



## AI 時代のフォトニクス

東京大学 先端科学技術研究センター 教授  
山下真司 YAMASHITA, Shinji  
(当協会 技術広報委員会 委員,  
「光応用技術研修会」講師)

最近、人工知能 (AI) についての記事やニュースを見ない日がない。実際、AI についての日経・読売・朝日新聞の記事数の合計は、2012 年には 10 件以下だったものが、2015 年には 1000 件以上、2017 年は 3000 件を超えているそうである (河島茂生, “新聞記事に見る人工知能やロボットの言説の変化,” 人工知能, vol.32, no.6, pp.935-942, Nov. 2017.)。本誌でも、2017 年 12 月号で「AI と技術的特異点 “シンギュラリティ” の世界」と題した特集を企画した。このような AI ブームがどうして起きているかという点、12 月特集号の各記事でも指摘されているように、デジタルエレクトロニクスの高速化、という一言に尽きるであろう。本号での特集である「コンピューショナルイメージング」もデジタルエレクトロニクスの高速化により可能になったと言える。

このようにデジタルエレクトロニクスはムーアの法則 (1.5 年で 2 倍) にしたがって指数関数的に高速化されてきた。では光技術 (フォトニクス) のほうはどうであろうか? 筆者は学生時代から 30 年近く、光ファイバの通信・センシング応用の研究を進めてきたので、フォトニクスの例として光ファイバ通信について考察してみよう。低損失な光ファイバがコーニング社により初めて実現されたのは 1970 年で、波長 632nm で損失は 20dB/km であった。ちなみに低損失化光ファイバの可能性を 1966 年に予測したカオは 2009 年にノーベル物理学賞を授与されている。当初の光ファイバはモードが多数あるマルチモード光ファイバ (MMF) であり、光ファイバ通信の速度はモード分散で制限されていた。そのためにコアを小さくしてモードを基本モードだけに制限したシングルモード光ファイバ (SMF) に移行してゆき、また損失もどんどん下がって 1980 年代には波長 1550nm で理論限界に近い 0.2dB/km が実現されている。SMF での制限要因はガラス自身に起因する波長分散であり、これを光ファイバの構造で打ち消した分散シフトファイバ (DSF) も 1980 年代に実用化された。1990 年代には長距離光ファイバ伝送を可能にするエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) が実用化され、これと波長分割多重 (WDM) を組み合わせることで 2000 年代の初めには Tbit/s を超える長距離光ファイバ伝送が可能になった。光ファイバブラッググレーティングや光ファイバ波長変換などの光ファイバ機能デバイスが盛んに研究されていたのもこの頃である。このように、2000 年代の初めまでの光ファイバ通信は、フォトニクスの進展により高速化されていたといっても過言ではない。この頃までの光ファイバ通信の送受信に用いられていたエレクトロニクスは化合物半導体を主体とした高速のアナログエレクトロニクスであり、シリコンベースのデジタルエレクトロニクスでは Gbit/s を超える光信号を扱えないと思われていた。

この流れが止まったのが 2000 年代の初めの IT バブル崩壊であった。企業は光通信部門を縮小して、光ファイバや光デバイスは供給過剰に陥った。それでも最近 10 年ほどは NASDAQ 総合指数は右肩上がりで上昇しており、すでに 2000 年のピークの 5,000 ドルを超えて 2018 年に 7,500 ドルに達している。光ファイバ通信についても同じことが言え、光ファイバの需要は 2007 年には IT バブルピーク

の需要を回復し、2017年にはその5倍（約5億km）となっている（CRUのデータによる）。

光ファイバ通信においてこの回復を牽引したのは、まさにデジタルエレクトロニクスの高速化であった。まず、10Gbit/sという高速伝送でも誤り訂正（FEC）が可能になった。FECなしでは $10^{-9}$ 以下の符号誤り率（BER）が必要であったところが、FECのおかげで $10^{-3}$ でも伝送が可能になり、必要な信号対雑音比（SN比）が大幅に緩和された。さらに、送信器では光のオン・オフで”1”と”0”のデータを信号光として送り、受信器ではそれを受光するだけの従来の強度変調・直接検出（IM-DD）方式に代えて、無線通信と同じように受信器でローカル光と信号光をミキシングするコヒーレント方式が採用され、無線通信と同じく光の振幅だけでなく位相も利用した多値PSKやQAMなどが利用できるようになり、伝送速度を飛躍的に拡大させた。このコヒーレント方式は1980年代に東大の大越、菊池らにより提案され、筆者も学生時代に大越の元でその研究に携わっていた。1990年代には実用一歩手前まで行ったが、レーザの位相ゆらぎの問題が簡単には解決できず、EDFAの実用化により忘れ去られてしまった。コヒーレント方式がふたたび蘇るのは、位相を $90^\circ$ ずらしたローカル光を用いる直交位相（IQ）受信器の出力から、高速デジタルエレクトロニクスを用いたAD変換・デジタル信号処理により位相ゆらぎを推定し、元の信号を再生するデジタルコヒーレント方式としてであった。これは東大の菊池らにより2000年代半ばに提案されたものである。このデジタルコヒーレント方式は単に以前のコヒーレント方式を蘇らせただけではない。FEC処理を入れられるだけではなく、従来は光学的に補償するしかなかった波長分散などの線形な現象による波形ひずみの補償がデジタル信号処理により可能になった。このアドバンテージは非常に大きく革命的で、光ファイバ通信システムの設計を一変させた。世界中の企業がこぞってデジタルコヒーレント方式の実用化に乗り出し、提案から10年も経たない間にほとんどの大容量光ファイバ通信システムがデジタルコヒーレント方式に置き換えられてしまった。

これまで述べた光ファイバ通信技術の進化は、デジタルエレクトロニクスの威力をまざまざと見せつけられるものであった。ではフォトニクスという面ではどうであろうか。デジタルコヒーレント以前は十分なSN比を確保しつつ、分散や非線形性による波形ひずみを起こさないようにするというところにフォトニクス技術が注ぎ込まれていたが、デジタルコヒーレントではそのうちの多くがデジタル信号処理に置き換えられ、フォトニクス技術への要求は小さくなり、むしろ後退している印象がある。これは例えばカメラの分野で、デジタルカメラの出現によりレンズへの要求が変化しているのと相似している。

ではデジタルエレクトロニクス全盛のAI時代にフォトニクスはどうあるべきだろうか。光ファイバを例にとりながらいくつか愚見を披露させていただきたい。

## 1. 換骨奪胎フォトニクス

最近の光ファイバ通信では、まだ実用化はされていないが、マルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバなどの空間多重（SDM）伝送の研究が非常に盛んで、19コア6モード光ファイバを用いた10Pbit/sの超大容量伝送がKDDIなどにより2017年に報告されている（世界記録）。このSDMはデジタルコヒーレントありきで生まれたものである。つまり、デジタルエレクトロニクスを前提として従来のフォトニクスに手を加えることで、新しいフォトニクスを生み出せる。

## 2. 温故知新フォトニクス

前述のようにデジタルコヒーレント方式は1980年代のアナログコヒーレント方式をベースとしている。また、マルチモード光ファイバは初期の光ファイバであるが、SDMの他に光軌道角運動量（OAM）伝送や非線形光学媒質としての研究が盛んになってきている。このように、昔から知られてはいるが何らかの原因で忘れられていたフォトニクスを、新しい視点と新しい技術（含デジタルエレクトロニクス）を加えて蘇らせることができる。

### 3. 心機一転フォトニクス

光ファイバは元々は通信を目的として開発されたものであるが、その初期から光ファイバにかかる温度や張力などの変化を測定する光ファイバセンサとしても用いられてきた。また、EDFAの技術を転用した光ファイバレーザは高出力と短パルスという2つの大きなアドバンテージを持ち、加工・計測・医療などに欠かせない技術になっている。これらが示すように、元来の適用分野と違う分野への応用を考えて新しい技術をプラスすることで、そのフォトニクスの新しい展開を図ることができる。