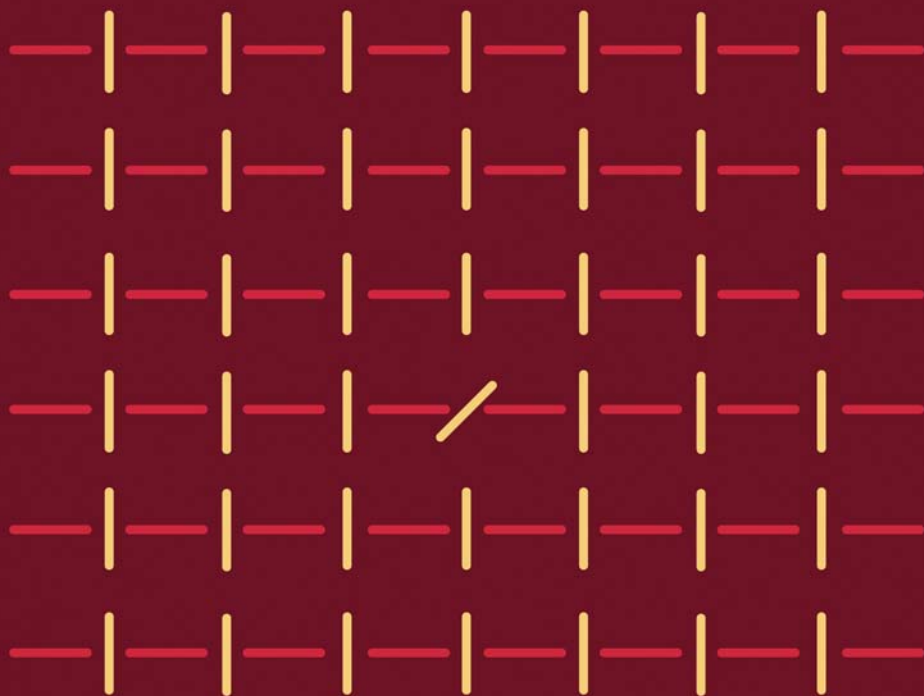


光通信技術の 飛躍的高度化

—光通信の新たな挑戦—

Innovations in Optical Fiber Communications Technologies

編者 中沢正隆 / 鈴木正敏 / 盛岡敏夫



まえがき

本書は、独立行政法人情報通信研究機構において、2008年1月に世界に先駆けて産学官連携で発足した「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会（EXAT研究会）」（EXAT：EXtremely Advanced Transmission）の約半年に亘る検討内容をまとめたものである。本書で述べられているように、現在のブロードバンド環境を実現している光通信技術、フォトニックネットワーク技術は、極言すれば、光ファイバ伝送路ならびに光中継器である光増幅器の超広帯域性に基いたものであり、過去20年間に3桁以上の大容量化を実現してきた。しかし、光ファイバで伝送できる光パワーの限界や光増幅器の帯域限界、海底光中継器への給電限界が間近に迫り、10年後以降のトラヒック需要に対応するためには、これらの限界を打破するブレークスルー技術が早期に求められている。本研究会では、2015年以降の実用可能なプロトタイプ完成と2020年以降の実用化を目指し、光通信の各分野の若手の一線の研究者、実用化経験者、標準化担当者に一同に集まって頂き、現状技術の限界や萌芽技術の把握、今後の技術課題を集中的に検討した。具体的には、ブレークスルー技術として、

- (1) 新規光ファイバ伝送路
 - (2) 新規多重化伝送・処理技術やノードアーキテクチャ
 - (3) 海底光伝送系イノベーション
- の3つの分野について議論した。

以上の検討より特に強調すべき基盤技術として次の3つの方向性が示された。

- [1] 単一の光ファイバ内で空間分割多重（Space Division Multiplexing: SDM）を実現することにより、毎秒ペタビットをはるかに越える情報量を伝送できる新規光ファイバ伝送路（マルチコアファイバ）（Multi-core）
- [2] 時間、波長、空間軸に加えて、伝搬（偏波）モードの直交性を利用し、モード分割多重（Mode Division Multiplexing: MDM）により伝送容量を飛躍的に増大させる多重化技術（Multi-mode）
- [3] シングルおよびマルチキャリア光 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）信号において、周波数利用効率を格段に向上させる高密度多値変調技術（Multi-level Modulation）

更に、これらの基盤技術の応用先としては、陸上光伝送系に加えて、物理

的制約が大きくケーブル内の光ファイバ心線数が制限される海底光伝送系が特に重要である。

これらの基盤技術“3つのM”をめぐって新概念の創出，諸技術の融合，新システムの統合が進み，新時代に向けた光通信インフラの飛躍的な高度化が進展するものと期待される。本書が，「光通信インフラの飛躍的な高度化」に向けた今後の研究開発推進の指針となれば幸いである。

2012年4月

編者一同

編者

(敬称略)

中沢 正隆	東北大学 電気通信研究所 所長・教授
鈴木 正敏	(株)KDDI 研究所 取締役
盛岡 敏夫	デンマーク工科大学 Photonics Engineering 学科 教授

執筆者

(敬称略, 五十音順)

青木 泰彦	(株)富士通研究所 ネットワークシステム研究所 フォトニクス研究部 主任研究員
青木 恭弘	日本電気(株) 海洋システム事業部 事業部長
榎並 和雅	(独)情報通信研究機構 理事
大橋 正治	大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻 教授
古賀 正文	大分大学 工学部 電気電子工学科 教授
國分 泰雄	横浜国立大学 理事・副学長, 大学院工学研究院 教授(兼任)
小柴 正則	北海道大学 大学院情報科学研究科 メディアネットワーク専攻 教授
齊藤 晋聖	北海道大学 大学院情報科学研究科 メディアネットワーク専攻 准教授
笹岡 英資	住友電気工業(株) 光通信研究所 主幹
鈴木 正敏	(株)KDDI 研究所 取締役
高良 秀彦	日本電信電話(株) NTT 未来ねっと研究所 主任研究員
田中 正俊	三菱電線工業(株) 光部品事業部 技術部 光ファイバ部品グループ
中沢 正隆	東北大学 電気通信研究所 所長・教授
長瀬 亮	千葉工業大学 工学部 機械サイエンス学科 教授
中村 守里也	(独)情報通信研究機構 光ネットワーク研究所 フォトニックネットワークシステム研究室 主任研究員
並木 周	(独)産業技術総合研究所 ネットワークフォトニクス研究センター 光信号処理システム研究チーム 研究チーム長
萩本 和男	日本電信電話(株) NTT 先端技術総合研究所 所長
福知 清	日本電気(株) システムプラットフォーム研究所 研究部長
松尾 昌一郎	(株)フジクラ 光電子技術研究所 光ファイバ技術研究部 グループリーダー

宮崎 哲弥	(独)情報通信研究機構 光ネットワーク研究所 所長
武笠 和則	古河電気工業(株) ファイテルフォトンクス研究所 光線路開発部 光ファイバGr. 主席研究員
盛岡 敏夫	デンマーク工科大学 Photonics Engineering 学科 教授
森田 逸郎	(株)KDDI 研究所 執行役員
姚 兵	日立電線(株) 技術本部 技術研究所
山下 真司	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
山田 誠	大阪府立大学大学院 電気・情報系専攻 准教授

目 次

序章 光通信の飛躍的高度化に向けた課題	1
(盛岡 敏夫)	
1. 研究課題	2
1.1 新規光ファイバ伝送路に向けた研究課題	3
1.2 新たな多重伝送・処理技術やノードアーキテクチャに向けた 研究課題	4
1.3 海底系イノベーション技術に向けた研究課題	5
2. 検討分野・技術とロードマップ	6
第1章 需要予測，将来の要求条件，現状商用化技術の概要	9
第1節 社会的要請と技術的要請	11
(盛岡 敏夫)	
1. 社会的要請	11
2. 技術的要請	13
第2節 需要予測	16
(盛岡 敏夫)	
1. アクセス系	16
2. 陸上基幹系	17
3. 長距離海底系	18
4. 需要と現状技術の関係	18
第3節 未来アプリケーションからの光伝送への期待	20
(榎並 和雅)	
1. はじめに	20
2. 映像の進化と伝送容量	21
2.1 スーパーハイビジョン	21

2.2 立体テレビ	24
2.3 超臨場感コミュニケーションの実現に向けて	25
3. 映像ユビキタス	26
4. 光通信ネットワークへの要求条件	27
5. まとめ	28
第4節 陸上系光伝送システムの現状と展望	30
(萩本 和男, 高良 秀彦)	
1. 光アクセス技術	31
2. 超大容量フォトニクストランスポート技術	32
3. まとめ	37
第5節 海底系光伝送システムの現状と展望	39
(鈴木 正敏)	
1. 海底系光伝送システムの概要	39
2. 海底系光伝送システムの現状技術	41
3. 最近の光海底ケーブルの状況	44
第2章 現状技術の限界と萌芽技術：光ファイバ	47
第1節 光ファイバケーブル技術の概要	49
(大橋 正治)	
1. 光ファイバの製造技術と光伝送損失の低減	49
2. 分散制御光ファイバ技術の開発	51
3. 光ファイバの研究開発の歴史	53
第2節 光ファイバ技術の現状と今後の展望	57
(笹岡 英資, 齊藤 晋聖, 松尾 昌一郎)	
1. 伝送損失	57
2. 波長分散・非線形性	58
3. 偏波モード分散	59
4. 伝送技術のインパクト	59
5. 容量増に向けた factor-of-10s	60
6. 新たなポテンシャルを有する新規構造ファイバ	
- 微細構造ファイバ - の提案	62

6.1 屈折率導波型フォトニック結晶ファイバ (PCF)	62
6.2 空気コアフォトニックバンドギャップファイバ (PBGF)	67
第3節 通信用光ファイバのファイバヒューズ - 現状とハイパワー化に 向けた今後の課題	77
(武笠 和則, 長瀬 亮)	
1. 陸上伝送用ファイバ / ファイバヒューズ問題の現状	77
2. 通信用光ファイバヒューズの現状	78
3. 通信用光ファイバの曲げによる被覆の損傷	80
4. ハイパワー化に向けた今後の課題	83
5. 光コネクタ接続点に起因するファイバヒューズ	87
6. 光コネクタ接続点よりファイバヒューズが発生する条件	89
6.1 異物による発熱	89
6.2 PC外れ	90
7. ハイパワー化に向けた光コネクタに関する今後の課題	93
第4節 高出力ファイバレーザに学ぶファイバハイパワー化技術 ...	94
(田中 正俊, 姚 兵)	
1. ファイバレーザの現状	94
2. 高出力の制限要因	97
3. さまざまなコア拡大ファイバ	99
4. ファイバレーザの構成例	102
4.1 Photonic Crystal Fiber	102
4.2 Yb添加Multi-Core Photonic Crystal Fiber	103
5. その他の諸問題	106
5.1 コネクタ	106
5.2 端末処理	107
5.3 被覆材料	108
5.4 フォトダークニング	108
6. まとめ	108
6.1 結論	108
6.2 研究課題	108

第5節 光通信システムの安全性とハイパワー化に向けた最近の動向 (IEC / JIS レーザ安全基準の立場から)	111
	(高良 秀彦)
1. レーザ安全に関連する標準化	111
2. IEC ・ JIS 標準規格	112
3. 光ファイバ通信システムの安全規格	113
4. ハイパワー化に向けた施策	115
5. まとめ	117
第6節 光ファイバ技術・標準化の現状と今後の動向	118
	(大橋 正治)
1. 国際標準化組織と役割	118
1.1 ITU-T の組織と役割	118
1.2 IEC の組織と役割	120
2. 光ファイバの国際標準化の状況	121
2.1 光ファイバの国際標準化の歴史	121
2.2 光システムと光ファイバ	122
3. 光ファイバの今後の動向と課題	126
第3章 現状技術の限界と萌芽技術：伝送技術・光ノード技術	129
第1節 伝送技術・フォトリックノード技術概論	130
	(福知 清, 古賀 正文)
1. 大容量リンク技術	130
2. フォトリックノード技術	134
第2節 コヒーレント伝送技術, 大容量伝送技術の現状と今後の展望	137
	(宮崎 哲弥, 中沢 正隆, 福知 清)
1. 内外国家プロジェクト動向	137
2. 各種方式	140
2.1 超高速光伝送技術	141
2.2 コヒーレント光 QAM 伝送技術	144

2.3 自己ホモダインQAM伝送技術	155
2.4 光OFDM伝送技術	157
2.5 インコヒーレントAPSK伝送技術	159
2.6 まとめ	161
3. エクサビットに向けて	164
第3節 空間多重伝送・処理技術	174
(武笠 和則, 國分 泰雄, 小柴 正則, 森田 逸郎)	
1. 空間モードを活用した光ファイバ技術の動向 - モード制御型 ファイバによる高機能化技術の研究開発状況 -	174
1.1 はじめに - 高次モードファイバ開発の背景	174
1.2 高次モード (HOM) DCFの開発	175
1.3 高次モードファイバのハイパワー用途への展開	177
1.4 モード制御ファイバの新たな研究	180
2. 空間多重 / モード多重伝送技術とマルチコアファイバ	182
2.1 空間多重 / モード多重伝送技術とマルチコアファイバ	182
2.2 異種コア非結合MCF	183
2.3 同種結合MCF	191
3. 光MIMO技術の現状と展望	197
3.1 MIMOの概要	197
3.2 MIMOの光通信への応用	199
3.2.1 偏波多重伝送	199
3.2.2 MMFを用いた複数モード伝送	202
第4節 光増幅技術の展望	205
(並木 周, 山田 誠, 中村 守里也)	
1. 光増幅技術概要	205
1.1 光増幅の基礎	205
1.2 光増幅器の種類と特徴	206
2. 光増幅器に関する標準化動向	210
3. 光増幅技術の課題と展望	213
4. マルチコア光増幅技術の現状と課題	216
5. まとめ	220

第5節	フォトリックノード技術の現状と今後の課題	222
	(古賀 正文, 青木 泰彦, 山下 真司)	
1.	ROADM リングネットワーク	222
1.1	システムアーキテクチャ	222
1.2	光伝達網 (フォトリックネットワーク) 技術	227
2.	光スイッチ技術の進展	230
2.1	3次元MEMSスイッチ	230
2.2	半導体光増幅器を用いる分配選択型スイッチ	231
3.	マルチグラニュラリティフォトリックノード技術	234
3.1	波長群パスクロスコネクトノード	235
3.2	仮想ファイバ・パスクロスコネクト (VFP-XC) ノード	237
4.	フォトリックネットワークの低炭素化社会への貢献	243
4.1	シリカ系光ファイバ	243
4.2	エルビウム添加光ファイバ増幅器	245
5.	超高速光信号発生・処理技術	248
5.1	超高速光信号発生・処理技術	248
5.2	超高速光信号発生	249
5.3	超高速光信号処理	253
5.4	まとめと今後の課題	258

第4章 光ケーブル, 光コネクタ, 融着技術の現状と課題

		261
第1節	光ファイバネットワークの構成	262
	(長瀬 亮)	
第2節	光ケーブル技術の現状と今後の課題	264
	(笹岡 英資)	
1.	光ケーブルの構造例	264
2.	光ファイバ特性への寄与	265
3.	伝送容量増に向けて	266
4.	まとめに代えて	267

第3節 光コネクタ技術の展望	269
(長瀬 亮)	
1. PC接続とハイパワー伝送	269
1.1 接続損失の影響	270
1.2 反射減衰量の影響	270
1.3 端面汚れの影響	273
2. MCFのコネクタ接続	274
3. まとめと今後の課題	276
第4節 光ファイバ融着技術	278
(松尾 昌一郎)	
1. フォトニック結晶ファイバ (PCF) の融着技術	278
2. マルチコアファイバ (MCF) 融着技術	281
第5章 海底系光伝送システムのイノベーション	285
第1節 海底系光伝送システムとは	286
(青木 恭弘, 福知 清)	
1. 海底ケーブルシステムの概要	286
2. 海底ケーブルシステム用変復調技術	288
3. 海底ケーブルシステム用光増幅中継器技術	289
4. 海底ケーブルシステム用光ファイバ技術	291
5. 海底ケーブルシステム用光ケーブル技術	292
6. 海底ケーブルシステム無中継伝送技術	292
第2節 海底系光伝送のマルチテラビットレベルに向けた大容量化技術	294
(青木 恭弘, 福知清)	
1. 海底ケーブルシステムの大容量化の流れ	294
2. マルチテラビット海底系光伝送システムを実現する伝送技術	295
3. マルチテラビット海底系光伝送システムの実用化に向けた課題	299

第3節 海底系光伝送システムのイノベーション技術	302
(鈴木 正敏, 森田 逸郎)	
1. 海底系光伝送システムの研究開発ターゲット	302
2. ケーススタディ	305
3. 研究開発課題	307
索引	309

序章

光通信の飛躍的高度化に向けた課題

一本の光ファイバで伝送できる容量や海底ケーブルの容量だけでなく、従来の設計に基づく光通信インフラは、近い将来確実に伝送容量の壁に直面する。このことを事前に予見し、然るべき対策として、我が国の通信インフラである陸上や海底系の光ファイバ伝送路、光伝送技術やノード技術の「飛躍的な高度化」に向けた取り組みが、我が国の情報通信技術・産業の持続的な発展にとって喫緊の課題である。

特に、まえがきでも述べた、来るべき近未来のペタビット通信を遅滞なく実現していくための3つのM (multi) 技術、すなわち、

マルチコア (Multi-core) ファイバなどのSDM (Space Division Multiplexing: 空間分割多重) 用の新規光ファイバ伝送路

マルチモード (Multi-mode) を用いたMDM (Mode Division Multiplexing: モード分割多重) 伝送技術ならびにMIMO (Multiple Input Multiple Output) 等の等化技術

多値変調方式 (Multi-level Modulation) 伝送方式やそれに関連する新たな伝送・処理技術やノードアーキテクチャ

は、学術分野だけでなく、技術(標準化)・産業等の分野でも世界を牽引していく主要技術となると考えられる。

今後の通信容量拡大の要請に基づき、3つのM技術はそれぞれ、10倍の容量拡大の可能性を開拓し、光通信インフラの持つ潜在的容量を1,000倍以上にすることが望まれる。さらに、これらの3つのM技術の成果は、我が国と

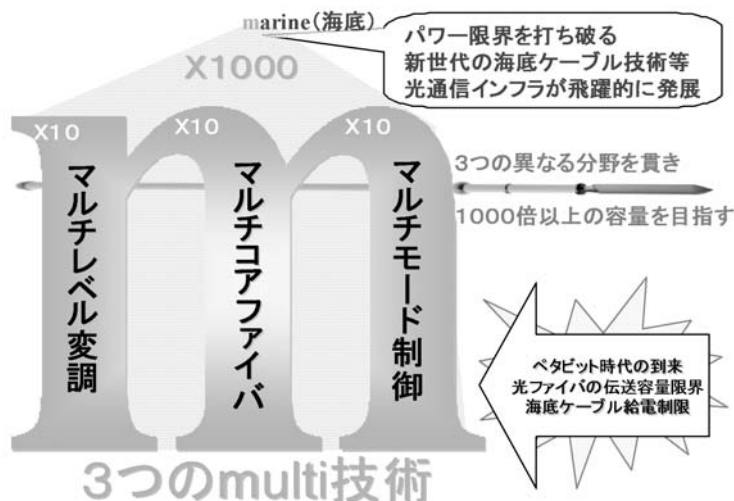


図1 光通信インフラの飛躍的な高度化のための3つのM (multi) 技術

世界を結ぶ情報通信の大動脈である，新世代の海底ケーブル等，光通信インフラに結集し，我が国の高度情報化社会を堅固に支えることが期待される。

以下に，3つのM技術構想に基づいた具体的な研究課題を列挙する。個々の技術分野における現状と課題，および課題解決に向けた取り組みの詳細については，以降の各章で説明する。

1 研究課題

本節では「増幅帯域，ファイバ入力光パワー，消費電力などの制限による伝送・処理容量の壁を突き破る」研究開発の方向性として下記の3つの項目についてそれぞれ，今後の研究課題を提示する。

- (1) 毎秒ペタビットをはるかに超える情報量を伝送できる新規光ファイバ伝送路(2章，4章)
- (2) TDM (Time Division Multiplexing: 時分割多重)，WDM (Wavelength Division Multiplexing: 波長分割多重)を超える「空間モードや空間コヒーレンス」も活用したSDM，MDMなどの新たな多

-
- 重伝送・処理技術やノードアーキテクチャ（3章）
（3）海底系イノベーション技術（5章）

1.1 新規光ファイバ伝送路に向けた研究課題

（1）ファイバヒューズ関連技術

（1-1）光ファイバ

- ファイバヒューズメカニズムの解明・解析
- ファイバヒューズ遠隔検知・伝搬停止技術
- 光ファイバのハイパワー耐性向上技術

（1-2）光コネクタ

- 光コネクタ端面清掃方法
- PC（Physical Contact）外れによるファイバ・ヒューズ発生原因の解明
- PC光コネクタの対パワー特性向上技術

（2）光通信システムの安全性

- ▷ 高パワー光ファイバ通信システムに向けた，人体への被曝制限および光ファイバ・光部品への損傷防止の両方を実現する，材料・デバイス，装置，およびシステム化技術

（3）新規光ファイバ

▷ マルチコアファイバ

- 結合・非結合系マルチコアファイバの設計技術ならびに製造技術
- モード制御を利用したさらなる高機能化

▷ 屈折率導波型フォトニック結晶ファイバ（Photonic Crystal Fiber: PCF）

- 空孔表面における凹凸のさらなる低減化による伝送損失の低減
- マルチコアファイバの高効率な結合・受光方法，一括増幅法などの開発

▷ 空気コアフォトニックバンドギャップファイバ（Photonic Bandgap Fiber: PBGF）

- 作製技術の向上によるシリカ表面粗さの最小化

- マルチモード PBGF における伝搬モード数の制御
- 反共振条件と表面モードフリー条件が両立できるようなコア・クラッド形状の最適化
- 空気コア PBGF 増幅器や低損失な接続技術の確立

(4) 高出力ファイバレーザ関連

- ▷ シングルモードビーム品質の向上と非線形光学効果の抑圧
- ▷ シングルモード出力時の低曲げ損失を維持したコア拡大技術
- ▷ シングルモード出力用高性能デリバリファイバ
- ▷ 高出力化とフォトダークニングの抑制技術

(5) 光コネクタ技術・光ファイバ融着技術・光ケーブル化技術

(5-1) 光コネクタ技術

- ▷ マルチコアファイバのファンナウト部品
- ▷ マルチコアファイバ PC 接続の信頼性
- ▷ SF (Sagged Fiber) コネクタのハイパワー耐性向上

(5-2) 光ファイバ融着技術

- ▷ マルチコア調心技術
- ▷ 調心を考慮に入れた光ファイバ構造設計

(5-3) 光ケーブル化技術

- ▷ 光ファイバの高性能を維持可能な光ケーブル・ケーブル化技術の開発

1.2 新たな多重伝送・処理技術やノードアーキテクチャに向けた研究課題

(1) 空間多重技術・モード多重技術

- ▷ 結合系マルチコアファイバにおけるモード合分波器と両立しうる波長多重化技術, 低損失な接続技術
- ▷ 非結合系マルチコアファイバにおけるコア間結合を回避するための設計条件
- ▷ 空間分割多重 (既存光ファイバを高密度に多心化)
- ▷ マルチモードファイバを用いたモード分割多重伝送技術
- ▷ MMF (Multi Mode Fiber) 複数モード伝送の長距離化技術

-
- ▷ 光多チャンネルMIMO 信号処理技術
 - ▷ 空間・モード多重用光信号処理技術

(2) 光増幅技術

- ▷ マルチコア一括光増幅器
- ▷ 光増幅器の多心化・高密度化
- ▷ マルチコア光増幅器と組み合わせ可能なマルチコア光 3R 技術
- ▷ 多モード、多心ケーブルを効率よく増幅できる光増幅技術

(3) EXA クラスノード技術

- ▷ 超大容量信号のノード内小型・高速交換・光スイッチング技術
- ▷ 光監視制御技術，障害復旧技術，障害耐力向上技術及び Tera 級ノードから Peta，Exa 級ノードへの拡張性（スケーラビリティ）
- ▷ 監視制御機能などを含めたノードアーキテクチャ技術
- ▷ 高非線形ガラス光ファイバや PCF，さらに新非線形材料による超高速光信号処理デバイス技術
- ▷ パーチャルファイバパス（VFP）によるエクサビット級フォトニックネットワーク技術
- ▷ 複数のマルチコアファイバ入出力におけるコア間空間スイッチを可能とする精緻な空間スイッチ技術の確立

1.3 海底系イノベーション技術に向けた研究課題

(1) 送受信技術

- ▷ 変調方式
非線形耐力のある高感度多値・マルチキャリア変調（QAM（Quadrature Amplitude Modulation），OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing），新方式）
- ▷ 信号処理技術
 - 高利得 FEC（Forward Error Correction）：FEC 利得 > 10dB
 - 偏波分離：MIMO
 - On-line DSP（Digital Signal Processor）：波長分散，偏波分散（Polarization Mode Dispersion: PMD）補償

(2) 光伝送路技術

- ▷ 極低損失・低非線形光ファイバ
 - 低損失化 (<0.16 dB/km)
 - 低非線形化 ($A_{\text{eff}} > 300 \mu\text{m}^2$) : 低マイクロベンディング損失
- ▷ 光増幅器
 - シームレス広帯域・利得フラット光増幅器 (100nm ~ 200 nm @10000km)
 - 低雑音化 ($NF = 3 \sim 3.5$ dB)
 - 高効率化

(3) ケーブル化技術

- ▷ 耐圧
 - 現状の耐圧 : 35kV 程度 10 倍程度拡大
- ▷ 多心化技術 (又はマルチコア/マルチモード)
 - 現状の心数 : 16 心 (8 ファイバ対) 10 倍程度収容可能
- ▷ 電圧降下低減技術
 - 現状の抵抗 : $0.7 \Omega/\text{km}$ 1/10 程度に

(4) 中継器技術

- ▷ 中継器回路の超小型化, 低消費電力化
- ▷ 中継器筐体の耐圧向上技術

(5) 海底ケーブル敷設技術

- ▷ 太径ケーブル, 大型中継器筐体の敷設技術
- ▷ 極寒北太平洋でのケーブル敷設技術

2 検討分野・技術とロードマップ

上記, 研究課題に基づく, 検討分野・技術ならびにロードマップを表1に示す。

表1 検討分野・技術とロードマップ

検討分野・技術		フェーズ1 2010-2015	フェーズ2 2015-2020	フェーズ3 2020-2025
新規ファイバ 伝送路	ファイバヒューズ (ファイバ・コネクタ)	- メカニズム解明 - 検知法確立	実用化	
	安全性規格	- 規格提案	規格化	
	マルチコアファイバ	20コア	100コア	
	フォトニック結晶 ファイバ	損失0.3 dB/km	損失0.2 dB/km	実用化
	フォトニックバンド ギャップファイバ	損失0.5 dB/km	損失0.2 dB/km	実用化
	光コネクタ技術	高出力用コネクタ	マルチコアコネクタ	実用化
	光ファイバ融着技術	新規ファイバ用	マルチコアファイバ	実用化
	光ケーブル化技術	新規ファイバ用	マルチコアファイバ	実用化
新規多重化 伝送・処理 技術ノード アーキテクチャ	空間多重技術・ モード多重技術	合分波器設計	合分波器製造	実用化
	マルチモード多重 技術	伝送距離100 km	伝送距離1,000 km	実用化
	光MIMO技術	10多重	100多重	実用化
	光信号処理・ デバイス技術 (3R)	- 材料探索 - 機能明確化	プロトタイプ	実用化
	光増幅技術	低雑音・広帯域化	マルチコア増幅器	実用化
	EXAクラスノード技術	- アーキテクチャ - 光スイッチ設計	プロトタイプ	実用化
海底系イノベーション技術	送受信技術	- 高感度多値変復調 - 高利得FEC	現場試験・商用化	現場試験
	光伝送路技術	- 損失 <0.16 dB/km - $A_{eff} > 300 \mu m^2$ - 光増幅器：広帯域、 利得フラット帯域 ~200 nm, NF= 3~3.5 dB	現場試験・商用化	
	ケーブル化技術	- 耐圧：~350 kV - 多芯化：~100 FP - 抵抗<1/10	現場試験・商用化	
	中継器技術	- 超小型化、 低消費電力化 耐圧向上	現場試験・商用化	
	海底ケーブル敷設 技術	- 太径ケーブル・ 大型中継筐体 - 極寒北太平洋 敷設技術	現場試験・商用化	

(盛岡 敏夫)