長距離光ファイバー海底ケーブル方式

布 川 眞[†]

低損失単一モード光ファイバーによる経済的な長距離大容量デジタル海底ケーブル方式の実現が期待されている。1980年代末の商用化を目標に、各国で実用化が進められている長距離光ファイバー海底ケーブル方式について述べる。

1. ま え が き

海底ケーブル通信の歴史は、1850年に海底電信ケーブルが英仏海峡に布設されたのが始まりである。同軸ケーブルを用いた、電話伝送が可能な長距離海底ケーブル方式が最初に布設されたのは1956年であり、以後同軸海底ケーブルは1965年に商用化が開始された通信衛星とともに、大陸間長距離通信を支える2つの柱となっている。

これまで同軸海底ケーブル方式は、電話伝送を中心に年々増大する通信需要を満たすため、10年当り約10倍という急ピッチで伝送容量の増大化が行われてきた。電話を中心とする通信需要は引き続き増加しており、今後、画像通信や高速データ通信等の新サービスの導入も期待されているため、さらに大容量の海底ケーブル方式が必要となる。また同軸海底ケーブル方式では周波数分割多重によるアナログ伝送方式が使用されているが、近年急速に進みつつあるデジタル通信網構築の観点から、海底伝送路のデジタル化が望まれている。

一方、光ファイバー通信技術は1970年代に入ってから急速に進歩し、その優れた特徴が次々と明らかになってきた。その結果、1970年代後半には、より大容量の同軸海底ケーブル方式を開発することは技術的、経済的に得策でないと考えられ、光ファイバー海底ケーブル方式の研究開発が開始された。光ファイバー海底ケーブル方式は、海峡横断等の短距離・無中継方式から大洋横断の長距離・中継方式に至るまで、広範囲な適用が考えられているが、本稿では1980年代末の商

用化を目標に実用化が進められている、波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯強度変調直接検波方式による長距離光ファイバー海底ケーブル方式の現状を中心に述べる。

2. 同軸ケーブル方式から光ファイバーケーブル方式へ

2.1 同軸ケーブル方式の推移¹⁾

同軸海底ケーブル方式による長距離伝送の商用化は、1956年の第1大西洋横断ケーブル(TAT-1)の建設に始まる。この方式は2条の同軸海底ケーブルを用い、中継器間隔72kmで3kHz帯域の電話48回線の双方向伝送を行った。以後、年々増加する通信需要を満たすため同軸海底ケーブル方式は次々に大容量化され、同時に回線当りのコストが低減されてきた。表1に世界の主な同軸海底ケーブル方式を示す。これらの同軸ケーブル方式は、周波数分割多重アナログ伝送方式を用いており、TAT-1等に使用されたSB方式を除いて、いずれも1条の同軸ケーブルを用いて双方向伝送を行う方式である。

同軸ケーブル方式の大容量化は、伝送周波数を高くすることによる伝送帯域の増大によってのみ行われてきた。電話数千回線の双方向伝送が可能な最新の大容量同軸海底ケーブル方式は、放送用カラーテレビの伝送を行える帯域幅を有しており、実際にサービスが供されている²⁾。しかしながら、中継器の方向誤差や電力分離器の遅延ひずみにより、放送用カラーテレビの伝送距離は1000~2500kmが限界といわれている^{3,4)}。伝送周波数の上昇にともなう同軸ケーブルの損失増加に抗して伝送容量を増大するためには図1、図2に示すように中継器挿入間隔の縮小とケーブルの大口径化が不可避である。このため、電話1万回線程度を伝送するさらに大容量の同軸ケーブル方式で

[†] 国際電信電話株式会社 研究所

“Longhaul Optical Fiber Submarine Cable Systems” by Makoto Nunokawa (Research and Development Laboratories, Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd, Tokyo)

表 1 世界の主な同軸海底ケーブル方式

システム 項目	米 国				英 国						日 本		
	SB	SD	SF	SG	0.6MHz	1.2MHz (NA)	3MHz	5MHz (NC)	14MHz (NE)	45MHz (NG)	CS-5M	CS-12M	CS-36M
最初の布設年	'56	'63	'68	'76	'61	'65	'69	'67	'71	'76	'76	'77	'75
回線容量(3kHz)	48	138	845	4,000	80	160	360	640	1,840	5,200	640	1,600	2,700 (4kHz)
最大方式長(km)	4,000	6,500	7,400	6,500	5,600	5,600	7,400	4,600	6,500	3,700	1,500	6,700	3,700
中継器間隔(km)	72	37	19	10	49	32	18	14	12	5.4	14	12	6
ケーブル直径	16	25	38	43	25	25	25	25	37	37	25	38	38
主な布設ケーブル	TAT-1 TAT-2 HAW-1	TAT-3 TAT-4 HAW-2 TPC-1	TAT-5 HAW-3 TPC-2	TAT-6	CANTAT-1 COMPAC SEACOM	SEACOM BRACAN-1	SAT-1	英 国 } ポルトガル TASMAN	CANTAT-2 COLOMBUS LUHO	ローマ } シシリー 英 国 } ベルギー	日 本 } 中 国 } 沖 縄 } 台 湾	OLU	沖 縄 } 宮 崎 } 日 本 } 韓 国

図 1 同軸海底ケーブル方式の中継器間隔

図 2 同軸海底ケーブル方式のケーブル絶縁体外径

は、中継器間隔は 4 km 程度、ケーブル径は約 50 mm となることが推定される。

中継器間隔の縮小は、システム内に含まれる高価な海底中継器数を増大させ、ひずみ雑音の相加、中継器の要求信頼度の上昇、遠隔給電圧の増加など、厳しい技術的問題の解決を必要とする。またケーブル径の増大は、布設や修理工事におけるケーブル取扱い性の悪化、ケーブル布設船への積載量の減少をもたらし、

システムの建設費を押し上げる。

一方、1970 年代に入って急速な進歩をみせた光ファイバー伝送技術は、同軸ケーブル方式より経済的な大容量海底ケーブル方式実現の可能性を示した。このための海底ケーブル方式の研究開発は、それまで約 20 年間にわたって着実に進んできた同軸ケーブル方式から光ファイバーケーブル方式へと方向転換が行われた。

2.2 光ファイバーケーブル方式の特徴

石英系光ファイバーは、1970 年に伝送損失 20 dB/km という値が実現⁵⁾されて以来、図 3 に示すように急速に伝送損失の低減化が進み、1979 年には 1.5 μ m 帯で 0.2 dB/km という、ほぼ理論限界に近い値が実現された⁶⁾。

単一モード光ファイバーは低損失性に加えて広帯域なため、長中継器間隔の大容量伝送を可能とする。また光ファイバーは直径約 0.1 mm と極めて細いため、

図 3 光ファイバー特性の進歩

図4 単一モード光ファイバー伝送の中継器間隔

1本のケーブル内での空間分割多重による大容量化も容易となる。さらに光ファイバー伝送はデジタル伝送に適しているため、海底伝送路のデジタル化が実現できる。このように単一モード光ファイバーは本質的に長距離大容量デジタル伝送に適しているため、同軸ケーブル方式と比較して、より経済的な大容量海底ケーブル方式の実現が可能となる。

石英系光ファイバーは波長1.3 μm帯において波長分散(波長により伝搬速度が異なる性質)が零となり、1.5 μm帯において最低損失を示す。このため光ファイバーを海底ケーブル方式に適用する際の波長帯としては、可能な限り中継器間隔を長くするため1.3 μm帯と1.5 μm帯が適している。図4に単一モード光ファイバー伝送における伝送速度と中継器間隔の関係の計算例を示す。この計算では、光ファイバーの特性については実用的に可能と思われる値を使用しているが、方式余裕(マージン)は考慮していない。また斜線で示されている幅は、使用する受光素子の受信感度に依存している。

1.3 μm帯では波長分散が零となるため、通常の高縦モード発振半導体レーザーの使用が可能であり、中継器間隔は損失制限となっている。実用的には伝送速度約300 Mb/s(64 kb/s電話換算約4000回線)で50 km前後の中継器間隔が期待できる。

1.5 μm帯では波長分散のため通常の高縦モード発振レーザーを使用した場合、比較的低い伝送速度で帯域制限となり、数十 Mb/s以上の伝送速度では1.3 μm帯の方が有利となる。1.5 μm帯の低損失性を生かすためには、分布帰還形(DFB)レーザー等の光ファイバーの波長分散の影響を受けない単一縦モード発振レーザー⁷⁾を使用するか、またはコア径、比屈折率差等の光ファイバー構造パラメータを調節して低損失を保ちつつ零分散波長を1.5 μm帯にシフトした光

図5 海底ケーブルシステムの価格

ファイバー⁸⁾⁹⁾を使用する必要がある。

これらのデバイスを使用することにより、実用的には1.5 μm帯において伝送速度約300 Mb/sで100 km前後の中継器間隔が期待できる。しかしながら、単一縦モード発振レーザーや分散シフト形光ファイバーは実現されてから日が浅く、その技術の確立には時間を要すると考えられている。このため、1980年代末の商用化を目標として実用化が進められている長距離光ファイバー海底ケーブル方式は、いずれも1.3 μm帯を使用している。

図5に1.3 μm帯伝送による光ファイバー海底ケーブル方式の価格推定例を示す。光ファイバー価格や光中継器価格に不確定な要因があるが、光ファイバーケーブル方式は、数千回線以上の伝送容量で同一容量をもつ同軸ケーブル方式にくらべて優位になり、回線当りの創設費は同軸ケーブル方式の3~5割になると推定されている。

3. 光ファイバー海底ケーブル方式の諸元

3.1 方式設計

図6に光海底ケーブル方式の基本構成を示す。データ、テレックス等の信号はそのままデジタル多重端局へ入力される。電話はADPCMとデジタルTASI(Time Assignment Speech Interpolation)を組合せた回線多重化装置により、また画像信号は予測符号化等により、それぞれ帯域圧縮された後、デジタル多重端局に入力される。陸揚局設備には、この他、海底中継器へ直流定電流を供給する給電装置および海底伝送路の動作を遠隔監視制御する監視装置が含まれる。

海底ケーブル方式は、主としてその使用環境条件から、陸上方式にくらべてかなり厳しい要求条件を満足しなければならない。海底伝送路で故障が発生する

図6 光ファイバー海底ケーブルシステムの構成

と、代替復旧回線経費、ケーブル布設船による修理経費の他、深海部での修理ではケーブルおよび中継器を追加する必要がある、修理経費が高くつく。そのため、方式の経済性検討に基づき、海底伝送路には極めて高い信頼度が要求される。これは光ファイバーケーブル方式においても変わらず、一般に方式設計寿命は25年程度、設計寿命期間内のシステム故障率は2~3回以下と、厳しい条件が設定されている。

この信頼度は通常すべて中継器回路に割当てられ、ケーブルに対する信頼度割当ては行われない。すなわち、ケーブルはシステム寿命内で無故障あるいは、故障確率が極めて低いことが要求される。端局装置は人のアクセスが容易であるため、方式上の信頼度割当てはないが、故障時間短縮のため2重化構成を用いることが多い。また海底伝送路において故障が発生した場合に、その故障箇所を陸揚局からできるだけ正確に、かつ迅速に標定できる遠隔監視方式が重要不可欠である。

深海底の温度は一般に2~3°Cで極めて安定しているが、中継器およびケーブルは、海底での高水圧下で25年にもわたる長期間安定した特性を保つことが要求される。また中継器、ケーブルは、深海域での布設および修理のための引揚げ時に加わる高張力に耐えなければならない。

表2に、1980年代末の商用化を目標に各国で実用化が進められている、大洋横断用長距離光ファイバー海底ケーブル方式の諸元を示す^{10)~16)}。

伝送速度は、国際間長距離伝送路の需要予測、高信頼度光中継器の技術的実現性およびCCITT勧告のデジタル階位を考慮して、280 Mb/sが選定されている。実際に伝送路を流れる信号速度は、BSI (Bit Sequence Independence) やタイミング信号抽出の容易性、端局間モニター、打合せ回線などを考慮して、例えば7B8B符号を用いると、約325 Mb/sと、さらに高速になる。

伝送路数（光ファイバー対）は3対程度までが考えられており、これは64 kb/s電話換算で最新の同軸ケーブル方式の3倍の容量であり、また回線多重化装置を用いることにより伝送容量をさらに3~5倍程度増加させることが可能なため、当面の需要に対しては十分な容量であると考えられている。

放送用カラーテレビをはじめとする画像伝送については、今のところ需要予測があまり明確でないため、方式の伝送容量は主に電話を中心に考えられており、画像伝送の具体的検討はあまりなされていない。しかしながら、光ファイバーケーブル方式は放送用カラーテレビの長距離伝送も充分可能であり、将来の画像伝送等、広帯域サービスの導入の可能性を考慮しつつ実際の建設計画が進められると思われる。

使用波長は、前に述べたように1.3 μm帯が使用され、中心波長は石英系単一モード光ファイバーが零分散となる1.31 μm前後が選定されている。1.3 μm帯

表2 各国の長距離光ファイバー海底ケーブル方式の諸元

諸元	日 本	アメリカ	イギリス	フランス
使用波長帯(μm)	1.3	1.3	1.3	1.3
使用光ファイバー	単一モード	単一モード	単一モード	単一モード
伝送速度(Mb/s)	280	280	280	280
伝送路数 (光ファイバー対)	1~3	1~3	1~3	1~4
最大方式長(km)	10,000	8,000	7,500	10,000
最大水深(m)	8,000	7,500	7,500	>6,500
中継器間隔(km)	50	25~50	25~50	25~50
給電電流(A)	1	1	1.2	1
中継器消費電力(W) (光ファイバー対)	5	4	3~5	5
予備半導体レーザ数	1	最大3	検討中	最大3
監視方式	光折返し	電気折返し	電気折返し	折返し
方式設計寿命(年)	25	24	25	25
信頼度(年) (MTBF)	10	8	10	15

での中継器間隔としては 101 km という実験結果¹⁷⁾も報告されているが、実用システムにおいては、方式余裕配分や光ファイバー、半導体レーザーなどの製造歩留りを考慮した最適化が必要のため、中継器間隔が短くなる。

損失配分としては、光ファイバー内への光入射電力 $-2.5\sim-6$ dBm、ケーブル損失 20 $\sim$ 25 dB、受光電力 $-36\sim-37$ dBm、方式余裕配分 6 $\sim$ 8 dB が考えられている。ここで方式余裕には設計製造偏差、経年劣化、温度偏差、修理余裕等が含まれている。

3.2 ケーブル

光ファイバー海底ケーブルの設計においては、①水深 6,500 $\sim$ 8,000 m の高水圧に耐え、深海からの引揚げ可能な抗張力(例えば 80 kN 以上)と抗張力/単位長水中重量比(例えば 19 km 以上)を有すること、②給電路の直流抵抗は 0.5 Ω /km 前後で 10 kV 程度の耐電圧を有すること、③ケーブル内への透湿防止およびケーブル破断時にケーブル内に海水が浸入しない、または侵入しにくい構造を有すること、を考慮する必要がある。

(1) 光ファイバー

海底ケーブルには、長距離大容量伝送に適した高強度単一モード光ファイバーが使用される。光ファイバーの外径は 125 μ m、コア径は 8 $\sim$ 10 μ m、カットオフ波長は 1.1 $\sim$ 1.28 μ m、零分散波長は 1.31 μ m 前後が選定されており、損失は 0.5 dB/km 程度が見込まれている。

海底ケーブルには布設および修理時の引揚げにおいてケーブルの水中重量によって大きな張力が加わり、特に深海底からの引揚げ時にはケーブルの伸びひずみは 0.6 $\sim$ 0.8% に達する。これは陸上用のケーブルにくらべてはるかに厳しい値である。

光ファイバーの引張強度は主として光ファイバー表面に確率的に存在する傷の大きさに依存する¹⁸⁾。このため、海底ケーブル用光ファイバーの製造にあたっては、製造雰囲気、被覆材料、製造方法等に特別に注意を払うとともに、低強度部分を除去するために、プルーフテストとよばれるスクリーニング試験が行われる¹⁹⁾。プルーフテストの負荷応力は、大まかには使用負荷応力の 3 倍程度であり、海底ケーブル用光ファイバーでは伸びひずみ 2% 前後のプルーフテストが必要となる。

光ファイバー製造技術の改良により、このような高レベルスクリーニングにおける光ファイバーの平均生存単長は改善されつつある²⁰⁾が、50 km にもおよぶ 1 中継区間の伝送路を構成するためには、光ファイバ

図 7 光ファイバー海底ケーブル

一の低損失高強度融着接続技術が不可欠である²¹⁾²²⁾。

なお、光ファイバーの高強度化とともに、光ファイバーをケーブル内に余長をもたせて収容することにより、ケーブルが伸ばされた時にも光ファイバーに伸びひずみが加わらないケーブル構造¹²⁾や、水中重量をあまり増加させずにケーブル抗張力を増大させることにより、光ファイバーに加わる伸びひずみを低減化するケーブル構造¹¹⁾の検討も行われている。

(2) ケーブル構造

図7(a)～(e)にこれまで発表された各国のケーブル構造を示す¹⁴⁾¹⁶⁾²³⁾。いずれのケーブル構造も、機械的に弱い光ファイバーをアルミニウム、銅および鋼線等から構成される複合金属チューブ内に収容して高水圧等の外力から保護し、この金属チューブを給電路として用い、海水から絶縁するためにポリエチレンで被覆する構造がとられている。

3.3 中継器

光海中継器は、光電気回路とこれを収容し高水圧から保護するきょう体とから構成される。

(1) きょう体

光海中継器のきょう体は、各国とも長年の実績がある同軸ケーブル方式用きょう体を基本にしている¹⁴⁾²⁴⁾²⁵⁾。また、きょう体とケーブルの機械的接続機構についても、各国が保有する布設船の布設機構に応じてジンバル（自在継手）構造またはジンバルレス構造を採用している。

光海中継器用きょう体の設計において配慮が必要な項目は、①ケーブルと中継器の接続部における光ファイバー接続部の機械的保護構造、②光ファイバーのきょう体内への導入部の気密高耐水圧構造、③光電気回路部で発生する熱を外部へ効率良く逃がす放熱構造である。

光ファイバーの接続部保護は、ケーブルと中継器の接続部に小形の耐水圧容器を設け、その中に光ファイバー接続部を収容する方法が一般に行われている。光ファイバーのきょう体内への導入部については、はんだ²⁶⁾や接着剤²⁷⁾またはこれらを併用する方法²⁵⁾により気密高耐水圧構造を実現している。効率的放熱構造の例としては、中継器回路ときょう体の間に挿入される緩衝体を金属バネ²⁴⁾や金属粉末を混入したゴム²⁸⁾で構成することにより放熱効率の改善がはかられている。

(2) 中継器回路

中継器回路は、光受信回路、再生中継回路、光送信回路、監視制御回路、給電回路等で構成される。前に述べたように、海底ケーブル方式における信頼度はす

図8 再生中継回路の要求信頼度

べて中継器回路に割当てられる。図8に中継器回路1台(片方向伝送)当りの要求信頼度の計算例を示す。これより、大洋横断用長距離方式では中継器回路は、10～20 fit (failure unit = 10^9 時間に1回の故障が起こる確率) 程度の高信頼度が要求される。

(a) 光送信回路 1.3 μm 半導体レーザー (InGaAsP/InP) はIC駆動を行うため、いずれも発振閾値の低いものが選定され、BH (Buried Hetero)²⁹⁾、DC-PBH (Double Channel Planar BH)³⁰⁾、VSB (V grooved Substrate BH)³¹⁾、IRW (Inverted Rib Waveguide)³²⁾ など各種の構造が採用されている。

1.3 μm 帯半導体レーザーのMTTF (Mean Time To Failure) については100万時間以上という推定もされており³³⁾、かなりの長寿命化が期待されるものの、その劣化原因は必ずしも明確にはなっていない。

このため方式実用化に当っては、予備レーザーをもうけ、現用レーザーが故障した時に、遠隔制御あるいは、自動制御で切替える、冗長構成が検討されている^{34)～36)}。

(b) 光受信回路 受光素子はアパランシェフォトダイオード (APD) と PIN フォトダイオードに大別される。日本では一般にシリコンバイポーラ系フロントエンドとの組合せで高感度が期待でき、かつ使用実績の豊富な Ge-APD が使用されている³⁷⁾³⁸⁾。しかし米、英では、APD は受信感度は良いが高バイアス電圧用の DC/DC コンバータが必要となり回路を複雑化し、高信頼度化上得策でないとして、InGaAs PIN フォトダイオードとシリコンバイポーラ¹⁰⁾ または GaAs FET¹¹⁾ との組合せを採用している。

(c) 再生中継回路 再生中継回路は、基本的には同軸ケーブルによる PCM 伝送等で使用されているものと同じである。しかしながら、デジタル再生中

図 9 IC 化再生中継回路

継回路は、アナログ中継回路にくらべてはるかに多くの能動素子を必要とする。このため、長距離方式において要求される高信頼度を満足するためには、モノリシック IC の導入による部品数の低減が不可欠である³⁷⁾³⁸⁾。再生中継回路のモノリシック IC 化は、また小形化、低消費電力化、低コスト化を可能とする。

モノリシック IC の設計においては、高信頼度化の観点から消費電力、チップサイズ、特性評価試験法を考慮することが必要であり、一般に 1 つの基本回路機能を 1 つの IC で構成する方法がとられている。その結果、半導体レーザー駆動回路、監視制御回路を含めて、一般に 6~8 個程度のシリコンバイポーラモノリシック IC で再生中継回路が構成されている。また、タイミング抽出には SAW フィルターが使用されている。図 9 に IC 化した光再生中継回路の構成例を示した³⁷⁾。

(d) 監視制御回路 監視制御回路は、中継器誤り率、半導体レーザーおよび受光素子の動作等の監視を行うとともに、予備レーザーへの切替えや障害発生時に障害区間を標定するためのループバック動作の制御を行う。各種項目についての監視をインサービスで行うかアウトサービスで行うか、また予備レーザーへの切替えを遠隔制御で行うか自動制御で行うかについては、それぞれの方式で若干異っている¹⁰⁾³⁷⁾³⁹⁾⁴⁰⁾。

4. む す び

1980 年代末の商用化を目標に、日、米、英、仏各国で実用化が進められている長距離光ファイバー海底ケーブル方式について、既発表論文を中心にその概要を述べた。波長 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯を使用する、いわゆる第 1 世代の長距離光ファイバー海底ケーブル方式は着実に実用化が進められており、1988 年には、大西洋で第 8 大西洋横断ケーブル (TAT-8) が、太平洋で第 3 太平洋横断ケーブル (TPC-3) がいずれも光ファイバーケーブル方式で建設されようとしている。

今後さらに、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯伝送、波長多重伝送、コヒ

ーレント伝送、光増幅中継、超低損失光ファイバー伝送等各種の新技术導入の可能性があり、より高性能で、より経済的な第 2 世代以降の長距離光ファイバー海底ケーブル方式の登場が期待されている。

おわりに、本稿発表の機会を与えていただいた KDD 研究所 鍛冶所長に深謝します。

(昭和 59 年 12 月 23 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 志村ほか：“海底同軸ケーブル通信方式”，電子通信学会 (1978)
- 2) 伊藤，小宮，宮城，石嶺：“沖縄県先島地域の全国即時網編入を終えて”，施設，**29**，4，pp. 40-49 (Apr., 1977)
- 3) 澤栗，菊地：“CS-36 M-D 2 方式の設計”，研実報，**25**，6，pp. 1053-1075 (June, 1976)
- 4) A. J. Bennett and J. E. Gayler：“Submarine Systems—current technology”，IEE Conference Publication, 183, pp. 118-121, (Feb., 1980)
- 5) F. P. Kapron, et al.：“Radiation Losses in Glass Optical Waveguides”，Appl. Phys. Lett., **17**，10，pp. 423-425 (Nov., 1970)
- 6) T. Miya, et al.：“Ultimate Low-loss Single-mode Fibre at $1.55\ \mu\text{m}$ ”，Electron. Lett., **15**，4，pp. 106-108 (Feb., 1979)
- 7) T. Ikegami, G. Motosugi：“Single Longitudinal Mode (SLM) Laser”，Proc. 9th Euro. Conf. Opt. Commun., pp. 31-34 (Oct., 1983)
- 8) T. Miya, K. Okamoto, Y. Ohmori and Y. Sasaki：“Fabrication of Low-dispersion Single-mode Fibers Over a Wide Spectral Range”，IEEE J., **QE-17**，6，pp. 858-861 (June, 1981)
- 9) B. J. Ainslie：“Transmission Properties of Triangular Profile Monomode Fibre for $1.55\ \mu\text{m}$ Operation”，Tech. Digest 4th IOOC, pp. 46-47 (June, 1983)
- 10) P. K. Runge and P. R. Trishitta：“The SL Undersea Light-guide System”，IEEE J., **SAC-1**，3，pp. 459-466 (Apr., 1983)
- 11) R. L. Williamson and M. Chown：“The NL1 Submarine System”，IEEE J., **SAC-1**，3，pp. 454-458 (Apr., 1983)
- 12) G. Le Noane and M. Lenoir：“Submarine Optical Fiber Cable Development in France”，ICC '82, pp. 7 D. 4. 1-7 D. 4. 3 (June, 1982)
- 13) Y. Niino：“Optical Fiber Submarine Cable System Development at KDD”，IEEE J., **SAC-1**，3，pp. 467-478 (Apr., 1983)
- 14) I. Yamashita, et al.：“The Application of Optical Fibres in Submarine Cable Systems”，ITU Telecom. J., **49**，2，pp. 118-129 (Feb., 1980)
- 15) 吹抜，根岸：“海底光ケーブル伝送技術，方式構成”，昭 58

- 連大, pp. 4・78-4・81 (Oct., 1983)
- 16) 新納: “海底光ケーブル伝送技術, 国際長距離光海底ケーブル方式の開発動向”, 昭58連大, pp. 4・82-4・85 (1983)
- 17) M. M. Boenke, et al: “Transmission Experiments Through 101 km and 84 km Single Mode Fibre at 274 Mb/s and 420 Mb/s”, Electron. Lett., **18**, 21, pp. 897-898 (Oct., 1982)
- 18) B. A. Proctor, et al: “The Strength of Fused Silica”, Proc. Royal Soc., **A297**, pp. 534-557 (1967)
- 19) 満永, 勝山, 小林, 石田: “スクリーニング試験による光ファイバー強度保証法”, 信学論誌, **J66-B**, 7, pp. 829-836 (July, 1983)
- 20) S. Sakaguchi, et al.: “Drawing of High-strength Long-length Optical Fibers”, Tech. Digest 4th IOOC, pp. 94-95 (1983)
- 21) J. T. Krause and C. R. Kurkjan: “Improved High Strength Flame Fusion Single Mode Splices”, Tech. Digest 4th IOOC, pp. 96-97 (1983)
- 22) Y. Miyajima, et al.: “Long-length Fibre Containing High Strength Splices”, Electron. Lett., **17**, 18, pp. 670-672 (Sep., 1981)
- 23) 舟木: “海底光ケーブル伝送技術, ケーブル”, 昭58連大, pp. 4・86-4・89 (1983)
- 24) 山崎, 江尻, 古沢, 新納: “光海底中継器きょう体の設計と試作結果”, 信学技報, CS 81-60, pp. 13-18 (July, 1981)
- 25) 西, 中村, 岡村: “海底光中継器きょう体構成法の検討”, 信学技報, CS 83-113, pp. 63-69 (Sep., 1983)
- 26) 江尻, 山崎, 古沢: “光海底中継器用光ファイバーフィードスルの構造に関する検討”, 昭57信学総全大, p. 7-322 (1982)
- 27) 西, 川上: “溝付テーパビン型海底光フィードスルの検討”, 信学技報, CS 81-59, pp. 7-12 (July, 1981)
- 28) 森光, 中村, 野村: “海底光中継器筐体の放熱設計”, 信学技報, CS 80-117, pp. 75-80 (Aug., 1980)
- 29) T. Tsukada: “GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs Buried-hetero Structure Injection lasers”, J. Appl. Phys., **45**, 11, pp. 4899-4906 (1974)
- 30) 水戸ほか: “InGaAsP DC-PBH 半導体レーザー”, 信学技報, OQE 82-98, pp. 21-28 (Jan., 1983)
- 31) 今井, 石川, 棚橋, 西谷, 田草川: “基板内埋込み型 InGaAsP/InP DH レーザ”, 信学技報, CS 81-26, pp. 79-84 (May, 1981)
- 32) S. E. H. Turley, et al.: “Properties of Inverted Ribwaveguide Lasers Operating at 1.3 μ m Wavelength”, Electron. Lett., **17**, 23, pp. 868-870 (Nov., 1981)
- 33) A. Rosiewicz and P. A. Kirkby: “The Reliability of IRW Lasers for Use in 1.3 μ m Monomode Systems”, Proc. 9th Euro. Conf. Opt. Commun. (Post dead line paper) (Oct., 1983)
- 34) C. O. Anderson, et al.: “An Undersea Communication System Using Fiberglass Cable”, Proc. IEEE, **68**, 10, pp. 1299-1303 (Oct., 1980)
- 35) 若林, 常磐, 望月, 波平: “光海底中継器の光源冗長構成に関する検討”, 信学技報, CS 81-61, pp. 19-24 (July, 1981)
- 36) 林, 雨宮, 相田: “光源冗長形海底光中継器を用いた中継伝送方式の信頼性に関する検討”, 信学技報, R 83-17, pp. 31-36 (July, 1983)
- 37) 若林, 立蔵, 矢野, 常磐, 新納: “長距離用 280 Mb/s 光海底中継器回路の設計と試作結果”, 信学技報, CS 83-149, pp. 53-60 (Dec., 1983)
- 38) 土屋, 雨宮, 加本: “400 Mb/s 集積化海底光中継器回路の特性”, 信学技報, CS 83-111, pp. 47-54 (Sep., 1983)
- 39) 新納, 若林: “長距離光海底ケーブルシステムの中継器監視方式”, 信学技報, CS 83-152, pp. 79-84 (Oct., 1979)
- 40) 林, 宮脇, 朝利: “海底光中継器監視制御方式の検討”, 信学技報, CS 83-112, pp. 55-62 (Sep., 1983)