次世代SBASの飛行実験による評価

北村光教（航法システム領域）

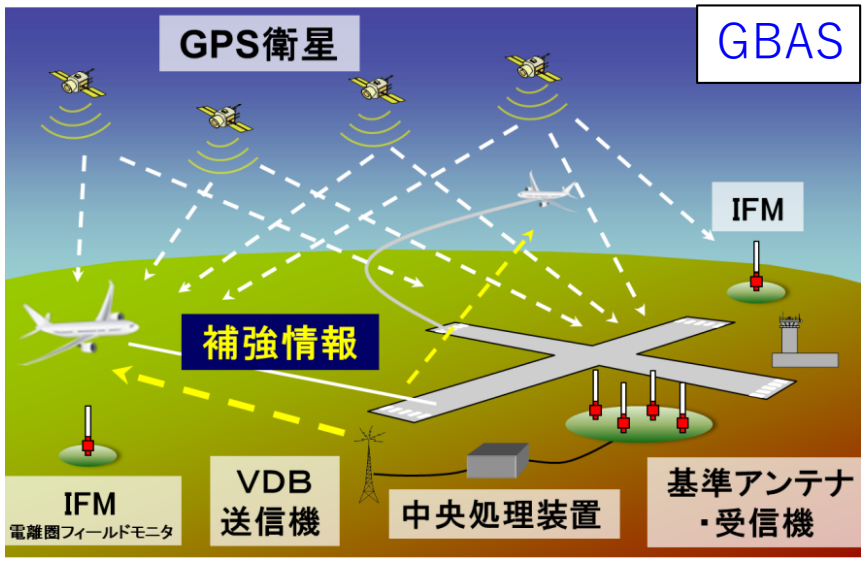
6月13日（金）15:20-15:45

コンテンツ

- GNSSと補強システム
  - SBASと次世代SBAS
- 石垣島における飛行実験
  - 実験用航空機
  - 飛行経路
- 実験結果
  - 現行SBASと次世代SBASの比較
  - 電子基準点との比較

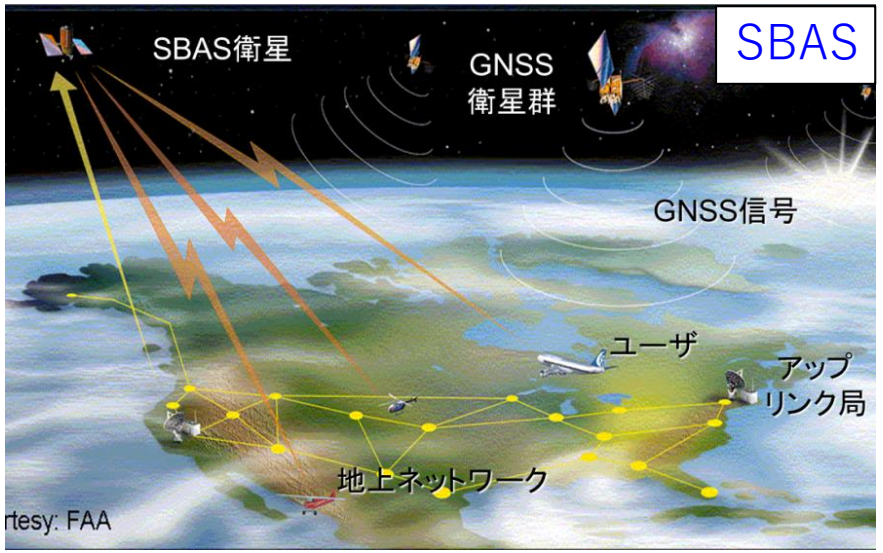
GNSSと補強システム

- 航空航法におけるGNSS
  - コアシステム（$GPS_{など}$）+補強システム（$SBAS_{など}$）＝安全な航法
- 補強システム



Ground-based Augmentation System

- 空港でGPSを監視
- VDB（VHF波）で補強情報を送信
  ILSと同等覆域（複数経路設定可）
- 空港周辺で高性能な補強



Satellite-based Augmentation System

- 広域に監視局を配置
- 静止衛星から補強情報を送信
  - 大陸規模の覆域
- 広域の補強が可能

補強性能
GBAS＞SBAS
↕
補強範囲
GBAS＜SBAS

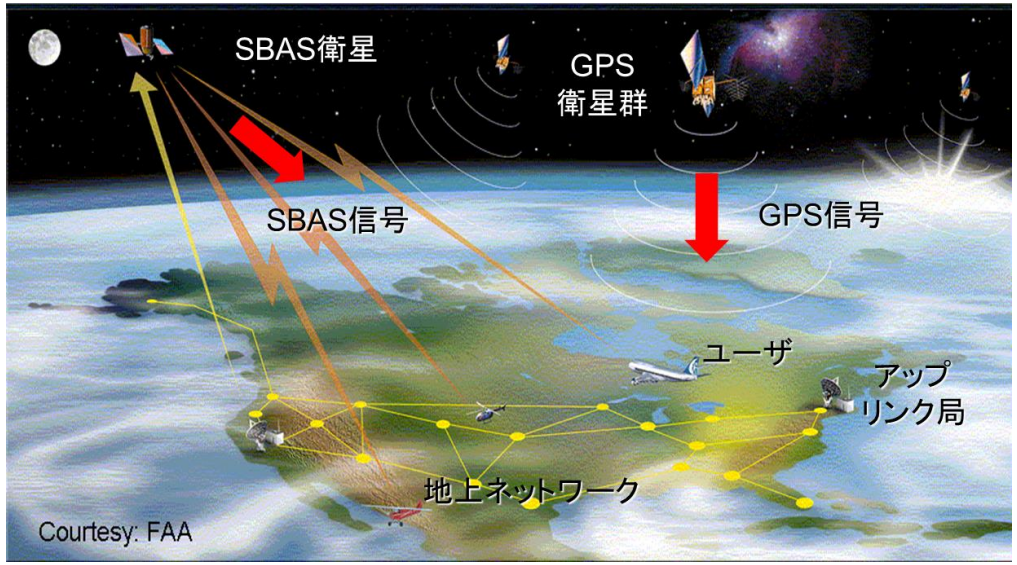
利用範囲と性能
トレードオフ

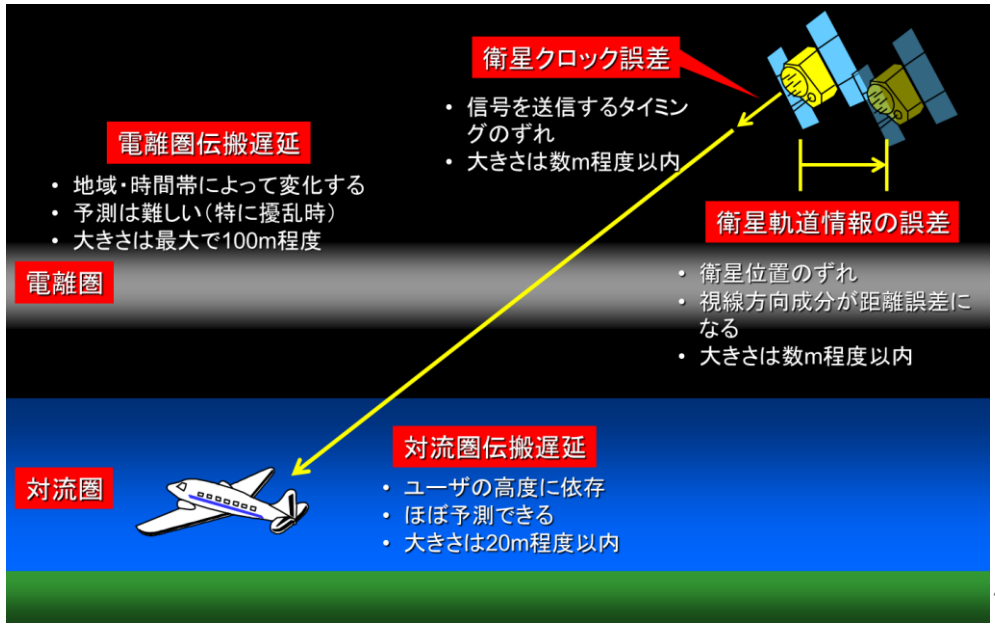
衛星型衛星航法補強システム SBAS

- 監視局ネットワークでGPSの誤差を要素毎に補正
  - 衛星軌道・時計補正、
  - 電離圏遅延補正、
  - インテグリティ情報

- 特徴
  - GPSのL1帯を補正
  - 電離圏の補正が必須
  - 太陽活動が活発な時期では性能低下する可能性がある

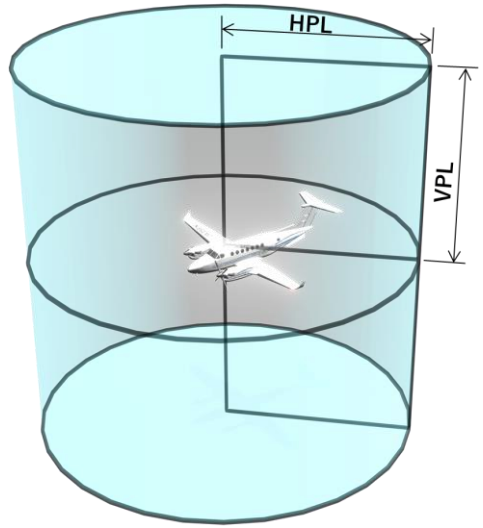
- 新しい滑走路進入方式（LPV）が整備されつつある





LPV（Localiser Performance with Vertical Guidance）とは

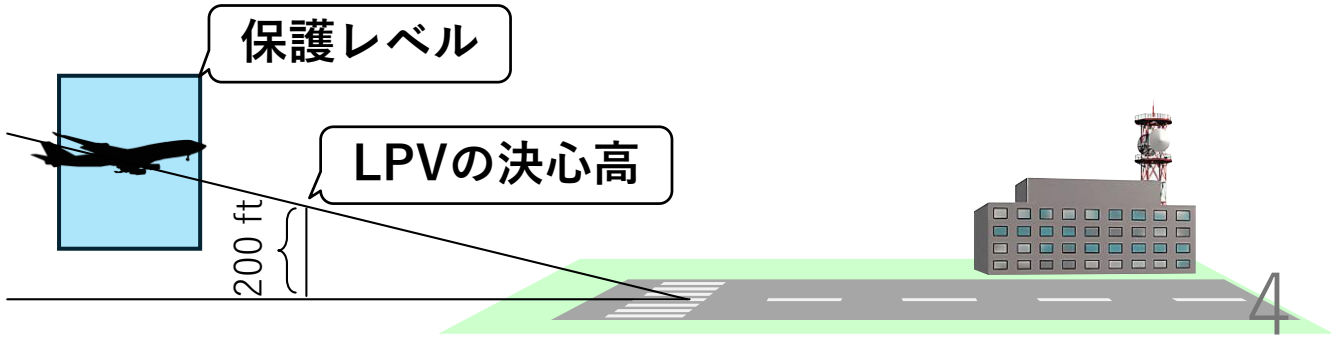
- SBAS補強測位を用いて航空機を滑走路へ誘導する**垂直誘導付進入方式**
- **LPV-200：決心高200 ft**まで垂直誘導が可能
  - 条件：**保護レベル＜警報限界**（水平40m、垂直35m）



HPLとVPLによる
保護領域

- 保護レベル（Protection Level）：
  - SBASの**インテグリティ機能**の一つで円柱状の保護領域
  - 真の機体位置が円柱の外側にある確率が2×10－7 [/app]
  - SBAS測位解の信頼限界として**衝突防止に重要**

- 警報限界（Alert Limit）：
  - 保護レベルが特定の大きさを上回った場合に警報を発する閾値
  - 飛行方式毎に、
    水平警報限界（HAL）と
    垂直警報限界（VAL）が定義される

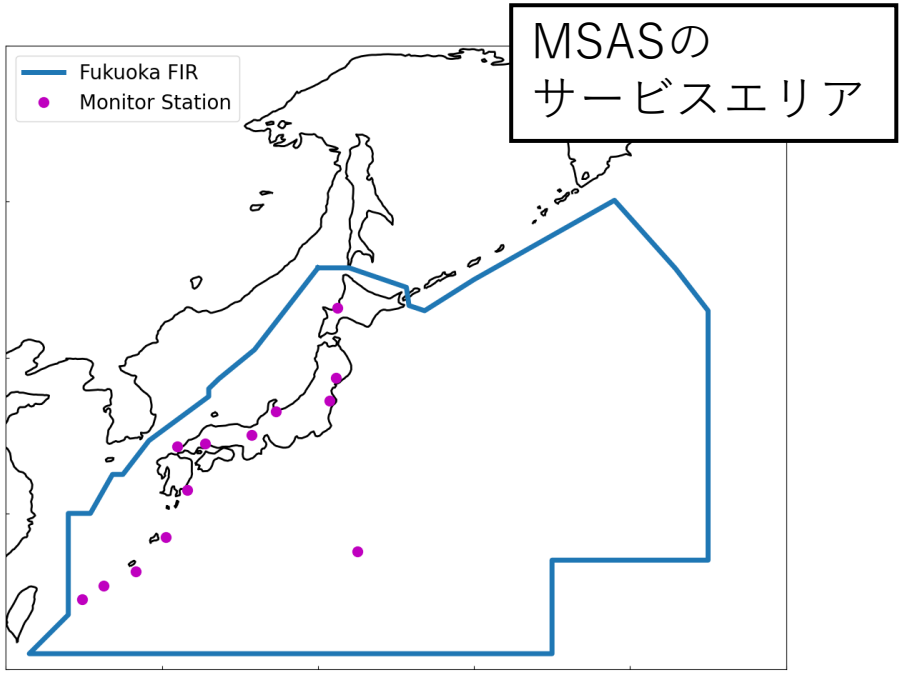


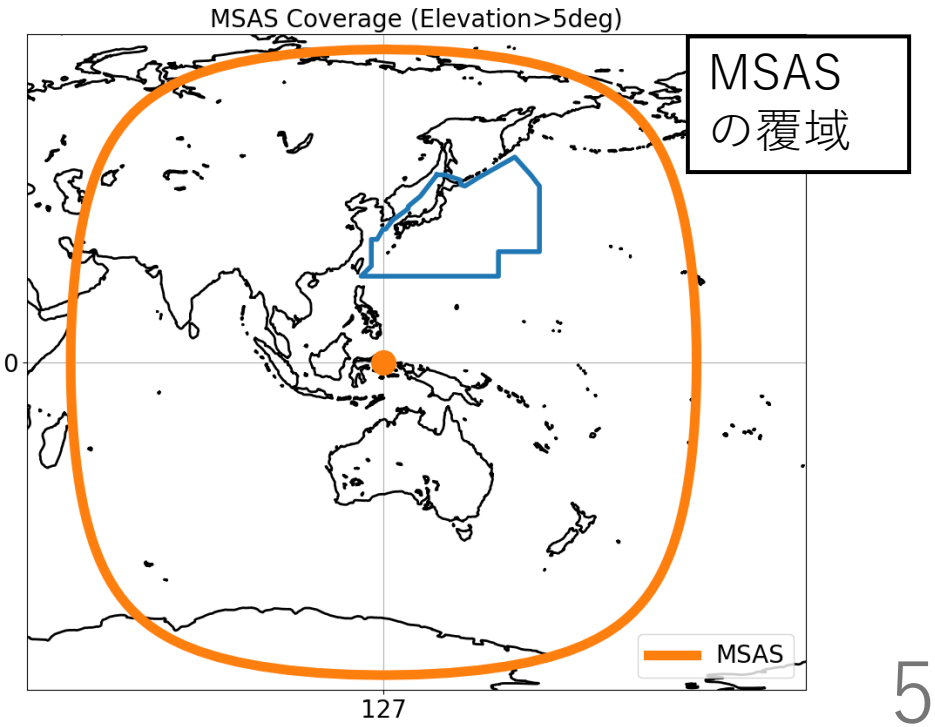
日本が運用しているSBAS

- MSAS
  （Michibiki-based Satellite Augmentation）
  - 航空局が運用する我が国のSBAS
  - 2007年から運用中
  - 監視局：13局
  - サービスエリア：福岡FIR

- 放送は準天頂衛星システム（内閣府）から
  - 3号機（静止軌道：東経127度）のL1Sb信号
  - サービスエリア全域が覆域内

- 日本全域で利用可能だが
  南方地域では電離圏の影響で
  性能が低下する場合も見られる
  （SBASの特徴）⇒ 次世代SBAS規格に期待





次世代SBAS（L5 SBAS）

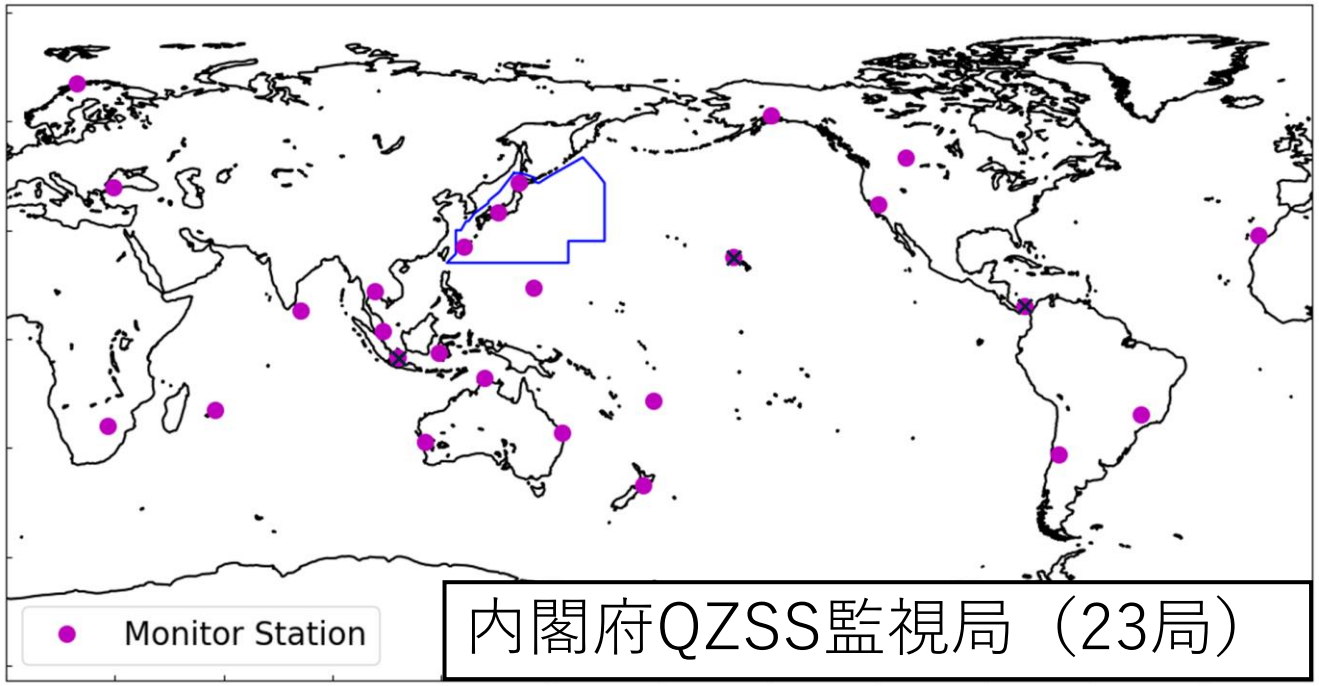
- 国際民間航空機関（ICAO）で2023年に国際標準（SARPs）化
- 現行SBASから機能向上が図られた
- 補強情報はL5帯信号で放送する

次世代SBASによる機能向上

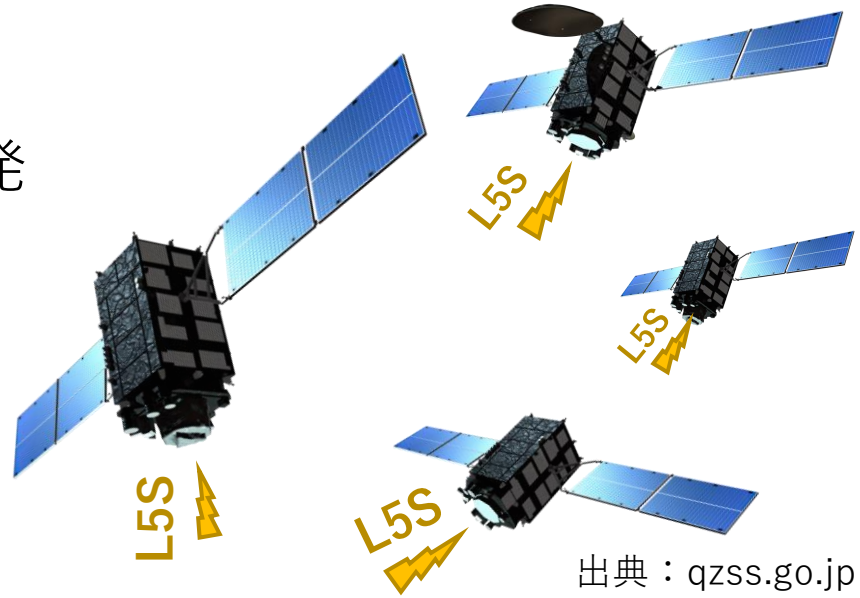
	測位信号	補強対象GNSS
現行SBAS （**L1 SBAS**）	L1帯	GPS
次世代SBAS （**L5 SBAS**）	L1+**L5**帯	GPS, **GLONASS, Galileo, BeiDou**
次世代SBAS の**特徴**	**2周波数(Dual-Frequencies)対応** ・電離圏遅延の高精度な補正に期待 ・LPV等の高度なSBAS進入の アベイラビリティ向上に期待	**複数GNSS(Multi-Core Systems)対応** ・衛星配置改善による 精度・アベイラビリティの向上 ・GPSが使えなくなった場合などでも 継続性の確保に期待

DFMC-SBAS プロトタイプ機

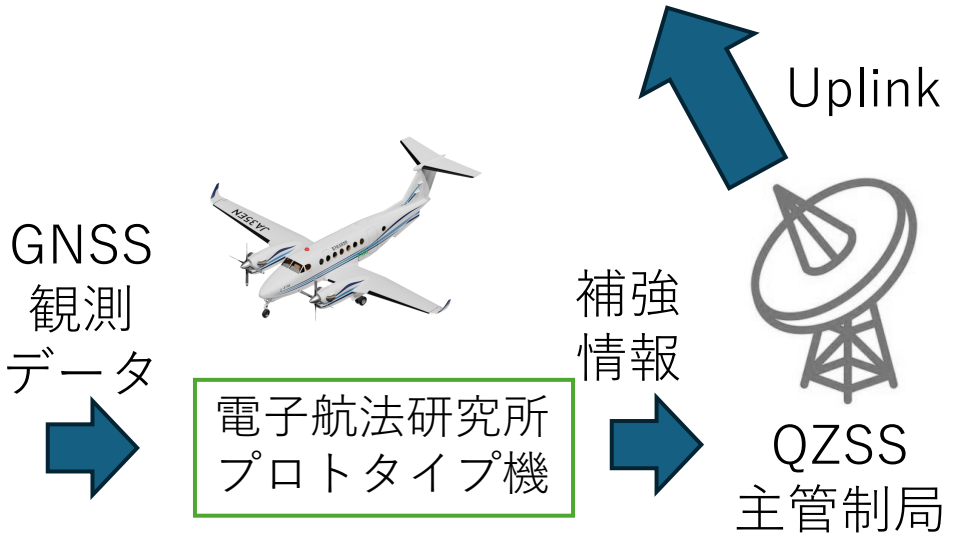
- ICAOにおける規格検証サポートを目的として
  電子航法研究所ではL5 SBASメッセージ生成機を開発
- QZSSから放送する実証実験を実施中
  - 放送信号：L5S信号
  - 放送衛星：2、3、4、1R号機



内閣府QZSS監視局（23局）



出典：qzss.go.jp



プロトタイプ機による放送実験の概要

L5 SBAS実証実験
石垣島における飛行実験

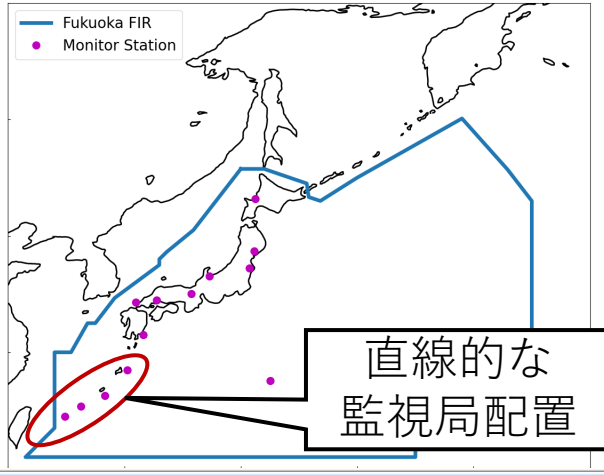
- **なぜ石垣島（南西諸島）なのか：**
  L1 SBASでの補強が困難
  - **監視局の偏り**衛星軌道・時計補正が難しい
  - **赤道異常等**があり、電離圏補正的にチャレンジングな環境
    特に春 or 秋の夜間は**電離圏の擾乱が発生しやすい**

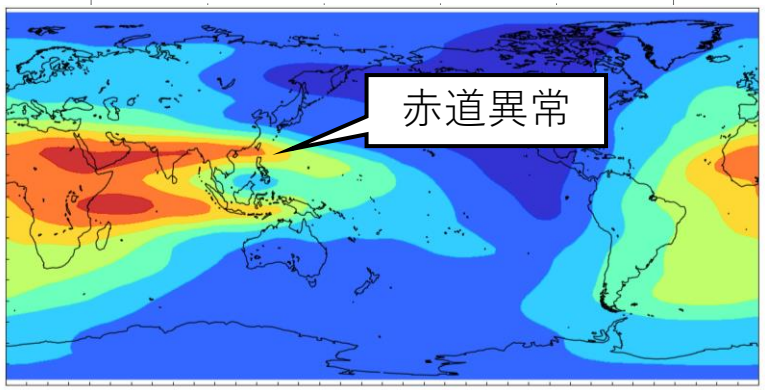
↓こういった環境では

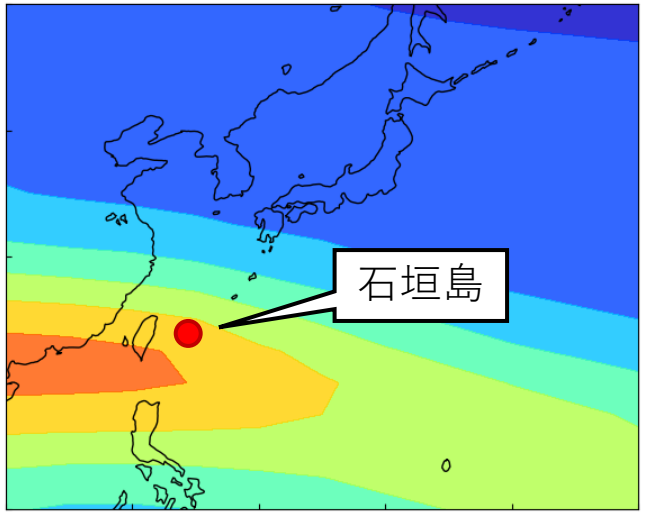
- L1 SBASでは
  LPV等の高度なSBAS進入が難しい

- L5 SBASでは
  L1+L5帯の2周波利用で電離圏の問題を解消し
  LPV進入で高いアベイラビリティが期待

- 石垣島で実際に飛行して
  プロトタイプ機によるL5 SBAS補強の性能を実証する



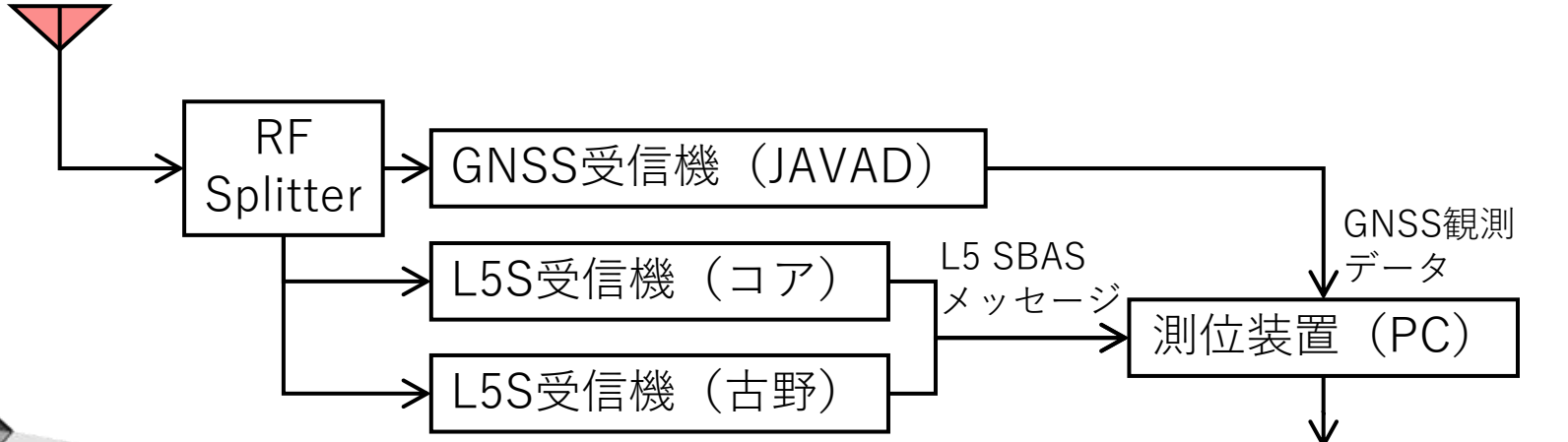




石垣島における飛行実験

- 実験用航空機「よつば」
  実験用装備を搭載
  - GNSSアンテナ：AeroAntenna AT1675-381
  - GNSS受信機：JAVAD Delta G3T
  - L5 SBAS受信機：コア製、古野電気製

実験用航空機「よつば」



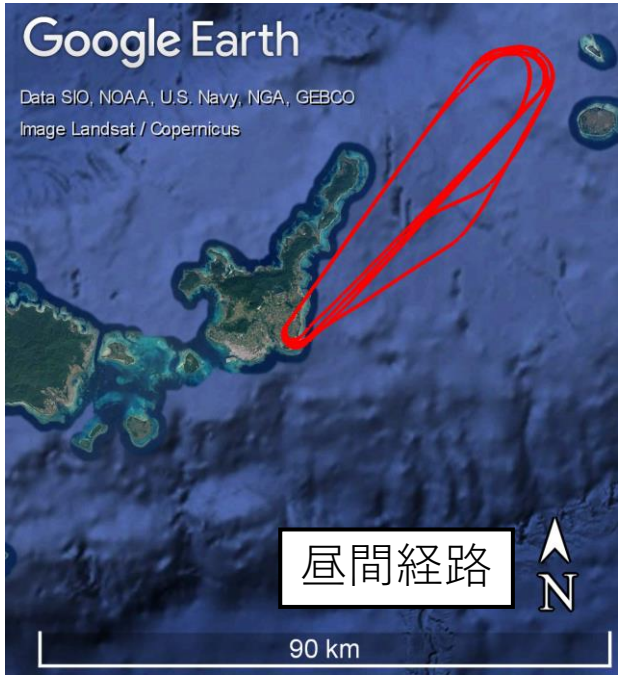
L5 SBAS受信装置構成

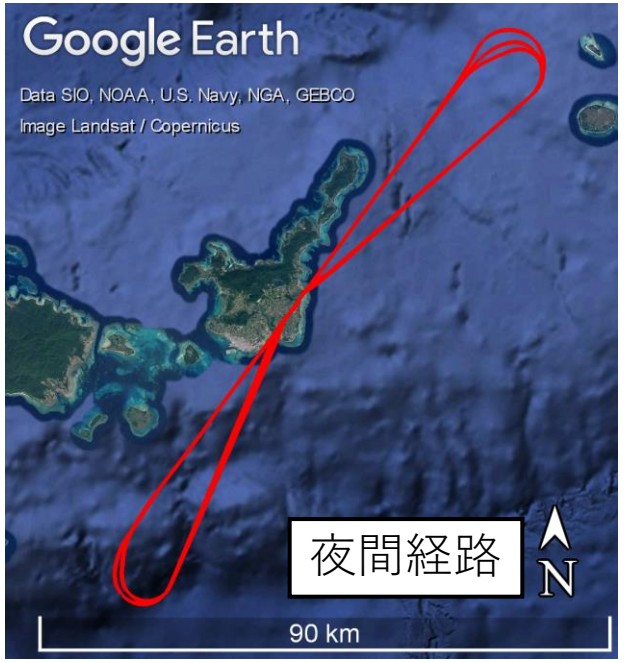
石垣島における飛行実験

- 実施期間：2025年5月24日～28日
  - 2025年2月26日の昼夜
  - 昼間：14:15~16:30
  - 夜間：20:44~23:03（日本時間）

- 飛行経路：石垣空港ローカルフライト
  - 新石垣空港を離陸
    →ローパスアプローチ（昼4回、夜5回）
    →着陸
  - 進入時以外の飛行高度：約2,000m

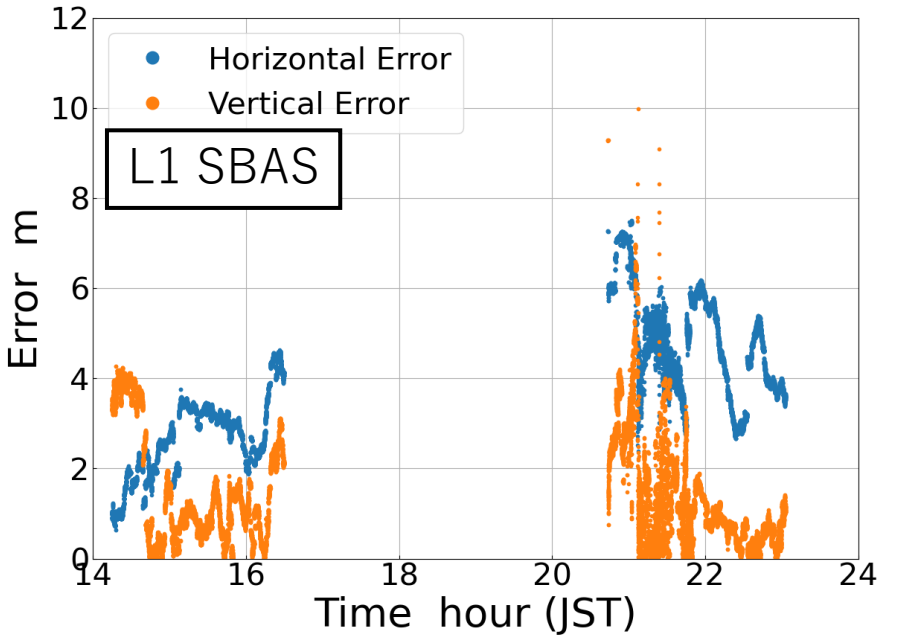
- 性能評価：
  - 測位精度（リファレンスにはRTK測位を利用）
  - LPV-200アベイラビリティ

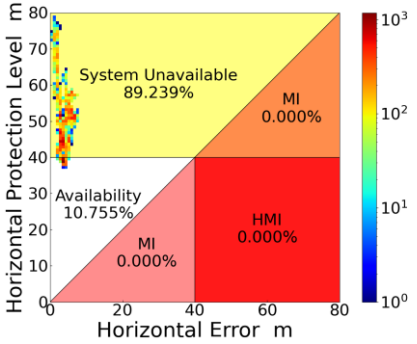


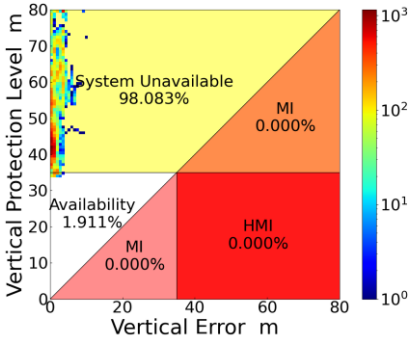


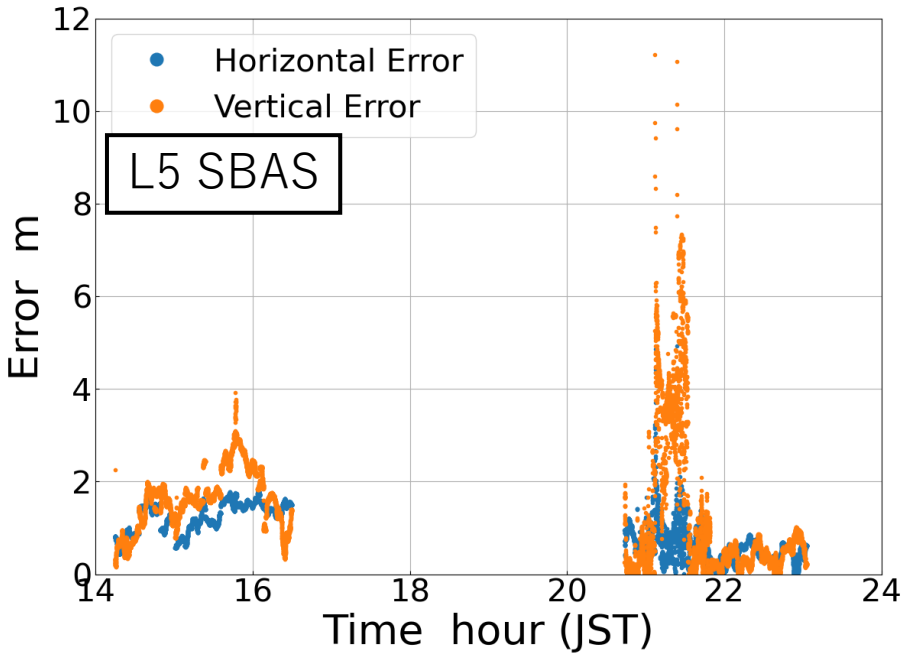
飛行実験結果

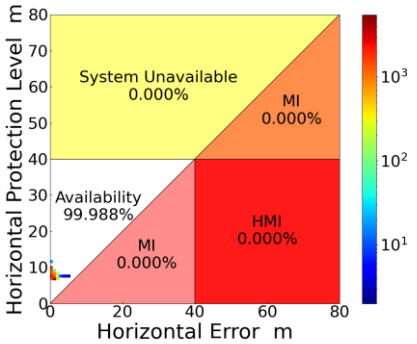
- 測位精度
  - L1 SBAS（MSAS）
    - 大きな誤差
      電離圏の影響大
  - L5 SBAS（プロトタイプ）
    - 良好な測位精度
    - 昼間の高度誤差が大きい
      MSASと比較して
    - 夜間に大きな誤差
- LPVアベイラビリティ
  - MSAS：　1.911%
  - DFMC：99.988%

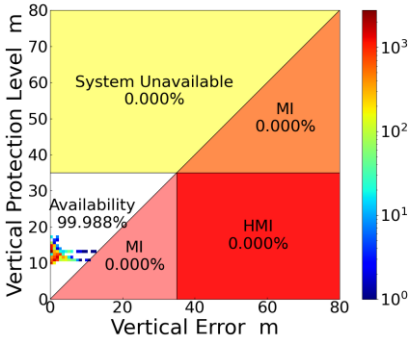




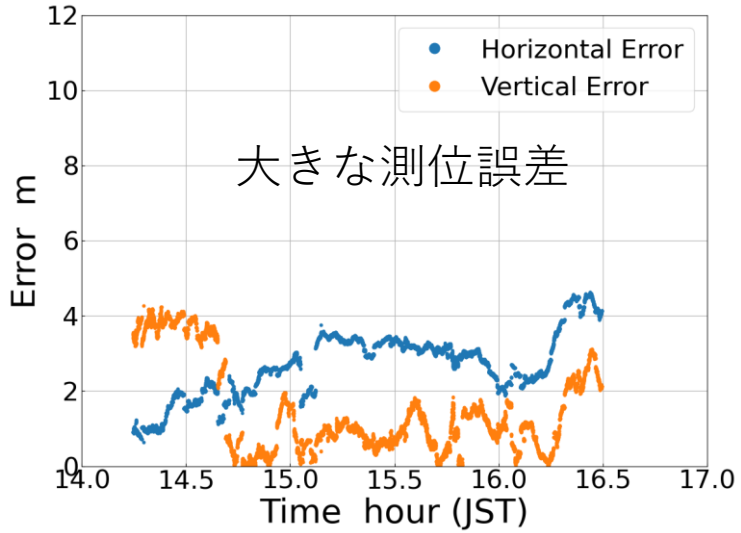
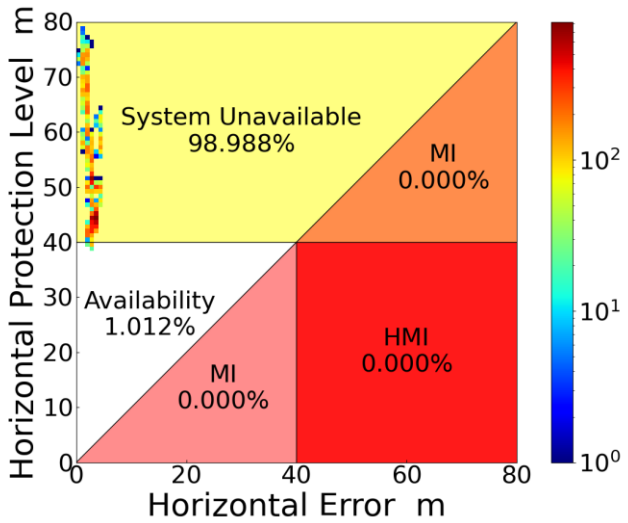
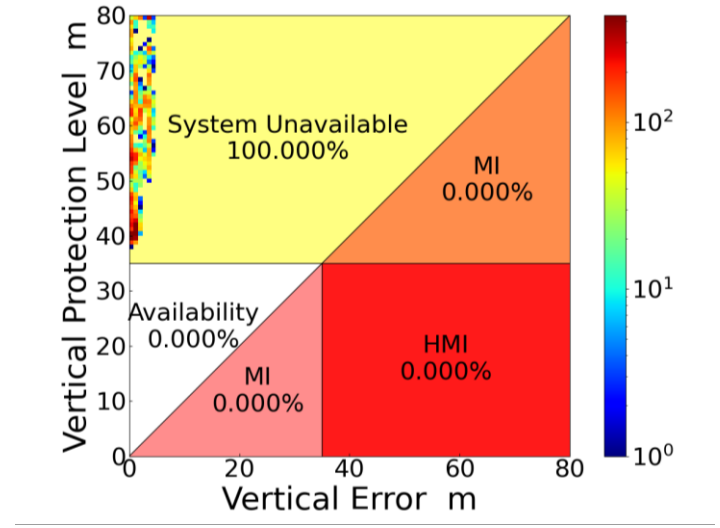
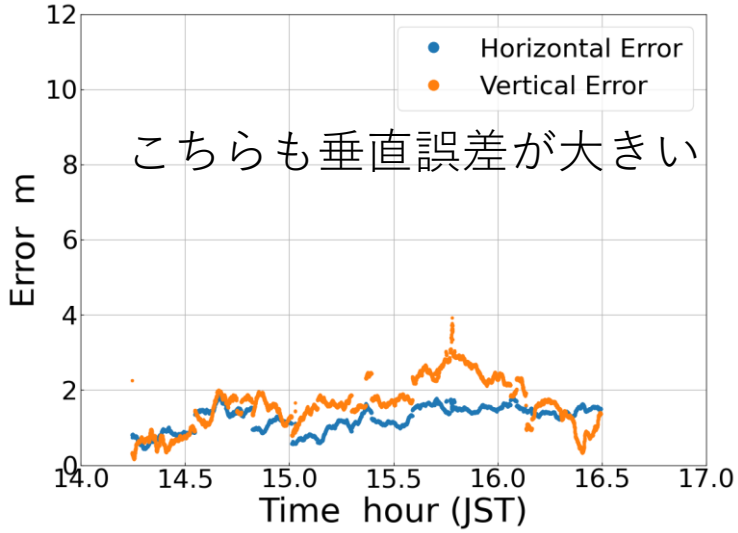
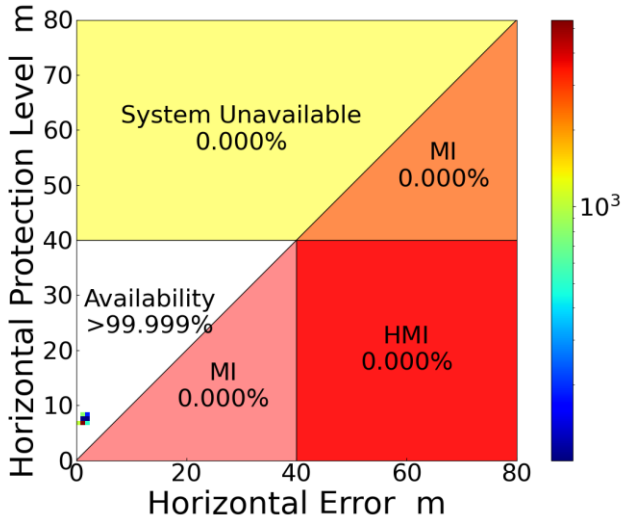
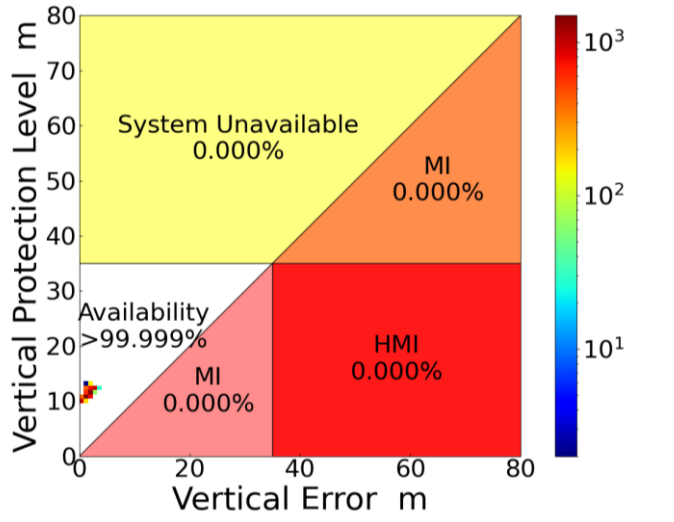








飛行実験結果（昼間フライト）

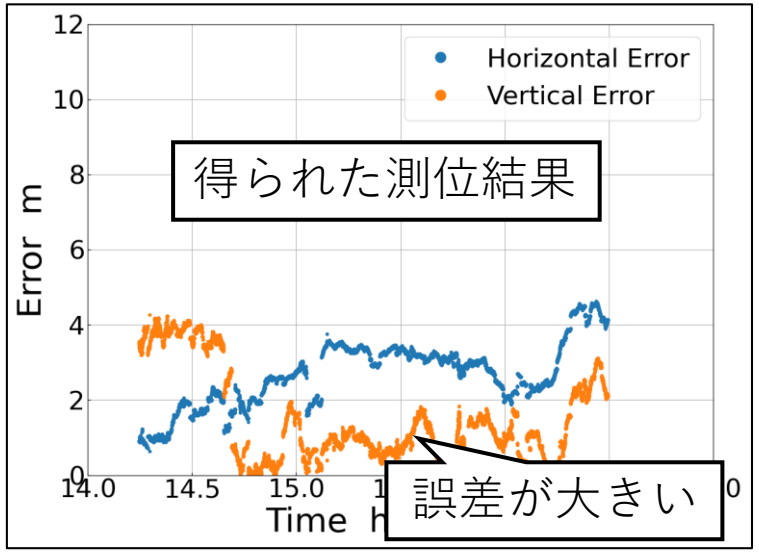
	測位誤差	インテグリティチャート（水平）	インテグリティチャート（垂直）
L1 SBAS			
L5 SBAS			

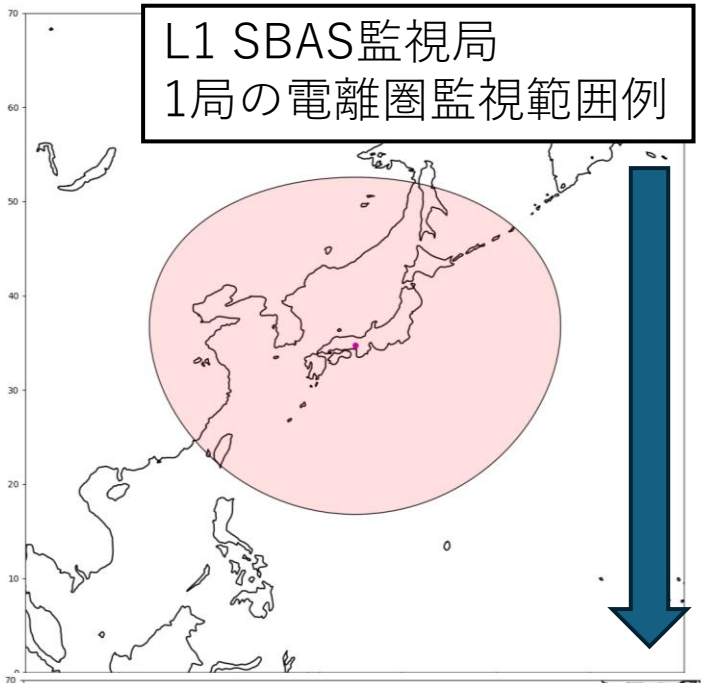
リファレンスに使ったRTKが悪い？

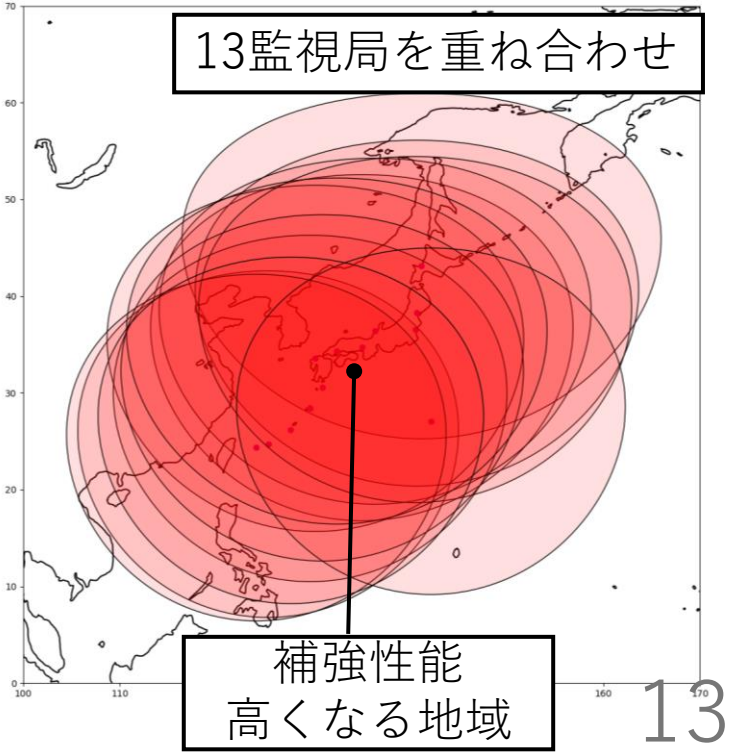
測位誤差の比較

- 得られた測位誤差が妥当なのか測位結果を検証する

地上における
測位結果と
比較する

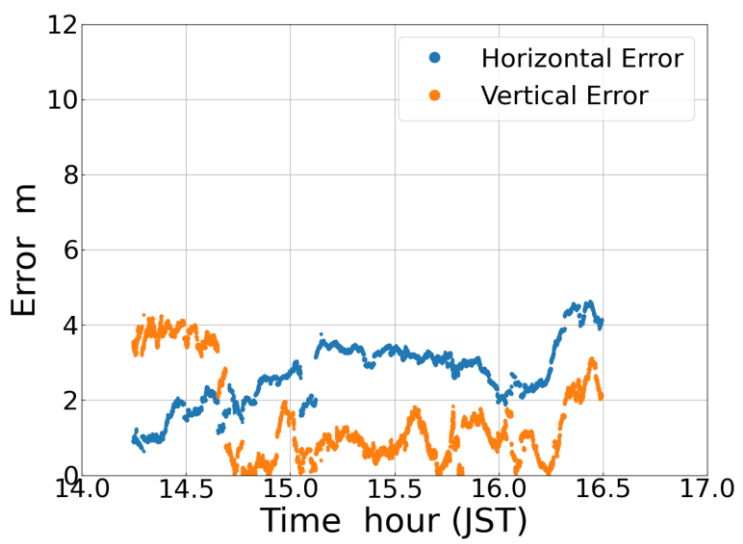
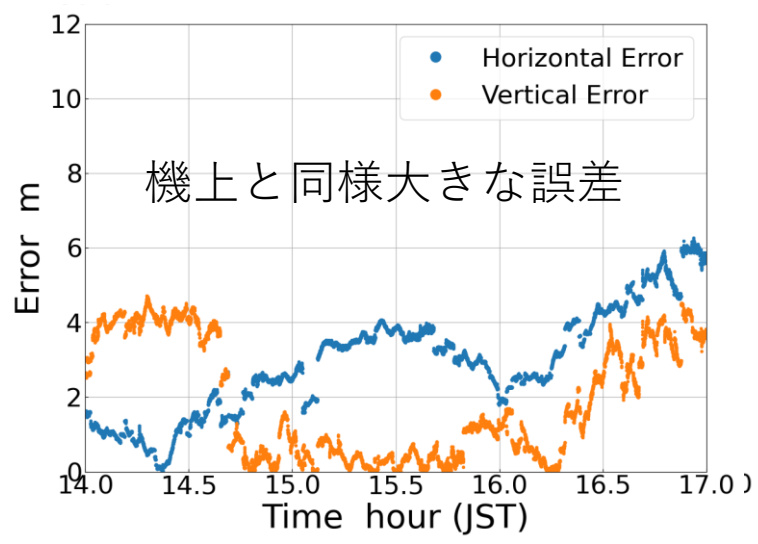
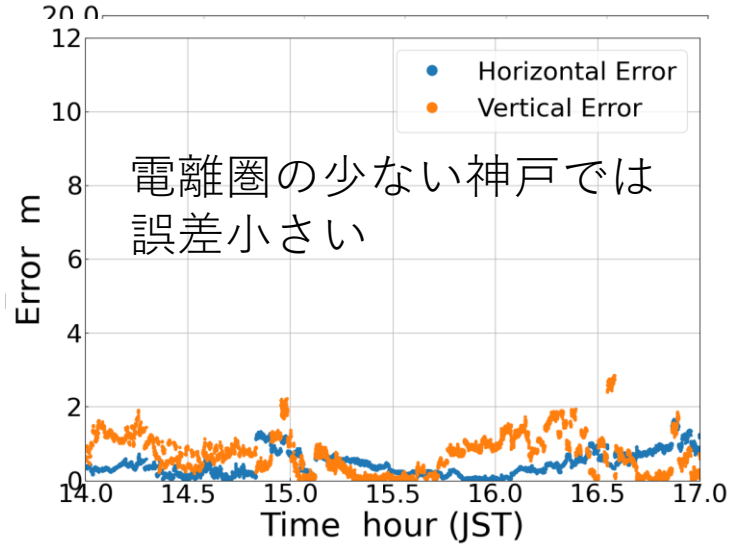
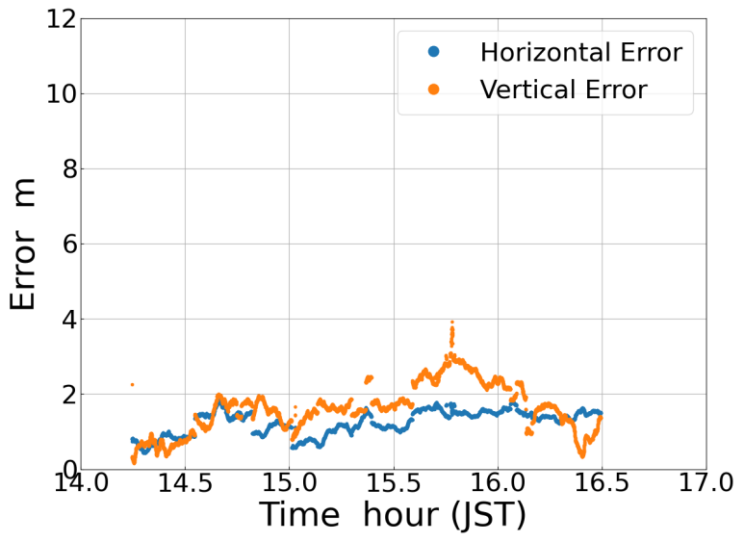
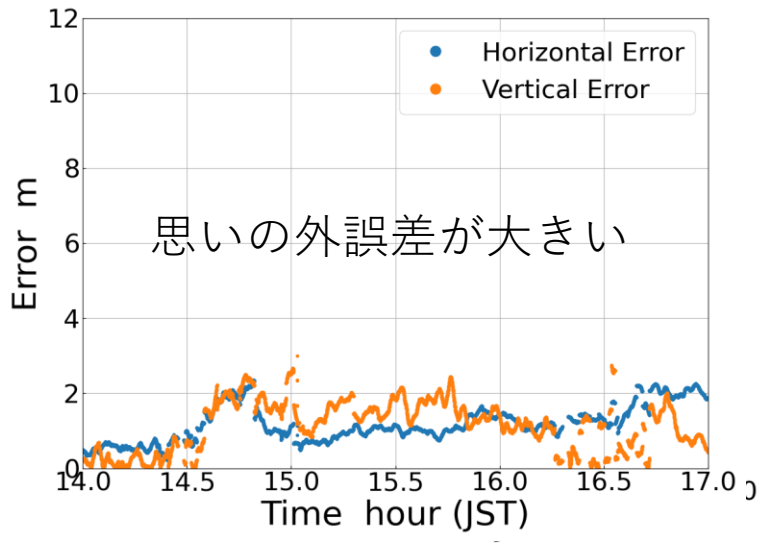
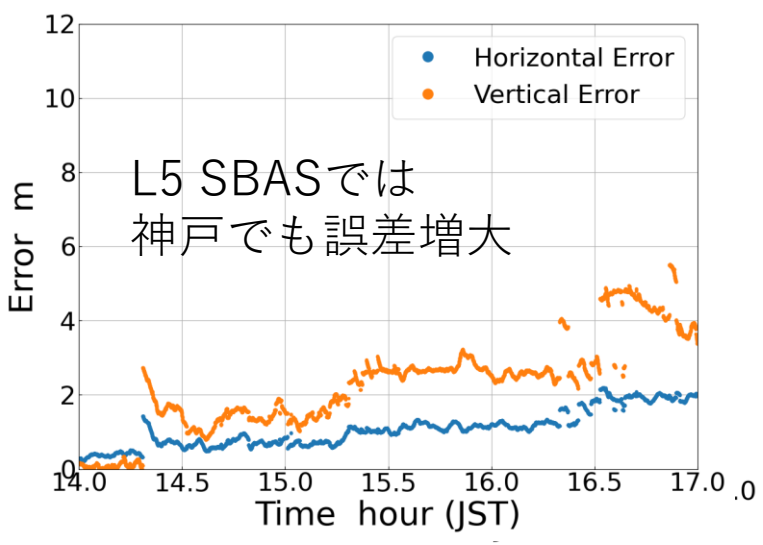






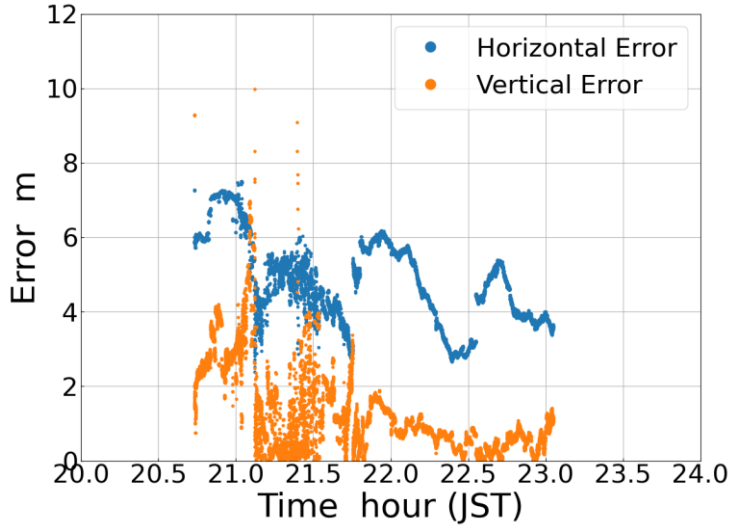
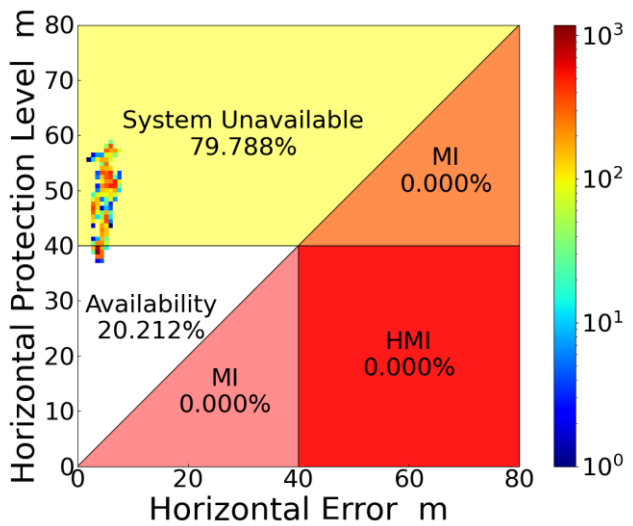
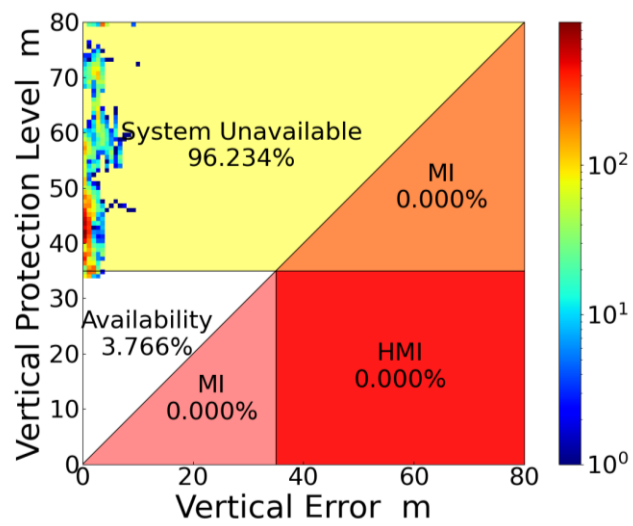
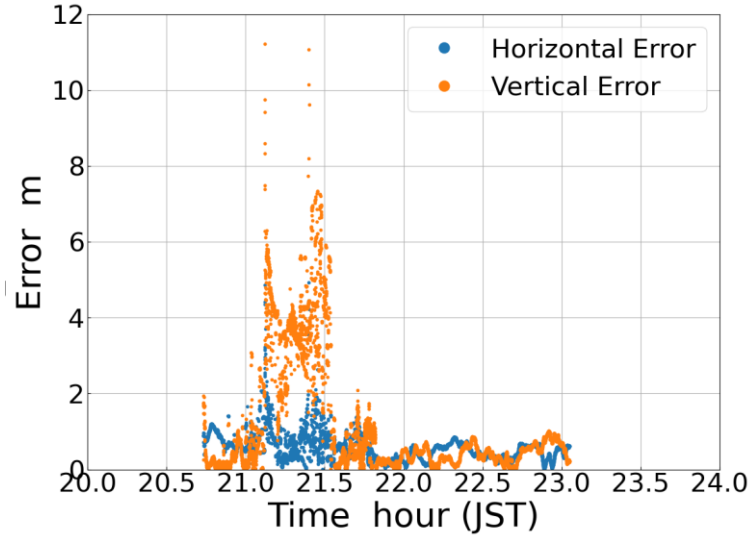
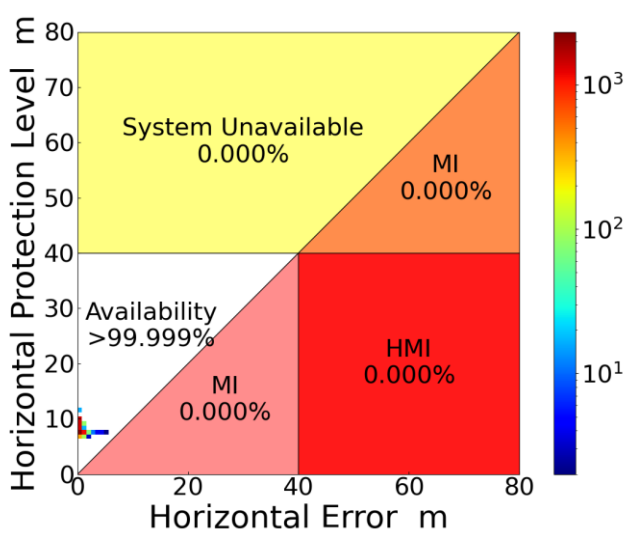
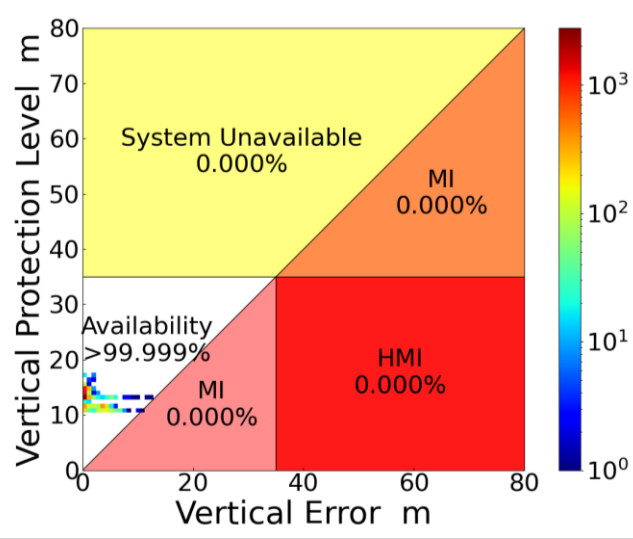
- 石垣島の電子基準点
  - 実験時周辺で**測位環境が大きく異ならない地域**
- 神戸の電子基準点
  - 石垣島から**電離圏環境的に十分離れている**
  - 監視局配置からL1SBASの補強性能が最も良くなる地域

昼間フライトー電子基準点との比較

	機上受信機	電子基準点（石垣）	電子基準点（神戸）
L1 SBAS			
L5 SBAS			

誤差傾向は地上と機上でおおよそ同じ ➡ 位置リファレンスのRTKに問題なし

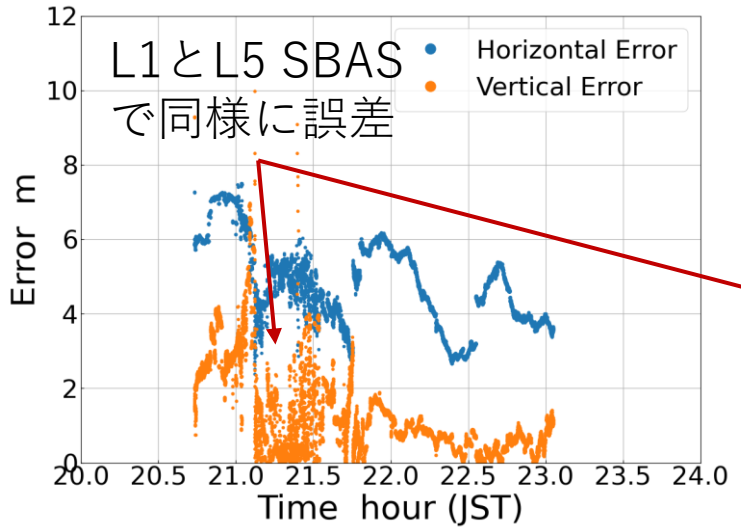
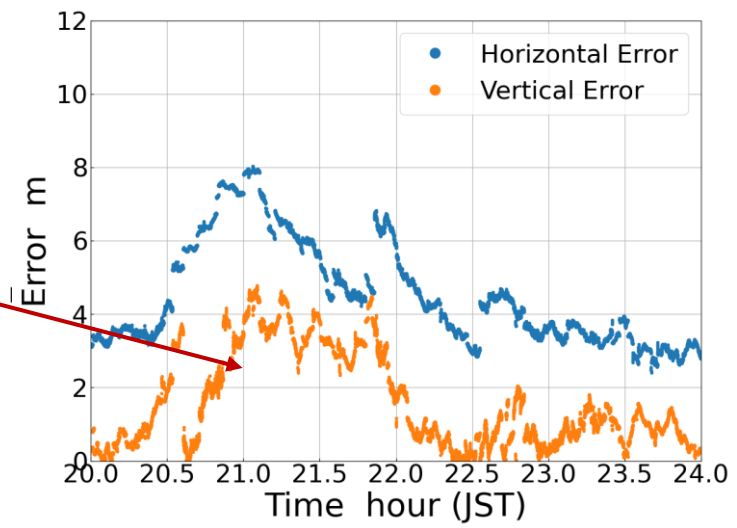
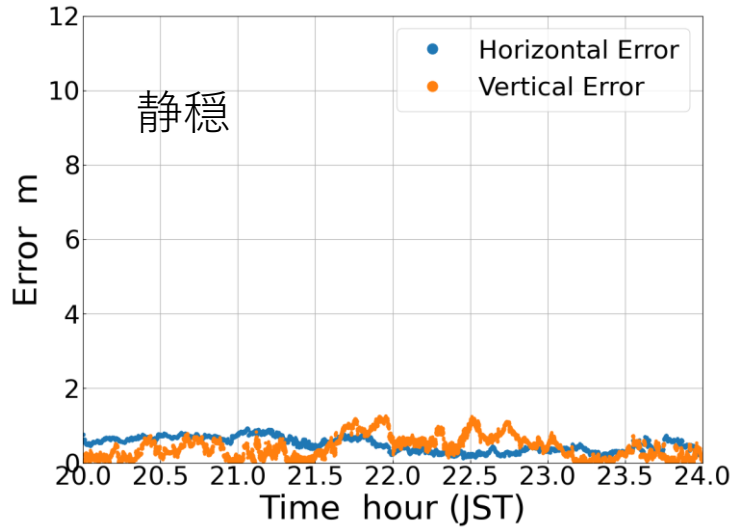
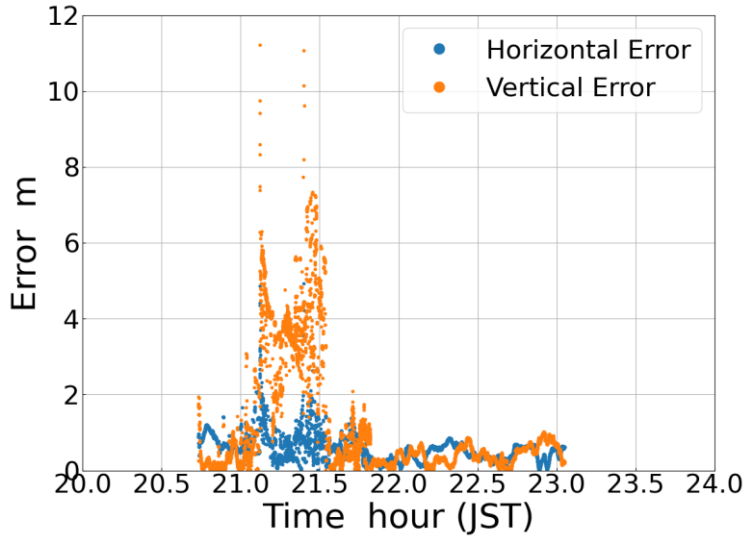
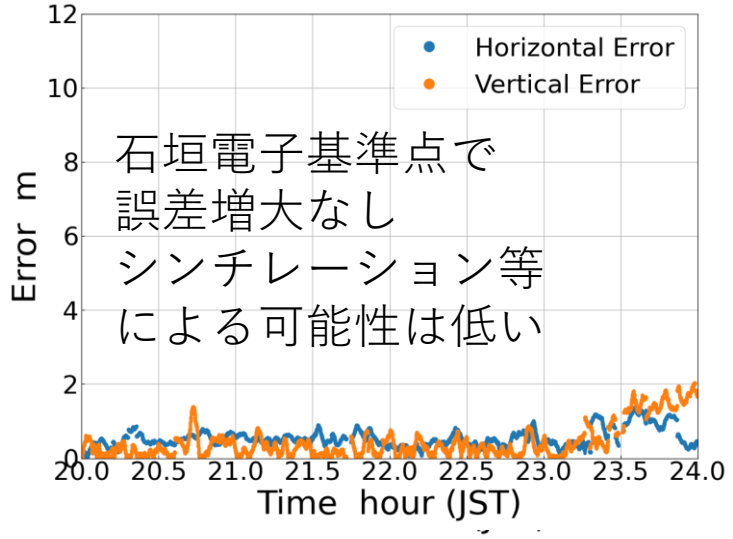
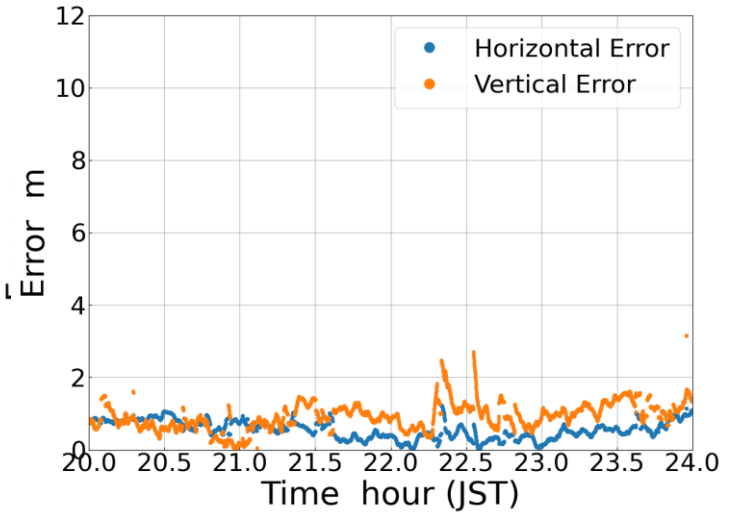
飛行実験結果（夜間フライト）

	測位誤差	インテグリティチャート（水平）	インテグリティチャート（垂直）
L1 SBAS			
L5 SBAS			

21:00~21:30で誤差増大

L5SBASは昼間ほどの誤差増大なし

夜間フライトー電子基準点との比較

	機上受信機	電子基準点（石垣）	電子基準点（神戸）
L1 SBAS			
L5 SBAS			

L5SBAS測位精度良好

夜間フライトにおける測位誤差

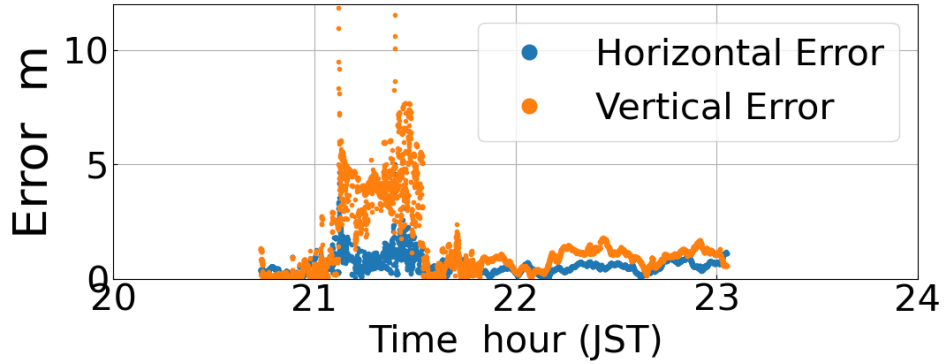
- 夜間フライトで大きな測位誤差
  - 21:06~21:32が特に大きな誤差

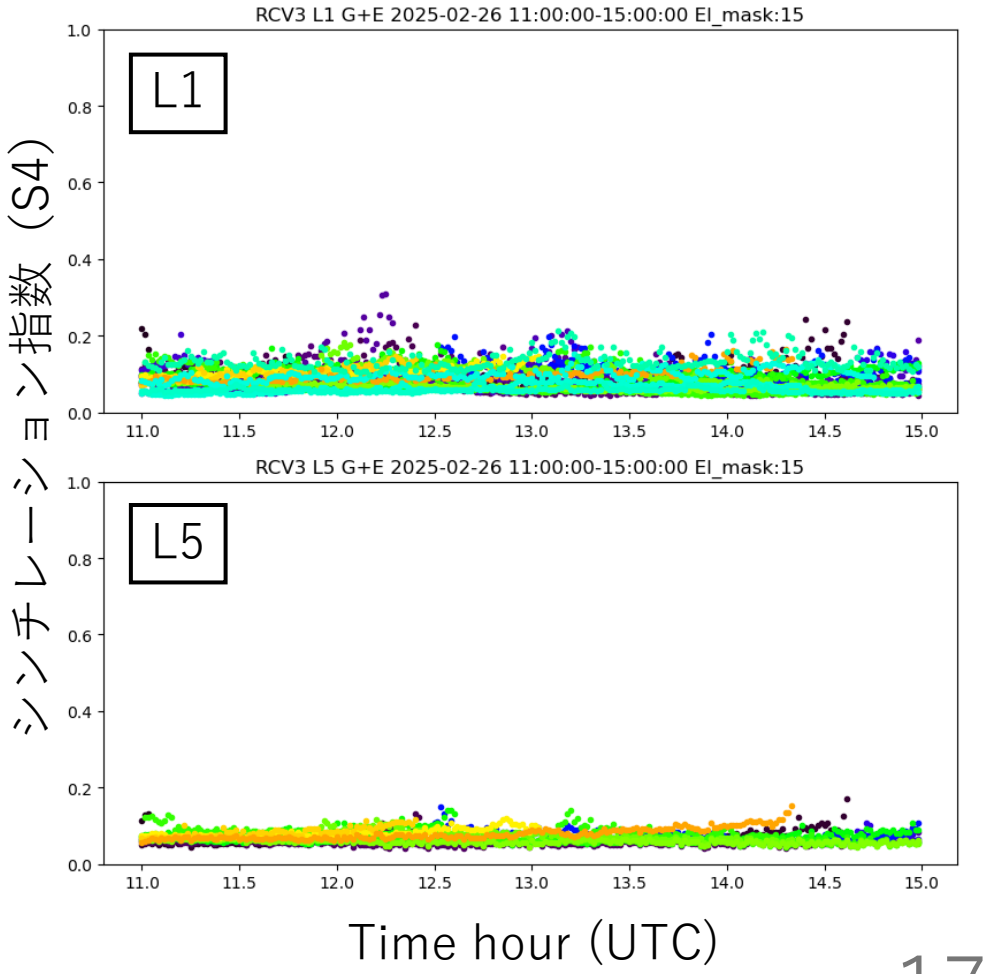
- 原因は調査中
  - 電離圏の状態が特別悪化した可能性は小さい
    - シンチレーションは発生していなかった
  - 衛星数も十分
  - 高度上昇後に石垣島から離れた地点で誤差が増大
    →リファレンスに利用したRTKが
    長基線となりミスFIXか

- リファレンスのミスFIXが問題であった場合

  将来的にLPV等設定時の検査において、同様の問題が発生する可能性がある

  （高精度GNSS測位のリファレンスをどうするのかという問題）





夜間フライトにおける測位誤差

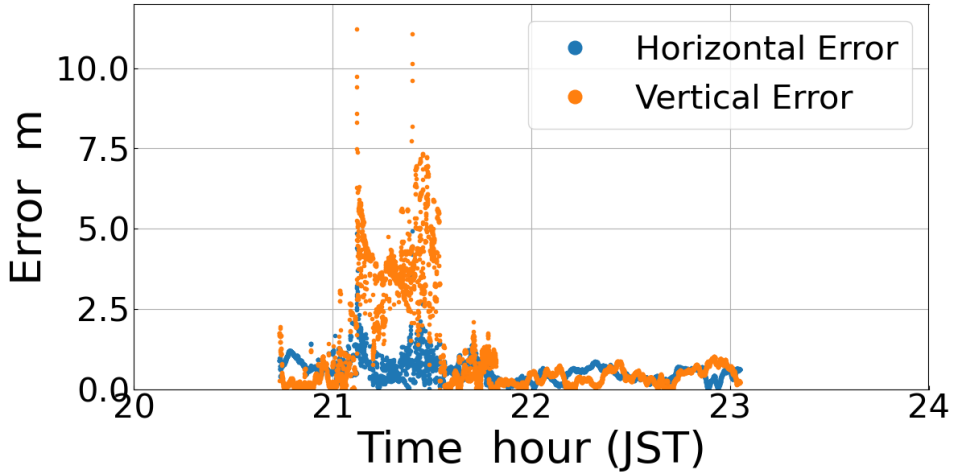
- 夜間フライトで大きな測位誤差
  - 21:06~21:32が特に大きな誤差

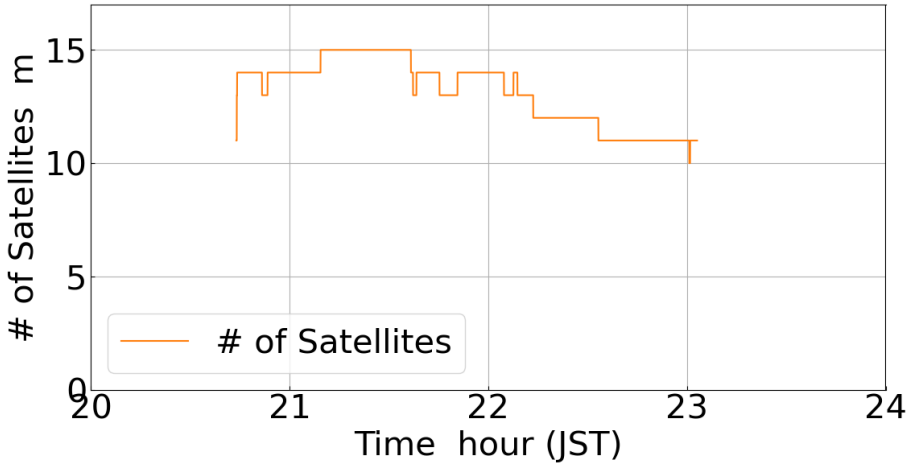
- 原因は調査中
  - 電離圏の状態が特別悪化した可能性は小さい
    - シンチレーションは発生していなかった
  - 衛星数も十分
  - 高度上昇後に石垣島から離れた地点で誤差が増大
    →リファレンスに利用したRTKが
    長基線となりミスFIXか

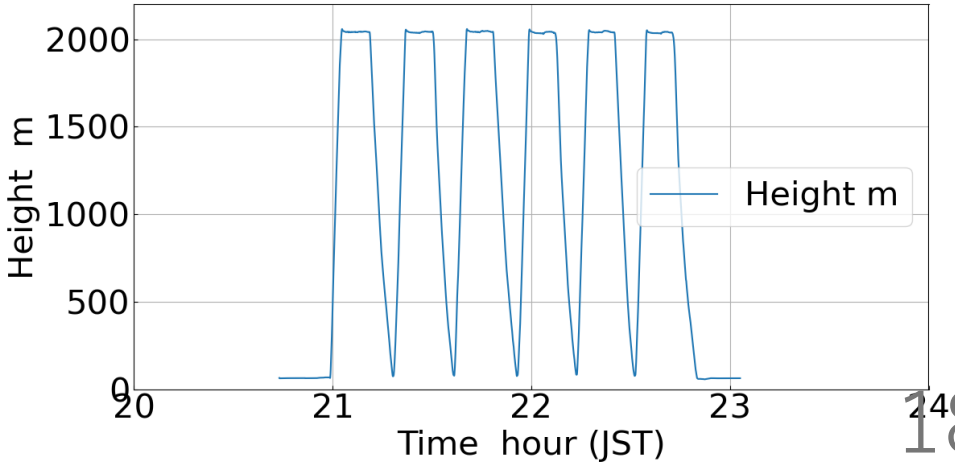
- リファレンスのミスFIXが問題であった場合

  将来的にLPV等設定時の検査において、同様の問題が発生する可能性がある

  （高精度GNSS測位のリファレンスをどうするのかという問題）







L5SBASの測位精度

測位精度

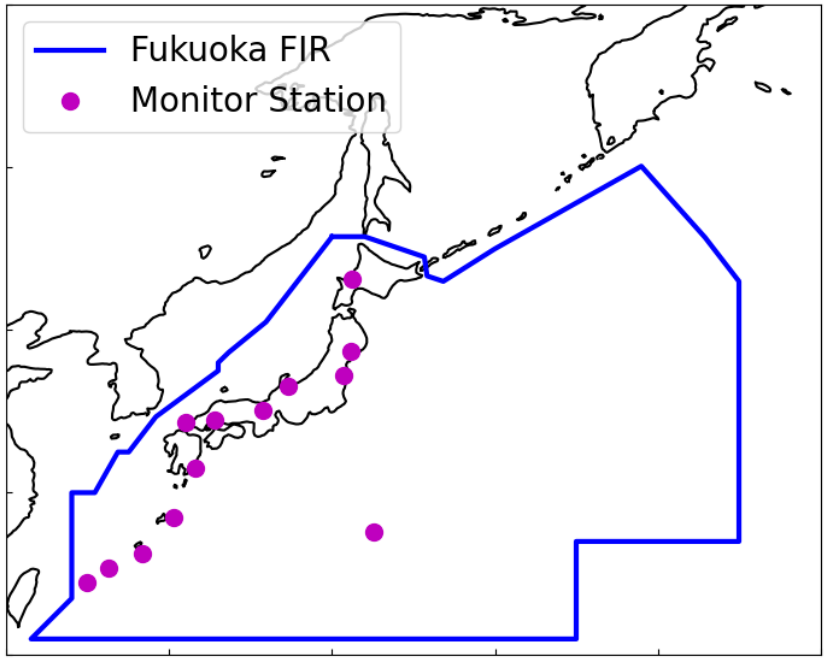
飛行実験におけるL1 SBASとL5 SBASの測位精度

	水平95% m		垂直95% m	
	MSAS	プロトタイプ	MSAS	プロトタイプ
昼間フライト	4.29	1.65	3.88	2.72
夜間フライト	7.08	1.12	3.64	4.35
全体	6.44	1.61	3.84	3.72

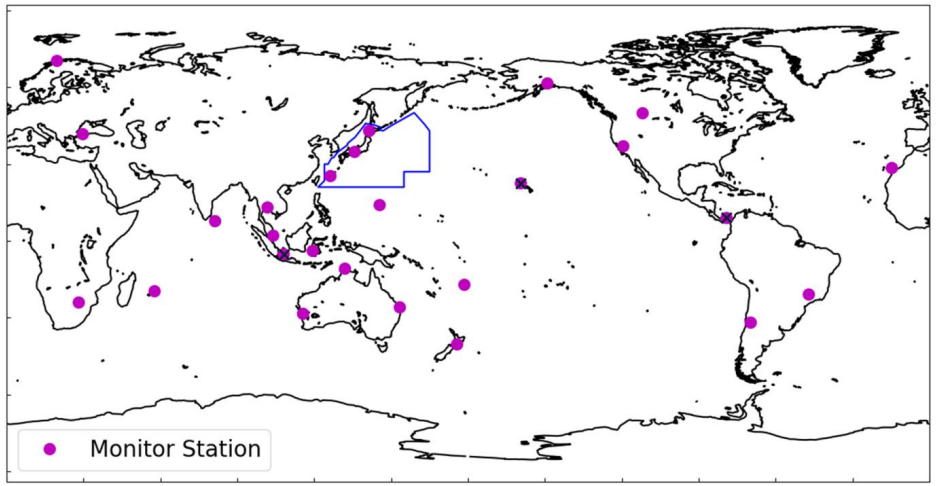
- L5SBASの昼間の垂直測位精度が悪かったが、それ以外は良好な測位精度

測位誤差の原因：調査中

- MSASと比較して世界局を使っている
  →日本における監視局密度が小さい
- 新しく追加された観測局の利用設定が不適切の可能性
  - 新規局：ハワイ、アラスカ、カリフォルニア、グアム



L1 SBAS（MSAS）の監視局配置



L5 SBAS（プロトタイプ）の監視局配置

まとめ

- 次世代SBAS（L5 SBAS）が規格化
- 電子航法研究所では、L5 SBASプロトタイプ機を作成、QZSSを利用した放送実験を実施中

- 石垣島におけるL5 SBASの実証実験（飛行実験）を実施
  - 測位精度は良好
  - 南西諸島においても高いLPVアベイラビリティが得られる可能性
  - ただし、プロトタイプ機の性能が悪化する時間帯あり
    - 原因調査中
  - 高精度GNSSを用いた飛行の位置リファレンスをどうするのか検討が必要
    - RTKの測位精度が十分でない場合

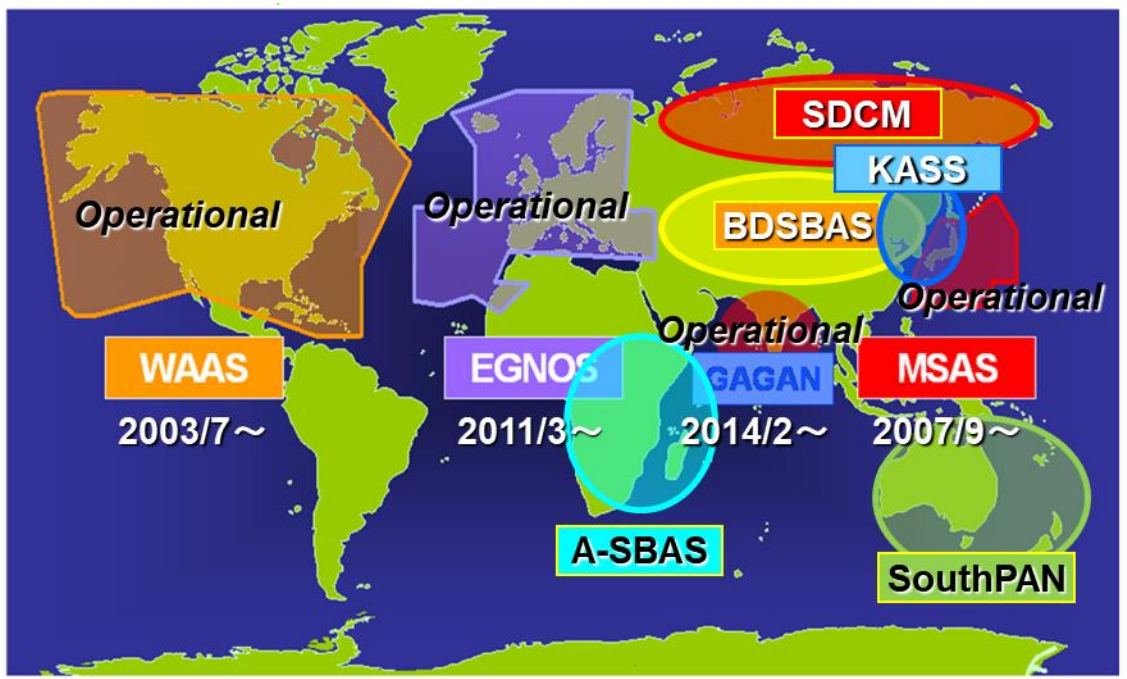
- 引き続き、L5 SBASの性能向上と認証機能等の機能拡張に取り組みたい。

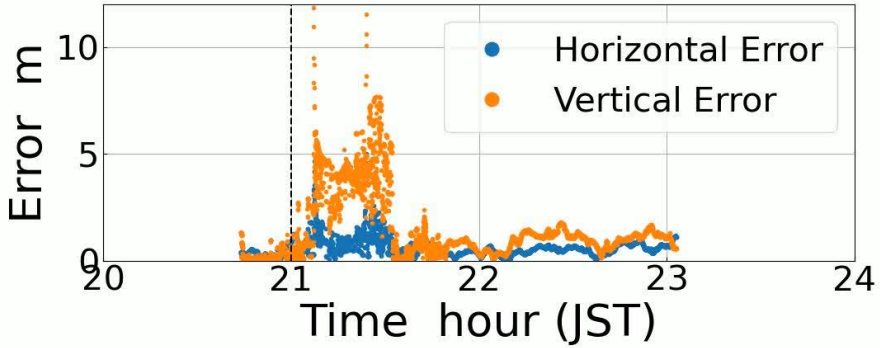
JA35EN
17.65 m
4.36 m
14.23 m
JA35EN

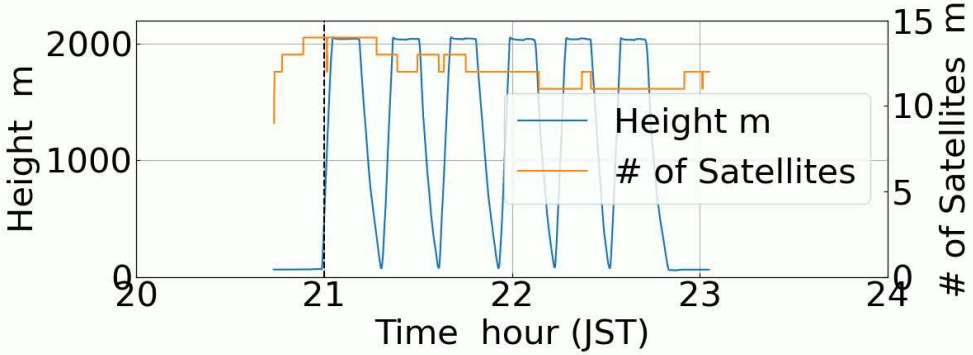
- 運用中のSBAS：すべてL1 SBAS
  - WAAS（米国、2003～）：段階的な改良を経て、現在はLPV200（CAT-I相当）モードまでサービス。2014年に二周波数対応の開発を開始、L5信号を試験的に送信中。
  - MSAS（日本、2007～）：現在はEnroute～NPAのサービス。航空局が整備・運用。2020年度から準天頂衛星3号機（GEO）を使用してサービスを継続。
  - EGNOS（欧州、2011～）：現在はLPV200モードまでサービス。二周波数対応及びGalileo対応のEGNOS V3を開発中。
  - GAGAN（インド、2014～）：
    En-route～LPVをサービス。
  - KASS（韓国、 2023年12月～）

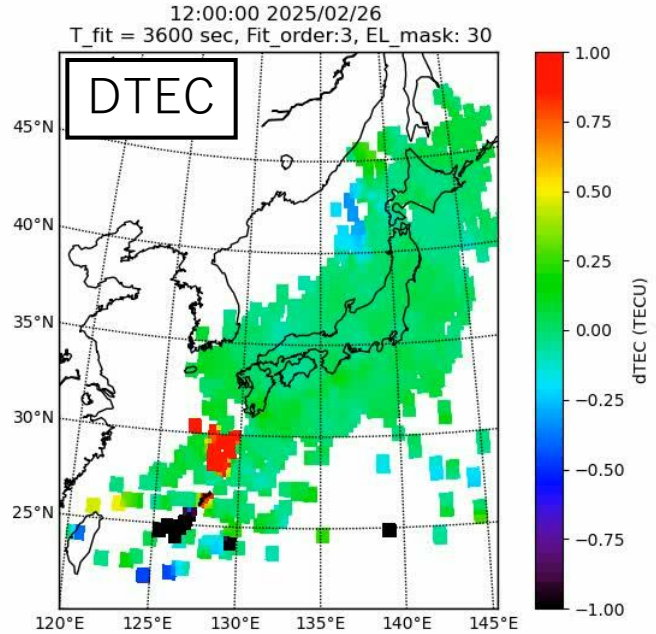
- 整備中のSBAS：
  - ロシア：SDCMを整備中。

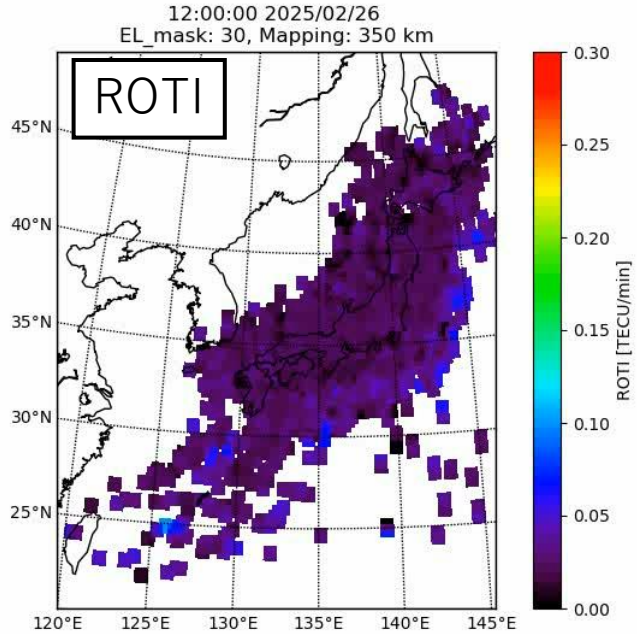
    静止衛星3機から試験送信中。
  - 中国：BeiDouの一部として
    BDSBASを整備中。豪州：SouthPANの試験中。
  - アフリカ：A-SBASの試験中。
    NIGCOMSAT-1Rを使用。
  - パキスタン：Pak-SBAS




Horizontal Error
Vertical Error
Error m
Time hour (JST)

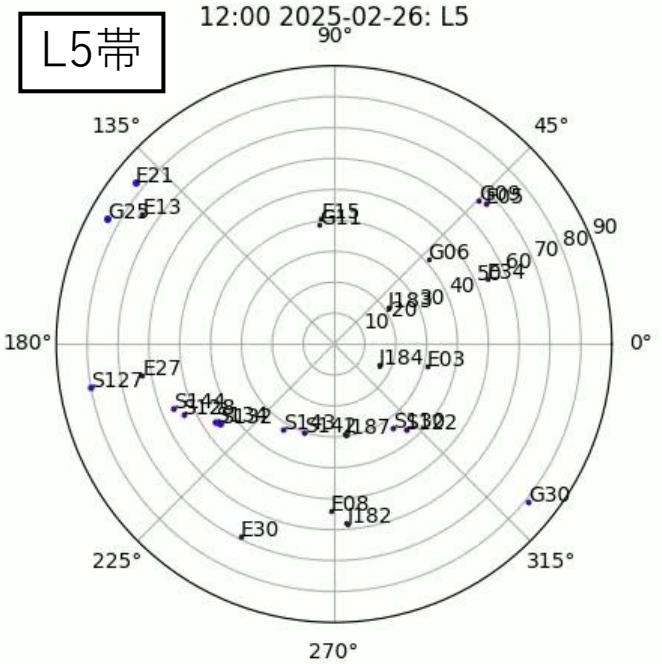

Height m
# of Satellites
Time hour (JST)


12:00:00 2025/02/26
T_fit = 3600 sec, Fit_order:3, EL_mask: 30
DTEC
dTEC (TECU)


12:00:00 2025/02/26
EL_mask: 30, Mapping: 350 km
ROTI
ROTI [TECU/min]

L1帯
12:00 2025-02-26: L1

L2帯
12:00 2025-02-26: L2


L5帯
12:00 2025-02-26: L5

シンチレーション