

平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成26年4月1日現在

研究代表者 氏名	中沢 正隆	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	東北大学・電気通信研究所・教授
研究課題名	光フーリエ変換を用いた新しい超高速無歪み光伝送技術の確立		
課題番号	16002008		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 中沢 正隆（東北大学・電気通信研究所・教授） 研究分担者 廣岡 俊彦（東北大学・電気通信研究所・准教授） 研究分担者 吉田 真人（東北大学・電気通信研究所・助教）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成16年度	80,900 千円
平成17年度	99,400 千円
平成18年度	48,100 千円
平成19年度	68,700 千円
平成20年度	61,900 千円
総計	359,000 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

本特別推進研究では、時間領域光フーリエ変換法(OFT: Optical Fourier Transformation)という新たな無歪み光伝送技術を提案し、160~320 Gbit/s OTDM (Optical Time Division Multiplexing: 光時分割多重) 信号の 500~1,000 km の長距離超高速伝送、ならびに 320 Gbit/s OTDM 信号の大容量 WDM 伝送を世界に先駆けて実現した。これにより、本伝送技術が超高速光伝送の長距離化とシステムマージンの拡大に大変有効であることを明らかにした。研究期間終了後も、以下に示すように研究が大きく進展し、OFT 法の超高速化による単一チャネルテラビット伝送(1.28 Tbit/s-500 km, 2.56 Tbit/s-300 km)の実現と超短パルスの伝送限界の究明、コヒーレント光パルスによる超高速多値伝送、更には光ナイキストパルスによる高性能化など、超高速光伝送技術が飛躍的に高度化された。以下ではこれらの成果について詳細に述べる。

①OFT 法の超高速化による単一チャネルテラビット長距離伝送の実現

特別推進研究における 320 Gbit/s OTDM 伝送の結果を踏まえ、単一チャネル 640 Gbit/s~2.56 Tbit/s への高速化に取り組んだ。このような超高速伝送にはサブピコ秒の光パルスが必要となることから、往復型の位相変調器を用いた超短パルス用の超高速 OFT 回路を新たに提案した。その構成を図 1 に示す。本回路を用いて、640 Gbit/s (単一偏波) ならびに 1.28 Tbit/s (偏波多重) DPSK (Differential Phase Shift Keying)信号の 525 km 伝送に成功した。さらに、DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)と呼ばれる 4 値の差動位相変調方式を導入することにより、単一偏波 1.28 Tbit/s-525 km ならびに偏波多重 2.56 Tbit/s-300 km 伝送を実現した。その伝送結果を図 2 に示す。これらは単一チャネルで 1 Tbit/s を超える伝送では最長となる伝送距離である。その一方で、このような超短パルス伝送では距離の拡大とともに伝送性能が急激に劣化し、2.56 Tbit/s 偏波多重伝送では図 2 に示す通り 300 km 以上の伝送が困難であることが明らかとなった。その原因を追究したところ、光ファイバの 2 次の偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)が直交偏波チャンネル間に大きなクロストークをもたらすことを新たに見出した。このクロストークはスペクトル帯域の 4 乗に比例し、パルス幅を狭くするほどその効果が急激に増大することから、これが究極的には超高速パルス伝送の限界を決定することを解明した。

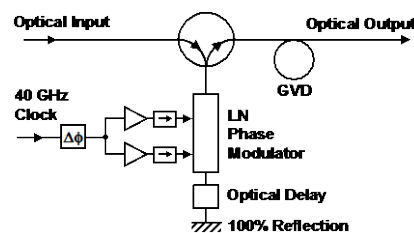
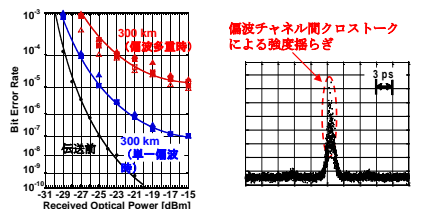


図 1 超高速 OFT 回路の構成



(a) 2.56 Tbit/s-300 km 伝送の符号誤り率 (b) 300 km 伝送後のパルス波形
図 2 2.56 Tbit/s/ch-300 km 伝送結果

②コヒーレント光パルスによる超高速多値伝送

従来の超高速光パルス伝送は、OOK (On-Off Keying)や DPSK などのインコヒーレント伝送が主流であり、1 パルスあたりの情報量は 1~2 ビットに留まっていた。一方我々は、光の振幅だけでなく位相も多値で変調する QAM (Quadrature Amplitude Modulation)と呼ばれるコヒーレント伝送技術に関しても精力的に取り組んできた。これにより 1 つのシンボルで多ビットの伝送を実現でき、周波数利用効率が大幅に向上する。そこで、OTDM による高速化と QAM による周波数利用効率の拡大を同時に実現するために、コヒーレント光パルスを QAM で多値変調し OTDM により多重化を行うコヒーレント OTDM-QAM 伝送を新たに提案した。その結果、10 Gsymbol/s の 64 QAM 信号を 160 Gsymbol/s に多重化することにより、1.92 Tbit/s-150 km の伝送を実現した。このとき周波数利用効率は 3.2 bit/s/Hz に達しており、図 2 に示した DQPSK 伝送(1 bit/s/Hz)と比べ 3 倍以上向上させることに成功している。

③光ナイキストパルスによる超高速光伝送の高性能化

超高速光通信における信号帯域の狭窄化は、周波数利用効率の拡大のみならず、①で述べた超短光パルス伝送における PMD の限界を克服するためにも不可欠である。そこで我々は、帯域広がりを抑えつつ高速化を実現できる新たな光パルスとして「光ナイキストパルス」を提案した。光ナイキストパルスは従来の光パルスと異なり、隣のパルスと重なっても互いの干渉が生じないため、幅の広いパルスを用いても超高速伝送が実現できる点が特徴である。ナイキストパルスを使って 1.28 Tbit/s-525 km 伝送を行った結果を図 3 に示す。挿入図に示すように、パルスどうしが重なっていてもシンボルが完全に識別できている。ナイキストパルスにより PMD によるクロストークを 4 dB 以上低減でき、従来方式を大きく上回る伝送性能を達成した。今後はコヒーレント光ナイキストパルスの OTDM-QAM 伝送により、1 波長でテラビットの伝送速度とシャノン限界に迫る周波数利用効率の両方を兼ね備えた究極的な光伝送技術の実現が期待される。

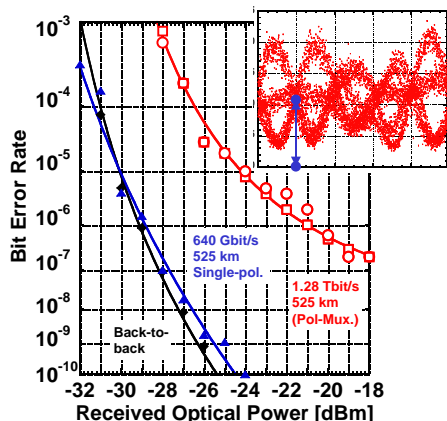


図 3 1.28 Tbit/s-525 km ナイキストパルス伝送

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

研究期間終了後、OFT法を用いた超高速光パルス伝送、超多値デジタルコヒーレントQAM伝送、コヒーレント光パルス伝送、光ナイキストパルス伝送を中心に、この5年間で58件の論文発表、81件の国際会議報告（うち26件は招待講演）を行っている。その他国内の学会・研究会においても多数の招待講演、一般講演を行っている。主要な発表論文を以下に列挙する。

- [1] T. Hirooka, M. Okazaki, T. Hirano, P. Guan, M. Nakazawa, and S. Nakamura, "All-optical demultiplexing of 640-Gb/s OTDM-DPSK signal using a semiconductor SMZ switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 20, pp. 1574-1576, October 2009.
- [2] P. Guan, M. Okazaki, T. Hirano, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Low-penalty 5x320 Gbit/s/single-channel WDM DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 21, pp. 1579-1581, November 2009.
- [3] M. Nakazawa, S. Okamoto, T. Omiya, K. Kasai, and M. Yoshida, "256-QAM (64 Gb/s) coherent optical transmission over 160 km with an optical bandwidth of 5.4 GHz," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 185-187, February (2010).
- [4] K. Kasai, T. Omiya, P. Guan, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 400-Gb/s OTDM-32 RZ/QAM coherent transmission over 225 km using an optical phase-locked loop technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 562-564, April (2010).
- [5] T. Hirano, P. Guan, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "640-Gb/s/channel single-polarization DPSK transmission over 525 km with ultrafast time-domain optical Fourier transformation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 14, pp. 1042-1044, July (2010).
- [6] P. Guan, H. C. Hansen Mulvad, K. Kasai, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "High time-resolution 640-Gb/s clock recovery using time-domain optical Fourier transformation and narrowband optical filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 23, pp. 1735-1737, December (2010).
- [7] P. Guan, H. C. Hansen Mulvad, Y. Tomiyama, T. Hirano, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 1.28 Tbit/s-525 km DQPSK transmission using ultrafast time-domain optical Fourier transformation and nonlinear optical loop mirror," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E94-B, no. 2, pp. 430-436, February (2011).
- [8] Y. Tomiyama, K. Harako, P. Guan, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Comparison between polarization-multiplexed DPSK and single-polarization DQPSK in 640 Gbaud, 1.28 Tbit/s-500 km single-channel transmission," *Opt. Fiber Technol.*, invited paper, vol. 17, no. 5, pp. 439-444, Oct. (2011).
- [9] P. Guan, T. Hirano, K. Harako, Y. Tomiyama, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "2.56 Tbit/s/ch Polarization-Multiplexed DQPSK Transmission over 300 km Using Time-Domain Optical Fourier Transformation," *Opt. Express*, vol. 19, no. 26, pp. B567-B573, Dec. (2011).
- [10] M. Nakazawa, K. Kasai, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Novel RZ-CW conversion scheme for ultra multi-level, high-speed coherent OTDM transmission," *Opt. Express*, vol. 19, no. 26, pp. B574-B580, Dec. (2011).
- [11] M. Nakazawa, T. Hirooka, P. Ruan, and P. Guan, "Ultrahigh-speed "orthogonal" TDM transmission with an optical Nyquist pulse train," *Opt. Express* vol. 20, no. 2, pp. 1129-1140, Jan. (2012).
- [12] K. Kasai, D. O. Otuya, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-Carrier 800-Gb/s 32 RZ/QAM Coherent Transmission Over 225 km Employing a Novel RZ-CW Conversion Technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 416-418, March (2012).
- [13] Y. Koizumi, K. Toyoda, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km," *Opt. Express*, vol. 20, no. 11, pp. 12508-12514, May (2012).
- [14] M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR," *Opt. Express*, vol. 20, no. 11, pp. 12530-12540, May (2012).
- [15] T. Hirooka, P. Ruan, P. Guan, and M. Nakazawa, "Highly dispersion-tolerant 160 Gbaud optical Nyquist pulse TDM transmission over 525 km," *Opt. Express*, vol. 20, no. 14, pp. 15001-15008, July (2012).
- [16] T. Hirooka and M. Nakazawa, "Linear and nonlinear propagation of optical Nyquist pulses in fibers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 18, pp. 19836-19849, August (2012).
- [17] T. Hirooka, K. Harako, P. Guan, and M. Nakazawa, "Second-order PMD-induced crosstalk between polarization-multiplexed signals and its impact on ultrashort optical pulse transmission," *J. Lightwave Technol.* vol. 31, no. 5, pp. 809-814, March (2013).
- [18] K. Harako, D. Seya, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "640 Gbaud (1.28 Tbit/s/ch) optical Nyquist pulse transmission over 525 km with substantial PMD tolerance," *Opt. Express*, vol. 21, no. 18, pp. 21063-21076, September (2013).
- [19] D. O. Otuya, K. Kasai, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "A single-channel 1.92 Tbit/s, 64 QAM coherent optical pulse transmission over 150 km using frequency-domain equalization," *Opt. Express*, vol. 21, no. 19, pp. 22808-22816, September (2013).
- [20] M. Nakazawa, M. Yoshida, T. Hirooka, and K. Kasai, "QAM quantum stream cipher using digital coherent optical transmission," *Opt. Express* vol. 22, no. 4, pp. 4098-4107, February (2014).

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

< 科研費 >

① 基盤研究(S)「繰り返しと光周波数を同時安定化した GHz 帯モード同期パルスレーザの実現とその応用」

研究代表者：中沢正隆、実施期間：2009~2013 年度、交付金総額：141,500,000 円

< 科研費以外の研究費 >

② 日本学術振興会 先端研究拠点事業「超高速光通信に関する拠点形成」

コーディネータ：中沢正隆、実施期間：2009~2013 年度、交付金総額：94,250,000 円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

特別推進研究の成果に基づき、その後超短光パルスを用いたビットレートの高速化が大きく加速し、上記(1)の①で述べたように、単一チャネル 640 Gbit/s~2.56 Tbit/s による 300~500 km の長距離伝送が実現されるに至った。それと同時に、超短光パルス伝送に伴う新たな課題も明らかになった。具体的には、サブピコ秒パルスの偏波多重伝送においては、ファイバ中の 2 次 PMD (Depolarization) と呼ばれる主偏波状態の周波数依存性によって直交偏波チャネル間で複雑なクロストークが生じ、これが伝送距離を制限する支配的要因となることが明らかとなった。これは OFT 法では補償が困難な歪みである。また、そのクロストークはスペクトル帯域の 4 乗に比例して増大することを導出した。その結果、光通信の超高速化には単にパルス幅を狭くするだけではなく、パルス波形およびパルス幅の最適化によるスペクトルの狭窄化、即ち周波数利用効率の拡大という新たな方向性を見出した。

周波数利用効率の拡大は、限られた周波数資源の有効活用や低消費電力化の観点からも強く求められている。そのため最近の光通信の研究では、高速化に加え、多値変調による高周波数利用効率化が急速に進展している。その動向を図 4 に示す。無線で実用化されているデジタル信号処理を光信号の多値変復調に積極的に活用するデジタルコヒーレント技術により、従来 1 bit/s/Hz 程度であった周波数利用効率が著しく向上されている。我々のグループは 2048 値の QAM 伝送により、世界最高の 15.3 bit/s/Hz の周波数利用効率を達成している。そして、QAM と OTDM の両方の特徴を活かすために、コヒーレントな光パルスの振幅と位相を QAM で多値変調し OTDM で高速化する伝送方式を進めている。しかしながら、通常のガウス型や Sech 型等のパルス波形は、隣のビットと重なり合うと干渉により情報が識別できなくなるため、出来るだけ幅を狭くする必要があり、周波数帯域の広がりが避けられない。そのため、周波数利用効率の拡大という観点からは最適なパルスとは言えないことが明らかになってきた。

そこで、超短パルス伝送の伝送限界の克服と周波数利用効率向上の課題を同時に解決する方法として、帯域広がりを抑えつつ高速化を実現できる新たな光パルス「光ナイキストパルス」を 2011 年に提案した。その原理を図 5 に示す。ナイキストパルスは sinc 関数的な形状を有し、その裾野はシンボル間隔ごとに強度がゼロとなる。そのため、幅が広く帯域の狭いパルスを用いても、隣接ビットとの重なりが生じるにもかかわらず干渉が生じない点が特徴である。この特徴を活かして、シンボルレート 160~640 Gbaud で 500 km の長距離伝送を行い、従来のガウス型や Sech 型の光パルスと比べて波長分散ならびに偏波モード分散に対する耐力が大幅に向上できることを明らかにした。さらに、コヒーレント光ナイキストパルスにより 64 QAM 信号を 1.92 Tbit/s/ch という超高速でありながら 7.5 bit/s/Hz という高い周波数利用効率で伝送することに世界で初めて成功し、本パルスが超高速且つ周波数利用効率の拡大に最適な伝送方式であることを実証している。これらの結果は、超高速伝送には超短パルスが不可欠という既成概念を覆し、幅の広いパルスを使っても超高速光通信が実現できることを明らかにしたもので、高速光通信の新しい方向性を切り開くものである。

以上のように、特別推進研究とそこから発展した一連の研究成果は、光に内在する高速性とコヒーレンスを最大限に駆使した伝送技術として、次世代の高速・大容量光通信システムの設計に有益な知見と指針を与えている。

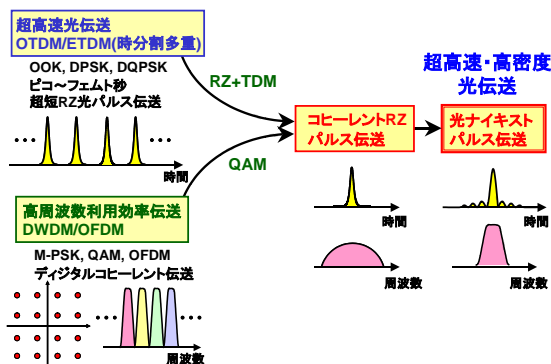


図 4 超高速・高密度光伝送の実現に向けた取り組み

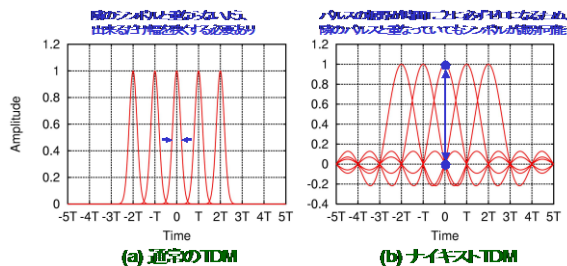


図 5 通常の TDM と光ナイキストパルスの TDM との比較

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

特別推進研究で得られた成果をさらに発展させ、産学官連携ならびに国際連携による超高速光伝送システムの基盤技術の確立を目指して、日本学術振興会の先端研究拠点事業(Core-to-Core Program) (2009~2013年度)において「超高速光通信に関する国際的な研究拠点形成」を進めてきた。具体的には、東北大学とハインリッヒ・ヘルツ研究所(HHI、ドイツ)、デンマーク工科大学(DTU)、サザンプトン大学(イギリス)の3機関との共同研究・研究者交流を中核とし、加えて国内の産学官連携も強化することにより、超高速光通信に関する組織横断的・分野横断的な研究交流体制の構築を進めてきた。その概要を図6に示す。これにより成果を相互に共有するネットワーク体制が構築され、各機関における研究活動が大幅に加速され、人的交流も活性化された。

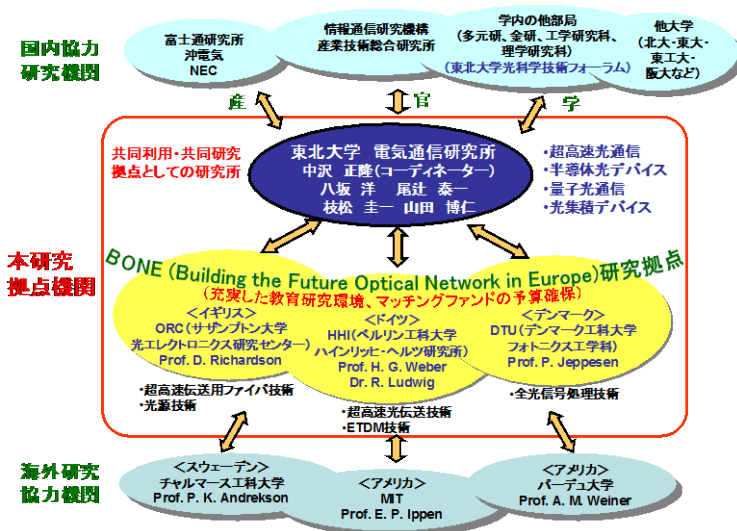


図6 超高速光通信に関する拠点形成(JSPS Core-to-Core Program)

特別推進研究で取り組んできた OFT 法、ならびにその後東北大学が提案した光ナイキストパルスは、各機関で極めて高い関心を集め、特に DTU の P. Jeppesen 教授、L. Oxenlowe 教授のグループは OFT 法による時間一周波数変換機能に着目し、新たな多重分離やクロック抽出など光信号処理への応用を幅広く展開している。最近では、OFT 法とナイキストパルスを組み合わせた新たな信号処理技術も報告している。

一方、国内では産業技術総合研究所(AIST)が超高速伝送技術の実用性の向上に向けて精力的に取り組んでおり、東北大学とは連携・協力協定を締結するとともに、特別推進研究実施期間中より通研共同プロジェクト「超高速光パルス制御技術に関する研究」「光波位相制御による高度通信・計測システムに関する研究」「超高速コヒーレント光制御による極限通信・計測システムに関する研究」を現在も継続している。その結果、ISBT と呼ばれる半導体デバイスによる OTDM 送受信装置の小型・集積化、スーパーハイビジョン映像の非圧縮伝送のデモンストレーション、光ナイキストパルスのネットワークノード装置への適用など、デバイスからシステムまで実用化を指向した成果が多数報告されており、この分野の活性化に貢献している。また、情報通信研究機構(NICT)とも包括協定を締結し、2012年には東北大学片平キャンパスに耐災害 ICT 研究センターが設立され、電気通信研究所に隣接する敷地内に世界最先端のロバスト光統合ネットワーク実証テストベッドが整備されている。

さらに、東北大学、AIST、NICT の3機関が省庁をまたいだ共催により立ち上げた超高速フォトニクスに関する国際シンポジウム(ISUPT: International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies)が、特別推進研究終了後も回を重ね、現在まで継続して開催している。これまでの開催状況を表1に示す。ISUPTは日本、ヨーロッパ、アメリカの順に場所を移しながら隔年で開催しており、既に10年目に入っている。ISUPTは世界の第一線で活躍する超高速フォトニクスの研究者が一同に会し、最新の成果の発信と活発な情報交換の場としてこの分野のコミュニティに定着し、研究活性化に貢献している。2009年には研究代表者(中沢)が委員長を務め東北大学でISUPTを開催し、22件の招待講演ならびに参加企業10社による展示会が開催され、137名の参加者が集い成功裏に終了している。2015年には京都、2017年にはヨーロッパ(デンマークもしくはオランダ)で開催することが決定している。

表1 ISUPTの開催状況

シンポジウム	開催日	開催国	開催場所	委員長
日欧米国際シンポジウム	2003年7月15日	日本	幕張メッセ	櫻井照夫(産総研)
ISUPT 2005	2005年8月1~3日	スコットランド	Univ. of St. Andrews	Prof. Wilson Sibbett
ISUPT 2007	2007年8月20~21日	アメリカ	MIT	Prof. Erich P. Ippen
ISUPT 2009	2009年8月4~5日	日本	東北大学	中沢正隆
ISUPT 2011	2011年9月15~16日	ドイツ	Heinrich Hertz Institute	Dr. Reinhold Ludwig
ISUPT 2013	2013年10月21~22日	アメリカ	Univ. of Rochester	Prof. Wayne H. Knox
ISUPT 2015 (予定)	2015年6月25~26日	日本	京都	宮崎智弥(NICT)

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	M. Nakazawa, T. Hirooka, F. Futami, and S. Watanabe, "Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 1059-1061, April (2004).	時間領域光フーリエ変換法による波形無歪み伝送の原理を提案し、2.5 psの光パルスを用いて3次分散歪みの除去を実証した。	38
2	T. Hirooka and M. Nakazawa, "Optical adaptive equalization of high-speed signals using time-domain optical Fourier transformation," Invited paper, J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 7, pp. 2530-2540, July (2006).	時間領域光フーリエ変換法を用いた分散の適応等化に関する実験結果と理論解析を招待論文として発表した。	21
3	M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, "Mode-hop-free, optical frequency tunable 40 GHz mode-locked fiber laser," IEEE J. Quantum Electron., vol. 43, no. 8, pp. 704-708, August (2007).	位相に情報を乗せる超高速 DPSK, DQPSK 伝送用の高繰り返し光パルス光源を実現するために、モードホップと呼ばれる発振周波数の変動を抑制する手法を提案した。	13
4	T. Hirooka and M. Nakazawa, "All-optical 40-GHz time-domain Fourier transformation using XPM with a dark parabolic pulse," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 22, pp. 1869-1871, November (2008).	パラボラ光パルスとの相互位相変調を用いて時間領域光フーリエ変換を全光学的に実現する手法を提案し、その基本性能を実証した。	11
5	M. Nakazawa and T. Hirooka, "Distortion-free optical transmission using time-domain optical Fourier transformation and transform-limited optical pulses," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 22, no. 9, pp. 1842-1855, September (2005).	時間領域光フーリエ変換を用いた波形無歪み伝送に関し、その歪み除去性能に関する理論解析を行った。特に位相変調のパラボラ形状からのずれが歪み除去効果にもたらす影響について定量的に評価した。	10
6	T. Hirooka, M. Nakazawa, and K. Okamoto, "Bright and dark 40 GHz parabolic pulse generation using a picosecond optical pulse train and an arrayed waveguide grating," Opt. Lett., vol. 33, no. 10, pp. 1102-1104, May (2008).	全光学的な光フーリエ変換を実現するために、パラボラの形状を有する光パルスの発生方法を提案し、Bright（上に凸）、Dark（下に凸）と呼ばれる2種類のパラボラパルス発生を実現した。	8
7	T. Hirooka, K. Hagiuda, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa, "160 Gb/s-600 km OTDM transmission using time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 24, pp. 2647-2649, December (2006).	時間領域光フーリエ変換法を実際に 160 Gbit/s OTDM 伝送に適用し、OOK 方式によりこれまでで最長距離となる 600 km の伝送に成功した。	7
8	T. Hirooka, M. Nakazawa, F. Futami, and S. Watanabe, "A new adaptive equalization scheme for 160-Gb/s transmitted signals using time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 10, pp. 2371-2373, October (2004).	時間領域光フーリエ変換法が、時間的に変動する波形歪みの適応等化にも適用できることを提案し、その基本性能を実証した。	7
9	T. Hirooka, M. Okazaki, P. Guan, and M. Nakazawa, "320-Gb/s single-polarization DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 22, pp. 1872-1874, November (2008).	時間領域光フーリエ変換法を 320 Gbit/s 伝送に適用して伝送性能が大幅に改善することを示し、この手法が高速伝送ほど有効であることを実証した。	6
10	T. Hirooka, M. Okazaki, and M. Nakazawa, "A straight-line 160-Gb/s DPSK transmission over 1000 km with time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 13, pp. 1094-1096, July (2008).	時間領域光フーリエ変換法を DPSK と呼ばれる差動位相変調方式に初めて適用し、OOK では 600 km であった伝送距離を 1000 km まで拡大し 160 Gbit/s では最長となる伝送距離を達成した。	4

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	M. Nakazawa, T. Hirooka, P. Ruan, and P. Guan, "Ultra-high-speed "orthogonal" TDM transmission with an optical Nyquist pulse train," Opt. Express vol. 20, no. 2, pp. 1129-1140, Jan. (2012).	高速化と周波数利用効率の拡大を同時に実現可能な伝送方式として光ナイキストパルスの時間多重伝送を提案した。従来のガウス型光パルスを大幅に上回る伝送性能を達成できることを実証し、超高速光伝送に最適な光パルスであることを明らかにした。	16
2	T. Hirooka, M. Okazaki, T. Hirano, P. Guan, M. Nakazawa, and S. Nakamura, "All-optical demultiplexing of 640-Gb/s OTDM-DPSK signal using a semiconductor SMZ switch," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 21, no. 20, pp. 1574-1576, October 2009.	SMZ と呼ばれる全光半導体光スイッチを用いて 640 Gbit/s OTDM 信号の多重分離に初めて成功し、SMZ デバイスの超高速動作を実証した。	13
3	K. Kasai, T. Omiya, P. Guan, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 400-Gb/s OTDM-32 RZ/QAM coherent transmission over 225 km using an optical phase-locked loop technique," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 8, pp. 562-564, April (2010).	コヒーレント光パルスの振幅と位相に情報を乗せることにより、32 QAM 信号の単一チャンネル 400 Gbit/s 高速 OTDM 伝送に初めて成功した。	11
4	T. Hirooka, P. Ruan, P. Guan, and M. Nakazawa, "Highly dispersion-tolerant 160 Gbaud optical Nyquist pulse TDM transmission over 525 km," Opt. Express, vol. 20, no. 14, pp. 15001-15008, July (2012).	光ナイキストパルスを用いて 160 Gbaud-525 km 伝送実験を行い、従来のガウス型や Sech 型の光パルスと比べて波長分散ならびに偏波モード分散に対する耐力が大幅に向上できることを明らかにした。	8
5	P. Guan, T. Hirano, K. Harako, Y. Tomiyama, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "2.56 Tbit/s/ch Polarization-Multiplexed DQPSK Transmission over 300 km Using Time-Domain Optical Fourier Transformation," Opt. Express, vol. 19, no. 26, pp. B567-B573, Dec. (2011).	時間領域光フーリエ変換法を用いて単一チャンネル 2.56 Tbit/s 偏波多重 DQPSK 信号の 300 km 超高速長距離伝送に初めて成功した。	7
6	M. Nakazawa, K. Kasai, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Novel RZ-CW conversion scheme for ultra multi-level, high-speed coherent OTDM transmission," Opt. Express, vol. 19, no. 26, pp. B574-B580, Dec. (2011).	コヒーレント光パルス伝送において多値 QAM 信号を高い SNR で復調するために、RZ-QAM 信号を CW のデータ信号に変換する手法を提案し、その有用性を実証した。	4
7	P. Guan, H. C. Hansen Mulvad, K. Kasai, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "High time-resolution 640-Gb/s clock recovery using time-domain optical Fourier transformation and narrowband optical filter," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 23, pp. 1735-1737, December (2010).	時間領域光フーリエ変換法を用いて OTDM 信号を WDM 信号に変換することにより、640 Gbit/s の超高速信号から 40 GHz のクロック信号を抽出することに成功した。	4
8	T. Hirano, P. Guan, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "640-Gb/s/channel single-polarization DPSK transmission over 525 km with ultrafast time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 14, pp. 1042-1044, July (2010).	時間領域光フーリエ変換法を超短パルスに適用するために往復型の位相変調器構成を用いた超高速 OFT 法を提案し、本手法により単一チャンネル 640 Gbit/s-525 km 伝送に成功した。	4
9	K. Kasai, D. O. Otuya, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-Carrier 800-Gb/s 32 RZ/QAM Coherent Transmission Over 225 km Employing a Novel RZ-CW Conversion Technique," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 24, no. 5, pp. 416-418, March (2012).	RZ-CW 変換法を用いて 32 QAM コヒーレント光パルスの伝送速度を 800 Gbit/s に高速化し、その 225 km 伝送に成功した。	3
10	Y. Tomiyama, K. Harako, P. Guan, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Comparison between polarization-multiplexed DPSK and single-polarization DQPSK in 640 Gbaud, 1.28 Tbit/s-500 km single-channel transmission," Opt. Fiber Technol., invited paper, vol. 17, no. 5, pp. 439-444, Oct. (2011).	偏波多重 DPSK 信号および単一偏波 DQPSK 信号を用いてチャンネル 1.28 Tbit/s 伝送の比較を行い、偏波多重に伴う PMD クロストークの問題点を初めて明らかにした。	3

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

時間領域光フーリエ変換法は超高速光信号の波形歪み除去に加えて、その時間一周波数変換としての機能に着目し、「時間レンズ」という名称で各種光信号処理への幅広い応用が見出されている。中でも、超短光パルスを用いた OFT により周波数軸上に変換しスペクトルアナライザに表示させることにより、パルス波形を 300 fs の分解能で測定可能な装置が米国 Thorlabs 社より販売されている(Ultrafast Temporal Magnifier, UTM-1500)。その他、OFT 法の性能改善を目的に提案したパラボラ光パルスの発生技術に関しては、受動モード同期レーザの超短パルス化に大変有用であることがコーネル大学のグループによって見出され、計測・生体イメージング用フェムト秒光源の高度化に貢献している。

その他、特許ならびに教育・啓蒙活動を通じての社会貢献の状況は以下の通りである。

①特許

時間領域光フーリエ変換法に関して特別推進研究実施期間中に申請した以下の特許がその後登録に至った。その一部はアメリカにおいても特許化がなされている。

- [1] OTDM/WDM 伝送方法及び装置（特許第 4252470 号）
- [2] 光パルス圧縮器および光関数発生器,光パルス圧縮方法及び光関数発生方法（特許第 4459547 号）
- [3] 光伝送方法及び光伝送装置（特許第 4471572 号）
- [4] 光フーリエ変換装置及び方法（特許第 4471666 号）
- [5] OTDM 伝送方法及び装置（特許第 4495415 号）
- [6] 超高速光パルスの波形歪み除去装置及び方法（特許第 5455053 号）
- [7] Optical Fourier transform device and method (US Patent No. 7352504)
- [8] Optical pulse compressor and optical function generator, optical pulse compression method and optical function generating method (US Patent No. 7428096)
- [9] OTDM transmission method and apparatus (US Patent No. 7672593)
- [10] Optical transmission method and optical transmission apparatus (US Patent No. 7747175)

②教育・啓蒙活動

・ 著書

学部生向けの教科書として「フォトニクス基礎」（朝倉書店）を分担執筆した。同書中の「光通信システム」の章を執筆し、光通信の基本事項に加え、超高速光パルス伝送・デバイスについても紹介している。また、最近の光通信における周波数利用効率の拡大に向けた取り組みを概観した専門書「High Spectral Density Optical Communication Technology」（Springer）を編集、出版した。さらに、今後 20~30 年先を見据えて光通信インフラの飛躍的な高度化の必要性・重要性を一般向けに紹介するための著書「光通信技術の飛躍的高度化」（オプトロニクス社）を編集・出版した。

・ 教育活動

大学が主催する通研公開、オープンキャンパスにおける成果展示に加え、科学者の卵養成講座、たのしいサイエンスサマースクール、高校への出前授業等で光通信の最先端と将来展望に関する講義を多数行い、研究成果のアウトリーチ活動にも力を注いでいる。

・ 国・地方自治体・公共団体における活動

日本学術会議連携委員、JST CREST 領域アドバイザー、OITDA 光テクノロジーロードマップ専門委員、日本学術振興会フォトニック情報システムに関する先導的研究開発委員、光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会委員長、総合科学技術会議革新的技術推進アドバイザー等の活動に従事し、専門的立場から次世代光通信・フォトニクス技術について数々の提言を行っている。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

特別推進研究に研究分担者として参画した准教授は、その後も超高速光伝送技術の高度化に関する研究を進展させ、それらの課題は科学研究費補助金「若手研究 S（2009～2010 年度）」および内閣府の「最先端・次世代研究開発支援プログラム（2010～2013 年度）」に採択されている。また、特別推進研究期間中ならびにその後の研究業績により、平成 21 年度光科学技術研究振興財団研究表彰、平成 22 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞、平成 24 年度 RIEC Award を受賞している。

もう 1 名の研究分担者は、現在本研究所の准教授として、引き続き超高速・高安定レーザの研究開発を進めるとともに、コヒーレント QAM 伝送、マルチコアファイバの研究を推進している。超多値デジタルコヒーレント伝送に関する研究業績により、IEICE ELEX Best Paper Award（2009 年）、とやま賞（2010 年）、電子情報通信学会論文賞（2012 年）を受賞している。

本研究に当時大学院生・ポスドクとして参画した学生のうち、1 名は日本学術振興会特別研究員（2010～2012 年）を経て、2012 年 11 月より本研究室の助教（プロジェクト特任）に就任している。現在、コヒーレント光パルスを用いた超高速多値伝送の研究に精力的に取り組んでおり、上述の IEICE ELEX Best Paper Award（2009 年）および電子情報通信学会論文賞（2012 年）を共同で受賞している。

さらに、当時修士課程在籍中であった中国人留学生 1 名が、その後本学の博士課程に進学し、2012 年 3 月に博士号を取得した。特別推進研究の中で得られた研究成果に対して 2009 年に IEEE Sendai Section より Student Award “The Best Paper Prize”を、また博士課程修了に際しては在学中の優秀な研究業績に対して東北大学総長賞を受賞している。その後 1 年間本学でのポスドクを経て、現在はデンマーク工科大学(DTU)のポスドク研究員を務めている。東北大学における超高速伝送の研究開発の経験を発揮し、DTU の超高速伝送グループの即戦力として活躍している。このようにグローバルに活躍する若手研究者が育成された点も特別推進研究の重要な成果である。