平成26年度経済産業省委託事業

# 平成26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

# 平成27年3月

株式会社 四国総合研究所

# 目 次

1. 調査	をの概要
1.1 事	≰業目的
1.2 誹	9査内容
1.3 美	ミ施体制
2. 調査	室方法
2.1 誹	『査対象と実験条件
2.2 ス	ガス可視化・濃度計測手法
2.2.1	計測原理
2.2.2	ガス可視化・濃度計測装置の構成11
2.2.3	ガス濃度の定量化
2.3 栲	擬配管の構造と管内ガスの制御
2.3.1	模擬配管の構造
2.3.2	管内ガスの制御 ······26
3. 計測	則結果
3.1 首	然拡散(ガス注入流量:0)境界層におけるガスの挙動の可視化30
3.1.1	窒素との境界層における水素ガスの挙動
3.1.2	窒素との境界層における空気,酸素ガスの挙動
3.2 道	I管におけるガス置換挙動の可視化
3.2.1	水平配管におけるガス置換挙動
3.2.2	鉛直配管におけるガス置換挙動41
3.3 T	字分岐管におけるガス置換挙動の可視化45
3.3.1	本管水平 - 枝管鉛直配置における置換挙動46
3.3.2	本管鉛直 - 枝管水平配置における置換挙動49
4. デー	- 夕解析及び評価
4.1 角	释析方法
4.1.1	置換挙動解析における定義
4.1.2	ガス濃度分布の解析手法
4.2 夕	わが及ばない場合における混合層の解析と評価
4.3 茝	I管水平配置における混合層の解析と評価
4.4 茝	百管鉛直配置における混合層の解析と評価
4.5 T	字分岐管における混合層の解析と評価67

4.6 ま	ミとめ	
5. 総招	舌	72
付録		
付録 I	実験結果一覧	
付録Ⅱ	実験装置外観	

# 調査の概要

## 1.1 事業目的

一般需要家向けの水素パイプライン供給に際して、保安確保のために必要となる導管等 のガス工作物について、そのネットワークとしての運用に係る安全基準や配管の設置・維 持管理方法等の具体的措置を明確化するため、これに有用な基盤技術、知見を整理し、当 該調査の成果を将来的にガス事業法の技術基準等の見直しに反映させることで、水素ネッ トワーク社会構築における保安確保を図ることを目的とする。

### 1.2 調査内容

一般集合建物内へ水素配管供給を想定した際のガス開通作業時において、配管内で水素 と空気の混合をさせずに安全に置換作業を行える条件や、気体挿入の取付け位置等配管の 構造の検証を行うため、試験用模擬配管を用いて、不活性ガスを介して空気から水素へ置 換する際の管内挙動(濃度分布)について調査を実施した。

具体的には、都市ガスの供給に使用されている建物内配管を想定し、形態や口径の異な る計測用模擬配管を製作し、ガス濃度可視化技術により管内全体の濃度分布を観察した。 計測用模擬配管は水平直管、鉛直直管、T字分岐管を基本形態とし、空気から窒素にガス 置換する場合と窒素から水素にガス置換する場合について、管内における濃度分布の経時 変化を測定した。測定は、模擬配管において気体の流速を0および大/小2パターンに変 化させて実施した。T字分岐管については、気体の流れ方向を主管/枝管の2パターンに ついて実施した。

測定された結果を基に、配管形状や配置あるいは気体の流速と管内ガス濃度変化の関係 を解析した。これにより、それぞれの条件下における管内挙動等の確認を行うと共に、水 平に配置した直管については、混合気体が形成されない条件や口径と気体の流速との関連 性等について調査を行った。

#### 1.3 実施体制及びスケジュール

本事業実施体制を図 1-3-1 に、本調査の実施体制を図 1-3-2 に、実施スケジュールを表 1-3-1 にそれぞれ示す。



図 1-3-1 事業実施体制



図 1-3-2 調査実施体制(四国総合研究所)

本事業の遂行にあたっては、学識経験者、ガス事業者等から構成される特別専門委 員会において、適宜、実施方針、進捗状況及び結果につき報告を行い、審議を受けると共 に、コメントを実務に反映させた。また総合調査受託者との連携会議において、試験条件 等の具体的内容につき助言を受けた。

本調査は、当社を主体として、ガス配管制御装置開発、同調整業務についてテクノ・

サクセス株式会社を、データ処理ソフトウェア開発、データ処理業務としてミクロ電子株 式会社をそれぞれ再委託とする体制の下実施した。

	実施項目				平成26年度								
	大分類		中分類	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
		(1)	制御系の設計										
1	模擬配管の製作	(2)	配管部品購入										
			製作、ガス制御機能確認										
		(1)	装置設計										
2 1	ガス濃度分布計測装置の製作	(2)	機器設備·部品購入										
			製作、濃度計測機能確認										
2	和笠中ガス連度公安の計測	(1)	予備試験、条件の検討										
3	記名やカス康度ガザジ計測	(2)	配管内ガス濃度計測										
4	配管における水素置換挙動の解析・評価	(1)	データ解析、評価										
5 委員会				7/31				11/21			2/23		
6	6 総合調査受託者との会議				7/11		10/1	10/31			1/8	2/5	
7	報告書作成										- 1		

表 1-3-1 実施スケジュール

# 2. 調査方法

## 2.1 調査対象と実験条件

本調査では、総合調査受託者やガス事業者との協議に基づき、図 2-1-1 に示す内管 モデルを想定し、配管系を構成する基本構造として、直管水平方向、直管鉛直方向、T 字分岐管の3形態を対象に、置換挙動調査を行うこととした。





具体的には、次の条件を基本方針として、配管条件と流速条件を設定した。

- ・ 窒素ガスから水素ガスへの置換挙動と空気から窒素ガスへの置換挙動を 個別に観測する。
- ・ 配管口径については、直管について 20A 及び 32A の 2 パターンを、T 字分岐管については 32A とする(なお、本調査対象から除外されている 50A 配管についても後述の流速 0 条件については実施する)。
- ・ 配管方向については、直管について水平及び鉛直の2パターンを、T字 分岐管について主管水平・枝管鉛直及び主管鉛直・枝管水平の2パターンに 対し、流れの方向を主管方向と枝管方向にそれぞれ設定した計4パターン とする。
- 流速条件は、各配管条件において水素のレイノルズ数(以下 Re 数)を一致 させた層流域の流速2パターンを設定し、導入初期の置換挙動を中心に基 礎的なデータを蓄積する。加えて外力が及ばない状態における水素・窒素境 界層の挙動として流速0の条件を含め、流速条件は合計3パターンとする。

以上の方針を整理すると本調査の実験条件は、表 2-1-1 に示す配管条件、表 2-1-2 に示す流速条件となる。なお、空気から窒素への置換挙動においては、窒素の流速を 水素 Re 数 100 及び 200 の場合と一致させる必要があるため、窒素 Re 数はそれぞれ 約 700 及び 1400 となる。

表 2-1-1 配管条件

※No.は図 2-1-1 の各形態に対応

No.	配管形態	流れ方向	初期状態	導入ガス	管サイズ	模式図	
	① 直管水平	-	窒素	水素	201		
Û		-	空気(酸素)	窒素	20A 32A		
		上方向	窒素	水素	(50A :	1	
2	<b></b> 直官鉛旦	上方向	空気(酸素)	窒素	流速 0 のみ)		
<ul> <li>3</li> <li>注管:鉛i</li> <li>枝管:水平</li> </ul>	<ul> <li>主管:鉛直</li> <li>枝管:水平</li> </ul>	1. 64	窒素	水素		t	
		王官	空気(酸素)	窒素			
		枝管:水平	枝管:水平	窒素	水素		
						校官	空気(酸素)
		十件	窒素	水素			
	主管:水平	土百	空気(酸素)	窒素			
4	枝管:鉛直	甘答	窒素	水素		4	
		化义官	空気(酸素)	窒素			

表 2-1-2 流速条件

和答问汉	水素レイノルズ数	流量	流速
旧旧日日	${ m Re}_{ m H2}$	Q[L/min]	v[m/s]
	100	10.2	0.49
20A	200	20.4	0.98
	0	0	0
	100	16.7	0.30
32A	200	33.4	0.60
	0	0	0
(50A)	0	0	0

# 2.2 ガス可視化・濃度計測手法

## 2.2.1 計測原理

本調査は、水素ガス或いは空気層に相当する酸素ガス濃度を計測することにより、 配管内部におけるガスの置換挙動を明らかにするものである。

ガスの挙動を明らかにするためには、ガス濃度の空間的な分布がどのように変化す るかを観測する必要がある。一般的なガス濃度の計測には、熱線型半導体式,接触 燃焼式等のガスセンサを用いる場合が多い。これらは主に、センサ素子に対象成分 が直接接触することに伴う素子の物性変化を捉えガス濃度を計測するものであるた め、1個のセンサは配置された1点のみにおけるガス濃度を計測する。したがって 空間的なガス濃度分布を捉えるためには、配管構造の内部にセンサを複数個配置す る必要があり、気体のセンサへの接触によって観測する流れの状態に影響を及ぼす 可能性がある。

一方、レーザ光を用いた光学的計測技術にはガスの流れを可視化する手法がある。 これらは、ガス成分分子による散乱光や蛍光等を捉えるものであり、流れの状態に 影響を及ぼすことはない。表 2-2-1 に、光学的に流れを可視化する代表的な手法を 挙げる。

計測手法・	原理	対象物理量	特徵	
シュドウガラフナ		泪底,压力	装置構成が容易	
シャトリクノノ伝		値度・圧力	密度変化の輪郭の可視化	
レーザ誘起蛍光法:		泪庄,淟庄	低濃度計測が可能	
LIF(Laser Induced I	Fluorescence)	価度・侲皮	衝突失活の影響がある	
レーザドップラ流速	則定法:	法注	流速の二次元分布測定が可能	
LDV(Laser Doppler	Velocimeter)	流迷		
粒子画像流速測定法(	ミー散乱):	法法	微小粒子の混合技術が必要	
PIV(Particle Image	Velocimetry)	训选	粒子混合による影響がある	
1.71. 带毛		汨 庄   ) 迪 庄	雰囲気ガス分子の影響がある	
レイリー訳乱		<b>温</b> 皮・	ミー散乱の影響がある	
	7 7 7 7	阳声 冲声	分子種の特定が可能	
	ストークス	温度・侲度	信号が微弱	
フマン散乱	アンチスト		S/N 比が大きい	
	ークス	<b>温</b> 皮・	観測領域に制限がある	

表 2-2-1 光学計測によるガス流の可視化手法

本調査においては2成分のガス混合状態を評価する必要があり、

① 物理量としてガス濃度が計測できる

② 水素ガスと窒素ガスおよび窒素ガスと酸素ガスの濃度が分離して計測できる 機能が要求される。このため本調査では、ラマン散乱に基づく流れの可視化及び空 間濃度分布計測手法を用いた。本手法は、レーザ光照射部及び観測部が光学的に透 明であれば、配管等の構造体内部の観測が可能であるため、本調査における計測用 模擬配管には石英管を用いた。

本調査に用いたラマン散乱の概念を図 2-2-1 に示す。



図 2-2-1 ラマン散乱の概念

ラマン散乱は分子による光の非弾性散乱の一種であり、入射光のエネルギーが分子 の内部エネルギーに奪われることによって入射した光の波長と異なった波長の光が 発生(散乱)する現象である。内部エネルギーは分子種で固有であり、分子種毎に 異なった波長の光が散乱される。ガス検知においては、一般的に分子の振動エネル ギーΔEに対応するラマンシフトΔν=ΔE/h(h:プランク定数)に応じて、入射光波長 λに対して長波長側に発生する1次ストークス光を利用する。表 2-2-2 に本調査にお いて配管系内に存在する水素、窒素、酸素について、ラマン散乱に関する各種パラ メータを、図 2-2-2 に水素、窒素、酸素のラマン散乱スペクトル例をそれぞれ示す。

表 2-2-2、図 2-2-2 に示すように、ラマン散乱光は入射レーザ光波長(355[nm])に 対して分子ごとに 10[nm]以上の異なる波長に生じる。このため、それぞれのガス種 のラマン散乱光波長にあった光学バンドパスフィルタを用いて観察すれば、3 種の ガスを分離して観測することができる。

また、ストークス光強度は分子密度に比例するため、ラマン散乱光の輝度から分子 密度を測定することができる。本調査では、100%の水素ガスおよび大気中の酸素分 子のラマン散乱光強度を測定して検量線を作成した。

分子のラマン散乱光の強度は一般に極微弱であるが、水素及び酸素は比較的強いラ マン効果を示す分子種である。

分子種	ラマンシフト	ラマン散乱波長	ラマン散乱断面積比
Х	$\Delta v [cm^{-1}]$	$\lambda x[nm]$	(窒素:1)
水素(H2)	4160	416.5	2.49
窒素(N2)	2331	387.0	1
酸素(O2)	1556	375.8	0.94

表 2-2-2 ラマン効果に関する水素、窒素、酸素の各種パラメータ

※ラマン散乱波長は入射波長λ=355[nm]とした場合



図 2-2-2 同じ密度の水素、窒素、酸素のラマンスペクトル例

# 2.2.2 ガス可視化・濃度計測装置の構成

本調査では、前述のラマン散乱光を高感度カメラを用いて画像として捉えることに より、配管内におけるガスの挙動を可視化する。図 2-2-3 に本調査に用いるガス可 視化・濃度分布計測装置の構成を、表 2-2-3 に構成機器の仕様をそれぞれ示す。

光源に Nd:YAG レーザ第3高調波(波長355[nm])を用い、シート状にしたレーザ光 を模擬配管の観測領域に照射して、配管の外部からラマン散乱光を観察した。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 カメラで画像として捉えた。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。したがって、シート光を拡大しレーザ光 照射領域を広く取ることで、可視化領域が広がることになるが、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、ラマン画像の輝度とのトレードオフの関係 となるため、観測対象に合わせた最適化が必要である。本調査では、焦点距離f= -200[mm]のシリンドリカル平凹レンズと、f=700[mm]のシリンドリカル平凸レンズ により、レーザ光を21×7[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21[mm]となり、レーザ光軸方向は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さ7[mm]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外乱光と レーザの散乱光を抑制する必要がある。また、本調査で計測する水素ガス及び大気 中の酸素ガスのラマン散乱光を窒素ガスのラマン散乱光とそれぞれ分離する必要が ある。ここでは、水素ガスについて中心波長 416.1[nm]、半値全幅 2.0[nm]、酸素 ガスについて中心波長 375.4[nm]半値全幅 2.0[nm]の光学バンドパスフィルタを使 用することでガス種を選択し、ラマンエッジフィルタを用いてレーザ光の散乱光を 遮断した。また、外乱光の影響を低減するために、 ICCD カメラのシャッタ開放の 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 10[ns]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 対して直角に強く放射される。したが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。



図 2-2-3 ガス可視化濃度分布計測装置の構成

# 表 2-2-3 ガス可視化・濃度分布計測装置仕様

パルスレーザ装置				
種別	フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザ			
メーカ/型式	Quantel/CFR400			
波長	355 [nm]			
パルスエネルギ	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]			
10	CCD カメラ			
メーカ/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			
	1024  imes 1024 [pixel]			
CCD フォーマット	ピクセル/素子サイズ:			
	$19 \times 19[\mu m]/12.4 \times 12.4[mm]$			
インテンシファイア形式	18mm-Gen III HBf			
分解能	16bit			
力	メラレンズ			
メーカ/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			
水素ガン	ス用干渉フィルタ			
メーカ/型式	Andover/020FC06-25 4161			
透過中心波長/半値全幅	416.1[nm]/2.0[nm]			
酸素ガン	ス用干渉フィルタ			
メーカ/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/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/型式	Princeton Instruments /Light Field			
平滑化処理	ガウシアン 5×5			

# 2.2.3 ガス濃度の定量化

図 2-2-3 に示す測定系において、ICCD カメラに導入されるラマン散乱光強度 *P*<sub>R</sub> は

$$P_{R} = P_{0} KG\Delta LN \frac{A}{r^{2}} \sigma T(r)$$
<sup>(1)</sup>

Po:照射レーザ光強度

K: 受光レンズおよびフィルタの透過効率

- G: 受光レンズのフォーカスと受光素子の結合効率
- ΔL: ICCD 撮像面の1素子が観測する空間領域
- A: 受光レンズの開口径
- r:観測位置とレンズまでの距離
- σ: 測定ガス種のラマン散乱断面積
- N: 測定ガス種の分子密度
- T(r): 大気透過率および石英管透過率の和

で表される。導入されたラマン散乱光は ICCD カメラ内部のイメージインテンシフ ァイア(以下 I.I.)の光電面で電子に変換され、電子を増倍して蛍光面において再度 光に変換して CCD で観測する。この過程において離散的なノイズ成分が発生する。 そこで、この離散したノイズを除去低減し、かつラマン散乱光の空間分解能および ラマン散乱輝度の分解能を損なわないフィルタ手法を検討した。

ここでは以下の手法により水素ガスの空間濃度分布を評価した。まず、I.I.による ノイズ成分を除去するために、取得画像に空間的な平滑化処理として 5×5 ガウシア ンフィルタを適用した。図 2-2-4 に用いたガウシアンフィルタのパラメータを示す。

<u>1</u> 256	4 256	<u>6</u> 256	4 256	<u>1</u> 256
4 256	<u>16</u> 256	<u>24</u> 256	<u>16</u> 256	4 256
<u>6</u> 256	<u>24</u> 256	<u>36</u> 256	<u>_24</u> 256	<u>6</u> 256
4 256	<u>16</u> 256	<u>24</u> 256	<u>16</u> 256	4 256
<u>1</u> 256	4 256	<u>6</u> 256	4 256	<u>1</u> 256

図 2-2-4 5×5 ガウシアンフィルタマスクパラメータ

ガウシアンフィルタは各要素の和が1となるように重み付けされており、画像処理 におけるノイズ除去手法として一般的に用いられるものである。図 2-2-5 に水素ガ スのラマン散乱光画像へのガウシアンフィルタ適用画像例を示す。図 2-2-5(a)につ いてみると、背景領域においても離散化した輝点が確認される。これは前述の I.I. によるノイズ成分であり、熱雑音により発生した光電子が増倍され、輝点として画 像に反映されたものである。このノイズは、同様に水素ガスのラマン散乱光画像に おける水素ガス分布領域の輝度にも重畳されている。これに対し、図 2-2-5(b)につ いてみると、平滑化処理を適用することで離散した輝点が大きく減少し、輝度の分 布をより連続的に観測できることがわかる。



(b) 水素ガスのラマン散乱光画像(フィルタ後)

図 2-2-5 水素ガスのラマン散乱光画像へのガウシアンフィルタ適用画像例

次に、得られたラマン散乱光画像の輝度から、水素ガス濃度を求める。前述のラマン散乱光強度を表す式(1)に示すように、同一の測定条件において計測されたラマン 散乱光信号強度はガス濃度に比例する。したがって、本調査では、事前に取得した 既知濃度の水素ガスによるラマン散乱光画像を取得し、その輝度を基に検量線を得 ることにより、ガス濃度を求めた。

図 2-2-6 に本装置により得られた、石英管内に濃度 100[%]及び 4[%]の水素ガスまたは空気(酸素ガス 21[%]と想定)を充填した場合におけるラマン画像を、図 2-2-7 に同画像により取得した水素ガス及び酸素ガス濃度の検量線の一例を、それぞれ示す。



(b) 水素ガス 4%

(c) 空気(酸素ガス 21%)

図 2-2-6 ラマン画像例



図 2-2-7 検量線例

図 2-2-7 の測定値は、図 2-2-6 に示す画像中央 5×5[pixel]の平均値である。水素に ついてみると、前述のとおりラマン散乱画像の輝度と濃度が線形の相関を示し、こ れはガス種に依らず共通の特性である。また、水素と酸素では、酸素の検量線の勾 配が小さい。こらは、ガス種ごとにラマン散乱断面積が異なるためである。このよ うに、ガス種ごとに取得した検量線から各ガスの濃度を判定することができる。な お、本手法では、観測対象や装置構成の変化に伴い、検量線が変更される。本調査 では、配管形態の変更と共に、レーザ光と ICCD カメラの位置関係が変わるため、 これに伴い検量線が変化するため、実験配置及び測定条件の変更に伴い既知濃度での検量線を取得し、濃度計測に反映させた。具体的な方法については、解析の章において後述する。

## 2.3 模擬配管の構造と管内ガス制御

### 2.3.1 模擬配管の構造

模擬配管の構造は、各試験条件に設定されたガス条件を実現しするための導入部と、 流れを安定させるための助走管、各ガスのラマン散乱光を撮影する観測部、ガスを 排出するための排気部から構成される。導入部及び排気部は全実験条件において共 通のものを用い、助走管及び観測部は、所定の配管条件に伴い組み替えることによ って、各実験条件における模擬配管を構成した。

導入部および助走管の構成を水平配管の場合を例に図 2-3-1 に示す。導入部および 助走管は 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 て接続されている。窒素から水素への置換を例に挙げると、導入部は、水素および 窒素の各ガスを導入する15A配管が50Aの導入管に接続された構造となっている。 ここで水素導入弁を V1H、窒素導入弁を V1Nと呼称する。V1H及び V1Nは、後述す るガスの導入に対する測定系のタイミング制御のため、フルボア式空圧弁を採用し た。導入管は試験条件に合わせた助走管に接続し、観測部へガスの導入を操作する 主導入弁へつながる。助走管は、上流側に口径を 50A から 20A または 32A へ変換 するレデューサ構造を経て、助走区間へと至る構造となっている。主導入弁は、助 走管、観測部の配管系と統一された開口径のボールバルブであり、ここでは V2 と呼 称する。V2 についても、前述と同様の理由により、空圧弁を適用した。また、実験 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、圧力及び水素ガス濃度をモニ タするためのセンサを接続した。空気から窒素への置換の場合、窒素導入ラインを 空気導入ラインへ水素導入ラインを窒素導入ラインに変更し、その他を同様の構造 とした。

18



図 2-3-1 ガス導入部の概略

観測部は、配管内にレーザ光を照射し、ガス分子により生じるラマン散乱光を撮影 するため、観測部に水素及び酸素のラマン散乱波長域において高い透過率を示し、 且つレーザ光の照射に伴う蛍光が生じにくい材料として石英を選定した。本調査で は直管について、配管口径 20A 及び 32A を対象に調査を行うため、これらの配管内 径に対し最も近い寸法の石英標準管を選定した。また、32AT 字分岐管については、 口径 32A 相当の石英管を切断、溶接することにより製作した。用いた石英管寸法を 表 2-3-1 に示す。

副偽顺汉	内径及び公差	ガス管規格内径
配官呼侄	[mm]	[mm]
20A	$21.0 \pm 1.0$	21.6
30A	$34.5 {\pm} 1.5$	35.7
50A	$51.5{\pm}1.5$	52.9

表 2-3-1 石英標準管寸法

観測部下流は、手動のフルボアバルブを経由して、フランジ接続により排気部へ 結合される。排気部にはガス温度、圧力を計測するセンサと、初期状態における観 測部内のガス濃度をモニタするためのガスセンサを配置した。これらの配管系に対 しレーザ光は、高反射ミラーを用いて照射光軸を調整し、各実験配置に合わせ必要 な位置に配置された石英窓を介し、管内に導入した。ここに述べた基本構造に基づ き本調査で製作した模擬配管構造とガス濃度可視化装置のレーザ光軸及びカメラの 位置関係を合わせた実験装置構成について、直管水平配置の例を図 2-3-2 に、直管 鉛直配置の例を図 2-3-3 に、T 字分岐管の例を 2 パターンの配置についてそれぞれ 図 2-3-4、図 2-3-5 に示す。なお、装置外観については、本報告書末尾の付録 II に添 付する。また、模擬配管に用いたセンサー覧を表 2-3-2 に示す。





図 2-3-3 直管鉛直における模擬配管構成







図 2-3-5 T 字分岐管(主管鉛直、枝管水平)における実験装置構成

品名	メーカ	型番等	仕様
圧力トランス ミッタ	長野計器	KP-15-17G-L4W1x74xxx1	圧力レンジ: -50kpa~50kpa 精度:±0.25%FS
		8500MM-0-3/8SW-H2-20SLM-2- 1-0.2MPA-20℃	流体:H <sub>2</sub> レンジ:0~20L/min 精度:1.0%FS
		8500MM-0-3/8SW-N2-20SLM-2- 1-0.2MPA-20℃	流体:N <sub>2</sub> レンジ:0~20L/min 精度:1.0%FS
マスフロー	- コフロック	8550MM-0-3/8SW-H2-60SLM-2- 1-0.2MPA-20℃	流体:H <sub>2</sub> レンジ:0~60L/min 精度:1.5%FS
流量計		8550MM-0-3/8SW-N2-60SLM-2- 1-0.2MPA-20℃	流体:N <sub>2</sub> レンジ:0~60L/min 精度:1.5%FS
		8550MM-0-3/8SW-H2-150SLM-2 -1-0.2MPA-20°C	流体 : H <sub>2</sub> レンジ : 0~150L/min 精度 : 1.5%FS
		8550MM-0-3/8SW-N2-150SLM-2 -1-0.2MPA-20℃	流体:N <sub>2</sub> レンジ:0~150L/min 精度:1.5%FS
シース熱電対	チノー	1SCHS1-0K02006132 VXI005AY	K 熱電対 測定レンジ:-200~1050℃ 精度:±2.5%
高濃度水素 ガス検知器	新コスモス 電機	XP-3140-H2	測定レンジ 0~100vol% 精度Hレンジ±5vol% Lレンジ±10%
酸素ガス 濃度計	新コスモス 電機	XP-3180-O2	測定レンジ 0~25vol% 精度±0.3vol%

表 2-3-2 センサー覧

図 2-3・2 に示すように、直管水平配置では、導入管端部に石英窓を配置し、レーザ 光を観測部へ照射した。1[m]の石英管 3 本をフランジを経由して直列に接続する構 造により、観測部長を 3[m]とした。置換挙動の可視化に際しては、仮に 1 回の計測 により全領域を観測した場合、本調査で用いる ICCD カメラの CCD フォーマット 1024×1024[pixel]のみに注目すると、得られた画像の空間分解能は約 3[mm]程度と なり、実質的には鉛直方向のセンサとしてはわずか 10[pixel]程度しか計測に寄与し ないことになる。ここでは可視化画像の空間分解能を確保するため、1 回の可視化 領域を 1m 以下とし、カメラ位置を適宜移動し、これを繰り返すことによって、全 領域の可視化画像を取得した。なお、本手法は、後述のガス制御方法に基づきガス を置換することで、実験の再現性が十分に確保されることを確認した上で適用した。 図 2-3-3 に示すように、直管鉛直配置の模擬配管は、導入部から曲管を経由して観 測部の石英管へ接続する構造とした。レーザ光は曲管に分岐部を設け石英窓を配置 し、観測部へ照射した。石英管の観測部長は 1[m]である。観測領域は直管水平配置 の場合と同様に1[m]の領域とし、したがって本条件では1回の計測で観測部全域が可視化される。

図 2-3-4、2-3-5 に示すように、T 字分岐管は、直管水平配置及び同鉛直配置の導入 部の構造をそれぞれ用いて構成されており、観測領域を主管部とするか、枝管部と するかにより、石英窓の取り付け位置を変更し、レーザ光を管内部に照射した。観 測領域は、観測部寸法が主管 0.6[m]枝管 0.3[m]であるため、ICCD カメラの空間分 解能を確保し視野内に収めることが可能である。本調査では、レーザ光の照射及び ICCD カメラの観測領域を調査対象である分岐部の主管と枝管に分けて行い、置換 挙動の可視化を行った。

## 2.3.2 管内ガスの制御

置換挙動測定に際し、前述の模擬配管系では、観測部を初期状態のガスで満たし、 導入部を置換ガスに入れ替えた後、主導入弁 V2 の開放によりガスの置換が開始され る。V2 はボールバルブを用いているため、開放初期から開放完了までに開口径に応 じて一定の時間を要し、その間、バルブ内における開口面積が変化する。これに伴 い、加圧状態での置換ガスの供給は、V2 開放初期に流速が速くなり、ガスの境界面 が大きく乱れ、計測結果に影響を及ぼす可能性がある。本調査では、置換挙動にお ける比較的初期の段階に注目して計測を行うため、V2 開放に伴う境界面乱れは最小 限に留める必要がある。

一方で、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、V2が閉鎖 されている状態でレーザ光を導入すると、バルブのボール面にレーザ光が照射され ることによりボールの表面状態が悪化し、シール性が低下する、或いはボールシー トにレーザ光が照射されることによりシート材の変質や、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。

したがって、本調査ではこれらを総合的に考慮し、表 2-3-3 に示す手順により、導入部のガスを置換し、V2 の開放及び計測を行うこととした。表 2-3-3 の手順は、窒素から水素へ置換する場合の例であり、空気から窒素へ置換する場合も、同一の手順を用いた。

はじめに、導入部及び観測部を含め、模擬配管全域を窒素に置換する(①)。この時、 模擬配管の最下流は大気開放されている。次に V2 を閉鎖し、導入部と観測部の接続 を遮断する(②)。V2 閉鎖時は、バルブのボール内は窒素で満たされた状態である。 次にガス導入バルブ V1 を閉じ、導入部の真空引きラインにより導入部内の真空引き を行う(③)。真空となった導入部へ水素を充てんする(④)。この時、大気圧調整ライ ンを開放し、一定時間水素を流し続ける。ボールバルブを含む導入部で実現できる 真空度は比較的低いため、③、④の操作を繰り返す。水素ガスセンサにより導入管 内の水素ガス濃度が 100[%]に至ったことを確認し、水素ガス導入弁 V1<sub>H</sub>を閉鎖する (5)。③、④の操作を4回繰り返すことで導入部内の水素ガス濃度が100[%]に至る。 V1H閉鎖後、導入管内の圧力が大気圧となっていることを確認し、大気圧調整ラインを閉鎖する。この段階で、導入管及び観測部は所定の成分が大気圧で充填されたことになる。続いて、主導入バルブV2を開放する。V2の開放完了には、例えば32Aの場合約2.5秒の時間を要する。V2の開放が完了した直後、レーザ光のシャッタを開放し、導入部へレーザ光を照射する(⑥)。レーザ光の照射開始後の0.1秒後に、水素導入バルブV1Hを開放し、水素への置換を開始する(⑦)。



表 2-3-3 ガス導入の手順



これらの一連の手順により、レーザ光の照射による V2 の損傷を防ぎ、また、バル ブ開放に伴う両ガスの境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、2.2.2 節にて述べたように、ICCD カメラの撮像のタイミングが レーザ装置の Q スイッチ信号と同期している。レーザパルスの繰返し周期 10[Hz] 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 0.1 秒の範囲で、繰返し周期が最大の 30[Hz]の場合でも 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 2-3-6 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装置を製作し、計 測結果の再現性を確保した。



図 2-3-6 計測のタイミングチャート

図 2-3-6 は 32A 配管における例であるが、本制御装置では、計測開始スイッチを 押下後、1回目のレーザ Q スイッチ信号入力が起点となり、2 秒後に V2 の開放が開 始し、V2 の駆動完了後(2.5 秒後)にレーザシャッタが開かれる。さらにその 0.1 秒後 に V1<sub>H</sub>が開放され、ガスの置換が開始される。ICCD カメラはレーザの Q スイッチ 信号に連動し、そのジッタはナノ秒オーダであり、本制御装置の精度は5 ミリ秒程 度であるため、計測ごとの撮像の起点のバラツキが改善され、同一条件における複 数回の実験結果に対し良好な再現性を実現することが可能となった。

# 3. 計測結果

本調査において得られたガス可視化画像を本章に示す。これらの画像は水素または酸素 によるラマン画像であり、各ガスの定性的な濃度分布の経時変化を視覚的に捉えることが できる。本調査における一連の実験により得られた全てのガス可視化画像は本報告書末尾 の実験結果一覧に示し、ここでは代表的な事例を取り上げて解説する。可視化画像は分子 密度が高いほど彩度が高く表示される。濃度の定量的な評価については後述するが、定性 的な変化は、画像の彩度の変化として捉えることができる。なお、各画像ともに、レーザ 光軸に対し垂直方向(管径方向)の輝度分布については照射レーザ光の強度分布(ガウス分 布)が反映されているものであり、特に光軸中心から離れた照射領域の彩度の低下は、ガス 濃度の変化によるものではないことに注意が必要である。

### 3.1 自然拡散(ガス注入流速:0)境界層におけるガスの挙動の可視化

図 2-3-2 及び図 2-3-3 に示した模擬配管において、観測部上流を所定の操作により置換した後、バルブ V2 を開放するのみとし、流速0の状態におけるガスの置換挙動を可視化した。水素層と窒素層または窒素層と空気層の接続は、図 3-1-1 示す手順で行った。



図 3-1-1 本試験における各ガス層の接続方法と経過時間

本調査では、ボールバルブにより両ガス層を接続し、バルブが完全に開放された直後からレーザの照射を開始するため、バルブの動作開始のタイミングから起算すると、 2.6 秒後に1フレーム目の画像が取得される。したがって、以下で示す画像における0 秒は、バルブ開の動作開始から2.6 秒後の状態である。なお、口径50Aの場合のみ、 バルブの開放が完了するまでに要する時間が長いため、0秒とした起点の画像がバルブ の動作開始から5.1 秒後の状態に相当する。

#### 3.1.1 窒素との境界層における水素ガスの挙動

図 3-1-2、図 3-1-3、図 3-1-4 に流速 0 場合の 20A、32A、50A 配管水平配置における窒素・水素層の挙動を、図 3-1-5、図 3-1-6 に 20A、32A 配管鉛直配置における挙動をそれぞれ示す。



図 3-1-2 20A 水平配管, 流速 0 における窒素層に対する水素の挙動



図 3-1-3 32A 水平配管, 流速 0 における窒素層に対する水素の挙動



図 3-1-4 50A 鉛直配管, 流速0における窒素層に対する水素の挙動



図 3-1-5 20A 鉛直配管, 流速0における窒素層に対する水素の挙動



図 3-1-6 32A 鉛直配管, 流速0における窒素層に対する水素の挙動

図 3-1-2~図 3-1-6 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。水素混合 は初期に顕著であり、時間の経過と共に進行が遅くなる。水平管では、管の上方ほ ど混合が先行する。これらの現象は、配管口径が大きいほどより顕著に現れること がわかる。

## 3.1.2 窒素との境界層における酸素ガスの挙動

ここでは、上述した水素と窒素の混合層形成と比較するために、流速0における空 気と窒素の混合層の形成を測定した。図 3-1-7、図 3-1-8、図 3-1-9 に流速0場合の 20A、32A、50A 配管水平配置における窒素・空気層の挙動を、図 3-1-10、図 3-1-11 に 20A、32A 配管鉛直配置における挙動をそれぞれ示す。



図 3-1-7 20A 水平配管, 流速 0 における窒素層に対する空気(酸素)の挙動



図 3-1-8 32A 水平配管, 流速0 における空気(酸素)層に対する窒素の挙動



図 3-1-9 32A 水平配管, 流速 0 における窒素層に対する空気(酸素)の挙動



図 3-1-10 20A 水平鉛直, 流速 0 における窒素層に対する空気(酸素)の挙動


図 3-1-11 20A 水平鉛直, 流速 0 における窒素層に対する空気(酸素)の挙動

図 3-1-7 から図 3-1-11 により、水素層場合と比較して明らかに混合の程度が小さ く、5 秒経過後の画像で若干、窒素層への空気の進行が見られる程度である。また、 空気に代えて酸素ガス(濃度 100%)を用いた場合でも同様の結果であった。 これらの可視化画像から、空気と窒素の境界面では拡散混合による著しい変化は生 じず、これは両者の輸送物性が極めて近いことに由来するものと推察できる。

#### 3.2 直管におけるガス置換挙動の可視化

### 3.2.1 水平配管におけるガス置換挙動

直管水平配置における窒素から水素への置換挙動の可視化結果について、20A 配管 の例を図 3-2-1(Re 数:100)、図 3-2-2(Re 数:200)に、32A 配管の例を図 3-2-3(Re 数:100)、図 3-2-4(Re 数:200)にそれぞれ示す。同様に空気から窒素への置換にお ける可視化画像として、20A 配管の例を図 3-2-5(流速 0.49[m/s])、図 3-2-6(流速 0.98[m/s])に、32A 配管の例を図 3-2-7(流速 0.30[m/s])、図 3-2-8(流速 0.60[m/s])に それぞれ示す。これらの画像は、水平方向 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。図 3-2-1 から図 3-2-4 にお ける窒素から水素への置換では水素ガスのラマン画像を観測しているため、水素ガ スの挙動は画像の輝度の上昇(彩度が高くなる)として表示される。図 3-2-5 から図 3-2-8 における空気から窒素への置換では、酸素ガスのラマン画像を観測しているた め、窒素ガスの挙動は、画像の輝度の低下(彩度が低くなる)として表示される。また、 ラマン画像では石英管の像が観測されないため、画像中に石英管の内壁上端及び下 端に相当する位置を破線で表記した。



図 3-2-1 32A 水平配管,水素 Re=100、0~1m における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-2 32A 水平配管,水素 Re=200、0~1m における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-3 20A 水平配管、水素 Re=100、0~1m における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-4 20A 水平配管、水素 Re=100、0~1m における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-5 32A 水平配管, 流速 0.30[m/s]、0~1m における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-2-6 32A 水平配管, 流速 0.60[m/s]、0~1m における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-2-7 20A 水平配管, 流速 0.49[m/s]、0~1m における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-2-8 20A 水平配管, 流速 0.98[m/s]、0~1m における空気層に対する窒素置換挙動

本実験装置により、いずれの置換挙動についても、対象ガスによるラマン画像が鮮明に取得された。窒素から水素への置換挙動では、撮影の起点となる0秒(バルブの動作開始から2.6秒後)の画像において既に水素のガスが進行している状況が確認で

きる。これは前節において述べた拡散混合による現象である。空気から窒素への置換の場合、この現象はみられない。また、窒素から水素への置換挙動では、水素の進行が管内の上方程先行している状況が捉えられる。この現象についても、空気から窒素への置換の場合にはみられない。また、進行の速度を比較すると、水素の進行が若干速いことがわかる。

# 3.2.2 鉛直配管におけるガス置換挙動

直管鉛直配置における窒素から水素への置換挙動の可視化結果について、20A 配管 の例を図 3-2-9(Re 数:100)、図 3-2-10(Re 数:200)に、32A 配管の例を図 3-2-11(Re 数:100)、図 3-2-12(Re 数:200)にそれぞれ示す。同様に空気から窒素への置換に おける可視化画像として、20A 配管の例を図 3-2-13(流速 0.49[m/s])、図 3-2-14(流 速 0.98[m/s])に、32A 配管の例を図 3-2-15(流速 0.30[m/s])、図 3-2-16(流速 0.60[m/s]) にそれぞれ示す。これらの画像は、鉛直方向 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。ラマン画像における各 ガスの表示については、前述と同様である。また、画像中に石英管の内壁左端及び 右端に相当する位置を破線で表記した。



図 3-2-9 32A 鉛直配管、水素 Re=100 における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-10 32A 鉛直配管、水素 Re=200 における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-11 20A 鉛直配管、水素 Re=100 における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-2-12 20A 鉛直配管、水素 Re=200 における窒素層に対する水素置換挙動



図 3-1-13 32A 鉛直配管、流速 0.30m/s における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-1-14 32A 鉛直配管、流速 0.60m/s における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-1-15 20A 鉛直配管、流速 0.49m/s における空気層に対する窒素置換挙動



図 3-1-16 20A 鉛直配管、流速 0.96m/s における空気層に対する窒素置換挙動

いずれの置換挙動についても、対象ガスによるラマン画像が鮮明に取得され、管内 ガスの挙動を確認することができる。

窒素から水素への置換挙動では、水平配置の場合と同様に、撮影の起点となる 0 秒(バルブの動作開始から 2.6 秒後)の画像において既に水素のガスが進行している 状況が確認できる。鉛直配置では、配管中心の水素ガスが先行して進行している。 空気から窒素へ置換する場合には、顕著な先行はみられない。

# 3.3 丁字分岐管におけるガス置換挙動の可視化

本報告では便宜的に、T字分岐管の各部位や流れの方向を図 3-3-1 に示す名称で呼称 する。



図 3-3-1 T 字分岐管の部位、流れ方向の呼称 (右:主管水平・枝管鉛直配置の例、左:主管鉛直・枝管水平配置の例)

本調査では、T字分岐管について、主管または枝管の一方の流れを遮断し、他方 ヘガスを流した場合における分岐部及び遮断側の管内におけるガスの挙動を可視化 した。

# 3.3.1 主管水平-枝管鉛直配置におけるガス置換挙動

図 3-3-2 に主管水平-枝管鉛直配置について、枝管方向へ窒素から水素置換した場合における可視化画像を、図 3-3-3 に同配管条件において空気から窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。図 3-3-4 に流れを主管方向として窒素から水素置換した場合、図 3-3-5 に流れを主管方向として空気から窒素へ置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。流速条件は、水素について Re=100、窒素について v=0.30[m/s]である。なお、画像中において離散的に生じている高輝度の点は配管内で生じた粉塵等による強い散乱光であり、対象成分の分布を示すものではない。



図 3-3-2 主管水平-枝管鉛直配置、枝管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 3-3-3 主管水平-枝管鉛直配置、枝管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])



図 3-3-4 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 3-3-5 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])

図 3-3-2 によると、初期挙動は 32A 水平配管の場合と同様であるが、水素が分岐 部に到達した後、閉鎖側の窒素層内へ進行している状況が確認できる。このとき、 混合層は管の上方が先行し発達している。また、閉鎖側への水素の進行は、水素が 分岐部へ到達した直後でなく、窒素との界面における濃度差が一定量に達すること で促進されている状況がわかる。一方、図 3-3-3 によれば、閉鎖された空気層への 窒素の進行は水素の場合と比較して明らかに少なく、管上方の先行も見られない。 初期に分岐部近傍の空気層を侵食している状況が見られるが、その後の混合層の発 達は緩やかであり、本調査における観測で、閉鎖側が窒素層で満たされる状態には 至らなかった。

図 3·3·4 によると、枝管方向流れの場合と同様に、水素が分岐部に到達した後、閉 鎖側の窒素層内へ進行している状況が確認できる。管の断面上において先行して発 達する部分は確認できない。また、閉鎖側への水素の進行は、水素が分岐部へ到達 した直後でなく、窒素との界面における濃度差が一定量に達することで促進されて いる状況がわかる。一方、図 3·3·5 によれば、前述と同様に、閉鎖された空気層へ の窒素の進行は水素の場合と比較して明らかに少なく、初期に分岐部近傍の空気層 を侵食している状況が見られるが、その後の混合層の発達は緩やかであり、本調査 における観測で、閉鎖側が窒素層で満たされる状態には至らなかった。

# 3.3.2 本管鉛直-枝管水平配置におけるガス置換挙動

図 3-3-6 に主管鉛直・枝管水平配置について、枝管方向へ窒素から水素置換した場合における可視化画像を、図 3-3-7 に同配管条件において空気から窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。図 3-3-8 に流れを主管方向として窒素から水素置換した場合、図 3-3-9 に流れを主管方向として空気から窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。流速条件は、水素について Re=100、窒素について v=0.30[m/s]である。



図 3-3-6 主管鉛直-枝管水平配置、枝管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 3-3-7 主管鉛直-枝管水平配置、枝管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])



図 3-3-8 主管鉛直-枝管水平配置、主管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 3-3-9 主管鉛直-枝管水平配置、主管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])

図 3-3-6 によると、初期挙動は 32A 鉛直配管の場合と同様であり、水素が分岐部 に到達した後、閉鎖側の窒素層内へ進行している状況が確認できる。混合層の発達 は管中央部が先行している。また、閉鎖側への水素の進行は、分岐部における窒素 との界面で両ガスの濃度差が一定量に達することで促進されている状況がわかる。 一方、図 3-3-7 によれば、閉鎖された空気層への窒素の進行は水素の場合と比較し て少なく、管断面方向で発達速度の分布はみられない。初期に分岐部近傍の空気層 を侵食している状況が見られるが、その後の混合層の発達は緩やかであり、本調査 における観測で、閉鎖側が窒素層で満たされる状態には至らなかった。

図 3-3-8 によると、枝管方向流れの場合と同様に、水素が分岐部に到達した後、閉 鎖側の窒素層内へ進行している状況が確認できる。混合層の発達は管の上方が先行 する。これらの挙動は、他の条件における水平方向の閉鎖側に向けた混合層の発達 挙動と共通する。図 3-3-5 における空気から窒素への置換の場合についても、他の 事例と共通する挙動が確認された。

# 4. データ解析及び評価

4.1 解析方法

前章に示した可視化画像をもとに、各ガスについて置換挙動の解析を行うが、画像 データについて、各画素が濃度情報を持つ一つのデータであると考えると、1枚の画 像は膨大なデータを有することになり、様々な解析手法の適用が考えられる。

本調査では、ラマン散乱光画像からガス濃度を算出し、これらの濃度変化と濃度分 布および水素/窒素と窒素/空気の混合層の長さがどのように変化するか調べ、ガス 置換時の挙動を解析する。

# 4.1.1 置換挙動解析における定義

本調査では、導管の開通作業時に、空気で満たされた配管系に一定量の窒素等不活 性ガスを導入しその後水素を導入することで、水素と空気中の酸素の混合層を形成 させず置換する工法を想定している。本調査では、これを水素と窒素の境界層及び 窒素と空気(酸素)の境界層に分離し、それぞれの混合層の時間変化を解析する。図 4-1-1に直管水平配置の場合を例にガスの置換挙動の模式図を示す。



図 4-1-1 ガス置換挙動の模式図

図 4-1-1 における L<sub>H</sub> は水素・窒素混合層の長さ、L<sub>AIR</sub> 窒素・空気混合層の長さであり、それぞれ次のように定義する。

水素層:水素が100[%]から98[%]の領域 L<sub>H</sub>:水素が2[%]から98[%]の領域 窒素層:窒素が100[%]から98[%]の領域 L<sub>AIR</sub>:酸素が2[%]から20[%]の領域 空気層:酸素が20[%]以上の領域 混合層 L<sub>H</sub> 及び L<sub>AIR</sub> が、流れの進行に伴いどのように発達するかを解析することに より、安全に置換作業を行うために必要な窒素層の長さ又は窒素ガスの体積を見積 もるための一つの指標とすることができる。

なお、ここで用いた 2[%]、98[%]等の閾値は、これまでに実施された異なる口径に おける水平配管に関する置換挙動調査にて用いられた閾値と統一しており、これら は水素の爆発下限界濃度を基にガス事業者との協議の下決定されたものである。

#### 4.1.2 ガス濃度の解析手法

前項に示した配管内における水素及び酸素のラマン画像を基に、水素及び酸素ガスの濃度分布を求め、これに基づき前述の各ガスの混合層の挙動を解析する。

本調査では、大きく分けて直管水平、直管垂直、T字分岐管の3種の配管形態による試験を行っており、それぞれの場合について解析の主旨は異なるものの、濃度分 布を求める手法はここで述べる処理を共通に用いる。以下に、CCDフォーマット512 ×512[pixel]で撮影した水素のラマン画像の場合を例に濃度解析手法を示す。

図 4-1-2 から図 4-1-4 に、ガス置換時、水素 100[%]、水素 0[%] (窒素 100[%]) の画像例を示す。これらの画像は、いずれも同一撮影条件で撮影された画像である。



図 4-1-4 窒素 100[%] (水素 0[%]) における水素ラマン画像

図 4-1-2 は、32A 直管水平配置における撮影開始から1 秒後の水素ラマン画像であ り、図 4-1-3 は同一の撮影条件で取得した管内に 100%水素ガスが満たされた場合の ラマン画像、図 4-1-4 は同様に、管内に 100%窒素ガスが満たされた場合の水素ラマ ン画像である。 説明のため、ここでは管の中央における濃度分布に着目して解説する。図4-1-2、図4-1-3、 図 4-1-4 における配管中央を中心として垂直方向 3[pixel]を平均化処理、水平方向に 5[pixel]の移動平均処理を施し、輝度の空間分布として表したグラフを図4-1-5、図4-1-6、 図4-1-7にそれぞれ示す。



図 4-1-5 水素ラマン画像の輝度分布(図 4-1-2 の画像における中央 3[pixel]の平均値)



図 4-1-6 水素 100% 画像の輝度分布(図 4-1-3 の画像における中央 3[pixel]の平均値)



図 4-1-7 水素 0%画像の輝度分布(図 4-1-4 の画像における中央 3[pixel]の平均値)

図 4-1-2 から図 4-1-4 に示したラマン画像の空間分解能は、1.95[mm/pixel]である が、平均化処理によって、図 4-1-5 から図 4-1-7 の空間分解能は垂直方向 5.86[mm]、 水平方向 9.75[mm]となる。図 4-1-5(以下水素データと呼称)に示した水素ラマン画 像の輝度分布には、撮影時に周辺の物体から生じる背景光による輝度と、2.2.3 節式 (1)に示した係数 G に相当する受光効率の空間分布が反映されている。図 4-1-6(以下 Ref.データと呼称)は水素濃度 100[%]に対する輝度の分布であるが、中央部の輝度が 強く、両端に向けて減衰しているのは、2.2.3 節式(1)に示した(1/r<sup>2</sup>)の効果と撮像光 学系の特性によるものである。また、図 4-1-7(以下 B.G.データと呼称)は窒素濃度 100[%] (水素濃度 0[%]) に対する輝度の分布であるが、水素ガスが存在しない状況 においても、一部輝度の分布が見られる。これらは、石英管の端部に配置された金 属製のフランジや周辺にある物体によるレーザ光の反射が光学フィルタの遮断能力 を超えて入射し、撮像素子まで到達しているものである。従ってここでは、水素ラ マンデータと B.G.データの差分により外乱光の影響を排除し、これを Ref.画像で除 することによって(1/r<sup>2</sup>)の効果と撮影系の特性を補正した上で、輝度を濃度に変換す る。これらの処理を施した結果を図 4-1-8 に示す。



図 4-1-8 図 4-1-2 から得られた水素ガス濃度空間分布

図 4-1-8 に示した管中央部の水素ガス濃度空間分布から、水素濃度が配管の下流側 へ進むにつれ低くなっていることがわかる。一方、図 4-1-6 に示した濃度 100[%]の 水素ガスの輝度分布には、輝度のバラツキ(離散したノイズの影響)が少なく、濃 度 100[%]に対するラマン画像の輝度が 10000 から 14000 カウントを示すのに対し、 輝度のバラツキは最大でも 100 カウントに収まっている。画像の輝度は濃度に比例 することから、水素ガス濃度 1[%]は 100 から 140 カウントに相当する。このため、 本解析における 2[%]の位置の判別が十分に可能であると言える。したがって、図 4-1-8 において下流側へ向けた濃度低下に重畳する比較的周期の短い濃度の変動は、 置換挙動において生じている細やかな濃度の変動が捉えられているものと考えられ る。

ここで示した一連の処理は、実験系の配置条件が変化すると輝度値が変化するもの であるため、本調査では実験条件の変更毎に背景画像(水素濃度 0[%])と参照画像(水 素濃度 100[%])を取得し、それぞれの条件について、対応する画像から得たデータを 用いて濃度分布を求めた。

### 4.2 外力が及ばない場合における混合層の解析と評価

3.1.1 節に示した流速 0 の場合、即ち拡散混合により形成される混合層の解析と評価 を行った。まず、窒素層に対する水素の混合層の発達について、32A 及び 20A 配管の 水平配置と鉛直配置の場合における経過時間と混合層長さ LHの関係を図 4-2-1 に示 す。なお、配管断面方向に濃度分布が生じるため、ここではそれぞれの条件において 混合層の発達が先行する位置として、水平配置では管上方部における混合層の変化、 鉛直配置では管の中央部における混合層の変化に注目し、両者を比較評価した。

図 4-2-1 によれば、混合層の発達は初期に比較的速く、時間の経過と共に勾配が緩 やかになる傾向がある。配管の配置方向についてみると、初期は水平配置の場合の混 合層の発達が大きく、やがて鉛直と水平配置で同様の挙動に推移するものの、両配置 について大きな挙動の違いは見られない。また、いずれの配置についても、混合層の 発達は管口径に依存していることがわかる。次に、水平配置について配管口径 20A、 32A、50Aを比較した結果を図 4-2-2 に示す。なお、50A の結果については、混合層 の発達が大きく進行し観測領域を外れたため、初期に挙動の追跡に留まる。図 4-2-2 によれば、全体として、初期に混合層の急峻な発達が生じ、徐々に緩やかに推移する 傾向がみられる。また、管口径によりその程度が大きく異なり、口径が大きいほど顕 著な発達がみられる。



図 4-2-1 v=0[m/s]における混合層 L<sub>H</sub>の時間変化の配管方向依存性 横軸の 0[s]はバルブ開の動作開始から 2.6 秒後



図 4-2-2 v=0[m/s]における混合層 L<sub>H</sub>の時間変化の配管口径依存性 横軸の 0[s]は、20A と 32A はバルブ開の動作開始から 2.6 秒後、50A は同 5.1 秒後

次に窒素層と空気層の界面において生じる混合層について、各配管口径、配管方向 における時間変化を図 4-2-3 に示す。



図 4-2-3 v=0[m/s]における混合層 LAIR の時間変化の配管方向依存性

図 4-2-3 に示すように、LAIR 層の顕著な特徴として、水素の場合に対し発達の程度 が非常に低いことが挙げられる。5 秒後の混合層の長さを比較すると、20A 配管の水 平配置で 1/27 程度の長さに留まっている。また、配管方向により発達の程度が異なり、 鉛直方向でさらに発達が遅くなる。なお、図 4-2-3 の結果は、本解析において保障さ れる空間分解以下の範囲で生じているため、定性的な評価に留める。より正確にはこ の点に焦点を絞った精密な計測によって得られたデータによる評価が必要である。

### 4.3 直管水平配置における混合層の解析と評価

直管水平配置について、ラマン画像から得られる混合層 L<sub>H</sub> 及び L<sub>AIR</sub> の先端及び後端の進行速度とガス流量から求まる流速を比較した結果を口径 20A、流速 0.49[m/s] の場合を例に、図 4-3-1 及び図 4-3-2 にそれぞれ示す。



図 4-3-1 20A 直管、水平配置、Re=100 の場合における混合層 LH 両端の挙動



図 4-3-2 20A 直管、水平配置、v=0.49[m/s]の場合における混合層 LAIR 両端の挙動

図 4-3-1 によれば、水素濃度 98[%]の位置が、0.2 秒遅れるものの、流速から求めた 位置と良い一致を示す。また、水素濃度 2[%]の位置は流速よりも早く進行し、流速と の差は徐々に拡大する傾向にある。したがって、混合層の濃度 98[%]の位置は水素ガ スの注入に伴うもので、濃度 2[%]の位置はガスの注入に加えて拡散の効果で進行する ものと考えられる。図 4-3-2 によれば、酸素 2 [%]、即ち窒素 98[%]の位置が流速から 求めた位置にほぼ一致している。また、酸素 20[%]の位置は、初期に増加率が高くな るものの、その後は流速の勾配にほぼ一致する。水素の場合と比較すると、混合層の 発達は緩やかである。

流れの進行に伴う L<sub>H</sub>の挙動を図 4-3-3 に、L<sub>AIR</sub>の挙動を図 4-3-4 にそれぞれ示す。 なお、横軸は流速に経過時間を乗じた位置であり、流れの進行距離に対して混合層の 長さがどのように変化するかを、配管口径と Re 数をパラメータとして示した。



図 4-3-3 直管水平配置における混合層 LH 長の変化



図 4-3-4 直管水平配置における混合層 LAIR 長の変化

図 4-3-3 によると、全条件に共通してみられる挙動として、LHの発達速度は初期に 速く、徐々に緩和される傾向にあり、配管口径が大きいと LHの長さとその増加の勾 配は大きくなる。Re 数について比較すると、顕著な差異は見られないものの、流速に 伴い混合層の発達が顕著になる傾向がある。しかしながら配管口径に対する依存性と 比較すると、その程度は少ない。図 4-3-1 に示した挙動を含めて考察すると、混合層 は、流れに伴う対流と拡散による混合が共に進行することで発達しており、初期に水 素及び窒素の物性の差異に伴う拡散混合の寄与が強く現れ、その後徐々に対流による 混合が支配的になっていくと考えられる。また、混合層の発達量の勾配がある段階で 緩やかになるのは混合層における水素濃度勾配が減少し拡散が緩和された結果であ ると推察される。また、初期の急速な混合層の発達と混合層先端の進行は、Re 数では なく、配管口径、即ち両ガスが形成する界面の断面積に依存する傾向がみられる。

図 4-3-4 によると、LAIR についても、流れの進行と共に発達しているが、混合層の 増加量は L<sub>H</sub>に比べ 2[m]到達地点で 1/3 程度である。また、LAIR についても、時間と 共に増加率は緩やかになっていく傾向にあるが、L<sub>H</sub>層にみられた混合層の発達量があ る段階で変化する現象は観測されない。本調査の範囲では、流速、配管口径の差異に よる顕著な特徴はみられず、いずれの条件も類似的な結果を示している。

これらの見解から、実際の置換作業において、直管水平配管において混合気体が形成されない条件について考察する。

LH層について、本調査で対象とした、Re=100、200の比較的緩やかな流れにおいて

は、水素が窒素層を侵食することで発達し、その増加量は初期に速く、徐々に緩やか になる傾向にある。したがって、図 4-3-3 で得られた結果を基に、置換作業を行う配 管延長に対し、窒素層の長さをどの程度確保する必要があるかを見積もることができ る。図 4-3-5 は、図 4-3-3 における、配管口径 20A 及び 32A、Re=100 の結果に対し、 発達の勾配を近似直線により示したものである。前述のとおり、LH層発達の速度は、 初期に速くその後緩和される。20A、Re=100の例をみると、110[cm]付近で勾配が変 化するため、この位置を境に、初期発達及び緩和後の結果に対し実線(青)に示す直線 近似ができ、これにより進行距離に対する一次関数の形で混合層 L<sub>H</sub>の長さを見積も ることができる。L<sub>H</sub>の進行が緩和傾向にあることを考慮すると、緩和後の勾配を用い ることでも、安全サイドの見積もりが可能であるが、より安全には、得られた値に対 しさらに安全率を乗じて適用する、あるいは、進行距離が十分に長い場合、破線(青) に示した初期発達及び緩和後の両者を合わせた勾配を用いることも考えられる。破線 (青)を用いた場合の一例を示すと、水素層が2[m]進行することで、およそ0.8[m]の混 合層が形成されている。これを基に、10[m]進行後の混合層は、混合層の増加勾配が 減衰することを考えれば4[m]以下に収まっていると考えられ、これに安全率を乗じた 量の窒素ガスを先行させておくことで、水素層が窒素層を追い越す状況が回避される。 また、LAIR層についても同様に、本調査の流速条件の範囲においては、いずれの条件 においても 2[m]の進行で 0.4[m]程度の発達に留まっている。10[m]進行後の LAIR 層 は前述と同様に考えると2[m]以下に収まるもの見積もられ、空気と水素ガスを完全に 分離できる窒素層の長さは、L<sub>H</sub>長 4[m]に L<sub>AIR</sub>長 2[m]を加えた 6[m]を基準として、 安全率乗じ、必要な窒素量を見積もることができる。



図 4-3-5 水素置換における混合層長さの見積もり

### 4.4 直管鉛直配置における混合層の解析と評価

直管鉛直配置について、水平配置の場合と同様に、ラマン画像から得られる混合層 LH層及び LAIR層両端の進行速度と流速から求まる基準位置との比較を行った結果を 20A 配管の場合を例に図 4-4-1 及び図 4-4-2 にそれぞれ示す。

図 4-4-1 によると、水素濃度 98[%]の位置の進行の立ち上がりが流速に対し遅れてい る。立ち上がり後の勾配は流速にほぼ一致しているが、初期の遅延時間分流速による 基準位置から後方を追従することとなる。これは、水平配置の場合にも見られた傾向 ではあるが、鉛直配置ではより顕著である。また、 $H_2=2[%]$ の位置は、水平配置の場 合と同様に、流速に対し速く進行する。一方、図 4-4-2 によると、LAIR 層にこれらの 現象は見られず、 $O_2=2[%]$ 層が流速と良く一致して進行し、 $O_2=20[%]$ の勾配も、初期 に急であるものの徐々に緩やかに推移し、流速に追従する傾向にある。

混合層 L<sub>H</sub>長の発達について解析した結果を図 4-4-3 に、これらを水平配置の場合と 比較した結果を 20A について図 4-4-4 に、32A について図 4-4-5 にそれぞれ示す。な お、鉛直配管では、観測長が 1[m]であるため、初期挙動の解析にとどまる。



図 4-4-1 20A 直管、鉛直配置、Re=100 の場合における混合層 LH 両端の挙動



図 4-4-2 20A 直管、鉛直配置、v=0.49[m/s]の場合における混合層 LAIR 両端の挙動



図 4-4-3 鉛直配置における混合層 LHの発達挙動

図 4-4-3 によると、配管口径が大きい程、L<sub>H</sub>の発達が速くなっていることがわかる。 また顕著ではないものの、Re 数の増大により発達が促進されている。また、図 4-4-4、 4-4-5 に示すように、配管の配置方向によって比較した場合、いずれの口径において も、鉛直配管において L<sub>H</sub> 発達が速い傾向にあるが、顕著な差異は認められず、同様 の挙動を示していると言える。また、水平配置の場合(図 4-3-3)では初期に混合層 の形成が促進され、やがて緩和する傾向にあったが、鉛直配置ではその傾向が現れて いない。鉛直配置における発達速度の緩和は、初期挙動に類似性がみられることから、 さらに流れが進行した後に生じる可能性はあるが、本調査対象の範囲においては推測 の域を出ない。



図 4-4-4 混合層 LH 発達挙動の配管方向による比較(20A)



図 4-4-5 混合層 LH 発達挙動の配管方向による比較(32A)

次に、LAIR層に関する発達挙動を図 4-4-6 に示す。



図 4-4-6 鉛直配置における混合層 LAIR の発達挙動

図 4-4-6 によると、各配管条件、流速条件によって LAIR 層の発達について顕著な差 異は認められず、類似的な傾向を示している。また、配管の配置方向について比較し ても、水平配管の場合(図 4-3-4)に対し大きな差異は認められない。

### 4.5 丁字分岐管における混合層の解析と評価

T字分岐管については、配管の配置方向とガスの流れ方向を変更した計8条件の計 測を行った。また、ラマン画像から、窒素から水素へ置換する場合、いずれの条件に おいても流れ以外の方向へ水素が進行する状況が確認されている。ここでは、図4-5-1 に示すとおり、分岐部における各ガスの境界層から発達する混合層の長さに注目し、 解析と考察を行う。計測の起点をいずれの場合も閉鎖側の開口面とし、解析の開始を 置換ガスが計測の起点に到達した時点とした。T字分岐管の交点から各端面までの寸 法はいずれも約30[cm]であり、32A石英管の口径を考慮すると、観測できる混合層の 上限は約28[cm]となる。また、32A水平配管の場合と同様に、水平方向の解析は、管 上方部の濃度を、鉛直方向の解析は管中央の濃度を用いて混合層長を解析した。

置換ガスが水素の場合について整理するにあたり、ラマン画像における挙動から、 閉鎖側への L<sub>H</sub> の発達挙動は、境界面と閉鎖系配管方向(水平/鉛直)の配置関係に より分類できることが推察された。したがって、図 4-5-2 では図 4-5-1 における①及 び③の配管条件、図 4-5-3 では同②及び④の配管条件について比較した結果をそれぞ れ示す。



図 4-5-1 T字分岐管の混合層解析領域(置換ガスが水素の場合)



図 4-5-2 ①、③の配管条件における L<sub>H</sub>の発達挙動



図 4-5-3 ②、④の配管条件における LHの発達挙動

図4-5-2は図4-5-1における①及び③、即ち、閉鎖側の配管が水平方向の場合である。 図4-5-2によれば、いずれの条件においても、非常に類似性の高い発達挙動を示して いることがわかる。各条件における立ち上がりの違いは、ガスの流れ方向などの条件 の差異によるものであるが、いずれも発達が開始されてから3秒程度で閉鎖側の端面 まで水素が到達している。また、32A直管水平配置におけるv=0[m]における挙動と 比較しても、同様の挙動を示していることがわかる。これらの挙動から、閉鎖側の開 口部において、置換に伴い水素と窒素の界面が生成されるが、対流による混合に比べ、 拡散による混合が支配的に作用しているものと解される。一方、Re 数による挙動の違 いは立ち上がり時間の違いとなって表れている。これは、生成される界面における濃 度差がより速く開いていくためであり、本調査における配管長の範囲では Re 数の増 大が L<sub>H</sub>の発達を促進する状況は認められない。

図 4-5-3 は、前述と同様に、②、④即ち、閉鎖側の配管が鉛直方向の場合である。 この場合についても、図 4-5-2 の場合と同一の解釈ができる。いずれの条件について も、非常に類似性の高い挙動を示し、鉛直配管、v=0[m/s]における拡散挙動との類似 性及び Re 数の増大に伴う作用についても同様の結果となった。

次に LAIR 層の発達挙動について、図 4-5-6、図 4-5-7 に示す。ここでは、流れの進行 方向に閉鎖空間がある場合と、流れに対して直角に閉鎖空間がある場合に分類し、図 4-5-6 に図 4-5-1 の①と④の場合を、図 4-5-7 に図 4-5-1 の②と③の場合を、それぞれ



図 4-5-6 混合層 LAIR 長の時間変化



図 4-5-7 混合層 LAIR 長の時間変化

示す。

図 4-5-6 は、図 4-5-1 における①、④即ち、閉鎖側の配管方向と分岐前の流れ方向が 一致している場合として整理される。図 4-5-6 によれば、いずれの条件においても、 初期の LAIR 長の増加は急峻でその増加量はほぼ同じである。その後、LAIR 長の増加は 緩やかとなっている。この遷移点における混合層の長さは流速に依存しており、流速 が速いほど LAIR 長は長い。

図 4-5-7 は、図 4-5-1 における②、③即ち、閉鎖側の配管方向と流れ方向が直角の関係にあり、界面が流れに沿って生成される場合である。図 4-4-7 によれば、観測の範囲において LAIR の発達は認められない。ただし、長時間観測すると、徐々に界面付近に LAIR 層が生成され始めるが、他の条件における発達速度と比較すると、著しく緩やかである。LAIR 層の発達については、本調査の観測時間内で、長さ 30cm の閉鎖側空間が混合層で満たされる状態には至らなかった。

### 4.6まとめ

本解析により得られた結果は以下のとおりである。

(1) 直管水平配置

口径 20A 及び 32A、水素 Re 数 100 及び 200 における L<sub>H</sub> 層及び L<sub>AIR</sub> 層の挙動を、置換ガスの進行距離と発達する混合層の長さを解析し、明らかにした。水平配置の場合、初期の発達の勾配は配管口径に強く依存し、口径が大きい程発達の勾配が急峻となる一方、顕著な Re 数の寄与は認められなかった。遷移後の緩やかな発達においては、Re 数の寄与が優位となり、Re 数が大きくなる程発達の勾配が急峻となった。これらを配管口径および Re 数について整理して得られた結果から、安全に置換作業を行うために必要な窒素層の見積もりを例示した。

(2) 直管鉛直配置

口径 20A 及び 32A、水素 Re 数 100 及び 200 における L<sub>H</sub> 層及び L<sub>AIR</sub> 層の挙動を解析 し、初期挙動が水平配置の場合と類似することを示した。

(3) T 字分岐管

口径32AのT字分岐管について、閉鎖側におけるLH層及びLAIR層の挙動を解析した。 LH層は配管の配置やガスの流れ方向に依らず閉鎖側で発達し、その挙動は流速0にお ける拡散による混合の挙動と極めて良い類似性を示すことを明らかにした。

LAIR 層は配管の配置とガスの流れ方向の条件により大きく異なる挙動を示すが、LH 層の発達速度と比較すると緩やかであることを明らかにした。
#### 5. 総括

本調査では、一般集合建物内へ水素配管供給を想定し、直管鉛直、直管水平、T 字分岐 管のそれぞれについて、水素の Re 数を 100、200 に統一し、窒素から水素へ置換した場 合における水素ガスの挙動、並びに空気から窒素へ置換した場合における空気(酸素ガス) の挙動を可視化し、濃度分布の経時変化を明らかにした。また、得られた可視化画像から 水素及び空気の空間濃度分布の経時変化を定量的に解析・評価することにより、流れに伴 う混合層の発達過程を明らかにした。

直管水平方向及び鉛直方向における置換挙動ついて、以下の結果が得られた。

- (1) 窒素から水素への置換において、混合層の水素濃度 98[%]の位置は流速に従って進行するのに対し、混合層の先端(水素濃度 2[%]の位置)は流速よりも早く進行し流速 との差は徐々に拡大する傾向を示した。混合層の発達過程は、初期に急峻に進み、遷 移点を経て緩やかな発達へと移行した。水平配置の場合、初期の発達の勾配は配管口 径に強く依存し、口径が大きい程発達の勾配が急峻となる一方、Re 数の寄与はわずか であった。遷移点後の緩やかな発達過程においては、Re 数の寄与が優位となり、Re 数が大きくなる程発達の勾配が急峻となった。鉛直配置の場合、初期挙動について、 配管口径、Re 数との相関は水平配置の場合と同様であった。配置方向による混合層の 発達の違いは、わずかに鉛直方向の発達速度に優位性が見られるものの、本調査の範 囲では顕著な差異は認められなかった。
- (2) 空気から窒素への置換における混合層の発達は、窒素から水素への置換と比較し て大幅に緩やかな進行であり、本調査における配管条件及び流速条件の範囲では、配 管口径及び Re 数との顕著な相関は認められず、いずれも同様の挙動を示した。配置 方向による混合層の発達の違いについても、顕著な差異は認められず、同様の挙動を 示した。
- (3) 直管水平配置について、(1)、(2)の見解と、各ガス条件、配管口径及び流速条件に おける混合層の長さに関する解析データにおける流れの進行に伴う混合層発達の勾 配を用いて、置換作業を安全に行うために必要な窒素量の見積もりを例示した。
- (4) 窒素と水素の境界層では、両ガス層の接続(バルブの開)に伴い、外力を伴わない流速0の条件においても、窒素層へ水素が進行し、混合層が形成されることが確認された。また、水平配置では管の上部の水素ガスが先行する現象が確認された。一方、窒素と空気の境界層において同様の現象は観測されなかった。したがってこの現象は、水素分子と窒素分子の拡散係数や比重などの物性に大きな差異があることに由来する現象であると結論付けられた。
- (5) 上記の拡散混合は、直管のガス置換挙動において、特に初期の混合層の発達とし て顕著に現れており、とりわけ水素置換について、その挙動に大きく影響する重要な

特性の一つとして考慮する必要がある。

T字分岐管における置換挙動について以下の結果を得た。

- (6) 窒素から水素への置換について、本調査の観測条件の範囲においては、主管及び 枝管が鉛直、水平のいずれの方向へ配置された場合であっても、閉鎖側へ向けて水 素ガスが侵入し、やがてその全域が混合層で満たされることが明らかになった。ま た、この場合の水素混合層の挙動は、外力が及ばない水素と窒素の界面で生じた挙 動と極めて高い類似性を示し、流速との相関は顕著に現れないことが確認された。 したがって、分岐部における水素混合層の発達には、水素分子と窒素分子の拡散係 数や比重などの輸送物性に大きな差異があることに由来する拡散混合が支配的に作 用し、その挙動を決定づけていると推察された。
- (7) 空気から窒素への置換について、本調査の観測範囲では、閉鎖部の空気層が混合層で満たされる状態には至らず、流れと閉鎖部の位置関係によって大きく異なる挙動を示すことが明らかになった。流れに対し界面が垂直に形成される場合、緩やかに混合層が発達し、発達の勾配は流速と相関がある。流れに対し界面が平行に形成される場合、混合層の発達はごくわずかとなり、本調査における観測の範囲では混合層が形成は確認されなかった。

本調査により、各条件におけるガスの挙動が可視化され、その経過が視覚的に明らかに なったことは極めて有意義な成果である。また、混合層の発達挙動については、ガス可 視化による空間濃度分布計測を用いることで、詳細な経緯を明らかにすることができた ものであり、重要な知見である。また、分岐部において閉鎖側へ水素の侵入が起こるこ とや、いずれの配置条件においても混合層が進行することが明らかとなったことは極め て興味深い知見となった。空気から窒素への置換では、閉鎖側おける空気層が窒素に全 置換されることはなく、この点も注目すべき知見である。

本調査に示した、水平配管の置換作業において必要な窒素量の見積もりは、安全率の設 定に十分な検討が必要であることも含め、これまでに実施された水平配管における置換 挙動調査により示唆された見解に沿うものである。

しかしながら、内管を対象に安全な置換作業を検討するためには、分岐部等による効果 や水素ガスの侵入、空気層の残存などを加味した詳細な考察が必要である。本調査では、 分岐部における置換挙動がガス種や配管条件により大きく異るものの、それらの挙動を 支配する主たる要因に関する知見が得られている。したがって今後、分岐部の境界面を 焦点に、管径や管長等の配管形態や様々な流速条件における実測データを蓄積すると共 に、得られた結果をシミュレーションに反映させ、相互補完的な解析、考察を行うこと によって種々の直管や分岐構造を含む配管系へ適用できる実用性の高い知見を得ること ができると考えられる。

## 付録

# I. 実験結果一覧

図表番号	配管形態	流れ方向	初期状態	導入ガス	管サイス、	流速条件
I -1-1	直管水平	-	窒素	水素	20A	流速 0
I -1-2	直管水平	-	窒素	水素	20A	Re100
I -1-3	直管水平	-	窒素	水素	20A	Re200
I -1-4	直管水平	-	窒素	空気	20A	流速 0
I -1-5	直管水平	-	空気	窒素	20A	0.49m/s
I -1-6	直管水平	-	空気	窒素	20A	0.98m/s
I -1-7	直管水平	-	窒素	水素	32A	流速 0
I -1-8	直管水平	-	窒素	水素	32A	Re100
I -1-9	直管水平		窒素	水素	32A	Re200
I -1-10	直管水平	-	空気	窒素	32A	流速 0
I -1-11	直管水平	-	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -1-12	直管水平	-	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -1-13	直管水平	-	窒素	水素	50A	流速 0
I -1-14	直管水平		窒素	酸素	50A	流速 0
I -2-1	直管鉛直	上方向	窒素	水素	20A	流速 0
I -2-2	直管鉛直	上方向	窒素	水素	20A	Re100
I -2-3	直管鉛直	上方向	窒素	水素	20A	Re200
I -2-4	直管鉛直	上方向	窒素	酸素	20A	流速 0
I -2-5	直管鉛直	上方向	空気	窒素	20A	0.49m/s
I -2-6	直管鉛直	上方向	空気	窒素	20A	0.98m/s
I -2-7	直管鉛直	上方向	窒素	水素	32A	流速 0
I -2-8	直管鉛直	上方向	窒素	水素	32A	Re100
I -2-9	直管鉛直	上方向	窒素	水素	32A	Re200
I -2-10	直管鉛直	上方向	窒素	酸素	32A	流速 0
I -2-11	直管鉛直	上方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -2-11	直管鉛直	上方向	空気	窒素	32A	0.60m/s

表 I 図表番号と実験条件一覧表

I -3-1	主管水平 枝管鉛直	主管	窒素	水素	32A	Re100
I -3-2	主管水平 枝管鉛直	主管	窒素	水素	32A	Re200
I -3-3	主管水平 枝管鉛直	主管	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -3-4	主管水平 枝管鉛直	主管	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -3-5	主管水平 枝管鉛直	枝管	窒素	水素	32A	Re100
I -3-6	主管水平 枝管鉛直	枝管	窒素	水素	32A	Re200
I -3-7	主管水平 枝管鉛直	枝管	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -3-8	主管水平 枝管鉛直	枝管	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -4-1	主管鉛直 枝管水平	枝管	窒素	水素	32A	Re100
I -4-2	主管鉛直 枝管水平	枝管	窒素	水素	32A	Re200
I -4-3	主管鉛直 枝管水平	枝管	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -4-4	主管鉛直 枝管水平	枝管	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -4-5	主管鉛直 枝管水平	主管	室素	水素	32A	Re100
I -4-6	主管鉛直 枝管水平	主管	室素	水素	32A	Re200
I -4-7	主管鉛直 枝管水平	主管	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -4-8	主管鉛直 枝管水平	主管	空気	窒素	32A	0.60m/s

#### I.1 水平配管



図 I-1-1 20A 水平配管、流速 0 における窒素層に対する水素の挙動











図 I-1-4 20A 水平配管、流速 0 における窒素層に対する空気(酸素)の挙動













図 I-1-7 32A 水平配管、流速 0 における窒素層に対する水素の挙動











### 酸素ラマン画像



図 I-1-10 32A 水平配管、流速 0 における空気(酸素)層に対する窒素の挙動



図 I-1-11 32A 水平配管、流速 0.30m/s、0~3m における空気(酸素)層に対する窒素置換挙動







水素ラマン画像



図 I-1-13 50A 水平配管、流速 0 における窒素層に対する水素の挙動



#### 酸素ラマン画像



図 I-1-14 50A 水平配管、流速 0 における窒素層に対する酸素の挙動

### I.2 鉛直配管



図 I-2-1 20A 鉛直配管、流速 0 における窒素層に対する水素の挙動



























図 I-2-8 32A 鉛直配管、水素 Re100 における窒素層に対する水素置換挙動











図 I-2-11 32A 鉛直配管、流速 0.30m/s における空気(酸素)層に対する窒素置換挙動





















図 I -3-4 主管水平-枝管鉛直配置、枝管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動(窒素流速:0.60[m/s])



図 I -3-5 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 I -3-6 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=200)


図 I -3-7 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])



図 I -3-8 主管水平-枝管鉛直配置、主管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速:0.60[m/s])



I.4 T字分岐配管、主管鉛直-枝管水平配置

図 I -4-1 主管鉛直-枝管水平配置、枝管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 I -4-2 主管鉛直・枝管水平配置、枝管方向流れにおける窒素層に対する水素の挙動 (水素 Re=100)



図 I -4-3 主管鉛直・枝管水平配置、枝管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.30[m/s])



図 I -4-4 主管鉛直・枝管水平配置、枝管方向流れにおける空気層に対する窒素の挙動 (窒素流速: 0.60[m/s])



















図Ⅱ-1 レーザ装置及び照射光学系



図Ⅱ-2 模擬配管:導入管及び助走管



図Ⅱ-3 直管鉛直配置石英管(32A相当)



図Ⅱ-3 直管水平配置石英管(32A相当)



図Ⅱ-4 T字分岐石英管(32A相当)



図Ⅱ-5 撮影状況