

光無線通信の現状と可能性

安立 恭晴

1. はじめに

昨今、スマートフォンに代表される移動体通信の需要が世界中で爆発的に増加している。この移動体通信を担う無線通信は電波を媒体として、周波数毎に利用方法や通信事業者が割当てられる。しかしこの周波数は有限であり、既にほとんどの周波数に空きがない。このため世界中で電波の周波数が入手困難な状況にあり、日本を除く多くの国では、周波数のオークションなども行われている。通信として使いやすい周波数ほど落札価格が高く、アメリカで行われているオークションでは、600MHz 帯の周波数に、200 億ドル（約 2 兆円）の値がつくこともある。^[1]

こうした、無線通信をつかさどる電波が逼迫している中で、更に世の中では多くのモノがデジタル化、自動化へと進展している。これは海事分野も例外ではない。様々な舶用機器がデジタル化され、航海中の船舶に対してさえも、陸上と同じように、高速で大容量の通信が求められつつある。そこで、不足した電波の能力を補う技術として、光による無線通信が、一部の分野で動き出している。将来的には、電波にかわり、光による無線通信を主力として位置づけようとする計画もある。そこで、本調査では、この光による無線通信の現状を調査し、船舶分野への応用の可能性について述べる。

2. 電波と光による無線通信

電波と光はそもそも、物理学的に全く同じ電磁波である。図 1 に示すように、電磁波には波長の違いによって、電波、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、ガンマ線といった異なる名前がつけられており、その性質も異なる。そして現在、デジタル信号を使った移動体通信網で利用されている電波の周波数帯は、図 1 で示す ①超短波/極超短波（VHF/UHF）と ②マイクロ波（SHF）の 10GHz 以下が、移動体全体の 9 割以上を占める。そしてこれを超える ③ミリ波（EHF）100GHz までを含めると、通信で利用できている周波数帯は、ほぼ 100 パーセントに達する。これはミリ波を超える周波数帯は、未だ上手く活用できていないことを示す。以下本報告書では、電波の周波数帯を超える、光の周波数帯（図 1 の赤枠）を活用した通信について言及する。

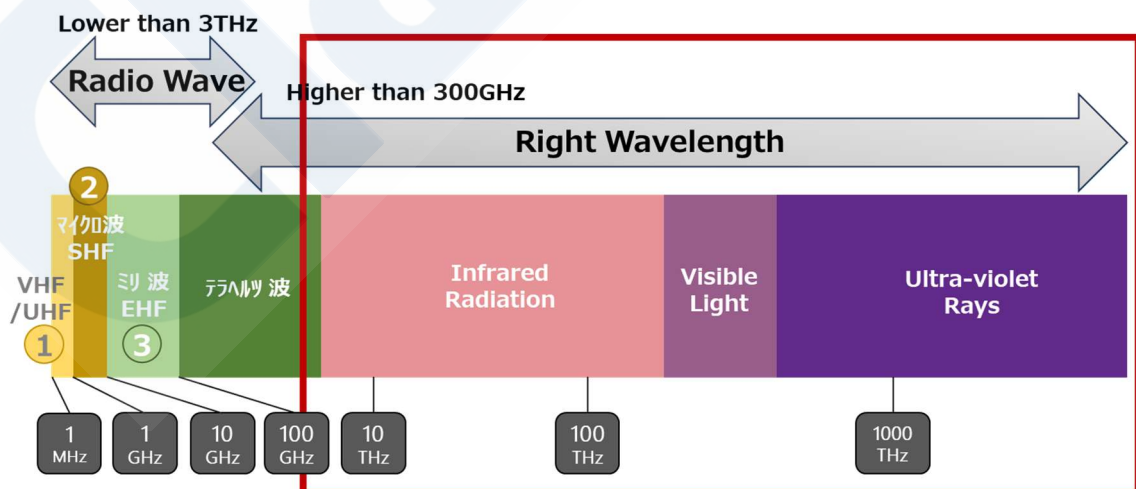


図 1. 電磁波の周波数 ^[1]

周波数は単位時間あたりに繰り返される波の数であり、波長は波と波の間の同一地点における距離を示す。周波数が高くて低くても電磁波自体の速度は変わらない。このため高周波数になるほど波長が短くなり、単位時間あたりの波の数が多くなることで伝播能力が高まる。すなわちデジタル伝送では一つの波に載せられる情報はゼロかイチであり、より多くのデータビットを波形に符号化できれば、高速で大容量の通信が可能となる。そして波の周波数の違いが、電波と光が異なる物理的性質をもつ要因となる。

この異なる性質となる境界は、波長や周波数の値により区別され、電波よりも短い波長、すなわち高い周波数帯の電磁波を光と位置付けられている。ただ、この境界を具体的に定められている国は少なく、目安として波長が約 1mm (1,000 μ m) 以下、周波数で 300GHz を超えるあたりから光とみなされることが多い。そして光とみなされると、電波に関わる規制の対象外となる。日本の電波法でも 3THz までの電磁波は電波として規制対象としているが、3THz を超える電磁波は法律上規制の対象外となる。^{[2][3]}

なお 3THz を超える光の場合でも、人に対する安全面への配慮事項として、アイセーフティ (Eye Safety) とよばれる人の目に対する保護を目的とした国際規格 IEC 60825-1 には従うよう求められている。また船舶の航行灯 (COLREGs 規則) との視認性の問題が発生する可能性もあるため、適切な波長の調整が必要となる。この他に国や地域毎に異なる規格や規制が存在する可能性があるため、利用する状況に応じた調査、対応が必要となることは留意しておきたい。

光を用いた通信ではこのような一部の規制があったとしても、電波のような周波数帯域や出力に対する法的規制は無い。その上、広大な帯域が利用でき、他の通信システムや電子機器との干渉が少ないため、狭域エリアでも複数通信の共存が容易である。一方でこれまで光を無線通信に利用できなかったのには理由がある。屋外で光を使った無線通信を行おうとすると、大気の揺らぎによる影響を受け易く、特に長距離の無線通信には向かないとされてきた。しかし最近になり、光無線通信の有用性が見直され始め、光を制御するためのあらゆる技術も開発され始めている状況にある。

以下の章では、通信に用いられる光の種類とその用途について説明した上で、大気の影響を緩和するための方策について述べる。

3. 光の種類と無線通信技術

光無線通信は近距離での利用を想定したリモコンや赤外線通信のようなものから、地上と衛星との通信を目的とするものまで、様々な用途での活用が見込まれており、既にその一部は実用化されている。そして今後は益々増大する通信需要に応えるため、電波よりも大容量通信が可能な光無線通信 (光自由空間通信) への期待が高まってきている。現在、光無線通信に用いられている伝送媒体は、赤外光、可視光、紫外光、そして近赤外光から可視光を跨ぐレーザー光の 4 種類の光源に大別することができ、それぞれ異なる特徴をもつことから、その用途も異なる。

- ・ 赤外線 : 近距離のデバイス間通信
- ・ 可視光線 : 高速な無線 LAN やインターネットへのアクセス
- ・ 紫外線 : 用途を模索中
- ・ レーザー光 : 長距離の通信 (地上と衛星間、衛星と衛星間などの通信)

(1) 「赤外線」を用いた光無線通信

赤外線を用いた光無線通信として IrDA (Infrared Data Association) と呼ばれる技術が存在する。赤外線は波長でいうと 700 μ m $\sim$ 1mm 程度に分布するが、特に赤外線通信で利用されるのは、波長が 700nm $\sim$ 2.5 μ m の近赤外線領域である。そしてこの赤外光を使用してデータを送受信する無線通信規格として、IrDA (Infrared Data Association) がある。ポイント・ツー・ポイント (Point-to-Point) で高速な光の点滅によりデータ通信が行われ、通信距離は $\sim$ 1m 程度、通信速度は 115kbps $\sim$ 16Mbps である。たとえば、テレビジョンを始めとする家電製品などのリモコンなどで利用されるケースが多い。



IrDA は、赤外光を使用して近距離で高速のデータ通信を可能にするための技術規格であると同時にデータ通信の手順が定められた通信プロトコルでもあり、"Infrared Data Association" という国際的な非営利団体によって管理、規格化されているが、正式な国際規格の範囲ではなく、各国の企業や組織がこの規格に準拠して製品やサービスを開発し提供しているのが現状である。

また、赤外光を利用した無線通信技術として、IrDA とは異なる技術仕様をもった家電製品向け「Consumer IR」規格や、ある企業が独自に定め提供している「Philips-RC-6」規約なども存在する。

(2) 「可視光」を用いた光無線通信

電波を利用した Wi-Fi (Wireless Fidelity) に対し、光を利用した無線通信として Li-Fi (Light Fidelity) が知られるようになってきた。人の目に見える可視光線 VLC (Visible Light Communication) 技術を使用してデータを送受信する。IEEE 802.15.7 として規格化されており、波長は 380nm $\sim$ 780nm の領域、通信距離としては $\sim$ 1m 程度、通信速度は 115kbps $\sim$ 16Mbps である。



照明光による通信などがこれに相当し、主に LED (Light Emitting Diode) が発する可視光スペクトルを利用したものが、現在では一般化している。

この Li-Fi は、可視光スペクトルを利用するため、電磁波の影響を受けることがなく、医療現場など特定のエリアでの利用に適している。また、電波のような拡散や干渉がないため、外部からの不正なアクセスや盗聴を防ぎ、光をシャットダウン、コントロールすることで情報の漏洩も防ぐことができるため、サイバーセキュリティ対策を目的とした活用も期待できる。

(3) 「紫外線」を用いた無線通信

紫外線を用いた無線通信技術は未だ実験段階であり実用例も未だ少ない。

紫外線の波長は 約 10 $\sim$ 380nm の範囲で、赤外線や可視光線に比べ波長が短くエネルギーが大きいのが特徴である。一般的に生物や物質に対して高いエネルギーを持ち、紫外線照射による生体組織の損傷や化学反応を引き起こす可能性があるため、これまでは殺菌や消毒などの用途で使われることが主であったが、実験レベルでは、紫外線を用いた無線通信も成果を上げつつある。

たとえば、2023 年 6 月に NICT が行った紫外線光無線通信の実験では、波長が約 200 ナノメートル (nm) から 400 ナノメートル (nm) の、深紫外波長帯光を活用し、太陽光による背景ノイズの多い日中に、ビルなどの障害物がある屋外で “見通し外 (NLOS: Non-Line-Of-Sight)” 環境下において、1 Mbps 以上の光無線通信伝送を確認している。^[4]

(4) 「レーザー光 (Laser beam)」を用いた無線通信

高出力なレーザー光を光源として用いることで長距離通信を可能とする FSO (Free Space Optics) 通信という技術がある。FSO で利用されるレーザー光の波長は、近赤外線スペクトル 700 ナノメートル

(nm) から可視光スペクトル 1550 ナノメートル (nm) に相当する光が利用される。レーザー (LASER) とは、"Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" の頭文字であり特定の波長や方向に高出力な光束として集中放射する光源のことである。そしてこの光源により生成される光のことをレーザー光と呼び、高いコヒーレンス特性を示す。コヒーレンス特性とは、生成された光が全て「同一の波長」、「同一の位相」を持つ特性のことである。同じ波長の光はスペクトル上に幅を持たないため、色収差が発生しない。このため光を同じ焦点に集めることが可能となるため、長距離の通信が可能となる。

また、同じ位相のメリットは、周波数が同一のため、重なり合うことで高い振幅の光を生成することができる。この特性を応用すると、別々のレーザーから生成されたレーザー光を重ね合わせることで、高いエネルギーの光を作ることができるため、さらに長距離通信の手助けとなる。このような特性から、地上と衛星間、衛星と衛星間などの長距離無線通信に適した技術とされ、いま FSO 通信が最も実用化に近い技術とされている。

5. FSO (Free-Space Optical Communication)

FSO 通信は、長距離通信に適した光無線通信技術の一つであり、過去 10 年間で急速に関心が高まり、大きな発展を遂げている。光は電波と比べ周波数が高く、単位時間当たりの波の数が多くなるため、その分、多くのデータを運ぶことができる。さらに広大な帯域幅が利用可能であることから、高速大容量通信には理想的環境にあり、増加の一途を辿る通信需要の解決策として期待されている。ただし光を用いた無線通信には、幾つかの課題も存在する。なかでも最も大きな問題は大气による影響である。光は大气中の雨、霞、乱気流などによって光源が減衰し、伝播が妨げられ、瞬断が発生することで通信の品質に大きな影響を与える。^[5]

(1) FSO 通信の伝播特性

レーザー光を用いる FSO 通信の伝播特性は、光の波長に依存する。

大气を通過する光ビームは、霧や雲に存在する小さな粒子によって、光の散乱や吸収が発生し、信号の減衰がもたらされ、瞬断に繋がり易い。さらに、大气中の温度や圧力の不均一性によって生じる乱流が、光の屈折を引き起こし、進路を不規則に変え、送受信における光軸の照準調整にも影響を及ぼす。

これらの影響は、光の波長が異なると、透過性や大气吸収、障害物の影響度なども異なってくる。

(2) FSO 通信で利用するレーザー光

FSO 通信で利用するレーザー光は、近赤外線と可視光線の間のスペクトルを利用する。可視光線は目に見える範囲の波長であり、一般的に空気や一部の素材を透過し易い性質があるため、見通しの効く範囲での通信には適しているが水蒸気やその他の気体に吸収され易い。一方で赤外線は可視光線よりも波長が長く、物質の分子や粒子との相互作用が弱いため、多くの物質を透過し、障害物を回避し易い。また大气の吸収もより少ないため、伝搬距離が長い傾向にある。このため FSO 通信では、常にレーザー光の波長を制御し、伝播特性や透過性を最適化することが重要となる。^[6]

6. 光の波長と大气の影響 (光の波長により大气の影響度は異なる)

FSO 通信に対し、大气中の影響度は、光の波長により左右される。大气中の障害となる雨や水蒸気などの分子や粒子の大きさと、搬送波となる光の波長との間には、相関関係があり、この波長の違いが、光の散乱、吸収、透過などの大气の影響度に大きく影響する。そしてこれら波長による相関関係を代用する現象として、「レイリー散乱 (Rayleigh Scattering)」と「ミー散乱 (Mie Scattering)」という理論値に従うことが確認されている。^[7]

(1) レイリー散乱 (Rayleigh Scattering)

レイリー散乱とは、光の波長が、散乱を引き起こす現象で、大気中の粒子よりもはるかに大きい場合に起こる。散乱を引き起こす粒子の大きさは、光の波長の $1/10$ 以下の場合に発生する。大気中では、酸素分子や窒素分子などがこの条件に合致するケースが多い。

散乱強度は波長の逆数の 4 乗に比例することが知られており、散乱強度を I 、波長を λ とすると、次のように表される。

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

この式は、短波長の光（青や紫）が長波長の光（赤）よりも強く散乱されることを示している。日中の空が青く見えるのは、太陽光中の短波長の青い光が大気中の小さな分子によって強く散乱されるためであり、青い光があらゆる方向に散乱され、空が青く見える。また夕方になると、太陽光が大気中を長い距離通過するため、短波長の青や紫の光は散乱され尽くし、長波長の赤やオレンジの光が残るため夕焼けは赤やオレンジ色に見えることは良く知られた現象である。

(2) ミー散乱 (Mie Scattering)

ミー散乱とは、光の波長が 散乱を引き起こす大気中の粒子のサイズと同程度かそれより大きい場合に発生する。これに該当する粒子は、霧、煙、塵、雨滴、そして浮遊する様々な粒子の混合物（エアロゾル）などである。また、ミー散乱はレイリー散乱と異なり、波長だけでなく、粒子の大きさや形状にも影響する。長波長の光も短波長の光と同程度に散乱を引き起こすことが多く、散乱光のパターンは粒子のサイズと形状によって複雑に変化する。これは霧や雲の粒子が光の波長と同程度の大きさである場合、霧や雲の粒子はミー散乱を引き起こし、光をほぼ均一に散乱するため、遠くの物体が白く霞んで見える。

ミー散乱の解析は、マクスウェルの方程式を用いた数値解法により行われる。散乱断面積は粒子のサイズ、形状、屈折率、および光の波長に依存し、粒子の半径と光の波長の比が変わると、散乱効率も変わる。また特定のサイズの粒子では共鳴現象が起こり、散乱効率が大きくなる。

7. 大気の影響を緩和する方法

FSO 通信における大気の影響度は、光の波長により左右されることは既に述べたが、大気の状態は時間とともに変化することが多く、障害となる波長も異なる。このため大気の状態を常に観察し、動的に最適な波長を選択しデータを送信するだけでは、大気中の障害物を回避するには、十分な対策とはならない。そこで現在有効性が認められている幾つかの要素技術とその方策について示す。^{[8][9]}

(1) 波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技術

波長分割多重とは、光の異なる波長の信号を一つの光路を通じて伝送する技術であり、複数のデータを同時に伝送することができる。ある波長で障害が発生した場合でも、他の波長では正常に受信できる可能性がある。また複数の波長で送信されたデータは、受信側で統合・補正することで復元が可能となる場合もある。また WDM では異なる波長ごとに独立したデータストリームを同時に伝送でき、独立したチャネルとして機能するため通信システムの柔軟性と信頼性が大幅に向上する。

(2) マルチビーム FSO (Free-Space Optical) 通信

マルチビーム FSO 通信は、自由空間光通信技術を使用して複数の光ビームを同時に送信し、通信容量や信頼性を向上させる技術である。高いデータレートを要求する通信システムや地上と衛星間通信

などの用途に向いている。

ここで利用する複数の光ビームは、それぞれ異なる波長や位相、偏向状態を持つよう生成することで、異なる光学的特性をもつビームにすることができる。この方式により各ビームが空間的に異なる経路を通り、互いに影響し合うことなく、それぞれが独立してデータを送受信できる状態を作り出す。同じデータを複数のビームを利用して同時に送信することで冗長化し、大気中の影響を緩和するのに役立つ。あるデータが伝送の途中で大気の影響を受けたとしても、他のデータでは正常に受信できている可能性がある。また受信側では、受け取った複数のビームからデータを統合し、ビットレベル、またはパケットレベルでエラー状況を確認し、冗長データの中から正しいデータを選び出す。もしくは受信したデータを比較し、エラーが発生しているビームのデータを他の正常なビームのデータで補完するなどの対処が可能となる。

さらにこのマルチビーム FSO 通信に対し、先に述べた WDM 技術を適応することで、一つ一つの光ビームに対し、波長を分割し多重化することができるようになるため、伝送効率を高めながら、大気の影響を緩和することが可能となる。

(3) OFDM 方式の併用

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : 直交周波数分割多重) とは、移動体通信環境におけるマルチキャリア伝送技術の一つである。周波数選択伝送 (FDM) を利用し、データ送信時の周波数帯を、複数のサブキャリアと呼ばれる搬送波に分割し、これらを直交するように配置することで干渉を防ぎながら異なるデータを同時に伝送する技術である。またこの技術はマルチパスフェージングの特性を持ち、安定した高速データ伝送を実現する手法の一つでもある。ここで言うマルチパスフェージングとは、電波や光波などの信号が、複数の経路を通して受信される現象を指し、信号が直接的な経路だけでなく、障害物によって反射されたり、屈折したりして複数の経路を通ることで生じる信号の影響を最小限に抑えるための手法のことである。特に、長距離の無線通信では、マルチパスフェージングの手法が通信品質や性能を維持するために重要な役割を果たす。^{[10][11]}

① 直交による多重化

OFDM 方式におけるサブキャリアは、直交することで多重化を可能としている。サブキャリアが直交するとは、時間平均的に、互いが干渉しないよう設計された状態を指す。

具体的には、あるサブキャリアの周波数スペクトルが、他のサブキャリアのゼロクロッシングポイントに一致するよう配置することでサブキャリア間の干渉を防ぐことができる。ゼロクロッシングポイントとは、ある信号が基準となるゼロの値を超え、正から負、または負から正へ変わる瞬間のことを指す。

② サブキャリアの定義と直交の条件

各サブキャリアは異なる周波数の搬送波であり、正弦波として表現できる。

サブキャリアの数を N 、各サブキャリアの周波数を $f_k = f_0 + k\Delta f$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$) とし、 Δf はサブキャリア間の周波数間隔とすると、サブキャリアが直交するためには、ある期間 T にわたって各サブキャリアの積分がゼロでなければならない。具体的には関数 t の関数としてのサブキャリア $S_k(t) = \cos(2\pi f_k t)$ と $S_m(t) = \cos(2\pi f_m t)$ の直交条件は以下のように表すことができる。

$$\int_0^T S_k(t) \cdot S_m(t) dt = 0 \text{ for } k \neq m$$

この条件は、サブキャリア $S_k(t)$ と $S_m(t)$ が異なる周波数であり、互いに干渉しないことを意味する。

そして OFDM では、サブキャリア間の周波数間隔 Δf が、シンボル期間 T の逆数 $\Delta f = \frac{1}{T}$ に等しくなるように設計する。これは各サブキャリアが互いにゼロクロッシングポイントで交わり、積分の結果がゼロになることを意味する。

③ 時間領域と周波数領域の直交性

時間領域では各サブキャリアが正弦波または余弦波として表現され、互いに重なることなく交差することで直交性を実現する。

周波数領域では、各サブキャリアのスペクトルは互いに重ならず、隣接するサブキャリアのゼロクロッシングポイントで交差させるため、サブキャリア同士の干渉を避けることができる。

④ OFDM におけるサブキャリアの直交性

各サブキャリアが互いに干渉しないよう、適切に周波数間隔を保ち、ゼロクロッシングポイントで交差する直交性を実現している。この直交性を保つことで、スペクトル効率が高く、干渉の少ないデータ伝送が可能となる。すなわち、どこかの周波数でエラーが発生しても、その影響を低減させる役割を果たすことができる。この周波数帯域を効率的に活用できる OFDM の特徴は、特に広い周波数帯域が利用可能な光では、電波よりもはるかに高い、効率的な性能を発揮することが可能となる。

8. FSO 通信に対する、マルチビーム、WDM、OFDM の併用

マルチビーム FSO 通信に対し WDM 技術を組み合わせ、さらに OFDM を併用することで、通信の信頼性、耐性、効率が大幅に向上することが確認されている。またその有効性は衛星と地上間の通信などでも良好な結果が得られている。^{[12][13]}

マルチビーム FSO 通信では、複数のビームを同時に送信し、それぞれのビームが異なる空間パスを伝送することで、空間的なダイバーシティを実現し、通信品質を向上させる。各ビームに異なる波長を割り当てるため、特定のビームが大気中の障害により劣化しても、受信側で他の複数のビームによりエラーの修復を図ることができる。また WDM では、マルチビームの、一つひとつのビーム上で、複数のデータを同時に伝送する役割を果たし、伝送効率の向上に寄与し、OFDM では、マルチパスフェージングに対して強い耐性を果たすため、伝送途中で発生する反射や屈折などの影響低減に役立つ。

これらを併用することで、大気中の影響を緩和し、複雑な大気条件下でも高品質なデータ伝送が期待できる。

9. あとがき

マルチビーム FSO 通信に WDM 技術を組み合わせ、さらに OFDM を併用することで、通信の信頼性、耐性、効率が大幅に向上する。特に大気中のエラーに対する耐性が強化され、通信品質を重視するシステムにおいて非常に有効な手法となる。この複数の技術を組み合わせた手法により、光が伝搬する大気の構造により、受信信号が急激に変化する件下でも、高品質なデータ伝送の実現が期待できる。ただし、このような技術は、変調・復調や送受信機器の高精度な光学調整技術に支えられていることは意識しておくべき事項である^[14]。

光無線通信（FSO: Free Space Optics）の導入には、これまでに示したような幾つかの課題もあるが、船舶業界の通信インフラを大幅に強化できる有望な可能性を秘めている。逼迫する電波の周波数帯とは異なり、国際的な周波数帯域の制限、調整なしにライセンスフリーで利用可能である。さらにこれまで利用してきた電波は全方向に広がるため、誰でも電波の受信自体はできてしまうのに比べ、FSO は拡散し難く非常に狭

い角度で伝送するため盗聴が極めて難しく、高セキュリティな通信を提供できる技術でもある。またこの直進する特性は、GMDSS やレーダーなど、他機器との干渉も発生し難いため、既存の船舶通信と併用することも可能とする。

大手の世界市場調査会社 GMI(Global Market Insights) 社によると、FSO 市場は 2022 年以降毎年 35%の成長を続けており、2027 年までには 20 億ドル程度の市場へ拡大するとレポートしている。ケーブルの敷設が不可能な海上でも高速なインターネット接続が行えることに加え、防衛を目的とした傍受困難な高セキュリティ通信も実現可能としている。^[15]

また FSO 通信は、今後グローバル（全世界的）なブロードバンド（広帯域の）ワイヤレス（無線通信）を実現するための、実用的なソリューションと位置付けている文献^[16]も報告されるようになってきており、今後、光を使った、高速で大容量通信が、日常生活にも浸透してくる日も、そう遠くない未来と思われる。

参考文献

- [1] 総務省, 世界情報通信事情, Register for the newsletter「Broadcast Incentive Auction」
- [2] 総務省, 電波利用, 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴, The Radio Use Web Site, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/freq/index.htm>, 参照編集.
- [3] 安立恭晴, "次世代の通信インフラ", ClassNK 技法, No.8(II), pp.43-49.
- [4] 国立研究開発法人情報通信研究機構 NICT ,<https://www.nict.go.jp/press/2023/06/01-1.html>
- [5] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022). Satellite Communications. Space Weather Prediction Center. <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-communications>.
- [6] CableFree (2022). Free Space Optics (FSO). CableFree 10+ Gigabit Wireless Networks. <https://www.cablefree.net/cablefree-free-space-optics-fso/>.
- [7] Jaya Lakshmi Ravipudi, Maïté Brandt-Pearce, "Impairment- and fragmentation-aware dynamic routing, modulation and spectrum allocation in C+L band elastic optical networks using Q-learning." University of Virginia, Charlottesville VA 22904, USA, Feb. 2023.
- [8] Belal Alakhras, Prof. Huseyin Canbolat, "Investigation study and analysed for an optimum wavelength of FSO Telecommunication System in a weather condition (Fog, Rain, and Snow) with real data applied."Electrical & Electronics Engineering, AYBU, and Turkey, Sep. 2022.
- [9] SAMIR AHMED AL-GAILANI, "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks, " School of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Sains Malaysia, Nibong Tebal 14300, Malaysia, Nov. 2022.
- [10] Kouji OHUCHI, "Fundamental Techniques for Optical Wireless OFDM System," Electrical & Electronics Engineering, AYBU, and Turkey, Jun. 2019.
- [11] Aditi Malik, Preeti Singh, "Free Space Optics Current Applications and Future Challenges," University Institute of Engineering & Technology, Panjab University, Chandigarh, India, Sep. 2015.

- [12] Daniel Edward Raible, "Free Space Optical Communications with High Intensity Laser Power Beaming," Cleveland State University," February 19, 2016.
- [13] SOLISS, きぼう日本実験棟, "小型光通信実験装置「SOLISS」が宇宙と地上間の双方向光通信に成功", 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, April, 2020.
<https://www.nict.go.jp/press/2020/04/23-1.html>
- [14] Hall, S, "A Survey of Free Space Optical Communications in Satellites. Georgia Institute of Technology.", May 2021.
- [15] Global Market Insights, "Free Space Optics (FSO) Communication Market Size By Platform (Terrestrial, Satellite, Airborne)," By Application, November 2022.
- [16] Majumdar, A, "Optical Wireless Communications for Broadband Global Internet Connectivity (1st ed.)." Elsevier, October 2019.