大容量光ネットワークの進化を支える空間多重光通信技術

本稿では，ブロードバンドネットワークの今後の発展を支える超大容量空間多重光通信技術を紹介します．本技術では，光ファイバ通信システムを構成する光伝送・ノード装置，光ファイバなどにおいて新たに空間の自由度を考えた構成・設計を行います．シングルモードファイバ（SMF）の物理限界を克服し，光ファイバ1心で現在の100倍以上の1 Pbit/sを超える大容量伝送と10 Pbit/s以上のノードスループットを持つ将来の光ネットワークの実現をめざします．

みやもと　ゆたか†1　かわむら　りゅうたろう†2
宮本　裕　/川村　龍太郎

NTT未来ねっと研究所†1
NTT未来ねっと研究所　所長†2

大容量光ネットワークの発展と技術課題

近年では，インターネットを通じた動画，電子決裁などが広く普及し，通信ネットワークは，私たちの生活に欠くことのできない基盤になっています．モバイル通信においても2020年に向けた新しいサービスである5Gの技術検討がスタートして，10 Gbit/sを超える広帯域，低遅延サービスの実現のため精力的な検討がなされています．また，IoT（Internet of Things）技術の進展により，より多様性のある端末がネットワークに接続され，通信ネットワークは私たちの身近な社会基盤として空気のようになくてはならないインフラとして，より重要性が高くなると考えられます．

これまでネットワークの大容量化・高度化を支えてきた光通信・ネットワーク技術の変遷を**図1**に示します．これまで，もっぱら1本の光ファイバに光の通り道（コア）が1つで，かつ導波モードが1つになるよう設計されたシングルモードファイバ（SMF）が，基本の伝送媒体として用いられてきました．NTT研究所では，その広帯域性を最大限に活かす経済的な最先端光伝送方式をタイムリーに研究開発・実用化することにより，30年で約5桁近い（2年で2倍）大容量化に貢献してきました．近年実用化されたデジタルコヒーレント技術[(1)]は，受信感度と周波数利用効率を向上するとともに，従来は困難であった長距離伝送時の光ファイバの歪特性補償性能を大幅に向上できます．現在，光ファイバの異なる偏波軸に別々の光信号を4値位相変調信号で変調して偏波多重・伝送することで，1波長当り100 Gbit/s級の大容量伝送が実現されています．既存の光ファイバ1本に従来と同じ周波数間隔50 GHz間隔で，80チャネル程度の光信号を波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）伝送することで，伝送容量8 Tbit/sの大容量光ネットワークが実用化されています．NTT研究所では，光変調信号の多値数をさらに64値以上に高度化することで1本のSMFで100 Tbit/s以上の大容量伝送を実証しています[(1)]．

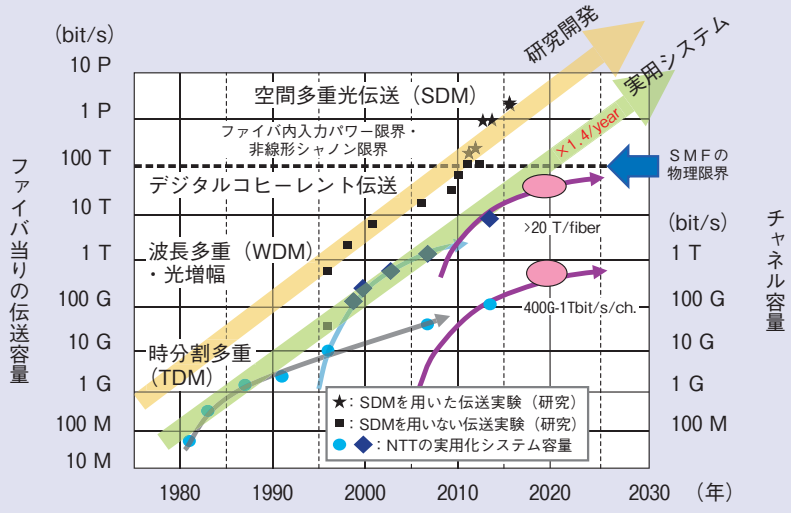

図1　大容量光通信システムの発展と基盤技術の変遷

＊1　QAM：信号電界の振幅と位相を複数の信号レベルで変調することで多値符号を伝送する高効率デジタル変調方式．

また，偏波多重16値QAM（Quadrature Amplitude Modulation）*1変調技術を基本としたさまざまなデジタル信号処理技術と2サブキャリア多重を適用することで1チャネル400 Gbit/s，ファイバ当り20 Tbit/s級の大容量光ネットワークが実用段階にあります[(2)]．さらに，現在の大容量光ネットワークでは，途中の光中継ノードに光スイッチを駆使したROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multplexier）ノードを挿入することにより，大容量光信号を電気信号に変換することなく実現し，光ネットワークの拡張性を格段に向上することが可能となっています[(2)]（**図2**）．最近では多方路ROADMの実用化により，100 Gbit/sチャネルを任意の波長，任意の方路に自由に設定できる大規模光中継ノードが実用化されています．

しかしながらこれまでのSMFを用いた光通信システムでは，従来と同じ中継間隔を保ちつつ100 Tbit/s以上の大容量化を実現することが困難になってきています．伝送容量の物理的な制限要因としては，光ファイバ通信に固有の光非線形効果*2により周波数利用効率の向上の制限が生じることや，保守者や通信システムに対する安全を確保するための許容光入力パワーの制限があります[(3),(4)]．また，光中継ノードでは，光信号の大容量化に伴い，方路設定を行うためのノードスループットを飛躍的に向上するための新たなノードアーキテクチャや高集積光スイッチ技術，高密度配線・コネクタ技術が求められていました．NTT研究所では，中継伝送システムおよび光中継ノードシステムの大容量化・大規模化を経済的に可能とするために，これらの制限要因を回避し，さらなる大容量光通信を実現する空間多重（SDM: Space Division Multiplexing）光通信技術の研究開発を進めてきました[(4),(5)]．本稿では，Pbit/s級の中継伝送容量と10 Pbit/s級の光中継ノードスループットを実現するSDM光通信技術の概要，およびその要素技術の研究開発状況と今後の展望について紹介します．

SDM光通信技術の概要と利点

SDM光通信システムの構成例の概要を**図3**に示します．SDM光通信システムは，主にSDM伝送媒体，光増幅機能およびROADM機能を有するSDM中継ノード並びにSDM集積光送受信回路などから構成されます．SDM光通信システムの光伝送媒体としては，従来の光ファイバを一方路当り複数本用いる場合（図3(a)），1心の光ファイバに複数のコア（光信号の通り道）を有するマルチコアファイバ（MCF）を用いる場合（図3(b)），1心の光ファイバに複数のモードを有し個々のモードに異なる信号を伝送するマルチモードファイバ（MMF）を用いる場合（図3(c)）などが考えられます．SDM中継ノードでは，空間多重された複数の大容量WDM信号（SDM/WDM信号）を一括して1つの光増幅中継することにより経済的な長距離伝送を実現します．また，中継されてきた大容量SDM/WDM信号の中から所定のチャネルが選択され，SDM光スイッチなどにより光電気変換せずに，任意の方路（8方路程度）の任意の波長に送出されます．SDM中継ノードの入出力に配置するSDM接続デバイスは上述したいずれかの伝送媒体に対応し，適切なインタフェー

*2　非線形効果：光強度に依存して，光信号の位相や周波数などが変調され信号歪を引き起こす現象．

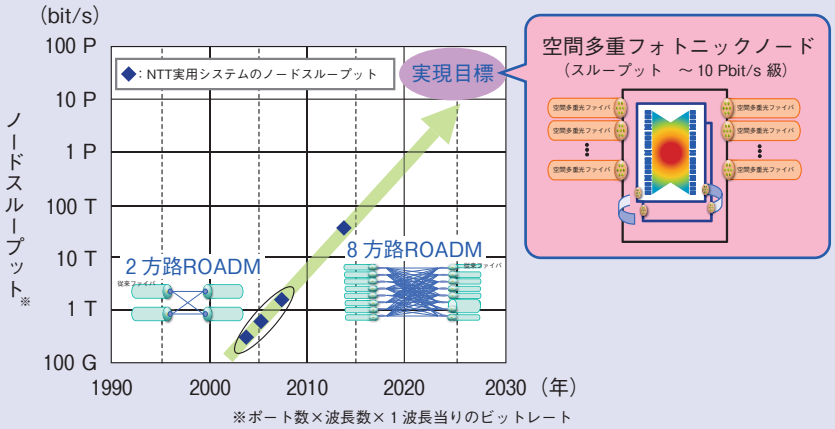

図2　空間体重フォトニックノード技術によるノードスループットの向上

スが選択されます．光中継ノードは，図3 ⒶのSMF複数本をSDM伝送媒体として用いる場合も考慮することで，既存のインフラの有効利用が可能となり，トラフィック需要に柔軟に対応できます．

これまでの光通信システムとSDM光通信システムの多重構造の比較を**図4**に示します．これまでのSMFを用いた商用システムでは，時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）と多値符号化により，チャネル当りの伝送速度（チャネル容量B）として100 Gbit/s（シンボルレート32 Gbaud）までの高速化を図ってきました．さらに，チャネル数（光送受信回路の多重数）N=100程度のWDM光信号が光増幅中継器により一括光増幅中

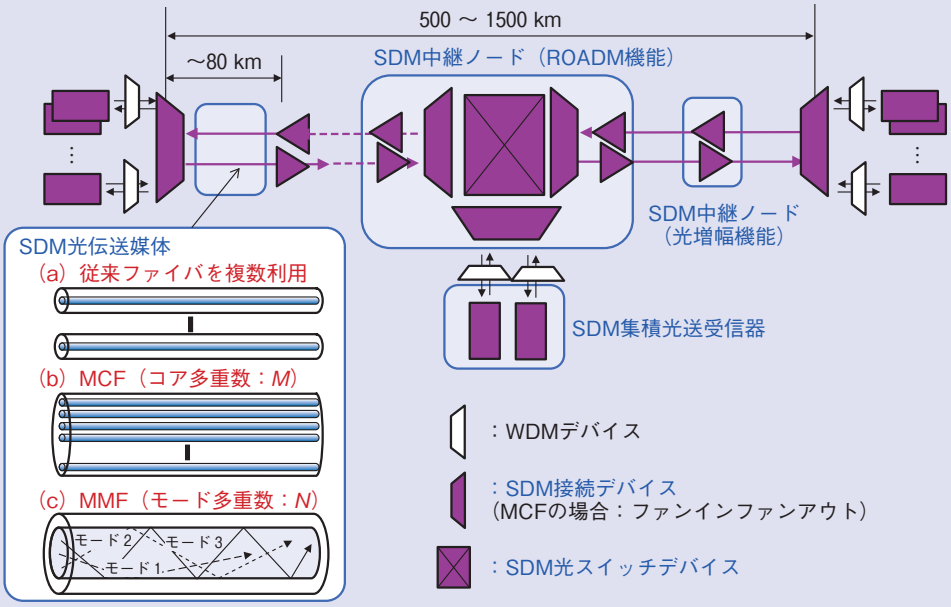

図3　SDM光通信技術を用いた大容量光ネットワークの構成例

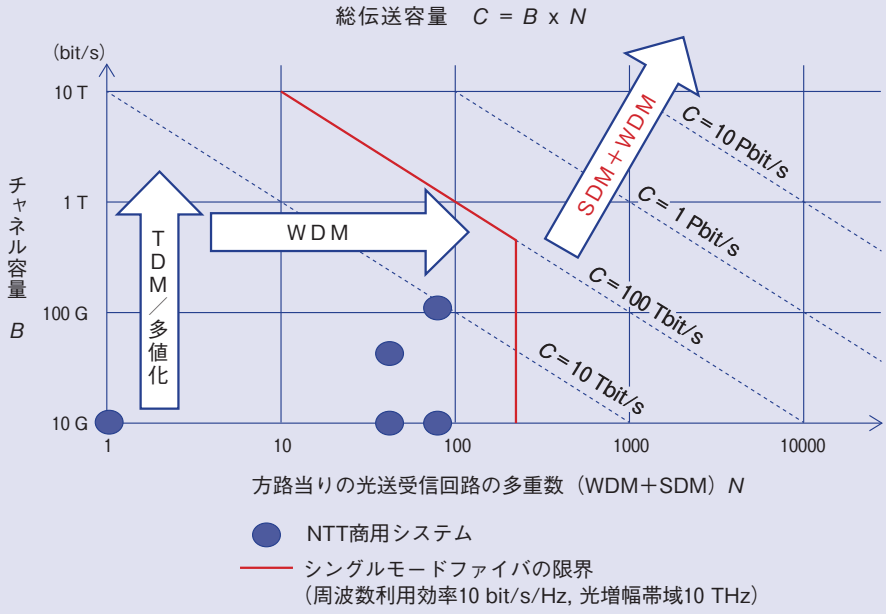

図4　SDM光通信技術による従来の100倍以上の多重数を有する大容量光ネットワークの経済的な実現

継され，総伝送容量（$C=B\times N$） 10 Tbit/s級の経済的な大容量長距離伝送システムを実現しています．従来のWDMシステムのチャネル数は，光増幅器の増幅中継できる帯域幅で決まり，実用レベルでは通常1帯域当り約4～5 THz，2つの帯域（Cバンド，Lバンド）を並列に用いることで最大約10 THz程度の信号帯域が利用可能です．これまで，その時々の光・電子デバイス集積技術を駆使することで，1方路1帯域当り100チャネル分の光送受信回路を限られた装置スペースと消費電力で実装することにより大容量システムの実用化が進展してきました．

チャネル容量は，同じ信号帯域内で多値符号化により周波数利用効率を向上することで増加できます．しかしながら，光ファイバ伝送固有の非線形効果により多値度と伝送距離にはトレードオフの関係があります．実用段階にある偏波多重16値QAM信号では，周波数利用効率を4 bit/s/Hz以上に向上できますが，さらなる多値符号化による10 bit/s/Hz級の高密度WDM伝送では現状，厳しい伝送距離制限を受けます[1]．このため，変調符号の多値数を上げずにTDM高速化やサブキャリア多重化によりチャネル容量を1Tbit/s以上に増やすと，チャネル当りの信号帯域も比例して増え，図4に示したように1点の光増幅帯域内のWDMチャネル数が減少します．図1に示したようにチャネル容量の高速化は，トラフィックの伸びに比較して緩やか（20年で10倍程度）であるため，今後もこれまでと同様のチャネル数を確保しチャネル容量を高速化しつつ，方路当りの伝送容量を大容量化するためには，WDMとSDMを併用した光多重技術の高度化を図っていく必要があります．このことから，総伝送容量CがPbit/s級以上の将来の超大容量伝送システムでは，実装される光送受信回路の最大個数が従来のSMFシステムの10～100倍になることが想定されます．このため，経済的な大容量光ネットワークの実現には，SDM技術を適用することで光送受信回路の小型・集積化ならびに光中継ノードの大規模化・高集積化を進め，光電気変換を介さずに光信号のままトランスペアレントに長距離中継伝送を実現することが重要となります．

SDM光通信基盤技術の要素技術

本特集では，SDM光通信基盤技術の3つの要素技術の観点から，現状の研究開発の状況と今後の展望を解説します（**図5**）．

① 光送受信伝送装置の高性能化・高集積化・低電力化技術
② 光ノード装置の大規模・集積化技術（光増幅中継器・光スイッチ）
③ 光伝送媒体の多重・集積化技術（SDM光ファイバ・光コネクタ融着接続）

まず，①光送受信伝送装置の高性能化・高集積化・低電力化については，これまでのSMFベースの光通信システムと共通の普遍的な技術課題です．本特集では，空間多重光通信システムならではのコア間クロストーク特性やデジタル信号処理の課題と，将来のPbit/s級伝送の実現性について解説します．SDM/WDMを併用した大容量光ネットワークでは，光送受信回路の多重数が1～2桁程度増えると考えられています．このため経済的な大容量光ネットワークの実現には，長距離伝送性能を向上させ，なるべく②の光中継ノードでSDM/WDMされた光信号のまま方路切替・長距離伝送を行うことで，光電気変換を減らし光送受信回路の数と消費電力を下げることが可能となります．このため，光送受信伝送装置の高性能化・高集積化・低電力化が重要な課題となります．

②光ノード装置の大規模・集積化（光増幅中継器・光スイッチ）については，光中継ノードのスループットを現在より100倍以上拡大し10 Pbit/s級に拡大するための，さまざまな光中継ノード構成方法を検討し，SDM光増幅器やSDM集積光スイッチなどの新デバイス技術の研究開発の取り組みを解説します．

最後に，③光伝送媒体の多重・集積化（SDM光ファイバ・光コネクタ融

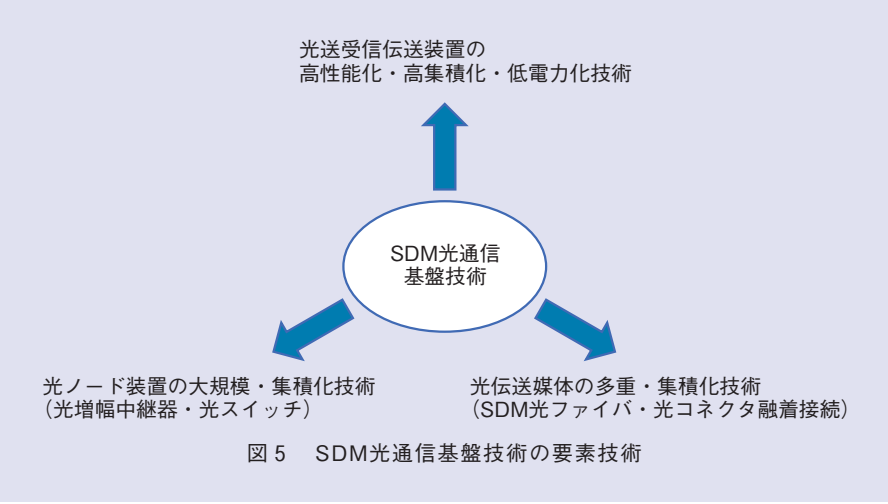

図5　SDM光通信基盤技術の要素技術

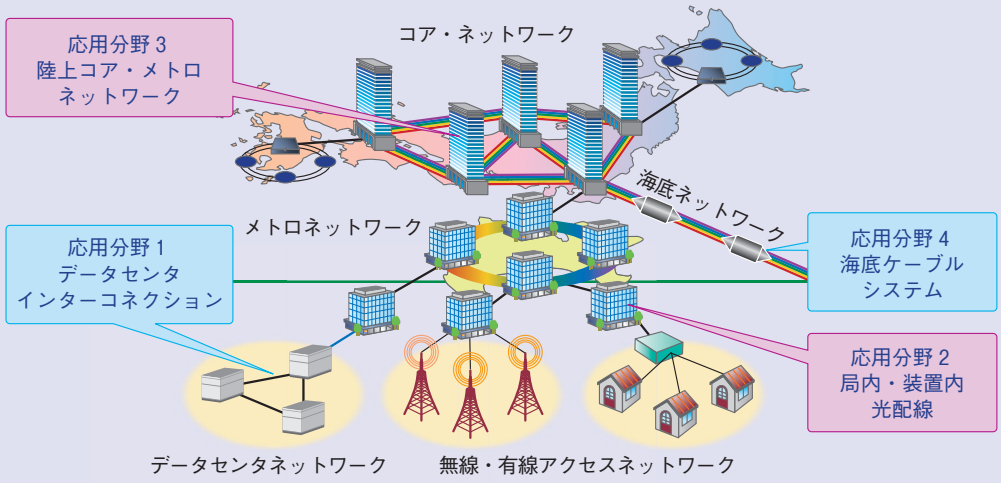

図 6　SDM光通信技術の応用分野

着接続）については，30～100以上の高密度空間多重（DSDM: Dense SDM）を実現するための光ファイバ伝送媒体の課題と実現性を解説します．マルチコアファイバ，マルチモードファイバ，さらにはそれらを組み合わせたマルチコア・マルチモードファイバの現状や，新規SDMファイバと既存のSMFとの変換を行うための接続デバイス，新規SDMファイバどうしの融着技術やコネクタ技術について解説します．NTT研究所では，これらの要素技術の研究開発を加速するために，一部の技術は総務省や情報通信研究機構などからの委託研究を受託し，一部の技術はオープンイノベーションによる研究開発を行っています[(4), (5)]．

今後の展開

今後のSDM光通信技術によるシステム性能向上が期待される適用領域を**図 6** に示します．データセンタインターコネクション，局内・伝送装置内配線等は，比較的短距離かつ小型高密度実装が強く求められ，SDM光通信技術を適用がもっとも期待されている適用領域の１つです．また，陸上のコア・メトロネットワークでは，従来の光ファイバケーブルの資源を有効利用しながら，光中継ノードを大規模化しスループットを向上するSDM光通信技術が中期的に必要となります．さらに，将来的な大容量SDM光ファイバケーブルは，標準化・実用化を進めることでPbit/s容量を超える経済的なコア・メトロ大容量光ネットワークの実現を支えることが期待されています．同時に，ますます大容量化する国際通信を支える海底ケーブルシステムでは，SDM光通信技術は従来のSMF伝送の限界を超えた大容量化を実現するとともに，海底ケーブルシステム固有の給電電力制限を緩和する技術としても期待されています．

■参考文献

(1) 宮本・佐野・吉田・坂野：“超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.23，No.3，pp.13-18，2011.
(2) 木坂・富沢・宮本：“Beyond 100G光トランスポート用デジタル信号処理回路（DSP），” NTT技術ジャーナル，Vol.28，No.7，pp.10-14，2016.
(3) 盛岡：“光通信技術―極限への挑戦―，” 信学誌，Vol.94，No.5，pp.412-416，2011.
(4) 宮本・竹ノ内：“毎秒ペタビット級伝送の実現を目指した高密度空間多重光通信技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.26，No.8，pp.52-56，2014.
(5) 宮本・佐藤・福徳・釣谷・橋本・ガボリ・中島・杉崎・長瀬：“空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発，” 信学技報，Vol.116，No.307，PN2016-40，pp.87-92，2016.

（左から）宮本　裕／川村　龍太郎

従来の光ファイバの伝送容量限界を超える大容量光ネットワークの経済的な実現に向け，空間多重光通信技術の適用が期待されています．NTT研究所では本技術を発展させ，今後の光ネットワークのさらなる発展を支えていきたいと考えています．

◆問い合わせ先
NTT未来ねっと研究所
フォトニックトランスポートネットワーク研究部
TEL　046-859-3011
FAX　046-859-5541
E-mail　pt-hosa-mirai@lab.ntt.co.jp