

小型アンテナを使った測地・周波数比較VLBI



関戸 衛

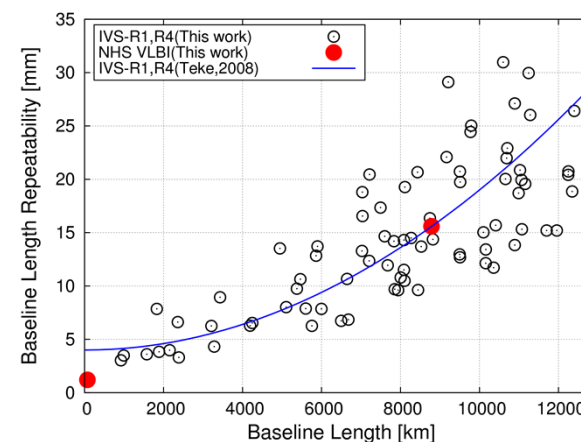
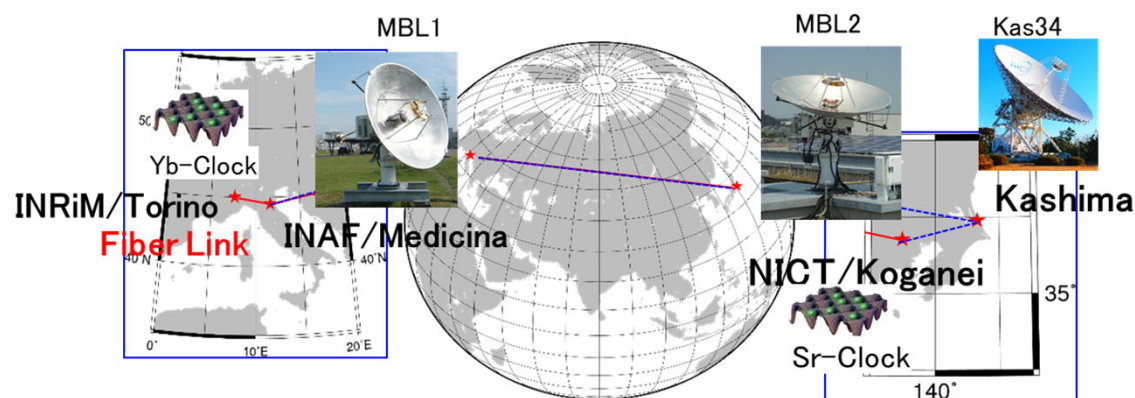
NICT 電磁波研究所 電磁波標準研究センター 時空標準研究室

令和3年 小型SLR,VLBI勉強会 2020年4月19日

最近の成果：

2.4mアンテナを使った基線長8900kmのVLBI実験

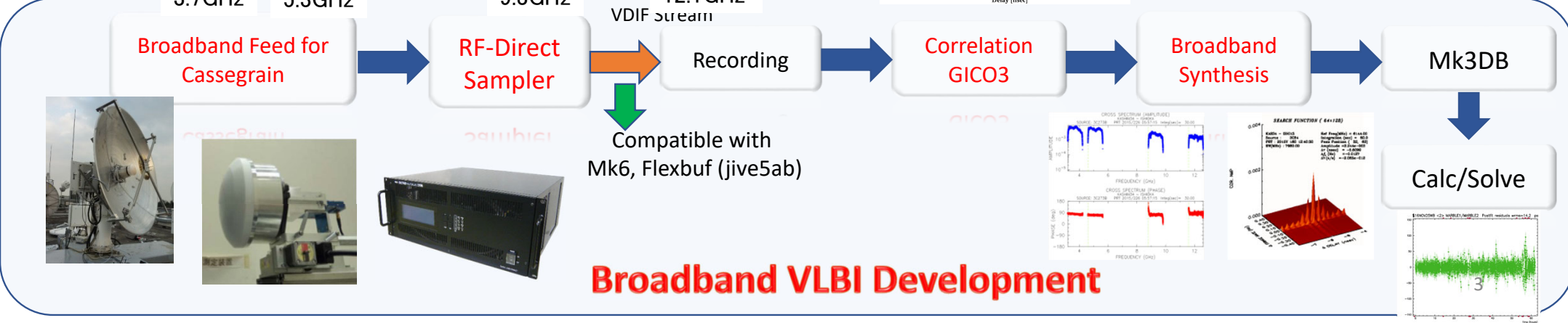
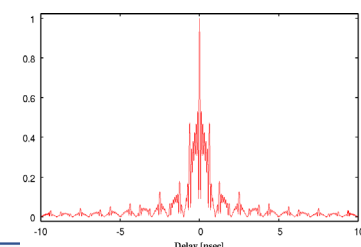
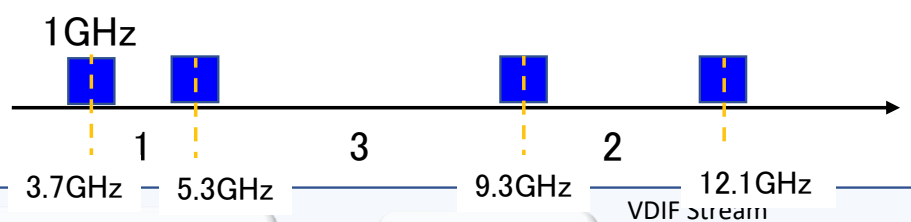
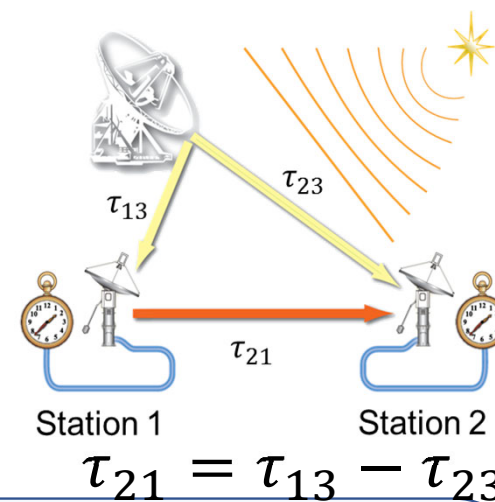
- Pizzocaro M., et al.,(2021) “Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry”, Nature Physics, DOI: 10.1038/s41567-020-01038-6
- Sekido M., et al.,(2021)“A broadband VLBI system using transportable stations for geodesy and metrology: an alternative approach to the VGOS concept” J. Geodesy DOI:10.1007/s00190-021-01479-8



Project Overview

目的: SI単位の1秒の再定義に向けた、精密周波数比較

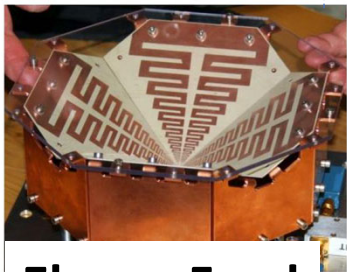
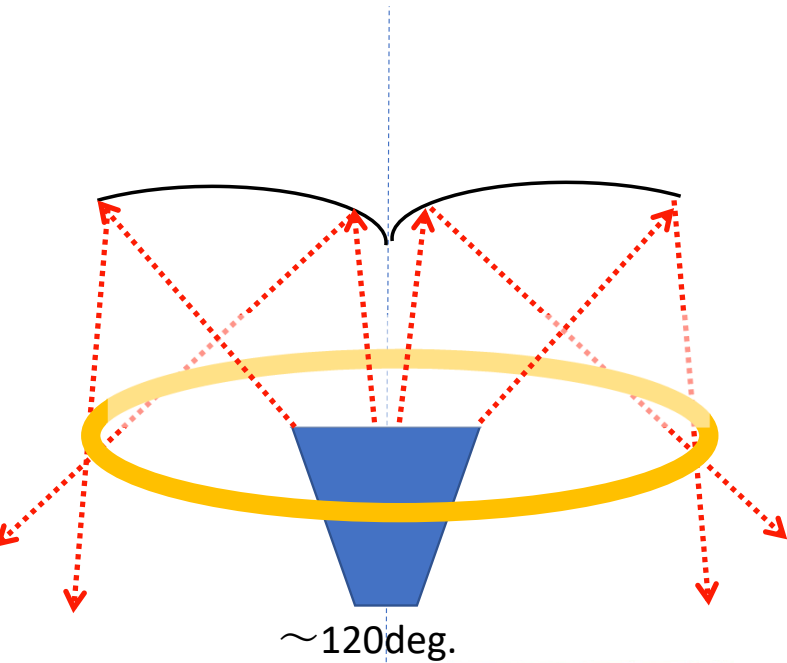
- 広帯域: 3.2-14 GHz (有効帯域幅3.3GHz) → 従来比10倍の遅延計測精度
- 可搬小型局: Node-Hub Style VLBI
- 大容量データ取得: 4 band (1024MHz 幅/band):
 - 従来比 $\sqrt{(1024\text{MHz} / 32\text{MHz})} = 5.7$ 倍の感度改善
 - 不定性なしの群遅延量



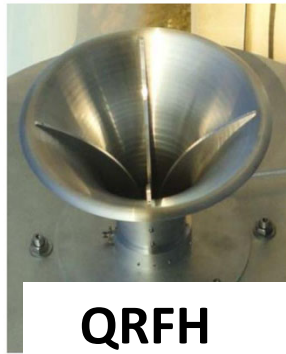
独自で広帯域受信機を開発

要求性能：

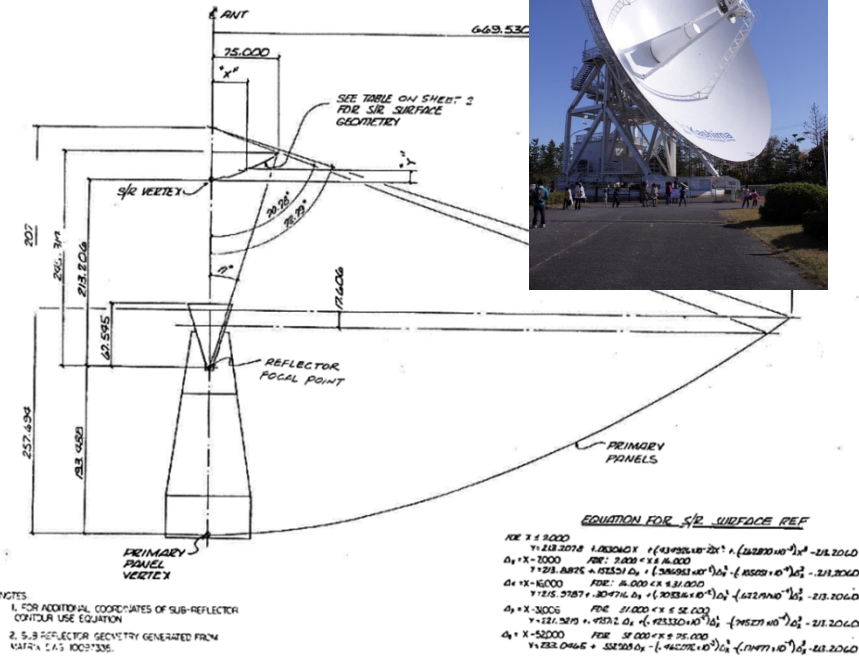
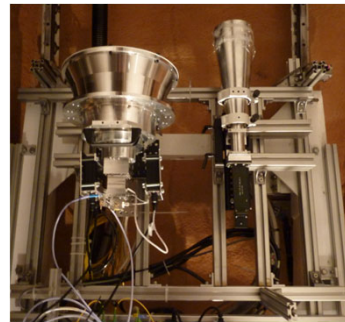
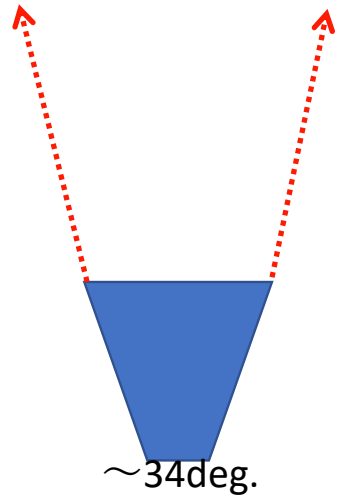
Broadband Frequency and
Narrow beam width



Eleven Feed

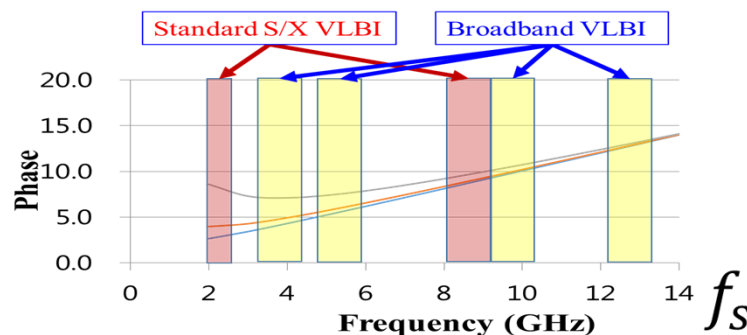


QRFH



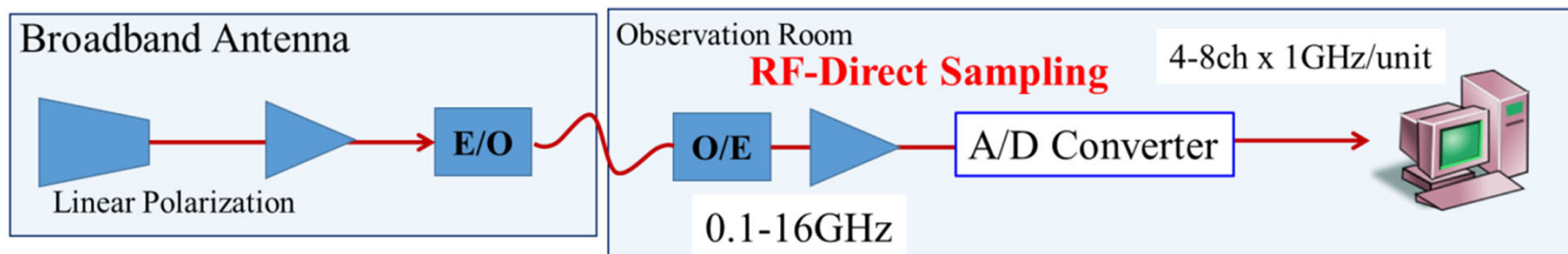
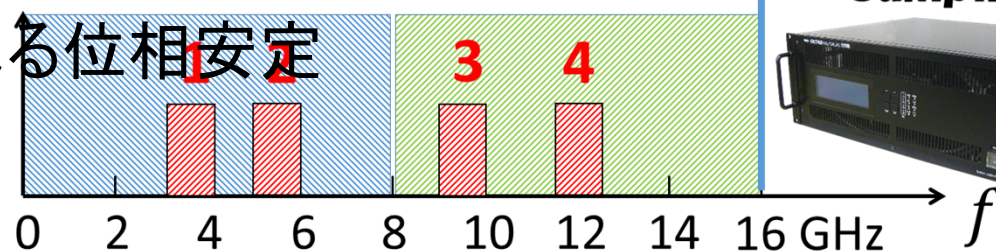
RFダイレクトサンプリング・デジタルフィルタ

- 群遅延量 = $\frac{d\phi}{df}$: 直線位相勾配
→ 位相関係が重要



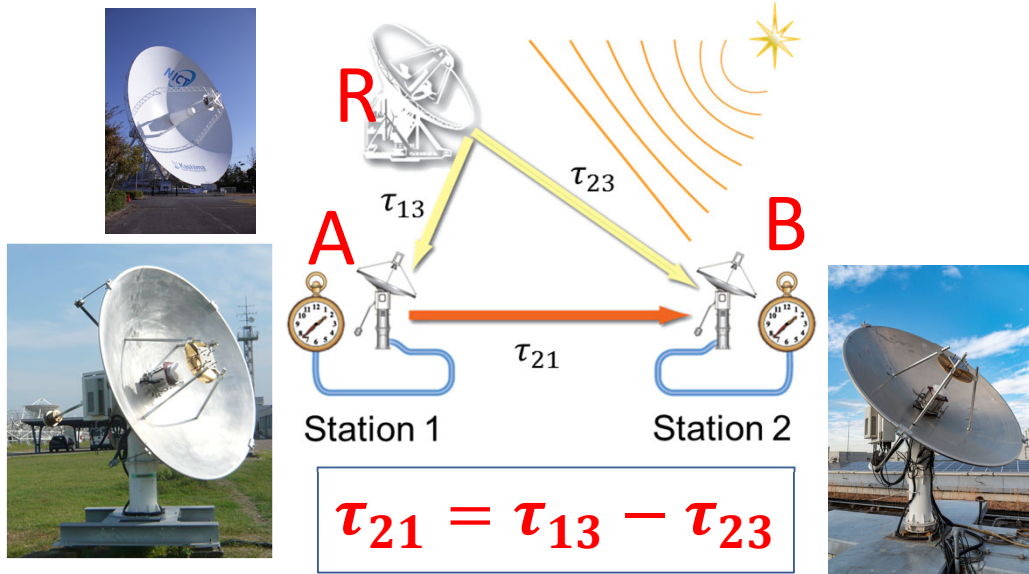
RF Direct Sampling

- アナログ周波数変換なし。デジタルフィルタ
- 簡単な信号系統・デジタル化による位相安定



新しい遅延観測量の利用

- 併合遅延を利用: $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{RA} - \overrightarrow{RB}$
- (大型)x(小型)≒(中型)x(中型)
- 利点: 大型アンテナの遅延キャンセル (重力変形、ケーブル遅延)、安価・可搬, 電波源構造の影響低減



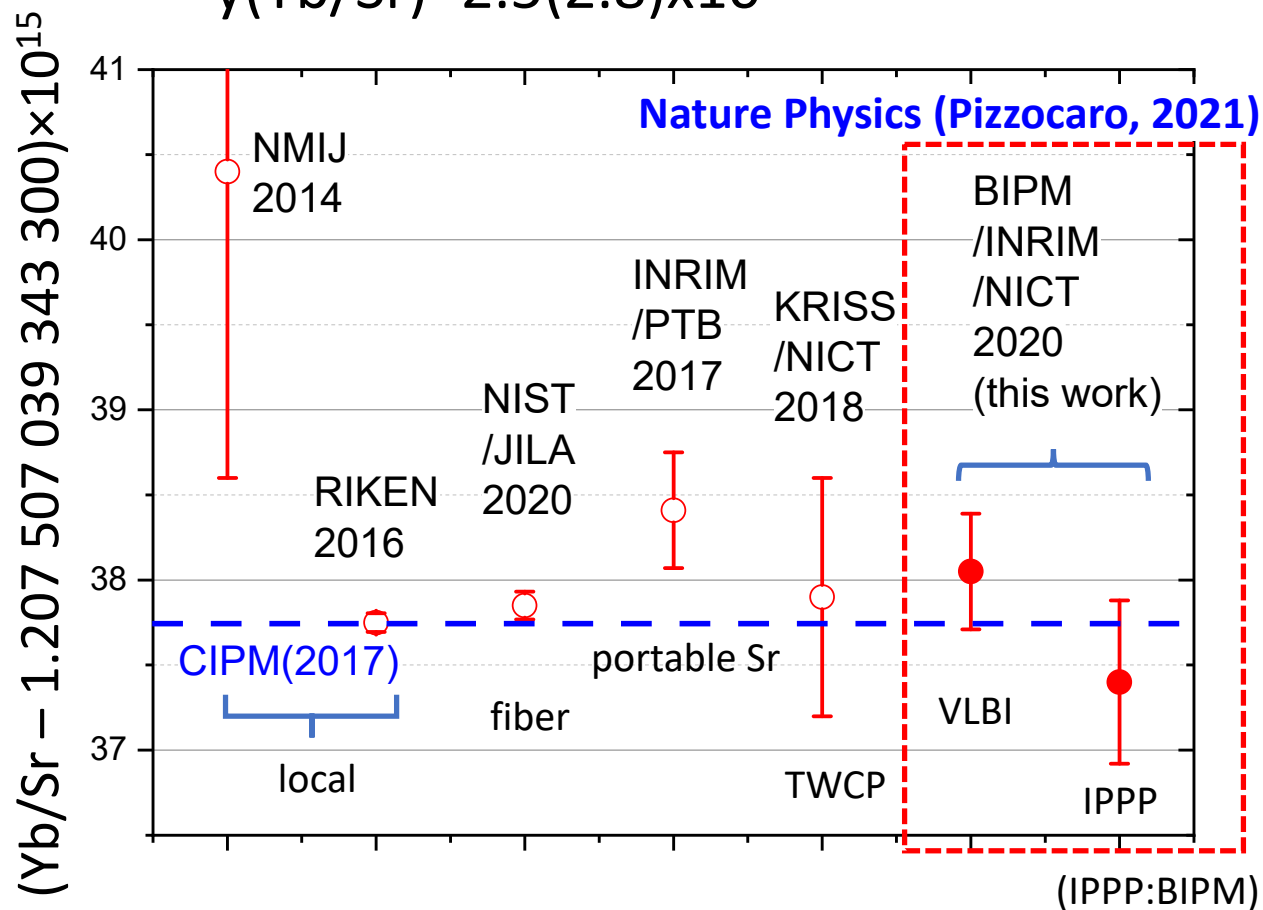
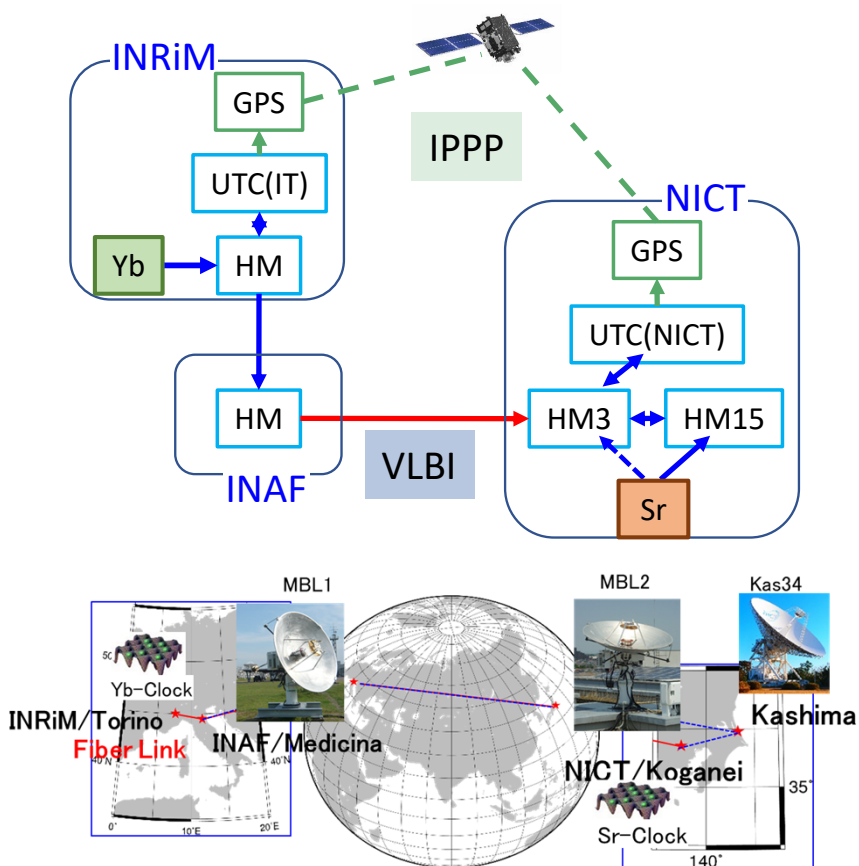
$$\text{SNR} \propto S D_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1}{T_{\text{sys}1}} \cdot \frac{\eta_2}{T_{\text{sys}2}}}$$

D_n : アンテナ直径
 S : 天体フラックス
 η_n : 効率
 T_{sys} : システムノイズ.

Yb/Sr 光格子時計間の周波数リンク

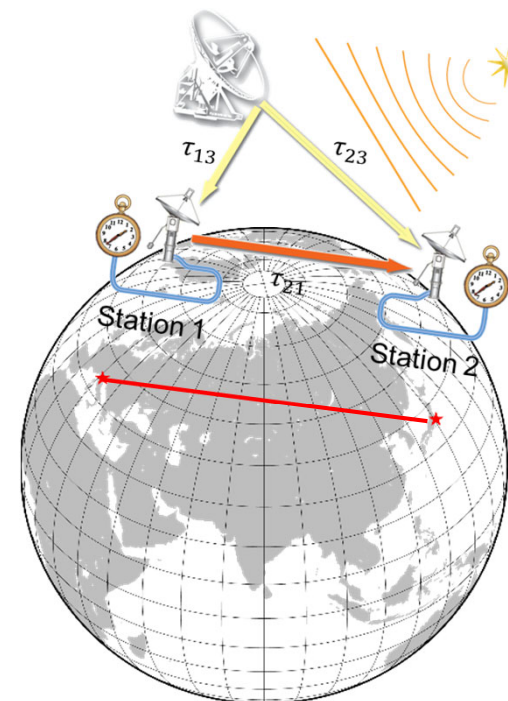
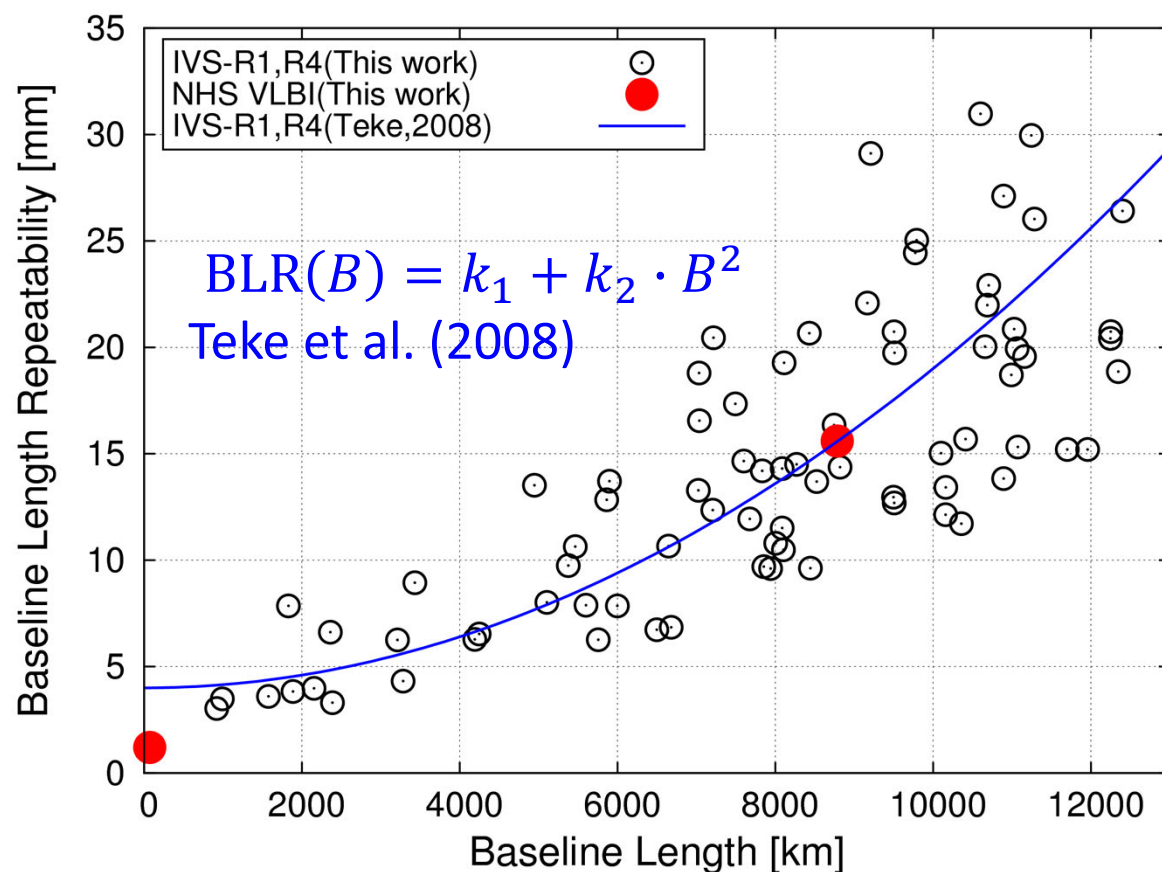
Best precision for 9000 km distance

$$y(\text{Yb/Sr}) = 2.5(2.8) \times 10^{-16}$$



基線長再現性 (BLR)

2.4m-2.4mアンテナ間のNHS VLBI 観測は、IVS-R1,R4 セッションの観測と同等のBLRを実現した。(70 km:1.4 mm, 8780 km:15 mm)



測地観測への小型VLBIの利用

- 地殻変動観測点を密にするためVLBIの研究が盛んになり始めた1980年代に検討され、運用された。
 - 1983年RRL談話会「測地観測におけるVLBI小型可搬局の可能性」吉野泰造：3 m車載局の検討
 - 米国ARIES計画においてJPLが車載局を開発(直径5m)：5億円
 - 1987年RRL談話会「超小型VLBI局の開発」雨谷純：3 mアンテナ、X-band, 2分x 136 Scan 80m (2.4cm)
 - その後、国分寺(1988), 稚内 (1989), 南大東島(1989)
 - Trask D.W. & Vegos S., (1982)“Mobile VLBI deployment plans of the Crustal Dynamics Project for the Western United States and Alaska”, Proc. International Colloquium.
 - IERS-TN2: 1979-1989 CDP, POLARIS/IRIS project

Development of Transportable Antennas by GSI



1984
 $\phi = 5 \text{ m}$
AZ-EL Mount
S band 2.2 - 2.32 GHz
X band 8.18 - 8.60 GHz
10t



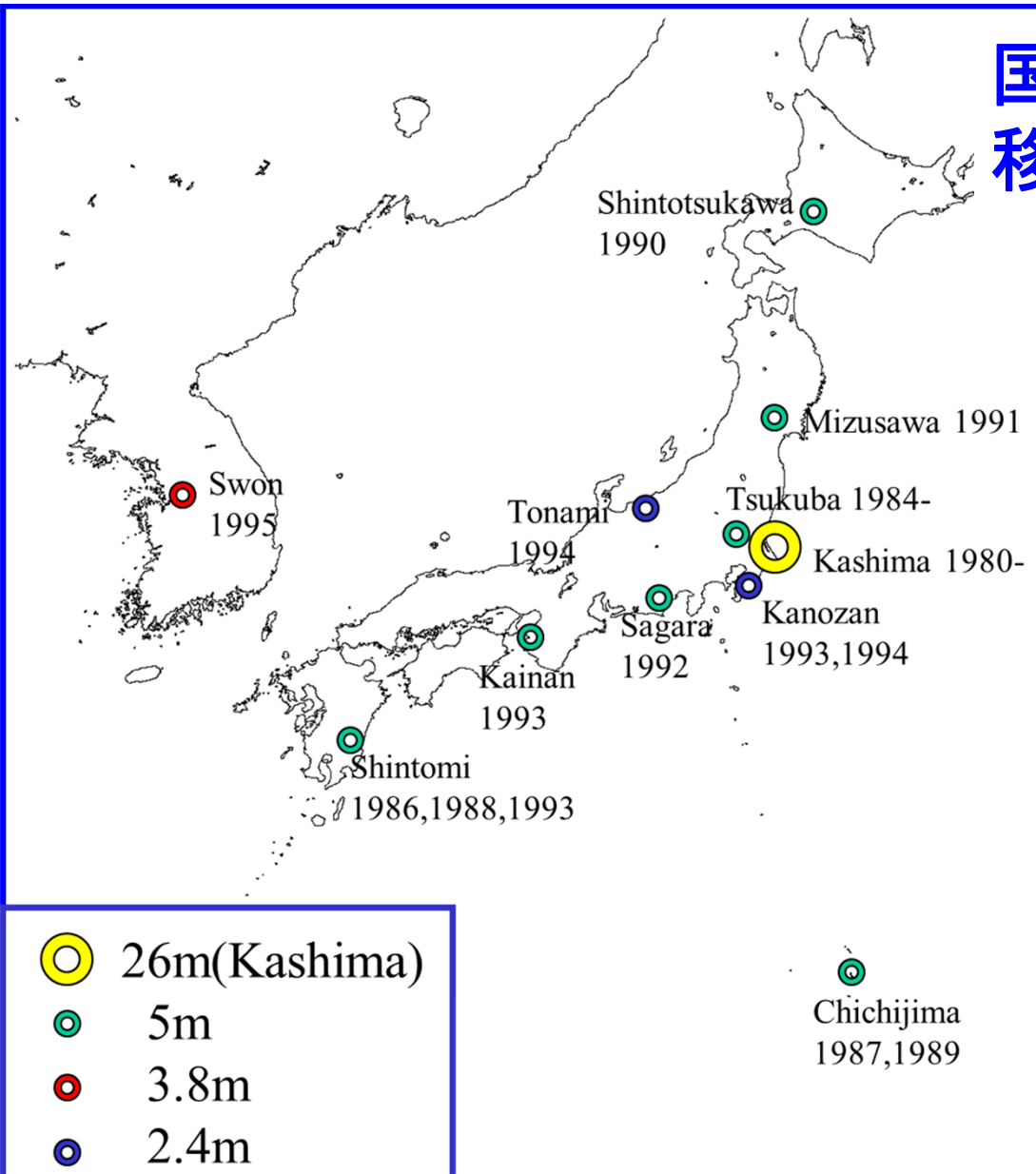
1992
 $\phi = 2.4 \text{ m}$
AZ-EL Mount
X band 8 GHz
coop. with CRL



1995
 $\phi = 3.8 \text{ m}$
AZ-EL Mount
S band 2.21 - 2.45 GHz
X band 8.18 - 8.98 GHz
3.5t

資料提供：国土地理院

国土地理院の 移動局を使った国内・国際VLBI観測



- 1986- : 国内移動実験開始

- 基線長再現性2cm



高島 & 石原 (2008) 子高度地理院における超長基線測量の変遷, 測地学会誌 54(4), pp.206-219

資料提供: 国土地理院

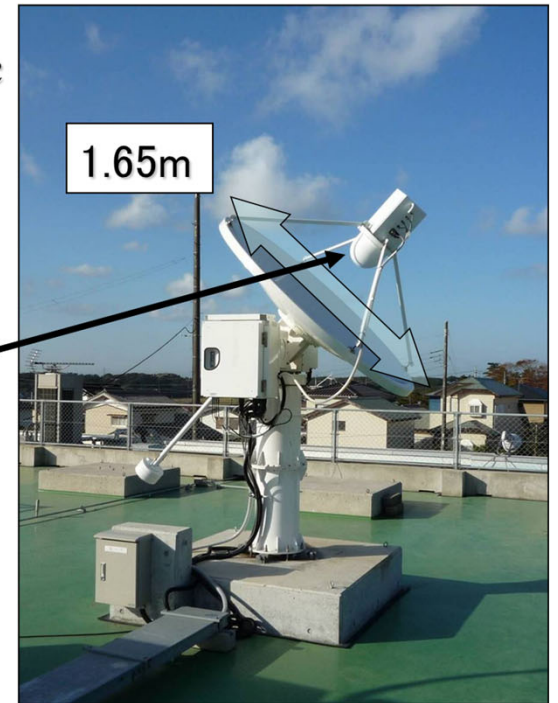
小型VLBIの開発:距離基準用 (2005~)

アンテナ直径	2.4m
受信周波数	8.18-8.60GHz
HPBW	約1°
偏波	右旋円偏波(RHCP)
システム雑音温度	123K
アンテナ制御方法	アンテナコントローラー+Sky Sensor
アンテナ指向精度	0.1°
アンテナ駆動速度	1° /sec(AZ、ELともに)
形式	カセグレンアンテナ、AZ-ELマウント
重量	アンテナ105kg、架台535kg

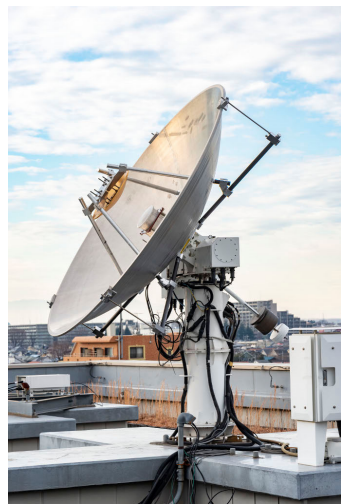


First Prototype

- Driving Speed 5 deg./sec
- S/X-band
- Tsys ~ 140 K (X)
~ 180 K (S)
- Broad-Band Feed



2.4m 広帯域(3-14GHz)



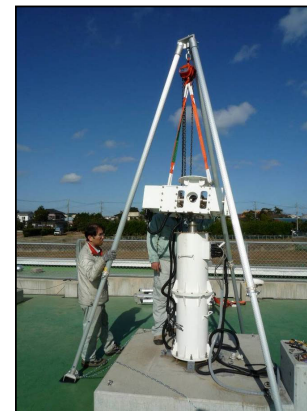
重機なしに可能な可搬小型アンテナの組み立て

2008年

34m観測棟屋上1.5m鏡の設置

2018年夏

イタリア INAF/Medicina局へ



7月21日 - 8月3日(実働10日間)

(1)アンテナ立ち上げ作業2日半、(2)ネットワーク設定・Ant性能測定1日半、(4)軸校正観測2日、(3)VLBI試験観測・相関処理2日、会議半日



小型広帯域VLBI局（1局）コスト概算

構成要素	概算費用
アンテナ駆動部	2000万円
主鏡	200万円
広帯域フィード（給電部）	100万円（*）
受信機BOX/空調	200万円
低雑音アンプ（LNA）	50万円/個
光信号伝送系	250万円
サンプラ	1500万円
データ記録PC（Raid 96TB, 10GEther）	250万円
マイクロ波部品	100万円
10GEther Switch	100万円
合計	4750万円

*：広帯域フィードははNICTが設計製作したため費用は予想の値