

光コムの光/電気周波数変換を用いた ファイバー・センシング



徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 教授
安井 武史

1. はじめに

光周波数コム (光コム)¹⁾は、多数の安定な光周波数モード列が一定間隔で規則的に櫛 (comb) の歯状で並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を示す光源であり、狭線幅特性と広帯域スペクトル特性の両方を併せ持っている (図1)。光コムを構成する各光周波数モードの光周波数 (ν_m) は、以下の式で与えることが出来る。

$$\nu_m = f_{ceo} + m f_{rep} \quad (1)$$

ここで、 f_{ceo} はキャリア・エンベロープ・オフセット周波数、 f_{rep} は周波数モード間隔 (繰り返し周波数)、 m はモード次数である。 f_{ceo} と f_{rep} は数十 MHz の電気周波数であるので、式 (1) は光周波数と電気周波数がコヒーレントに繋がっていることを示している (コヒーレント周波数リンク)。例えば、 f_{ceo} と f_{rep} を電気周波数標準 (マイクロ波あるいは RF 波) に位相同期すると、電気から光に周波数接続でき、光コムが『光周波数の物差し』として利用出来る。この特性は、光周波数標準や分光計測に革命的進展をもたらし、2005 年ノーベル物理学賞に繋がった。一方、光格子時計を始めとした光周波数標準の研究が進み、電気周波数標準を大きく凌駕する性能が達成可能になっている。ここで、光コムを光周波数標準に位相同期すると、光から電気への周波数接続が確立され、光周波数標準と同等な不確かさを有する電気周波数信号 (f_{rep}) の発生が可能になる。これは、光コムが『光/電気周波数変換』に利用出来ることを意味しており、電氣的発生手法よりも桁違いに安定なマイクロ波やミリ波の発生に利用されている。

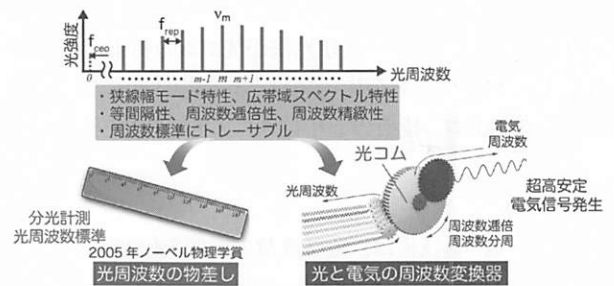


図1 光周波数コム(光コム)

上記の『光/電気周波数変換』機能は、信号発生だけでなく、センシングにも有用であると考えられる。電磁波の最も基本的な物理量である周波数は、各種物理量の中でも最高精度の国家標準 (セシウム原子時計、周波数不確かさ 10^{-15}) が整備され、離散量 (デジタル量) として計測出来るので、周波数計測は最も高精度な物理計測である。特に、各種の周波数標準が整備され計測機器も充実している電気周波数信号 (マイクロ波 ~ RF 波) は、高精度・広ダイナミックレンジ・高速・簡便・低価格な計測が可能である。したがって、被測定物理信号を電気周波数信号へ正確に変換して計測出来れば、各種物理計測の高度化が期待できる。例えば、代表的な光センシング手法であるファイバー・センシングでは、測定物理量に依存した光スペクトルシフトを観測することが多いが、ここで光コムの『光/電気周波数変換』と融合できると、測定物理量を電気周波数信号として計測することが可能になる。すなわち、光コムの『光/電気周波数変換』と周波数標準に基づいた「高精度電気周波数計測」の良好な整合性を利用することにより、ファイバー・センシングの高度化が期待できる。

我々は、マルチモード干渉 (MMI) ファイバーセンサーをファイバー光コム共振器内に配置することにより、電気周波数 (f_{rep}) 読み出し型の屈折率センシングやバイオセンシングに関する研究を行っている^{2,4)}。本稿では、これらの研究成果について紹介する。

2. 測定原理

MMI ファイバーセンサー⁵⁾は、クラッドレス・マルチモードファイバー (MMF) の両端にシングルモードファイバー (入射側 SMF 及び出射側 SMF) を融着した構造となっている (図2)。入射側 SMF からの光は、回折されて、クラッドレス MMF 側面で全反射を繰り返しながら、出射側 SMF に向かう。出射側 SMF 入口において、マルチモード干渉条件を満たした波長成分 (λ_{MMI}) のみが最終的にセンサーを通過する。ここで、クラッドレス MMF 側面に接触している溶液サンプルの屈折率が変化すると、グース・ヘンシェンシフト量に変化し、 λ_{MMI} が変化する。すなわち、屈折率依存型光スペクトルシフトを示すことになる。先行研究では、広帯域光の光スペクトル計測から屈折率を決定していたが、比較的ブロードなスペクトル形状に対する微小なスペクトルシフト量が高精度化の課題とされていた。

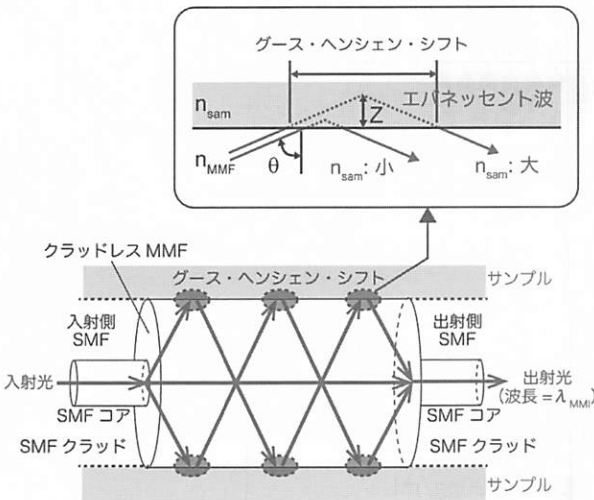


図2 マルチモード干渉 (MMI) ファイバーセンサー

次に、MMI ファイバーセンサーをリング型ファイバー光コム共振器内に配置する場合を考える (図3)^{2,3)}。この場合、共振器内 MMI ファイバーセンサーは、屈折率依存型チューナブル・バンドパスフィルターとして機能することになり、屈折率に依存して、ファイバー光コ

ムの出力光スペクトルがシフトすることになる。ファイバー光コムの波長帯 (1.5 μm 帯) では、共振器ファイバーは屈折率分散を有しているため、屈折率依存型光スペクトルシフトは、光学的共振器長 (nL , n : 共振器ファイバー屈折率、 L : 共振器ファイバー長) の屈折率依存性シフトに変換される。 f_{rep} は光速 ($c=299,792,458\text{m/s}$) を光学的共振器長 (nL) で除することにより算出するので、屈折率依存性を示す。すなわち、 f_{rep} の高精度計測から、屈折率センシングが可能になる。

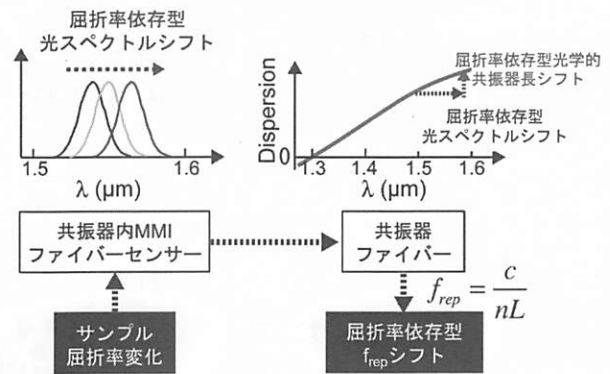


図3 電気周波数 (f_{rep}) 読み出し型屈折率センシング

3. 屈折率センシング^{2,4)}

混合比の異なる水 / エタノール混合溶液を標準サンプルとして計測を行った。図4(a) および 4(b) は、屈折率の異なる混合溶液サンプルにおける光コムの光スペクトル (λ_{MMI} 信号) と RF スペクトル (f_{rep} 信号) を示している。いずれにおいても、屈折率依存性のスペクトルシフトの確認ができる。光スペクトルでは、比較ブロードなスペクトル幅に対して、屈折率依存性シフトが微小であった。一方、RF スペクトルでは、1Hz 以下の極めて狭線幅なスペクトルが得られている上に、そのシフト量がスペクトル幅よりも十分に大きかった。両者の比較から、電気周波数読み出し型屈折率センシングにおける優位性が確認出来る。図4(c) は、屈折率変化と f_{rep} シフトの相関性を示しており、良好な線形性が得られている。この線形スロープと f_{rep} 周波数揺らぎから屈折率分解能は 4.88×10^{-6} RIU (Refractive index unit)、線形スロープと実測値の差の二乗平均平方根から屈折率精度は 5.35×10^{-5} RIU (Refractive index unit) のセンシング性能が得られた。

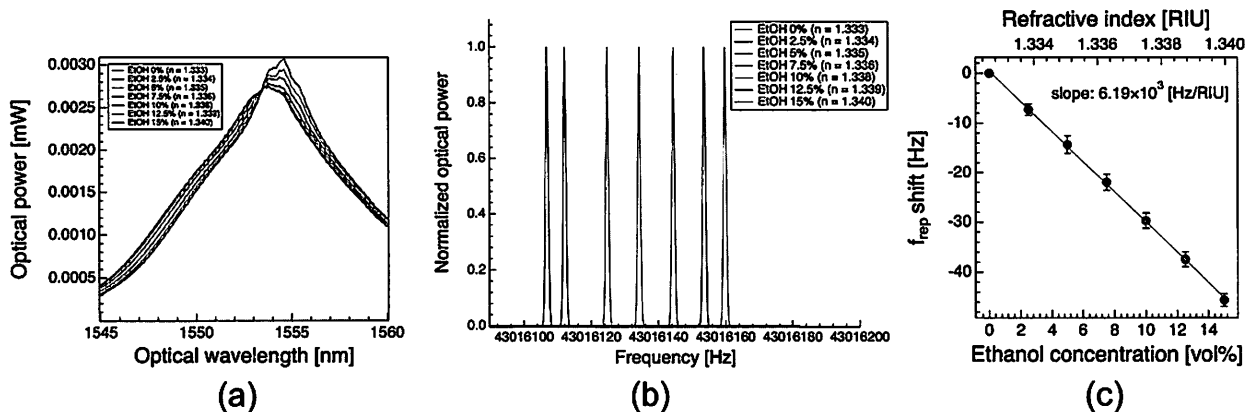


図4 電気周波数 (f_{rep}) 読み出し型屈折率センシング

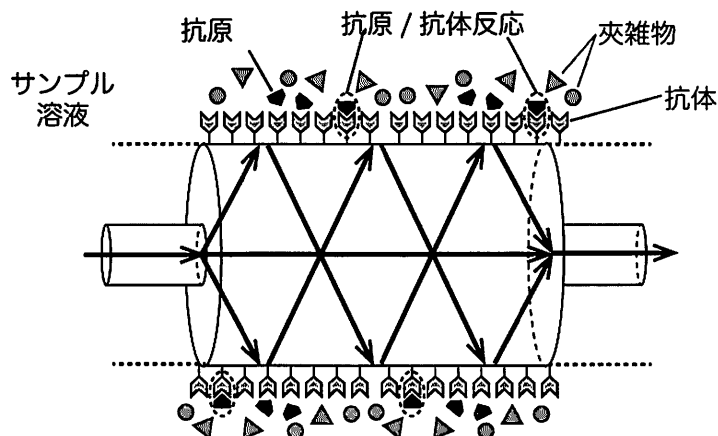


図5 マルチモード干渉(MMI)ファイバーセンサーの表面修飾

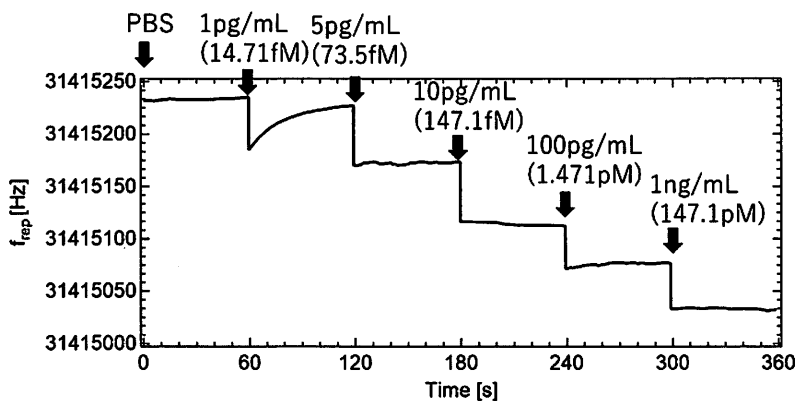


図6 アビジン/ビオチン結合のモニタリング

4. バイオセンシング⁵⁾

図2や図3では、共振器内 MMI ファイバーセンサーが屈折率依存型チューナブル・バンドパスフィルターとして機能することを説明したが、ファイバーセンサー表面に分子識別層を表面修飾することにより、バイオセンシングへの拡張が可能になる。例えば、抗原・抗体反応を利用する場合には、ファイバーセンサー表面に抗体を表面修飾すると、それに対応した抗原のみが特異的に吸着する(図5)。この結果、センサー表面の実効的な屈折率が、抗原吸着量に依存して変化し、抗原濃度依存型光スペクトルシフトを引き起こす。後は、図3と同じメカニズムで、最終的に f_{rep} 読み出し型バイオセンシングが可能になる。

ここでは、代表的な抗原抗体反応であるアビジン/ビオチン結合のセンシングを行った。アビジン/ビオチン結合は、免疫検出や特定タンパク質生成など様々な生化学実験で利用されており、親和性が非常に高いことが特徴である。ここでは、UV オゾンによってクラッドレス MMF 表面を洗浄及び改質した後、シランカップリングによるアミノ基末端修飾を行い、最後に自己組織化単分子膜 (SAM) 上へのビオチン修飾を行った。バイオセンシング実験に先立ち、水滴接触角計測で親水性/疎水性評価を、またフーリエ変換赤外分光計測で化学成分分析を行い、クラッドレス MMF 表面におけるビオチン修飾を確認した。この MMI バイオ・ファイバーセンサーをファイバー光コム共振器内に配置し、アビジン溶液 (PBS バッファー) のモル濃度変化に対する f_{rep} 変化を計測した。その時の f_{rep} センサーグラムを図6に示す。アビジン溶液の濃度変化に応じて、階段状の f_{rep} シフトが確認出来る。今回の実験において、15fM 程度のモル濃度まで検出可能なことを確認した。

5. まとめ

これまで、光コムは『光周波数の物差し』として、分光計測や距離計測に幅広く利用されてきた。今後は、『光周波数の物差し』としてだけでなく、『光/電気周波数変換』の機能を利用することにより、ファイバーセンシングのような新しい分野への応用展開が期待される。今回紹介した屈折率センシングやバイオセンシングはその一例であり、ファイバーセンサーの多機能性と光

コムの高精度性を融合することにより、両者の特徴を活かしたセンシングが可能になると考えられる。

本研究は、JST/ERATO 美濃島知的シンセサイザプロジェクト (JPMJER1304)、内閣府/地方大学・地域産業創生交付金 (徳島県「次世代“光”創出・応用による産業振興・若者雇用創出計画」)、および文部科学省、科学研究費補助金 基盤研究 (A) (課題番号: 19H00871, 22H00303) より研究支援を受けた。

参考文献

- 1) Th., Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature* 416 (6877), pp. 233-237 (2002).
- 2) R. Oe, S. Taue, T. Minamikawa, K. Nagai, K. Shibuya, T. Mizuno, M. Yamagiwa, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, H. Fukano, Y. Nakajima, K. Minoshima, and T. Yasui, "Refractive-index-sensing optical comb based on photonic radio-frequency conversion with intracavity multi-mode interference fiber sensor," *Opt. Express* 26 (15), pp. 19694-19706 (2018).
- 3) R. Oe, T. Minamikawa, S. Taue, T. Nakahara, H. Koresawa, T. Mizuno, M. Yamagiwa, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, Y. Nakajima, K. Minoshima, and T. Yasui, "Improvement of dynamic range and repeatability in a refractive-index-sensing optical comb by combining saturable-absorber-mirror mode-locking with an intracavity multimode interference fiber sensor," *Jpn. J. Appl. Phys.* 58 (6), art. 060912 (2019).
- 4) R. Oe, T. Minamikawa, S. Taue, H. Koresawa, T. Mizuno, M. Yamagiwa, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, and T. Yasui, "Refractive index sensing with temperature compensation by a multimode-interference fiber-based optical frequency comb sensing cavity," *Opt. Express* 27 (15), pp. 21463-21476 (2019).
- 5) S. Taue, Y. Matsumoto, H. Fukano, and K. Tsuruta, "Experimental analysis of optical fiber multimode interference structure and its application to refractive index measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (4S), art. 04DG14 (2012).