

シリカベース高非線形光ファイバとその応用技術

Silica-Based Highly Nonlinear Fibers and Their Applications

山本 義典*
Yoshinori Yamamoto

田村 欣章
Yoshiaki Tamura

長谷川 健美
Takemi Hasegawa

光ファイバ内で発生する非線形現象は、広帯域光発生、ファイバレーザ、光増幅、光信号処理、センサ、計測、分光など非常に多くの分野での応用が検討されており、シリカベース高非線形光ファイバ (HNLf) は、標準的なシングルモードファイバ (SMF) に比べて非線形性が10倍以上大きいことに加え、伝送損失やSMFとの接続損失が低いこと、高次分散を含めた波長分散特性の高精度制御が可能という利点を有しており、これらの用途に適した有望な媒体として期待されている。本稿では、各用途に合わせて当社が開発した各種シリカベースHNLfを紹介する。特に、HNLfの重要な特性である波長分散特性に関して、ゼロ分散波長がファイバ長さ方向に極めて安定なHNLf、4次分散を制御したHNLfについて述べる。また、波長分散の高精度測定技術についても述べる。加えて、HNLfを用いた最新の応用技術として、光周波数コムへの適用例を紹介する。

Silica-based highly nonlinear fibers (HNLfs) are promising platforms for a wide range of applications utilizing fiber nonlinearities, such as broadband light sources, fiber lasers, amplification, all optical processing, sensors, metrologies, and spectroscopies. The key challenges for their practical applications are tailoring the chromatic dispersion, including higher-order dispersion, as well as high nonlinearity, low fiber attenuation, and low splice loss to standard single mode fibers. This paper outlines our silica-based HNLfs, which are designed specifically for desired applications, featuring HNLf with a longitudinally uniform zero dispersion wavelength and HNLfs with optimized fourth-order dispersion. We also demonstrate an accurate chromatic dispersion measurement and present two types of optical frequency combs that use our silica-based HNLfs as application examples.

キーワード：高非線形光ファイバ、波長分散、光周波数コム

1. 緒言

シリカを材料とした光ファイバは、今日では世界中に張り巡らされており、指数関数的に増加を続ける通信トラフィックを支える情報通信インフラの根幹となっている。光ファイバに高いパワーの信号光を伝搬させると、四光波混合 (Four Wave Mixing: FWM)、自己位相変調 (Self-Phase Modulation: SPM)、相互位相変調 (Cross-Phase Modulation: XPM) などの非線形現象が発生する。これら非線形現象は、信号光の品質を劣化させ、伝搬できる情報容量の制限要因となるため、通信用光ファイバにおいては非線形現象は抑制することが望まれる⁽¹⁾。

一方で、光ファイバ中で生じる非線形現象を積極的に利用した応用技術も注目を集めている。非線形現象をより効率良く発現させるのに適した光ファイバとして、シリカベースの高非線形光ファイバ (Highly Nonlinear Fiber: HNLf) が開発されており^{(2)~(4)}、ファイバレーザ、広帯域・低雑音光増幅、スーパーコンティニューム (Supercontinuum: SC) 光源、光信号処理、歪・温度センサ、周波数/時間/長さ計測、近赤外分光といった、様々な応用技術への適用がなされている⁽⁵⁾。

HNLfをこれら様々な用途に適用するためには、非線形性が高いこと、ファイバ損失や接続損失が低いことに加え

て、波長分散^{*1}特性が用途に応じて適切に制御されていることが重要である。本稿では、各用途に応じて当社がこれまでに開発してきたシリカベースHNLfを紹介するとともに、波長分散の高精度測定技術、ファイバ長さ方向の安定性、および、高次分散を含めた波長分散特性の制御について述べる。さらに、HNLfを用いた応用技術として最近注目が集まっている光周波数コム^{*2}への適用例も合わせて紹介する。

2. シリカベース高非線形光ファイバ

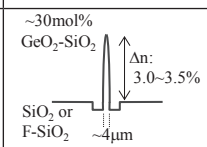
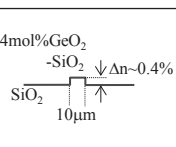
シリカガラス自体は、非線形性が本質的に小さい材質であるが、光ファイバの場合、実効断面積 A_{eff} が数十 μm^2 以下という狭いコア領域に光パワーが閉じ込められるためパワー密度が高く、かつ、物質と光との相互作用長が長いことから、容易に非線形現象が発現する。光ファイバの非線形性の大きさを示す指標である非線形係数 γ は、下式 (1) で表される。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n_2 と λ はそれぞれ非線形屈折率と波長である。

表1には、HNLFと、比較例として標準的なSMFについて、屈折率分布および光学特性の典型値を示す。HNLFには、直径約4μmという狭いコア領域に二酸化ゲルマニウム(GeO₂)が高濃度に添加されており、コアとクラッドとの比屈折率差Δnがおよそ3%と、SMFに比べて約10倍高いのが特徴である。これにより、HNLFのn₂はSMFの約2倍、A_{eff}はSMFの約1/8であり、その結果γが20~30/W/kmと、SMFの16倍以上に拡大されている。なお、γは線形偏波状態におけるXPM法での測定値を示しており⁽⁶⁾、以降も同様である。また、HNLFはディプレストクラッド型屈折率分布を採用しており、高い非線形性を保ちつつ使用波長においてシングルモード動作を担保するとともに、波長分散の高い設計自由度を有している。

表1 HNLFおよびSMFの屈折率分布と光学特性

	HNLF	SMF
屈折率分布		
非線形屈折率n ₂ [×10 ⁻²⁰ m ² /W]	5~6	3
A _{eff} [μm ²] ^(*)	8.5~11	80
非線形係数γ [1/W/km]	20~30	1.5
ファイバ損失α [dB/km] ^(*)	0.5~2	0.2
ゼロ分散波長λ ₀ [nm]	1450~1650	1300~1320

*: 波長1550nmにおける値

ここで、光ファイバ中で発生する非線形現象の一つであるFWMの発生効率、γ、実効長L_{eff}、励起光パワーP_{pump}に対して、(γ×L_{eff}×P_{pump})²に比例することが知られている。従って、FWMをより効率良く発生させるには、γが高いことに加えて、L_{eff}、P_{pump}が大きいこともまた求められる。実効長L_{eff}はファイバ長Lとファイバ損失αを用いて下式(2)で表され、ファイバ損失が低いほど、同じファイバ長に対して実効長を長くすることができる。

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

また、励起光パワーP_{pump}に関しては、一般に励起光レーザはSMFピグテールから出力されるため、HNLFとSMFとの接続損失が低いことが望ましい。これまでに当社は、γ=30/W/kmとシリカベースHNLFでは最大の非線形性を有しつつ、ファイバ損失が0.9dB/kmと比較的に低いHNLFを実現している^{(3), (7)}。このHNLFは、SMFとの融着接続損失も0.1dB程度と低く、FWMを効率良く発生させるのに適したHNLFである。

なお、シリカガラスよりもγが二桁程度大きい非シリカ系のガラスを用いたファイバもこれまでに開発がされているが⁽⁸⁾、シリカベースHNLFは、低いファイバ損失、高い波長分散の制御性、SMFとの低い接続損失、高信頼性、高耐久性といった利点があることから最も広く使用されており、実用に適した非線形媒体であると考えられる。

3. 波長分散特性の制御

3-1 各用途に適した波長分散特性

HNLFにとってもう一つの重要な特性が、波長分散である。HNLFを様々な用途に適用するためには、それぞれの用途に応じた適切な波長分散特性が求められており、波長分散の高い制御性がシリカベースHNLFの大きな特長である。表2には、これまでに当社が開発した各種シリカベースHNLFの代表的な光学特性をまとめた。また、図1には4種類のシリカベースHNLFの代表的な波長分散特性を示す。Type-Iは、波長1550nm付近の通信波長帯において小さな正の波長分散を有することから、効率的にソリトンを発生でき、広帯域なSC光発生への適用が可能である⁽⁹⁾。一方、Type-IIやType-IIIは、波長分散がゼロとなる波長(ゼロ分散波長)が通信波長帯の中にあり、FWMやXPMを高効率で発生できることから、波長変換^{(10), (11)}やパラメトリック増幅⁽¹²⁾などの応用に適している。特にType-IIIは、通信波長帯で分散スロープがほぼゼロであることから

表2 各種シリカベースHNLFの代表的な光学特性

	A _{eff} ^(*) [μm ²]	γ ^(*) [1/W/km]	ファイバ損失α ^(*) [dB/km]	波長分散のタイプ (図1)	ゼロ分散波長 [nm]	分散スロープ ^(*) [ps/nm ² /km]	β ₄ [×10 ⁻⁵⁵ s ² /m]
HNLF-A	11	20	0.6	Type-I, II	1450~1620	+0.03	-1
HNLF-B	8.5	30	0.9			+0.02	+1
HNLF-C	9.5	25	1.0			+0.025	+0.2
HNLF-D	12	18	1.3			+0.05	-2
HNLF-E	9.5	25	13			+0.015	+2
HNLF-F	16	10	0.5	Type-III	-	< 0.005	+4
HNLF-G	10	21	0.5	Type-IV	^(*) 3	+0.01	-

*1: 波長1550nmにおける値

*2: ゼロ分散波長における値

*3: 波長分散~-15ps/nm/km at 1550nm

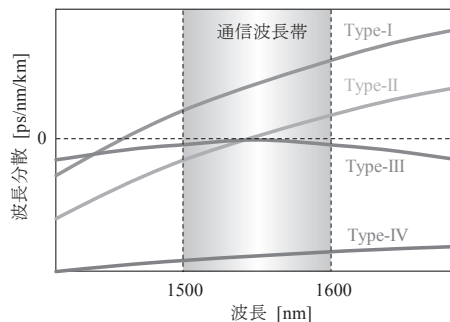


図1 各種シリカベースHNLFの代表的な波長分散特性

分散フラットHNLFと呼ばれ、広い波長範囲に亘って群遅延差を小さく抑えられるという利点がある⁽¹³⁾。Type-IVは、大きな負の波長分散を持ち、信号光間のFWMやXPMを抑えることができ、集中定数型ラマン増幅への適用が期待される⁽¹⁴⁾。

3-2 波長分散の高精度測定

各用途に応じて適切な波長分散を持ったHNLFを適用するためには、その波長分散を正確に測定することもまた重要である。しかし、一般にHNLFは使用する長さが短く、また、波長分散の絶対値が小さいため、従来の測定法(位相法)では波長分散を正確に測定することは困難であった。そこで我々は、FWMの発生効率が極大、極小となる波長が周期的に表れることを利用して、波長分散を測定する手法を提案した⁽¹⁵⁾。図2には、長さ1,000mおよび50mのHNLFに対して、提案手法(FWM法)と従来の位相法を用いて波長分散を測定した例を示す。50mと短いHNLFの場合、位相法では測定ばらつきが大きくなってしまふのに対して、FWM法では高精度に波長分散を測定できることがわかる。また、本手法を用いて、HNLFの γ を測定できることも報告している⁽¹⁶⁾。

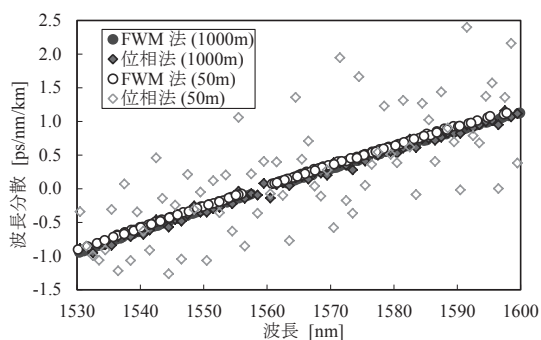


図2 FWM法および位相法による長さ1,000mおよび50mのHNLFの波長分散測定結果

3-3 波長分散の長手安定性

非線形現象の一つであるFWMは、光ファイバ中にプローブ光(信号光)と、高パワーの励起光を入射したときに、それらの周波数差と同じだけ離れた周波数に変換光(アイドラ光)が発生する現象であり、波長変換など多くの用途に活用されている。FWMにおいては、プローブ光、励起光、変換光の間で位相整合条件が満たされる場合、変換光は常に同位相で足し合わされるため、発生効率が高くなる。一般的には、励起光波長がHNLFのゼロ分散波長と一致する場合に広いプローブ光波長の範囲で位相整合条件が満たされ、FWM変換帯域(変換効率が1/2以上となるプローブ光の波長幅)を広くできると考えられる。ここで、光ファイバの通常の使用状況では、その構造は長さ方向に

一様だと見なせる場合が多いが、厳密には微小な構造の揺らぎがある。これによりゼロ分散波長が長さ方向に変動すると、FWM変換帯域が悪化してしまう。従って、光ファイバの長さ方向のゼロ分散波長の変動を可能な限り抑えることが求められる。この課題に対し、我々は、当社が長年培ってきた伝送用光ファイバ製造技術を適用することで、HNLFの構造変動の抑制を実現した。図3には、作製した長さ3kmのHNLFの長さ方向におけるゼロ分散波長の変動を測定した結果を示す。ゼロ分散波長の変動が長さ3km全長に亘って±1nm以下に抑えられていることを確認した⁽³⁾。これは、コア直径の変動に換算すると±0.03%以下の変動に相当し、代表的なHNLFのコア直径が約4 μ mであることから、コア直径にして±1.2nm以下というごく僅かな変動でしかない。この変動がいかに小さなものであるかを示すため、図4にシリカガラスの構造を概略的に示した。シリカガラスは、ケイ素と酸素(Si-O)の六員環を1単位とした構造を持つが、この六員環の大きさがおよそ0.6nmと言われている。すなわち、ファイバ長3kmに亘るコア径変動が六員環僅か2つ分に相当しており、極めて優れた安定性を有していることがわかる。

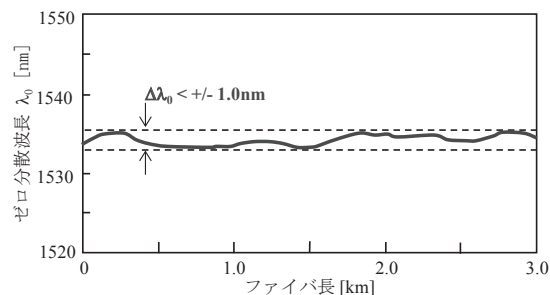


図3 長さ3kmのHNLFにおけるゼロ分散波長の長手変動の測定結果

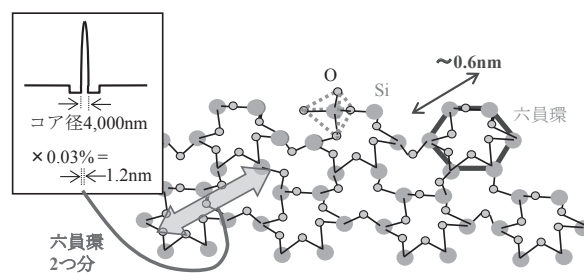


図4 シリカガラスの構造の概略図

3-4 高次分散の制御

FWM変換帯域をさらに拡大するためには、波長分散だけでなく、高次の分散特性の制御が重要となる。4次分散

項まで含めた位相整合条件を導出すると、位相整合条件からのずれ(位相不整合量) $\Delta\beta$ は、次式(3)で表される。

$$\Delta\beta = -\beta_2 \cdot 4\pi^2 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{\text{pump}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{probe}}} \right)^2 - \beta_4 \cdot \frac{4}{3} \pi^4 c^4 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{\text{pump}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{probe}}} \right)^4 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 λ_{pump} 、 λ_{probe} はそれぞれ励起光波長、プローブ光波長である。また、 β_2 、 β_4 はそれぞれ λ_{pump} における2次分散、4次分散であり、 c は真空中の光速である。ここで、励起光波長がゼロ分散波長と一致、すなわち $\beta_2=0$ であっても、高次の分散項である β_4 はゼロではないため、式(3)において $\Delta\beta=0$ にはならない。従って、 β_4 を低減することができれば、広いプローブ光波長において $\Delta\beta \sim 0$ を満たすことができ、FWM変換効率の拡大が可能と考えられる⁽¹²⁾。我々は、 $\beta_4=0.2 \times 10^{-55}$ [s⁴/m]と、標準的なHNLF-Aに比べて β_4 が一桁小さいHNLF-Cを開発した。図5には、HNLF-Cと標準的なHNLF-Aそれぞれ長さ100mにおけるFWM変換効率の測定結果を示す。HNLF-AにおけるFWM変換帯域が100nm程度であるのに対して、HNLF-Cでは220nmと2倍以上のFWM変換帯域を実現しており⁽³⁾、⁽¹⁰⁾、広帯域な波長変換が可能である。

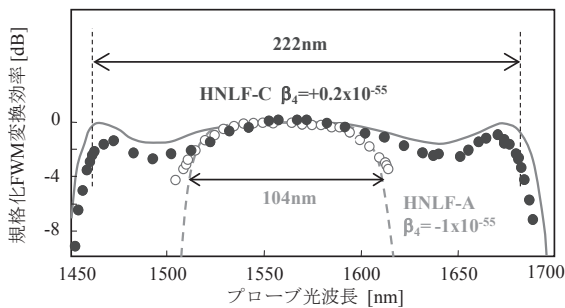


図5 HNLF-CおよびHNLF-AにおけるFWM変換効率 (●, ○: 測定結果、実線: 数値計算結果)

一方、 β_2 が正で β_4 が負で大きい場合には、ある特定の λ_{probe} においてのみ $\Delta\beta \sim 0$ となることもまた式(3)から予測される。すなわち、特定の波長のプローブ光のみを選択的に波長変換するといった応用が可能になると考えられる。これを可能にするべく開発したのがHNLF-Dであり、その β_4 は符号が負で、大きさはHNLF-Aの二倍と大きい。このHNLF-D100mを用いて、FWM変換効率を測定した結果を図6に示す⁽¹¹⁾、⁽¹⁷⁾。ここで、HNLF-Dのゼロ分散波長は1528nmである。 λ_{pump} を1527.2nmに設定した場合、波長1600nm付近でのみ波長変換できることを確認し

た。さらに、 λ_{pump} を1527nm、1526.8nmへと変えると波長変換するプローブ光波長は1610nm、1620nmへと変化することがわかる。僅か0.2nmの励起光波長の変化で、波長変換するプローブ光波長を10nmシフトさせることができおり、選択的な波長スイッチなどへの適用が望まれる。

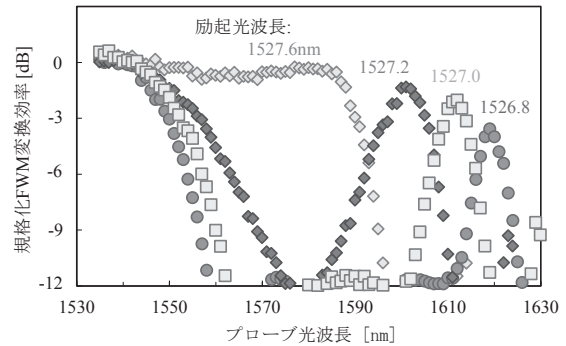


図6 HNLF-DにおけるFWM変換効率

4. シリカベース高非線形光ファイバの応用技術例

本章では、シリカベースHNLFの応用技術のうち、特に注目が集まっている光周波数コムへの適用例を紹介する。光周波数コムは古くから研究が行われてきたが、近年では大容量・波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)通信用の多波長光源への適用や、天文学においては系外惑星探索への適用も盛んに検討がなされている。

WDM通信用多波長光源については、分散フラットHNLF(図1のType-III)を用いた光周波数コムが提案されている⁽¹⁸⁾。ここでは、種光として連続光レーザを用いており、位相変調器の変調周波数を設定することで、周波数間隔を変化させることができる。図7には、周波数間隔を100GHzとしたときの出力光スペクトル例を示す。分散フラットHNLFを用いることで、100nm以上の広い波長

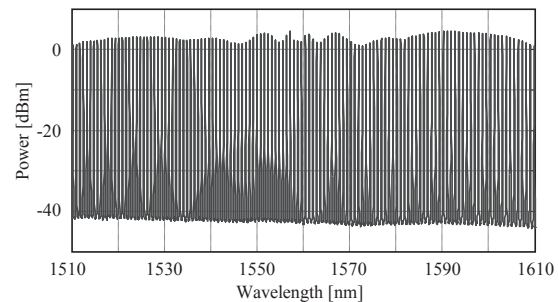


図7 光周波数コム光源の出力スペクトル例 (カリフォルニア大学サンディエゴ校Radic教授よりご提供)

帯域に亘ってパワーが平坦な100チャンネル以上の多波長光を得ている。また、狭線幅(10kHz)、低ノイズ(相対強度雑音が-140dB/Hz以下)、高い周波数安定性(変動が10MHz)など、商用のデジタルコヒーレント通信用光源と比較しても、同等またはより優れた品質を有している。この光周波数コム光源を用いて発生させた399チャンネルのWDM信号光を、当社で開発した22コアシングルモードマルチコアファイバ31kmに渡って伝送させた実験結果が報告されている⁽¹⁹⁾。2015年時点でファイバ1本あたりの伝送容量の最高記録となる2.15Pbit/sを実現しており、将来の超大容量光伝送への適用が期待される。

一方、天文学においては、太陽系以外に地球と同程度の大きさの惑星を探したい、というのが最近の重要なテーマの一つとなっており、ここでも光周波数コムの適用が検討されている。系外惑星を探索する際には、星光を超大型望遠鏡で集め、そのスペクトル吸収線を分光器によって測定するが、高い周波数安定度を持つ光周波数コムを同時に分光器に導入することで、スペクトルを精確に測定するための「基準」として用いている。

このような系外惑星探索用の光周波数コムには、極めて高い性能が要求される。近赤外領域において大気の影響が小さく、光の透過率の高い波長域であるY、J、Hバンド(970-1750nm)をカバーする超広帯域が要求されるとともに、分光器の分解能の数倍以上となる10GHz以上の広い周波数間隔が必要となる。このような広い周波数間隔の場合、種光のピークパワーが比較的小さくなってしまいうので、広帯域化が難しいのが課題であった。そこで、ゼロ分散波長が1325nmと短いHNLFを新規に開発し、ゼロ分散波長が1430nmのHNLFと縦続接続させることで、短波長側のコム発生帯域を拡大し、周波数間隔が12.5GHzで波長範囲が1040~1750nmという超広帯域の光周波数コムの発生に成功した⁽²⁰⁾。これにより、新しい天文観測の開拓にも資することを期待する。

5. 結 言

当社で開発しているシリカベースHNLFを紹介した。シリカベースHNLFは、長手方向の構造安定性、高次分散を含めた波長分散特性の高い制御性、低ファイバ損失、低接続損失などの利点を有しており、非線形現象を用いた応用技術の有望な媒体である。今後も、多くの実用的な用途への適用が期待される。

6. 謝 辞

HNLFの応用技術について有益なご議論を頂くとともに、光周波数コム光源の出力スペクトルの図をご提供頂いた米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 Stojan Radic 教授、Nikola Alic 博士、Bill Kuo 博士に感謝いたします。

用語集

※1 波長分散

光ファイバ中を光が伝搬する際の、波長による伝搬時間の差を表す指標。一般に、「波長が1nm異なる光が光ファイバを1km伝搬したときの遅延時間差 [ps]」で定義される。波長分散Dと二次分散 β_2 とは、 $D = -(2\pi c / \lambda^2) \times \beta_2$ の関係にある(c:真空中の光速、 λ :波長)。また、波長に対する波長分散の傾きが分散スロープであり、さらに分散スロープの波長依存性が4次分散である。

※2 光周波数コム

周波数軸上に等間隔に並んだスペクトル成分を持つ櫛(Comb)型のスペクトルを持つ多波長光。高い周波数精度を持つことから、時間/周波数/長さ計測や分光などへの適用が古くから検討されている。一般に、非線形媒質に単一または少数波長の種光を入力することで発生する。

参 考 文 献

- (1) P. P. Mitra and J. B. Stark, "Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications," *Nature*, 411, pp. 1027-1030 (June 2001)
- (2) M. Hirano, T. Nakanishi, T. Okuno, and M. Onishi, "Silica-Based Highly Nonlinear Fibers and Their Applications," *J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol.15, no.1, pp.103-113 (January/February 2009)
- (3) M. Onishi, "New nonlinear fibers with application to amplifiers," OFC2004, paper TuC3, Los Angeles, USA (February 2004)
- (4) M. Takahashi, R. Sugizaki, J. Hiroishi, M. Tadakuma, Y. Taniguchi, and T. Yagi, "Low-Loss and Low-Dispersion-Slope Highly Nonlinear Fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no.11, pp.3615-3624 (November 2005)
- (5) M. Vasilyev, Y. Su, and C. McKinstrie, "Introduction to the Special Issue on Nonlinear-Optical Signal Processing," *J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol.14, no.3, pp.527-528 (May/June 2008)
- (6) T. Kato, Y. Suetsugu, M. Takagi, E. Sasaoka, and M. Nishimura, "Measurement of the nonlinear refractive index in optical fiber by the cross-phase-modulation method with depolarized pump light," *Opt. Lett.*, vol.20, no.9, pp.988-990 (May 1995)
- (7) T. Nakanishi, M. Hirano, T. Okuno, and M. Onishi, "Silica-based highly nonlinear fiber with $\gamma = 30$ /W/km and its FWM-based conversion efficiency," OFC2006, paper OTuH7, Anaheim, USA (March 2006)
- (8) L. Fu, M. Rochette, V. Ta'eed, D. Moss, and B. Eggleton, "Investigation of self-phase modulation based optical regeneration in single mode As_2Se_3 chalcogenide glass fiber," *Optics Express*, vol.13, no.19, pp.7637-7644 (September 2005)
- (9) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, and M. Nakazawa, "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," *Optics Express*, vol.14, no.12, pp.5223-5231 (June 2006)
- (10) M. Hirano, T. Nakanishi, T. Okuno, and M. Onishi, "Broadband Wavelength Conversion over 193-nm by HNL-DSF Improving Higher-order Dispersion Performance." ECOC2005, paper TH.4.4.4, Glasgow, UK (September 2005)
- (11) M. Hirano, T. Nakanishi, T. Okuno, and M. Onishi, "Selective FWM-based Wavelength Conversion Realized by Highly Nonlinear Fiber," ECOC2006, paper TH.1.3.5, Cannes, France (September 2006)

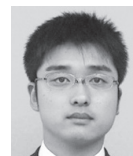
- (12) S. Radic, "Parametric amplification and processing in optical fibers," *Laser & Photonics Reviews*, vol.2, no.6, pp.498-513 (December 2008)
- (13) T. Okuno, M. Hirano, T. Kato, M. Shigematsu, and M. Onishi, "Highly nonlinear and perfectly dispersion-flattened fibres for efficient optical signal processing applications," *Electron. Lett.*, vol.39, no.13, pp.972-974 (June 2003)
- (14) T. Miyamoto, M. Tanaka, J. Kobayashi, T. Tsuzaki, M. Hirano, T. Okuno, M. Kakui, and M. Shigematsu, "Highly nonlinear fiber-based lumped fiber Raman amplifier for CWDM transmission systems," *J. Lightw. Technol.*, vol.23, no.11, pp.3475-3483 (November 2005)
- (15) M. Hirano and T. Sasaki, "Straightforward Chromatic Dispersion Measurement Based on Phase Mismatching FWM," *ECOC2009, Paper 4.1.6, Vienna, Austria* (September 2009)
- (16) G. Huang, Y. Yamamoto, M. Hirano, A. Maruta, T. Sasaki, and K. Kitayama, "Straightforward method for measuring optical fiber's nonlinear coefficient based on phase mismatching FWM," *Optics Express*, vol.21, no.17, pp.20463-20469 (August 2013)
- (17) B. P.-P. Kuo, M. Hirano, and S. Radic, "Continuous-wave, short-wavelength infrared mixer using dispersion-stabilized highly nonlinear fiber," *Optics Express*, vol.20, no.16, pp. 18422-18431 (July 2012)
- (18) V. Ataie, E. Temprana, L. Liu, E. Myslivets, B. P.-P. Kuo, N. Alic, and S. Radic, "Ultrahigh Count Coherent WDM Channels Transmission Using Optical Parametric Comb-Based Frequency Synthesizer," *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no.3, ppp.694-699 (February 2015)
- (19) B. J. Puttnam, R. S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano and J. Marciante, "2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single-Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb," *ECOC2015, PDP.3.1, Valencia, Spain* (September 2015)
- (20) K. Kashiwagi, T. Kurokawa, Y. Okuyama, T. Mori, Y. Tanaka, Y. Yamamoto, M. Hirano, "Direct generation of 12.5-GHz-spaced optical frequency comb with ultrabroad coverage in near-infrared region by cascaded fiber configuration," *Optics Express*, vol.24, no.8, pp.8120-8131 (April 2016)

執筆者

山本 義典* : 光通信研究所 主席



田村 欣章 : 光通信研究所



長谷川 健美 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者