

次世代光無線システム

--- 空間・ファイバのシームレス接続システムの研究開発 ---

若森 和彦

高橋 浩一

松本 秀樹

村上 匡亮

羽鳥 光俊

カムギシャ カザウラ, 大前 和憲, 鈴木 敏司, 松本 充司

有本 好徳

浜松ホトニクス(株)

オリンパス(株)

昭和電線電纜(株)

小糸工業(株)

中央大学

早稲田大学GITS/GITI

独立行政法人 情報通信研究機構

Agenda

- ・研究の背景
- ・空間とファイバのシームレス接続光無線とは
- ・空間とSMFの接続技術
- ・フル光接続システムの有効性評価
- ・今後の展望

研究の背景



従来技術での壁

従来技術での速度的限界

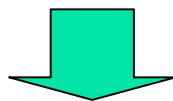
波長: 800nm帯, Si系光デバイス

光学系の微細化, 精緻化

所要パワーの増加

コストプレッシャー
アイセーフ

光ファイバ網との接続(プロトコルの制約)



次世代光無線システム

Bit rate free, Protocol free



新しい光無線デザイン

アイセーフの達成

低コスト化 ファイバ系デバイス, モジュールの利用



: $0.8 \mu\text{m}$ $1.55 \mu\text{m}$

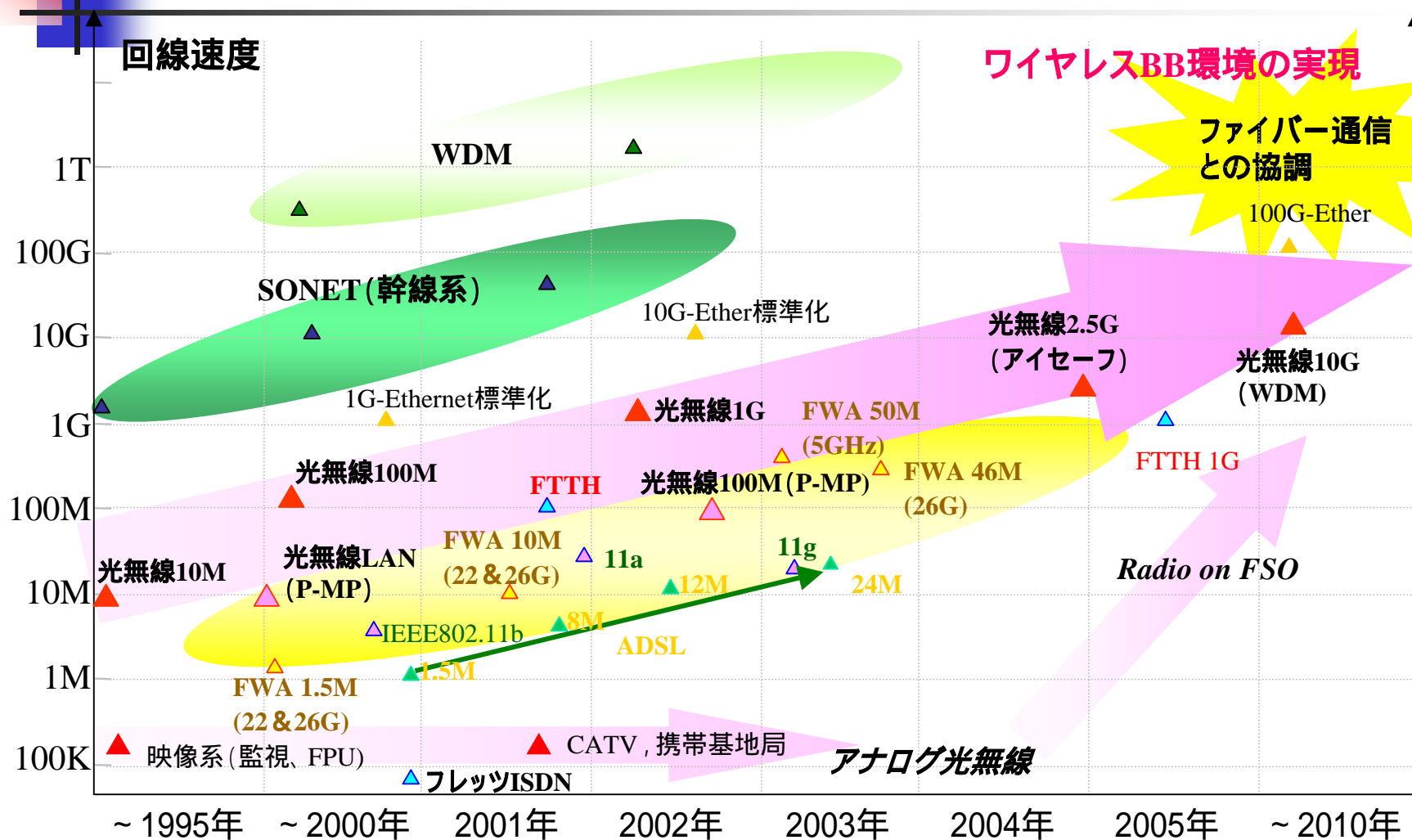
ファイバ技術の応用

光ファイバ網との接続

O/E, E/O変換を伴わない All-optical system

SMF  SMF

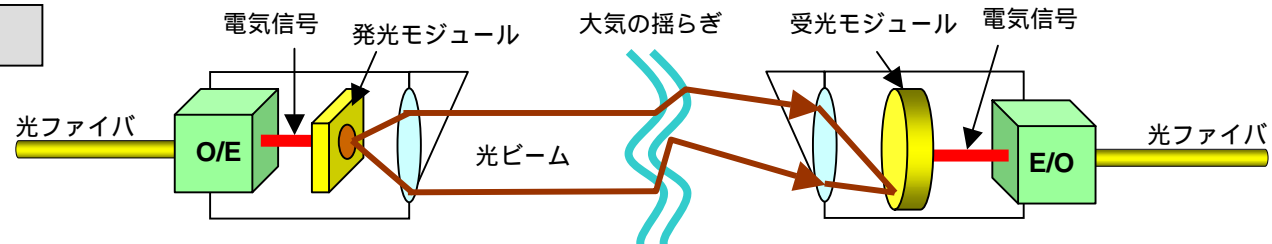
光無線技術ロードマップ



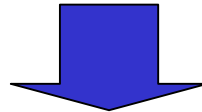
空間とファイバのシームレス接続 光無線とは

ファイバと空間のシームレス接続

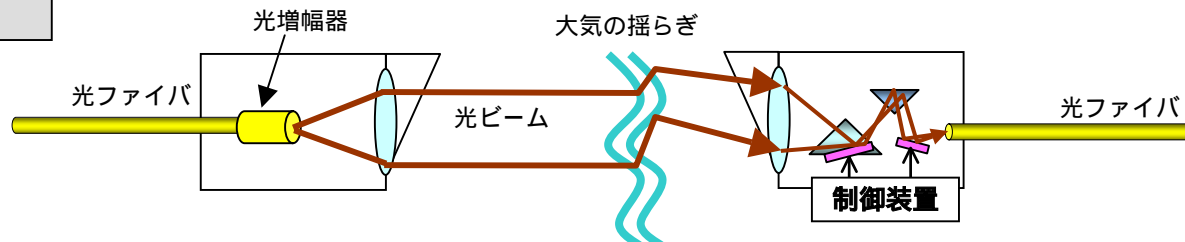
現在の光無線装置



光ファイバと光無線の接続部分で光 / 電気(O/E)、電気 / 光(E/O)変換が必要
(光ファイバ部分で波長分割多重した光信号をそのまま送受信することができない)
受光モジュールが大きく(500 μm 程度)、また、入射角度は自由なため導光は比較的容易



フル光接続光無線



一貫して光信号(光ファイバ部分で波長分割多重した光信号をそのまま光無線で送受信)
直径10 μm の光ファイバのコアに適切な角度で導光する必要

Bit rate free , Protocol free の実現



NICT委託研究

ICSAから提案

NICT委託研究

H16～17年度研究予算化

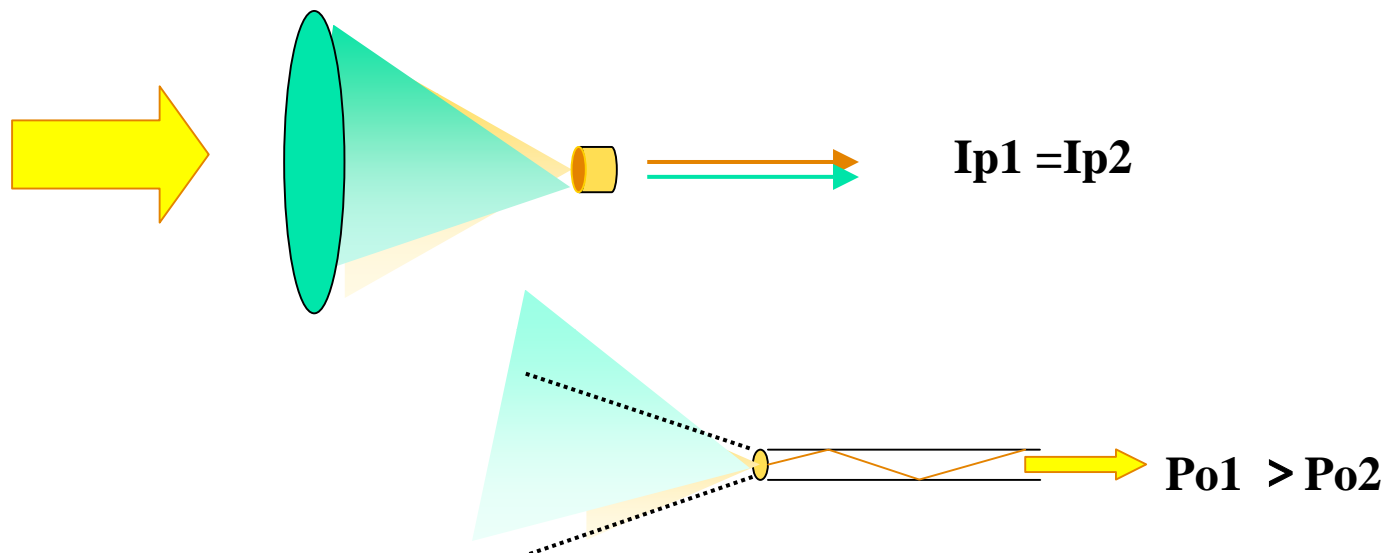
1. 空間光のシングルモードファイバへの効率的導光技術の開発

2. フィールド実験によるフル光接続光無線の有効性の検証

- ・受信光信号の大気揺らぎを補償する捕捉・追尾技術の開発と検証
- ・フル光接続の有効性(高速化, プロトコルの自由度向上)評価
- ・1.55 μm 帯の伝播特性データ取得 ・光波とミリ波の伝搬特性の比較

技術的課題

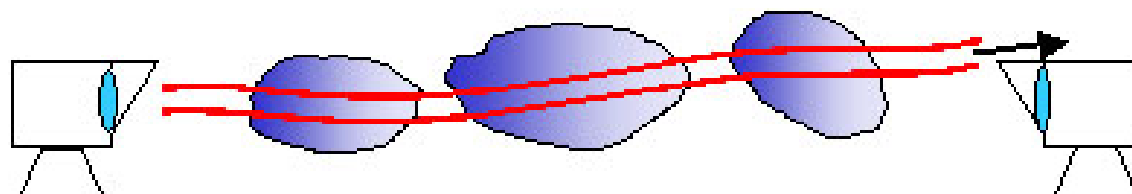
従来の受光デバイス: 入射角度は無関係



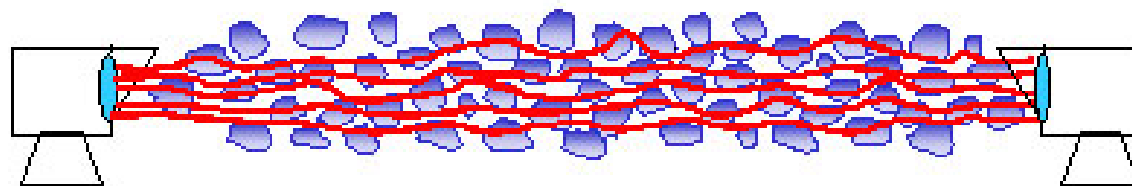
直径 $10\ \mu\text{m}$ の光ファイバのコアに適切な角度で導光する必要

大気揺らぎによる到来角度変動が避けられない

大気揺らぎ



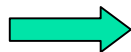
Beam wander



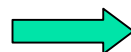
Scintillation or intensity fluctuations

Beam wander: 低速な変動 (日週的, 季節的変動)

Scintillation: 高速変動



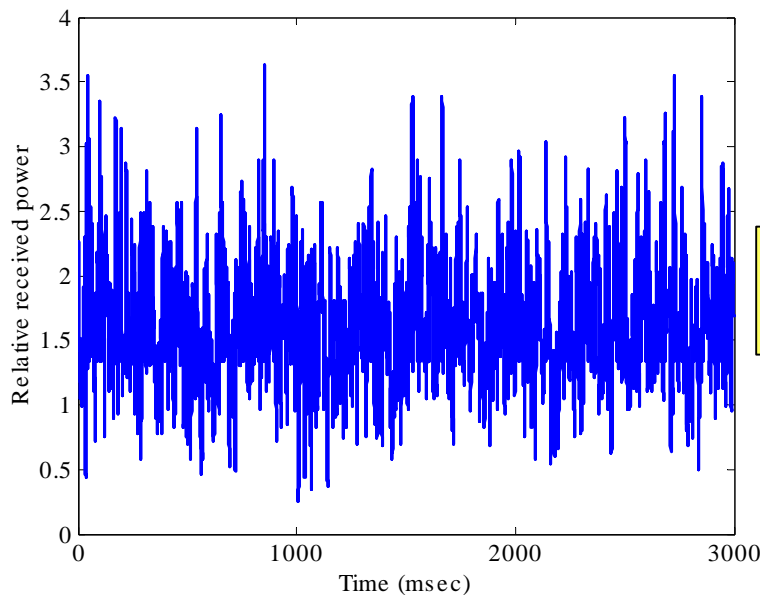
到来角度変動



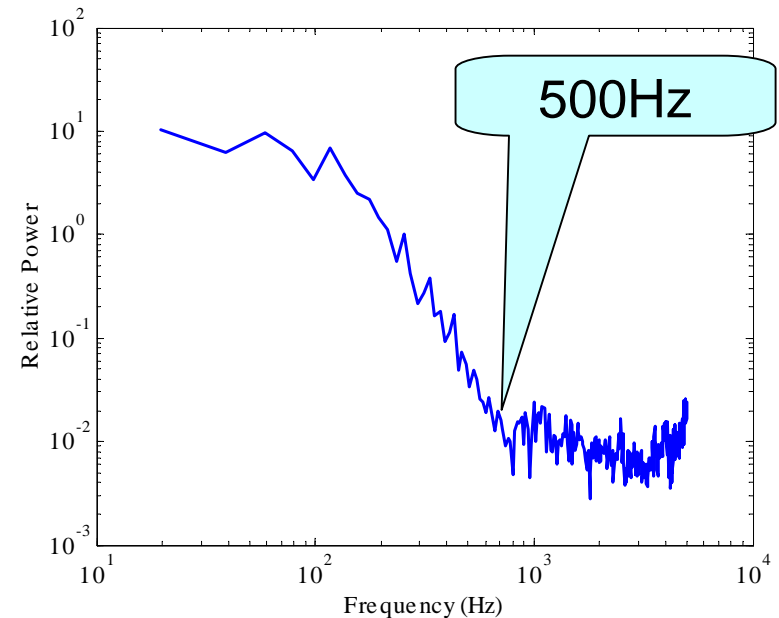
従来型追尾方式では追従できない

大気の早い変動

- Typical fluctuation rates vary from several Hz to 1kHz
- Over 100Hz the received beam power is significantly reduced



**Optical beam intensity
fluctuation**

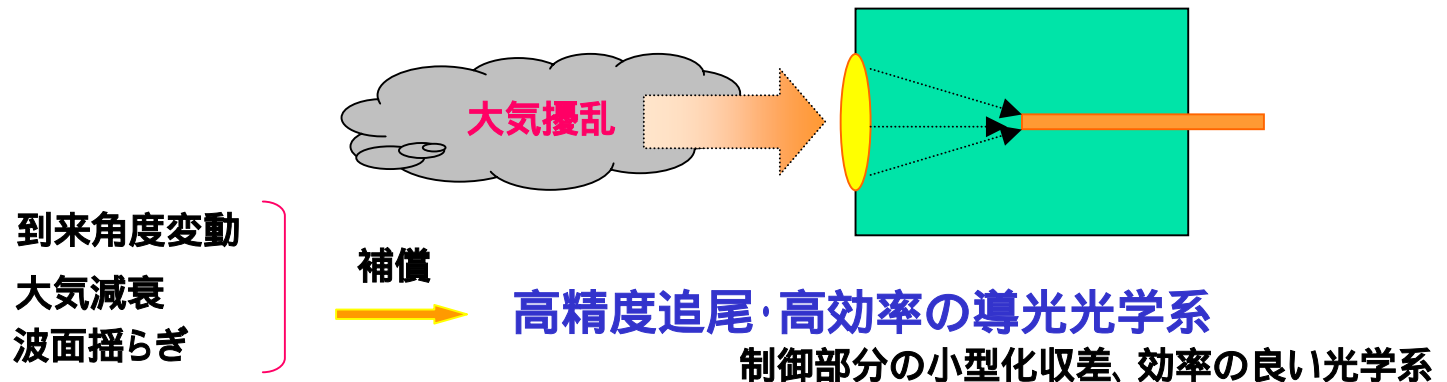


**Frequency response of received
power variations**

空間とSMFの接続技術

空間とSMFの接続技術

大気揺らぎによる到来角度の変動の抑圧
低損失での空間からSMFへの光の導光



装置としての妥当性 フィールドでの評価が最重要

装置規模

長期フィールド試験(伝送品質)

Fiber to Fiber の優位性



Approach of the Project

空間光のSM-Fiberへの導光

高精度追尾・高効率の導光光学系

制御部分の小型化収差、効率の良い光学系

NICTにおける衛星間光通信の研究成果を展開

目標: 追尾速度500Hz, 損失3dB程度のFiber受信光学系を実現

フィールド評価

長期フィールド試験(伝送品質)

Fiber to Fiber の優位性の実証

2.5Gbps 以上の伝送速度の実現 / WDM伝送

目標: 稼働率 99.9% at 1Km

従来システム: $\lambda=800\text{nm}$ \longleftrightarrow Fiber to Fiberシステム: $\lambda=1550\text{nm}$

1550nm帯での光伝播特性の把握

周波数資源の有効利用, システムの柔軟性

ミリ波との特性比較, 補完関係の検討



高速追尾の実現

従来型追尾

ゆっくりとした角度変動に対して光学系全体を駆動

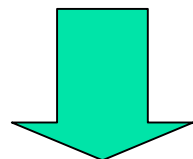
シンチレーションによる誤差軽減のために積分時間長い

従来型ファイバー受信

角度依存を低減するため光学系デフォーカス化

結合損失増大

送信出力増, 受信光学系の大型化



高速に追尾できれば相手を見失うリスク少ない

広がりのないビーム, 小さな光学系でもOK

非共振型2軸ガルバノミラー

FPM (fine positioning mirror)

FPM諸元

角度センサー内蔵

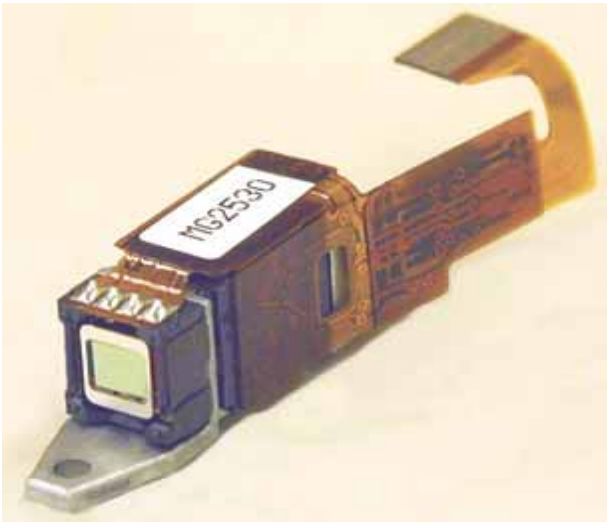
角度信号生成用トランスインピーダンスアンプ内蔵

AZ/ELアクチュエータドライバ内蔵

主な仕様

項目	仕様 (typ)	備考
ミラー有効領域	2.3mm × 2.8mm	
波長帯域	1260 ~ 1360nm 1480 ~ 1625nm	
反射率	> 97%	
ミラー振れ角	AZ: ± 7.8deg EL: ± 6.5deg	機械振れ角 "
アクチュエータ変位感度	AZ: 51.3deg/V EL: 45.2deg/V	AZ 端子電圧基準 EL 端子電圧基準
アクチュエータ加速度感度	AZ: $1.63 \times 10^7 \text{deg/sec}^2/\text{V}$ EL: $1.67 \times 10^7 \text{deg/sec}^2/\text{V}$	AZ 端子電圧基準 EL 端子電圧基準
角度検出センサー感度	140mV / deg	弊社試験回路使用時
角度分解能	0.2mrad	
電源電圧	+5V ± 5% +3.3V ± 2% +2.00V ± 1%	基準電圧
動作温度	-10 ~ +65deg	
保存温度	- 40 ~ +85deg	
外形寸法	全長 37.6 全高 10.4 全幅 7.5mm	

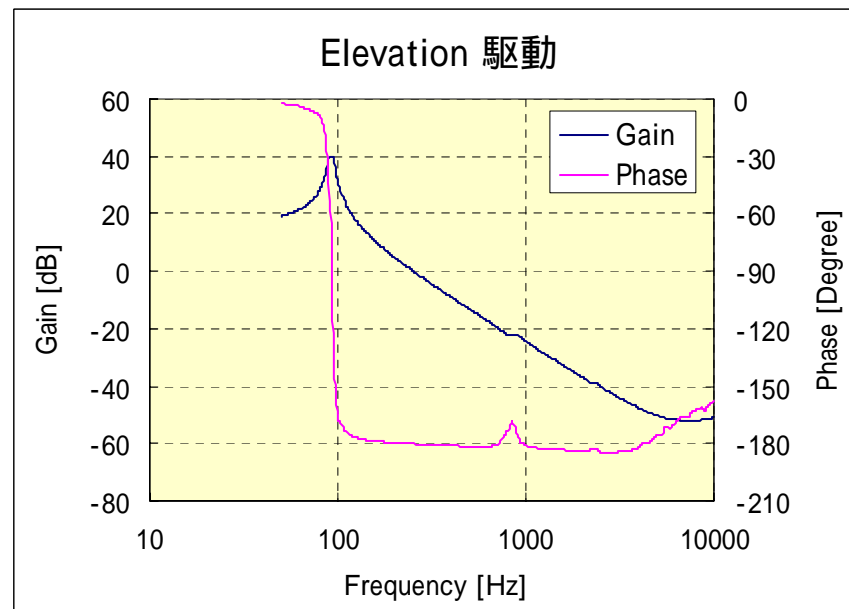
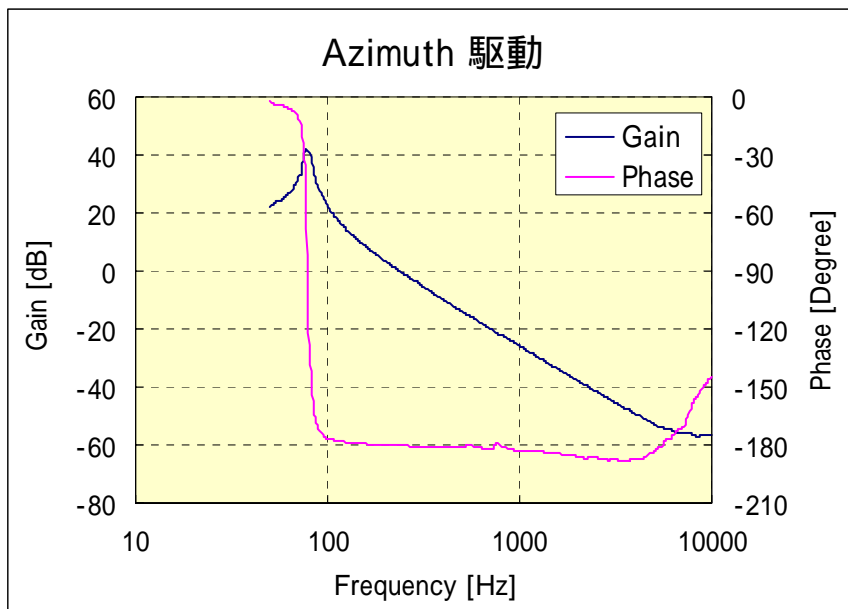
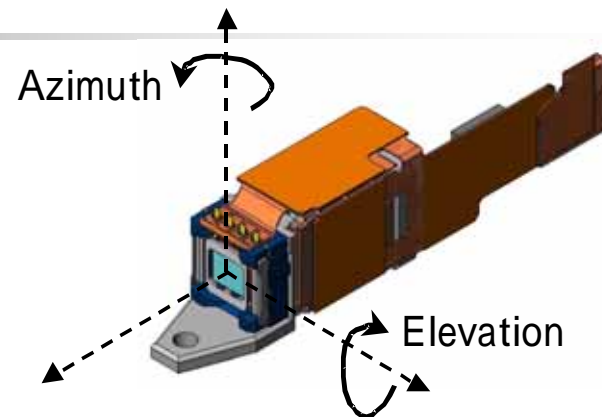
ムービングコイル型 2軸ガルバノミラー



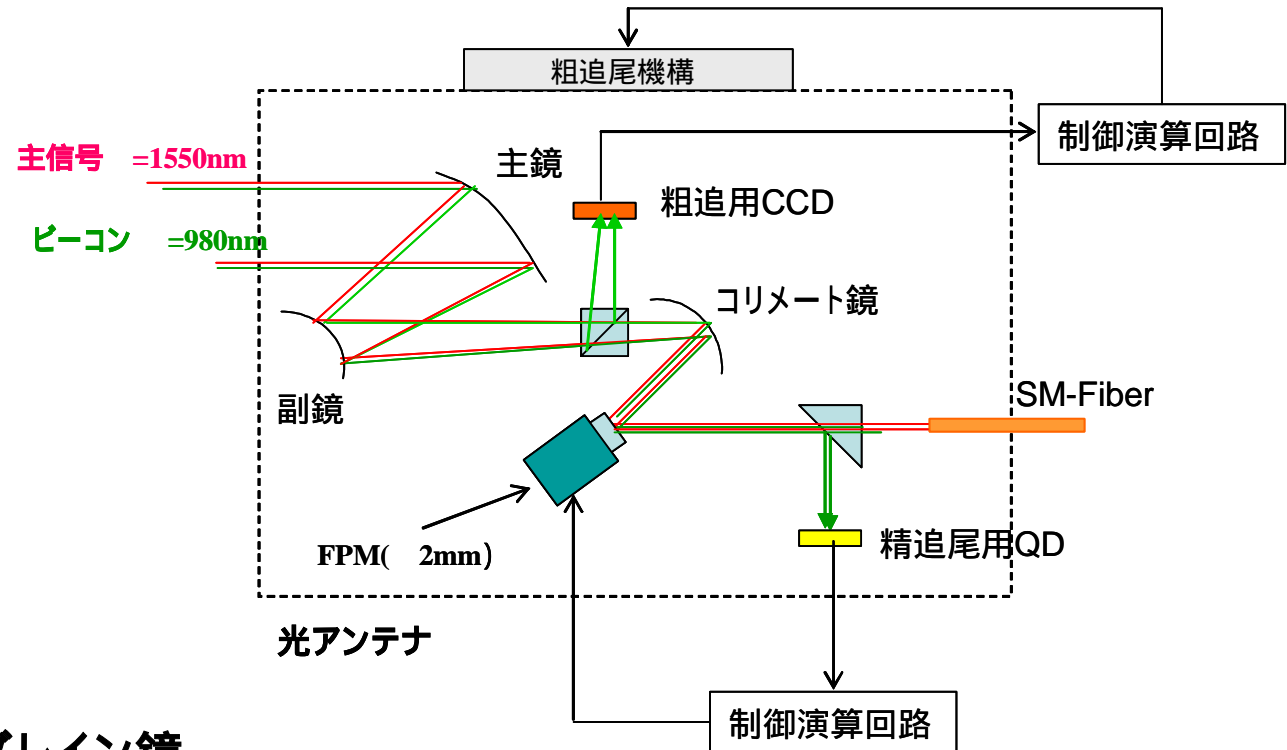
FPM 応答特性

2軸回転ミラーアクチュエータ 周波数応答特性

(駆動信号入力に対するミラー角度変位の応答性)



光アンテナの構成

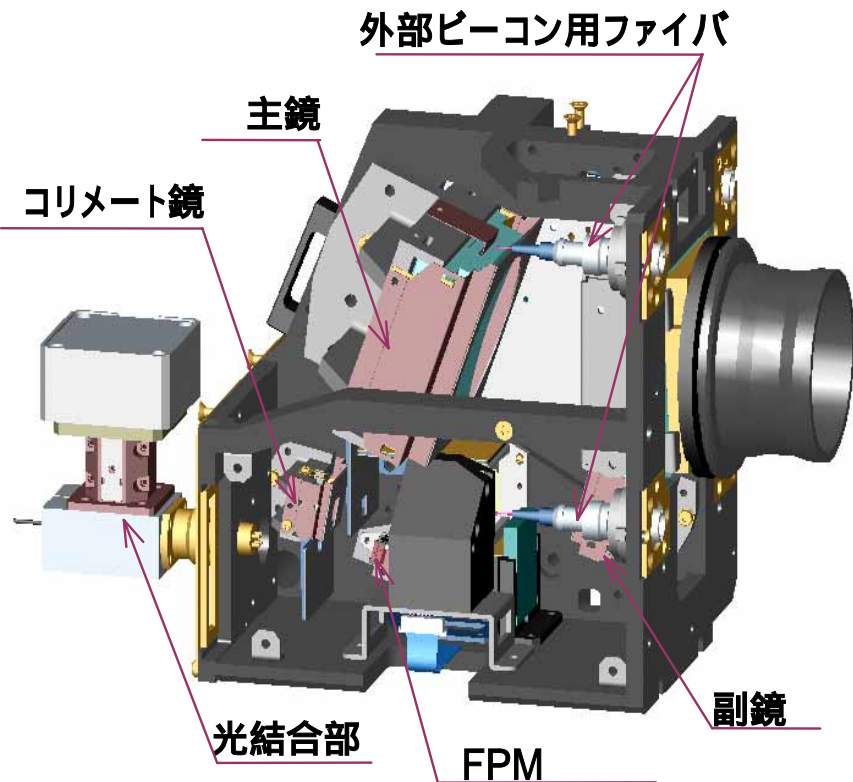


小型軽量化

軸外しカセグレイン鏡

粗追尾と精追尾の独立制御

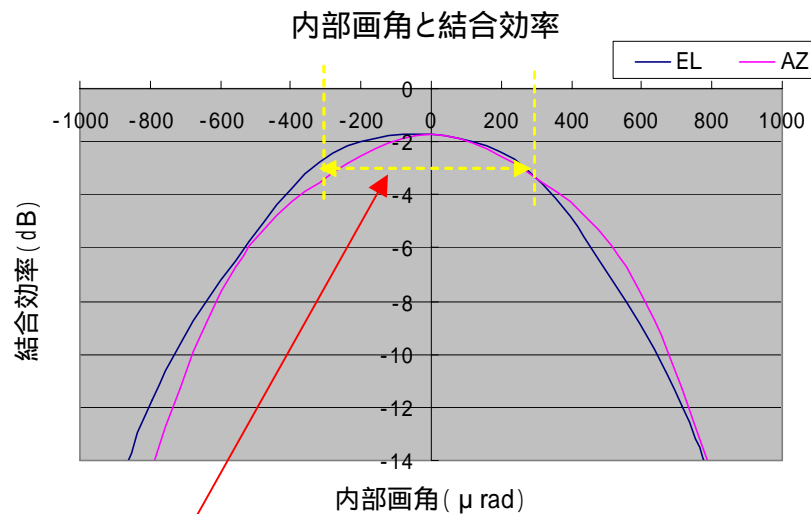
光アンテナモジュール



光アンテナモジュール内部構造

結合損失のシミュレーション

(実際の装置では鏡面加工精度などの影響で若干結合効率が低下:5dB)



横軸内部画角が到来角度変動に対応 ($20 \pm 1 \mu\text{rad}$)。
縦軸は結合損失。 $\pm 15 \mu\text{rad}$ まで
損失3dB以下となっていることがわかる。

フル光接続システムの 有効性評価

実験サイト1

大久保55号館 ← 1km → 早稲田14号館



回線設計

光アンテナ	
波長	1550nm
送信電力	100mW (+20dBm)
入射(射出)口径	40mm
ビーム拡がり角	94.5μrad
伝搬距離	1km
仰角	0度
受信開口	40mm
ビーム拡がり損失	- 11.4dB
内部光学損失	- 10dB
実験系光学損失	- 6dB
最小受信電力	- 27dBm(at2.5Gbps)
回線マージン	19.6dB

$$= 2.44 \quad /D$$

$$10\log(\text{受信開口} / \text{受信ビーム拡がり幅})^2$$

追尾用ビーコン(CCD)	
波長	980nm
送信電力	60mW (x 4) +23.8dBm
ビーム拡がり角	8.7mrad
伝搬距離	1km
受信開口	40mm
ビーム拡がり損失	-46.7dB
内部光学損失	- 7.5dB
最小受信電力	- 60dBm
回線マージン	29.6dB

追尾用ビーコン(QD)	
波長	980nm
送信電力	60mW (x 4) +23.8dBm
ビーム拡がり角	8.7mrad
伝搬距離	1km
受信開口	40mm
ビーム拡がり損失	-46.7dB
内部光学損失	- 7.8dB
最小受信電力	- 50dBm
回線マージン	19.6dB

空間---SMF 結合損失

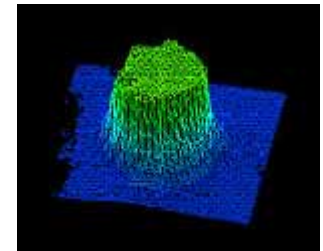
送信出力@EDFA : 20dBm (100mW)

実験室 ~ 屋上伝送路損失 : 2dB

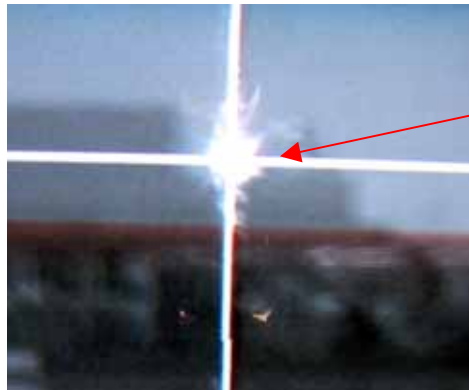
空間での拡がり損失@1km : 11.4dB

最適時の受光パワー (光アンテナ出力@屋上) : -5dBm

光アンテナの空間---SMF 結合損失 5dB (送受で10dB)



Beam far field pattern

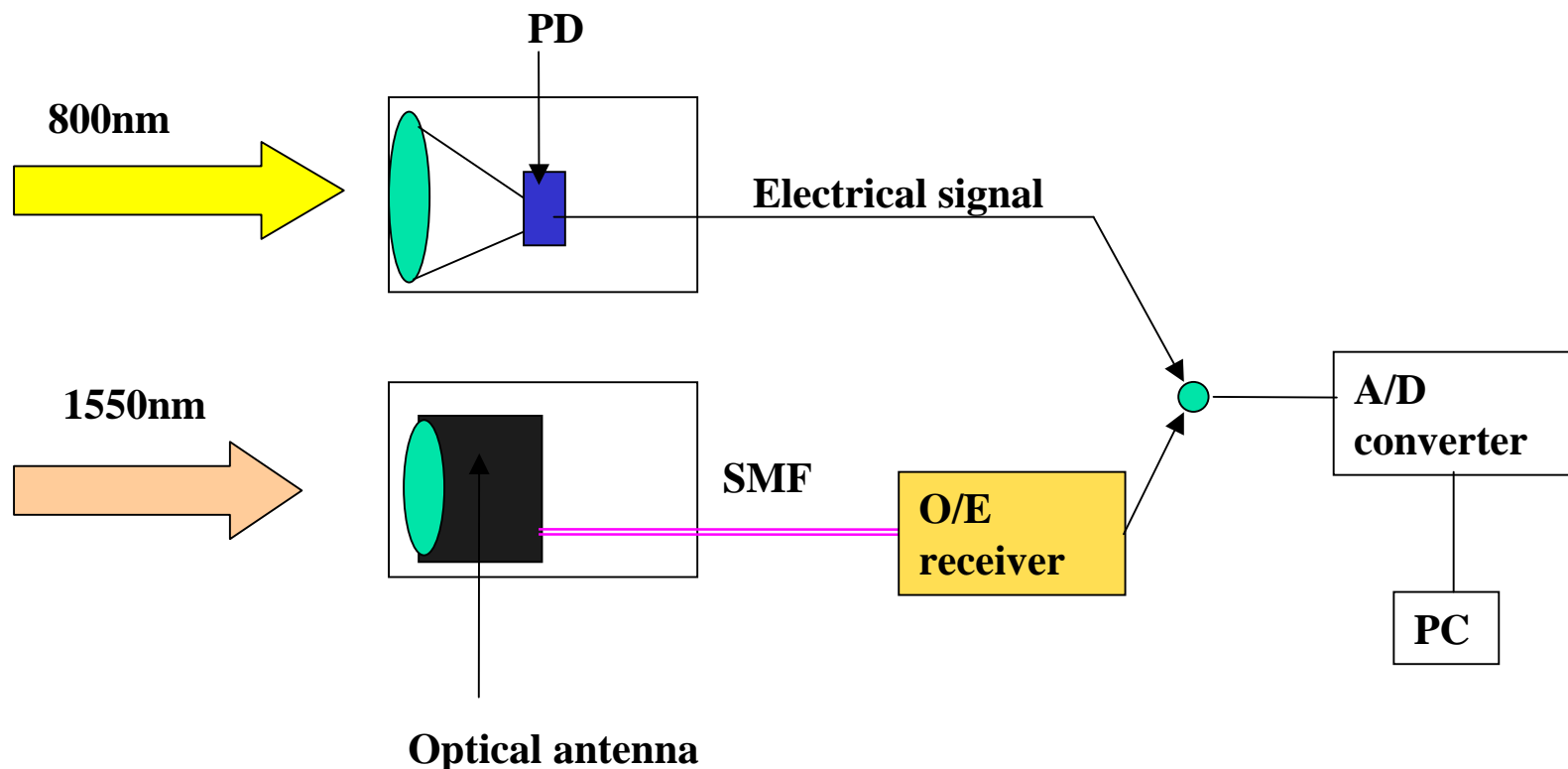


早稲田14号館屋上の開発した光無線装置(右)
と粗追尾用CCDで相手側(大久保55号館)装置
を捕捉した写真(上)



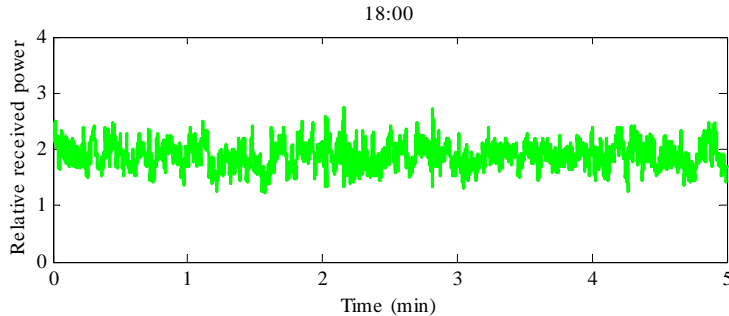
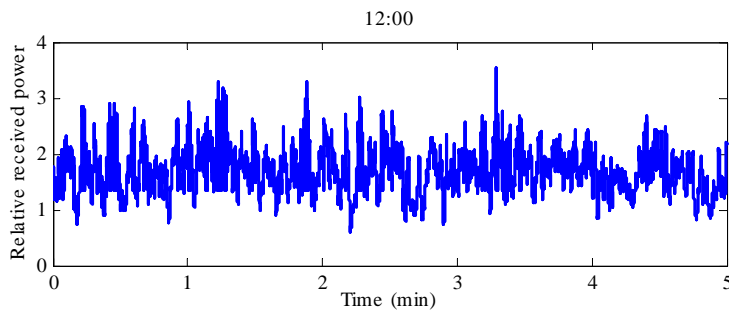
Measurements setup of atmospheric turbulence

Scintillation and arrival beam angular fluctuation measurements



Scintillation effects

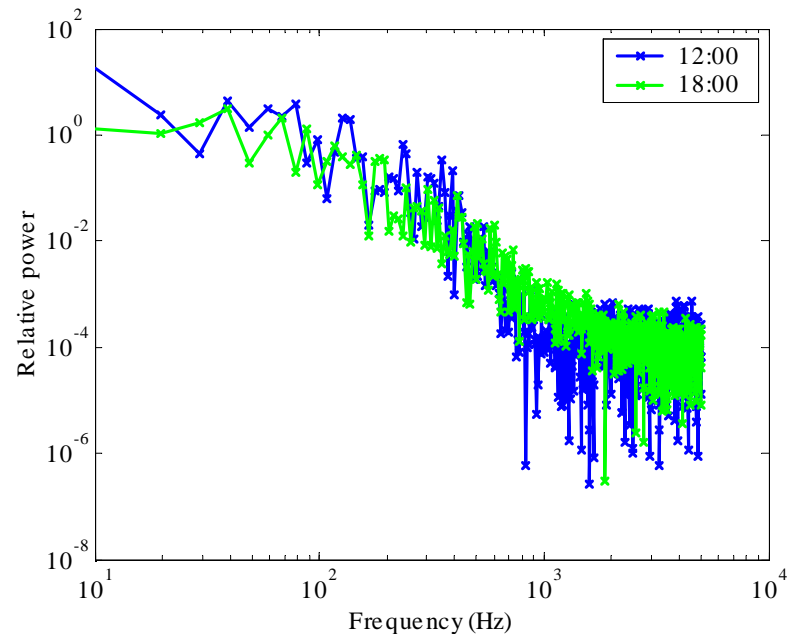
Scintillation induced intensity fluctuation rates typically vary from several Hz to 1kHz
Over 100Hz the received beam power is significantly reduced



Optical beam intensity fluctuation



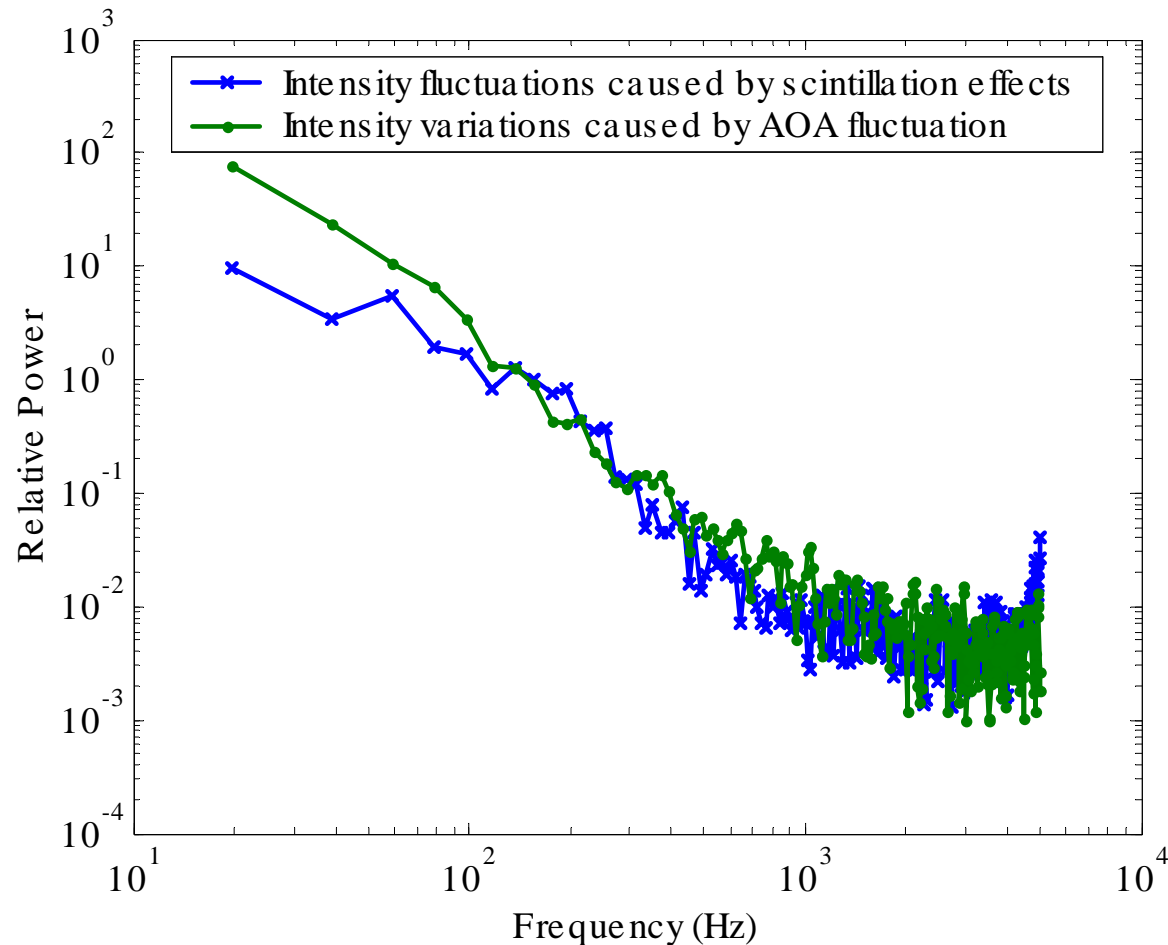
(Power spectral density)



Frequency response of received power variations

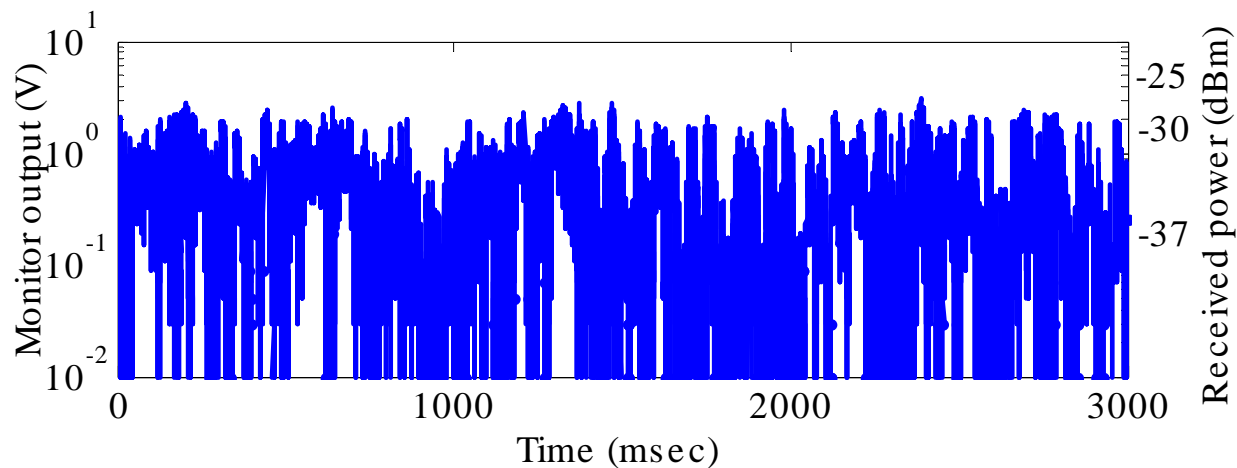
Arrival beam angular fluctuation

Scintillation & arrival beam angular changes

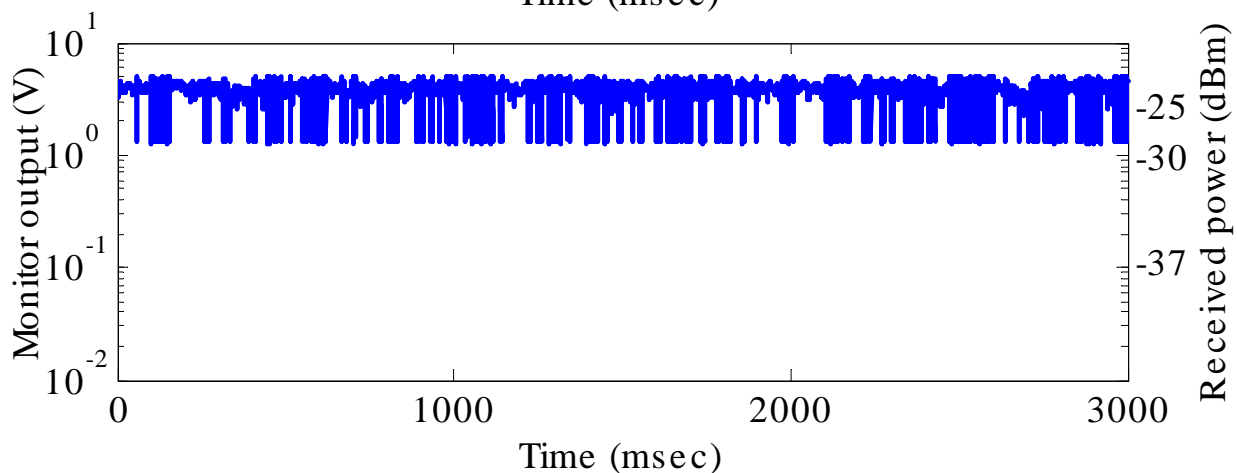


到来角度変動の抑圧

追尾OFF

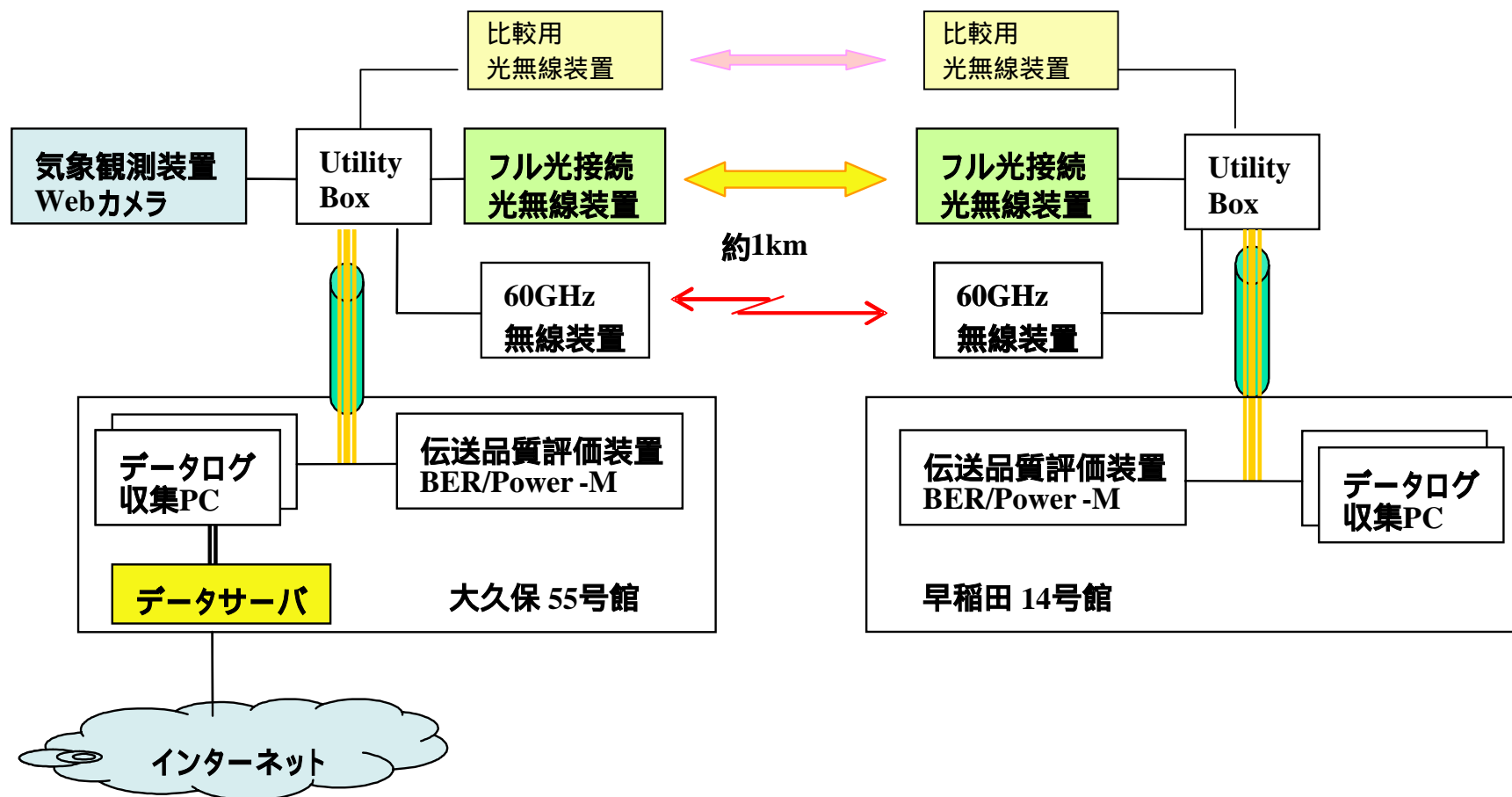


追尾ON



有効性の評価

実験構成概要



計測機器

屋上設置機器

気象計



60GHz無線アンテナ

大久保55号館屋上

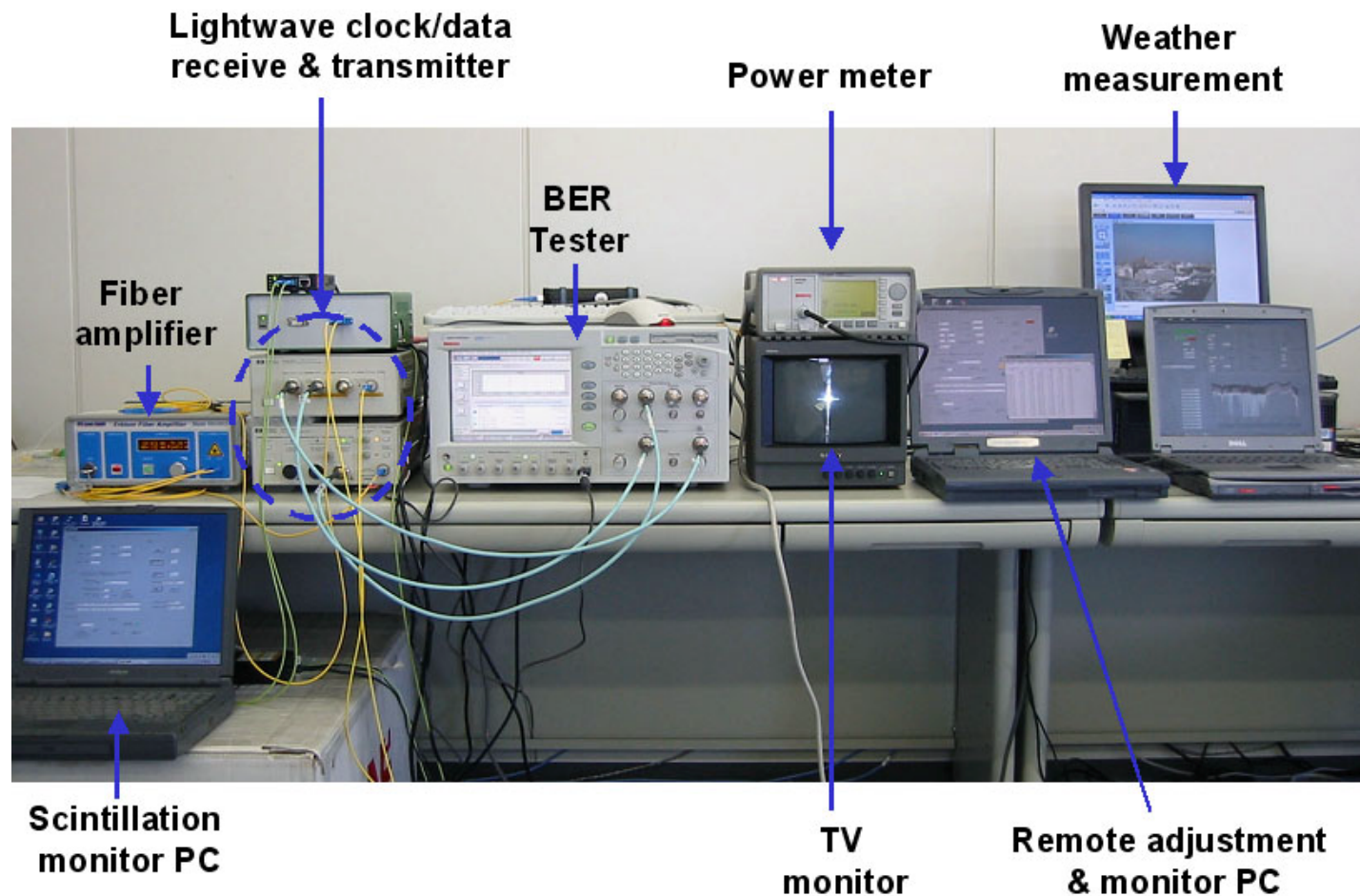
試作した光無線装置(右)
比較用の従来型装置(左)



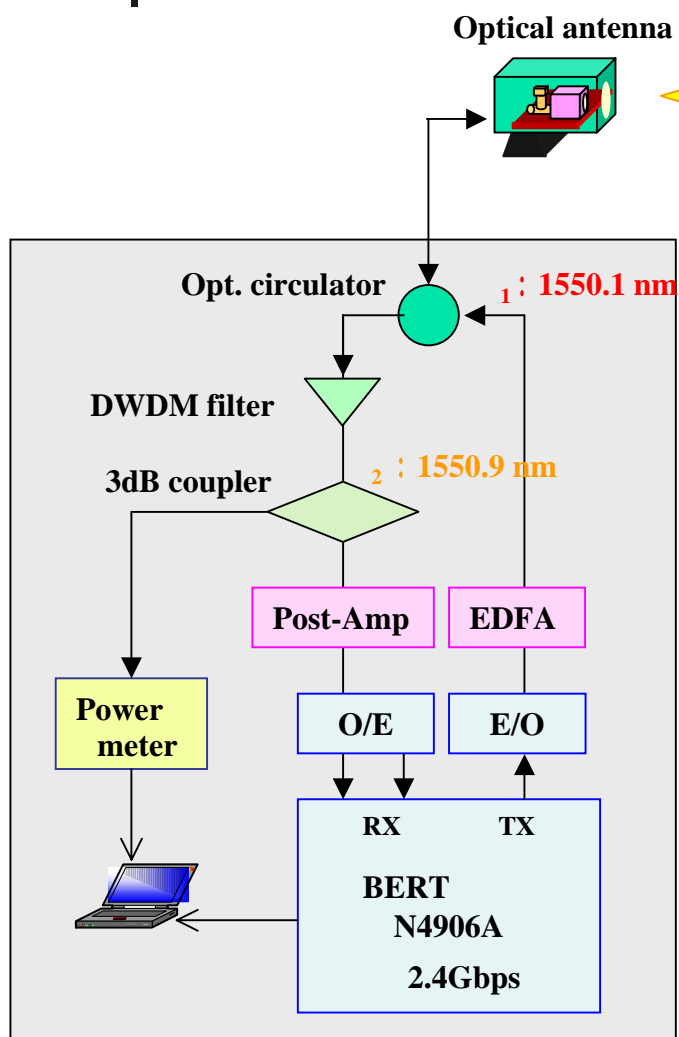
早稲田14号館屋上

計測機器

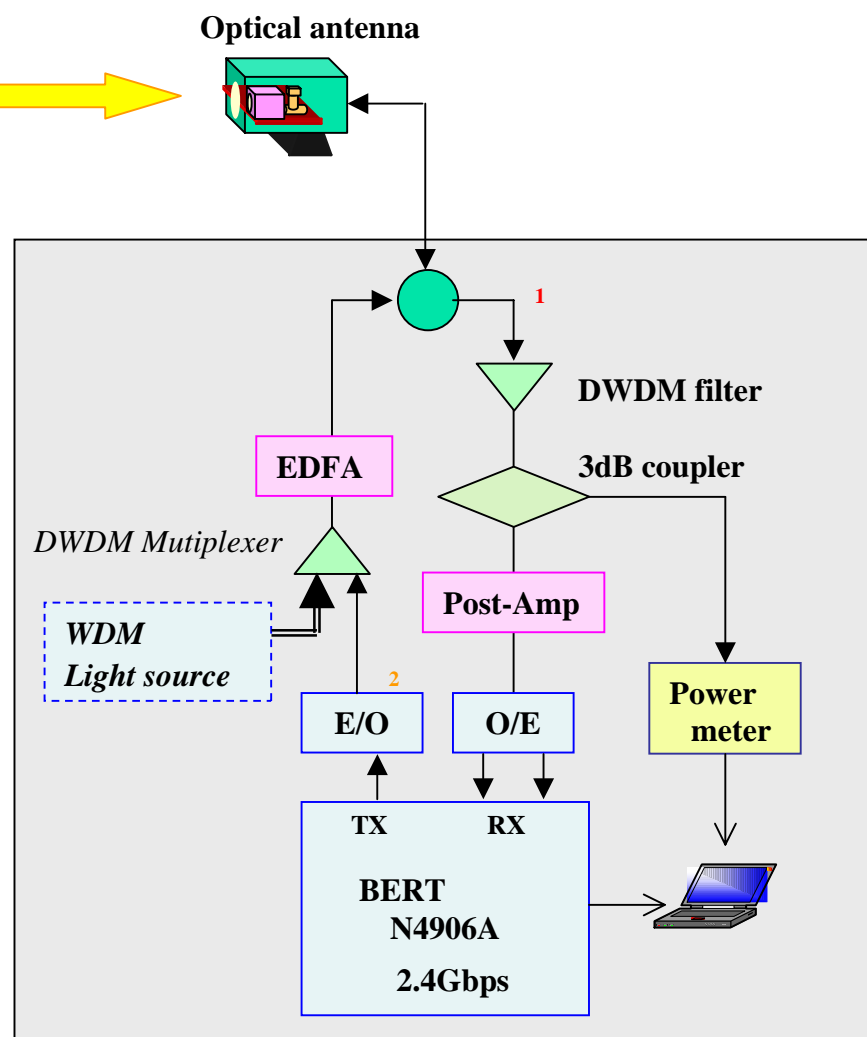
実験室内計測機器



通信品質評価実験系



大久保55号館



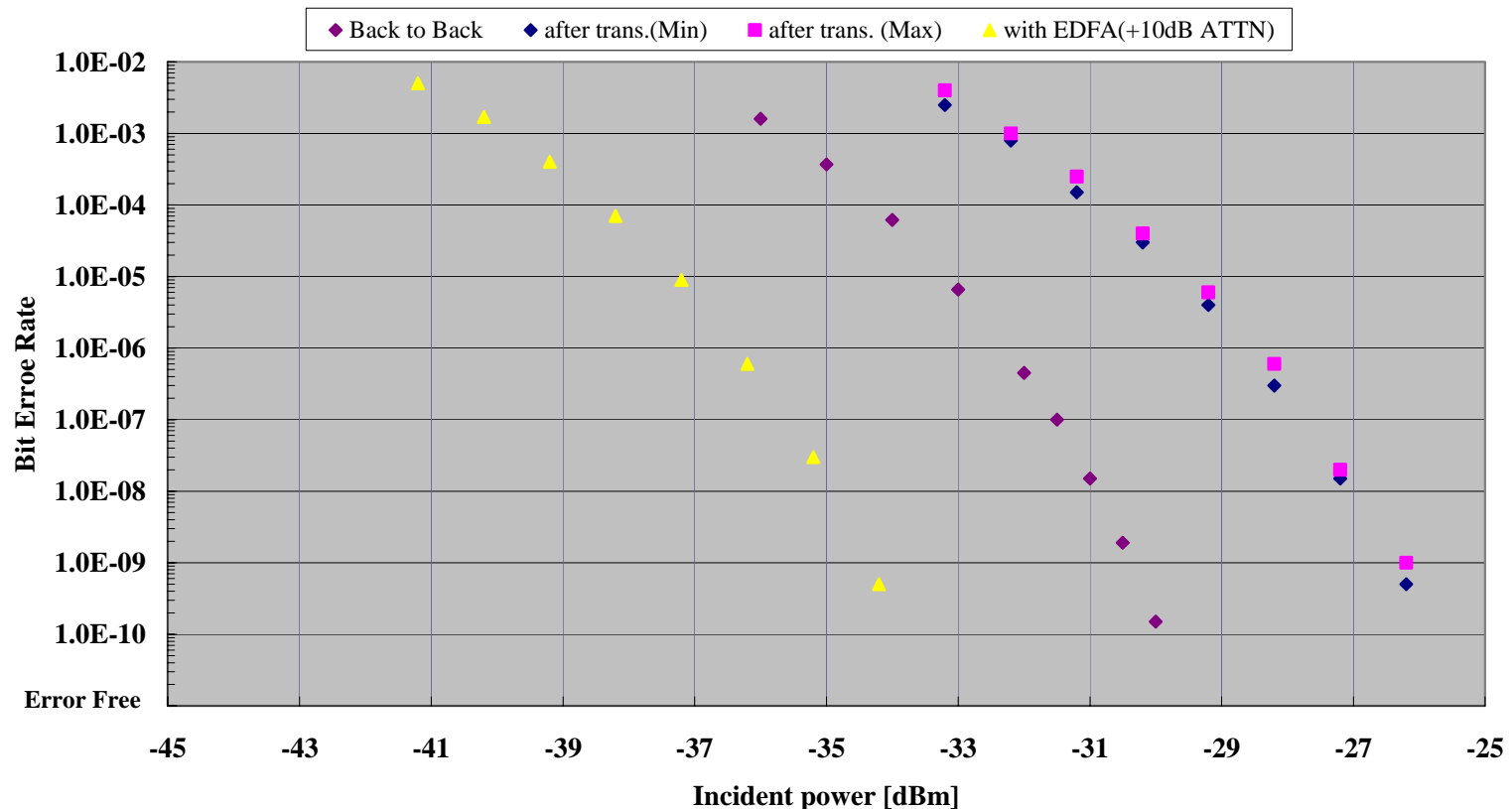
西早稻田14号館

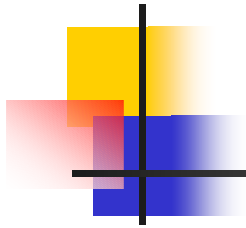
実験系のBER特性

2.5Gbps Bit error rate characteristics

伝送後のBER特性

Agilent 83430A Light source & 83446A Receiver Data rate: 2.488Gbps



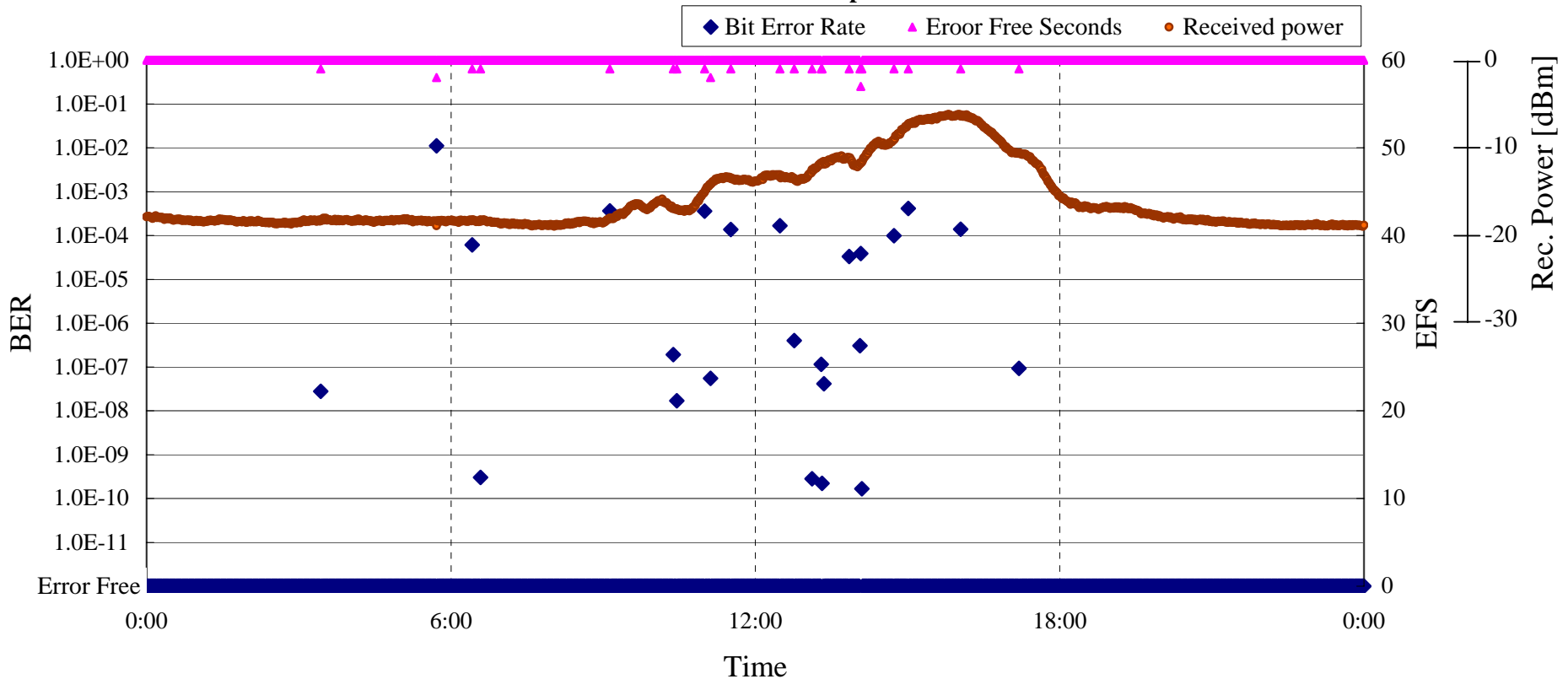


Stability

BER & Rec. power

Bit error rate characteristics

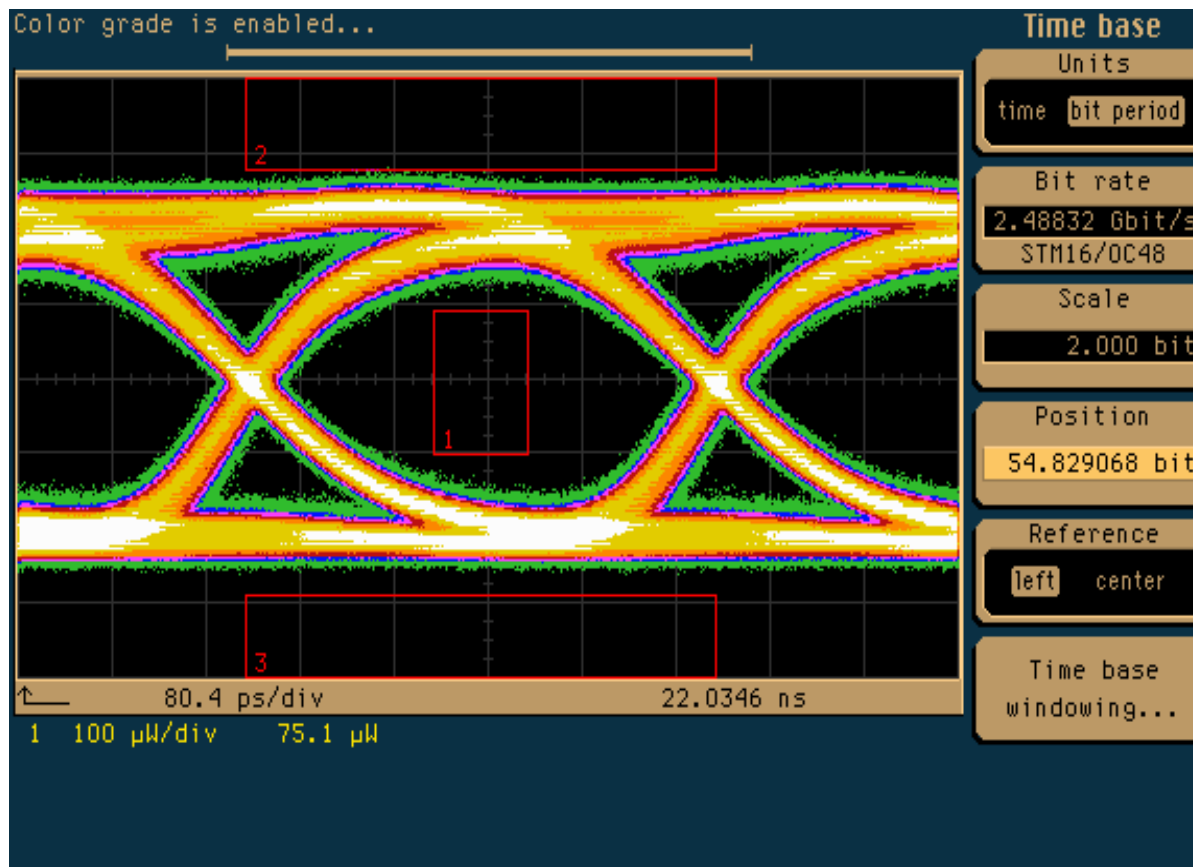
Data rate : 2.488Gbps / PN23



Stability cont. Eye pattern

30分間の積算

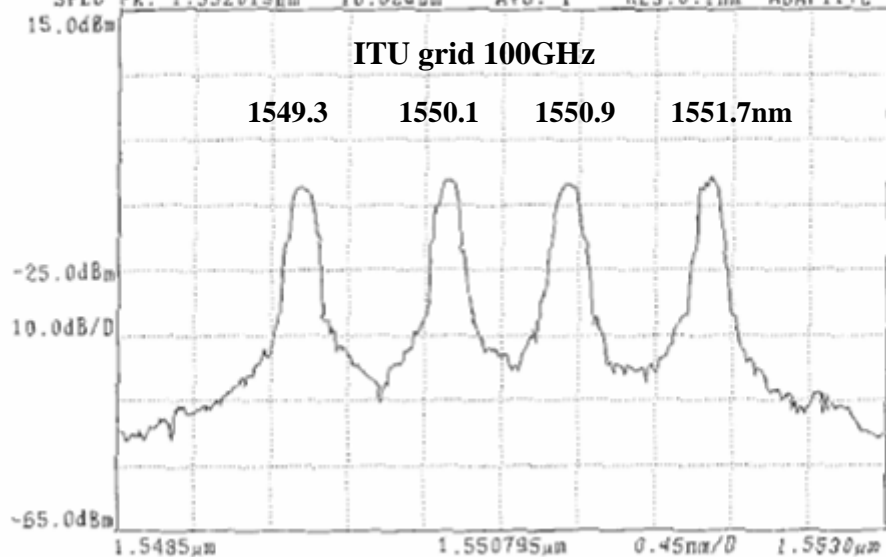
図中のマスクは STM16 標準パターン



DWDM 伝送実験

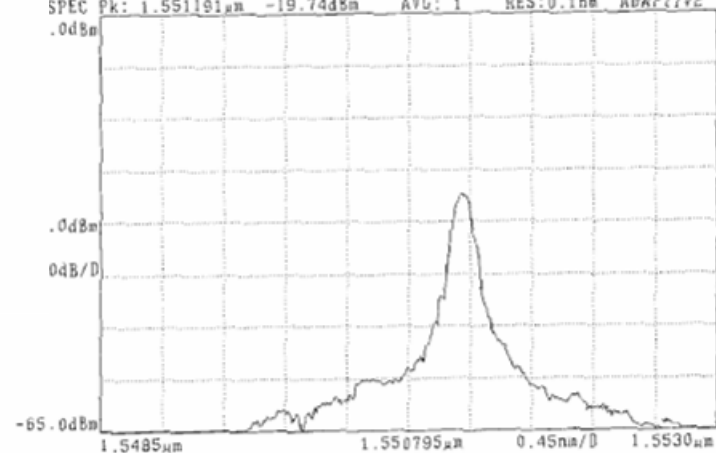
100GHz 間隔 100mW/wave で送信

** ADVANTEST Q8381A Optical Spectrum Analyzer ** 2005-11-24 17:58:55
SPEC Pk: 1.552019 μ m -10.62dBm AVG: 1 RES:0.1nm ADAPTIVE

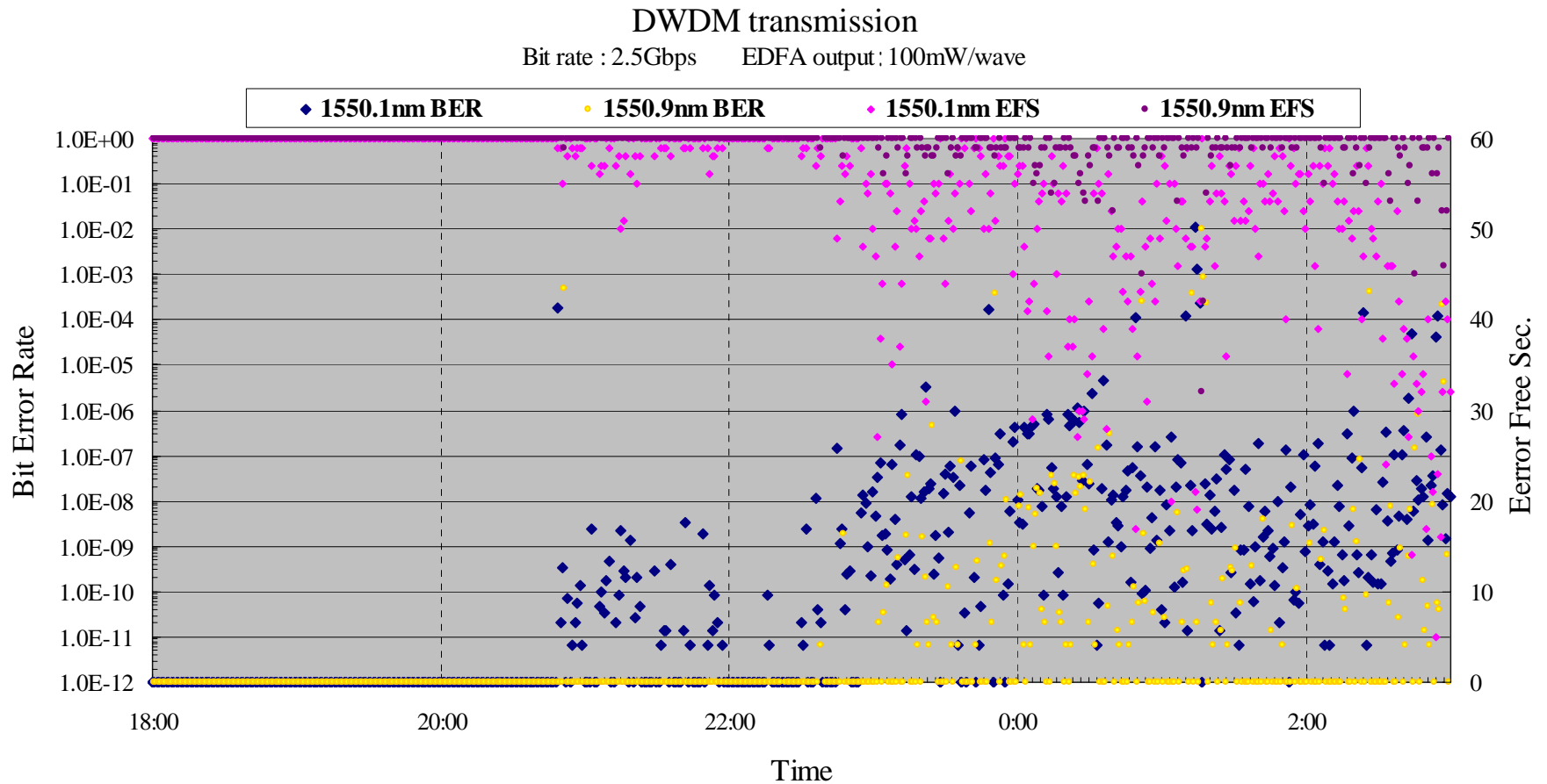
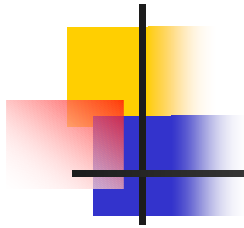


DWDM filter output

ADVANTEST Q8381A Optical Spectrum Analyzer ** 2005-11-24 18:01:19
SPEC Pk: 1.551191 μ m -19.74dBm AVG: 1 RES:0.1nm ADAPTIVE

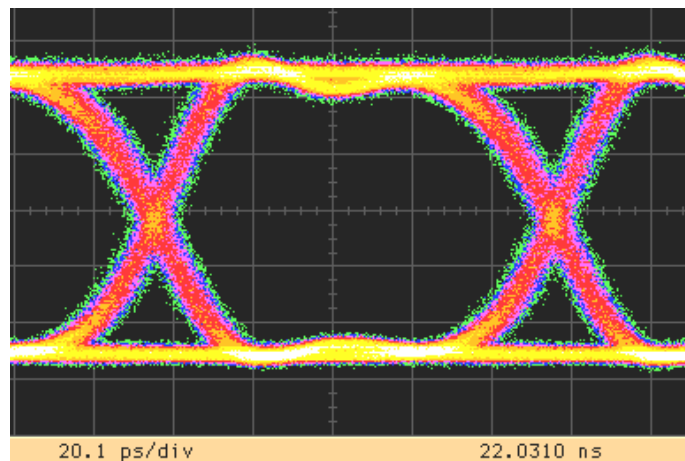


Transmission characteristics



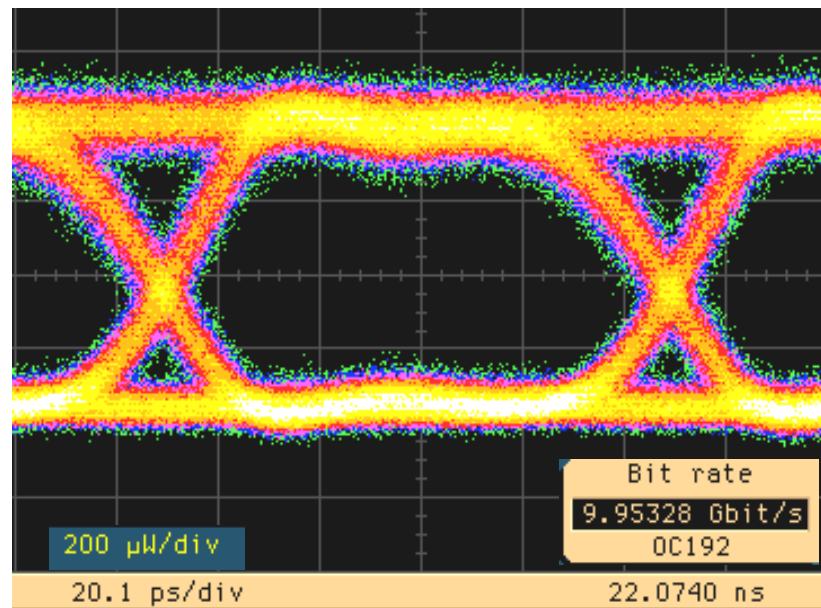
10Gbps伝送実験

世界初の10Gbps光無線通信



送信波形

9.95Gbps OC192

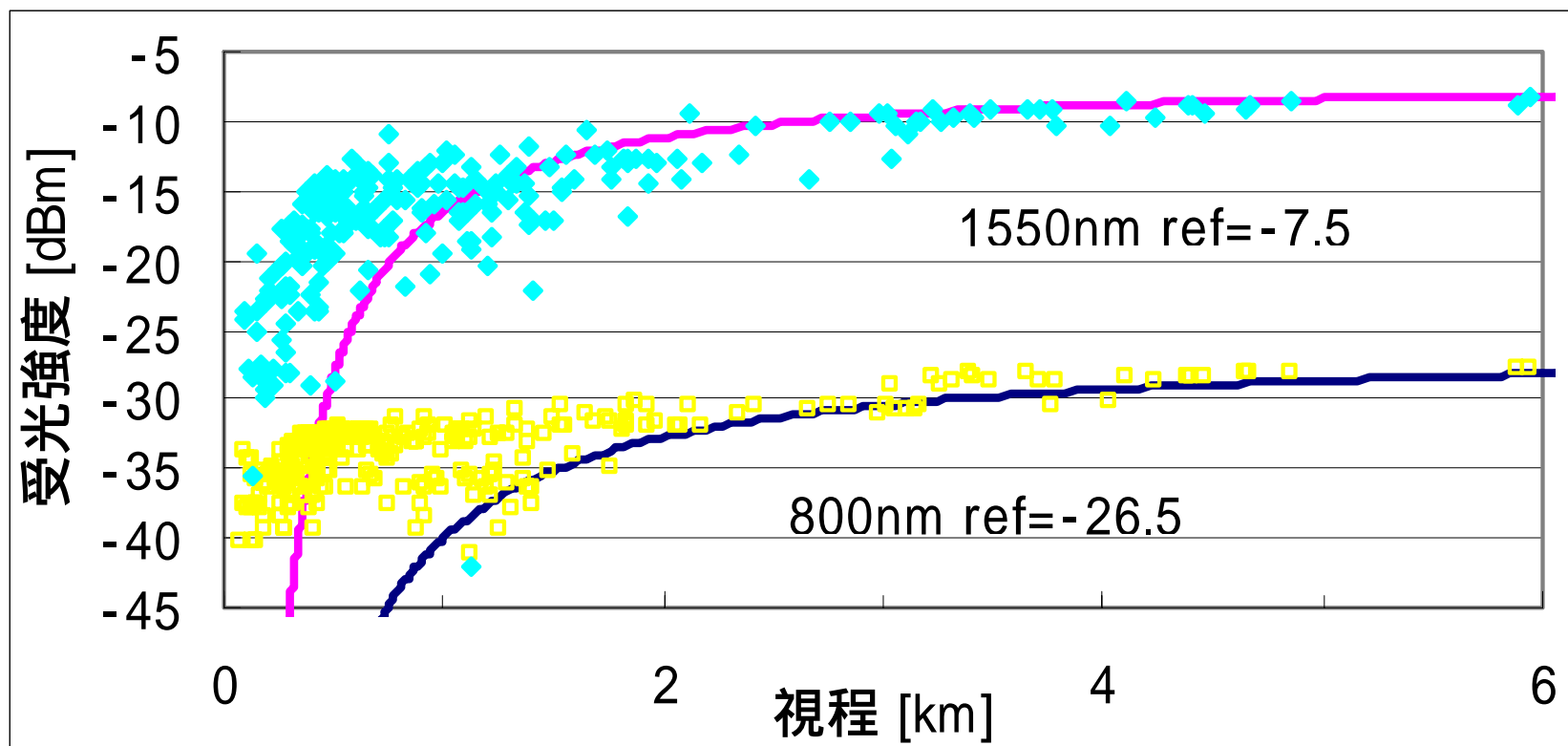


1km伝送後

光波減衰特性の比較

視程:V[km] , 波長: [nm] , 伝送距離:D[km]における受光強度:P[dBm]は

$$P = ref - \frac{17 D}{V} \left(\frac{550}{V} \right)^q \quad q = 0.585 V^{1/3}$$



視程計との差異

伝搬路監視カメラ映像



視程計: 560m



視程計の表示値よりカメラ映像の方が遠くまで視認できることが多い

まとめ / 今後の展望



まとめ

研究成果 空間光 Fiber 結合損失約5dB, 500Hzの精追尾速度を有する
フル光接続光無線装置を開発

従来報告されてきた結合損失は約10dB ➡ 2倍以上の効率を達成

500Hzの精追尾速度 ➡ 大気揺らぎを抑圧



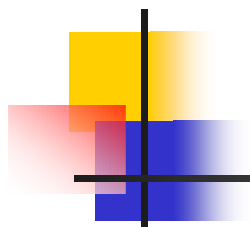
安定的な双方向通信システムの開発

次世代フル光接続光無線システムの有効性を実証

世界初の10Gbps超の無線通信の実証

ファイバ --- 空間 --- ファイバのシームレス接続による

Bit rate free & Protocol free 無線通信システムの実現



今後の展望

課題

追尾方式の最適化と簡略化

各種気象条件化での安定動作の確保



ファイバー通信との協調による次世代光ネットワークの拡張
周波数資源を節約したワイヤレスブロードバンド環境の実現

ユビキタス社会への貢献

本日はありがとうございました

電子情報通信学会総合大会

2006年3月24日(金)～27日(月)

会 場: 国士舘大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区)

シンポジウム企画「最新の光無線技術とその応用」(CS-12)
にて、招待講演を含め11件の発表が予定されております。