

高ファイネス外部共振器を用いた 変圧器劣化診断用アセチレンガスセンサの開発

染谷 竜太¹、今村 武¹、幡野 浩¹、今井 佑輔²、高橋 肇²、鄭 和翊²、山口 滋²

Study of Acetylene Gas Sensor Using the High Finesse External cavity for Power Transformer Diagnosis

Ryuta Someya¹, Takeshi Imamura¹, Hiroshi Hatano¹,
Yusuke Imai², Hajime Takahashi², Kazuyoku Tei², Shigeru Yamaguchi²
¹Power and Industrial R&D Center, Toshiba Corp., ²Tokai University

Abstract

We apply CEAS technique to monitor trace acetylene gas in oil as marker of power transformer diagnosis. Developed CEAS sensor can detect trace acetylene (C_2H_2) gas as low as $8ppb$ in a few seconds. And we consider to wavelength drift with increase concentration of C_2H_2 .

1. はじめに

大型の油入変圧器は電力の安定供給のため、定期的な保守管理が必要である。保守管理における診断方法の一つに油中ガス分析法がある。これは、変圧器構成絶縁物の劣化進行や、機器異常が生じると、これらの劣化・異常由来のガスが変圧器絶縁油中に溶存するためである⁽¹⁾。

特に、変圧器内部に放電が生じた場合、アセチレン(C_2H_2)が生じることが知られている。そのため、高感度かつ迅速に C_2H_2 を検出することが可能となれば、変圧器の劣化・余寿命診断の精度向上が可能となる。

そこで、作業性や分析時間に優れ、精度、感度が飛躍的に向上する半導体レーザーと高ファイネス外部共振器を用いた分光法に着目し^(2,3)当該手法を用いたガス分析装置及び安定化について検討を行った。

2. 測定原理

(2・1) レーザー吸収分光法

対象物質に特定波長の光を照射すると、対象物質の分子運動の状態遷移のために光強度は減衰する。このときの透過光強度を透過前の光強度の割合を検出することで、媒質中の分子濃度を求めることができる。透過前光強度を I_0 、透過後光強度を I 、媒質中を透過する距離を L としたときの光強度の吸収量は、

$$I/I_0 = \exp(-\alpha L) = \exp(-\sigma N L) \dots \dots \dots (1)$$

となる。 α は吸収係数、 σ は吸収断面積、 N は測定ガスの分子数密度である。

吸収過程が生じる光の波長や波長に対する吸収線の形状は、分子構造により異なり、吸収強度も異なる。この現象を利用してガス種判定や濃度同定を行うことができる。

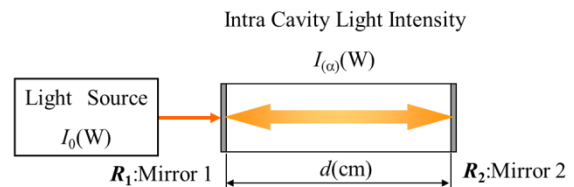


Fig.1. External Cavity Constitutive Model

(2・2) 外部共振器を用いた共振器内分光

高感度な測定を行うには、(1)式より、媒質透過距離 L を長くする必要がある。単純に L の増幅をするのではなく、レーザー光を小型の外部共振器中に閉じ込め L を増加させる手法が、共振器内分光法である。

外部共振器を用いた際の媒質透過距離 L は、共振器内の光子寿命 τ と光速 c の積で求めることができる。このときの L は、Fig.1のように、共振器長が d 、鏡の反射率を R_1 、 R_2 のとき、

$$L = c\tau = \frac{1}{\alpha + \frac{1}{2d}(1 - R_1 R_2)} \dots \dots \dots (2)$$

で決定される。ここで、 $\alpha=0$ (無損失)、 $d=10cm$ 、 $R_1=R_2=0.9999$ とすると τ は約 $3\mu s$ に達し、 L も $1000m$ 程度となる。従って、 $10cm$ の共振器を用いるだけで $1km$ もの媒質透過距離を得ることができる。

外部共振器を用いた測定を行う場合、分子による吸収損失に加え、共振器を伝播している間の損失を考慮する必要がある。従って、全損失 α は対象ガスによる吸収損失及び共振器を1回通過したときの単位距離あたりの損失の総和となる。

また、共振器内光強度を I としたときの共振器内部損失は、共振器内光強度と入射強度の関係から、

$$I_{(a)} = \frac{I_0}{(1 - \sqrt{\exp(-2\alpha d)})^2} \dots\dots\dots (3)$$

と表せるため、(3)式を用いて濃度測定を行うことができる。

3. 装置構成及び実験結果

〈3・1〉 装置構成

本実験を行うに当たり、Fig.2のような実験装置を構成した。1530nmの通信用半導体レーザーにAR (Anti-Reflection) コーティングを施したものを光源として用いている。また光源から光共振器までの光導路は全て光ファイバーを用いている。加えて実験時の発振波長を検証するため、光カプラを用いて光源の光を分波させている。

ガス濃度測定では、共振器内に設置した中空ガラスセル内にC₂H₂ガスを導入し、共振器後部に設置した光検出器の強度を測定して行った。

外部共振器の共振器長を10cm、前面ミラーの反射率を99.99%、背面ミラーの反射率を99.9975%とした。また、図中破線内のFBGは、波長ドリフト抑制の検証を行う際に導入した。

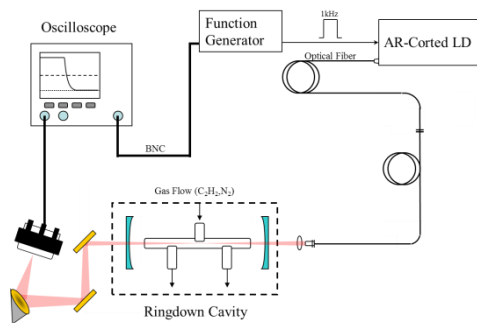


Fig.2. Schematic of the laser based C₂H₂ sensor

〈3・2〉 実験結果

構成した装置によってC₂H₂測定を行った結果をFig.3に示す。横軸は装置に導入した既知濃度のC₂H₂ガス濃度、縦軸は測定によって求められたC₂H₂ガス濃度である。図中の白抜き四角のプロットが測定結果である

まず、今回の実験から8ppbのC₂H₂を測定できることを確認した。

しかし、ガス濃度が100ppbを超えたあたりから、測定結果がサンプル濃度と相関していないことが解った。

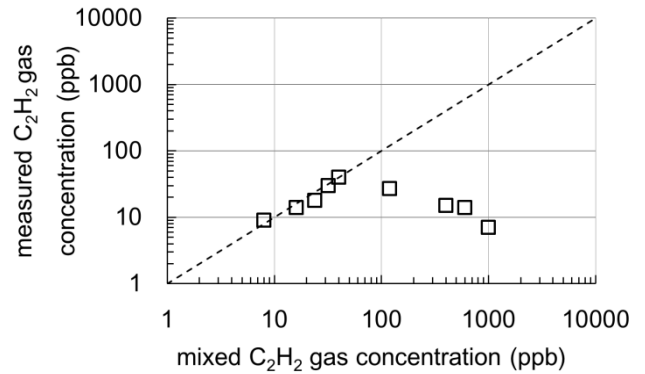


Fig.3. Measurement results of each concentrations of C₂H₂

4. まとめ

今回、以下に示すことが明らかになった。

- ・ 通信用半導体光源と高フィネス外部共振器を用いることで8ppbのC₂H₂を測定できることを明らかにした。
- ・ 濃度が濃くなるにつれ、測定結果がサンプル濃度と相関しないことが確認された。

発表では本報告内容及び高濃度測定における測定誤差の拡大についての調査結果についても報告する。

文 献

- (1) 電気協同研究会:「油入変圧器の保守管理」, 電気協同研究, 第54巻, 第5号(その1) pp.25-29 (1999)
- (2) J. Sato, et.al: “Flexible laser diode trace gas sensor based on cavity ringdown spectroscopy with an optical fiber-coupled high-finesse external-cavity diode laser”, Applied Physics B, Vol.96, No.4 pp.741-744 (2009)
- (2) R. Someya, et.al: “A Study of Trace Gas Detection Based on Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy (CEAS) For Power Transformer Diagnosis”, CLEO – PR 2013, Kyoto, Japan (2013)