



測地学会第100回講演会

VLBI観測による火星探査船「のぞみ」の位置決定結果 と今後の宇宙飛行体軌道決定技術の開発計画



Radio Astronomy Applications Group
Kashima Space Research Center

通信総合研究所 宇宙通信研究センター 市川隆一、関戸 衛、大崎裕生、小山泰弘、近藤哲朗
宇宙航空研究開発機構/ISAS 吉川 真
富士通(株) 大西隆史
のぞみ相対VLBIグループ
(JAXA/ISAS、国立天文台、国土地理院、JAXA/NASDA、北海道大、岐阜大、山口大、SGL/CRESTech)

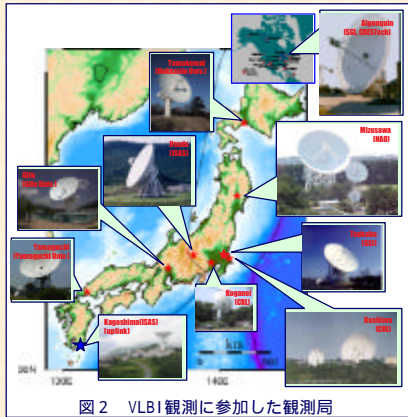


図2 VLBI観測に参加した観測局

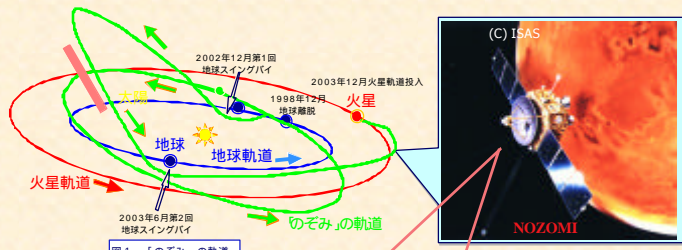


図1 「のぞみ」の軌道

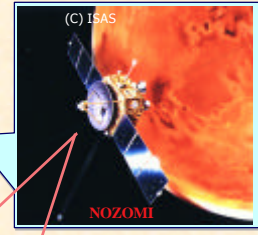


図3 「のぞみ」の概略位置とVLBI観測に使用した電波源(2003年3月1日-6月18日)

はじめに

通信総合研究所では、宇宙科学研究所、国立天文台、国土地理院、宇宙開発事業団、北海道大学、岐阜大学、山口大学、およびCRESTechに所属するアルゴンキン観測局と共同で火星探査船「のぞみ」の測位を目的として、2002年10月以降2003年7月7日まで30回のVLBI観測を実施してきた。一連の観測は、2003年6月19日に実施された「のぞみ」の第2回地球スイングバイ直前の軌道決定支援を行い、さらに相対VLBI法による宇宙飛行体の高精度軌道決定技術の獲得を目的とする(図1)。

観測と解析モデル

2002年10月21日から2003年7月11日にかけて、我々は30回以上の「のぞみ」VLBI観測を実施してきた(表1)。観測参加局は、「のぞみ」の運用を担当する宇宙科学研究所の臼田64mアンテナの他、通総研の鹿島34mと鹿島11m、小金井11m、北大宮小笠14m、岐阜大11m、山口大32m、国土地理院つくば32m、および茨城10mとVERA20m、さらにカナダアルゴンキン46m局である(図2)。一連の観測では、クロックオフセット決定のため「のぞみ」からの信号の他に3-4個のクエーサーからの電波も受けている(図3)。詳しくは市川他[2003年合同大会講演No.D006-P011]「相対VLBI法による火星探査船「のぞみ」の軌道決定」を参照。今回の観測では、(1)安価で汎用性の高いK15システムによるデータ取得(近藤他、2002)、(2)CPUの進歩やアルゴリズム改善によって性能向上が容易に見込めるソフトウェア相関、(3)有限距離VLBIモデルの採用(関戸他、2003)、そして(4)高速の光結合ネットワークによる迅速なデータ伝送、といった4つの技術的新規性が威力を発揮した。特に、(1)、(2)、(4)については、既存のPCの性能向上、およびPCとネットワークとの親和性の高さが観測の効率化、操作性の簡便化に大きく役立っている。

また(3)については、電波源が無制限にあると見せるクエーサーと異なり、地球から探査船までは有限の距離であることから電波の波面を球面波で取り扱う必要がなくなる制約を解決する手法として確立された。詳しくは、関戸ら[2003年合同大会講演No.D006-011]「相対論を考慮した有限距離電波源のVLBI遅延モデル」を参照されたい。観測、相関処理、解析を経て宇宙へのVLBI遅延データ提供までの流れは図4に示す通りである。高速の光結合ネットワークが利用可能な条件下では、これらの作業はほぼ20時間以内で完了させることができた。

結果

一連の観測のうち、昨年10月21日、22日、今年1月10日、および5月21日-27日の観測では、「のぞみ」から発信されるレンジ信号を受けることにより明確な群遅延フリッジが検出された。図5は、今年1月のn2010観測で得られた群遅延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」位置と従来のR&R法による位置を比較した例である。図に示すように、R&R法と誤差の範囲内で一致している。このときは、約24時間の観測時間を確保し、さらに精密にクエーサーと「のぞみ」を切り替えたため、大気や電離層などの共通誤差要因の相殺効果が寄与したものと考えられる。また、群遅延データの解析の他、位相遅延による解析を進めているところであるが、また従来のR&R法との差がまだ大きく、さらに検討が必要である。

一方、宇宙研においても、「のぞみ」軌道決定ソフトにVLBI群遅延データを取り込めるような改造を施し、R&R法とVLBIデータとの比較を行っている。図6は、5月下旬のデータについてR&R法により推定した軌道に対するVLBI群遅延データの残差(O-C)を示したプロットである。図より、数10ナノ秒のばらつきがあるものの、R&R法による結果とVLBIデータとが一致していることがわかる。しかしながら、基線によっては系統的なトレンドも認められる。この原因は現時点では判明していないが、今後調査を進める予定である。

「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&R法による軌道決定結果と調和的
顕著なバイアスはないものの、ばらつきはまだ大きく(数10nsec)、原因不明のトレンドがある

今後の宇宙飛行体軌道決定技術の開発計画
現段階では、群遅延データの解析による宇宙飛行体測位が可能となっている。一方、地球外惑星の大気擾乱観測、大気鉛直プロファイル観測のためのプローブ投下、惑星表面での観測ローバーの測位、あるいは高精度衛星測位の計画などが開発あるいは検討段階にあり、高精度かつ簡便な衛星測位技術が将来ますます重要となる。そこで通総研では、位相遅延データ解析とGRID技術との分散化処理を応用した高速相関処理技術を柱に準リアルタイムでの宇宙飛行体測位技術の獲得を目指しており、研究・開発を進めている。具体的には今年度中に

- 位相遅延解析実現に向けた開発
ラインに対応した準リアルタイム相関処理ソフトの開発
宇宙飛行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
飛行体遅延を可能にするアンテナ制御ソフトの開発
観測スケジュール作成自動化
伝搬遅延除去手法の開発
相関処理の高速化、分散化
GRID技術の応用

成果のとらまとめ
予測値計算誤差の評価
国内-アルゴンキン基線でフリッジ検出されていない問題の解決
R&R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

などの項目について開発を進める予定である。また、実際の宇宙飛行体をターゲットとした実証実験の一環として、今年5月に宇宙研によって打ち上げられた小惑星探査船「はやぶさ」の相対VLBI観測を予定している。「はやぶさ」からは、VLBI観測に適した広帯域のテストリ信号が十分な強度で発信されており、有効データが取得可能と期待できるとから、相対VLBI技術の開発推進に大きく寄与すると考えている。

観測日時(UT)	観測コード	観測参加局	観測のよみ
2002/10/21 16:54-20:05	N20294	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2002/10/22 16:54-20:05	N20295	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/01/07 08:30-10:10	N20007	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/01/08 09:20-07:53	N20008	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/01/10 00:20-01:11 01:02	N20010	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/01/22 00:30-06:54	N20022	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/01/23 00:30-07:00	N20023	KS34, KS11, KG, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/02/24 00:25-08:00	N20055	KS34, KS11, U, G, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/03/18 15:00-03/19 15:00	N20077	KS34, U, Y, MZ20, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/03/20 02:30-16:30	N20079	KS34, U, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/02 16:20-04/03 13:54	N20084	KS34, U, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/08 14:20-21:30	N20088	KS34, U, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/12 14:20-21:30	N20102	KS34, U, Y	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/18 14:20-21:30	N20108	KS34, KS11, U, Y	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/22 14:20-21:30	N20112	KS34, KS11, U, Y	RISER-リアル, K4, K5
2003/04/28 14:20-04/29 14:20	N20118	KS34, KS11, U, Y, G, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/01 14:20-21:30	N20121	KS34, KS11, U, Y, G, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/06 14:20-21:30	N20126	KS34, KS11, U, Y, G, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/10 00:00-23:00	N20130	KS34, KS11, U, Y, G, A, TM	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/13 00:00-04:16	N20133A	KS34, KS11, U, TM	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/13 08:00-05/14 04:22	N20133B	KS34, KS11, U, TM	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/20 06:55-10:00	N20140	KS34, KS11, U, Y, G, TM, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/21 06:55-10:00	N20141	KS11, U	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/22 06:45-22:00	N20142	KS34, KS11, U, Y, G, TM, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/23 17:55-22:00	N20143	KS34, KS11, U, Y, G, TM, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/05/27 08:25-09:40	N20147	KS34, KS11, U, Y, G, TM, MZ20	RISER-リアル, K4, K5
2003/06/04 06:00-6/5 09:10	n0195	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS, A	RISER-リアル, K4, K5
2003/06/19 00:30-23:00	n0170	KS34, KS11, KG, U, G, TM	RISER-リアル, K4, K5
2003/06/25 15:00-22:00	n0176	KS34, KS11, Y, G, TM, TS	RISER-リアル, K4, K5
2003/07/11 14:55-21:20	n0191	KS34, KS11, U, Y, G, TM, TS	RISER-リアル, K4, K5

観測局: KS34 鹿島34m, KS11 鹿島11m, U 臼田64m, Y 山口32m, G 岐阜11m, MZ20 つくば32m, MZ10 茨城10m, MZ10 多摩10m, A: アルゴンキン46m

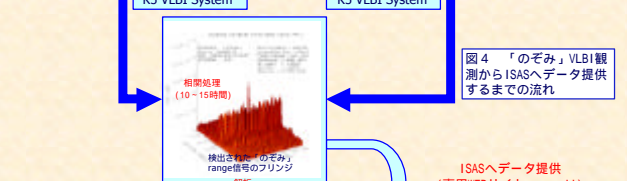
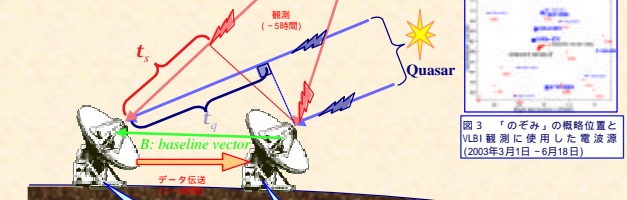


図5 推定された「のぞみ」位置の比較(2003年1月10日観測の結果)

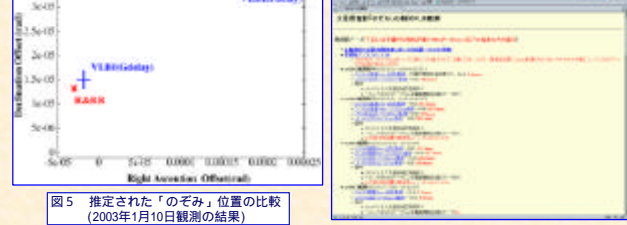


図6 R&R法により決定された「のぞみ」軌道を基準としたときのVLBI観測群遅延データの残差

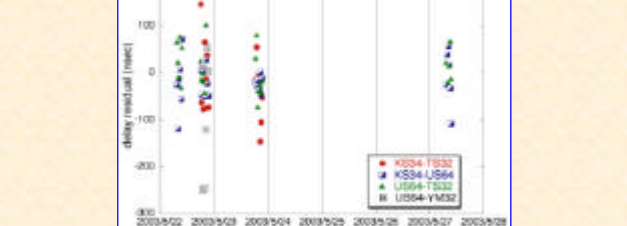


図7 rms of delay residual (SCATTER)

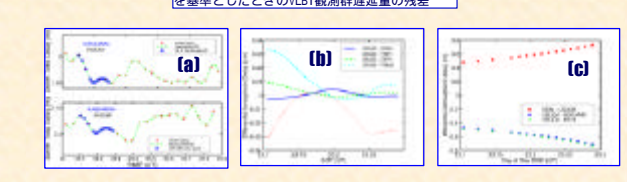


図8 VLBIデータの伝搬遅延除去-電離層中性化大気-

(a) VLBI局近傍のGPS観測データより推定された天頂遅延(鹿島, 臼田)
(b) 基線間での大気伝搬遅延量の差
(c) 基線間での電離層遅延量の差(電離層遅延についてはBERN大学のCODE global ionosphere dataを使用)
(d) 伝搬遅延除去の有無による群遅延残差の比較(群遅延データに多項式近似した場合の残差)