2D12　フォトニッククリスタルファイバーを用いた顕微 CARS 分光法の開発(II) マルチプレックス CARS 顕微鏡の製作

（東大院理）○加納英明、濵口宏夫

【序】我々は、フォトニッククリスタルファイバー（Photonic crystal fiber, PCF）を用いた新しい Coherent anti-Stokes Raman Scattering （CARS）顕微鏡の開発を行っている。本研究で用いている PCF は、Ti:sapphire 発振器程度の出力で可視から近赤外に渡る超広帯域白色光を発生させることが可能であるため [1]、近年様々な分野に応用されている [2,3]。今回我々は、この白色光の持つ広帯域特性を利用して、マルチプレックス CARS 顕微鏡を製作したので報告する。これまで複数のグループがマルチプレックス CARS 顕微鏡を開発しているが [4,5]、いずれもピコ秒およびフェムト秒の二台の Ti:sapphire 発振器を同期発振させたものであり、(1) 光源が複雑になること、(2) 一度に測定可能なスペクトル領域にはフェムト秒レーザーからくる制限があること、などの欠点があった。今回 PCF からの広帯域近赤外光を用いることで、これらの欠点を克服し、よりコンパクトな装置を開発することができた。

【実験】図 1 に実験装置を示す。光源には励起レーザー一体型の Ti:sapphire 発振器（Coherent 社; Vitesse, 中心波長 801nm, パルス幅 90fs, 繰り返し 80MHz, 出力 940mW）を用いた。発振器からの出力の一部（約 300mW）をフォトニッククリスタルファイバー（オーシャンフォトニクス社/Crystal Fibre 社; NL-PM-750,コア径 1.7μm, ゼロ分散波長 750nm、全長約 100cm）に導入して、可視から近赤外にわたる超広帯域白色光を発生させた。本実験では可視域をフィルターでカットし、近赤外領域の白色光のみを Stokes 光（ω_2 光）として用いた。また、発振器からの出力の残りの部分はバンドパスフィルターにより狭帯域化して Pump 光（ω_1 光）として用いた。ω_1 光は光学遅延路を経由した後白色光（ω_2 光）と同軸に倒立顕微鏡（Nikon; TE-2000S）へと導入した。二つのレーザー光を高開口数 (0.9)の対物レンズで集光しているために波数ベクトルの角度分布が幅広く、その結果位相整合条件が広帯域で満たされている。試料において発生した CARS 光をファイバープローブ（単芯,コア径 200μm）により分光器まで導き、CCD カメラ（Princeton Instruments; Spec-10:400BR/XTE）でマルチプレックス測定を行った。ω_2 光はファイバーの分散特性のため近赤外領域でも若干チャープしているが、今回測定した波数領域はω_1 光のパルス幅内で十分同時測定が可能である。CARS イメージはピエゾステージを走査することにより得られた。各点での露光時間は 500ms であった。また、ω_1, ω_2 光の出力はそれぞれ約 9.0, 2.4 mW であった。

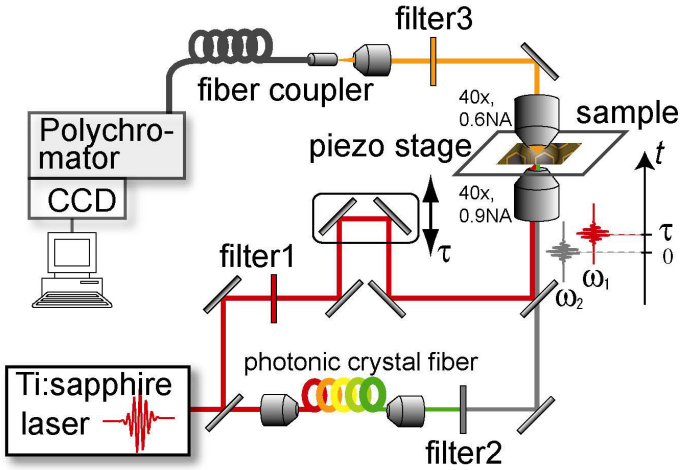

図 1 マルチプレックス CARS 顕微鏡；filter1: narrow bandpass filter; filter2: NIR-pass filter; filter3: visible-pass filter.

【結果・考察】図２に用いたレーザー光のスペクトルを示す。図２(a)のω_1光のスペクトル幅はガウス関数でのフィットにより半値全幅～20cm^{-1}と見積もった。これは本装置の波数分解能に対応する。図２(b)のω_2光のスペクトルは800nmから1070nm付近まで構造を持って広がっており、今回は2770～3140cm^{-1}の領域でマルチプレックス測定を行った。これまで報告されたマルチプレックス CARS 顕微鏡と比較して、約２倍程度の広帯域化を実現した [4,5]。

図３にマルチプレックス測定の実験結果を示す。試料にはポリスチレン微小球（直径 10 μm）を用いた。図３上図は微小球中心付近でのマルチプレックス CARS スペクトルである。ポリスチレン微小球の CH 伸縮振動に由来する CARS スペクトルを S/N 比よく測定することに成功した。図３下図には、各々の振動数での CARS イメージングの結果を示す。ラマン共鳴の振動数のときのみ、微小球のイメージが明瞭に観察されている。CARS イメージの結果は微小球の本来の直径（10 μm）より小さくなっているが、これは微小球の表面付近でレーザー光が正しく集光されなかったことによると考えられる。また、CARS スペクトルは低波数側に裾を引く非対称な形状を示しているが、これは CARS 測定においてしばしば問題となる非共鳴バックグラウンドによると考えられる。

白色光は数 mm 長の PCF でも十分発生可能であり、分散制御などを行うことで指紋領域までマルチプレックス測定が可能となることが期待される。

[1] J. Ranka *et. al*, *Opt. Lett.* **25,** 25 (2000).

[2] H. Kano and H. Hamaguchi, *Opt. Lett*. **28**, 2860 (2003).

[3] H. N. Paulsen *et. al*, *Opt. Lett.* **28,** 1123 (2003).

[4] M. Muller *et. al*, *J. Phys. Chem. B* **106,** 3715 (2002).

[5] J. –X. Cheng *et. al*, *J. Phys. Chem. B* **106,** 8493 (2002).

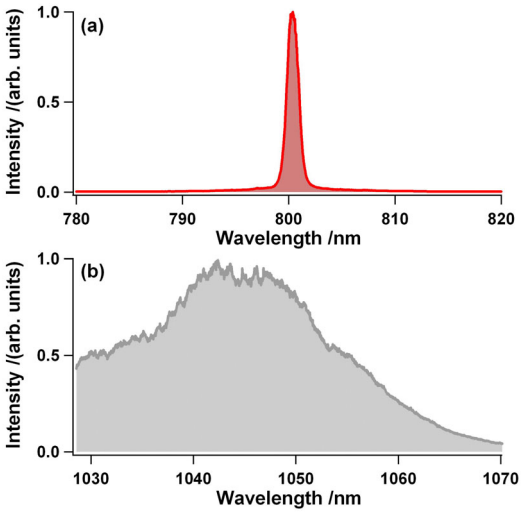

図２ 用いたレーザー光のスペクトル； (a) ω_1光， (b) ω_2光（強度未補正）。

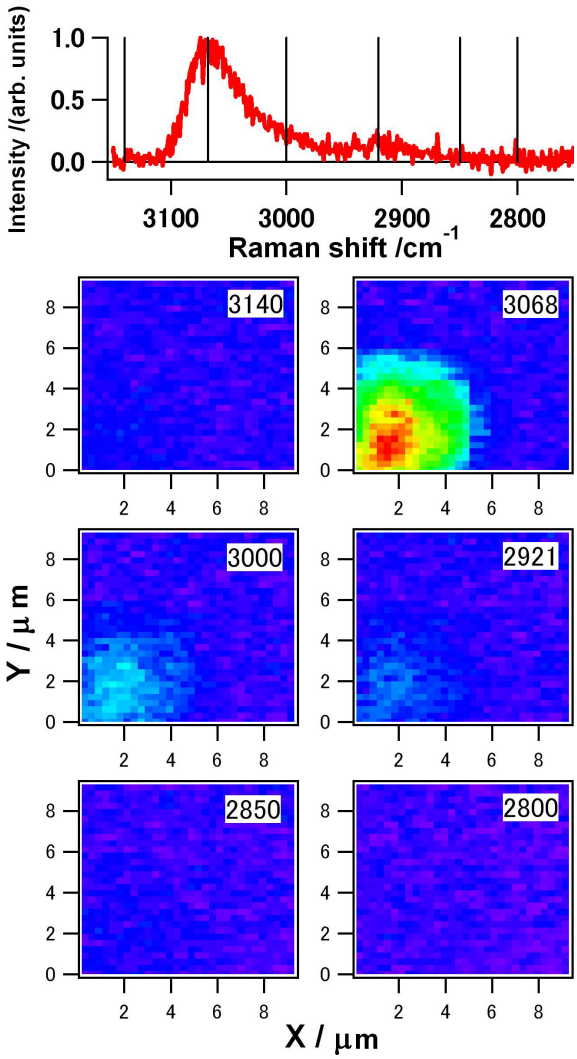

図３ ポリスチレン微小球（直径 10 μm）のマルチプレックス CARS 測定（面内方向）。イメージ右上の数字はそれぞれラマンシフトに対応する。