1-3 海洋油汚染監視システムの実用化について

環境・エネルギー研究領域 リモートセンシング研究グループ 樋富 和夫

1. まえがき

タンカーによる油流出事故は、1997年の「ナホトカ」号や1999年の「エリカ」 号のような大規模な汚染に発展する恐れがあり、依然として環境への重大な脅威となって いる。このような海洋汚染を防ぐには、事故防止対策を実施するとともに、被害を最小限 に押さえるための防除体制作りが必要である。

これまでの汚染事故を省みると、夜間や荒天下において、流出油の発見・監視が非常に 困難で対処に遅れをとったこと、また、防除作業において、流出油の種類、性状変化、漂 流位置等に関する情報が不足していたことが指摘されている。

このようなことから、昼夜を問わず汚染状態のリアルタイム情報を提供できる監視シス テムの開発研究に着手した。

レーザ励起による油の蛍光を受光する蛍光ライダーを提案し¹⁾、そのプロトタイプを開発した。プロトタイプの検知性能を検証するため、航空機による海上観測実験など^{2)~4)}を 実施し、問題点の抽出と対策^{5).6)}を講じ、実用化の見通しが得られた。現在、環境省地球 環境保全等試験研究費によりベンゼンなどの有害液体物質を検知対象⁷⁾とし、実用化を目 指している。

本報告では、プロトタイプの開発状況から実用化の見通しまでについて記述する。

2.海洋油汚染監視システムの開発要件

開発着手時の要件を以下に示す。

コンパクト;防除現場に直行できる航空機に搭載可能な小型の装置であること。

リアルタイム情報;防除関係者にリアルタイム汚染情報を提供できること。

昼夜観測;昼夜を問わず汚染物質を追跡できること。

油種識別;防除資機材に必要な油種や変質を識別できること。

これらの要件を満足させるため、観測システムにライダー技術及び蛍光分析技術を導入 すること、即ち小型蛍光ライダーの開発を提案した。蛍光ライダーの基本構成はレーザと CCDカメラである。近年における小型高出力レーザと小型高解像度CCDカメラの出現 により、小型化、画像化及び昼間観測が可能で ~ の要件が満たされている。また、レ ーザビームによる励起によって発する物質の蛍光により夜間観測と油種識別が可能で と の要件が満たされる。

これらの要件を全て満たす観測方法は従来方式(可視カメラ、赤外カメラ、マイクロ波 レーダ)にはないため、蛍光ライダーの開発に着手した。 3. 蛍光ライダーの概要

蛍光ライダーの概要を図1に示す。開発した蛍光ライダーは、油の分子を励起させ蛍光 を発生させるためのパルスレーザ(紫外域波長:355nm)と受光系(バンドパスフィルタ、 ゲート付きイメージインテンシファイア、CCDカメラ)で構成され、パルス信号発生器 とコンピュータで同期制御と画像収録が行われる。このシステムの重量と消費電力はそれ ぞれ約43 kg、約800 W で、軽飛行機、ヘリコプター、船舶への搭載が可能である。 レーザ光は他の光源で得られなかった単色性、指向性、高エネルギーの特徴を有し励起



<u> </u>				
	構成機器名	寸法(mm)	重量(kg	電力(W)
1)	パルス・レーザ	388 × 77 × 67	4.5	500
	レーザ電源部	197 × 406 × 356	14.5	
2)	イメーシ・インテンシファイア	29 × 80	3.7	20
	コントローラ	242 × 270 × 63		
3)	CCDカメラ	44 × 44 × 78	0.16	3.5
4)	画像表示装置	380 × 365 × 106	8.0	120
5)	画像記録装置	158 × 58 × 317	2.5	13
6)	パルス発生器::2台	356 × 216 × 121	4.6 × 2	70×2
	計		42,.56	796.5

図1 蛍光ライダーの概要

光として分光法などに使用されている。

蛍光は、分子または結晶に光を照射すると、電子的な励起状態になり、これがエネルギ ーのより低い電子状態(基底状態)に遷移するときに生じる発光である。蛍光は入射光に 比べて非常に弱い。夜間は妨害となる光が少なく、その蛍光を増幅すれば容易いに観測で きる。しかし、日中は太陽光が背景光となって、これに埋もれてしまい観測が困難となる。 この場合、イメージインテンシファイア(以下、I.I.と表現)のゲート操作とフィル ターを用いると観測が可能になる。即ち、タイミングをとって、電子的シャッターをレー ザパルス幅(約1億分の1秒)に近い時間開放することと、フィルターにより特定の波長 のみを通すことにより背景光を弱めることができる。

この蛍光ライダーでは、蛍光はCCDカメラで記録される画像内に、ほぼ入射レーザビームの大きさに等しいスポットとして得られる。使用したレーザのビーム拡がり角は3 mrad、即ち。高度100 m で直径30 cm のスポットとなる。そのスポットの強度や波長を比較して識別が行われる。

4. 蛍光の特性

識別は油の特性を示す蛍光スペクトルの、ある特定の波長を比較して行われる。図2に 油類の蛍光スペクトルを示す。蛍光スペクトルは水又は海水に試料を浮かべた状態、即ち 実際の観測状態に合わせ、ストリークカメラで計測される。計測した油類は3つのパター ンに分類される。(a)は軽油と海水で台形状のスペクトル、420~480 nm 付近に最 大強度がある。(b)はシステム油、A重油、 船尾管潤滑油(システム油)で短波長ピー ク型三角形状のスペクトル、430 nm 付 近に最大強度がある。(c)は廃油(軽油、 A重油、C重油の混合)、原油、C重油で 長波長側ピーク型三角形状のスペクトル、 490 nm 付近に最大強度がある。

これらのスペクトルがデータベースに蓄 積され、バンドパスフィルターの選定や識 別に利用される。

5.システムの検知性能

5.1 水槽における検証

中距離の観測性能及び昼夜観測性能を検 証するために実施した観測例を図3に示 す。観測距離は約77m、観測対象は蛍光 剤ローダミン(Rhodamine;R-6G)である。 (a)~(c)は昼間、(d)は夜間に おける実験である。(a)は、レーザとI. I.を使用しない状態、即ち太陽光のみに よる蛍光(画像中央の楕円)及び樹木が観 測されている。これは太陽光による油流出 面観測の可能性を示唆すものである。(b) は、I.I.を使用せず、レーザ出力最大

の場合で、レーザと太陽光による蛍光が観 測されている。(c)はレーザ出力最大、 I.I.ゲイン70%、ゲート時間15 ns の場合で、太陽光による背景光は除去され、 レーザーによる蛍光のみが観測されてい る。(d)はレーザ出力最大、I.I.ゲイ ン70%、ゲート時間20 ns の場合で、 夜間における蛍光が観測されている。 水 槽における性能検証実験により、中距離観 測、昼夜間観測、背景光除去が可能である ことが確認された。

5.2 航空機による検証

航空機によるシステムを検知性能を検証 するため、2000年3月、日本海におい てビーチクラフト(電子航法研究所所有)





に搭載し、実海域実験を行った。

日本海のナホトカ号沈没地点における 観測例を図4に示す。観測時の速度と高 度はそれぞれ150knot、1,000ft(約 300m)である。(a)は浮遊油の可視 画像、(b)はレーザーがターゲットに当 たった形跡がなく、太陽光による405 nm 画像である。速度150knot、高度 1,000ftの飛行条件におけるレーザス ポットは直径が90cm、計測間隔が50 m となり、ターゲットに捕らえることは 難しく、観測装置は飛行速度を変えられ るへリコプターへの搭載が適している。

琵琶湖における観測例を図5に示す。 飛行条件は同じで、極力、水平飛行で観 測が行われ、スポット画像が取得された。 使用したフィルターはレーザ波長355 nmのみをカットするノッチフィルターで あるため、スポットは、ラマン光、プラ ンクトン等の蛍光、532 nm 反射光等 が含まれている。これは琵琶湖に油が浮 遊していない観測例であるため、飛行実 験後、室内で琵琶湖観測再現実験を行い、 浮遊油がある場合は強い蛍光が観測され ることを確認した。

5.3 飛行観測実験で得られた問題点と その対策

琵琶湖の観測実験においてスポットの 連続画像が取得され、目標の1つである 航空機搭載への見通しが得られたが、解 決しなければならない幾つかの問題点が 判明した。

1)離陸時における気圧変動によって、 レーザ用冷却水が漏れ、レーザにインタ ーロックが掛かりレーザが停止する。

この対策として、レーザを気圧変動対応型に変更し、出力も11 mJ から60 mJ へ向上された。

2)旋回等で高度が変わると蛍光等の







(b) 蛍光ラーダーによる(a) 浮遊油可視画像405nm 波長画像図4 ナホトカ号沈没海域における観測例



琵琶湖飛行コース



スポット画像が観測できない。

この問題に対する対策はレーザの海面反射光をシステムへの同期信号として利用し観測 距離変動に対して実時間で対応する。

励起レーザ波長としてYAGレーザ(基本波長1,064 nm)の第三高調波(355 nm) を使用しているが、355 nm 光には1,064 nm と532 nm (第二高調波)の光が含 まれいるため、3つの波長の光を同期信号とすることは可能である。ただ、その信号を受 信するフォトマルセンサの3波長における感度性能が優先される。

反射光とほぼ同時に蛍光が受光される。そこで、最も大きな問題は機器や配線による遅 延があることであり、これらの遅延時間 250000 を含め反射光の受光前にカメラ側のトリ 200000 (tripped and the second secon ガ信号を必要とする。この対策法として、 1回前のレーザ発射から海面反射光受光 までの時間を記憶し、その時間を減算に 50000 よって、次のゲート操作のトリガ信号に 0 反映させる回路(演算遅延パルス発生器) を考案(特願2001-273331号)した。

6. 更なるシステムの高度化

今後、開発しなければならない実用化 に重要な課題として次の2点がある。

油種を高精度で識別できるシステム に改善する。

荒天時に海中に潜った油や流出事故 後に海底に沈んだ油の検知方法を確立す る。

6.1 油の高精度識別

図6は軽油、原油、A重油の蛍光スペ クトル(図2)のプロットである。 交 点や重なった部分があり、1つの波長の みでは誤った識別をする可能性があるた め、検知する波長を増加させる方法を検 討した。検知波長の増加法として、リア ルタイム観測、即ち画像取得構想は堅持 して、4波長を同時に観測できる図7の 受光装置を考案(特許第 3453595 号)し 開発した。





図 6 識別が困難な例



4 波長受光装置 図 7



4波長受光装置による観測例 図 8

車のバケットにシステムを設置し、20mの高さからバケットを旋回させて観測した例である。ターゲットは救命浮環の上に貼り付けた円形プリンター用紙である。太陽光の反射と励起による円形ターゲット、即ち油流出面に相当する画像とターゲット内にレーザに

よる4波長の蛍光スポットが観測されている ことを確認した。また、画像が連続取得され ていることを確認した。

油の識別例を図9に示す。これは、アクリ ル性円筒底なし容器を浮環に乗せ固定し、試 料(軽油、潤滑油、A重油)を注入・浮遊さ せ、高所作業車(20m)で観測した例であ る。図は4つ波長とそれぞれの蛍光スポット の最大強度値をプロットしたもので、識別さ れていることを確認した。

6.1.2 演算遅延パルス発生器の性能検 証

演算遅延パルス発生器を使 用し、受光システムの自動計 測を検証した。実験は当所構 内の道路上で、ベニア板に当り けたプリンター用紙をタ ーゲットとし、観測距離(1 00~350 m)を変えてプ ターへの搭載を模擬した実 である。レーザは単独制御と し、内部トリガ4 Hz でビー ムが発すれる。フォトマル センサ、演算遅近パルス発生 器、4波長受光装置を接続し



図9 油の識別例



図10 演算パルス発生器による自動計測例

た受光システムでターゲットから帰ってきた反射光をフォトマルセンサが受け演算遅延パ ルスの遅延パルス信号で4波長受光装置が自動計測できるか検証された。

図10に計測画像例を示す。これは、観測距離350m、50回、連続的に記録された例 で自動計測が可能であることが確認された。

4 波長受光装置と演算遅延パルス発生器の検証により、ヘリコプターに実海域実験(2003年12月;日本、2004年;フランスと日本)への見通しが得られた。

6.2 海面下の油の検知

海面に浮かんだ油の検知は可能であるが、荒天時に油が海面下に潜り発見できないといわれている⁸、また、1999年に発生したエリカ号重油流出事故では事故後に海底に沈

んだ油が潜水艇で確認されている。フランスのセドレと当所は研究協力に関する覚書を交わしており、セドレからの依頼によりグリーンレーザによる探査方法について検討した。

YAGレーザの第2高調波532 nm であるグリーンレーザは海水による減衰が小さく 海底地形探査に使われている。これまでの調査や実験により、以下の結果が得られた。

水の濁度の影響によって、計測可能な水深が大きく変わる。

海面下の潜った油は海底からの反射信号との差から計測可能である。

グリーンレーザでは蛍光情報が得られないため、海底に沈んだ油は泥などとの判別が 困難である。

紫外レーザ355 nm が利用できれば水深と蛍光を同時に計測することができる。その 可能性を調べるため、深海水槽において観測実験を行った。水槽の底に石英ガラスと真鍮 で構成される容器に収納されたプリンター用紙をターゲットとして、紫外レーザビームに よる蛍光と水深の計測を行った。図11にその結果を示す。

これは水深33.6 m における計測例で、清水の場合、ターゲットの蛍光が観測される ことが確認された。これは、荒天時に海面下に潜った油や沈んだ油に関する検知の可能性 を示すもので、水面下の計測も実用化へ近づいたと思われる。



図11 水深33.6mにおける水深と蛍光の計測例

7. あとがき

励起レーザによる油の蛍光を受光する蛍光ライダーを提案し、そのプロトタイプを開発 した。プロトタイプの検知性能を検証するため、航空機による海上観測実験などを実施し、 得られた問題点の対策として、レーザの更新、演算遅延パルス発生器の考案を行った。 また、実用化のための課題を解決するため、4波長を同時に受光できる受光装置を考案した。性能検証の結果、油種識別が可能であることが確認された。また、紫外レーザによる水深と蛍光の計測実験の結果、水面下の油の検知が可能であることが確認された。

平成15年度12月~2月と平成16年度に東京湾と当所の上空で、観測限界などを明確にするため、ヘリコプターによる検証実験が実施される。また、来年度はフランスにおいて、実際の油を流出させる実海域実験で観測が行われる。それらの検証実験によって、成果を上げることができれば、実用化への証明になると考えられる。

今後、濁度と計測限界の明確化、識別のためのデータベースの充実、用途に応じた軽量 化などの課題を解決して行きたいと考えている。

船舶による海上観測実験では、弓削商船高等専門学校、松下邦幸機関長、村山雄二郎教授、多田光男助教授ほか乗組員、また、航空機による海上観測実験では電子航法研究所、山本憲夫室長、山田公男主任研究官ほか岩沼分室職員に多大なるご支援を頂いた。

また、ナホトカ号湧出油の現状調査には第八管区海上保安本部担当官にご協力を頂いた。 ここに心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究
 - 第1報: 蛍光特性の計測、山岸 他5、第69回船舶技術研究所講演集、pp.193-197、 1997
 - 第2報:実時間画像表示システム、樋富 他5、第71回船舶技術研究所講演集、 pp.109-112、1998
- 2) 蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究
- 第3報:海上実験、樋富 他4、第73回船舶技術研究所講演集、pp.263-266、1999 第4報:航空機による実海域実験、樋富 他4、第74回船舶技術研究所講演集、 pp.45-50、2000
- 3) Susumu Yamagishi, Development and test of a compact lidar for detection of oil spills in water, SPIE, 2000
- 4) Susumu Yamagishi, DETERMINATION OF LIDAR SIGNAL FROM IMAGES OF BACKSCATTERED NATURAL LIGHT ON WATER SURFACE, INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 2001
- 5) 樋富 他4、海洋汚染監視システムの高度化に関する研究(第1報) 第1回海上技 術安全研究所講演集、pp.129-132、2001
- 6) 樋富 他4、海洋汚染監視システムの高度化に関する研究¹第2報)第2回海上技 術安全研究所講演集、pp.351-354、2002
- 7) 樋富 他3、4波長蛍光画像による海洋汚染物質の検知について、第22回レーザセンシングシンポジウム、pp.171-174、2003
- 8)鈴木淑夫、流出油事故に関する二つの国際会議について、海上防災 No.95 pp29-52、1997