

相対VLBI観測による深宇宙飛翔体 軌道決定技術

-「のぞみ」位置推定結果と今後の開発方針-

市川隆一、関戸衛、大崎裕生、小山泰弘、近藤哲郎

通信総合研究所 鹿島宇宙通信研究センター

大西隆史

富士通（株）

吉川真

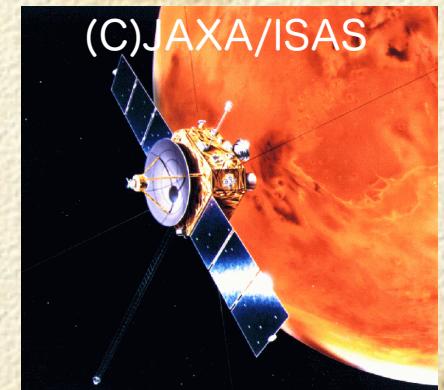
宇宙航空研究開発機構(JAXA/ISAS)

「のぞみ」相対VLBIグループ

(JAXA/ISAS, NAO, GSI, JAXA/NASDA, CRL, 北大、岐阜大、山口大、SGL/CRESTech)

本日の内容

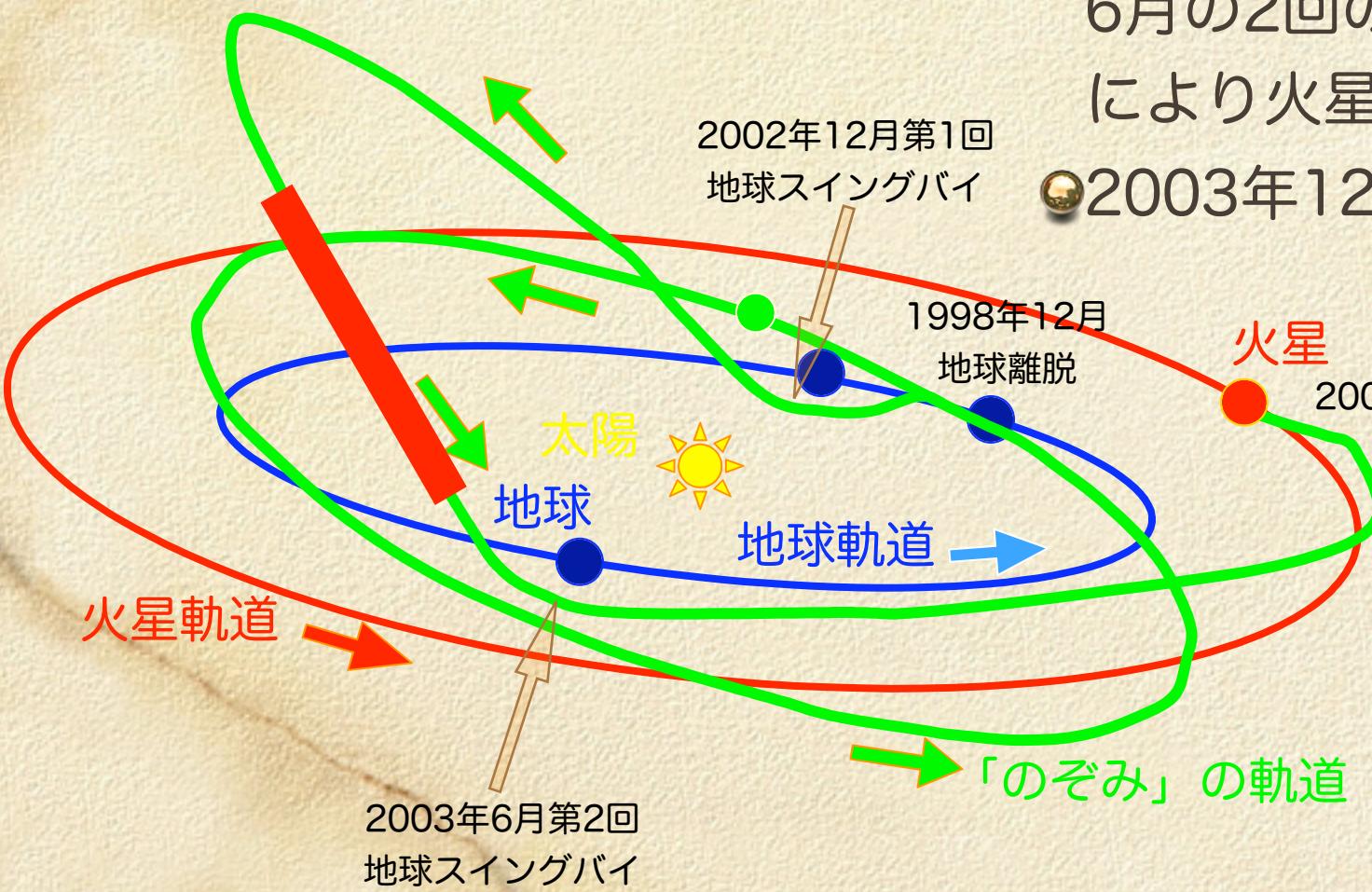
- 目的
- 火星探査船「のぞみ」の現況
- 「のぞみ」相対VLBI観測の概説
- 「のぞみ」推定位置の比較
 - ★ R&RR法による結果とVLBI観測結果
- 相対VLBIによる軌道決定技術の今後の開発方針
- まとめ



目的

- 火星探査船「のぞみ」の第2回地球スイングバイ直前の軌道決定支援
- 準リアルタイムでの相対VLBI法による深宇宙飛翔体軌道決定技術の獲得
 - ★ 「のぞみ」支援はこの研究開発の実地検証という位置付け
 - ★ 将来の惑星探査で迅速、かつ高精度の軌道決定が必要とされている

「のぞみ」の軌道



- 1998年末の地球スイングバイ時のトラブルで燃料消費大
- 軌道変更を余儀なくされる
- 1999年末の火星到達不可能に
- 2002年12月、および2003年6月の2回の地球スイングバイにより火星に向かう軌道に投入
- 2003年12月火星到着予定

「のぞみ」相対VLBI観測

相対VLBI観測の利点

- ★ 高い角度分解能を生かした軌道決定
- ★ 飛翔体とQSOのスイッチング観測により電離層・中性大気による伝搬遅延誤差を相殺できる

「のぞみ」とQSOを組み合わせたスケジュールにより観測

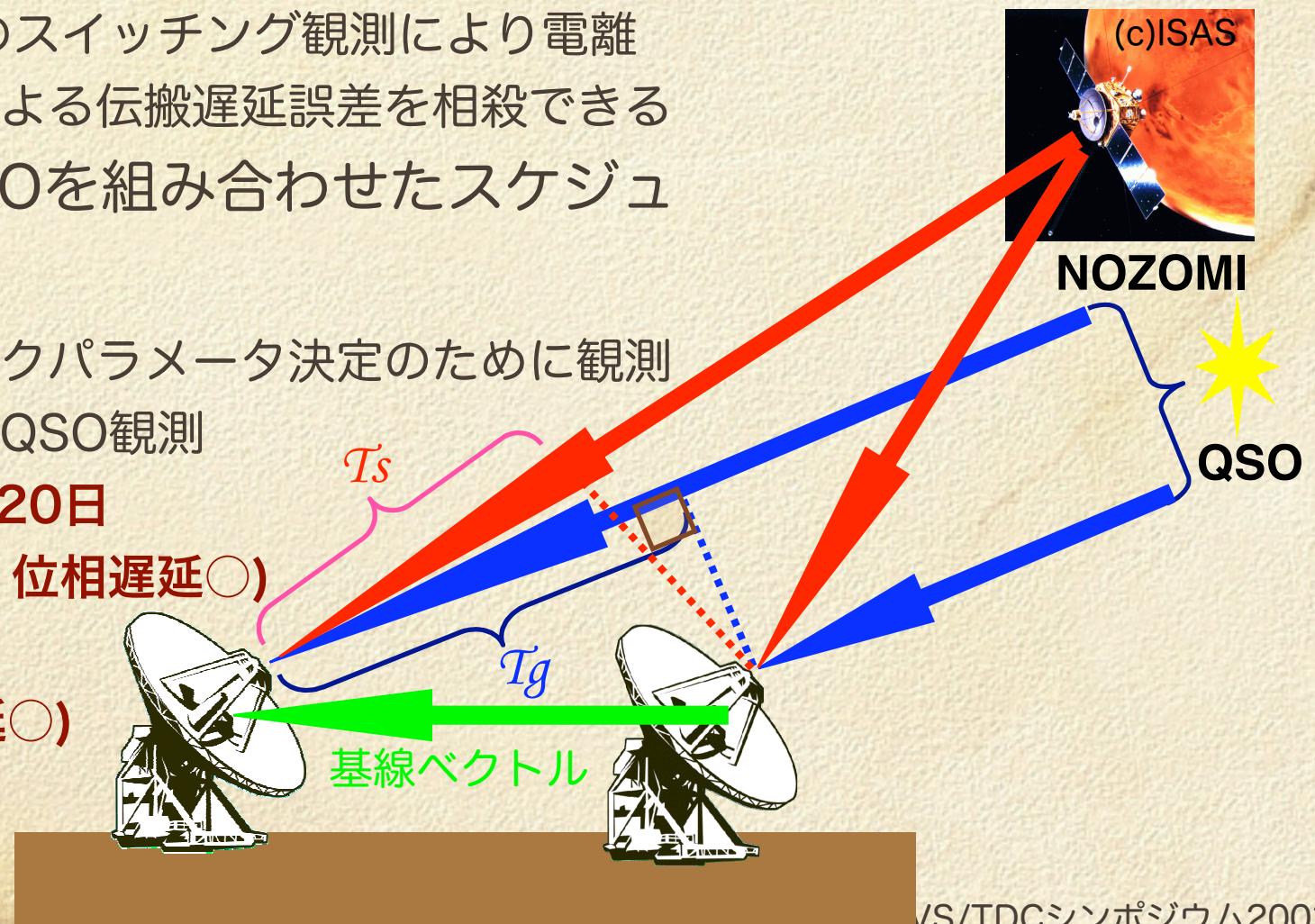
- ★ 現状ではクロックパラメータ決定のために観測の最初と最後にQSO観測

◆ 2003年1月下旬～5月20日

tone信号のみ(群遅延X、位相遅延○)

◆ 5月20日～

range信号受信可(群遅延○)



「のぞみ」観測に参加したVLBI局

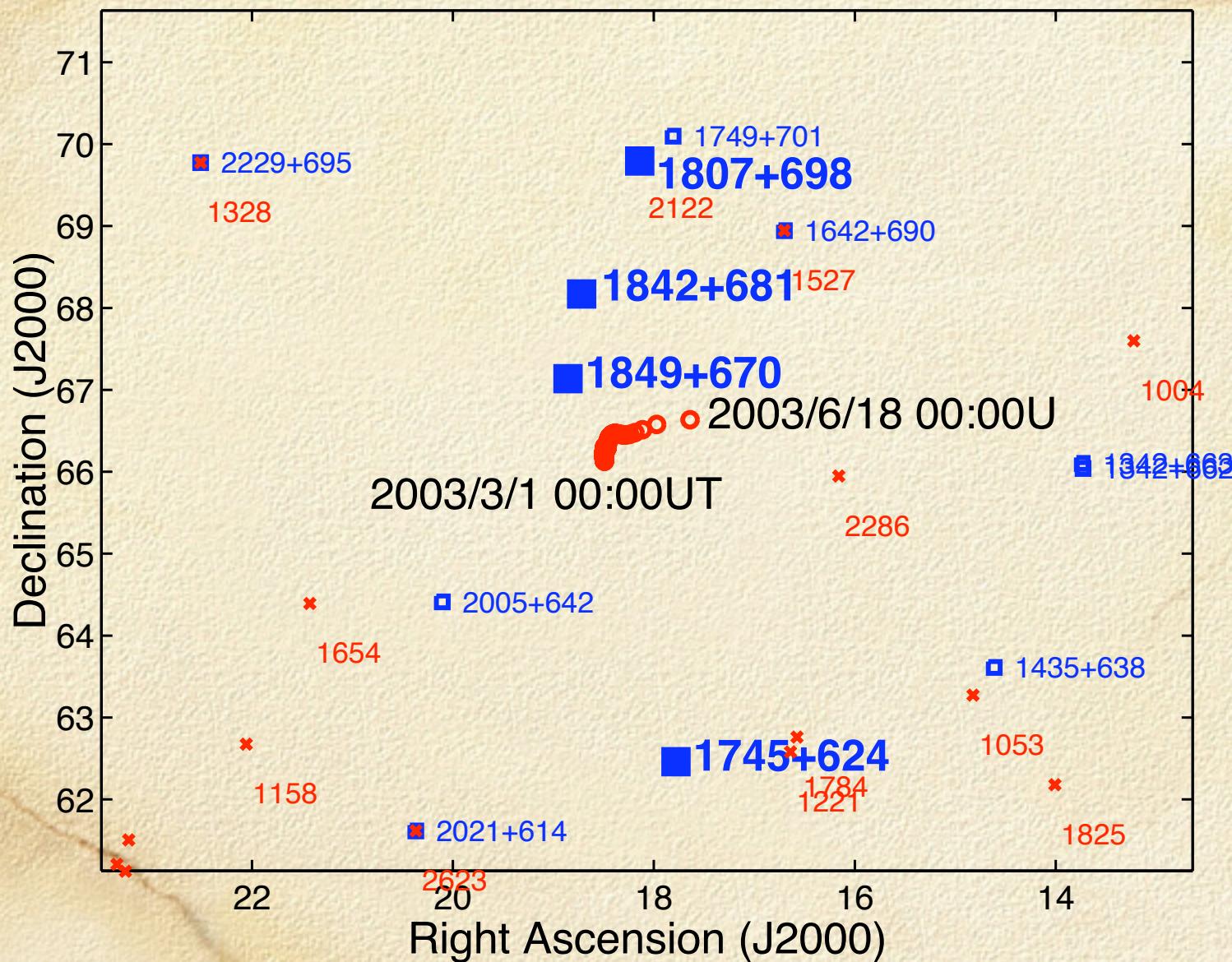
観測参加、どうもあり
がとうございました



光結合ネットワーク

既存のInternet経路
とDisk 送付

「のぞみ」の軌跡と 観測に使用したQSO



「のぞみ」 VLBI観測における 技術的新規性



K5システムによる観測

- ★ 安価で汎用性高い
- ★ ネットワークとの親和性良



ソフトウェア相關処理

- ★ CPUの進化・アルゴリズム改善にともな
い性能向上
- ★ 簡単操作(2時間程度のレクチャーでOK)
- ★ 研究の裾野を広げる効果大



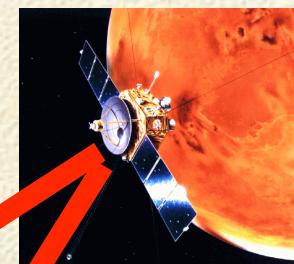
有限距離VLBIモデル(cf. 関戸氏の講演)



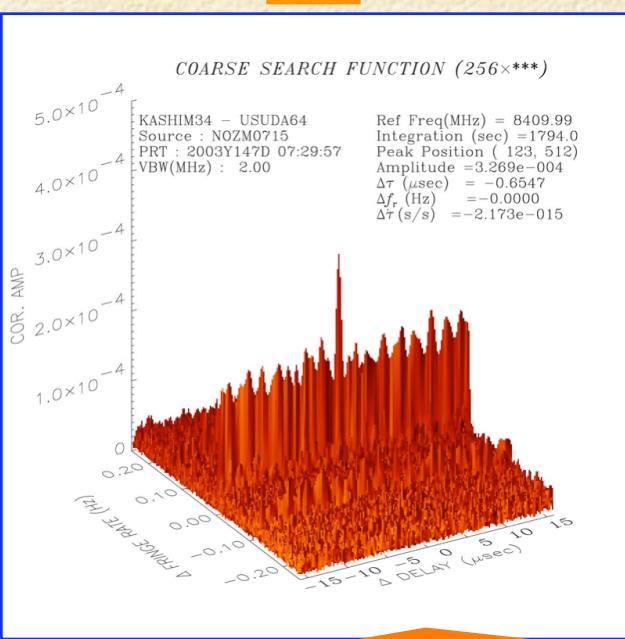
高速の光結合ネットワーク

- ★ 観測終了後の迅速なデータ伝送

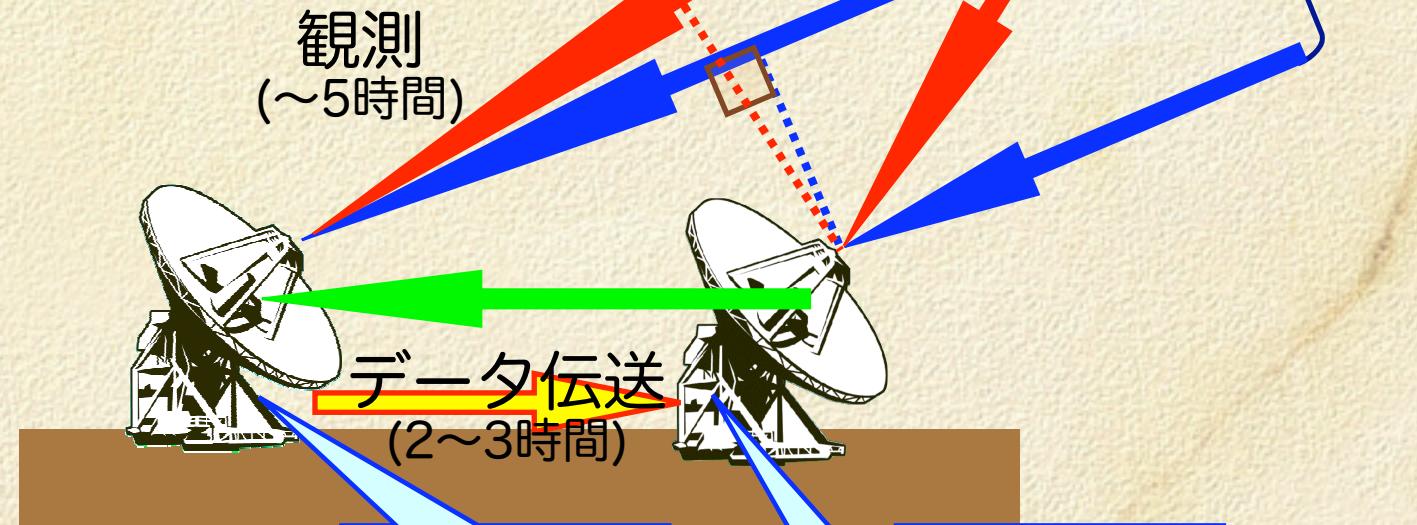
観測からISASへのデータ提供までの流れ



ISASへデータ提供



相関処理
(10~15時間)



K5 VLBI System



K5 VLBI System

「のぞみ」VLBI 観測の履歴

7ヶ月間に
約30回実施!!

観測日時(UT)	実験コード	観測参加局	記録システム
2002/10/21 16:54-20:05	NZ0294	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	K4, K5, RISEターミナル
2002/10/22 16:54-20:05	NZ0295	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	K4, K5, RISEターミナル
2003/01/07 06:30 -10:10	NZ0007	KS34, KS11, KG, G, U	K5
2003/01/09 00:20 -07:53	NZ0009	KS34, KS11, KG, G, U	K5
2003/01/10 00:20 - 01/11 01:02	NZ0010	KS34, KS11, KG, G, U	K5
2003/01/22 03:00 - 06:54	NZ0022	KS34, KS11, KG, G, U	K5
2003/01/23 02:10 - 07:00	NZ0023	KS34, KS11, KG, G, U	K5
2003/02/24 00:25 - 08:00	NZ0055	KS34, KS11, U	K5
2003/03/18 15:00 - 03/19 15:00	NZ0077	KS34, U, Y, MZ20, A	K5, RISEターミナル
2003/03/20 02:30 -16:30	NZ0079	KS34, U, A	K5
2003/04/02 14:20 - 04/03 13:54	NZ0092	KS34, U, A	K5
2003/04/08 14:20 - 21:30	NZ0098	KS34, U	K5
2003/04/12 14:20 - 21:30	NZ0102	KS34, U, Y	K5
2003/04/18 14:20 - 21:30	NZ0108	KS34, KS11, U, Y	K5
2003/04/22 14:20 - 21:30	NZ0112	KS34, KS11, U, Y	K5
2003/04/28 14:20 - 04/29 14:20	NZ0118	KS34, KS11, U, Y, A	K5
2003/05/01 14:20 - 21:30	NZ0121	KS34, KS11, U, Y, G	K5
2003/05/06 14:20 - 21:30	NZ0126	KS34, KS11, U, Y, G	K5
2003/05/10 00:00 - 23:58	NZ0130	KS34, KS11, U, Y, G, A	K5
2003/05/13 00:00 - 04:16	NZ0133A	KS34, KS11, U, TM	K5
2003/05/13 05:00 - 05/14 04:22	NZ0133B	KS34, KS11, U, TM, A	K5
2003/05/20 06:55 - 10:00	NZ0140	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, MZ20	K5, RISEターミナル
2003/05/21 06:55 - 10:00	NZ0141	KS11, U	K5, RISEターミナル
2003/05/22 06:45 - 22:00	NZ0142	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, MZ20	K5, RISEターミナル
2003/05/23 17:55 - 22:00	NZ0143	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, MZ20	K5, RISEターミナル
2003/05/27 06:25 - 09:40	NZ0147	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, MZ20	K5, RISEターミナル
2003/06/04 06:00 - 6/5 09:10	nz0155	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, A	K5
2003/06/19 03:00 - 23:00	nz0170	KS34, KS11, KG, G, TM	K5
2003/06/25 15:00 - 22:00	nz0176	KS34, KS11, Y, G, TM, TS	K5
2003/07/11 14:55 - 21:29	nz0191	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS	K5

観測局名 : KS34: 鹿島34m、KS11: 鹿島11m、KG: 小金井11m、U: 真田64m、Y: 山口32m、G: 岐阜11m、

TM: 苫小牧11m、TS: つくば32m、MZ20: 水沢20m、MZ10: 水沢10m、A: アルゴンキン46m

VLBI観測データのISASへの提供 -その1-



ISAS提供用データ

- ★ 各基線毎に作成
- ★ クロックオフセット
- ★ 伝搬遅延除去前後の群遅延データを記述
- ★ 大気遅延：VLBI局近傍のGPS点データによる推定値
- ★ 電離層遅延：ベルン大学TECデータによる推定値

OU010	2.3105369e-07	#	yy	doy	hh:mm:ss	srcname	tau_org	tau_er	atm_del	atm_err	ion_del	ion_err	tau_cal	tauc_er
2003	010	02:55:00	NOZM0255	-1.300584096e-04	2.39e-08	1.68137e-09	0.00e+00	-9.45126e-12	5.59e-11	-1.300600815e-04	2.39e-08			
2003	010	03:19:00	NOZM0319	-1.579092520e-04	1.96e-08	1.68194e-09	0.00e+00	-1.30469e-11	8.92e-11	-1.579109209e-04	1.96e-08			
2003	010	03:43:00	NOZM0343	-1.847999711e-04	2.19e-08	1.67083e-09	0.00e+00	-1.46575e-11	5.94e-11	-1.848016273e-04	2.19e-08			
2003	010	04:07:00	NOZM0407	-2.100282592e-04	1.86e-08	1.66569e-09	0.00e+00	-8.11657e-12	1.36e-11	-2.100299168e-04	1.86e-08			
2003	010	04:31:00	NOZM0431	-2.336209637e-04	2.00e-08	1.69898e-09	0.00e+00	1.33124e-12	2.11e-11	-2.336226640e-04	2.00e-08			
2003	010	04:55:00	NOZM0455	-2.550576208e-04	2.25e-08	1.79194e-09	0.00e+00	4.20993e-12	6.91e-12	-2.550594169e-04	2.25e-08			
2003	010	05:19:00	NOZM0519	-2.742906849e-04	1.94e-08	1.91311e-09	0.00e+00	7.54994e-12	1.84e-11	-2.742926055e-04	1.94e-08			
2003	010	05:43:00	NOZM0543	-2.912494147e-04	2.21e-08	2.01630e-09	0.00e+00	1.61545e-11	1.63e-11	-2.912514471e-04	2.21e-08			
2003	010	06:07:00	NOZM0607	-2.911520477e-04	1.53e-08	2.09181e-09	0.00e+00	2.35221e-11	5.97e-12	-2.911541630e-04	1.53e-08			
2003	010	06:31:00	NOZM0631	-3.052579182e-04	9.18e-09	2.17169e-09	0.00e+00	2.44522e-11	1.29e-11	-3.052601143e-04	9.18e-09			
2003	010	06:55:00	NOZM0655	-3.165476017e-04	8.25e-09	2.28710e-09	0.00e+00	2.23304e-11	6.06e-12	-3.165499111e-04	8.25e-09			

VLBI観測データのISASへの提供 -その2-

のぞみVLBI観測 - Netscape
ファイル(E) 編集(E) 表示(V) ジャンプ(G) ブックマーク(B) ツール(T) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

http://www2.crlc.jp/ka/radioastro/RandD/NOZOMI/

Mail ホーム ラジオ Netscape Japan 検索 Shop@AOL ブックマーク

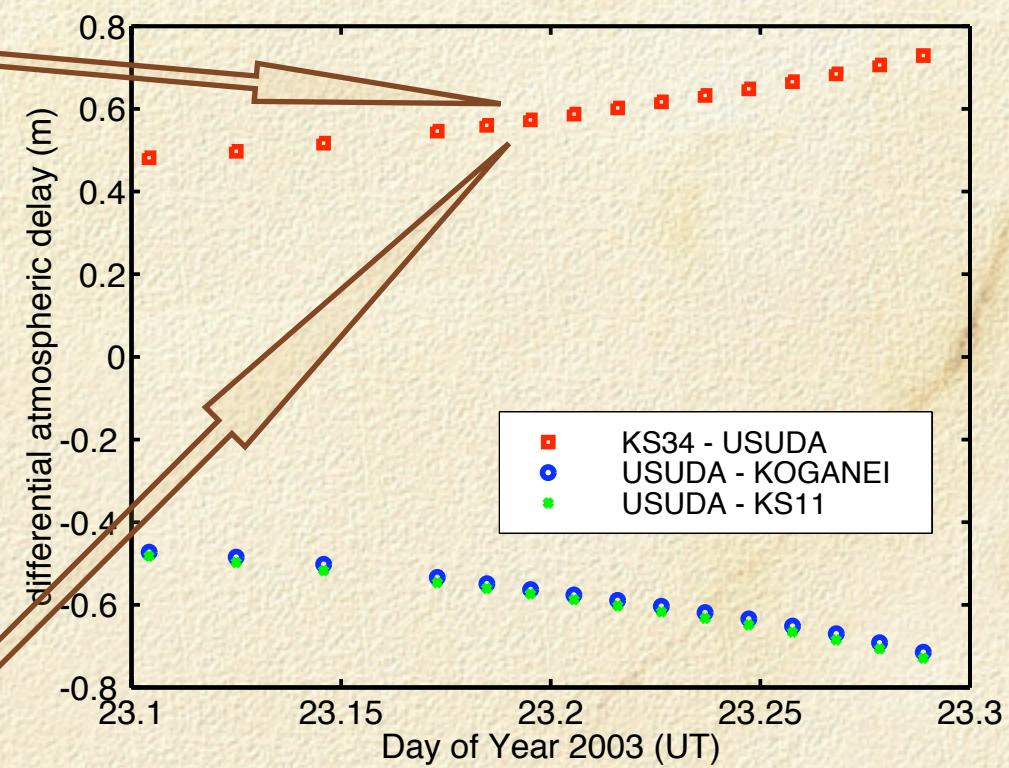
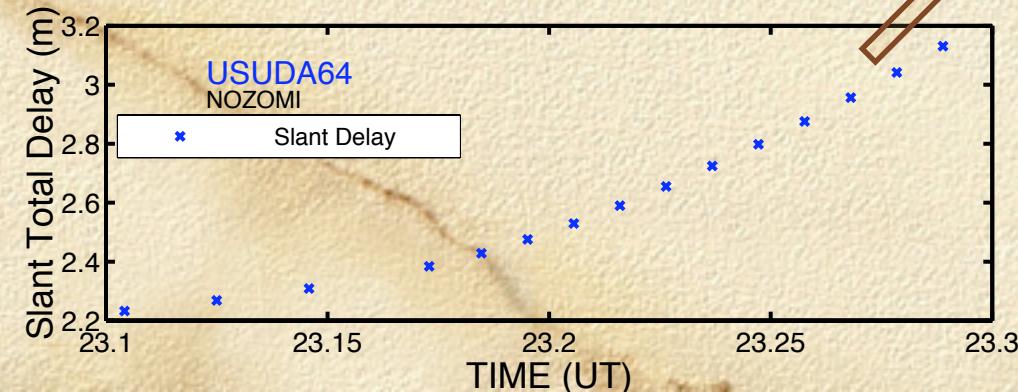
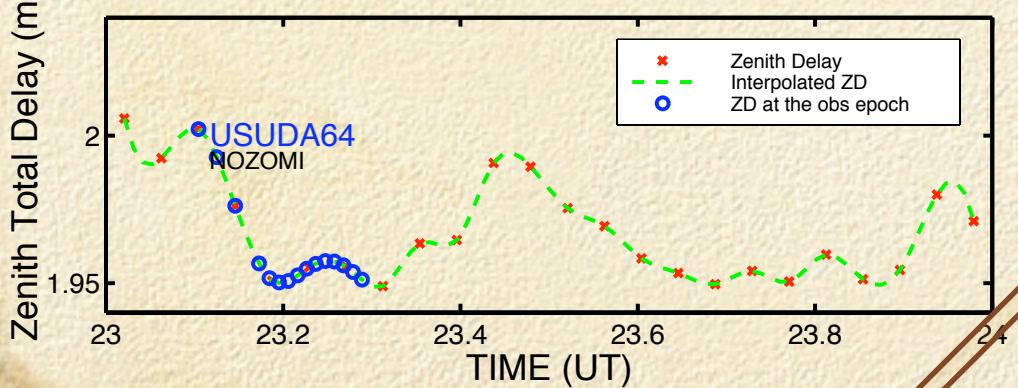
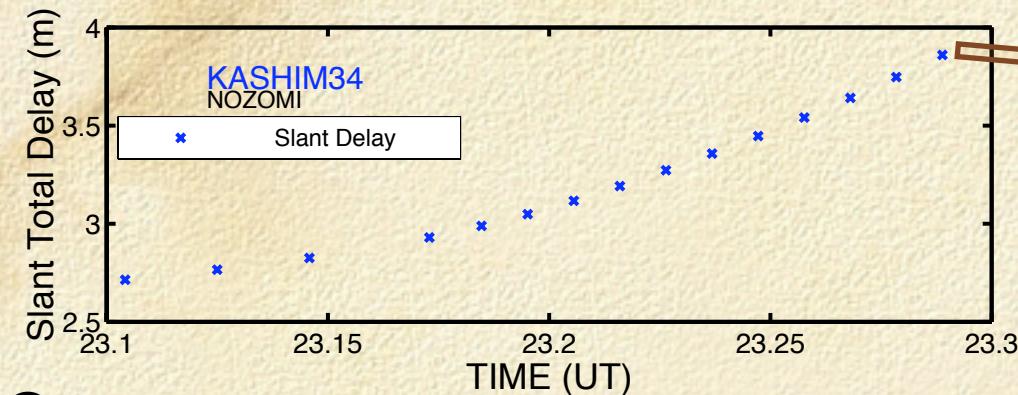
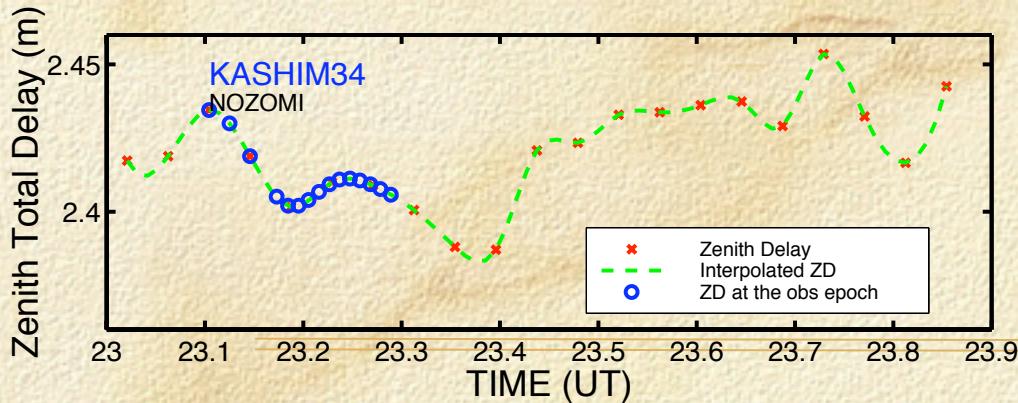
のぞみVLBI観測

火星探査船「のぞみ」の相対VLBI観測

群遅延データ(下記には予備的な精度評価でRMSが100nsec以下の結果のみを提示)

- 各観測局の位置(相関処理に用いる局位置～ITRF97準拠)
- 群遅延データフォーマット
 - (2003.5.26 クロックrateをヘッダに新たに付加したのでご注意ください。ただし、群遅延結果にはrate計算されたクロックオフセットが既に入っているのでヘッダでは読み飛ばしても可)
- nz0142観測前半(2003/5/22 15:40-19:05JST)
 - QU142A(鹿島34m-臼田)基線～予備的精度評価結果(※): RMS **9.8nsec**
 - UT142A(臼田-つく(f32m)基線～RMS **33.6nsec**
 - 備考
 - GPSによる大気遅延補正情報あり
 - ベルン大学GPSデータによる電離層遅延補正データあり
- nz0142観測後半(2003/5/23 02:45-07:00JST)
 - QU142B(鹿島34m-臼田)基線～RMS **28.2nsec**
 - QT142B(鹿島34m-つく(f32m)基線～RMS **50.7nsec**
 - UT142B(臼田-つく(f32m)基線～RMS **0.8nsec**
 - UK142(臼田-山口32m)基線～RMS **20.1nsec**
 - 備考
 - GPSによる大気遅延補正情報あり
 - ベルン大学GPSデータによる電離層遅延補正データあり
 - 山口局は局位置の精度数m(パンディGPSによる)
- nz0143観測(2003/5/24 02:55 - 07:00JST)
 - QU143(鹿島34m-臼田)基線～RMS **12.7nsec**
 - QT143(鹿島34m-つく(f32m)基線～RMS **25.7nsec**
 - UT143(臼田-つく(f32m)基線～RMS **30.2nsec**
 - UK143(臼田-山口32m)基線～RMS **20.0nsec**
 - 備考
 - GPSによる大気遅延補正情報あり
 - ベルン大学GPSデータによる電離層遅延補正データあり
 - 山口局は局位置の精度数m(パンディGPSによる)
- nz0147観測(2003/5/27 14:55 - 18:45JST)
 - QU147(鹿島34m-臼田)基線～RMS **4.2nsec**
 - UT147(臼田-つく(f32m)基線～RMS **1.6nsec**
 - 備考
 - GPSによる大気遅延補正情報あり
 - ベルン大学GPSデータによる電離層遅延補正データなし

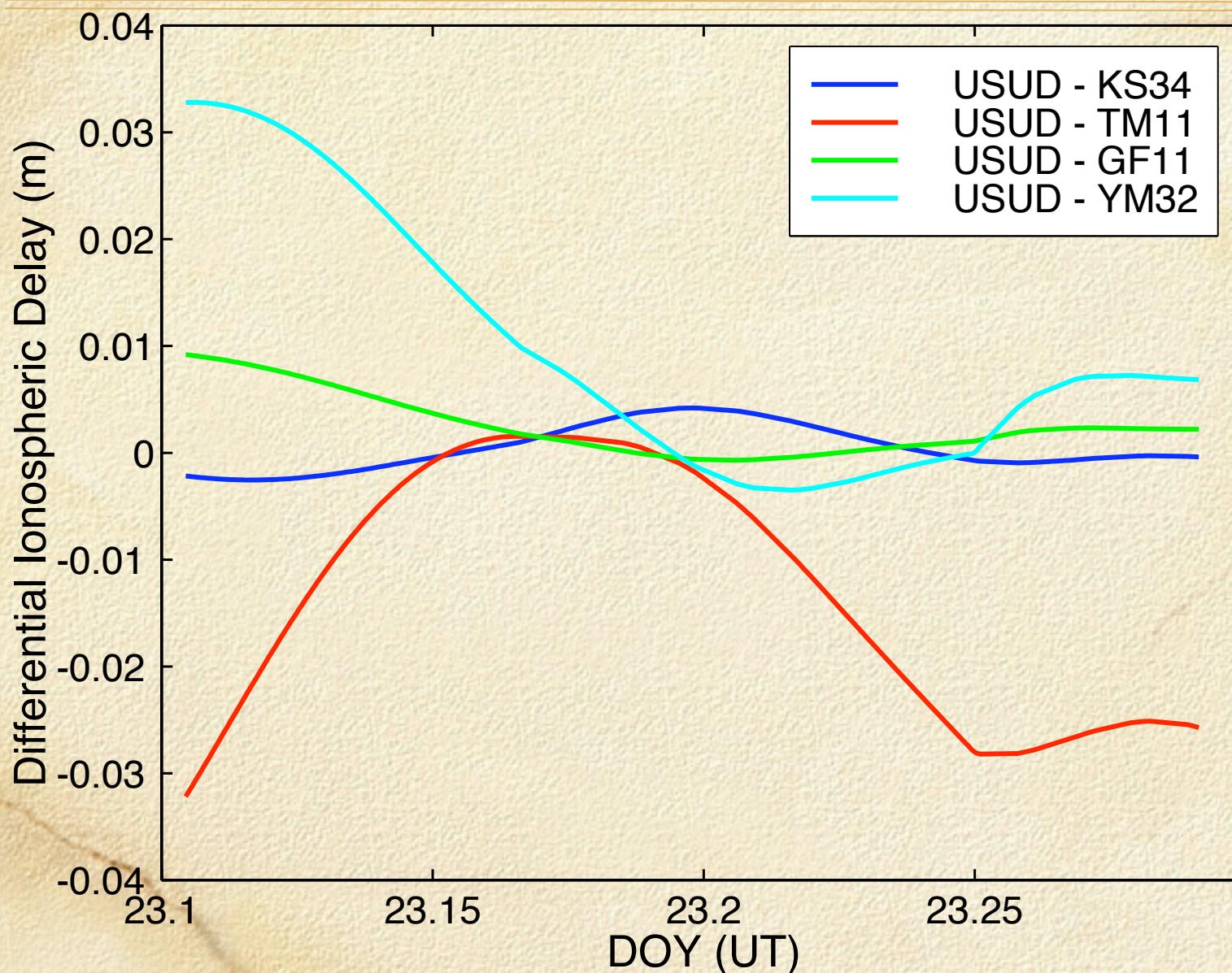
伝搬遅延の除去 -中性大気-



VLBI局近傍のGPS観測点データより天頂遅延量を推定し、マッピング関数により視線遅延量に引き直した後に基線間での差を計算

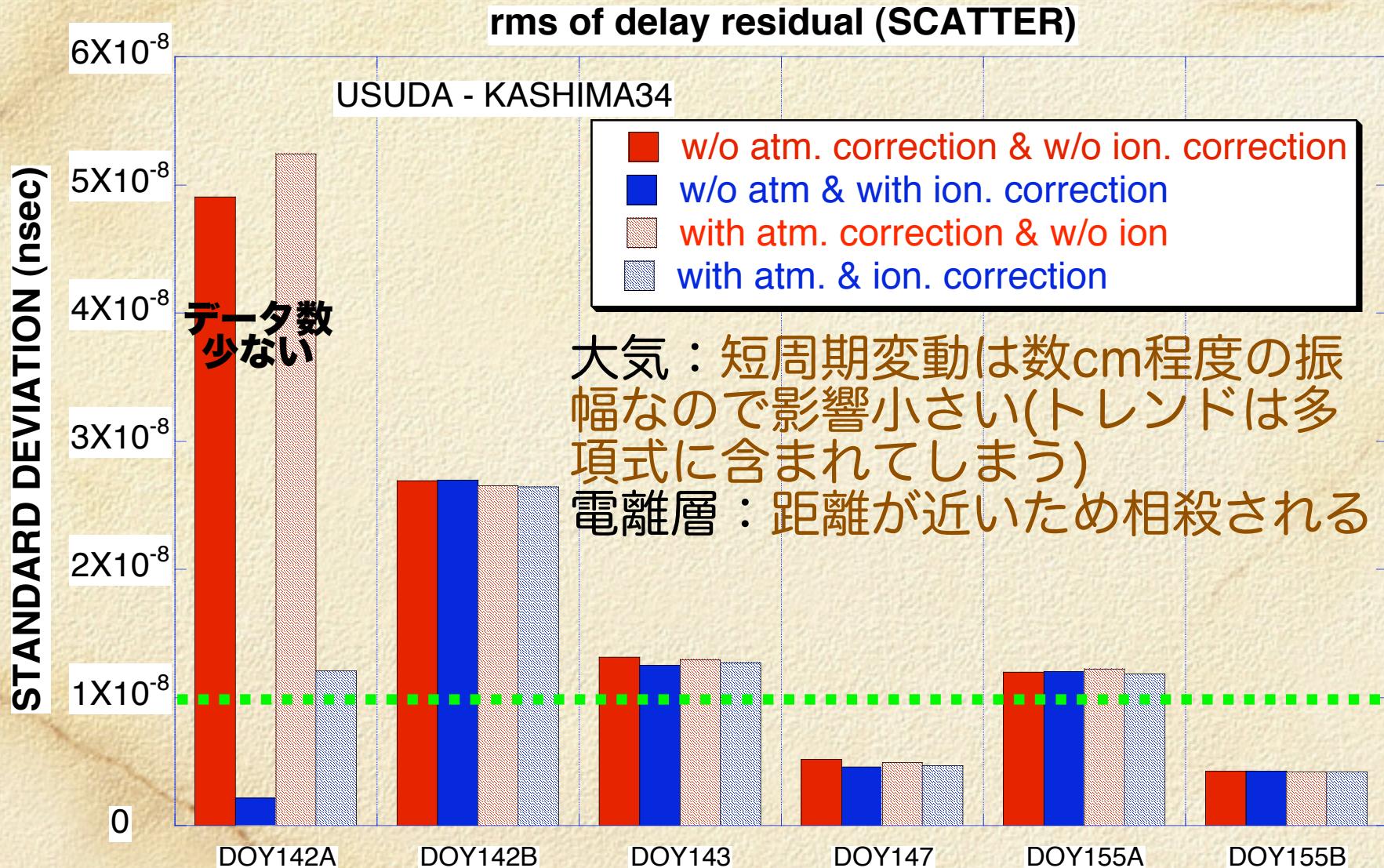
伝搬遅延の除去 -電離層-

IGS観測網(グローバルGPS観測網)より推定された全電子密度マップ(BERN大学提供)から、任意の場所での電離層遅延量を推定



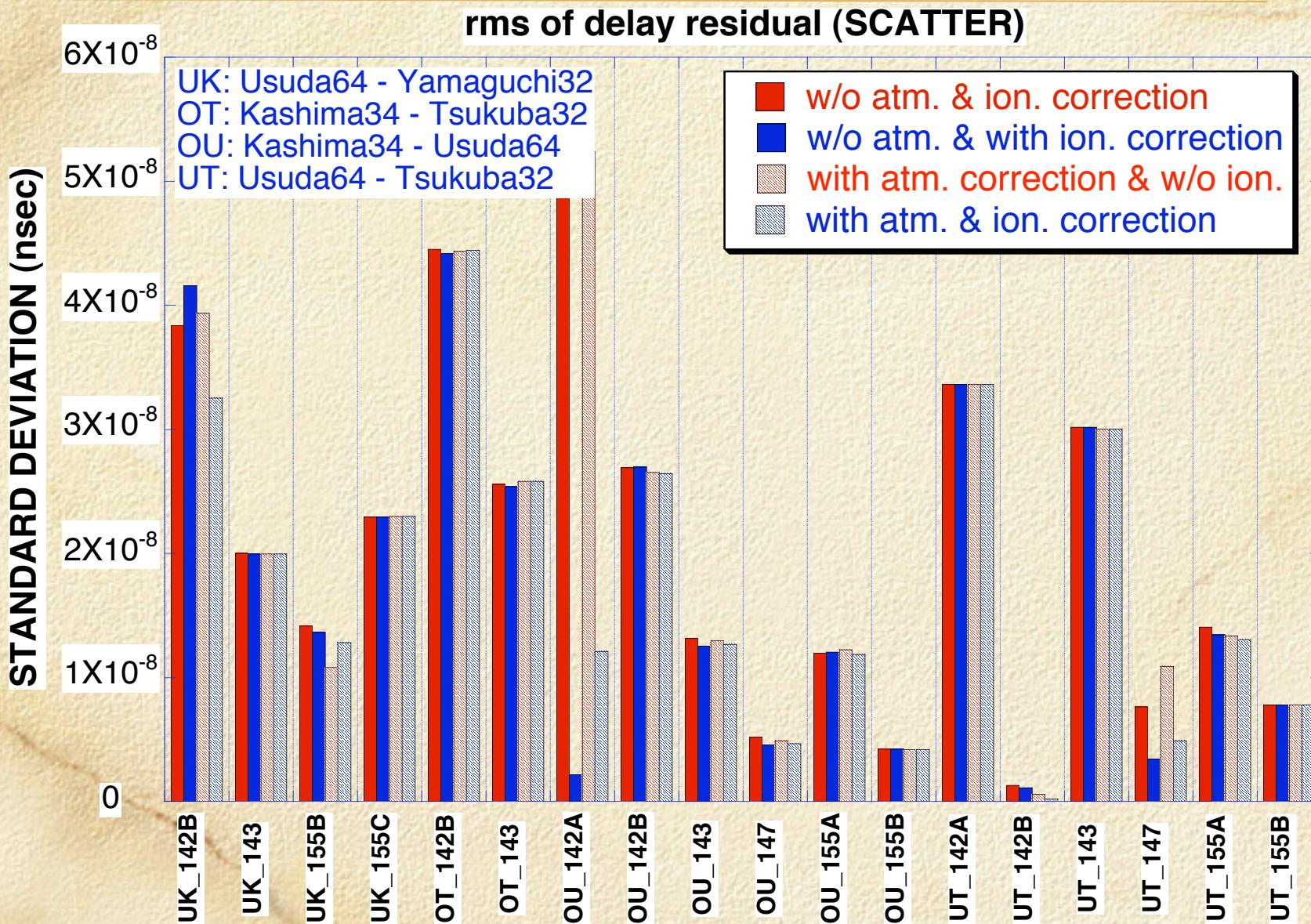
群遅延の評価

-多項式近似した際の残差の比較～伝搬遅延除去の有無でどの程度変わるか?-



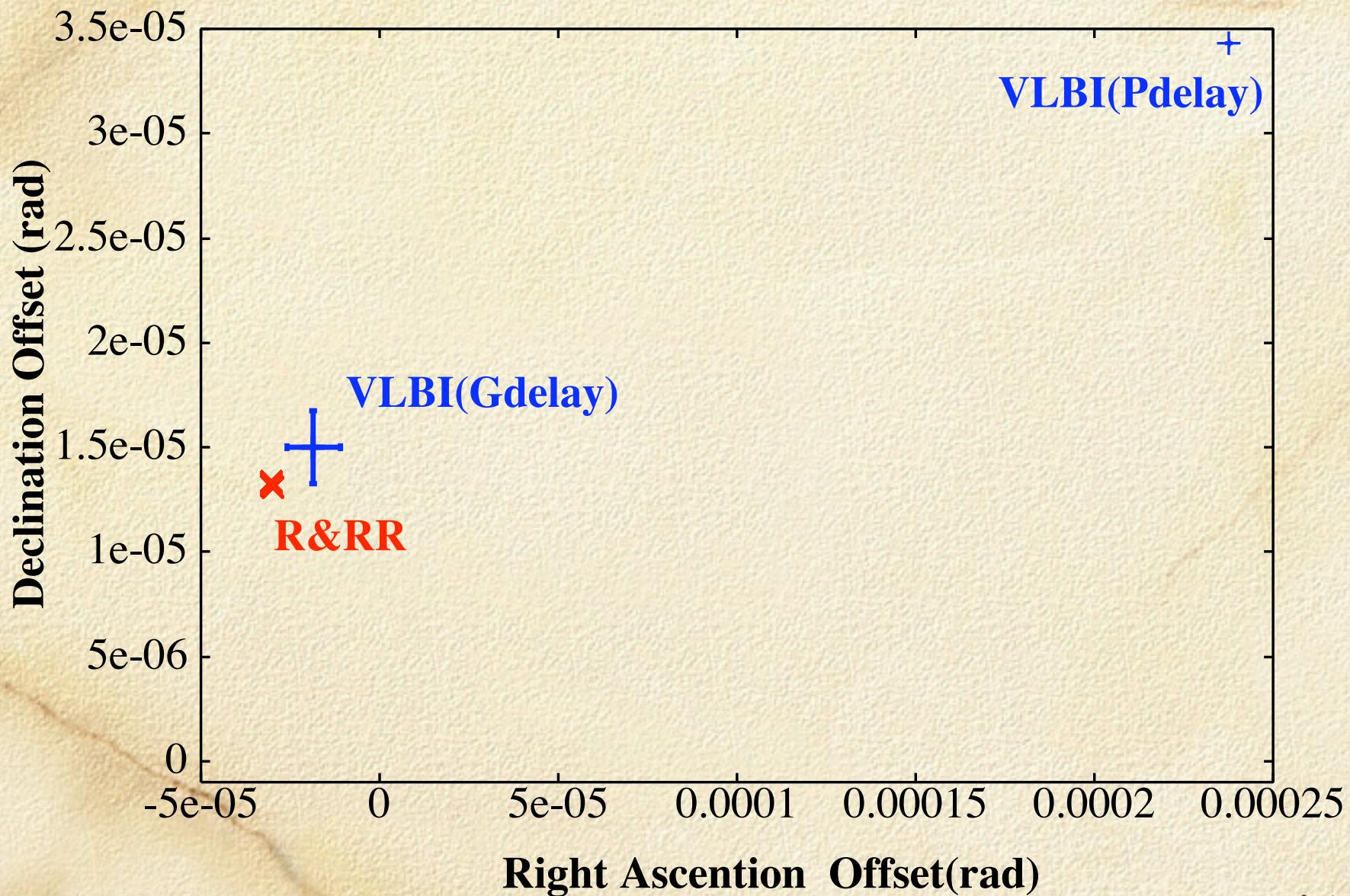
群遅延の評価

-多項式近似した際の残差の比較～伝搬遅延除去の有無でどの程度変わるか?-



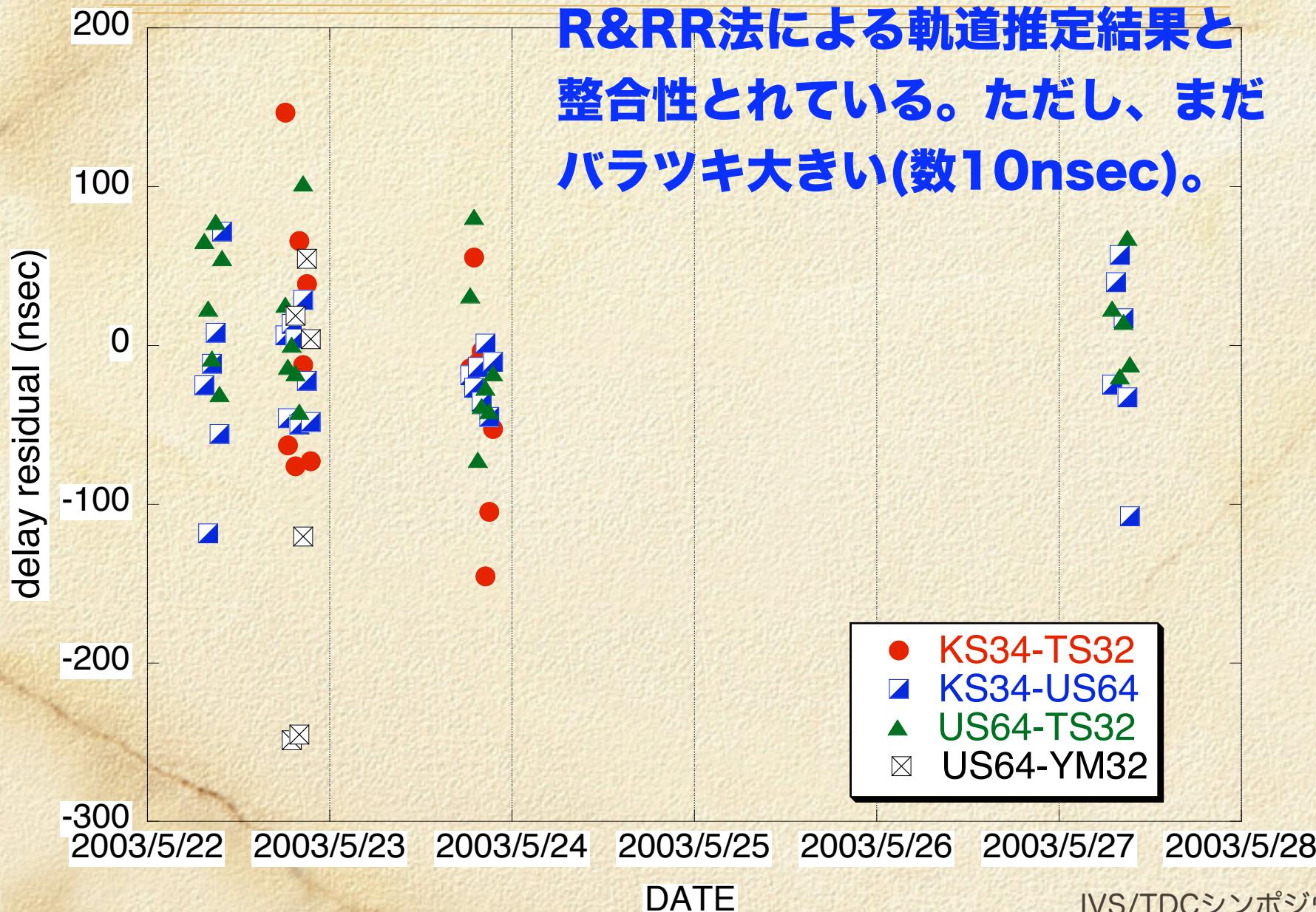
「のぞみ」位置推定結果の比較

-2003年1月10日の観測データを用いて有限距離
VLBIモデルにより推定された「のぞみ」位置と
R&RRによる推定位置とを比較-



「のぞみ」VLBI観測結果の評価

-ISASによるR&RR法に基づく軌道推定結果との比較-



今後の開発方針 -その1-



位相遅延解析実現に向けた開発(関戸)

- ★ ラインに対応した狭帯域信号を相関処理ソフトの開発
- ★ R&RR法との比較による、群遅延・位相遅延データに基づく「のぞみ」推定位置の評価



宇宙飛翔体軌道決定を目的とした相対VLBI観測の各種支援ソフト開発(市川)

- ★ 観測スケジュール作成自動化
- ★ 伝搬遅延量除去手法の開発

今後の開発方針 -その2-



予測値計算誤差の評価(市川)

- ★ 国内-アルゴンキン基線でフリンジ検出されず
- ★ 「のぞみ」の信号強度は充分のはずだが...
- ★ 予測値に問題あるか？



相関処理の高速化、分散化(大崎)

- ★ GRID技術の応用



飛翔体追尾を可能にするアンテナ制御ソフトの開発(大崎)



技術検証を目的とした、小惑星探査船「はやぶさ」観測の実施(のぞみ班全員)



成果のとりまとめ(のぞみ班全員)

まとめ

- 「のぞみ」軌道決定支援のため約30回のVLBI観測を各機関と協力して実施
- 得られたVLBI群遅延データは、R&RR法による軌道推定結果と調和的
★バイアスはないものの、ばらつきまだ大きい(数10nsec)
- 今後、位相遅延解析技術の獲得、高速化・分散化による準リアルタイム処理を目指す

スイングバイ成功!!

