

●—— ラマン分光法による油入変圧器の診断技術

油入変圧器は、変圧器として最も一般的に用いられている。低コストにもかかわらず対負荷性能が高く、設置条件を選ばないために、電力供給網を支える基盤装置として広く利用されている。油入変圧器には、放熱と絶縁のために、鉱油・絶縁紙が封入されている。これらは、長期間の利用に伴う継続的な加熱・冷却によって経年劣化し、定期的な状態診断および交換が必要である。

油入変圧器の経年劣化を評価するために、油中溶解ガス分析試験が実施されている。絶縁紙の分解によってCO、CO₂が、絶縁油の過熱によってCH₄、C₂H₄が、また、放電異常によりH₂、C₂H₂が生成されることが知られている。油中に溶解しているこれらの成分の濃度は、変圧器の使用状況と余寿命を診断するための良い指標となる。特に、極微量 (ppm レベル) でもC₂H₂が検出された際には、変圧器機能に異常が見られることが多い。

最近、Wangらは、分光学的手法によって、油中溶解ガスを、短時間で高感度に分析する方法を報告した¹⁾。この方法はラマン分光法に基づいており、単一波長の励起光源で、多成分ガスを一斉に検出することが可能である。被測定分子から放出されるラマン散乱光の強度は、励起光パワーに比例して増加する。したがって、一般的なガスラマン分析では、気体分子の低いラマン散乱断面積を補うために、ワット級の出力を有する光源が用いられる。しかしながら、Wangらのラマン分光装置では、出力100 mW程度の低コストの可視(642 nm)半導体レーザーが用いられており、この励起光パワーを増強するために、光共振器増強法が利用されている。

この方法では、高い光反射率を有する鏡を向かい合わせに配置した、光共振器と呼ばれるデバイスを用いる。その反射鏡間に、強め合って干渉する条件下で、レーザー光が空間的に閉じ込められる。その結果、共振器内のレーザー光強度は、光の反射回数に応じて増大する。Wangらの実験では、反射率99.992%の高反射鏡を用い、低パワーレーザー光を、約2100倍(222 W)まで増強した。この増強された励起光を用い、絶縁油のヘッドスペースガスに含まれる微量成分を、ppmレベルでの検出限界で、定量的に測定した。高精度・高感度・高選択性を兼ね備えたこの分析手法は、油入変圧器の診断技術にとどまらず、広く多成分気体センシングへの応用が期待される。

1) P. Wang, W. Chen, J. Wang, J. Tang, Y. Shi, F. Wan: *Anal. Chem.*, **92**, 5969 (2020).

[九州大学大学院工学研究院 財津慎一]

●—— 1分子FRETと2-color二次元蛍光寿命相関分光法による核酸のマイクロ秒構造変化ダイナミクスの検出

生体分子の構造変化を検出するための方法として、Förster共鳴エネルギー移動(FRET)は不可欠な技術である。これにはドナー-アクセプターペアと呼ばれる1ペアの蛍光色素が利用される。これらが近接して存在しているとき、ドナーが励起されるとそのエネルギーがアクセプターへと移動しアクセプターが励起される。この効率率は蛍光色素間の距離に大きく依存するため、単一分子のFRETである1分子FRET(smFRET)では距離に関する情報から生体分子の構造の変化を検出できる¹⁾。

smFRETの計測の手法としては、二次元蛍光寿命相関分光法(2D FLCS)が挙げられる。これは試料をパルスレーザーで励起した際に放出される光子の時間に関する情報を利用するものである。蛍光寿命(蛍光分子が励起されてから光子を放出して基底状態に戻るまでの時間)の二次元マップが得られ、単一分子レベルで生体分子の不均一性や高い時間分解能での構造変化を検出できる²⁾。この方法ではドナーの蛍光由来の光子の情報を利用するが、FRETによってドナーの蛍光寿命は短くなるため蛍光の検出可能性が低くなっていた。そこで、Chengらはアクセプターの蛍光由来の光子の情報を利用できるように拡張された2-color 2D FLCSという方法を開発し、これを用いて核酸の構造変化ダイナミクスに関する定量的な議論を行った³⁾。5'末端および3'末端がFRETのドナー-アクセプターペアとなる蛍光色素で標識されたヘアピン形成配列を持つ一本鎖RNAおよびDNAについて、smFRETを検出するため2-color 2D FLCSが行われた。その結果、RNAおよびDNAの両方についてアクセプターが欠損した分子、ヘアピンが'open'な分子、'closed'な分子の3種類の状態に割り当てられる三つの独立した蛍光成分が得られた。同じデータはfiltered FCS⁴⁾という方法でも解析され、RNAおよびDNAのヘアピン構造の形成・解離速度に関する情報が得られた。結果として、ヘアピン形成速度には大きな差が見られなかった一方で解離速度はDNAの方が10倍以上大きいということが報告されている。

このように高い時間分解能でsmFRETを検出することは1分子レベルで生体分子の構造ダイナミクスを解明するのに非常に有効であり、今後も多くの知見をもたらすことが期待される。

1) D. K. Sasmal, L. E. Pulido, S. Kasal, J. Huang: *Nanoscale*, **48**, 19928 (2016).

2) K. Ishii, T. Tahara: *J. Phys. Chem. B*, **117**, 11414 (2013).

3) C. Cheng, K. Ishii, T. Tahara: *J. Phys. Chem. B*, **124**, 10673 (2020).

4) S. Felekyan, S. Kalinin, H. Sanabria, A. Valeri, C.A.M. Seidel: *ChemPhysChem*, **13**, 1036 (2012).

[大阪公立大学大学院工学研究科 田中優仁, 許 岩]