

超小型 SAR 衛星の研究

－50kg 級 SAR 衛星のフィージビリティスタディ及び剛体パネルの展開法－

宮崎研究室

磯村 哲矢, 中島 弘貴

1. 緒言

合成開口レーダ（以下、SAR）は人工衛星や航空機等の移動プラットフォームに搭載され、高分解能化された2次元電波画像を得ることのできるレーダである。光より波長の長いマイクロ波を使用しているため、昼夜、天候の別なく地表を観測できるのが SAR の最大の利点である。この利点により環境観測、大規模災害観測などグローバルな地球観測に利用され今後は植生観測や土地利用・開発管理など、様々な分野で利用が期待されており、需要が非常に高い衛星である。

人工衛星 ALOS-2の形状や搭載パーツについて

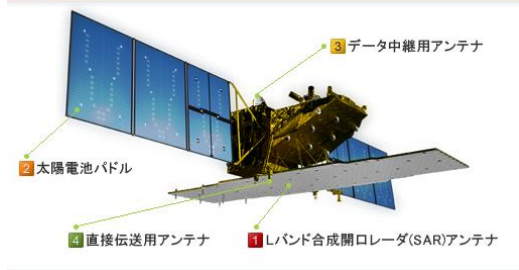


Fig.1 ALOS-2 の形状と搭載パーツ^[1]

しかし、SAR を搭載した衛星は、大型衛星が多く、コストや開発期間が長いことが課題の一つである。この課題を解決するために我々の研究室では SAR アンテナに展開パネルを適用した超小型 SAR 衛星を研究している。そこで、本研究では超小型衛星で SAR を実現するための 50kg 級 SAR 衛星のフィージビリティスタディとパネルの形状精度保証法について述べる。

2. 50kg 級 SAR 衛星のフィージビリティスタディ

2.1. 背景と目的

先に述べたように SAR 衛星は大型衛星が多く、50kg 級で SAR 衛星を実現した例はない。

Table.1 各国の SAR 衛星

	国	重量[kg]	観測周波数帯	最高分解能[m]
ALOS/PALSAR	日	4000	Lバンド	10
RADARSAT-2	加	2200	Cバンド	3
TerraSAR-X	独	1200	Xバンド	1
Cosmo-Skymed	伊	1700	Xバンド	1
WiSAR	加	853	Cバンド	3
ALOS-2	日	2000	Lバンド	1

そこで、50kg 級 SAR 衛星を開発するには、

- ・ 形状精度・形状安定度の高い展開パネル
- ・ 商用化に対応できる分解能・観測幅
- ・ SAR 画像を送信するための通信及び圧縮方法
- ・ マイクロ波放射や姿勢制御、通信のための電力
- ・ 高精度な姿勢マヌーバ

などを検討する必要がある。そこで本研究では、これらに必要なスペックや要求を検討し実際に 50kg 級 SAR 衛星を実現できるか検討する。

2.2. フィージビリティスタディ

2.2.1. アンテナパネルの平面精度

アンテナパネルサイズは 50×50[cm]のパネルを 8 枚展開し、4.0×0.5[m]のアンテナを検討している。ここで、一般的に形状精度は使用する電波の波長の 10 分の 1 から 20 分の 1 程度が必要とされている。以下に各周波数帯で求められるヒンジの精度を示す。

Table.2 各周波数帯でのヒンジの要求精度

名称	波長[mm]	平面精度 [mm]	ヒンジ精度[deg.]	
			全体	1個当たり
Lバンド	600~200	60~20	0.859~0.286	0.123~0.041
Cバンド	75~37.5	7.5~3.75	0.107~0.054	0.015~0.008
Xバンド	37.5~25	3.75~2.5	0.054~0.036	0.008~0.005

この表から分かるとおり、機構にはとても高精度なヒンジが要求される。そこで図のようにヒンジロッドを組み合わせたパネルを検討し、今後解析をする予定である。

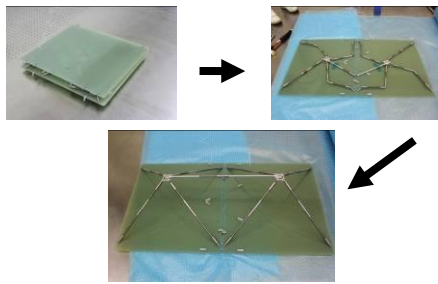


Fig.2 ヒンジロッドを組み合わせた SAR アンテナ

2.2.2. 分解能, 観測幅の算出

ALOS と同じ Lバンドで先に示したアンテナサイズを用いて商用化に対応できるように, 分解能 10[m] 以下を目標に分解能, 観測幅を算出した.

Table.3 分解能と観測幅

周波数[GHz]	1.27	オフナディア角φ [deg]	35
アンテナ実開口長d[m]	4	高度h[km]	650
パルス幅[sec]	6.00E-05	チャープ率	-4.30E+11
分解能		観測幅	
スラントレンジ方向[m]	5.81	観測幅Rmax[km]	39.8
グラウンドレンジ方向[m]		実合成開口長[km]	393.8
30[deg]	11.63	1シーン面積[km ²]	15688
40[deg]	9.04		
50[deg]	7.59		

表から分かる通り, 分解能, 観測幅共に十分商用化できる値であることが分かった.

2.2.3. 通信

SAR の画像データは容量が非常に大きく, いかに画像データを迅速にダウンリンクするかが商用化のカギとなる. 本研究ではデータ圧縮について調査し, アクセルスペースの Xバンド高速通信機の値を用いて回線設計を行った. なお, データ圧縮については参考文献[2]よりオンボードプロセッサを搭載し, さらに圧縮をかけることによって 25~70MB 程度まで圧縮可能であることが分かった.

Table.4 回線設計の例

項目	値	単位
送信局	周波数	8200 [MHz]
受信局	アンテナ	パラボラ
	アンテナ直径	20 [m]
ビットレート	20	[Mbps]
回線マージン	3.73	[dB]
SAR画像1枚のデータ容量	70.36	[MB]
SAR画像1枚の送信時間	3.518	[sec]

結果, 画像 1 枚の送信時間は 4 秒以下となり, 十分

商用化可能なレベルである.

2.2.4. 電源

SAR ではマイクロ波を放射して画像を取得する為, ミッション時に非常に電力を消費する. しかし, 各衛星で消費電力に差があり 50kg 級での消費電力を推定するのは困難である. そこで, バス部の消費電力を 60W, ミッション時の増加電力を TerraSAR の値を参考に 800W と設定し太陽電池パネルの必要面積を計算した.

Table.5 太陽電池パネルの計算

セル効率[%]	26.5	ミッション時間[h]	9
食時消費電力[W]	60	アレイ発電量[W]	732
日照時電力[W]	60	全セル面積[m ²]	2.05
ミッション時増加電力[W]	800		

表の設定値で算出すると, 必要な面積は約 2[m²] であることが分かった. アンテナも展開する必要があるので収納方法が今後の課題であると考え.

2.2.5. 姿勢

姿勢制御については(株)ウェルリサーチと共同研究し, シミュレーションによる姿勢制御の性能見積もりを行った.

Table.6 RADARSAT の値とシミュレーション値

衛星	項目	仕様機器	精度
RADARSAT	姿勢決定	太陽センサ, 3軸磁力計 3軸ジャイロ, スタートラッカ	±0.02°
	姿勢制御	RW, 磁気トルカ	±0.05°
シミュレーション	姿勢決定	太陽センサ, 3軸磁力計, GPS 3軸ジャイロ, スタートラッカ	±0.015°
	姿勢制御	RW, 磁気トルカ	±0.025°

表から分かる通り, 姿勢制御については十分実現できるレベルであることが分かった.

2.3. 結論

以上より, 構造・分解能・通信・電源・姿勢について 50kg 級で SAR 衛星を実現する可能性を示すことができた. 以下に今回検討したスペックを示す.

Table.7 検討したスペック

軌道高度	650	[km]	最高分解能	7.6×2	[m]
重量	50	[kg]	太陽電池セル面積	2.05	[m ²]
衛星サイズ	50×50×50	[cm]	画像1枚の送信時間	3.52	[sec]
アンテナサイズ	4×0.5	[m]			

表のように商用化できるレベルの実現可能性が証明できた. しかし, 今後の課題としていかにパネルを

収納するか等の課題を解決しなければならない。

3. 剛体パネルの展開法

3.1. 序論

従来, SAR 用アンテナを含め形状精度が要求される展開パネル構造物では, 剛体展開とラッチ固定を組み合わせた方式が採用されてきた。ただし, 一般に, パネルの剛体展開により面を構成することは容易ではなく, これまでは観音開きや Z 折りなど単純な展開方式しか採用されていない。実際, これまで, パネルの展開方式を考えるに当たって, 様々な折り紙の理論が検討されてきた。しかし, 折り紙の多くは紙の弾性変形を利用したものが多く, 構造物にエネルギーを溜めたくない, 剛性を保ちたいという理由から利用できずにいた。しかし, 折り紙の中にも, 弾性変形を利用せずに展開が出来る方法が考えられている。その一つにミウラ折りがある。

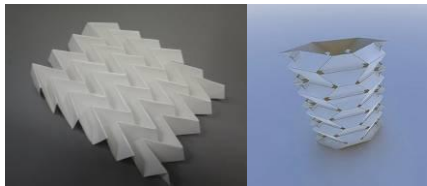


Fig.3. ミウラ折り(左)と三次元ミウラ折り(右)

しかし, ミウラ折りのような複雑な展開方式をパネルで実現しようとする, パネル同士のヒンジの取り付けが問題となる。また, ヒンジのガタがパネルの剛展開にどのような影響を及ぼすのかを考えていかなければならない。

これらの問題を解決することで, これまで実現できずにいた複雑な展開方式も実現できるようになると考えている。

3.2. 目的

- ・ミウラ折りを利用した剛体展開可能な構造物の製作及び, それに通じて一般的な剛体展開可能な構造物に要求されるパネルやヒンジの形状の特徴を抽出する。
- ・拘束条件の定式化法及び展開性評価法を提案する。

3.3. 設計・製作

剛体展開パネルをつくるには, ヒンジ, ナット, ネジ頭, パネル同士が収納時に干渉するという問題

を考慮した設計を行う必要がある。そこで, 三次元ミウラ折りを元に 3DCAD を用いて, 合計三パターンのモデルの設計を行いパネルの製作を行った。一つ目は, パネルにヒンジをそのまま取り付けモデルを製作した。



Fig.4. モデル 1 の製作品(左)ヒンジ部の干渉(右)

ここで, ヒンジを固定するためのナット, ネジがパネルを畳んだ時に干渉してしまい折畳めなくなった。そのため二つ目は, ヒンジの取り付け部に溝をつけて干渉しないモデルを製作した。

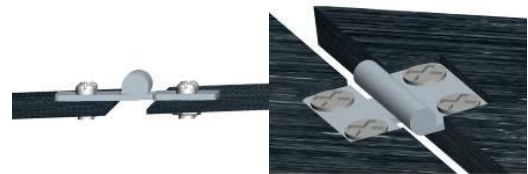


Fig.5. ヒンジの取付け(左)と干渉しない構造(右)

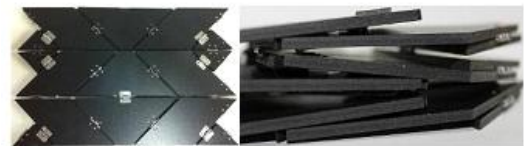


Fig.6. モデル 2 の製作品(左)とパネルの干渉(右)

モデル 2 でヒンジ部の干渉は無くなったが, ヒンジの間に何枚ものパネルを挟み込む構造になっている箇所があるため, 完全に収納することができないことがわかった。そこで三つ目は, パネルの厚みを底上げすることで折畳めるようになる部分は底上げし, それでも折畳むことができない部分は拘束を外したモデルを製作した。この結果, 剛体展開可能な構造物を製作することが出来, 改良するにつれて収納性が改善された。また, モデルの寸法は製作性を考慮して適宜変更した。



Fig.7. モデル 2 パネル(左)底上げしたパネル(右)

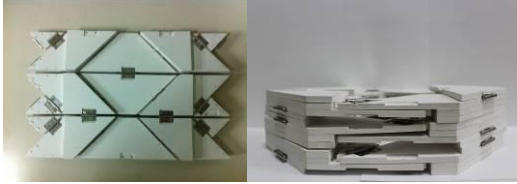


Fig.8. モデル 3 の展開時(左)と収納時(右)

Table 8. モデル 1,2,3 の諸元

パネルの諸元			
種類	モデル 1	モデル 2	モデル 3
材質	アクリル	低反発塩ビ板	低反発塩ビ板
厚さ[mm]	3	3	5
全縦[mm]	316	96	145
全横[mm]	926	188	363
収納性	×	△	○

3.4. 拘束条件の定式化および展開性評価法

前節でパネルの厚みの影響で既存のヒンジでは、拘束できない箇所が複数存在した。そのため、展開が力学的に安定して行われているか評価していくことにした。以下に展開に関する拘束条件式を示す。

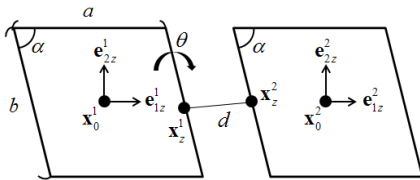


Fig.9. 剛体の回転運動

Table 9. 各パラメータの定義

初期値			
物体座標	x_0^1, x_0^2	正規直交基底行列	R_0^1, R_0^2
θ 回転時			
物体座標	x^1, x^2	正規直交基底行列	R^1, R^2
定数			
$x_0^1 \rightarrow x^1, x_0^2 \rightarrow x^2$ のベクトル			y^1, y^2
R^1, R^2 を表す回転ベクトル			α^1, α^2
ヒンジのベクトル			d^1, d^2
未知数			
物体座標	x^1, x^2	回転角(変数)	Θ^1, Θ^2
並進ガタ	δ^1, δ^2	回転ガタ	Φ^1, Φ^2
R^1, R^2 を表す回転ベクトル		β^1, β^2	

拘束条件式

$$R^1 = R_0^1 T(\beta^1), R^2 = R_0^2 T(\beta^2) \quad (1)$$

$$x_z^1 = x^1 + R^1 y^1, x_z^2 = x^2 + R^2 y^2 \quad (2)$$

$$R_z^1 = R^1 T(\alpha^1), R_z^2 = R^2 T(\alpha^2) \quad (3)$$

$$f^c = \begin{bmatrix} x^1 + R_z^1 (d^1 + \delta^1) - (x^2 + R_z^2 (d^2 + \delta^2)) \\ R_z^1 T(\Theta^1) T(\Phi^1) - R_z^2 T(\Theta^2) T(\Phi^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)の拘束条件式を上記の未知数で偏微分すると、12行 24列の行列 \mathbf{A} と、12行のベクトル \mathbf{b} が得られる。また、 $f^c = 0$ が $t = t_0$ では成り立っているとする。

$$\mathbf{A} \delta \mathbf{Z} + \mathbf{b} \delta \theta = 0 \quad (5)$$

ここで得られた式のランクを求めることで、展開の安定性を評価することができる。

3.5. 結論

・剛体展開可能な構造物を製作するには、パネル同士を接続するヒンジ部の干渉を防ぐ構造にする必要がある。また、ヒンジ間に複数枚パネルが入り込む箇所では、パネルの厚みを底上げする必要がある。

4. 結言

フイージビリティスタディについては可能性を示すことができたが、開発では姿勢やアンテナ設計等は他機関と共同開発する必要がある。構造に関しては収納方法と高精度に展開できるパネルが重要であり、3.4 節より拘束条件の定式化及び展開性評価をする必要がある。

参考文献

- [1] <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos2/gaiyo.html>
- [2] 財団法人 機械システム振興協会 「合成開口レーダによるリモートセンシングの商用化に向けてのフイージビリティスタディ」
- [3] 茂原正道, 鳥山芳夫 「衛星設計入門」
- [4] 大内和夫 「リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎」
- [5] 旧 NASDA 「衛星間通信回線設計基準」
- [6] 宮崎康行 「ゴッサマーマルチボディダイナミクスの基礎」