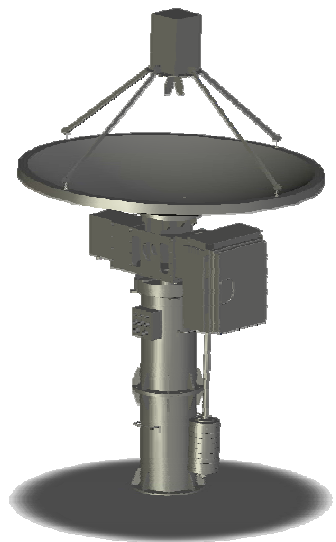


# 測地VLBI技術による 高精度時刻比較

瀧口 博士<sup>1</sup>, 小山 泰弘<sup>1</sup>, 市川 隆一<sup>1</sup>, 後藤 忠広<sup>2</sup>,  
石井 敦利<sup>1,3,4</sup>, Thomas Hobiger<sup>1</sup>, 細川 瑞彦<sup>2</sup>



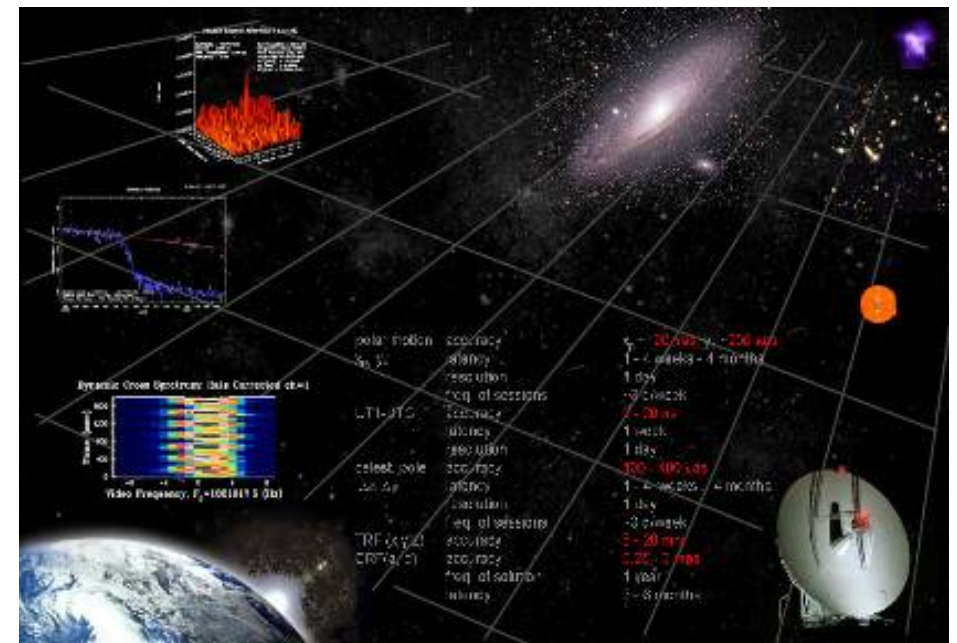
<sup>1</sup> 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター,

<sup>2</sup> 情報通信研究機構,

<sup>3</sup> 国土地理院, <sup>4</sup> (株)エイ・イー・エス

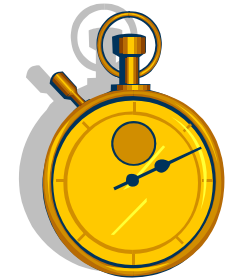
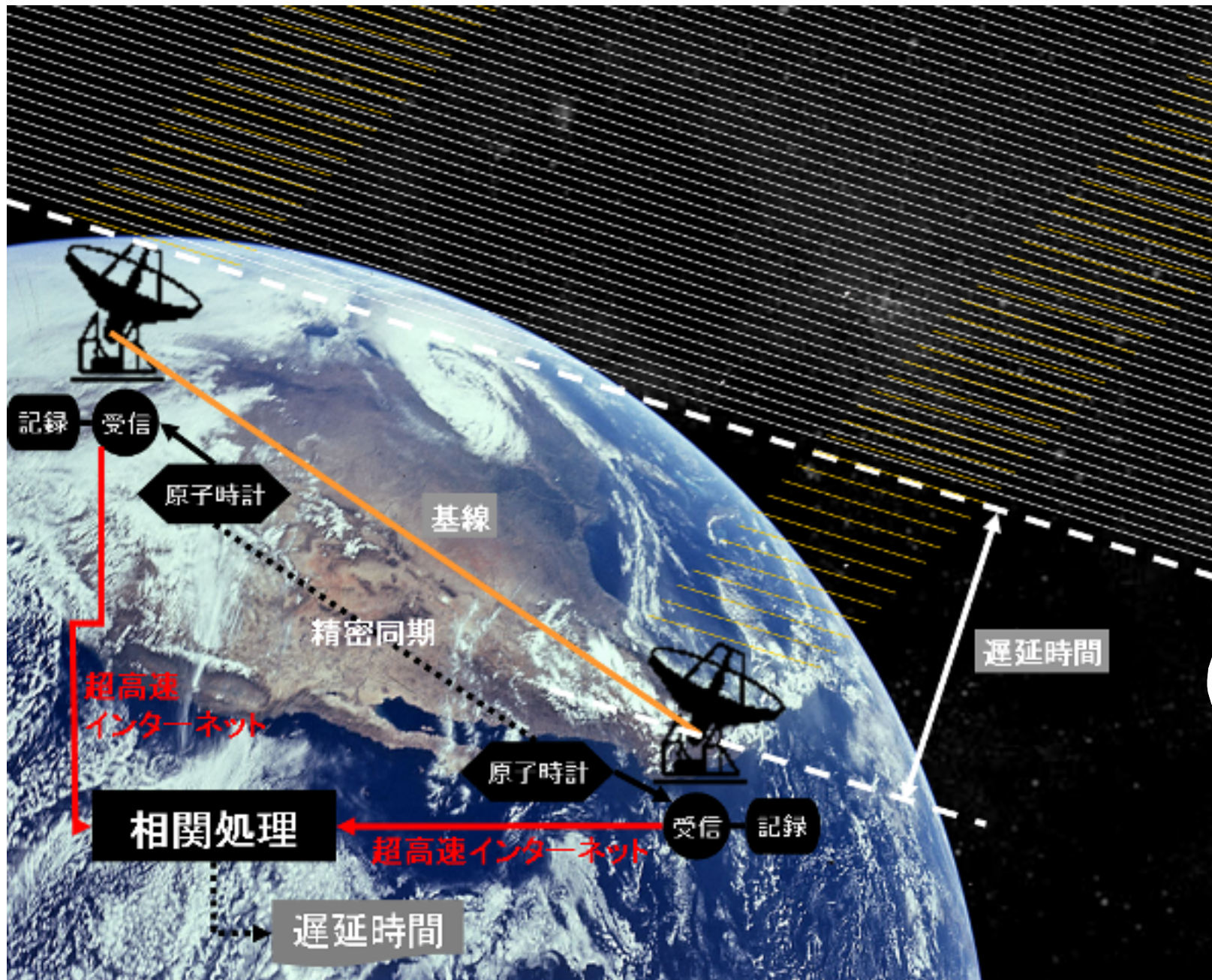
# 発表内容

- なぜVLBI時刻比較か？
  - VLBIとは？
- これまでの結果
  - 鹿島-小金井基線
    - 周波数比較
- IVS, IGSデータを用いた比較
  - Wettzell-Onsala基線
    - 周波数比較
- まとめ
- 今後の課題



# VLBIとは？

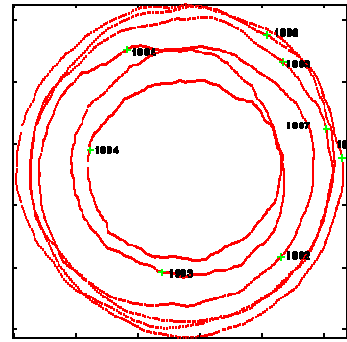
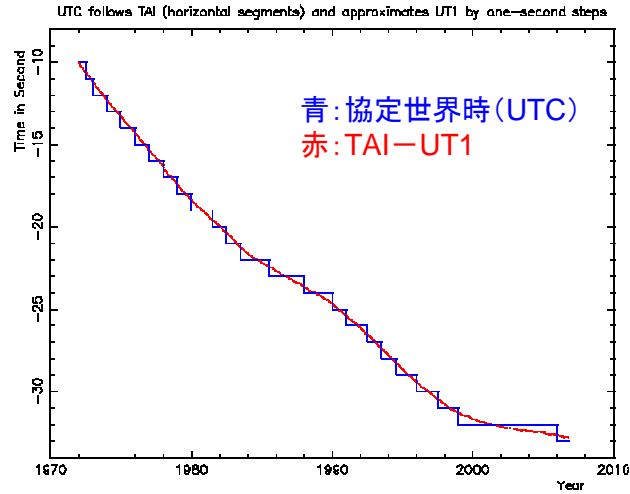
VLBI(超長基線電波干渉計 : Very Long Baseline Interferometry)



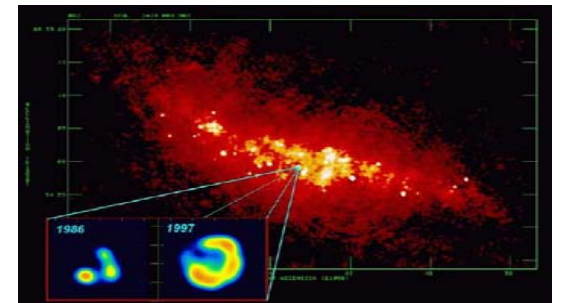
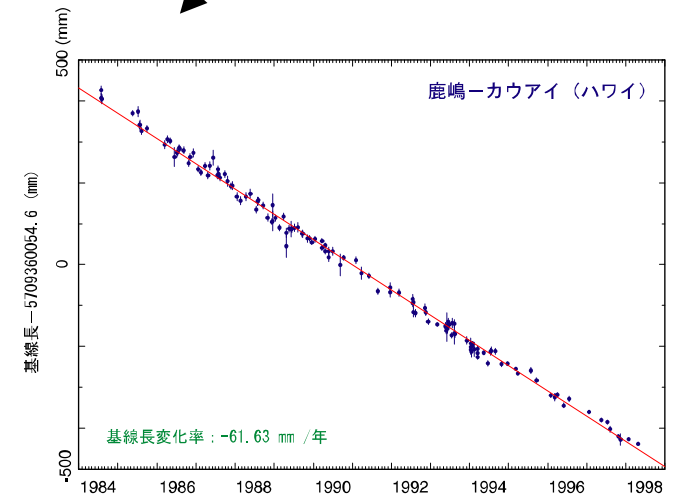
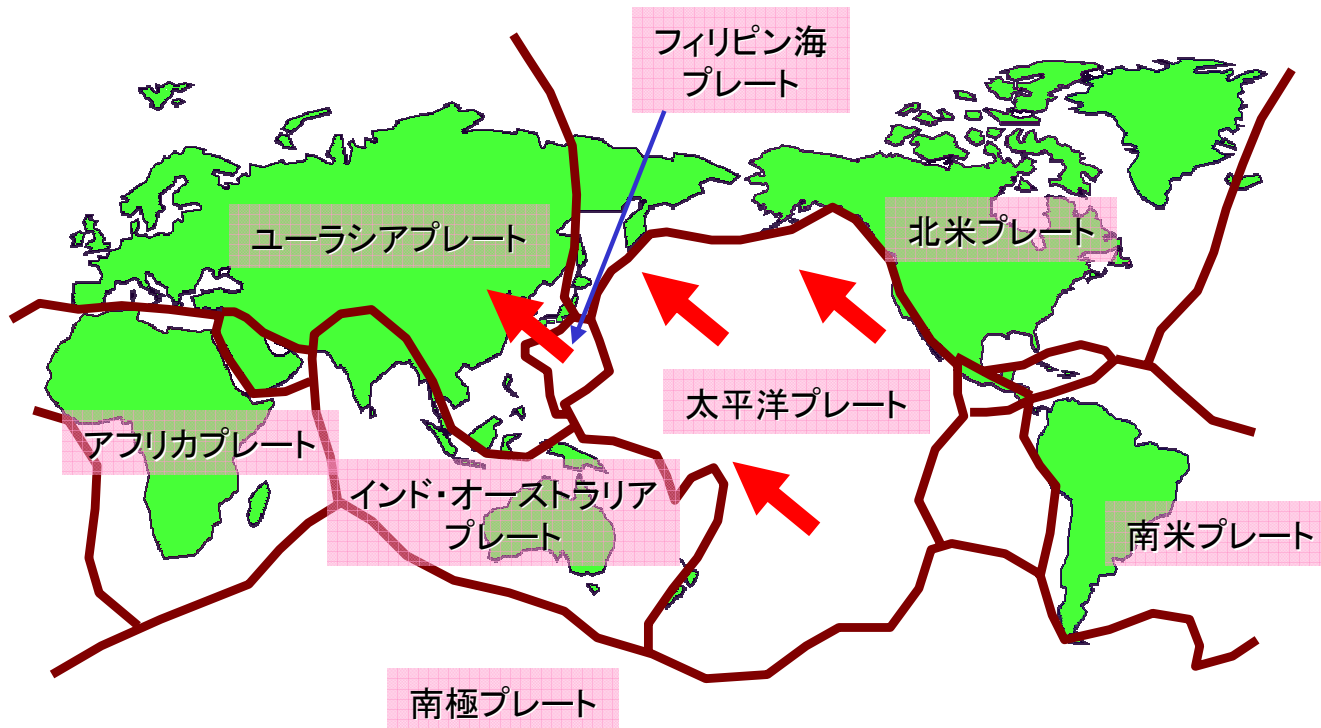
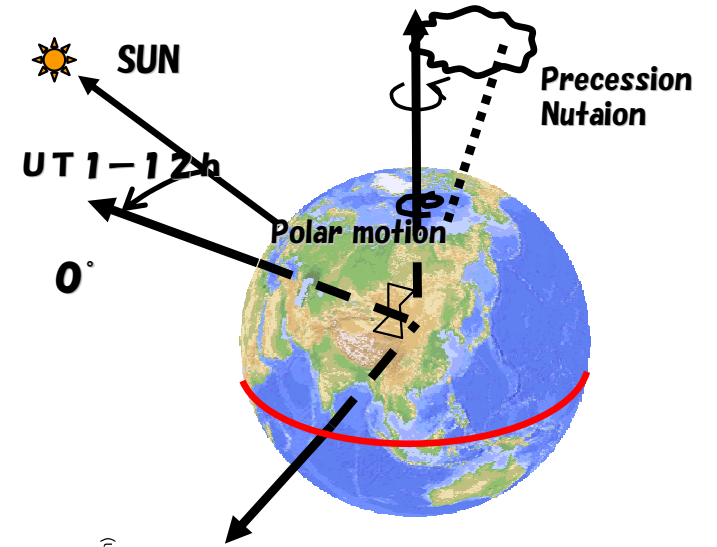
電波の到達  
時間遅れを  
計測

電波星からの  
電波を2局で  
受ける

# 国際原子時(TAI)に対する地球自転速度(UT1)



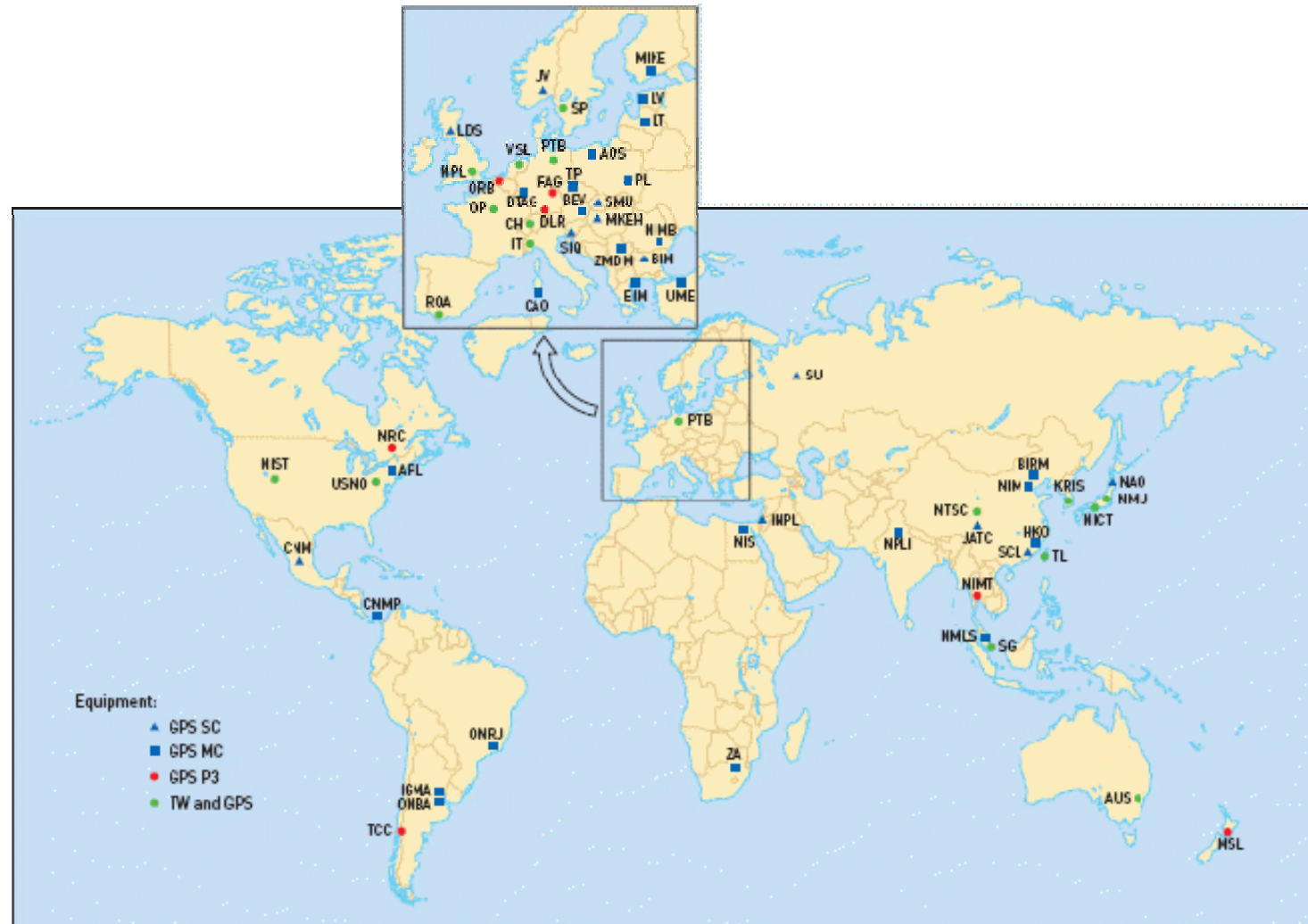
地表における北極の位置



# なぜVLBI時刻比較か？

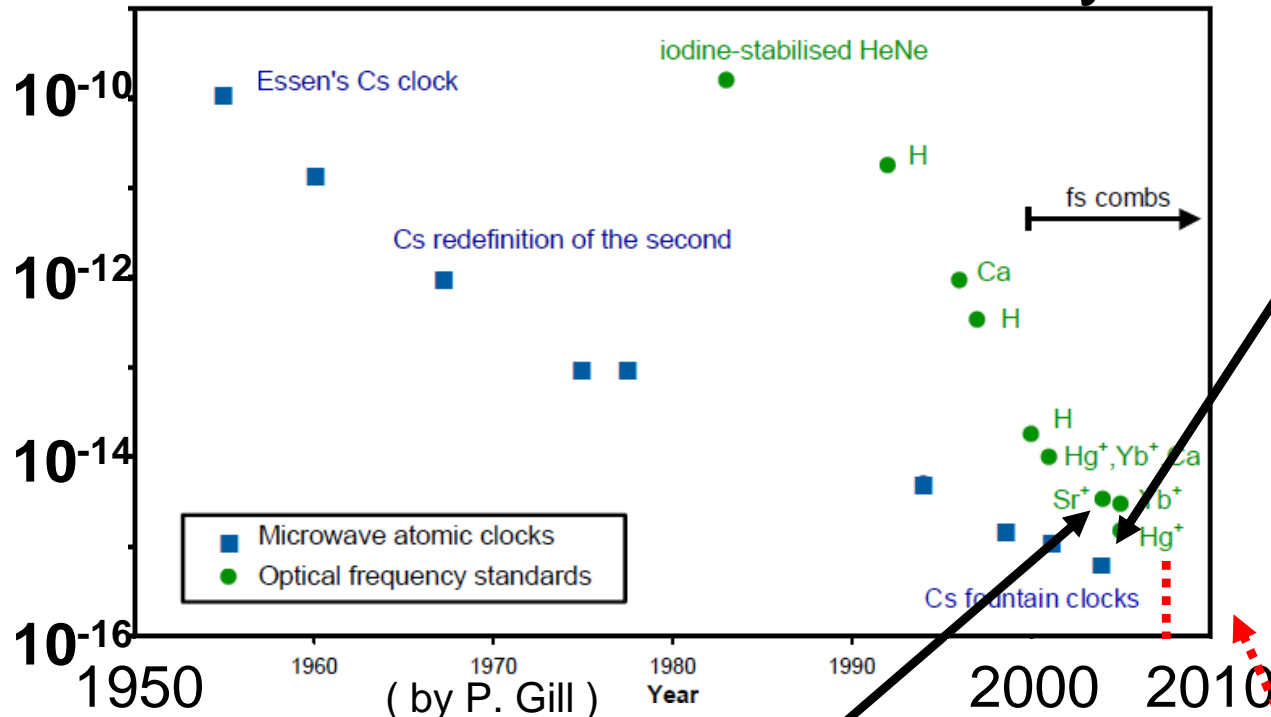
時刻比較用途：協定世界時UTCの維持・運用

200台以上の  
原子時計，  
周波数標準器の  
重み付き平均



# 周波数標準器の進歩

## Fractional Uncertainty



**NICT-CsF1**

..... *developing*

$2 \times 10^{-15}$

**NICT**

optical clocks

..... *developing*



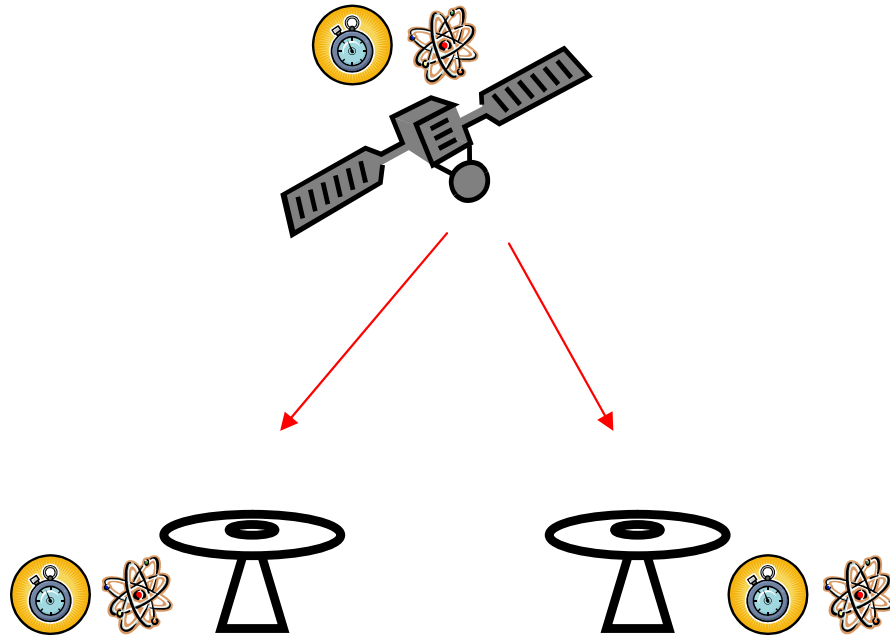
**NICT-O1**  $6 \times 10^{-15}$

$10^{-16} \sim 10^{-17}$

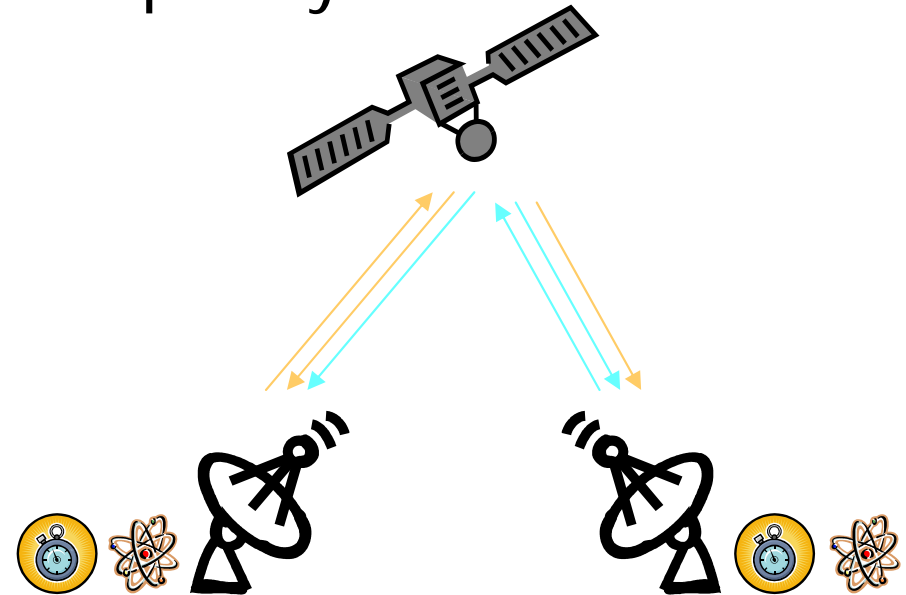


# 衛星時刻比較

- GPS Time Transfer



- Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer



Typical r.m.s performance (by E. Thomas)

Stability (1day)	Time	Frequency
GPS (Carrier-Phase)	0.1 ns	$2 \times 10^{-15}$
TWSTFT	0.1-0.2 ns	$2-4 \times 10^{-15}$

✓ 光周波数標準・光格子時計 実現を見越し  
⇒ 現在の時刻比較精度を改善する必要

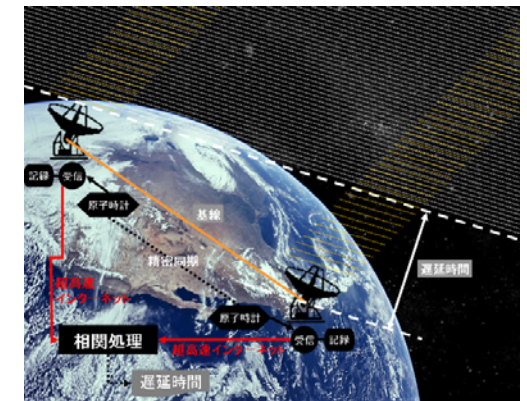
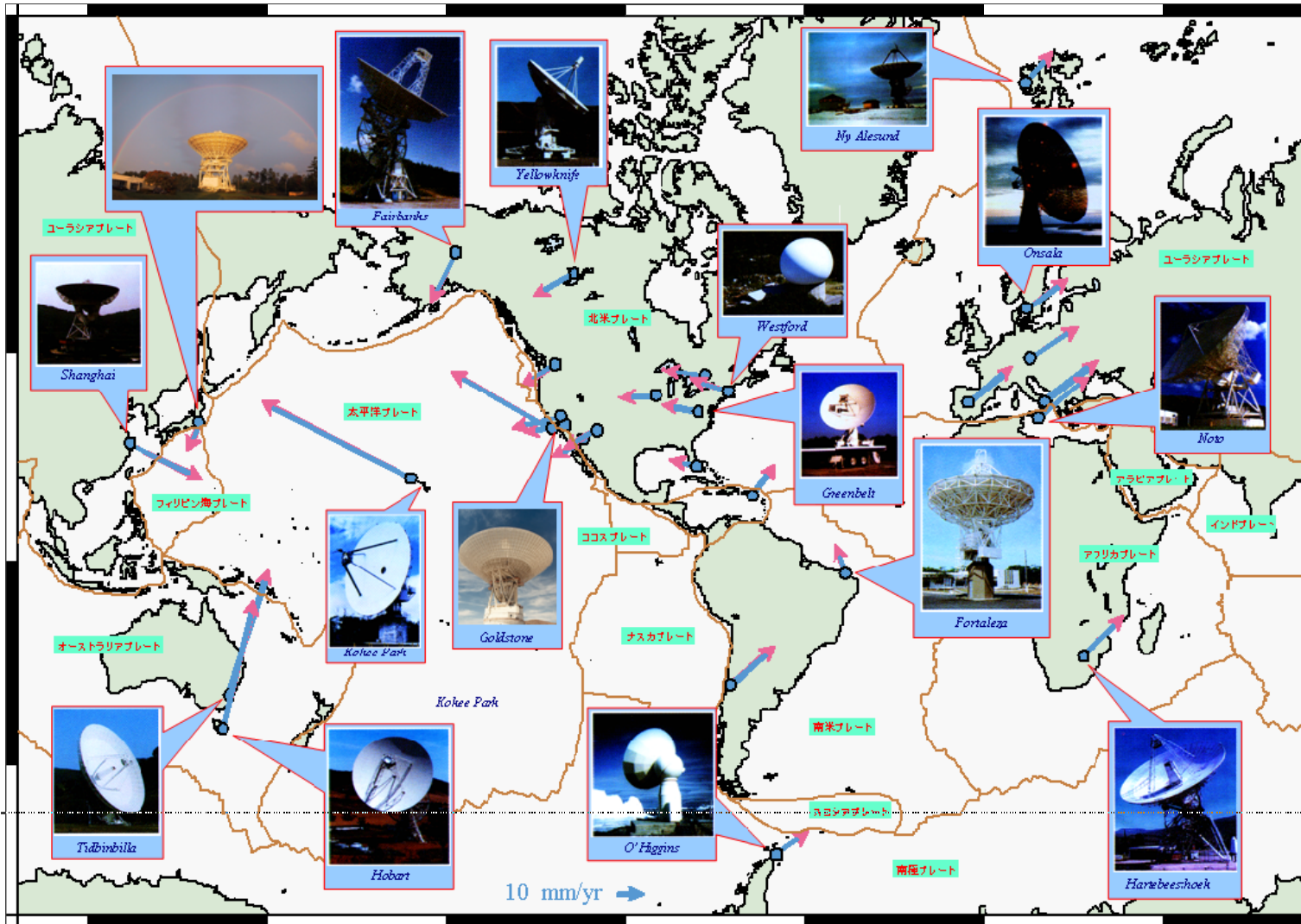
# 測地VLBI技術

- IVS 国際測地VLBI観測

IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)

- 観測局の時系オフセット: 約20ピコ秒

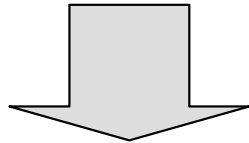
- ← 現在の時刻比較(UTC構築)よりも高精度





# VLBI時刻比較

- 測地VLBI観測による時刻比較
  - 国内外の研究機関との間で 高精度に時刻比較が可能
  - ⇒ UTCの高度化  
時間周波数標準の高確度化



## NICTの取り組み

- 小型VLBIシステムの開発
  - MARBLE SYSTEM
  - 国際時刻比較も想定
- 現在のシステムによる観測で検証
  - 2007年 鹿島—小金井基線



# Development of a compact VLBI system

## MARBLE SYSTEM

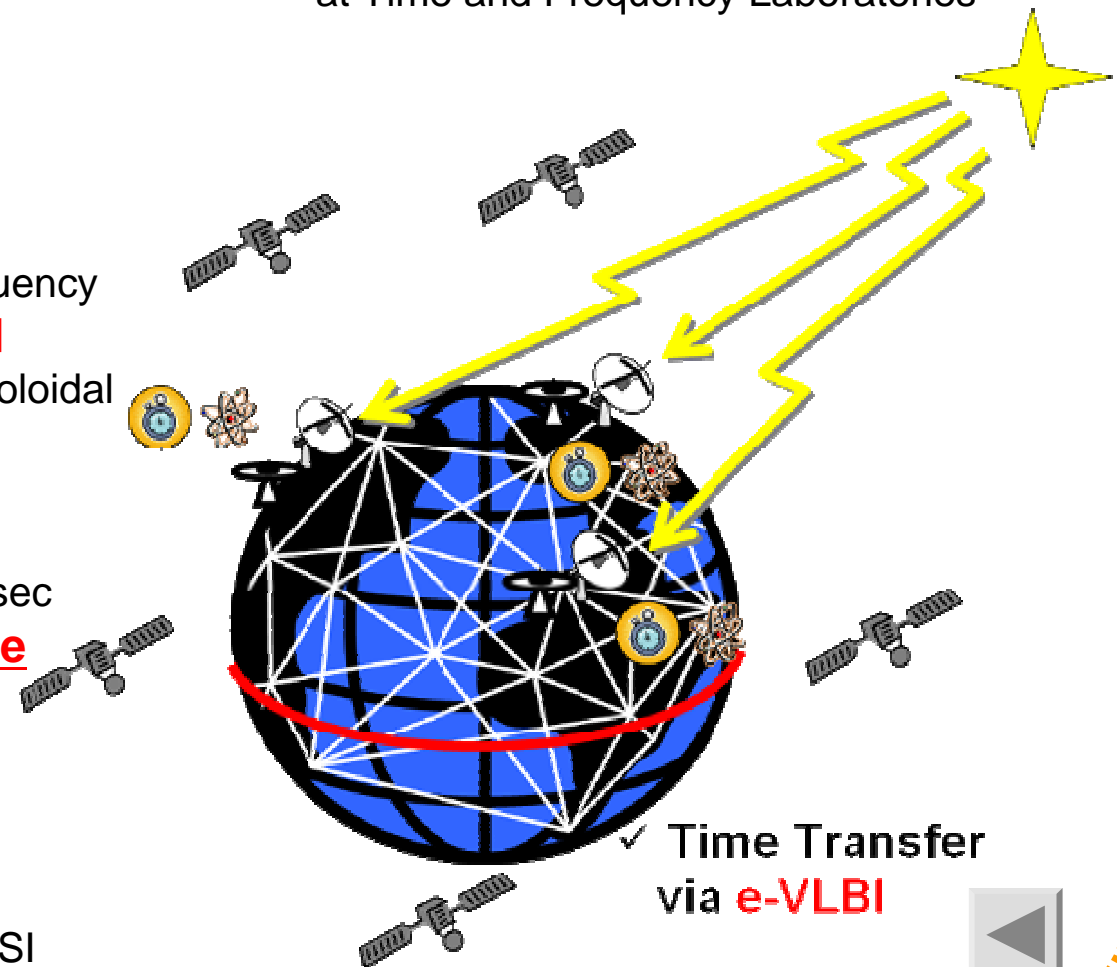
(Multiple Antenna  
Radio-interferometry of  
Baseline Length Evaluation)

- Diameter **1.6m**
- Receiving Frequency
  - **S/X-band**
- Front-fed paraboloidal reflector
- Az-El mounting
  - Max speed  
AzEl **5 deg/sec**
- **Transportable**  
by human

Collaborating with GSI

## Future Image

- ✓ collocate small VLBI antennas for  
Time and Frequency Transfer  
at Time and Frequency Laboratories



✓ Time Transfer  
via **e-VLBI**

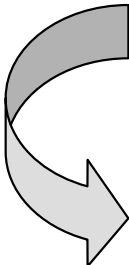


# これまでの結果

## • 現在のシステムによる観測で検証

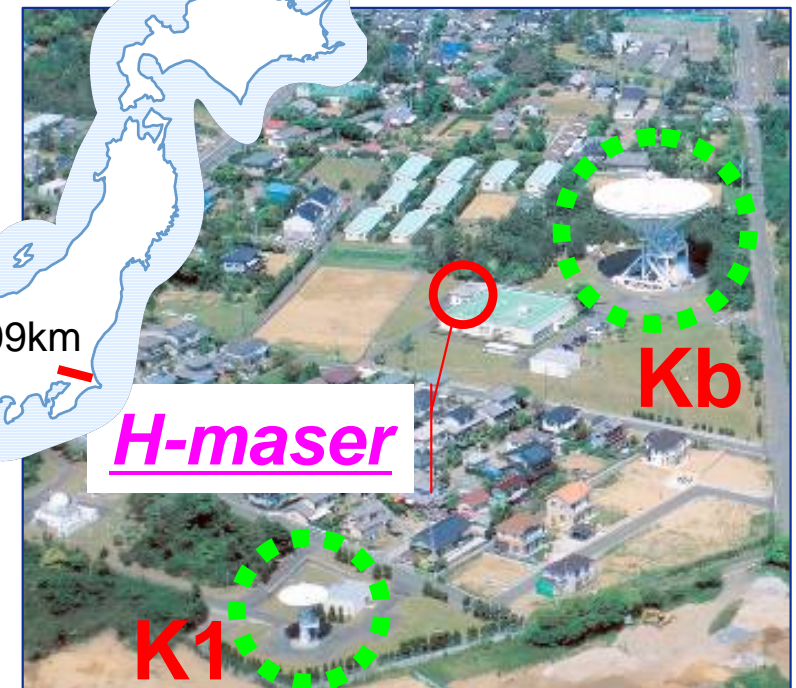
### – 2007年 鹿島—小金井基線

- GPS, VLBI 並行観測
- VLBIクロックオフセット推定精度: 30ps
- 時系列比較: 調和的
  - $\pm 500\text{ps}$ の範囲で一致
- 安定度評価
  - VLBI時刻比較: **安定**
  - 同期間, 長時間平均で

- 
- 小山・他(2007)@日本地球惑星科学連合大会
  - 瀧口・他(2007)@日本測地学会
  - Takiguchi et al., (2008)@EFTF2008
  - 瀧口・他(2008)@日本地球惑星科学連合大会

**IVS, IGSデータで比較**

Koganei



Kashima

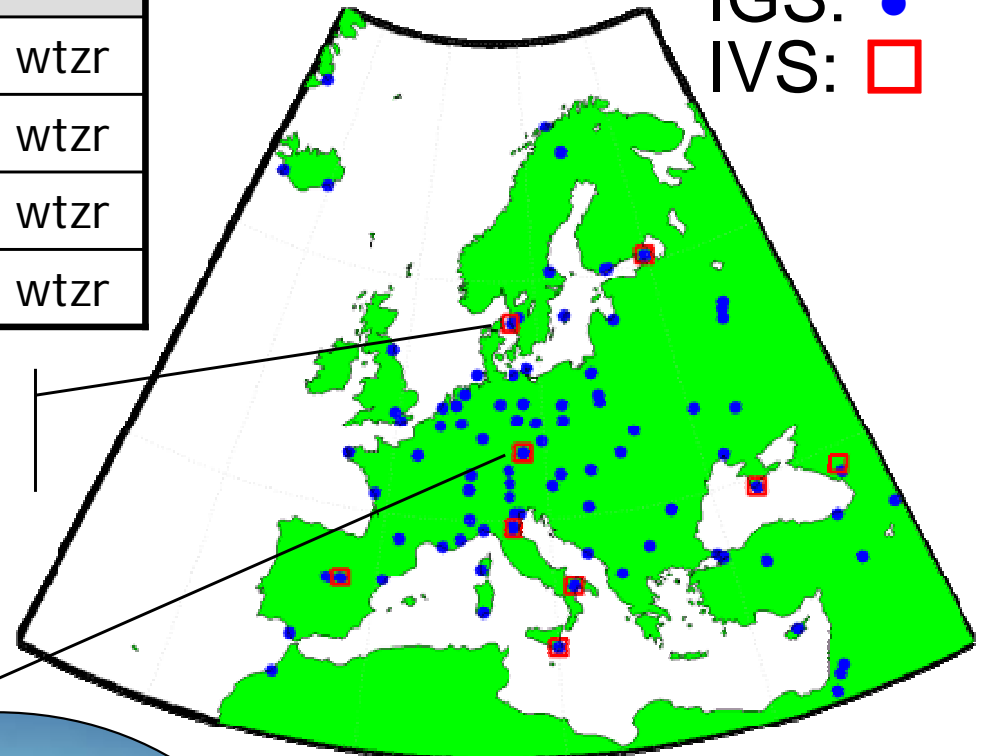
# 使用データ

DOY (2007)	IVS		IGS Station
	Session	Station	
092	R1270	HhKkNy <b>On</b> ShTsWf <b>Wz</b>	onsa, wtzr
100	R1271	KkNy <b>On</b> TcTsWf <b>Wz</b> Zc	onsa, wtzr
113	R1273	KkMcNy <b>On</b> TcTsWf <b>Wz</b>	onsa, wtzr
122	R1274	FtHhNy <b>On</b> Tc <b>Wz</b> Zc	onsa, wtzr



Sweden  
Onsala Space Observatory

**Onsala**



**Wettzell**

Germany  
Fundamental Station Wettzell



- 南北 920km
- VLBI, GPS:  
同じH-maserをシェア

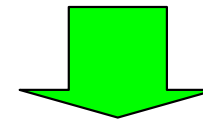
# Data Analysis

- VLBI

- calc/solve
- multi baseline
- S/X combination
- reference to WETTZELL
  - station coordinates
  - atmospheric delay / 60min
  - clock offset / 60min

- GPS

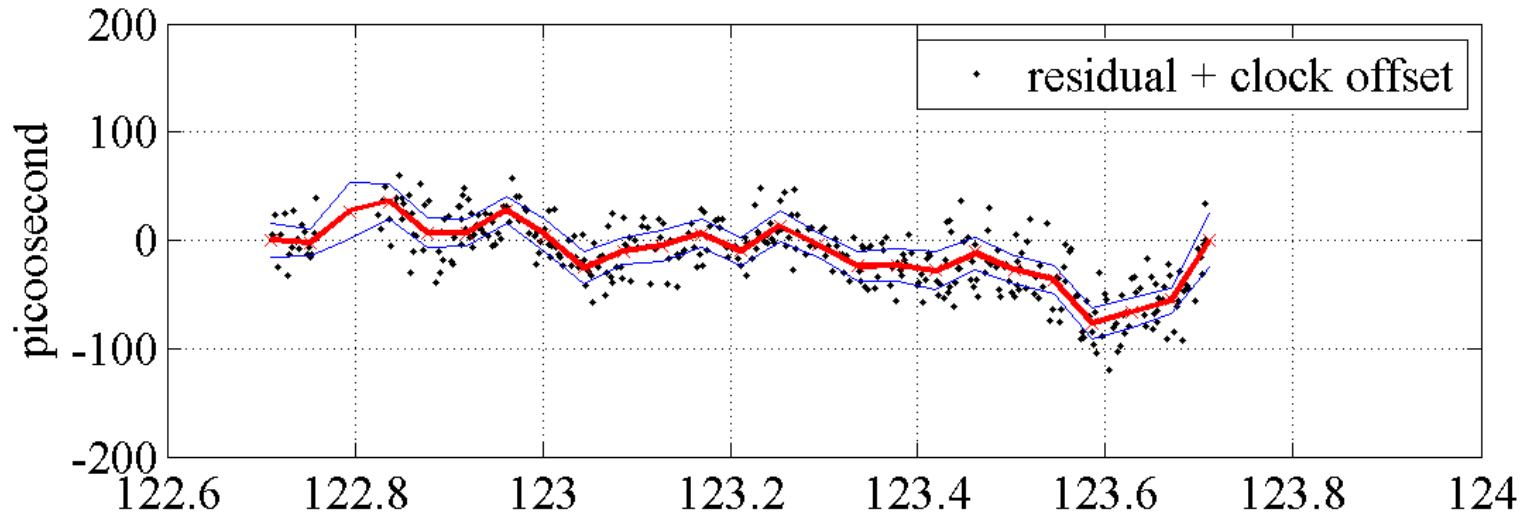
- GIPSY-OASIS II
- Precise Point Positioning
  - station coordinates
  - atmospheric delay / 5min
  - clock offset / 5min



- Time Defference  
clock offset A - clock offset B

# VLBI : clock offset

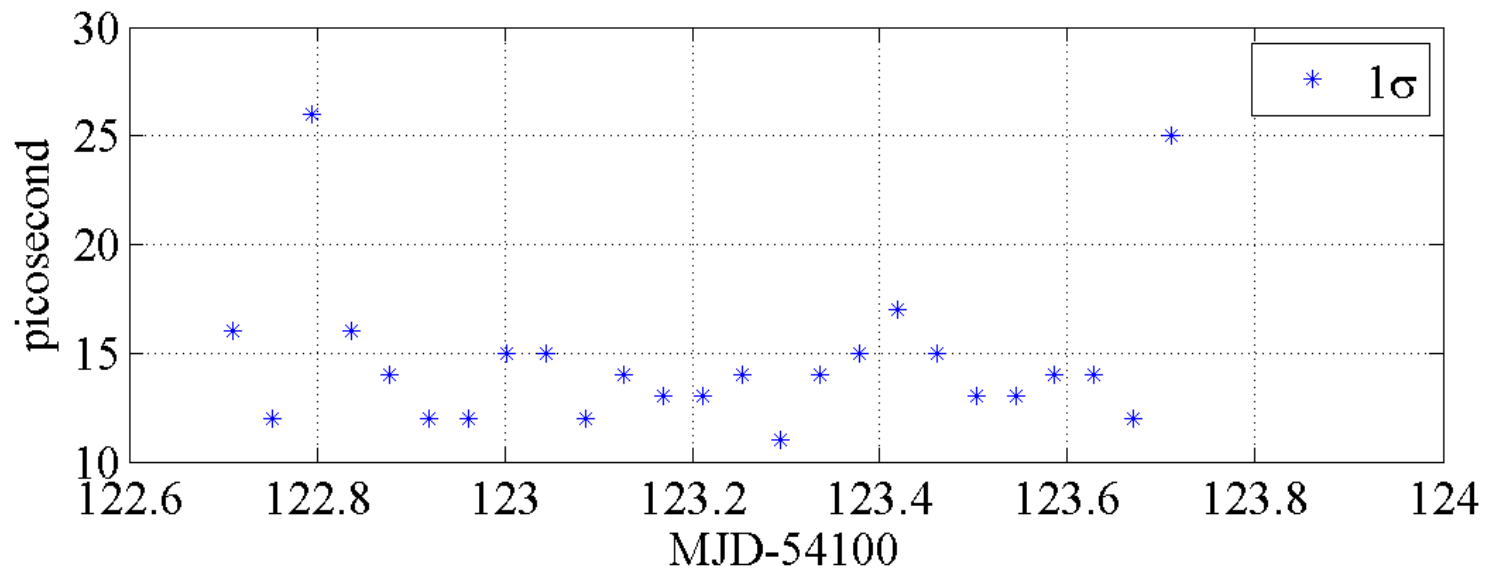
DOY : 122 R1274



R1274

14.7 ps

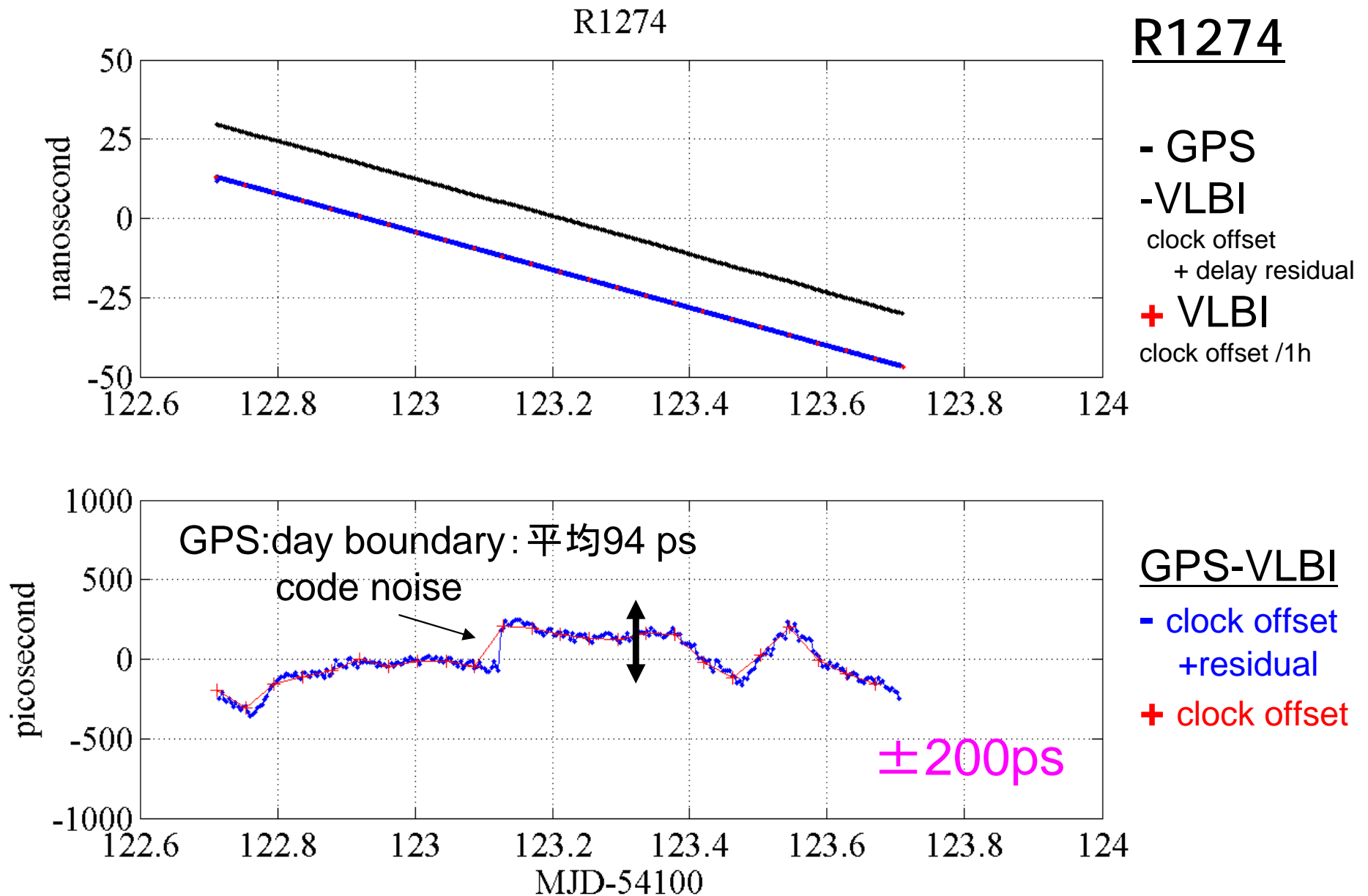
一次, 2次成分を取り除いたもの



**16.1 ps**

@ 1hour

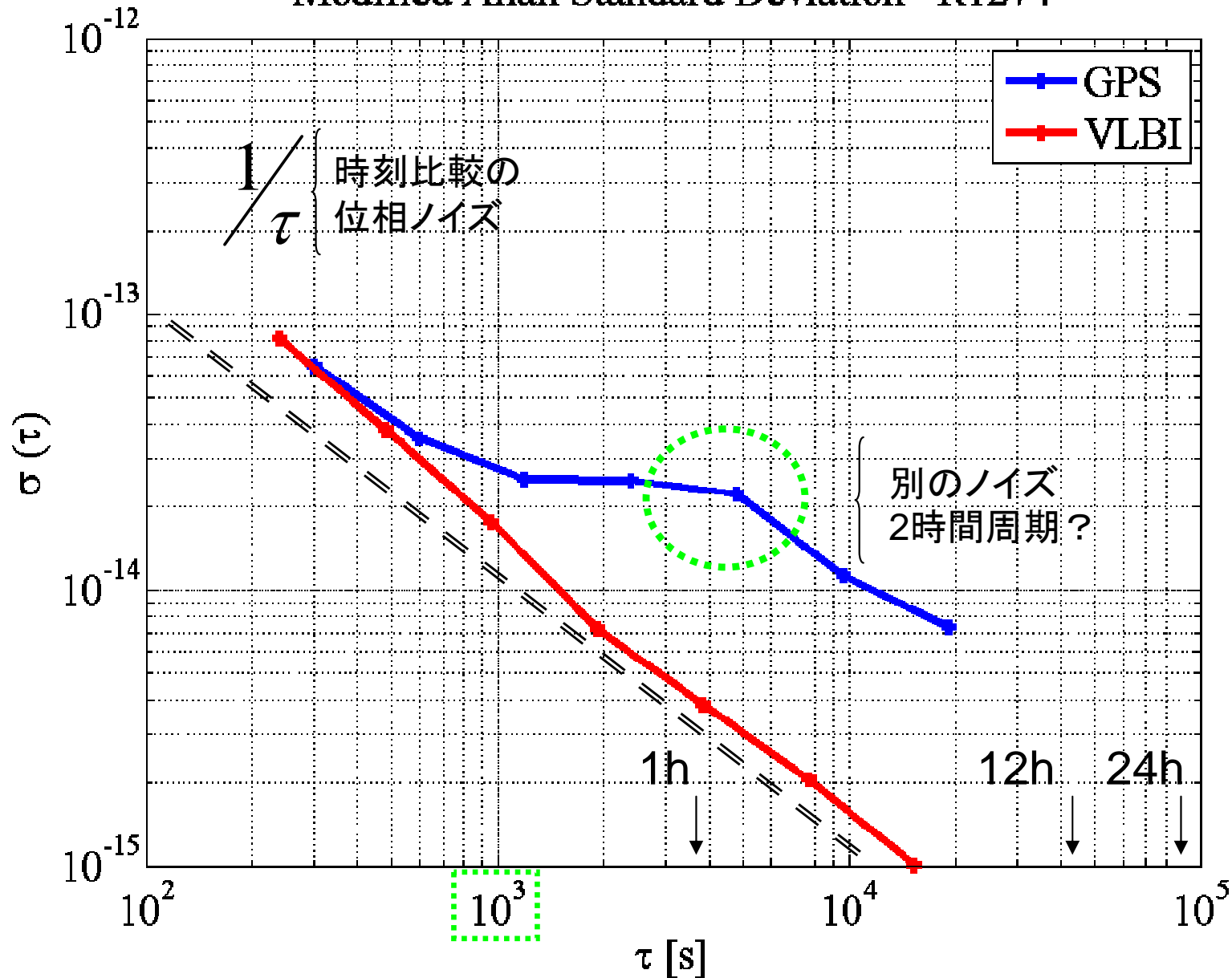
# Difference of Time Series (ONSA-WTZR)



# Frequency Stability

Modified Allan Standard Deviation R1274

R1274





# Frequency Stability

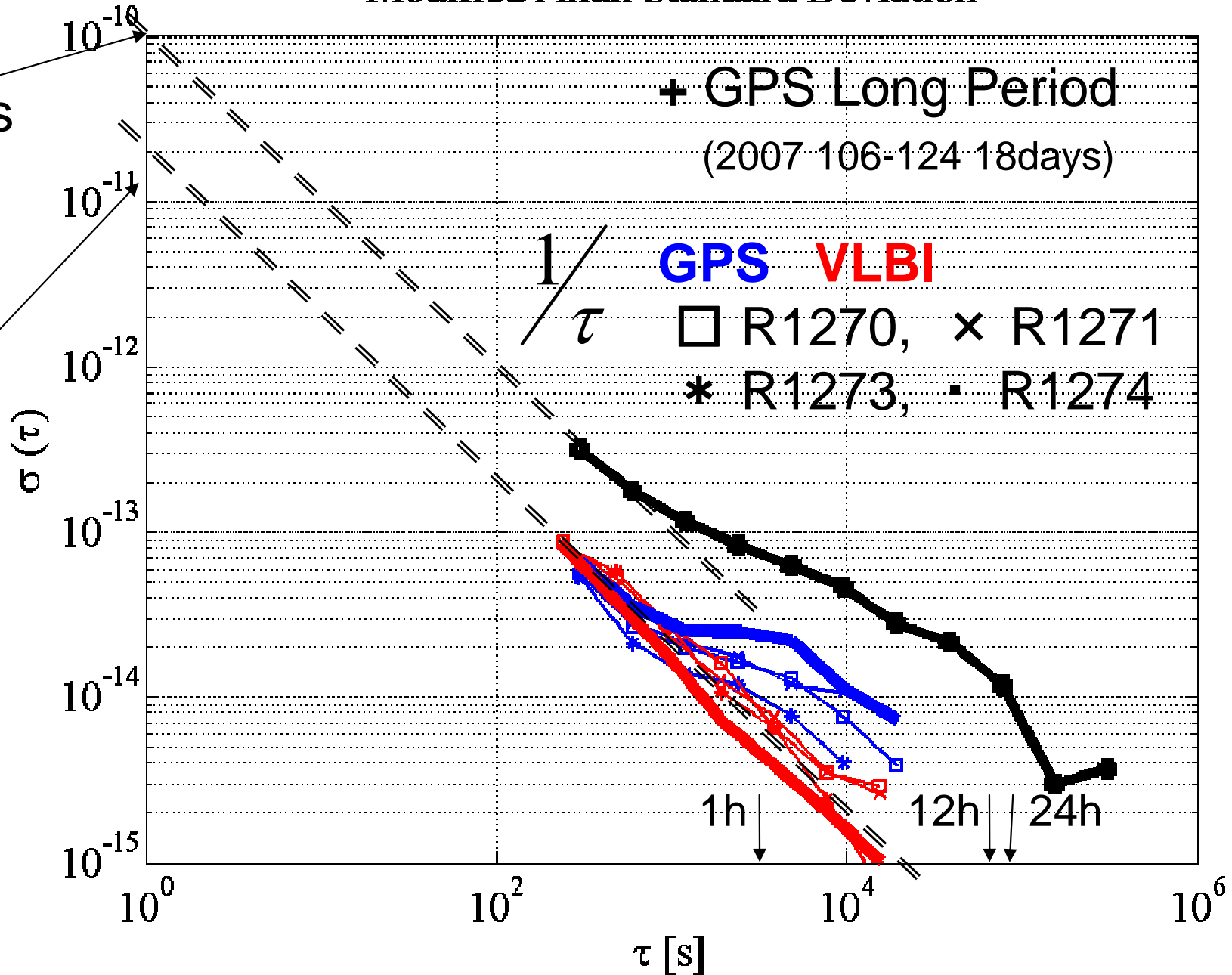
Modified Allan Standard Deviation

**GPS**

100ps  
@ 1s

**VLBI**

20ps  
@ 1s



# まとめ

## IVS, IGS Data

- VLBI時刻比較 v.s. GPS時刻比較
  - VLBIクロックオフセット推定精度：
    - 16 ps@1hour
  - 時系列比較：調和的
    - $\pm 200\text{ps}$ の範囲で一致
  - 安定度評価
    - 同じ基線, 同じ期間では VLBIの方が安定
      - $10^3$  以上の平均化時間で
    - VLBIの傾きはほぼ  $1/\tau$ 
      - 時刻比較の位相ノイズのみ
    - $2 \times 10^{-11}$  (20ps)@1s

期待通りのポテンシャル有り

# 今後の課題

- 時刻比較用に環境整備
  - 測地 ⇒ 時刻比較
  - GPS受信機, アンテナの恒温化
- 長期間連続データの取得: 2~13日
  - 鹿島-小金井基線
  - CONT02, CONT05, CONT08
- 国際実験
  - 日-独, 日-米 e-VLBI
- Instrumental delayのキャリブレーション
  - Zero Baseline Interferometry