

論文の内容の要旨

論文題目 OCT応用のための分散チューニングファイバレーザの
性能向上に関する研究

氏 名 田久保 勇也

本研究においては、OCT応用のための分散チューニングファイバレーザの性能向上を行った。OCTは赤外線を用いた断層イメージング技術であり、非破壊・非接触・非侵襲の断層撮影が可能であることが特徴である。またX線CT等と比べると、浅い領域を高い分解能で見ることによって長けており、リアルタイム撮影が可能であることも利点である。このような特徴を活かし、眼科や歯科で利用が始まっているほか、内視鏡や血管カテーテルと組み合わせた技術も研究されている。

OCTには様々な撮影原理があり、最も原始的なものはTime-domain OCT (TD-OCT) と呼ばれている。この手法では低コヒーレントな光源をマイケルソン型の干渉計に入射し、その干渉光から画像情報を取得している。それぞれの光路にはサンプルと参照用のミラーが置かれている。光源の可干渉性が低いと、光路差がほぼゼロでないと強い干渉が発生しない。したがって参照用のミラーをサンプルの深さ方向に動かしていき、強い干渉が発生した点には反射面が存在するという点である。これにより深さ方向の反射面情報を取得することができるが、ミラーを機械的に動かすために速度が制限されるという欠点がある。そこで考案されたのが、周波数ドメインで干渉信号を取得する、Spectral-domain OCT (SD-OCT) とSwept-source OCT (SS-OCT) である。SD-OCTではTD-OCT同様に広帯域光源を用いるが、ミラーを時間的に動かすのではなく回折格子とCCDカメラを用いて周波数領域で干渉信号を取得している。これをフーリエ変換することで、TD-OCT同様の断層画像を得ることができる。一方SS-OCTではレーザ光源を使用し、発振周波数を掃引することで周波数領域の干渉信号を取得している。CCDカメラのような特殊なディテクタを用いる必要がないことが特徴である。これらの周波数ドメインのOCTはTD-OCTに比べて撮影速度や感度が優れているため、現在のOCT研究の主流となっている。

SS-OCTの性能は光源に大きく依存する．具体的には広帯域に波長掃引を行うほど深さ方向の分解能が向上し，高速に掃引を行うほど画像撮影速度が向上し，掃引時のレーザの瞬時線幅が細いほどイメージング深度が向上する．これらの要件を満たすレーザとして，波長可変ファイバレーザが多くの場合に用いられる．これは光ファイバを用いて共振器を構成する光ファイバレーザに，何らかの波長選択フィルタを挿入し，その選択波長を掃引することで発振波長を掃引するものである．現在までにファブリ・ペロー型のフィルタやポリゴンミラー型のフィルタなど様々なタイプのフィルタが用いられ，近年ではMEMSを用いた波長可変レーザも開発されている．しかしいずれの構成においても機械的な動きによって波長選択を行っているため，フィルタによって速度や帯域が制限され，線形な掃引をすることも難しいという問題点がある．

そこで当研究室では，分散チューニングという手法を用いた波長掃引レーザについて研究を行っている．分散チューニングでは機械的なフィルタを用いず，電氣的に発振波長を制御することが可能である．その原理は以下のようなものである．レーザの共振器長で決まる発振モードの間隔は自由スペクトル間隔(free spectral range: FSR)と呼ばれているが，FSRは共振器の屈折率に依存する．したがって共振器中の波長分散の値が大きい場合には，屈折率が光の波長に依存するため，FSRも波長に依存する．このFSRの整数倍の周波数で光に変調をかけると高調波能動モード同期が発生し，光がパルス発振するが，FSRが波長に依存するため，変調周波数を変えると発振波長も変化する．これが分散チューニングにおける波長可変の原理である．フィルタによる帯域や速度の制限が存在しないため，高速・広帯域な波長掃引が可能である．

当研究室ではこれまで最大250kHzの波長掃引時において，SS-OCT画像の取得に成功している．しかしOCT画像のイメージング深度が1mmに満たないという問題を抱えている．これは波長掃引時のレーザのスペクトル幅が広がっていることが原因である．この原因を探るために分散チューニングの波長掃引のシミュレーションが考案され，高い異常分散の使用，高い変調周波数でのモード同期等によってスペクトル幅が改善されることが示された．しかしこれらの条件を満たそうとすると，波長可変帯域が狭まってしまうというトレードオフが存在する．この問題を解決するために，正弦波変調ではなくパルス変調によってモード同期を行うという手法が考案された．パルス変調は高周波成分を多く含むため，波長可変帯域を保ったまま実効的に高い変調周波数でモード同期をすることが可能である．実際にパルス変調を用いてレーザの瞬時スペクトル幅が改善されたという結果が過去に示されている．

本研究においてはこれらをさらに突き詰めることを目的としている．まずは分散チューニングにおける発振スペクトルのシミュレーションと実験による評価を行った．分散チューニングにおけるシミュレーションの手法はAverage modelとDiscrete modelが考案されており，本研究においては光パルスの状態をより詳細に計算できるDiscrete modelを採用した．非掃引時のシミュレーションにおいては細い発振スペクトルを得る

ために、高い分散量、低い変調周波数、低い半導体光増幅器(semiconductor optical amplifier: SOA)の線幅増大係数が必要であることが確認された。分散の符号に関しては、異常分散の方がSOAの非線形効果との相互作用で細いスペクトル幅を実現できることが確認できた。また掃引時のシミュレーションにおいては、分散に関しては非掃引時同様、異常分散でかつ高い分散量が細いスペクトル幅をもたらすことが確認できた。一方で変調周波数に関しては、高い周波数を用いた方が瞬間的に変調をかけることができるため有利であることが確認できた。加えて波長掃引の方向についても評価を行い、1GHz以上の高い変調周波数においては上り掃引、すなわち短波長側から長波長側への掃引の方が安定かつ細いスペクトルで発振できることが確認できた。これらのシミュレーション結果を実験にによって確認し、非掃引時に関しては小さい分散量と低い変調周波数によって広い波長可変帯域が得られ、反対に大きい分散量と高い変調周波数によって細いスペクトル幅が得られることが確認できた。シミュレーションと比べて実験においては、SOAの非線形光学効果が大きく影響していることも確認できた。

シミュレーションと実験によって、波長可変帯域と細い発振スペクトルを両立するためにパルス変調が有用であることが確認できたので、実際にレーザ系を構成して実験を行った。正弦波変調によってモード同期を行った場合と比較して、パルス変調を行った方が波長可変帯域やスペクトル幅が改善することが確認できた。またパルス変調を用いた分散チューニングレーザを初めてOCT光源として使い、正弦波変調を用いた場合と比べて画像のイメージング深度が向上していることを確認した。

上記の波長掃引レーザとしての性能向上に加え、分散チューニングレーザの新たな応用としてスペクトル可変レーザとしての応用についても研究を行った。分散チューニングにおいては変調周波数を掃引することで波長掃引を行っているが、この際の掃引波形を操作することによって、波長掃引を行った際のスペクトル形状を制御することが可能である。これを利用することで、スペクトルの平坦性を向上させるなどの応用が可能となる。本研究においては実際に分散チューニングのスペクトル可変性について評価を行い、掃引波形の操作によって形状制御が可能であることを確認した。またこのレーザの掃引周期とCCDカメラの露光周期を同期させることにより、分散チューニングレーザを広帯域光源として用いてSD-OCT応用を行った。実際に分散チューニングレーザによるSD-OCT画像の取得に成功した。

本研究においては分散チューニングレーザについて、SS-OCT光源としての性能改善のためにシミュレーションと実験による評価を行い、パルス変調を用いてOCT光源としての性能向上を確認した。また新たなアプローチとしてスペクトル可変性に着目し、掃引波形によるスペクトル制御を実現したほか、SD-OCT光源として応用して画像の撮影にも成功した。これらの研究成果は、分散チューニングレーザのOCT光源としてのポテンシャルを示すものである。