

宇宙光通信に関する研究開発の動向

情報通信学部 通信ネットワーク工学科
高山佳久

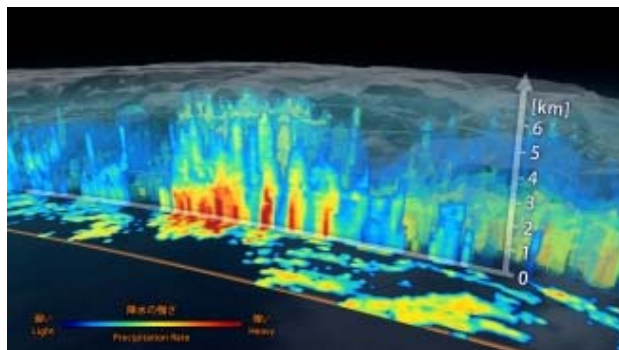
宇宙の利用例(地球観測)



全球降水観測計画「GPM」



陸域観測技術衛星2号
「だいち2号」(ALOS-2)



二周波降水レーダ(DPR)に
よる降水の三次元分布
(GPM/DPR)



「だいち2号」が観測した伊豆
大島



水循環変動観測衛星
「しずく」(GCOM-W)



温室効果ガス観測技術
衛星「いぶき」(GOSAT)

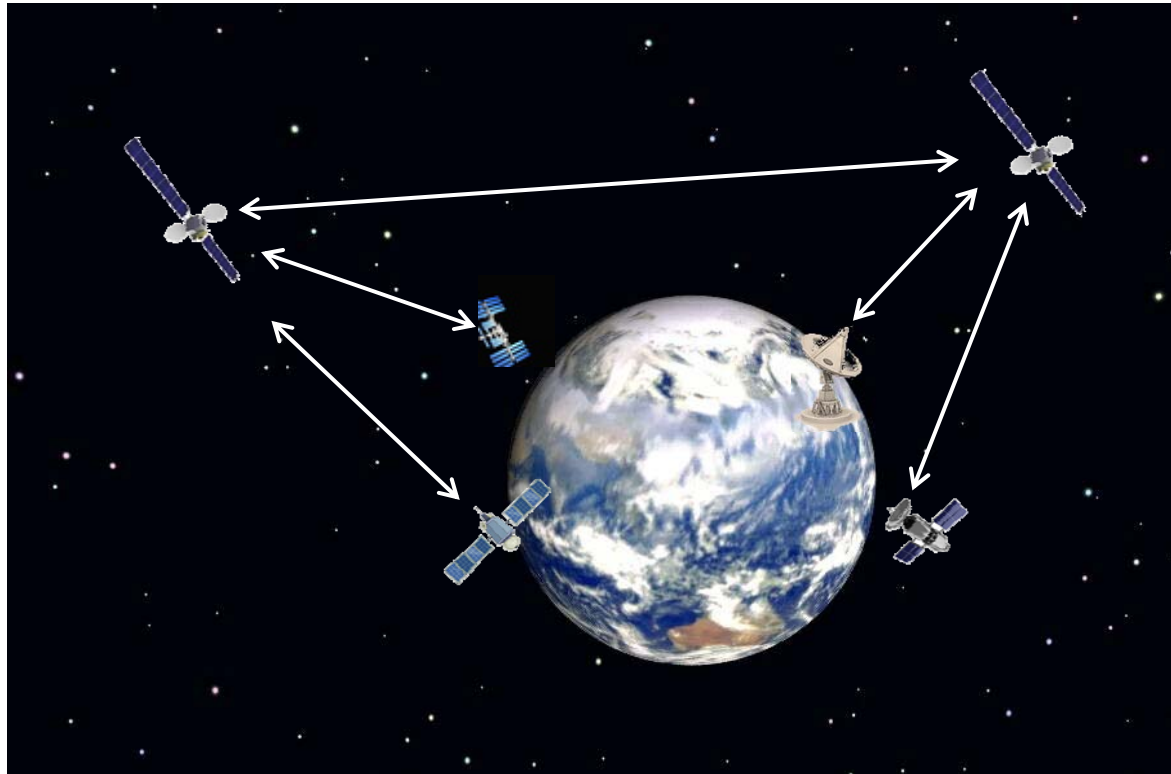


月周回衛星「かぐや」
(SELENE)

宇宙の利用例(データ中継)

地球を周回する衛星や宇宙ステーションと地上局との間の通信を中継

広大な範囲で、即時通信を可能とする。



宇宙/空間光通信の特徴



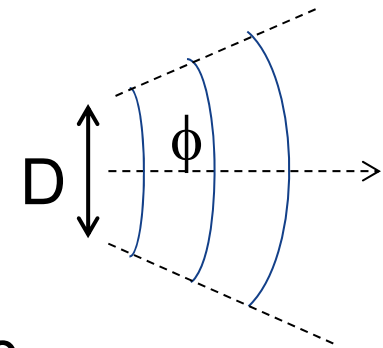
理想的な送信系でのビームの広がり角: $\phi \approx \lambda / D$

電波(25 GHz) の波長例: 12,000 μm

レーザ光の波長例: 1.5 μm

広がり角の比: $\phi_{\text{Ka}} / \phi_{\text{L}} = 8,000$

照射領域の比: $(\phi_{\text{Ka}} / \phi_{\text{L}})^2 = 64,000,000$



同じ大きさのアンテナを用いた場合、Ka-bandと比べてレーザ光は、単位面積当たり**6400万倍強い**電力で照射することができる。



小さな装置で高速データ伝送ができる

レーザ光は、Ka-bandと比べて**8000倍鋭い**ビームである。



相手に当てるためには、工夫が必要

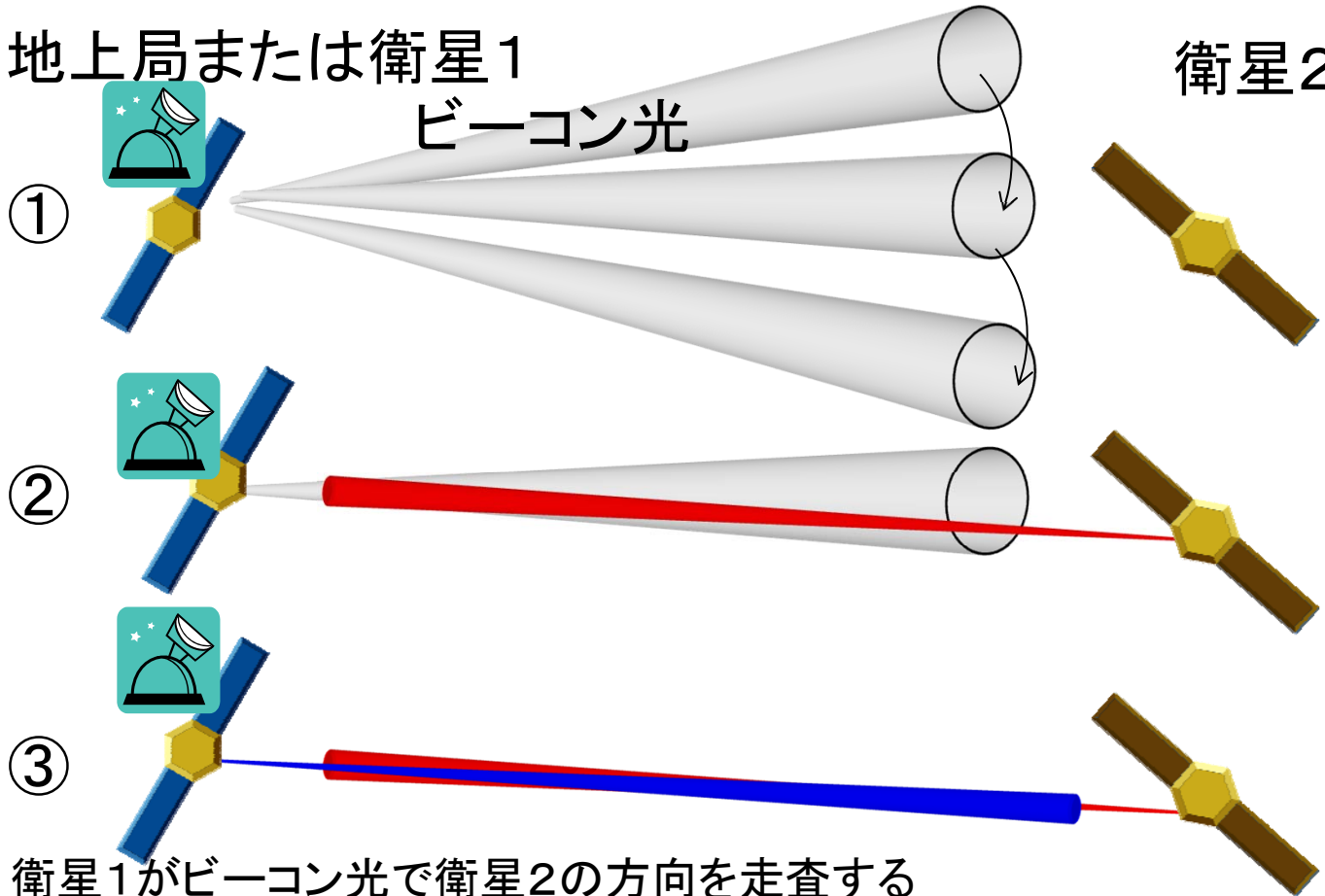
特有の技術: 相手を探す1

「この辺りにいるはず」の相手を探して捕まえる技術が必要

地上局または衛星1

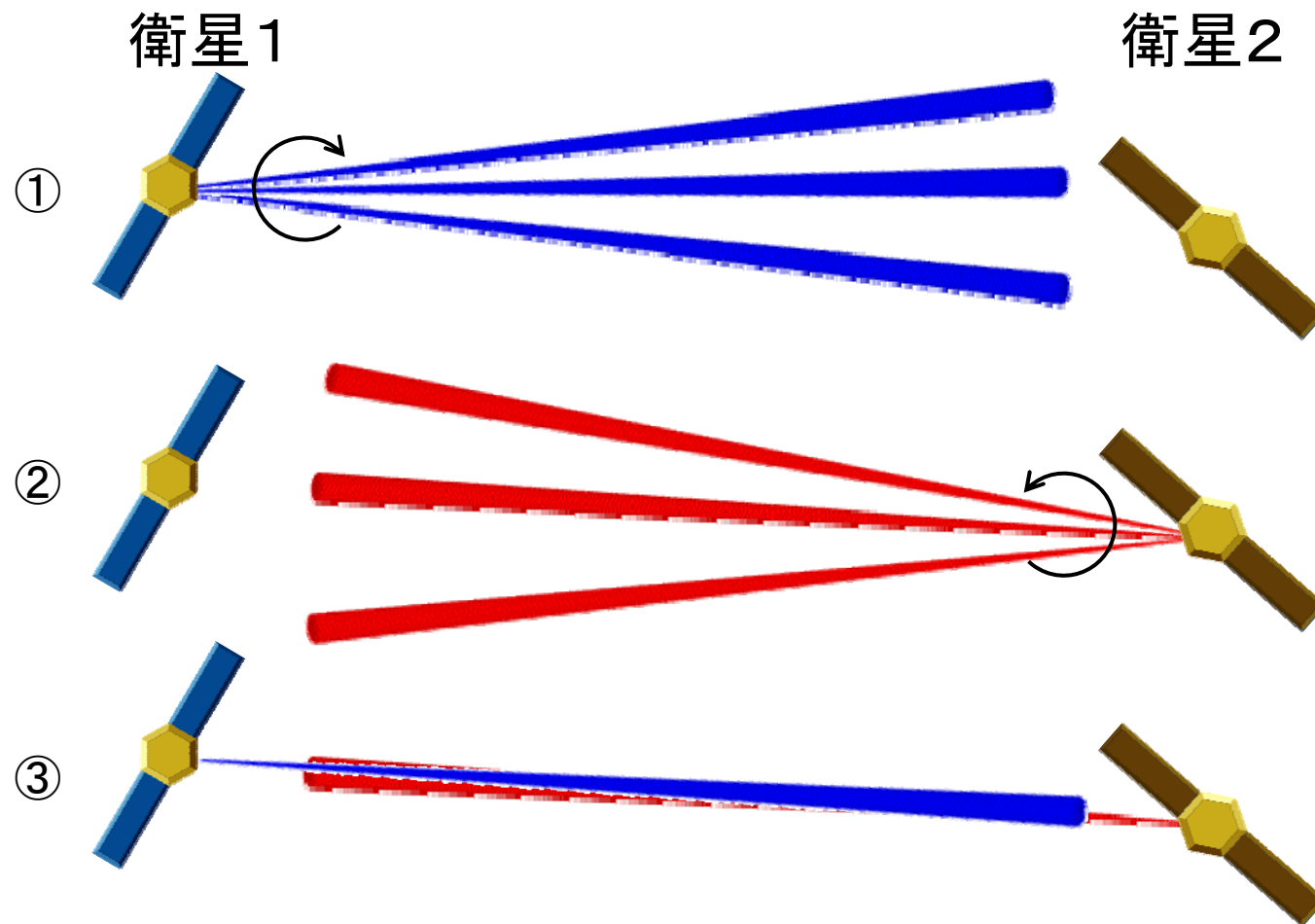
ビーコン光

衛星2



- ① 衛星1がビーコン光で衛星2の方向を走査する
- ② 衛星2は、衛星1のビーコン光を検出すると、衛星1の方向へ通信光を出射する
- ③ 衛星1は衛星2の光を検出するとビーコン光を止め、通信光を衛星2へ出射する
- ④ 衛星1と衛星2の間でデータ送受を行う

特有の技術: 相手を探す2



- ① 衛星1は、衛星2の辺りを通信光で走査し、一定時間の後、遮断する。
- ② 衛星2は、衛星1の通信光が一瞬検出された方向を走査し、一定時間の後、遮断する
- ③ 上記①と②を繰り返しそれぞれの走査範囲を小さくする
- ④ 衛星1と衛星2の間でデータ送受を行う

特有の技術: 光を当て続ける



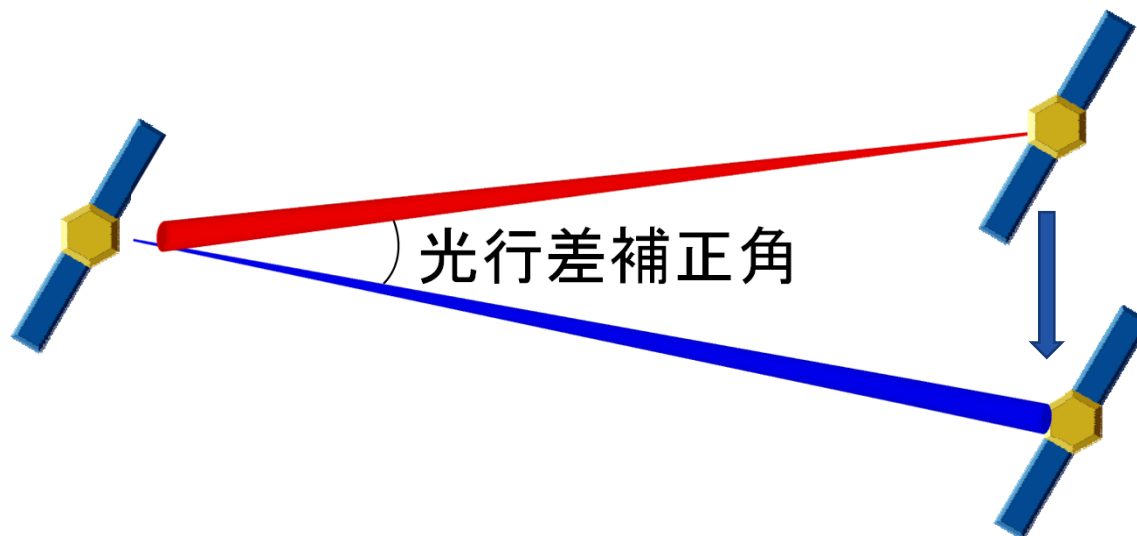
通信相手は、高速で移動する。

鋭いビームで照射する。

光が相手に届くまでに時間が掛かる。 例) 1000kmで約3ms

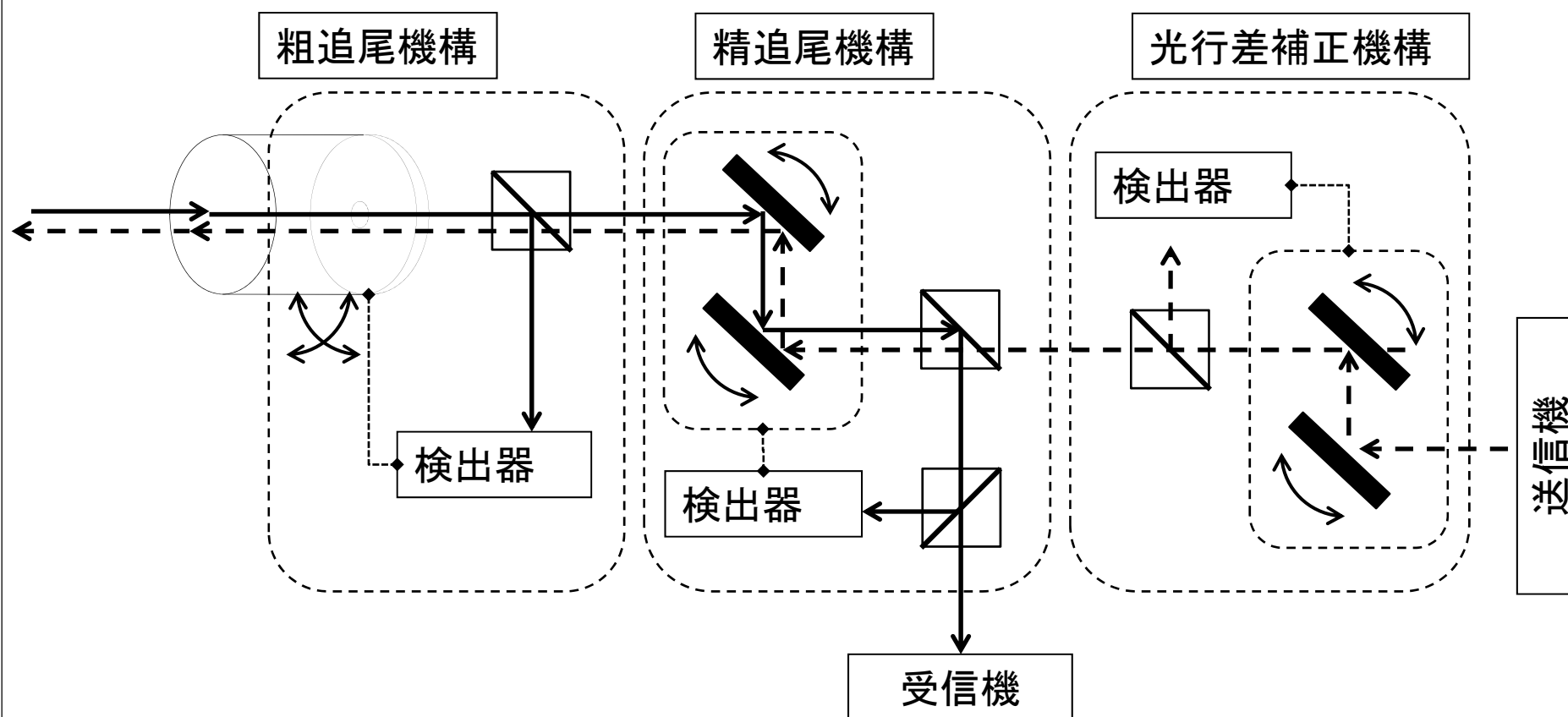


光が相手に届くまでの間に、相手が移動する方向と距離を予測し、予め光の射出方向を補正する高度な技術が必要



低軌道衛星の場合、
約7km/s(時速約
25200km)で移動

装置の構成例

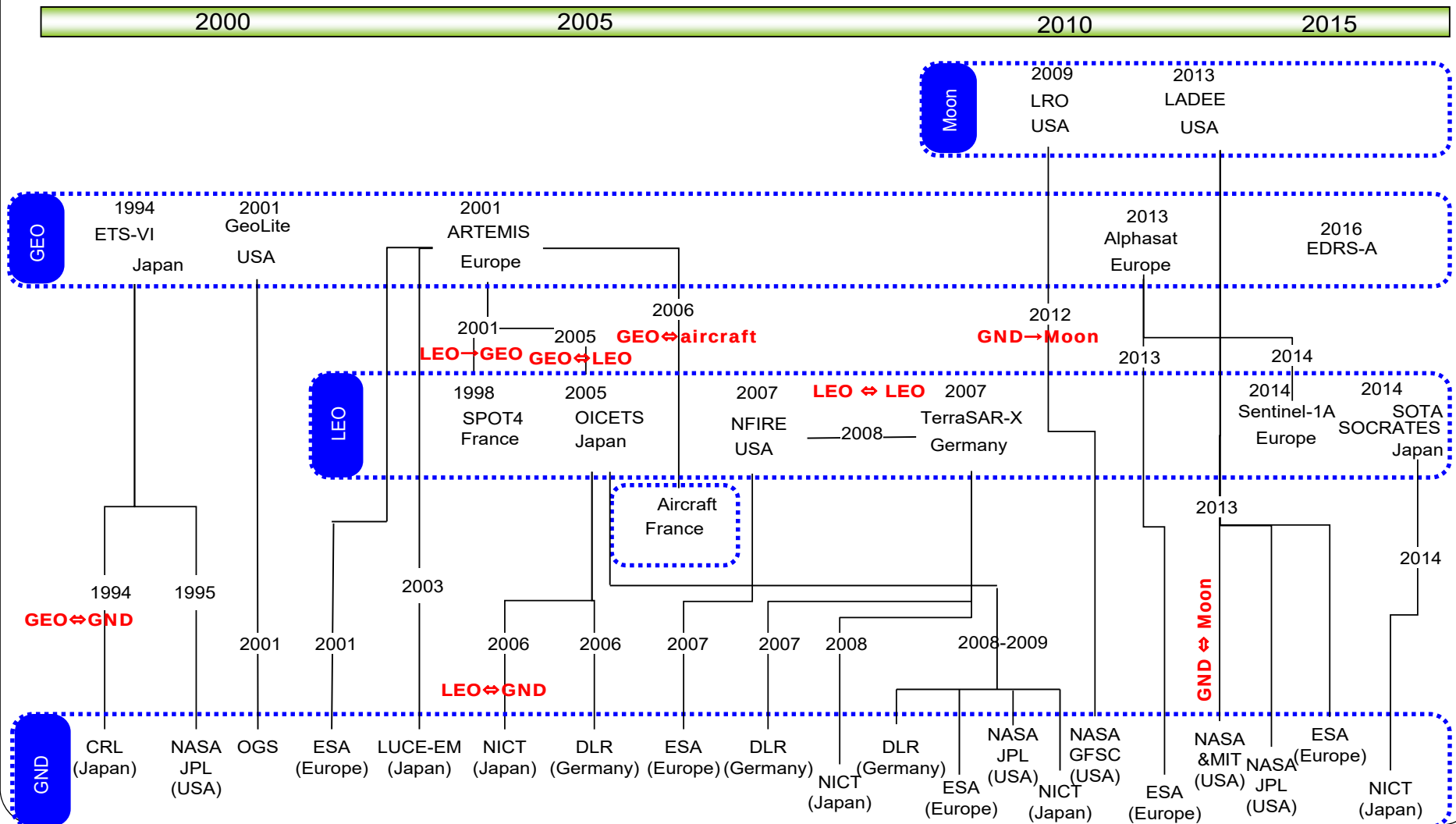


宇宙光通信の実績

- (1) 静止軌道 (GEO) と地上
- (2) 静止軌道 (GEO) と低軌道 (LEO)
- (3) 低軌道 (LEO) と地上
- (4) 低軌道と低軌道
- (5) 静止軌道と静止軌道

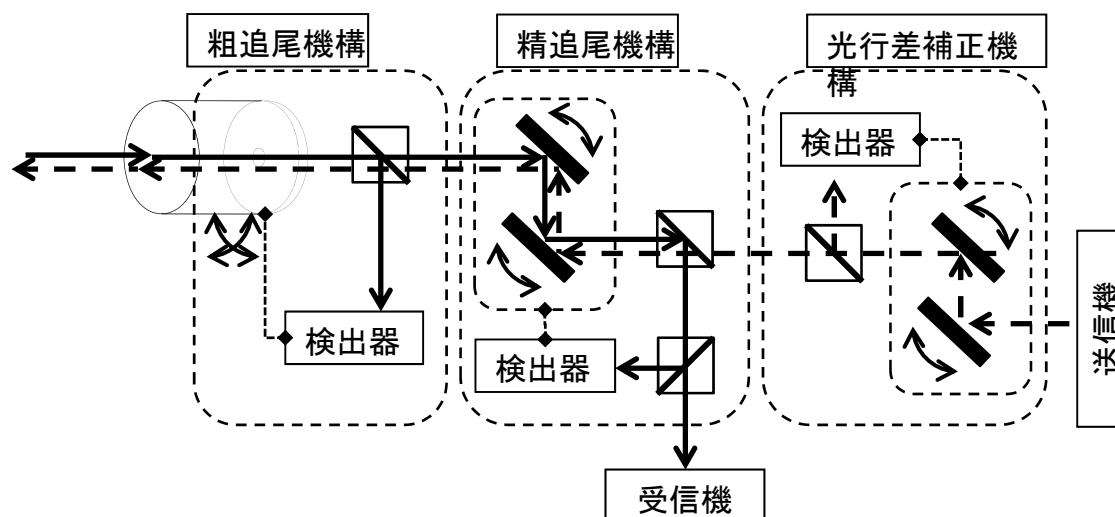
日本の技術は世界初・三冠に貢献

← ドイツとアメリカの協力で実施
未実施



装置の例

項目	仕様例
衛星搭載光アンテナ直径	~30cm
粗追尾駆動精度	~0.01deg
精追尾精度	~1μrad
通信光の射出電力	数10mW~1W
通信光の波長	0.8μm、1μm、1.5μm
データレート	1Mbps~5.6Gbps
通信距離	500km~40000km
光地上局の望遠鏡直径	12cm~1.5m



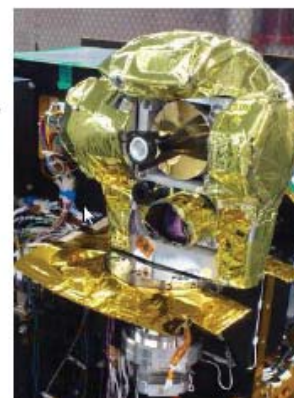
低軌道衛星と地上との間で 1.5 ミクロン光による光衛星通信に成功

～世界初！新しい誤り訂正符号の実装～

【ポイント】

- 1.5 ミクロンレーザ光による低軌道地上間通信、50kg 級超小型衛星に搭載し軌道上実証に成功
- 大気ゆらぎ影響下で光衛星通信の誤り訂正等通信方式を実現、正常に機能することを実証
- 周波数資源の制約を受けず、かつ、低コストで将来の光衛星通信の超大容量化を実現可能に

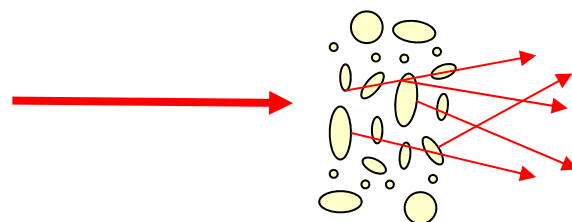
国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT、理事長：坂内 正夫) は、1.5 ミクロンレーザ光を用いた低軌道衛星*¹ と地上間の通信のための超小型光通信機器 (小型光トランスポンダ、SOTA*²) の開発と宇宙空間における機能実証、さらに、独自に実装した誤り訂正機能を用いた伝送実験に世界で初めて成功しました。これらの実験は、2014 年 5 月末に打ち上げられた 50kg 級の超小型衛星 SOCRATES*³ に搭載して実施してきました。超小型衛星に搭載可能な光通信端末の成功は、装置開発としても画期的な成果です。



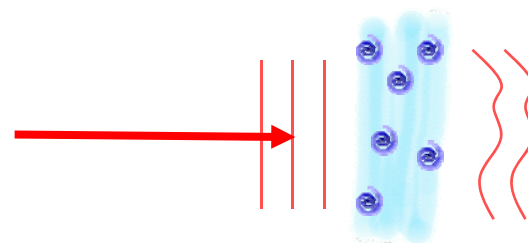
大気的光通信への影響

光への大気の影響

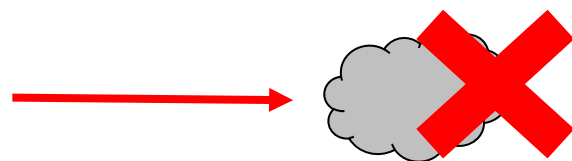
散乱



波面の歪



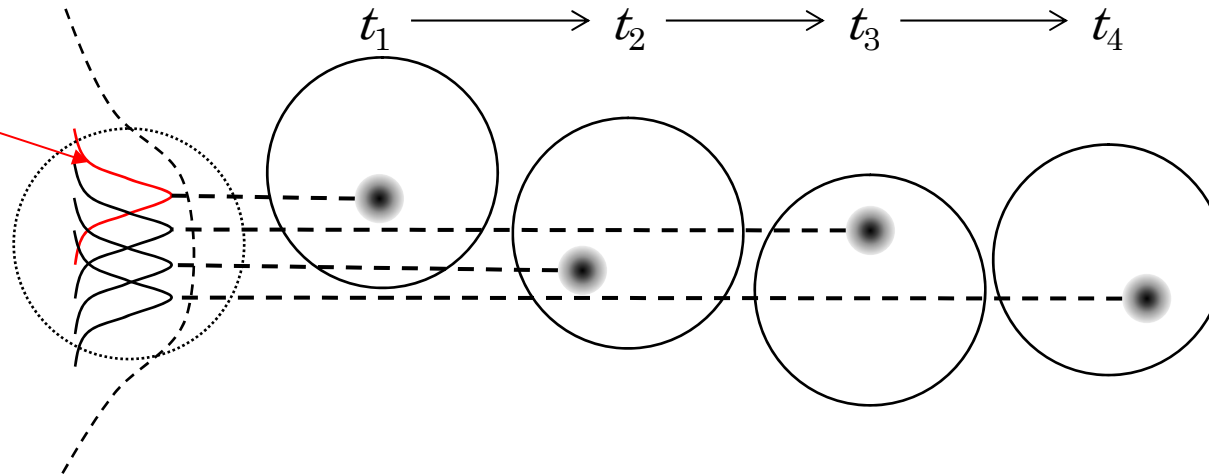
遮断



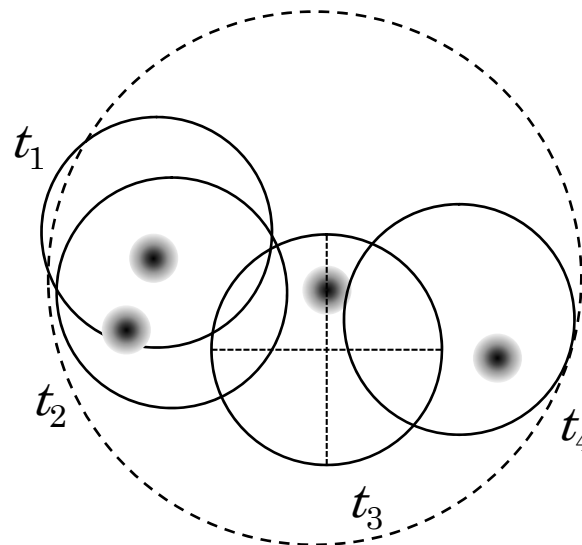
減衰
強度の急激な変化
伝搬方向の変動
焦点位置の移動
焦点の散在
など...

大気の影響の例(ビームワンダー)

時刻 t_1 の光

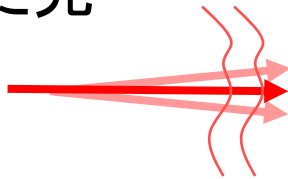


時刻 $t_1 \sim t_4$ の観測

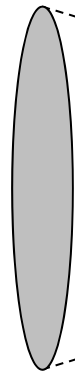


大気の影響の例（焦点の移動、散在）

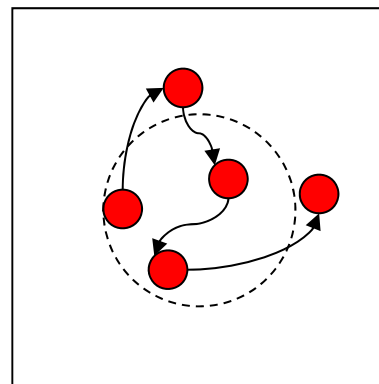
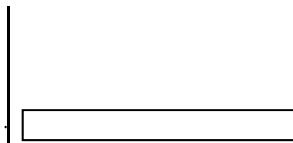
大気の影響を
受けた光



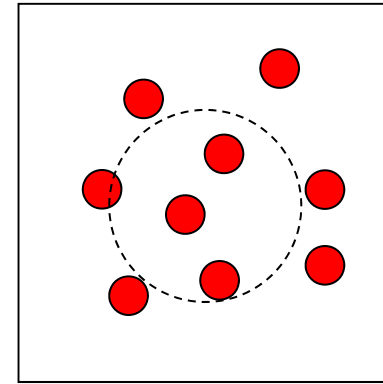
レンズ 望遠鏡



焦点面

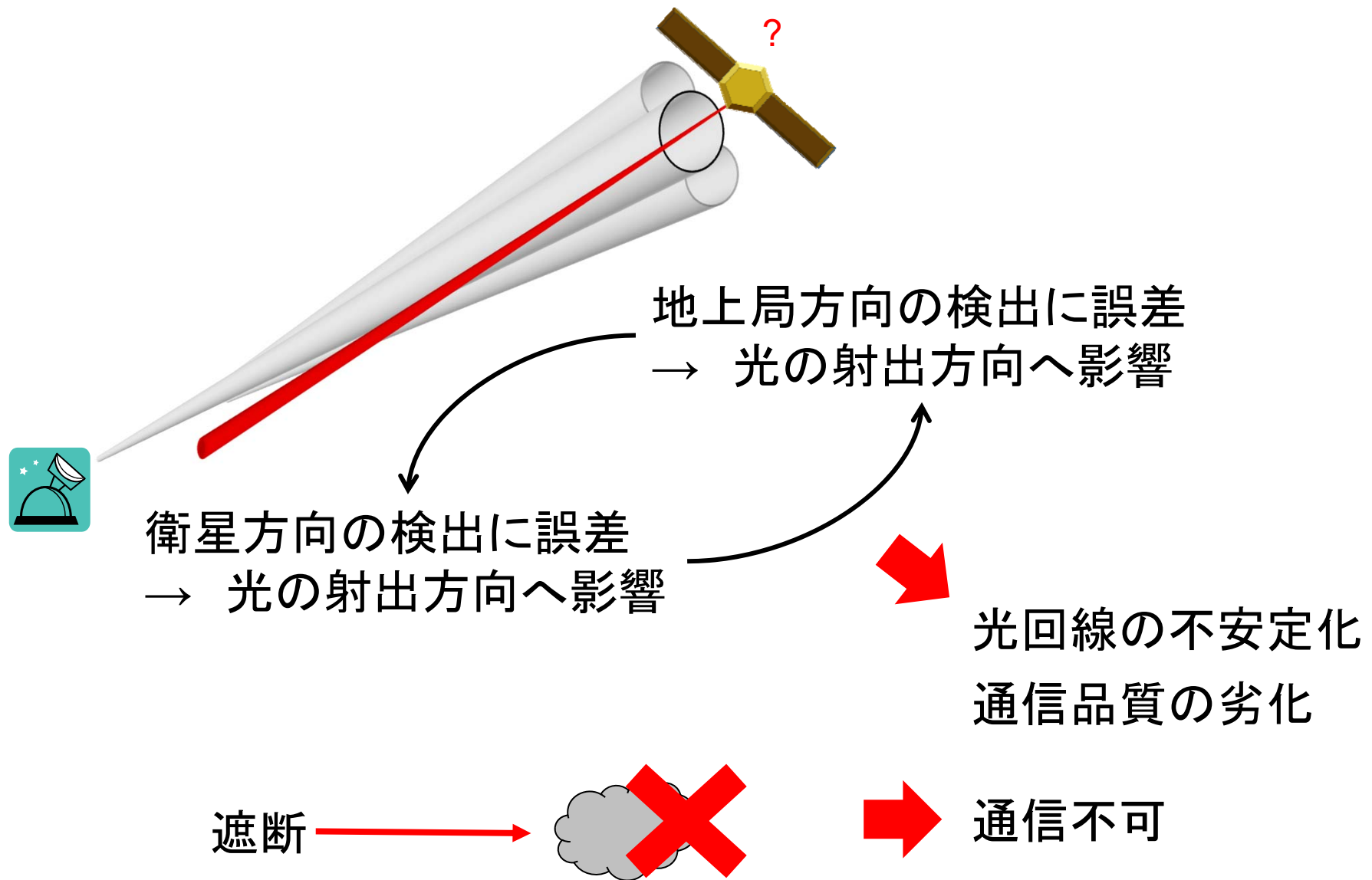


焦点の移動



焦点の散在

衛星-地上光通信システムへの影響

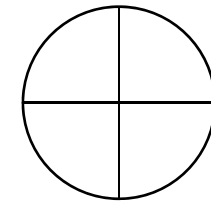
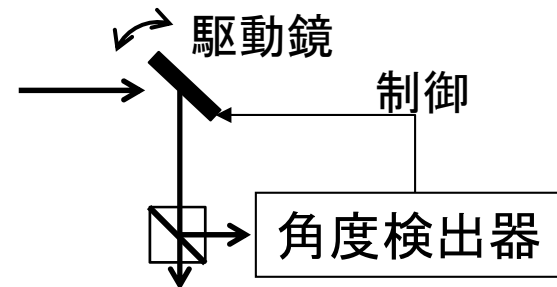


大気の影響への対策の例



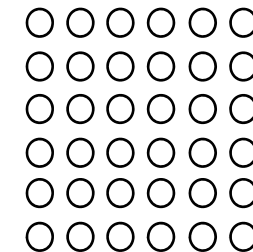
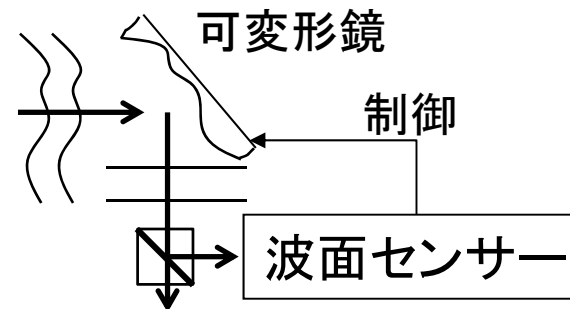
光の伝搬方向の補正

・高速駆動鏡



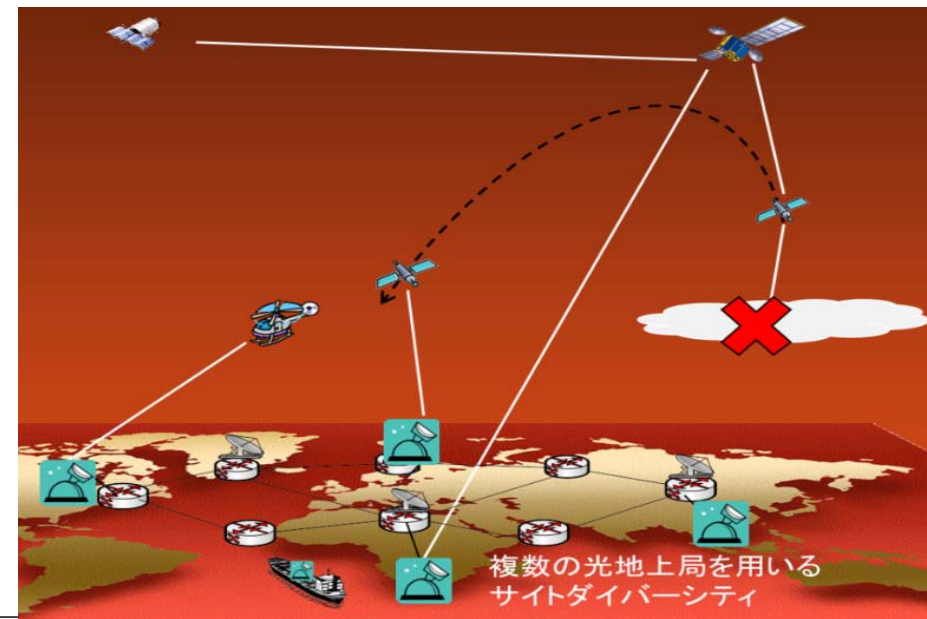
光の波面の補正

・可変形鏡



遮断の回避

・サイトダイバーシティ



宇宙光通信に関する議論と研究開発の動向

宇宙機関の会合



The Interoperability Plenary (IOP) formed in 1999
ASI, CNES, DLR, ESA, ISRO, JAXA, KARI, NASA, RFSA, UKSA



The Interagency Operations Advisory Group (IOAG), 1999
Optical Link Study Group (OLSG), 2010



The Consultative Committee for Space
Data Systems (CCSDS), 1982
Optical Coding and Modulation (OCM), 2009
Optical Communications (OPT), 2014



The Space Frequency Coordination
Group (SFCG) formed in 1980



The International Committee on Global
Navigation Satellite Systems (ICG), 2005



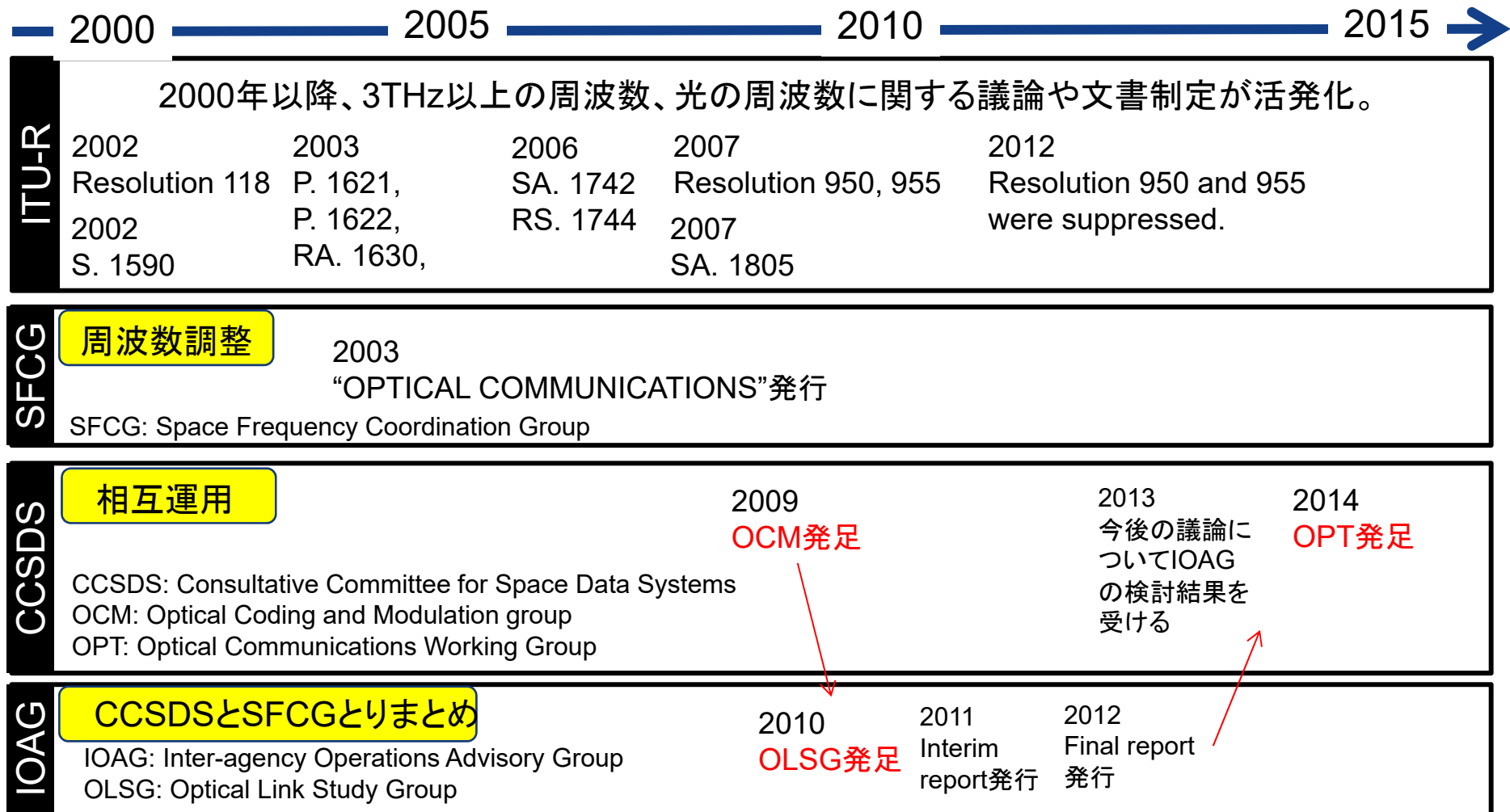
The International Space Exploration
Coordination Group (ISECG), 2006

ITU-Rと宇宙機関間会合における議論の流れ

2002年 Resolution 118: 3THz以上の周波数が今後検討される。

2007年 WRC-07: 次回のWRCで光の議論を行うことになった

2012年 WRC-12: 光通信システム間の干渉が問題になるという報告はない。



1. レーザの波長

1064nmあるいは1550nm帯が利用の中心

アイセーフティの観点からは、1550nm帯が望ましい

(1)宇宙光通信での使用実績

→0.8 μ m帯、1 μ m帯、1.5 μ m帯

(2)大容量データ伝送への適用

→1 μ m帯、1.5 μ m帯

(3)地上での利用状況

→1.5 μ m帯

(4)安全性

→1.5 μ m帯

2. 検討シナリオ

衛星間光通信、および衛星ー地上局間光通信

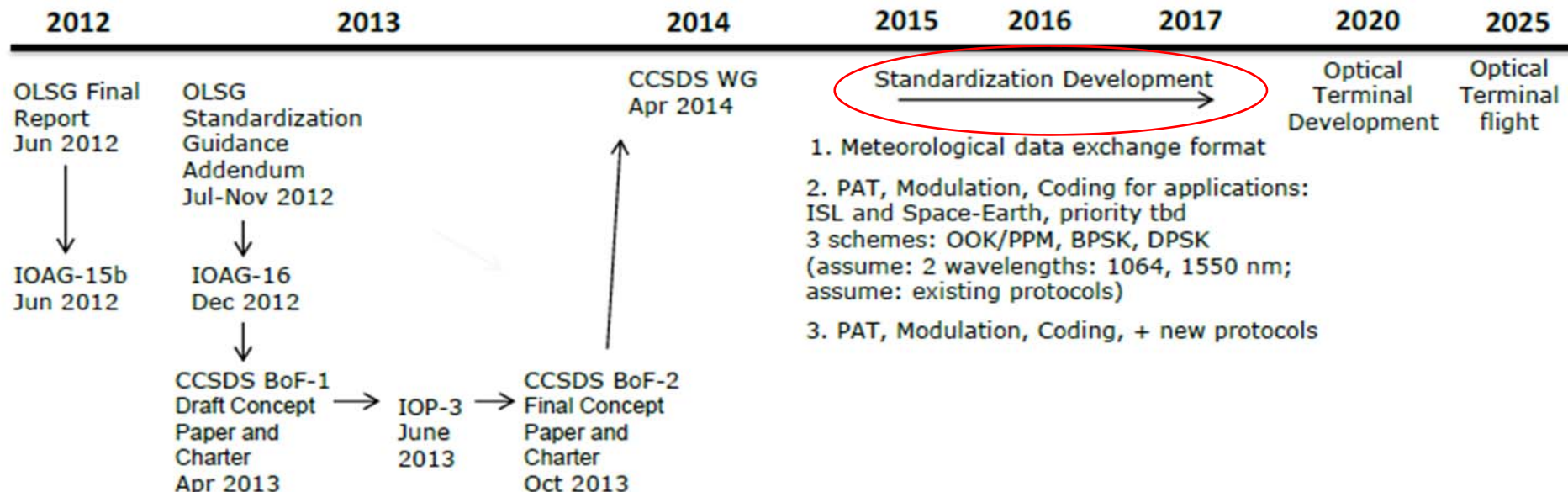
3. 大気の影響への対応

大気によるレーザ光への影響の把握が必要

サイトダイバーシティによる雲の遮断の回避が有効

標準化議論のスケジュール

Optical Communication Standardization and Development

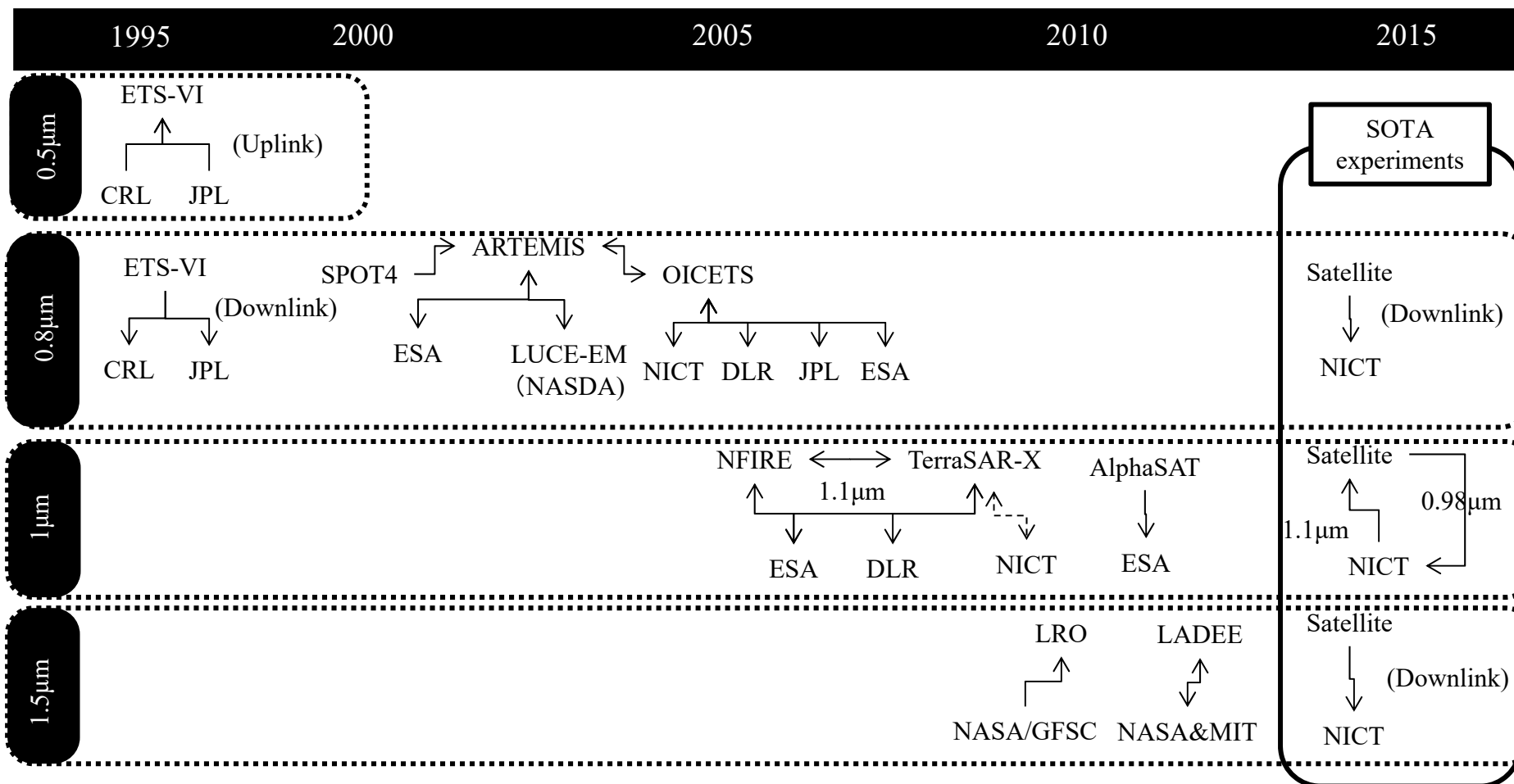


Technology Demonstrations

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2020	2025
TerraSar-X (DLR) 2009 LEO-ground demo 1064nm, Homodyne BPSK	LLCD (NASA) 2013 Moon-earth demo 1550nm, single photon detection and PPM	Sentinel/EDRS (ESA) 2014 ISL 1064nm, Homodyne BPSK					
TerraSar-X to NFIRE (DLR) 2008 ISL LEO-LEO demo 1064nm, Homodyne BPSK	LCT-135/Alphasat (ESA) 2013 ISL, GEO to earth demo 1064nm, Homodyne BPSK						
					Optel-μ (ESA) 2017 LEO-earth demo - direct detection and PPM		
						DOT (NASA) 2018 Mars-ground 1550nm, direct detection PPM	

Klaus-Juergen Schulz, John Rush, "Results of the Optical Link Study Group," Space Ops. 1275004, 2012.

これまでの通信波長



最近のプロジェクト



地域	プロジェクト名／衛星名	通信波長	通信方式	適用箇所
ドイツ	TerraSAR-X	1μm	BPSK	LEO-LEO LEO-GND
米国	NFIRE	1μm	BPSK	LEO-LEO
米国	OPALS	1.5μm	IMDD	LEO-GND
米国	LLCD	1.5μm	PPM	Moon-GND
欧州	AlphaSAT	1μm	BPSK	GEO-GND
日本	SOTA	1.5μm	IMDD	LEO-GND
欧州	ERDS	1μm	BPSK	GEO-LEO
米国	LCRD	1.5μm	DPSK, IMDD	GEO-LEO GEO-GND
ドイツ	OSIRIS	1.5μm	IMDD	LEO-GND
欧州	Optel-μ	---	IMDD, PPM	LEO-GND
米国	DOT	1.5μm	PPM	Mars-GND
米国	TDRS	1.5μm	DPSK	GEO-GND

LEO 低軌道, GEO 静止軌道, GND 地上

日本の研究開発の流れ



宇宙光通信技術の研究開発

ETS-VI(きく6号)

- 通信機器名 LCE
- 1994年 衛星-地上局間光通信に世界で初めて成功。

OICETS(きらり)

- 通信機器名 LUCE
- 2005年 衛星間光通信に世界初の成功。
- 2006年 低軌道-地上局間光通信に世界初の成功。

SOCRATES

- 通信機器名 SOTA
- 低軌道衛星-地上局光通信に、地上の通信波長帯1.5 μ mを初めて採用。

高速な空間光通信技術の研究開発

次世代LEOシステム

- 2001年~2005年
- 地上の通信波長帯1.5 μ mを採用
- データ伝送速度2.5Gbps

光空間通信技術

- 2010年~2013年
- 地上の通信波長帯1.5 μ mを採用
- データ伝送速度40Gbps
- 移動体からのデータ伝送を実施

- 宇宙光通信技術の高速化
- 地上で発達した光通信技術の宇宙への適用

過去 現在 今後

宇宙の利用例

宇宙光通信の特徴、特有の技術

宇宙光通信の実績

大気的光通信への影響

宇宙光通信に関する議論と研究開発の動向