

わが国の光ファイバ通信研究（後編）



VII 光ファイバ通信システムの実用展開

7-1 初期の光ファイバ通信 商用光システムは1970年代の後半から用いられ、初期の例は、1978年にAlGaAs/GaAsレーザの0.85 μ m短波長帯でNECが敷設した、セルフォック・ファイバによるフロリダ半島のディズニーワールド内電話回線がある。また、初期のシリカ光ファイバを用いる0.85 μ m帯の光通信システムでは、1978年、東京電力が光ファイバ通信方式の運用を開始した。さらに東生駒市では、HiOVIS (Highly-interactive Optical Visual Information System) と呼ばれた、家庭間を映像で結ぶ試みが行われた。公衆通信の試験システムは1977年にNTTのネットワーク [光ファイバ通信方式 (32Mb/s) の実用化試験、小山正樹・島田禎晋・三木哲也 1977 IEICE業績賞]、AT&Tやカナダ、そして欧州などで広く行われた。1979年から通商産業省による「光応用計測制御システム」プロジェクトが行われ、テストベッドとして産業界の光通信技術が確り発展した。

光通信システムは光ファイバ、半導体レーザ、光変調器や光スイッチ、光変調方式とシステム方式、光ファイバ増幅器、光検出器などの光デバイス、分波器などの光回路、そして高速で動く電子回路などの進歩に助けられて発展した。1977年に波長分割多重 (WDM; Wavelength Division Multiplexing) により電子デバイスによる速度制限を補って、少しずつ波長をずらした多くの波長を束にして用いて大容量化する構想がNECやNTTの三木哲也のグループなどにより開拓された^[79]。

光ファイバ通信の研究では、当初は成熟度が低い半導体レーザの周波数安定度の問題などから、堅牢で経済的な光強度変調システムを主体とした二値のデジタル光回線に注力され、技術創設とシステム展開がなされたことは新分野の産業活動を根付かせる上でも賢明であった。

前述のような1970年代後半の0.85 μ m帯システムの実用化に続いて、1980年代の初めには1.3 μ m帯でFPレーザや単一モードレーザと単一モード光ファイバを用いる

システムが商用化された [高速デジタル単一モードファイバ伝送システム、伊藤武・中川清司・石田之則 (NTT) 1983 IEICE業績賞]。1.3 μ m帯の太平洋・大西洋横断光海底ケーブルは1989年に商用化された [国際長距離光海底ケーブル方式 (OS-280M) の開発、新納康彦・若林博晴・山本均 (KDD) 1989 IEICE業績賞]。しかし、1980年代の後半から、次に述べる1.5 μ m帯が長距離の主力になるにつれて、1.3 μ m帯の役割は、長距離回線から中短距離の光ファイバ通信システムへと移った。

7-2 1.5 μ m長波長帯光ファイバ通信 1980年に1.5 μ m帯でDSMLレーザが実現し、国内企業で実用化された。1983年に、筆者は光ファイバの低損失帯における単一モード光ファイバと単一モードのDSMLレーザから成る1.5 μ m帯長距離光ファイバ通信の提言を具体的に行った^[14]。実用化に関しては、前述の様に1.5 μ m帯の片端面鏡一様DFBレーザ (温度同調のDSMLレーザ) が開発され、1982年に、KDDの山本果也や宇高勝ら、そして、NTTの池上徹彦や黒岩邦夫らにより、当時としては高速の直接変調の伝送実験が行われた。この研究動向は迅速に世界に広まった。当初の1.5 μ m帯光システムは、開拓直後の光デバイスを堅実に用いて、堅牢な光強度変調システムを主体とした二値のデジタル光回線に注力され、着実な展開がなされた。

この間の1981年に、DSMLレーザの高速直接変調に伴って、単一波長を保ちながら中心の発振波長が少し動くという、「動的波長広がり」現象を小山二三夫らと見出し、1985年に、この動的波長広がりによる光ファイバの伝送帯域幅を理論的に示した^[80]。そして、高速伝送における外部変調器の必要性を明らかにした。この波長広がりはその後チャープとも呼ばれるようになった。1988年に小山と伊賀は、外部変調によるチャープと伝送帯域との関係を明らかにした^[81]。前後するが、1980年にChinlon LinとH. Kogelnik (米) は光ファイバによる伝搬につれて歪む光パルスを元に戻す光学的パルス等価器を開発し^[82]、1985年に予め歪みを与えた (predistortion) 光信号による光学的分散補償の方法がT.L. KochとRodney C. Alfarness (米) によりなされ、さ

[79] S. Sugimoto, K. Minemura, K. Kobayashi, M. Seki, M. Shikada, A. Ueki, T. Yanase and T. Miki, "High speed digital signal transmission experiments by optical wavelength division multiplexing", *IOOC '77*, C7-4, July 1977.

[80] F. Koyama and Y. Suematsu, "Analysis of dynamic spectral width of dynamic-single-mode (DSM) lasers and related transmission bandwidth of single-mode fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 4, pp. 292-297, Apr. 1985.

[81] F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping of external modulators", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-6, no. 1, pp. 87-93, Jan. 1988.

著者:末松 安晴

東京工業大学名誉教授（元学長）、高知工科大学（元学長）と国立情報学研究所（元所長）の各名誉教授

略歴：半導体レーザーを中心に、光ファイバー通信の先駆的な研究を行う。昭和58年ワルデマ・ポールセン金メダル（デンマーク）、平成8年紫綬褒章受章、平成26年日本国際賞受賞、平成27年文化勲章受章。

らに、電子的な分散補償の方式がJ.H. WintersとR.D. Gitlinらにより開発された^[83]。1987年にはWDM方式がAT&T（米）やNTTにより商用回線に用いられた。

7-3 大容量長距離商用光ファイバ通信 1.5 μm 帯の商用の大容量長距離光ファイバ通信は、国内では1987年からNTTが陸上幹線に〔大容量光伝送方式の開発、中川清司・車田克彦・酒井徹志 1990 IEICE業績賞〕、そして1992年からKDDとAT&Tによる大陸間の太平洋横断光海底ケーブル、TPC-4、で用いられ（図13、5）、現在に至っている。これらの幹線システムには主に温度可変の1.5 μm 帯DSMLレーザーが用いられている（図5）。

また、先に述べたように、1987年にPayneらにより始められた Er^{3+} ドープの光ファイバ増幅器（EDFA）は、1989年にNTTの中沢正隆（現東北大）らにより半導体レーザー励起で実用的となり、波長幅40nmもの広帯域光増幅が開発された。EDFAが開発されて各中継箇所でも電気信号に落とすことなく、損失のために弱くなった光を一括増幅出来、長距離光システムの低コスト化に貢献している〔光増幅国際長距離海底ケーブル方式の開発と実用化、若林博晴・秋葉重幸・山本周（KDDI）1997 IEICE業績賞〕、〔WDM伝送用光ファイバ増幅器の広帯域化に関する先駆的研究、須藤昭一・大石泰文・森淳（NTT）2000 IEICE業績賞〕。

2001年には伝送容量が10.92Tb/sにも達するテラビット級の高密度の波長領域多重伝送（DWDM）通信システムが開発された〔テラビット光伝送の実証、小林郁太郎（NTT）・桑原秀夫（富士通）・鹿田実（NEC）1997 IEICE業績賞〕、〔テラビット級WDM長距離光伝送システムの研究開発実用化、萩本和男・織田一弘・平子正典（NTT）2005 IEICE業績賞〕、〔10テラビット級OTN(Optical Transport Network) 基盤技術の先駆的研究、宮本裕・富澤将人・佐野明秀（NTT）2011 IEICE業績賞〕。

また、多様な光通信システムの開拓が活発に行われ〔光周波数分割多重（光FDM）の先駆的研究、野須潔・鳥羽弘・河内正夫（NTT）1991 IEICE業績賞〕、さらに、電気信号処理の限界を超えて全て光領域で処理する新しい可能性の探求が行われている〔全光処理による超高速光伝送方式の先駆的研究、猿渡正俊・川西悟基・盛岡敏



図13 大陸間海底ケーブルの例。放送用に限った太平洋横断海底ケーブルが例示されている。一般の通信を含めると図の何倍もの光ケーブルが敷設されて用いられている。地図データはTelegarphy社のHomepageによる。

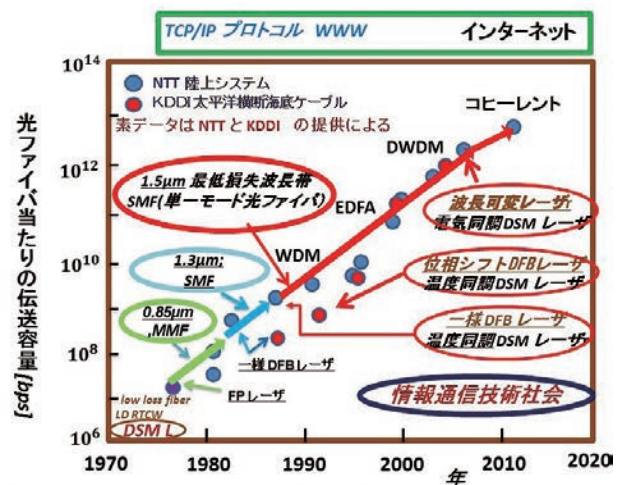


図5(再掲) 光ファイバ当たりの商用伝送容量の年次増加と、システムとして光源の半導体レーザー。素データはNTTとKDDIのご厚意による。

夫（NTT）1995 IEICE業績賞〕、〔フォトニックトランスポートネットワークの先駆的研究、佐藤健一・古賀正文・岡本聡（NTT）1999 IEICE業績賞〕。そして、安定な大容量光伝送方式〔大容量波長多重光海底ケーブル方式の開発、鈴木正敏・枝川登・松島裕一（KDDI）2003 IEICE業績賞〕や、無線ネットワークと光ネットワークの接続〔光CDMAネットワークの先駆的研究、北山研一・塚本勝俊（阪大）2004 IEICE業績賞〕を目指したシステム研究などが広範に行われている。

[82] C. Lin and H. Kogelnik, "Optical-pulse equalization of low-dispersion transmission in single-mode fibers in the 1.3-1.7 μm spectral region", *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 476-478, Nov. 1980.

[83] J.H. Winters and R.D. Gitlin, "Electric signal processing techniques in long-haul fiber-optic systems", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 38, No. 9, pp. 1439-1453, Sep. 1990.

7-4 光ファイバ通信が家庭へ 新技術は家庭に入って初めて完成すると云われる。日本に於けるFTTH (Fiber To The Home) の普及は、NTTにより2001年頃から始まり、大容量の情報光ファイバにより家庭に届くようになった。このFTTHでは、温度管理が行き届いている局から家庭へは1.5 μ m帯DSMLレーザが、温度管理が不十分な家庭から局へは1.3 μ m帯FPレーザが用いられている {PDS技術による経済化光アクセスシステムの開発実用化、渡辺隆市・三鬼準基・酒井隆司 (NTT) 1998 IEICE業績賞}、{FTTH用1.25Gb/sパースト光送受信インタフェース技術の実用化開発、本島邦明・田上仁之・中川潤一 (三菱) 2000 IEICE業績賞}。2013年現在のFTTHの全国の契約数は2,500万件を超えている。

7-5 コヒーレント通信 1980年に、東大で位相変調に基づくアナログでコヒーレント通信の開拓を目指した、半導体レーザの周波数安定化などが試みられた {コヒーレント光ファイバ通信研究の創始と先駆的貢献、大越孝敬 (東大)・山本喜久 (NTT)・菊池和朗 (東大) 1985 IEICE業績賞} が、光ファイバ増幅器とDWDMシステムの実用化が進んだことにより、一時期、注目されなくなった。その後光源の高性能化 (狭線幅化、安定化) や高速デジタル演算素子 (DSP) の進歩を背景に、菊池和朗らにより2005年以降、電波並みの多値位相変調の技術を駆使したデジタル・コヒーレント (Coherent) 通信の技術が開拓されて商用化された {100Gデジタル・コヒーレント光伝送方式の実用化、富澤将人 (NTT)・尾中寛 (富士通)・菊池和朗 (東大) 2013 IEICE業績賞}。位相変調に基づくコヒーレント通信では、利用する位相と振幅の状態を様々に選べるので多値変調が出来、一光波当たりの伝送容量が増大した。現在では、100Gbpsの大容量伝送に発展し、近年商用化された。NotelのKim Robert (加) は関連回路のLSI化に貢献した。そして、東北大の中沢らは高度の多値変調により光波一サイクル当たりの伝送量を10ビット以上に増大させた。

コヒーレント通信用の半導体レーザでは100kHz程度の狭スペクトルが必要であり、強度変調用比して共振器長の長いDSMLレーザが用いられている。波長可変レーザ、すなわち電気同調のDSMLレーザは電子技術による制御を必要として商用化が遅れていたが、生産性が高く、低消費電力型の特徴が活かされて、2004年頃からDWDM伝送システムに用いられるようになった。さらにデジタル・コヒーレントシステムの実用化に対応している。

7-6 将来に向けて 将来に向けた一層の大容量化のためには、多値位相変調技術に加えて、多芯光ファイバなどを用いる試みもあり、第二世代の大容量光技術への転換期にある。また、半導体光増幅器など、今後、光デバイスには電力効率の向上が課せられ、さらに高性能化

のために集積化へと展開している。将来に向けた通信システムでは、ソリトン伝送、セキュリティの観点から量子通信、そして大容量時代のモバイル通信に備えたTHz通信などが様々に試みられている。また、文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」では、光ネットワークの超低エネルギー化を目指して「光パスネットワーク大規模実証実験」が行われている。もっと先には、COM-Generatorによる高密度通信、位相を保つ一方方向性光増幅デバイス、位相を保つ光記憶デバイス、可変の光遅延回路、Si基板光増幅器など、まだ光波帯には存在しない新機能の研究・開拓も夢として残されている。光通信技術は次世代の発展に向けた飛躍の転換点にあると考えられている。

7-7 光ファイバ通信と情報通信社会 現代の情報通信ネットワークの基盤となったインターネットの基本技術として、先に述べたようにTCP-IPが1973年に統合され、さらにWWWが1991年に公開されて確立し (図5)、情報通信の機能が世界的に広まった。図5に示すように、インターネットの発展は物理網としての光ファイバ通信の進歩に支えられている。光ファイバの伝送量が大容量化し、NTTやKDDIの資料を参考にすると、光通信が無かった1970年代中頃に比して1990年代の中頃には4桁以上に増大し、結果として画像情報の伝送コストを激減させて、ネット利用の商業的な価値を高めた。そして1990年代にはYahoo! (1994) やGoogle (1998)、そして楽天 (1997) などのネットビジネスが続々と生まれ、成長した。

光ファイバ通信の研究は、社会の発展に必要な知識情報を担う電子表示を即時に活用するインターネットの発展を支えて、大容量長距離通信技術を確立・進展させ、遠い未来のものだった情報通信技術文明を現実の社会に引き寄せた。研究は未来を現実社会へ引き寄せる活動であると云われる所以である。”Research brings the future into existing society”。

VIII むすび

わが国の光通信研究は、戦後の荒廃から立ち上がる時期と軌を一にして始められた。この時期、研究費獲得が困難な時期であったが、新分野への挑戦が行われた。そこには、幾つかの有り難い環境があって新分野への挑戦が後押された。卑近な例では、大学の歯に衣を着せない討論が行われていた「マイクロ波輪講会」(末武国弘東工大教授) や大学の枠を越えて新分野の討論がなされた「電子ビーム懇談会」(岡村総吾・斎藤成文東大教授)、そして、後の1960年設立の日本学術振興会第130委員会「光と電波の境界領域研究会」(初代委員長は吉永弘阪大教授、第三部会長霜田光一東大教授)、1963年設立の電子通信学会「量子エレクトロニクス研究会」(初

代委員長はNEC原島治博士)などは初期の光技術に関する産学連携の討論の場となり、光通信のように当初はまったく光が当たっていなかった新分野の研究者には、新成果を掌握して勇気付けられた討論環境であった。今後こうした若者が刺激される討論の場が数多く運営されることを望むものである。

大学の研究や人材育成に関しては、文部省(当時)の科研費による支援が、こうした社会的に光が当たらなかった時代の分野への支援が行われていた。筆者は光通信研究を初めた5年目の1966年(昭和41年)に47万円の科研費(各個研究)を頂戴した。この額は、当時の大学講座費より多く、有用であった。5年後の1971年に行われた技術予測では光通信という項目すら無かった。そうした時代にも、大学の自発的研究や一部の企業研究者の間では光通信研究が熱心に行われ、科研費で着実に支援されていた。自発研究やそれを支援する科研費の重要性を示す証左であろう。後年、量子エレクトロニクスに関する各種の科学研究費特定研究が支援され、1977年からは柳井久義と牧本利夫両教授を代表として、3年間の特定研究「光導波エレクトロニクス」などが支援された。この特定研究によりわが国の大学を中心とした光通信研究体制が形成され、研究・人材育成に貢献した。表1に、当時の研究者と研究テーマ一覧を示す(P22参照)。筆者は1980-1982年に亘って、科研費特別推進研究「長波長光集積レーザおよび光集積回路」の支援を受けて研究を積極的に進められ、現在広く用いられている通信用半導体レーザであるDSMLレーザの開拓のご支援を頂いた。他にも幾つかの特別の研究支援が多数行われてこの分野が活性化された。

この間、科研費は初期の比較的少額だった均等配分から傾斜配分に移って、大学の研究は大いに支援された。なお、筆者の個人的経験では、初期の1960年代の光通信研究では、研究費も均等配分で実験的な研究には苦勞

があった。この間には民間からの助け、例えば、TDKの山崎貞一社長から見返りを求めない多額の研究支援があって初めて、初期の研究、特にレーザの試作を伴う実験を遂行することができた。

産業界では、1975年からNTTが企業との共同研究を進めて光通信研究開発を強力に牽引した。1978年からのHiOVISの試みや、1979年から通商産業省による「光応用計測制御システム」、通称光大プロが大々的に行われ、テストベッドとして産業界の光通信技術を押し上げるのに貢献した。文部省(当時)の支援により進められた1983年に竣工した東京工業大学情報伝達システムは単一モード光システムのテストベッドでもあった。こうして、研究の中頃からの光通信研究は、国を挙げて産官学で強力な研究開発が行われた。

光通信研究は研究開発段階から世界のトップ水準で行われた戦後最初の産業分野と云われ、単一モードシステムや極低損失光ファイバ連続製造技術、光ファイバケーブル化・接続技術、通信用の動的単一モード半導体レーザや光デバイス、光集積回路、波長領域多重通信、面発光レーザ、量子ドット構造、半導体レーザ励起の光ファイバ増幅器、デジタル・コヒーレント通信など、システム概念やデバイス開発で世界の研究開発をリードしてきた。こうして、世界の最先端に顔を出して研究出来る環境を構築していただいた科学研究費を始め各界からのご指導・ご支援に深謝して本稿をしめたい。

謝 辞

本稿の取りまとめは日本学術振興会のご依頼によるもので、京藤倫久監事、宮嶋和男参与、笹川光参事、企画調査課の諸氏を初め関係各位の叱咤ご激励に感謝する。また多くの方々から原稿のチェックをして頂いた。ここに合わせて深謝する次第である。

表1 各班構成の研究代表者および研究題目

研究課題	研究代表者
第Ⅰ班 光導波現象および基礎理論	
1. 光導波路における光と音波の相互作用の研究	鈴木 道雄 (北大・工・教授)
2. 光導波路のゆらぎ現象と導波伝送特性	朝倉 利光 (北大・応電研・教授)
3. 光導波エレクトロニクスにおける非線形光学の研究	稲場 文男 (東北大・通研・教授)
4. 光導波路における表面ポラリトンの研究	国府田隆夫 (東大・工・教授)
5. 酸化物強誘電体薄膜による光導波と光回路素子の研究	池上 淳一 (京大・工・教授)
6. 光導波路の設計論的研究	熊谷 信昭 (阪大・工・教授)
7. 光導波路および光回路素子における波動場の計算機解析	安浦亀之助 (九大・工・教授)
8. 光導波回路による光信号処理の基礎的研究	田中 俊一 (東大・工・教授)
9. テーパ型光導波路とその応用に関する研究	沢 新之輔 (愛媛大・工・教授)
第Ⅱ班 光導波・発光材料の微細加工	
1. 導波路形光変調用材料の作成・加工の研究	青木 昌治 (東大・工・教授)
2. 新しい光集積回路用化合物半導体の研究	日野 太郎 (東工大・工・教授)
3. クラストイオンビーム蒸着技術による光導波路・光回路の形成	高木 俊宜 (京大・工・教授)
4. 分子ビームおよび液相エピタクシーによる光導波・発光材料の研究	浜川 圭弘 (阪大・基礎工・教授)
5. 電子ビームおよびイオンビームによる光集積回路の微細加工に関する研究	難波 進 (阪大・基礎工・教授)
6. 光回路素子用化合物半導体および高分子材料の研究	栗田 正一 (慶応大・工・教授)
7. 光導波路用混合薄膜の研究	大頭 仁 (早大・理工・教授)
8. 紫外線露光によるサブミクロンのフォトエッチング過程の研究	竹中はる子 (日本女子・家政・教授)
9. 電気光学材料PLZT薄膜を用いた導波型光信号素子	松波 弘之 (京大・工・助教授)
第Ⅲ班 光導波路	
1. 光集積回路用導波路の研究	虫明 康人 (東北大・工・教授)
2. W型光ファイバの伝送特性の研究	西田 茂穂 (東北大・通研・教授)
3. 光ファイバ内屈折率分布の最適化ならびにその関連計測技術に関する研究	大越 孝敬 (東大・工・教授)
4. 光ファイバの超広帯域化とその光源に関する研究	末松 安晴 (東工大・工・教授)
5. 集束型光ファイバおよび薄膜伝送路の研究	山田 亮三 (静岡大・工・教授)
6. 光回路素子の機能的結合法に関する研究	小山 次郎 (阪大・工・教授)
7. 光導波路における伝送姿態の定量分析法に関する研究	滝山 敬 (同志社大・工・教授)
第Ⅳ班 発光源と光増幅・機能素子	
1. 集束性半導体機能素子集積回路の研究	西沢 潤一 (東北大・通研・教授)
2. 超音波による光機能素子の研究	御子柴宣夫 (東北大・通研・教授)
3. 半導体レーザの発振・超高速変調と結合法に関する研究	柳井 久義 (東大・工・教授)
4. 1~1.7μm波長帯における半導体レーザおよび能動光回路素子の研究	古川静二郎 (東工大・総合理工研・教授)
5. 集積形レーザの研究	雨宮 好文 (名大・工・教授)
6. 金属イオン拡散による能動光導波路素子の研究	服部 秀三 (名大・工・教授)
7. 光導波化能動素子に関する研究	松尾 幸人 (阪大・産研・教授)
8. 半導体レーザの動作特性および外部変調に関する研究	石橋 鏗造 (金沢大・工・教授)
9. 圧電性光薄膜導波路とII-IV-V ₂ 族化合物とで構成される光導波機能素子の開発	石田 哲朗 (山梨大・工・教授)
第Ⅴ班 光回路素子	
1. 光導波回路測定解析用高精度アナライザの研究	斎藤 成文 (東大・生研・教授)
2. 精密微細回折格子を用いた光集積回路素子の研究	浜崎 襄二 (東大・生研・教授)
3. 一方向性光集積回路素子の研究	末武 国弘 (東工大・工・教授)
4. 磁気光学効果を用いた光薄膜機能素子の研究	赤尾 保男 (名大・工・教授)
5. 広帯域導波形光変調素子の研究	末田 正 (阪大・基礎工・教授)
6. 異方性結晶を用いたモード結合形光導波回路素子の研究	牧本 利夫 (阪大・基礎工・教授)
7. 電気光学効果制御誘電体多層膜光導波路に関する研究	横戸 健一 (山形大・工・教授)
8. 液晶を用いた光導波回路素子の研究	小林 駿介 (農工大・工・教授)
9. 導波路型光変調素子の広帯域化に関する研究	山下 栄吉 (電通大・電気通信・教授)
10. 導波路を利用した記憶素子とレーザに関する研究	藤田 廣一 (慶応大・工・教授)
11. 音響光学素子を用いた光信号発生器の研究	宮地 杭一 (芝浦工大・工・教授)

表1 1977年に3年間計画で始まった文部省科学研究費補助金(特定研究)の研究組織、研究代表者と研究題目。