

VLBI 周波数比較への応用とGALA-V システムの開発(X) - 2.4mアンテナによる大陸間VLBI -



関戸衛, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 近藤哲朗, 堤正則, 川合栄治,
宮内結花, 長谷川新吾, 渡部謙一, 鈴山智也, 小室純一, 井戸哲也
寺田健次郎, 難波邦考, 高橋留美, 岡本慶大, 青木哲郎, 池田貴俊,

大陸間周波数比較技術としてのVLBI

技術名	信号源	軌道依存	電波送信	精度	運用コスト
衛星双方向	通信衛星	小	送信免許	< 1.e-15 (Code) < 1.e-16 (Carrier Phase)	>100万円/年
GNSS	GPS /GNSS 衛星	高	--	< 1.e-16 (IPPP)	低
VLBI	電波天体(ICRF)	--	--	< 1.e-16 (Broadband)	中 (**)

** 小型 VLBI 局の運用コストは低いが大規模アンテナの保守費は別.

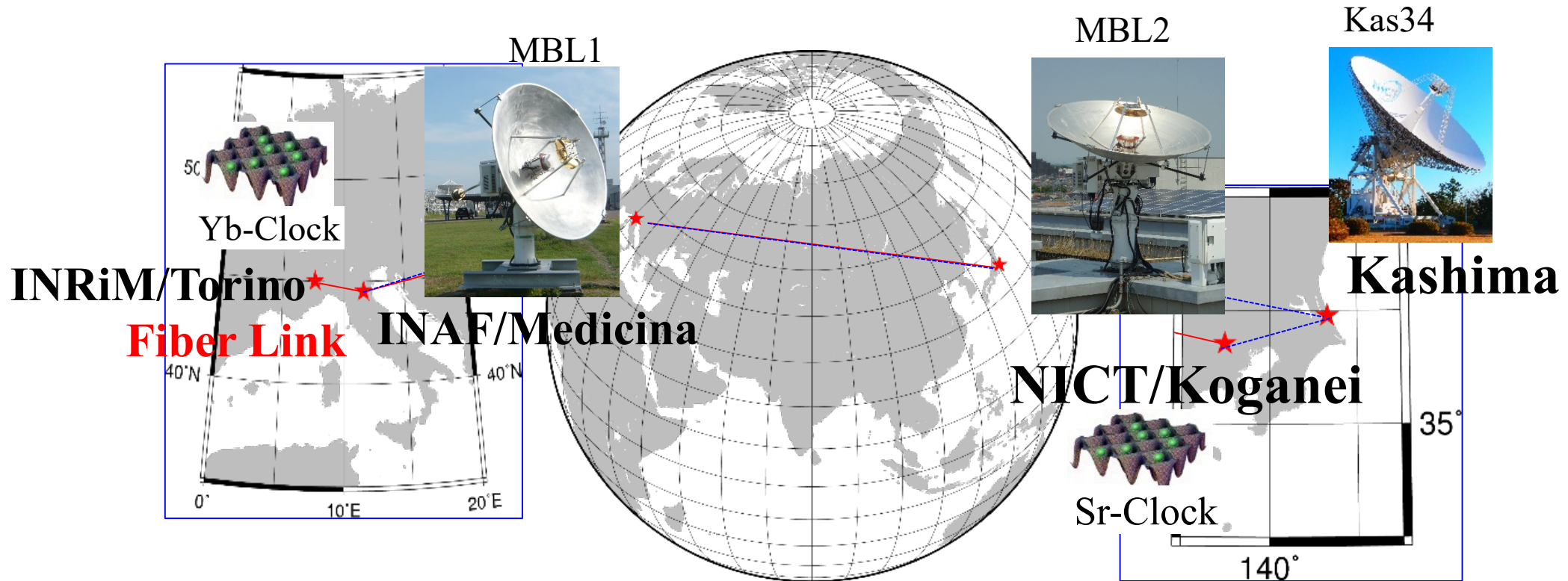
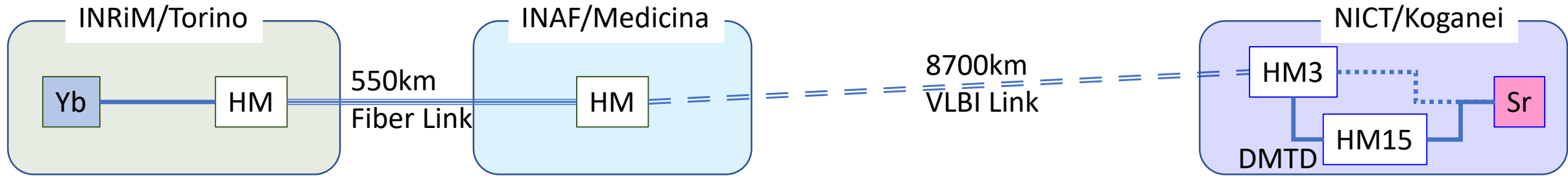
VLBI周波数比較の特徴

- A. (絶対遅延量) 広帯域VLBIによる絶対遅延量(Ambiguity Free)計測
- B. (安定性) 遠方の電波源を固定点として使用する。(A)絶対群遅延計測と合わせてVLBI周波数リンクの長期安定性が特徴
- C. (自由度) 衛星の可用性、送信免許などに依存しない。

周波数リンク実験: INRiM-INAF-NICT

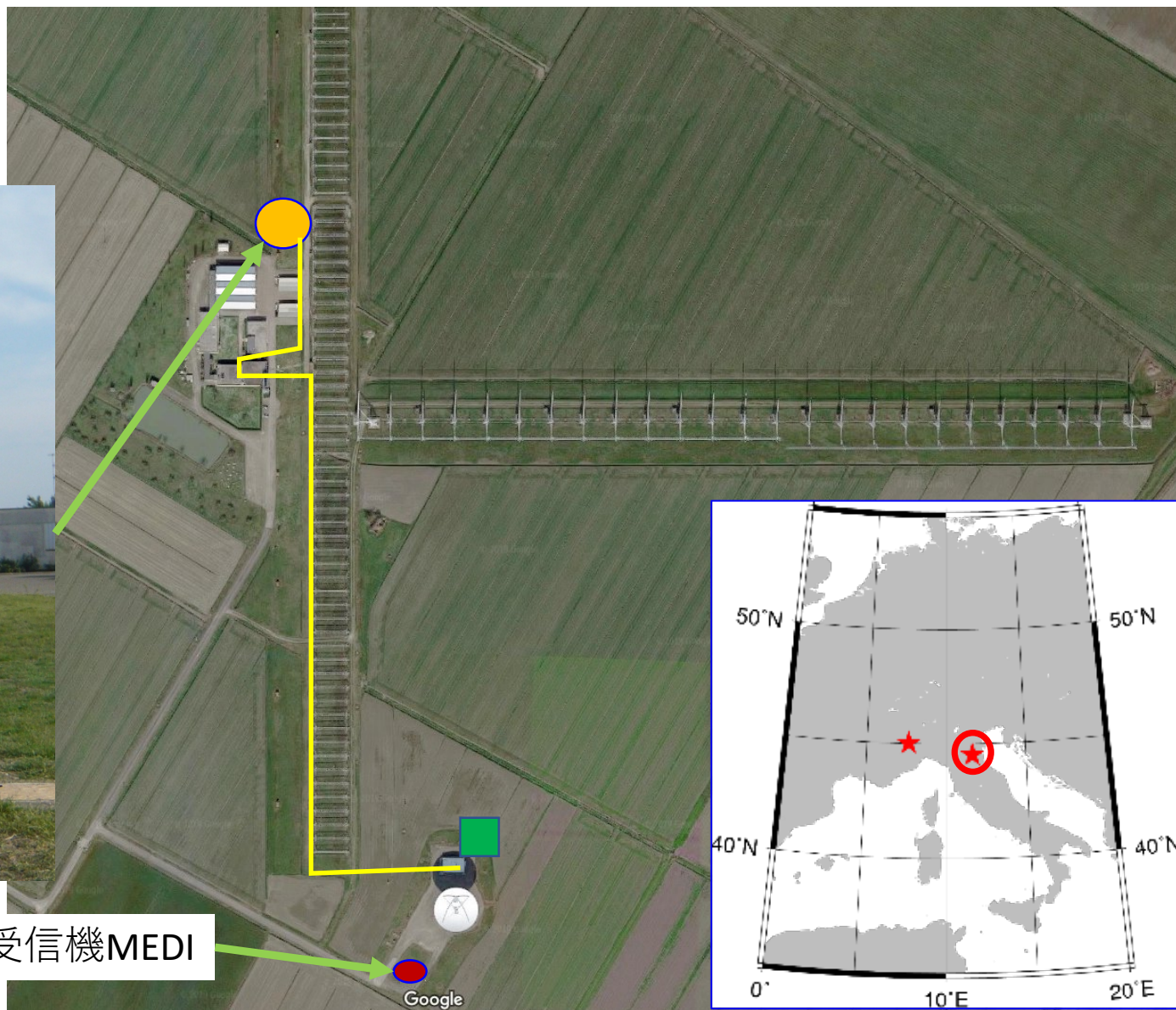
目的: 光格子時計の大陸間周波数比較

光格子時計: Sr光格子時計 (NICT,Koganei), Yb光格子時計 (INRiM、Trino)



INAF/IRA メジチーナ 電波天文観測所

2.4m 直径アンテナ(MBL1)

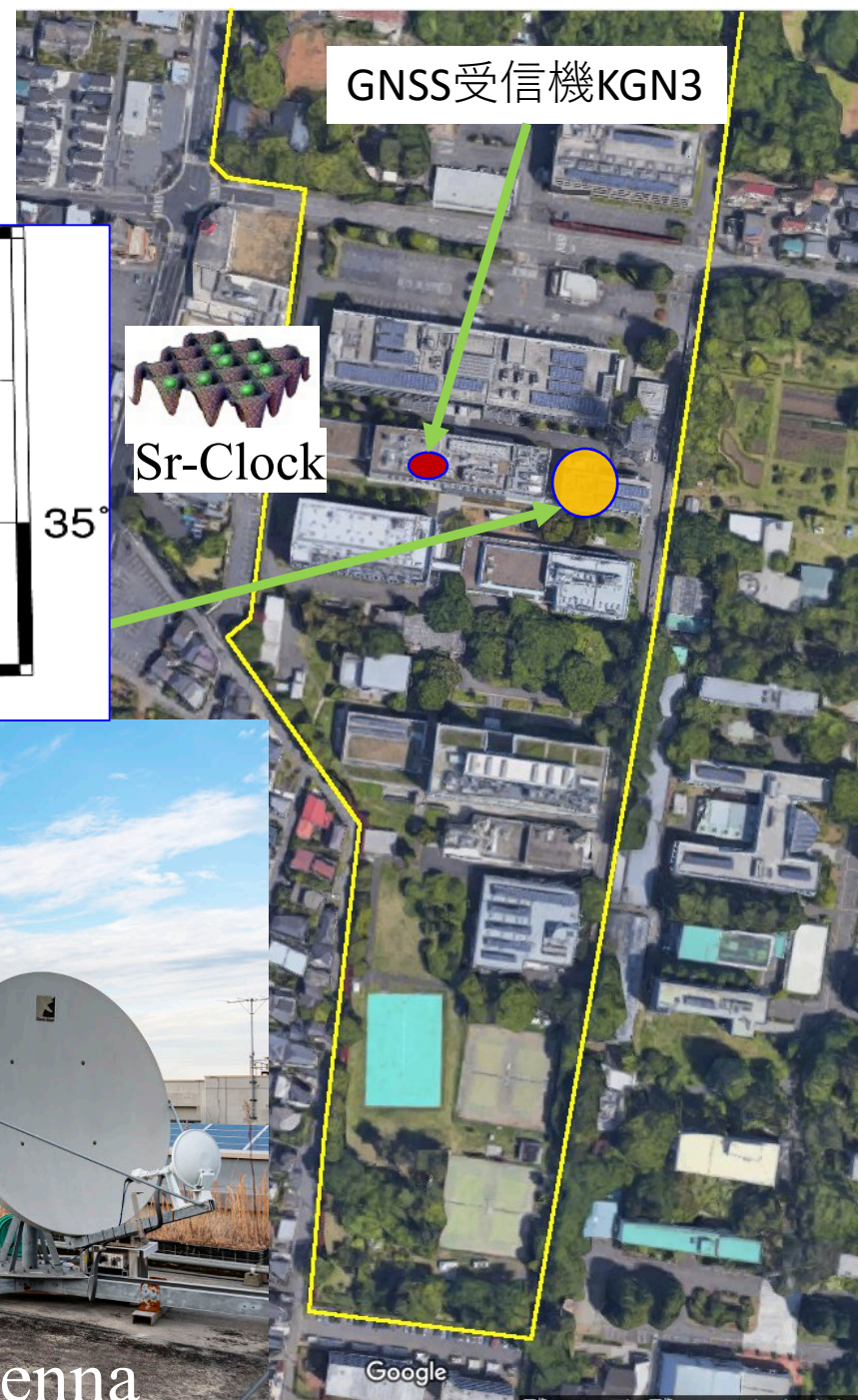
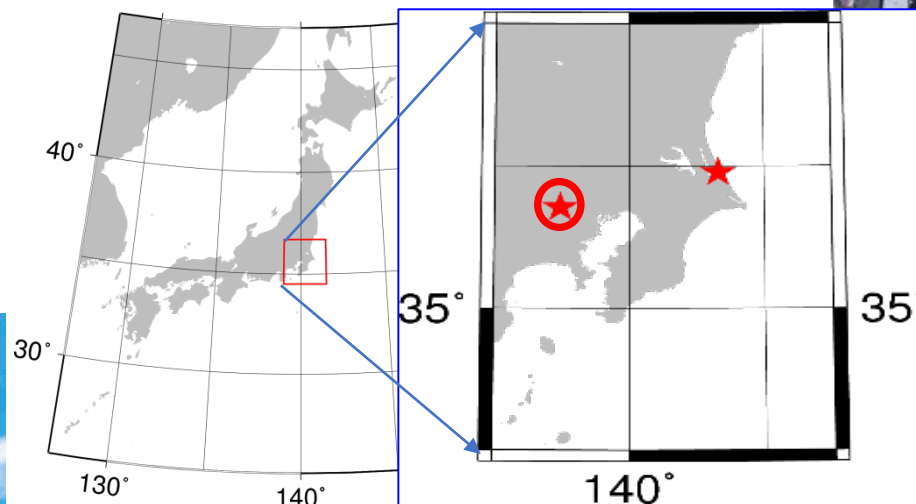
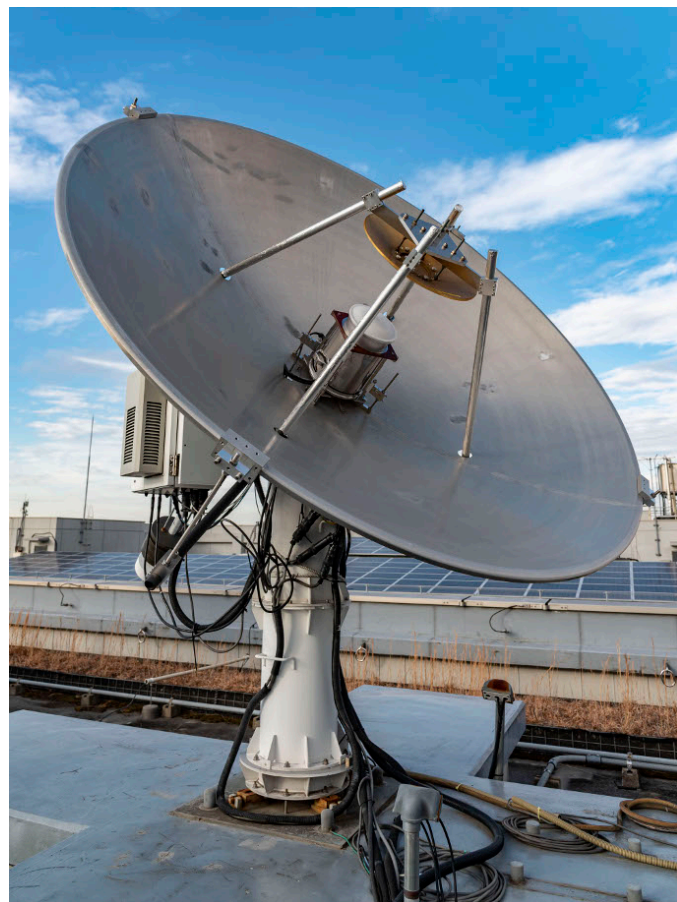


GNSS受信機MEDI

Google

NICT/ 小金井本部

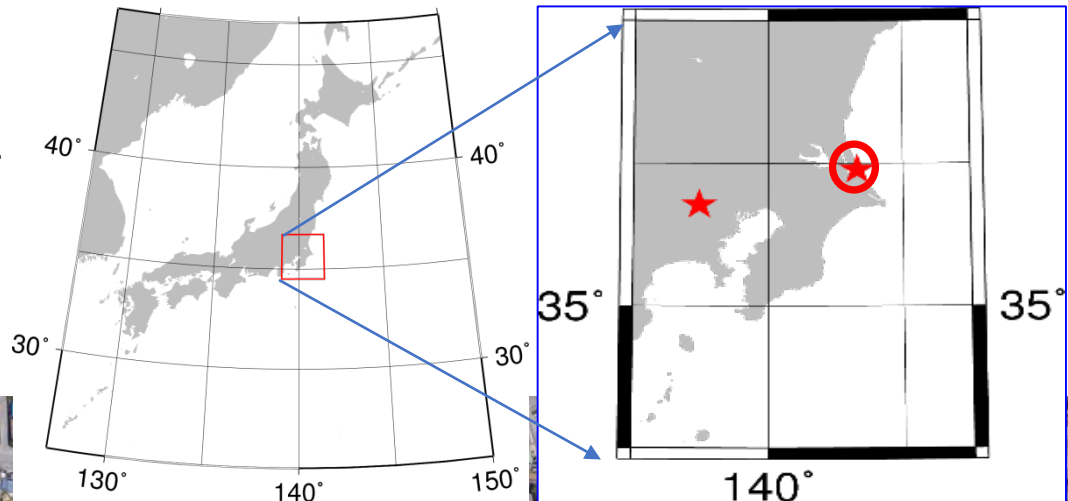
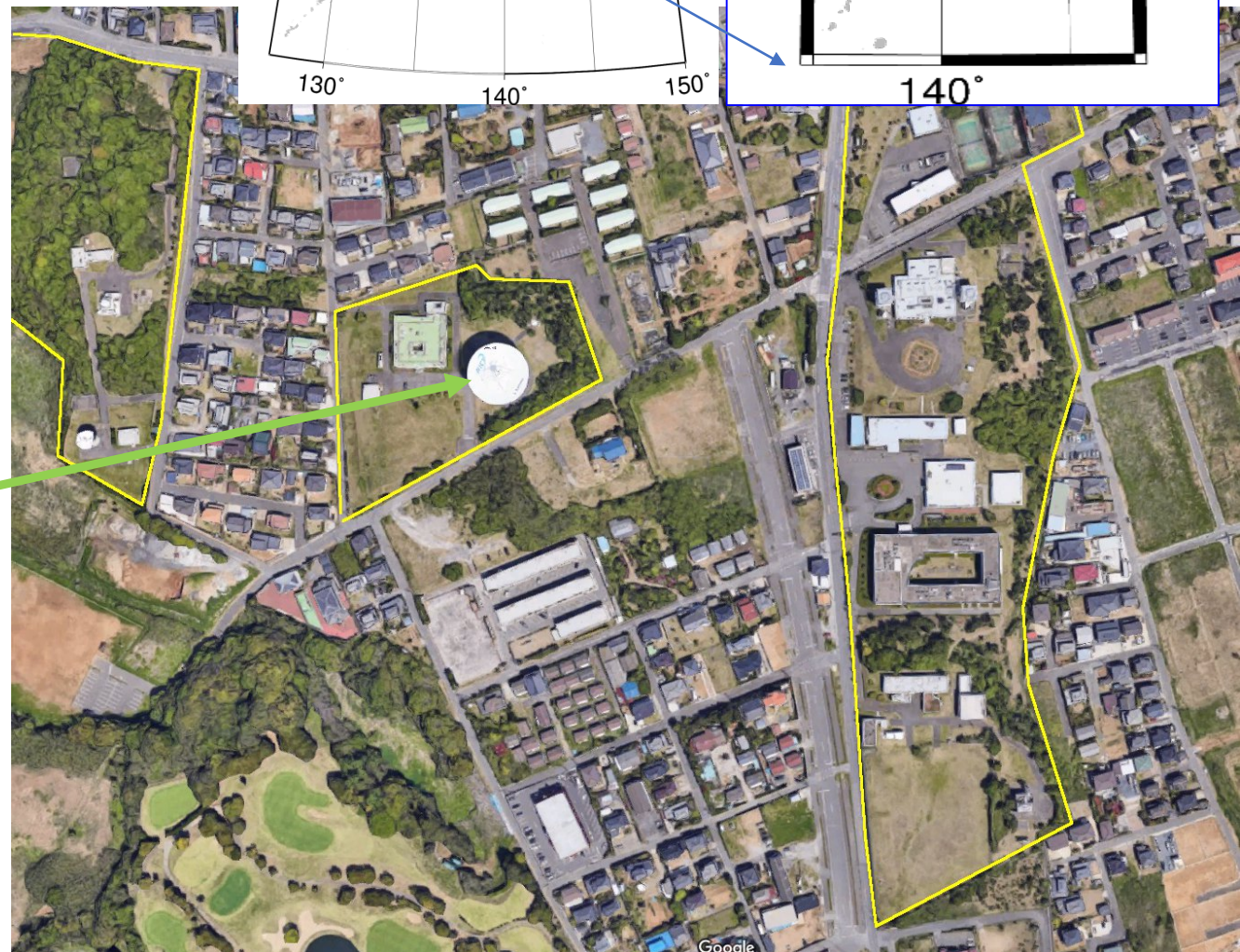
2.4m直径アンテナ
(MBL2)



MBL2 and TWSTFT Antenna

NICT/ 鹿島宇宙技術センター

34m直径アンテナ (Kashima34)



‘Node-Hub’型 VLBI

- 閉合遅延 を使った小型アンテナ間の VLBI

$$\tau_{21}(t_1) = \tau_{23}(t_1) - \tau_{13}(t_1) + \tau_{13}(t_1)\dot{t}_{21}(t_1)$$

- 小型アンテナを使う利点:

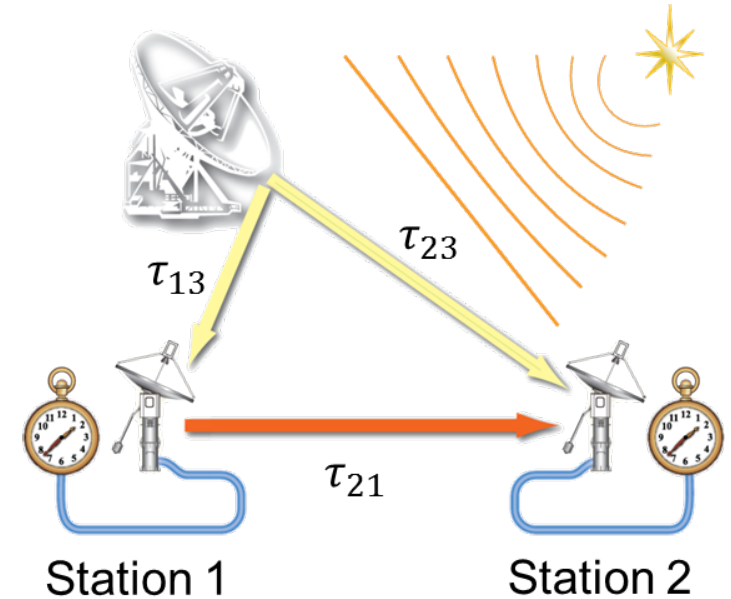
- 小さい変形。速いアンテナ駆動。
- 大型アンテナの影響は消える。
- 低コスト。

- 不利な点:

- 感度小, ← 大型アンテナとの同時観測による SNR 向上

$$\text{Signal to Noise Ratio} \propto S D_1 D_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2 / T_{\text{sys}1} T_{\text{sys}2}}$$

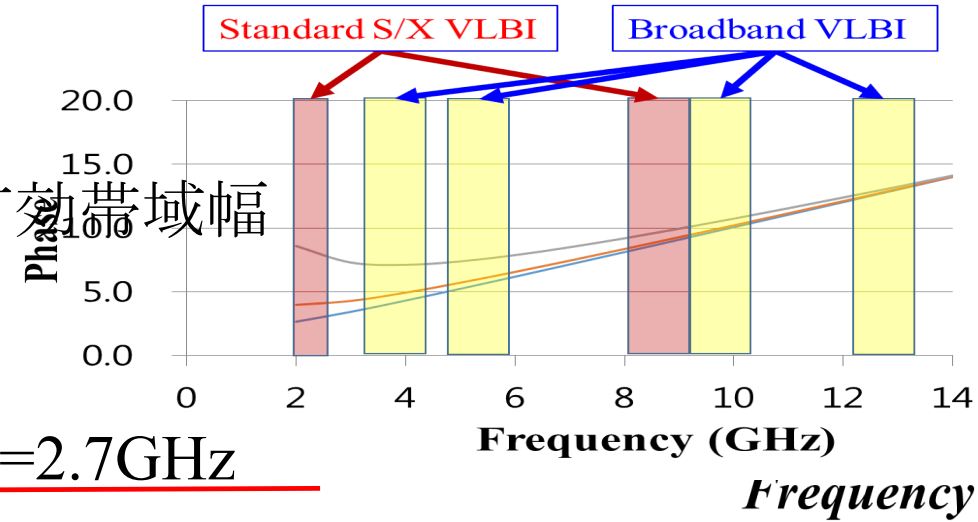
D_n : アンテナ直径, S : 天体フラックス, T_{sys} : システムノイズ



技術的特徴: 広帯域 ・ RF-ダイレクトサンプリング

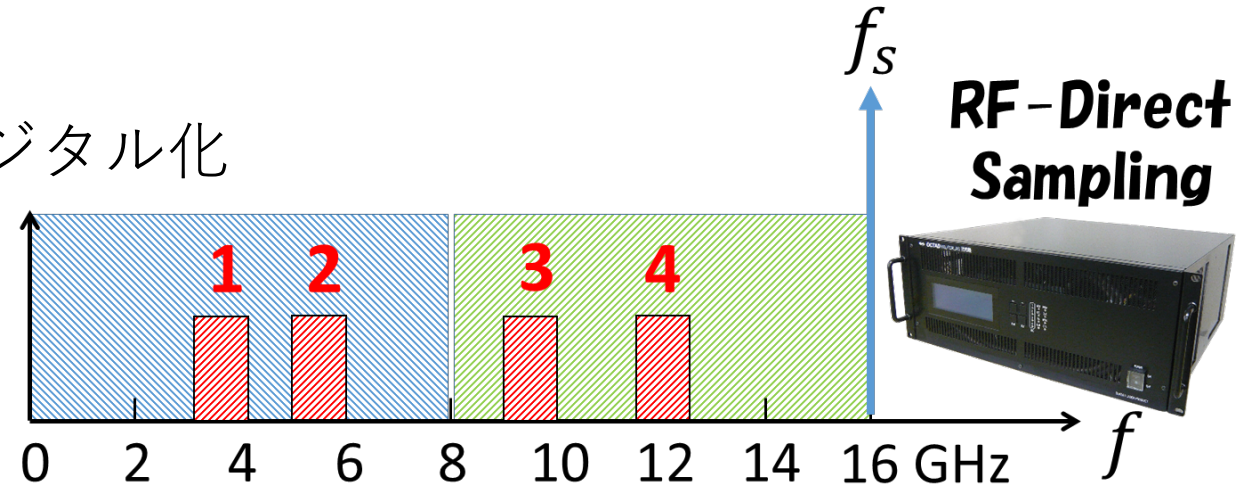
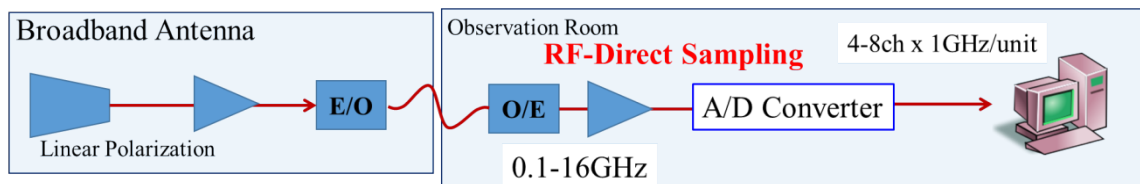
• Bandwidth Synthesis (BWS)

- 従来の S/X VLBI: 16MHz x 10 ch 帯域幅1GHz 有効帯域幅 $\Delta f_{RMS}=150\sim 300\text{MHz}$
- 広帯域 VLBI, 3-14GHz
 Freq: 6.0, 8.5, 10.4, 13.3GHz \rightarrow 有効帯域幅 $\Delta f_{RMS}=2.7\text{GHz}$



• RF-Direct Sampling

- アナログ周波数変換なし、直接デジタル化
- 位相安定がよい



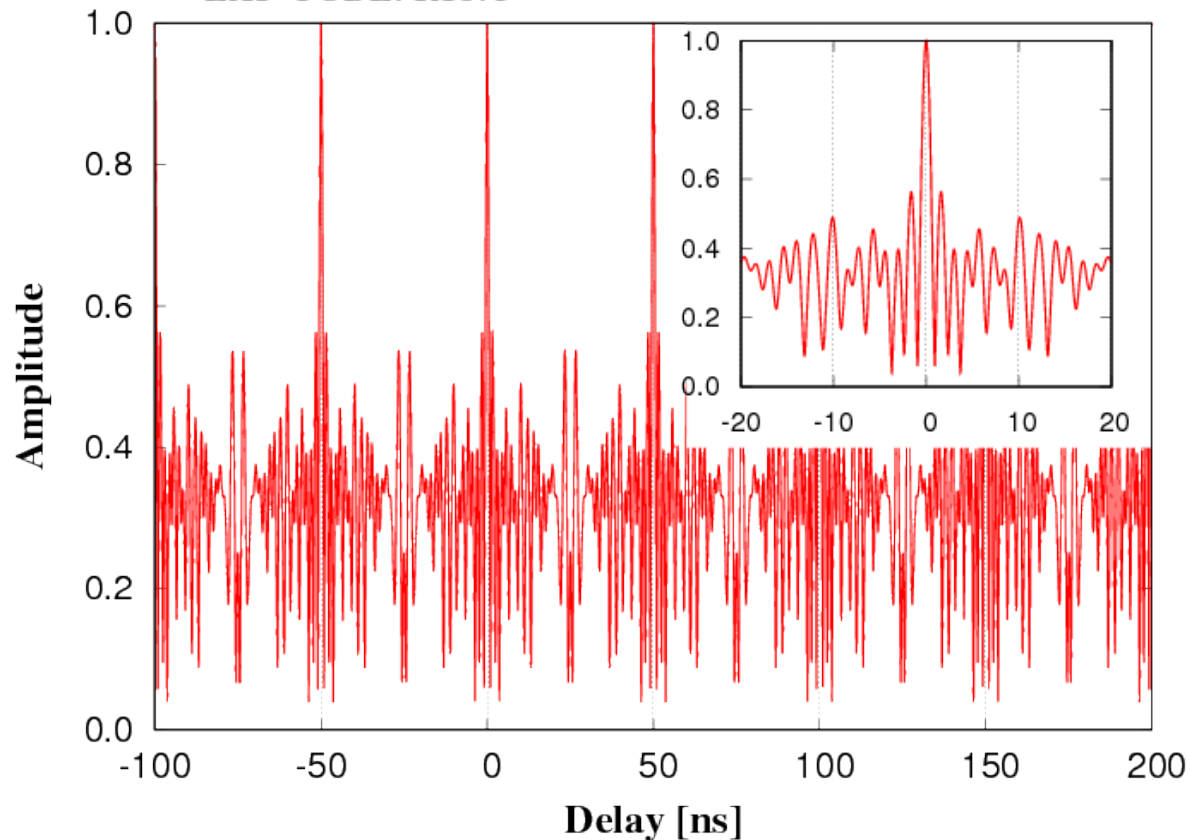
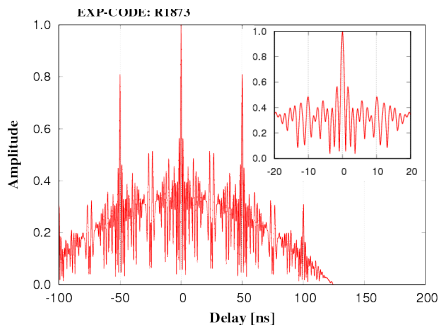
バンド幅合成の遅延分解関数

Standard geodetic VLBI

Freq.= 8212.99, 8252.99, 8352.99,
8512.99, 8732.99, 8852.99,
8912.99, 8932.99 MHz

BW = 8MHz

EXP-CODE: R1873



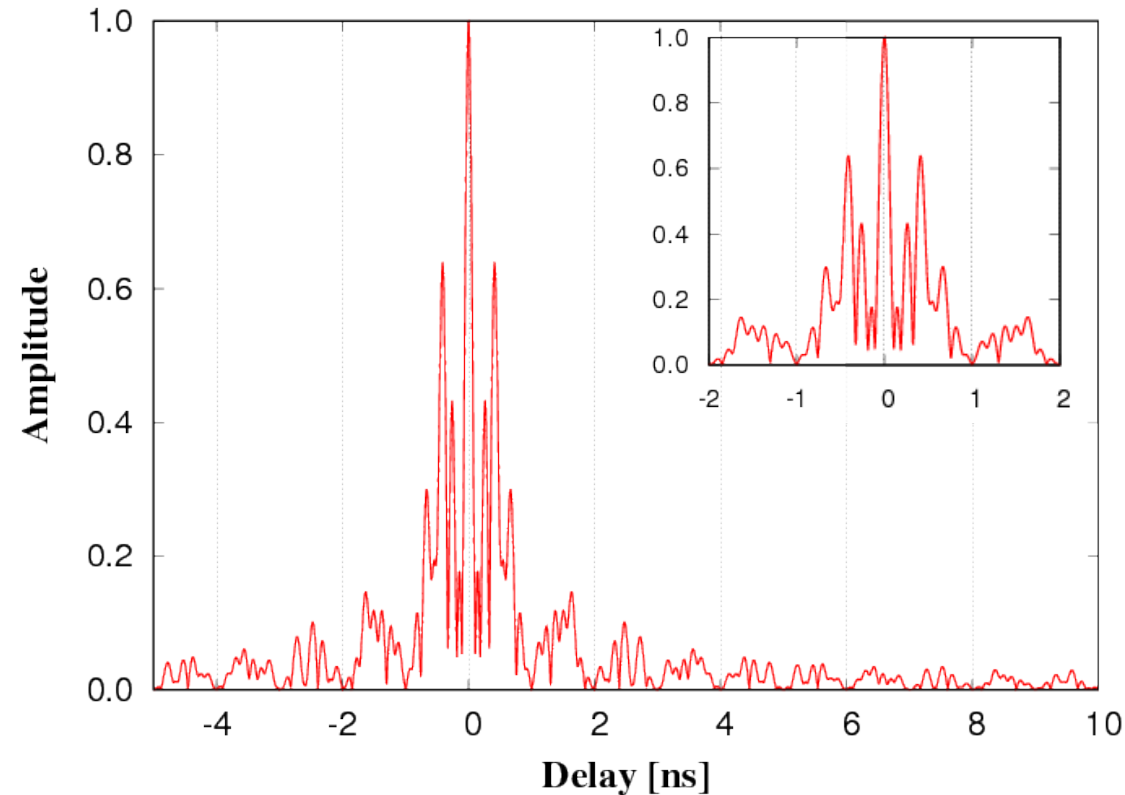
Broadband VLBI

Freq.= 6000, 8500, 10800, 13300 MHz

BW= 1024MHz

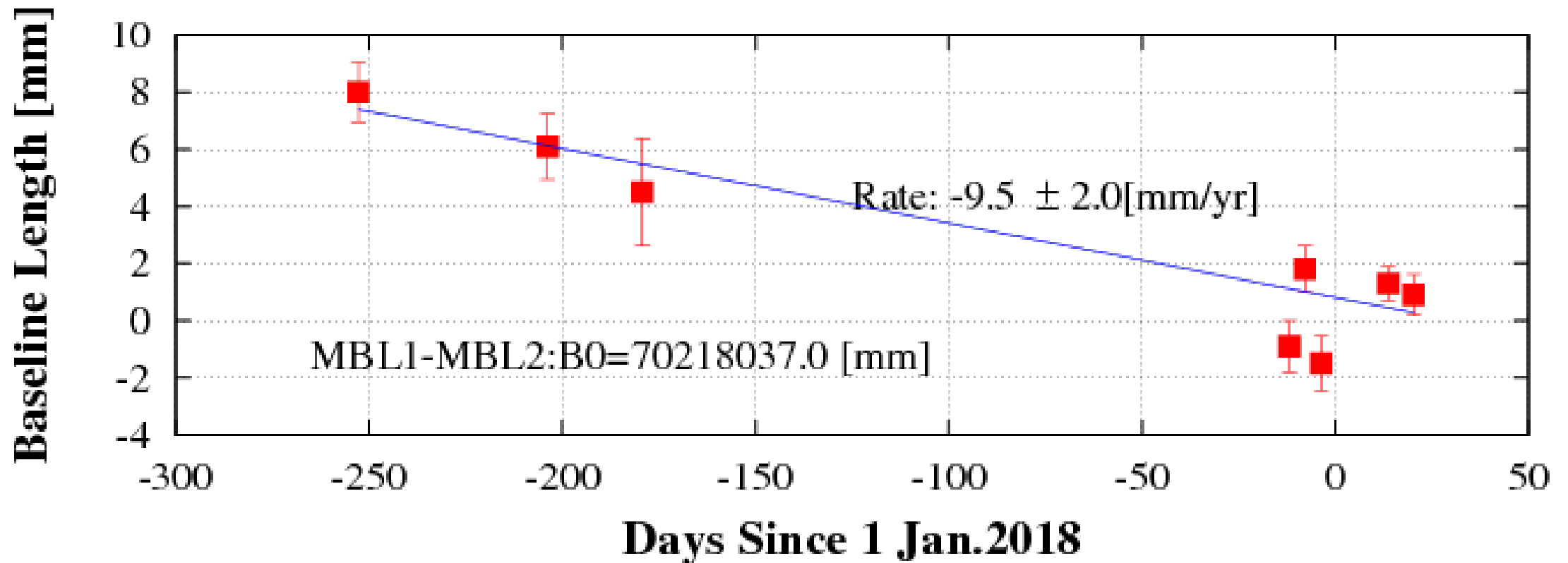
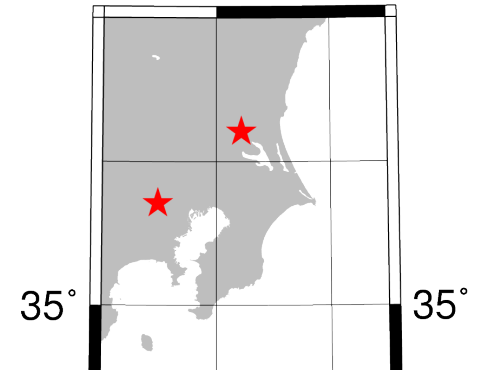
- 10倍高い分解能
- アンビギュイティなし

EXP-CODE: GALAV-1



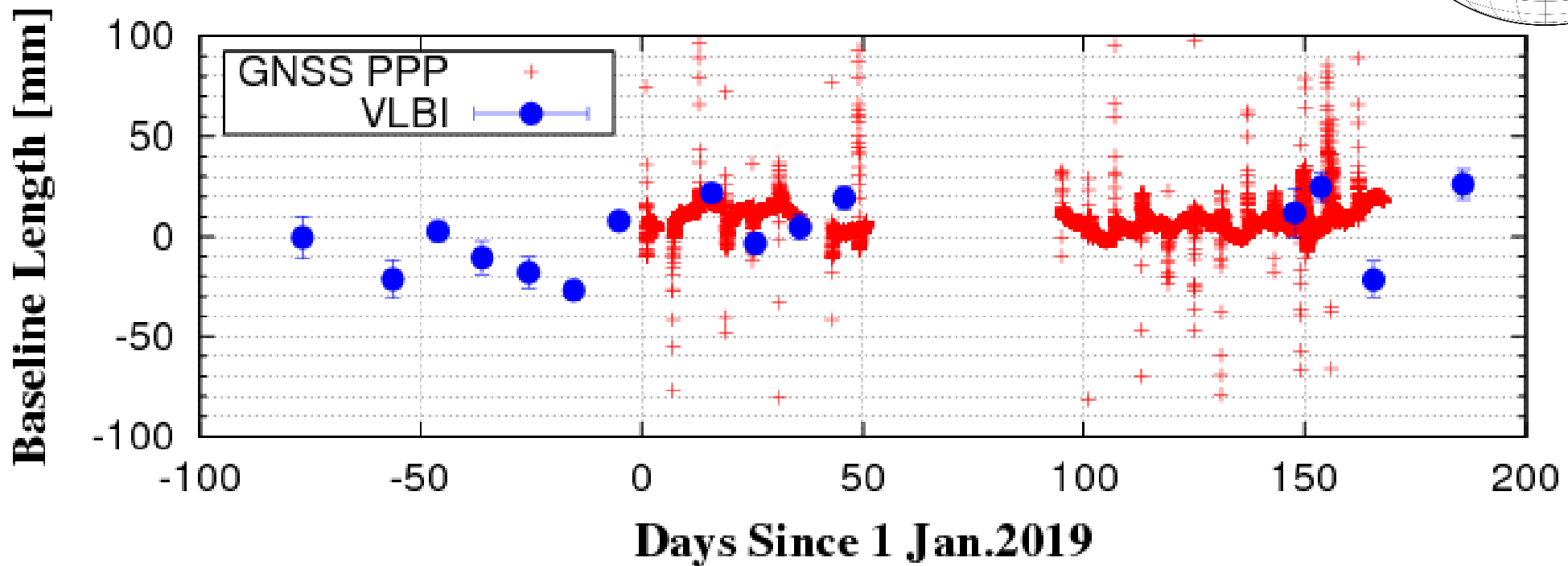
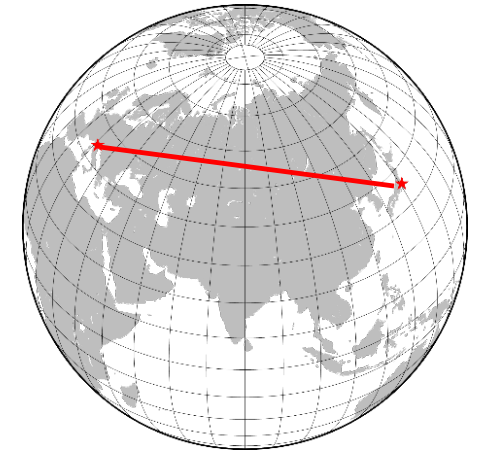
広帯域VLBIの測地性能（国内基線）

- Domestic Experiment -- 70km baseline:
 - Delay Residual WRMS: ~10ps
 - baseline repeatability WRMS: 1.2 mm

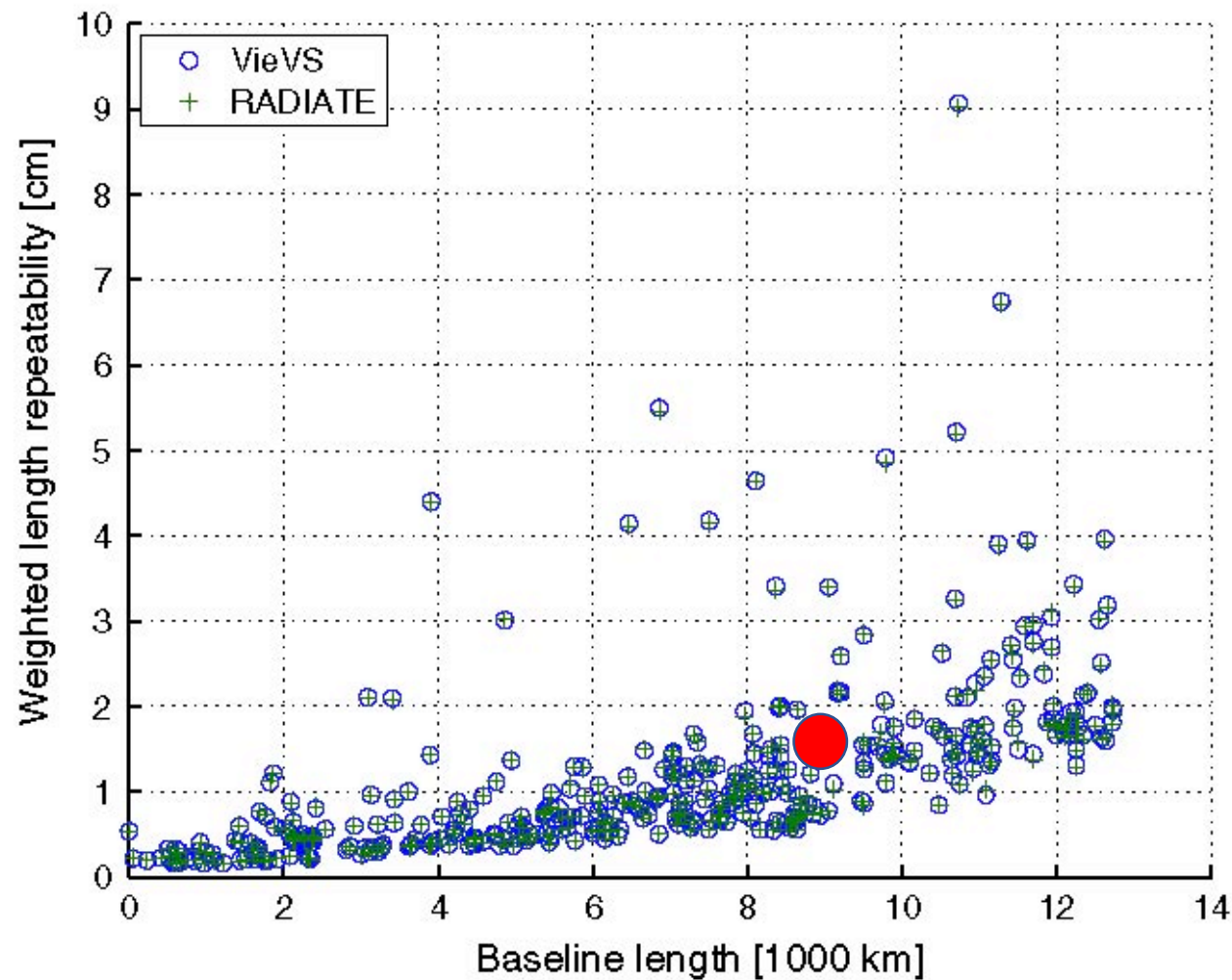
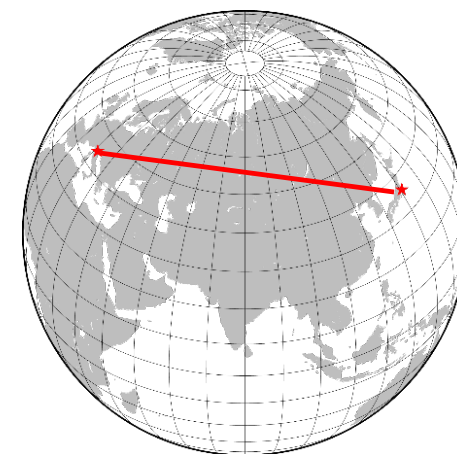


広帯域VLBIの測地性能（日－伊 基線）

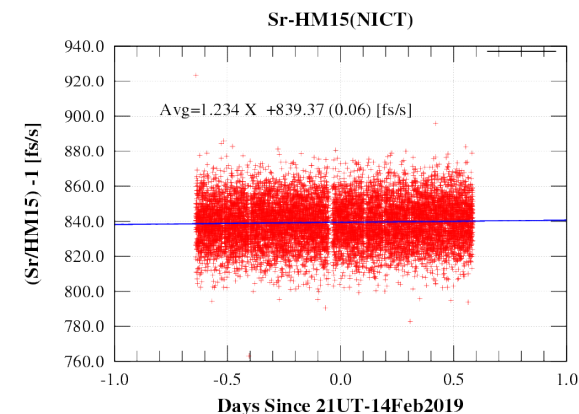
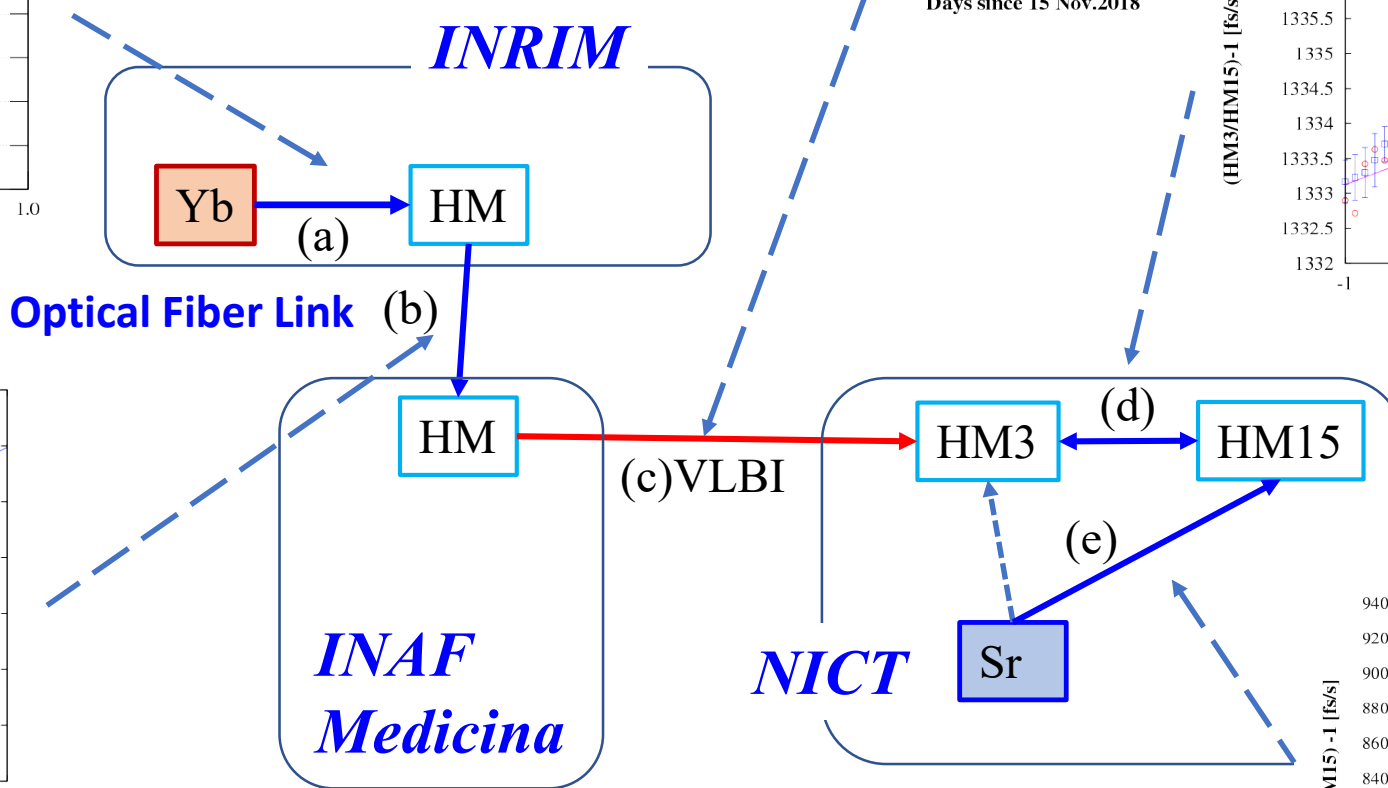
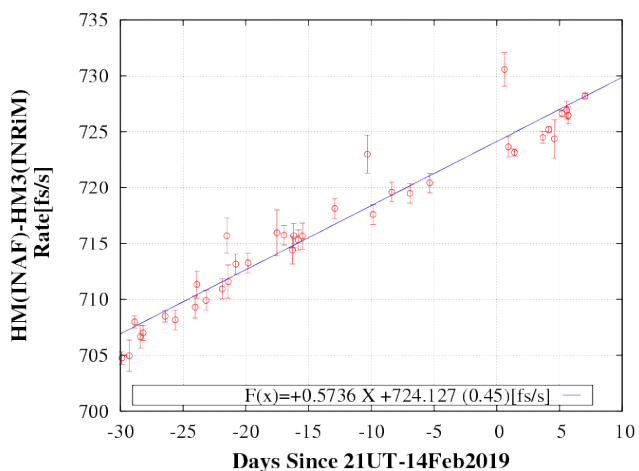
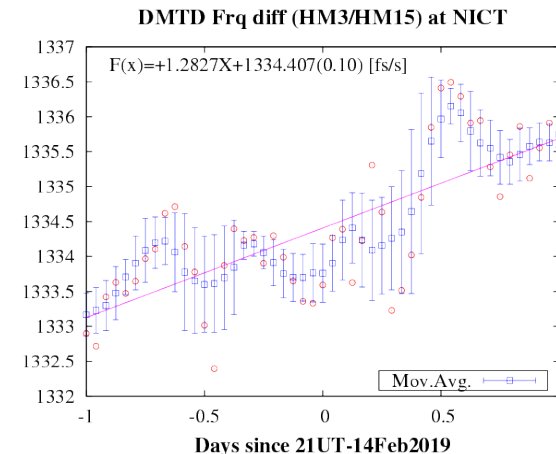
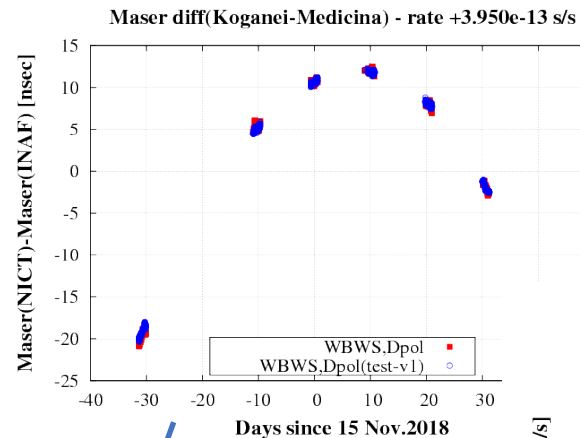
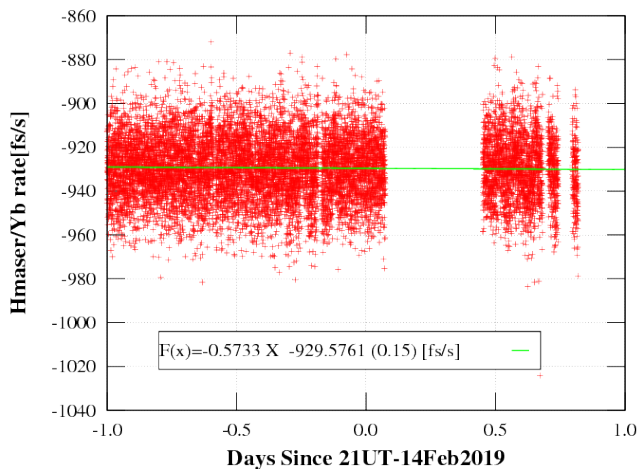
- Intercontinental Experiment -- 8700km baseline:
 - Delay Residual: WRMS:~30ps
 - baseline repeatability WRMS: 15mm



測地観測性能: 2.4m-2.4m 8,784.56km
基線長の再現性 : WRMS: 15mm

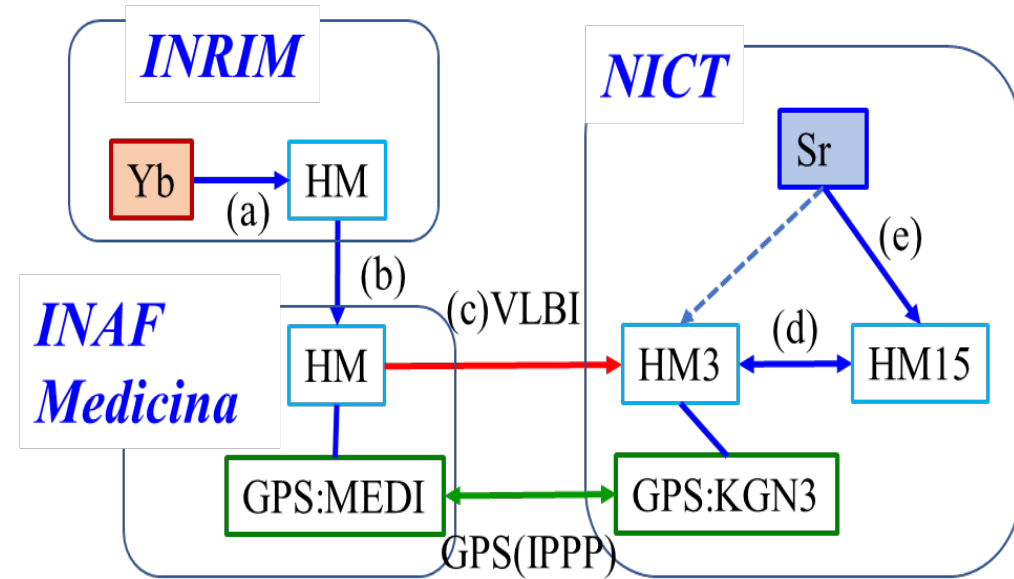
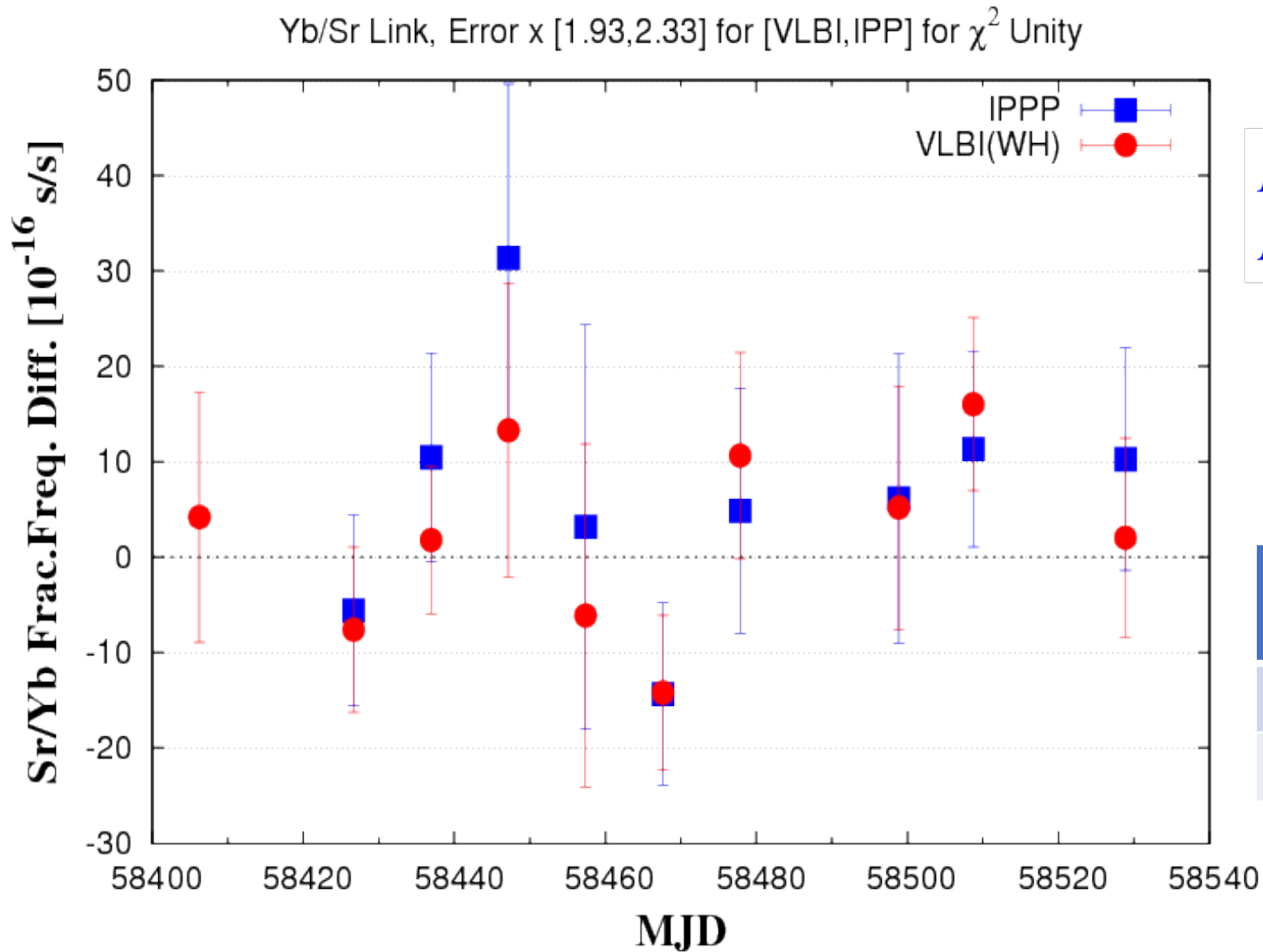


Freq. Link Block Diagram



Sr/Yb-link results. VLBI and GPS(IPPP)

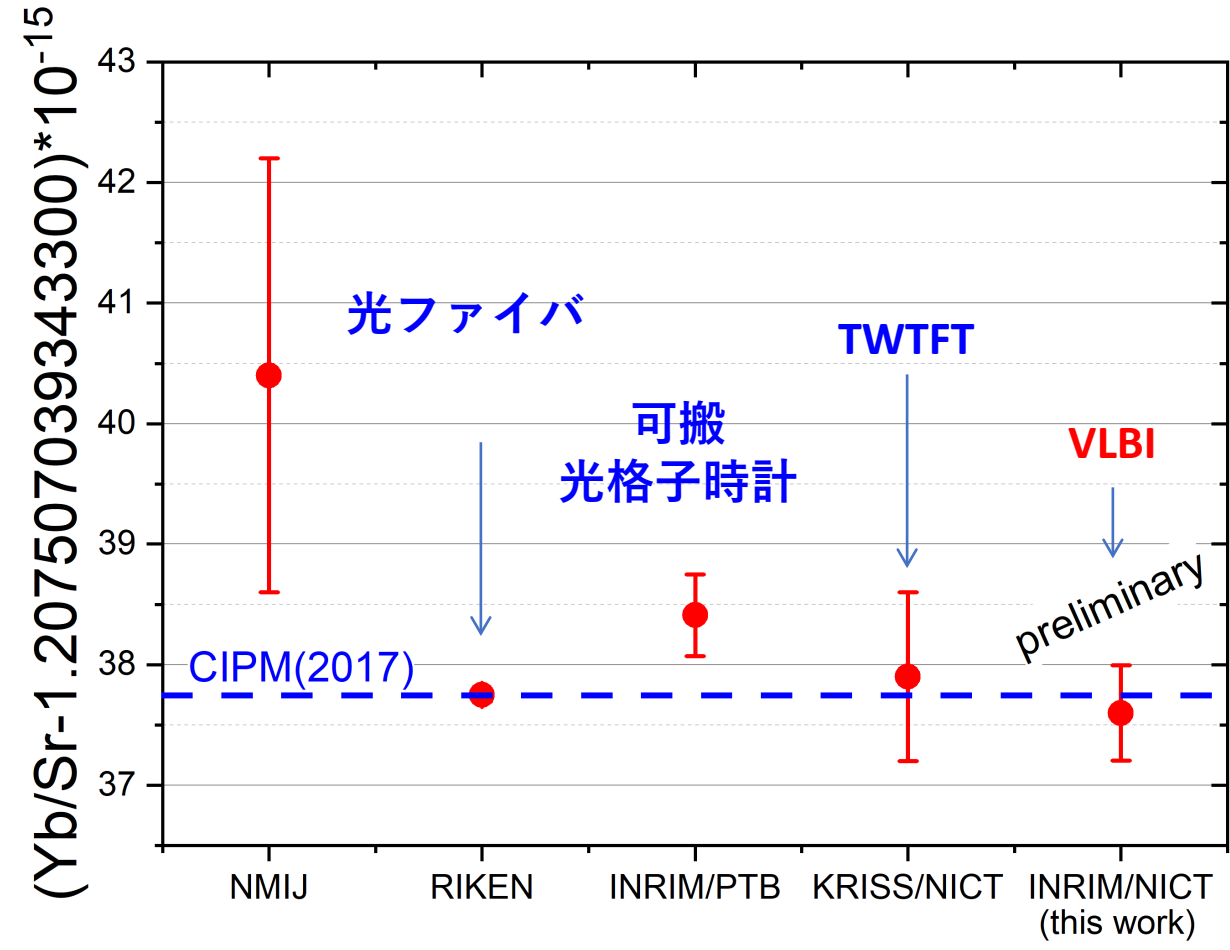
Error was inflated to make χ^2 unity.



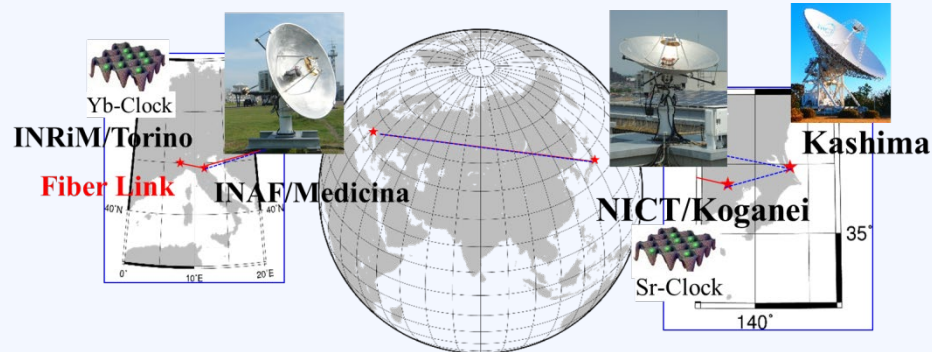
After scaling the error of link data.

	Sr/Yb Frac.	Uncertainty	Weighted RMS	N
VLBI	1.2e-16	3.3.e-16	9.8e-16	10
IPP	3.5e-16	4.0e-16	1.1e-15	9

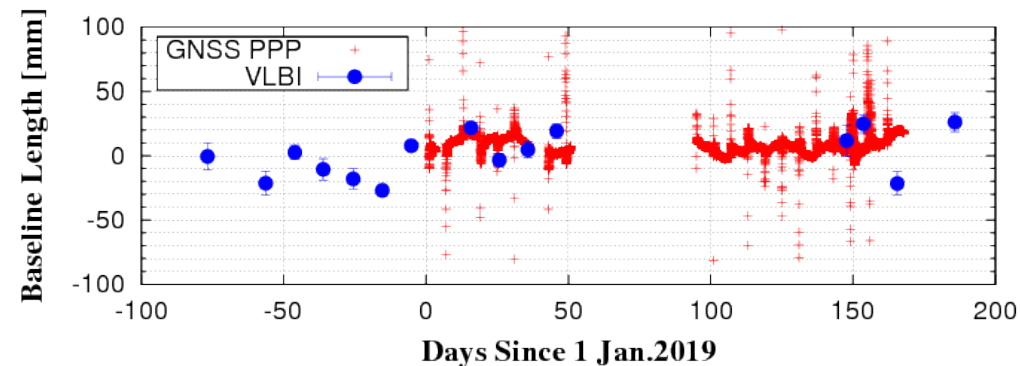
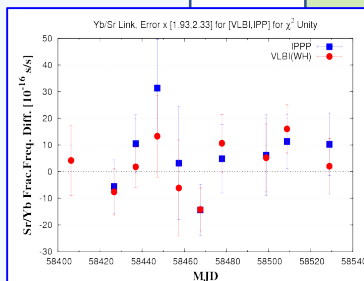
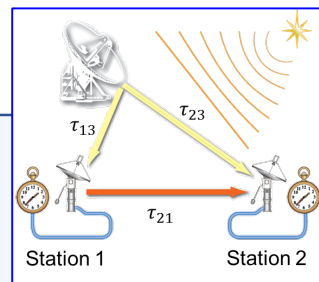
Y/Sr 周波数比 これまでの測定との比較



Summary



**Broadband VLBI (2.4m)による
Sr/Yb光格子時計の周波数比較**



**Node-Hub style VLBI による測地観測
基線長再現性 15mm RMS@8700km**

広帯域システムによる小型(2.4m)アンテナ間のVLBI観測実施

70km基線長再現性 1.2mm

8700km基線長再現性 15mm

Sr - Yb 周波数リンク $-1.2(3.3) \times 10^{-16}$.

ご静聴ありがとうございました

謝辞

- イタリアの実験にあたって**G.Cerretto, F.Bregolin, F.Levi, A.Mura, E.Cantoni, P.Barbieri, A.Tampellini of INRiM, M.Negushini, G.Maccaferri, C.Bortolotti, M.Roma, G.Zacchioli, R.Ricci of INAF, G.Petit, J.Leute of BIPM** に感謝します。
- 高速研究ネットワーク JGN, GARR, GEANT, Internet2, and TransPAC 特に池田貴俊氏(KDDI)がイタリアからの高速データ伝送に寄与している。データ伝送ソフトは**H.Verkoeter** (JIVE)氏の**JIVE5ab**を使用した。
- VLBI 解析ソフト **Calc/Solve**, アンテナ制御ソフト **Field System9**, スケジュールソフト **Sked**は **NASA/GSFC**の開発ソフトウェアを使用している。