

WG 測地・地球物理

題目：内核自由章動の検出を目指した高感度時空計測の構築にむけて
Quest for spatial measurement with microsecond accuracy.

これで良いか？
流体核自由章動のリバイズ等も含まれる

国立天文台 水沢VLBI観測所 寺家孝明
Sep-23, 2020, VERA UM, V懇将来計画中間まとめ報告会

VLBIと測地

- 時空の計測
距離，角度，時間・時刻
- 地球科学での残された問題，太陽系天体への展開
- VLBIの役割は…… インフラ，座標系，リファレンス，現象を説明するための制約としての観測量の提示
計る（測る，量る）ことがVLBIの意義
- VLBIが推定できるパラメータ
- 今後，VLBIから新たな計測装置への変換は？

これらについて，検討

Simulation of GA

$R_0 = 8.2$ kpc, $\Omega_0 = 29.5$ km/s/kpc, $A = 5.02$ μ as/yr.

$$A_1 = A \cos \alpha_0 \cos \delta_0$$

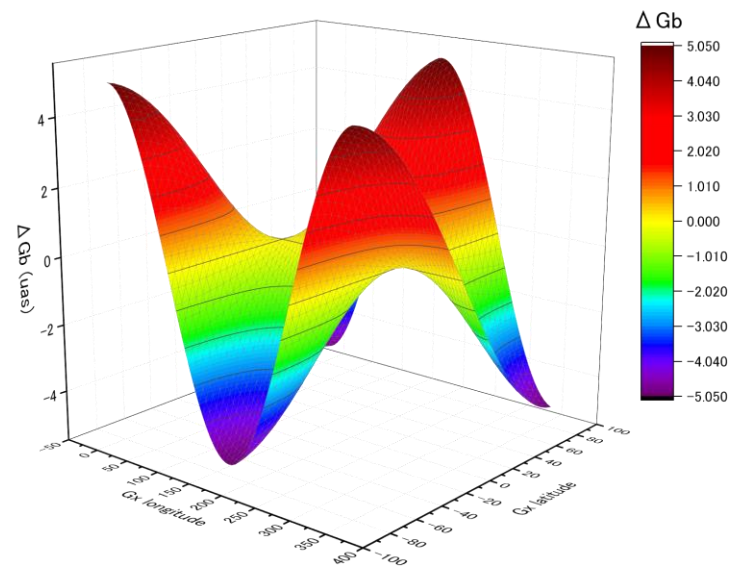
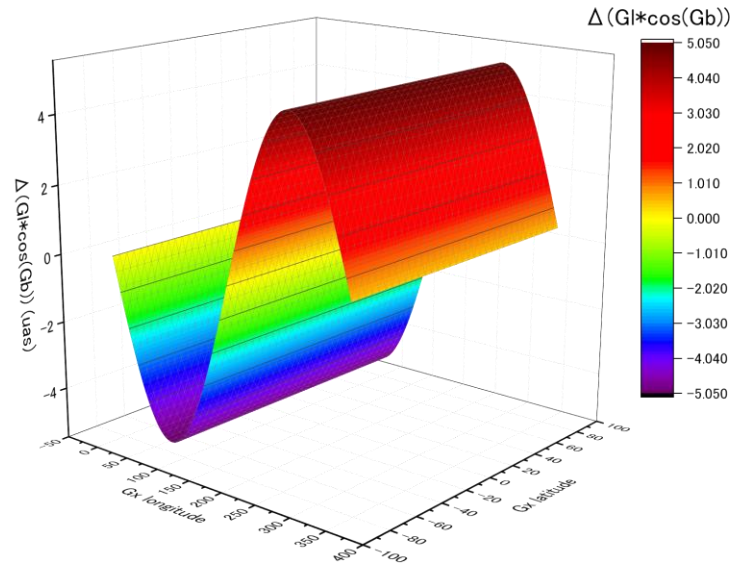
$$A_2 = A \sin \alpha_0 \sin \delta_0$$

$$A_3 = A \sin \delta_0$$

$$\mu_\alpha \cos \delta = -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha$$

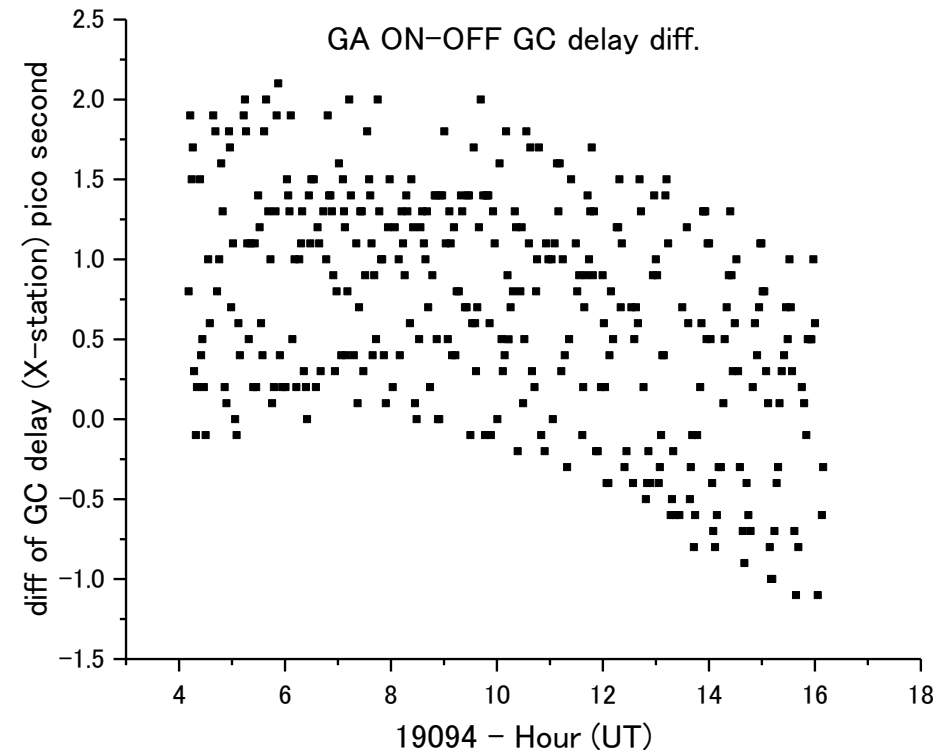
$$\mu_\delta = -A_1 \cos \alpha \sin \delta - A_2 \sin \alpha \sin \delta + A_3 \cos \delta$$

α_0, δ_0 : R.A. and Dec. of Galactic Center.



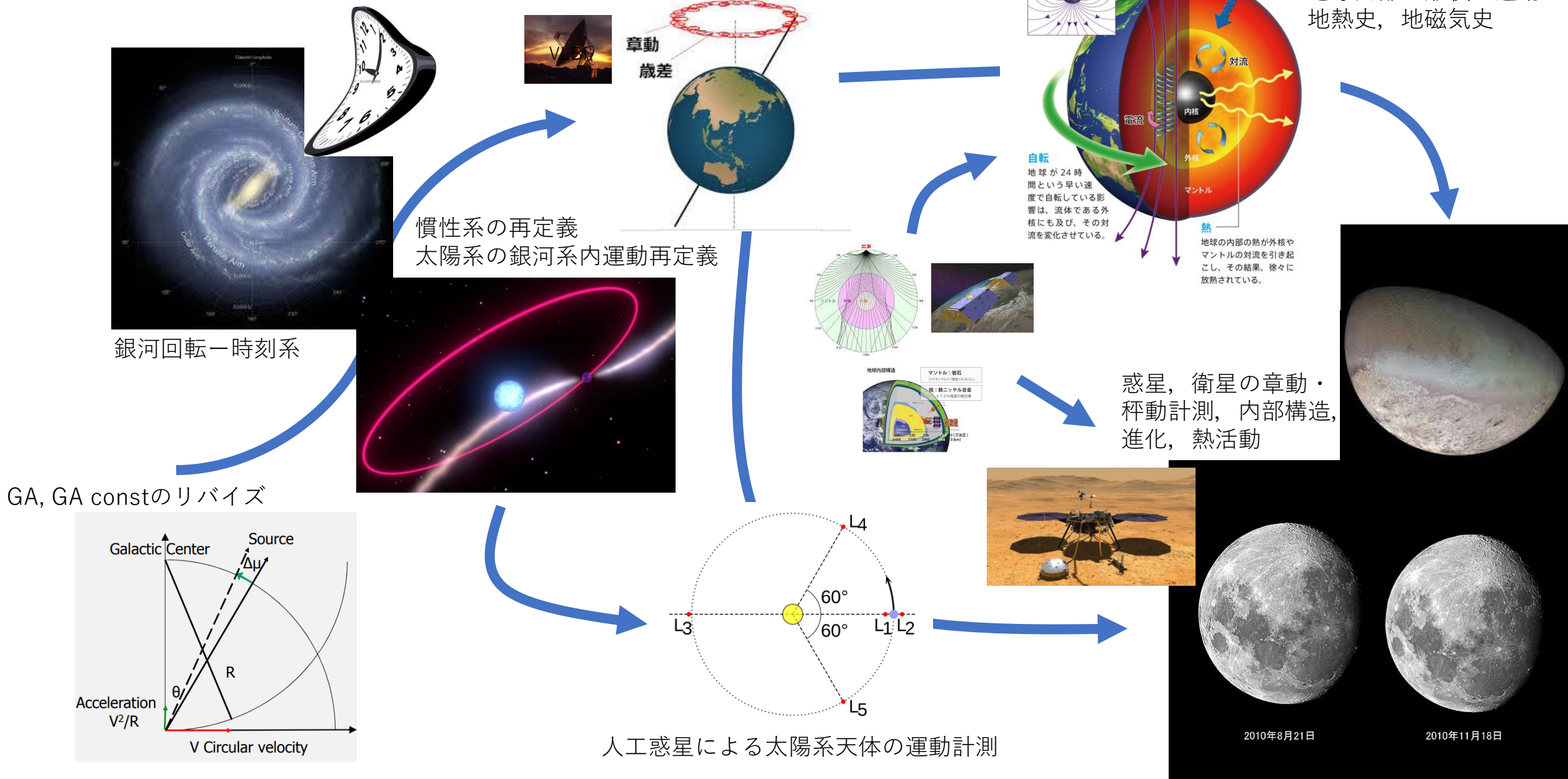
0.2 μ as/yr Coupling to Precession and Nutation
(Malkin, 2008, Astronomy Report)

▪ DelayX



Difference of Predicted Geocentric Delay between GA-on and GA-off.
Epoch0 of GA=2015.0, Diff. year=4.2, Station=VERA-Mizusawa

マイクロ秒角の角度計測と波及する観測対象
(この中でEurekaを探求)



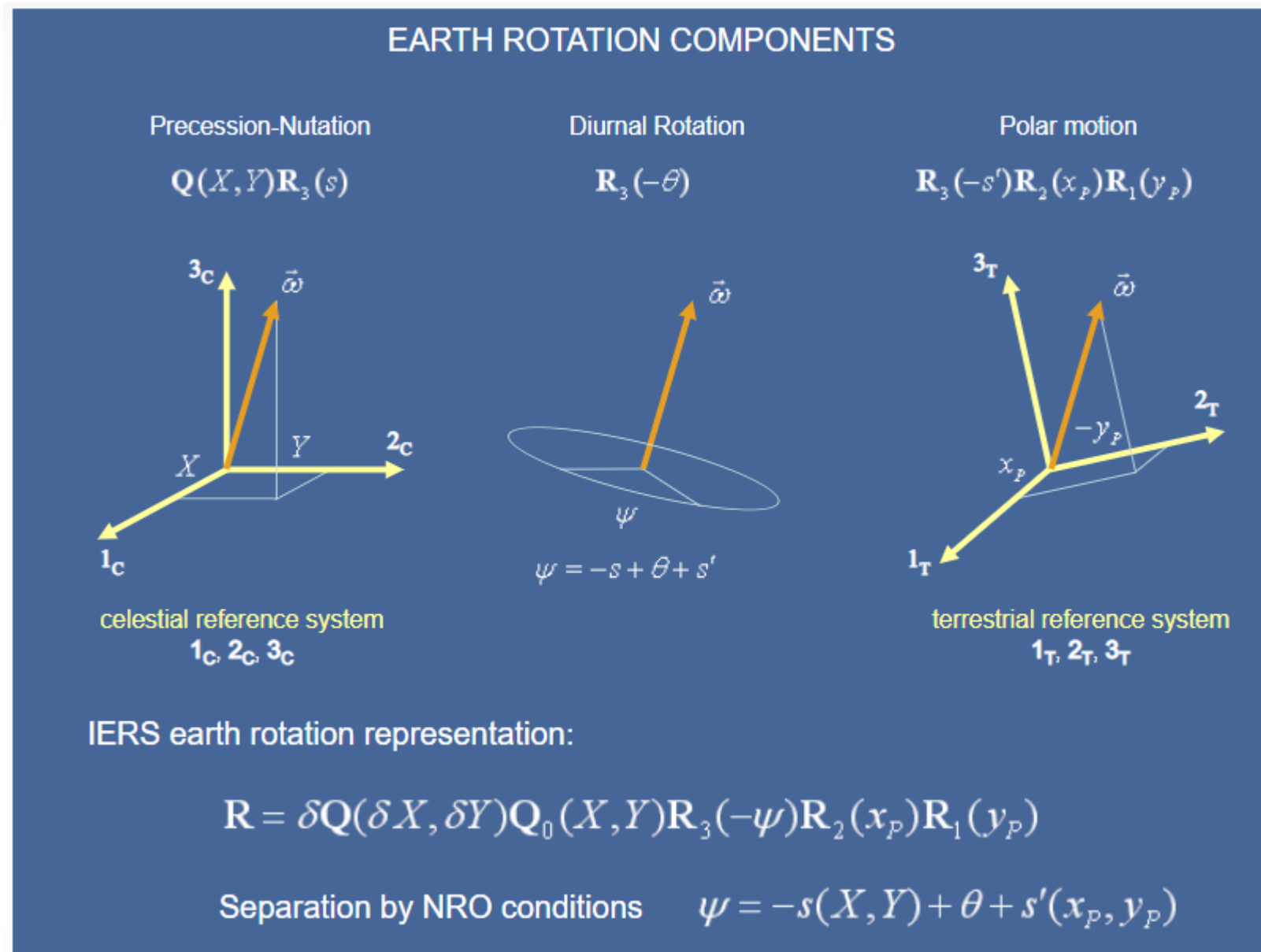
EOPの表記

- GCRSとGTRSの間の変換マトリクス.
- CIPは軸 3_c に相当し, TIO (赤道と黄道の公転) が 1_T に相当する.
- GCRSの X, Y 面は2003年のCEPをCIPと合わせた時, CIPを垂線とする面で定義 (IAU2006).
- δQ が歳差章動角の実観測値であり, CIPとCEPの間の傾きとして表される.

$$Q_0(TCG) = PN(TT) + offset$$

(伝統的歳差章動項)

$GCRS(TCG) \rightarrow BCRS(TCB) \rightarrow inertial system$ s : X_p (TIO)の非回転原因による方向変化, 地球変形や重心移動による平均回転楕円体の軸の移動

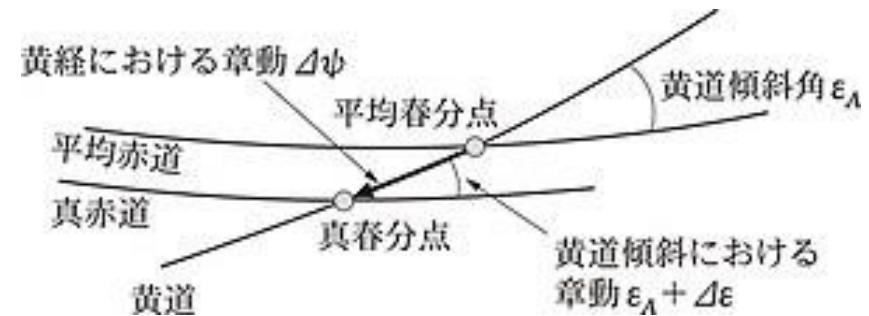


章動

太陽と月の引力によっておこる地球の自転軸の変動のうち、歳差以外の、比較的短い周期の規則的変化。太陽と月が地球に及ぼす引力の強さと向きは、公転運動の性質を反映して半月、半年、18.6年などの周期で規則的に変わる。それに応じて地球もさまざまな周期の首振り運動を行うが、このような短い周期のものが章動である。なお章動では極運動と異なり地球上の極（自転軸と地表の交点）の位置はほとんど変わらない。

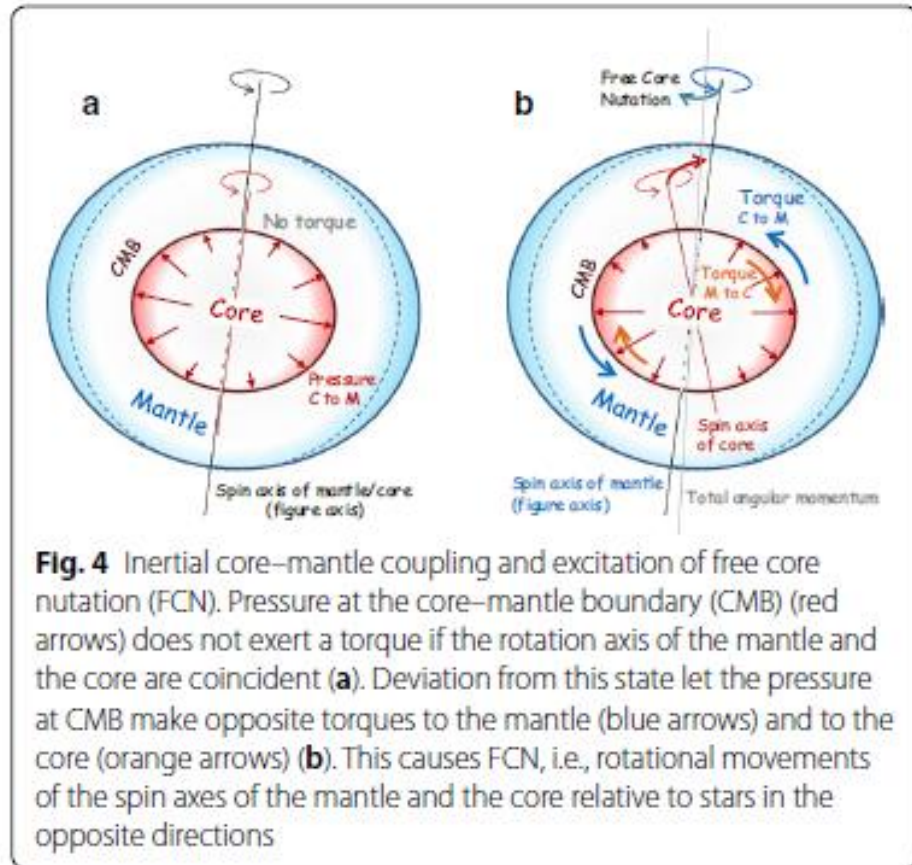
章動は多数の周期成分からなっているが、代表的なものは赤道面（地球の自転軸に垂直な平面）と黄道面（地球が公転運動を行う平面）の23度26分の傾きを原因とする半年周と半月周の章動、白道面（月の軌道面）が黄道面に対して約5度の傾きを保ち、しかもその向きが18.6年の周期で変化することによる18.6年周章動、地球と月の軌道が楕円（だえん）形であるために生じる年周と月周の章動などである。最大の18.6年周章動でさえ振幅が9秒角にすぎない微小な運動である。章動は地球の内部構造、とりわけ地球深部の流体核の影響を強く受けるため、その性質を利用して流体核の粘性や核マントル境界の形状などを調べる研究に役だっている。明治期の緯度観測によって木村栄（ひさし）が発見した有名な年周 z 項も章動に及ぼす流体核の影響が原因であった。（ニッポニカより）

潮汐力に対する地球（流体・固体）の変形，重心移動で発生する自転軸の首振り。
複数の潮汐成分（分潮）に対応して周波数が決まる。地球内部の構造や自転・公転によってによってレゾナンスが発生する（K1分潮 $t=23.93h$ ，等）ことは，重力観測から調査されている。



伝統的な章動の概念図

自由章動 (FCN)



Heki, 2020, EPS

The instantaneous axis of rotation of a solid body cannot remain rigorously fixed inside the body if it oscillates in space, and vice-versa. The Poinsot movement consists in cones rolling on each other without slipping, the contact line being the rotation axis, which describes one cone in space and another inside the body. Usually, we call precession and nutation the motions of the Earth's rotation axis in the space reference frame. The polar motion (or "wobble") is the associated movement related to the Earth, modifying the latitude at a given place.

The nutations forced by the Moon, the Sun and the planets are generally much more important than the free nutations. Among these free oscillations, there is the Free Core Nutation (FCN) and the ["Free Inner Core Nutation"](#) (FICN).

The Free Core Nutation (FCN) is a mode related to non-alignment of the rotation axis of the core and of the mantle. It has a long period (of 432 days) in the celestial frame and is a retrograde mode. The physical parameters involved are the flattening of the Core Mantle Boundary (CMB) and the deformation of the CMB induced by the dynamic pressure. This mode is also called the Nearly Diurnal Free Wobble (NDFW, period of about 1 day), if observed in the terrestrial reference frame. (Z 項のこと)

The lunar-solar attraction is responsible not only for the orbital motion, but also for the nearly periodic tidal motion of the Earth. The tidal force tends to deform the Earth to a prolate ellipsoid aligned with the Earth-Moon and Earth-Sun axis. The most obvious phenomenon, which represents the Earth's response to the luni-solar tidal force, is the ocean tide, but also there are deformations of the solid Earth, simply called Earth tides. There are additionally induced variations of the Earth's orientation in space (nutations). Observations of the Earth's responses to tidal forces supply important constraints to understand the Earth's interior. In particular, the variation of the observed response as a function of the frequency in the tidal band tells us something about the interior of our planet that seismology cannot provide. This variation with frequency is caused by resonant behavior of the Earth near 1 cycle per day, due to a normal mode of the rotating Earth. This mode is the Nearly Diurnal Free Wobble (NDFW, period of about 1 day, period = $1 / [-(1 + (1 / 432))]$ day), if observed in the terrestrial reference frame, and the Free Core Nutation (FCN, period = 432 days), if referenced in the space frame.

Observing the NDFW / FCN is thus very useful to measure the CMB flattening and to obtain information about the dissipation effect at this interface. Fortunately, the eigenfrequency of the NDFW is located within the tidal band and is thus sensitive to the tidal forcing for the diurnal tides. In the space frame, the FCN is measured by the Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

It is worthy to note that the observation of the NDFW / FCN is a non-seismic proof of the fluidity of the outer core.

FCNの様相

- 振幅：dX Ac 64.1, As 34.0, dY Ac 64.6 As 33.9 micro asc
- 周期：-431.18~-431.27dayが最新の推定値
- 振幅が40年（18.6年の倍数？）で変化？. 白道-黄道の昇交点移動に何らかの関係があるのか？
- 周波数成分は単一ではなく，マルチトーンの可能性あり
- Dissipation Process
- 431日の周期は一定か？
- 大気による励起があるかもしれない.

Lambert, 2006, A&A

— semi-annual, CW, quasi-biennial wobbleとの関連性は？

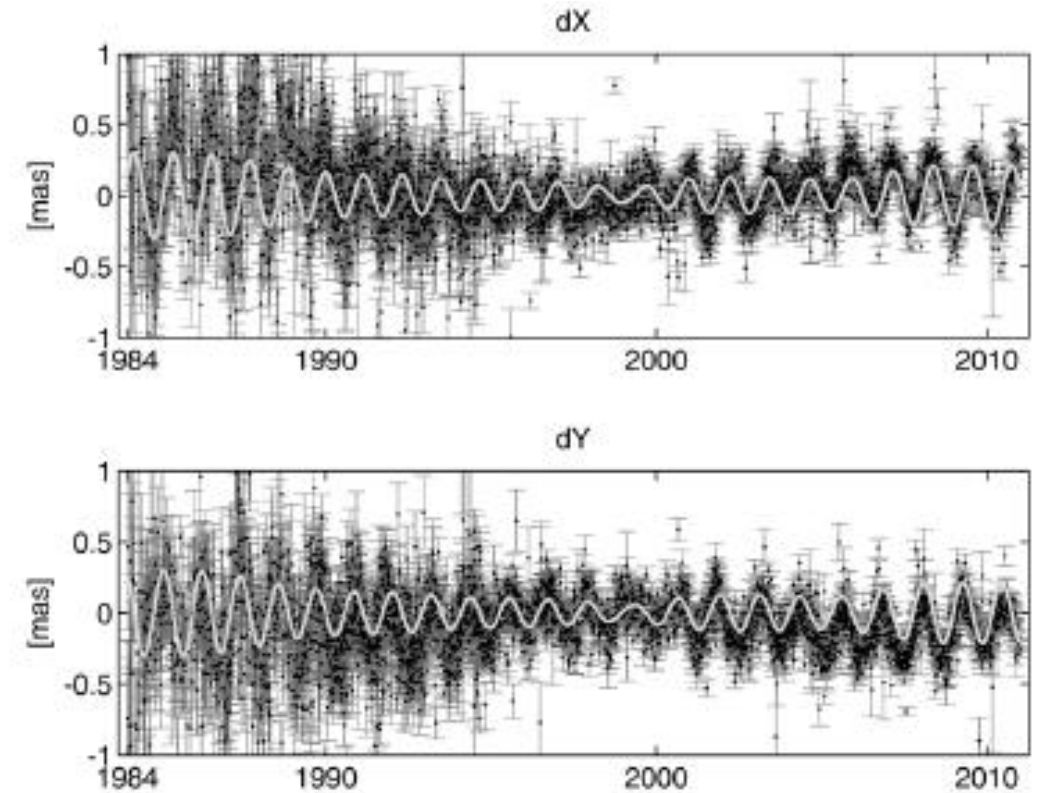
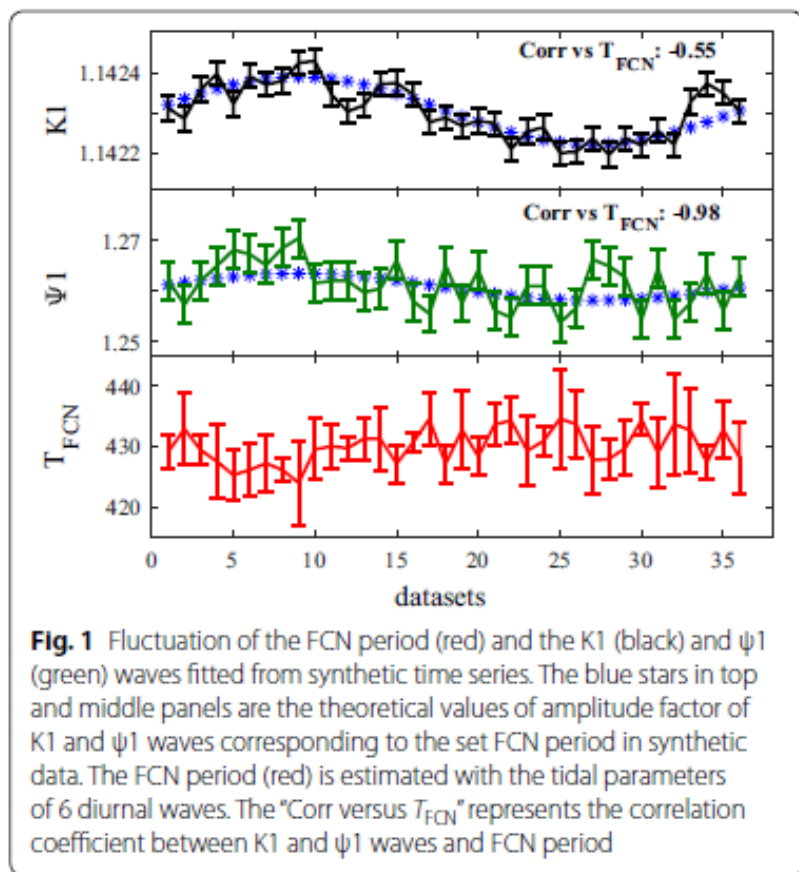


Fig. 2. CPO with respect to the IAU 2006/2000A precession-nutation model (grey) together with the FCN model (light grey) estimated in this work. Before 1986.0 and after 2009.0, the model is extrapolated.

Krasna H., Böhm J., Schuh H. 2013, A&A



Cui, *et al.*, 2018 EPS

重力計から見たレゾナンスの周期変化

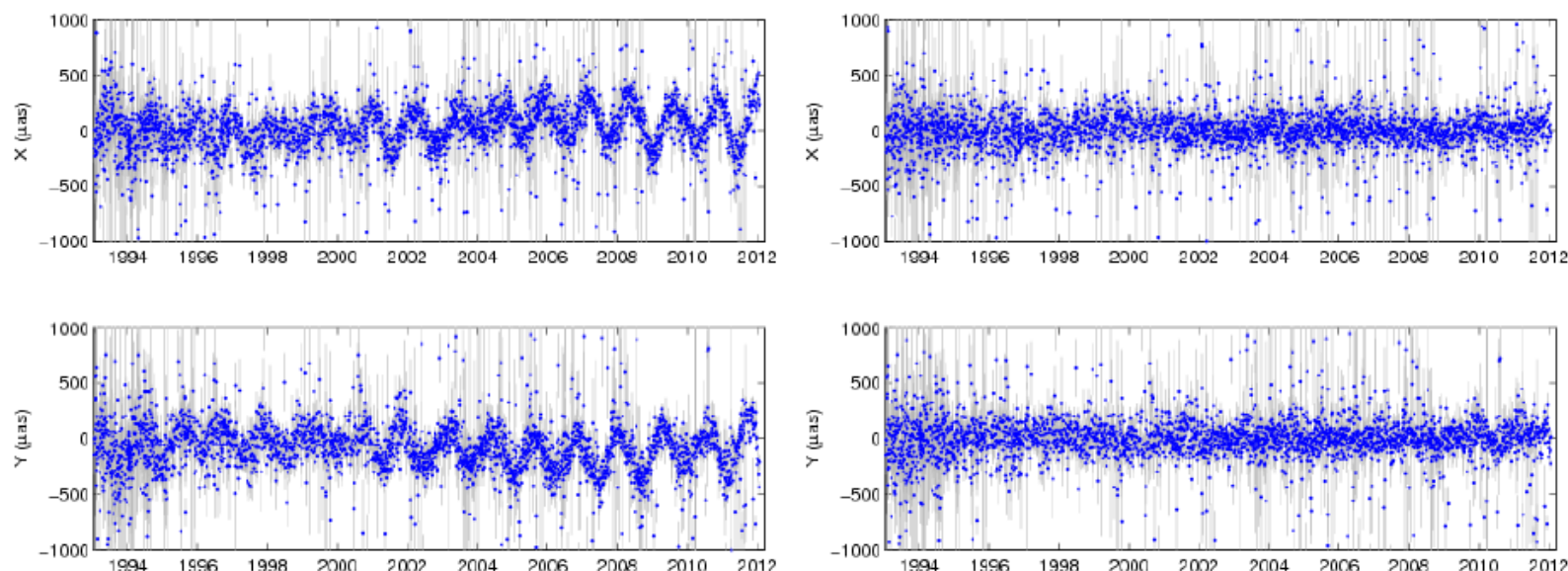


Figure 1. The OPA series of nutation offsets with respect to IAU 2000A after 1993 before (left) and after (right) fitting and removal of the FCN and the tidal terms.

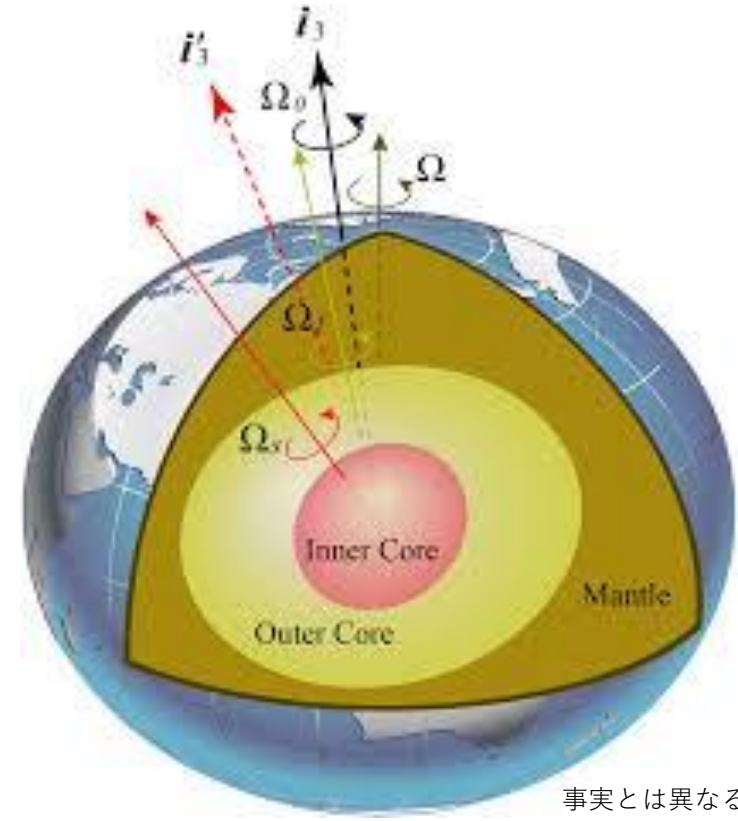
Lambert, *et al.*, 2012, IVS GM Proceedings

VLBI観測から推定された章動角（左）からFCNと潮汐項を取り除いた残差（右）。左よりも右の残差の分布が広がっており，FCNの正しい除去が出来ていない．FCNのモデルの不備が考えられる．誤差に埋もれたシグナルの検出とモデル化は？

FICN (Free Inner Core Nutation)

This motion is very similar to the FCN, but, concerns the outer and inner core. It has never been observed and theoretical calculations predict a very weak resonance effect on Earth tides and nutations. The period is retrograde diurnal in the terrestrial frame and prograde long-period in the celestial frame (of about 470 days). (Dehant et al. (1993), and others). The parameters involved are the flattening of the inner core, the densities of the inner core and outer core, and the deformation of the Inner Core Boundary (ICB) due to the fluid dynamic pressure on the ICB. In a very detailed analysis of VLBI data, Mathews et al. (JGR, 2001) have determined a FICN period and damping from its resonance in the nutations. They obtain a period of 1025 days.

<http://sbc.oma.be/frinconu.html>



事実とは異なる場合がございます

地震（自由振動）により励起するという説もあり，常に同じ振動状態では無いかもしれない．
MCBでの応力軸偏差分布と同じように，ICBでの流体圧による応力軸偏差分布が変化することが，
FICNの起動力？内角の首振りトルクの中で何割がマントルまで染み出すのか？

内核

- 半径1200km.
- 固体で珪酸塩と鉄・ニッケル系金属が主成分とされる.
- 形状は3軸不等の楕円体？もっと複雑？
- 地球の冷却により，流体核からの析出で成長．形成開始年代は30億年前といわれてきたが，東工大とSpring-8の研究から7億年前に変わりそう．析出レートが4倍速くなる．
- 地震波の伝道速度に異方性.
- 地震波伝道速度の異方性の方向がマントルに対してずれていく現象から，マントルに対して差動回転しているかもしれない.
- 地震波伝道速度の異方性は内核の結晶構造の向きに起因するか？
- 回転軸はマントルの軸と傾いているか（FICN励起源）．
- マントルとの回転の結合は磁束コネクション？
- Transition. Euler Rotation. Time variation of the angular velocity of each Euler axis？



FICNの振幅は？

MHBで明確な振幅の予測は見当たらない.

Table 5. Contributions (Re, Im) to Nutations From Individual Effects^a

Period	Anelasticity	OT Load	OT Current	CMB emc	ICB emc
−6798.38	(−0.351, −0.155)	(−0.920, 0.986)	(0.005, −0.020)	(−0.328, 0.249)	(−0.101, 0.278)
6798.38	(0.047, 0.021)	(0.117, −0.126)	(−0.001, 0.003)	(0.037, −0.029)	(0.010, −0.049)
−365.26	(0.267, 0.094)	(0.174, −0.216)	(0.000, −0.001)	(−0.450, 0.411)	(−0.012, 0.017)
365.26	(−0.010, −0.004)	(−0.021, 0.023)	(0.000, −0.001)	(−0.0003, 0.003)	(−0.014, 0.003)
−182.62	(0.034, 0.015)	(0.061, −0.069)	(0.001, −0.002)	(−0.016, 0.012)	(0.000, 0.000)
182.62	(0.287, 0.126)	(0.574, −0.615)	(−0.014, 0.050)	(0.061, −0.047)	(0.026, −0.013)
−13.66	(0.002, 0.001)	(0.006, −0.009)	(0.000, −0.005)	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)
13.66	(0.095, 0.041)	(0.021, −0.019)	(−0.056, 0.104)	(0.002, −0.001)	(0.000, 0.000)

^a Units are in mas.

Mathews et al., 2002, JGR

Nutation componentsに対する，地球内部構造の効果の大きさ-----

Semi annual componentでのCMBとICBの効果の比は30:1～40:1くらい.

FCNに対してFICNの振幅は，FCNの1/30～1/40くらいとすると，FCNの40分の1くらいの振幅か？~2.5 *micro asc*?

振幅や周期が常に一定とは限らない．レゾナンスによる増幅はあるか？ノードがあるか？

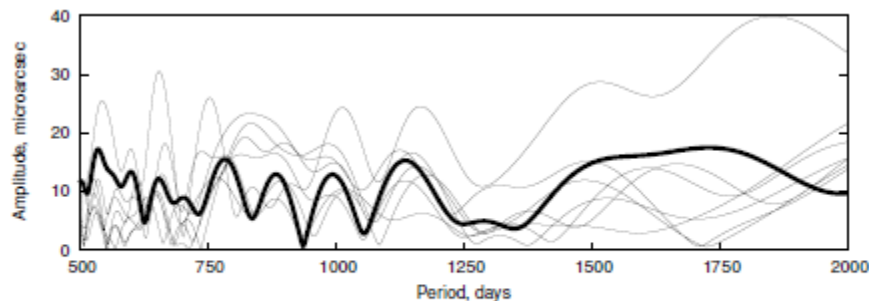


Figure 1: Periodogram of the individual (think line) and IVS combined (thick line) CPO series after removing FCN.

MHBで予測された周期帯に明確なピークは見られず，10～20 μasc のハーモニクス的な誤差が卓越している.
 少なくともMHBの予測された周期帯に10～20 μasc 以上の振幅を持つ振動は見られない．ノイズレベルが高いことが原因と述べられている.

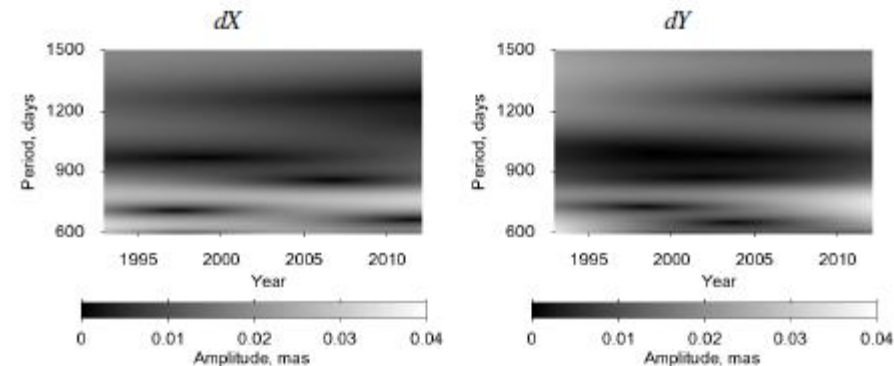


Figure 2: Wavelet scalograms for the IVS combined CPO series after removing FCN.

Malkin, 2013, Physics.geo-ph

FICN検出の試み

Table 3. 95 per cent CI for the estimated resonance parameters and comparison with the results of Koot *et al.* (2008) and Mathews *et al.* (2002).

Parameter	Nutation	Gravity	Koot <i>et al.</i> (2008)	Mathews <i>et al.</i> (2002)
N_2^R	(0.0482, 0.0488)	$(4.5, 7.3) \times 10^{-4}$	0.05129	0.0489108
N_2^I	$(1.23, 1.53) \times 10^{-3}$	$(-1.7, 0.7) \times 10^{-4}$	-0.362×10^{-3}	1.62916×10^{-3}
T_{FCN}	(-430.1, -429.3)	(-515, -396)	-421.94	(-429.93, -430.48)
Q_{FCN}	(15 392, 16 866)	(7763, 320 888)	13 665	20 000
N_3^R	$(1.6, 8.4) \times 10^{-4}$	$(-7.2, 9.1) \times 10^{-4}$	2.9584×10^{-4}	2.95844×10^{-4}
N_3^I	$(-2.0, 3.6) \times 10^{-4}$	$(-7.4, 9.4) \times 10^{-4}$	-9.577×10^{-5}	-9.57707×10^{-5}
T_{FICN}	(362, 414)	(28, 725)	1000	(930, 1140)
Q_{FICN}	(2600, 6807)	(75, 3083)	271	677
N_1^R	(-0.804, -0.796)	—	-0.7755	-0.791653
N_1^I	(0.027, 0.037)	—	-0.00358	0.0414503
T_{CW}	(425, 430)	—	393	430.3
Q_{CW}	(19, 40)	—	108	88.4

Rosat, *et al.*(2017), Geophys J. Int.

For the FICN, the most probable solutions do not agree with the previous estimates by Koot *et al.* (2008) or Mathews *et al.* (2002).

The FICN is poorly, if at all, constrained by the VLBI nutation data.

It emerges from these results that both gravity and nutation data are not precise enough to put objective constraints on the FICN frequency and damping factor.

FICN検出の試み

Lambert, *et al.*, 2012, IVS GM Proceedings

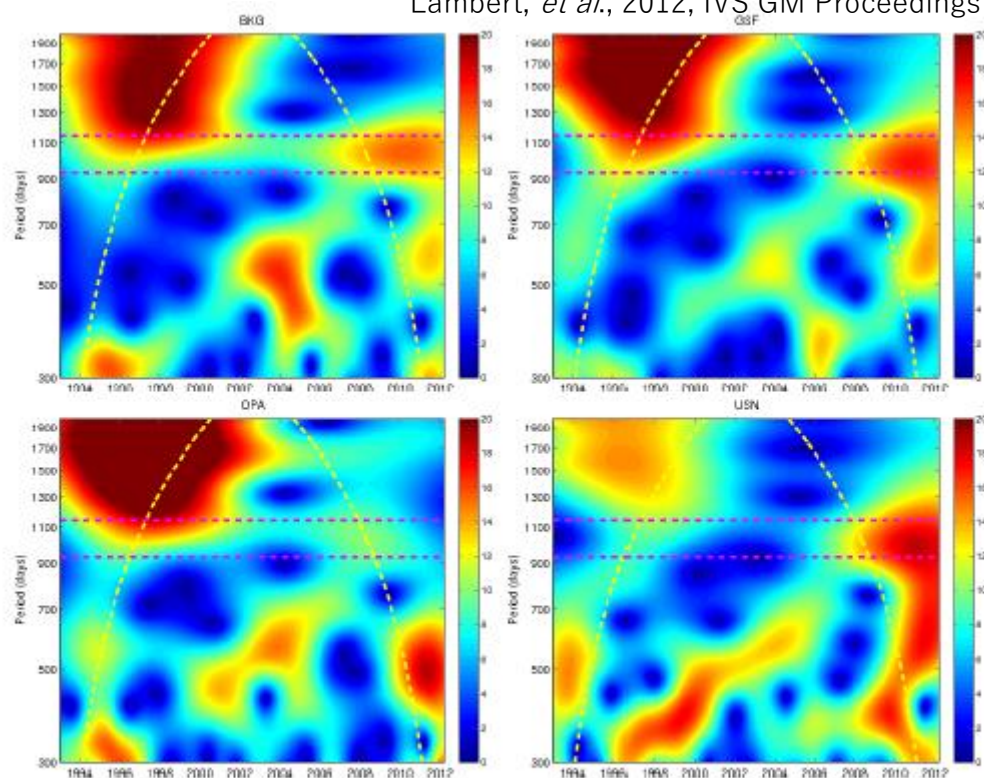


Figure 2. Wavelet spectra of four operational nutation series. The horizontal dotted lines show the FICN frequency band around 1034 days following Mathews *et al.* (2002). Amplitude unit: μs .

複数のVLBI章動角推定シリーズのウェーブレットスペクトル。MHBで示された周期帯（赤横ドット線）に2008年頃からピークがあるように見える。

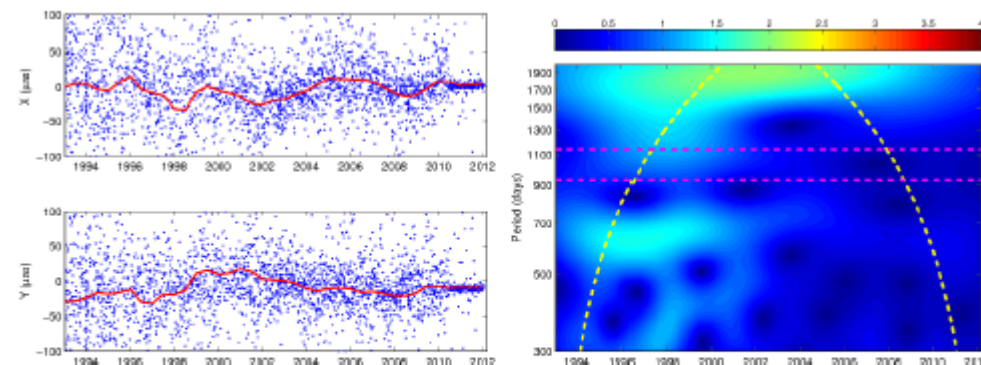


Figure 3. Nutational signature of the unstable radio sources (left), and prograde band of its wavelet spectrum (right). The horizontal dotted lines show the FICN frequency band following Mathews *et al.* (2002). Amplitude unit: μs .

観測電波源の構造の変化が、EOPの解に影響を与える事項を考慮して、構造の変化が大きい電波源を外した場合の章動角推定移動平均値からウェーブレット解析を行った場合の結果

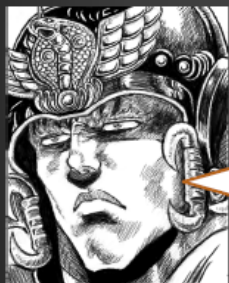
FICNの周期帯からピークが消えた。左図のモザイクの殆どは電波源構造変化の影響？MHBが示した周期は、実はfake, ghost？

ネットワークの形状も適正か？

FICN検出に対する壁は……

WHY IS IT HARD TO DETECT THE TARGET SIGNAL?

Too large disturbance



- 観測値の持つ白色雑音誤差が大きすぎて、変化が雑音に埋もれている.
- シグナルの継続期間が有限の場合、積分によって雑音的な誤差による揺らぎを減らす効果が望めない.
- シグナルによる観測値への寄与と系統的誤差源のランダムウォーク的な変化が分離出来ない.
- 観測装置の不安定性や観測値にスケール誤差を与える要素が観測値へ擾乱を付加する.

Misdirect processing



1. モデルのフォーミュラが間違っているか、必要精度まで表されていない.
2. モデルの時空間分解能が不足.
3. モデルが賞味期限切れである.
4. データ量不足や白色雑音誤差の過多が原因で、当て嵌め値が不安定.

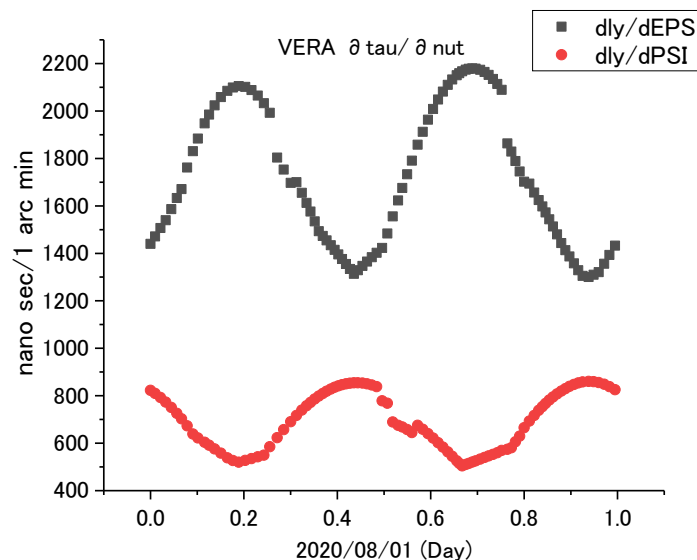
- 章動の検出に最適化されたネットワークの構築が必要
- 章動角の推定値の誤差が大きくて、シグナルが埋もれているように見える.
- 天体の構造変化、等の外部誤差源による擾乱を考慮する必要
- 観測システムに検出できる感度があるか？

- 振幅が極めて小さい. 数マイクロ秒角？ 周期の予測が正しいかどうかは分からない. 振幅の大きさや周期は一定か？
- FCNや章動のモデル化が不十分では？
- 地球内部の構造、内核の構造と運動、ICBの形状モデルが不十分.

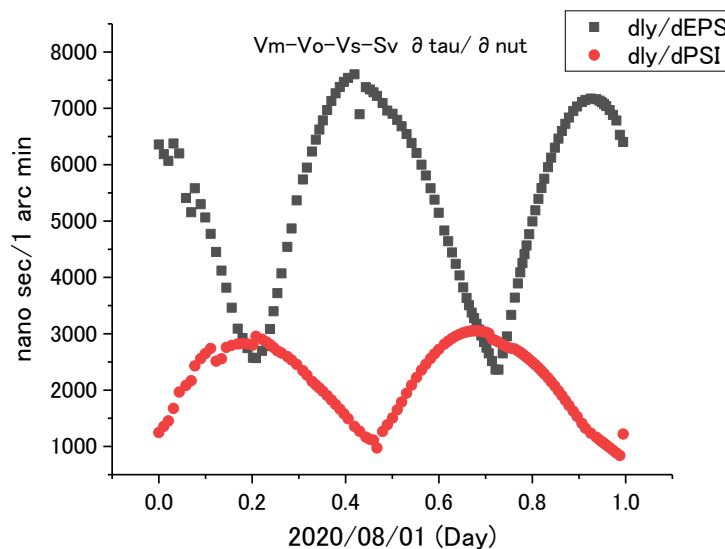
レベルを上げて効果的に殴る事が、攻略への道
レベルを上げる = トータルパッケージングとして性能向上

章動角計測の感度とネットワークの形状の関連性

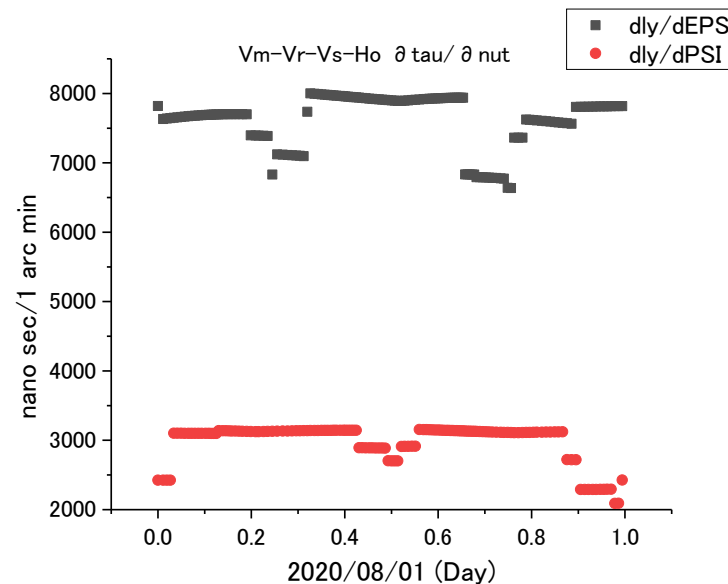
幾何学的遅延の章動コンポーネントに対する偏微分 $\partial\tau/\partial\epsilon$, $\partial\tau/\partial\psi$ の計算
先ずは、章動角の大きさ（1分角）でシミュレーションを行う



VERA



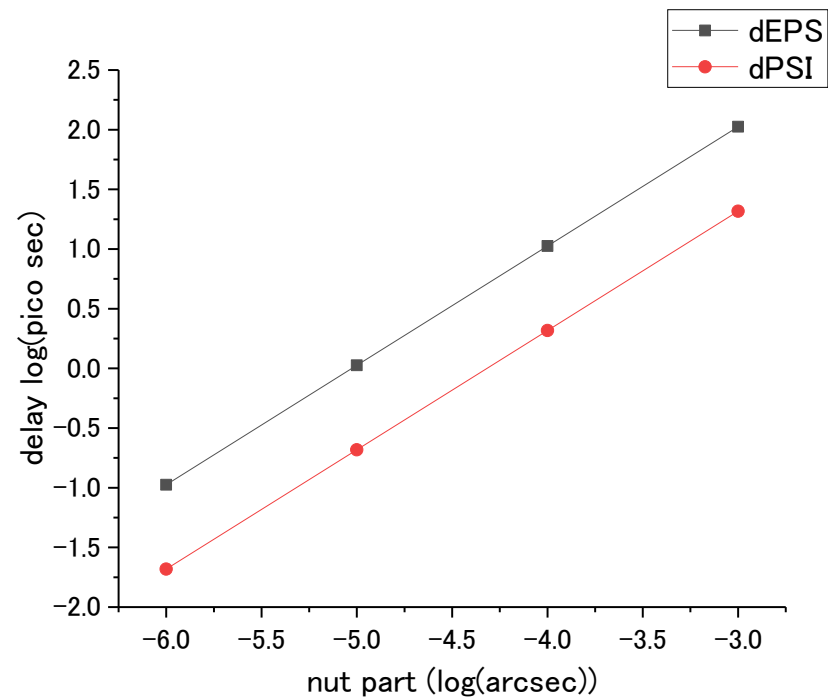
VERA + Svetloe



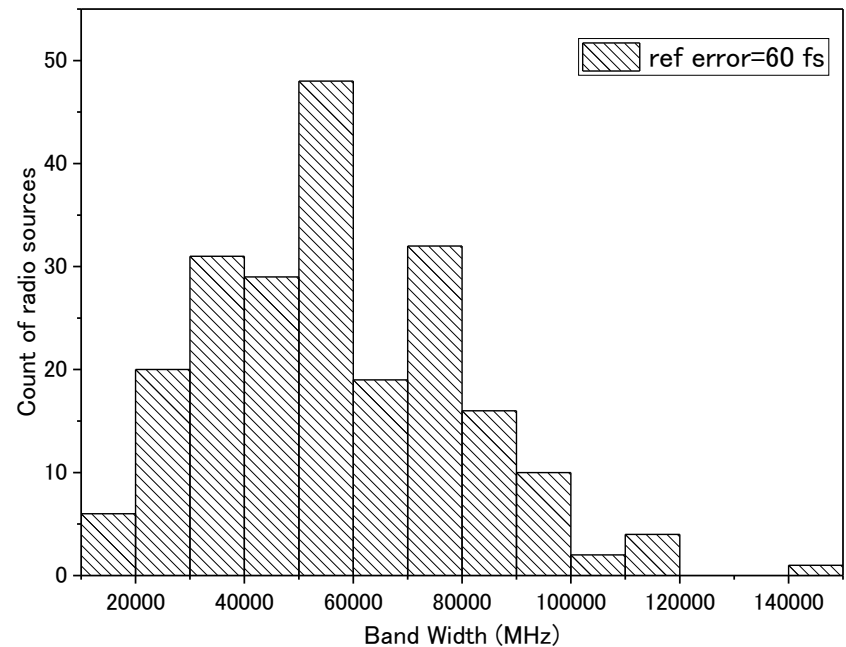
VERA + Hobart

緯度方向に汎地球基線を持ったネットワークで、高感度で安定した計測が可能。
SvetloeやHobartを入れるとVERAネットワークの3~4倍の大きさのネットワークになる。
基線長に比例して、感度が上昇する。

章動角計測の感度とネットワークの形状の関連性―― 2



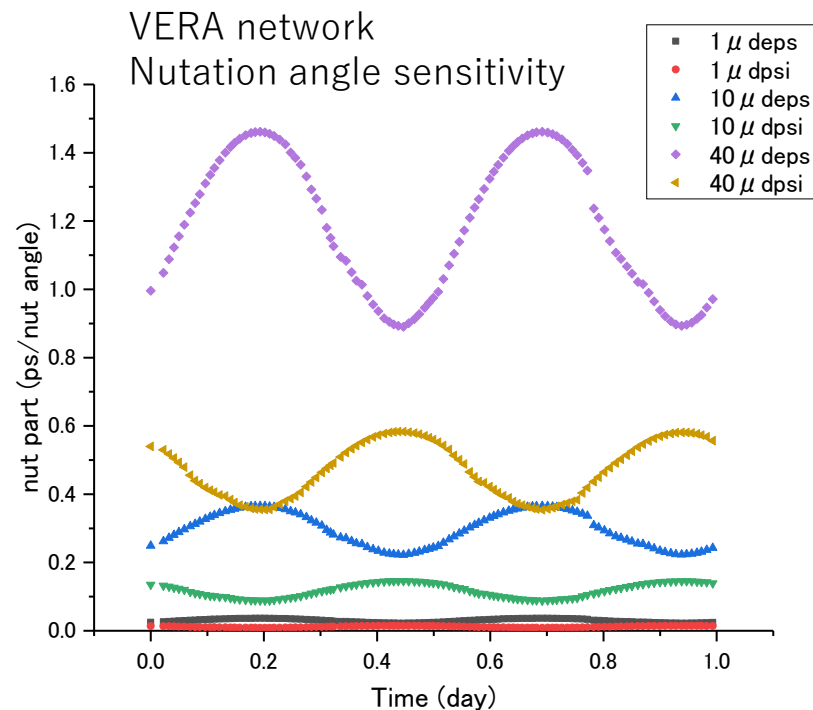
章動角の大きさに対して必要な遅延の精度
1 μ ascには100～30 fsの精度が遅延に必要



60fsの白色雑音誤差を得るために必要な帯域幅
VERA基線, Q帯, 電波源は広帯域K/Q帯連続波源フリンジサーベイ (Jike, et al., 2018, 10th IVS GM)から選択.

基線	基線長 km	感度 ps/ μ asc
VERA	2000	0.06
Global	10000	0.3
人工衛星	40000	1.2
地球-月	300000	10

100GHzの帯域幅や惑星間VLBIは、最終的な目標として…… ここ数年で現実的な観測仕様は？



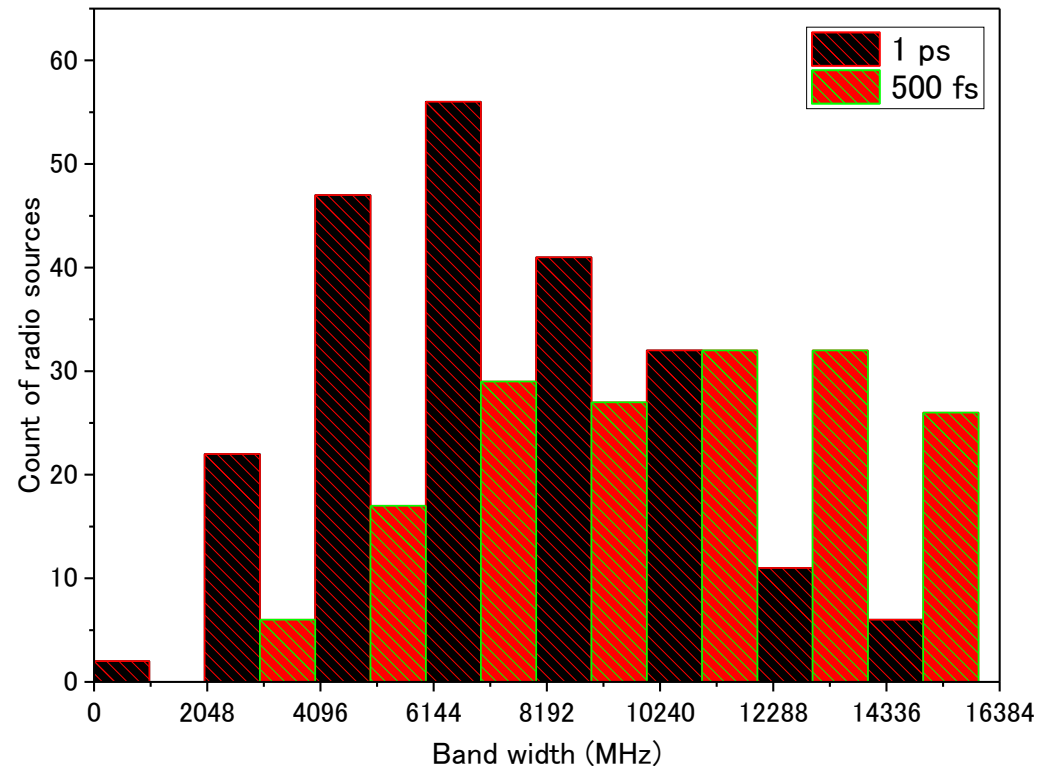
遅延の短期的誤差を決定する周波数安定度を作る基準信号発生器の精度に掛り始めるか？

遅延の精度が 10^{-14} オーダーはそろそろ現状の基準信号発生器の限界に近い。

Hメーザーも短期安定度はOCXOの安定度に依存。

40 μ ascの精度を目指すならば、誤差 1 psでも可能性が出てくる。20 μ ascでは、500 fsの精度が求められる。20 μ ascは現在の章動角計測の2 – 3 倍の精度。

Q帯 広帯域フリンジサーベイより。



誤差 1 psは8GHzの帯域幅で100以上の電波源を確保，更に，誤差 500 fsでも12 GHzまであれば，100以上は確保される。構造効果指数が1 (Charlot et al., 2010, AJ)の電波源もほぼ網羅されており，構造変化による章動角への影響を削減することは可能と考えられる。

調査を進めるたびにVGOSの考えに近くなります。差別化は？

遅延計測精度とネットワーク感度のまとめ

- $1 \mu\text{asc}$ の推定に感度を持つためには、汎地球ネットワークで300 fs, VERA基線では60 fsの遅延決定精度が必要.
- 60 fsの遅延決定精度を保証できる帯域幅は100 GHz必要であり, 将来の希望性はあるが, まだ現実的ではない.
- $10\sim 40 \mu\text{asc}$ の章動角決定精度を目指すことは現実的. そのためには500 fsから1 psの精度を遅延観測値で保証する必要がある.
- 電波源のコンパクトネスや構造変化を抑えるためには高周波 (22GHz, 43GHz~) が良いか? 22GHz帯はCRFが整備, 43GHz帯の輻射構造マップは整備されつつある.
- 1 psの遅延計測が出来たならば, 人工衛星や月-地球間VLBI等, 太陽系の広さを用いた時空計測手段へ計測決定精度を適用することで, $1 \mu\text{asc}$ の角度計測能力を持つことが出来るだろう.

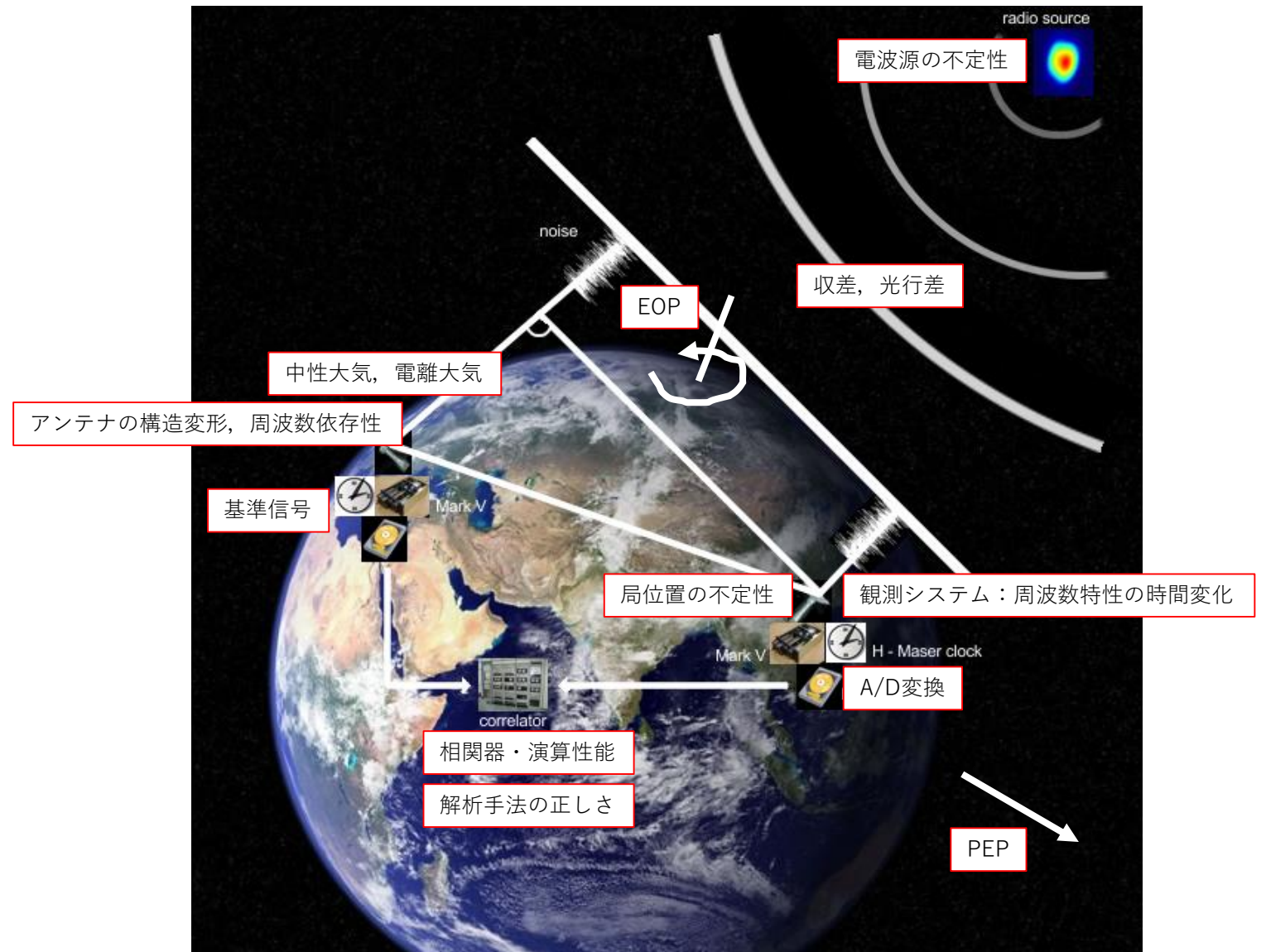
--- 月-地球間距離を数 mmの精度で計測する技術に相当.

地上と月面では時間の進み具合も違うはず. 相対論.
月面力学時とTCG, TCBの接続をどうする?

Total Packagingとしての精度向上に向けて

- 遅延に憑く誤差：理論的白色雑音以外では
 - 電波源：位置や構造の時間不定性，**周波数**依存性，高周波，広帯域を原因とする誤差源
 - アンテナ：構造の時間変化とその**周波数**特性変化
 - 観測システム：帯域内**周波数**特性の時間揺らぎ
 - 基準信号：基準信号や局内信号の**周波数**安定度
 - 中性大気・電離大気：**周波数**揺らぎの中でランダムウォーク成分よりも周期の長い変動
 - 観測局位置，EOP, PEP：位置のTRFに対する不定性，時間変化，ドップラー**周波数**の偏差
 - A/D変換：サンプリング**周波数**揺らぎ，エポックジッタ，サンプリング特性の時間変化
 - 収差・光行差：**周波数**依存性，天文常数の正しさ
 - 相関器：演算性能，演算精度，雑音成分と遅延追尾性能，部分ビット，部分位相補正，時間-**周波数**変換の演算信頼性の問題。
 - 解析：VLBIの誤差分布特性に的確な重みづけとのおのづれ，**周波数**特性に合わせた解析方法は？

F1でも総合的に性能が良いチームが強いです

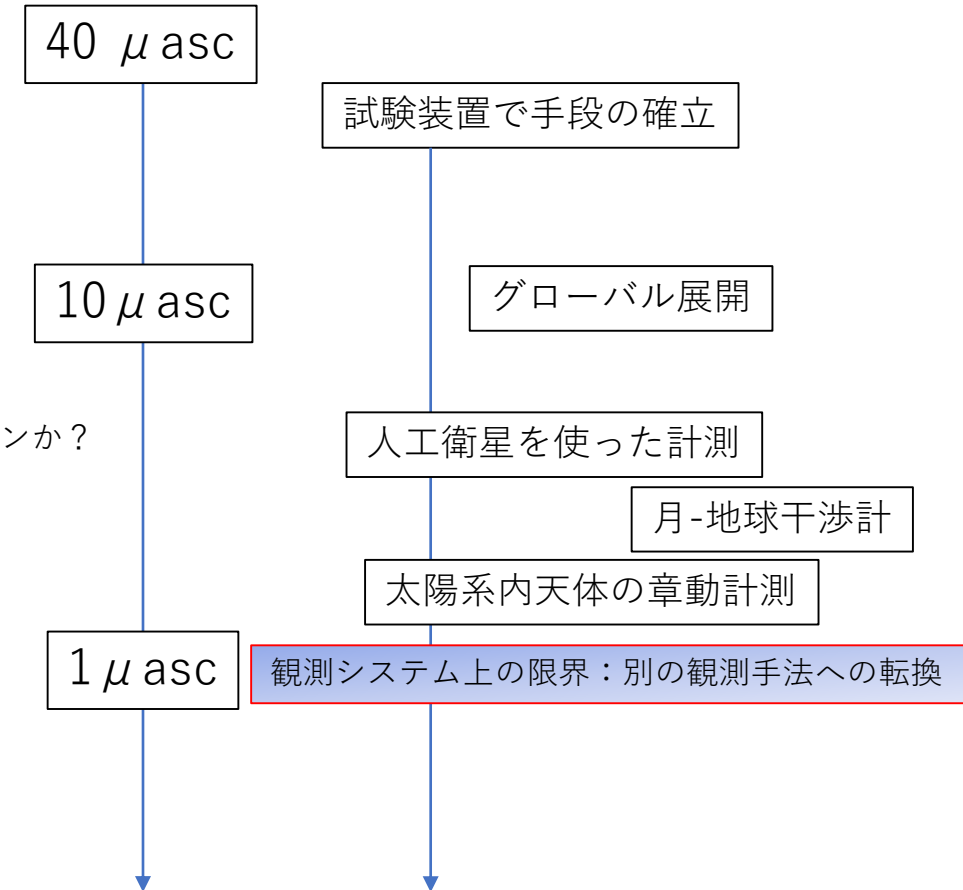


誤差の削減や観測目標展開のstrategy

周波数揺らぎの時間特性

- 白色雑音成分は積分で対処。ランダムウォーク，不定バイアス成分は補正で対処。
- ピコ秒の精度に対応する補正方法（時間レゾリューション，周波数レゾリューション）。
- 帯域内位相特性の時間変化は，観測帯域内の基準周波数 f_0 から1 GHz先で0.001 rad が要求最低ラインか？
- 周波数変化のトレーサビリティは，数分～観測時間。Scan間の周波数特性変化を結合すること。
- 相関処理が等研究の科学的要求に見合う性能であるかどうかを確認し，演算性能の向上を図る。

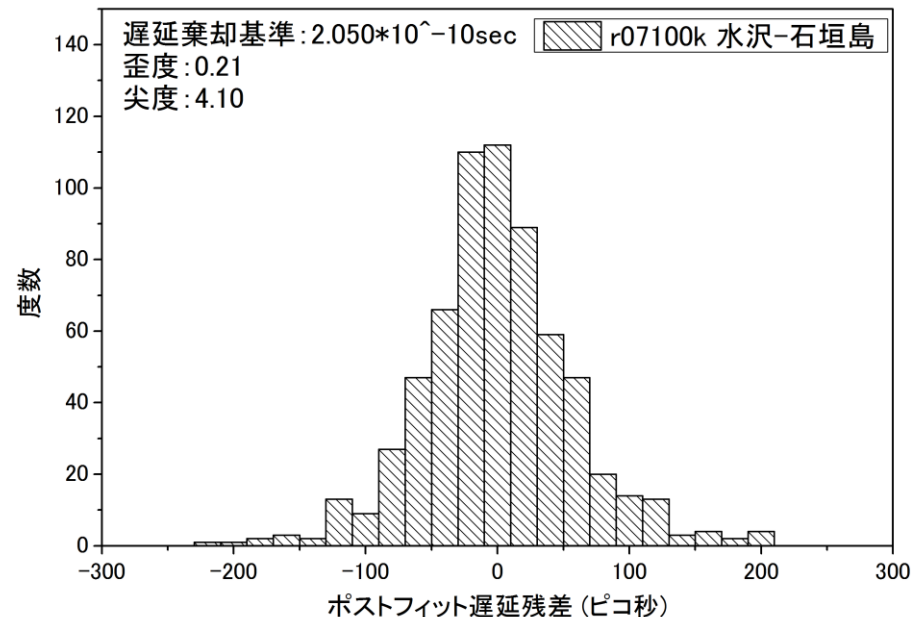
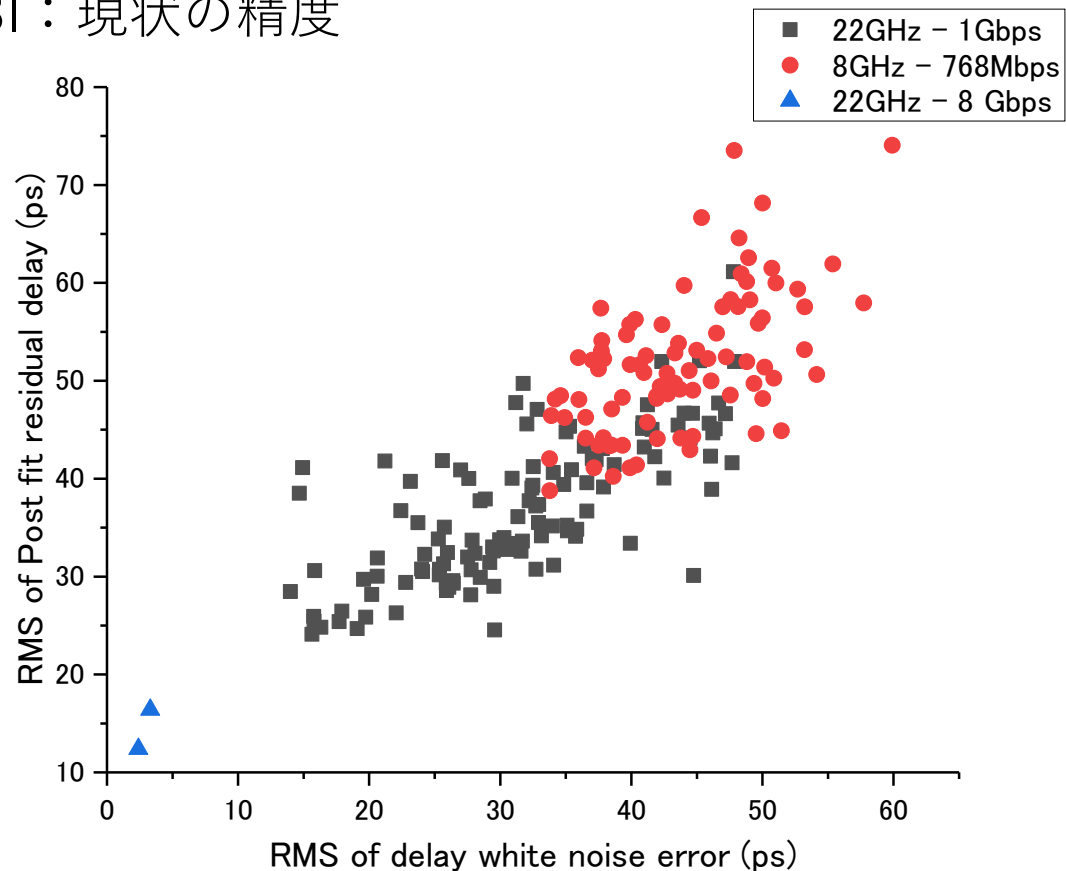
- 1， トータルエラーバジェットとして，まずは10 ps，次に1 ps，最終的にfsオーダー。
- 2， 観測装置としては，地球上の基線で精度向上を図る。
- 3， 太陽系探査機，月面干渉計，外惑星・衛星の章動計測へ展開。



地道な解決が必要。必殺技やエクスカリバーはありません。
エクスカリバーは，CRSとTRS（BRS）をつなぐ新たな観測方法かと思われます。
電磁波干渉法や素粒子干渉？は使うとして，VLBIよりも信頼性の高い観測手法は……

相対論測地，次世代の時空計測（赤外，光への移行，光格子時計，時間・周波数のRefが変わるか？）の可能性を探ることが重要かと思われます。
次世代周波数基準を用いた新たな時空計測

VLBI：現状の精度



VLBIのpost-fit残差の分布はlogistic分布. 白色雑音成分以外の誤差要因が混じっており, その大きさはr.m.s.で凡そ12 psと予測.

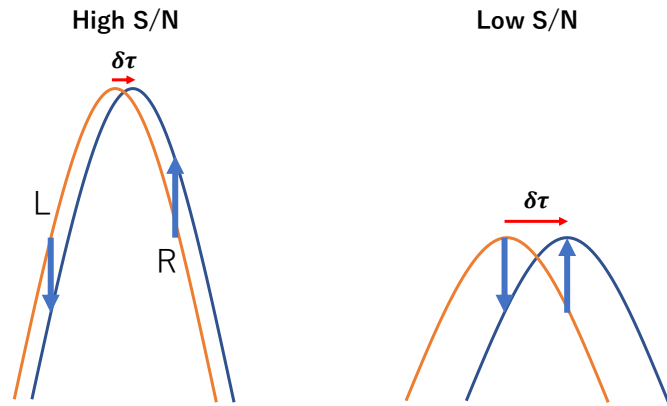
白色雑音の理論的な誤差の大きさは2-3 psを達成しているが, post-fit 残差はおよそ15 psある.

誤差要因は,

- ・ 相関器の遅延トラッキングエラーと付加ノイズ
- ・ 周波数揺らぎの数分以上の周期の成分の中で補正しきれなかった成分

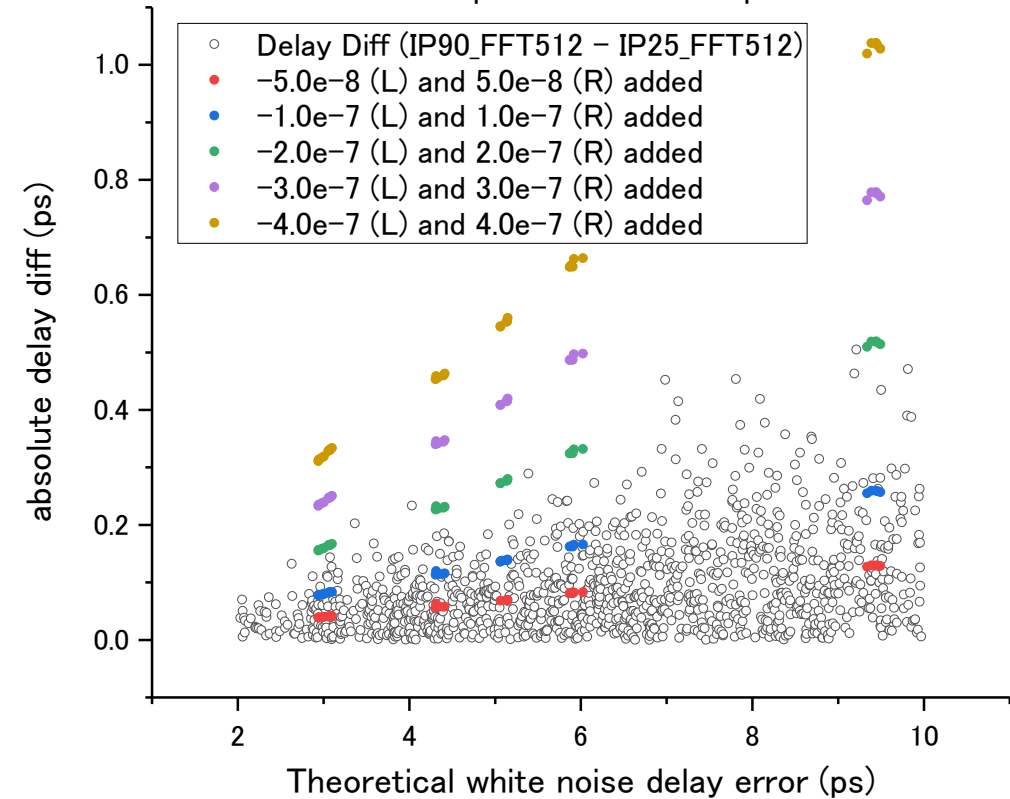
大気による周波数揺らぎ, 帯域内周波数特性の時間変化をトレースできるかが鍵である.

相関器の演算性能, 水沢Soft相関器



- When searching for fringe peaks uses the three points quadratic function fit, an offset occurs in the delay according to the change of the correlation coefficient at both ends.
- Even with a constant correlation coefficient offset, the lower the SNR, the larger the delay offset ($\delta\tau$).

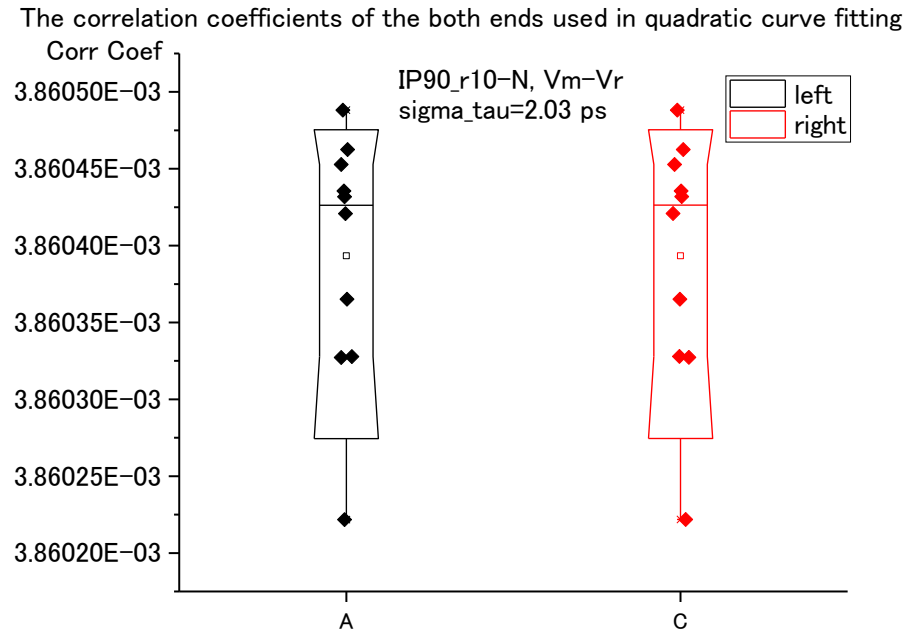
The variations in correlation coefficients change the solution of quadratic function peak search.



In the three points quadratic function fit of IP90_r10-1 fringe peak, an offset is added to the correlation coefficients at both ends.

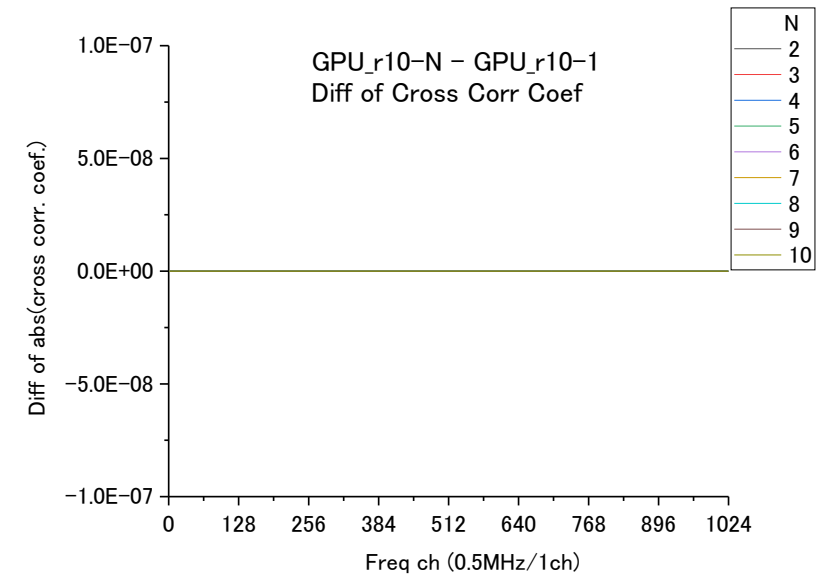
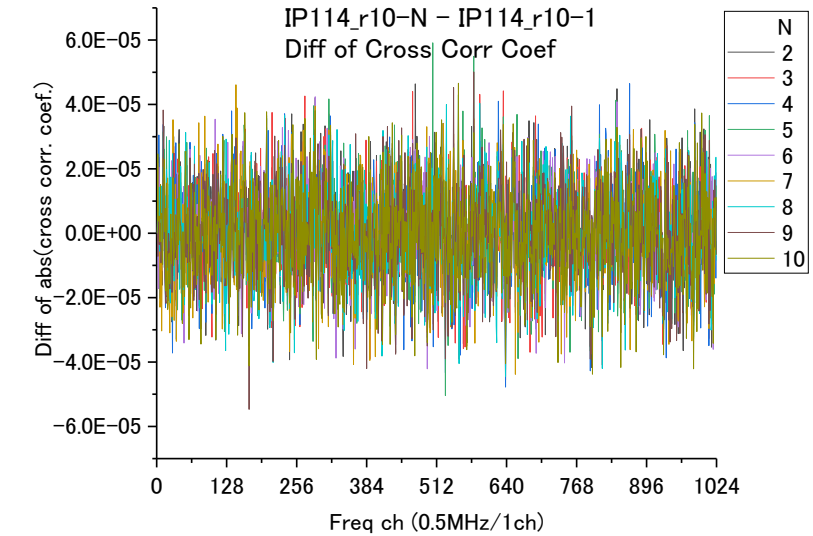
When the offset to be added to both ends is ∓ 2 at the 7th decimal place (green), the slope fits well with the top line of the scattered distribution.

遅延に差が発生する原因：

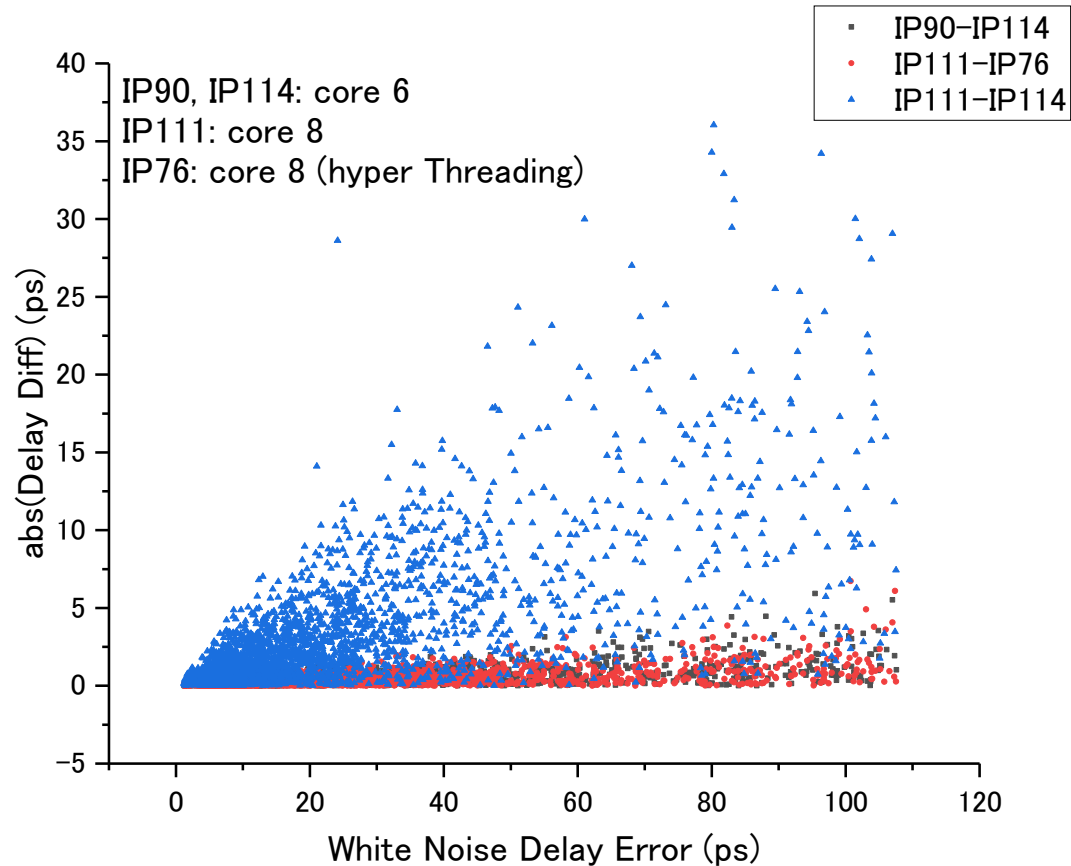


- Actually, the value of the correlation amplitude is unstable at the seventh decimal place.
- This is due to the reproducibility of the raw correlation data.
- GICO3 adds noise in FFT. It is considered that the effect by adding this noise is visible.
- GPU Corr. engine kfxcom has eliminated this noise addition.

The correlation coefficient varies at the fifth decimal place. The scatter of the mean after integration is reduce 0.00988 times.



Effectiveness of Hyper-Threading

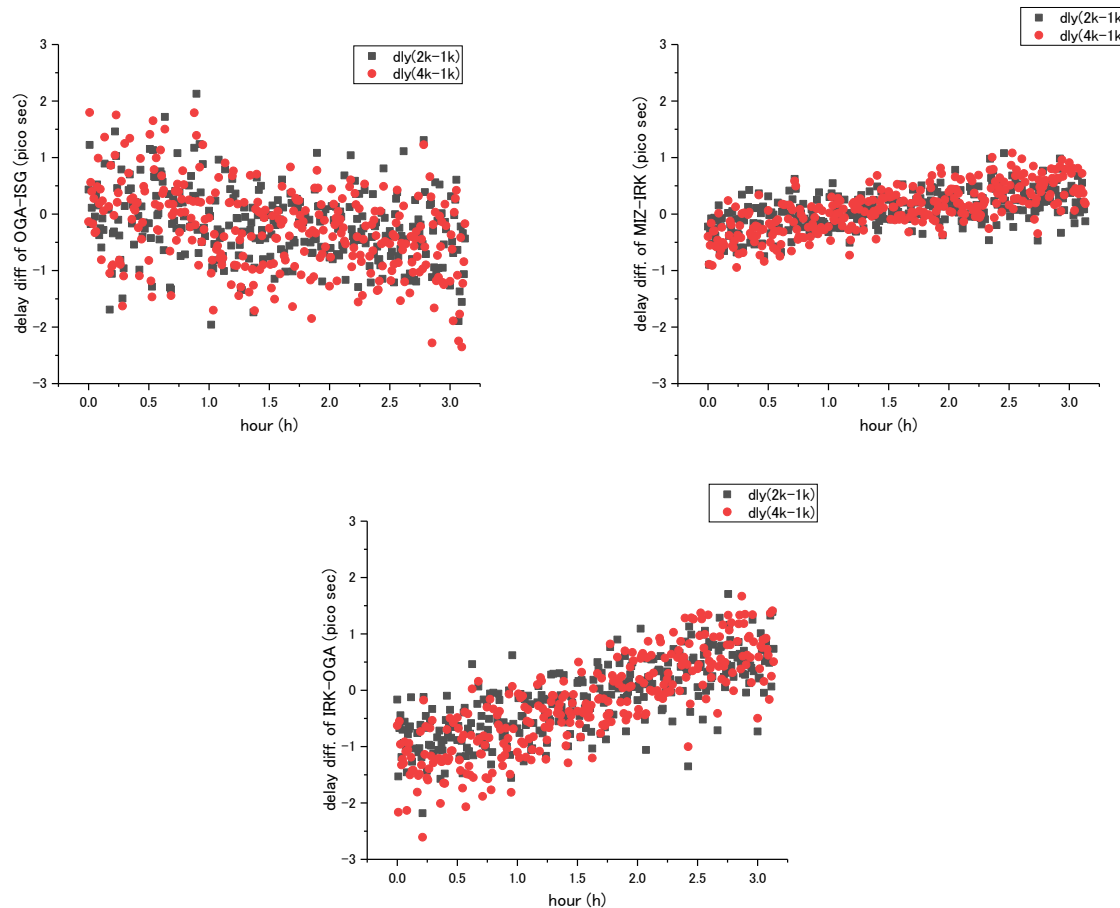


- Both IP76 and IP111 are 8 core CPUs.
- IP76 is made up of 16 cores by hyper-threading.
- However, the delay difference for IP111 falls within the range of variation due to additional noise.
- The delay difference seems to be different depending on the number of cores, not depending on hyperthreading.

相関器付加遅延誤差：FFT点数の違いによって発生する遅延差と特徴

It must be guaranteed that the calculation accuracy of the delay output by the correlator is less than 500 fs or 1 ps.

- Verification of calculation guarantee accuracy.
- Performance inspection of delay / phase tracking, FFT, and integrator.
- Strict handling of reference time and linking to data.

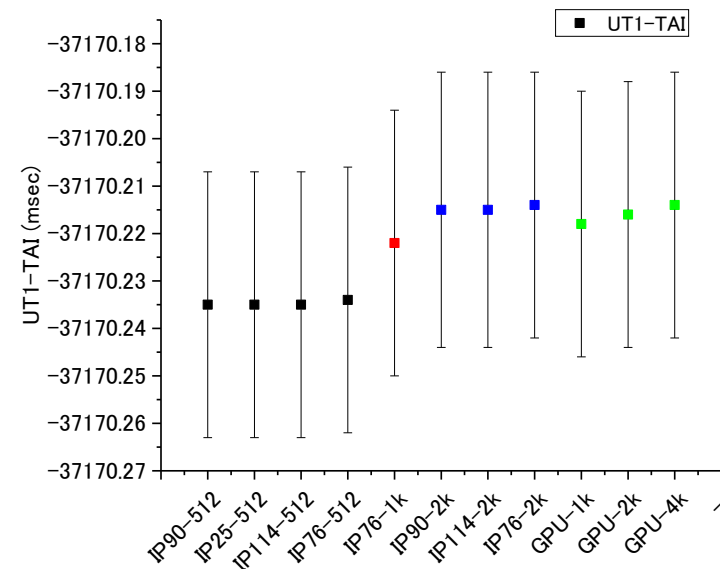
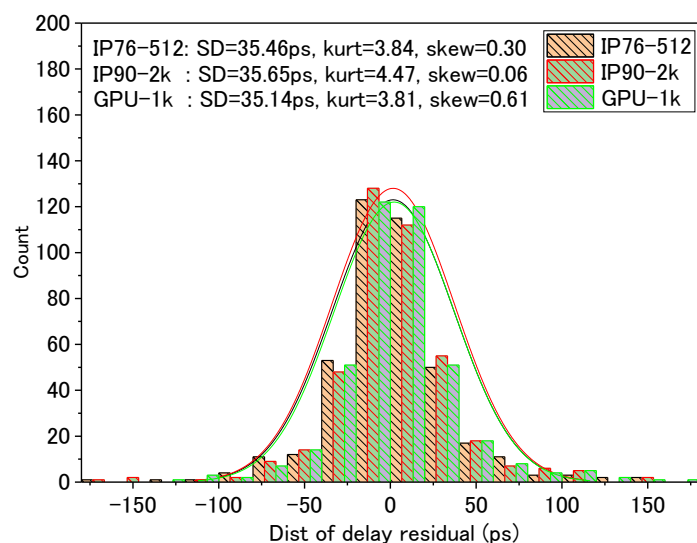
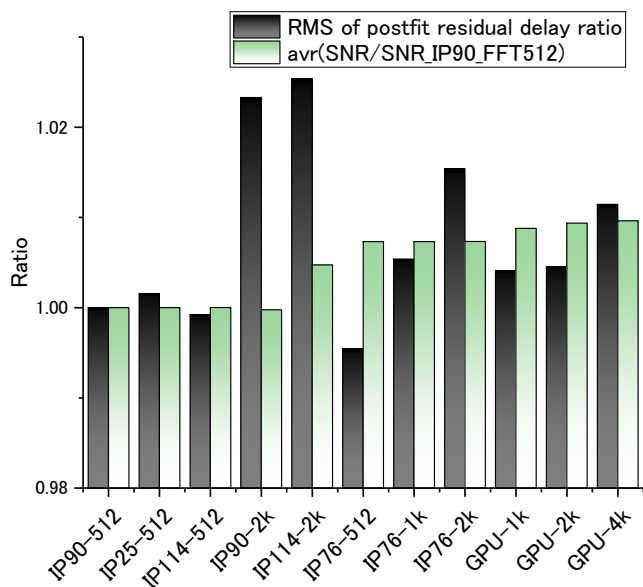


- GPU-corr: IP61, Corr Engine Part: kfxcom2.0.0
- Radio Source: 3C454.3, Integ Time: 32 sec, BW: 512MHz
- Number of FFTp: 1k, 2k, 4k

- As FFTp increases, the integral segment length increases, and the resolution for a priori is reduced.
- Consider the possibility that the phase tracking error of the integration segment and its reference time will differ. The starting point of a priori for phase tracking or the cumulative phase error of higher-order differential arguments within the integration segment changes. This can cause a systematic difference in delay depending on the FFT point.
- Why is the scatter-like delay difference caused by the difference in FFT points? Insufficient calculation accuracy of correlator? What are the factors that cause noise to be mixed in during phase shift?

Comparison of Parameter Estimated

Est. Param.: Clock poly, Atm poly, WX, WY, UT1, Nutation Angle
All estimation parameters set in analysis are the same.



- There seems to be no relationship between SNR and the magnitude of the post-fit residuals.
 - In gico3, it seemed that the larger the number of FFT points, the kurtosis of the residual distribution increases. If the FFT points are 512 or 1k on an 8-core CPU, there is likely to be additional noise different from the others.
 - For UT1, the solution steps according to the number of FFT points. kfxcom is also smaller than gico3, but the steps are confirmed.
- Investigation of the relationship between FFT and time synchronization error is yet to begin.

まとめ

- $1\mu\text{asc}$ での空間角度計測能力を目指した研究である.
- FICNは内核の運動を地表に情報提供するパラメータであるが、きわめて小さな振幅であるとされ、現在の章動角の測定精度では検出できていない.
- 章動角の測定をマイクロ秒角の精度を地上で実現するためには、地球規模のVLBI基線で300 fsの遅延計測能力が必要になり、その要求を実現化するための観測システムはまだ現実的ではない.
- 我々の持つVLBIネットワークでは、先ずは10~40マイクロ秒角での章動角計測を実現を目指す. そのための遅延計測は数psよりも小さい精度を必要とする. その要求精度を目指すための観測システムは、実現化の可能性はある.
- 43GHz帯の電波を用いる場合、帯域幅は8 GHzが要求される. 天体のコンパクトネスや構造変化を考慮した場合、高周波に向かうことがRecommendedと思われる. ただし、電波源の観測可否に関するCandidateなど素性を調べる準備は必要.
- 遅延に憑く誤差は、白色雑音誤差だけではない. トータルパッケージングとして、VLBI観測・解析システムの性能を上げて、誤差の縮小を目指すことも、本研究の目的である.
- 将来的には、太陽系の惑星、衛星の章動計測、月-地球VLBIによる時空計測、惑星・衛星の章動計測など、深宇宙探査への方角と、VLBIに代わる次世代の時空計測システムへの展開を望む.

研究提案まとめ

課題

- FCNのリバイズ, FICNの発見

観測目標

- マイクロ秒角オーダーの時空角度計測能力を目指す

観測要求

- 1 psより小さい誤差の精度で遅延時間を計測することが可能な観測手法と解析手法
- FCNの振幅の長期変動のモニターを考えると数10年スケールの観測が必要.

装置要求

- 22GHz, 43GHz帯, 帯域幅は8GHzBW以上.
- トータル位相揺らぎが0.001rad/数分 r.m.s. (post-correction).
- 相関処理のトータル付加誤差が500 fs未満であること.
- 相関係数の演算有効桁が小数点以下8桁よりも小さい値であること. 広帯域データの相関係数のダイナミックレンジに対応できること.

エラーバジェットの詳細を作り始めたら, まだまだ増えると思います.