

博士論文審査報告書

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

情報通信トラフィックは、高速な光ネットワークの広範な敷設に支えられ、動画配信などの広帯域サービスやクラウドコンピューティングの普及などに伴って爆発的に拡大している。特に、情報のグローバル化に伴い情報流通は全世界を巡っており、急増する情報トラフィックを賄うために長距離幹線系、特に光海底ケーブルにおける伝送容量の一層の拡大が求められている。光海底ケーブルにおいては、光直接増幅により複数波長を同時に増幅でき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、ファイバ当たりのケーブル伝送容量が飛躍的に拡大され、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、EDFAを用いた光増幅中継伝送システムでは信号光レベルの再生のみで有り、波形整形やジッタ補正などの波形再生を行うものでないため、光ファイバの分散による信号歪みや、光増幅器からの雑音や光ファイバの非線形性による波形劣化が伝送距離に応じて累積され、長距離大容量伝送の特性向上の妨げになっていた。この問題を抑圧するためには、特に1波長当たり10 Gbit/s以上の高速WDM長距離伝送では、光ファイバの非線形効果の制御と共に分散マネジメントが極めて重要となる。

本論文は、WDM伝送をベースにした光海底ケーブルシステムの一層の大容量・長距離化を目的として、光伝送技術に関して理論及び実験面から取り組んだものである。光ファイバの分散マネジメントにおいて、非線形も考慮しながら分散値と分散スロープ値を制御した光ファイバの最適配置指針を新たに提案した。その結果、10Gbit/s・数千km級の長距離化、40Gbit/s・数百km級の無中継伝送、40Gbit/s WDMの高密度伝送化、そして既存システムの40Gbit/s級アップグレード化において、それぞれ当時世界最高特性を実証した。これらの研究を通してテラビット伝送実現への知見を与えた成果がまとめられている。

以下に各章ごとにその成果の概要を述べ、評価を加える。

第1章「序論」では、主に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について概説すると共に、さらなる容量拡大に向けた技術課題について詳述している。

第2章「光通信システム設計手法」では、本論文のシステム設計を行う上で不可欠な光ファイバの分散や非線形に関する理論について纏めている。すなわち、非線形シュレディンガー方程式より、ペナルティフリー伝送に必要な条件式を導出し、伝送損失補償、分散マネジメントに加え、非線形性を抑圧する手法を提示した。またシステム設計手法として、2ステップの光ファイバ構成について累積非線形性を導出して設計指針とした。さらに数

値シミュレーション手法や周回伝送系を用いた実験手法、評価パラメータなど次章以降の特性評価に対する基礎を提示している。

第3章「長距離 WDM 伝送システムにおける分散マネジメント技術」では、光増幅中継を用いた大洋横断伝送システムにおける 320Gbit/s 超級を実現する伝送システム技術の提示及び実証を行っている。従来のノンゼロ分散シフトファイバ方式(NZ-DSF ベース)では WDM 帯域端での分散スロープが補償しきれないという欠点があることを見出し、そこで新たに通常単一モードファイバ(SMF)と分散スロープ・分散補償ファイバ(SC-DCF)の組み合わせ方式(SMF+SC-DCF: SMF ベース)と分散平坦ファイバ(DFP ベース)の2つの方式を提案し、詳細に比較検証を行った。その結果、DFP ベースでは本質的に分散スロープをゼロに出来るもののローカル分散が小さいが故に非線形性の影響が免れず、20WDMx20Gbit/s-2,000km の伝送に止まるが、他方、SMF ベースでは、高いローカル分散による非線形性の抑圧と分散スロープの完全補償が可能であるため、32WDMx10Gbit/s-7,280km の長距離伝送が可能な事を、数値シミュレーションと実験により明らかにした。このように提案した分散マネジメントにより 320Gbit/s 級大洋横断システムの設計指針を与えたことは評価に値する。

第4章「分散マネジメント伝送路とラマン増幅を用いた 40Gbit/sWDM 無中継システム」では、光増幅中継を省いた低コストな無中継光伝送路において 40Gbit/s の超高速化を実現すべく、遠隔励起 EDF 増幅とラマン増幅を併用したシステムにおいて 300km を越える伝送を可能とする分散マネジメント技術の提案と実証について述べている。遠隔に配置された EDF への W 級の電力ポンプ光による非線形性の回避のために大口径ファイバ(EE-PDF)を伝送路の両端に配置し、そして同時にその分散を補償するために NZ-DSF を中央に配置することにより総分散値を約 40%低減し、その結果これまで 250km に制限されていた伝送距離を 25WDM で初めて 306km までの長距離伝送を実現したことは評価に値する。

第5章「信号スペクトル狭帯域化による 40Gbit/s 高密度 WDM 伝送技術」では、WDM 伝送の高密度化において、チャンネル間の非線形クロストークを抑圧しながらも周波数利用効率を出来るだけ向上させるためには、分散マップの最適化に加えて、信号フォーマットと光フィルタリングの重要性に着目し、種々の構成について詳細に検討を行った。その結果、EE-PDF+SC-DCF+EE-PDF の3ステップ分散の組み合わせにおいて、リターンツーゼロ(RZ)変調方式より低光強度・狭帯域なキャリア抑圧リターンツーゼロ差分位相変調(CS-RZ DPSK)方式の採用、及び 50GHz チャンネル間隔に対して狭帯域フィルタを伝送距離に応じて信号スペクトルに対して対称、非対称に配置する最適化指針を提案し、25WDMx40Gbit/s-480km、スペクトル効率 0.8bit/Hz などの当時世界最高の高密度伝送などを実証したことは評価に値する。

第6章「JIH ケーブルシステムのアップグレード技術」では、既設の日本列島周回の国内光海底ケーブルシステムであるJIHの通信容量拡大のアップグレード技術について検討を行った。既設光海底ケーブルシステムでは、伝送路側でのマネジメント対応が実質的に不可能であるため、そこで、端局技術を改良することとし、信号フォーマットと誤り訂正符号に着目し、それらの最適化により既存JIHシステムの16倍以上のアップグレード化を実現する方式を提案し、40Gbit/sベースのWDM伝送において1Tbit/s級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ことは、低コストな既存伝送路の大容量化に貢献するものである。

第7章「結論」では、本論文の結論を述べ、今後の研究課題について述べている。

以上を要約するに、本論文は種々の光海底ケーブルシステムのWDM伝送の容量拡大に向けて、光ファイバの非線形性を考量して分散をマネジメントした光ファイバの配置の重要性について、シミュレーション及び周回実験での実証の観点から示したものである。7,000km級の長距離光増幅中継伝送ではWDM波長域に渡っての分散フラット化を、300km級の無中継伝送ではファイバ端において光増幅の高電力ポンプ光への非線形性抑圧を、WDM高密度化のためには狭帯域変調方式とプリフィルタリングが有効であること、そして既存のJIHケーブルシステムに対しては信号フォーマットなどの端局技術により16倍の容量グレードアップが可能なことなどを示し、光海底ケーブルの当時世界最高級の長距離大容量伝送の指針を与えた意義は極めて大きい。

これらの成果は現代の高度情報化社会構築に向けて光エレクトロニクス及び光通信工学の面から多大な貢献をなしたものと評価することができる。よって、本論文は博士（工学）に値するものと認める。

2014年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	宇高 勝之
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	松本 充司
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	加藤 勇
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	中島 啓幾
	大阪大学准教授	博士（工学）大阪大学	丸田 章博