

特集 ライダー技術 I

セキュリティ分野におけるレーザリモートセンシング

伊澤 淳¹, 横澤 剛², 倉田 孝男¹, 大海 聡一郎¹, 藏田 真太郎¹, 染川 智弘³, 江藤 修三⁴, 眞子 直弘⁵, 堀澤 秀之⁶, 山口 滋⁶, 藤井 隆⁴, 久世 宏明⁵

¹株式会社 IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原1番地)
 ²明星電気株式会社 (〒372-8585 群馬県伊勢崎市長沼町 2223)
 ³ (公財)レーザー技術総合研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-3)
 ⁴ (一財)電力中央研究所 (〒240-0916 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)
 ⁵千葉大学 環境リモートセンシング研究センター (CEReS) (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)
 ⁶ 東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

Security applications of laser remote sensing

Jun IZAWA¹, Takeshi YOKOZAWA², Takao KURATA¹, Soichiro OOMI¹, Shintaro KURATA¹, Toshihiro SOMEKAWA³, Shuzo ETO⁴, Naohiro MANAGO⁵, Hideyuki HORISAWA⁶, Shigeru YAMAGUCHI⁶, Takashi FUJII⁴, and Hiroaki KUZE⁵

¹ IHI Corporation, 1, Shin-nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama, 235–8501
 ² MEISEI ELECTRIC CO., LTD., 2223, Naganuma-cho, Isezaki, Gunma, 372–8585
 ³ Institute for Laser Technology, 2–6, Yamadaoka, Suita, Osaka 565–0871
 ⁴ Central Research Institute of Electric Power Industry, 2–6–1, Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240–0196
 ⁵ Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University, 1–33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263–8522

⁶Tokai University, 4–1–1, Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259–1292

(Received February 8, 2021)

We describe the application of laser remote sensing technology to a wide range of environments by using our laser radar technology based on Mie scattering lidar, with various laser-sensing methods such as spectroscopy and image acquisition. Among various targets, this paper focuses on the field of security, namely, CBRNE (Chemical, Biological, Radioactive, Nuclear, and Explosive) remote detection. The use of a high-power, compact femtosecond laser (terawatt laser) enables classifying cesium aerosol (radioactive and nuclear simulated) and riboflavin aerosol (biological simulated) at a stand-off distance of 10 m and identifying different plastics (explosive simulated). In turbid water that simulated seawater, visualization of the 1951 USAF (U.S. Air Force) resolution test chart was achieved using a pulse laser as part of turbid water visualization technology. Since no information was available from a normal camera, the results have confirmed the superiority of our method. We also describe laser Raman measurements that have shown the ability to identify underwater substances.

キーワード:レーザリモートセンシング,LIBS, nPEF, イメージング, ラマン分光 **Key Words**: Laser remote sensing, LIBS, nPEF, Imaging, Raman spectroscopy

1. はじめに

レーザセンシングは,対象物にレーザを照射し, 対象物とレーザ光の相互作用によって発生する信号 光を受光して分析することにより対象物の情報を得 る技術である.その相互作用の物理現象に応じて手 法と得られる信号情報を適切に選択することによ り,対象物の位置,形状および色彩コントラスト, 材質,含有微量成分などの様々な情報を得ることが できる.さらに高出力レーザ及び送受信光学系・高



セキュリティ分野におけるレーザリモートセンシング(伊澤 淳)

感度検知素子/手法を組み合わせたレーザリモート センシング技術に発展させることができる.これに より,遠方や通常ではアクセス不可能な危険な環境 においても非接触で安全に計測することが可能であ る.

特にセキュリティ分野においては、有害な物質や 爆発物など危険性が潜む環境や、水中や上空などの 極限環境での計測が求められる. 我々 IHI グループ (株式会社 IHI および関連会社) では、ミー散乱ラ イダー粉塵計測システムでライダー技術を長年培っ てきた. この技術をベースに、社外共同研究者と連 携して様々な計測手法を組み合わせ、セキュリティ 事業への適用を想定したレーザリモートセンシング システムの研究開発を行っている.

IHI グループにおけるレーザリモート センシングシステム

Table 1 は,我々が取り組んでいるレーザリモー トセンシングシステムの一覧である.パルスレーザ を光源として,散乱,ブレークダウン発光,多光子 励起蛍光,ラマン,光吸収などの物理現象から時間 波形,波長スペクトル,画像信号などが得られる. これを用いて,粉塵環境,有害物質/爆発物,水中, 悪天候下,高温などの様々な条件において環境,交 通,セキュリティ,生産技術等の多岐にわたる適用 先へ展開を試みている.また,レーザ以外のランプ 光や太陽光などの自然光源を用いた吸収分光を利用 した計測技術・装置の研究開発も行っている.

3. セキュリティ分野への適用事例

本節では、Table 1 に示した適用事例のうち、セ キュリティ分野への適用事例の概要を紹介する.こ れらの研究は、IHI グループと社外研究機関で研究 グループを構成して実施している.社外研究機関が 実施した基礎研究の成果をもとに当研究グループで 応用に関する共同研究を実施し、最終的には IHI グ ループでのシステム化・製品化を目指している.

3.1 CBRNE 物質遠隔検知システム

あらかじめ計測対象種別が予測できる場合には、 その物質に対して最適な手法を選択することが可能 である.しかしながら、このような予測が事前にで きない場合や計測対象が多種にわたる場合には多数 の計測手段を用意しておくことが必要であり、シス テム構築が難しい.よって、一種類の装置(システ ム)によって複数(可能であれば全部)の種別の物 質を検知できるような手法が望ましい.一方、高出 力フェムト秒レーザ(いわゆるテラワットレーザ) により発生する非線形現象を用いた計測手法を用い ることにより、1台の装置で複数の種別に対応する システムを実現できる可能性がある.我々は、高出 力フェムト秒レーザによる大気中のエアロゾル物質 などの遠隔検知技術を研究しており、これを CBRNE(Chemical;化学、Biological;生物、Radio-

| No. | 手法 | 計測環境 | 計測対象 | 検知対象 | 用途 | 参考文献 |
|-----|---|------|--------------|--|-------------|-----------------------|
| 1 | フェムト秒LIBS (Laser Induced Bleakdown Spectroscopy) | 空中 | エアロゾル | C (Chemical) R (Radioactive) N (Nuclear) | セキュリティ | 1)-6) |
| 2 | 多光子励起蛍光 (n-Photon Exited Fluorescence:nPEF) | 空中 | エアロゾル | B (Biological) | セキュリティ | 2), 4), 6)-8) |
| 3 | フェムト秒LIBS | 地上 | ハード ターゲット | E (Explosive) | セキュリティ | 2), 4), 6), 9)-11) |
| 4 | レンジゲート+画像計測 | 水中 | ハード ターゲット | 不審物の画像情報 | セキュリティ | † 1 |
| 5 | ラマン | 水中 | 水中漏洩物 | オイル | 資源 エネルギー | 12)-14) |
| 6 | ミー散乱ライダー | 空中 | エアロゾル | 粉塵濃度の空間分布 (排煙,石炭ヤード等) | 各種産業 | 15), 16) |
| 7 | コヒーレントライダー | 空中 | エアロゾル | 風向風速 | 航空,環境 | 17) |
| 8 | LIF (Laser Induced Fluorescence) | 無重力下 | 火炎 | 燃焼成分 (OHラジカル他) | 宇宙開発 | 18) |
| 9 | TOF (Time of Flight) +点群計測 | 空中 | ハード ターゲット | 踏切内異物の種別 (人, 車両等) | 交通 | 19)-22) |
| 10 | 時間ゲート+波長フィルタ | 溶接部 | 溶接溶融部 | 溶接の状態 (溶融状態等) | 生産 | 23) |
| 11 | 差分吸収 | 空中 | 大気 | CO ₂ 濃度 | 環境 | 24)-26) |

Table 1 Application examples of laser remote sensing in the IHI-Group campaniles.



Fig. 1 Schematic of our proposed lidar system for detecting and classifying CBRNE aerosols by LIBS or TPF using a high-power femtosecond laser⁶⁾.

active;放射性物質,Nuclear;核,Explosive;爆発物)物質の遠隔検知システムへの適用を検討している.Fig.1にシステム構成を示す⁶⁾.システムはミー散乱ライダーによる検知部と,高出力フェムト秒レーザによる識別部からなる.通常は検知部のナノ秒パルスレーザを対象空間に照射・走査し,空間全体を持続的に監視する.監視中に不審なエアロゾルを検知した場合に,その距離と方向を抽出し,高出力フェムト秒レーザを照射して識別を行う.

システムの究極の目標は,数百mから数kmの 距離領域において,高出力フェムト秒レーザを用い た LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy; レーザ誘起ブレークダウン分光)と,nPEF (n Photon Excited Fluorescence;多光子励起蛍光)の一 種である TPF (Tow Photon excited Fluorescence;2 光子励起蛍光)の手法を用いて様々なエアロゾルの スタンドオフ検知および識別を行うことである.

高出力フェムト秒レーザ光の照射により,高い ピークパワーを用いた非熱的過程による低温プラズ マが生成される.このため、プラズマの熱輻射によ るバックグラウンドノイズを抑制したコントラスト の高いスペクトルが得られ、高感度計測の観点から 有望である.加えて、フィラメンテーション現象を 用いて遠距離において相互作用長の長い集光チャネ ルを生成することが可能であり、遠隔での物質検知 に有用である.

さらには検知手法として用いた LIBS および nPEF は高出力フェムト秒レーザを用いることによ り同一のシステムで実現可能であり,計測対象種に よって手法を使い分けることができる.

LIBS は高い強度のレーザ光を物質に集光し、ブレークダウンさせてプラズマを生成する.プラズマ

中の電子がイオンに再結合する際,エネルギー準位 間を遷移することにより,そのエネルギー差に相当 するエネルギー(波長)を持つ光を発光する.エネ ルギー構造に由来するその発光波長は物質(原子, ラジカル等)の種別により異なるため,分光測定 データを既知の波長データベースと照合することに より対象物の種別を特定することができる.LIBS はレーザの波長を選ばず,簡易な構成で多種の物質 を検知対象とすることができる上,発光波長の線幅 が狭く分離が容易であることから,微量成分の検知 にも適している.

nPEFは、光の物質への吸収過程において複数の 光子(多光子)が同時に吸収され、n倍のエネル ギー(1/nの波長)の準位に励起される現象を用い た計測手法である.紫外レーザに比べて製作が容易 な可視~近赤外レーザで、高いエネルギーをもつ準 位に励起することが可能になる.多光子励起の吸収 係数は光強度に対して非線形で、高出力フェムト秒 レーザのような高いピークパワーを持つレーザにお いて顕著に現象が現れる.

分子(特に有機物のような構造の複雑な分子)に おいては、分子の共鳴現象に由来する発光が多数か つ微細・複雑なスペクトル形状を持ち、通常の計測 においては複数のスペクトルが結合した広い線幅の スペクトルとして観測される.このスペクトルは同 一の元素組成を持つ物質においても分子構造の違い により中心波長ないしは形状が異なる.このため検 知したのち種別を識別する際、特に有機物のように 元素組成が類似しているが、分子構造が異なる物質 の種別を識別するのに有利である.

高出力フェムト秒レーザを用いるもう一つのメ リットであるフィラメンテーションでは、自己収束 現象による連続的な集光チャネルが形成される. こ れは、空気ないしはレンズ等の透過媒質の、光強度 に対して非線形な屈折率の分布により、レーザビー ムの断面内が局所的に集光し、光の伝搬方向に連続 した集光領域(チャネル)を生成する現象である。 ピークパワーが高いほど屈折率の分布は大きくな り、高出力フェムト秒レーザのような高いピークパ ワーを持つレーザにおいて影響が顕著になる.フィ ラメンテーションの結果として集光領域においてブ レークダウンが生じ、プラズマの連続的なチャネル が生成される.従来のナノ秒レーザではプラズマ化 させるために強く集光させる必要があり、100mを 超えるような遠距離でのプラズマ化は難しい.一方 フェムト秒レーザでは、このフィラメンテーション 現象を用いることにより、レーザ光は平行光もしく は緩やかな集光状態であってもレーザ光自身の自己



セキュリティ分野におけるレーザリモートセンシング(伊澤 淳)

収束により遠距離での集光,プラズマ化が可能であ る.高出力フェムト秒レーザを用いたフィラメン テーション現象の実例として,Fujii らの報告があ る²⁷⁾.この報告では,フィラメンテーション現象 による大気のプラズマ化を多数の筋状の発光として 観測しており,ビームパターンの断面中にフィラメ ンテーション現象による複数の集光スポットを確認 している.LIBS 計測により,距離 16mにおいて塩 化ナトリウム(食塩)エアロゾル中のナトリウムの 遠隔検知に成功している²⁷⁾.

フェムト秒レーザはナノ秒レーザと比較してより 高度なレーザ技術に基づいており,特にテラワット レーザと称されるような高出力フェムト秒レーザに 関しては,これまで実験室レベルでの運用しかでき なかった.近年になってレーザ技術と取扱いノウハ ウの向上により専用コンテナでの運用が可能とな り,屋外での移動と試験が可能となった.レーザの 小型化と耐環境性の向上は継続して研究開発が進ん でおり,将来的にはより運用性の高いシステムの実 現が期待できる.

R, N物質のような元素物質の検知を模擬して, セシウムの検知試験を実施した.Fig.2は,計測さ れたLIBS スペクトルの典型例である⁴⁾.中心波長 852.1 nm にて,セシウムに由来する急峻なピーク が観測されている.現状では,計測距離 10 m でセ シウムエアロゾル濃度 3.2 µg/L におけるスペクト ルピークの有無を判別できた⁴⁾.

B物質のような有機物エアロゾルの検知は、リボ フラビンを模擬物質として用いた.Fig.3は観測さ れた典型的なTPFスペクトルである⁷⁾. 蛍光のピー クは、約500 nm から550 nm の波長範囲で観察さ れた.この結果は、リボフラビンのTPF検出に関 する過去の報告と一致している²⁸⁾.現状では距離



Fig. 2 LIBS spectrum observed for cesium aerosol, with laser energy of 181 mJ/pulse, pulse width of 1000 fs, beam size of 3×5 mm (at the aerosol position), concentration of the cesium aerosol of $3.2 \,\mu$ g/L (0.001 wt% of cesium chloride in aqueous solution)⁴⁾.



Fig. 3 TPF spectrum observed for riboflavin aerosol, with laser energy of 10 mJ/pulse, pulse width of 100 fs, laser beam size of \sim 3 mm of diameter at the aerosol position, riboflavin aerosol concentration of 1.3 µg/L (0.0032 wt% of riboflavin in aqueous solution).⁷⁾



Fig. 4 LIBS spectrum observed for bulk organic plastic samples, with laser energy of 0.6 mJ, the actual pulse width of 150 fs (slightly longer than the nominal value of 120 fs), the spot diameter of approximately 0.1 mm (an estimated value)⁹⁾.

10 m において 1.3 μg/L のリボフラビンエアロゾル 濃度におけるスペクトルピークの有無を判別できて いる⁴⁾.

E物質の検知については、有機プラスチックを模 擬物質とした LIBS により行っている. Fig. 4 にナ イロン 6, ウレタン, ポリエチレン, ポリスチレン 試料についての LIBS スペクトルを示す⁹⁾. 小型 フェムト秒レーザを用いた机上試験により、CH. CN, C₂のラジカル発光が, C, Hの元素のピーク に加えて観察されている.この試験では、検知に加 え、各試料における LIBS スペクトルからの種別の 違いについての類別を行っている。単純なピーク波 長の違いだけでは、すべての試料がほぼ同じ化学種 で構成されているので、同じ波長にピークが現れ類 別ができない. 我々はスペクトルのピーク強度比を 用いた類別を試み、Fig.5に示すように2種(2次 元)の強度比を用いることにより各々の類別ができ ることを確認した¹¹⁾. このような分析には, PCA (Principal Component Analysis; 主成分分析) や PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis ; 部分的最小二乗判別分析)などの多変量解析手法が





Fig. 5 Classification of LIBS spectra of organic materials based on 2D plot of peak intensity ratios¹¹.

有用と考えられる⁹⁾.

3.2 水中画像および水中成分計測

近年、資源探査などの海洋利用が盛んになってき ている. ROV (Remotely Operated vehicle; 遠隔操作 型の無人潜水機), UUV (Unmanned Underwater Vehicle;無人水中航走体)等に水中カメラを搭載し た海底探査が従来技術として確立しているが、沿岸 域などでは通常のカメラでは数m以上の距離が観 測困難な濁水域が大半である.水中では電磁波も使 用できないため、濁水中の計測ではこれまで超音波 計測が主流であった.光を用いた方式では、パルス レーザを用いた TOF (Time of Flight; 飛行時間) に よる距離計測をベースとした点群計測による形状構 築技術が水中計測へ適用されてきた(Table 1の No. 9が空中での適用事例である). 我々は検知された 物体の種別を認識するために、空間分解能の向上や コントラスト情報などの付加価値増加を目的とし て、レーザと超高速ゲート付き超高感度カメラによ る濁水中の画像計測技術に取り組んでいる.

Fig. 6 にシステム構想を示す^{†1}. ROV, UUV 等の 水中機器に搭載し,ソナー等による広域探索で検知 された不審な物体・障害物に対して本システムによ る計測を行い,物体の画像計測と識別を行う.本シ ステムは,パルスレーザとゲート付高感度カメラを 用いた高感度画像計測システムである.レーザを目 標物に照射し,散乱光を撮像装置にて画像計測す る. この時,撮像装置入射部に取り付けた高速 シャッタにより目標物からの散乱光が撮像装置に到 達するタイミングに合わせて時間ゲートをかける.



Fig. 6 Schematics of the underwater visualization system^{†1}.



Fig. 7 Examples of visualization of USAF chart in turbid water by a normal camera and the underwater visualization system^{†1}.

これにより目標物手前の濁水からの散乱光を除去し、濁水中でも鮮明な画像を得ることができる.

Fig.7に、実海域を模擬した濁水中での計測例を 示す^{†1}.水槽内の水道水に濁度標準試料(カオリ ン)を混合して濁度 0.75 の濁水を調整し、距離 4 mで撮影している. 左が通常カメラおよび通常照 明. 右が本システムによる撮影画像である. 本シス テムでは、照明光源に波長 532 nm の Nd: YAG SHG (最大出力 50 mJ, パルス幅約 5 ns) を用い, A4 サ イズの USAF (U.S. Air Force) 解像度テストチャー ト (1951 USAF resolution test chart) をターゲットと して全面に拡散照射し、 散乱光を ICCD (Intensified Charge-Coupled Device;光増幅機能付き電荷結合素 子)カメラで撮影している. ICCD のゲインを制御 して約20nsの時間ゲートをかけ、濁水からの散乱 光を排除している. 通常カメラでは光量は十分であ るものの、濁水からの散乱によって白濁してしま い、ターゲットの描画を判別することができない. 一方で本システムによる画像は、時間ゲートにより 濁水からの散乱光を排除し,鮮明な画像が得られて いる

海中におけるレーザセンシングの適用先として, 形状・画像計測の他に海中成分の検知識別も有用で ある.海中は海底パイプラインなどのエネルギー・ 資源の輸送手段としても活用されている.広域にわ

^{†1}IHIパンフレット "濁水中可視化技術", Subseatech Japan 2018.





Fig. 8 Raman spectra of canola oil with thicknesses of 5, 10, and 20 mm located 2 m away in the water tank¹⁴⁾.

たるパイプラインの漏洩監視および早期発見の手段 として、広範囲にわたる領域を短時間でモニタリン グできる手法の開発が望まれている.海水中の漏洩 成分を検知し、パイプライン由来の成分(油分)を 識別する手法として、ラマン散乱の分光計測に取り 組んでいる.

Fig. 8 に,水中ラマン計測の例を示す¹⁴⁾.水槽中 に油膜厚さ5~20mmのオイルセルを設置し、波長 532 nmのNd:YAG SHG(最大出力 10 mJ. パルス幅 約10ns)を水槽窓から照射した.水槽窓からオイ ルセルまでの水中距離は2mである. 信号光をレー ザ近傍に設置した受光光学系および分光計測装置に てスペクトル計測し、ラマン信号を検出した。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. 測定の波長分解能は 1.4 nm であ る. 本図では、観測視野に含まれる水がほぼ均一で あることを利用し、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)で規格化してい る. さらに見やすいように、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、油膜厚さに応じて油 のラマン信号が大きくなっていることがわかる.

本結果により,水中の油に対してもラマン法によ る遠隔測定は可能であり,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¹⁴⁾.

4. おわりに

本稿では、セキュリティ分野のレーザリモートセンシングにおける当研究グループの取り組み例として、高出力フェムト秒レーザを用いた CBRNE 物質の遠隔検知と、濁水中の可視化技術ならびにラマン分光による海中成分検知技術について紹介した。今後もレーザリモートセンシング技術と分光・画像計測技術をはじめとする各種レーザセンシング技術を融合させて、セキュリティ分野並びに環境・エネル

ギー・生産技術などの様々な分野への適用を進めて いく.

参考文献

- J. Izawa, T. Kurata, T. Yokozawa, S. Eto, and T. Fujii: "Standoff detection of cesium aerosol by LIBS using a ns-pulsed laser", Proceedings of International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering (LANE'13), Yokohama, Japan, April 23–25, (2013) 35.
- 2) 横澤 剛, 伊澤 淳, 倉田孝男, 松永 易, 染川智弘, 眞 子直弘, 久世宏明:「エアロゾル識別用スタンドオフ計 測システムの検討」, 第 31 回レーザセンシングシンポジ ウム予稿集, B-4, (2013) 20.
- 3) 伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 松永 易, 江藤修三, 藤井隆:「レーザ誘起ブレークダウン分光法によるセシウムエアロゾルの遠隔検知」, 第31回レーザセンシングシンポジウム予稿集, F-4, (2013) 120.
- 4) J. Izawa, T. Yokozawa, T. Kurata, A. Yoshida, Y. Matsunaga, T. Somekawa, S. Eto, N. Manago, H. Horisawa, S. Yamaguchi, T. Fujii, and Hiroaki Kuze: "Stand-off detection and classification of CBRNE using a lidar system based on a high power femtosecond laser", Proc. SPIE, **9253**-10 (2014).
- 5) 藤井 隆, 伊澤 淳, 倉田孝男, 横澤 剛, 江藤修三: 「フェムト秒レーザを用いたレーザ誘起プレイクダウン 分光によるセシウムエアロゾルの遠隔検知」, 第 31 回 レーザセンシングシンポジウム予稿集, P-11, (2015) 46.
- 6) 国内特許, 2018年, 第6425351号.
- 7)伊澤 淳,横澤 剛,倉田孝男,松永 易,染川智弘,眞子直弘,久世宏明:「フェムト秒レーザによる多光子吸収過程を用いた生物由来エアロゾルの遠隔検知」,第31回レーザセンシングシンポジウム予稿集,P-22,(2013) 86.
- 8) 伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 三代 周, 松永 易, 染川 智弘, 眞子直弘, 久世宏明:「フェムト秒レーザを用い た多光子吸収過程における生物由来エアロゾルの蛍光特 性」, 第 32 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, P-25, (2014) 86.
- 9) 倉田孝男, 伊澤 淳, 松永 易, 横沢 剛, 堀沢秀之, 山 口 滋:「レーザ誘起ブレークダウン分光を使った有機化 合物の識別」, 第 31 回レーザセンシングシンポジウム予 稿集, P-23, (2013) 88.
- 10) 倉田孝男,伊澤 淳,堀澤秀之A,横澤 剛 B,松永 易, 山口 滋:「レーザー誘起ブレークダウン分光を使った有 機化合物の識別」、レーザー学会学術講演会第35回年次 大会講演予稿集 E11a I 9 (2015).
- 11) 国内特許, 2018年, 第6307903号.
- 12) 染川智弘, 伊澤 淳, 藤田雅之, 河仲準二, 久世宏明: 「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」, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿 集, 415p-B409-2 (2020).
- T. Somekawa, J. Izawa, M. Fujita, J. Kawanaka, and H. Kuze: "Remote detection of oils in water using laser Raman spectros-copy", Opt. Commun. 480 (2020) 126508.
- 14) 染川智弘, 伊澤 淳, 藤田雅之, 河仲準二, 久世宏明: 「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」, 第 38 回レーザセンシングシンポジウム予稿 集, A-1, (2020).



- 15) 中島勇人、山本貴史、松坂文夫、原 熙、藤井政光、甲 斐憲次:「アイセーフ・レーザーによる大気環境計測」、 レーザー研究 25 巻 1 号、(1997) 50.
- 16) 横沢 剛,東川孝,伊澤淳,眞子直弘,久世宏明:第 44回光波センシング技術研究会 講演路文集,「アイ セーフライダーシステムの産業応用」,LST-44-22, (2009) 147.
- 17) 中島勇人、山本貴史、松坂文夫、原 熙:「アイセーフコ ヒーレントレーザレーダの開発」、第 19 回レーザセンシ ングシンポジウム予稿集, B-2, (1998) 13.
- 18) 濱野靖徳,小原正孝,藤森俊郎,山口 滋,佐藤順一: 「小型可搬型 LIF 測定装置の開発」,石川島播磨技報 36 巻2号,(1996) 84.
- 19) 関本清英,鎌上則夫,久光豊,小野一也,永田宏一郎:「三次元レーザレーダの開発」,石川島播磨技報43 巻4号,(2003)114.
- 20) 高野武寿,山口 真,平岩勇樹,寺内 強,中村寿夫: 「小型三次元レーザレーダの開発」,石川島播磨技報47
 巻2号,(2007)81.
- 21) 久光 豊,関本清英,永田宏一郎,上原 実,大田栄一: 「三次元レーザレーダ式踏切障害物検知装置の実用化」, IHI 技報 48 巻1号,(2008) 1.
- 22) 関本清英,永田宏一郎,白木博文,兼坂 薫:「三次元 レーザレーダによるさらなる交通安全社会の実現に向け て」, IHI 技報 51 巻 4 号, (2011) 77.
- 23) 大脇 桂,森田一郎,高橋秀夫,八木武人,海老名信 ー:「溶接部可視化装置(iL Viewer)の開発と応用」,石 川島播磨技報 42 巻 5 号, (2002) 270.
- 24) 伊澤 淳, 大海聡一郎, 稲元智行, 久保田伸彦:「レーザ を用いた広域 CO₂ 漏えい検知技術の開発」, IHI 技報 52

巻4号, (2012)50.

- 25) 伊澤 淳, 倉田孝男, 馬場隼也, 間野正美, 犬伏和之: 「広帯域赤外 OPO を用いた実森林における大気中 CO₂ の濃度計測」, 第 34 回レーザセンシングシンポジウム予 稿集, E-9, (2016) 58.
- 26) 伊澤 淳, 倉田孝男, 馬場隼也, 間野正美, 犬伏和之: 「広帯域赤外 OPO を用いた実森林内での CO₂ 濃度変動 の検知能力」, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会 講演予稿集 E408a I 03 (2017).
- 27) T. Fujii, N. Goto, M. Miki, T. Nayuki, and K. Nemoto: "Lidar measurement of constituents of microparticles in air by laser-induced breakdown spectroscopy using femtosecond terawatt laser pulses", Opt. let. **31** (23), (2006) 3456.
- 28) G. Méjean, J. Kasparian, J. Yu, S. Frey, E. Salmon, and J. -P. Wolf: "Remote detection and identification of biological aerosols using a femtosecond terawatt lidar system", Appl. Phys. B 78, (2004) 535.



1994年3月慶應義塾大学理工学部電 気工学科卒,1996年3月同大学院理 工学研究科修士課程電気工学専攻修 了.同年4月より石川島播磨重工業 株式会社(現株式会社IHI)に勤務 し,現在に至る.主にレーザ光源及 び周辺装置,レーザ計測技術に関す る研究開発に従事.2001年3月学位

取得(工学博士,岡山大学).レーザセンシング学会・ レーザー学会・電気学会会員.