

かぐや (SELENE) の子衛星の高精度位置決定： 多周波数同一ビーム法に基づく相対VLBI観測

菊池冬彦・劉慶会・花田英夫・河野宣之・松本晃治
岩田隆浩・SanderGoossens・浅利一善・石原吉明
鶴田誠逸・石川利昭・野田寛大・並木則行
NataliaPetrova・原田雄司・平勁松・佐々木晶

目次

- 背景 (6枚)
 - V L B I とは何か？**
 - V L B I は何故必要か？**
 - 飛翔体の精密軌道決定の重要性**
 - Configuration of the VRAD Mission**
 - 国内V L B I 観測**
 - 国際V L B I 観測**
- 手法 (5枚)
- 結果 (7枚)
- 結論 (1枚)

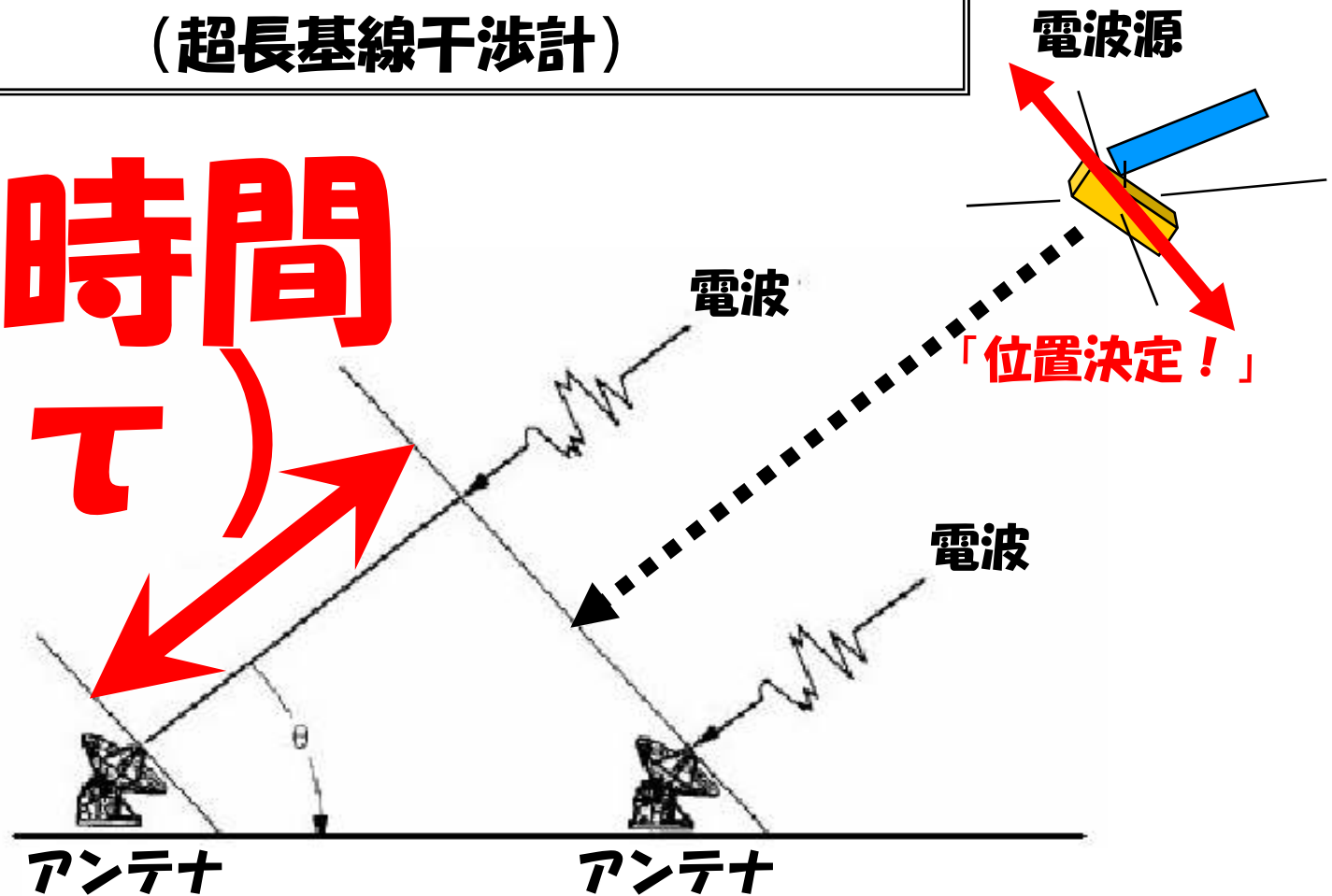
VLBIとは何か？

「そもそもVLBIとは何の略か？」

Very Long Baseline Interferometry

(超長基線干渉計)

遅延時間
($\Delta\tau$)



VLBIは何故必要か？

● ドップラー&レンジング

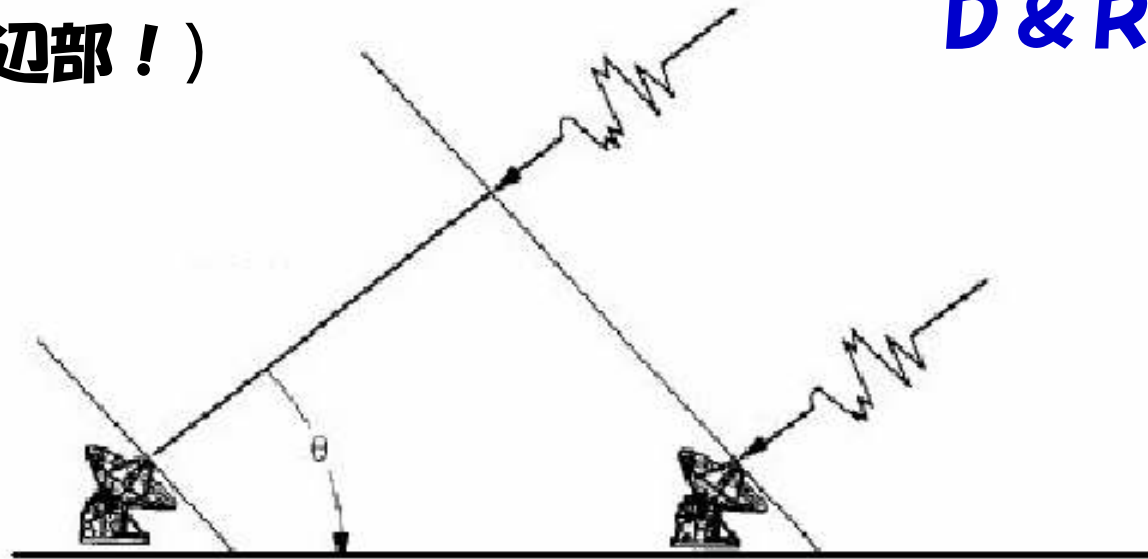
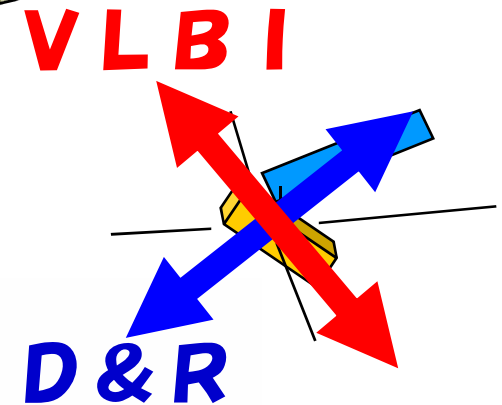
→ 視線方向の運動に感度あり



● VLBI

→ 視線方向に垂直な運動に感度あり

∴ 3次元精密軌道決定の為には両方とも必要
(特に月の縁辺部！)



飛翔体の精密軌道決定の重要性

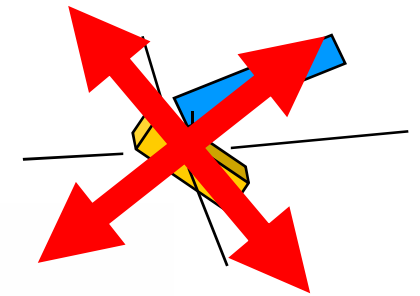
月・惑星の重力探査ミッションのロードマップ

進化 ← 内部構造 ← 重力場 ← 重力加速度 ← 軌道

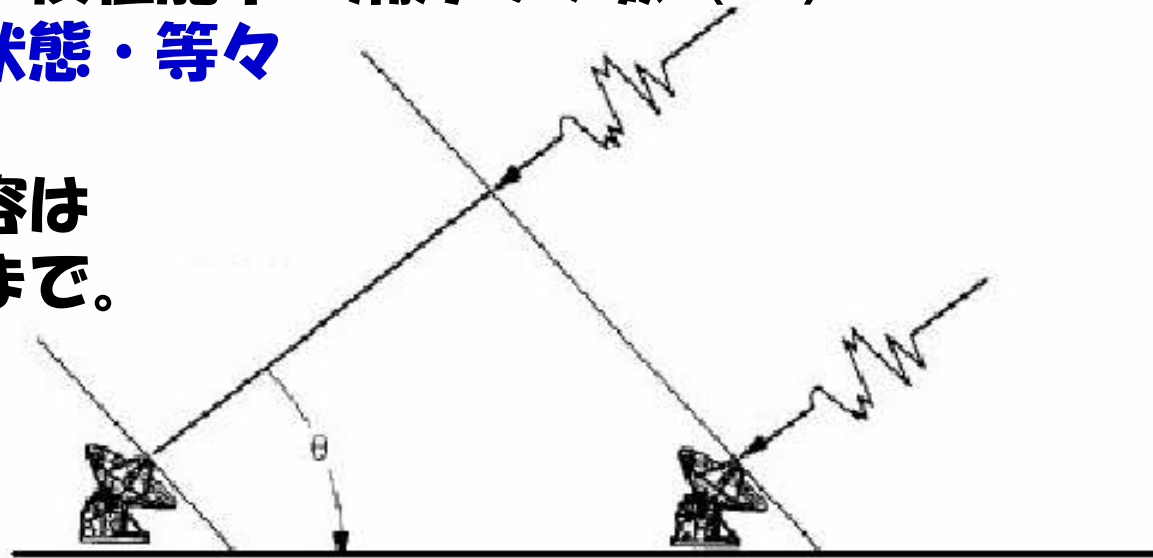
VRADミッションに当てはめてみると・・・ (青写真)

子衛星の軌道 (特に月縁辺部)

- 重力加速度 (同上)
- 重力場 (特に低次項)
- 重力偏平率・慣性能率・潮汐ラフ数 (?)
- 組成・熱的状态・等々



※今回の発表内容は
軌道を求める所まで。



Configuration of the VRAD Mission

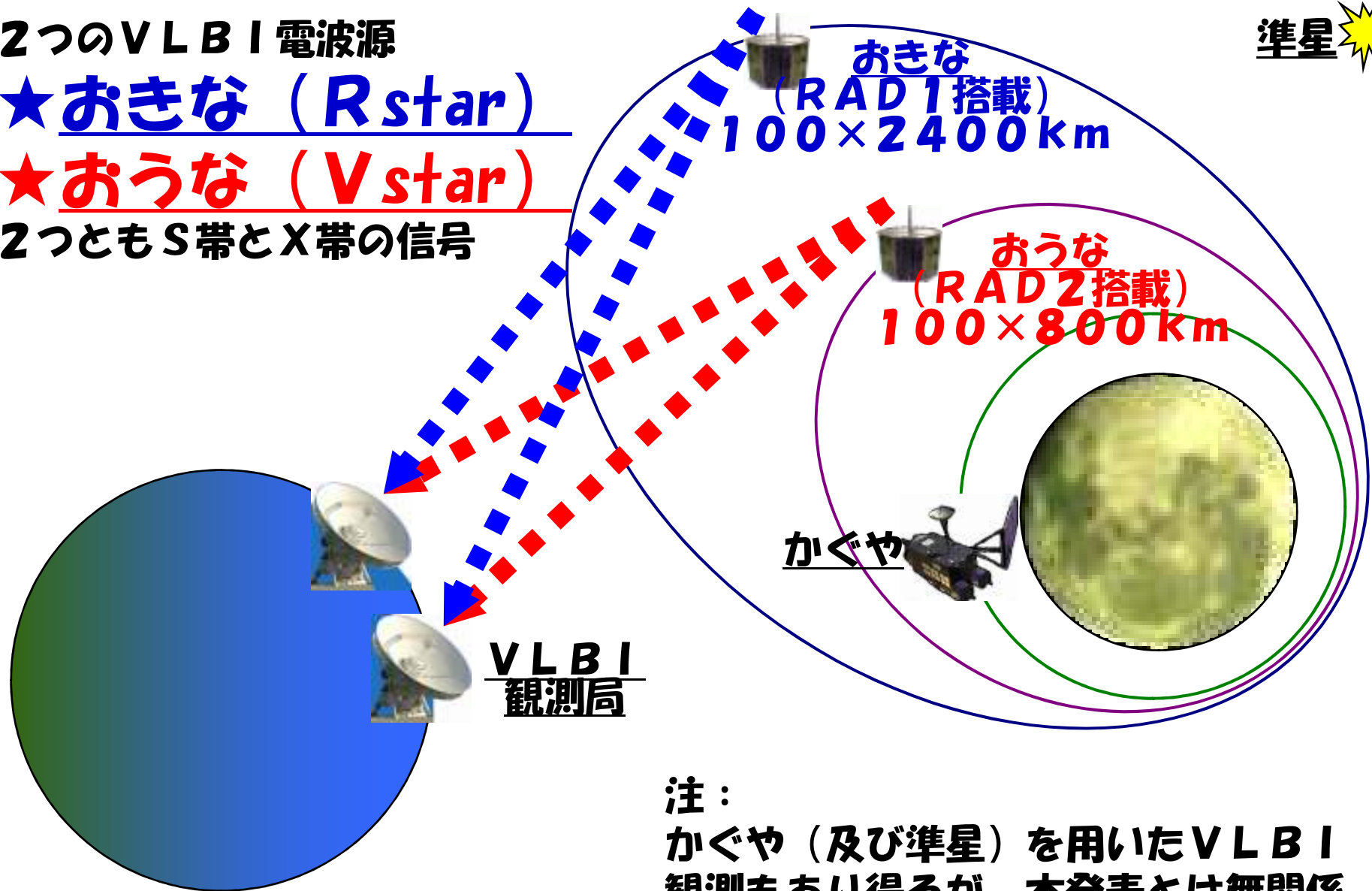
2つのVLBI電波源

★おきな (Rstar)

★おうな (Vstar)

2つともS帯とX帯の信号

準星 



注：
かぐや（及び準星）を用いたVLBI観測もあり得るが、本発表とは無関係。

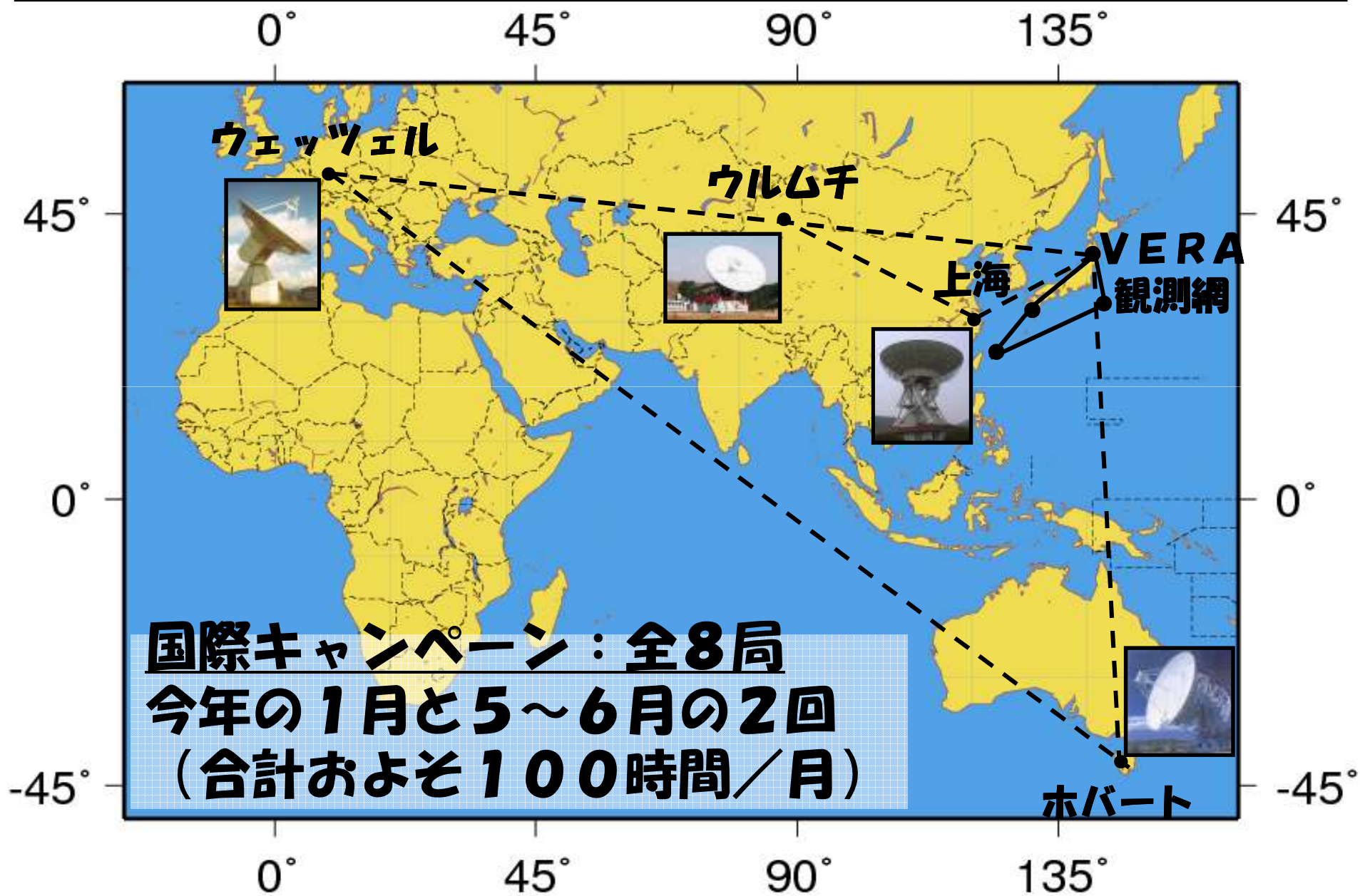
国内VLBI観測

VLBIアンテナを使用させて頂いた国内外の全ての観測所（及び観測局）に対して深くお礼を申し上げます



**水沢VERA観測所：全4局
3日／週（合計24時間／週）**

国際VLBI観測



目次

- 背景 (6枚)
- 手法 (5枚)
 - 遅延時間とアンビギュイティ
 - 群遅延と位相遅延
 - 多周波数VLBI観測
 - 多周波数法の困難
 - 相対VLBI観測
- 結果 (7枚)
- 結論 (1枚)

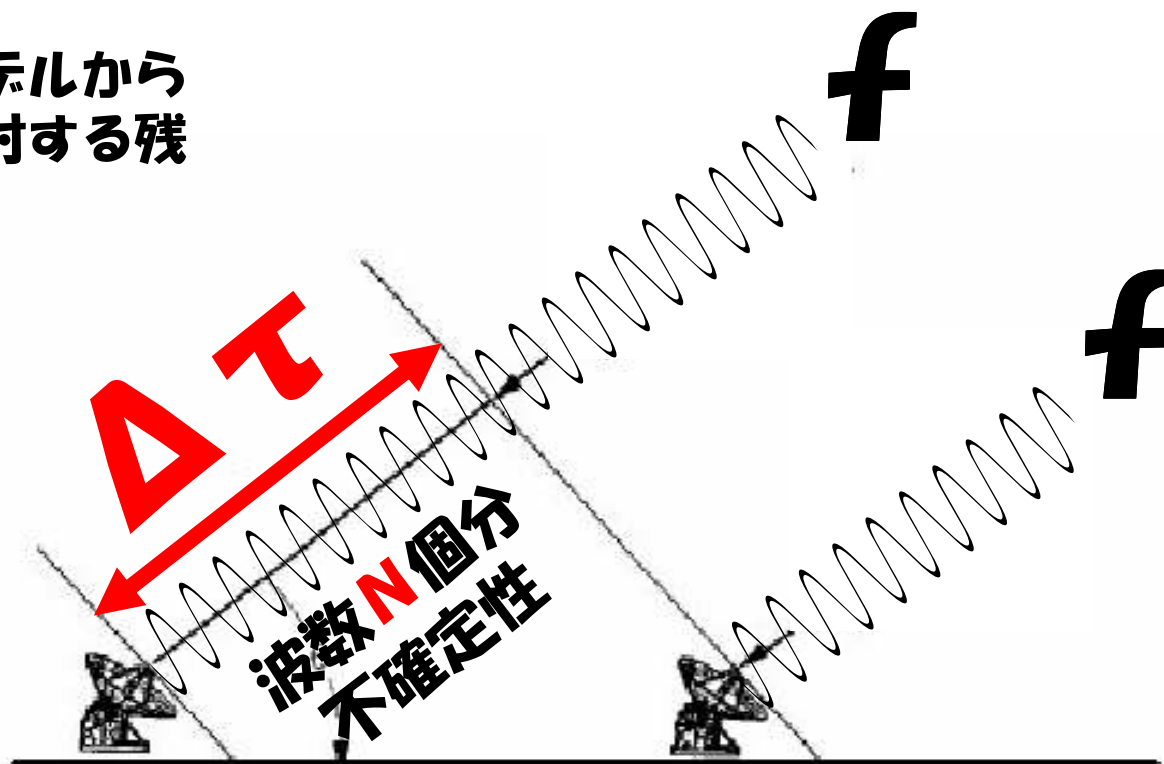
遅延時間とアンビギュイティ

$$\Delta \phi \pm 2\pi N = 2\pi f \Delta \tau$$

$\Delta \phi$: フリンジ位相 N : アンビギュイティ f : 周波数 $\Delta \tau$: 遅延時間

注:

より厳密には、モデルから
得られる予測値に対する残
差だけ調べる。



群遅延と位相遅延

遅延時間は大きく二通りあるけど・・・

群遅延

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 + 2\pi(N_2 - N_1)}{2\pi(f_2 - f_1)}, \quad \sigma(\Delta\tau) \approx \frac{1}{f_2 - f_1}$$

複数の周波数に対してNの**相対値**を推定（**数十ピコ秒精度**）

例：マースオテッセイ、のぞみ、はやぶさ、等

位相遅延

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\phi_1 + 2\pi N_1}{2\pi f_1}, \quad \sigma(\Delta\tau) \approx \frac{1}{f_1}$$

個々の周波数に対してNの**絶対値**を推定（**数ピコ秒精度**）

例：マゼラン（？）

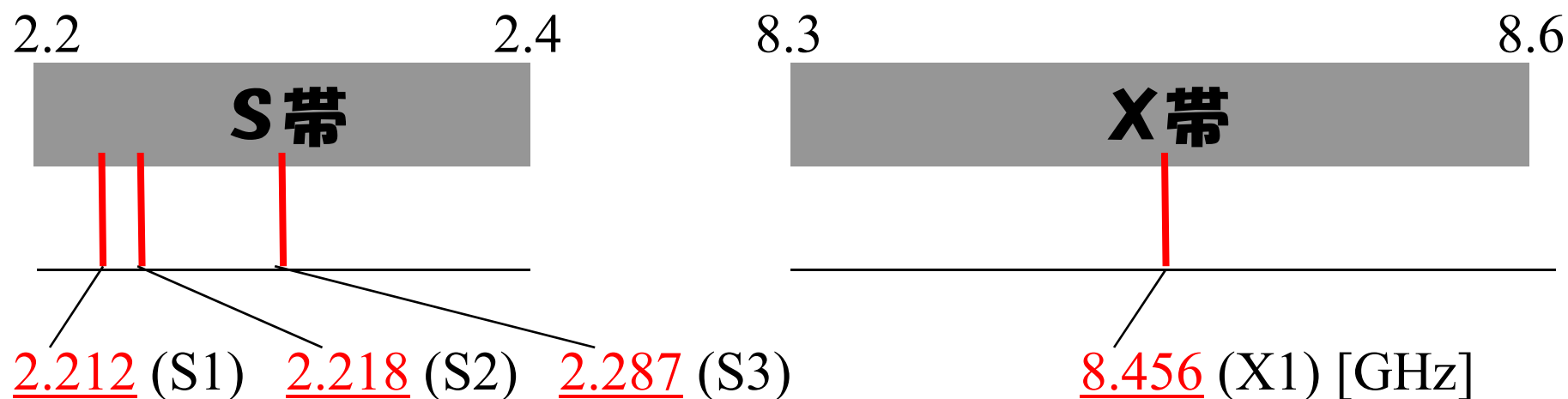
Nの推定は位相遅延の方が格段に難しい！

でも精度は位相遅延の方が桁違いに良い！何とかならないのか？

多周波数VLBI観測

位相遅延推定が成功する為には・・・

個々の周波数における N の絶対値の推定が可能となるように、或る**特定の周波数**の信号だけを利用する。



Kono et al., 2003

この条件下で期待される位相遅延の精度は**3.3ピコ秒!**

多周波数法の困難

位相遅延推定が成功する為の必要条件は非常に厳しい

●フリッジ位相のRMS誤差

→ S帯：4.3度以下 X帯：10度以下

※中性大気&電離層の擾乱は10度以上

●全電子数 (TEC) の推定RMS誤差

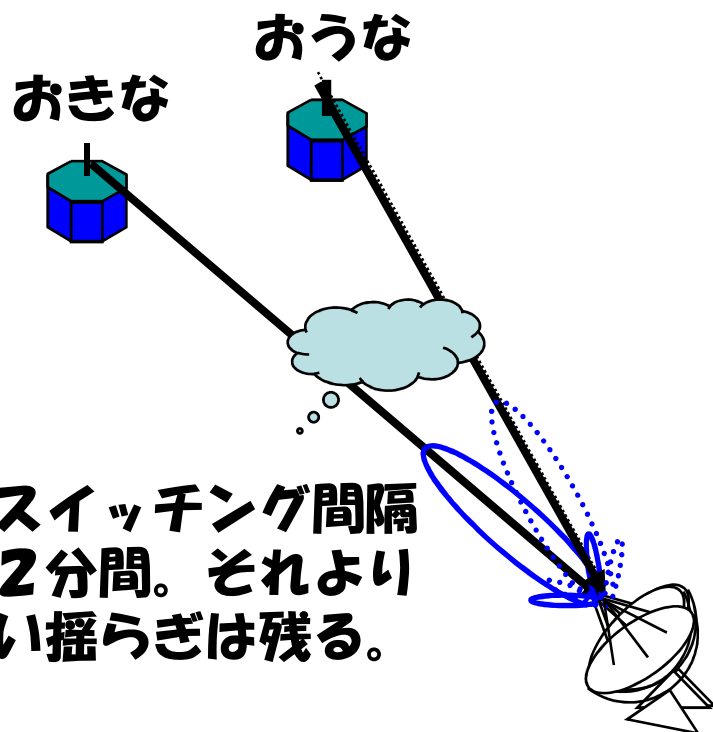
→ 0.23TECU以下

※GPSによる推定精度でさえ2TECUが限界

「何とかならないのか？」

相対VLBI観測

離角 > ビーム幅 の場合

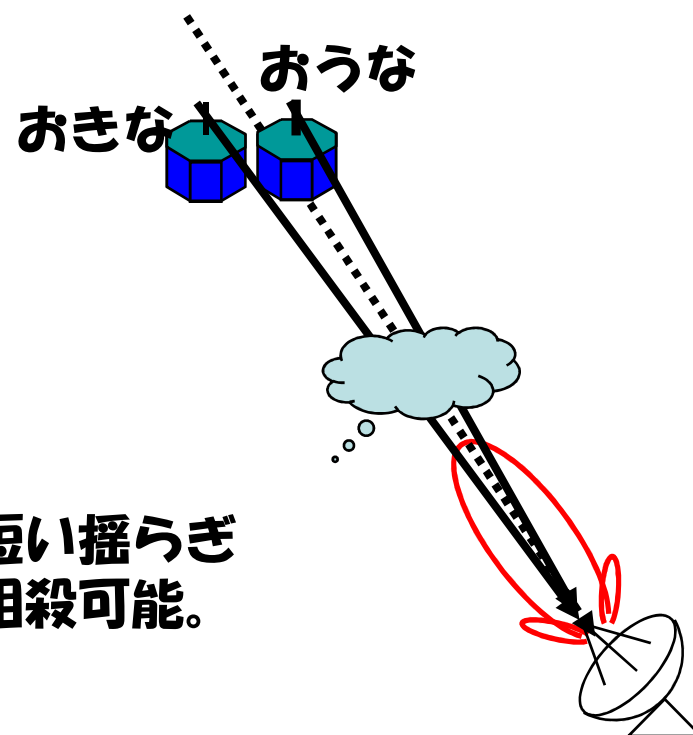


※スイッチング間隔は2分間。それより短い揺らぎは残る。

スイッチング観測

例：のぞみ、ジオテイル、等

離角 < ビーム幅 の場合



※短い揺らぎも相殺可能。

同一ビーム観測

例：マゼラン&パイオニアビーナス

いずれも中性大気や電離層の擾乱による遅延誤差の大部分を相殺
(更に局内遅延も消える)

目次

- 背景（6枚）
- 手法（5枚）
- **結果（7枚）**
 - 相対フリンジ位相：X帯**
 - 相対フリンジ位相：S帯**
 - 相対TEC**
 - アンビギュイティの絶対値の推定**
 - 相対位相遅延誤差とクロージャ：X帯**
 - 相対位相遅延誤差とクロージャ：S帯**
 - 精密軌道決定に対するVLBIの寄与**
- 結論（1枚）

相対フリンジ位相：X帯

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

↕ 10 deg.

60秒積分でのRV相対フリンジ位相のRMS誤差

1.3度

(遅延推定の必要条件は**10度以下**)

相対フリンジ位相：S帯

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

↕ 10 deg.

60秒積分でのRV相対フリンジ位相のRMS誤差

1. 8度

(遅延推定の必要条件は**4. 3度以下**)

相対TEC

各々の伝播経路における**TEC**の差は
複数の周波数における**フリッジ位相**から推定可能

$$\Delta\Delta D = \frac{1}{2\pi k} \cdot \frac{f_{s1}^2 \cdot f_{x1}^2}{f_{x1}^2 - f_{s1}^2} \cdot \left(\frac{\Delta\Delta\phi_{x1}}{f_{x1}} - \frac{\Delta\Delta\phi_{s1}}{f_{s1}} \right)$$

$\Delta\Delta D$: 相対**TEC** **k** : 定数 **f** : 周波数 **$\Delta\Delta\phi$** : 相対**フリッジ位相**

$\Delta\Delta D$ 推定結果 : **-0.02 ~ -0.07 [TECU]**

RV相対TECのRMS誤差

0.01TECU

(**遅延推定の必要条件は0.23TECU以下**)

アンビギュイティの絶対値の推定

位相遅延推定が成功する為の必要条件は二つとも満足！
そこで実際にアンビギュイティを求めると・・・

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

(凡例はフリンジの積分時間)

推定成功！世界初！

相対位相遅延誤差とクロージャ: X帯

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

↑↓ 1 ps

- RMS誤差 **0.29ピコ秒** (< 目標精度 **3.3ピコ秒**)
- クロージャほぼ **0ピコ秒**

相対位相遅延誤差とクロージャ：S帯

結果は削除
(投稿論文との内容重複)

↕ 2 ps

- RMS誤差 **2.27ピコ秒** (< 目標精度 **3.3ピコ秒**)
- クロージャほぼ **0ピコ秒**

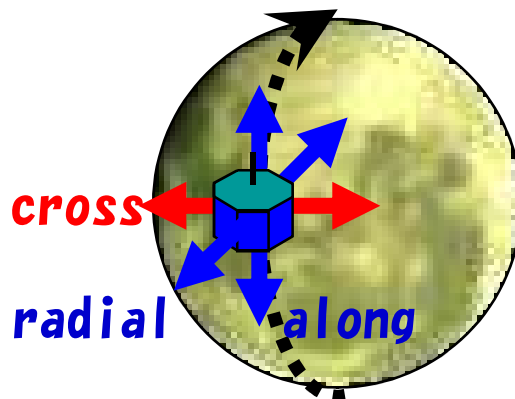
精密軌道決定に対するVLBIの寄与

Overlaps during Edge-on Geometry

おきな	R	A	C	計
DR	3.96	8.78	103.14	103.59
DRV	2.42	4.37	25.60	26.08
DRV-	2.73	5.61	13.44	14.82

おうな	R	A	C	計
DR	2.55	23.00	229.56	230.72
DRV	1.23	6.39	20.06	21.09
DRV-	1.30	5.74	8.01	9.94

(単位：メートル)



クロストラックで
劇的な精度改善!

目次

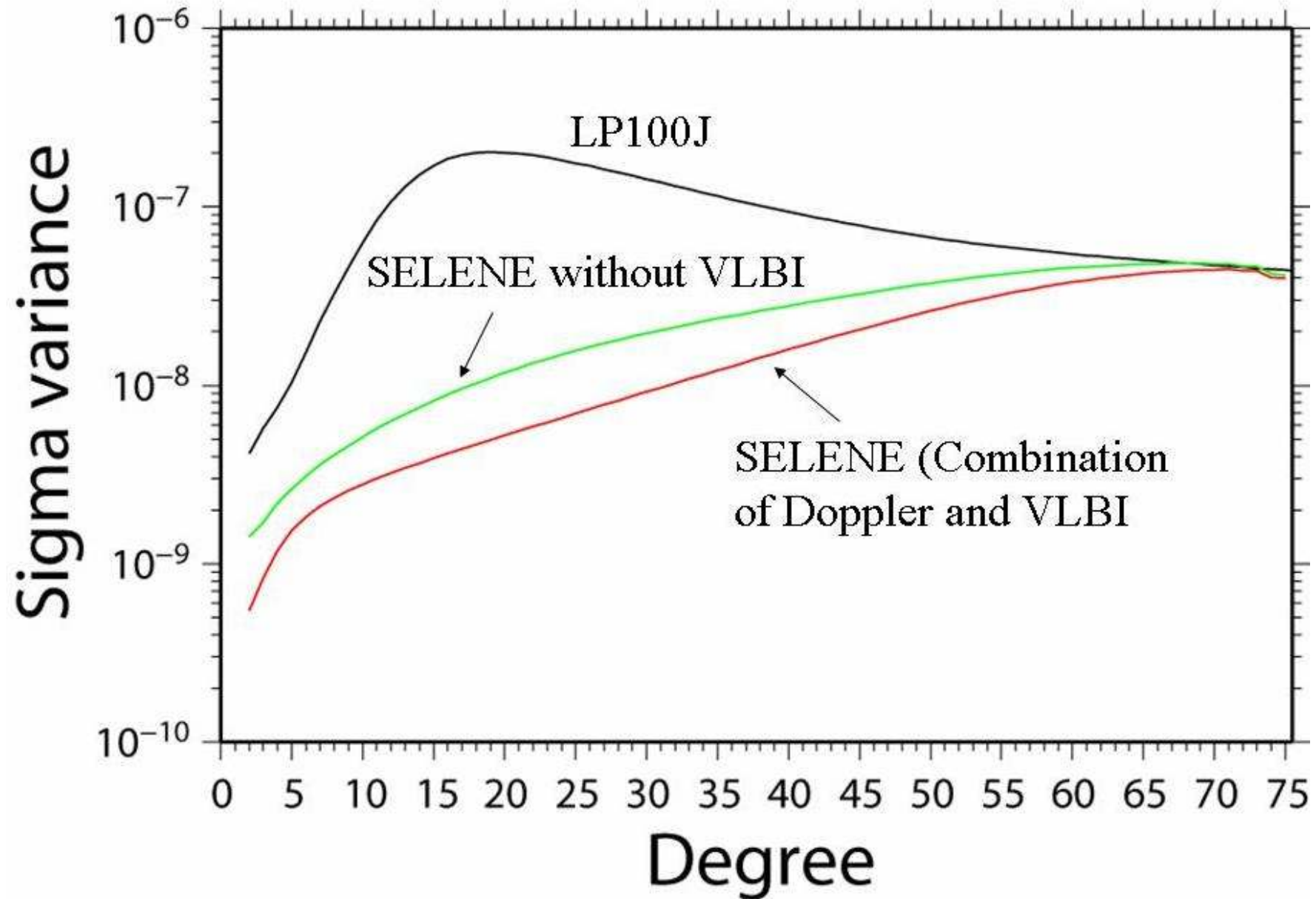
- 背景 (6枚)
- 手法 (5枚)
- 結果 (7枚)
- 結論 (1枚)

結論

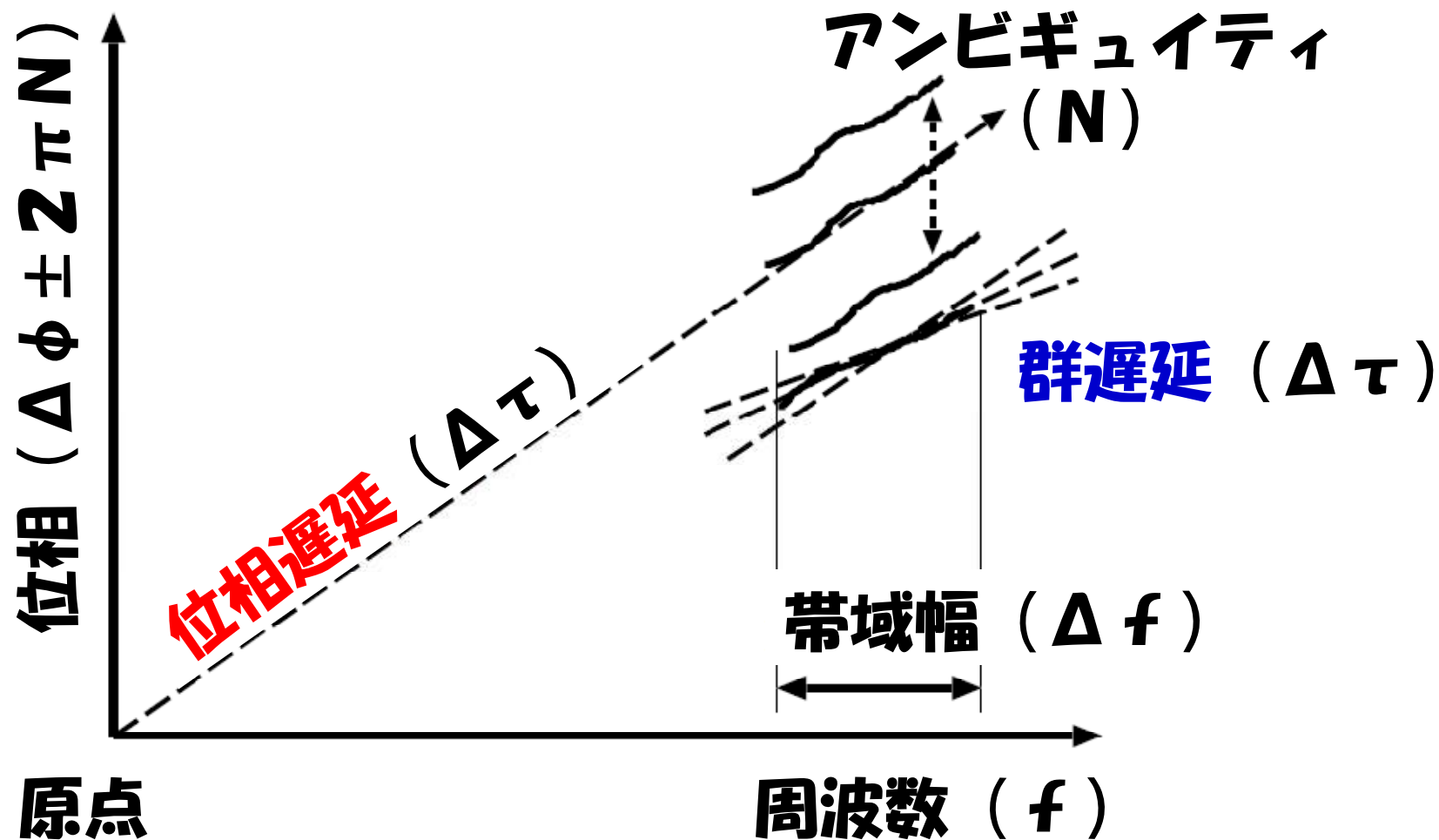
- 国内外のVLBI観測網で子衛星の電波観測
 - > 追跡・受信・記録等の観測系はいずれも良好
- 多周波数法と同一ビーム法を併用
 - > 位相遅延時間の推定に世界で初めて成功
 - > 従来のVLBI観測よりも大幅に精度向上
 - > 子衛星の軌道決定精度も大幅に向上
- 今後も観測・解析を継続
 - > 月重力場（特に低次項）への寄与を目指す！

參考資料

重力場モデル精度

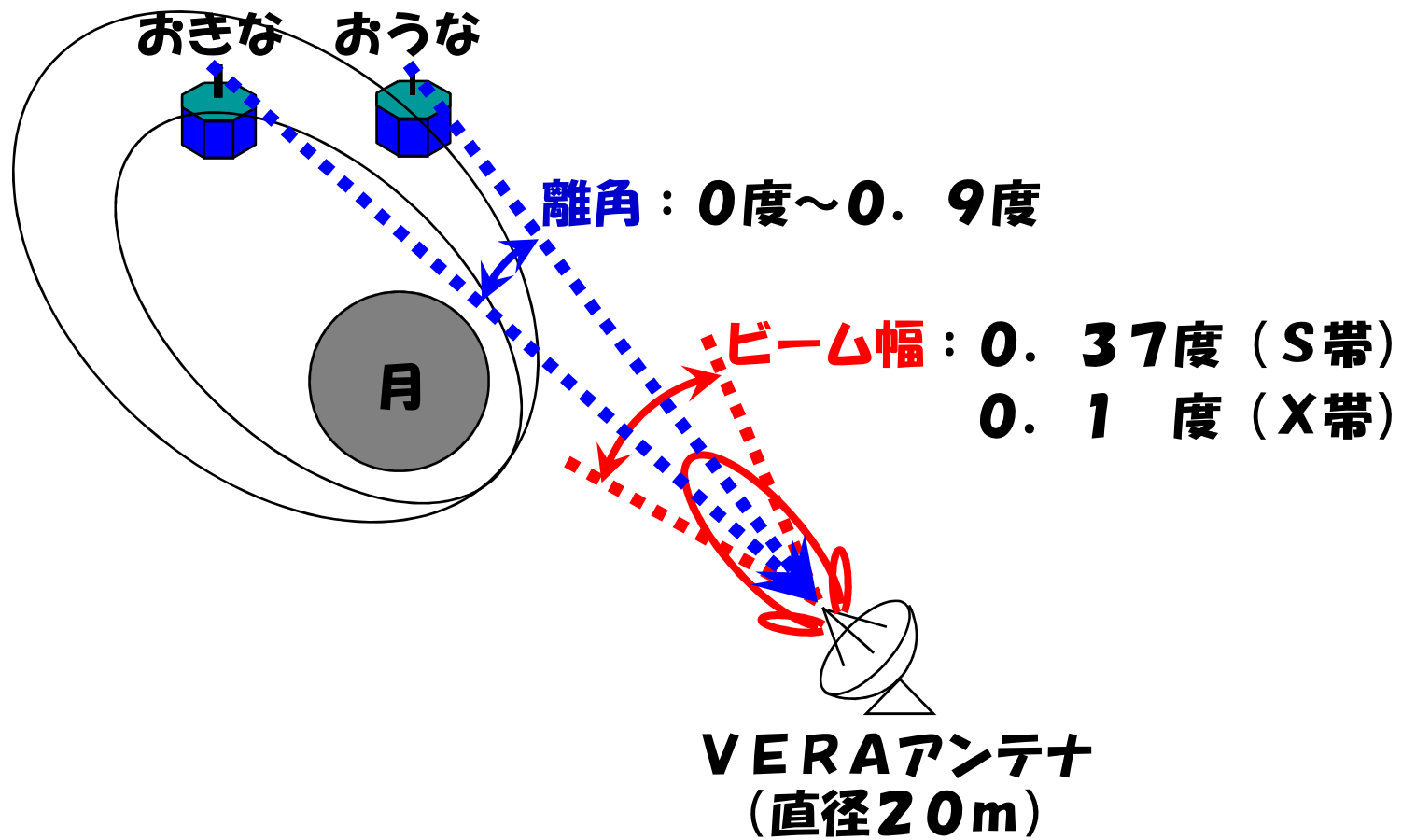


周波数と位相の関係



- 群遅延の推定精度：周波数の帯域幅の逆数に比例
- 位相遅延の推定精度：周波数自体の逆数に比例

離角とビーム幅



相対位相遅延の誤差の見積もり

誤差要因	S帯	X帯
熱雑音	2.7	0.2
アンテナ位相特性	2.1	0.6
機械遅延	0.3	0.1
中性大気遅延	0.24	0.1
電離層遅延	0.02	0.02
時計オフセット&レート	0	0
上記のRSS誤差	3.44	0.64
実際のRMS誤差	2.27	0.29

(単位：ピコ秒)

精密軌道決定：おきな

Overlaps during Edge-on Geometry

モデル	データ	R	A	C	計
LP 100 K	DR	5.71	20.79	101.03	103.30
	DRV	7.41	30.79	176.51	179.33
	DRV-	5.96	28.53	187.90	190.14
SGM 90 em	DR	3.96	8.78	103.14	103.59
	DRV	2.42	4.37	25.60	26.08
	DRV-	2.73	5.61	13.44	14.82

VLBIはSとXの両方を含む。

又、データの重みは・・・

$$D = 0.2 \text{ mm/s}$$

$$R = 0.7 \text{ m}$$

$$V = 1 \text{ cm}$$

(単位：メートル)

精密軌道決定：おうな

Overlaps during Edge-on Geometry

モデル	データ	R	A	C	計
LP 100 K	DR	2.05	26.16	263.24	264.55
	DRV	1.52	14.32	147.44	148.14
	DRV-	1.53	14.72	151.83	152.55
SGM 90 em	DR	2.55	23.00	229.56	230.72
	DRV	1.23	6.39	20.06	21.09
	DRV-	1.30	5.74	8.01	9.94

VLBIはSとXの両方を含む。

又、データの重みは・・・

$$D = 0.2 \text{ mm/s}$$

$$R = 0.7 \text{ m}$$

$$V = 1 \text{ cm}$$

(単位：メートル)