

測地VLBI技術による高精度 時刻比較 - 第二報 -

瀧口 博士,¹ 小山 泰弘,¹ 市川 隆一,¹
後藤 忠弘,¹ 石井 敦利,^{1,2,3} Thomas Hobiger¹

¹ 情報通信研究機構, ² 国土地理院, ³ (株)エイ・イー・エス





これまでの結果

- ✧ 小山・他(2007)@連合大会

- ✧ 測地VLBI (VLBI時刻比較) とGPS時刻比較

- ✧ Kashima 11m - Koganei 11m

- ✧ 調和的

- ✧ バラつきはVLBIの方が小さい

- ✧ 一週間連続観測を実施

- ✧ 再解析

内容

なぜVLBI時刻比較か？

- UTC, JST, NICT-01
- 衛星時刻比較
- 測地VLBI観測

測地VLBI実験

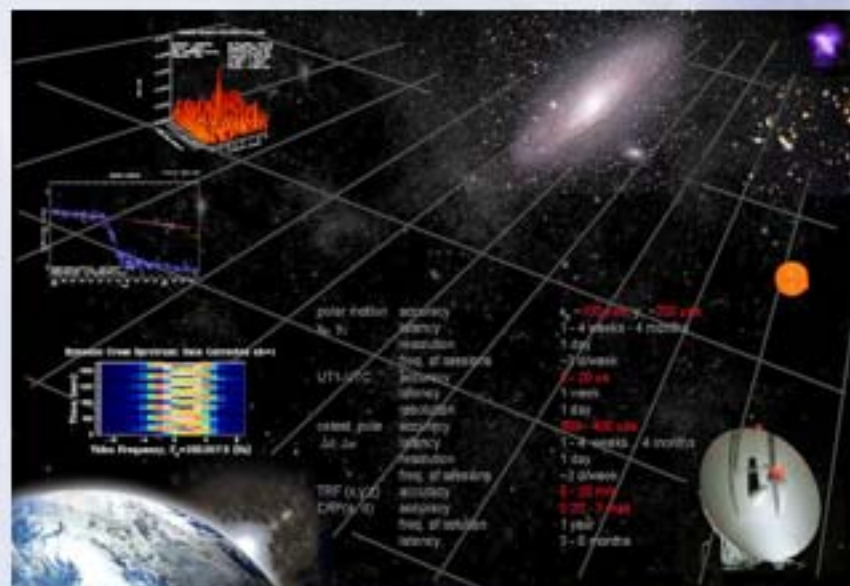
- 鹿島11m - 小金井11m
- 鹿島34m - 小金井11m

GPS時刻比較との比較

- 時系列比較
- 安定度評価

問題点

今後の課題

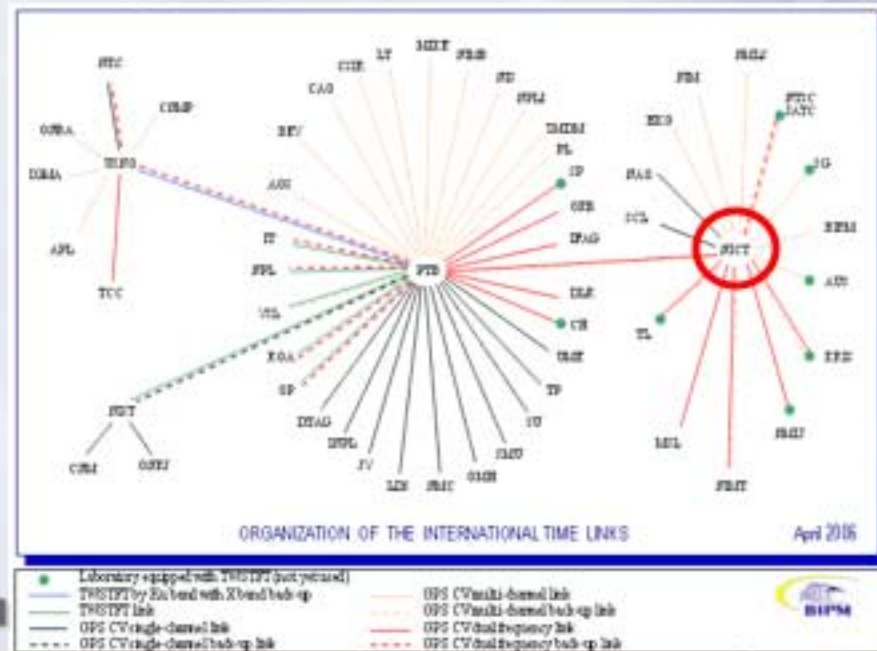


なぜVLBI時刻比較か？

時刻比較用途: UTCの維持

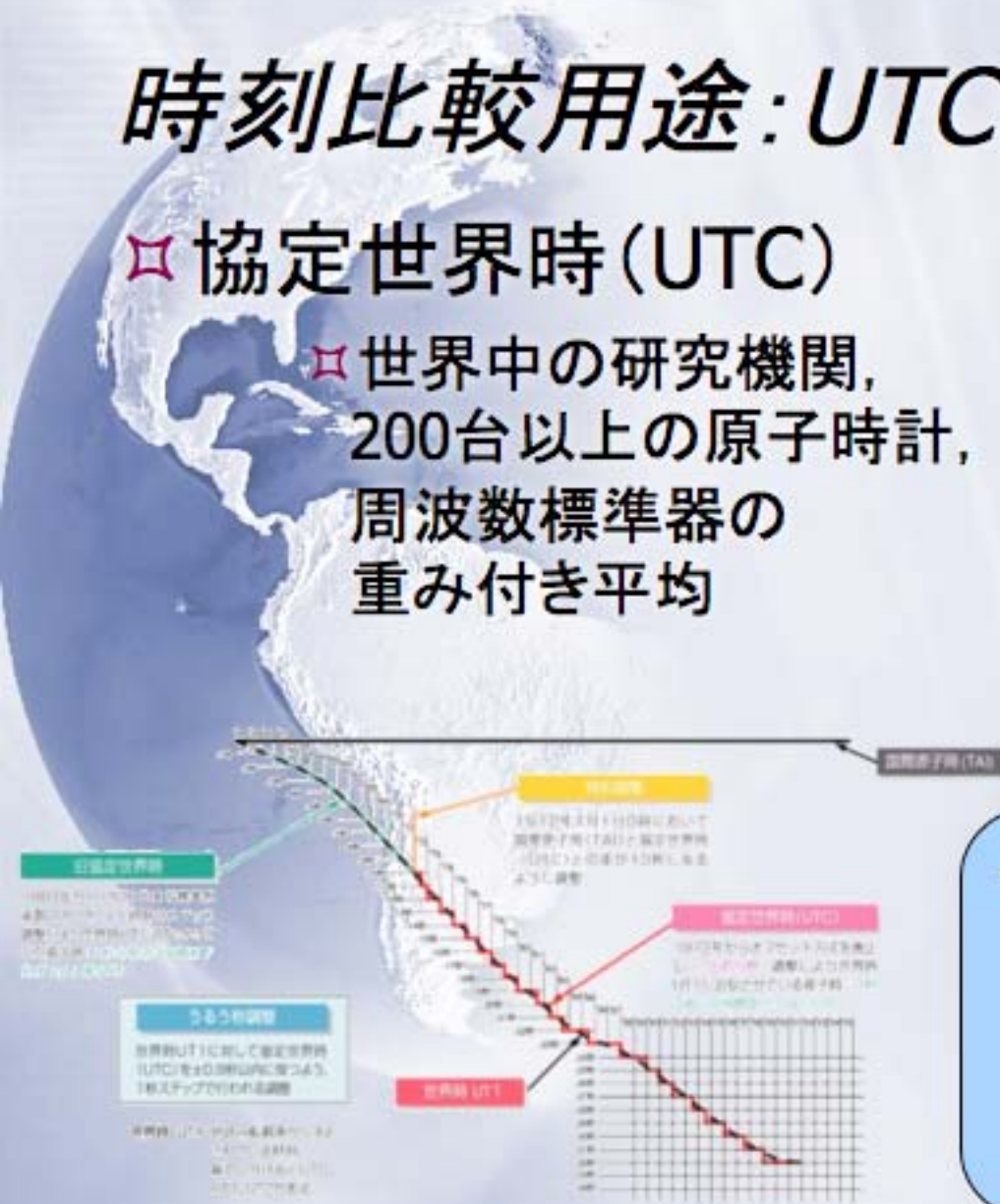
☞ 協定世界時 (UTC)

☞ 世界中の研究機関,
200台以上の原子時計,
周波数標準器の
重み付き平均



✓ 時系の維持運用

- 高確度での時刻標準の実現
- 原子時計や周波数標準器の較正
- ✓ 正確さを検証
- ⇒ 国内外の研究機関と定期的に時刻比較



NICT

日本標準時 (JST) : NICT

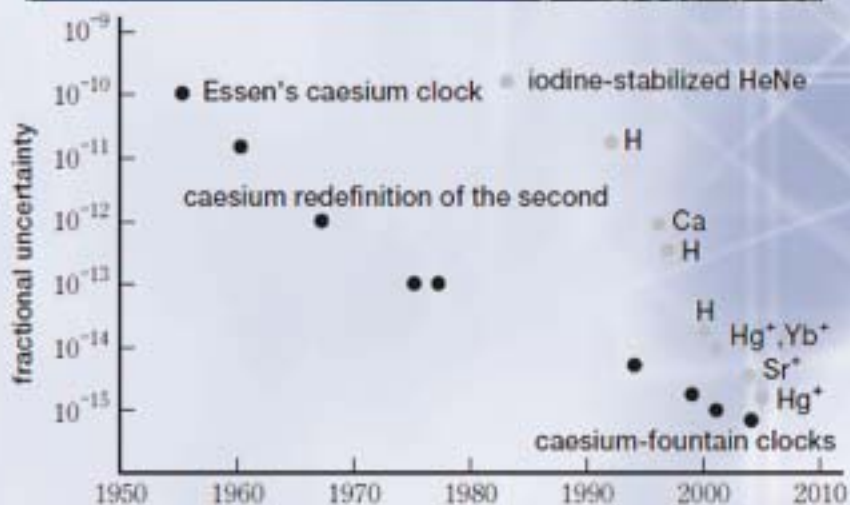
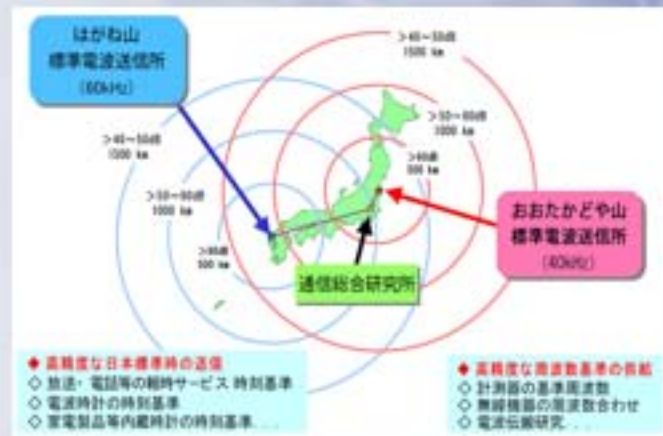
- セシウムビーム型原子時計 18台
- 水素メーザー原子時計 1台
- ⇒ 長波標準電波で配信

一次周波数標準

- NICT-O1: 光励起熱ビーム型
- 6×10^{-15} の周波数確度を実現
- セシウム原子泉型
- 2×10^{-15} の周波数確度を実現
- 光周波数標準・光格子時計 開発中
- 10^{-16} → 10^{-18} 目標

✓ 時系の維持運用

- 高確度での時刻標準の実現
- 原子時計や周波数標準器の較正
- ✓ 正確さを検証
- ⇒ 国内外の研究機関と定期的に時刻比較



4

周波数標準の不確かさ向上 (P. Gill作成)

衛星時刻比較

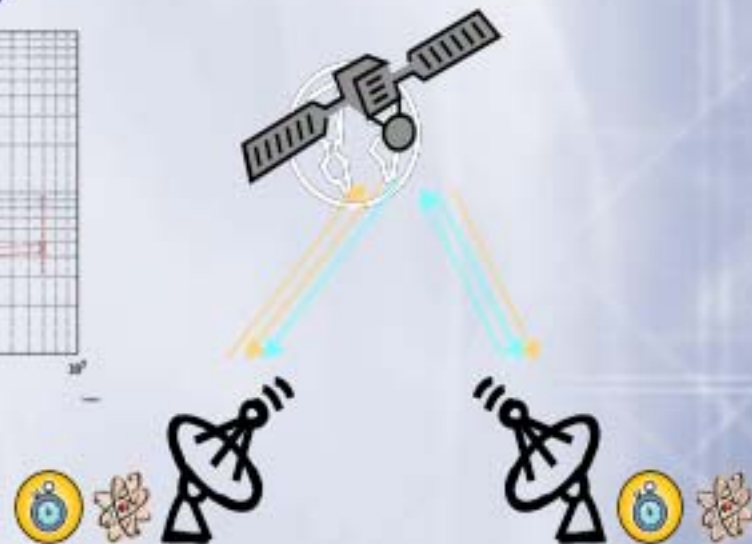
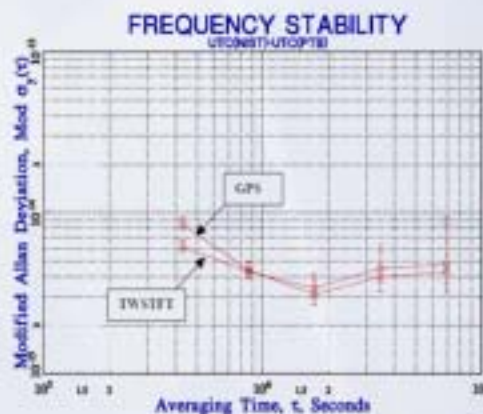
GPS時刻比較

(GPS Time Transfer,
Common-View, Carrier Phase)



衛星双方向時刻比較

(Two-Way Satellite Time and
Frequency Transfer : TWSTFT)



比較精度: 数百ピコ秒

- ✓ 光周波数標準・光格子時計
 - ✓ 10^{-16} 10^{-18} 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

❑ 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

❑ VLBI2010

❑ 個々の遅延時間推定精度 **4ピコ秒**
達成見込み

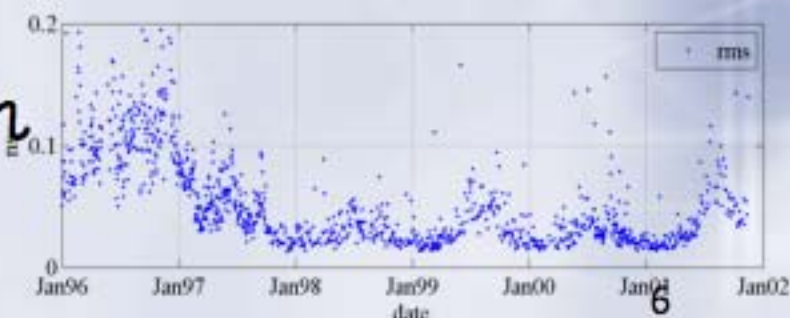
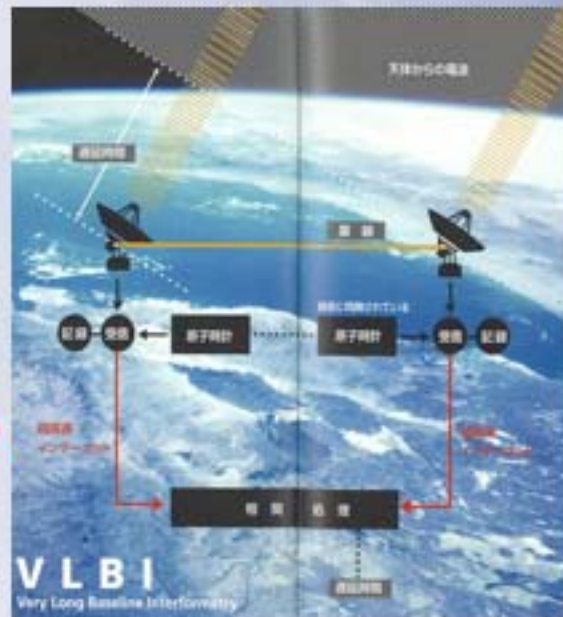
❑ 首都圏地殻変動観測計画 (KSP: Key Stone Project)

❑ 小金井局に対する鹿島局のずれ

❑ 1996 - 2001年までの6年間

❑ 平均して59ps

❑ 1月に限定した場合45psの精度



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



現在のシステムによる観測で検証

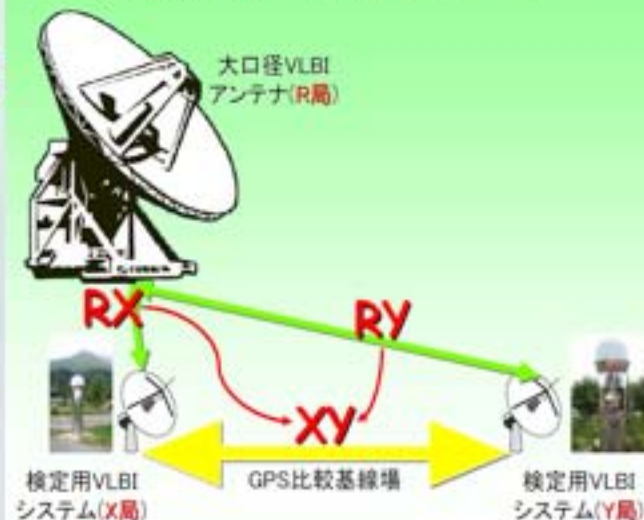
課題

測地VLBIシステム: アンテナ, 原子時計や周波数標準器

↑
国土地理院との共同研究

「1m級アンテナを用いた基線場検定用VLBIシステムの開発」
が有効

基線場検定観測のイメージ



小型VLBIアンテナによる高精度国際時刻比較



測地VLBI実験

GPS観測



Code	Term	Baseline	Mode	System
k07011	1/11 - 1/12	鹿島11m 小金井11m	4Mbps/ch, 1bit, 16ch, 64Mbps	K5/VSSP
k07022	1/22 - 1/23			
k07059	2/28 - 3/3			
k07166	6/15 - 6/23	鹿島 <u>34m</u> 小金井11m	16Mbps/ch, 1bit, 16ch, 256Mbps	K5/VSSP <u>32</u>



Term	Baseline	Kashima	Koganei
2006年末 - 2007年6月始め	鹿島11m 小金井11m	Ashtech Z-XII3T (Metronome)	Septentrio PolarRX2 TR
6/15 - 6/23	鹿島 <u>34m</u> 小金井11m	Ashtech <u>Z-XII3</u>	Ashtech <u>Z-XII3</u>



解析

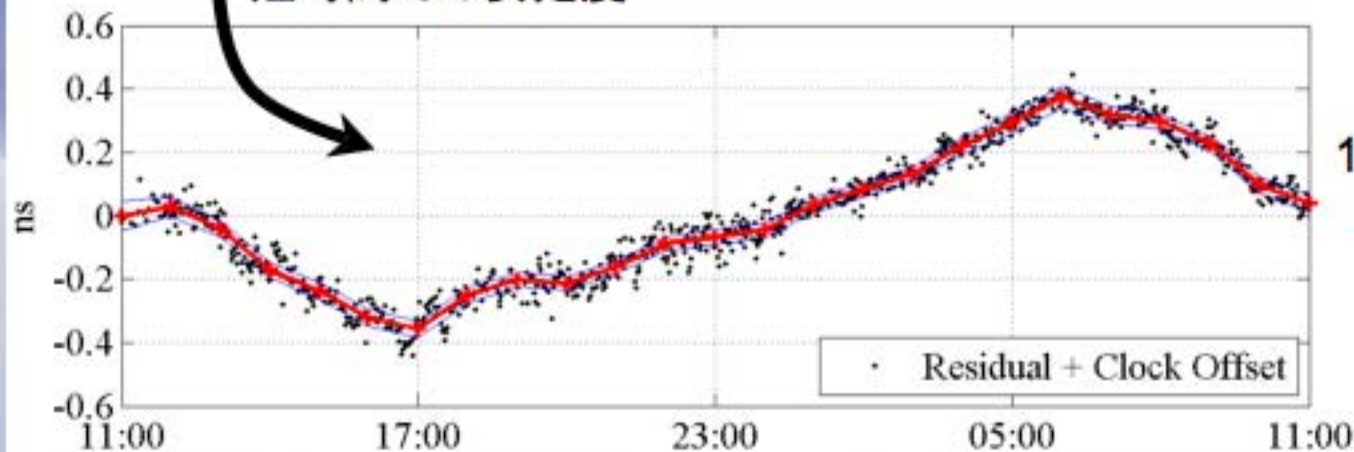
✧ VLBI

- ✧ Calc/Solve
- ✧ 鹿島局固定 基線解析
- ✧ 大気遅延 / 60分
- ✧ **クロックオフセット / 60分**
 - ✧ 2次項まで

⇒ H.M.(KAS) - H.M.(KOG)

遅延残差 + クロックオフセット

短時間での安定度



✧ GPS

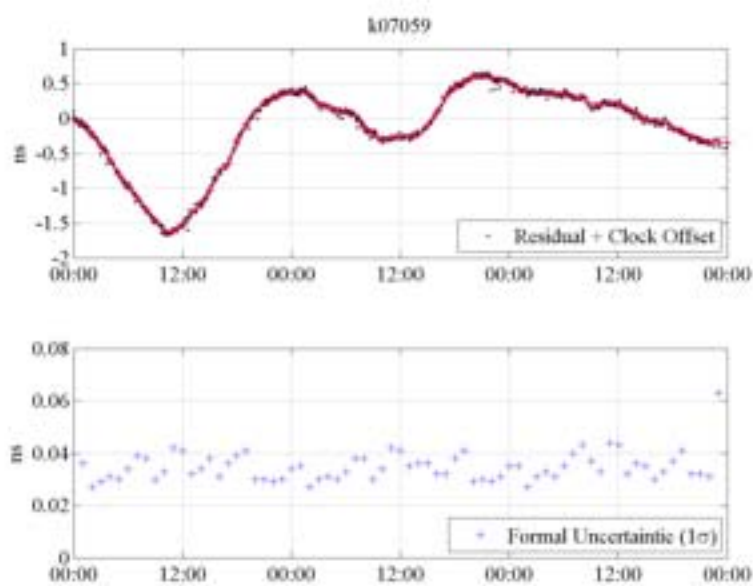
- ✧ GIPSY-OASIS II, PPP
 - ✧ 鹿島局, 小金井局毎に解析
 - ✧ 局位置 / 1日
 - ✧ 大気遅延 / 5分
 - ✧ クロックオフセット / **5分**
 - ✧ **鹿島クロックオフセット**
 - 小金井クロックオフセット

⇒ H.M.(KAS) - H.M.(KOG)

1obs : 30~数100秒
天体毎に異なる
等間隔ではない

VLBI

クロックオフセット 推定誤差



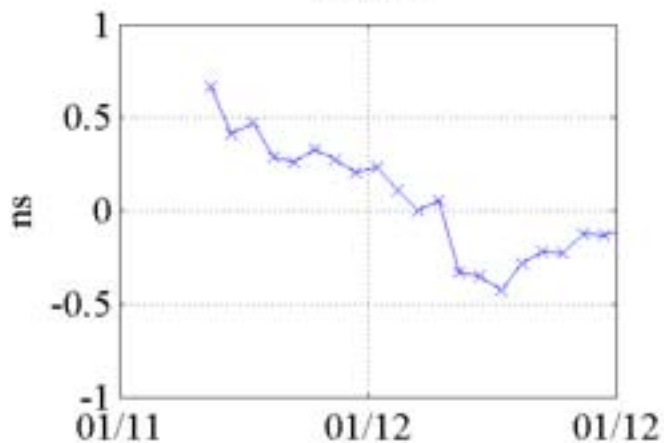
Code	Formal Error [ps]
1) k07011	138
2) k07022	51
3) K07059	36
4) k07166 A	28
5) k07166 B	40
6) k07166 C	23
平均	53
平均(K5/VSSP32)	30

- SNR → 最適スケジュール
- VSSP32
- 34m

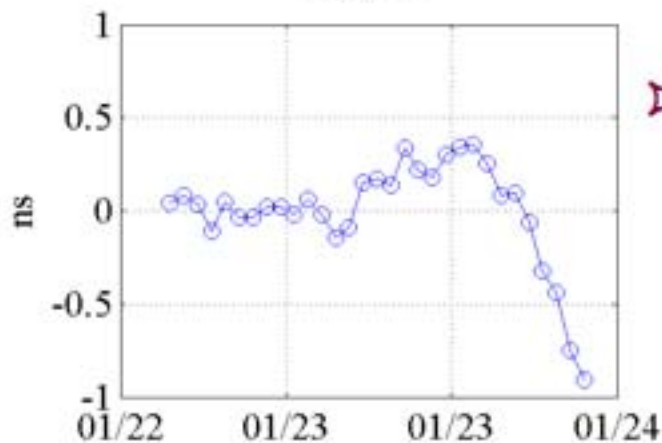
GPS時刻比較との比較

- 時系列 -

k07011

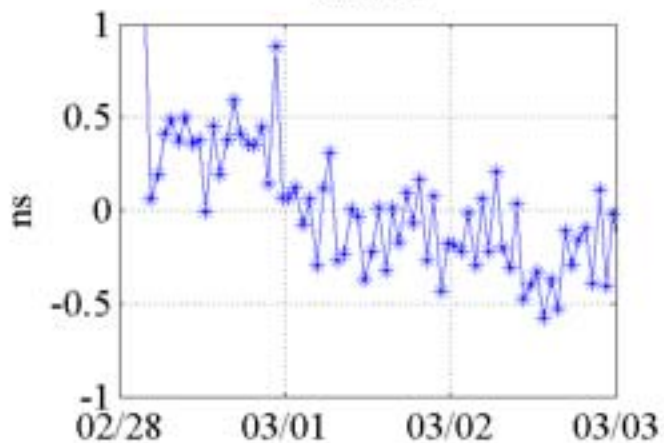


k07022

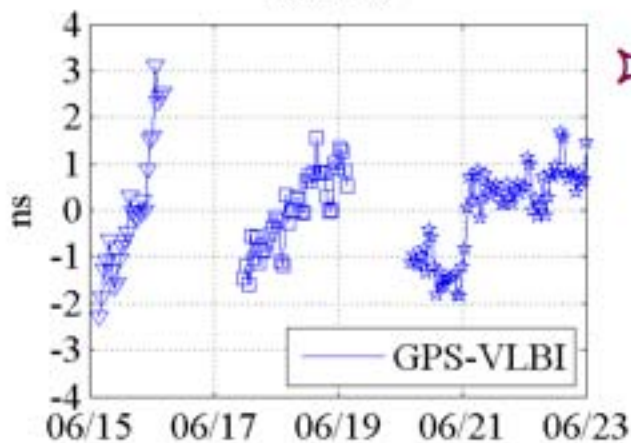


□ VLBI, GPSそれぞれで求められた、鹿島局を基準とした小金井局のクロックオフセット時系列の差

k07059



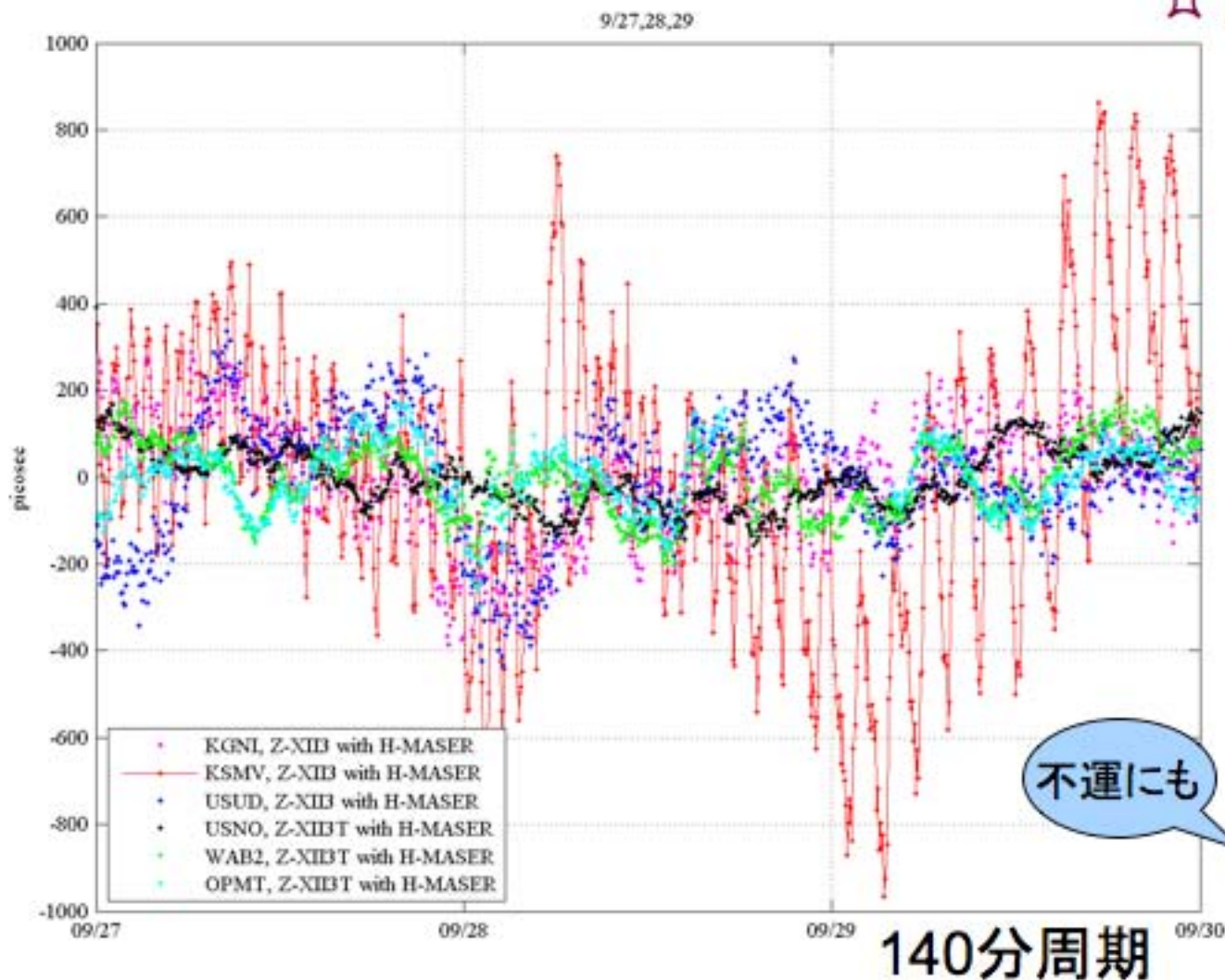
k07166



□ **±500ps** で一致

□ K07166実験: GPS受信機の個体差

Ashtech Z-XII3 vs. Z-XII3T



IGS点との比較

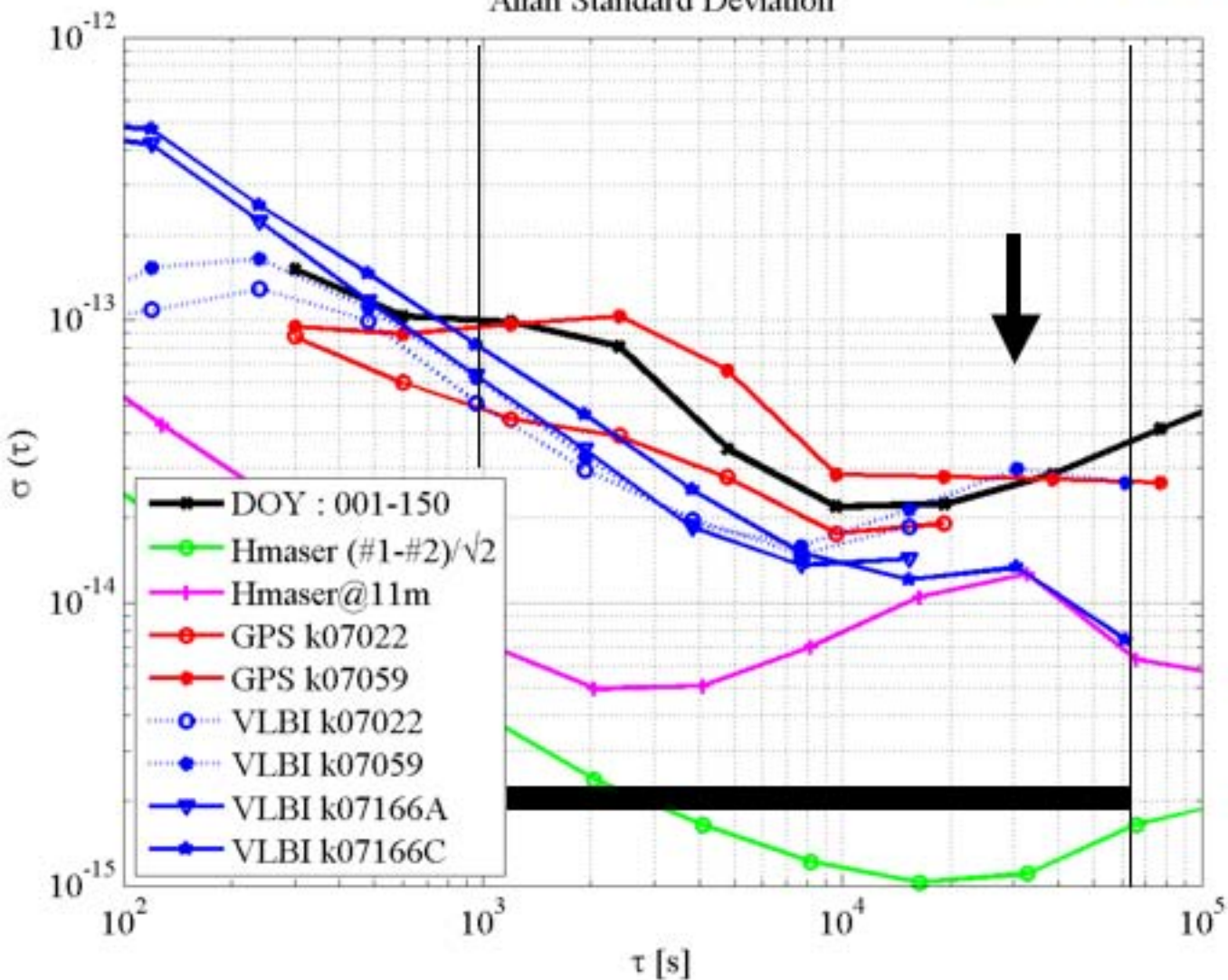
- Ashtech Z-XII3
- Ashtech Z-XII3T
- 外部周波数
- 水素メーザー

- ロックはしている
- 振幅大
- 周期変動有り
- Z-XII3機種差ではない
- 個体差
- 時刻比較には使用できない

GPS時刻比較との比較

- 安定度評価 -

Allan Standard Deviation



✧ GPS: 0~150日
 ✧ VLBI:
 遅延残差+クロック
 オフセットデータか
 らアラン分散

✧ 1000~60000秒
 VLBI安定度:高

✧ 10000秒以上
 安定度低下

✧ 30000秒ピーク
 =半日周期

VLBI時刻比較の安定度
 2.4×10^{-11} @1sec
 $\rightarrow \sqrt{2} \times 2.4 \times 10^{-11}$
 $= 3.4 \times 10^{-11} = 34 \text{psec}$

レーザーの安定度
 2.0×10^{-12} @1sec
 $\rightarrow \sqrt{2} \times 2.0 \times 10^{-12}$
 $= 2.8 \times 10^{-12} = 2.8 \text{psec}$

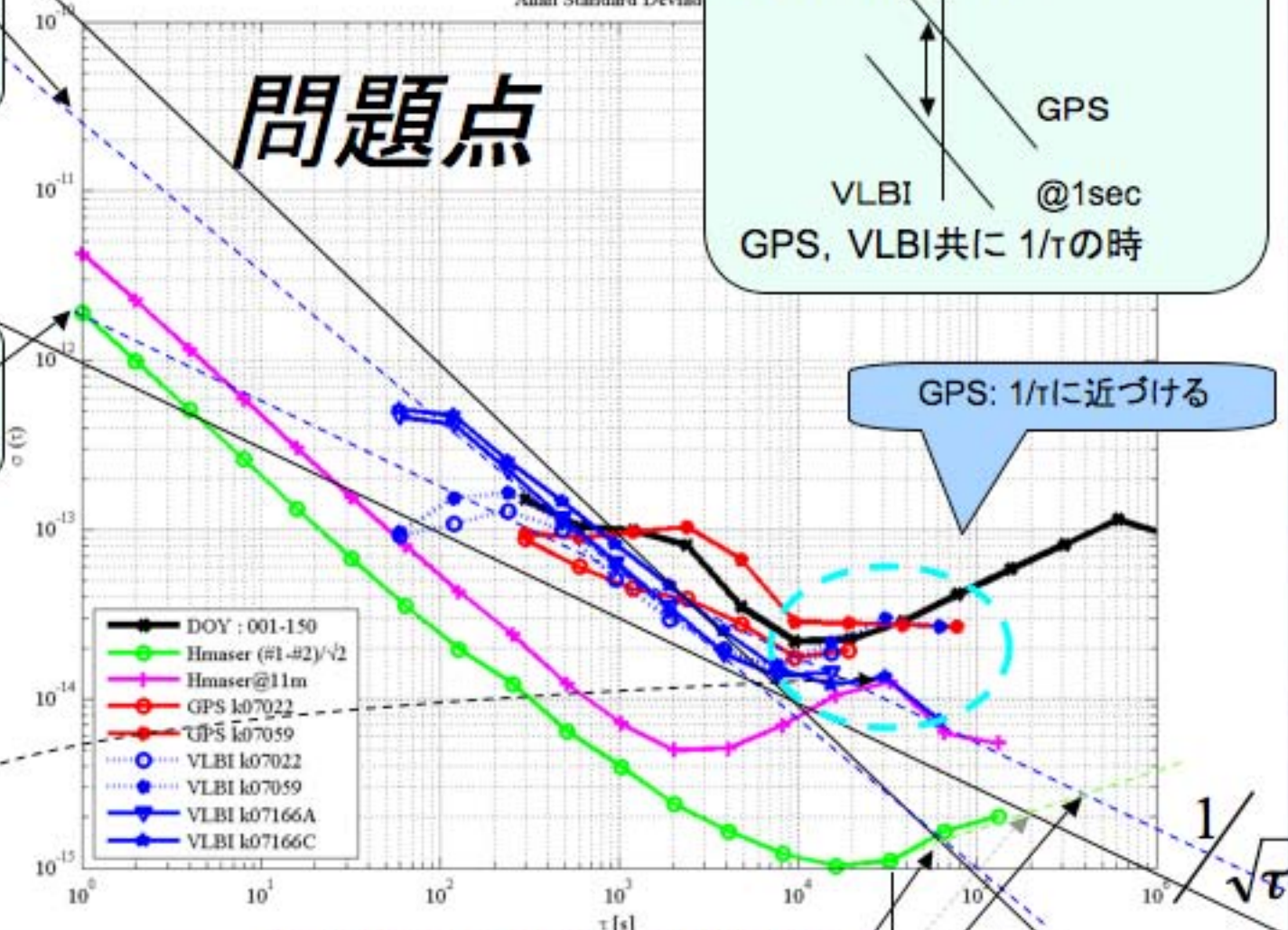
Allan Standard Deviation

問題点

GPSとVLBIとの差



GPS: $1/\tau$ に近づける



- DOY : 001-150
- Hmaser (#1-#2)/√2
- Hmaser@11m
- GPS k07022
- GPS k07059
- VLBI k07022
- VLBI k07059
- VLBI k07166A
- VLBI k07166C

半日周期のもりあがり
 $(1.1 \times 10^{-14}) \times (4.3 \times 10^4)$ 半日
 $= 473 \times 10^{-12} = 473 \text{psec}$
 半日で約500psec変動

VLBI時刻比較の安定度を周波数標準の安定度まで落とすには
 $6 \times 10^4 \times 3 = 50$ 時間 = 2日から
 $(1 \times 10^5 \times 3 = 167)$ 時間 = 7日
 $4 \times 10^5 \times 3 = 333$ 時間 = 13日
 の観測が必要

安定度低下の要因 (1)



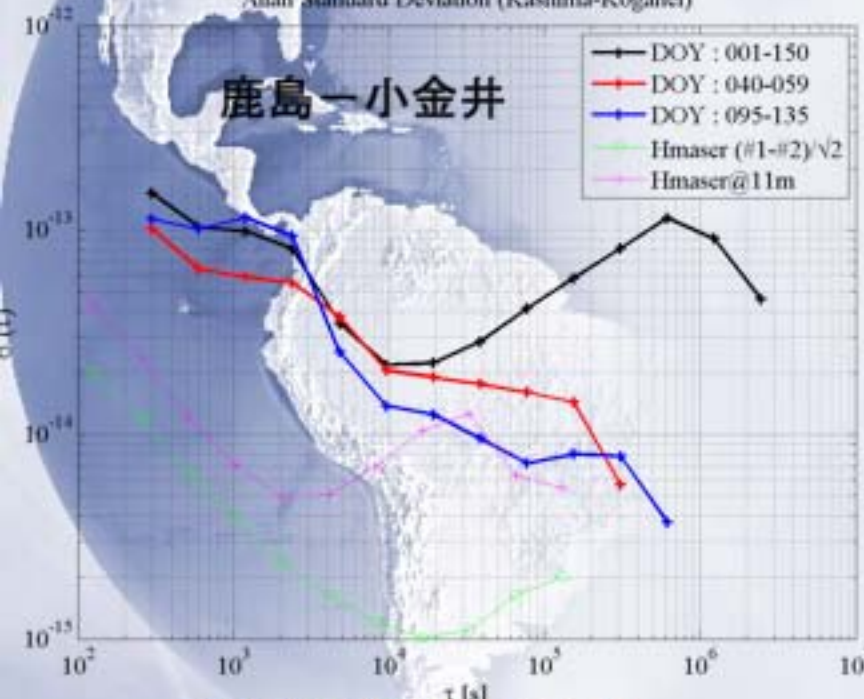
□ 周波数標準からの距離

安定度低下の要因 (2)

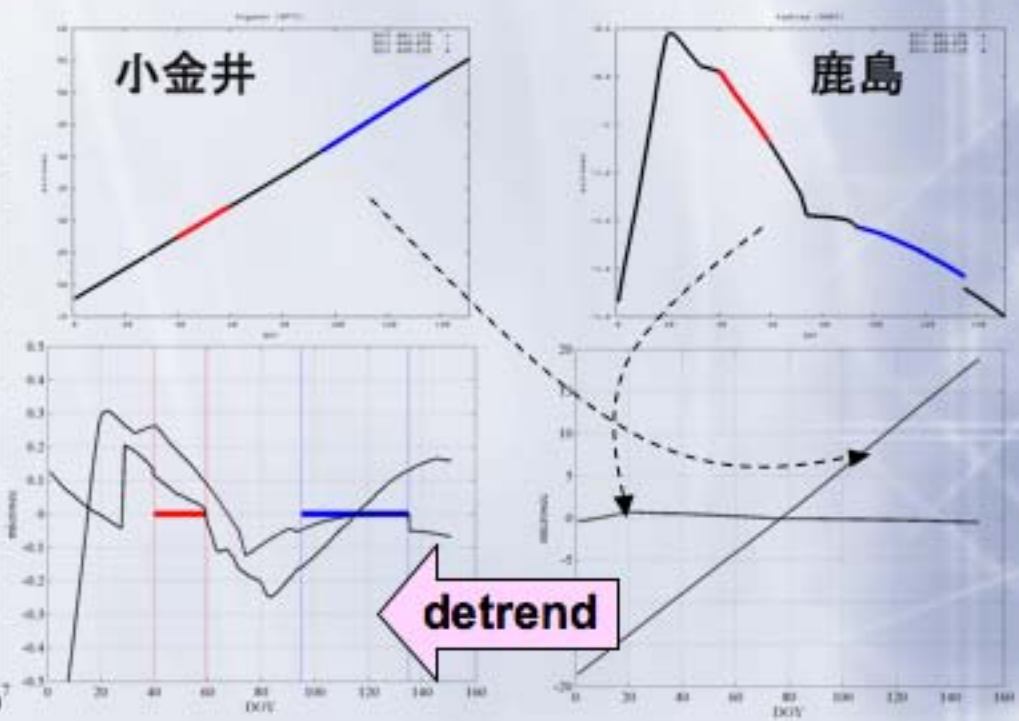
□ 周波数標準

Allan Standard Deviation (Kashima-Koganei)

鹿島-小金井



GPS時刻比較



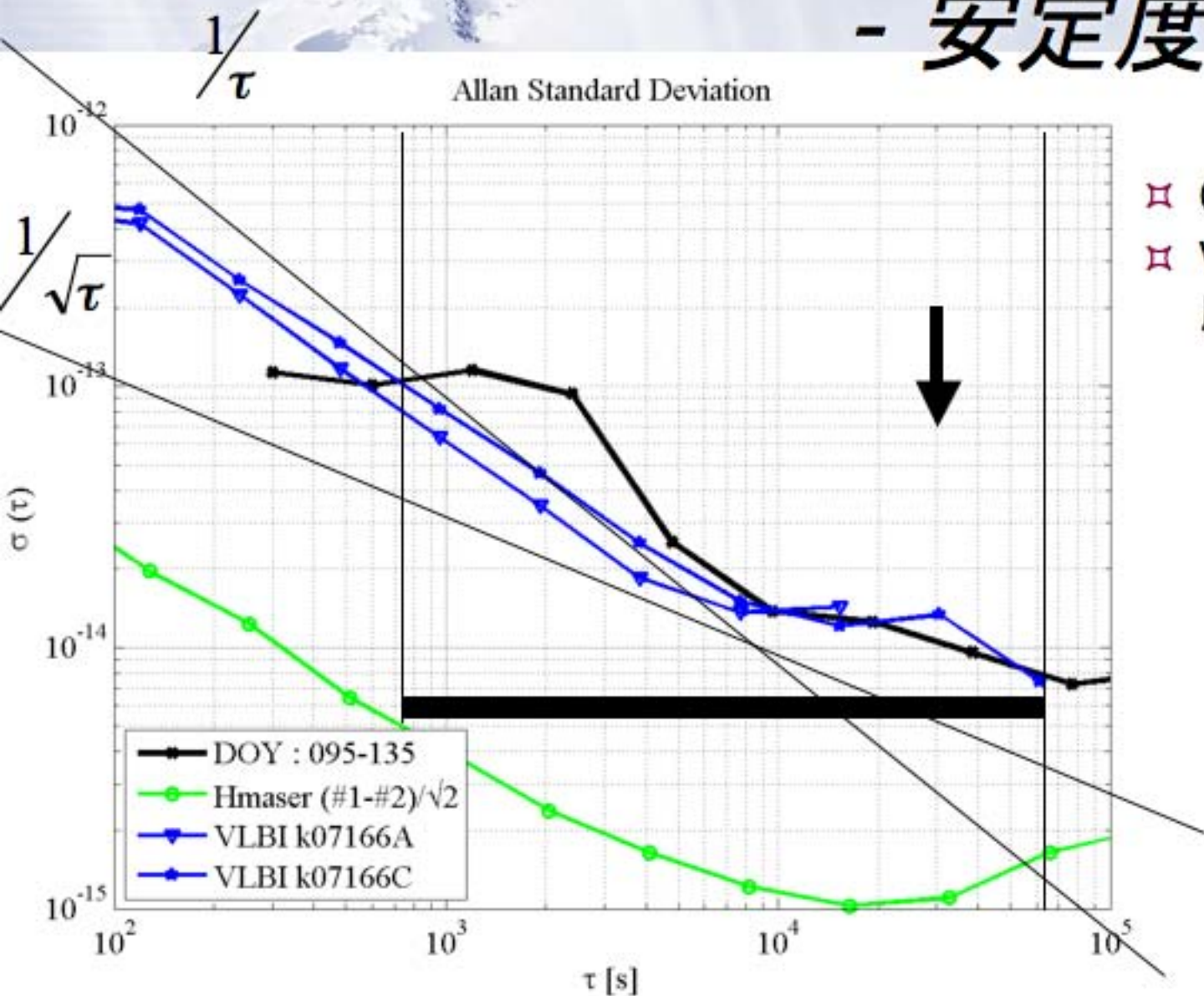
観測時期設定ミス？

新しく実験 → K07166実験時のGPSデータが使用できない

VLBI: 保守

GPS時刻比較との比較

- 安定度評価 -



✧ GPS: 安定度: 良

✧ VLBI:
鹿島34m, VSSP32

✧ 800~60000秒

✧ VLBI安定度: 高

まとめ

✧ 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: **30ps**

✧ 時系列比較: 調和的

✧ **±500ps**の範囲で一致

✧ 安定度評価

✧ VLBI時刻比較: **安定**

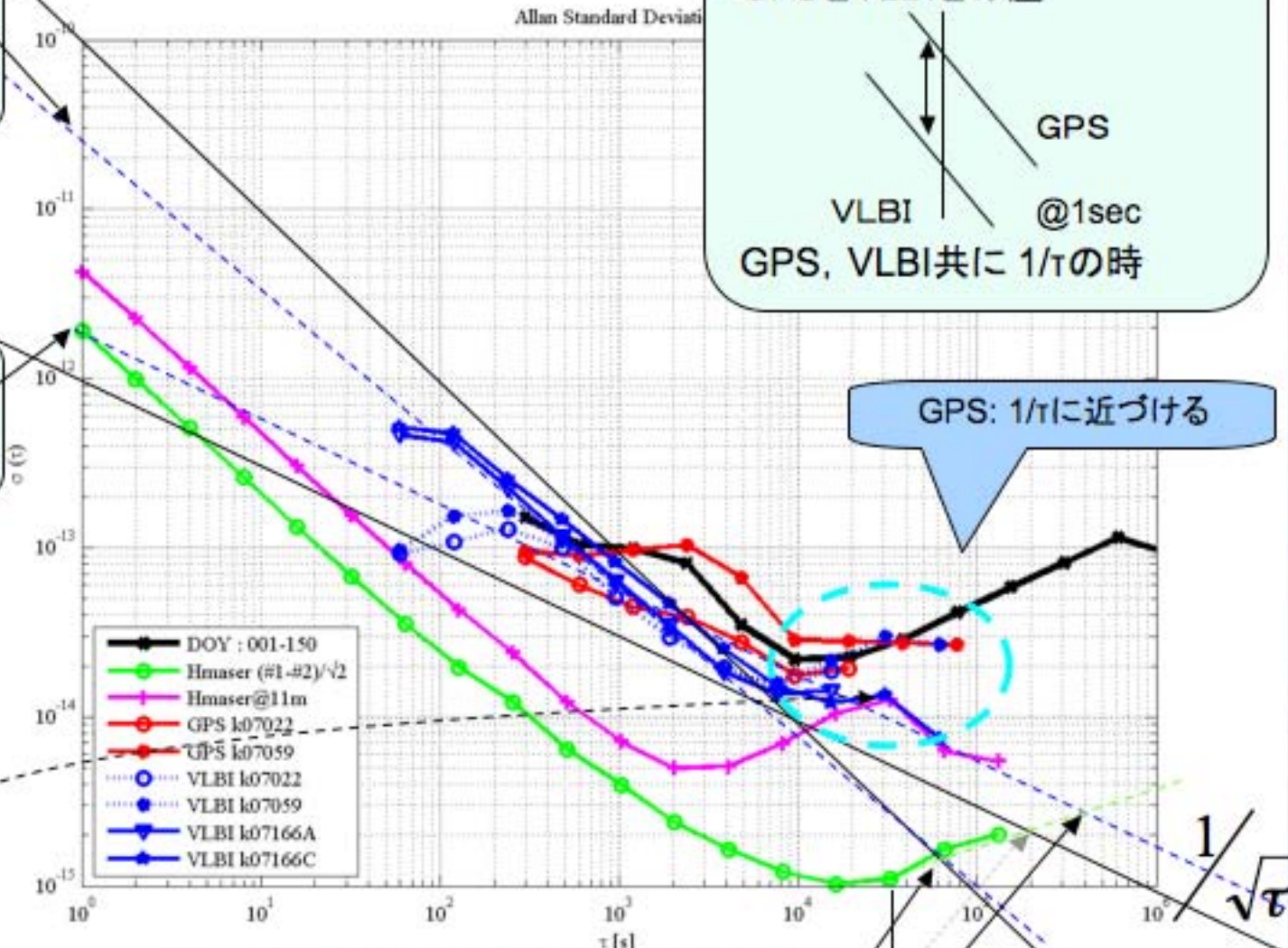
VLBI時刻比較の安定度
 2.4×10^{-11} @1sec
 $\rightarrow \sqrt{2} \times 2.4 \times 10^{-11}$
 $= 3.4 \times 10^{-11} = 34 \text{psec}$

レーザーの安定度
 2.0×10^{-12} @1sec
 $\rightarrow \sqrt{2} \times 2.0 \times 10^{-12}$
 $= 2.8 \times 10^{-12} = 2.8 \text{psec}$

GPSとVLBIとの差



GPS: $1/\tau$ に近づける



半日周期のもりあがり
 $(1.1 \times 10^{-14}) \times (4.3 \times 10^4)$ 半日
 $= 473 \times 10^{-12} = 473 \text{psec}$
 半日で約500psec変動

VLBI時刻比較の安定度を周波数標準
 の安定度まで落とすには
 $6 \times 10^4 \times 3 = 50$ 時間 = 2日から
 $(1 \times 10^5 \times 3 = 167)$ 時間 = 7日
 $4 \times 10^5 \times 3 = 333$ 時間 = 13日
 の観測が必要

今後の課題

- ❑ 長期間連続データの取得: 2~13日
- ❑ 時刻比較に特化した観測
 - ❑ 最適スケジュール, 電波源の選択
 - ❑ 同一電波源を長時間?
- ❑ 大気遅延等の物理パラメータの改善
 - ❑ 別観測から補正
- ❑ 観測帯域 64Mbps → 256Mbps
- ❑ 国際実験
 - ❑ 日-独, 日-米 e-VLBI
- ❑ 1m級アンテナの開発




3基線実験

鹿島34m-鹿島11m-小金井11m

小金井

Code	Term	Baseline	Mode	System
k07xxx	今年中 7~13日	鹿島34m 鹿島11m 小金井11m	16Mbps/ch, 1bit, 16ch, 256Mbps	K5/VSSP32

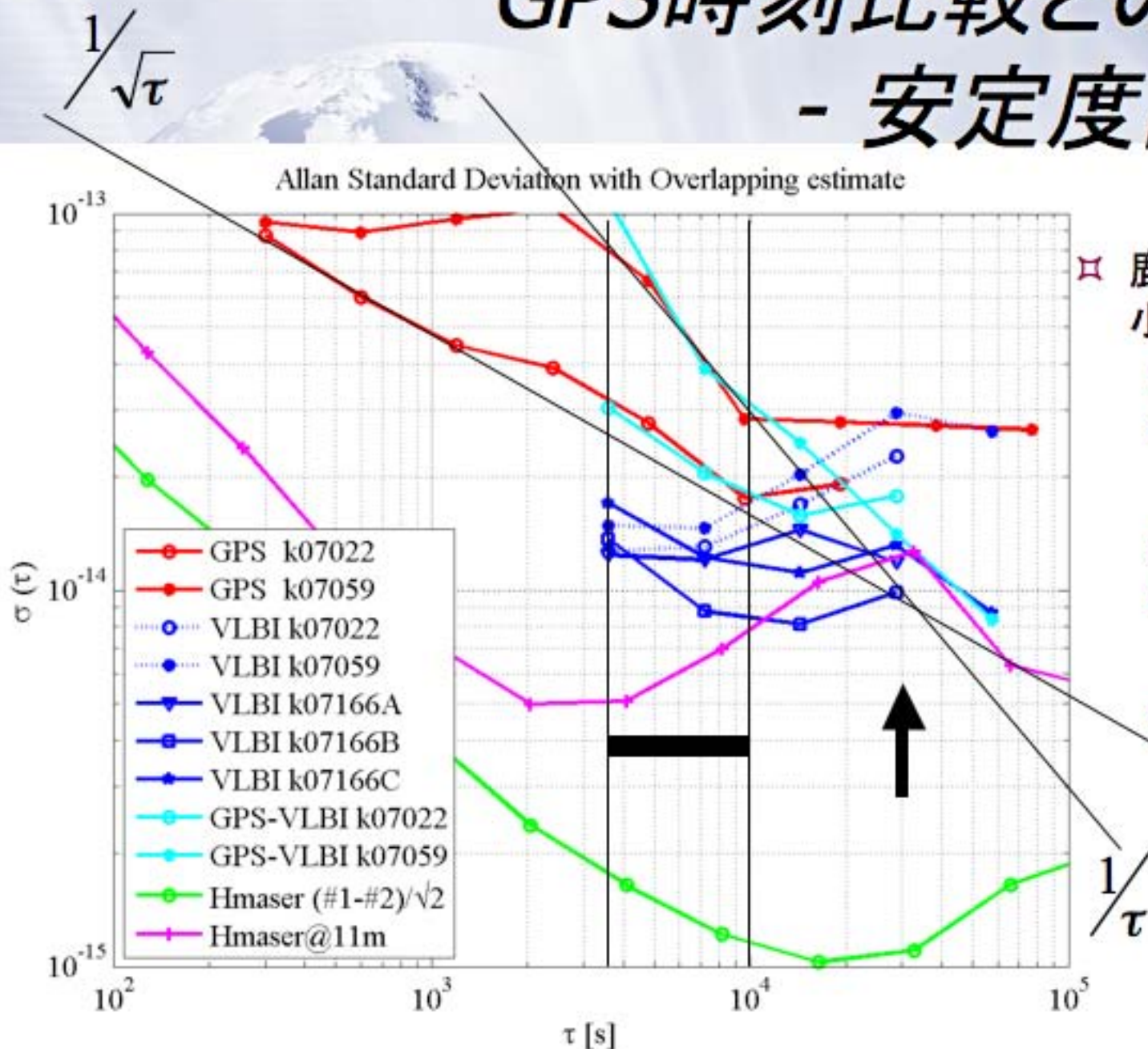




以下, 資料

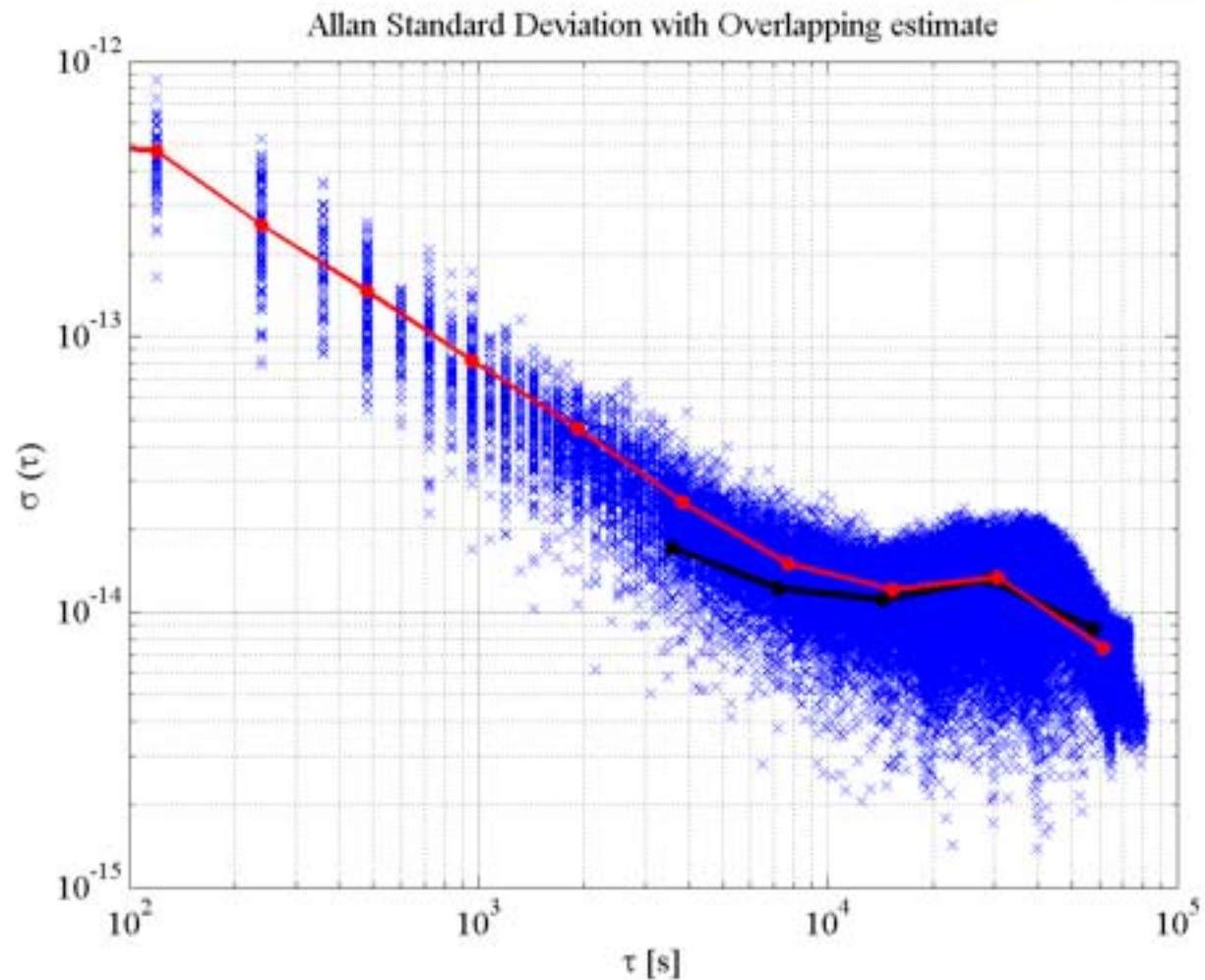
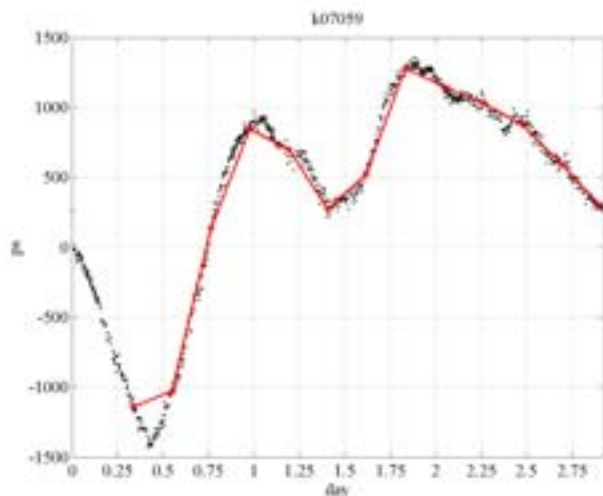
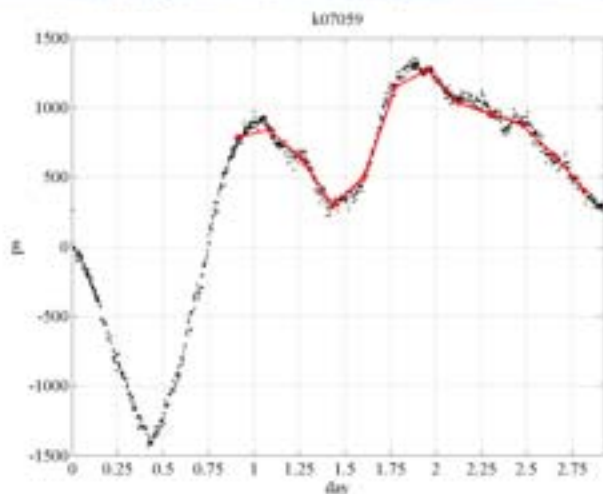
GPS時刻比較との比較

- 安定度評価 -



- ✧ 鹿島11m
- ✧ 小金井11m 基線
- ✧ 3600~10000秒
- ✧ VLBI安定度高
- ✧ 10000秒以上
- ✧ 安定度低下
- ✧ 30000秒ピーク = 半日周期

不等間隔データを補間したデータでの アラン分散計算結果

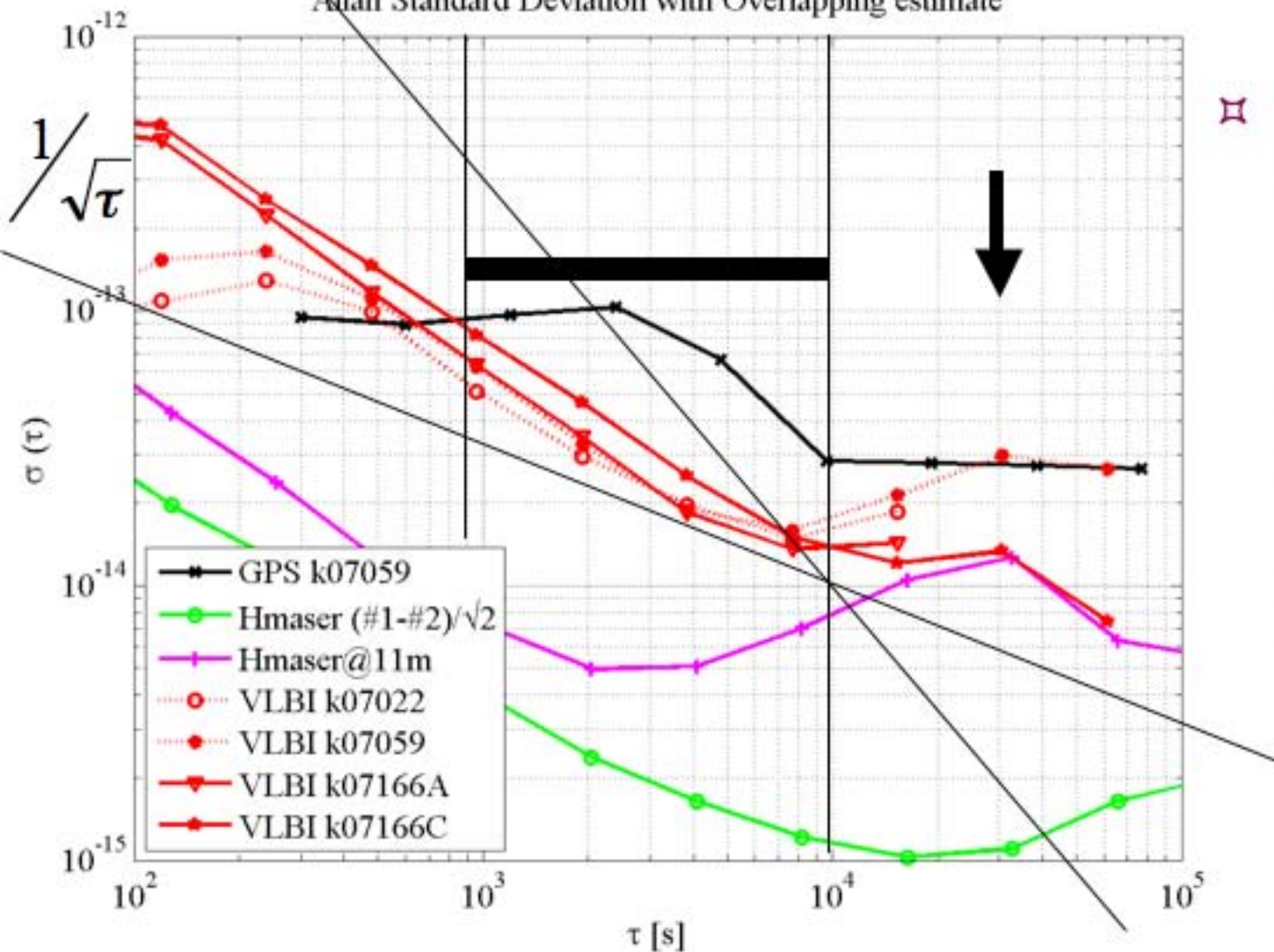


GPS時刻比較との比較

- 安定度評価 -

$$\frac{1}{\tau}$$

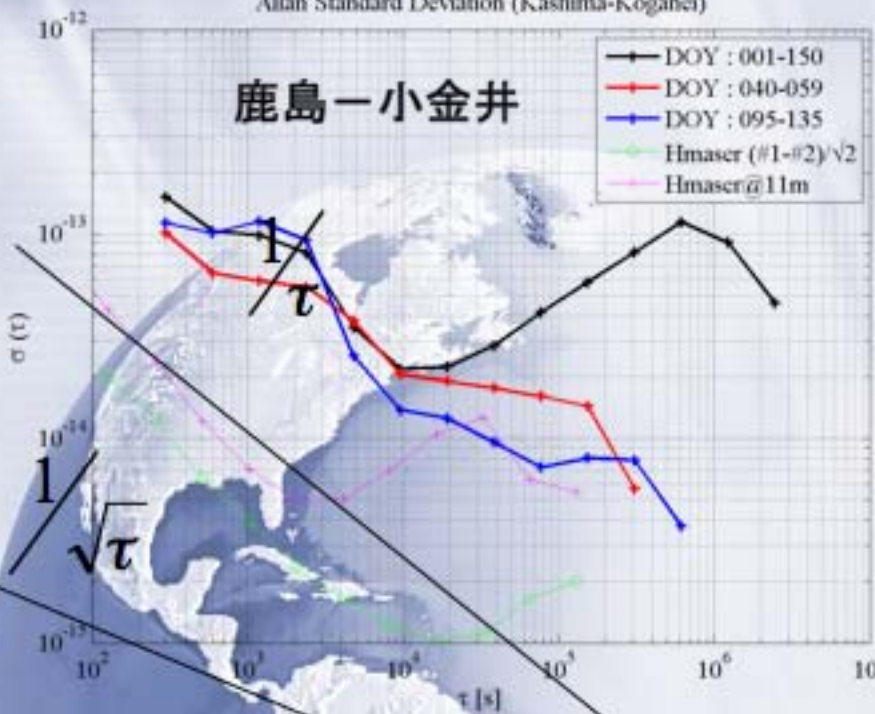
Allan Standard Deviation with Overlapping estimate



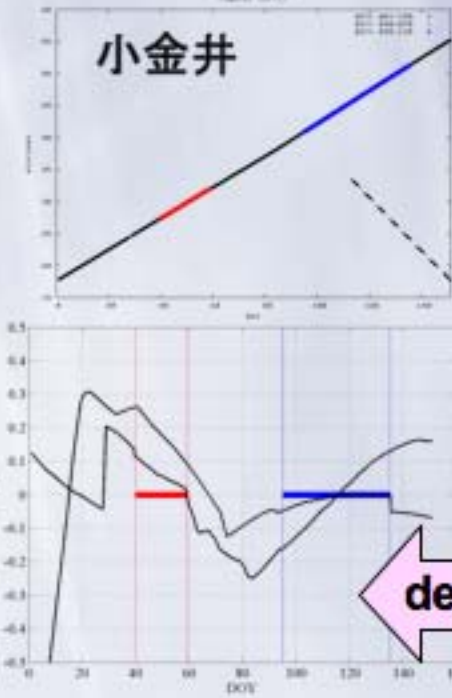
- ✧ 鹿島11m
- ✧ 小金井11m 基線
- ✧ 3600~10000秒
- ✧ VLBI安定度高
- ✧ 10000秒以上
- ✧ 安定度低下
- ✧ 30000秒ピーク = 半日周期

Allan Standard Deviation (Kashima-Koganei)

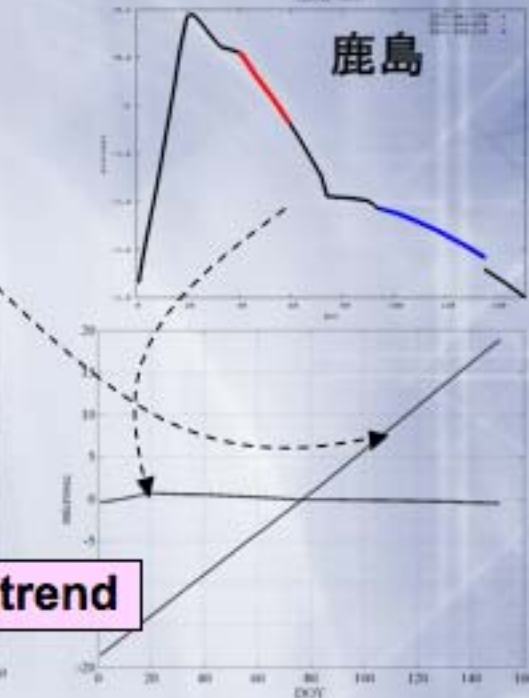
鹿島—小金井



小金井

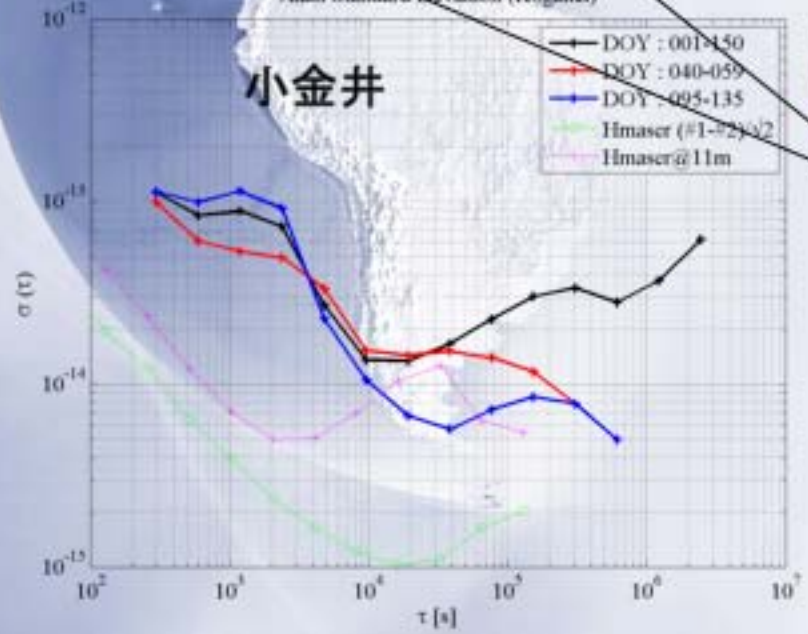


鹿島



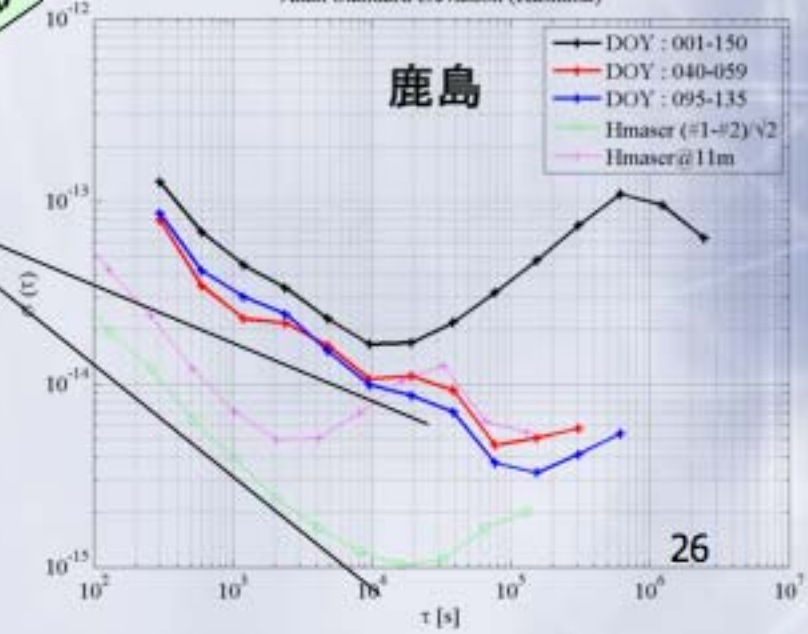
Allan Standard Deviation (Koganei)

小金井



Allan Standard Deviation (Kashima)

鹿島



アラン分散

detrend

VLBI時刻比較の安定度

$$2.4 \times 10^{-11} \text{ @1sec}$$

$$\rightarrow \sqrt{2} \times 2.4 \times 10^{-11}$$

$$= 3.4 \times 10^{-11} = 34 \text{ psec}$$

レーザーの安定度

$$2.0 \times 10^{-12} \text{ @1sec}$$

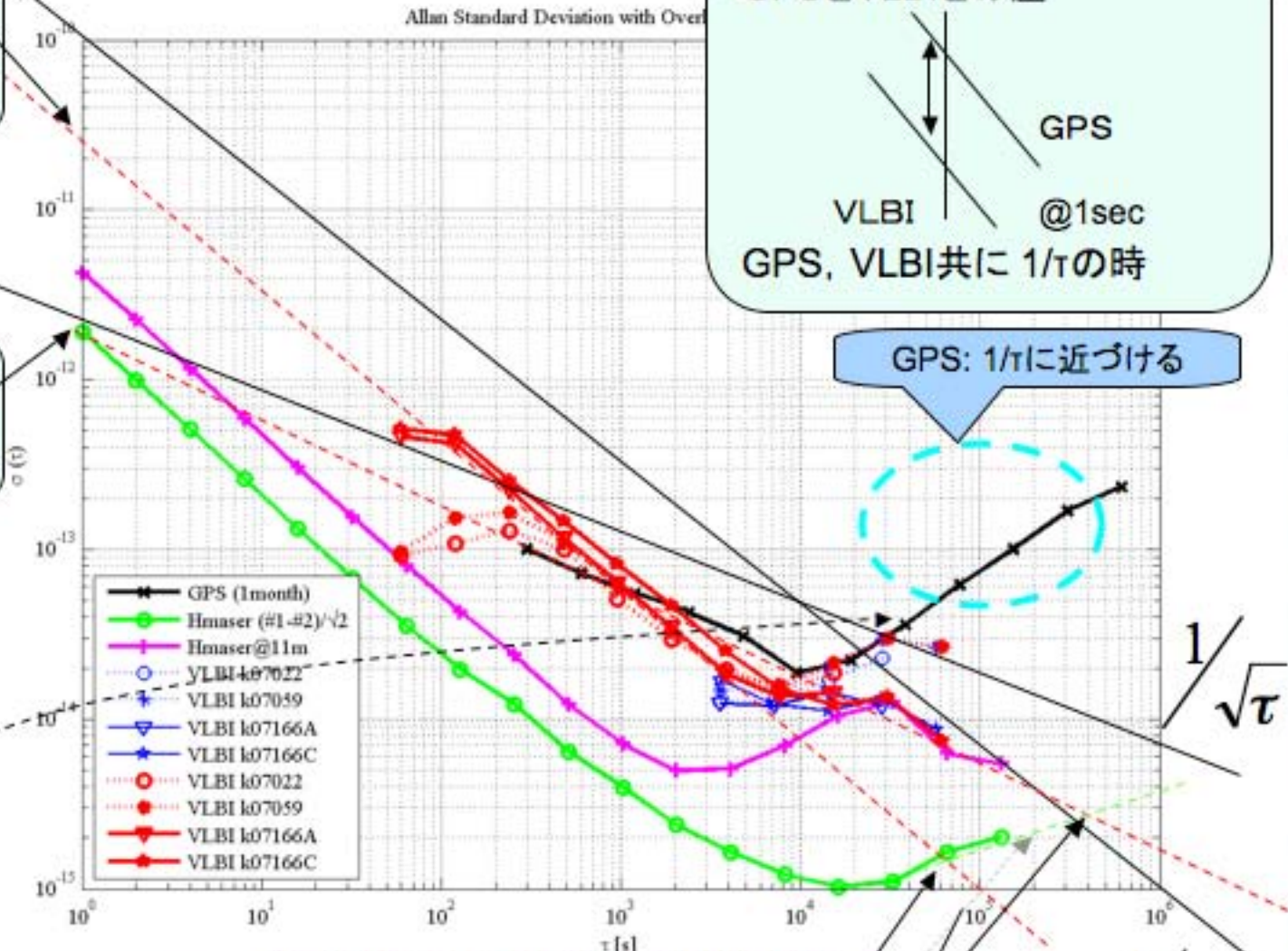
$$\rightarrow \sqrt{2} \times 2.0 \times 10^{-12}$$

$$= 2.8 \times 10^{-12} = 2.8 \text{ psec}$$

GPSとVLBIとの差



GPS: 1/τに近づける



半日周期のもりあがり

$$(1.1 \times 10^{-14}) \times (4.3 \times 10^4) \text{ 半日}$$

$$= 473 \times 10^{-12} = 473 \text{ psec}$$

半日で約500psec変動

VLBI時刻比較の安定度を周波数標準

の安定度まで落とすには
 $6 \times 10^4 \times 3 = 50 \text{ 時間} = 2 \text{ 日}$ から
 $(1 \times 10^5 \times 3 = 167 \text{ 時間} = 7 \text{ 日})$
 $4 \times 10^5 \times 3 = 333 \text{ 時間} = 13 \text{ 日}$
 の観測が必要