

研究の概要

広帯域光波の創生制御の研究

光機能物質研究室

大石 泰丈, 鈴木 健伸

本研究では, 我々の開発した高非線形ガラスを用いた微細構造光ファイバ技術を基に高精度な分散制御やバンドギャップ構造による輻射場の制御も取り入れ, ガラス材料導波路素子による紫外から遠赤外域亘る超広帯域スーパーコンティニューム光の発生, 波長変換に代表される光パラメトリック効果を利用した高効率光信号処理で超低消費電力ネットワーク技術構築バイス, さらには量子情報通信に必要な相関光子対生成や単一光子光源の実現を目指した. さらに, 太陽光励起ファイバレーザーの実現による太陽光エネルギーの新規な変換技術の開拓を行った.

(1) 微細構造光ファイバの開発

ロッドインチューブ法とスタッキング法を組み合わせた独自の高非線形ガラスを素材とした微細構造光ファイバ(MOF: Microstructured Optical Fiber, (フォトニッククリスタルファイバとも呼ばれるが以下では MOF と呼ぶこととする.))作製法を開発した. また, 新規ガラス素材も開発しコアとクラッドの成分の異なる, たとえば, テルライトガラスコア/フォスフェイトガラスクラッド, カルコゲナイドガラスコア/テルライトガラスクラッド等のハイブリッド微細構造光ファイバ(ハイブリッドMOF)を世界に先駆けて実現し, 従来困難であった光通信帯域を含む可視から近赤外域で波長分散の零・平坦化等を可能とする構造を解明した.

また, ファイバ強度を確保したテルライトナノファイバの実現に初めて成功し, また光通信帯域での単一モード動作を実現した. また非線形定数を石英 MOF の約 300 倍の $31.4\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ にまで向上した. (Nature Photonics, vol. 5, p. 463, 2011 で注目研究として紹介された.) 図 1 に実現した微細構造光ファイバの構造例を示す.

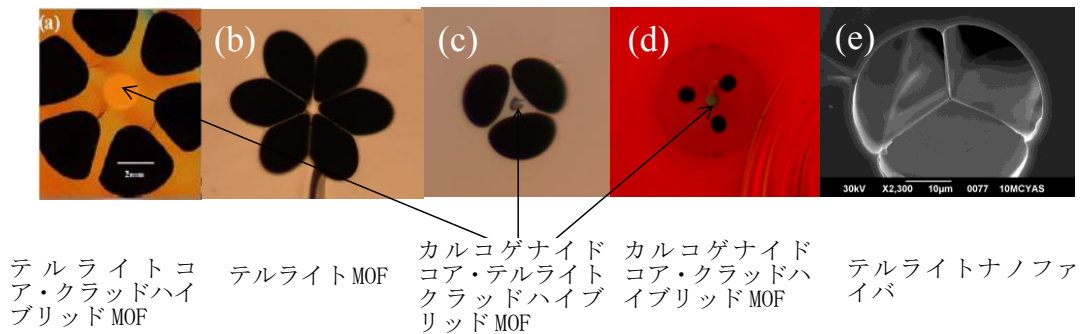


図1 高非線形ハイブリッド MOF およびナノファイバ

(2) 光パラメトリック増幅

四光波混合は、パラメトリック増幅、波長変換、波形整形等の光信号処理やパラメトリック発振によるコヒーレント光の発生に応用される高非線形光ファイバの重要な非線形現象である。テルライトガラスやカルコゲナイドガラス MOF による広帯域四光波混合の可能性を検討した。

その結果、コアガラスとして $\text{TeO}_2\text{-Li}_2\text{O-WO}_3\text{-MoO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 、クラッドガラスとして $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ を開発し、テルライトガラスコア/フォスフェイトガラスクラッドのハイブリッド MOF 構造による波長分散制御により、石英ファイバでは不可能な 1.29 から 2.49 μm に亘る帯域 1.2 μm もの超広帯域な増幅帯域が実現できることを初めて明らかにした。

また、1560nm に零分散波長をもつテルライト MOF の作製した。同 MOF を 1554nm でパルス励起して 104 dB の高利得を確認することに成功した (図 2)。また 300nm を超える増幅帯域が見込まれ (図 2)、200nm 程度の増幅帯域を有する石英光ファイバと比較するとテルライト MOF ではより高利得広帯域パラメトリック増幅が実現可能であることが実証でき、テルライト MOF が優れた光パラメトリック増幅媒体になることを初めて示すことができた。

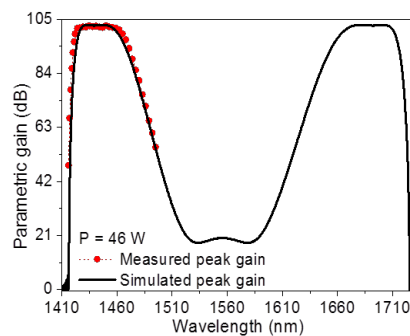


図2 テルライト MOF の光パラメトリック増幅特性

(3) 広帯域スーパーコンティニューム光の発生

●遅延ラマン応答特性の解明

長波長域への SC (Supercontinuum:スーパーコンティニューム) 光の拡張には SSFS (Soliton Self Frequency Shift:ソリトン自己周波数シフト) が主要な役割を果たす。そのため、解析には、MOF 媒体の遅延ラマン応答特性の理解が不可欠となる。石英ファイバでは、遅延ラマン応答は知られている。しかし、テルライトガラス等の多成分ガラスでは、知られていない。そこでその解明を初めて行った。

遅延ラマン応答 (図 3) は、ガラスの各ラマンモードによる遅延の総和で表わされることを明らかにした。また、得られたラマン応答を使いテルライト MOF 中の SSFS を再現でき、テルライトファイバ中の光パルス伝搬が精密に解析できることを明らかにした。また、カルコゲナイドファイバやフッ化物ファイバの遅延ラマン応答も初めて明らかにした。その結果、これまで困難であったこれら素材の非線形導波路中での非線形シュレディンガー方程式による SC の高精度解析を初めて可能にした。テルライトファイバでは、SSFS は石英ファイバと比較してほぼ 2 倍のシフト量があり、広帯域 SC 光発生に有効であることを明らかにした。また、フッ化物ファイバにおいても石英ファイバに比較して大きな SSFS が得られ、SC 光が紫外から $8\mu\text{m}$ に及ぶ中赤外域に発生できることを明らかにした。

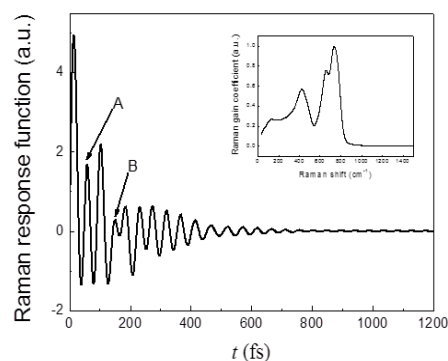


図 3 テルライトファイバの遅延ラマン応答特性

●テルライト MOF による SC 光発生

ファイバ径を長手方向で変化させ波長分散を変化させた所謂テーパー構造をとることにより波長分散をファイバ長手方向に変化させると発生した光波間で位相整合が満たされやすくなり、四光波混合が起きやすくなる。その結果、SC 光スペクトルが広がりやすくなる。テルライト MOF のテーパー化に成功し、従来 1 オクターブの帯域であったテルライト MOF の SC スペクトルを平坦化されたスペクトル形状で 600 から 2800nm の 2 オクターブ以上の帯域に拡大した (図 4)。テルライト MOF による可視から中赤外域亘る平坦化された SC 光の発生に成功したのは初めてである。

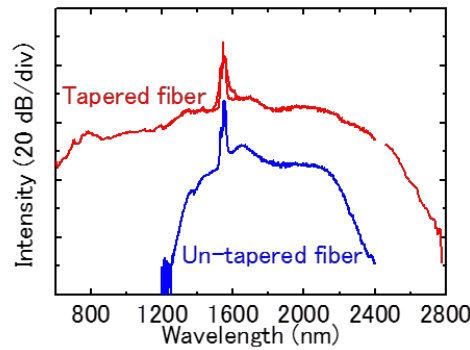


図4 テルライトファイバのSCスペクトル

●カルコゲナイドMOFによるSC光発生

1. $55\ \mu\text{m}$ 帯の近赤外域で励起するとカルコゲナイドファイバの吸収損失の高い可視域にTHG (Third Harmonic Generation) が発生して、カルコゲナイドMOFの損失を急激に上昇させることを見出した。そのため、零分散波長を $2\ \mu\text{m}$ 以上の波長に設定し、また励起波長もより長波長に設定することにより、THGが発生しても吸収損失の低い波長域に発生させ、光劣化による損失増加の抑制を試みた。零分散波長を $2.2\ \mu\text{m}$ に設定したカルコゲナイドMOFを実現し波長 $2.3\ \mu\text{m}$ で励起して、 1.37 から $5.65\ \mu\text{m}$ に亘るSC光の発生を確認することに成功した。また、光劣化による損失の急激な増加も抑制できた。このSC光は、発表当時カルコゲナイドMOFでこれまで報告されたもののなかで最も広帯域なものである。さらに As_2Se_3 をコアとするカルコゲナイドファイバにより $10\ \mu\text{m}$ に及ぶSC光の発生を確認に初めて成功した (図5)。

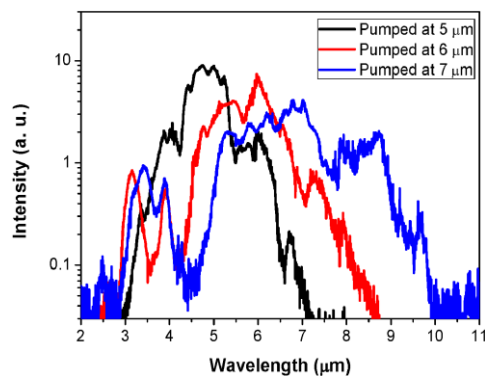


図5 カルコゲナイドファイバのSCスペクトル

●フィラメンテーションによるSC光発生

透明媒質中に高強度の短パルス光を入射すると光カー効果による光の集束現象とプラズマ発生による屈折率低下による光ビームの発散効果がつりあい、自己導波路形成 (所謂フィラメンテーション) が起こることが知られている。この現象を利用すると導

波路を人工的に形成することなしにその素材の SC 光発生媒質としての極限特性を検証できると考えられる。テルライトガラスは 0.4 から 6 μm に亘り透明であり，フッ化物ガラスは 0.2 から 8 μm に亘り透明である。現在，この透過域全体に亘り SC 光を現実発生できるかが課題である。ファイラメンテーションを利用した SC 光の発生を検討した。テルライトガラスの場合，0.6 μm から 6 μm に亘る SC 光の発生を確認することができた。また，フッ化物ガラスでは，0.2 μm から 8 μm に亘る 5 オクターブ以上の SC 光の発生に成功した (図 6)。3 dB 帯域は 1.15-4.76 μm であり，20 dB 帯域は 0.39-7.4 μm であった。

このようにテルライトでは赤外吸収端に及ぶ SC 光が発生し，フッ化物ガラスでは紫外吸収端から赤外吸収端に亘る SC 光が発生することが確認できた。光透過域全体で SC 光が発生し得ることを実証したのは世界で初めてである。また， As_2Ae_3 カルコゲナイドガラス中では 13 μm にまで SC 光が拡張することを確認し，それら素材が広帯域，特に中赤外 SC 光発生に有効な素材であることを実証した。

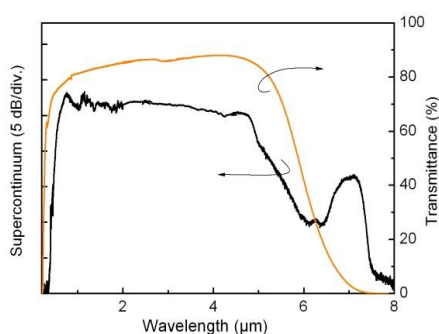
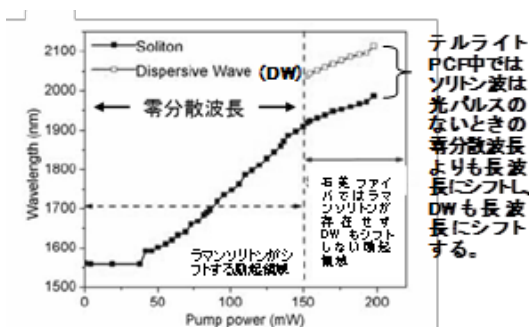


図 6 ファイラメンテーションにより発生したテルライトガラスの SC スペクトル



石英ファイバでは零分散波長までソリトン波はシフトするが，より長波長には移動しない。また，DW もシフトしない。テルライト MOF では，励起光強度が上がると屈折率が変化するため，零分散波長が長波長に移動するので，両波ともさらに長波長に移動する。

図 7 テルライト MOF の動的導波路特性制御

(4) MOF の動的伝搬特性制御

石英ファイバの場合，非線形性が小さいので，コア径が小さな MOF に短パルスを伝搬させても，光カー効果による屈折率変化に伴う導波路特性 (波長分散特性) の変化は，ほとんど起きない。しかし，テルライト MOF の場合，非線形性が格段に大きくなるため波長分散特性の変化は顕著となると考えた。異常分散領域に短パルスを入射させるとソリトン波はラマン利得による自己周波数シフトにより長波長域にシフトする。しかし，石英ファイバでは零分散波長に到達するとソリトンのシフトは止まる。また，ソリトン波により発生した分散波は零分散波長の正常分散側で発生して，その波長にとどまることが知られている。しかし，テルライト MOF を用いると零分散波長の移動が起こるため

ソリトンの長波長シフトは止まらず、零分散波長の移動とともに長波長に移動した。また、分散波はパルスエネルギーとともに長波長域にシフトした。我々は、初めて石英ファイバでは起こらないこの波長分散の動的変化による SC スペクトル拡張現象の検証に成功した (図 7)。

(5) 相関光子対生成

量子情報通信に必要な単一光子生成のための手法として Spontaneous Four Wave Mixing (SFWM) を利用した相関光子対生成が注目されている。高非線形を有するテルライトやカルコゲナイド MOF は SFWM 媒質として有望と考えられる。SFWM を利用する場合、ラマン散乱による雑音増加が問題になると考えられる。そこでラマン散乱による雑音の相関光子対生成に及ぼす影響を検討した。上記した波長分散が自由度高く設定できる高非線形ハイブリッド MOF を用いることにより、ラマン散乱光の混入を回避できる波長領域にアイトラー及びシグナル光を発生させることにより、低雑音で相関光子対生成ができることを初めて明らかにした。この結果は、高非線形ハイブリッド MOF により低雑音で相関光子対生成が可能であることを示すものであり、量子情報通信の光源応用として有望であることを示した。

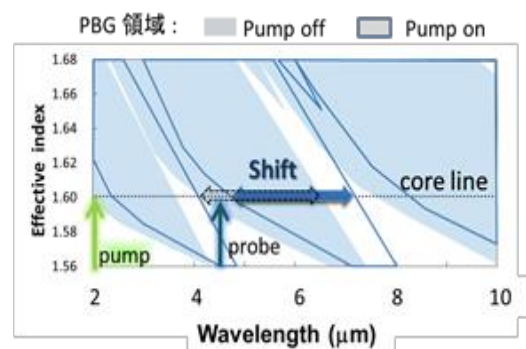


図 8 フォトニックバンド構造の光による動的制御。制御光 (pump) を $2\mu\text{m}$ より短波長の PBG 領域から外れた波長域 (図中では白色部) に入射し、高屈折率ガラスロッドにトラップさせて光カー効果を起こさせて屈折率分布を変えてバンドギャップ構造を変化させる。伝搬光 (probe) は当初 PBG 領域内にありコアを伝搬するが、制御光が入射されると PBG 領域から外れた波長域に位置することになり、コアを伝搬することができなくなる。したがって、制御光により強度変調されることになる。また、PBG 領域内にある光は、波長分散が変化することにより、その位相が制御される。

(6) フォトニックバンドギャップファイバの伝搬特性の動的制御

全固体 PBGF (Photonic Band Gap Fiber) の伝搬波長域はファイバ材料の屈折率と構造によって決まる PBG 領域になる。そのため、ひとつのファイバ構造に対して、伝搬波長域や分散などの伝搬特性は一意に決定される。伝搬特性を動的に制御することができれば、一本のファイバに種々の特性を持たせることができ、応用の可能性を格段に広げることが期待できる。そこで、光カー効果による屈折率変化を利用し、光によって全固体 PBGF の伝搬特性を動的に制御することを検討した。コアおよびクラッドにテルライトガラス $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Li}_2\text{O-Bi}_2\text{O}$ を高屈折率ロッドにカルコゲナイドガラス $\text{Ge}_{15}\text{Ga}_3\text{Sb}_{12}\text{S}_{70}$ を使用し、全固体 PBGF を構成し光カー効果を利用した光制御により、バンドギャップを 265nm もシフト可能であることを初めて明らかにした (図 8)。また、この全個体 PBGF の実現に初めて成功した。光による MOF の導波路特性の動的制御を行い、slow light

の可変制御, 光パルスの選択的波長変換, 動的な輻射場制御による光学活性イオンの光学遷移の制御によるファイバレーザー動作の新規制御法の開拓につなげる途を開いた.

(7) 誘導散乱を用いた高効率 slow light および fast light 生成

超高速ネットワークのノードでは, 光パルスの波形整形や分離などの機能を実現するための超高速全光スイッチや光パルス列を一時的に保持する光バッファメモリーが必要である. 全光型の光バッファメモリーの候補として光吸収や利得による大きな屈折率分散を利用した群速度の制御, いわゆる, "slow light および fast light" がある.

光ファイバの誘導ブリルアン散乱を用いた slow light および fast light 場合, 励起強度を変えることにより遅延量を容易に可変にすることができるという大きな利点がある. しかし, 未だ実用には至っていない. その主な原因は, 遅延効率と遅延時に生じる光パルスの広がりである. 石英ファイバ, 酸化ビスマス系ファイバや As_2Se_3 ファイバと比較して大きく, テルライトファイバの誘導ブリルアン散乱による遅延効率が非常に良いことを明らかにし. 伝送容量を劣化させる光パルスの広がりが二重利得法により効果的に抑制できる条件を解明した. また fast light の生成効率も 3.77ns/mW という光ファイバのなかで最も大きな効率を持つことを初めて明らかにした. テルライト光ファイバは最も光パルスの群速度制御素子として優れた特性を有することを明らかにした.

(8) 太陽光励起ファイバレーザーの開発

太陽光はレーザーの励起光としてはパワー密度が低く (100mW/cm^2), 太陽光集光比には限界が存在するため, 効率よく励起できる構造を実現するかが課題である. これまで太陽光レーザー媒質には主に YAG 結晶が用いられ, 強制冷却が必須であった. ファイバレーザーは, ガラスの高い透明性, 励起光を閉じ込める導波路構造, 長い相互作用長, および信号光と利得媒質との高いモード整合効率を利用できるため高効率な励起が可能であり, また, 比表面積が大きい冷却性能に優れる等の特徴を持つため, 太陽光励起レーザー媒質にはファイバが適しているとの考察のもと本研究を進めた.

ファイバレーザー媒質をレーザー活性イオンの Nd の性能指数および太陽光による広帯域光励起による発光量子効率の観点から選択した. その結果, フッ化物ガラス中の Nd の $1.06\ \mu\text{m}$ 発光の量子効率は石英ガラスなどの酸化物ガラス中よりも高 70% であることを実証した. そこで, Nd 添加フッ化物ダブルクラッドファイバの試作を共同研究先であるファイバラボ社と行い, 太陽光励起による Nd 添加ファイバレーザー発振に世界で初めて成功した (図 9).

● 太陽光励起ファイバレーザーの単一波長発振

上記の Nd^{3+} 添加フッ化物ガラスファイバを用いた太陽光励起レーザー発振を実現したが, 誘電体多層膜をミラーとして用いていたため, 複数の波長で発振し時間的に変化するという課題があった. ファイバブラッググレーティング (FBG) をミラーとして用いることにより図 10 に示すように $1.054\ \mu\text{m}$ の単一波長で発振することに成功した. これにより, 複数のファイバをバンドル化し, レーザー光をコヒーレントに結合することで, 高出力の太陽光励起ファイバレーザーが実現

するものと期待できる。

● 太陽光励起レーザー用新規結晶の高い結晶の探索

これまでの太陽光励起固体レーザーの研究の多くではレーザー結晶として $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) が用いられてきたが, Nd^{3+} , Cr^{3+} :YAG の Cr^{3+} の発光と Nd^{3+} の吸収スペクトル上の重なりが小さいため, Cr^{3+} から Nd^{3+} のエネルギー移動効率は十分ではない. Cr^{3+} の電子準位間のエネルギー差は結晶場の影響を強く受けて大きく変化するので, ホスト結晶に依って結晶場を制御することでエネルギー移動効率を高めることができるものと考えられる. フローティングゾーン法により Nd^{3+} , Cr^{3+} : $LaGaO_3$ 単結晶を作製し, Cr^{3+} の発光帯と Nd^{3+} の吸収帯のスペクトル上の重なりが大きく, Cr^{3+} の発光寿命から Cr^{3+} から Nd^{3+} へのエネルギー移動効率を見積もったところ, 100 K 以下の温度では 50 % 以上であった. 同濃度の Nd^{3+} と Cr^{3+} を添加した YAG の室温でのエネルギー移動効率は 20 % であるが, それを上回る約 35% のエネルギー移動効率を実現した. このことから, $LaGaO_3$ は太陽光励起レーザー媒質として YAG を上回る特性のものであることを明らかにした.

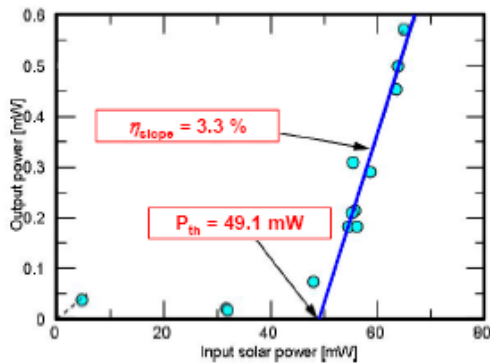


図 9 Nd 添加フッ化光ファイバによる太陽光励起ファイバレーザーの新特性

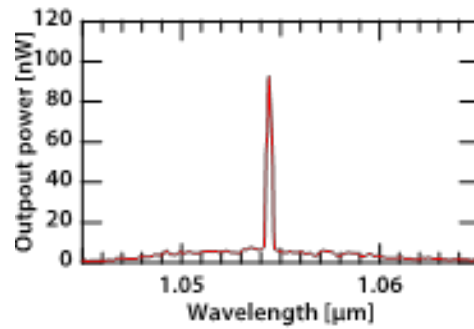


図 10 FBG シリカファイバにより共振器を構成した Nd^{3+} 添加フッ化物ファイバの太陽光励起レーザー発振スペクトル