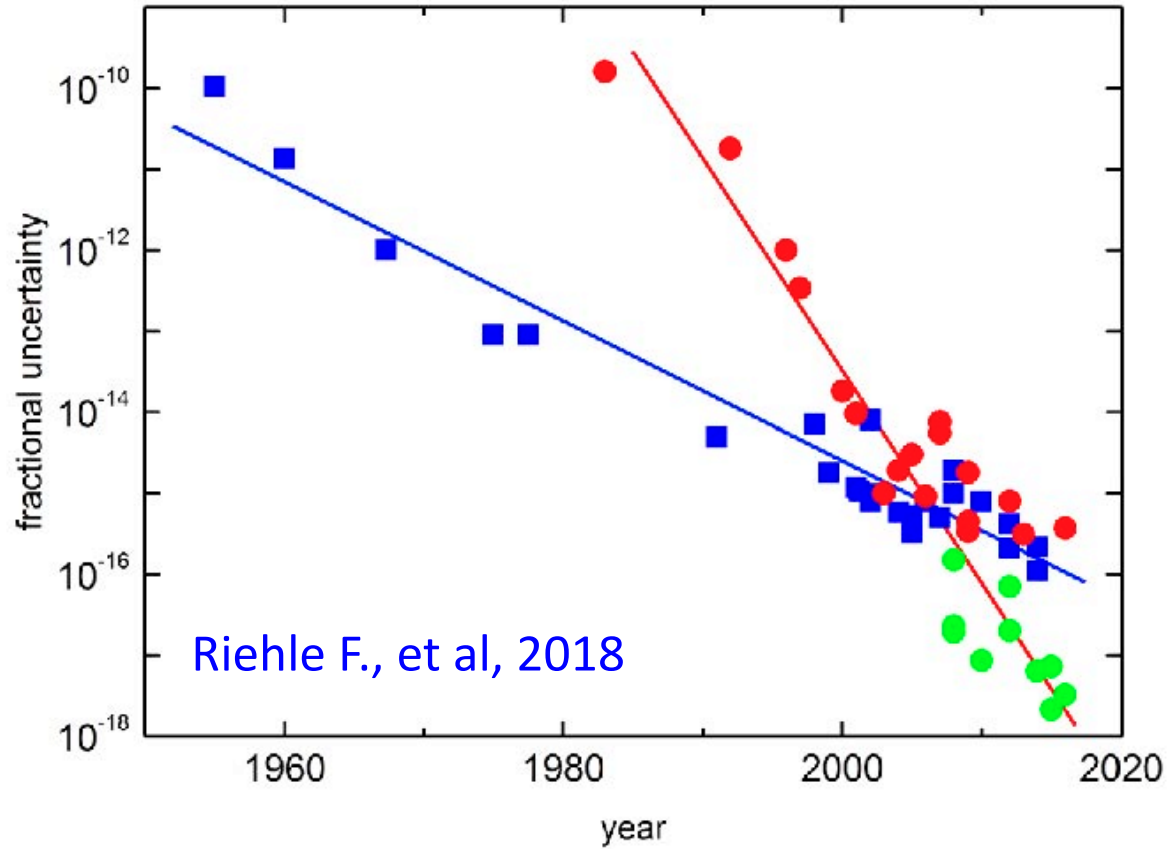


小型広帯域VLBIを使った、イタリアー日本の VLBI 観測(測地・精密周波数比較)



関戸衛、岳藤一宏、近藤哲朗、氏原秀樹、堤正則、川合栄治、
宮内結花、長谷川新吾、蜂須英和, Nemitz Nils, 井戸哲也(NICT)、
M. Pizzocaro, C.Clivati, D.Calonico(INRiM)
F.Perini(INAF), G.Petit, J.Leute (BIPM)

光周波数標準器の進展



- 光周波数標準の確度は-18乗台が実現されている。
- SI単位との整合を確認するための9種の原子遷移が推奨されている。

Table 2. SRS as of 2017.

Frequency (Hz)	Fractional uncertainty	Transition
6834 682 610.904 3126	6×10^{-16}	^{87}Rb ground state hfs
429 228 004 229 873.0	4×10^{-16}	^{87}Sr neutral atom, $5s^2\ ^1\text{S}_0-5s5p\ ^3\text{P}_0$
444 779 044 095 486.5	1.5×10^{-15}	$^{88}\text{Sr}^+$ ion, $5s\ ^2\text{S}_{1/2}-4d\ ^2\text{D}_{5/2}$
518 295 836 590 863.6	5×10^{-16}	^{171}Yb neutral atom, $6s^2\ ^1\text{S}_0-6s6p\ ^3\text{P}_0$
642 121 496 772 645.0	6×10^{-16}	$^{171}\text{Yb}^+$ ion, $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{F}_{7/2}$
688 358 979 309 308.3	6×10^{-16}	$^{171}\text{Yb}^+$ ion, $6s\ ^2\text{S}_{1/2}-5d\ ^2\text{D}_{3/2}$
1064 721 609 899 145.3	1.9×10^{-15}	$^{199}\text{Hg}^+$ ion, $5d^{10}6s\ ^2\text{S}_{1/2}-5d^96s^2\ ^2\text{D}_{5/2}$
1121 015 393 207 857.3	1.9×10^{-15}	$^{27}\text{Al}^+$ ion, $3s^2\ ^1\text{S}_0-3s3p\ ^3\text{P}_0$
1128 575 290 808 154.4	5×10^{-16}	^{199}Hg neutral atom, $6s^2\ ^1\text{S}_0-6s6p\ ^3\text{P}_0$

Riehle F., et al, 2018

長距離周波数比較の方法

Technique	重要な要素	衛星軌道依存性	地上電波の送信	精度	運用コスト
TWSTFT	通信衛星	あり	必要	< 1.e-15 (Code) < 1.e-16 (Carrier Phase)	>数百万円/yr.
GPS	GPS 衛星	大きい	なし	< 1.e-15 (IPPP)	低い
VLBI	天球電波源 (不動)	なし	なし	< 1.e-15 (Broadband)	低い(*)

- ❑ VLBIは不動の電波源 (ICRF, ITRF)を基準とするため、長期安定度に優れている。
衛星に依存しない
- ❑ 広帯域VLBIでは、Ambiguityなしに群遅延が測定可能。（絶対群遅延量の測定）
- ❑ 送信免許を必要とせず、地球上のどこでも使用可能
- ❑ 高い導入コスト(大型アンテナ) が難点. 主として広帯域小型アンテナを使うことでこの点は緩和される。

我々の観測方法の特徴

- **広帯域**(3-14GHz、BW=1GHz x 4band)による感度の改善、遅延計測精度の向上。→受信機は氏原さんの発表
- **ダイレクトサンプリング**（デジタル周波数変換・フィルタ）による信号安定化と**広帯域バンド幅合成**
- **NODE-HUB方式のVLBI**：閉合遅延をつかった仮想観測

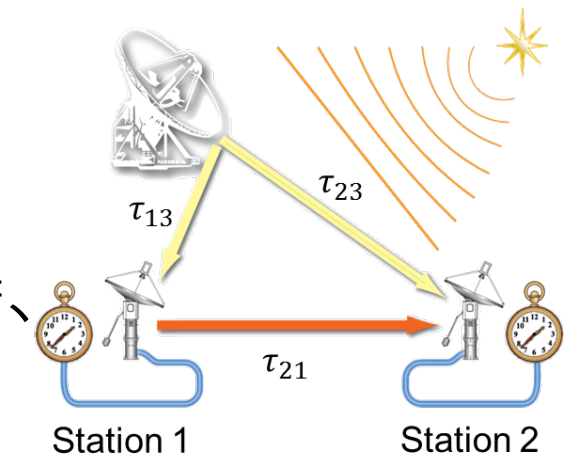
$$\tau_{21}(t_1) = \tau_{23}(t_1) - \tau_{13}(t_1) + \tau_{13}(t_1)\tau_{21}(t_1)$$

● 利点:

- 速い駆動速度、少ない変形量。
- 大型アンテナの影響はほぼ完全に消える。
- 低コスト。

● 課題:

- 長基線では電波源構造の影響が含まれる。



⇒近藤さんの発表、
岳藤さんポスター

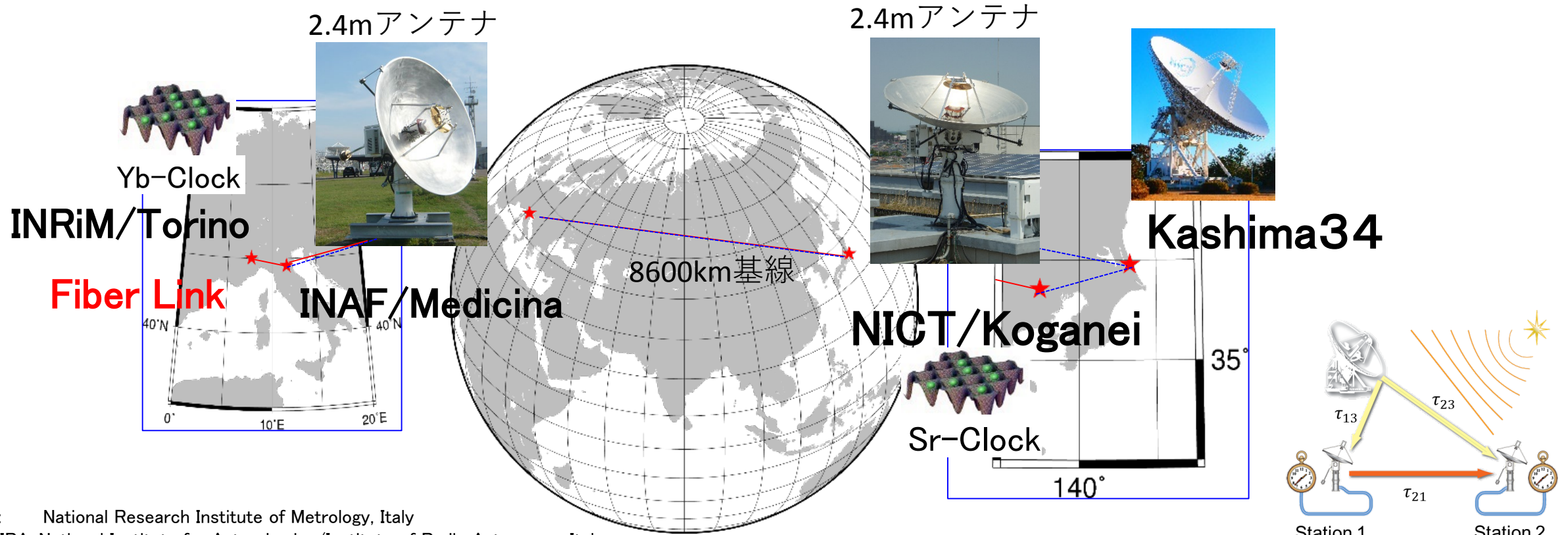
INAF-INAF-NICT のVLBI実験

2018年8月 小型広帯域アンテナをイタリア(Medicina)に設置

2018年 10月: 4-5, 14-15, 24-25日、11月: 4-5, 15-16, 25-26日、12月: 4-5, 14-15, 25-26日、

2019年 1月: 15-16, 25-26日、2月: 4-5日、14-15日。

計13回

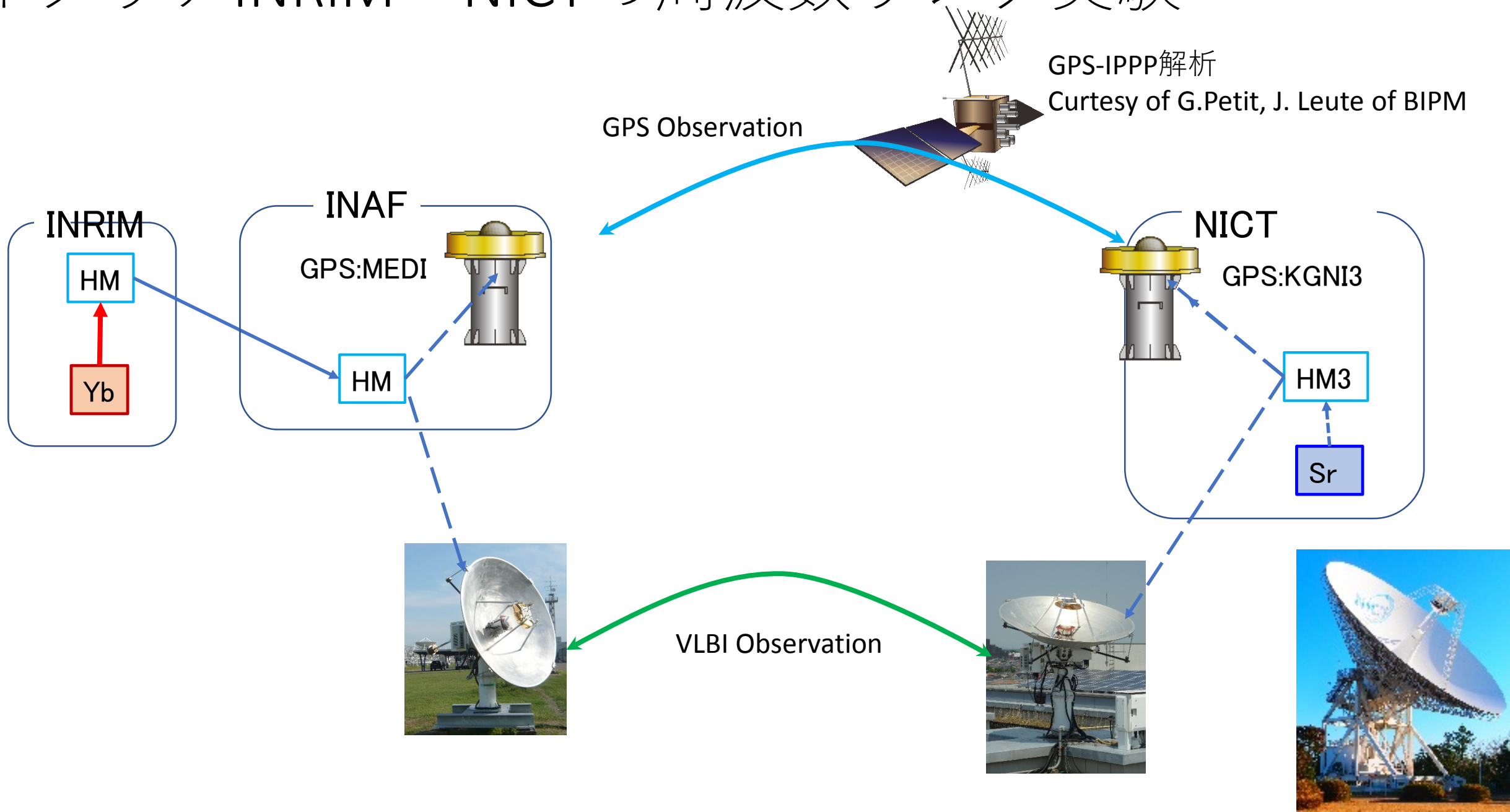


INRiM: National Research Institute of Metrology, Italy

INAF/IRA: National Institute for Astrophysics/Institute of Radio Astronomy, Italy

NICT: National Institute of Information and Communications Technology, Japan

イタリア INRiM - NICT の周波数リンク実験

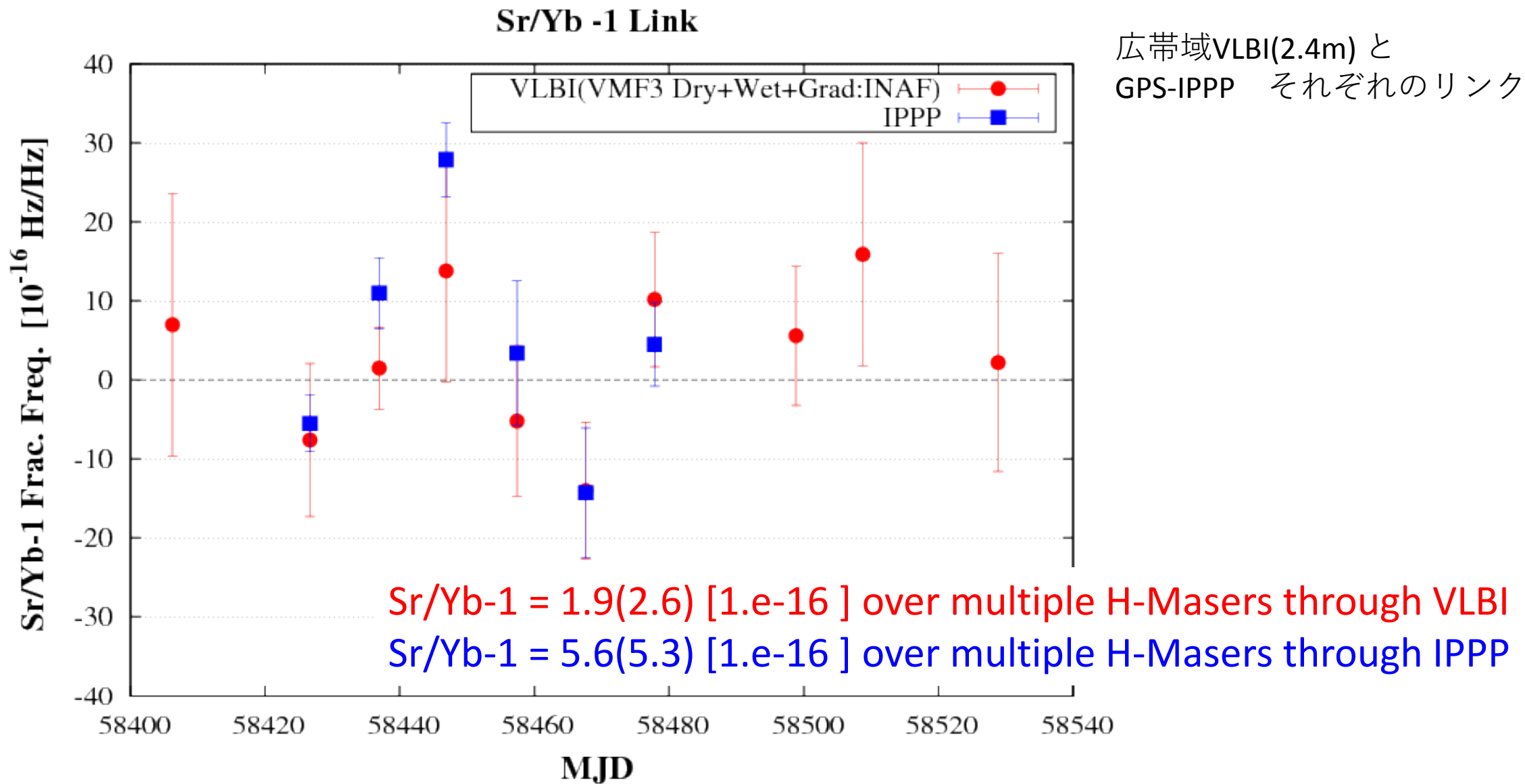


Sr/Yb – 1 の INRiM-NICT の周波数リンク結果

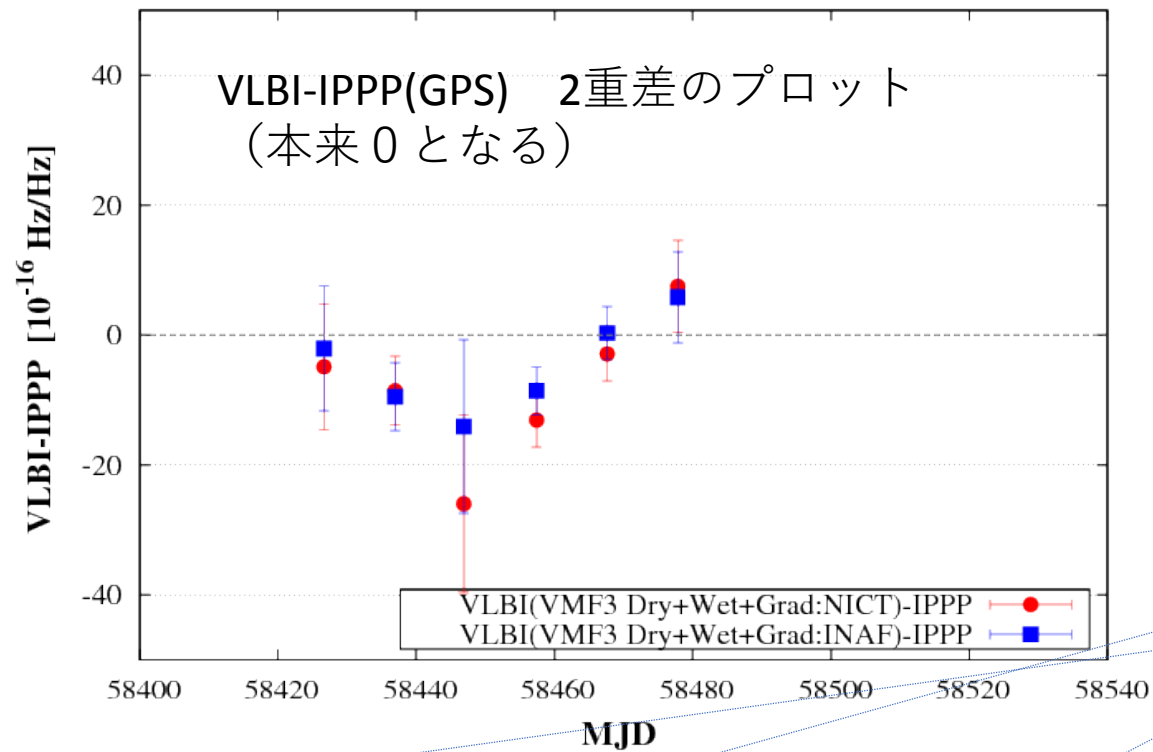
広帯域VLBI(2.4m) と
GPS-IPPP それぞれのリンク

		Using VLBI	uncertainty	using IPPP	uncertaint y
Year/Doy	MJD	[1.e-16]	[1.e-16]	[1.e-16]	[1.e-16]
2018/287	58405.64861	7.0	16.6		
2018/308	58426.02708	-7.6	9.7	-5.5	3.6
2018/318	58436.33264	1.5	5.2	11.0	4.5
2018/327	58445.99931	13.8	14.0	27.9	4.7
2018/338	58456.79097	-5.2	9.5	3.4	9.2
2018/349	58467.02014	-14.0	8.7	-14.3	8.2
2018/359	58477.24931	10.2	8.5	4.5	5.3
2019/015	58498.24931	5.6	8.8		
2019/025	58508.13194	15.9	14.1		
2019/045	58528.12431	2.2	13.8		
	Weighted average	1.86	2.7	5.55	5.8

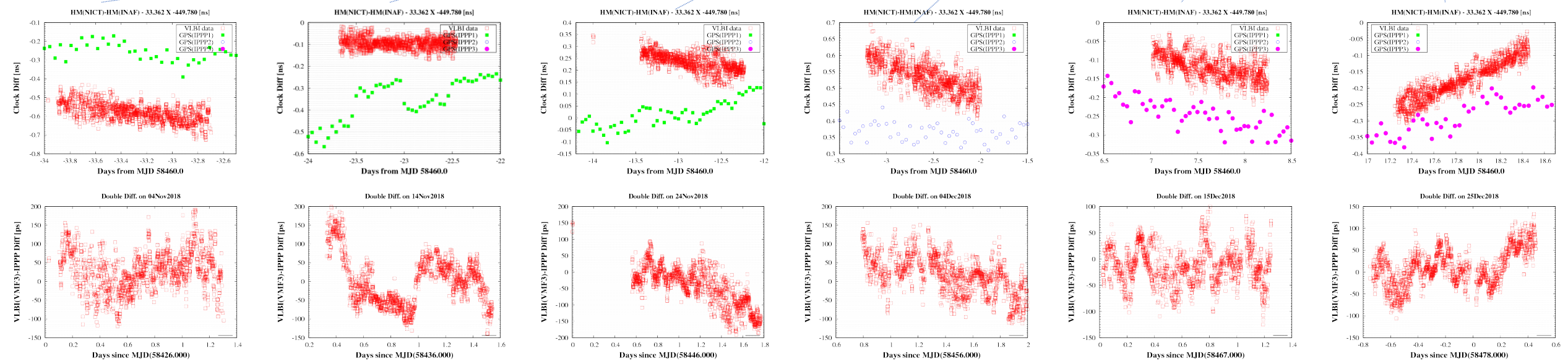
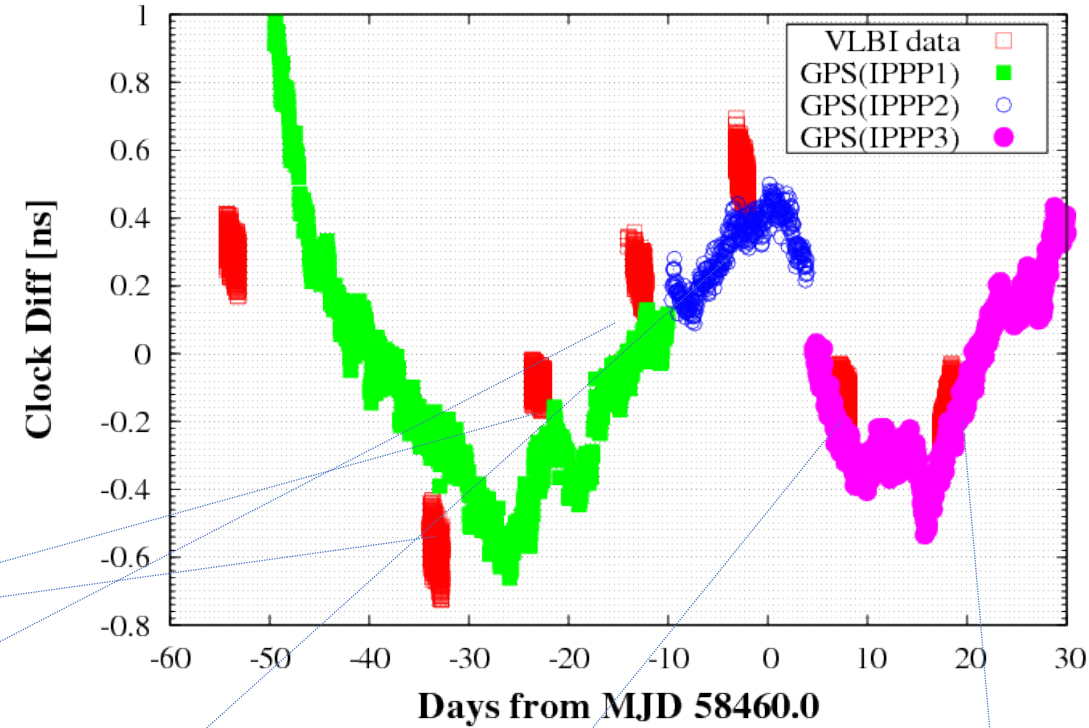
Sr/Yb - 1 の INRiM-NICT の周波数リンク結果



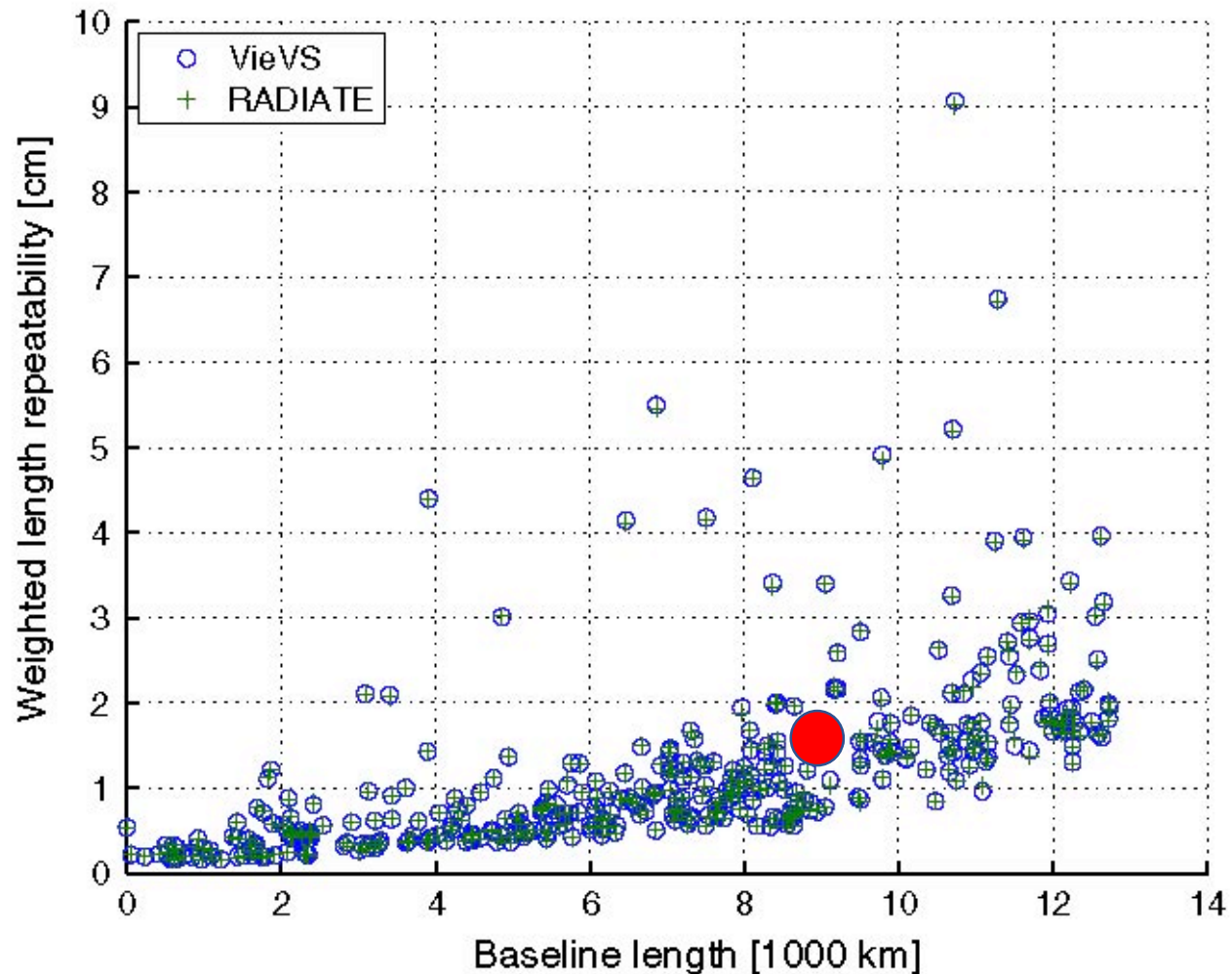
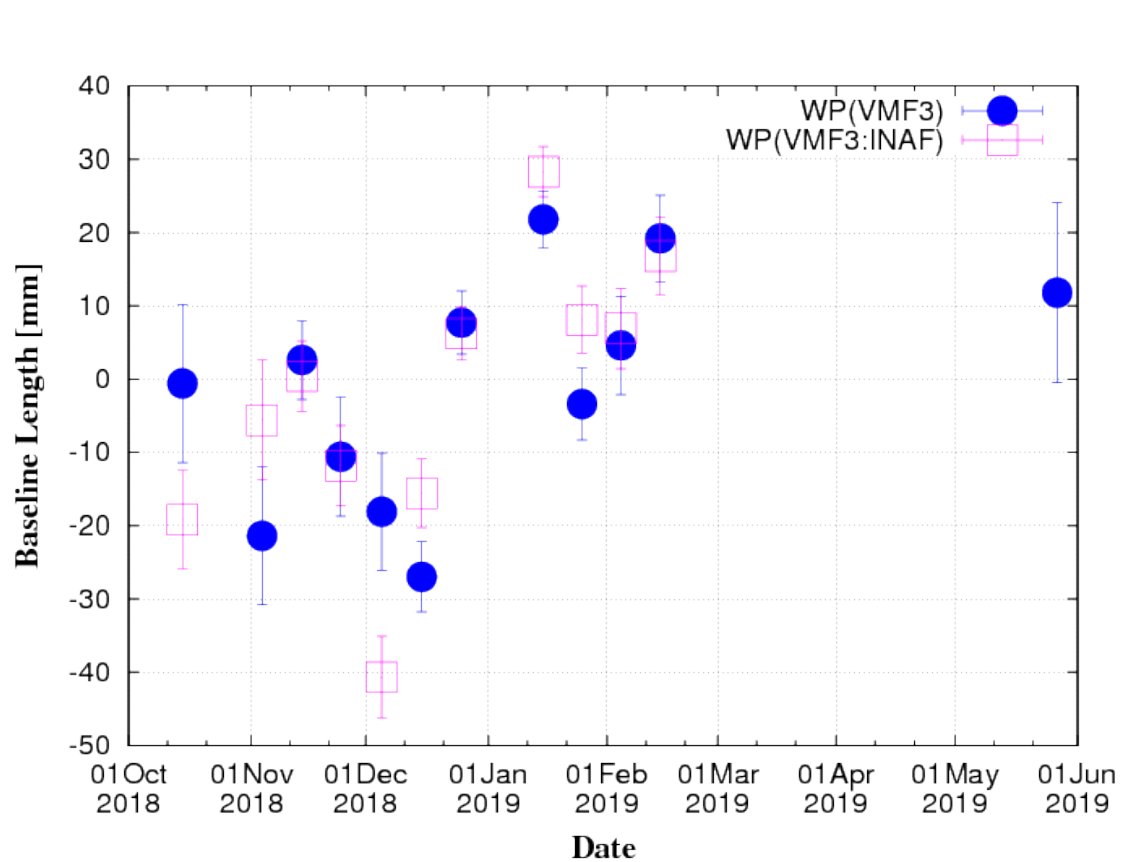
VLBI-IPPP Double Diff.



HM(NICT)-HM(INAF) - 33.362 X -449.780 [ns]



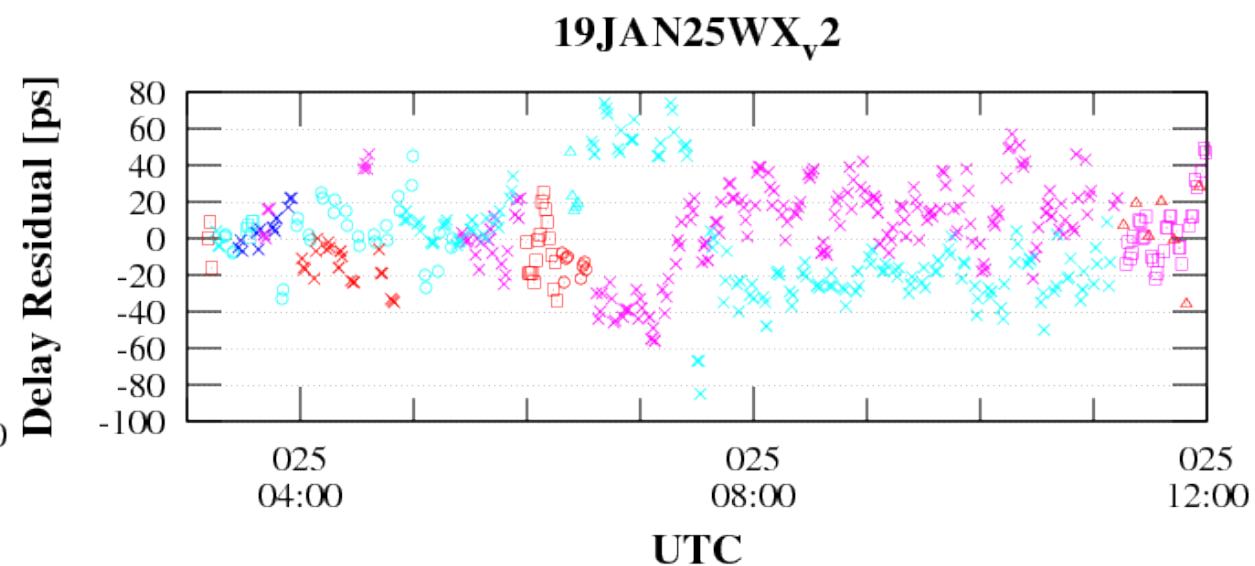
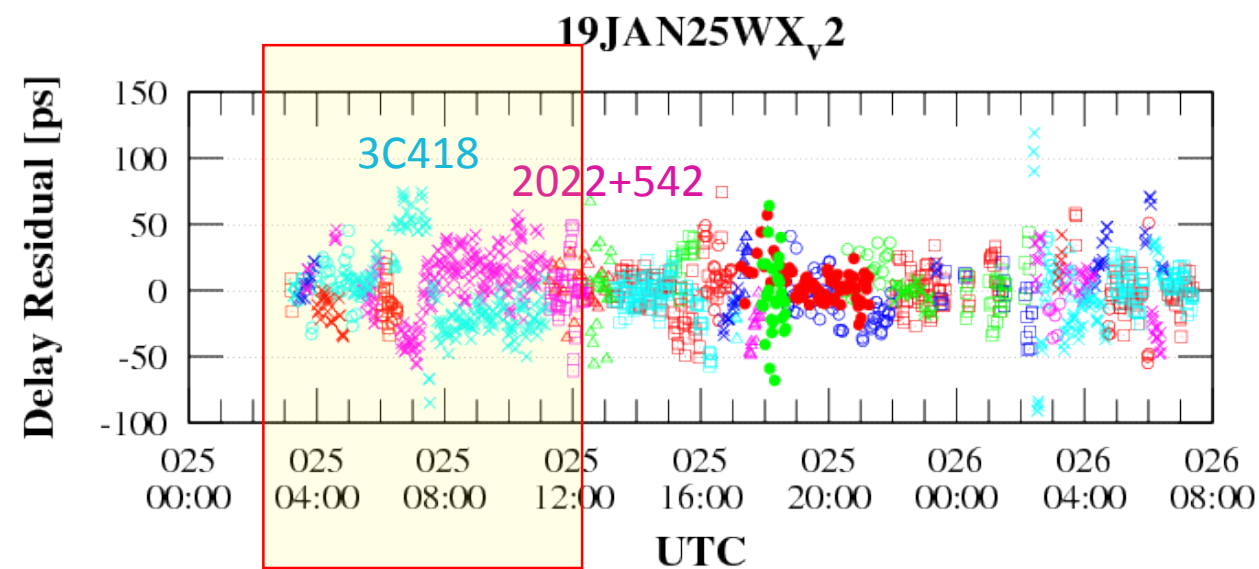
測地観測性能: 2.4m-2.4m 8,784.56km
基線長の再現性 : WRMS: 1.4-1.8cm



誤差の要因のひとつ：遅延量のO-C残差

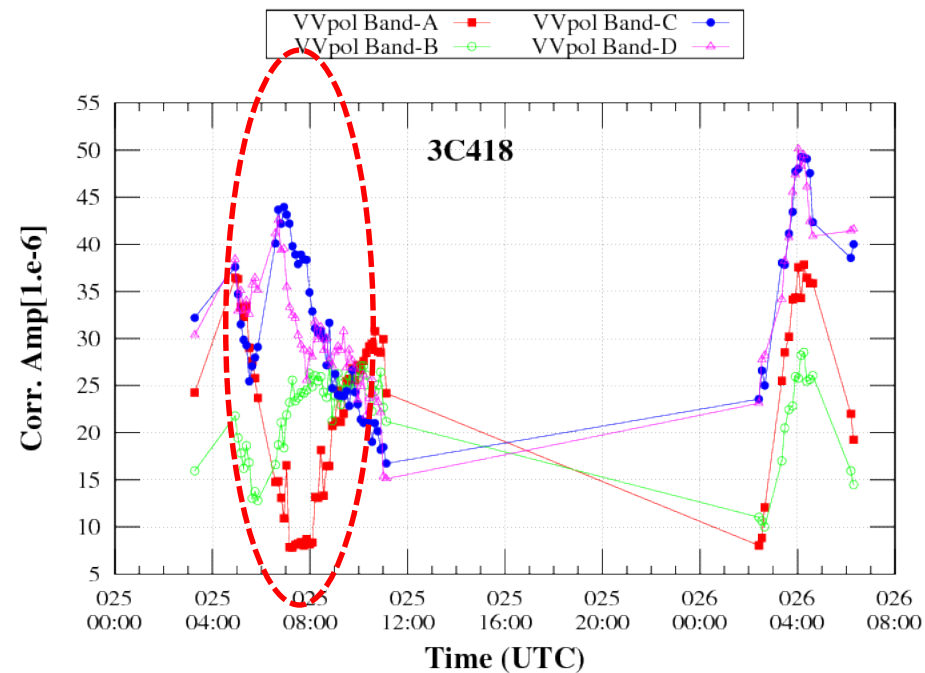
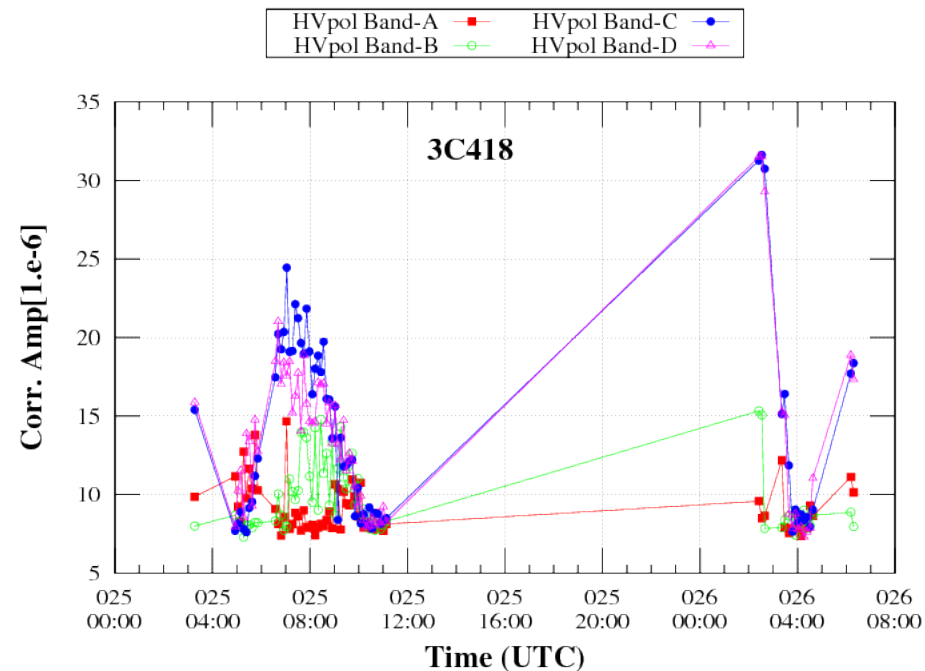
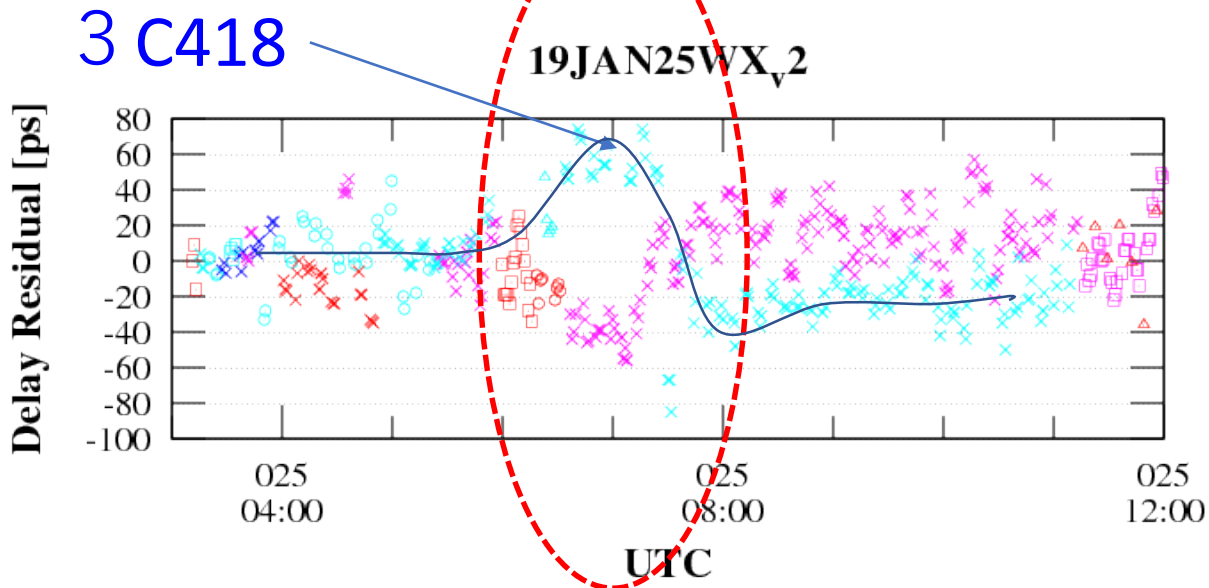
0059+581	□	0814+425	▲	1803+784	×
0110+495	▣	1039+811	▲	1928+738	×
0133+476	▣	1044+719	○	2022+542	×
0202+319	▣	1055+018	○	3C418	×
0212+735	▣	1144+402	○	OJ287	●
0234+285	▴	1546+027	○	OK290	●
0552+398	▴	1611+343	○		
0738+313	▴	1749+096	×		

0059+581	□	0814+425	▲	1803+784	×
0110+495	▣	1039+811	▲	1928+738	×
0133+476	▣	1044+719	○	2022+542	×
0202+319	▣	1055+018	○	3C418	×
0212+735	▣	1144+402	○	OJ287	●
0234+285	▴	1546+027	○	OK290	●
0552+398	▴	1611+343	○		
0738+313	▴	1749+096	×		



変な遅延変化をしているところは
4つのバンド(6.0,8.5,10.4,13.3GHz)のうち
6GHzでのみフリッジが消えている。

0059+581	□	0814+425	△	1803+784	×
0110+495	□	1039+811	△	1928+738	×
0133+476	□	1044+719	○	2022+542	×
0202+319	□	1055+018	○	3C418	×
0212+735	□	1144+402	○	OJ287	●
0234+285	△	1546+027	○	OK290	●
0552+398	△	1611+343	○		
0738+313	△	1749+096	×		



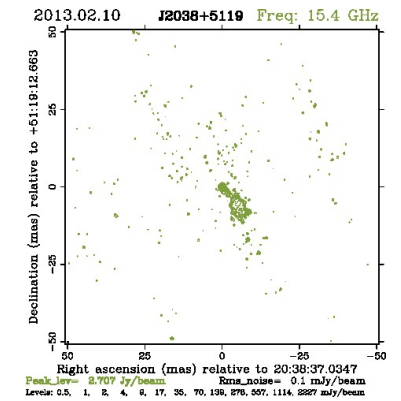
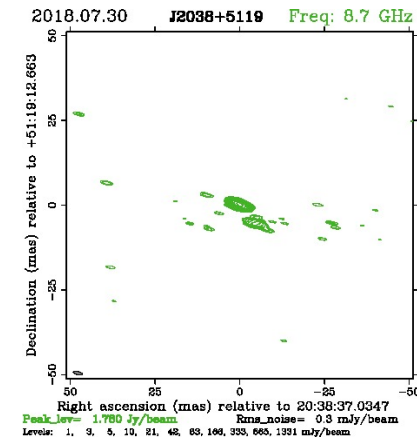
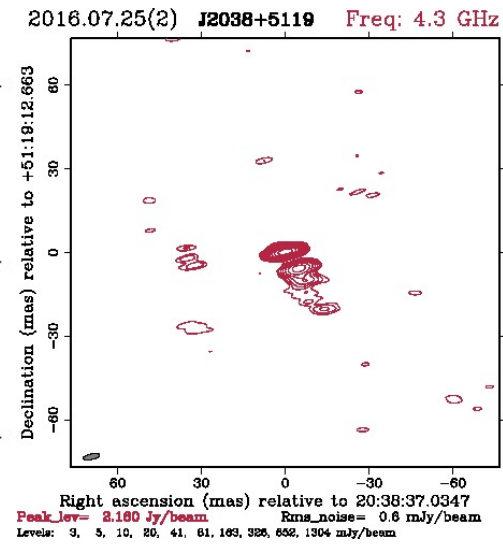
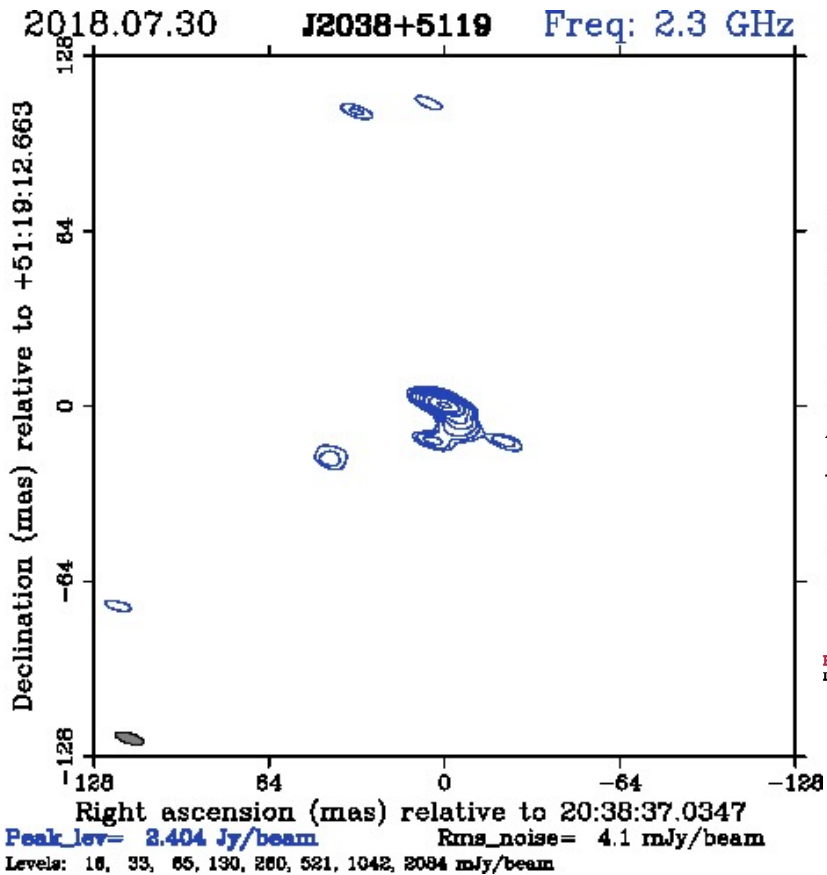
3C418の場合

2.3GHz

4.3GHz

8.7GHz

15.4GHz



まとめ：現在までの達成と課題

- 2.4mアンテナをMedicinaに移設し、2018.10-2019.2: 13回の実験を実施
- Sr/Ybの周波数差をVLBI観測により $1.9(2.6) [1.e-16]$ で測定した
- 現在のところIPPP (GPS)の結果： $5.6(5.3)$ よりもよい。
- 基線長8700kmを1.4-1.8cmの基線長再現性で測定可能。既存のVLBI観測と比較しても遜色ない。

- 天体構造の影響がみえる。→観測に使用する天体の選択で対応
- これまで1.5日の観測であったが、5-7日程度の観測にして精度改善を試みている。

謝辞

- IPPPのデータは、G.Petit, J.Leute(BIPM)の解析結果を提供していただいた。
- イタリアINAFからの大容量のデータ伝送は高速研究ネットワークJGN, GEANT, INTERNE2, TransPACにより実現されている。
- 解析ソフトウェアのCALC/SOLVEやアンテナ制御ソフトウェアFS9ははNASA/GSFCが開発したソフトを使っている。
- NICTの情報システム室の難波邦孝氏、岡本慶大氏、高橋留美氏には、高速ネットワークの外部接続のためのFW準備などサポートを受けている。

平均化の数を増やしたときのWRMS
と、不確かさ(WRMS/sqrt(n))の変化

