

超長距離光増幅海底ケーブルシステム

山 本 周

光増幅器の海底ケーブルシステムへの応用は、光再生中継方式を使用した光海底ケーブル開発当初からの夢であった。今日、エルビウム光ファイバー増幅器(EDFA)の発明により、光増幅中継海底ケーブルシステムが現実のものとなった。EDFAを使用した多中継光伝送では伝送ビットレートの高速度化や波長多重(WDM)技術の適用が比較的容易であり、しかも低コストに実現できる。このような理由から、国内、国際の海底システムに光増幅中継伝送方式が取り入れられている。

現在建設が進められている大洋横断の超長距離光増幅海底ケーブルシステムでは、高品質のデジタル光伝送を保つため光増幅技術の採用に関連し各種の新技術を採用した。また、WDM技術によりシステム導入後の伝送容量のアップグレードの可能性についても現場試験で確認している。さらにWDM技術や光ソリトン技術を使ったいっそうの大容量化と高度なネットワーク運用を目指した次世代光海底システムの研究・開発が行われている。

1. 光増幅海底システムの実用状況

国際ケーブル通信では従来のISDNサービスに加え、映像伝送、インターネットを始めとするマルチメディア通信の急速な展開により45 Mb/s、155 Mb/s国際専用回線サービスの需要が近年高まっている。こうしたサービス需要の増大を賄うための大容量通信方式として、EDFAを使用した光増幅海底伝送は時宜を得た技術と

Ultra-long distance optical amplifier submarine cable systems (1996年7月2日受理)
Shu YAMAMOTO 国際電信電話(株)研究所 (〒356 上福岡市大原 2-1-15)

いえる。

表1に主な光増幅海底ケーブルシステムのプロジェクトを示す。図1に示すようにアジア、太平洋域では、日米間を直通で結ぶ北ルートとハワイ、グアム経由で結ぶ南ルートでループ状を形成するTPC-5 CNや東南アジア9カ国を接続するAPCNなどの海底ケーブル・ネットワーク(CN)に5 Gb/s光増幅方式が使用される。

TPC-5 CNの南ルートについては、1995年末より運用が開始されアトランタ・オリンピックの映像伝送にも使用された。

同じく5 Gb/s光増幅方式により大西洋域においてはアメリカ、イギリス、フランスをループで接続する大西洋横断システムTAT-12/13が、またイギリスから地中海、インド洋を経て日本と接続するFLAGシステムがそれぞれ1996年、1997年の完成に向けて建設されている。さらに、2.5 Gb/sの光信号を4ないし8波長多重したWDM伝送による光増幅海底ケーブルシステムの開発も進められ、アフリカ大陸を包囲するアフリカ・ワン光海底ネットワークやイギリス、シンガポールを接続するSEA-ME-WE 3システムの海底プロジェクトへの適用が計画されている。

2. 5 Gb/s 光増幅海底ケーブルシステム

光海底ケーブルシステムは、システム寿命を25年以上として設計され、この間、規定された伝送品質を維持する必要がある。したがって、要求された伝送特性を満足する伝送設計と高信頼度設計が重要なシステム開発事項となる。特に最近のフレーム・リレー、ATMなどの高速通信プロトコル伝送のサービスを提供するうえで伝送特性への要求値は従来と比較し、ビット誤り率に換算

表1 主な光増幅海底ケーブルシステム。

システム	伝送容量	システム全長 (km)	陸揚げ局数	中継間隔 (km)	運用開始予定 (年)
TPC-5 CN	5 Gb/s×2 ファイバー・ペア	24000	6	33~80	1996
TAT 12/13	5 Gb/s×2 ファイバー・ペア	13000	4	45~75	1996
FLAG	5 Gb/s×2 ファイバー・ペア	27000	14	75~90	1997
APCN	5 Gb/s×2 ファイバー・ペア	11500	9	75~90	1996
SEA-ME-WE 3	2.5 Gb/s 4 WDM×2 ファイバー・ペア	19000	16~23	70~90	1998
Africa-ONE	2.5 Gb/s 8 WDM×2 ファイバー・ペア	40000	54	~80	1999

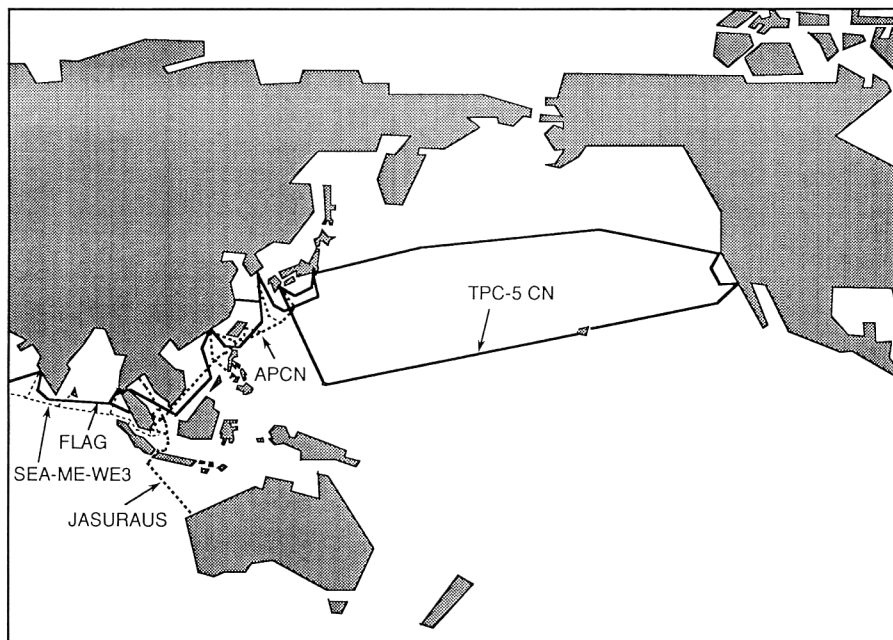


図1 太平洋領域における光増幅海底ケーブルシステム。

して2桁程度厳しく、国際電気通信連合 (ITU) で規格が勧告化されている¹⁾。このようないっそう厳しい伝送規格に準拠すべく新技術を採用し光海底システムの構築が図られている。

2.1 光増幅中継伝送路技術

5 Gb/s 光海底ケーブルシステムは太平洋横断する日米直結ルートの伝送を可能とするため、最大方式長を9000 kmとして開発を行った。中継系はすべて光増幅中継器と光ケーブルで構成するトランスペアレントな光伝送システムである。このため、伝送される光信号には、光増幅中継伝送路の様々な光学特性が累積し信号劣化の要因となる。システム設計のうえでは、このような累積効果の見積りと軽減が重要となる。光増幅中継器の自然放出光雑音の累積以外に累積雑音およびファイバーのカー効果による非線形と波長分散の相互作用が大きいいた

め、所要信号伝送特性を得ることは、それほど容易ではない。

そこで、中継器間隔と中継器出力の最適化を図ると同時に、光ファイバーの波長分散を特殊なマップに従って接続し伝送特性の向上を図った。すなわち、光信号をファイバーの正常波長分散領域で伝送することによりファイバー非線形による累積雑音と信号の四光子混合を抑圧し、また線形累積する波長分散は、正分散を有する通常光ファイバーを周期的に挿入することにより等化を行っている²⁾。さらに中継器に使用されている光学部品の微小な偏光依存性やEDFAのわずかなホールバーニング特性が光増幅多中継伝送では、伝送中の信号の偏波状態の変動で受信SNゆらぎを発生する³⁾。このようなSNゆらぎを抑圧するため光送信器に偏波スクランブラーを採用した。

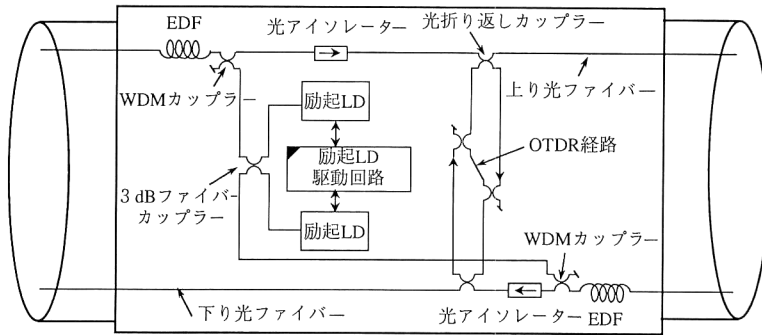


図2 光増幅海底中継器ユニットの構成図。

2.2 光増幅海底中継器技術

図2にTPC-5 CN等に使用されている光増幅中継器の基本構成を示す⁴⁾。中継器回路は、光増幅器本来のシンプルな構成を生かし小型化、高信頼性、低コスト化を図った。またEDFAは飽和利得領域で使用し、励起は一定ポンプパワー制御とした。この結果、中継器入力信号レベルの微小変化は飽和領域動作のEDFAの利得圧縮効果により信号出力では抑圧される。また、大きな信号レベルの劣化は多段中継特性により回復される。励起方式は、低雑音化を図るため後方励起を採用した。

励起用LDは光増幅中継器の信頼性を決定するクリティカルな部品として挙げられる。このため、要求信頼度確保と中継回路の簡易化のため一対のEDFに対し2個の1.48 μm励起LDを3dBファイバークップラで結合し励起パワーをそれぞれに分配する冗長構成とした。これにより、一方のLDが故障しても光増幅器の利得を維持することができシステム故障が避けられる。

2.3 5G伝送端局装置技術

5G伝送端局装置は外部変調器による5Gb/sのNRZ光信号の発生とデジタル再生光受信器により海中の光増幅中継設備と接続する部分と2.5Gb/sのSTM-16信号に分離、多重し局内の装置に接続する部分より構成される⁵⁾。

長距離光増幅中継システムでは、先に述べたように伝送中の信号の偏波特性による伝送信号特性ゆらぎがある。これについては送信器に偏波スクランブラを採用することにより対策は施されているものの、25年以上のシステム寿命を考慮すると、きわめて小さい時間率ではあるが伝送特性劣化を招くおそれがある。このため、2.5 Gbpsと5 Gbpsとの多重・分離部にリードソロモン符号を使用し誤り訂正を施した。例えば伝送路の符号誤りが10 E-4程度に劣化しても10 E-12以下の符号誤り率

を回復することができる。これは、SN利得に換算すると5 dB以上の改善効率に相当する。この結果良好な伝送品質の確保と大きなシステム設計マージンを得ることができた。

2.4 中継システムの遠隔監視技術

海底に敷設された光増幅中継器を陸揚げ局から遠隔監視することは光海底システムを運用・保守するうえで重要である。従来のデジタル再生中継器の監視回路は各種項目をモニターするために重装備となる傾向にあった。一方、EDFAの増幅多中継特性は過大損失の増加によるSN劣化に対して十分な耐力があり、またビット誤りの伝搬が生じないことなどの理由から多くの監視項目は不要と考えられ中継器出力に関するもの以外は省略した。

中継伝送路の監視は図2に示すような中継器に設けられた上り、下りのファイバを接続する光折返しパスを使用して行われる。すなわち、端局装置において監視信号を5 Gb/sの主信号にAM重畳し、各光中継器で監視信号を折り返す。中継線路監視装置は、各中継器の折返し監視信号の遅延時間を利用して送信監視信号との相関をとることによって光折返し利得を検出する⁶⁾。

遠隔監視は主信号伝送を行っているインサービス状態で行われるが、伝送路が障害となった場合もアウトオブサービス監視が可能で、障害中継器もしくは障害中継区間が評定できる。さらにアウトオブサービスでは、中継区間内の障害点の探索を行うためにコヒーレントOTDR装置の開発を行った⁷⁾。EDFAの低域遮断特性により、光パルスによる通常のOTDR装置は不可能なため連続光によるFMパルスを使用したコヒーレント検波により、各中継器の伝送方向の後方散乱を下りファイバを介して測定できる。

2.5 SDH 端局装置技術

従来海底ケーブルシステムはポイント-ポイントの伝送であったが、EDFA 光増幅中継方式の採用により伝送容量が飛躍的に増大したことから SDH 端局装置の採用により、ケーブル障害時の対策や伝送容量の効率的利用のためネットワークによる運用が行われるようになった。

TPC-5 CN, TAT 12/13 では、ケーブル陸揚げ局をループで接続することにより、リング・ネットワークを構成する。図 3 に示すように光増幅中継部分は 2 ファイバー・ペアで構成され、1 ファイバー・ペアをサービス、他方をプロテクションとする。陸揚げ局の端局装置では 5 G 端局装置により 5 Gb/s の光信号を 2.5 Gb/s の信号に多重分離した後、回線切替装置により、さらに 155 Mb/s の STM-1 信号に分離し、通常は各局で国内網に接続するトラフィックとそのままするトラフィックに分けるアド/ドロップ (ADM) 機能を有する。

このようなリング・ネットワークでは、ある区間でケーブル・カット障害が発生した場合、回線自動切替によりサービスに流れていた信号をプロテクションのファイバー・ペアを使用し、正常時とは反対側に迂回しケーブル障害を回避する。特に、このような切替を大洋横断システムで行う場合には故障した区間の 2 つの局のみで信号を折り返すと最悪時には大洋を 3 往復し伝送品質の劣化を招くおそれがあるため、155 Mb/s レベルで各局で折り返す方式が採用されている⁹⁾。

一方、図 4 に示すような海中分岐装置を使用した光海底ケーブル・ネットワークでは、各局で STM-1 信号をアド/ドロップする構成や APCN のような複雑なネットワーク構成では、ケーブル障害時の複雑なレストレーションやトラフィックの再構成を行うため、STM-1 多重分離装置とデジタル・クロスコネク (DXC) 装置によって STM-1 レベルの回線編集を可能としている⁹⁾。

3. 商用システムのアップグレード

EDFA の増幅は伝送ビットレートに依存しないため光増幅海底ケーブルシステムの伝送ビットレートの高速化の可能性がある。特に大洋横断システムでは光増幅器中継器に光フィルターを使用していないため、EDFA 自体にフィルター効果があるものの、送信側で伝送帯域の減少を補償するプリエンファシス技術を使用すれば WDM 伝送が可能である¹⁰⁾。

TPC-5 CN のすでに敷設した区間を使用して各種アップグレード試験を行った結果、2.5 Gb/s 6 波長多重、5 Gb/s 4 波長多重、10 Gb/s 伝送により伝送容量を 2 倍ないし 4 倍に増大できることが確認された。

このように、光増幅器中継器のトラスペアレントな特性は光海底ケーブルシステムをアップグレードするうえで非常に有効である。

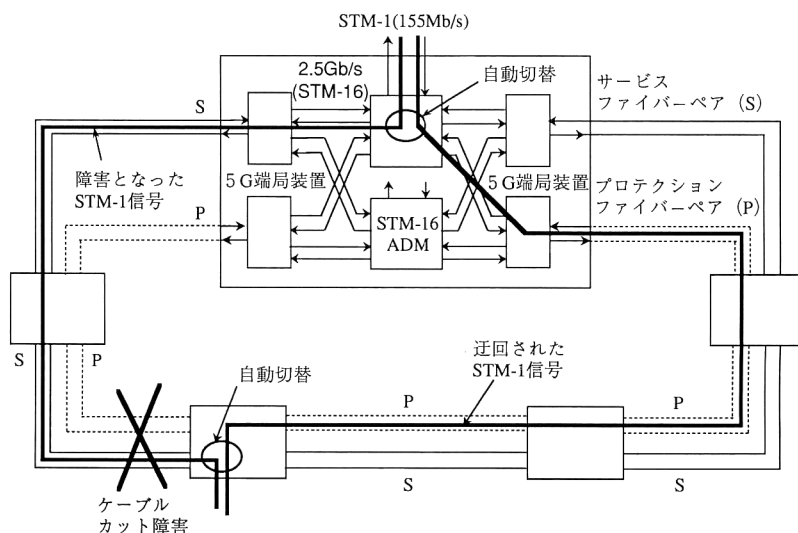


図 3 大洋横断リング・ネットワーク構成とプロテクション動作原理。

4. 波長多重光海底ケーブル方式

WDM 伝送による商用海底ケーブルシステムのアップグレード試験や室内伝送実験の結果、海底システムの伝送にいつもの大容量化を目指した波長多重光海底システムの実用化が高まっている。WDM 伝送は超高速技術に頼らないで、現状の光端局装置技術で海底システムの伝送容量アップが図れる。

今後の海底ケーブルシステムは複数の陸揚げ局を接続するネットワーク構成となる傾向にある。ケーブル・ネットワーク構成で WDM 伝送を使用すれば、ケーブルシステムの容量のうち必要な容量を波長単位で分離することができる。1 波長伝送では、すべての容量を各局ごとに端局装置で終端してから、必要な容量を電氣的にア

ド/ドロップする必要がある。これに対し WDM 伝送では、光フィルターにより所要の波長を分離できるため、各局で終端する端局装置は小規模な構成ですむ。

図5は光海中分岐装置に光アド/ドロップ (ADM) フィルターを使用した波長多重光海底ケーブル・ネットワークの構成である¹¹⁾。陸揚げ局はすべての波長を終端するハブ局と光 ADM 分岐装置に接続する分岐局から構成される。分岐局は、波長多重された信号のうち必要な波長のみがアクセスできる。一方、ハブとなる陸揚げ局はすべての波長のトラフィックを伝送端局装置で電気信号に変換し DXC 装置により電気レベルで回線編集を行う。このような光 ADM 分岐構成では、ハブ局と分岐局との通信について他の分岐局がアクセス不可能であ

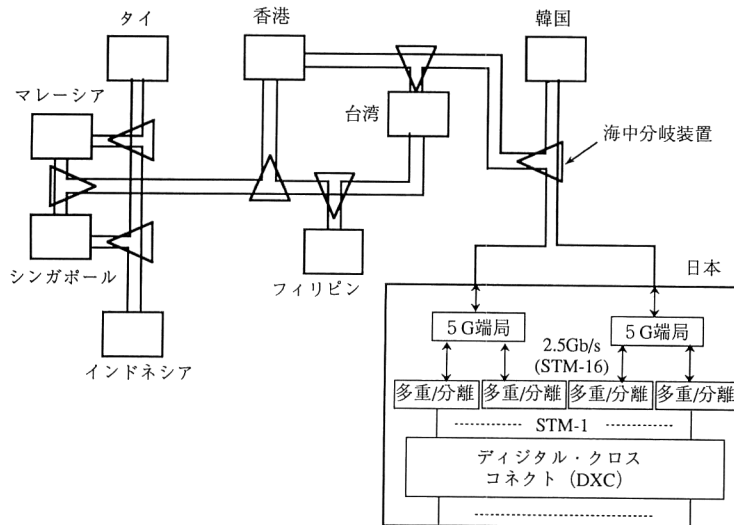


図4 アジア・パシフィック・ケーブルネットワーク (APCN) の構成。

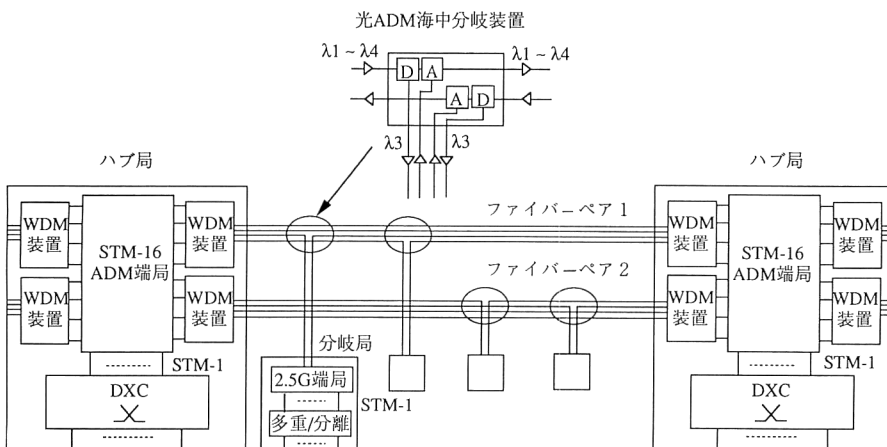


図5 波長多重 (WDM) 光増幅海底ケーブルシステムの構成。

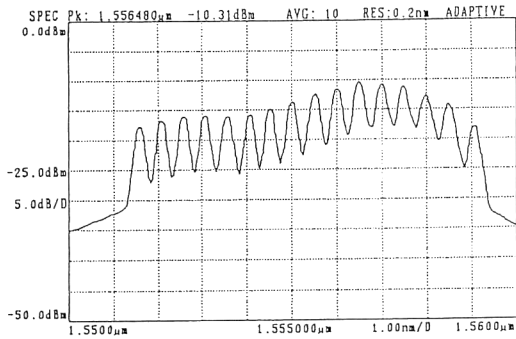


図6 5 Gb/s 16 波長多重 7400 km 伝送後の光スペクトラム。

る。したがって分岐局間の秘話性が保たれ、また分岐ケーブル部分が障害になった場合には、他の波長のトラフィックには影響を及ぼさないなどの利点がある。

5. 次世代光海底ケーブルシステム

2.5 Gb/s の信号を 8 波長多重した 20 Gb/s の伝送容量の海底システムは実用領域に達しつつある。一方、次世代光海底システムとしては、さらに大容量の長距離伝送方式をねらった研究が進められている。大容量化として波長多重数をさらに増大する方法と 1 波長当たりの伝送ビットレートを高速化する方法が検討されている¹²⁾。波長多重度を上げるには、波長間隔を詰め波長帯域を有効利用することと増幅器の広帯域化が重要である。

高密度波長多重による長距離伝送では、分散シフトファイバーを使用するため波長分散がそれほど大きくないことと、波長間隔の縮小により、四光子混合によるファイバー非線形劣化が顕著になる。このような隣接波長の位相整合条件を抑圧するためには、波長分散をさらに負分散とする高負分散シフトファイバーの使用が有効である。さらに、現在の光増幅海底ケーブルシステムと同じように累積分散を等化するには異常分散を有する通常ファイバーを周期的に挿入する。

多中継増幅で十分なフラットな伝送帯域を確保するには EDFA の利得等化が必要である。EDFA 単体の波長帯域は数十 nm であるが、9000 km に及ぶ長距離多中継伝送では、EDFA をもつ固有の帯域特性が累積し、フィルター効果により波長帯域は 1 nm 程度に減少する。そこで、利得波長特性を広帯域にフラット化する方法として、EDFA の利得波長特性とは逆特性の光フィルターを挿入する利得等化が有効である。

このように高負分散光ファイバーによる非線形の抑圧と光増幅器の利得等化による広帯域化により、超大容量

の WDM 伝送が可能になる。図 6 に 5 Gb/s の NRZ 信号を 16 波長多重したときの 7400 km 伝送後の光スペクトルを示す¹³⁾。従来の NRZ 伝送技術を用いた波長多重により 100 Gb/s 近い超大容量大洋横断光海底伝送システムの可能性が考えられる。

一方、NRZ 信号により 1 波長当たりの伝送ビットレート的高速化する場合には、伝送ビットレートの上昇にともない光ファイバーの非線形による自己位相変調効果の影響が大きくなり伝送特性の急激な劣化を招く。このため伝送ビットレート的高速化については、ファイバー非線形と波長分散を整合させた光ソリトン伝送が期待されている。ソリトン伝送で問題となる Gordon-Haus ジッターについては、累積波長分散を制御する周期分散等化法により、効果的に抑圧することができる。8000 km のテストベッド伝送実験 20 Gb/s の光ソリトン伝送が、ほぼ現在の 5 Gb/s の長距離海底システムと同等の特性で伝送できることを確認した¹⁴⁾。

光ソリトンによる高速化と WDM 伝送技術により大容量化を図る次のステップがあるが、スライディング光フィルターと各中継スパンで波長分散をテーパ状に減少させることにより、波長多重で問題となる衝突ジッターや四光子混合を抑圧できることが、Mollenauer らにより 10 Gb/s 8 波長多重、8000 km の周回伝送で示されている¹⁵⁾。波長多重光ソリトン伝送が実用的に構成できればいっそうの超大容量長距離伝送が期待される。

EDFA 光増幅器の利用により光海底ケーブルシステムの大容量伝送が実現できるようになった。現在大規模な光海底ケーブルシステムが世界各地で建設されている。建設が完了する今世紀末にはマルチメディア通信を支えるグローバルリンクとして重要な役割を果たすものと思われる。さらに次世代光海底ケーブルシステムに向け、100 Gb/s の伝送容量の長距離光増幅システムの研究も活発に進められている。

文 献

- 1) ITU-T Recommendation G. 826.
- 2) H. Taga, S. Yamamoto, N. Edagawa, Y. Yoshida, S. Akiba and H. Wakabayashi: "Fiber chromatic dispersion equalization at the receiving terminal of IM-DD ultra-long distance optical communication systems," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-12** (1994) 1042-1046.
- 3) S. Yamamoto, N. Edagawa, H. Taga, Y. Yoshida and H. Wakabayashi: "Observation of BER degradation due to fading in long-distance optical amplifier system," Electron. Lett., **29** (1993) 209-210.
- 4) S. Akiba: "A long-haul optical amplifier system engineering based on EDFS technology," *Optical Amplifier and*

Their Applications (Optical Society of America, Yokohama, 1993) pp. 110-113.

- 5) S. Yamamoto, H. Takahira and M. Tanaka: "5 Gbit/s optical transmission terminal equipment using forward error correcting code and optical amplifier," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 254-255.
- 6) 堀内幸夫, 山本 周, 秋葉重幸: "光ルーパック法による光増幅中継線路の監視方法", 電子情報通信学会論文誌, **J78-B-I** (1995) 753-763.
- 7) Y. Horiuchi, S. Yamamoto and S. Akiba: "Highly accurate fault localization over 4580 km optical amplifier system using coherent Rayleigh backscatter Reflectometry," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC) '93*, MoC1.3 (1993).
- 8) ITU-T Recommendation G. 841.
- 9) D. R. Gunderson, A. Lecroart and K. Tatekura: "The Asia Pacific cable network," *IEEE Commun. Mag.*, **34** (1996) 42-48.
- 10) J. C. Feggeler, *et al.*: "WDM transmission measurements on installed optical amplifier undersea cable systems," *Opt. Fiber Commun. (OFC) '96*, TuN3 (San Jose, 1996).
- 11) W. C. Malla and J. Schesser: "Africa ONE: The Africa optical network," *IEEE Commun. Mag.*, **34** (1996) 50-57.
- 12) N. S. Bergano, *et al.*: "100 Gb/s WDM transmission of twenty 5 Gb/s NRZ data channels over transoceanic distances using a gain flattened amplifier chain," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC) '95*, postdeadline paper (Brussels, 1995) pp. 967-970.
- 13) H. Taga, N. Takeda, K. Imai, S. Yamamoto and S. Akiba: "5 Gbit/s 16 WDM transmission experiments over 7300 km through 0.98 μm /1.48 μm hybrid pumped transmission line," *OECC '96* (Makuhari, 1996).
- 14) N. Edagawa, I. Morita, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Taga and S. Akiba: "20 Gbit/s 8100 km straight-line single-channel soliton-based RZ transmission experiment using periodic dispersion compensation," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC) '95*, postdeadline paper (Brussels, 1995) pp. 983-986.
- 15) L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev and M. Neubelt: "Demonstration of soliton WDM transmission at up to 8 \times 10 Gbit/s, error free over transoceanic distances," *Opt. Fiber Commun. (OFC) '96*, postdeadline paper, PD23 (San Jose, 1996).