

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

Observation of oil spill using a helicopter-based fluorescence lidar

篠野雅彦^a、樋富和夫^a、山之内博^a、田口昇^a、桐谷伸夫^a、山岸進^b

Masahiko Sasano^a, Kazuo Hitomi^a, Hiroshi Yamanouchi^a, Noboru Taguchi^a, Nobuo Kiriya^a
and Susumu Yamagishi^b

^a海上技術安全研究所、^b日本造船研究協会

^aNational Maritime Research Institute, ^bShipbuilding Research Association of Japan

Abstract

We develop a new helicopter-based fluorescence imaging lidar system for monitoring of oil spill. It consists of a 355nm UV pulsed Nd:YAG(THG) laser, four-wavelength optical filters, and an ICCD camera. The first oil spill observation has been operated on May/2004 in French coast in collaboration with “DEPOL04”, the international oil spill observation and recovery experiment. The oil spill fluorescence signal and sea water signal were analyzed, and the discrimination of two signals was examined.

1. はじめに

タンカーの海難事故は、石油が海上に大量に流出する可能性があり、海岸の生物環境や人間の経済活動に深刻な影響を与える危険性を含んでいる。1997年に発生した日本海沖でのナホトカ号折損事故では、C重油約6,000klが海洋上に流出する事態となったため、オイルフェンス等で流出油の拡散を防ぎ、油回収船で回収を行うか、油拡散剤で処理することが求められた。しかし荒天下での流出油の目視確認は昼間でも難しく、拡散状況が正確に把握できなかったため、海洋上での流出油防除作業は計画段階から困難を極めた。このような背景から、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、海洋流出油の正確な情報を得るためのモニター装置の開発が急務であると考えられる。

現在、海上技術安全研究所リモートセンシング研究グループでは、海洋流出油モニターのための、ヘリコプター搭載蛍光ライダーを開発している。これは、タンカーの海難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た、リモートセンシング装置である。この装置は、ヘリコプターに搭載することで、海難現場までの高速移動と、注目している海域での低速移動しながらのモニター作業を可能にしている。また、レーザーを海面に照射し、海面や海中で発生した蛍光を観測するアクティブリモートセンシングであるため、昼夜や天候に関らず高感度で流出油を観測することが可能である。さらに、レーザー励起による蛍光を観測するため、原油、重油、軽油等の石油類だけでなく、目視では海水と判別しづらい、種々の透明な石油化学製品も検出対象物とすることができる。この装置により得られた流出油情報は、将来的には、無線を使って流出油対策本部に送信することを想定している。

2. 石油のレーザー励起蛍光スペクトル

種々の石油類に紫外レーザーをあ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構造によって決まる。石油類は様々な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、励起用レーザー光として、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、採取した海水に石油類を浮かべ、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、C 重油、A 重油、軽油について行った。また、海水は高知沖で採取したものをを用いた。試料液体中で発生した蛍光の測定には、浜松ホトニクスストリークカメラ C5680 を使い、入射スリットの前に 355nm 用ノッチフィルターと分光器を置いて、時間と波長の 2 次元で蛍光スペクトルを記録し、レーザー励起蛍光のふるまいを調べた。

その結果、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、C 重油、A 重油、軽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) を測定して、水/油判定と、大まかな油種判定をすることとした。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。

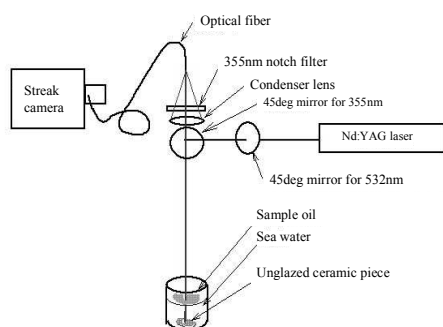


Fig.1 Schematics of laser induced oil fluorescence spectrum measurement.

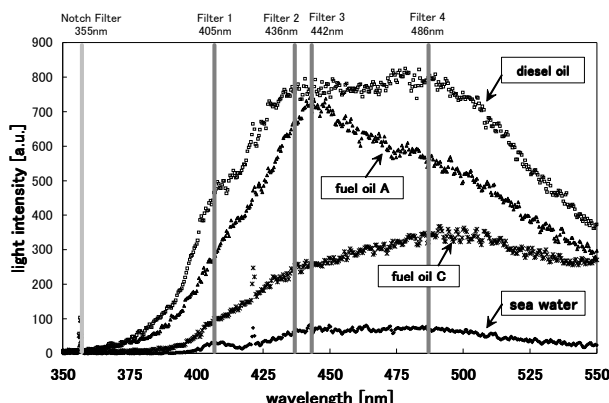


Fig.2 UV laser induced oil fluorescence spectrum. (Measured with a 355nm notch filter)

3. 蛍光ライダー装置

海洋流出油モニター用ヘリコプター搭載蛍光ライダー装置の構成図を Fig. 3 に、諸元を Table 1 に示す。送信レーザーは Quantel BigSkeyLaser CFR400 を使い、Nd:YAG 第 3 高調波をビーム拡がり約 1mrad で海面に照射している。ビーム強度はパルスあたり約 40mJ、繰返しは 4Hz で制御している。

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 つの領域に分け、それぞれ別の光学系の受光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されている。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 の光学フィルタを取付けているので、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。

このように、光学フィルタと ICCD カメラを用いて、広い視野の 4 波長蛍光画像を取得することで、スキャナー機構やビームエキスパンダー、分光計などの重く精密な部品を省略し、軽く振動に強いシステムを実現している。

また、蛍光イメージのシグナル/ノイズ比を上げるために、発射されたパルスレーザー光が海面にあたる前後の数 100ns のみ、ICCD カメラを露光し記録している。このようにすることで、海洋流出油からのレーザー励起蛍光シグナルを損することなく、太陽光の海面散乱光ノイズだけを小さくすることが可能とな

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、レーザー発射から 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、前回のパルスレーザーが発射してから、海面で弾性散乱し、その散乱光がヘリコプターに到達するまでの経過時間を記録しておき、そこから次の観測時の最適 ICCD ゲート信号を作り出すような電子回路を用いている。レーザー発振が 4Hz で行われるため、海面までの距離測定も 0.25 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。

全ての機器は、3つのラックに収められる。ヘリコプター下部に取り付けられるベリーラック、ヘリコプター客室に取り付けられるキャビンラック、ヘリコプターバッテリー部に取り付けられる電源ラックである。機器とラックを含めた重量はそれぞれ 108.2kg、56.9kg、16.4kg で、総重量は 181.5kg となる。各ラック間は、ケーブルでのみ接続されており、ヘリコプターの機体に下方観測用窓などの特別な仕様は必要ないため、一般の民間ヘリコプターに搭載することが可能である。

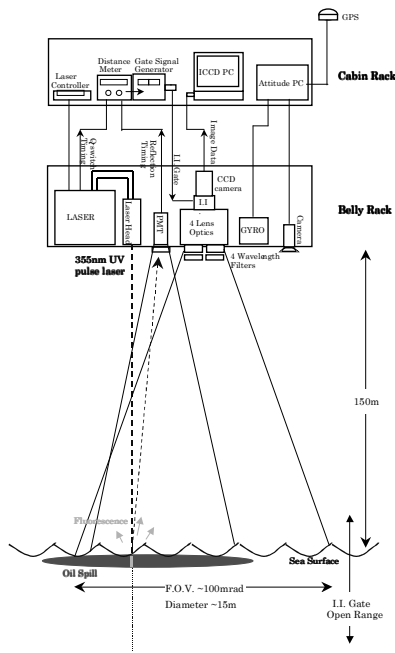


Fig.3 Schematics of the helicopter-based Fluorescence imaging lidar for monitoring of oil spill.

4. 海上流出油観測

2004年5月24~27日の期間、海洋流出油観測及び防除国際共同実験「DEPOL04」が開催された。この実験は、CEPOL（フランス汚染防止機関）・フランス税関・CEDRE（フランス水質汚染事故研究センター）の共同主催の下、フランス沖で実施されたもので、実海域に各種の石油を流出し、その挙動を観測した後、再び回収するという実践的海洋実験である。

我々は、フランス民間ヘリコプターに蛍光ライダー装置を搭載して、流出油のリモートセンシング観測実験に2日間参加し、1日目は海水観測、2日目は流出重油観測を行った。パルスレーザーが海面に当たるタイミング付近の400nsの間4波長 ICCD カメラを露光させて撮ったライダー観測例を、Fig.4に示す。

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

Laser	Type	Nd:YAG(THG)
	Wavelength	355nm
	Energy	40mJ/pulse
	Repetition	4Hz (Max 10Hz)
	Beam Divergence	1mrad
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	4Hz
Distance Meter	Distance Resolution	0.75m
GPS	Position Resolution	0.9m horizontal 1.6m vertical
Attitude Measurement Equipment	Attitude Resolution	0.2deg

レーザー励起による蛍光がスポット状に現れていることが確認できる。また、レーザーと無関係に $500 \mu s$ の間 4 波長 ICCD カメラを露光させて撮ったパッシブ観測の例もあわせて示す。パッシブ観測では、太陽光の海面付近での散乱光を観測していると考えられ、海水と流出重油の散乱光の違いから、油濁の境界のあたりが確認できる。

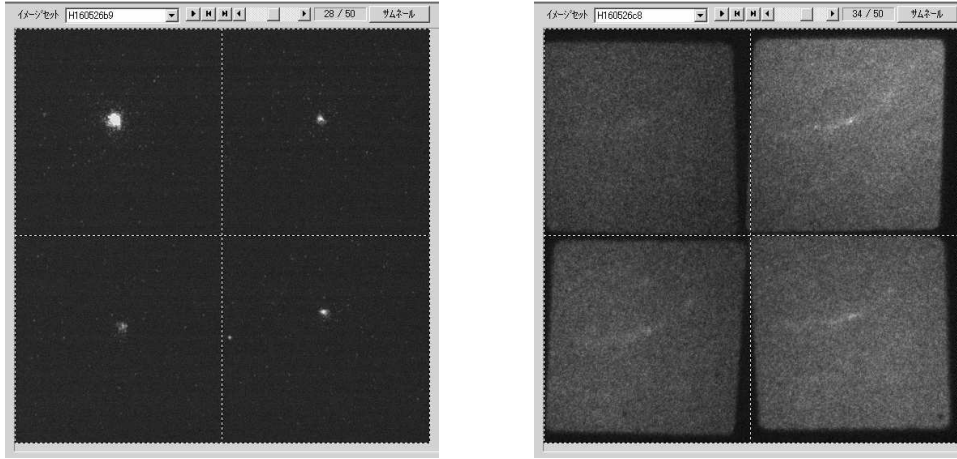


Fig.4 Example of fluorescence imaging lidar observation (gate width 400ns, height 157m, helicopter speed 91km/h), and passive image observation (gate width 500us, height 332m, helicopter speed 32km/h). The wavelength of 4 images are, counter clockwise from top-left, 405, 436, 442, 486nm.

5. まとめと考察

油流出事故のリアルタイムモニターができるリモートセンシング装置として、ヘリコプター搭載型蛍光ライダーを開発し、海洋上で流出油のテスト観測を行った。その結果、海水と流出油の、レーザー励起による 4 波長 2 次元画像が得られた。また、日中晴天下では、パッシブ観測でも流出油の 4 波長 2 次元画像が得られ、流出油の形状を観測することができた。

4 波長 2 次元画像から、各波長のライダー信号強度を算出し、4 波長の信号強度比パターンを示したものが、Fig. 5 である。海水を観測したときの典型的な形からずれている観測イベントがあることがわかる。これが流出重油の薄い油膜部分にレーザーが照射されたときの油蛍光信号である可能性があり、現在、確認を進めている。また、今後さらに流出油観測実験を続け、様々な石油類の観測データを蓄積することで、観測パターンを確認していく予定である。

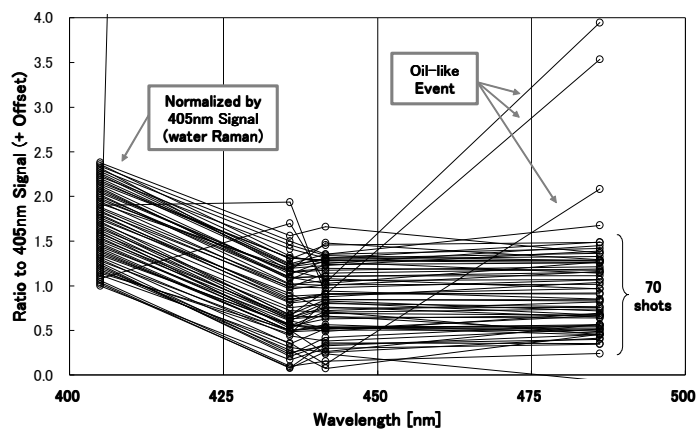


Fig.5 Four-wavelength lidar signal ratio for each laser shot. (gate width 1us, height 212–257m, helicopter speed 31–99km/h)