

長距離光ネットワークの技術進化

A Technological Evolution of Long Distance Fiber Network

竹内 明, 長峰 啓, 柳生 拓也

要約 2015年現在, インターネットの普及, 特に映像や音楽配信サービスの拡大によってネットワーク上のトラフィックは急速に増加しており, 通信事業者は従来の10Gbpsを主体としたDWDMシステムから100Gbpsを主体としたDWDMシステムへの移行を余儀なくされている。

ユニアデックスでも, 過去からの10Gbps DWDMシステムの構築のみならず, 東名阪の基幹100Gbps DWDMシステムを成功裡に構築した。

本稿では, そのDWDMの基本原理から, 将来の200Gbps/400Gbpsを実現する技術について述べる。

Abstract Today (2015), the data traffic on network has been increasing rapidly due to the Internet service expansion, especially in video & audio service area. Thus, the Telecommunication carriers have been required to increase their network capacity by 100Gbps DWDM technology, instead of 10Gbps DWDM system.

We, UNIADDEX have provided 10Gbps DWDM system deployment services to the Telecom carriers so far, and succeeded 100Gbps DWDM system deployment between Tokyo and Osaka.

This report explains the principle of DWDM technology and its future technologies such as 200Gbps/400Gbps DWDM systems which reported recently.

1. はじめに

2015年現在, 通信事業者が構築・運用している光伝送ネットワークでは, インターネットの普及, 特に映像や音楽配信サービスの拡大によってネットワーク上のトラフィックが急速に増加している。

光伝送ネットワークではWDM (Wavelength Division Multiplexing) と呼ばれる光波長を多重する機器を使い複数の伝送信号を異なる光波長 (周波数帯) にのせて大容量通信を実現しているが, 特に多く (数十~数百) の光波長を多重できる機器をDWDM (DenseWDM) といい, 通信事業者では局舎に配備されたDWDM装置を使用して多様なサービスを中継している。

光伝送ネットワークでは伝送経路である光ファイバー上での光の減衰, 波形劣化, 雑音付加が発生するため実用に耐える伝送品質を維持することが難しく, 中継アンプによる光増幅やWDM装置内にて波長分散を補償する等の対処が必要となる。また, 10Gbpsまでの光伝送方式である光波長多重は, データ値を光の明滅 (オンオフキーイング) で直接検波して伝達する強度変調方式のため, 10Gbps以上のデータ伝送に用いた場合, ITU-Tで規定されている波長間隔 (周波数グリッド) に収まらず, 品質が維持できない。そのため, 40Gbps, 100Gbps, 将来の200Gbps, 400Gbpsでは新たな技術的要素である偏波多重変調方式が採用されている。

100Gbps で使用されている変調方式は DP-QPSK (Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying) 方式と呼ばれ、光スペクトルの利用効率や光波長分散耐性面が向上されており、本稿執筆時点 (2015)、通信事業者での商用展開が進んでいる。更に光伝送機器ベンダー各社は既に次のステップである 400Gbps の光波長多重の開発を進めており、実用検証フェーズに入っている。

本稿では、2章で DWDM システムの構成や変調方式 (DP-QPSK 方式)、3章では DWDM の設計・構築に関わる技術的要素である光ファイバーの減衰 (リンクバジェット)、光信号対雑音比 (OSNR)、光接続損失と反射、波長分散 (CD)、偏波モード分散 (PMD) と偏波 (SOP) 変動について、4章では DWDM 技術の今後の進展について解説する

2. DWDM 光ファイバー ネットワークについて

本章では、一般的な DWDM 光ファイバーネットワークについての原理、使用機器構成、変調方式、実際に構築した機器構成例などを簡単に解説する。

2.1 光ファイバー通信とは

光ファイバー通信とは電気信号を光信号に変えて光ファイバー内を伝送する通信のことである。基本構成は、電気信号⇄光信号を変換する変換器 (E/O 変換器 or O/E 変換器) と光信号を伝送する媒体の光ファイバーである (図 1)。

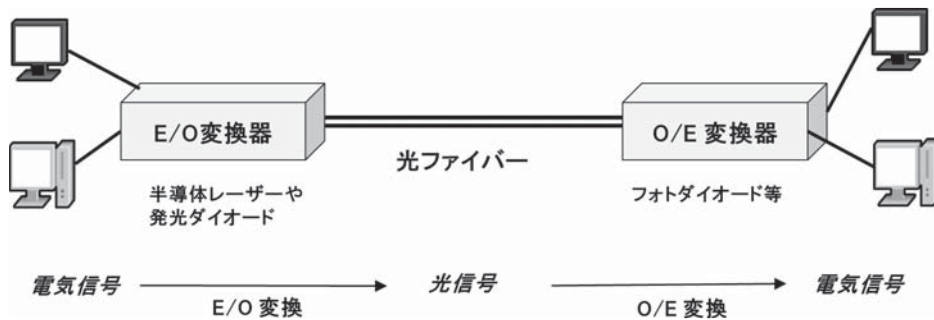


図 1 光ファイバー通信

「光ファイバーの父」と呼ばれ 2009 年にノーベル物理学賞を受賞したチャールズ・クエン・カオ博士によって、1966 年、光ファイバーが極めて低損失で広帯域な情報伝送の可能性があると示す研究が発表され、1970 年に米国コーニング社で低損失光ファイバーが開発され、その後の低損失大容量光ファイバー通信の実用化が大きく推進された。伝送容量を見てみると、1980 年代初頭は 100Mbps 程度であったが、その後順次拡張され、10Gbps、40Gbps を経て 2010 年代前半には 100Gbps 通信が実用化されている。これらの伝送容量は時分割多重方式、波長分割多重方式、多値変調方式などの技術進化により飛躍的に向上してきた。

2.2 DWDM とは

光ファイバーを透過する光の損失量は波長により異なる。そのため、光ファイバー通信では損失が少ない 850nm、1310nm、1550nm といった波長帯の光を使用する。特に、損失が少ない

い 1550nm 帯域の光信号が長距離通信では用いられているが、この帯域をさらに複数の細かい帯域に分割し、複数波長の光を1本の光ファイバーで同時に伝送する技術が波長分割多重(WDM)である。WDMは多重される密度によって2種類に分類される。粗密度波長分割多重方式(CWDM)と高密度波長分割多重方式(DWDM)である。CWDMは波長密度が低く16波長程度を多重することが可能であり、送受信装置が安価に製造できるためシステム構築のコストが抑えられるのが特徴である。一方、DWDMは波長多重数が80~96程度と、CWDMに比べて緊密なシステムである。大規模かつ大容量が要求されるバックボーン回線ではより多くの波長を多重できるDWDMが採用されている。

2.3 DWDMの構成

DWDMの基本的な構成機器は以下の通りである(図2)。

- ・トランスポンダー
 - クライアント信号を波長多重するための特定波長の光信号に変換するモジュール
- ・光フィルター
 - 波長が異なる複数の光信号を多重/分割するモジュール
 - Mux/Demux モジュールと呼ばれることもある
- ・アンプ
 - 光信号を増幅させるモジュール

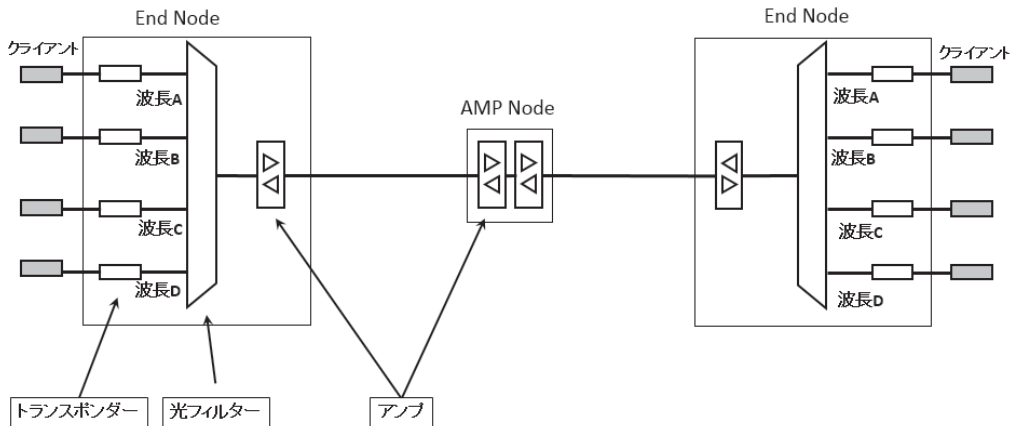


図2 DWDM構成要素

End Nodeは、複数のクライアント信号を収容し、波長分割多重を行うNodeであり、トランスポンダー、フィルター、アンプで構成される。また、Node間にはその距離に応じて、減衰した光信号を増幅し通信距離を延長するためのAMP Nodeが配置される。

上記の基本的なDWDM構成では、二つのEnd Nodeですべての波長がAdd/Dropされるが、複数のNodeによるネットワークを構築する場合に、Nodeにおいて任意の波長をAdd/DropせずThroughさせたい場合がある。そのような場合には、設定で特定の波長をAdd/DropまたはThroughさせることができる光スイッチを構成に組み込む必要がある。このように光スイッチにより任意の波長をAdd/Drop/ThroughできるNodeをOADM Nodeと呼ぶ(図3)。

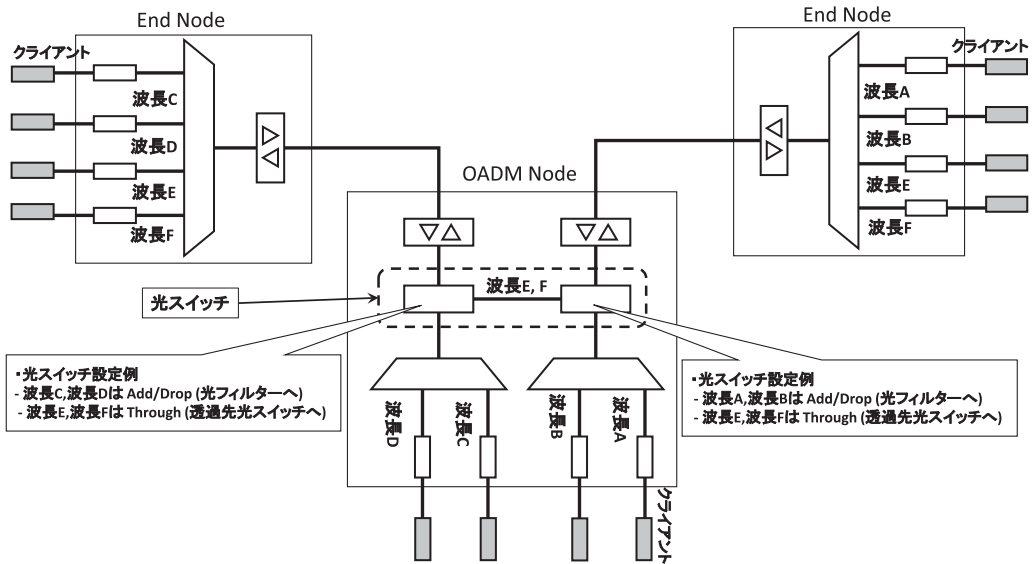
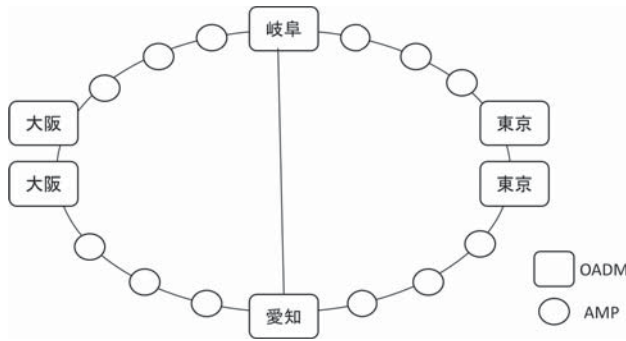


図4は、ユニアデックス株式会社にて実際に構築した DWDM ネットワークの構成である。この例では、東京 x2、大阪 x2、愛知、岐阜の計6箇所に OADM Node を配置し、その間を12箇所の AMP Node で増幅する構成を採っている。



2.4 DWDM で使用する変調方式

DWDM で使用する変調方式は、通信速度によって異なるものが用いられている。以下、10Gbps 通信と 100Gbps 通信を具体例に、それぞれで用いられる変調方式を説明する。

10Gbps 通信では1秒間に100億回もの光の On/Off (点滅) でデータを送っている。この変調方式を OOK (ON-Off-Keying) という (図5)。しかし、この方式を 100Gbps 通信にそのまま適用することはできない。これ以上に明滅速度を上げると明滅の明瞭さが低下し On/Off の識別が困難になってくるからである^[1]。

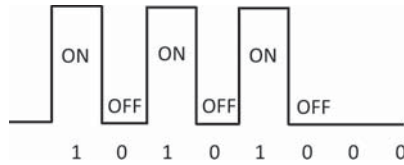


図5 OOK

そこで、100Gbps 通信では、従来のような光の明滅を光信号の送受信に用いるのではなく、光の波としての性質を利用し位相差を活用して光信号の送受信に用いることにより高速かつ長距離通信を可能としている。この変調方式は、DP-QPSK (Dual Polarization Differential Quadrature Phase Shift Keying の略：偏波直交多重多値デジタル信号変調方式) と呼ばれていて、QPSK による変調と偏波多重を組み合わせた技術である。QPSK では送信したいデータが“00”のときに位相 0 度，“01”のときに 90 度，“10”のときに 180 度，“11”のときに 270 度の光信号を出力する (図 6 左)。多値変調方式では情報を載せられる最小単位時間をシンボルと呼び、QPSK は四つの異なる位相を用いることで 2bit/シンボルの通信を行う変調方式となる。変調方式として QPSK を用いることで、OOK (1bit/シンボル) の 2 倍の通信を行うことが可能となる^[2]。また偏波多重とは、直行する偏波が互いに干渉しない性質を利用し、光の波の水平偏波と垂直偏波のそれぞれで異なる信号を送出し多重する技術である (図 6 右)。偏波多重を用いることでさらに 2 倍の通信を行うことが可能となる。

OOK であれば 25Gbps に相当する通信速度まで対応可能であったが、これら二つの技術を組み合わせることにより DP-QPSK では 4 倍、すなわち 100Gbps の通信を実現している。

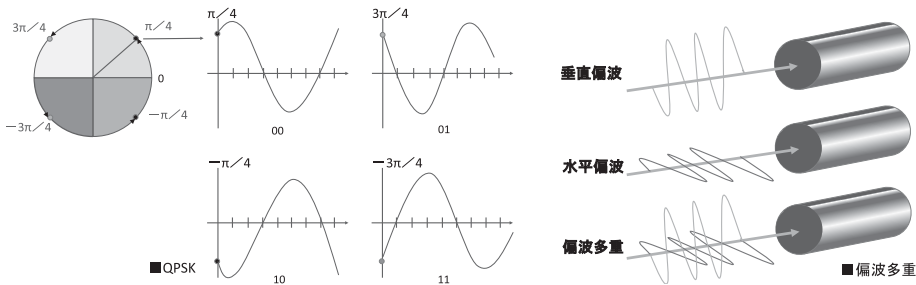


図6 DP-QPSK

3. DWDM ネットワーク構築にあたって考慮する点

長距離光ファイバーネットワークを設計構築する際に考慮しておくべきポイントは、リンクバジェット、OSNR、接続損失と反射、コネクタ端面汚れ、分散 (波長分散、偏波分散) がある。更に、100Gbps 通信で偏波多重変調方式を使用する場合、SOP 変動も考慮する必要がある。本章では各項目について解説する。

3.1 リンクバジェット

送信側の光信号の強さと受信側の受信感度の差をリンクバジェットという。送信側と受信側の距離が開くに従い光ファイバーを通る光信号は減衰していき、受信感度を下回ると信号として認識できない。長距離伝送を行うためには、このリンクバジェットを一定のマージン以上確

保する必要がある。更に、光ファイバーによる減衰を補うために、途中で AMP (光増幅器) を配置する設計が必要となる (図 7)。

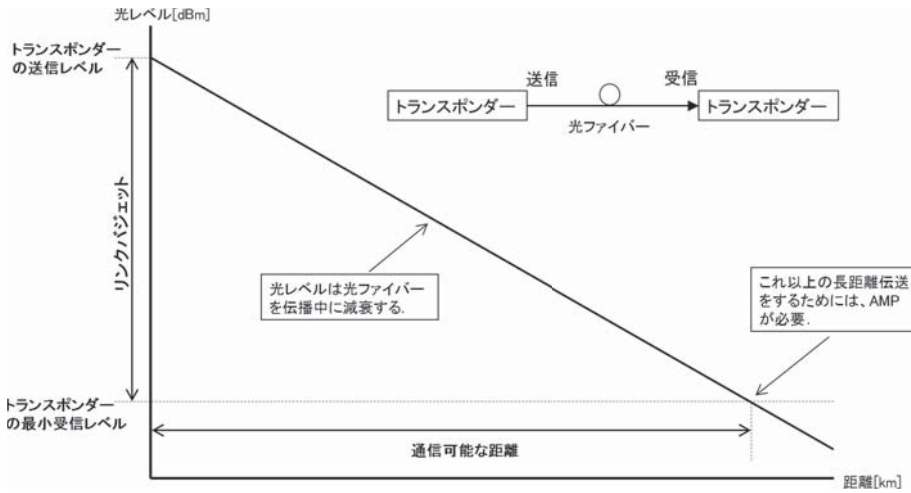


図 7 リンクバジェット

3.2 OSNR

OSNR とは、光信号対雑音比 (Optical Signal to Noise Ratio の略) の意味である。信号強度と雑音強度の比を表している。長距離伝送するために AMP を通すと信号だけでなく雑音も増幅される。更に、AMP 通過毎に AMP 固有の雑音を追加されるため OSNR が悪化する。その結果、増幅を繰り返すと信号を識別できなくなる (図 8)。100Gbps DP-QPSK を用いたシステムにおいて、OSNR の仕様上の限界値は、12 ~ 14.5dB であり、メーカーによって異なる。

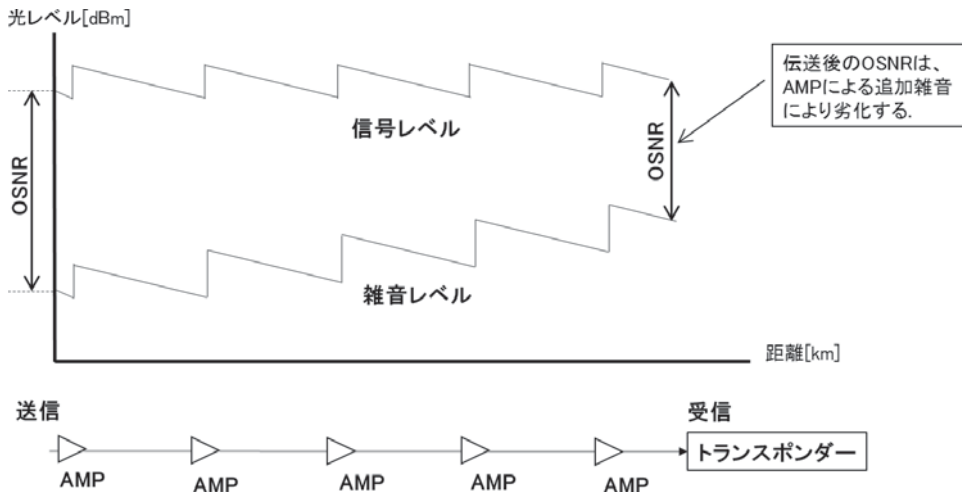


図 8 OSNR

3.3 光接続損失と反射

光ファイバーの接続ポイントでは光接続損失が発生する。光接続損失とは、メタル線で言え

ば接触により生ずる電気抵抗値に相当し、この損失が小さく安定している程、光を遠くまで伝送できる。長距離伝送用のSM（シングルモード）ファイバーは、光の通り道であるコアに相当するMFD（モードフィールド径）の大きさが $10\mu\text{m}$ と小さく、光プラグと光アダプタの光軸ズレや角度ズレによって光接続損失を生じる。また、接続面に隙間がある場合、屈折率の違いから光の反射が発生する。この反射が大きいと光伝送用の光源側に光が反射し、各種障害発生の原因にもなる（図9）。

これらの接続損失や反射はそれぞれ装置に許容値が決められているので確認しておく必要がある^[3]。

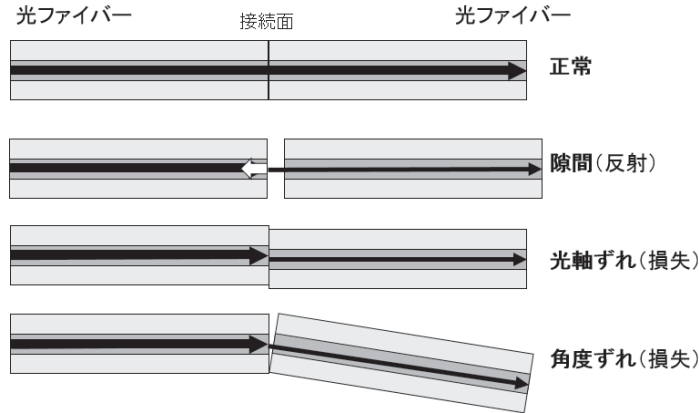


図9 光接続損失と反射

3.4 コネクタの端面汚れ

光コネクタ端面の汚れは、光ファイバーネットワークの不具合を引き起こす原因の一つである。肉眼では確認できない光コネクタ端面の汚れやゴミの付着が反射と損失の増加を引き起こす。光ファイバー側のコネクタ端面だけでなく装置側端面にも汚れが付着していないか確認する必要がある。汚れの確認には自動良否判定機能付きのファイバースコープを用いると作業効率が向上する。ファイバースコープで確認した時のサンプルを図10に示す^[4]。

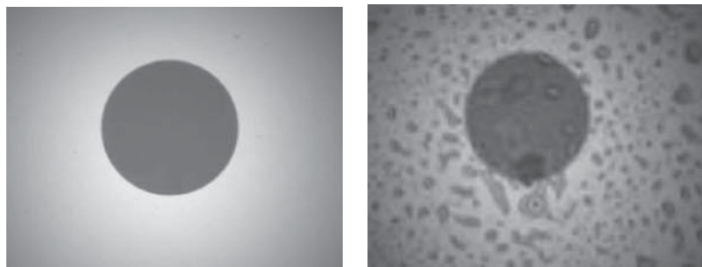


図10 光ファイバー汚れ状態（良好状態：左 と 皮脂汚れ付着状態：右）

3.5 波長分散（CD），偏波モード分散（PMD）

一般的な光源は完全な単一波長でなく、ある幅を持った波長特性を持っている。このような波長に幅のある光パルスが入射すると、光の伝搬速度や伝搬経路の長さが波長によって異なる

ために到達時間に差が生じパルス幅が広がる現象が発生する。この現象を波長分散（CD：Chromatic Dispersion の略）という。図 11 に波長分散によりパルス幅が広がる様子を示す。長波長の信号成分は、短波長の信号成分に比べて、遅れて光ファイバーの遠端に到達するため、伝送後の信号成分は劣化する。

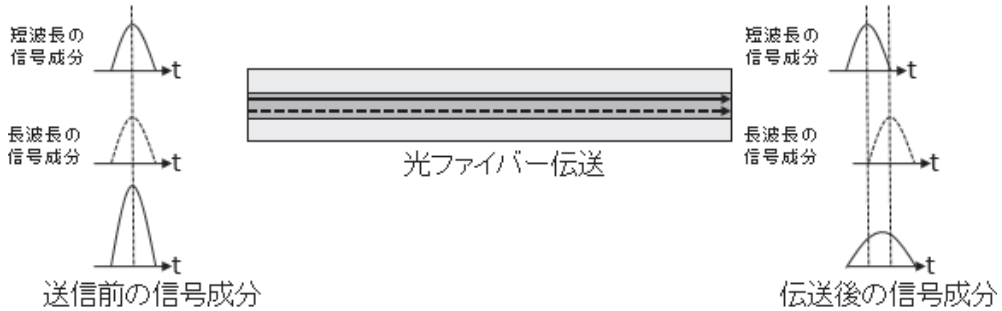


図 11 波長分散

光ファイバーのコア形状が製造上などの理由により、わずかに楕円化している場合に、二つの直交偏波モード成分間に伝搬時間差を生じ、パルス波形の広がる現象が発生する。この現象を偏波モード分散（PMD：Polarization Mode Dispersion の略）という^{[5][6][7]}。図 12 に偏波モード分散によりパルス幅が広がる様子を示す。光信号が光ファイバー遠端に到達する時間は、y 軸方向の信号成分と x 軸方向の信号成分で差があるため、伝送後の信号成分は劣化する。

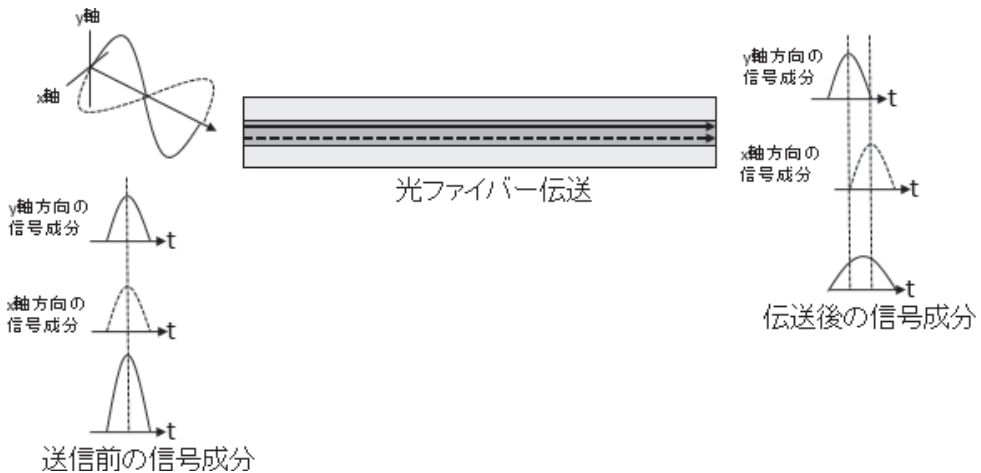


図 12 偏波モード分散

波長分散も偏波モード分散も通信距離が長くなるほど大きくなる。言い換えると、通信距離を延ばすためには分散を小さく抑えることが必要になる。また、分散の影響は通信速度が速くなるほど大きくなる。通信速度が速くなると 1 パルス当たりの時間幅が短くなり、分散による信号成分の時間軸上の劣化が大きく見えるためである。

3.6 SOP と SOP 変動について

光通信という偏波とは、電場および磁場が、特定の方向にのみ振動する波のことである。偏波の状態を SOP (State of Polarization) と呼ぶ。SOP はストークスベクトルという四つの成分で記述することが可能である。ストークスベクトルの成分は S_0, S_1, S_2, S_3 で表す。 S_0 は光の強度を、 S_1, S_2 は振動方向のベクトルの成分を示す。 S_3 は楕円の度合いを示し、0 に近づく程、楕円率が高くなり、1 または -1 に近づく程、真円に近づく。

SOP は時々刻々と変化しており、その変化を直感的に理解するためにポアンカレ球と呼ばれる半径 1 の球面上の座標点で極座標表示される (図 13 左)。

なお、SOP とストークスベクトルの関係についての数学的説明は参考文献で詳しく記載されているため本論文中では記載しない^{[5][6][7][8]}。

時間経過による SOP 変動はストークスベクトルのポアンカレ球面上の移動で表される。SOP 変動が大きいときには球面上でのある時刻 t でのベクトル S_t と次の時刻 $t+1$ のベクトル S_{t+1} のなす角度 ω が大きくなる (図 13 右)。

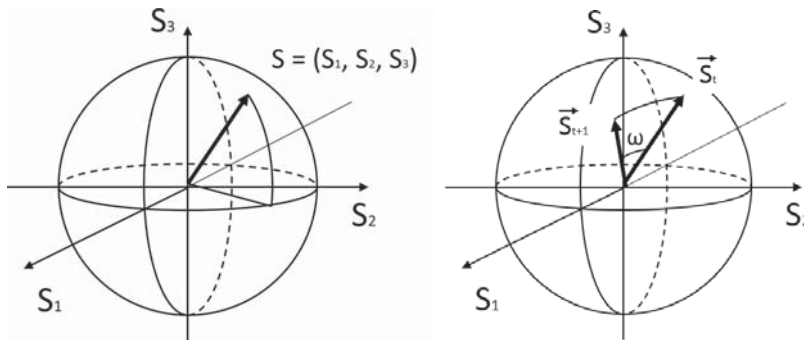


図 13 ポアンカレ球とストークスベクトル

4. DWDM 技術の今後の進展

本章では、更なるネットワーク帯域拡大の需要にこたえるために、今後実用化が求められている技術について解説する。

通信速度を高めることを考えた場合、変調方式を DP-QPSK よりも伝送速度が高いものに変更する方法と、帯域幅 (あるいは波長数) を大きくする方法の二つが考えられる。それぞれの方法についての本稿執筆時点の状況と今後の進展について解説する。

4.1 変調方式

2.4 節で述べた通り、既存の DWDM での 100Gbps 通信では QPSK と偏波多重を組み合わせた DP-QPSK という変調方式が使われているが、QPSK の代わりに 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) と呼ばれる多値変調方式を用いることで通信速度を高めることができる。QPSK では位相が異なる四つの信号点により 2bit のデータを 1 シンボルで表現しているが、16QAM は位相と振幅との組み合わせによる 16 の異なる信号点を用いることで、4bit のデータを 1 シンボルで表現することが可能である (図 14 左)。さらに信号点が多い 64QAM (64 Quadrature Amplitude Modulation) であれば 8bit のデータを 1 シンボルで表現することが可能である (図 14 右)。

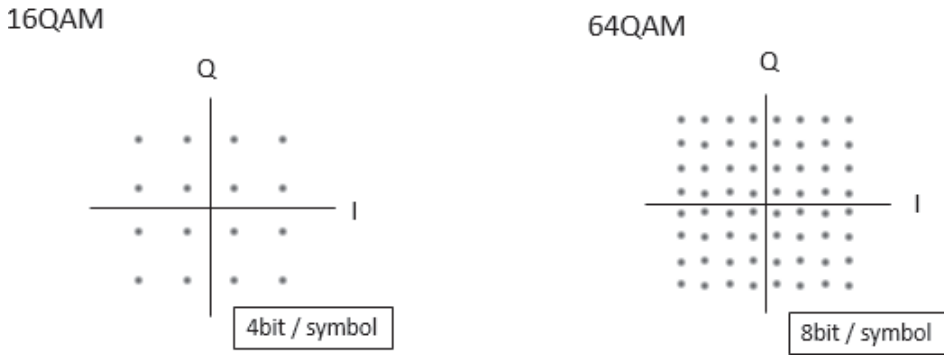


図 14 16QAM と 64QAM

このように、信号点が多い多値変調方式を採用することで通信速度を2倍、4倍に高めることが可能だが、トレードオフとして伝送距離が短くなってしまふ。図 15 は、伝送に伴い信号の歪みや雑音の影響が大きくなっていき信号点が判別できなくなるまでの様子を示している。信号点が多いほど信号点距離は短くなり誤差の影響を受けやすくなる。そのため通信可能な距離が短くなってしまふ。

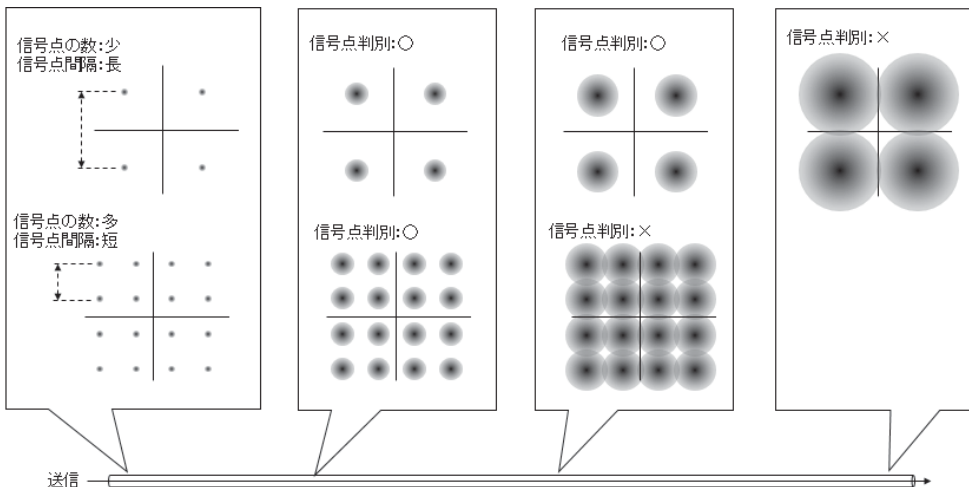


図 15 多値変調方式信号点の数と伝播誤差の影響度の関係

本稿執筆時点（2015年8月）では、DP-16QAM 変調方式による 200Gbps 通信を可能とする製品をリリースしているメーカーが既にあり、他の主要な DWDM メーカーからも 2015 年度から 2016 年度にかけて、200Gbps 通信を可能とする製品がリリースされる見込みである。しかし、DP-64QAM など信号点が多い変調方式については、各社がプロトタイプを用いたフィールドでの実用検証にて伝送に成功させているものの、ロードマップ上では、実際の製品がリリースされる時期は 2017 年から 2018 年くらいになる見込みである。

変調方式についての工夫として、QPSK や 16QAM 以外の変調方式を個別に採用し特色を持たせるメーカーもある(図 16)。あるメーカーは、4ASK という変調方式を採用した製品をリリースしている。この変調方式は、QPSK と信号点の数が同じであり通信速度は変わらない。また

信号点間隔はQPSKより狭くなるため、通信可能な距離も短くなる。一方で、位相のずれによる誤差の影響を受けにくくなり、復調のための計算処理が簡単になる。そのため、距離が比較的短いエリアにおいては、伝送品質を高めつつコストを抑えられることを特徴としている。

また別のメーカーでは、QPSK、16QAM、に加えて8QAMという変調方式を採用した製品をリリース予定である。8QAMは信号点が8でありQPSKの1.5倍の通信が可能である。16QAMよりも信号点距離が長いので通信可能な距離は長くなる。したがって、DP-16QAM(200Gbps)で伝送することが困難な線路長であるが、DP-QPSK(100Gbps)では余裕がありすぎるといった場合には、DP-8QAM(150Gbps)が通信距離と通信速度のバランスがとれた変調方式となる。3種の伝送方式を設定にて変更することで、伝送距離に応じた最適な通信速度を実現できることが特徴となっている。

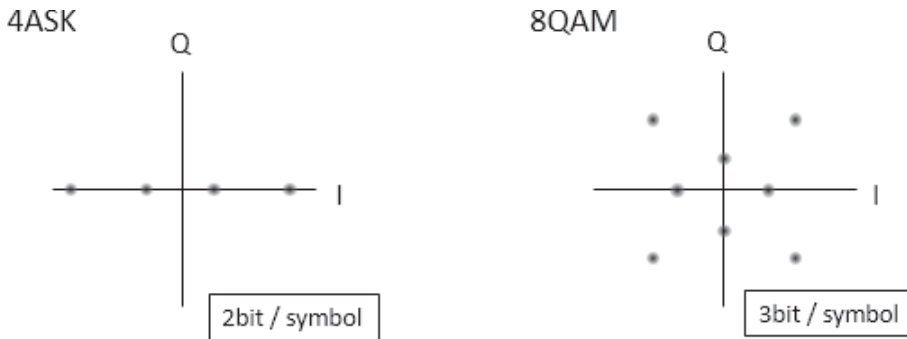


図16 メーカー個別で採用している変調方式(4ASK, 8QAM)

4.2 フレキシブルグリッド

DWDMで用いる波長の中心周波数およびスロット幅の使い方はグリッドと呼ばれる。1990年代にITU-T G.649.1でリファレンスとしてのグリッドが記載された内容が、以降、デファクトスタンダードとして長く用いられている^[9]。このグリッドは、中心周波数やスロット幅が固定的に決められているものであったため固定グリッドと呼ばれる。中心周波数が、 $193.1 + n \times 0.05$ [THz]と決められているため、各波長で使用できる帯域(スロット幅)もおのずと50GHzとなっている(図17)。

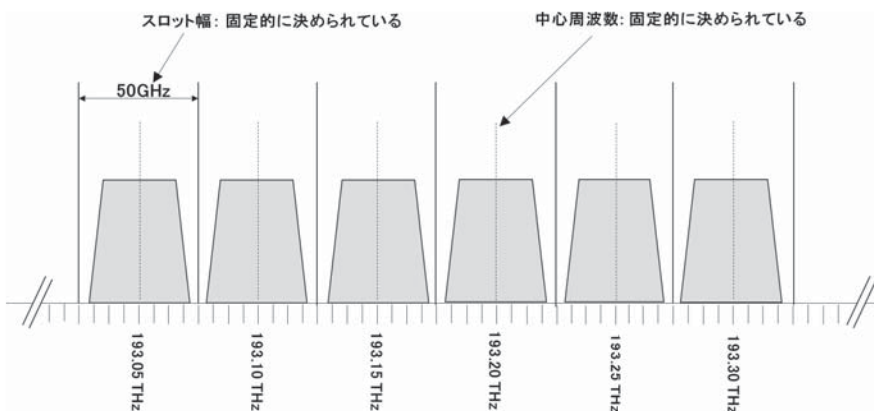






図17 ITU-T G.649.1 50GHz 固定グリッド

これまででは、この帯域幅に収まる範囲の信号を用い、変調方式を工夫することで通信速度を向上させてきた。しかし、更なる高速化と波長の利用効率の向上を考えた場合に、固定グリッドの考え方から従ってはいないという市場の要請がでてきた。

表1は、通信速度と、それを実現するための変調方式と必要な帯域幅の組み合わせ、および通信可能な距離の関係を表している。現状採用されている DP-QPSK 変調方式による 100Gbps 通信は Case #4 にあたり、帯域幅 50GHz を使用することで 3,000km までの範囲で通信可能である。Case #3 では、通信可能な距離を 1,500km までとすることで、DP-QPSK 変調方式による 200Gbps 通信が 75GHz 帯域幅で実現できることを示している。このように、変調方式と帯域幅の組み合わせを、通信距離に応じて柔軟に選択することで効率よく通信速度を高めることが本来は可能である^[10]。

しかし、固定グリッドに従った場合には、Case #1 や Case #3 のような 50GHz のスロット幅を超える信号を使うことはできない。固定グリッドにしたがって 400Gbps 通信を実現するためには、例えば Case #2 のような 50GHz 以下の帯域幅の DP-16QAM 変調方式による 200Gbps 通信を 2 スロット使う必要がある。Case #1 が適用できる通信距離の区間であったとしても、100GHz の帯域幅を消費することとなるため、波長の利用効率の点で無駄が発生してしまう。

表1 変調方式と帯域幅の組み合わせおよび通信距離

	Case #1	Case #2	Case #3	Case #4
通信速度	400Gbps	200Gbps	200Gbps	100Gbps
変調方式	DP-16QAM	DP-16QAM	DP-QPSK	DP-QPSK
帯域幅	 75GHz (37.5GHz x2)	 37.5GHz	 75GHz	 50GHz
通信距離	~300km	~600km	~1,500km	~3,000km
50GHz 固定グリッドでの利用	×	○	×	○

そこで、2012年にフレキシブルグリッドという考え方が新たに追加された。図18に示すとおり、中心周波数は $193.1 + n \times 0.00625$ [THz] と定義されているため、6.25GHz 間隔で任意の値を設定することが可能である。これにより、スロット幅の制限も緩和される。具体的には、スロット幅は $12.5 \times m$ [GHz] と定義されており、前述の Case #1 や Case #3 のような 50GHz を超える帯域を使う通信が、固定グリッドよりも効率的に波長を配置することで可能となる。

このようにフレキシブルグリッドのメリットは大きいですが、実際に利用されるようになるまでにはまだ時間がかかるであろう。

その理由の一つは、フレキシブルグリッドに対応した可変フィルターが必要となることにある。固定グリッドの場合には、使用する波長の中心周波数とスロット幅が固定的に決められていて、AWG (Arrayed Waveguide Grating) と呼ばれる構造が比較的簡単で安価に製造でき

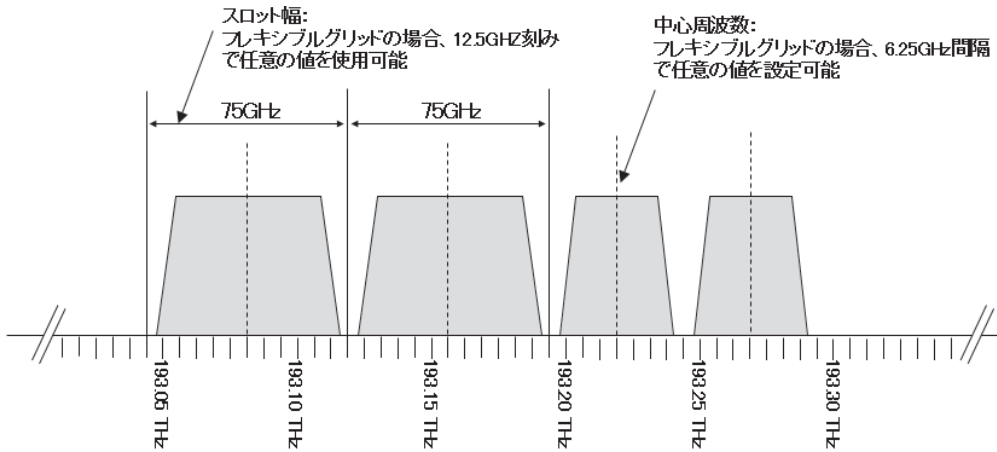


図 18 ITU-T G.649.1 フレキシブルグリッド

る光フィルターが用いられている。しかし、フレキシブルグリッドに対応するフィルターは中心周波数とスロット幅をポートごとに可変できなければならない。このようなフィルターはWSSで用いられる技術をベースに作成する、あるいは既存のWSSそのものを使用することで代替可能であるが、いずれにしてもAWGによる光フィルターと比較して高価なものとなる。

さらに、システム内での波長の衝突を回避するための制御が困難という問題もある。固定グリッドの場合にはシステム全体で使用する波長が固定されているため、限られた波長数に対して衝突回避の制御を行えばよいが、フレキシブルグリッドの場合は、使用する波長それぞれの中心周波数、スロットの組み合わせは無限に多くなる。そのため、システム内での衝突回避のための仕組みを新たに開発し実装する必要がある。

各メーカー、ハードウェアとしてはフレキシブルグリッドに対応済みとうたっているが、実際に使用するために必要なソフトウェアについては開発中であり、リリース次期は未定となっている。

5. おわりに

長距離光ネットワークの技術進化と題して、これまでの10Gbpsから現在の100Gbps、そして将来の200G/400Gbpsの波長多重技術の進化を紹介してきた。この分野の技術革新は目覚ましいものがあり今後も注目していきたい。最後に、本稿執筆にあたりご協力ご指導いただいた皆様に深く御礼申し上げます。

- 参考文献 [1] 中島 英規, 田中 雄作, 「増え続けるデータトラフィックに対応する次世代イーサネットサービスとは」, KVH株式会社, 2013. 10
<http://thinkit.co.jp/book/2013/08/20/4209>
 [2] Circuit Design 「デジタル位相変調・復調について」
http://www.circuitdesign.jp/jp/technical/modulation/modulation_PSK.asp
 [3] ドナルド・スターリング著, 赤木保之訳, 行松健一 監訳, 「光ファイバネットワーク技術解説」, ソフトバンククリエイティブ(株), 2002, Chapter 11
 [4] 「光コネクタ端面汚れが及ぼす影響とその対策」, NTTアドバンステクノロジ(株), 2014 https://www.keytech.ntt-at.co.jp/cgi-bin/contact/form_51.html
 [5] D. Waddy, P. Lu, L. Chen, and X. Bao, “Fast state of polarization changes in aerial

fiber under different climatic conditions”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, no. 9, pp.1035-1037, 2001.

- [6] H. Kogelnik, R. M. Jopson and L. E. Nelson, “Optical fiber telecommunications IV-B systems and impairments”, Chapter 15, Academic Press, 2002.
- [7] I. Kaminow and T. L. Koch, “Optical Fiber Telecommunications III”, Academic Press, 1997.
- [8] 「いまさら聞けない光学計算」, CYBERNET SYSTEMS CO., LTD
<http://www.cybernet.co.jp/codev/lecture/optics/opt06/>
- [9] Recommendation ITU-T G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2012
- [10] 滝広 眞利, 「100G 超伝送の技術開発トレンドと実用化への展望」, MPLS Japan 2014 公演資料, 華為技術日本(株), 2014.
http://mpls.jp/2014/presentations/MPLS_JAPAN2014_HuaweiJapan_web.pdf

※上記参考文献中の URL は, 2015 年 10 月 14 日時点での存在を確認。

執筆者紹介 竹内 明 (Akira Takeuchi)

1986 年日本ユニバック(株)入社。カスタマーサービス部にて大型汎用コンピューターの導入保守担当に従事。2000 年よりネットワーク専門部隊にてキャリア向けネットワークの構築保守を担当。



長峰 啓 (Akira Nagamine)

2002 年(株)ネットマークス入社, DWDM 装置の設計・導入・保守を担当。パケットトランスポート装置の保守を担当。2014 年ユニアデックス株式会社に移籍, パケットトランスポート装置の提案・導入を担当。



柳生 拓也 (Takuya Yagyū)

2002 年ユニアデックス(株)入社。ネットワーク関連の新技术、新製品の調査, 評価および提案支援を担当。2011 年よりキャリア向け DWDM 装置の評価および提案を担当。

