

レーザー誘起蛍光による燃料油漏れの遠隔検知

Remote sensing of fuel oil leak using laser-induced fluorescence

二宮 英樹 (四国総合研究所)

Hideki Ninomiya (Shikoku Research Institute Inc.)

Laser light was irradiated on fuel oil, and spectral distribution and time variation of laser-induced fluorescence were measured. As a result, fuel oil emitted strong fluorescence when irradiated by ultraviolet laser light, and the intensity of fluorescence changed depending on the thickness of oil and the time exposed to air. The fluorescence from fuel oil was captured by a camera which was synchronized with laser irradiation and compared with a background image which was obtained without laser irradiation. Fuel oil leak could be detected using this method.

1. はじめに

火力発電所では重油を主体とした燃料油を用いて発電を行っており、漏油検知は発電所安全管理の重要項目である。このため、ボイラのバーナ付近の漏油想定箇所にセンサを設置して油漏れを検知する方法やITVカメラによる監視が行われている。センサによる検知は特定箇所の監視に限定され、またカメラによる監視は太陽光や日陰の影響を受けるなどの課題があり、定期的な巡視による確認作業が行われているのが現状である。このため、遠隔から広範囲の漏油を監視する方法が求められている。

油や塗装などの有機物に光を照射すると強い蛍光や散乱光が発生することから、物質の検知や組成分析に利用されている。レーザーを用いた遠隔計測では光吸収や蛍光を観測する方法や分子によるラマン散乱を測定する方法が利用されている。これらの分析手法は液体や固体表面の分析に広く利用されており、顕微鏡の世界から遠くは衛星からの地表や海面観測にまで利用されている¹⁻³⁾。

レーザーを照射して液体や固体の表面を観察する場合、ラマン散乱光やレーザー誘起蛍光が同じ波長域に同時に発生することが多い。特に塗料や油膜などの有機物の蛍光は広い波長範囲にわたって強く現れるため、これらを分離して測定することは難しく、表面に付着した物質を特定するためには、対象物の散乱光特性や蛍光特性さらに外乱の影響を事前に調べておく必要がある。

ここでは、燃料油の吸光・蛍光特性と散乱光特性の測定結果を基に、レーザー誘起蛍光を既設の監視カメラを用いて測定して遠隔から漏油を検知する手法について報告する。

2. 燃料油の吸光・反射・蛍光特性

2. 1 燃料油の吸光と反射特性

分析用石英セル (T-3.UV-10: 日本石英硝子社製) に燃料油 (S 分 0.16%) を入れ、硫酸バリウム粉末をリファレンスとして、分光光度計によって紫外線から近赤外線領域の吸光度と反射率を測定した。積分球の観測窓に対する石英セルの専有面積は約 70% である。その結果、燃料油は紫外線領域から近赤外線領域の光を 90% 以上吸収しほぼ黒色であり、波長に対して特徴的な吸収は見られないことから、この波長領域における分光測定あるいは映像観察ではその存在を特定することはできないと考えられる。

2. 2 燃料油の蛍光特性

分析用石英セルに入れた油に、紫外線ランプ光や LED 光あるいはレーザー光を照射して燃料油の蛍光スペクトルを分光器で測定した。分光測定条件は、スリット幅 5 μ m、露光時間 10ms、積算回数 100 回である。分光測定における励起光の遮光には、ランプ光や LED 光励起の場合は吸収式長波長透過フィルタ (シャープカット色ガラスフィルタ) を使用し、レーザー光励起の場合は干渉式レーザー光遮断フィルタ (ホログラフィック・ノッチフィルタ) を使用した。

燃料油の蛍光スペクトル例を **Fig.1** に示す。紫外線レーザー (355nm) 励起における蛍光は可視光領域の全波長域で観測され、400~500nm の波長域で比較的強い。青色 (473nm) や緑色 (532nm) レーザ励起における蛍光は、500~650nm で観測される。

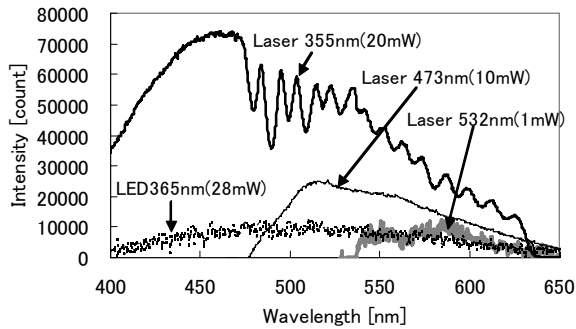


Fig.1 Fluorescence spectra of fuel oil.

次に、燃料油をシャーレに入れ、斜めに傾斜させて油膜厚さに対する蛍光強度を測定した。燃料油 (S 分 0.16%、SG : 0.9182) にレーザ (波長 532nm, 出力 1mW) を照射した場合の蛍光スペクトル強度を **Fig.2** に示す。燃料油の蛍光は油膜厚 0.1mm の場合はほとんど観測されず、0.2mm 以上で観測される。蛍光が観測される厚みになると、厚さに関係なく 580nm 近傍の蛍光が強く観測される。波長 550nm と 580nm について、燃料油の厚さに対する蛍光強度を **Fig.3** に示す。油膜厚が 0.2mm 以上で蛍光強度は飽和する。

硫黄分が多く含まれる燃料油 (S 分 1.77%) の蛍光スペクトルを **Fig.4** に示す。蛍光のピークは 580nm に現れ、**Fig.2** に示した蛍光スペクトルとほぼ同様である。

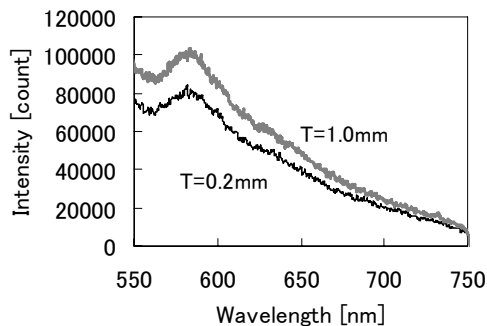


Fig.4 Spectral intensity of fluorescence vs thickness of fuel oil (sulfur content: 1.77%).

大気に曝した燃料油の蛍光の経時変化を **Fig.5** に示す。燃料油のレーザ誘起蛍光は時間と共に弱くなる。燃料油の初期膜厚は 1mm 程度であり、5 時間後では 0.2mm 程度である。また、燃料油を追加 (**Fig.5** 中の 15 時間) 直後は蛍光強度が一時的に増加し、時間が経過すると蛍光強度が減少する。この現象を **Fig.3** の厚みに対する蛍光強度と比較すると、燃料油の蛍光は揮発成分によるもので時間経過と共に油膜が薄くなると考えられる。

3. 太陽光による蛍光とレーザ誘起蛍光の比較

Fig.1 に示したように、燃料油は様々な波長の光照射によって蛍光を発する。このため太陽光によって発する蛍光を調べた。100W の太陽灯 (XC-100 ; セリック社) の光を 55cm の距離から照射して、蛍光測定を行った。試料は燃料油 (S 分 0.16%、SG : 0.9182) を使用し、油膜厚は 1mm とした。また、同時にレーザ光を照射して蛍光強度の比較を行った。励起レーザ光の波長は 532nm、照射強度は 1mW である。

Fig.6 に太陽灯とレーザを同時照射した場合の蛍光強度と太陽灯だけを照射した場合の蛍光強度を示す。また、**Fig.7** に、同時照射した蛍光強度から太陽灯だけの蛍光強度を差し引いた値 (強度差) と、レーザ光だけを照射し

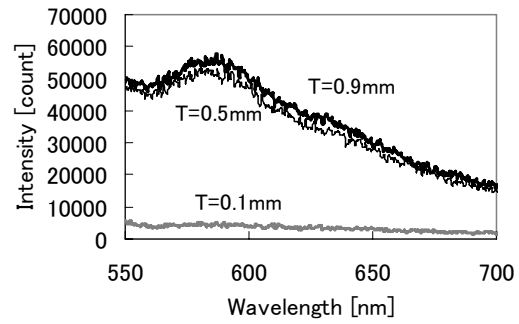


Fig.2 Spectral intensity of fluorescence vs thickness (T) of fuel oil (sulfur content: 0.16%). Pumping wavelength is 532nm.

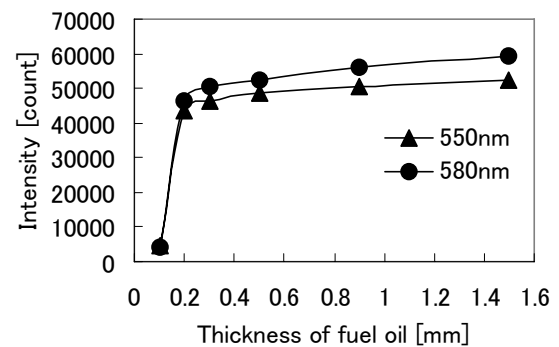


Fig.3 Intensity of fluorescence vs oil thickness.

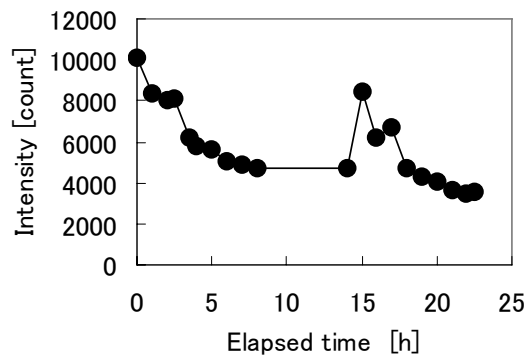


Fig.5 Time variation of laser-induced fluorescence.

た場合の蛍光強度を示す。

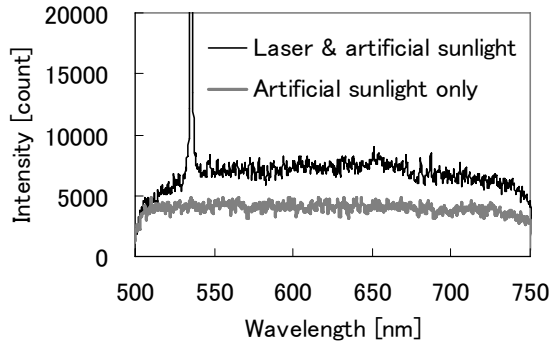


Fig.6 Fluorescence spectra of fuel oil pumped by laser and artificial sunlight.

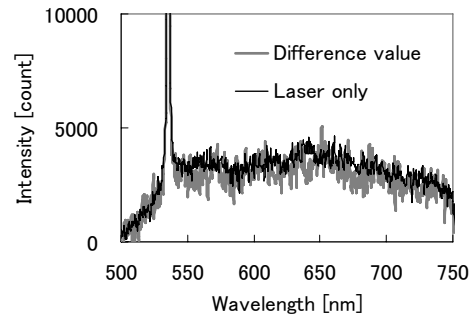


Fig.7 Difference value of fluorescence spectra shown in Fig.6 and fluorescence spectrum of fuel oil pumped by laser at 532nm.

Fig.6 に示すように、太陽光が当たっている場合でも、レーザ光照射における蛍光は優位性を以て観測できる。また、**Fig.7** に示すようにそれらの差を求めることで、太陽光の影響を排除することも可能である。このことから、レーザ誘起蛍光を検知することで、燃料油の存在を検知できる。

4. 監視カメラによる燃料油の漏洩検知の可能性検討

4. 1 試験方法

監視領域の画像取得において、奇数コマでレーザ光を照射しない背景を撮影し、偶数コマでレーザ光照射によって発生させたレーザ誘起蛍光を撮影し、その差分から燃料油を判別するための基礎実験を行った。**Fig.8** に CCD の画像取得とレーザ照射の実験方法を、**Fig.9** に画像取得信号とレーザ照射のタイミング波形を示す。

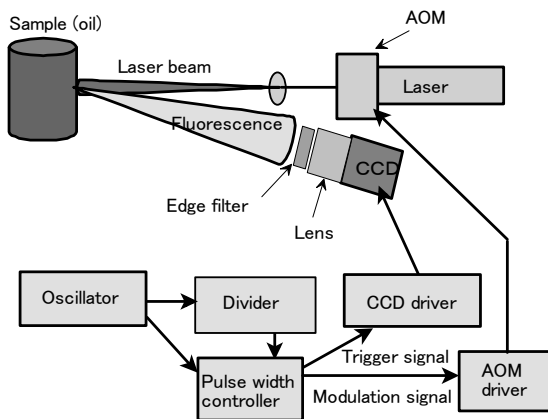


Fig.8 Experimental setup for remote sensing of fuel oil leak using laser-induced fluorescence.

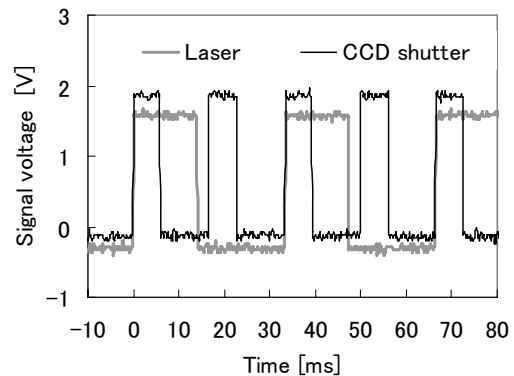


Fig.9 Waveform of laser irradiation signal and CCD shutter signal.

レーザ光を試料である燃料油に照射し、油の蛍光をレーザ光遮断エッジフィルタ（ロングパス光学フィルタ）とレンズを通してCCDカメラで撮影した。レーザ装置は連続発振のレーザ（532nm、1mW）を使用し、音響光変調器（AOM）でON/OFF制御して照射した。エッジフィルタの532nmにおける透過率は $<10^{-6}$ である。レンズは25mm（F1.4）を、CCDカメラはKP-MIAN（日立国際電気）を使用した。CCDコントローラはジャンクションボックス（JU-MIA）を、AOMドライバはD-100L（HOYA）を使用した。

CCDの画像取り込みとレーザ照射の制御は、まず水晶振動子を用いた発振回路で基準信号を発生し、分周回路を用いて1/2周期を発生させる。次にパルス幅制御回路でCCDのトリガパルスとシャッタ時間をコントロールし、同時にAOMのゲート時間を調整してレーザ光の照射時間を決定する。**Fig.9** に示すように、CCDトリガ信号の時間幅は6ms（シャッタ時間：1/150秒）であり、AOMのゲート幅（レーザ照射時間幅）は14msである。この制御回路のレーザ照射時間幅は1.7~24ms、CCDシャッタ時間幅は0.4~6.0msであり、環境の明るさによってシャッタ時間やレーザ照射時間が調整できる。

4. 2 レーザ照射試験結果

背景画像とレーザ照射画像を Fig.10 に示す。試験は Fig.8 に示した配置で、実験室内の太陽灯照明下で行った。CCD のシャッタ時間とレーザ照射時間は共に 1ms である。

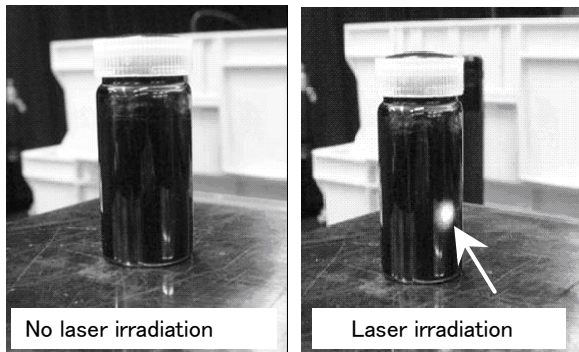


Fig.10 Images of fuel oil with and without laser irradiation. Laser wavelength is 532 nm, irradiation power is 1 mW.

Fig.10 に示すように、1 フレームおきにレーザを照射すると、レーザ照射の有り/無しの映像が取得でき、この差分を求めることで油の蛍光を検知することができる。

この計測方法のフローチャートを Fig.11 に示す。まず、基準信号と同期して奇数フレームの画像取得を行い表示する。次に、偶数フレームの画像を取得して表示し、差分処理を行った結果を表示する。しかしながら、装置を初期化し画像取得を開始した時のレーザ照射と取得フレームの関係は一義的に決まらず、レーザ照射が奇数フレームなのは偶数フレームなのか決定できない。そこで、画像差分処理は（奇数フレームから偶数フレームを引く）あるいは（偶数フレームから奇数フレームを引く）を選択する方式とした。

取得画像の事例を Fig.12 に示す。(a) は奇数フレームの画像（レーザ照射無し）、(b) は偶数フレームの画像（レーザ照射有り）、(c) は差分画像（レーザ照射画像からレーザを照射していない画像の輝度差）である。この場合は、偶数フレームとレーザ照射が同期している。

Fig.12 (c) に示すように、レーザ誘起蛍光と背景画像の差分を観測することで燃料油の存在を検知することが可能である。

5. まとめ

レーザ光の照射によって燃料油から強い蛍光が観測された。この蛍光をレーザ光の照射と同期したカメラで捉え、レーザ照射の有無の画像の差分を求めることで油の付着が検知できることを確認した。

この手法は漏油や汚れなど表面付着物の検知に有効な手段であると言える。

参考文献

- 1) 橋本守, コヒーレント反ストークスラマン散乱顕微鏡の開発, レーザ研究, 31, 6, pp.375-379 (2003).
- 2) 竹内延夫, レーザを用いた宇宙からの大気観測, レーザ研究, 24, 12, pp.1278-1284(1996).
- 3) 板部敏和, 航空機搭載ライダー, レーザ研究, 17, 4, pp.300-308(1989).

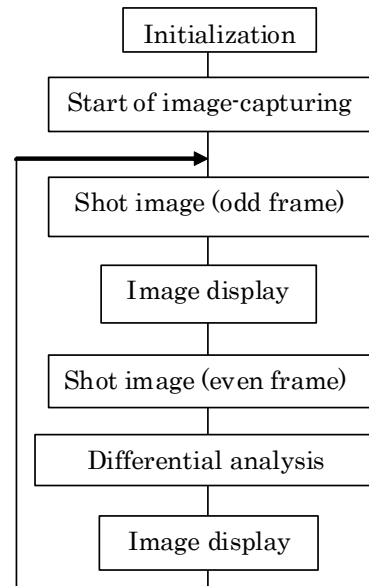


Fig.11 Flow chart for detection of leaked fuel oil by the ITV camera.

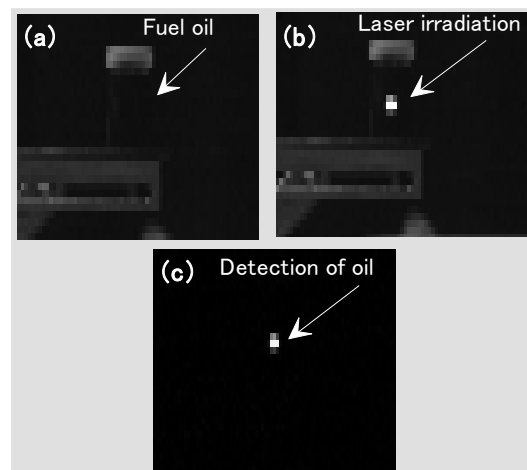


Fig.12 Detection images of fuel oil: (a) no laser irradiation, (b) with laser irradiation, (c) difference image. Laser wavelength is 532 nm, irradiation power is 1mW, irradiation time is 5 ms and frame rate is 30 frames/sec.