

高非線形分散シフトファイバを用いた短尺櫛形分散配置ファイバによる高繰り返し超短パルス発生

High-Repetition Rate Ultra-Short Pulse Train Generation by Short Comb-Like Dispersion Profiled Fiber Using High-Nonlinearity DSF

忠 隈 昌 輝*

Masateru Tadakuma

麻 生 修*

Osamu Aso

坂 野 操*

Misao Sakano

並 木 周*

Shu Namiki

概 要 将来の光通信の大容量化を目的にWDM通信技術だけでなく40 Gbps/chを越える信号速度の高速化の研究も進んでいる。電気的処理が困難な超高速信号処理においては光ファイバの非線形現象を利用したファイバ型非線形デバイスによる全光信号処理が有効である。このような全光信号処理を行ううえで信号の時間基準となる高速光パルス列発生器の開発を目的とし通常の約6倍の非線形性を持つ高非線形1.55 μm 零分散ファイバと1.3 μm 零分散シングルモードファイバを組み合わせ短尺の櫛形分散配置ファイバ(CDPF; Comb Like Dispersion Profiled Fiber)を構成し、高繰り返し超短パルスの発生を行った。またベDESTALノイズを低減しパルス品質を向上させるためにDI-NOLM構成を取り込んだCDPFを設計し、繰り返し周波数100 GHz、パルス幅380 fsのパルス列を発生を実現した。

1. はじめに

伝送信号の高速化とWDMの高密度化により伝送容量は増大している。今後更なる容量増大の方向性を考えた場合、1) WDM高密度・広帯域化と2) 信号速度高速化が予想される。2) の利点を考えると広帯域WDM化に比較して同等の伝送容量を保つために少ない波長数(チャンネル数)で実現可能であり、システムの波長特性に対する制御を考えるとコスト的に有利になる可能性を秘めている。現在注目されている40 Gbps/chシステムよりも更に高速な伝送を構築する場合、送受信部等の電気的信号処理速度限界が律速になる。そのためスイッチングを行ったり、超高速信号を電気処理可能な速度まで落とす過程において全光信号処理が使われることになる。このような全光信号処理技術において光ファイバ中での非線形光学効果を利用したファイバ型非線形デバイスにより光通信分野において新たな技術革新をもたらされることが期待されている。本研究では高非線形分散シフトファイバを用いた櫛形分散配置ファイバ(Comb Like Dispersion Profiled Fiber; CDPF)による短パルス発生法により、さまざまな光信号処理を行ううえで信号の時間基準となる高速光パルス列(光クロック)発生器の研究・開発を行った。

2. 光ファイバ中でのパルス圧縮を用いた高繰り返し超短パルス光源

高繰り返し周期を持つ超短パルス光源は特に大容量光時分割多重伝送(Optical Time Division Multiplexing; 時分割多重)における全光信号処理技術で重要な役割を担うと考えられている。40 Gbps/chを越える信号速度の光パルス発生方法としては、40 Gbps以下の短パルス光源をOTDMして使用するのが主流である^{1), 2)}。単体の光源から超高速パルスを発生する手段としては半導体DFBレーザのモードロック³⁾、ファイバ中の変調不安定性を利用する方法⁴⁾等の研究が行われているが、全光信号処理における局所制御パルス光源にはより簡易な方法で安定した高繰り返しパルスの発生方法が望まれている。その場合に二つの波長の異なる光を重ね合わせたビート変調光は高繰り返しパルス列の発生方法として有効である。この方法の利点として市販の波長可変光源を組み合わせることができ設定が容易な点と光源の波長帯域に対応した任意の波長のパルスが形成できる点、また繰り返し周波数を自在に設定でき高繰り返し発生が可能であることなどが挙げられる。このような高繰り返しビートパルス光は光ファイバ中を伝搬する過程におけるファイバの非線形性と分散性の効果によりパルス幅の狭い超短パルス光に圧縮変換される⁵⁾。ファイバを用いたビートパルス圧縮としては分散減少ファイバを用いたソリトンパルスの断熱圧縮を実現する方法^{6), 7)}分散値の異なるファイバを階段状に接続し分散減少ファイバを模擬した伝送路を用いた圧縮⁸⁾等が行われている。更に通常の1.3 μm 零分散ファイバ(SMF)と1.55 μm 零分散

* ファイナルフォトニクス研究所 光伝送サブシステム開発部

ファイバ (Dispersion Shifted Fiber; DSF) という一般的な二種類のファイバのみを交互に用いて接続した櫛形分散配置ファイバ (CDPF) によりピコ秒パルス光の発生が観測されている^{9), 10)}。更に DSF と SMF の接続数を減らした簡潔な構成でもソリトンパルス列が発生可能であることが発表されている^{11), 12)}。またこのようにして発生した光パルスを用いた伝送特性評価も行われている¹³⁾。図 1 に CDPF の構成を示す。波長の異なる二つのレーザ光を合波することにより発生した波長 1.55 μm 帯のビート光を櫛形分散配置ファイバに入射させる場合を考える。まず DSF では非線形性が支配的であり、自己位相変調 (Self Phase Modulation; SPM) によりスペクトルが広がりチャープが生じる。このパルスがつぎに入射する SMF の異常分散性により、パルス立上がり・立下がり付近のチャープが補償されパルス幅が狭くなる。これを順次繰り返すことによりパルス幅が次第に狭くなっていく。櫛形分散配置ファイバを構成した過去の研究例では、通常の DSF 及び SMF が使用されている。この方法ではファイバ中での非線形効果がパルス圧縮の中心的な役割を果たしているため、効果的なパルス圧縮を行うためには高非線形な DSF^{14), 15)}を用いることが有効である。そこで本研究では高非線形性を持つ DSF (High Nonlinearity DSF; HNL-DSF) を用いて CDPF を構成し高繰り返し超短パルスを発生させることを検討した。ここで用いた高非線形 DSF の伝送特性を表 1 に示す。

このファイバは通常の DSF に比べ、非線形光学係数 γ ($\gamma = n_2/A_{\text{eff}} \cdot 2\pi/\lambda_p$; n_2 非線形屈折率; A_{eff} 有効断面積; λ_p 中心波長) が約 6 倍大きく、そのため同等の非線形効果を得るのにファイバ長が短くて済む。HNL-DSF を用いてファイバ長を短縮することにより以下の利点が挙げられる。1) 二つの波長の間の偏

表 1 高非線形ファイバの特性
Characteristics of high nonlinearity fiber

パラメータ	value
伝送損失	0.61 dB/km
ゼロ分散波長	1565.5 nm
分散スロープ (@ λ_0)	0.029 ps/nm ² /km
非線形係数 (γ)	17.5 W ⁻¹ km ⁻¹

表 2 5 対の CDPF 構成 (m)
Configuration of five pairs of CDPF

Pair of fibers	Dispersion@1565 nm	1	2	3	4	5
DSF	- 0.015 ps/nm/km	160	200	100	50	30
SMF	+ 17 ps/nm/km	144	7	2	0.3	0.3

波状態の変動が小さくなり、より大きな四光波混合 (Four Wave Mixing; FWM) を得ることができる。2) 短尺ファイバでは長手方向の分散値の変動を抑えることができるため、より大きく広帯域な SPM を得るために必要となるゼロ分散状態を維持することができる。

3. HNL-DSF を用いた 5 対の CDPF によるパルス発生

この HNL-DSF と SMF を 5 対組み合わせさせた構成により全長 693.6 m の櫛形分散配置ファイバを作成した¹⁶⁾。使用したファイバの特性を表 2 に示す。この CDPF を含む実験系を図 2 に示す。ビート光は二つの波長可変レーザにより発生させた。二つのレーザの波長及び波長間隔は 0.831 nm とし、発生パルスの繰り返し周波数が 100 GHz に近くなるように設定した。レーザの波長は使用した HNL-DSF の非線形性が最も発生しやすい零分散波長付近に設定した。使用した二つの波長可変レーザ (Agilent8368F) は誘導ブリュアン散乱を抑圧するために内蔵された位相変調機能を作動させた。二つの信号光は偏波コントローラで同一偏波状態に調整され、溶融型カップで合波されたのち偏光子を透過する。そしてビート光はエルビウムファイバ増幅器で増幅された。また CDPF の 1 本目の DSF に入力する強度を誘導ブリュアン散乱発生限界値以下 (27.5 dBm) に設定した。図 3 は二つのレーザ光によって生成されたビートパルスの自己相関波形である。図 4 及び 5 に出力光のスペクトル波形と自己相関波形を示した。出力パルスの繰り返し周期は 104 GHz、相関波形の半値全幅 (Full-Width at Half-Maximum; FWHM) は 505 fs となり、パルス波形を sech 関数で表現されるソリトン型形状に換算した FWHM は 328 fs となった。また

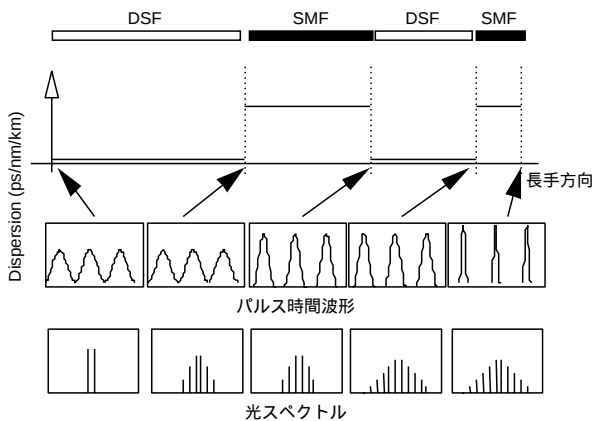


図 1 櫛形分散配置ファイバによるパルス圧縮過程 (DSF と SMF が 2 対の例)
Pulse compression process using comb-like dispersion profiled fiber

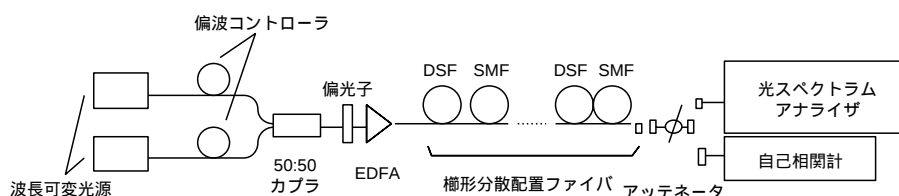


図 2 実験構成
Experimental setup

スペクトルプロファイルを sech^2 で fitting することにより求められた半値全幅は 7.59 nm であることから, sech 波形を仮定した場合のバンド幅パルス幅の積は 0.305 となった。また最終段出力パルスの duty 比は 0.034 であり, パルス周期-幅比 ($T/\Delta\tau$; T : パルス周期, $\Delta\tau$: 出力パルス幅) は 29.3 に達していることがわかる。

CDPF において高圧縮率を実現するためには, より多くの楕形セグメント対が必要であり構成は複雑になる。またビート変調光のピークでの非線形位相シフトは放物線に近く, SMF によるチャープ補償は直線性を持っている。したがってパルスの裾野は完全にはチャープが補償されず, ベDESTALノイズとし

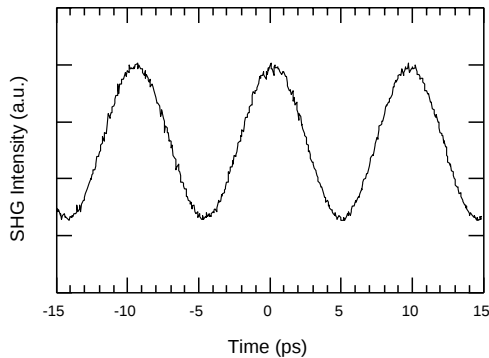


図3 ファイバ入力ビートパルス
Autocorrelation trace of fiber input beat pulse

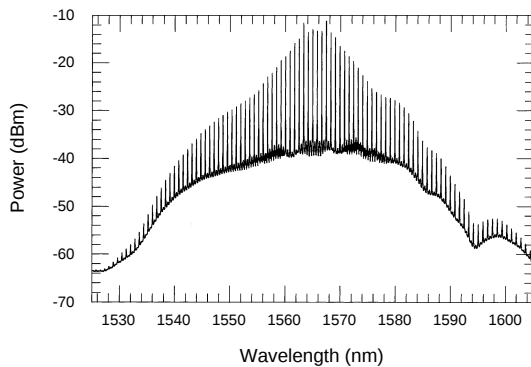


図4 出力光パルスの光スペクトル
Optical spectrum of output pulse

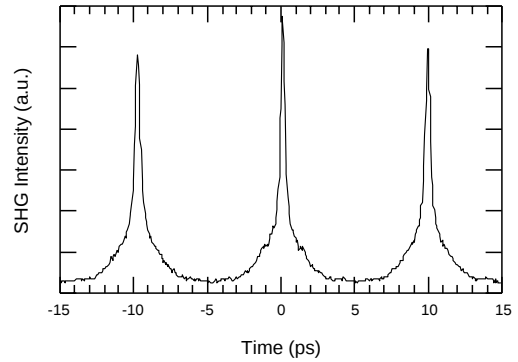


図5 出力光パルスの自己相関波形
Autocorrelation trace of output pulse

で残留することになる。図5に示されるようにパルスの裾野にはベDESTALノイズが存在していることが分かる。

4. DI-NOLMを用いたベDESTALノイズ抑圧 パルス光源

短パルスにおけるベDESTALノイズの除去には, DI-NOLM (Dispersion-Imbalanced Nonlinear Optical Loop Mirror) が有効である^{17), 18), 19)}。DI-NOLMは異なる分散特性を持つファイバで構成された Sagnac ループであり, DI-NOLM 内で二方向に分割されたパルスは非対称な分散構成のループにより周回方向でパルス広がり率が異なり, それにより生じるピークパワー変化で異なる非線形位相シフトを受ける。このループ中の伝搬特性により電場強度の時間微分に依存してパルス成分が分別される。そのためパルス中心部のみがループを透過し, ベDESTALは除去される。そこで5対のCDPFよりも更に簡潔な構成で図5に示されるパルスと同等なパルス圧縮を実現しつつ同時にベDESTALを抑圧の実現を目指した。その結果, 短尺の3対のHNL-DSFとSMFにより構成したDI-NOLMを含むCDPFによりビートパルス圧縮とベDESTALノイズ抑圧を同時に実現した²⁰⁾。

5. 実験構成と測定結果

実験構成図を図6に示す。HNL-DSFとSMFを用いてCDPFとファイバループを構成した。CDPFは2つのHNL-DSFと1つのSMFセグメントから成り, ループミラーは2つのSMFと1つのHNL-DSFセグメントから構成されている。このCDPFと

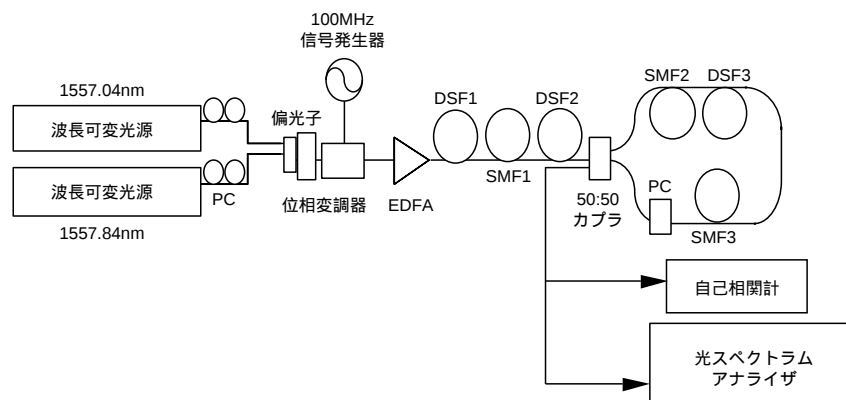


図6 実験構成図 (P.C.; 偏波コントローラ)
Experimental setup (P.C.; polarization controller)

DI-NOLMを構成するファイバの特性を表3に示した。用いたHNL-DSFのゼロ分散波長は1557 nm付近であり、その他の特性は表1と同様である。二波長ビート信号は二つの波長可変レーザ光源を用いて発生させた。二つの波長間隔はパルス列の繰り返し周期が100 GHzに近くなるように0.8 nmとし、各々の波長を1557.04 nmと1557.84 nmに設定した。二波長の強度は等しく設定し、その偏波状態が互いに平行で一致し位相変調器入力部に設置した偏光子の透過損失が最小になるように偏波コントローラで調整した。両波長光は溶融型カプラにより合波される。合波された光は誘導ブリュアン散乱の発生を防ぐために位相変調器で100 MHzの変調信号で位相変調される。その後ビート光はEDFAで増幅される。CDPFを構成する初段のDSFに入射するビート光強度は+27.7 dBmである。DI-NOLM中では、反時計回りのパルスの圧縮率は時計回りパルスの圧縮率よりも小さくなるように設計されている。そのためループ周回方向の違いにより非線形位相シフト量に差が生じる。SMF3の長さはペDESTALが最も抑圧されるように最適化されている。

表3 櫛形分散配置ファイバ長 (m)
Comb-like dispersion profiled fiber length

セグメント	1	2	3
DSF	200	100	62
SMF	91	7.5	0.3

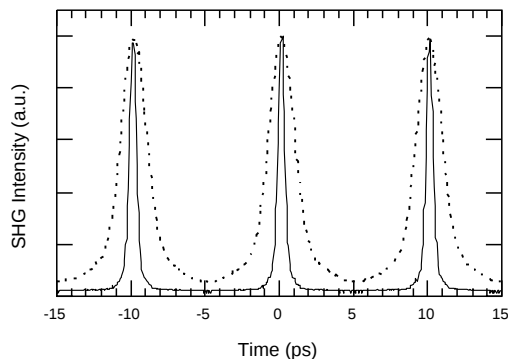


図7 DI-NOLM 入出力パルス自己相関波形 (点線; 入力パルス, 実線; 出力パルス)
Autocorrelation traces of DI-NOLM input and output pulses
Output pulse (solid line)
Input pulse (dashed line)

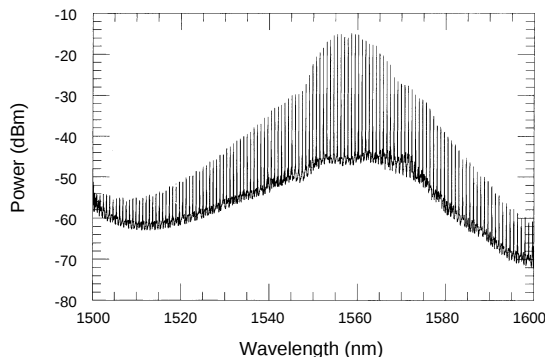


図8 DI-NOLM 出力パルス光スペクトル
Optical spectrum of DI-NOLM output pulse

ループ内を周回する両方向のパルス光の偏波状態は挿入損失のない偏波コントローラにより調整されている。DI-NOLMはCDPFの一部分を構成しているため、ファイバループミラーからの出力パルスは圧縮されかつ同時ペDESTALノイズが抑圧されている。

DI-NOLMにおける入力パルス (DSF2出力パルス) と出力パルスを図7に示した。またDI-NOLM透過後の出力パルスの光スペクトルを図8に示した。DI-NOLMからの出力パルスの繰り返し周波数は98.9 GHzであり、観測された自己相関波形のFWHMは587 fsであった。したがってsech²型パルスプロファイルを仮定した場合のパルス幅は380 fsと見積もられる。また図8のスペクトルピークをsech²関数でフィッティングしFWHMは1229 GHzと求められた。そのためパルス時間幅-スペクトル幅積は0.467となった。DI-NOLMの入力及び出力パルス波形を示す図7を比較すると、1.369 psであった入力パルスは出力で380 fsと圧縮比が3.6に達していることが分かる。また図9ではループミラーを時計回りで周回しSMF3から出力されるパルスとループミラー出力パルスの自己相関波形を比較している。SMF3からの出力パルスはしたがって直線的なCDPF構成からの出力に相当する。図9よりループミラーをCDPFの作用を成す一要素として構成することによりループミラーからの出力パルスに含まれるペDESTAL成分は直線構成のCDPFを透過した場合に比べ抑圧されており、パルスプロファイルはソリトン関数に近い形状に整形されていることがわかる。パルス周期-幅比 $T/\Delta\tau$ は26.6に達している。

6. おわりに

光ファイバの非線形性を利用し、40 Gbpsを越える超高速光伝送における全光信号処理に用いられる高繰り返し短パルス光源の開発を目指した。そして通常のDSFの約6倍の非線形光学係数を持つ高非線形DSFとSMFを利用し、全長693.6 mの短い櫛形分散配置ファイバを構成することにより、繰り返し周波数104 GHz、パルス幅328 fsのソリトンパルス列を発生することに成功し、パルス周期-幅比29.3を達成した。更にファイバ構成を簡略化しながらパルス圧縮率を維持しペDESTALノイズ

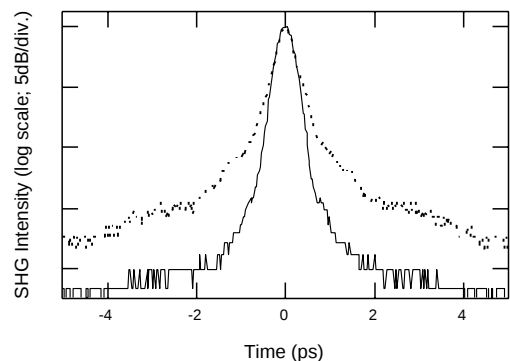


図9 ファイバループミラー出力パルス自己相関波形 (実線; ループミラー出力, 点線; DI-NOLM内反時計回り伝搬SMF3出力)
Autocorrelation trace of DI-NOLM output pulse
Loop mirror output (solid line)
SMF3 output clockwise propagation in the DI-NOLM (dashed line)

を除去するため、3対のHNL-DSFとSMFにより、短尺CDPFとDI-NOLMを構成した。この短尺CDPF-DI-NOLMを用い、ペDESTALを抑制した繰返し周波数100 GHz、パルス幅380 fsのパルス列を発生させた。この出力は5対の直線型CDPF出力と比較してよりペDESTALノイズが抑制されている。このような高繰返しピートパルス圧縮光源は光信号処理用光クロックとして有望であり、実用化に向けて時間的安定性、短パルス幅、低ノイズ性、小型化等が今後の課題となる。

最後に本研究を行うに当たり、HNL-DSFの作成を行って下さった、WFチーム八木 健主査、廣石治郎氏、熊野尚美氏、杉崎隆一氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) S.Kawanishi, H.Takara, T.Morioka, O.Kamatani, K.Takiiguchi, T.Kitoh and M.Saruwatari, "Single channel 400Gbit/s time-division-multiplexed transmission of 0.98ps pulses over 40km employing dispersion slope compensation" Electron. Lett., 32, 916 (1996)
- 2) G.Raybon, B. Mikkelsen, R-J. Essianbre, A.J.Stentz, T.N.Nielsen, D.W.Peckham, L.Hsu, L.Gruner-Nielsen, K.Dreyer, J.E.Johnson, "320Gbit/s single-channel pseudo-linear transmission over 200km of nonzero-dispersion fiber" in Optical Fiber Conference 2000., PD29(Baltimore U.S 2000)
- 3) 小川 洋, 荒平 慎, 加藤 幸雄, 国松 大介, "超高速モード同期半導体レーザ" 電子情報通信学会論文誌 J84-C No.1, 1(2001)
- 4) P.Franco, F.Fontana, I.Cristiani, M.Midrio and M.Romagnoli, "Self-induced modulational-instability laser" Opt. Lett. 20, 2009 (1995)
- 5) E.M.Dianov, P.V.Mamyshev, A.M.Prokhorov, and S.V.Chernikov, "Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers" Opt. Lett., 14, 1008(1989)
- 6) S.V.Chernikov, J.R.Taylor, P.V.Mamyshev and E.M.Dianov, "Generation of soliton pulse train in optical fibre using two cw singlemode diode lasers" Electron. Lett., 28, 931(1992)
- 7) A.V.Shipulin, D.G.Fursa, E.A.Golovchenko and E.M.Dianov, "High repetition rate cw fundamental soliton generation using multisoliton pulse compression in a varying dispersion fibre" Electron. Lett. 29, 1401(1993)
- 8) S.V.Chernikov J.R.Taylor and R.Kashyap "Experimental demonstration of step-like dispersion profiling in optical fibre for soliton pulse generation and compression" Electron. Lett., 30, 433 (1994)
- 9) S.V.Chernikov, J.R.Taylor and R.Kashyap, "Integrated all optical fibre source of multigigahertz soliton pulse train" Electron. Lett., 29, 1788(1993)
- 10) E.A.Swanson and S.R.Chinn, "40-GHz pulse train generation using soliton compression of a Mach-Zehnder modulator output" IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 114(1995)
- 11) 丸田章博, 崎村俊夫, 縣 亮, スタニスラフ チェルニコフ, 長谷川 晃, "櫛形分散配置ファイバを用いた誘導変調不安定ピコ秒光ソリトン光源" 信学技法, LQE97-10(1997)
- 12) A.Agata, R.Kurebayashi, A.Suzuki, A.Maruta and A.Hasagawa "Optical design of comb-like dispersion profiled fiber for picosecond optical soliton source and its application to dispersion managed soliton transmission" in OptoElectronics and Communications Conference, 1998 Technical Digest 190 (Makuhari, Japan, 1998)
- 13) A.Maruta, Y.Yamamoto, S.Okamoto, A.Suzuki, T.Morita, A.Agata, A.Hasegawa, "Effectiveness of densely dispersion managed solitons in ultra-high speed transmission" Electron. Lett. 36, 1947 (2000)
- 14) O.Aso, S.Arai, T.Yagi, M.Tadakuma, Y.Suzuki and S.Namiki, "Broadband four-wave mixing generation in short optical fibres" Electron. Lett., 36, 709 (2000)
- 15) J. Hiroishi, N. Kumano, K. Mukasa, R. Sugizaki, R. Miyabe, S. Matsushita, H. Tobioka, S. Namiki and T. Yagi, "Dispersion slope controlled HNL-DSF with high γ of $25 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ and band conversion experiment using this fiber" in European Conference on Optical Communication, 2002, PD 1.5.(Copenhagen, Denmark, 2002)
- 16) M.Tadakuma, O.Aso and S.Namiki, "A 104GHz 328fs soliton pulse train generation through a comb-like dispersion profiled fiber using short high nonlinearity dispersion shifted fibers" in Optical Fiber Conference, 2000 Technical Digest ThL3(2000)
- 17) A.L.Steele, "Pulse compression by an optical fibre loop mirror constructed from two different fibres" Electron. Lett., 29, 1971 (1993)
- 18) W.S.Wong, S.Namiki, M.Margalit, E.P.Ippen, and H.A.Haus, "Self-switching of optical pulses in dispersion-imbalanced nonlinear loop mirrors" Opt. Lett., 22, 1150(1997)
- 19) K.R.Tamura and M.Nakazawa, "Spectral-smoothing and pedestal reduction of wavelength tunable quasi-adiabatically compressed femtosecond solitons using a dispersion-flattened dispersion-imbalanced loop mirror" IEEE Photonics Technol. Lett., 11, 230(1999)
- 20) M.Tadakuma, O.Aso, M.Sakano, S.Namiki, "100GHz 380fs pedestal suppressed pulse train generation by incorporating dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror into short comb-like dispersion profiled fiber" in OptoElectronics and Communications Conference, 2002 Technical Digest 646 (Yokohama, Japan, 2002)