光バックプレーン技術

茨木 修*

Technology Trends of Optical Backplane Research and Development

Osamu IBARAGI*

* 社団法人エレクトロニクス実装学会 (〒167-0042 東京都杉並区西荻北3-12-2)

* Japan Institute of Electronics Packaging (3-12-2 Nishiogikita, Suginami-ku Tokyo 167-0042)

1. はじめに

ブロードバンドサービスを提供する情報通信装置は、その処理能力を向上させることがますます望まれている。ネットワークの光伝送により情報伝送能力は大幅に向上しているが、実際に利用できる能力はその数分の1しか利用できない場合が多い。その主因は、サーバやルータの処理能力にあるといわれている。このような大容量のサーバやルータのバックプレーンは主に電気伝送を用いており、この電気伝送の速度、並列伝送数が物理的限界に近づいていることが原因の一つある。特に並列伝送数については数千ピンの電気コネクタの挿抜が困難となっている。そこで、1本の信号線の速度を桁違いに高速化できる光バックプレーンを用い、装置内のドーターボード間に光伝送を導入して大幅な性能を向上することが期待されている。

このため、図1に示すように、ボード間信号伝送速度を1Gbps以上とするには光バックプレーン技術が必須であるとして、1990年代から研究開発が進められてきた。しかし、その後、電気伝送においても高速伝送化技術開発が進められた¹⁾。伝送方式を送受の1:1対向伝送を採用し、送信側でのプレエンファシス回路、受信側でのイコライザ回路の採用によって、現在では、XAUI規格(3.125Gbps×4ch)まで電気伝送できるバックプレーンが商用化されている。電気伝送はさらに高速化対応も進められており、デファクトスタンダードの団体であるOIF (Optical Internetworking Forum)では、11Gbps/ch伝送方式を標準化している。また、技術的には25Gbps/ch程度まで電気伝送が可能として研究開発が進められている。

今のところXAUI程度速度領域までは、コストパフォーマンスおよび保守を含めて使用実績の観点からは、現状で

図1. バックプレーンの高速化動向

図2. 光伝送の適用に向けたロードマップ

は電気伝送が優位となっている。しかし、10 Gbps/ch以上の電気バックプレーンの商用化は難しいともいわれており、まだXAUI規格以上の電気バックプレーンは商用化まで至っていない。その理由は、高速伝送の安定性、消費電力増加およびコスト高が問題といわれている。具体的には、電気バックプレーンにおいて、千本を超える多数の並列配線を用いて、10 Gbps/ch以上で高速伝送できる配線板の製作が非常に難しくなり、このため大幅なコスト増という課題がある。また、プレエンファシス回路とイコライザ回路を形成するための占有面積がシリコンチップ上で大幅に増えることによって、LSIのコストおよび消費電力量が大幅に増大することも問題となる。これに対して、光バックプレーンは、光配線部は、速度が100 Gbps/ch程度まではマルチモード伝送でも可能であり、実装も比較的容易であり、10 Gbps/ch以上の速度領域ではコスト面でも優位になると思われる。ただし、課題は光電変換モジュールの低コスト化、小型化である。

光伝送の適用についてのロードマップについて図2に示す。光伝送はすでに、ネットワークはもちろんのこと、データセンタ内のコンピュータ装置間通信にも導入されている。特に超大型高速のクラスターコンピュータでは、光ケーブル伝送で電気ケーブル接続の場合に起こる伝送速度およびケーブル量の問題を解決している。今後は、Board to Boardの領域、すなわち、光バックプレーンが実用的になってくると期待されている。その先の光伝送技術の導入については、Chip to Chip（光マルチモジュール）、さらに先にはシリコンフォトリソニクスに進展すると予想されている。光モジュールの低コスト化および光配線化の保守・修理技術開発の遅れから当初予想よりも進展が遅れてはいるものの、装置内の光化は進んできている。

このような状況を背景に、国内外での光バックプレーン

の研究開発が進められている。また、光バックプレーンの普及促進をするための標準化の検討も進められている。これらについては、以下に詳説する。

2. 光バックプレーンの分類

電子回路工業会(JPCA)の光回路実装標準化推進委員会や国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)のTC86/91 JWG9では光バックプレーンの標準化の検討を進めており、下記のように定義している。

「光バックプレーンとは、光コネクタを基板上に平行に並べ、これらのコネクタ間を相互光配線で接続する配線板である。これに別の複数の光配線板（この配線板をドーターボードまたはカードと称する）を垂直に実装して、ブックシェルフ型に構造を形成し、これらを相互光接続する。このように、光バックプレーンはドーターボードの相互光接続と機械的支持の機能を果たす。また、この光バックプレーンおよびドーターボードに電気コネクタを実装して、電気接続も同時に行う形態が一般的である。

また光バックプレーンの種類については、その実装構成から図3のように大きく3つに分類している。

(1) タイプ1：光配線と電気配線が同一バックプレーン基板内に形成された配線板を用い、片面にドーターボードを実装し、その背面を必要に応じてケーブルの接続（電気および光）に使うタイプ。

光バックプレーンの基板の具体的な例としては、光ファイバボードや光導波路シートと電気配線板を張り合わせた光電気複合配線板、あるいは、光導波路を内層に形成した光電気複合配線板を用いたものがある。コンパクトで電気配線板と同じような組立容易性、保守性を有することから多くの機関が開発を進めている。

(2) タイプ2：バックプレーン基板としては電気配線のみ形

図3. 実装構成からみた光バックプレーンの分類

表1. 光接続形態による光バックプレーンの分類と機能比較

光接続形態	バックプレーン光配線	光コネクタ	信号接続	光接続ピッチ	伝送能力	備考
裏面接続型 (タイプ2)	(光ケーブル)	MU, DS プラグイン	1:1	6.3 mm/ch (8心/50 mm)	光ファイバ伝送と同じ (~40 Gbps)	すでに実用
	(光ファイバボード)	MPO, HPX	1:1	2 mm/ch (8心/16 mm)	同上	すでに一部実用
45度ミラー 接続型 (タイプ1, 3)	光シートバス	45度ミラー LD/PD内蔵	N:N	10 mm/ch (12 ch/120 mm)	SCSIバス (6 ch×160 Mbps) ~2.5 Gbps/ch	接続ピッチ, 伝送能力は, 富士ゼロックス+アイ工業 + 本多通信 (2000年) 開発の例
	高分子光導波路	45度ミラー LD/PD内蔵	1:1	7.6 mm/ch	2.5 Gbps/ch	接続ピッチ, 伝送能力は, ダイムラクライスラー社 (1999年) 開発の例
光導波路直角 曲げ接続型 (タイプ1, 3)	高分子光導波路	導波路曲げ 直角コネクタ	1:1	5.7 mm/ch (10 ch/57 mm)	3 Gbps/ch ~144 ch	接続ピッチ, 伝送能力は, PoINTプロジェクト (1998年) 開発の例
	光ファイバボード	ファイバ曲げ 直角コネクタ	1:1	1 mm/ch (48心/50 mm)	光ファイバ伝送と同じ (~40 Gbps)	接続ピッチは, ASET (2000年), 3M社 (2003年) 開発の例

成し、光配線は基板とは独立させ、その基板を貫通して光接続する構造の光コネクタを用いたタイプ。片面にドーターボードを実装し、裏面にフレキシブル光配線板、または光ケーブルにより光接続する。

光配線部と電気配線板とを個別に形成し、電気配線板に穴を開け、ここに光コネクタ取付けて光接続をするため比較的簡易かつ信頼性の高い構成ができるので、すでに光ケーブルを用いボード当たり数本の光接続のものは商用化されている。

(3)タイプ3：バックプレーン基板を中心に置き、両面にドーターボードを実装して光接続するタイプ。バックプレーンには電気および光の配線が形成され、コネクタが実装されている。

これはバックプレーンが中心にあるので光ミッドプレー

ンともいわれる。

これは、タイプ1よりもさらに多くのドーターボード間の光接続を必要とする場合の大規模大容量装置向けの光バックプレーン構造である。

一方、光コネクタ接続形態から光バックプレーンについて実装密度、伝送能力を比較したものを表1に示す。前述したように、光ケーブルコネクタを用いた裏面接続型（タイプ2）のものはすでに実用的に使用されている。さらに光接続数の増加とコンパクト化を狙い、平面の光配線板を用いたもの（タイプ1および3）については、バックプレーンとドーターボードの光接続部を45度のミラー反射で光を直角に曲げて接続するもの（45度ミラー接続型）と、光導波路の曲げ損失が小さな範囲の曲率半径で直角に曲げたもの（導波路直角曲げ接続型）の開発が進められている。

3. 光バックプレーンの技術開発動向

これらの光バックプレーン実現に向けた主要な課題は、バックプレーン上の低損失な光導波路の実現および光モジュールを搭載したドーターボードとバックプレーンとを直角に接続する光直角コネクタの実現である。これらをいかに低損失でかつ低コストで光接続できるかが光バックプレーンの普及を左右するといっても過言ではない。

光バックプレーン部の光配線の全長は1m程度になることもあるため、できるだけ低損失な光配線板が要求される。光回路のロス配分設計にもよるが、光バックプレーンの光配線はできれば0.05 dB/cm以下の伝送損失が望まれ研究開発が進められている。光バックプレーンの光配線としては高分子光導波路あるいは光ファイバボードが用いられる。

高分子光導波路については、低損失化および製法の研究開発が進み、マルチモードではあるが、しばらくこれを光バックプレーンに適用する試みが始まった。高分子光導波路は、年々、低損失化の開発が進んでいるが、光バックプレーンでは30~60cm角程度の大型サイズを必要とするため、材料および製造方法が限定される。RIE (Reactive Ion Etching) 法などでの光導波路を形成することは困難であるため、感光性樹脂を用いたもの、または金型成型したものに限定される。

一方、光ファイバボードについては、長距離伝送と同様な極低損失の光ファイバを使いバックプレーン内は高々1m程度の伝送距離のため、伝送損失は無視できるという大きな利点を有する。ただし、高密度な光線パターンを形成することと、光コネクタまたは光デバイスとの接続部をいかにコンパクトに実現するかが研究開発の課題となっている。

光バックプレーン用直角接続コネクタについては、前述の表1に示すように45度ミラー接続型と光導波路直角曲げ接続型に分類される。

光バックプレーンと光ドーターボードの光接続部を、45度ミラーで光を反射させ直角に曲げて接続する型のものには、別部材のミラーを用いたタイプ（ダイムラクライスラー社開発のもの²⁾などが代表例）と光導波路の先端を45度にカットして全反射を用いたタイプ（富士ゼロックス社等が開発した光シートバス³⁾などが代表例）がある。直角接続部分は、コンパクトであるが、いずれもコネクタ内でレンズを用いて集光して接続し、その直後に光電変換モジュールが内蔵されている。このため、コネクタのサイズが大きくなるので、コネクタを含めた光接続構造を高密度に実現することと接続損失を低減することが課題である。

一方、曲げ損失が小さな範囲の曲率半径で緩やかに光導波路を直角に曲げてからコネクタ接続する直角曲げ接続型については、コネクタ接続部は、光ファイバ用のコネクタ構造が適用でき、安定で低損失な光接続ができる利点をもつ。ただし、直角曲げ部をコンパクトに実現することが課

題である。光導波路は急角度で（曲率半径が小さく）曲げると伝送損失が大幅に増加する。しかし曲率半径をある範囲以上に保つようにすれば、その曲げ損失は無視できる。例えば、通信用光ファイバでも曲率半径15mmまでは0.1 dB以下の曲げ損失であり、さらに光導波路のコアとクラッドの屈折率差比(Δ)を大きくすることにより、曲率半径5mm程度まで小さくしても損失を無視でき、ドーターボードの実装ピッチ10mm程度まで対応できるようになる。

このように、光バックプレーンを実現する光配線板および光コネクタの開発が進んでいるが、光ドーターボードの挿抜の際の光接続部の清掃および、接続部が一部破損した場合の補修などの対策も含めた技術開発が求められている。

以下に具体的な光バックプレーンの開発例を紹介する。

3.1 ファイバボードを用いた光バックプレーン

本格的なBoard to Boardの光バックプレーンとして実用的といわれているのが光ファイバボードと直角曲げ光コネクタを用いた構成のものである。これは、まず、超先端電子技術開発機構 (ASET: Association of Super-Advanced Electronics Technologies) の超高密度電子SIプロジェクト (1999年~2004年) で基本構成が開発⁴⁾され、さらにこの技術を基に、産総研の産官研究連携体のHyperSI (2004年~2007年) で改良研究⁵⁾が進められた。さらにこの構造を基本とした光バックプレーンをJPCA標準規格^{6)~8)}とし、さらにIEC国際標準規格化作業も進められている。

光ファイバボードとは、光ファイバでフレキシブルフィルム上に所望の光配線パターンを描いて貼り付けた構造の光配線板である⁷⁾。これに用いられている光ファイバは長距離伝送と同じもので1dB/km以下の極低損失のため1m程度と短い光バックプレーン上の直線配線の伝送損失は無視できる。曲げ配線部についても、光ファイバの曲率半径と損失増の例を図4に示すように、シングルモードファイバ（屈折率差(Δ)=0.3%, コア径10 μ m, クラッド径125 μ m)では曲率半径を10mm以上、マルチモードファイバ(Δ =1%, コア径50 μ m, クラッド125 μ m)では20mm以上とすれば損失増加は0.1 dB以下とできる。屈折率差を大

図4. 光ファイバの曲率半径と損失

きくすることにより光をコア内に閉じ込める効果が増し、配線パタンの曲率半径をさらに小さくしても、光配線部の損失は無視できる範囲となる。そこで $\Delta=1.9\%$ とし、光ファイバの曲げ応力を緩和するためにガラスのクラッド径を $80\mu\text{m}$ （コア径は $50\mu\text{m}$ ）とし、被覆の樹脂層と合わせて外径 $125\mu\text{m}$ とする細径高 Δ ファイバが、HyperSIで開発された⁹⁾。この光ファイバを用いた光ファイバボードは、曲率半径を5mm程度まで曲げても損失が無視できる。また細線化することにより曲げ応力を軽減できるので、ファイバの曲げに対する信頼性も確保して、 $125\mu\text{m}$ ピッチ高密度配線の光ファイバボードが実現できた。また、この細径高 Δ ファイバは、被覆樹脂層の厚さを正確にコントロールして、被覆を除去せずに $125\mu\text{m}$ 穴径MTフェルールに直接接続できる構造として、MTフェルールへの取付けの簡易化も図っている。

一方バックプレーンとドーターボードを光直角接続する光コネクタとして、光ファイバボードを曲げて接続する構成のものが開発された。この詳細な構成は、図5に示すように、バックプレーン部のファイバボードの端部を損失が問題とならない範囲の曲率半径で曲げ、バックプレーンに垂直方向に光路を変換し、先端にMTフェルールを付けて、コネクタハウジングに収容する構造である。

同様にボード側についても光ファイバボードの先端にMTフェルールを付け、コネクタハウジングに収容する。ただし、バックプレーン側コネクタとボード側コネクタが嵌合する時、突合する各フェルール間隙にばらつきがあるので、最後のMTフェルールが突合するまで、先に突合したフェルールはそのままの状態でも動できる構造（これをセルロック・フロート構造と呼ぶ）としている。

ASETでは、バックプレーン側コネクタ内のMTフェルールがフロートする構造として、ドーターボード側のコネクタが大きくなるのを避けた構造を採用した^{10),11)}。HyperSIでは、前述の細径高 Δ ファイバを開発して、曲率半径が小さくできるようになったので、ドーターボード側コネクタ側のMTフェルールがフロートする構造としてコネクタを小型化して、ドーターボードのバックプレーン実装ピッチを20mmまで高密度化できる構造とした⁹⁾（図6参照）。

またコネクタ部は高密度に多数の配線を接続することが要求される。MTフェルールの多心化としては穴を2~6段としたものがあるが、これを光ファイバボードに取付ける場合、特殊な治具を必要とし、また組立歩留まりが低下する。そこで、MTフェルールについても光ファイバ心線径 $125\mu\text{m}$ と同じピッチで、1列で16心および24心の高密度MTフェルールをHyperSIで開発した（図7参照）。直角光コネクタとしては、この高密度MTフェルールを1つのハウジング内に4個を実装すると96心のものが構成できる。

これらの光ファイバボードおよびファイバ曲げ直角接続光コネクタを用いて図8に示す光バックプレーンを構成す

図5. ファイバ曲げ直角光コネクタの基本構造

図6. ファイバ曲げ直角光コネクタの基本構造（HyperSI開発コネクタ）

図7. 24心高密度MTフェルール

る。これは、早期普及を狙いバックプレーンの寸法、ドーターボードの実装物理仕様としては、デファクトスタンダードのATCA (Advanced Telecommunication Computing Architecture)の高速電気バックプレーンに準じた構成となっている。すなわち、バックプレーン外形およびドーターボードの実装ピッチなどはATCAバックプレーン構成と同じ寸法として、そのゾーン3（高さ97mm幅426mm）に光バックプレーンが実装できる構成となっている。ドーターボードの光接続ボタンはデュアルスタ配線で、総計384本の光配線接続を形成している。この構成でボード→バック

図8. ATCA 準拠光バックプレーン

プレーン→ボードでの平均伝送損失は1 dB以下であり、10 Gbps/chの伝送を確認している。この光バックプレーンの光配線に10 Gbps/chの信号速度で伝送した場合、XAUI インタフェースを用いたATCA 電気バックプレーンに比べ、5倍以上信号伝送能力を有する。

3.2 その他の光バックプレーンの開発例

以下に文献などから調査した代表的な光バックプレーンの研究開発例を紹介する。

(1) POINT プロジェクト開発の光バックプレーン¹²⁾

タイプ1の光バックプレーンとしての具体的な試作として最初に発表されたのはPOINT プロジェクトで開発した高分子光導波路を用いた光バックプレーンである。高分子光導波路のコアは50 μm 角、ピッチ100 μm で144 chの光配線を形成し、伝送損失は0.1 dB/cm (波長850 nm) である。バックプレーンコネクタ部について詳細な報告はないが光導波路を緩やかに直角に曲げたタイプといわれている。全長50 cm バックプレーン接続での挿入損失は16.3 dBである。20 cmの導波路長で3 Gbpsの伝送を確認したとの報告がある。

(2) ダイムラクライスラー社開発の光バックプレーン²⁾

高分子光導波路と45度ミラー直角コネクタを用いたタイプ1の光バックプレーンをダイムラクライスラー社が開発している。この光バックプレーンは航空機内のコンピュータに適用する目的で開発された。19 インチラックに14枚のドーターボードを実装 (ピッチ30.48 mmと推定) したものである。高分子光導波路は、コア断面は250×200 μm と大きい、伝送損失は0.04 dB/cm (波長840 nm) と小さい。光バックプレーンコネクタは、45度ミラーを用いレンズで集光し、ボード側にも直径5 mmの球レンズで集光して光素子と光導波路間を接続する構造となっている。このコネクタ接続を含む光トランシーバ間の損失は14 dB以下で設計されており、2.5 Gbps/chの伝送を確認している。

図9. 光シートバス

(3) I/O プロジェクト開発の光バックプレーン¹³⁾

I/O (Interconnects by Optics) プロジェクト開発の光バックプレーンは、プラスチック光ファイバ (POF) マトリックス (8×8または16×16) のパッドジョイント型コネクタを用いたタイプ2の光バックプレーンである。I/O プロジェクトは、欧州のRCI社、Helix社、IMEC社、FCI社、Optospeed社、Avatron社などで共同開発した光バックプレーン、光モジュールをAlcatel社の7770光ルータに適用することを目的とした共同開発プロジェクトである。

(4) 3M社開発の光バックプレーン¹⁴⁾

3M社開発の光バックプレーンは、光ファイバボードと直角曲げコネクタを用いたタイプ1の光バックプレーンである。これは3.1節で説明した光バックプレーンと類似している。特徴は、コア径62.5 μm 、クラッド径80 μm 、被覆径125 μm の光ファイバ (High Strength Circuit Fiber) を用いた光ファイバボードと、着脱容易なボール&ソケットと呼ばれる多心コネクタを用いている点にある。光ファイバの曲げは、曲率半径を6 mm以上として、ボール&ソケットフェルールの接続ロス0.7~1.1 dB程度である。

(5) 光シートバスを用いた光バックプレーン³⁾

光配線を光シートバスと称するプレーナ型の高分子導波路を用い、その一端を45度カットして全反射で光路を90度変換してコネクタ接続する構成のものが、富士ゼロックス社、アイカ工業社および本多通信工業社で共同開発されている。この構成の光バックプレーンの特徴は、光シートバスという部品を使って、図9に示すようにN対Nの光のバス接続を可能とした点である。光シートバスのある端子から出射された光信号は、他端で反射拡散され、各ボードの入射端に分配される構成である。光を拡散させる構造であるため、1:1接続の構成よりも損失は大きく、超高速伝送には多くの課題はあると思われるが伝送距離を限定すれば2.5 Gbps程度までの可能性をシミュレーションで実証している。また、簡単な構造で光バス接続ができることから安価な光バックプレーンが構成できるので、いろいろなアプリケーションが期待されており、すでに、SCSIバス (160 Mbps×6ビット) に適用できる段階にまで商用化している。

なお、本報告にはNEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) からの委託業務に基づきASETで開発した成果、

および産総研の産官研究連携体HyperSIの開発成果が含まれています。関係各位の皆様に深く感謝いたします。

(2009.6.16-受理)

文 献

- 1) 吉川隆士：“光と電気の融合／棲み分けとLSI光インタコネクションの実例”，日本テクノセンタ 세미나資料（2002年10月29日）
- 2) J. Guttman, H. P. Huber, O. Krumphplz, J. Moisel, M. Rode, R. Bogenberger and K. P. Kuhn: “19-inch Polymer Optical Backplane”, Proc. ECOC'99, I-354, September, Niece, 1999
- 3) 馬場智夫, 新津岳洋, 窪田将司, 三浦昌明：“光伝送を使うSCSIバスを開発，コストは電気配線の30%減”，EDN Japan 2001.8, pp. 59-66, 2001
- 4) 茨木 修, 三川 孝, 木下雅夫, 比留間健之, 菊池秀雄, 松井輝仁, 堀 彰弘, 石塚 剛, 平松星紀, 佐々木純一, 広瀬直広, 熊井晃一, 伊藤克通, 土屋政季：“超高密度電子SIプロジェクトにおける光電気複合実装技術開発”，2004信学全大 SC14-2, pp. S104-S105, 2004
- 5) 茨木 修, 鈴木修司, 増田 宏, 斉藤和人, 木下雅夫, 岡田義邦, 青柳昌宏, 佐々木純一：“高速情報通信装置用光バックプレーンの開発”，機構デバイス／電子部品・材料/光エレクトロニクス／レーザ・量子エレクトロニクス 研究会 2005.8.26
- 6) JPCA 規格：BP1型光バックプレーン実装インタフェース規格, JPCA-PE05-02-01S-2008
- 7) JPCA 規格：光バックプレーンDS配線接続規格, JPCA-PE05-02-02S-2008
- 8) JPCA 規格：多心直角曲げ光コネクタを用いた光バックプレーンの性能規格, JPCA-PE05-02-03S-2008
- 9) 茨木 修, 広瀬直宏, 岡部雅寛, 小西敏文, 市村 顕, 三川 孝：“光ファイバボードの先端研究開発”，電子情報通信学会技術研究会, 信学技報, Vol. 103, No. 267, EDM2003-31, 2003
- 10) 市村 顕, 辛島靖治, 広瀬直宏, 岡部 豊, 茨木 修：“直角光多心コネクタの検討”，2001信学総大, B-10-5, P438, 2001
- 11) JPCA 規格：石英ファイバを用いた多心直角曲げ光コネクタの詳細, JPCA-PE03-01-03S-2003
- 12) Y. S. Lui, R. J. Wojnarowski, W. A. Hennessy P. A. Piacente, J. Rowltte, Jr. M. Kadar-Kallen, J. Stack, Y. Liu, A. Peczalski, A. Nahata and J. Yardley: “Plastic VCSEL Array Packaging and High Density Polymer Waveguides”, Proc. ECTC1998 pp. 999-1005, 1998
- 13) I/Oプロジェクト（2001.9～2004.8）パンフレット
- 14) M. A. Meis: “Opto-Electronic Backplane Technology for Cost Effective Bandwidth Management”, Proc. ECTC2003 pp. 1073-1079, 2003