

# 衛星-地上局間光通信のための要素技術

---

東海大学 情報通信学部 通信ネットワーク工学科  
高山佳久

# 衛星-地上局間光通信の特徴

## 無線

- ・長距離
- ・強い送信、弱い受信

## 移動体

- ・高速
- ・位置の不確定性
- ・姿勢制御の誤差
- ・搭載装置の重さ、寸法、電力などへの制限
- ・周波数の変化

## 地上局

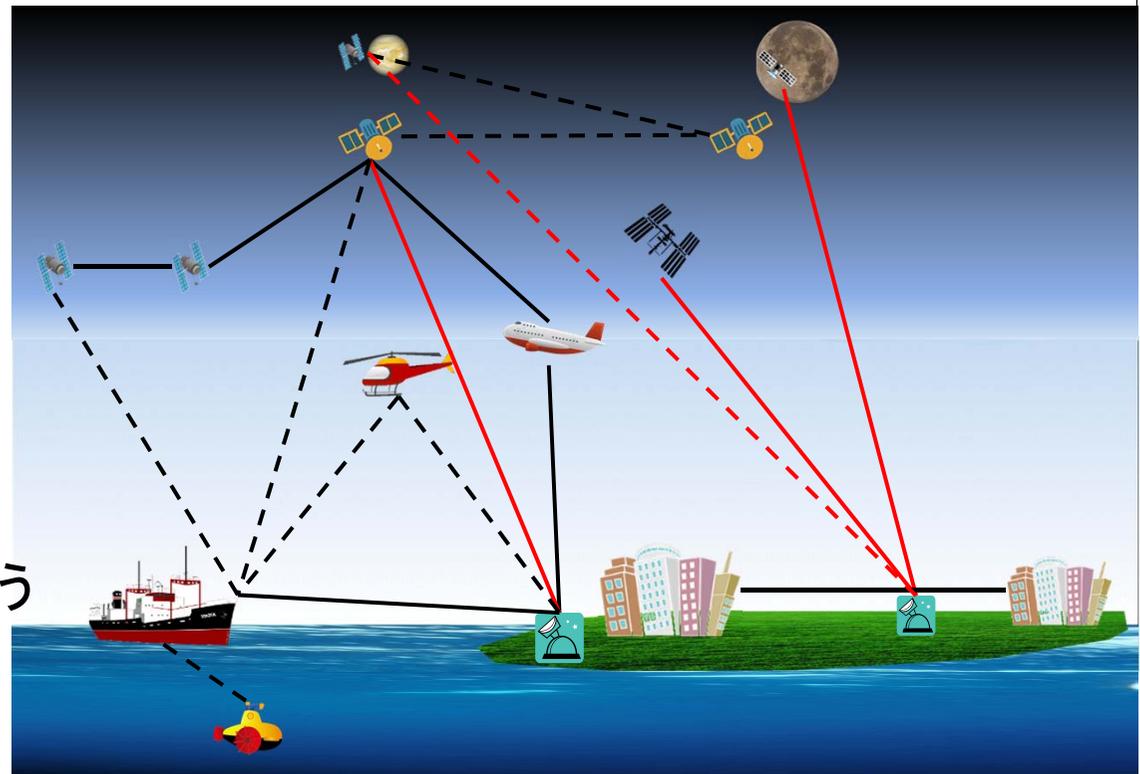
- ・高速追尾
- ・高いデータレート受信
- ・衛星側のリソース不足を補う  
(大口径の望遠鏡、強い光の射出など)

## 大気影響

- ・伝搬方向の変動
- ・強度変動
- ・瞬断
- ・遮断

## レーザー光

- ・高指向性



# 衛星-地上局間光通信への要求



## 要求

- ・光回線の迅速な確立
- ・光回線の迅速な復帰
- ・光回線の維持
- ・安定した送受信
- ・大容量伝送
- ・長い時間の通信

## 通信装置に必要な機能

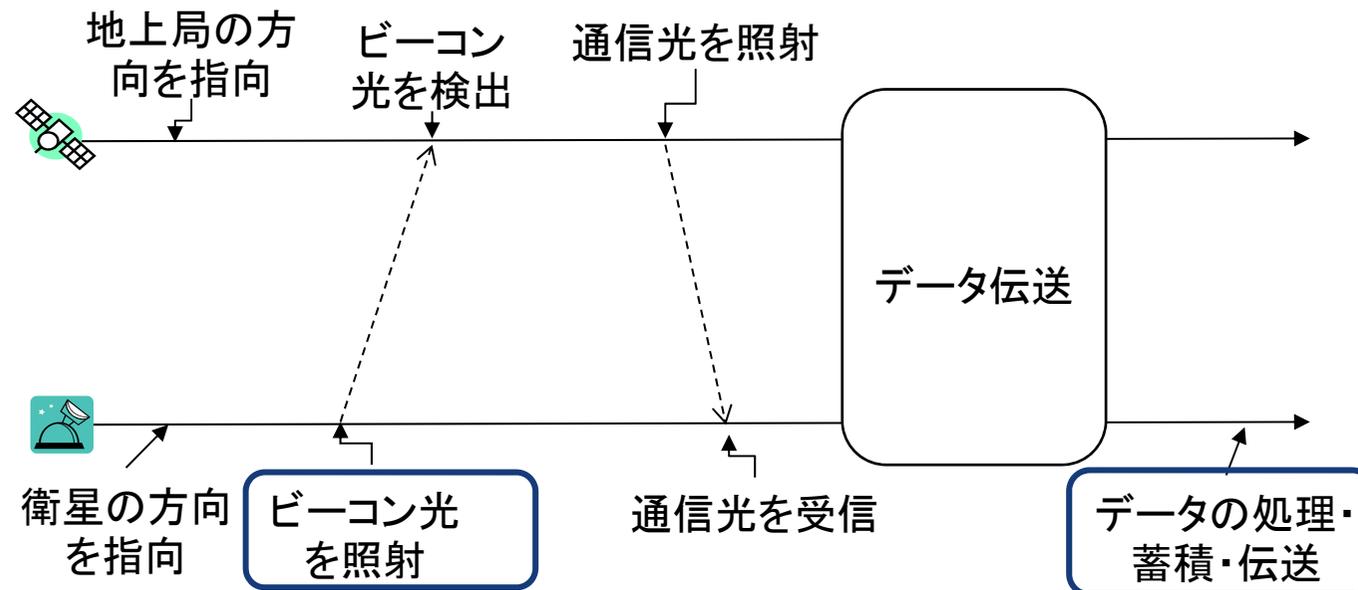
- ・捕捉(初期捕捉、再捕捉)
- ・追尾(粗追尾、精追尾)
- ・光行差補正
- ・大気影響の低減
- ・高効率な光結合
- ・ドップラー補償
- ・雲の回避

## その他(搭載機体)

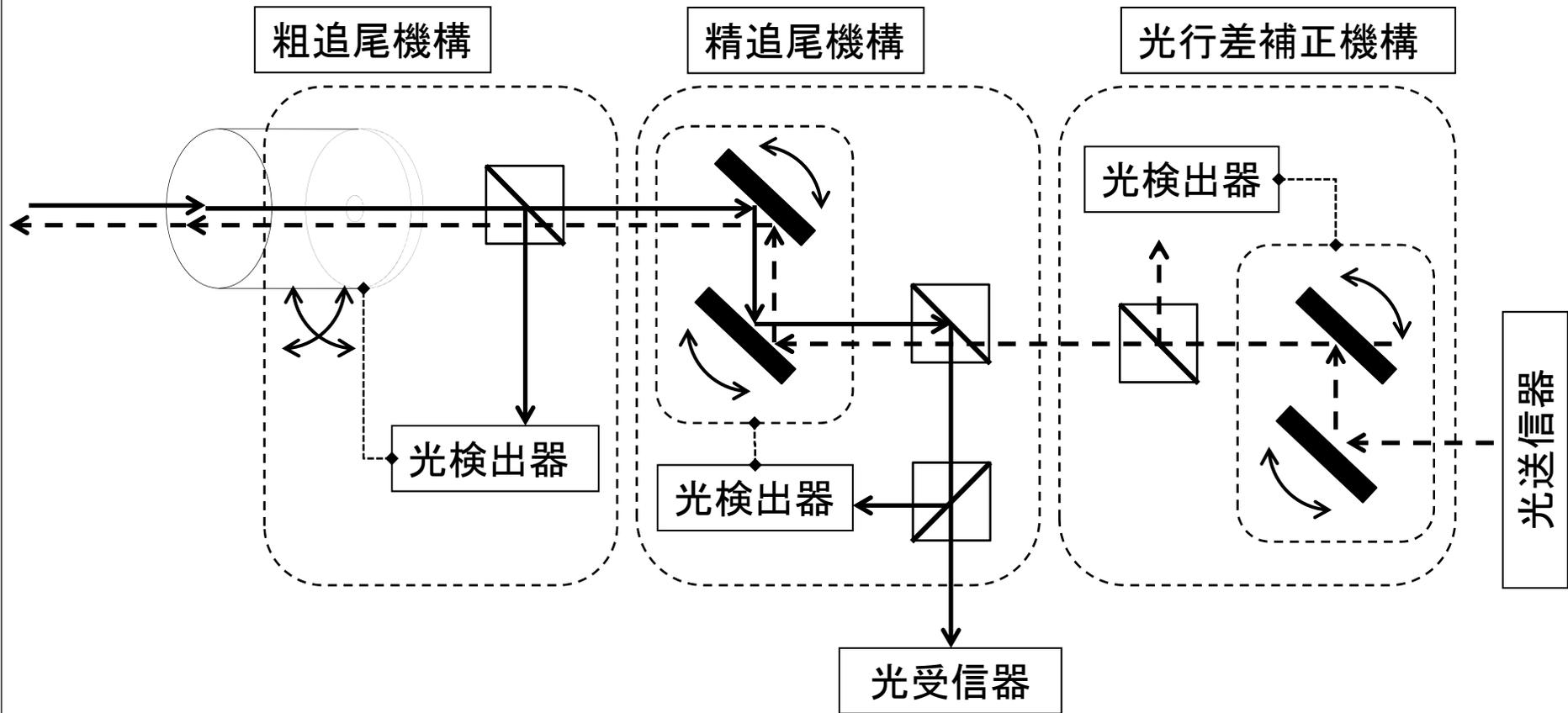
- ・姿勢制御
- ・フィードフォワード

## その他(システム)

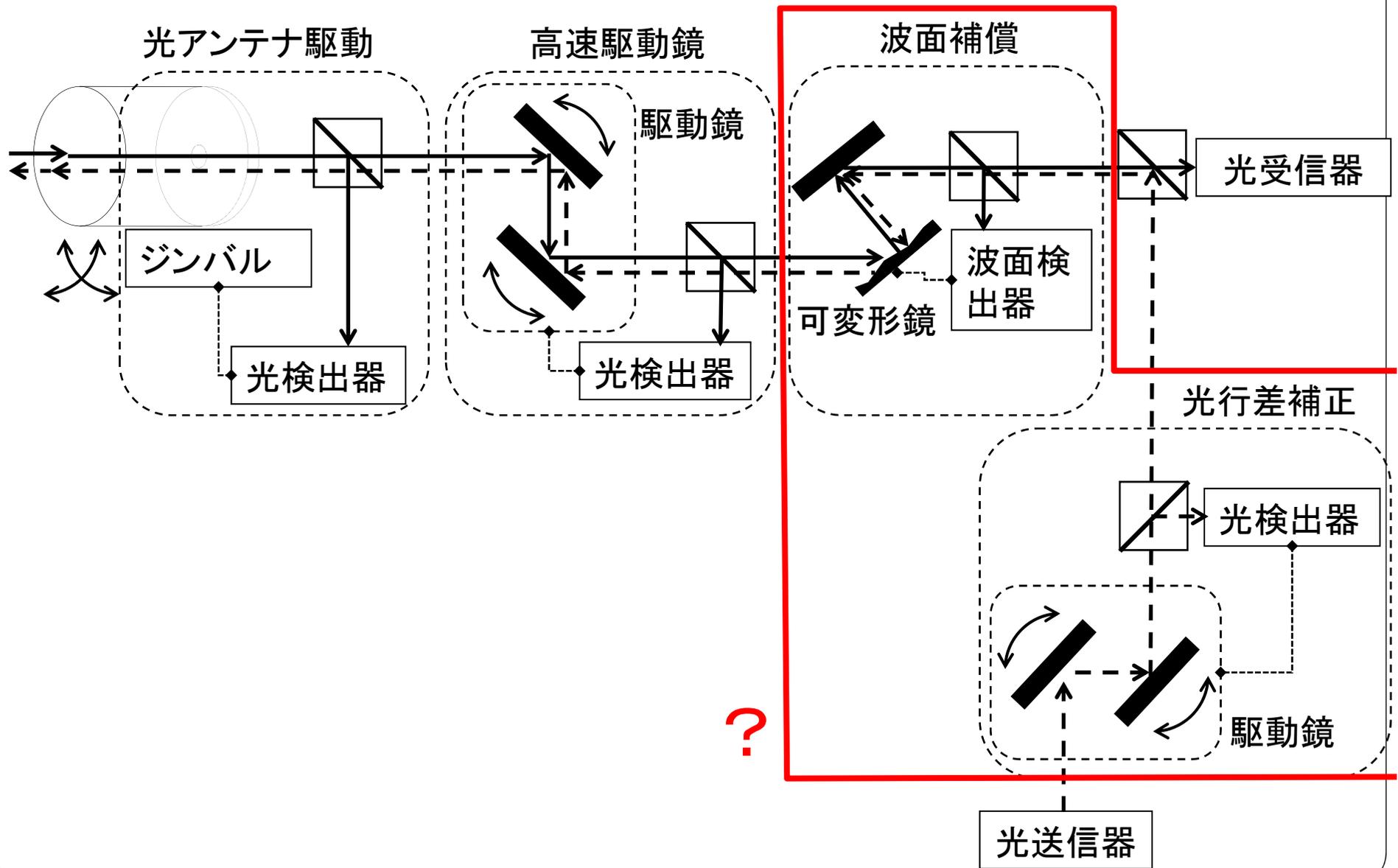
- ・軌道情報
- ・複数の地上局



# 装置の構成例



# 装置の構成例

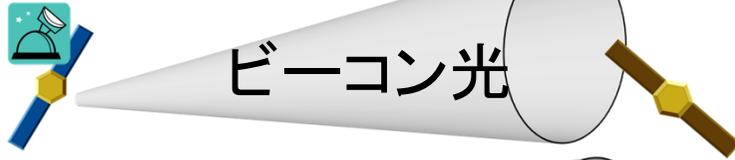


# 要素技術： 捕捉

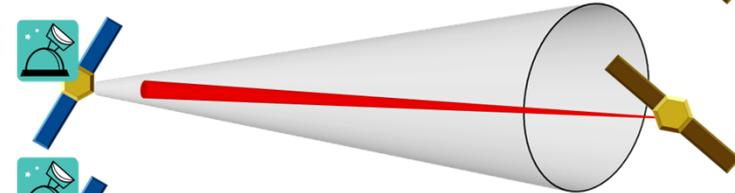
地上局/衛星1

衛星2

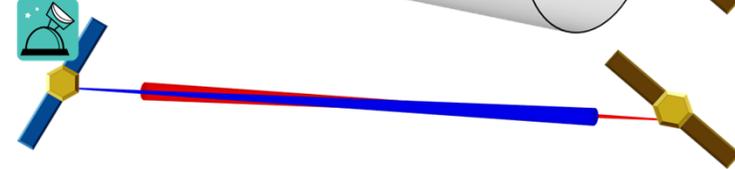
①



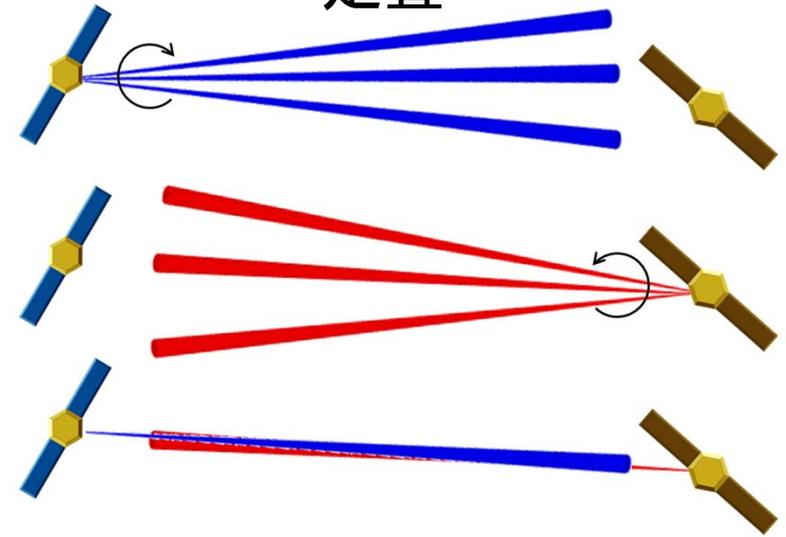
②



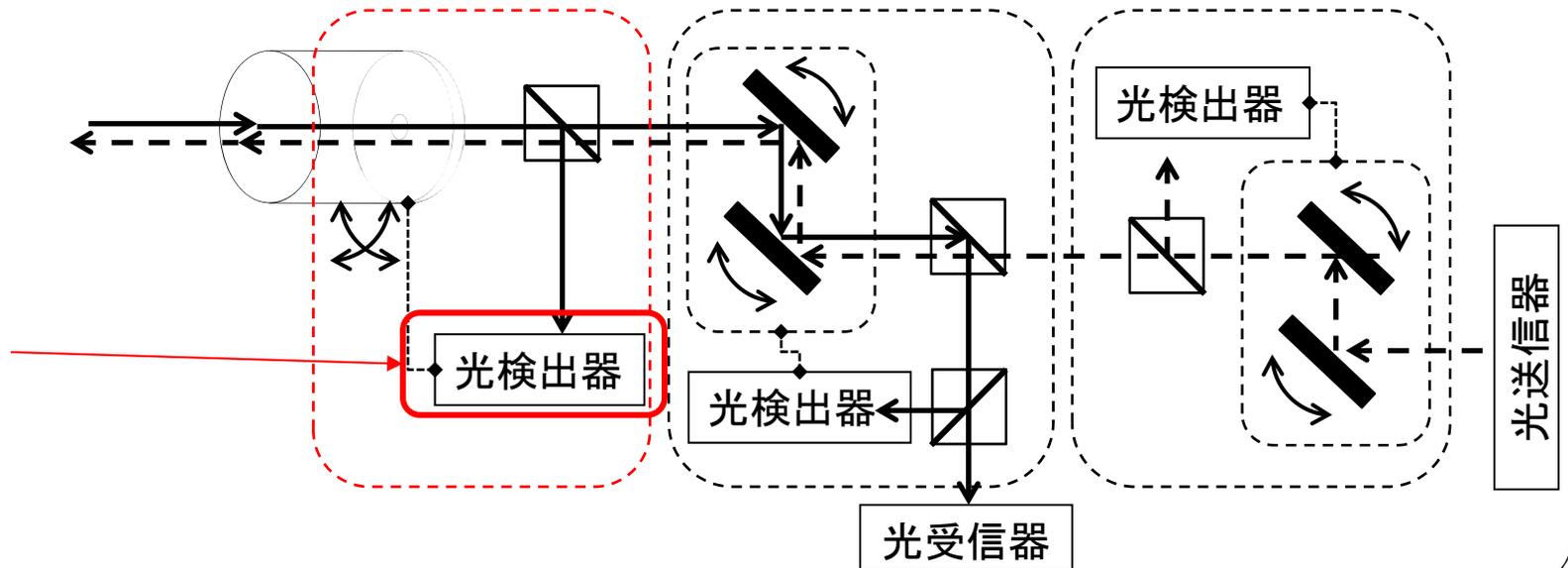
③



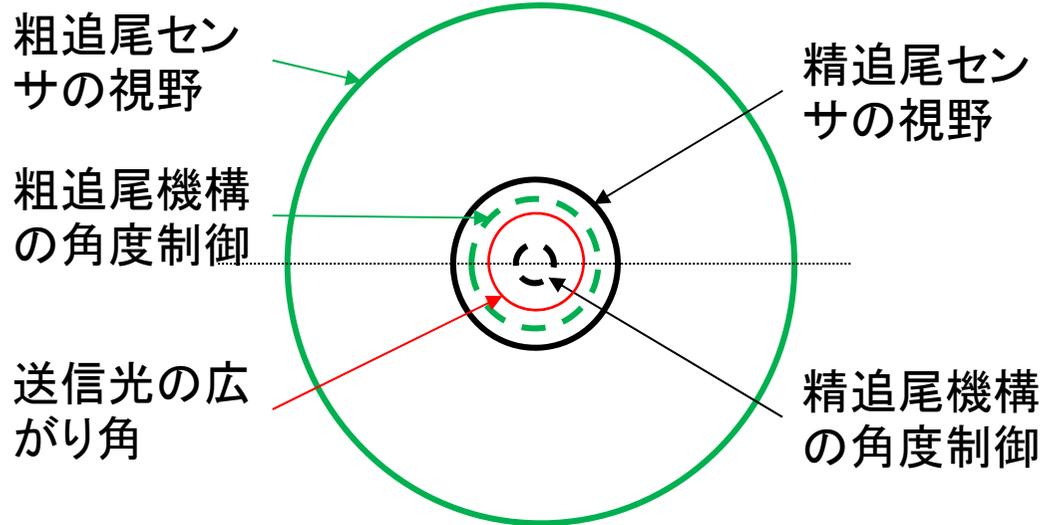
走査



カメラ  
または  
四分割PD



# 要素技術： 追尾



## 粗追尾

Tracking accuracy  $\pm 0.01$  deg.

Optical sensor: CCD

Field of view  $\pm 0.2$  deg.

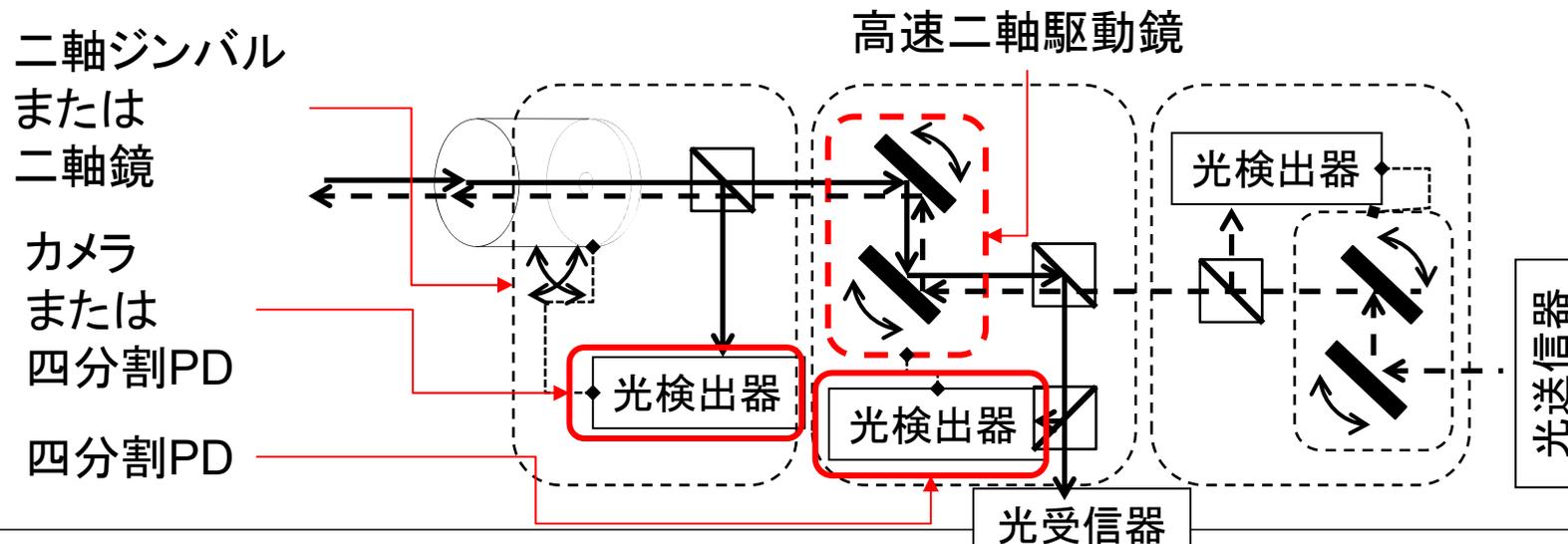
## 精追尾

Tracking accuracy  $\pm 0.92$   $\mu$ rad

Optical sensor: Quadrant detector

Field of view  $\pm 200$   $\mu$  rad.

T. Jono, et. al., "Demonstrations of ARTEMIS-OICETS Inter-Satellite Laser Communications", AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), 5461, 1355, pp. 1-7 (2006)



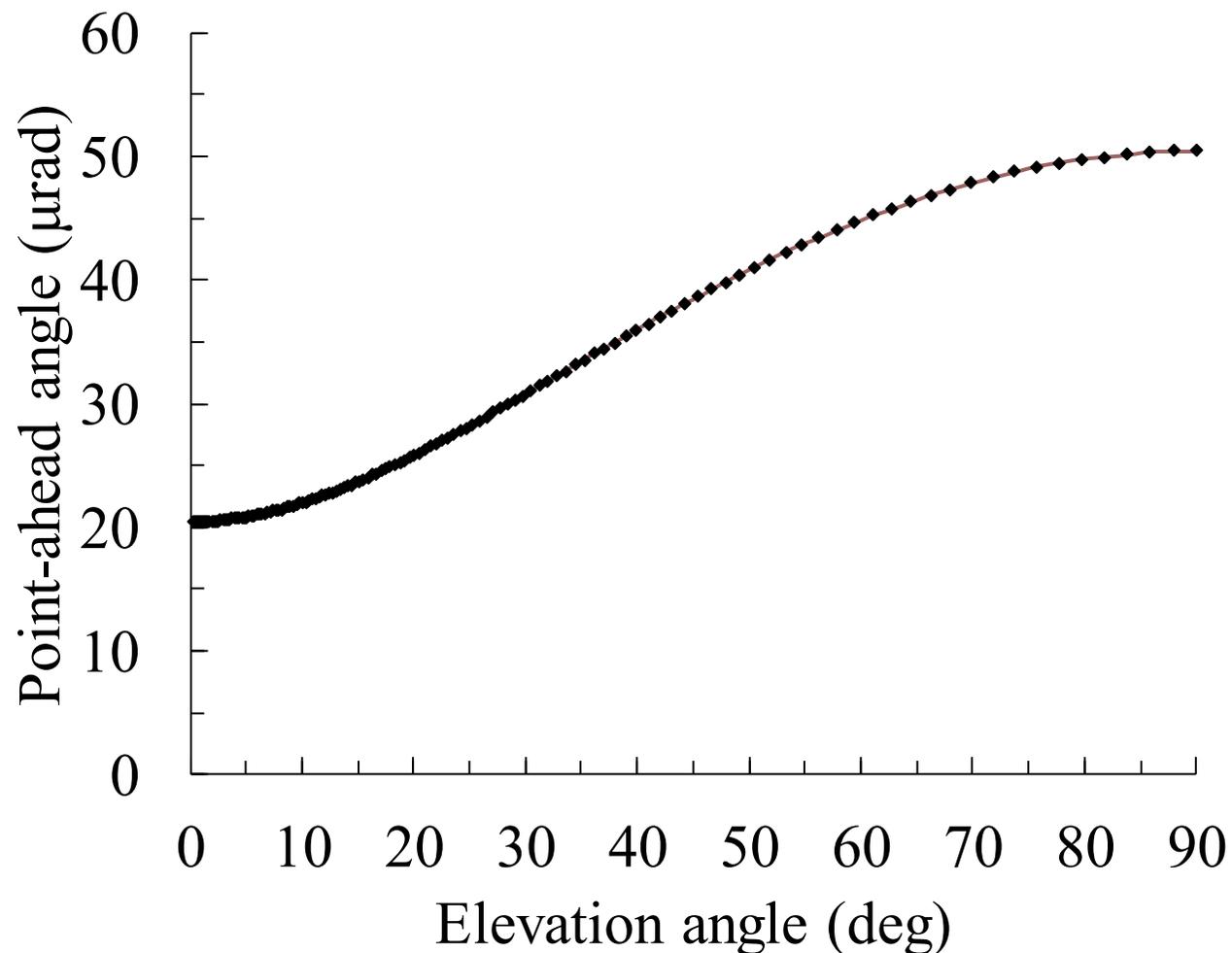


# 光行差補正角の計算例



地上→衛星

衛星高度  
600kmの場合



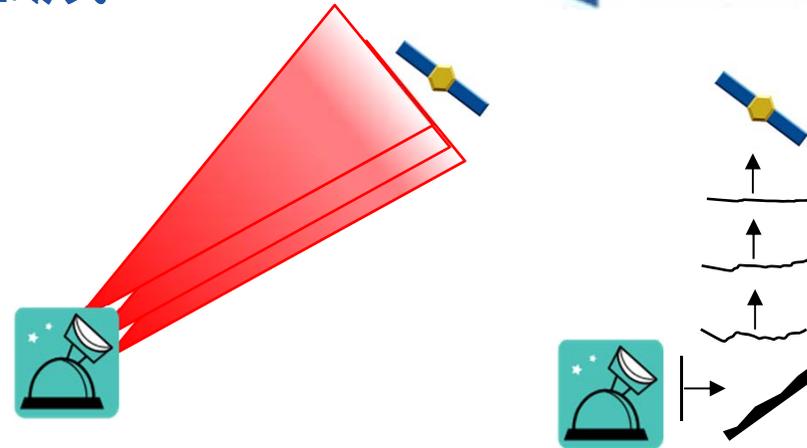
衛星高度36000kmの場合  
→ 約20μrad

# 要素技術： 大気影響の低減



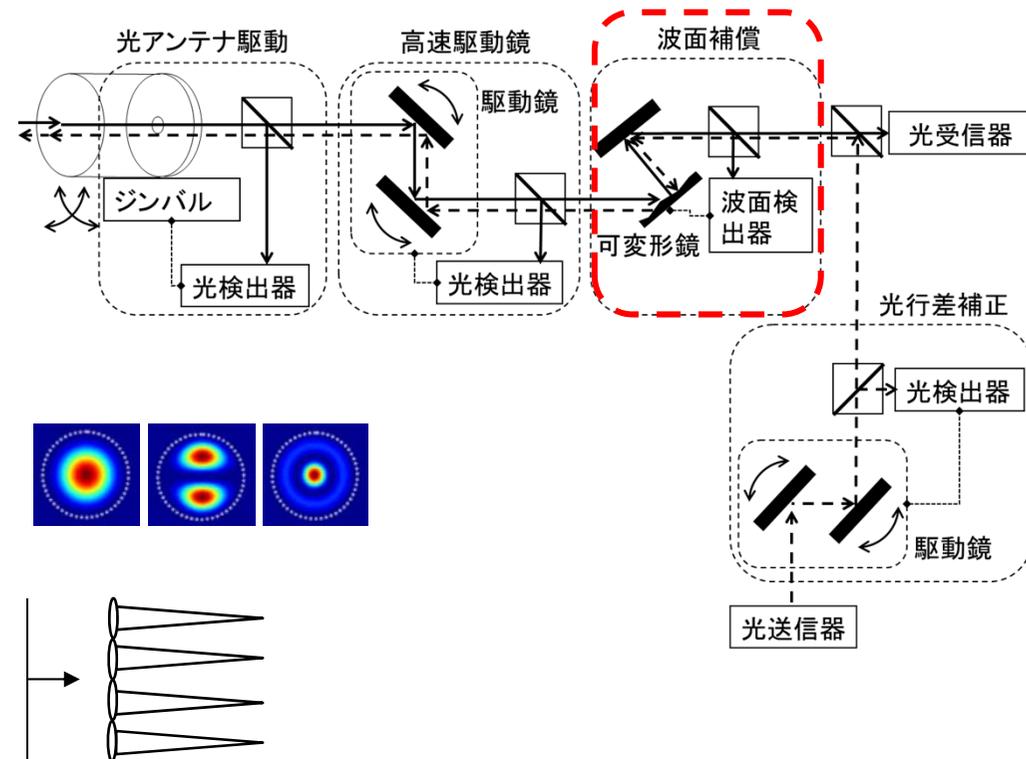
## 送信

- 複数光の同時伝送
- 歪を与えた波面の伝送

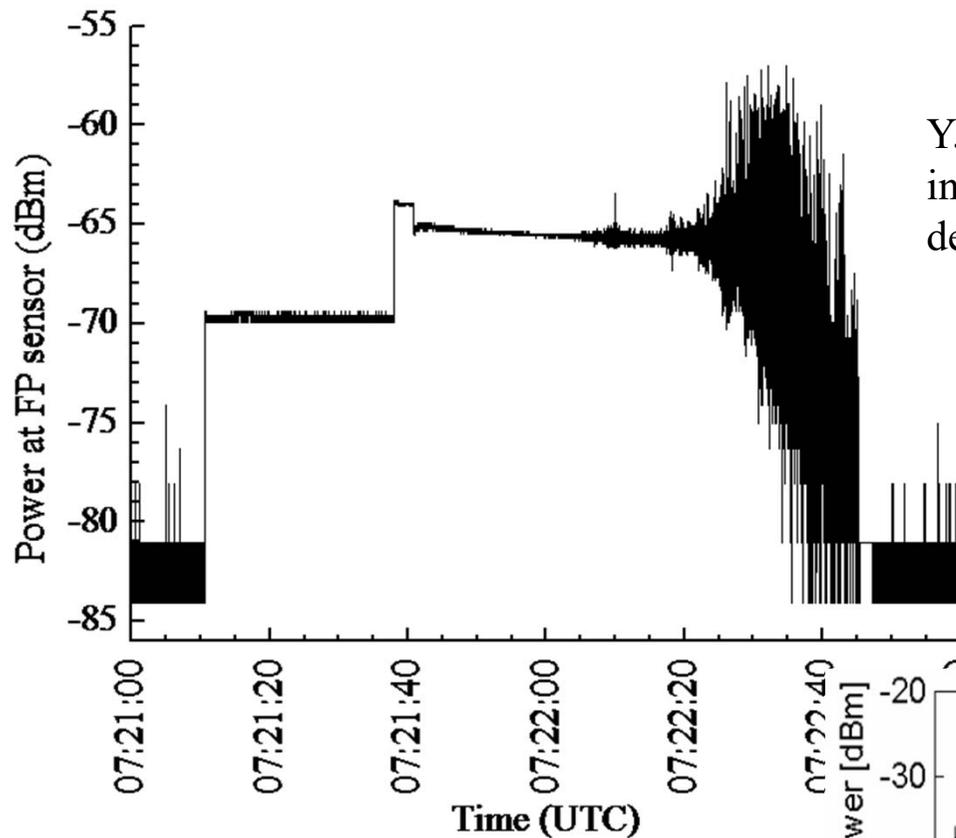


## 受信

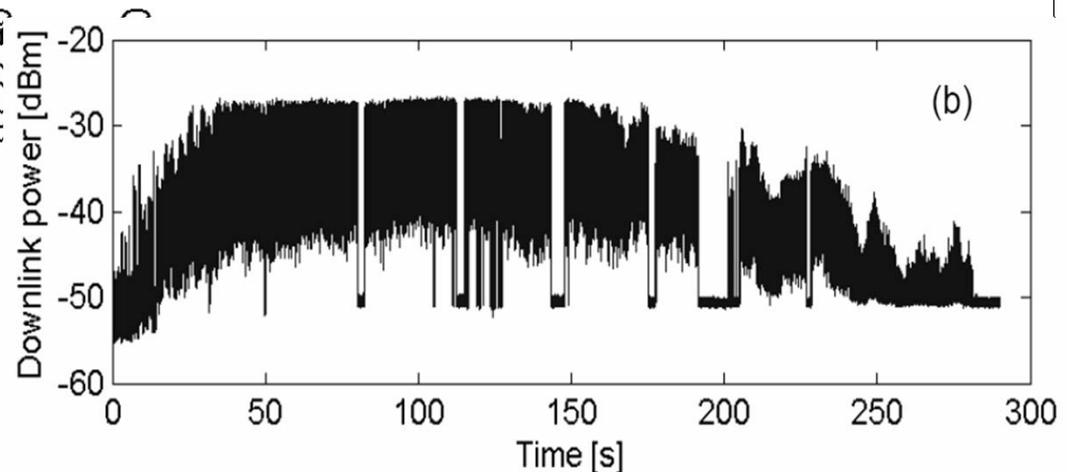
- 補償光学
- 複数開口での受信  
モード分割  
波面分割
- 大口径の受信器



# 大気の影響の例(強度の変動)

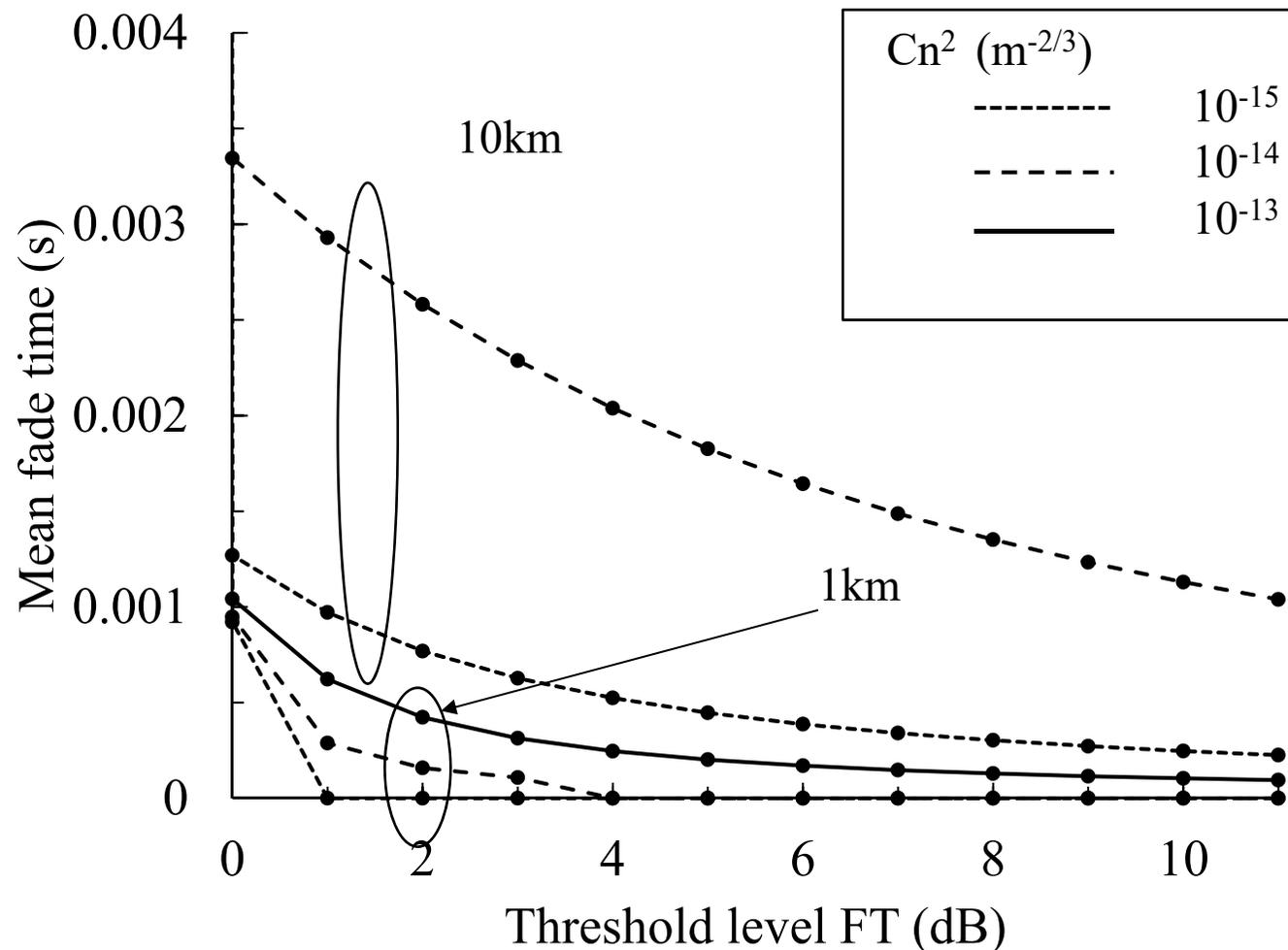


Y. Takayama, et al., "Observation of atmospheric influence on OICETS inter-orbit laser communication demonstrations", Proc SPIE 6709 (2007).



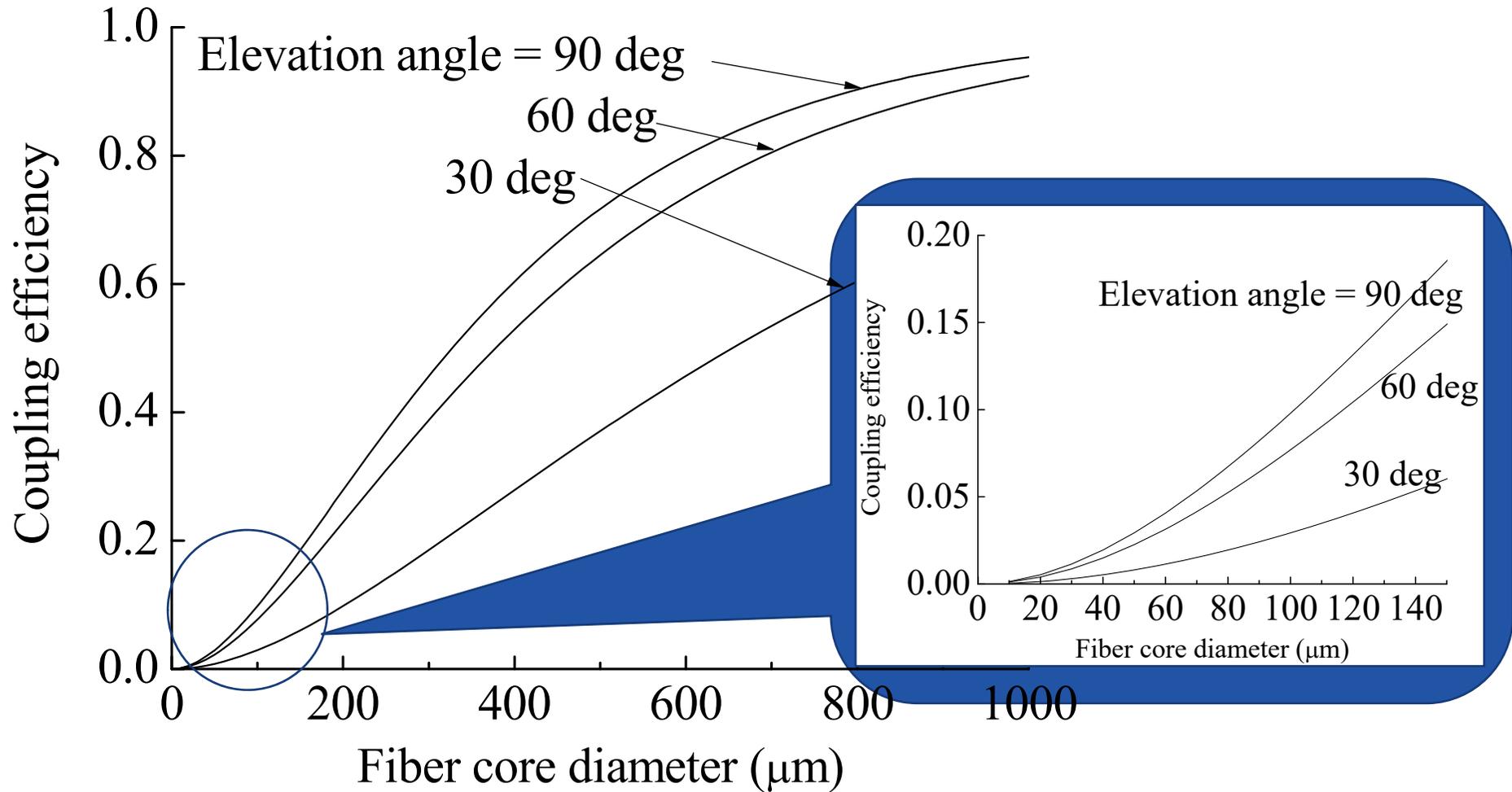
M. Toyoshima, et al., "Ground-to-OICETS laser communication experiments", Proc. SPIE 6304 (2006).

# 大気の影響の例(強度の変動)

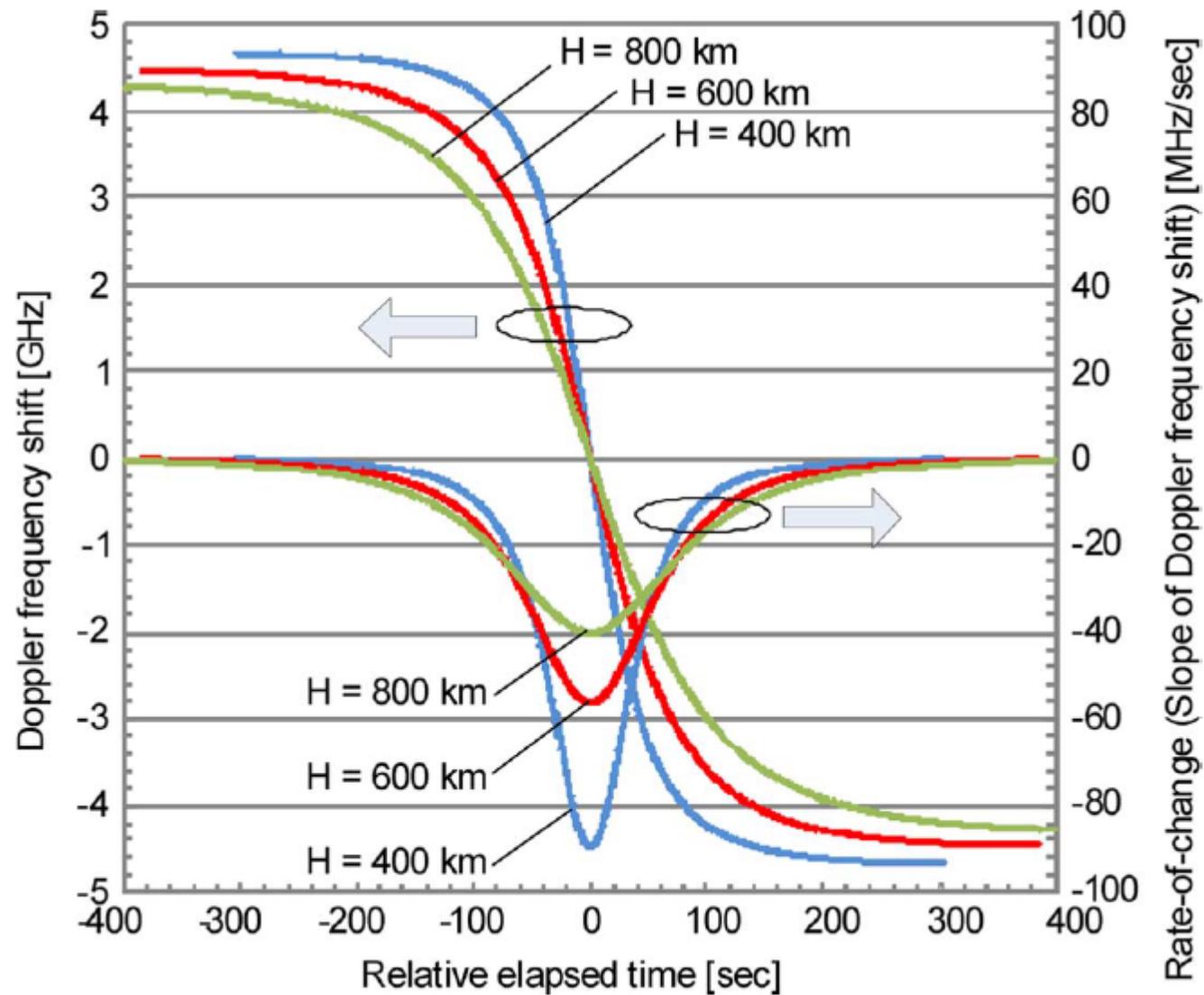


$FT = 10 \log(\text{平均信号電力} \div \text{閾値とする電力})$

# 光ファイバへの結合効率



# ドップラー効果による周波数の変化



Yozo Shoji, Martyn J. Fice, Yoshihisa Takayama and Alwyn J. Seeds, "A pilot-carrier coherent LEO-to-Ground downlink system using an optical injection phase lock loop (OIPLL) technique," IEEE J. Lightwave Tech., 30, 16, pp. 2696-2706 (Aug. 16, 2012).

## 光の広がり角、アンテナ径、射出パワーの例(衛星)

名称	光の広がり角	射出パワー	通信速度	装置のサイズ	参考
ETS-VI	30 $\mu$ rad (0.002deg)	13.8mW	1Mbps	主鏡直径 7.5cm 装置重量 22.4kg	荒木賢一, 光学, 33, 10, p.582, 2005.
OICETS	5 $\mu$ rad (0.0003deg)	100mW	50Mbps	主鏡直径 26cm 装置重量 140kg	M. Toyoshima, et al., Acta Astronautica, 55, p.261, 2004.
SOTA	200 $\mu$ rad (0.01deg)	40mW	10Mbps	主鏡直径 5cm 装置重量 6kg	Y. Koyama, et al., ICSSC 17-2, pp. 1- 6, 2013.

## ところで、そもそも

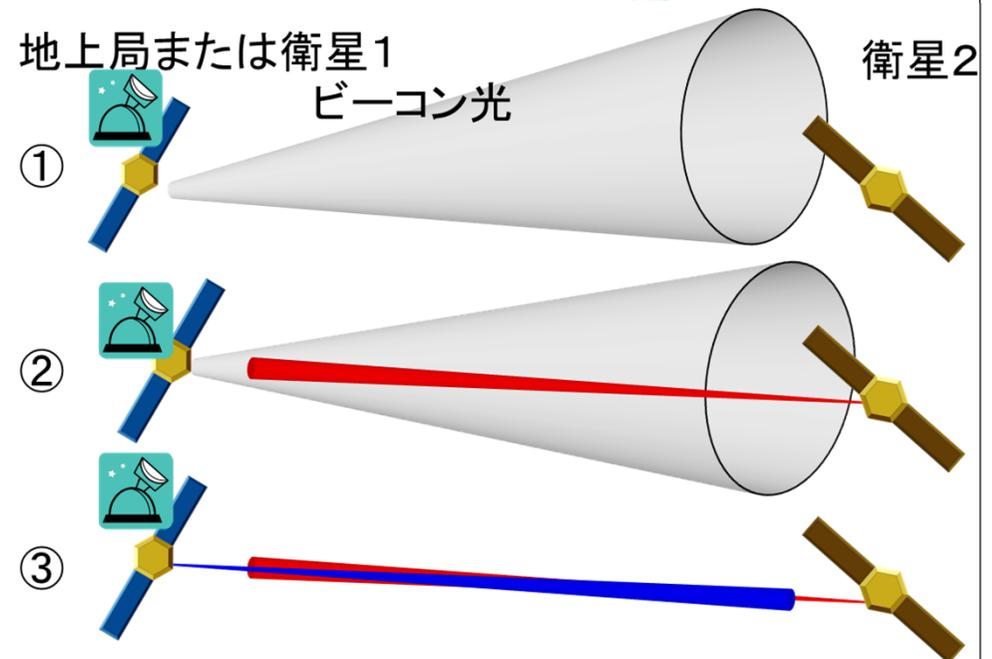
光の回線を形成する過程では、  
①における自局のビーコン光  
の正常な射出は、②において  
相手局からの通信光を検出して、  
初めて確認できる。

ビーコン光を照射したのに、相  
手局からの光を検出できない  
場合、原因として、

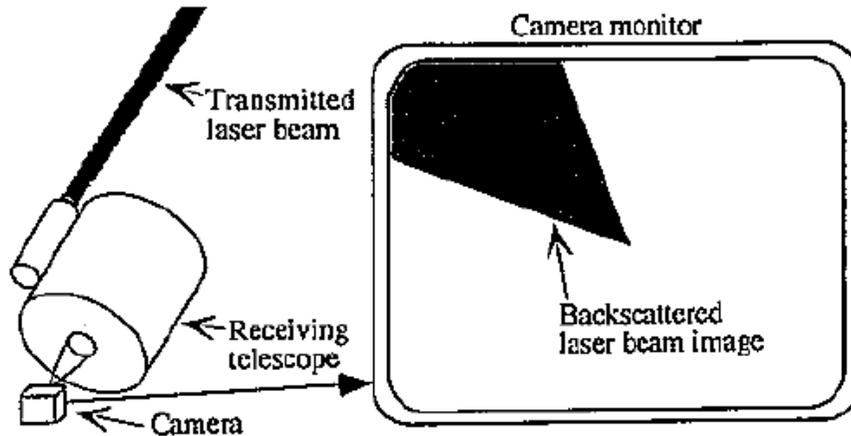
- (1) 自局が射出したビーコン光が相手局を照射していない。
- (2) 自局のビーコン光は相手局を照射しているが、相手局からの通信光が自局に到達していない。

が考えられる。原因を明らかにするには、切り分けが必要。

 自局から射出した光の伝搬方向を、自局側で確認する。



# 自局が射出した光の確認の例



Toyoda M, Araki K and Suzuki Y,  
 “Ground-to-satellite narrow-laser-beam  
 pointing by use of a backscattered  
 image,” Appl. Opt. 40, 30, pp. 5295-5303,  
 2001.

Fig. 1. Conceptual drawing of laser beam transmission and observation of the backscattered laser beam image.



<http://www.nict.go.jp/press/2015/06/img/20150603-2-04L.png>

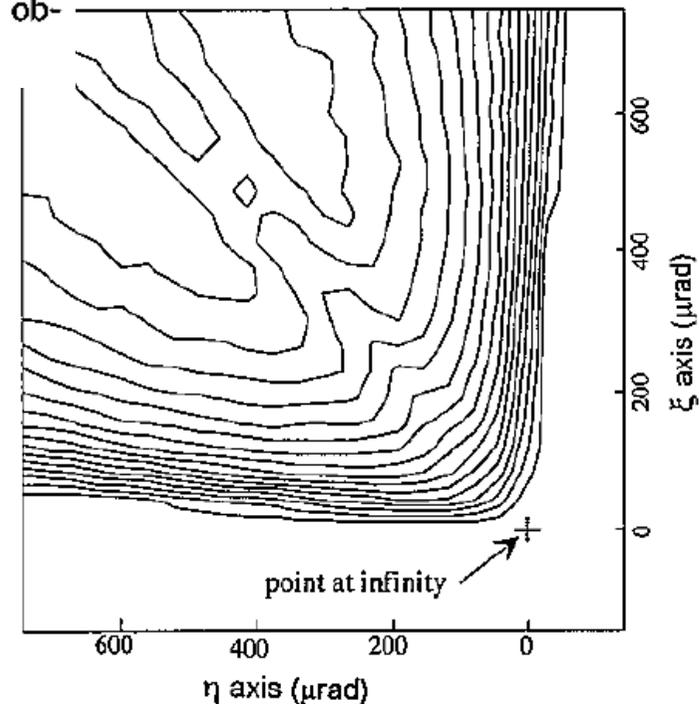
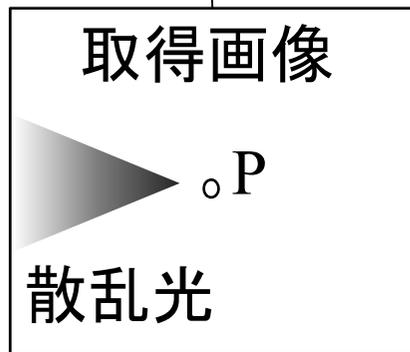
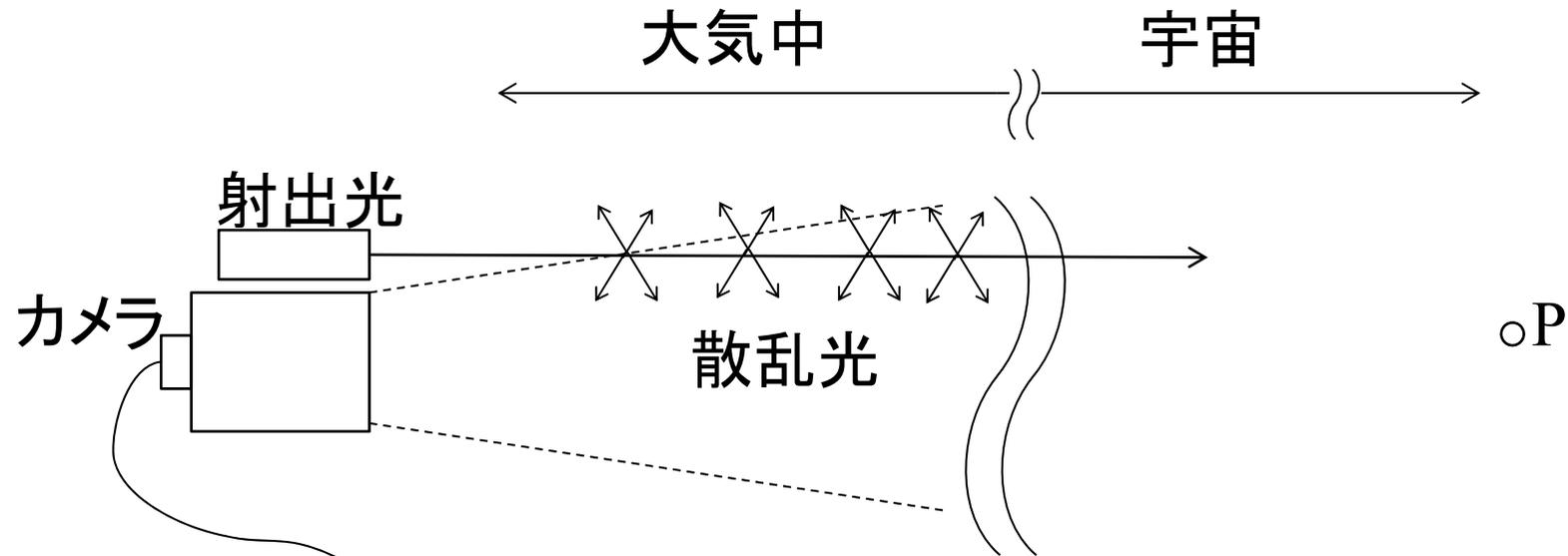


Fig. 6. Calculated contour map of the image of the backscattered laser beam at 60-deg elevation.

# 自局が射出した光の確認



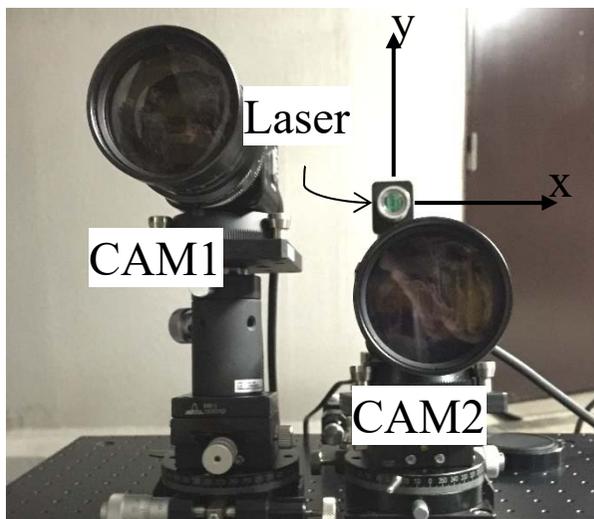
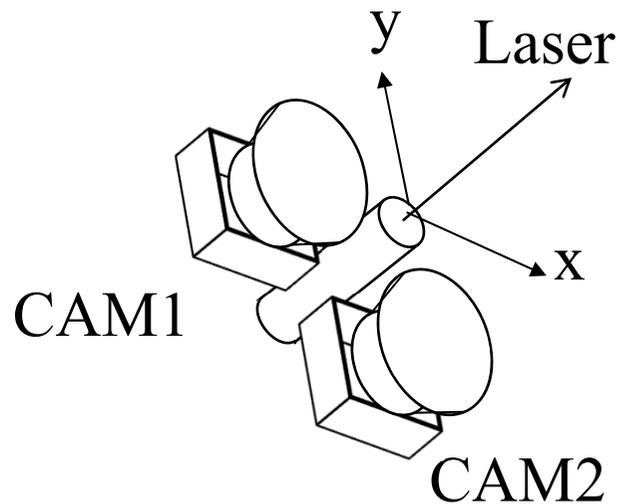
自局が射出した光の大気による散乱光を、自局に備えたカメラで撮像し、光の伝搬方向を確認する



自局に戻る散乱光が弱い、あるいは散乱が起こらない領域では、光の伝搬を確認できない

# 空間中の直線の特定

三次元空間中の直線は、二つの平面の光線で与えられる



佐野杏, 織田桂史, 高山佳久, "散乱光を利用した光の伝搬方向の計測に関する検討," 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 71, p. 71, 2016.

衛星-地上局間光通信の特徴

要素技術

装置の構成例

大気の影響

ところで、そもそも