

平成 16 年 9 月 30 日  
平成 16 年度東京大学地震研究所共同利用  
干渉 SAR の展開

SARインターフェロメトリ双子衛星システム  
SIDUSS 2002

- every two weeks, then every week -

宇宙航空研究開発機構 宇宙利用推進本部 システム技術開発部  
児 玉 哲 哉  
kodama.tetsuya@jaxa.jp

# SAR インターフェロメトリ双子衛星システム：SIDUSS

## SAR Interferometry Dual Satellite System

- ・地殻変動検出に有力で我が国の伝統である L バンド SAR を搭載
- ・電氣的・機械的に同一の衛星 1 組（2 機）によって構成される

打上げ後は 2 機のフォーメーションフライトにより DEM 作成

地殻変動検出モードでは観測頻度向上のため

個々の衛星は独立した運用

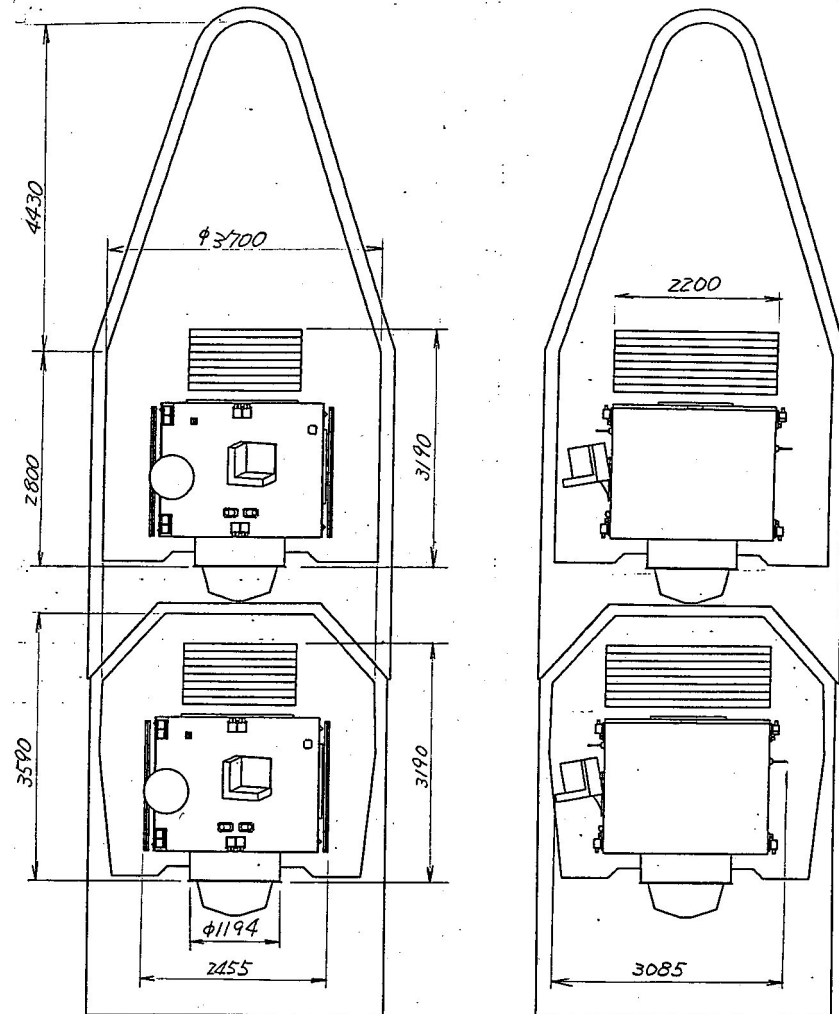
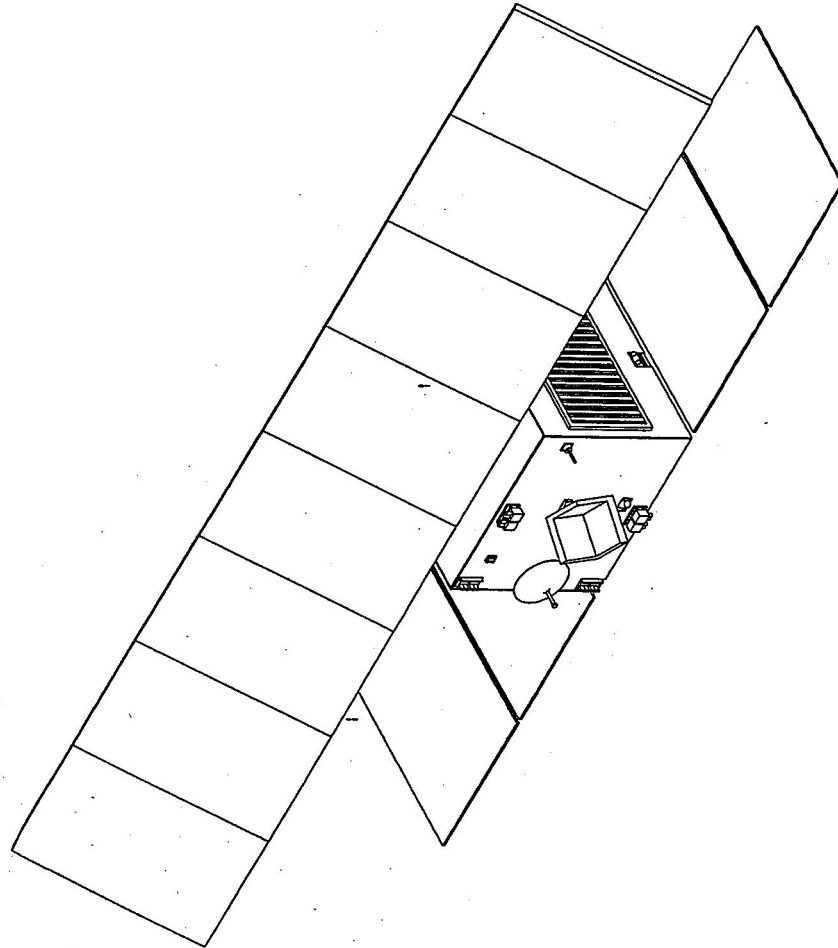
観測頻度を向上させるため

回帰日数を 1 日に軌道変換できる可能性

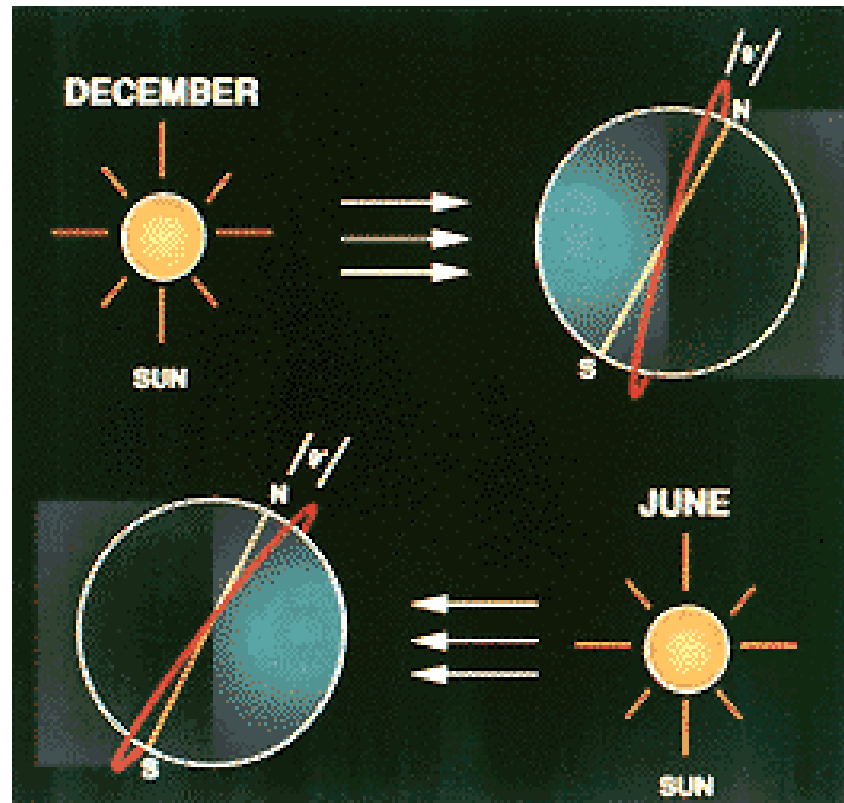
火山噴火前の地殻変動検出：**エクストラ・サクセス！**

地震発生前の地殻変動検出：**スーパー・エクストラ・サクセス！！**

# 検討結果(1996,1998) : デュアルロンチによる2機同時打ち上げ

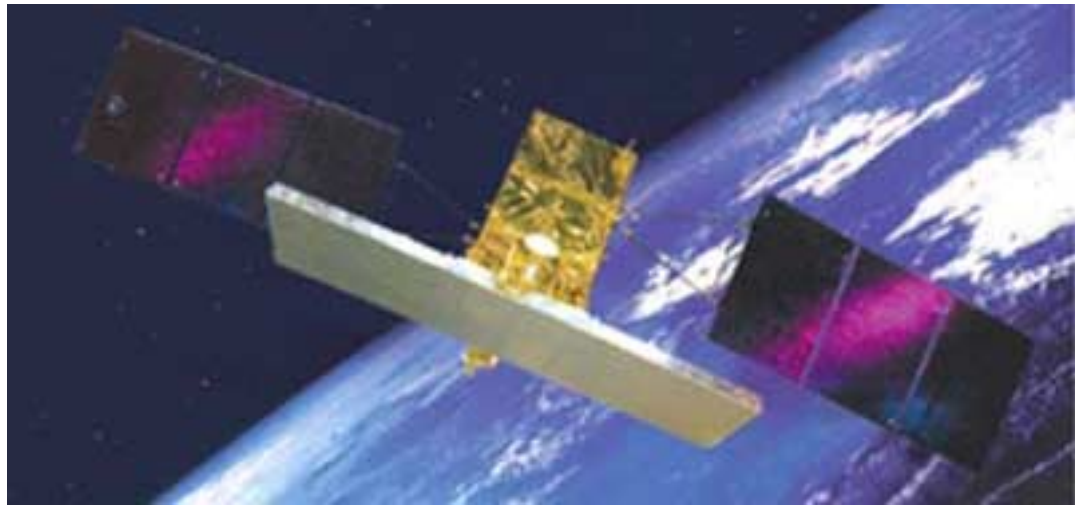
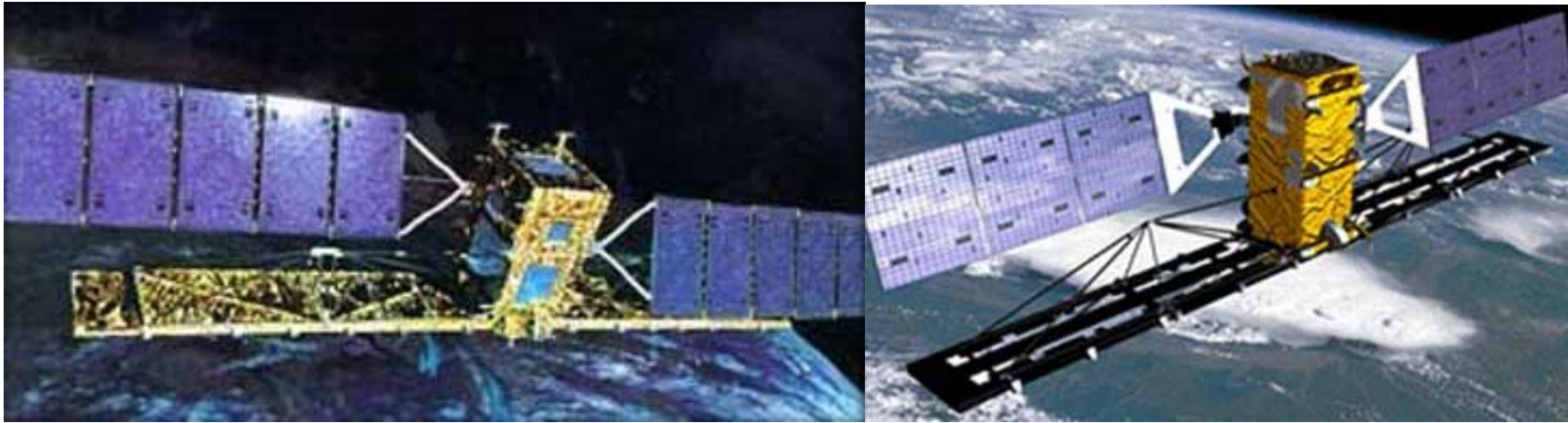


## SAR 単独衛星のメリット = Dawn Dusk Orbit の利用



- 常に日照が得られるため、太陽電池パドルを駆動する必要がない
- 衛星の熱入力面も限られるため、熱設計が容易かつ熱制御も効率的
- 前衛投影面積が小さく、大気による軌道擾乱・高度低下が少ない
- 他の地球観測衛星と運用時間帯が重ならない

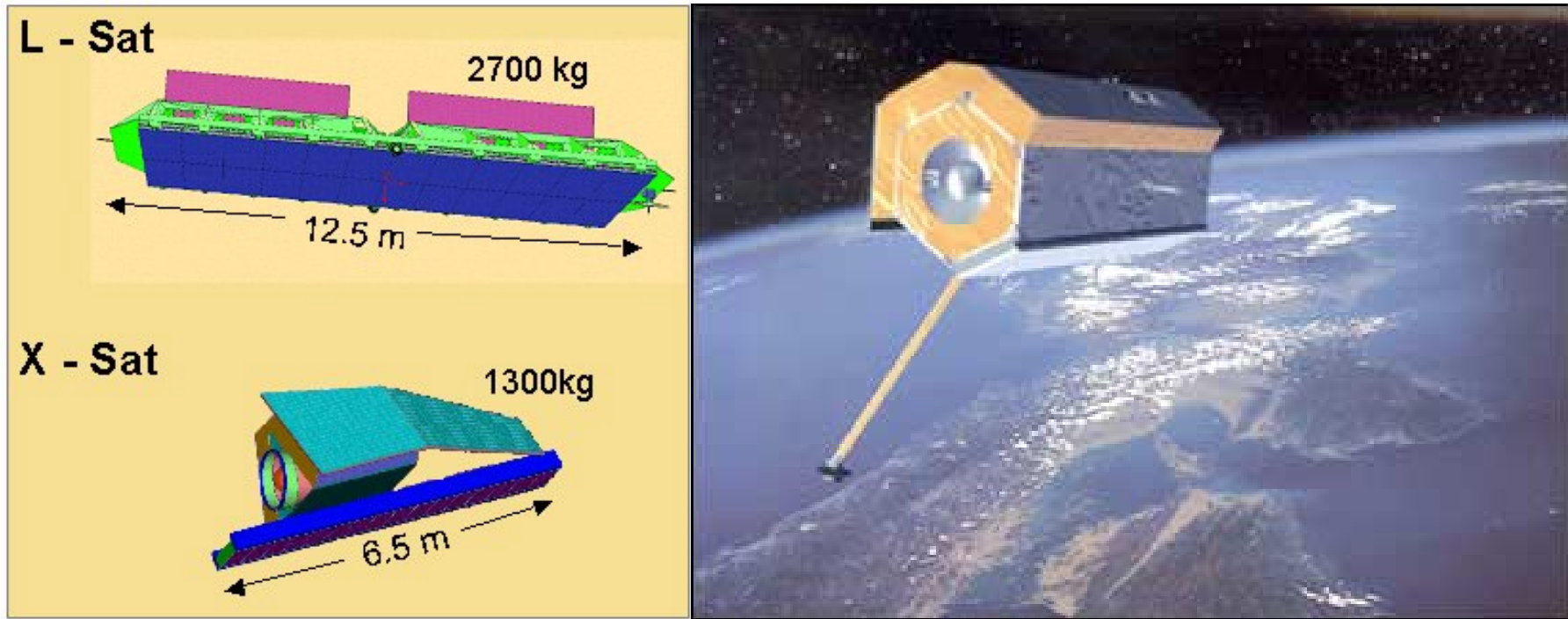
従来の単独 SAR 衛星システム : Radarsat-1/2/3, Cosmo-Skymed



# Simple is Best な衛星システム : TerraSAR-X/L

TerraSAR-L SnapDragon(中央部で折りたたんで(!)打ち上げ)

TerraSAR-X 「ほぼ六角柱」な衛星形状



(c) ESA and Astrium

# GRACE と Multi-Satellite Dispenser



(c) DLR and Eurokot

## SIDUSS 2002：平成 14 年度検討の前提条件と結果

- ・ 搭載 SAR は ALOS/PALSAR
- ・ Dawn Dusk Orbit のメリットと H-IIA ロケットの投入能力を生かす

シングルロンチフェアリングで 2 機同時打ち上げ

+

展開機構は SAR アンテナのみ

十分な重量マージンで極めてシンプルな衛星システムを構築

II

質を落とさずに安く・早くできる！（マージンをリスク管理にあてる）



## 平成 14 年度検討結果

- ・ 既存技術によるフォーメーションフライトのフェージビリティを確認
  - ・ H-IIA シングルロンチフェアリングで 2 機同時打ち上げ構成
  - ・ 十分なマージンを確保し極めてシンプルな衛星システムを提示
  - ・ 質を落とさずに早く・安く製作できる可能性（リスク管理への対処）  
**Faster, Better and Cheaper? No, Then Worse.**  
**Feasible, Breakthrough and Concrete!**
- \* フェーズドアレイなので緊急観測にも対処可能（1日4回？）

## 15 年度の検討課題

観測頻度の向上：観測幅の拡大 or

SAR アンテナ地球面展開：**左右両方観測可能**

オフナディア角が大きくなると効率低下

リスクを負って二兎を追う価値はあるか？

( 定期的定性的観測 or 突発的非定性的観測 )

軌道変換の採用：回帰日数 30 日@平時、1 日@有事

**軌道高度 560km 前後 ( 周回数 15 ) での軌道選定**

低大気抵抗設計・十分な重量マージン故に可能&必要電力削減可

サブサイクルはどうする？ 定期的定性的観測なら 1 日！

## 軌道変換の考え方

- ・ 定常観測：回帰日数 1 ヶ月、2 機で約 2 週間毎の観測
- ・ 緊急観測：2 機とも回帰軌道に軌道変換

ミッション期間中にそのようなイベントは何回想定できるか？

せいぜい 1 ~ 2 回

- ・ 折衷案：1 機のみ回帰軌道に軌道変換、1 機は定常観測軌道のまま

推進変動が運用に与える影響：タンデムフライトなければ無視？

- \* ターゲットを定常入射角におさめるか？ビーム幅内に留めるか？

## 平成 14 年度の観測軌道案：

回帰日数	高度	軌道傾斜角	飛び越し数	軌道間距離@30°	
36 日	711 km	98.23 deg	19	65.7 km	
31 日	704 km	98.20 deg	17	76.2 km	
<u>30 日</u>	<u>698 km</u>	<u>98.18 deg</u>	<u>17</u>	<u>78.6 km</u>	候補

## 拘束条件

- ・ ALOS/PALSAR の軌道高度：700 km 前後（観測幅 70 km）
- ・ 観測漏れなし@緯度 30 度以上

回帰日数 30 日では観測漏れが発生するが、  
必要なら軌道設計もしくは観測幅拡大で対処可能

**ALOS/PALSAR ベースで 15 日毎に地殻変動監視を達成**

平成 15 年度の観測軌道案：回帰軌道高度 550km 前後で回帰日数 28 日

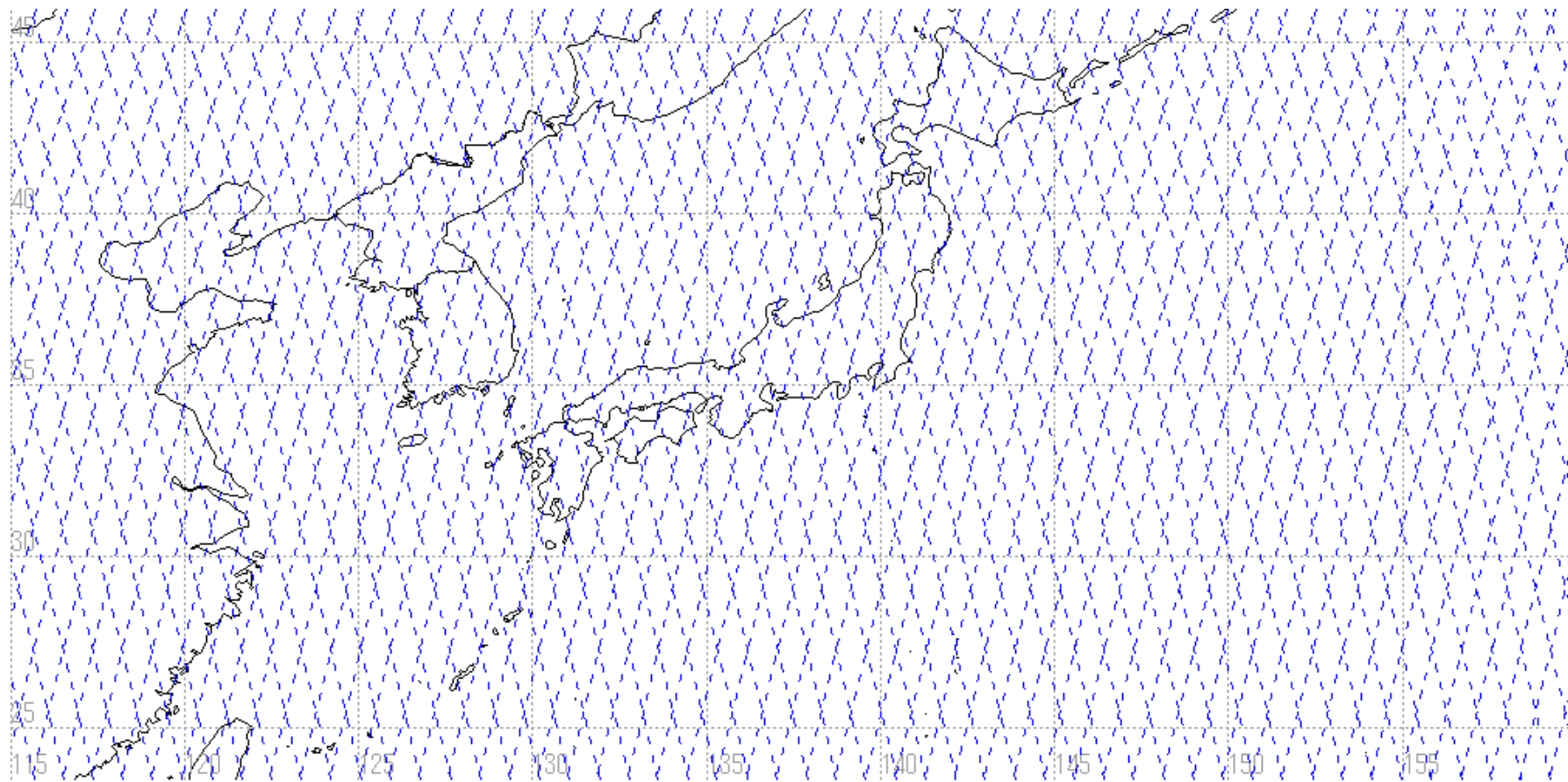
回帰日数	飛び越し数	高度	軌道傾斜角	軌道間距離@30°
28 日	-5	616.73 km	97.853 deg	83.845 km
28 日	-3	594.30 km	97.765 deg	82.465 km
28 日	-1	572.05 km	97.678 deg	82.088 km
1 日	0	560.99 km	97.593 deg	約 2300km
28 日	+1	549.97 km	97.508 deg	81.715 km 候補
28 日	+3	528.07 km	97.508 deg	81.344 km
28 日	+5	506.34 km	97.426 deg	80.976 km

### 拘束条件

- SAR 観測幅 85 km
- 観測漏れなし@緯度 30 度以上

**ALOS/PALSAR ベースで 14 日毎に地殻変動監視を達成**

# 観測領域



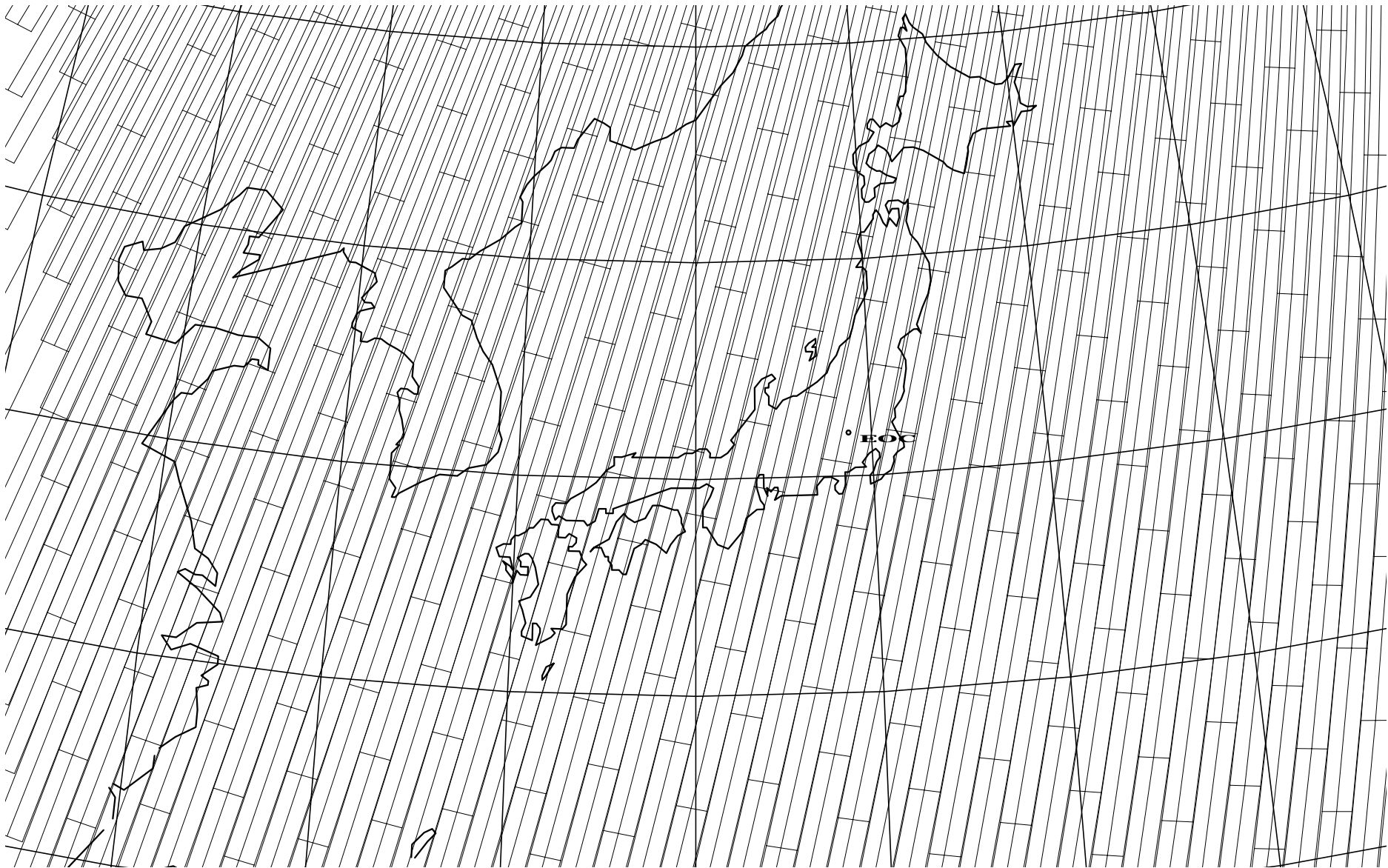


図1 降交パスの swath (28日分)

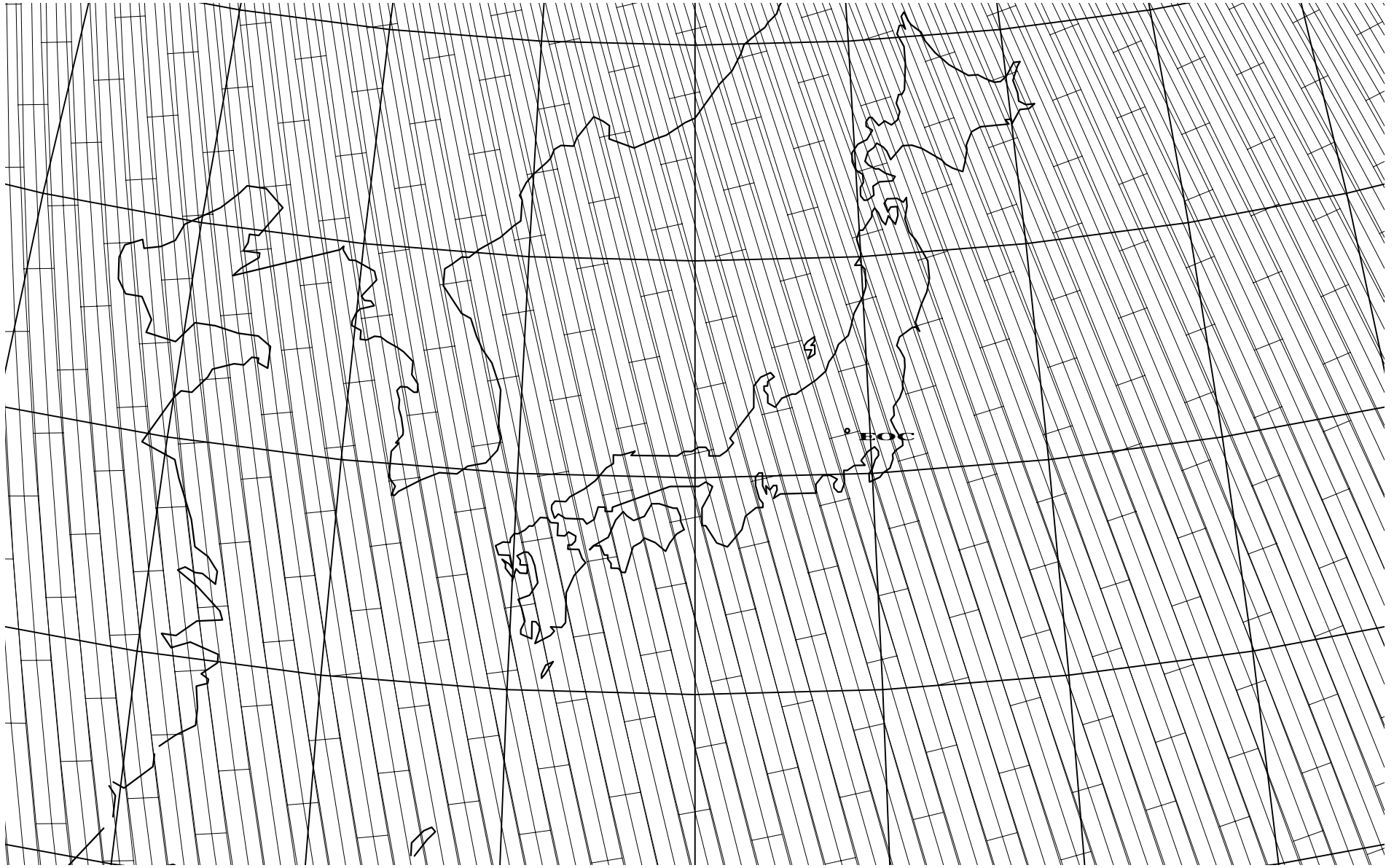
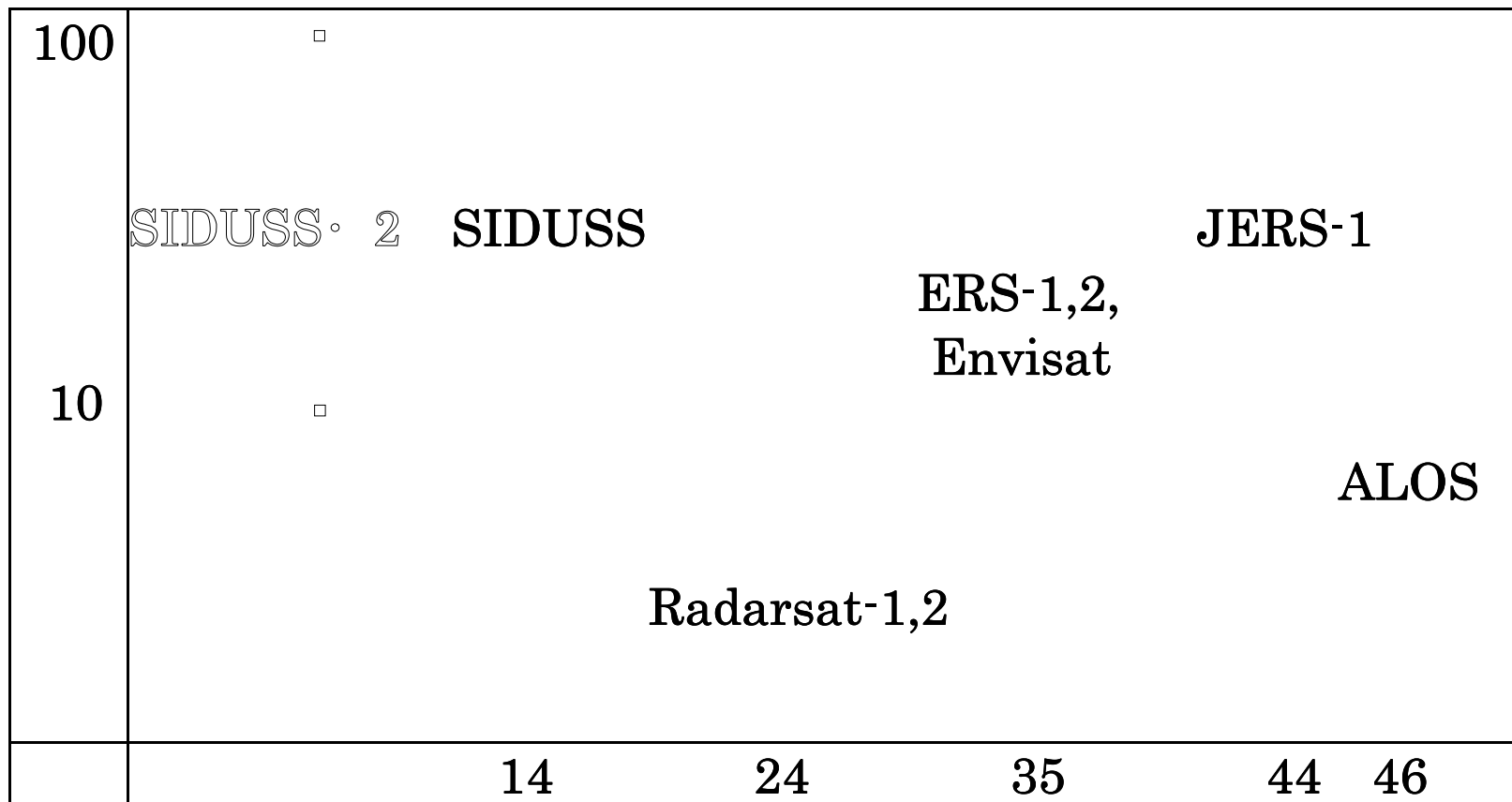


図2 昇交パスの swath (28 日分)



# 参考：SAR 搭載衛星の回帰日数と分解能

分解能[m]



回帰日数[days]

Planned

Operation

Finished

## 緊急観測のためのスラスト解析

拘束条件：2機のどちらか、SARカメラ、イ角可変、降交+昇降パスで1日程度で軌道変更

4N スラストでは噴射時間の上限が軌道周期の15%を大幅に超えないと少ない周回数で軌道変換を実施できないため20N スラストの使用が現実的。

\* 緊急観測要求時間を数日程度に緩和させれば4N スラストの採用もありうる

緊急観測要求に対する設計は、実際の利用要求<sup>\*1</sup>、実際の運用要求<sup>\*2</sup>、代替手段（商用高解像度衛星<sup>\*3</sup>、航空機等<sup>\*4</sup>）及びコストを総合的に判断したうえで実施することが必要である<sup>\*5</sup>。

\*1 CEOS は災害状況把握に1～2mの分解能を推奨（CEOS Disaster Management Support Project PROGRESS REPORT, 1998, 1999）

\*2 内閣府は特定の衛星に限定せずに利用することを想定している（総合科学技術会議第15回宇宙開発利用専門調査会、平成15年11月27日）

\*3 最近の例ではGlobalsecurity.orgが、2004年4月22日に発生した北朝鮮・龍川の列車爆発事故現場のOrbview-3画像（24日撮影）、Quickbird画像（27日撮影）及びSPOT-5画像（27日撮影）を公開

\*4 航空自衛隊百里基地所属の偵察航空隊が運用するRF-4E/RF-4EJ偵察機が、大規模災害等発生時における民生協力において活躍している（<http://www.jda.go.jp/jasdf/hyakuri/hya02-03.htm>）

また近年、各地方自治体においてヘリコプターテレビ電送システム（ヘリテレ）の整備が進んでいる

\*5 地球観測衛星の寿命期間中（3～5年）に、破滅的な災害が発生する可能性はせいぜい1～2回と思われる

## 重量配分

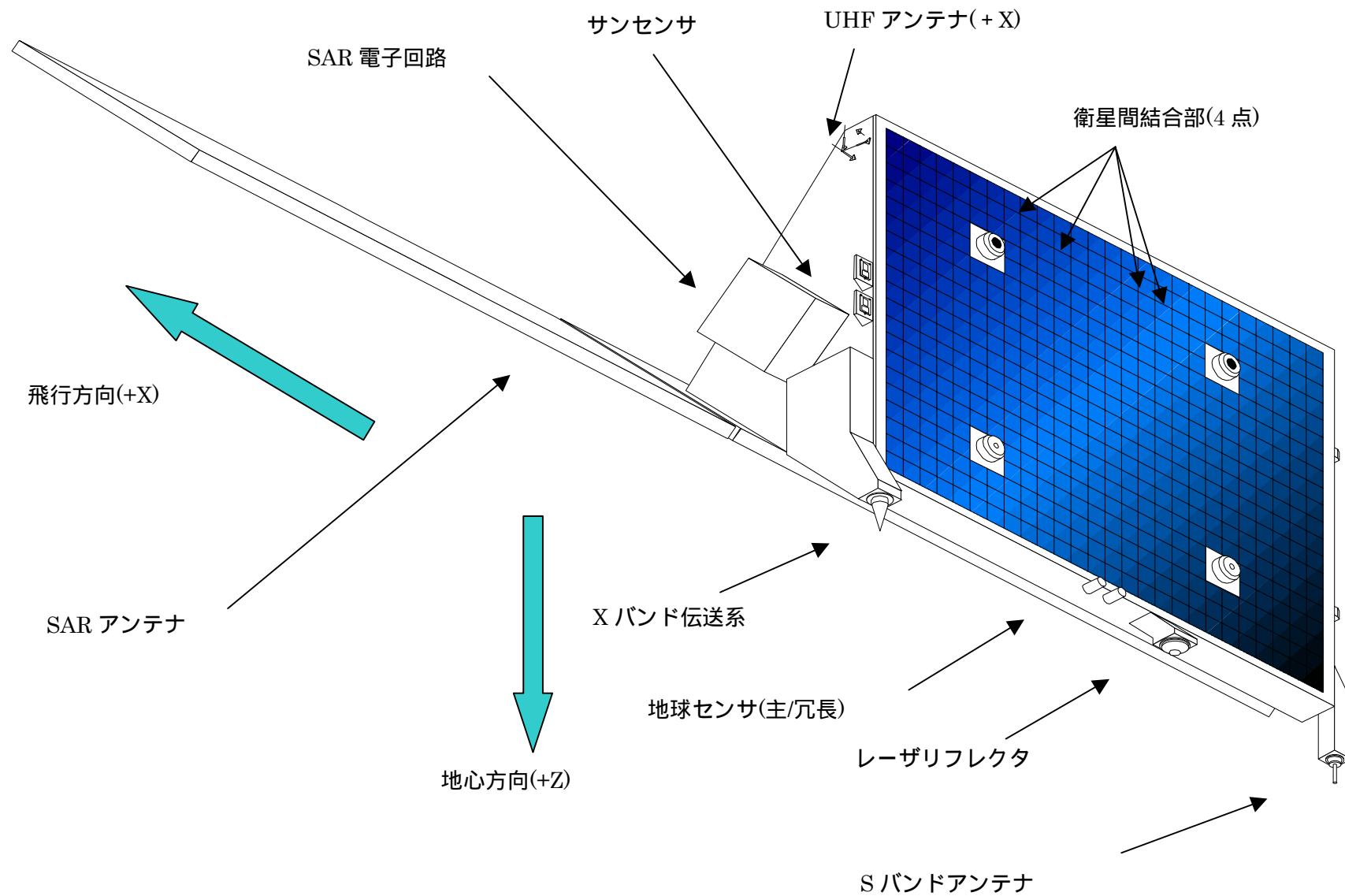
搭載 SAR(ALOS/PALSAR)	500	アンテナ 370kg、電気回路部 130kg
TT&C 系	37	S-Ant 含
姿勢制御系	115	GPSR、恒星センサ含
電源系	76	Li-ion 40AH × 2
太陽電池パネル	50	Multi-junction セル@ = 27% ( 2.8kW )
データ記録・伝送系	36	MDR 72GB、X-Ant 含
構体系	300	乾燥重量の 21% ( 通常 15% )
熱制御系	35	
計装系	112	LRR 含
推進系	30	4Nノスタ × 4、20Nノスタ × 8、 550 × 2
搭載最大推薬量	120	

---

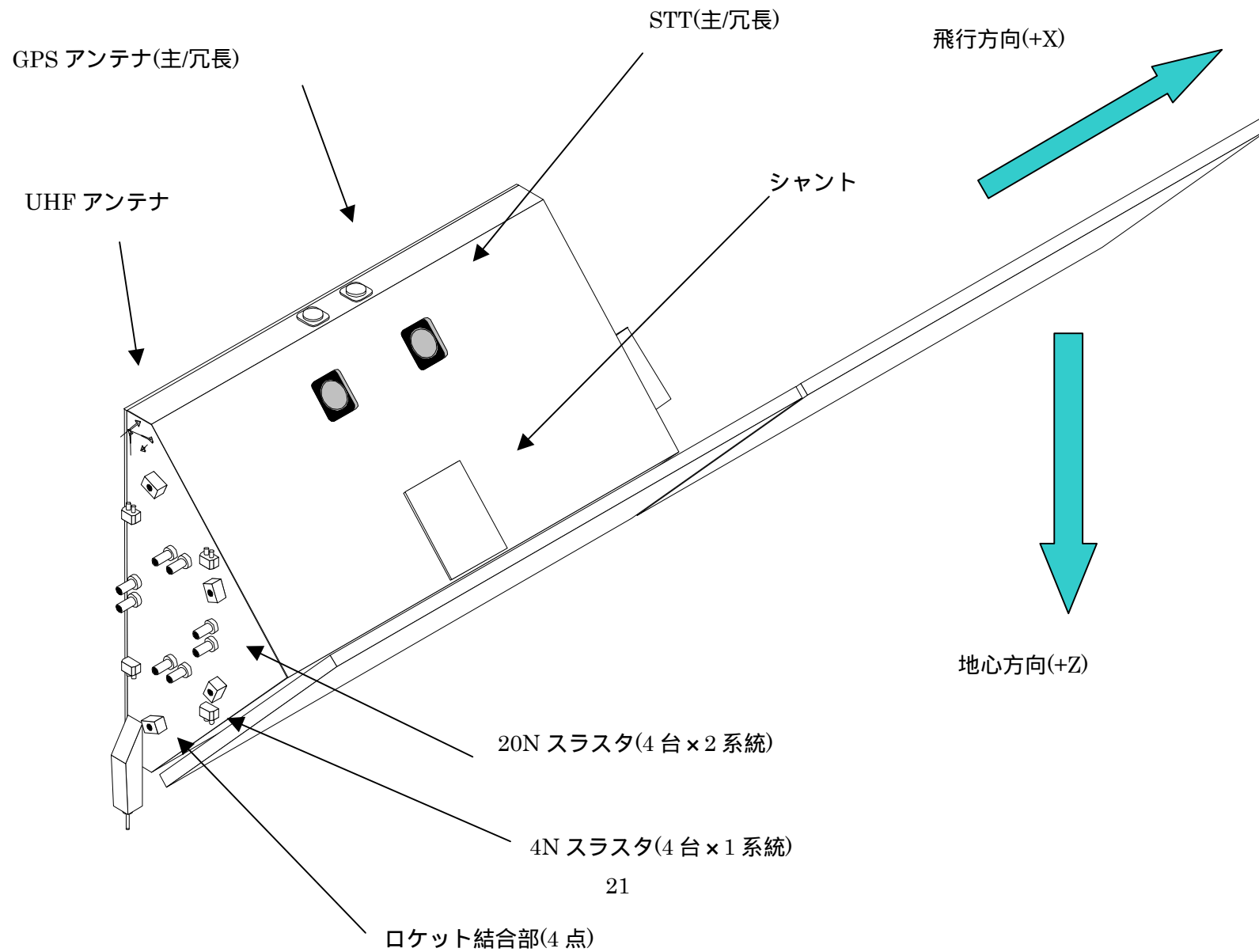
合計 1411 kg 3000kg 未満@ 2 機

投入能力(5200kg)に対し十分過ぎるマージン：複数ビギ-搭載も可能

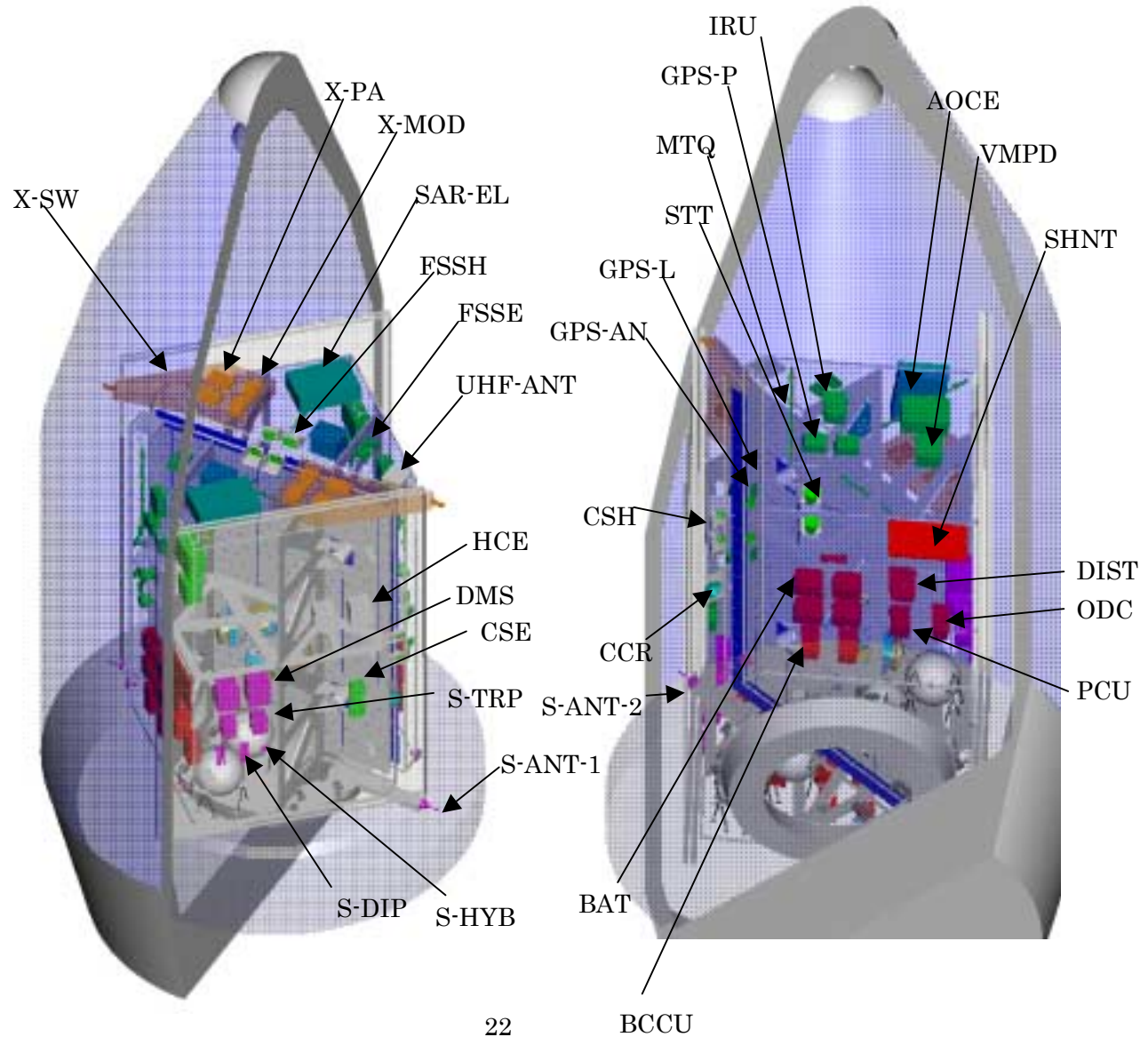
# SIDUSS 軌道上コンフィギュレーション(1/2)



# SIDUSS 軌道上コンフィギュレーション(2/2)



# SIDUSS 打上げコンフィギュレーション



## 搭載 L バンド SAR

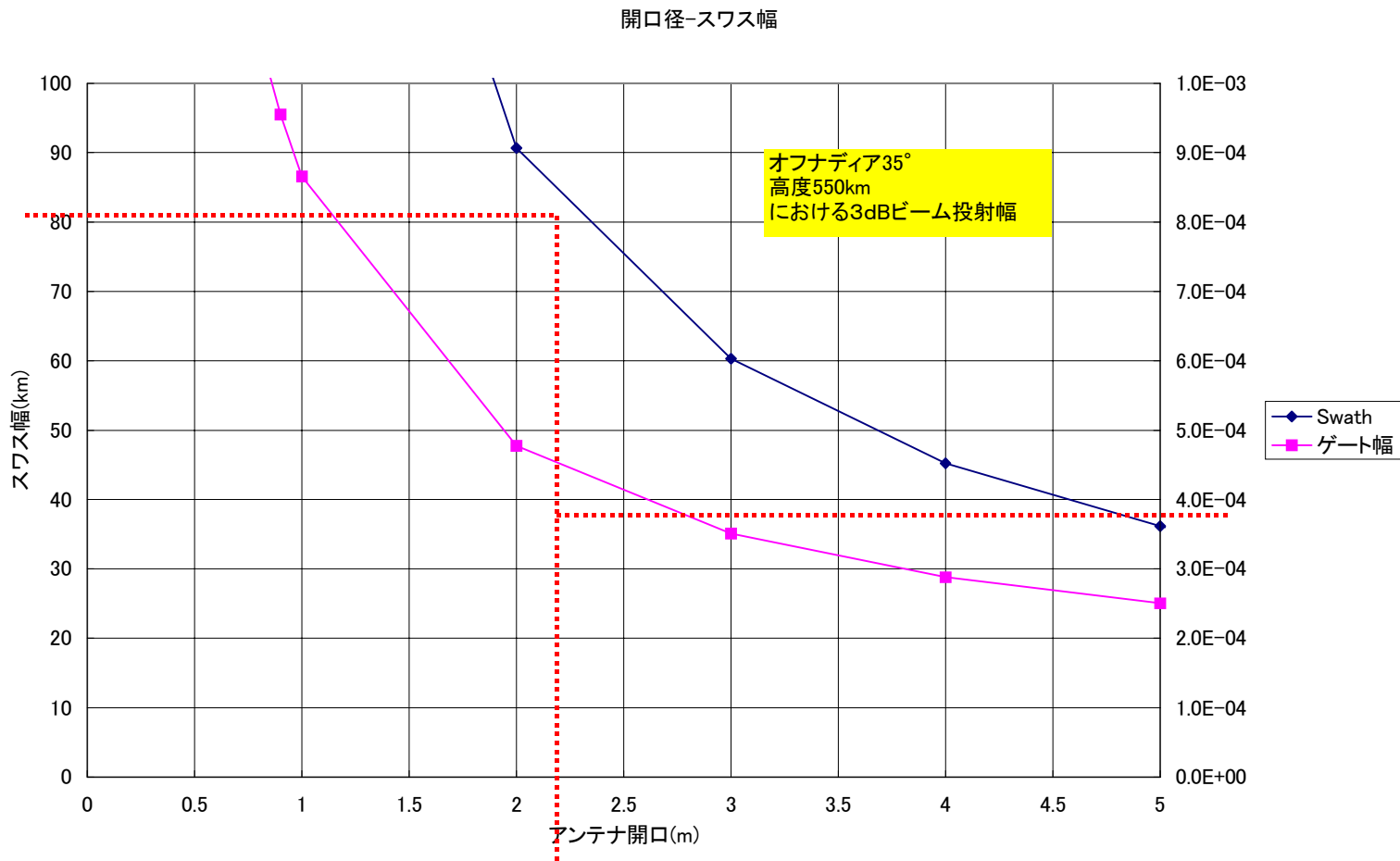
- ・ 定常観測：ALOS/PALSAR 通常モード観測
- ・ 緊急観測：ALOS/PALSAR オフナディア角可変

単純に PALSAR を SIDUSS に搭載すると、  
軌道高度が低い分レンジが短縮し計算上 NESZ が 3dB ほど改善される。  
ただしビーム幅一定であるためそのままでは観測幅が狭くなる。

SAR の観測幅を決定する要素はアンテナビーム幅と受信ゲート時間。  
ビーム幅は周波数が一定であればアンテナ開口径によって決定され、  
観測幅方向のビーム幅を拡大するにはレンジ方向アンテナ幅を  
小さくする必要がある。

レンジ方向観測距離が伸張されるため、反射波に含まれるターゲット信号を  
切り出すためのゲート時間も延長する必要がある。

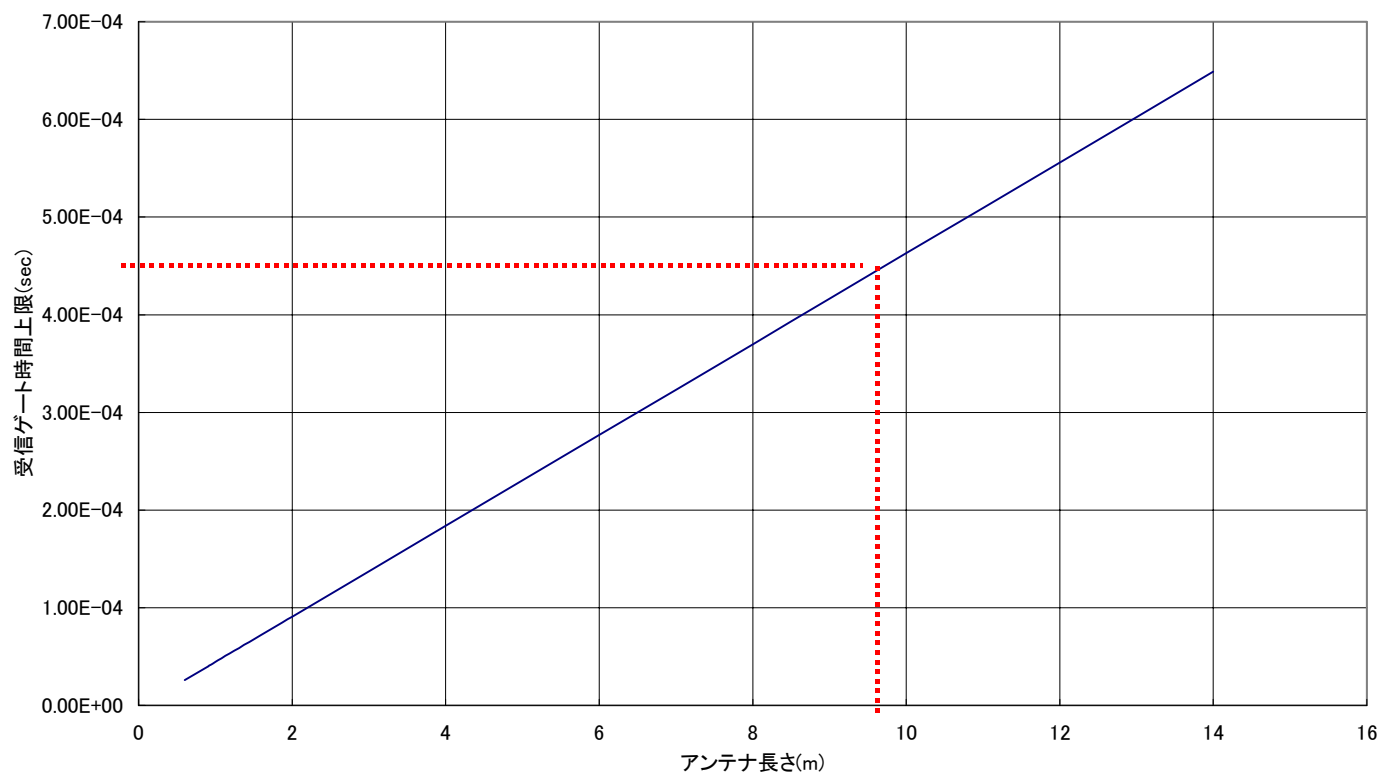
高度 550km、オフナディア 34.3 度で観測幅 85km を達成するには、アンテナ幅 2.2m 以下、ゲート時間 450 $\mu$ sec 以上が必要である。





ゲート時間に対する送信パルスの混入を防ぐため  
PRF を下げる必要があり、アジマス方向アンテナ長の拡大が必要。  
450 $\mu$ sec 以上のゲート時間を許容するためには、  
アンテナ長は 9.5m 以上が必要となる。

アンテナ長さと受信ゲート時間上限



アンテナ面積の減少(PALSAR 比 20%)による画質低下の可能性：

レーダーの S/N に対してアンテナ面積は二乗で効くため、  
アンテナ面積が 80% となった場合の S/N の劣化は-2dB 程度。

SIDUSS は ALOS に比べ運用高度が低い(距離は S/N に-3 乗で効く)、  
送信パワーが同じであれば、3dB 程度の S/N 向上が見込まれ、  
相殺すると 1dB の改善が見込める。

\* 送信出力は、アンテナ幅の削減により T/R モジュールの搭載台数(□RF 出力)が 20%程度減少するため、これを考慮するとほぼ PALSAR と同等の S/N

結論：

観測幅 85km を実現するためには、アンテナサイズ変更のみで、  
既開発コンポーネントの利用で PALSAR と同等の S/N を得られる。

\* 観測幅の拡大は S/A に対し悪影響を及ぼす可能性が高く要検討

## 16年度SIDUSS検討方針：

### 1．左右両側観測可能な衛星システムのトレードオフスタディを実施

方策1：SAR 地球指向面展開

方策2：ロールマヌーバー併用 (Radarsat-2)

### 2．搭載載 SAR の検討

観測幅 85km を維持、

地球指向展開にした場合の性能維持や展開方式についても検討

### 3．プログラムコストの低減、開発期間短縮化の方策

### 4．ユーザー要求の再確認及び利用可能性の検討



図3 Both Side Looking による swath (降交パス 1 日分)

## 第 15 回宇宙開発利用専門調査会での論点と対応(案) (2004.1.16)

### 論点 8

地球観測衛星の利用において、科学的知見を活用した災害の予知・予測を行う必要がある、国際貢献のあり方としても議論が必要である。

### 対応

本分野における課題・留意事項として、今後の取りまとめに反映。国際貢献のあり方については、今後の専門調査会で議論。

## 第 39 回総合科学技術会議 (2004.9.9)

－ 気候変動メカニズムの解明と予測、気候変動の検知と予測、災害の予知・予測など、実社会に役立つデータを科学的知見を活用して引き出し、その提供を推進する。

Source: <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihu39/haihu-si39.html>

1. タンデムモードでのDEMは必須か？
2. ScanSARモードは必要か？ 偏波はHHだけでなくVVも必要か？  
例：オフナディア固定・HH以外の131モードは日本以外で実施
3. 左右両面観測によるDEM精度の向上は望めるか？
4. 観測パスは西→東か？ 東→西か？
5. 地殻変動監視以外に有効な利用は？  
例：中分解モードで回帰日数の削減（14日）を図り、  
定常地殻変動監視以外で可変ビーム高分解能観測（TerraSAR方式）
6. 緊急監視のための軌道変換は有効か？
7. プロジェクト化するにはどうすればよいか？

## 参考：地球観測ロードマップ（2003.4.2 宇宙開発委員会資料）

社会安全を確保するための常時性・即時性のある観測システムの構築に向けて

### 要求機能

最終ゴールは、全天候で必要な性能をもって常時観測できる

宇宙システムを構築し、即時に地上の利用システムにデータを提供する

### 目標達成の手段

(1)全天候： 成開口レーダ(SAR)により実現

(2)必要な性能：空間分解能 1~10 メートル

(静止では 10 メートルを目標)

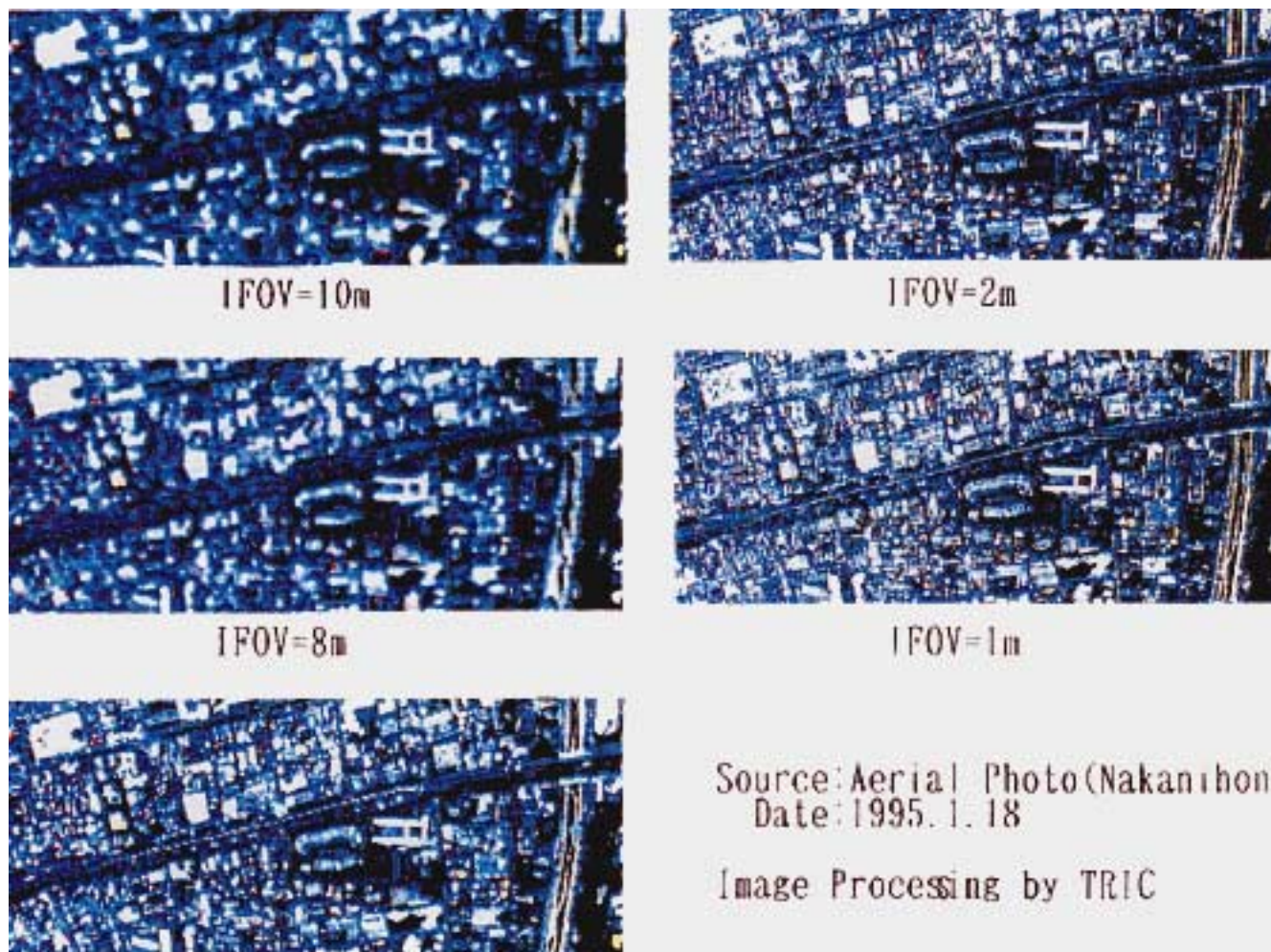
SAR で 5 乃至 30 メートル、良質なインターフェロメトリ

(3)常時観測：静止地球観測衛星(光学)+複数周回衛星(SAR)

(4)即時データ提供：衛星上でのオンボード・データ処理、ユーザ地上局への直接  
伝送、極地域へのデータ受信局設置、データ中継衛星等を適宜組み  
合わせるにより、3 時間以内のデータ提供を実現

Source: [http://www.nasda.go.jp/press/2003/04/eosloadmap\\_20030402\\_j.html](http://www.nasda.go.jp/press/2003/04/eosloadmap_20030402_j.html)

## 解像度による比較：被害状況把握に分解能 5m でも不十分



Source: 坂田俊文、人工衛星から手が見える、Plutonium Winter No.24



## 防災分野における取組み(第15回宇宙開発利用専門調査会, 2003.11.27)

### 利用予定の主な人工衛星

高分解能(解像度1~数m)	中・低分解能(解像度10m程度)
<ul style="list-style-type: none"><li>・IKONOS(米)</li><li>・EROS-A1(イスラエル)</li><li>・QuickBird(米)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・IRS(印)</li><li>・RADARSAT(加)</li><li>・LANDSAT7(米)</li><li>・SPOT(仏) 等</li></ul>
既に運用中	
<ul style="list-style-type: none"><li>・ALOS(日)</li><li>・情報収集衛星(日)</li></ul>	

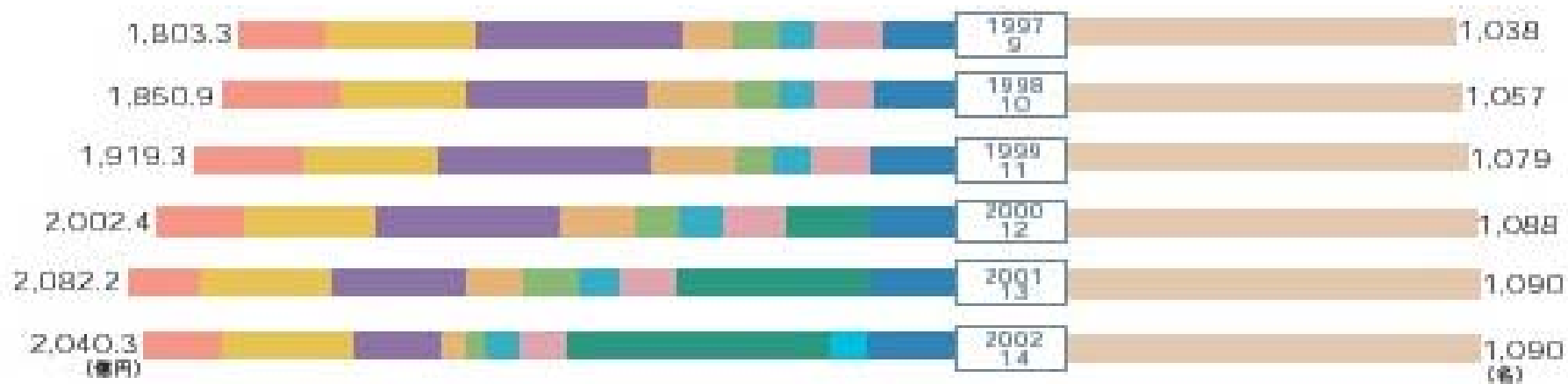
※特定の衛星に限定せずに利用することを想定

#### 国際災害チャータ:

- ・大規模災害時に人工衛星画像を相互利用するための宇宙機関間の国際的枠組み
- ・内閣府(防災)を指定ユーザとしてJAXAが加盟申請中
- ・加盟機関間で、無償でデータ提供

Source: <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/cosmo/haihu15/siryoy15-2-1.pdf>

## NASDA の予算・人員の推移 (1997～2002)



- ロケット開発費
- 宇宙環境利用総合推進費
- 人工衛星開発費
- ロケット打上げおよび施設建設費
- 筑波宇宙センター施設建設費
- 追跡管制費
- 地球観測情報処理費
- 情報収集衛星システム開発等受託費
- 施設設備費
- 事業運営費・一般管理費

予算事項の分類が2002年度(14年)から変更

Source: [http://www.nasda.go.jp/pr/services/pamphlet/pdf/all\\_nasda\\_pamphlet2\\_j.pdf](http://www.nasda.go.jp/pr/services/pamphlet/pdf/all_nasda_pamphlet2_j.pdf)

## これまでの地球衛星開発@NASDA

MOS/JERS：黎明期

ADEOS：技術開発優先・大艦巨多砲主義期

- ・プラットフォーム技術（軌道上交換なし）
- ・サブシステム独立熱制御（IIまで）

ADEOS-II/HIROS ALOS/ATMOS：地球観測バブル期

- ・観測対象：海洋、大気（オゾン／降雨）、陸域（広域／高分解能）
- ・観測軌道：太陽同期、太陽非同期
- ・実証ミッション：MDS計画（企画倒れ）

GCOM：戦略的撤退(転進)期（IGSへのリソース集中）

GOSAT/GPM：衰退(倦怠?)期（結果的に既存ミッションが生き延びた）

\* とても衛星群や高度な技術を要する衛星はあがりそうにないのが現実

全員、再出発が必要 = 「のぞみ」失敗原因究明へ

- 委員長が苦言・宇宙開発委

文部科学省宇宙開発委員会は10日、宇宙航空研究開発機構から日本初の火星探査機「のぞみ」の火星周回軌道への投入を9日夜に断念したとの報告を受け、調査部会でエンジン燃料のバルブ故障や電源システムのトラブルの原因を究明し、対策をまとめることを決めた。委員会トップからは、日本の宇宙開発技術の信頼性が揺らいでいることに、「再出発」の必要性を指摘する声も出た。

10月に発足した宇宙機構は、環境観測技術衛星「みどり2」の運用を断念し、H2Aロケット6号機による情報収集衛星の打ち上げにも失敗している。

井口雅一委員長（東大名誉教授・自動車工学）は「全体的に信頼性が不足しているのは明らか。メーカーを含めて全員が再出発する必要がある」と苦言を呈した上で、「性能が下がり、コストが上がっても、信頼性向上を第一にすることが大事だ」との考えを示した。（2003.12.10 時事通信）

## SIDUSS の進むべき道

地殻変動監視に目的を絞り込む

搭載 SAR : PALSAR を極力利用

バス : 十分なマージンを与え、単純な設計

性能は下げず、コストも上げず、信頼性を確保