



# 光データリンクの研究開発

西江 光 昭

Research and Development of Optical Data Link Modules — by Mitsuaki Nishie — Optical data link modules (ODLs) are one of the basic components used in optical communication systems. In the beginning, ODLs were developed as low-end components applicable for 1 Mb/s transmission rate. With the progress of optical transmission technologies, ODLs evolved to become faster, smaller and multifunctional. Today, the most advanced ODLs have a transmission rate exceeding 10 Gb/s, a dispersion penalty compensation function, and also various control functions using built-in microprocessors. Widely used in applications such as public communication systems, local area networks and large-scale server systems, ODLs play important roles in the information society. Sumitomo Electric has been developing and shipping ODLs as well as optical fibers and optical devices since 1970s, and this paper describes the ODL development concept and technologies of Sumitomo Electric.

## 1. 緒 言

光データリンクは光通信を行う際に使われる最も基本的な部品の一つである。光送信側では電気信号を光信号に変換、伝送路である光ファイバに効率良く光信号を結合させる機能を持ち、光受信側では光信号を電気信号に変換する機能を持つ<sup>(1)~(3)</sup>。光データリンクは図1に示すように光送信モジュールと光受信モジュールで構成される。光送信、光受信が個別のモジュールもあるし、一体となった光トランシーバモジュールもある。また、光伝送方式の高度化に伴い、光データリンクに光信号の処理機能、電気信号の処理機能を搭載した複合モジュールもある。光通信にはアナログ信号を伝送する方式、デジタル信号を伝送する方式があるが、一般的に光データリンクはデジタル信号伝送用のモジュールを指す場合が多い。現在では、図2に示すようにブロードバンドネットワークのいたるところで使われている。

光データリンクという用語は、この種のモジュールが出始めた時には、一般的には使われていなかった。通信機器メーカー等の光通信システム構成図を見ても、この種の機能

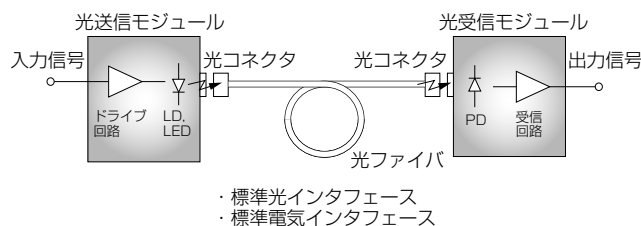


図1 光データリンク構成

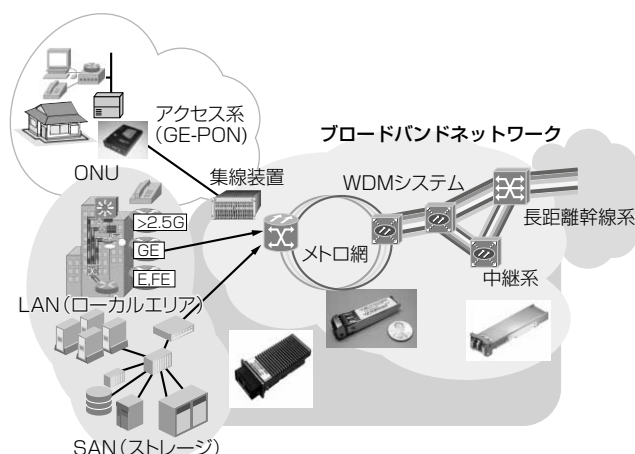


図2 光通信ネットワークと光データリンク

のモジュールはE/O、O/Eと表現されている場合が多い。光通信の実用化で世界の最先端を走っていた米国大手メーカーも、Optical Transmitter Module, Optical Receiver Moduleという用語を使っていて、Optical Data Linkという表現は無い。おそらく、世界で最初に光通信用の光電気変換モジュールを光データリンクと命名したのは当社であると思われる。70年代末に光伝送用モジュールをSUMILINK®と称して製品化したのが、光データリンクのデビューであろう。SUMILINK®が世に出された時にはアナログTV信号伝送用のSUMILINK® AM-01とデジタル伝送用モジュールSUMILINK® DX-01があった。アナログ伝送用のモジュールはその後、映像伝送システムに合わせたカスタム製品化、更にはCATV用光伝送機器として発展していき、現在では

CATV 幹線用等に幅広く使われているが、いわゆる汎用のモジュールの形態とならなかった。デジタル伝送用スミリンク™は、ハイブリッドIC技術を採用したニュースミリンク、モールド技術を採用したスーパースミリンクと発展し、公衆通信用、LAN用等の光データリンクとして幅広く製品化されてきた。光データリンクと光デバイス研究開発活動の変遷を図3に示す。

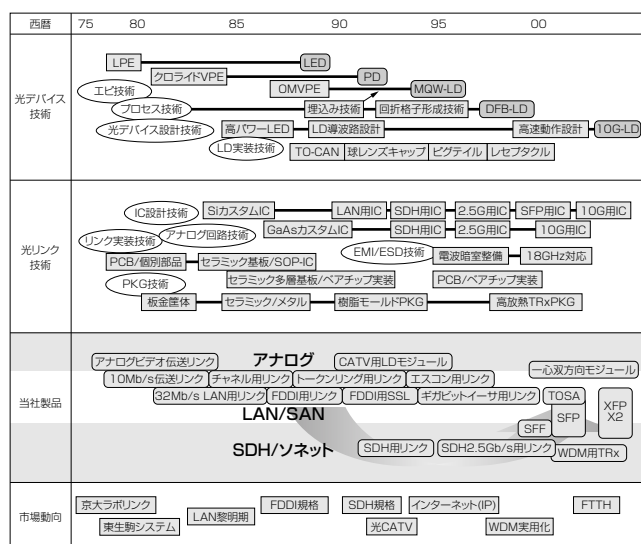


図3 光デバイス/リンク研究開発活動の変遷

## 2. 当社に於ける光通信技術開発の黎明期

当社で光リンク開発に繋がる光通信技術開発がいつごろ開始されたのか、昔の資料を調べてみたところ、1975年6月13日に第一回光通信システム開発連絡会議が横浜で開かれていることが分った。それ以前にも調査検討はしているようだが、具体的な目標を持って開発に着手したのは、この時点と思われる。光ファイバ、光デバイスについては先行して、開発に着手しており、当社の光ファイバ開発、化合物半導体開発にやや遅れて光通信システム開発が始められ、今の光データリンク事業に繋がっている。

種々の光伝送技術の調査と平行して、光伝送実験を細々と始めたのがこの時点であったが、当社で最初の光伝送実験は可視光LEDを光源に用い、受信はシリコンのフォトダイオード (PD) にシリコン MOS-FET のアンプを接続した構成の1.544Mb/s システムであった。誤り率試験機等も入手出来ず擬似ランダムパターン発生器を手作りして伝送実験を行った。実験には200m長のファイバを用いたが、実際に光信号がファイバを通るのは、当たり前と言えば当たり前であるが、伝送出来ることを確認したことは百聞は一見に如かずという感慨があった。

折りしも京都大学情報工学科から1Mb/sの光通信コンピュータネットワーク (LABOLINK)<sup>(4)</sup>の引き合いがあり、76年5月に納入した。光源は近赤外 (0.91μm) のLED、受光素子はシリコンPINフォトダイオードで、光ファイバはコア径200μmのPCF (Plastic Clad Fiber) であった。シングルモードファイバはおろか、まだ石英マルチモードファイバも敷設に耐えるものは無い時代であった。光ファイバの接続技術が無く、また光コネクタも光ファイバ同士の接続に使えるものが未開発であったので、長めのファイバケーブルを敷設し受信器の設置場所に合わせて巻き取り、光ファイバ端に現地で光コネクタを取り付け、光送受信機と接続した。当社初の光通信システム納入であったが、光ファイバケーブルの敷設工事も当社初という実験室から出て実際のデータ通信に使われた最初の製品であった。

このように最初の光伝送システムは光部品技術が不十分な中で、必要最小限の性能は出せたが、光データリンクに必須のTOSA (Transmitter Optical Sub-Assembly)、ROSA (Receiver Optical Sub-Assembly)、光コネクタ技術は、1976年から進めた東生駒映像情報システム (Hi-OVIS)<sup>(5)</sup>の開発を通して培った。このシステムはその当時としては、最先端の双方向VOD (Video on Demand) システムであった。情報化社会を予見したアルビントフラーの有名な著書である「第3の波」が発行されたのが80年であり、それより2年前にHi-OVISは完成していたことから、その先進性が分る。

TOSAは発光波長0.83μmのLED<sup>(6)</sup>にスタブファイバと新規開発のフェルール径4mmの光コネクタを取り付けたものであった。写真1にTOSAの外観を示す。ROSAは、コネクタフランジに新規開発の受光径800μmのSiフォトダイオードを無調芯で取り付けただけのものであった。光コネクタは当時のPCF特有のファイバコアの突き出し (現在のHard-clad-PCFではこの問題は無い) を抑えるための特殊な構造を持つものであった。このような新規開発の光部品



写真1 Hi-OVISに使用されたTOSA LED光源に、スタブファイバ、モニタPD、ヒートシンクが付いている。

と、アナログベースバンドビデオ伝送技術を駆使して、78年春にHi-OVISを無事完成させ、7月に運用開始した。Hi-OVISは双方向VODシステムなのでアナログ画像音声信号と制御データを伝送する必要があるが、画像音声信号は通常のNTSC信号フォーマットを用い、制御データは6MHzに振幅変調方式で周波数多重する方式を用いた。基本的にはアナログ変調方式である。Hi-OVISの開発を通して光データリンクに必須の実使用に耐える光部品を他社に先駆けて開発出来たことは、その後の光データリンク開発に大いに役立った。

### 3. 初期の光リンク開発

基本的な光通信技術をHi-OVIS開発で培ったが、その後のデジタル時代を予見して、デジタル伝送技術開発を開始した。光データリンクとして最初に開発したモジュールは、TTLインタフェースであり、伝送速度は～500Kb/sであった。送信はLEDの電流を単純にON/OFFさせて発光/消光させるものであり、受信はフォトダイオードに抵抗を負荷した回路をFET入力の電圧比較（コンパレータ）ICで電圧検知して、受信信号を取り出すというものであり、光受信レベルに合わせて比較電圧レベルの調整を要するものであった。Hi-OVIS等では、光受信フロントエンドにはMOS-FET等を用いた高感度受信回路を採用していたが、光データリンクは単一電源、小型化を優先して、フロントエンドアンプは省略し、電圧比較器にいきなり入力する方式とした。多少の性能は犠牲にしても低コスト、単純かつ安定に動作することを優先する方針で開発を進めた。しかし、大きな問題はHi-OVISで開発した光部品のコストが非常に高く、光データリンク全体としては高コストになるということであり、光部品の低コスト化を図った。低コスト化の主要な方策はプラスチックスリーブでかつスリーブが円筒形では無く先端が細い円錐台形で、突き出しをガラス窓で抑えた光コネクタと、それに適合するTOSA、ROSAの開発であった。この光コネクタを用いた光データリンクは使用対象となるファイバはPCFで、伝送距離は数km以



写真2 SUMBUS-ST-LSに搭載されたスミリンク初期モデル

下であり、主にFA用等で使われた。この種の光データリンクは電子回路を高度化し、光ファイバ突き出しを押えたH-PCF<sup>(7)</sup>を開発して、FA用途等を対象としたSUMILINK<sup>®</sup>(7)として製品を供給している。以下の項では、シングルモードファイバやマルチモードファイバを使用する更なる高速化、長距離化対応の光データリンクの研究開発について記述する。当時の光データリンクが搭載された光通信システム基板の一例を写真2に示す。

### 4. HICを採用した光データリンクの開発

SUMILINK<sup>®</sup>の商標で光データリンクを製品化したのが、その構造は板金折り曲げの筐体にTOSA/ROSAをネジ止めし、プリント基板実装の電子回路部を収納するという稚拙なものであった。折りしも、カーエレクトロニクス部門でハイブリッドIC（HIC）開発に着手し、光データリンク開発グループも一緒にHICの技術習得をするよう提案があり、早速参加した。当時としては最先端の実装技術であり、その後の光データリンク開発に大きく役立った。カーエレ部門はHICそのものの開発とHICを使用した製品開発の双方を進めたが、光データリンクではHICを使いこなして競争力を高めることに重点化して開発を進めた。具体的には電子デバイスのベアチップ実装による高性能化、小型化に加えて、HICをYAGレーザファンクショントリミングすることにより光デバイス/電子デバイスのバラツキを補正しようというものである。各種部品を実装組み立てたモジュールをレーザトリミングにより、①光出力レベルの調整を行うこと、②発光デバイスの立ち上がり下がり時間のバラツキでパルス幅歪が出るのを補正すること、③光受信信号の1, 0判定スレッシュホールドレベルを調整すること等に使用した。これにより、光通信に要求される厳しい諸規格をクリアして安定した性能を実現する光データリンクが開発出来た。この光データリンクはニュースミリンクと名付けられた。最初に製品化したモジュールは、その当時に出始めた高速イーサネット<sup>(註)</sup>対応の20Mb/sのDM-02とトークンリングLAN<sup>(46)</sup>対応の32Mb/sのDM-03である。外観形状を図4に示す。送信/受信共に単一5V電源で動作するモジュールであるが、受信側では、±5Vで動作するICしか入手出来ず、やむを得ず5Vを-5Vに変換するDC/DC-ICもモジュールに組み込んで単一5Vモジュールとした。HICの導体抵抗値が高いことも一因で、DC/DCのスイッチングノイズが回り込み受信感度が低下することに大変苦しんだが、HICのグラウンド配線には銅導体のいわゆるバスバーを入れることと、ノイズキャンセルのために受信フロントエンドの信号と逆相の差動入力にフォトダイオード容量と等価の可変コンデンサを入れ、製品毎に微調整をすることによって必要受信感度を確保することに成功し(写真3参照)、ようやく光データリンクも量産をするという段階にこぎ着けた。対象となるファイバはマルチモー

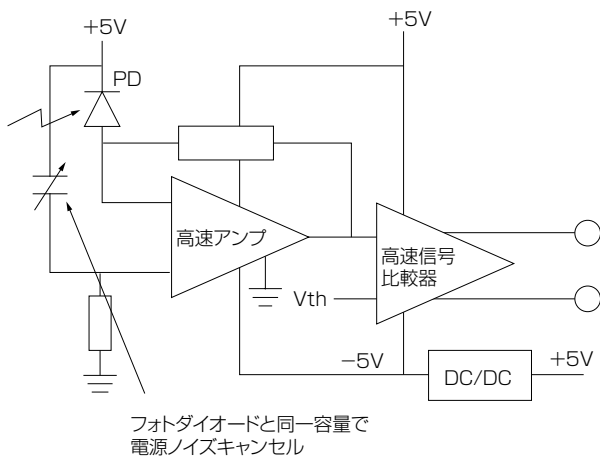


図4 DM-03受信部回路図



写真3 HICを使用した最初の光データリンク  
DM-02も同一形状

ドファイバ、光源は短波長 ( $0.85\mu\text{m}$ )、電気入出力はTTLインタフェースの製品であった。

信頼性については、その当時平行して進めていた大手のコンピュータメーカーとの光モデム共同開発等で習得した技術があり、試験項目とサンプル数の規定を定めて量産化に当っては必ず試験実施、試験結果のレビューを行ってきた。

このような状況の中、高速化、長寿命が期待出来る長波長の光データリンク開発に踏み出すきっかけとなる引き合いがあり、200Mb/sの光データリンク開発を始めた。この引き合いは当初、光源が短波長レーザの仕様であったが、当社からのカウンタープロポーザルで長波長LED仕様<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>となった。この光データリンク開発は、当社を含む日米欧3社の開発競争になったが、当社は200Mb/sを単一5Vで実現する技術（特に受信フロントエンド部を1チップカスタムICで実現することが必須）を持っていないために、他社の後塵を拝することとなった。しかし、内製長波長LEDの開発が進み、受信モジュールは2電源ではあったが高速光データリンク開発<sup>(10)~(13)</sup>に成功し、この製品/技術は80年

代後半に検討が進められたFDDI (Fiber Distributed Data Interface) の規格審議への参加、対応製品開発に大いに貢献した。また、当社のFDDIを始めとするLAN製品<sup>(14)</sup>にも搭載された。

筐体には社内製セラミックパッケージ<sup>(15)</sup>を用いて迅速な光データリンク開発に対応してもらった。写真4に外観形状と内部構造を示す。



写真4 FDDI用光データリンク外観(上)と受信部構造(下)  
GaAs-FETによる受信フロントエンド部(+12V)、ゲイン不足のためブートストラップ回路でPD容量キャンセルし、受信帯域確保SOP-ICは当社初の光通信用カスタムIC(-5V動作)

## 5. モールド型光データリンクの開発

セラミックパッケージを採用して光データリンクを開発してきたが、今一つ競合他社との差別化は難しかった。そのような状況の中、VICCという委員会で大阪/横浜地区横断で次世代光データリンクの構想を議論した。光データリンクを構成する全ての部品も検討対象として、約1年の検討期間を経ての結論は、樹脂モールド技術を適用した光データリンク開発であった。シリコンIC等の電子デバイスは樹脂モールドパッケージが標準であるが、シリコンICと比べて、素子としての完成度の低い光デバイスをモールドパッケージに入れようと、また精密部品である光コネクタスリーブをもモールドパッケージに入れようというチャレンジングな目標であった。もっとも光デバイスを直接モールドするわけでは無く適切なパッケージに搭載し、TOSA/ROSA構造にしてモールドしようというコンセプトである。この技術は結局当社以外のメーカーは実現しなかったことから分かるように大変ユニークかつ、非常識な提案であった。

モールドパッケージングのアピールポイントは、ネジと半田付けが無い高信頼性で光データリンクメーカーにとってもユーザにとっても量産性に優れた光データリンクの実現

であった。また、従来の光データリンクは基板にリフロー半田し水洗浄をすることは不可能であり、手間のかかる手実装の工程が必要であった。これをモールド構造にすることによって、一般の電子部品と同様にリフロー半田し水洗浄し、自動実装化が可能になることをユーザメリットとしてアピールした。

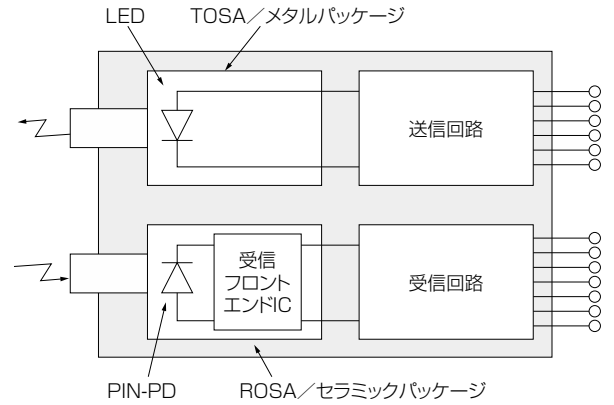
このモジュールはスーパースミリンク（Super Sumi-Link™：SSL）と命名したが、VICC出席での新幹線ビューフェで話題の新製品アサヒスーパードライを飲みながら名付けたものである。

VICCの方針を受け、88年からモールド型光データリンク開発を開始した。光データリンク仕様は市場が立上りつつあったFDDI対応とした。

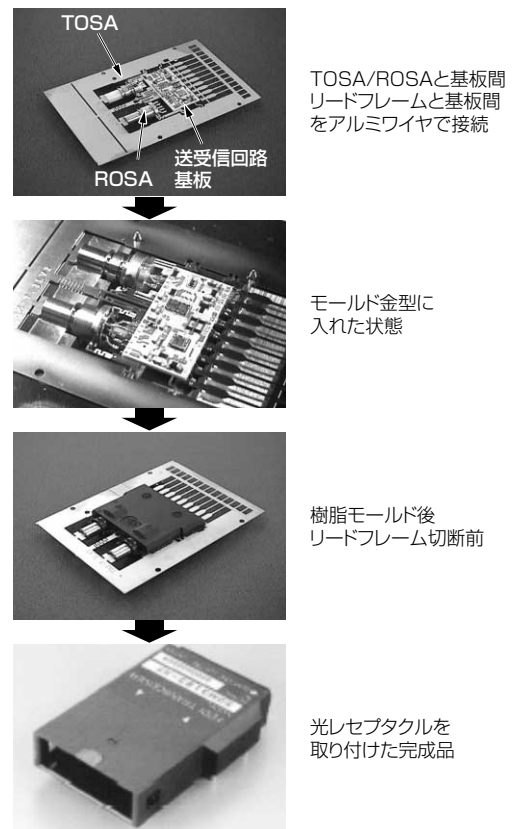
この開発ではモールドパッケージングの技術開発に留まらず、モールド構造に適したコンパクトな電子回路にするために送信／受信用IC、光デバイス用パッケージの開発も平行して行う必要があった。その他の部品も根本的な見直しを迫られ、結局LEDチップ以外は全て新規設計となる大プロジェクトとなり、IC設計／回路設計チームと機構設計チームとのコンカレント技術開発を進めた。この開発には、**図5**に示すようにROSAには伊丹のセラミックパッケージ、TOSAに銅タングステンパッケージ、大阪のLED、PDの開発等も同時に進める必要があり、各部門の全面的な協力を得て開発を進めた。夫々に開発課題がある上に抜本的かつ前例の無い設計変更であり、信頼性確認には万全の注意を払った。部分的な試作段階で少量のサンプルであっても、ヒートサイクル、湿熱試験、振動試験等を実施し、不具合を早く発見することに努めた。例えば通常のもールドICと比べて非常に大きいサイズのモールドパッケージであるためにストレスも大きく、パッケージクラックを回避しながら内部基板のサイズを最適化する必要があり、強度計算と試作を繰り返してサイズを決定した。

最後に残った大きな課題はTOSA/ROSAと回路基板を接続する方式であった。これには様々な要件を考慮して、太物アルミワイヤボンディングが最適であるとの結論を得ていた。太物アルミワイヤボンディングは車載機器やパワーデバイスに使われる技術であり、その分野では確立された技術であるが、TOSA/ROSAのひ弱なりードピンへのボンディング条件確立、ボンディング後モールド金型に入れるまでの工程でアルミワイヤにストレスがかかることが不可避であることなどから、充分な特性を得られるまでにワイヤ径、ワイヤ特性、ボンディング条件／設備／治具等で試作を重ねて適切な条件を割り出した。このボンディング技術は一般的な電子デバイスへのワイヤボンディングと比べて歩留りとしては完全とは言えず、いくらかの不良（断線不良）を工程内で発生する状態で製品化されたが、一連の工程が非常に強いスクリーニング試験となり、製品として完成したものは市場での不良は発生しなかった。それまでの光リンクはネジ止め、手半田作業等での組立に起因する

クレームが根絶出来なかったが、モールド構造の光リンクは従来構造と比べて桁違いの高信頼性を示した。現在に至るまで当社の光データリンクは高い信頼性で市場の評価を得ているが、その先駆けとなる製品であった。光データリンクの組立工程を**図6**に示す。



**図5** モールド型FDDI光データリンクブロックダイアグラム



**図6** モールド型光データリンク組立工程

この光データリンクの電子回路部としては、LED駆動用IC、受信フロントエンド用IC（TIA）、受信リミッティング用2R-IC（Reshaping Regenerating）を開発した。ICのプロセスは全てシリコンバイポーラである。高速ICとしては社内でもGaAsプロセスの実用化が進み始めていたが<sup>(16)</sup>、<sup>(17)</sup>、光データリンク用途には時期尚早と判断した。IC設計シミュレーションも光データリンク開発グループが行い、ICを使う立場で最適な機能を実現する設計に努めた。ICメーカは国内の大手電機メーカ2社を選んだ。

受信フロントエンド用ICは図7に示すような構成であり、現在の技術から見るとノイズ耐性にやや問題ある方式ではあるが、筆者の知る限り世界初の差動出力段を持つ光受信フロントエンド用ICである。これはモールドパッケージというノイズ耐性に関しては必ずしも最適では無い技術を補完する方式であった。その後、光データリンクの動作安定性の観点からノイズ耐性の改善が進められ、現在では他社製品でも光受信フロントエンド用ICはほとんど例外無く差動出力段を持つ構成になっている<sup>(18)</sup>、<sup>(19)</sup>。

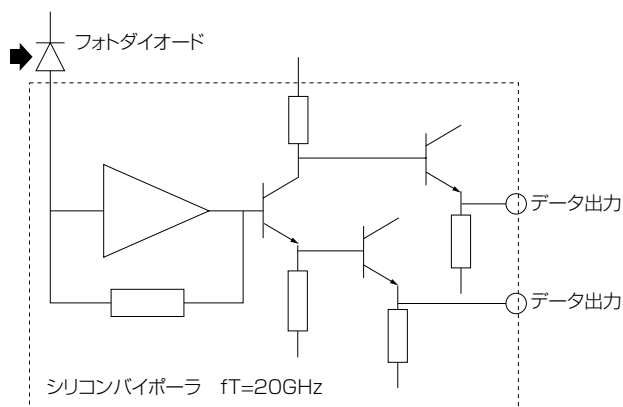


図7 受信フロントエンドIC（点線内）

このようにして、開発したFDDI用モールド型光データリンク（SSL）であるが<sup>(20)</sup>、<sup>(21)</sup>、90年3月の製品化とほぼ同時期に欧米の最強と言える競合メーカ4社がピン互換品を発表した。SSLの販促キャラバンでは非常に良い反応を得られていたが、欧米の巨大情報通信/エレクトロニクスメーカ連合軍と無名のメーカの比較ではユーザーの実使用での判断は連合軍に軍配が挙がることになってしまい、SSLのメリットを重要視する一部のユーザー以外ではほとんど採用されないという事態となった。乾坤一擲の意気込みで開発した光データリンクであり頭を抱えることになったが、困った時には妙案が見つかるものである。4社連合の基板実装ピン配置は2列ピンであり、当社SSLはそれに直交する向きで1列ピンであるが、図8のように双方が搭載出来るH型のプリント基板配線パターンを見出した。早速、

ユーザにHパターンで基板配線をすれば、当社の光データリンクを使用出来、万が一の不具合の場合は4社連合品も使えることをアピールした。その結果、Hパターンで当社品を使用するユーザが徐々に増え、また当社品の供給不安も杞憂に過ぎないことがユーザでも分ってきた。更にHパターンを止めて1列ピンパターンにすれば、部品実装面積が増えてより高機能小型のボード設計が出来るので1列ピンパターンにするというユーザも現れ始めた。これに相前後して、4社連合の1社がSSLのOEM販売することになり、結果的に当社はFDDI用光データリンクでシェアトップとなり、ピン配置は1列ピンが大半を占めることとなった。

引き続き、やや大型のFDDI用光コネクタに代わりSC2芯光コネクタを使用した次世代の小型モジュールの開

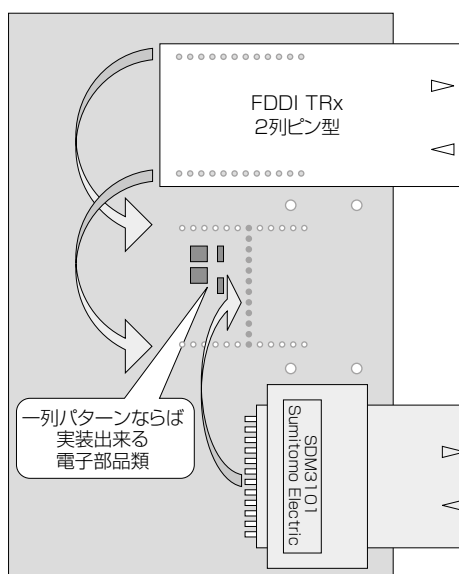


図8 FDDI基板Hパターン実装図

FDDI  
125Mb/s  
13ピン一列  
43×63×12mm  
(32cc)



SC2芯型  
9ピン一列  
25×38×9.5mm  
(9cc)

写真5 一列ピン型光データリンクの小形化

発の動きが持ち上がったが、今度は有力メーカ各社共に当初より一列ピンで開発を進めた。写真5にFDDI用光データリンクとSC2芯型光データリンク<sup>(22)、(23)</sup>を示す。

## 6. 公衆通信用光データリンク

91年にFDDI用モールド型光データリンクの開発を終了し事業部移管した後の次なる光データリンク開発ターゲットは、80年代末にSDH/ソネット規格<sup>(24)、(25)</sup>がITU（国際電気通信連合）により制定されたことから公衆通信用モジュールに定めた。公衆通信用モジュールは従来、伝送機器メーカーが個々の仕様に基づいて内製している場合がほとんどであったが、伝送規格の標準化により汎用品として取引されることになると見込んでのことである。規格概要を表1に示す。LAN用光データリンクメーカーが信頼性/仕様が厳しい公衆通信用モジュールを開発して勝ち目はあるのかという疑問を残しながらも、モールドパッケージという目に見える特徴を最大限に活かせば道は開けると信じて開発を進めた。モールドパッケージのアドバンテージを最大限に活かすために、形状は汎用電子デバイスと同一の24ピンのフットプリント（ピン配置、サイズ）とした。写真6に外観を示す。このサイズは当時の同機能のモジュールと比べて、1/4から1/5のサイズである<sup>(26)、(27)</sup>。その当時の公衆通信用光データリンクの受信にはクロック再生機能が必須であり、24ピンモールドパッケージという特徴を活かして製品化を完遂するためには、小型化のためにリタイミング機能を持つ1チップの受信3R-IC（Reshaping Retiming Regenerating）の開発が必要不可欠であった。IC開発は国内の大手電子機器メーカーと共同で開発することとし、先方

との技術検討を繰り返して155Mb/s（STM-1/OC-3）、622Mb/s（STM-4/OC-12）の両方で使うことが出来、無調整で動作する3R-ICの開発を決定した。

リタイミング機能を実現するためには、受信データを適切なタイミングでクロック信号で打ち抜く必要があり、タイミングのバラツキが大きく従来技術では一つ一つ製品毎に調整していた。モールドパッケージではこのような調整が出来ずリタイミングを実現するには、無調整化が必須であった。そのために、IC設計ではデータ信号とクロック信号の遅延時間の温度依存性も含めて詳細にシミュレーション、設計を繰り返してバラツキも含めて仕様を満足する設計条件を見出してIC開発を進めた。



写真6 モールドSDH光データリンク

細心の注意を払って設計をしたものの悪い予想は当り、リタイミングクロックパルス発生回路のノイズが大きく、動作不安定に陥り開発は難航した。結果的にはクロックパルス発生回路の電源ラインにインダクタを入れ他の回路部との電氣的アイソレーションを取り、さらに電源パスコンは入れないという常識に反する回路構成で安定動作を得た。このICは当社仕様に基づき開発を進め、ICメーカーも外販可能（オープンカスタム）という条件であったが、結果的には他社は使いこなすことは無く、当社のSDH用光データリンクの競争力の維持に貢献した。このICを使用した受信モジュールのブロックダイアグラムと内部構造を図9に示す。

リタイミング素子には、その当時最も安定した性能が期待出来るSAWフィルタ方式を採用した。SAWデバイスは差動入出力でモールドの熱履歴に耐えられるものを外部メーカーと共同開発した。

また、受信フロントエンド用ICには、当初はバイポーラデバイスを検討していたがダイナミックレンジの問題を克服出来ず、デバイスとして飽和特性に優れるFETの採用が必須であり、社内製のGaAs-ICを採用した。ダイナミックレンジを広げるためのクリッピング機能も搭載したものである<sup>(28)、(29)</sup>。

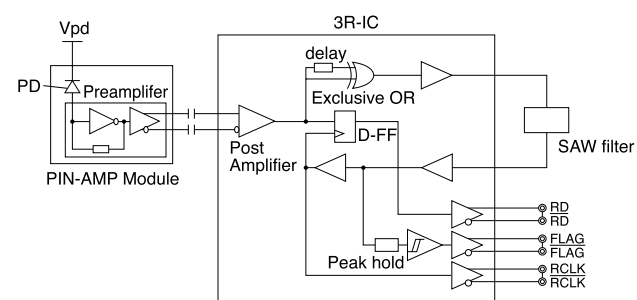
表1 代表的なSDH/ソネットの伝送仕様

|                       | STM-1<br>(155Mbps)  | STM-4<br>(622Mbps)  | STM-16<br>(2.4Gbps)  | STM-64<br>(10Gbps)   |
|-----------------------|---|---|--|--|
| 短距離<br>(Intra office) | 1.3 μm帯<br>2km<br>-15dBm<br>-23dBm<br>(FP-LD)<br>(PIN-PD)   | 1.3 μm帯<br>2km<br>-15dBm<br>-23dBm<br>(FP-LD)<br>(PIN-PD)   | 1.3 μm帯<br>2km<br>-10dBm<br>-18dBm<br>(FP-LD)<br>(PIN-PD)  | 1.3 μm帯<br>2km<br>-6dBm<br>-11dBm<br>(DFB-LD)<br>(PIN-PD)  |
| 中距離<br>(Short Haul)   | 1.3 μm帯<br>15km<br>-15dBm<br>-28dBm<br>(FP-LD)<br>(PIN-PD)  | 1.3 μm帯<br>15km<br>-15dBm<br>-28dBm<br>(FP-LD)<br>(PIN-PD)  | 1.3 μm帯<br>15km<br>-5dBm<br>-18dBm<br>(DFB-LD)<br>(PIN-PD) | 1.55 μm帯<br>40km<br>-1dBm<br>-13dBm<br>(EA-LD)<br>(PIN-PD) |
| 長距離<br>(Long Haul)    | 1.55 μm帯<br>80km<br>-5dBm<br>-34dBm<br>(DFB-LD)<br>(PIN-PD) | 1.55 μm帯<br>80km<br>-3dBm<br>-28dBm<br>(DFB-LD)<br>(PIN-PD) | 1.55 μm帯<br>80km<br>-2dBm<br>-28dBm<br>(DFB-LD)<br>(APD)   | 1.55 μm帯<br>80km<br>-2dBm<br>-26dBm<br>(EA-LD)<br>(APD)    |

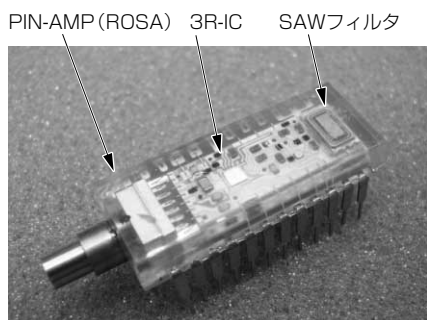
上から順に、波長、伝送距離、光送信出力、受信感度、推奨発光素子、推奨受光素子

送信モジュールはレーザダイオード、レーザ駆動IC、光出力制御ICが主要部品であるが、レーザ駆動ICには内製GaAs-ICを採用した。シリコンバイポーラICに比べて、レーザ出力波形の安定性に一日の長があったためである<sup>(30)</sup>。

このSDH用光データリンク開発もモールドパッケージ、IC開発のコンカレント開発であったが、約2年の期間で当初目標の性能の光データリンク開発<sup>(31)</sup>、<sup>(32)</sup>に成功した。この光データリンクは競合他社の金属筐体の光データリンク<sup>(21)</sup>、<sup>(22)</sup>とは一線を画す電子デバイスをイメージさせる外観でリタイミング機能も含めてSDH/ソネット規格を満足するモジュールであり、国内外伝送機器メーカーで幅広く採用され、当社光データリンクの公衆通信分野への進出の先鞭を付けるモジュールとなった。



(a) 受信モジュールブロックダイアグラム



(b) 内部構造

図9 3R-ICを使用した光データリンク

## 7. 公衆信用光データリンクの高速化開発

155Mb/s, 622Mb/sのSDH/ソネット用光データリンクの開発と製品化は順調に進み、95年春に事業部移管し、次の開発は2.5Gb/sに定めた。このクラスのモジュールはPCM画像伝送機器対応等のカスタム用としての開発は進めていたが<sup>(33)~(35)</sup>、汎用製品としての開発である。問題はマーケットは間違い無く存在するが、どのマーケットをどういう技術で狙うかということである。結論としては、送信モジュールはSDH/ソネットですった24ピンモールドパッケージとし、受信モジュールはさすがに24ピンでは実現出

来ないと判断し、金属パッケージを選択した。目標仕様は、小型化、低消費電流化を狙った中短距離対応とした(表1、STM-16参照)。完成品の外観を写真7に、消費電力とサイズ(容積)を図10に示す。サイズは送受信モジュール合わせて18cc<sup>(36)</sup>と小型化開発<sup>(37)~(40)</sup>が進んでいる中でも最小容積を狙った。



写真7 2.5Gb/s光データリンク

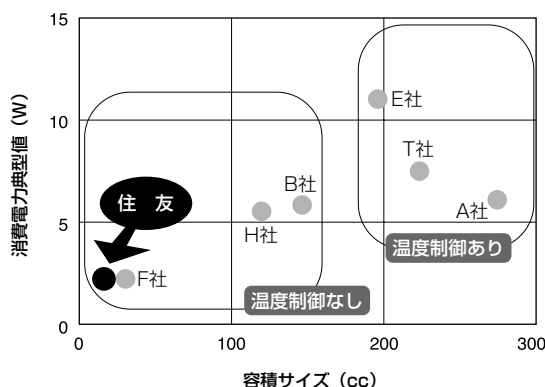


図10 2.5Gb/s光データリンクサイズ・消費電力比較

送信用では、レーザドライバ用に内製のGaAs-ICを新規開発した<sup>(41)</sup>。受信モジュールのリタイミング方式は155/622Mb/sSDHソネットの場合と同様にSAWフィルタ方式とし、当初は海外製のSAWフィルタを用いて量産を開始したが、内製のダイヤモンドSAWフィルタ<sup>(42)</sup>も平行して開発を進め、途中からこれに置き換えていった。ダイヤモンドSAWフィルタは温度特性に優れ、図11に示すように広温度範囲で良好な受信感度特性を示した。

受信用3R-ICにはSDH/ソネット用3R-ICを共同開発したICメーカーと共同開発した。今回は1チップ化は必須では無く、①受信データをクロック信号で打ち抜くタイミングには調整が必須であったこと、②155/622Mb/sSDHソネットの開発でクロックパルス発生回路のノイズの処理で苦しんだことから、クロックパルス発生回路とデータ再生回路



を別々にする2チップ構成でリタイミング機能を実現する方式とした。また、タイミング調整にはICメーカーから提案のプログラマブル位相シフト回路を採用した。受信モジュールのブロックダイアグラムとチップ構成を図12に示す。2チップ間の回路配線長でクロックノイズを被るタイミングが変化することから、最適受信感度を得るためには配線長も詳細に調整する必要があった。これは調整可能な2チップ構成にしたことが幸いしたとも言えることであった。しかも、このICは初回設計で動作するという僥倖にも恵まれ、96年秋にはサンプル出荷を果し順調に製品化を進めた<sup>(43),(44)</sup>。図13に、受信モジュールの特性例を示す。

そのような状況のなか、さる大手ユーザからファイバ波長分散の大きい1.55 $\mu\text{m}$ 帯を使った長距離モジュールの引き合いがあり、対応の可否を迫られた。その当時の長距離モジュールは送信側ではレーザをペルチェ素子を使って温度調整をしたものを用いるのが常識であり、無温調のレーザを使って長距離伝送をせよという無謀な要求であったが、後に引けない状況でもあり開発をすることとした。問題は広い温度範囲に渡って、レーザを駆動した時の波長変

動(チャープ)の抑制である。当時の技術ではレーザを温度調整するのが常識であるが、常識を捨てよということであった。この問題の解決には多くの知恵を絞ったが、①内製のDFBレーザの光出力が高く、チャープ特性が良かったこと<sup>(45)~(48)</sup>、②2.5Gb/s用に設計した内製GaAs-ICの波形特性が素直で、リングング無く立ち上がり時間も速いものに仕上がっていたこと、③モールド構造という、ベアチップ実装のドライバICとレーザチップ間の配線が短い長さで結線出来ていること、④モールド構造でありながら、パッケージの腹面に調整用抵抗チップを抱かせることで微調整をしたこと等、が相俟って80km伝送に耐える送信モジュールを完成させることが出来た。受信モジュールでは高感度化のためにアバランシェフォトダイオード(APD)を使う必要があり、精密な温度補償機能を持つバイアス回路が必須であったが、小型の回路を長距離化を見越して予め開発していた。またAPDには約80Vの高電圧が必要だが、小型のDC/DCモジュール開発を電源メーカーと進めており、これも含めて、サンプル出荷に成功し量産が始まった。しかし、量産の歩留りは思わしく無く受信モジュールで予想外の温度特性不良を頻発した。原因はバラツキ評価も行った上で中短距離用では問題なく動作したと思われたICの設計ミスが、波形ゆらぎの大きい長距離用で顕在化したこと

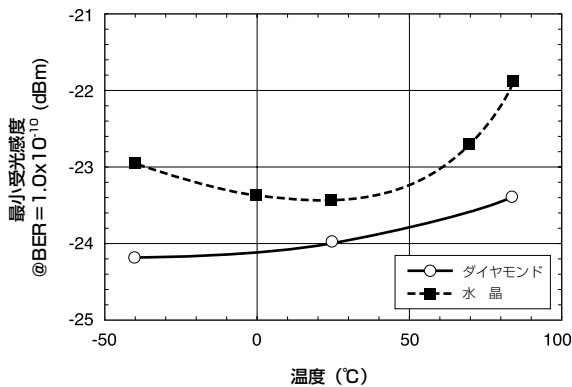


図11 2.5Gb/sモジュール最小受信感度の温度特性

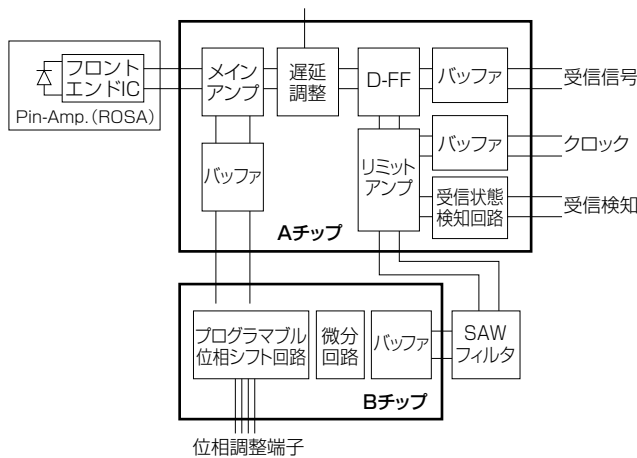
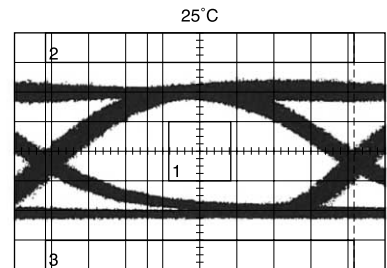


図12 2.5Gb/s受信モジュールブロックダイアグラム



(a) Optical Output Waveform (Filtered)

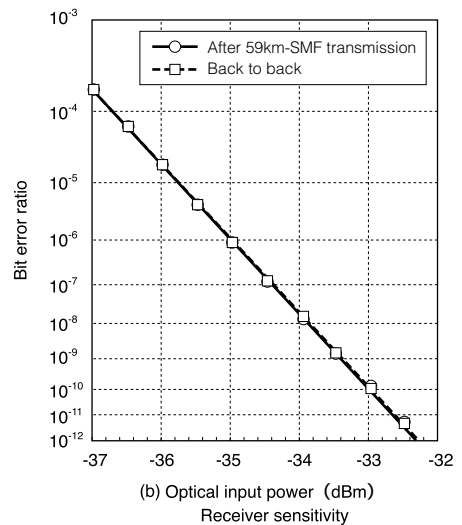


図13 2.5G光データリンク特性

であり、これを修正し順調な量産に入った。このモジュールは伝送機器メーカーに好評で光通信バブルの波にも乗り光データリンク事業も大きく発展したが、しばらく後にバブル崩壊を迎えることになる。

## 8. さらなる小型化・高速化・高機能化

2.5Gb/sの長距離通信用光データリンクの開発と相前後して起こったのが、小型化の動きである。5章で述べたようにSC2芯光コネクタを使った9ピン一列タイプが業界標準(Multi Source Agreement)となったが、更に小型のLC型光コネクタが開発されたことにより、光データリンクの幅も光コネクタ同等の13.6mm(0.55inch)にしようというものである。ここに至って、一列ピンは構造的に不可能になり、2列ピン構造の光データリンクの開発を進めることとなった。写真8に示すSFF(Small Form Factor)と言われる光データリンクである。これの開発に当っては、当初、光デバイスをも透明樹脂モールドする方式<sup>(49)</sup>で開発を始めたが、光デバイスと樹脂モールドとの長期信頼性の問題が顕在化し、電子回路部は基板上に実装し、従来と同様のTOSA、ROSAを使う方針とした。SFF<sup>(50)、(51)</sup>の代表的な



写真8 SFFとSC2芯型光データリンク  
SC2芯型光データリンクの幅が1インチであるのに対し、SFFトランシーバの幅は0.55インチと約半分のサイズになる。

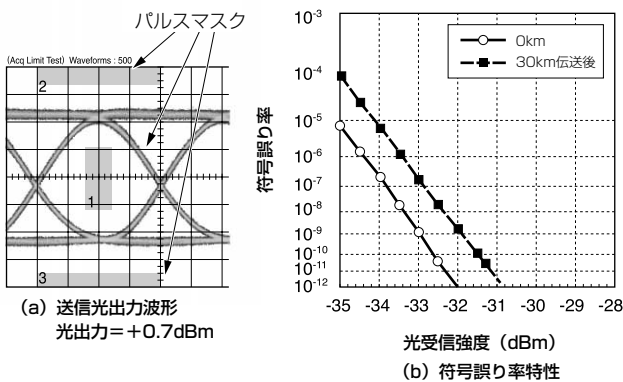


図14 長距離伝送用2.5Gb/sSFFの特性

特性を図14に示す。小型化されたが、良好な性能を保持している。このモジュール形状は更に発展していき、システム基板への半田付けを伴わない着脱可能なSFP(Small Formfactor Pluggable)<sup>(52)~(54)</sup>に発展していった。現在の2.5Gb/s以下の伝送速度の光データリンクの多くが公衆通信用途も含めてこの形状のものになっている。SFPは基本的にクロック再生機能(3R)を内蔵していないが、IC性能の向上、基板設計技術の向上で公衆通信用途においても3R機能は光データリンクに内蔵する必然性は無くなってきていた。また、SFPの種類、光送信状態、光受信状態等の状態監視信号をネットワーク制御側に伝えるためにSFPにはマイクロプロセッサもしくはそれに順ずる機能を持つICを内蔵することが基本となっている。

SFPの外観形状を写真9に示す。さらに、DWDM(Dense Wavelength Division Multiplex)方式の光データリンク<sup>(55)、(56)</sup>もレーザ温度安定化用のペルチェ素子の大幅な小型化、低消費電流化により、SFPで実現している<sup>(57)、(58)</sup>。DWDM用TOSAの概観、構造を図15に示す。

また、近年FTTH(Fiber To The Home)システム<sup>(59)</sup>対応等で、ファイバ1心での双方向通信が出来るBi-Directional機能が実用化されているが、この機能を内蔵したSFPも開発されている。(写真10参照)

SDH/ソネットの伝送速度規格では2.5Gb/sの上位規格は10Gb/sとなるが、1990年代末から、電気多重復号機能



写真9 SFP外観

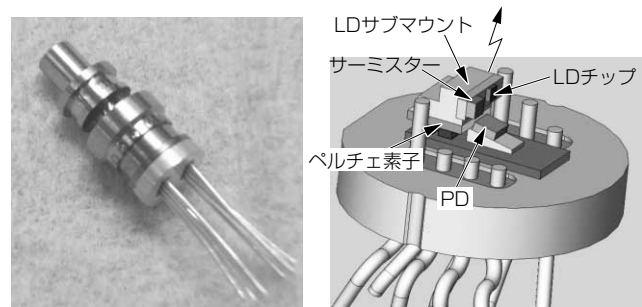


図15 SFP対応DWDM用TOSA(左)と内部実装図(右)

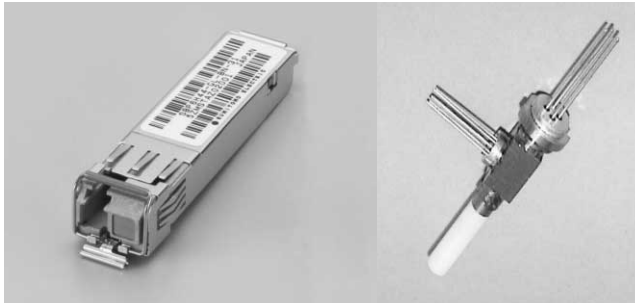


写真10 一芯双方向SFPとBOSA  
(Bi-directional Optical Sub-Assembly)

を内蔵した10Gb/s光データリンク<sup>(60)</sup>の需要が急増し、当社もこのモジュールの開発を始めた。更に小型化/低消費電力化を狙って、米国シリコンバレーに設立したICS (Innovation Core SEI) 社を軸に超小型のXFP (10G small Form-factor Pluggable)<sup>(61)~(63)</sup>の開発を進めた。この企画は当社/ICSの他、JDSU、Tyco等有力メーカ10社がファウンダーになり規格制定を進めたものである。現在では10G用光データリンクの主流になりつつある。ブロックダイアグラムを図16に示す。10Gb/sという高速伝送でありながら、システム基板との電気インタフェースはカードエッジコネクタ型になっているため、電気信号波形を整形する機能 (Signal Conditioner) を内蔵している。

10Gイーサネット用にはX2<sup>(64)、(65)</sup>が多く使われている。X2の電気入出力は3.125Gb/s×4レーンのパラレルインタフェース (XAUI) であり、X2内部で10.3125Gb/sのシリアル信号に変換し光通信をするという機能を持っている。XFP、X2の外観形状を写真11に示す。XFP、X2共に10Gb/sという高速モジュールでありながら小型化されており、伝送性能の確保、放熱技術、電磁放射ノイズの抑制には極めて高い技術力を必要とし、当社での開発においてもシミュレーションと試作実測を繰り返して所要の性能を確保している<sup>(66)</sup>。また、小型のモジュールでありながら、光ファイバの波長分散特性による伝送帯域不足を電子的に補償する機能 (Electronic Dispersion Compensation) を内蔵し

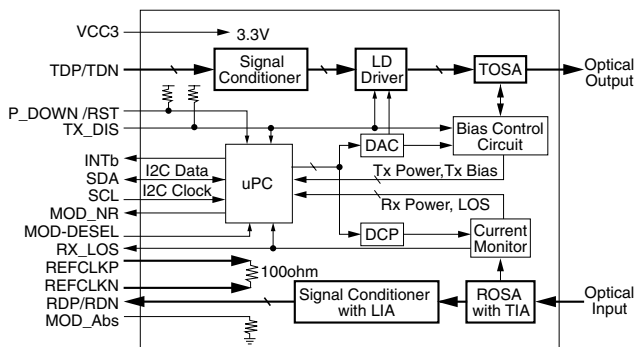


図16 XFP ブロックダイアグラム

たモジュールも開発されている<sup>(67)</sup>。ブロックダイアグラムを図17に示す。

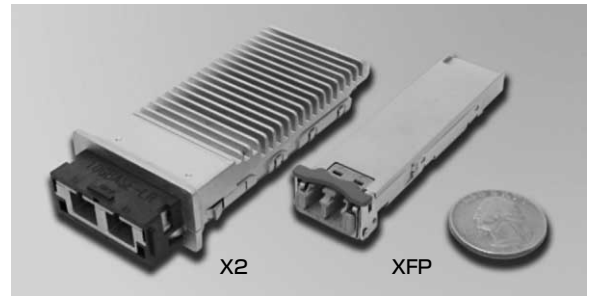


写真11 10Gb/s プラガブル光データリンク外観

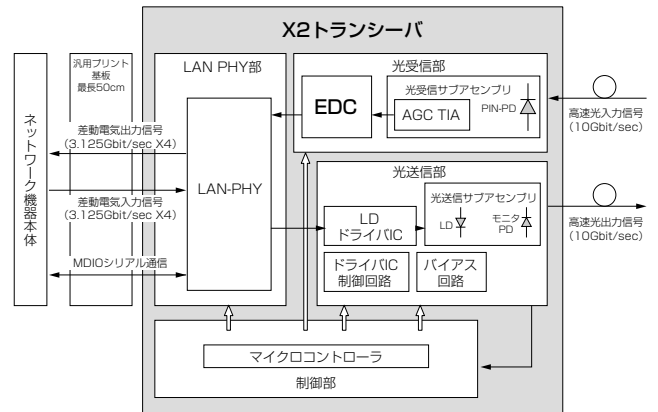


図17 ファイバ分散補償機能内蔵X2ブロックダイアグラム  
光受信部にEDC (Electronic Dispersion Compensator) を搭載している。

## 9. 今 後

光データリンクは伝送速度10Gb/sにまで高速化され、更にファイバの波長分散による伝送帯域制限を補償する機能までも内蔵した製品が開発されている。また、DWDMにおいても、200km以上にも及ぶ長距離伝送が可能な光データリンクがSFPの形状で実用化されている。これらの製品ではマイクロプロセッサを内蔵して、レーザの最適動作の制御、光レベル監視等の機能も装備しており、インテリジェント化が進んでいる。更なる高速化もIEEE802.3 Higher Speed Study Groupで審議されており、近い将来、40G、100G伝送用の光データリンクが開発されるであろう。40G、100G共、ファイバの波長分散、PMD (Polarization Mode Dispersion) 等の影響の問題があり、4波程度の波長多重技術を用いることが検討されており、これを内蔵した複合化高機能モジュールとなる。また、DWDMシステムでは、送信モジュールの波長を可変にしてネットワークを

フレキシブルなもの、保守性に優れたものにするという要求もある。インターネットに代表される情報化社会はますます高度化されると思われるが、その進展を支えるキーコンポーネントとして光データリンクは重要性を増していくであろう。また、更なる低消費電力化は地球温暖化対策等との関係で大きな開発課題になるだろう。そのためには、非常に低消費電力化が期待出来る表面発光レーザ (VCSEL) とその低消費電力駆動技術、最先端の高速電子デバイス技術を取り入れた低消費電力化を図ること等が重要となると思われる。

## 10. 結 言

光データリンク開発について記述したが、やはり、技術には旬があることを感じる。光データリンクに応用した技術は、短波長LED/長波長LED/長波長LDであったり、ハイブリッドICであったり、モールド技術であったり、専用アナログICもシリコンバイポーラ、CMOS、GaAs等であったりしたが、その時々で最先端でありながら実用可能な技術を選択して来た。光データリンクの機能も、以前の公衆通信用途ではクロック再生機能 (3R) が必須であったが、IC性能の向上、基板設計技術の向上で光データリンクに内蔵する必要は無くなった。その一方で10Gb/s伝送では、分散補償等の高度な機能を実現するために3R機能が光データリンクには必要となっている。また、以前はレーザトリミングによって性能ばらつきを補正していたが、現在では、内蔵したマイクロプロセッサによって極めて高精度に、調整されるようになっていく。これらの個々の技術全てが最先端技術というわけでは無いが、光データリンク開発にはそれを支える多くの旬の技術が必要である。

光データリンク開発は光伝送技術開発という先端技術の一部ではあるが、伝送システム技術者が光伝送固有のややこしい技術を意識すること無く、安心して使えるようにすることが最大の使命であると考え研究開発を進めてきた。

筆者は光データリンク事業はレストランと同じようなものだと光データリンクを担当する人達に言ってきた。すなわち、光デバイス、電子デバイス、電子部品、光学部品、機構部品等を上手に料理して、食べる人 (光データリンクユーザ) においしい料理として提供することが必要ということである。そのためには、通常では入手出来ない良質の食材 (光デバイス等) を直営牧場で生産する必要もあるだろうし、契約農場で特製の食材 (カスタムIC等) を作ってもらい、門外不出のレシピで料理することで、評判のレストランになることが事業として重要であり、ユーザ (光伝送システムメーカー) に応えることである。少なくともユーザの家庭料理よりおいしい料理である必要がある。さもなくば、ユーザが自ら種々の素材を調達して自炊をすることになる。実際、光伝送システムが実用化された当初は光

データリンクの専門メーカーはほとんど無く、光伝送部門が自前で光通信用モジュールを作っていた。当社は光デバイスを直営牧場で生産し、ユーザにはそれなりの評判のレストランとしていくつかの星をもらってきた。あるいは化合物デバイス開発が光データリンク開発に先行していたことから牧場が直営レストランを営んでいるとも言えるが。いずれにせよ、このレストランは今後も素材の鮮度を見極める眼力、よりよい食材であるデバイスを開発していき、おいしく料理する腕を持ち続けて更なる発展をしていくと確信している。

・Ethernet (イーサネット) は富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

## 参 考 文 献

- (1) 西江、「学生のページ/光データリンクモジュール」、電子情報通信学会誌、p.1267 (1998)
- (2) 御神村、「学生のページ/光リンクモジュールの最近の技術動向」、電子情報通信学会誌、p.133 (2003)
- (3) 西江他、「第2部 光アクセス通信用デバイスとその応用/第2節 光LAN、光・マイクロ波半導体応用技術」、(株)サイエンスフォーラム
- (4) S.Yajima et al : Labolink, "An Optically Linked Laboratory Computer Network", COMPUTER magazine Nov.1977 P52-P59
- (5) 中原他、「光映像情報システム」、住友電気、第114号、昭和54年2月 P.65
- (6) 奥田他、「光ファイバ通信用高輝度発光ダイオード」住友電気、第117号、(昭和55年9月) P.64
- (7) 住友電工 PCF/スミリンクカタログ  
[http://www.sei.co.jp/h\\_pcf/j/index.html](http://www.sei.co.jp/h_pcf/j/index.html)
- (8) 奥田他、「高速応答型InGaAsP/InP DH LED ( $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ )」、第126号 住友電気 (昭和60年3月)
- (9) 藤谷他、「マイクロレンズキャップ付LED」、第128号、住友電気 (昭和61年3月) P.131
- (10) 浜口他、「FDDI用光トランシーバの諸特性」、住友電気、第136号 (1990年3月) P.81
- (11) 高田他、「高速ローカルエリアネットワーク用光データリンク」、第129号、住友電気 (昭和61年9月) P.37
- (12) 松下他、「125Mb/s光LAN用光送受信モジュール」、B-685 昭和63年電子情報通信学会春季大会
- (13) 林他、「低消費電力小型データリンク」、B-687、昭和63年電子情報通信学会春季大会
- (14) 堀井他、「マルチプロトコル対応FDDIバックボーンLANシステムの開発」、第143号 住友電気 (1993年3月) P.37
- (15) 大江、田中、「高速光通信時代を支えるパッケージ技術」、vol.84 No.9 電子情報通信学会誌 (2001年9月) P.639
- (16) 御神村他、「広ダイナミックレンジ型GaAs光受信用前置増幅器IC」、B-743、1990年電子情報通信学会秋季大会
- (17) 稲野他、「高速光受信器用・広帯域GaAs前置増幅器IC」、B-744 1990年電子情報通信学会秋季大会
- (18) 関口他、「雑音耐性に優れた光受信モジュール」、C-212、1996年電子情報通信学会総合大会
- (19) MAXIM社、「光ネットワークICカタログ」  
<http://japan.maxim-ic.com/>
- (20) 窪田他、「125Mbps光送受信器の諸特性」、B-740 1990年電子情報通信学会秋季大会

- (21) 林他、「プラスチックモールド型FDDI用光トランシーバ」、住友電気 第137号(1990年9月)P.64
- (22) 郷他、「ギガビットイーサネット用光リンクモジュール」、SEIテクニカルレビュー 第152号(1998年3月)P.36
- (23) Go, H. et al : "Low Power Consumption Molded Gigabit Fiberoptic Transceiver Module," 1998 Electronic Components and Technology Conference, pp. 1192-1198
- (24) ITU-T Recommendation G.957 : Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy
- (25) ITU-T Recommendation G.958 : Digital line systems based on the synchronous digital hierarchy for use on optical fibre cables
- (26) 速見他、「622Mb/s光受信モジュール」、B-723、1992年電子情報通信学会秋季大会
- (27) 菊池他、「156Mb/s長距離用光送受信モジュール」、B-721、1992年電子情報通信学会秋季大会
- (28) 稲野他、「622Mbps広ダイナミックレンジ光受信器」、B-642、1991年電子情報通信学会秋季大会
- (29) 西山他、「3.3V動作SDH光受信モジュール用GaAsプリアンプIC」、B-10-131、1997年電子情報通信学会総合大会
- (30) 中村他、「非対称高周波特性LDドライバGaAsIC」、B-657、1991年電子情報通信学会秋季大会
- (31) 藤村他、「3.3V動作SDH622Mb/s光送信モジュール」、B-10-129、1997年電子情報通信学会総合大会
- (32) 西山他、「3.3V動作SDH156/622Mb/s3R光受信モジュール」、B-10-130、1997年電子情報通信学会総合大会
- (33) 高橋他、「1.2Gb/s光送受信機の開発」、B-645、1991年電子情報通信学会秋季大会
- (34) 岩館他、「2.5Gbps光送受信機の開発」、B-988、1992年電子情報通信学会春季大会
- (35) 上坂他、「2.5Gb/s伝送用小型PIN-Amp.モジュール」、B-989、1992年電子情報通信学会春季大会
- (36) 津村他、「2.5Gb/s用光リンクモジュール」、SEIテクニカルレビュー 第153号(1998年9月)P.20
- (37) 財津他、「超小型2.4Gb/s光送信モジュールの開発」、B-1056、1996年電子情報通信学会通信ソサエティ大会
- (38) 葛上他、「小型化2.4Gb/s光送信モジュール」、B-1057、1996年電子情報通信学会通信ソサエティ大会
- (39) 安田他、「小型化2.4Gb/s光受信モジュール」、B-1058、1996年電子情報通信学会通信ソサエティ大会
- (40) 早坂他、「超小型化2.4Gb/s光受信モジュールの開発」、B-1059、1996年電子情報通信学会通信ソサエティ大会
- (41) 津村他、「2.4Gb/s動作小型光送信モジュール」、B-10-135、1997年電子情報通信学会総合大会
- (42) 中幡他、「2.5Gbps光通信用ダイヤSAWフィルタ」、SEIテクニカルレビュー 第153号(1998年9月)P.25
- (43) 高橋他、「小型2.4Gb/s3R光受信モジュール」、B-10-136、1997年電子情報通信学会総合大会
- (44) 柏谷他、「マルチビットレート対応光受信モジュール」、B-10-117、1999年電子情報通信学会通信ソサエティ大会、2R、2.5Gb/sリンク
- (45) 林他、「歪み量子井戸レーザ」Vol.91、No.320、p37、信学技報(1991)
- (46) T. Nakabayashi, et al : Uncooled DFB laser modules operating with low distortion over a wide temperature range for return paths of CATV network systems OFC (1996)
- (47) Atsushi Matsumura, et al : Wide Temperature (-40℃~95℃) Operation of Uncooled 1610 nm DFB Laser for CWDM Application OFC (2005)
- (48) 松村他、「CWDM用DFBレーザの開発」SEIテクニカルレビュー 第169号(2006年7月)P.21
- (49) Tonai, I. et al : "Long Wavelength Transparent Epoxy Mold Optical Data Link", 1998 Electronic Components and Technology Conference, pp. 1199-1205.
- (50) 佐藤他、「2.5Gb/s長距離用SFF光トランシーバモジュール」、SEIテクニカルレビュー 第161号(2002年9月)P.15
- (51) Kurashima, H et al : "Manufacturing Technique of SFF transceiver" 1999 Electronic Components and Technology Conference
- (52) 沖他、「2.5Gb/s動作SFP光トランシーバの開発」、B-10-52、2001年電子情報通信学会総合大会
- (53) 「RoHS対応小型プラグブル光トランシーバ(SFP)の開発」、SEIテクニカルレビュー 第169号(2006年7月)P.27
- (54) Tanaka, K. et al : "SDH/SONET Multi-rate SFP Module with Gain Selectable Transimpedance Amplifier and Extinction Ratio Control Circuit" 2007 Electric Components and Technology Conference
- (55) 村田他、「DWDM用2.5Gb/s光送信モジュール」、B-10-154、2000年電子情報通信学会総合大会
- (56) 米田他、「2.5Gb/s超小型波長可変光送信モジュールの開発」、SEIテクニカルレビュー 第161号(2002年9月)P.23
- (57) 前田他、「DWDM対応SFP型光トランシーバの開発」、SEIテクニカルレビュー 第168号(2006年3月)P.61
- (58) Ichino, M. et al : "Small Form Factor Pluggable Optical Transceiver Module with Extremely Low Power Consumption for Dense Wavelength Division Multiplexing Applications" 2005 Electric Components and Technology Conference, pp. 1044-1049
- (59) 辻他、「GE-PCN装置用光IFの開発」、SEIテクニカルレビュー 第164号(2004年3月)P.51
- (60) 松元他、「長距離版10Gbpsトランスポンダモジュールの開発」、SEIテクニカルレビュー 第161号(2002年9月)P.10
- (61) XFP Promoters, (10 Gigabit Small Form Factor Pluggable Module) XFP Revision 4.1, 2005
- (62) 日高他、「中距離版10GbpsXFPトランシーバの開発」、SEIテクニカルレビュー 第165号(2004年9月)P.48
- (63) 倉島他、「10Gbpsプラグブル光トランシーバ開発におけるシミュレーション技術」、SEIテクニカルレビュー 第171号(2007年7月)P.14
- (64) X2 Promoters, (A Cooperation Agreement for a Small Versatile 10 Gigabit Transceiver) X2 Issue 2.0b, 2005
- (65) 船田他、「10 Gigabit Ethernet用X2型光トランシーバの開発」、SEIテクニカルレビュー 第168号 P.55
- (66) Oki, K. et al : "The Design Challenge with the Predictable Analysis of the Heat Dissipation and the Electro magnetic Radiation for 10Gbps Pluggable Optical Transceivers" 2006 Electronics Components and Technology Conference, pp. 1567-1572
- (67) 稲野他、「FDDIマルチモードファイバー対応10GBASE-LRM用X2光トランシーバの開発」、第SEIテクニカルレビュー 172号(2008年1月)P.140

---

執筆者

西江 光昭

フェロー  
材料技術研究開発本部 技師長  
解析技術研究 センター長

---