



ジャーナル 6

Journal of the ITU Association of Japan
Jun 2024 Vol.54 No.6

トピックス

「第56回世界情報社会・電気通信日のつどい」開催

特集

EXAT研究会「15周年シンポジウム」

EXAT研究会の15年の歩み／大容量光通信システムの発展と展望
SDM関連シミュレーション技術高度化の歴史
SDM光ファイバ研究の最新動向と今後の展望
マルチコアファイバ接続・光ケーブル研究の最新動向と今後の課題
マルチコア光ファイバ増幅技術の最新動向と今後の展望
EXATロードマップ活動とSDM光ファイバの標準化動向
SDM光伝送技術の最新動向と今後の展望
コア選択スイッチの 海底MCF分岐装置への適用に関する検討
結合型マルチコアファイバ用光コネクタの接続特性
モード分割多重伝送のためのPLC型モード制御デバイス

スポットライト

更別村のデジタル推進について

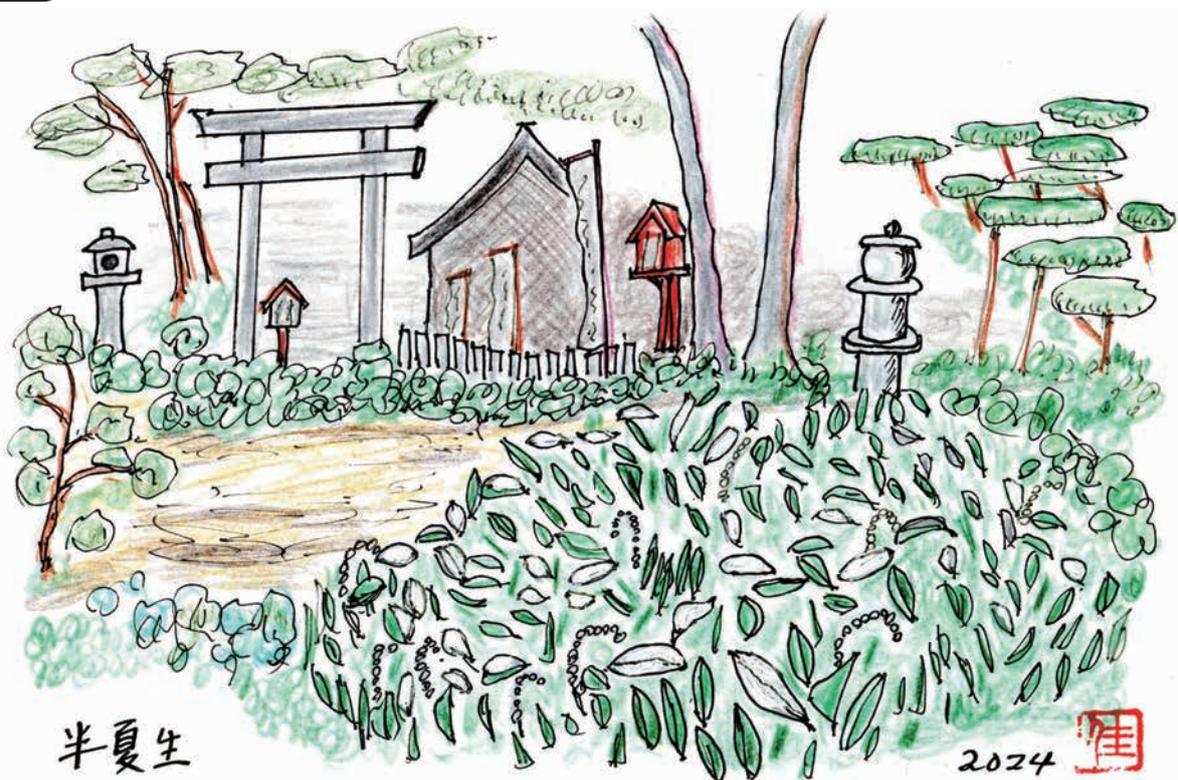
会合報告

ITU-T:SG13 (将来網及び新興ネットワーク技術)

ITU-T:SG17 (セキュリティ) / APT:AWG-32 (APT無線グループ)

エッセイ

情報通信技術の国際標準化活動におけるアカデミアの役割



トピックス

「第56回世界情報社会・電気通信日のつどい」開催 一般財団法人日本ITU協会	3
---	---

特集

EXAT研究会「15周年シンポジウム」	
EXAT研究会の15年の歩み 東北大学 中沢 正隆／国立研究開発法人情報通信研究機構 淡路 祥成／デンマーク工科大学 盛岡 敏夫	5
大容量光通信システムの発展と展望 早稲田大学 鈴木 正敏／日本電信電話株式会社 宮本 裕	8
SDM関連シミュレーション技術高度化の歴史 北海道大学 小柴 正則	13
SDM光ファイバ研究の最新動向と今後の展望 住友電気工業株式会社 長谷川 健美	15
マルチコアファイバ接続・光ケーブル研究の最新動向と今後の課題 株式会社フジクラ 竹永 勝宏	17
マルチコア光ファイバ増幅技術の最新動向と今後の展望 古河電気工業株式会社 高坂 繁弘	19
EXATロードマップ活動とSDM光ファイバの標準化動向 日本電信電話株式会社 中島 和秀	21
SDM光伝送技術の最新動向と今後の展望 株式会社KDDI総合研究所 相馬 大樹／別府 翔平	23
コア選択スイッチの海底MCF分岐装置への適用に関する検討 香川大学 田原 理加	26
結合型マルチコアファイバ用光コネクタの接続特性 千葉工業大学 藤巻 湧己	28
モード分割多重伝送のためのPLC型モード制御デバイス 北海道大学 佐藤 孝憲／齊藤 晋聖	30
更別村のデジタル推進について 北海道更別村役場 品田 亮太	32
ITU-T SG13(Future networks and emerging network technologies 3/1-3/15) 国立研究開発法人情報通信研究機構 谷川 和法	34
ITU-T SG17第5回会合報告 株式会社KDDI総合研究所 磯原 隆将／三宅 優	39
アジア・太平洋電気通信共同体(APT)無線グループ(AWG)第32回会合(2024年3月4日-8日)報告 総務省 総合通信基盤局 電波部 電波政策課 国際周波数政策室	44
シリーズ「大学とITU」3 情報通信技術の国際標準化活動におけるアカデミアの役割 東京大学 中尾 彰宏	47

スポット
ライト

会合報告

エッセイ

情報
プラザ

「社会人のためのデータサイエンス入門」 受講者募集中(2024年6月11日(火)開講) 総務省 統計局 統計情報利用推進課	51
日本ITU協会 研究会開催一覧 (2024年1月~3月)	52



【表紙の絵】

IEEE Fellow 池田佳和

●三宅八幡宮の半夏生(京都市左京区)
叡山電車で出町柳から約十分の駅近かにある子供の守り神のお社。境内の湧き水池畔には半夏生(はんげしょう)が茂っている。初夏には白い葉も出てきて、白ピーズを繋いだような花が咲く。夏夏が過ぎると「半夏生」という七十二候の暦日が来るが、関西ではタコを食べる習慣がある。

免責事項
本誌に掲載された記事は著者等の見解であり、必ずしも当協会の見解を示すものではありません。

本誌掲載の記事・写真・図表等は著作権の対象となっており、日本の著作権法並びに国際条約により保護されています。これらの無断複製・転載を禁じます。



ITU (International Telecommunication Union 国際電気通信連合) は、1865年に創設された、最も古い政府間機関です。1947年に国際連合の専門機関になりました。現在加盟国数は193か国で、本部はジュネーブにあります。ITUは、世界の電気通信計画や制度、通信機器、システム運用の標準化、電気通信サービスの運用や計画に必要な情報の収集調整周知そして電気通信インフラストラクチャの開発の推進と貢献を目的とした活動を行っています。日本ITU協会 (ITUAJ) はITU活動に関して、日本と世界を結ぶかけ橋として1971年9月1日に郵政大臣の認可を得て設立されました。さらに、世界通信開発機構 (WORC-J) と合併して、1992年4月1日に新日本ITU協会と改称しました。その後、2000年2月15日に日本ITU協会と名称が変更されました。また、2011年4月1日に一般財団法人へと移行しました。

「第56回世界情報社会・電気通信日のつどい」開催

一般財団法人日本ITU協会 企画部

2024年5月17日、当協会主催の「第56回世界情報社会・電気通信日のつどい」が京王プラザホテル（新宿区西新宿）にて開催され、日本政府、情報通信放送業界等から約110名の関係者が参集した。式典に続いて祝賀会も行われた。

5月17日は、1865年に国際電気通信連合（ITU）の基礎となった万国電信条約が署名された日にあたる。「世界情報社会・電気通信日（World Telecommunication and Information Society Day）」と銘打ち、ITUや各国が記念日として祝うことに合わせ、我が国では日本ITU協会が式典を開催している。この式典では、今年で52回目となる長い伝統のある総務大臣賞と日本ITU協会賞が、国際標準化や国際協力分野において広く情報通信・放送分野で活躍してこられた方々の功績を称え、贈呈された。

式典では、来賓の渡辺総務副大臣より、我が国が昨年「G7デジタル・技術大臣会合」や「IGF京都」を開催するなど、国際連携の深化への重要な役割を果たしてきたこと、引き続きITUの活動を通じた積極的な貢献を行うべく、対応していきたいとお言葉をいただいた。また、柘植外務副大臣からは、日本ITU協会が、ITUやアジア・太平洋電気通信共同体（APT）等の取組みへの協力や、我が国と世界の電気通信・放送技術の発展への貢献を通じて、日本とこれら機関の連携の要としての活動を展開してきたこと、国際機関幹部ポストの獲得において尽力してきたことについてご紹介いただいた。日本ITU協会賞選考委員会の徳田委員長からは、本年の選考についての報告があった。

続いて、総務大臣賞及び日本ITU協会賞の贈呈式が行われ、総務大臣賞は、2015年～2023年の8年間にわたりITU-R SG6議長を務め、超高精細度テレビジョン映像方式やHDR-TV（高ダイナミックレンジテレビジョン／ High-Dynamic

Range Television）方式の勧告策定をはじめ、AIやイマーシブメディア等の新技術を放送に導入する取組みを主導して、SG6の第75回工学・科学・技術エミー賞受賞に寄与した西田幸博氏（日本放送協会放送技術研究所）に贈呈された。また日本ITU協会賞特別賞は、長年、医療分野（外科）へのICT技術の活用に取り組み、最近ではXR／VR／AR／MR技術を外科手術に応用する具体的な製品開発、提供、普及活動を積極的に進めている杉本真樹氏（Holoeyes株式会社代表取締役CEO／帝京大学沖永総合研究所 Innovation Lab／帝京大学医学部外科学講座 肝胆膵外科）に贈呈された。

ITUの活動または我が国のITU関係諸活動への貢献、世界情報社会サミットにおける基本宣言または行動計画の実現への貢献、情報通信、放送または郵便の分野における国際協力活動への貢献、その他情報通信または放送に係る国際的な活動に関する功績があった8名の個人と1件の団体に「功績賞」、15名の個人に「奨励賞」の贈呈を行い、その功績が称えられた。

贈呈式の後は記念講演が行われ、「外科医療のデジタル革新」のテーマで、特別賞を受賞した杉本真樹氏に講演いただいた。

今年も、式典会場において、総務大臣賞並びに日本ITU協会賞を贈呈することができたことに、感謝を申し上げる。受賞者の皆様の今後益々のご活躍とご健勝をお祈りするとともに、推薦機関をはじめ、本式典を支えていただいている各方面の方々に御礼を申し上げます。なお、式典の様子は、当協会のウェブサイトに掲載するので、是非ご覧いただきたい。

https://www.ituaj.jp/?page_id=31906



■記念撮影



■総務大臣賞受賞 西田幸博氏



■日本ITU協会賞 特別賞受賞 杉本真樹氏



■日本ITU協会賞 功績賞受賞の皆様



■日本ITU協会賞 奨励賞受賞の皆様

■総務大臣賞、第52回日本ITU協会賞 受賞者一覧
(敬称略) (所属は推薦時)

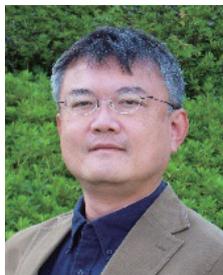
氏名	会社名
【総務大臣賞】	
西田 幸博	日本放送協会
【特別賞】	
杉本 真樹	Holoeyes株式会社 帝京大学冲永総合研究所 Innovation Lab 帝京大学医学部外科学講座 肝胆腸外科
【功績賞】	
井上 正純	公益財団法人KDDI財団
今田 諭志	KDDI株式会社
岩崎 順子	日本電気株式会社
岩間 司	国立研究開発法人情報通信研究機構
軍司 明允	特定非営利活動法人 BHNテレコム支援協議会
近藤 芳展	NTTアドバンステクノロジー株式会社
中村 浩崇	NTTイノベティブデバイス株式会社
山田 渉	日本電信電話株式会社
HAPS国際周波数 標準化チーム	ソフトバンク株式会社
【奨励賞】	
縣 幹哉	KDDI株式会社
宇都宮 隆介	楽天モバイル株式会社
海野 恭平	株式会社KDDI総合研究所
河崎 純一	株式会社KDDI総合研究所
菅澤 孝一	NTTイーアジア株式会社
鈴木 泰樹	KDDI株式会社
陶山 桃子	日本放送協会
武田 大樹	株式会社NTTドコモ
チン ウェンゼン	株式会社NTTドコモ
難波 忍	KDDI株式会社
藤井 勝巳	国立研究開発法人情報通信研究機構
伏木 雅	富士通株式会社
松川 隆介	株式会社NTTドコモ
山崎 大人	国際協力機構 (JICA)
渡邊 淳司	日本電信電話株式会社

EXAT研究会の15年の歩み



東北大学
災害科学国際研究所
特別栄誉教授

なかざわ まさたか
中沢 正隆



国立研究開発法人
情報通信研究機構
フォトニックICT研究
センター
研究センター長

あわじ よしなり
淡路 祥成



デンマーク工科大学
Department of
Electrical and
Photonics
Engineering 教授

もりおか としお
盛岡 敏夫

1. はじめに

本特集は、2023年12月11日に東京で開催された、電子情報通信学会 通信ソサイエティ EXAT研究会^[1]主催の「光通信インフラの飛躍的高度化に関するシンポジウム—EXAT (3M) 研究活動開始15年の節目を迎えて—」での講演内容をまとめたものである。2008年1月に情報通信研究機構 (NICT) 主導により発足したEXAT研究会^[2]は、2010年4月からは、電子情報通信学会 通信ソサイエティの研究会として、その活動の場を移し、現在、世界の最先端光ファイバ通信技術を牽引している。この間、本研究会が、提唱する3M空間多重光伝送技術 (マルチコアファイバ、マルチモード制御、マルチレベル変調) (図1) によって、光ファイバ1本当たりの伝送容量 (実証実験) は、毎秒32テラビットから約23ペタビットと約3桁近く拡大した。本稿では、2008年～2009年の創成期、2010年からの電子情報通信学会EXAT研究会での積極的な国際連携活動、さらには、NICT・総務省のEXAT関連国家プロジェクトや商用化に向けた動きなど、これまでの15年の歩みを概観する。



■ 図1. 1,000倍の伝送容量を実現する3M技術

2. NICT EXAT研究会の創生 (2008年～2009年)

年率40%程度で増加する通信トラフィックの急増 (20年で

3桁程度の増加) に鑑み、3桁以上の伝送容量を有する新たな光伝送路や光伝送技術の創出を目指して、2008年1月に、NICT主催の「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)」が、世界に先駆けて発足した。産学官からの約25名のメンバにより、第1期 (2008年) では、現状技術の限界把握、毎秒ペタビットをはるかに超える伝送能力を有する新規光ファイバや、時分割多重 (TDM) や波長分割多重 (WDM) を超える空間分割多重 (SDM) などの新規伝送処理技術を議論した。メンバには、将来の実用化を見据え、光通信の各分野から若手の第一線の研究者、光通信システム関連の実用化経験者、ITUやIEC等の国際標準化に現役で携わる方々が名を連ねた。第2期 (2009年) では、第1期で検討した技術に関して、産学官連携での新規国家プロジェクト創設に向けた技術課題について議論を重ねた。研究会名の略称であるEXATは、EXtremely Advanced Transmissionに由来するが、加えて「毎秒エクサ (EXA=10¹⁸) ビット伝送を目指した技術」の意も包含する。2008年11月には、第1期活動の報告会を兼ねた国際シンポジウムEXAT2008が、約200名の参加者を集めて東京で開かれ、世界に先駆けて新規光ファイバやSDM伝送技術の研究開発の方向性を議論した。

3. 電子情報通信学会 EXAT研究会 (2010年～) における国際連携活動

NICT EXAT研究会の活動を受けて、2010年4月には、世界に向けた本技術分野の啓発と促進、次世代の光通信インフラを目指した技術研究戦略などについて更に幅広い議論を加速するために、電子情報通信学会通信ソサイエティ「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する時限研究専門委員会 (EXAT研究会、現在、特別研究専門委員会)」^[1]が発足した。これまで、EXAT2008を含め7件の国際シンポジウムの主催、23件の国際学会でのワークショップ・シ

ンポジウムの技術協働を実施し、積極的に国際連携活動を進めている。また、本分野の技術ロードマップの詳細化と社会実装への寄与の一環として、標準クラッド径マルチコアファイバについて、そのロードマップ Ver.2^[3]を完成させた。

近年、標準クラッド径マルチコアファイバ技術は、空間多重伝送の実用展開に向けた最初のマイルストーンとして国際的に注目を集めており、ITU-T SG15においても、2022年に発行した空間多重光ファイバケーブルに関する技術レポート^[4]の中で、空間多重光ファイバの実用展開に向けた候補技術の一つとして位置付けられている。本技術レポートの検討・発行提案は日本からの寄書投稿により実現したものであり、EXAT研究会メンバも寄与している。ロードマップと国際標準化動向については、本特集の「EXATロードマップ活動とSDM光ファイバの標準化動向」を参照されたい。なお、これまでEXAT研究会で検討した技術分野の進展は、日本語出版^[5]並びに英語出版^[6]において詳細に記述されている。

4. NICT・総務省 EXAT関連国家プロジェクト

図2に産学官連携プロジェクトを含めたEXAT研究会の発足から現在までの歩みを示す。

国内の研究連携については、複数の通信キャリアが連携する枠組みの仲介及び総合調整をNICTが担い、さらに、主要ファイバメーカー、主要ベンダがそれぞれの業態に則した要素技術に関して参画するとともに、ファイバ設計や理論検討面で大学等がコミットする、産学官バランスのとれたオールジャパン研究開発体制を2009～2010年にかけて準備した。2010年当時、SDM技術は萌芽技術の段階に

あったため、初動では公的資金の投入を主軸としてリスクの高い研究開発を迅速に進めて一定の成果を挙げ、国際的な技術のコンセンサスの形成や事業化の機運を段階的に高めて、民間事業者の投資を徐々に拡大し、スムーズに事業化・商用化に至る戦略を執っていた。

具体的にはNICTの高度通信・放送研究開発委託研究制度（いわゆるNICT委託研究）を用いて、複数の企業・大学が参画する研究開発プログラムが段階的かつ継続的に実施されてきた。皮切りとなったのは2010年から3か年かけて実施した、課題146「革新的光ファイバ技術の研究開発」であり、史上初めて通信用のマルチコアファイバの設計、製造方法及び性能評価を組織的に実施したプロジェクトである。なお、当時の背景説明として「5～10年後にペタビット級光通信を実現するため」と銘打たれていたが、奇しくも2年後には1ペタビット毎秒の光伝送が実現することとなる（後述）。続く、課題150「革新的光通信インフラの研究開発」は2011～2015年にかけて実施され、マルチコアファイバを用いた光伝送システムの構成要素である、マルチコア光増幅技術、マルチコアファイバ接続技術に加えて、当時欧米にてマルチコアファイバとの競合技術として立ち上がってきたマルチモード伝送も視野に入れたマルチコア・マルチモード伝送技術の3つの柱によって成り立っていた。課題146と併せてこのプロジェクトの完遂により、初期段階のマルチコアファイバ光伝送システムの概観が見通せるようになった。なお、課題150実施期間の中途、2012年に12コアファイバを用いた1ペタビット毎秒が達成された^[7]。

その後、課題146の後継としては、課題170「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」（2013～2017年）において、本格的なマルチコアファイバの研究が行われ、マルチコア



■ 図2. EXAT研究会の発足から現在までの歩み



ファイバの設計指針、作成方法の確立、低損失化、コア間干渉低減などの評価指標の検討、解析的・数値的な理論強化、数モード・多モードの検討、性能と製造性の両立、入出力・結合方法などの技術的進展に加えて、初めて標準化に向けた行動計画の立案なども実施された。さらに続く、課題203「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」(2018~2022年)では、課題170及び後述の課題188実施中に発明された標準外径マルチコアファイバを早期実用化の主力と位置付けて、量産性の向上につながる標準外径マルチコアファイバの製造技術と、ケーブル化などの周辺技術及び評価技術に関する集中的な研究開発を推進した。

一方、課題150の後継としては、マルチコアファイバによって増大するリンク伝送容量を収容可能な10ペタビット毎秒級のノードスループットを実現する大容量交換技術に重点化した課題188「空間多重フォトニックノード基盤技術の開発」(2016~2020年)が実施され、空間多重ノードアーキテクチャやシステム制御を前提とした評価手法、空間多重ノード内での光増幅、方路制御技術及び空間多重に最適化された配線技術など、ノードの構成要素を網羅する研究開発が行われた。加えて、総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業において当該技術分野における日欧の連携を促進するための「再構成可能なインフラのためのスケラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発(SAFARI)」や、ICT重点技術の研究開発プロジェクトにおいて海底ケーブルシステムに特化した「マルチコア大容量光伝送システム技術(OCEANS)」、マルチコアファイバ接続技術を含む「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」など多角的に社会実装を促進する研究開発プログラムが実施されてきている。

そして、現在もNICT革新的情報通信技術(Beyond 5G(6G))基金事業として、課題002「Beyond 5G大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発」、課題010「Beyond 5G時代に向けた空間モード制御光伝送基盤技術の研究開発」などのプログラムが継続的に実施されており、直近の実用化だけでなく、光通信インフラの「持続的な」飛躍的高度化を目指した最先端の研究開発が行われている。

5. 商用化へ向けて

前述した研究連携の中で課題170及び課題188において、早期実用化を目指して創出された標準外径のマルチコアファイバのコンセプトは、後継の課題である課題203及び総務省のOCEANSに主たる研究対象として継承された。この2つのプログラムにおいて各社連携の枠組みの中で技術が成熟し、プログラム終了後も国内企業における技術蓄積が継続された結果が実ったのであろうか、2023年秋に、国内ファイバメーカーによる世界初のマルチコアファイバ量産の開始と、米国プラットフォームによる太平洋横断ケーブルシステムにおけるマルチコアファイバの導入計画について、それぞれ発表がなされた^[8]。これらはマルチコアファイバの初の商用化であり、2010年に描いたスムーズな事業化・商用化が進展し始めた兆しである。

参考文献

- [1] 電子情報通信学会 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する特別研究専門委員会
<https://www.ieice.org/~exat/?FrontPage>
- [2] 「我が国基礎・基盤研究の現状~NICT EXAT研究会~」ITUジャーナル 2009年5月号
https://www.ituaj.jp/member_archive/itu2009.php
- [3] EXATロードマップhttps://www.ieice.org/~exat/Roadmap/EXAT_Roadmap_ver2.pdf
- [4] ITU-T Technical Report GSTR-SDM “Optical fibre, cable, and components for space division multiplexing transmission” (09/2022) https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/tut/T-TUT-HOME-2022-1-PDF-E.pdf
- [5] 「光通信技術の飛躍的高度化」(中沢、鈴木、盛岡 編) オプトロニクス社 (2012年) http://shop.optronics.co.jp/products/detail.php?product_id=427
- [6] M. Nakazawa, M. Suzuki, Y. Awaji, T. Morioka (eds.) “Space-Division Multiplexing in Optical Communication Systems,” Springer Series in Optical Sciences, vol 236. Springer, Cham. (2022年) <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-87619-7>
- [7] H. Takara, et. al., “1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency,” ECOC2012, Th.3.C.1.
- [8] 「世界初 極低損失マルチコア光ファイバの量産化に成功」(2023年9月) <https://sumitomoelectric.com/jp/press/2023/09/prs115>
「マルチコアファイバー技術で海底ケーブルを強化」(2023年9月) <https://cloud.google.com/blog/ja/products/infrastructure/delivering-multi-core-fiber-technology-in-subsea-cables?hl=ja>

大容量光通信システムの発展と展望



早稲田大学理工学術院
客員教授

すずき まさとし
鈴木 正敏



日本電信電話株式会社
NTT未来ねっと研究所
フェロー

みやもと ゆたか
宮本 裕

1. はじめに

本稿では、光ファイバの低損失性と広帯域性をフルに活用した大容量光通信システムのこれまでの発展並びに今後のパラダイムシフトを起こす新技術の展望について解説する。代表的な大容量光通信システム^[1]として陸上光ネットワークと海底ケーブルシステムを取り上げ、それぞれにおける実装・敷設条件等のシステム要求条件の違いによる発展の経緯と今後の技術動向について述べる。

2. 陸上光通信システムの進展と将来展望

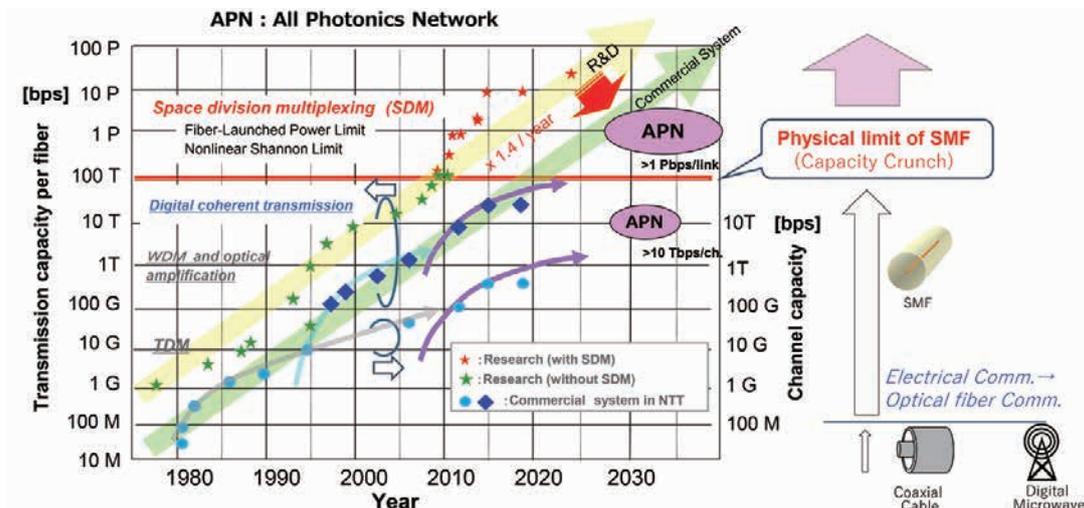
本章では、近年の陸上光通信システムの進展と現状技術と将来展望を述べる。

2.1 陸上基幹伝送システムのリンク容量の発展

図1に我が国での陸上基幹光ネットワークの発展の推移を示す。我が国で最初の陸上基幹光通信システムは、多モード光ファイバ（MMF）を用いた32Mbit/s再生光中継システムであり、1981年に近距離区間に実用化された。単一モー

ド光ファイバ（SMF）を用いた基盤技術が世界に先駆けて早期に実用化され、1985年には、SMFを用いた日本縦貫ルートが完成した。陸上光ネットワークでは、既設の光ファイバケーブルを用いて、既存システムとの中継間隔の後方互換性を保ちながら中継装置を置き換えることで大容量化が図られる。パラダイムシフトを起こす数々の中継伝送技術の革新が重層的に実用化されることで、これまでに、SMFをベースとした光中継伝送技術が飛躍的に発展し、40年で約6桁の大容量化が達成されている。

1990年代半ばまで、強度変調直接検波方式を用いたTDM（Time-division Multiplexing）による単一波長システムの高速化により大容量化が実現され、1987年には、1.5 μ m帯単一モードレーザを適用したF-1.6G方式（単一波長、1.6Gbit/s再生中継方式）、1996年にはエルビウム添加光ファイバ増幅中継器（EDFA）を用いたFA-10G方式（単一波長10Gbit/s光増幅中継方式）が実用化された。その後、2000年代にはWDM（Wavelength Division Multiplexing）と広帯域光増幅中継技術により、リンク容量1Tbit/s級の



■ 図1. 陸上光ネットワークのリンク容量の推移とパラダイムシフトを起こした要素技術



10Gbit/sチャンネルベースWDMシステムによる大容量化が実現された。現在の陸上光ネットワークでは、主要なネットワークノード（ノード）間の代表的な再生中継間隔は500～1,000kmであり、ノード間には、複数の中継ビルに平均中継間隔約80～100km程度で光増幅中継器が配置され、送信した光信号が光ファイバ中で受ける損失を光増幅中継器で補償されながら中継されている。2010年代には、多値デジタル変復調信号処理技術を駆使したデジタル・コヒーレント技術によるWDMシステムにおける周波数利用効率向上と長距離化が進み、2013年には、100Gbit/sチャンネル（偏波多重4値位相変調）を用いたリンク容量8Tbit/s WDM光ネットワーク、2017年からは、400Gbit/sチャンネル（マルチキャリア16値QAM (Quadrature Amplitude Modulation)）を用いた伝送容量20Tbit/s級のデータセンタ間ネットワークや長距離WDM光ネットワークが実用化されている。

2.2 マルチバンド波長多重伝送技術による大容量化

陸上長距離光ネットワークでは、ケーブル1心当たりの平均的なファイバ心数は数100心程度であり、当面の大容量化に向けては、既設のSMF資源を有効に活用した大容量化の検討が進んでいる。これまではC帯またはL帯など単一のEDFA光増幅帯域として約4.5THzを用いた光増幅中継システムが主に実用化されてきた。しかしながら、近年のデジタル・コヒーレント技術の実用化により周波数利用効率の大幅な高度化が進んだ結果、今後、更なる周波数利用率の大幅な向上が難しくなりつつある。さらに、近年の研究開発により、SMFを用いた長距離伝送時のリンク容量の物理的限界が、光非線形効果による信号歪や安全な許容入力パワ制限により、図1に示すとおり、100Tbit/s付近にあることが分かってきている（キャパシティクラッシュ）。このため、今後のSMFを用いたシステムの100Tbit/s級大容量化に向けては、波長多重チャンネル容量の高速化とWDMシステム当たりの波長チャンネル数確保（100ch程度）を両立するために、C+L帯（約9THz）やそれを超えるマルチバンド長距離伝送技術の実用化が検討されている。最近では、SMFの許容パワ制限や光非線形効果を考慮したリンク容量100Tbit/s超級伝送実験例として、バンド間の誘導ラマン散乱効果を考慮した1,000km級3バンド光増幅中継伝送実験（中継スパン80km）^[2, 3]が報告されている。

2.3 空間多重光通信技術による大容量化

長距離大容量光通信システムにおけるキャパシティクラ

ッシュを抜本的に回避する技術として、2008年に発足したEXAT研究会から、空間多重光通信技術（Space Division Multiplexing (SDM)）の重要性が提唱された^[4]。以来、日本が本分野をリードして、本特集に代表される様々な研究開発がグローバルに進められている。なかでもMulticore Fiber (MCF)を用いた伝送方式については、2010年代には、ファイバ1心当たりのコア数の向上とコア間のクロストーク抑圧を両立するための長距離大容量伝送方式の限界追及が、精力的に検討されてきた。特に、屈折率分布とコア配置を制御することで、クロストークを抑圧可能な単一モードコアによる弱結合MCFは、既存のSMF用のデジタル・コヒーレント伝送技術そのまま適用できる利点がある。機械的信頼性を保ちつつファイバケーブル化可能なクラッド外径として、現在の光ファイバの2倍の250 μ mまで許容したMCF条件下で、2012年には、1心で各コアが同じ屈折率分布をもつ弱結合ホモジニアスMCFにより、12コアまでの高密度化が図られた。この12コアファイバにおいて、光増幅帯域としてC帯と拡張L帯の11THz帯域を用いたマルチバンドWDM技術を併用することで、世界初の1Pbit/s無中継伝送実験（50km）が報告された^[5]。さらに、2017年には、同じMCFの制約条件にて、日欧連携総務省受託研究（SAFARI）において、2種類の屈折率をもつ32コアヘテロジニアスコア構造MCFによりコア間クロストークを抑圧し、光増幅器の低電力・小型化を考慮し、光増幅帯域をC帯のみとすることで、世界初の単一方向伝送による1Pbit/s光増幅中継実験（200km）^[6]、さらに、多値符号化変調方式を併用することで0.75Pbit/s光増幅中継（1,200km）の実現性が示された。超大容量化に関しては、クラッド外径250 μ mの制限を外した条件下で、モード多重技術とマルチバンド伝送技術を併用した更なる限界追及が進められ、空間多重数（モード数 \times コア数）100以上で2017年には世界初の10Pbit/s（1京：10¹⁶）を超える伝送実験（11.3km）^[7]、2023年には世界最大容量22.9Pbit/s伝送実験（13km）が報告された^[8]。

最近では、陸上光ネットワークでSDM技術の実用化に向けて、特にMCFの量産性や国際標準化の観点で、既存のSMFと同じ標準クラッド外径125 μ mで、コア間クロストークを抑えた4コア弱結合MCFの検討が進んでいる。2017年には、NICT委託研究（#170、#188）において、共通仕様で複数のファイバベンダで試作した4コアファイバ及びマルチコアファイバ増幅器、マルチコアコネクタを適用した、マルチベンダ相互接続実験が実施され、118Tbps光増幅中継（3 \times 100km）伝送実験が報告された^[9]。その後、そ

これらの知見を踏まえつつ、NICT委託研究（#203）にて、陸上光ネットワークに向けた標準クラッド外径4コアファイバケーブル設計・量産化技術の検討^[10]が進んだ。現在では、ITU-TにおいてはSDM技術レポート発効を含む標準化推進、IECにおいてはMCコネクタ評価測定方法に関する国際標準化が活発化している。

また、将来のPbit/s級光通信システムの実用化を見据えた際には、媒体としての空間多重ファイバの空間利用効率のみならず、光送受信機や光増幅中継器、光スイッチノード等の光ネットワークノード装置の小型集積化・低電力化が必須となる。例えば、WDMシステム導入経緯を振り返ると、図1の1996年の世界初の1Tbit/s級WDM伝送実験実証から、国内で経済的な1Tbit/s級WDMシステムが本格的に導入実用化される2003年までに約10年を要している。その理由は、その10年間で、シリコン集積回路技術や10Gbit/sクラスの光送受信回路実装技術の進化、多方路Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM) ノードの導入により、10Gbit/s級送受信装置や光スイッチングノード装置の小型化・低電力化が進んだことによる。Pbit/s級のSDMシステムの実用化においても、MCF等のSDM伝送媒体の性能を引き出しつつ経済化を図るには、SDM光ネットワークノード装置の小型集積化・低電力化の検討が極めて重要であると考えられる。NICT委託研究（#188、#170）では、Pbit/s超級ノードスループットの空間多重フォトニックノード実現に向け、SDM技術による光スイッチノード集積技術やクラッド励起MC光増幅器等、光増幅中継器の小型・低電力化が検討された。標準クラッド外径4コアファイバと集積化波長選択光スイッチノード等を用いた3ノード

構成実験ネットワークを構成し、Pbit/s超のノードスループット実証実験が報告された^[11]。

3. 光海底ケーブルの進展と将来展望

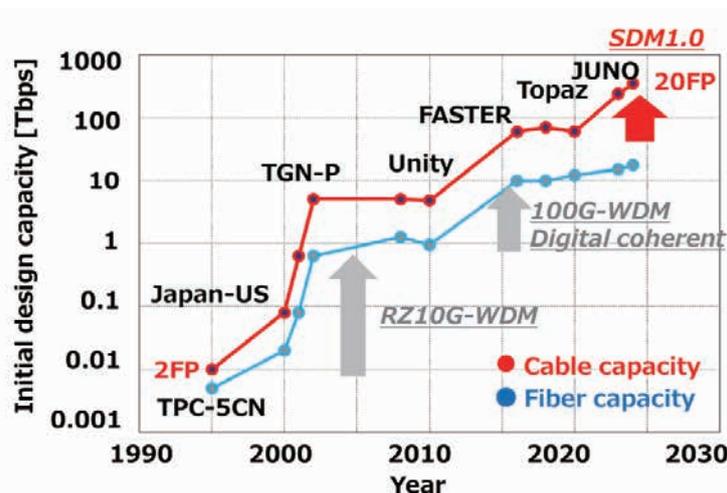
本章では、光海底ケーブルの進展と現状技術、さらに、海底ケーブル特有のスペース及び電力制限の観点から空間多重技術による光海底ケーブルの将来展望を述べる。

3.1 ファイバ当たりの容量の推移

光海底ケーブルシステムは、陸上システムと同様に光信号速度の高速化、帯域幅拡大による並列化及び多値化の順で進展してきた。図2に主要太平洋横断光海底ケーブルのファイバ容量並びにケーブル容量の推移を示す。単一波長の光海底ケーブルでは、1989年に商用化された280Mbit/sの信号速度が1995年の光増幅中継システムTPC-5では約18倍の5Gbit/sまで高速化された。続いて、光増幅器の帯域幅を拡大しWDM技術と分散補型非線形光伝送路の定常解であるチャープドガウシアンRZ信号を用いる分散マネージドソリトン伝送技術^[12]により、10Gbit/s、100WDMが実現され総容量は一気に200倍の1Tbit/sまで大容量化され、1990年代末から2010年半ばまで世界中で商用化された^[13]。続くデジタル・コヒーレント方式では、偏波多重とQAMによる多値変調により周波数利用効率が向上し、現在、ファイバ伝送容量は約20倍の20Tbit/sまで拡大されている。

3.2 空間多重によるケーブル容量の拡大

1本の光ファイバが伝送できる商用光海底ケーブルの容



■ 図2. 主要太平洋横断光海底ケーブルのファイバ容量とケーブル容量の推移

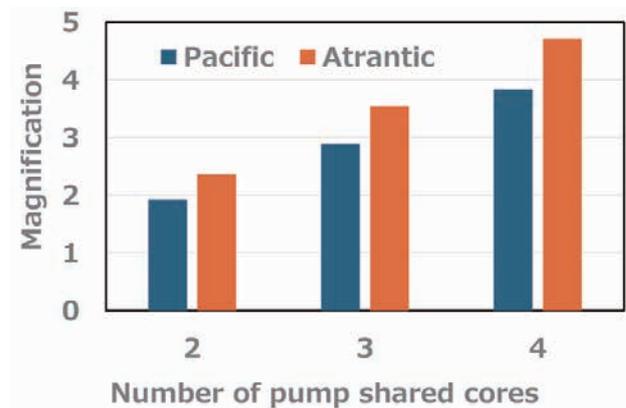


量は既にほぼ飽和しており、次世代に必要とされる数十倍の容量拡大には、SDMによる並列化が有効である。SDMでは、S/N拡大のために光パワの増加を要する高速化や多値化と異なり、多重数に応じて容量拡大が可能である。図2のケーブル容量の推移をみると、ファイバ容量がほぼ飽和した2020年代以降もファイバ心線数を増やして総容量が増加していることが分かる。1995年から現在までに心線数は10倍まで拡大されており、単一コア光ファイバによる空間多重技術はSDM1.0と呼ばれている。しかしながら、外形2cm以下の海底ケーブルのスペース制限により、ケーブルへ収容可能な心線数は50心（25FP：ファイバペア）程度に制限されるため、空間利用効率の高いMCFによるSDM2.0の研究開発が世界中で進められている。

SDMによる大洋横断伝送の可能性は、2012年に初めて7コアファイバと7コアEDFAを用いる伝送実験にて報告され^[14]、翌年にはファイバ容量140Tbit/s以上で容量・距離積1エクサbit/s・kmを超える光海底ケーブルの可能性が実証された^[15]。現在は、上述したように標準クラッド径125 μ mの4コアファイバの研究開発^[13]や標準化が精力的に進められ、光海底ケーブルでのSDM2.0の早期実用化を目指した総務省受託プロジェクト（OCEANS）において、1.7cm径の光海底ケーブル（4コアファイバを含む16FP）の試作や62.9Tbit/s-9,150kmの太平洋横断伝送試験等^[16]が実施された。2025年に商用予定の太平洋横断海底ケーブルTPUにおいては、OCEANSの成果の一部として、MCFの最初の商用システムとして台湾-海中分岐-フィリピン間の約840kmの区間に2コアファイバの導入が計画されている。

3.3 電力制限に伴うケーブル容量制限

スペース制限に加えて、光海底ケーブル特有の制約条件は電力制限である。海底ケーブル内の導体の電気抵抗は約0.8 Ω /kmであるため、給電電流1Aを仮定すると1万kmで8kVが熱として失われる。陸上局の給電装置の電力は現在16~18kVであり、ケーブル抵抗による消費電力を除く電力を100台以上の中継器に分配する必要がある。電力制限がシステム総容量を決定すると言っても過言ではない。SDM1.0では、EDFAのポンプLDを冗長化し、1台のポンプLDで2台のEDFAを励起するポンプシェアリングを導入し消費電力を抑制しつつ心線数を増加させたが、更なる容量拡大にはシェアリング数を増加する必要がある。図3に、4コアファイバを用いる大西洋（7,000km）及び太平洋（9,000km）横断システムにおける、ポンプシェア数に対する



■図3. 4コアファイバのポンプシェア数に対する容量拡大率

最大ケーブル容量の基準値からの拡大率を示す。基準容量としては、大西洋横断光海底ケーブルで500Tbit/s（24FP）、太平洋横断光海底ケーブルで350Tbit/s（20FP）とした。その他のパラメータは給電電圧18kV、給電電流1A、ケーブル抵抗0.8 Ω /km、ポンプLD電圧2.5Vとして、超低損失光ファイバ（損失 α =0.15dB/km）によりスパン長を80kmに拡大し中継器数を削減している。現在のポンプシェア数では、大西洋横断システムでは2コアファイバにより基準容量の2.4倍（1.18Pbit/s）、太平洋横断1.9倍（670Tbit/s）が実現可能である。注意すべき点は、大洋横断光海底ケーブルでは4コアファイバでも電力制限により有効コア数は増加できず容量増加が困難であることである。更にケーブル容量を増加するためには、図3に示すように4コアファイバとポンプシェア数を3~4に拡大する必要があり、大西洋横断で4.7倍（2.4Pbit/s）、太平洋横断で3.8倍（1.3Pbit/s）の容量拡大が見込まれる。将来コア数の多いランダム結合型MCFにより、更にコア数を拡大し大容量化を図るには、給電電力の増加や、ケーブル・中継器の高耐圧化などの抜本的な変更が必要となり、経済性と大容量性のトレードオフの関係になる。

4. おわりに

本稿では、陸上・海底の光通信システムの大容量化の変遷と空間多重による超大容量化の展望を述べた。これまで、日本がリードした空間多重光通信技術により既存のSMFの物理限界を超えたペタビット超級のリンク容量の実現にむけ、様々な研究開発が活発に推進されてきた。空間多重光通信技術を用いた大容量光通信システムの実用化に向けて、標準クラッド外径の4コアファイバの国際標準化が進められ、光海底ケーブルでは2コアファイバの2025年の商用

導入が計画されている。2008年に発足したEXAT研究会が掲げた「25年後の光通信の飛躍的高度化」に向けた開発目標は大幅に前倒しされており、今後、関連技術の更なる進展による大容量光通信インフラの継続的実現が期待される。

参考文献

- [1] 宮本裕, 森田逸郎; 創立100周年記念特集 通信技術の進化と未来への展望, 3-2 大容量光増幅中継技術, 電子情報通信学会会誌, Vol.100, No.8, pp.789-793, 2017.
- [2] F. Hamaoka, M. Nakamura, T. Sasai, S. Sugawara, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, E. Yamazaki, "110.7-Tb/s Single-Mode-Fiber Transmission over 1040 km with High-Symbol-Rate 144-GBaud PDM-PCS-QAM Signals," Proc. OFC2024, Tu3E.2, 2024.
- [3] T. Kobayashi, S. Shimizu, A. Kawai, M. Nakamura, M. Abe, T. Kazama, T. Umeki, M. Nagatani, K. Kimura, H. Wakita, Y. Shiratori, F. Hamaoka, H. Yamazaki, H. Takahashi, and Yutaka Miyamoto, "C+L+U-Band 14.85-THz WDM Transmission Over 80-km-Span G.654.E Fiber with Hybrid PPLN-OPA/EDFA U-Band Lumped Repeater Using 144-Gbaud PCS-QAM Signals," Proc. OFC2024, Th4A.1, 2024.
- [4] T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies ; 'EXAT initiative toward 2020 and beyond," Proc. OECC2009, FT4, 2009.
- [5] H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," Proc. ECOC2012, Th3.C.1, 2012.
- [6] T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, K. Shibahara, T. Mizuno, A.Sano, H. Kawakami, A. Isoda, M. Nagatani, H. Yamazaki, Y. Miyamoto, Y. Amma, Y. Sasaki, K. Takenaga, K. Aikawa, K. Saitoh, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, M. Nooruzzaman, and T. Morioka, "1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band Dense SDM Transmission over 205.6-km of Single-mode Heterogeneous Multi-core Fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM Channels," Proc. OFC2027, Th5B-1, 2017.
- [7] D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s dense SDM/WDM transmission over low-DMD 6-mode 19-core fibre across C+L band," Proc. ECOC2017, Th.PDP.A.1, 2017.
- [8] B. J. Puttnam, M. van den Hout, G. Di Sciullo, R. S. Luis, G. Rademacher, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "22.9 Pb/s Data-Rate by Extreme Space-Wavelength Multiplexing", Proc. ECOC2023, Th.C.2.1, 2023.
- [9] T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. De Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Abe, S. Aozasa, Y. Wakayama, T. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto, K. Nakajima," Proc. OECC2017 postdeadline paper 2, 2017.
- [10] T. Mori, Y. Yamada, K. Shibahara, T. Matsui, M. Kikuchi, Y. Sagae, D. Soma, S. Beppu, T. Nagashima, T. Morishima, T. Hayashi, M. Ohzeki, K. Takenaga, M. Takahashi, T. Sasaki, R.Sugizaki, Y. Miyamoto, and K. Nakajima, "Applicability of Standard Cladding Diameter Multi-Core Fiber Cables for Terrestrial Field," IEEE J. Lightwave Technol, vol. 42, no. 3, pp. 1044-1055, 2024.
- [11] F. Inuzuka, H. Hasegawa, K. Shibahara, H. Takahashi, T. Tsuritani, K. Seno, N. Nemoto, Emmanuel Le Taillandier de Gabory, S. Yanagimachi, T. Sakamoto, K. Nakajima, M. Takahashi, R. Sugizaki, R. Nagase, K-I Sato and Y. Miyamoto, "Power-saving Aware SDM Photonic Node with the Throughput Scalable to over Peta bit per second," OECCPSC2022, Invited paper TuF4-1, 2022.
- [12] M. Suzuki, "Dispersion managed solitons and their application to high-capacity optical submarine cable systems", Journal of Optik, Special Issue of Golden Jubell of Optical Solitons, 280, 170771, Elsevier, 2023.
- [13] 鈴木、森田、秋葉; 長距離光ファイバ通信システム~大洋横断伝送に焦点をあてた高速・大容量化技術の進化と将来展望~, オプトロニクス社、2019.
- [14] H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, Y. Mimura, K. Maeda, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "First demonstration of MC-EDFA-repeated SDM transmission of 40 × 128-Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160-km 7-core MCF," Proc. ECOC2012, Th.3.C.3 2012.
- [15] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s× km super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km sevenscore fiber," Proc. ECOC2013, PD3.E.3, 2013.
- [16] D. Soma, S. Beppu, Y. Wakayama, S. Sumita, H. Takahashi, N. Yoshikane, I. Morita, T. Tsuritani, M. Suzuki. "Trans-pacific class transmission over standard cladding ultralow-loss 4-core fibers", Optics Express, Vol. 30, pp.9482-9493, 2022.



SDM関連シミュレーション技術高度化の歴史 —MCFの解析・設計技術—



北海道大学 名誉教授 こしば まさのり
小柴 正則

1. MCFとは

EXAT研究会が発足した2008年ころから、空間分割多重 (SDM: space-division multiplexing) 伝送のためのマルチコアファイバ (MCF: multicore fiber) の検討が本格的に始まった。MCFは、コア中心間の距離 (本稿ではコア間隔と呼ぶことにする) によって、非結合型MCF (UC-MCF: uncoupled-core MCF) と結合型MCF (CC-MCF: coupled-core MCF) に大別される (本稿ではUC-MCFをMCFと呼ぶことにする)。

MCFは、コア間クロストーク (XT: crosstalk) を十分に低減させ、各コアを独立した伝送路として利用するもので、同種コア型MCFと異種コア型MCFに分類される。これらのMCFの英語名称については、当時、中沢先生をはじめ、グラスゴー大学のDe La Rue先生にもご意見をうかがって、同種コア型MCFはhomogeneous MCF^[1]、異種コア型MCFはheterogeneous MCF^[1]に落ち着いたと記憶している。

MCFでは、各コア内のモードは基本的に1個であるが、複数のモードを収容して空間多重度を拡大することもできる。こうしたMCFは、マルチモードMCF (MM-MCF: multi-mode MCF) あるいはフェューモードMCF (FM-MCF: few-mode MCF) と呼ばれる。

一方、CC-MCFは、複数のコアを近接配置することによって生じるスーパーモードのそれぞれを独立した伝送路として利用するものである。このとき、コア間隔を適切に設定すると、各スーパーモードが互いにランダム結合するようになり、群速度が平均化されて群遅延広がり (GDS: group delay spread) が伝送距離の平方根に比例するMCFを実現できる。こうしたMCFはランダム結合型MCF (RC-MCF: randomly-coupled MCF) と呼ばれ、長距離伝送に適している。

ところで、國分先生は、2コアファイバのコア間隔をコア半径の4倍程度に設定すると、偶モードと奇モードの伝搬定数がほぼ等しくなって互いに結合しやすくなることを、2008年開催のEXATシンポジウムで指摘している^[2]。このコア間隔は、2010年代半ばころから本格的に検討が始まったRC-MCFのコア間隔とほぼ一致しており、大変興味深い。

2. MCFの解析・設計技術

ファイバの諸特性を評価するには、まず、固有モード解析を行って各モードの伝搬定数 (固有値) と電磁界分布 (固有関数) を知る必要がある。真円コアファイバのように厳密解が分かっている場合もあるが、ファイバ構造が複雑になると厳密解の導出が困難になり、数値解析が必要になる。

数値解法には様々なものがあるが、光領域では有限要素法 (FEM: finite element method) やビーム伝搬法 (BPM: beam propagation method)、電波領域では有限差分時間領域法 (FDTD: finite-difference time-domain method) がよく利用されている。現在、FEMやBPMはMCFの設計にも必須になっているが、曲げやねじれ、さらには構造のランダムな変化を組み込むことは難しい。このため、MCF解析に特化したモード結合理論 (CMT: coupled-mode theory) とパワー結合理論 (CPT: coupled-power theory) の開発が進められてきた。

本稿では、MCFの解析・設計技術としてのCMTとCPTを取り上げ、これらの理論の高度化の歩みを概観する。

3. MCFのXT解析

光導波路間あるいはモード間の結合の評価には、伝統的にCMTが利用されてきた。このCMTによれば、MCFのXTは伝搬方向に周期的に変化すると予想される。ところが、予想に反して、XTは伝送距離に比例して大きくなるのが、2010年、実験的に示された^[3]。これは、構造が伝搬方向にランダムに変化していることを示唆しており、同じく2010年、CPTの導入によってこの実験結果の説明が可能になった^[3]。

また、2010年には、異種コア型MCFのXTの曲げ半径依存性が測定され、臨界曲げ半径と呼ばれる曲げ半径を境として、位相整合領域 (PMR: phase-matching region) と位相不整合領域 (non-PMR) が存在することが実験的に示された^[4]。この実験結果を説明するために、2011年、位相整合点 (PMP: phase-matching point) における結合パワーのランダムな離散変化を考慮した解析モデル (DCM: discrete changes model) が開発され^[5, 6]、PMRではXTが曲げ半径とともに大きくなることが明らかになった^[5, 6]。

DCMは簡便であるが、PMPが存在しないnon-PMRには適用できないので、2011年、曲げやねじれ、構造のランダムな変化を考慮したCMTが開発された^[7]。結果として、XTは、PMRでは曲げに支配され、non-PMRでは構造変動の統計的性質（相関長）に支配されることが明らかになった^[7]。

さて、CMTでは計算に時間がかかるので（確率的取扱が必要）、2011年、構造変動のみならず、曲げやねじれを考慮したCPTが開発された^[7]。この場合、パワー結合係数（PCC：power coupling coefficient）が伝搬方向に変化するので、パワー結合方程式を逐次的に解くことになる。

ところで、2012年、指数関数型自己相関関数（ACF：autocorrelation function）を導入し、ねじれ周期で平均化したPCCの解析解が導出された^[8]（未知変数は相関長）。この解析解はPMR、non-PMRのいずれにも適用でき、MCFのXT解析に広く利用されている。なお、MM-MCFやFM-MCFの場合には、コア内のモード間結合を考慮した解析が必要で、2015年、こうした解析が可能なCMTも開発された^[9]。

4. RC-MCFのGDS解析

2010年代半ばころから、RC-MCFのGDS解析がCMTを用いて本格的に始まり、GDSが伝送距離の平方根に比例することが明らかになった（実験的にも確認されている）。

CMTによる解析によれば、GDSはコア間隔に強く依存しており、ねじれや製造ばらつきの程度にもよるが、GDSが最小になるコア間隔はおよそ20 μm とされている^[10]。このコア間隔は、石英系シングル（単一）モードファイバのコア半径（コア直径は9 μm 程度）のほぼ4倍になっている。

5. PMCを考慮したXT解析

2011年当時、偏波モード結合（PMC：polarization mode coupling）が起こっていないMCFのXT分布が自由度2のカイ2乗分布に従い、PMCが起こっている場合には、自由度4のカイ2乗分布に従うことが理論的に明らかにされていた^[5, 6]。こうしたMCFのXT分布は実験的にも確認されていた^[6]が、複屈折相関長並びに複屈折ビート長とXTの関係については、しばらく議論されないままになっていた。

2020年になって、曲げがない場合^[11]、2022年には、異種コア型MCFを含めて曲げがある場合^[12]について、CMTによるXT解析が行われた（すべてのコアで同一の相関長と同一のビート長を仮定）。また、2020年には、偏波モード分散を未知変数としたXTの簡便な解析法が開発された^[13]（相関長がビート長に比べて十分短いという条件の下で）。

6. BSA伝送MCFのXT解析

最近、隣接コアに伝搬方向が異なる信号光を配置することによって、XTを大幅に低減することが可能な双方向信号配置（BSA：bidirectional signal assignment）伝送に対する関心が高まっている。長距離BSA伝送では、後方散乱XTと間接XT、短距離BSA伝送では、後方反射XTと間接XTの評価が必要で、いずれの評価にもCPTが用いられている^[14]。

ところで、PCCはこれまで暗黙のうちに対称とされてきたが、コア依存損失（CDL：core-dependent loss）があるとPCCは非対称になる。2023年、ACFが指数関数で与えられる場合、現実的なCDL、相関長の範囲では、PCCを対称として取り扱っても問題のないことが報告された^[15]。

7. 未解明の課題（むすびに代えて）

MCFの解析・設計技術としてのCMTとCPTを取り上げ、これらの理論の高度化の歩みを概観した。残りの紙面を借りて、未解明の課題をいくつか紹介し、むすびとしたい。

相関長の異常な長延化、クラッド径に依存するXT、曲げ半径に依存する相関長など、いずれもCMT、CPTの枠組みで合理的に説明できていない^[16]。さらには、FM-MCFにおいて、理論的には固有モードではないLPモードが固有モードとして伝搬する現象も、原因を解明できていない^[16]。

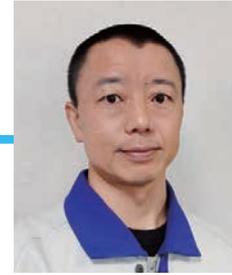
末筆ながら、SDM関連技術について、日ごろご討論いただいているEXAT研究会の関係各位に深謝する。

参考文献

- [1] M. Koshiba et al., IEICE Electron. Exp., vol. 6, pp. 98-103, Jan. 2009.
- [2] Y. Kokubun and M. Koshiba, Proc. EXAT Symp., pp. 36-48, Nov. 2008.
- [3] K. Takenaga et al., Opt. Fiber Commun. Conf., OWK7, Mar. 2010.
- [4] T. Hayashi et al., Eur. Conf. Opt. Commun., We.8.F.6, Sep. 2010.
- [5] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., OWJ3, Mar. 2011.
- [6] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., PDPC2, Mar. 2011.
- [7] M. Koshiba et al., Opt. Exp., vol. 19, pp. B102-B111, Dec. 2011.
- [8] M. Koshiba et al., IEEE Photon. J., vol. 4, pp. 1987-1995, Oct. 2012.
- [9] J. H. Chang et al., Opt. Fiber Commun. Conf., W4I.4, Mar. 2015.
- [10] T. Hayashi et al., Proc. IEEE, vol. 110, pp. 1786-1803, Nov. 2022.
- [11] C. Antonelli et al., Opt. Exp., vol. 28, pp. 12847-12861, Apr. 2020.
- [12] K. Saitoh, J. Lightw. Technol., vol. 40, pp. 1527-1543, Mar. 2022.
- [13] C. Antonelli et al., Eur. Conf. Opt. Commun., Th1A-1, Dec. 2020.
- [14] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., M1E.1, Mar. 2022.
- [15] Y. Kobayashi and T. Hayashi, Opt. Exp., vol. 31, pp. 502-508, Jan. 2023.
- [16] Y. Kokubun and M. Koshiba, IEICE Electron. Exp., vol. 17, 20202001, Aug. 2020.



SDM光ファイバ研究の最新動向と今後の展望



住友電気工業株式会社 光通信研究所 グループ長 **はせがわ たけみ**
長谷川 健美

1. はじめに

光通信網の通信容量需要の指数的な成長を背景として波長多重技術やデジタルコヒーレント伝送技術が開発されてきた結果、広く用いられている単一モードファイバ（SMF：Single Mode Fiber）の1心あたりの情報伝送容量は物理限界に迫りつつあり、伝送容量を更に拡大する手段として空間多重（SDM：Spatial Division Multiplexing）の重要性が高まっている。本稿ではSDM光ファイバの商用化が始まった海底通信と、SDM光ファイバの普及に向けフィールドでの検証が進んでいる陸上通信におけるSDM光ファイバの研究動向を解説する。

2. 海底通信向けSDM光ファイバ

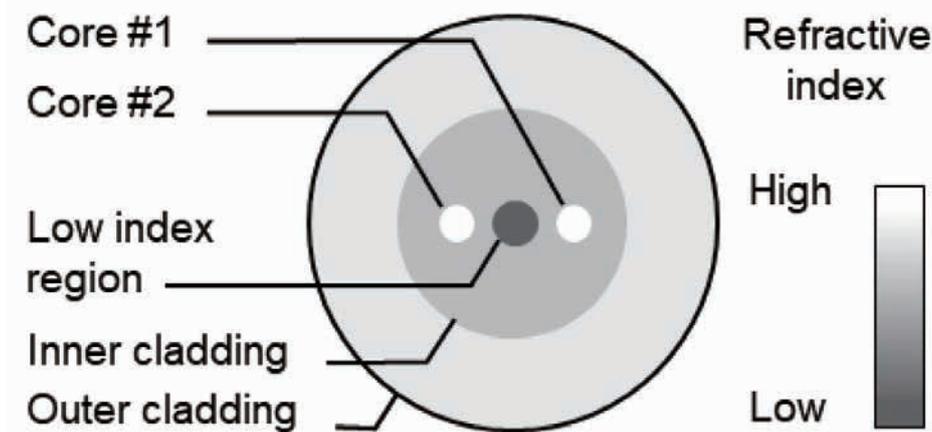
先進的な伝送技術が用いられることが多い海底ケーブルでは1心あたりの伝送容量が既に限界に近いことに加え、海底光中継器への供給電力の制約下で伝送容量を最大化する上でもSDMが有効であることからSDMの必要性が高く^[1]、ケーブル内の光ファイバの多心化が第1世代のSDMとして普及している。多心化が進んだ結果、最先端の光海底ケーブルとして48心ケーブルが実用化されている^[2]が、海底ケーブルの構造上の制約もあり、更なる多心化は困難が予想される。そこで、1本の光ファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ（MCF：Multi-Core Fiber）が、第2世代のSDMとして期待されている^[3]。2023年には光海底

ケーブル用の2コアファイバ（2CF：2-Core Fiber）が商用化される^[4]とともに、2CFを採用した光海底ケーブルの建設開始も発表される^[5]など、海底通信での商用化に向けた活動が進んでいる。

MCFは複数のコアを有することから、接続におけるコア配置の管理や敷設環境でのコア間クロストークの管理など、SMFにはなかった複雑性が生じ得る。MCFの普及を円滑に進める上では、MCF自体の光学特性に加えて、上記のような複雑性の低減も重要となる。海底通信用2CF^[6, 7]（図）では、(a) 鏡像対称コア配置によりMCFの極性をなくして端別管理を不要化し、(b) コアシフトによるコア識別により識別用マークを省略する、などの複雑性の低減策が採用されるとともに、従来の海底通信向けSMFと同等の光学性能が実証されている。

3. 陸上通信向けSDM光ファイバ

陸上通信網においても管路空間の制約下で伝送容量を拡大していくためにはMCFなどのSDM光ファイバが今後必要となると考えられる。陸上通信網においてはマルチベンダ化や標準化も重要となるが、これまでに4コアファイバでの複数ベンダ間相互接続^[8]やITUでの標準化に向けたSDM技術の文書化^[9]が進められている。また、2019年にはイタリアのL'Aquila市街にMCFのフィールドテストベッドが初めて敷設され^[10]、陸上環境での伝送性能が実証され



■ 図. 海底通信用2CFの構造

るとともにコア間での位相ゆらぎの相関を利用して精度を高めた光周波数クロック伝送^[11]など、MCFの特徴を活用した応用技術も実証されている。さらに、データセンタの棟内や棟間の接続では高密度の光ケーブルが用いられるが、12コアファイバによりケーブルの密度を高めるとともに1コア当たりの接続時間を低減できることが期待されている^[12]。

4. おわりに

SDM光ファイバの開発が進み、海底通信向けの商用化や陸上通信向けのフィールド検証が進んでいる。伝送装置や接続・増幅などの関連技術と共に開発と量産が進むことで、光通信網の発展が今後も進むことが期待される。

参考文献

- [1] M. A. Bolshtyansky, et al., "Single-mode fiber SDM submarine systems," *J. Lightwave Technol.* 38, 1296-1304 (2020).
- [2] NEC press release, "NEC qualifies 24 fiber pair subsea telecom cable system-Fully qualified end-to-end solution for larger capacity and better connectivity," issued on Mar. 19, 2021.
- [3] H. Takeshita, et al., "Demonstration of uncoupled 4-core multicore fiber in submarine cable prototype with integrated multicore EDFA," *J. Lightwave Technol.* 41, 980-988 (2023).
- [4] Sumitomo Electric press release, "Sumitomo Electric launches world's first mass-produced ultra-low loss, multi-core fiber," issued on Sep. 22, 2023.
- [5] Google blog, "Boosting subsea cables with multi-core fiber technology," issued on Sep. 13, 2023.
- [6] T. Suganuma, et al., "2-core fiber for practical spatial division multiplexing," *SubOptic 2023, TU3C-2*, (2023).
- [7] T. Suganuma, et al., "First ≤ 0.15 -dB/km uncoupled 2-Core fibre for transoceanic cable," *ECOC 2023, Th.A.6.3*, (2023).
- [8] T. Matsui, et al., "118.5 Tbit/s transmission over 316 km-long multi-core fiber with standard cladding diameter," *OECC 2017*, doi:10.1109/OECC.2017.8115049.
- [9] C. Kito, et al., "ITU-T standardization activities for spatial division multiplexing optical fibers and maintenance of outdoor optical facilities," *NTT Technical Review* 21 (2), 45-48, (2023)
- [10] T. Hayashi, et al., "Field-deployed multi-core fiber testbed," *OECC/PSC 2019 PDP3* (2019).
- [11] N. Hoghooghi, et al., "Towards international clock comparisons on a telecom network: ultrastable optical frequency transfer over deployed multi-core fiber," *OFC 2024, Th4A.5* (2024).
- [12] T. Hayashi, et al., "Ultra-High-Density Microduct Cable with Uncoupled 12-Core Fibers with Standard 250- μ m Coating," *OFC 2023, Tu2C.2* (2023).

ITUが注目しているホットトピックス

ITUのホームページでは、その時々ホットトピックスを“NEWS AND VIEWS”として掲載しています。まさに開催中の会合における合意事項、ITUが公開しているICT関連ツールキットの紹介等、旬なテーマを知ることができます。ぜひご覧ください。

<https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>



マルチコアファイバ接続・光ケーブル研究の最新動向と今後の課題



株式会社フジクラ 光応用技術R&Dセンター 光通信研究部 主席研究員

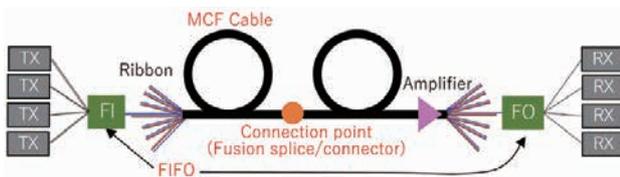
たけなが かつひろ
竹永 勝宏

1. 研究背景

現在、光通信で用いられているSMF (Single mode fiber) は光の通り道であるコアが1つであり、その通信容量限界が差し迫っていると言われており^[1]。近年の通信容量増大の要望に応えるため、複数のコアを持つMCF (Multi-core fiber) が注目され、研究開発が盛んに行われている。最近では、MCFの実用化に必要な接続技術、ケーブル技術が数多く報告されている。ここでは、これらの最新の動向と今後の課題を紹介する。

2. マルチコアファイバの接続技術

MCFを用いた伝送システムの概略図を図1に示す。ここでは、MCF同士を接続する技術として融着接続技術、コネクタ接続技術について紹介する。また、既存のSMFのシステムに接続するために必要となるSMF-MCF変換技術についても紹介する。さらに、それらの課題についても述べる。



■ 図1. MCFを用いた伝送システム概略図

2.1 融着接続技術

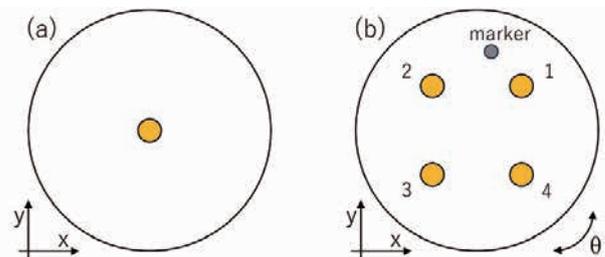
融着接続は、光ファイバの先端部を加熱、融解し、光ファイバ同士を接続する方法である。クラッドの中心に1つのコアを持つSMFでは汎用的な接続方法として広く用いられているが、クラッドの中心から離れた位置にコアを持つMCFでは、MCFの軸周りに回転調心する必要がある (図2参照)。

MCFを調心する際の観察手段としては、図3に示す2つの方法が主に検討されている。サイドビュー方式、エンドビュー方式は、それぞれMCFの側面画像、断面画像を基に調心する方法である。サイドビュー方式はエンドビュー方式に比べて装置の構成をシンプルにすることができ、サイズ・コスト面で有利である。

近年、サイドビュー方式での検討が多くなされており、4コ

アMCF同士の融着接続損失、調心時間としてそれぞれ平均0.1dB^[2, 3]、90秒という報告もなされている。

MCFの融着接続技術は、SMFの接続損失、接続時間にどれだけ近付けるかが課題であり、更なる低損失化や接続時間短縮の検討が必要である。



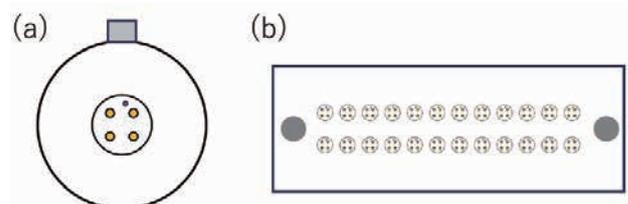
■ 図2. 光ファイバ断面と調心方向 (a) SMF、(b) MCF

	Side-view method	End-view method
観察方法		
融着機の構造	シンプル (回転調心機構は必要)	複雑
調心時間	普通	長い
マーカの検出	可	可(複雑な構造でも)

■ 図3. 融着接続の観察方法と特徴

2.2 コネクタ (単心、多心) 技術

脱着が可能な接続方法として、コネクタ接続技術がある。融着接続同様に、光ファイバの軸に対する回転調心後、コネクタキーに対して固定が必要となる。これまで、単心コネクタだけでなく、多心コネクタ (図4参照) の報告も複数なされている。単心では平均0.1dB以下の損失^[4]、多心では、平均0.2dB以下の損失が報告されている^[5, 6]。



■ 図4. MCFコネクタ模式図 (a) 単心、(b) 多心

MCFのコネクタ接続技術では、SMFの接続損失、調心時間（コスト）にどれだけ近付けるかが課題であり、今後も低損失化や簡易な調心方法の検討が必要である。

2.3 SMF-MCF変換技術

既存のSMFのシステムやデバイスとMCFを接続するためには、MCFの各コアを合分波するFIFO（Fan-in/Fan-out）が必要である。これまで、図5に示すような様々なFIFOが報告されている^[7]。図5には挿入損失やコストについても示しており、低損失、低コストが実現可能と考えられているバンドル型^[7, 8, 9]や低損失が実現可能で、信頼性も高い溶融延伸型^[10]などが注目されている。

バンドル型、溶融延伸型ではそれぞれ、平均0.4dB、0.2dBの挿入損失が報告されている。

SMF-MCF変換技術（FIFO）は、通常のSMFのシステムにはないデバイスであり、今後、更なる低損失化、低コスト化及び低クロストーク化の実現が望まれる。

	空間光学系	導波路型	バンドル型	溶融延伸型
模式図				
損失	○	△	○	○
コスト	△	○	○	△

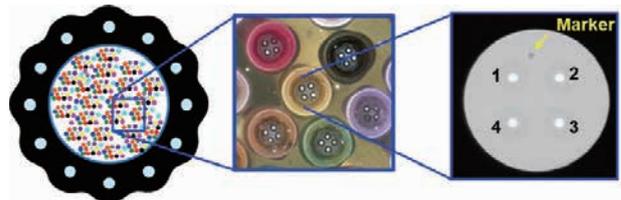
■図5. FIFOの各種方式と特徴

3. マルチコアファイバケーブル技術

MCFを実用化するためには、実際のフィールドにケーブルとして敷設する必要がある。これまで、2コア～12コアのMCFを十数本～数百本束ねたMCFケーブルが数多く報告されている^[11-15]。これらMCFケーブルは、SMFと同等の損失増加や機械特性が報告されており^[11-14]、実際のフィールドに敷設しても大きな問題がないことが確認されている^[13]。図6は288心の4コアMCFを実装したケーブルの断面模式図及び一部の実写真である。MCFケーブルは、非常に多くのコアを高密度に束ねることができるため、海底ケーブ

ルやデータセンターなど高密度大容量伝送が求められる領域での活用が期待されている。

MCFを実用化するためにはケーブル中の大量のMCFの接続時間、検査時間の短縮技術開発が望まれる。



■図6. MCFケーブルの断面模式図及びMCF断面写真

4. おわりに

MCFの実用化に必要な接続技術、ケーブル技術の最新の動向を紹介した。また、それぞれの技術の今後の課題についても紹介した。

参考文献

- [1] T. Morioka, OECC2009, FT4, 2009.
- [2] T. Kremp et al., OFC2023, Tu2C.1, 2023.
- [3] M. Nakagawa et al., International Symposium EXAT2023, P-16, 2023.
- [4] R. Nagase, IEICE Transactions on Communications, Vol. E106-B, No. 11, pp. 1044-1049, 2023.
- [5] H. Nakane et al., 2024 IEICE General Conf., B-10A_B-13-25, 2024.
- [6] K. Haji et al., OFC2024, W4J.6, 2024.
- [7] M. Takahashi et al., OECC/PSC2022, TuC4-1, 2022.
- [8] T. Kikuchi et al., OECC/PSC2022, TuC4-2, 2022.
- [9] K. Ozaki et al., OFC2023, W2A.10, 2023.
- [10] V. I. Kopp et al., OFC2022, Th1E.2, 2022.
- [11] M. Tsukamoto et al., IWCS2016, 14-3, 2016.
- [12] M. Kikuchi et al., IWCS2017, 9-1, 2017.
- [13] T. Oda et al., OFC2023, Tu2C.4, 2023.
- [14] T. Hayashi et al., IWCS2023, 8-6, 2023.
- [15] Google. プレスリリース<https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/delivering-multi-core-fiber-technology-in-subsea-cables?hl=en>



マルチコア光ファイバ増幅技術の最新動向と今後の展望

古河電気工業株式会社 フォトニクス研究所 主席研究員 **たかさか 高坂** **しげひろ 繁弘**



1. はじめに

単一コアのエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)は標準の光ファイバ増幅器として光ファイバ通信システムに広く採用されている。マルチコア(MC: MultiCore)EDFAは、単一コアEDFAよりも小型化と低消費電力化が期待される光ファイバ増幅器である。

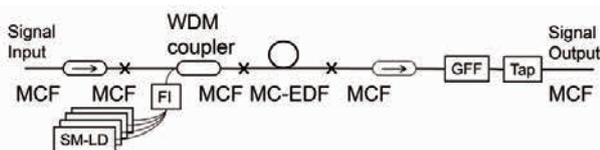
小型化は、マルチコアEDF(MC-EDF)をはじめアイソレータや波長分割多重(WDM)フィルタなどのマルチコア光デバイスと従来の単一コア型デバイスがほぼ同じ大きさで、部品点数がほぼ同じであることによる。MC-EDFAの実装体積は単一コアEDFAとほぼ同一であるため、コア当たりの体積がコア数分割程度に小さくなる。コア励起4コアEDFAは、実装体積の縮小や単一コアEDFAと同等の増幅特性に向けた改善が行われている。

低消費電力化は、クラッド励起型のMC-EDFAにのみ期待される。クラッド励起MC-EDFAの励起光源であるMM-LD(Multi-Mode Laser Diode)の電気-光変換効率が、コア励起型MC-EDFAの励起光源であるシングルモードLDのおよそ1.5倍あるためである。しかし、クラッド励起光がエルビウム添加コアに吸収される効率が著しく低いため、効率を向上させる試みがなされてきた。最近、Cバンドにおいては結合型12コアEDFAのコア当たりの消費電力が単一コアEDFAよりも低い消費電力に達した^[1]。Lバンドにおいては非結合型19コアEDFAのコア当たりの消費電力が単一コアEDFAと同等の消費電力に達した^[2]。

本稿では、小型化が期待されるコア励起MC-EDFA技術と低消費電力化が期待されるクラッド励起MC-EDFA技術の最新動向と今後の発展方向を紹介する。

2. コア励起MC-EDFA

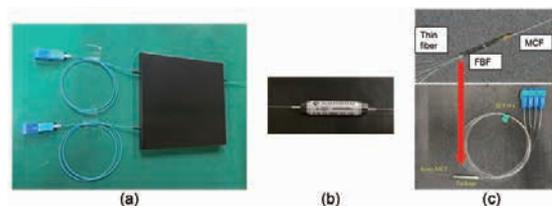
コア励起MC-EDFAの構成例を図1に示す。信号光の入



■ 図1. コア励起MC-EDFAの構成例。矢印: アイソレータ、×印: 融着点、GFF: 利得等価フィルタ、FI: ファンイン

出力は伝送用MCF(MultiCore Fiber)に融着接続することを想定している構成である^[3, 4]。励起光源の数がコア数と同じであるため、消費電力は単一コアEDFAと同一である。光学系は、信号光が伝搬するファイバがMCFで、光デバイスがマルチコアデバイスであることを除き単一コアEDFAと同一の構成であるため、実装体積も単一コアEDFAと同一になる。そのため、コア当たりの体積はコア数で分割した程度に小さくなる。

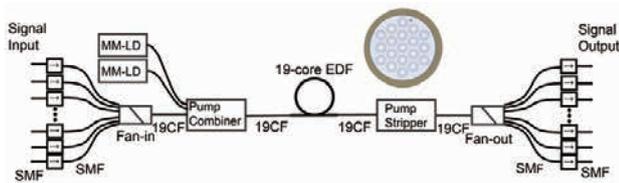
図2(a)は、図1からGFFとTapを省いた光学系を収納した124×135×10(mm³)の筐体の外観写真である。2本の入出力4コアファイバと4本のポンプ入力ファイバが筐体から出ている。4コアアイソレータの寸法はφ5.5×27mm(図2(b))^[5]、ファイババンドル型4コアFIの寸法は3×3.5×45(mm³)(図2(c))^[6, 7]である。4コアEDFAや光デバイスの寸法が、単一コアEDFAや単一コア用の光デバイスとほぼ同一であることが分かる。MCFの接続には、自動調芯機能を持つ融着器を用いた。2電極放電と3電極放電による平均融着損失は、それぞれ0.07dBと0.02dBと、単一コアファイバの融着損失と同等である^[8-10]。調芯を含む融着時間は、マーカ付き4コアファイバで90秒と短い。増幅特性は、1-2dB程度雑音指数(NF)が大きいものの単一コアEDFAと同一の利得が1dB未満のコア間利得差で得られている。光デバイス等による挿入損失の改善により、NFも単一コアEDFAと同一に近付くであろう。



■ 図2. コア励起4コアEDFA(a)、4コアアイソレータ(b)、ファイババンドル型FI(c)の外観写真

3. クラッド励起MC-EDFA

クラッド励起MC-EDFAの構成例を図3に示す^[2]。クラッドに励起光を伝搬させるために、図3中の19コアEDFの断面写真に示されるようにガラスクラッドの外側に低屈折率樹脂を被覆することでダブルクラッド構成をなす。ポンプコン

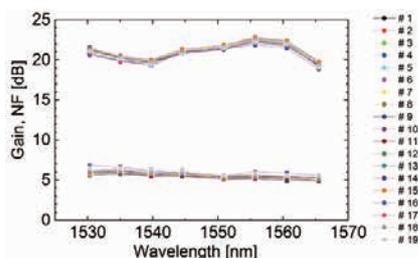


■ 図3. クラッド励起MC-EDFAの構成例。MCFはダブルクラッドファイバ。矢印：アイソレータ

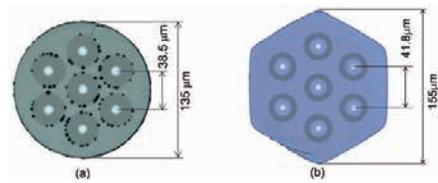
バイナにおいてMM-LDの出力光が内側クラッドに入射され、MC-EDFからの残留励起光をポンプストリッパで除去する点がコア励起構成と異なる。FIFOの外側に単一コアのアイソレータが設置されているが、マルチコアのアイソレータに置き換えると実装体積が小さくなる。図4にCバンドクラッド励起19コアEDFAの増幅特性を示す^[11]。増幅特性の形状は単一コアEDFAと同一であり、コア間利得差は1dB未満である。NFは光デバイスの挿入損失のために1dB程度大きい。

クラッド励起効率の低いことがクラッド励起型の課題である。MC-EDFの内側クラッド径が大きいいため、クラッドポンプ光の伝搬を計算しMC-EDFの最適化を行うことが困難である。そのため、クラッド励起効率を向上させる項目を実験的に確認してきた^[12]。その項目は、第1にクラッド径の縮小である^[13]。クラッド励起パワー密度に出力が比例するからである。第2にコア径の拡大である。これはクラッド励起光がコアに衝突する確率を向上させると考えられる。第3にコア数の拡大である^[14]。同一のコア特性とコア密度である場合、コア数が多いと利得が高い。クラッド励起光を散乱する効果が高いと考えられる。

以上の項目をすべて反映させ、クラッド径166 μm 、コア間距離30 μm 、モードフィールド径7 μm 、の19コアEDFを作製した。EDF長を8mに設定するとCバンド帯の増幅を行いポンプパワー 28W、-5dBm/coreの入力に対し17.5dBm/coreの出力が得られたが^[4]、実用に必要とされる20dBm/coreに出力が達していない。一方で、EDF長を50mに設定するとLバンド帯の増幅を行え、ポンプパワー 28W時に、7.5dBm/coreの入力に対し24.3dBm/coreと高い出力が得られる^[4]。



■ 図4. クラッド励起19コアEDFAの増幅特性例。入力信号光パワーは-5dBm/core。ポンプパワーは35W^[11]。



■ 図5. クラッドに空孔を挿入した7コアEDF (a)^[15]、六角形クラッドの7コアEDF (b)^[16]。

20dBm/coreの出力は11.2Wのポンプ光で得られ、消費電力は単一コアEDFAと同等の1.2W/coreである。長いEDF長が低いクラッド励起効率を補っていると考えている。

最近、さらにクラッド径を90 μm と小さくしコア密度を高めた12コアEDFは、ついにEDF長が短尺となるCバンドにおいても単一コアEDFAを下回る低消費電力を達成した^[1]。この12コアEDFのコア間距離は15.5 μm と縮小されるため、結合型MC-EDFとして動作する。コア間距離が、例えば30 μm 以上必要な非結合型におけるCバンド動作での利得向上が残った課題である。

さらにクラッド励起効率を向上させる項目として、クラッド内にミー散乱体として空孔を挿入する^[15]、クラッド形状を円から六角形に変える^[16]、などが有効であることが確認されている。このような技術が、クラッド励起MC-EDFAの消費電力削減に寄与するだろう。

4. おわりに

小型化が期待されるコア励起MC-EDFA技術と低消費電力化が期待されるクラッド励起MC-EDFA技術の最新動向と今後の技術の方向性について紹介した。

参考文献

- [1] T. Sakamoto et al, ECOC 2023, We.C3.3 (2023).
- [2] S. Takasaka et al, ECOC 2022, Th2A.4 (2022).
- [3] Y. Wakayama et al, OFC 2022, Th2A.5 (2022).
- [4] T. Ohtsuka et al, OFC 2023, M1B.4 (2023).
- [5] K. Iwasaki et al., ECOC 2023, P13 (2023).
- [6] T. Sasaki et al, OECC 2022, TuC4-3 (2022).
- [7] V. I. Kopp et al., OFC 2022, Th1E.2 (2023).
- [8] M. Ohzeki et al., OFC2022, M4E.4 (2022).
- [9] T. Kremp et al, ECOC 2022, Tu3A.3 (2022).
- [10] T. Fujii et al., OFC2023, Th2A.10 (2023).
- [11] S. Takasaka et al., ECOC 2018, Th1K.2 (2018).
- [12] S. Takasaka, ECOC 2021, Tu1A.1 (2021).
- [13] Y. Tsuchida et al., ECOC2016, M.2.A.2 (2016).
- [14] S. Takasaka et al., ECOC 2017, Th.2.D (2017).
- [15] S. Takasaka et al., ECOC 2020, Th2A (2020).
- [16] K. Maeda et al, ECOC 2023, P10 (2023).



EXATロードマップ活動と SDM光ファイバの標準化動向

日本電信電話株式会社 アクセスサービスシステム研究所 **なかしま かずひで**
中島 和秀



1. はじめに

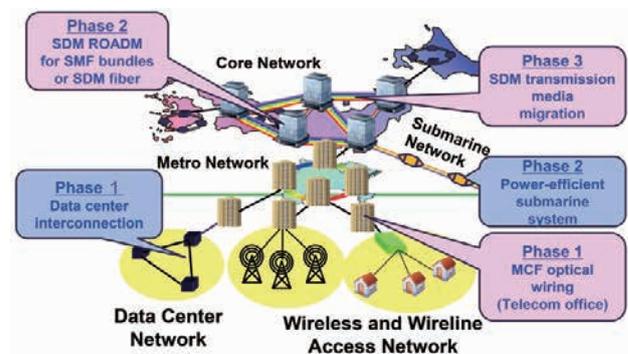
光通信インフラの飛躍的な高度化に関する特別研究専門委員会（EXAT特別研専）では、マルチコア（Multi-core）、マルチモード（Multi-mode）並びに多値変調（Multi-level modulation）の“3M”技術の重要性を世界に先駆け提唱し、“3M”技術による将来の光通信インフラの革新に向けた道標として、2017年にEXATロードマップ初版を、2020年に第2版を発行している^[1]。本稿では、EXATロードマップと現在の空間分割多重（SDM：Space division multiplexing）技術動向との相関について振り返るとともに、SDM光ファイバに関する国際標準化の動向について概説する。

2. EXATロードマップ

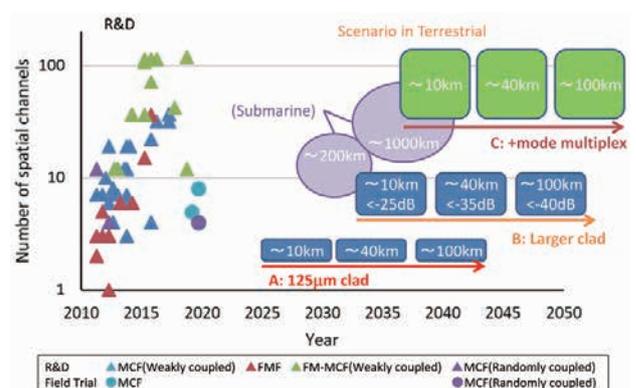
EXATロードマップの目的は、第1に“3M”技術に関連する研究者の仲間づくりを促進すること、第2に技術ロードマップを共有し効率的な実用展開を実現することにある。2010年以来、“3M”技術を包含するSDM技術の研究は世界的に活性化しており^[2]、EXATロードマップの第1の目的は十分に達成されたと言える。ここで、2017年～2020年にEXATロードマップが想定したSDM技術の展開シナリオと現在の動向との相関について検証してみる。図1にEXATロードマップで想定された、SDM技術の3つの導入フェーズを示す。第1フェーズではデータセンタ間や通信局舎内の光配線領域で、第2フェーズでは海底システム及び陸上基幹ネットワークでSDM技術の適用が進み、第3フェーズでは多様な領域でSDM光ファイバへの移行が進むとされている。図2はEXATロードマップにおける、SDM光ファイバの展開シナリオを示す。図2によれば、標準クラッド径の維持、拡大クラッド径の活用、空間モードの活用の順に空間多重度の拡張が進み、2020年代後半から標準クラッド径SDM光ファイバの短距離区間における実用展開が、2030年初頭から海底システムへの展開が進むと予想されている。

2024年4月時点で商用導入されたSDM光ファイバは存在しないが、2023年9月にGoogleから新たな海底システムの一部でマルチコア光ファイバ（MCF：Multi-core fiber）を適用する計画が発表された^[3]。また、住友電気工業株式会社からは2コア構造MCFのプロダクト化がリリースされた^[4]。

ここで、Googleの計画では標準クラッド径を維持した2コア構造MCFの適用が検討されており、図2の空間多重度の拡張イメージと合致している。一方、図1及び図2ではSDM技術の短距離区間からの展開を想定しているのに対し、現状では第2段階として考慮されていた海底システムへの展開が先行している。これは、現在使用されている海底光ケーブルの光ファイバ収容空間は僅か数mmの直径しかなく、既に収容心線数の増大による容量拡張が限界を迎えつつあるため、海底システムでは“空間”による制約が顕在化していることに起因すると考えられる。ここで重要なのは、今後、SDM技術の適用領域を陸上システムにも広げ、海底SDMシステムの導入を更に加速するために、どのような実現技術が必要となるかである。EXATロードマップにはこれに対する方向性も示唆されている。第1フェーズで想定された短距離アプリケーションでは、膨大な心線数もしくは



■ 図1. SDM技術の導入で想定される3つのフェーズ^[1]



■ 図2. SDM光ファイバのロードマップ^[1]

は空間チャネル数を効率的に運用するための多心光ファイバの一括接続が不可欠となる。また、海底SDMシステムの普及には、既存の単一コア光増幅器の並列使用に比べ、より効率の高いSDM光増幅器の実現が求められる。したがって、既存のEXATロードマップを参照し近い将来の実現技術を明確化することで、SDM技術の実用展開を更に加速することができると考えられる。

3. SDM光ファイバの標準化動向

今日の光ファイバケーブル及び光接続技術の国際標準は、ITU-T (International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector) 及びIEC (International Electrotechnical Committee) の協調活動の下に制改訂されている。既に、IECではMCF光コネクタに関する議論が進められており、試験法及び光学互換の標準文書が制定されている^[5, 6]。一方、SDM光ファイバに関しては、2022年にITU-TがSDM光ファイバケーブルの技術動向と標準化に向けた課題を取りまとめた新規技術レポートを発行し^[7]、SDM光ファイバの候補として図3に示す6種類の光ファイバを定義した。次いで、2023年11月の会合で、日本からの提案に基づき、図3に示す各種SDM光ファイバの提供領域と適用時期を明確化した上で、新規SDM光ファイバ勧告の制定について議論することが合意された。このため、今後SDM光ファイバについても標準化に向けた議論が進展することが期待されるが、ここで留意したいのは、SDM伝送システムとして広く利用される状態を実現するには、関連技術標準を含むSDMエコシステムの構築が不可欠となる点である。

図4にSDMエコシステムの実現に向けたロードマップのイメージを示す。物理層の技術標準に限定しても、SDMエコシステムの構築では、光ファイバに加え、光ケーブル、試験法、接続技術、サブシステムと光部品並びにシステムイ

ンタフェースなどの標準を規定する必要がある。仮に、個々の標準制定に最低2年の議論期間を必要とし、関連技術分野の並列検討を想定したとしても、すべての標準を確立するには6年程度の期間が必要になる。したがって、2030年代初頭における陸上SDM伝送システムの普及を目標とする場合、2025年ごろからSDM光ファイバ標準の制定に着手し、ITU-TとIECの緊密な連携による計画的な標準化を推進する必要があることが分かる。

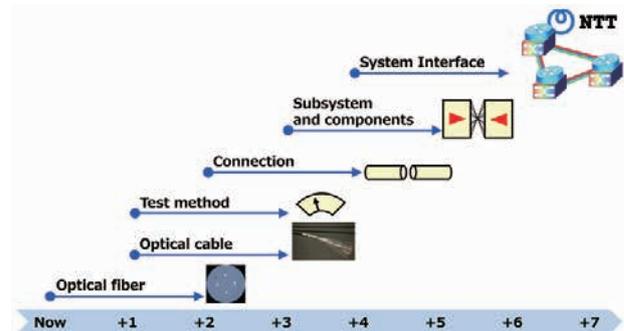


図4. SDMエコシステムの実現に向けた標準化ロードマップのイメージ

4. おわりに

EXATロードマップと現在のSDM技術状況との関係並びにSDM技術に関する国際標準化の動向について概説した。標準クラッド径MCFの実用展開が期待される中、2030年初頭におけるSDM伝送システムの多様な領域への実用展開・普及を見据えたSDMエコシステムの実現に向け、計画的な国際標準化活動が推進されることが望まれる。

参考文献

- [1] “EXATロードマップ,” 技術資料-EXAT (ieice.org).
- [2] W. Klaus et al., in Proceedings of the IEEE, vol. 110, no. 11, pp. 1619-1654, Nov. 2022.
- [3] “Boosting Subsea Cables with Multi-Core Fiber Technology,” (2023). <https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/delivering-multi-core-fiber-technology-in-subsea-cables?hl=en>
- [4] “世界初 極低損失マルチコア光ファイバの量産化に成功,” (2023). 世界初 極低損失マルチコア光ファイバの量産化に成功 | 住友電工 (sumitomoelectric.com)
- [5] IEC 61300-3-4, (2023).
- [6] IEC PAS 63503-3-30, (2023).
- [7] ITU-T Technical Report GSTR-SDM, (2022).

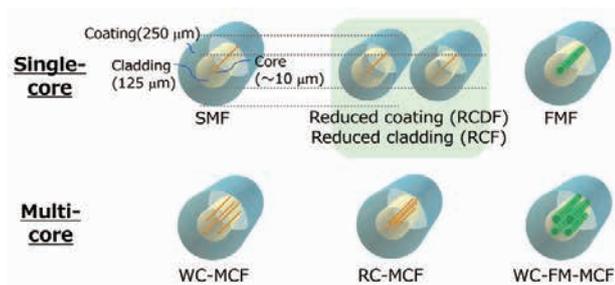


図3. ITU-T技術レポートで定義された6種類のSDM光ファイバ^[7]



SDM光伝送技術の最新動向と今後の展望



株式会社KDDI総合研究所
先端技術研究所

そうま だいき
相馬 大樹



株式会社KDDI総合研究所
先端技術研究所

べっぷ しょうへい
別府 翔平

1. 空間分割多重 (SDM) 光伝送システム

光伝送システムの飛躍的な大容量化に向けて、空間分割多重 (SDM) 光伝送システムが検討されている。図1に示すように、SDM用光ファイバとしては、コアを複数持つマルチコアファイバ (MCF) と、伝搬モードを複数持つマルチモードファイバ (MMF) がある。

MCFは、コア間のクロストークの大きさによって、弱結合型と結合型に分けられる。弱結合型MCFは、ファイバ断面の屈折率設計によってクロストークを抑制しており、従来の光送受信器が使用可能である。このような弱結合型MCFの設計としては、簡素な屈折率分布を用いることでコストを抑えたステップインデックス (SI) 型と、コアの周囲に屈折率の低いトレンチ層を設けることで光の閉じ込めを強くし、クロストークを低減させるトレンチアシスト (TA) 型がある^[1]。弱結合型MCFにおいては、実現可能なコア数はクロストークにより制限される。長距離伝送を想定すると、従来のシングルモードファイバと同じ125 μ mのクラッド径 (標準外径) の場合には、4コア程度が上限と考えられている。

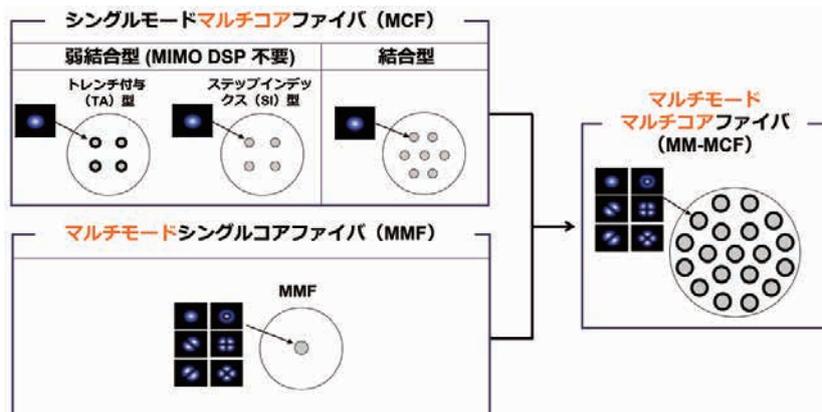
更なるSDM数の増加に向けた光ファイバとしては、結合型MCF及びMMFがある。結合型MCF及びMMFでは、コ

アまたは伝搬モード間のクロストークを許容し、SDM数を増加させる。発生したクロストークは、受信器に実装した大規模な多入力多出力デジタル信号処理 (MIMO DSP) により除去する。結合型MCFは、現在のところSDM数はMMFに比べて劣っているものの、伝搬損失が低く、コア間偏差も少ないこと等から、主に1,000km以上の長距離伝送システム (陸上または海底ケーブル) への適用が検討されている^[2]。MMFは、主に最大1,000km程度の短～中距離伝送システム (データセンター間または陸上) において、SDM数を更に拡大させる手段として検討されている。結合型MCF及びMMFのいずれにおいても、SDM数に応じた大規模なMIMO DSPの実現が重要な課題となっている。

また、更なるSDM数の増加に向けては、MCFとMMFのハイブリッドであるマルチモード・マルチコアファイバ (MM-MCF) もあり、10コア \times 10モード=100SDMを超える伝送実験が報告されている^[3, 4]。

2. 記録的な大容量・長距離SDM光伝送実験の動向

弱結合型MCFを用いた大容量かつ長距離の伝送実験としては、標準外径TA-4コアファイバを用いた138.9Tb/s



■ 図1. SDM伝送用光ファイバの分類

12,345km伝送実験が報告されている^[5]。本実験では、大容量化のために、既存の波長帯域であるCバンドに加えてL及びSバンドが用いられている。また、更にコア数が多い大容量の伝送実験として、TA-22CFを用いた2.15Pb/s 31km伝送実験が報告されている^[6]。ただし、このような多コアの弱結合型MCFでは、クロストークを抑圧するためにコア間距離を一定以上確保する必要があり、一般には標準外径ではなくってしまう。外径の大きなファイバは折れやすく、機械的信頼性に課題があるとされている^[1]。近年では、早期実用化に向けて、標準外径という制約の中で、どこまで大容量・長距離の弱結合型MCF伝送システムが実現できるかが盛んに検討されている^[1]。このような標準外径の弱結合型MCFの取組みについては後述する。

更なるSDM数の増加に向けた結合型MCFの検討では、最大コア数としては標準外径の結合型19CFがあり、1.7Pb/s 63.5km伝送^[7]が報告されている。結合型MCFの特徴を生かした多コアかつ長距離の伝送実験としては、結合型12CF 1.2Tb/s 7,280km伝送実験が報告されている^[8]。さらに、既存のWDM技術による大容量化と長距離性を両立した伝送実験として、結合型4CF 50.4Tb/s 9,150km伝送実験が報告されている^[9]。このように、結合型MCFは、長距離伝送に適した特性を持ち、かつ波長依存性が小さく広帯域であることから、大容量かつ長距離伝送が求められる陸上や海底ケーブル伝送システムへの適用が期待できる。

MMFを用いた大容量伝送実験としては、結合型MCFの最大コア数（19コア）を超える標準外径の55モードファイバを用いた3.56Pb/s伝送実験が報告されている^[10]。多モードかつ長距離の伝送実験としては、15モード 273.6Tb/s 1,001km伝送が報告されている^[11]。

しかし、これらの結合型MCF及びMMFを用いた伝送実験の報告では、外径は標準外径であるものの、MIMO DSPがオフラインでしか動作していないことが重要な課題である。

MMFとMCFを組み合わせたMM-MCFでは、2017年に初めて100以上のSDM数の6M-19CF（6mode×19core=114SDM）を用いた10Pb/sの超大容量伝送実験が報告され^[3]、2023年にはWDM波長帯域の拡張により22.9Pb/sの超大容量伝送実験が報告された^[4]。ただし、MM-MCFは、標準外径ではない上にMIMO DSPも必要となるため、SDM伝送システムとしては将来技術と考えられている。

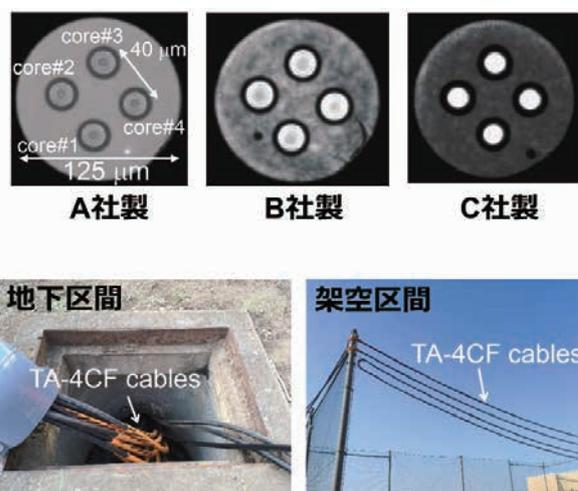
3. SDM光伝送システムの実用化に向けた取組み

3.1 標準外径SDM光ファイバ/ケーブル

SDM伝送システムの早期実用化に向けては、MIMO DSP不要かつ機械的信頼性の高い標準外径の弱結合型MCFが有望視されている。具体的な伝送アプリケーションとして、陸上及び海底への敷設を見据えた標準外径4CFのケーブル化も報告されており、ケーブル化を行っても大きな光学特性（クロストーク等）の劣化がないことが確認されている^[1, 12]。また、隣接するコア同士で伝搬方向を変える双方向コア多重伝送方式を採用すれば、クロストークを一層抑圧でき、伝送距離の延伸が可能となる^[13]。2023年には、Google社が双方向伝送を想定した設計の標準外径弱結合型2CFを海底ケーブルへ導入することをアナウンスした^[14]。

3.2 敷設環境下における検証

特に陸上伝送システムは、実験室内とは異なり、架空区間などの外乱が多い敷設環境が含まれる。また、融着やコネクタによる接続箇所も多くなるため、実際の敷設環境における伝送性能の検証が重要となる。イタリアのラクイラ市では、市街地の地下トンネルに敷設された標準外径の弱結合型4CFを用いて、偏波変動速度や伝搬遅延揺らぎの評価等が行われている^[15]。国内では、NTTから、地下洞道に敷設された標準外径の4CFを用いた伝送実験が報告されている^[1]。同様に、KDDIからも、架空やマンホール等を含む外乱環境下かつ異ファイバベンダ間の相互接続損失を含む、実用環境に近い標準外径4CF伝送路を用いた実験が報告されている^[16]。4CF断面及び4CFケーブル敷設環境の写真を図2に示す。本実験では、接続による損失及



■ 図2. 屋外敷設された弱結合型4CFケーブルの例



びクロストーク増加を考慮しても、63.5Tb/s 1,800kmもの大容量かつ長距離の伝送が可能であることが示されている。

4. SDM光伝送システムの今後の展望

4.1 SDM数の拡大に向けたMIMO信号処理のリアルタイム化

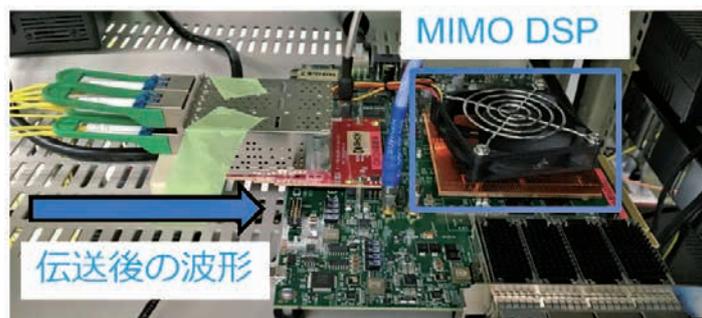
標準外径の弱結合型MCFでは、最大コア数はクロストークによって制限される。更なるSDM数の増加に向けては、MIMO DSPによるクロストーク除去を前提とした結合型MCF及びMMF伝送技術が必須となる。したがって、MIMO DSPのリアルタイム動作及び専用集積回路（ASIC）化を実現する必要がある。リアルタイム実装では、オフラインとは異なり、大規模MIMO演算で生じる演算遅延を考慮する必要がある。遅延の存在下で、刻一刻と変動するコア及びモード間の結合状態の変動に対して追従できるかどうかは重要な検討項目である。近年、FPGAを用いたリアルタイムMIMO DSPの実装及びリアルタイム伝送実験が行われている。2015年に、60kmの結合型3CFを用いたリアルタイム伝送実験が初めて報告された^[17]。2021年には、結合型4CFを用いた7,200kmの長距離リアルタイム伝送が実証された^[18]。本実験で用いた、結合型4CF用のリアルタイムMIMO DSPを実装したFPGAボードを図3に示す。これらは実験室内で行われたものであるが、より過酷な敷設環境のファイバに対する追従性の検証も報告されている^[15]。この実験では、イタリアのラクイラ市に敷設された結合型の4CFを用いて検証を行っている。コア間結合状態の変化は、従来のシングルコアファイバにおける偏波間結合に比べれば高速であるものの、MIMO DSPで追従可能な範囲であることが示されている。2024年には、具体的なASICの設計が初めて報告された^[19]。今後、MIMO DSP ASICの実現による、結合型MCF等を用いた大容量SDM伝送システムの実現が期待される。

5. おわりに

本稿では、大容量化に向けたSDM光伝送技術の最新動向として、記録的な大容量・長距離SDM光伝送実験について紹介した。また、早期実用化に向けて有望視されている標準外径の弱結合型MCF伝送の実証実験について述べた。最後に、弱結合型MCFにおけるコア数上限を打破するMIMO DSPアシスト型大容量SDM光伝送技術について、実現の鍵となるリアルタイムDSPに関する最新の成果を紹介した。

参考文献

- [1] T. Mori et al., J. Lightwave Technol., vol. 42, no. 3, 1044–1055, Feb. 2024.
- [2] T. Hayashi et al., J. Lightwave Technol., vol. 35, no. 3, 450–457, Feb. 2017.
- [3] D. Soma et al., J. Lightwave Technol., vol. 36, no. 6, 1362–1368, 2018.
- [4] B. J. Puttnam et al., ECOC 2023, Th.C.2.1, 2023.
- [5] M. Van Den Hout et al., ECOC 2023, M.A.5.5, 2023.
- [6] B. J. Puttnam et al., ECOC 2015, PDP.3.1, 2015.
- [7] G. Rademacher et al., OFC 2023, Th4A.4, 2023.
- [8] M. Arikawa et al., OFC 2024, Th3E.1, 2024.
- [9] D. Soma et al., J. Lightwave Technol., vol. 39, no. 22, 7099–7105, Nov. 2021.
- [10] G. Rademacher et al., ECOC 2023, We.A.1.1, 2023.
- [11] M. Van Den Hout et al., OFC 2023, 294–297, Th4B.5, 2023.
- [12] H. Takeshita et al., OFC 2022, M4B.1, 2022.
- [13] T. Ito et al., OFC/NFOEC 2013, OTh3K.2, 2013.
- [14] Google, “Boosting Subsea Cables with Multi-Core Fiber Technology.”, 2023.
- [15] M. Mazur et al., OFC 2022, Th4B.8, 2022.
- [16] D. Soma et al., OFC2023, Tu2C.5, 2023.
- [17] S. Randel et al., IPC 2015, PD4, 2015.
- [18] S. Beppu et al., J. Lightwave Technol., vol. 40, no. 6, 1640–1649, Mar. 2022.
- [19] E. Borjeson et al., OFC 2024, W1E.4, 2024.



■ 図3. 結合型4CF用リアルタイムMIMO DSP

コア選択スイッチの海底MCF分岐装置への適用に関する検討



香川大学 大学院創発科学研究科 創発科学専攻 修士課程 2年

たはら りか
田原 理加

1. はじめに

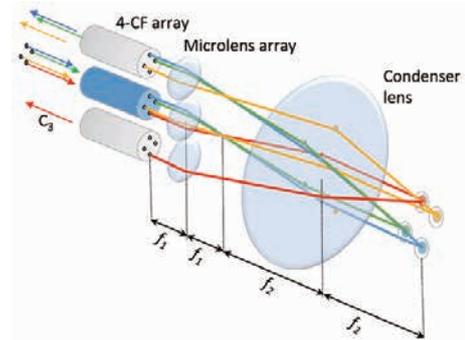
空間分割多重 (SDM) 技術は、海底光ケーブルシステムで最初に導入されると想定されている。マルチコアファイバ (MCF) を採用する次世代海底SDM時代における新しい分岐装置 (BU) アーキテクチャとして、これまでに我々は、ファンイン (FI) ファンアウト (FO) デバイスを持たずに MCFを直接サポートし、コア単位に分岐可能な、コア選択スイッチ (CSS) ベースのBUアーキテクチャを提案している^[1]。本アーキテクチャは、複数の1×2 SMFスイッチ機能を1つの自由空間光学系内に収容することができ、空間利用効率に優れている。

図1に4コアファイバ (4-CF) を用いた1×2 CSSの光学系を示す。入力MCFの各コアから射出した光ビームは、コリメータレンズアレイによって空間的に分離され、コンデンサレンズによってそれぞれの各コアに対応した各スイッチングミラー上に結像する。ミラー上に結像した光ビームは反射し、コンデンサレンズとコリメータレンズによってコリメートされ、出力MCFの同じローカルコア番号のコアに結像する。スイッチングミラーの角度を調整することで、任意の出力MCFに出力することが可能である。

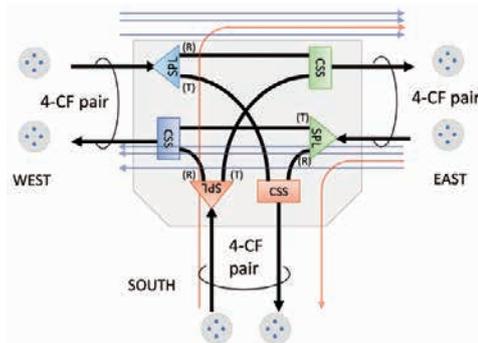
海底BUはスペースが限られており、さらに、長期信頼性が要求されるため、4-CFを直接収容できるBUの実用化には更なる小型化と信頼性の向上が不可欠である。今回我々は、入力側CSSを受動部品である全ポート反転スプリッタに置き換えるとともに、これを3台集積化した4-CFスプリッタモジュールと3つの4-CF CSSを集積化したCSSモジュールを用いて4-CF BUを構成することで、BUの高信頼化と小型化を図った^[2]。本稿はその要約である。

2. Broadcast and Select型BUの構成

図2に、1×2全ポート反転4-CFスプリッタと1×2 4-CF CSSに基づくBroadcast and Select (B&S) 構成を採用したBUアーキテクチャを示す。全ポート反転スプリッタはパッシブ型であるため、製造コスト削減と信頼性向上が期待できる。なお、自由空間光学系にハーフミラーを用いるだけで1×2 4-CFスプリッタを構成した場合、反射ポートにおいては、出力光が射出される光の進行方向に対してのコア位



■ 図1. 1×2 4-CF CSSの光学系



■ 図2. B&S構成のBUアーキテクチャ

置が入射したコア位置から水平方向に鏡面反転する。一方、MEMSミラーをスイッチング素子として用いるCSSにおいても、同様のコア位置の鏡面反転が生じるので、スプリッタの反射ポートにおいては出力側CSSの反転は自動的にキャンセルされ、BUの入出力ポート間でコア位置の反転は発生しない。しかし、1×2 4-CFスプリッタの透過ポートにおいて出力光はミラーによる反射を経験しないため、出力光が出力されるコア位置が水平方向に反転せず、出力側CSSによる鏡面反転がキャンセルされない。これはBUの出力ポートによってコア位置の反転と非反転が混在することを意味する。ネットワーク全体で伝送路の誤接続を防ぐためには、少なくとも1つのデバイスにおいてコア位置の反転と非反転の混在を防ぐことが好ましい。そのため、B&S構成のBUにおいては、ハーフミラーを透過した透過光を、リレー光学系を介して全反射ミラーに送り、出力光が射出されるポートでのコア位置を意図的に反転させる全ポート反転スプリッタを採用する。



3. 集積化スプリッタと集積化CSS

これまで説明したように、海底BUでは、スペースは貴重で有限な資源であり、海底BUには小型化が極限まで求められる。

一方、自由空間光学系は、複数のビームを並列処理することで、複数のシステムを1つのモジュールに集積化するのに有利である。そのため我々は、図3に示すように、自由空間光学系を用いて3つの集積化全ポート反転スプリッタと3つの集積化CSSを試作した。

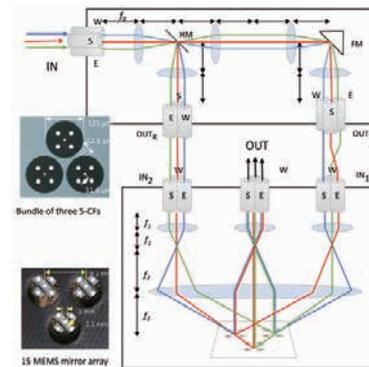
図3の下部に示した3つの集積型1×2 4-CF CSSは、3つのバンドル型1×8 5-CF CSSプロトタイプを流用し、8つの出力ポートのうち2つの出力ポートだけを使用した（5つのコアのうち、中央のコアは使用しない）。正三角形の頂点に3つの5-CFがファイバ間隔 $12.5\mu\text{m}$ で隣接して配置された5-CFバンドルとMEMSミラーアレイの拡大画像を図3左に示している。5-CFバンドルは、シリコン基板上に直径 $125\mu\text{m}$ の穴を3つ形成し、コアの回転位置を調整しながら $125\mu\text{m}$ のクラッド5-CFを挿入することで構成される。集積化した3つの1×2全ポート反転4-CFスプリッタと集積化した3つの1×2 4-CF CSSの写真をそれぞれ図4に示す。

4. BUの特性

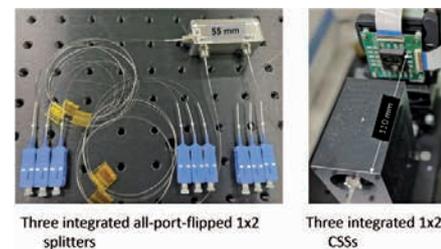
スプリッタとCSSを集積化したBUプロトタイプの性能を調べるため、伝送実験を行った。全ポート反転スプリッタの反射ポートと透過ポートはレンズの透過回数の違いから、3つのBUすべてで反射ポートを選択した場合が最もコア間クロストーク (XT) の性能がよく、3つのBUすべてで透過ポートを選択した場合が最もXTの値が悪くなり、光信号対雑音比 (OSNR) ペナルティが発生しやすいと考えられる。そこで、3つのBUすべてで反射ポートを選択した場合と3つのBUすべてで透過ポートを選択した場合のXT特性とビット誤り率 (BER) 対OSNR特性を測定し、すべて透過ポートを選択した場合の測定結果を図5に示す。図5 (a) に示すように、累積XTは-34 dB以下であり、図5 (b) に示すように、測定可能な光信号対雑音ペナルティは発生しないことを確認した。

5. おわりに

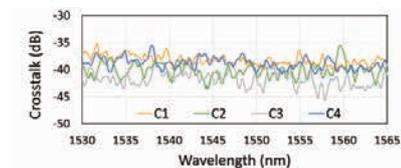
本稿では、4-CFをサポートする海底BUのプロトタイプについて報告した。BUプロトタイプは、3つの集積化全ポート反転4-CFスプリッタと3つの集積化4-CF CSSから構成され、コアごとの分岐機能を提供可能である。集積化1×2全ポート反転4-CFスプリッタと集積化1×2 4-CF CSSによる4-CF BUプロトタイプを用いて、3つのBUを模擬したネット



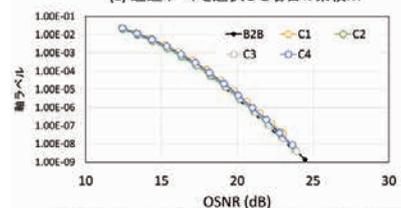
■ 図3. スプリッタとCSSを用いたBUの光学系



■ 図4. 全ポート反転スプリッタとCSS



(a) 透過ポートを選択した場合の累積XT



(b) 透過ポートを選択した場合のBER対OSNR特性

■ 図5. 3つのBUの累積XTとBER対OSNR特性

ワークを構築し、SDM光信号がこれをOSNRペナルティなしで通過可能であることを実証した。

参考文献

- [1] K. Matsumoto and M. Jinno, "Core selective switch based branching unit architectures and efficient bidirectional core assignment scheme for regional SDM submarine system," in Proceedings Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), W3F.3, 2022.
- [2] R. Tahara et al., "Submarine SDM branching unit with integrated all-port flipped multicore fiber splitters and integrated core selective switches," ECOC 2023, Th.B.6.2, 2023.

結合型マルチコアファイバ用光コネクタの接続特性



千葉工業大学 工学研究科 機械電子創成工学専攻 藤巻 湧己

1. はじめに

現在の光ファイバ通信では主にシングルモードファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) が利用されており、SMF1本あたりの伝送容量は100Tbit/sが限界であることが明らかになっている。そこで、更なる大容量化を実現するために1本の光ファイバ内に複数のコアを有するマルチコアファイバ (MCF: Multi-Core Fiber) を用いた空間分割多重伝送 (SDM: Space Division Multiplexing) が注目されている。現在研究が行われているMCFを分類すると、各コアを独立した伝送路として用いる非結合型マルチコアファイバ (UC-MCF: Uncoupled Multi-Core Fiber) と近接したコア間で光信号を結合させ、マルチモードで信号を伝送する結合型マルチコアファイバ (C-MCF: Coupled Multi-Core Fiber) に大別できる。C-MCFはUC-MCFと比較してより長距離の信号伝送に適している。

一方でMCFを伝送路に用いる場合、着脱可能に接続できる光コネクタが必須となる。我々はいままでに、UC-MCFを接続するSC形光コネクタを開発し、実用に供することが可能な性能を有していることを確認している^[1]。しかし、C-MCFの接続特性に関する報告はされていない。そこで、本研究ではC-MCF用SC形光コネクタの接続損失を国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission) に規定されるランダム接続試験によって測定した。また、測定結果とC-MCF用光コネクタの電磁界解析による軸ずれと接続損失の関係を示すシミュレーション結果^[2]を比較する。

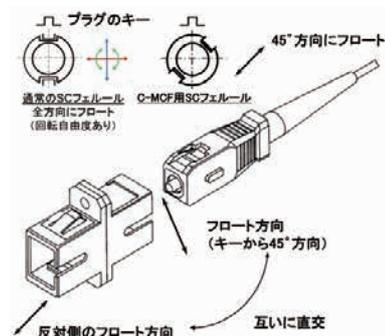
2. MCF用SC形光コネクタの構造

光コネクタは通常、ファイバケーブルに接続されているため、光ケーブルに数10N程度の外力が作用する可能性を考慮しなければならない。このような力が光コネクタと相互作用する場合、プラグハウジングは10 μ m以上変形し、SMFの調心許容範囲よりもはるかに大きくなる。この問題を解決するために、フェルールのフロート構造が広く使用されている。

MCFはSMFと異なりファイバ中心以外にコアが配置されているため、MCFを接続する場合にはフェルール軸回りの角度精度が必要である。しかし、角度精度とフェルールのフロート構造はお互い相反する要求である。この問題を解

決するために、オルダム・カップリング機構を有するMCF用SC形光コネクタが提案された^[3]。MCF用SC形光コネクタは、引張荷重を加えた状態での伝送試験 (IEC 61300-3-51) など、通信ネットワークに使用するのに十分な機械的性能を備えている^[4]。

図1は、MCF用SC形光コネクタの構造である。通常のSC形光コネクタのフェルールはプラグハウジング内で回転を含む全方向にフロートするのに対し、キー溝を狭くすることにより1方向のみにフロートするようにした。C-MCFの場合は、図1に示すようにキーから45°方向にフロートする構造とすることにより、同じプラグを対向させたときにオルダム・カップリング機構を構成する構造とした。



■ 図1.

3. 実験内容と結果

光ファイバ接続点において、光パワーの一部が漏れ出すことにより生じる接続損失の測定を試みた。C-MCFではコア間の光が結合するため、UC-MCFのように各コアの接続損失を測ることはできない。今回は表に示すような結合型12コア

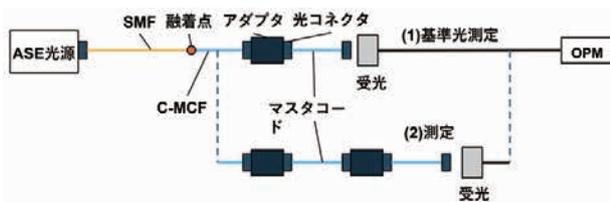
■ 表.

パラメータ	C-12CF
断面構造	
コアの材料	SiO ₂
クラッド径	125 μ m
コア半径	4.8 μ m
コア間距離	15.5 μ m
コア Δ	-0.35%

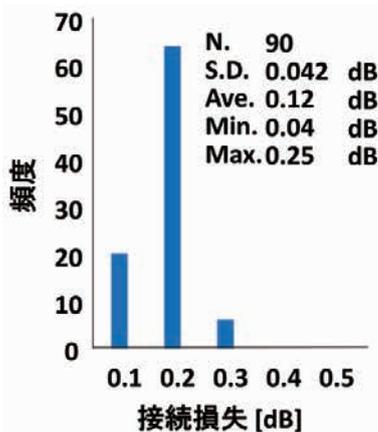


ファイバ (C-12CF) を用いてランダム接続損失 (IEC 61300-3-34) の測定を行った。ランダム接続による測定ではマスタとなる光コネクタ10個と、マスタに接続する光コネクタ9個とをすべての組み合わせで特性評価を行う。測定では、サンプルとして両端SC形光コネクタ付きC-12CFそれぞれ10本作製し、ASE光源 (波長1520~1570nm) を使用した。図2に、ランダム接続の測定系を示す。光コネクタプラグには、2章において示した結合時オルダム・カップリング方式のC-MCF用SC形光コネクタ^[3]を使用した。

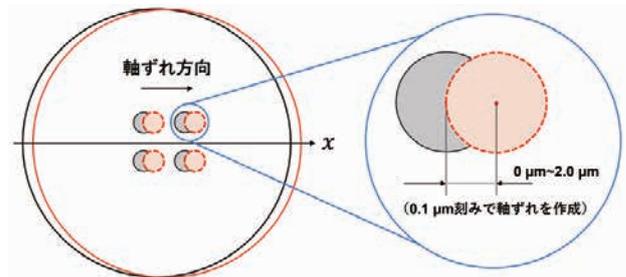
図3にC-12CF用光コネクタの接続損失の測定結果を示す。90接続点を測定し、平均0.12dB、最小値0.04dB、最大値0.25dBであった。以上の結果より、光コネクタの光学互換標準 (IEC 61755-1) におけるGrade B (97%が0.25dB以下) を満たす値を得ることができた。一方で、接続損失の支配的な要因は図4に示すような軸ずれである。図5に示すC-12CFの接続損失のシミュレーション結果^[2]から、C-12CF用光コネクタの軸ずれを見積もると0.4~1.4 μ m程度であると考えられる。また、C-MCFはSMFと比較して曲げ損失が大きい^[5]、測定系の配置の変化が光パワー変動の要因になるとともに、モードが変化すると図5に示すように接続損失が変化する可能性がある。よって、正確に接続損失を測定するには引き続き測定法に関する検討が必要である。



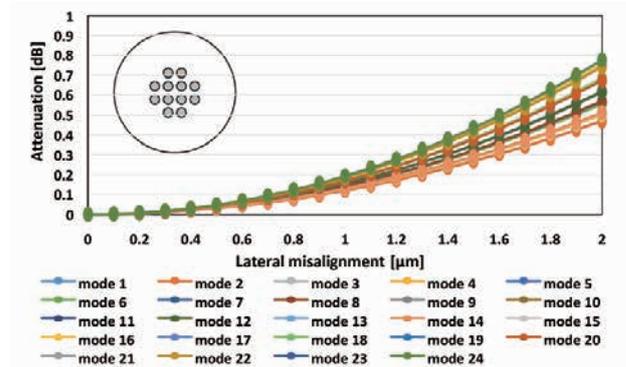
■ 図2.



■ 図3.



■ 図4.



■ 図5.

4. おわりに

本稿では、C-MCF用光コネクタの重要な特性の1つである接続損失をランダム接続によって測定し、接続損失の平均が0.12dBであることを報告した。IEC 61755-1におけるGrade Bを満たす値を得ることができたため、光通信ネットワークを使用するのに十分な光学的性能であるといえる。一方で、C-MCF用光コネクタの電磁界解析による接続損失のシミュレーション結果と比較すると、軸ずれは0.4~1.4 μ m程度であると考えられる。また、C-MCFは測定系の配置の変化が光パワー変動やモード変換の要因になる可能性があるため、正確に接続損失を測定するには測定法に関する再検討が必要である。

謝辞

本研究はNICT委託研究 (No.01010) の援助による。

参考文献

- [1] 上村他, 信学技報OCS2021-46 (2022).
- [2] 藤巻他, 信学技報OFT2023-10 (2023).
- [3] K. Imaizumi, et al, IWCS 2019, 8-1 (2019).
- [4] 井澤他, 信学技報EMD2020-34 (2021).
- [5] 今田他, 信学技報OFT2022-58 (2023).

モード分割多重伝送のためのPLC型モード制御デバイス



北海道大学
大学院情報科学研究院
准教授

さとう たかのり
佐藤 孝憲

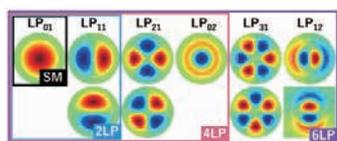


北海道大学
大学院情報科学研究院
教授

さいとう くにまさ
齊藤 晋聖

1. モード分割多重伝送

空間分割多重 (SDM) 光伝送における要素技術の1つに、複数の定在状態 (モード) を用いて光信号の多重化を行う「モード分割多重 (MDM)」技術がある。ファイバ中の伝搬路 (コア) が円対称な光ファイバでは、図1に示す直線偏光 (LP) モードが存在し、伝搬可能なモード数が少数となるよう設計したファイバが数モードファイバ (FMF) である (LP_{ml} モードの添え字は、周 (m) 及び径方向 (l) の次数で、m>0 では位相のずれた2モードが縮退し、LP_{11a}、LP_{11b}モードのように呼び分ける)。単一モード (SM) が伝搬するコアを複数配置して空間多重度を上げるマルチコアファイバ (MCF) と比べると、FMFのほうがより高い空間多重度を実現できるものの、モード間の伝送特性差が大きく、MIMO信号処理を見据えた伝送システムにおいては信号復元精度の劣化を招き、最大伝送距離の制限要因となることから、長距離伝送においてはモード数の拡張が困難である。そこで、図2に示すような長距離伝送システムの中継器において、光増幅だけでなくモード交換やモード損失差の低減を行うことで、モード間伝送特性差を均質化することが有効である。本稿では、このようなモード制御を行う石英系平面光波回路 (PLC) を用いたデバイスについて紹介する。



■ 図1. ファイバ中を伝搬するLPモードの電界分布

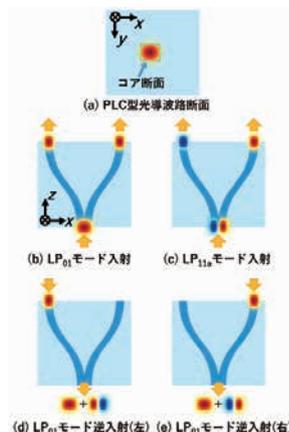


■ 図2. FMFを用いた長距離伝送システムの構成例

2. PLC型モード合分波器

半導体レーザからの光波でFMFの各モードを励振するには、モード合波器 (MUX) が必要となる。光の相反性により、モードMUXは特別な場合を除いて逆方向入射によりモード分波器 (DeMUX) としても機能する。PLC型のモード合分波器は集積度が高く、かつ、後述のような柔軟なモード制御が可能である。

図3 (a) に、石英系PLC型光導波路の断面図を示す。コアとその周囲は光ファイバと同じくガラスから成り、屈折率の高いコア部を全反射しながら光波が進む。光ファイバと同じ材料であり、低損失に相互接続可能である。図3 (b) のようなY字状のコア (以下、Y字導波路) を形成すれば、光等分岐素子として動作させることができる (厳密性は欠くが、ここではファイバモードの呼称に合わせて説明する)。また、図3 (b) のLP₀₁モードだけでなく、図3 (c) のように高次のLP_{11a}モードも等分岐し、これらの出射位相は入射モードの対称性に対応している。光の線形性と相反性より、図3 (b) と図3 (c) の足し合わせの状態並びに逆伝搬状態も成立する。すなわち、図3 (d)、(e) のように、上の枝導波路の片側にLP₀₁モードを入射した場合、下側の幹導波路ではLP₀₁/

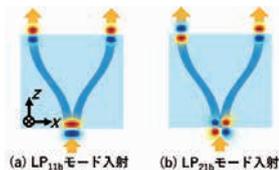


■ 図3. PLC型Y字導波路における光伝搬

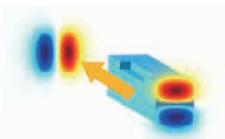


LP_{11a}モードが励振されることを意味している。このように、Y字導波路は1種のモード合分波器として機能する。

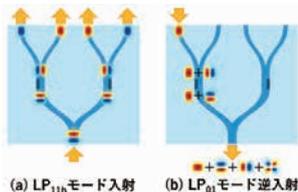
さらに次数の高いモードでもこのような等分岐動作を行えるが、PLCの性質上（単一層の加工をする限りにおいて） x 方向にしか分岐できないため、 y 方向の次数は不変である。具体的には図4のように、LP_{11b}/LP_{21b}モードに対しては、枝導波路側でLP_{11b}モードとして出射する。しかし、モード合分波動作としては、最終的にLP₀₁モードの出力とする必要がある。そこで、図5のようなL型導波路を用いたモード回転子（LP_{11a}/LP_{11b}モード交換器）が有用である。これをY字導波路の前後に配置することで、 y 方向の次数を落とすことができるため、原理的には任意の次数のモードを入射した場合においても、Y字導波路とモード回転子を組み合わせることで、LP₀₁モードの出力を得ることができる。図6 (a)、(b) は、より高次のモードに対応させた構成の一例であり、図6 (a) のようにLP_{11b}モードを入射した場合でもLP₀₁モードとして出射され、逆側から入射した場合はLP₀₁/LP_{11a}/LP_{11b}/LP_{21b}モードの重ね合わせとして出射される。



■ 図4. PLC型Y字導波路における高次モードの光伝搬



■ 図5. L型導波路を用いたモード回転子



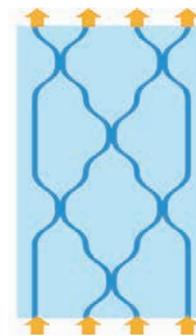
■ 図6. 4モード合分波器の構成例

3. PLC型モード制御デバイス

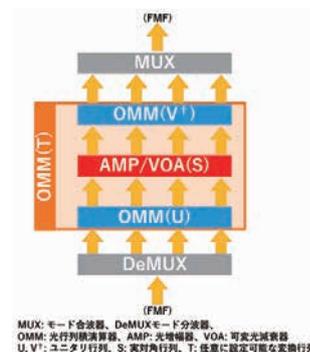
図6の4モード合分波器は、図2の中継器におけるモードMUX/DeMUXとして利用可能な具体的なデバイスの一例であるが、モードMUXで分波されたLP₀₁モードをそれぞれ増幅するだけでは、中継器前後のFMF中で生じたモード

間遅延差や損失差を補償することができない。そこで、最近検討されているのが光モード振幅に対する行列積演算回路（OMM: Optical matrix multiplexer）である。図7は、4つの入力光振幅に対して任意のユニタリ行列 U を乗算した出力を得ることが可能なOMMの基本構成を示している。図中では省略しているが、Y字導波路の他に位相制御素子・分岐比制御素子が含まれており、これらを制御することで、任意のユニタリ変換を行うことができる。図8のように、図7のOMMを2つと、その間に光増幅器・減衰器を挟めば、伝達行列表現としては $T=USV^+$ となる。これは、特異値分解の行列表現であり、任意の行列による光振幅変換が可能であることを意味している。伝達行列 T を適切に設定することで、モード交換や利得/損失差の制御も任意に可能となり、前後段のFMFリンクに応じたモード間伝送特性差の補償が可能となる。ただし、この構成では単純な線形変換が施されるだけであり、中継器単体で遅延の補償までには至らない。モード間遅延差の補償には、複数回にわたる中継器でのモード交換によりモード遅延差を平均化することが有効である。

このほか、既に6モード合分波器などが既に報告されているが、今後、更なるモード数拡大に向けたモード合分波器及びモード制御デバイスの検討に向けて注力していきたい。



■ 図7. 4×4光ユニタリ変換器の構成例



■ 図8. 中継器における任意モード制御デバイスの構成例

更別村のデジタル推進について

北海道更別村役場 企画政策課 スーパービレッジ推進室 しなだ りょうた
品田 亮太

1. 更別村の概要と地域課題

更別村は日高山脈の東側、北海道十勝地方の中南部に位置しており、北は十勝の中心都市・帯広市に隣接している。村の人口は約3,100人、総面積は176.90km²で、その多くは平坦な土地となっている。また、気候にも恵まれており、冷涼で寒暖の差が大きく、日照時間が多い。広大な土地と最適な気候を生かした大規模農業を行っており、農家一戸当たりの平均経営面積が約50ha、トラクターの所有台数は約6台、食料自給率は6,800%を誇り、いずれも日本最大規模を誇る。

そんな本村においても、他の自治体と同様の課題を抱えている。高齢化率は約32%で、高齢世帯が増加しており、農家戸数の減少や農作業オペレーターの慢性的不足、農業の担い手確保の問題やコミュニティの維持、医療・福祉サービス強化などが課題となっている。

2. デジタル推進の背景

2016年に短期間で複数の台風が本村を襲い、強風・大雨による大きな被害を受けた。特に農業分野では影響が大きく、畑が冠水してしまい、トラクターが畑に入れない状況になり、作業が全くできなくなってしまった。この出来事を背景に、ドローンによる作業やAIを活用した農業のスマート化に舵を切り、その推進のために規制改革に向けて、2017年に国家戦略特区を申請したことが本村におけるデジタル化の始まりである。国家戦略特区は不採択になったものの、その後もスマート農業の推進だけでなく、村全体をスマートシティ化する構想に発展し、スーパーシティ構想へ



■ 図1. 台風被害により水につかった畑

の申請を経て、2022年にデジタル田園都市国家構想を申請し、採択された。その後は、役場と企業、大学研究者などで組織されたスーパービレッジ協議会を立ち上げ、産官学が一体となった「スーパービレッジ構想」として、取り組みをスタートさせた。

3. 「スーパービレッジ構想」について

スーパービレッジ構想では、「100歳までワクワク 世代を超えてみんなでつながり合う幸せな地域」の実現を目指しており、シニア世代を含む幅広い世代の村民が健康で生きがいを持って過ごすために必要なサービスを「更別ベーシックインフラサービス」（以下、SBIS）とし、産官学で設立したSocialKnowledgeBank合同会社にてサービス展開する取組みとなっている。SBISは「ひやくワクサービス」「デジタル公民館」「超なまら本気スマート農業」の3本柱で事業を展開している。

「ひやくワクサービス」では、運動教室やカラオケ、健康レポートなどの趣味系・健康系サービスを展開している。これらのサービスは行政サービスとは切り離し、受益者負担に基づくサブスクリプション形式で、複数のサービスを定額で提供している。

「デジタル公民館」では、通信基盤を整備しており、別事業において整備した農村部の光回線に加え、市街地に共助Wi-Fiを整備し、村内の通信環境を構築すると同時に、村民へスマートフォンの無料貸し出しサービスを行っている。行政への手続き・届出や施設の予約などをオンライン上でできるシステムを構築し、行政DXについても推進している。

また、心拍・血中酸素濃度などの生体情報を計測できるウェアラブルウォッチや家庭の配電盤に設置して使用電力から生活リズムの把握を可能とする電力センサーを貸与し、利用状況等を家族へ共有できるサービスを展開し、独居高齢者でも安心して暮らせるような環境を提供している。

さらに、自動運転車両の運行をはじめとした移動系サービスも実施しており、広く村民に利用いただけるサービスを展開している。

デジタルに関することや日常生活での困りごとがある高齢者を中心とした村民のサポートを本村在住のコミュニティ



ナース*が行うことで「つながりづくり」をしながら、デジタルとアナログのハイブリッドでコミュニティの維持・再構築の役割を担っている。

「超なまら本気スマート農業」については、全自動ロボットトラクターや農業用ドローンの導入によって、農作業時間の削減と効率化を図り、農家戸数の減少や高齢者でも離農せずに働けるような環境の実現を図ることが目標となっている。

2020年度から、東京大学農学部サテライトキャンパスが開設されており、スマート農業の推進に向けて連携しており、



■ 図2. オンラインでの健康教室



■ 図3. 自動運転車両の導入



■ 図4. 全自動トラクターによる農作業

本村の試験圃場を活用してAI研究を行っている。東京大学だけでなく、2022年度には帯広畜産大学と民間企業が本村の試験圃場にて、完全無人走行のロボットトラクターを活用した大豆栽培実験を実施した。研究機関などの実証実験だけでなく、村内農家において既に約400台の自動操舵トラクターが導入されていることや、ドローンによる農薬・融雪剤散布などを行う事業者も村内に設立され、実際に運用をしているところであり、着実にスマート農業を推進している。また、ドローンについては、農業利用のみならず、物流分野においても利用できるように現在調整をすすめている。

このように、スマート農業を実現することで農作業の省力化・効率化を実現でき、生産力の維持ができる。また、高齢者の離農を抑えることができるとともに、農業の魅力向上により若者の就農者数の増加による担い手の確保が可能となり、本村の基幹産業の衰退を抑えることが期待できる。

4. 今後の更別村について

日本全国の自治体において、産業の担い手不足問題や人口流出など多くの問題を抱えており、本村においても例外ではない。これらの地域課題の解決に向けて、行政DXの推進やデジタルを用いた各種サービスを展開することで、村民の生活利便性向上を図る。ただ、単にデジタルを用いて効率化、利便性の向上を図るのではなく、デジタルを用いて、人と人とのつながりを深め、村民一人一人のウェルビーイングを高めることを目指す。「だれ一人取り残さないデジタル化の実現」に向けて、デジタルディバイドの解消やサービス利用者の拡大、利便性向上に努め、行政だけでなく、村民、企業、研究機関等が連携しながら、より良く、持続的で豊かな村づくりを行っていく。



■ 図5. 更別村の風景

* 自宅訪問やイベント参加を通じて村民同士のつながり・絆づくりの担い手として活動

ITU-T SG13 (Future networks and emerging network technologies 3/1-3/15)



国立研究開発法人情報通信研究機構
SG13議長 たにかわ かずのり
谷川 和法

1. 会合の概要

第4回ITU-T SG13会合が2024年3月1日から15日にかけてITU本部（ジュネーブ）で開催され、40か国から338名の参加者があった（107名が現地参加、231名がリモート参加）。259件の寄書があり、出力文章は445件となっている。

クロージング・プレナリ会合で、新勧告案1件を凍結（Determination-表1）、新勧告案12件及び勧告改訂案1件を合意（Consent-表2）、補助文章1件が承認（Agreement-表3）された。この内、日本からの寄与活動の結果としては、早稲田大学寄書によりICN（Information Centric Network）

のサービスチェーンニングに関する改訂Y.3073 Amd 1「Framework for service function chaining in information-centric networking」、NICT寄書によりFMSC（Fixed, Mobile and Satellite Convergence）統合制御に関する新勧告Y.3207「Fixed, mobile and satellite convergence-Integrated network control architecture framework for IMT-2020 networks and beyond」が合意されている。

また、今会合では新作業項目提案が50件あったが、その内42件（表4）が新勧告草案や新補助文章草案（技術報告書または補足文章）として作業開始が承認されている。

■表1. 凍結された勧告草案一覧

勧告番号	タイトル	TD/PLEN	課題
Y.2776	Deep packet inspection-intelligent management and maintenance of policy information base	225	7

■表2. 合意された勧告草案一覧

勧告番号	タイトル	TD/PLEN	課題
Y.2250 (Y.fmsl)	Requirements and Framework of Human-oriented Message Service for Smart Learning in Future Network	226	1
Y.2502 (Y.ARA-CPN)	Architecture of resource authentication and orchestration in computing power network	227	2
Y.3129 (Y.det-FQ-rf)	Requirements and framework for stateless fair queuing in large scale networks including IMT-2020 and beyond	228	6
Y.3658 (Y.bDDN-NP-ReqArch)	Big Data Driven Networking-Functional requirements and functional architecture of network programmability	229	7
Y.3820 (Y.QKDNi-SDNC)	Quantum Key Distribution Network Interworking-Software Defined Networking Control	230	16
Y.3821 (Y.QKDN-rsrq)	Quantum key distribution networks-requirements for resilience	231	16
Y.3062 (Y.TiAN-eval)	Trustworthiness Evaluation for IMT-2020 and Beyond with Autonomous Network Functions	232	16
Y.3551 (Y.ccdm-reqts)	Cloud computing-Framework and functional requirements of cloud data mobility management	233	19
Y.3186 (Y.IMT2020-DJLML)	Requirements and framework for distributed joint learning to enable machine learning in future networks including IMT-2020	234	20
Y.3142 (Y.IMT2020-AINDO-req-frame)	Requirements and framework for AI/ML-based network design optimization in future networks including IMT-2020	235R1	20
Y.3162 (Y.IMT-2020-EIL)	Evaluating intelligence capability for network slice management and orchestration in IMT-2020 network and beyond	236	21
Y.3073 Amd 1	Framework for service function chaining in information-centric networking	237	22
Y.3207 (Y.FMSC-INCA)	Fixed, mobile and satellite convergence-Integrated network control architecture framework for IMT-2020 networks and beyond	238	23



■表3. 承認された補助文章草案一覧

文章番号	タイトル	TD/PLEN	課題
Supplement 81 to Y.3200-series (Y.Supp-Y.Sat-Use-Cases)	Use cases of satellite communications in Developing Countries	239	5

■表4. 新作業項目一覧

勧告略号	タイトル	TD/WP	課題
Y.NGNe-DT-reqts	Requirements and framework for NGN evolution to support digital twin	489/WP3	2
Y.CPN-TP-Arch	Requirements and functional architecture of computing power network transaction platform	490/WP3	2
Y.QKDN_qos_auto_fa	Quantum key distribution networks-Functional architecture for autonomic quality of service assurance	742/WP1	6
Y.bDDN-ROSMec	Big data driven networking-Mechanism for resource orchestration and scheduling of big data plane	352/W2	7
Y.FunArch-INSA-FL	Functional architecture for intelligent awareness of network status based on federated learnig	353/WP2	7
Y.3804 Rev.	Quantum key distribution networks-Control and management	510/WP3	16
Y.QKDN-safr	Quantum key distribution networks-Framework for service awareness	512/WP3	16
Y.QKD-IPsec-fr	Framework for integration of quantum key distribution and IPSec	513/WP3	16
Y.3808 rev.	Integration of quantum key distribution network and secure storage network 3	514/WP	16
Y.QKD-orfr	Framework for quantum key distribution network orchestration	516/WP3	16
Y.QKD-rsff	Quantum key distribution networks-functional framework of resilience	517/WP3	16
Y.trust-AI	Overview of trust provisioning for networks and services using AI technologies	518/WP3	16
Y.3505 Rev.	Cloud computing-Overview and functional requirements for data storage federation	368/WP2	17
Y.3601 Rev.	Big data - Framework and requirements for data exchange	366/WP2	17
Y.ccts-frame	Functional framework and requirements of task scheduling for cloud services in distributed cloud environment	337/WP2	17
Y.ICI-AN-reqts	Scenarios and requirements of intelligent controller interaction for autonomous network in future networks including IMT-2020	758/WP1	20
Y.KM-AN	Knowledge management for autonomous networks	757/WP1	20
Y.KNO	Requirements and framework for knowledge-based network optimization in IMT-2020 networks and beyond	764/WP1	20
Y.IMT2020-DDP	Future networks including IMT-2020 : requirements and framework of distributed data plane	766/WP1	20
Y.ESBN	Enhanced service-based network in IMT-2020 networks and beyond	717/WP1	21
Y.DT-NS	Digital twin for network slicing in IMT-2020 networks and beyond	718/WP1	21
Y.ICN-ECP	Information-centric networking in networks beyond IMT-2020 : Framework and capabilities of elastic control plane	775/WP1	22
Y.DTN-ModelReq	Digital twin network-General technical requirements of model domain in digital twin layer	776/WP1	22
Y.DTN-NPNsp	Digital twin network-functional requirements and architecture of service platform for non-public networks	777/WP1	22
Y.FMSC-DN	Fixed, mobile and satellite convergence-Dedicated networks for IMT-2020 and beyond	701/WP1	23
Y.FMSC-IUSU-arch	Fixed, mobile and satellite convergence-Enhanced architecture for IMT-2020 networks and beyond in support of integrated user-centric service unit	702/WP1	23
Y.Supp-OSE-UC	Use cases of open service environment for future networks	457/WP3	1
Y.Supp.UC-NRS-DLT	Supplement to Y.2345 Use cases of network resource sharing based on distributed ledger technology for supporting large-scale deep learning models	487/WP3	2
Y.Supp.CPN-EF	Supplement to Y.2500 series "Expectations and information flows of resource awareness and service orchestration in computing power network	488/WP3	2

TR.QoS-AIGC	QoS assurance requirements and framework for supporting artificial intelligence generated contents	740/WP1	6
Supp-Y.DLT	Use cases of Distributed ledger technology in networks of Developing Countries	463/WP3	5
Supp-Y.NGNe-Use-Cases	Use cases of Next Generation Network evolution in Developing Countries	465/WP3	5
TR.CDI-TNS	Considerations and potential requirements of cross domain interoperability for trustworthy networking and services	511/WP3	16
TR.SQKDN	Standardization consideration of satellite-based QKDN	515/WP3	16
TR.URCN-req	Service Requirements of Ubiquitous Real Time Communication Network for future networks	750/WP1	20
TR.AN-gaps	Gap analysis for Autonomous Networks	760/WP1	20
TR.AN-PoC	Proof of Concept activities for Autonomous Networks	762/WP1	20
TR.IMT2030-terms	IMT-2030 networks-Considerations on terms and definitions	765/WP1	20
TR.GenAI-Telecom Networks	Requirements and methodology for deploying and assessing Generative AI models in telecom networks	763/WP1	20
Y.Supp59 Rev4	IMT-2020 and beyond standardization roadmap		21
TR.nr	Future network resilience use cases and capability requirements	788/WP1	22
TR.FMSC-MON	Fixed, mobile and satellite convergence-Considerations of multi-orbit networking for IMT-2020 and beyond	703/WP1	23

勧告略号 Y.: 勧告草案、TR.: 技術報告草案、Y.Supp.: 補足文章草案

2. WTSA-24に向けた準備

SG13に関するResolution 2の改定案として、SG主要活動テーマを、IMT-2020からIMT-2030へ、FMC (Fixed, Mobile Convergence) からFMSCに、Cloud computingからComputing including cloud computing and data handlingへ、ML (Machine learning) からAI/ML on Future networksに拡大することで了承された。

次会期に向けて既存研究課題のToR (Term of Reference) の改定が、会合期間中のNSPアドホック (Next Study Period ad-hoc、3/5、3/7、3/12) で審議された。おおむねすべての研究課題が現状の研究テーマを継続する意向であることが表明され、研究課題1、2、5、6、7、17、18、19、20、21、22、23の改定案が了承された。研究課題16については、研究テーマQKDNとTrustworthy networkごとに研究課題を分割することが了解され、それぞれのToRについて引き続きNSPアドホックで審議されることになった。ただし、UKから、Trustworthy networkに関する研究をSG17とSG13で統合することを検討中であることが表明されたり、複数の研究課題のToRに意見留保が求められており、次回SG会合で議論されることになっている。

また、SG13内コーディネーション及びWeb3.0に携わる新研究課題の設立については合意が得られず、引き続き検討することになっている。

SG13におけるNSPアドホックの審議は、以下のメーリングリストでITU-Tメンバーに公開されている。

t22sg13nsp@lists.itu.int

3. FG/JCA/CG/RG/アドホックグループ等

3.1 FG-AN

2020年12月から、これまで10数回に及ぶ会合を重ねてきたFG-AN (Focus Group on Autonomous Networks) が今年度で活動期限を迎え、最終レポートが報告され (SG13-TD210/PLEN)、4件の出力文章「Knowledge Management for Autonomous Networks (SG13-TD660/WP1)」、「Gap analysis for Autonomous Networks (SG13-TD661/WP1)」、「Glossary of terms and definitions for Autonomous Networks (SG13-TD662/WP1)」、「Report with Proofs-of-Concept (SG13-TD663/WP1)」が紹介された。出力文章は、すべて研究課題20の作業文章として引き継がれている。

3.2 JCA-ML

AI/ML (Artificial Intelligence/Machine Learning) に関連するITU-T SG及び標準化団体間の連携促進を目的とするJCA-ML (Joint Coordination Activity on Machine Learning) の活動の報告 (SG13-TD214/PLEN) があり、標準化ロードマップの改定と用語集の作成状況が紹介された。また、次回SG会合で、JCAの期限延長が議論されることが確認された。

3.3 CG-Dataset

ネットワークにおけるAI/ML活用で用いられるデータ (メタデータ、データモデル等) についてITU-T、標準化団体及び



学術機関と情報を交換するためのCG-dataset (Correspondence Group for datasets applicable for AI/ML in networks) の報告 (SG13-TD218/PLEN) があり、ATIS やETSIとの情報交換の状況、データモデルに関するテクニカルレポート作成の状況が報告された。また、次回SG会合期間中に、半日のワークショップ「At the crossroads of Standards and Research: AI/ML datasets for future networks」が開催されることが紹介された。

3.4 AIに関する新FG設立提案

2023年11月のSG会合で、トルコ、UAE、ナイジェリア、ザンビア、チュニジア、カメルーン、コートジボアール、インド、ドイツ、China Telecom、楽天モバイル、グラスゴー大学から、新たにAIを扱うFG-AI6G (Focus Group on AI in 6G) について設立提案が出されている。新FGは、6G時代のネットワークにおける「AI native」について研究することが提案されたが、前会合での設立は見送られた。FGのToRを検討するために専用のCG-AI6G (Corresponding Group on artificial intelligence for IMT2030) が立ち上げられ、今会合でToRを再審議したが、現在の各研究課題の活動と新FGの研究テーマの重複等の懸念から設立は合意されなかった。研究対象を、6Gではなく「通信事業者ネットワークにおけるAI native活用」とするFG-AINN (Focus Group on Artificial Intelligence Native for Telecommunication Networks) に変更して、新ToRを次回SG会合で審議することとなった (SG13-TD223R1)。

3.5 環インド洋諸国に関する新RG設立提案

インドから、環インド洋諸国に関する新RG (Regional Group) の設立が提案された。本提案の環インド洋諸国の枠組みでは、対象国が4つの既存通信団体 (APT、ATU、CEPT、LAS) と所属が重複するため、新RGと既存団体の間の関係に懸念が表明された。そこで、各通信団体に本提案について意見照会して、次回SGで再度審議することとなった (SG13-TD248/PLEN)。

4. 個別審議

主な研究課題について、本会合で合意された勧告草案、承認された補助文章及び了承された新作業項目を中心に審議状況を報告する。

4.1 研究課題2 (NGN進化形)

研究課題2は、SDNとNFVを含めた革新的な技術によるNGNの進化を扱っている。今会合では、勧告草案Y.2502「Framework and Requirements of Decentralized

Trustworthy Network Infrastructure」が合意された。Y.2325は、NGN進化形において分散台帳を利用して信用度を高めたネットワークインフラのフレームワークと要求条件に関する勧告案である。また、NGN進化形での物理レイヤーを対象としたデジタルツインや、ネットワークとコンピューティングリソースの統合制御コンセプトであるCPN (Computer Power Network) の処理プラットフォーム等に関して計4件の新作業項目の開始が了承されている。

4.2 研究課題6 (QoS)

研究課題6は、主にIMT-2020ネットワークやQKDN (Quantum Key Distribution Network) のQoSを審議している。勧告草案Y.3129「Requirements and framework for stateless fair queuing in large scale networks including IMT-2020 and beyond」が合意されている。これは、決定論的ネットワークでのステートレスな公平キューイングに関する要求条件とフレームワークに関する勧告である。本会合では、AIによる自動コンテンツ作成に関するQoSを扱う勧告草案、IMT-2020ネットワークのWANにおける決定論的ネットワークのインターワーキングにおけるQoSに関する勧告草案、自律的QoS保障に関する勧告草案が開始されている。

4.3 研究課題16 (TrustNW、QKDN)

研究課題16は、ネットワークのトラスト、量子技術利用ネットワークとサービスを議論している。

QDN (Quantum Key Distribution Network) のインターワーキングにおけるSDN機能を扱った勧告草案Y.3820「Quantum Key Distribution Network Interworking-Software Defined Networking Control」、QKDNのネットワークとしての障害耐性に関する要求条件を扱った勧告草案Y.3821「Quantum key distribution networks-requirements for resilience」、自律ネットワークにおける自律ネットワーク機能のトラストレベルの評価を扱う勧告草案Y.3062「Trustworthiness Evaluation for IMT-2020 and Beyond with Autonomous Network Functions」が合意されている。

本研究課題ではQKDNを含む量子技術のネットワーク応用に関する活発な議論が繰り返されており、QKDN既存勧告の改定やQKDNのネットワーク耐性強化に向けたアーキテクチャ、QKDNのオーケストレーション等計9件の新作業項目が開始されている。

4.4 研究課題17 (クラウド要求条件)

研究課題17は、クラウドにおけるコンピューティングに関する要求条件を議論している。本会合では、ビッグデータ

の交換に関する勧告改訂案Y.3601 Rev.が開始されており、Y.3603のカタログ仕様との整合とメタデータの修正等を実施する。新勧告改訂案Y.3505 Rev.は、クラウドのデータストレージフェデレーションに関する勧告で、最新ユースケースの追加と対応する要求条件を更新することになっている。また、CloudでのAI活用やハードウェアアクセラレーション等の新規技術動向に関する複数の新規作業開始提案がリビングリスト扱いになっており、継続して対応を審議している。

4.5 研究課題19 (クラウド管理)

研究課題19は、クラウドサービスやリソース管理に関する審議を担当している。クラウドデータのモビリティ管理のフレームワークと要求条件に関する勧告草案Y.3551「Cloud computing-Framework and functional requirements of cloud data mobility management」が合意されている。今会合から、クラウドコンピューティングにおける仮想マシン及びコンテナの統合管理や分散クラウド環境でのタスクスケジューリングに対するフレームワーク等の研究も進めている。

4.6 研究課題20 (アーキテクチャ、機械学習)

研究課題20は、IMT-2020ネットワークや将来網に関する各種アーキテクチャと機械学習活用について議論している。AIによるネットワーク設計の最適化に関するY.3142「Requirements and framework for AI-based network design optimization in future networks including IMT-2020」や分散した連合学習に関する要求条件を扱うY.3186「Requirements and framework for distributed joint learning to enable machine learning in future networks including IMT-2020」が合意された。

また、本会合では多くの新作業項目(勧告草案4件、新補助文章4件)の開始が了承されている。FG-ANの出直文章を基にした新勧告草案Y.KM-AN「Knowledge management for autonomous networks」、新補助文章TR.AN-gaps「Gap analysis for Autonomous Networks」と「TR.AN-PoC Proof of Concept activities for Autonomous Networks」、このほか、自律ネットワークの制御機能に関する新勧告草案や通信事業者ネットワークへの生成AIの適用に関する新技術報告書、IMT-2030に関する用語集等が開始されている。

4.7 研究課題21 (NWソフト化)

研究課題21は、IMT-2020ネットワーク及び将来網のソフト化に関する議論をしている。今会合で、IMT-2020ネットワークにおけるAI活用レベルの分類に関するY.3162「Evaluating intelligence capability for network slice manage-

ment and orchestration in IMT-2020 network and beyond」が合意された。

本会合では、ネットワークスライス管理のためのデジタルツインに関する新作業項目やサービス指向ネットワークのコンセプト作りが開始されている。また、JCA-IMT2020の活動成果を文章化するSupplement 59 to ITU-T Y.3100-series:「IMT-2020 and beyond standardization roadmap」の新改定案Rev.4の作業も開始されている。

4.8 研究課題22 (新技術)

研究課題22は、ICN (Information Centric Networking) といったIMT-2020ネットワーク及び将来網での新ネットワーク技術を扱っている。早稲田大学の寄書により、本会合で合意された勧告改訂草案Y.3073 Amd.1「Framework for service function chaining in information-centric networking」では、複数のサービスチェーンへの分岐を扱えるように拡張されている。また、ネットワークのデジタルツインのモデル領域に関する要求条件やNPN (Non Public Network) のデジタルツイン等の新作業項目が開始されている。

4.9 研究課題23 (有線無線衛星統合)

研究課題23は、IMT-2020ネットワーク及びその発展形で固定網-移動網の技術融合(FMC: Fixed Mobile Convergence)及び固定網-移動網-衛星通信網の技術融合(FMSC: Fixed Mobile Satellite Convergence)について議論している。NICTの寄書により、FMSCのE2Eサービスの提供やリソース制御を実現するための統合制御を扱うY.3207「Fixed, mobile and satellite convergence-Integrated network control architecture framework for IMT-2020 networks and beyond」が完成して合意されている。また、ユーザリクエストベースでFMSCサービスを提供するためのアーキテクチャを扱うための新勧告草案や複数衛星軌道への地上局機能の対応に関する新技術文章草案等が開始されている。

5. 今後の会合予定

次回SG13会合は、今期研究期間の最終会合となり、2024年7月15~26日にジュネーブで開催される。次回SG会合前に、研究課題1、2、5、6、16、18、19、20、22、23の中間ラポータ会合(e-meeting)が開催される。中間会合日程は、下記URLで確認できる。

<https://www.itu.int/net/ITU-T/lists/rgm.aspx?Group=13&Q=-1&From=2024-04-01&To=2024-07-12>



ITU-T SG17第5回会合報告



株式会社KDDI総合研究所
ユーザブルトラストグループ
グループリーダー

いそはら たかまさ
磯原 隆将



株式会社KDDI総合研究所
リスクマネジメント・DX推進部
部長

みやけ ゆたか
三宅 優

1. はじめに

ITU-T SG17 (セキュリティ) の第5回会合が、2024年2月20日(火)～3月1日(金)に、スイス(ジュネーブ)のITU本部において開催された。この会合には、日本からの25名を含む、55か国・諸機関の333名(現地参加161名、リモート参加172名)が参加した。提出された寄書は187件(うち日本から10件)で、520件の臨時文書(Temporary Document)が発行された。なお、第4回会合と同様に、今回の会合もリモート参加が可能であり、リモート参加については、Working Partyレベルまでの議論には参加が可能であるが、Study Groupのオープニング、クロージングの各プレナリセッションにおける合意形成には参加できないとされた。

2. SG17全体に関わる結果

2.1 生成AIのセキュリティとプライバシーに関するワークショップの開催

今回の会合に先立つ2月19日(月)に「Generative AI: Challenges and Opportunities for Security and Privacy」と称するワークショップが開催された。本ワークショップは、ISO/IEC JTC1 SC27、ETSI、OECD等の関係者も招待し、生成AIのセキュリティとプライバシーに関する標準化活動状況や各研究機関での取組み状況等が紹介された。パネルディスカッションを含む4つのセッションが開催され、ワークショップ全体としては、17件の講演が行われた。はじめに、生成AIを含むAIに関するセキュリティとプライバシーの懸念、リスク、脅威に焦点を当てた議論が行われた。次に、生成AIに関するセキュリティとプライバシーの懸念を軽減するための対策に焦点を当て、効果的な対策を実現する方法についての議論が2セッション行われた。最後にパネルディスカッションが行われ、今後の生成AIに関するセキュリティとプライバシーの標準化の方向性の検討と、SG17における将来の活動に対する推奨事項について議論がなされた。本

ワークショップを受けて、AIセキュリティに関する情報交換の場として、コレスポネンスグループCG-AI Securityを設立した。また、AIセキュリティに関連する標準化活動を調査し、今回のワークショップの成果を共有するために、ITU-T SGs、ETSI SAI、OECD、IEEE AIS Trust and Agency Committee、ISO/IEC JTC 1/SC 27/WG 4 & WG 5、ISO/IEC JTC 1/SC 42/WG 3にリエゾンを送付した。

2.2 サイバーセキュリティ対応組織の構築運用に関するミニワークショップの開催

今回の会合期間中の2月22日に、「ITU-T X.1060: Exploring an Operational Framework for Cybersecurity」と称するミニワークショップが開催された。本ワークショップは、日本からの貢献によりSG17で勧告化されたX.1060 (Framework for the creation and operation of a cyber defence centre)の活動の紹介と、ベストプラクティスの情報交換及び堅牢なセキュリティ対策の実装に関する実用的なガイダンスが示された。2つのセッションが開催され、既存のセキュリティ対策組織をX.1060が提唱する「サイバーディフェンスセンター」のモデルに成功裡に移行した事例等の紹介や、FIRST CSIRT Framework等の既存フレームワークとX.1060の連携を議論する2つのセッションが開催され、日本からの講演1件を含む計6件の講演が行われた。

2.3 WTSA-24準備に関する特別セッション

WTSA-24準備に関する特別セッションが、計4回(2月21日、2月22日、2月26日及び2月27日)開催された。本セッションでは、前回会合以降に実施されたコレスポネンスグループCG-SG17-WTSA24-PREPの活動の成果物と、本セッションに提出された各国寄書を対象に、WTSA-24後のSG17の体制検討を審議した。日本からも、課題15にあるインキュベーションプロセスの課題1への移設と課題7を分割してメ

タパスに関する活動を含めること、課題3を単独で残す、または課題10とマージすること及び課題14を課題11に統合することを提案する寄書を提出した。議論の結果、課題15にあるインキュベーションプロセスの課題1への移設とSG17の課題数を12に維持することについて合意された。今回の特別セッションの成果を受けて、第4回会合で合意しており、WTSA-24後のSG17の体制検討を行うコレスポンデンスグループCG-SG17-WTSA24-PREPの活動を現在の研究会期の末まで継続し、2024年7月のTSAG会合前にSG17としての提案を取りまとめることとした。

3. 会合の主な審議内容と結果

3.1 WP1: セキュリティ戦略とコーディネーション

WP1は、SG17の運営に関わるコーディネーション（全体の進捗管理や課題間の調整など）及びITU-T全体のセキュリティに関わるコーディネーションを主な目的とする課題1と、量子ベースのセキュリティを含むセキュリティ全般の新技术（エマージングテクノロジー）について、そのインキュベーションメカニズムなどを検討する課題15から構成されている。

- 課題1では、既存勧告案のX.cs-raを補完するものとして、サイバーセキュリティ参照アーキテクチャのセキュリティ要件を抽出するためのユースケースに関する技術レポートTR.cs-uc (Use cases for extracting the security requirements for cyber security reference architecture) ほか2件の新規ワークアイテムが設立された。
- 課題15では、NISTで標準化検討中のPQCと親和性の高い先進的な暗号アルゴリズムを紹介し、5G/B5Gにおける暗号アルゴリズムの適用に関する技術指針を提供するTR.ac-pqc (Guidance on use of advanced cryptography based on PQC) ほか8件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1713 (Security requirements for the protection of quantum key distribution node) とAmendments to X.1715 (Security requirements and measures for integration of quantum key distribution network and secure storage network) が合意された。そして、TP.inno-2.0 (Description of the incubation mechanism and ways to improve it) の発行が合意された。

3.2 WP2: 5G、IoT、ITSのセキュリティ

WP2は、各種サービスに必要とされるセキュリティアーキテクチャとフレームワークを検討する課題2、電気通信サービスとIoTのためのセキュリティを検討する課題6及び

高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) のセキュリティを検討する課題13から構成されている。

- 課題2では、SG13で議論されているCPN (Computing Power Network) の1要素であるComputing Power Centerの相互接続に関するセキュリティガイドラインである技術レポートTR.sec-int-cpc (Security considerations for interconnection of computing power centers) ほか3件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1819 (Security Capabilities of Network Layer for IMT-2020/5G Edge Computing) とX.1820 (Security Requirements for the Operation of IMT-2020/5G Core Network to Support Vertical Services) が凍結された。そして、TR.zt-acp (Guidelines for zero trust based access control platform in telecommunication network) が合意された。
- 課題6では、IoT機器のセキュリティに関する技術要件を提供し、データの収集・保管・セキュリティ分析に関する要件と、IoT機器のセキュリティアラートと可視化に関する要件を提案するX.sm-iot (Technical requirements of security situation monitoring for Internet of things (IoT) device) ほか2件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1352Amd (Amendment 1 to Recommendation ITU-T X.1352: Security requirements for Internet of things devices and gateways) がTAP投票を経て合意された。そして、X.1353 (Security methodology framework based on blockchain for zero-touch deployment in massive IoT) とX.1354 (Security Controls for Internet of Things (IoT) system) が凍結された。
- 課題13では、Advanced Air Mobility (AAM) において取り扱われるデータの分類とそれらに対するセキュリティガイドラインであるX.aamd-sec (Security guidelines for categorized data in advanced air mobility (AAM)) が新規ワークアイテムとして設立された。また、X.1373rev (Secure software update capability for intelligent transportation system communication devices) がTAP投票を経て合意された。そして、X.1384 (Security requirements and guidelines for vehicular edge computing) が凍結された。

3.3 WP3: サイバーセキュリティと管理

WP3は、ISO/IEC JTC1 SC27との連携をベースとして、電気通信における情報セキュリティマネジメントとセキュリ



ティサービスについて検討する課題3と、サイバーセキュリティとスパム対策について検討する課題4から構成されている。

- 課題3では、X.1060を改訂するX.1060-rev (Framework for the creation and operation of a cyber defence/security centre) ほか2件の新規ワークアイテムが設立された。
- 課題4では、マルウェア攻撃に対するネットワーク上のストレージ保護のためのセキュリティフレームワークX.nspam (Security framework for network storage protection against malware attacks) ほか1件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1237 (Technical security framework for protection of personally identifiable information while countering mobile messaging spam) が凍結された。

3.4 WP4：サービスとアプリケーションのセキュリティ

WP4は、安全なアプリケーションサービスの実現に寄与する技術を検討する課題7、クラウドコンピューティングとビッグデータ基盤のセキュリティを検討する課題8及び分散台帳技術 (DLT: Distributed Ledger Technology) のセキュリティ課題の整理とDLTをセキュリティに活用する方法を検討する課題14から構成されている。

- 課題7では、リコメンデーションサービスにおけるセキュリティの脅威の特定と、それらに対するセキュリティ要件を定めるX.str-irs (Security threats and requirements for information recommendation service) ほか3件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1150 (Security assurance framework for digital financial services) がTAP投票を経て合意された。そして、X.1471 (A reference monitor for online analytics services) が凍結された。さらに、X.1144rev (The revision of eXtensible Access Control Markup Language)、X.guide-ccd (Security guidelines for combining de-identified data using trusted third party)、X.sg-dtn (Guidelines for Digital Twin Network) 及びX.smsrc (Security measures for smart residential community) が合意され、補足文書X.suppl.uc-dcc (Use cases for digital COVID-19

certificates) の発行が合意された。

- 課題8では、クラウド基盤のDDoS対策に関するガイドラインX.gapci (Guidelines on Anti-DDoS protection for cloud infrastructure) ほか3件の新規ワークアイテムが設立された。
- 課題14では、NFTなどのデジタル収集サービスのセキュリティ要件X.sg-dcs (Security guidelines for DLT-based digital collection services) ほか5件の新規ワークアイテムが設立された。

3.5 WP5：基本的なセキュリティ技術

WP5は、ID管理と生体認証を通信環境で利用する際のアーキテクチャ及びメカニズムを検討する課題10と、X.509を含むPKI関連技術や統一モデリング言語 (UML: Unified Modeling Language) 等の安全なアプリケーションを支援する基盤技術について検討する課題11から構成されている。

- 課題10では、NISTがSP800-63-4の初期公開草案を公表してITU-TのX.1254の改訂を提案していることを受けて、既存勧告のX.1254をNISTの活動と整合させるためのX.1254rev (Entity authentication assurance framework) ほか4件の新規ワークアイテムが設立された。また、X.1280 (Framework for out-of-band server authentication using mobile devices) とX.1281 (APIs for interoperability of identity management systems) がTAP投票を経て合意された。そして、X.gpwd (Threat Analysis and guidelines for securing password and passwordless authentication solutions) が凍結された。
- 課題11では、ITU-T X.510 | ISO/IEC 9594-1のセキュリティとユーザビリティの強化に資する拡張を行うX.500: The Directory: Overview of concepts, models and servicesほか9件の新規ワークアイテムが設立された。

3.6 今会合で設立された新規ワークアイテム一覧

今回のSG17会合では、61件の新規ワークアイテム提案が寄せられ、そのうち55件を設立した。通常よりも多くの提案となったため、新規に設立したワークアイテムの情報について、表1に整理する。

■表1. SG17第5回会合で設立された新規ワークアイテム

課題	ワークアイテム名称	勧告名称
課題1	TR.cs-uc	Technical report : Use cases for extracting the security requirements for cyber security reference architecture
課題1	TR.cs-sc	Technical report : Collection of Security Concerns to support X.cs-ra Cyber Security Reference Architecture
課題1	CRAMM Roadmap	SG17 Cyber Security Reference Architectures, Models and Methodologies Roadmap
課題2	TR.sg-lmcs	Technical report : Security guidelines for DLT-based lifecycle management of computing services
課題2	TR.sec-int-cpc	Technical report : Security considerations for interconnection of computing power centers
課題2	TR.sd-cnc	Technical report : Security guidelines for data of coordination of networking and computing
課題2	X.ztmc	Guidelines for high level Zero trust model and its security capabilities in telecommunication networks
課題3	X.cdc-csirt	Relationships between Cyber Defence/Security Centre and Computer Security Incident Response Team
課題3	X.1060-rev	Framework for the creation and operation of a cyber defence/security centre
課題3	X.1058-rev	Information security, cybersecurity and privacy protection-Code of practice for personally identifiable information protection
課題4	X.nspam	Security framework for network storage protection against malware attacks
課題4	X.gpmr	Guidelines and security measures for prevention and mitigation of ransomware
課題6	TR.st-iot	Technical report : Security threat scenarios in Internet of things
課題6	X.sm-iot	Technical requirements of security situation monitoring for Internet of things (IoT) devices
課題6	X.gnssa-iot	Guidelines of implementing network security situational awareness for IoT systems
課題7	X.fr-vsasi	Functional requirements for visualization service of network security assets and security incidents based on digital twin
課題7	X.ias	Functional requirements for the unified authentication service of telecommunication operators
課題7	X.str-irs	Security threats and requirements for information recommendation service
課題7	X.sgrtem	Security guidelines for real-time event monitoring and integrated management in smart city platforms
課題8	X.FR-MSP	Functional Requirements of Microsegmentation Platform in a cloud-based environment
課題8	X.ckrp	Framework of cryptographic key resource pool for cloud computing
課題8	X.mbaas-cs-sec	Security requirements and framework of collaboration service for multiple blockchain as a service platforms
課題8	X.gapci	Guidelines on Anti-DDoS protection for cloud infrastructure
課題10	X.1254rev	Entity authentication assurance framework
課題10	X.oob-pacs	Framework for out-of-band physical access control systems using beacon-initiated mutual authentication
課題10	X.tis	Telebiometric authentication based on information splitting
課題10	TR.divs	Technical report : Rationale and initial approach of a decentralized identity verification system (DIVS) based on verifiable data
課題10	TR.SIMRegBio	Technical report : Guidelines for SIM Identity and Biometrics Registration.
課題11	X.500Amd.1	The Directory : Overview of concepts, models and services
課題11	X.501Amd.2	The Directory : Models
課題11	X.509Amd.1	The Directory : Public-key and attribute certificate frameworks
課題11	X.510Amd.1	The Directory-Protocol specifications for secure operations
課題11	X.511Amd.1	The Directory : Abstract service definition
課題11	X.518Amd.1	The Directory : Procedures for distributed operation
課題11	X.519Amd.1	The Directory : Protocol specifications
課題11	X.520Amd.1	The Directory : Selected attribute types
課題11	X.521Amd.1	The Directory : Selected object classes
課題11	X.525Amd.1	The Directory : Replication
課題13	X.aamd-sec	Security guidelines for categorized data in advanced air mobility (AAM)
課題14	X.qsdlt-ca	Guidelines for building crypto-agility and migration for quantum-safe DLT systems
課題14	TR.dw-lasf	Technical report : A landscape analysis and security features for a digital wallet
課題14	X.1400rev	Terms and definitions for distributed ledger technology
課題14	X.sr-dpts	Security requirements for DLT data on permissioned DLT-based distributed power trading systems



課題14	X.sg-dcs	Security guidelines for DLT-based digital collection services
課題14	TR.gscim-dlt	Technical report : Guidelines for security consideration for incident management by DLT service provider
課題15	X.sr-da-gai	Security threats and requirements for data annotation service of generative artificial intelligence
課題15	X.sgGenAI	Security Guidelines for Generative Artificial Intelligence Application Service
課題15	X.ig-dw	Implementation guidelines for digital watermarking
課題15	X.sc-sscti	Guidelines on Security Capabilities for Software Supply Chain in the Telecommunications Industry
課題15	TR.se-ai	Technical report : Security Evaluation on Artificial Intelligence Technology in ICT
課題15	X.srm-fml	Security requirements and measures of federated machine learning
課題15	X.pg-cla:	Procedural guideline for continual learning to actively respond to network attacks
課題15	TR.ac-pqc	Technical report : Guidance on use of advanced cryptography based on PQC
課題15	TR.QKDN-SP	Technical report : Overview of security profile for Quantum Key Distribution Networks in hybrid mod

4. 今後の会合の予定

次回のSG17会合は、次に述べる2つのオプションが提案された。1つ目のオプションは、6月下旬か7月上旬にスイス（ジュネーブ）以外を開催地として2週間の会合を実施するものであり、会期の前日には、デジタルツインとメタバースのセキュリティとプライバシーに関するワークショップを開催する。もう1つのオプションは、7月11日と12日にWTSA準備のためのオンラインの会合を実施し、9月にスイス（ジュネーブ）にて1週間の会合を実施するものである。3月末時点で開催地の立候補が無かったため、2つ目のオプションが選ばれることとなり、9月の会合は2日～6日が予定されている。

次回までに開催される中間会合等の予定を表2に示す。

5. おわりに

今回の会合では、当時の時点で現研究会期の最高の件数を記録した前回会合の実績値である153件を2割程度上

回る、187件の寄書が提出された。そして、これらのうち、61件が新規ワークアイテム提案であった。提出された新規ワークアイテム提案の対象の技術分野は、分散台帳、量子鍵配送、AIに関するものが多く、また、提出国は中国が約半数を占め、それに韓国が続いた。こうした状況は、新興技術の隆盛に伴ってセキュリティ分野で検討すべき課題が継続的に発生する様相を如実に示している。同時に、審議にあたる参加メンバーのリソースは限られているため、審議が進行中の勧告草案も含めて過去に前例のない件数を扱う状況について、限られた時間で精緻な審議を行うための会合の在り方についても検討と考慮が必要と考える。こうした対応は、ITU-Tの勧告が、真に意義のある成果であると社会から適格を得るためにも、重要な課題である。この課題に対して、日本が世界の情報通信技術の発展と安定に、その存在感を発揮しながら貢献すべく、標準化活動への取組みを進めていく。

■表2. 今後の関係会合の予定

会合名	開催期間	開催地	会合内容
課題1中間会合	2024年5月17日	ソウル（韓国）	セキュリティマニュアル、TR-Suss及び課題1に関する将来的なワークアイテムすべてのレビュー
課題3中間会合	2024年6月5日	e-meeting	X.shcdの審議
課題3中間会合	2024年6月6日	e-meeting	X.1058-revとX.1053-revの審議
課題3中間会合	2024年6月11日～12日	e-meeting	Sup-cdc、X.gsm-cdc及びX.1060-revの審議
課題4中間会合	2024年5月24日	e-meeting	課題4のすべてのワークアイテムの審議
課題7中間会合	2024年5月21日～22日	杭州市（中国）	課題7のすべてのワークアイテムの審議
課題8中間会合	2024年5月21日～22日	杭州市（中国）	課題8のすべてのワークアイテムの審議
課題10中間会合	2024年5月16日～27日の間で1日	検討中	課題10のすべてのワークアイテムの審議
課題13中間会合	2024年6月4日～5日	e-meeting	X.evtol-secとX.sup-cv2x-secの準備と課題テキストの審議
課題15中間会合	2024年6月4日～6日	e-meeting	インキュベーションセッションに関する新規課題と既存課題の審議
課題15中間会合	2024年7月	e-meeting	量子鍵配送に関する新規課題と既存課題の審議
SG17会合	①2024年7月11日～12日 ②2024年9月2日～6日	①e-meeting ②スイス（ジュネーブ）	

アジア・太平洋電気通信共同体 (APT) 無線グループ (AWG) 第32回会合 (2024年3月4日-8日) 報告

総務省 総合通信基盤局 電波部 電波政策課 国際周波数政策室

1. はじめに

AWG第32回会合 (AWG-32) は、タイ・パタヤ市内のホテルにおいて、2024年3月4日~8日の日程でオンライン (Zoom) と併用する形で開催され、参加者数は、APT加盟国、企業等から約445名 (参加登録者数)、我が国からは90名が参加 (うち、39名が現地参加) した。

AWG-32会合の結果大要

- WRC-27議題1.7及び議題1.13の検討周波数帯におけるIMTの利用状況等に関する作業項目の追加提案 (中国) については、WRC議題に関する作業はAPGからの指示の下行われることが妥当であるとして、否決された。
- WG-TER隷下のTG-WPTにおいて、議長 (韓国) が参加できず、さらに代理議長についてもすべてのセッションへの参加が困難であったことから、韓国側の要請により急遽、東北大・塚本氏が共同代理議長を務めた。
- 前回のAWG会合から作業が開始されたRLANに関する新規レポート案について、Wi-Fiに関する記載の充実化を図るヒューレッド・パッカード (HP) 社と周波数帯に関する記載 (特にupper 6GHz) の削除を求める中国との間で意見対立が先鋭化したが、両論併記のまま主にレポート構成について議論し、次回会合以降引き続き検討することとなった。
- 「地上系及び非地上系システムを活用した多層ネットワーク接続のマルチコネクティビティに関する新APT報告草案」は、第30回から第32回会合にかけて各国の入力により順調に情報が集約されており、次回会合 (AWG-33) での最終化に向けて検討が必要とされた。

2 主な結果概要

今会合における主な議題の結果は以下のとおり。

(1) IMT

WRC-27議題1.7の検討周波数帯のうち、4400-4800MHz帯に関して、アジア太平洋地域における利用状況や今後の計画などの情報を収集することを目的とする質問票及びWRC-27議題1.13の検討周波数帯のうち、ITU-R勧告M.1036に記載されているIMT特定済みの各周波数帯について利用状況の情報を収集することを目的とする質問票の作成について、中国より提案されたが、APGからの指示を待たずに作業を行うことへの懸念が我が国やニュージーランド等から示された。APGに対して、AWGがサポートできる課題がないかについて問うリエゾン文書の作成について検討されたものの、結果として作成されないこととなった。なお、上記の2件の中国寄与文書は、次回会合に持ち越されることとなった。

また、APT/AWG/REP-15 (Rev.9) の「移動体通信事業者の周波数、技術、ライセンス期間に関する情報」に関する最新情報がニュージーランドより入力され、次回会合では、APT/AWG/REP-15 (Rev.9) を改定する新たな作業項目を設定することで合意され、次回会合での作業が完了する予定。本件を所掌するSub-WG IMT Technologies議長からは、本レポートの情報をAFIS*に盛り込むのが理想的であるという意見が表明されたことを踏まえ、IMT関連のデータをAFIS*に入力するよう主管庁に要請された。

APT報告APT/AWG/REP-93 (モバイルブロードバンドPS-LTE) について、AWG-30会合において、同報告に対し既に情報を提供しているほかのAPT加盟国 (韓国、中国、我が国、オーストラリア) の情報を更新することとともに、より多くのAPT加盟国からの内容提供を募ることを目的に、改訂作業が開始された。

今会合においては、改訂に向けた寄与文書の入力はなく、

* AFIS (APT Frequency Information System) : APT諸国の周波数割当情報を整理することを目的に、2017年に整備されたシステムであり、AWG傘下のAFIS Ad-Hoc Groupにおいて、当該システムの活用に関する検討が行われている。



作業文書のエディトリアルな更新が行われ、次回会合（AWG-33）での改訂作業完了を予定している。また、併せて公共安全分野における3GPPの活動に関する情報が共有された。

(2) 電波監視

前回会合（AWG-31）において我が国から提案を行った「最近の典型的な電波干渉の事例と原因・対策に関するケーススタディ」を基に、インドネシア、中国、ベトナムから事例追加の提案が行われた。次回会合（AWG-33）まで各国からの事例追加の提案を受け付けた後、AWG-34で新APT報告として完成する予定。

また、前回会合（AWG-31）においてベトナムから新APT報告案に向けた提案が行われた「不正基地局（RBS）の監視・特定に関する技術的ガイドライン」について、ベトナムからの提案内容の修正とともに中国から提案内容を補強する提案がなされた。次回会合（AWG-33）においても引き続き議論が行われ、新APT報告として完成する予定。

(3) 固定無線システム/地上系無線標定システム

我が国からの提案により作業を開始し進めていた「252-296GHzで運用されるP2P無線システムに関するAPT報告」及び「厳しい気象条件下における固定無線システムの通信性能に関するAPT報告」について、我が国からの提案により軽微な修正を行った上で、予定どおり今会合にて承認され完成した。

「ダム及び河川管理システムに必要となるXバンド二偏波固体素子型雨量レーダーに関する新APT報告案」及び「450GHz以上の周波数で運用するテラヘルツ固定無線システムに関する新APT報告案」については、我が国からの寄与文書により内容が充実化され、AWG-33での完成を目指すことが確認された。

(4) 無線LAN

前回のAWG会合から作業が開始されたRLANに関する新規レポート案について、Wi-Fiに関する記載の充実化を図るヒューレット・パッカード（HP）社と周波数帯に関する記載（特にupper 6GHz）の削除を求める中国との間で意見対立が先鋭化したことが、両論をレポート案に残したままレポート構成についての議論を行い、大枠の合意が得られた。内容については、Scope部分の議論に終始し、周波数帯の書き方やunlicensedに限るのかどうかといった課題が残されたまま、次回に持ち越すこととなった。

また、以前のAWG会合から持ち越されていたAFCに係る新規レポート案について、APT地域にAFCを利用している国はないとして中国からはレポート作成そのものについて反対意見が示されたが、作業計画の更新を部分的に行い、次回に持ち越すこととなった。

(5) HAPS

APT加盟各国における国家ブロードバンド接続に関する戦略策定の参考とすることを目的に、AWG-30において、「ブロードバンド接続性のためのHAPS産業とエコシステムに関する新APT報告案」の策定作業が開始され、今会合では我が国とインドネシアからそれぞれWRC-23で特定されたHIBS用周波数に関する情報を追加する寄与文書が入力され、これらに基づき作業文書の更新が行われた。作業完了予定についてAWG-33となっていたところ、インドネシア提案に基づいて設けられた本報告書の一部の章（ケーススタディと技術ロードマップをまとめる章）におけるコンテンツが無い現状を踏まえ、一会合延期することを我が国から提案し、AWG-34での完成を目指すこととなった。

(6) ITS

前回会合において我が国が提案した新作業項目案2件（ITS用ミリ波レーダー/センサ及び路車間協調ITSに関するAPT新報告）について、それぞれAPT新報告の完成に向けて、我が国からの寄与文書に基づき作成作業が行われた。両新報告については、AWG-34での完成を予定している。

上記のITS用ミリ波レーダー/センサ波のAPT新報告の策定に資するべく、我が国からの寄与文書に基づいて、24GHz帯、60GHz帯、76/79GHz帯の3周波数帯におけるミリ波レーダ・センサ技術の利用状況、標準技術、規制に関する情報収集を目的とした質問票が作成され、次回会合を締め切りとした回章として発出されることとなった。

また、次回会合では、路車間協調ITSのAPT新報告作成に資する質問票の作成が行われることとなった。

(7) 衛星利用

「地上系及び非地上系システムを活用した多層ネットワーク接続のマルチコネクティビティに関する新APT報告草案」について、我が国からNTNに関するネットワーク制御技術や光通信と無線通信の比較表等の情報を提案した。また、韓国が研究開発例に関する内容を提案し反映された。

GSOAから免許制度手続を簡素化することの重要性を報告内に追記する提案があったが、中国及び韓国が、機微な内容であり、本報告のスコープを超えるものであるとして反対した。オフラインでの議論の結果、当該情報については、情報提供のみを目的とするものであり、主管庁の主権に影響を与えてはならない旨のノートに記載した上で、一部箇所をスクエアブラケットで囲んだまま、TMP文書とすることで合意した。次回会合に改めて議論を行うこととなった。

「Ku帯における非静止衛星地球局端末に関する新APT報告案」については、Eutelsat Asia・ソフトバンク等から今会合での完成を目指して最終化する提案がなされた。これに対して中国がCEPTでの検討結果をそのままAPTの報告として記載することに懸念を示し、本文から関係する技術的な記載を削除する提案を行った。議論の結果、本報告のスコープであるNGSO FSS地球局の運用特性に関する情報を提供することを念頭に修正が行われ承認された。

「移動衛星業務におけるIMT-2020衛星コンポーネントアプリケーション提供のための技術に関する現状についての新APT報告草案」については、ITU-APT Foundation of India及びGSOAから、本報告に関連し、WRC-27議題1.13及び1.14に関する決議番号等の情報を入力する提案があった。ニュージーランドや韓国から、APGから検討の指示が出ていない状態で、AWGでWRC議題に関連する検討を行うことは適当でない旨の反対があり、関連する記載が削除された。議長報告に本件に関する議論状況を記載することとなり、APGに対し、本報告に関する検討状況を知らせるリエゾン文書を発出することで合意した。

2015年に採択されたAPT報告58（13.75-14GHz帯のAPT地域での利用）については、WRC-27議題1.2での検討周波数帯と被っていることから、パプアニューギニアから自国の周波数利用状況の追記提案があったほか、GSOAから、APT加盟国への質問票の素案が提出された。

なお、本件に関連し、AWGではWRC議題に関する議論はAPGからの要請がない限り行うべきではないという意見がニュージーランドや韓国から示され、議論の結果、議長報告に当該報告への更新に必要な情報提供をAPT加盟国に求める記述を追加することで合意された。

(8) WPT

今次会合においては、WG-TER隷下のTG-WPTの議長（韓国）が参加できず、さらに代理議長についてもすべてのセッションへの参加が困難であったことから、韓国側の要請により急遽、東北大・塚本氏が共同代理議長を務めた。

モバイルポータブルデバイス用Non-Beam WPTに関するAPTレポートの改訂に向けた作業文書案（WPTがAM放送に与える影響調査の結果）については、我が国から、本調査はWPTのAM放送への影響を明確にするものであり、調査の結果、必要隔離距離は短く、WPTデバイスの位置等を変えることで共存は可能であるとし支持した一方、中国からは調査方法について懸念が寄せられ、提案元のAppleと中国の間でオフライン協議の結果、中国からの修正提案を反映した上で承認された。

なお、勧告文書案については、中国からAWG-32での承認は見送るべきと反対意見が表明され、最終化はAWG-33に持ち越された。

Beam WPTに関するインパクトスタディレポートについては、最終化時期をAWG-32からAWG-34に延期するため、TEMP文書案として作業文書の修正とマイクロワークプランの修正案が承認された。

移動機械用WPTのAPTレポートの改訂に向けた作業文書案については、エディターであるPark氏（韓国）が議論に参加できなかったことから、現状の作業文書をTEMP文書としてAWG-33に持ち越された。

(9) 航空・海上関係

中国からの提案で進められている、IMTに準拠した航空機搭載のATG（Air To Ground）通信システムに関する報告に関しては、APT各国における動向等についての質問票が完成し、発出されることとなった。また、報告文書の完成予定については、当初のAWG-33からAWG-35へ後ろ倒しすることが合意された。

3. 次回日程

次回会合（AWG-33）は、2024年9月ごろにバンコクにて開催される予定である。

情報通信技術の国際標準化活動における アカデミアの役割



東京大学 大学院工学系研究科 教授 **なか お 中尾 彰宏**

次世代の情報通信技術であるBeyond5G/6Gを目指した研究開発が急速に進展している。

2023年には、国際電気通信連合（ITU）においてIMT2030（6G）のフレームワーク勧告が策定*され、3GPPが同年12月に6Gの標準化に取り組む表明をした。2023年世界無線通信会議（WRC23）でも、新たな周波数利用への合意が進んでいる。

Beyond5G/6Gの技術目標は、大容量、低遅延、多数接続の向上に加え、低消費電力、安心安全、自律性、拡張性などの実現が目標として設定されている。付随して、エッジコンピューティング、ソフトウェア化、AI利活用など、計算機科学と情報通信工学の融合が進んでおり、情報通信機能を出口とする半導体開発・利活用が急速に進むことが予想される。

時代とともに注力する研究開発の方向性は変遷するが、情報通信技術の社会実装においては、国際的な合意形成のもと普及することで、相互運用の可能性が高まり、グローバルマーケットへの普及によりコストの低減が可能となるため、国際標準化活動は重要である。

標準化活動は技術を実用化しビジネスを遂行するためのツールである、と言われることがある。そのため、標準化は産業界が取り組むべきであり、大学が標準化活動に参加することが適切ではないとする声を聞くことがある。私はその度に大きな誤解があると感じている。

これだけ国際産学連携が進んでいる現代において、最先端技術の創成や、人財供給の源泉である大学が様々な国際標準化の仕組みを知り、また、技術の黎明期から商用・実用化までのパスを把握した上で、研究開発や人財育成に取り組むことは大きな意義があると考えられるからである。つまり、アカデミアや大学発のスタートアップ企業が産業界と共に、産学連携の一環として標準化の現状を把握することは有益である。

ここで、情報通信技術の国際標準化活動には様々な形態があることに留意する必要がある。

ITUのような、国際標準の合意を目的に、周波数利用か

らアーキテクチャの勧告など幅広く取り組む国際連合下部の標準化組織や、3GPPのように移動通信の実装仕様の合意を目指す標準化プロジェクト、国際会議や標準規格を制定する米国に本部を置く学術研究団体であるIEEE（米国電気電子学会）、スイスのジュネーブに本部を置く非政府機関であるISO（国際標準化機構）などもあれば、IETF、IRTFなどのインターネット技術の標準化を推進する任意団体もある。

また、IOWN、O-RAN、AI-RAN Allianceのように、企業主導でアカデミアも広く参画するグローバルフォーラムやアライアンスの形態で合意形成を目的とする団体もある。また、これに限らず多くの国際標準化の活動が展開されている。

公的機関の制定するデジュール標準や、市場での支持を得た事実上の標準規格であるデファクト標準という区別の仕方もある。

このような様々な標準化活動へのアカデミアの関わりは様々な形態があり得ると考えられる。しかし、筆者がこれまで関わってきた標準化活動において、アカデミアの役割は以下の3つに大別されるのではないかと考えている。

- (1) 新技術の概念の早期合意形成の貢献
- (2) 国際産学連携
- (3) 人財育成

本稿では、それぞれについて実例を挙げ、紙面の許す限り、その意義を考える。

(1) 新技術の概念の早期合意形成の貢献

移動通信の進化は10年に1度の世代交代という意味で、5Gや6GなどGenerationの頭文字Gが使用される。ITUでは、5Gや6Gの標準化の開始時期までに、ビジョン勧告やフレームワーク勧告と呼ばれる文書を合意する。

ITU-TにおけるStudy Group（SG）では将来の情報通信に向けたアーキテクチャを取り扱うSG13があり、アカデミアを含め広いステークホルダーが参加可能なFocus Group（FG）という議論の場が組織される場合がある。5Gの場

* IMT towards 2030 and beyond : <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/Pages/default.aspx>



合は、ITU-T Focus Group on IMT-2020が組織され、エンド・ツー・エンド通信アーキテクチャやソフトウェア化など、様々なWorking Group (WG) で議論が行われた(Established 2015-05 ; Terminated 2016-12)。

その中でもソフトウェア化WGは、筆者がWG長を務め、5GMFのネットワーク委員会の活動を基本として、産学で5Gにおける仮想化・ソフトウェア化の重要性について意見を交換し、5Gにおけるネットワークスライシングのアーキテクチャの重要性を説き、アウトプット文書を成果として周知することになった。この活動は、ITU-TやITU協会から評価され2016年に「Certification of Appreciation」、「国際活動奨励賞」の受賞に至っている。

3GPPやETSIでは、並行して、5Gにネットワークスライシングや仮想化・ソフトウェア化を導入するための実質的な議論が進み、現在の5Gのエンド・ツー・エンドネットワークのアーキテクチャには、ネットワークスライシングが実装され、商用化に至っている。

2015年の当初では、これまで有線網で議論されていたスライシングの考え方を、移動通信に導入する目的やユースケースが明確ではなかったものの、産学で様々な参加者の意見を多く取り入れた結果、ソフトウェア化・仮想化・スライシングの移動通信における有用性を早期に合意形成できたと言える。このように、新技術の概念の早期合意形成に、アカデミアは大きく貢献するべきであろう。

最近では、超知性ネットワークと呼ばれる、情報通信における機械学習やAIの利活用に注目が集まる。ソフトウェア化で柔軟に複雑な機能が実装可能になることは、機械学習・人工知能 (AI) の情報通信への利活用を促進する。ネットワーク運用におけるオペレーションの自動化、機器障害の予測、電力消費の削減などをAI・機械学習により最適化することが可能になりつつある。

我が国の学術界では電子情報通信学会を中心に、情報通信基盤において、運用を自動化したり、障害を自動検知・予測したりする自律創発性を備える必要性を強く認識しており、筆者が、2019年には19研究専門委員会を横断的にまとめて、RISING (超知性ネットワークに関する分野横断的研究会) を組織している。RISINGでは、多くの若手研究者や学生を啓発するため、ポスター発表やパネル討論を実施しており、無線・有線通信基盤技術のあらゆる分野の研究者から多くの興味を集めている。

ITU-Tでは、5Gにおける機械学習やAIの利活用・技術開発を進めることを目的に、コンテスト形式でアイデアを募

るML5G Challenge AI for Good (<https://aiforgood.itu.int/about-ai-for-good/aiml-in-5g-challenge/>) の活動を2020年から行っており、多くの国から参加がある。日本からも東京大学をはじめ、企業の多くが参加をしている。

2020年7月からは、ITU-Tにて、ITU AI/ML in 5G Challengeと呼ばれる、コンテスト形式で5Gに関わるAI/機械学習の適用に関する課題 (Problem Set) を解くイベントが開催されている。各国が地域におけるコンテストのホスティングを行っており、我が国でも、前述のRISINGのコミュニティを中心として、TTCやNEC、KDDIなどの企業の連合で、日本での地域コンテストを推進している。

第1回ITU AI/ML in 5G Challengeでは、ブラジル、中国、インド、アイルランド、ロシア、スペイン、トルコ、米国、日本等の産学が地域ホストとなり、23種の課題が設定され、62か国から911チームがエントリーした。日本では2種の課題が設定され、国内/外から39チームがエントリーし、審査の結果、6チームをファイナルカンファレンスに登録した。

ファイナルカンファレンスでは、ブラジル、スペイン、中国、インド、アイルランド、アメリカ、トルコ、ロシア、日本等から推薦された33チームが参加し、オンラインの発表審査会が行われ、日本からは、2チームが3位、4位を受賞 (大学と企業) している。

その後も2023年度まで、ITU AI/ML in 5G Challengeプログラムには、RISINGが中心となって、TTCの協力を得て、日本から大きく貢献をしており、同様の形式で計4年間にわたり積極的な活動を継続している。

AI・機械学習の利用は、今後、更に研究開発や標準化の策定が進行すると予想されるが、このように、これから新技術の概念を早期合意形成する活動にアカデミアの貢献が必要と考えられる。

(2) 国際産学連携

総務省と欧州委員会が共同で実施する委託研究「第5世代移動通信システム-次世代の通信ネットワーク技術」において、筆者がPIを務める東京大学とCoPIのフィンランドアールト大学 (Aalto University) とが、「5G! Pagoda (サービスに応じたスライス動的生成・管理機能の実証と標準化を目的とする日欧連携5G移動通信基盤テストベッド)」という研究提案を行い、2016年7月1日に採択され2019年7月まで実施された。

共同委託研究メンバーは、日本側が、東京大学大学院情報学環 (PI)、KDDI研究所、日立製作所、NECネッツ



エスアイ、早稲田大学、欧州側が、アールト大学、エリクソン、オレンジ、フラウンホーファー研究所 (FOKUS)、EURECOM, MANDATインターナショナル、ユニバーサルデバイスゲートウェイ (UDG) である。

研究の目的は、ITU-T FG IMT-2020で優先度が高いと合意された第5世代モバイルネットワークにおける有線網の課題を3つに分類し、(1) スライスアーキテクチャの実現と有無線統合エンドツーエンドスライス構築機構、(2) データプレーンプログラム可能性と先進的プロトコルの収容及び、(3) スケーラブルスライス運用管理の各々に対応する技術開発項目を定義し、検証のためのテストベッド及び標準化の検討を含め、日欧連携による研究開発を実施し、国際標準化を実現することである。

このプロジェクトにより、第5世代移動通信の早期実現と日欧の連携及び開発技術の標準化が大きく進展することになった。レジリエントなインフラを整備し、包摂的で持続可能な産業化を推進するとともに、イノベーションの拡大を図ること及び都市と人間の居住地を包摂的、安全、レジリエントかつ持続可能にするというSDGsの目標に沿ったプロジェクトである。

本プロジェクトにより、移動通信基盤の「スライシング」の学術分野を確立し、5Gにおけるスライシングの国際標準化に多大な貢献 (3GPP 94件・ITU 13件の寄書提案) を産学で達成し、総務省から研究奨励賞を受賞している。

このように、大学は単なる研究開発ではなく、国際標準を獲得することを目的として、国際産学連携を実施することで、情報通信技術分野における社会貢献が可能である。

また、東京大学は、筆者が中心となり、ITU-T、3GPP、ETSIのセクターメンバーとしての活動だけでなく、近年、企業が主導する以下のアライアンスに積極的に加盟している。

・IOWN グローバルフォーラム (2022年9月加盟)

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想とは、あらゆる情報を基に個と全体との最適化を図り、多様性を受容できる豊かな社会を創るため、光を中心とした革新的技術を活用し、これまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信並びに膨大な計算リソース等を提供可能な、端末を含むネットワーク・情報処理基盤の構想である。

・O-RANアライアンス (2024年1月加盟)

Open RANは、ステークホルダーが構成要素間の接続をオープンインタフェースで明確に定義し、サブライチャー

ンリスクの軽減と機能開発上の合意形成・新エコシステムを促進する活動の総称である。現在、具体的な活動母体として、通信事業者が中心となって進めるO-RAN Allianceと呼ばれる業界団体があり、同団体で策定された仕様が公開されている。

Open RANの重要性は、無線ネットワークにおける構成要素技術が明確にオープンインタフェースで定義されるため、通信事業者の視点ではベンダーロックインを避け、サブライチャーリスクを軽減することが可能であり、通信機器ベンダーの視点では、よりグローバルにマーケットを広げることが可能となる。また国家の視点では、特定地域のブラックボックスの技術への依存性を排除するなど経済安全性に貢献するなどのメリットがある。一方で、パフォーマンスの最適化、相互接続性検証の必要性など、課題もある。

・AI-RANアライアンス (2024年4月加盟)

AI-RANアライアンスは、AIを駆使してモバイルネットワーク (RAN: Radio Access Network) の効率性をグローバル規模で向上させ、ネットワークによる消費電力を削減し、既存のインフラを改善することで、5G及び6Gに向けて、AIを活用した産学連携により新たなビジネスの機会を創出することをミッションとしている。創立メンバーは、Amazon Web Services, Inc. (AWS)、ARM、DeepSig Inc. (DeepSig)、Telefonaktiebolaget LM Ericsson (Ericsson)、Microsoft Corporation (Microsoft)、Nokia、Northeastern University、NVIDIA、Samsung Electronics、ソフトバンク株式会社 (ソフトバンク) T-Mobile USA, Inc. (T-Mobile) 及び東京大学である。

それぞれのフォーラムやアライアンスでは、共通してアカデミアからの参画に期待をしており、その理由としては、多様なステークホルダーからの異なる視点からみた社会受容性の確認や、アカデミアで創成される最先端の技術・概念・ユースケースなどが、産業界にとって大きな価値を生むことが認識されているからと考えられる。これらのフォーラムやアライアンスでのデファクト標準の形成の活動は国際産学連携の場となっているのである。

(3) 人財育成

東京大学では、Diversity and Inclusionという標語の下に、包摂的な人財の活躍を目指した研究教育・社会実装活動を推進している。

筆者の研究室でも、様々な教育の機会を提供する中で、



標準化活動にも触れる機会を作るため、2022年から2023年にかけて、学部4年生の女子学生を、ITUのインターン生として派遣をする取組みを実施した。

彼女は、2022年5月から、ITU Artificial Intelligence/Machine Learning in 5G Challengeのアシスタントとして日本からリモートで働き始め、9月からはジュネーブに移動し、AI for Goodチームの現場スタッフとして活躍している。ITUでのインターンシップの経験は、他の方法では出会う機会がなかったであろう人々とのつながりを築くことができ、標準化という分野に対する知的・専門的な関心を持つ契機となっている。

彼女曰く、「ITUで過ごした時間は、差し迫った将来の決断に必要な経験と視野を得るのに役立っただけでなく、学部生にはめったに提供されないキャリアの機会への扉を開くのにも役立ちました。私の将来のキャリアのすべては、ITUでのインターンシップがきっかけで始まったと言っても

過言ではありません。」と述懐している。

このように、若い学部学生が国際標準化の現場を経験し、さらに、人的ネットワークや今後のキャリアパスへ生かすことが可能になったことは、我が国にとって貴重な成功モデルケースが形成されたと言える。若年層への国際標準化の舞台へのインターン機会創出は、産業界では実現し難いことであり、先進教育による人財育成とその後の産業界への人財供給の観点で、非常に重要なアカデミアの果たすべき役割であると考えられる。

今後、国家の屋台骨を支える重要インフラの一つである情報通信技術において、国際標準化活動におけるアカデミアの果たすべき3つの役割、(1) 新技術の概念の早期合意形成の貢献、(2) 国際産学連携、(3) 人財育成は、今後も産学両方の業界が認識した上で、アカデミアで継続的に推進をしていく必要がある。

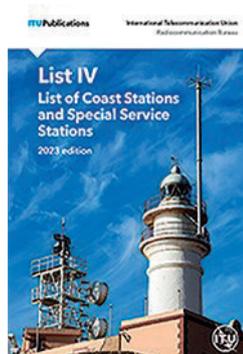
国際航海を行う船舶局に必須の書類 好評発売中！



-New!-
船舶局局名録
2024年版



海上移動業務及び
海上移動衛星業務で使用する便覧
2020年版



海岸局局名録
2023年版

お問い合わせ: hanbaitosho@ituaj.jp



「社会人のためのデータサイエンス入門」受講者募集中 (2024年6月11日(火)開講)

総務省 統計局 統計情報利用推進課

社会人・大学生等を対象とした、統計データ分析の基本的な知識を学べる無料のオンライン講座開講



今、ビジネスの現場では、統計的な思考力によって様々な課題を解決していく能力、すなわち“データサイエンス”力の高い人材が求められています。総務省統計局は、統計リテラシー向上のための取組みとして、「データサイエンス・オンライン講座」を開講しています。その講座の一つである「社会人のためのデータサイエンス入門」を2024年6月11日(火)に開講します。

「社会人のためのデータサイエンス入門」の概要

- 開講期間 2024年6月11日(火)～8月6日(火) 予定
- 学習時間 1回10分程度×6～9回程度(1週間)×4週
- 課題 各週の確認テストと最終課題の実施
- 講師 安宅和人氏(慶應義塾大学環境情報学部教授) ほか
- 講座内容
 - Week 1 : 統計データの活用
統計データを用いた分析事例を知り、統計リテラシーを学ぶ
 - Week 2 : 統計学の基礎
データ分析に必要な統計学の基礎を学ぶ
 - Week 3 : データの見方と表し方
データの見方と適切なグラフの選び方を学ぶ
 - Week 4 : 公的データの使い方
誰もが使える公的統計データの取得方法と使い方を学ぶ

本講座は、統計学の基礎や統計データの見方等、統計データ分析の基本的な知識を学習し、身近なデータの活用役に役立つことができる内容となっています。

(注) 本講座は、2023年6月に実施した講座を再び開講するものです。



データサイエンス・オンライン講座は
3つの特色ある講座から構成されています



2024年6月開講

「社会人のためのデータサイエンス入門」

統計学の基礎等、統計データ分析基本的な知識を習得

2024年9月開講予定

「社会人のためのデータサイエンス演習」

ビジネス上での分析事例を中心に実践的なデータ分析手法を習得

2025年1月開講予定

「誰でも使えるオープンデータ」

統計オープンデータを活用したデータ分析の手法を習得

本講座のほか、より実践的なデータ分析の手法を学ぶ「社会人のためのデータサイエンス演習」、統計オープンデータを活用したデータ分析の手法を学ぶ「誰でも使える統計オープンデータ」も順次開講していきますので、是非、御活用ください。

統計学のプロフェッショナルが分かりやすく解説する講座をあなたも受講してみませんか？

どなたでも受講登録が可能(登録料及び受講料無料)ですので、是非、御活用ください。

受講登録はこちらから

データサイエンス・オンライン講座
「社会人のためのデータサイエンス入門」
<https://gacco.org/stat-japan/>



日本ITU協会 研究会開催一覧 (2024年1月～3月)

ITU-R研究会	テーマ	概要	講師
第407回 2024年2月16日	ITU 2023年 世界無線通信会議 (WRC-23) 結果報告	ITUの2023年世界無線通信会議 (WRC-23) が、2023年11月20日～12月15日にかけてアラブ首長国連邦のドバイで開催されました。WRCは3～4年ごとに開催され、各周波数帯の利用方法 (周波数の国際分配)、衛星周波数の国際調整手続等、無線通信に関する国際的な規則である無線通信規則 (RR) を改正するために行われるITUでも最大規模の会議です。 今般のWRC-23では、ITU加盟国163か国等から約3,900名、日本からは総務省及び民間事業者等約130名が参加し、携帯電話用基地局としての高高度プラットフォーム (HAPS) の利用や衛星と携帯電話端末間の直接通信等、非地上系ネットワーク (NTN) に関する議題において、我が国の提案を反映しつつ周波数確保等に成功するなど、我が国にとって重要な結果が得られました。 本講演ではこうしたWRC-23の結果を報告します。	総務省 総合通信基盤局 電波部 電波政策課 国際周波数政策室 林 祐二郎氏
第408回 2024年3月21日	ITU-RにおけるHAPS 周波数拡張に向けた 取組み —WRC-23 議題1.4 の経緯と結果—	昨年末に開催された2023年の世界無線通信会議 (WRC-23) の議題1.4として、携帯電話用基地局としての高高度プラットフォーム (HAPS) の周波数追加、及び既存周波数の規制見直しが決定されました。 本議題は、2019年の世界無線通信会議 (WRC-19) での議題立上げ、ITU-Rにおける技術・規制案の検討、WRC-23での無線通信規則の改正に向けた議論等、約6年間の活動において日本が主体的な役割を担ってきました。 本講演ではそれらの活動における課題や対処、最終的にWRC-23で得られた結果をその際の気付きとともにご説明します。	ソフトバンク株式会社 渉外本部 電波政策統括室 標準化推進部 福本 史郎氏

ITU-T研究会	テーマ	概要	講師
第565回 2024年1月17日	B5G/6G時代に向けた セキュリティ最新 トピックについて —SG17の取組み状況を ベースに—	5Gネットワークへの移行に伴い、ネットワーク機能の高度化が進むとともに、ネットワーク基盤の構築方法が大きく変化しようとしています。また、AI技術の進展や量子技術の発展により、サービスを構成する基盤技術も大きな変化が生じています。一方で、新サービスに対するセキュリティやプライバシーの不安も生じています。 本講演では、ITU-T SG17における動向を中心に、セキュリティの面から注目されている新技術とそのセキュリティ・プライバシー保護対策の検討状況について幅広くご紹介します。	株式会社KDDI総合研究所 情報システム・セキュリティ部 ITU-T SG17副議長 三宅 優氏
第566回 2024年2月15日	ケーブルテレビの将来 を見据えた標準化の 在り方について —ITU-T SG9の現在 と今後の考察—	COVID-19パンデミックが一段落し、2023年5月にはインドから、11月にはコロンビアからそれぞれ招聘を受け、ITU-T SG9も対面会合が復活しました。 同時に、2024年10月に予定されている世界電気通信標準化総会 (WTS-24) まで残り1年を切り、SG9においても、WTS-16より2会期 (8年) 続く所掌定義や研究内容の見直しの議論が開始されました。 そこで見てきたのが、「ケーブルテレビ」の役割の多様化です。これらを踏まえて、次会期の標準化作業を一層効率的に推進すべく、日本から2024年1月のTSAG会合に向けてSG再編の一案を提案しました。 本講演では、SG9の最新動向及びTSAGの議論の様子も含めて、SG再編提案の背景やあるべき将来像を考察します。	KDDI株式会社 技術統括本部 技術戦略本部 ITU-T SG9議長 宮地 悟史氏



情報通信研究会	テーマ	概要	講師
第127回 2024年1月22日	CES報告と米国ICT 業界2024年の展望	<p>生成AIで大きく湧いた2023年を受け、ハイテク業界ではAI活用が広がっている。CESでは、多くのデバイスを対象にエンベデッド系AIが注目を集めている。一方、AIサービスを支えるクラウド業界やテレコム業界は厳しい設備投資を続けているにも関わらず、新サービスによる収益の拡大に苦戦している。その背景には、ICT業界がクラウドネイティブ化を経て、アプリケーションへと進むサービス開発パイプラインの大きな転換が潜んでいる。</p> <p>今回は、CESの報告とともに、2023年通年の米通信業界を振り返りながら2024年を展望してみたい。</p>	アリアル・イノベーション ICTジャーナリスト 小池 良次氏
第128回 2024年1月25日	デジタル技術による スポーツ体験・ スポーツ産業の変革	<p>スポーツの歴史は、技術革新と大きく関わっていることはご存じでしょうか? 古代オリンピック種目にあるような陸上競技や格闘技に始まり、近代の球技、最近のeスポーツに至るまで、スポーツ競技は、技術と共に発明・進化を遂げてきました。いま、IoTやAI技術を含めたDX（デジタル・トランスフォーメーション）の波を受けて、スポーツの世界にも大きな変化が起きています。</p> <p>また、DXは、単に、「みる」「する」「支える」のスポーツ体験を変えるだけでなく、お金を生み出す仕組みや産業構造にもインパクトを与えます。</p> <p>本講演では、デジタル技術がもたらすスポーツ体験やスポーツ産業の変革について、国内外のスポーツテック（Sports-Tech）の事例を交えて、分かりやすくお伝えします。</p>	株式会社NTTデータ経営 研究所 ビジネス変革ユニット 河本 敏夫氏

ITUAJより

編集後記

5月17日、国際電気通信連合（ITU）が定めたWorld Telecommunication and Information Society Day（世界情報社会・電気通信日）に合わせて、日本ITU協会では、本年も京王プラザホテル（新宿）にて「世界情報社会・電気通信日のつどい」を開催しました。

本号トピックスで詳細をお伝えしております。どうぞご覧ください。

本年は関係者向けのオンライン同時配信は行いませんでしたが、ITUが行ったジュネーブからのイベント放送「Digital Innovation for Sustainable Development」の中で、当協会の式典と祝賀会の模様が紹介されました。

ITUのウェブページから録画をご覧ください。（日本の紹介は、28：10～29：17）

WTISD-24 - Live broadcast from the ITU TV studio in Geneva

<https://www.youtube.com/watch?v=Fzehj-XcYlo>

ITUジャーナル読者アンケート

アンケートはこちら https://www.ituaj.jp/?page_id=793

編集委員

- 委員長 亀山 渉 早稲田大学
- 委員 深堀 道子 総務省 国際戦略局
- 寺山由希子 総務省 国際戦略局
 - 谷内 正登 総務省 国際戦略局
 - 林 祐二郎 総務省 総合通信基盤局
 - 橋本 昌史 国立研究開発法人情報通信研究機構
 - 山本 浩司 日本電信電話株式会社
 - 中山 智美 KDDI株式会社
 - 大山 真澄 ソフトバンク株式会社
 - 陶山 桃子 日本放送協会
 - 新井 勇太 一般社団法人日本民間放送連盟
 - 菰田 正樹 通信電線線材協会
 - 長谷川一知 富士通株式会社
 - 森 正仁 ソニーグループ株式会社
 - 神保 光子 日本電気株式会社
 - 中平 佳裕 沖電気工業株式会社
 - 吉野 絵美 一般社団法人情報通信技術委員会
 - 三木 啓嗣 一般社団法人電波産業会
 - 山崎 信 一般社団法人日本ネットワークインフォメーションセンター
- 顧問 齊藤 忠夫 一般社団法人ICT-ISAC
- 新 博行 株式会社NTTドコモ
 - 田中 良明 早稲田大学

編集委員より

プロの馬

KDDI株式会社

なかやま さとみ
中山 智美



日頃の運動不足解消を目的に数十年ぶりに乗馬を始めました。熱心に練習していた10代の頃と違い、本当に思いどおりにいきません。年を取って体が動かないというよりも、思ったように馬と意思疎通が図れないのです。

どうすれば上手くできるかな?と考えていたところ、当時の乗馬の先生がよくおっしゃっていた言葉が突然蘇ってきました。「馬がプロだから。」

優しい性格で人間と上手くやっていく子、人間の指示には従いたくないけれど仕事と割り切ってくれる子、適切に指示をしないと動かない子、等々いろいろな性格の馬がいます。昔、私が乗っていた馬は乗り手が的確な場所で合図を出せなくても「ここで飛び越して欲しいのね」とこちらの気持ちを汲んで障害を飛んでくれていたのに、私が馬を操っているつもりになっていたことを今頃になって気が付いたのでした。

人間同士の関わり合いにおいても、相手の心の深さに助けられてもその時には気が付かず、後になって、そういうことだったのかと気付くことが多くなってきたように思います。

センサーを用いて体温、血圧、心拍数のような数値を計測したり、人の表情、体の動き等を分析することで高い精度で人間の感情を測り、必要な対処ができる機械もあると思いますが、気配、雰囲気、相手との関係性といった測定が簡単でないものを総合的に短時間で感じ取る能力は、今のところ人間や一部の動物の方が勝っているのでしょうか。

COVID-19以降、交流や会合においてオンラインとリアルを使い分け、便利にはなりましたが、オンラインではリアルと比較して非言語で得られる情報量が少ないため、コミュニケーションがストレスにもなり得ること。それぞれの目的に沿って可能な限り誤解やすれ違いなく、相手にも自分にも心地よい対話をするためにはどうしたら良いかと、言語/非言語に関わらず数値化やマニュアル化できない心の在り方について考えている今日この頃です。

ITUジャーナル

Vol.54 No.6 2024年6月1日発行/毎月1回1日発行

発行人 山川 鉄郎

一般財団法人日本ITU協会

〒160-0022 東京都新宿区新宿1-17-11

BN御苑ビル5階

TEL.03-5357-7610(代) FAX.03-3356-8170

編集人 岸本淳一、石田直子、平山早美

編集協力 株式会社クリエイト・クルーズ

©著作権所有 一般財団法人日本ITU協会



The ITU Association of JAPAN

一般財団法人 日本ITU協会