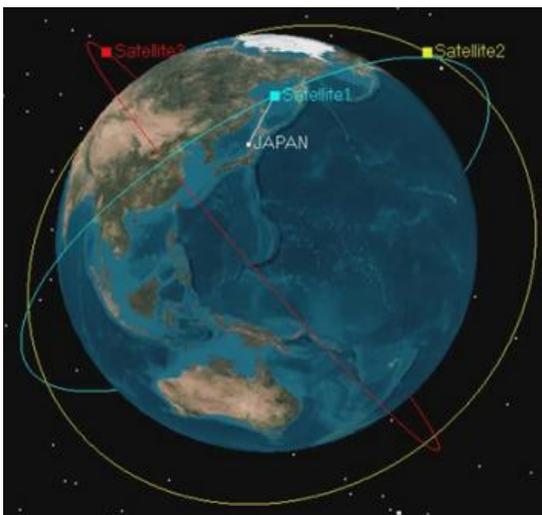


図 9 軌道イメージ

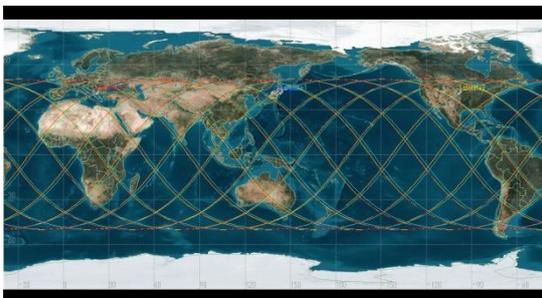


図 10 グラウンドトラック

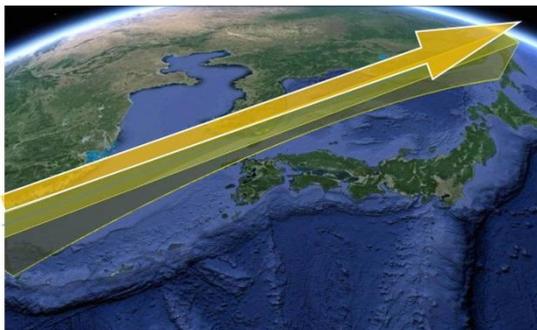


図 11 モニタリング範囲

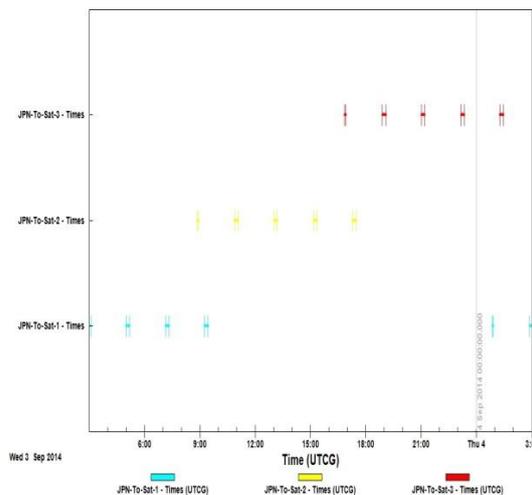


図 12 モニタリング周期

図 12 より，本衛星 1 機あたり 1 日に計 5 回で 1 時間弱程度のモニタリングになってしまう。そのため，プラットフォームの比較より，人工衛星の次に本ミッションに適している無人航空機と連携し，モニタリングすることで，その弱点を補う。

(4) 無人航空機

i 無人航空機諸元

本ミッションに利用する無人航空機イメージを図 13 に，無人航空機諸元を表 6 に示す。

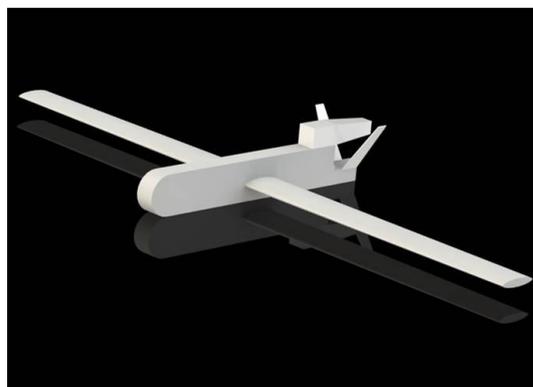


図 13 無人航空機イメージ

表 6 無人航空機諸元

翼幅 [m]	20.0	
最大離陸重量 [t]	8.2	
ペイロード [kg]	1588	
巡航高度 [km]	25.8 [dB/K]	
巡航速度 [km/h]	97.0 [dBHz]	
運航可能時間 [h]	93.9 [dBHz]	
搭載センサー	超高感度カメラ フェイズドアレイレーダー	
分解能 [m] (カメラ)	3.09 [dB]	
撮影可能範囲	[km ²]	231
	[km ² /min]	192
	[km ² /h]	11,633

本ミッションでは、General Atomics Aeronautical Systems の無人航空機を参考にしている^v。

ii 無人航空機数

先にも示したようにモニタリング範囲は 20 万 [km²] である。12 機のモニタリング範囲を図 14, 各無人航空機の運用イメージを図 15 に示す。

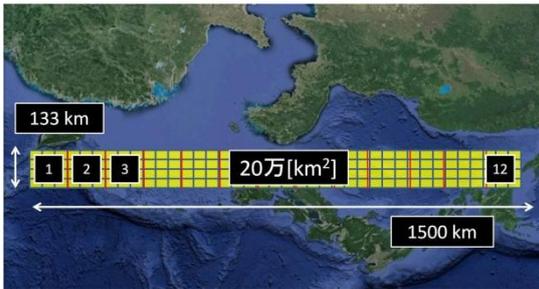


図 14 12 機のモニタリング範囲

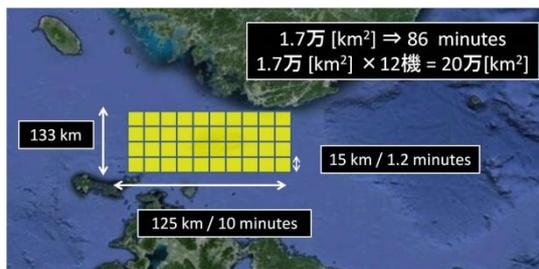


図 15 各無人航空機の運用イメージ

図 14 に示すように、12 機の無人航空機はそれぞれ割り当てられた範囲をモニタリングする。軌道計算によるとモニタリング衛星は 24 時間に 15 回のモニタリングをすることができる。96 分に 1 度 10 分間のモニタリングを行うため、間隔は約 86 分間である。その間、レーダーの弱点を補う超高感度カメラにより無人航空機が全範囲をモニタリングするためには、最低限 12 機の無人航空機が必要だと見積もった。

(5) 回線設計

本ミッションに関わるモニタリング衛星、通信衛星及び無人航空機の回線設計を表 7～表 9 に示す。無人航空機による撮影画像のビットレートは 1 枚当たり 324 万画素を 1 秒で転送、77.8 [MBPS] を想定しており、通信衛星から地上局への伝送は 12 機分を想定している。モニタリング衛星による撮影画像 (SAR) のビットレートは 4.16 [MBPS] とした。また、データの圧縮は想定していない。

表 7 回線設計 (通信衛星ー地上局)

通信衛星 (静止軌道)	
送信周波数	10 [GHz]
送信出力電圧	500 [W]
送信 EIRP	72.9 [dBW]
地上局 (福井工業大学 ^{vi})	
受信 G/T	34.4 [dB/k]
受信 C/N ₀	126 [dBHz]
要求 C/N ₀	104.7 [dBHz]
ビットレート	89.7 [dBHz]
	933.6 [MBPS]
マージン	21.3 [dB]

表 8 回線設計 (通信衛星－無人航空機)

無人航空機	
送信周波数	12.25 [GHz]
送信出力電圧	900 [W]
送信 EIRP	52.2 [dBW]
通信衛星 (静止軌道)	
受信 G/T	25.8 [dB/K]
受信 C/N ₀	97.0 [dBHz]
要求 C/N ₀	93.9 [dBHz]
ビットレート	78.9 [dBHz]
	77.8 [MBPS]
マージン	3.09 [dB]

表 9 回線設計 (モニタリング衛星－通信衛星)

モニタリング衛星	
送信周波数	10 [GHz]
送信出力電圧	10 [W]
送信 EIRP	55.9 [dBW]
通信衛星	
受信 G/T	24 [dB/k]
受信 C/N ₀	101.1 [dBHz]
要求 C/N ₀	81.2 [dBHz]
ビットレート	66.2 [dBHz]
	4.16 [MBPS]
マージン	19.9 [dB]

3 結 論

本ミッションでは3つの衛星を配置することにより定期的に日本海付近 (レーダーが届かない範囲) を通過し空域及び海域の状況をモニタリングすることができた。また、分解能が8.0 [m]、分解能の観測幅を133 [km]となる高度及び軌道を設定することにより小型の航空機及び船舶を対象とし、

より広範囲な空間の把握を可能にした。

加えて、本衛星と無人航空機の連携のよ
うに人工衛星と連携させて運用していく
ことが今後も必要とされると予想され
るとともに、新しい分野の運用の資と
なると考えている。

4 参考文献

ⁱ 航空自衛隊-主要装備

<http://www.mod.go.jp/asdf/equipment/>
(2014/07/03 アクセス)

ⁱⁱ 平成25年度の緊急発進実施状況について

http://www.mod.go.jp/js/Press/press2014/press_pdf/p20140409.pdf

(2014/07/03 アクセス)

ⁱⁱⁱ CESSNA SKYHAWK

<http://www.cessna.com/en/single-engine/skyhawk>

(2014/07/03 アクセス)

^{iv} 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」

<http://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/04/sat29.pdf>

(2014/07/03 アクセス)

^v General Atomics Aeronautical Systems

<http://www.ga-asi.com/products/aircraft/index.php>

(2014/10/29 アクセス)

^{vi} Xバンド地上局福井工業大学

<http://www.fukui-ut.ac.jp/ut/ele/GSNworkshop-UNISEC2011.pdf>

(2014/10/29 アクセス)