

**オムニポテントファイバレーザをコアとする  
デジタルフロンティア光計測の研究**  
Study on digital frontier photonic sensing based on  
omnipotent fiber lasers

課題番号：18H05238

山下 真司 (YAMASHITA, SHINJI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授



研究の概要

超スマート社会(Society 5.0)においてはサイバー空間とフィジカル空間を繋ぐものとしてセンシング技術が重要である。本研究では、**デジタル的な特徴と高い機能をもつ万能レーザを意味するオムニポテントレーザをファイバレーザで実現し、これとデジタルコヒーレント信号処理技術とを融合させることで、革新的なデジタルフロンティア光計測の実現を目指す。**

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ファイバフォトニクス、センシングデバイス、信号情報処理

1. 研究開始当初の背景

サイバー空間とフィジカル空間が様々な形で相互に影響し合い、そこから新たな産業やサービスが生まれる社会は**超スマート社会**あるいは **Society 5.0** と呼ばれている。そこでサイバー空間とフィジカル空間を繋ぐものとしてセンシング技術が重要である。

2. 研究の目的

本研究では、**デジタル的な特徴と高い機能をもつ万能レーザを意味するオムニポテントレーザをファイバレーザで実現し、これとデジタルコヒーレント信号処理技術とを融合させることで、サイバー空間とフィジカル空間とをつなぐ革新的なデジタルフロンティア光計測の実現を目指す** (図1)。

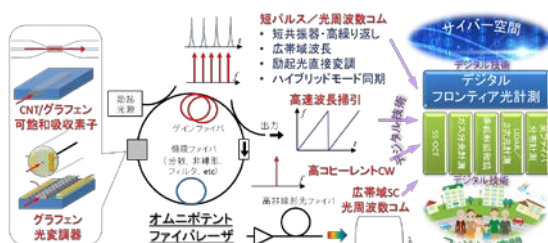


図1 オムニポテントファイバレーザをコアとしたデジタルフロンティア光計測

3. 研究の方法

本研究では、**モード同期デバイス**を利用して**オムニポテントファイバレーザ**の機能をさらに進化させ、それらとデジタル技術の融合により革新的な**デジタルフロンティア光計測**を発展させ確立するように、具体的な研究テーマを設定している。オムニポテントフ

ァイバレーザとデジタル技術の融合により新機能を提示すること、デジタルフロンティア光計測の極限性能を理論的に解明し実証すること、学術研究に裏打ちされた使える光計測技術を提供しながら革新性を実証すること、を研究のゴールとしている。

4. これまでの成果

**モード同期デバイス**に関しては、代表者の山下と分担者のセットのオリジナル技術であるカーボンナノチューブ(CNT)/グラフェン可飽和吸収素子(SA)と分担者の石樽のオリジナルなポリマー光導波路作製技術であるモスキート法とを融合させることにより、**SA特性を精密に制御できる導波路型 CNT/グラフェン SA 作製技術**を確立しつつある。また、偏波維持(PM)光ファイバケーブルファイバの実現に成功した。新たな展開として、CNTを窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)で包んだヘテロ構造である**CNT@BNNT**をSAとして使い、高光ダメージ耐性を持つことを示した。グラフェン光変調器については、**スロット導波路構造のグラフェン光変調器**を提案するとともに、**グラフェン装荷 Si および SiN 導波路**の試作、およびその特性の確認とモード同期ファイバレーザへの応用に向けた研究を進めている。

**オムニポテントファイバレーザ**に関しては、上述のCNT@BNNTをSAとして利用した**短共振器(10cm)・高繰り返し(1GHz)FPモード同期ファイバレーザ**の実現に成功した。また、CNT-SAを用いて波長2μmでの**双方向発振受動モード同期ファイバリングレーザ**の

実現に成功するとともに、新たな展開として、**自己発振波長掃引**が双方向ファイバレーザにおいて発現することを初めて見出した。一方、近年注目されている波長 3 $\mu\text{m}$  以上の中赤外波長帯でグラフェンの光非線形特性を検討・測定し、**中赤外波長で高い光非線形特性**を持つことを明らかにした。波長 1 $\mu\text{m}$  帯においては、非線形偏波回転受動モード同期ファイバレーザの分散の最適化によりレーザ単体からはこれまでにない超広帯域 (10dB 帯域 106nm) なスペクトルのパルス発生に成功した。また、最近注目されている**モード同期 Figure-9 ファイバレーザ**について、光非相反素子の代わりに光周波数シフトを用いる構成を提案し、実証を行った。デュアルコム分光光源としては、CNT/グラフェン SA を用いることにより、提案していた**双方向同時発振受動モード同期ファイバレーザ**だけでなく、新たな展開として**2波長および2偏波**でも同時発振受動モード同期が可能であることを初めて見出した。

**デジタルフロンティア光計測**に関しては、**分散チューニング波長掃引 OCT システム**に**デジタルコヒーレント方式**を用いることにより、位相不確定性の問題を解決して分解能と深達度を同時に改善できることを初めて示した。さらに新たな展開として、**圧縮センシング (CS)**を分散チューニング波長掃引 OCT システムに初めて適用し、少ないサンプリング数で OCT 画像の取得が可能であることを示した。また、上記のオムニポテントファイバレーザに基づく**ガス・環境センシング**および**多光子/誘導ラマン散乱 (SRS) 顕微鏡**の研究を進めている。3次元光計測システムは最近世界的に特に注目が高まっており、ほとんどが光パルスを用いる**Time-of-flight (TOF)**あるいは**周波数掃引光**を用いる**周波数変調連続光 (FMCW)**に基づくものに対し、本研究で我々はオリジナル技術である**振幅変調連続光 (AMCW) 3次元レーザスキャナ**の性能を格段に改善し、実用的な産業用3次元光計測システムを完成させつつある。**2周波数振幅変調**により高い分解能と小さい測距不確定性の両立に成功し、付随する問題は**デジタル信号処理**にて対処している。**高速偏波スクランプリング手法**により測定物表面からの反射・散乱光との干渉による**スペックル**の問題を解決するとともに、新たな展開として**スペックルの偏波依存性**から被測定物の**素材の分類**の可能性を初めて発見した。加えて、新しい構成の**ベッセルビーム光学系**を導入することでメートル級の3次元光計測が可能になりつつある。さらに、新たな展開として、高分解能・干渉フリーな**TOF ライダー**のために、**光サンプリングのタイミング抽出**を従来手法に比べて桁違いに高速で実行できる**新しいデジタル信号処理手法**を考案した。分布型光ファイバ計測に関しても光フ

ィバ中の**ブリルアン散乱**を利用した**圧力・温度の高精度分布測定**の研究を進めた。

## 5. 今後の計画

**モード同期デバイス**に関しては、これまでの導波路型 CNT/グラフェン SA および導波路型グラフェン光変調器の研究をさらに推進するとともに、広い波長帯への展開を図る。また、**微小リング光共振器**や**微小電気機械システム (MEMS) 技術**と組み合わせることで更に機能性を高めること検討している。**オムニポテントファイバレーザ**についてもこれまでの研究をさらに推進するとともに、高繰り返し**モード同期チップレーザ**、波長 2 $\mu\text{m}$  以上の中赤外波長への展開、マルチモード光ファイバを利用した**四光波混合 (FWM)**に基づく**広帯域波長変換**、などの新しい研究を計画している。**デジタルフロンティア光計測**に関してもこれまでの研究をさらに進化させるとともに、**分散チューニング波長掃引 OCT システム**と**AMCW 3次元レーザスキャナ**の実用化を進める。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] Z. Zhang, et al. "Short-cavity mode-locking laser using SWCNT@BNNT with 1D van der Waals heterostructure as saturable absorber", Applied Physics Express, submitted.
- [2] T. Shirahata, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Compensation of phase-uncertainty-induced impairments in dispersion-tuned swept laser OCT using digital coherent detection," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, submitted.
- [3] Y. Morimoto, et al., "Polarization dependence of optical properties of single-mode polymer optical waveguides fabricated under different processes at 1310/1550 nm," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Feb. 2020, accepted.
- [4] S. Yokokawa, et al., "Coherent light source with 106-nm broadband spectrum generated directly from Yb-doped fiber oscillator," SPIE Photonics West LASE, 11260-57, Feb. 2020.
- [4] C. Zhang, et al., "Polarization-insensitive laser scanning and profiling using amplitude-modulated CW scheme," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 10.1109/TIM.2019.2946429, Oct. 2019.
- [5] S. Yamashita, "Nonlinear optics in carbon nanotube, graphene, and related 2D materials (チュートリアル論文)," APL Photonics, vol.4, 034301, Dec. 2018.

その他学会誌論文 11 件、国際会議発表 42 件 (うち招待講演 8 件)、国内学会発表 46 件 (うち招待講演 2 件)、特許 1 件

## 7. ホームページ等

<http://www.cntp.t.u-tokyo.ac.jp>