

# 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

実施期間 令和 6 年度  
測地部宇宙測地課 古居 晴菜 本田 昌樹  
栗原 忍

## 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)」を実現した実質の国際標準として、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 のうち三つ以上を定常的に運用する局 (GGOS コアサイト) 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、GGOS コアサイトとして 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。

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)」というシステムの開発を行っている (Otsubo *et al.*, 2023)。これに関して石岡局にて開発・試験を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「小型レーザ測距システムの開発と試験」を締結した。本稿では、2024 年度までの共同研究の取組状況及び今後の課題について報告する。

## 2. Omni-SLR とは

SLR とは、Satellite Laser Ranging の略で、レーザを用いて人工衛星と望遠鏡の距離を計測する宇宙測地技術である。望遠鏡から送信されたレーザが人工衛星に搭載されたコーナークューブリフレクタで反射し、望遠鏡に戻ってくるまでの時間を求めることで距離を測ることができ、複数の測距結果を合わせて解析することにより人工衛星の軌道や望遠鏡の位置、ひいては地球の重心位置や重力場などを求めることができる。

Omni-SLR は従来の SLR と比べて小型で、既製品を含む部品を組み合わせることにより低価格で構築可能な SLR システムである。レーザの出力も小さく安全性も高いため、SLR の導入をより容易にすることが期待される。望遠鏡用の架台に直径約 20 cm の受信用望遠鏡が付いており、その周辺にレーザ発射口や検出器等の機器類が付属する構造になっている (写真-1)。なお、Omni-SLR は現在も開発中であり今後も構成は変更される可能性がある。



写真-1 石岡局に設置された Omni-SLR (2025 年 2 月 19 日時点)。それぞれ、左は架台側からの視点、右は望遠鏡側からの視点の写真、同一の機器。

### 3. 観測室の設置と環境整備

#### 3.1 スライドルーフ式 SLR 観測室

2024年2月26日に石岡局にスライドルーフ式のSLR観測室が設置された(写真-2)。この観測室は南北方向に長辺を向けるように設置されており、SLR観測のために屋根が開閉できるようになっている。屋根は、屋内の開閉スイッチで開閉できるほか、雨滴センサにより自動で閉じるようになっている。観測室は、ローカルタイ測量を想定し、南北にドアが、東西の壁には足元に窓があり、各方向の視通が取れる構造とした。また、Omni-SLRの本体を置く部分と観測室の他の床面部分は基礎を分離して、Omni-SLRの本体に与える観測室側の振動等の影響を軽減させている。



写真-2 石岡局に設置されたスライドルーフ式 SLR 観測室（屋根が開いた状態）

#### 3.2 筑波山への視通の確保

Omni-SLRの駆動においては基準となる方向を正確に決めることが重要である。そこで石岡局では、視通を確保した上で十分遠方にある不動の目標物として筑波山を基準方向とした(写真-3)。これにより、Omni-SLRの駆動開始時の位置の調整が簡便になり、かつ筑波山の正確な緯度経度を初期値として与えることでキャリブレーションの精度も向上した。

また、2章でも言及したとおり、Omni-SLRは既製品を含む複数の部品で構成されているため、レーザーの発射方向と望遠鏡による受信方向を平行にするためのアライメント調整作業を実施する必要がある。これは望遠鏡を90°の角度で囲むように取り付けられた3台の光学カメラ(うち1台はレーザー発射口とレンズを共有)及び望遠鏡とレンズを共有する1台の光学カメラを用いて、遠方の目標物がそれぞれのカメラの視野の中心に来るように微調整することで実現される。このときに目標が近すぎると視線が斜行してしまい、遠すぎると角度の僅かな違いでも水平方向の差が大きくなるため最初から目標にすると視野から外れてしまい調整が難しくなる。石岡局ではOmni-SLRから程よい距離にある筑波山山頂付近の建造物を目標とすることでアライメント調整作業を効率的に実施できる。

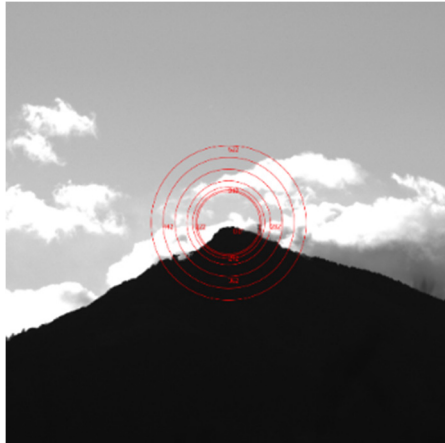


写真-3 Omni-SLRに取り付けられたカメラで視準した筑波山山頂

## 4. IERS の観測点の登録の観測点の登録

### 4.1 S 点の登録

IERS（国際地球回転・基準系事業）に登録する場合、登録できる局位置の点は S 点と M 点の 2 種類が存在する。SLR の場合、前者は水平方向の回転軸である AZ 軸と鉛直方向の回転軸である EL 軸の交点、後者は任意の不動点である。石岡局の Omni-SLR はまず二つの回転軸の交点である S 点で登録申請を行い 2024 年 4 月 25 日に申請が受諾され、DOMES 番号 21791S002 を取得した。

### 4.2 M 点の登録と器械高測定のための器高式水準測量

石岡局に設置された Omni-SLR は可搬型であるため、架台を動かしてしまうと S 点の位置も変わってしまう。M 点の場合は、任意の不動点に加えてその不動点から望遠鏡の S 点までの偏心ベクトルを併せて申告することができる。この偏心ベクトルは変更になった場合は適宜修正登録が可能であるため、可搬型である Omni-SLR の局位置としては M 点を登録する方が将来的に運用する際に現実的である。そこで、石岡局では今後 Omni-SLR を 2 台置くことや器高式水準測量を実施することを想定して観測室内に金属標を 2 個設置し、このうち北側にある一点を M 点として追加で登録することとした（写真-4 左）。今回は AZ 軸と EL 軸の交点が架台の中心（AZ 軸上）にあることを仮定し、設計図上で架台の上端から何 mm 下にその交点があるかをメーカーに問い合わせた。不動点から望遠鏡の S 点までの偏心ベクトルは、金属標から架台の上端までの比高差を器高式水準測量で求めてから（写真-4）架台の上端から AZ 軸と EL 軸の交点までの距離を引くことで算出し、 $(x, y, z) = (0, 0, 1.5408)$  と求めた。これを基に登録申請を行い、2024 年 10 月 18 日に申請が受諾され、DOMES 番号 21791M008 を取得した。



写真-4 設置された金属標と、器高式水準測量を実施している様子

## 5. 試験観測作業

2025年2月15日現在、2024年9月4日～6日及び2025年2月13日～14日に一橋大学が実施した試験観測において、7種類の衛星で合計11パス分の測距に成功した（表-1、写真-5）。これにより、石岡局において Omni-SLR を使った衛星測距が可能であることが確認された。特に、2024年2月14日に測距が成功した Stella は、この時は地球の影に入っていたため光学カメラで視認ができないパスであり、目視での確認なしでレーザを微調整することに成功した初のパスである。

表-1 測距に成功したパスの内訳（2月15日現在）

日時（UTC）	対象衛星
2024-09-04 11:30 頃	Starlette
2024-09-04 15:01 頃	Beacon-C
2024-09-04 15:24 頃	Ajisai
2024-09-04 16:54 頃	Beacon-C
2024-09-05 11:36 頃	Stella
2024-09-06 11:10 頃	Swarm-A
2025-02-13 11:06 頃	Beacon-C
2025-02-13 12:19 頃	hy2d
2025-02-13 14:57 頃	SWOT
2025-02-14 10:22 頃	Beacon-C
2025-02-14 11:16 頃	Stella

これら期間においても、測距に失敗したパスは多くあり、より正確なアライメント調整や各 부품の固定、観測ソフトのキャリブレーション作業など、ハード面とソフト面両方において現在も改良作業が進められている。特に、アライメント調整に関しては、微調整が可能であることと短期間では動かない程度の強い固定を両立する必要があると、治具の調整と試験観測が繰り返されている。

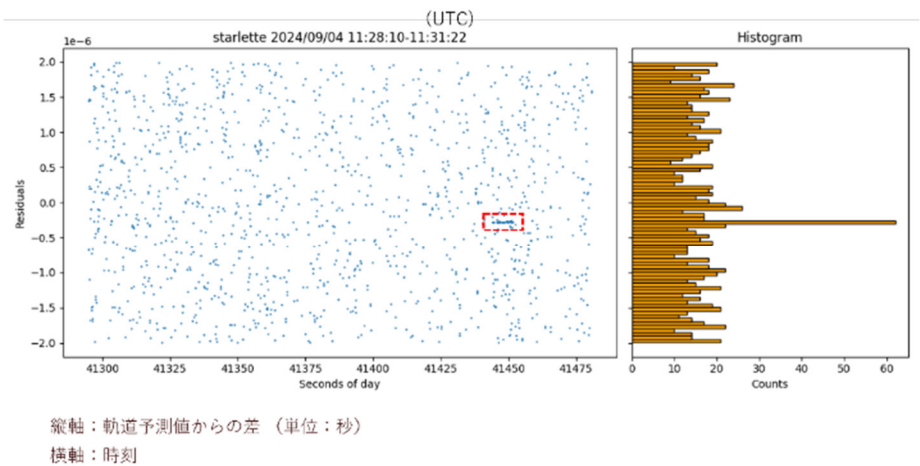


写真-5 Omni-SLR からレーザーを照射している様子（左）と、9月4日のStarlette衛星観測時におけるリターンパルスの検出時の画面（右）

## 6. 今後の課題

前述したとおり、衛星測距を安定して実施するためにはレーザー発射方向と望遠鏡の受信方向が平行な状態を実現しそれを維持することが求められ、これに必要なアライメント調整の部品や手順の改良が課題の一つとなっている。また、Omni-SLRの駆動によって架台自体が微動してしまう可能性を小さくするため将来的に観測室の床面にアンカーなどを打ち込み架台の脚を確実に固定することや、キャリブレーション用の近距離ターゲットを固定で設置しその距離を正確に測ることによる観測精度の向上も検討されている。加えて、現在は器高式水準測量のみによって決定されている金属標とAZ軸・EL軸の交点を結ぶ偏心ベクトルについて、小型ミラーをOmni-SLRに設置して回転駆動させ離れた位置からトータルステーションで観測を行いAZ軸・EL軸の交点を算出してから、ローカルタイ測量時に金属標の座標も求めた上でより正確な値を求めることも目指す。

## 7. まとめ

石岡局では一橋大学とOmni-SLRの研究開発の共同研究を進めている。2024年2月に観測室が設置されて以降、金属標の設置と器高式水準測量による器械高の測定、日々の観測作業への参加など様々な形でOmni-SLRの研究開発に携わってきた。今後はアライメント調整作業や観測オペレーションなどより実践的な作業にも積極的に参加し、国土地理院職員のオペレーションによる衛星測距の成功を目指したい。

## 参考文献

Otsubo, T., Araki, H., Yokota, Y., Matsumoto, T., Kobayashi, M., Kouno, K., Doi, K., Aoyama, Y., Takashima, T., and Yanagimoto, N. (2023). Small-size, low-cost, multi-purpose SLR System: Omni-SLR. In *XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)*. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences.