

光学式ガスセンサーの開発

(可燃性ガス等を光で迅速に検知できるセンサーを開発する)

電子情報科 主任研究員 田尻健志

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの導入と関連産業の創出が期待されている。このような中、再生可能エネルギーの余剰電力を水素ガスに変換して貯蔵・利用する Power To Gas (P2G) が注目を集めている。しかし、水素ガスを含めた可燃性ガスは拡散して爆発し易い特徴を持っているため、漏洩ガスを迅速に検知し爆発を未然に防ぐ必要がある。また、コストを抑え安全性を高めたセンサーシステムの実現は難しい。そこで本研究では、空間内の水素ガスを迅速・高感度に検知できる光学式の水素センサーを開発する。初年度は、FDTD法(有限差分時間領域法)により水素ガスを検知する連結微小球プローブモデルの仕様について検証した。

1. 緒言

2050年カーボンニュートラルを実現するために、世界各国でCO₂排出抑制や再生可能エネルギーの導入拡大を目指している^[1]。再生可能エネルギーを主力電源として利用するには、コスト、系統制約、調整力の問題を解決する必要がある。このような中、余剰電力を水素に変換して貯蔵・利用する Power To Gas (P2G) が注目され、実用化に向けた実証事業が進められている。水素ガスは正しい取扱いを行えば安全なガスであるが、他の可燃性ガスと比較すると拡散性や浸透性が高く、漏洩する危険性がある。また、空気中での爆発濃度範囲が4%~75%と広いため、ガスが漏洩した場合には迅速に検知し、爆発を未然に防ぐ必要がある。

従来から利用されている水素センサーには、接触燃焼式や半導体式などがあるが、検知できるガス濃度範囲が低濃度範囲と狭く、検知時間にも数十秒が必要である。また、検知箇所を数百℃に加熱する必要があるため、加熱により水素ガスが爆発する危険性があり、消費電力量も高くなる。さらには、空間的なガス分布を把握するには、大量にセンサーを設置し、安全性と経済性を両立する必要がある。

そこで本研究では、多種の可燃性ガスにあわせたプローブモデルの選定を理論・実験の両面で行い、光学的に検知できる微小球プローブを開発する。また、微小球プローブを用いた試作装置を開発し、可燃性ガスの検出濃度範囲を評価する。

微小球プローブは、ある条件下で光を入射すると微小球内を周回する電磁波モードが発生し、特定波長の入射光が強く散乱されることが分かっている^[2-3]。この周回する特有の電磁波モードは、ウィスパーリング・ギャラリー・モード(Whispering Gallery Mode、以下WG

モード)と呼ばれており、微小球表面状態(屈折率、コート厚み)に非常に敏感である。このため、本研究ではWGモードの変化を利用することで、微小球表面に吸蔵した水素ガスを高感度に検知できるセンサーの開発を行う。微小球プローブはシンプルな構造であるため大量生産が容易であり、低コスト化に繋がる。また、空間に大量のセンサーを設置できるため、水素ガスの漏洩箇所や空間分布状態を把握することができる。

本報では、微小球プローブをFDTD法(有限差分時間領域法)により解析し、連結した微小球の仕様や励起方法を検証したので報告する。

2. 研究内容と結果

2.1 微小球プローブの選定

微小球の光閉じ込め効果は、周辺媒質との屈折率差が大きいのほど高いため、高い屈折率を持つ微小球を選定する必要がある。本研究では、Mie理論に基づき微小球の散乱断面積を計算し、空気や水素ガス中でも散乱光ピークが発生する直径10μm、屈折率n=1.40のシリカ(SiO₂)微小球を選定した^[4]。

図1に示すように、シリカ微小球は表面に水素を吸蔵する薄膜コーティングがない状態でも、水素ガスの充填により散乱光の共振ピーク波長が短波長側へシフトすることを確認している^[5]。このため、本研究では直径10μmのコーティング無しのシリカ微小球を用いて検証した。

また、昨年度までは単一の微小球を励起し、散乱光の共振ピーク波長変化を確認したが、本研究では、2個以上の微小球を連結した複合球へと展開し、散乱光強度を比較することで検知範囲の拡大と感度の向上を図る。

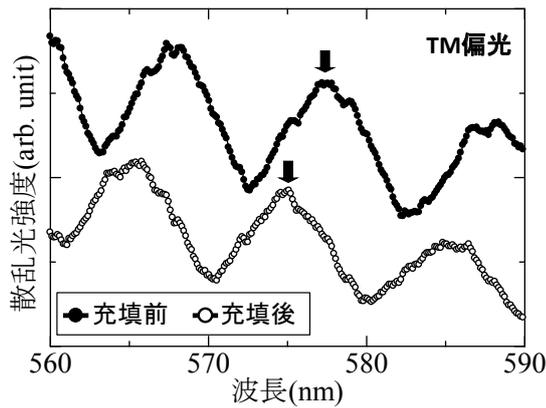


図1 水素充填による散乱光スペクトルの変化

2. 2 微小球の励起方法

昨年度までは、油浸対物レンズ（ニコン製、100×）を用い、全反射減衰配置で単一のシリカ微小球を励起し、分光器により散乱光スペクトルを検出した。しかし、微小球の励起位置が少しでも異なると散乱光強度に誤差が生じ、装置の小型化や低コストを進めるには励起方法と検出方法の改善が必要となる。そこで、本研究では、励起方法を光ファイバー方式へと簡易化し、再現性を向上させる検出システムを検証した。

図2 (a) は FDTD 法（有限差分時間領域法）を用い、導波光から連結した微小球を励起する計算モデルを示す。微小球の直径 (d) と屈折率 (n) は $10\ \mu\text{m}$ と 1.40 、周囲媒質の空気 (n_{air}) と導光板 (n_w) の屈折率は、それぞれ 1 と 1.5 としている。励起波長は単一の微小球で TM 偏光の共振ピーク波長が発生する $577\ \text{nm}$ とした。計算の結果、連結した2つの微小球で光が閉じ込められ、WGM が励起されることを確認した。また、図2 (b) と (c) で示すように、2つの微小球が接触および非接触の場合でもそれぞれの微小球で WGM が励起され、導波光との結合が有効であることを確認した。したがって、本研究では直径数 μm に細くした光ファイバーを用い、テーパ部から染み出すエバネセント光との結合^[6]により WGM を励起し、出射光の強度変化を検証する。

3. 結言

水素ガスを検知する微小球プローブとして、直径 $10\ \mu\text{m}$ 、屈折率 1.40 のシリカ微小球を選定し、連結微小球の仕様を検証した。また、FDTD 法（有限差分時間領域法）により、導波光を連結微小球に結合することで WGM を励起できることがわかった。次年度は、テーパ型光ファイバーを作製し、水素ガスの有無における散乱光ピーク波長の変化による強度変化を検証する。

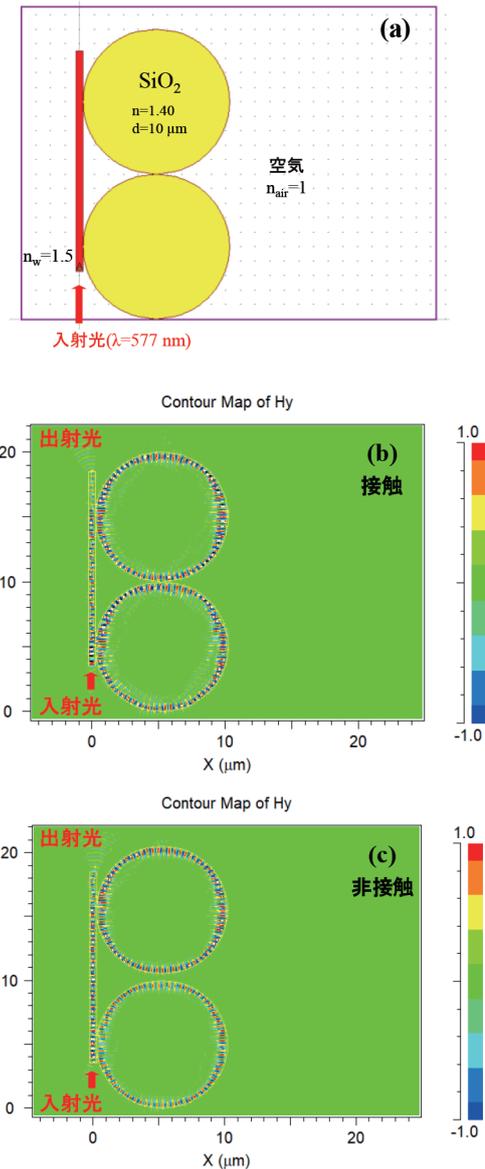


図2 連結微小球の励起状態

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁、第6次エネルギー基本計画、2021.
- [2] 福井萬壽夫、大津元一：光ナノテクノロジーの基礎、オーム社、2003.
- [3] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, *Anal. Sci.*, 30, pp. 799–804, 2014.
- [4] 田尻健志、岡本敏弘、原口雅宣：第84回応用物理学会秋季学術講演会、22a-A602-3, 2023.
- [5] 田尻健志：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 22–26, 2023.
- [6] 五神真、成田善廣：応用物理、第71巻6号、pp. 671–677, 2002.