

早稲田大学におけるブロードバンド 関連技術の取組み

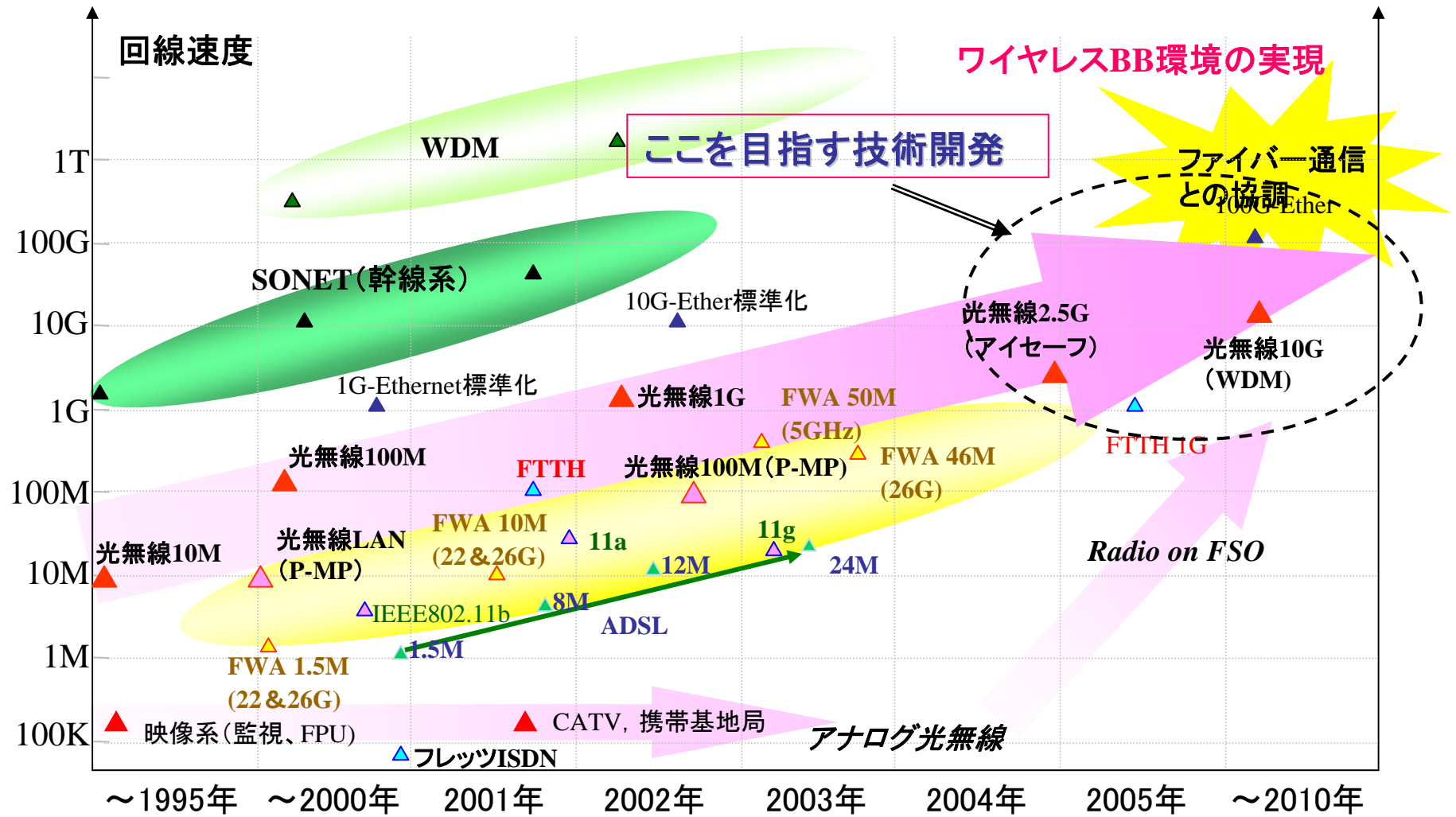
1. 空間・ファイバのフル光接続光無線システムの研究開発
(次世代光無線システム)
2. 60GHz ミリ波キャンパスネットワークの構
3. 近距離高速赤外線通信標準化の取組み

2007年2月23日

早稲田大学 大学院国際情報通信研究科
松本充司

1. 空間・ファイバのフル光接続光無線
システムの研究開発
(次世代光無線システム)

光無線技術ロードマップ



ICSA技術部会資料より

研究開発の背景

1. 採算性や投資効率等の面で整備の進み難い地域が存在
2. 低コストのネットワーク構築が必要

これには無線技術が有望である. しかしながら電波無線には

(1) 電波の周波数資源の問題や

(2) 速度やプロトコル変換等のインタフェースの課題がある,

(3) また, 光無線もあるが, 現状では光ファイバとの親和性

(速度や変調方式)に課題がある. すなわち, 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)変換が必要従って, **Bit rate , Protocol に制約がでてくる.**

従来技術での壁

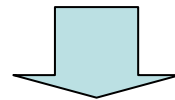
従来技術での速度的限界

波長: 800nm帯, Si系光デバイス ⇔ 物性的制約 : 2Gbps

光学系の微細化, 精緻化 ⇔ 設計・製造精度: コスト

所要パワーの増加 ⇔ アイセーフティ

光ファイバ網との接続(プロトコルの制約)

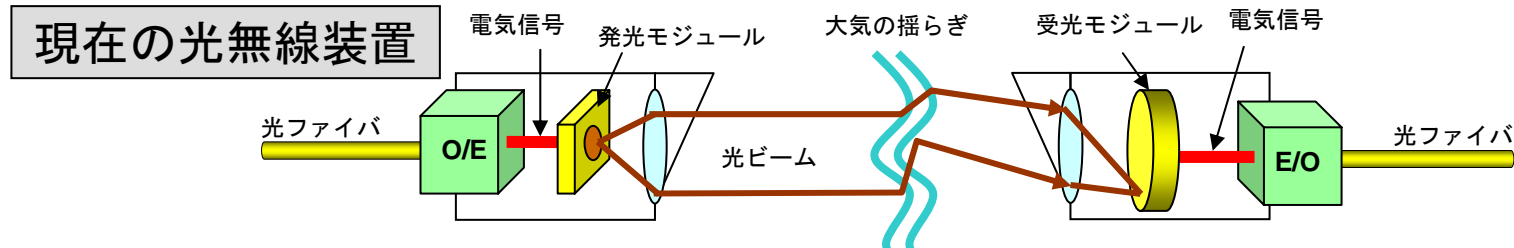


次世代光無線システムの構築

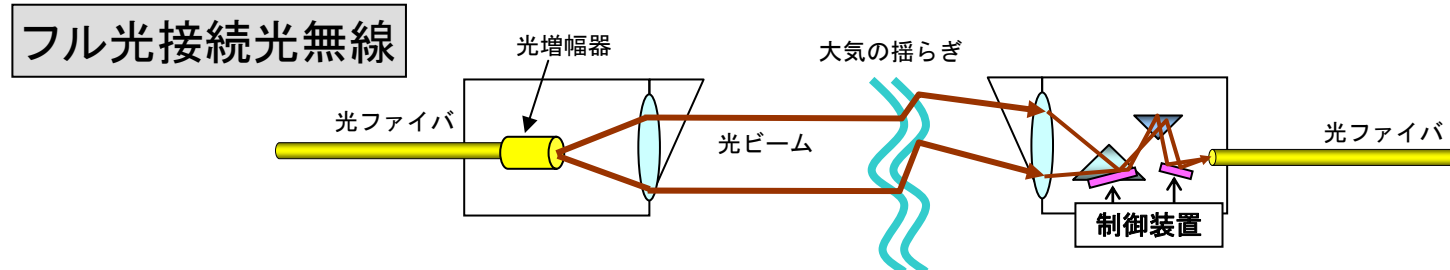
Bit rate free, Protocol free

光ファイバシステムとの一体化 ファイバ技術の応用, アイセーフの達成

ファイバと空間のシームレス接続



- 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 μ m程度)、また、入射角度は自由なため導光は比較的容易



- 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 μ m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

研究内容

1. 空間光のSM-Fiberへの導光部分：

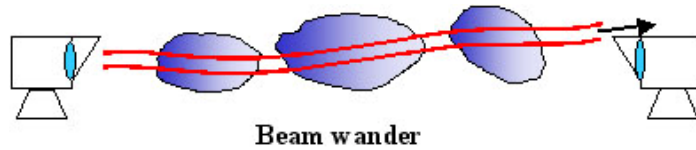
高精度追尾・高効率の導光光学系は制御部分の小型化収差，効率の良い光学系の開発が必要．このためNICTで開発中の衛星間光通信の研究成果に着目し，追尾速度500Hz，損失3dB程度のFiber受信光学系の実現を目指した．

2. フィールド評価：

長期フィールド試験でFiber to Fiber の優位性の実証する．
2.5Gbps 以上の伝送速度の実現 WDM伝送（稼働率 1kmで99.9%）
従来システムの波長は $\lambda=800\text{nm}$ ．これをFiber to Fiber直結を考慮し $\lambda=1550\text{nm}$ とした．

このため，周波数資源の有効利用システムの柔軟性の観点およびミリ波との特性比較，補完の観点から1550nm帯での光伝播特性の把握が必要となった．

大気揺らぎの影響を除去



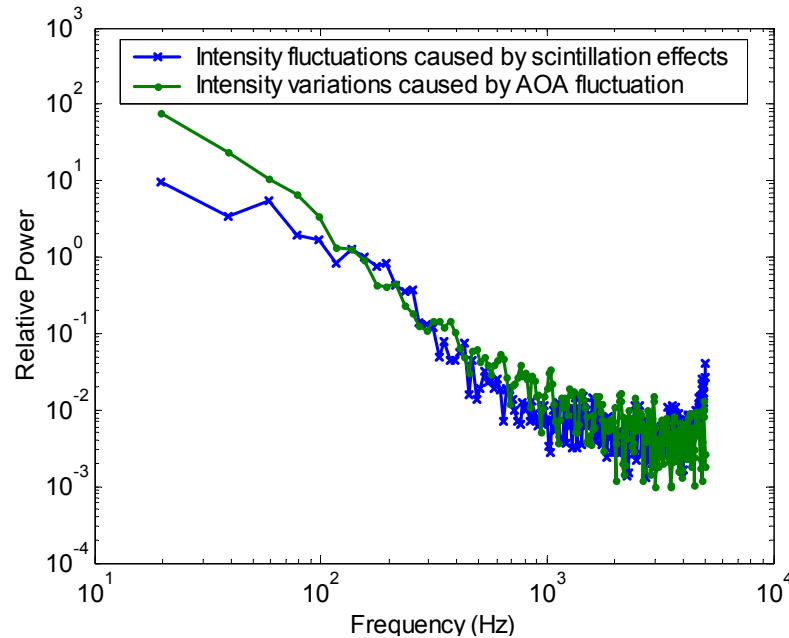
Beam wander: 低速な変動(日週的, 季節的変動)

従来型追尾で対応可能



Scintillation: 高速変動 \Leftrightarrow $\hat{=}$ 到来角度変動

Scintillation & arrival beam angular changes



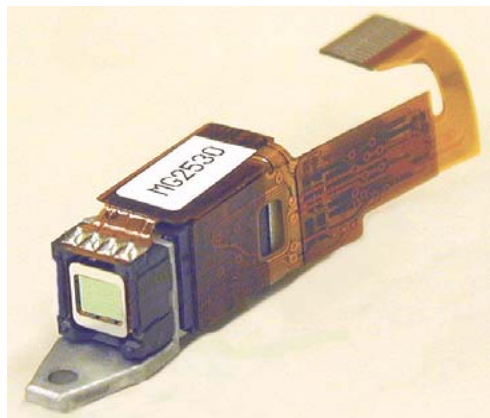
↓
従来型追尾方式では追従できない

↓
高速追尾の実現による波面補償

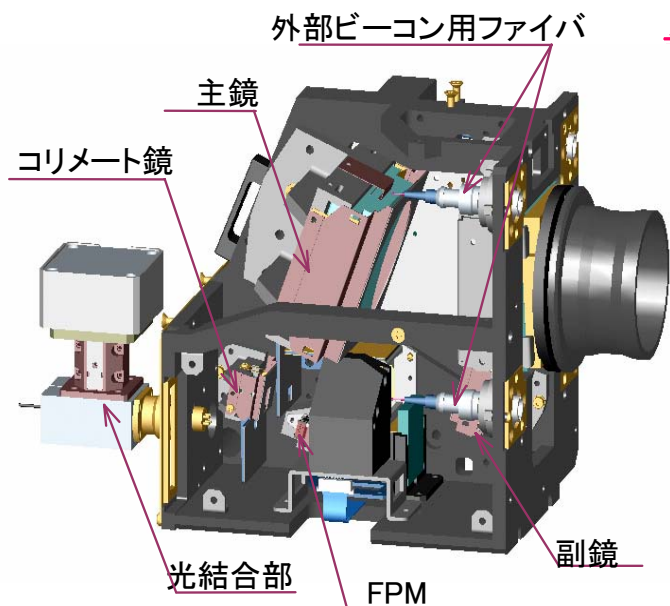
高速に追尾できれば相手を見失うリスク少ない
広がりのないビーム, 小さな光学系でもOK

↓
非共振型小型2軸ガルバノミラー
FPM (fine pointing mirror)

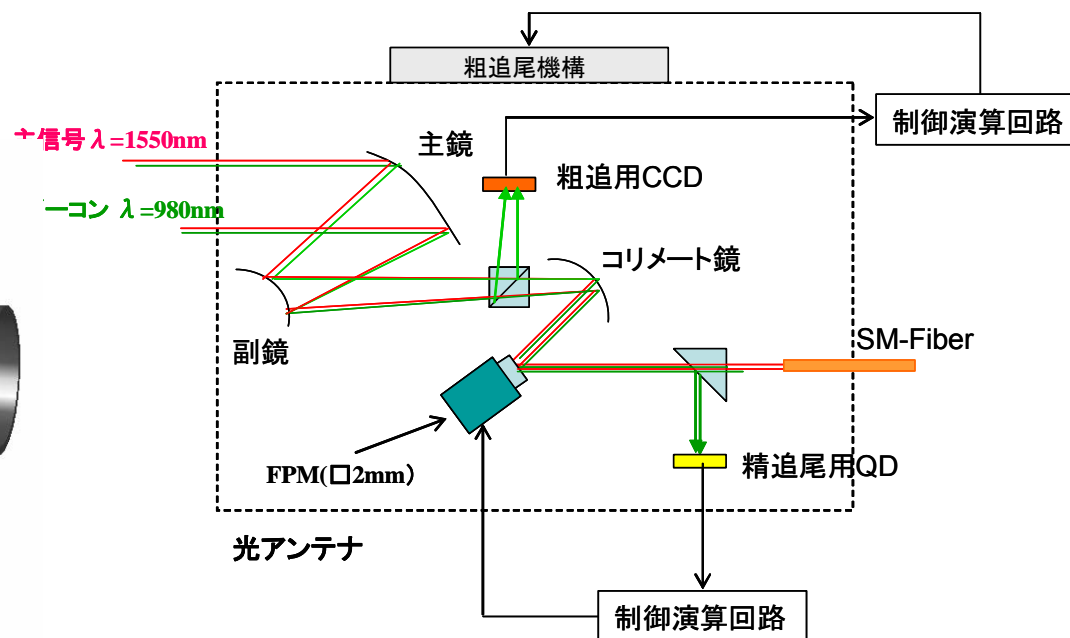
FPM と光アンテナ光学系



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
 数kHzまで安定駆動



小型軽量化, 集光効率up: 軸外しカセグレイン鏡



結合損失のシミュレーション:
 ±15 μ radまで損失3dB以下

フル光接続システムの有効性評価

1. 実験サイト

大久保55号館

← 1km →

早稲田14号館



SMF 結合損失

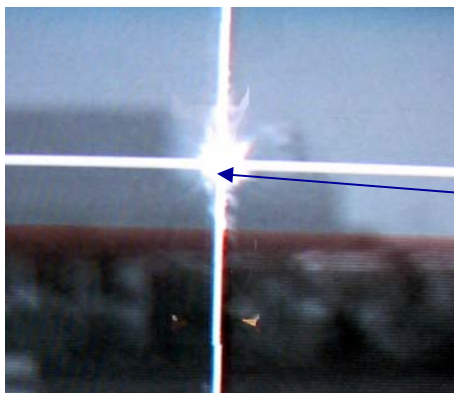
送信出力@EDFA : 20dBm (100mW)

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

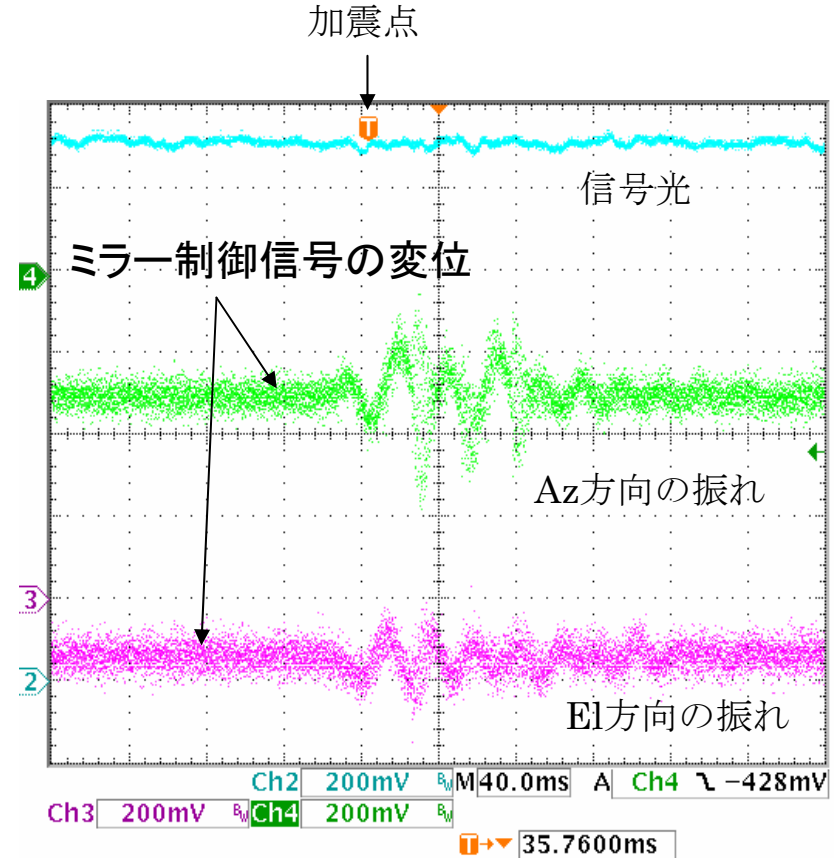
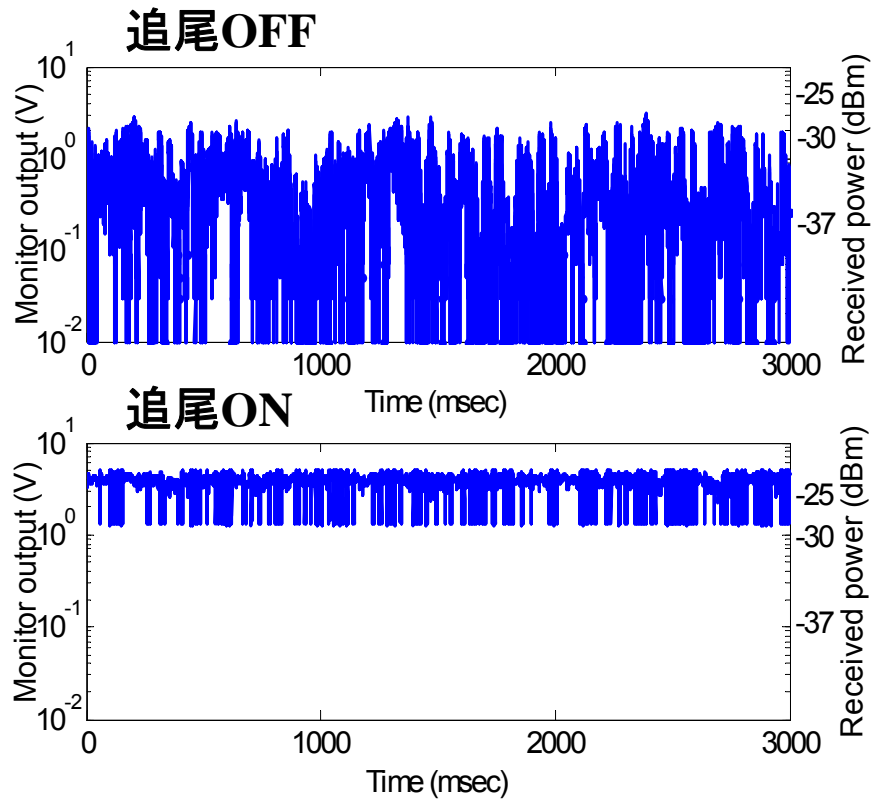
光アンテナの空間---SMF 結合損失 \approx 5dB (送受で10dB)



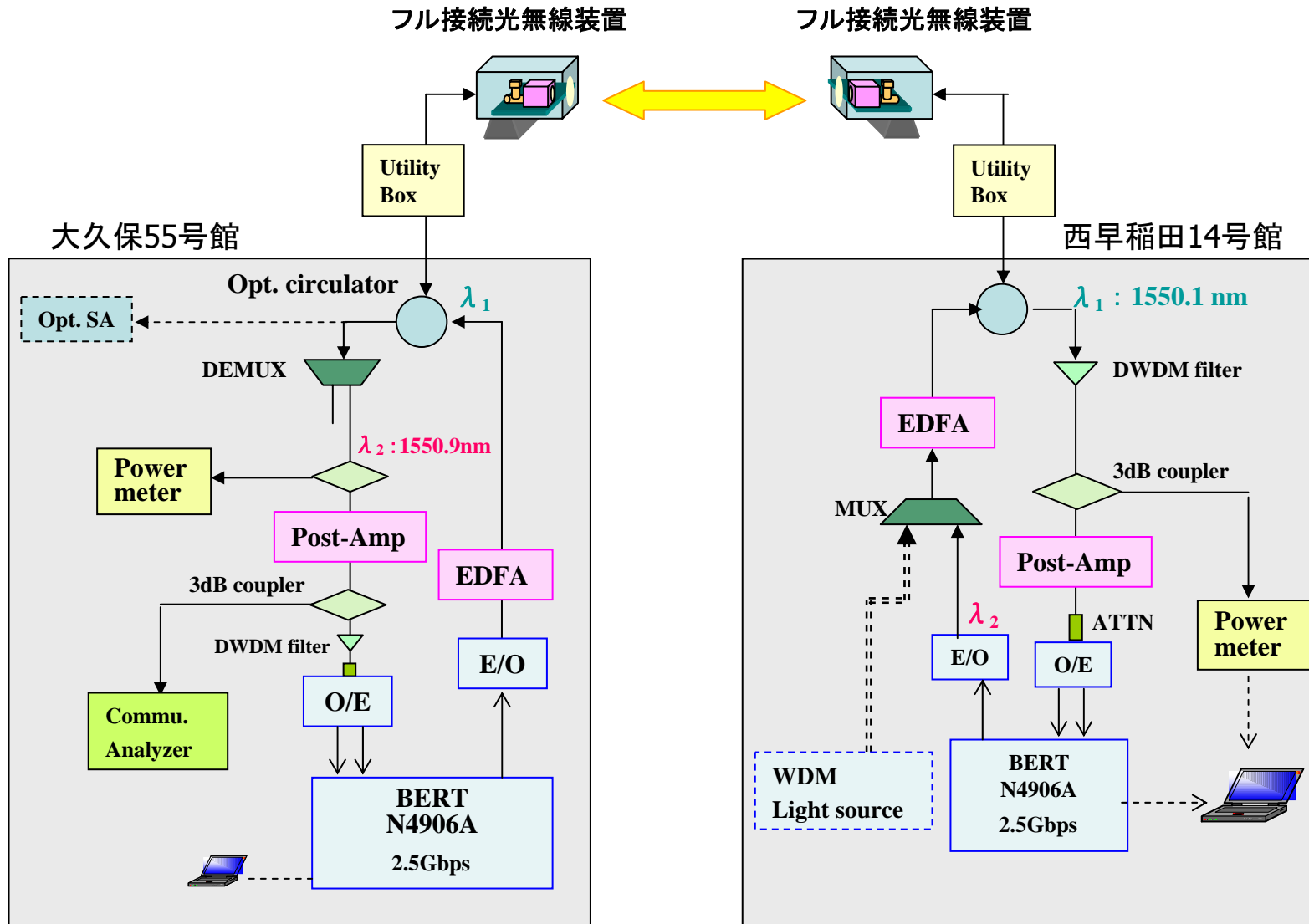
早稲田14号館屋上の開発した光無線装置(右)と

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)

到来角度変動の抑圧



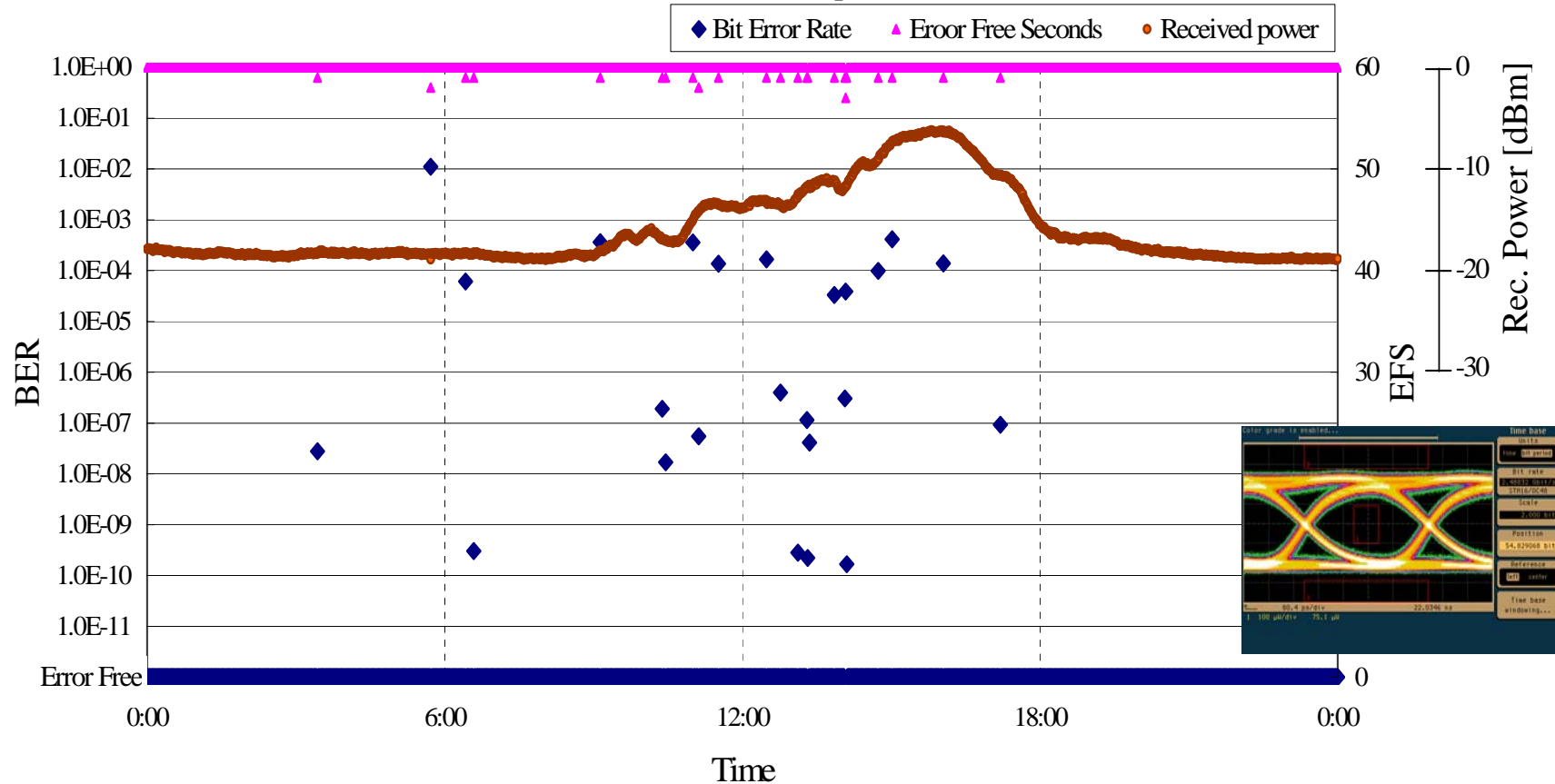
通信品質評価実験系



安定性 BER, 受信電力

Bit error rate characteristics

Data rate : 2.488Gbps / PN23

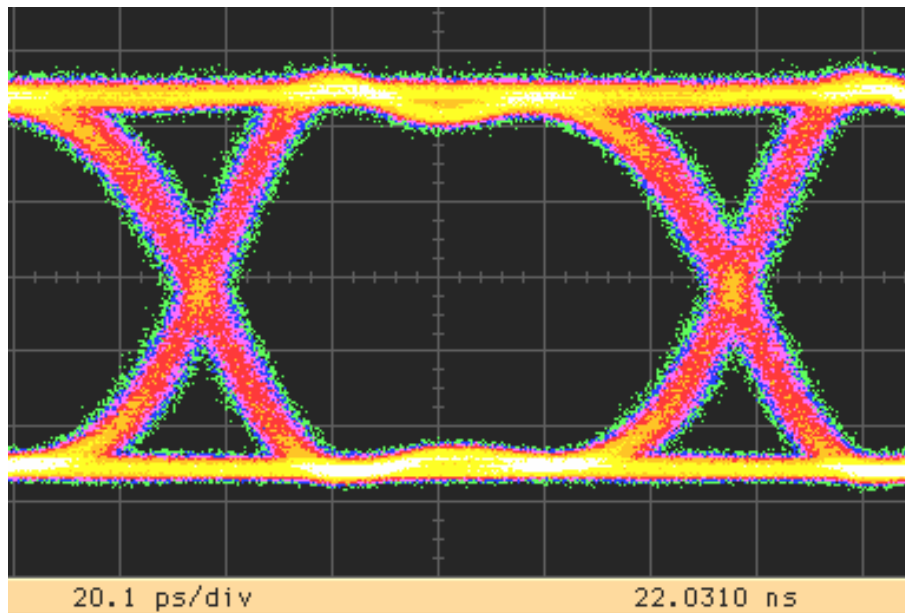


図中のマスクは STM16 標準パターン(30分間の積算)

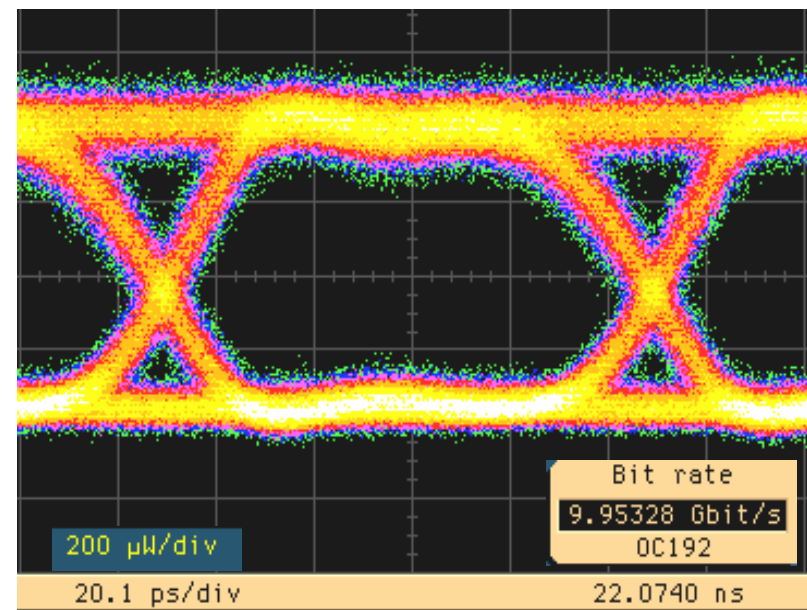
10Gbps 伝送実験

世界初の10Gbps光無線通信

DWDMとで100Gbps以上の通信も可能



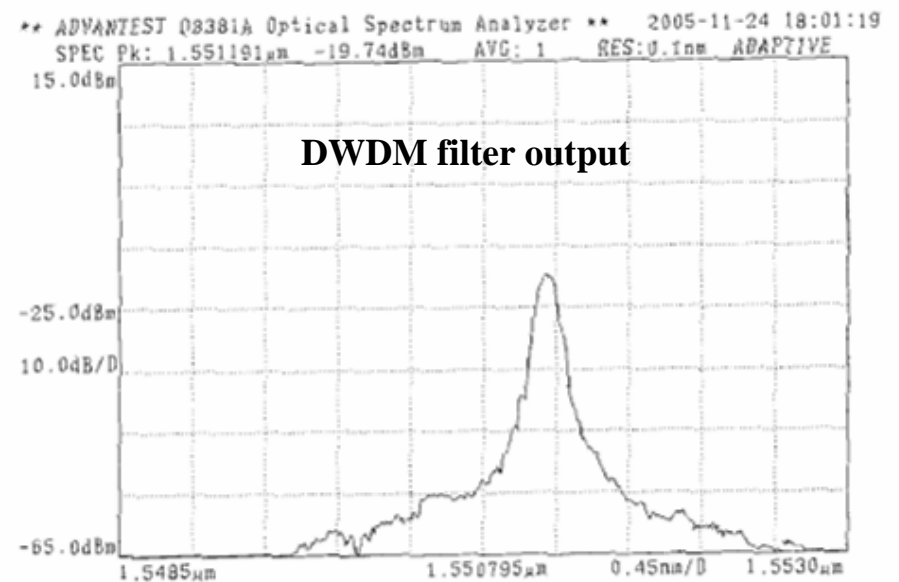
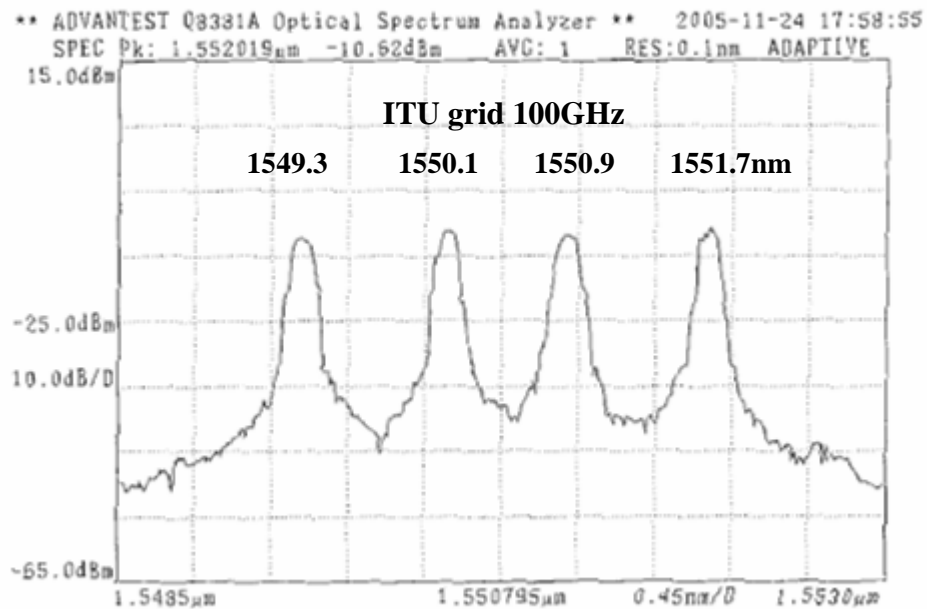
送信波形 9.95Gbps OC192



1km 伝送後

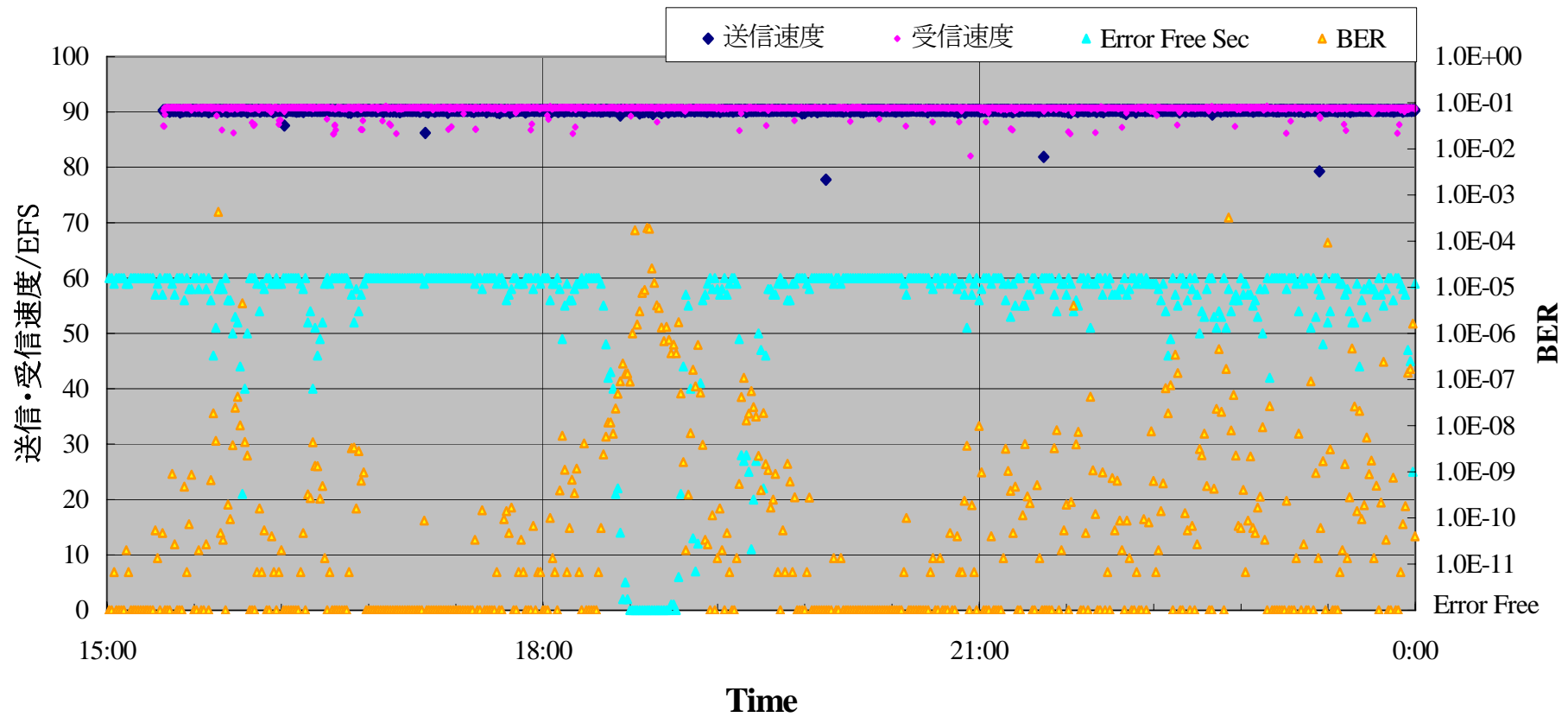
DWDM 伝送実験

100GHz 間隔 100mW/wave で送信



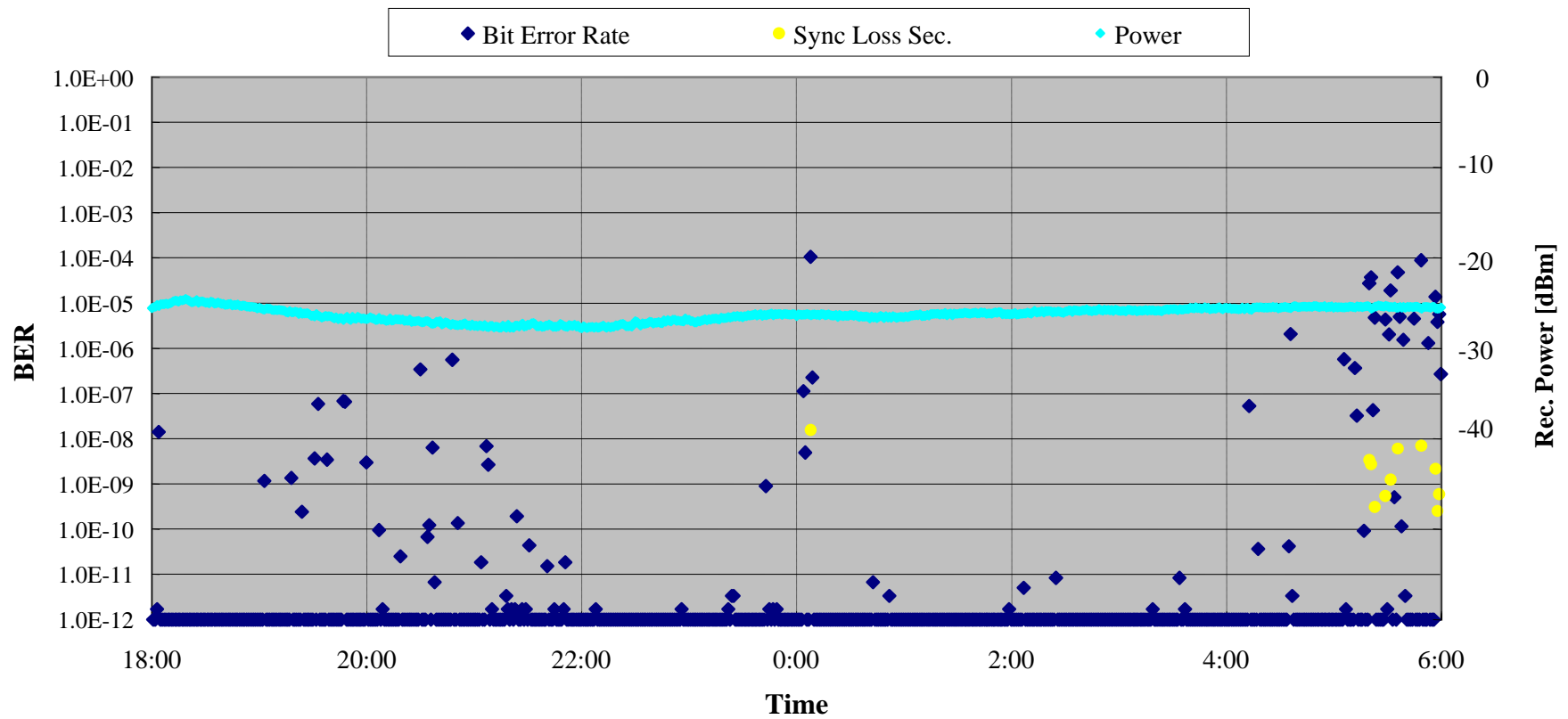
WDM通信実験結果の例

伝送路品質と TCP Throughput
2006.02.16 BER(2.5Gbps) & G-Ethernet WDM構成



10Gbps伝送実験

10Gbps BERT 2006年1月26日～27日



研究成果

1. 従来報告されてきた空間光 \leftrightarrow Fiber間の結合損失は約10dB, これを約5dBとし2倍以上の効率を達成し, 安定的な双方向通信システムの開発
2. 500Hzの精追尾速度を有するフル光接続光無線装置を開発し, 大気揺らぎを抑圧



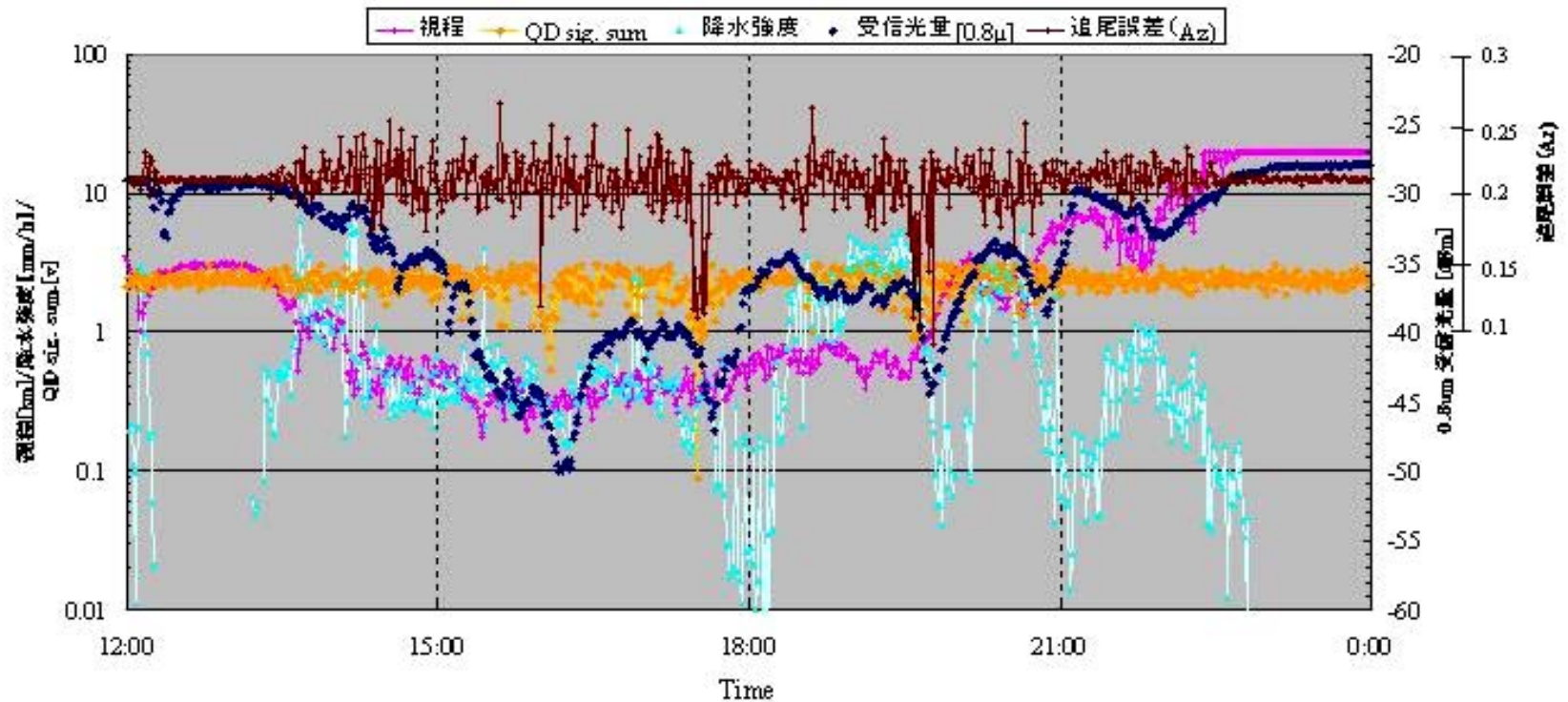
ファイバ -- 空間 -- ファイバのシームレス接続による
Bit rate free & Protocol free 無線通信システムを
実現し, 世界初の10Gbps超の無線通信の実証した

今後の課題は

- (1) 追尾の安定性
- (2) 様々な気象条件化での安定動作の確認

追尾精度, 安定性

追尾状態と光波減衰量, 視程の関係
2006.01.14 降雨の影響



回線設計値 追尾, 信号識別マージン: 20dB
2006年1月(降雨、降雪があった)の月間稼働率
追尾維持率: 99.5% (従来型光無線装置の稼働率: 99.9%)
主信号回線稼働率: 90%

不稼働の定義: 1分間の計測時間でBER > 10⁻² かつ FES < 30 となった場合その1分を不稼働とした

通信無線光

世界最高速の10ギガビット

早大・情通機構、実験に成功

情報通信研究機構と早稲田大学は二日、レーザー光を使って無線で通信する光無線通信の実験で、世界最高となる毎秒10ギガビットは十億ビットの通信速度を達成したと発表

日経産業新聞

平成18年2月3日 6面

量通信ができることを初めて実証した。

情通機構などは、光ファイバーで利用されている波長と同じ一・五ギガビットは百万分の一、帯のレーザー光を出す通信装置を開発した。早大の久

保キャンパス（東京・新宿）と西早稲田キャンパス（同）に新装置を設置。一ギガの距離で通信実験を実施したところ、毎秒10ギガの通信速度を達成した。

光ファイバーの基幹通信網では毎秒10ギガが主流。今回の実験は光無線で初めてファイバー並みの速度が出たことになった。通信品質も光ファイバー並みなことを確認した。現在の光無線通信装

置は、波長が〇・八ギガ帯のレーザー光を利用している。この波長では、毎秒10ギガ程度の通信速度が限界。また、気温の変化に影響を受けやすく、通信品質が不安定になりやすい課題もある。

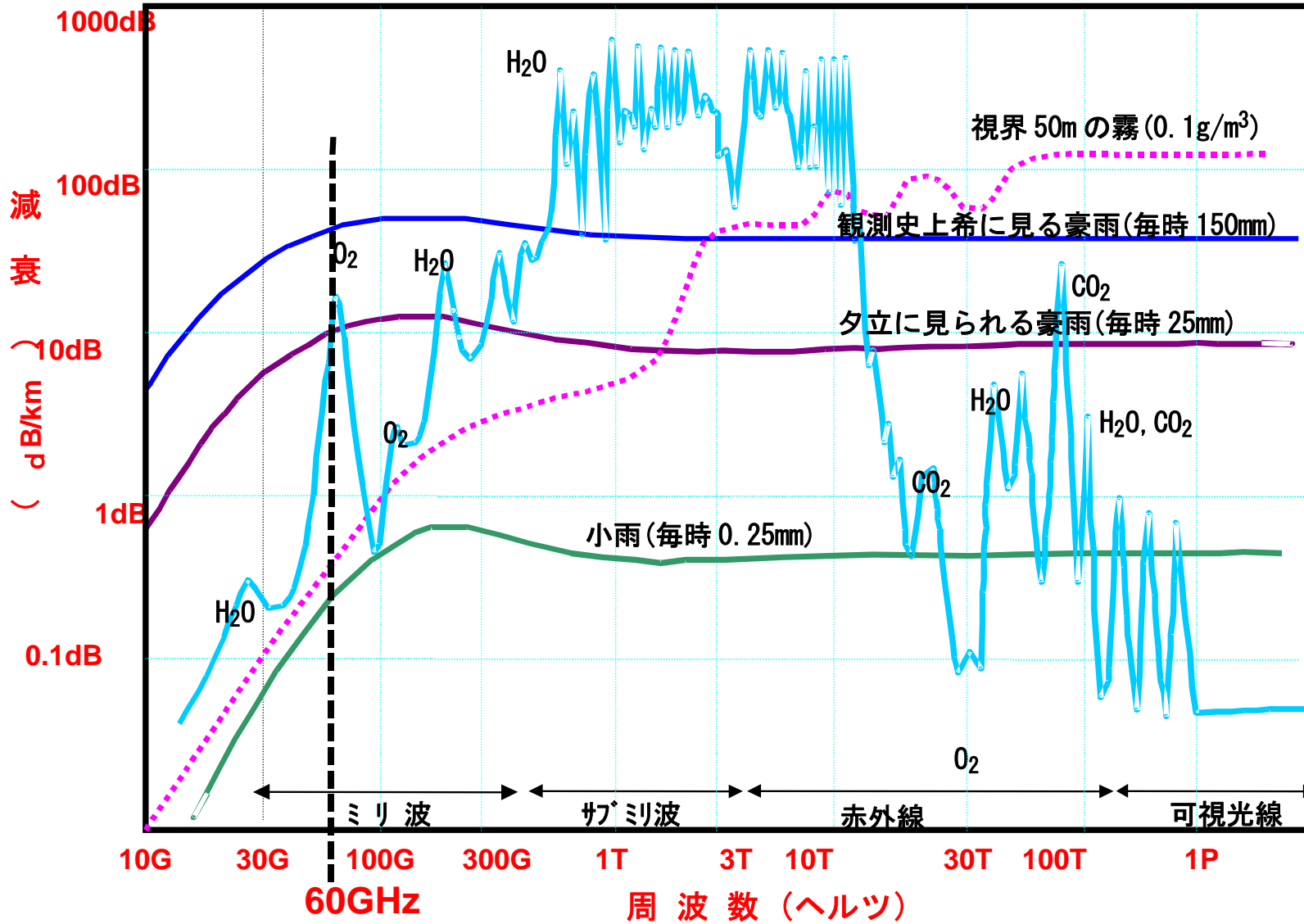
60GHzミリ波キャンパスネットワークの構築 (Waseda Campus Wireless Network)

60GHz帯無線システムの導入背景

◆IPネットワークの進展でTCP/IP通信の実現, WEBへのアクセスが増大
◆マルチメディアシステム技術の進展 (MPEG2映像伝送, VoIP等) により, 大学内, 大学間を結ぶ遠隔 講義, ゼミやシンポジウムの交流の気運が高まっている. このため, 安価で100Mbps程度の高速, 高品質, 天候の影響を受け難い無線インフラとなる大学内, 大学間 (中継により1km以上) を結ぶ高速キャンパスLANの構築が求められている. これをケーブルやファイバーのような高価な導入費が無く, 実現可能な短距離無線システムを必要とする. この要求条件を満足するのが60GHzの無線システムである. 首都圏でのラストマイル問題を解決できる.

- 1) 高速伝送が可能(OC-3~OC-12)
- 2) 最大伝送距離 (300-400m)
- 3) 天候 (雨滴) による影響を受ける酸素吸収による減衰 (16dB/km)
- 4) アンテナ設置 (ビルの屋上, 屋内)
- 5) 見通し内通信 (セキュリティに強い)
- 6) 電波干渉が少ない (他に妨害を与えない)
- 7) 小型, 安価, 密度の濃い導入できる
- 8) 2000年無免許電波利用が認可

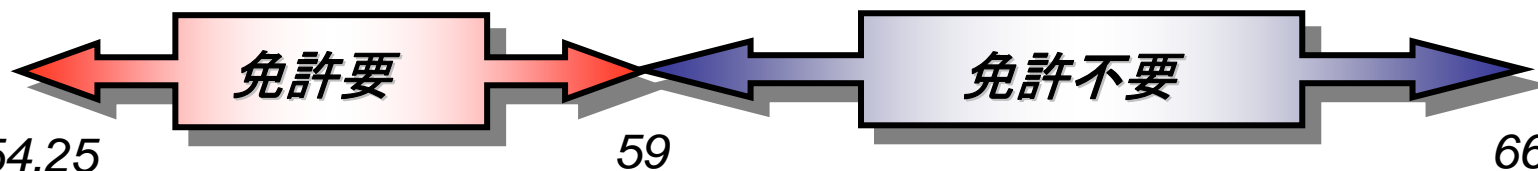
ミリ波の大気減衰特性



60GHz帯周波数割当

官報より（平成12年8月9日付）

54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66_{GHz}



54.25

59

66

陸上移動業務・番組素材中継用

通信方式：FDMA/TDMA

FDD/TDD etc.

変調方式：AM/FM/PM etc.

空中線電力：0.1 W 以下

偏波：水平・垂直偏波

スプリアス：50 μ W 以下

特定小電力無線局

変調方式：規定なし

空中線電力：0.01 W 以下

空中線利得：47 dBi 以下

スプリアス：500 μ W 以下

占有帯域幅：2.5 GHz 以下

技術適合基準証明（メーカーがTELECから取得）

ユーザーでの免許申請(免許方式に基づき免許状発行) 無線従事者資格者要、選任届

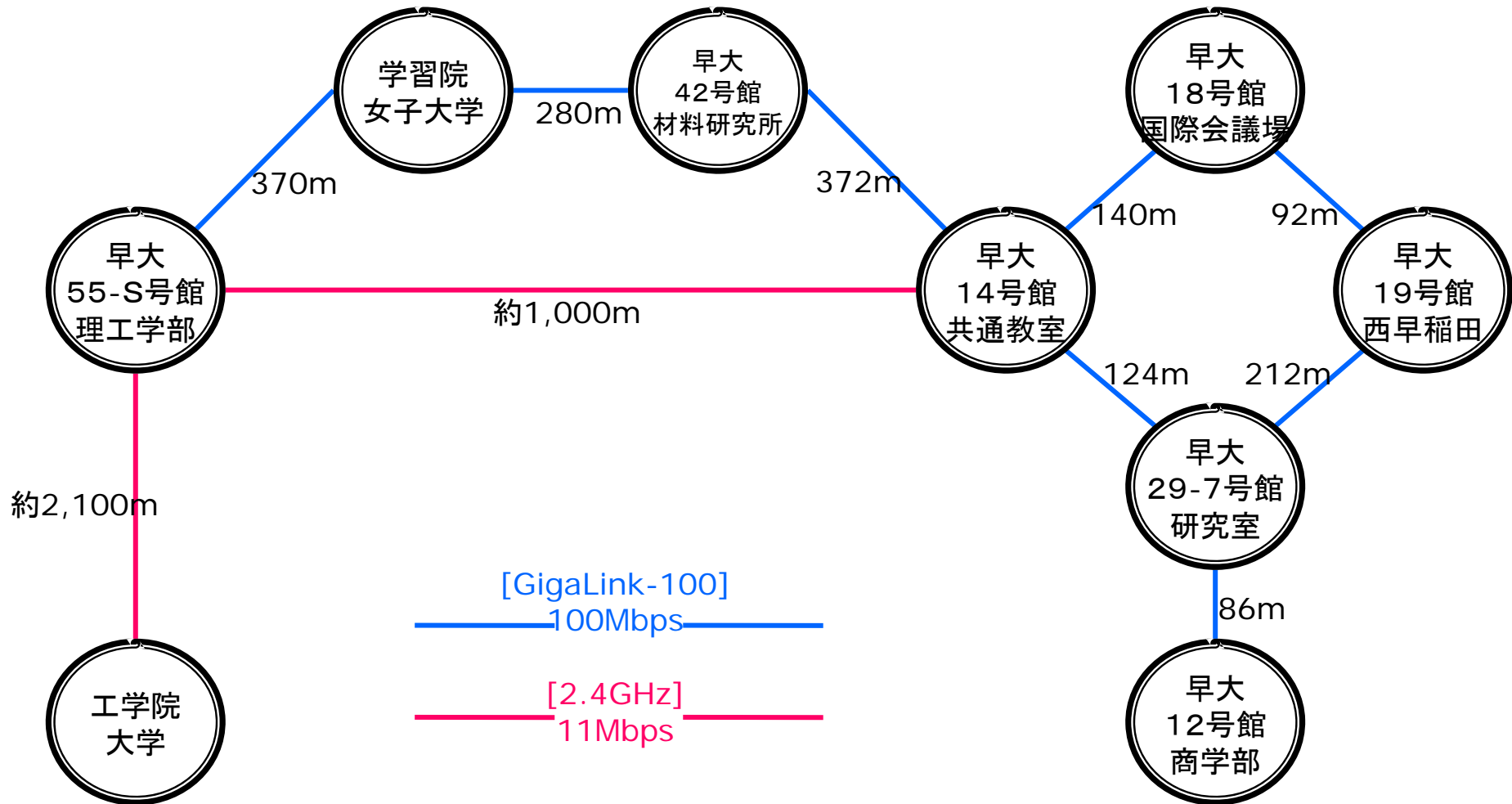
ユーザー使用可

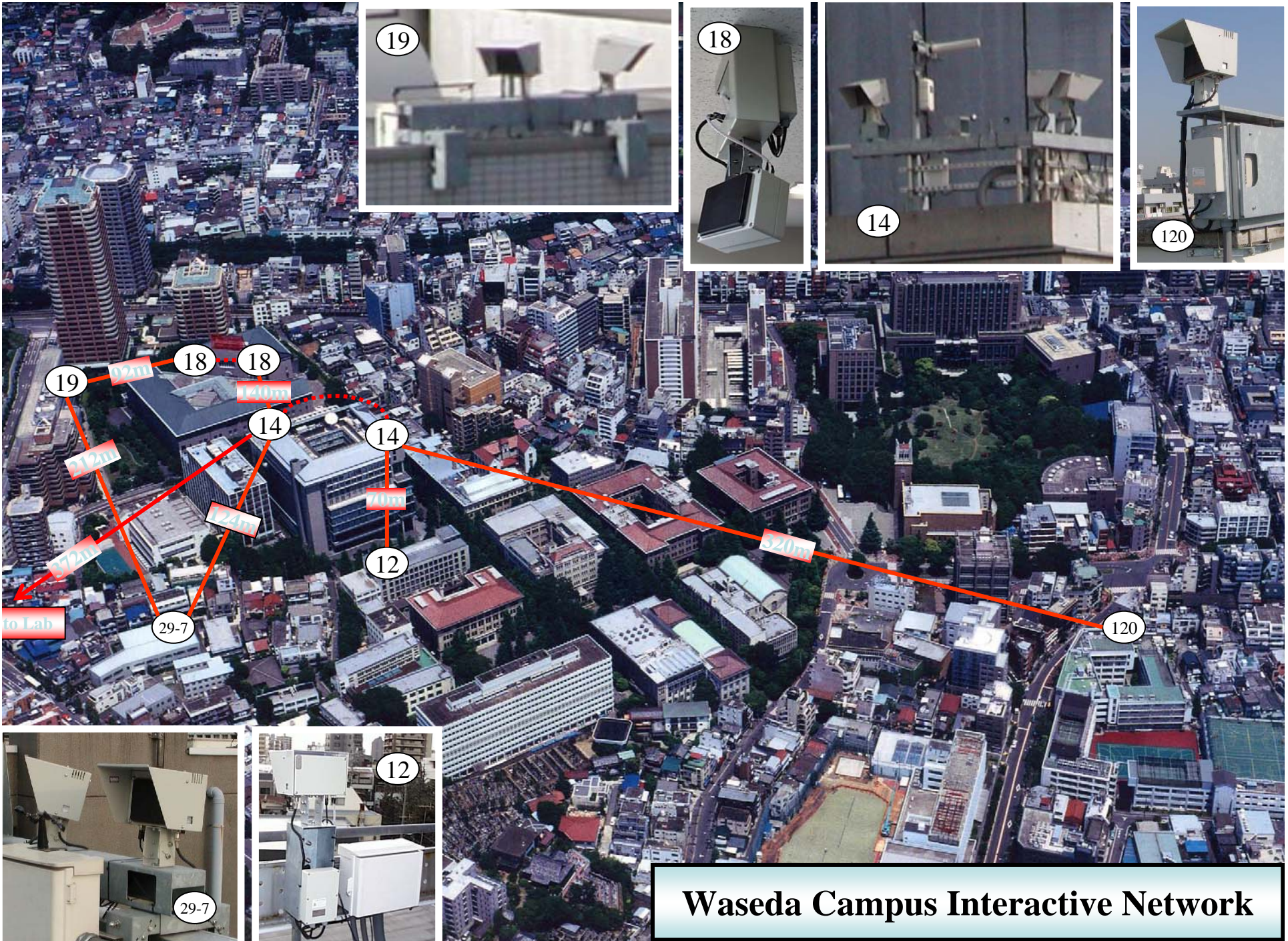
技術適合基準証明（メーカーがTELECから取得）

ユーザー即使用可

TELEC：財団法人テレコムエンジニアリングセンター

早稲田 60GHz 高速無線ネットワーク構成図



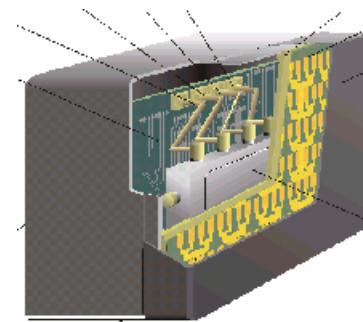


Waseda Campus Interactive Network



60GHz無線通信装置設置例

1台設置例

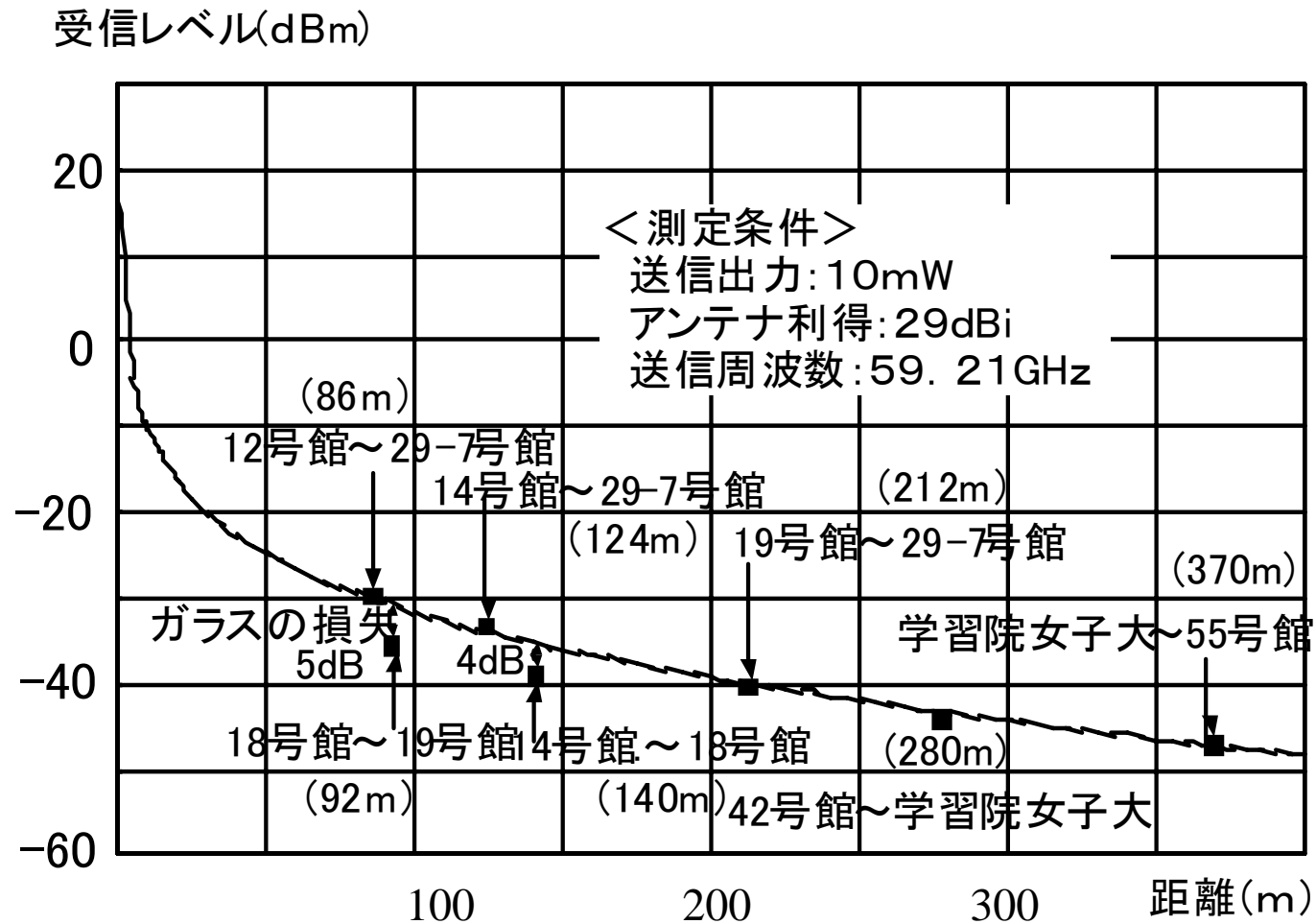


2台設置例

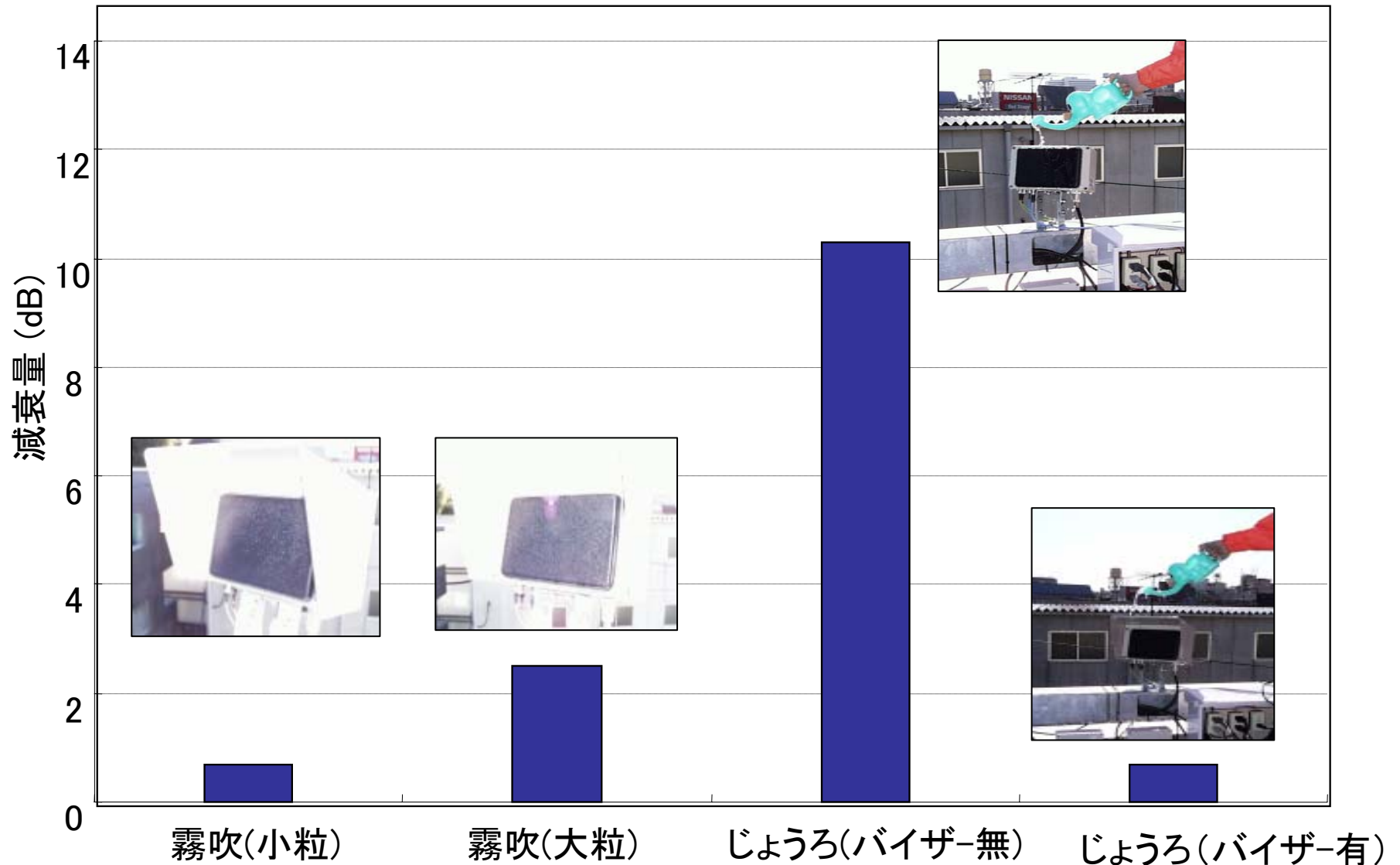


パラボラをつけば
通信距離延長: 1000m
(アンテナ利得: 43dBi)

距離変化によるレベル減衰特性



雨滴によるレベル減衰実験



60GHzの実証実験結果

- (1) 60GHz帯無線通信方式の実験を行い、良好な特性が得られた.
- (2) アンテナ距離減衰は16dB/kmが成り立つことを実証した.
- (3) 晴天時:ビット誤り率 10^{-8} 以下, 近隣のアンテナの干渉が問題ないことを確認した.
- (4) 改良型GUNN発信器を開発し, 周波数変動要素を削減して安定化を図り, 長期安定動作を確認した.
- (5) 27素子こう指向性アンテナを開発し, 早大工学院大間(約2km)無線リンクに導入し, 安定動作を確認し, 所要の伝送特性を得た.
- (6) アンテナ屋内設置の場合にはガラスの減衰を考慮

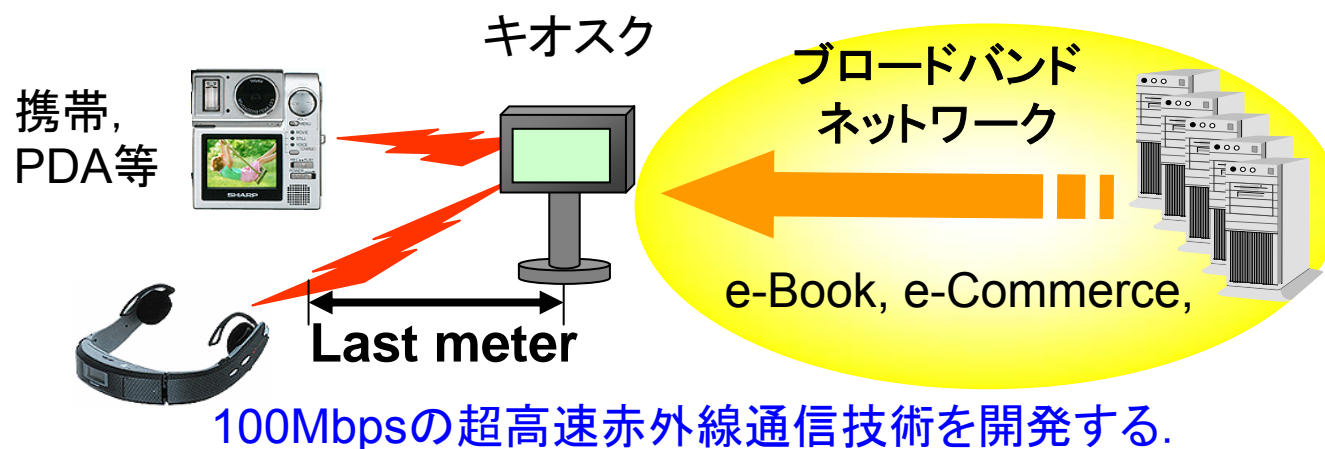
今後の課題:

IPネットワークの構築(レイヤ3SW導入), ネットワークの特性(スループットなど)測定, 長時間伝送特性の測定, 天候の影響などをデータ収集, 無線送受信装置の信頼度, MPEG2やVoIP特性等、リアルタイム系のアプリケーション(遠隔講義, 遠隔ゼミ)の動作確認

3. 近距離高速赤外線通信標準化の 取り組み

近距離高速赤外線通信技術の動向

- 公衆回線(xDSL, FTTH)の高速化
- デジタルカメラの普及
- HDD搭載携帯MP3プレーヤー,
- ビデオビューワーの普及
- 赤外線クレジット決済利用の兆し
- PDA、PC向けコンテンツ販売端末の登場
- 電子ブックが携帯電話で楽しめる

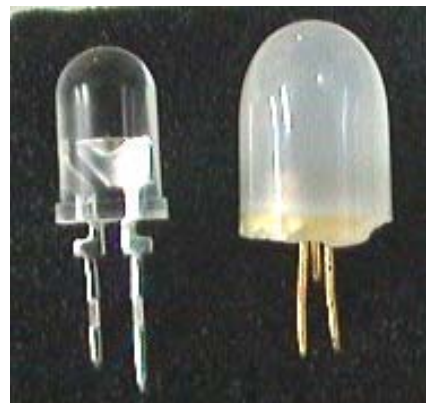
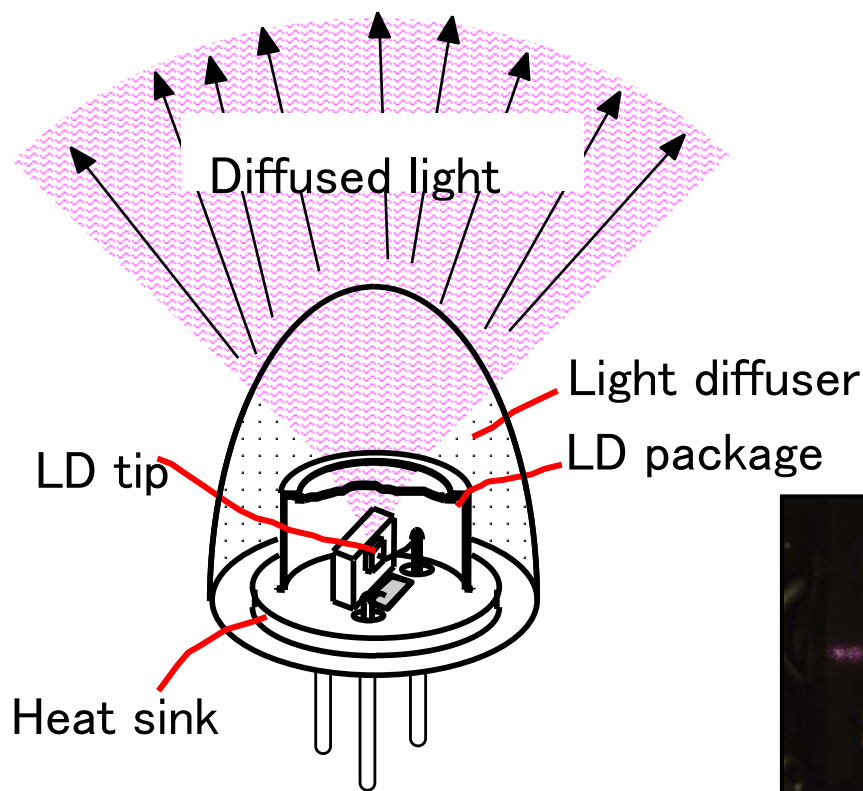


標準化目標

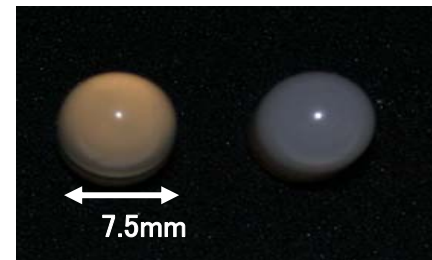
(1) 100Mbit/s以上の通信速度対応小型赤外線トランシーバ・モジュールの開発・試作と物理層規格(UFIR)の策定と標準化：目に対する安全性を確保したアイセーフ半導体レーザ(LD)および従来送信デバイスに使用されてきた発光ダイオード(LED)による100Mbps以上の速度に対応できる物理レイヤ送受信回路の研究開発

(2) 100Mbit/s高速赤外線通信プロトコル(IrBurst)の設計・試作と標準化

LDにおける課題 アイセーフLDの設計



左:LED
右:アイセーフLD

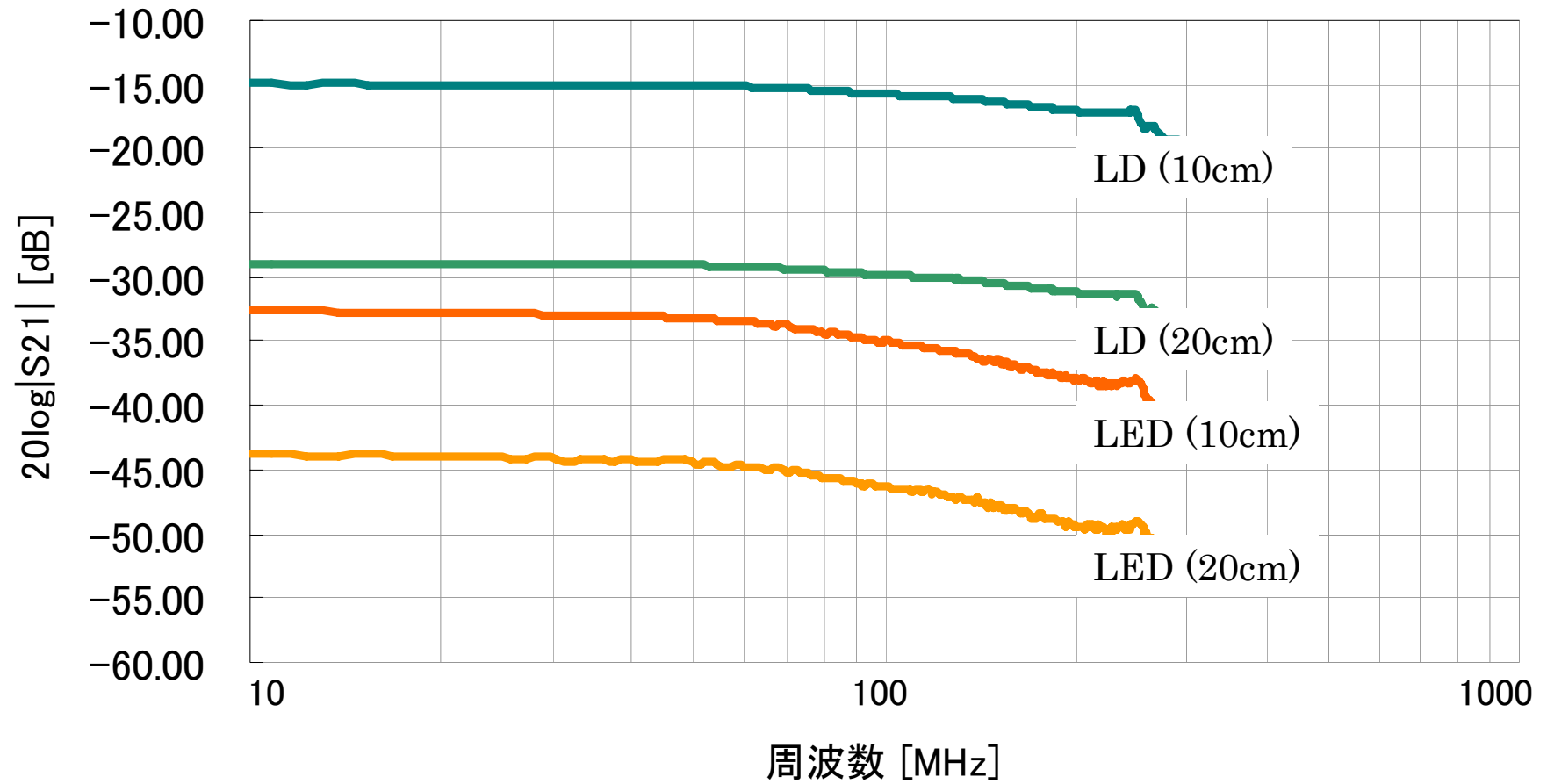


アイセーフLDの送受構成



試作したアイセーフLDの放射状況

LDとLEDの周波数特性



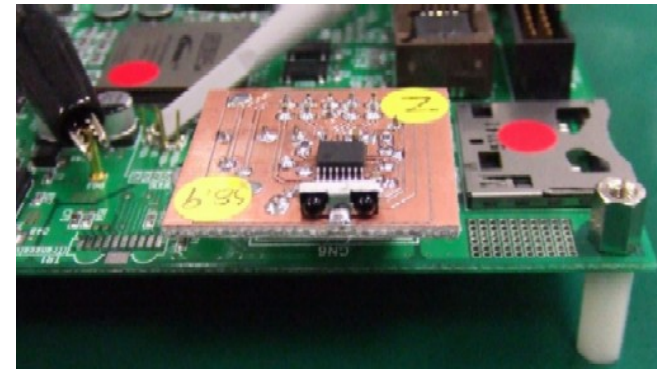
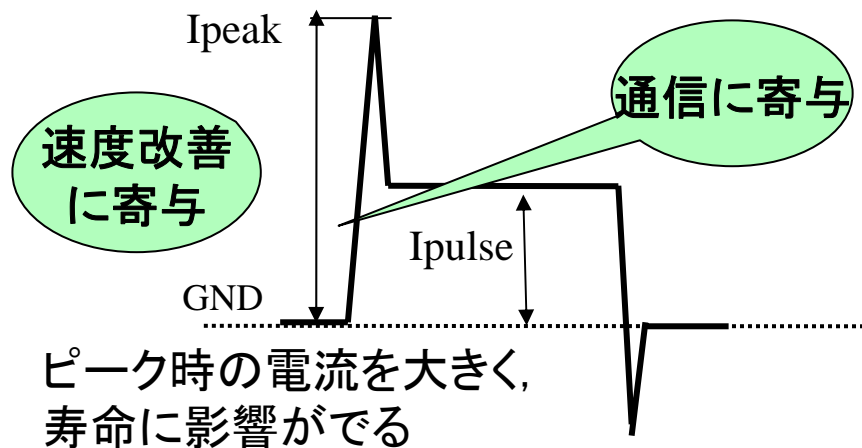
LEDによる高速化手法

現状、量産レベルで入手可能なLEDの遮断周波数は約50MHzである。新規にオーバードライブ回路を開発することにより、応答速度を改善し125Mbit/sの通信に対応可能とした。

1. DCバイアスを印加



2. ピーキング



アイセーフLDによる速度実験



プロトコルの高速化と標準化

1. 現行プロトコルの改善: IrSimple の開発
2. 高速プロトコルの新開発: IrBurst の開発

既存OBEXの問題点

- 物理レイヤの有効活用ができない
 - 1つのコマンドパケットに対するレスポンスが来ないと
 - 続くコマンドパケットが送れない)
- ヘッダと解析処理

IrBURSTでの解決策

- 大きなデータはTTP上にダイレクトにマッピングするデータ
- 転送専用チャンネル
 - 無駄なヘッダの削除
- IrLMPのパケット多重機能の有効活用
 - 複数のオブジェクトから構成されるコンテンツへの対応
- コントロール・プロトコルの新規策定
 - データチャンネルの生成、削除など

現在のIrDAプロトコルの状況

- IrDA方式による赤外線データ通信方式：
豊富なアプリケーションプロトコル：
(IrTranP, IrWW, IrOBEX, IrBurst, IrFM ,など)
PDA, パソコン, 携帯電話, ポータブルプリンタなど携帯情報端末や
情報周辺機器に多く採用され, 身近な近距離無線通信方式として
市民権を得ている.
- IrDA赤外線通信トランスポートレイヤ以下
(IrLAP, IrLMP, TinyTP)の基本プロトコル
基本プロトコルが1994年に制定されて以降, 小規模な改定が施
されたほか根本的な改良はなされていない.



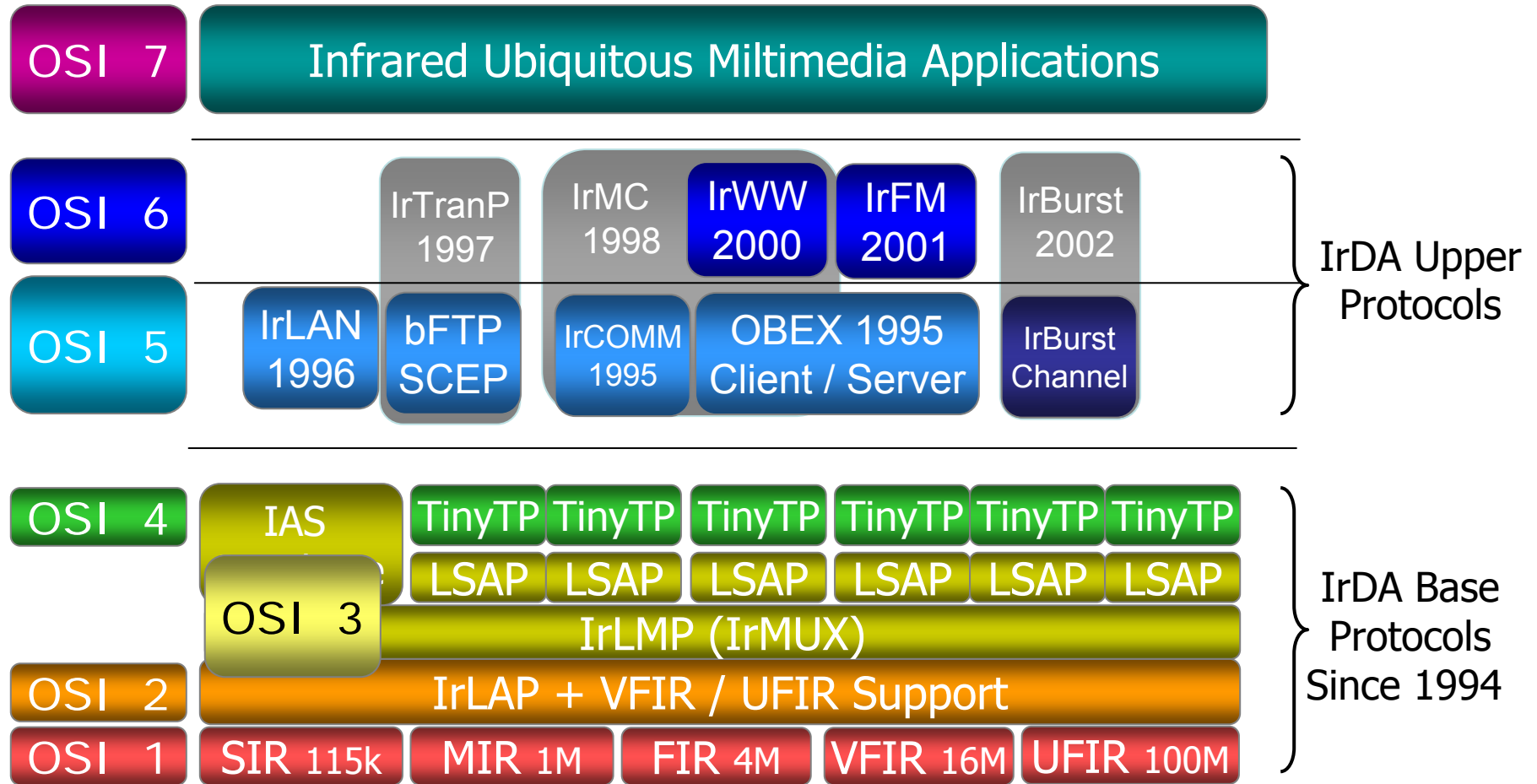
高速化、高効率化のためのプロトコル改善の余地がある

近接通信の転送速度とコンテンツサイズの関係

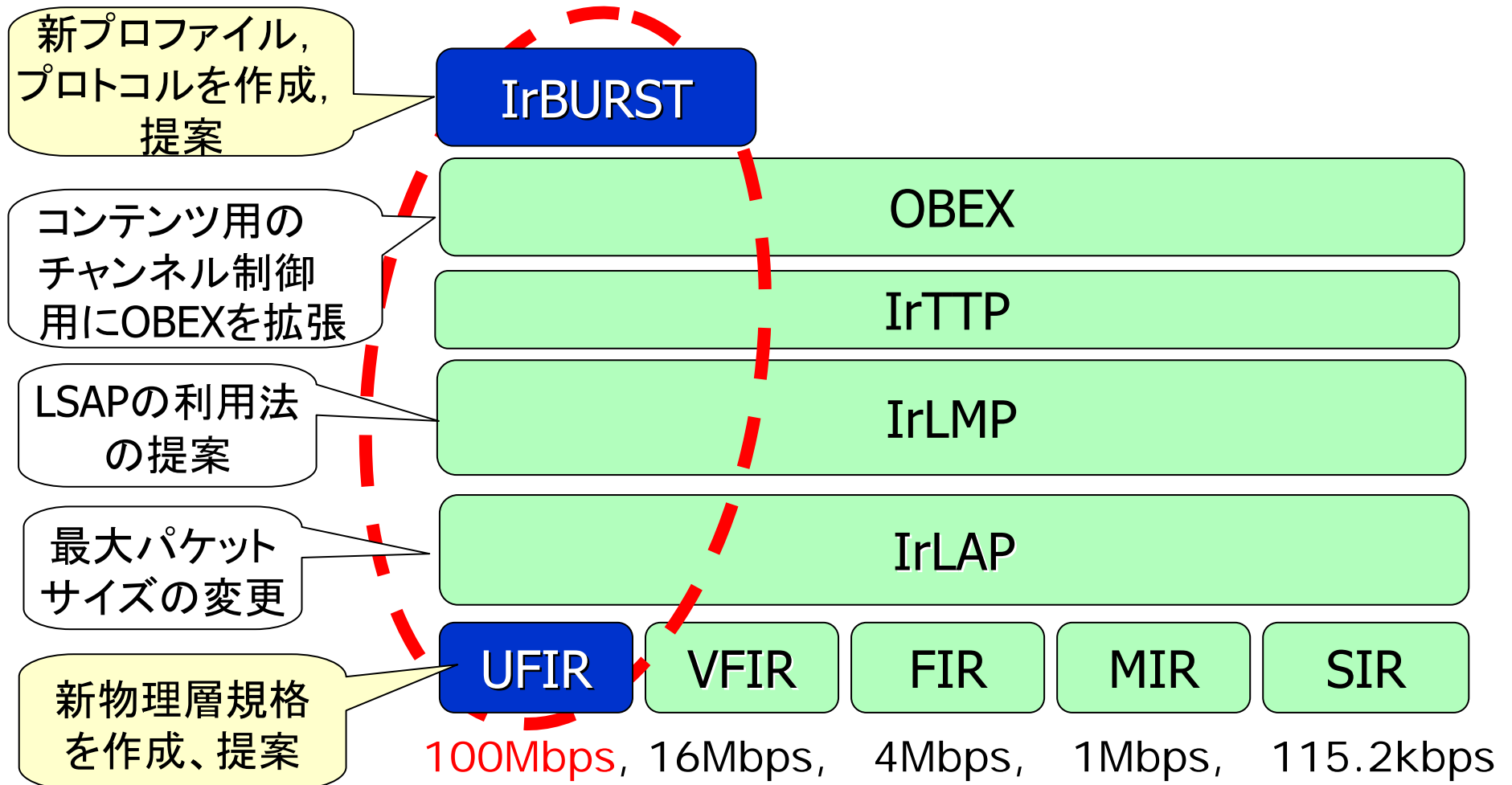
近接通信方式 Communication Method	通信速度 Bit/Sec (bps) (Byte/Sec)	文字情報(Text) 5000文字 10k bytes	画像情報 (Picture) 2Mピクセル 500k bytes	音楽情報(Music) Mp3 3分30秒間 3.5M bytes
IrDA赤外線 SIR方式	115k bps (10kByte/sec)	1秒	48秒	318秒
IrDA赤外線 FIR方式	4M bps (500kbyte/sec)	0.02秒	1秒	7秒
IrDA赤外線 UFIR方式	100M bps (12M byte/sec)	0.0001秒	0.04秒	0.3秒
Bluetooth Version 1.1	1M bps (約700k) (70k Byte / Sec)	0.15秒	7.2秒	50秒
Bluetooth Version 2.0 + EDR	3Mbps (210kbyte/Sec)	0.05秒	2.3秒	16.7秒
USB Version 1.1	MAX 12M bps (1.5Mbyte/Sec)	0.007秒	0.33秒	2秒
USB Version 2.0	MAX 480M bps (60Mbyte/Sec)	0.000017秒	0.008秒	0.06秒

上記の通信速度は理想の転送速度であって、現実とのギャップは大きい

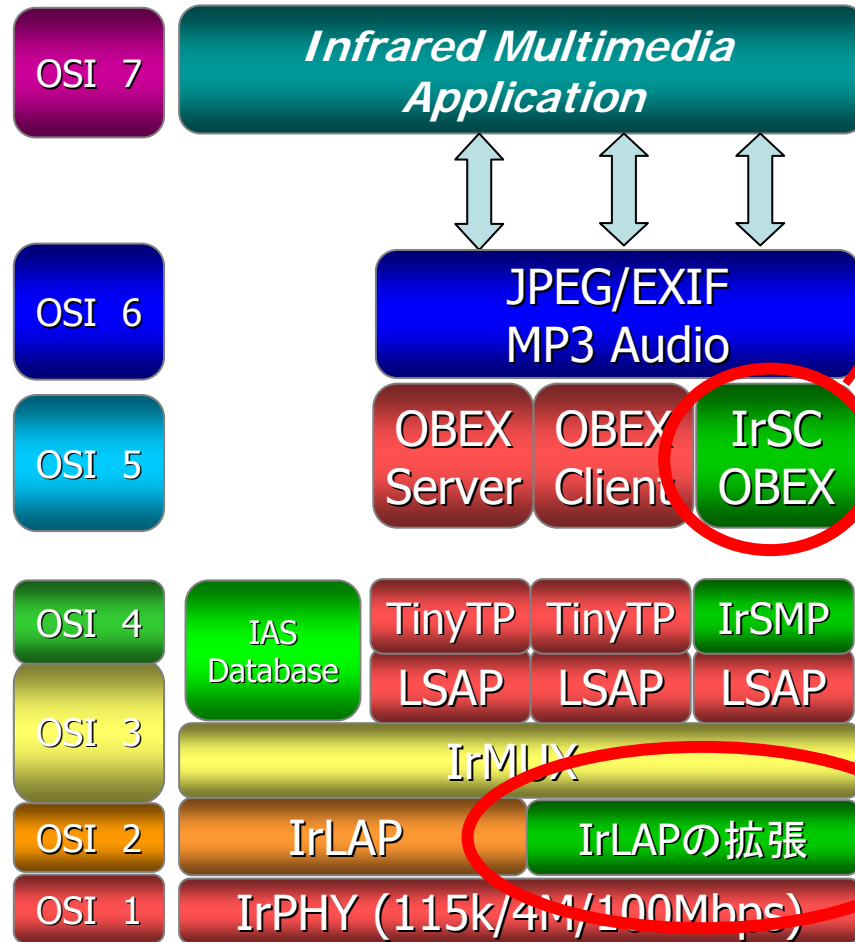
現在のIrDAプロトコルの状況



赤外線通信の標準化



IrDA基本プロトコルの最適化



- IrSimple
IrLAPの条件を拡張し最適化する
- IrLAP (データリンク層)
HDLC正規応答モード(半二重)
アドホックネットワーク構成に必要な装置発見手順
接続時QOS (Quality of Service) による通信条件の最適化

(1) 既存プロトコルの高速化(改良)

IrDA規格:

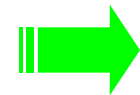
すでに10年以上の歴史と実績すでに10億台以上の機器にIrDA搭載されている

最適化の制約:

互換性を重視するため、現在のIrDA方式を根本的に変更することは実際的ではない。

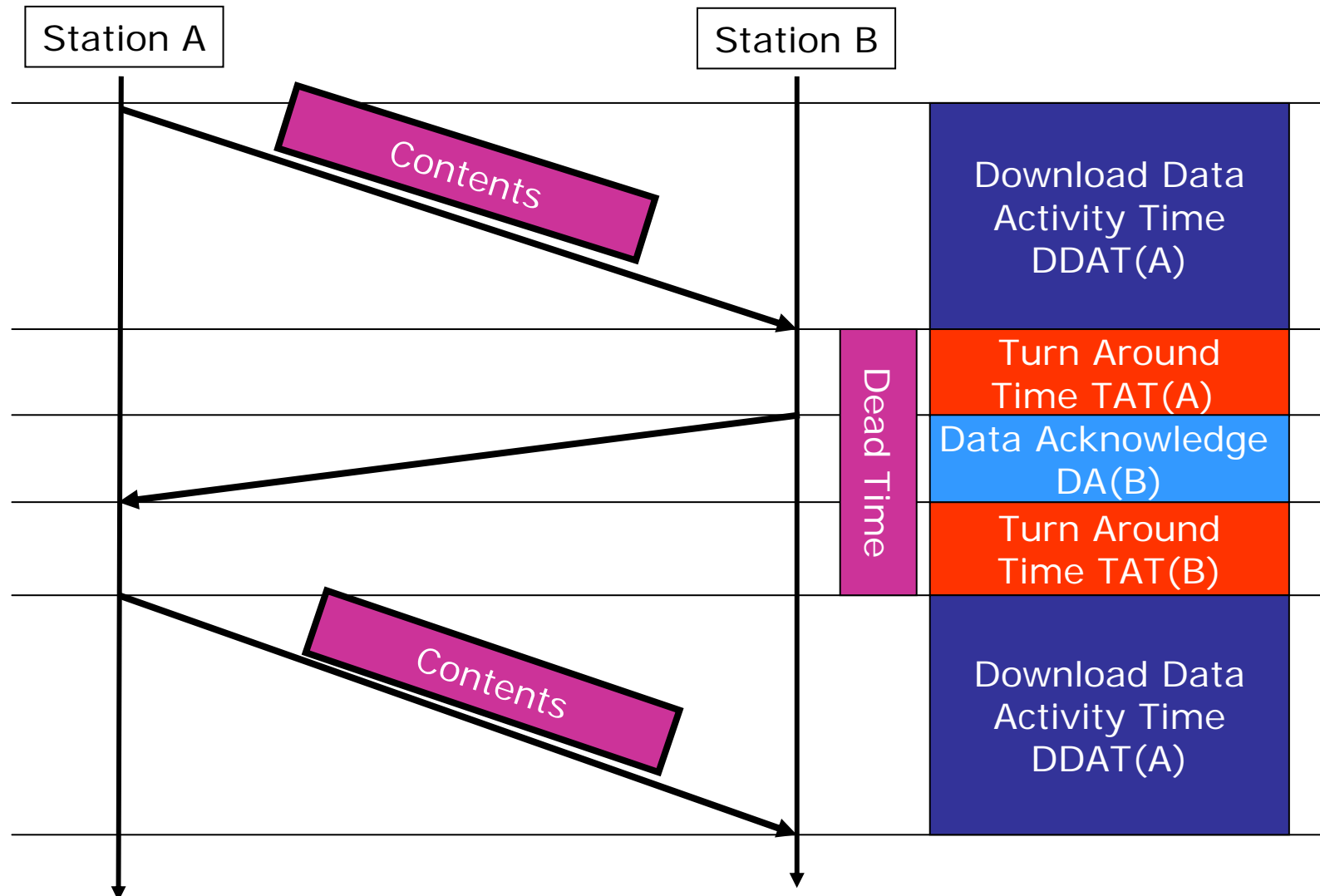
最適化のアプローチ:

現在のIrDA方式の自然な拡張をすることによる、スループットの向上を考察する

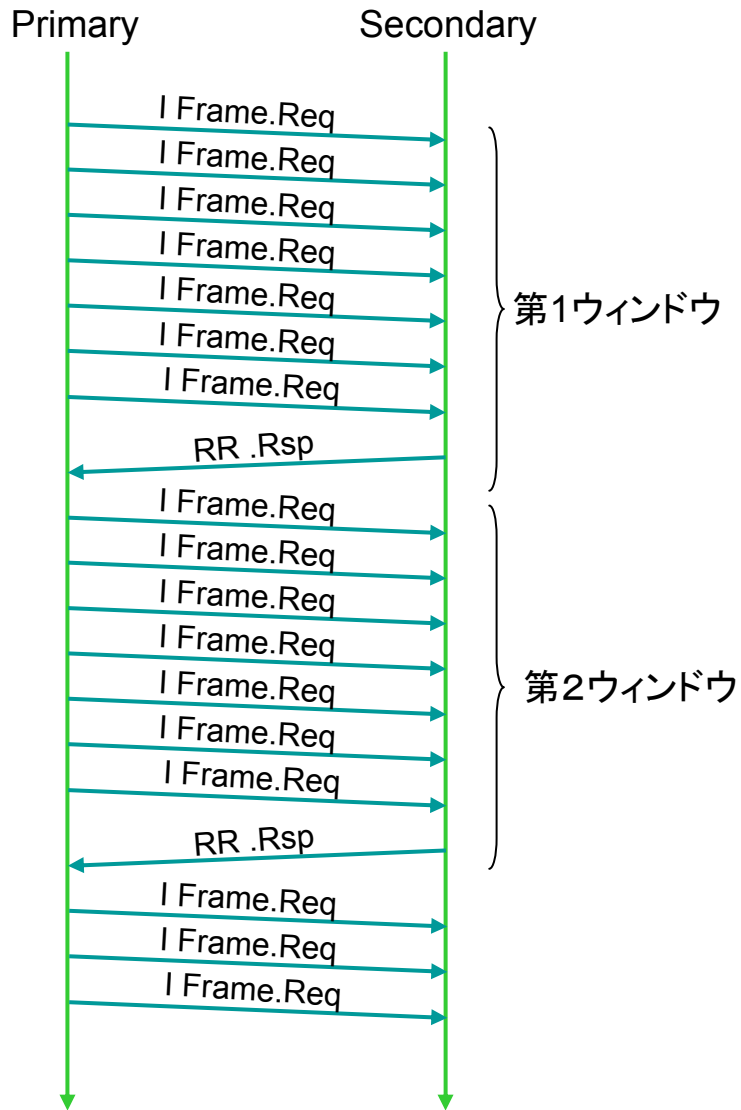


- 単一コンテンツ程度のデータ転送を重視
画像データや音楽データなどの大規模なデータ転送をすばやく行うことを目的とする。
IrFIR方式(4Mbps)において500kバイト~数Mバイト程度のデータを1秒~数秒で転送できる,家電リモコン的な使い勝手のよさを特徴とすること。
- 自立したプロトコルであること
IrSimple単体で自立プロトコルとして機能することがのぞまれる。
家電製品に応用できるように,単方向方式も可能であること。
- 物理層変更なしで高速化を可能にすること
IrSimpleでは、ハードウェア層(IrPHY)には手を加えない。
高速化のために新たな高速デバイスの開発を行うことは、時間と開発費用が多大にかかり、コスト増は実際的ではない。
むしろ、現在あるハードウェア層の能力を引き出すことができる最適化を行うことによって、実質の通信速度を向上させる。

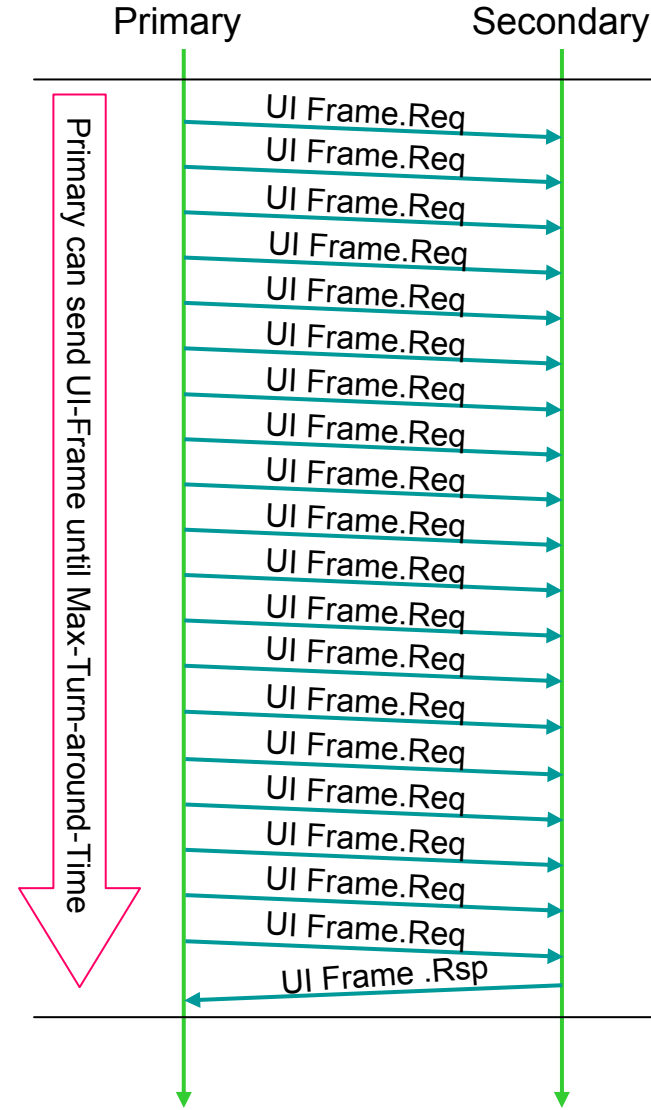
高効率化の技術的考慮点(1)



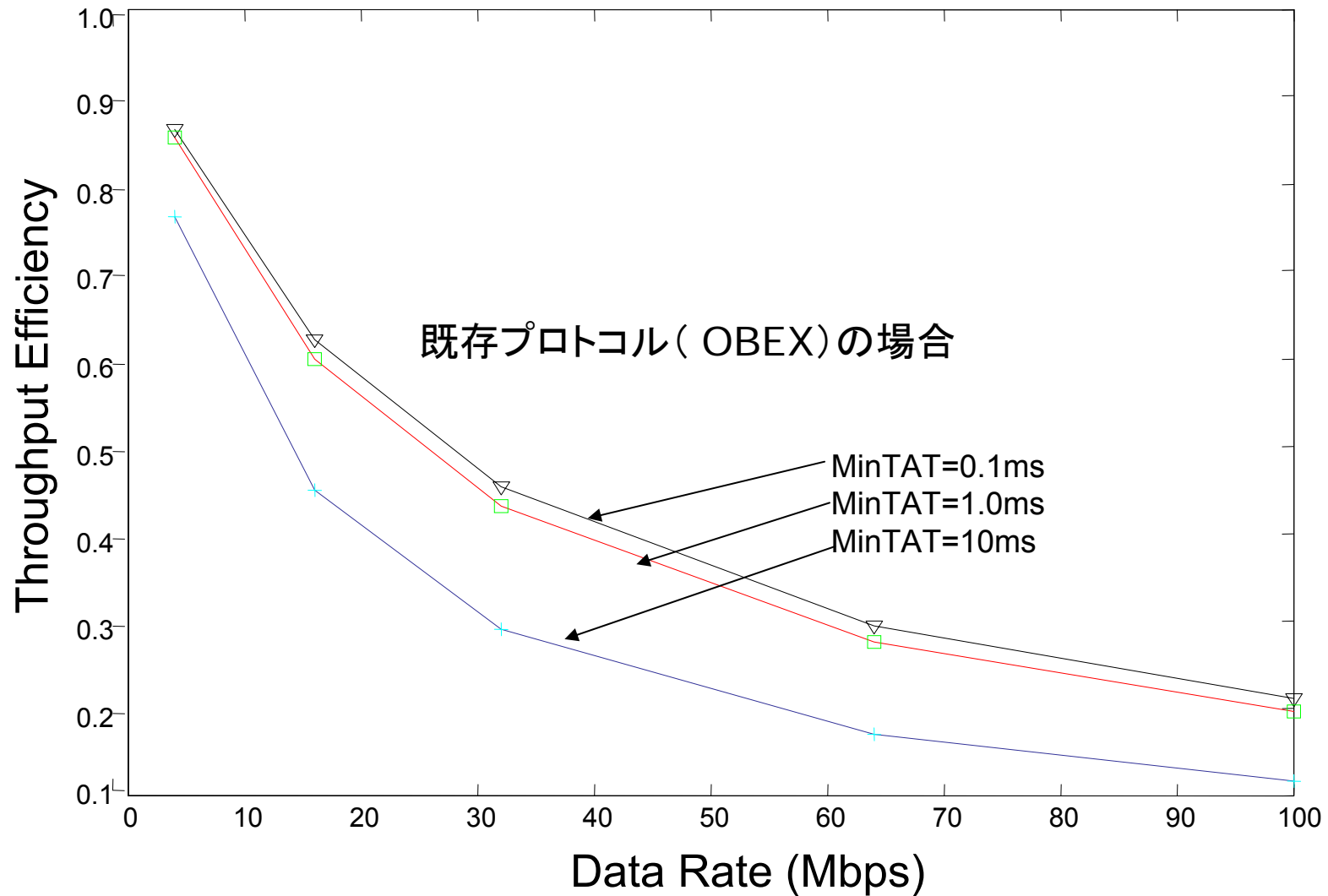
現行のIrDA データ通信方式



IrSimple 高度バーストデータ通信シーケンス



既存IrDAシステムデータ速度の転送効率



100Mbps用プロトコルレイヤの開発

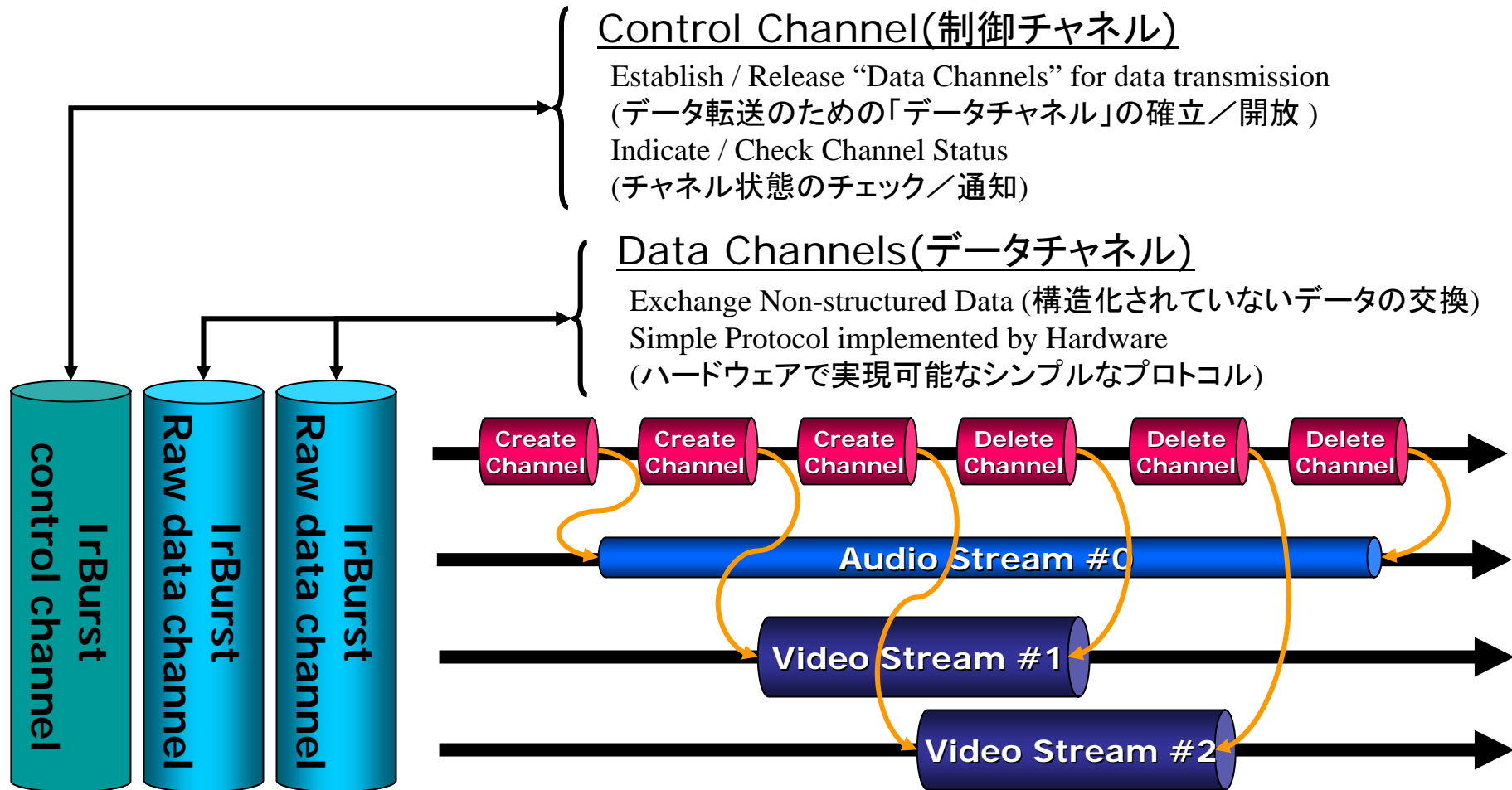
コントロールプロトコル

- データ転送チャンネルの動的生成, 削除
- 転送中のデータのステータスモニター

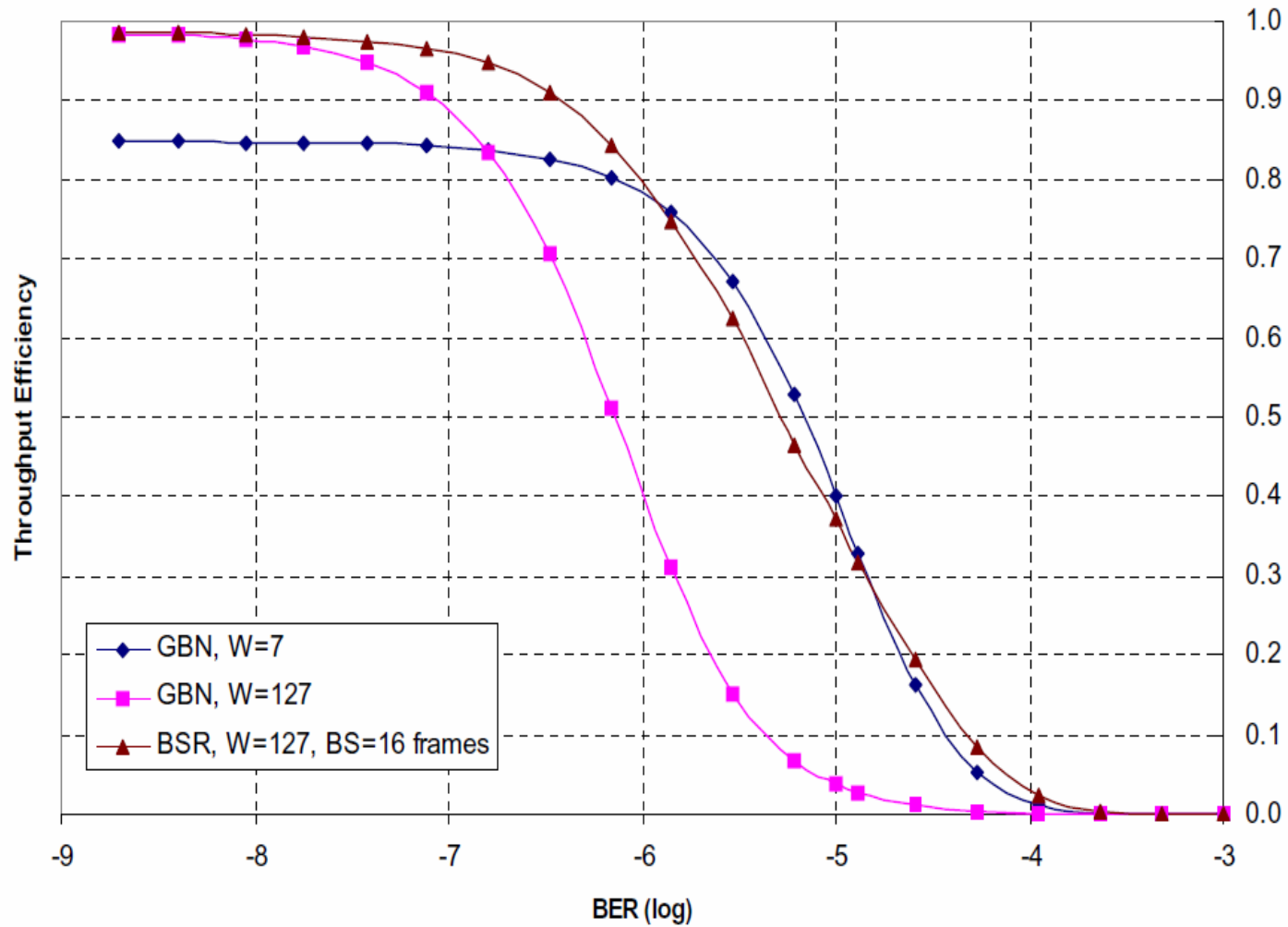
2種類のコントロール方法を提供

- 既存OBEXを利用する
- IrBURST専用制御プロトコル

IrBurstプロトコル提案



新開発のブロック選択方式のスループット



まとめ

- フロントエンドユニットの開発では、初めて半導体レーザ素子（LD）を民生用の空間伝送用光源として用いることに成功し、アイセーフ化技術を確立した。
- デモ機を作製し、アイセーフLDを用いたUFIR伝送になんら問題がなく、通信距離においてはその放射強度の高さから発光ダイオードを用いた場合に比べて距離が伸びることが確認できた
- UFIR小型高効率ユニットを開発し、携帯電話への搭載可能なUFIRユニットの開発に目処を得た
- 上位プロトコルであるIrBurstは標準化が完了
- 下位物理層（UFIR）においても、Draft化が達成
- 上位プロトコルを実装した実際の通信システムの構築と伝送実験の実施、伝送パラメータの最適化については、今後の課題であるが個々の要素技術では完成度の高いものとなっている。
- IrBurst, UFIRが何れも、IrDAに採択されたことから、国際標準化はほぼ成功した