

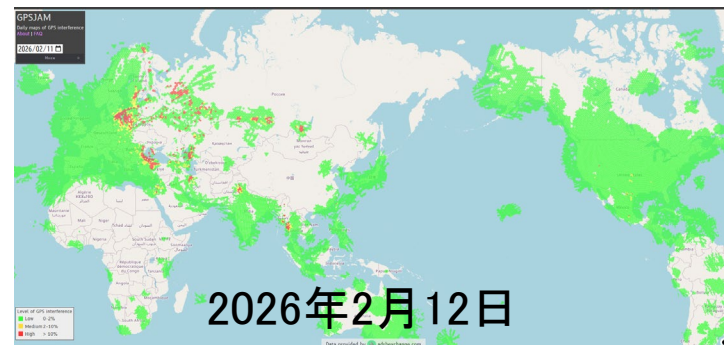
衛星搭載GNSS受信機のこうたん性強化

2026年7月29日

JAXA 研究開発部門／PNTに係る抗たん性強化WG
富高

1. はじめに(1／3)

1. 近年、地球観測ミッションは高頻度観測・高分解能化・リアルタイム性の高度化が進み、衛星運用における**高精度・高信頼性・リアルタイムの軌道決定**が不可欠となっている。
2. 従来の衛星測位ではGPS単独受信が主流であったが、GNSSの多様化・高度化が進むなか、**GPS・Galileo・QZS等を複数利用するマルチGNSS受信機**が地球観測衛星における標準技術として急速に普及しつつある。
3. さらに、高精度単独測位（PPP: Precise Point Positioning）の性能向上や、電離圏観測・気象観測などのリモートセンシングへの応用が進展し、**マルチ GNSS は軌道決定と観測性能の双方において重要性を増している**。
4. 一方で、現在運用中のLEO/GEO衛星では、昨今の世界情勢を背景として、**地上からの妨害電波に起因して航法継続に支障が生じる事例が増加**している。また、民間航空機への影響は、欧州中東の紛争地域に限らず、アジア地域にも拡大している。
(右下図参照)
5. 以上の状況を踏まえ、JAXA では衛星測位における「**高精度化・高抗たん性**」の確保を目的として研究開発を継続してきた。
6. 本発表では、これらの研究成果を反映した現行及び次世代機の「**GNSS受信機の抗たん化の取り組み**」について説明する。



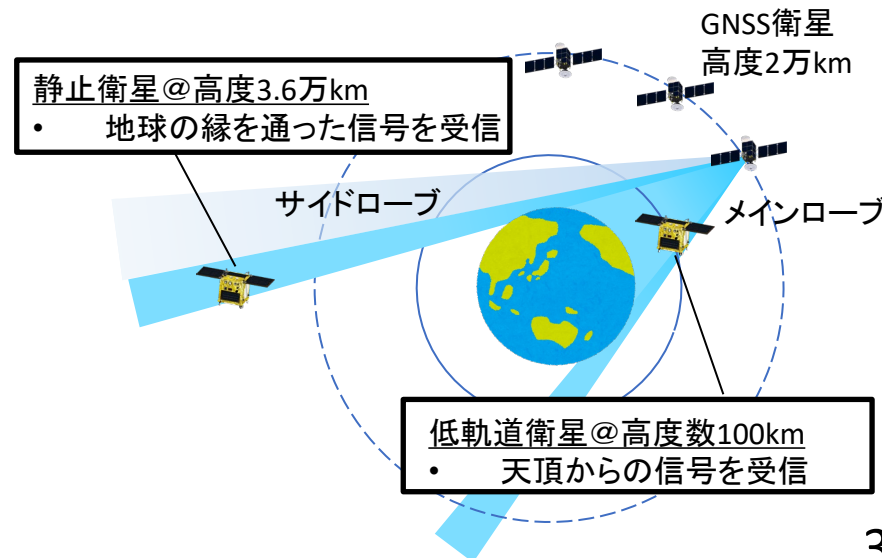
1. はじめに(2/3)

「衛星搭載GNSS受信機への影響」発表資料再掲

	低軌道GPSR	静止軌道GPSR
信号レベル	強い	比較的弱い
アンテナ方向	反地心指向	地心指向
ダイナミクス	干渉地域上を10分程で通過	地球の自転と同期するので、干渉地域上空に留まる

赤文字：妨害波の影響を受けやすくなる項目

微弱信号を受信するため、利得が高いアンテナを地球に指向させる静止GPSRの方が、妨害電波の影響を受けやすい。



1. はじめに(3/3)

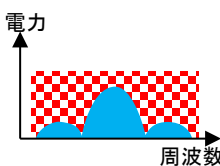
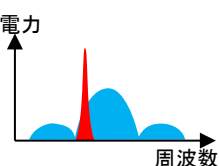
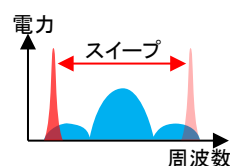
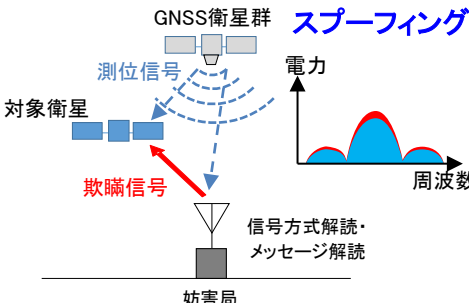
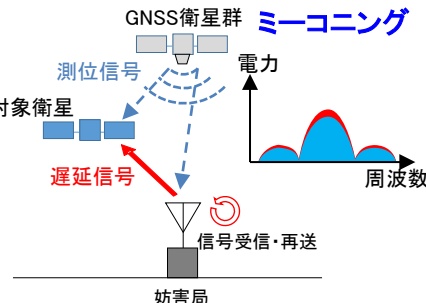
□妨害波について

妨害波は、ジャミングと欺瞞信号に分けられる。また、欺瞞信号には、スプーフィングとミーコニングがある。

ジャミング: GNSS信号に近い周波数で強い電波を出し、受信機が正しい測位信号を受け取れなくする攻撃

スプーフィング: 攻撃者が偽の衛星信号を作って誤った位置や時刻を信じ込ませる攻撃

ミーコニング: 本物の衛星信号を受信して遅延させて再送することで位置をずらす攻撃

	(a) ジャミング			(b) 欺瞞信号	
妨害イメージ	ノイズジャミング パルスジャミング 	トーンジャミング 	スweepジャミング 	スプーフィング 	ミーコニング 
妨害に必要な電力	大 帯域を覆う 大電力が必要となる	中 狭帯域のピーク 電力を大きくする 必要がある	中 狭帯域のピーク 電力を大きくする 必要がある	小 捕捉時は、受信する測位信号より僅かに大きければ良い 追尾中に欺瞞する場合は、電力を大きくする必要がある(同期式除く)	

2. GPS受信機の抗たん化の取り組み

2. GPSR受信機の抗たん化の取り組み(1/2)

背景

妨害波による衛星運用障害が多数存在

- 地上紛争地域から発せられたGPS航法への妨害波が軌道上にまで到達(図1)
- 宇宙機航法システムの妨害波に対する脆弱性が課題
 - 宇宙機開発において、妨害波によるGPSの航法異常は想定されておらず、衛星運用において意図しない挙動が確認されている。
 - 現行のGPS受信機ではソフトウェアしか更新できず、取り得る対策が限定的。

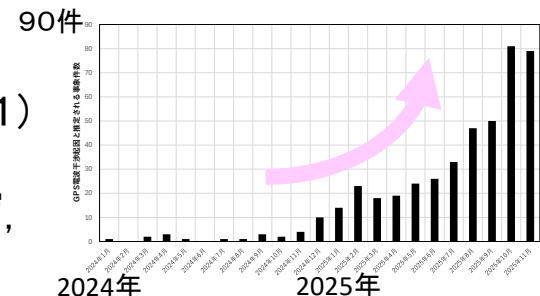


図1 LEO衛星のGNSS妨害数の遷移

目的

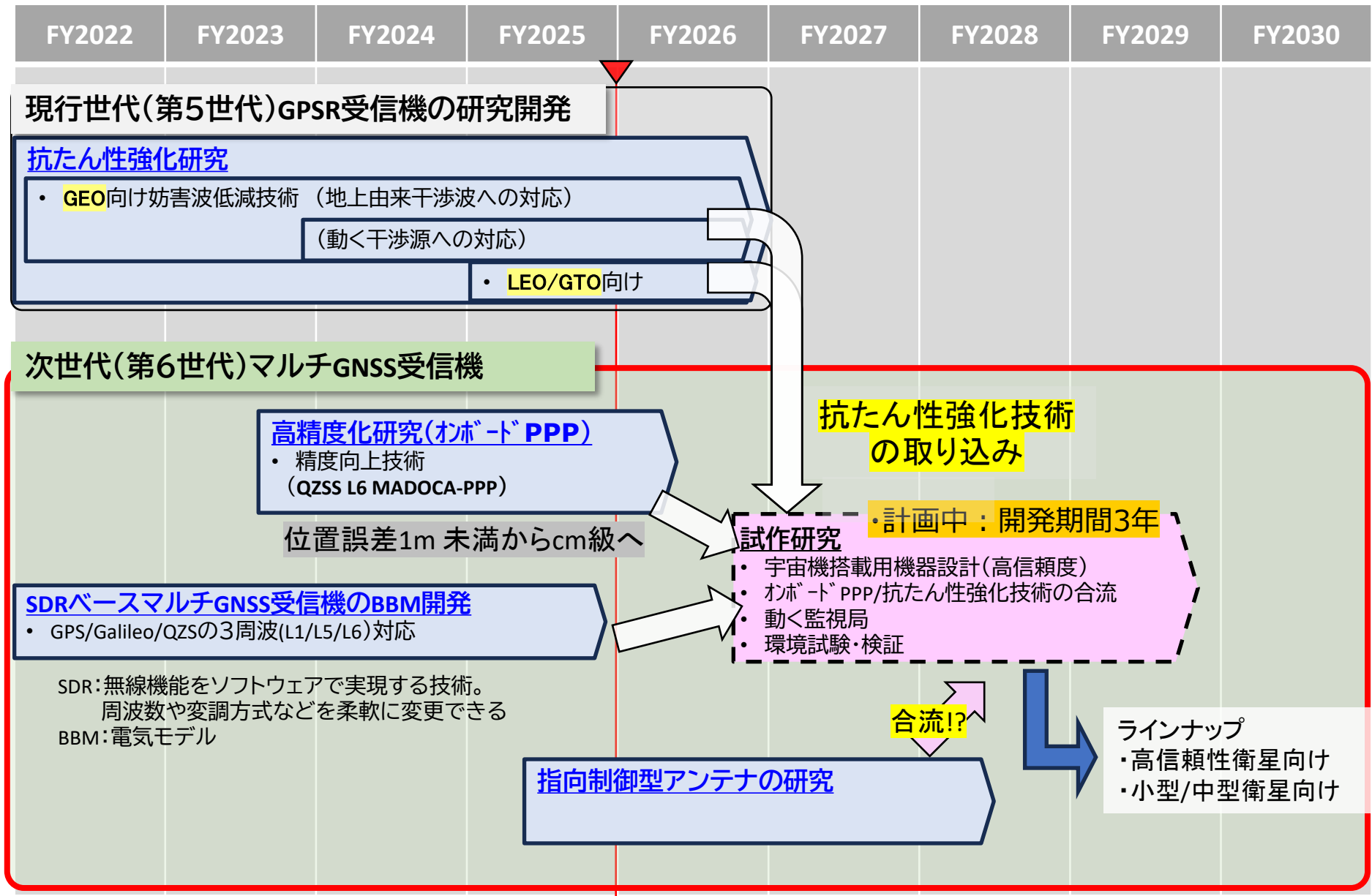
多様に変化する軌道上の電波環境に適応し、宇宙機の安定的な運用を実現すること

アプローチ

➡「PNTに係る抗たん性強化WG」を設置 ※ALL JAXA体制

- ① 宇宙機で発生している実際の深刻な衛星運用障害例を詳細に解析し、安定的な運用を継続できる妨害波に対しレジリエントな宇宙機の設計・運用の方策を検討する
 - ➡**現行世代機(第5世代)の対策**
- ② ソフトウェア受信機(SDR)を基盤とした多周波・マルチGNSS対応の受信機を開発して抗たん性向上を図る
 - SDR化によるメリット
 - 時々刻々変化する軌道上の電波環境に対し、ハードウェアの変更・再開発なしに柔軟に、こうたん性を発揮可能(軌道上書き換えも可能)。
 - 衛星用途に合わせてハイグレード品と同等の機能・性能を**低コストな受信機のラインナップ化**で我が国の宇宙利用全体に資する
 - 多周波・マルチGNSS化、高精度化によるメリット
 - 多周波化(L1/L5/L6帯)とマルチGNSS化(GALILEO/QZS)機能を備えることで抗たん性が向上する
 - ➡**次世代機(第6世代)の対策**

2. GPSR受信機の抗たん化の取り組み(2/2)

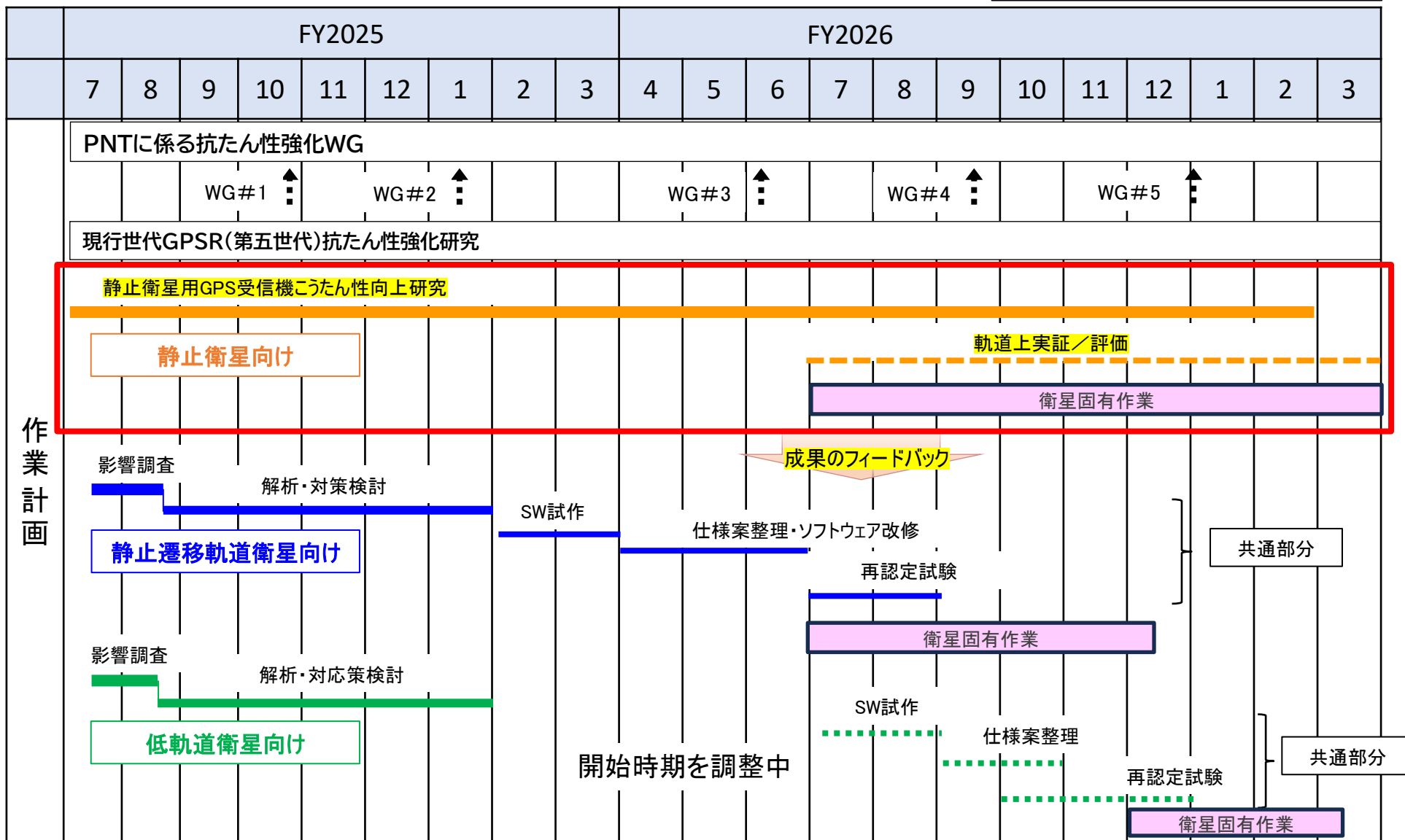


3. 現行世代(第5世代)GPSR受信機 抗たん性強化研究

3. 現行世代抗たん性強化研究(スケジュール)

■【現行世代GPSR: 抗たん性強化研究】のスケジュール

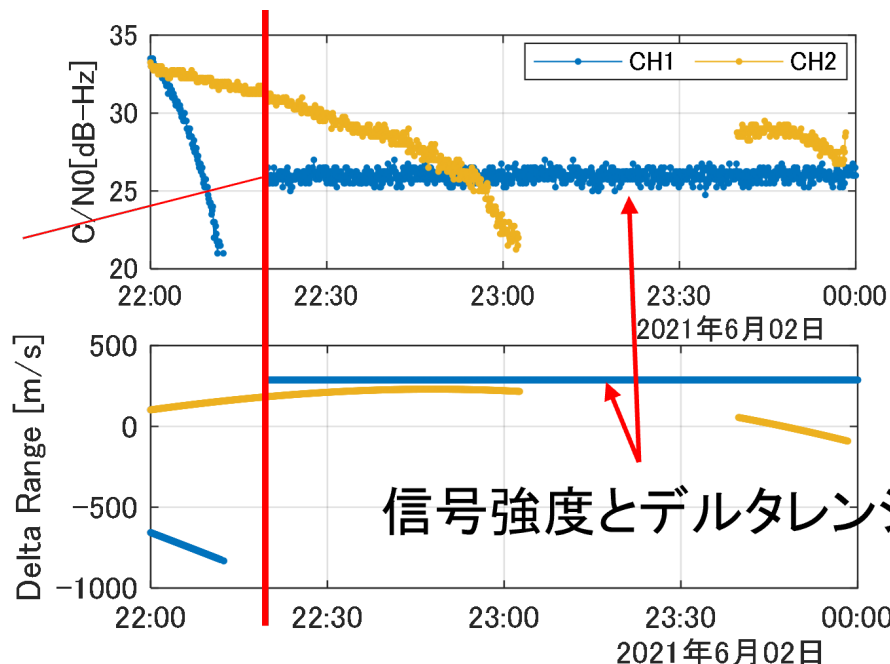
— 実施中/済 --- 計画中



(a) ジャミング波の特徴

- 発信源が不明な干渉波を受信し, 該当する受信チャンネルが長時間使用できなくなる事象が発生.
- 干渉波の特徴は以下
 - ✓ 信号強度とデルタレンジ(搬送波位相の変化量)がほぼ一定
 - ⇒ 発信源は静止衛星と位置関係が変わらない
 - ✓ 信号捕捉に成功するが航法メッセージの復調ができない

CH1の干渉波の
受信タイミング

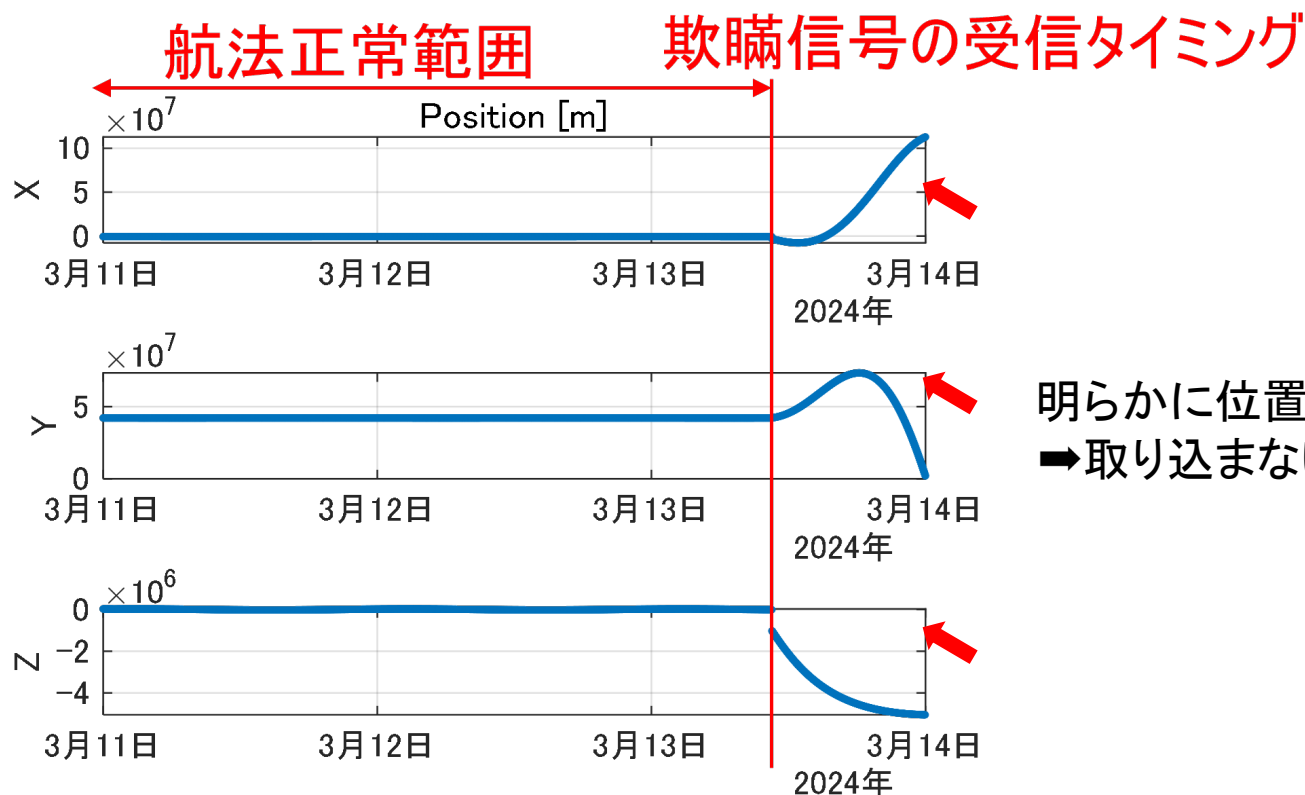


CH1: 干渉波を受信
CH2: 正常な測位信号を受信

信号強度とデルタレンジが一定

(b) 欺瞞攻撃の特徴

- 復調された疑似距離か航法メッセージが異常であるため、この観測量を航法に取り込んだ結果、航法値が発散する現象が確認された。
- ミーコニングやスプーフィングのような妨害攻撃が各地で確認されており、その影響を受けていると推察される。



明らかに位置が飛んでいる
➡取り込まないことが重要

□対策

①ジャミング対策

- a. **ジャミング棄却**:ジャミング信号の特性を把握し棄却(正常信号のみ受信)
- b. **追尾性能向上**:干渉前の信号の情報をもとに再追尾
- c. **有効な信号の追加**:干渉源とは配信位置が異なる**準天頂衛星信号**を使用
- d. **アンテナ選択**:ジャミングが予見されるアンテナは使用しない

②欺瞞信号対策

- e. **異常値棄却**:航法異常値の棄却、取り込み防止

□効果

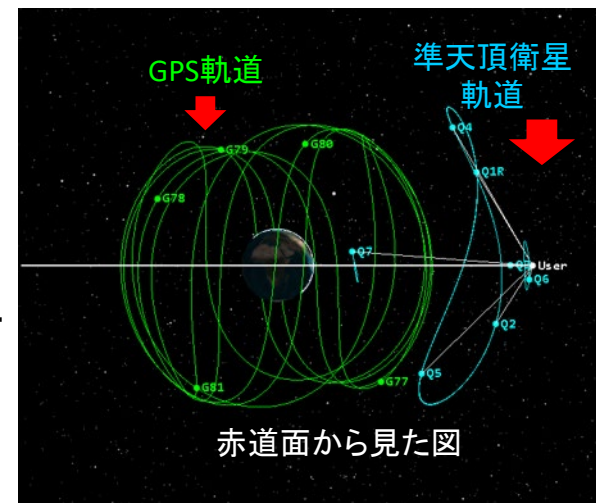
ジャミングや欺瞞信号を模擬可能なシミュレータを使用して効果検証.

表 ジャミング対策aとbの効果を確認した結果

	航法有効時間	位置誤差※1	速度誤差
正常時	23555 s	17.3 m	0.004 m/s
対策なし	16756 s	32.8 m	0.018 m/s
対策あり	27330 s※2	17.6 m	0.004 m/s

*1: 95%値の3次元二乗和平方根 *2: シミュレーションケースによって異なる。あくまで指標とし、正常時との明確な差異なし

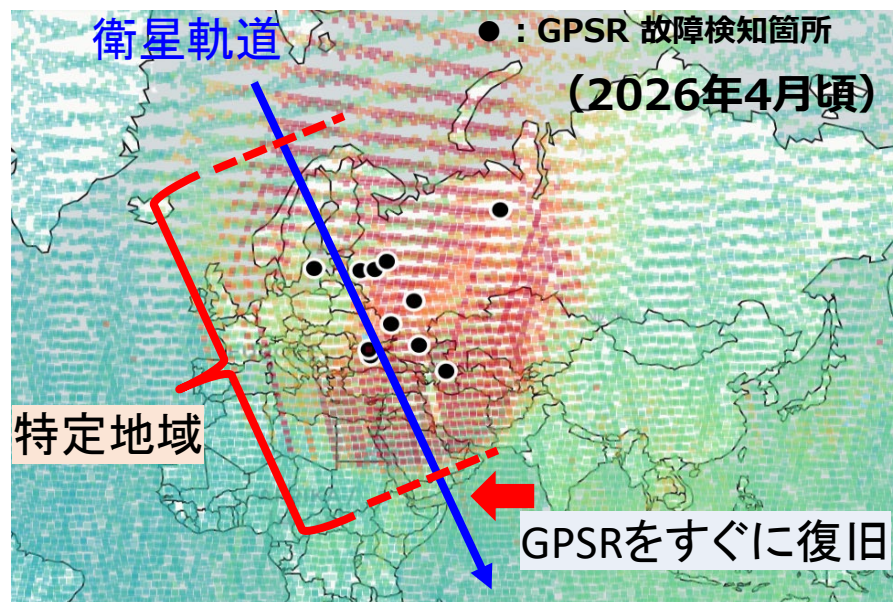
対応策によって妨害信号の影響がない正常時と同等の性能を得ることができた。



QZSS対応(有効な信号の追加)

□低軌道衛星の解析・対策状況

- ① 特定地域上空では、強い妨害電波によりGPS測位が困難となり、測位精度の低下や航法停止が確認され運用に支障をきたしている。L1C/A信号だけでなく、L2C信号への干渉も確認
- ② 偽のGPS信号によって位置情報を誤らせるスプーフィング攻撃の発生も確認。



妨害電波の強さを示すAGC値の分布 (コニア図)

◆ 検討中の対策

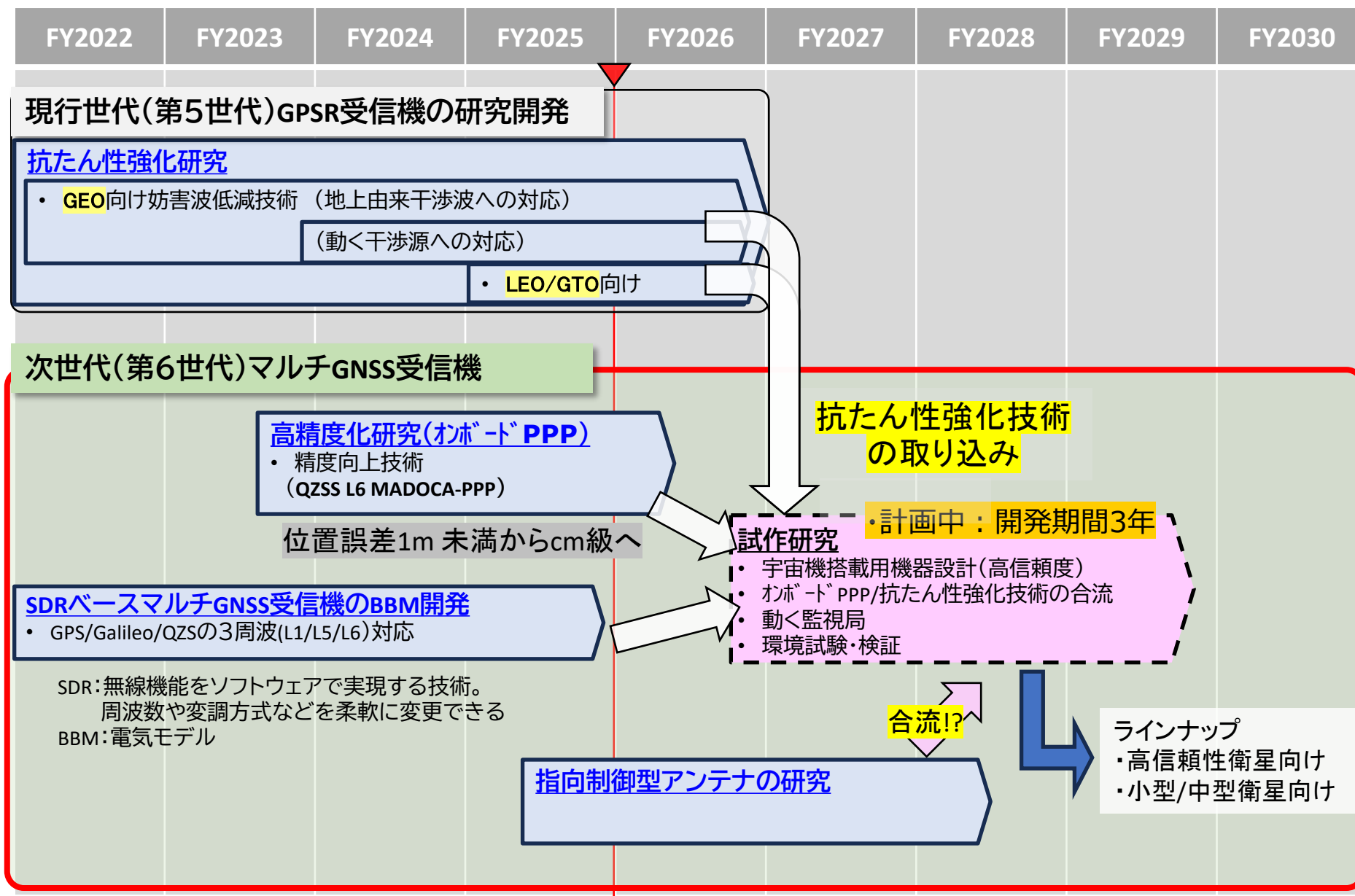
- ① 妨害電波の影響を受ける特定地域では、誤差を低減して航法停止を抑制するとともに、推定軌道(内部軌道伝播)を活用してミッションを継続する。また、停止した場合でも速やかな航法復帰を実現する。
- ② 偽のGPS信号による誤誘導を防ぐため、異常信号の検知・排除機能(RAIM)を強化し、正しい航法を維持する。

□静止遷移軌道用GPSRの対策状況

- 電気推進等で長期間かけて低軌道から高高度(例:静止軌道高度)に遷移する衛星
- LEO/GEOの対策を組み合わせで対策を検討中。軌道による切り替えやソフトウェア規模が大きくなることが課題

4. 次世代受信機（第6世代）の 研究開発状況

4. 第6世代の研究開発状況(再掲)



4. 第6世代の研究開発状況(課題の整理)

課題: 将来の宇宙機の安全性・信頼性向上と抗たん性強化が必要

課題への対応:

恒久対策は以下の研究開発候補があり、まずマルチGNSS化・多周波化を実施し、必要性を見極めたうえでアドオン開発していく方針とする

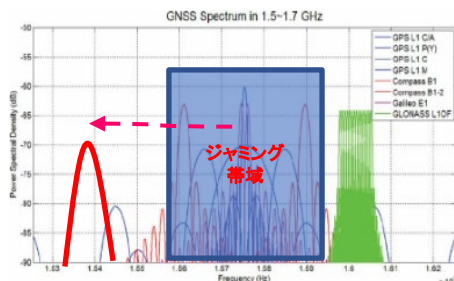
	ジャミング	欺瞞信号	導入コスト	導入難度
①マルチGNSS・多周波化	○	○	中	小
②航法メッセージ認証(NMA)	×	◎	中	小
③拡散コード認証(SCA)	×	○	中	特大※
④指向制御型アンテナ	◎	○	中	中～大
⑤コグニティブ無線	△～○	△～○	大	特大※

◎効果特大、○:効果あり、△:効果限定的、×:効果なし

導入難度はGPS本体の技術難度や地上システムへの導入難度、GNSSプロバイダとの調整が含まれる

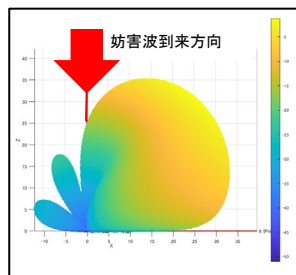
⑤コグニティブ無線

GNSSではないが、他案件で研究中

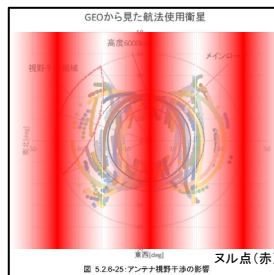


④指向制御型アンテナ

妨害波到来方向のアンテナゲインを能動的に抑制する(研究中)



第二技術部門と研究中



航空技術部門より提供

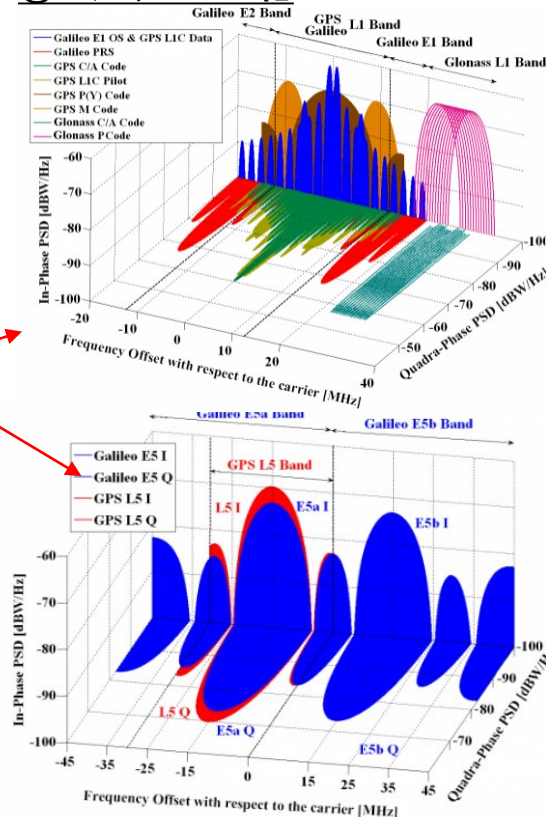
②信号認証

メッセージを暗号化する
(OSNMA、QZNMA)

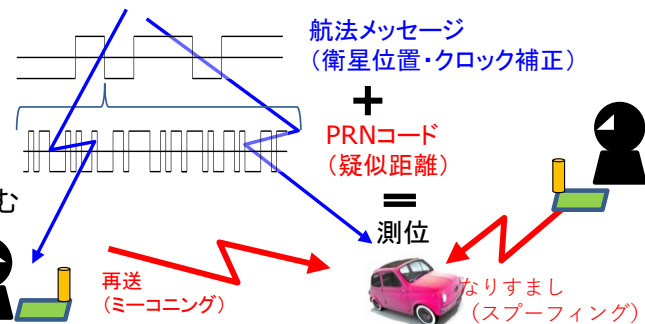
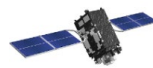
③拡散コード認証

透かし暗号を埋め込む
(Chimera@GPS)

①マルチGNSS化



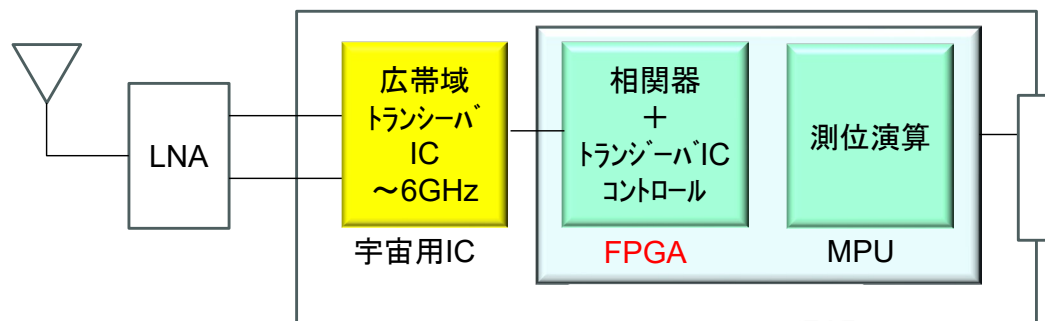
<https://gssc.esa.int/navipedia>



4. 第6世代の研究開発状況(特徴1:SDR)

■ SDR受信機の特徴

- BBMはソフトウェア指向の受信機(SDR)であり、柔軟性と拡張性を有する(特徴)
 - ① **マルチGNSS化**: GPS/Galileo/QZSの民生信号L1帯(L1C/A,L1C/B,L1C,E1OS)、L5帯(L5,E5a)
 - ② **オンボードPPP**: Galileo/QZSの高精度補強信号であるL6帯も対応
 - ③ 現行機向けで研究開発し獲得した**抗たん性強化ロジックを組み込む**
 - ④ 脱ASIC化とIP化により**ハイグレード/ミドルクラス受信機への両対応が可能**
 - ⑤ ユーザーニーズや昨今頻繁な**信号・メッセージ変更/追加に柔軟に対応可能**
 - ⑥ **指向制御型アンテナや信号認証など将来の技術合流が容易に対応可能**



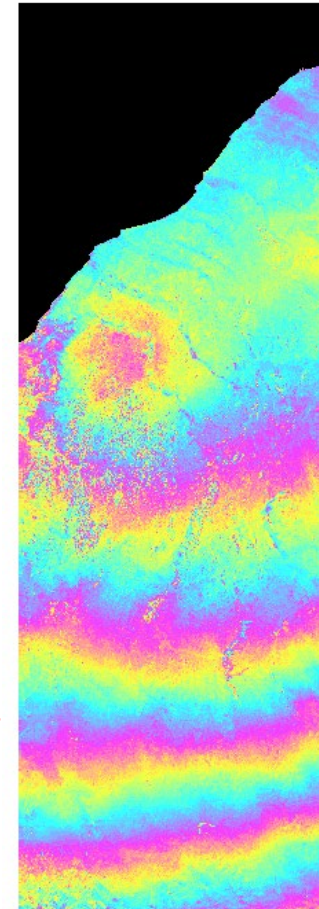
マルチGNSSコアBBM構成ブロック図

4. 第6世代の研究開発状況(特徴2:高精度化)

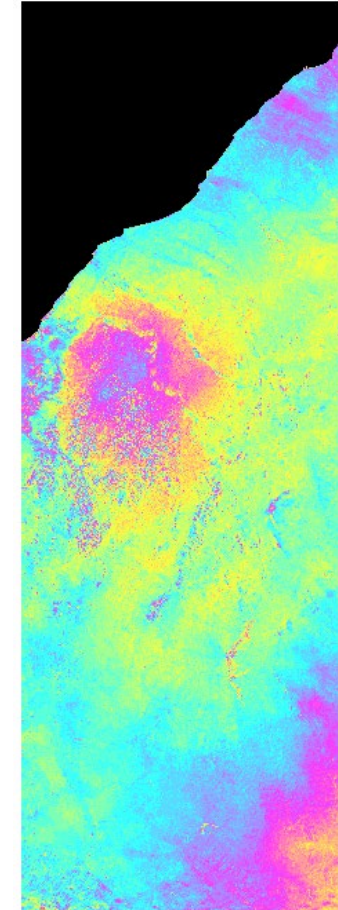
■高精度化に向けた技術的特徴(オンボードPPP)

- 準天頂衛星やGalileo衛星から放送される高精度補強信号(MADOCA-PPPやHigh Accuracy Service)を使用して、軌道上で、センチメートル級の位置・時刻決定精度をリアルタイムに実現
⇒JAXAでは現在実証してその効果を確認している
- これにより、以下が期待できる。
 - ✓データ配信までの時間を大幅に短縮
 - ✓ミッションの高精度化(例:右画像処理)
- また、GNSS信号が妨害されて衛星数が減っても、測位精度の低下や航法誤差の蓄積を抑えられるため、ミッション継続性が向上する。
⇒LEOジャミング対策の航法停止抑制効果に大きく寄与

Before
オンボード軌道



After
精密軌道暦



地球観測衛星
への衛星オン
ボードPPP
技術の適用



●オンボードGPSR航法解を使用して処理した衛星画像には、長波長のノイズが載っていることが確認できるが、衛星オンボードPPPと同程度の精度である精密暦を使用して処理した衛星画像には、長波長のノイズは無く、鮮明な画像が得られていることが確認できる。

北海道胆振地震時のALOS-2画像(出典:国土地理院)¹³

オンボードPPPによる効果

<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/on-board-ppp/>

5. まとめ

5. まとめ

- 現在運用中のLEO/GEO衛星では、昨今の世界情勢を背景として、地上からの妨害電波に起因して航法継続に支障が生じる事例が増加している。
- JAXAでは、2023年から干渉波対策に取り組んでおり、現在は「PNTに係る抗たん性強化WG」を立ち上げ、組織横断的に活動している。
- 現行世代受信機への対応
 - GEO用: 2025年度までにソフトウェアを試作し、妨害信号の影響がない正常時と同等の性能を確認済み。現在は最終動作確認を実施中であり、今年度に軌道上実証を行い、順次リリース予定。
 - LEO/GTO用: GEO研究開発成果をフィードバックし、早期に対策を展開予定
- 次世代受信機(第六世代)への対応
 - JAXAにおいて、マルチ・多周波GNSS受信機のBBM開発を完了
 - オンボードPPP技術を適用し、測位精度および抗たん性の強化を図る方針
 - ハイグレード／ミドルクラス受信機をラインナップ化予定

航空機搭載GPS受信機で精度劣化が確認されている地域



GPS jam(<https://gpsjam.org/>)