

光ファイバ通信についての誤解

佐藤 憲史*

Misunderstandings about Optical Fiber Communications

Kenji Sato*

Abstract: Three misunderstandings about optical fiber communications are described. The first misunderstanding is, “because optical fibers transmit light, which speeds through wires faster than electricity, they enable high-speed communication.” Electrical signals through wires and space also transfer at the speed of light. The light speed is not directly contributed to the data rate. The frequency of light is extremely high and the bandwidth is large. The wide bandwidth is essential to high-speed communications. The second is about mode in fiber. The mode is sometimes explained by using a ray-tracing method. However, the mode is a feature of waves. The single mode and multi mode should be understood based on the wave analysis. The third is about coherent light and shot noise. It is a classical view that the coherent light has a uniform phase. The phase of coherent state can not be fixed. Quantum mechanics shows that the coherent state consists of many states with different numbers of quantum. The shot noise originates from the coherent state.

Key Words: Optical fiber communication, misunderstanding, speed of light, single mode, coherent.

1. はじめに

透明な物体に光が導かれる現象は、19 世紀後半、J. Tyndall によって発見されたといわれている。Tyndall は、チンダル現象で有名なイギリスの科学者である。噴水から出る水は曲線を描いて落ちるが、光がその水に入射すると曲線に沿って導かれることが記述されている [1]。20 世紀に入り、ガラスのような透明な物体を細長く加工したケーブルに光を導いて通信するというアイデアがいくつか提案され、試みられた。光ファイバ通信が現実のものとなったのは、1970 年代以降である。これには、C. Kao による低損失石英ファイバの提案が寄与している。Kao は、この功績で 2009 年ノーベル物理学賞を受賞している。日本では、1981 年に、当時の電電公社（現在の NTT）によって光ファイバ通信が実用化された。これは、世界でも先駆的な事業であり、その後、日本は光ファイバ通信の進歩をけん引することになる。光ファイバ通信は、この四半世紀の間に世界中に広まった比較的新しい技術である。著者は、大学等で光ファイバ通信について講義をする機会があった。それらを通して、光ファイバ通信について、意外な誤解があることに気づかされた。本稿では、そのような誤解をいくつか述べる。科学やいろいろな理論に誤解はつき

ものであるが、誤解をとらえてそれを解き明かすことは、本質を理解する上で大変重要であり、また、教育上も有効であると考えられる。

2. 光は速い？

試験などで学生に、「光ファイバ通信の特徴を述べよ」という課題を出すと、何人かは、「光ファイバ通信は光を使っているので高速な通信が可能である」という解答をする。このような見方は学生だけでなく、権威ある学会の記事にも見られる。以下は、C. Kao のノーベル物理学賞受賞を紹介した IEEE SPECTRUM NEWS の記事からの引用である [2]。

Because optical fibers transmit light, which speeds through wires faster than electricity, they enable high-speed communication and large bandwidth data transfer literally at the speed of light.

光速を超えることは困難であることが知られているが、電線を使う固定電話や無線の携帯電話では、電気信号の伝搬速度がどのようになるか、あまり考えられていない。図 1 に示すように、電線と無線と光ファイバによる 3 つの通信で、信号が届く時間が最も小さい（最も速い）ものはどれか尋ねると、高専の高学年生でも多くは、光ファイバ通信が最も速いと答える。電磁波の速度がその周波数に依存せず、光速になることをどこかで学んでいるはずだが、その実感がないと推察される。そこで、電気電子工学科の 4

* 電気電子工学科 Department of Electrical and Electronics Engineering

年生の学生実験の中で、同軸ケーブルを伝搬するパルスの速度を測定する課題を設定した。40 m の同軸ケーブルに、パルス信号を伝搬させ、入力点と出力点での時間差を測定することで速度を求めるといふ、きわめて原理的な実験である。同軸ケーブル内では、伝搬速度は光速の 7 割程度になる。光ファイバ内を伝搬する光も石英の屈折率により、その速度は光速の 7 割程度である。光ファイバ中の光と電話線を伝わる電気信号の速度は、ほとんど変わらない。無線のように空気中を伝わる電磁波の速度を求めるとも可能であるが、無線受信装置等が必要となる。結論としては、空気を伝送路とする無線が光速に近く、最も速いことになる。

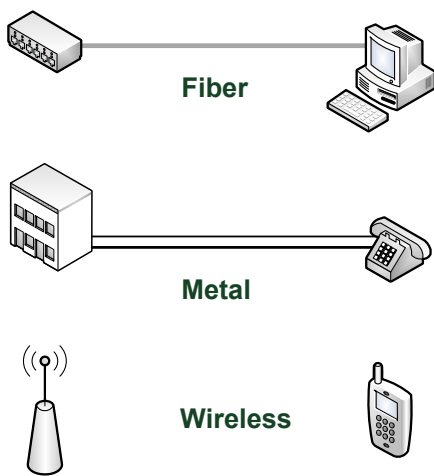


図 1. 最も速い通信はどれ？

通信における速度は、デジタル通信ではデータ速度を意味しており、ビットレート(bps: bit per second)で表される。bps は 1 秒間に伝送されるビット数であり、物理的な速度とは直接関係ない。光ファイバ通信において、データ速度を高くできることは確かであり、10 Gbps の速度が実用化されている。光ファイバ通信が高速化できる要因は、光速ではなく、その帯域にある。ビットレートは 1 秒間に信号がオンオフする回数を表している。ビットレートが高くなれば周波数が高くなり、広帯域が必要になることは容易に推察される。では、ビットレートと帯域の関係はどうなるか。基本的にはシャノンの情報理論より、1 ビットあたり 1 Hz の帯域が必要とされる。光ファイバ通信で使われる赤外光の周波数は、例えば、波長 1.5 μm では、200 THz である。キャリア周波数が飛躍的に高くなり、その広帯域性から高速な通信が可能となっている。光ファイバ通信の実用化にあたっては、低損失化が大きな課題であったが、C. Kao らによって克服された。光ファイバにおいて光信号は、通常、電気的な変調によって生成されており、電気的な応答が速度を制限する。現状の技術で、40 Gbps の光信号を生

成し検出することが可能であるが、さらなる高速化は電気的な IC の開発によるところが大きい。単一チャンネルの高速化には限界があるので、異なる波長に信号をのせて多重化する波長分割多重方式 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) による大容量化が一般的になっている。これも光の広帯域性を生かした技術である。光ファイバ通信のさらなる大容量化には、ファイバの波長分散や非線形効果など様々な問題がある。

3. 光ファイバのマルチモードとシングルモード

図 2 に示すように、光ファイバは、中心部にある屈折率 (n_0) の高いコアとそれを取り囲む屈折率 (n_1) の低いクラッドからなる。屈折率の高いコアから屈折率の低いクラッドに光が入射する場合、その境界面において、入射角がある値以下では全反射される。そこで、コアに閉じ込められた光は外部に漏れることなく長手方向に伝搬される。これが、光ファイバの原理であるが、高速・長距離通信を実現するには、光のモードが問題となる。ファイバは、多数のモードが存在するマルチモードと単一のモードしか存在しないシングルモードに分けられる。図 2 において、折れ線は左端から入射する光を光線で表している。マルチモードファイバでは、コアが大きく、光はいろいろな経路をとることができる。しかし、シングルモードファイバではコアを小さくして、光の経路が単一になるようにしている。このような説明がいくつかの教科書に掲載されている。光の経路がたくさんあると経路ごとに信号の到達時間が異なる。モードが多数ある場合にもモードごとに伝搬速度が異なるが、これを、モード分散という。モード分散があると受信された信号が送信した信号から歪んでしまうので問題である。そこで、高速・長距離通信では、シングルモードファイバが使用されている。

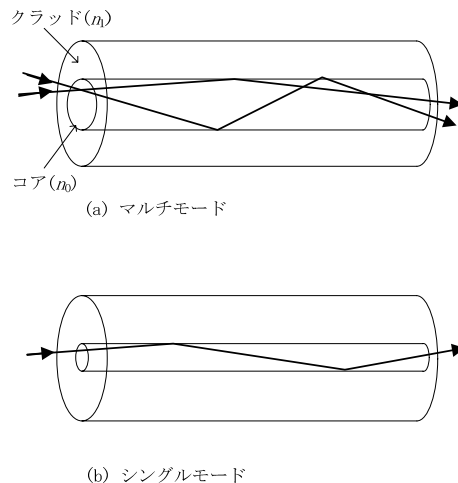


図 2. 教科書にみられるマルチモードファイバとシングルモードファイバの説明図。

シングルモードファイバの重要性は明らかであるが, 図 2 (b) に示すように, コアを細くしても光の経路は単一と限らない. このような見方からシングルモードの条件を導出することはできず, 光が波であることに基づいた波動解析が必要になる. 石英系シングルモードファイバでは, コアとクラッドの屈折率の違いは 0.3 % 程度であり, コアの直径は 10 μm 以下である. 図 3 は, シングルモードファイバ内の光強度を模式的に示している. コアの中心部分で強度は強く, 長手方向には半波長ごとに強弱を繰り返している. マルチモードでは断面の強度分布にいろいろなパターンが発生するが, 膜の振動におけるモードのようになる.

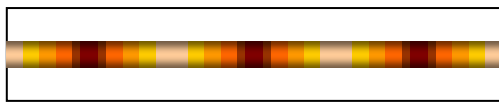


図 3. シングルモードファイバにおける強度分布の模式図.

図 2 に示されたマルチモードとシングルモードの説明は光線近似に基づいているが, 光線近似でモードを議論すること自体ナンセンスである.

4. コヒーレント光とショットノイズ

光ファイバ通信の特徴として, 高速化と同時に長距離化があげられる. 長距離化は光ファイバの低損失によっている. 現在, 石英系光ファイバでは, 波長 1.6 μm 近傍で損失係数 0.2 dB/km が得られている. このような低損失光ファイバを用いても, 100 km では 20 dB の損失があり光信号強度は 1/100 になる. そこで, Er をドープしたファイバ型光増幅器 (EDFA: Er-doped Fiber Amplifier) が 1980 年代に開発されている. これは, 半導体レーザ, 光ファイバに次ぐ大きな発明であった.

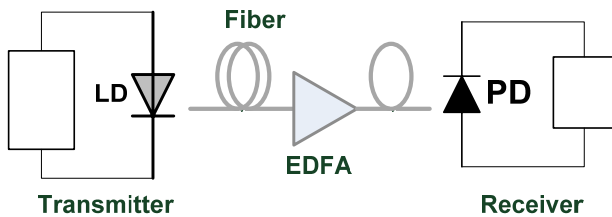


図 4. 光ファイバ通信の基本的な構成.

EDFA を用いた光ファイバ通信システムの基本的な構成を図 4 に示す. 太平洋を横断する海底ケーブルでは約 9000 km のファイバ長になるが, 例えば 30 km ごとに 300 個の光増幅器が繋がれていることになる. 光増幅器の出現で光ファイバ通信の長距離化が飛躍的に進んだ. しかし, 光増幅器があれば距離の制限がなくなるわけではない. デジタ

ル通信において通信の品質はアナログ通信と同様に, SNR (Signal to Noise Ratio) で決まる. 光ファイバ通信では, ショットノイズ限界が問題になる. 図 4 に示すように, レーザダイオード(LD)による光をファイバを通してフォトダイオード(PD)で検出する. フォトダイオードでは入射した光子を電子に変え, 電流として信号を取り出している. このとき, 電子の流れが均一ではなく, ばらつきを持っている. 電子の数が多き時にはそのバラツキはあまり問題にならないが, 数が少なくなると問題になる. このようなノイズをショットノイズと呼んでいる. ここで取り上げる誤解は, ショットノイズの起源がどこにあるか, ということである. PD から得られる電子の流れがそもそもショットノイズを持っているという見方がある. 人や車の流れが平均で一定でも, ある瞬間ごとを比較するとばらつきが出るように, 電流にもばらつきが出るのは当然ということになる. では, ショットノイズがことさら光ファイバ通信で問題となるのはどうしてか? 光を使わない電気通信でも送受信機内では, 電子の流れで信号を処理しているのであり, ショットノイズが問題になるはずである. 極限的な電気通信ではショットノイズも問題となるが, 電気通信では熱雑音が支配的である.

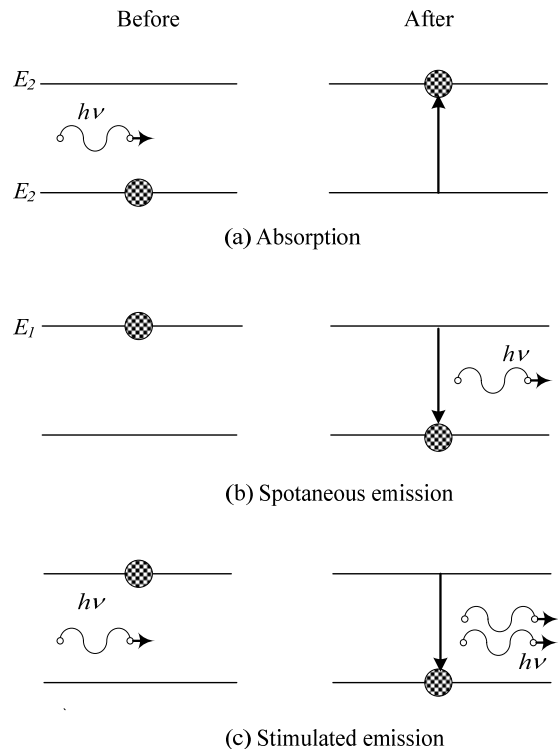


図 5. 3つの基本的な光過程.

ショットノイズの起源はコヒーレント光にある. レーザから発生される光はコヒーレント光であるが, コヒーレント光そのものがショットノイズを持っている. 光と電子の

基本的な相互作用として, 図 5 に示すように, 3つの過程がある. (a) は吸収過程であり, エネルギー $h\nu$ (h はプランク定数, ν は光子の周波数) をもつ光子を電子が吸収することでエネルギー準位の高い状態に遷移する. (b) は自然放出過程であり, 高い準位にある電子が光子を放出して低い準位に遷移する. (c) は誘導放出過程であり, 外部から光子が入射するとそれがトリガとなって光子の放出が起きる現象である. 自然放出と異なり, 入射した光子に同期して同じ周波数の光子が放出されるので, 光増幅の作用がある. “誘導放出では位相がそろった光波が発生し, 誘導放出を応用したレーザーでは位相のそろったコヒーレントな光が得られる,” という記述が見受けられる. ところが, “位相がそろっている,” という見方が誤解のもとになる. 量子力学では不確定性原理があり, 位相や振幅を同時に確定することが不可能になる. 電場と磁場を同時に確定することができないといってもよい. コヒーレント状態はさまざまな個数のエネルギー量子を持つ状態の重なりとして表現される [3]. コヒーレント光の量子数を観測するとポアソン分布のばらつきが現れ, ショットノイズとして観測される. また, EDFA のような誘導放出を応用した光増幅器においては, SNR の劣化が必然的に起こる. “誘導放出では位相がそろった光波が発生する,” ということは量子力学では成り立たなくなる. 周波数が低い電磁波では, 量子のエネルギー $h\nu$ が小さいので量子数がきわめて多く, ショットノイズは問題にならない. そのため, 位相と振幅が確定した古典的な波動の描像でよい.

4. おわりに

光ファイバ通信に関する3つの誤解を述べた. “光は光速で信号を伝送するので速い,” という見方がある. しかし, 電話線や無線による電気信号はほとんど光速で伝送されている. 光が速いことと通信速度が高いことは直接関係ない. 光の周波数が高く, 広帯域であることが本質である. この誤解は, 物理的な速度と通信速度の混同に原因がある. 光ファイバのモードは, 光線近似では理解できない. 光を波動としてとらえてはじめてシングルモードやマルチモードの描像が明らかになる. 光を波動としてとらえるか, 粒子のようにとらえるかは, 問題に応じて判断されなければならない. 光ファイバ通信で問題となるショットノイズの起源はコヒーレント光そのものにある. “コヒーレント光は位相がそろった波,” という描像は誤解を含んでおり, 量子力学的な不確定性を考慮する必要がある.

参考文献

- [1] J. Tyndall, Proc. Roy. Inst. 1, p. 446, 1854.
- [2] <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/nobel-goes-to-boyle-and-smith-for-ccd-camera-chip>
- [3] コヒーレント状態の量子力学的な定式化は, R. J. Glauber によってなされた. この功績で Glauber は 2005 年ノーベル物理学賞を受賞している.