

# 分散チューニングや CNTのSC光を利用

## 高速・高分解能OCTの実現へ

ファイバレーザの実用化から25年。通信分野での光増幅から始まった同レーザの開発は、出力の向上や効率のよさから次々と新しい用途への応用が進んでいる。そのうちの一つが、光コヒーレンストモグラフィへの応用だ。

ファイバレーザの特長は、小型軽量であること、高出力化が容易、媒質の表面積が大きいことから冷却が容易であること、開口率が小さいため集光しやすく高パワー密度で、高分解能の加工が可能などである。また全ファイバ型レーザは長期安定性を持ち、伝送用ファイバに高効率で結合することができる。

1987年に通信信号の増幅用としてEr(エルビウム)添加ファイバ増幅器が開発され、光電変換を行わずに光信号をそのまま増幅できるようになったことから、増幅器としての研究開発が急速に進んだ。また高出力化が可能ことから光通信以外の用途での開発も進んだ。Nd(ネオジウム)ファイバレーザのクラッド励起により高出力への可能性が

見出されて以降、出力が加速度的に増加。1030~1100 $\mu\text{m}$ のYb(イッテルビウム)や2 $\mu\text{m}$ のTm(ツリウム)のファイバレーザなどにおいても高出力ならびに短パルス化が進んでいる。切断加工などの産業用途において従来のレーザを置き換えつつあるとともに、医療用などさまざまな分野でも応用が期待されている。

### 新しいモード同期を利用したOCT

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の山下真司教授の研究室では、光ファイバの応用研究に取り組んでいる。現在とくに注力しているのが、新規のモード同期法によって発生させた広帯域光を利用した光コヒーレンス

トモグラフィ(OCT: optical coherence tomography)用光源の研究である。日本学術振興会の「最先端・次世代研究開発支援プログラム」の研究テーマにも選ばれている。

カーボンナノチューブ(CNT)を利用したスーパーコンティニウム(SC)光を光源とするものと、分散チューニングにより波長の掃引を行う手法について実用化を目指している。

OCTは近赤外線波長帯のインコヒーレント光源の干渉を利用して人体などをその場観察する手法である。その原理は、光源から出た光を検出光と信号光に分け、対象物から返ってきた光と参照光の干渉から対象物の深度方向の情報を得る。

OCTには大きく3つの方法がある。第1の方法が参照光のミラーを前後方向にスキャンして参照光路長を変化させることにより、物体の深さ方向のスキャンを行うTD(time domain)法であり、最初に考案、実用化された。第2の方法がSS(swept source)法である。波長可変光源で波長を変化させることにより、波長ごとの干渉強度を時間軸に沿って取得し、深さ方向の反射分布を得る。第3の方法がSD(spectral do-

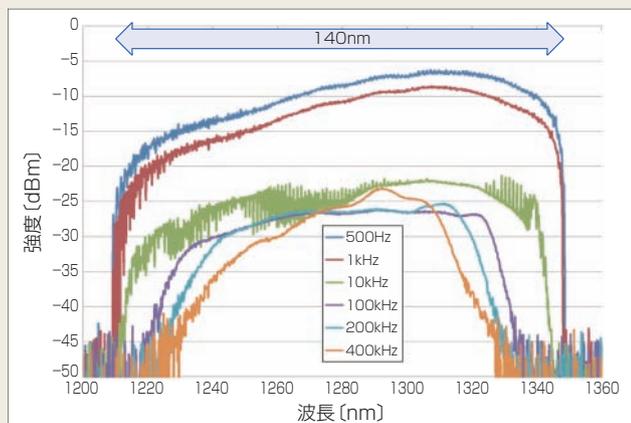


図1 分散チューニングレーザで掃引速度を変化させたときの波長帯域の変化。

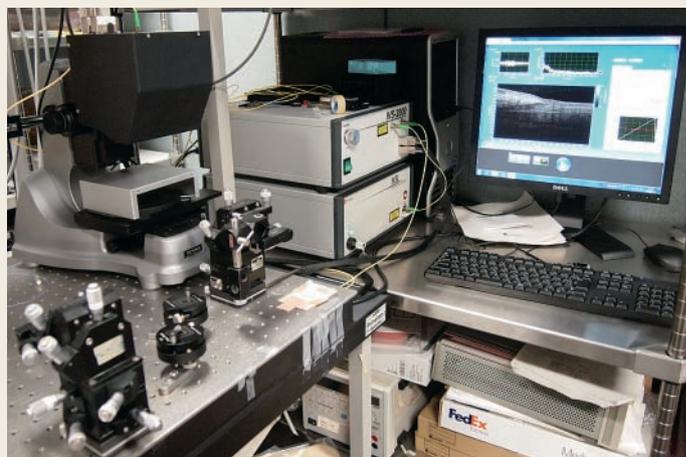


図2 SS-OCTシステムの装置構成。画像は人の指の断層画像。

main)法で、広帯域の波長を光源に使用し干渉光を回折格子などによって空間的に分光して検出する。

研究室では、とくにSSおよびSD法の光源の開発に取り組んでいる。OCTの深さ方向の分解能は、光源の波長域に反比例する。このことから、一般的には光源の波長域は100nm程度が求められる。「光ファイバは短パルスが作れること、広い波長を速く振れることからOCT光源に向いている」と山下氏は言う。

## SS-OCT

研究室ではSS-OCT方式の波長スキャンに分散チューニング法を用い、500kHz以上の波長チューニングが可能なことを示すとともに、200nm近い波長の掃引を実証している。分散チューニングとは、モード同期において共振器内の分散が大きい場合、周波数を変化させると波長も変化することを利用する手法である。モード同期ではレーザ共振器内の光の往復時間に合わせて変調を与え、縦モードを同期させる。そのため周波数を変動させることにより発振波長を掃引することができる。2006年にこの手法で高速掃引できることを初めて山下氏のグループが示した。

分散チューニングレーザは、分散媒質として100mの分散補償ファイバを用い、広帯域の半導体光増幅器(SOA)を増幅媒質とした。波長変調はSOAの駆動電流を直接変調することによって実現している。SOAの変調周波数を460MHz付近で1.5MHz変化させると140nm程度の波長掃引ができるという。「従来は光ファイバ型共振フィルタもしくは回折格子とポリゴンミラーを組み合わせたものがあるが、数十kHzが限界だった。分散チューニングを用いることで高速化・簡略化が可能にな

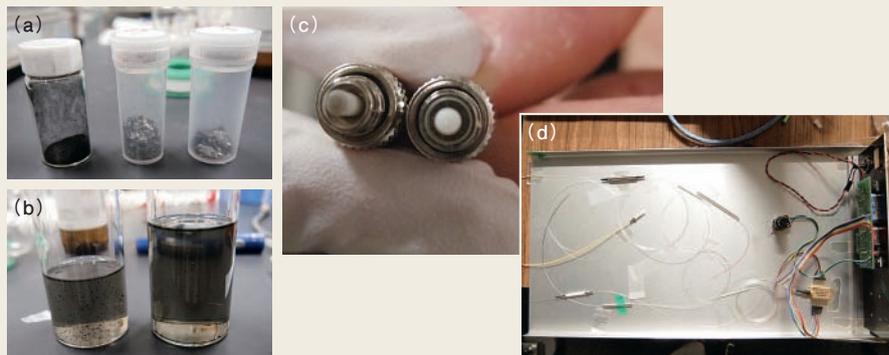


図3 (a)左から黒鉛、グラフェン、カーボンナノチューブ。(b)アルコールに溶かし、ファイバの断面に直接CNTを成長させる。(c)左がカーボンナノチューブを付着させたもの、右が何もつけていない端子。(d)SD-OCT用高繰り返しCNT短パルスレーザの構成。

る」(山下氏)。

図1は掃引速度ごとの波長帯域を測定したものである。「高速になるほど波長掃引幅は狭くなるものの、200kHz程度までの高速化は可能」(山下氏)。図2がこの光源を用いて構築したSS-OCTシステムと人の指の断層画像である。

掃引速度は共振器長に依存する。そこで分散媒質を分散補償ファイバからチャープ光ファイバグレーティングに換えて共振器長を短くすることにより、さらなる高速化にも成功しているという。

## SD-OCT

研究室で取り組んでいるもうひとつの光源が、可飽和吸収体を使用した受動モード同期法を利用した手法である。可飽和吸収体にCNTを使用しているのが特徴だ。短パルスによって発生するSC光を、SD-OCTシステムの広帯域光源として使用する。可飽和吸収体とは、光が強くなると吸収量が大幅に減少する材料。最初は光を吸収して反転分布が大きくなるため短パルス、大出力が得られるとして近年注目されている材料でもある。「機械特性や電気伝導性については応用が進んでいるが、光学的特性の面での応用はあまりなかった」(山下氏)。可飽和吸収体と

しての応答速度が速いことが示されたことから、光ファイバへの応用を開始。2003年に初めて山下氏のグループによりCNTを利用したレーザが作製された。「CNTは光ファイバ間に挟み込めるため、短い共振器を作成することが可能になる」(山下氏)。作成も容易で、高速、広帯域であるなど多くの利点がある。なお2009年には海外グループによりグラフェンを利用したものも作製されている。

このCNT受動モード同期レーザを光源としたSD-OCTシステムによって、5mm長の共振器長で、繰り返し周波数が最大20GHzを実現している(図3)。パルス幅約1psの非常に高安定なパルスの生成ができていているという。また高出力化にも取り組んでおり、高出力でも使用できる光ファイバ型CNTデバイスを開発し、平均パワーで0.25W、ピークパワーでは5.6kWの高出力モード同期光ファイバレーザを実現している。

「CNTやグラフェンは応用範囲が広いので、OCTだけでなくほかの光ファイバの応用研究にも積極的に取り入れていきたい」(山下氏)。

### 訪問した研究室

東京大学 大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 山下研究室

LFWJ