



ハイパーカミオカンデ実験のための 全世界測位システムを用いた ビームラインと検出器の同期システムの開発

2023/02/20 第29回ICEPPシンポジウム

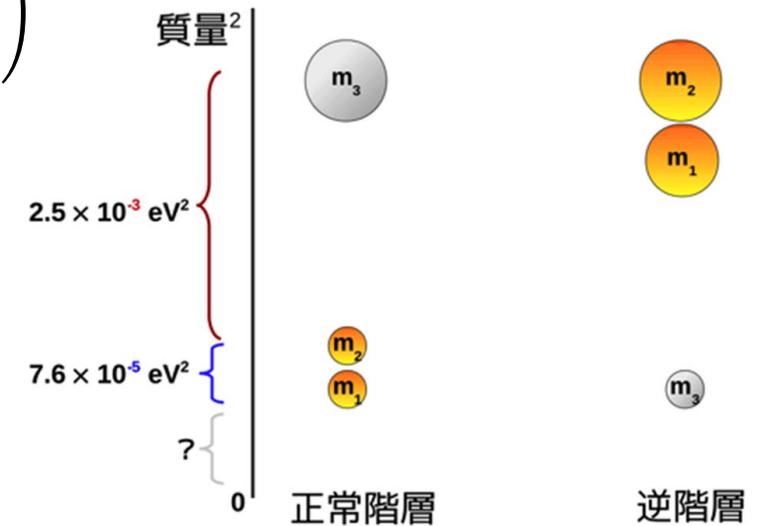
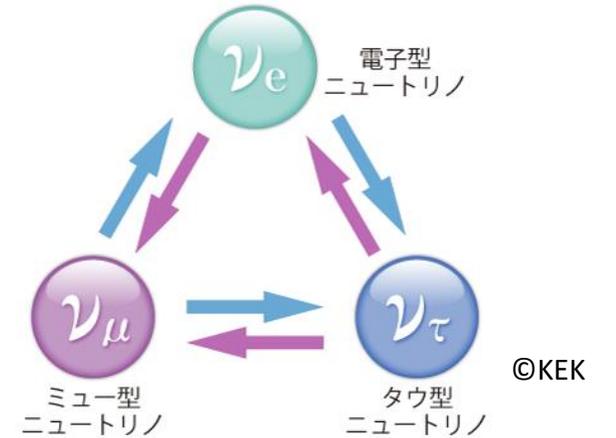
東京工業大学久世研究室 寺田虎太郎

ニュートリノ振動

- フレーバーが伝搬中に変化
 - 振幅は振動パラメータや固有質量と相関

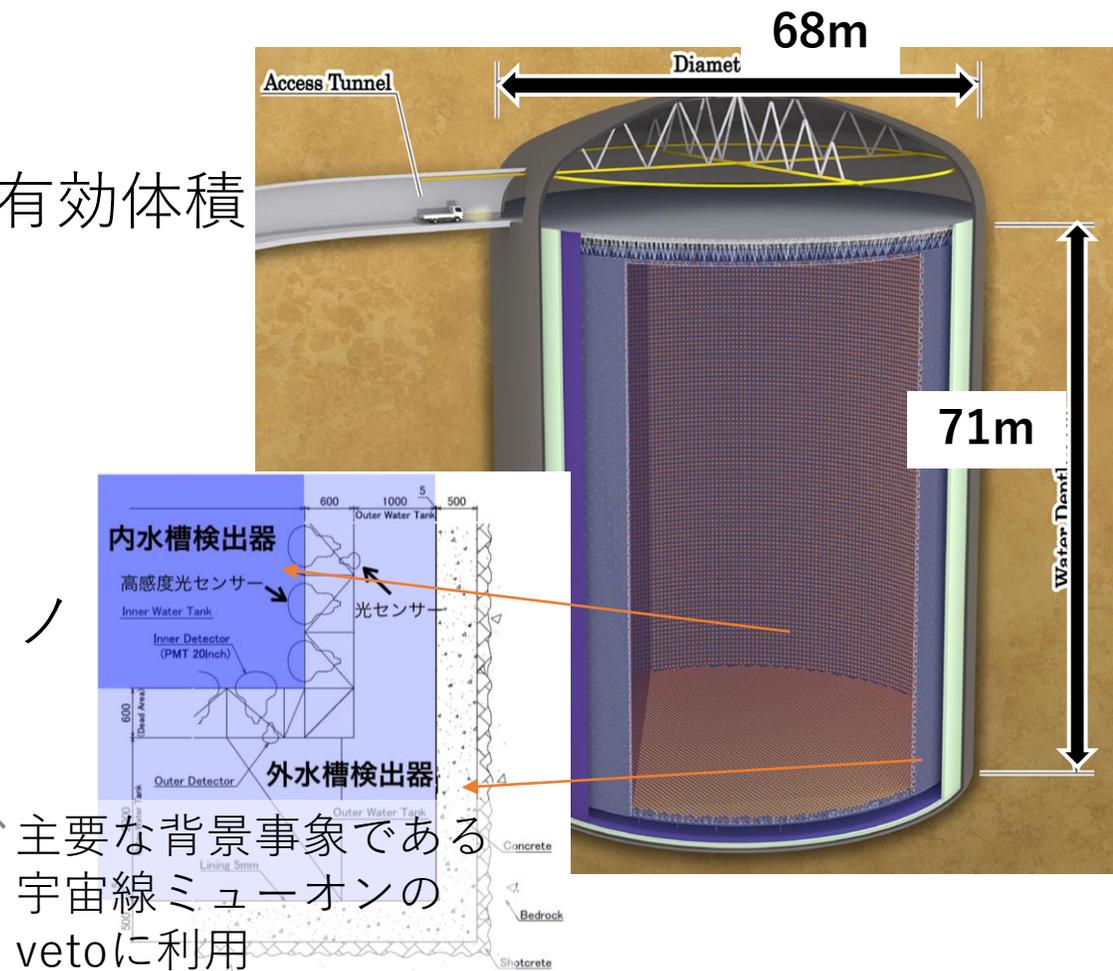
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- 未解決問題
 - CP対称性の破れ (δ_{CP})
 - 質量階層性問題



ハイパーカミオカンデ (HK)

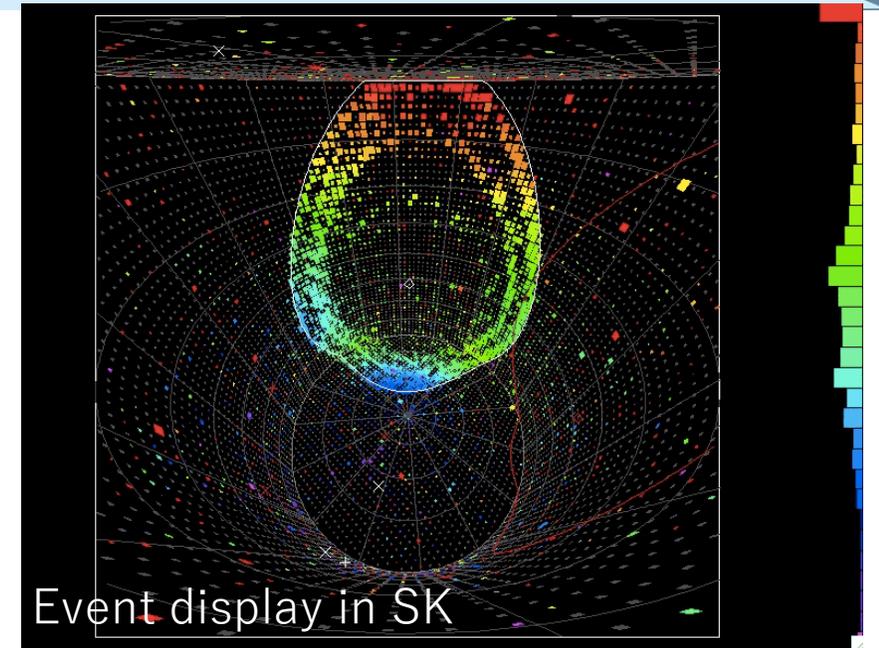
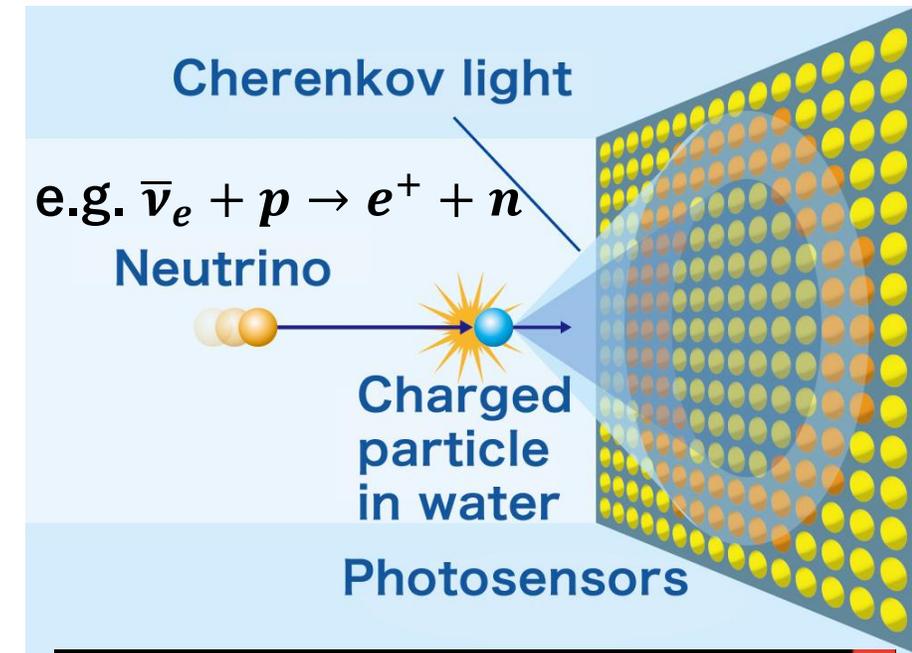
- 次世代の水チェレンコフ検出器
 - スーパーカミオカンデ(SK)の約8倍の有効体積
- 多くの物理対象
 - 核子崩壊探索
 - ニュートリノ振動の精密測定
⇒ (δ_{CP} , 質量階層性など)
 - 超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノ
- 2027年の実験開始に向けて開発中
 - 同期システムなどのエレクトロニクス
 - PMTの性能評価 etc.



© Kamioka Observatory, ICRR, The Univ. of Tokyo

検出原理

- ニュートリノの相互作用などで荷電粒子が生成しチェレンコフ光を放出
- ヒットしたPMTの位置, 電荷, 時間情報からチェレンコフ光を生成した粒子の(生成)位置、運動量、種別を再構成
- PMTやエレクトロニクスの性能が再構成精度に直結

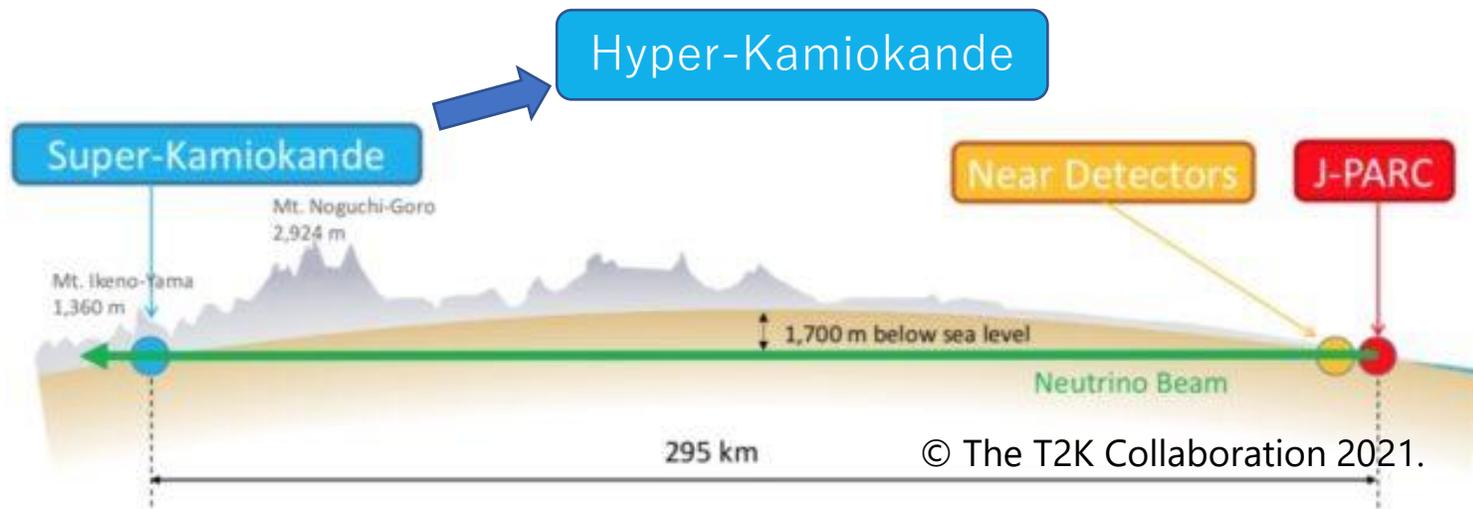


Tokai to Hyper-K (T2HK)実験

- 長基線ニュートリノの振動実験($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$)
 - J-PARC加速器施設で $\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ ビームを生成
 - 前置検出器 (ND) と後置検出器 (HK) で検出
- 各要素がアップグレード中
 - 後置検出器の置き換え (SK \Rightarrow HK) など



© 2022 J-PARC Center.

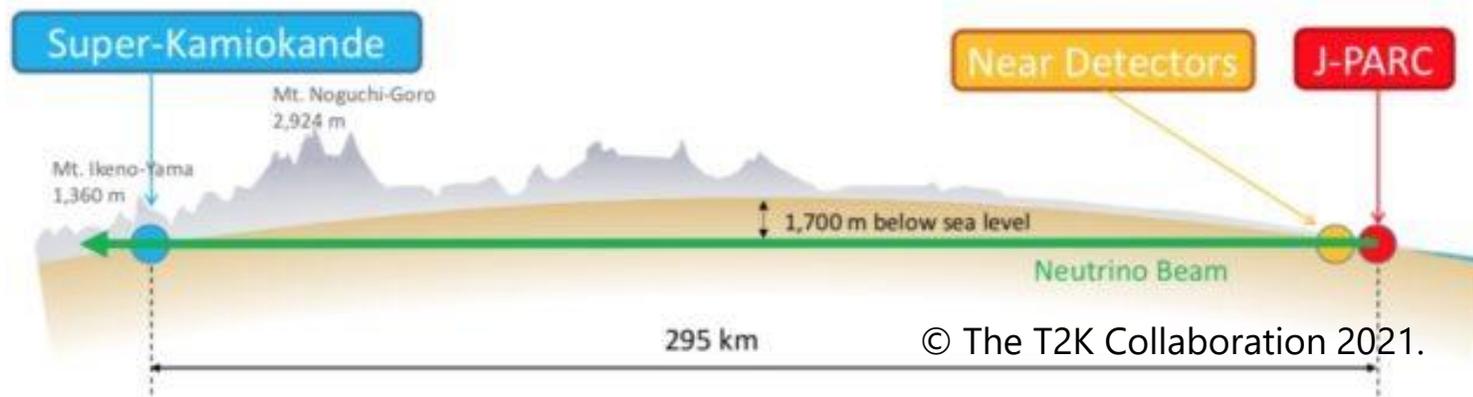


Tokai to Hyper-K (T2HK)実験

- 事象選別
 - J-PARC : ビームの生成時刻を記録し, NDとHKに配布
 - ND, HK : 受け取った時刻をもとに事象選別
- $O(10 \text{ ns})$ の精度でJ-PARCとHKの間の同期が必要 \Rightarrow GNSSを利用



© 2022 J-PARC Center.



Global Navigation Satellite System (GNSS)

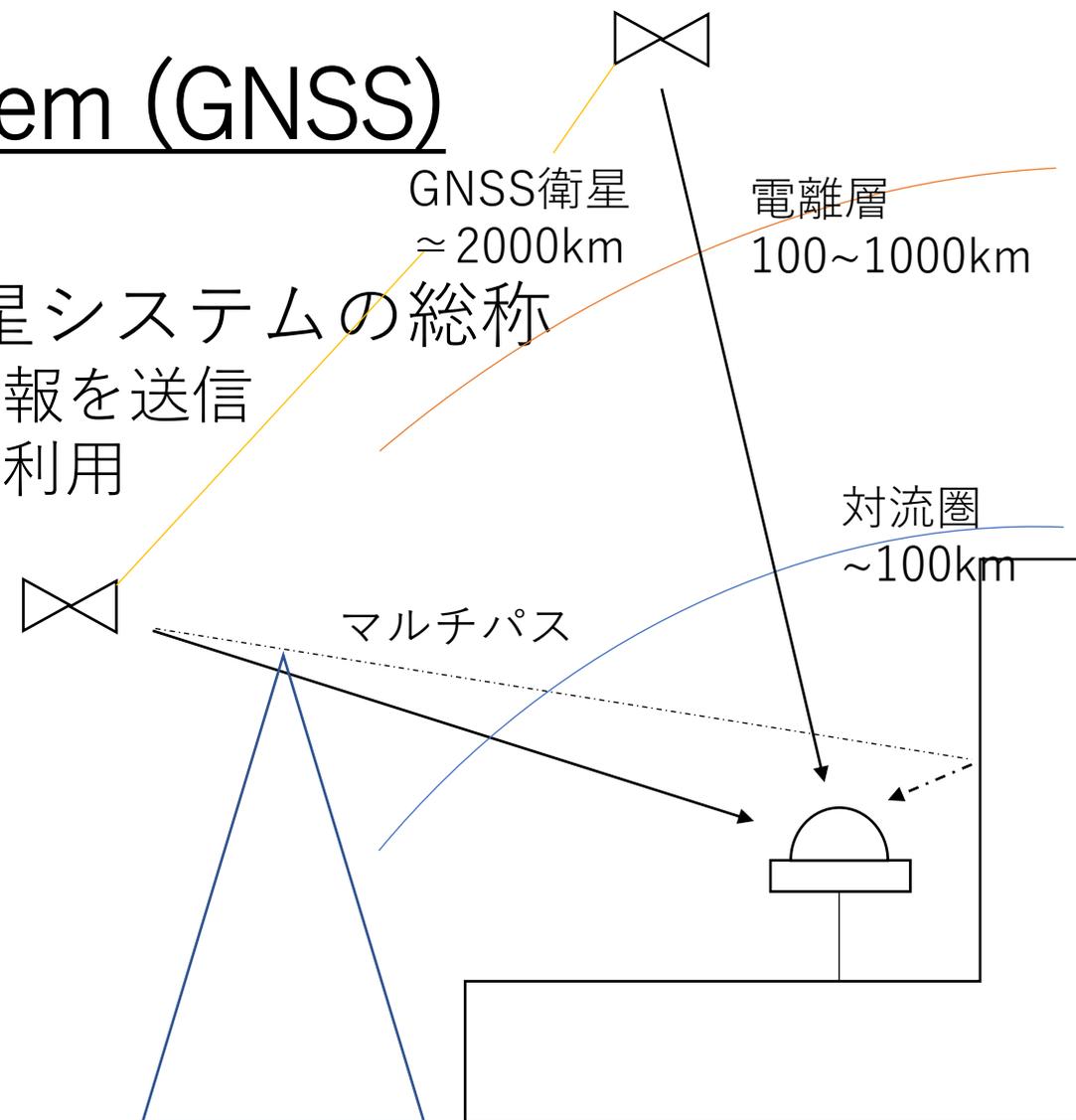
- GPS, GLONASS, みちびきなどの衛星システムの総称

- 原子時計が備わっていて、時間や軌道情報を送信
- 測量や航法、**時刻比較**など幅広い分野で利用

- GNSS時間は短期的には不安定

- 100 ns 程度のふらつき
- 電離層遅延や対流圏遅延, マルチパス等

- Rb原子時計などをGNSS時刻に同期させ安定な時計を作る



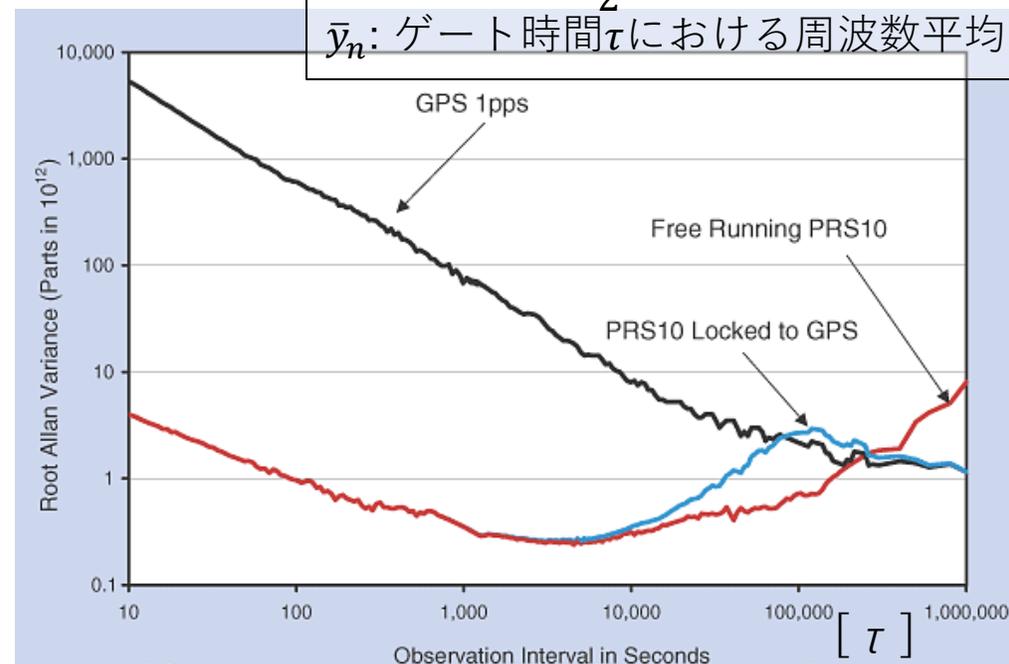
Global Navigation Satellite System (GNSS)

- GPS, GLONASS, みちびきなどの衛星システムの総称
 - 原子時計が備わっていて、時間や軌道情報を送信
 - 測量や航法, **時刻比較**など幅広い分野で利用
- GNSS時間は短期的には不安定
 - 100 ns 程度のふらつき
 - 電離層遅延や対流圏遅延, マルチパス等
- Rb原子時計などをGNSS時刻に同期させ安定な時計を作る

Allan 分散 : 周波数安定度の指標

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle$$

\bar{y}_n : ゲート時間 τ における周波数平均

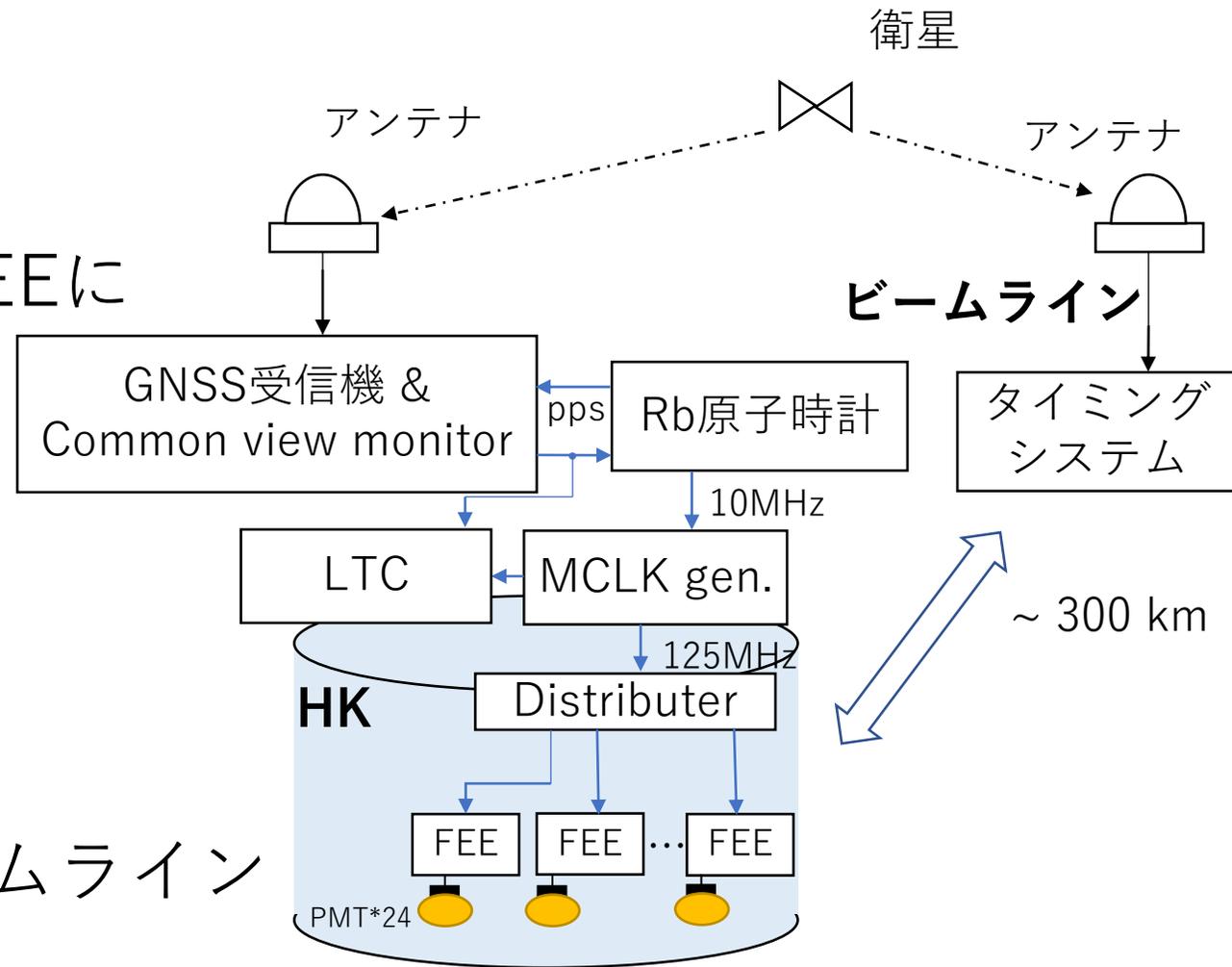


<https://www.thinksrs.com/products/prs10.htm>

タイミングシステム

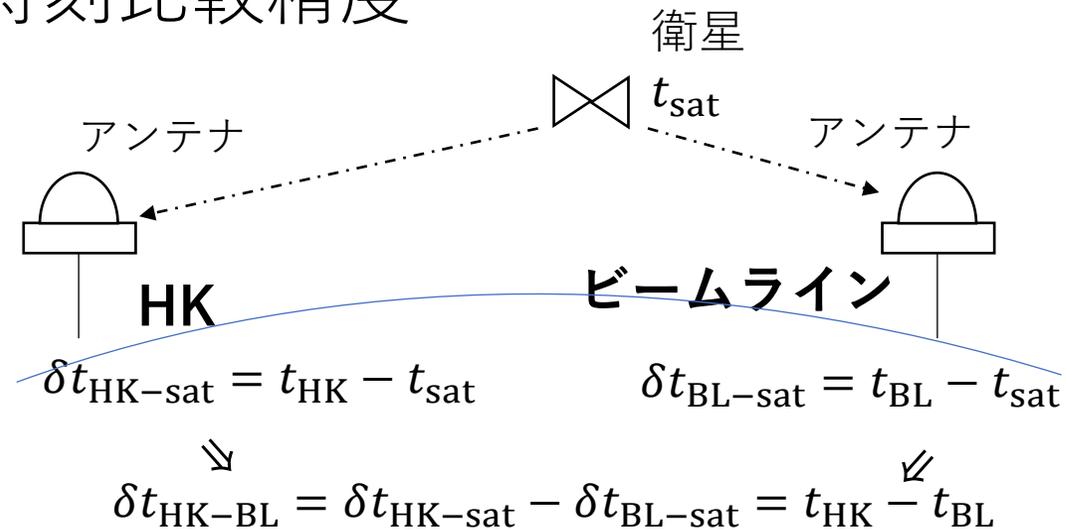
pps : pulse per second
FEE : frontend electronics
MCLK : master clock

- SK のシステムを基に拡張
- 基準クロック (MCLK) を各FEEに配布しPMTを同期
- LTC (local time counter) 基準クロックとGNSS ppsの対応を記録
⇒ 加速器 ν 事象の選別を利用
- Common view monitor 衛星を媒介にしてHKとビームライン間の時間を直接比較



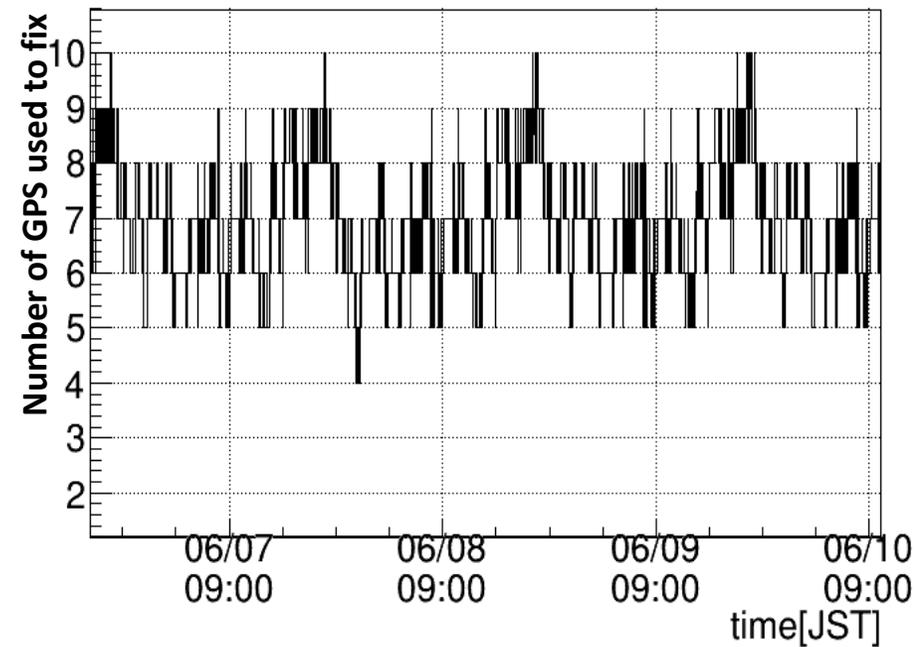
Common view法

- 同一の衛星から信号を受け取り衛星を媒介にして離れた2か所の時計を比較する方法
⇒ 10 ns 以下の時刻比較精度

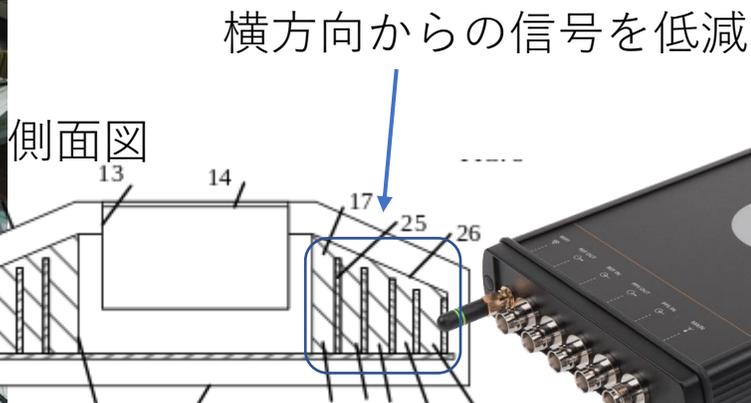


SKからのアップデート

- 神岡は山間部にあり，衛星の受信状況がしばしば悪くなる
- アンテナや受信機の性能を向上予定
 - みちびきへの対応，多周波の受信，マルチパスの低減など



Septentrio PolarNt Choke ring

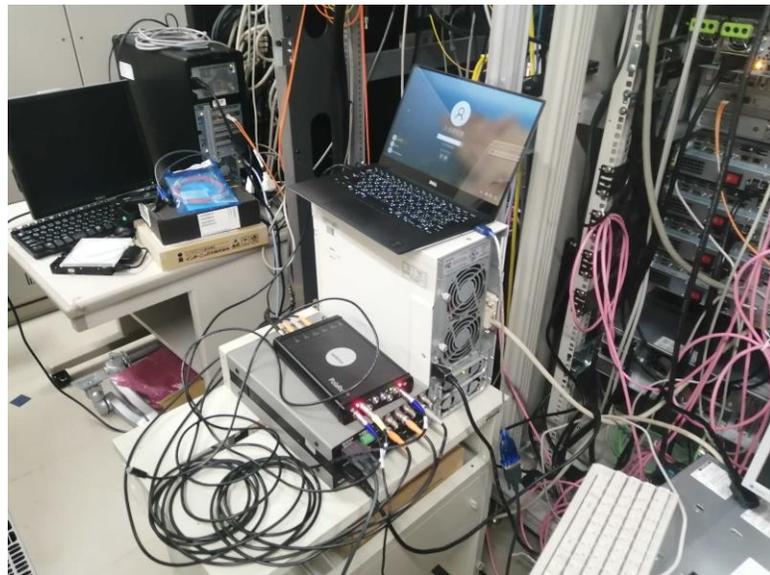


Septentrio Polarx5tr

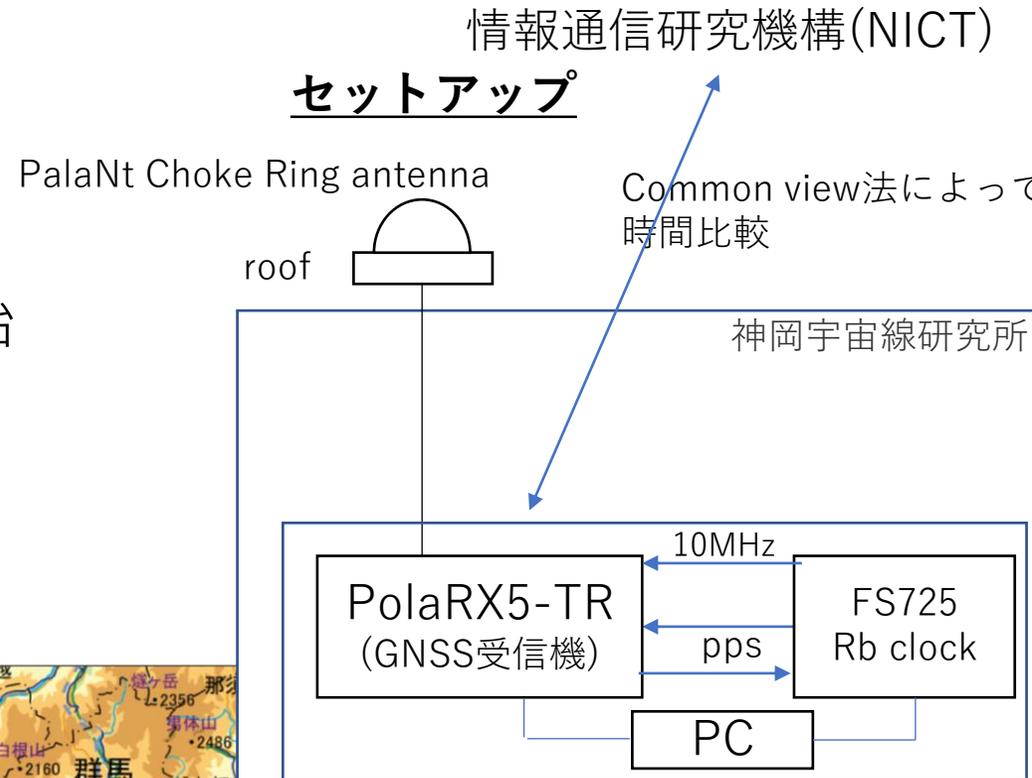


性能評価

- 神岡でアンテナや受信機の性能評価を開始
- NICTの配布するJSTに対する時間安定性を評価
- その他受信環境も並行してモニター



© Geospatial Information Authority of Japan



性能評価

- SKで運用中のアンテナの傍に設置（実際の運用は別地点）

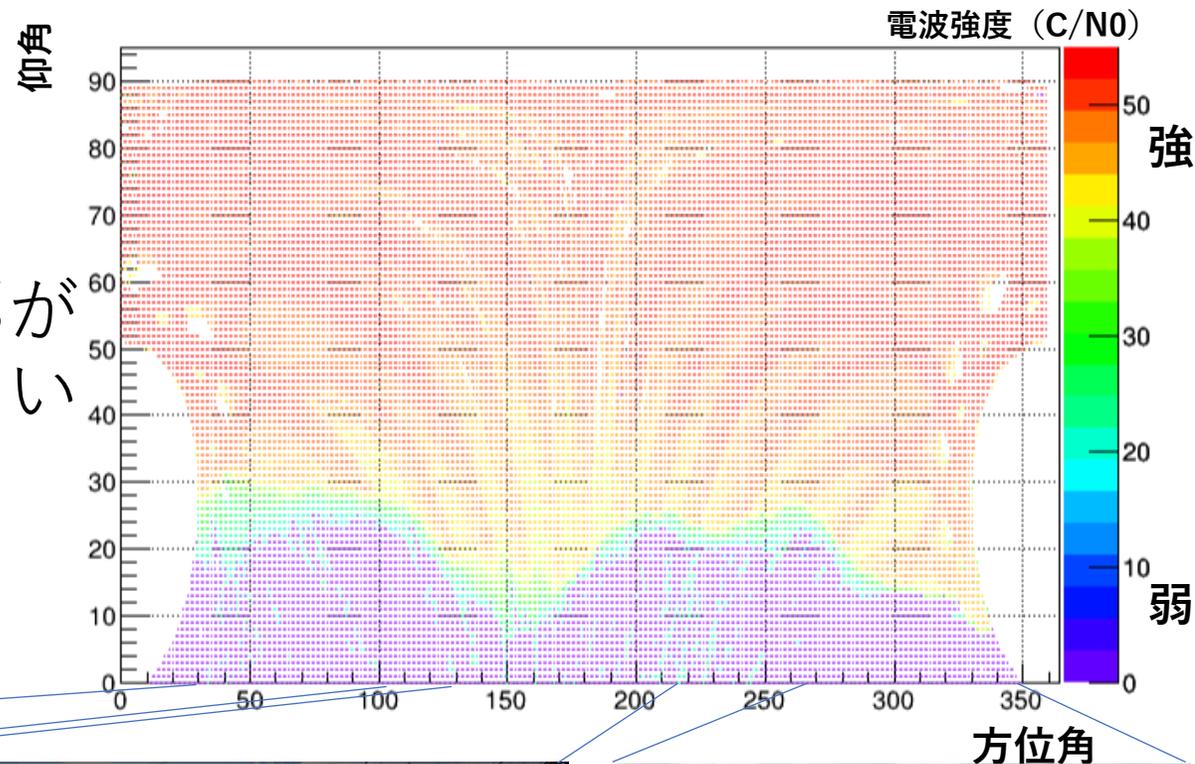


アンテナ設置地点



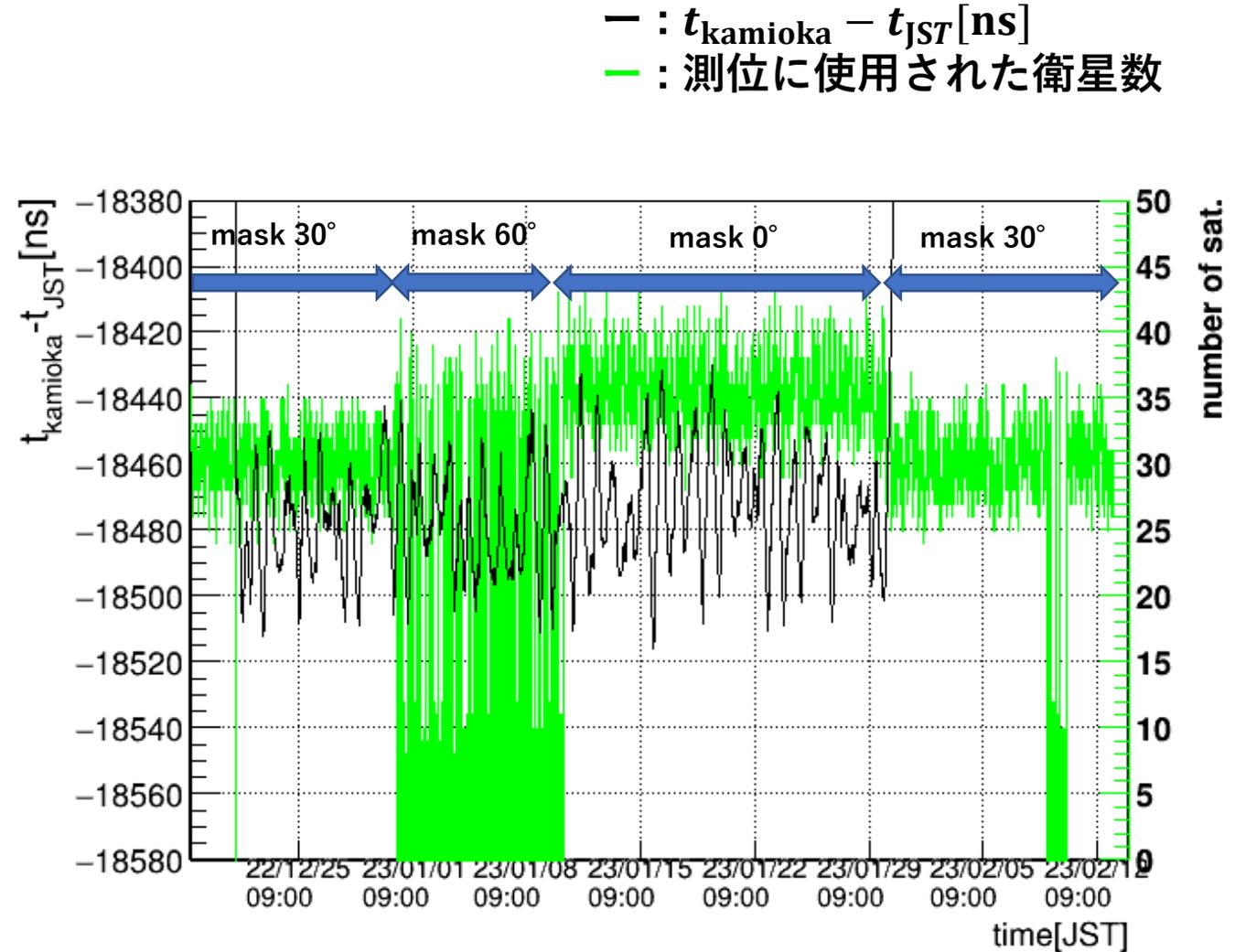
衛星受信環境

- SKアンテナ設置地点で測定
- 衛星の信号強度分布から山の輪郭が再構成⇒稜線以下の衛星を使わないように設定して運用
- HKの坑道付近で測定を行い、最終的な設置点を検討予定



時間安定性の評価

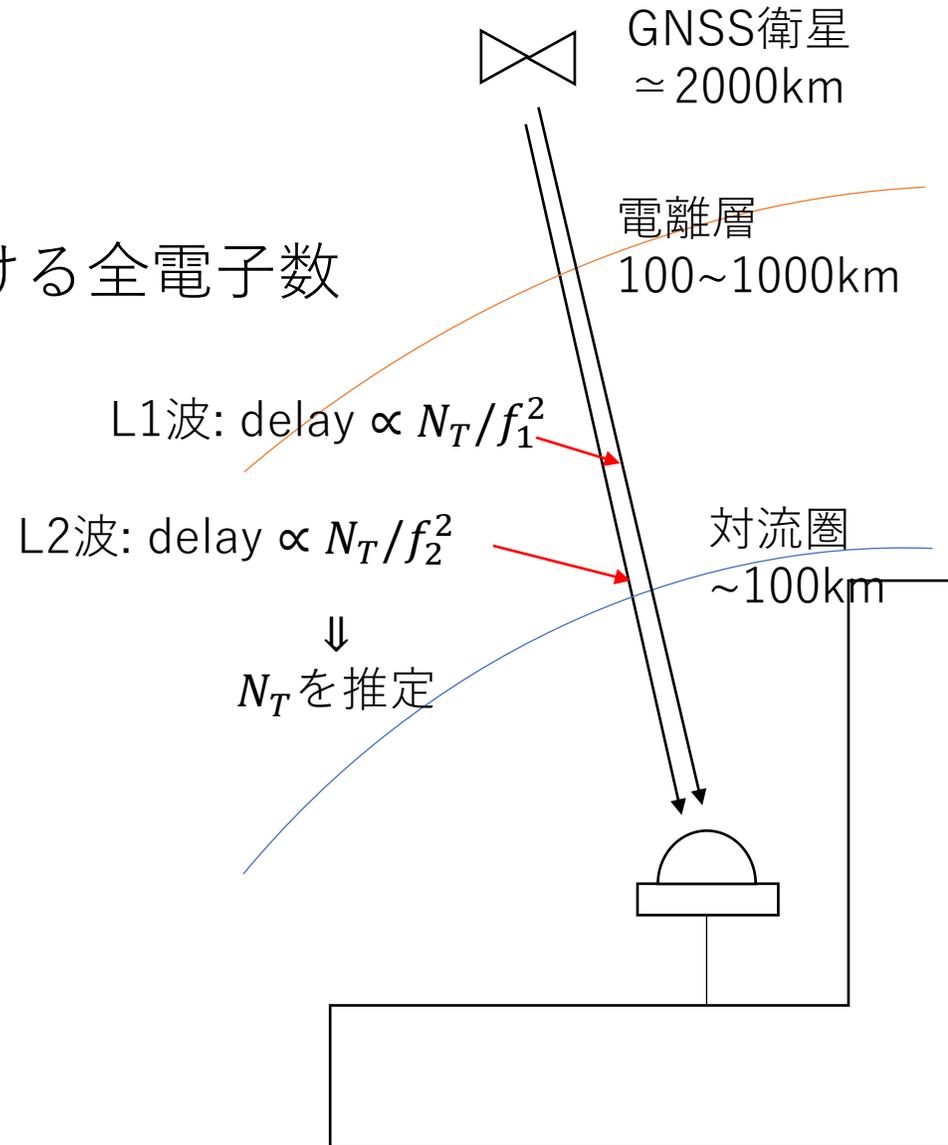
- 測位に使う衛星の条件などを変えながら安定性の評価
 - Peak-to-peakで50 nsの安定性
- 24時間周期の変動は衛星軌道や電離層, 対流圏遅延などに関係
- Rb原子時計の時定数の調整などを行い, 安定性は向上する見込み



電離層遅延

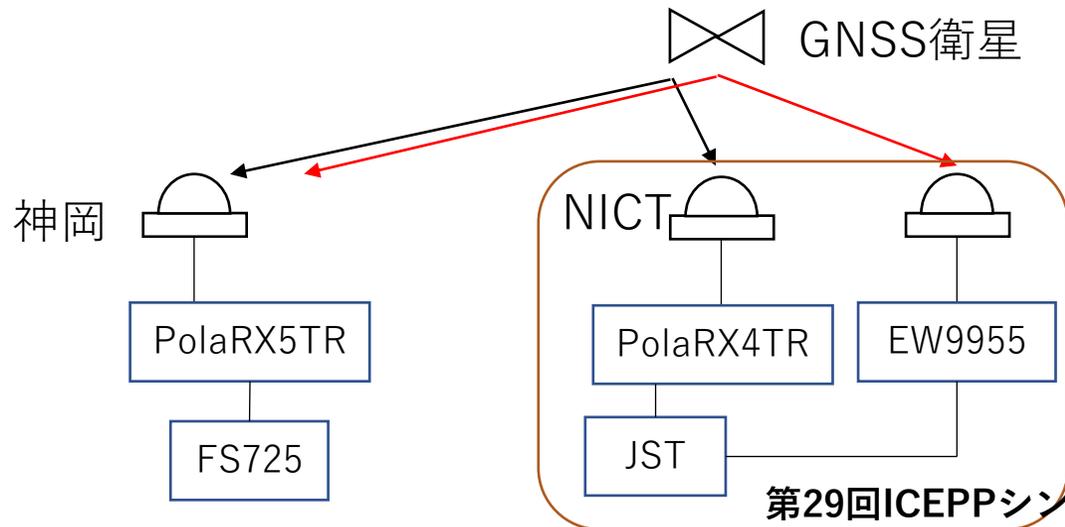
- 電離層遅延 $\propto N_T/f^2$
 - 電離層での電波の速度減衰
 - $N_T = 10 \times 10^{16} \text{el/m}^2$ で10ns程度(GPS L1)
- 多周波の受信機を利用すると電離層遅延を相殺することが可能

N_T : 伝搬経路における全電子数
 f : 周波数

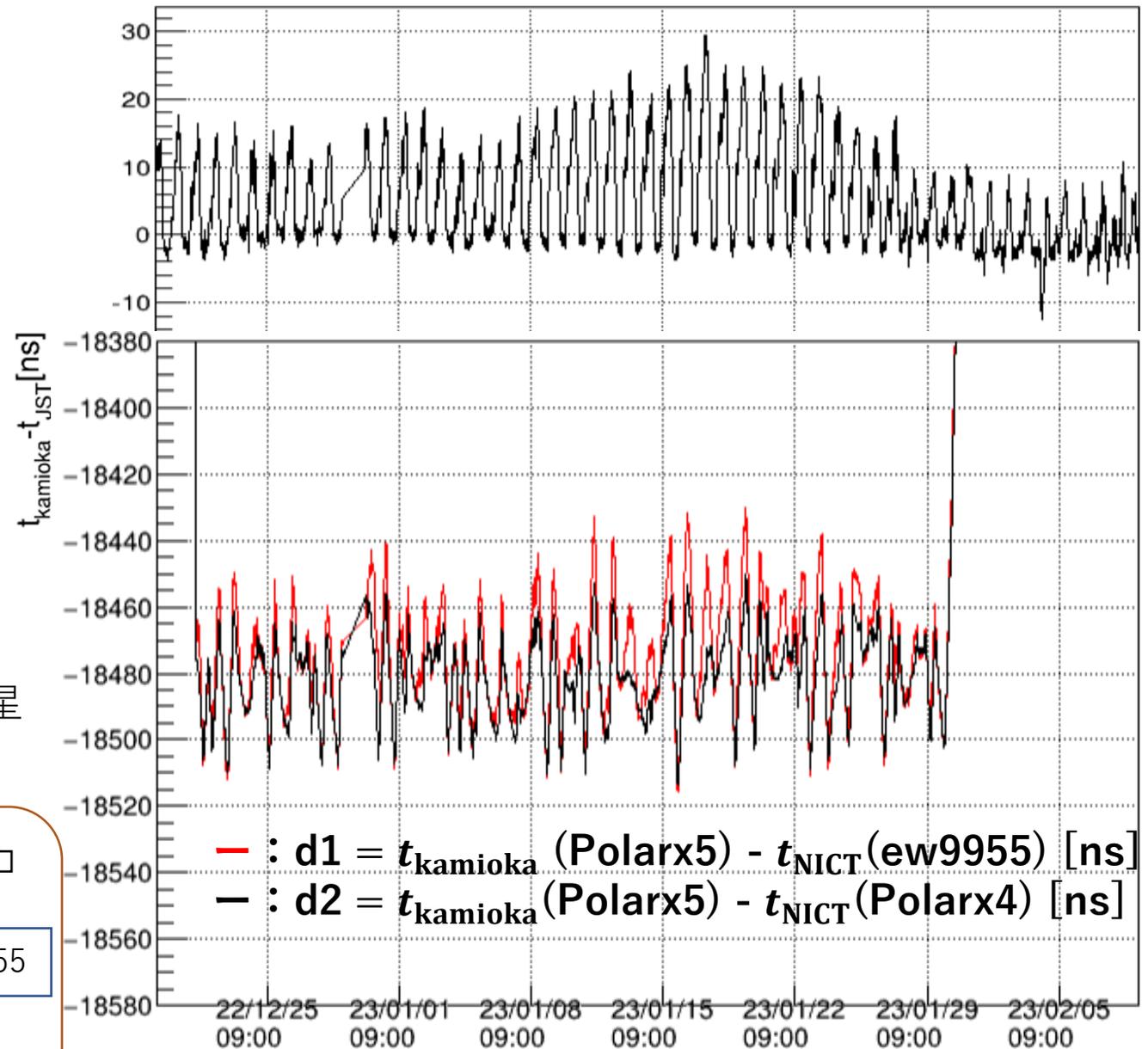


電離層遅延による影響

- 現在のセットアップ
 - 神岡：多周波受信機, NICT：1周波受信機
⇒NICT側のみで電離層遅延の寄与が残る
- NICTで運用中のpolarx4tr（多周波）に関しても、同様に神岡との時間差をモニタした
- d2-d1：受信機が変わることによる計算結果への影響, 最大30ns, 24時間周期で変動
⇒実際の運用では受信機をそろえることが重要

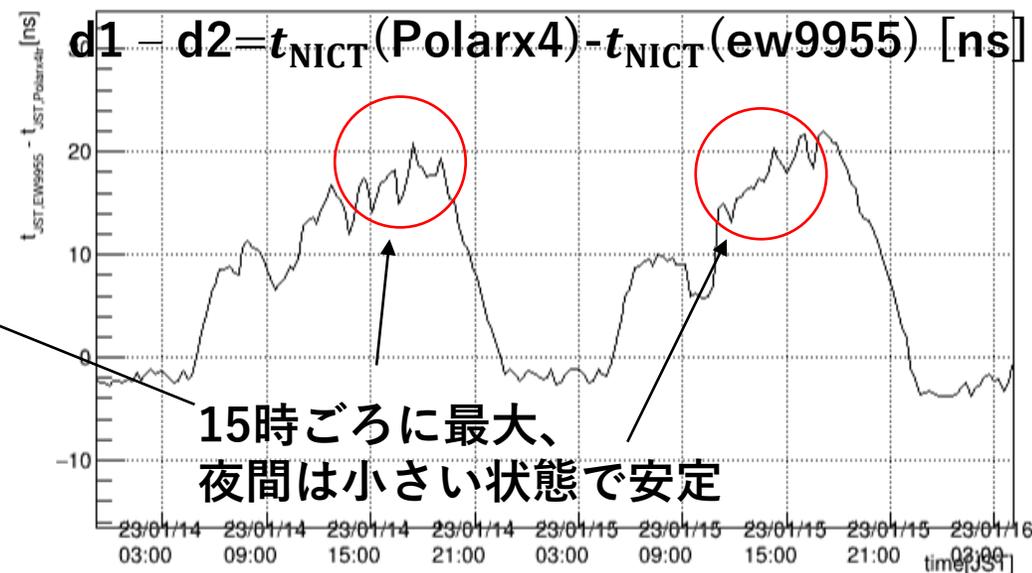
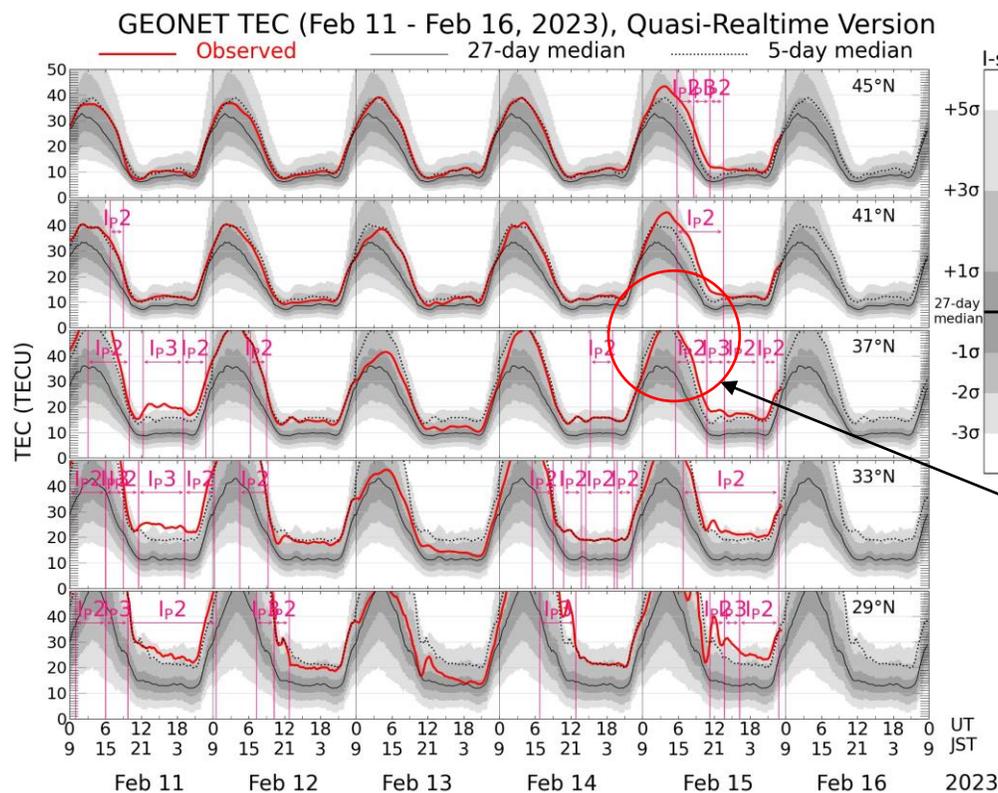
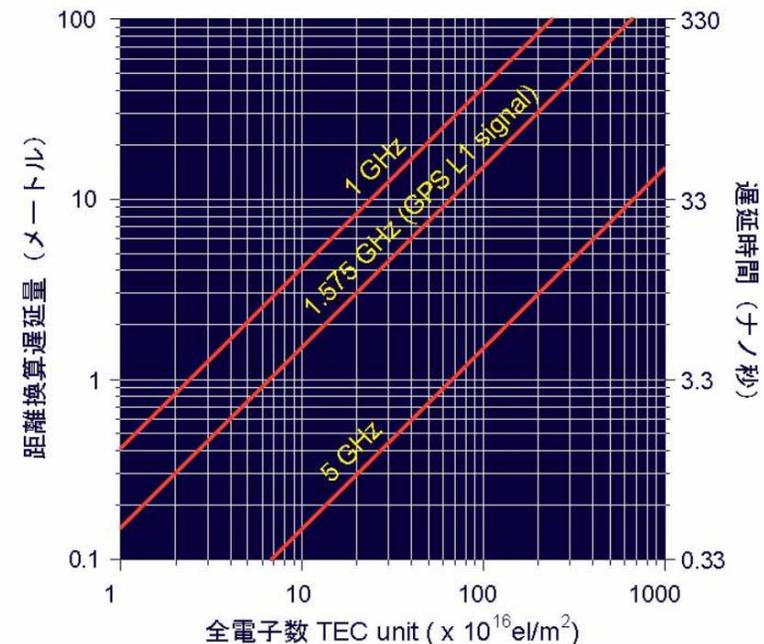


$$d1 - d2 = t_{\text{NICT}}(\text{Polarx4}) - t_{\text{NICT}}(\text{ew9955}) \text{ [ns]}$$



NICTの電離層データと比較

- $t_{NICT}(ew9955) - t_{NICT}(Polarx4)$ の変動や値と電離層の測定値に相関があることを確認



まとめと展望

- HKは2027年の実験開始に向けて建設や各システムの開発が進められている
- 加速器vの検出において約300km離れたHKとビームラインの間での時間同期が重要であり, GNSSを利用したタイミングシステムを運用予定である
- HKに向けて新しいGNSSアンテナや受信機を導入予定であり, それらの性能評価を行っている
- その他システムに関しても並行して開発が進められている