

高速赤外空間通信技術の展望

廣本 宣久

1. 高度情報通信社会と高速赤外空間通信

21世紀の高度情報通信社会においては、音声、文字、静止画像、動画像、高精細映像などを統合する多様なマルチメディア機器とそれらを結ぶネットワークが、産業、交通・運輸、医療・福祉、教育などあらゆる分野において活用され、オフィス、家庭を含め社会のほとんど隅々にまで浸透してくるため、さらなる高速・大容量通信が必要となると考えられる。そのキーテクノロジーになるのが、光（赤外）通信技術である。将来（2010年代）の公衆通信ネットワークにおいては、光ファイバー通信網において Tbps (10¹² bits per second) 級の国際幹線網と国内幹線網が必要となり、またビジネス通信網においても 100 Gbps の基幹 LAN (local area network), 600 Mbps の分配系、そしてハブ-端末機器間の高速ワイヤレス赤外線通信などが必要となると予想されている¹⁾。

Tbps 級の高速・大容量 1.5 μm 帯光ファイバー通信については、波長分割多重(WDM: wavelength division multiplexing) 技術、光時間分割多重(OTDM: optical time division multiplexing) 技術、あるいは両者を組み合わせることによって実現されると考えられる。分配系、特に各家庭など加入者系の FTTH (fiber to the home) の技術では、1.3 μm/1.5 μm 帯光ファイバー並用 ONU (optical network unit) の簡易化・低価格化技術や、石英系光ファイバーに比べ伝送損失は大きい、大きいコア径(数百 μm)をもち、接続、分岐が容易な POF (polymer or plastic optical fiber)²⁾を用いるシステムなどが研究されている。光ファイバーネットワークのアクセス網につなぐ加入者系の“to the home”部分では、ミリ波帯の無線システム³⁾も

有望である。後者の実用化のためには、信号で変調されたミリ波を直接伝送する光によるミリ波帯サブキャリアー伝送(光・ミリ波融合通信)⁴⁾が必要になると考えられる。

高度情報通信社会における赤外空間(無線)通信の役割は、ひとつには地上において室内の情報通信端末-ネットワークハブ間に用いる簡便でかつ安全な高速のワイヤレスリンクと、構内やビルディング間に用いるやや長距離の可搬でフレキシブルな高速(Gbps 級)の空間通信システムを提供することである。また、もうひとつの重要な役割は、グローバルな大容量光衛星間通信システムを確立するとともに、宇宙空間で活動する人間に必要な地上と同レベルの高速通信 LAN システムを提供することであろう。

本稿では、これらの地上で用いる高速赤外空間通信技術と宇宙における大容量光衛星間通信技術の現状と将来について解説する。

2. 赤外空間通信システムの現状と安全性

2.1 赤外空間通信システムの現状

赤外空間(無線)通信は、端末と端末、端末とネットワークハブあるいはネットワークハブとネットワークハブ間のデータ通信システムとして、ワイヤレスな環境を提供するとともに、送受信器の小型軽量化が可能、電磁雑音に強い、機器間の干渉性が小さい、秘密保持性(セキュリティ)が高い、免許が不要、低価格化の可能性があるなどの特長をもっている。現在、ワイヤレスインターフェイスやワイヤレス LAN システムには GaAs/AlGaAs 発光ダイオード(LED: light emitting diode)と Si フォトダイオード(PD: photodiode)を用いる波長 0.7~0.8 μm 帯のデータ通信システムが実用化されている。室外のビルディング間などの長距離通信用のものでは、LEDの代わりに GaAs/AlGaAs レーザーダイオード(LD)が用いられる。

郵政省通信総合研究所(CRL) (〒184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1)
E-mail: hiromoto@crl.go.jp

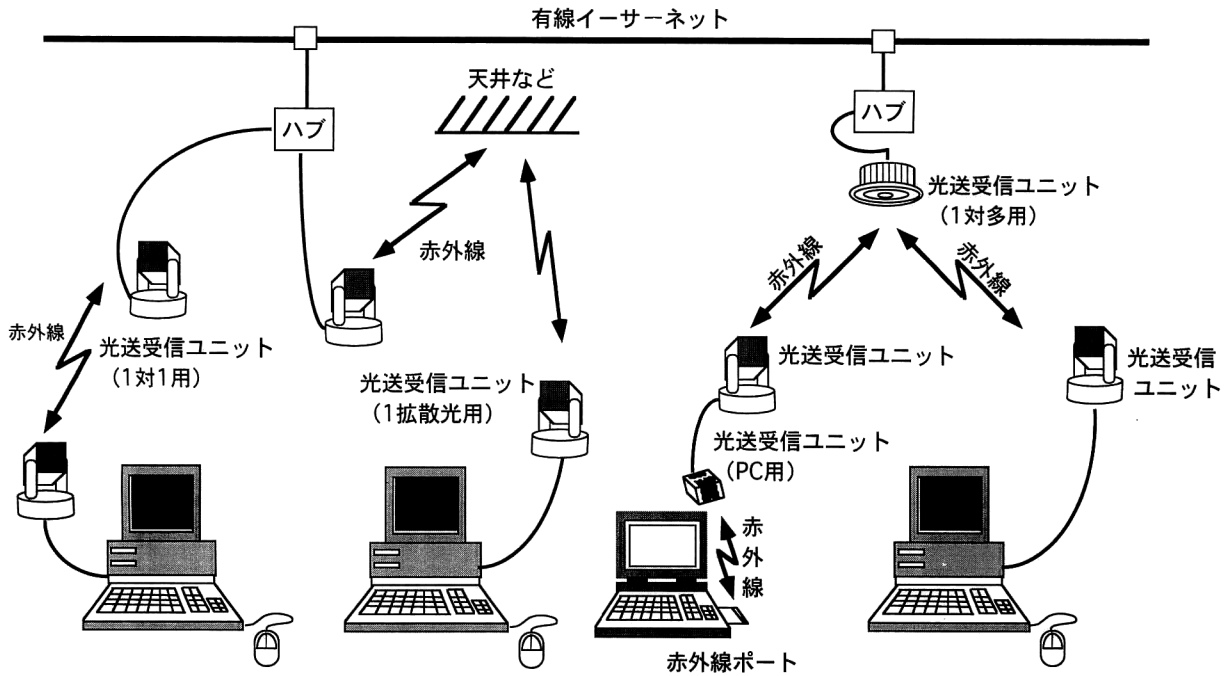


図1 10 Mbps イーサネット LAN 互換赤外線空間通信システムの例。

ノートパソコンや電子手帳などの情報機器間の0~1mの距離のデータ通信に、最高4 Mbpsの伝送速度まで対応するIrDA (Infrared Data Association) 規格⁵⁾の赤外線通信ポートが広く使われ、標準化が進められている⁶⁾。IrDA規格には、用いる赤外線の波長(0.85~0.9 μm)や伝送方式(RZ符号ベースバンド伝送)、通信方式(4値PPM, 調歩同期)、通信速度などの物理層の規格と通信プロトコルや誤り検出・訂正機能などを実現するデータリンク層が含まれている。

オフィスなどの室内のLAN (local area network) として、20 m程度の距離をつなぐ、10 Mbpsイーサネット(Ethernet) LAN互換の対向式(光ビーム幅1度角程度)の赤外線無線通信システムや、厳密な光軸合わせを必要としない拡散式のもの実用化されている(図1)。業者団体である光無線通信システム推進協議会(ICSA)によって、10 Mb/s光無線LANシステムの標準規格(ARIB STD-T50 1.0)が現在提案されている⁷⁾。

室外で用いる、ビルディング間などを結ぶ高速LANシステムのために、伝送速度155 MbpsのATM (asynchronous transfer mode, 非同期伝送モード) 通信などが可能な赤外線空間通信システム(伝送距離1 km程度, 最大4 km)も実用化されている。これらの装置には、精密な光軸調整のためのCCDカメラによるファインダー画面、相手方ビームのトラッキング機能などが備えられている。表1に赤外線空間通信/LANシステムの開発動向をまとめる。

表1 光空間通信/LANシステムの開発動向。

システム	IrDA 2.0 方式	室内空間通信/ LAN	屋外光空間通信/ LAN
波長帯	0.7~0.8 μm 波長帯	0.7~0.8 μm 波長帯	0.7~0.8 μm 波長帯
対向式/ 拡散式	対向式	対向式または 拡散式	対向式
データ伝 送速度	0.576 Mbps 1.152 Mbps 4 Mbps	10 Mbps (Ethernet)	155 Mbps (ATM) 100 Mbps (FDDI)
伝送距離	1 m	20 m	2 km
適用	コードレスイン ターフェイス	オフィスなど	ビルディング間 など

2.2 赤外線空間通信の安全性

赤外線空間通信では、人が活動する環境を赤外線ビームが飛びかうため、人体特に目に対する安全(アイセーフティ, eye safety)を守る必要がある。図2に長時間(>10,000 s)の露光に対するレーザーの目に対するMPE (maximum permissible exposure, 最大許容露光量)の波長依存性を示した⁸⁾。MPEは、レーザー放射の人に対する障害発生率が50%の照射レベルの1/10のレーザー光強度を意味する。半導体レーザーに関しては、日本工業規格JIS C6802⁹⁾(対応国際規格IEC60825-1)のレーザー製品の放射安全基準において危険度によるクラス分けがなされ、安全予防対策が義務付けられている。2.1に述べた室内LAN用の赤外線空間通信システムでは、クラス1(どのような条件でも目に対するMPEを超えない低出力レーザー)の光源が推奨さ

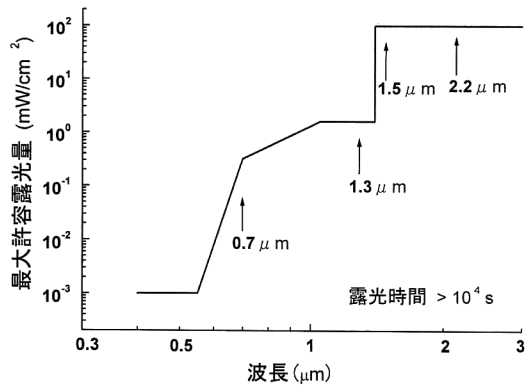


図2 レーザー光の最大許容露光量 (MPE) の波長依存性。

れている。しかし、屋外のビルディング間等の LAN システムでは、クラス 3B(連続光放出レベルが 0.5 W 以上で、直接ビーム内での被曝が危険であるレベルの中出力のレーザー)程度の光源が使われている。

LED については、レーザーと異なり放射ビームが広がっているため危険性が低いと考えられるが、まだ国際的に放射安全基準が決められておらず、現在 IEC/TC76 において検討が進められている段階である。国内では財団法人光産業技術振興協会によって、安全基準策定のため LED の光放射パワー測定法の調査が進められている。

図2からわかるように、赤外空間通信の高速・大容量化ではより高出力の光源が必要になることを考慮すると、目に対する安全を保障するためには、眼球内での吸収の小さい 1.4 μm よりも長い波長の赤外線を用いたアイセーフな赤外空間通信システムを開発していく必要がある。

その場合、現在の光ファイバー通信のデバイスが使える 1.5 μm 帯と、将来的には3章で述べる 2 μm 帯の空間通信システムが研究対象になると考えられる。

3. 高速 2 μm 帯赤外空間通信システム

3.1 赤外ビームの大気伝搬特性

屋外の空間通信システムを構築する場合、大気中の分子・エアロゾルによる伝送光の消散(吸収と散乱)、および熱放射光と太陽光などの散乱光の影響の小さい波長帯を選択することが重要になる。図3に2 km の伝送距離での大気の透過率のシミュレーション⁹⁾の結果を示した。ここでは、標準大気¹⁰⁾を仮定し、高度 0 km, 1 気圧, 温度 15°C, 湿度 46%とし、エアロゾルとして都会モデルをとり、波長 0.55 μm での消散係数 0.7 km⁻¹を仮定している。この図から、波長 2.2 μm 帯の赤外線が最も大気の透過率が高いことがわかる。また、この波長帯は、太陽光の散乱光と大気による熱放射との谷間になるため、大気放射輝度も低く

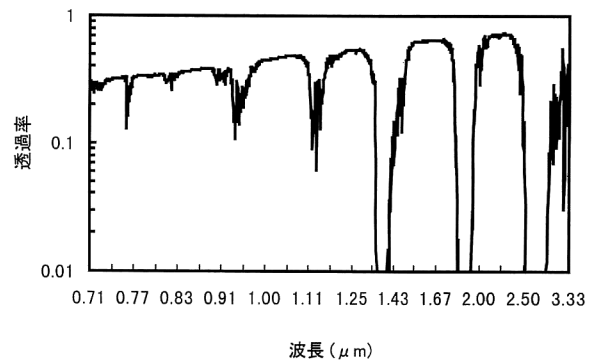


図3 大気の透過率の波長依存性のシミュレーション結果。標準大気、高度 0 km, 1 気圧, 温度 15°C, 湿度 46%を仮定し、エアロゾルとして都会モデルをとり、波長 0.55 μm での消散係数 0.7 km⁻¹としている。

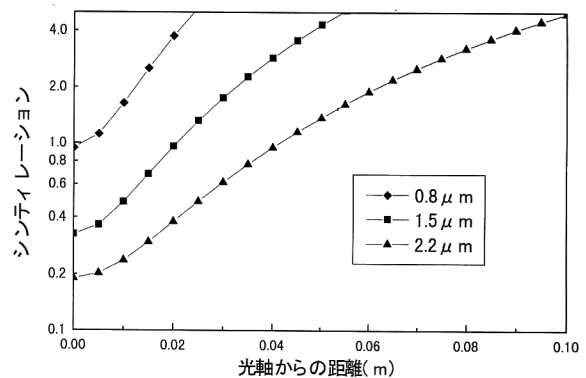


図4 送信有効ビーム直径 5 cm のガウシアン型の赤外ビームを 2 km の距離、水平伝搬させたときのシンチレーション指数の光軸からのずれに対するプロファイル(波長 0.8 μm, 1.5 μm および 2.2 μm)。大気の屈折率ゆらぎのパラメータ $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ を仮定している。シンチレーション指数 σ_I は I を受信強度として $\langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$ で定義される。

好都合である。

大気のゆらぎによるシーイングは、送信ビームを広げ受信強度を低下させるとともに、受信強度を大きく変動させるので、回線設計において重要な要素となる。図4に波長 0.8 μm, 1.5 μm および 2.2 μm での送信有効ビーム直径 5 cm のガウシアンビームを高度 0 km で、距離 2 km を水平伝搬させたときの、受信点でのシンチレーション指数¹¹⁾(受信強度を I としたとき、 $\sigma_I = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$)の光軸からのずれをパラメータとしたプロファイルの計算結果を示した。ここでは、屈折率ゆらぎのパラメータ C_n^2 を $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ としている。受信点での有効ビーム直径は、波長 0.8 μm, 1.5 μm および 2.2 μm でそれぞれ 11.5 cm, 12.9 cm および 15.2 cm で、回折のため波長が長いほどビームが広がり、光軸中心での受信強度は低くなるが、シンチレーション指数は逆に小さくなることがわかる。少し大きな大気ゆらぎ($C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)があつて、0.8

μm の波長ではデータ伝送がほぼ不可能なシンチレーション指数の大きさである場合も、波長 $2.2 \mu\text{m}$ 帯の赤外線であれば伝送が可能なレベルに保たれることになる。

3.2 高速 $2 \mu\text{m}$ 帯赤外通信回線の検討

3.1 に述べた理由から、屋外のビルディング間等の高速赤外空間通信システムに $2.2 \mu\text{m}$ 帯を用いることが最適であるとされている¹²⁾。表 2 に、大気消散、シンチレーションを考慮した $2.2 \mu\text{m}$ 帯での伝送速度 0.62 Gbps 、伝送距離 2 km の高速空間通信の回線設計例を示す。条件 1 は、波長 $2.2 \mu\text{m}$ での平行ビームでの伝送の場合で、受信点でのシンチレーション指数がほぼ最小となるように、送信有効ビーム直径を 5 cm としている。この場合、 ± 3 秒角程度のビームの指向精度が必要になる。条件 2 は、波長 $2.2 \mu\text{m}$ での拡散ビームによる伝送の場合で、このときは ± 30 秒角程度のビームの指向精度で十分である。

3.3 高速 $2 \mu\text{m}$ 帯赤外通信用検出器

表 2 からわかるように、 50Ω 並列抵抗で決まる NEP (雑音等価電力) を考えると、高速赤外空間通信においては、雨等による減衰を補償するのにそれほど十分な回線マージンをもっているとはいえない。そのため、並列抵抗を 100 倍大きくし ($5 \text{ k}\Omega$)、10 倍 NEP を改善した高感度受信系を構築することを想定すると、通常の動作バイアス電圧下においても暗電流が十分小さい検出器が必要となる。しかし現在、市販されているカットオフ波長 $2.6 \mu\text{m}$ の InGaAs PIN フォトダイオードでは、暗電流が大きすぎる (表 3 参照)。

高速 $2.2 \mu\text{m}$ 帯赤外通信用受光素子として、現在 CRL ではピーク感度波長 $2.2 \mu\text{m}$ に最適化した $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($x=0.22$) 半導体を用いた高速 PIN フォトダイオードの試作を浜松ホトニクス (株) の協力で進めている。図 5 に新開発の

表 2 高速 $2 \mu\text{m}$ 帯赤外空間通信回線例。

項目	条件 1	条件 2	単位	コメント
波長	2.2	2.2	μm	
データ伝送速度	620	620	Mbps	
帯域幅	1.24	1.24	GHz	4 値 PPM 符号
送信光出力	20	20	dBm	100 mW (ピーク)
送信器内損失	-5.23	-5.23	dB	透過率=0.3
送信有効ビーム直径	5	2	cm	
送信光学系焦点距離	無限大	-80	m	
送信光学系でのレーザー光強度	1.527	9.547	mW/cm^2	
伝搬距離	2000	2000	m	
大気透過率	0.72	0.72		都市のエアロゾル
回折ビーム広がり因子	2.453	29.53		
大気ゆらぎによるビーム広がり因子	1.24	1.02		$C_n^2=1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$
受信距離における有効ビーム直径	15.2	60.2	cm	
中心軸上でのシンチレーション指数	0.19	0.307		
シンチレーション指数 < 0.5 の受信ビーム直径	5.2	72	cm	
必要光軸指向精度 (+)	2.682	31.049	秒角	
受信光学系直径	10	10	cm	
ビーム広がりによる損失	-3.637	-15.59	dB	
受信器内損失	-5.23	-5.23	dB	透過率=0.3
受信光強度	4.476	-7.479	dBm	
受信器雑音等価光強度	-32	-32	dBm	現状の InGaAs-PIN PD, $R=1.1 \text{ A/W}$
S/N=21 dB の光強度	-11	-11	dBm	$R_{sh}=50 \Omega$, ビット誤り率= 1×10^{-8}
マージン	15.48	3.52	dB	

表 3 新しい InGaAs PIN フォトダイオードの性能 (市販のカットオフ波長 $2.6 \mu\text{m}$ InGaAs PIN フォトダイオードとの比較)。

	新しい InGaAs PIN フォトダイオード		市販の InGaAs PIN フォトダイオード		
	測定値 (既試作)	計算値	浜松ホトニクス G5853-01	エピタックス ETX100T-GR2.6	
受光部直径 (mm ϕ)	0.3	1.0	0.1	1.0	0.1
ピーク感度波長 (μm)	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4
感度@波長 $2.2 \mu\text{m}$ (A/W)	1.3	1.3	1.3	1.2	1.0
接合容量 @ $V_R=1 \text{ V}$ (pF)	8	90	0.9	200	<6
暗電流 @ $V_R=1 \text{ V}$ (μA)	0.3	3.3	0.033	15~150	0.5
立ち上がり時間 (ns) @ $V_R=1 \text{ V}$ (入力インピーダンス 50Ω)	0.3	—	0.03	—	0.5

受光部直径 $300\ \mu\text{m}\phi$ の InGaAs PIN フォトダイオードの感度スペクトルを示す。表3にまとめたように、InGaAs PIN フォトダイオードの受光部直径を $100\ \mu\text{m}\phi$ とすることによって、逆バイアス電圧 $1\ \text{V}$ で $1\ \text{pF}$ 以下の接合容量が実現でき、入力インピーダンス $50\ \Omega$ とすると立ち上がり時間 0.03 秒という高速性能が期待できる。また、同じバイアス電圧下で暗電流は $0.033\ \mu\text{A}$ であり、非常に小さな暗電流が実現できる。この新しい PIN フォトダイオードを用いて高感度受信を実現するため、並列抵抗が大きくかつ高速のプリアンプの開発も行っている。

さらなる高感度化のためには、ピーク感度波長 $2.2\ \mu\text{m}$ のアバランシフォトダイオード (APD) の研究開発が必要となる。

3.4 高速 $2\ \mu\text{m}$ 帯赤外通信用レーザー

$2\ \mu\text{m}$ 帯高速空間通信の発光素子としては、半導体レーザーの InGaAsSb/AlGaAsSb 多重量子井戸レーザーとタイプIIの InAs/GaSb 超格子レーザー¹³⁾が現在最も有望である。そのほかにバルクの InSb 半導体を用いた電磁力励起レーザー¹⁴⁾、Tm や Ho などの希土類をレーザーイオンとしてドープした Tm, Ho: YAG 結晶や Tm, Ho: YLiF₄ 結晶を用いた半導体レーザー励起固体レーザー¹⁵⁾、Tm³⁺ 添加フッ化物ファイバーを用いたレーザーなどの利用が考えられる。また、量子井戸サブバンド間遷移レーザー¹⁶⁾の可能性もある。

4. 光衛星間通信

4.1 光衛星間通信の特徴

宇宙は大気の影響がなく、光信号の超高速伝送を障害するものがないため、光空間通信にとって最も理想的な環境を提供する。そのため、光衛星間通信システムは地球規模 (グローバル, global) の高速・大容量通信において将来重要な役割を果たすようになることが期待される¹⁷⁾。

衛星間では大気ゆらぎがないため、送受信装置の小型・軽量化のためには、小さい開口で回折損を小さくできる短波長の光を用いるほうが有利となるが、現在地上で開発されている技術を応用することを考えると、当面 $0.8\ \mu\text{m}$ 、 $1.064\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$ または $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の波長を中心に開発が進められると考えられる。

光衛星間通信では、波長の短い光を搬送波として用いるため小型・軽量の送受信装置が実現できる可能性があるが、鋭い光ビームを対向させなければならないため、光ビームの精密な捕捉・追尾・指向が要求される。また地上通信と比べて、格段に伝送距離が長くなるため、大出力のレーザーが必要とされる。

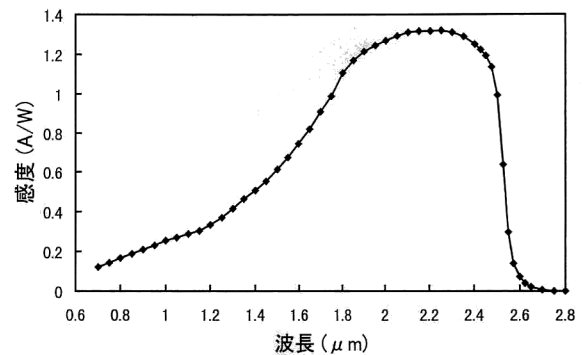


図5 ピーク感度波長 $2.2\ \mu\text{m}$ の InGaAs PIN フォトダイオード (受光部直径 $300\ \mu\text{m}\phi$) の感度スペクトル。

4.2 光衛星間通信実験の現状

世界で初めての衛星-地上間双方向光通信が1994年12月、技術試験衛星VI型 (ETS-VI) 衛星とCRL宇宙光通信センターとの間で行われた¹⁸⁾。衛星搭載の光通信基礎実験装置 (LCE: laser communication equipment) は、直径 $7.5\ \text{cm}$ の望遠鏡と発光素子として GaAs/AlGaAs LD (波長 $0.83\ \mu\text{m}$ 、出力 $14\ \text{mW}$)、地上からのアルゴン (Ar) レーザー (波長 $0.51\ \mu\text{m}$) の送信ビームを受信するための Si APD を備えている。実験のデータ伝送速度は、 $1.024\ \text{Mbps}$ であった。また、米国 JPL (Jet Propulsion Laboratory) においても ETS-VI衛星との間で日米共同の光通信実験を行い成功した。

次の開発段階である衛星-衛星間光通信が、ヨーロッパ ESA (European Space Agency) を中心として SILEX (semiconductor laser intersatellite link experiment) 計画として進められている。2000年に、静止衛星 ARTEMIS と周回衛星 SPOT 4 との間で、波長 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯において $50\ \text{Mbps}$ 程度のデータ通信実験を行う予定である。日本においても宇宙開発事業団 (NASDA) によって、ARTEMIS 衛星との間で光衛星間通信を行うための実験衛星 OICETS (optical interorbit communication experimental test satellite) の開発が行われている。

4.3 高速宇宙光通信技術の将来計画

4.2に述べた ETS-VI衛星実験、OICETS-ARTEMIS 衛星間実験を進展させ、将来地上のネットワークに匹敵する数 Gbps の伝送速度をもった高速光衛星間通信システムを実現する計画が検討されている。わが国においては、CRL を中心として、ギガビット衛星通信システムにおける静止衛星間光リンク ($0.8\ \mu\text{m}$ 帯 $300\ \text{Mbps}$ および $1.5\ \mu\text{m}$ 帯 $1.2\ \text{Gbps}$ 程度) 実証実験計画、数 Gbps の伝送速度をもつネットワークを宇宙に構築するための宇宙ステーション JEM 暴露部超高速宇宙光通信実験計画が進められている。

後者の計画では、2002年頃に宇宙ステーションと地上局

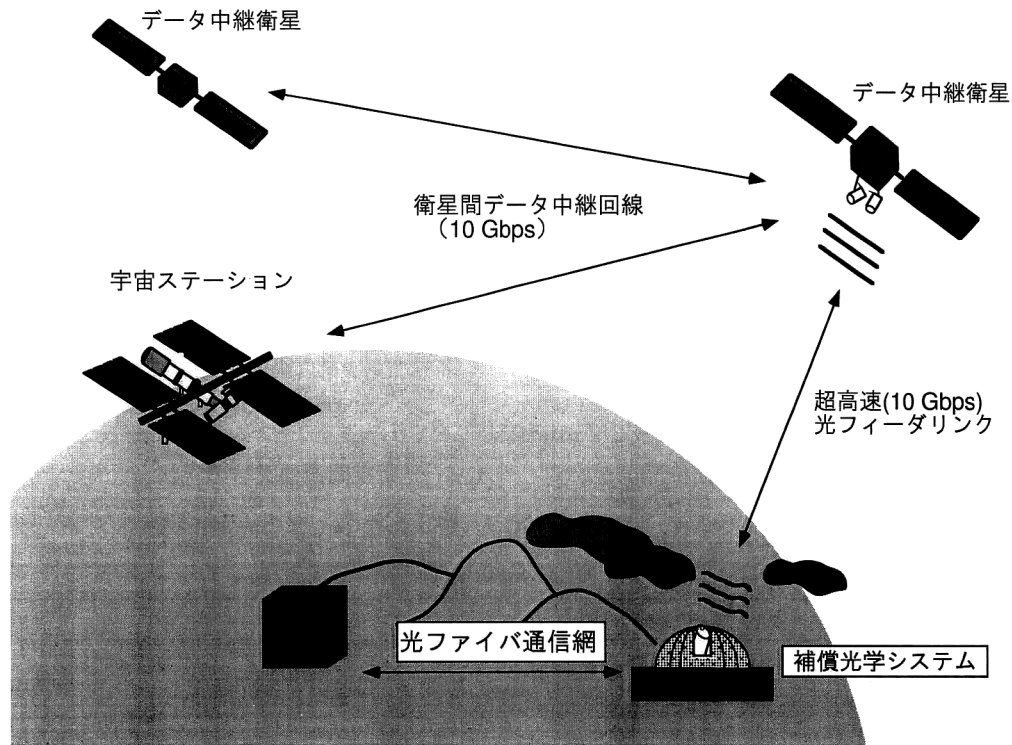


図6 将来の光衛星間通信システムの概念図。

との間で $1.5\ \mu\text{m}$ 帯 2.5 Gbps 等の高速光通信実験を行う予定である。また、送受信光学系に大気ゆらぎを実時間に補償する補償光学系(アダプティブ光学, adaptive optics)を用いることによって、衛星-衛星間だけでなく地上-衛星間のファイダリンクに、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯で 10 Gbps におよぶ高速通信が実現できる可能性が検討されている¹⁹⁾。図6に将来の光衛星間通信システムの概念図を示した。

高度情報通信社会において、高速赤外空間(無線)通信技術は、室内におけるワイヤレスな高速 LAN システムと屋外のビルディング間などのフレキシブルな高速通信回線を提供するとともに、衛星間通信において地上の光ファイバ通信に匹敵するグローバルな大容量通信と宇宙空間での高速 LAN を実現するためのキーテクノロジーとなる。本稿では、赤外空間通信システムの現状とアイセーフな環境を保障する将来の高速 $2\ \mu\text{m}$ 帯赤外空間通信、および光衛星間通信システムの現状と将来について解説した。

文 献

- 1) 平原奎治郎：“光テクノロジーロードマップ情報通信分野概要”，光テクノロジーロードマップ情報通信分野デバイスおよび基盤材料技術マップワークショップ講演資料（(財)光産業技術振興協会，1997）pp. 1-3.
- 2) 小池康俊：“広帯域ポリマ光ファイバ”，電子情報通信学会誌，78 (1995) 560-564.

- 3) T. Ihara and K. Fujimura: “Research and development trends of millimeter-wave short-range application systems,” *IEEE Trans. Commun.*, **E79-B** (1996) 1741-1753.
- 4) T. Kuri and K. Kitayama: “60 GHz band millimeter-wave signal generation and transport over optical frequency division multiplexing networks,” *Electron. Lett.*, **32** (1996) 2158-2159.
- 5) 宇野裕史, 塚本昌彦, 中村 真: “モバイル・コンピューティング時代のための赤外線通信技術①~④”, インターフェース, Aug. (1995) 164-173, Oct. (1995) 159-167, Nov. (1995) 127-133, Dec. (1995) 174-188.
- 6) 松本充司: “赤外線通信インターフェースの標準規格”, 電子情報通信学会誌, **80** (1997) 461-469.
- 7) 社団法人電波産業会: 10 Mb/s 光無線 LAN システム標準規格 ARIB STD-T50 1.0 版 (社団法人電波産業会, 1997).
- 8) 日本工業規格 (JIS): “レーザー製品の放射安全基準”, C6802 (1991).
- 9) ONTAR Corporation: *ONCORE, Personal Computer Version of the MODTRAN2 Atmospheric Model Ver. 2.0* (ONTAR Corporation, Massachusetts, 1993).
- 10) U.S. Standard Atmosphere, 1976 (NOAA, NASA, and USAF, 1976, Washington).
- 11) L. C. Andrews, R. L. Phillips and P. T. Yu: “Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system,” *Appl. Opt.*, **34** (1995) 7742-7751.
- 12) N. Hiromoto and M. Akiba: “Two-micron infrared receiver for high data rate free-space communication,” *Technical Digest of International Topical WS Contemporary Photonic Technology (CPT '98)*, Tokyo (1998) pp. 171-172.
- 13) M. E. Flatte, C. H. Grein, H. Ehrenreich, R. H. Miles and H. Cruz: “Theoretical performance limits of 2.1-4.1 μm InAs/InGaSb, HgCdTe, and InGaAsSb lasers,” *J. Appl. Phys.*, **78**

- (1995) 4552-4559.
- 14) 森本 武, 千葉明朗: “電磁力励起赤外半導体レーザー”, 日本赤外線学会誌, **4** (1994) 2-17.
 - 15) 浅井和弘: “アイ・セイフ固体レーザー”, 応用物理, **63** (1994) 478-482.
 - 16) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson and A. Y. Cho: “Quantum cascade laser,” *Science*, **264** (1994) 553-556.
 - 17) 古濱洋治: “人工衛星と通信”, 光衛星間通信, 第1章, ATR 国際電気通信基礎技術研究所編 (オーム社, 東京, 1995) pp. 1-28.
 - 18) K. Araki, M. Toyoshima, T. Takahashi, T. Fukazawa, M. Toyoda, M. Shikatani and Y. Arimoto: “Experimental operations of laser communication equipment onboard ETS-VI satellite,” *Proc. SPIE*, **2990** (1997) 264-275.
 - 19) Y. Arimoto, Y. Hayano and W. Klaus: “High speed optical feeder-link system using adaptive optics,” *Proc. SPIE*, **2990** (1997) 142-151.

(1998年4月9日受理)