

遠距離VLBI周波数比較の プロジェクトについて

関戸衛、岳藤一宏、氏原秀樹、近藤哲朗、宮内結花、
堤正則、川合栄治、長谷川新吾

- 現在までの達成
- これからの計画・予定
- 周波数比較PJ以外のVLBIの役割・活動

2016年4月21日 時空談話会

Gala-V Project 概要

■ 小型広帯域のアンテナを原子時計の開発拠点に設置して、原子時計間の周波数比較を行う。

■ できるだけ**VGOSと互換性のある広帯域VLBIシステム**

■ 独自技術

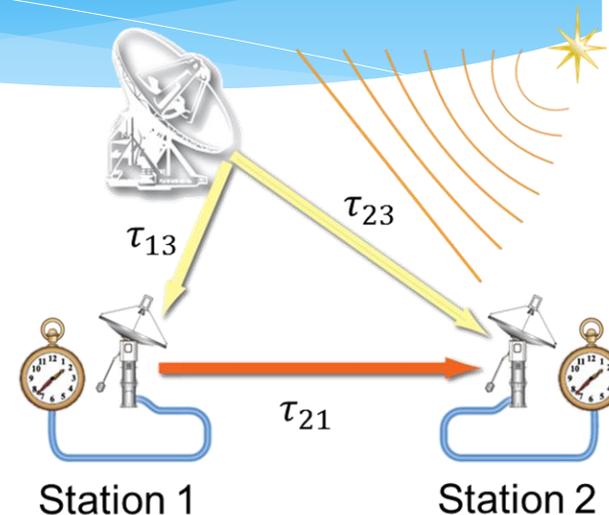
■ カセグレン用広帯域フィードの設計開発

■ ダイレクトサンプリング法

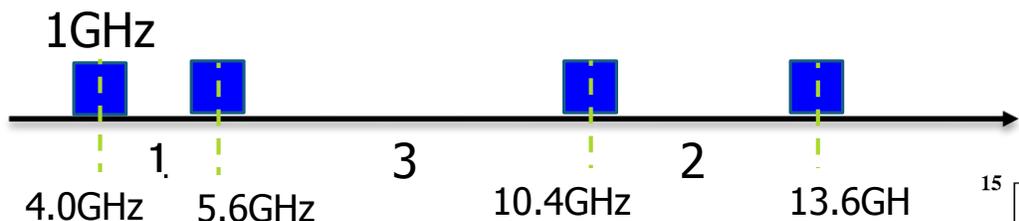
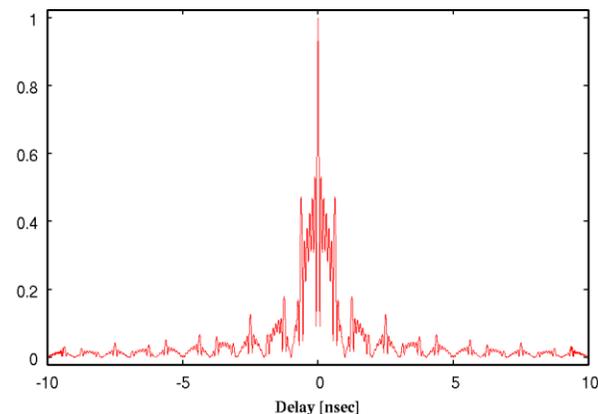
■ データ取得:**3-15GHz**で**4バンド**(1024MHz幅)

■ $f_c = 4.0\text{GHz}$, 5.6GHz , 10.4GHz , 13.6GHz

■ **有効帯域幅:3.8GHz**(従来の10倍)

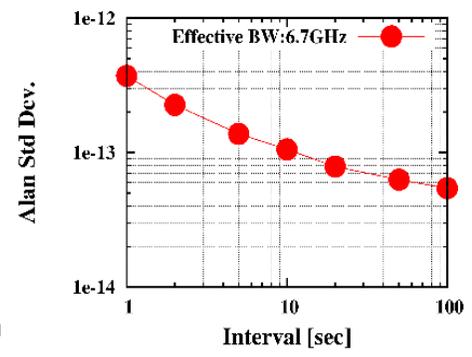
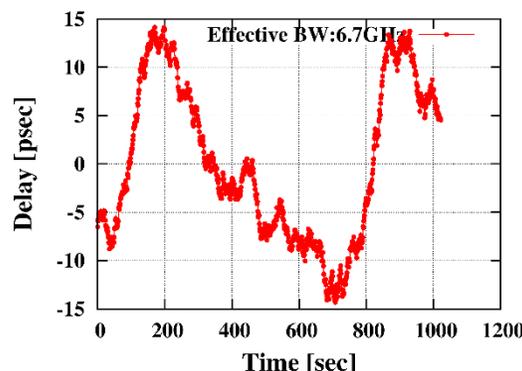
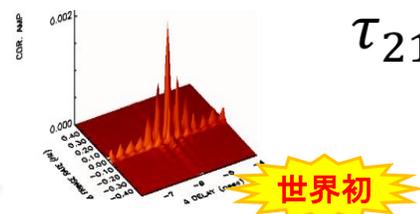


$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$



遅延分解関数

従来に比べて10倍高い遅延計測精度が期待できる。



Topics of our PROJECT

1. カセグレンアンテナ用広帯域フィードの開発(Kashima 34)

- IGUANA-H: 6.5-15GHz
- NINJA : 3-14.4GHz



2. ダイレクトサンプリング(16GHz)と広帯域バンド幅合成.

A) RF信号を**周波数変換なし**に直接A/D変換.

B) 広帯域バンド幅合成(**位相校正信号PCALを使わず**).

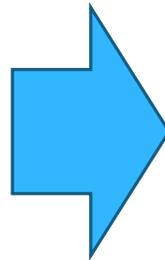
3. 超広帯域(3-12GHz)のVLBI実験の結果、数分で20 psec程度の遅延変動が観測された。大気遅延の推定向上のためには高速な天体切り替えが必要であることが確認された。

Broadband Feed for Cassegrain optics Kashima 34m antenna

現在は直線偏波1つであるが
今年中に直線両偏波化の予定



IGUANA-H Feed (6.5-15GHz)

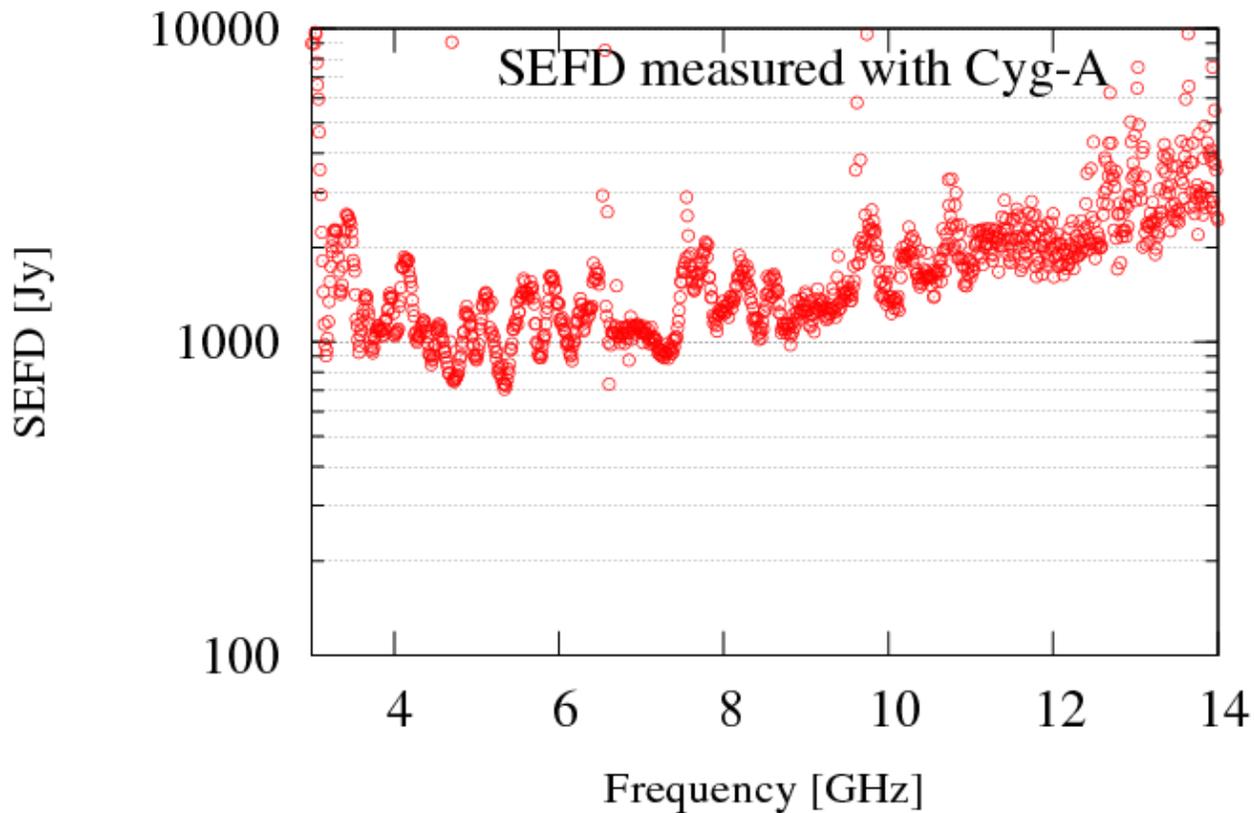


NINJA Feed (3.2-14.4GHz, nominal)

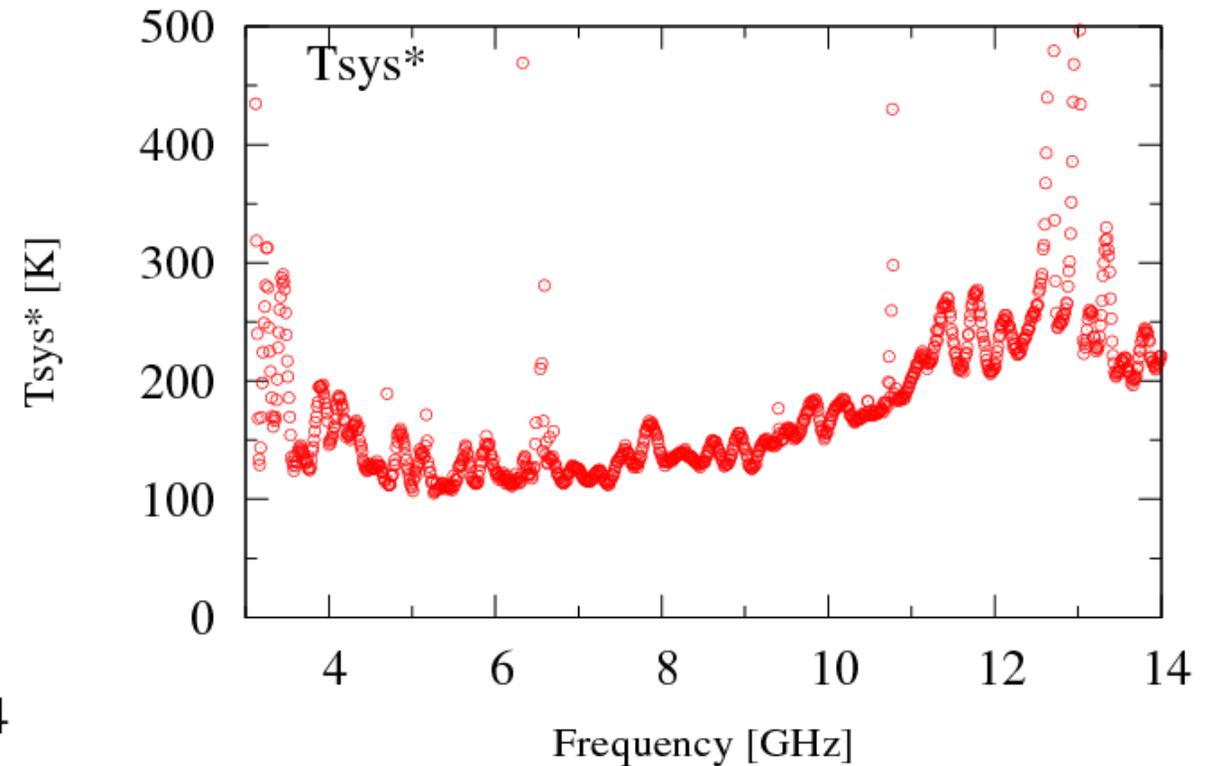


NINJA Broadband Feed on 34m antenna

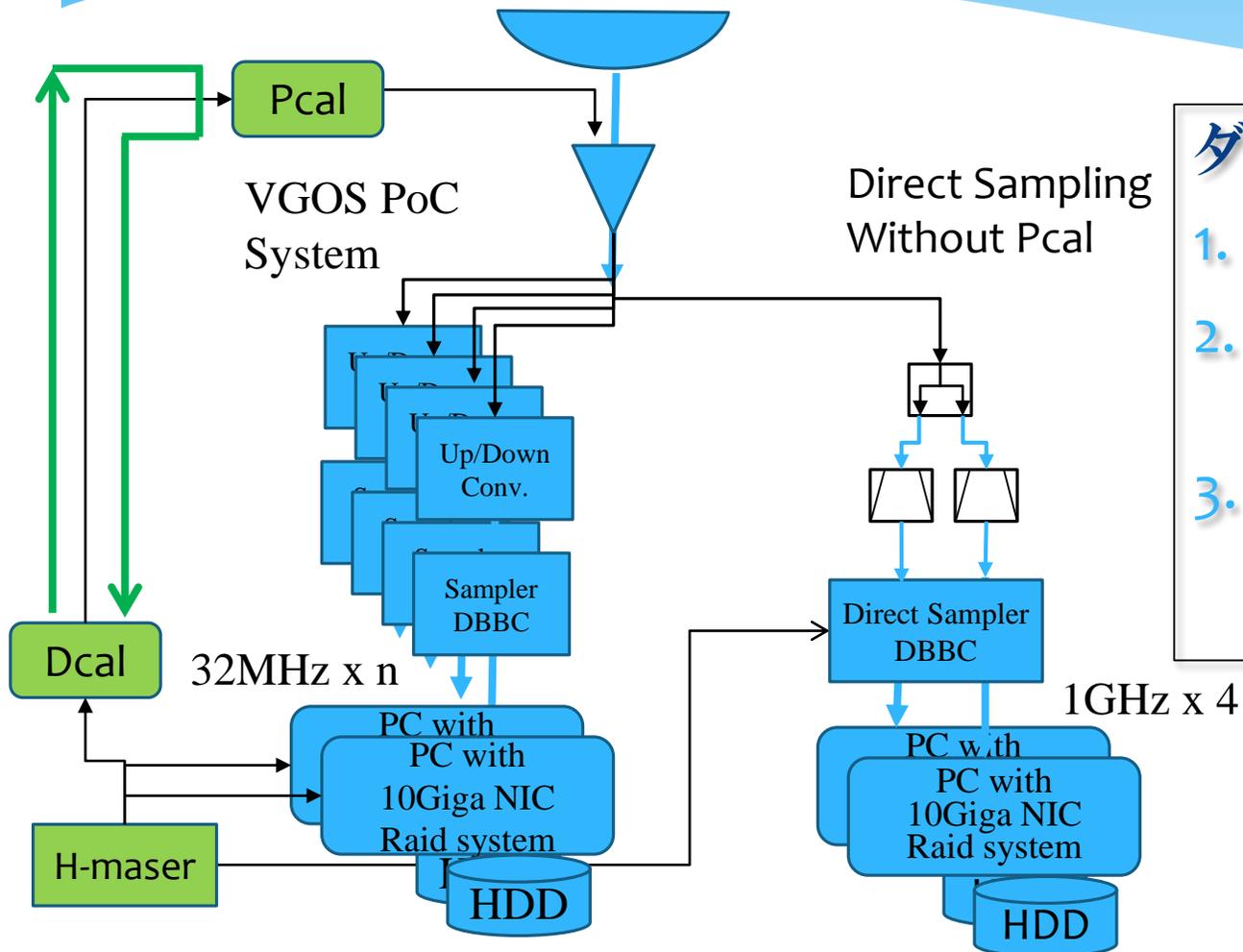
SEFD of Kashima 34m with NINJA Feed



Modified System Temperature with NINJA Feed



ダイレクトサンプリング方式により 校正系を簡素化したシステムが可能に。



ダイレクトサンプリングの利点

1. 少ない(アナログ)構成機器.
2. チャンネル間の位相関係が安定となり、PCALが不要に。
3. 検証されれば **遅延校正系も不要.**

RF信号を直接A/D変換する高速サンプラ

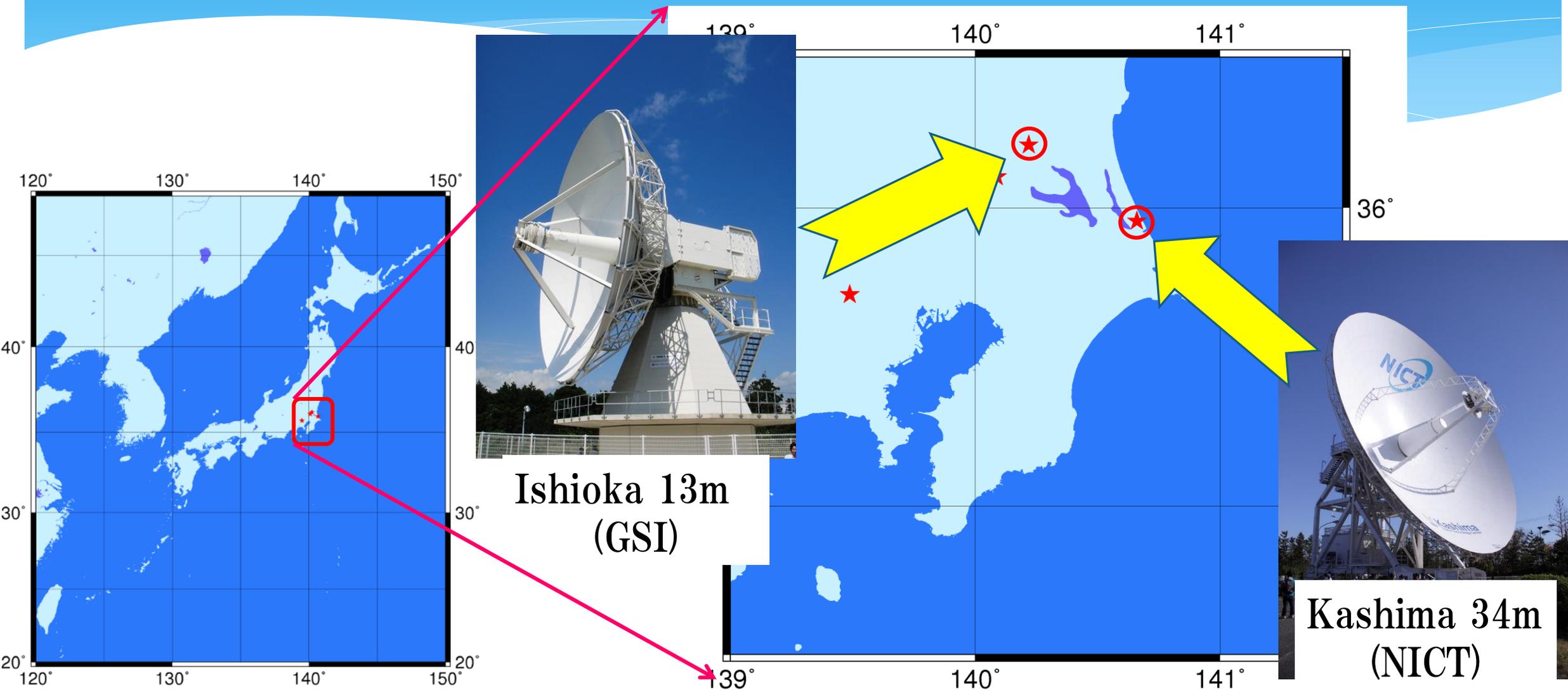
K6/GALAS



国立天文台の開発したサンプラを仕様変更して活用。 共同研究資源の活用

IF Input Port	2
Input Freq. Range	0.1-16.4 GHz
Sampling mode	DBBC Mode Nch/unit=1,2,3, or 4 2048 Msps/ch Qbit=1, or 2 bit
Output Port	10GBASE-SR, 4port
Max Data rate	16384 Mbps/port

石岡局との国内評価実験 14-15 Aug. 2015



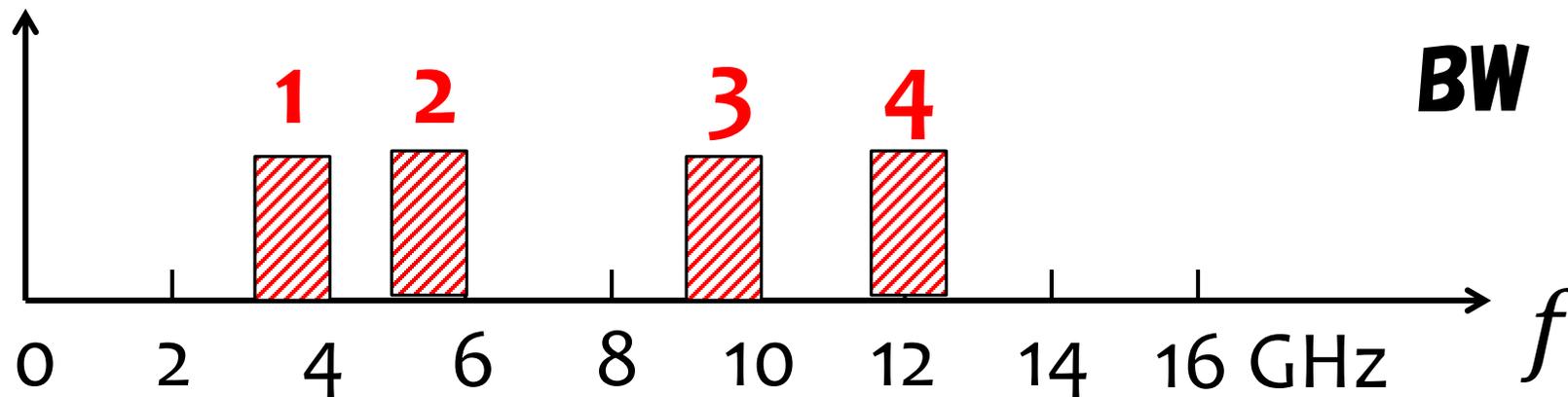
ゼロ冗長配列の周波数配置



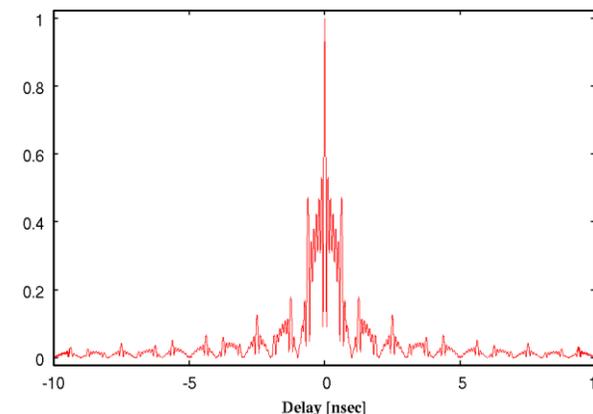
不定性なしに群遅延が
高精度に求められる

Direct Sampling (K6 / GALAS)

BW 1024MHz each

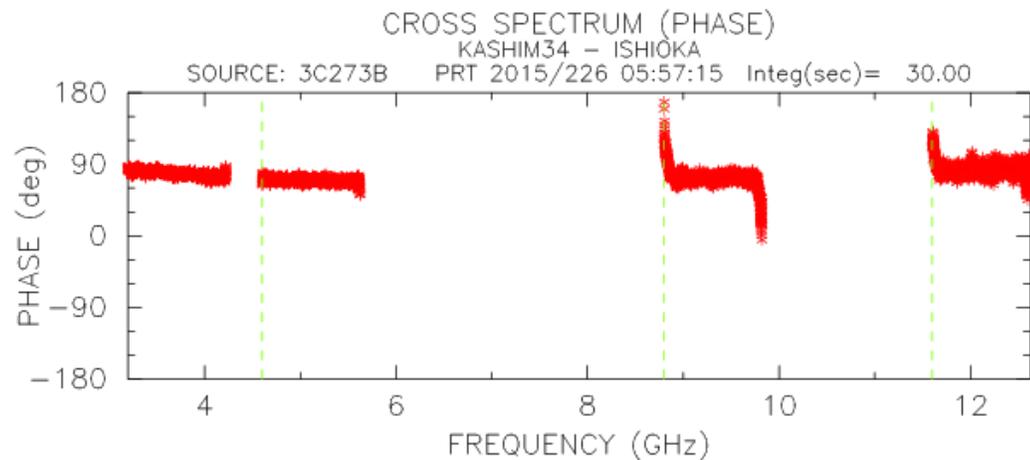
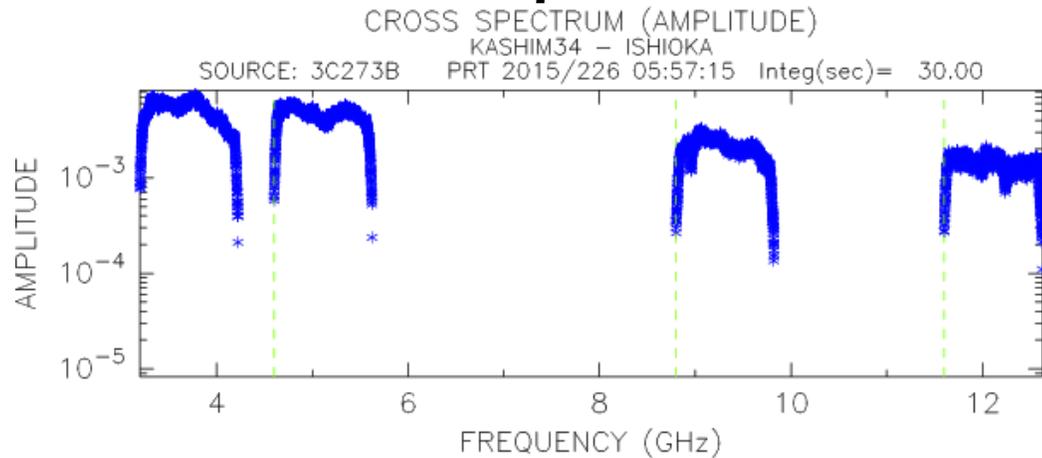


Lower Edge= 3.2, 4.8, 8.8, 11.6GHz

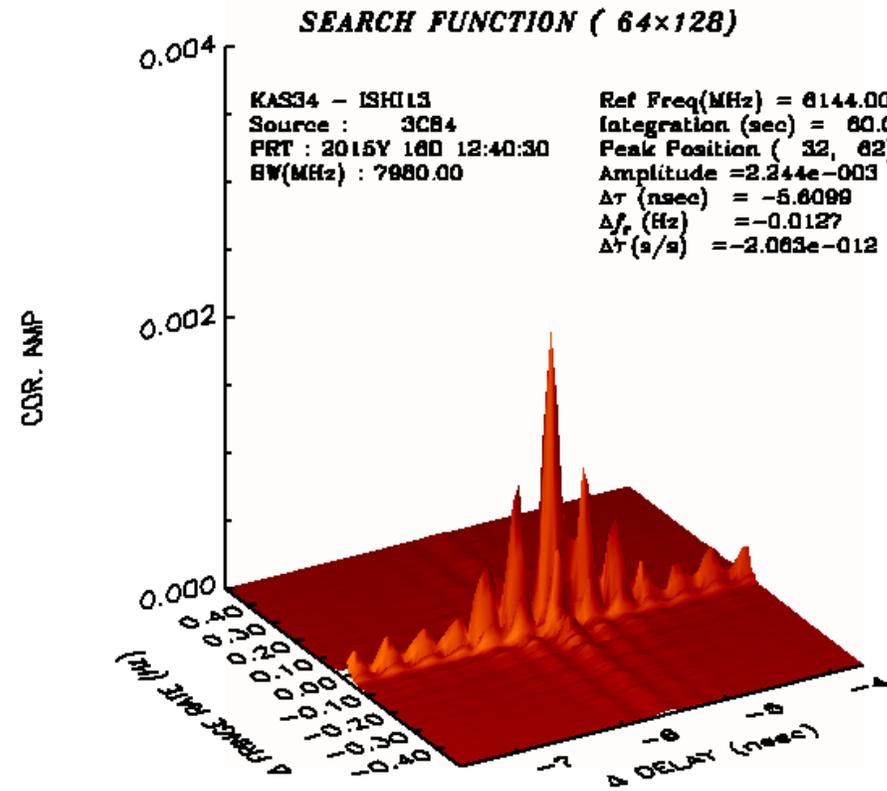


Full Bandwidth Synthesis #1-# (6-14GHz) by Phase Calibration with Radio Source

Cross Spectrum

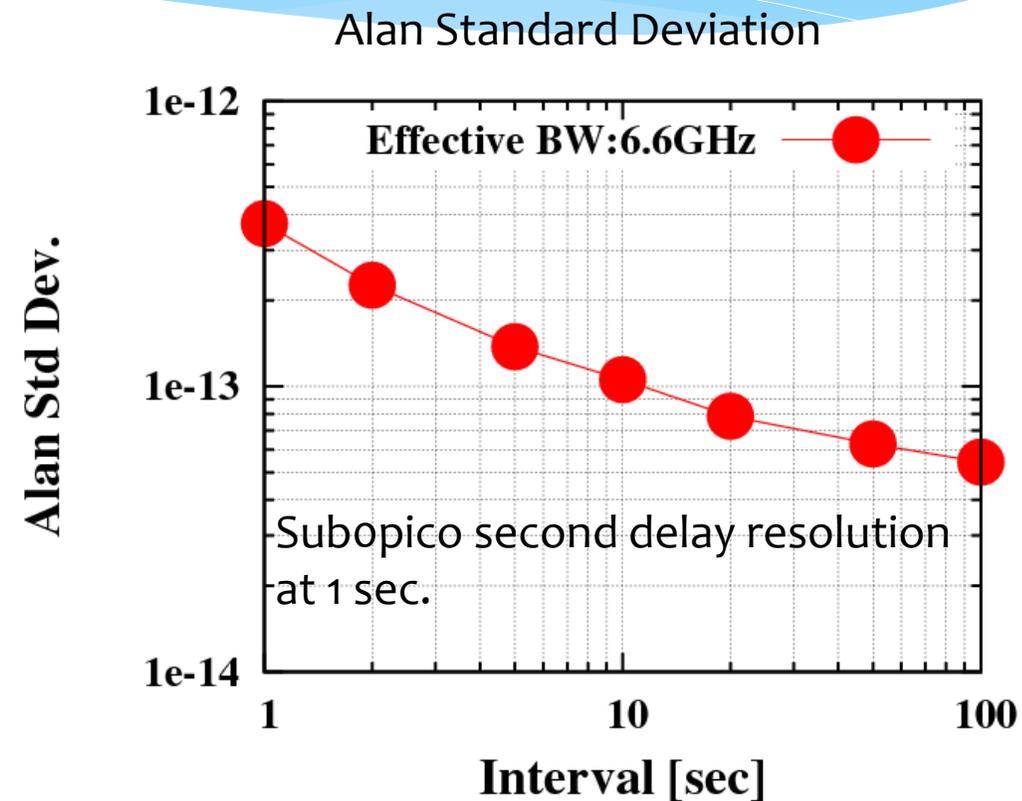
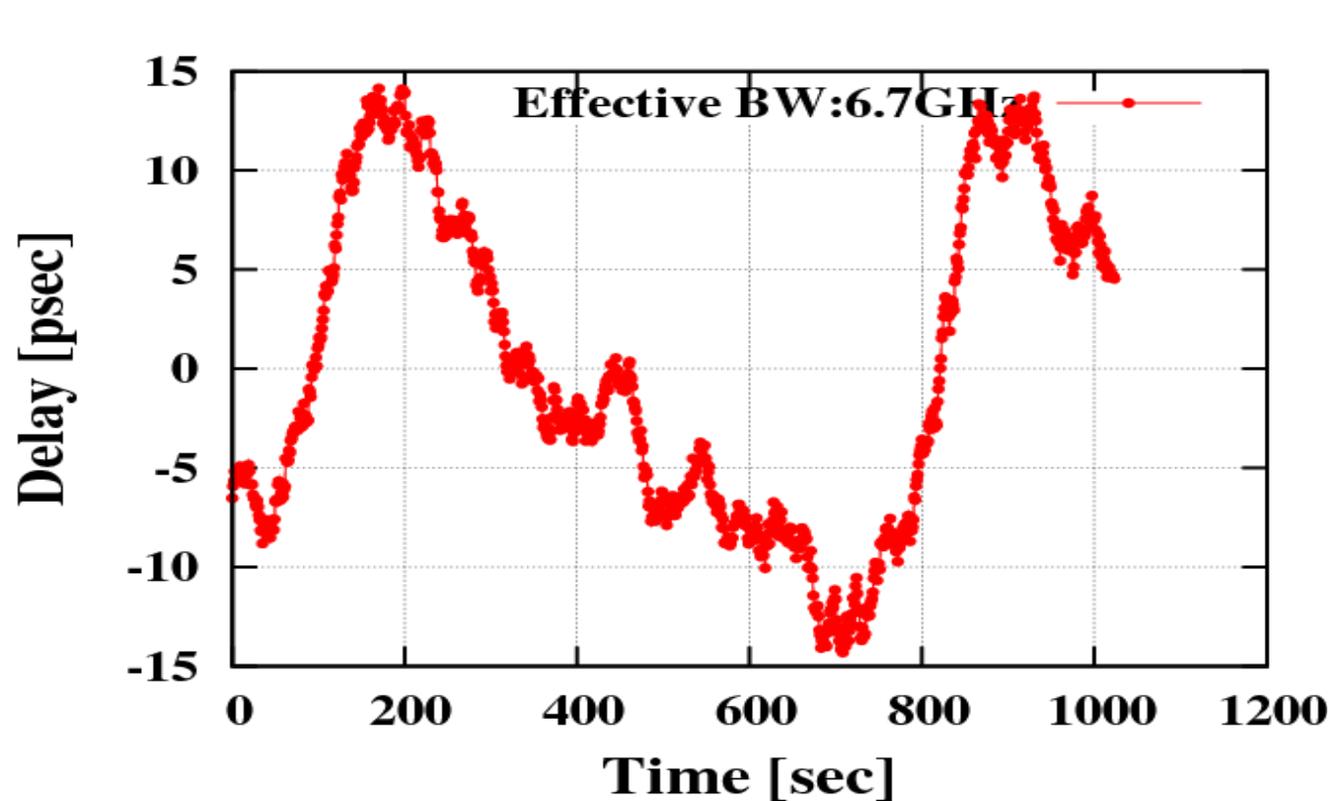


Delay Resolution Function



広帯域群遅延量(3.2-12.6GHz)の挙動

鹿島34 - 石岡 13m



Broadband Antennas used in Gala-V Project

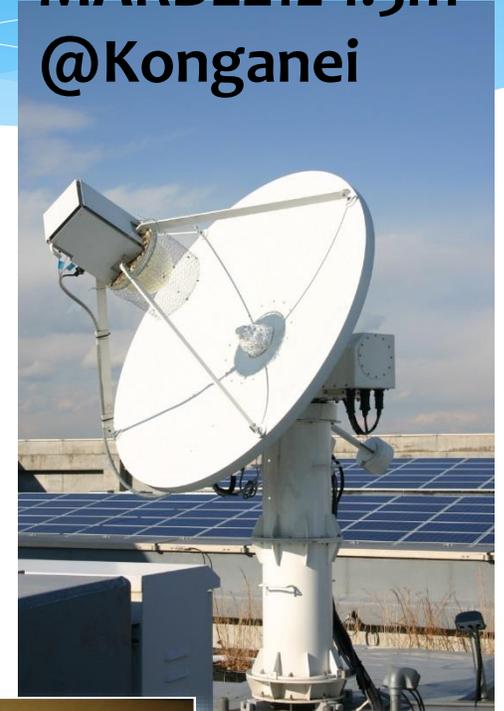
Kashima 34m



MARBLE1 1.6m @NMIJ(Tsukuba)



MARBLE12 1.5m @Konganei

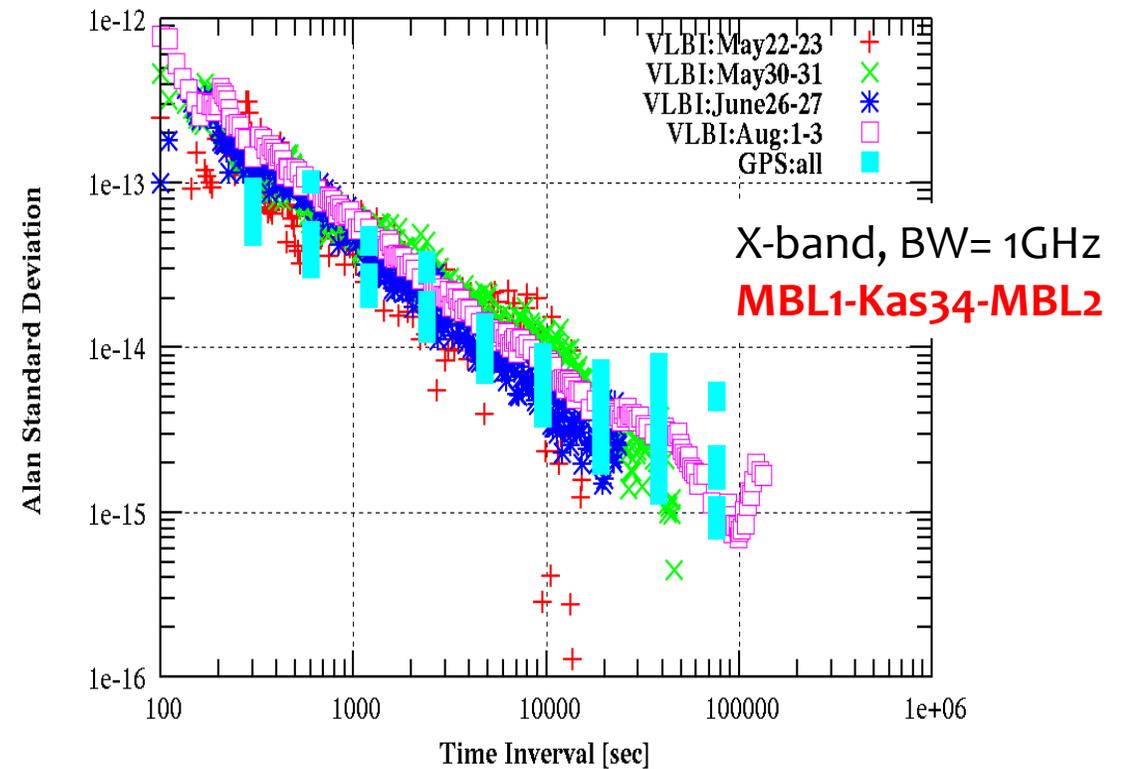
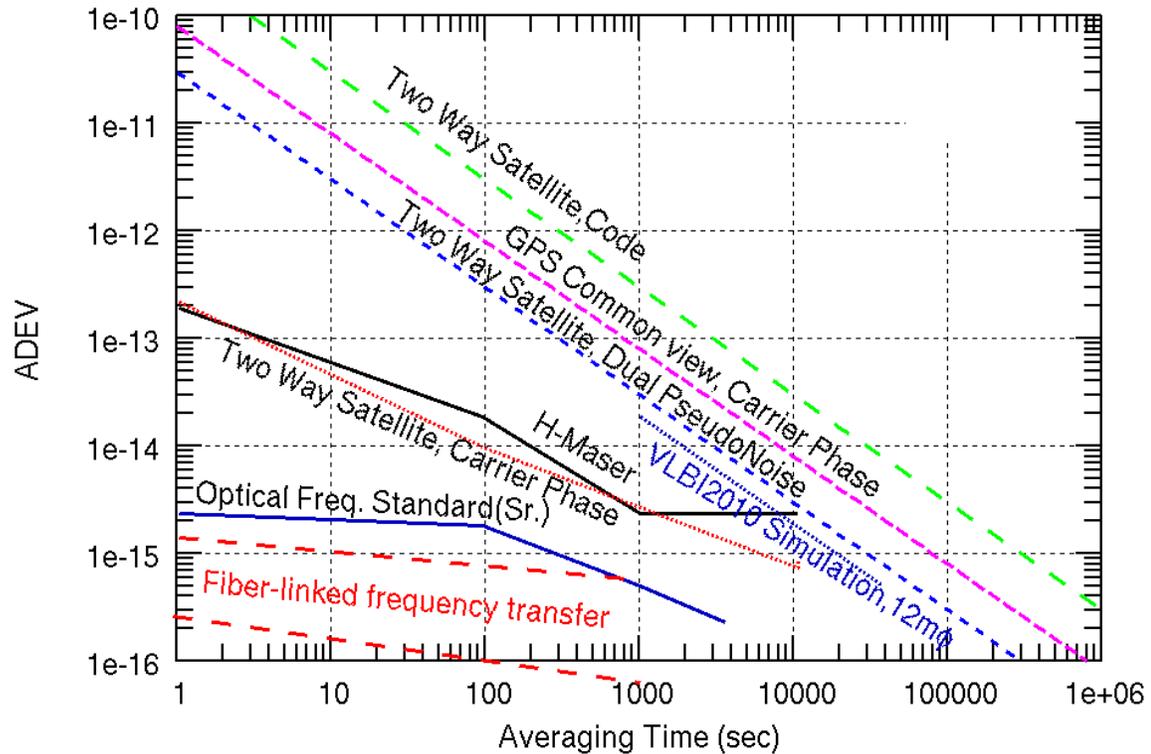


Original broadband Feed
NINJA, IGUANA-H



Rindgren
QRHA

周波数比較技術としての目標とこれまで



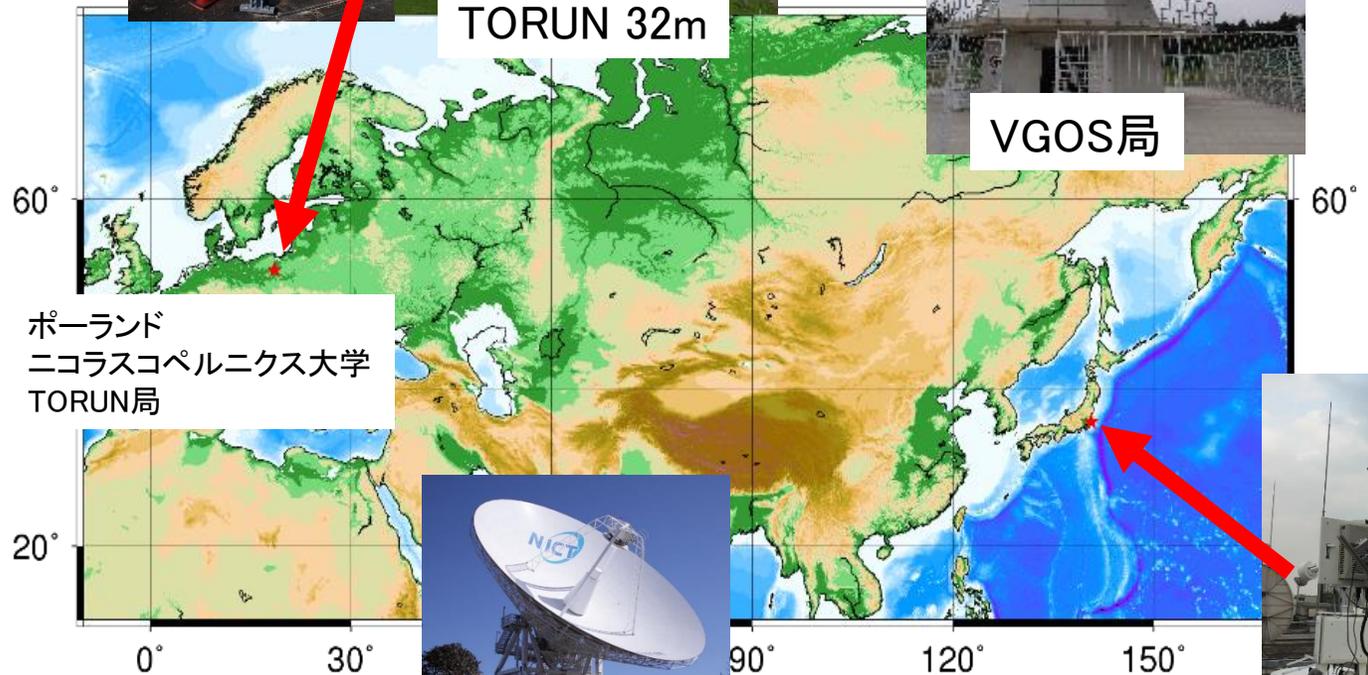
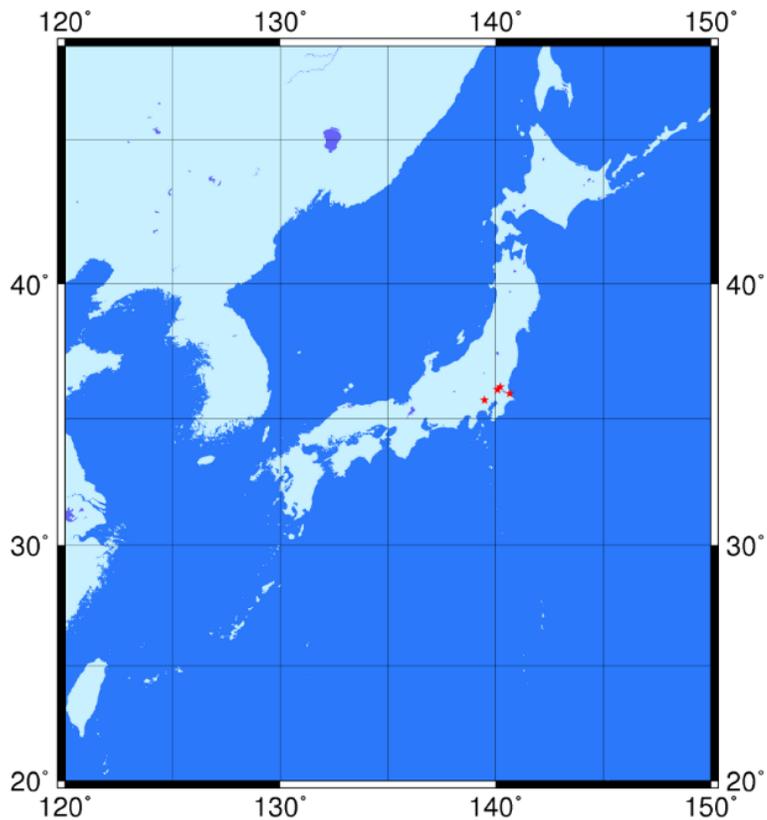
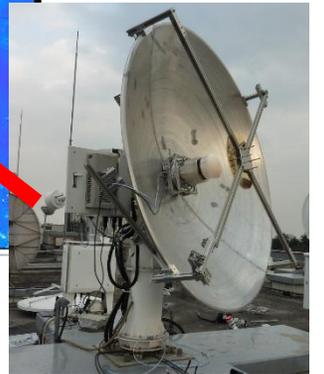
国内観測から超長基線の観測へ



TORUN 32m



VGOS局



ポーランド
ニコラスコペルニクス大学
TORUN局



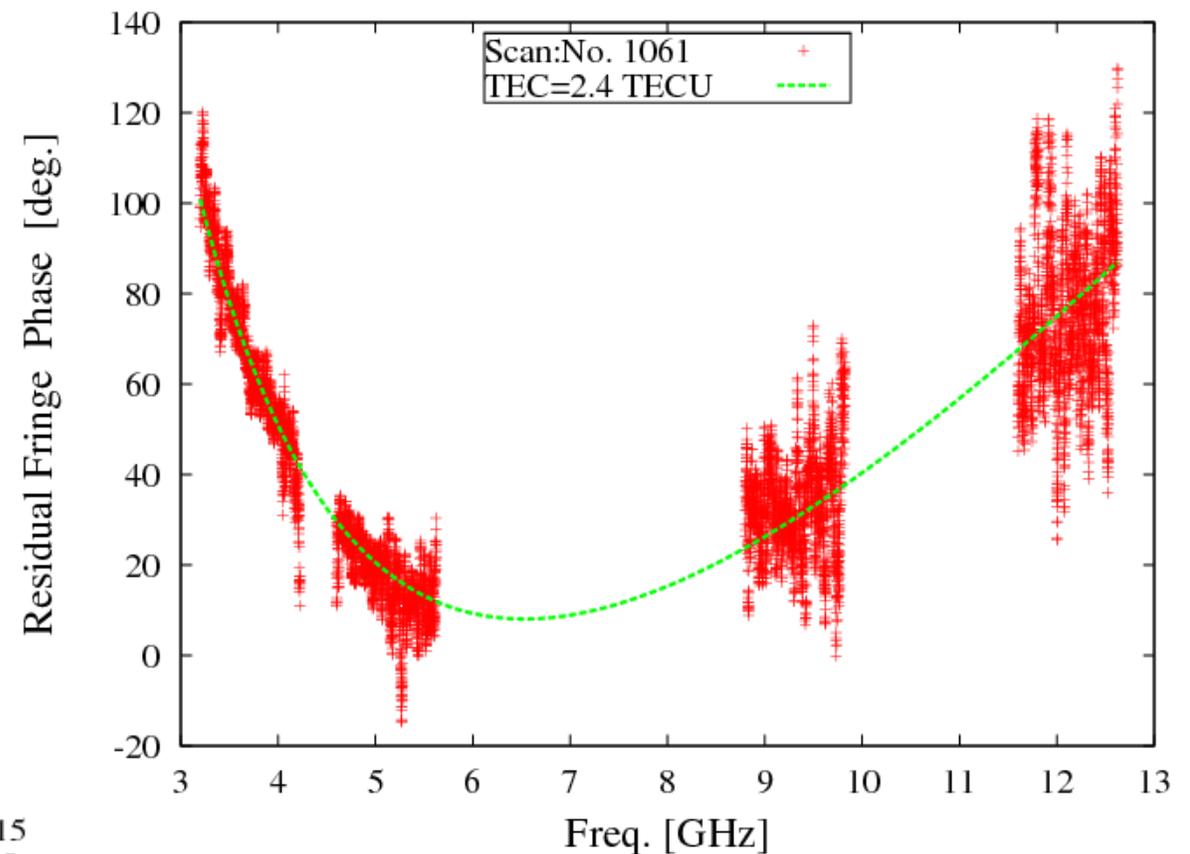
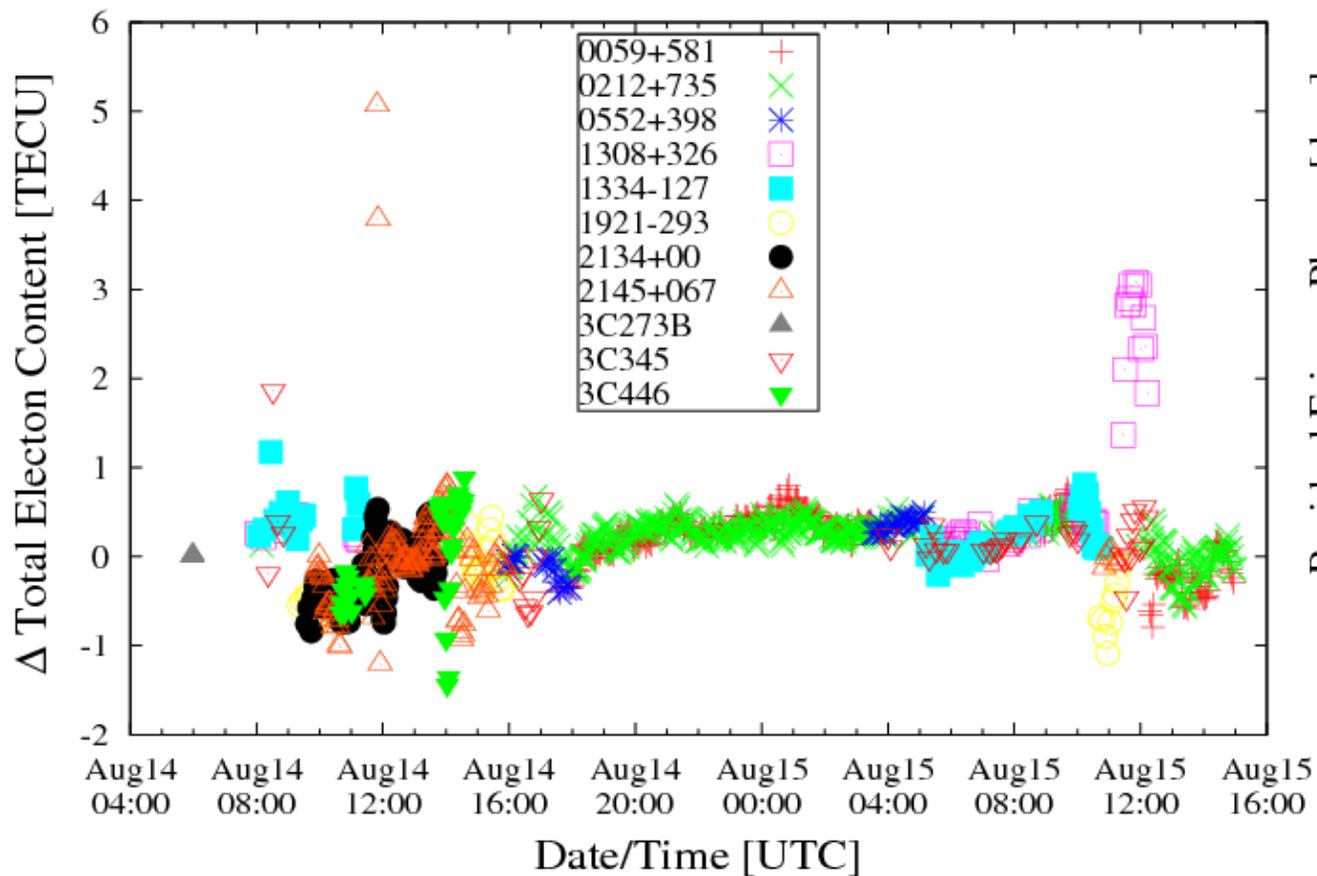
超長基線の広帯域VLBIの課題

1. 遠隔地安定運用に耐えられる小型アンテナに
2. 広帯域バンド幅合成技術の開発
 1. 直線偏波2x2の相関処理 合成技術の開発
 - * 4つの偏波の相互相関(VV,HH,VH,HV)を合成するアルゴリズム
 - * →ストークスパラメータの算出、天文学的成果も。
 2. 大きな電離層遅延の影響を考慮した(同時推定する)バンド幅合成
3. 天体の構造の影響

電離層遅延の影響

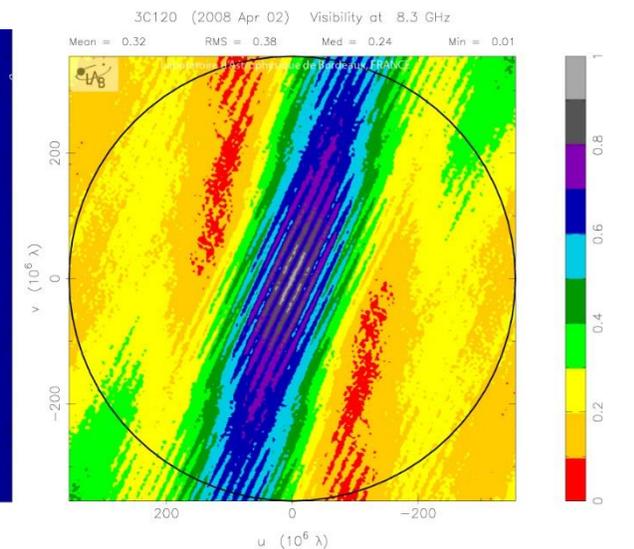
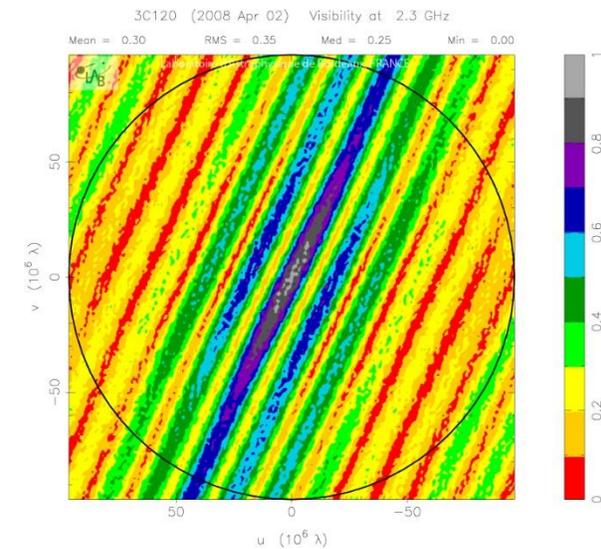
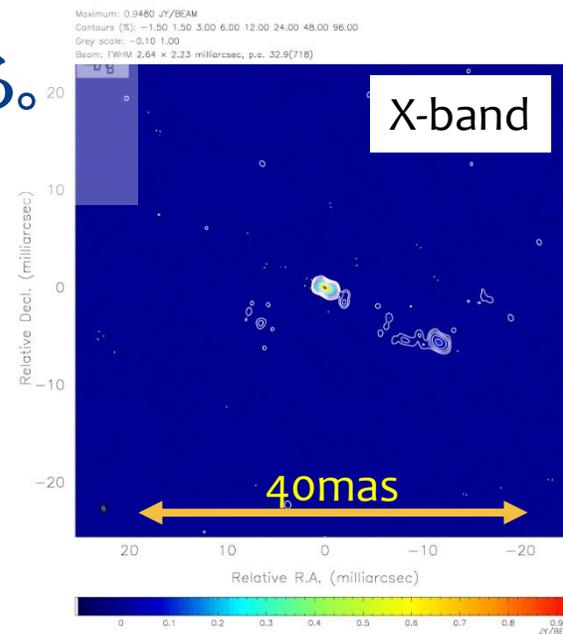
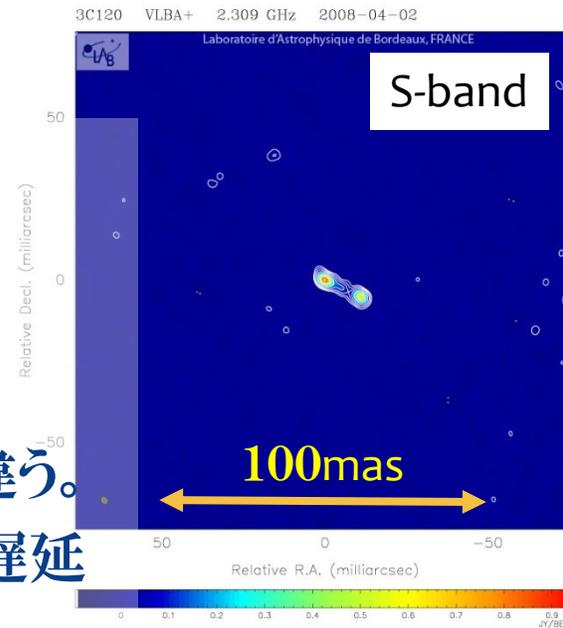
$$\phi[\text{deg.}] = \alpha \frac{\delta\text{TEC}}{f} + 360 \times \delta\tau \times f + c$$

Δ Total Electron Content vs Time



電波源構造の影響

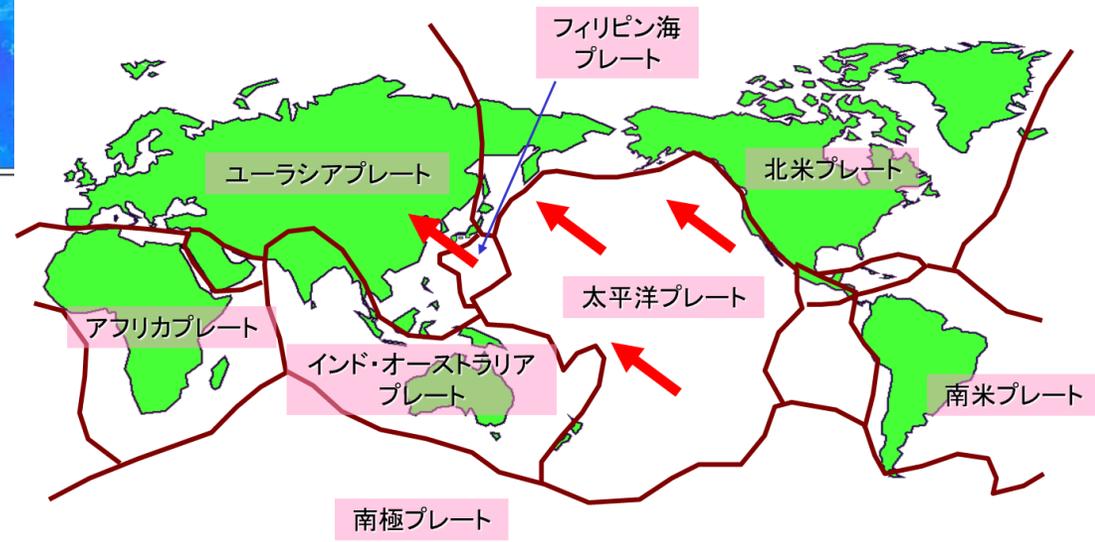
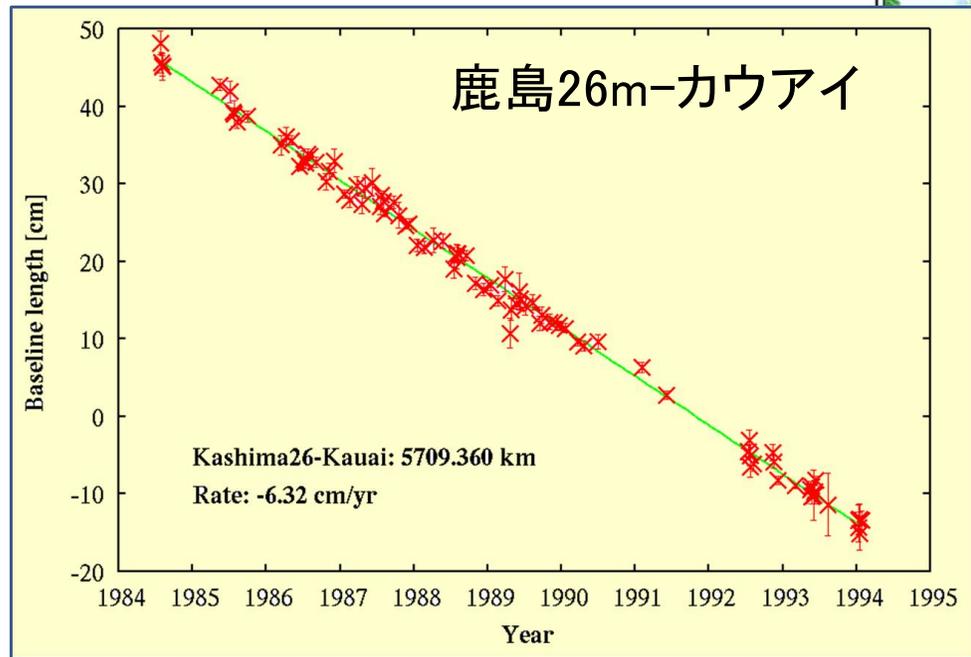
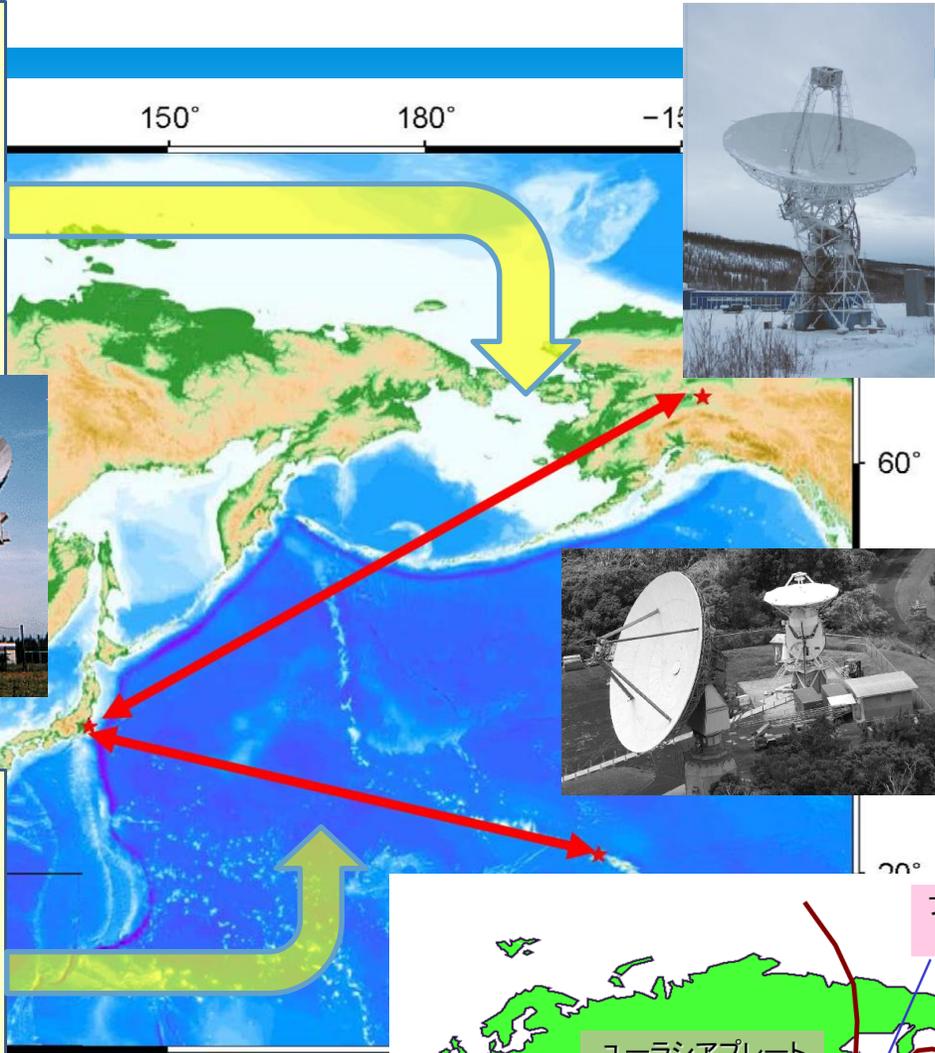
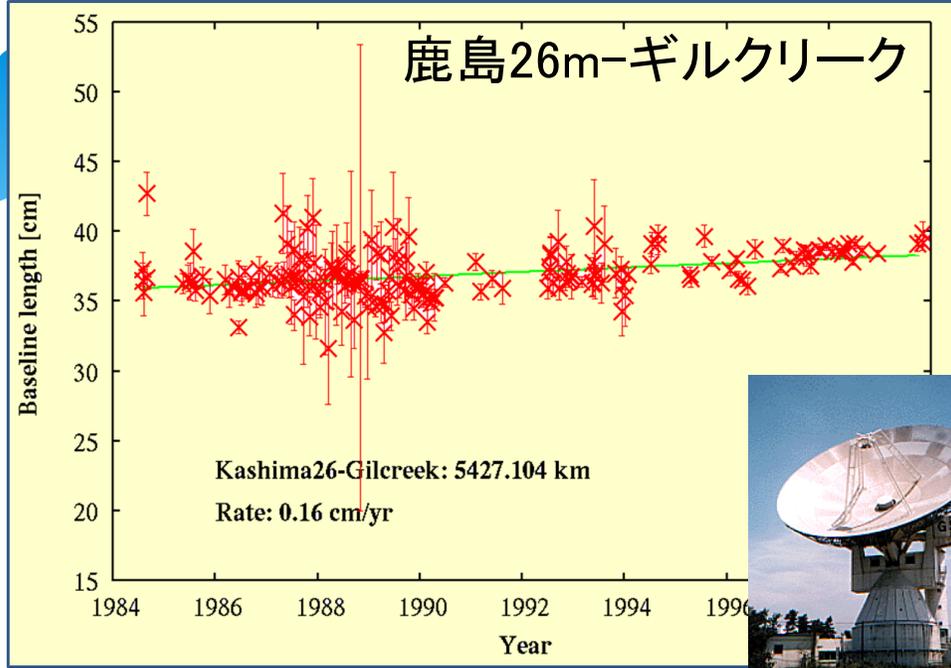
- * 群遅延量: $= \frac{\partial \phi}{\partial f}$ 帯域幅方向の位相傾斜
- * VLBIは空間周波数をサンプリングする。
 - * 空間周波数: $= B/\lambda$
 - * 同じ基線でもRF周波数によって空間周波数が違う。
 - * →天体構造の影響(psオーダ)が観測される群遅延に付加される。
- * 見かけの天体構造は周波数に依存して異なる。



当面の計画(最速の場合)

	2016	2017	2018
広帯域システムの開発実験	海外の広帯域VLBI局とのVLBI実験→ <ul style="list-style-type: none">• 広帯域バンド幅合成アルゴリズム開発• 天体構造の影響調査		
周波数比較の実証実験	つくばMBL1の2.4m化 小型アンテナの耐久試験 遠隔長期運用のための改修	MBL1の海外への輸出・設置	
	周波数比較・性能評価実験 <ul style="list-style-type: none">• 数日程度の観測を10日程度のインターバルで実施。		海外局との周波数比較評価実験 <ul style="list-style-type: none">• 数日程度の観測を10日程度のインターバルで実施。

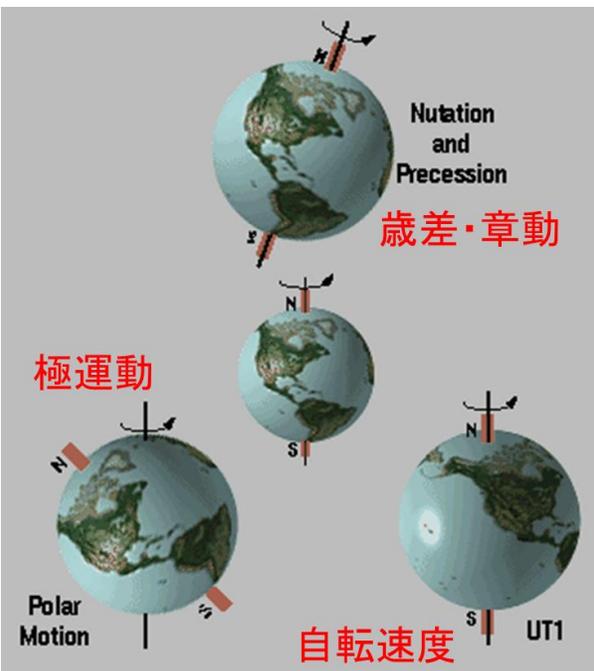
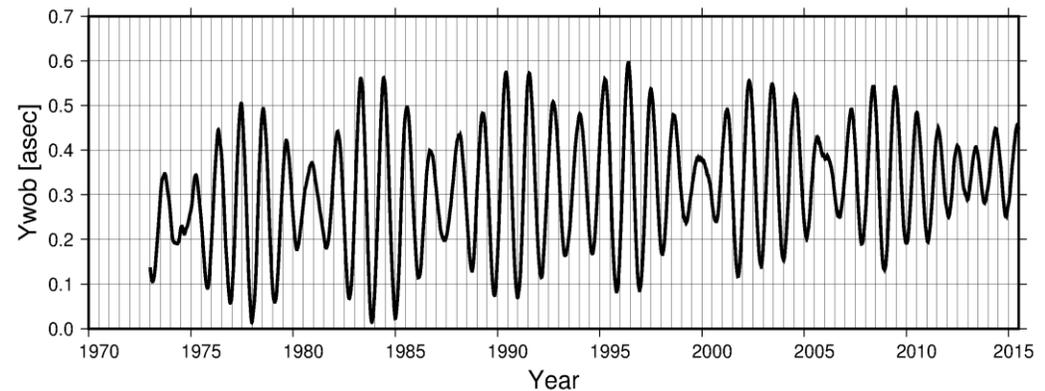
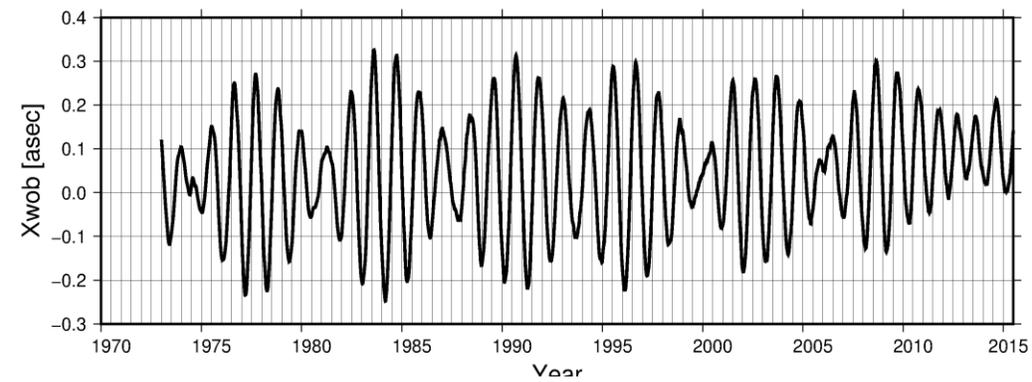
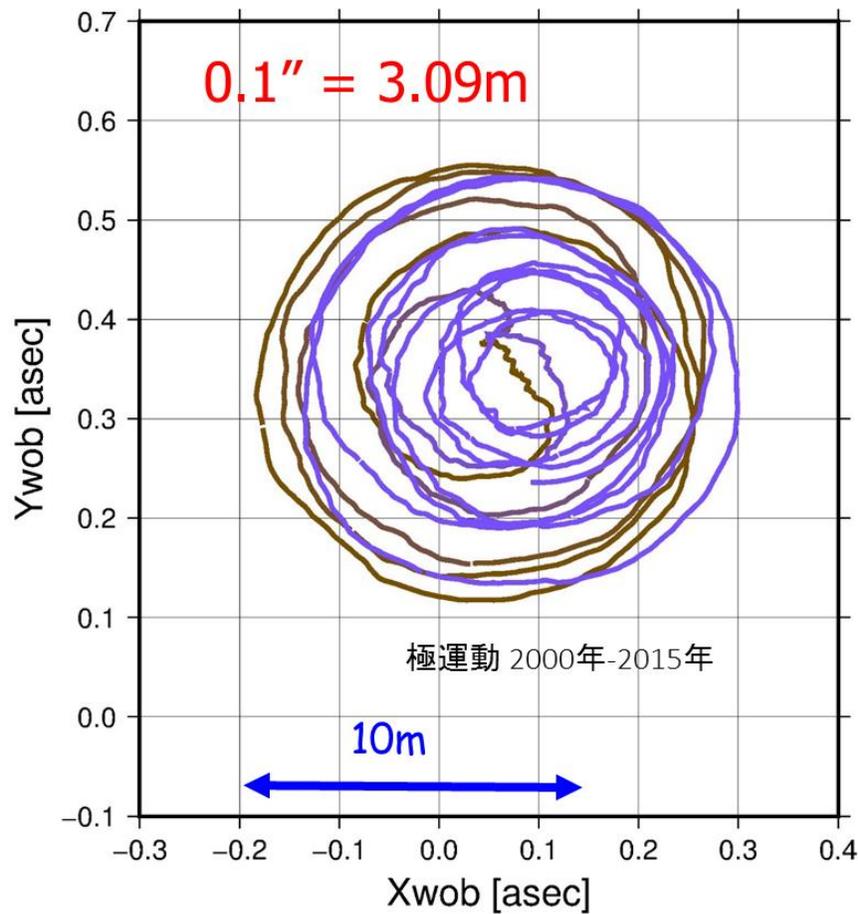
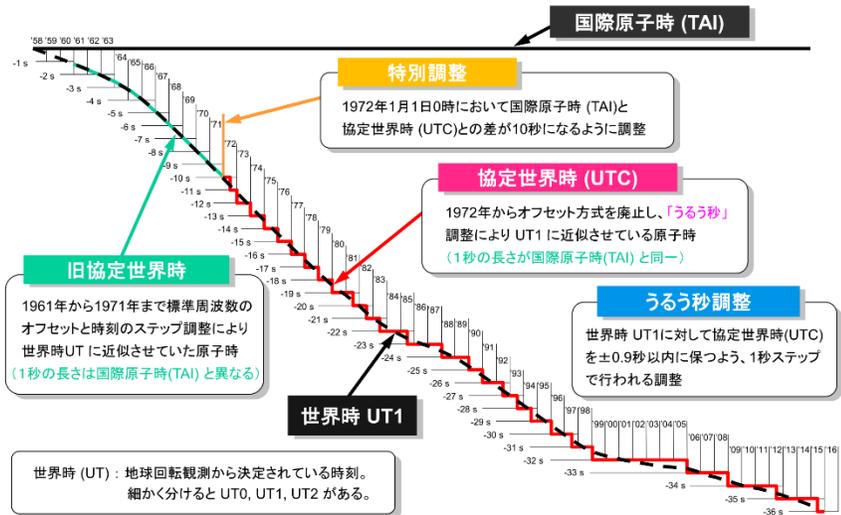
周波数比較プロジェクト 以外のVLBIの活動



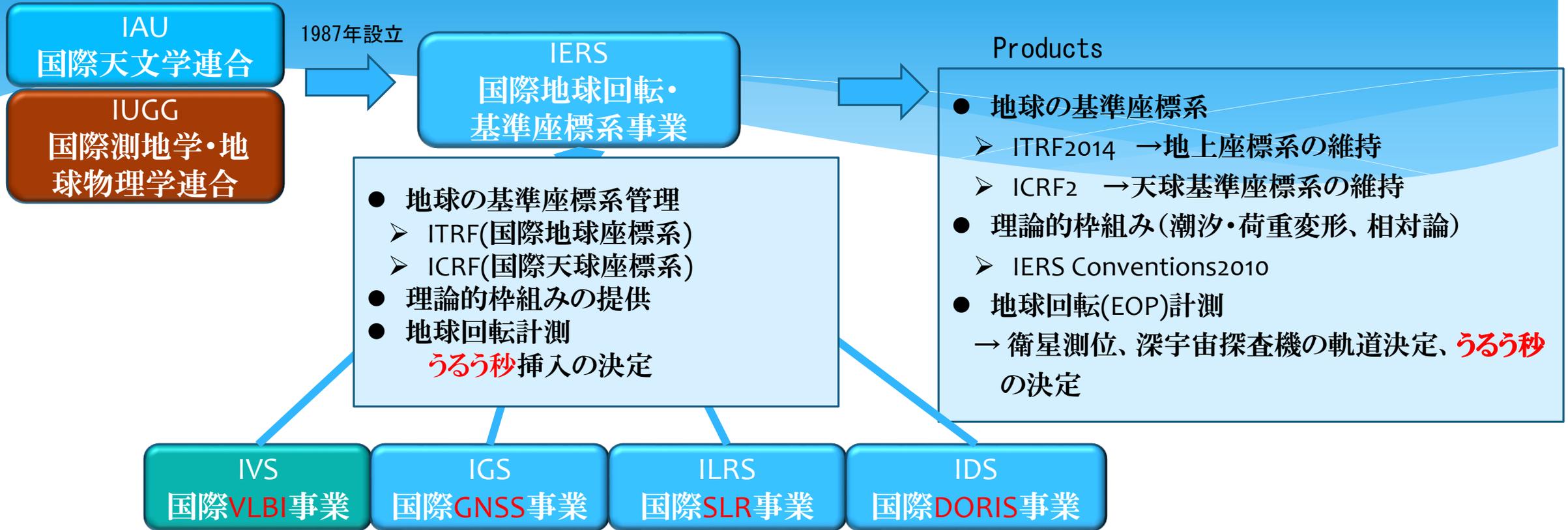
地球姿勢パラメタ

Erth Orientation Parameter / Earth Rotation Parameter

Chandler Wobble : 周期435日の変動
Annular Wobble : 1年周期



測地・地球回転と時間に関する国際機関とVLBI



ICRFの管理と
UT1-UTCの調整
(閏秒)の計測で
不可欠な貢献

日本国内

- 国土地理院:
 - 国内の座標地管理、迅速UT1-UTC計測 (筑波ドイツ、つくばハワイ)
 - NICTのVLBI技術を活用
- NICT: 2001年発足時よりIVSの技術開発センター
- 国立極地研究所: 南極昭和基地10mアンテナ 南極大陸の測地VLBI拠点
- 国立天文台: VERA20mアンテナ(水沢、鹿児島、父島、石垣島)

IVSの現状と方向

- 地球の基準座標系管理
 - ITRF(国際地球基準座標系)
 - ICRF(国際天球基準座標系)
- 地球回転計測
 - 自転軸方向とUT1-UTC
 - うるう秒挿入の決定

→
一桁高い精度
を目指して

VGOS観測システムを推進

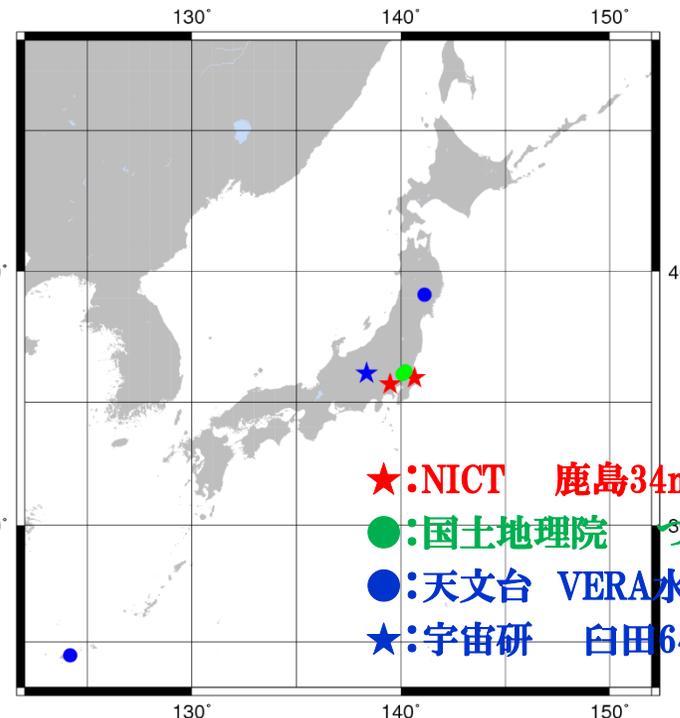
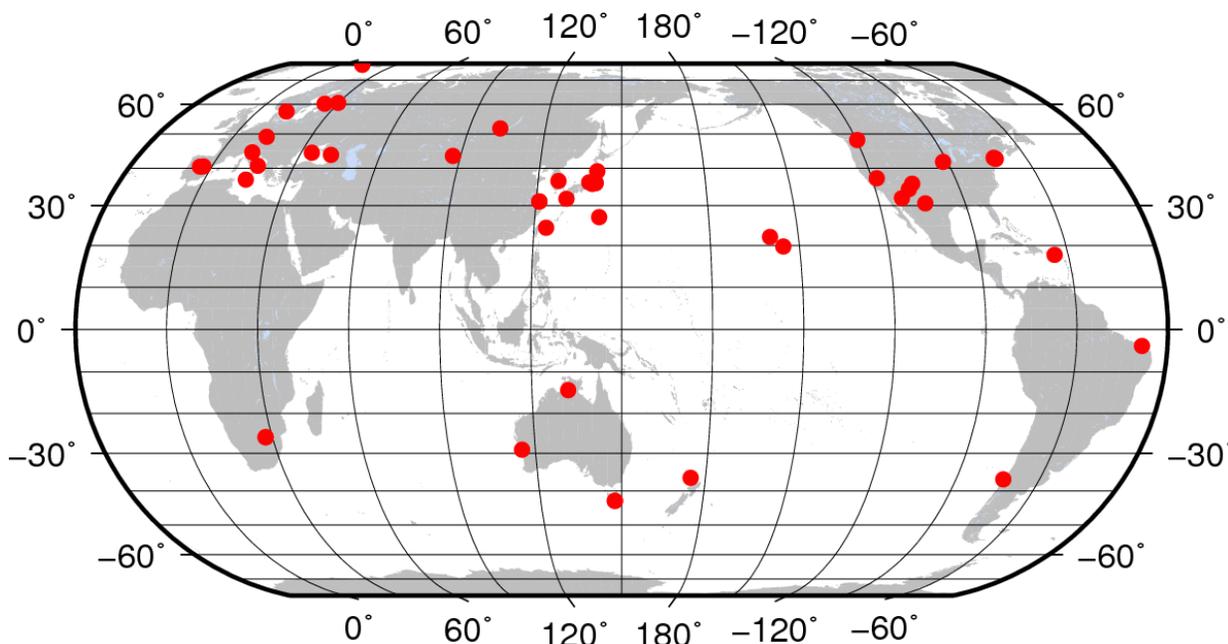
- 広帯域観測
 - 従来のS/X帯→3-14GHz
 - 直線2偏波
 - データレート 256Mbps→16Gbps
- 中型高速駆動アンテナ
 - 12m口径、5-12度/秒
- 目標精度 1mm ~ 3ps

新アンテナ建設

- 米国: NASA, MIT, USNO
- ドイツ: BKG
- ロシア: IAA
- スペイン: IGN
- 中国: 上海天文台
- 豪州: タスマニア大
- 日本: 国土地理院
- 南アフリカ: HARTRAO
- スウェーデン: オンサラ
- ノルウェー: Ny-Alsund



2014年1月現在 Activeな ITRF VLBI観測局



- ★: NICT 鹿島34m、11m、小金井11m
- : 国土地理院 つくば32m、父島10m、始良10m
- : 天文台 VERA水沢20m、VERA石垣20m→位置天文
- ★: 宇宙研 白田64m→軌道決定

最新のITRF2014

- * ITRF2008に対して加えられた新しい特徴

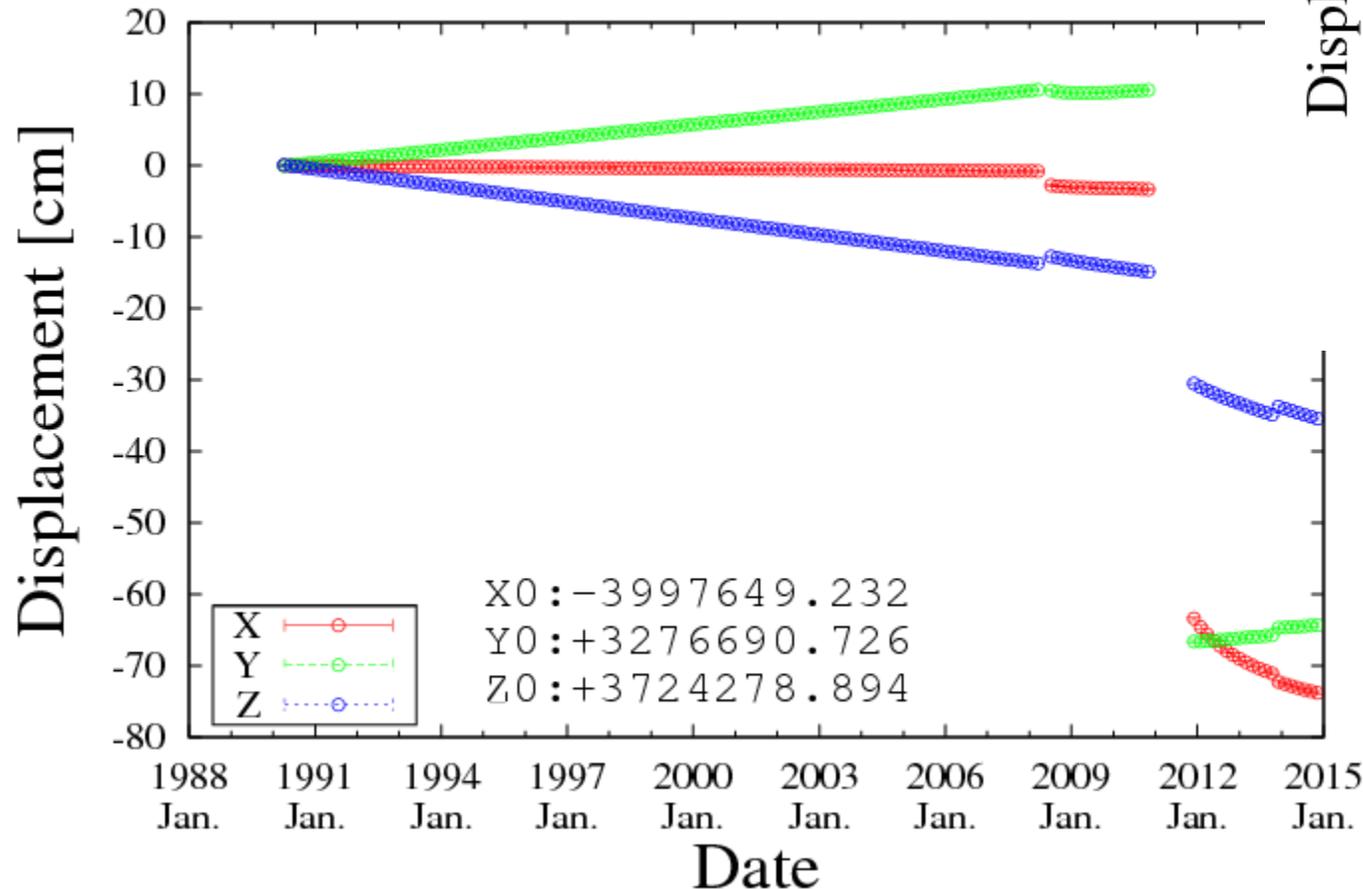
- * 地震後の余効変動Post Seismic Deformation:PDFをモデル化して地震の多い地域の局位置とした。
- * 日本(つくば、水沢、鹿島、小金井、始良、白田)、チリ、カリフォルニアなど

$$X(t) = X_0 + V \cdot (t - t_0) + \delta X(t)$$

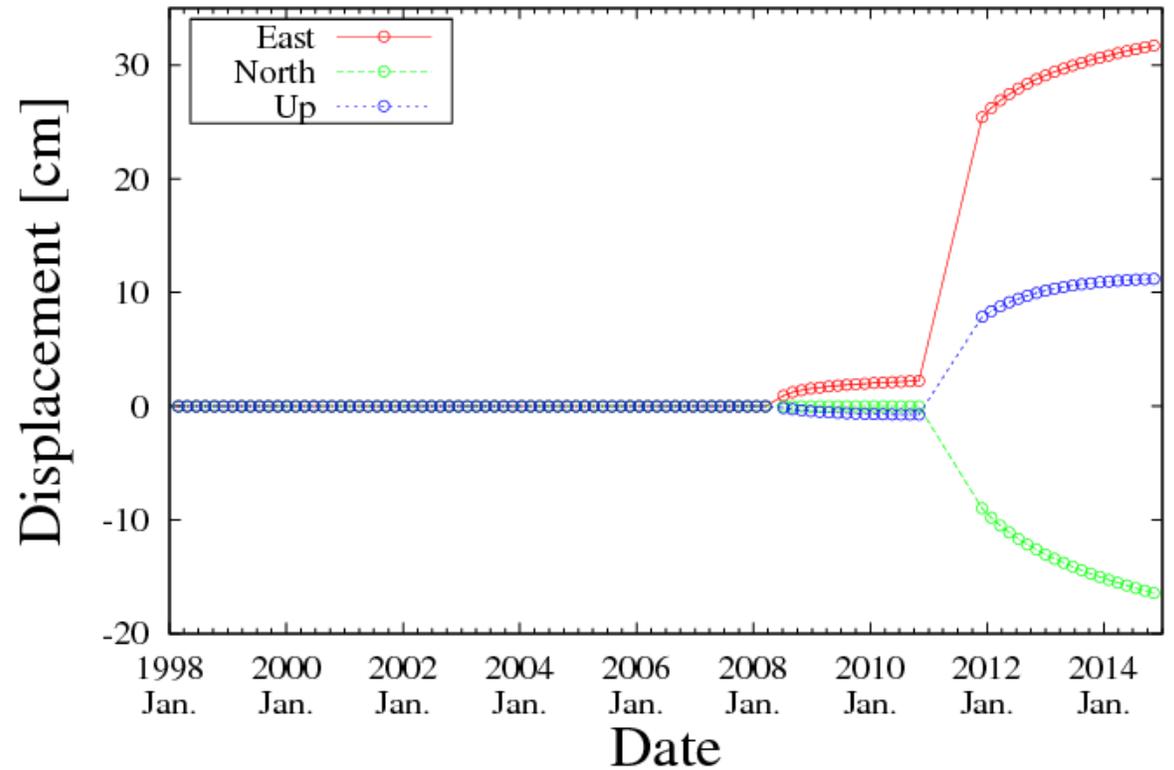
$$\delta X(t) = \sum A_i \log \left(1 + \frac{t - t_i}{\tau_i} \right) + \sum B_i \left(1 - \exp \left(-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e} \right) \right)$$

ITRF上のアンテナ座標 鹿島34m

ITRF2014: Kashima 34m X/Y/Z



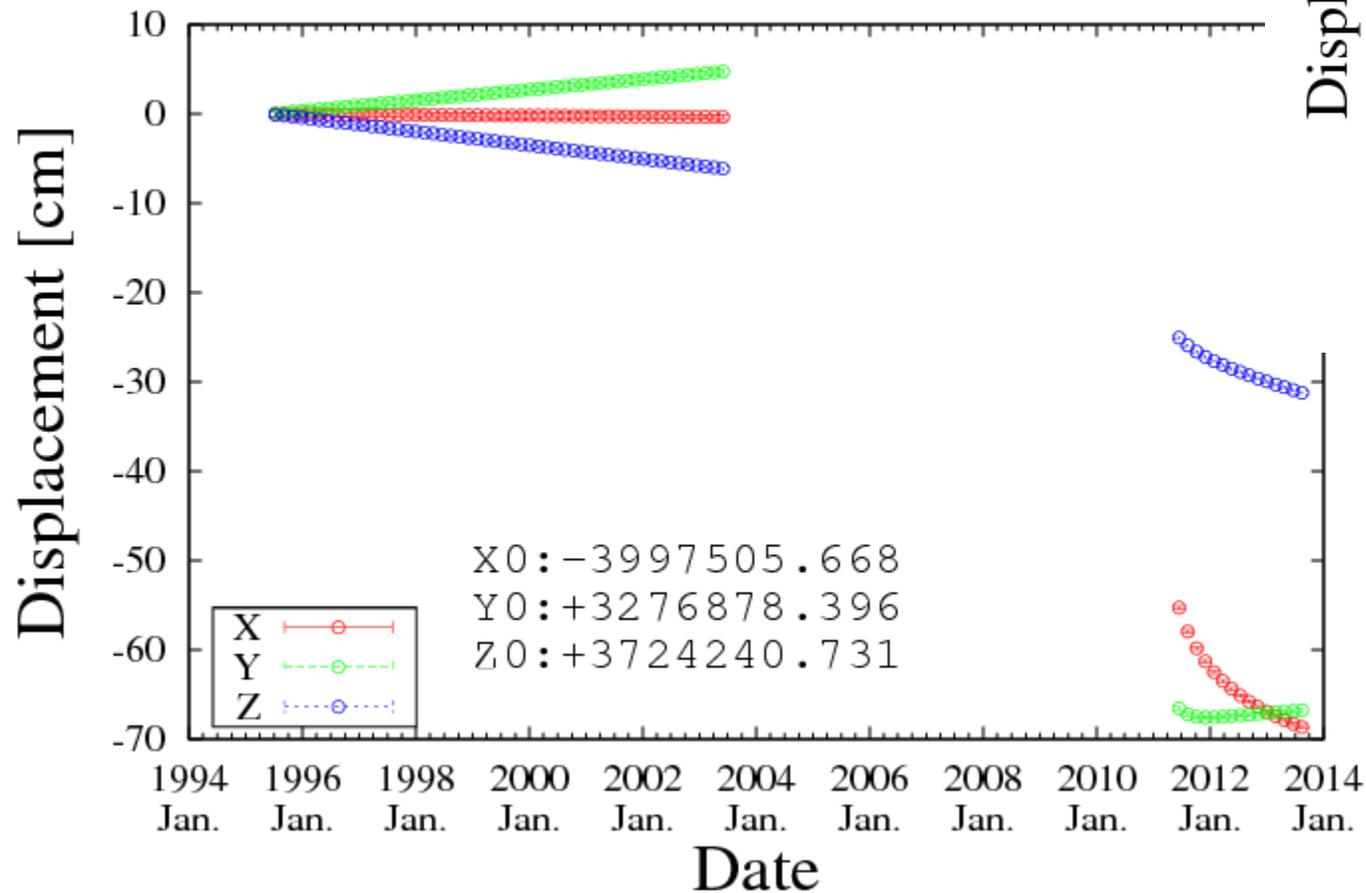
Kashima 34m East/North/Height



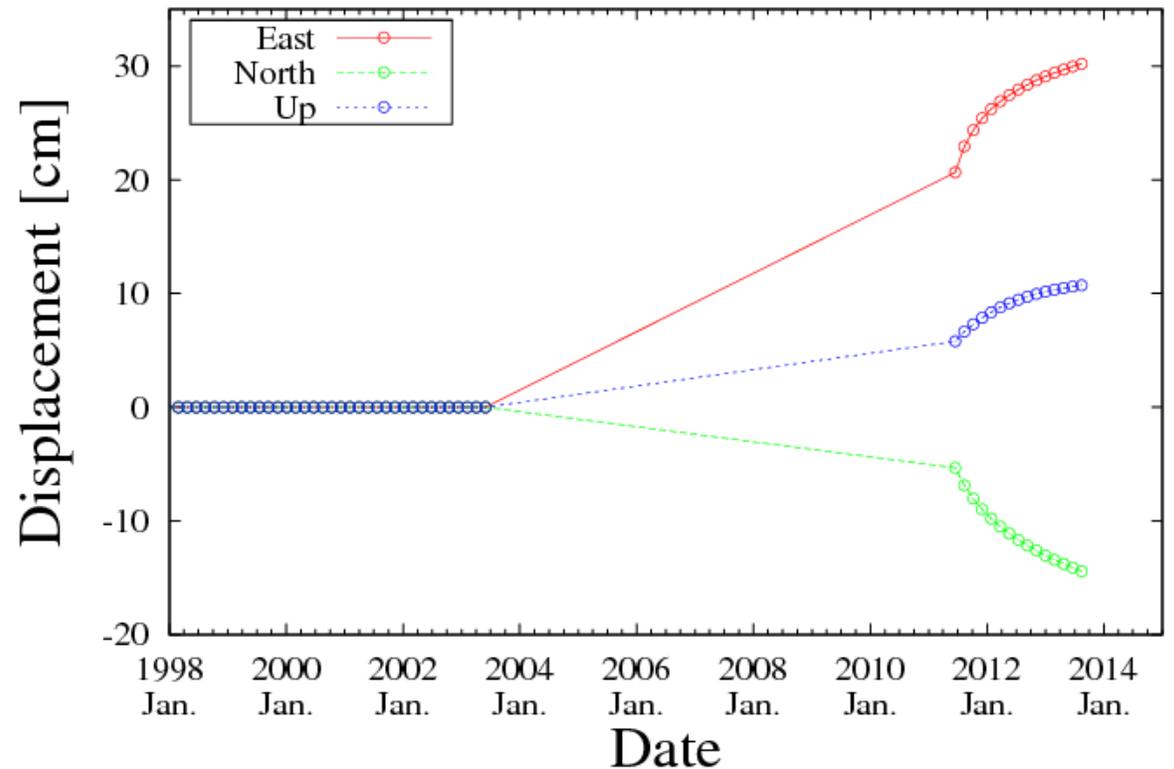
- 2008/6/14 岩手宮城内陸地震 M7.2
- 2011/3/11 東北地方太平洋沖地震 M9.0
- 2013/10/26 福島県沖地震 M7.1
- 1990/03/22-2008/04/02
- 2008/05/14-2010/12/15
- 2011/10/26-2013/10/11
- 2013/11/14-2014/12/04

ITRF上のアンテナ座標 鹿島11m

ITRF2014: Kashima 11m X/Y/Z



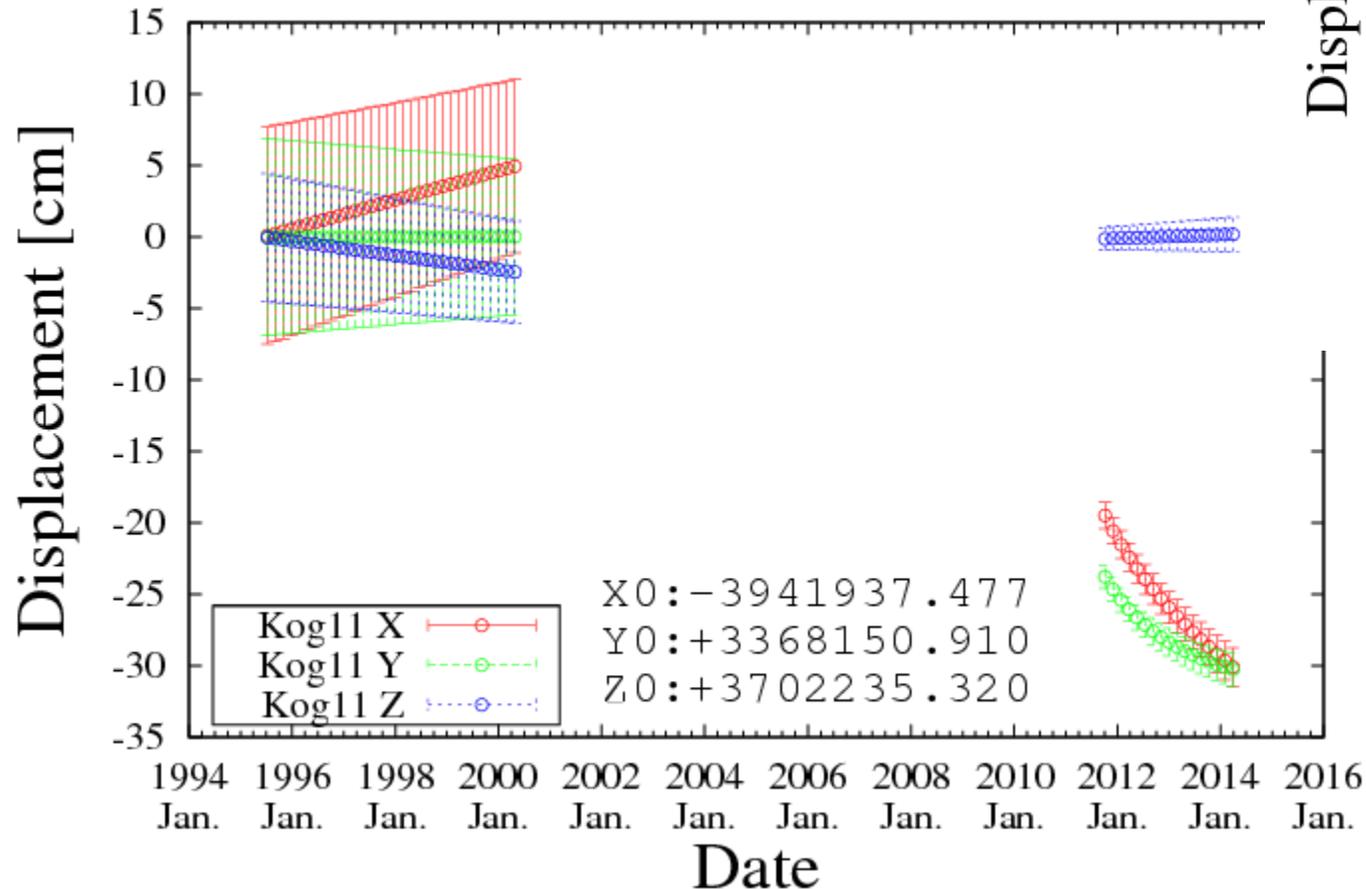
Kashima 11m East/North/Height



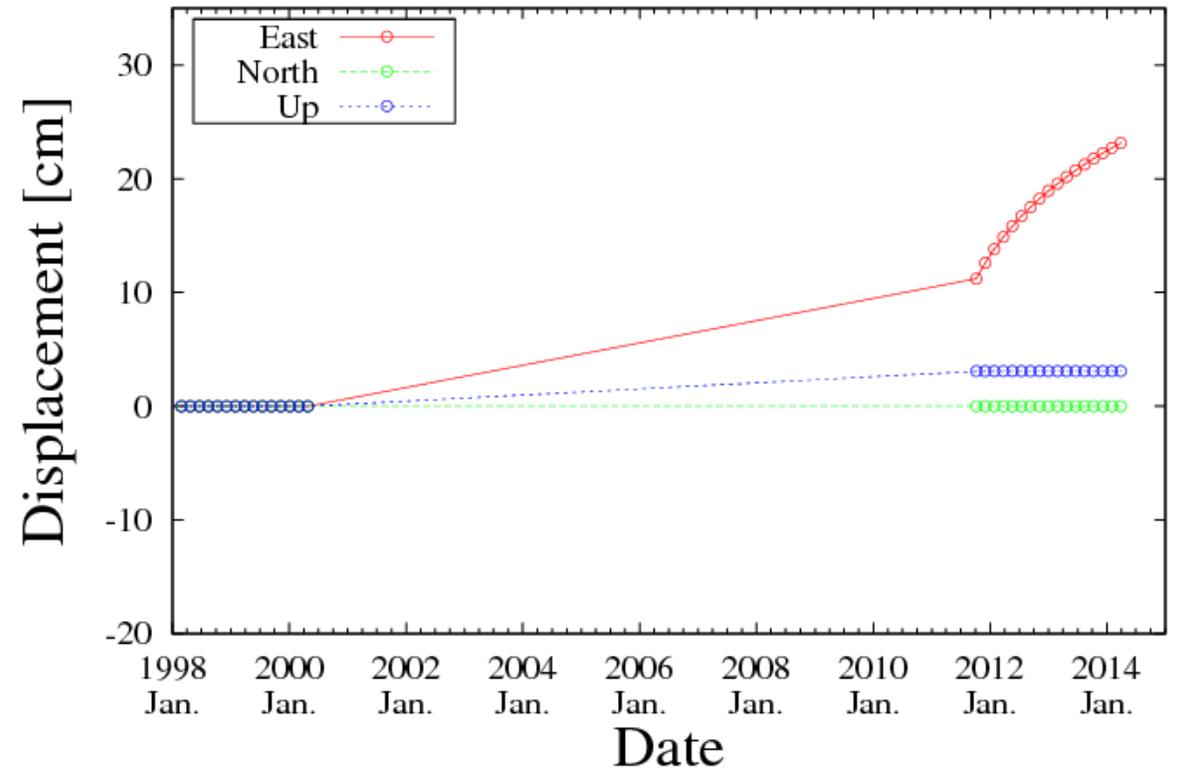
- 2008/6/14 岩手宮城内陸地震 M7.2
- 2011/3/11 東北地方太平洋沖地震 M9.0
- 2013/10/26 福島県沖地震 M7.1

ITRF上のアンテナ座標 小金井11m

ITRF2014: Koganei 11m X/Y/Z

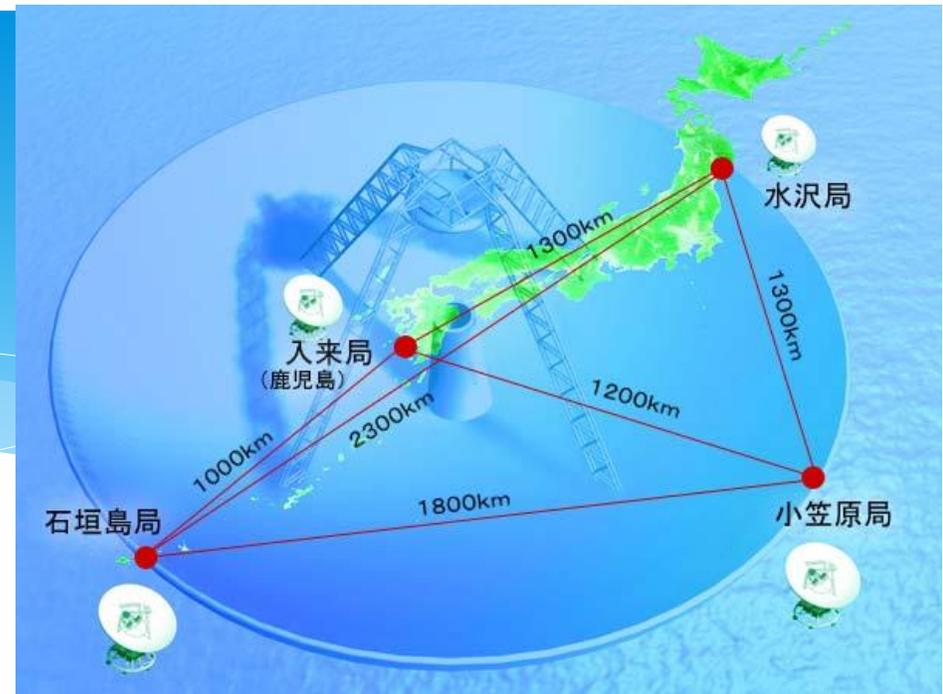
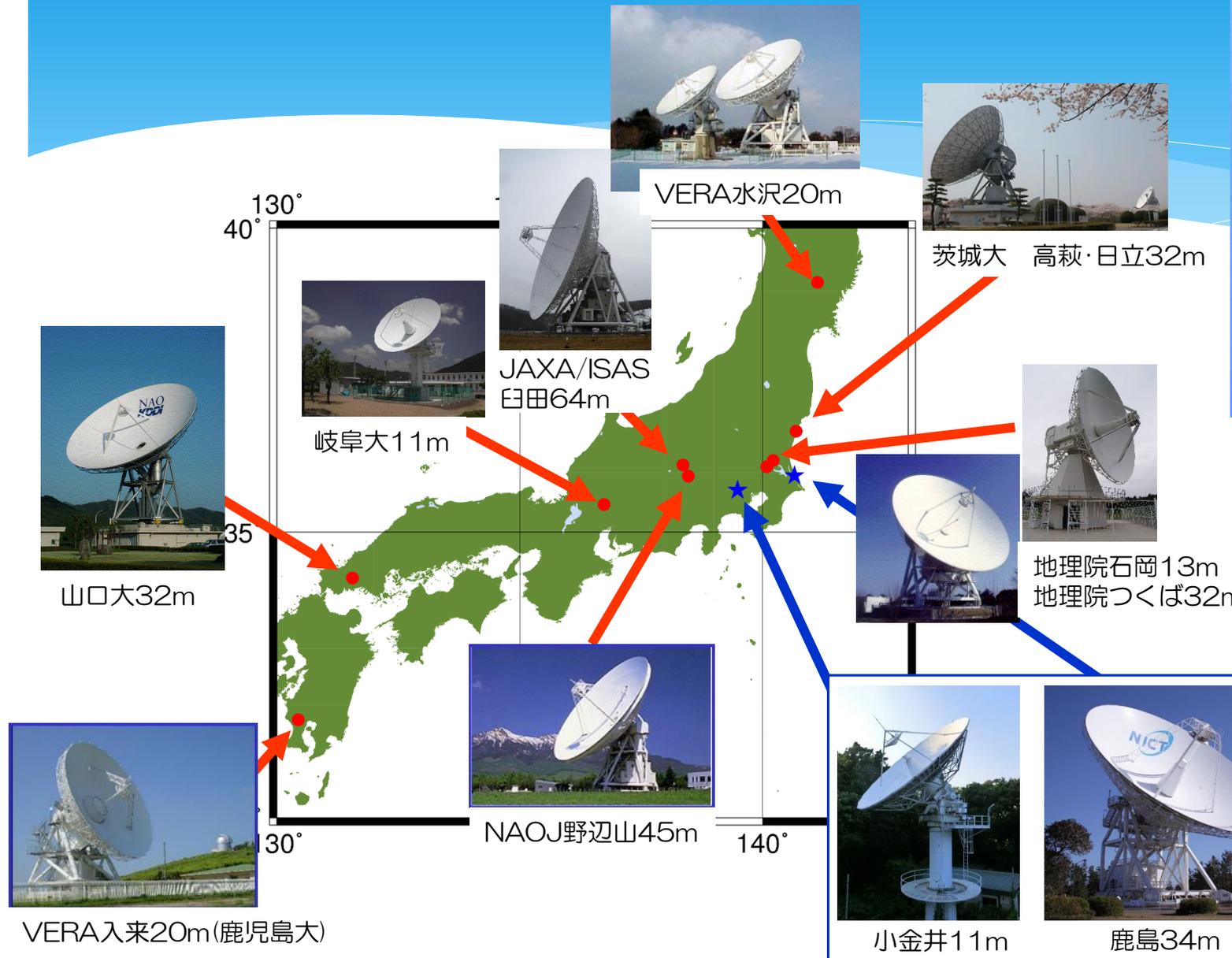


Koganei 11m East/North/Height



- 2008/6/14 岩手宮城内陸地震 M7.2
- 2011/3/11 東北地方太平洋沖地震 M9.0
- 2013/10/26 福島県沖地震 M7.1
- 1990/03/22-2008/04/02
- 2008/05/14-2010/12/15
- 2011/10/26-2013/10/11
- 2013/11/14-2014/12/04

国内のVLBI共同研究機関



国立天文台VERA Project 20mアンテナ

おわり