慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	イオン群気流の時空間微細構造解明に特化したハイブリッド熱流動イメージング法の開発
Sub Title	Development of hybrid imaging technique for thermofluid dynamics for investigations of spatiotemporal fine structure in ion gas flow
Author	佐藤, 洋平(Sato, Yohei)
Publisher	
Publication year	2015
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2014.)
JaLC DOI	
Abstract	気流中マイナスイオン群の時空間微細構造解明に向けて, コヒーレント・アンチストークスラマン散乱(CARS)光による混合気流の非侵襲センシング法の開発を行った。気体として二酸化炭素および窒素を選定し, 混合比変化に伴うそれぞれのCARS光強度は理論に基づいた二次曲線を示していることが明らかとなった。チャネル内気流混合過程の濃度分布非侵襲センシングを行い, チャネル下流域では, 二酸化炭素および窒素の混合比変化を的確にとらえることが可能となり, 理論との整合性を確認した。マイクロ・ガスデバイス内に蛍光プローブを混入することなく, 非侵襲にて速度, 温度や濃度分布を計測することが可能となった。 This research work focused on the development of non-intrusive sensing technique using coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) in order to investigate spatiotemporal fine structure of ion gas flow in micro gas device. Carbon dioxide and nitrogen were selected as gas phase. It was observed that the relationship between CARS intensity from each gas and mixture ratio had a form similar to quadratic function, which is consistent with the CARS theory. Measurements of mixture ratio in channel flow were performed at ten measurement points. The present sensing technique has an ability to measure a change in mixture ratio in the downstream region, which was confirmed by the theoretical mixing process. It can be concluded that non-intrusive measurement of gas concentration in micro device was achieved by Raman scattering, which means that fluorescent particles and dye are no longer required.
Notes	研究種目 : 挑戦的萌芽研究 研究期間 : 2012 ~ 2014 課題番号 : 24656144 研究分野 : ナノ・マイクロ熱流体工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_24656144seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月 ２５ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2012～2014
課題番号：２４６５６１４４

研究課題名（和文）イオン群気流の時空間微細構造解明に特化したハイブリッド熱流動イメージング法の開発

研究課題名（英文）Development of hybrid imaging technique for thermofluid dynamics for investigations of spatiotemporal fine structure in ion gas flow

研究代表者
佐藤　洋平（SATO, Yohei）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：００３４４１２７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：気流中マイナスイオン群の時空間微細構造解明に向けて、コヒーレント・アンチストークスラマン散乱（CARS）光による混合気流の非侵襲センシング法の開発を行った。気体として二酸化炭素および窒素を選定し、混合比変化に伴うそれぞれのCARS光強度は理論に基づいた二次曲線を示していることが明らかとなった。チャネル内気流混合過程の濃度分布非侵襲センシングを行い、チャネル下流域では、二酸化炭素および窒素の混合比変化を的確にとらえることが可能となり、理論との整合性を確認した。マイクロ・ガスデバイス内に蛍光プローブを混入することなく、非侵襲にて速度、温度や濃度分布を計測することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：This research work focused on the development of non-intrusive sensing technique using coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) in order to investigate spatiotemporal fine structure of ion gas flow in micro gas device. Carbon dioxide and nitrogen were selected as gas phase. It was observed that the relationship between CARS intensity from each gas and mixture ratio had a form similar to quadratic function, which is consistent with the CARS theory. Measurements of mixture ratio in channel flow were performed at ten measurement points. The present sensing technique has an ability to measure a change in mixture ratio in the downstream region, which was confirmed by the theoretical mixing process. It can be concluded that non-intrusive measurement of gas concentration in micro device was achieved by Raman scattering, which means that fluorescent particles and dye are no longer required.

研究分野：ナノ・マイクロ熱流体工学

キーワード：気流熱流動非侵襲センシング　非線形ラマン散乱　CARS　自発ラマン散乱　ラマンイメージング　フェムト秒レーザ光　熱流動多変量分布　校正曲線

１．研究開始当初の背景

近い将来、環境分析や局所的なガス分析を迅速に処理可能なマイクロ・ガスデバイスが普及すると考えられ、その性能を決定する主要因は、熱流動現象を支配する物理量（速度、温度や濃度等）時空間分布の計測精度であるが、マイクロスケールを有する空間分解能にてガス熱流動を計測可能とする技術が現在まで皆無であった。更に、気流中のイオン群挙動によりデバイス材質が帯電してしまうが、今後は、非接触かつ非侵襲なガス熱流動計測技術が望まれている。

２．研究の目的

マイクロ・ガスデバイス内実流動場に蛍光粒子や色素を全く混入しない理想的な完全非侵襲熱流動センシング法の確立に向けて、分子からの非線形ラマン散乱光を用いた混合気流濃度分布の非侵襲センシング技術の開発を行う。本研究では、気体中の分子固有の振動に起因するラマンスペクトル（Chemical fingerprint = 分子の化学的指紋）の強弱に基づいているため、熱流動中の分子やイオンの挙動そのものを的確に把握することが可能となる。

３．研究の方法

(1)<u>コヒーレント・アンチストークスラマン散乱（CARS）光による混合気流の非侵襲センシング法の開発</u>

マイクロスケール・ガス熱流動計測に特化した、フェムト秒レーザシステム、光パラメトリック発振器、倒立顕微鏡、各種光学フィルタおよび EM-CCD カメラから構成される、図１に示す CARS 顕微鏡システムを構築した。気体としてラマン活性な二酸化炭素および窒素を選定し、それぞれの CARS 光発生に必要なラマンシフト（二酸化炭素：1,388 cm^{-1}、窒素：2,331 cm^{-1}）に適応した、ポンプ光およびストークス光の波長を設定した。

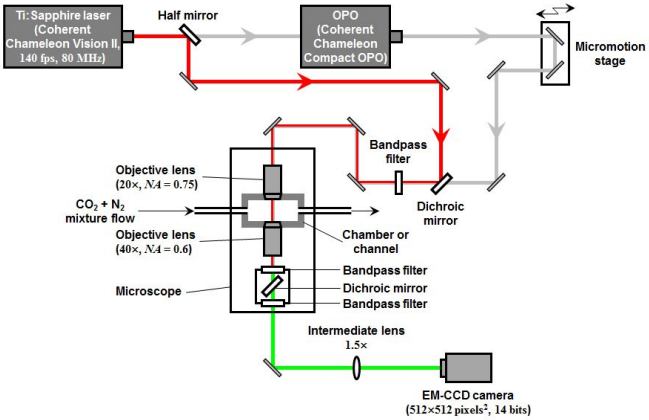


図 1　マイクロスケール・ガス熱流動センシング用 CARS 顕微鏡システム。

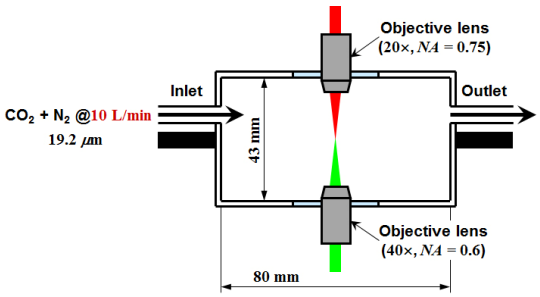
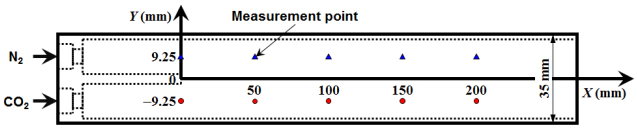


図 2　CARS 光発生用密閉チャンバ概要。

(a) チャネル上面図



(b) チャネル断面図

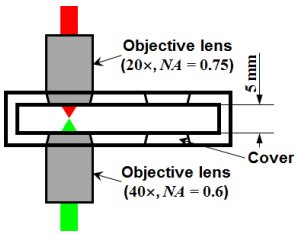


図 3　チャネル概要。

図２に示すようにポンプ光とストークス光集光用および CARS 光検出用対物レンズを、混合気流を注入する密閉チャンバ内に挿入可能とした。

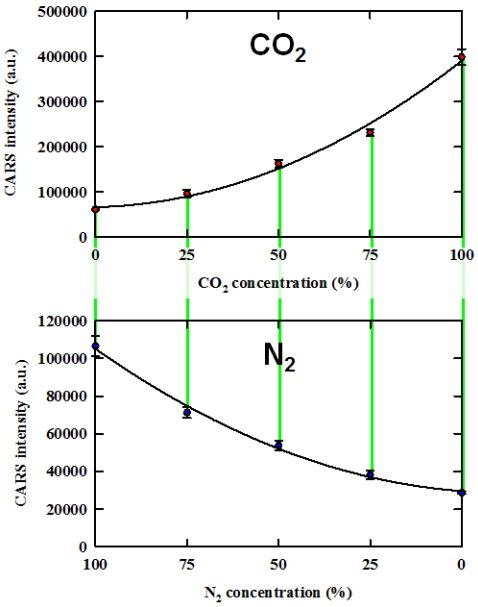
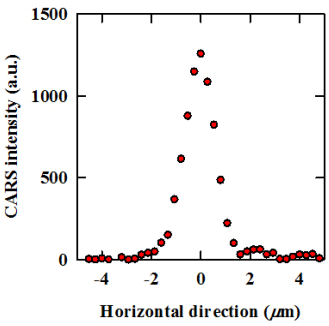
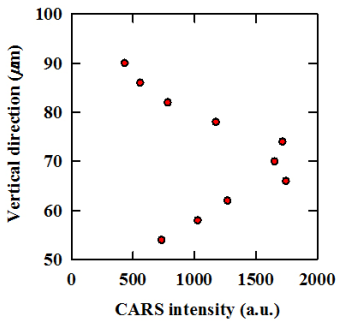


図４　CARS 光強度と気流混合比との相関関係。



(a) 水平方向

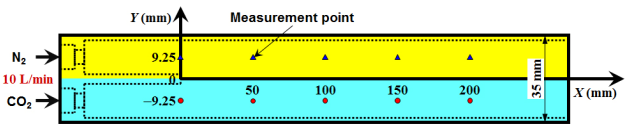


(b) 垂直方向

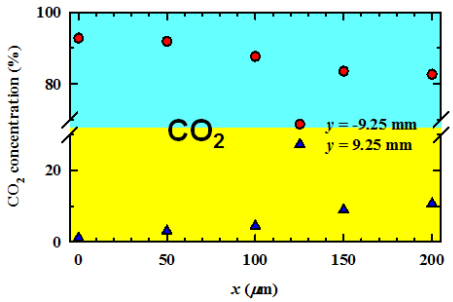
図５　CARS 光強度と気流混合比との相関関係。

(2)<u>混合気流の濃度二次元分布の非侵襲センシング法の開発</u>

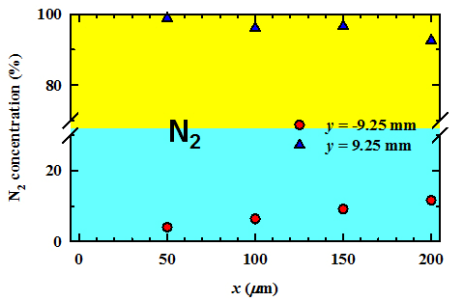
気流混合過程における濃度分布非侵襲センシングを行うために、図３に示すように下流域における混合計測を可能とするチャネルを製作して実験を行った。チャネル内に設置した 10 点の計測点における二酸化炭素および窒素の混合比を変化させた際の、それぞれの気体からの CARS 光強度の計測を行った。



(a) 計測点概要



(b) 二酸化炭素



(c) 窒素

図６　混合気流の二次元濃度分布。

４．研究成果

(1)<u>CARS 光強度と気流混合比との相関関係</u>

図４に二酸化炭素および窒素の混合比を変化させた際の、それぞれの CARS 光強度との相関関係を示す（以降、校正曲線と呼ぶ）。二酸化炭素および窒素の校正曲線は共に、CARS 光の理論に基づいた二次曲線を示すことが明らかとなった。尚、対物レンズを用いた際の CARS 光発生領域は、図５に示す CARS 光強度分布において、半値幅に基づいて求めた処、2.5 μm × 2.5 μm × 44.5 μm であった。

(2)混合気流の濃度二次元分布

チャネル内に設置した 10 点の計測点における二酸化炭素および窒素の混合比を変化させた際の CARS 光強度の計測を行い、各点における校正曲線の取得を行った。二酸化炭素および窒素の校正曲線は共に、CARS 光の理論に基づいた二次曲線を示し、更に二次曲線の形状は対物レンズ間の距離に依存していることが明らかとなった。即ち、各計測点におけるそれぞれの気体の校正曲線を把握する必要がある。

次にチャネル内に二酸化炭素および窒素を同一流量で供給し、各点における二酸化炭素および窒素の混合比の計測を行った。図６にそれぞれの混合比分布を示す。チャネル下流域では、二酸化炭素および窒素の混合比変化を的確に捉えることが可能となり、更に理論との整合性を確認した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

① Reiko Kuriyama & Yohei Sato, "Two-wavelength Raman imaging for non-intrusive monitoring of transient temperature in microfluidic devices," *Measurement Science and Technology*, 査読有, Vol. 25, No. 9, 2014, 095203 (9pp). DOI:10.1088/0957-0233/25/9/095203

② Reiko Kuriyama & Yohei Sato, "An investigation of measurement condition for non-intrusive velocity determination based on thermal tracing by Raman imaging," *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, Vol. 9, No. 2, 2014, 14–00351 (11pp). DOI: 10.1299/jtst.2014jtst0014

③ Reiko Kuriyama & Yohei Sato, "Non-intrusive measurement of microscale temperature distribution by spontaneous Raman imaging," *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, Vol. 14, Issue 6, 2013, pp. 1031–1037. DOI:10.1007/s10404-012-1110-8

〔学会発表〕（計 9 件）

①守屋まどか, 山縣侑生, 栗山怜子, 山本憲, 佐藤洋平, "CARS 顕微鏡による混合気流の非侵襲濃度分布計測," 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2014, 2014 年 11 月 8 日, 芝浦工業大学（東京都・江東区）.

② Yuki Yamagata, Kota Ozawa, Reiko Kuriyama, Ken Yamamoto & Yohei Sato, "Non-intrusive and micron-resolution sensing for gas mixture flow using CARS," *The 25th International Symposium on Transport Phenomena*, 2014 年 11 月 5 日, Krabi (Thailand).

③ Yohei Sato, Reiko Kuriyama, Takeshi Noguchi, Yuki Yamagata & Tetsuro Tateishi, "Non-intrusive and micron-resolution detection of chemical species in microchips using CARS microscopy," *The 24th International Conference on Raman Spectroscopy*, 2014 年 8 月 11 日, Jena (Germany).

④Reiko Kuriyama, Tetsuro Tateishi & Yohei Sato, "Development of total internal reflection Raman imaging for non-intrusive quantitative visualization of near-wall concentration," *The 17th International Symposia on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2014 年 7 月 7 日, Lisbon (Portugal).

⑤山縣侑生, 小澤考太, 栗山怜子, 佐藤洋平, "CARS 顕微鏡を用いた混合気流の非侵襲・高分解能センシング," 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014 年 5 月 23 日, アクトシティ浜松コングレスセンター（静岡県・浜松市）.

⑥ Reiko Kuriyama, Atsushi Ito, Takeshi Noguchi, Kota Ozawa & Yohei Sato, "Raman imaging technique for non-intrusive visualization of scalar distribution in microfluidics," *The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences*, 2013 年 10 月 29 日, Freiburg (Germany).

⑦山縣侑生, 小澤孝太, 栗山怜子, 佐藤洋平, "CARS を用いた気流中イオン濃度の非侵襲センシング," 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2013, 2013 年 10 月 19 日, 弘前大学（青森県・弘前市）.

⑧ Koichi Hishida, Mitsuhisa Ichiyanagi, Yutaka Kazoe & Yohei Sato, "Laser-based measurement techniques for interfacial transport phenomena in microchannels," *ASME 2013 The 11th International Conference on Nanochannles, Microchannels, and Minichannles*, 2013 年 6 月 16 日, 北海道大学（北海道・札幌市）（招待講演）.

⑨小澤孝太, 池邉隆将, 栗山怜子, 佐藤洋平, "マイクロスケール気流熱流動構造解明に向けた非侵襲センシング法の開発," 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2012, 2012 年 11 月 17 日, 熊本大学(熊本県・熊本市）.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

http://www.tfe.sd.keio.ac.jp/

６．研究組織

(1)研究代表者

佐藤 洋平（Yohei SATO）
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：００３４４１２７