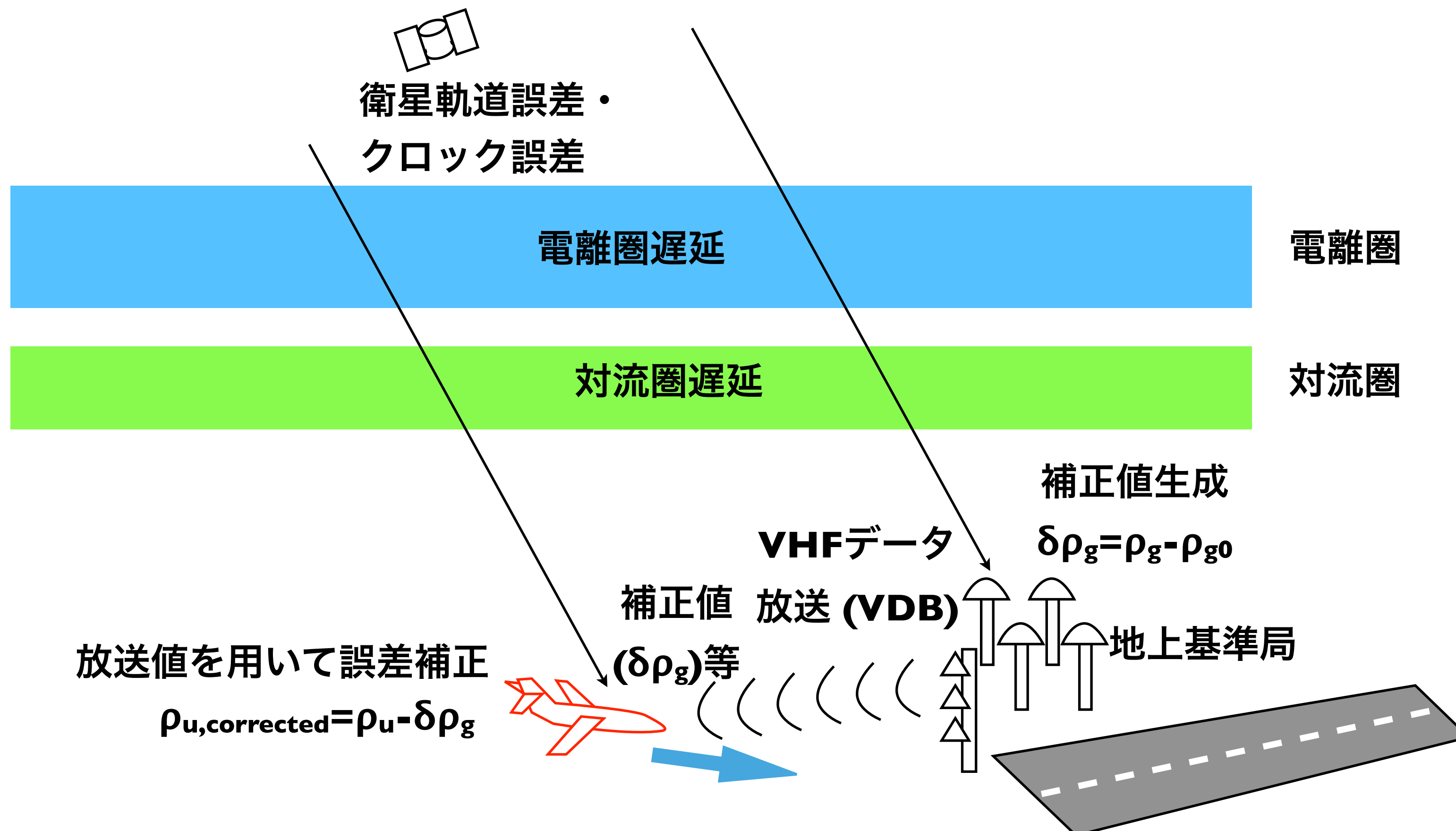


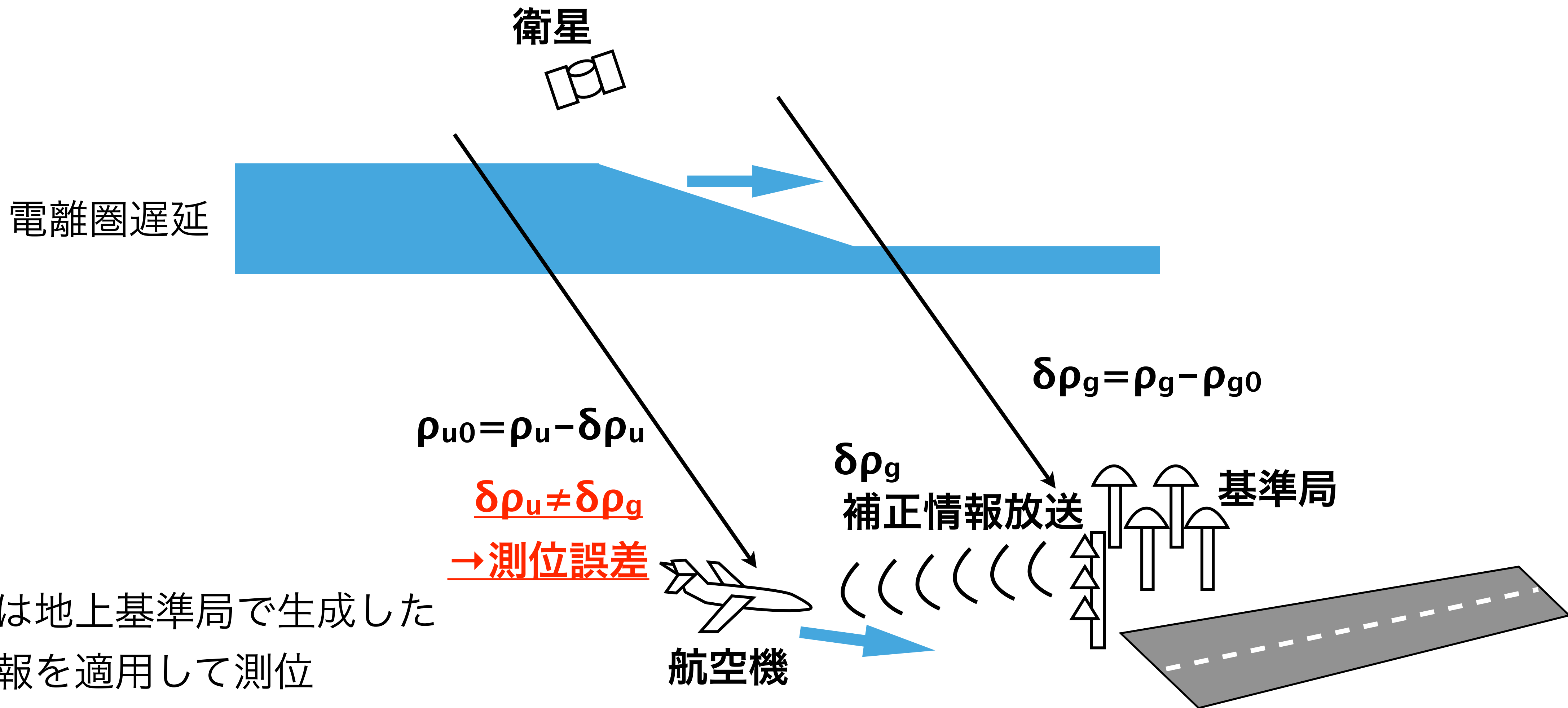
東南アジアにおけるGBAS導入のための電離圏環境評価

航法システム領域 *齋藤 享、吉原 貴之、中村 真帆 (現拓殖大学)

- * GBAS: GNSS ground-based augmentation system (地上型衛星航法補強装置)
 - ディファレンシャルGNSSを用いた精密進入・着陸誘導装置
 - 測距補正值、インテグリティ情報、進入パス情報を地上から放送



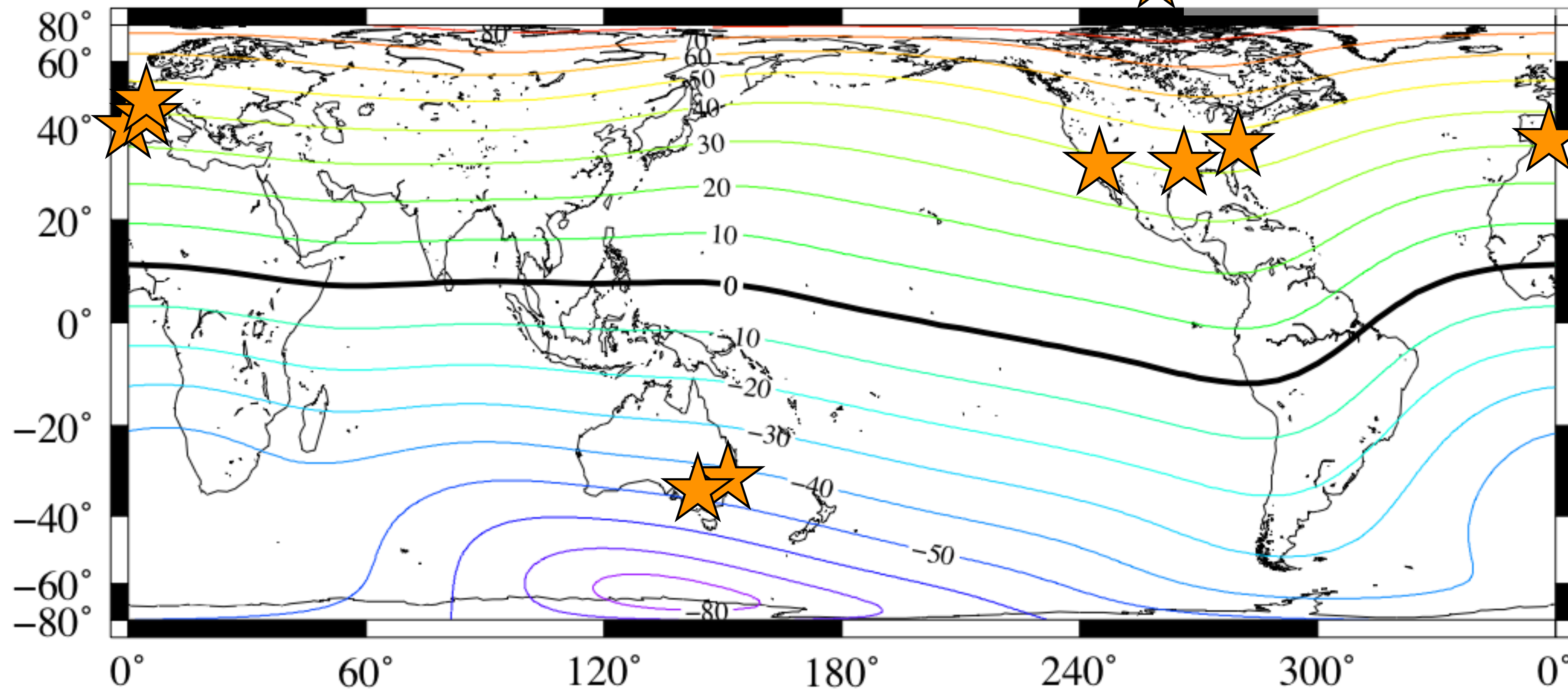
- * 衛星クロック誤差
 - ディファレンシャル補正で完全消去
- * 衛星軌道誤差、対流圏遅延
 - 空港周辺程度の範囲では大きく変わらない
- * 電離圏遅延
 - 通常は大きく変わらないが時に大きく変動する (電離圏擾乱)



- * 航空機は地上基準局で生成した補正情報を適用して測位
- * 基準局と航空機で電離圏遅延量が異なる場合に誤差の可能性

GBASの導入状況

★ 運用中（ロシアを除く）



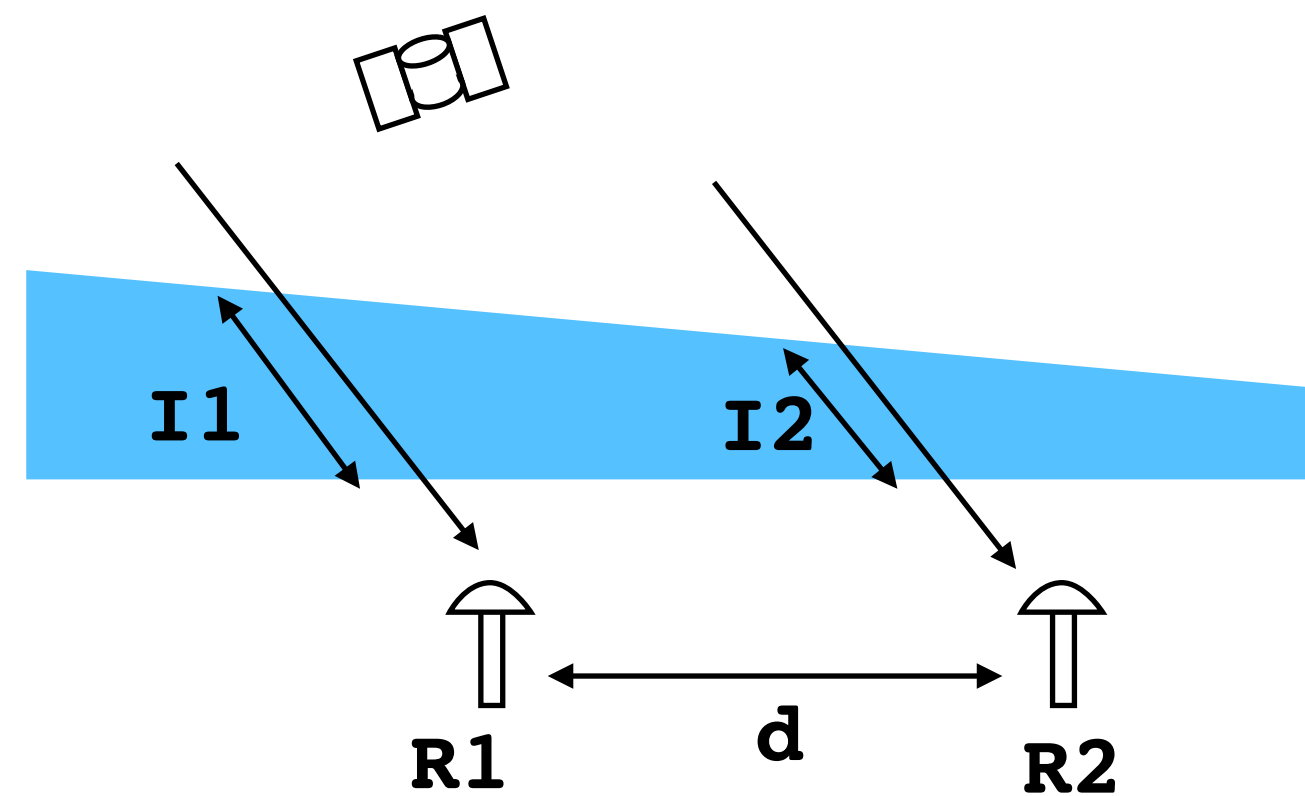
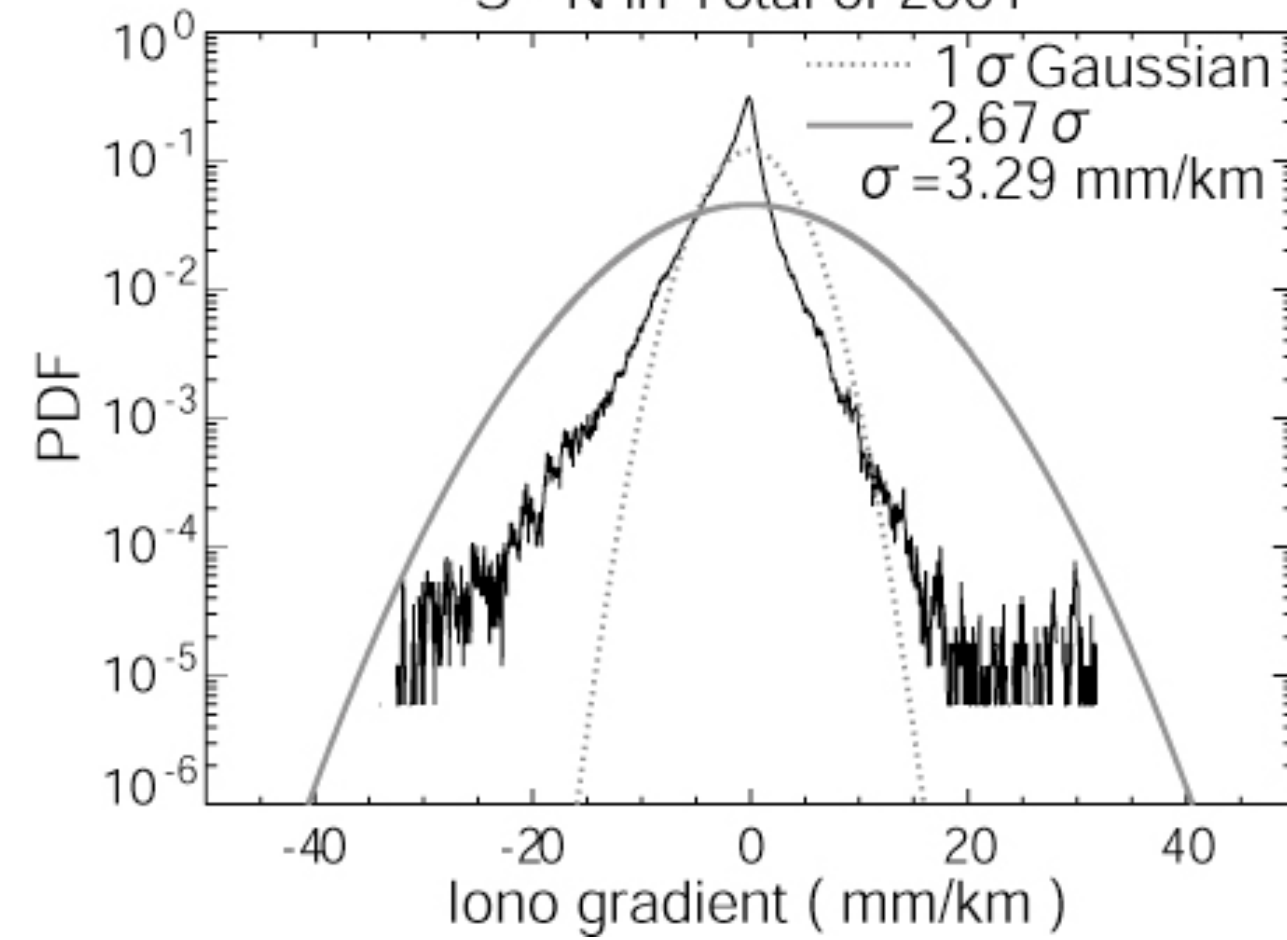
- * GBASの導入は世界中で進みつつあるが、磁気低緯度地域では運用に至ったものはまだない
 - 中緯度地域に比べ厳しい電離圏環境
 - ✓ 羽田空港においては、磁気低緯度対応のGBASを運用評価中
 - ➔ 日本発のGBASの海外展開の可能性

- * 電離圏静穏時と擾乱時を分けて扱う
 - 電離圏変動が2桁異なるため、まとめて取り扱うと可用性が損なわれる
- * 静穏時
 - 常に存在する背景電離圏変動であり、保護レベル(10^{-7})レベルの信頼性)で誤差をバウンド
 - **垂直換算電離圏遅延量勾配(σ_{vig})**で記述
- * 擾乱時
 - 常には存在しないが、発生すると危険な誤差の要因となりうる
 - 電離圏異常を検出、または航空機が危険な状況にならないように事前に対策
 - **電離圏脅威モデル**により記述

静穏時電離圏勾配パラメータ (σ_{vig})

発生確率密度分布

S - N in Total of 2001



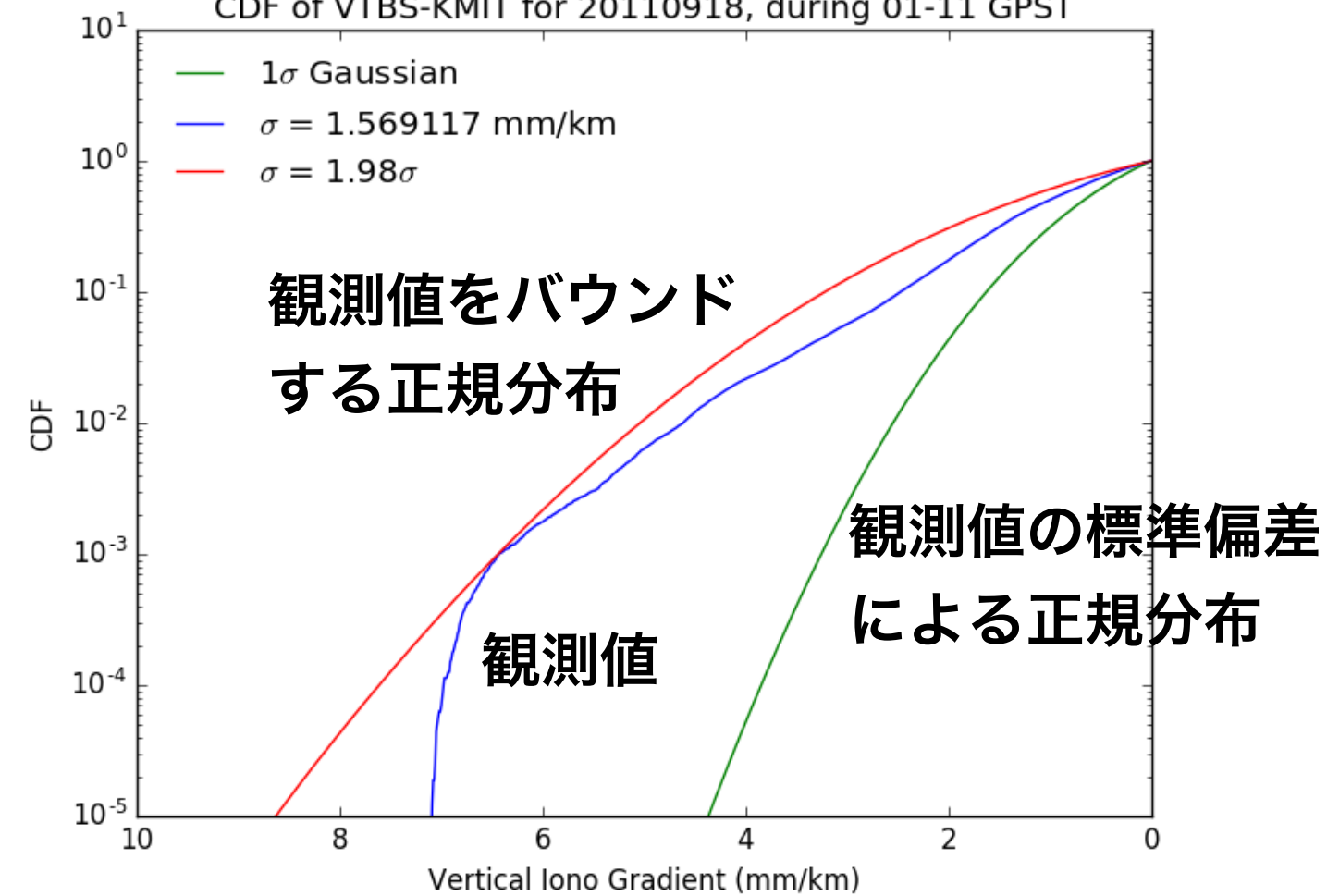
垂直換算電離圏勾配

$$G_{12} = (I_1 - I_2) / d / F_{PP}$$

- ◆ Nominal gradient is several mm/km
- ➡ Precise ionospheric delay estimation is necessary

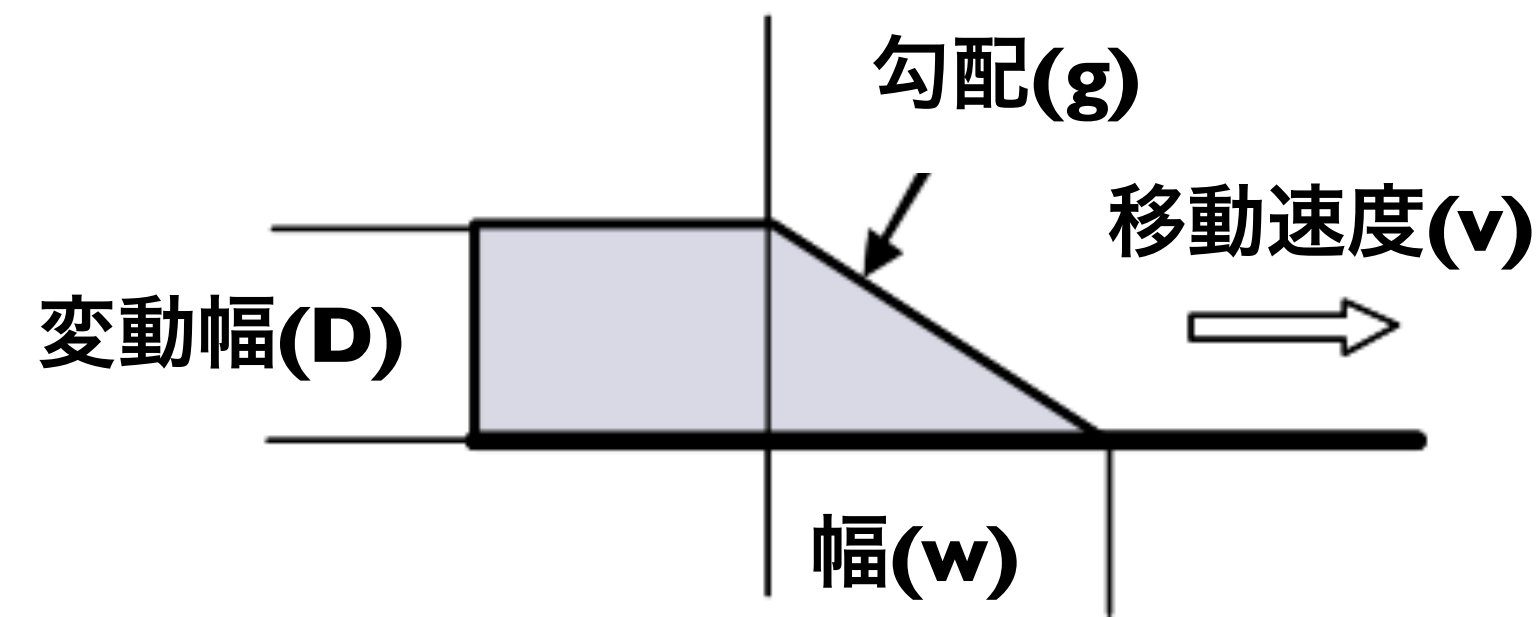
累積発生確率密度分布

CDF of VTBS-KMIT for 20110918, during 01-11 GPST



垂直換算電離圏勾配

- * 2受信機間の電離圏遅延量差から電離圏勾配を求める
 - Station-pair法
- ◆ 静穏時電離圏勾配は数mm/km
- ➡ 精密な電離圏遅延量差推定が必要

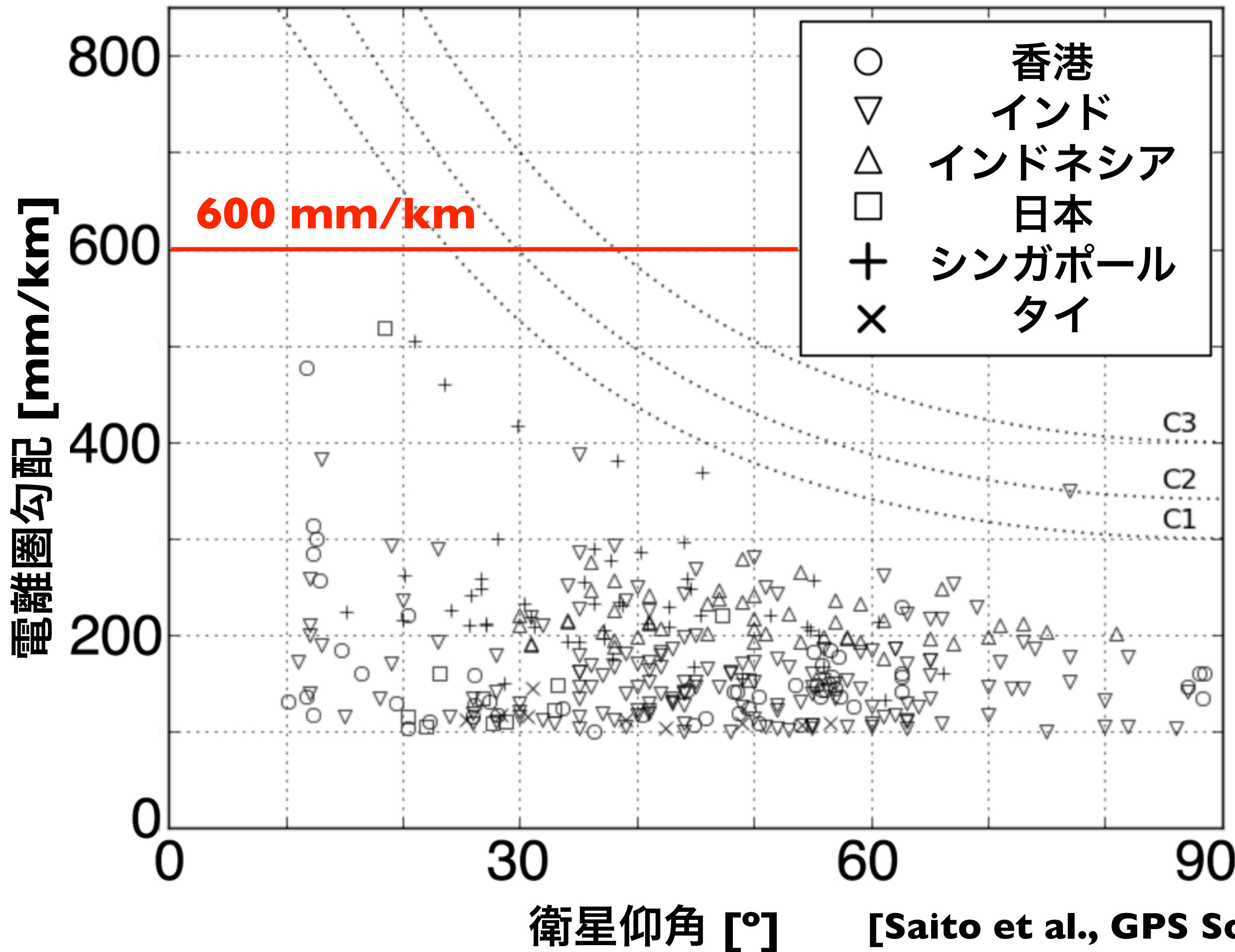


米国本土(CONUS) モデル

カテゴリーIII GBAS (GAST-D)
SARPs 検証用モデル

| パラメータ | 値の範囲 |
|--------------|---------------------|
| 幅 (w) | 25-200 km |
| 変動幅 (D) | 0-50 m |
| 移動速度 (v) | 0-750 m/s |
| 勾配 (g) | 衛星仰角に依存 |
| 衛星仰角 (EL) | 勾配最大値 (g) |
| EL < 15° | 375 mm/km |
| 15 ≤ EL < 65 | 375 + (EL-15) mm/km |
| 65 ≤ EL | 425 mm/km |

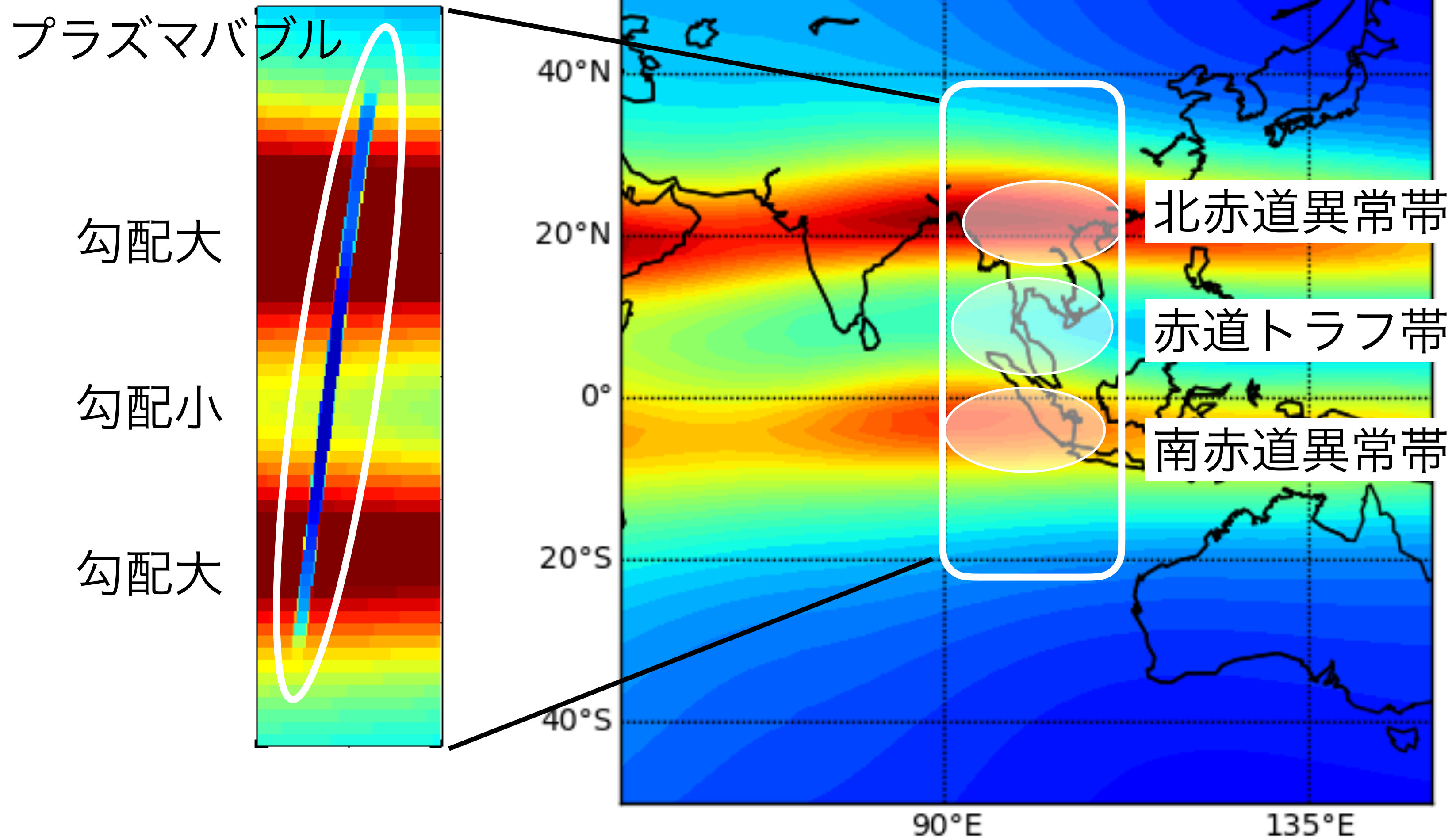
| パラメータ | 値の範囲 |
|--------------------|------------|
| 幅 (w) | 25-200 km |
| 変動幅 (D) | 0-80 m |
| 移動速度 (v) | 0-1500 m/s |
| 勾配 (g) | 移動速度に依存 |
| 移動速度 (v) | 勾配最大値 (g) |
| v < 750 m/s | 500 mm/km |
| 750 ≤ v < 1500 m/s | 100 mm/km |



- * ICAOアジア太平洋地(APAC)電離圏問題検討タスクフォース(ISTF)によるモデル
 - アジア太平洋地域の磁気低緯度地域のデータを使用
 - ICAO APAC文書として採択
 - ✓ 電離圏脅威モデルとしての採用は各国の責任
- * アジア太平洋の磁気低緯度地域を一つとして扱っているため、場所によっては保守的すぎる可能性あり

磁気低緯度地域内変動

電離圏遅延



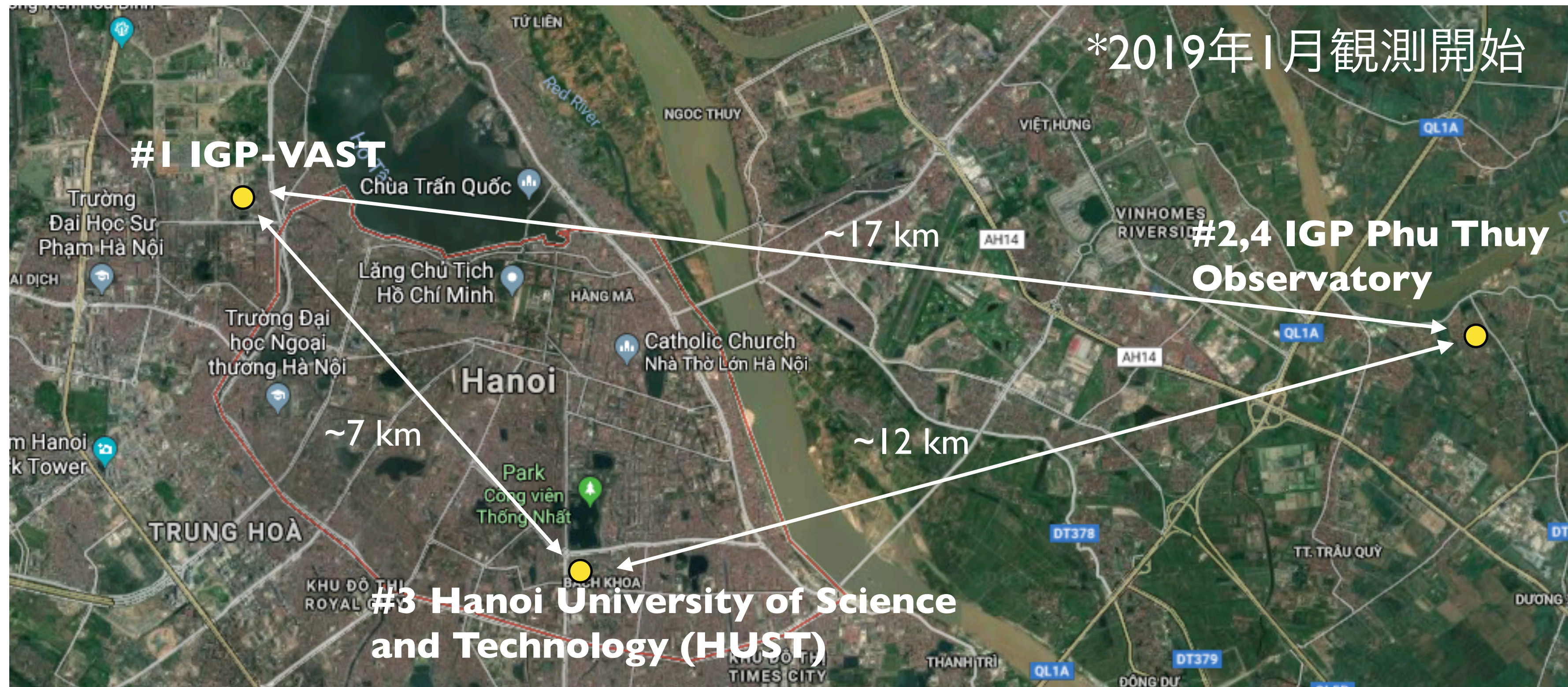
- * 磁気低緯度地域電離圏には、赤道異常帯とそれに挟まれるトラフ帯など、地域内変動がある。
- * 背景電離圏密度が高い赤道異常帯では、電離圏勾配が大きくなりやすいと予想される。

- * 磁気低緯度地域内でGBASの性能を最大化するため、電離圏遅延量の磁気低緯度地域内変動を明らかにし、より適切な電離圏脅威モデルを構築する

電離圏環境調査実施場所の選定

- * 磁気低緯度地域内の特徴地域それぞれにおいて実施する
 - 北赤道異常帯
 - ➡ ベトナム
 - 南赤道異常帯
 - ➡ インドネシア
 - 赤道トラフ帯
 - ➡ タイにおいて別プロジェクト(GBAS実証実験)の中で実施中

観測点配置 (ベトナム・ハノイ)



| No. | Location | System |
|-----|----------|---|
| #1 | IGP-VAST | Trimble Alloy |
| #2 | Phu Thuy | GSV-4004B |
| #3 | HUST | Trimble NetR9 (Operated by HUST and JAXA) |
| #4 | Phu Thuy | Trimble NetR9 |

*ベトナム科学アカデミー地球物理学研究所 (IGP-VAST)との共同研究による

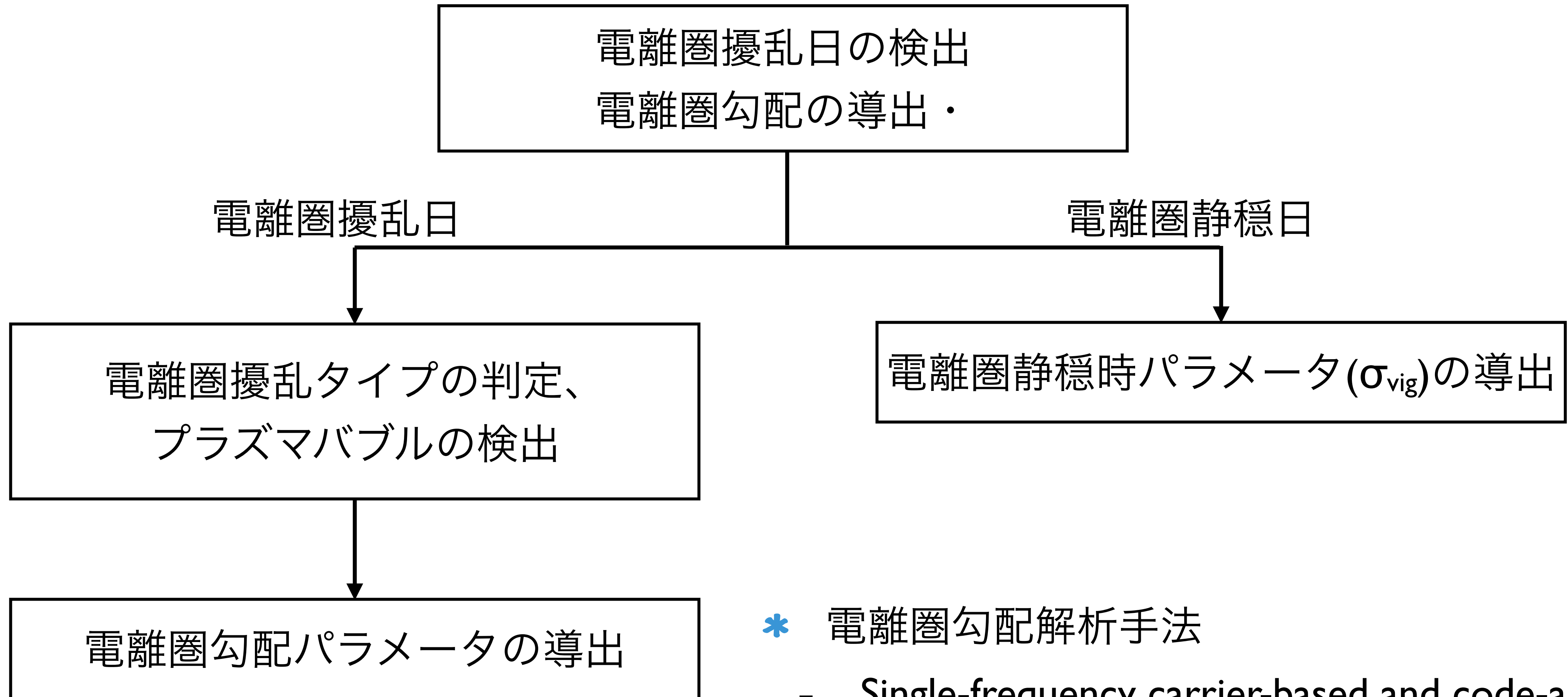
観測点配置 (インドネシア・バンドン)



| No. | Location | System |
|-----|----------|-----------------------------|
| #1 | IDN1 | Septentrio AsteRx SBi3 Pro+ |
| #2 | IDN2 | |
| #3 | IDN3 | |
| #4 | IDN4 | |

*インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN, 現・インドネシア研究革新庁(BRIN))との共同研究による

解析の流れ



* 電離圏勾配解析手法

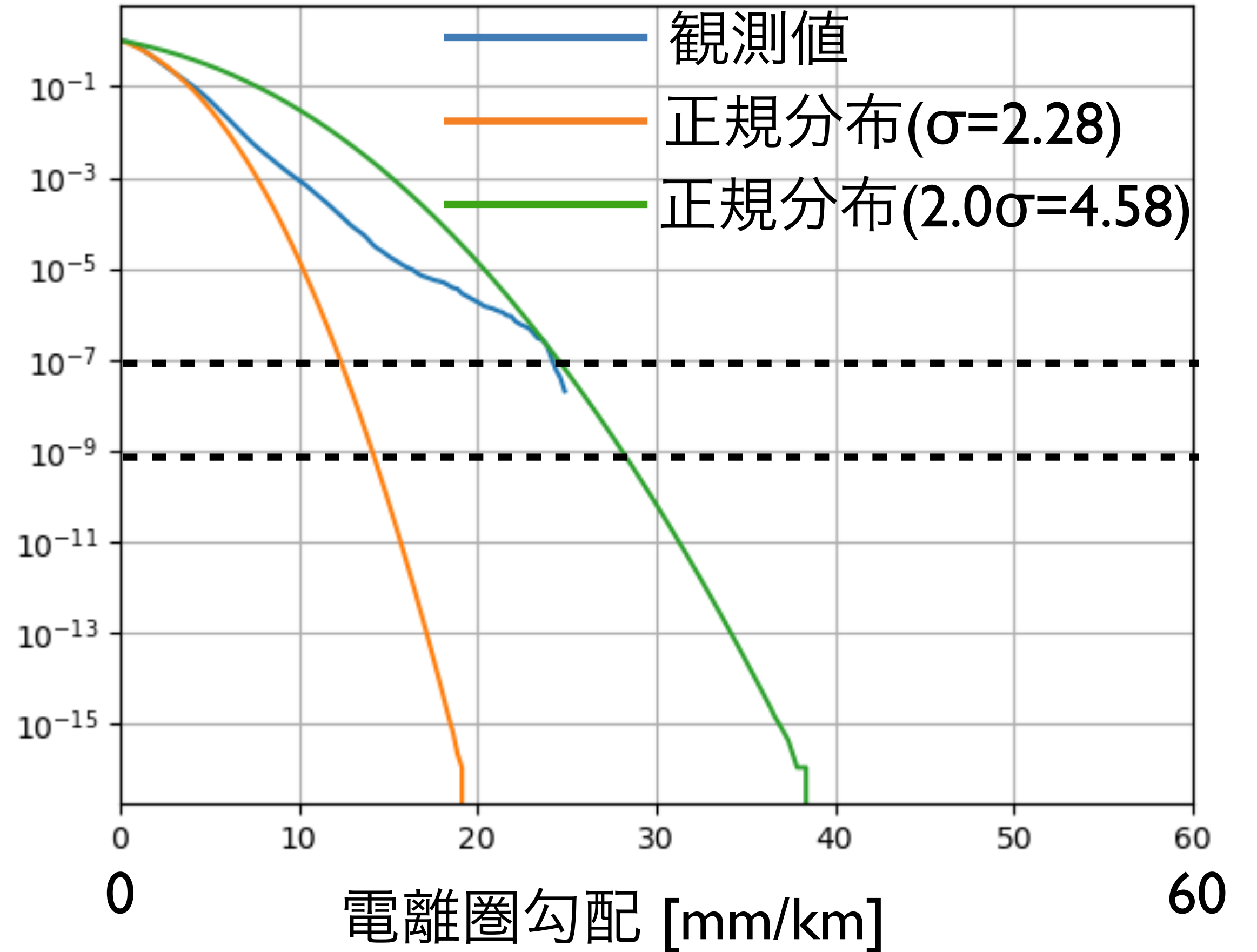
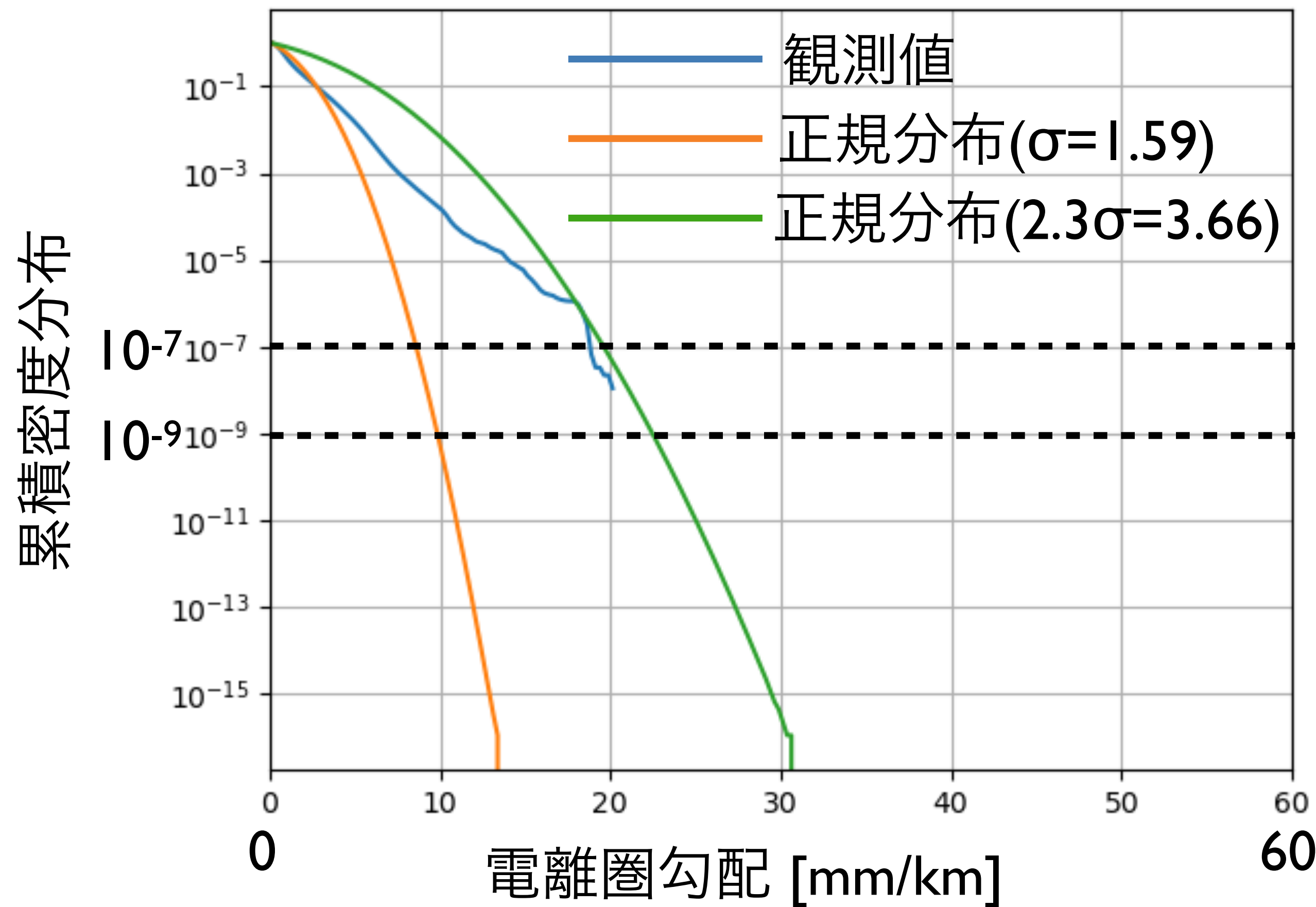
- Single-frequency carrier-based and code-aided (SF-CBCA法)

[Fujita et al., JAAA, 2010; Saito et al., ION GNSS 2012]

- * ベトナム・ハノイ
 - 2022年3月12日～2023年2月6日
 - ✓ 2019年1月～2022年3月までのデータも比較として使用
- * インドネシア・バンドン
 - 2022年5月26日～2022年12月30日

ハノイ

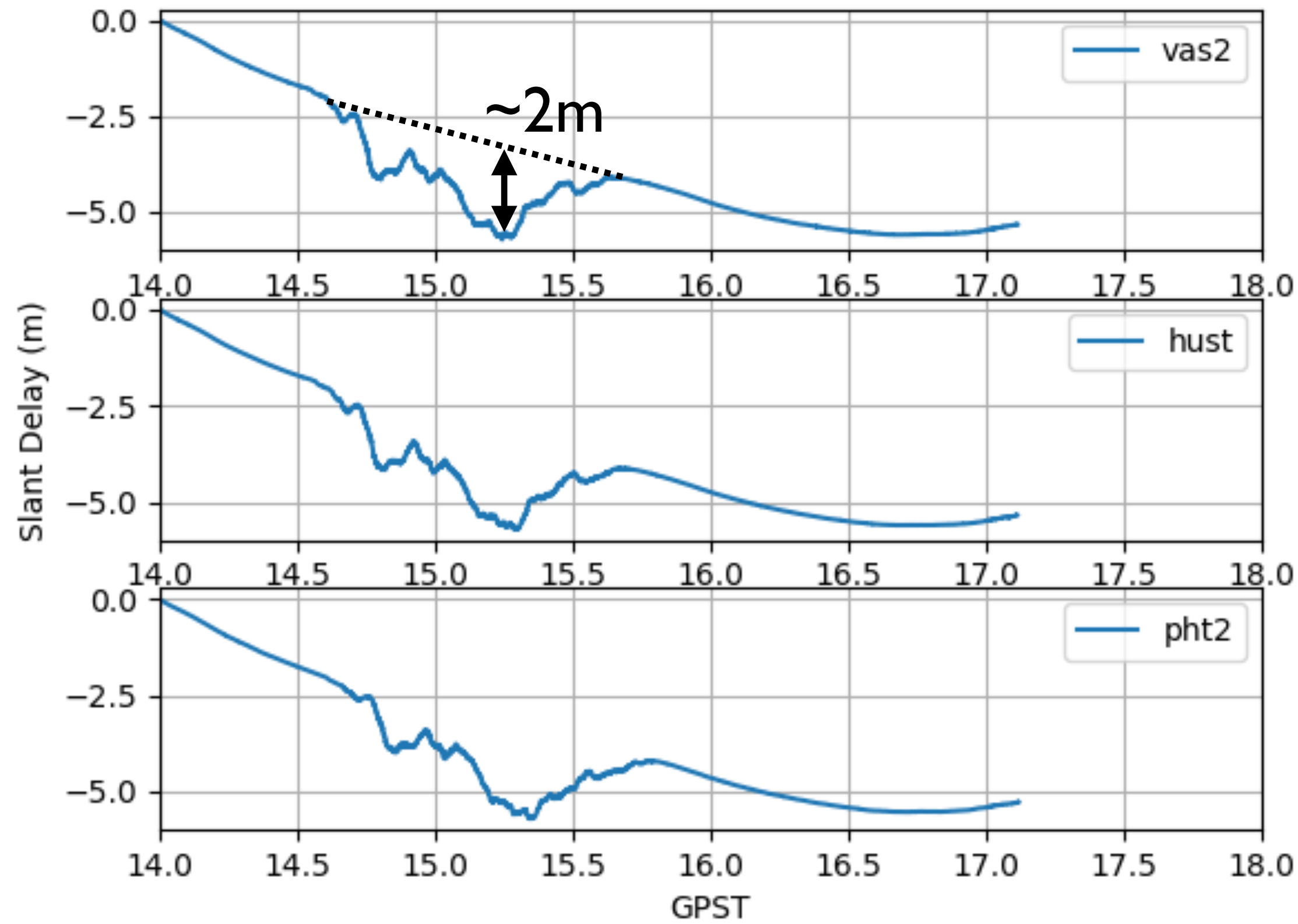
バンドン



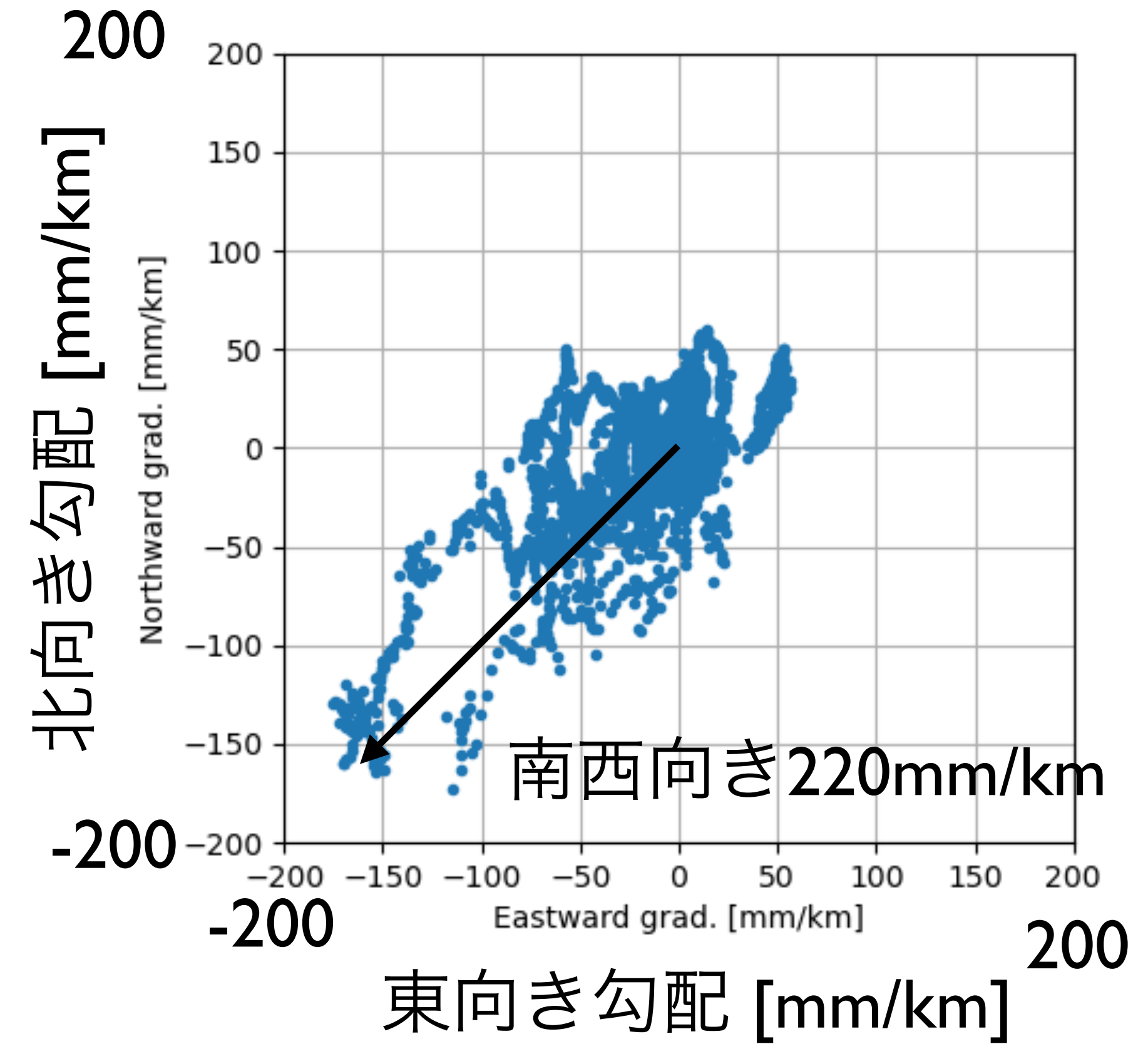
* ハノイ、バンドンともに同程度

ハノイにおける電離圏擾乱の例(2022年9月30日)

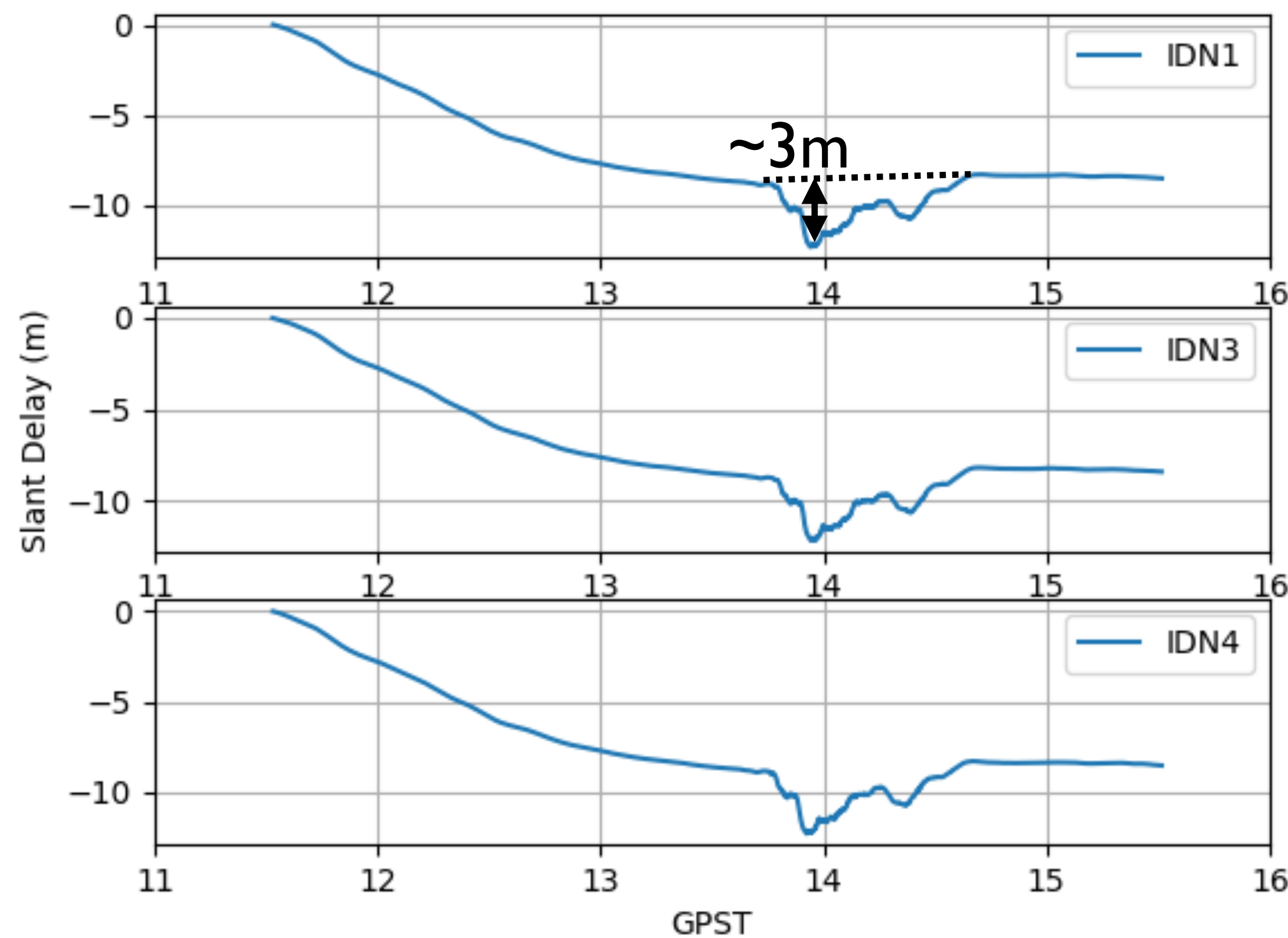
電離圏遅延量



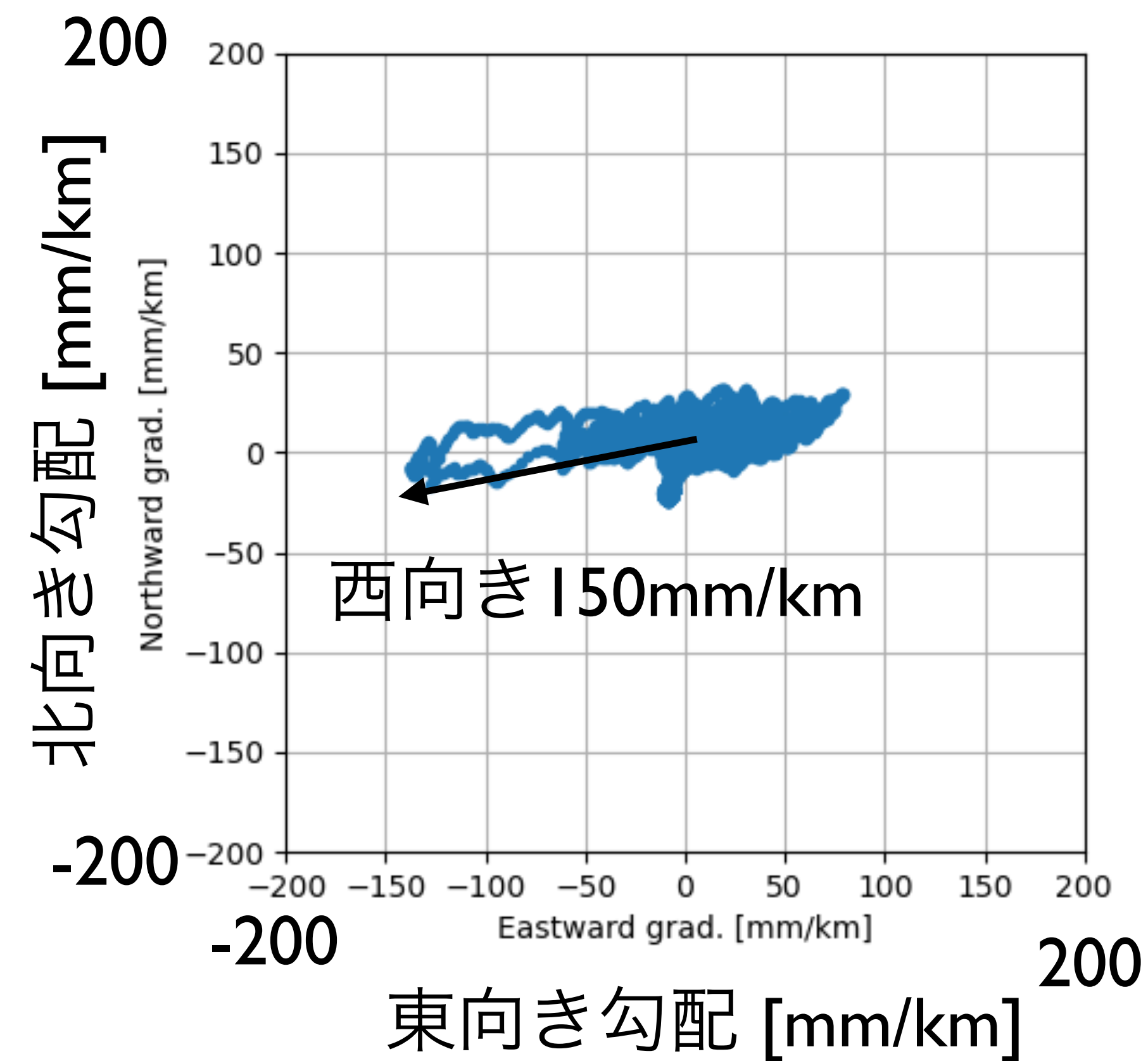
電離圏勾配ベクトル



電離圏遅延量



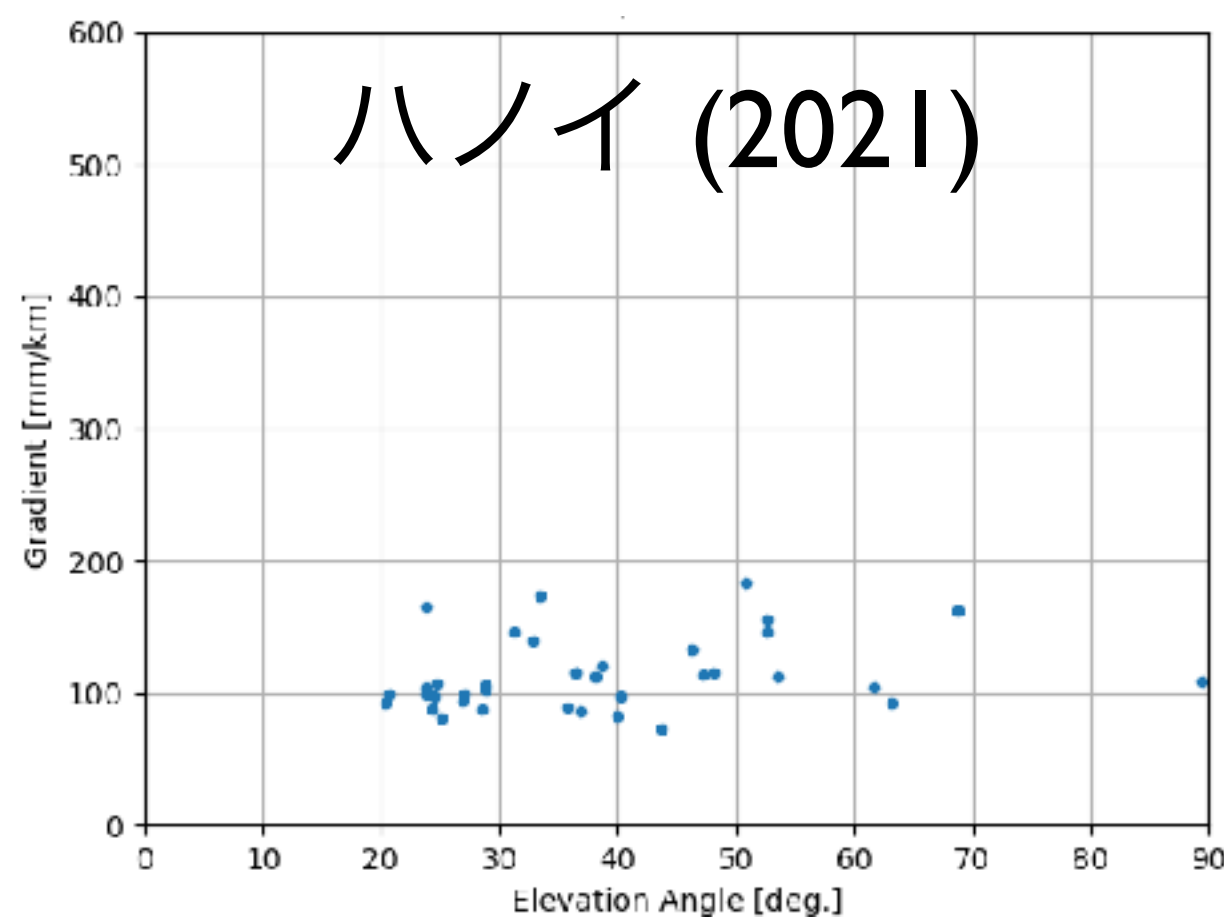
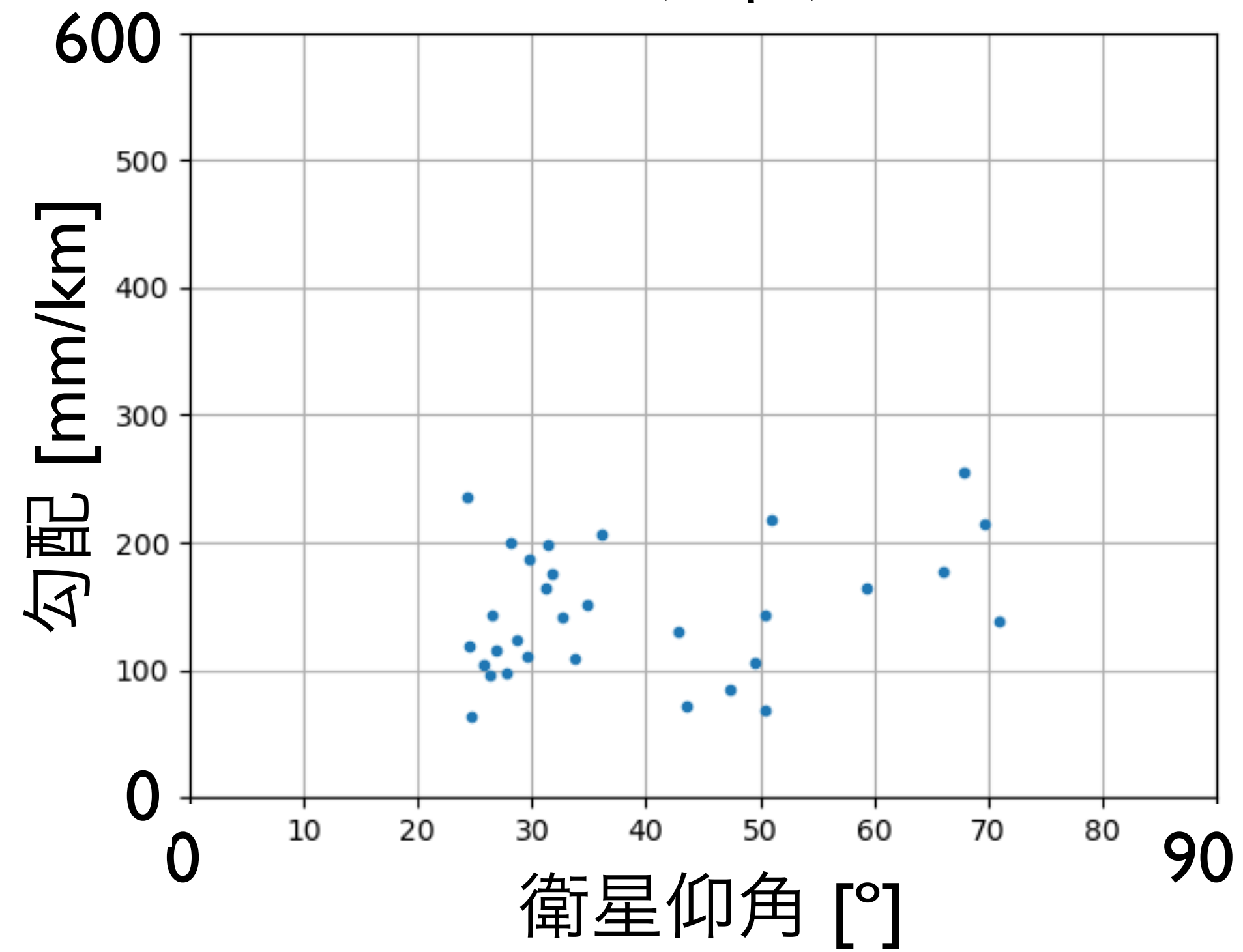
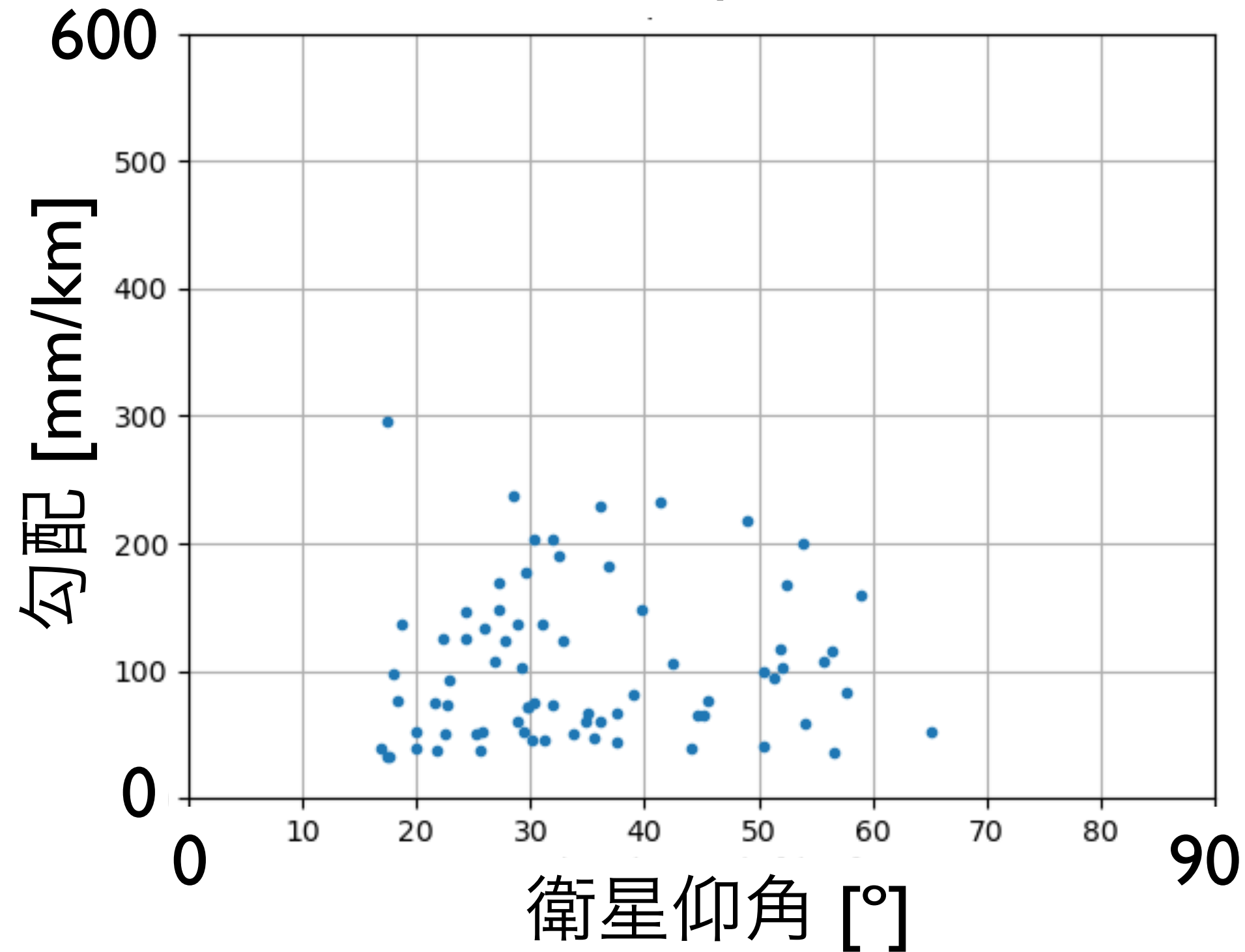
電離圏勾配ベクトル



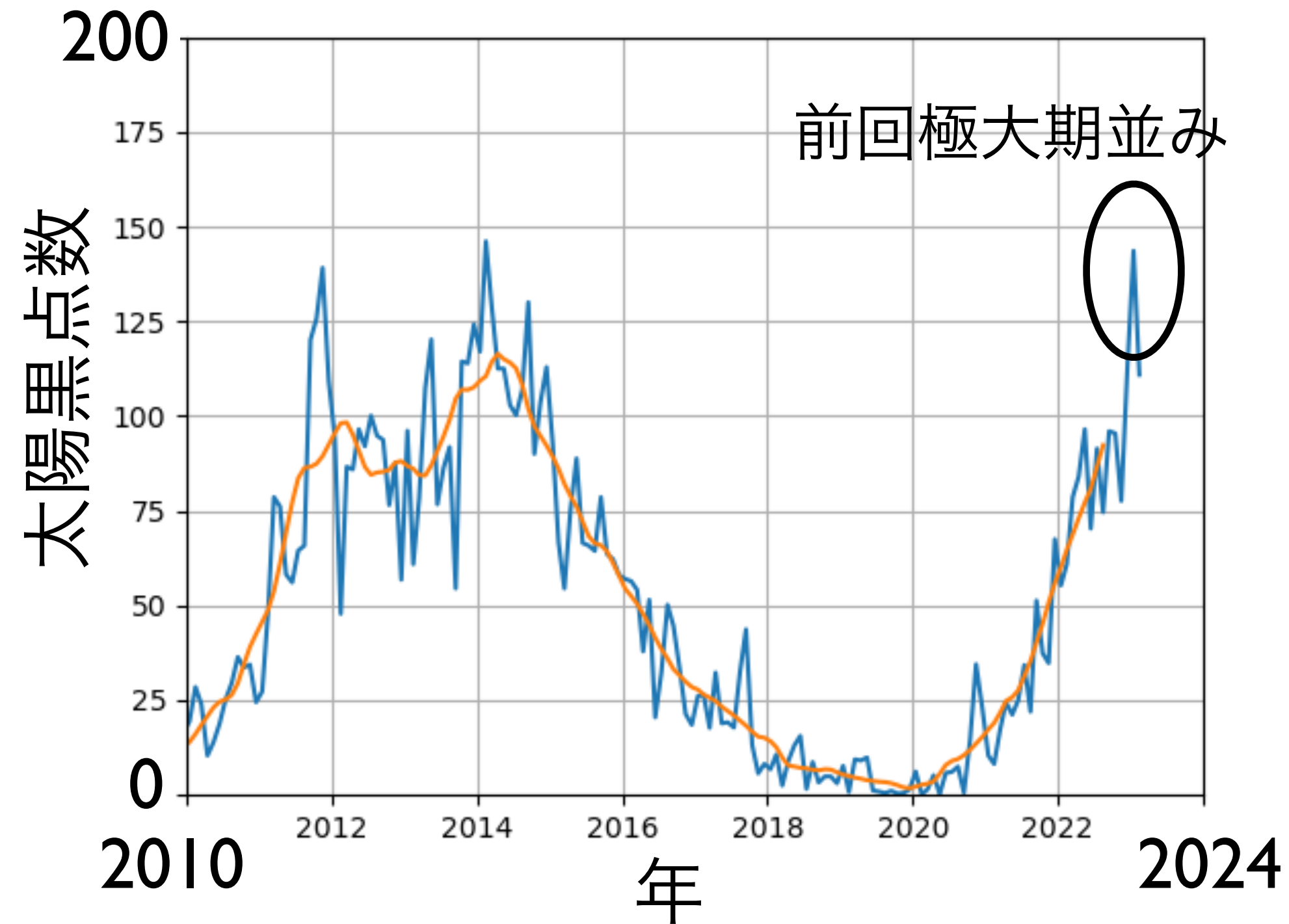
電離圏勾配と衛星仰角

ハノイ

バンドン



- * 最大約300 mm/km、
 - ハノイ、バンドンともに同程度、APACモデルの範囲内
 - イベント数の差は観測期間の差
- * 目立った衛星仰角依存性なし
- * ハノイでは2021年に比べて最大勾配、イベント数ともに増加



Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

| | 静穏時 | | 擾乱時 | |
|------|----------|----------------|------|--------------------|
| | σ | σ_{vig} | 最大勾配 | 100 mm/km以上のイベント数* |
| 2019 | 1.17 | 2.75 | 54 | 0 |
| 2020 | 1.07 | 2.79 | 60 | 0 |
| 2021 | 1.28 | 4.49 | 184 | 37 |
| 2022 | 1.63 | 3.66 | 296 | 74 |

* 静穏時、擾乱時とも、年々活発化の傾向

- * 磁気低緯度地域におけるGBAS導入促進のため、東南アジア地域において電離圏環境調査を行っている
 - ベトナム・ハノイ
 - インドネシア・バンドン
 - ✓ 現地研究機関との協力により電離圏観測システムを安定的に運用
- * 解析結果
 - 静穏時電離圏パラメータ：3~4 mm/km
 - 最大電離圏勾配: ~300 mm/km
 - 太陽活動の上昇に伴い、静穏時、擾乱時ともに電離圏活動上昇傾向
- * 現地研究機関と協力し電離圏環境調査を継続
 - 今期太陽活動極大期を過ぎるまで調査継続予定
 - GBAS導入を見据え、現地研究機関への技術指導を継続