

全球 VLBI 観測システム（VGOS）に関する研究開発

実施期間	令和 7 年度
測地部宇宙測地課	橋本 果歩 古居 晴菜 石垣 真史 若杉 貴浩

1. はじめに

世界各地の VLBI 機関が参画する国際 VLBI 事業（以下「IVS」という。）では、VLBI アンテナを運用する観測局以外に、観測データを相関処理しアンテナ間の電波遅延時間を算出する相関局、相関結果から地球姿勢パラメータや各観測局の位置、速度等を推定する解析局等、役割に応じた分担がある。国土地理院では、IVS 観測局として石岡 VLBI 観測施設（以下「石岡局」という。）の維持管理を行い VLBI 観測へ参加しているほか、IVS 相関局及び解析局として、つくば相関局/解析センターを運営しており、地球姿勢パラメータの一つである地球自転速度を推定する 1 時間観測（以下「INT 観測」という。）の相関処理を定常的に担当している。本報告書では、毎週末実施している、全球 VLBI 観測システム（VGOS : VLBI Global Observing System）（Petrachenko *et al.*, 2009）（以下「VGOS」という。）による INT 観測である VGOS-INT-B/C について、令和 7 年度から実装した全自動相関処理の方法の詳細と今後の課題について報告する。

2. VLBI 観測と相関処理手順

2.1 VLBI 観測の概要と自動化の意義

IVS が管理する主な VLBI 観測は、主に 2 種類の観測時間と 2 種類の観測周波数帯によって四つに大別される。観測時間としては、地球自転速度の推定を目的とした INT 観測と、地球自転速度以外に歳差・章動・極運動をはじめとした地球姿勢パラメータ、アンテナ局位置等の推定を目的とした 24 時間観測がある。観測周波数帯としては、2 GHz 帯（S バンド）と 8 GHz 帯（X バンド）の電波を観測する S/X 観測と、3-14 GHz 帯の広帯域を観測する VGOS 観測がある（図-1）。現在の VGOS 観測では、3, 5, 6 及び 10 GHz 帯をそれぞれバンド A, B, C 及び D と表記する。国土地理院ではこのうち、S/X 観測の INT 観測及び 24 時間観測並びに VGOS 観測の INT 観測の相関処理を担当している（表-1 及び図-2）。相関処理とは、VLBI 観測で得られたデータを基に観測局間における電波の受信時間の差である遅延時間を求める処理である。解析とは、相関処理結果を用いて地球姿勢パラメータ、アンテナ局位置等を推定することをいい、観測時間の長さによって、推定できるパラメータが異なる。

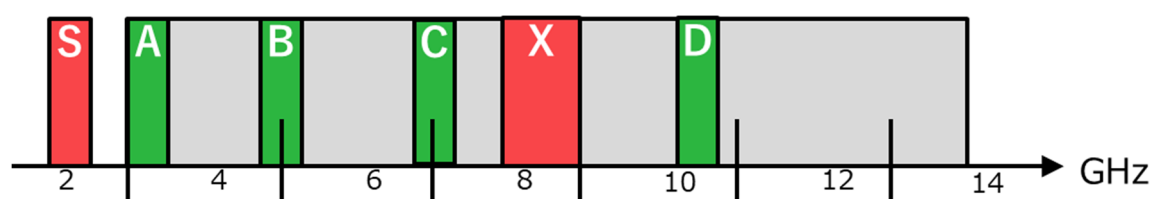


図-1 S/X 観測と VGOS 観測の観測周波数帯を表した図

図中の S, X 及び A, B, C, D は、S/X 観測及び VGOS 観測における観測帯域を表す。現行の VGOS 観測は A から D の 4 周波数帯から構成され、それぞれで 3, 5, 6 及び 10 GHz 帯の電波を観測している。

表-1 国土地理院が相関処理を担当する観測一覧

観測の長さ	観測タイプ	観測名	参加観測局 国名	使用ソフトウェア	自動化の状況
1時間	S/X	INT-2	アメリカ, ドイツ	K5	全自動化運用中
	VGOS	VGOS-INT-B/C	日本, スウェーデン	DiFX/HOPS	令和7年7月 全自動化成功
	VGOS	VGOS-INT-G	日本, スペイン, 中国, ポルトガル	DiFX/HOPS	手作業
24時間	S/X	AOV	日本, オーストラリア, 韓国, 中国, ニュージーランド	DiFX/HOPS	手作業

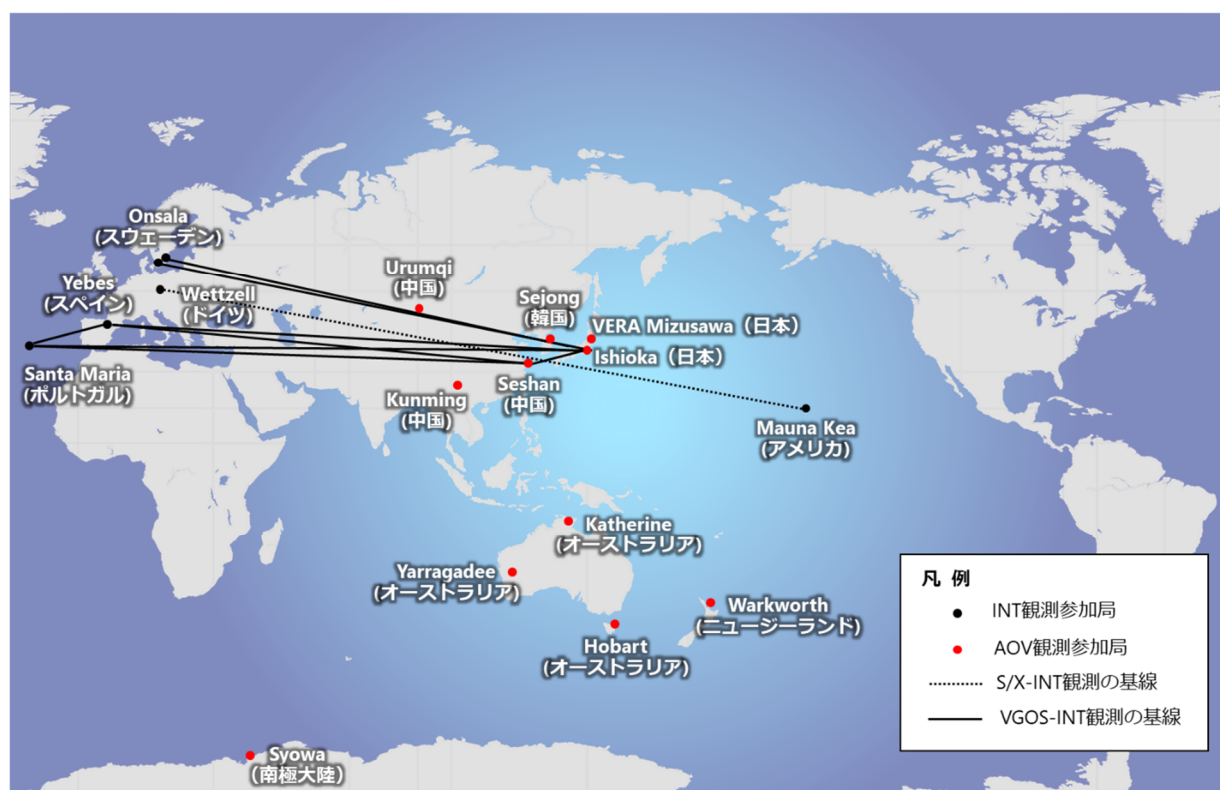


図-2 国土地理院が相関処理を担当する観測の参加局と INT 観測の基線を表した図

スウェーデン Onsala 局には、同一観測局内に二つのアンテナがある。そのため、地図上の実際の位置とは対応していない。中国 Seshan 局には二つのアンテナがあり、それぞれが VGOS-INT-G 観測と AOV 観測に参加している。

INT-2 は、アメリカの Mauna Kea 局とドイツの Wettzell 局が参加する S/X-INT 観測で、毎週土曜日と日曜日の 7:30 UTC に計 2 回行われている。国土地理院は INT-2 の相関処理に加えて解析も担当しており、定常的に相関処理と解析の両方を自動で実施している。INT-2 の解析では、地球の自転速度から求める時刻系である世界時 (UT1) と国際原子時を基にした時刻系である協定世界時 (UTC) の差である $dUT1$ を推定しており、推定された $dUT1$ は地球姿勢パラメータの迅速解として国際地球回転観測事業 (IERS) が公開している Bulletin A の統合解の一つとして活用されている (Davis and Byram, 2024)。また、 $dUT1$ 迅速解推定を目的とした定常 VGOS 観測は、アメリカ Kokee 局とドイツ Wettzell 局で平日実施されている。観測後、アメリカ Washington 相関局が相関処理を実施し、概ね 2 日以内に結果を IVS に提出することで、 $dUT1$ 迅速解推定に貢献している。

一方、国土地理院が関連処理を担当している VGOS-INT-B/C は、石岡局とスウェーデンの Onsala 局が参加する VGOS-INT 観測で、毎週金曜日 23:30 UTC から 12 時間おきに計 4 回行われている。VGOS-INT-B/C の観測は週末に行われ、そのうち VGOS-INT-B は NASA 解析局での解析結果が dUT1 迅速解推定に貢献している。しかし VGOS-INT-B/C は関連処理が自動化されていないため、関連処理結果を IVS へ提出するまでに 3 日以上を要するという課題があった。そこで、IVS 相関局として関連処理結果の提出を早めることで地球自転速度のより迅速な推定に貢献するため、週末中に全自動関連処理を行う仕組みを構築した。

2.2 VGOS-INT-B/C 関連処理の概要

VGOS-INT-B/C 関連処理は VGOS Data Processing Manual (Barrett *et al.*, 2021) に基づいて実施している(図-3)。関連処理にはオーストラリアのスウィンバーン大学が開発した DiFX(Deller *et al.*, 2007)、後段の工程であるバンド幅合成やオフセット補正には、アメリカのマサチューセッツ工科大学が開発・提供する Haystack Observatory Postprocessing System (以下「HOPS」という。)を使用している。全自動関連処理プログラムにおける、各手順の概要を以下に示す。

① DiFX 関連処理

観測データを用いて行う、観測局間における遅延時間の粗推定。

② バンド幅合成とオフセット補正

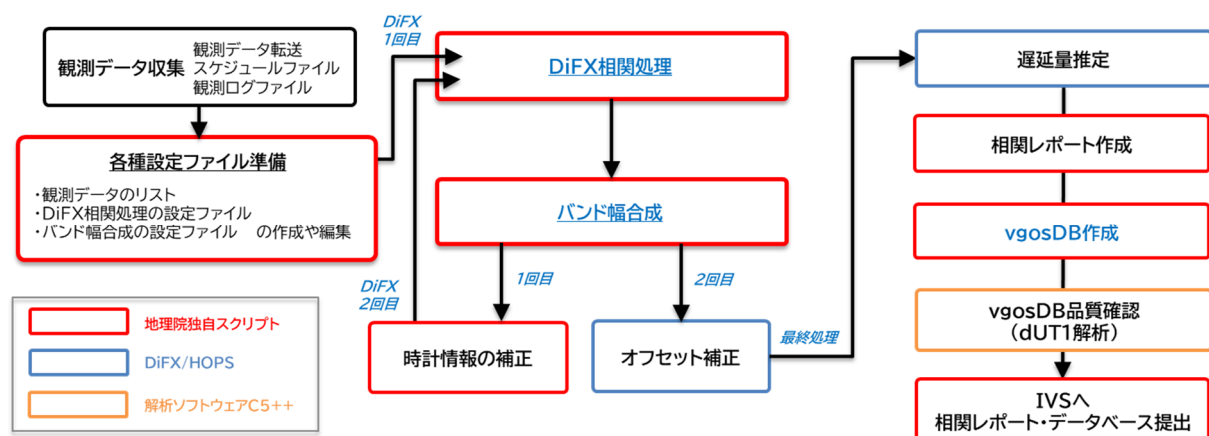
観測局間における遅延時間の詳細推定と結果の品質確認。

③ 経路遅延量の推定

dUT1 解析時に使用する、観測した信号が観測局内のケーブルを通る間に生じる遅延量の推定。

④ 関連レポートとデータベースの作成

IVS 提出用に関連処理結果をレポートとデータベースにまとめる。IVS へ結果を提出する前に、dUT1 解析を行い提出結果の品質確認も実施している。



3. VGOS-INT-B/C の変遷と運用状況

3.1 Onsala 局内の短基線処理について

VGOS-INT-B/C は、石岡局と Onsala 局内にある二つのアンテナそれぞれで構成される長基線二つと、

Onsala 局内にあるアンテナ間の短基線一つの計 3 基線から構成される。Onsala アンテナ間の距離は約 75 m と極めて短く、VLBI 観測データに挿入された人工信号や観測局周辺の環境に起因する共通のノイズにより天体からの電波と混同され相関処理結果の品質が悪化するという問題がある。dUT1 解析においてある程度の精度を得るためには、短基線の相関処理時に人の目で処理結果を確認し必要に応じてノイズの多いデータを処理から除く作業が不可欠であり、この作業が自動相関処理システム構築の障壁となっていた。そこで、短基線の相関処理結果の有無が、dUT1 の推定へ与える影響を確認した。多くの IVS 解析局が使用している解析ソフトウェア nuSolve (Bolotin *et al.*, 2014) を用いて 3 基線から推定される dUT1 の値 (図-4, 橙) と 2 基線から推定される dUT1 の値 (図-4, 青) を比較した。その結果、推定される dUT1 は 1 シグマの範囲で一致することが確認された。これを受けて、IVS 相関/解析局関係者らの同意を得た上で、2025 年 6 月末以降の観測では長基線のみ相関処理を行うこととなった。これにより、VGOS-INT-B/C の自動相関処理システムの構築が可能となった。

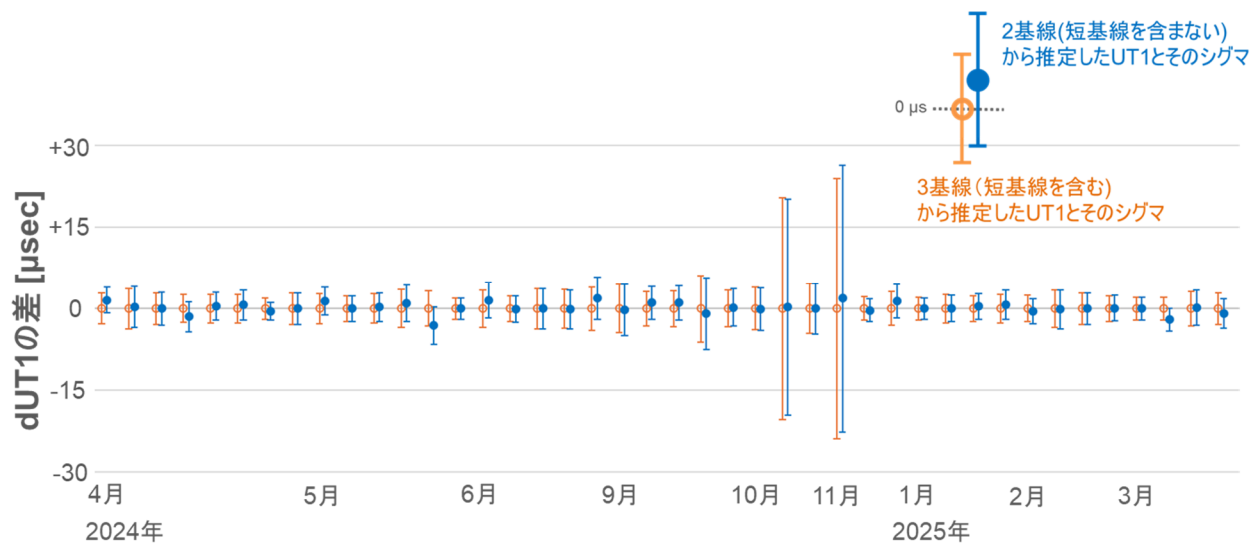


図-4 VGOS-INT-B/C における基線数と dUT1 算出結果

3.2 全自動相関処理の運用状況

令和 7 年 7 月に初めて、IVS への VGOS-INT-B/C の相関処理結果の自動提出に成功した。当時は VLBI 観測の終了後から 14 時間後に相関処理結果の提出が完了していた。このうちデータ転送時間に費やした時間は約 9 時間で、提出までの時間の半分以上を占めていた。その後、Onsala 局からつくば相関局へのデータ転送速度向上を目的とした試験を実施し、データ転送実行方法を改良した結果、所要時間は 2 時間にまで短縮された。令和 8 年 2 月現在、特段のトラブルがない限りは、図-3 に示した工程を全自動で実行し終え、VLBI 観測の終了から 5 時間後に IVS へ相関処理結果を提出している。

4. まとめと今後の課題

令和 7 年度までに相関処理の全自動化の達成と転送速度の見直しが完了し、他の観測と同等かそれ以下の所要時間で地球自転速度の迅速な推定に貢献できるようになった。次年度以降は、データストレージからのデータ読み出し速度の向上と観測条件の変化にも柔軟に対応できる汎用性の向上により、現在は約 3 時間要するプログラムの動作時間の短縮と全自動化の安定化を図っていきたい。

参考文献

- Barrett J., Cappallo R., Corey B., Crew G., Elosegui P., Niell A., Ruszczyk C., and Titus M. (2021): VGOS Data Processing Manual, <https://www.haystack.mit.edu/wp-content/uploads/2021/01/vgos-data-processing.pdf> (accessed 24 Mar. 2026).
- Bolotin S., Baver K., Gipson J., Gordon D., and MacMillan D. (2014): The VLBI Data Analysis Software vSolve: Development Progress and Plans for the Future, IVS 2014 General Meeting Proceedings, 253–257, https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2014/054_Bolotin_etal.pdf (accessed 24 Mar. 2026).
- Davis M. and Byram S. (2024): The IERS Rapid Service / Prediction Center Mission, Challenges, and Developments, IVS 2024 General Meeting Proceedings, 155–161, <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2024/NASA-CP-20250002586.pdf> (accessed 24 Mar. 2026).
- Deller A. T., Tingay S. J., Bailes M., and West C. (2007): DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 119, 318–336. doi:10.1086/513572
- Petrachenko B., Niell A., Behrend D., Corey B., Bohm J., Charlot P., Collioud A., Gipson J., Haas R., Hobiger T., Koyama Y., MacMillan D., Malkin Z., Nilsson T., Pany A., Tuccari G., Whitney A. and Wresnik J. (2009): Design Aspects of the VLBI2010 System: Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee. NASA/TM2009-214180, p.25.