

ラマンイメージングによる管内気体拡散挙動の可視化と濃度分布計測

(株)四国総合研究所 電子技術部 朝日 一平
(株)四国総合研究所 電子技術部 杉本 幸代

キーワード : レーザラマン分光法
ラマンイメージング
空間濃度分布
水素
管内気体拡散挙動

Key Words : Laser Raman spectroscopy
Raman imaging
Concentration distribution
Hydrogen
Diffusion behavior of gas in
a pipe

Visualization of diffusion behavior and measurement of concentration distribution of gas in a pipe by Raman imaging

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department
Ippei Asahi, Sachiyo Sugimoto

Abstract

Research to clarify the advection and diffusion behavior of gas plays an important role in a wide range of fields from basic to applications in science and technology. In general, the behavior of fluid is reproduced and clarified by CFD simulation analysis supported by experimental results. That is, experimental results are extremely important in guaranteeing the reproducibility of simulation analysis. However, at present, measurement of spatial concentration distribution by multipoint measurement using a contact type gas sensor is mainstream. In this method, there are the problems that the installation of the sensor physically affects the flow field, the measurement results may be delayed in time depending on the responsiveness of the sensor, the spatial resolution becomes rough, and the like. The interference with the original flow field becomes stronger in the case of a closed space such as the inside of a structure.

In this paper, we report on our success in constructing a measurement system based on Raman imaging technology, visualizing the gas behavior and measuring the spatial concentration distribution of gas in a pipe without any interference with the original flow field.

1. 序論

気体の移流や拡散挙動を明らかにするための研究は、噴流や渦の解析、エンジン内気体流動解析、室内流動解析など、科学技術における基礎から応用に亘る幅広い分野において重要な役割を果たしている¹⁾³⁾。一般的に、流体の挙動は実験結果に裏付けられた CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションによって再現され、明らかにされる。即ち、実験結果がシミュレーション解析の再現性を保証する上で極めて重要であると言える。

流れの状態は、流速、温度、密度、圧力などの物理量の空間分布として表現される。媒質が可燃性物質である場合、流体解析の目的は概ね安全性の検証や、エネルギー効率の向上であるため、媒質の密度或いは濃度に注目し、流れの様子が観測される。しかしながら、現在、実験による濃度分布計測は、接触式ガスセンサを用いた多点計測による手法が主流である¹⁾。この方法では、センサの設置が流れ場に物理的な影響を与えること、時間的、空間的な分解能が粗いこと、などが課題となる。本来の流れ場への干渉は、構造体内部等の比較的狭隘な閉鎖空間内を観測する場合、その影響はより顕著となる。

本稿では、これらの課題を解決できる流れの可視化手法として、ラマンイメージング技術に基づく流れの可視化について述べる。本技術では、本来の流れ場へ一切干渉することなく、構造体内部における気体挙動の可視化と空間濃度分布の計測が可能である。

2. 技術的背景

流れの状況を理解することは、現象を解明するための第一段階として重要なステップであるが、通常、流れそのものは目に見えないものである。これを目に見えるようにする技術が、流れの可視化である。当然のことながら、本来の流れの状態に影響を与えない手法が求められるため、一般的に、光を用いた非接触計測手法が適用される。流れを可視化する光学的手法としては、シャドウグラフ法や粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV)、平面レーザー誘起蛍光法 (Planer Laser Induced Fluorescence : P-LIF) が良く知られている。

シャドウグラフ法は、流れ場に形成される媒質

の密度変化 (= 光の屈折率変化) を光の陰影として投影することで、流れの経時変化を可視化する手法である⁴⁾。噴流内に生じる乱流や渦の様子など、比較的速い現象をリアルタイムで撮像することが可能であるものの、基本的には定性的な可視化に留まるものである。

PIV は、トレーサと呼ばれる微粒子を投入した流れ場にレーザー光を照射し、流れに追従するトレーサから生じる弾性散乱光を撮像することで流れを可視化する。これにデジタル画像処理技術を加え、流れ場の多点の速度情報を抽出する流速計測技術である⁵⁾⁷⁾。気流の計測では主に、粒径数 μm のオイルミストが用いられる。この場合、観測に用いる現象は微粒子による光の Rayleigh 散乱である。PIV は、流れの定性的把握と定量計測を可能とする比較的新しい計測技術であり、近年では 2 次元・3 次元計測や高時間分解計測も可能となっている。しかしながら、PIV は、トレーサが流れ場に追従することを前提とする手法であること、構造体内部の観測においてはトレーサの付着によって観測が困難になる場合があることに留意が必要である。また、得られる物理量は速度分布に限られる。

P-LIF は、レーザーの照射によって生じる媒質からのレーザー誘起蛍光を撮像する手法であり、照射するレーザー光をシート状に拡大整形することにより、2 次元のエリア計測を可能とするものである⁸⁾¹⁰⁾。

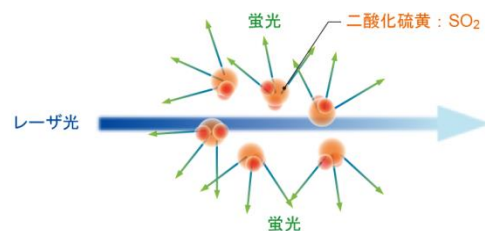


図1 レーザ誘起蛍光の概念

図1に示すように、レーザー誘起蛍光は、対象物質をレーザーで励起し、緩和過程で発する蛍光を測定するものであり、照射するレーザー波長は、対象物質の電子吸収帯に一致させる必要がある。LIF 信号強度は一般に次式で表される⁸⁾。

$$S_{LIF} = \Phi n_{total} \chi f_B(T) \alpha G \eta \frac{I_{Laser}}{h\nu} \quad (2.1)$$

ここで、 S_{LIF} : LIF 信号強度、 Φ : 装置定数 (励起領域の体積、観測領域の立体角、検出器の量子効率により定まる)、 n_{total} : 気体分子の全密度、 χ : 対象物質のモル分率、 $f_B(T)$: 振動回転状態の統計分布関数、 α : 吸収係数、 G : 吸収線とレーザ線幅の重なり率、 η : 量子収率、 I_{Laser} : 励起光強度、 h : Planck 定数、 ν : 励起光の振動数である。量子収率 η は 2 準位系モデルの定常状態を仮定できる場合、次式に示すレート方程式を解くことで求められる。

$$\eta = \frac{A}{A + BI_{Laser} + Q} \cong \frac{A}{Q} \quad (2.2)$$

ここで、 A 、 B はアインシュタインの A 係数、 B 係数、 Q は分子衝突によって励起状態の物質が光の輻射を伴わずに失活するクエンチングレートである。一般に、実験においては BI_{Laser} が無視できる程度に励起光強度を抑える。 Q は物質によっては A に比べて 2 桁程度大きく、分子衝突に由来するものであるため、温度や観測空間の分子組成等に依存する。場合によってはこれらに加え振動・回転準位間での緩和や項間交差の影響を考慮する必要がある。

P-LIF では、流れ場を形成する分子から生じるこれらの蛍光を、シートビームによって 2 次元空間分布として直接観測するため、トレーサは不要である。従って、より本来の姿に近い状態で流れ場を観測することができる。しかし、濃度計測を行う場合、前述のように多くの条件や制約を考慮する必要がある。また、蛍光発光の波長幅が比較的広く、多くの物質において重なる波長領域が生じるため、分子種の特定制定ができる条件は限られている。構造体内部の観測では、多くの場合構造体そのものから生じるレーザ誘起蛍光との分離に留意する必要がある。

このように、一般的に用いられている流れの可視化技術において、空間濃度分布計測ができる手法は限られており、その中でも多くの制約が課されているのが現状である。

3. 計測原理

これらの背景を踏まえ、著者らは、流れを可視化するための計測原理として、レーザラマン分光法を用いることとした。

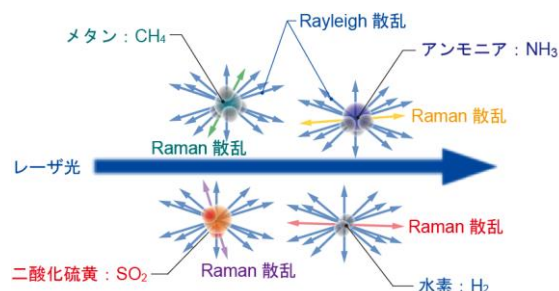


図 2 ラマン散乱の概念

図 2 に示すように、ラマン散乱は、分子による光の非弾性散乱の一種であり、光と物質を構成する分子の間におけるエネルギーの交換によって、入射光と異なる波長の光が散乱される現象である¹¹⁾。入射光に対する散乱光の波長の変化量は物質固有の値を有し、これをラマン散乱光と呼ぶ。また、物質をレーザ光で励起し、ラマン散乱光を分光して検出する手法をレーザラマン分光法と呼ぶ。

気体の検知においては一般的に、分子の内部エネルギーに対応するラマンシフト ν に応じ、入射光波長 $\lambda (= 1/\nu_0)$ に対して長波長側に発生する一次ストークス光を用いる。分子 x によるラマン散乱波長 λ_x は $1/\lambda_x = \nu_0 - \nu$ により定まる¹¹⁾。即ち、複数種の物質が混在する雰囲気中に、任意波長のレーザ光を照射すると、ラマン効果は各物質固有の内部エネルギーに対応する複数の波長の散乱光となってそれぞれに生じる。図 3 に波長 355nm のレーザ光により励起した大気主成分である窒素、酸素及び代表的な可燃性ガス種であるメタン、水素のラマンスペクトルをそれぞれ示す。

図 3 に示すように、複数種の物質が混在している場合でも、単一波長のレーザ照射に伴い、各分子固有の波長に散乱光が生じる。従って、励起レーザ波長により定まる対象分子種のラマン散乱波長のみ注目し応答を捉えることにより、雰囲気中に存在する特定分子の検出が可能であり、分光計測を行うことによりマルチ成分の同時観測も可能となる。また、ラマン散乱光の強度は、励起空間中に存在する分子の密度に比例するため、ラマン散乱光の強度から、濃度の定量化が可能となる。このように、レーザラマン分光法は、各種計測手法と比較して優れた特徴を有する手法であり、単原子分子を除く多くの化学物質に対し、原理的に

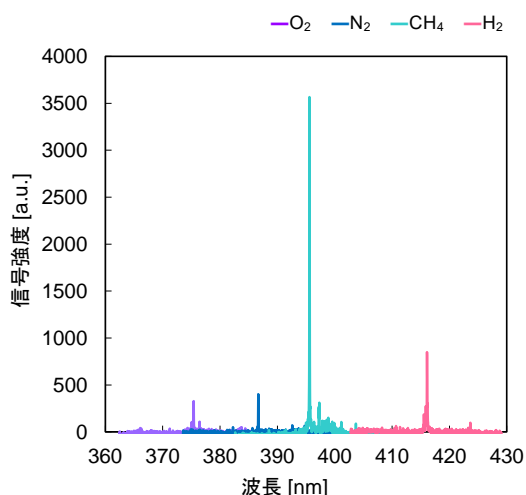


図3 大気成分及び可燃性ガスのラマンスペクトル事例

は適用可能である。一方で、現時点で本原理を用いて実用化されている製品はごく僅かである。その最大の要因は、ラマン散乱が他の光-物質間相互作用と比較して、極めて弱いためである。表1に代表的な光-分子間相互作用の断面積の典型値を示す¹²⁾。

表1 光-分子間相互作用の断面積

過程	断面積 σ [cm ²]
紫外吸収	10 ⁻¹⁸
赤外吸収	10 ⁻²⁰
蛍光	10 ⁻¹⁹
レイリー散乱	10 ⁻²⁶
ラマン散乱	10 ⁻²⁹

表1に示すように、一般にラマン散乱は、他の光-物質間相互作用と比較し、概ね 1/1000 以下の発生確率（断面積）であり、非常に微弱な作用であることがわかる。従って、実用にあたっては、微弱な応答を高感度に捉えるための様々な方策が必要である。

4. 実験装置構成

4.1 ラマンイメージングシステム

本稿では、前節に述べたラマン散乱光を高感度 CCD 検出器を用いて画像として捉えることにより、気体の挙動を可視化する。ここでは、対象を

水素分子とし、構造体を配管とした場合、即ち、配管内における水素の流れの可視化事例について解説する。これは、将来における一般家庭に向けた水素導管供給を想定し、現行の都市ガスパイプラインの運用方法を水素に転用することが可能であるかどうかを検討する調査事業の一環として実施したものであり¹³⁾、ここでは、初期状態として窒素が充填された配管内に水素を導入した場合の両ガスの置換挙動を可視化した事例について述べる。

図4にラマンイメージングシステムの装置構成を、表2に主要構成機器の仕様をそれぞれ示す。

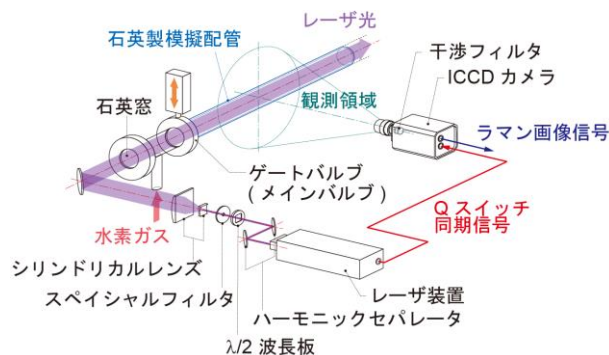


図4 ラマンイメージングシステム装置構成

表2 主要構成機器の仕様

パルスレーザー装置	
種別	フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザ 3 ω
メーカー/型式	Quantel CFR400
波長	355 [nm]
パルスエネルギー	80[mJ](Max)
パルス幅	7[ns]
ビーム外径	6.0[mm]
ビーム拡がり角	<3.5[mrad]
繰返し周波数	30 [Hz]

ICCD カメラ	
メーカー/型式	Princeton Instruments/PI-MAX4:1024f
イメージセンサ	MPP フロントイルミネイテッド CCD
CCD フォーマット	1024×1024 [pixel] ピクセル/素子サイズ： 19×19[μm]/12.4×12.4[mm]
インテンシ ファイア形式	18mm-Gen III HBf
分解能	16bit
カメラレンズ	
メーカー/型式	Nikon/Ai Nikkor 50mm f/1.2S
焦点距離	50 [mm]
絞り (最大-最小)	f/1.2-f/16
水素ガス用干渉フィルタ	
メーカー/型式	Andover/020FC06-25 4161
透過中心波長 /半値全幅	416.1[nm]/2.0[nm]
酸素ガス用干渉フィルタ	
メーカー/型式	Andover/020FC04-25 3754
透過中心波長 /半値全幅	375.4[nm]/2.0[nm]
ラマンエッジフィルタ	
メーカー/型式	Semrock/LP02-355RU-25
レーザ光 ブロッキング値	>99.9999[%]
信号処理ソフトウェア	
メーカー/型式	Princeton Instruments /Light Field
平滑化処理	ガウシアン 5×5

本手法では、構造体の一部にレーザ波長に対し透過率が高い物質を用いた窓を設け、内部にレーザ光を導入すると共に、構造体における観測箇所を対象分子のラマン散乱波長に対し透過率が高い物質を用いて製作することによって、構造体外部から内部の流れを非接触で可視化する。

光源に Nd:YAG レーザ第 3 高調波(波長 355nm)を用い、シート状にしたレーザ光を後述する模擬配管の観測領域に照射して、水素分子によるラマ

ン散乱光を撮像した。ラマン散乱光はレーザ照射光軸に対して直角方向から広角カメラレンズにより集光し、ICCD 検出器を用いて画像として検出した。この場合、水素分子のラマン散乱波長は約 416nm となり、レーザ波長、観測波長共に紫外領域の光となる。従って、レーザを導入する窓材及び観測部の配管は紫外波長域において高い透過率を有する石英を用いて製作した。

本装置によるガスの可視化領域は、ICCD カメラの視野内にあるレーザ光照射領域である。シート光を拡大し、レーザ光照射領域を広く取ることで、可視化領域が拡大することになるが、シート光の拡大はレーザ光のエネルギー密度を低下させ、これに伴いラマン散乱光強度が低下する。このように、本計測手法では可視化領域の拡大と計測の感度がトレードオフの関係となるため、対象物質や求められる検出限界に合わせ、照射ビーム外形の最適化が必要である。ここでは、焦点距離 $f = -200\text{mm}$ のシリンドリカル平凹レンズと、 $f = 700\text{mm}$ のシリンドリカル平凸レンズにより、レーザ光を $20 \times 7\text{mm}$ のシート状に整形し、観測部へ照射した。従って、本装置によって一回の計測により可視化される領域は、レーザ光軸に対し鉛直方向に 20mm となり、レーザ光軸方向については ICCD カメラの視野によって決まる値となる。また、撮像面に対し垂直方向については、レーザシート光の厚み 7mm の領域で生じたラマン散乱光が積算された値となる。

ラマン散乱光は極めて微弱であるため、計測の際、太陽光や照明光などの背景光やレーザ照射に伴う散乱光の影響を大幅に抑制する必要がある。また、本研究で対象とする水素分子と観測空間に存在する他の分子(本稿では窒素)のラマン散乱光とを分離する必要がある。ここでは、中心波長 416.1nm 、半値全幅 2.0nm の光学バンドパスフィルタを使用することで水素分子のみを選択し、ロングウェーブパスエッジフィルタを用いてレーザ波長の外乱光を遮断した。また、背景光の影響を抑制するために、ICCD カメラのシャッター開放のタイミングをレーザ光のパルス発振と同期させ、ICCD カメラの露光時間をレーザパルスと同程度の 7ns とした。ラマン散乱光は励起レーザ光の電場の振動方向に対して直角方向に強く放射される。従ってレーザ光の偏波面は観測面内において垂直

となるよう調整した。

前述のとおり、本装置では観測部の配管を石英で製作している。石英は、紫外領域における透過率が高いことに加え、ガラス材の中でもレーザー照射に伴う誘起蛍光の発生が少ない物質である。通常、蛍光スペクトルは励起波長より長波長側の広い波長域に亘りブロードな分布を示すため、本手法のように、ストークス光を観測する場合、ラマン散乱波長と蛍光波長の一部が干渉することになる。即ち、蛍光は本質的に干渉フィルタによる波長選択の効果が及ばず、ガラス材の中では相対的に低いとされる石英の蛍光であっても、ラマン散乱を観測する場合は十分強い外乱光となる。一方、ラマン散乱光はレーザーの照射に伴い瞬時に発生する現象であるのに対し、蛍光はレーザーの照射から数十 ns 以上の時間をおいて比較的長時間に亘り発光する現象である。これは両者の光学過程が異なることに由来する。本システムでは、この特性を利用して、レーザー照射からゲート開放までの遅延時間を適切に設定することで、水素分子によるラマン散乱光と石英管から生じるレーザー誘起蛍光を時間的に分離している。

4.2 模擬配管

前項に述べた方策は全て、取得画像におけるラマンイメージのコントラストを高めるためのものである。しかしながらそれでも、ラマン散乱光が非常に微弱であることから、より鮮明な流れのラマンイメージを得るには十分ではない。ここでは、観測部（石英管）を含む配管系全体（以下模擬配管）によって生成する流れの再現性を高め、単一条件において、ラマンイメージの撮像を複数回行い、得られた各時刻のラマンイメージを重ね合わせることによって、より明瞭な流れの可視化を実現した。模擬配管の構成を図5に示す。

模擬配管の構造は、水素導入条件を設定するための供給系と、流れを安定させるための助走管及び水素のラマン散乱光の経時変化を撮影する石英管から成る試験系と、ガスを排出するための排気系から構成される。本稿では、直管内におけるガス可視化事例について述べるが、配管の組み替えによって、縮径管や曲管など、様々な形状の配管内部の観測が可能となっている。石英部を除き、全配管系は SUS304 管により製作した。各部位はフランジ接続または溶接接続によって接続されて

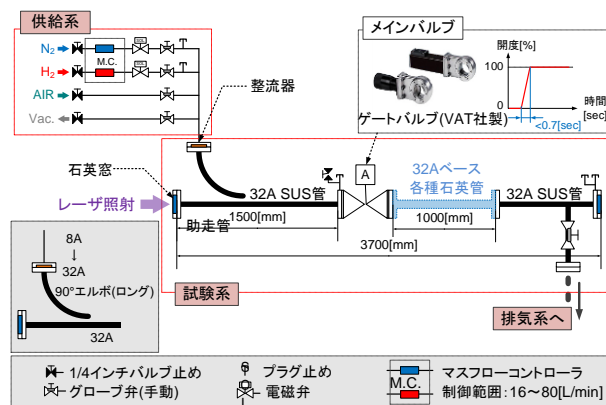


図5 模擬配管の構成

いる。窒素から水素へ置換する場合、供給系から導入される水素及び窒素の各ガスは 8A 配管から整流器を通過し、32A 助走管に接続される構造となっている。ここで水素導入弁を V_H 、窒素導入弁を V_N と呼称する。 V_H 及び V_N は、ガスの導入に対する計測系の精密なタイミング制御のため電磁弁（防爆仕様）を採用した。助走管は 1500mm の延長とし、観測部へガスの導入を操作するメインバルブへ接続する。ここで、試験結果を用いてシミュレーション解析の再現性評価を行うことを視野に入れると、メインバルブ開放時に界面を崩すことなく計測を開始することが重要なポイントとなる。即ち、開閉機構と開閉の応答速度に注目し最適なバルブを適用する必要がある。ここでは、VAT 社製ゲートバルブをメインバルブに採用した。ゲートバルブは上下摺動によりバルブの開閉を行う機構となっており、バルブの開閉開始から完了までの時間は 0.7 秒以下である。また、試験における初期状態の調整に必要なガス置換操作を行うために、導入管及び助走管に大気圧調整ラインと真空引きラインをそれぞれ設置し、導入管内のガス温度、圧力及びガス濃度をモニタするためのセンサを接続した。

観測部は、配管口径 32A を想定した実験を行うものとし、規格に示される配管内径に対し最も近い寸法の石英標準管を選定した。

以上、本研究において構築したラマンイメージングシステムと模擬配管から成る実験装置（図6）について概説したが、ラマンイメージングでは、レーザー装置等を含む撮像のための光学システムのみならず、観測場を構成する機器についても、ラ

マンイメー取得するために最適化を図ることが重要であり、これによって、鮮明な可視化画像を得ることができる。

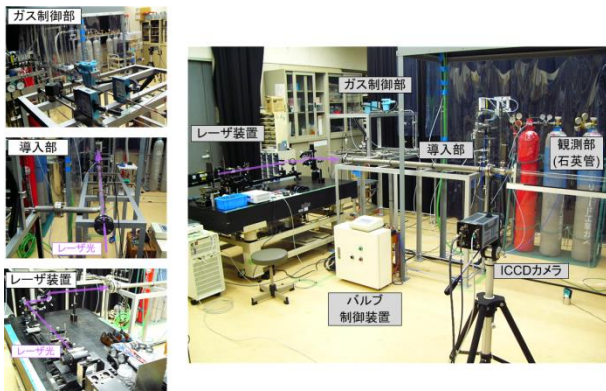


図 6 配管内水素のラマンイメージング
実験装置外観

4.3 管内ガス流と計測のタイミング制御

前述の模擬配管系では、置換挙動の計測に際し、観測部を初期状態の窒素で満たし、助走管を水素ガスに入れ換えた後、メインバルブの開放により石英管内の置換を開始する。一般的に、バルブは動作機構や口径により開閉の応答速度が異なり、また、動作中は必然的に管内の開口面積が変化する。このとき、助走管内にガス導入に伴う圧力が作用していると、バルブ開動作の間、開口面積の変化に応じ流速が変化し、ガスの境界面が大きく乱れるため、計測結果から各ガスの物性そのものに由来する置換挙動を解析することが困難となる。従って、本研究における模擬配管では、管内ガス制御において、初期状態におけるガス界面の乱れを最小限に抑えることに留意し、部品の選定やガス制御手法の検討を行った。

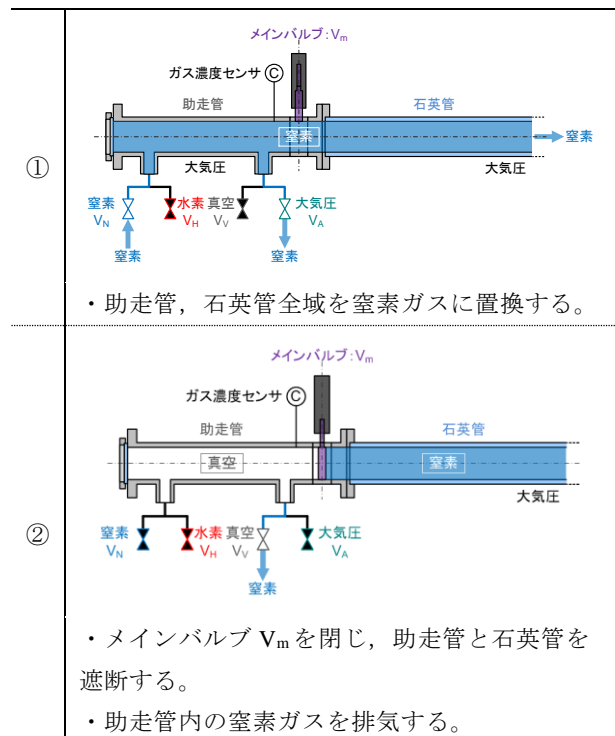
前述のとおり、本研究でメインバルブとして用いるゲートバルブは、バルブ開動作開始から完了までの経過時間がわずか 0.7 秒であり、応答が非常に速い。また、開閉動作は上下摺動によるため、ガス界面に与える物理的な作用は各種バルブの動作機構の中では最も少ないと考えられ、本研究におけるメインバルブに適している。本実験装置では、観測部にレーザ光を照射する必要があるが、メインバルブを閉止した状態でレーザ光を導入すると、バルブにレーザ光が照射されることによりシール面の表面状態が悪化し、気密性能が低下する。また、シール材の変質や、これに伴う微粒子

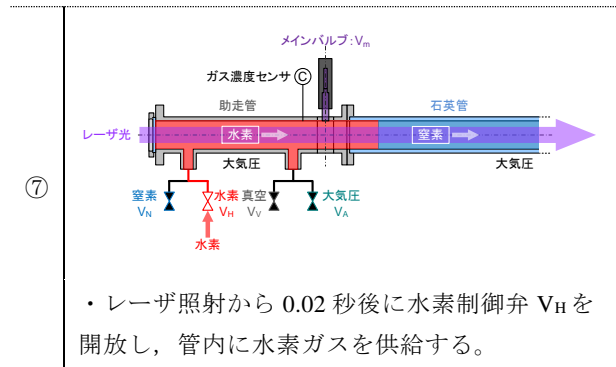
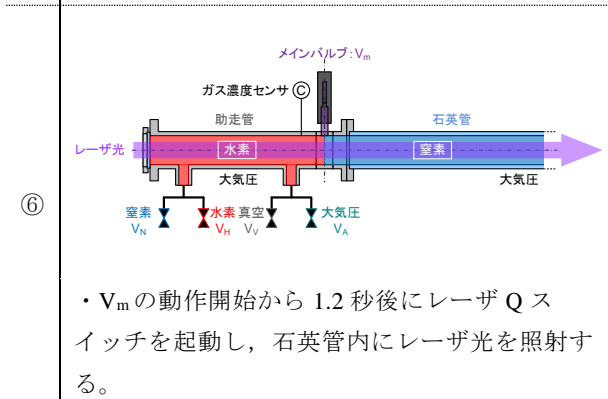
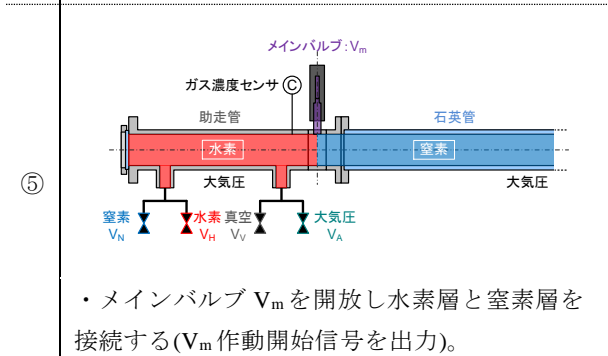
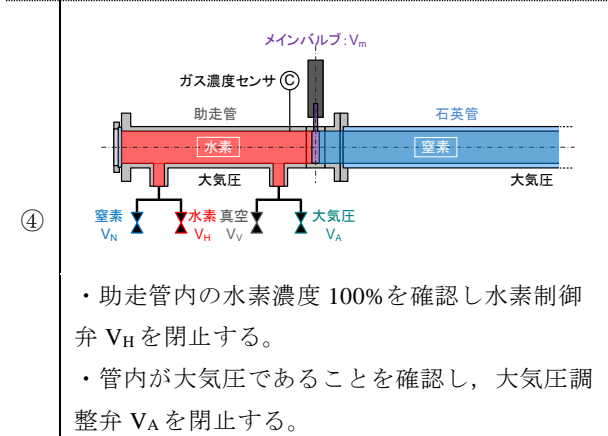
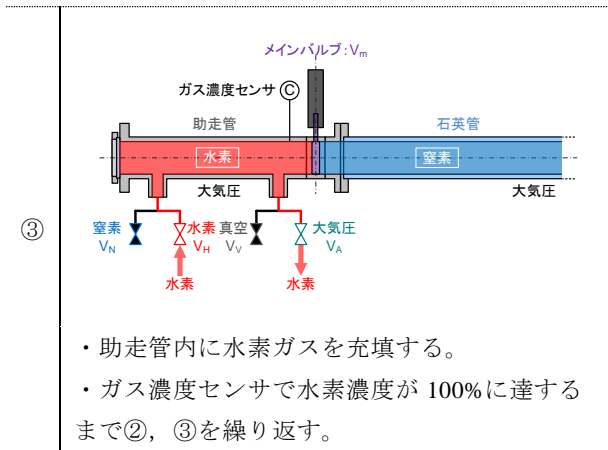
の生成が計測に悪影響を及ぼすことが懸念された。

従って、本研究ではこれらを総合的に考慮し、表 3 に示す手順により、導入部のガスを置換し、メインバルブの開放及び計測を行うこととした。

はじめに、助走管及び石英管を含め、模擬配管全域を窒素に置換する(①)。このとき、模擬配管の最下流は大気開放されている。次にメインバルブを閉止し、助走管と石英管の接続を遮断すると共に、助走管内の気体を排出し真空状態にする(②)。十分に真空度が確保されていることを確認し、助走管内に水素ガスを導入する(③)。このとき、水素ガス濃度センサの指示により、助走管内の水素濃度をモニタリングし、100%に至るまで②、③を繰り返す。水素濃度 100%に至ると、助走管内への水素供給を停止し、同管内圧力が大気圧であることを確認の上、排気系のバルブを全て閉止する(④)。これまでが試験の準備段階となる。続いてメインバルブを開放し、水素ガス及び窒素ガスを接続する(⑤)、メインバルブ開放から 1.2 秒後にレーザ Q スイッチを起動し、管内にレーザ光を照射する(⑥)。Q スイッチ起動から 0.02 秒後に水素制御バルブを開放し、管内に水素ガスを供給する(⑦)。

表 3 気体導入の手順





これらの一連の手順により，レーザー光の照射によるメインバルブの損傷を防ぎ，また，バルブ開放に伴う両ガスの界面の乱れを抑えた上で置換挙動を可視化することが可能となった。

本実験装置では，4.1 節に述べたように，ICCD カメラの撮像のタイミングがレーザー装置の Q スイッチ信号と同期している。レーザーパルスの繰返し周期 30Hz で計測する場合を例にとると，バルブ開放のタイミングによって，計測ごとに現象に対する撮像の起点が最大 0.03 秒程度の範囲でずれることになる。本実験装置では，図 7 のチャートに示すようにバルブの駆動とシャッタの開放のタイミングを制御する時限装置を製作し，計測結果の正確な再現性を確保した。

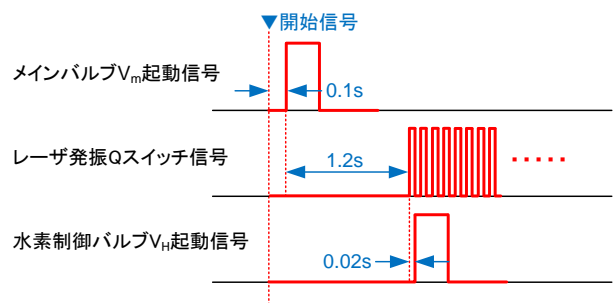


図 7 計測のタイミングチャート

4.4 ガス濃度の定量化

図 4 に示すラマンイメージングシステムにおいて，ICCD カメラに導入されるラマン散乱光強度 P_R は，

$$P_R = \eta P_0 K G \Delta L N \frac{A}{r^2} \sigma e^{-2 \int_0^r [\alpha_L(r') + \alpha_R(r')] dr'} \quad (4.1)$$

で表される。ここで， η ：検出器量子効率， P_0 ：レー

ザ光強度, K : 受光系透過効率, G : 幾何光学的結合効率, ΔL : 検出器が観測する空間領域, A : 受光レンズ開口径, r : 離隔距離, σ : ラマン散乱断面積, N : 分子密度, α_L : レーザ波長消散係数, α_R : ラマン波長消散係数である。

式(4.1)において, 本研究では, 観測領域やレーザーの伝搬距離がメートルオーダー程度の近距離であるため, 消散係数 α を含む減衰項の寄与は極めて低い。従って, 減衰項の乗数を 0 即ち, 減衰項を 1 と置くことができる。また, 他のパラメータは, 画素ごとに異なる値をとるものの, 試験時の模擬配管と可視化システムの配置や構成部品が決まれば, 全て定数となる。従って, 事前に既知濃度のガスによるラマンイメージを検量線として取得しておくことによって, 実験結果の画像の各画素の輝度 P_R から水素分子の密度が計測され, ガス濃度を求めることができる。

5. 実験結果とシミュレーションの再現性評価

5.1 窒素との境界層における水素の挙動

図 8 に流速 0 の場合の直管水平配置における窒素・水素層の挙動を, 図 9 に同じく直管鉛直配置における挙動をそれぞれ示す。

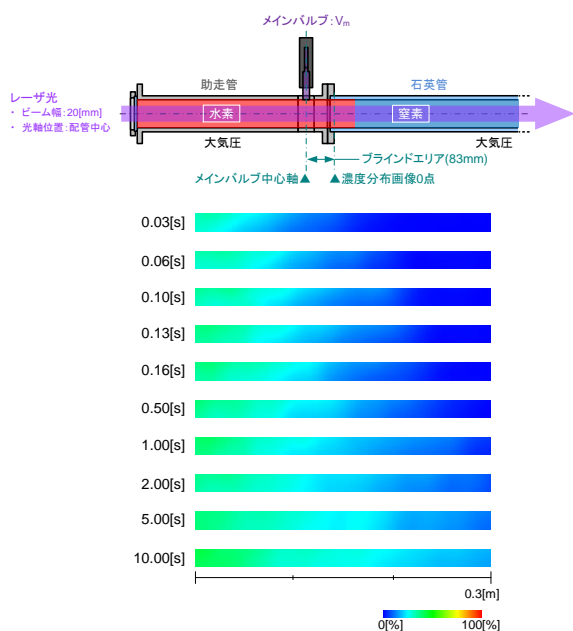


図 8 配管内水素ガス流のラマンイメージ
(流速 0, 直管水平配置)

これらは, 流速 0, 即ちメインバルブを境に上側に水素, 下流側に窒素を, いずれも大気圧で充

填し, メインバルブの開放のみを行った際の水素

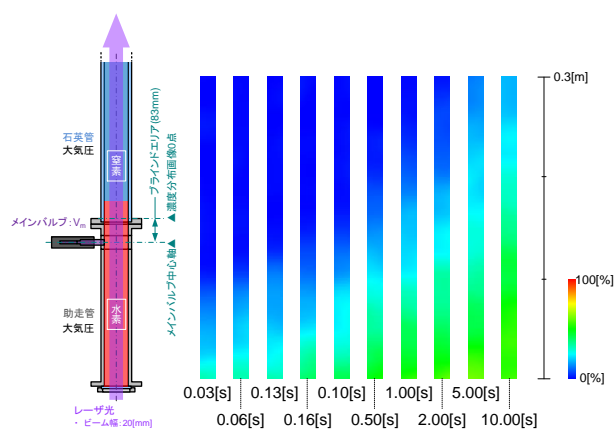


図 9 配管内水素ガス流のラマンイメージ
(流速 0, 直管鉛直配置)

填し, メインバルブの開放のみを行った際の水素の挙動を可視化したものである。可視化画像の彩度は水素濃度に対応する。図 8, 図 9 により, いずれの条件においても窒素と水素の界面が形成されると, 流れがない場合でも水素が窒素層へ混合していく状況が確認できる。特に注目すべき特徴は, 例えば図 8 について, 観測開始から 0.03 秒(バルブ開放からの実時間 1.25 秒後)において既に約 200mm まで水素が進行している。これはブラインドエリアを含むと約 280mm 進行していることになり, その後の経時変化の速度と比較すると著しく速いことがわかる。鉛直方向の配置についても同様の傾向を示しているが, 若干水素の進行が抑えられていることが確認される。また, 水平配置では, 水素が配管の上方でより発達が促進されている一方で, 鉛直方向では管径方向の顕著な濃度勾配は見られない。これらの特徴は, 水素と窒素の比重差に伴う, 配管の配置方向と重力の作用として理解することができる。即ち, 両ガスの境界が形成されると同時に界面に重力分布が生じ, 比重が軽い水素が窒素側上方へ, 比重が重い窒素は水素側下方へ流れ込むことでこれらの挙動が説明できる。流れを伴わない場合の水素の挙動は, 時間の経過と共に徐々に減衰するが, 本研究の範囲では平衡状態に達することはなく, 発達が継続された。観測開始から 10 秒後におけるバルブ付近の水素濃度は 50%以上で推移している。

5.2 移流を伴う管内水素置換挙動の可視化

次に, 移流を伴う場合における配管内水素置換

挙動の実験結果を図 10、図 11 にそれぞれ示す。

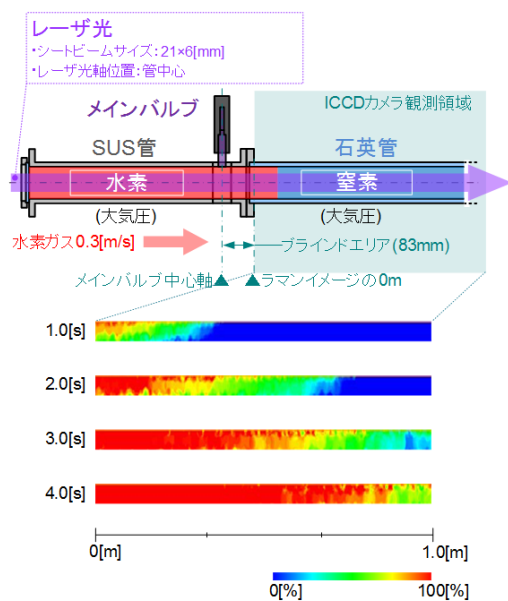


図 10 配管内水素ガス流のラマンイメージ
(流速 0.3m/s, 直管水平配置)

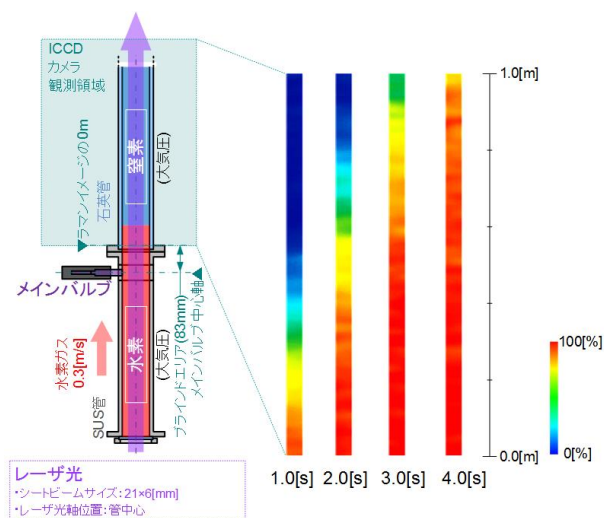


図 11 配管内水素ガス流のラマンイメージ
(流速 0.3m/s, 直管鉛直配置)

図 10、図 11 の画像は、いずれもブラインドエリアから下流側 0[m]～1 [m]の範囲を可視化したものであり、計測開始から 1 秒ごとの変化を抽出したものである。実験結果をみると、いずれの条件についても、窒素層への水素の進行がラマンイメージとして鮮明に捉えられていることがわかる。水平配置の条件では、1 秒の画像において、既に水素が窒素層へ進行しており、上方が先行する様子

が確認できる。これは図 8 において観測された流れのない場合の水素の挙動が大きく寄与しているものと考えられる。その後、先端の形状は概ね維持されたまま、水素層が窒素層を押し進める様子が確認できる。鉛直配置の条件においても概ね同様の挙動を示すが、先端の特徴が異なることは、前節に述べたとおりである。

以上に示したように、本技術を用いることで、配管等の構造体内部の気体の挙動を可視化することが可能である。各画素の輝度が一つのセンサが出力するデータであると考えれば、従来のセンサ多点配置による手法と比較して飛躍的に高い空間分解能が得られる。これは、シミュレーションの再現性評価において、多角的な観点から比較できることを意味している。

ラマン散乱は、単原子分子を除く多くの物質において観測可能であるため、可視化対象となる媒質の自由度も非常に高く、特に水素分子など、本手法によってのみ可視化することができる物質があることを勘案すると、本技術は極めて有用性、将来性の高い可視化技術であると言える。

6 まとめ

気体分子から生じるラマン散乱光を画像として捉える手法を用いて、配管を模擬した石英製の構造体内部における気体挙動を可視化する装置を開発し、得られた可視化画像から、管内ガス濃度空間分布の経時変化が計測できることを、水素分子を例に示した。

本手法は、開放空間におけるガス噴流等への適用はもとより、他の形状の構造体や様々な分子種への応用が可能であるため、今後、より高度な流体挙動可視化技術への展開を進めていく予定である。

【謝辞】

本研究の一部は平成 26、27 年度経済産業省 水素ネットワーク構築導管保安技術研究「配管における水素置換研究」の一環として実施したものであり、関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 松浦一雄, 中野政身, 石本淳: 日本機械学会流体工学部門論文集, 0138 (2010)

- 2) 村上知行, 寺田敦彦, 西原哲夫, 稲垣嘉之, 國富一彦: 日本原子力学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.316-324 (2006)
- 3) 井上雅弘, 月川久義, 金山寛, 松浦一雄: 水素エネルギーシステム, Vol.33, No.4, pp.32-43 (2008)
- 4) Goldstein, R. J. & Kuehn, T. H. 1996 Optical Systems for Flow Measurement : Ed. R. J. Goldstein, Taylor & Francis, Washington, DC, Chapter 7
- 5) R. J. Adrian : Annual Review of Fluid Mechanics 23, pp.261-304 (1991)
- 6) M. Raffel, et al.: シュプリンガー・フェアラーク 東京 (2000)
- 7) 川添浩平, 中拂博之, 真島 浩, 金巻裕一, 山田 明, 染谷 聡: 三菱重工技報, Vol.53, No.4, pp.148-151 (2016)
- 8) Lin Ma et al., Optics Letters, Vol.42, Issue 2, pp. 267-270 (2017)
- 9) 麻田 泰生, 山本 和弘, 林 直樹, 山下 博史: 日本燃焼学会誌, Vol.160, No52, pp.146-152 (2010)
- 10) N. Jiang, M. Webster, W. R. Lempert, J. D. Miller, T. R. Meyer, C. B. Ivey, and P. M. Danehy: Applied Optics Vol. 50, Issue 4, pp. A20-A28 (2011) <https://doi.org/10.1364/AO.50.000A20>
- 11) 朝日 一平, 杉本 幸代, 二宮 英樹, 下川 房男, 高尾 英邦, 大平 文和, 筒井 靖之, 林 宏樹, 今野 隆: 電気学会論文誌. E, Vol.133, No.9, pp.260-266 (2013)
- 12) J. J. Laserna : JOHN WILEY & SONS, New York, p.22 (1996)
- 13) 平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(配管における水素置換挙動調査) 調査報告書 (2016)