

GBAS海外展開のための電離圏環境評価

1*齋藤 享、1吉原 貴之、2Le Huy Minh、3Pornchai Supnithi

1海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 航法システム領域

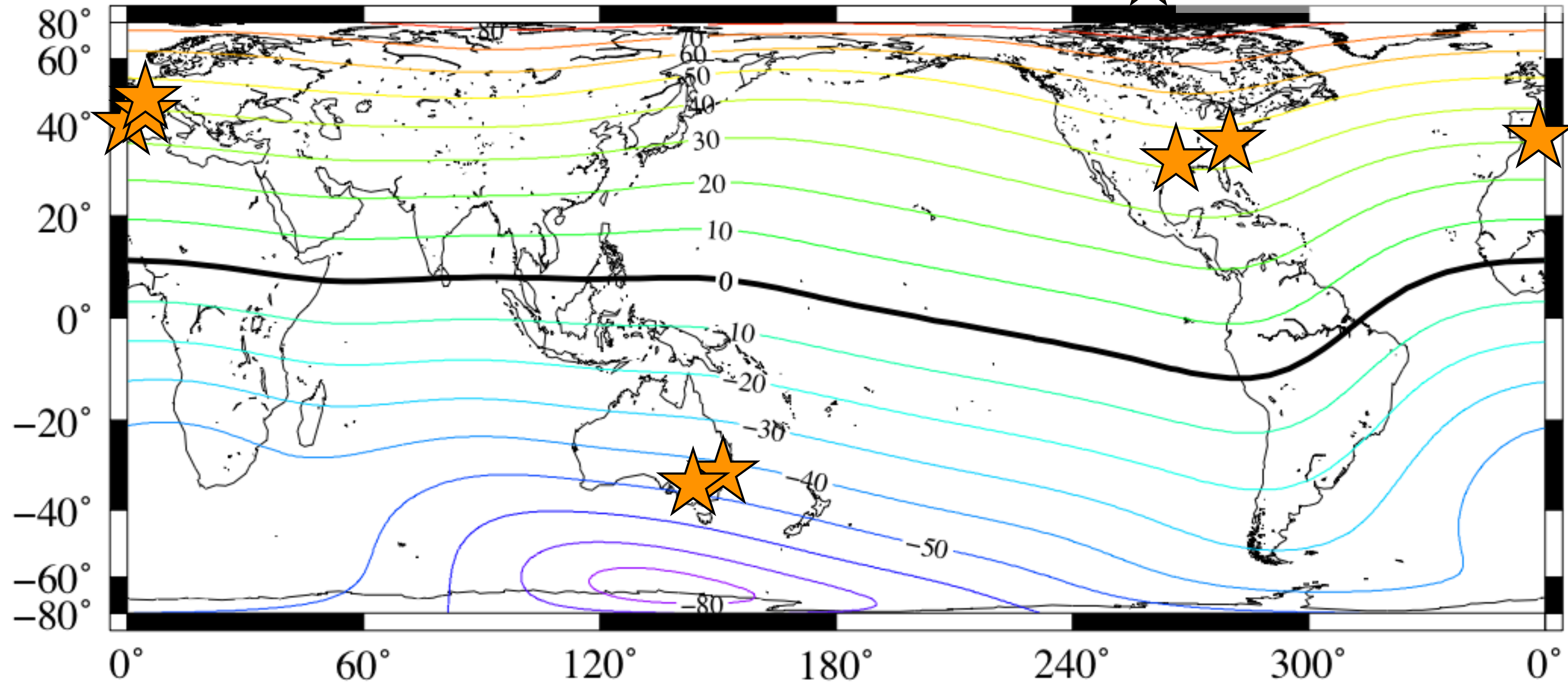
2ベトナム科学アカデミー地球物理研究所

3タイ・モンクット王工科大学ラカバン

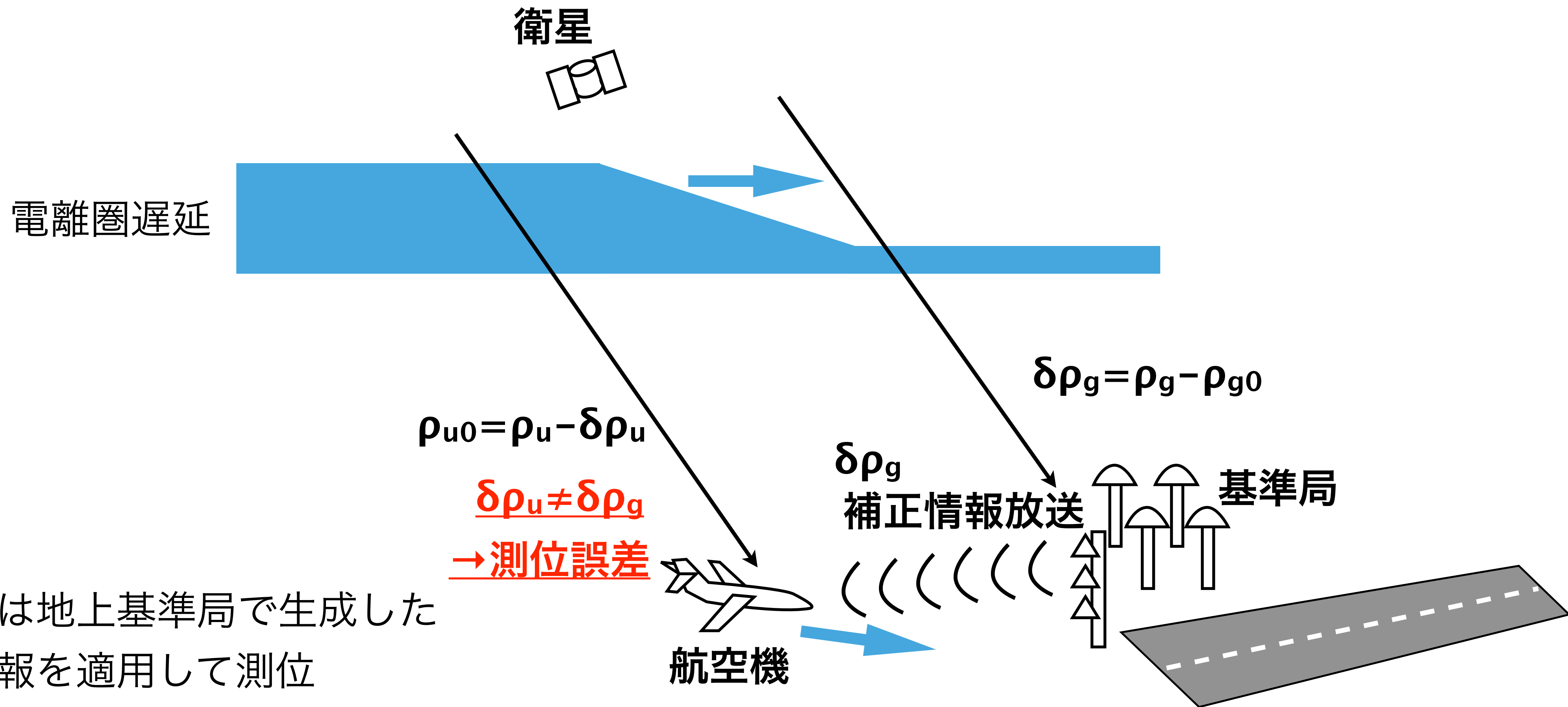
- * 世界的にGBASの運用が開始されつつある
- * 日本においても、羽田空港でGBASの運用評価が実施されている
- * 日本を含む磁気低緯度地域では欧米とは電離圏環境が異なるため、電離圏対応が重要
- ✓ 磁気低緯度地域におけるGBAS展開のためには、設置場所に対応した電離圏環境の評価が必要
- ➡ GBAS展開支援のため、磁気低緯度地域に適した電離圏環境評価手法を確立する必要がある

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



- * 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

* 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

GBASにおける誤差

$$\sigma_i^2 = \sigma_{pr_gnd,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{pr_air,i}^2 + \sigma_{iono,i}^2$$

静穏時電離圏成分

$$\sigma_{iono} = F_{pp} \sigma_{vig} (x_{air} + 2\tau v_{air})$$

傾斜係数

距離

スモーキング時定数

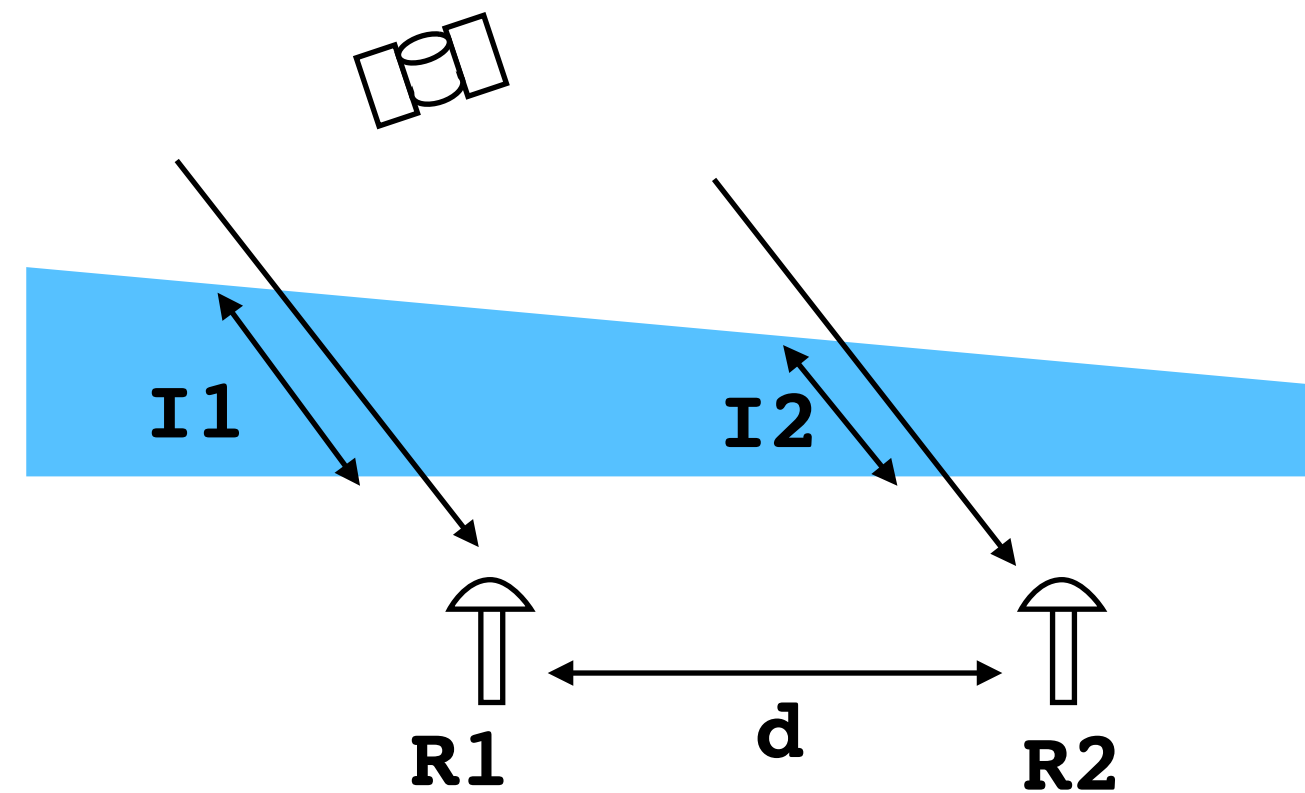
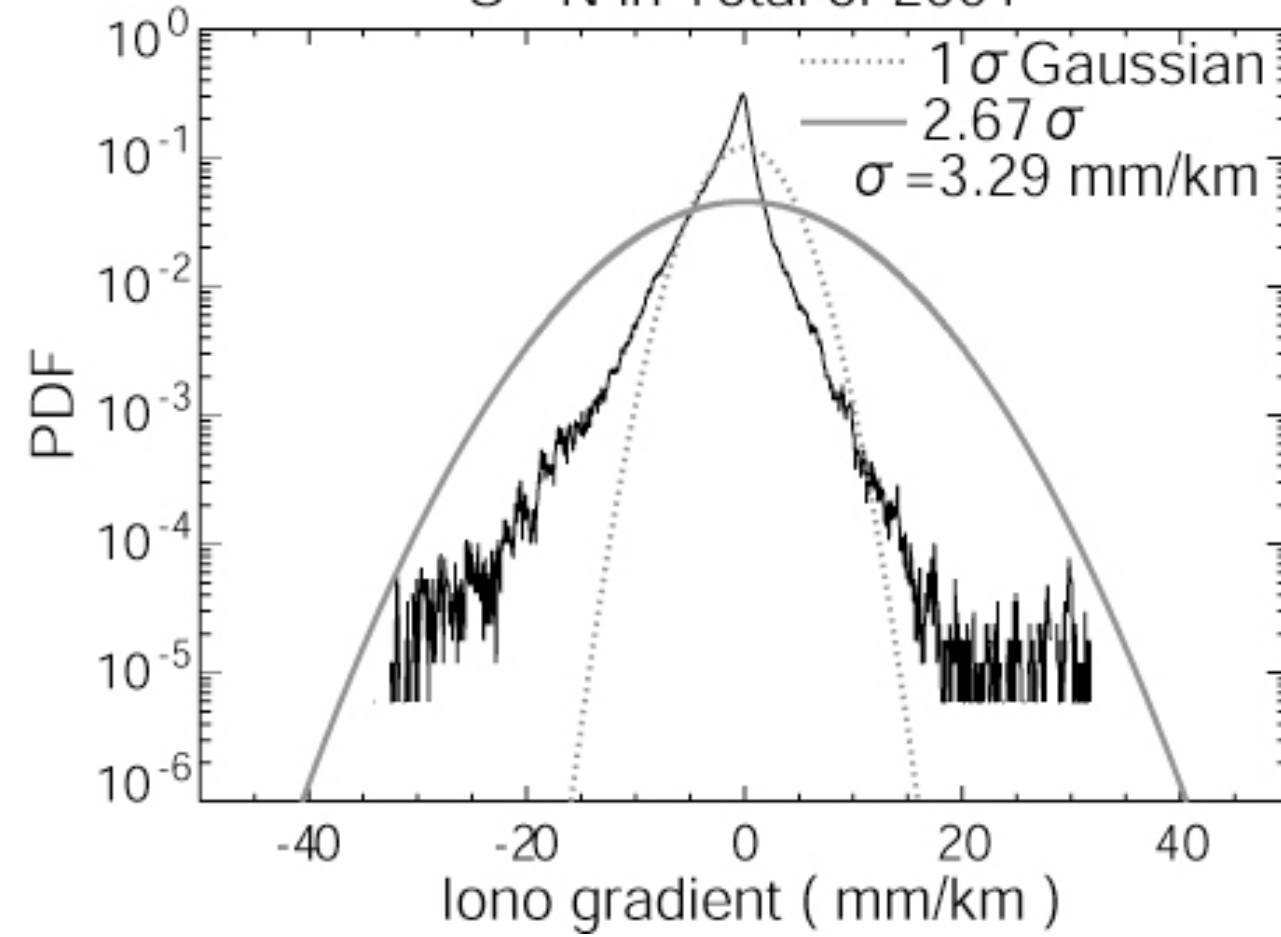
航空機速度

* 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

発生確率密度分布

S - N in Total of 2001



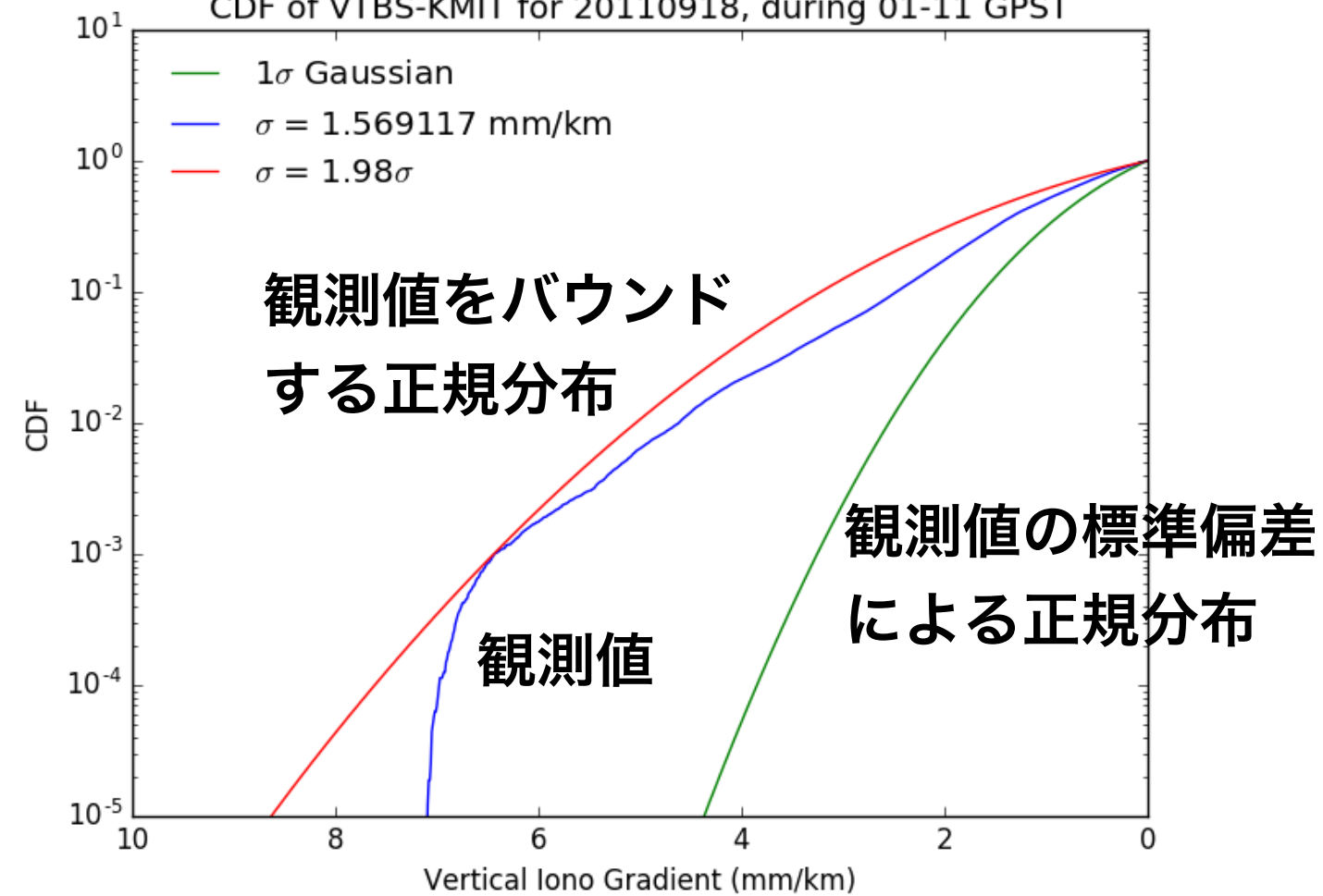
垂直換算電離圏勾配

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

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

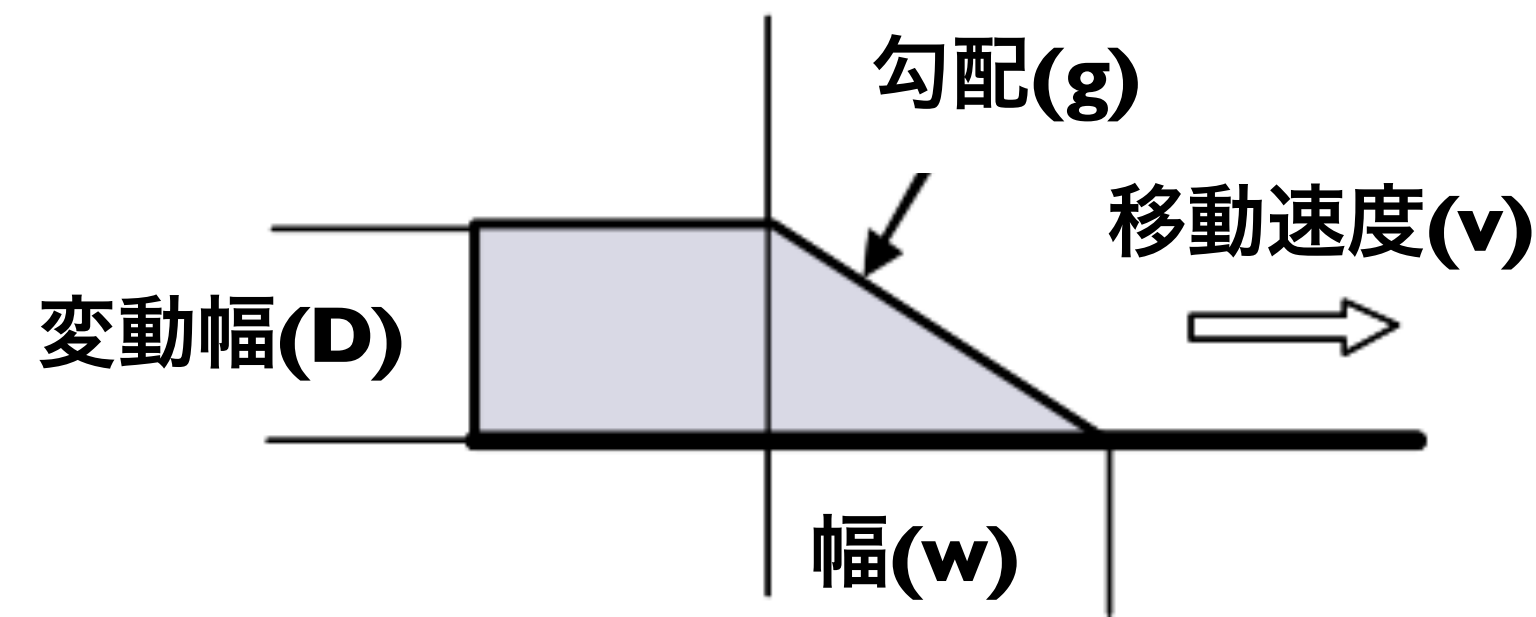
累積発生確率密度分布

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

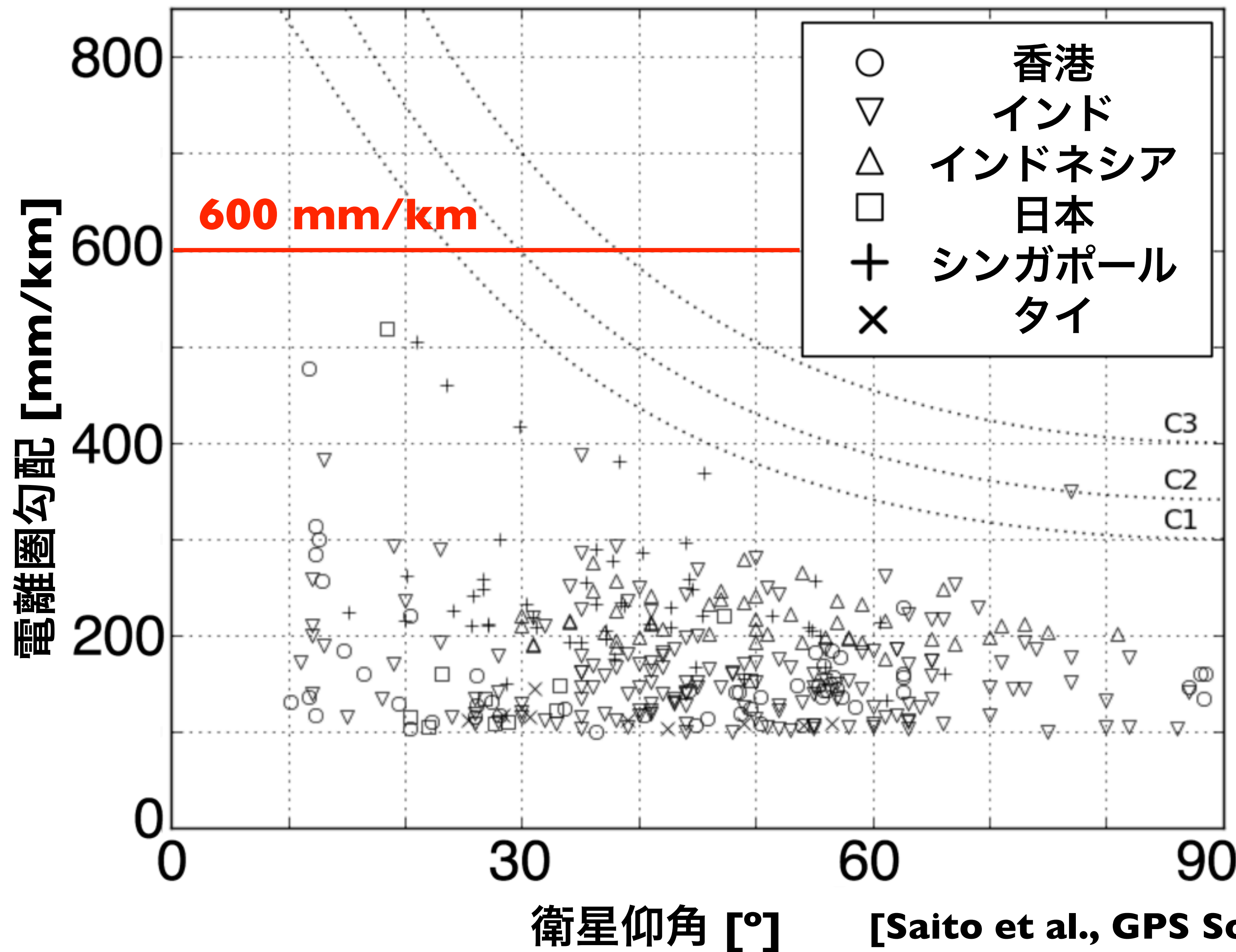


米国本土(CONUS) モデル

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



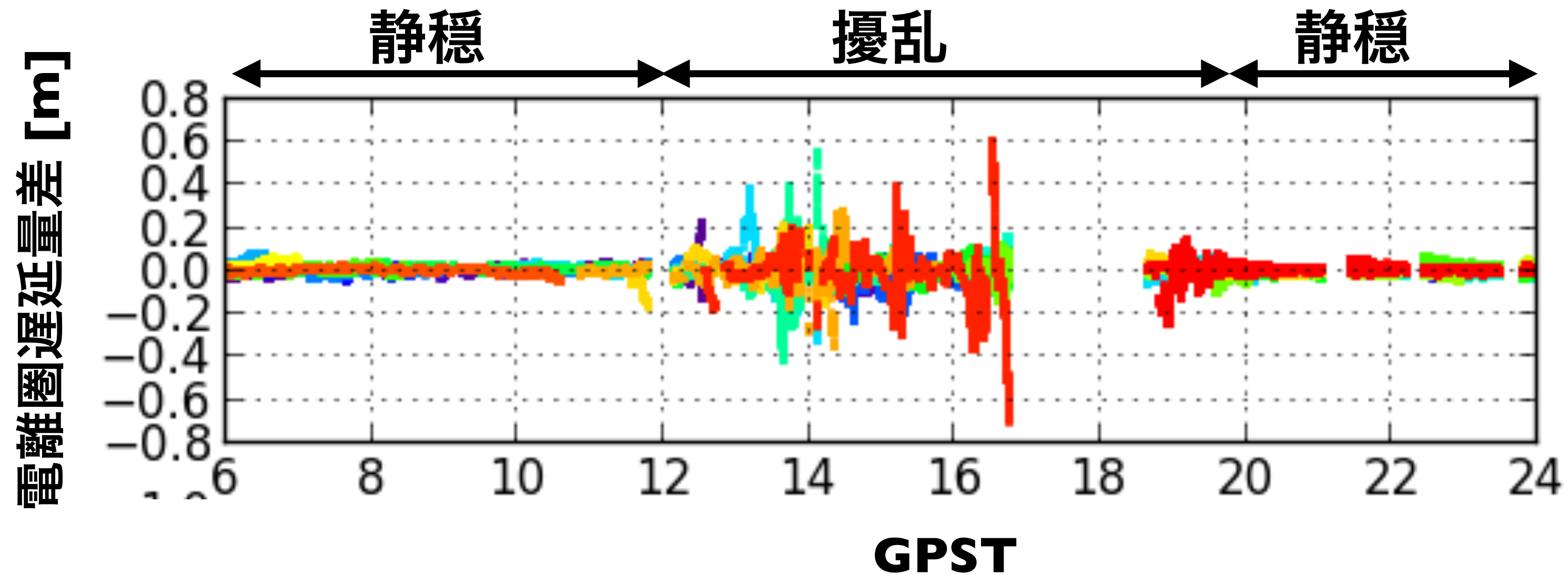
- * ICAOアジア太平洋地域 (APAC)電離圏問題検討タスクフォース(ISTF)によるモデル
- アジア太平洋地域の磁気低緯度地域のデータを使用
- ICAO APAC文書として採択
- ✓ 電離圏脅威モデルとして採用するかどうかは各国の責任の範囲

- * 電離圏環境パラメータ（静穏時電離圏勾配パラメータと電離圏脅威モデル）は航空航法の安全性に関わる
 - ➔ GBASを導入する各国の責任で定められるべきもの
- * 各国の責任
 - 静穏時電離圏勾配パラメータと電離圏脅威モデル（以下併せて電離圏環境パラメータという）の決定
 - GBAS導入後のこれらのパラメータの継続的なチェックと更新
 - ✓ 電離圏環境パラメータの妥当性を判断する知見が最低限必要
 - ✓ 独自に評価し，維持・更新する技術を有することが望ましい

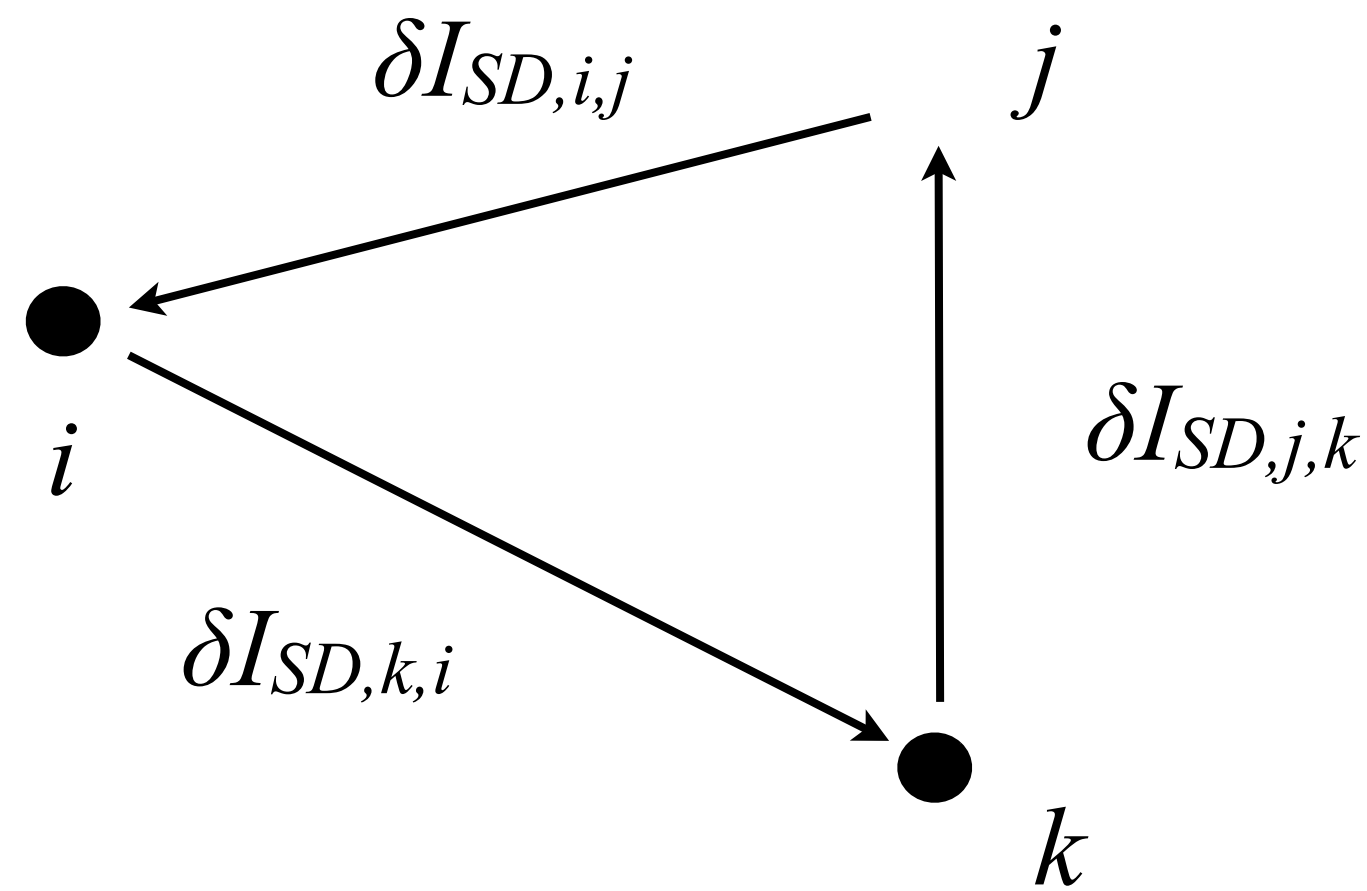
- * 電離圏環境パラメータ推定要件
 - 空間スケール10 km程度の電離圏勾配を検出できること
 - 電離圏勾配の空間スケールの最小値は10 km程度
 - 標準的なGBASのサービス範囲は空港周辺23 NM（約43 km）
 - 移動速度・幅が推定できること
 - 観測ネットワークの要件は解析手法による
- * SF-CBCA法（後述）を使う場合の観測ネットワーク要件
 - 10 km程度の間隔で2次元的に配置された、最低3台のGNSS受信機
 - 2周波GNSS受信機、1 Hz程度のサンプリング

1. 3つのGNSS受信機間の電離圏遅延量差を導出 [Fujita et al., J.Aero.Astro.Avi., 2010]
2. 冗長性を用いて解を検証 [Saito et al., ION GNSS 2012]
3. 2次元電離圏勾配ベクトルの導出
4. 電離圏環境パラメータの導出
 - A. 静穏時電離圏勾配(σ_{vig})の推定
 - B. 擾乱時電離圏勾配について、速度と幅の導出 [Saito and Yoshihara, Radio Sci., 2017]

- * SF-CBCA (Single-Frequency Carrier-Based and Code-Aided)法
 - 2受信機間の電離圏遅延量差を位相測定値を元に推定
 - 1周波観測値のみを用いるので、電離圏擾乱時にも有効
 - 高精度であり、静穏時電離圏勾配の推定に有効



冗長性を用いた解の検証



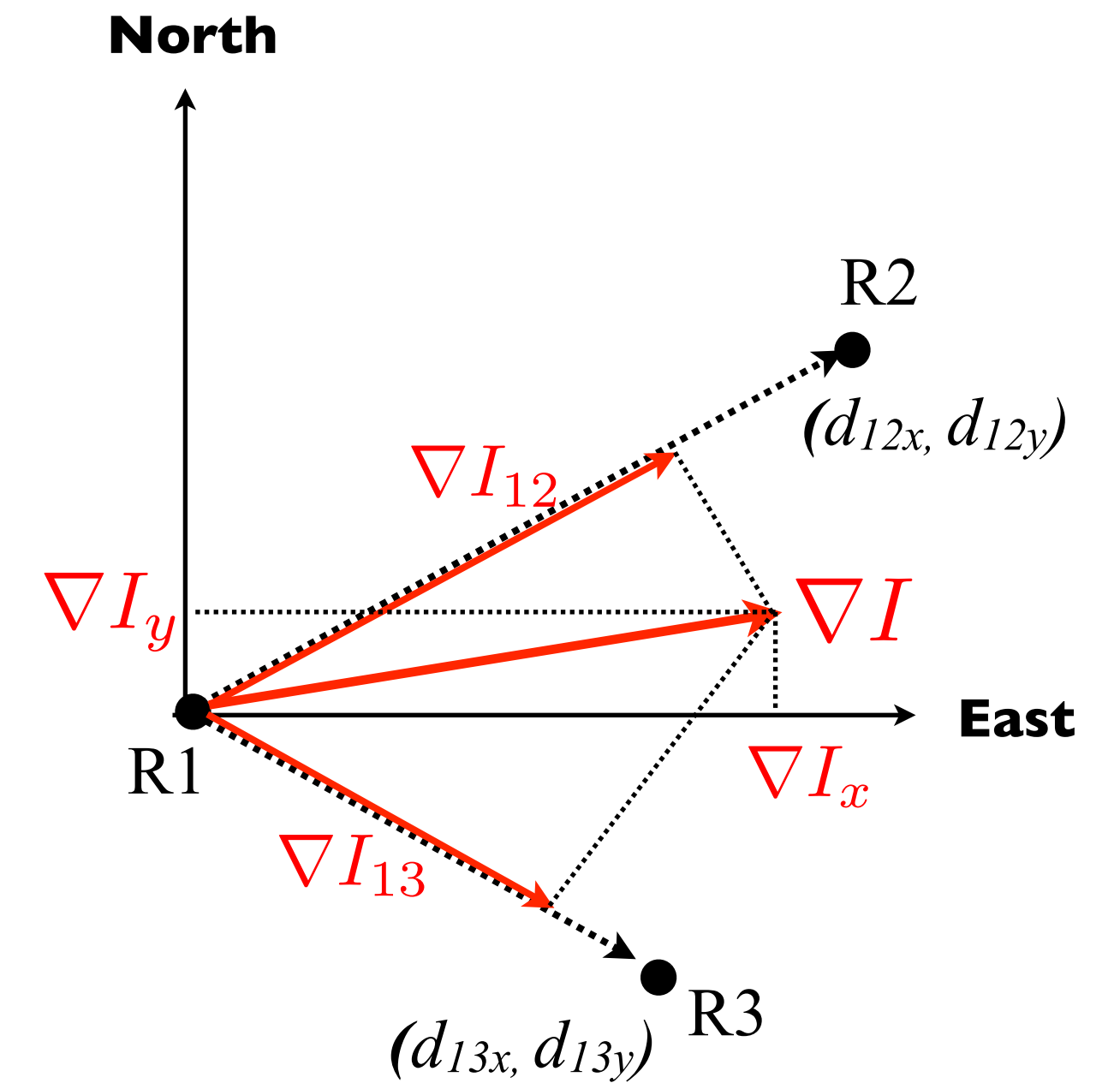
2次元勾配ベクトルの推定

$$\begin{bmatrix} \delta I_{12} \\ \delta I_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{12x} & d_{12y} \\ d_{13x} & d_{13y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla I_x \\ \nabla I_y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \nabla I_x \\ \nabla I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{12x} & d_{12y} \\ d_{13x} & d_{13y} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \delta I_{12} \\ \delta I_{13} \end{bmatrix}$$

$$\delta I_{12} = \nabla I_{12} |d_{12}|$$

$$\delta I_{13} = \nabla I_{13} |d_{13}|$$



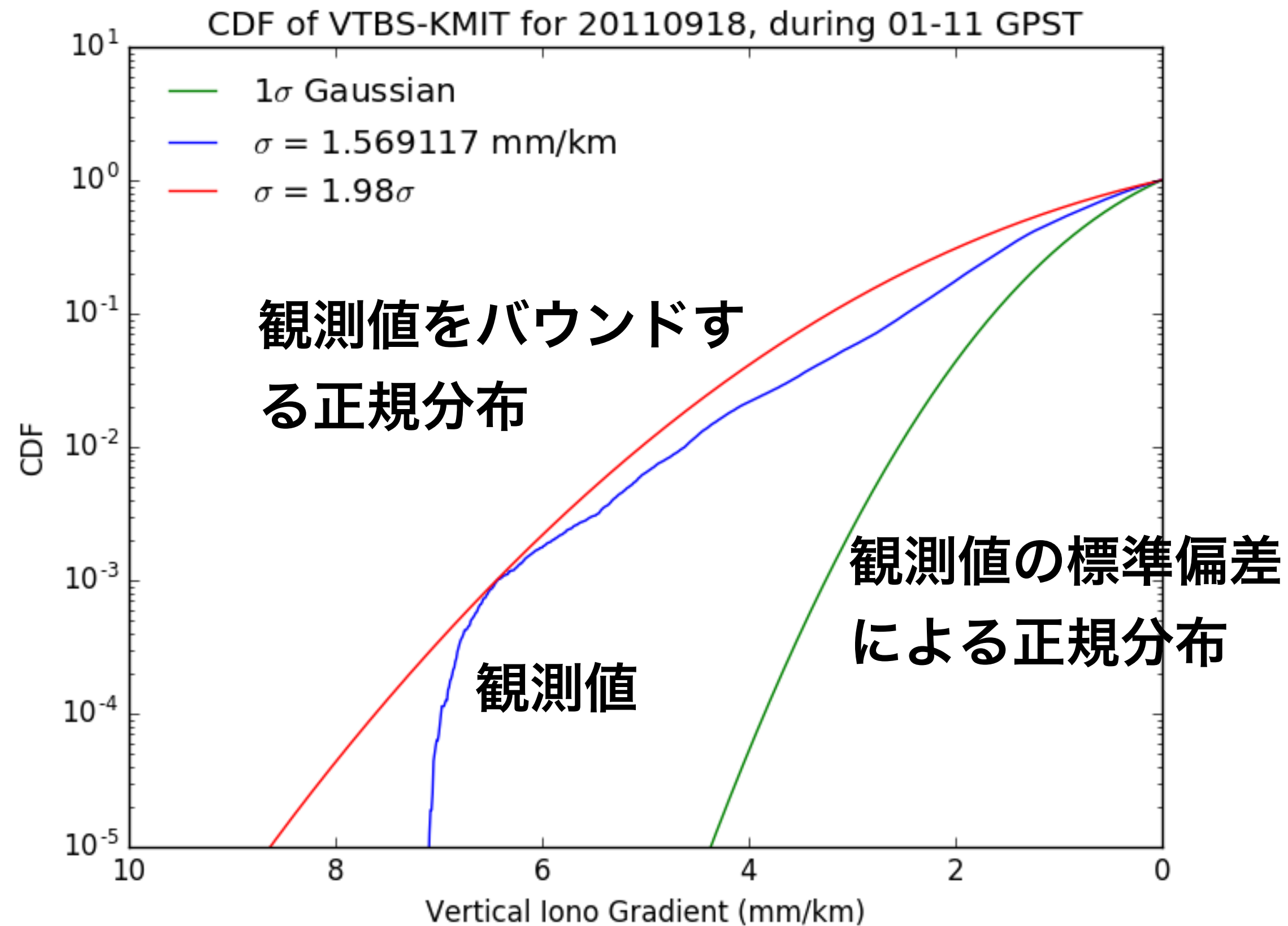
* 解の検証

- 3組の受信機ペアの電離圏遅延量差の総和は0であることを用いる
- 総和が一定以上の場合は推定誤りとして排除

* 2次元勾配ベクトルの推定

- 検証済みの2組の受信機ペアの電離圏遅延量差から2次元電離圏勾配を再構成

累積発生確率密度分布



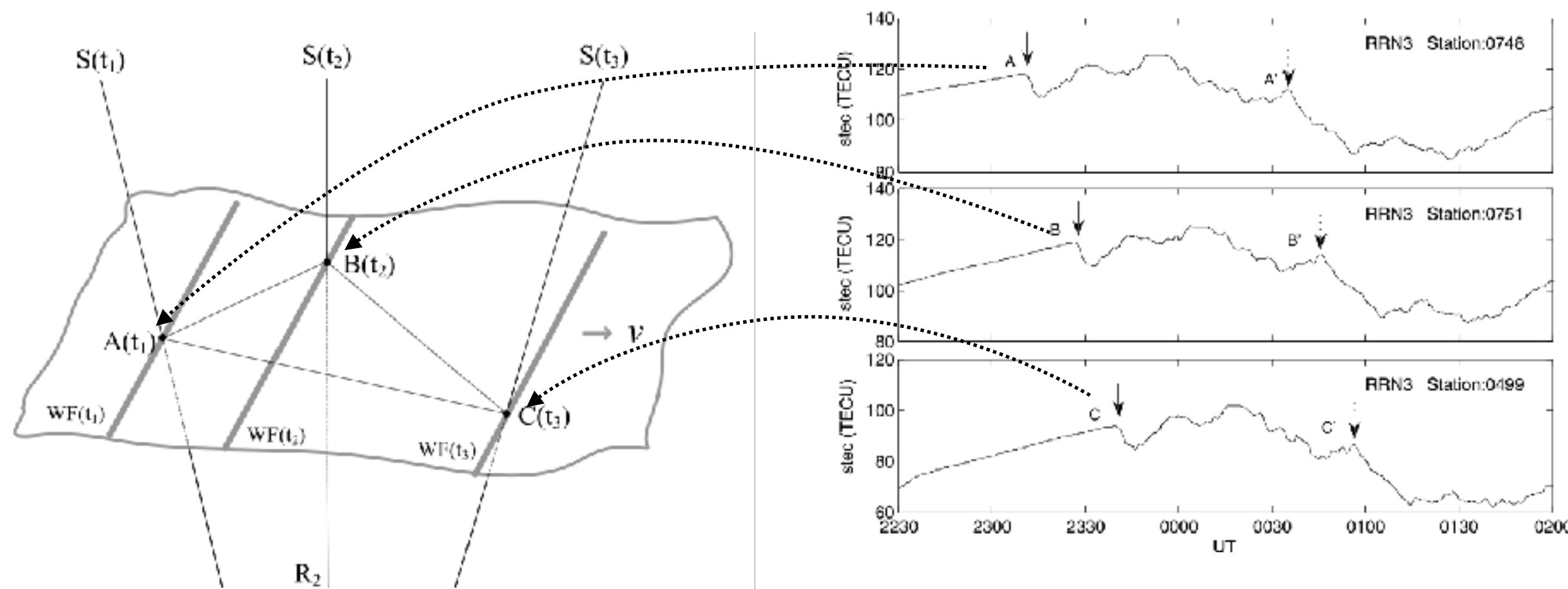
垂直換算電離圏勾配

- * 2次元電離圏勾配の大きさをうい、電離圏勾配の発生確率密度分布を導出
 - 通常は正規分布よりも広い裾野を持つ
- ✓ 累積確率密度分布をにおいて、必要な確率で観測値をバウンドするように、観測値の標準偏差に係数を掛ける

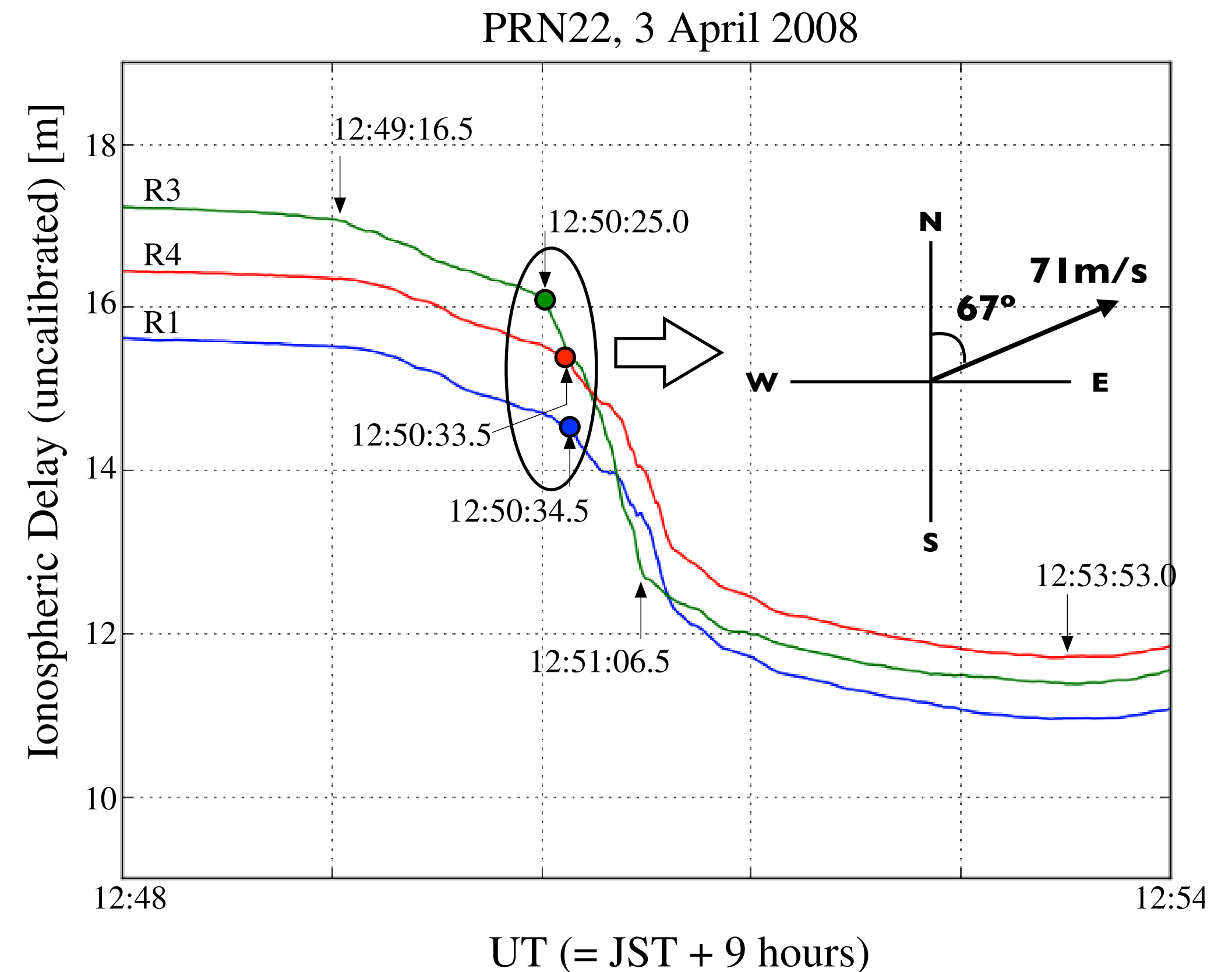
➡ σ_{vig}

- * 3受信機の電離圏遅延変動の特徴点を用い、その時刻差から速度を導出
 - 衛星の移動の効果を補正する必要あり

電離圏遅延量変動の特徴点を検出



特徴点の検出と速度の推定例



波面と速度の導出

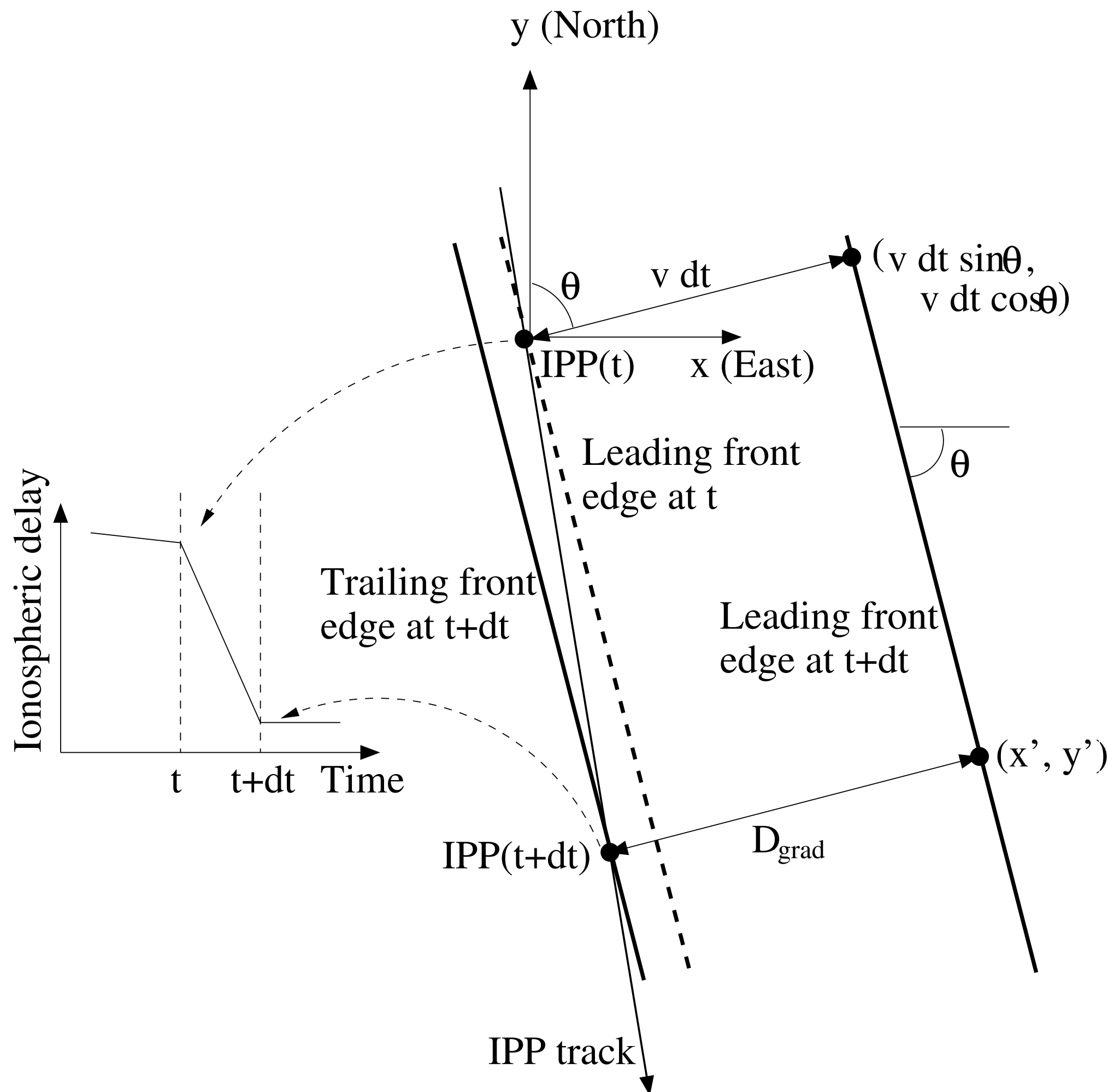
$$v = \frac{d_{12} \cos \alpha}{t_2 - t_1}$$

$$v = \frac{d_{13} \cos(\alpha - \beta)}{t_3 - t_1}$$

→ v, α

[Li et al., J. Geophys. Res., 2012]

- * 各受信機の電離圏遅延量変動時系列から、急勾配区間の幅を推定
 - 衛星移動による効果を補正する必要あり



$$y - IPP_y(t + dt) = (x - IPP_x(t + dt)) \tan \theta$$

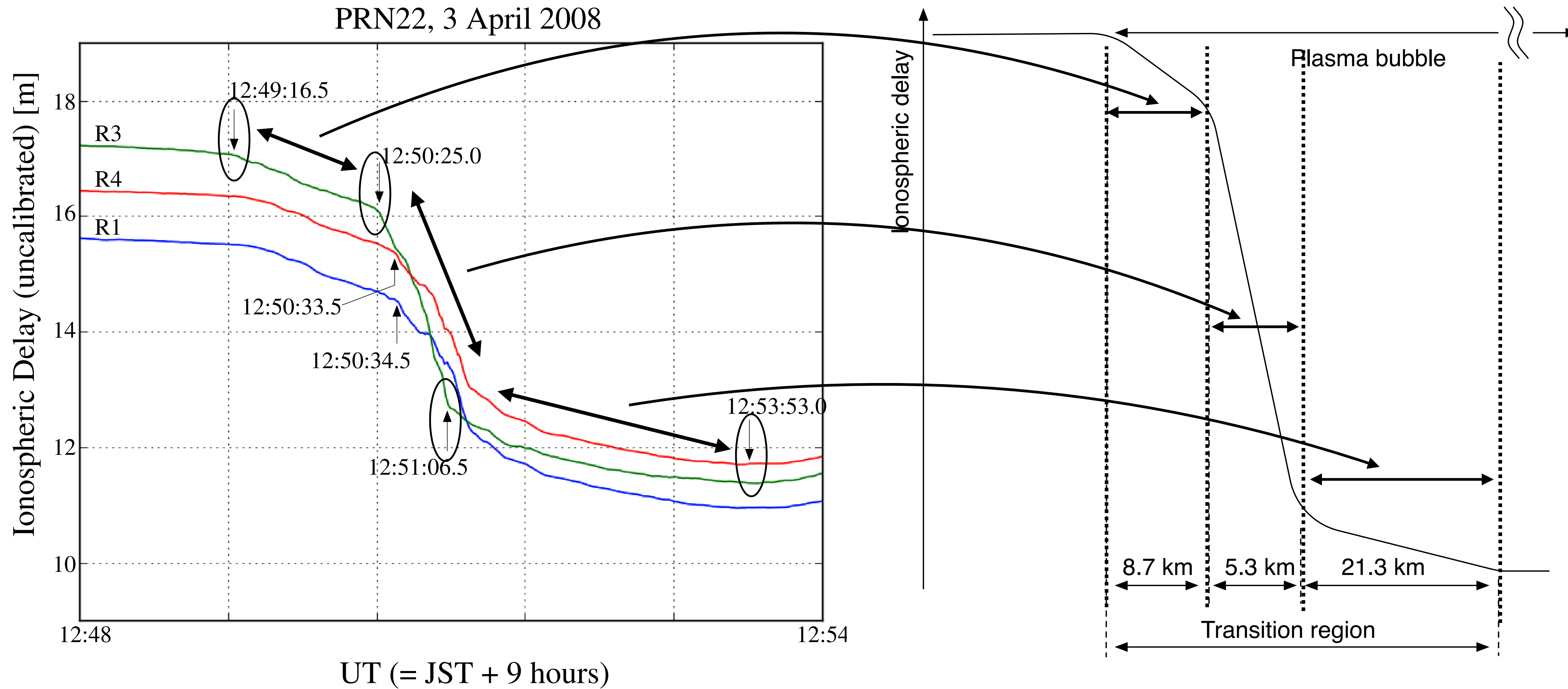
$$y - v dt \cos \theta = -\tan \theta (x - v dt \sin \theta)$$

$$x' = \{v dt (\tan \theta \sin \theta + \cos \theta) + IPP_x(t + dt) \cot \theta - IPP_y(t + dt)\} / (\tan \theta + \cot \theta)$$

$$y' = -x' \tan \theta + v dt (\tan \theta \sin \theta + \cos \theta) = \frac{v dt (\tan \theta \sin \theta + \cos \theta)}{1 + \tan^2 \theta} + \frac{IPP_x(t + dt) \cot \theta - IPP_y(t + dt)}{1 + \cot^2 \theta}$$

$$D_{grad} = \sqrt{(x_2 - IPP_x(t + dt))^2 + (y_2 - IPP_y(t + dt))^2}$$

[Saito and Yoshihara., Radio Sci., 2017]



[Saito and Yoshihara., Radio Sci., 2017]

電離圏データ収集例：タイ・バンコク



- * 2011年から継続的に観測中
 - 静穏時電離圏勾配パラメータ (σ_{vig})、勾配特性等の解析を実施

- * 電離圏環境評価は、GBAS導入において安全性を担保する上で最も重要な課題
- * GBASの導入・運用には、電離圏環境が当初の想定を超えていないか継続的に検証する必要がある
 - GBASを導入する各国の責任
 - GBASの海外展開においてはハードウェアを展開するだけでなく、電離圏環境の保証のためのソフトウェア技術を合わせて展開する必要がある
- * 電子航法研究所では、データ収集から解析まで一通りの技術を確立した。
 - 日本のGBAS技術の海外展開に活用されることを期待する
 - 日本のGBASの継続的な改良にも活用されることを期待