



NOZOMI/HAYABUSAの VLBI観測

関戸衛、市川隆一、後藤忠広、近藤哲朗

情報通信研究機構

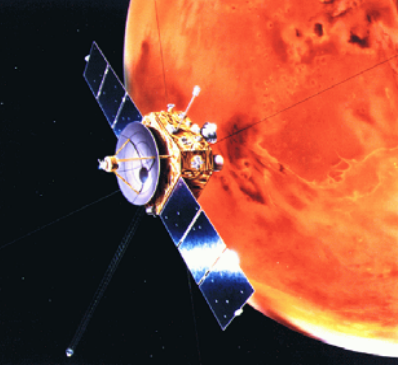
吉川真、竹内央

宇宙航空研究開発機構



発表内容

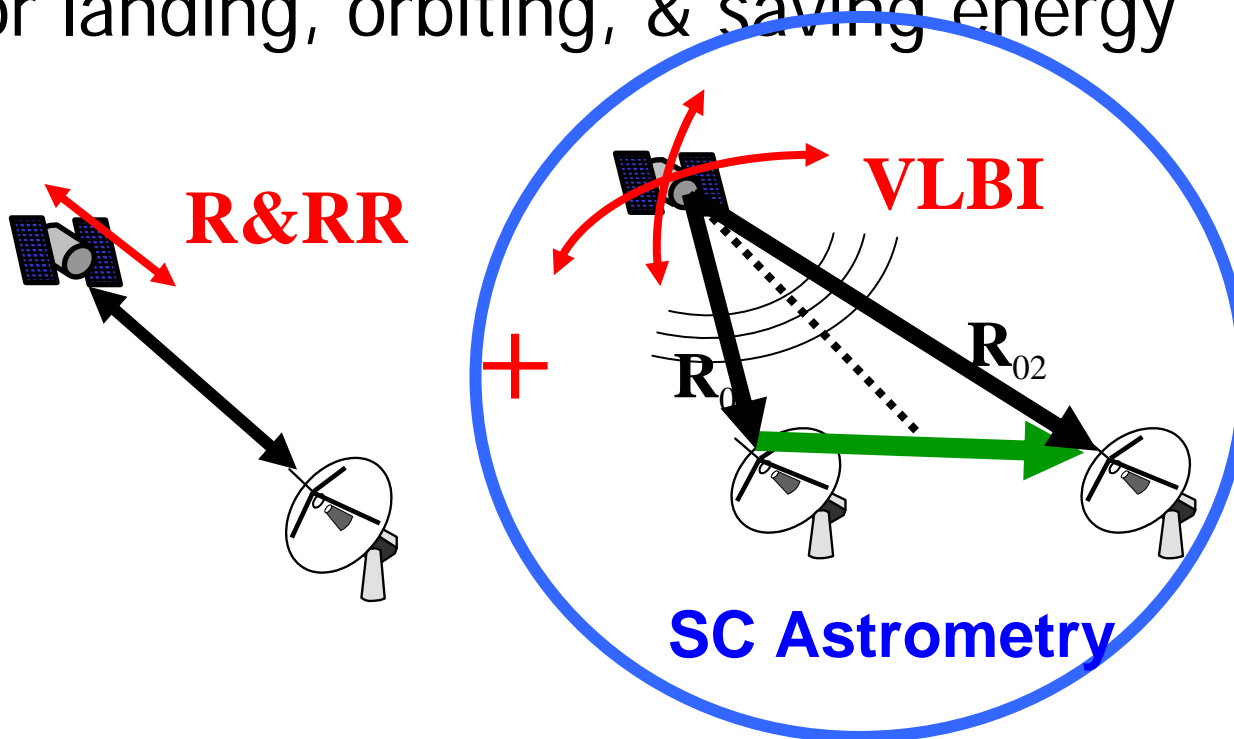
- NOZOMI・HAYABUSAで行ってきたこと
- 群遅延計測の精度の問題
- HAYABUSAのイトカワタッチダウン時の位相遅延観測
 - 相対VLBIの補正精度評価
- 最近の進展
 - M系列符号の解読、レプリカの使用
 - NASA, JAXA, ESAの共同DDOR観測



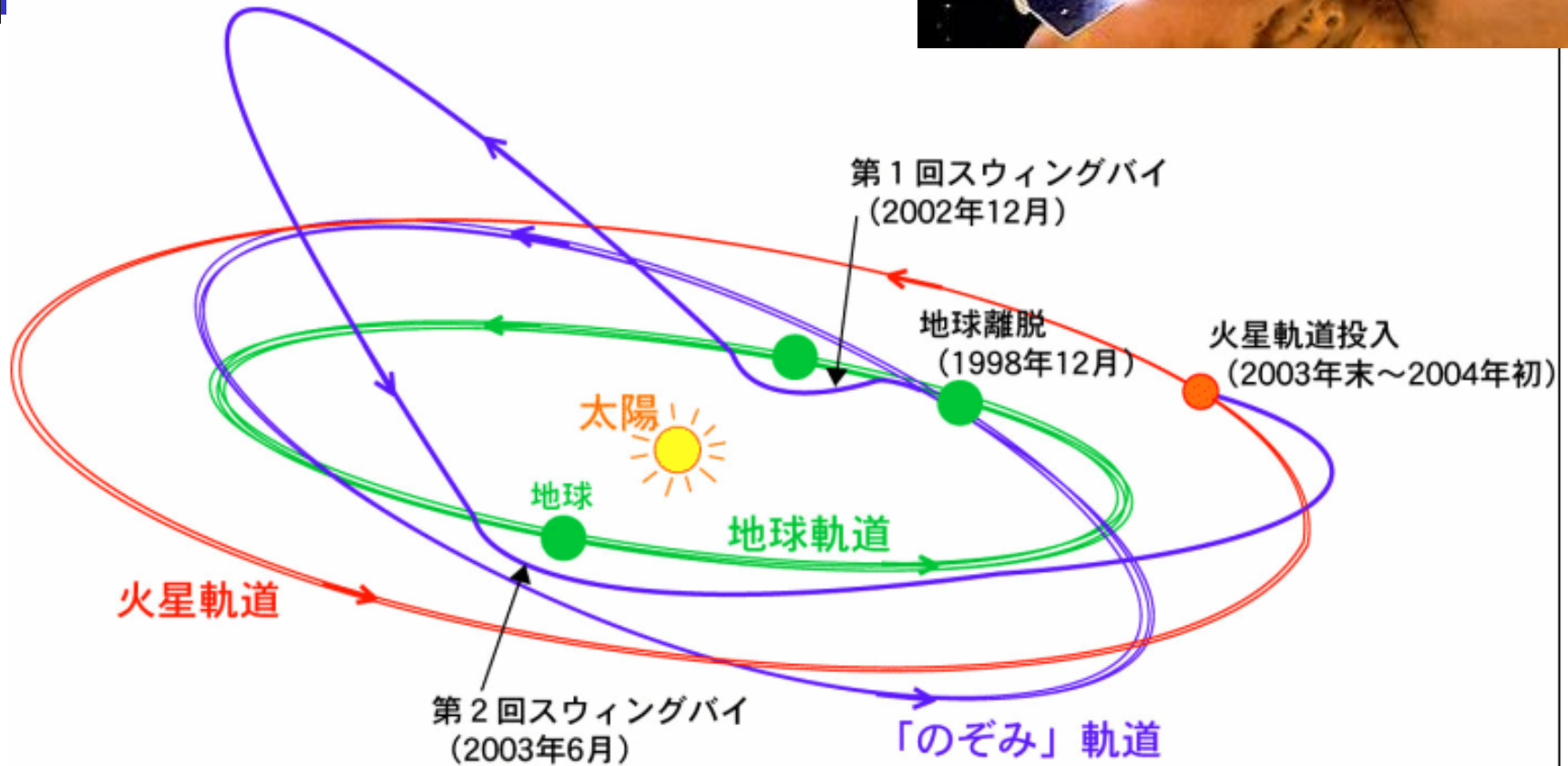
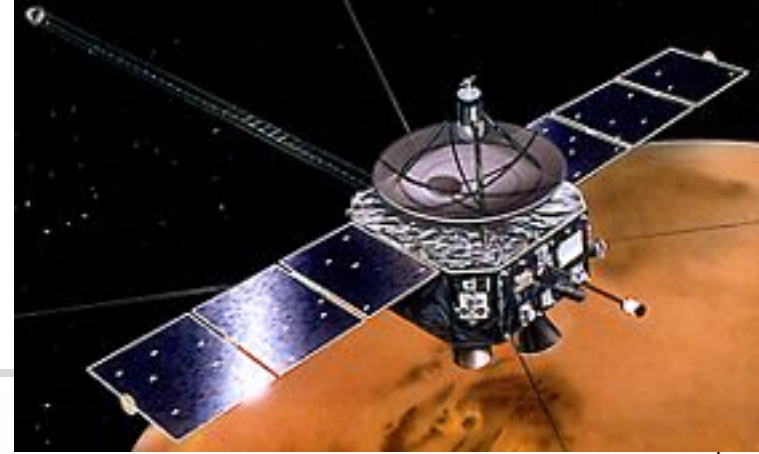
Spacecraft Navigation with VLBI: Motivation

Requirements for increased accuracy of orbit control for future space missions:

- For landing, orbiting, & saving energy

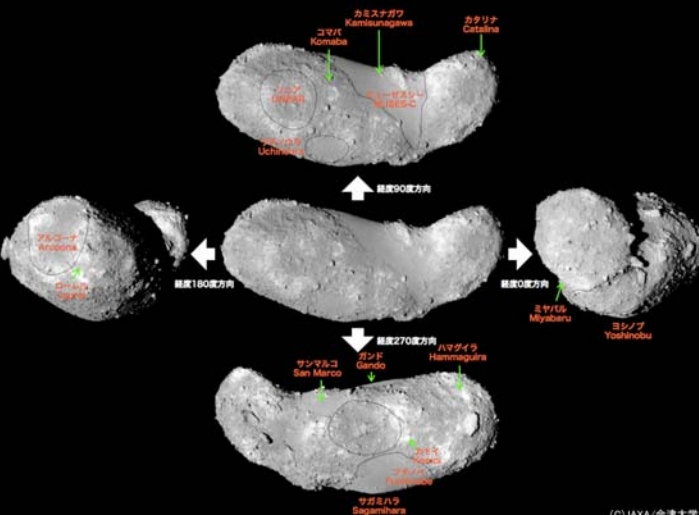


火星探査機 NOZOMI



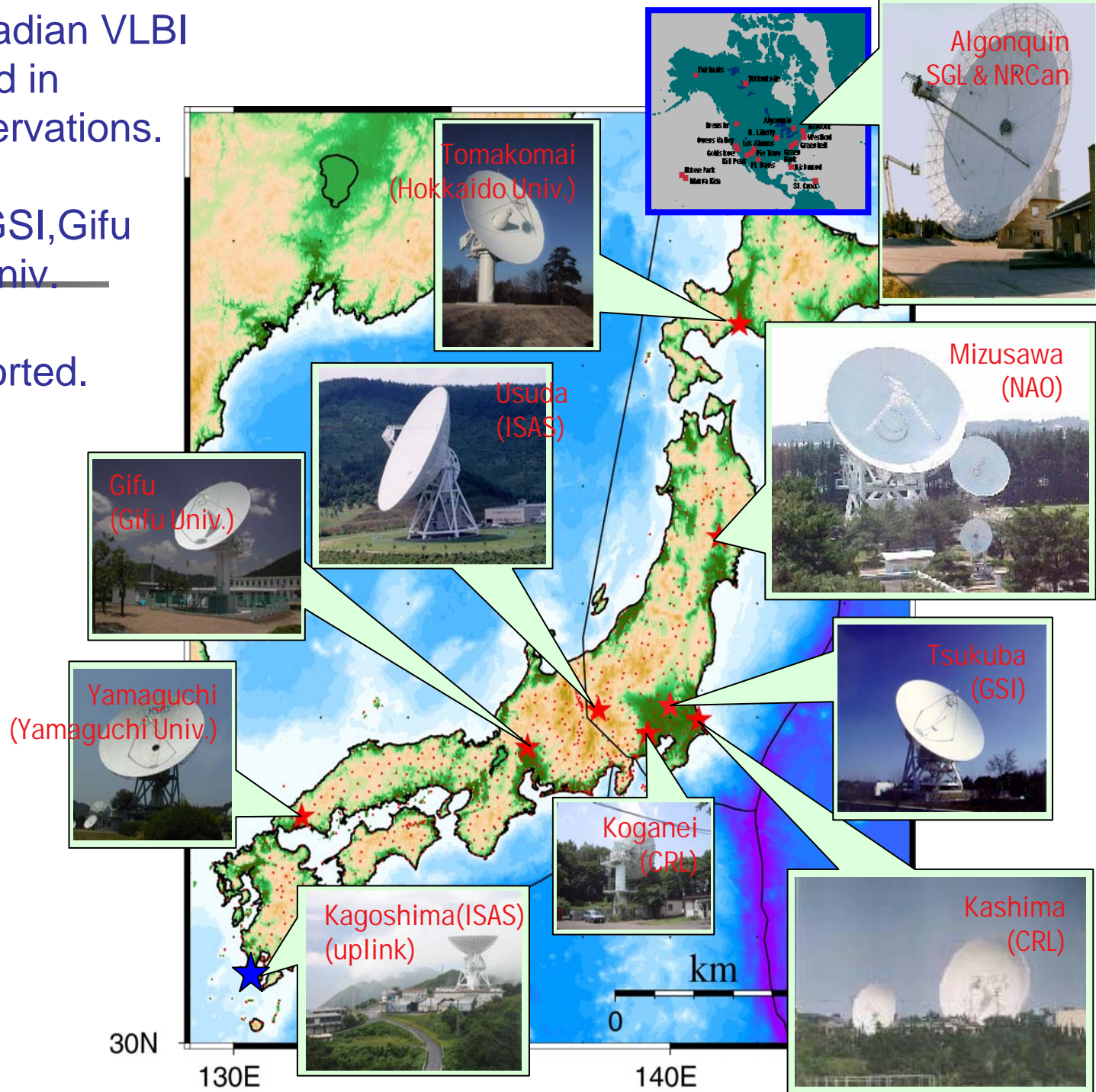
小惑星探査機HAYABUSA

- 2003年5月9日 Launched
- 2005年9月 小惑星イトカワ到着
- 2005年11月 小惑星イトカワ タッチダウン
- 2010年6月 地球にカプセル投下

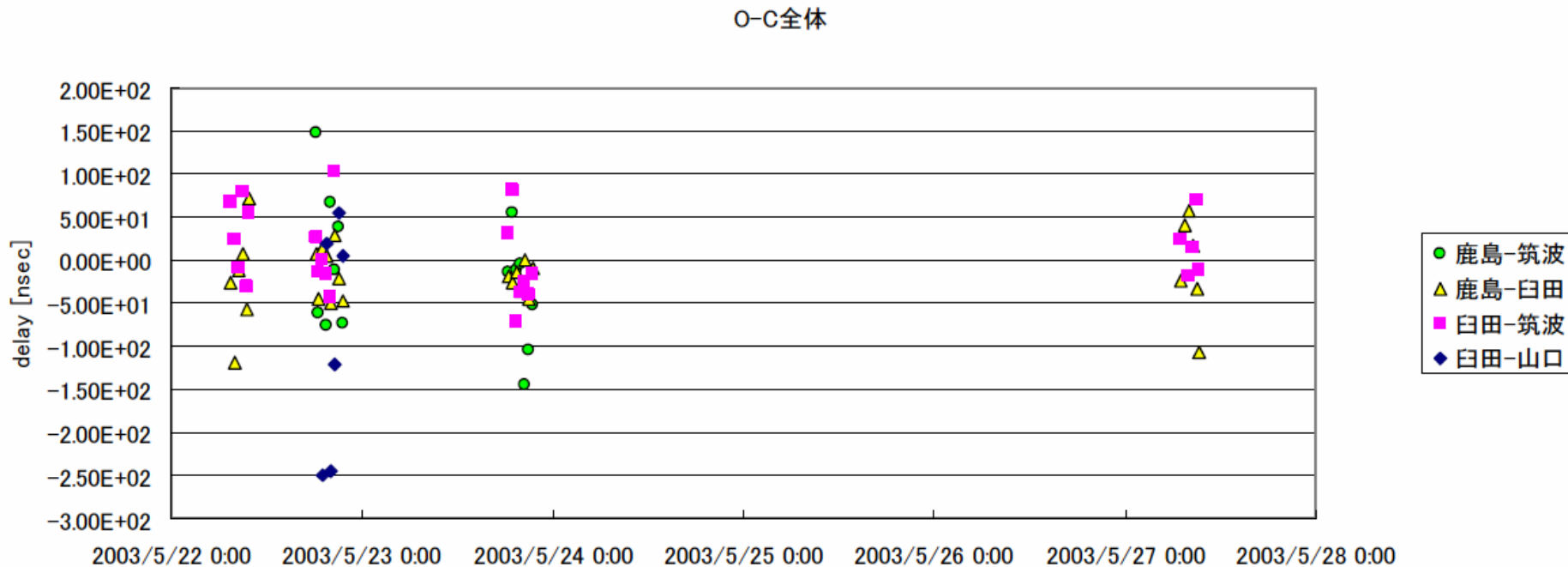


Japanese and Canadian VLBI Stations participated in NOZOMI VLBI observations.

ISAS, CRL, NAOJ, GSI, Gifu Univ, Yamaguchi Univ.
Hokkaido Univ.
SGL, NRCan supported.



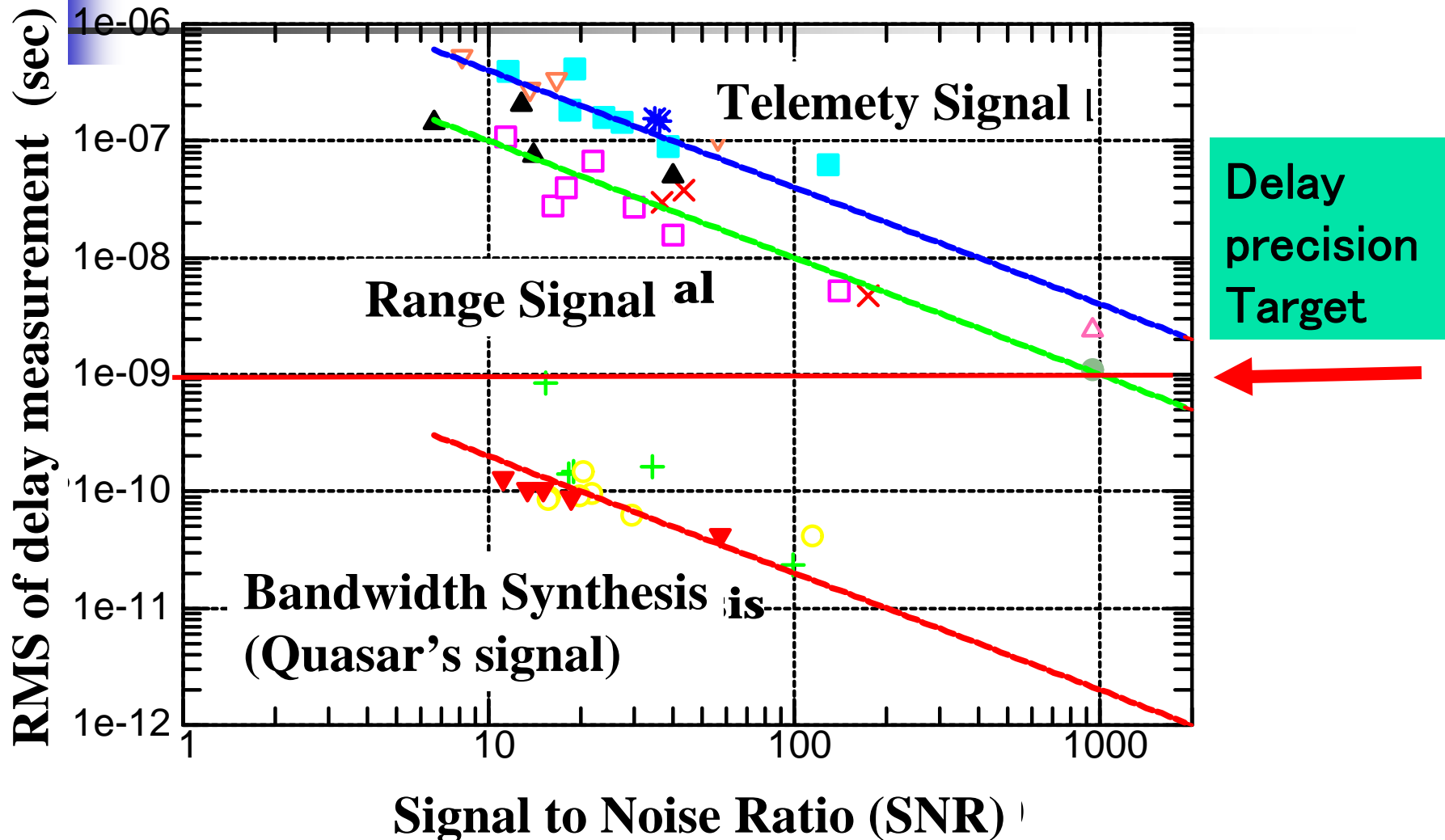
R&RRで評価したNOZOMIの 群遅延データ (by 富士通大西氏)



群遅延計測精度

Hayabusa Observations
In May /30~July 4 2005

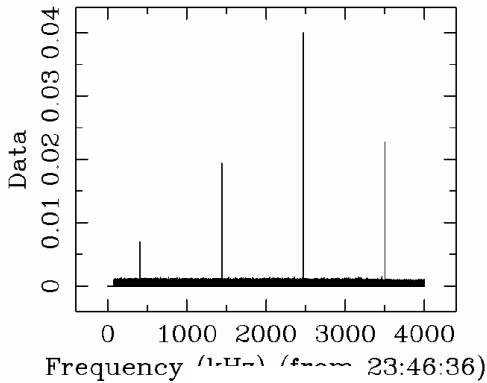
$$\sigma_{\tau} = \frac{A}{(SNR \times BW)}$$



VLBI 観測量: 群遅延

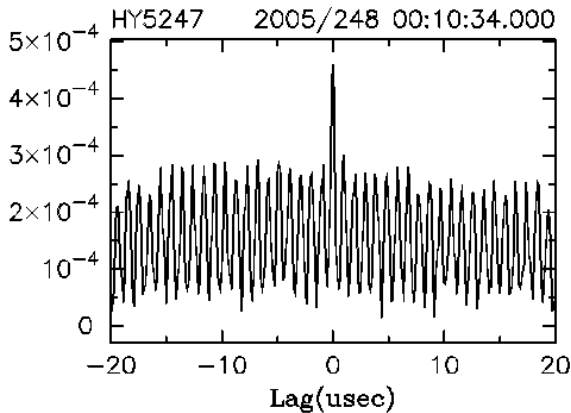
DDOR signal

0.000 - 1.000 sec.
8e+03 kHz-1bit Auto Cor Spectrum



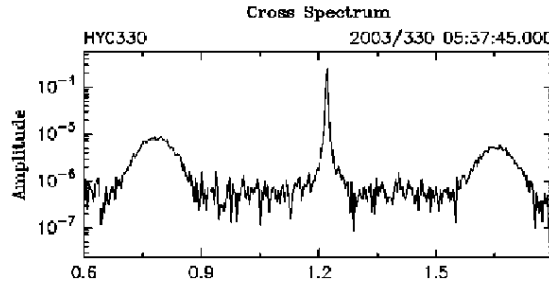
← 4MHz →

Fringe



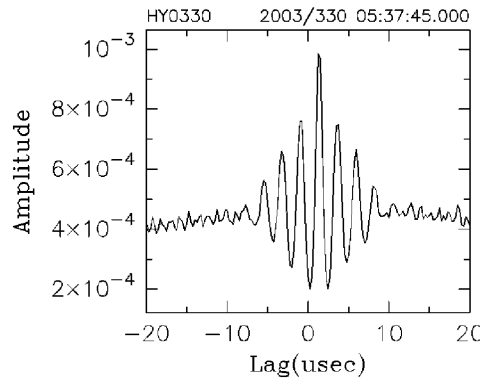
Effective Bandwidth
450kHz

Range signal



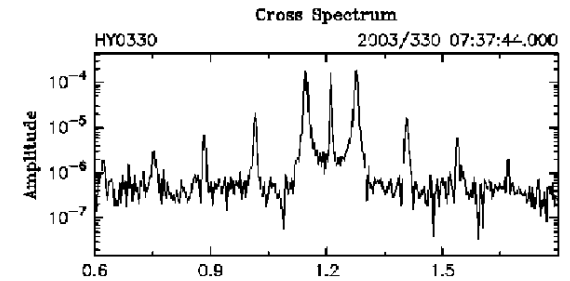
← 1MHz →

Fringe



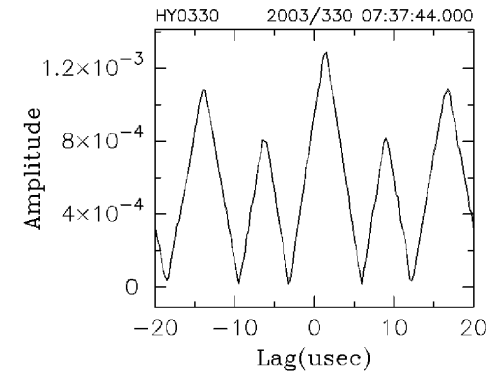
Effective Bandwidth
100kHz

Telemetry Signal



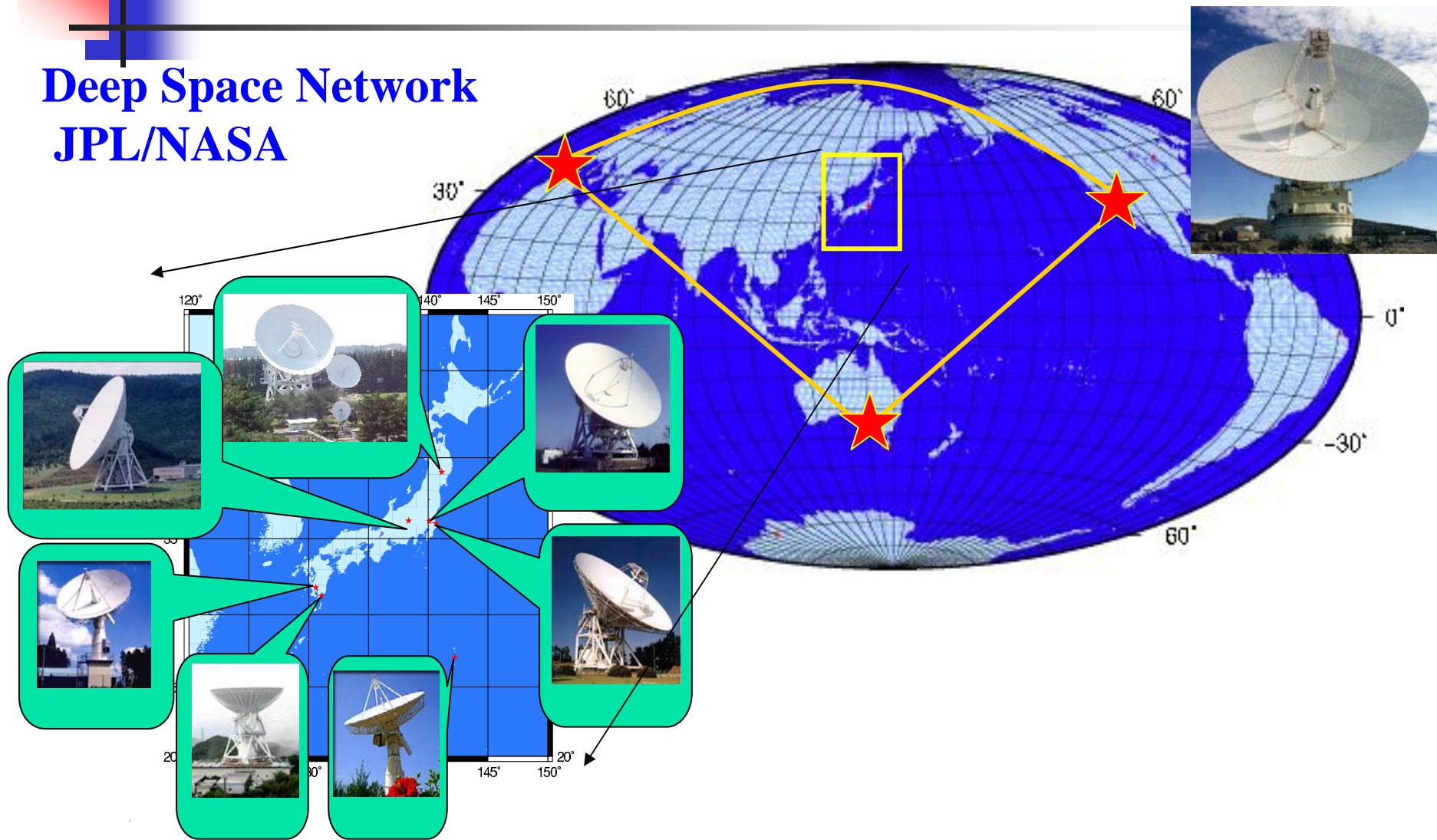
← 1MHz →

Fringe



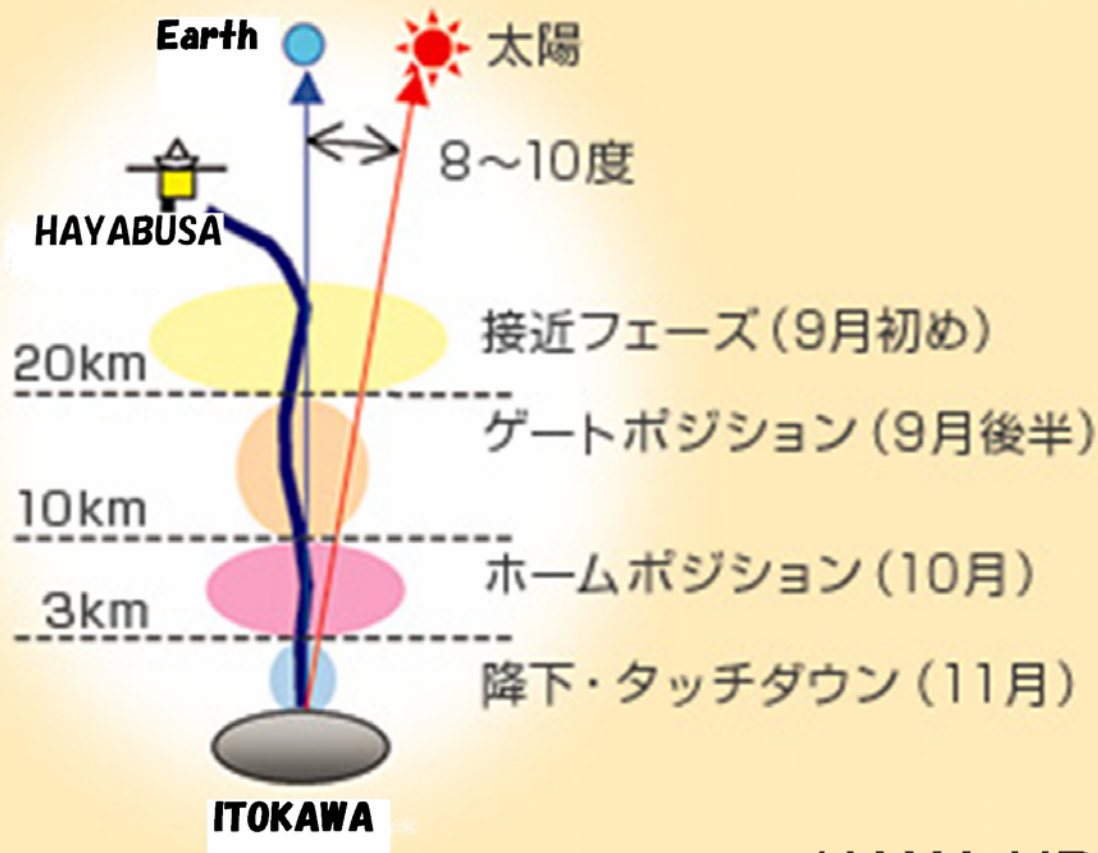
Deep Space Network and Japanese Domestic VLBI stations

Deep Space Network
JPL/NASA



Hayabusa's Touchdown Approach to ITOKAWA in Nov. 2005

AVI PL Observation



(JAXA HP )

Fri

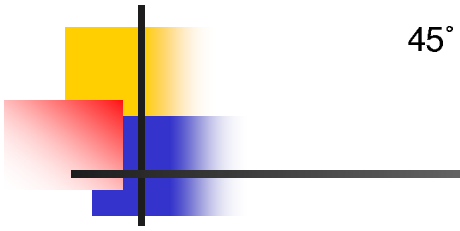
△ VLBI of HAYABYSA in Nov. 2005

観測周波数 : 8.4GHz

Epoch	Reference Source (Angular Distance)	Switching Cycle	Observation Stations
4 th Nov.	1352-104(3.3deg)	6 min.	O,T,C
12 th Nov.	1430-178(3.3deg.) 1443-162(2.4deg.)	6 min. Alternatively	O,T
19 th Nov.	1443-162(5.5deg.) 1430-178(8.5deg.)	6 min. Alternatively	O,T,M
25 th Nov.	1514-241(6.8deg.) 1504-166(7.1deg.)	6 min. Alternatively	O,T

O:Kashima34, T:Tsukuba32m, C: Chichijima10m, M: Mizusawa 20m

HYBS VLBI observation



45°
40°

140° 145° 150°



Mizusawa 10m, 20m



Tsukuba 32m



Usuda 64m



25°
20°

145° 150°



Uchinoura 34m



Chichi 10m



Kashima 34m

相対VLBIによる遅延校正

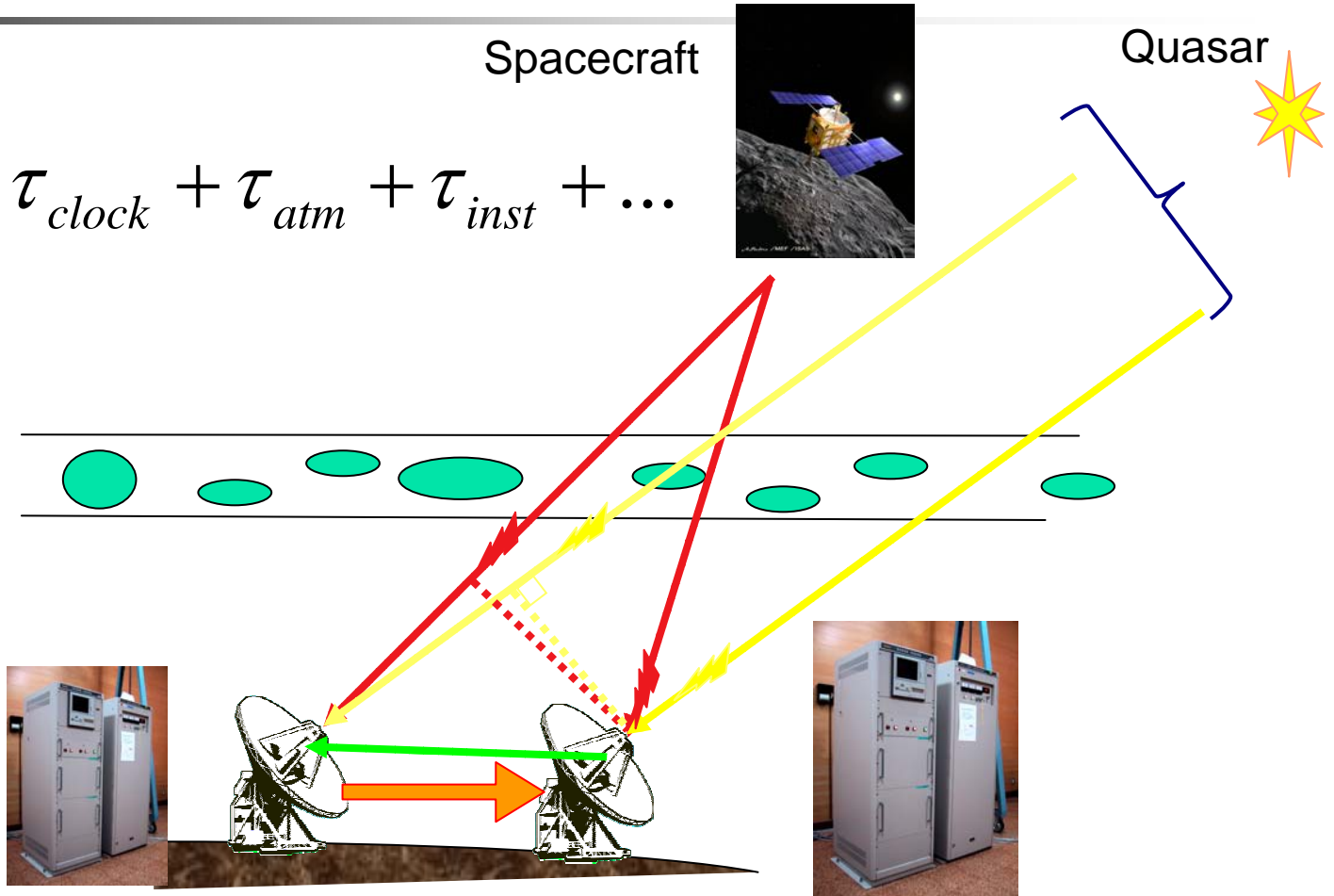
相対VLBIにより、得られる遅延精度は？

$$\tau = \tau_{geo} - \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{inst} + \dots$$

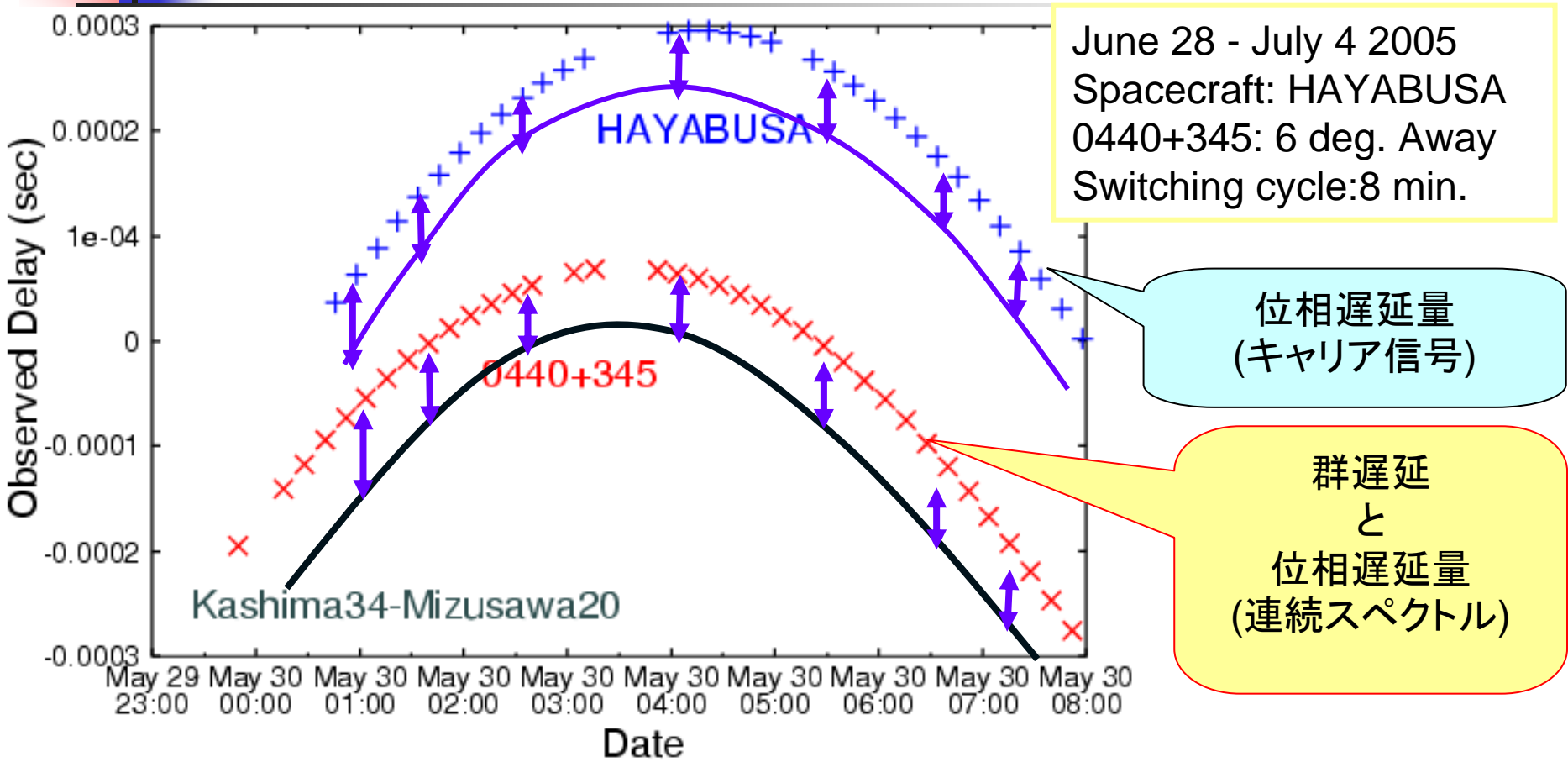
Spacecraft



Quasar



Delta-VLBI: Data Processing Scheme



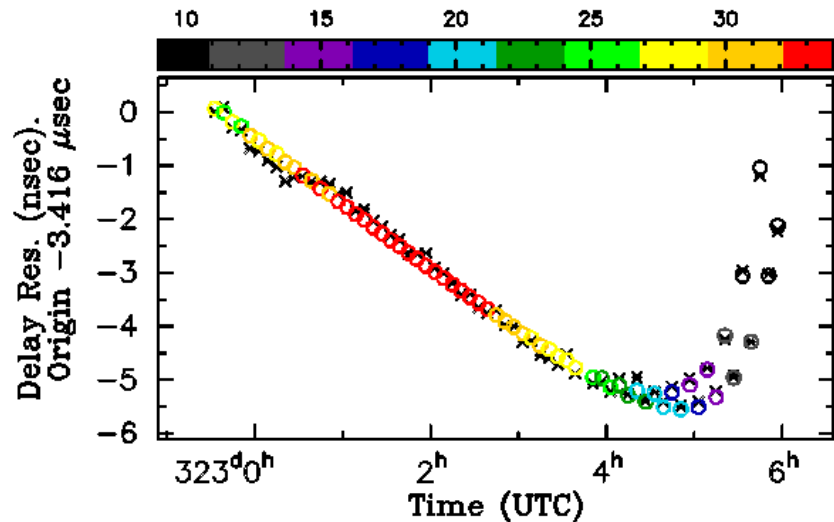
大気(El_x, El_y, t)クロックモデル による内挿

参照電波源 (Quasar) の群遅延量

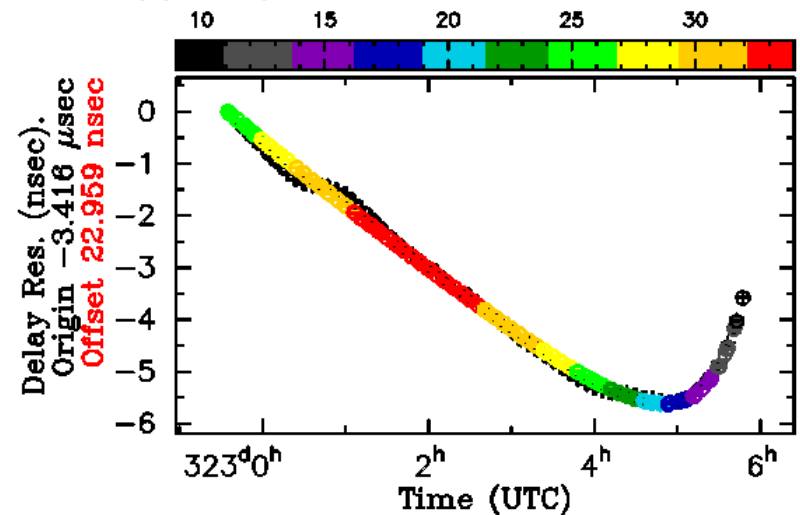
$$\tau = \tau_{geo} + (\tau_{clock}^0 + \tau_{clock}^1 t) \\ + (\tau_{atm,y}^0 + \tau_{atm,y}^1 t) fm(El_y) - (\tau_{atm,x}^0 + \tau_{atm,x}^1 t) fm(El_x)$$

HAYABUSA の位相遅延量

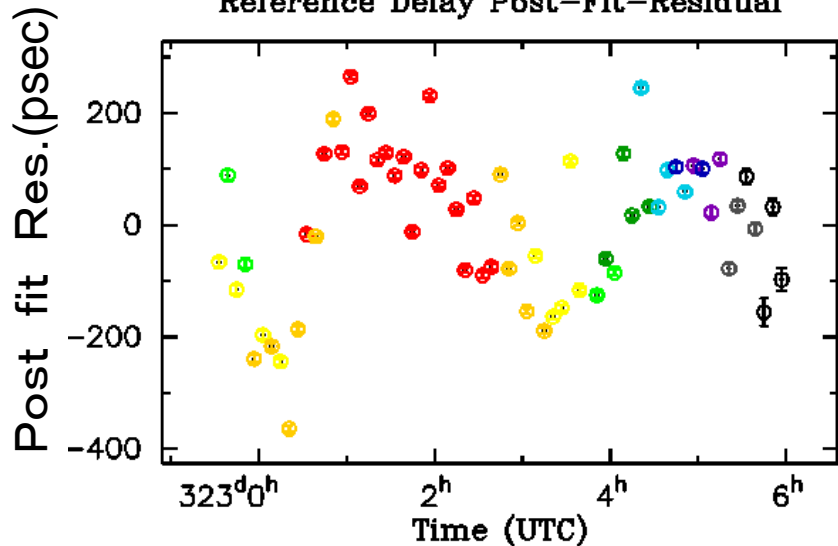
Model Fitting to Reference source



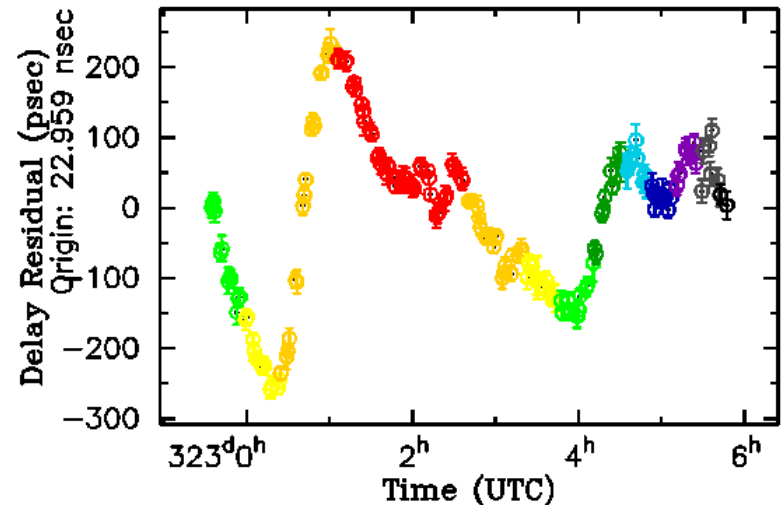
Applying to HYBS



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

Piece-wise linear

レプリカ(M系列符号)との相関

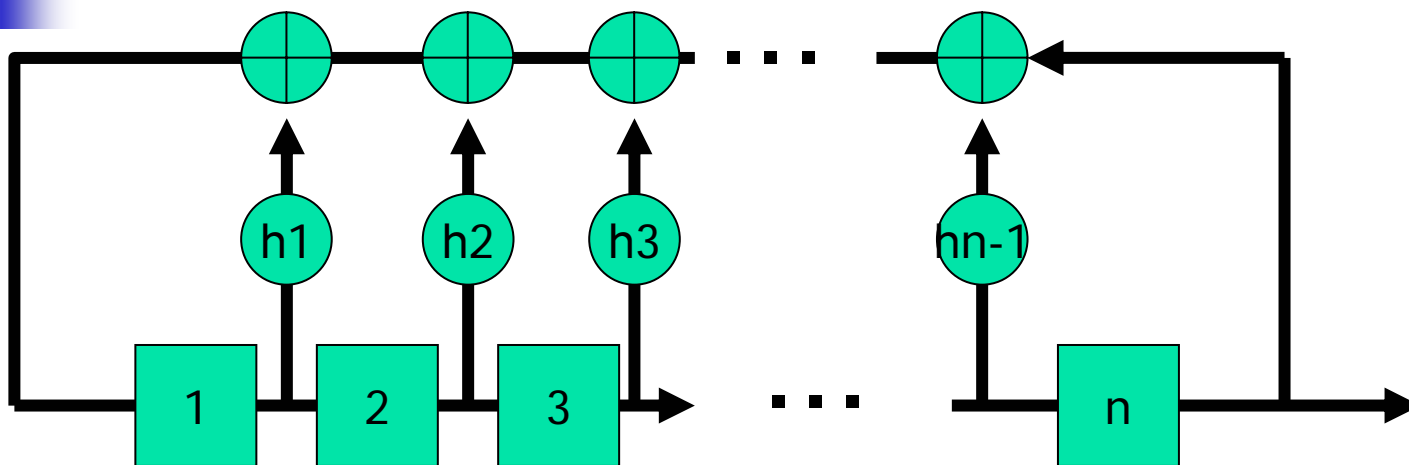
- 相関係数、SNRの大幅な改善
=> 遅延計測精度の改善が期待できる
- NICT後藤さんが臼田Uplink信号からM系列のcodeを解析
 - 255bit周期, 512bit周期の生成多項式を推定

$$\rho_{VLBI} = \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{T_{sys1}T_{sys2}}} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$$

$$\rho_{sc} = \sqrt{\frac{T_{a1}}{T_{sys1}}} \approx 0.1 - 0.03$$

人工符号との相関処理の場合 10倍～30倍改善

n次の生成多項式から生成される
M系列：巡回多項式で周期最大となるもの



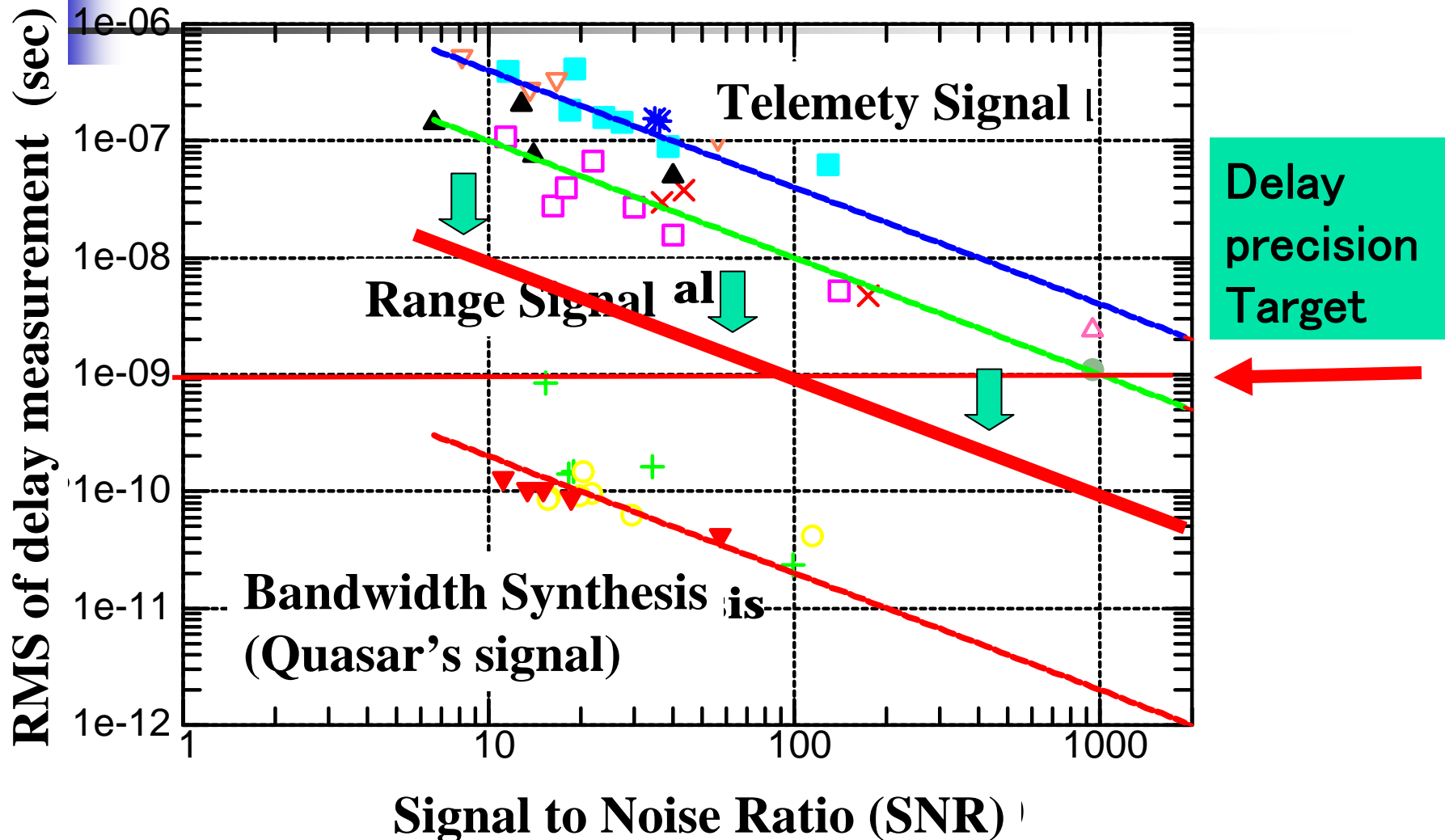
$$x_n = x^n + h_{n-1}x^{n-1} + \cdots + h_1x + 1$$

符号は擬似ランダムノイズとなり、自己相関関数が単一の鋭いピークを持つ

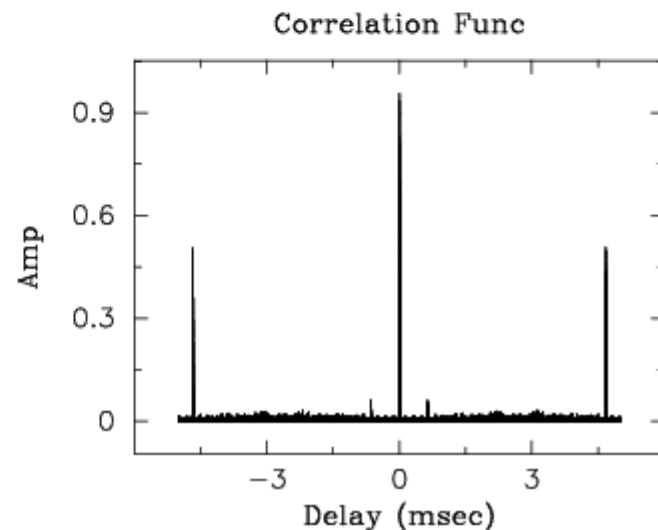
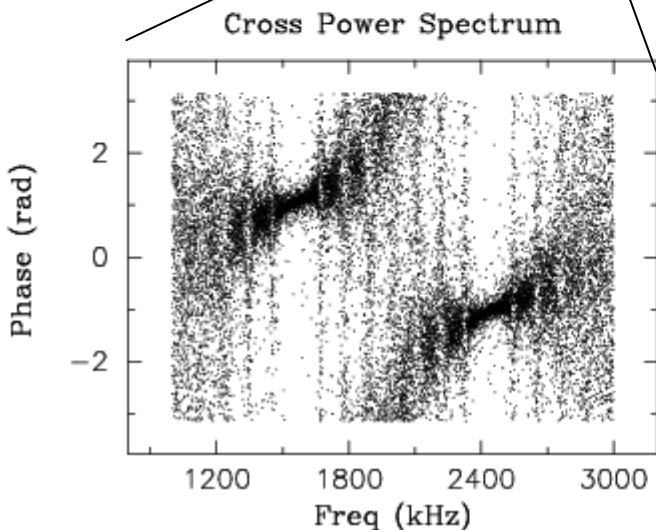
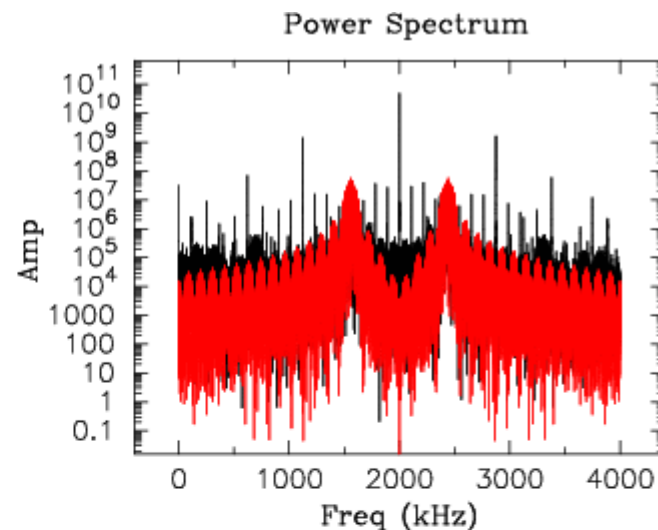
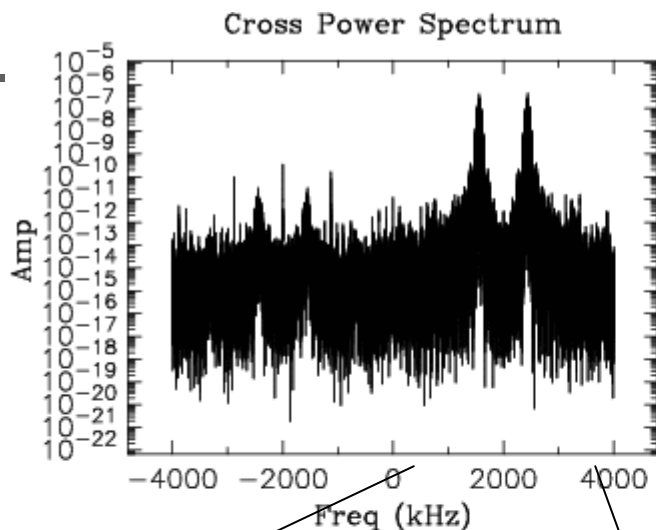
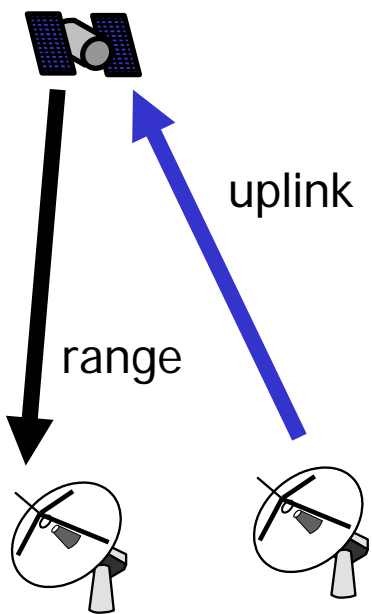
群遅延計測精度

Hayabusa Observations
In May /30~July 4 2005

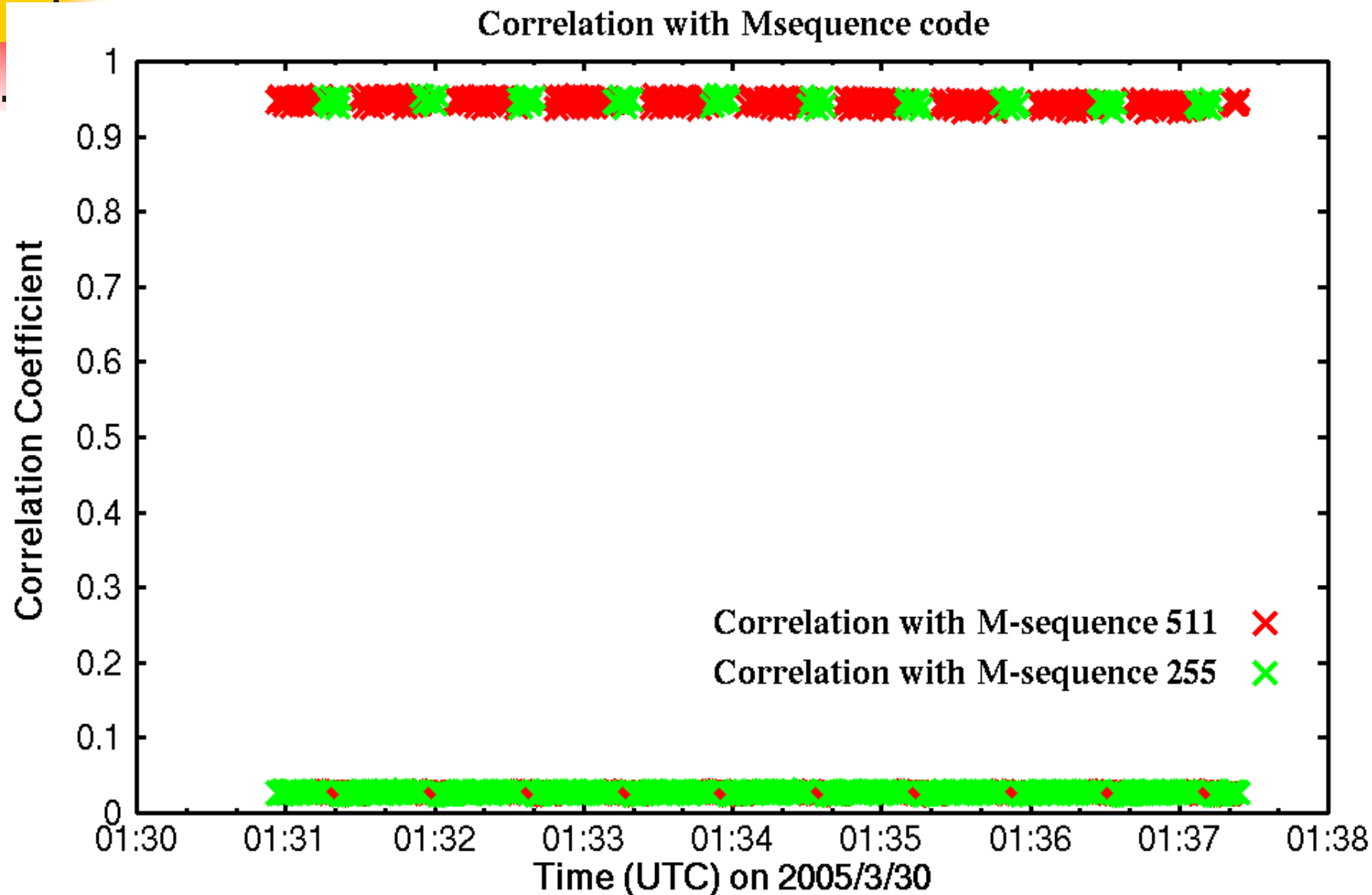
$$\sigma_{\tau} = \frac{A}{(SNR \times BW)}$$



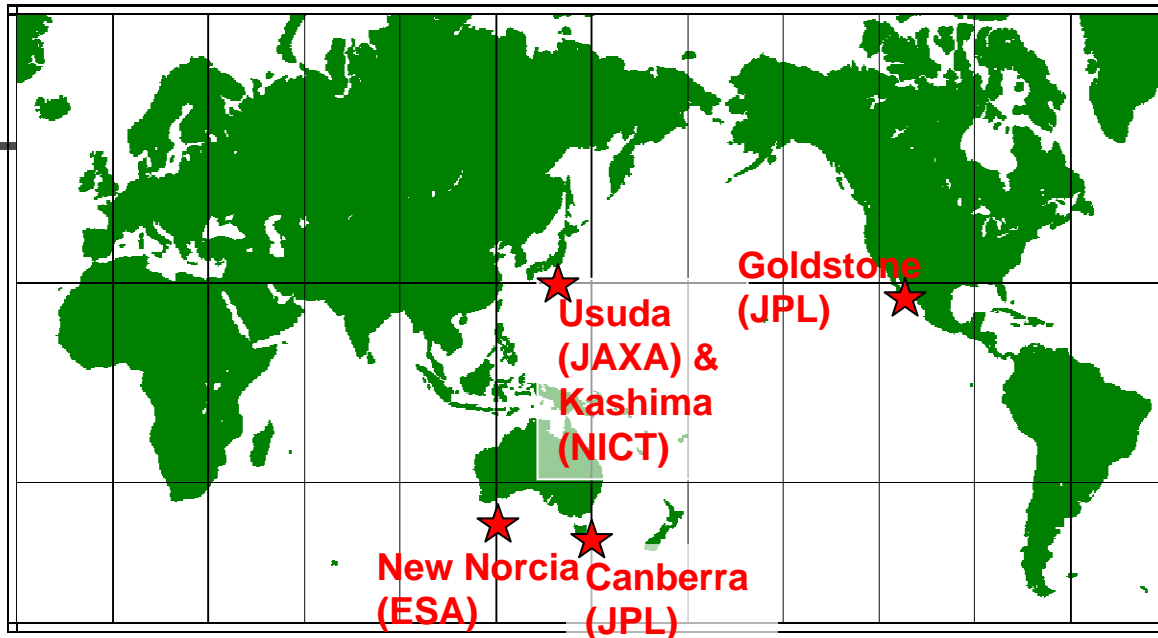
HAYABUSAのレンジ信号(uplink)とM系列の信号との相関



M系列(255,511)とUplink信号との相関

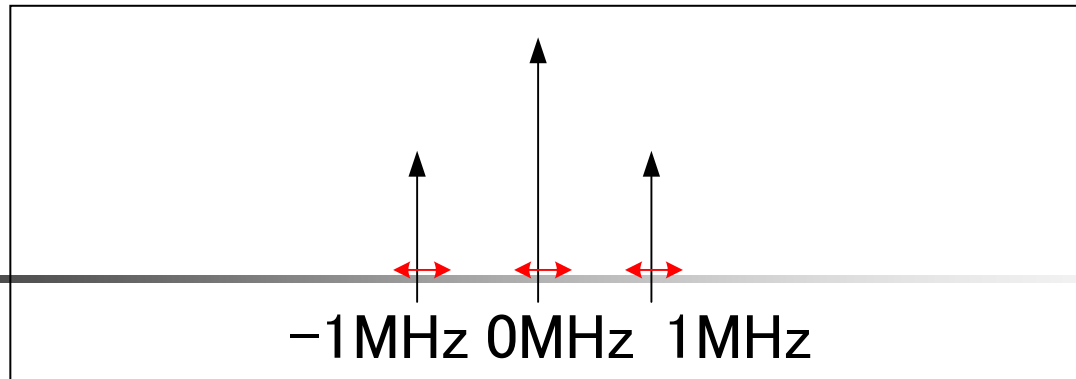


HAYABUSA Delta-DOR experiment between JAXA, JPL, ESA, and NICT (Nov 15, 2008)

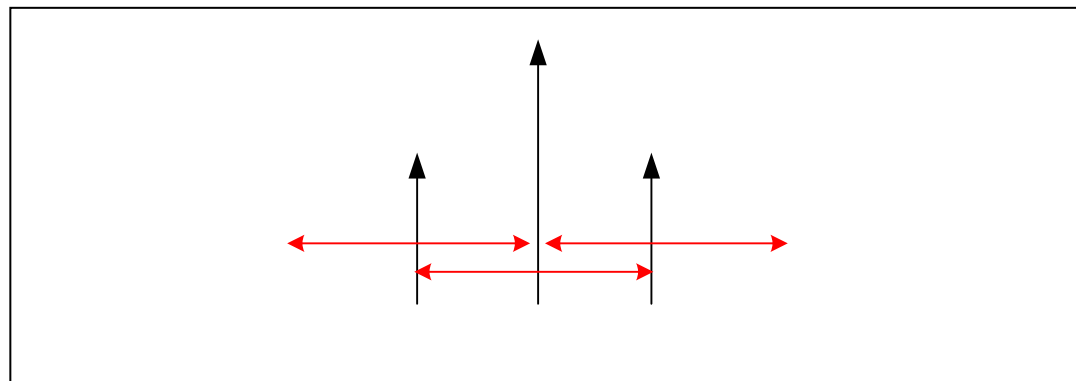


- 初となる JPL(DSN), ESA, JAXA, NICT の四機関(5局)の間の Delta-DOR 観測を実施。
- はやぶさには Delta-DOR tone generator が設置されていないため Canberra 局からトーン信号(± 1 MHz)を uplink して代用した。(トラポン内部の帯域制限により 2 MHz 帯域幅以上は不可。)
- はやぶさまでの距離は 1.9[AU]。非常に悪い回線状況であったが、10~20 nsec r.m.s. で群遅延を計測できた。

データ処理方式



探査機観測時(50kHzBW, 8bitサンプリング)
→各局の位相差の勾配から群遅延を出す。

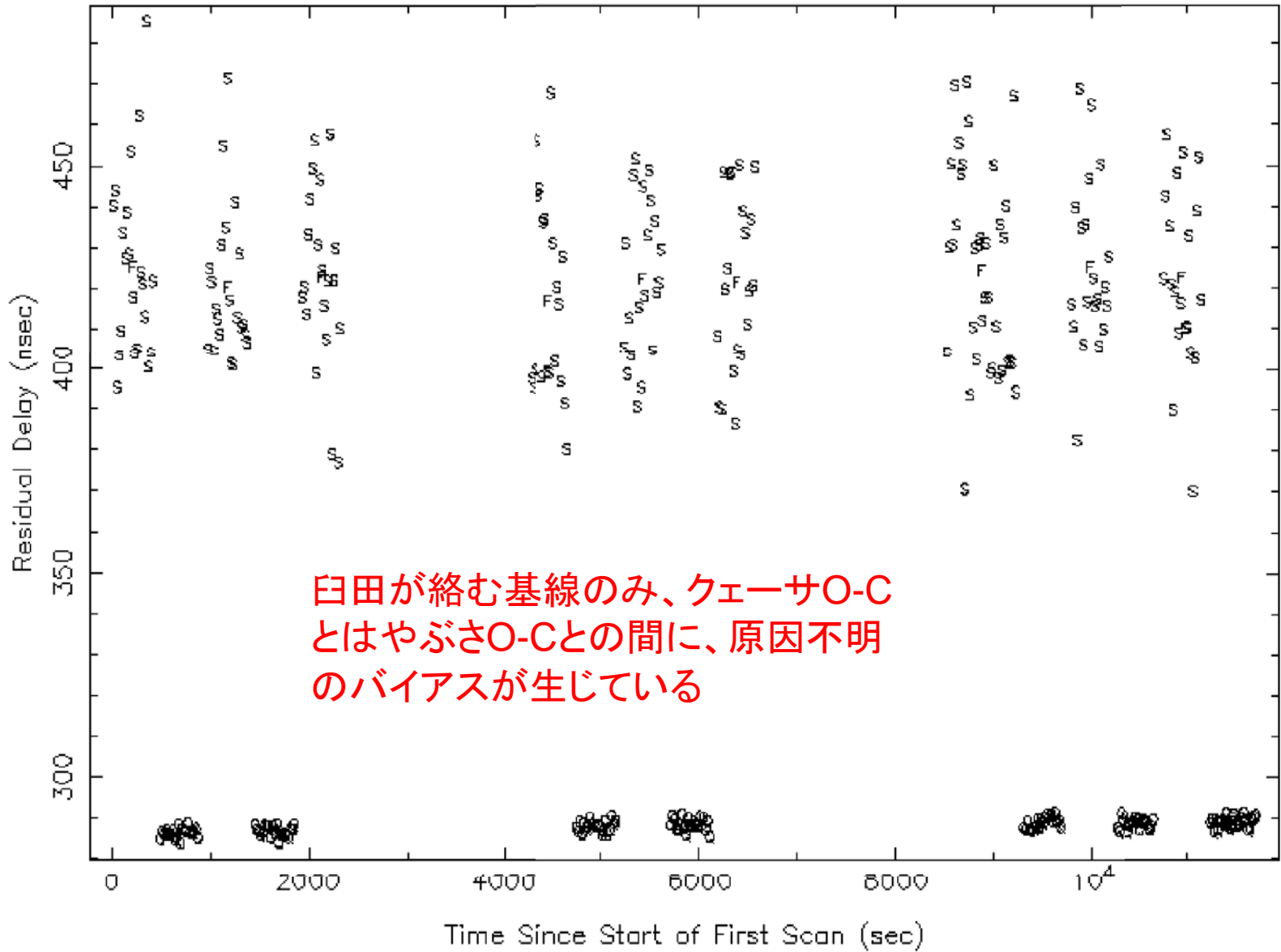


キューサ観測時(2MHz BW, 2bitサンプリング)
→バンド幅合成により群遅延を計測し、探査機の群遅延を補正。
臼田では 8MHz BW, 4bit のK5 ベースバンド信号1chを記録し、ソフトウェアにより各信号を切り出した。

臼田 - キャンベラ O-C

HIT Any Key to Continue

08/319 22:14:00.0000 DSS 34/DSS 91 CHN PR 2 3 MOD = 484.9



臼田が絡む基線のみ、クェーサO-C
とはやぶさO-Cとの間に、原因不明
のバイアスが生じている



まとめ

- 残念ながらまだVLBIによる深宇宙探査機の軌道決定は、試行途上
- 探査機側の信号形態も含めた検討進行中
- NASA, ESA, JAXAのDDOR観測実施(2008年11月)