

### 下里水路観測所レーザー測距装置へのキロヘルツレーザーの導入<sup>†</sup>

福良博子<sup>\*1</sup>, 瀬尾徳常<sup>\*2</sup>, 井城秀一<sup>\*2</sup>, 衣笠智大<sup>\*2</sup>, 中西政仁<sup>\*2</sup>, 山口哲郎<sup>\*3</sup>

Installation of a kilohertz laser on the satellite laser ranging system at the Shimosato Hydrographic Observatory<sup>†</sup>

Hiroko FUKURA<sup>\*1</sup>, Noritsune SEO<sup>\*2</sup>, Hidekazu INOSHIRO<sup>\*2</sup>, Tomohiro KINUGASA<sup>\*2</sup>,  
Masahito NAKANISHI<sup>\*2</sup>, Tetsuro YAMAGUCHI<sup>\*3</sup>

#### Abstract

The satellite laser ranging system for the satellite laser ranging (SLR) observations in the Shimosato Hydrographic Observatory (SHO) has been in operation for almost 10 years since its last update in 2009. In order to enhance the safety and usability of the observation system, the SHO updated the laser ranging equipment in 2018. The new system uses a laser oscillator with a changeable pulse repetition rate up to 1 kHz (i.e., kilohertz laser), by which we can collect the ranging data at a higher rate than by the former one with a pulse repetition rate of 5 Hz. The relevant updates on the control devices and software contribute to the simplification of the SLR operation. These updates will enable the SHO to continue to provide high-quality laser ranging data to the International Laser Ranging Service (ILRS) as a Global Geodetic Observing System (GGOS) site.

#### 1 はじめに

第五管区海上保安本部下里水路観測所 (Photo 1) は 1982 年から人工衛星レーザー測距 (SLR; Satellite Laser Ranging) 観測を行い、海図の基準点である海洋測地本土基準点の位置決定、離島の精密位置決定を行うとともに、国際測地基準座標系の維持管理や人工衛星の軌道決定に寄与してきた。そうした貢献により、下里水路観測所は、国際測地学協会 (IAG; International Association of Geodesy) のもとに設置された全球統合測地観測

システム (GGOS; Global Geodetic Observing System) ネットワークのサイトとして承認されている (GGOS Japan, 2019)。

こうした国際測地観測への貢献を継続することが求められるなか、今般レーザー測距観測の根幹部であるレーザー装置の 4 度目となる改修を行うにあたり、世界的に主流となっているキロヘルツレーザーを導入し、またこれに付随する改修を行ったので報告する。

<sup>†</sup> Received September 20, 2019; Accepted November 14, 2019

\* 1 第八管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 8<sup>th</sup> Regional Coast Guard Headquarters

\* 2 第五管区海上保安本部 下里水路観測所 Shimosato Hydrographic Observatory, 5<sup>th</sup> Regional Coast Guard Headquarters

\* 3 電応システム株式会社 Denohsystem Inc.



Photo 1. The exterior of the Shimosato Hydrographic Observatory

写真 1. 下里水路観測所

## 2 近年の主な改修

下里水路観測所では 2009 年度まで 3 ヶ年かけて大規模な改修を行っている（鈴木他, 2010）。以降の 10 年間では老朽更新に加え安全対策の強化や機能改善等が行われており、特記事項について簡単に触れる。

### 2.1 データ集録解析装置の導入

2009 年の望遠鏡改修時に、主望遠鏡の鏡筒内部に小型の反射鏡（以下「内部 CCR」という。）が搭載されており、この内部 CCR をより有効活用するため、2011 年度に「データ集録解析装置」を導入した。これにより装置外部にレーザーを照射することなく、光速度の補正量を含んだ、装置の内部遅延量の測定（以下「レンジサーベイ」という。）が可能となった。

この装置で特徴的なのは、ファイアコントローラ及び回転チョッパーである。

従来のレンジサーベイでは地上に設置された標的を用いており、その際は、送信光を減衰させるアッテネータと受信光を減衰させるアッテネータを、光路上でそれぞれ通過させることにより、強いレーザー光が直接受光器である光電子増倍管（以下「PMT」という。）へ送られることがない機構になっている。

人工衛星からの反射光は地上標的からの反射光と比べて大変微弱な光量のため、人工衛星測距を

行う際は前述の送信及び受信のアッテネータを外して運用することとなる。

しかし、この状態のまま送信光路上にある内部 CCR からの反射も有効にし、そのまま受光してしまうと、PMT に強い光が入ってしまい、PMT 等に致命的なダメージを与えかねない。また、衛星からの反射光と内部 CCR からの反射光の入光レベルがほぼ均等でないと、測定したい反射光とノイズである雑光の判断が難しくなり、測定処理が困難になる。これを回避するためには内部 CCR からの光のみ光量を弱める必要がある。

この対策として、受信光路上に ND フィルタを取り付けた回転チョッパーを設置した。この回転チョッパーの速度は 5 Hz であり、レーザー発振回数と一致させている。特に、回転速度のふらつきを想定し、チョッパーの回転に合わせてレーザーの発射タイミングを図るファイアコントロールを行っている。すなわちファイアコントローラでレーザーの発振とチョッパーの回転を同期させることにより、ND フィルタで内部 CCR からの反射光をブロックする機構であり、内部 CCR からの反射光が ND フィルタに当たるタイミングを逆算して、レーザー発射信号を出す機構としている。

この概念は今回のレーザー改修にも生かされている。

### 2.2 直焦点による光学視認の改善

2009 年の改修では主望遠鏡の可視光像を視認できる機構ができたものの、実際はレーザー光を発射すると、レーザー送信光により視界が飽和してしまい、衛星追尾時に可視光像の活用は困難であったうえ、焦点位置の任意設定が不可能であったため、CCD カメラ等で合焦させることが出来なかった。

この対策として 2017 年度に直焦点の受光部の前にラマンロングパスフィルタを取り付けた。このフィルタによりレーザー光の 532 nm 波長を除去することで、観測中でも主望遠鏡の可視光像を確認できるようになり、飛来する人工衛星の確認

が可能となるとともに望遠鏡内部の主鏡をはじめとする光学系の状態確認が容易となった。

### 3 レーザー装置の概要

従来のレーザー装置は発振周波数が5 Hz という、いわゆる低速繰り返し型であった。今回導入したレーザー装置は高速繰り返し型レーザーで、発振周波数が10 Hz～1 kHzで可変となっている。同様の装置は通称キロヘルツレーザーと呼ばれている (Photo 2)。キロヘルツレーザーでは1回の観測で大量のデータが得られることから、1パルスの観測精度が劣っても統計処理により精度向上が見込め (大坪他, 2013)、世界のSLR観測局でも主流となっていることから、今回の導入は世界標準に合わせたといえる。

レーザー装置の主要仕様と比較表はTable 1のとおり。



Photo 2. Installed laser oscillator (top) and appearance of the laser system (bottom)

写真2. 新レーザー装置. 発振器 (上) 及び電源部 (下).

Table 1. Specifications of the old and new laser systems  
表1. 新旧のレーザー装置スペック

項目	旧装置	新装置
励起源	フラッシュランプ	レーザーダイオード
発振形態	Qスイッチパルス発振	連続波発振
発振周波数	5Hz	10Hz～1kHz (可変)
出力 (1パルス)	60mJ	3mJ
パルス幅	< 20ps	< 30ps
二次冷却方式	水冷式	空冷式

主な変更点として、従来は発振方式としてQスイッチ方式のレーザーを使用していたものがダイオード方式になった。これにより色素溶媒として使用していた有機溶剤 (1,2-ジクロロエタン) が不要になり、職員の健康被害と保管事故の懸念が払拭された。また、二次冷却方式が水冷式から空冷式となったことにより冷却水循環装置が不要となり、電源部もコンパクトになるなど省スペース化された。更に、レーザーの出力をはじめ主電源であるキースイッチ以外の操作・設定はソフトウェアで管理できるようになった。

従来のレーザー装置は有機溶剤の補充など、職員が少なからず装置の内部まで手を入れてメンテナンスをする必要があったものの、今回の装置は発振機構が完全にブラックボックス化するとともにメンテナンスフリーとなり、基本的に業者による定期保守・消耗部材の交換のみで安定して稼働することから、職員の負担が軽減し運用しやすくなった。

### 4 キロヘルツレーザー導入に伴う周辺機器及びソフトウェアの改修

発振周波数が大幅に増加したことにより、送受信信号処理が大きく変更となり、扱うデータ量も増大したことから、従来の自動制御装置及びソフトウェア「WSRS」で行っていた処理を複数のコンピュータに分散した。具体的には、送受信信号を処理し測距データを作成するデータサーバ (以下「SVR」という。) と、主にゲート処理を扱うレンジゲートジェネレータ (以下「RGG」という。) を用意し、望遠鏡の駆動やレーザー装置制

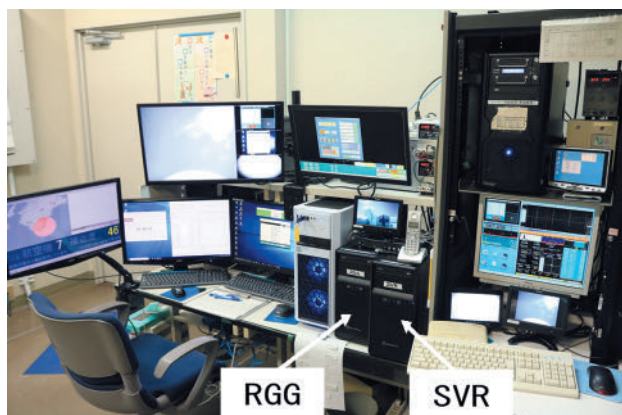


Photo 3. Control unit for the satellite laser ranging system

写真3. レーザー測距装置の自動制御装置

御を行うコンピュータとは分離した (Photo 3).

また、送信光ノイズ対策として回転チョッパーを改修した。

更に、1パルスあたりのレーザー出力が1/20になったことから、スタート信号検知器への光学系を変更し、衛星からの受信信号を処理するコンパレータを高感度のものに替えるなど、送受の検知器周辺に弱信号対策を行った。

#### 4.1 送受信信号処理

従来のレーザー装置では5 Hz、つまり200 msごとにパルスレーザーを発射していた。従来の送受信信号処理は200 msのうちに、発射したレーザーが人工衛星から反射して戻ってくることが前提の仕様であった。発射したレーザー光が人工衛星で反射し戻ってくるまでの時間をフライトタイムと呼んでおり、例えば国産測地衛星 Ajisai までの距離を約1,500 km とするとフライトタイムは約10 ms、アメリカの測地衛星 Lageos-1 ではそれぞれ約6,000 km、約40 msとなる。衛星までの距離が3万キロを超えると200 msの間に戻ってこないものの、通常観測する人工衛星では支障ない距離であった。

これがキロヘルツレーザーになると発振間隔は1 msになることから、送信信号と受信信号が入り交じることが前提となり、入り交じる送信信号と受信信号それぞれに正しい組み合わせ、いわゆ

るペアリングの処理が必要となることから、従来と比べ同時に行う処理が大幅に増え、制御が複雑となる。

このため制御装置の負担を軽減し、測距データ処理を行う SVR 及び同ソフトウェア「WSVR」を新たに導入した。

#### 4.2 ゲート処理

キロヘルツレーザーでは送信信号がいつ戻ってくるか、人工衛星の位置により刻一刻と変化するフライトタイムを正確に把握し、どのタイミングで発射した送信信号に対する受信信号かを確実にペアリングする必要がある。このため送信装置の検知信号のタイミングをもとに、受信装置に人工衛星からの信号を受信するタイミング及び時間を設定するゲート処理機能を強化した。

従来のシステムでもゲート処理を行っているものの、こちらはペアリングの必要はなくノイズ対策が主目的であった。

今回からキロヘルツレーザー対応のためより高い処理能力が必要となり、RGG (ゲートコントロールユニット、専用コンピュータ及びソフトウェア「WRGG」) を導入した。

#### 4.3 送信光ノイズ対策

2009年の改修で望遠鏡が送受信一体型となった。送受信一体型望遠鏡では送信レーザー光の強い散乱光から受信回路を保護する必要がある。このため受信回路の入り口には送信タイミングに合わせて5 Hzで上下に動き光路を塞ぐ機械式チョッパーが備わっていた。但し従来の機構では1 kHzという速さに対応させるのは困難であった。

このため、チョッパーを回転する円盤型とし、キロヘルツレーザーに対応したファイアコントローラと組み合わせることにより、高速かつ安定に光路を遮断できる構造にした (Photo 4)。具体的には、透明の円盤に中心から線が20本刻み、この線を光の遮断部とし、その間を透過部とした。この円盤を3,000 rpmで回転させることによ

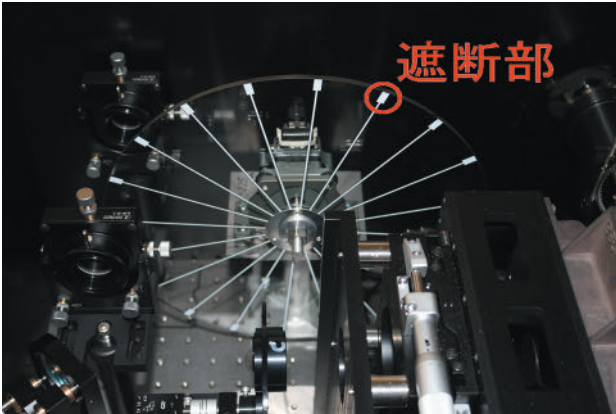


Photo 4. Rotary chopper  
写真4. 回転チョッパー

り、遮断部が1 kHzで光路を塞ぐようにした。回転速度を一定に保ち、遮断部が光路を横切るタイミングに合わせてレーザーを発射させることにより、送信光によるノイズが受信回路に入らないようブロックしている。

回転を利用した構造は慣性の効果もあり、また高性能のモータにより安定した回転速度を得られている。取り付けられた回転計でも3,000 rpmの数値が乱れることは殆どなく、確実に送信光のノイズが遮断できている。

#### 4.4 各信号の制御タイミングについて

ここでは、距離測定に発生する信号と制御のタイミングについて説明する (Fig. 1)。

回転チョッパーは遮断部が50  $\mu\text{s}$ 、透過部が950  $\mu\text{s}$ になるよう定速回転し続ける。

レーザー発振コマンドはレーザーを発振するタイミングをその立ち上がりで指示する1 kHz固定矩形信号で、衛星測距時には回転チョッパー遮断部の立ち上がりに同期する。但し、ファイアコマンドによりファイアゲートが出力されるまで、レーザー装置からレーザーは射出されず、装置内部で発振を繰り返す。

衛星測距時、観測者が望遠鏡から外部へレーザーを発射するタイミングでファイアコマンドをオンにし、レーザー発射を指示すると、ファイアゲートが出力され、レーザーがレーザー装置から発射される。

スタート信号は発射されたレーザー光をスタート信号検知器が検知し、微弱な電気信号に変換されたもので、整形処理を経てイベントタイマーに入力される。

受信用ゲートは衛星からの反射光が戻る時刻にPMTに供給される信号である。受信ゲートはスタート信号の立ち下がりを中心点にフライトタイムを計算し、反射光が戻るタイミングがその中心になる標準0.5  $\mu\text{s}$ 幅のゲート情報としてWRGGのゲートキューに登録され、FIFO (先入れ先だし)方式で該当ゲートのオープン時刻に生成される。フライトタイムは衛星までの距離によって決まるため、衛星の軌道に沿って時々刻々と変化することから、衛星までの距離によっては衛星からの反射光も回転チョッパーにより遮断され測距不能となる場合がある。このような測距可否はWSRSのオペレーション画面にてリアルタイムで把握できるようにになっている。

ストップ信号は受信用ゲートが設定されている時間内にPMTに入射した光を微弱な電気信号に変換したもので、整形処理を経て、イベントタイマーに入力される。

レンジサーベイの場合は、信号と制御のタイミングが衛星測距時と若干処理が異なる。

レンジサーベイではレーザー発射直後 (約0.1  $\mu\text{s}$ 後)に反射して戻ってくる内部CCRからの信号を捉える必要があることから、回転チョッパー遮断部ではなく透過部でレーザーを発射するような仕組みとしている。内部CCR反射光とレーザー発射に伴う強烈なノイズ光は、送信アッテネータと受信アッテネータでそれぞれ減衰されるため、PMTに強信号が入ることはない。

#### 4.5 自動制御ソフトウェア WSRS

レーザー測距装置を制御するソフトウェアWSRSは、Ver.9からキロヘルツレーザー対応のVer.10へ更新した。基本的なキロヘルツレーザーに必要な制御と、SVRとRGGとの連携機能に加え、ユーザインターフェイス部が修正された。

具体的には、測距モードの表示内容が変更され

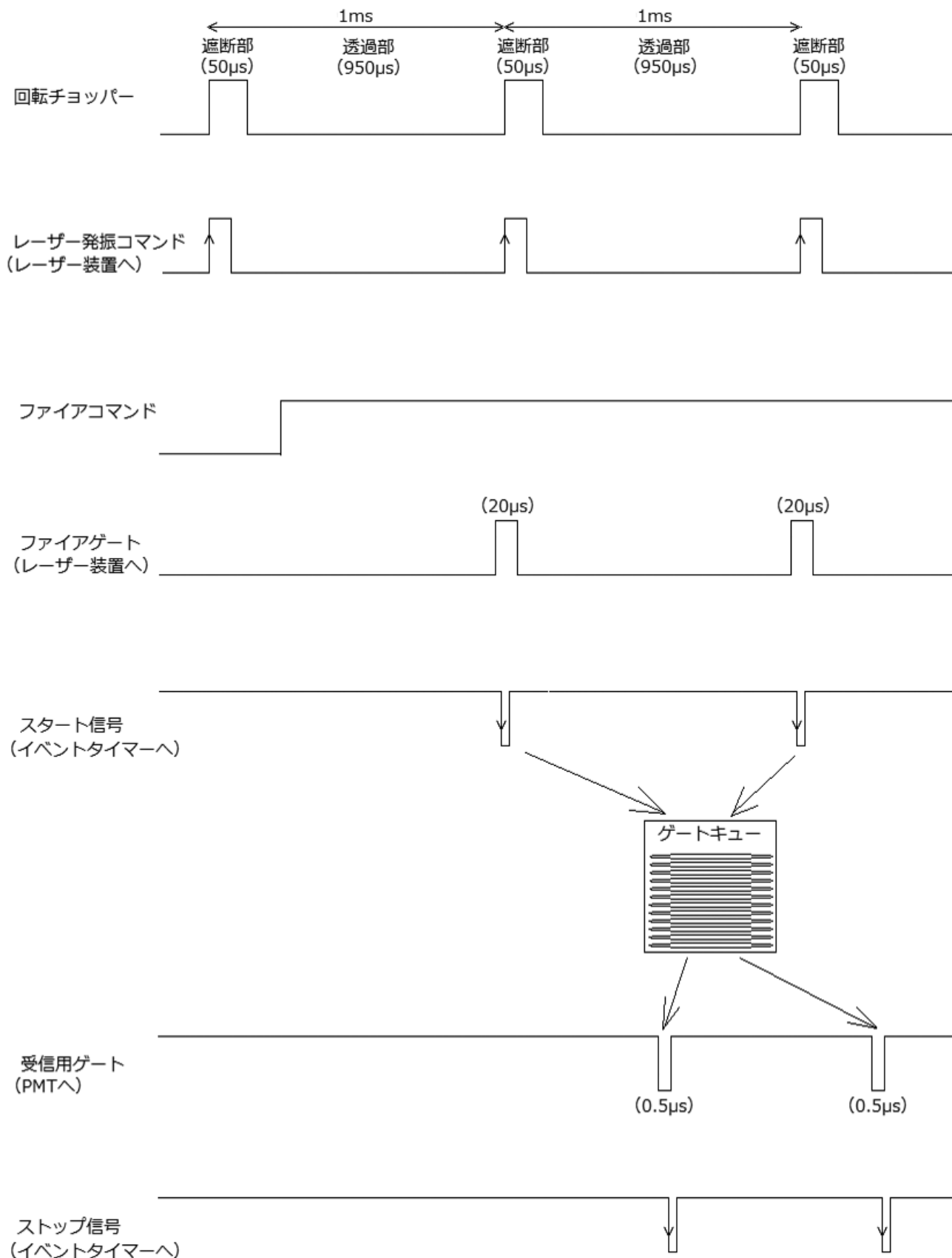


Fig. 1. Timing diagram of the new laser system

図 1. 各信号のタイミングチャート



Photo 5. A snapshot of the tracking mode of WSRS  
写真5. WSRS 測距モード画面

た. 従来のように全ての測距結果の O-C (実測値と計算値の差分) の数値を画面に出す仕様のままでは, 観測者も 1 kHz の表示に追いつかず情報を把握することが困難である. このため画面上には間引きした測距データが表示される. ただ, これだけでは傾向がつかみにくいことから, 測距データの O-C についてヒストグラムとヒットチャートを表示させ, ノイズに埋もれた信号も容易に判別できるようにした (Photo 5).

データ処理モードにも修正が加わった. 従来のままでは, 約 200 倍に膨れあがった取得全データから衛星からの反射光 (リターン) とノイズの分別作業を行うのは時間が掛かり, 職員の負担も増大することから二段階に分けて処理する機能を追加した. まず間引いたデータで職員がノイズ除去作業を行い, 平滑処理する. 次にその処理結果を基にコンピュータが自動で取得全データのノイズ除去を行い, 平滑処理する. この二段階処理より, 大量のデータでも比較的容易に処理ができるようになった.

## 5 観測と運用

本改修と同時期に望遠鏡区画を含む施設改修を行っていたことから, 新レーザーによる本格運用は 2019 年 5 月から開始した. 改修前後のデータ比較表は Table 2 のとおり. Ajisai, Lageos (1, 2), 低高度測地衛星 (LEO) 別にそれぞれ, 2018 年と 2019 年の同時期 3 ヶ月間における取得パス

Table 2. Summary of observation data with old (May to July 2018) and new (May to July 2019) laser system. LEO (Low Earth Objects) denotes Starlette, Stella, Larets and LARES.

表 2. レーザー装置改修前後の衛星別観測データ一覧表

LEO は Ajisai を除いた低高度測地衛星 (Starlette, Stella, Larets, LARES) をまとめたもの.

Ajisai	pass	return/pass	NP/pass	RMS/pass
2018. May~Jul.	71	645. 4	17. 6	12. 1
2019. May~Jul.	38	1886. 1	13. 3	28. 7
Lageos-1/2	pass	return/pass	NP/pass	RMS/pass
2018. May~Jul.	73	509. 6	12. 2	15. 3
2019. May~Jul.	33	410. 8	7. 8	14. 4
LEO	pass	return/pass	NP/pass	RMS/pass
2018. May~Jul.	87	212. 7	9. 4	8. 4
2019. May~Jul.	51	626. 3	7. 8	9. 9

数, 1 パスあたりの平均リターン数, 平均ノーマルポイント (Sinclair, 1997) 数, 平均 RMS (mm) を示している. 発振回数の増加により 1 パスあたりのリターン数が大幅に増加し, パルス幅の変化に伴う精度変化がみられる.

Ajisai についてはパルス幅の変化以上に測距精度が劣化しているとみられ, いわゆる target signature 効果 (大坪・横田, 2018) の可能性も考えられるところ, 今後原因を究明していく必要がある.

現在のところ, 以前のレーザー装置と比べ 1 パルスの出力が小さくなったことにより, ノイズとの切り分けが上手くいかず特に日中の観測が非常に困難となっている. また夜間であってもノイズが多いため, データ処理に多くの時間を割かざるを得ない状況である. しかしながら, レーザー装置が更新されたことで, 有機溶剤の交換などメンテナンスが不要となったことにより安全性が向上し, レーザー装置の操作がソフトウェア制御となるなどこれまで煩雑であった手順や操作が非常に簡略化された.

## 6 おわりに

下里水路観測所で SLR 観測を開始して 37 年, これまで長期にわたって安定したデータ提供を行っている. 国際レーザー測距事業 (ILRS ;

International Laser Ranging Service) に参加する世界の観測局を見ても、1980年代前半から一つの地点で継続して運用している例は多くない(大坪他, 2013)。

この長期的に安定した観測を継続するためには、日々の観測装置のメンテナンスに加え、経年劣化かつ陳腐化していく装置を最新維持していくことが必要不可欠であり、これまでもレーザー測距装置の各構成部品を少しずつ改修することによって、観測を継続することに成功してきた。今回のキロヘルツレーザーの導入は運用面での変化をもたらし、いくつかの課題を抱えるものの、観測は成功し新装置での観測に移行できている。

今後も引き続き安定した観測を続け、日本そして世界の基準座標系の構築へ貢献していきたい。

### 謝 辞

歴代の下里水路観測所職員、観測機器に携わられた民間の技術者の方々、解析をはじめとする技術サポートをしてくださった国内外の方々、予算や組織のために尽力いただいたの方々、そして日本のSLRプロジェクトに関わられた全ての方々へ、数多くの方々の下里が支えられていることに深く感謝し、厚く御礼を申し上げます。

### 文 献

A. T. Sinclair /RGO (1997) Data Screening and Normal Point Formation, [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data\\_and\\_products/data/npt/npt\\_algorithm.html](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data_and_products/data/npt/npt_algorithm.html)

GGOS, GGOS Japan, <http://www.ggos.org/en/ggos-affiliates/ggos-japan/>, 参照 2019年9月13日

大坪俊通・中村信一・佐藤まりこ・國森裕生 (2013) 衛星レーザー測距をとりまく世界の情勢と日本の位置, 測地学会誌, 59-3, 79-86

大坪俊通・横田裕輔 (2018) グローバル測地技術としての衛星レーザー測距: 現状と課題, 測地学会誌, 63-2, 75-79

鈴木充広・成田誉孝・緒方克司・山田圭佑 (2010)

下里水路観測所の人工衛星レーザー測距装置の現況と諸元, 海洋情報部研究報告, 46, 116-124

### 要 旨

下里水路観測所が実施する人工衛星レーザー測距 (SLR) 観測に使用する「レーザー測距装置」は、2009年度に完了した機器更新から約10年が経過し老朽化が進んだことから、2018年度にレーザー測距装置を更新した。新しいレーザー装置にはいわゆるキロヘルツレーザーを導入し、発振周波数が従来の5 Hzから最大1 kHzに上がり、観測データ量が飛躍的に増加した。また、安全性も向上し、保守管理も容易になった。これに併せた制御装置等の改修により、SLR観測の運用時の操作性も向上した。これらの改修により、全球統合測地観測システム (GGOS) 局である下里水路観測所が引き続き国際レーザー測距事業 (ILRS) に貢献することが期待できる。