

## 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

鈴木充広，成田誉孝，緒方克司，山田圭佑：下里水路観測所

### The present status and specification of the satellite laser ranging system at the Shimosato hydrographic observatory

Michihiro SUZUKI, Yoshitaka NARITA, Katsushi OGATA and Keisuke YAMADA: Shimosato hydrographic observatory

#### Abstract

The Shimosato hydrographic observatory has been carrying out for satellite laser ranging observation since 1982. In 2009, the satellite laser ranging system thoroughly replaced. In this report, we overview the present status and specification of the upgraded system.

#### 1 はじめに

第五管区海上保安本部下里水路観測所は，我が国の領海等管轄海域の確定と海洋測地網の構築及び精度維持を目的として1982年以来，人工衛星レーザー測距（SLR：Satellite Laser Ranging）観測を行っており，海上保安庁が刊行する海図の経緯度の基準となる世界測地系における下里の位置を精密に決定してきた。下里水路観測所において継続して得られた観測データは国際レーザー測距事業（ILRS：International Laser Ranging Service-Pearlman, Degnan and Bosworth, 2002）の枠組みの中で国際データセンターに送付され，国際地球基準座標系（ITRF：International Terrestrial Reference Frame-Boucher, Altamini and Sillard, 1999）の構築・維持にも大きく貢献している。

下里水路観測所はこのように長年にわたって国際的なSLR観測局の一つとして観測を行ってきた。下里水路観測所のSLR装置は，2009年8月まで1982年の観測開始時に導入されたものが使われ続けてきた。この間，幾多の改修改良が行われたことにより27年前の装置ではあっても現在の国際的なSLR観測

の水準での観測を続けることが出来た。しかし装置全体の老朽化は否めず，近年は経年劣化によると考えられるトラブルが頻発したことから，2007～2009年の約3年を掛けて老朽化の著しい部分の改修作業を行ってきた。この改修作業が2009年11月に完了したので，今改修によって従来の装置から大きく変わったSLR装置について更新された箇所を中心として紹介する。

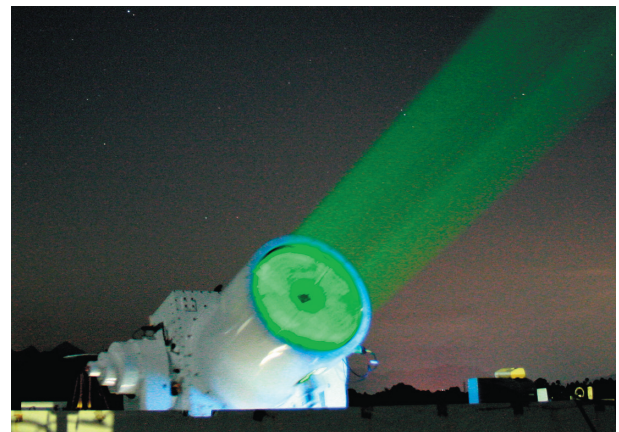


写真1 改修後のSLR用望遠鏡  
Photo. 1 The telescope of the Shimosato SLR system after the upgrade.

## 2 改修の概要

SLR装置は数多くの機器、ソフトウェアによって構成されており、その全てを同時に作り直すことは困難であること及び、改修期間であってもできる限り観測を継続するという観点から、2007年6月から2009年11月末までの約2年6ヶ月の時間をかけて順次、各部の機器、ソフトウェアの改修を行うこととし、改修中もSLR観測を実施した。

改修作業は、大きく2007年の改修作業と2008、2009年の改修作業とに分けることができる。

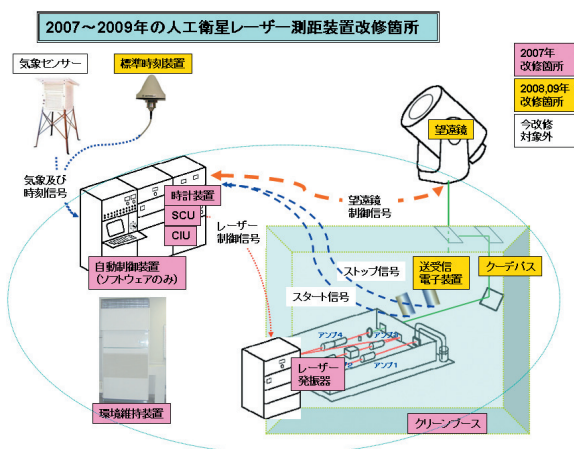
### (1) 2007年の改修

2007年には特に老朽化の激しいレーザー発振器及び電子装置の改修を主にを行い、2008年3月末までに作業を完了した。改修を行った主な装置は以下のとおりである。

- ・レーザー発振器
- ・時計装置
- ・システムコントロールユニット (SCU: System Control Unit)
- ・コンピュータインターフェースユニット (CIU: Computer Interface Unit)
- ・自動制御装置ソフトウェア
- ・環境維持装置 (クリーンブースを含む)

### (2) 2008、2009年の改修

2008、2009年の改修は主に光学系と送受信光の検



第1図 人工衛星レーザー測距装置の改修箇所  
Fig. 1 The upgrade of the SLR system. Red and yellow parts were upgraded in 2007 and 2008-2009, respectively.

知器について行い、2009年11月末までに作業を完了した。改修を行った主な装置は以下のとおりである。

- ・望遠鏡 (光学系及び鏡筒部)
- ・クーデバス
- ・送受信電子装置 (受信部)

(1)(2)の改修の間の、2008年4月～2009年8月の期間は、改修前後の装置が入り混じった状態ではあったが、SLR装置が稼働する状態であったため、SLR観測を実施した。

## 3 改修後の制御室内

改修作業終了後の制御室内の器機配置の状況は写真2のとおりである。制御室はSLR観測時に観測者が自動制御装置を介して望遠鏡での人工衛星追尾やレーザー光発射等の制御を行う部屋である。

自動制御装置、SCU、CIU、時計装置等、主に望遠鏡やレーザー発振器を制御するための電子装置は写真2の左側に設置されている。

写真2の右側にはクリーンブースの中に納められたグレーのレーザー発振器本体と乳白色 (天板は黒色) のレーザー光軸監視装置が並ぶ。レーザー光軸監視装置の奥に見える黒色の装置は送受信電子装置である。クリーンブースの手前に見える箱形の二つの装置は、レーザー発振器に電力を供給するレーザー発振器用パワーユニット (右) 及びキャパシターバンク (左) である。クリーンブースの奥、垂

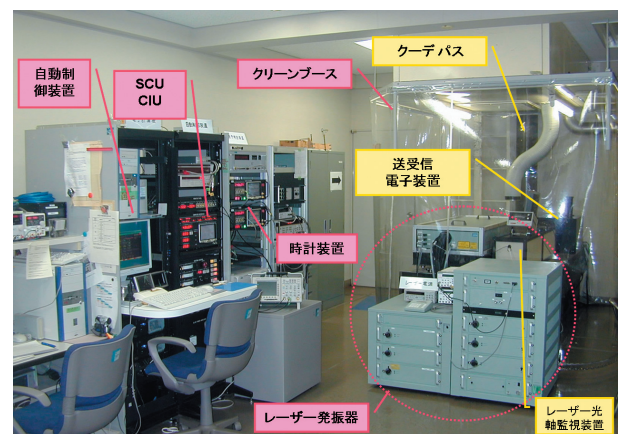


写真2 改修後の制御室内  
Photo. 2 The SLR system in the control room after the upgrade.

直に伸びる黒色の円筒形の構造物は望遠鏡へ送信用レーザー光を送り出し、また望遠鏡で受信した衛星からの反射光を送受信電子装置に導く光学系、クーデパスの一部である。

図中の装置名称を示した吹き出しの色の違いは、それぞれの装置が改修された年の違いで、赤色は2007年の改修を、黄色は2008、2009年の改修を表している。

レーザー発振器は温湿度の変化に敏感であり、また塵や埃は微量であっても故障の原因となることから、制御室全体は環境維持装置によって常に気温 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\% \pm 10\%$ 、防塵フィルターによってクリーンルーム化した環境に保たれている。ただし、観測者の出入りに伴って外部から持ち込まれる塵埃の問題があるため、レーザー発振器本体はさらに陽圧化したクリーンブースで覆うことで、塵埃等による故障の予防を図っている。

SLR観測を行う場合、観測者はこの制御室で、自動制御装置に表示される情報からそれぞれの装置の状態をモニターし、必要に応じて設定値の変更などを行うことで各装置をコントロールすると共に、人工衛星からの反射光の有無を頼りに人工衛星の搜索と追尾を行う。

#### 4 改修された主な装置

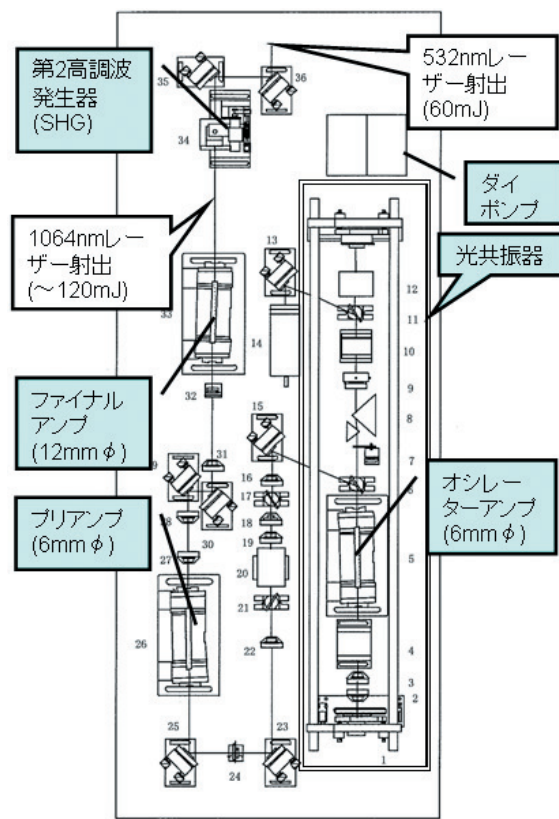
##### (1) レーザー発振器

図2に新しいレーザー発振器の部品配置図を、写真3には実際のレーザー発振器内部の写真を示した。図2、写真3を見比べれば、部品配置図の各部品がレーザー発振器の中にどのように実装されているかがわかる。写真3には実際のレーザー発振器内で増幅され、射出されるまでのレーザー光の光路を赤色及び緑色の矢印線で示した。ここで矢印の向きはレーザー光の進む方向を、線の色と線種はレーザー光の波長と強さをそれぞれ表している。色及び線種の示す内容は次のとおり。

- ・ 線色 (レーザー光波長)
  - 赤色：1064 nm 緑色：532 nm
- ・ 線種 (レーザー光強度)
  - 点線 < 細実線 < 太実線

第1表 レーザー発振器の主な変更点  
Table 1 Comparison between new and old laser generators.

項目	旧装置	新装置	備考
発信周波数	4Hz	5Hz	
出力	120mJ	60mJ	1パルスあたり
パルス幅	<100ps	< 20ps	
アンプ数	4	3	オシレータ含む
SGH 温調	無	有	
SHG 調整	手動	遠隔手動	
アンプ冷却	循環式	独立式	共に水冷式



第2図 レーザー発振器部品配置図  
Fig. 2 The laser generator.

第1表にレーザー発振器の主な変更点を示す。新レーザー発振器は、従来の発振器に比べ1パルスあたりのエネルギーは1/2だが、これはパルス幅が短くなったためで発光している間のエネルギーを単位時間に換算した尖頭値では倍以上となる。

また、比較表の数値としては表れないがSHGに温調装置が取り付けられたことや、それぞれのアンプを独立して冷却する方式となったことなどから

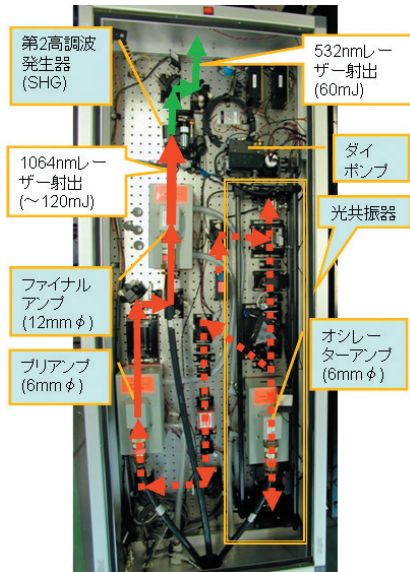
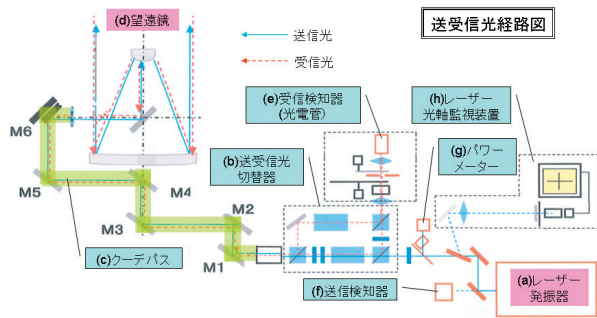


写真3 レーザー発振器内部  
Photo. 3 The photograph of the laser generator.



第3図 送受信レーザー光経路図  
Fig. 3 The upgraded SLR optical schematic showing transmit and receive optics.

レーザー発振の安定度は格段に向上している。

(2) 送受信光学系

今回の改修で、従来の送受信別光学系から送受信同一光学系に切り替わり、レーザー光がたどる光路が複雑になった。その様子を模式的に示したものが第3図である。

図中青矢印線で示したものが送信光の経路、赤矢印破線で示したものが受信光の経路である。

送受信光が通過する装置を順に示せば次のとおりである。

- |             |           |
|-------------|-----------|
| (送信光)       | (受信光)     |
| (a) レーザー発振器 | (d) 望遠鏡   |
| ↓           | ↓         |
| (b) 送受信光切替器 | (c) クーデパス |

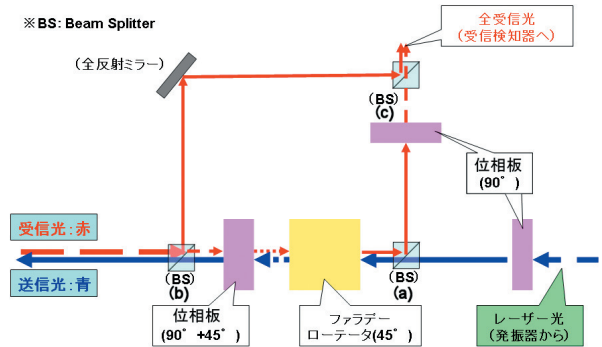
- |           |                 |
|-----------|-----------------|
| (c) クーデパス | (b) 送受信光切替器     |
| ↓         | ↓               |
| (d) 望遠鏡   | (e) 受信検知器 (光電管) |

送受信光とも、望遠鏡とクーデパスは共通の経路としている。その光の経路を切り替える装置が、送受信光切替器である。

(2-1) 送受信光切替器

送受信光切替器はレーザー発振器で作られたばかりのレーザー光が強く垂直偏光している点に着目して、レーザー光の進行方向と偏光方向の違いによって光の経路を切り替える装置である。

送受信光切替器内の光路の模式図を第4図に、実際の送受信光切替器内の光学部品の配置状況を写真4に示した。第4図、写真4の中のBSはビームスプリッター (Beam splitter) と呼ばれる光学素子で水



第4図 送受信光切替器内部の光路図  
Fig. 4 The optical beam separator. Blue and red lines show transmit and receive laser light, re-spectively.

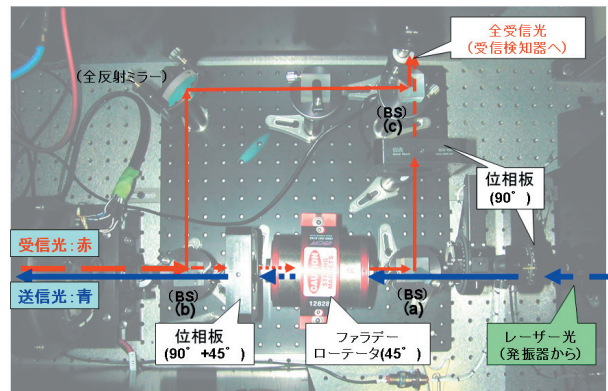


写真4 送受信光切替器内部写真  
Photo. 4 The photograph of the optical beam separator.

平偏光の光は透過し、それ以外の光は反射する働きをしている。送受信光切替器は位相板及びファラデーローテータと呼ばれる光の偏光面の角度を制御する光学素子とBSを使い切替器内を通過する光の光路を切り替えている。位相板はそこを透過する光の偏光面を $90^\circ$ 、 $45^\circ$ のように一定角度、回転させる複屈折光学素子である。ファラデーローテータは磁場をかけた物質の中を磁場に平行な向きに通り抜ける光の偏光面が回転する現象（ファラデー効果）を利用した光学素子である。両者の大きな違いは偏光面の回転方向が光の進行方向によって変化するかどうかである。

第4図で考えると、装置に対する光の偏光面の回転の向きは、位相板では図の左に向かう光と右に向かう光とでは反対となるがファラデーローテータでは変化しない。このため図 (a), (b) 間を通過する送信光（左向き）と受信光（右向き）の偏光面の角度の変化はそれぞれ次のようになる。

- ・送信光 ((a)→(b)) :  $45 + (45 + 90) = 180^\circ$
- ・受信光 ((b)→(a)) :  $-(45 + 90) + 45 = -90^\circ$

このように同じ経路をたどる光でもその進行方向によって偏光面の回転角が変わる。この仕組みとBSを巧みに配することによって、送受信光切替器は進行方向の異なる強力な送信光と微弱な受信光の光路を切り替えている。

### (2-2) 光軸監視装置

光軸監視装置（写真5）は、レーザー発振器からのレーザー光が正しい位置と角度で送出されている

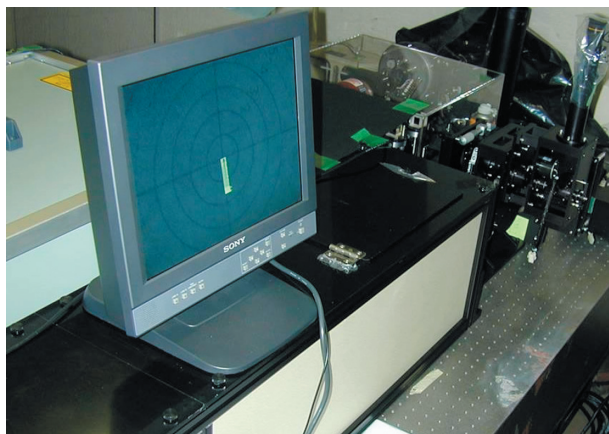


写真5 レーザー光軸監視装置  
Photo. 5 The laser beam axis monitor.

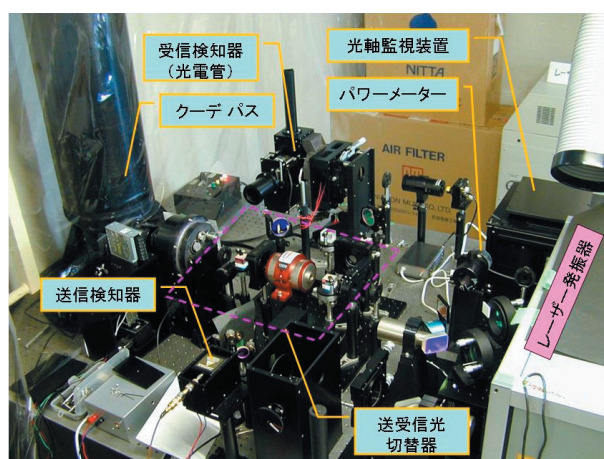


写真6 光学ベンチ上の配置状況  
Photo. 6 The optical bench.

かを監視する装置で、レーザー発振器本体と並んで設置されている。

この装置は今改修から新たに導入されたもので、この装置を使うことでレーザー発振器の調整後に起こるレーザーの光軸のずれを容易に確認、修正できるようになった。

### (2-3) 送受信電子装置他の配置状況

写真6は、送受信電子装置等の配置の状況を写したものである。レーザー発振器のレーザー送出口とクーデパス入口の間に、多数の検知器が並んでいる。現在はそれぞれの装置がケースに収められている（写真6は仮組状態）。

送受信電子装置の中核を為すレーザーの送信検知器と受信検知器（光電管）が送受信光切替器を挟むように設置されている。受信検知器は従来は望遠鏡に直接取り付けられていたが、今改修で温度調整された室内に設置されたことで、測距データの安定化が図れるものと期待している。

### (3) 望遠鏡（鏡筒部）

今回の改修で目に見えて大きく変化した部分が望遠鏡鏡筒部である。従来の望遠鏡にはレーザー光を送出するための送信用望遠鏡（口径170 mm）と人工衛星からの反射光を捉えるための受信望遠鏡（口径600 mm）の二つの望遠鏡が並んだ送受信別光学系であった。これを今回の改修によって、送受ともに同一の望遠鏡を使う送受信一体型の望遠鏡（口径750 mm）に変更した。

新望遠鏡鏡筒部の寸法，光学的な性能については，第2表のとおり。

なお，望遠鏡架台部は今改修には含まれておらず，従来のものを継続して使用している。

第2表 新望遠鏡の諸元

Table 2 The specification of the new telescope.

鏡筒部寸法		
鏡筒部全長	1943.2mm	突起部除く
(前部長)	1232.0mm	〃
(後部長)	711.2mm	〃
鏡筒部最大幅	1000.0mm	〃
鏡筒部最大高	1000.0mm	〃
主望遠鏡光学系		
光学系形式	ナスミス	※カセグレン
有効口径	750mm	
合成焦点距離	7470mm	F9.96
分解能	< 1秒角	視野中心
主鏡有効口径	750mm	放物面鏡(凹)
主鏡焦点距離	1500mm	F2.0
副鏡有効口径	180mm	双曲面鏡(凸)
532nm 光反射鏡	80×120mm	平面鏡
鏡面精度	< $\lambda/6$	$\lambda = 532\text{nm}$
照準確認用望遠鏡		
光学系形式	マクストフ	
有効口径	80mm	
合成焦点距離	960mm	F12.0

第5図は新望遠鏡鏡筒部の横断面図である。

光学系はナスミス式である。ただし，ナスミス鏡には532 nmのレーザー光は反射し，他の波長の光は透過する特殊なタイプの鏡を使用したため，レーザー光以外はナスミス鏡を透過するので，カセグレン式といえる（ナスミス鏡は取り外しが可能な構造になっているため，取り外せばレーザー光もカセグレン式となる）。

第5図 (a) はクーデパスの終端でここから送信用のレーザー光が望遠鏡鏡筒内に導かれ，ナスミス鏡に反射し，直径750 mmの緑色の光束となって (b) から送出される。

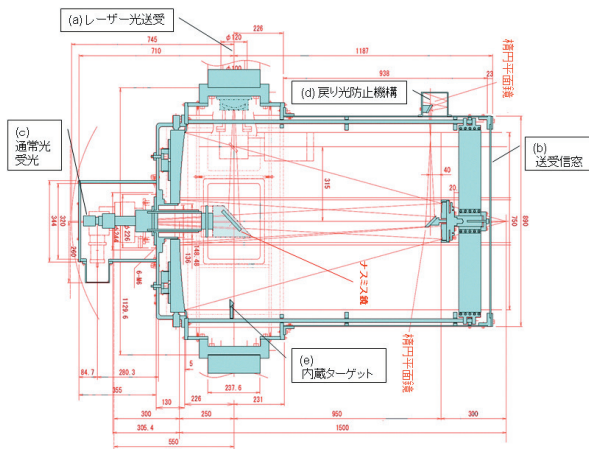
人工衛星からの反射光は (b) を通り，集光されてナスミス鏡で反射され (a) を通ってクーデパスへ導かれる。一方，532 nm以外の波長の光はナスミス鏡を透過して (c) で焦点を結ぶ。(c) には通常 CCD カメラが取り付けられており，光る衛星の観測や望遠鏡の調整作業に利用されている。

このように主望遠鏡の可視光像を直接確認出来る機構は従来の望遠鏡にも存在したが，その可視光の透過率は極めて低く，北極星等の輝星でもその視認が困難だったことに比べ，新望遠鏡の可視光の透過率は高く，結像の状態も良いことから6～7等星クラスの暗い恒星でも容易に確認できるようになり，恒星を使って望遠鏡の姿勢制御パラメータを取得するスターキャリブレーション（写真9）などの作業の効率が格段に良くなった。

なお，(c) は通常は制御室内に設置されている受信光検知器（光電管）の取り付けが可能ないように制御室内の受信光検知器の取り付け部と同じ形状・構造に作られている。これはクーデパス等に障害が生じた場合にも観測が継続できるよう配慮したものである。

望遠鏡鏡筒の筒先にあたる (b) には，望遠鏡内の光学系等を塵埃や結露から保護する目的で平面ガラスが取り付けられている。写真7の望遠鏡写真で鏡筒の先端部に空の色を写して暗青色に見える部分はその平面ガラスである。

(d) は送信レーザー光の戻り光防止機構である。これは，送信用の強力なレーザー光が光学系を逆に



第5図 新望遠鏡横断面図

Fig. 5 New telescope which transmit and receive laser light.



写真7 新望遠鏡前面写真  
Photo. 7 New telescope (front side).



写真9 スターキャリブレーション  
Photo. 9 Star calibration.



写真8 新望遠鏡背面写真  
Photo. 8 New telescope (rear side).

たどって受信電子装置等を破壊することのないように取り付けられたものである。仮に図の光学系から(d)とこれに関連する二枚の楕円平面鏡が無ければ、送信用に送出された強力なレーザー光のうち、望遠鏡の副鏡中心(送受信光学系の光軸上にある部分)で反射する光は、送信光学系を逆にたどって送受信光切替機構や、受信電子装置に達することになる。送信光は大変強力な光であるためこのような戻り光が発生すると、微弱な衛星からの反射光を検知するために作られたデリケートな受信系の器機を破損させるおそれがあることから、それを防ぐために(d)が設けられた。写真7の望遠鏡写真の鏡筒前部下部に見える白色の小さな立方体の箱状のものが第5図(d)に相当するものである。

第5図(e)には小型の鏡(コーナキューブ)が取り付けられており、従来は数百m~数km離れた地上物標に固定した鏡を使って衛星測距観測前後に行っていたキャリブレーション観測を、望遠鏡本体のみで行えるようになった。

写真8は新鏡筒の背面の写真である。写真で判るとおり背面には4箇所に可動式のバランスウェイトが設置されており、観測に必要な各種器機の取り付け、取り外しを行ってもこのバランスウェイトの位置調整によって容易に鏡筒部のバランスをとることが可能である。

望遠鏡背面中央に取り付けられた立方体の箱状のものは、この鏡筒のカセグレン焦点(第5図(c))にあたる箇所です。通常はレーザー光以外の光が焦点を結んでおり、CCDカメラによってその映像を捉えている。

新鏡筒を載せて人工衛星を追尾する架台部については、従来から使用している架台をそのまま利用しているが、受信電子装置の取り付け場所を鏡筒本体から制御室に移したことで、それまで鏡筒部から架台部を通して制御室内のSCU等とを結んでいた信号ケーブルの数が減少し、架台の動作が以前より滑らかになった。

#### (4) 自動制御装置及び周辺器機

自動制御装置はSLR観測におけるほとんどあらゆる部分に関わる装置である。その本体は制御コンピュータと呼ばれるコンピュータ本体と、周辺器機

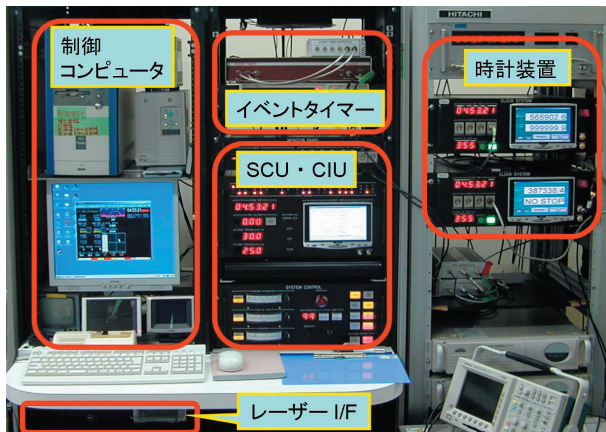


写真10 自動制御装置関連機器

Photo. 10 Equipments related to automatic control unit.

を接続するための複数の専用インターフェースボード及び、制御用ソフトウェアによって構成されており、専用インターフェースボードから先には、SCU, CIU, レーザーI/Fユニット, 気象センサー, イベントタイマーといった器機が接続されている。

今改修で改修, 更新されたもののうち自動制御装置に関連するのは次のとおり。

- ・ソフトウェア (WSRS Ver 3.0)
- ・SCU (望遠鏡全般の制御)
- ・CIU (時計装置, 送受信装置のデータ取得)
- ・レーザーI/Fユニット (レーザー発振制御)
- ・イベントタイマー (レーザー往復時間計測)

SCU, CIU, レーザーI/Fユニットは, 旧装置の機能を置き換えたもので, 操作性や安定性は増しているが, 基本的な性能が変わったわけではない。

対してイベントタイマー及び制御用ソフトウェアは従来のものから変更された点がある。

(4-1) イベントタイマー (A 032-ET)

イベントタイマーはレーザー光の往復時間を計測

第3表 レーザー光飛翔時間計測機器の新旧比較  
Table 3 Comparison between new and old time interval measurement equipments.

項目	旧機種	新機種
モデル名	SR620	A032-ET
分解能	4ps	1ps
精度	30ps	7-9ps

するための装置である。従来はタイムインターバルカウンタSR 620を用いて測定していた。SLR観測は, レーザー光の往復時間によって人工衛星までの距離を測定する観測なので, その精度が直接観測精度に影響する重要な装置である。従来のタイムインターバルカウンタとイベントタイマーの分解能 (Resolution) 及び精度 (Precision) は第3表のとおり。どちらも大幅に向上している。

(4-2) ソフトウェア (WSRS Ver 3.0)

WSRSはかつて海洋情報部が行っていた一次基準点観測に使用された可搬式レーザー測距装置 (HTSLR-1-Sasaki, 1988) の制御ソフトウェアSRSをベースにして作られた国産のSLR観測用制御ソフトウェアである。現在のバージョンはWindows 2000または, Windows-XP上で動作するアプリケーション



写真11 WSRS (衛星測距モード)

Photo. 11 WSRS (Satellite ranging mode).

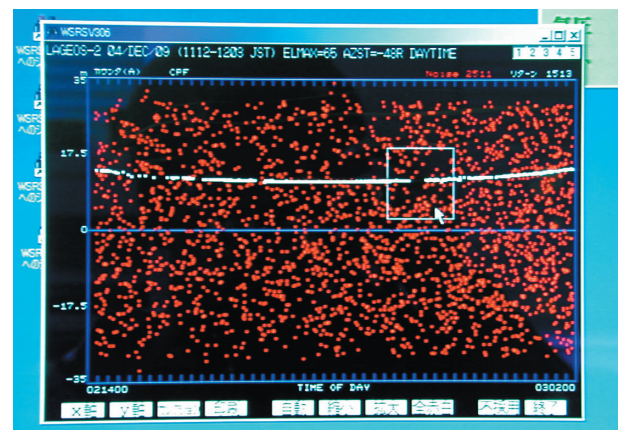


写真12 WSRS (データ処理モード)

Photo. 12 WSRS (Data processing mode).



となっている（ただし機器制御には専用のインターフェイスボードが必要）。

今回導入したVer 3.0は、前述したイベントタイマーの制御が可能で、ILRSが配布している最新の軌道要素CPF (Ricklefs, 2006) に対応している。また、精度向上のために下里で開発されたTTS法及びCMD法（黒川隆司・福良博子・久間裕一・井城秀一・田中郁男・鈴木充広・長岡継・江川有聡, 2007）にも対応したソフトウェアである。

## 5 おわりに

3年近い時間を掛けた改修で下里水路観測所のSLR観測装置はその大部分が新しい装置に置き換わった。それぞれの装置の性能は確実に向上しているはずだが、引き渡しを受けたばかりの現時点では、旧装置での観測データに精度等の面で追いついていない。

それぞれの装置をどのように組み合わせ、どのように設定するべきか、これから試行錯誤を繰り返して、一刻も早く旧装置のデータに追いつき、そして追い越せるように努力と工夫をしてゆこうと職員一同考えている。

## 参 考 文 献

- Pearlman, M.R., Degnan, J.J., and Bosworth, J.M. :  
“The International Laser Ranging Service”,  
Advances in Space Research, Vol.30, No.2,  
p.135-143, July 2002, DOI : 10.1016 ; S 0273-  
1177 (02) 00277-6.
- Boucher, C., Altamini, Z., and Sillard, P. : The 1997  
International Terrestrial Reference Frame  
(ITRF 97), IERS Technical Note 27, Observa-  
toire de Paris, Paris, 1999.
- Sasaki, M. : Completion of transportable laser rang-  
ing station (HTLRS), Data Report of Hydro-  
graphic Observations, Series of Satellite Ge-  
odesy, No.1, p.59-69, (1988)
- Ricklefs, R.L. : Consolidated Laser Ranging Predic-  
tion Format Version 1.01, (n.d.) Retrieved  
from [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/cpf\\_](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/cpf_)

1.01.pdf, (2006)

黒川隆司・福良博子・久間裕一・井城秀一・田中郁男・鈴木充広・長岡 継・江川有聡：下里SLR観測の新手法，海洋情報部研究報告，43，37-43，（2007）