

光ファイバの歴史からわかること

山下 真司[†]

What We Learn from the History of Optical Fiber

Shinji YAMASHITA[†]

私は1988年に大学院修士課程で光ファイバ通信の研究を始め、その後は光ファイバセンサ/レーザーと研究領域を広げてきたが、一貫して光ファイバに関する研究に携わってきた。光ファイバ技術の歴史とそこから読み取れることをまとめておきたいと思う。

通信用の光ファイバがCharles Kao(2009年ノーベル物理学賞)による低損失光ファイバの予測とそれを元にしたコーニングの低損失石英ガラス光ファイバの実現(20 dB/km, 1970年)に始まったのはよく知られている通りである。半導体レーザーの室温発振が実現されたのも同じ1970年であった。光ファイバのパラメータとしては、波長域、モード、損失、分散(波長分散および偏波モード分散)、および非線形性が挙げられる。石英ガラス光ファイバの波長域については低損失化を目指し632 nm⇒850 nm⇒1,300 nm⇒1,550 nmと長波長帯に移り、理論限界に近い0.15 dB/kmが実現されている。またモードについても、当初のマルチモード光ファイバ(MMF)からシングルモード光ファイバ(SMF)が当たり前になった。波長分散については、単純なステップ状屈折率分布のSMFは最低損失の波長1,550 nm帯で比較的大きな異常分散をもつが、屈折率分布を設計することにより波長分散のコントロールが可能になり、波長1,550 nm帯で零分散をもつ分散シフト光ファイバ(DSF)やSMFとは逆の正常分散をもつ分散補償光ファイバ(DCF)なども作られるようになった。また光ファイバカップラーや光ファイバグレーティング(FBG)などの機能部品も全光ファイバ化されているのは周知のとおりである。

私が研究を始めた80年代後半はDSFを伝送路とした強度変調(On/Off変調)による高速伝送(当時は10 Gb/s)が本命だと考えられており、私自身は位相/周波数変調とヘテロダイン/ホモダイン高感度受信機による長距離化を狙った研究(コヒーレント光ファイバ通信)に携わっていた。ところが、80年代後半に出現したエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)が状況を一変させてしまった。光ファイバの損失による制限が事実上なくなり、10,000 kmを超えるような光ファイバ通信が実現できるようになった。また多数の波長を一括して増幅できるため、波長多重(WDM)が一気に進んだ。ところがDSFでは光ファイバの非線形現象(主に四光波混合)によるWDM信号の劣化が大きいため、分散をわざと残した非零DSF(NZDSF)が用いられるようになった。コヒーレント光ファイバ通信も実用化一歩手前まで行ったものの、結局はEDFAには太刀打ちできず、消えていった。WDM+NZDSF+分散補償で10 Tb/sの超大容量伝送が実現されたのが2001年であった。

この後は通信バブル崩壊などで技術的な進展が一時途絶えかけたが、2005年頃からさらなる大容量化に向けて、無線通信と同様に位相/周波数の多値変調が可能なコヒーレント方式が見直されるようになった。ただし以前とは異なり、超高速のデジタル信号処理と組み合わせたいわゆるデジタルコヒーレント(DC)と呼ばれる方式で、以前のアナログ方式では難しかった信号光と局発(LO)光との位相同期の問題を解決し、さらに分散のような線形の歪はデジタル信号処理で完全に補償が可能になった。DCの導入により伝送路である光ファイバへの要求が変化している、すなわち、分散は問題ではないので構造が単純なSMFでよく、むしろEDFAの登場であり重視されてこなかった超低損失性、低非線形性および低雑音増幅が重要となってきている。さらに最近では、空間的に信号光を多重化する空間多重(SDM)をDCと共に用いることが盛んに研究されており、SDMのためにマルチコア光ファイバ(MCF)やMMF、さらにはマルチコア/マルチモード光ファイバまでもが検討されるようになってきている。DC+SDMで1 Pb/s、というのが現在の世界記録である(2012年)。

このように、光ファイバについてはMMF⇒SMF⇒DSF⇒NZDSF⇒SMF, MCF, MMF, と元に戻ってきていることは興味深い。前述のコヒーレント方式⇒DCもまた然りであるし、EDFAも光ファイバの初期からあった希土類ドープ光ファイバレーザーのリバイバルであるとも言える。もちろん単純なリバイバルではなく、周りの技術の変化があってこそ、である。私の周りのある先生は、このようリバイバルは大域的位相が異なる「リーマン面」のようなもの、と表現されていたが、言い得て妙である。2年前に「温故知新」というタイトルで大坪先生が本稿を書かれていたが、そこでも言われていたように、スクラッチから考えるだけでなく、少し前に消えてしまった技術・研究を調べて掘り起こすことも重要であると思われる。

[†] 東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)

[‡] Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904