

ヘリコプター搭載蛍光ライダーによる海洋流出油の観測Ⅱ

(ホンダエアポートにおける観測実験)

Observation of oil spill using a helicopter-based fluorescence lidar II (flight experiment at Honda Airport)

篠野雅彦、樋富和夫、山之内博、桐谷伸夫、山岸進

Masahiko Sasano, Kazuo Hitomi, Hiroshi Yamanouchi, Nobuo Kiriya and Susumu Yamagishi

海上技術安全研究所

National Maritime Research Institute

Abstract

We developed a helicopter-based fluorescence imaging lidar for monitoring of oil spill on the ocean. It consists of a 355nm UV pulsed Nd:YAG (THG) laser, four-wavelength optical filters, and an gated ICCD camera. The flight experiment was operated on January and March 2005 at Honda Airport in Saitama-prefecture Japan for the performance evaluation of the system. The 2-D images of oil film were successfully observed as laser-induced fluorescence patterns from diesel oil and kerosene in a daytime.

1. はじめに

現在、日本の石油輸入は海上輸送がほとんどを占めている。しかし、石油タンカーは事故により石油を海洋上に大量に流出する危険性を持っている。このような事故が発生した場合、流出油が海岸に漂着する前に洋上で回収すれば、海岸付近の生物環境や人間の経済活動に対する影響を最小限に止めることができる。このため、洋上防除作業のための油回収船やオイルフェンス、オイルスキマー等、様々な流出油防除装置が開発され、配備されている。石油は海洋上に流出すると、時間の経過と共に拡散し、回収が困難になる。事故発生直後にこれらの装置を用いて迅速に防除作業を進めることが望まれる。

しかし、実際のタンカー事故は昼夜を問わず発生し、荒天時に事故発生が多いこともあって、事故海域付近での目視による流出油の確認は難しい。流出油の位置と規模が正確に把握できなかったため、洋上での流出油防除作業が遅れ、海岸に漂着したケースが数多く報告されている[1]。タンカーの油流出事故に対する海洋汚染防除対策として、昼夜や天候を問わず海洋流出油の正確な情報を得ることのできるモニター装置が求められている[2]。

現在、海上技術安全研究所では、海洋流出油モニターのためのツールとして、ヘリコプター搭載型蛍光イメージングライダーを開発している[3]。この装置は、タンカーの油流出事故が発生した場合に現場海域に急行し、昼夜や天候を問わず油流出状況をリアルタイムモニターすることを目的としている。ヘリコプターに搭載することで、事故海域までの高速移動と、注目している海域で低速移動でのモニター作業を可能とする。また、石油のレーザー励起蛍光を観測するため、昼夜や天候に関わらず高感度を保つことができる。さらに、2次元イメージを観測するため、油と海水の境界線を明確に観測し、流出油のマッピングをすることが可能である。

2. 石油のレーザー励起蛍光スペクトル

石油は高分子であるため、紫外レーザーを当てると蛍光を発光する。種々の石油類に紫外レーザーを当てたときの発光スペクトルは、励起するレーザー光の波長と、励起される油分子の分子構造によって決まる。石油は、様々な分子量をもつ有機分子の混合液体であるため、そのレーザー励起蛍光も、広い波長

に渡ってなだらかなスペクトルとなる。我々は励起用レーザーとして、比較的安定で大出力を得やすい Nd:YAG パルスレーザーの第 3 高調波（波長 355nm）を用いることとした。このレーザーによる各種石油の蛍光スペクトルを確認するため、ビーカーの中の蒸留水に薄い油膜（平均厚さ 1mm）を浮かべ、レーザーを照射して、その発光スペクトルを調べた。このときの実験装置の構成図を Fig.1 に示す。スペクトル測定は、重油、軽油、灯油の 3 種類を蒸留水に浮かべたものについて行った。また、参照用に蒸留水と海水の 2 種類を測定した。海水は高知沖で採取したものを用いた。試料液体中で発生した蛍光の一部を、355nm 用ノッチフィルターを通して弾性散乱光を減少させた後に光ファイバーで受光し、CHROMEX の分光計 250IS と浜松ホトニクス ストリークカメラ C5680 を用いて時間と波長の 2 次元で蛍光を分解して計測し、レーザー励起蛍光の特性を調べた。

その結果、蒸留水と海水のスペクトルには、波長 405nm に水ラマン光の特徴的なピークが現れることを確認した。また、石油類には発光スペクトルに特徴的なピークは現れず、波長 400～600nm の範囲でなだらかな蛍光スペクトルを持ち、そのスペクトルパターンは、重油、軽油、灯油で違うことも確認した。これらの実験から、海洋流出油観測用のライダー装置では、発光スペクトルを全波長にわたって測定するかわりに、その中の特定の 4 波長（水ラマン 1 波長+油種判定 3 波長）を測定すれば、流出油検出と、大まかな油種判定ができることがわかる。Fig.2 に、時間積分した各種石油類の蛍光スペクトルを示す。

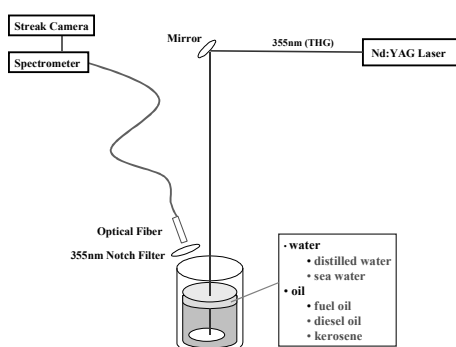


Fig.1 The schematic of laser induced oil fluorescence spectrum measurement.

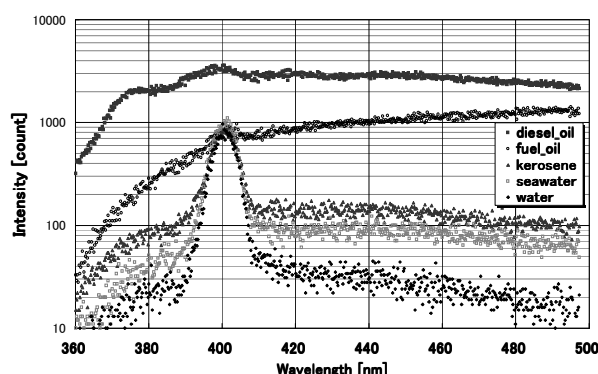


Fig.2 The 355nm laser induced fluorescence spectrum.
(Measured with a 355nm notch filter)

3. 蛍光イメージングライダー装置

流出油モニター用ヘリコプター搭載型蛍光イメージングライダーの構成図を Fig.3 に、諸元を Table 1 に示す。送信レーザーは Quantel BigSkeyLaser CFR400 を用い、Nd:YAG レーザーの第 3 高調波を直下の海面に照射する。ビーム強度はパルスあたり約 50mJ、繰返しは 8Hz である。ビーム拡がり観測状況に応じて、1mrad から 100mrad の間で調整する。ヘリコプターは高度 150～300m を飛行するので、海面でのレーザー径は約 15cm～30m、海面からのライダー信号は、レーザー発振時刻から 1～2 μ s 後となる。

受光装置は、浜松ホトニクスの ICCD カメラ C7972-03 を用いている。イメージ増強管の受光面を 4 つの領域に等分割し、それぞれ別の光学系の結像面として用いることで、4 つの映像を同時に記録するように設計している。4 つの光学系は、それぞれ直径 5cm の集光レンズから成り、視野角は約 100mrad である。それぞれの視野は無限遠で一致しており、中心波長 405.0、435.8、441.6、486.1nm の光学フィルタを付けているので、同じ視野について波長の違う 4 枚の画像を同時に取得する設計となっている。CCD のピクセル数は、1024×1024 であるため、1 つの波長に対応する 1 枚の画像は、512×512 のサイズとなり、各ピクセルが 12 ビットの強度分解能を持っている。また、蛍光イメージの S/N 比を上げるために、海面からのライダー信号を含む 200ns の間、ICCD カメラのゲートをオープンして、2 次元画像を記録している。こ

れを実現するためには、ヘリコプターから海面までのレーザー経路に沿った距離をあらかじめ設定して、レーザー発振から ICCD カメラのゲートオープンまでのタイミングを制御する必要があるが、レーザー経路はヘリコプターの位置や姿勢によって常に変化する。そのため、前回の海面でのライダー信号時間を記録しておき、その時間幅を用いて次のライダー観測での ICCD ゲート信号を作り出す電子回路を用いている。レーザー発振が 8Hz で行われるため、海面までの距離測定も 0.125 秒毎に更新されることになる。

一方で、ヘリコプターの位置と姿勢は、GPS とジャイロ、加速度計により計測している。位置の計測は、GPS 受信状況の良いときには、精度 1m ほどで緯度、経度、高度の位置を決めることができる。また、姿勢の計測は、精度 3.5mrad 以下で測定することができる。

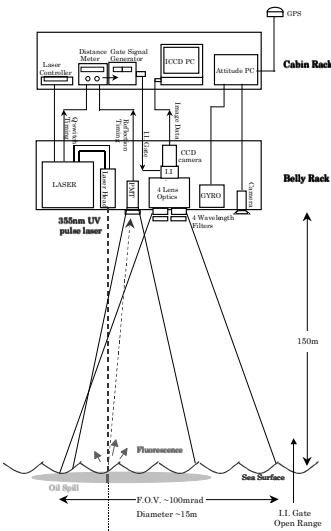


Fig.3 Schematics of the helicopter-based Fluorescence imaging lidar for monitoring of oil spill.

Table 1 Specifications of the helicopter-based fluorescence imaging lidar.

Laser	Type	Nd:YAG(THG)
	Wavelength	355nm
	Energy	50mJ/pulse
	Repetition	8Hz (Max 10Hz)
	Beam Divergence	1 – 100 mrad
Optical filter	Peak wavelength	405, 436, 442, 486nm
	FWHM	10nm
ICCD camera (Image Intensifier + CCD camera)	I.I. Gain	7 * 10 ⁴
	CCD camera Pixel Size	1024 * 1024 (512*512 / filter)
	Digitizing	12bit
	F.O.V.	100mrad
	Recording Repetition	8Hz
Distance Meter	Distance Resolution	0.75m
GPS	Position Resolution	0.9m horizontal
		1.6m vertical
Attitude Measurement Equipment	Attitude Resolution	0.2deg

4. ヘリコプターからの油膜観測実験

2005 年 1 月 17～19 日と 2005 年 3 月 1～3 日の期間、埼玉県の本ダエアポートにおいてヘリコプターによる油膜の蛍光ライダー観測を行った。空港敷地内に一辺 2m の簡易プールを 3 つ設置し、1 つは空にして、残りの 2 つの中にそれぞれ軽油と灯油を 20 リットル散布してターゲットとした（平均厚さ約 5mm。底面の凹凸のため、位置による油膜厚のばらつきは大きかった）。飛行観測の様子を Fig.4 に示す。



Fig.4 The view of flight testing site, the helicopter-based lidar system, and the target oils.

1月の飛行観測では、レーザー拡がり角を約1mradに調整して、ターゲットの油膜で発生するスポット状の発光を観測した。一方、3月の飛行観測では、レーザー拡がり角を約60mradに調整してICCDカメラの視野の内側ほぼいっぱいの円形に拡げ、ターゲットの油膜全体に励起レーザーを当ててその蛍光を観測し、2次元形状を可視化した。60mradに拡げたときのレーザーパターンは、位置によって2倍程度の強度むらが存在した。それぞれのレーザー拡がり角における、上空150mからの軽油の観測例を、Fig.5に示す。観測は日中に行われた。左の観測例では、レーザーが照射された位置だけがスポット状に強い蛍光を発光していることが確認できる。一方、右の観測例では、軽油の油膜全体がレーザー励起蛍光によって発光し、簡易プールの形状が可視化されていることが確認できる。

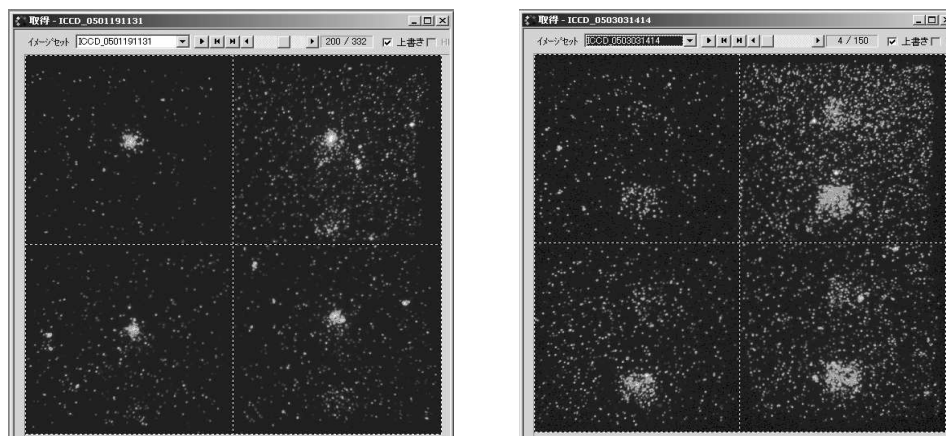


Fig.5 Examples of fluorescence imaging lidar observation data (Left: beam divergence 1mrad, Right: 60mrad).

The helicopter height is 150m. The ICCD camera gate width is 200ns.

The wavelength of 4 images are, counterclockwise from top-left, 405, 436, 442, 486nm respectively.

5. まとめと考察

海洋流出油の全日全天候型リアルタイムモニター装置として、ヘリコプター搭載型蛍光イメージングライダーを開発した。その性能評価のため、地上に簡易プールを設置し、軽油と灯油についてヘリコプターからのライダー観測を行った。その結果、レーザー励起による軽油・灯油の蛍光信号を得ることに成功した。また、ビーム拡がり角を約60mradにした場合に、軽油の油膜形状を可視化することに成功した。観測は、すべて日中に行われた。晴天の日中でも軽油は透明度が高く、目視観測が難しい。今回のテスト観測で、蛍光ライダーが透明度の高い石油類、特に軽油のモニターに有効であることが証明できた。

一方で、日中、ビーム拡がり角を約1mradにした場合には、水ラマン信号を観測することができたが、ビーム拡がり角を約60mradにした場合には、水ラマン信号を観測することができなかった。これは水ラマン散乱による発光量が少ないために、単位面積当たりのレーザー強度が低い状態では、日中の背景光ノイズにライダー信号が埋もれてしまったものと考えられる。未だ夜間のテスト観測を行ったことはないが、夜間は背景光ノイズが少ないため、ライダー信号検出が比較的容易であると考えられる。したがって、現状のレーザー強度では、日中は狭いビーム、夜間は広いビームを照射するように調整するのが最適であると考えられる。

参考文献

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, White Paper on Efforts against Ocean Pollution (2004), pp.15
- [2] C.E.Brown and M.F.Fingas, Marine Pollution Bulletin Vol.47 (2003) pp.477-484.
- [3] M.Sasano, K.Hitomi, H.Yamanouchi and S.Yamagishi, J. Visual. Soc. Japan Vol.25 Suppl.1 (2005) pp.421-424.