

# かぐやのVLBI観測の現状と今後の計画

国立天文台 花田英夫・VRADチーム\*・VERAチーム\*\*

\*国立天文台RISE推進室、JAXA、九州大学、東京大学

\*\*国立天文台水沢VERA観測所、鹿児島大学

PI: 花田英夫

Sub PI: 岩田隆浩

RSAT PI: 並木則行

RISE/NAOJ: 浅利一善, 石原吉明, 石川利昭, 河野宣之,  
菊池冬彦, 佐々木晶, S. Goossens, N. Petrova,  
鶴田誠逸, 野田寛大, 松本晃治, 劉慶会

VERA/NAOJ: 岩館健三郎, 寺家孝明, 亀谷 收, 柴田克典,  
田村良明,

VERA/鹿児島大学: 中川亜紀治

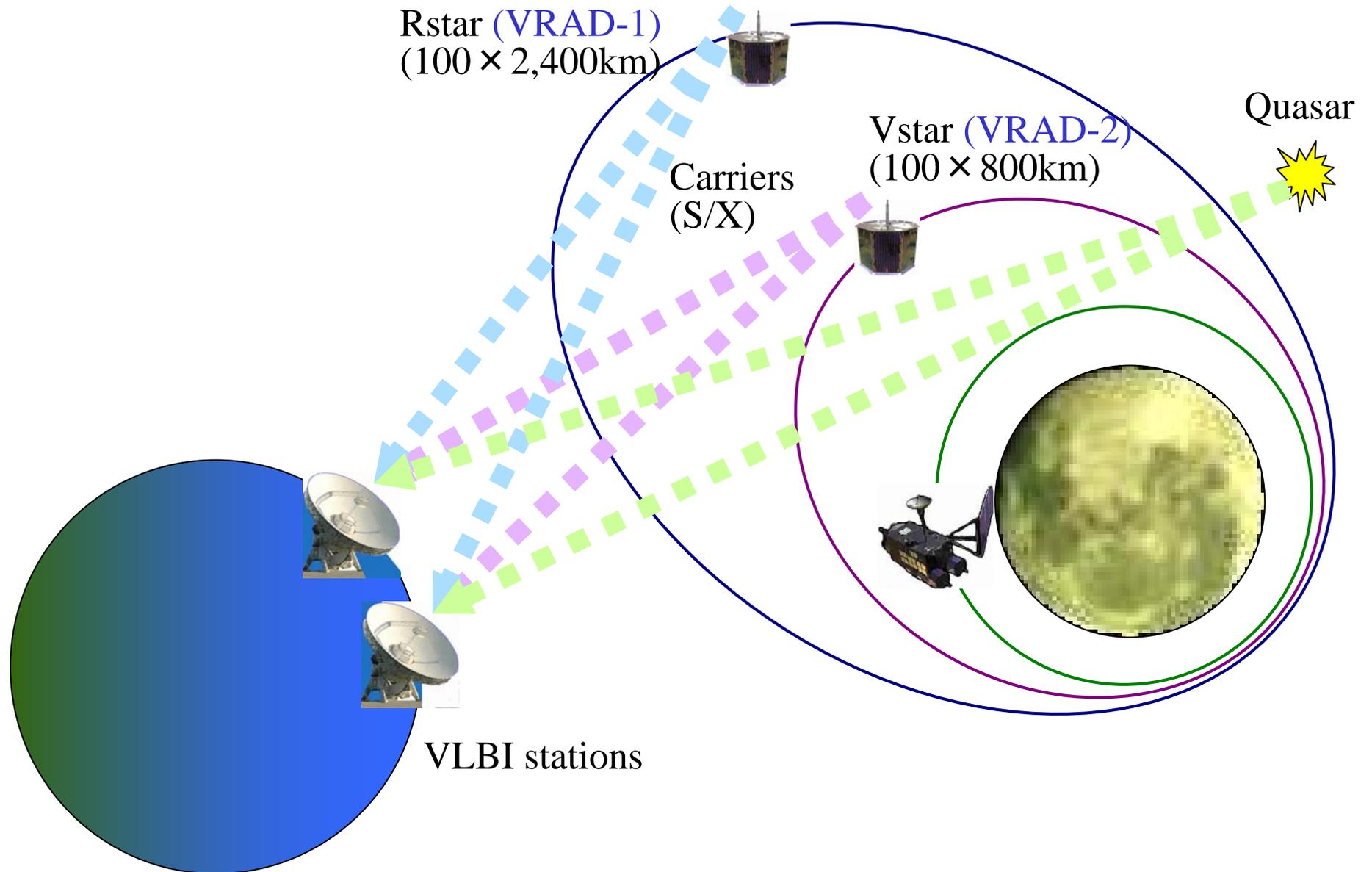
Shanghai Astronomical Observatory: X. Hong, J. Ping,  
X. Huang, X. Bo, T. An

Urumqi Observatory: N. Wang, Y. Aili, Wenjun, Zhanghua

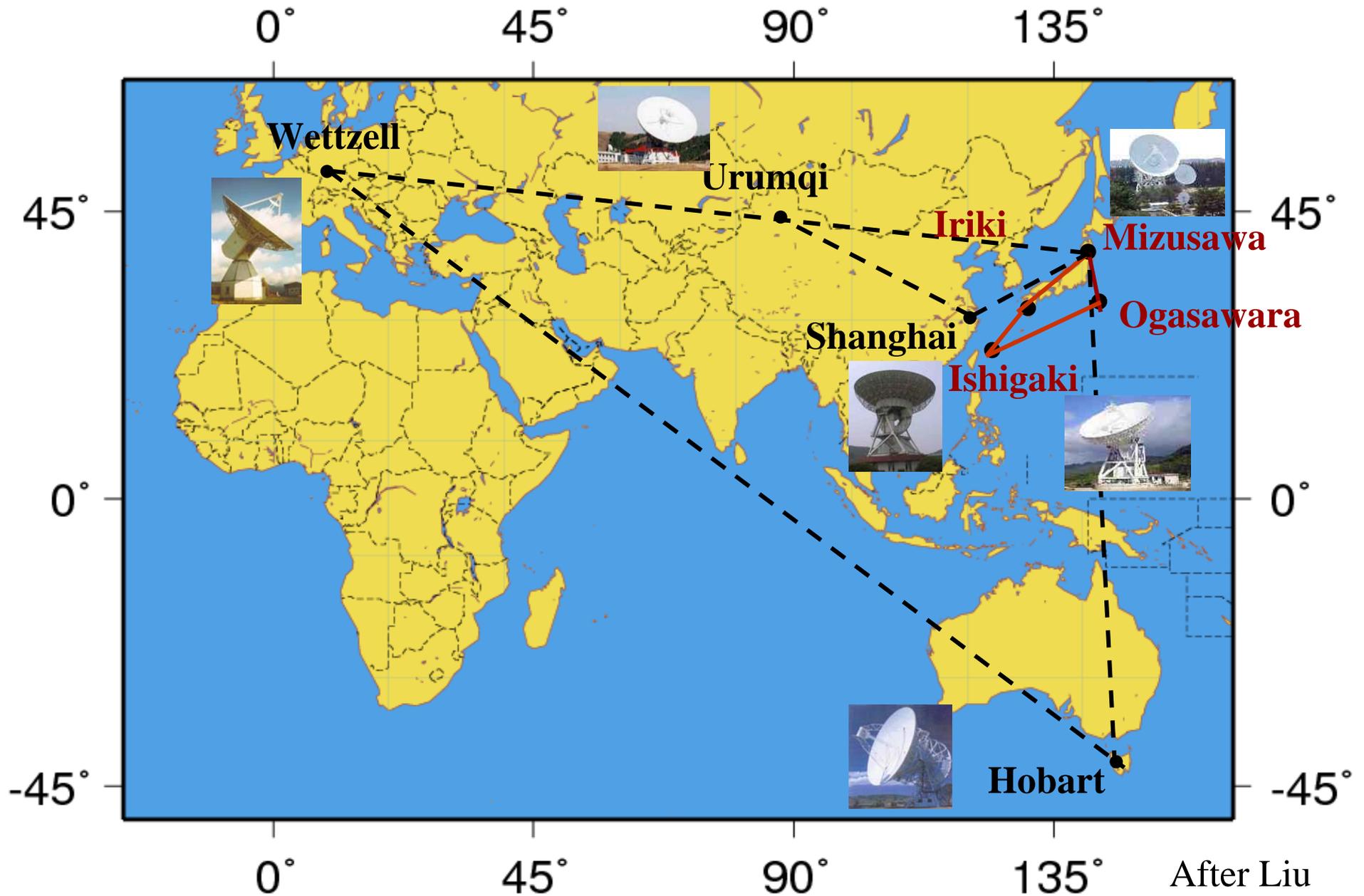
University of Tasmania, Hobart: S. Ellingson, B. Reid,  
J. McCallum

Fundamental Station Wettzell: W. Schlüter, G. Kronschnabl

# Configuration of VRAD in SELENE(Kaguya)



# Distribution of VLBI stations for SELENE





# Record of VLBI observation of SELENE (Kaguya)

## International Observation

2008 Jan

UT		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
JST		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Tue																									
2	Wed																									
3	Thu																									
4	Fri																									
5	Sat																									
6	Sun																									
7	Mon	Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho																								
8	Tue	Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho																								
9	Wed	Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho																								
10	Thu																									
11	Fri																									
12	Sat			Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz																						
13	Sun																									
14	Mon																									
15	Tue			Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz																						
16	Wed			Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz																						
17	Thu																									
18	Fri																									
19	Sat																									
20	Sun								Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz																	
21	Mon								Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz																	
22	Tue												Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz													
23	Wed																									
24	Thu																									
25	Fri																									
26	Sat																									
27	Sun																		Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho, Wz							
28	Mon																			Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho						
29	Tue																			Mi, Ir, Is, Og, Sh, Ur, Ho						
30	Wed																									
31	Thu																									

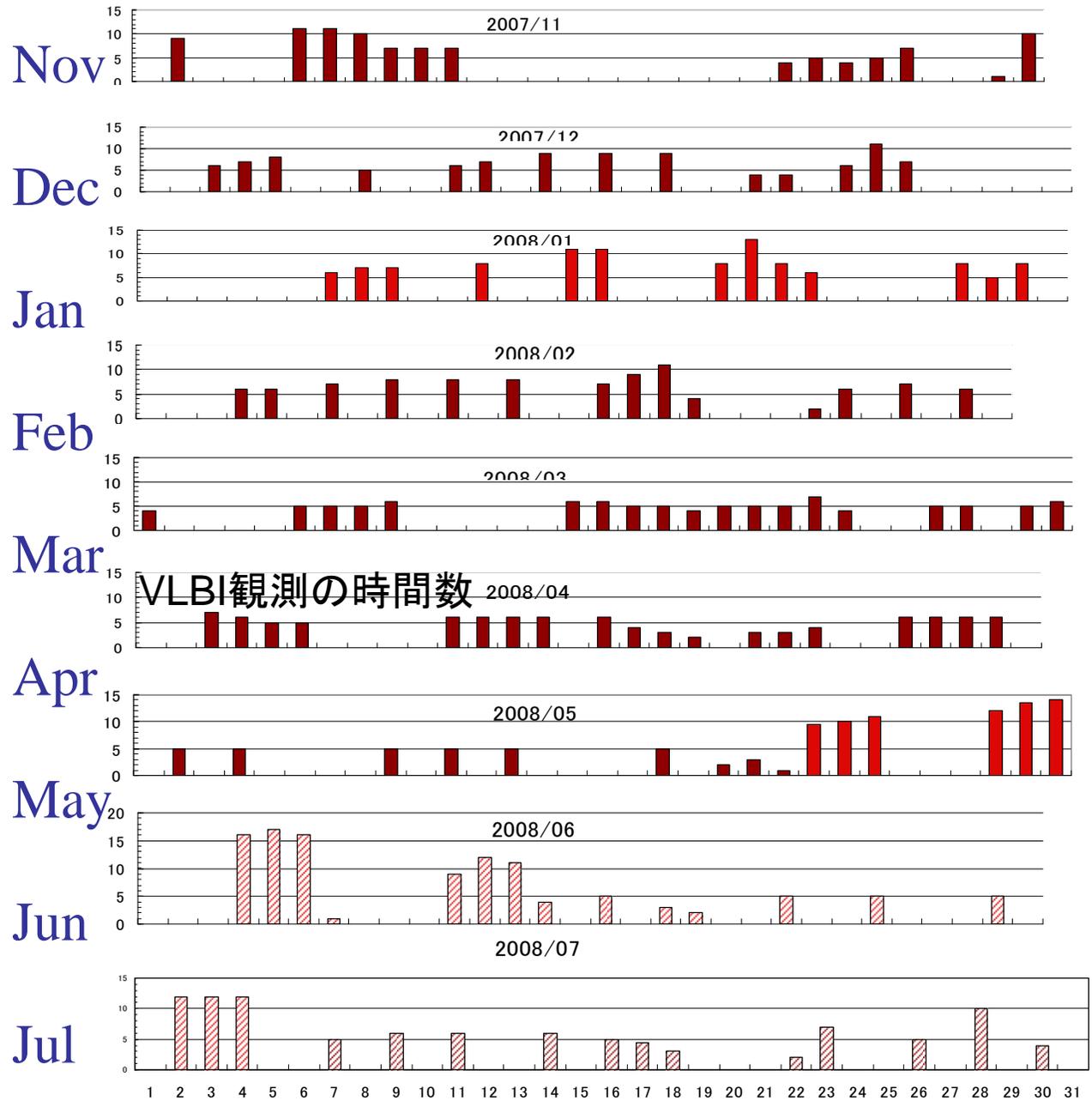
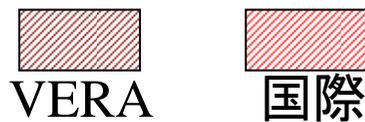
Mi : Mizusawa, Ir : Iriki, Is : Ishigakijima, Og : Ogasawara (VERA stations)  
 Sh : Shanghai, Ur : Urumqi, Ho : Hobart, Wz : Wettzell

# VLBI観測の 時間数

解析終了



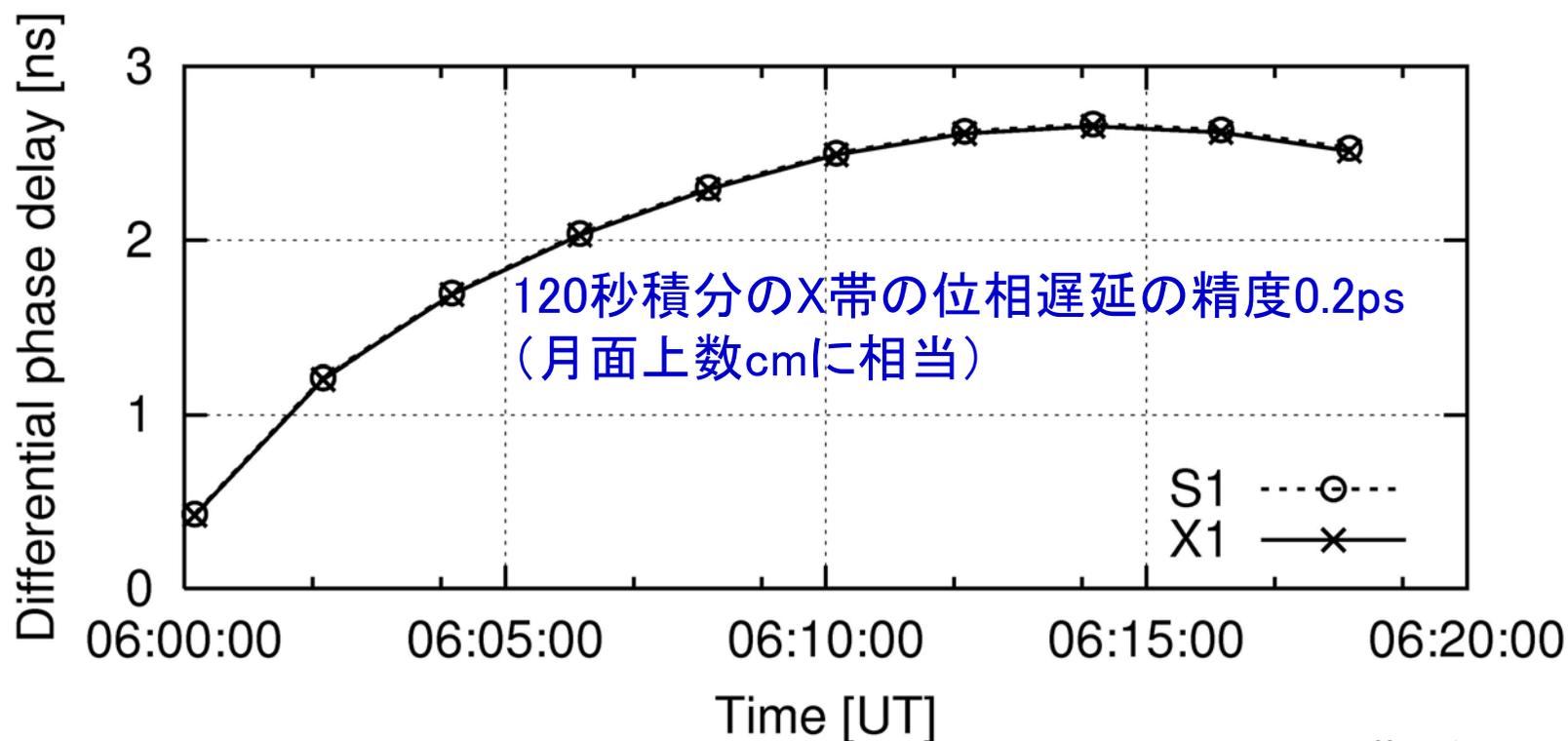
解析未了



# 相関処理結果の例

## 「おきな」と「おうな」の相対位置の時間変化

縦軸:「おきな」と「おうな」の信号の到達時間差(単位ナノ秒)、  
横軸:時刻



# Overlap results and including VLBI data during edge-on geometry Jan. 27-28, 2008

Model/data	Rstar overlaps (meters)				Vstar Overlaps (meters)			
	radial	along	cross	total	radial	along	cross	total
LP100K / DR	未公開							
LP100K / DRV								
SGM100fc / DR								
SGM100fc / DRV								

Data weights used: Doppler 2 mm/s, range 5 m, VLBI 20 cm

DR: Doppler/range, DRV: Doppler, range, VLBI, SGM100fc includes VLBI data

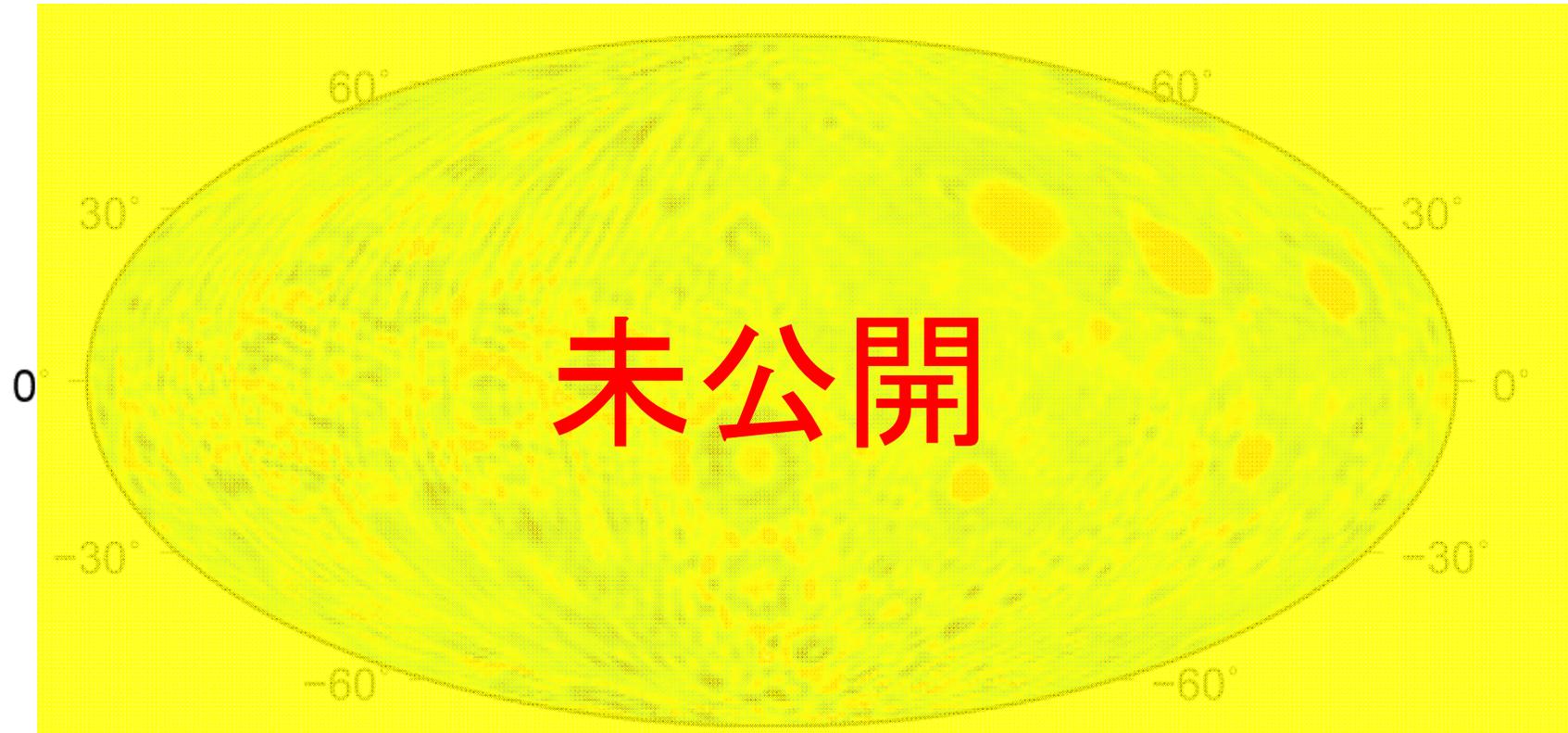
# Degree 2, moment of inertia and estimated $k_2$ value

<i>Model/reference</i>	$k_2 \pm \text{error}$	$C/MR^2 \pm \text{error}$
LP165P	$0.026 \pm 0.003$	$0.3932 \pm 0.0002$
SGM90e	<b>未公開</b>	
SGM100fc		
<i>Goossens and Matsumoto 2008 (GRL)</i> , incl. 1 cpr accelerations for LP	$0.0213 \pm 0.0075$	Same as LP165P
Idem, no 1 cpr accelerations for LP (same LP processing as SGM models)	$0.0244 \pm 0.0008$	Same as LP165P
LLR	$0.0210 \pm 0.0025$	Same as LP165P

$k_2$  sigma's are **ten times formal error**;  $C/MR^2$  sigma's are based on **five times formal error** of gravity coefficients

松本他(2008)

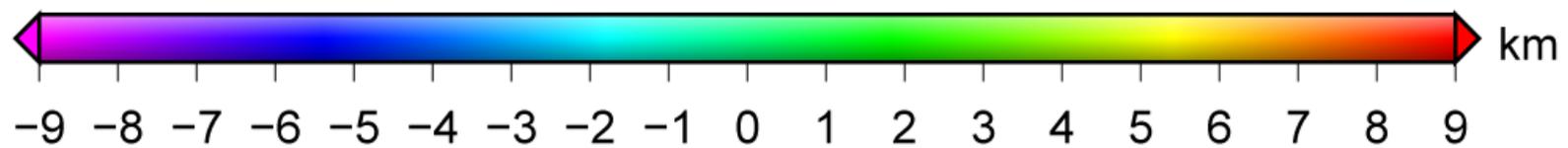
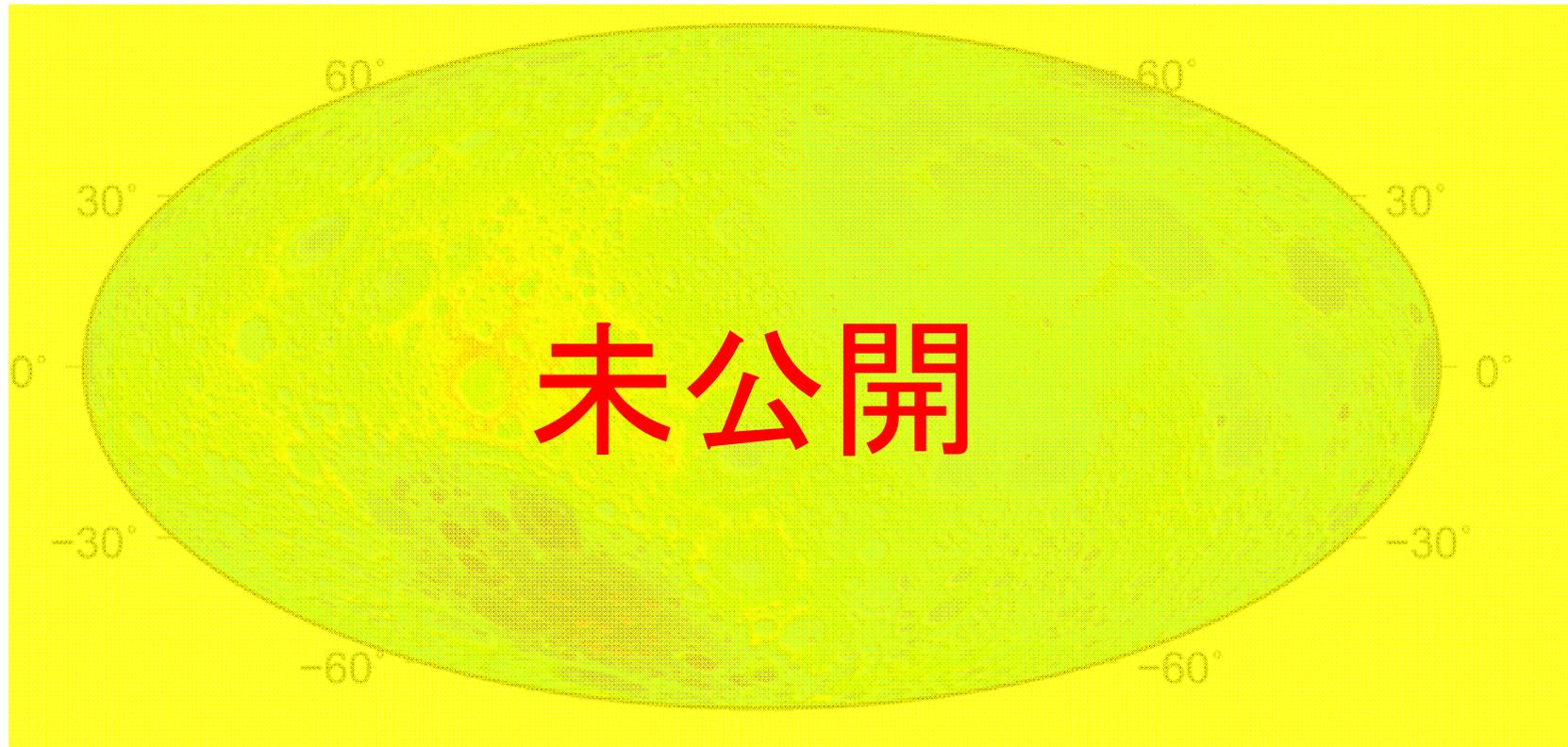
# Comparison between LP100K and SGM100fc



Far-side ← → Near-side

松本他(2008)

# Topography from LALT (Laser ALTimeter) data

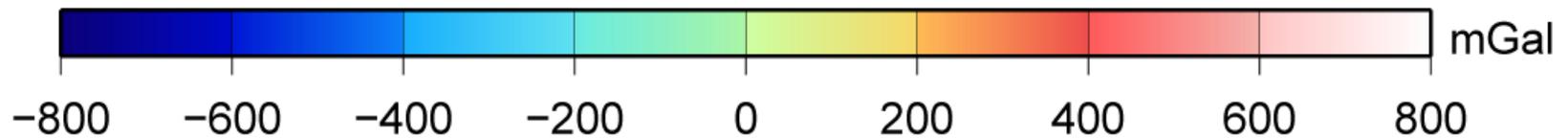


topo

荒木他(2008)

# Bouguer anomaly

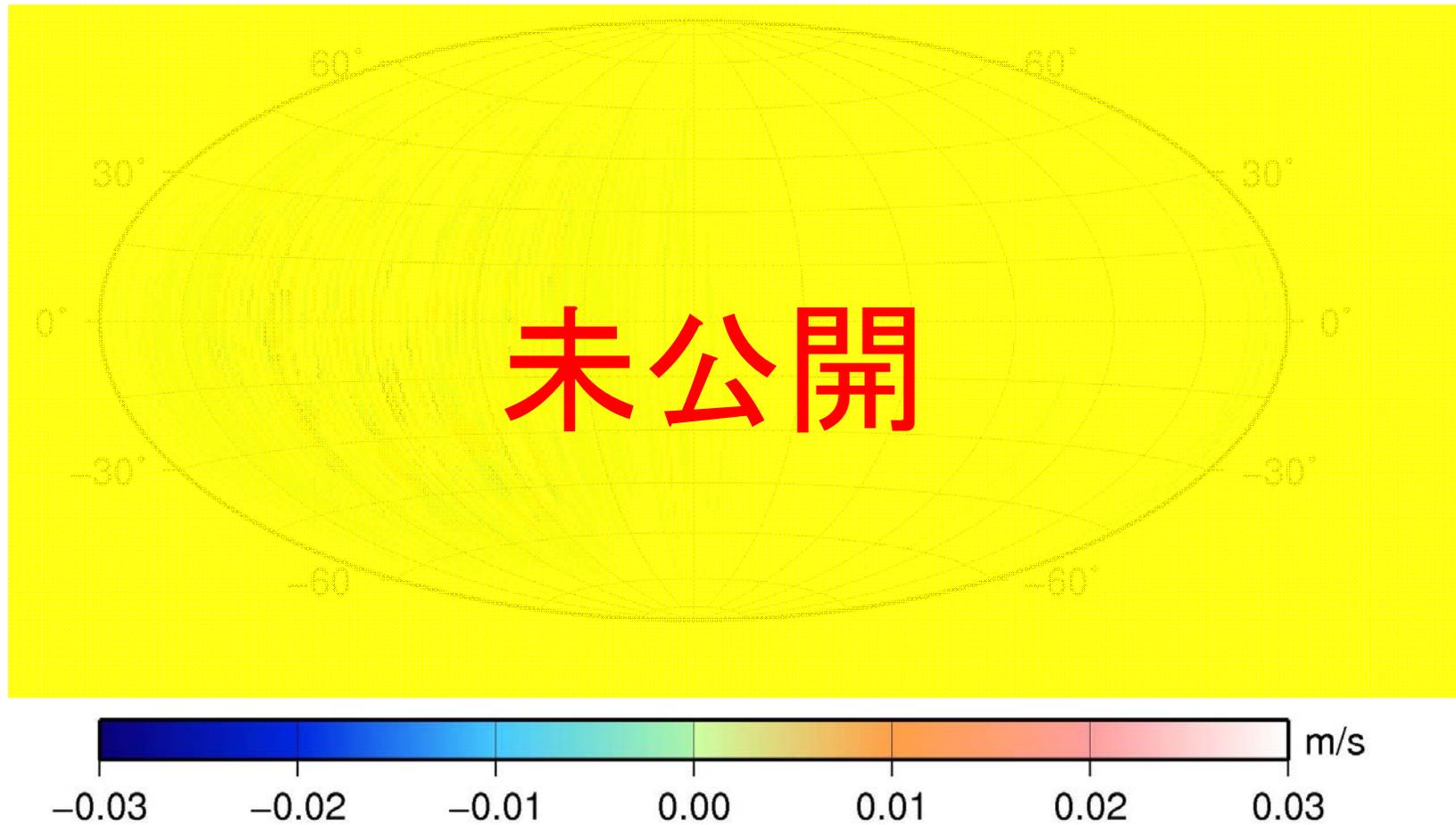
Crustal density =  $2800 \text{ kg m}^{-3}$



FHT: Feldspathic Highlands Terrain、SPAT: South Pole–Aitken Terrain、  
PKT: Procerallum KREEP Terrain

並木他(2008)

# 4-way ドプラー観測の領域



4-wayドプラー観測データの残差(LP100Kとの比較)(Goossens他、2008)

# かぐやの延長ミッション(後期運用)の計画案

未公開

# 「おきな」落下までの観測計画

- これまで順調に観測を継続しているが、高緯度地域等の観測データが不足している領域が存在するので、定常観測期間に補えない部分を中心に延長ミッションで観測を継続したい。
- その場合には「おきな」の軌道精度を維持するためにVLBI観測を合間に行うことが重要である。
- また、月の慣性モーメントに関係する重力場の2次の係数をこれまでより一桁以上向上させるもう一つの観測目標についても、観測期間が長ければ長いほど高精度の重力場モデルを構築できる。
- したがって「おきな」が月面に落下するまでは、「おきな」と「おうな」のVLBI観測を定常観測と同様な頻度で行いたい。

# おきな落下後の観測方針

- 定常観測期間の「おうな」の運用頻度は「おきな」に比べて少ないために、太陽輻射圧等の衛星の工学モデルが「おきな」に比べて高い精度で求まらない可能性がある。
- 「おうな」の延長ミッションを行い、衛星の工学モデルの精度を向上することができれば、ノミナルと延長を合わせた長期間のデータを1月程度の長いアーク長で再解析することによって、重力場の2次の係数を $1 \times 10^{-10}$  (当初目標の約5倍)まで向上させ、中心核の密度ばかりでなく内核の存否までを確認することが期待できる。
- 「おうな」単独、「おうな」と主衛星、「おうな」とクエーサーとの相対VLBI観測では、「おきな」と「おうな」の相対VLBI観測ほどの高精度は期待できないが、ドプラー観測、測距と組み合わせることによって上記目的を達成することができる。
- そのために必要なVLBI観測の頻度については、これまでの主衛星やクエーサーとの相対VLBI観測の解析結果を評価した上で決める必要があり現在検討中である。

# 今後の課題

- かぐやのミッション期間の観測を継続する
- 重力場解析に使用するVLBIデータ数を増やす
- 「おきな」と「おうな」の軌道長をより長くする  
→ 重力場の低次項の精度をより向上させる
- 主衛星の姿勢データを取り込む
- 地球物理学的な解釈

# 謝辞

RSAT/VRADミッション機器とおきな(リレー衛星)・  
おうな(VRAD衛星)の開発に尽力いただいた  
NEC東芝スペースシステムズ, 日本アンテナ, 日  
本飛行機の技術者諸氏, 並びにかぐや(セレー  
ネ)プロジェクトを支えるスタッフメンバーに深く感  
謝します.

VERA局および外国局のVLBI観測に協力頂いたみ  
なさま、IVSの委員会のDirk Behrend氏、小山康  
弘氏に感謝します。

このミッションは故富家文穂氏の卓越した知識と技  
術がなければ成し遂げられませんでした。氏の  
天逝を悼み、謝意を表します。