

有害液体物質流出時の 環境汚染モニタリングに関する研究

樋富 和夫*、山之内 博*、間島 隆博*、山岸 進*
篠野 雅彦*、桐谷 伸夫*、星野 邦弘*、山口 良隆*
田口 昇*、池本 義範、泉山 耕**

Monitoring System for Detection of Spilled Hazardous Substances

by

Kazuo Hitomi, Hiroshi Yamanouchi, Takahiro Majima,
Susumu Yamagishi, Masahiko Sasano, Nobuo Kiriya,
Kunihiro Hoshino, Yoshitaka Yamaguchi, Noboru Taguchi,
Yoshinori Ikemoto and Koh Izumiyama

Abstract

This paper describes a newly developed fluorescence monitoring system to detect spilled chemical substances with their fluorescence characteristics excited by the laser and the atmospheric dispersion model of chemical substances. Tankers around our country transport a large amount of various kinds of chemical substances. However the effective techniques for such chemical substances have not yet established, and sometimes accident of chemical tankers provokes difficult problems. The SAKURA, a tanker of Panamanian nationality caused the collision accident in TSUGARU offing in 1988, spilled a considerable amount of styrene monomer which was colorless and transparent. The declaration of evasive area for ships and an evacuation order to inhabitants were delayed in the first action of prevention activity. The object of our research is to develop a detection device for liquid hazardous chemical substances and to provide a dispersion model which is able to predict the dangerous area, using information obtained by the new device.

* 環境・エネルギー研究領域、 ** 海洋開発研究領域

原稿受付 平成17年10月13日

審査済 平成18年 2月27日

目 次

1. まえがき	38
2. 観測システムの開発要件	38
3. 蛍光ライダーシステム	39
3. 1 システムの概要	39
3. 2 油の蛍光特性	39
3. 3 システムの検知性能	40
3. 3. 1 水槽における検証	40
3. 3. 2 船舶による検証	40
3. 3. 3 航空機による検証	40
3. 3. 4 飛行観測実験で得られた問題点 とその対策	41
4. システムの実用化	41
4. 1 システムの高度化	42
4. 1. 1 有害液体物質データベースの構築	42
4. 1. 2 多波長蛍光計測装置の開発	44
4. 1. 3 フォトマル受信機の開発	45
4. 1. 4 高度化のまとめ	46
4. 2 ヘリコプター搭載型観測システム	46
4. 3 飛行観測実験によるシステムの検証	46
4. 3. 1 飛行観測実験による基本性能の検証	46
4. 3. 2 飛行観測実験による総合検証実験	48
4. 4 拡散ガスの危険域表示ソフトウェアの構築	49
4. 5 全体システム構想	50
5. あとがき	51
謝辞	51
参考文献	51

1. まえがき

タンカーによる油流出事故は大規模な汚染に発展する恐れがあり、流出油は環境への重大な脅威となる。

1997年の「ナホトカ」号や1999年の「エリカ」号による大規模汚染は長期にわたり環境に与えた影響は甚大であった。

大規模汚染に発展する要因として、1)目視、特に夜間や荒天時における流出油の発見・監視の困難性、2)荒天時防除の困難性、が挙げられる。防除法の決定には、流出油の種類、性状変化、漂流位置等に関するリアルタイム情報が不可欠である。

このような背景と課題をもとに、昼夜を問わず汚染状態のリアルタイム情報の提供が可能な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)~3)}、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、航空機による飛行観測実験など^{4)~7)}を実施し、問題点の抽出と対策^{8),9)}を講じ、実用化の見通しを得た。

その後、2000年11月、フランスにおける「イエボリ・サン」号沈没事故において、積載されていた毒性の強いスチレンモノマーによる大規模汚染が懸念され、国際問題となった。緊急防除に関する国際協力体制の構築を主たる目的としたOPRC条約は、対象物質を油から有害危険物質に広げる2000年新議定書が締約国で協定された。研究開発の条項では、最新の技術（特に、監視および防除技術）の向上に関する研究成果の交換および促進協力が定められるなどの国際的な動きがあった。そのような背景を踏まえて、当所で開発した油検知用蛍光ライダー技術を有害液体物質の監視技術¹⁰⁾へ発展させ、本研究では、システムの開発と実用化を目指した。

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¹¹⁾までについて記述する。

2. 観測システムの開発要件

観測システムの開発要件を以下に示す。

- ①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。
- ②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。
- ③昼夜観測；昼夜を問わず汚染物質を追跡できること。
- ④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。
- ⑤広域観測；流出現場を迅速に観測できること。
- ⑥荒天時観測；流出を伴う海難事故が発生し易い荒天時に観測ができること。

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およ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、画像化および昼間観測が可能で①～③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③と④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、マイクロ波レーダー）にはないため、蛍光ライダーの開発に着手した。⑤と⑥は今後の課題と位置づけたが、後述するレーザビーム拡大時、水深34m、および雨天時の蛍光観測の成功により、2つの要件を満たす見通しが得られた。

3. 蛍光ライダーシステム

3.1 システムの概要

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（以下、PCと表現）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43kg、約800Wで、軽飛行機、ヘリコプター、船舶への搭載が可能である。蛍光ライダーの概要を写真3.1と表3.1に示す。



写真3.1 蛍光ライダー

表3.1 蛍光ライダーの概要

構成機器名	寸法(mm)	重量(kg)	電力(W)
1) パルス・レーザ レーザ電源部	388×77×67 197×406×356	4.5 14.5	500
2) ICCDカメラ イメージンシファイア コントローラ CCDカメラ	29×80φ 242×270×63 44×44×78	3.86	23.5
3) 画像表示装置(PC)	380×365×106	8	120
4) 画像記録装置	158×58×317	2.5	13
5) パルス信号発生器	356×216×121	4.6×2	70×2
計		42.56	796.5

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光として分光法などに使用されている。

蛍光は、入射光を吸収した物質がそれと異なる波長の光（スペクトル）を発する現象で、その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いので、電子的に数千倍から数万倍増幅して観測できる。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できない。この場合、イメージンシファイア（以下、I.I.と表現）のゲート操作とフィルタを用いると観測が可能になる。つまり、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。

この観測システムでは、蛍光は記録される画像内には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。そのスポットの強度を比較して識別が行われる。

3.2 油の蛍光特性

油の識別は防除資機材の選定や、タンカーの通常運航で油が微量流出したときに何処から漏れているかを判断し対処を行う場合に必要である。

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3.1に油類の蛍光スペクトルを示す。

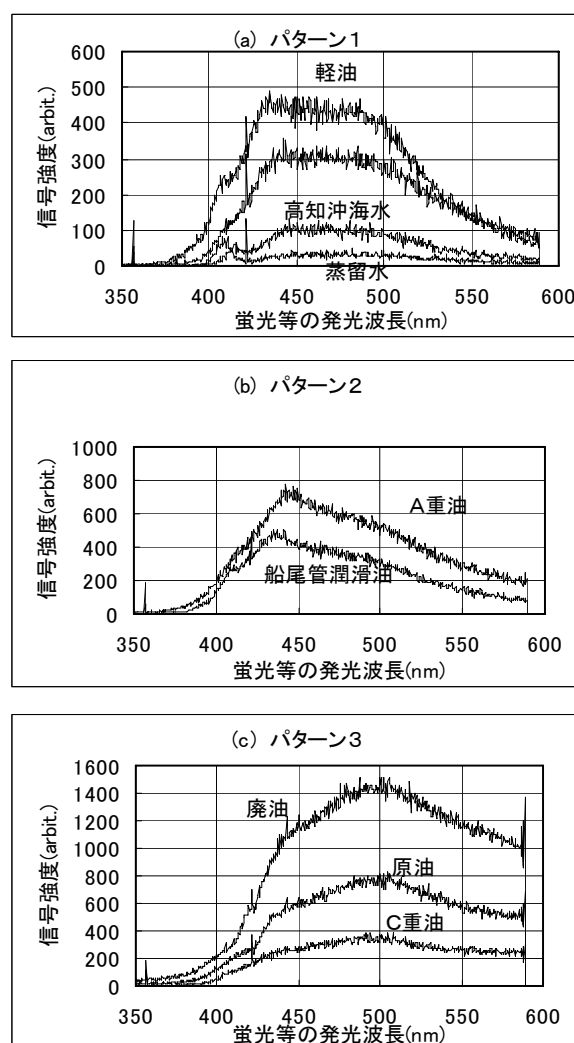


図3.1 油類の蛍光スペクトル

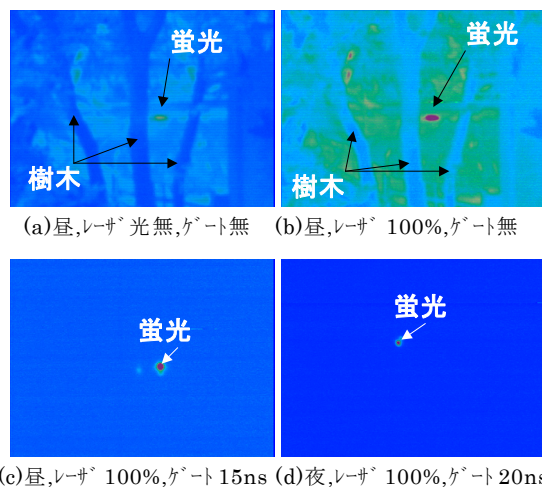
蛍光スペクトルは水または海水に試料を浮かべた状態、即ち実際の観測状態に合わせ、浜松ホトニクス C5680蛍光寿命計測装置（ストリークカメラ）で計測される。計測した油類は3つのパターンに分類される。(a)は軽油と海水で台形状のスペクトル、420nm～480nm 付近に最大強度がある。(b)はA重油

と船尾管潤滑油（システム油）で短波長ピーク型三角形形状のスペクトル、430nm 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形状のスペクトル、490nm 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の選定や物質の識別に利用される。

3.3 システムの検知性能

3.3.1 水槽における検証

中距離の観測性能、昼間の背景光除去、夜間観測性能を検証するために実施した観測の結果を図3.2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。



図

3.2 昼夜間の観測例（距離77m）

(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）およ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るものである。(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%、ゲート幅15ns(ナノ秒)の場合で、太陽光による背景光は除去され、レーザ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%、ゲート幅20ns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。

3.3.2 船舶による検証

航行時の昼間観測における光学的擾乱（白波、背景光の影響）の除去例を図3.3に示す。図中の(a)は光学的擾乱画像で、蛍光や水のラマン散乱光は観測されない。(b)はゲートで光学的擾乱を除去した例で

、水のラマン散乱光と白波による太陽反射光が観測されている。(c)はゲートと偏光フィルタ（方向0度）の装着による例で、ほんの僅かにラマン光が観測されている。(d)は(c)の状態から偏光フィルタの方向を90度に変えた場合で、ほぼラマン光のみが観測されている。航行時の昼間観測における擾乱は、ゲートと偏光フィルタにより除去できることが確認された。

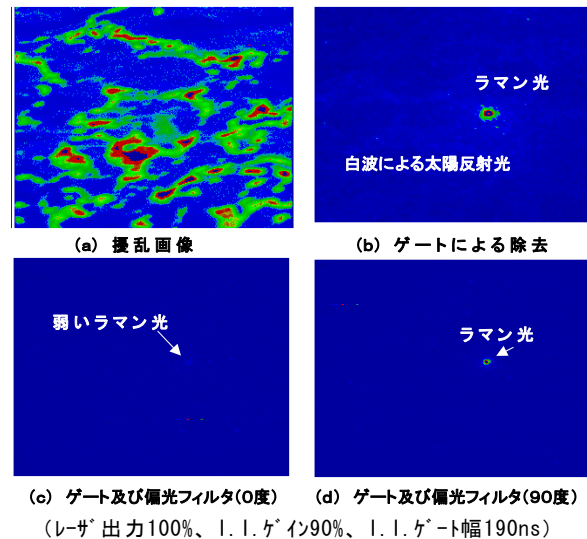


図3.3 光学的擾乱の除去例

3.3.3 航空機による検証

航空機によるシステムの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3.4に示す。

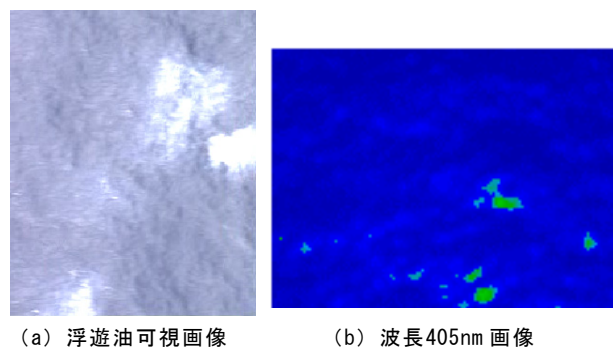
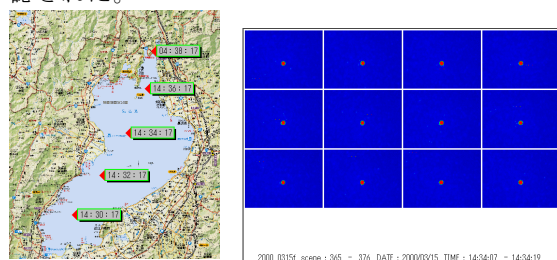


図3.4 ナホトカ号沈没海域における観測例

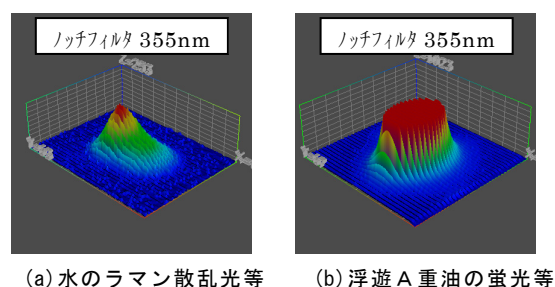
観測時の飛行高度と飛行速度はそれぞれ1,000ft(約300m)、150ktである。レーザ出力9mJ/パルス、I.I.のゲート幅6μs、I.I.のゲイン100%が機器設定条件である。(a)は浮遊油の可視画像、(b)は405nm画像である。(b)には水のラマン散乱光、あるいは蛍光のスポットが確認されず、太陽反射光による405nm

画像(パッシブ)のみであった。水のラマン散乱光が確認されていない理由は、レーザ出力9mJ/パルスが十分でないことも考えられるが、HDD(Hard Disk Drive)への記録周期1Hz、飛行速度150kt、飛行高度1,000ftの観測条件ではレーザビーム直径90cm(3mrad)による計測間隔が約77mとなり、ターゲットを捕らえることが難しいためである。パッシブでターゲットを捕捉し、その位置情報からホバリングでターゲットの蛍光を計測する方式、すなわちヘリコプター搭載型システムが今後の検討課題となった。

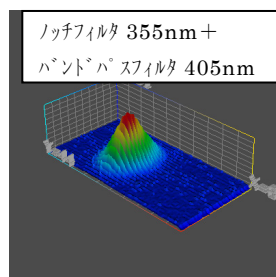
琵琶湖における観測例を図3.5に示す。飛行条件は同じで、極力、水平飛行で観測が行われ、スポット画像が取得された。使用したフィルタはレーザ波長355nmのみをカットするノッチフィルタであるため、スポットは、ラマン散乱光、プランクトン等の蛍光、532nm反射光等が含まれている。これは琵琶湖に油が浮遊していない観測例であるため、飛行実験後、室内で琵琶湖観測再現実験を行った。浮遊油がある場合は図3.6に示す強い蛍光が観測されることが確認された。



(飛行コース) (連続記録画像)
図3.5 水のラマン散乱光等のスポット画像



(a) 水のラマン散乱光等 (b) 浮遊A重油の蛍光等



(c) 浮遊A重油の405nm蛍光等
図3.6 琵琶湖観測再現実験結果

3.3.4 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9mJ/パルスから60mJ/パルスへ向上された。

②旋回等で飛行高度が変わると蛍光等の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1,064nm)の第三高調波(355nm)を使用しているが、355nm光には1,064nmと532nm(第二高調波)の光が含まれているため、3つの波長の1つ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。

同期信号としての利用に当たって最も大きな問題は、蛍光が反射光とほぼ同時に受光されること、フォトマル信号の経路する機器や配線による遅延があることであり、これらの遅延時間を含め反射光の受光前にカメラ側のトリ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、その時間を減算によって、次のゲート操作のトリガ信号に反映させるフォトマル受信機(蛍光計測装置:特許3646164号)を考案した。

③HDDへの記録周期を向上させるため、レーザの繰り返し周期(10Hz)に近づける。また、最適な飛行速度と飛行高度を明確にするため、ヘリコプター搭載型システムを検討する。

4. システムの実用化

実用化を図るため、飛行観測実験の結果を踏まえて、解決しなければならない以下の課題を明らかにする必要がある。

- ①油種を高精度で識別できるシステムに改善する。
- ②フォトマル受信機の製作により自動観測方式に改善しシステムを高度化する。
- ③HDDへの記録周期を向上させる。
- ④システムが観測できる最適な観測飛行高度と飛行速度を明確にする。

その後の国際動向として、1999年フランスにおける「エリカ」号重油流出事故による大規模汚染

と開発した蛍光ライダーのプロトタイプに関する情報交換より、フランスCEDREとの研究協力を行うことになった。「蛍光ライダーシステムの実用化」および「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法の検討」が分担する研究課題となった。さらに、2000年11月、フランスにおけるスチレンモノマー積載「イエボリ・サン」号沈没事故の発生、対象物質を油から有害危険物質に広げる2000年OPRC条約新議定書の協定があった。そのような背景を基に、当所で開発した油検知用蛍光ライダー技術を有害液体物質の監視技術へと発展させ、システムの開発と実用化を目指した。

そのため、システムは、高度化¹²⁾、ヘリコプター搭載型へ再構築¹³⁾、および飛行観測実験による性能検証を行う必要があった。

4.1 システムの高度化

4.1.1 有害液体物質データベースの構築

(1) 有害液体物質の蛍光特性

有害液体物質を識別するための最適な励起波長と蛍光の受光波長を明確にするため、日立 F-2500 分光

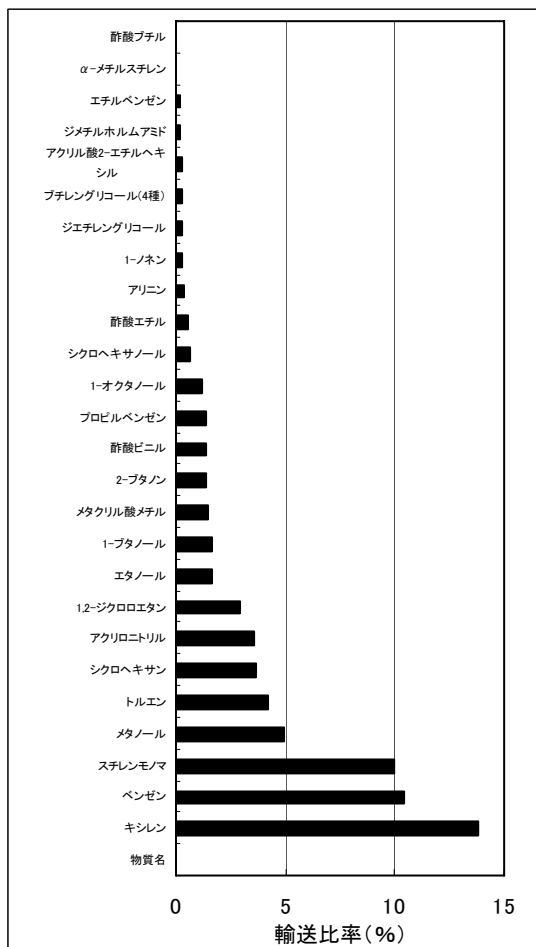


図4.1 測定対象の有害液体物質

蛍光光度計により各励起波長の発光スペクトルを測定した。有害液体物質は、試薬として購入したものをそのままの濃度で栓付きの10mm 角型石英ガラスセルに入れて測定を行った。測定対象の物質は図4.1に示す輸送量の多いキシレン、ベンゼン等29種である。測定された有害液体物質の分光蛍光光度データはデータベースに蓄積された。ベンゼンの分光蛍光光度測定結果を図4.2に示す。縦軸と横軸はそれぞれ励起波長(220~400nm)と蛍光等の発光波長(220~500nm)である。図中には、励起光、ベンゼンのラマン散乱光および蛍光が示されている。ベンゼンの蛍光の最大値は275nm 励起波長による285nm の蛍光波長に見られた。図中横軸のカーソルは355nm に対応する励起波長の位置を示している。この355nm 励起による発光スペクトルを図4.3に示す。横軸と縦軸はそれぞれ蛍光等の発光波長と信号強度である。図には励起光の散乱光とベンゼンのラマン散乱光が示さ

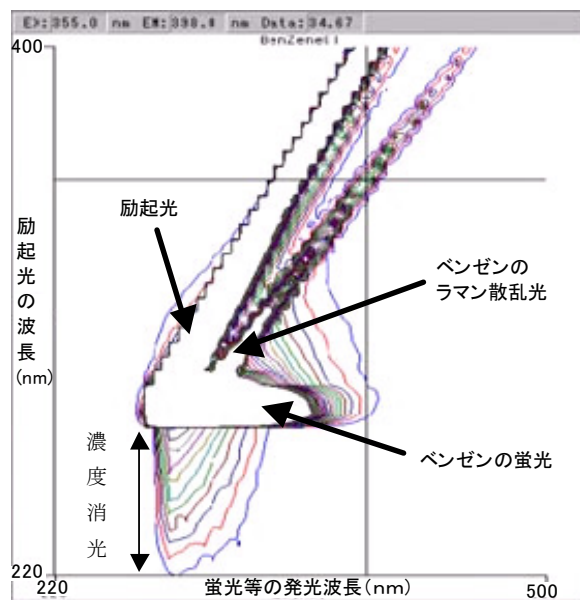


図4.2 ベンゼンの分光蛍光光度

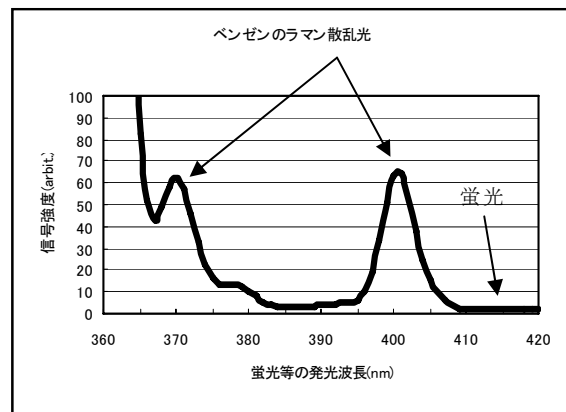


図4.3 355nm 励起によるベンゼンの発光スペクトル

れている。他の物質に対しても蛍光の最大値が得られる励起波長を調査した結果、280nm であることが分かった。しかし、図4.2に示されているように励起波長275nm 以下では、励起光の信号が見られず、試料の濃度が高すぎるために励起光がセルの入り口付近で吸収され、セルの中心付近で十分に励起光に到達しない濃度消光¹⁴⁾と呼ばれる状態になっている。280nm 励起では濃度消光によって計測できない物質も存在するため、蛍光ライダーに採用している355nm 励起法と280nm 励起法による有害液体物質の識別法について検討した。

(2) 355nm 励起による識別

355nm 励起による識別には、1) 蛍光を発する物質はその蛍光波長、2) 蛍光が微弱な物質はラマン散乱光波長、の信号強度が用いられる。取得されたデータにより識別法が検討された。355nm 励起における識別方法と識別例を図4.4に示す。

識別方法は、3種のラマン散乱光波長信号強度を3軸とする直交空間座標における物質の合成強度 I_m を水の合成強度で無次元化した距離指標 r と水ラマン波長405nm 座標軸との成す角度 θ を指標として判別する。

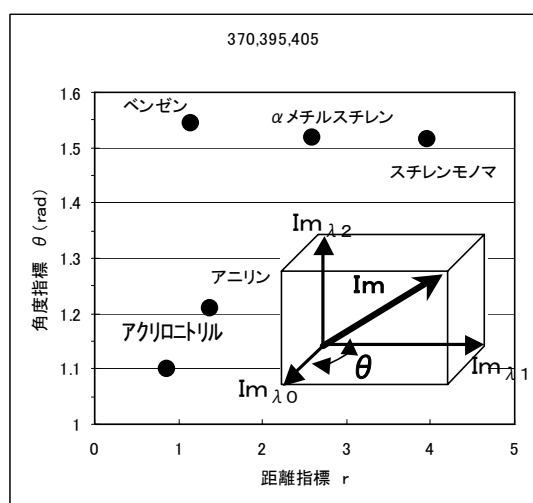


図4.4 識別法と識別例

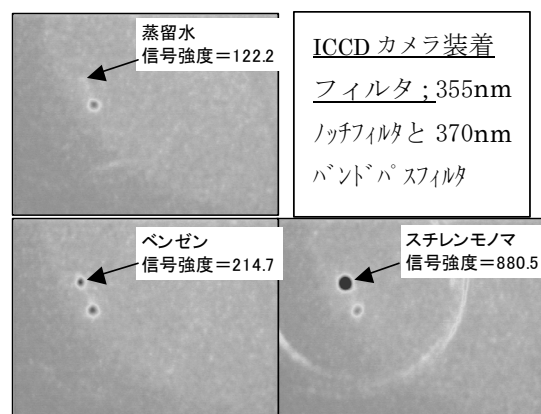


図4.5 発光画像

識別にベンゼン、スチレンモノマ等の特性を示す波長370、395、405nm のラマン散乱光の信号強度を用いた結果、識別が可能であることが示された。また、励起レーザと ICCD カメラによって測定された蛍光画像による識別実験では、図4.5に示す370nm 画像内の蛍光スポットから得られる信号強度が物質によって異なること、後述する飛行観測実験で水のラマン散乱光が観測されたこと、から識別が可能であることが確認された。

(3) 280nm 励起による識別

280nm 励起では、22種類の物質に蛍光スペクトルが計測されたが、濃度消光によって計測できない物質が7種あった。その7種の物質の内、水面に浮遊した状態に上方からレーザを照射する方式により表面から蛍光等を発光する物質が5種あり、図4.6に示すようにそれらの物質は水のラマン光と同等以上の信号強度を有する。濃度消光で全くレーザ光を通さない2つの物質（アクリル酸2エチルヘキシルとメタクリル酸メチル）は水のラマン信号も得られないため、その波長を測定することにより、それらの物質と水の判別は可能である。識別結果のまとめを表4.1に示す。

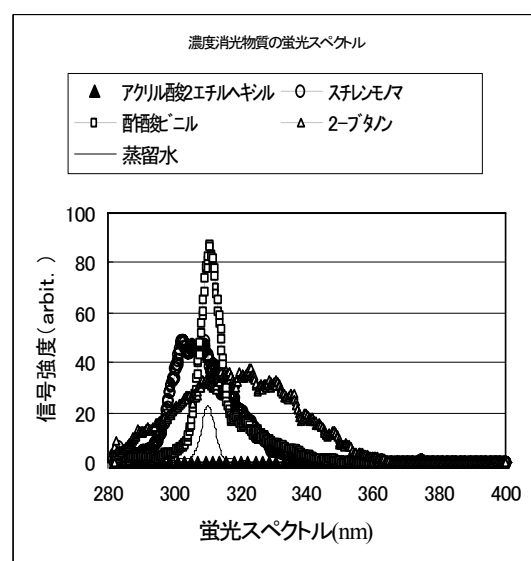


図4.6 濃度消光物質の蛍光スペクトル

(4) 励起レーザ

280nm 励起用のレーザは532nm YAG レーザ、色素レーザ(532nm から560nm 光に変換)、波長変換結晶(560nm から280nm 光に変換)で構成される。この構成によって出力は532nm レーザ光の100分の1となり、高出力が必要な大型のシステムとなる。一方、355nm 励起用のYAG レーザは高出力化と小型化が進み、光学系の入手やメンテナンスが容易であり、システムはコンパクトに設計できる。そのため、現状では、355nm 励起による観測法が実用的である。

表4.1 有害液体物質の識別結果のまとめ

物質名	355nm励起	280nm励起	濃度消光
ベンゼン	Aタイプ	蛍光とラマン	275nm以下
アクリロニトリル	Aタイプ	蛍光とラマン	230nm以下
酢酸エチル	Bタイプ	蛍光とラマン	245nm以下
シクロヘキサノール	蛍光とラマン	蛍光とラマン	—
1-ノネン	蛍光とラマン	蛍光とラマン	275nm以下
酢酸ブチル	Bタイプ	蛍光とラマン	245nm以下
ジメチルホルムアミド	Bタイプ	蛍光とラマン	260nm以下
1-ブタノール	Bタイプ	蛍光とラマン	—
キシレン	Bタイプ	蛍光とラマン	275nm以下
スチレンモノマ	Aタイプ	蛍光とラマン	300nm以下
シクロヘキサン	Bタイプ	蛍光とラマン	—
アリニン	Aタイプ	蛍光とラマン	325nm以下
α -メチルスチレン	Aタイプ	蛍光とラマン	300nm以下
エチルベンゼン	蛍光とラマン	蛍光とラマン	275nm以下
1-オクタノール	Bタイプ	蛍光とラマン	—
1,2-ブチレングリコール	蛍光とラマン	蛍光とラマン	260nm以下
1,3-ブチレングリコール	Bタイプ	蛍光とラマン	240nm以下
1,4-ブチレングリコール	Bタイプ	蛍光とラマン	—
2,3-ブチレングリコール	蛍光とラマン	蛍光とラマン	350nm以下
アクリル酸2-エチルヘキシル	Bタイプ	全て吸収	295nm以下
メタノール	Bタイプ	蛍光とラマン	—
エタノール	Bタイプ	蛍光とラマン	—
2-ブタノン	Bタイプ	蛍光とラマン	325nm以下
トルエン	Bタイプ	蛍光とラマン	275nm以下
1,2-ジクロロエタン	Bタイプ	蛍光とラマン	—
メタクリル酸メチル	Bタイプ	全て吸収	280nm以下
酢酸ビニール	Bタイプ	蛍光とラマン	260nm以下
プロピルベンゼン	蛍光とラマン	蛍光とラマン	275nm以下
ジエチレングリコール	蛍光とラマン	蛍光とラマン	—
備考 Aタイプ=3波長370、385、395、405nmによる識別 Bタイプ=3波長375、385、395、405nmによる識別			

(5) データベース

データベースには、①図4.2で示した分光蛍光光度データ、②蛍光等の発光画像データ（図4.5）、③蛍光寿命データ（図4.6）、可視・紫外光領域透過率データ、ならびに物性値が収録された。

4.1.2 多波長蛍光計測装置の開発

(1) 汚染物質の高精度識別

図4.7は軽油、原油、A重油の蛍光スペクトルである。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波長の映像を1つのフレームへ同時に記録できる図4.8の受光装置を考案（特許第3453595号）し開発した。

(2) 多波長蛍光計測装置の性能検証

観測例を図4.9に示す。これは高所作業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

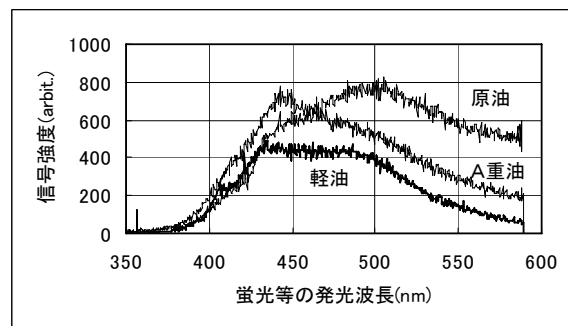


図4.7 識別が困難な例

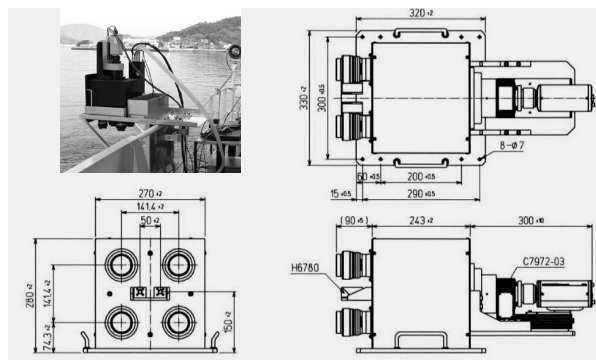


図4.8 多波長蛍光計測装置

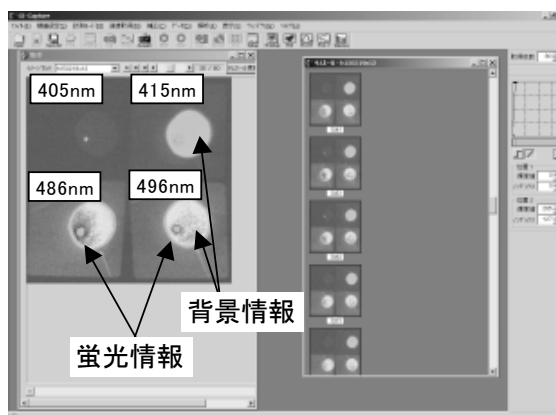


図4.9 多波長蛍光計測装置による計測例

回転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。また同時に、画像が連続取得されていることも確認した。

油の識別例を図4.10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、20m高所作業車で観測した例である。図は4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。

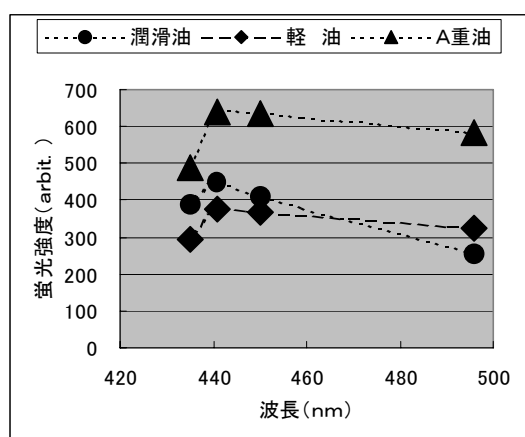


図4.10 油の識別例

(3) 海面下の油の検知

海面に浮かんだ油の検知は問題なく可能であるが、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¹⁵⁾、また、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。

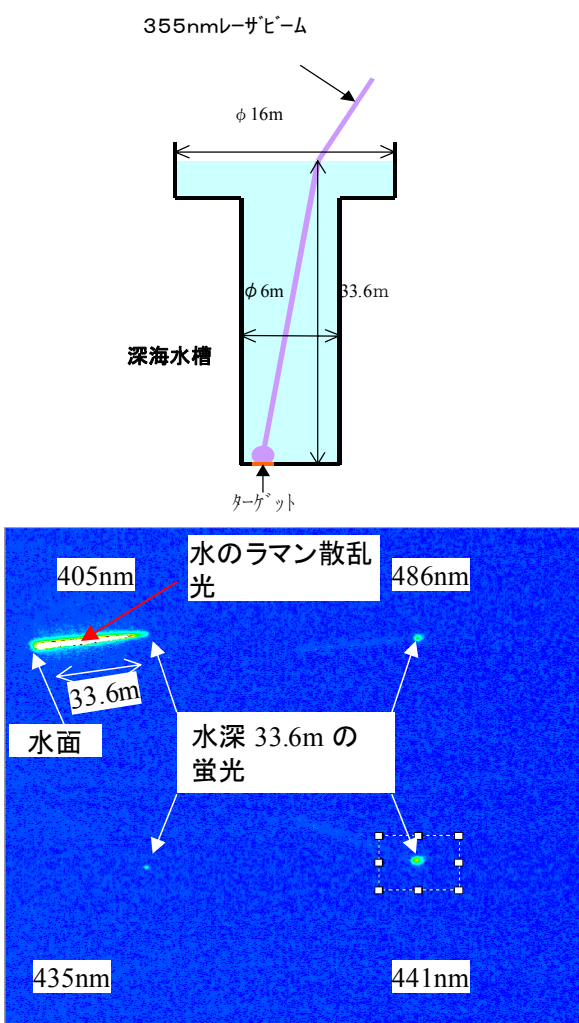


図4.11 水深33.6mにおける蛍光の計測例

YAG レーザの第2高調波532nm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。文献調査や測深実験により、以下の検討結果が得られた。

- ① グリーンレーザは海水の濁度によって測定できる水深が異なる。
- ② 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。
- ③ 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難しい。

そこで、紫外レーザ355nm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4.11にその結果を示す。これは水深33.6m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ある。

4.1.3 フォトマル受信機の開発

海面反射レーザ散乱光をトリガー信号として用いる計測系において、計測系の各要素の持つ時間遅れ100~300nsによるタイミング不良を解消し、レーザ入射から数nsで発光する蛍光の画像を鮮明に計測するためのフォトマル受信機を開発した。

フォトマル受信機を使用し、受光系の自動計測を検証した。受光系は、フォトマルセンサ、フォトマル受信機、多波長蛍光計測装置で構成される。実験は当所構内の道路上で、ベニア板に張り付けたプリンター用紙をターゲットとし、観測距離100~350mで実施された。これは、ヘリコプターへの搭載を模擬した実験である。レーザは単独制御とし、内部ト

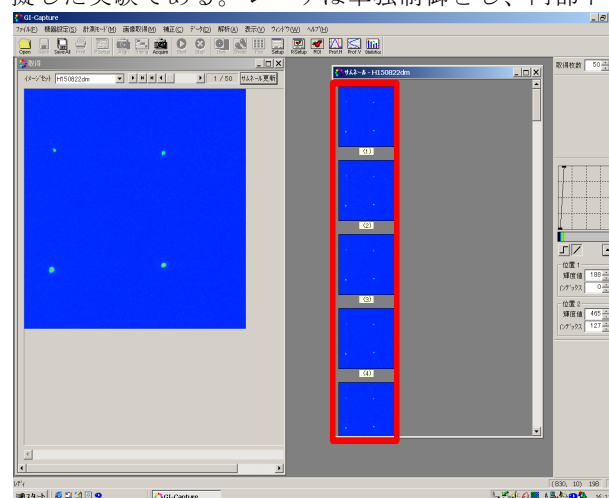


図4.12 フォトマル受信機による自動計測

リガ4Hz でビームが発射される。ターゲットからのビーム反射光をフォトマルセンサが受け、フォトマル受信機による遅延パルス信号で多波長蛍光計測装置の自動計測が円滑に実施されるか検証された。図 4.12 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。

4.1.4 高度化のまとめ

高度化された装置の主な仕様を表 4.2 に示す。

表 4.2 高度化された装置の仕様

	仕様
レーザー	YAGパルスレーザー(BigSky CFR400) 波長=THG(355nm)、出力=60mJ パルス周波数=1~10Hz、パルス幅=13ns ビーム広がり角=4mrad
多波長蛍光計測装置	①レンズ; 4個 透過率=70%以上(400~700nm) 絞り=1.2~C、焦点距離=50mm ②ICCDカメラ; 1台(浜松ホトニクス C7972) ゲート開放時間=20ns~連続 感度ゲイン=1~64 光電面有効面積=18mm 有効画素=1344×1024
フォトマル受信機	①計測用基準クロック周波数; 100MHz ②シャッターデレイ時間 設定時間=10ns~1,000ns 設定分解能=10nsステップ ③出力パルス 設定パルス幅=10ns~1,000ns 設定分解能=10nsステップ 出力レベル=TTL、50Ω ④距離測定 測定可能範囲=120m以上 測定分解能=3m

高度化によって、以下の成果が得られた。

- ①油類や29種の有害液体物質に関するデータベースが構築された。
- ②多波長蛍光計測装置の検証により、蛍光情報と背景情報に関する4波長画像が同時かつリアルタイムに取得されることが確認された。また、水深33.6mの蛍光観測に成功し、荒天時の海面下に潜った油や沈んだ油観測の見通しが得られた。
- ③フォトマル受信機の検証により、自動観測への見通しが得られた。

4.2 ヘリコプター搭載型観測システム

ヘリコプターによるシステムの観測性能を検証するため、搭載するための架台を製作した。その概要を図 4.13 と写真 4.1 に示す。架台は、①観測用機器を搭載するためのベリーラック、②制御機器を搭載するためのキャビンラック、③バッテリーと接続し全ての機器へ電源を供給するための電源ラックで構成される。

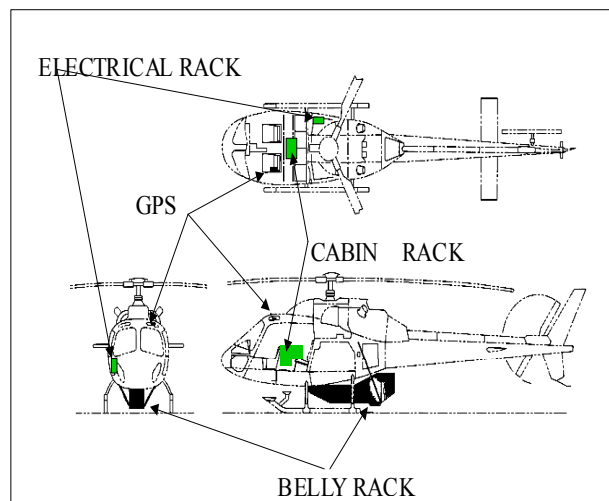


図 4.13 ヘリコプター搭載架台の概要

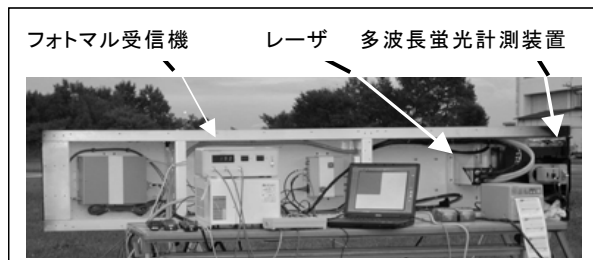


写真 4.1 ベリーラックへの搭載状況

ベリーラックには、レーザーヘッドおよび同電源、フォトマルセンサおよび同プリアンプ、フォトマル受信機、多波長蛍光計測装置および同コントローラ、ジャイロ、下方監視カメラ（可視）、またキャビンラックには、画像記録用ノートPC、GPS受信機、GPS・ジャイロデータ収録装置、パルスジェネレータ、レーザーコントローラ、モニタ、さらに電源ラックには28V/100V変換インバータ2台が搭載されている。

GPSアンテナはヘリコプター機内の天窓に設置される。

これらを装着するヘリコプターの型式はアエロスパシアル式AS355F2型である。ヘリコプターに搭載する新たな機器の仕様を表 4.3 に示す。

4.3 飛行観測実験によるシステムの検証

4.3.1 飛行観測実験による基本性能の検証

(1) 渡瀬遊水池における観測

飛行観測実験は平成16年1月に渡瀬遊水池（海拔約13m）で2日間行われた。観測対象物は水のラマン散乱光と水中植物プランクトン等の蛍光物質とした。飛行高度150m~300mと飛行速度5kt~100ktおよびICCDカメラの露光時間（I.I.のゲート幅; 100ns~1,000ns）およびI.I.の感度ゲインを観測性能検証のパラメータとした。観測機の離

陸風景を写真4.2に示す。

観測の結果、微弱光である水のラマン散乱光と水中の蛍光物質が計測された。しかし、飛行時間の経過に伴って欠落データが増加することが判明した。そのため、2日目の観測実験では手動観測に切り替えて実施したが、同様の結果であった。

飛行観測実験終了後、機器の総点検を行い、以下の問題点が明らかになった。

表4.3 ヘリコプターおよび機器の仕様

機器名	仕様
ヘリコプター (AS355F2型)	搭載重量;400kg~600kg 巡航速度;Max.110knot 航続時間;2.5~3.0hour
ジャイロ	ピッチ; -90~+90度 ロール; -90~+90度 方位; -180~+180度
GPS	受信時間間隔;0.2秒 GPS時間;hhmmss、速度;knot 方位; -180~+180度(北0度) その他;緯度、経度、高度(m)
GPS・ジャイロデータ収録装置	上記データの記録他 CPUタイム、データ間隔時間
下方監視カメラ	可視CCDカメラ



写真4.2 観測機の離陸風景

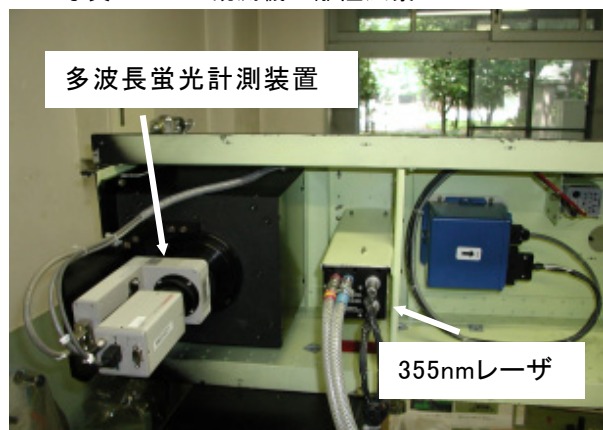


写真4.3 ノイズ対策検証実験の観測状態

①ヘリコプターの飛行時の振動により、レンズの焦点距離が ∞ から1.5mに変化した。その結果、焦点がぼやけたシグナル（水のラマン散乱光）しか観測されなかった。

②ベリラック内のレーザ電源のノイズがフォトマルセンサのプリアンプへ影響を与えた。その結果、プリアンプからフォトマル受信機へ出力する信号にノイズが付加され、ICCDカメラの露光開始時間が不安定になった。

③レーザ出力が60mJ/パルスから20mJ/パルスへ低下していた。

以上の問題点を解決するため、以下の対策を講じた。

①の振動対策として、レンズの焦点距離が ∞ から1.5mに変化しないように設定部を金具で固定した。

②のノイズ対策として、フォトマルセンサとプリアンプを離すことは信号系にあまり好ましくないが、プリアンプをキャビン内に設置することとした。また、プリアンプのノイズカット機能（レーザのQスイッチ信号立ち上がりから750nsまでの間で120mV以下の受信信号をカット）を付加した。

③の出力低下問題を解決するため、メンテナンスを行い34mJ/パルスまで回復した。

以上の対策を講じて地上実験で、ノイズ対策の効果が昼夜、雨天時に検証された。観測状態を写真4.3に示す。装置はベリラックを90度回転させて設置された。観測は、水平方向約150m先の樹木をターゲットとした。雨天時の観測例を図4.14に示す。観測されたスポットは樹木の蛍光である。対策を講じた結果、昼夜、雨天時においても自動観測ができることが確認された。

(2) フランス沖における観測

フランス CEDRE との研究協力協定に基づき、平成16年5月にフランス沖散布油の観測・防除トレーニング実験(DEPOL04)¹⁶⁾に参加し、観測システムの観測性能を検証した。

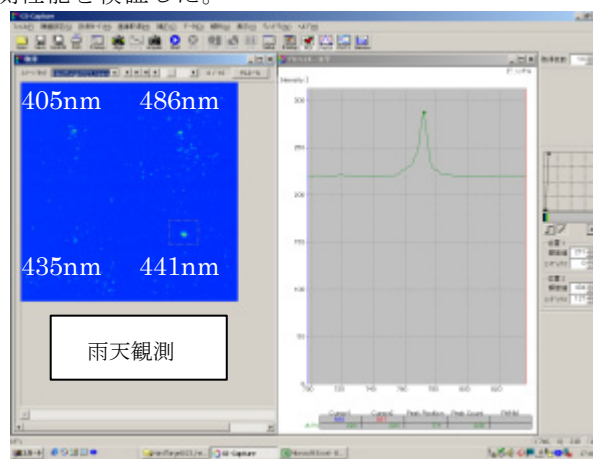


図4.14 ノイズ対策後の自動観測例

観測の結果、以下の成果が得られた。

①レーザ出力 34mJ/パルス、I. I. のゲート幅 400ns、I. I. のゲイン 48、飛行高度 300m、飛行速度 5kt で海水のラマン散乱光が 200 枚の連続画像として取得された。

②レンズに施した振動対策(振動によるレンズの焦点距離変動)に問題がないことが確認された。

③ICCD カメラのみによるパッシブ観測を行い、図 4.15 に示す流出油画像(飛行高度 220m、飛行速度 5kt、I. I. のゲイン 48) が得られた。

④アクティブ観測では、海水のラマン散乱光が連続的に全て観測されたが、油を示す顕著な蛍光スポットは図 4.16 の 1 例(レーザ出力 34mJ/パルス、I. I. のゲート幅 1μs、I. I. のゲイン 50、飛行高度 220m、飛行速度 100kt) のみであった。観測後の解析で薄膜油の蛍光が 4 データ程取得されていることが判明した。飛行高度 220m、飛行速度 100kt においても海水のラマン散乱光の連続画像が取得できることが確認された。

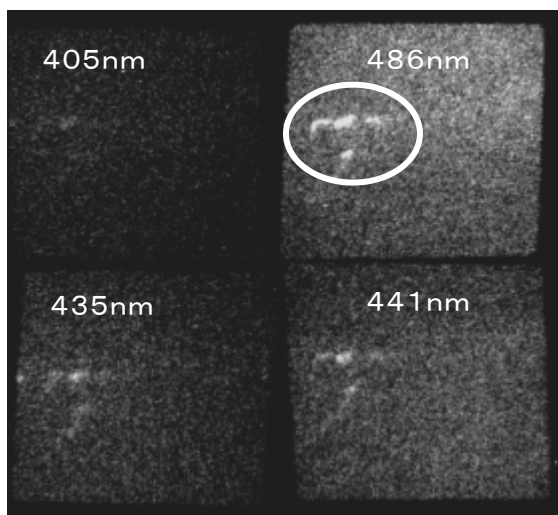


図 4.15 散布油のパッシブ観測画像(丸囲)

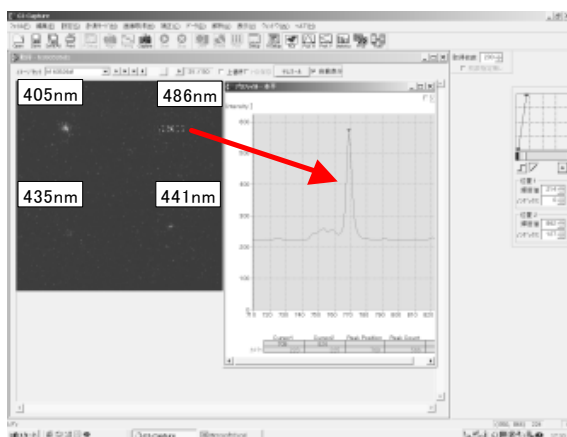


図 4.16 散布油のアクティブ観測画像

油のパッシブ画像や水のラマン散乱光・蛍光などのデータが収集でき最小限の目標は達成した。

また、観測時において以下のソフトウェア上の問題点が明らかになった。

- ① 画像取得のモニタリングができないため、油が計測されたか再生し確認しなければならない。
- ② 取得した画像の記録にファイル名を手動で入力する必要があり、誤入力や時間の浪費となった。
- ③ 記録が取得画像を一時記録した R A M (Random Access Memory) から H D D へ記録するのみの方式であった。
- ④ 観測機器の設定記録が自動でないため、メモを取る必要があり、未記入や時間浪費につながった。
- ⑤ フランスにおける実験時では、G P S と画像収録 P C が統合されていなかった。

4.3.2 飛行観測実験による総合検証実験

飛行観測実験¹⁷⁾による基本性能の検証で得られた問題点に対して講じた対策を以下に示す。

- ①画像取得時のモニタリングを可能にした。
- ②取得データのファイル名を自動生成方式とし、ファイル名は画像収録 P C 時間の年月日時分とした。
- ③画像記録方式を自動生成ファイル名で H D D へ直接記録できる方式も追加した。
- ④GPS と画像収録 P C を統合し、位置情報のモニタリングが P C 側で行えるようにした。
- ⑤GPS 情報、画像収録 P C 時間、機器設定条件等を記録する管理ファイル(txt)を自動生成できる機能を追加し、汚染マップを作成できるようにした。

各観測実験を踏まえた改良点や追加した機能等を総合的に検証するため、平成 17 年 1 月と 3 月に本田エアポート(桶川、海拔約 50m)で飛行観測実験を実施した。下方監視カメラで撮影したターゲットを図 4.17 に示す。ターゲットは 1.8m 角容器に入れた各 20 リットルの軽油、灯油、1,2 ブチレングリコールである。

(1) パッシブとアクティブ観測

本田エアポートで飛行高度(絶対高度=飛行高度-海拔高度)と飛行速度をパラメータとして飛行観測実験を実施した。

パッシブ観測では、絶対高度 212m、飛行速度 47kt でターゲットを補足できることが確認された。

アクティブ観測では、パッシブ観測で得られたターゲットの位置情報を基にその上空からホバリングでターゲットを観測し、図 4.18 に示すように絶対高度 132m において、日中の強い背景光下においても鋭

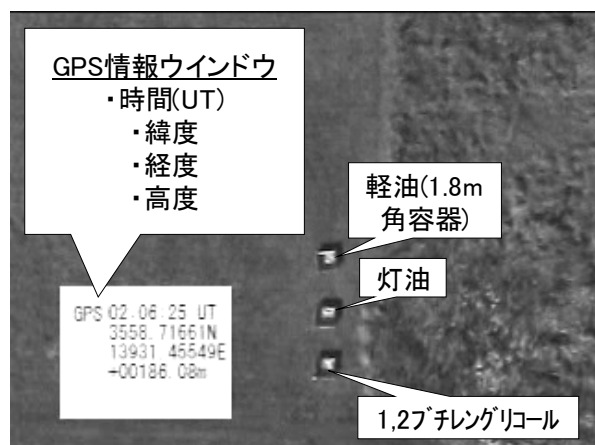


図4.17 下方監視カメラで撮影したターゲット

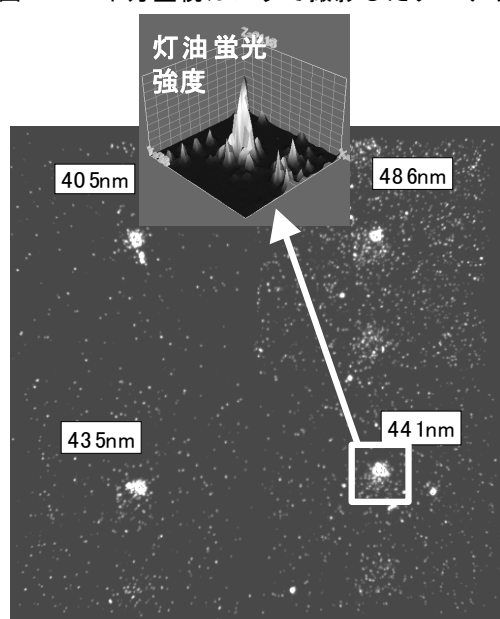


図4.18 ホバリングによる観測例

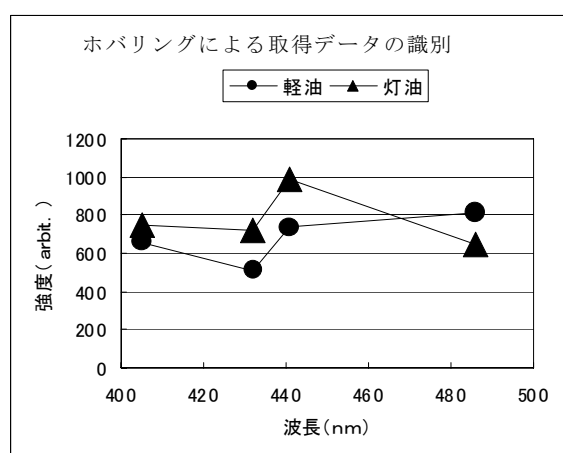


図4.19 ホバリングによる取得データの識別

いピーク値が観測された。ピークの信号強度値を用いた識別(図4.19)では、データベースによる物質同定により、識別が可能であることを明らかにした。

(2) 拡大したレーザービームによる観測

ターゲット捕捉の向上、観測スピード(飛行速度)の向上、夜間広域観測の見通しを得るため、レーザービーム(通常1mrad)を凹レンズで広げた場合(60mrad)の観測性能を検証した。

拡大したレーザービームによって、ターゲットが補足されたときの絶対高度と飛行速度の関係を図4.20に示す。

レーザービームを拡大した場合の飛行速度と絶対高度の関係は(1)式で得られる。

$$\text{飛行速度(kt)} = \text{絶対高度(m)} \times \text{レーザービーム拡がり角(rad)} \times \text{記録周期(Hz)} \times (1 - \text{オーバーラップ率}) \times 1.9444 \quad (\text{ktへの換算値}) \quad (1)$$

HDDへの記録周期1.2Hzでは絶対高度267m、飛行速度45ktでターゲットが補足された。一方、RAM(RANDOM ACCESS MEMORY)への1次記録方式(記録周期8Hz)では絶対高度286m、飛行速度86ktの観測が実現している。しかし、RAM記録後にHDDへ再記録する必要があるため、連続観測ができない。従って、観測目標である絶対高度300m、飛行速度100ktを実現するためにはHDDへの記録周期を1.2Hzから図中の一点鎖線で示した6Hz程度に今後改善する必要がある。

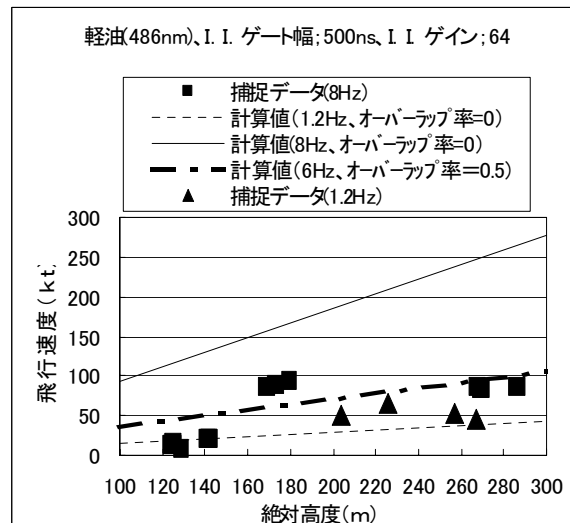


図4.20 拡大したレーザービームによる観測結果

4.4 拡散ガスの危険域表示ソフトウェアの構築

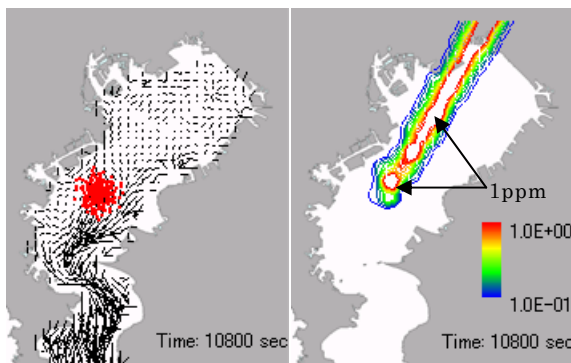
ケミカルタンカーの座礁、衝突事故などにより水上に流出した化学物質や蒸発ガスの挙動を予測し、防除活動の支援や避難勧告に資する危険域表示ソフトウェアの開発を行い、以下の成果^{19)、20)}を得た。

① 変分法により複数地点のAmedasデータから、空間補間により拡散解析で対象とする領域の風速分布

を求める風速分布推定プログラムを構築した。

② 海面上の液体拡散解析、その液体からの蒸発量算定、大気中のガス拡散解析の3要素で構成される計算モデルからなる拡散解析プログラムを構築した。水面上および大気中の両拡散解析を行うため、流出液体およびガスの挙動を粒子の動きにより模擬するランダムウォーク法を採用し、各計算モデルでは風速分布推定プログラムで得られた計算結果が利用される。

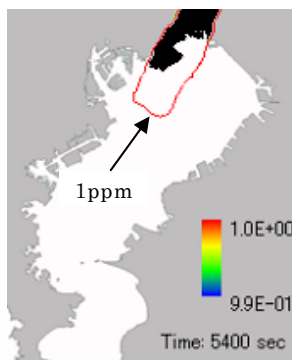
③ ダイヤモンドグレース号原油流出事故発生から3時間後の潮流分布と液体粒子の分布と蒸発ガス濃度の分布を図4.21に示す。シミュレーションの結果は、潮流に関しては3時間後に見られる横浜港沖に形成される時計回りの渦により、千葉県側へ移流を起こし、流出油の拡散が助長されたこと、および蒸発に関しては流出直後に比較的高い濃度の蒸発ガスが、風によって北東方向へ流れたことにより、異臭報道や江戸川区南葛西の測定局の炭化水素濃度測定結果をほぼ再現できていることを示した。



(a) 潮流分布と液体粒子 (b) 蒸発ガス濃度分布

図4.21 シミュレーション結果

④ ダイヤモンドグレース号原油流出事故発生と同じ条件下で流出物質をベンゼンとした場合のシミュレーションを示した図4.22のように許容濃度1ppm以上の範囲を表示できる危険域表示ソフトウェアを構築した。



(ベンゼン流出事故を想定)

図4.22 避難勧告域表示画面

4.5 全体システム構想

全体システム構想を図4.23に示す。全体システムはデータベース、観測システム、データ伝送装置、拡散危険域表示装置で構成される。観測されたデータから汚染の有無を自動的に判定し、管理ファイルに記録される。管理ファイルから図4.24に示す汚染マップを作成する。汚染マップを作成するための管理ファイルはデータ伝送装置から通信衛星経由で拡散計算システムへ伝送される。データ伝送装置に関しては研究対象としなかったが、現状の通信衛星については調査した結果、2005年6月1日よりKDDIでサービスが開始されているイリジウム衛星が、アンテナの大きさや衛星捕捉から判断してインマルサット衛星より適している。伝送された数値汚染マップを基に拡散ガスの危険域予測が行われ、その結果が対策本部へ伝送される。全体システムの運用は観測、伝送、予測、伝送が繰り返され、実施されることになる。

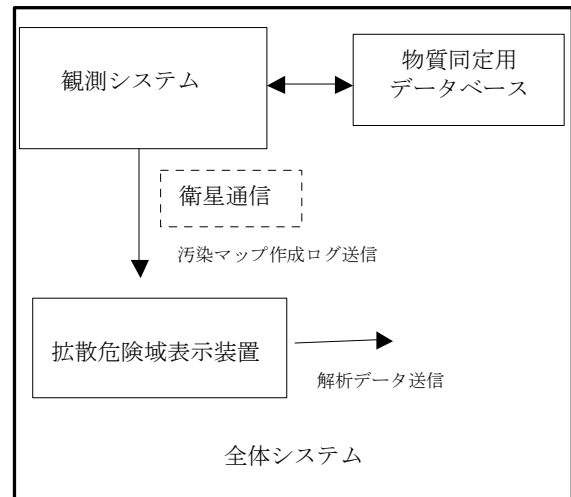


図4.23 全体システムの概要

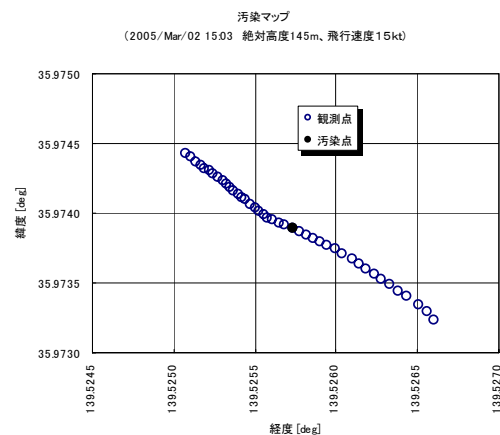


図4.24 汚染マップ

5. あとがき

有害液体物質流出時における環境汚染モニタリングシステムとして、データベース、観測システム、危険域表示ソフトウェアで構成されるシステムを開発した。主な成果を以下に示す。

- ① 多波長蛍光計測装置およびフォトマル受信機を製作し、これらを組み入れたヘリコプター搭載型観測システムを開発し、飛行観測実験により問題点の抽出とその対策がなされ、ほぼ自動観測方式となり、有視界飛行観測の実用化が可能となったと考える。
- ② 60mrad に拡大したレーザビームによる観測実験では、1.2Hz 記録周期で絶対高度267m、飛行速度45kt 観測を実現したが、目標の絶対高度300m、飛行速度100kt での観測を行うためには1.2Hz 記録周期を4～6 Hz 記録周期に改善することが今後の課題である。
- ③ 水深約33.6m、雨天時、ビーム拡大時の蛍光観測に成功し、夜間における広域観測、荒天時観測技術確立への見通しが得られた。
- ④ 海上流出事故における海上拡散、大気拡散、および蒸発ガス濃度の時系列変化を予測することを目的とした解析プログラムの作成と検証を行い、避難勧告に資する危険域表示ソフトウェアが構築された。

謝辞

本研究は、運輸省運輸技術の研究開発費(平成10年度、11年度)、指定研究費(平成12年度、13年度)、環境省地球環境保全等試験研究費(平成14年度～16年度)により実施した。本報告は、それらの研究で得られた成果を取りまとめたものである。

荒天時観測技術は未だ確立されていない技術であり、汚染物質を迅速に防除するために必要不可欠な技術であるため、引き続き、環境省地球環境保全等試験研究費により確立を目指す。ご支援頂いた関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山岸 他5、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、第69回船舶技術研究所講演集(1997)、pp193-196
- 2) 樋富 他5、蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究 第2報：実時間画像表示システム、第71回船舶技術研究所講演集(1998)、pp109-112
- 3) 樋富 他4、蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究、船舶技術研究所総合報告(2000)、pp57-64
- 4) 樋富 他4、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、第73回船舶技術研究所講演集(1999)、pp263-266

5) 樋富 他4、蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究 第4報：航空機による実海域実験、第74回船舶技術研究所講演集(2000)、pp45-50

6) Susumu Yamagishi, Development and test of a compact lidar for detection of oil spills in water, SPIE, 2000

7) Susumu Yamagishi, DETERMINATION OF LIDAR SIGNAL FROM IMAGES OF BACKSCATTERED NATURAL LIGHT ON WATER SURFACE, INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 2001

8) 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(2001)、pp129-132

9) 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2報)、第2回海上技術安全研究所講演集(2002)、pp351-354

10) 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(2003)、pp171-174

11) 樋富、海洋油汚染監視システムの実用化について、第3回海上技術安全研究所講演集(2003)、pp25-32

12) 樋富 他3、蛍光ライダーによる海洋汚染検知システムについて、可視化情報シンポジウム講演論文集(2003)、Vol.23、pp469-472

13) 篠野 他3、流出油検出のためのヘリコプター搭載型リモートセンシング装置の開発、第4回海上技術安全研究所研究発表会講演集(2004)、pp325-328

14) 日立分光蛍光光度計 FL Solutions プログラム操作編付-18

15) J.O.Rødal、ノルウェーにおける海上油流出緊急防災、海洋における油流出事故対策に関する国際専門家会議録(1997)、pp257-264

16) 篠野 他4、ヘリコプター搭載型蛍光イメージングライダーによる流出油のリモートセンシング、可視化情報シンポジウム講演論文集(2005)、Vol.25、pp421-424

17) 篠野 他4、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実験)(2005)、pp79-82

18) 篠野 他4、Remote Sensing of Chemical Pollutants on the Ocean, ISME, 2005

19) 間島、海上流出化学物質の蒸発ガス拡散解析、第4回海上技術安全研究所研究発表会講演集(2004)、pp225-260

20) 間島、樋富、海上流出化学物質の海上拡散・蒸発ガス拡散解析、可視化情報シンポジウム講演論文集(2005)、Vol.25、pp417-420