

VGOS に関する研究開発（第 5 年次）

実施期間	平成 26 年度～平成 30 年度		
測地部宇宙測地課	梅井 迪子	若杉 貴浩	
	石垣 真史	上芝 晴香	
	松本 紗歩	栗原 忍	
	吉川 忠男	宗包 浩志	

1. はじめに

国際的な VLBI 観測のとりまとめを行う機関である国際 VLBI 事業（以下「IVS」という。）は、新たな国際 VLBI 観測の方針である「VGOS（当初「VLBI2010」、2012 年に名称変更）」を 2005 年に決定した（Niell et al., 2006）。これは国際測地学協会（IAG）のもとで地球の幾何学的形状、地球回転、重力場を高精度に観測し、それらをモニターするとともに、すべての地球関連科学とその応用分野にとっての基盤となる、高精度かつ安定したグローバルな基準系を与え維持することを目的とした全球統合測地観測システム（GGOS）（Plag & Perlman, 2009）の要求を満たすために策定されたものであり（Hase et al., 2012）、直径 12 m 級で毎秒 12 度で回転する高速駆動アンテナ及び広帯域周波数対応の受信システムを用いて、①1 mm の精度での局位置決定、②24 時間 365 日の連続観測、③24 時間以内の解の算出を目指すものである。

IVS の方針決定を受け、国土地理院は、2012 年から VGOS に対応した石岡 VLBI 観測施設（以下「石岡局」という。）の建設を開始し、2015 年から従来の S/X 帯（2 GHz 及び 8 GHz 帯）を用いた VLBI 観測を開始するとともに、2016 年から広帯域周波数を用いた観測にも参加してきた。

平成 30 年度は、石岡局において引き続き S/X 帯を用いた VLBI 観測を定常的に実施したほか、6 月から 9 月にかけて、広帯域（3～14 GHz）用受信機による観測を行った。加えて、VGOS データの相関処理試験と VGOS データの解析処理技術に関する調査を実施した。

2. 研究内容

2.1 石岡局における広帯域観測

石岡局では、S/X 帯を用いた VLBI 観測に加え、期間を限定して VGOS に対応した広帯域観測を実施している。平成 30 年度は 6 月から 9 月にかけて、S/X 帯用の受信機から広帯域用受信機に切り替えた上で、IVS が主導する 24 時間の VGOS 観測に 7 回参加した。観測の諸元を表-1 に示す。また、IVS のサブグループであるアジア・オセアニア VLBI グループ（AOV）内においても VGOS を推進することを目的として、現在 VGOS の整備を進めている Hobart 局（オーストラリア）との広帯域試験観測を VGOS 観測と同じ設定で実施した。

また、平成 30 年 8 月には国立研究開発法人情報通信研究機構（以下「NICT」という。）との共同研究の一環で、原子時計の周波数を大陸間規模で比較するための VLBI 観測に参加した。NICT が Medicina 局（イタリア）に移設した小型アンテナ及び NICT 小金井局とともに観測を実施した。

表-1 IVS が主導する VGOS 観測の諸元

参加局	石岡（日本）、GGAO, Kokee, Westford（アメリカ）、 Yebes（スペイン）、Wettzell（ドイツ）、Onsala（スウェーデン）
バンド数（中心周波数）	4 バンド（3240.4, 5480.4, 6600.4, 10440.4 MHz）
各バンドの帯域幅	32 MHz×8ch
偏波	垂直・水平両偏波
量子化ビット	2 bit
トータルサンプリングレート	8 Gbps

2.2 広帯域データの相関処理試験

国土地理院は、NICT により開発されている K5/VSSP 相関処理ソフトウェア（以下「K5」という。）を用いて、S/X 帯による従来型の VLBI 観測の相関処理を行っている。K5 は S/X 帯観測のために開発されたソフトウェアであるが、昨年度の研究から、K5 が S/X 帯以外の周波数帯にも適用可能であること、また、VGOS データの標準フォーマットである VDIF 形式のデータを処理できることが確認された。今年度は、海外の相関局で処理された結果と比較し、K5 の VGOS データへの活用可能性について検討を行った。

2.3 VGOS データの解析処理技術に関する調査

国土地理院は IVS 公認の相関局・解析センターとして、S/X 帯を用いた VLBI 観測の相関処理・解析を行っている。一方、国土地理院以外の IVS 公認相関局は、オーストラリアで開発された相関処理ソフトウェア DiFX (Deller et al., 2007) を利用している。また、IVS が主導する VGOS 観測の相関処理にも DiFX が利用されている。DiFX の基本的な情報や将来的な動向に関する調査を実施するため、平成 30 年 9 月に DiFX ユーザーズミーティングに参加した。加えて、平成 30 年 6 月に実施された第 10 回 IVS 総会及び第 39 回 IVS 評議会に参加し、VGOS への移行等に関する情報収集を行った。

3. 得られた成果

3.1 石岡局における広帯域観測

IVS が主導する VGOS 観測では、安定して広帯域の観測データを取得することができた。観測データは昨年度と同様に、データ形式の変換後に Haystack 観測所（アメリカ）に転送され、同観測所で相関処理が実施された。7 回の VGOS 観測のうち 1 回は、周波数変換器の不具合により、1 バンドでフリッジが確認されなかったが、残りの 6 回については全 4 バンドでフリッジが検出された。Hobart 局との試験観測においても、全バンドでフリッジを確認することができ、Hobart 局における VGOS の整備に貢献することができた。

NICT との周波数比較実験では、全 4 バンド（6, 8.5, 10, 11 GHz 帯）でフリッジが確認された。大陸間規模で周波数を比較するための鍵となる、長基線の広帯域バンド幅合成を実現するため、現在 NICT によって研究開発が進められている（関戸ほか、2018）。

3.2 広帯域データの相関処理試験

昨年度に引き続き、平成 29 年 12 月に実施された CONT と呼ばれる連続観測の石岡局－Yebes 局（スペイン）基線のデータを用いて相関処理試験を行った。同観測で取得された 3, 5, 6, 10 GHz 帯の各チャンネルを K5 で相関処理し、各帯域内のチャンネルをバンド幅合成して、各帯域での遅延量を得

た。上海天文台（中国）が DiFX を用いて同観測の試験的な相関処理を実施していたため、その結果を入手し比較した。表-2 にバンド幅合成で得られた信号対雑音比を示す。比較の結果、ほぼ同程度の信号対雑音比を得ており、各帯域の遅延量を算出するまでの過程においては、K5 が適用可能であることがわかった。

一方で、VGOS で得られる最終的な遅延時間は、電離層による誤差の影響を推定しつつ、各帯域の遅延を合成し、さらに、二つの偏波を合成して初めて求めることが可能となる。K5 ではこれに対応したソフトウェアは開発されておらず、さらに処理を進めるためには大規模なソフトウェアの開発が必要である。

表-2 各帯域内のチャンネルをバンド幅合成して得られた信号対雑音比の比較。H は水平偏波、V は垂直偏波を表す。

帯域	信号対雑音比（国土地理院）				信号対雑音比（上海天文台）			
	HH	HV	VH	VV	HH	HV	VH	VV
3 GHz	28.3	14.8	12.4	21.5	20.7	10.1	10.4	16.6
5 GHz	22.9	14.5	12.0	21.5	19.2	13.5	8.9	19.7
6 GHz	19.9	15.1	10.3	21.7	17.9	12.4	8.9	18.1
10 GHz	5.2	7.4	4.7	9.9	—	—	—	10.5

3.3 VGOS データの解析処理技術に関する調査

ドイツのバート・ケッツティングで開催された第 12 回 DiFX ユーザーズミーティングでは、VGOS 観測の相関局である Haystack 観測所の担当者から VGOS で得られる広帯域観測データに対しては、観測装置ごとの位相特性や電離層による遅延の補正等を入念に行う必要があり、従来型の S/X 帯による観測データの処理と比較し処理が複雑になることが示された。また、DiFX の開発者である Adam Deller 氏（オーストラリア Swinburne 工科大）から、相関処理の高速化のため GPU（Graphics Processing Unit）を用いた相関処理ソフトウェアのテストに関する報告があり、GPU を用いると現状より少なくとも 3 倍程度の計算速度向上が見込まれ、将来的に DiFX へ統合することを検討していることが報告された。加えて、Web サイトの整備やメールベースでの情報共有に力を入れており、サポート体制が非常に充実していることも判明した。調査の結果、VGOS への移行後も DiFX が実質的なスタンダードとして利用されることが予想される。

第 39 回 IVS 評議会においては、VGOS の進展と観測局の活用に関する議論が行われた。この中で、S/X 帯を用いる従来型観測局と VGOS 観測局が同一の観測を行う混合（mixed-mode）観測を進めていく方針が示された。混合観測では、VGOS 観測局がそのシステムを維持しながら S/X 帯による従来の観測に加わることで、これまで従来観測に基づき提供されてきた測地基準座標系や地球姿勢パラメータ等の算出に参画することができるため、VGOS への移行後もこれらの成果の連続性を確保することが可能となる。

現在、石岡局では日本の測地基準系を維持するために S/X 帯による観測を定常的に実施する一方、VGOS の推進のため、期間を限定して広帯域観測に参加している。両観測モードを切り替えるためには受信機を載せ替える必要があるが、混合観測が導入されれば広帯域用受信機を搭載したまま両モードの観測を行うことが可能となる。しかし、混合観測を実施するためには、石岡局の広帯域用受信機で遮断している 2 GHz 帯の電波を受信しなければならない。実際の観測は相関処理の手法が確立され

た後に本格化することになるが、石岡局で混合観測を実施するためには、広帯域用受信機に組み込まれているフィルタの改良が必要となる。

4. 結論

石岡局において S/X 帯による VLBI 観測を定常的に実施するとともに、平成 30 年 6 月から 9 月にかけて世界の VGOS アンテナとの間で広帯域観測を行った。昨年度に引き続き、VGOS による広帯域観測への完全移行に向けて安定してデータを取得することができた。K5 を用いた広帯域観測データの試験から、各帯域の遅延量を算出するまでの過程においては、K5 が適用可能であるが、最終的な遅延量の算出にはソフトウェアの改修が必要であることがわかった。また、VGOS データの解析処理技術に関する調査から、DiFX が VGOS へ移行後も実質的なスタンダードとして利用されることが見えてきた。VGOS データの本格的な相関処理に向け、DiFX の導入及び従来観測データを用いた試験的な処理を通じて、運用技術の習得やノウハウの蓄積を行うことが推奨される。

更に、IVS 全体の計画として、混合観測の導入が今後推進されることが判明した。石岡局における混合観測に備え、広帯域用受信機に組み込まれているフィルタの改良に向けた混信状況の調査及び技術的検討を実施する必要がある。VGOS への移行時期や運用のあり方は依然として流動的であり、引き続き国際会議への参加等を通じて情報収集を継続する必要がある。

参考文献

- 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.
- Hase, H., Behrend, D., Ma C., Petrachenko, B., Schuh, H., and Whitney, A. (2012): The Emerging VGOS Network of the IVS, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting Proceedings, p.8-12.
- Niell, A., A. Whitney, B. Petrachenko, W. Schlüter, N. Vandenberg, H. Hase, Y. Koyama, C. Ma, H. Schuh, and G. Tuccari (2006): VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2005 Annual Report, edited by D. Behrend and K. D. Baver, NASA/TP-2006-214136, 13-40.
- Plag, H.-P., and Perlman, M., eds. (2009): Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer Berlin, ISBN: 978-3-642-02686-7, DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4_1-11.
- 関戸衛, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 近藤哲朗, 堤正則, 宮内結花, 川合栄治, 長谷川新吾, 渡部謙一, 鈴山智也, 栗原忍, 若杉貴浩, 上芝晴香, 梅井迪子, 石垣真史, 小室純一, 寺田健次郎, 難波邦考, 高橋留美, 岡本慶大, 青木哲郎, 池田貴俊, Perini Federico (2018) : VLBI 周波数比較への応用と GALA-V システムの開発 (IX) -イタリア Medicina への広帯域アンテナ設置-, 日本測地学会第 130 回講演会.