

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

Study on Dispersion-Managed High-Speed  
WDM Transmission Technologies  
in Optical Submarine Cable Systems

光海底ケーブルシステムにおける  
分散マネージメント高速 WDM 伝送技術  
に関する研究

申請者

Keiji	TANAKA
田中	啓仁

2013 年 5 月

本論文は、光海底ケーブルシステムの高速・大容量化を実現するための光伝送技術に関する研究成果を詳述した技術論文である。光増幅中継システムおよび無中継システムにおいて、伝送容量の拡大および距離の延伸に資する分散マネジメント方式を新たに提案すると共に、当該方式の有効性を数値シミュレーションならびに伝送実験により実証した。

光信号を光直接増幅するエルビウム添加光ファイバ増幅器 (erbium-doped optical fiber amplifier: EDFA) と波長多重 (wavelength division multiplexing : WDM) 技術とを組み合わせることで、光ファイバ当たりのケーブル伝送容量が飛躍的に拡大し、2000年には、1波長当たり 10 Gbit/s 信号を 16 WDM 化した伝送容量 160 Gbit/s の大洋横断ケーブルが商用化されている。しかしながら、光増幅中継伝送システムでは、信号を再生しないため、光ファイバ伝送中に生じる信号歪みや光増幅器からの雑音などが距離に応じて累積される。光伝送システムの研究開発は、伝送を制限するこのような問題を抑制もしくは解決することにある。特に、1波長当たり 10 Gbit/s 以上の高速 WDM 伝送では、光ファイバの分散と非線形効果に起因する伝送劣化を抑制する分散マネジメントが重要となる。

本論文では、1波長当たり 10 Gbit/s 以上の高速 WDM 伝送システムにおける分散マネジメント方式を新たに提案している。新規提案方式を適用することで、光増幅中継伝送システムでは 10 Gbit/s ベース WDM での 320 Gbit/s 大洋横断伝送を、無中継伝送システムでは 40 Gbit/s ベース WDM での 300 km 超のテラビット伝送を世界で初めて実証した。また、光増幅中継伝送システムにおいて、WDM 信号を高密度化することで容量拡大を図る信号スペクトルのプリフィルタリング技術に着目し、システム特性に応じたフィルタリング条件を最適化して、周波数利用効率 0.8 bit/s/Hz の 40 Gbit/s ベース高密度 WDM での太平洋横断伝送が実現可能であることを示した。さらに、急増するトラフィック需要に迅速かつ低コストで対応するためのアップグレード技術として、既設国内光海底ケーブルシステムである JIH (Japan Information Highway) の伝送容量を 16 倍の 1 Tbit/s とするための端局技術を明らかにし、JIH にてテラビット伝送が実現可能であることを実証した。

第 1 章「序論」では、太平洋横断光海底ケーブルシステムの伝送容量拡大の変遷と各システムに適用されたブレイクスルー技術について概説すると共に、PC-1 (Pacific Crossing 1) および Japan-US ケーブルで実現された 160 Gbit/s システム以降のさらなる容量拡大に向けた技術課題について詳述した。単一チャネル伝送での分散マネジメントでは、非線形効果である自己位相変調 (self-phase modulation : SPM) と、光ファイバスパンの分散値であるローカル分散値と伝送

路中での分散補償後のシステム分散がマネージメント対象となるが、WDM 伝送では、さらに信号帯域全体にわたっての波長分散と相互位相変調 (cross-phase modulation) などの非線形クロストーク効果も考慮する必要がある。このような状況下では、商用導入に必要な伝送品質を確保するために、システムをどのように設計するかが重要な技術課題となる。さらに、無中継伝送システムでは、光ファイバ伝送路への光信号入力パワーおよびラマン増幅・遠隔 EDF 励起のためのポンプ光入力パワーをどこまで大きくできるかが長延化に向けた課題となる。上述の光伝送システムにおける分散マネージメントに加え、有限な EDFA 帯域の有効利用に資する WDM 信号の高密度化技術や、既存のリソースを有効利用して迅速かつ低コストにてトラフィック需要に対応するシステムアップグレード技術も課題となる。なお、本章の最後に、本論分の構成と第 2 章以降に記載する研究内容について説明した。

第 2 章「光通信システム設計」では、光通信システムにおけるシステム設計の指針と手法について述べた。光ファイバ中のパルスの振舞いを記述する非線形シュレディンガー方程式から伝送ペナルティフリーとなる伝送損失補償と分散マネージメントの条件式を導出し、システム設計の指針を理論的に明確化した。また、システム設計手法として、光ファイバスパンでの累積非線形量に着目した理論解析、数値シミュレーション、ならびに周回ループ伝送実験について説明した。

第 3 章「長距離 WDM 伝送システムにおける分散マネージメント技術」では、大洋横断光増幅中継伝送システムにおける分散マネージメント技術について述べた。160 Gbit/s クラスの大洋横断システムに適用されている DSF (dispersion-shifted fiber) 伝送路では、分散値と分散値の波長依存性 (分散スロープ) の両方を補償できないため、伝送路での累積波長分散の影響により波長多重数の拡張が制限される。そこで、本問題を解決する方法として、SMF (standard single-mode fiber) とスロープ補償型 DCF (slope-compensation dispersion compensation fiber: SC-DCF) を組み合わせてスパン毎に分散と分散スロープを補償する方法を提案し、当該スパン構成にて 32 x 10.7 Gbit/s - 7,280 km の大洋横断可能な長距離 WDM 伝送を世界で初めて実証した。また、本質的に零分散スロープ特性を有する分散フラットファイバを用いる方法も提案し、分散フラットファイバのポテンシャルと今後に向けた課題を明らかにした。

第 4 章「分散マネージメント伝送路とラマン増幅を用いた 40 Gbit/s ベース WDM 無中継伝送システム」では、遠隔励起 EDF 増幅とラマン増幅を併用した無中継伝送システムにおける分散マネージメント技術について述べた。無中継伝送システムでの距離延伸のためには、SNR (signal-to-noise ratio) を高く保持す

ることが重要となるため、光ファイバへの入力信号の高出力化、光増幅の高ゲイン化、および伝送路での累積分散値の抑制を目的とした分散マネージメント方式を提案した。これまでは 40 Gbit/s ベース WDM での伝送可能距離が 250 km に制限されていたのに対して、本方式を適用することで、伝送可能距離を世界で初めて 300 km 超に延伸した 25 x 40 Gbit/s – 306 km の無中継伝送を実証した。

第 5 章「信号スペクトル狭窄化による 40 Gbit/s ベース高密度 DWDM 伝送システム」では、WDM 高密度化技術について述べた。光増幅帯域が有限である光増幅中継 WDM 伝送システムでのさらなる大容量化のためには、伝送路の分散マネージメント技術に加えて、周波数利用効率の向上が重要となる。そこで、周波数利用効率の向上が期待できる 40 Gbit/s 高速信号を用いて、高密度 WDM 伝送を実現するチャンネル間隔狭窄化技術を提案した。チャンネル間隔を狭めた際のチャンネル間非線形クロストークの影響と、フィルタリングによる信号スペクトル狭窄化が伝送特性に与える影響を、数値シミュレーションならびに伝送実験により定量的に検討し、周波数利用効率 0.8 bit/s/Hz の 40 Gbit/s ベース伝送にて最長となる 25 x 40 Gbit/s – 480 km の高密度 WDM 伝送を実証した。また、当該高密度 WDM 伝送にて有効となるプリフィルタリングのシステム特性毎の最適条件を明らかにし、40 Gbit/s ベース WDM での太平洋横断伝送が可能であることを示した。

第 6 章「40 Gbit/s ベース WDM 伝送技術による JIH ケーブルシステムのアップグレード」では、既設国内光海底ケーブルシステムである JIH のアップグレード技術について述べた。光海底ケーブルシステムでは、伝送路側でのマネージメント対応が実質的に不可能であるため、光送受信端局側でのアップグレード技術が重要となる。そこで、端局技術として、信号フォーマットと誤り訂正符号 (forward error correction : FEC) に着目し、JIH システムの 16 倍以上の容量拡大に相当する 50 Gbit/s から 1 Tbit/s へのアップグレード化を実現する方式を提案した。その結果、信号フォーマットの最適化と FEC 技術の適用により、2.5 Gbit/s ベースから 40 Gbit/s ベースの WDM 伝送 (1 Tbit/s 伝送) へのアップグレードが実現可能であることを示した。

最終章となる第 7 章では、光増幅中継伝送システムにおける SMF/SC-DCF スパンを用いた伝送路の分散フラット化を実現する分散マネージメント技術、無中継伝送システムにおける遠隔励起 EDF/ラマン増幅を併用した高 SNR 化を実現する分散マネージメント技術、大容量化に必須となる高密度 WDM 伝送技術、および既存システムのアップグレード技術の有効性を総括し、光伝送システム開発における本研究成果の意義を示した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 田中 啓仁 印

(2013年 5月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>題名 : Study on Capacity Upgrade of JIH (Japan Information Highway) Submarine Cable System Using 40 Gbit/s-Based WDM Transmission Technologies</p> <p>掲載誌名 : IEICE Transactions on Communications, Vol. E87-B No. 6, pp.1463-1469</p> <p>発行年月 : 2004年 6月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, N. Yoshikane, and N. Edagawa</p>
論文	<p>題名 : 40 Gbit/s x 25 WDM 306 km Unrepeateded Transmission using 175<math>\mu</math>m<sup>2</sup>-Aeff Fibre</p> <p>掲載誌名 : IEE Proceedings Optoelectronics, Vol.150 Issue 3, pp.224-228</p> <p>発行年月 : 2003年 6月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, H. Sakata, T. Miyakawa, I. Morita, K. Imai, and N. Edagawa</p>
レター	<p>題名 : 40 Gbit/s x 25 WDM 306 km Unrepeateded Transmission using 175<math>\mu</math>m<sup>2</sup>-Aeff Fibre</p> <p>掲載誌名 : IEE Electronics Letters, Vol. 37 Issue 21, pp.1354-1356</p> <p>発行年月 : 2001年 10月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, H. Sakata, T. Miyakawa, I. Morita, K. Imai, and N. Edagawa</p>
レター	<p>題名 : 50 GHz-Spaced 40 Gbit/s x 25 WDM Transmission over 480 km Using Bandlimited RZ Signals</p> <p>掲載誌名 : IEE Electronics Letters, Vol.37 Issue 12, pp.775-777</p> <p>発行年月 : 2001年 6月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, and N. Edagawa</p>
レター	<p>題名 : Impact of Nonlinear Crosstalk in 0.8 nm-Spacing 40 Gbit/s DWDM Systems</p> <p>掲載誌名 : IEE Electronics Letters, Vol. 36 Issue 14, pp.1217-1218</p> <p>発行年月 : 2000年 7月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, N. Edagawa, and M. Suzuki</p>
レター	<p>題名 : 320 Gbit/s (32 x 10.7 Gbit/s) Error-Free Transmission over 7,280 km Using Dispersion Flattened Fibre Link with Standard SMF and Slope Compensating DCF</p> <p>掲載誌名 : IEE Electronics Letters, Vol. 35 Issue 21, pp.1860-1862</p> <p>発行年月 : 1999年 10月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, N. Edagawa, and M. Suzuki</p>
レター	<p>題名 : 400 Gbit/s (20 x 20 Gbit/s) Dense WDM Soliton-Based RZ Signal Transmission Using Dispersion Flattened Fibre</p> <p>掲載誌名 : IEE Electronics Letters, Vol. 34 Issue 23, pp.2257-2258</p> <p>発行年月 : 1998年 11月</p> <p>連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, M. Suzuki, N. Edagawa, and S. Yamamoto</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	<p>題名 : Study on Optimum Pre-Filtering Condition for 42.7 Gbit/s CS-RZ DPSK Signal            発表 : The Optical Fiber Communication Conference 2004, TuF2            発表年月 : 2004 年 2 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, and N. Edagawa</p>
国際会議	<p>題名 : Detuning Tolerance of 50 GHz-spaced 40 Gbit/s-Based DWDM System            発表 : Optoelectronics and Communications Conference 2003, 15D1-4            発表年月 : 2003 年 7 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u>, and N. Edagawa</p>
国際会議	<p>題名 : Study on Capacity Upgrade of JIH(Japan Information Highway) Submarine Cable System Using 40 Gbit/s-based WDM transmission Technologies            発表 : National Fiber Optical Engineer Conference 2003, E2-3            発表年月 : 2003 年 9 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, N. Yoshikane, and N. Edagawa</p>
国際会議	<p>題名 : Present and Future of Ultralong-Haul Optical Fiber Transmission            発表 : Nonlinear Physics : Theory and Experiment.II            発表年月 : 2002 年 6 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u></p>
国際会議	<p>題名 : Study on the Optimum Signal Format for Long-haul 40 Gbit/s-Based WDM Systems            発表 : ITCOM 2002            発表年月 : 2002 年 7 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u>, I. Morita, A. Agata, and N. Edagawa</p>
国際会議	<p>題名 : Expected Spectral Efficiency by Using Optically Pre-Filtered RZ            発表 : The Optical Fiber Communication Conference 2002, Workshop 203            発表年月 : 2002 年 3 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u></p>
国際会議	<p>題名 : 40 Gbit/s-Based Unrepeated WDM Transmission Systems            発表 : The Optical Fiber Communication Conference 2002, ThFF1            発表年月 : 2002 年 3 月            連名者 : T. Miyakawa, and <u>K. Tanaka</u></p>
国際会議	<p>題名 : 40 Gbit/s x 25 WDM 306 km Unrepeated Transmission Using 175<math>\mu</math>m<sup>2</sup>-Aeff Fibre            発表 : European Conference on Optical Communication 2001, Mo.F.3.6            発表年月 : 2001 年 9 月            連名者 : <u>K. Tanaka</u>, H. Sakata, T. Miyakawa, I. Morita, K. Imai, and N. Edagawa</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月、	連名者（申請者含む）
国際会議	題名	: 50 GHz-Spaced 40 Gbit/s x 25 WDM Transmission over 480 km Using Bandlimited RZ Signals	発表	: Optoelectronics and Communications Conference 2001, TUE1 発表年月：2001年7月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, and N. Edagawa
国際会議	題名	: 40 Gbit/s-Based WDM Systems with SMF-Based Dispersion Flattened Transmission Line	発表	: Research Group for Optical Soliton Communications Symposium 2000 発表年月：2000年11月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, M. Suzuki, and N. Edagawa
国際会議	題名	: Impact of Nonlinear Crosstalk in 0.8 nm-Spacing 40 Gbit/s DWDM Systems	発表	: Optoelectronics and Communications Conference 2000, 14D4-3 発表年月：2000年7月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, N. Edagawa, and M. Suzuki
国際会議	題名	: 320 Gbit/s (32 x 10.7 Gbit/s) Error-Free Transmission over 7,280 km Using Dispersion Flattened Fibre Link with Standard SMF and Slope Compensating DCF	発表	: European Conference on Optical Communication 1999, WeC4.3 発表年月：1999年9月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, N. Edagawa, and M. Suzuki
国際会議	題名	: 400 Gb/s Dense WDM Soliton-based RZ Transmission Using Dispersion Flattened Fiber	発表	: Research Group for Optical Soliton Communications Symposium 1998 発表年月：1998年11月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, N. Edagawa, and M. Suzuki
国際会議	題名	: 400 Gbit/s (20 x 20 Gbit/s) Dense WDM Soliton-Based RZ Signal Transmission Using Dispersion Flattened Fibre	発表	: European Conference on Optical Communication 1998, pp.85-86 発表年月：1998年9月 連名者： <u>K. Tanaka</u> , I. Morita, M. Suzuki, N. Edagawa, and S. Yamamoto
その他の研究業績	論文		2件	（共著、招待論文1件を含む）
	国際会議（査読付）		7件	（共著、招待講演2件を含む）
	チュートリアル講演（海外）		1件	
	解説記事（和文）		2件	