

NICTにおけるSLR関連調査研究

国立研究開発法人 情報通信研究機構
ワイヤレスネットワーク研究所 宇宙通信システム研究室

宇佐美 敬之
中園 純一, 久保岡 俊宏, 斉藤 嘉彦, 辻 宏之

本発表の構成

1. 令和6年のSLR関連活動報告

- 光地上局の位置づけ
- 今年度試験観測データ取得状況
- 現在のSLRシステム概要
- 今後の展望

2. NICTにおける光地上局整備状況

- 光地上局テストベッド「HICALI-GATE」の全体
- 概要案内
- 共同研究や一般ユーザへの有償貸し出し提案
- SLRを光地上局に展開するための技術課題
- NICTの光地上局テストベッド

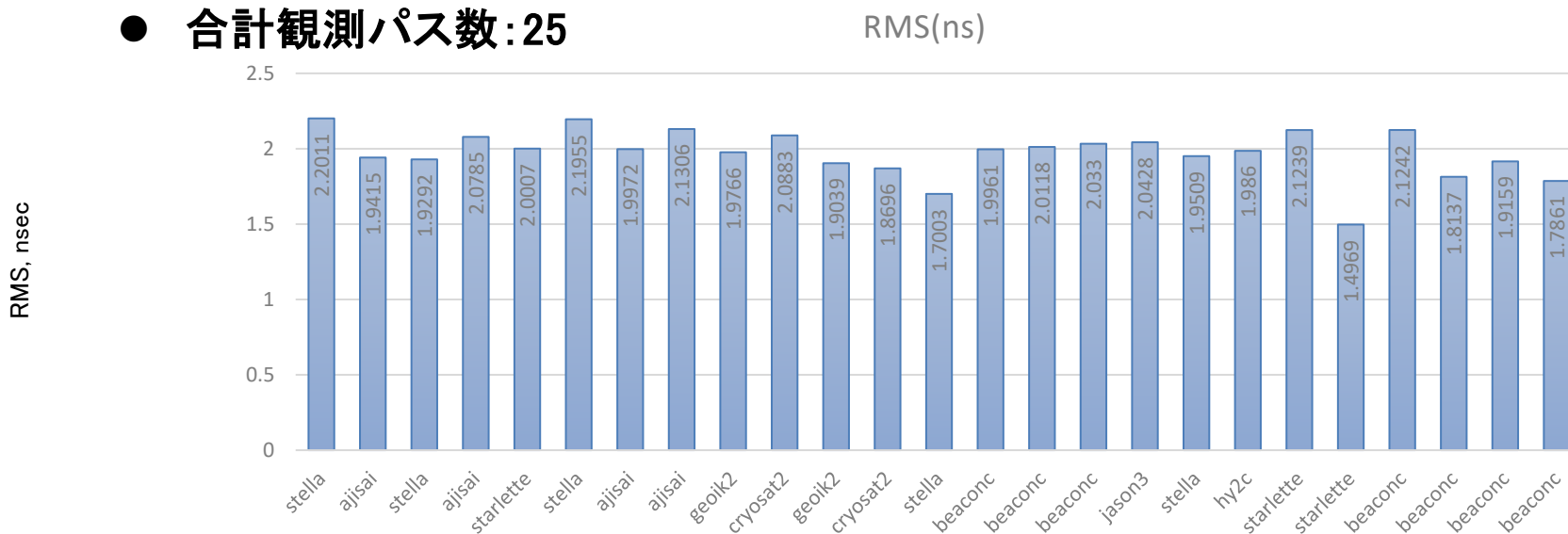
令和6年のSLR関連活動報告

はじめに：光地上局の位置付け

- NICTでは、衛星～地上間の安定した光通信を実現する為に必要な高精度な測距精度技術の研究開発を実施
- 小金井本部に整備している1.5m望遠鏡において、定常的なSLR観測を行い、望遠鏡の健全性を担保し、光通信実験のための軌道情報の正確化を目指しているところ
- 本発表では、**2024年の試験観測データ取得現状と試験観測の統計データ**示し、**NICTにおける地上局の設備状況を踏まえた今後の展望**について紹介する。

試験観測データ取得状況：SURELITEレーザ 10HzによるSLR 試験観測状況

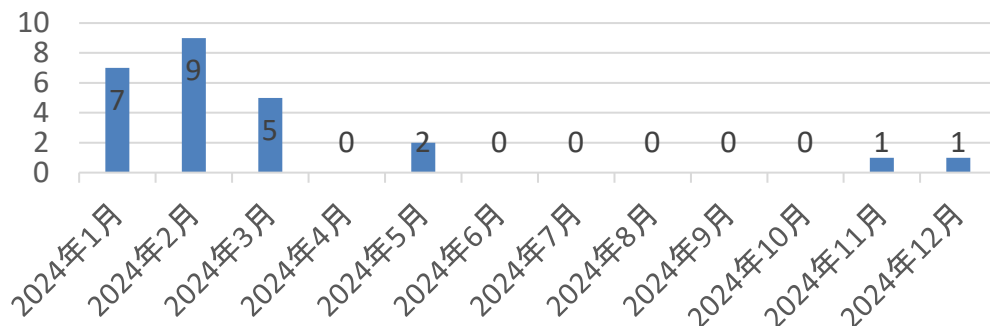
- 観測期間：2024/1/1～2024/12/17
- 合計観測パス数：25



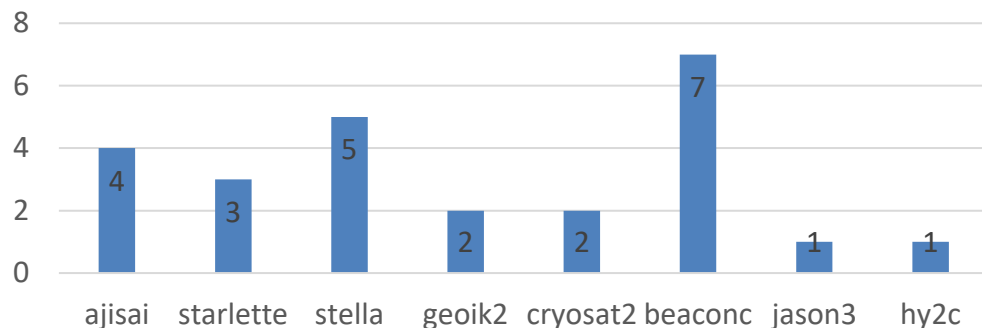
- ピコ秒レーザへ本格的に切り替わるまで10HzSURELITEナノ秒レーザを使用して試験運用中だが、ジッターが大きく、RMSの値も現状大きくなっている。
- 主鏡全体を使用せず、複鏡によるロスを防ぎ光を発振する方式により運用を続けていた。
- ピコ秒レーザを用いたシステムの立ち上げを現在行っており、同時にPLZTシャッターを再度セットアップして、早い繰り返しに対応できるシステムを構築する。

試験観測データ取得状況：SURELITEレーザ 10HzによるSLR 試験観測状況

月別 SLR 実施数



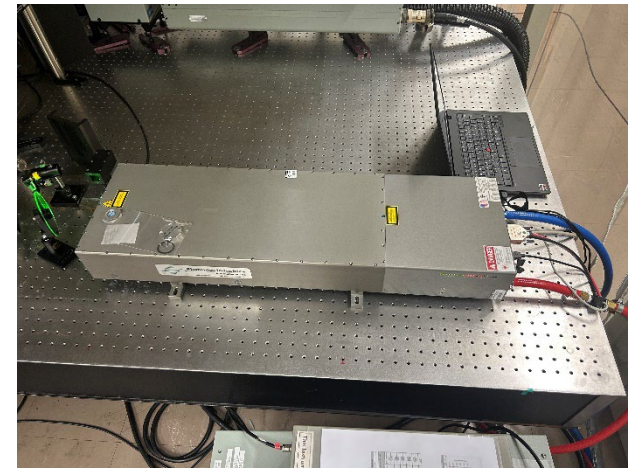
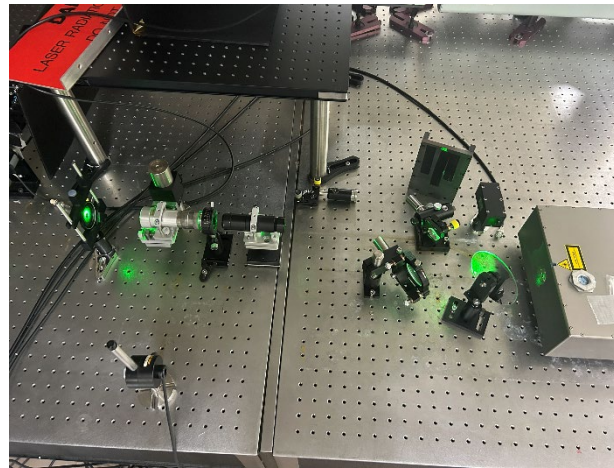
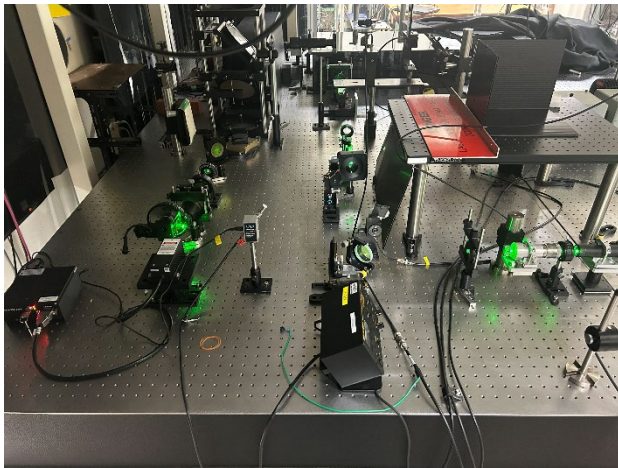
衛星別SLR実施数



参考) 観測データ一覧

Target name	Start time	End time	FR	NP	FR/NP	RMS(ns)
stella	2024/1/9 9:41	2024/1/9 9:46	137	5	27.40	2.2011
ajisai	2024/1/9 9:46	2024/1/9 9:52	897	9	99.67	1.9415
stella	2024/1/9 11:19	2024/1/9 11:25	394	6	65.67	1.9292
ajisai	2024/1/16 9:24	2024/1/16 9:36	3005	24	125.21	2.0785
starlette	2024/1/16 9:36	2024/1/16 9:43	1002	12	83.50	2.0007
stella	2024/1/16 9:52	2024/1/16 10:00	507	11	46.09	2.1955
ajisai	2024/1/25 9:26	2024/1/25 9:39	1177	22	53.50	1.9972
ajisai	2024/2/8 9:03	2024/2/8 9:14	245	3	81.67	2.1306
geoik2	2024/2/8 9:26	2024/2/8 9:34	129	3	43.00	1.9766
cryosat2	2024/2/13 9:48	2024/2/13 9:56	370	11	33.64	2.0883
geoik2	2024/2/15 9:31	2024/2/15 9:37	155	5	31.00	1.9039
cryosat2	2024/2/15 9:46	2024/2/15 9:54	134	5	26.80	1.8696
stella	2024/2/15 9:55	2024/2/15 10:02	100	2	50.00	1.7003
beaconc	2024/2/27 8:29	2024/2/27 8:42	116	5	23.20	1.9961
beaconc	2024/2/27 10:22	2024/2/27 10:36	1997	44	45.39	2.0118
beaconc	2024/2/27 10:22	2024/2/27 10:36	2020	46	43.91	2.033
jason3	2024/3/4 10:04	2024/3/4 10:10	279	5	55.80	2.0428
stella	2024/3/4 10:15	2024/3/4 10:22	187	5	37.40	1.9509
hy2c	2024/3/21 10:44	2024/3/21 10:50	709	7	101.29	1.986
starlette	2024/3/22 9:35	2024/3/22 9:45	678	12	56.50	2.1239
starlette	2024/3/27 9:21	2024/3/27 9:32	191	6	31.83	1.4969
beaconc	2024/5/2 10:01	2024/5/2 10:15	747	25	29.88	2.1242
beaconc	2024/5/17 10:17	2024/5/17 10:30	209	8	26.13	1.8137
beaconc	2024/11/21 8:36	2024/11/21 8:46	694	18	38.56	1.9159
beaconc	2024/12/10 9:37	2024/12/10 9:49	271	7	38.71	1.7861

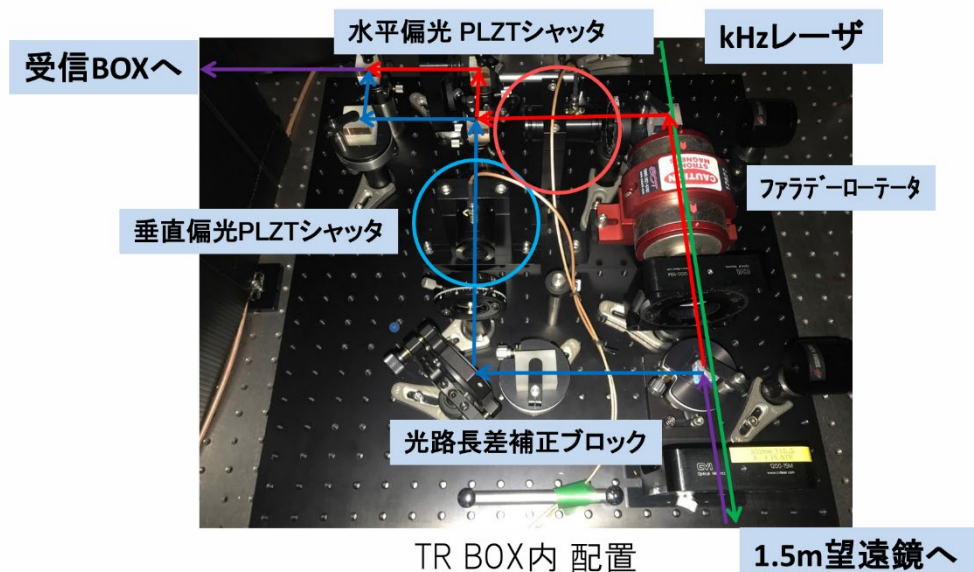
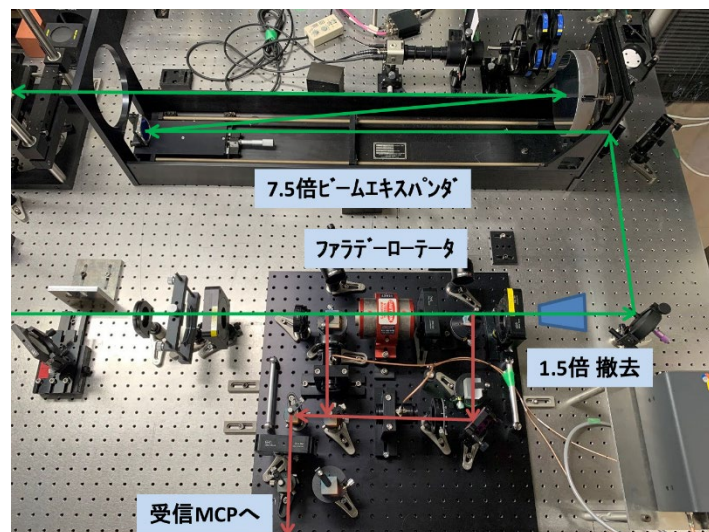
現在のSLRシステムの概要



アライメント用のCWレーザと光軸同期 ← レーザの高さを調整し
ビーム幅を10mm径に調整 ← レーザ出力

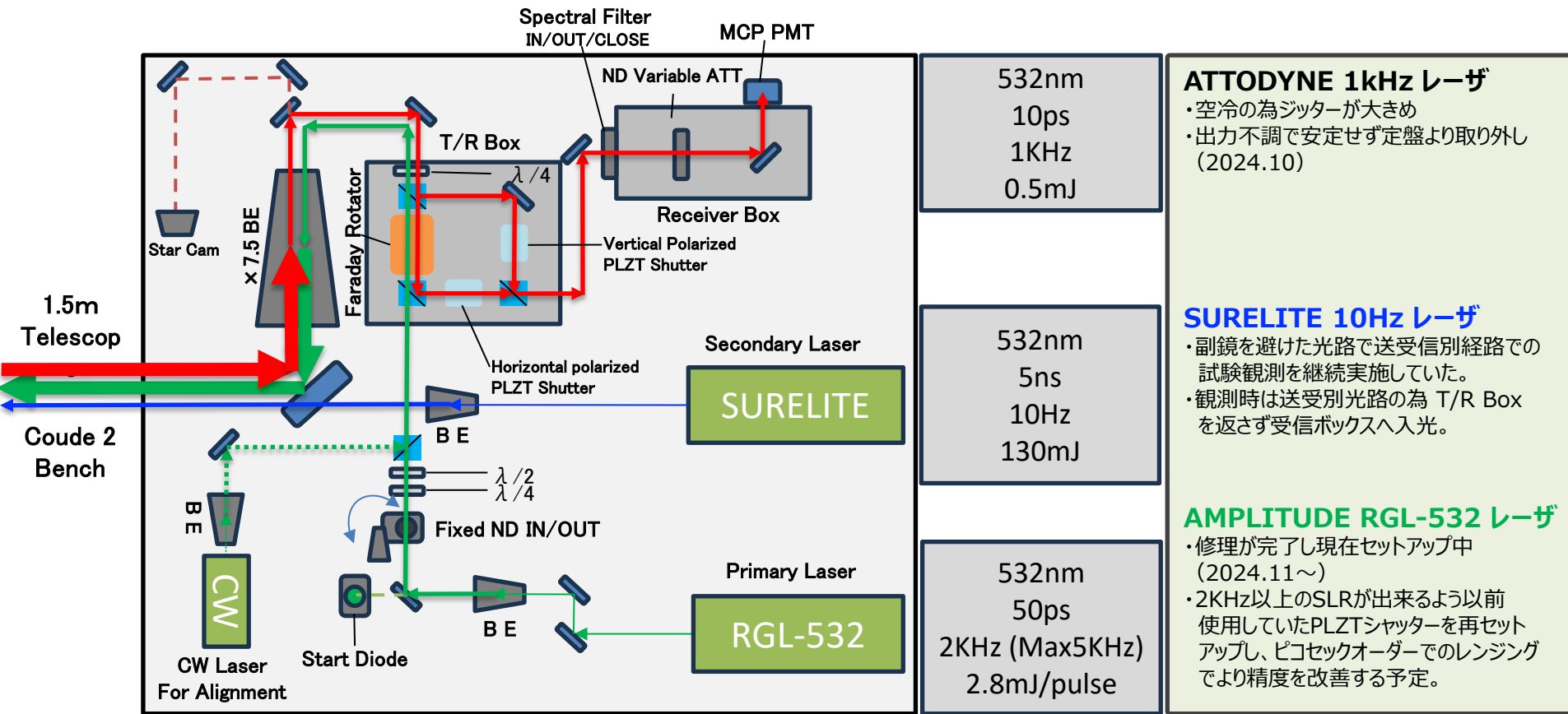
- ・出力低下で使用不能となったATTODYNEレーザをベンチより撤去。
- ・繰り返しが早く高出力なAMPLITUDE社製 ピコ秒レーザ をJAXA様より譲渡いただき、本年度メーカーにて内部修理実施
- ・高レート of レーザに対応する、PLZTシャッターを再度セットアップする為、アライメント用のCWレーザと同期させ、セットアップを現在行っている。

現在のSLRシステムの概要



- 10Hzで送受別体としていた為、しばらく使用していなかったPLZTシャッターを再度光軸のセットアップを実施し運用予定。
1キロヘルツ以上のシャッタリングにPLZTシャッターは有効、繰り返しが早いほうがシャッター効率も良い。
- ビームエキスパンダによる正反射の受信回り込みを防ぐ為、改修を行った7.5倍化したビームエキスパンダも有効。

現在のSLRシステムの概要



SLR OPTICAL SYSTEM CONFIGURATION

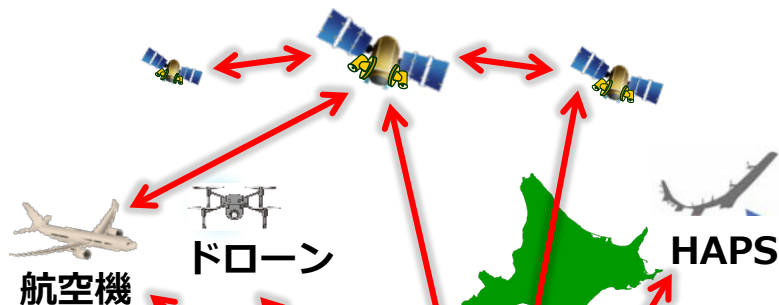
今後の展望

- 10Hzのナノ秒レーザで試験観測を継続してきた。
ピコ秒レーザの修理が完了し、現在送受信ともに再セットアップを行っている。
 - ATTODYNE レーザでは1KHzまでのSLRであったが、ピコ秒レーザをセットアップし
今後は2KHz以上のSLRもシステム含め検討中。
 - 正確な原子時計を搭載した衛星とのT2L2SLRリンク実験や、スペースデブリ、
月測距などの応用実験に既存新設の望遠鏡を利用して行っていく予定。
 - GEOもターゲットに測距を行い、近い将来に通信実験を行う静止衛星との安定した
通信を実現する為の測距制度向上を目指す。
- 小金井 1.5m SLR局の長期展望:
- NICT独自で測地用ルーチン局の維持をおこなうことは困難
 - 光通信やスペースデブリなどの技術開発局として運用を継続
 - 本会活動、共同研究などを通じ、他機関運用局の試験用設備として活用されれば幸い。

NICTの光地上局の整備状況

NICTの光地上局の整備状況

衛星コンステレーション



概要:

- **2-m 大型光地上局 (鹿島)**
- **1-m 光地上局 (小金井, 鹿島, 沖縄) : 既設**
- **40-cm 小型光地上局 (小金井, 鹿島, 神戸)**
- **可搬型光地上局 (小金井)**
1号車 3号車 J型
- **1.5m SLR光地上局**

赤字 : 新設された光地上局

黒字 : 既設の光地上局



ユースケース:

- あらゆる飛翔体を対象とした通信テストベッド
- 衛星地上間のデモンストレーション
- LEOコンステレーションの社会実装のデモンストレーション
- 新規デバイスの評価用テストベッド
- サイトダイバーシティのデモンストレーション

大型アンテナ光地上局：2m望遠鏡

- ドームの大きさ直径約8m、望遠鏡の高さ約9m、望遠鏡有効径2.05m。**一枚鏡の望遠鏡としては国内最大。**
- 低軌道衛星を**10秒角以下の精度で正確に追尾可能**
- 受信アンテナとして利用する場合、そのアンテナ利得は40cm小型光アンテナに比べ**約25倍**
- 衛星-地上間で数百Gbps以上の通信や深宇宙通信との通信を実現するために**大口径化、補償光学系を整備**



C1主鏡
1枚凹面鏡 直径2050mm

C1主鏡 (表面)



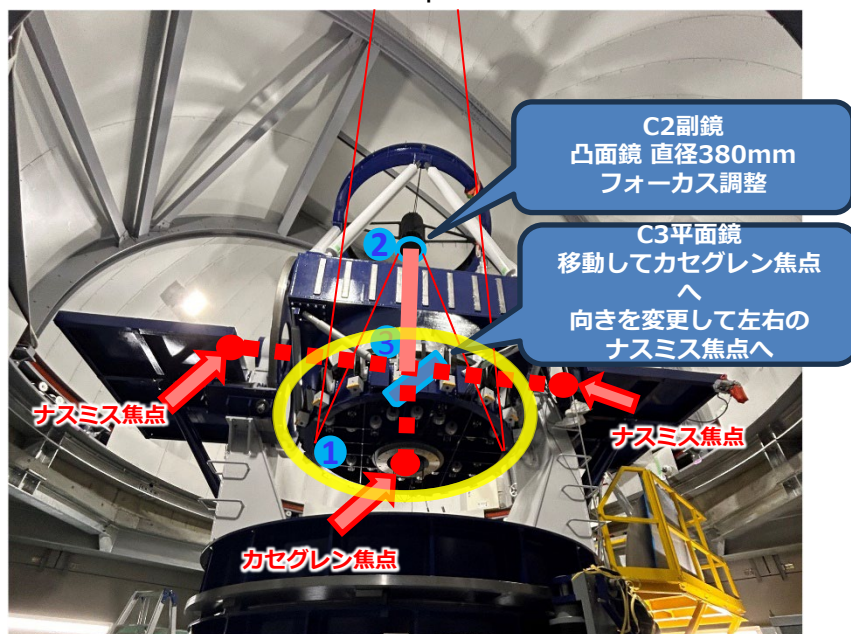
C1主鏡 (背面)



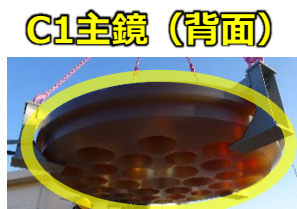
望遠鏡形式	クラシカルカセグレン式望遠鏡
焦点位置	ヒゲリ焦点、ハミ焦点、クデ焦点
有効径	2050mm
主鏡口径比	F=1.75
F値	F=11.7
波面誤差	1/6波長@633nm
仰角範囲	5~90度
方位軸駆動範囲	-90~+540度
方位軸制御分解能	0.01秒角
高度軸観測範囲	5~90度
高度軸制御分解能	0.01秒角
追尾精度	10秒角以下（低軌道衛星）

大型アンテナ光地上局 : 2m望遠鏡

- ドームの大きさ直径約8m、望遠鏡の高さ約9m、望遠鏡有効径2.05m。**一枚鏡の望遠鏡としては国内最大。**
- 低軌道衛星を**10秒角以下の精度で正確に追尾可能**
- 受信アンテナとして利用する場合、そのアンテナ利得は40cm小型光アンテナに比べ**約25倍**
- 衛星-地上間で数百Gbps以上の通信や深宇宙通信との通信を実現するために**大口径化、補償光学系を整備**

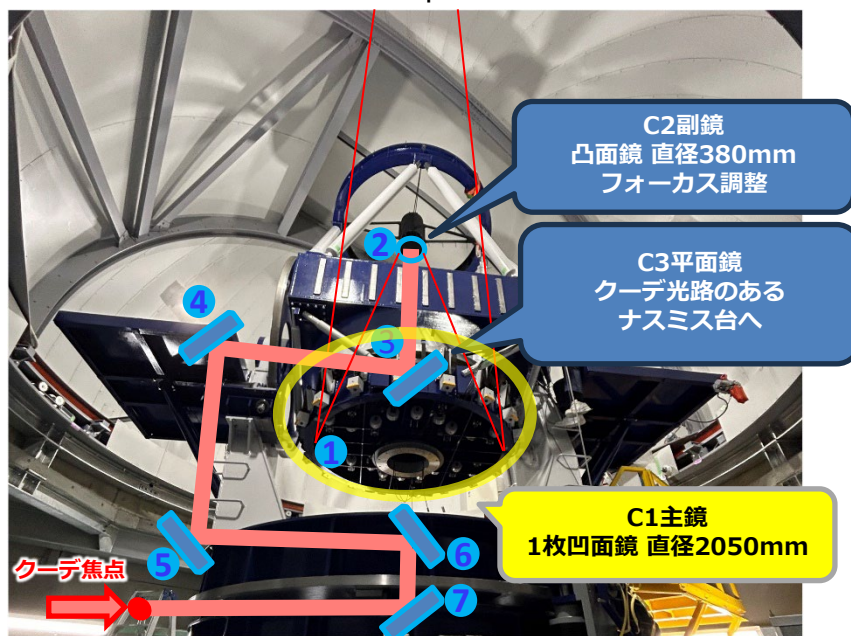


望遠鏡形式	クラシカルカセグレン式望遠鏡
焦点位置	カセグレン焦点、ナスマス焦点、クーデ焦点
有効径	2050mm
主鏡口径比	F=1.75
F値	F=11.7
波面誤差	1/6波長@633nm
仰角範囲	5~90度
方位軸駆動範囲	-90~+540度
方位軸制御分解能	0.01秒角
高度軸観測範囲	5~90度
高度軸制御分解能	0.01秒角
追尾精度	10秒角以下 (低軌道衛星)



大型アンテナ光地上局：2m望遠鏡

- ドームの大きさ直径約8m、望遠鏡の高さ約9m、望遠鏡有効径2.05m。**一枚鏡の望遠鏡としては国内最大。**
- 低軌道衛星を**10秒角以下の精度で正確に追尾可能**
- 受信アンテナとして利用する場合、そのアンテナ利得は40cm小型光アンテナに比べ**約25倍**
- 衛星-地上間で数百Gbps以上の通信や深宇宙通信との通信を実現するために**大口径化、補償光学系を整備**



C2副鏡
凸面鏡 直径380mm
フォーカス調整

C3平面鏡
クーデ光路のある
ナスミス台へ

C1主鏡
1枚凹面鏡 直径2050mm

クーデ焦点

C1主鏡 (表面)

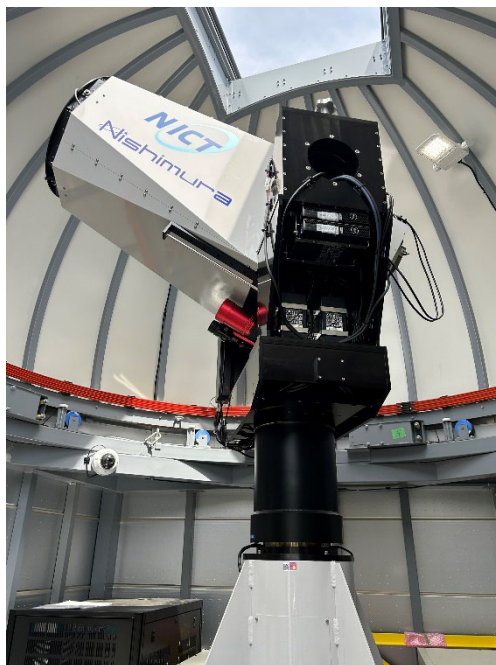


C1主鏡 (背面)



望遠鏡形式	クラシカルカセグレン式望遠鏡
焦点位置	カグレン焦点、ハミ焦点、クーデ焦点
有効径	2050mm
主鏡口径比	F=1.75
F値	F=11.7
波面誤差	1/6波長@633nm
仰角範囲	5~90度
方位軸駆動範囲	-90~+540度
方位軸制御分解能	0.01秒角
高度軸観測範囲	5~90度
高度軸制御分解能	0.01秒角
追尾精度	10秒角以下 (低軌道衛星)

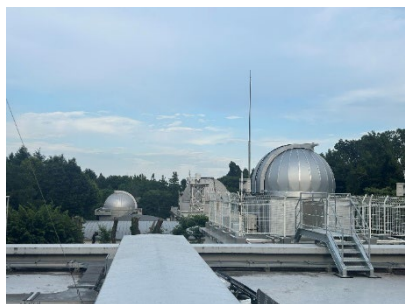
小型アンテナ光地上局 : 40cm望遠鏡



小型軽量に設計し高速に移動する飛翔体向けに設計

低軌道衛星、HAPS、航空機、船舶など様々なプラットフォームとの光通信の検証が可能な、
主鏡40cm小型アンテナ光地上局
(小金井, 鹿島, 神戸の3拠点に整備)

望遠鏡形式	クラシカルカセグレン式望遠鏡
焦点位置	カセグレン焦点、クーデ焦点
有効径	400mm
主鏡口径比	F=3
F値	F=15
波面誤差	1/6波長@633nm
高度軸駆動範囲	-5~90度
方位軸駆動範囲	-90~+540度



サイト間の地上ネットワーク網

- 3 拠点の光地上局間には**JGN（10Gbpsクラス）ネットワーク**により接続
- 望遠鏡の制御系ネットワークとは別に利用者が機材等を持ち込み接続するためのネットワークも整備
- ユースケースに応じてサイト間でL2、L3の閉域ネットワークの構築も可能
- 各サイトの観測データをネットワーク転送し、集約することも容易



鹿島2m



鹿島40cm



小金井40cm



神戸40cm

JGN(10Gbps)

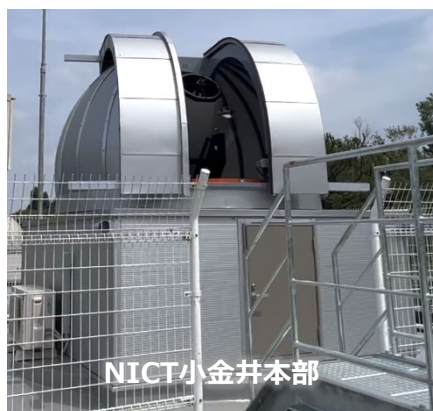
サイト間の遅延時間の実測値（2024.4現在）

番号	起点	終点	RTT
①	小金井	鹿島	2.078msec
②	小金井	神戸	10.480msec
③	鹿島	神戸	12.900msec

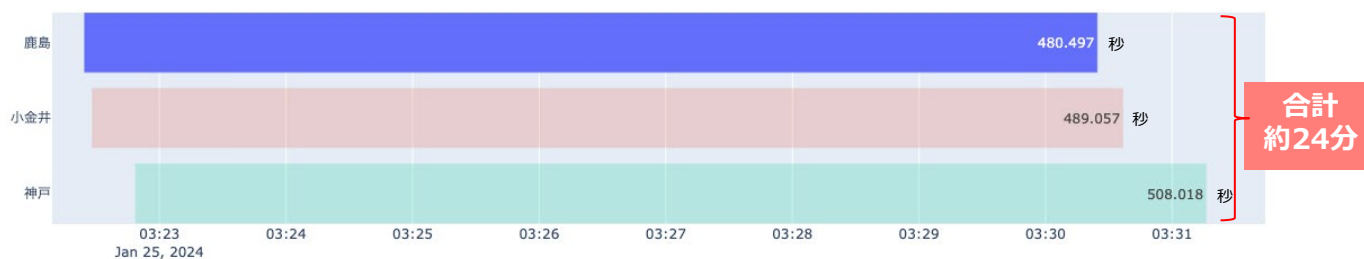
※静止軌道衛星ー地上間の往復遅延時間は、
約270msec（参考）

利用例：複数サイトの同時利用

- 3拠点小型光アンテナを同時に利用することにより、高速移動する低軌道衛星等の観測時間を確保可能



平均パスの場合の観測時間の例（衛星は高度600km太陽同期軌道、地上局最小仰角 10degでシミュレーション）



可搬型光地上局：40cm望遠鏡

- 既に実験運用を行っている可搬型光地上局1号車（8 t 車）をベースに、小型化をはかり運用の利便性を向上し開発
- 電源用発電機と制御系を搭載した**制御用車両**と、光通信望遠鏡を搭載した**光地上局車両**の（5 t 車）2台編成とした



可搬型光地上局：40cm望遠鏡

- 既に実験運用を行っている可搬型光地上局1号車（8 t 車）をベースに、小型化をはかり運用の利便性を向上し開発
- 電源用発電機と制御系を搭載した**制御用車両**と、光通信望遠鏡を搭載した**光地上局車両**の（5 t 車）2台編成とした
- 光通信用**望遠鏡**だけでなく、**RF用平面アンテナ**も搭載可能に

制御用車両



光地上局車両



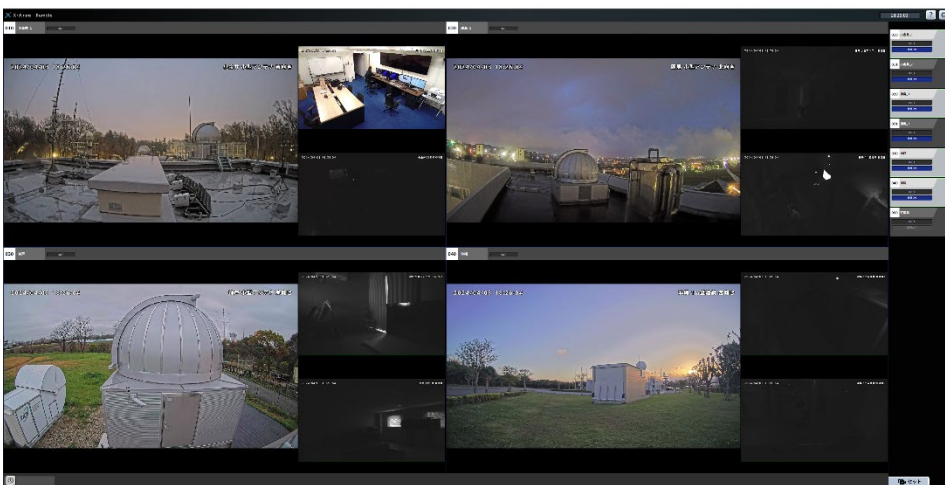
可搬用小型光アンテナ

- 飛翔体と地上間で光無線通信をするための小型アンテナ。
- 運搬が可能な設計で、設置場所の移動が可能。「miniSLR」の技術を応用し、大幅な小型化を実現
 - サイズ：2250×1400×2200（幅×奥行×高さ, 単位：mm）
- さまざまな光学系機器やモデムなどの搭載が可能で多様な研究に適用可能



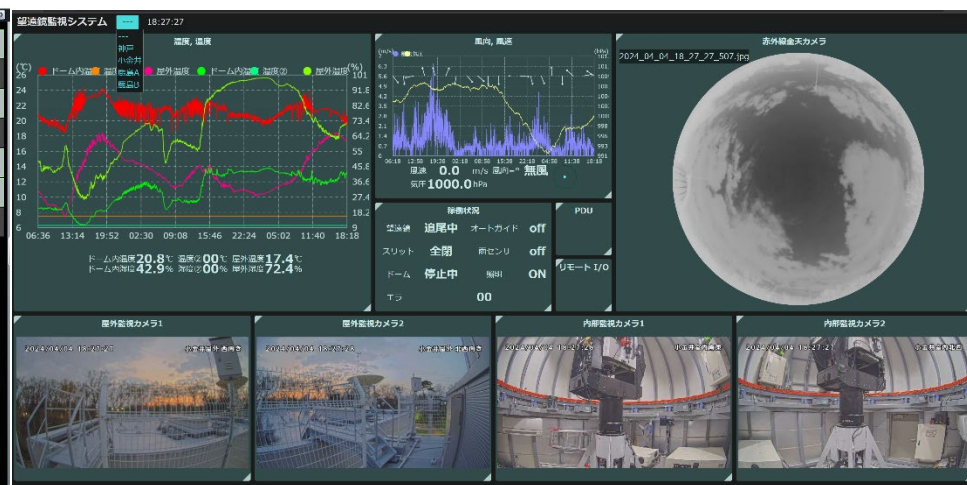
光地上局テストベッドの構築：集中制御機構

- 望遠鏡を駆動、制御する装置やカメラ、気象計等の機器（1地上局約30個、小型3サイト大型1サイト分、合計約120個）をネットワーク接続し遠隔操作可能に
- ほぼリアルタイムに各光地上局の状況が確認でき、ネットワークを介して遠隔操作
- 集中制御可能に各サイトに下記センサ等を設置しており、各局の気象データを遠隔から確認可能
- 上記のデータにより小金井、鹿島、神戸の気象条件のよいサイトを選択して、衛星ー地上間の通信を行うことも可能



ネットワークカメラシステム

希望の1~4サイトを選択し、光地上局と周辺の映像および制御室などをリアルタイムで確認可能
さらに過去9日分のビデオ映像をサーバにて保存、呼び出し再生が可能

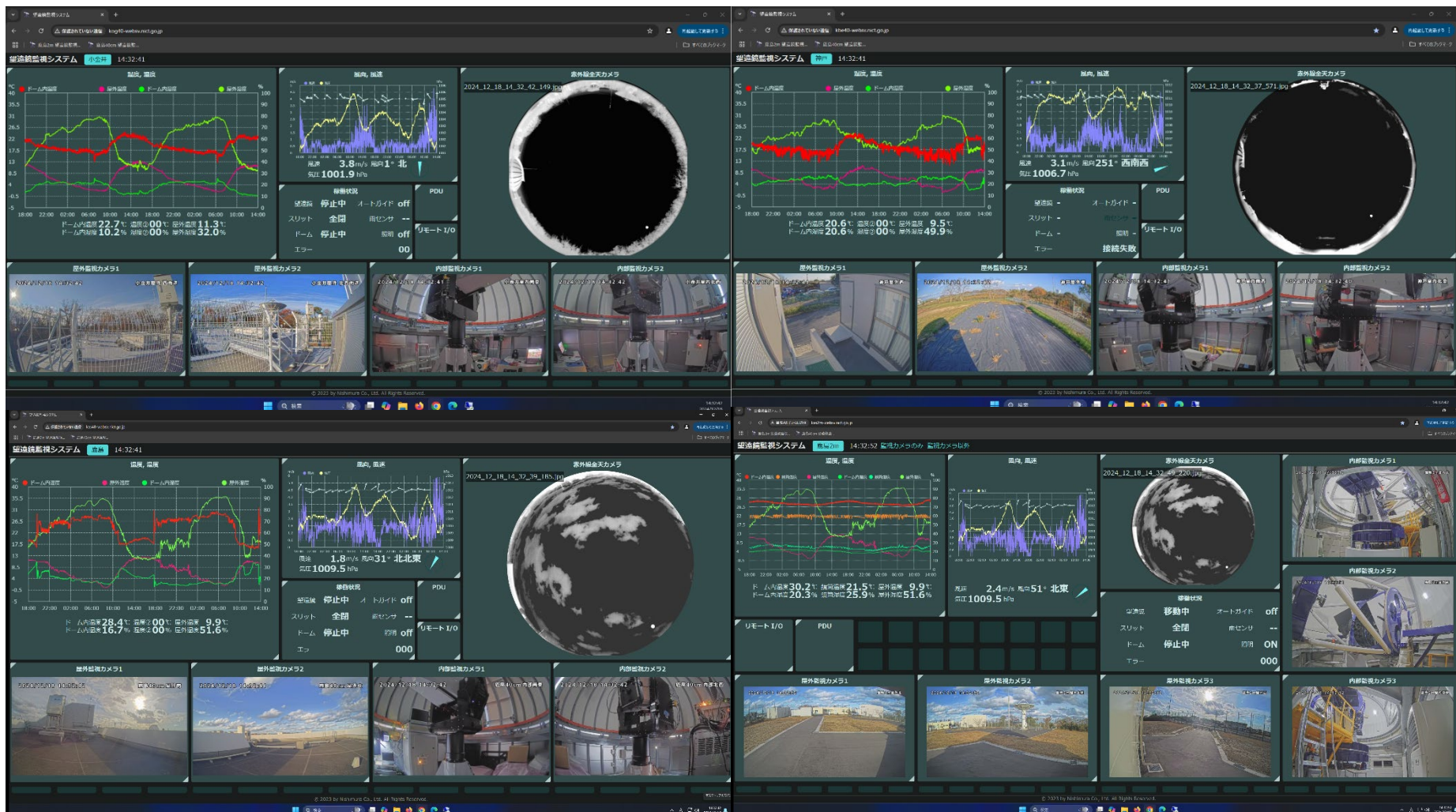


新設光アンテナ地上局の望遠鏡監視システム

温度 湿度 風向 風速 雲の様子 降雨状況が1画面で確認できる
望遠鏡コントローラやドライバの電源をPDU、リモートI/Oより操作可能

光地上局テストベッドの構築：集中制御機構

■ 各制御室には複数のサイトを管理できるモニターを用意、ネットワークを介して遠隔操作、集中制御可能に



SLRを光地上局に展開するための技術課題

- NICTではこれらの光地上局を活用し、衛星～地上局間で光空間通信を行う場合に、気象条件のよいサイトを選択して、衛星～地上局間で光空間通信するサイトダイバーシティ技術の研究開発を実施
- サイトダイバーシティ技術により選択したサイトで安定した通信を行うためには、選択したサイトで望遠鏡の粗追尾から可視レーザを利用して行うSLRが必要と考える。
- 各拠点に通信設備とは別のベンチでSLRをセットアップするのが理想だが、複数の課題がある。
 - ① 繰り返しの早い高出力のレーザが必要で、レーザの温度管理や定期的なメンテに高い金額と時間を要する。
 - ② 高性能な受信ディテクター、その他時間管理に必要な部品が多数あり一通り揃えればとても高価になってしまう。
 - ③ セットアップするのにそれなりのスペースを要し、他の通信装置との共存を想定して作られていないと追加でSLRをする事が難しい。
 - ④ 光通信用として開発され製造されたアンテナは、波長が1550nmを想定して設計されており、532nmの波長では損失が多くなったり、平行光で長い光路を利用する事が難しい可能性がある。
- 上記のコストとスペース、精度の課題を解決するために、以前から研究されている大坪先生のOmni-SLR技術を活用することができないか検討したい。

NICTの光地上局テストベッド

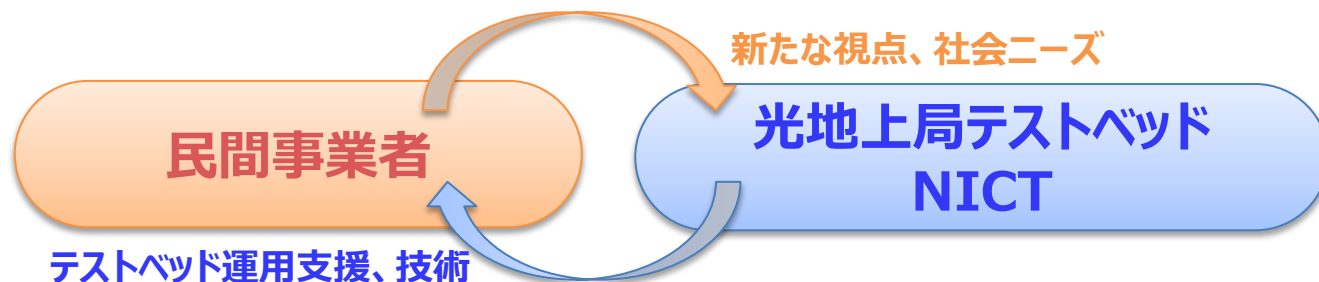
共同研究だけでなく、民間事業者の新規宇宙ビジネス参入のために利活用いただき、技術課題を産学官連携して解決していくため、国内外の企業、大学等の皆様にご利用いただけるよう共同利用制度を整備中。

共創や光空間通信技術の研究開発等を共業していきたい。

機器を持ち込みいただき光アンテナと接続して利用したり、望遠鏡を利用して希望の対象物を撮像できるか確認する等のご利用が可能なように制度を整備しています。

光地上局テストベッド 『HICALI-GATE』

(High speed Communication with Advanced Laser Instrument Grand Access TEstbed)



ご興味ございましたら、下記お問い合わせから是非ご連絡ください

<https://www2.nict.go.jp/wireless/contact.html>

※お問い合わせ内容に「光地上局テストベッドについて」と記載ください

