

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：74417

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01929

研究課題名（和文）海底開発における環境影響評価に向けた水中レーザーリモートセンシング手法の開発

研究課題名（英文）Development of underwater laser remote sensing method for environmental impact assessment in seafloor development

研究代表者

染川 智弘（Somekawa, Toshihiro）

公益財団法人レーザー技術総合研究所・レーザープロセス研究チーム・上席研究員

研究者番号：00508442

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：日本が持つ広大な海底の有効利用が実施・計画されているが、開発に伴う環境影響評価を効率的に実施する手法の開発が求められており、レーザーを用いたリモートセンシング技術であるライダーを利用した海中モニタリング技術を開発している。水中にあるガスや油のラマン信号を指標として、水中物質の識別だけでなく、距離情報まで得られることを示し、水中ラマンライダーによる海中モニタリング実現に向けた成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の自動運転や安全技術にも利用されているライダーは、大気中での測距だけでなく物体識別なども可能であるが、その技術を海中モニタリングに応用し海底開発に伴う海中環境の影響評価を効率良く実施しようという試みである。海洋面積が広大な日本にとっては新たな海底開発への取り組みを支援する技術として社会的な意義がある。また、ラマン分光を利用した測定対象の識別能力も有する水中ラマンライダー技術は、測距しかなかった水中ライダーに新しい可能性を提案している。

研究成果の概要（英文）：The effective use of the vast sea area is crucial for Japan as a maritime country, but there is a need to monitor the environmental change parallel to the seabed development. Lidar (light detection and ranging) is a very promising technique for monitoring the vast seafloor. Lidar enables real-time three-dimensional (3D) imaging to measure the round-trip time between pulse emission and laser-induced signal detection and can monitor not only the target distance but also the target identification using the light-matter interaction such as Raman scattering. Therefore, we proposed Raman lidar using a green laser with relatively high transmission in water and demonstrated the remote detection method of oils in water by laser Raman spectroscopy and lidar system.

研究分野：レーザー分光・応用計測

キーワード：ライダー ラマン分光 海中モニタリング 環境影響評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の領海・排他的経済水域は国土面積に比べて12倍程度と広く、海底鉱物資源・メタンハイドレート掘削、CO₂を海底地層に圧入して大規模削減を目指すCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)、石油などのエネルギー資源を輸送する海底パイプラインなどの有効な海底利用が実施・計画されている。海底開発では資源探査手法だけでなく海洋生態系・環境への影響評価が必要とされているが、現状の採取・採水測定では頻度とエリアに限度があり、海中での効率的なモニタリング手法の開発が必要である。そこで、海中を効率よくモニタリングするために、レーザーを用いたリモートセンシング技術であるライダーを利用した海中モニタリング技術を開発している。水中のガスや油などのラマン信号から3次元マッピング観測を行い、効率的な海中モニタリングを目指している。

これまでに、現有の技術シーズである水中ラマンライダーの海中モニタリングへの適用可能性を検証するために、水中のCO₂ガスやメタンガスを測定対象とした水中ガスラマンライダーを開発し、沼津や竹富島近海での海上観測に成功している(図1)。

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、海底開発における環境影響評価を効率的に実施するために、ラマンライダーを利用した海中モニタリング技術を開発した。

これまでは、CO₂ガスやメタンガスを利用して水中ガスラマンライダーの開発を実施してきたが、これらのガスが実際に海底から漏れいしている観測サイトが日本に少ないことや、模擬観測としてガスを海中で漏れいさせることが環境汚染となり困難であることが判明した。そこで、海底パイプラインで輸送されている油を測定対象として、以下の研究内容を実施し、本手法の海中モニタリングへの適用可能性を検討した。

- (1)レーザーラマン分光法による水中油の遠隔測定手法の開発
- (2)水中ラマンライダーによる水中油の遠隔測定手法の開発

遠隔測定実験には、長さ6mの長水槽を利用し、油は実験中に万が一水槽に漏れいしても環境負荷が小さい植物油であるキャノーラ油とした。

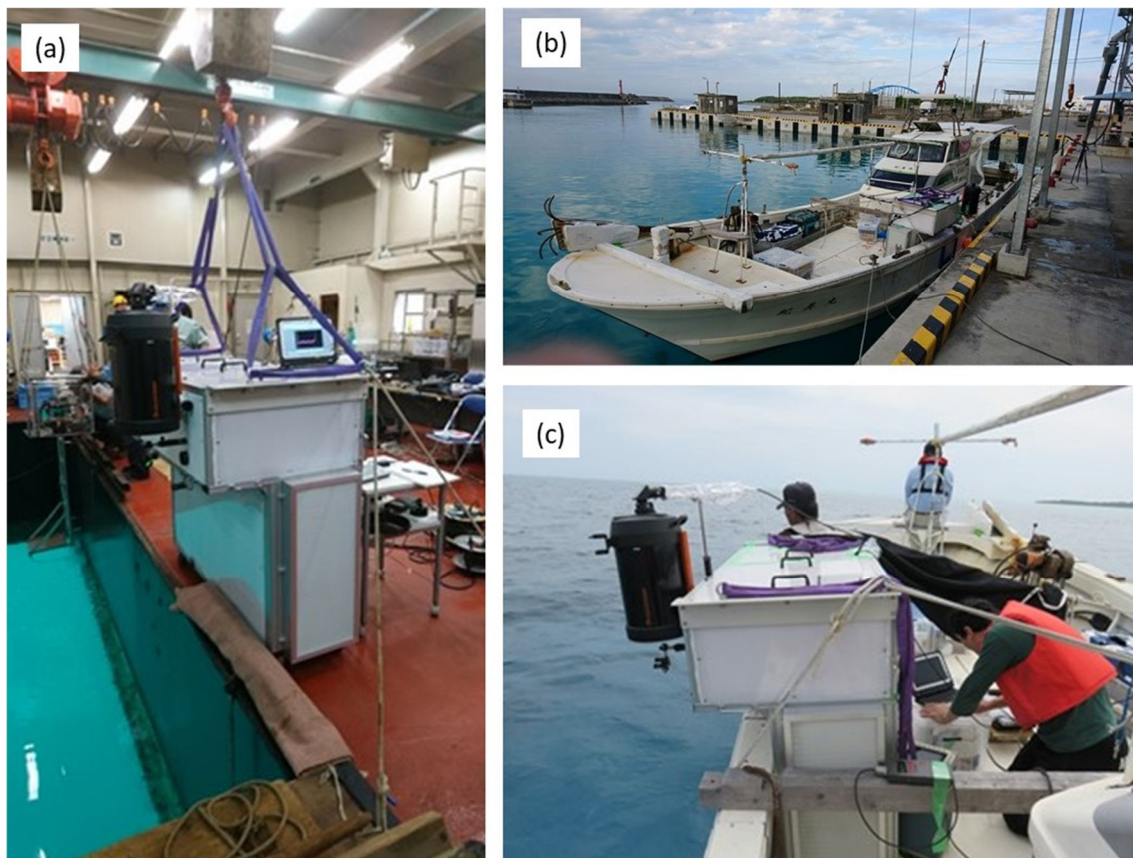


図1 (a)沼津のOKIシーテックでの海上観測の様子、(b)漁船に搭載した水中ガスラマンライダーシステム、(c)竹富島近海での海上ラマンライダー観測の様子

3. 研究の方法

(1) レーザラマン分光法による水中油の遠隔測定手法の開発

これまで、水中のガスをラマン散乱で検出する場合、散乱光強度が大きい波長 355 nm のレーザーを利用してきた。ところが、油に波長 355 nm のレーザーを照射すると蛍光が生じ、ラマン信号に対する信号雑音比 (signal-noise ratio: SN 比) が低下する。そこで、油の検出には蛍光の影響が少なく、また水に対する吸収が比較的小さく遠方まで伝搬可能な波長 532 nm のレーザーを利用することとした。

図 2(a)に本実験で使用した油試料であるキャノーラ油のラマン分光測定光学配置を示す。油試料は光路長が 5 mm の 4 面が研磨面である蛍光セルに入れた。使用したレーザー光は波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 10 Hz、パルスエネルギー 20 mJ である。このレーザーを集光せずに光学セルに照射し、後方約 25° の位置からラマン散乱を測定している。集光光学系には 532 nm のエッジフィルターを挿入し、背景光となる波長 532 nm のレイリー光をカットしている。光ファイバーでミニ分光器 (BroLight, BIM-6703) まで導き、スペクトルを測定した。CCD カメラの露光時間は 4 ms であり、100 回積算信号の 5 回平均のスペクトルを取得した。測定の波長分解能は 1.4 nm である。

図 2(b)に油のラマンスペクトルを示す。1290 cm^{-1} と 1450 cm^{-1} がそれぞれ、C-H と $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ の変角モードによる散乱信号である。1660 cm^{-1} と 1750 cm^{-1} がそれぞれ、C-C と C=O の対称伸縮モードであり、2910 cm^{-1} に見られる大きな信号が C-H の対称伸縮モードによるものである。また、これらのラマンスペクトルは油の構造に由来するため、油種の識別も可能である。

図 3(a)に長水槽による水中油の遠隔実験の様子、図 3(b)に光学配置図を示す。長水槽は 30 度角の開口であり、長さは 6 m である。入射の窓には合成石英を利用しているため、紫外光の入射も可能である。長水槽は水道水で満たしている。使用したレーザーは上記の油試料の測定と同じであるが、レーザーのパルスエネルギーは 100 mJ である。油試料は光路長が 5、10、20 mm の蛍光セルに入れ、水中伝搬距離が 2 m の位置に設置した。ラマン散乱光は口径 20 cm の望遠鏡で集め、エッジフィルターでレイリー光を除去した後、ミニ分光器で観測している。レーザーは蛍光セルに垂直に入射させ、観測視野中のレーザーと油の相互作用長を変化させることで、測定する油の量を変化させた。

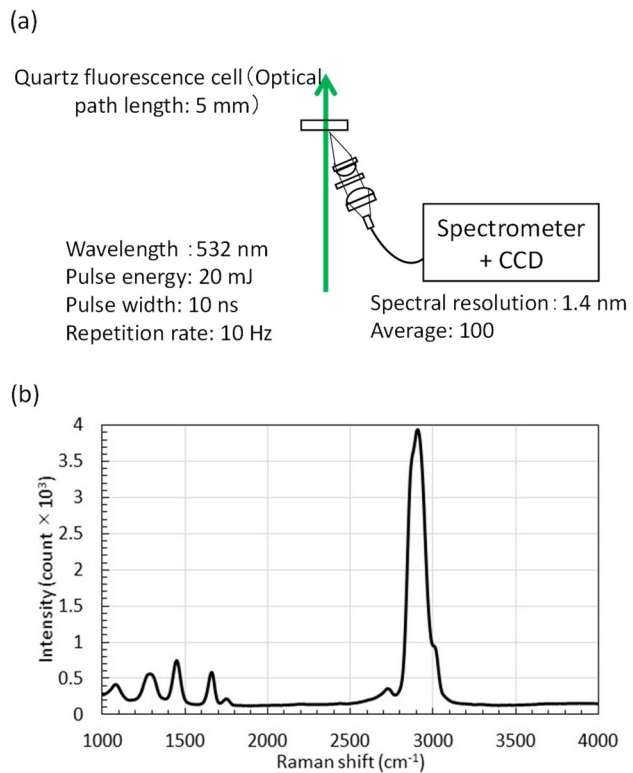


図 2 油試料の(a)ラマン分光測定光学配置と (b)ラマンスペクトル

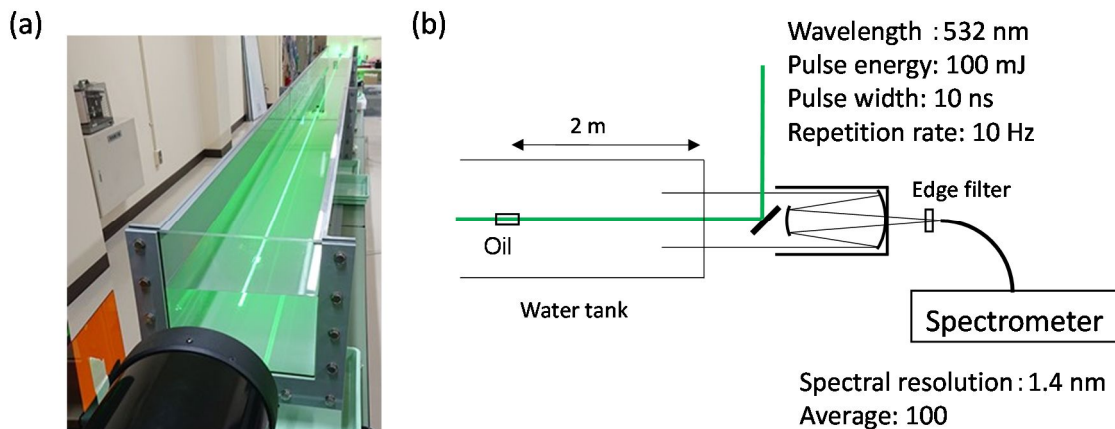


図 3 (a)長水槽による水中油の遠隔計測実験の様子と(b)測定光学配置

(2) 水中ラマンライダーによる水中油の遠隔測定手法の開発

図 4 に海上ライダー観測用に開発した小型ラマンライダーの光学配置を示す。本ライダーシステムは、海底パイプラインからの油流出事故の遠隔検出を目的として、油のラマンライダー信号が測定できる仕様である。また、海上観測を容易にするため、300×600 mm のブレードボード上に作成した非常に小型で可搬性のあるシステムである。開発した小型ラマンライダーシステムの性能を評価には、図 3(a)に示した長水槽を利用してライダー計測を実施した。

レーザーは海上での観測を想定して小型で可搬性の高い Continuum 社の Minilite を使用した。波長 532 nm を出力した際のパルスエネルギーは 20 mJ (パルス幅: 5 ns) であり、繰り返し周波数は 10 Hz で動作させた。レーザーヘッドの大きさは 267×172×63.5 mm、重さは 3.6 kg である。また、レーザーの電源も、大きさ 381×197×365 mm、重さ 14.5 kg であり、500 W 程度の電力で動作するため、海上観測が容易である。望遠鏡はマクスツフカセグレ式であり、口径は 127 mm、焦点距離は 1500 mm である。望遠鏡で集めたラマン散乱光は、レンズでコリメートした後に、波長 532 nm のエッジ、ノッチフィルターで、微弱なラマンライダー信号計測を阻害するレイリー光などを除去している。その後、ダイクロイックミラーで波長を分離し、油、水のラマン波長の干渉フィルターによって波長を限定し、光電子増倍管 (PMT) とオシロスコープでライダー信号を記録している。使用した干渉フィルターは、油の C-H 対称伸縮モードである 2910 cm^{-1} に相当する波長 628 nm と水の O-H 対称伸縮モードである 3400 cm^{-1} に相当する波長 649 nm である。

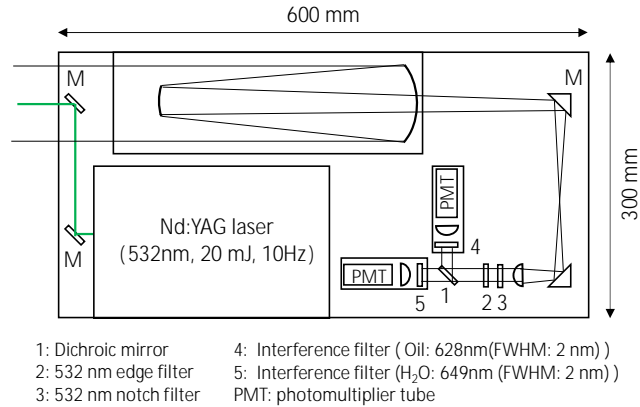


図 4 小型ラマンライダーの光学配置

4. 研究成果

(1) レーザーラマン分光法による水中油の遠隔測定手法の開発

図 5(a)に長水槽による水中油の遠隔計測実験でのラマンスペクトルを示す。100 回積算信号の 5 回平均のスペクトル (露光時間: 4 ms) を取得した。スペクトルは、観測視野に含まれる水がほぼ均一であるために、3400 cm^{-1} に見られる水のラマン信号 (O-H の対称伸縮モード) で規格化し、見やすいように、信号強度にオフセットをかけて並べてある。油からは信号強度の大きな 2910 cm^{-1} の C-H の対称伸縮モードが水のラマン信号の裾に観測されている。挿入図に油の 2910 cm^{-1} 部分の拡大図を示しているが、光路長に応じて油のラマン信号が大きくなっていることがわかる。したがって、水中にある油に対してもラマン法による測定は可能であり、海底パイプラインの油流出事故を遠隔から観測できる可能性を示した。

図 5(b)に油試料の光路長と 2910 cm^{-1} の油と 3400 cm^{-1} の水のラマン信号強度比との関係を示す。誤差は 5 回連続して測定した結果の標準偏差である。光路長 5, 10, 20 mm の 3 点の結果は、点線で示す直線近似でフィットすることが可能であるが、原点を通っていない。これは、2910 cm^{-1} の油のラマン信号は、信号強度の大きな水の裾に位置しており、水のラマン散乱信号強度のゆらぎ以下の信号は検出できないためだと考えられる。検出限界はこの近似直線の X 軸との交点とすると、油の長さにして約 5.0 mm である。

今回の実験では、水中ドローンなどに装置を搭載することを想定し、小型の分光器を利用したため、信号強度の大きな 2910 cm^{-1} の信号しか観測できなかったが、感度の高い分光システムを利用すれば、検出感度が向上するだけでなく、図 2(b)に示した 1290 ~ 1750 cm^{-1} に見られる微細なラマンスペクトルの観測も可能になり、より詳細な油の識別が実施可能になるのではないかと考えている。

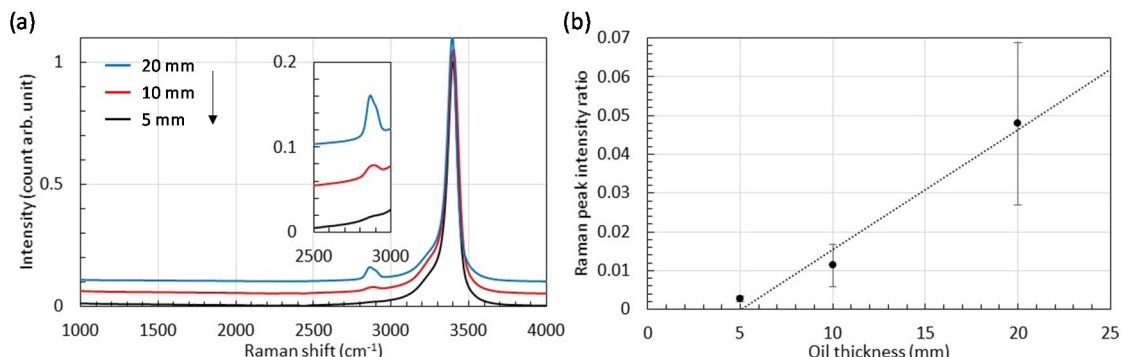


図 5 (a) 長水槽での水中油遠隔計測実験のラマンスペクトル (光路長: 5, 10, 20 mm) (b) 油試料の光路長と 2910 cm^{-1} の油と 3400 cm^{-1} の水のラマン信号強度比との関係

(2)水中ラマンライダーによる水中油の遠隔測定手法の開発

図 6(a)に長水槽を利用した水中油のラマンライダー計測結果を示す。100 回積算信号の 5 回平均のライダー信号を取得した。距離 0 m は、入口窓部分に設置したスクリーンからのライダー信号で決定し、水の屈折率を 1.33 として水槽中の距離を換算した。上から光路長 20, 10, 5 mm のセルを設置した場合の油の波長でのライダー信号であり、比較のため一番下に同時に測定した水の波長でのライダー信号も載せてある。水のライダー信号は、すべての光路長の油試料でほぼ同じ信号が得られたため、水チャンネルの典型的なライダー信号として光路長 20 mm の場合の結果を示している。

油のライダー信号は、5.6 m 付近から立ち上がり、6 m を越えた 6.2 ~ 6.4 m 付近にピークを持ち、油の厚みによってピーク強度や信号の幅に違いが見られる。このように、油のチャンネルでは 6 m 付近で限定的なライダー信号のピークが得られているのに対し、水のチャンネルでは 4.8 m 付近から信号が立ち上がり、6 m 付近でピークが見られる。水のチャンネルでは、4.8 m から信号が立ち上がっている。これは、送信レーザーと受光望遠鏡の観測視野が重なってから信号が得られるためである。以上から、本ライダーシステムで、水中の油試料に対しても、油特有のライダー信号の検出に成功しており、水中にある物質の同定だけでなく、位置情報も得られることがわかった。

距離 6 m の位置に設置した油のライダー信号は 2 m 程度の空間幅を持っている。本実験で利用したパルス幅 5 ns のレーザーパルスでの空間分解能は、水中の屈折率 1.33 を考慮すると、0.56 m となるはずだが、本実験で得られたライダー信号の空間分解能は計算値より悪い。これは、水中特有の乱流の影響ではないかと考えており、今後、水中ライダーへの水中乱流の影響を評価したい。また、より空間分解能の高いライダー計測を実施するには、パルス幅がピコ秒などのレーザーの利用や、ライダー信号のピーク立ち上がり時間での距離を決定するなどの手法の検討も必要になると考えている。

図 6(b)に油試料の光路長と油のライダー信号強度の関係を示す。ライダー信号強度は油から得られたライダー信号の面積で評価している。誤差は 5 回連続して測定した結果の標準偏差である。6 m の位置に何も置かなかった際のライダー信号での油位置に相当するライダー信号面積の標準偏差を とすると、検出限界 (3)は 1.51 mm となる。したがって、本ライダーシステムは、海上観測を容易とする小型なシステムであるが、1.5 mm 厚程度の油の漏えい検出が可能である。

レーザーを利用した海中環境の効率的な影響評価を目指して、海中のガスや油を指標とした水中ラマンライダー技術を開発した。今後は、本システムを利用した海上観測によって適用可能性を検討するだけでなく、ICCD カメラを利用した時間ゲートスペクトル測定も実施したい。

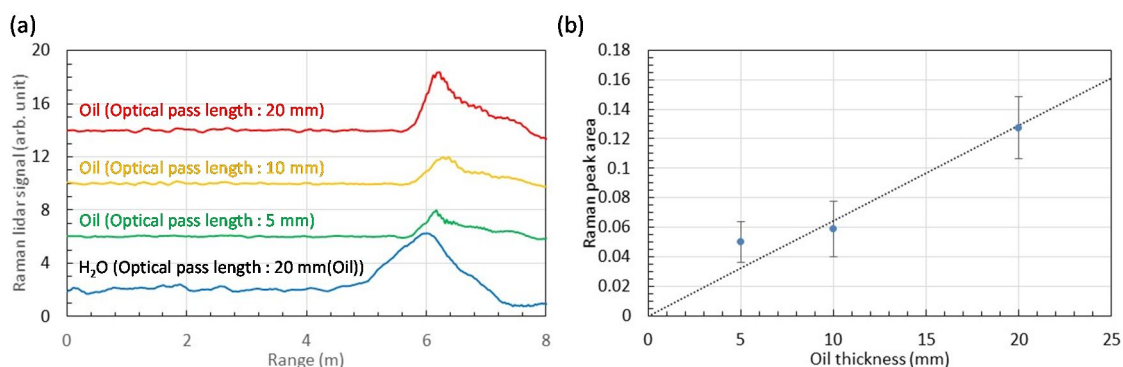


図 6 (a) 長水槽での水中油ラマンライダー信号、(b) 光路長と油のライダー信号強度の関係

< 引用文献 >

- T. Somekawa, A. Tani, and M. Fujita, Remote detection and identification of CO₂ dissolved in water using a Raman lidar system, *Appl. Phys. Express*, 4, 2011, 112401
- 染川智弘、水中ガ斯拉マンライダーによる海中モニタリング技術の開発、*O plus E*, 42 巻、2020、195-200
- 染川智弘、ラマンライダーを利用した海水中モニタリング手法の開発、*レーザー研究*, 48 巻、2020、599-603
- 染川智弘、ラマンライダーによる海中モニタリング技術の開発、*光アライアンス*, 12 巻、2020、57-60
- T. Somekawa, J. Izawa, M. Fujita, J. Kawanaka, and H. Kuze, Remote detection of oils in water using laser Raman spectroscopy, *Opt. Commun.* 480, 2021, 126508

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 染川智弘	4. 巻 42
2. 論文標題 ラマンライダーによる環境計測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気評論	6. 最初と最後の頁 195-299
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 染川智弘	4. 巻 48
2. 論文標題 ラマンライダーを利用した水中モニタリング手法の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 599-603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 染川智弘	4. 巻 31
2. 論文標題 ラマンライダーによる海中モニタリング技術の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Somekawa, J. Izawa, M. Fujita, J. Kawanaka, and H. Kuze	4. 巻 480
2. 論文標題 Remote detection of oils in water using laser Raman spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Opt. Commun.	6. 最初と最後の頁 126508
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2020.126508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 染川智弘	4. 巻 42
2. 論文標題 水中ガスマンライダーによる海中モニタリング技術の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OplusE	6. 最初と最後の頁 195-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Somekawa, S. Kurahashi, J. Kawanaka, M. Fujita	4. 巻 10791
2. 論文標題 Development of the marine Raman lidar system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1079104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2324955	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Somekawa, M. Fujita	4. 巻 176
2. 論文標題 Raman spectroscopy measurement of CH4 gas and CH4 dissolved in water for laser remote sensing in water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 1021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817601021	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 染川智弘、伊澤淳、藤田雅之、河仲準二、久世宏明
2. 発表標題 レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発
3. 学会等名 第38回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 染川智弘、伊澤淳、藤田雅之、河仲準二、久世宏明
2. 発表標題 レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 染川智弘、倉橋慎理、河仲準二、藤田雅之
2. 発表標題 海上ラマンライダーによる海底面測距
3. 学会等名 第37回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 染川智弘、伊澤淳、藤田雅之、河仲準二、久世宏明
2. 発表標題 レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 染川智弘、倉橋慎理、河仲準二、藤田雅之
2. 発表標題 海上ラマンライダー技術の開発
3. 学会等名 第36回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 染川智弘、倉橋慎理、河仲準二、藤田雅之
2. 発表標題 ラマンライダーによる海中モニタリング技術の開発
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 染川智弘、倉橋慎理、藤田雅之、河仲準二
2. 発表標題 ラマンライダーによる海上観測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 染川智弘、倉橋慎理、藤田雅之、河仲準二
2. 発表標題 ラマンライダーによる海上観測
3. 学会等名 第44回リモートセンシングシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Somekawa, S. Kurahashi, J. Kawanaka, and M. Fujita
2. 発表標題 Development of the marine Raman lidar system
3. 学会等名 SPIE Remote Sensing (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------