

小型衛星レーザ測距システムの開発と試験に関する共同研究

実施期間 令和 6 年度～令和 7 年度
測地部宇宙測地課 荒木 詩乃 堀 草子
菅原 安宏 若杉 貴浩

1. はじめに

国際地球基準座標系（ITRF）は、国連総会が決議した「持続可能な開発のための地球規模の測地基準座標系（GGRF）」を実現した事実上の国際標準として、広い分野で国際的に用いられている。この ITRF を構築・維持するためには根幹技術である VLBI・SLR・GNSS・DORIS のうち複数を定常的に運用する局の整備が重要である。国土地理院の石岡測地観測局（以下「石岡局」という。）は既に VLBI と GNSS を有しているため SLR を整備することができれば、ITRF の構築・維持へ更なる貢献が期待できる。特に、地球の重心、すなわち ITRF の原点は SLR でのみ決められていることから、石岡局をより強固に ITRF に結び付けることとなる。

また、ITRF を構築する四つの技術の観測網はそれぞれ独立しているため、それぞれの座標を結合させるためには、同一局内において、それぞれの技術の参照点間の位置関係（ローカルタイベクトル）を求める必要がある。なお、参照点とは物理的な中心位置を指し、GNSS においてはアンテナ底面の中心、VLBI 及び SLR においては駆動 2 軸の交点である。このローカルタイベクトルを求めるための地上測量をローカルタイ測量という。石岡局では、VLBI-GNSS の位置関係を算出するローカルタイ測量を毎年実施している。

一橋大学は、従来の SLR と比べて小型で低価格の「小型衛星レーザ測距システム（Omni-SLR）」の開発を行っている（Otsubo et al., 2025）。この開発・試験を石岡局にて実施したいとの要請があったため、石岡局における SLR の整備の前段階として、2024 年 1 月に共同研究「小型衛星レーザ測距システムの開発と試験」を締結した。その後 2024 年度には石岡局に Omni-SLR が設置され、国際地球回転・基準系事業（IERS）の識別番号である DOMES 番号を取得した。なお石岡局における各観測局の DOMES 番号は表-1 のとおりである。

表-1 石岡局における各観測局の DOMES 番号

観測局	DOMES 番号
VLBI	21791S001
GNSS	21791M001
SLR	21791M008

2025 年度は Omni-SLR の参照点を求め、石岡局の中で VLBI-GNSS-SLR のローカルタイベクトルを求める手法について検証を行った。本稿では、Omni-SLR を含むローカルタイ測量の検証結果及びその今後の課題について報告する。

2. ローカルタイ測量とは

ローカルタイ測量とは、異なる宇宙測地技術間の観測網を結び付けるためのローカルタイベクトル

を求める地上測量である。石岡局にはもともと VLBI と GNSS が導入されており、これらの位置関係を求めるローカルタイ測量のために、VLBI と GNSS の周囲に観測用のピラーが複数設置されている（図-1）。VLBI-GNSS のローカルタイベクトルを求める際には、①水準測量及び多角測量、②VLBI アンテナ参照点の観測、③方位角観測を実施している。

①水準測量及び多角測量では、ピラー、GNSS アンテナ参照点、VLBI 観測点間の比高及び位置関係を求める。なお、VLBI 観測点とは、VLBI アンテナ駆動 2 軸の交点と地上の基準点網を結び付けるための測量標である。②VLBI アンテナ参照点の観測では、アンテナの AZ 軸と EL 軸の交点であるアンテナ参照点の位置を求める。この参照点は直接視準することができないため、インサイド法（Matsumoto et al., 2022）により間接的な観測を用いて推定している。③方位角観測では、①②を実施した石岡局の局所座標系を地心直交座標系に合致させるために、石岡局のピラーと一等三角点「筑波山」にて水平角観測及び GNSS 観測を実施する。国土地理院は、ニュージーランド土地情報庁（Land Information New Zealand）の Chris Crook 氏が作成したソフトウェア「pyaxis」を用いて、これらの観測結果の計算処理から IERS へ提出する SINEX ファイルの作成までを一貫して行っている。

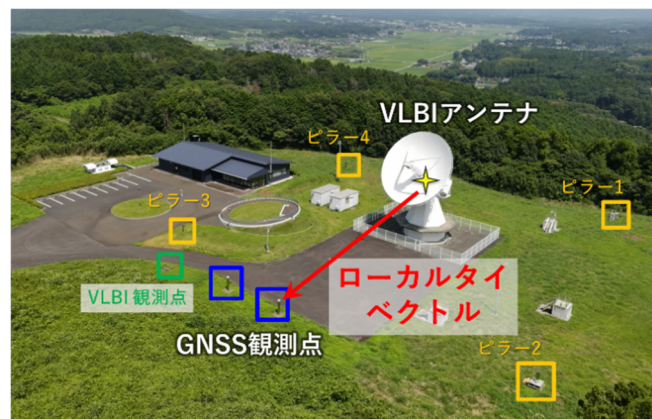


図-1 石岡局のローカルタイ測量概要

3. Omni-SLR を含むローカルタイ測量

3.1 作業内容の検討及び準備

石岡局で VLBI-GNSS-SLR のローカルタイベクトルを求めるに当たり、Omni-SLR の回転駆動の中心である参照点を求める必要がある。Omni-SLR の参照点も VLBI と同様に AZ 軸と EL 軸の交点となるが、VLBI と異なり Omni-SLR は回転中心付近にトータルステーションを設置することができない。このため Omni-SLR の参照点については、周囲の観測点から Omni-SLR 本体に取り付けたターゲットを視準し、一定角度ごとに位置を記録した軌跡（アーク）から AZ 軸と EL 軸を推定して参照点を求める方法（以下「アウトサイド法」という。）を採用することとした。

本年度は検証を目的としたため、Omni-SLR を取り囲む 3 か所に仮杭を設置し（図-2）、この仮杭 3 点を水準測量及び多角測量の観測網に含む計画とした。



図-2 仮杭設置位置の概略図

アウトサイド法については、Omni-SLR を取り囲む仮杭 3 点とピラー 3 から Omni-SLR 本体に取り付けた Red Ring Reflector (以下「RRR」という.) を視準することとした。RRR は磁石で対象物に取り付けるため、主鏡とカメラを保持するリング上にネジ止めした鉄板に設置した。設置位置は写真に示す 2 か所とした (図-3)。また RRR の設置位置を決めた後に、各観測点から RRR を視準できる Omni-SLR の駆動範囲を事前に確認し、観測計画に反映させた。なお、Omni-SLR の回転の 0 方向は、仮杭 3 に反射板を設置しレーザを照射したときに、反射板の中心にレーザが当たる向きとしている。



図-3 RRR 設置位置 (黄色枠内)

3.2 観測

検討結果を基に作業計画を作成し、観測を実施した。水準測量の際には仮杭上に直接標尺を置き、アウトサイド法による観測及び多角測量の際には仮杭上に三脚を設置して観測した。なお、来年度以降は仮杭の位置に設置した既存と同型の金属製ピラーを用いて観測を実施する予定である。VLBI アンテナのインサイド法による観測と方位角観測については従来の方で行った。実際にアウトサイド法で観測した七つのアークを表-2 に示す。各アークに対し、各観測点から RRR が見える範囲で位置を 10 度ごとに観測した。なお、表-2 に示した観測全てを 1 日で終えている。

表-2 アウトサイド法の観測

Arc No.	RRR 位置	対象 アーク	AZ 駆動 範囲	EL 駆動 範囲	仮杭 1 視準範囲	仮杭 2 視準範囲	仮杭 3 視準範囲	ピラー3 視準範囲
1	1	EL	90	0-80	EL 0-80	-	-	-
2	1	EL	270	0-80	-	-	-	EL 0-80
3	1	AZ	0-360	0	AZ 80-120	AZ 0-30	AZ 250-300	AZ 180-210
4	1	AZ	0-360	20	AZ 80-120	AZ 0-30	AZ 250-300	AZ 180-210
5	2	EL	0	0-80	-	EL 0-80	-	-
6	2	EL	180	0-80	-	-	EL 0-80	-
7	2	AZ	0-360	0	AZ 80-120	AZ 0-30	AZ 250-290	AZ 180-210

4. Omni-SLR を含むローカルタイベクトルの算出

Omni-SLR 関連の観測結果を含む全ての観測データから、pyaxis のインプットファイルを作成し、計算処理を実行したところ、計算途中で処理が中断され、ローカルタイベクトルを得ることができなかった。この原因を特定するため、インプットファイルからアウトサイド法に関連した観測データのみを除外し、計算を実行したところ、計算は最後まで終了した。この計算から得られた VLBI-GNSS 間のローカルタイベクトルは、Omni-SLR を含まない従来の観測網による計算で得られる値とほぼ同等の結果であった。これらのことから、アウトサイド法の観測データ又はその観測計画に問題があると推測された。

アウトサイド法の観測データを含めた計算のログを確認したところ、EL 軸を推定するアークの計算が収束していないため、計算処理が中断されたことが分かった。これを受けて観測データを見直したところ、今回の観測計画では一つの AZ 角度において一つの EL アークしか存在せず、VLBI のインサイド法のように同じ位置で 2 個以上のアークを観測していなかった。AZ 角度を 180 度反対に向けたときの EL アークは取得していたが、これでは EL 軸が完全に水平でなかった場合に軸が定まらず、計算が収束していないものと推測される（図-4）。

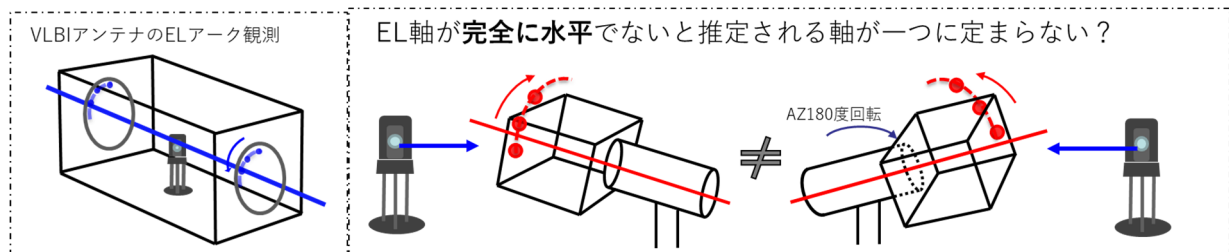


図-4 EL アークの取得状況

本来であれば AZ 軸を挟んだ反対側にも RRR を設置するのが理想ではあるが、Omni-SLR の機構上反対側に EL 駆動に伴って回転する部分が存在しない。したがって、まずは同 AZ 角度で 2 個以上の EL アークが必要かどうかを検証するため、ピラー3 から最初に設定した RRR 位置 1 と 2 に対し、EL アークを取得する追加観測を行った（表-3）。

表-3 追加観測

Arc No.	RRR 位置	対象 アーク	AZ 駆動 範囲	EL 駆動 範囲	仮杭 1 視準範囲	仮杭 2 視準範囲	仮杭 3 視準範囲	ピラー3 視準範囲
8	1	EL	180	0-80	-	-	-	EL 0-80
9	2	EL	180	0-80	-	-	-	EL 0-80

その後、追加観測で得られた EL アークと本観測で得られた AZ アークをアウトサイド法の観測データとしてインプットファイルを作成し、pyaxis の計算処理を実施したところ、計算処理は最後まで終了した。追加の観測データを加えて得られた VLBI-GNSS 間のローカルタイベクトルは、従来の観測網による計算とほぼ同等の値であった。この結果から、追加の観測データを加えたインプットファイルによる pyaxis の計算は妥当と推測される。

次に、Omni-SLR を含むローカルタイベクトルの比較検証を行った。ローカルタイ測量から得られたローカルタイベクトルの確からしさを確認するため、比較対象として、GNSS-SLR 間の相対位置ベクトルを計算した。GNSS-SLR 間の相対位置ベクトルは、GNSS 連続観測点「ISHI」と Omni-SLR の金属標上で行った GNSS 観測と、金属標から Omni-SLR の参照点までの偏心ベクトル（古居ほか、2025）から得られる。得られた結果を表-4 に示す。

表-4 今年度の観測から求められた GNSS-SLR のローカルタイベクトル（参考値）

GNSS-SLR [m]	ΔN	ΔE	ΔU	σN	σE	σU
計算された相対位置ベクトル	-19.8590	-74.8189	0.7357			
ローカルタイ測量によるベクトル	-19.8516	-74.8166	0.7231	0.0008	0.0005	0.0014

計算の結果、GNSS-SLR のローカルタイベクトルは、GNSS-SLR 間の相対位置ベクトルと 1 cm 程度の範囲で整合していた。また、標準偏差についても 1 mm 程度に収束した。このことから、追加観測を含む今年度の観測方法であれば、妥当性のあるローカルタイベクトルを算出できることが明らかになった。ただし、今年度の観測は仮杭や三脚を用いた数週間にわたる観測であり、仮杭や三脚に起因する誤差が生じている可能性があること、アウトサイド法の EL アーク追加観測の測量時期が他の測量時期と異なること、アウトサイド法のミラーの設置位置や観測データが十分かどうか検証できていないことなどから、この結果はあくまで参考値とすることとした。

5. 来年度以降の検討事項

来年度以降に向けて確実に改善できることとしては、仮杭での観測が三脚から金属製のピラーに変わるため、仮杭や三脚に起因する誤差が軽減し測量の安定性が増すこと、アウトサイド法の観測計画を最初から同じ AZ 角度で 2 アーク取得するよう設定し、同じ時期に全ての観測を実施することが挙げられる。

これに加えて、アウトサイド法の観測方法については以下に記載する追加の検討が必要と考えられる。今回の観測ではローカルタイ測量中も SLR 観測が可能な状態にしていたため、RRR 設置位置やアーク取得のための Omni-SLR の駆動範囲に制約が生じた。今後はこれらについて、ローカルタイ測量期間中は Omni-SLR の機器を一時的に架台から取り外す可能性も含め、取得するデータとその範囲を精査することが必要である。

6. 結論

石岡局において、開発中の Omni-SLR を含んだ VLBI-GNSS-SLR のローカルタイベクトルを算出する手法の検証を行った。Omni-SLR を含むローカルタイ測定の観測計画については、アウトサイド法において、同 AZ 角度で 2 個以上の EL アーク観測が必要なことが明らかになった。また、追加観測のデータを含む GNSS-SLR 間のローカルタイベクトルの計算が、確からしい値に収束することが確認された。来年度以降は今回得られた知見を基に観測計画と観測手法をさらに精査し、必要な観測条件を明確化した上で再度観測を実施する予定である。

参考文献

- 古居晴菜，本田昌樹，栗原忍（2025）：小型レーザ測距システムの開発と試験に関する共同研究，国土地理院令和 6 年度調査研究年報，42–46.
- Matsumoto, S., Ueshiba, H., Nakakuki, T., Takagi, Y., Hayashi, K., Yutsudo, T., Mori, K., Sato, Y. and Kobayashi, T. (2022): An effective approach for accurate estimation of VLBI-GNSS local-tie vectors, *Earth Planets Space*, 74, 147. doi:10.1186/s40623-022-01703-5
- Otsubo, T., Araki, H., Yokota, Y., Kouno, K., Kobayashi, M., Matsumoto, T., Nakamura, Y., Nakajima, J., Furui, H., Honda, M., Kurihara, S., Aoyama, Y. (2025): Omni-SLR: a compact, low-cost, multi-purpose SLR system for the future expansion of global geodetic network, *GGOS Days 2025 - IAG Scientific Assembly 2025*, Rimini, Italy. doi:10.5281/zenodo.17513351