

平成30年度経済産業省委託事業

平成30年度水素導管供給システムの安全性評価事業

維持管理工法の水素適用性評価

【地中及び大気中の水素拡散挙動調査】

調査報告書

平成31年3月

株式会社四国総合研究所

目 次

1.	調査の概要	1
1.1	事業目的	1
1.2	事業内容	1
1.3	実施方法	1
1.4	実施体制及びスケジュール	2
2.	調査方法	4
2.1	実験方法の概要と実験条件	4
2.2	舗装条件の決定	6
2.2.1	道路構造の調査	6
2.2.2	道路舗装構成層の基本物性	9
3.	水素ガス計測手法	12
3.1	地中水素ガス濃度の計測方法	12
3.1.1	センサの選定	12
3.1.2	気体熱伝導式ガスセンサによる地中水素濃度計測の性能評価	13
3.2	大気中水素ガス濃度の計測方法	15
3.2.1	レーザラマンイメージングによる水素ガス拡散挙動の可視化	15
3.2.2	ガス可視化・濃度計測装置の構成	18
3.2.3	ガス濃度の定量化	21
4.	透気係数及び拡散係数の計測手法	24
4.1	土壌試料の透気係数計測	24
4.1.1	透気係数計測装置の設計製作	24
4.1.2	透気係数計測方法	26
4.2	土壌試料の拡散係数計測	26
4.2.1	拡散係数計測装置の設計製作	26
4.2.2	拡散係数計測方法	28
5.	小規模容器による基礎試験	38
5.1	小規模試験装置と実験方法	38
5.1.1	小規模試験装置の設計製作	38
5.1.2	実験条件の設定	42
5.1.3	小規模試験の実施方法	43

5.2	実験結果	44
5.2.1	小規模試験の実験結果	44
5.2.2	透気係数及び拡散係数計測の実験結果	62
5.3	考察	63
5.4	まとめ	65
6.	地中及び大気中の水素濃度分布計測（実フィールド試験）	67
6.1	実フィールド試験装置の製作	67
6.1.1	土壌模擬槽及び気密ブースの設計製作	67
6.1.2	埋設配管の設計製作	70
6.1.3	安全対策	72
6.2	実フィールド試験装置構成	80
6.3	実フィールド試験における地中水素濃度分布計測	84
6.3.1	水素ガスセンサの配置	84
6.3.2	地中水素濃度計測結果	85
6.3.3	考察	89
6.3.4	まとめ	102
6.4	実フィールド試験における大気中水素濃度分布計測	103
6.4.1	観測領域	103
6.4.2	大気中濃度分布計測結果	104
6.4.3	考察	105
6.4.4	まとめ	106
6.5	漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測	107
6.5.1	実験方法	107
6.5.2	実験結果	107
6.5.3	考察	111
6.5.4	まとめ	115
7.	シミュレーション解析の基礎検討	116
7.1	概要	116
7.2	小規模試験モデル解析	117
7.2.1	解析モデル	117
7.2.2	解析条件	119
7.2.3	解析結果	120
7.3	フィールド試験解析	125
7.3.1	解析モデル	125

7.3.2	解析条件	127
7.3.3	解析結果	128
7.4	再現性の評価	131
7.5	感度解析（異なる条件における解析）	133
7.5.1	各土壌パラメータの感度計算	133
7.5.2	拡散特性の影響についての試計算	141
7.6	まとめ	145
8.	総括	146

[参考文献]

[付 録]

I.	小規模容器による基礎試験結果	155
II.	実フィールド試験の地中の水素濃度分布計測結果	162
III.	漏えい停止後の地中の水素濃度分布計測結果	174

1. 調査の概要

1.1 事業目的

「水素導管供給システムの安全性評価事業（総合調査）」では、近年、実用化が想定される水素導管の供給形態を見据え、想定される新設の中低圧水素導管供給システムを構成する要素を整理し、その安全を確保するための手法や保安のレベルのあり方等を検討することとしている。

このため本事業では、その想定される新設の中低圧水素導管供給システムを実際に運用していく際の維持管理上の課題について、技術調査等を通じて安全且つ合理的な維持管理方法を明らかにすることにより、水素ガスの工作物の技術基準の整備に資することを目的とする。

1.2 事業内容

万一ガス漏えいが発生した場合には、「①漏えいを迅速に検知」⇒「②漏えい位置を的確に特定」⇒「③遮断等の措置」⇒「④漏えい箇所の修理」といった対応が必要となる。

本調査では、「①漏えいを迅速に検知」、「②漏えい位置を的確に特定」、「③遮断等の措置」、「④漏えい箇所の修理」の措置を講じるための技術を対象とし、水素導管供給システムにおいて、人為もしくは自然災害等で損傷した際の水素ガス漏えいを迅速に検知する技術等を調査し、水素導管供給システムの維持管理における安全対策に係る知見を明らかにすることとしている。

このため平成 30 年度においては、平成 28 年度及び平成 29 年度の調査結果を踏まえ、地中埋設導管からの水素ガス漏えい時における対応措置の検討において、基本的な知見となり得る、舗装による拡散挙動への影響を確認するため、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した実フィールド試験及びシミュレーションを行い、水素ガスの拡散挙動を把握し、漏えい検知を行う際の検知間隔等について整理する。

1.3 実施方法

(1) 小規模容器による基礎試験

下記(2)の実フィールド試験におけるデータ収集と(3)のシミュレーション解析に向けた条件の検討を目的とした基礎試験として、内径φ100 mm の地中模擬槽及び縦 300 mm×横 280 mm×高さ 300 mm の大気模擬槽により構成した小規模容器を用いて、内径φ1.0 mm のピンホールから水素ガスを漏えいさせ、舗装有無の条件下での水素ガスの拡散挙動を確認した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、舗装は一般的に使用される道路構造部の舗装構成とした。

試験条件として、水素ガス漏えい量 4 パターン（供給圧力：2.5 kPa、5.0 kPa、7.5

kPa、10.0 kPa) について、水素ガスの拡散挙動を整理した。

(2) 実フィールド試験

上記(1)の基礎試験結果を踏まえ、実フィールド試験として、直径 7 m 程度、土砂部分 0.7 m、路盤 0.35 m、舗装 0.15 m の地中模擬槽を製作し、漏えい水素ガスについて、深さ 1.2 m からの地中拡散挙動（濃度分布）及び、大気（地表面近傍）への拡散挙動（濃度分布）の調査を実施した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、舗装は一般的に使用される道路構造部の舗装構成とした。

地中における深さ方向及び水平方向の拡散挙動（濃度分布）を計測するため、地中に水素センサを 40 個埋設した。また、レーザ計測により大気中（地表面近傍）における拡散挙動の可視化及び濃度分布の計測を行った。

試験条件として、水素ガス漏えい量 2 パターン（供給圧力：2.5 kPa、10.0 kPa）について、地中及び大気中（地表面近傍）への拡散挙動（濃度分布）の漏えい開始からの経時変化を計測した。また、供給圧力 10.0 kPa での試験実施後を初期状態として、水素供給停止後の地中水素濃度経時変化を計測した。

(3) シミュレーション解析の基礎検討

上記(2)で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検証を行い、舗装を施した際における水素の地中拡散挙動及び大気拡散挙動について、シミュレーションが可能かどうかについて検証を行った。

1.4 実施体制及びスケジュール

本事業実施体制を図 1-4-1 に、本調査の実施体制を図 1-4-2 に、実施スケジュールを表 1-4-1 にそれぞれ示す。

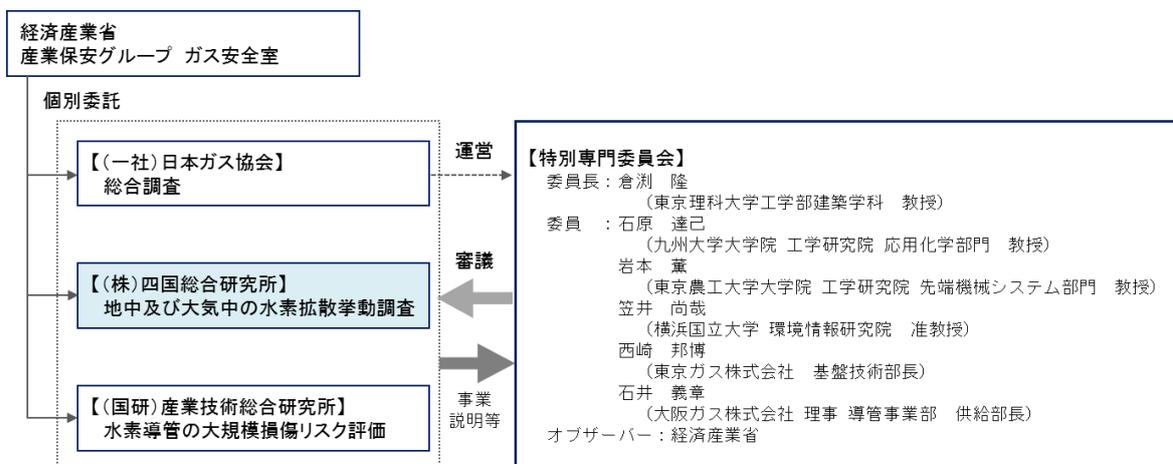


図 1-4-1 事業実施体制

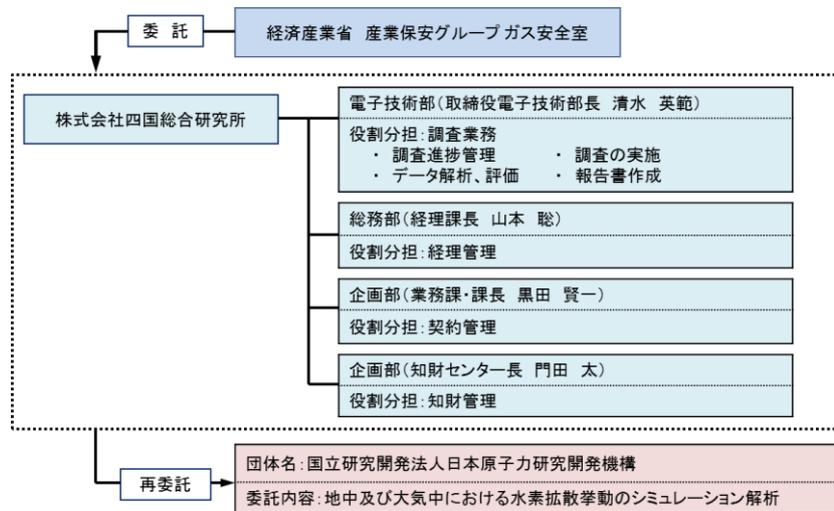


図 1-4-2 調査実施体制

表 1-4-1 実施スケジュール

実施項目		開始	終了	平成30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	実験条件の検討	H30.7	H30.8	■											
2	小規模容器による基礎試験	(1) 実験装置設計・製作	H30.7	H30.11	■										
		(2) 透気係数・拡散係数計測	H30.10	H30.12			■								
		(3) 水素濃度計測実験	H30.11	H31.2				■							
		(4) 解析, 評価	H30.11	H31.2				■							
3	実フィールド試験	(1) 実験装置設計・製作	H30.7	H31.1	■										
		(2) 透気係数・拡散係数計測	H30.12	H31.1			■								
		(3) 水素濃度分布計測	H31.1	H31.2				■							
		(4) 解析, 評価	H31.1	H31.2				■							
4	シミュレーション解析と再現性評価	(1) 解析条件検討	H30.7	H30.10	■										
		(2) シミュレーション解析	H30.11	H31.2			■								
		(3) 再現性評価	H31.1	H31.2				■							
5	委員会	-	-			8/8			12/4		2/22				
6	総合調査受託者との会議	-	-	7/17		9/25	10/22	11/20	12/19	1/23	2/12	3/4			
7	報告書作成	H31.2	H31.3								■				

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、指摘事項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、地中及び大気中における水素拡散挙動のシミュレーション解析については、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構へ再委託する体制で実施した。

2. 調査方法

2.1 実験方法の概要と実験条件

本調査では、地中及び大気中における水素拡散挙動について、一般的な埋設土及び一般的な道路舗装等に使用される舗装構造を用いて、実運用における地中及び大気中を模擬したフィールド実験装置を製作し、実験による観測とシミュレーション解析の再現性評価を行った。

1.3 節に示した本調査の実施方法に基づき、具体的な実施内容を

- ① 小規模容器における地中及び大気中における水素拡散挙動計測（濃度計測）
- ② 実フィールドにおける地中及び大気中における水素拡散挙動計測（濃度計測）
- ③ 地中及び大気中における水素拡散挙動のシミュレーション解析と再現性評価

の3項目に分類した。

①については、アスファルトが水素拡散に及ぼす影響を確認するため、地中及び大気空間を模擬した小型容器を製作した。地中模擬槽は真砂土層及びアスファルト層の2層により構成し、下層には、一般的な埋設土である真砂土を転圧充填し、真砂土上にアスファルト層を設置した。真砂土層の底板には配管の腐食漏えい等を想定した損傷に相当する放出口を施工し、所定の条件にて水素を放出した。また、地中模擬槽上に接続可能な大気模擬槽を製作した。製作した小規模容器により、地中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として計測した。

②については、実フィールド試験として水素導管の埋設環境を模擬した地中模擬槽を製作し、水素漏えい箇所が地表面から深さ1.2mとなるよう配管を設置した。配管には腐食漏えい等を想定した損傷に相当する放出口を施工し、所定の条件を再現し水素を放出した。地中模擬槽には一般的な埋設土として用いられている真砂土を転圧充填し、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した。地中模擬槽の周囲には大気空間を模擬する気密ブースを製作した。製作したフィールド実験装置により、地中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として計測した。

③については、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析により、②の濃度計測と同一の条件で計算を行い、実験結果に対する解析結果の再現性を評価することで地中及び大気中における水素拡散挙動へのシミュレーション解析の適用可能性を評価した。

本調査における実験及びシミュレーション解析条件を表2-1-1に示す。

表 2-1-1 実験及びシミュレーション解析条件

項目	No.	土壌層構成			損傷形状 (放出口形状)	供給 圧力 [kPa]	濃度 計測	漏えい 停止後の 挙動計測	CFD 解析
		真砂土 [mm]	碎石 [mm]	アスファルト [mm]					
① 小規模容器による基礎試験	1-(1)	200	—	—	ピンホール φ1.0 mm	2.5	○	—	○
	1-(2)	200 コート剤 塗布	—	—		2.5	○	—	—
	1-(3)	200	—	25		2.5	○	—	○
	1-(4)	200	—	100		2.5	○	—	○
	1-(5)	200	—	100		5.0	○	—	—
	1-(6)	200	—	100		7.5	○	—	—
	1-(7)	200	—	100		10.0	○	—	—
	1-(8)	200	—	150		2.5	○	—	—
	1-(9)	200	—	150		5.0	○	—	—
	1-(10)	200	—	150		7.5	○	—	—
	1-(11)	200	—	150		10.0	○	—	—
② 実フィールド試験	2-(1)	700	350	150	2.5	○	—	○	
	2-(2)	700	350	150	10	○	○	—	

水素放出条件について、放出口形状（配管の損傷形状）は、腐食による配管の損傷を想定し、ピンホールφ1.0 mm とした。供給圧力については、中低圧での水素配管供給を想定し、①について 2.5 kPa、5.0 kPa、7.5 kPa、10.0 kPa の 4 パターン、②について 2.5 kPa、10.0 kPa の 2 パターンとした。土壌試料は平成 29 年度調査事業と同様の真砂土を用いた。舗装条件の決定及び容器設計の概念については後述する。なお、これらの実験条件は総合調査受託事業者との協議により決定した。

また、実フィールド規模での舗装有無の条件下における水素拡散挙動の比較のため、真砂土層のみで実フィールド試験を実施した平成 29 年度調査事業と水素供給量を揃え、表 2-1-2 に示す実験条件にて水素拡散挙動を計測した。

表 2-1-2 実験条件

No.	土壌層構成			損傷形状 (放出口形状)	供給 流量 [L/min]	濃度 計測	漏えい 停止後の 挙動計測	CFD 解析
	真砂土 [mm]	砕石 [mm]	アスファルト [mm]					
3-(1)	700	350	150	ピンホール φ1.0 mm	1.93	○	—	—
3-(2)	700	350	150		5.54	—	○	—

2.2 舗装条件の決定

2.2.1 道路構造の調査

本調査では、地中模擬槽に一般的な道路構造部に使用される舗装を施し、実フィールド試験を実施する。舗装の基本構造を図 2-2-1 に示す^[4]。

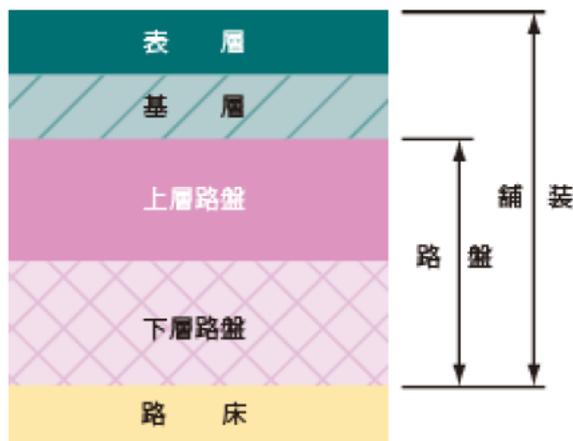


図 2-2-1 舗装の基本構造

舗装は、図 2-2-1 に示したとおり、下層路盤、上層路盤、基層、表層の 4 層により構成され、真砂土や山砂等の路床の上に敷設される。

路盤は、路面の交通荷重を広く分散させて路床にかかる応力を減少させ、安全に伝えるために路床上に敷設され、通常下層路盤と上層路盤に分けられる。下層路盤は比較的支持力の小さい安価な材料で現地材料が用いられる場合が多く、上層路盤は支持力の大きい良質な材料を使用する。基層は路盤と表層の間に敷設され、路面に掛かる交通荷重を均一に支持分散させる役割があり、通常加熱アスファルト混合物が用いられる。表層は最上部の層であり、交通荷重を下層に分散させ、雨水の浸透を防止する。ここにも加熱アスファルト混合物が用いられる。

一般的な舗装はこのような基本構造を基に敷設されるが、交通量や目的により層の構

成、各層の厚さ、用いる材料は様々であるのが実情である。碎石には主に単粒度碎石、クラッシャーラン、粒度調整碎石の3種があり、それらの各々に最大粒径が異なる複数の種類がある。図2-2-2は碎石層に比較的好く用いられる最大粒径30mmの碎石について、単粒度碎石、クラッシャーラン、粒度調整碎石のJISで定められた骨材粒度分布を示したグラフである。骨材とは、碎石、砂利、砂、砕砂その他これに類似する材料であり、舗装用骨材としては、2.36mmふるいに止まる骨材を粗骨材、2.36mmふるいを通過し75μmふるいに止まる骨材を細骨材、75μmふるいを通過する鉱物質粉末をフィラー（石粉）と呼ぶ。

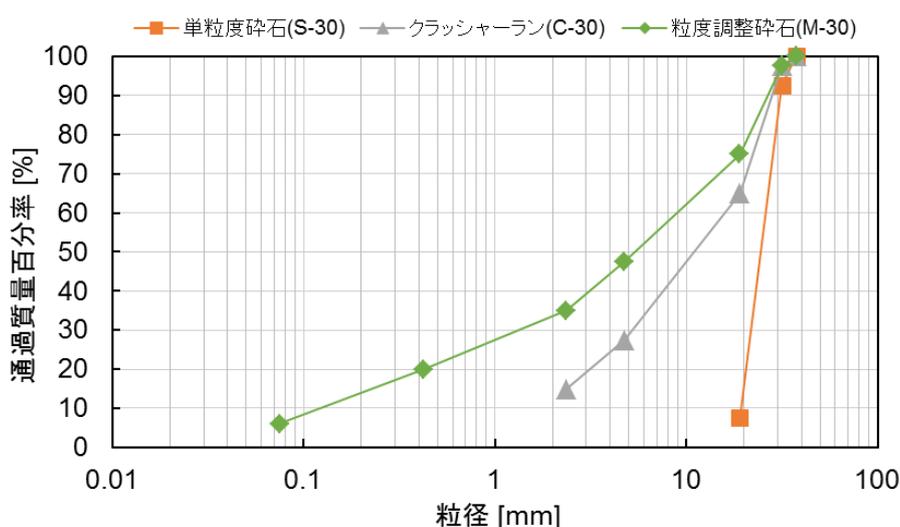


図 2-2-2 碎石の粒度分布（最大粒径 30 mm）

図 2-2-2 に示したとおり、単粒度碎石は粒度分布範囲が狭く、粒度の揃った骨材により構成される。クラッシャーランは単粒度碎石より粒度分布範囲が広く、粒度調整碎石は更に粒度範囲が広い。

前述したように、基層及び表層は加熱アスファルト混合物が用いられる。加熱アスファルト混合物は、結合剤であるアスファルトに骨材やフィラーを組み合わせる適切な配合とし、これを所定の温度条件で加熱混合して製造されるものである。アスファルト混合物は交通量、目的に加え、舗装する場所の気象条件等により、配合設計される。図 2-2-3 は、標準的に用いられるアスファルト混合物の骨材粒度分布の例である。図中凡例の AS はアスファルトを表し、括弧内の数字は骨材の最大粒径を表す。

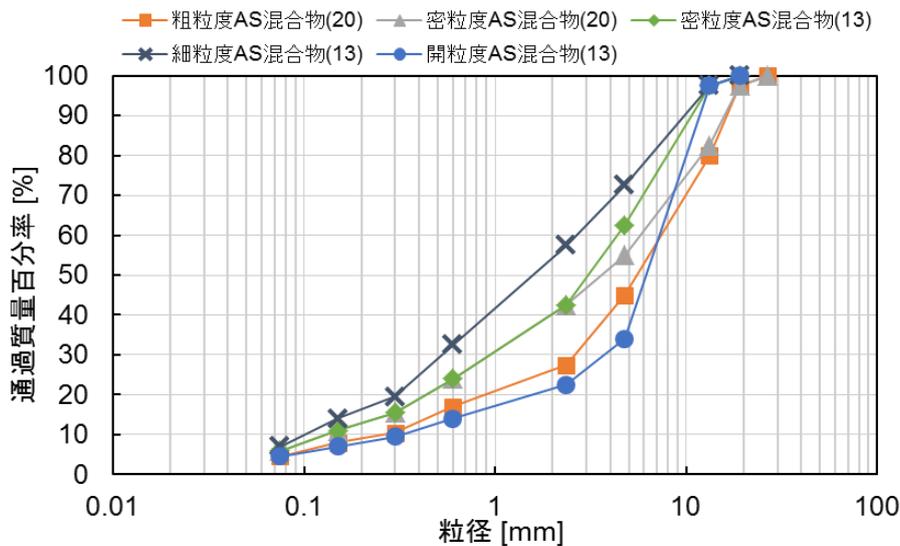


図 2-2-3 アスファルト混合物の骨材の粒度分布

図 2-2-3 に示したとおり、粗粒度や開粒度アスファルト混合物は粗骨材が多く配合されており、密粒度、細粒度の順に細骨材やフィラーの配合量が多くなる。アスファルト混合物はこれらの粒度分布を持つ骨材に 3~8 % (混合物全量に対する質量百分率) のアスファルトを混合して製造される。

アスファルト混合物を敷設する際、路盤上に瀝青材料を薄く散布する。これをプライムコートと呼ぶ。プライムコートは路盤とその上に敷設するアスファルト混合物の付着を良くする等の役割があり、粘度が比較的 low、路盤の中によく浸透するアスファルト乳剤 PK-3 (カチオン乳剤) が一般的に用いられる。プライムコートの散布量は一般には 1.0~2.0 L/m² である。また、アスファルト舗装の基層と表層の間にも薄く瀝青材料を散布する。これは、タックコートと呼ばれ、基層と表層のアスファルト混合物の付着性を高める目的で散布される。タックコート用瀝青材料には、通常アスファルト乳剤 PK-4 (カチオン乳剤) が用いられる。タックコートの散布量は一般には 0.3~0.6 L/m² である。

本調査においては、一般的な道路構造部へ使用される舗装として、図 2-2-4 に示す、「車道舗装 50 型」に基づき実フィールドに舗装を施すこととした。「車道舗装 50 型」は東京都中央区における呼称であり、地域により「車道アスコン 50 型」等別名称の場合がある。

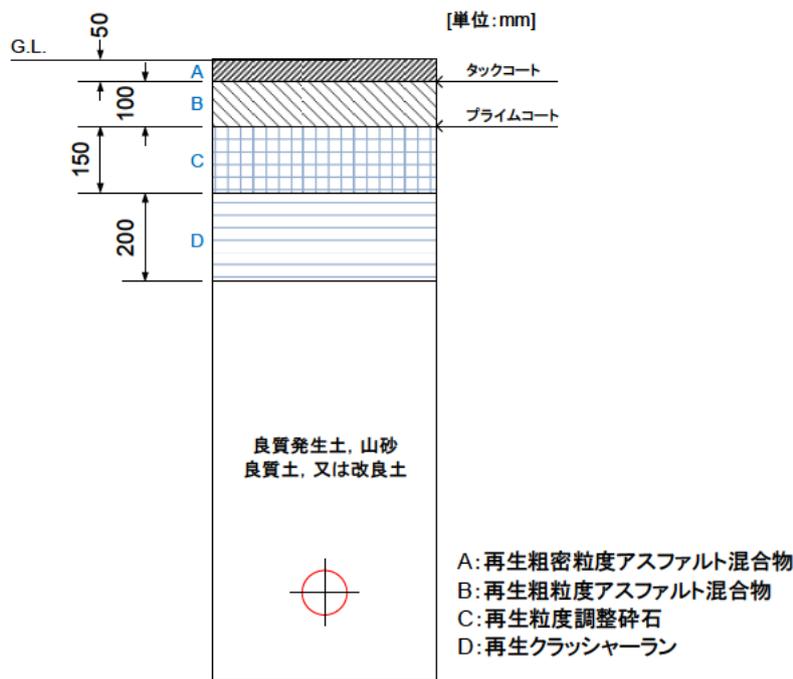


図 2-2-4 「車道舗装 50 型」の構造

図 2-2-4 に示したとおり、「車道舗装 50 型」舗装は路床上に再生クラッシャーランを用いた 200 mm の下層路盤、その上に再生粒度調整碎石を用いた 150 mm の上層路盤、路盤上に再生粗粒度アスファルト混合物を用いた 100 mm の基層と、再生密粒度アスファルト混合物を用いた 50 mm の表層により構成されるが、本調査においては、

- ・ 碎石層とアスファルト層について、それぞれの基本的な拡散への影響を確認する。
- ・ 実験やシミュレーションの複雑化を避け、結果を理解し易くする。

の 2 点の目的から、路盤とアスファルトを単層化し、碎石層 350 mm、アスファルト層 150 mm として実験を実施することとした。総合調査受託事業者等からの助言に基づき、導管の埋設深さはアスファルト表面から 1.2 m とするため、路床である真砂土層の放出口からの高さを 700 mm とした。

2.2.2 道路舗装構成層の基本物性

前項で述べたとおり、本調査における土壤模擬槽は、アスファルト層 150 mm、碎石層 350 mm、真砂土層 700 mm の 3 層により構成する。

アスファルト層に用いるアスファルト混合物は表層の舗装に一般的に用いられる、密粒度アスファルト混合物 (13) を用いることとした。図 2-2-5 に、図 2-2-3 にて示した標準配合の密粒度アスファルト (13) の粒度分布と本調査に用いる密粒度アスファルト (13) の粒度範囲の比較を示す。

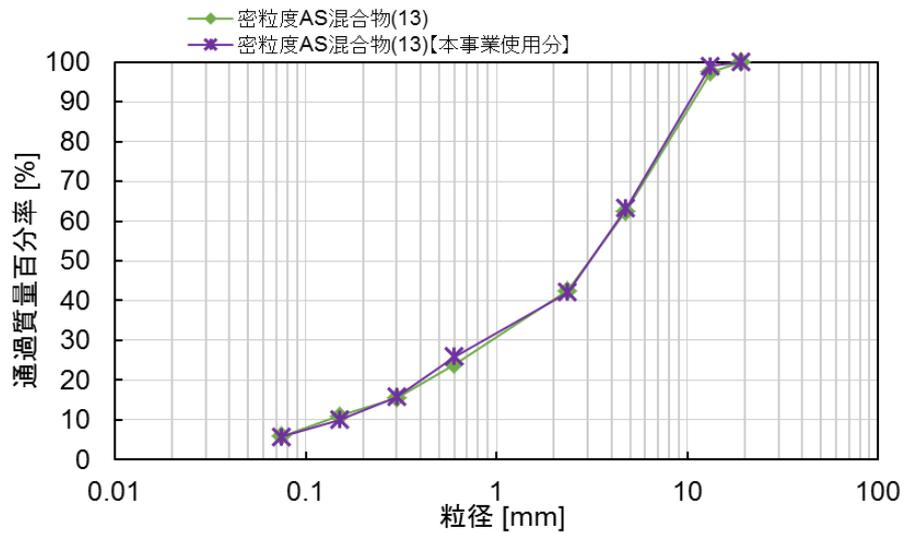


図 2-2-5 密粒度アスファルト混合物（13）の標準配合と本事業使用分の骨材粒度分布の比較

図 2-2-5 に示したとおり、本事業に用いる密粒度アスファルト混合物（13）は、標準配合品と同様の骨材粒度分布である。

また、図 2-2-6 に、粒度調整碎石（M-30）の JIS で定められた骨材粒度分布と本調査に用いる粒度調整再生碎石（RM-30）の骨材粒度分布の比較を示す。

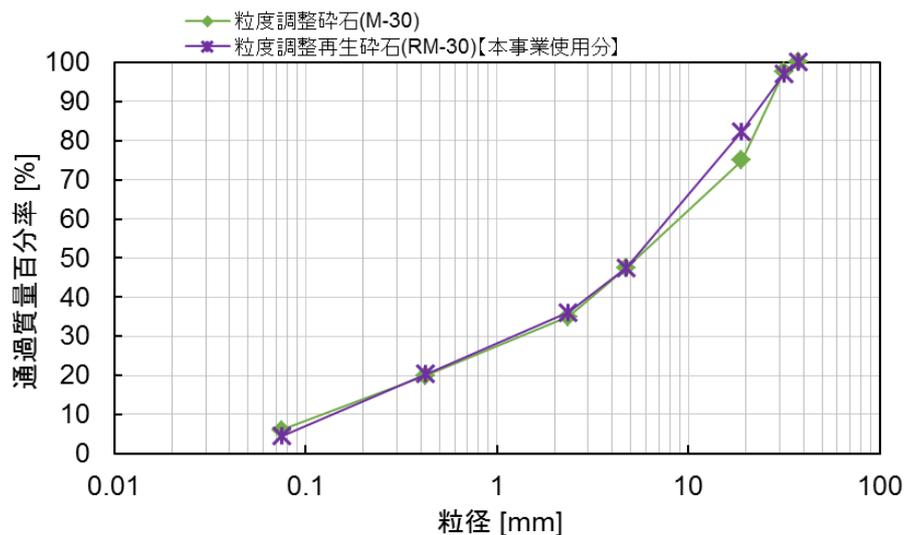


図 2-2-6 粒度調整碎石（M-30）の JIS で定められた骨材粒度分布と本事業使用分粒度調整再生碎石（RM-30）の骨材粒度分布の比較

図 2-2-6 に示したとおり、本事業に用いる粒度調整再生砕石（RM-30）は、JIS で定められた砕石とほぼ同様の骨材粒度分布である。

真砂土については、平成 29 年度に真砂土のみの条件下にて実施した実験結果と本年度の結果を比べる際に、土壌の性質がかけ離れていては比較が困難となるため、昨年度と同等品を用い、実験を実施することとした。図 2-2-7 は、本年度用いた真砂土と平成 29 年度事業で用いた真砂土の粒度分布の比較であり、昨年度とほぼ同様の粒度分布であることが確認された。

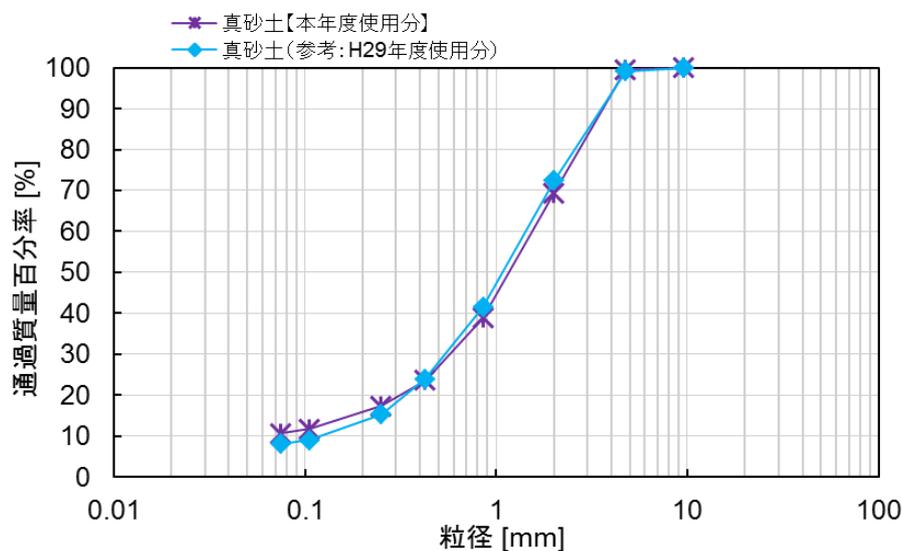


図 2-2-7 本年度用いた真砂土と平成 29 年度事業で用いた真砂土の粒度分布の比較

また、前項で示した、プライムコート及びタックコートについて、タックコートはアスファルト層については基層と表層を単層化し施工するため、塗布する必要はない。プライムコートについては本来であれば砕石層上に散布する。コート剤は液体であり通常スプレーノズルで散布するため、不均一な層となる可能性がある。本調査は舗装を施した際の水素拡散挙動について基礎的な知見を得ることが目的であるため、実フィールド試験においてはコート剤なしの条件下にて実験を行うこととした。コート剤が水素拡散挙動に及ぼす影響については、小規模試験において、コート剤を塗布した場合と塗布しない場合について実験を実施し、確認を行うこととした。

3. 水素ガス計測手法

3.1 地中水素ガス濃度の計測方法

3.1.1 センサの選定

地中における水素濃度計測は、水素センサを複数箇所に埋設し水素濃度の経時変化を計測することで、小規模容器及び実フィールド試験装置の地中模擬槽全体に亘る水素拡散挙動を把握する。本調査において、小規模容器による基礎試験では容器内を、実フィールド試験では気密ブース内を窒素ガスで満たした状態から水素を放出し、濃度計測を開始する。したがって、用いる水素センサは無酸素状態で動作する必要がある。

一般的に用いられる接触式水素ガスセンサの検知原理と特徴を表 3-1-1 に整理した。

表 3-1-1 接触式水素ガスセンサの検知原理と特徴^[2]

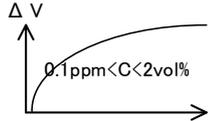
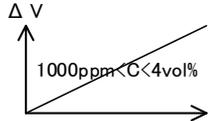
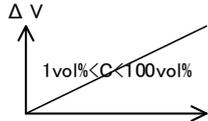
センサの名称	検知原理	特 徴	出力の濃度依存性
熱線型半導体式	○水素の金属酸化物半導体表面上での酸化反応による伝導電子の増加 ○素子表面の「分子ふるい」効果による水素選択性発現	○高感度・高選択性 ○温度・湿度依存性小 ○90%応答：～20秒	
接触燃焼式	○水素の触媒 (Pd、Pt/Al ₂ O ₃) 燃焼による素子温度上昇	○水素感度は比較的高いが選択性は無い ○温度・湿度依存性小 ○90%応答：5～10秒	
気体熱伝導式	○水素混合に伴う気体熱伝導率の変化を加熱された素子の放熱量（温度）の変化としてみる	○低感度だが水素選択性は比較的高い ○温度・湿度依存性小 ○90%応答：5～10秒	
Mg-Ni 反応式	○水素分子の吸着により変化した薄膜の光学的な光反射率、光透過率をレーザ照射により変化としてみる	○高感度・高選択性 ○温度・湿度依存性大 ○60%応答：3秒以下	現時点では定量化が困難

表 3-1-1 によれば、濃度計測に用いることができる水素ガスセンサは複数存在するものの、無酸素環境下の土壌試料内において使用できる検知原理は気体熱伝導式及び Mg-Ni 薄膜反応式の 2 種のみである。また、Mg-Ni 薄膜反応を用いた光学式センサ（水素可視化シート）は、薄膜を構成する分子への水素の吸着に伴う、薄膜の光透過率の上昇（反射率の減少）を用いて水素検知を行うものであり、水蒸気や繰返し使用による経時的な薄膜成分の劣化や土壌試料の物理的な接触による薄膜成分の剥離など、濃度変化

以外の変動成分の影響により、濃度の定量化は困難である。

したがって、本調査では、地中における水素濃度計測については、気体熱伝導式ガスセンサを採用した。本調査で用いた気体熱伝導式ガスセンサの外観と寸法を図 3-1-1 に、ガスセンサの定格を表 3-1-2 示す。

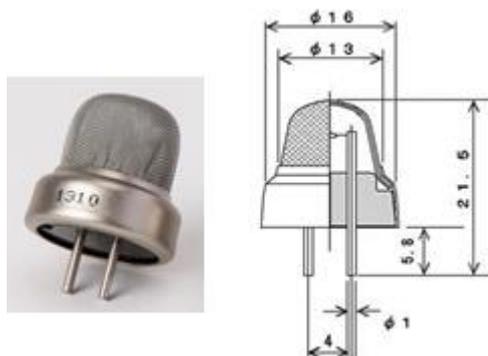


図 3-1-1 気体熱伝導式ガスセンサの外観と寸法
(株式会社ネモトセンサエンジニアリング/NAP-21A)

表 3-1-2 気体熱伝導式ガスセンサの定格

項目	仕様
印加電圧	DC1.8±0.1 V
消費電流	120～130 mA(1.8 V 印加)
使用時周囲温湿度	-10 ～+50 °C、95 %RH 以下
保管時周囲温湿度	-20 ～+60 °C、99 %RH 以下

本調査の検索範囲において、センサ素子単体で現在入手できる気体熱伝導式ガスセンサは、本製品のみであった。同製品は、二酸化炭素検知センサとして市販されている。電極への気体分子の接触に伴う温度の低下によってガス濃度を計測する本センサは、対象分子の比熱が大きいほど検出感度が向上する。したがって、二原子気体の水素を検出する場合、多原子気体の二酸化炭素の場合と比較して感度良く、速い応答で検出することができる。

3.1.2 気体熱伝導式ガスセンサによる地中水素濃度計測の性能評価

一般に、気体熱伝導式ガスセンサは、対象ガス濃度を計測するセンサと共に、環境温度による出力の変化を補正する参照用の素子（補償素子）を一对として使用し、濃度計測を行う。本調査では、センサ素子を直接土壌試料内に埋設し水素濃度を計測するため、埋設する物体の体積が小さいほど良く、環境温度変化の少ない条件において濃度計測を実施する場合、補償素子の併設を省略することができる。本調査において、気密ブース

は十分に温調がなされた室内に配置されている。気密ブース内は、実験開始前に定められた時間窒素パージを行い、その後所定の流量で水素ガスが導入するが、水素ガスは土壌試料中を拡散するため、流れの速度は非常に緩やかであることが予測された。以上の検討に照らし、各種水素放出条件において地中模擬槽における真砂土内の温度を計測したところ、室温 22.0 °C に対し 18.5 °C でほぼ変化は見られなかった。したがって、本調査では、補償素子を用いず、センサ素子単体を土壌試料中に埋設することとした。

小規模容器による基礎試験及びフィールド試験に先立ち、上記の用法に照らし、18.5 °C の環境においてセンサを土壌に埋設した状態で水素濃度計測の検量線を取得した。図 3-1-2 に高濃度域までの検量線取得結果を、図 3-1-3 に低濃度域の検量線取得結果を示す。

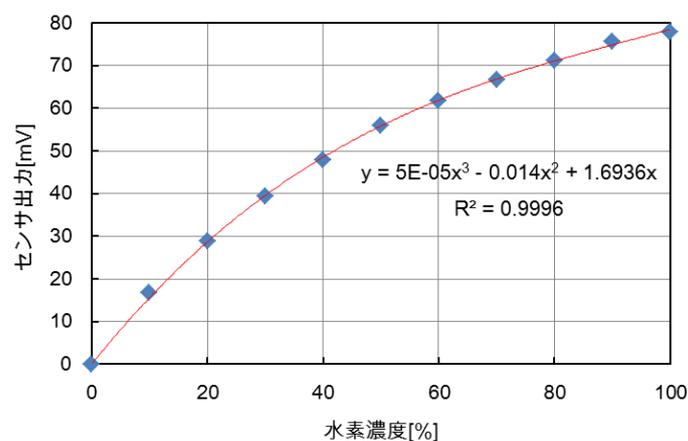


図 3-1-2 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性
(高濃度域)

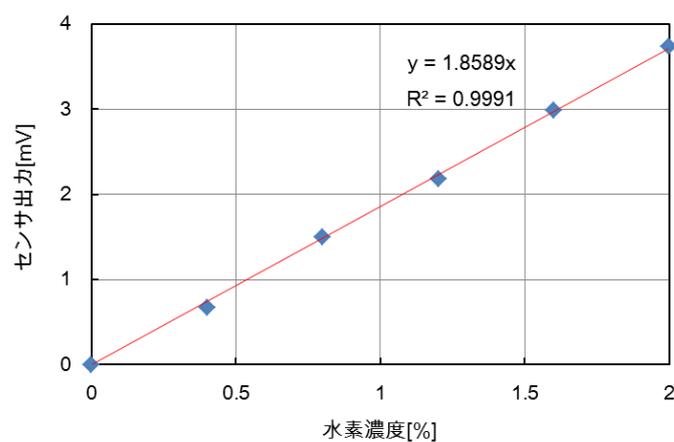


図 3-1-3 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性
(低濃度域)

図 3-1-2 に示すように、本センサは 0~100 %までの広いダイナミックレンジで水素濃度計測が可能であるが、センサ出力と水素濃度の相関は、広範囲で見るとやや線形から外れた特性を示す。したがって、本調査では、埋設する各センサ毎に取得した検量線に基づき、近似曲線の多項式を求め、水素濃度の計測を行った。

図 3-1-3 に示すように、本センサは限られた範囲で見るとセンサ出力と水素濃度は線形の相関となる。

本センサの時間分解能は、計測値の出力時に行う平均化処理回数に依存し、これらは計測値のバラツキに寄与することから、本センサの検出限界とトレードオフの関係となる。本調査では、応答速度を 5 秒として平均化処理回数を設定し、この場合の水素検出限界は S/N 比 2.0 として 0.1 %であった。

3.2 大気中水素ガス濃度の計測方法

3.2.1 レーザラマンイメージングによる水素ガス拡散挙動の可視化

本調査では、小規模容器による基礎試験における大気模擬槽及びフィールド試験における気密ブース内の水素拡散挙動の可視化及び空間濃度分布計測を行う。

ガス濃度の計測は、一般的に、地中水素濃度計測において採用した気体熱電動式をはじめ、熱線型半導体式、接触燃焼式等のガスセンサが用いられる場合が多い。これらは主に、センサ素子への対象成分の直接接触による素子の物性変化を捉えるものであるため、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、大気模擬槽にセンサを複数箇所配置する必要があり、気体がセンサ構造体へ接触することによって、観測する拡散挙動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非接触でガスの流れを可視化或いは濃度を計測する手法がある。これらは、ガス分子による散乱光や蛍光等を捉えるものであり、気体の挙動に物理的影響を及ぼすことはない。表 3-2-1 に、光学的に流れを可視化する代表的な手法を挙げる。

表 3-2-1 光計測技術に基づく気体挙動の可視化手法

計測手法・原理	対象物理量	特徴
シャドウグラフ法	温度・圧力	装置構成が容易 密度変化の輪郭の可視化
レーザー誘起蛍光法： LIF (Laser Induced Fluorescence)	温度・濃度	低濃度計測が可能 衝突失活の影響がある
レーザードップラ流速測定法： LDV (Laser Doppler Velocimetry)	流速	流速の二次元分布測定が可能
粒子画像流速測定法（ミー散乱）： PIV (Particle Image Velocimetry)	流速	微小粒子の混合技術が必要 粒子混合による影響がある
レイリー散乱	温度・濃度	雰囲気ガス分子の影響があるミー 散乱の影響がある
ラマン散乱	ストークス	分子種の特定が可能 信号が微弱
	アンチストークス	S/N 比が大きい 観測領域に制限がある

本調査においては窒素雰囲気中における水素分子を計測するため、以下の機能が要求される。

- ・ 物理量としてガス濃度計測が可能
- ・ 水素ガスと窒素ガスの濃度の分離計測が可能

このため本調査では、ガス分子のラマン散乱光を捉えるレーザーラマン分光法を用いて水素拡散挙動の可視化及び空間濃度分布計測を行った。

本手法は、レーザー光照射部及び観測部が光学的に透明であれば、本実験における気密ブース等の構造体内部の遠隔・非接触計測が可能である。本調査においては、後述する小規模容器による基礎試験における大気模擬槽及び気密ブース側壁にレーザー光透過用の石英窓を配置し、レーザー光軸に対し直角方向となる側壁面を水素のラマン散乱光を高効率で透過するアクリル材を用いて製作する又は側壁面に水素のラマン散乱光を高効率で透過するガラス材を観測窓として配置することで、気密ブース等の外部から大気模擬槽内における水素拡散挙動の非接触計測を実現する。

本計測手法の原理的現象であるラマン散乱の概念を図 3-2-1 に示す。

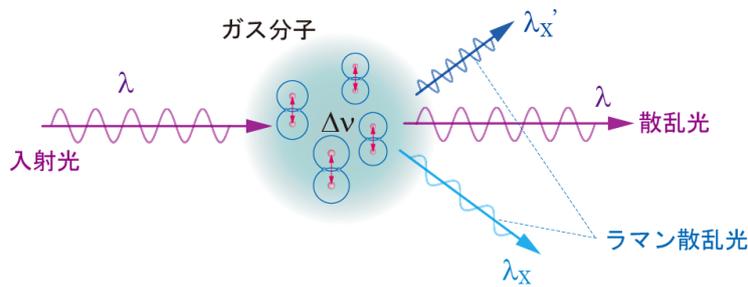


図 3-2-1 ラマン散乱の概念

ラマン散乱は分子による光の非弾性散乱の一種であり、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。入射光に対する散乱光の波長の変化量はエネルギー交換に用いる分子の内部エネルギーが固有の値を有するため、ある特定波長の光の入射に伴い、分子種毎に異なった波長の光が散乱される。これをラマン散乱光と呼ぶ。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 $\Delta\nu = \Delta E/h$ (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 3-2-2 に本調査において容器内に存在する水素、窒素について、ラマン散乱に関する各種パラメータを、図 3-2-2 に水素、窒素のラマンスペクトル例をそれぞれ示す。

表 3-2-2、図 3-2-2 に示すように、複数種の物質が混在している場合においても、単一波長のレーザー照射に伴い、各分子固有の波長にラマン散乱光が生じる。水素のラマン散乱光は入射レーザー光波長 (355 nm) に対して 60 nm 以上離れた波長に生じる。また、水素のラマン散乱光と窒素のラマン散乱光は 30 nm 以上離れた波長に生じる。このため、水素及び窒素それぞれのラマン散乱光波長に整合する光学バンドパスフィルタを用いて観測すれば、窒素分子と十分に分離して水素分子のみを検出することができる。

また、ストークス光強度は分子密度に比例するため、検出されたラマン散乱光の輝度から分子密度を計測することができる。一般に、気体のラマン散乱光強度は他の光-物質間相互作用と比較して極めて微弱であるが、水素は比較的強いラマン効果を示す分子種である。

表 3-2-2 ラマン効果に関する水素、窒素の各種パラメータ^[3]

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
X	$\Delta\nu$ [cm ⁻¹]	λ_X [nm]	(窒素 : 1)
水素 (H ₂)	4160	416.5	3.1
窒素 (N ₂)	2331	387.0	1

※ラマン散乱波長は入射波長 $\lambda=355\text{nm}$ とした場合

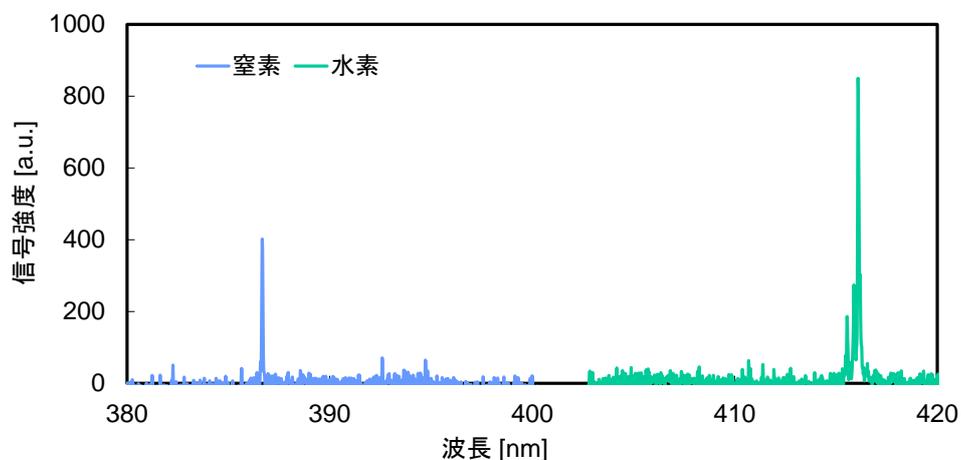


図 3-2-2 同一密度の水素及び窒素のラマンスペクトル例

3.2.2 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、水素拡散挙動を可視化する。図 3-2-3 に本調査に用いるガス可視化・濃度分布計測方法を、表 3-2-3 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、レーザ光を石英窓を介し小規模容器による基礎試験における大気模擬槽及びフィールド試験における気密ブースの地表面上 20 mm に照射し、大気模擬槽外部からラマン散乱光 (416 nm) を撮像した。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最も強く放射される。したがって、レーザ光の偏波面を鉛直方向に設定し、レーザ照射光軸に対して直角方向からラマン散乱光を広角カメラレンズにより集光する配置とし、ラマン散乱光を高効率で検出した。集光した光は、ICCD カメラにより増幅し画像として PC へ出力した。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。即ち、レーザ光をシート状に拡大し観測することで、観測領域を拡大することができる一方で、レーザ光の拡大は光子密度の低下に繋がり、計測の感度は低下する。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、観測対象に合わせ照射ビーム外形の最適化が必要である。本調査における実フィールド試験では、比較的低濃度の水素挙動を観測するため、レーザヘッドから出力されたビームを整形せずに気密ブース内へ照射し、最も高い感度設定により実験を行った。したがって、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 15 mm、レーザ光軸方向の視野については、ICCD カメラの視野によって決まる約 3.2 m となるが、実フィールド試験においては、比較的大規模空間における拡散挙動を観測するため、ICCD カメラ 2 台を配置し、それらのカメラの撮像範囲が不連続となるのを避けるため、光軸上で 2 台のカメラの視野が 0.5 m 分重なるように設置した。これにより計

5.9 m の観測領域を確保した。なお、撮像面に対し垂直方向については、レーザービームの厚み方向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ー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のラマン散乱光を窒素ガスのラマン散乱光から分離する必要がある。ここでは、中心波長 415.9 nm、半値全幅 10 nm 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、ラマンエッジフィルタを用いてレーザー光波長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 カメラのシャッター開放のタイミングをレーザー光のパルス発振と同期させ、ICCD カメラの露光時間を観測領域を考慮し 50 ns とした。

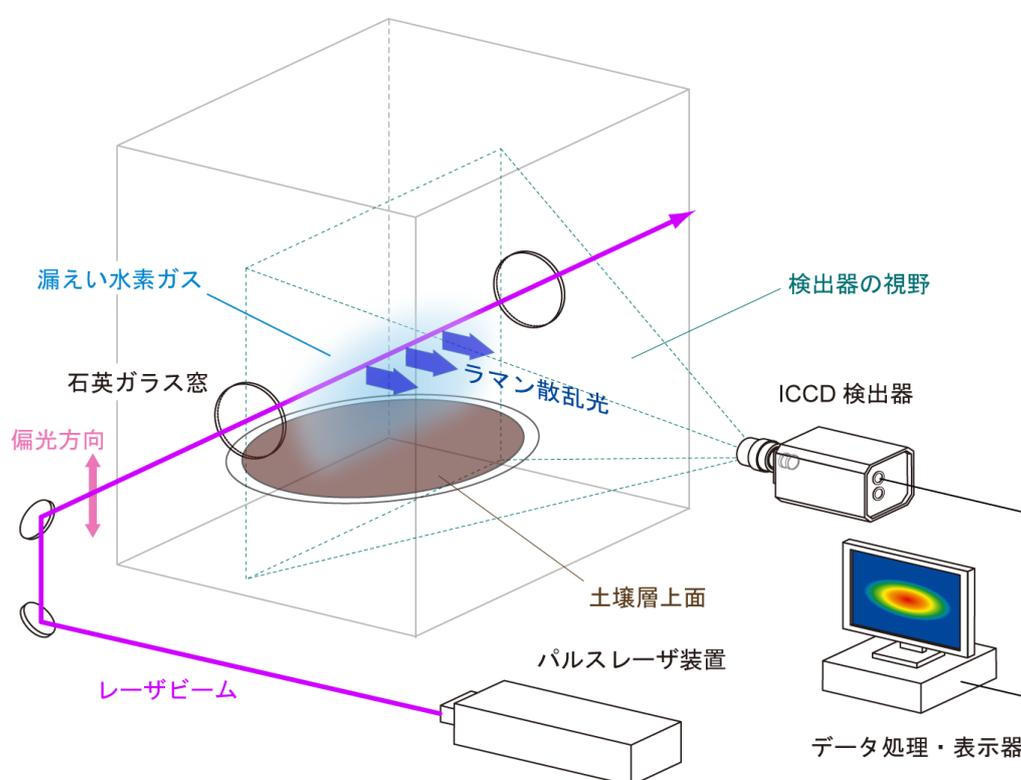


図 3-2-3 大気中における水素ガス可視化・濃度分布計測方法

表 3-2-3 水素ガス可視化・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
メーカー/型式	Quantel/CFR400
波 長	355 [nm]
パルスエネルギー	90 [mJ] (Max)
パルス幅	7 [ns]
ビーム外径	15 [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
	1024×1024 [pixel]
CCD フォーマット	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	18 mm-Gen III HBf
分解能	16 bit
カメラレンズ	
メーカー/型式	Nikon/Ai Nikkor 35 mm f/1.4S
焦点距離	35 [mm]
絞り(最大-最小)	f/1.4 f/16
水素ガス用干渉フィルタ	
メーカー/型式	Andover/415FS10-25
透過中心波長/半値全幅	415.9 [nm]/10 [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

3.2.3 ガス濃度の定量化

本計測装置において、ICCD カメラに導入されるラマン散乱光強度 P_{ij} は、

$$P_{ij} = \eta P_{0ij} K G_{ij} \Delta L N \frac{A}{r^2} \sigma e^{-2 \int_0^r [\alpha_L(r') + \alpha_H(r')] dr'} \quad (3.2.1)$$

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
- $T(r)$: 大気透過率
- α_L : レーザ波長消散係数
- α_H : ラマン波長消散係数

である。添字 i, j は ICCD カメラにおけるフォーマット $i \times j$ の CCD 検出器の単一素子の座標を示す。

式(3.2.1)において、本調査では、観測領域やレーザの伝搬距離が数メートル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。したがって、減衰項の乗数を 0 即ち、減衰項を 1 として差し支えない。また、他のパラメータは、試験時の容器材質や可視化装置の配置、構成部品が決まれば、単一の CCD 素子に対しては全て定数となるものである。しかし、主にレーザ光強度や、レンズの収差、CCD 素子感度の個体差等に依存して、感度には空間的な分布が生じる。これを補正する手段として、本調査では、小規模容器による基礎試験では事前に既知濃度の水素ガスによる画像を、実フィールド試験においてはラマン散乱断面積比が既知（表 3-2-3）の窒素ガスによる画像を取得しておき、計測された画像を既知濃度の画像で除することにより、感度分布が補正された水素濃度分布画像を得る手法を用いた。

図 3-2-4 に本装置において、観測部に設置したガスセル内の水素ガスを可視化し、セル内水素濃度を変化させた際の水素ラマン信号強度の変化を示す。計測値はパルス 30 shot（時間分解能 1 fps）の積算結果とし、水素ラマン画像の中央 5×5 pixel の平均値とした。

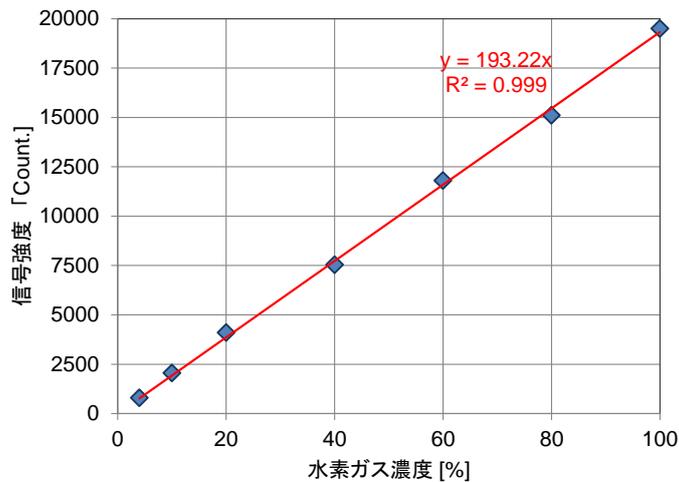


図 3-2-4 ラマン散乱光信号強度の水素濃度依存性

ラマン散乱光信号と水素濃度は良好な線形の相関を示し、0～100%の広い濃度域において線形性が維持されている。高濃度側の計測の限界は、CCD素子の飽和を示す約60000カウントまでとなる。低濃度側の検出限界は、撮像に伴うノイズ信号により決定し、本計測条件（積算回数）ではノイズ信号強度が20カウント以下であるため、S/N比2.0として、検出限界は約0.2%となる。また、ラマン信号から得られる画像は前述のとおり、主に幾何光学的要因に由来する感度分布をもっており、画像の中心から外側へ向け感度が低下する。用いるカメラレンズや光学フィルタ等の条件により、中心部に対し30%程度の感度低下が生じる場合がある。一方で、ノイズ成分は、主に電氣的要因に由来するため、観測領域全体に亘り比較的均一に生じる。これらを勘案し、本装置におけるICCDカメラ観測領域全域に亘っての検出限界は0.4%程度とするのが妥当である。このように、本手法では事前に取得した検量線からガス濃度を特定することができる。なお、本手法では、観測対象や装置の配置が同一であれば、同一の検量線を用いることができるため、事前に取得した検量線を用いて濃度計測に反映させた。

本計測において、カメラレンズに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・増倍された後、蛍光面において再度光に変換されCCD素子によって検出される。ICCDカメラによる微弱光の検出では、計測環境に関わらずこれらの検出過程において、離散的なノイズ成分が恒常的に発生する。したがって、良好な可視化画像及び濃度分布の取得には、離散したノイズの影響を低減し、且つラマン散乱光の空間分解能及び輝度分解能を損なわないフィルタ処理方法が必要となる。

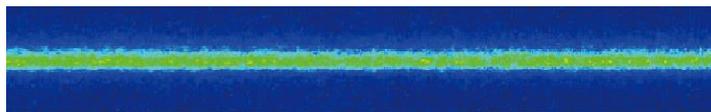
ここでは以下の手法により水素ガスの空間濃度分布を評価した。まず、I.I.によるノイズ成分を除去するために、取得画像に空間的な平滑化処理として5×5ガウシアンフィルタを適用した。図3-2-5に用いたガウシアンフィルタのパラメータを示す。

$\frac{1}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{6}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{1}{256}$
$\frac{4}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{4}{256}$
$\frac{6}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{36}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{6}{256}$
$\frac{4}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{4}{256}$
$\frac{1}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{6}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{1}{256}$

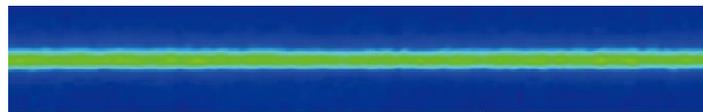
図 3-2-5 5×5 ガウシアンフィルタマスクパラメータ

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 3-2-6 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 3-2-6(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 3-2-6(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。

以上の手法を用いて、ガスのラマンイメージから濃度分布の定量化を行った。これによる本試験における濃度分布計測の性能は、検出限界（水素）0.1%、時間分解能 30 秒である。



(a) 水素ガスのラマン散乱光画像（フィルタ前）



(b) 水素ガスのラマン散乱光画像（フィルタ後）

図 3-2-6 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

4. 透気係数及び拡散係数の計測手法

本章では、小規模容器による基礎試験及び実フィールド試験の地中模擬槽を構成する各層の地質パラメータである透気係数及び拡散係数の計測手法について述べる。空隙率を含め、実験において得られた透気係数及び拡散係数のデータを用いて、CFD シミュレーションを実施し、実験結果とシミュレーション解析結果を比較して再現性を評価する。また、小規模容器による基礎試験で用いた真砂土とアスファルトの透気係数及び拡散係数計測結果を基に予備解析を実施し、実フィールド試験の水素拡散挙動を予測することにより、水素センサ埋設点の最適化を実施する。

4.1 土壌試料の透気係数計測

4.1.1 透気係数計測装置の設計製作

図 4-1-1 に透気係数計測装置の構成を、図 4-1-2 に製作した装置の外観を示す。

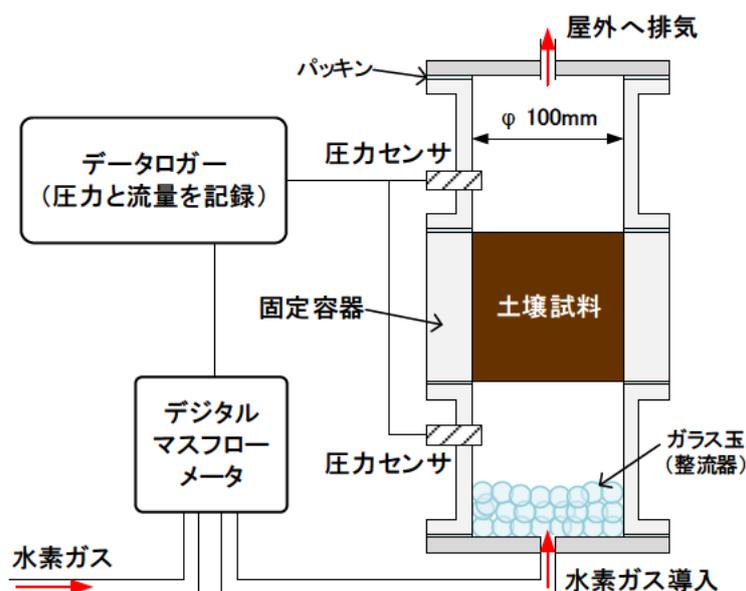


図 4-1-1 透気係数計測装置の構成

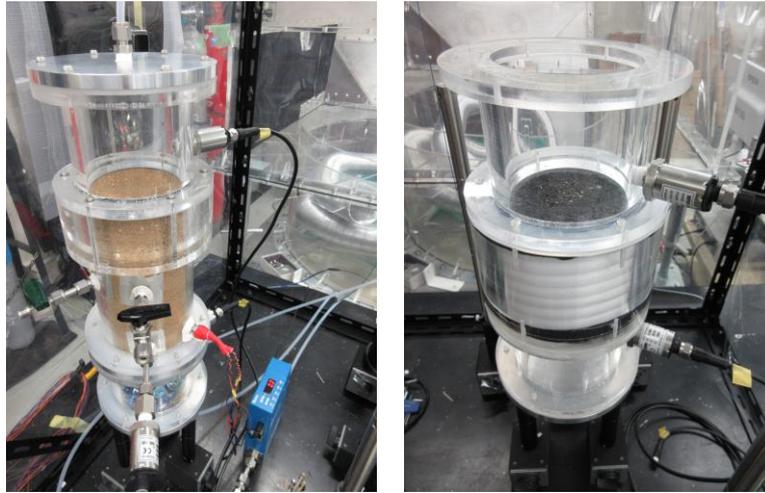


図 4-1-2 透気係数計測装置の外観

(左：真砂土透気係数計測時 右：アスファルトコア透気係数計測時)

計測容器は内径 $\phi 100$ mm の円筒形、アクリル製で、土壌試料通過前後の水素ガスの圧力を圧力センサ（計測レンジ：0～20 kPa）で、試料を通過する水素ガスの流量を流量計（デジタルマスフローメータ、計測レンジ：0～20 L/min）で計測し、データロガーで記録した。土壌試料は、アクリル製の固定容器に充填し、上下の計測容器とネジ止めし連結した。各容器間にはパッキンを入れ、水素ガスが漏れないように気密した。下部の容器には、水素ガスの流れを均一にするために、ガラス球（ビー玉）を高さ約 50 mm 充填した。

表 4-1-1 に透気係数計測に用いた機器の仕様を示す。

表 4-1-1 透気係数計測に用いた機器の仕様

名称	型式（メーカー）	主な仕様
レギュレータ	IR-1B (ヤマト産業)	低圧水素用 1次側最高使用圧 0.5 MPa 2次側最高使用圧 0.03 MPa
流量計 (水素用)	8500MM-0-2-1/20SLM (KOFLOCK)	流量レンジ：0～20 L/min センサ方式：熱式巻線センサ 測定精度： $\pm 1.0\%$ FS
圧力センサ	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ：0～20 kPa センサ方式：感圧素子 測定精度： $\pm 0.35\%$ FS
データロガー (データ収集)	Midi LOGGER GL820 (GRAPHTEC)	電圧測定範囲：20mV～50V、1-5 V/FS

4.1.2 透気係数計測方法

透気係数は、試料を透過するガスの流量と、透過前後でのガスの圧力差を計測し、以下の式により算出する。

$$k = -\frac{Q \cdot \mu}{A \cdot \frac{dp}{dx}} \quad (4.1.1)$$

k : 透気係数 [cm²]

Q : 流量 [cm³/s]

μ : ガス粘性係数 [Pa·s]

A : 試料断面積 [cm²]

dp/dx : 圧力勾配 = 圧力差 [Pa] / 試料長さ [cm]

実際の計測は以下の手順で行った。

①計測容器内を窒素でパージする。

②水素を流し、流量が一定になり安定するまで待つ。

③水素の流量を変化させ、圧力と流量の変化をデータロガーで記録する。

(2 L/min、5 L/min、10 L/min を基本に3段階程度変化させた。変化させる際には、流量が安定してから最低 10 秒程度データを取り、平均化した値を用いて透気係数を算出した。)

④ロガーのデータをもとに PC 上で計算を行い式(4.1.1)に基づき、透気係数を算出する。

4.2 土壌試料の拡散係数計測

本節では、土壌試料の拡散係数の計測について述べる。計測装置及び拡散係数の算出方法については、遅沢省子氏「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用」^[4]、川本健氏 他「Gas Transport Parameters in the Vadose Zone : Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles」^[5]他^{[6]-[9]}を参考に実施した。

4.2.1 拡散係数計測装置の設計製作

拡散係数計測装置の構成を図 4-2-1 に、外観を図 4-2-2 に示す。

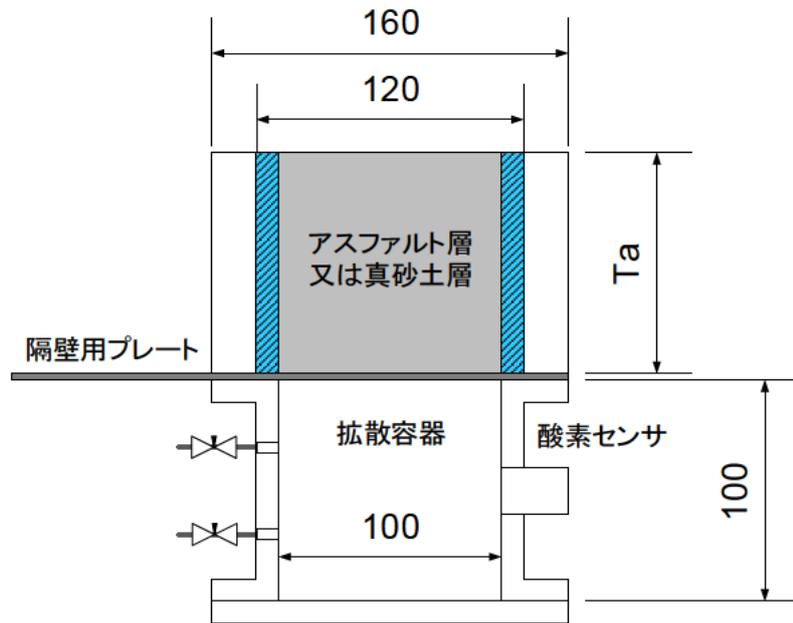


図 4-2-1 拡散係数計測装置の構成



図 4-2-2 拡散係数計測装置の外観

装置は窒素で置換した拡散容器と試料容器を接続し、拡散容器内にて、試料を透過し拡散する酸素濃度を計測する構造とした。アクリル製の試料容器部、拡散容器部、及びそれぞれの容器を遮断隔壁用プレートから成り、隔壁用プレートを引き抜くことにより遮断されている試料容器と拡散容器を一体化させた。試料容器は円筒形であり、真砂土用は内径φ100 mm、容器長 200 mm、アスファルト舗装用は内径φ120 mm、容器長 25 mm、100 mm、150 mm であり、後述する小規模容器による基礎試験装置に接続可能な形状とした。底部には土壌試料の落下防止のパンチングメッシュを敷設し、リング状のステンレス金具によって固定した。拡散容器の内径はアスファルトコア径と同径のφ100 mm であり、真空グリスを塗布後、上記の 2 つの容器の間に隔壁用プレートを挟み、それぞれの容器内の空間を隔離した状態でボルトにより固定した。

拡散容器には酸素ガスセンサと窒素置換用パージラインを設置した。窒素流出側にはバルブの操作時間を確保するために、拡散容器への酸素の逆流を遅延させるため配管を約 5 m 接続した。酸素濃度センサには光明理化学工業製 OC-6B (φ2.0×2.08 cm) を用いた。この計器はガルバニ電池式の酸素ガスセンサであり、計測範囲 0～100%、90%応答が 10 秒以内である。表 4-2-1 に拡散係数計測装置に用いた機器の仕様を示す。

表 4-2-1 拡散係数計測装置に用いた機器の仕様

名 称	型 式 (メーカー)	主な仕様
酸素ガスセンサ	OC-6B (光明理化学工業)	検知範囲：0～100 % センサ方式：ガルバニ電池式 応答時間：90 %10 秒以内
データロガー (データ収集)	Midi LOGGER GL820 (GRAPHTEC)	電圧測定範囲：20mV～50V、1-5 V/FS 熱電対測定範囲：-200<TS≤1370 °C 湿度測定範囲：0～100 %

4.2.2 拡散係数計測方法

(1) 計測手順

- ① 試料を試料容器に充填する。
- ② 真空グリスを塗布した試料容器と拡散容器を、隔壁用プレートを容器間に挿入した状態で接続し、それぞれの容器を隔離する。
- ③ 拡散容器内に窒素ガスを流入させ、酸素ガス濃度が 0 %になるまで容器内を窒素ガスで緩やかに置換する。
- ④ 酸素ガス濃度が 0 %となったことを確認後、拡散容器内圧と大気圧との間に差圧が発生することを防ぐため、流出側を大気解放した状態で、窒素流入側のパージラインを閉じ、その後、流出側の順にパージラインのバルブを閉じる。
- ⑤ 置換後、拡散容器内の気流が落ち着くまで待つ。

- ⑥ 隔壁用プレートを引抜き、試料を通過して拡散する酸素を拡散容器に接続したセンサにて計測する。
- ⑦ 酸素センサの濃度値が大気中の酸素濃度まで到達した時点、若しくは、解析に十分な点数のデータが取得できた時点で計測を終了する。

(2) 拡散係数の算出

拡散法により、拡散量 N は式(4.2.1)で与えられる。

$$N = -D_e \frac{dC}{dZ} \quad (4.2.1)$$

D_e : 自由大気中の拡散係数^[10]

C : ガス濃度

Z : 任意深度

土壌試料の上端における O_2 濃度が常に大気中に等しく、また拡散容器内ではガスは速やかに混合し濃度差が生じないと仮定すると、土壌試料の拡散係数 D_e を含む式(4.2.2)が近似的に成り立つ。

$$\frac{C(t) - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{\exp(-D_e \alpha_1^2 \cdot t / \theta_a)}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \quad (4.2.2)$$

C : 酸素濃度

C_0 : 初期時間における拡散容器内の酸素濃度

$C(t)$: 時刻 t における拡散容器内の酸素濃度

C_i : 大気中の酸素濃度

L_S : 試料容器の長さ

L_A : 拡散容器の長さ

θ_a : 土壌試料の気相率 (空隙率)

α_1 : 計算定数

α_1 は式(4.2.3)を満たす α_n の 1 番目の正の根である^[11]。

$$\alpha \tan(\alpha \cdot L_S) = \theta_a / L_A \quad (4.2.3)$$

式(4.2.2)は、両辺に自然対数を取ることで以下のように変換される。

$$\ln \frac{C(t) - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{D_e \alpha_1^2}{\theta_a} t + \ln \left[\frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{1}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \right] \quad (4.2.4)$$

式(4.2.4)の右辺第 2 項は時間変化しない定数項であるため、式(4.2.4)の左辺と時刻 t の間には勾配 $D_e \alpha_1^2 / \theta_a$ の直線関係が成立する。この勾配は任意の時刻 $t_1 \sim t_2$ ($t_1 < t_2$) 間の時間差と、それぞれの時刻における式(4.2.5)の左辺値の差から以下のように求められる。

$$\frac{D_e \alpha_1^2}{\theta_a} = \frac{\ln(C_i - C(t_2)) - \ln(C_i - C(t_1))}{t_2 - t_1} \quad (4.2.5)$$

t_1, t_2 : 任意時間 ($t_1 < t_2$)

式(4.2.5)を D_e について整理し、各パラメータに計測値を代入すれば、土壌試料の拡散係数が求められる。

D_e は温度や気圧、対象とするガスの種類などによって異なるため、試料中の拡散しやすさを表す指標としては一般に、同じ温度・気圧条件下での自由大気中の拡散係数 D_a に対する比である相対拡散係数 D_e / D_a で示すことが多い。これを求めるため、 D_a を式(4.2.6)で求める。

$$D_a = D_0 \cdot \frac{1013}{P} \cdot \left(\frac{T}{273.15} \right)^n \quad (4.2.6)$$

D_0 : 標準状態における自由大気中の拡散係数

D_a : 拡散係数 (相互拡散係数)

P : 計測時の気圧

T : 計測時の温度

(3) 計測方法の妥当性

本計測手法の妥当性を評価するために、中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ (ユニチカ社製 UB-2022LN)、 $\phi 512 \mu\text{m}$ (不二製作所社製 FGB-35) のガラスビーズを土壌試料として拡散係数の計測を行った。試料容器長は 150 mm、試料容器内の空隙率は 0.39 とし、複数回同じ条件の計測を行うことで、実験装置の再現性の確認を行った。図 4-2-3 に拡散係数計測における酸素濃度の経時変化事例、図 4-2-4 に酸素濃度変化量の直線回帰事例、表 4-2-1、表 4-2-2 に拡散係数計測結果をそれぞれ示す。

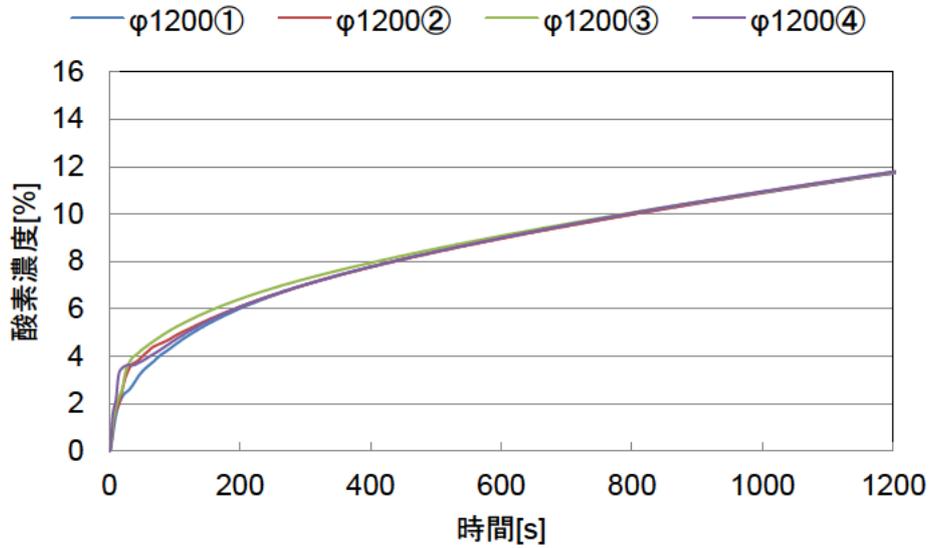


図 4-2-3 拡散係数計測における酸素濃度の経時変化事例

図 4-2-3 に示すとおり、拡散係数の計測では、土壌試料と拡散容器が接続された瞬間からの拡散容器における酸素濃度の経時変化データが得られるが、最初期は隔壁用プレートの引き抜きによる拡散容器内への空気の流入が起こるため、正確な酸素濃度の上昇値を得ることが難しい。そのため、計測開始最初期のデータはサンプルから除外する。また、拡散容器中の酸素濃度が大気中の酸素濃度まで到達した場合は、到達直前以降のデータも併せて除外する。

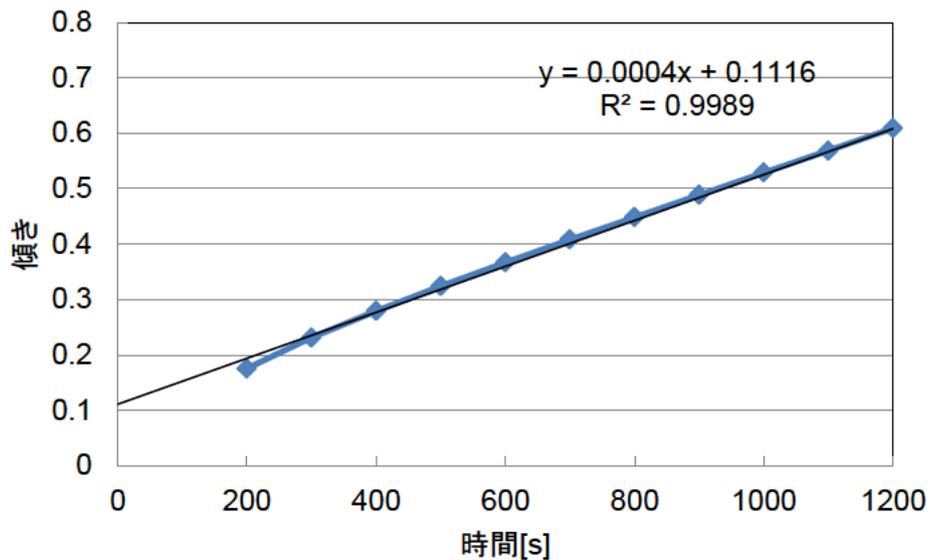


図 4-2-4 酸素濃度変化量の直線回帰事例
(ガラスビーズ中心粒径φ1200 μm、試料容器長 150 mm)

次に、図 4-2-4 に示すとおり、得られた酸素濃度のデータから、ある 2 点の時間における酸素濃度の変化量をプロットし直線回帰を行い、その直線の勾配を求める。勾配を求めるに当たり、前述の除外するデータ範囲を除いた状態で近似曲線を求める。直線回帰により求めた勾配と、試料容器の長さ L_s 、拡散容器の長さ L_A 、試料の空隙率 θ_a から、式 (4.2.3) を用いて計算定数 α_1 を算出する。酸素の拡散係数 D_e (O_2) は得られた計算定数 α_1 と式 (4.2.5) を用いて求めることが可能となる。算出した酸素の拡散係数と標準状態における自由大気中の酸素の拡散係数 D_0 (O_2) から試料の相互拡散係数 D_e/D_0 を算出し、相互拡散係数と自由大気中の水素の拡散係数 D_0 (H_2) より、対象の試料における水素の拡散係数 D_e (H_2) を導出する。計算定数 α_1 は、陽解的に求めることができないため、収束計算を行って導出する。

表 4-2-1 拡散係数計測結果 (再現性確認)
(ガラスビーズ中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ 、試料容器長 150 mm)

回数	相互拡散係数	拡散係数 [m^2/s]
1	0.3986	2.8304E-05
2	0.3853	2.7354E-05
3	0.3924	2.7860E-05
4	0.3996	2.8373E-05

表 4-2-1 に示すとおり、中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いた複数回の計測結果について良好な再現性が得られている。変動係数は 0.0168 であった。

表 4-2-2 拡散係数計測結果 (再現性確認)
(ガラスビーズ中心粒径 $\phi 512 \mu\text{m}$ 、試料容器長 150 mm)

回数	相互拡散係数	拡散係数 [m^2/s]
1	0.3607	2.5610E-05
2	0.3401	2.4145E-05
3	0.3540	2.5135E-05
4	0.3491	2.4785E-05

表 4-2-2 に示すとおり、中心粒径 $\phi 512 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いた複数回の計測結果について良好な再現性が得られている。変動係数は 0.0247 であった。拡散係数は理論的には土壌試料の空隙率にのみ依存する値であり、ガラスビーズの中心粒径が変化しても空隙率が等しい場合同じ値を示すが、これについても概ね実験結果と一致している。

次に、中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いて、拡散係数の試料容器長依存性を確認した。試料容器長は50 mm、100 mm、150 mm、300 mmとし、試料容器内の空隙率は0.39とした。実験結果を表4-2-3に示す。

表 4-2-3 拡散係数計測結果（試料容器長依存性確認）
（ガラスビーズ中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ ）

試料長 [mm]	相互拡散係数	拡散係数 [m^2/s]
50	0.3939	2.7966E-05
100	0.3829	2.7182E-05
150	0.3986	2.8304E-05
300	0.4012	2.8482E-05

表4-2-3に示すとおり、中心粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いた試料容器長依存性確認計測の結果についてどの条件においてもほぼ同じ値になる結果が得られている。変動係数は0.0206であった。前述のとおり、拡散係数は理論的には土壌試料の空隙率にのみ依存する値であり、試料容器長が変化しても空隙率が等しい場合同じ値を示すが、これについても実験結果と一致している。

実験結果から計測方法の妥当性を考える上で、まず、土壌中の気体の拡散に係る研究において、これまでに提案されている主な実験式・半理論式の事例を表4-2-4に示す。ここにおいて D は拡散係数、 D/D_0 は相互拡散係数、 V_a は気相率（空隙率）を示す。

表 4-2-4 拡散係数の実験式及び半理論式の事例

No.	文献筆頭著者	発表年	関係式	相関関係	計算結果事例 気相率($V_a=0.39$)
1	Penman	1940	$\frac{D}{D_0} = 0.66V_a$	線形	0.257
2	Van Bavel	1952	$\frac{D}{D_0} = 0.61V_a$	線形	0.238
3	Wesseling	1962	$\frac{D}{D_0} = 0.9V_a - 0.1$	線形	0.251
4	Buckingham	1904	$\frac{D}{D_0} = V_a^2$	非線形	0.152
5	Marshall	1959	$\frac{D}{D_0} = V_a^{\frac{3}{2}}$	非線形	0.244
6	Millington and Quirk (MQ)	1960	$\frac{D}{D_0} = V_a^{\frac{4}{3}}$	非線形	0.285

拡散係数 D は気相率（空隙率）のみを変数とする関数として整理されている。実際の土壌では、液相（水分）の影響や気相孔隙の形状・分布など気相率以外の量的・質的なパラメータを考慮する必要性が指摘されているものの、様々な土壌について気体拡散計測例を蓄積するような研究は少ないのが現状である。仮に理想的な条件として、ガラスビーズ層を想定（粒径：一定値、液相なし、気相率（空隙率）：0.39）して相互拡散係数を試算すると、最大値が 0.285、最小値が 0.152 となり、実験式・半理論式による相互拡散係数の推定結果は比較的広範囲に分布する。

土壌試料としてガラスビーズを用いて、拡散係数の解析モデルを用いた推算値と実験結果を比較した結果を図 4-2-5 に示す。ここでは中心粒径 $\phi 512 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いて実験を行い、空隙率は 0.39 とした。ガラスビーズに用いられているガラスの比重（メーカー公表値：実験により検証済）を用いて、実験においても正確に空隙率を再現した。

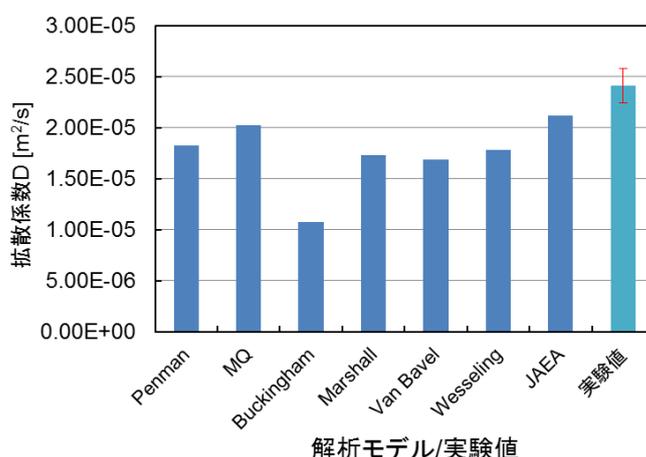


図 4-2-5 拡散係数の解析モデルを用いた推算値と実験結果の比較

図 4-2-5 に示したとおり、実験結果を見ると、いずれの推算値よりもやや大きい値 ($2.41 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) を示した。また、再現性評価試験により確認した拡散係数計測装置の計測結果のバラツキは $\pm 7\%$ であり、これらを加味しても、推算値との大幅な差異はないと言える（最大+20%程度）。

ここで、平成 28 年度事業の際に用いた図 4-2-6 に示す 3 次元軸対称モデルにて、シミュレーション解析により拡散係数の感度解析を実施した。表 4-2-5 に解析条件を示す。本解析は拡散係数の違いが水素拡散に及ぼす影響を確認することが目的であるため、表 4-2-5 に示したとおり、拡散係数以外のパラメータは一定とし実施した。Case2 の拡散係数は表 4-2-3 に示した粒径 $\phi 1200 \mu\text{m}$ 、試料長 150 mm の条件にて得られた実測値であり、Case1 の拡散係数は拡散係数計測装置改良途中で得られた Case2 に対し約 25%小さい値を適用した。

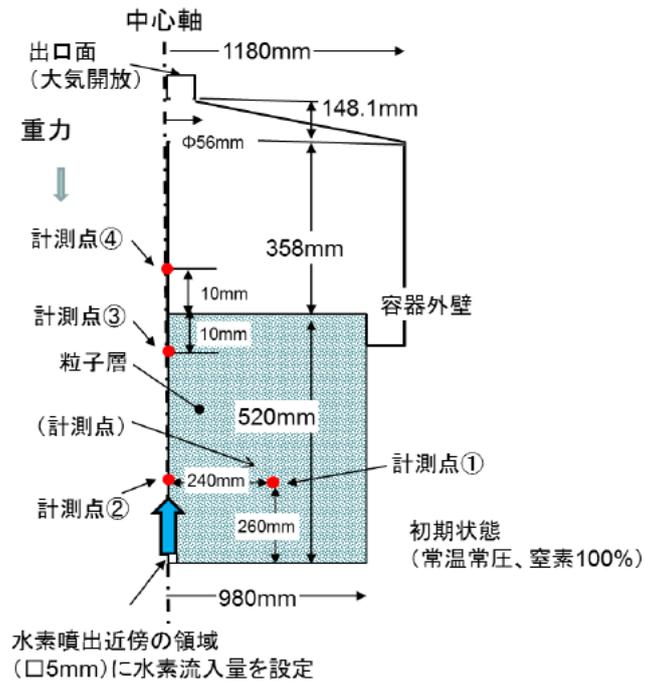


図 4-2-6 拡散係数感度解析モデル形状

表 4-2-5 拡散係数感度解析の解析条件

項目	Case1	Case2
拡散係数 [m^2/s]	2.138E-05	2.830E-05
透気係数 [m^2]	1.331E-09	
空隙率 [%]	39	
水素ガス流量 [L/min]	8.58	
水素供給圧力 [kPa]	2.9	
放出口	$\phi 1\text{ mm}$	

以上の条件にて実施した拡散係数感度解析結果を図 4-2-7、4-2-8 に示す。図 4-2-7 は Case1 及び Case2 における水素放出開始から 100 s 後と 300 s 後の水素濃度分布であり、図 4-2-8 は Case1 及び Case2 における計測点①～④（グラフ凡例において point-1～point-4 と表記）の水素濃度の推移である。

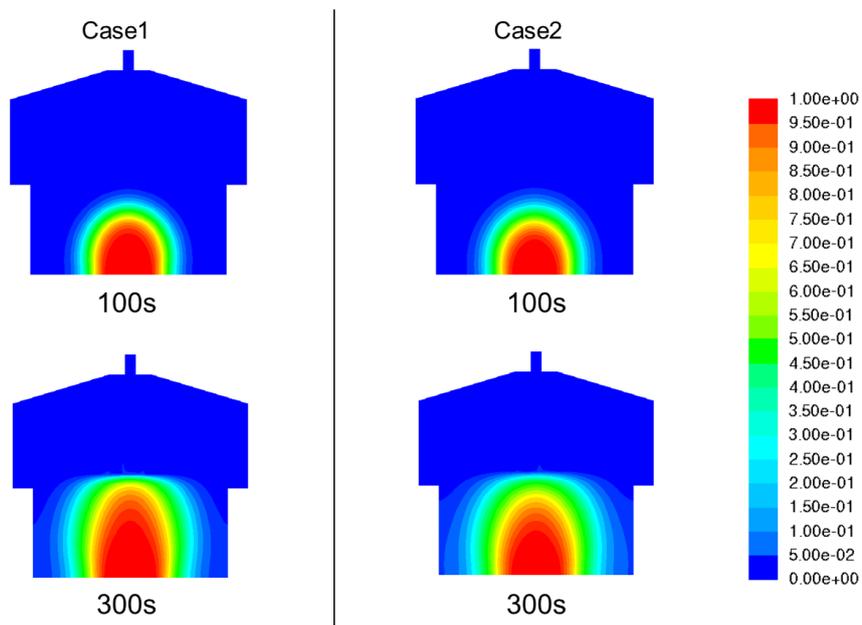


図 4-2-7 拡散係数感度解析 水素濃度分布

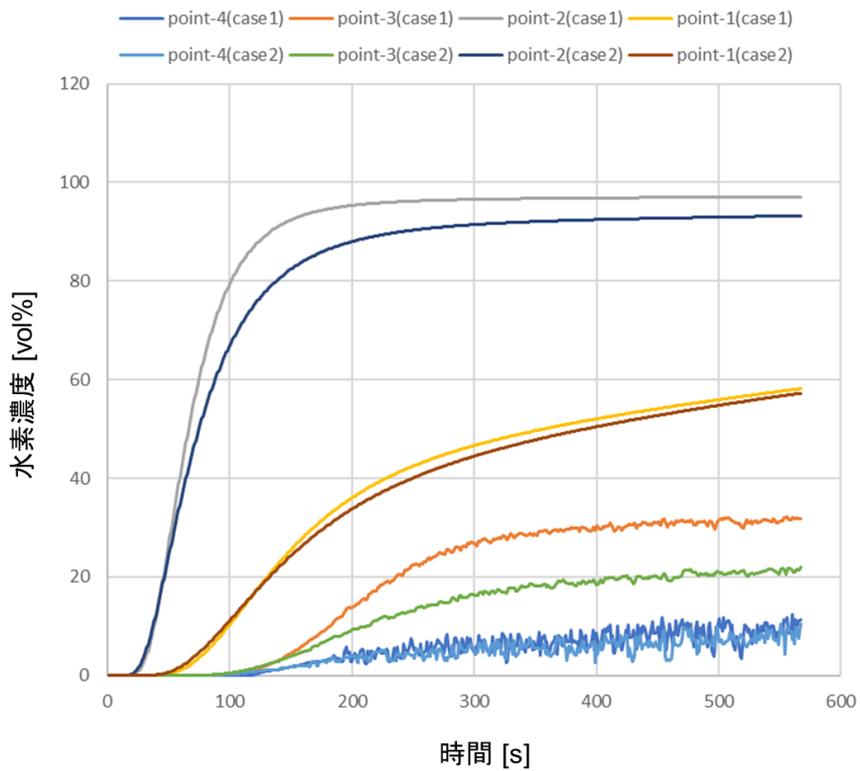


図 4-2-8 拡散係数感度解析 各計測点の濃度推移

図 4-2-7 及び 4-2-8 に示したとおり、ガラスビーズを用いた場合において拡散係数が 25 %異なると、放出口直上において 10 %の誤差が発生する位置があるものの概ね濃度値が一致し、立ち上がり時間などの濃度上昇の傾向については両者がほぼ一致する結果が得られた。

したがって、いずれの拡散係数の解析モデルと比較するかにもよるが、本手法による実測値を用いることにより大幅な拡散挙動の違いは生じないものと考えられる。

以上の結果から本調査に用いる拡散係数の計測方法の妥当性を確認した。実フィールド試験において行う拡散係数計測については、敷設するアスファルト舗装の厚みが 150 mm であるため、試料容器長 150 mm を用いた。

5. 小規模容器による基礎試験

本章では、アスファルト舗装の有無とその厚みが水素拡散挙動に及ぼす影響を明らかにすること及び実フィールド試験における諸条件の検討を目的として、一般的な埋設土及びアスファルト舗装を充填した容器に水素を放出し、小規模容器による基礎試験を行ったので、その方法及び結果について述べる。

5.1 小規模試験装置と実験方法

5.1.1 小規模試験装置の設計製作

本試験において、アスファルト舗装の有無とその厚みが水素拡散挙動に及ぼす影響を明らかにするための小規模試験装置を設計製作した。装置の構造を図 5-1-1 に、装置外観を図 5-1-2 に、小規模試験で使用したアスファルトコアの外観を図 5-1-3 にそれぞれ示す。

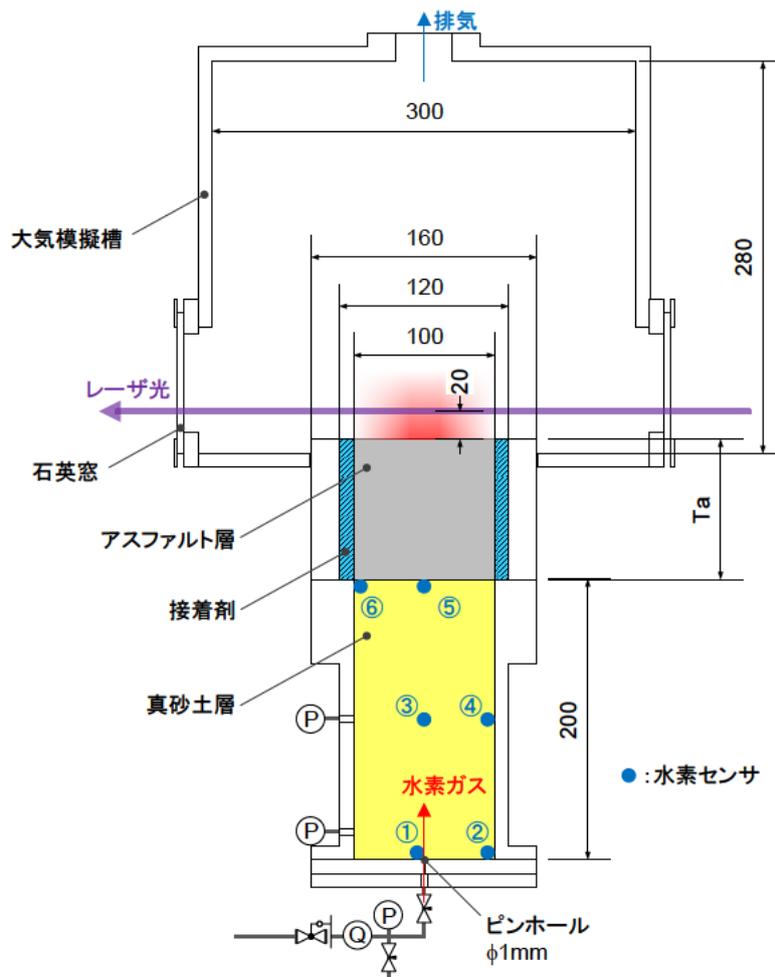


図 5-1-1 小規模試験装置の構造

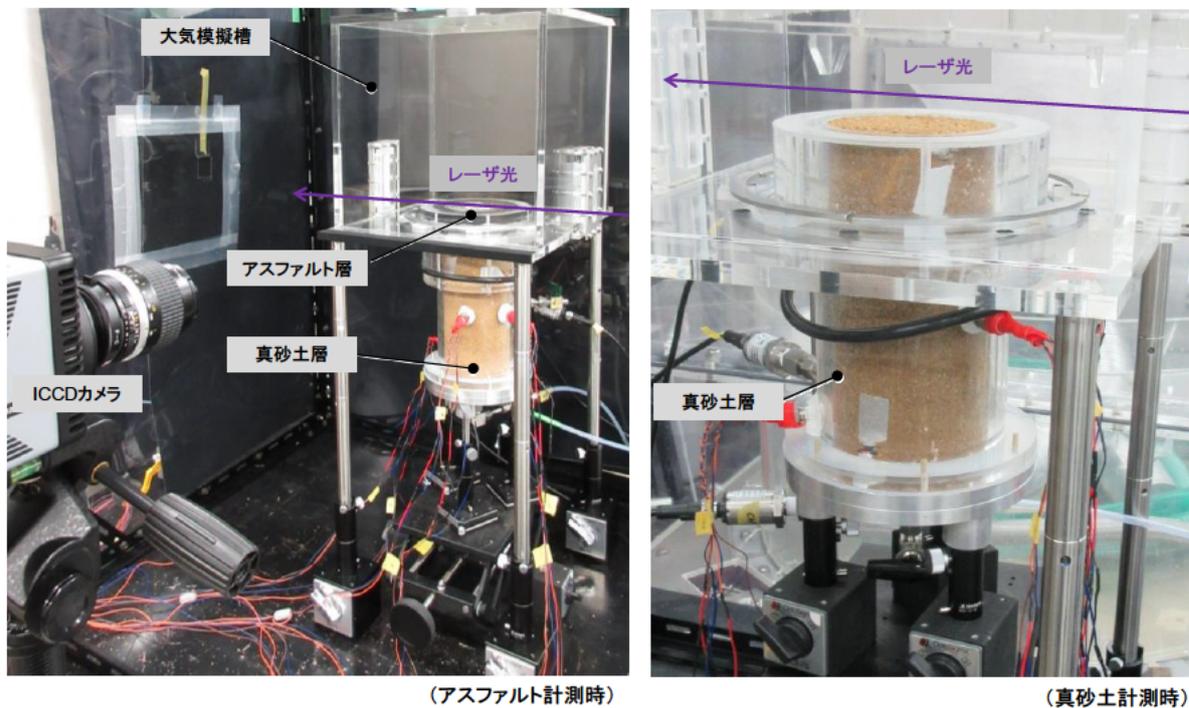


図 5-1-2 小規模試験装置の外観



図 5-1-3 アスファルトコアの外観 (直径 ϕ 100mm)
 (厚さ (左から) 25 mm (アクリル容器固定後)、100 mm、
 150 mm (側面気密処理後))

試験装置は大気模擬槽とアスファルト層と真砂土層から構成される。大気模擬槽には石英窓を配置し、石英窓を介して大気模擬槽中にレーザー光を照射することにより、真砂土若しくはアスファルトから染み出す水素の拡散挙動の光計測を行う。内寸は縦 300 mm × 横 280 mm × 高さ 280 mm であり、上面に排気用の配管を接続した。アスファルト層

はアスファルトコアを固定する内径 $\phi 120$ mm の円筒形の亚克力容器から成り、厚み違いのアスファルトを固定するため、容器の高さを 25 mm、100 mm、150 mm とした。アスファルトコアは直径 $\phi 100$ mm であり、側面をブチルゴム系テープで気密処理後、変性シリコンコーキング剤により固定した。真砂土層は両フランジ付の内径 $\phi 100$ mm の円筒形の亚克力容器から成る。側面には圧力センサ配管用開口 2 箇所及び真砂土内に埋設する水素センサ用の貫通穴 3 箇所を設けた。底部には水素放出口（ピンホール $\phi 1$ mm）を設け、土壌試料の粒がピンホールを塞ぐことのないよう、目開き 0.28 mm の SUS304 製メッシュを取付けた。放出口直近に流量計及び圧力計を配置した。放出口直下には三方バルブを配置し、バルブの操作により水素、窒素の供給及び停止を行う。アスファルト層及び真砂土層は、組み替え可能な構造とし、これらを組み替えることにより、アスファルト有無の条件下及びアスファルト厚さの異なる条件下における試験を実施する。アスファルト層若しくは真砂土層と大気模擬槽との接続は O リング及び固定治具を用いて行い、大気模擬槽底面と O リングを挟み込む構造で上下から 2 つの固定治具を接続することにより気密する。固定治具の溝構造を三角溝とすることで O リングの気密性を高めている。また、アスファルト層及び真砂土層は、前述の透気係数・拡散係数の計測装置と接続することが可能であり、土壌試料及びアスファルトの状態を変化させることなく透気係数及び拡散係数を計測することが可能である。水素センサは真砂土層の上層、中間層、下層の水素濃度を確認するために、放出口近傍から鉛直方向に 3 点（図 5-1-1 中奇数番号）、容器壁面鉛直方向に 3 点（図中 5-1-1 偶数番号）に埋設した。

表 5-1-1 に小規模試験装置に用いた機器の仕様を示す。

表 5-1-1 小規模試験装置に用いた機器の仕様

名 称	型 式 (メーカー)	主な仕様
レーザー (大気計測用)	Explorer One HP (Spectra Physics)	発振波長 : 355 nm 発振周波数 : 50 kHz パルスエネルギー : 80 μ J パルス幅 : 5 ns ビーム径 : 1.2 mm (at waist, $1/e^2$)
検出器 (カメラ)	PI-MAX4 (Princeton Instruments)	電子冷却型 EM-ICCD(VIS)
エッジフィルタ	LP02-355RU-25 (Semrock)	レーザー波長 : 355 nm レーザー波長遮断率 99.9999%以上
バンドパスフィルタ	415FS10-25 (Andover)	透過中心波長 : 415.9 nm 透過半値全幅 : 10 nm
画像処理ソフトウェア	Light Field (Princeton Instruments)	—
レギュレータ	IR-1B (ヤマト産業)	低圧水素用 1次側最高使用圧 0.5 MPa 2次側最高使用圧 0.03 MPa
流量計 (水素用)	8500MM-0-2-1/20SLM (KOFLOCK)	流量レンジ : 0~20 L/min センサ方式 : 熱式巻線センサ 測定精度 : $\pm 1.0\%$ FS
流量計 (窒素用)	8500MM-0-2-1/150SLM (KOFLOCK)	流量レンジ : 0~150 L/min センサ方式 : 熱式巻線センサ 測定精度 : $\pm 1.5\%$ FS
圧力センサ	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ : 0~20 kPa センサ方式 : 感圧素子 測定精度 : $\pm 0.35\%$ FS
温度センサ	KT6YA (CHINO)	K 熱電対
データロガー (データ収集)	Midi LOGGER GL820 (GRAPHTEC)	電圧測定範囲 : 20mV~50V、1-5 V/FS 熱電対測定範囲 : $-200 < TS \leq 1370^\circ\text{C}$ 湿度測定範囲 : 0~100 %

5.1.2 実験条件の設定

小規模試験による基礎試験の目的を以下の4項目とし、実験を実施する。

- ① アスファルト舗装の有無による水素拡散挙動の違いを明らかにする。
- ② アスファルト舗装の厚さが水素拡散挙動に及ぼす影響を明らかにする。
- ③ 実フィールド試験における水素供給圧力を検討する。
- ④ 得られた透気係数・拡散係数を基にシミュレーション解析にて予備解析を実施し、実フィールド試験の水素拡散挙動を予測することにより、実フィールド試験における地中水素センサ埋設点の最適化を実施する。

小規模容器による基礎試験条件を表 5-1-2 に示す。

表 5-1-2 小規模容器による基礎試験条件

試料 (厚さ[mm])	供給圧力			
	2.5 kPa	5.0 kPa	7.5 kPa	10.0 kPa
真砂土(200)	○	-	-	-
真砂土(200)+コート剤	○	-	-	-
真砂土(200)+アスファルト(25)	○	-	-	-
真砂土(200)+アスファルト(100)	○	○	○	○
真砂土(200)+アスファルト(150)	○	○	○	○

試験に用いた真砂土、各アスファルトにおいては個々に透気係数及び拡散係数計測を実施する。

また、アスファルト乳剤が水素拡散挙動に及ぼす影響を確認するために、プライムコート剤として一般的な道路に用いられるコート剤を塗布した場合と塗布しない場合の結果の差異を確認する。コート剤として用いたアスファルト乳剤を図 5-1-4 に示す。コート剤は JIS K 2208 に定められているカチオン系浸透性アスファルト乳剤 PK-3 を用いた。



図 5-1-4 カチオン系浸透性アスファルト乳剤 PK-3

5.1.3 小規模試験の実施方法

本節では、各実験条件における小規模試験の具体的な実施方法について述べる。

実験の実施に当たっては、まず、容器内全体を窒素パージし、土壌層及び大気層がすべて窒素雰囲気となってから調整及び計測を行った。

具体的な試験実施方法は以下のとおりである。

- ① バルブを開きピンホールから水素を放出し、データロガーの指示値を確認し、水素が所定の圧力で放出されるよう、レギュレータを調整する。
- ② バルブを閉じて窒素に切り替え、容器内を窒素パージする。
- ③ 窒素パージを停止し、データロガーのデータ取得を開始する。(更新周期:200 ms)
- ④ バルブを開いて水素を放出すると同時に大気計測を開始し、60 秒間計測する。
- ⑤ 放出開始後 60 秒でバルブを閉じる。
- ⑥ データロガー停止、計測終了。
- ⑦ 窒素パージする。

真砂土層内の水素濃度については、前述の埋設水素センサの出力をもとに各計測点ごとの水素濃度経時変化データを取得した。センサ出力を水素濃度に変換するに当たっては、各センサごとに事前に取得しておいた検量線データに基づいて計算を行った。

また、大気計測では、ICCD カメラのインテンシファイアゲイン×100 (Max)、EM ゲイン×50、CCD 上での積算回数 25000 回として計測した。レーザ発振が 50 kHz であるため計算上の計測更新周期は 0.5 秒であるが、ソフトウェア上での処理速度の関係から本計測における計測更新周期は約 1 秒であった。ソフトウェア上の機能であるタイムスタンプ機能により確認したところ、各フレーム間の時間間隔は 1.004~1.005 秒と一定であったため、計測更新周期を 1 秒と見なして解析を行った。

大気中水素濃度を算出するに当たっては、図 5-1-5 に示すとおり、土壌層の中心を原点とし、レーザ光軸上に 10 mm ごとに-5 (-50 mm) ~+5 (+50 mm) の合計 11 点の大気中水素濃度計測点を設定した。各計測点において水素濃度算出に用いたエリアは、2 mm 四方となる。

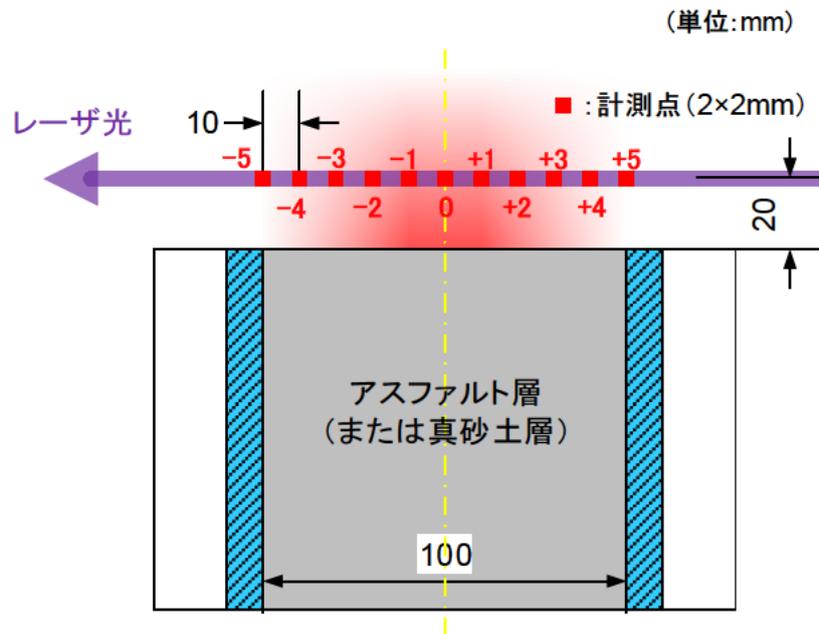


図 5-1-5 小規模試験における大気計測点の位置

5.2 実験結果

5.2.1 小規模試験の実験結果

(1) アスファルトの有無及び試料厚さ比較

アスファルト舗装の有無による水素拡散挙動の違い及び、アスファルト舗装の厚さが水素拡散挙動に及ぼす影響を確認するため、真砂土のみの場合と、真砂土とアスファルト舗装（アスファルト厚さ 25、100、150 mm）を重ね合わせた土壌試料の場合について試験を実施した。供給圧力を 2.5 kPa に設定し、地中及び大気中の水素ガスの濃度経時変化の計測を行った。

計測結果について、地中水素濃度経時変化を図 5-2-1～5-2-4 に、計測点ごとの大気中水素濃度経時変化を図 5-2-5～5-2-8 に、大気中水素濃度経時変化の試料上の平均濃度値を図 5-2-9 にそれぞれ示す。図 5-2-1～5-2-4 の地中濃度変化の凡例は、AS 後の数字がアスファルトコアの厚みに、S1 から S6 が水素センサの埋設番号に対応しており、図 5-2-5～5-2-8 の大気中濃度変化の凡例は、-5 から +5 が図 5-1-5 に図示した計測点の位置に対応している。アスファルトコアを設置せず、真砂土のみで計測した場合には「真砂土のみ」と記載した。

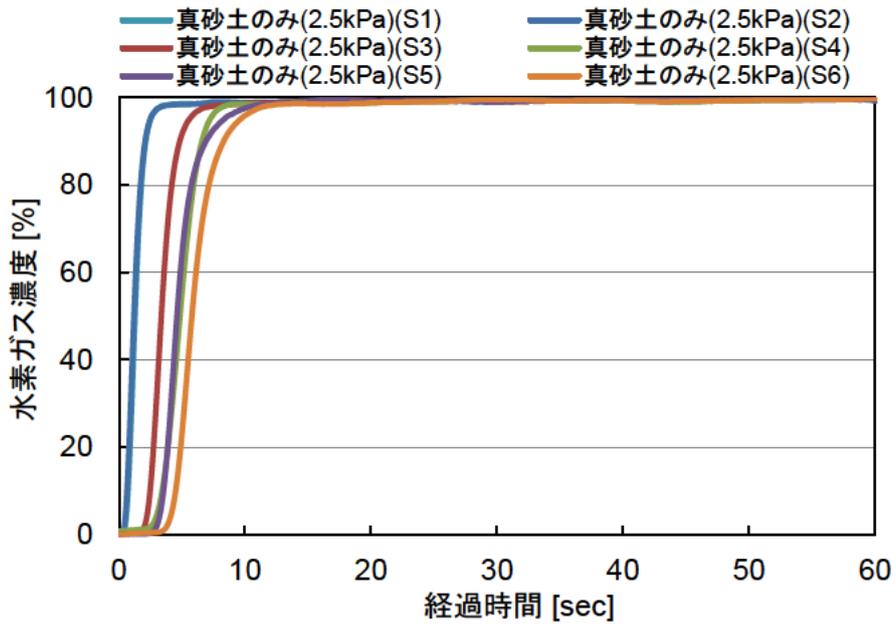


図 5-2-1 地中水素濃度経時変化
(真砂土のみ、供給圧力 2.5 kPa)

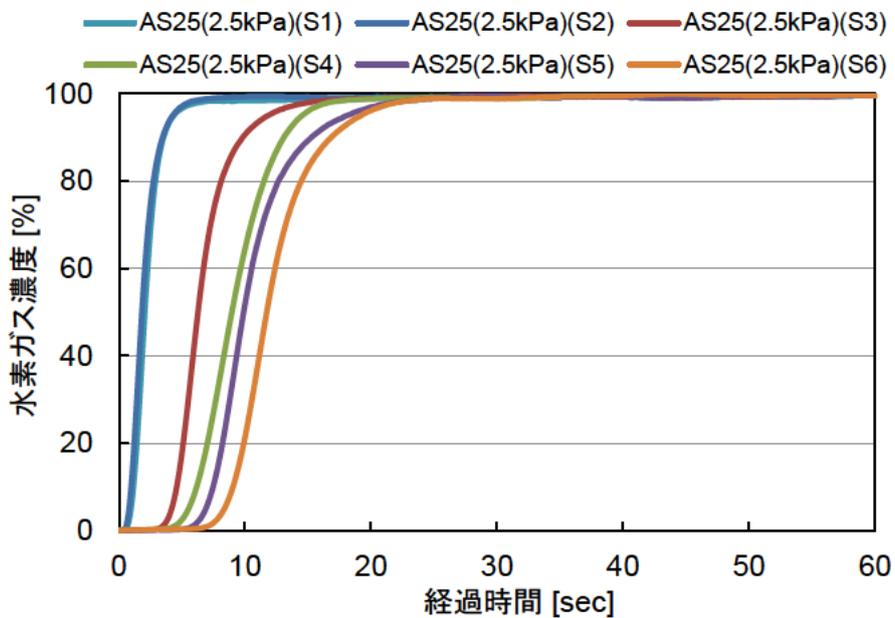


図 5-2-2 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 25 mm、供給圧力 2.5 kPa)

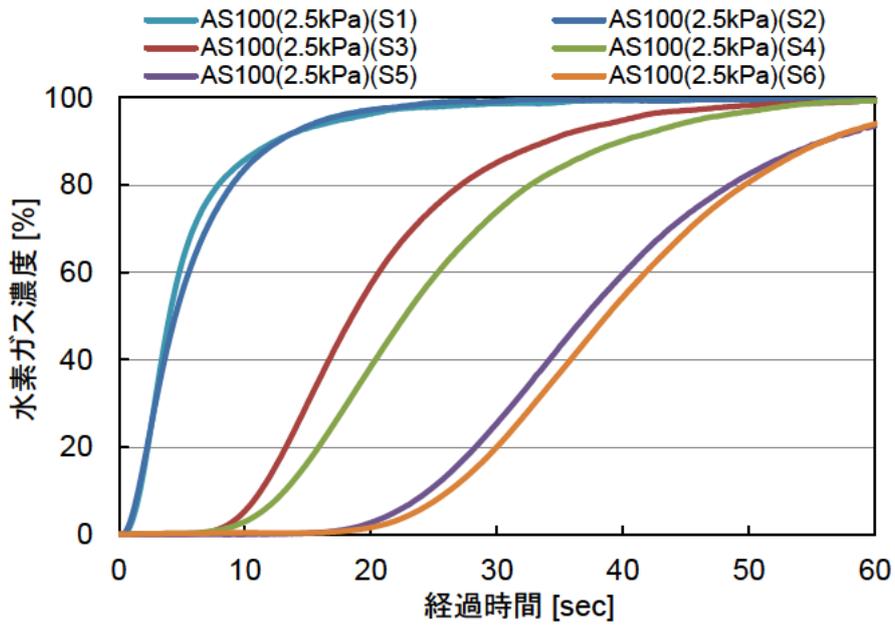


図 5-2-3 地中水素ガス濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 2.5 kPa)

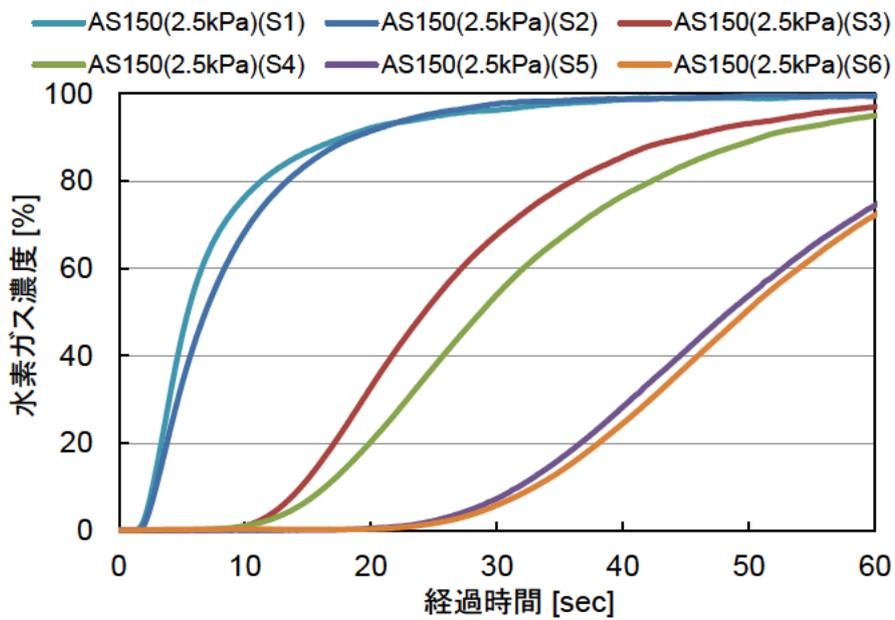


図 5-2-4 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 2.5 kPa)

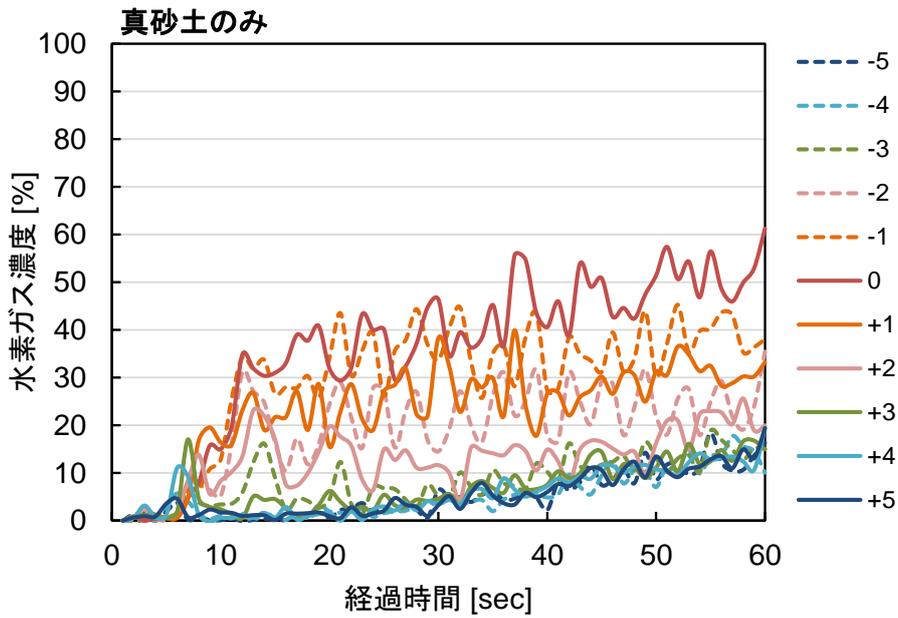


図 5-2-5 各計測点における大気中水素濃度経時変化
 (真砂土のみ、供給圧力 2.5 kPa)

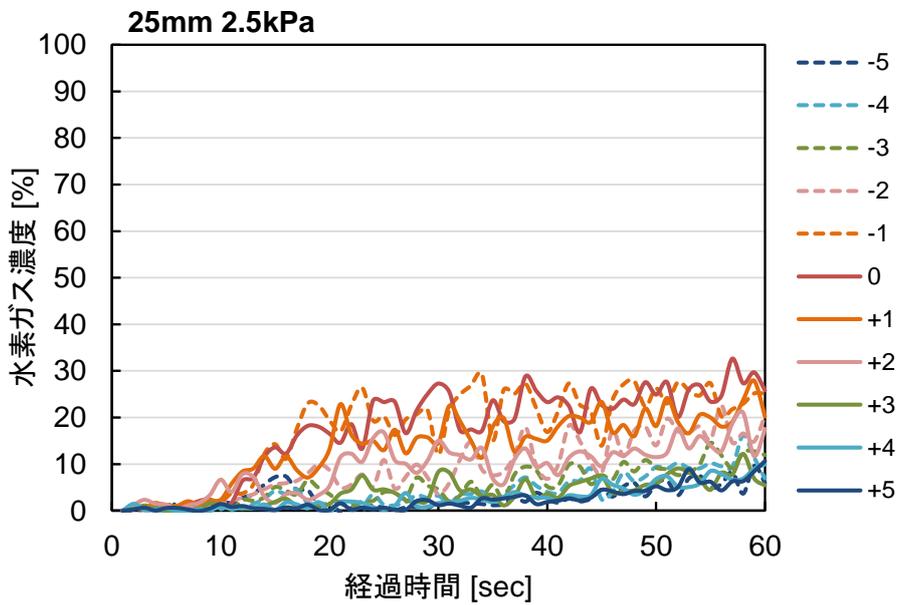


図 5-2-6 各計測点における大気中水素濃度経時変化
 (アスファルト厚さ 25 mm、供給圧力 2.5 kPa)

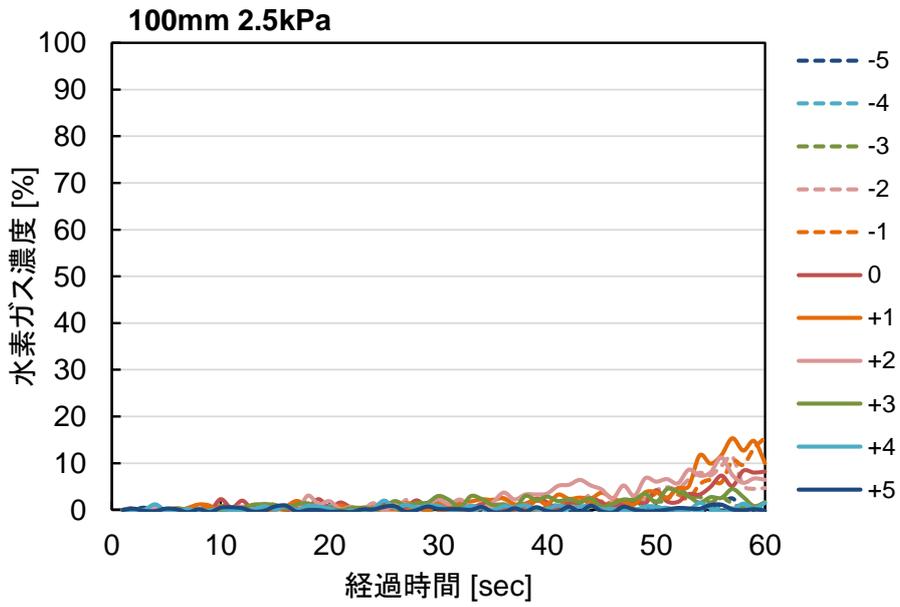


図 5-2-7 各計測点における大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 2.5 kPa)

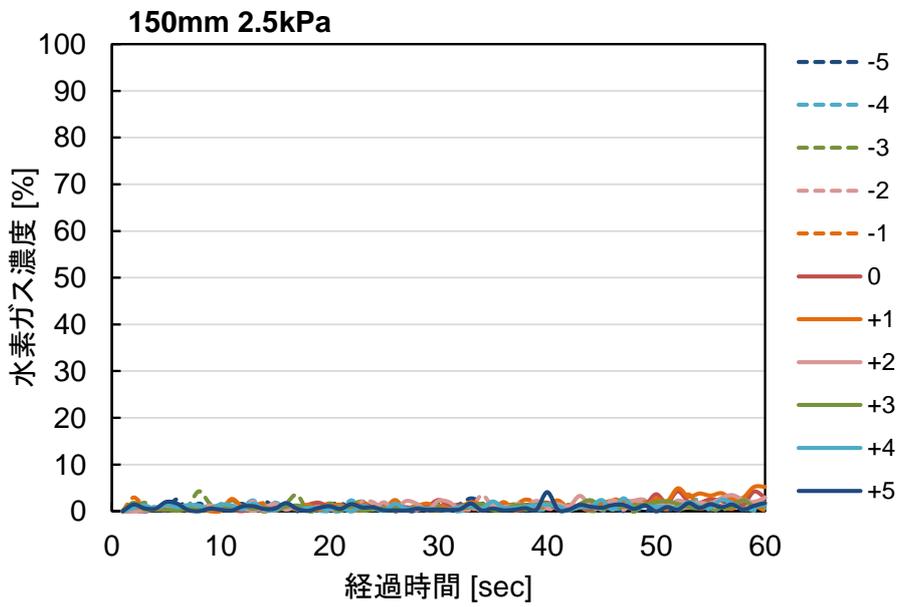


図 5-2-8 各計測点における大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 2.5 kPa)

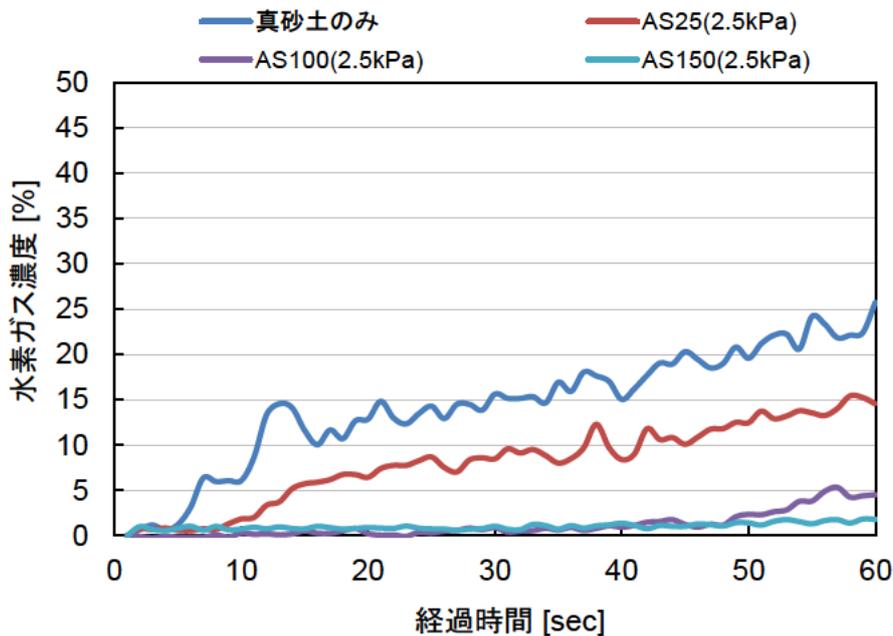


図 5-2-9 大気中における試料上の平均濃度値の経時変化
(アスファルトの有無及び試料厚さ比較)

供給圧力を一定としアスファルト厚さを変化させた場合、地中水素濃度経時変化及び大気中水素濃度経時変化の両者について、真砂土のみ（アスファルト厚さ 0 mm）のときが最も濃度の立ち上がり時間が早く、濃度上昇勾配が急峻であった。アスファルトの厚みが増加と共に、濃度の立ち上がり時間が遅れ、濃度上昇勾配が緩やかになる傾向であった。

(2) 供給圧力比較

実フィールド試験における水素供給圧力の検討のため、真砂土とアスファルト舗装（アスファルト厚さ 100、150 mm）を重ね合わせた土壌試料の場合について、供給圧力を変化させて試験を実施した。

アスファルト厚さ 100 mm にて供給圧力を 2.5、5.0、7.5、10.0 kPa とした場合の地中水素濃度経時変化を図 5-2-10～5-2-13 にそれぞれ示し、計測点ごとの大気中水素濃度経時変化を図 5-2-14～5-2-17 に、大気中水素濃度経時変化の試料上の平均濃度値を図 5-2-18 にそれぞれ示す。アスファルト厚さ 150 mm にて供給圧力を 2.5、5.0、7.5、10.0 kPa とした場合の地中水素濃度経時変化を図 5-2-19～5-2-22 にそれぞれ示し、計測点ごとの大気中水素濃度経時変化を図 5-2-23～5-2-26 に、大気中水素濃度経時変化の試料上の平均濃度値を図 5-2-27 にそれぞれ示す。

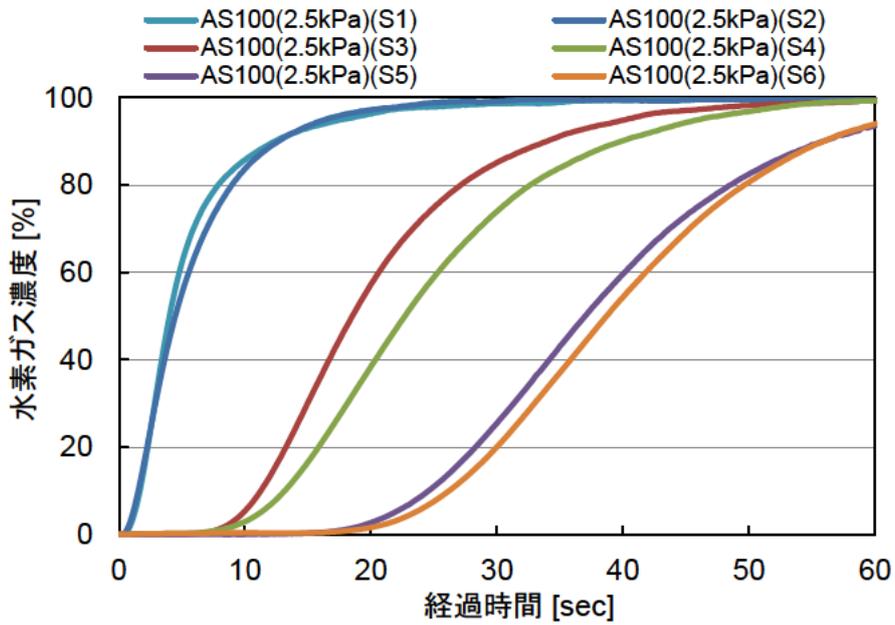


図 5-2-10 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 2.5 kPa)

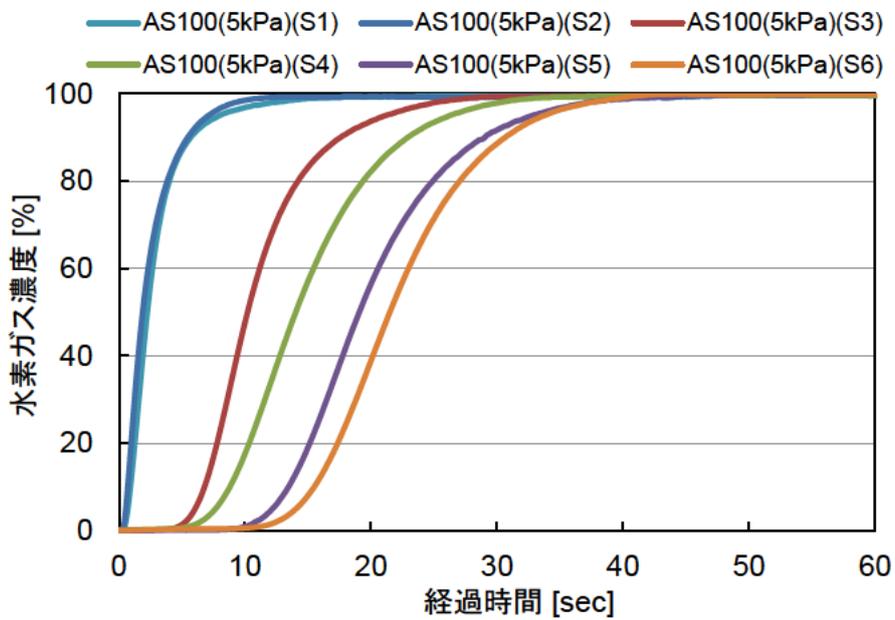


図 5-2-11 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 5.0 kPa)

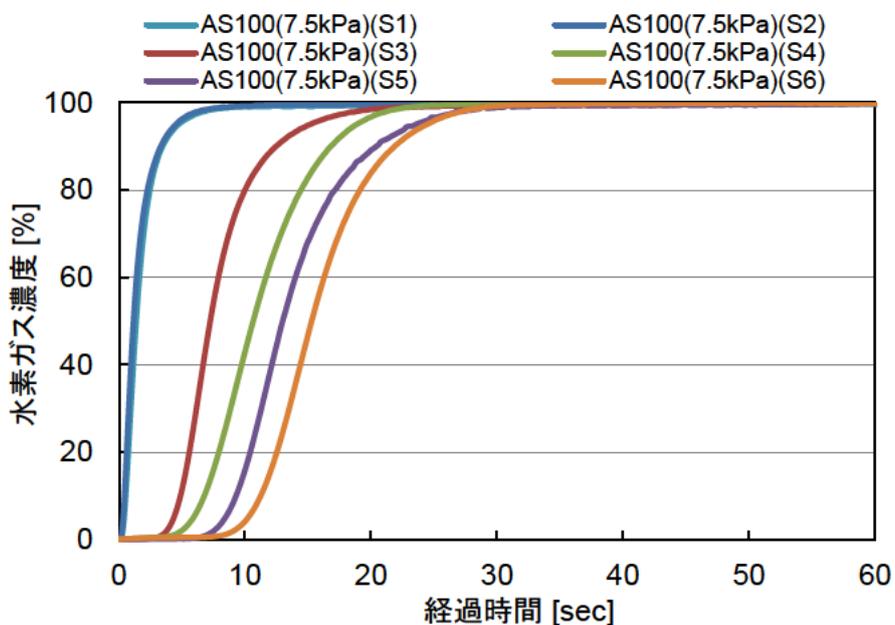


図 5-2-12 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 7.5 kPa)

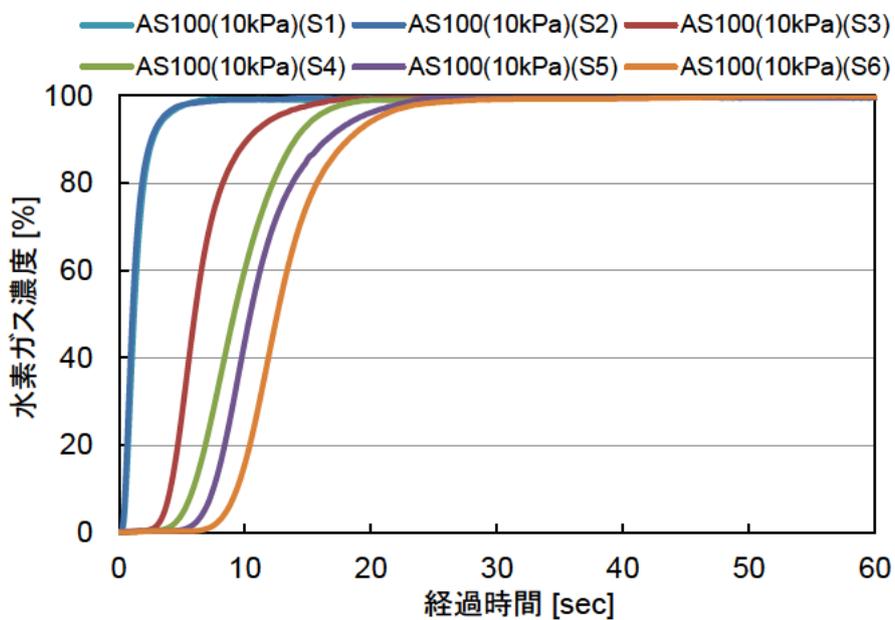


図 5-2-13 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 10.0 kPa)

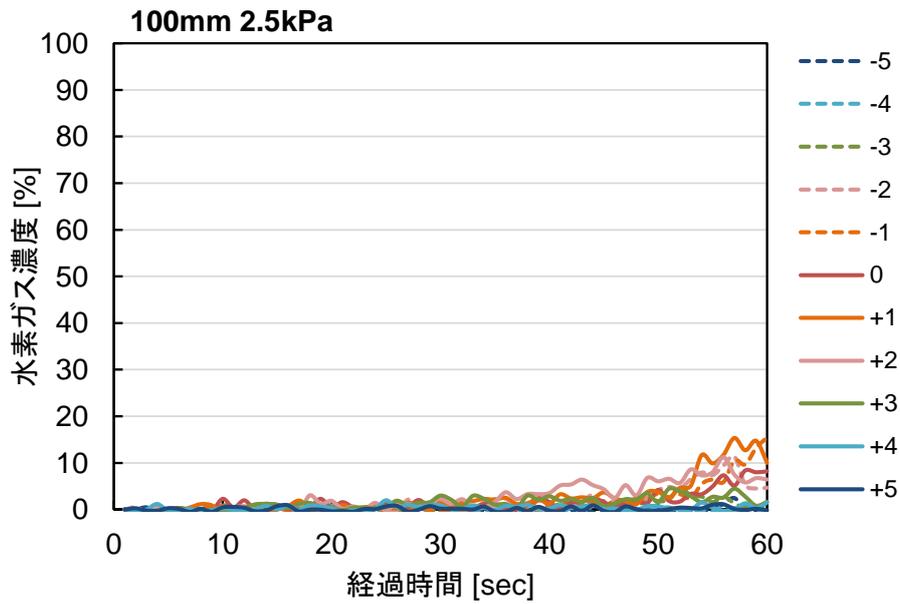


図 5-2-14 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 2.5 kPa)

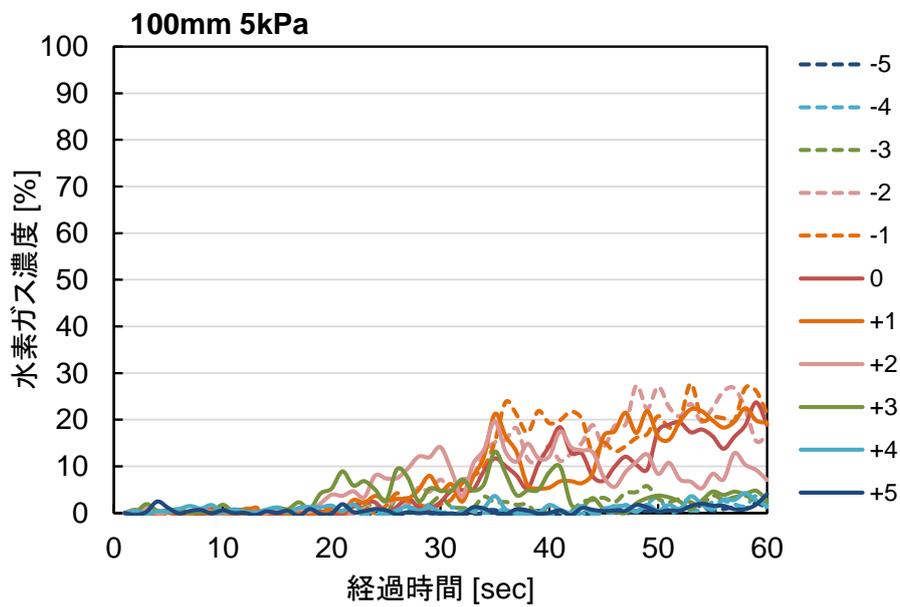


図 5-2-15 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 5.0 kPa)

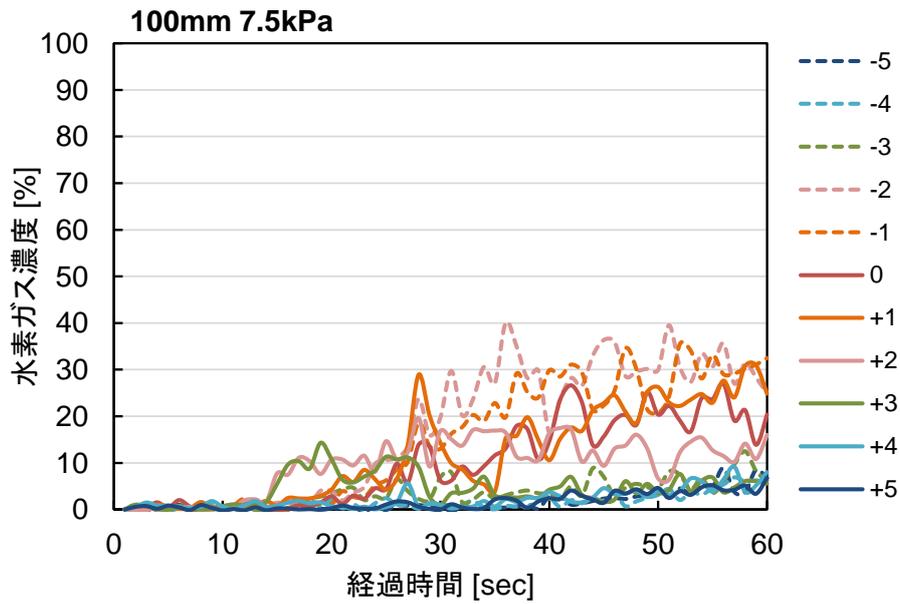


図 5-2-16 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力 7.5 kPa)

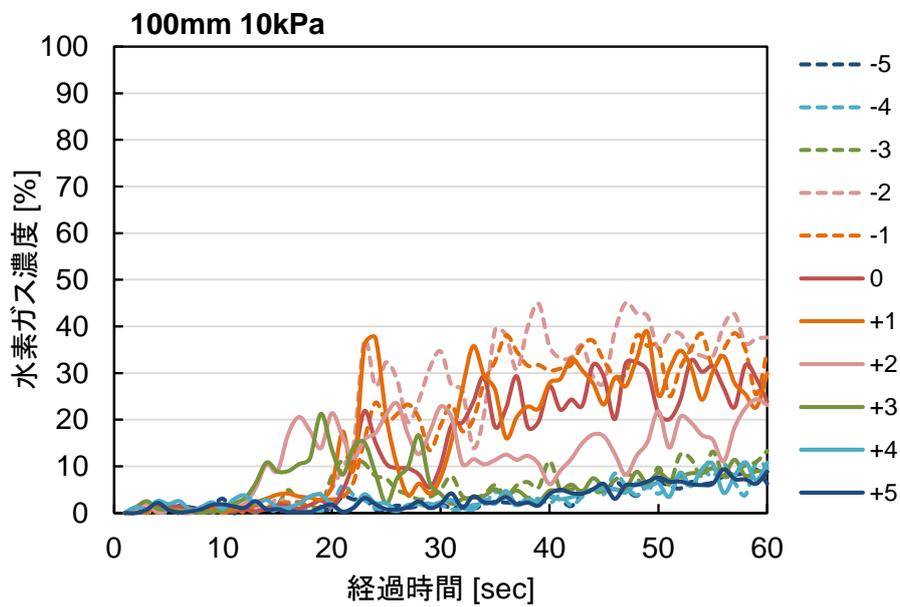


図 5-2-17 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 100mm、供給圧力 10.0kPa)

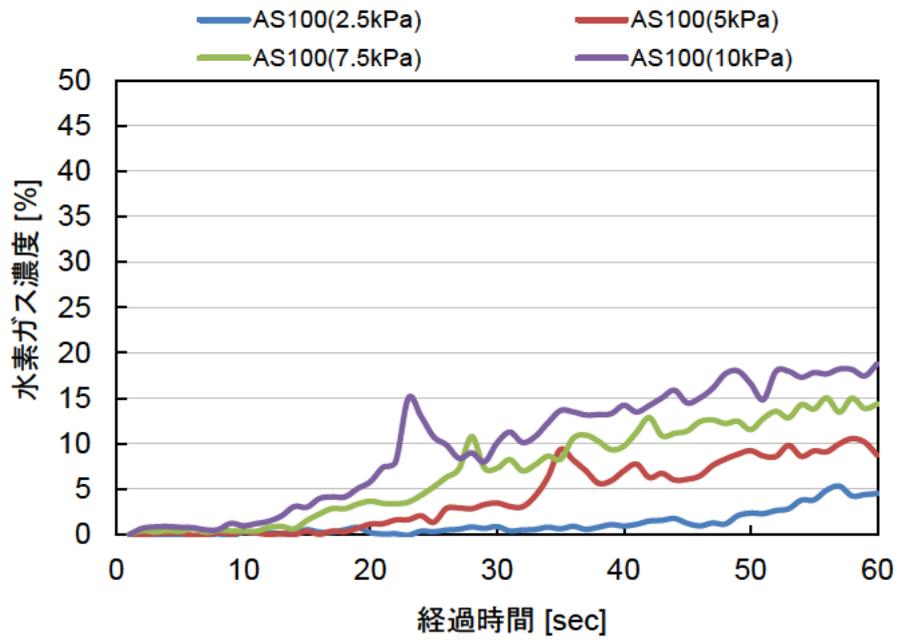


図 5-2-18 大気中における試料上の平均濃度値の経時変化
(アスファルト厚さ 100 mm、供給圧力比較)

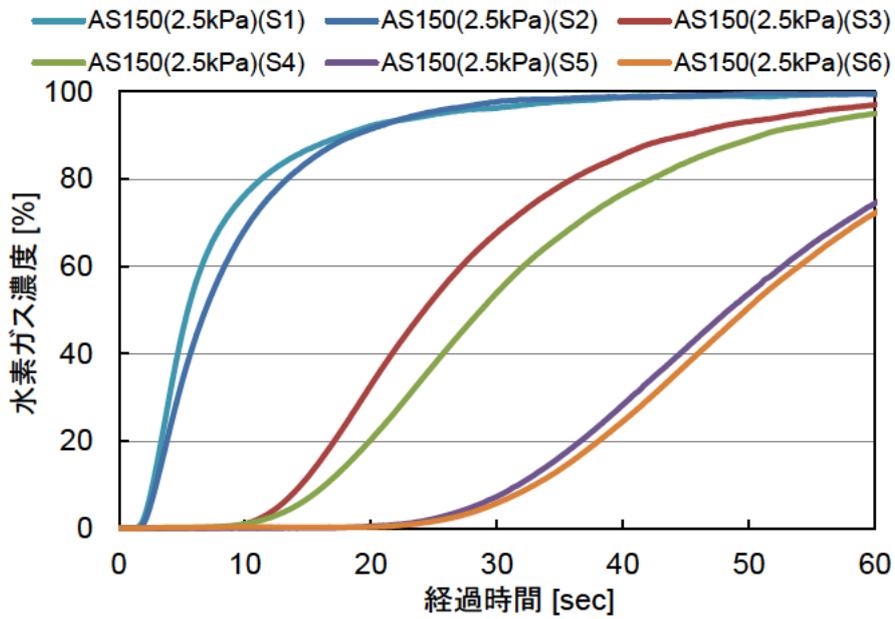


図 5-2-19 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 2.5 kPa)

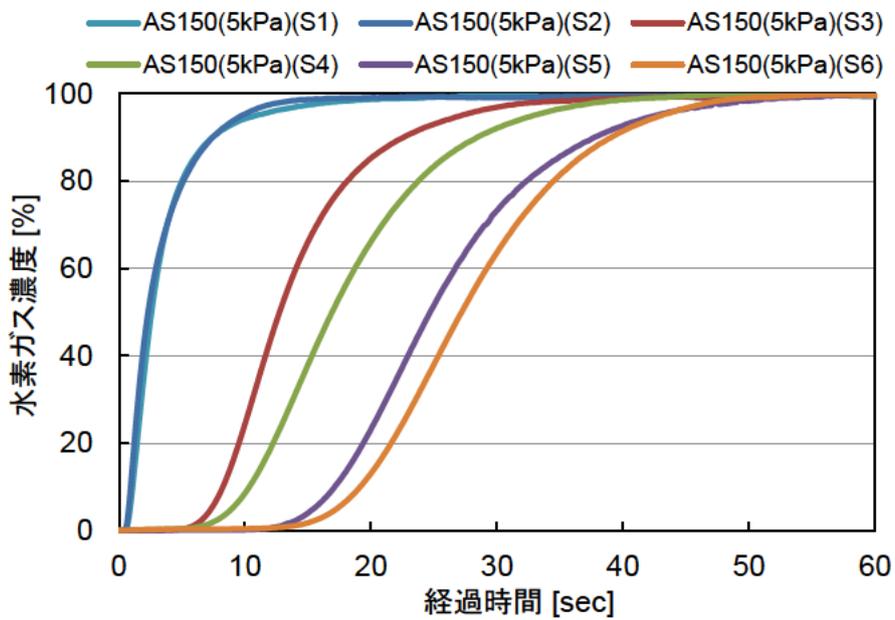


図 5-2-20 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 5.0 kPa)

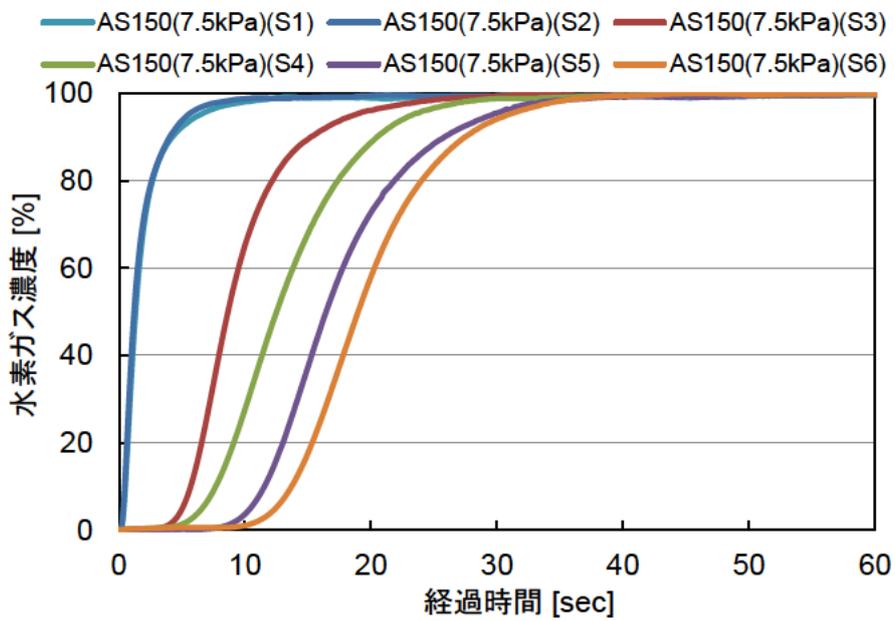


図 5-2-21 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 7.5 kPa)

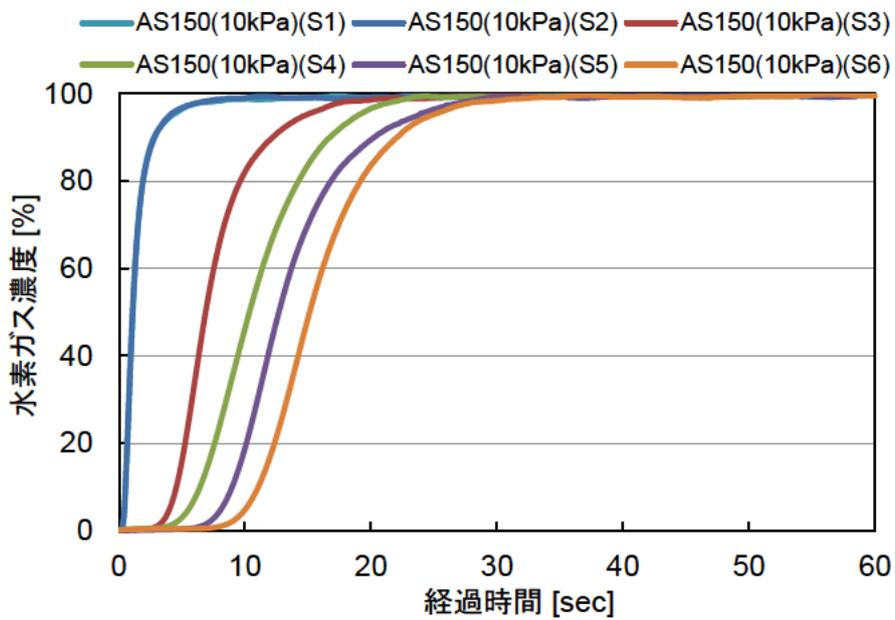


図 5-2-22 地中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 10.0 kPa)

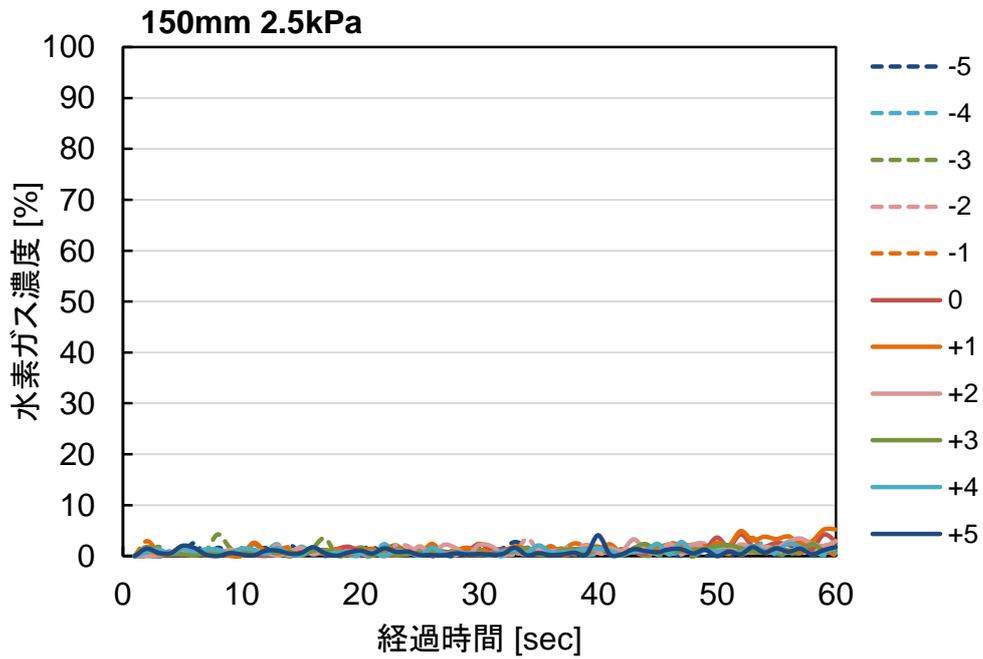


図 5-2-23 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 2.5 kPa)

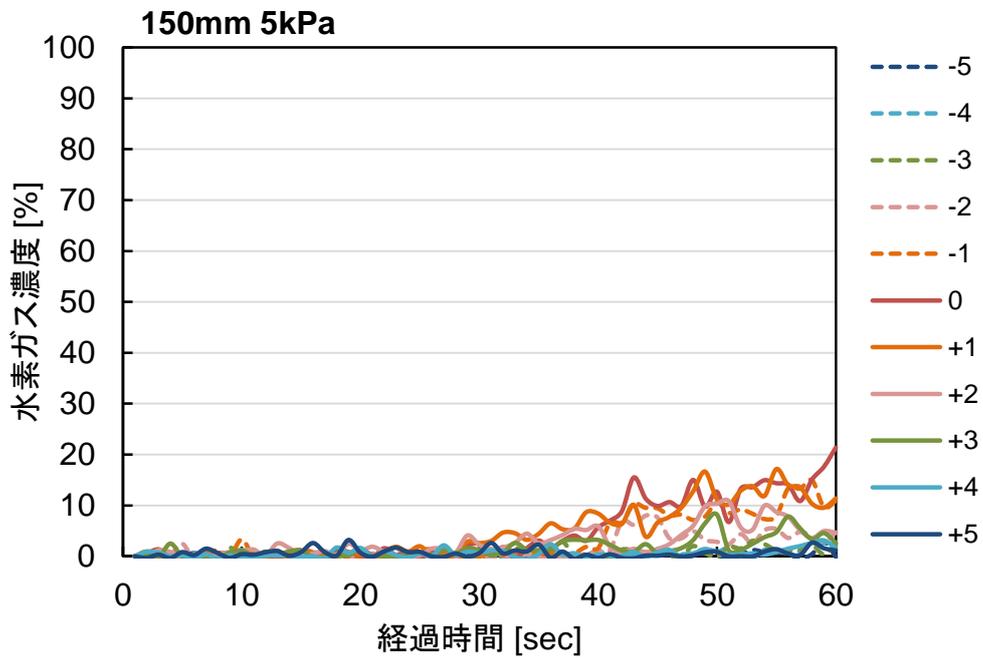


図 5-2-24 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 5.0 kPa)

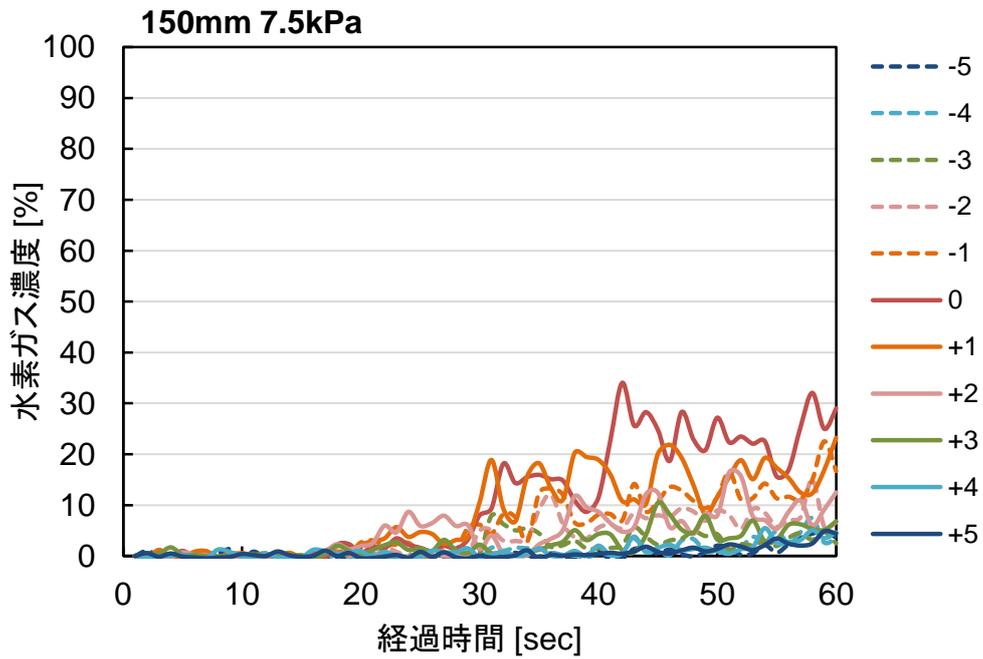


図 5-2-25 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 7.5 kPa)

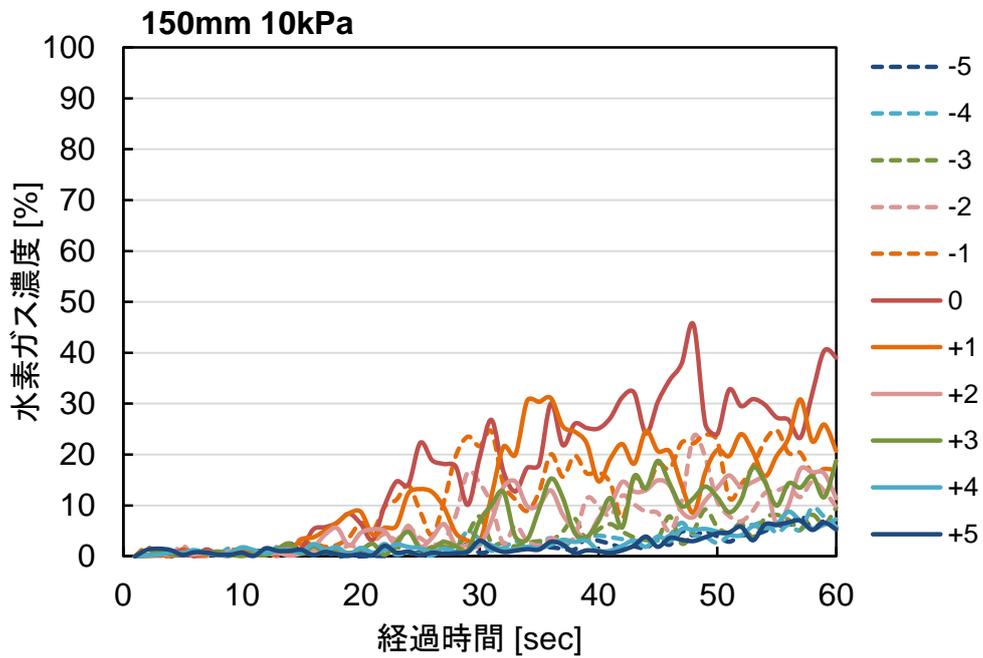


図 5-2-26 各計測点の大気中水素濃度経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力 10.0 kPa)

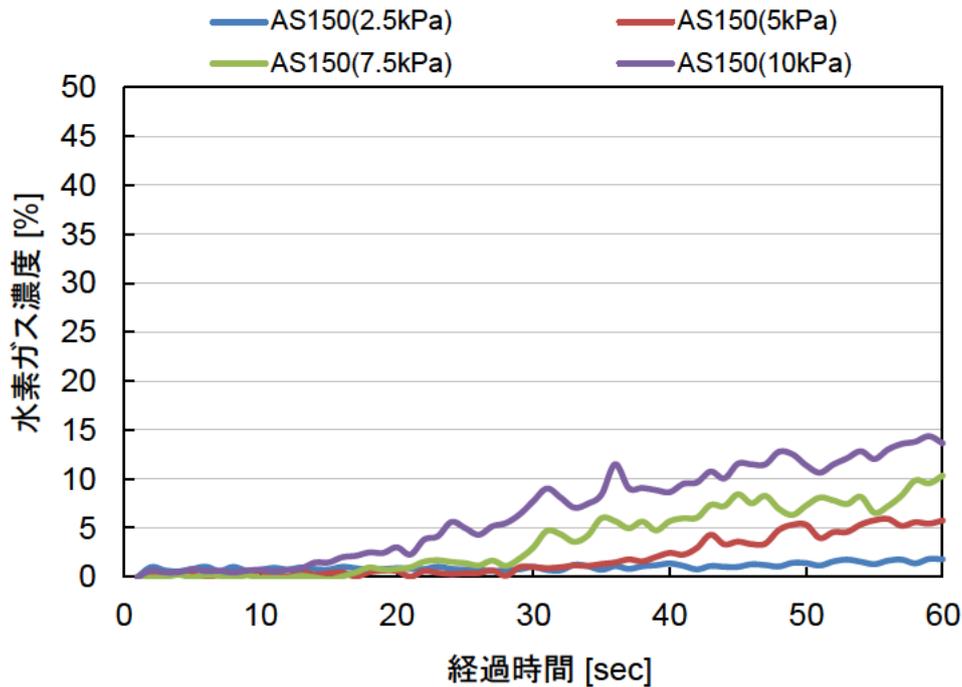


図 5-2-27 大気中における試料上の平均濃度値の経時変化
(アスファルト厚さ 150 mm、供給圧力比較)

アスファルト厚さを一定とし、供給圧力を変化させた場合、供給圧力が最も低い 2.5 kPa の場合が最も濃度の立ち上がり時間が遅く、濃度上昇勾配が緩やかであった。供給圧力の増加と共に、濃度の立ち上がり時間が早くなり、濃度上昇勾配が急峻となった。

(3) アスファルト乳剤（コート剤）による影響の比較

アスファルト乳剤（コート剤）の有無による水素拡散挙動の違いを確認するため、真砂土の表面にコート剤を塗布し、試験を実施した。コート剤を塗布しない場合の結果（地中：図 5-2-1、大気中：図 5-2-5）と比較するために、供給圧力は 2.5 kPa に設定した。

コート剤を塗布した場合の地中水素濃度経時変化を図 5-2-28 に、各埋設点の地中水素濃度経時変化のコート剤の有無の比較を図 5-2-29、5-2-30 に示す。また、計測点ごとの大気中水素濃度経時変化を図 5-2-31 に、大気中水素濃度経時変化の試料上の平均濃度値のコート剤の有無の比較を図 5-2-32 に示す。図中、コート剤を塗布した場合の結果には「+コート」と記載した。

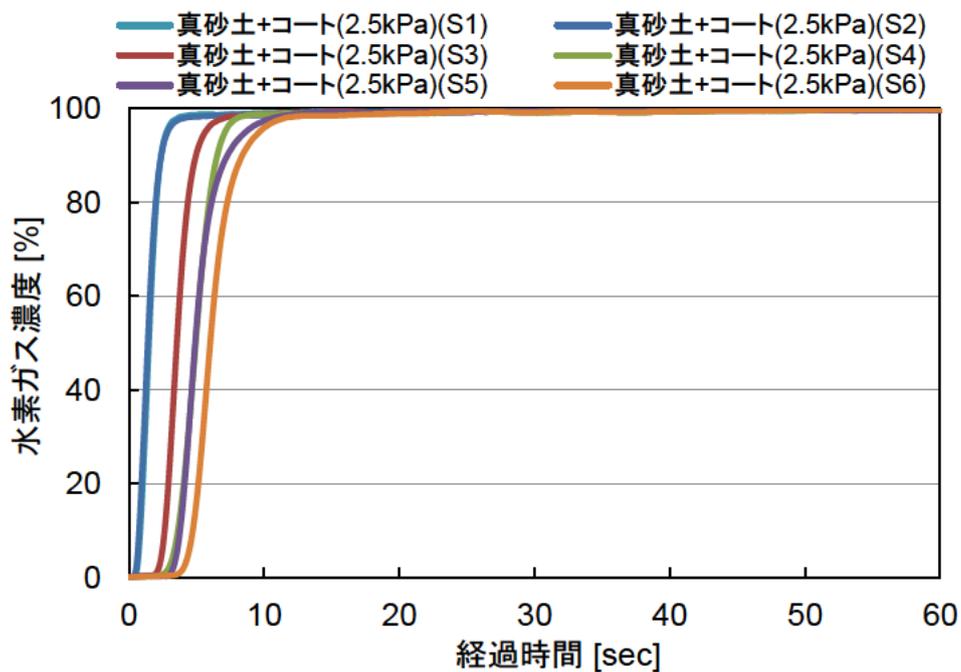


図 5-2-28 地中水素濃度経時変化
(真砂土+コート剤、供給圧力 2.5 kPa)

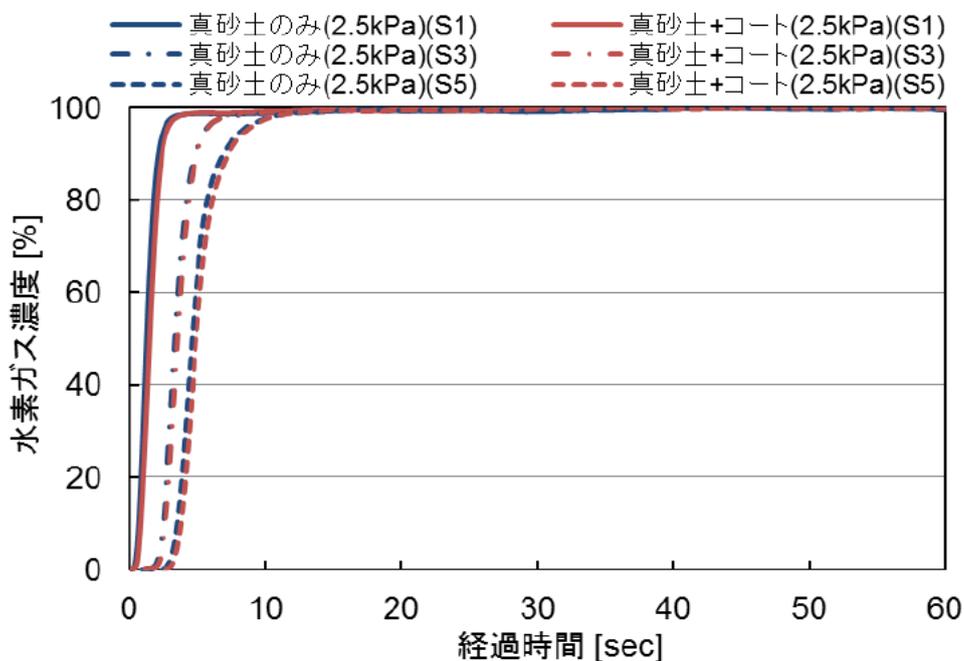


図 5-2-29 埋設点①、③、⑤における地中水素濃度変化
(供給圧力 2.5 kPa、コート剤有無比較)

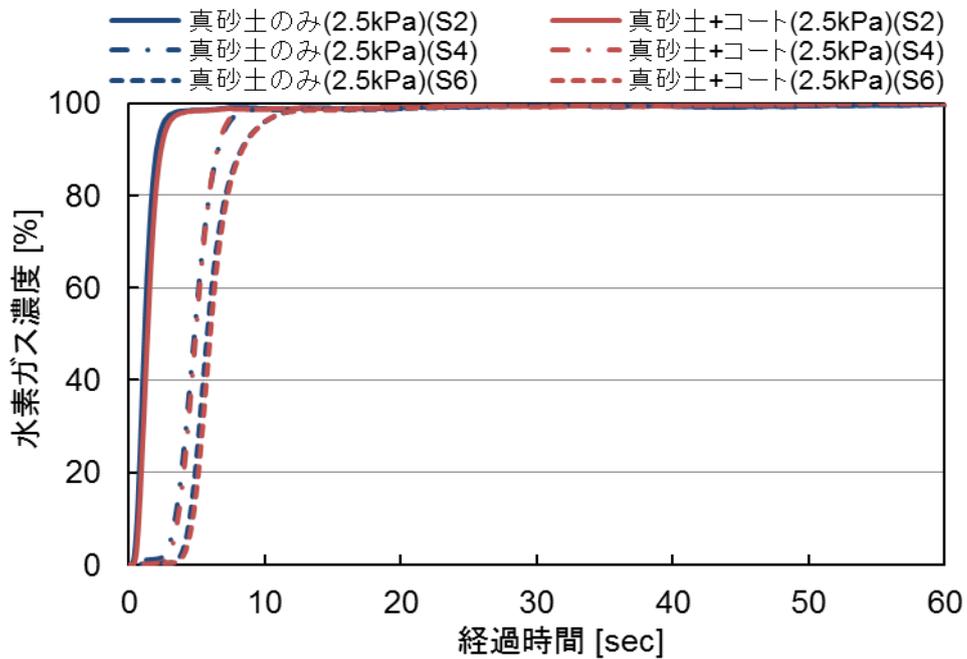


図 5-2-30 埋設点②、④、⑥における地中水素濃度変化
 (供給圧力 2.5 kPa、コート剤有無比較)

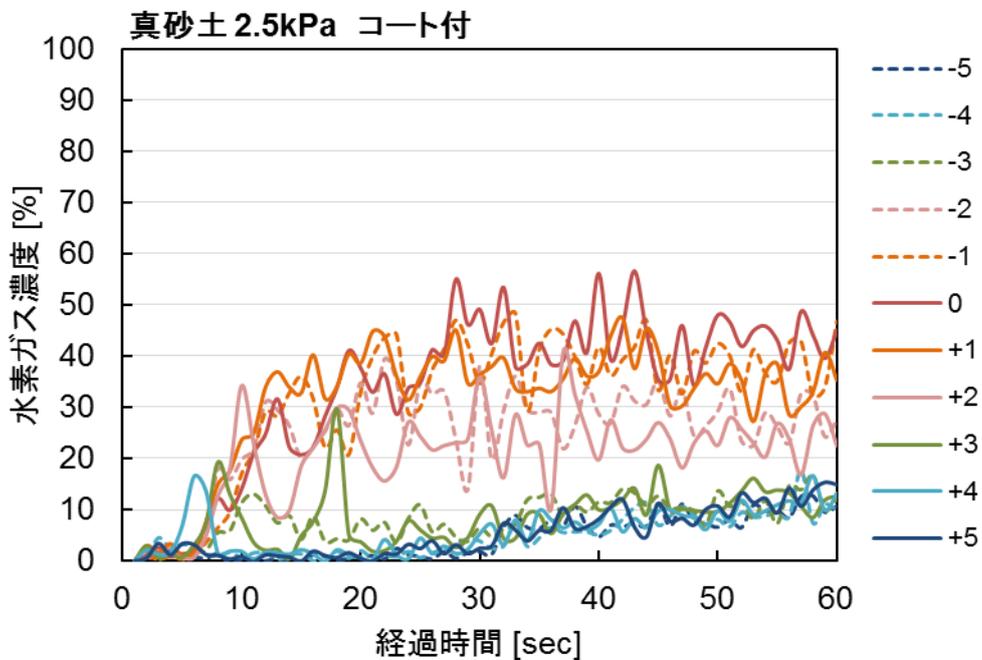


図 5-2-31 各計測点における大気中水素濃度経時変化
 (真砂土+コート剤、供給圧力 2.5 kPa)

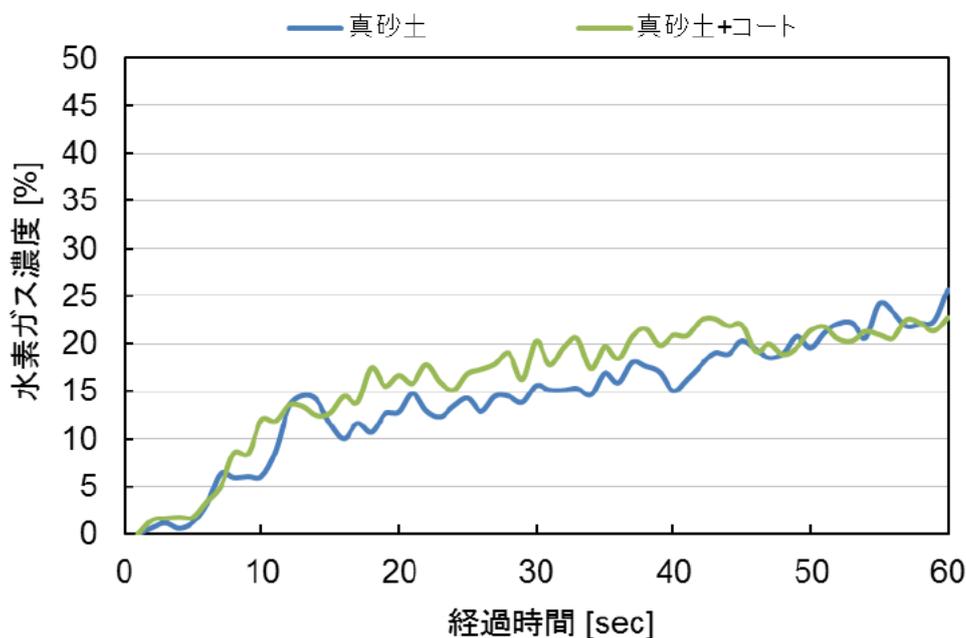


図 5-2-32 大気中における試料上の平均濃度値の経時変化
(供給圧力 2.5 kPa、コート剤有無比較)

図 5-2-29、5-2-30、5-2-32 に示したとおり、コート剤の有無の条件下において地中及び大気中の水素拡散挙動はほぼ一致し、本試験条件下においてコート剤が水素拡散挙動へ及ぼす影響が極めて小さいことを確認した。

5.2.2 透気係数及び拡散係数計測の実験結果

前章で述べた透気係数及び拡散係数計測装置を用いて、小規模試験に用いた①真砂土（厚さ 200 mm）、②アスファルト舗装（厚さ 25 mm）、③アスファルト舗装（厚さ 100 mm）、④アスファルト舗装（厚さ 150 mm）、について透気係数、拡散係数を計測した。透気係数、及び拡散係数の計測結果を表 5-2-1 にそれぞれ示す。

表 5-2-1 小規模試験に用いた試料の透気係数及び拡散係数

試料	①真砂土 (200 mm)	②アスファルト (25 mm)	③アスファルト (100 mm)	④アスファルト (150 mm)
透気係数 [m ²]	2.4739E-11	1.7865E-12	7.6432E-13	9.7824E-13
相互拡散係数	0.2250	0.0086	0.0080	0.0109
拡散係数 [m ² s ⁻¹]	1.5978E-05	6.1304E-07	5.6919E-07	7.7537E-07

表 5-2-1 に示した透気係数及び拡散係数は、シミュレーション解析条件の基礎検討及び実フィールド試験における水素センサ埋設点の検討のための予備シミュレーション解析に用いた。

5.3 考察

前項にて計測した地中及び大気中の水素濃度経時変化を基に、アスファルトが水素拡散に及ぼす影響について考察する。

供給圧力を一定としアスファルト厚さを変化させた場合、地中水素濃度経時変化及び大気中水素濃度経時変化の両者について、真砂土のみ（アスファルト厚さ 0 mm）のときが最も濃度の立ち上がり時間が早く、濃度上昇勾配が急峻であった。アスファルトの厚みが増加と共に、濃度の立ち上がり時間が遅れ、濃度上昇勾配が緩やかになる傾向であった。図 5-3-1 に供給圧力 2.5 kPa においてアスファルトの厚さを変化させた場合のアスファルト厚さと流量の関係を示す。図中において、真砂土のみの場合をアスファルト厚さ 0 mm としてプロットした。図 5-3-1 に示したとおり、アスファルト厚さが増加すると水素の流量が減少する。このため、アスファルト厚さの増加と共に、水素濃度の時間変化が緩やかになる。

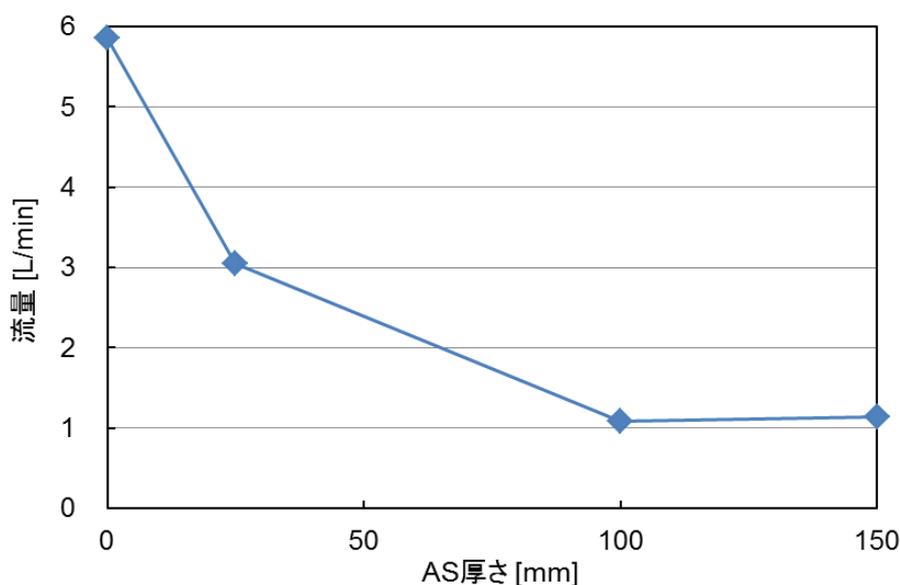


図 5-3-1 アスファルト厚さと流量の関係
(供給圧力 2.5 kPa)

また、アスファルト厚さを一定とし、供給圧力を変化させた場合、供給圧力が最も低い 2.5 kPa の場合が最も濃度の立ち上がり時間が遅く、濃度上昇勾配が緩やかであった。供給圧力の増加と共に、濃度の立ち上がり時間が早くなり、濃度上昇勾配が急峻となっ

た。図 5-3-2 にアスファルト厚さ 150 mm にて供給圧力を変化させた場合の供給圧力と流量の関係を示す。図 5-3-2 に示したとおり、供給圧力が増加すると流量も増加する。このため、供給圧力の増加と共に、水素濃度の時間変化が急峻になる。

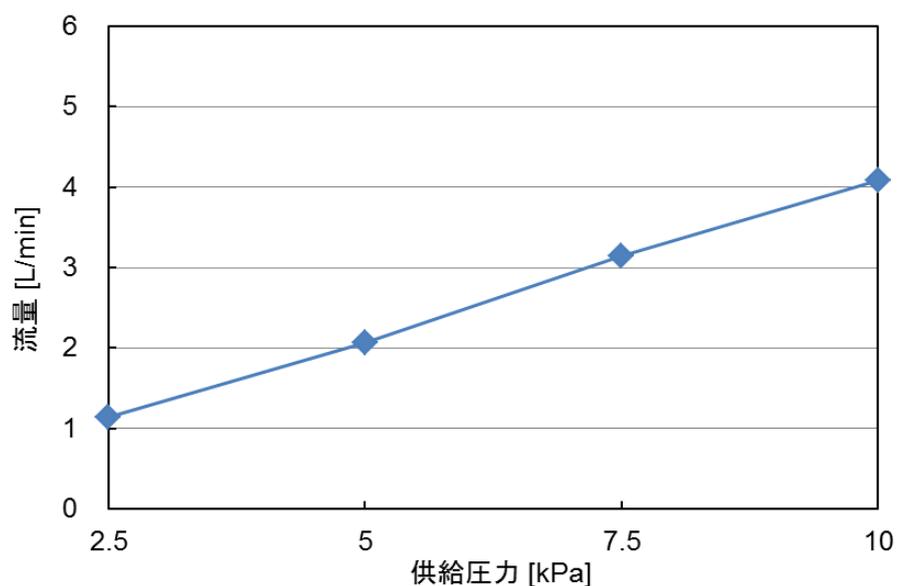


図 5-3-2 供給圧力と流量の関係
(アスファルト厚さ 150 mm)

また、実フィールド試験において地中に埋設する水素センサの埋設点を検討するため、表 5-2-1 に示した本試験に用いた試料の透気係数及び拡散係数を用い、実フィールド試験の予備解析を実施した。予備解析は、実フィールド試験の土壌層が全て真砂土の場合と、真砂土の表層 150 mm をアスファルト層で置き換えた場合の 2 パターンについて実施し、図 5-3-3 に示した水素濃度分布を得た。

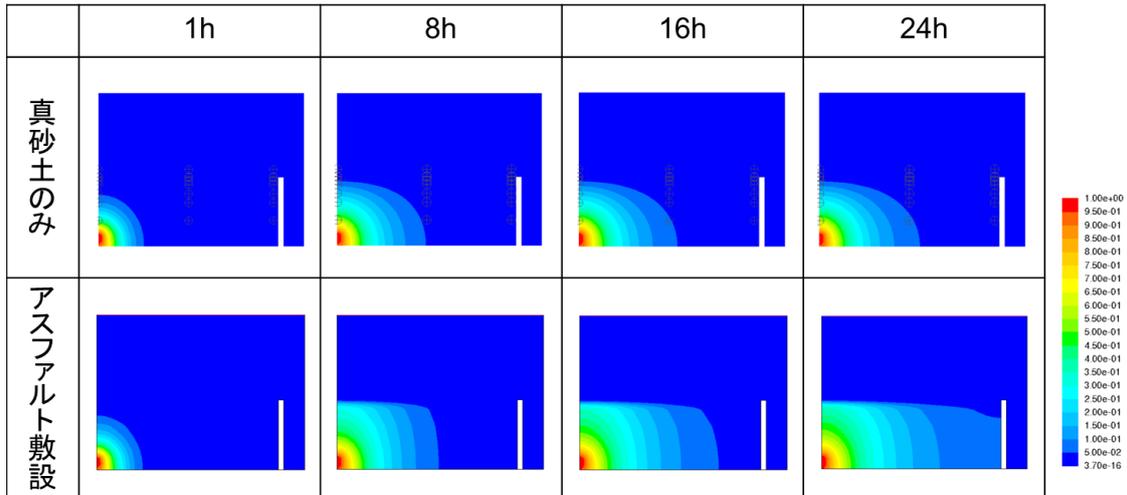


図 5-3-3 実フィールド試験予備解析のコンター図

図 5-3-3 に示したとおり、真砂土のみの場合とアスファルトのみの場合を比較すると、アスファルトを敷設した場合の方が水平方向の拡散が早く進む傾向にある。このため、実フィールド試験では、地中内に可能な限り均等に水素センサを埋設し、地中水素拡散挙動の詳細を得ることとした。

5.4 まとめ

本章では、地中及び大気中を模擬した小規模容器を製作し、真砂土のみの場合と真砂土上にアスファルトを設置した場合において所定の条件下において試験を実施し、5.1.2 項で示した試験の目的に対し、以下の結果を得た。

- ① アスファルト舗装の有無による水素拡散挙動の違いを明らかにする。
 - ・ 地中水素拡散挙動については、真砂土のみの場合が濃度の立ち上がり及び濃度上昇が最も早く、真砂土上にアスファルトを敷設すると、濃度の立ち上がりが遅くなり、濃度上昇勾配が緩やかとなった。
 - ・ 大気中水素拡散挙動については、真砂土のみの場合が試料上の平均濃度値の立ち上がりが最も早く、60 秒後の到達濃度が最も高かった。真砂土上にアスファルトを敷設すると、試料上の平均濃度値の立ち上がりが遅くなり（真砂土のみの場合に対しアスファルト 25 mm 敷設の場合約 5 秒遅れ）、60 秒後の到達濃度が低くなった（真砂土のみの場合とアスファルト 25 mm 敷設の場合の濃度差約 10 %）。
- ② アスファルト舗装の厚さが水素拡散挙動に及ぼす影響を明らかにする。
 - ・ 地中水素拡散挙動については、アスファルトの厚さの増加に伴い、濃度の立ち上がりが遅く、濃度上昇勾配が緩やかとなった。
 - ・ 大気中水素拡散挙動については、アスファルトの厚さの増加に伴い、試料上の平均濃度値の立ち上がりが遅くなり（アスファルト 150 mm について 2.5 kPa の

場合に対し 5.0 kPa の場合約 5 秒遅れ)、60 秒後の到達濃度が低くなった (アスファルト 150 mm について 2.5 kPa の場合と 5.0 kPa の場合の濃度差約 3%)。

- ③ 実フィールド試験における水素供給圧力を検討する。
 - ・ アスファルト 150 mm を用いた試験において、供給圧力 2.5 kPa の流量 (1.14 L/min) に対し 10.0 kPa の流量 (4.08 L/min) は 3.58 倍となり、明確な流量差を確認できたため、実フィールド試験における供給圧力条件を 2.5 kPa、10.0 kPa の 2 パターンとして実施することとした。
- ④ 得られた透気係数・拡散係数を基にシミュレーション解析にて予備解析を実施し、実フィールド試験の水素拡散挙動を予測することにより、実フィールド試験における地中水素センサ埋設点の最適化を実施する。
 - ・ 真砂土層のみの場合に比べ、アスファルトを敷設した場合、水素ガスの水平方向への拡散が顕著であったため、土壌層全体に可能な限り均等に水素ガスセンサを配置し、地中水素ガス濃度経時変化を計測することとした。

以上の結果から、アスファルトが水素拡散挙動に及ぼす定性的な特性を明らかにし、以降の章で実施する実フィールド試験の試験条件や計測方法を最適化した。

6. 地中及び大気中の水素濃度分布計測（実フィールド試験）

6.1 実フィールド試験装置の製作

6.1.1 土壤模擬槽及び気密ブースの設計製作

本調査において設計製作した実フィールド試験装置の概要を図 6-1-1 に示す。設計にあたり、計測方法に関する留意事項や総合調査受託事業者等からの助言を踏まえ、以下の点に配慮した。

- ・ 土壤模擬槽に充填する土壤は一般的な埋設土を用い、埋設土上に一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した。
- ・ 埋設土については真砂土を用いるが、本調査においては水素の基礎的な拡散挙動を計測し、シミュレーション解析の再現性を評価することが目的であるため、比較的含水比の低い土壤を充填し水分の影響が少ない状態にて計測を実施した。
- ・ 舗装については 2.2 項 舗装条件の決定にて述べたとおり、実際の舗装構造の多くは、2 層の路盤（下層路盤、上層路盤）の上に 2 層のアスファルト（基層、表層）を施すが、本調査においては舗装有りの条件下における水素の基礎的な拡散挙動を計測し、シミュレーション解析の再現性を評価することが目的であるため、各層を単層化し、路盤 1 層、アスファルト 1 層として計測を実施した。
- ・ 土壤模擬槽の形状は転圧の際の強度保障の観点から円筒形とし、直径については、平成 29 年度に実施した真砂土のみ（舗装無し）の場合と実験結果を比較するため、平成 29 年度と同径のφ7 m とした。
- ・ 土壤模擬槽には実運用で用いられている SUS 製の 32A 配管に外部から開閉可能な機構を有したφ1 mm のピンホール（放出口）を施工し、実運用のガス配管埋設の土壤層深さを想定して、地表面から放出口までの埋設深さを 1.2 m とした。
- ・ 大気中を模擬する気密ブースは、水平方向寸法及び容積を土壤模擬槽より大きく設定し、大気解放状態への水素拡散を模擬するよう考慮し、幅 8 m×奥行 8 m×高さ 3 m として製作した。
- ・ 気密ブースは実験場へ水素が漏えいしないよう配慮し、前述したラマンイメージングにより大気中における水素濃度分布計測を実施するための、レーザ光の導入・射出窓（石英製）を気密ブース側面に設けた。
- ・ レーザ光照射により発生する水素のラマン散乱光をレーザ光軸に直交する方向から高感度カメラにより計測するため、レーザ光導入・射出窓を施工した壁面に対し垂直な面に観測窓を施工した。
- ・ 観測窓は波長 355 nm のレーザ光を照射した場合の水素分子のラマン散乱波長（416 nm）に対し高い透過特性を持つ必要があるため、観測波長において分光透過特性が良い透明ガラス材を用いた。

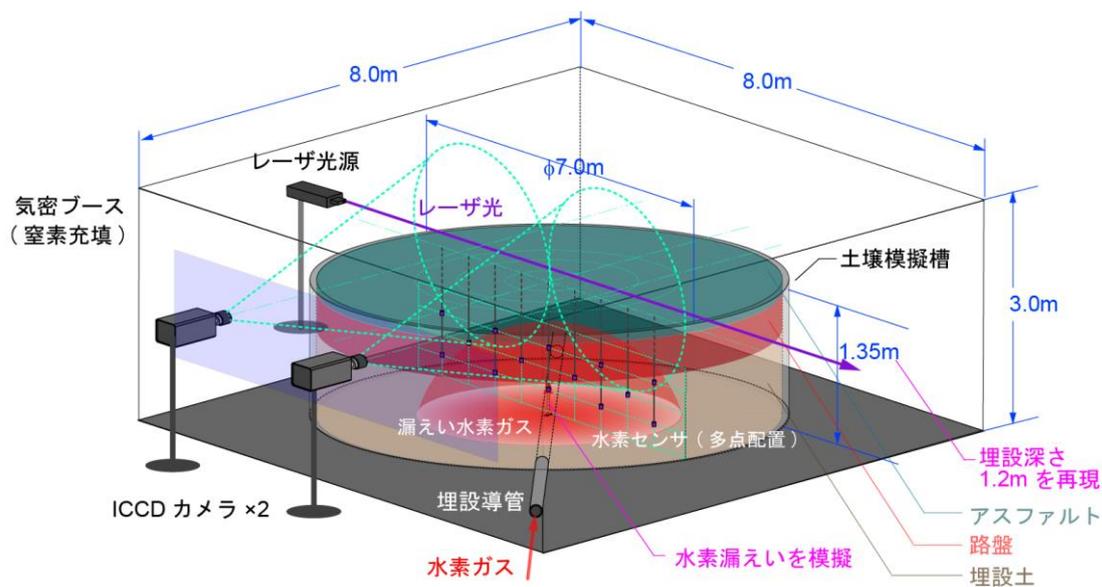
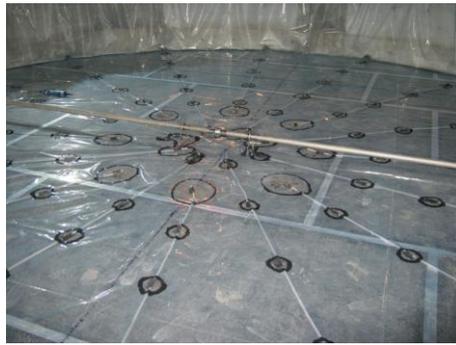


図 6-1-1 フィールド試験概要

図 6-1-2 に土壌模擬槽の製作工程を示す。土壌模擬槽のコンクリート壁の高さは 1.35 m であり、アスファルト表面から放出口までの埋設深さを 1.2 m とした。水平方向については円筒形の中心に放出口が位置するように埋戻しを行った。実フィールド試験における安全性を確保するため、土壌模擬槽及び気密ブースを窒素パージし、水素と酸素を混合させずに実験を実施した。そのため、埋設配管に影響を及ぼさない土壌模擬槽底部に窒素パージラインを円筒形の中心から放射状に 16 本配置した (図 6-1-2(b))。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

図 6-1-2 土壌模擬槽の製作工程

(a)コンクリート壁施工後、(b)ガス配管敷設後、(c)真砂土敷設後
(d)砕石敷設後、(e)アスファルト敷設作業、(f)アスファルト敷設後

また、気密ブースの製作工程を図 6-1-3 に示す。前述したとおり、気密ブースには 355 nm のレーザ光を照射した際の水素ラマン散乱波長 (416 nm) において透過性が高く、カメラの視野を遮ることのないサイズ(幅 5 m×高さ 1.5 m)のガラス窓板を施工した(図 6-1-3(c)、(d))。土壌槽内に 16 本の窒素パージラインを設けたが、大気側の窒素パージを

速やかに行うため、気密ブース壁面にも 4 箇所（4 隅下方）の窒素パージロを設けた。

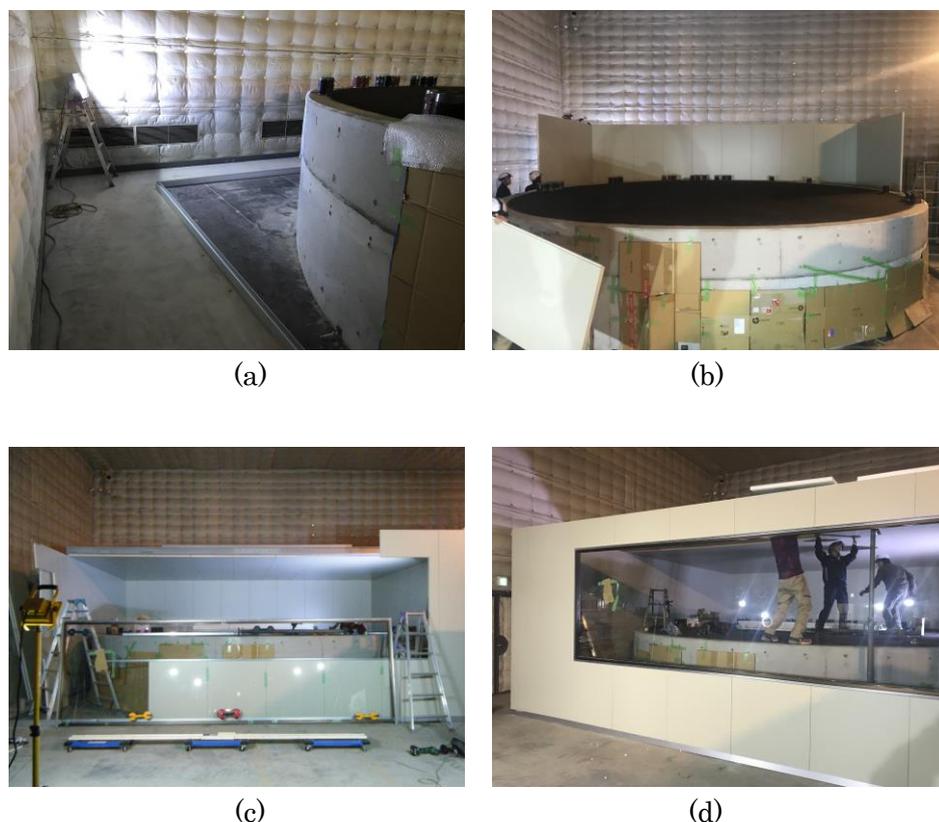


図 6-1-3 気密ブースの製作工程

(a)ベース施工後、(b)壁面施工作業、(c)観測窓取付け前、(d)天井施工・仕上げ作業

6.1.2 埋設配管の設計製作

本調査における実フィールド試験の埋設配管の水素放出機構を図 6-1-4 に、水素放出部の外観を図 6-1-5 に、また、放出口近傍の埋設管設置概要を図 6-1-6 に示す。

開閉機構として電動アクチュエータを用いた可動式の弁を用いる方法もあるが、稼働機構が放出口近傍に占める体積が大きく、配管のみが埋設されている実運用における埋設環境と異なるため、本調査においては、図 6-1-4 に示したとおり配管内に圧力制御により水平移動するピストンを設け、水素供給側と逆側の空間を真空引き又は窒素ガスにより加圧することにより、水素放出口を開閉する機構とした。

図 6-1-6 は放出口近傍の埋設配管設置概要であり、底板（鉄板）から高さ 150 mm に放出口が位置するよう、埋設配管の高さを調整し、水素放出口（ピンホール $\phi 1$ mm）には、土壌試料の粒がピンホールを塞ぐことのないよう、目開き 0.28 mm の SUS304 製メッシュを取り付けた。

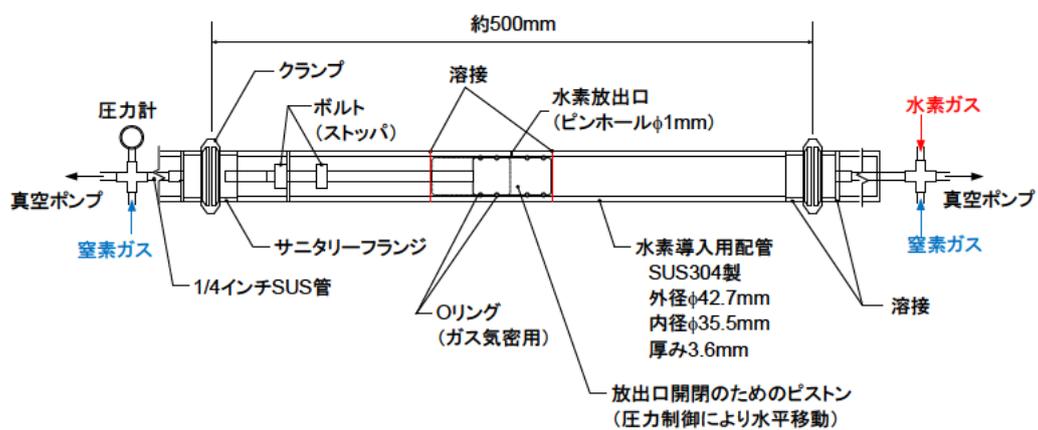


図 6-1-4 埋設配管の水素放出機構

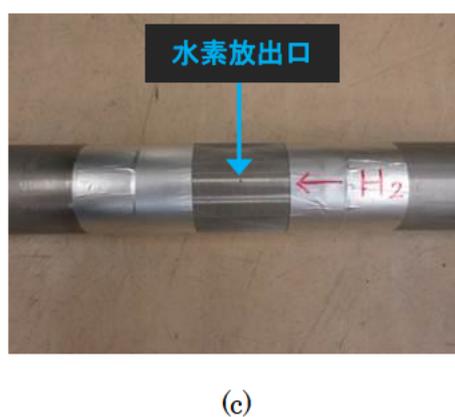


図 6-1-5 水素放出部の外観

(a)バルブ機構部、(b)シリンダ・ピストン、(c)水素放出口

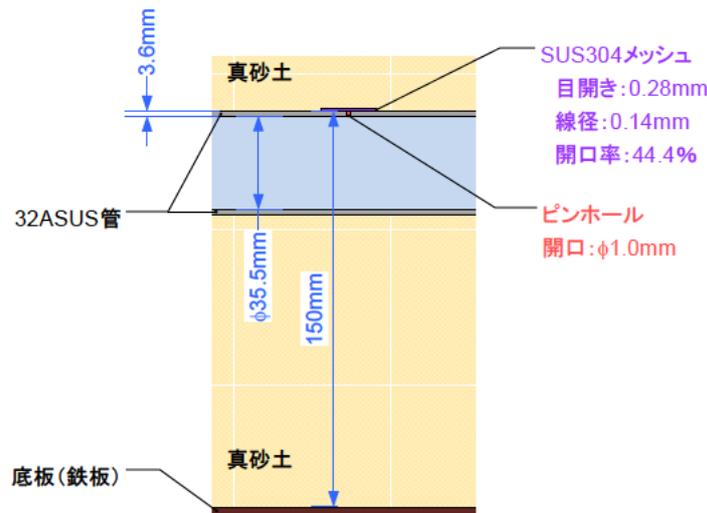


図 6-1-6 埋設配管設置概要 (放出口近傍)

6.1.3 安全対策

本調査は、水素ガスを用いて実験を行う。水素ガスは、着火エネルギーが低く、爆発濃度範囲が広い可燃性ガスであるため、実験時の十分な安全対策が必要である。本項では、実フィールド試験を安全に実施するために施した安全対策について述べる。

(1) 安全対策

ここでは、本調査において生じる事象に対し、燃焼の構成要件を照らし合わせ、確実に安全性が確保できる方法を選定した。

① 可燃性物質：水素

実験の過程において、水素が燃焼（爆発）条件を満たす状態が頻繁に生じるものと想定される。特に、地中における放出口近傍では常時水素濃度 4～75 %の状態であると予想される。

② 点火源：静電気放電等

土壤模擬槽内に真砂土、碎石、アスファルトを敷設し、土壤模擬槽内及び気密ブース内にはドライガスを常時流動させる。また、地中には水素センサが埋設されている。これらの条件で、静電気放電等の点火源の発生を完全に防止することは困難である。

② 支燃物質：酸素（空気）→窒素

土壤模擬槽及び気密ブース内を無酸素環境とすることで、水素及び点火源が存在する状態においても着火を完全に防止することができる。即ち、土壤模擬槽及び気密ブース内の初期状態を窒素ガス 100 %とすることで、無酸素状態が実現でき、安全性が確保できる。本調査の想定は大気環境下における水素拡散挙動であるが、大気の約 80 %は窒素分子で構成されており、分子量で比較しても、大気：28.8 g/mol、

窒素：28 g/mol であり、その差は僅かであることから、水素拡散挙動への影響は概ね大気の場合と一致するものと考えられる。

以上の検討に基づき、本調査では実験環境を窒素雰囲気とすることで安全性を確保することとした。図 6-1-7 に実フィールド試験装置の安全設備概要を、図 6-1-8 に実験場の安全設備概要を示す。また、図 6-1-9 に安全設備の外観を示す。

実験開始時における土壌模擬槽及び気密ブース内の無酸素状態の確認については、図 6-1-7 に示す気密ブース天井部 3 箇所の酸素センサの指示値により無酸素状態を確認した後、水素の導入を開始した。実験終了時は、水素供給停止後速やかに土壌模擬槽及び気密ブース内を窒素パージし、気密ブース天井部 3 箇所及び排気口の水素センサの指示値により水素が存在しないことを確認した後、次の条件における実験を実施した。また、設置した計測器の確認等で気密ブースへ立ち入る必要のある場合は、土壌模擬槽及び気密ブースを窒素パージした後、気密ブース天井部 3 箇所の水素センサの指示値により水素が存在しないことを確認し、更に窒素パージ口から大気を注入して、酸素センサの指示値により気密ブース内が大気に置換されたことを確認してブースの出入り口を解放した。

加えて、万一の気密ブースからの水素又は窒素漏えい時の対策として、図 6-1-8 に示す実験場の 4 箇所の排気口全てに水素センサ及び酸素センサを配置し、窒素パージ時と実験時は常時監視を行った。また、実験場の押込通風機は常時運転状態とし、実験場内を換気した。

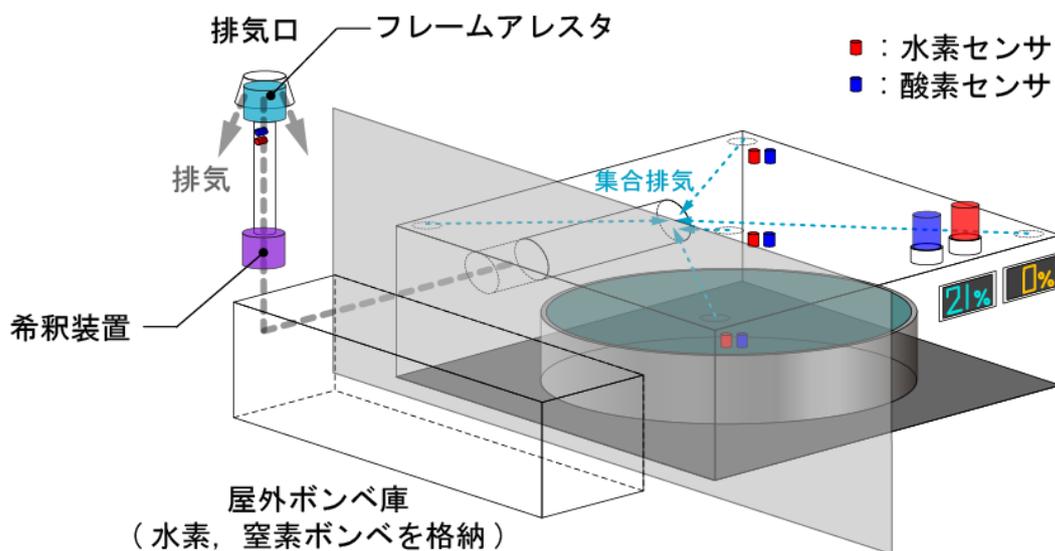


図 6-1-7 実フィールド試験装置の安全設備概要

実験場（無響室）：容積 2514m³

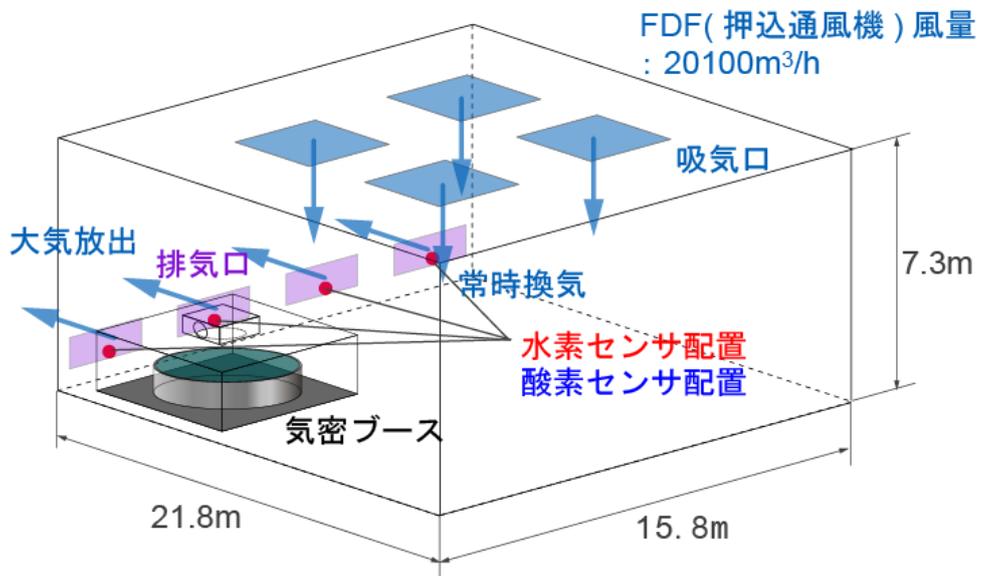


図 6-1-8 実験場の安全設備概要



(a)



(b)



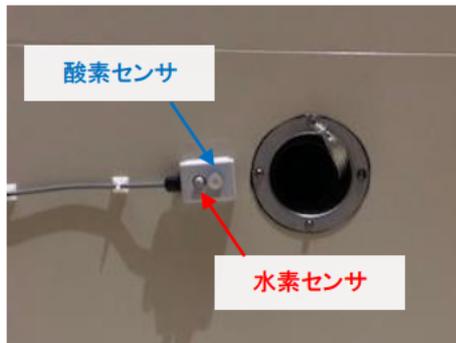
(c)



(d)



(e)



(f)

図 6-1-9 安全設備の外観

- (a)全センサ監視画面、(b)拡大表示モニタ、(c)パトライト、(d)信号処理部
 (e)実験場内監視用ガスセンサ、(f)気密ブース内監視用ガスセンサ

図 6-1-10 に安全設備の警報発報条件を示す。気密ブース内は実験前に窒素パージを行い、無酸素状態で実験を実施する。実験中はブース内の水素濃度が上昇するが、無酸素状態であるため着火することはない。しかし、何らかの原因で気密ブースが大気

と繋がり、水素濃度と酸素濃度の両者が閾値を超過する状態になった場合、水素警報器及び酸素警報器が警報を発報する。また、気密ブースやガス供給系から水素が漏えいし、実験場内の水素濃度が閾値を超過した場合には、水素警報器が警報を発報する。実験場内に水素又は窒素が漏えいし、実験場内の酸素濃度が閾値未満となった場合、酸素警報器が発報する。水素警報器が発報した場合、安全設備からガス供給系の水素ガス緊急遮断装置へ異常設定信号が出力され、即座に水素ガスの供給を遮断する。気密ブース内の異常であれば、速やかに窒素パージを開始し、水素濃度及び酸素濃度が正常となるまで監視する。実験場内の異常である場合、常時運転状態としている押込通風機により、実験場内が十分に換気され、水素濃度が正常となるまで実験場には立ち入らない。酸素警報器のみが発報した場合には、屋外のボンベ庫にてガスの供給を手動で停止し、水素漏えいの場合と同様に常時運転状態としている押込通風機により、実験場内が十分に換気され、酸素濃度が正常となるまで実験場には立ち入らない。

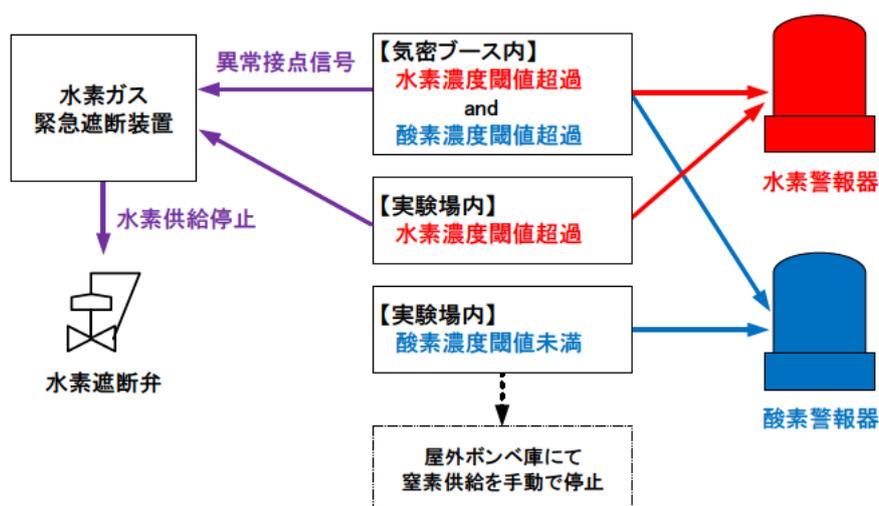


図 6-1-10 安全設備の警報発報条件

(2) ガス供給系

実フィールド試験のガス供給系の概要を図 6-1-11 に、ガス供給系の外観を図 6-1-12 に示す。

ガス供給系は、屋外に設置したボンベ庫と実験場内に設置したアウトレットユニットにより構成される。アウトレットユニット（図 6-1-12(f)）は、調圧器及びガス緊急遮断装置（ガスシャッタ接点）より成る。

ボンベ庫内には、液化窒素ボンベ 3 本×2 系統と、半自動切換減圧弁付の水素ガスボンベ 2 本を格納した（図 6-1-12(a)）。窒素パージ中に液化窒素の系統の切換が必要な場合は手動にて切換を行うが、水素ガスについては、実験中に水素ガスボンベの切

換が必要となった場合においても、速やかに予備ボンベから水素が供給されるよう配慮した。水素及び窒素はボンベ庫内の圧力調整器を介し（図 6-1-12(c)、(e)）、アウトレットユニットの圧力調整器にて所定の圧力まで減圧し気密ブース内へ導入する。パージ用の窒素ガスは、図 6-1-12(d)に示した 20 個の流量計（土壤模擬槽内パージライン×16 個、気密ブース壁パージロ×4 個）を介し放出した。また、水素の流量については、アウトレットユニットの圧力調整器の下流に配置した流量計により計測した（図 6-1-12(f)）。

ガス緊急遮断装置は、気密ブース外壁に設置した地震計が異常を発報する又は前述した安全設備の水素警報器が発報した場合、水素供給系に設置したエア駆動弁に計装用窒素ボンベから窒素が供給され、即座に水素供給を遮断する仕組みとなっている。

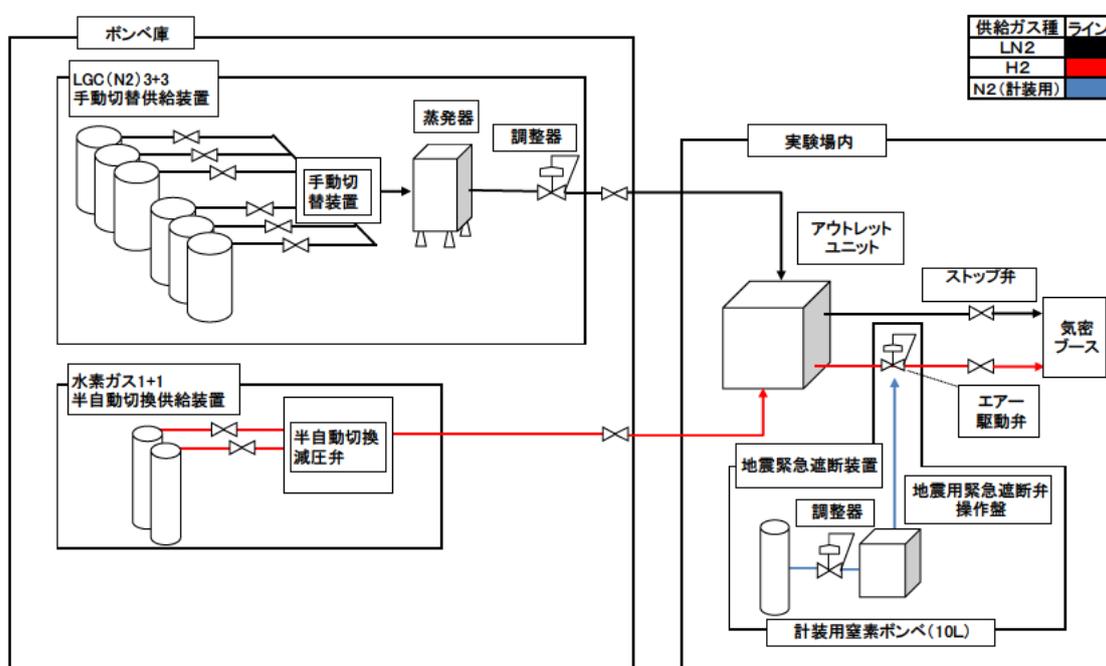


図 6-1-11 ガス供給系構成図



(a)



(b)



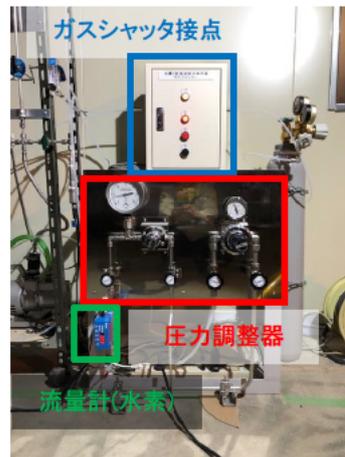
(c)



(d)



(e)



(f)

図 6-1-12 ガス供給系外観

- (a)ボンベ庫、(b)地震計、(c)窒素供給系、(d)流量計 (ページ用窒素)
 (e)水素供給系、(f) アウトレットユニット (圧力調整器・ガスシャッタ接点)

(3) 水素ガスの排気方法

気密ブース内への水素の放出に伴い、屋外排気口から窒素ベースの水素混合ガスが流出する。本実験では、大気の揺らぎや風の影響がない理想的な状態における水素拡散挙動を計測することを目的としているため、本来であれば、容器内への水素の導入に伴って気密ブースから押し出される気体に外力を及ぼすことなく大気へ開放放出することが理想的である。大気放出するに当たっては、水素濃度を爆発下限界である4%以下に十分希釈する必要がある一方で、排気系への希釈用窒素の導入が、気密ブース内からの気体の放出を抑制或いは促進した場合、本来の水素拡散挙動が再現されない。即ち、本実験では、気密ブースから放出される気体の流れに影響を与えない希釈排気方法が必要である。ここでは、図6-1-13に示す手法を用いて、水素ガス濃度を2%以下に希釈し、排気を行った。

気密ブースからの排気系を2分岐し、排気口を下流側とし、上流側から希釈用窒素ガスを導入し、気密ブースから放出された水素ガスと混合する。この時、ブース内は大気圧に設定されているため、そのまま混合させると希釈用窒素ガスは排気系下流側へ流れると共にブース内へも流入し、容器内圧を上昇させる。したがって、ここでは排気系下流側に吸引放出器を配置し、上流側からの希釈用窒素の流れを下流側へ誘導した。同様に吸引放出器の作用が気密ブース内に及んだ場合、容器内圧が低下する。これらの希釈排気系の影響は、いずれも気密ブース内圧力として確認することができることから、気密ブース壁面に微差圧計を設置し、大気圧との差圧を常時監視した。希釈用窒素ガス流量は、本実験において最も水素濃度が上昇する供給圧力10.0 kPaの条件において排気ガス中の水素濃度が2%以下となるように設定した。これに対し、吸引放出器の吸引量を気密ブース内圧力が大気圧を維持するように調節することで、水素拡散挙動に影響を及ぼすことなく、排気する水素ガスを希釈し、安全に排気できる希釈排気方法を実現した。

また、図6-1-14に示すとおり、排気口直前にはフレームアレスタを組み込み、万一の着火に備えた逆火防止機能を付加した。

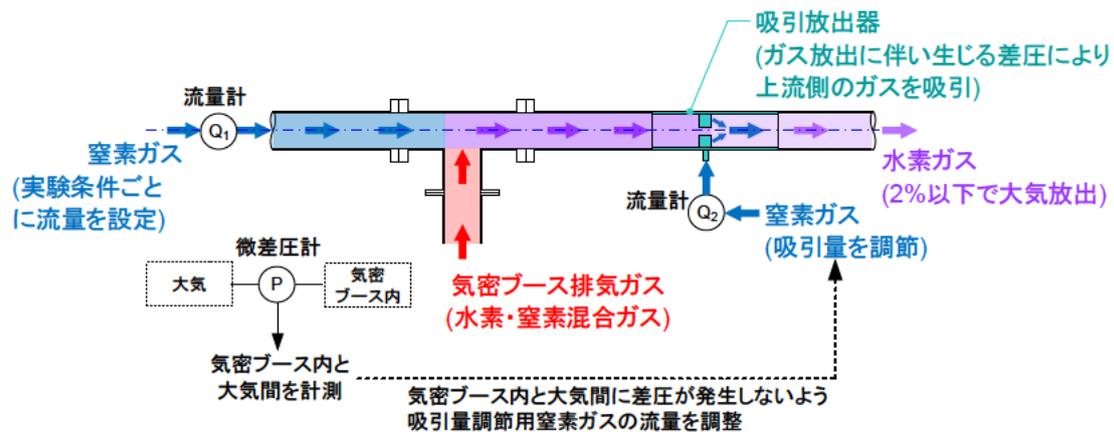


図 6-1-13 本実験における水素希釈排気方法



図 6-1-14 フレイムアレスタ内蔵排気口外観

6.2 実フィールド試験装置構成

3 章で述べた地中及び大気中の水素濃度計測装置及び前節に示した本調査における実験装置の各要素を統合した、全体の装置構成を図 6-2-1 に示す。気密ブース内に配置されるセンサは、

- ・ 地中水素濃度計測用：気体熱伝導式ガスセンサ
- ・ 水素放出条件観測用：圧力センサ、温度センサ
- ・ 土壌模擬槽内圧観測用：圧力センサ
- ・ 保安監視用：酸素センサ、気体熱伝導式ガスセンサ（水素センサ）
- ・ 気密ブース内環境監視用：温度センサ、圧力センサ、湿度センサ

であり、これらの出力とガス供給に係る流量計の出力をデータロガーにより記録した。

表 6-2-1 実験装置に用いた機器の仕様

名 称	型 式 (メーカー)	主な仕様
流量計 (水素用)	8500MM-0-2-1/20SLM (KOFLOCK)	流量レンジ：0～20 L/min センサ方式：熱式巻線センサ 測定精度：±1.0%FS
流量計 (窒素用)	RK20T-V-1/4-N2-50L/MIN (KOFLOK)	流量レンジ：5～50 L/min センサ方式：フロート式 測定精度：±6.0%FS
圧力センサ (水素供給圧力観測) (土壌模擬槽内圧観測)	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ：0～20 kPa センサ方式：感圧素子 測定精度：±0.35%FS
圧力センサ (気密ブース内監視)	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ：±50 kPa センサ方式：感圧素子 測定精度：±0.25%FS
圧力センサ (ピストン移動用窒素)	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ：-100～500 kPa センサ方式：感圧素子 測定精度：±0.25%FS
デジタル微差圧計	GC62 (長野計器)	圧力レンジ：±200 Pa センサ方式：シリコン・キャパシタンス 測定精度：±1.5%FS (差圧表示)
温度センサ	KT6YA (CHINO)	K 熱電対
酸素センサ	OC-6B (光明理化学工業)	検知範囲：0～100% センサ方式：ガルバニ電池式 応答時間：90%10 秒以内
湿度センサ	HM1500LF (Measurement Specialties)	検知範囲：0～100 %RH センサ方式：静電容量型 測定精度：±5.0%RH
データロガー (データ収集)	GM10-1J0/C8/E1 GM90PS-1N1M0 GX90XA-10-U2N-3N (横河電気)	電圧測定範囲：±1 V、±6 V/FS 熱電対測定範囲：-270 < TS ≤ 1370℃ 湿度測定範囲：0～100%



図 6-2-2 実フィールド試験装置外観



図 6-2-3 大気中濃度計測表示部外観



図 6-2-4 地中濃度計測表示部外観

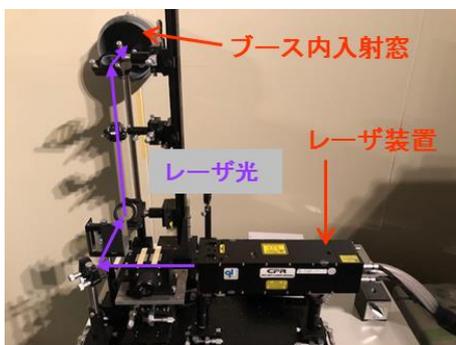


図 6-2-5 レーザ装置外観



図 6-2-6 ICCD カメラ外観

6.3 実フィールド試験における地中水素濃度分布計測

本節では、地中模擬槽内の真砂土層及び碎石層中に 40 点埋設した気体熱伝導式水素ガスセンサによる地中水素濃度の計測結果を示すと共に、アスファルト舗装を施した条件下において漏えいした水素ガスの本質的な挙動について考察した。

6.3.1 水素ガスセンサの配置

本調査における地中水素濃度計測では、気体熱伝導式ガスセンサを直接土壌試料中に埋設した。地中水素ガス濃度計測における地中模擬槽内におけるセンサの配置 (断面図) を図 6-3-1 に示す。

図 6-3-1 に示したとおり、センサの地中模擬槽内での設置箇所については、計測点として 33 点 (①～③③)、拡散挙動の対称性を確認するための 7 点 (③④～④①) を配置した。平成 29 年度事業との比較のため、図 6-3-1 中青色で図示したセンサについては昨年度と同箇所に埋設し、図中にて白色で示したセンサを本年度追加箇所に埋設した。センサの配置は、センサ同士を水平面内或いは鉛直方向で互いに間隔をとって配置することにより水素拡散挙動への影響を抑制し且つ地中模擬槽内全体を網羅できるよう配慮した。

本実験では、地中水素濃度計測と同時に、大気中におけるレーザ計測による水素ガス濃度計測を行う。地中の水素濃度分布と大気中に染み出す水素濃度の関係性を確認するため、レーザ光軸を含む面内にセンサを埋設した。

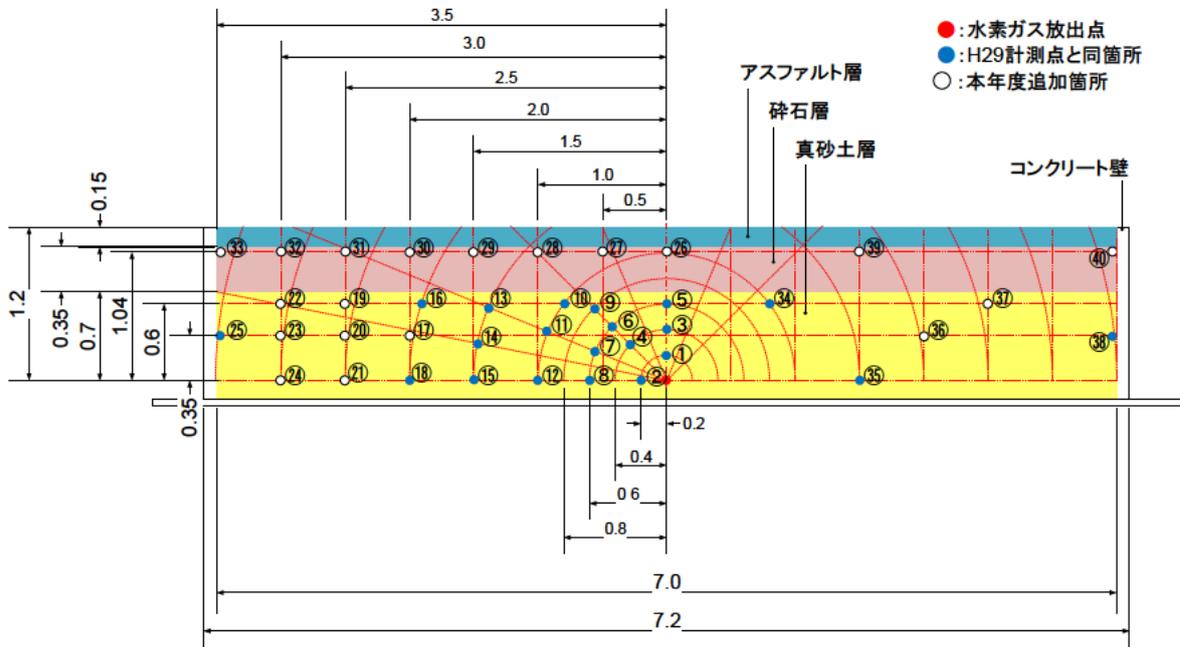


図 6-3-1 地中水素濃度計測におけるセンサの配置

6.3.2 地中水素濃度計測結果

図 6-3-1 に示したセンサ配置により表 2-1-1 に示した No.2-(1)及び(2)の条件下において実施した地中水素濃度計測結果を図 6-3-2～図 6-3-9 にそれぞれ示す。図 6-3-2～図 6-3-5 は供給圧力 2.5 kPa の場合の水素濃度経時変化であり、40 個埋設したセンサのうち埋設番号が小さい順に 10 個ずつを一纏めとしてプロットした。図 6-3-6～図 6-3-9 は供給圧力 10.0 kPa の場合の水素濃度経時変化であり、2.5 kPa の結果と同様にセンサ 10 個ずつを一纏めとしてプロットした。

計測開始時間は、地中への水素放出開始時とした。いずれの条件についても、放出口近傍においては立ち上がりが比較的急峻な濃度上昇を示し変曲点を経て緩やかな変化へと推移し、放出口から比較的離れた位置においては、立ち上がりから緩やかに濃度が上昇する傾向にある。

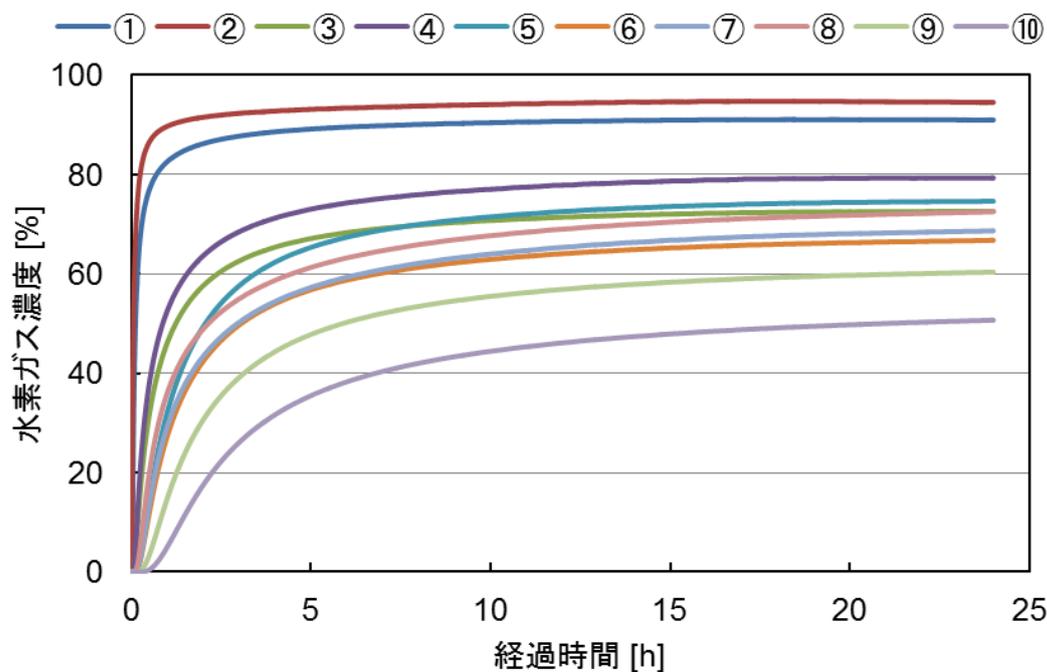


図 6-3-2 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 2.5 kPa、センサ埋設番号①～⑩)

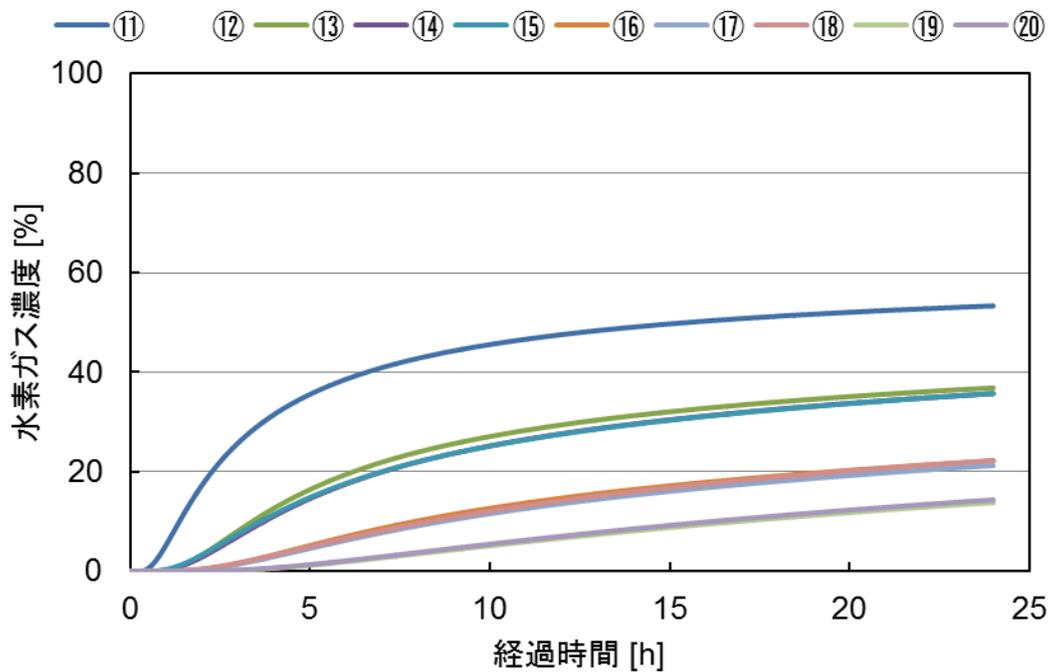


図 6-3-3 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 2.5 kPa、センサ埋設番号①①～①⑩)

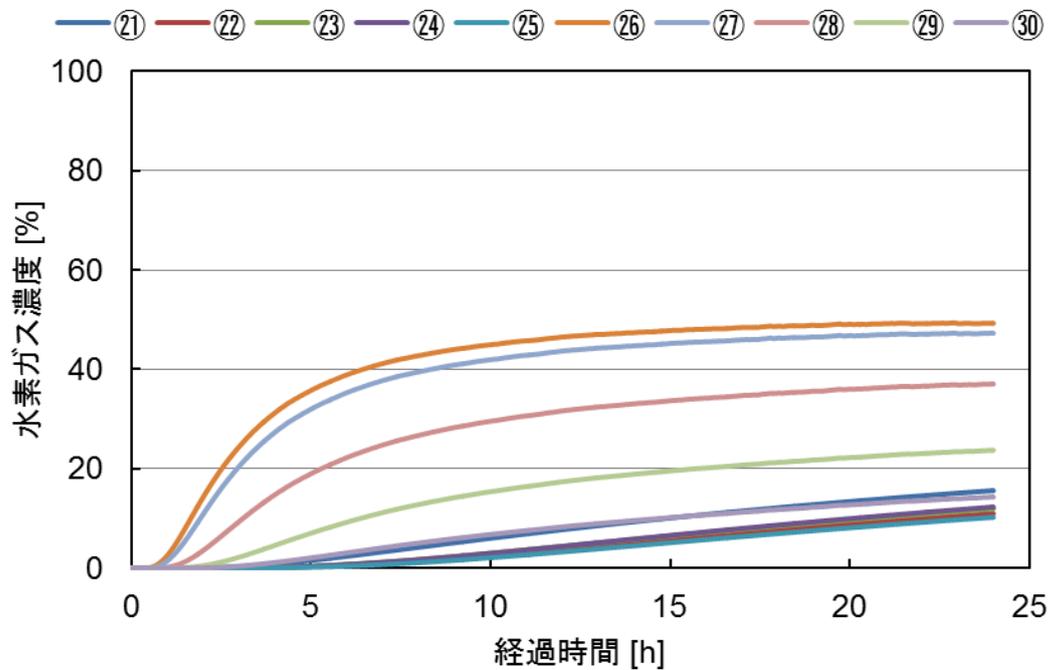


図 6-3-4 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 2.5 kPa、センサ埋設番号②①～②⑩)

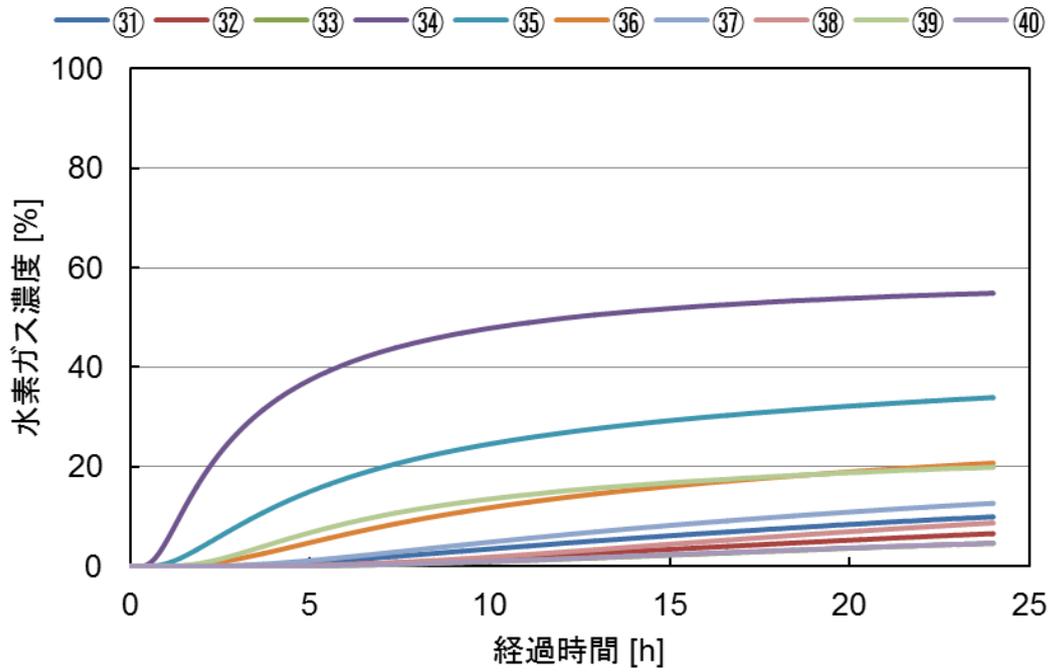


図 6-3-5 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 2.5 kPa、センサ埋設番号③①～④⑩)

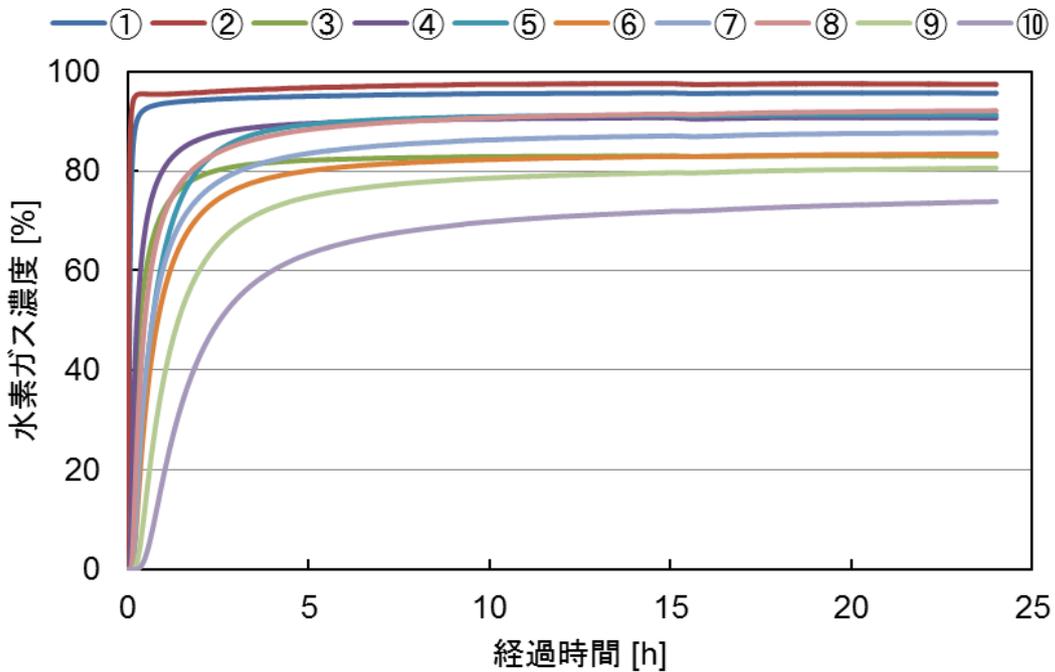


図 6-3-6 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 10.0 kPa、センサ埋設番号①～⑩)

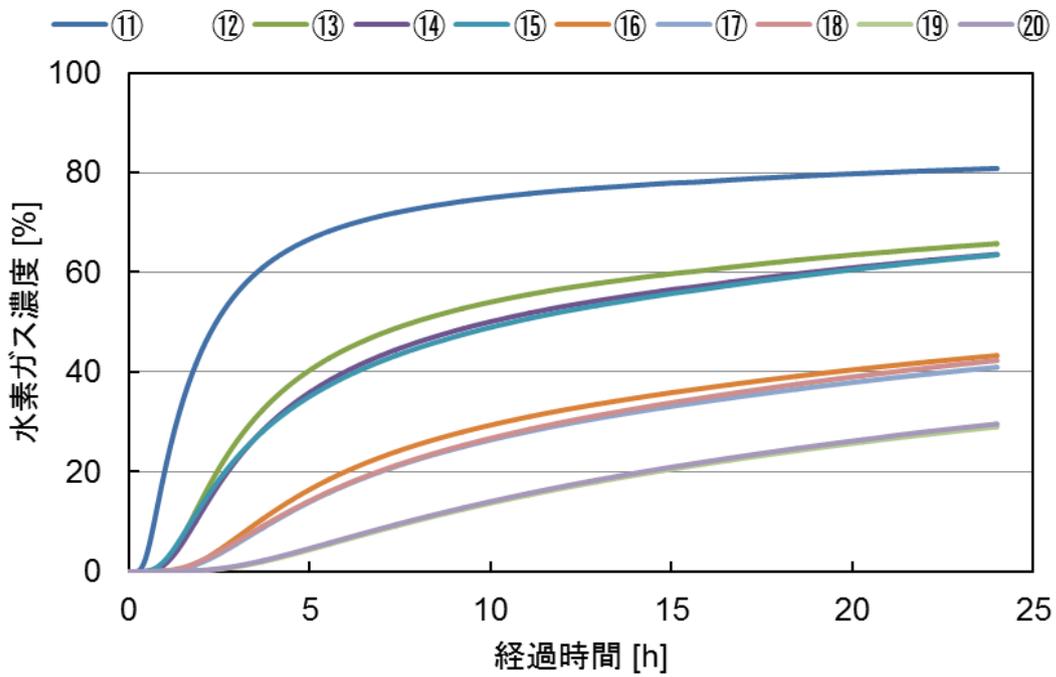


図 6-3-7 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 10.0 kPa、センサ埋設番号⑪～⑳)

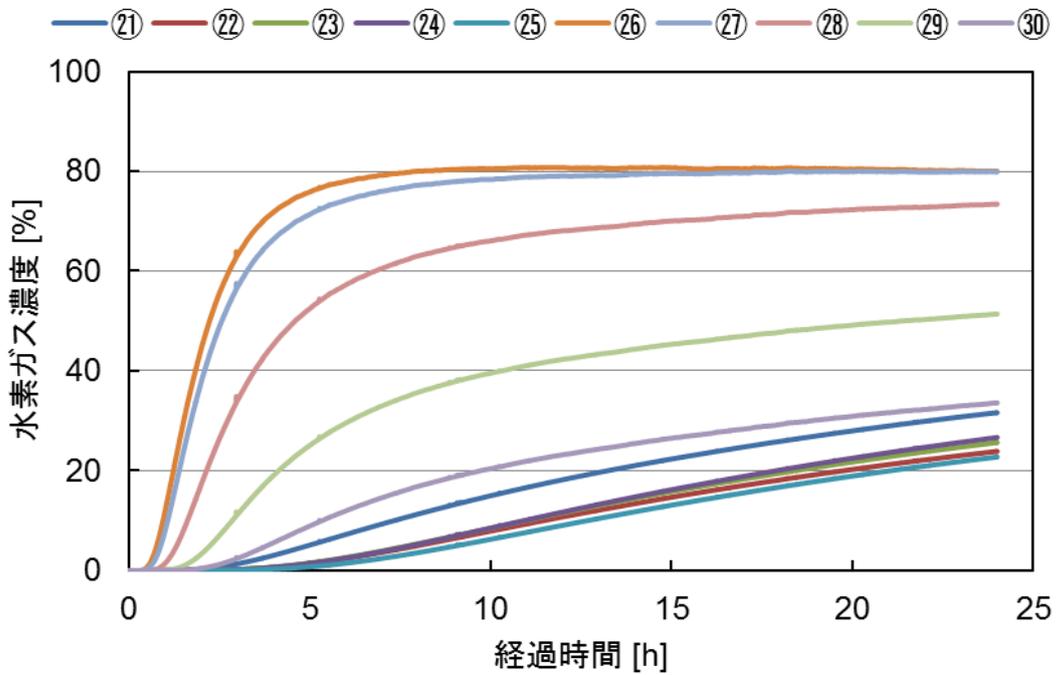


図 6-3-8 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 10.0 kPa、センサ埋設番号㉑～㉓)

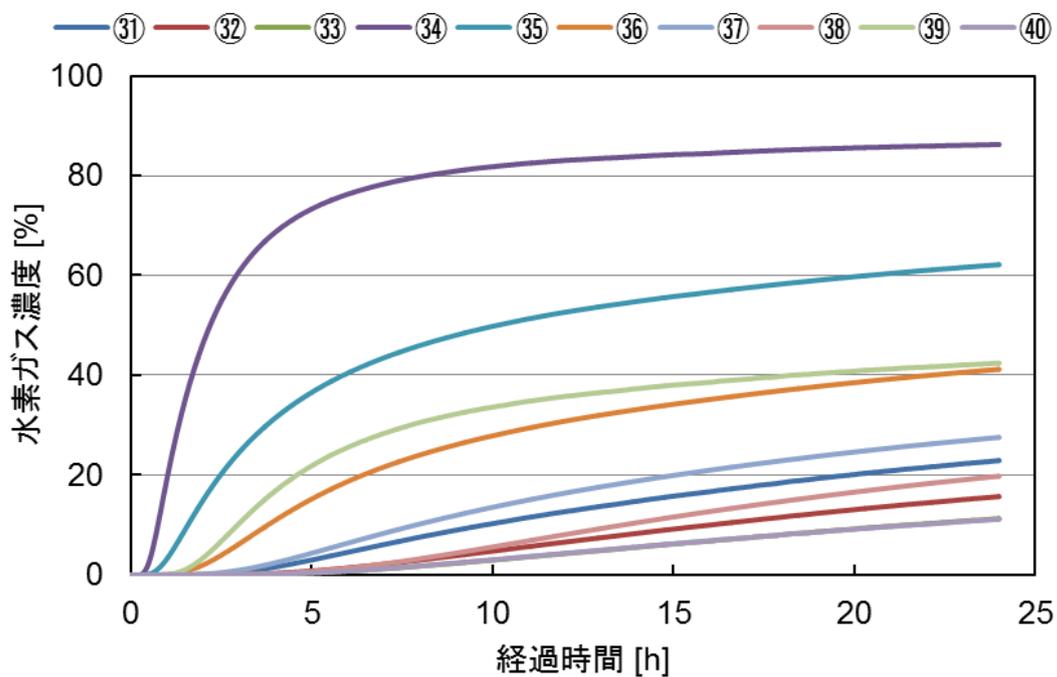


図 6-3-9 地中の水素濃度経時変化
(供給圧力 10.0 kPa、センサ埋設番号③①～④⑩)

6.3.3 考察

前項に示した地中水素濃度計測結果に基づき、地中における漏えい水素ガス拡散挙動について考察する。

図 6-3-2～6-3-5 に示した供給圧力 2.5 kPa の場合の地中水素濃度経時変化のうち、同心円上の埋設点について整理した結果を図 6-3-10 に、図 6-3-6～6-3-9 に示した供給圧力 10.0 kPa の場合について同様に整理した結果を図 6-3-11 に示す。

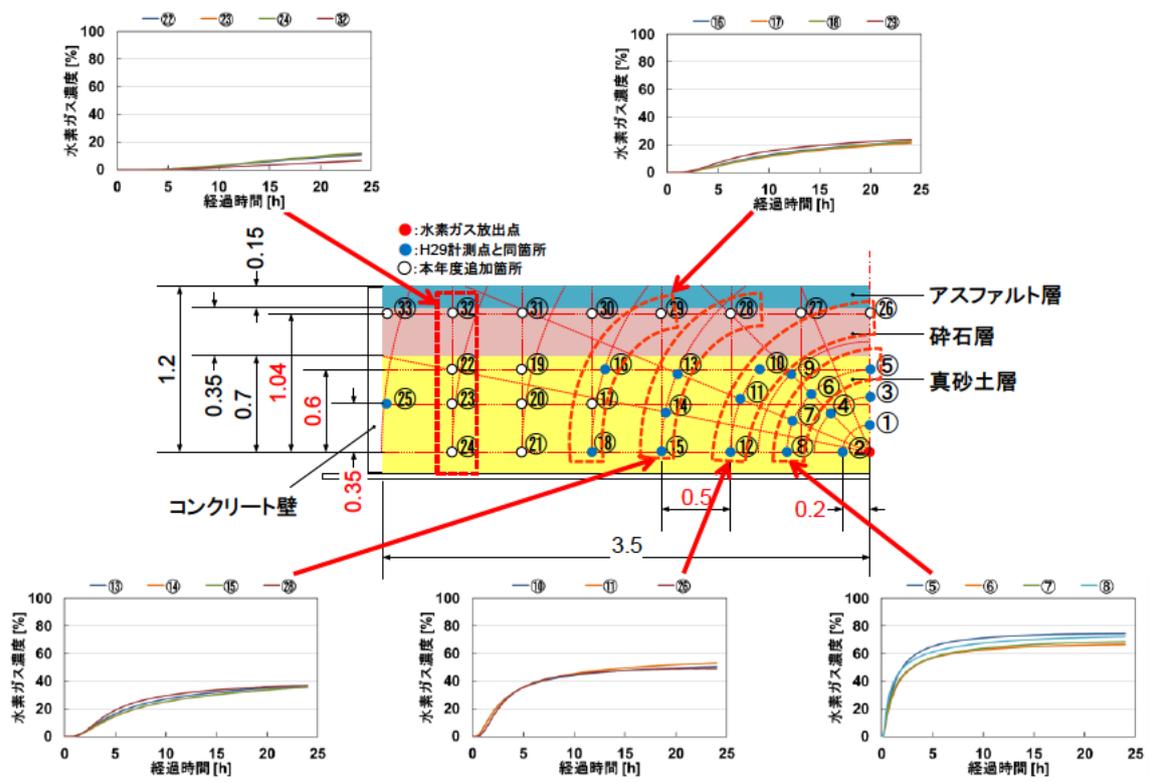


図 6-3-10 同心円上の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(供給圧力 2.5 kPa)

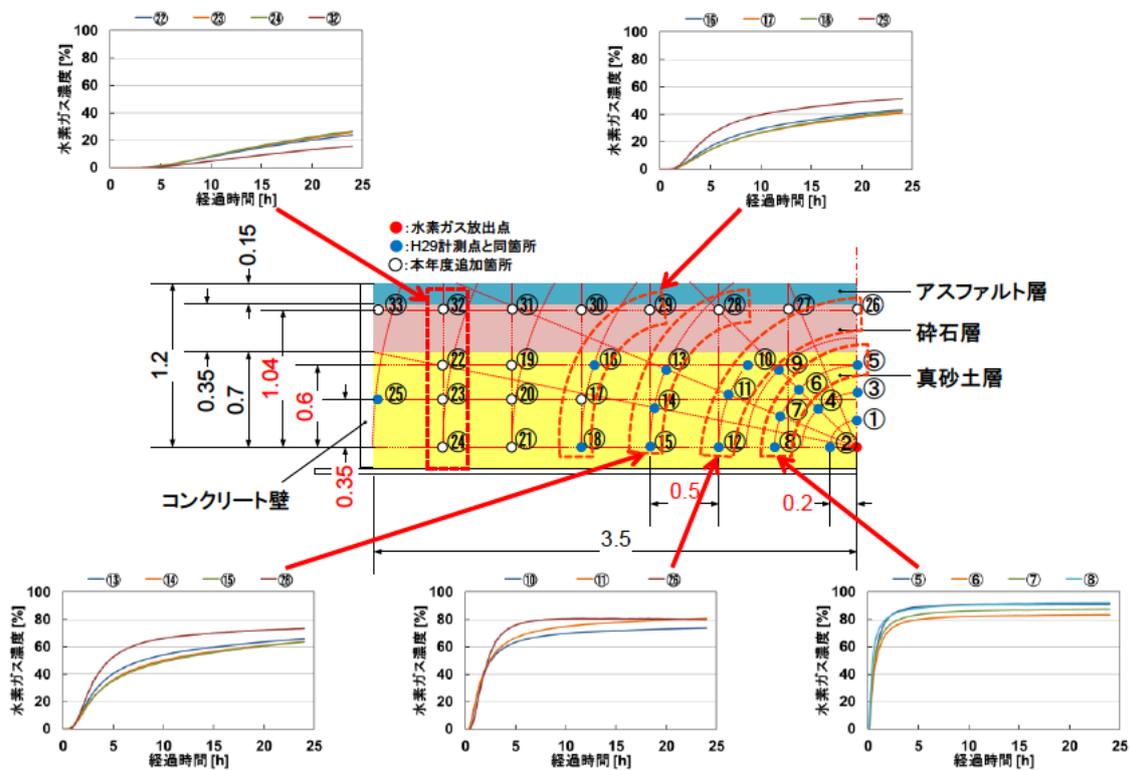


図 6-3-11 同心円上の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(供給圧力 10.0 kPa)

図 6-3-10 及び図 6-3-11 に示したとおり、同心円上に埋設したセンサはほぼ同一の経時変化を示し、水素が放出口を中心とし同心円状に拡散することが明らかとなった。

また、図 6-3-12 に供給圧力 2.5 kPa の場合の、水素放出軸を対称軸とした線対称の埋設点の水素濃度経時変化の比較結果を示す。

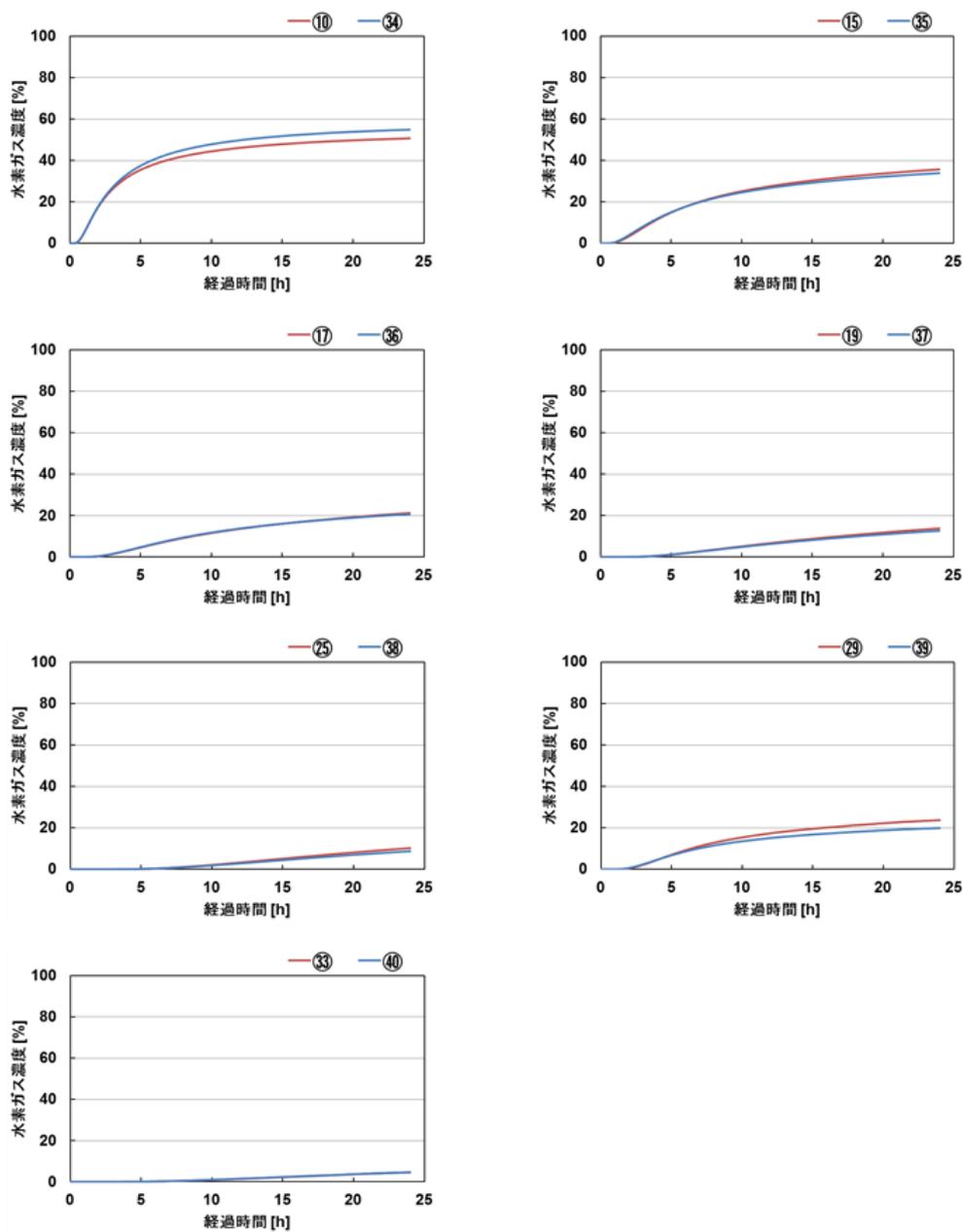


図 6-3-12 水素放出軸を対称軸とした線対称の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(供給圧力 2.5 kPa)

図 6-3-12 に示したとおり、水素放出軸を対称軸として水素濃度経時変化は線対称となっている。土壌条件の均一な理想的な条件下においてガスは放出軸に対して軸対称に拡散するため、これらの結果から、本試験における真砂土層、碎石層、アスファルト層の各層が均一に施工されていることが分かる。

図 6-3-13 及び図 6-3-14 に供給圧力 2.5 kPa の場合と供給圧力 10.0 kPa の場合の水素拡散挙動のカラープロットを示す。図中の黒枠が幅 7.0 m、高さ 1.2 m の土壌模擬槽の断面を表し、座標(0, 0)に水素放出口が位置する。図中の色付きの矩形により地中に埋設

したセンサの濃度値を示し、センサの濃度値を直線補間することにより得たコンター図を背景として、各条件における水素の広がりを視覚的に示した。前述したとおり、本試験では水平方向の座標が負の値をとる位置に多くのセンサを埋設したが、図 6-3-12 に示したとおり水素拡散の対称性が確認されたため、水平方向の座標が正の値をとる位置に、負の値をとる位置のセンサの濃度値を反映させ、層の断面全体の濃度変化として図 6-3-13 及び 6-3-14 に示した。

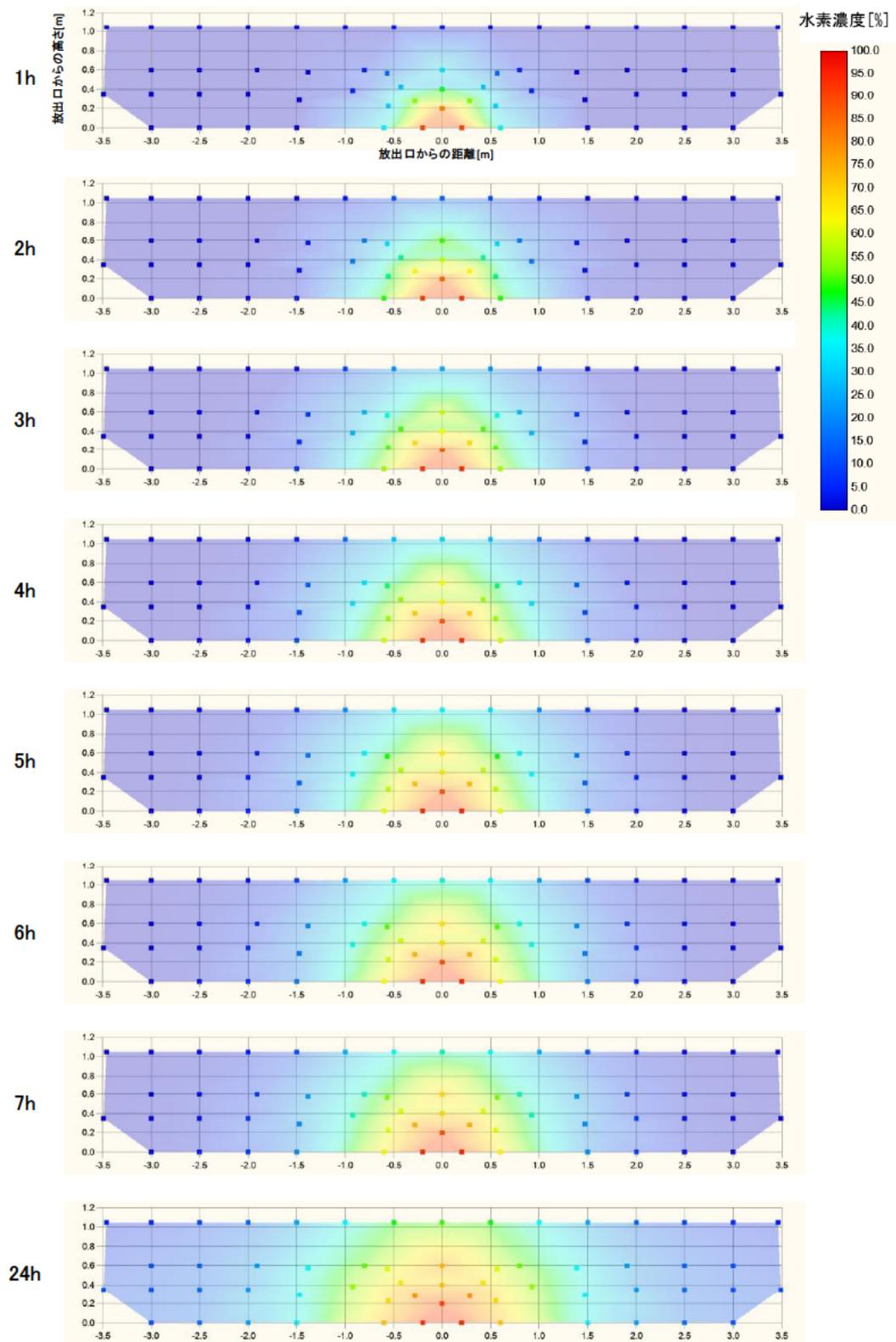


図 6-3-13 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 1~7 h、24 h)

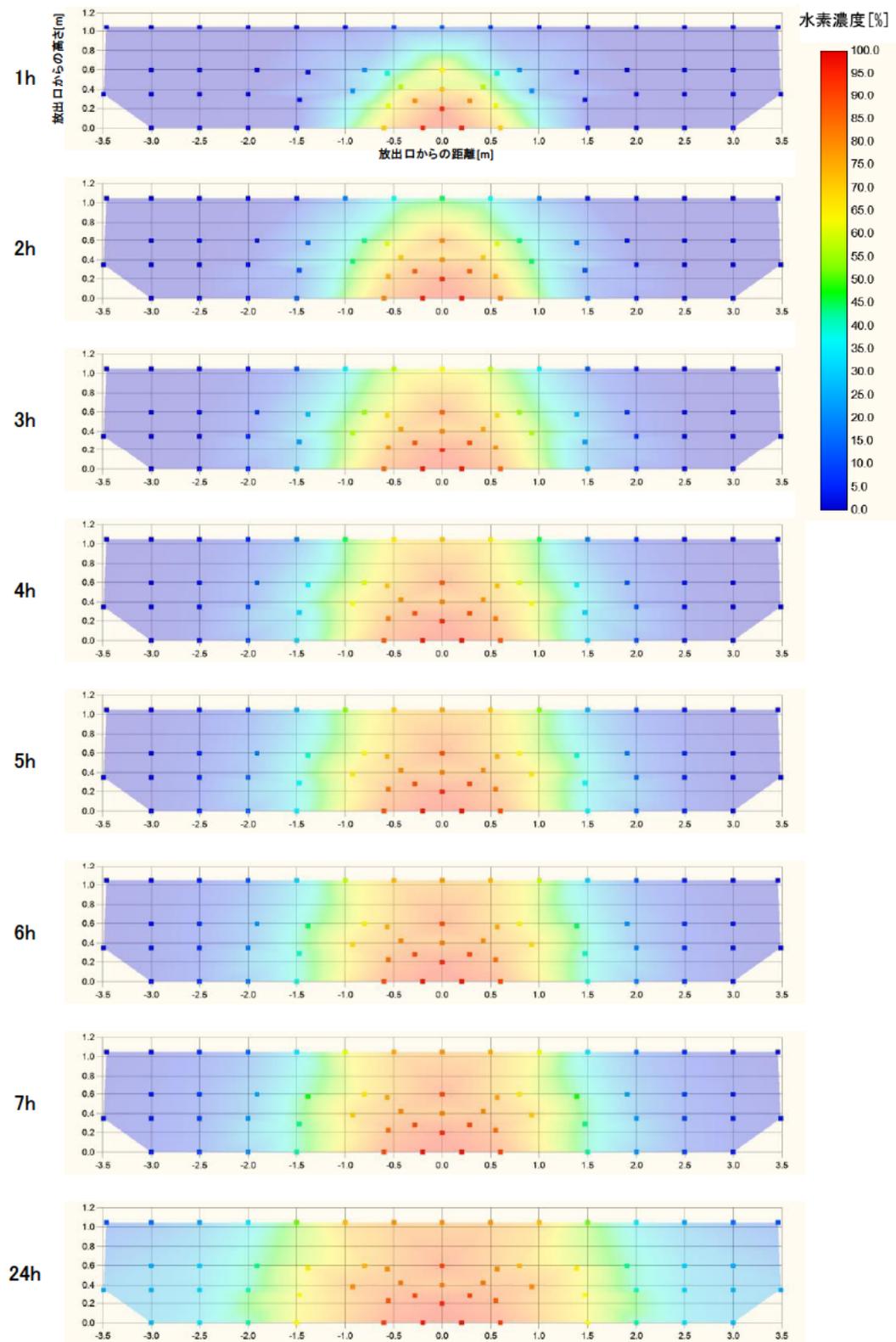


図 6-3-14 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 10.0 kPa、経過時間 1~7 h、24 h)

図 6-3-13 及び図 6-3-14 から水素が同心円状に拡散していく様子が分かる。また、両者の図を比較すると、供給圧力が 10.0 kPa の場合、2.5 kPa に比べ水素流量が増加するため、それに伴い、水素濃度上昇が早く、広範囲に水素が広がっていることが分かる。

水素の爆発濃度範囲の下限値は 4% であるため、図 6-3-13 及び図 6-3-14 に示した結果から、水素濃度が 4% 以上となる範囲の変化を抽出した結果を、図 6-3-15 及び図 6-3-16 に示す。図 6-3-15 が 2.5 kPa の場合であり、図 6-3-16 が 10.0 kPa の場合である。

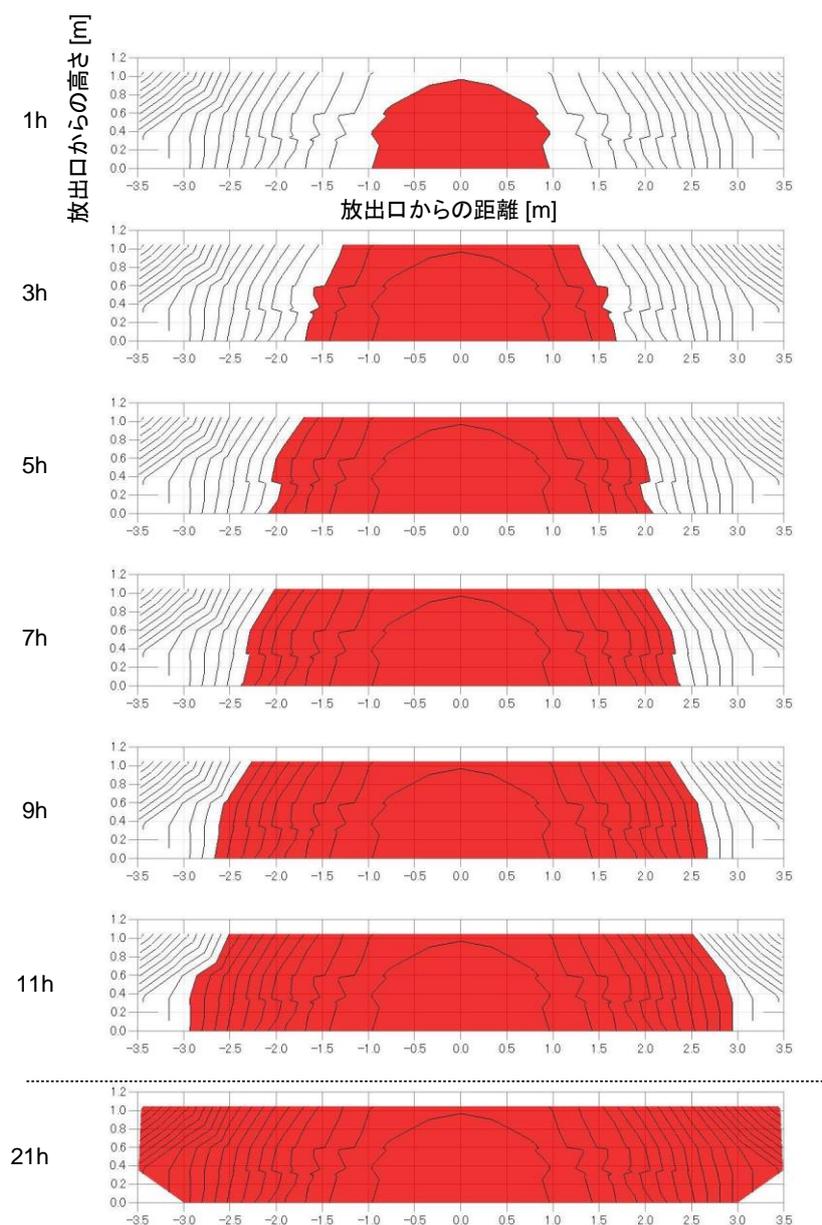


図 6-3-15 水素濃度が 4% 以上となる範囲の拡がり
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 1、3、5、7、9、11、21 h)

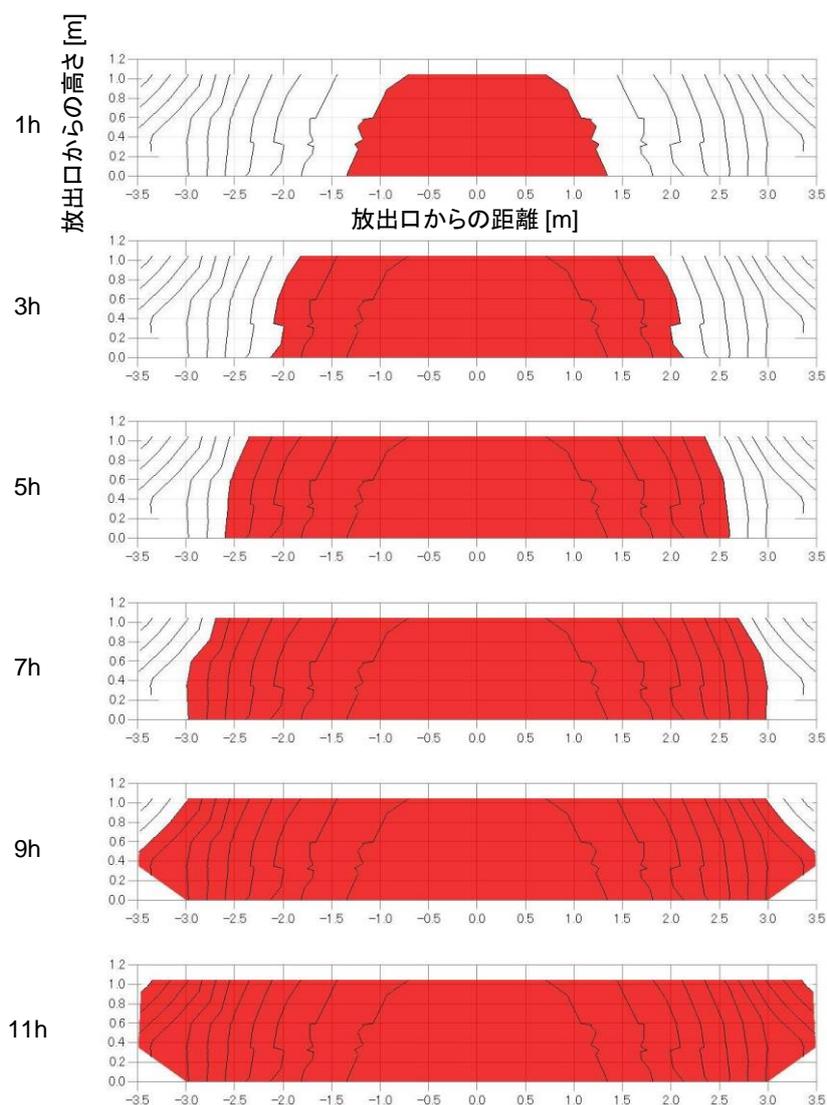


図 6-3-16 水素濃度が 4 %以上となる範囲の拡がり
(供給圧力 10.0 kPa、経過時間 1、3、5、7、9、11 h)

図 6-3-15 と図 6-3-16 を比較すると、水素流量の多い 10.0 kPa の方 4 %以上となる範囲の発達早い。しかしながら、2.5 kPa の場合においても、漏えい開始から 1 時間で放出口から 1 m 以内で 4 %以上となり、時間の経過と共に危険範囲は徐々に増え続ける。実現場での復旧作業の際には、漏えい箇所の近傍では水素が爆発範囲の濃度で存在することを念頭に作業を実施する必要がある。

図 6-3-17 及び図 6-3-18 は、放出口と水素センサの離隔距離と水素ガス濃度の関係について整理した結果である。図 6-3-17 は供給圧力 2.5 kPa の場合、図 6-3-18 は供給圧力 10.0 kPa の場合についての結果である。

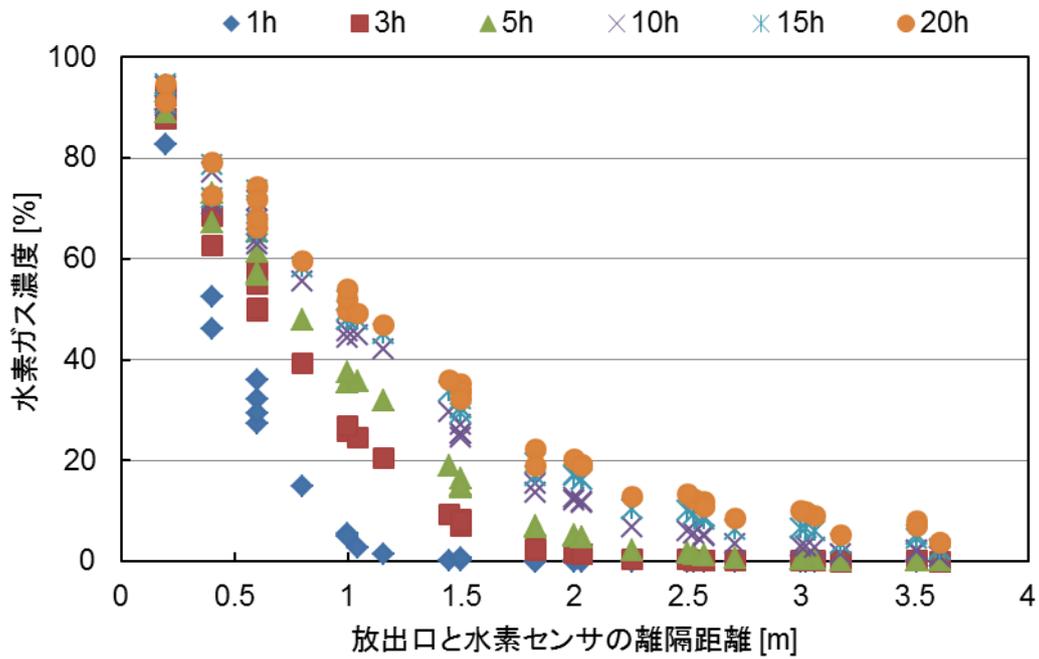


図 6-3-17 放出口と水素センサの離隔距離と水素濃度の関係
(供給圧力 2.5 kPa)

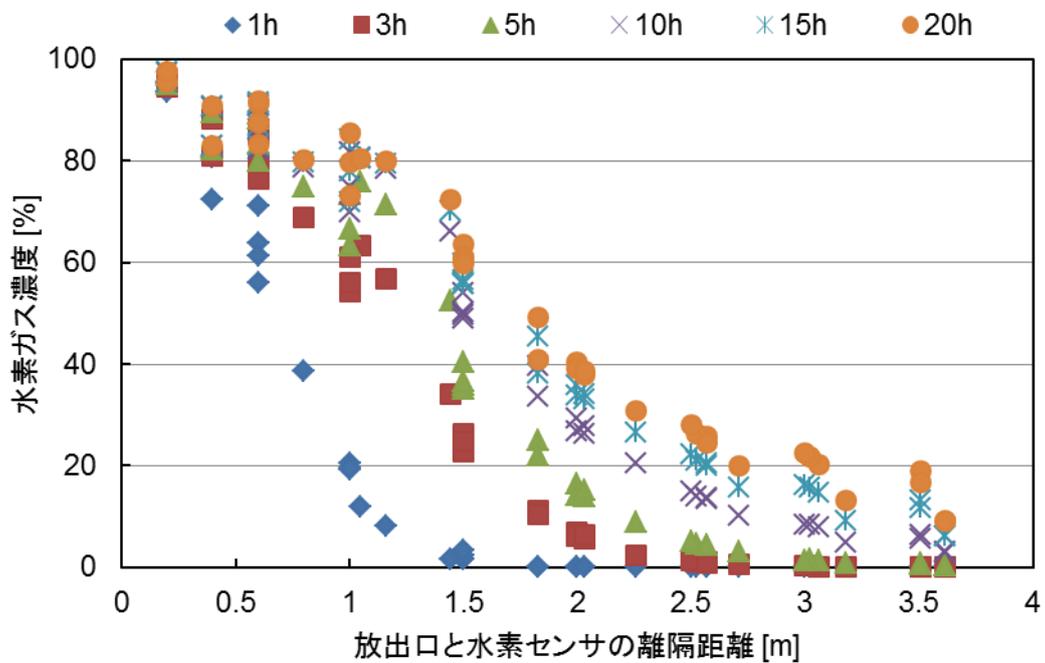


図 6-3-18 放出口と水素センサの離隔距離と水素濃度の関係
(供給圧力 10.0 kPa)

図 6-3-17 より、供給圧力 2.5 kPa において放出口と水素センサの離隔距離と水素濃度の関係の特徴は以下のとおりであった。

- ・ 放出口近傍（離隔距離 0.2 m 以下）については、放出開始から急激に濃度が上昇し、3 h 程度で濃度上昇が飽和する。
- ・ 放出口からの離隔距離が 0.2～1.5 m の範囲では、放出開始からの濃度上昇勾配が急峻であり、およそ 5 h 程度で濃度上昇の変曲点に達し、その後濃度が徐々に上昇する。
- ・ 放出口からの離隔距離が 1.5 m より大きい範囲では、放出開始後 3 h 程度から緩やかに濃度が上昇する。

供給圧力が 10.0 kPa においては、図 6-3-18 に示したとおり、

- ・ 放出口近傍では、放出開始から急激に濃度が上昇し、3 h 程度で濃度上昇が飽和する範囲が 2.5 kPa の場合より広がり、離隔距離 0.6 m 以下の範囲で同様の特徴が見られる。
- ・ 放出口からの離隔距離が 0.6～1.5 m の範囲では、放出開始からの濃度上昇勾配が急峻であり、およそ 5 h 程度で濃度上昇の変曲点に達し、その後濃度が徐々に上昇する。
- ・ 放出口からの離隔距離が 1.5～2.0 m の範囲では、放出開始後 1 h 程度から濃度が徐々に上昇する。
- ・ 放出口からの離隔距離が 2.0 m より大きい範囲では、放出開始後 3 h 程度から緩やかに濃度が上昇する。

供給圧力が大きくなると水素の流量が増加し、これに伴い、急激に水素濃度が上昇する範囲が広がる。実現場において水素漏えいが発生した際には、地中に漏えいする水素の流量のモニタリングをした上で、濃度観測点での濃度上昇の特徴と照らすことにより、漏えい位置の推定が可能となる。

次に、平成 29 年度の調査事業において、舗装を施さない真砂土のみの場合について同様の試験を実施した結果と本年度の実験結果を比較する。昨年度、真砂土のみを充填した土壤模擬槽に 2.5 kPa の供給圧力にて水素を放出したところ、流量は 1.93 L/min であった。本年度、舗装を施した上で 2.5 kPa の供給圧力の場合、流量は 3.34 L/min となり、昨年度に比べ流量が増加した。地中に放出する水素の流量は特に放出口直近の土壤の締め固め具合に依存するため、昨年度の方が放出口直近の土壤が締め固まっていたことが原因と推察される。

そこでここでは、昨年度試験を実施した際の水素放出流量 1.93 L/min に流量を合わせ、アスファルト舗装を施した条件下にて地中水素拡散挙動の確認試験を実施した。地中水素濃度経時変化のうち、同心円上の埋設点について整理した結果を図 6-3-19 に示す。

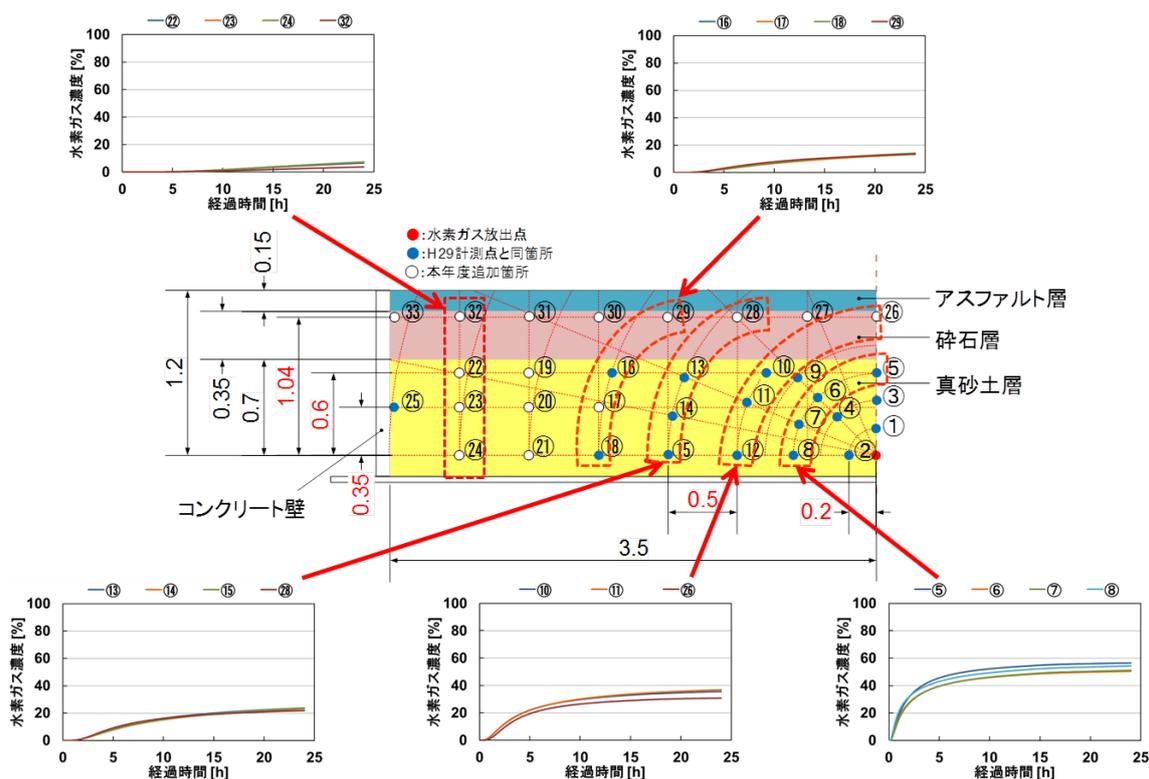


図 6-3-19 同心円上の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(流量 1.93 L/min)

図 6-3-19 に示したとおり、流量を 1.93 L/min とした場合についても、水素は同心円状に拡散する特徴を持つ。

本試験により得られた結果と、昨年度の真砂土のみの場合の試験結果について、真砂土層を上層、中間層、下層の 3 層に分け、層ごとの水平方向のガスの広がりについて整理した結果を表 6-3-1 に示す。本年度は真砂土の上に碎石を敷設し、碎石層にもセンサを配置し濃度変化を計測したため、参考として上層（碎石層）の濃度分布についても表中に記載した。

表 6-3-1 舗装が有る場合と無い場合の層ごとの水素濃度の比較
(流量 1.93 L/min、放出開始から 5 h までの比較)

	舗装有り	舗装なし (真砂土のみ)
<p>上層 (碎石層) (放出口からの高さ 1.05 m)</p>		<p>グラフ凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 5.0h ● 4.5h ● 4.0h ● 3.5h ● 3.0h ● 2.5h ● 2.0h ● 1.5h ● 1.0h ● 0.5h
<p>上層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0.6 m)</p>		
<p>中間層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0.35 m)</p>		
<p>下層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0 m)</p>		

表 6-3-1 に示したとおり、真砂土のみの場合とアスファルトを敷設した場合では水素拡散の特徴が大きく異なる。真砂土のみの場合は、放出開始から時間が経過しても水平距離が 1.5 m より離れた位置では水素濃度の上昇がごく微量であった。これに対し、アスファルトを敷設した場合、放出開始から徐々に水素が水平方向にも拡散し、高濃度の領域が真砂土のみの場合に比べ大きくなっていることが分かる。特に、上層では、真砂土のみの場合、大気層とのガスの交換作用から、中間層及び下層に比べ水素濃度が低い状態となるが、アスファルトを舗装した場合、ガスの閉じ込め効果により、上層（真砂土層）で真砂土層のみの場合に比べ凡そ 3 倍の水素濃度であった。

以上の結果から、舗装が無い場合と有る場合を比較すると、舗装が有る場合の方が水素の閉じ込め効果が高く、ガスが高濃度となる領域の拡大が時間の経過と共に徐々に進むため、実現場にて水素漏えいが発生した際は、漏えい開始からの経過時間を念頭に置き、安全対策を実施すると共に、被害拡大を防ぐために迅速な復旧作業を実施する必要がある。

6.3.4 まとめ

実現場を想定し、舗装を施した土壤模擬層に気体熱電動式ガスセンサを 40 箇所配置し、各点における水素ガス濃度の経時変化により、地中における水素拡散挙動を観測した結果、以下の結論を得た。

- ・ 地中における水素ガスの広がり、ほぼ同心円状の挙動を示す。
- ・ 本試験条件の範囲において、水素濃度が爆発範囲となる領域は水素放出開始から徐々に拡大し、供給圧力 2.5 kPa では凡そ 21 時間後、10.0 kPa では凡そ 11 時間後に土壤模擬層内のほぼ全ての領域で 4%以上の濃度となった。
- ・ 本試験条件の範囲において、放出口近傍（～0.5 m 程度）では水素放出開始から、急激に濃度が上昇する。
- ・ 放出口からの離隔距離 0.5 m 程度～1.5 m の範囲では、放出開始からの濃度上昇勾配が急峻であり、およそ 5 時間程度で濃度上昇の変曲点に達し、その後濃度が徐々に上昇する。
- ・ 放出口からの離隔距離が 1.5 m より離れた範囲では、放出開始から条件に応じ数時間の遅延時間を経た後（2.5 kPa の場合 3 時間、10.0 kPa の場合 1 時間程度）、徐々に水素濃度が上昇する。
- ・ 同流量にて水素を放出した条件にて、舗装が無い場合と有る場合を比較すると、舗装が有る場合の方が水素の閉じ込め効果が大きく、水平方向への拡散が促進され、高濃度の水素が検出される範囲が拡大することが明らかとなった。

6.4 実フィールド試験における大気中水素濃度分布計測

本項では、地中を通過し地表面から大気中に染み出した漏えい水素ガスの拡散を模擬し、気密ブース内の大気中地表面上において拡散する水素ガスをレーザラマンイメージングにより可視化すると共に空間濃度分布を計測した結果を示し、大気中における水素ガス拡散挙動の基本的な特徴について考察した。

6.4.1 観測領域

前述のとおり、本調査で用いるレーザラマンイメージングでは、観測空間中に波長 355 nm のレーザ光を大気模擬槽内に照射し、水素分子から生じるラマン散乱光(波長 416 nm)を気密ブースの外部から ICCD カメラにより撮像することにより、水素拡散挙動を可視化すると共に、得られた画像のラマン散乱光の輝度分布から水素ガス濃度分布を計測する。ここでは、図 6-4-1 に示すように、地中と大気中の境界である地表面に注目し、アスファルト表面から高さ 20 mm の位置で円の中心点を通るように水平にレーザ光を照射し、水素ガスの可視化を行った。時間分解能は 30 s である。

本手法における観測領域は、ICCD カメラの視野内におけるレーザビームの伝搬領域となる。本実験には ICCD カメラを 2 台使い、水素ラマン散乱光を撮像した。カメラ 1 台当たりのレーザ光軸上の視野は 3.2 m であり、2 台のカメラの撮像範囲が不連続となるのを避けるため、光軸上で 2 台のカメラの視野が 0.5 m 分重なるように設置した。レーザ光のビーム径は照射範囲内において約 ϕ 15 mm であるため、本実験におけるラマン観測範囲は、放出口直上を原点とした水平距離 \pm 2.9 m における高さ 15 mm の領域となる。観測領域のうち、放出口直上を原点とし、地中水素センサを多く埋設した側に向かって 0.5 m 刻みで大気側計測点(濃度評価点)を 6 点設定し(④～⑩)、大気中水素濃度の経時変化を評価した。

本実験装置では、比較的大容量の気密ブースにより大気模擬槽を形成しているが、排気口、即ち外気との接触面が、天井部に配置された 5 箇所の排気口(直径 ϕ 100 mm)のみである点が、実際の屋外環境と大きく異なる。したがって、大気側の観測は、水素濃度が低い比較的初期の段階では屋外環境を良好に再現するが、時間の経過と共に、閉鎖空間における挙動の特徴が顕著になっていくものと推察される。

本実験における大気側の観測は、漏えい量の多い供給圧力 10 kPa とした実験において、気密ブース天井部 3 箇所に設置した安全監視用水素センサの指示値が 4% 以下となる範囲において実験を実施し、計測時間を 24 h とした。

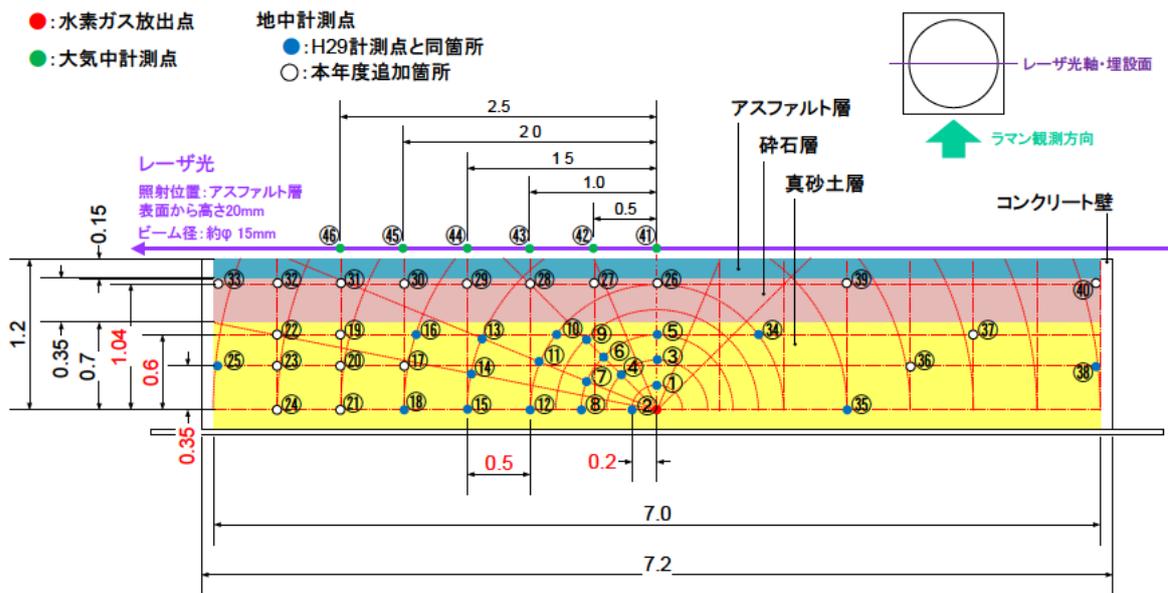


図 6-4-1 大気中水素濃度分布計測の観測領域

6.4.2 大気中濃度分布計測結果

本試験により得られた各計測点の水素濃度経時変化を図 6-4-2 及び図 6-4-3 に示す。図 6-4-2 は供給圧力 2.5 kPa の場合、図 6-4-3 は供給圧力 10.0 kPa の場合の経時変化である。

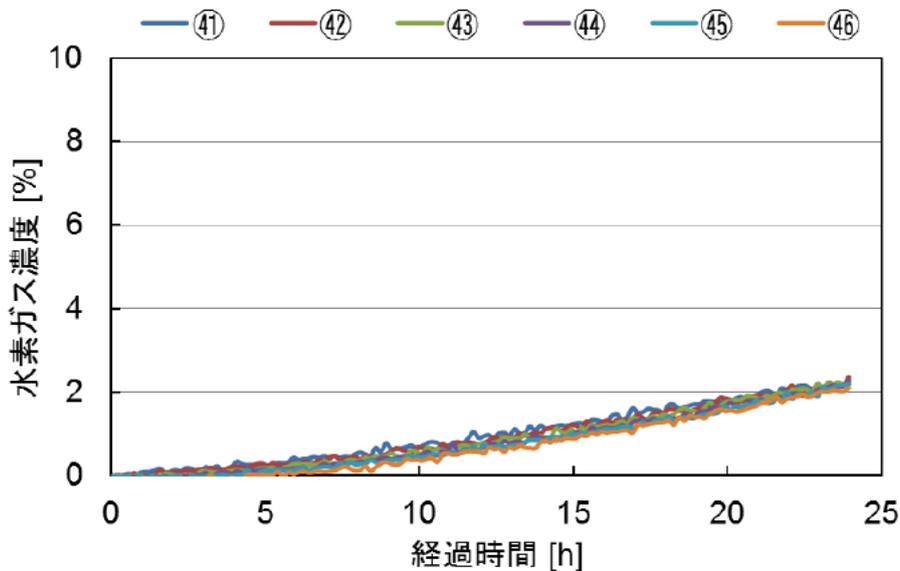


図 6-4-2 各計測点における大気中水素濃度経時変化
(供給圧力 2.5 kPa)

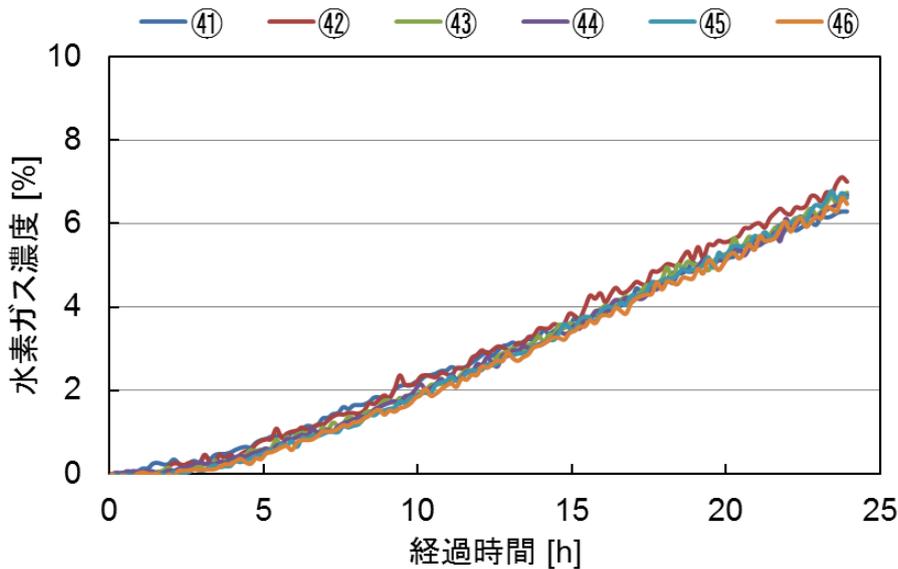


図 6-4-3 各計測点における大気中水素濃度経時変化
(供給圧力 10.0 kPa)

図 6-4-2 及び図 6-4-3 に示したとおり、本試験における計測範囲内である、放出口からの水平距離 2.5 m 以内の範囲においては、放出口の直上の濃度上昇がごく僅か先行するものの、ほぼ一様の水素濃度であった。

本試験条件下において、供給圧力 2.5 kPa の場合は大気中の水素濃度が爆発下限濃度である 4 % を超過することはなかったが、供給圧力 10.0 kPa においては凡そ 17 h で水素濃度が 4 % を超過する結果となった。

6.4.3 考察

前項に示した大気中水素濃度計測結果を基に、大気中における水素拡散挙動の基本的な特徴について考察する。

水素濃度の空間分布についてみると、いずれの条件についても、本試験の計測範囲内である放出口からの水平距離 2.5 m 以内の範囲において、ほぼ一様の水素濃度分布であった。図 6-4-4 に水素濃度の空間分布の一例として、供給圧力 2.5 kPa、経過時間 5 h の場合の水素濃度分布を示す。図中、水色線にて示したグラフは真砂土のみの場合の水素濃度分布の事例である。

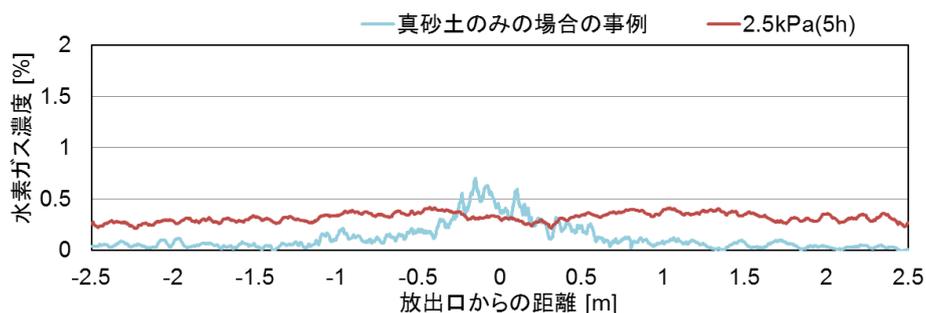


図 6-4-4 大気中の水素濃度空間分布
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 5 h の場合)

図 6-4-4 に示したとおり、真砂土のみの場合は放出口直上にピークを持つ傾向であったが、舗装を施すと水素濃度は計測範囲内において一様の値となる。この結果から、実現場において水素漏えいが発生した際に、アスファルト舗装表面から大気に染み出す水素の濃度を計測することにより、漏えい箇所を特定することは困難であることが明らかとなった。

経時変化について見ると、本試験の観測時間において、いずれの条件でも水素濃度は上昇し続けており、10.0 kPa の場合については、凡そ 17 時間で水素濃度が 4 % を超過した。この結果は、本実験装置が閉鎖空間に近い環境であることに起因するものと考えられる。実際の屋外環境においては、風や外乱により大気は絶えず移流しており、屋外環境において観測される水素濃度は、本試験において観測された水素ガス濃度に比して低くなるのが想定される。

6.4.4 まとめ

レーザラマンイメージングにより、大気中における水素ガス可視化及び空間濃度分布計測を行った結果、以下の結論を得た。

- ・ ラマンイメージングにより、アスファルト舗装を通過して大気中に拡散する水素ガスの挙動を可視化し、空間濃度分布を計測することができた。
- ・ アスファルト層表面の水素濃度空間分布は本試験の計測範囲内（放出口からの水平距離 2.5 m 以内）においてほぼ一様であった。
- ・ 本試験の観測時間内において、供給圧力 2.5 kPa では水素濃度が 4% を超過することはなかったが、供給圧力 10.0 kPa においては凡そ 17 h で水素濃度が 4% を超過した。
- ・ 経時変化について見ると、時間の経過と共に徐々に水素濃度が上昇する。
- ・ 実際の屋外環境においては、大気層は風や外乱により絶えず移流しており、屋外環境において観測される水素濃度は、本試験において観測された水素ガス濃度に比

して低くなることが想定される。

- ・ アスファルト層表面における水平方向の水素濃度分布は本試験の計測範囲内においてほぼ一様であったが、アスファルト層下部では水平方向に分布があったため（表 6-3-1 舗装有り 上層（碎石層）参照）、漏えい箇所を特定するためにはアスファルト下での濃度計測が必要である。

6.5 漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測

本項では、埋設導管の損傷による水素漏えいが生じた際に、当該導管への水素供給を停止した場合を想定し、地中に拡散した水素ガスの消散していく際の挙動を明らかにしたので、その実験方法及び結果について述べる。

6.5.1 実験方法

前述のフィールド実験装置を用いて、図 6-5-1 に示す手順により、漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測を行った。

供給圧力 10.0 kPa の条件下において 24 h のフィールド実験を終え水素供給を停止した状態を初期状態とする。この時、気密ブース内の大気層側は数千 ppm～数%オーダーの水素ガスが存在する状態にある。実際の屋外環境を想定し、大気層側のみ窒素パーズを開始し、大気層側の水素を実験装置外に放出する。この時、地中における水素濃度がどのように推移するかを計測した。窒素パーズ量は 40 L/min に設定した。

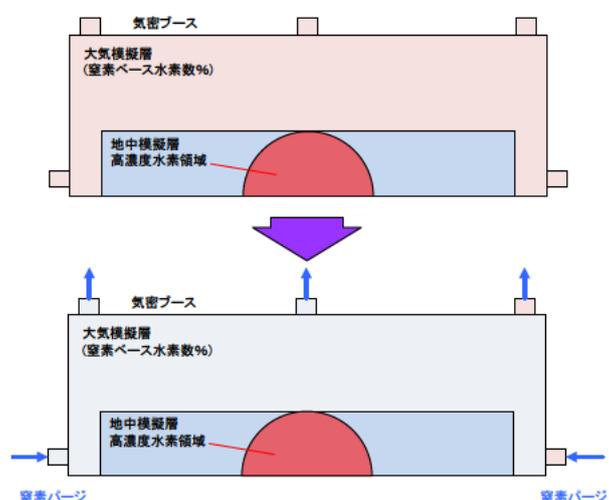


図 6-5-1 漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測方法

6.5.2 実験結果

供給圧力 10 kPa の試験実施後の漏えい停止後の地中における水素濃度分布の経時変化について、図 6-5-2～6-5-5 に各計測点の結果を、図 6-5-6、6-5-7 にカラープロット表示による水素濃度分布の可視化画像を示す。

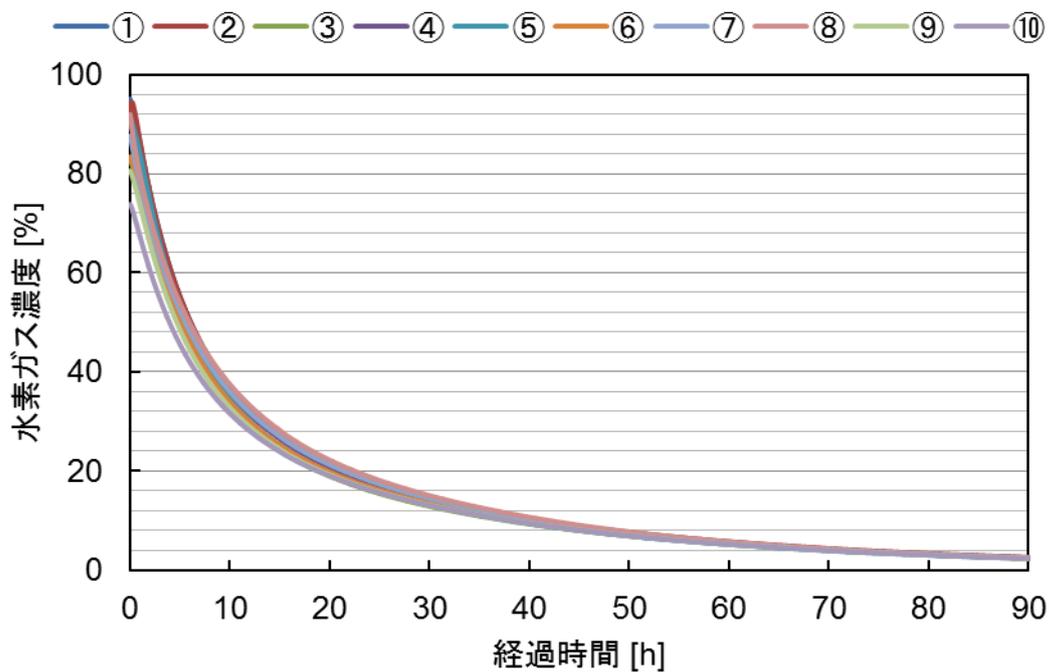


図 6-5-2 地中の水素濃度経時変化
(10.0 kPa 漏えい停止後、センサ埋設番号①～⑩)

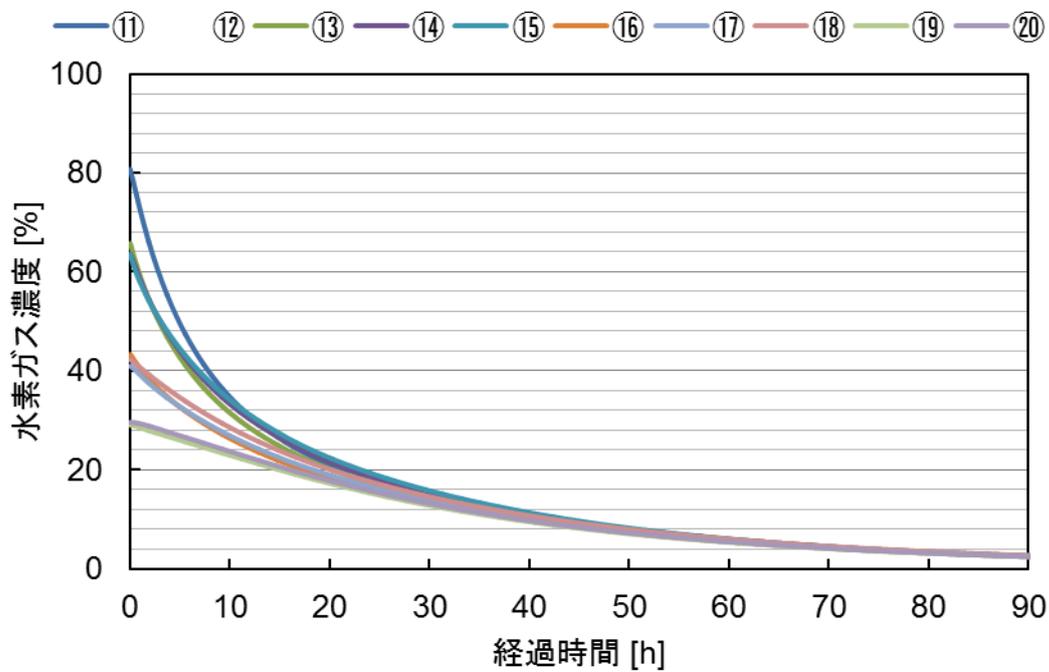


図 6-5-3 地中の水素濃度経時変化
(10.0 kPa 漏えい停止後、センサ埋設番号⑪～⑳)

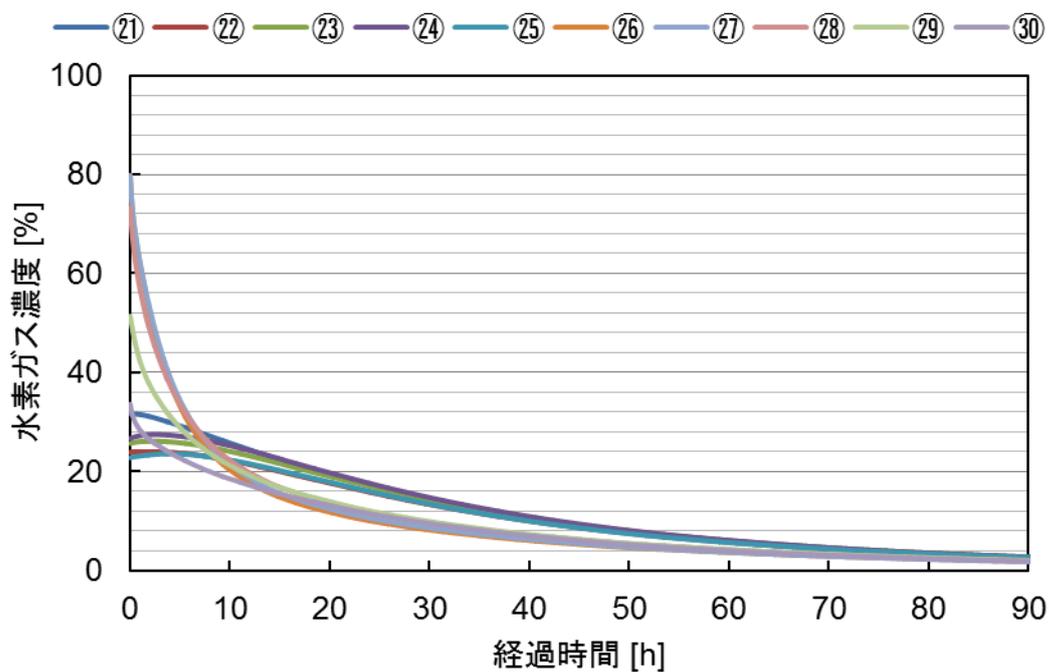


図 6-5-4 地中の水素濃度経時変化
(10.0 kPa 漏えい停止後、センサ埋設番号②①～③⑩)

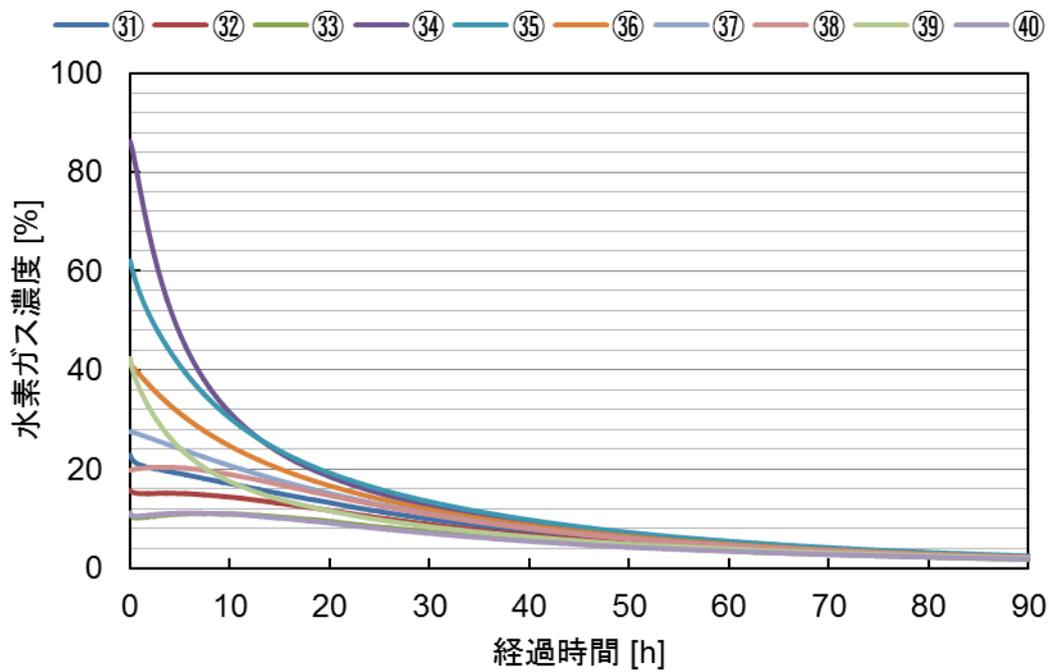


図 6-5-5 地中の水素濃度経時変化
(10.0 kPa 漏えい停止後、センサ埋設番号③①～④⑩)

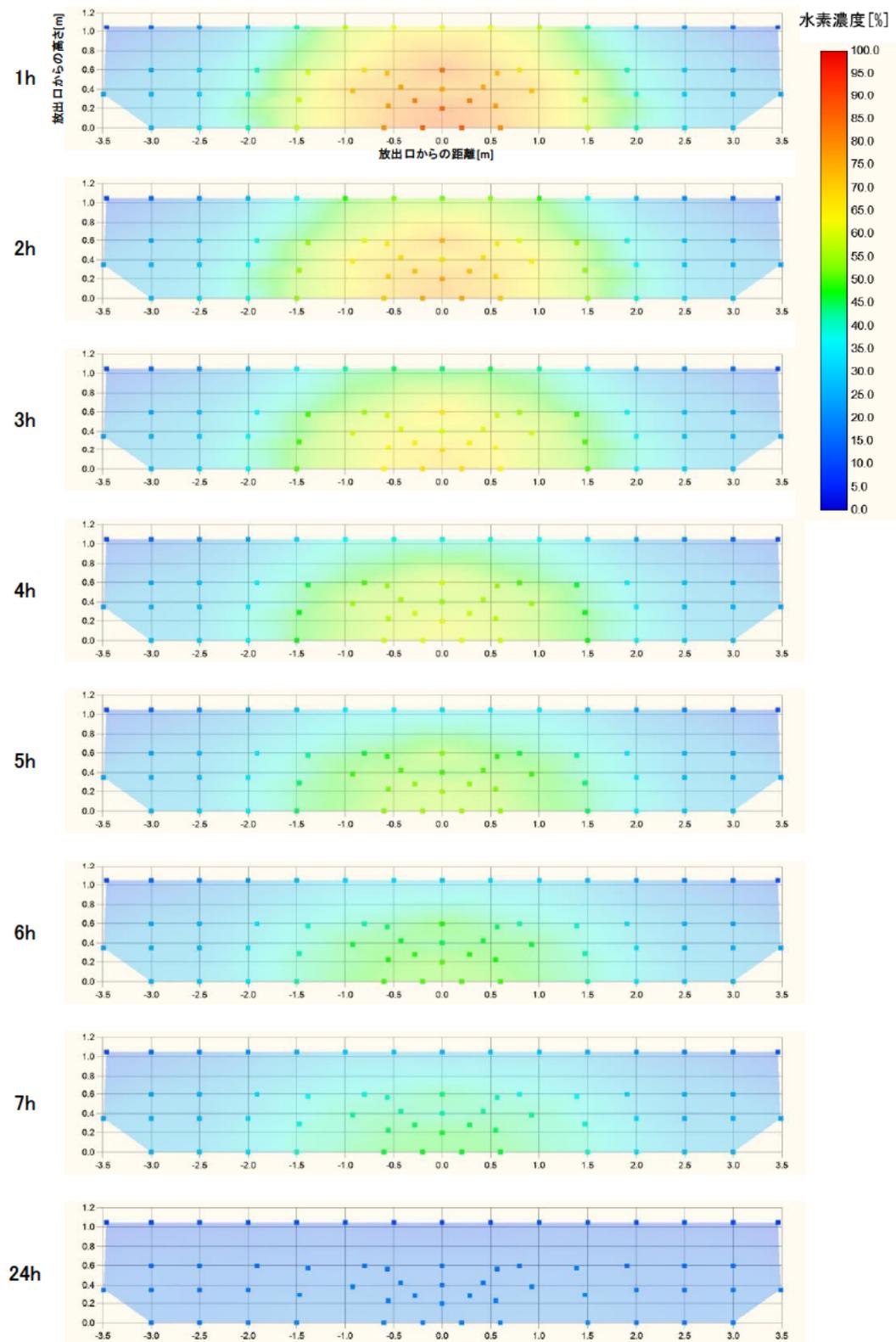


図 6-5-6 水素濃度経時変化のカラープロット
(10.0 kPa 供給停止後、経過時間 1~7 h、24 h)

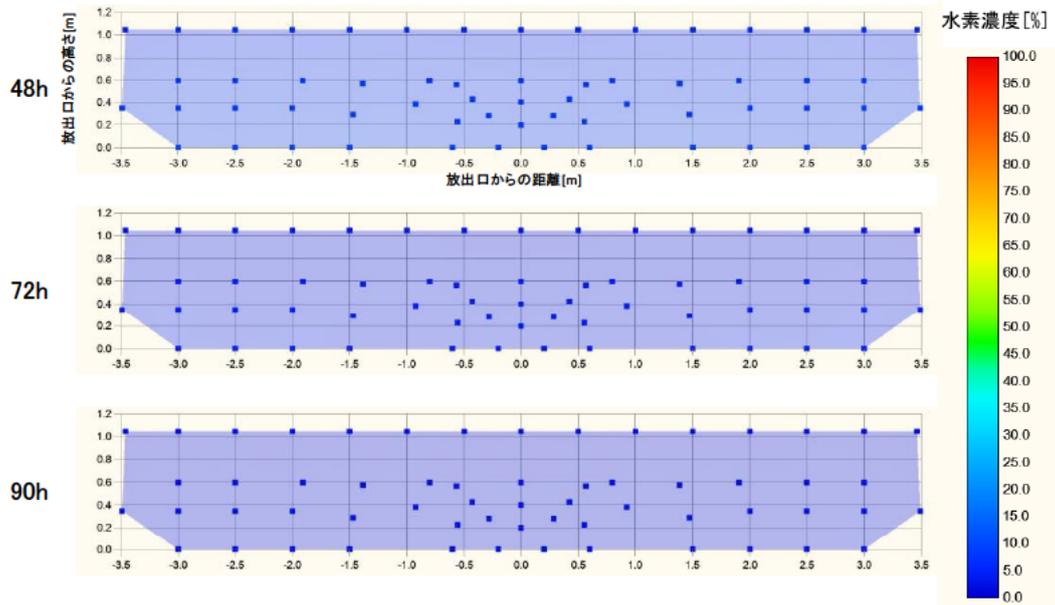


図 6-5-7 水素濃度経時変化のカラープロット
(10.0 kPa 供給停止後、経過時間 48、72、90 h)

図 6-5-2～7 に示したとおり、全てのセンサの濃度値は徐々に同じ値に収束し、およそ 76 h 後に全てのセンサの指示値が 4%以下となった。

6.5.3 考察

図 6-5-2～6-5-5 に示した地中水素濃度経時変化のうち、同心円上の埋設点について整理した結果を図 6-5-8 に示す。

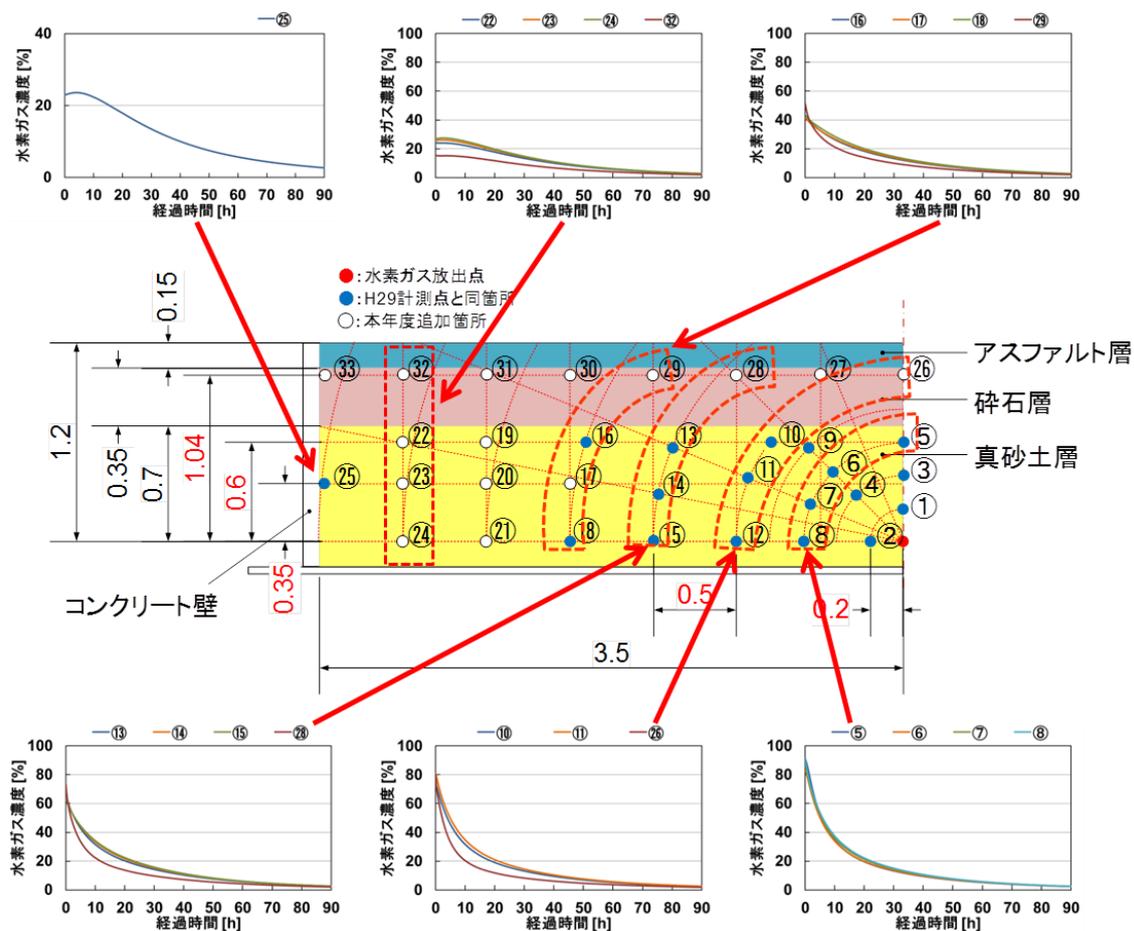


図 6-5-8 同心円上の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(10.0 kPa 漏えい停止後)

図 6-5-8 に示したとおり、漏えい停止から徐々に水素濃度が低下し、全てのセンサの指示値が時間と共に同じ値に収束するが、壁面付近のセンサについては初期状態（漏えい停止時）の濃度が低く、初期状態から濃度が僅かに上昇した後、5 h 程度後から濃度が下がり始めた。

この結果から、実現場においては舗装による水素ガス閉じ込め効果が大きく、水素ガスの漏えい停止後もガスが地中に留まり、水素ガス濃度が爆発範囲内である状態が長時間持続する。地中にガスの拡散を阻害する埋設物などが有る場合等、条件によっては、漏えい停止時よりもガス濃度が高濃度となる場合もあり、復旧作業の際には注意が必要である。

次に、漏えい停止時の挙動についても、平成 29 年度の真砂土のみの試験結果と比較するため、昨年度と同流量 (5.54 L/min)、同時間 (5 h) 水素を放出した後、水素放出を停止し、漏えい停止後の拡散挙動の確認試験を実施した。得られた地中水素濃度経時変化のうち、同心円上の埋設点について整理した結果を図 6-5-9 に示す。

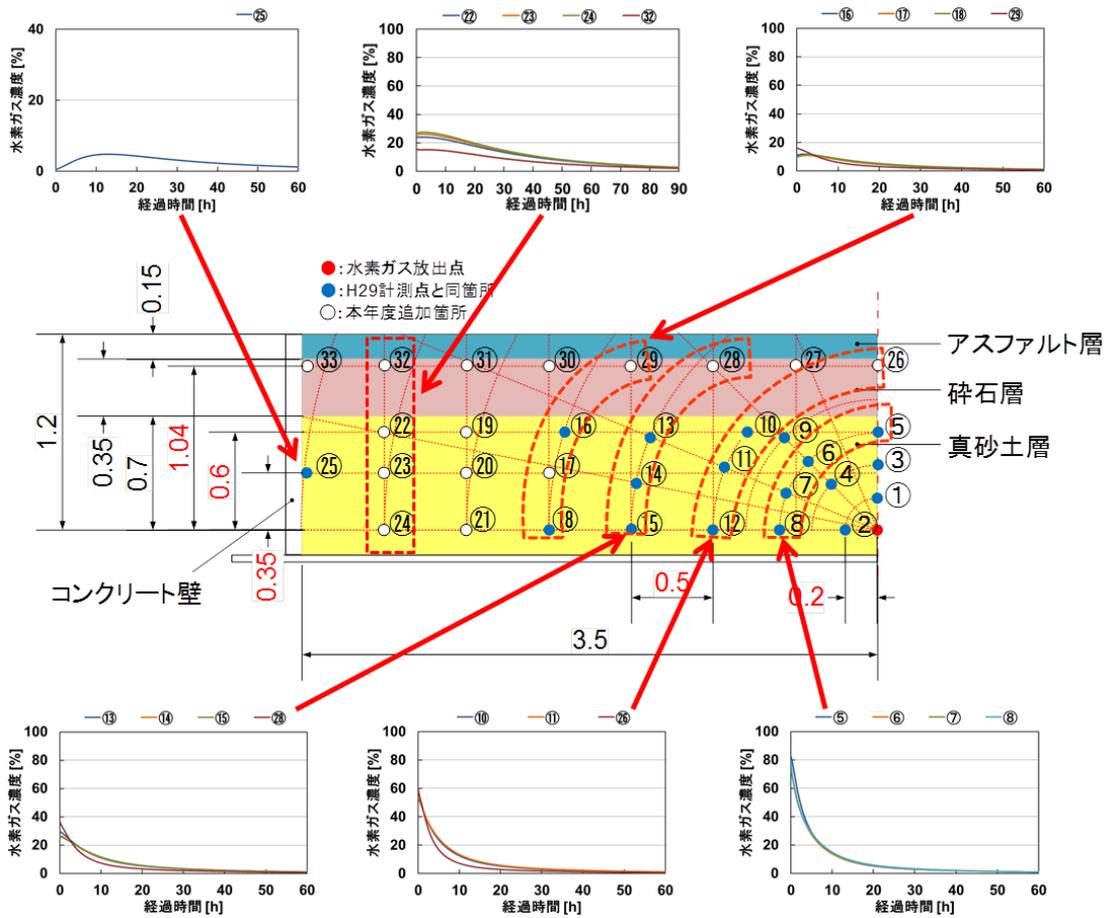


図 6-5-9 同心円上の埋設点の水素濃度経時変化の比較
(5.54 L/min 漏えい停止後)

図 6-5-9 に示したとおり、水素濃度の経時変化は図 6-5-7 に示した供給圧力 10 kPa 実験時と同様の特徴であった。

本試験により得られた結果と、昨年度の真砂土のみの場合の試験結果について、真砂土層を上層、中間層、下層の 3 層に分け、層ごとの水平方向のガスの広がりについて整理した結果を表 6-5-1 に示す。表 6-3-1 と同様に、参考として上層（碎石層）の濃度分布についても表中に記載した。

表 6-5-1 舗装が有る場合と無い場合の層ごとの水素濃度の比較
 (5.54 L/min にて 5 h 放出後の漏えい停止から 12 h までの比較)

	舗装有り	舗装なし (真砂土のみ)
上層 (碎石層) (放出口からの高さ 1.05 m)		グラフ凡例 ■ 0h ▲ 1h × 2h ◆ 3h ● 4h ◆ 5h ○ 6h ◆ 7h ◆ 8h ◆ 9h ◆ 10h ◆ 11h ◆ 12h
上層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0.6 m)		
中間層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0.35 m)		
下層 (真砂土層) (放出口からの高さ 0 m)		

表 6-5-1 に示したとおり、舗装が無い場合と有る場合では漏えい停止後の拡散挙動についても大きく特徴が異なる。舗装が無い場合、水素濃度は急激に下降し、特に上層（真砂土層）ではその傾向が顕著であり、全ての層において漏えい停止から 5 h 程度で水素濃度が 4%を下回る。一方、舗装が有る場合、水素濃度は徐々に低下するものの、水素が地中に長時間留まり、12 h 経過後もほぼ全ての埋設点で 4%を超過する水素が滞留したままの状態であった。

以上の結果から、舗装が無い場合に比べ、舗装が有る場合の方が水素が地中内に滞留し、水素濃度が爆発範囲内である状態が長時間継続することが明らかとなった。

6.5.4 まとめ

地中埋設導管の損傷による水素漏えい時に、水素供給を停止した場合を想定し、地中に拡散した水素の空間濃度分布の経時変化を計測し、舗装が有る場合の水素の拡散挙動として以下の結果を得た。

- ・ 壁面付近では、漏えい停止からおよそ 5 時間程度の間、水素ガス濃度が減少することなく漏えい停止時よりも濃度が上昇した。
- ・ 実現場においては舗装による水素ガス閉じ込め効果が大きく、水素ガスの漏えい停止後もガスが地中に留まり、水素ガス濃度が爆発範囲内である状態が長時間持続する。
- ・ 地中にガスの拡散を阻害する埋設物などが有る場合等、条件によっては、漏えい停止時よりもガス濃度が高濃度となる場合もあり、復旧作業の際には注意が必要である。

7. シミュレーション解析の基礎検討

本章では、地中及び大気中における水素拡散挙動について、小規模試験および実フィールド試験における実験条件にて CFD シミュレーションを実施し、地中模擬槽内及び大気中模擬槽内の空間の水素濃度変化を明らかにする。また、実験結果とシミュレーション結果を比較し再現性を評価することで、地中及び大気中における水素拡散挙動のシミュレーション解析が可能であるかどうかを明らかにする。

7.1 概要

本調査においては、埋設水素導管が損傷した場合の水素漏えい量についての知見を得るため、損傷穴からの水素漏えいについて、実フィールド試験において実施する、土壌を用いた試験装置の水素拡散挙動について CFD 解析によるシミュレーションを実施し、土壌等の充填層内及び充填層上部の空間の水素濃度変化を明らかにする。解析には ANSYS 社の汎用流体解析コード FLUENT^[12]を用いた。シミュレーションの基礎方程式を以下に示す。充填層の影響は、主に運動方程式中に抵抗力として導入されると共に、ガスの輸送方程式中の拡散係数に屈曲度として反映される。同種の手法は、メタン、プロパン等の可燃性ガス漏えい実験でも再現性が検証されている。^[13]

(1) 質量保存則

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g) = Q_g \quad (7.1.1)$$

(2) 運動方程式

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\rho_g}{\varepsilon} u_g u_g \right) = -\varepsilon \nabla p_g + \nabla \cdot (\mu_g \nabla u_g) - \left(\frac{\varepsilon \mu_g}{K} u_g \right) + \varepsilon \rho_g g \quad (7.1.2)$$

(3) ガス種 i の輸送方程式

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g Y_i) + \nabla \cdot (\rho_g u_g Y_i) = \nabla \cdot (\varepsilon \rho_g D_{i,m} \nabla Y_i) + Q_i \quad (7.1.3)$$

ここに

ε : 空隙率

ρ_g : 密度 [kg/m³]

u_g : 流速 [m/s]

p_g : 圧力 [Pa]

μ_g : 粘性係数 [Pa·s]

Q_g, Q_i : 漏えい量 [kg/m³・s]

K : 透気係数 [m²](= $\frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}$) [14]

d_p : 粒径 [m]

g : 重力 [m/s²]

Y_i : ガス種 i の質量分率

$D_{i,m}$: 有効拡散係数 [$\frac{m^2}{s}$](= $\frac{2\varepsilon}{3-\varepsilon} D_i$) [14]

D_i : 分子拡散係数 [m²/s]

土壌中の透気係数及び有効拡散係数は、数値モデルとして幾つか散見されるが[15][16]、土壌構造（単粒や団粒）、土粒子の粒径や形等の影響を受けることから、空隙率を含め、試験において得られたデータを反映して、シミュレーションを行う。

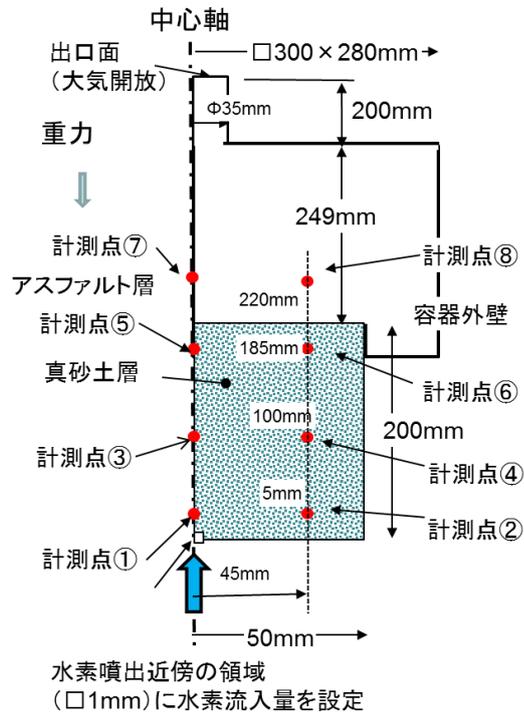
7.2 小規模試験モデル解析

本項では、空間内の窒素雰囲気内での水素拡散挙動の確認、流量、水素供給圧力及び土壌パラメータの各種パラメータに対する感度確認のために行った小規模試験モデルに関する解析結果について記す。

7.2.1 解析モデル

解析モデルを図 7-2-1 に示す。小規模試験結果を再現するため 3 次元モデルとして、充填層部は真砂土層とアスファルト層の土壌で構成される。真砂土層は、直径φ100 mm、高さ 200 mm である。アスファルト層は真砂土層の上部に追設される。土壌層の上部空間は、縦 300 mm×横 280 mm、高さ 249 mm で、上端に出口配管を模擬した直径φ56 mm の排出口を設けている。モデルの総メッシュ数は 40 万セルである。水素の噴出口は、底面中央部 1 mm 四方の領域に水素発生量を設定することで再現している。モデル内の初期状態は常温常圧の窒素 100 % とし、水素噴出時点からの水素濃度分布の推移を計算した。また、濃度評価点を充填層内と上部空間に計 8 点に設置し、それらの評価点において実験値と解析結果を比較した。

◆ 真砂土のみ



◆ アスファルト+真砂土 初期状態 (常温常圧、窒素100%)

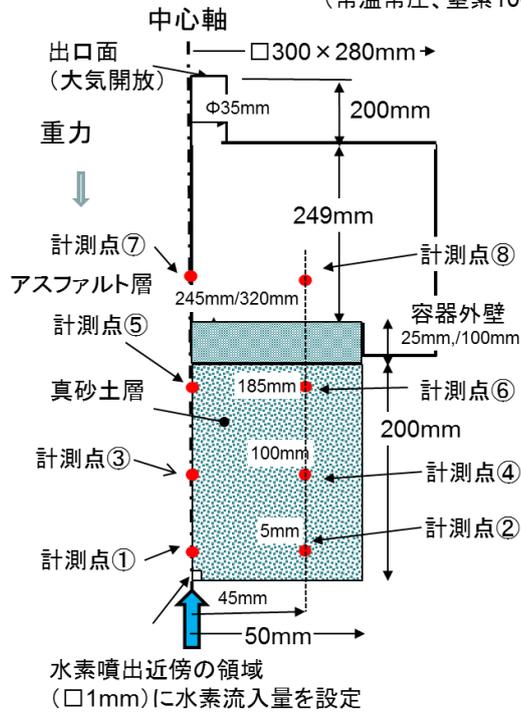


図 7-2-1 モデル形状

7.2.2 解析条件

解析条件を表 7-2-1 に示す。解析コードは FLUENT Version17 を使用し、物性は水素、窒素の密度を圧縮性としている。窒素雰囲気中への水素噴出であるために密度差による浮力の影響が大きいことから重力を考慮して解析を実施した。また、十分に遅い流れ場であることから、流動モデルは層流としている。解析におけるパラメータとして、アスファルト層の厚さに関して表 2 に示すとおり、2 ケース（厚さ 25 mm 及び 100 mm）解析を実施した。

境界条件は、排出口部を大気開放とし、壁面は断熱+No-slip 条件、流量は、実験時の流量/圧力条件に基づき、表 7-2-2 に示すとおり設定している。また、拡散係数及び透気係数、空隙率に関しては、表 7-2-3 に示すとおり、一様な条件をそれぞれの流量（圧力）条件に対して実施した。また、水素-窒素の 2 成分系の分子拡散係数については、 $0.753759 \text{ cm}^2/\text{s}$ (@20°C) を用いた^[17]。

表 7-2-1 解析条件

モデル	
コード	FLUENT Ver.17
物性	密度：圧縮性（窒素、水素）
重力	有り
流動モデル	層流
充填層	空隙率、拡散係数、透気係数【実測値】
境界条件	
下流側	大気開放
壁面	断熱/Noslip
流量	試験条件に沿って、水素流量をソースタームとして設定

表 7-2-2 流量（圧力）条件

試料	供給圧力 [kPa]	流量 [L/min]
真砂土層のみ	1.7625	4.3
アスファルト（厚さ 25 mm）	2.15	3.275
アスファルト（厚さ 100 mm）	2.8	0.625

表 7-2-3 土壌パラメータ

試料	透気係数 [m ²]	拡散係数 [m ² /s]	空隙率
真砂土層のみ	2.4739E-11	1.598E-5	0.2789
アスファルト (厚さ 25 mm)	1.7865E-12	6.1304E-7	0.038
アスファルト (厚さ 100 mm)	7.6432E-13	5.6919E-7	0.038

7.2.3 解析結果

解析結果を図 7-2-2～7-2-7 に示す。図 7-2-2 は真砂土層のみの場合における各時刻毎の水素濃度分布である。水素放出から時間の経過と共にやや縦長の同心円状の分布となる。水素放出から 300 秒経過後には、土壌層と上部空間の界面に水素が到達する。図 7-2-3 に同条件における各測定点の水素濃度推移を示す。水素放出後、放出口に近い計測点①及び③の濃度が上昇し、90～100%の水素濃度に到達する。

図 7-2-4 及び図 7-2-5 はそれぞれ真砂土層とアスファルト層（厚さ 25 mm）を組み合わせた場合における各時刻毎の水素濃度分布及び各測定点の水素濃度推移である。いずれも真砂土層のみの場合と同様の傾向を示すが、流量の減少に伴い、水素の到達速度が低下していることが認められる。また、水素濃度推移から、各点の水素濃度の立ち上がりが遅くなり、且つその傾きも緩やかになることが分かる。

図 7-2-6 及び 7-2-7 は、それぞれ真砂土層とアスファルト層（厚さ 100 mm）を組み合わせた場合の各時刻毎の水素濃度分布及び各測定点の水素濃度推移を示す。土壌が複層になる場合、高さ方向の水素の到達速度が高まり、半楕円形に近い水素濃度分布を示す。特にアスファルトが厚い条件では、それが顕著になり、アスファルト層の厚さが水素の拡散に大きな影響を与えることを示唆している。試験との比較では、放出口直上位置において解析結果が試験結果よりも早い濃度変化を示しており、側壁側では逆に試験結果が解析結果よりも早い濃度変化を示す結果となっている。全体的な濃度変化の様相は、計算値では漏えい口を中心に直上部に凸の楕円形状で水素が広がっていく傾向に対して、試験結果は底面から半径方向にはほぼ均一に上方に拡散していく様相を示している。この原因として、①土壌と底板との間隙部の影響、②漏えい口近傍の水分（水蒸気）挙動の影響、③漏えい口近傍での急激な拡散現象（乱流拡散他）の影響等、濃度、流速変化の大きい漏えい口近接部での漏えい量モデルの設定が試験体系を十分に反映できていないことが推察される。これらの不確かな点は、フィールド試験体系のような大規模な体系では、土壌パラメータの影響の方が優位と考えられるが、今後の検討課題として留意しておく点と考えられる。また、検討にあたっての参考として、7.5.1 項に各土壌パラメータの感度計算結果を、7.5.2 項には漏えい口直上の濃度分布改善策の一つと考えられる

拡散特性の影響についての試計算結果を整理した。

水素導管の保守管理、漏えい検知の観点からは、アスファルト層が無い場合では水素噴出口直上の上部空間において地表面の近くでは約 60%の非常に高い水素濃度分布が見られることから漏えい箇所の特定に有益である。しかし、アスファルト層を設置した場合には、厚さ 100 mm では大幅に水素流入量が減少することもあり、大気中での水素濃度は大幅に低減される傾向にある。しかし、アスファルト層を敷設した土壌でも、上部空間の水素濃度に比べて、地中の水素濃度は比較的高く可燃範囲を維持していることから、地中内の水素濃度の低減対策の検討が必要であることが、シミュレーションにおいても確認できた。

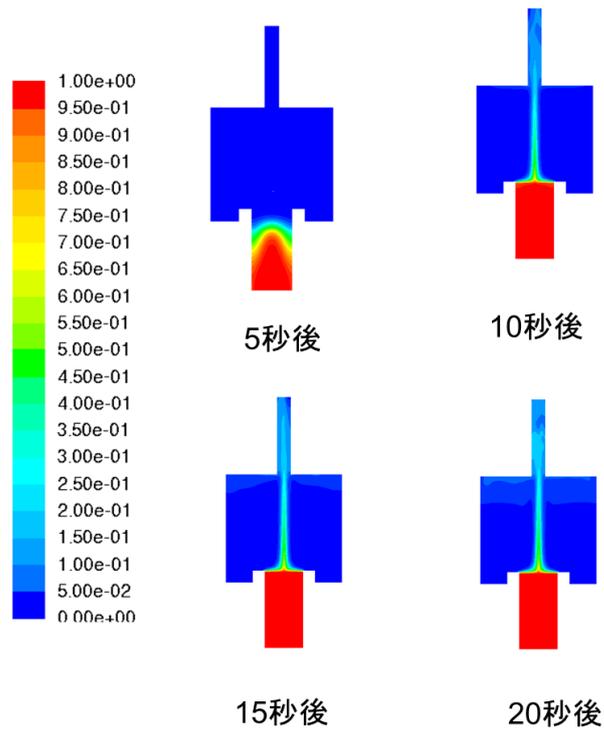


図 7-2-2 小規模試験モデル解析 水素濃度分布
(真砂土層のみ)

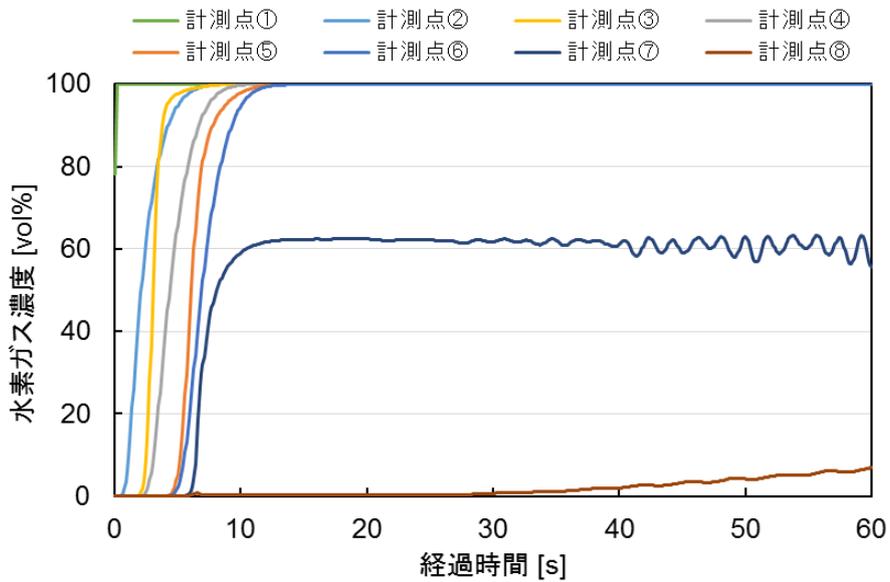


図 7-2-3 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移
(真砂土層のみ)

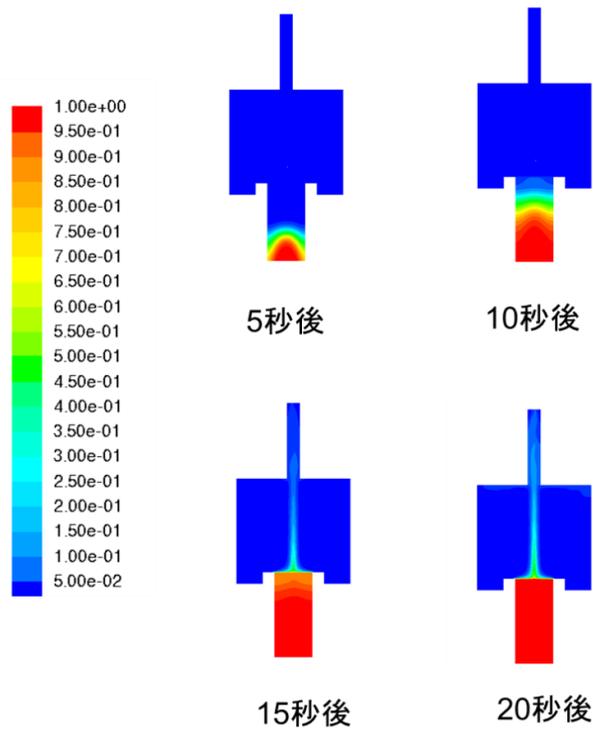


図 7-2-4 小規模試験モデル 解析水素濃度分布
(真砂土層とアスファルト層 (厚さ 25 mm) の組み合わせの場合)

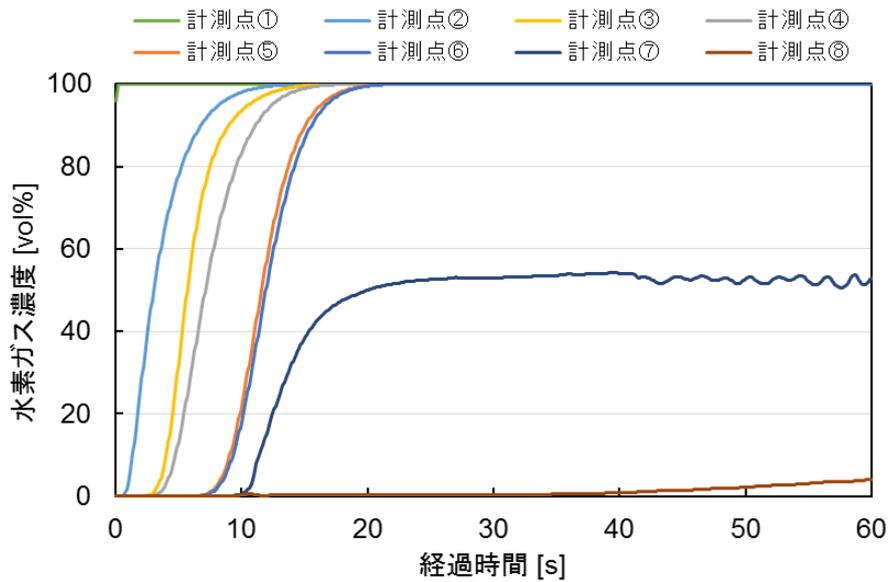


図 7-2-5 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移
(真砂土層とアスファルト層 (厚さ 25 mm) の組み合わせの場合)

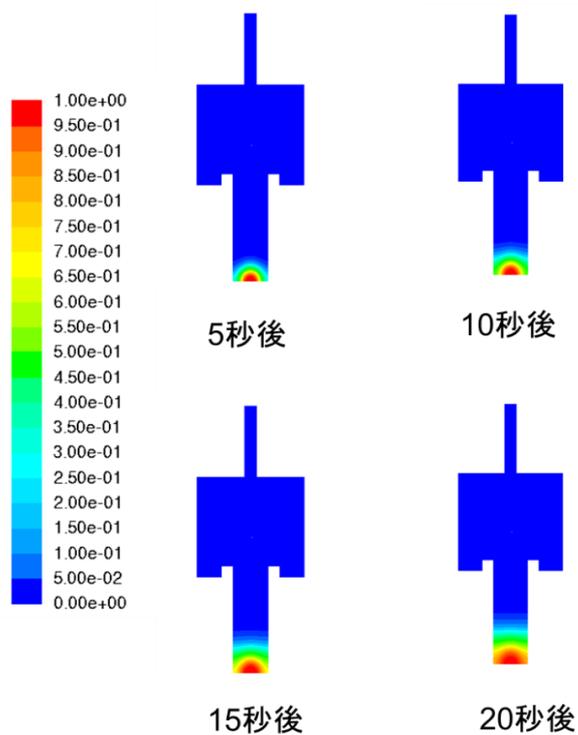


図 7-2-6 小規模試験モデル 解析水素濃度分布
(真砂土層とアスファルト層 (厚さ 100 mm) の組み合わせの場合)

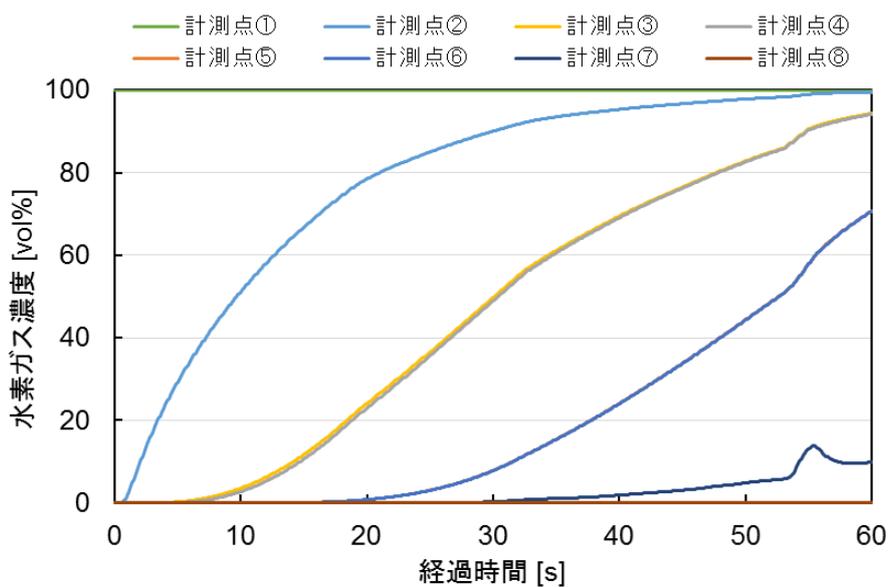


図 7-2-7 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移
(真砂土層とアスファルト層 (厚さ 100 mm) の組み合わせの場合)

7.3 フィールド試験解析

本項では、実フィールド試験をモデルとした大型モデルに対する解析結果を記す。基礎方程式は前項と同様である。解析パラメータは、流量(圧力)、土壌パラメータであり、試験による実測値を反映した。

7.3.1 解析モデル

解析モデルを図 7-3-1 に示す。モデルは 3 次元軸対象モデル (1/4) であり、充填層は直径 $\phi 7$ m、高さ 1.35 m の円筒形であり、土壌層周囲のコンクリート壁も忠実に再現している。周囲空間は 8 m 四方、高さ 3 m の領域である。上端に出口配管を模擬した排出口を設けている。試験において土壌層内に埋設された鋼管もモデルに含んでおり、水素の放出口はその中心に設定している。前項同様底面中央部 1 mm 四方の領域に水素発生量を設定することで水素の放出を模擬している。モデル内の初期状態は常温常圧の窒素 100% とし、水素噴出時点からの水素濃度分布の推移を計算した。また、試験との比較のため計測点を図 7-3-2 に示すように土壌層内、上部空間合せて計 9 点設定した。なお、試験においては、各計測点は、同一平面上に存在するが、本解析では、メッシュ数節約の観点から 1/4 モデルとしており、土壌中の計測点(表 7-3-1)のうち、計測点 7 点(③、⑪、⑮、⑲、⑳、㉓、㉖)を解析との照合計測点として、鋼管と同一平面に設定した。また、空間中の計測点(図 7-3-2)については、④、④の 2 点を解析との照合計測点として設定した。

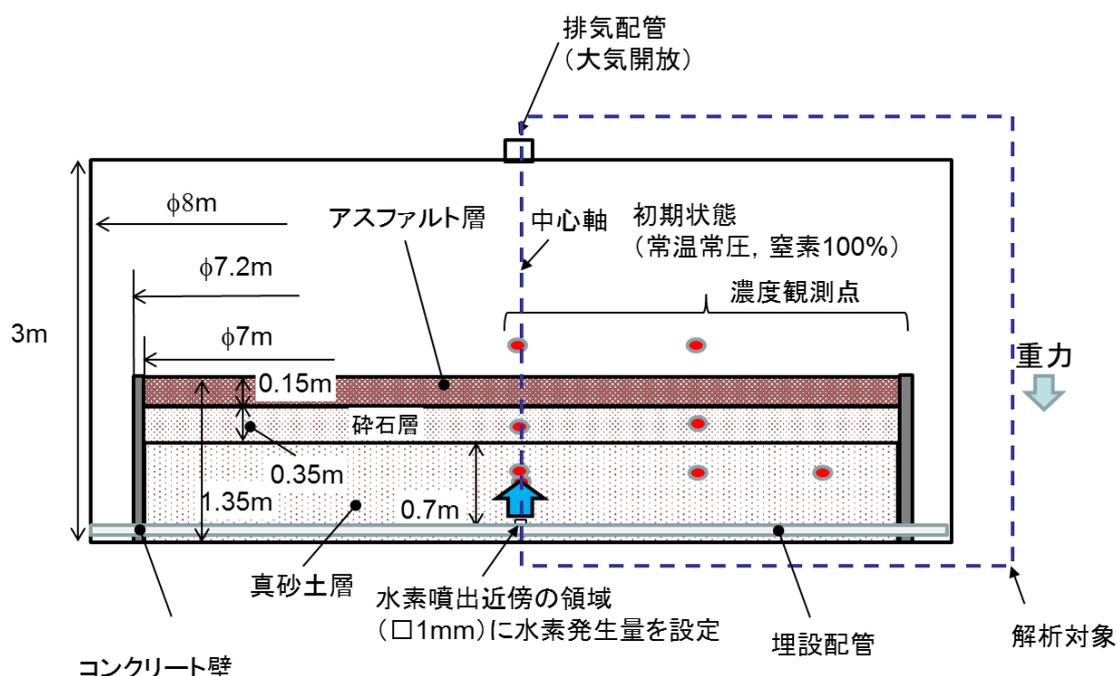


図 7-3-1 フィールド試験解析モデル

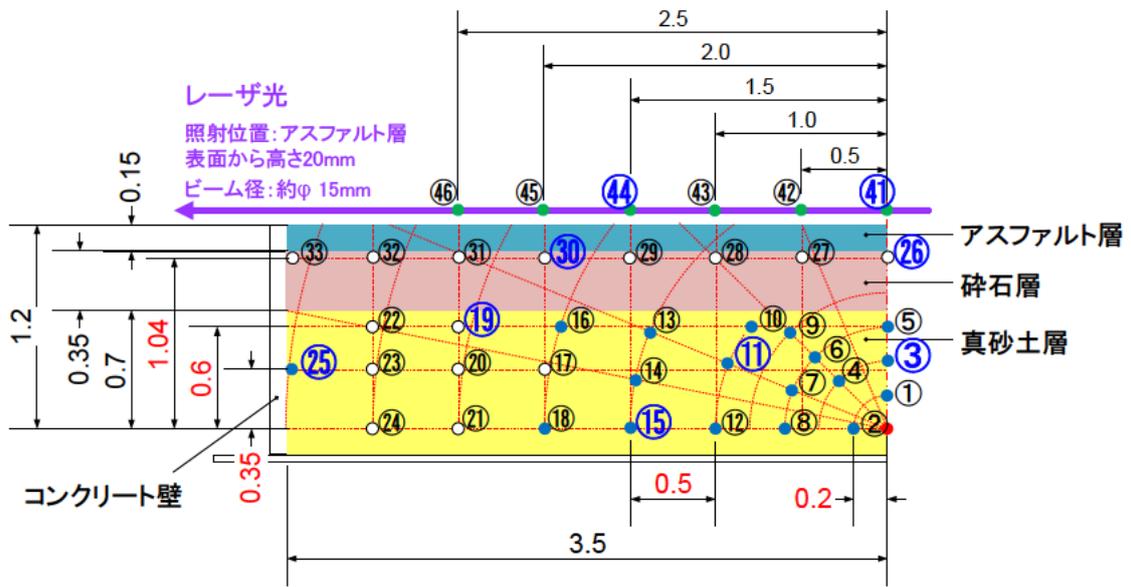


図 7-3-2 実験結果とシミュレーション解析結果の評価点
 (図中青文字にて記載の計測点にて評価)

表 7-3-1 フィールド試験解析モデル土壌中の計測点
(色付部：解析との照合計測点)

No.	放出口との距離	放出口からの高さ	アスファルト表面からの深さ	中心からの距離
	d [m]	h1 [m]	h2 [m]	x [m]
1	0.200	0.200	1.000	0.000
2	0.200	0.000	1.200	0.200
3	0.400	0.400	0.800	0.000
4	0.400	0.283	0.917	0.283
5	0.600	0.600	0.600	0.000
6	0.600	0.424	0.776	0.424
7	0.600	0.230	0.970	0.554
8	0.600	0.000	1.200	0.600
9	0.800	0.566	0.634	0.566
10	1.000	0.600	0.600	0.800
11	1.000	0.383	0.817	0.924
12	1.000	0.000	1.200	1.000
13	1.500	0.574	0.626	1.386
14	1.500	0.293	0.907	1.471
15	1.500	0.000	1.200	1.500
16	2.000	0.600	0.600	1.908
17	2.030	0.350	0.850	2.000
18	2.000	0.000	1.200	2.000
19	2.571	0.600	0.600	2.500
20	2.524	0.350	0.850	2.500
21	2.500	0.000	1.200	2.500
22	3.059	0.600	0.600	3.000
23	3.020	0.350	0.850	3.000
24	3.000	0.000	1.200	3.000
25	3.508	0.350	0.850	3.490
26	1.045	1.045	0.155	0.000
27	1.158	1.045	0.155	0.500
28	1.446	1.045	0.155	1.000
29	1.828	1.045	0.155	1.500
30	2.257	1.045	0.155	2.000
31	2.710	1.045	0.155	2.500
32	3.177	1.045	0.155	3.000
33	3.614	1.045	0.155	3.460
34	1.000	0.600	0.600	-0.800
35	1.500	0.000	1.200	-1.500
36	2.030	0.350	0.850	-2.000
37	2.571	0.600	0.600	-2.500
38	3.508	0.350	0.850	-3.490
39	1.828	1.045	0.155	-1.500
40	3.614	1.045	0.155	-3.460

7.3.2 解析条件

解析条件は、前項と同様である（表 7-2-1 参照）。解析コードは FLUENT Version17 を使用し、物性は水素、窒素の密度を圧縮性としている。窒素雰囲気中への水素噴出であり浮力の影響が大きいことから重力を考慮した計算となっている。また、十分に遅い

流れ場であることから、流動モデルは層流としている。解析パラメータは、表 7-3-2 に示すとおり、流量（圧力）について実施した。透気係数及び拡散係数、空隙率は、実験により得られた表 7-3-3 に示す値を用いた。なお、本解析では、透気係数及び拡散係数、空隙率は、土壌層内で一様とした。また、水素-窒素の 2 成分系の分子拡散係数については、 $0.749317 \text{ cm}^2/\text{s}$ (@ 19°C) を用いた^[17]。境界条件は、下流側を大気開放とし、壁面は断熱+No slip 条件である。

表 7-3-2 フィールド試験解析の解析パラメータ

項目	値
供給圧力 [kPa]	2.47
流量 [L/min]	3.37

表 7-3-3 フィールド試験解析の土壌パラメータ

項目	透気係数 [m^2]	拡散係数 [m^2/s]	空隙率 [%]
真砂土層	2.7714E-11	8.3002E-06	23.643
碎石層	2.5865E-11	9.4884E-06	23.217
アスファルト層	6.0269E-12	1.2119E-06	6.900

7.3.3 解析結果

上記条件における各時刻ごとの水素濃度分布図を図 7-3-3 に、各計測点の水素濃度推移を図 7-3-4 に示す。放出された水素は、放出口から同心円状に拡がり拡散していく。水素濃度の推移から、いずれの点においても、水素放出から 10 時間程度を経過した時点においてもわずかな上昇傾向となっているが、概ね定常に近づくことが示された。水素濃度は、放出口直上の碎石層に近い真砂土層側にて約 85%に留まり、アスファルト層に沿って半径方向に広がっていく様相が確認できる。大気中では、各測定点の水素濃度が 1%以下のほぼ一様な濃度変化となっている。図 7-3-5 に供給圧力 2.5 kPa とした場合の経過時間 5 h、10 h、15 h におけるアスファルト層とその近傍の水素濃度分布を示す。アスファルト近傍では水素濃度が低いため、50%までを赤色で図示し、50%以下の濃度を 25 階調で色付けした。図 7-3-5 に示したとおり、いずれの時間においてもアスファルト層中で水素濃度が急激に減衰している。

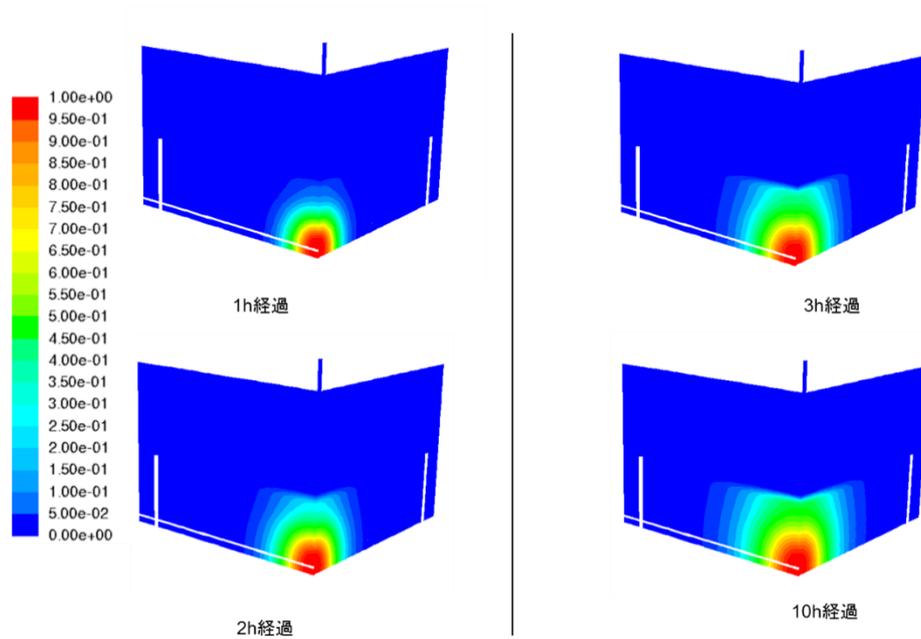


図 7-3-3 フィールド試験解析水素濃度分布

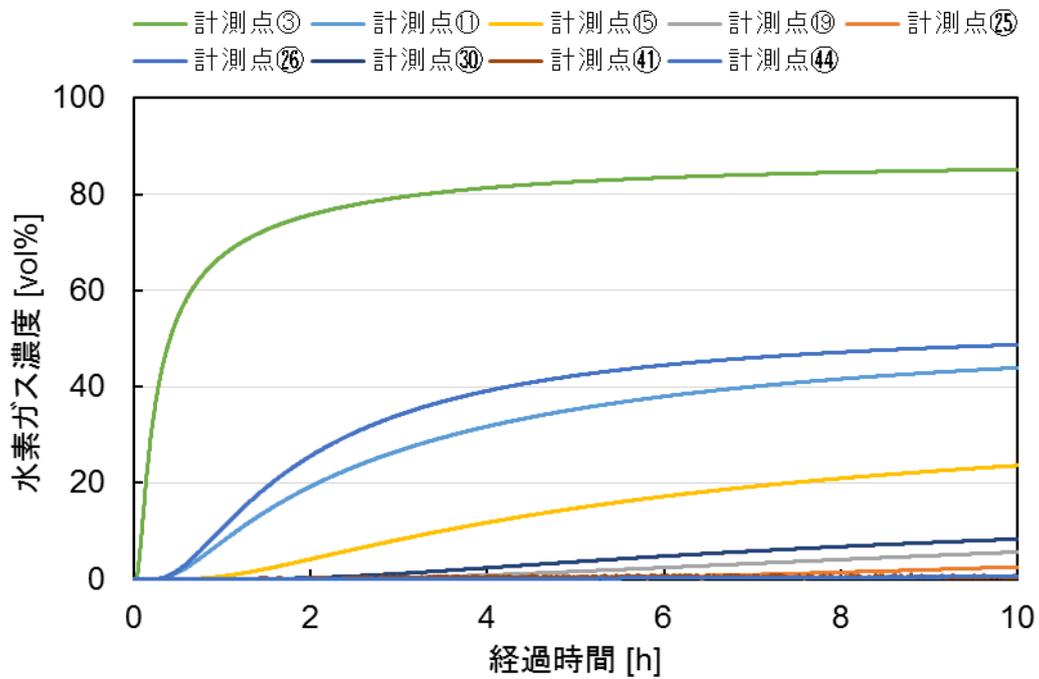
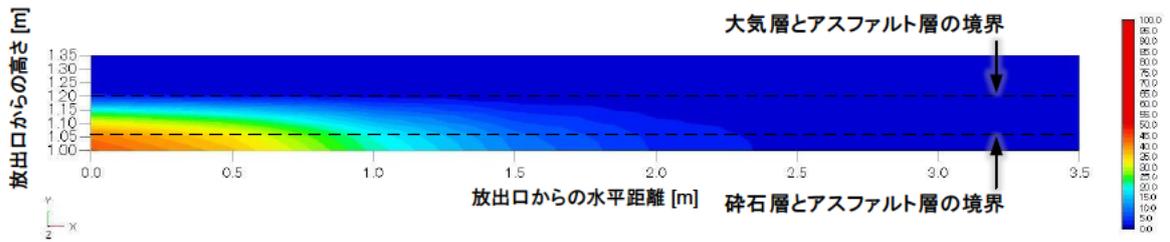
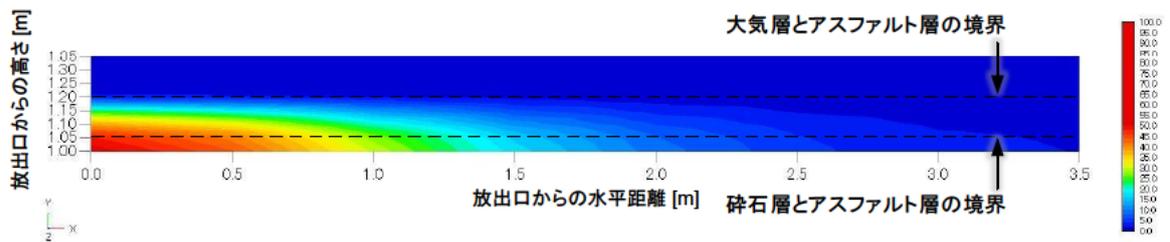


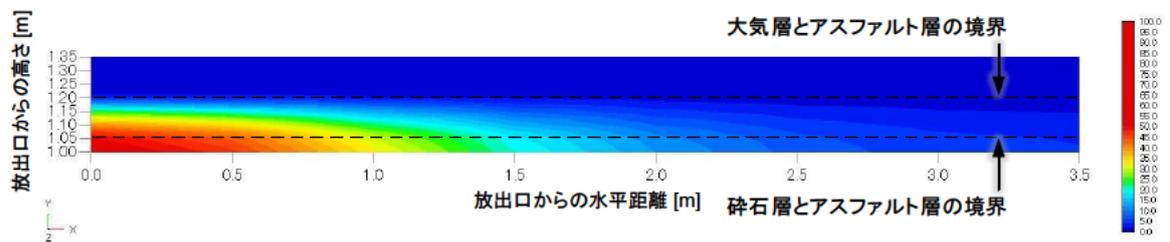
図 7-3-4 フィールド試験解析における各計測点の水素濃度推移



(a) 経過時間 5h



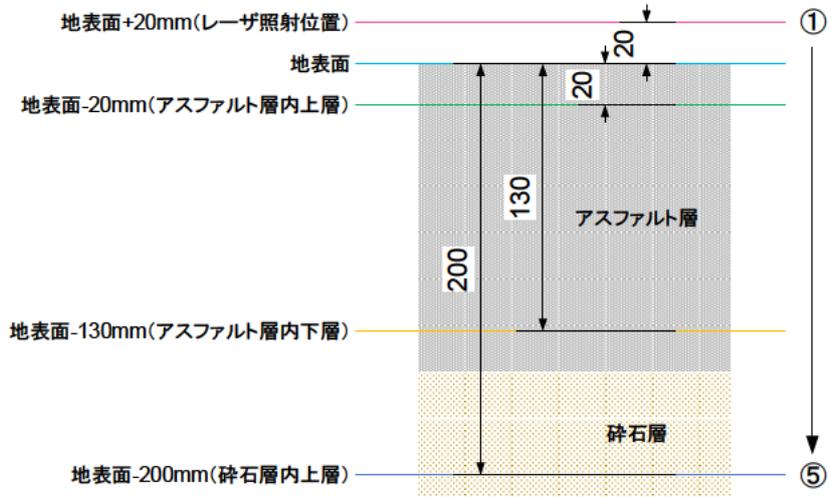
(b) 経過時間 10h



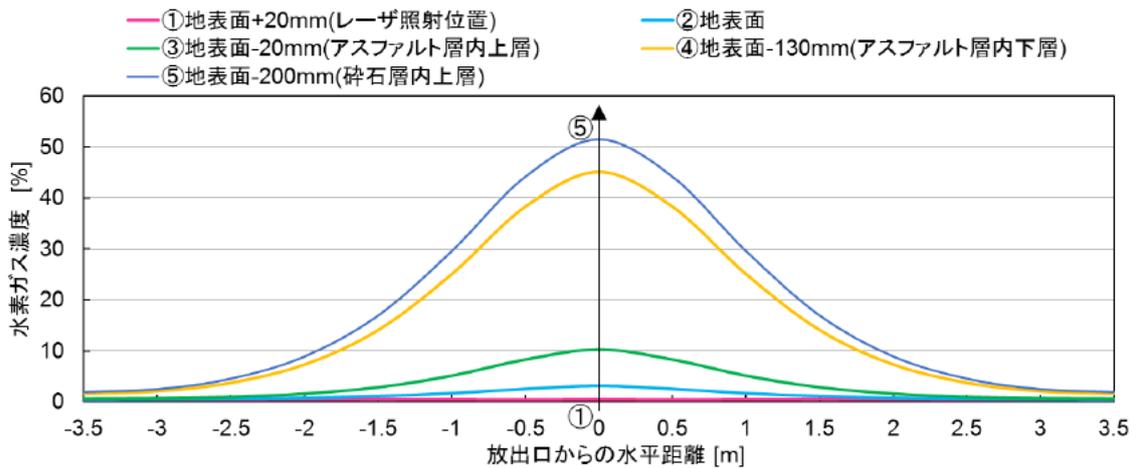
(c) 経過時間 15h

図 7-3-5 フィールド試験解析におけるアスファルト層とその近傍の水素濃度分布
(供給圧力 2.5 kPa)

また、図 7-3-6 に経過時間 10 h における、地表面近傍の水素濃度分布を示す。図 7-3-6(a) で図示した各高さにおける水素濃度の水平方向の分布を、図 7-3-6(b) に示した。



(a) 水平方向の水素濃度分布表示位置



(b) 各高さにおける水素濃度分布

図 7-3-6 地表面近傍の水平方向の水素濃度分布
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 10 h)

図 7-3-6 に示したとおり、地中においては放出口上の濃度が高い濃度分布であり、地表面において僅かに放出口上の濃度が高い分布が確認されたが、地表面上 20 mm (レーザー照射位置) ではほぼ一様の分布となる。

7.4 再現性の評価

図 7-3-2 に示した評価点において、実験結果とシミュレーション解析結果を比較した。比較結果を図 7-4-1 に示す。

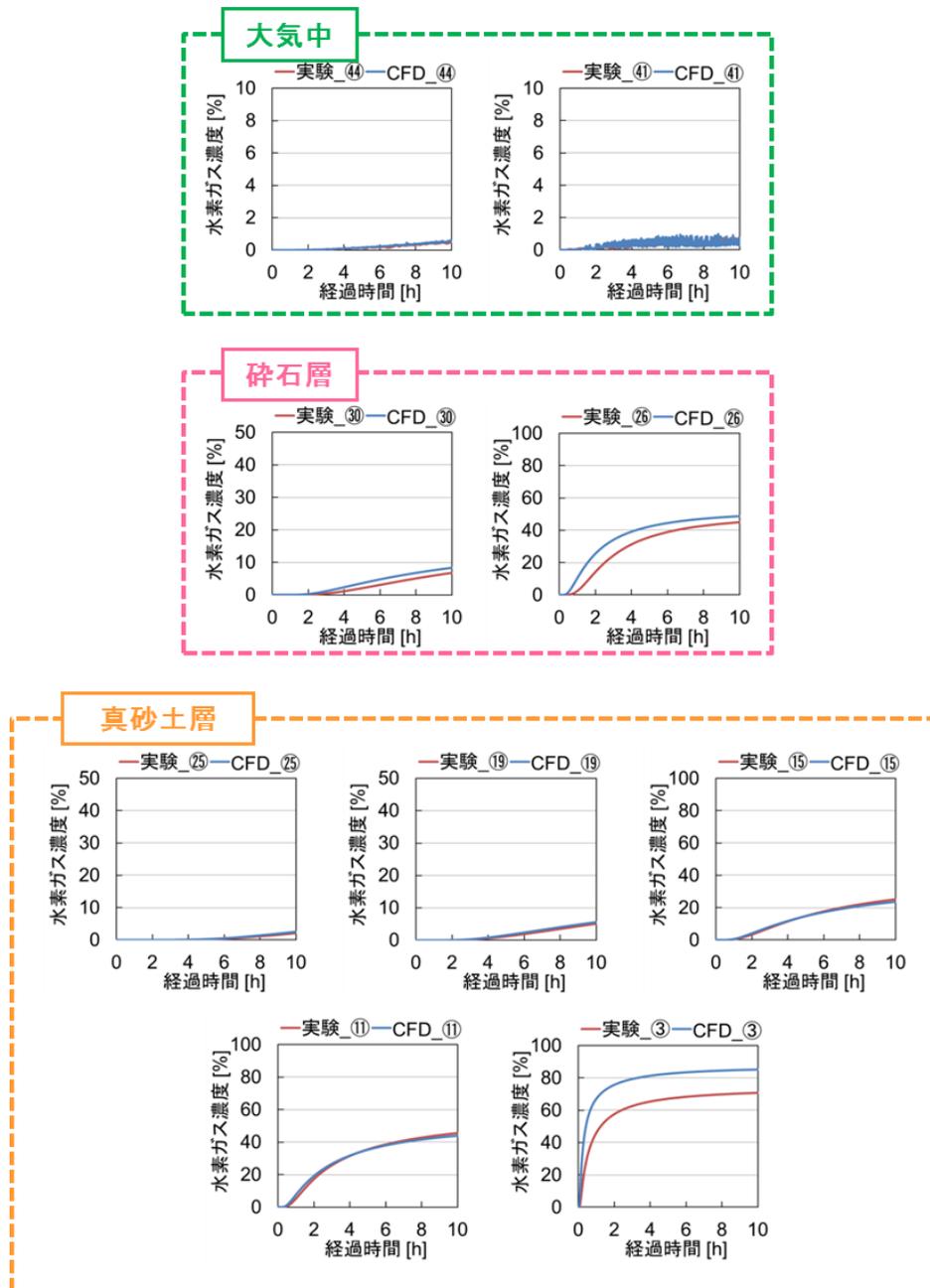


図 7-4-1 実験結果とシミュレーション解析結果の比較

試験との比較では、傾向は概ね一致しているが、放出口直上位置の真砂土層、碎石層において、濃度変化に最大 25%程度の相違が生じる箇所もある。この原因として、比較的水分を多く含む土壌パラメータの状態変化や分布の影響、加えて、小規模試験モデルでも考えられた水素放出モデル等の影響が推定される。本事業で活用している土壌中での水素挙動解析は、空隙率は濃度変化の時定数的な影響に限定されるので、拡散挙動に

よって変化したガス密度によって生じる浮力と土粒子分布をモデル化した流動抵抗のバランスを拡散係数と透気係数が主要なパラメータとしている。現在の土壌シミュレーション研究では、各係数を粒径分布や気相空隙率、飽和度等でモデルの高度化等の事例も見られるが、数少ない土壌の代表値を用いた簡素なモデルでも概ね定性的な濃度の感度を把握することができることを確認できたことから、今後は、そのサンプル依存性をさらに整理し、現象の大局的理解や鍵となるパラメータの影響抽出等への活用を視野に、モデル精度の向上を図ることが有益であると考えられる。

7.5 感度解析（異なる条件における解析）

7.5.1 各土壌パラメータの感度計算

本節では、シミュレーションに用いている土壌パラメータ（空隙率、透気係数、拡散係数）の感度解析を行い、水素濃度分布への影響を確認した。解析対象は小規模試験とし、真砂土層のみの場合について計算を行った。各パラメータは、表 7-2-3 を代表値として、前後 2 ケースを選定し、パラメータ間の影響は考慮していない。表 7-5-1 に計算条件一覧を示す。

本検討では、以下の結果が明らかになった。

- 空隙率の影響：図 7-5-1～7-5-4 にケース①、②の容器内水素濃度の経時変化を示す。本検討の場合、基礎方程式（7.1 項）から空隙率は定常濃度に至る時定数として、濃度勾配の変化に再現されている。
- 透気係数の影響：図 7-5-5～7-5-8 にケース③、④の容器水素濃度の経時変化を示す。本検討の場合、浮力が支配的で、流体抵抗に相当する透気係数の効果が小さいことがわかった。これは、運動方程式（7.1 項(2)）に慣性抵抗（Forchheimer 抵抗）^[18]を導入した場合でも同様な状況を確認した。
- 拡散係数の影響：図 7-5-9～7-5-12 にケース⑤、⑥の容器内水素濃度の経時変化を示す。拡散係数に比例して、大気（窒素）との密度差が小さくなることで浮力の影響が低減されることから、濃度勾配の傾きが抑制されることがわかった。したがって、本体系では、拡散係数の感度が支配的であると考えられる。

表 7-5-1 感度計算条件

条件番号	透気係数 [m ²]	拡散係数 [m ² /s]	空隙率	供給圧力 [kPa]	流量 [L/min]
ケース① (空隙率 0.1)	2.4739e-11	1.598E-5	0.1		
ケース② (空隙率+0.1)	2.4739e-11	1.598E-5	0.3789		
ケース③ (透気係数×10)	2.4739e-10	1.598E-5	0.2789	1.7625	4.3
ケース④ (透気係数×0.1)	2.4739e-12	1.598E-5	0.2789		
ケース⑤ (拡散係数×10)	2.4739e-11	1.598E-4	0.2789		
ケース⑥ (拡散係数×0.1)	2.4739e-11	1.598E-6	0.2789		

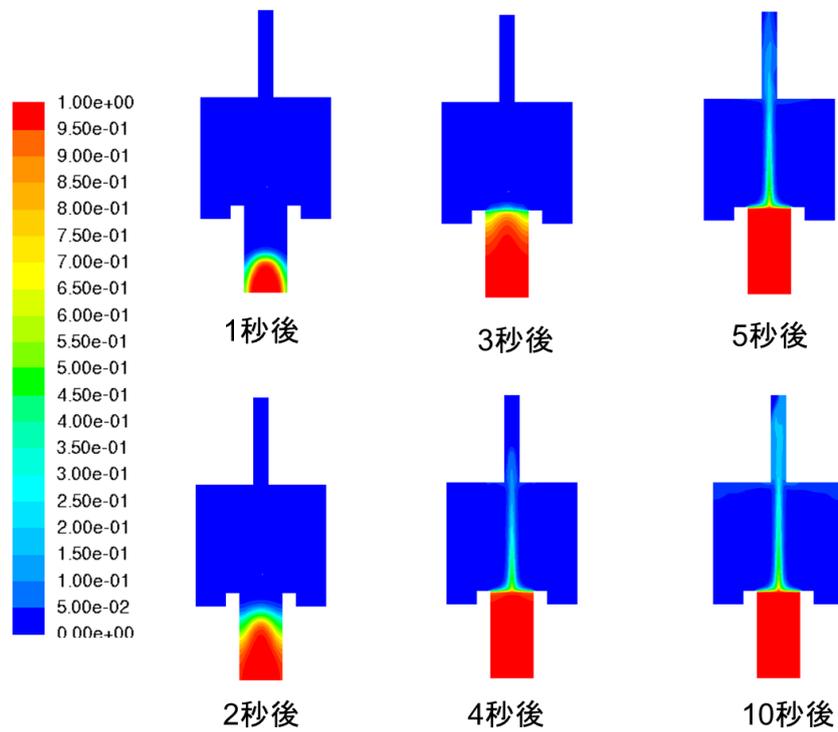


図 7-5-1 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース①)

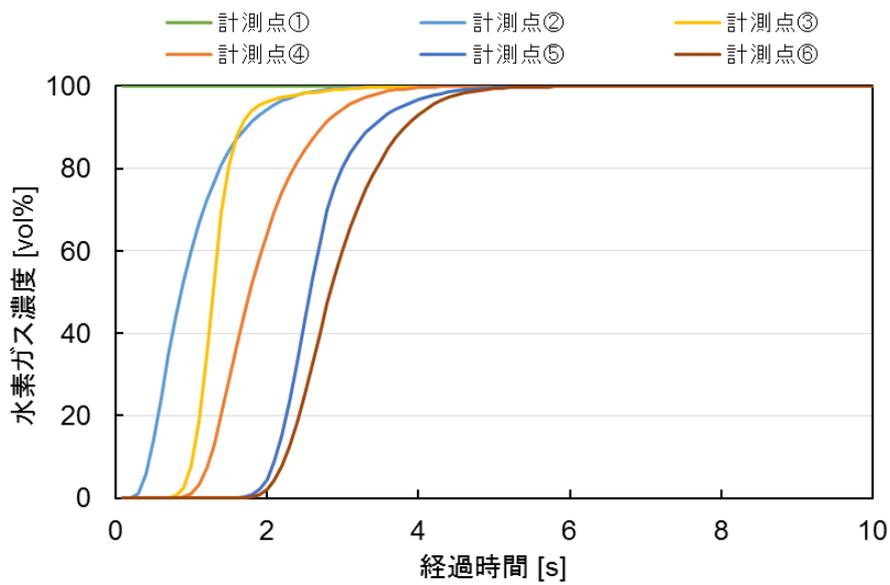


図 7-5-2 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース①)

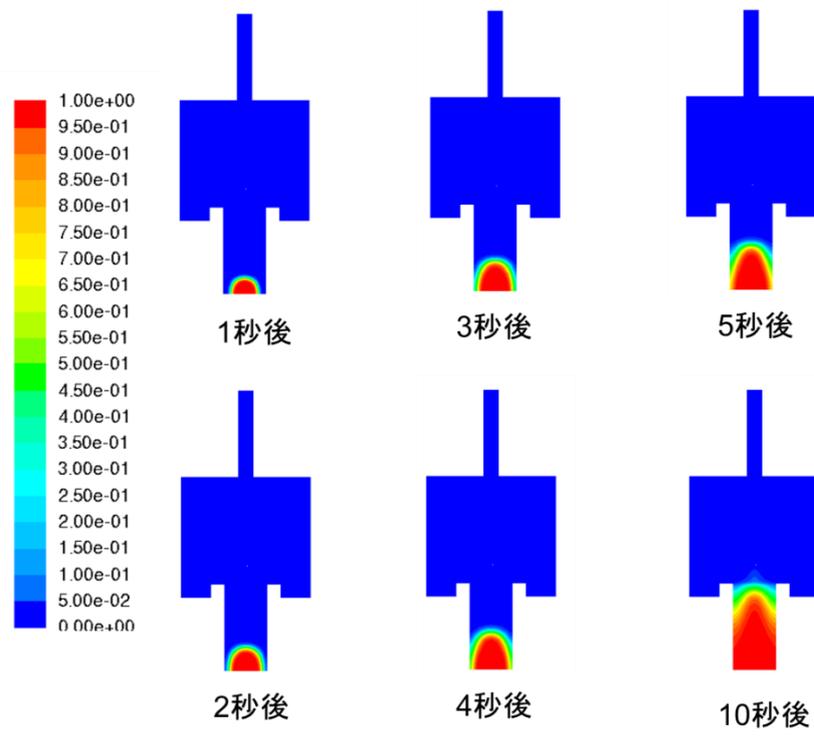


図 7-5-3 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース②)

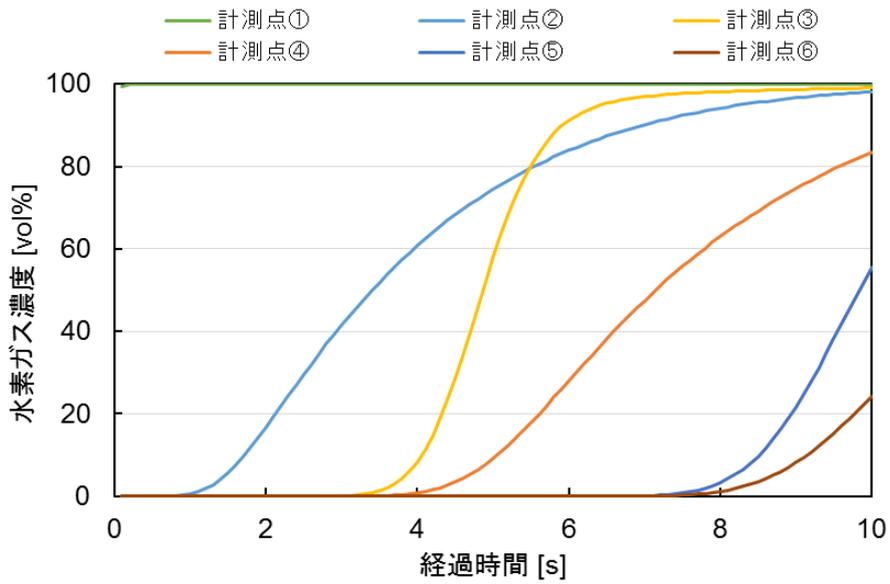


図 7-5-4 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース②)

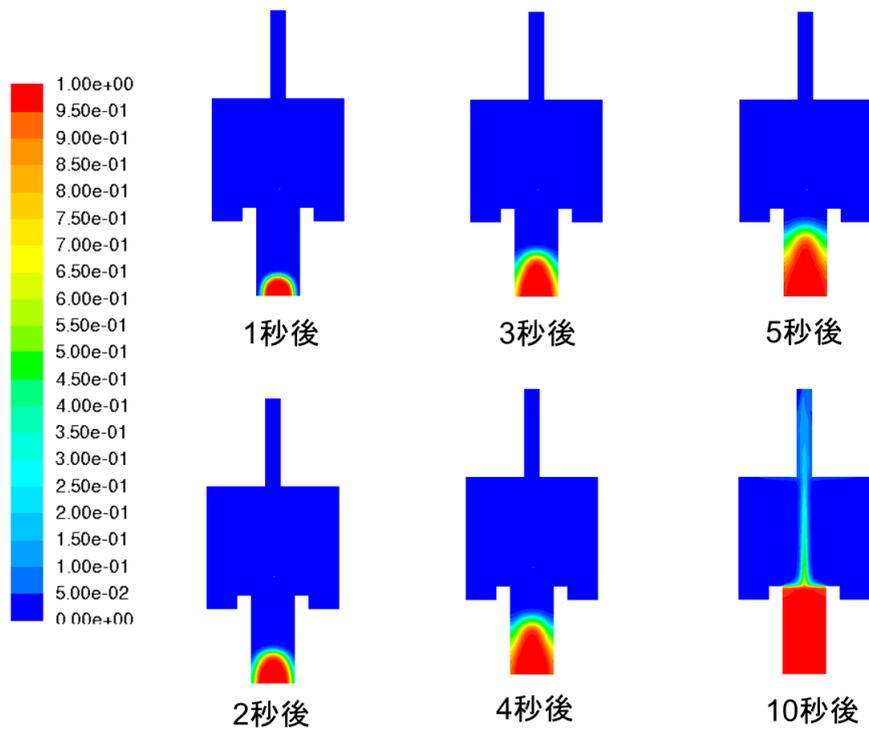


図 7-5-5 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース③)

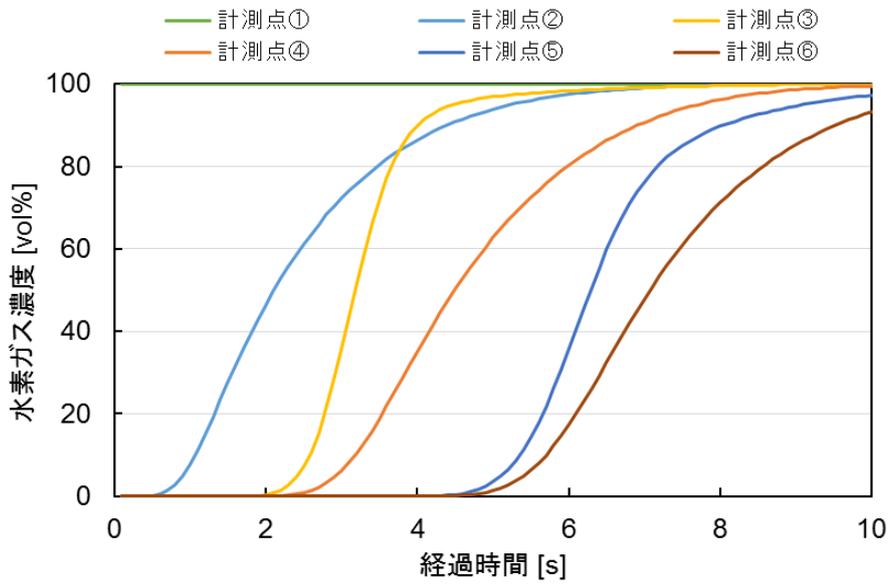


図 7-5-6 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース③)

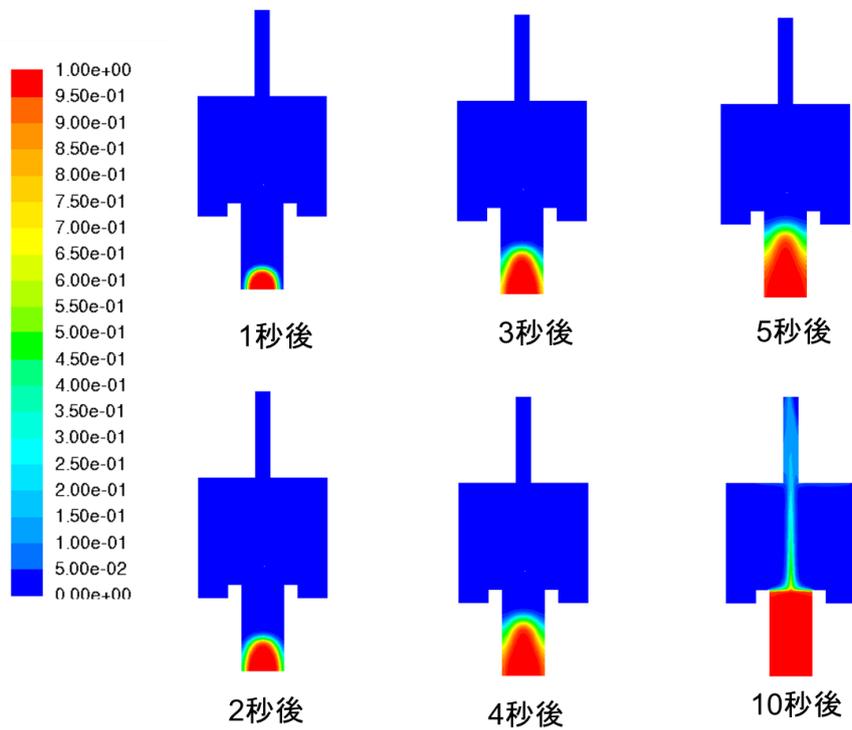


図 7-5-7 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース④)

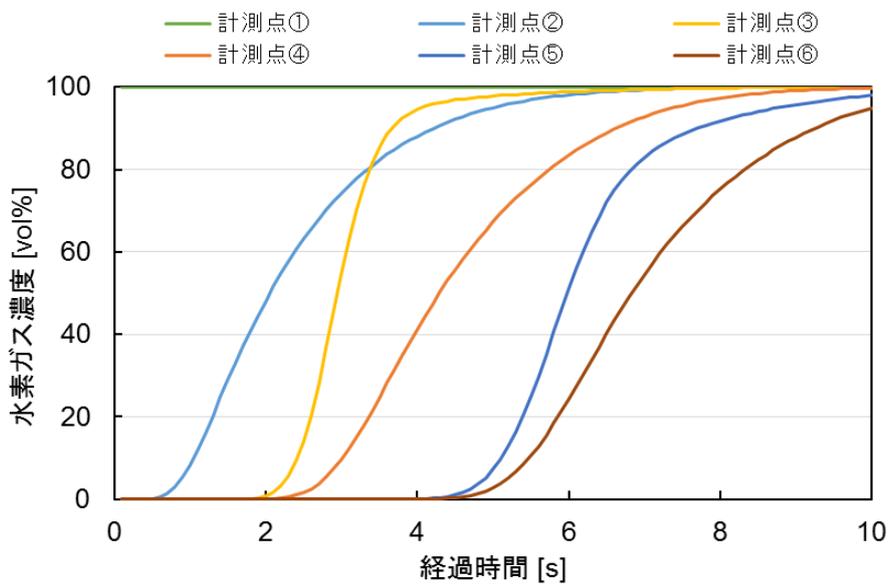


図 7-5-8 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース④)

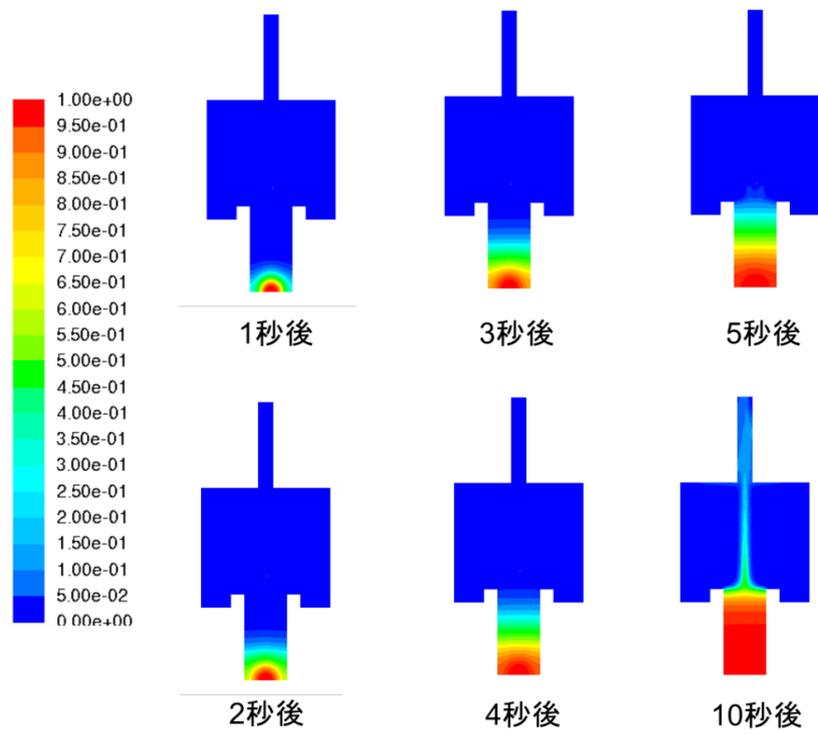


図 7-5-9 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース⑤)

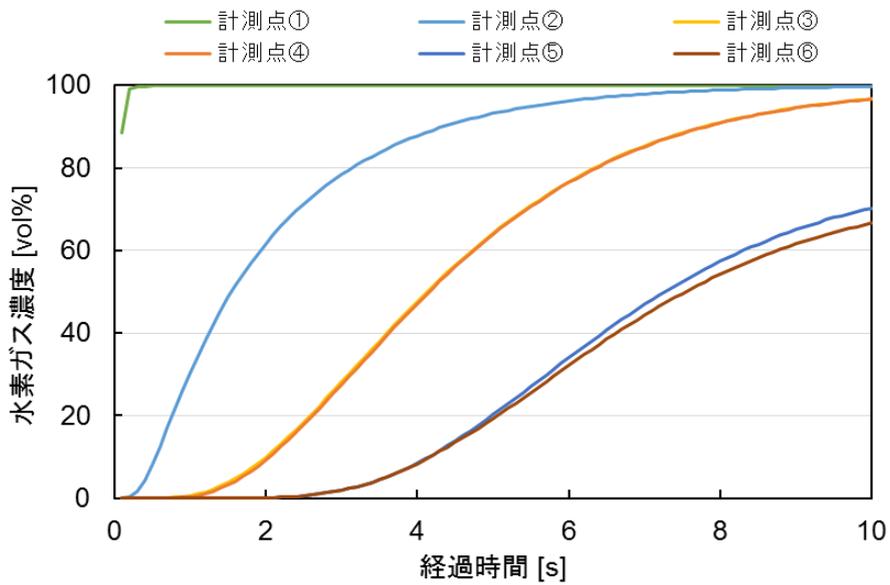


図 7-5-10 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース⑤)

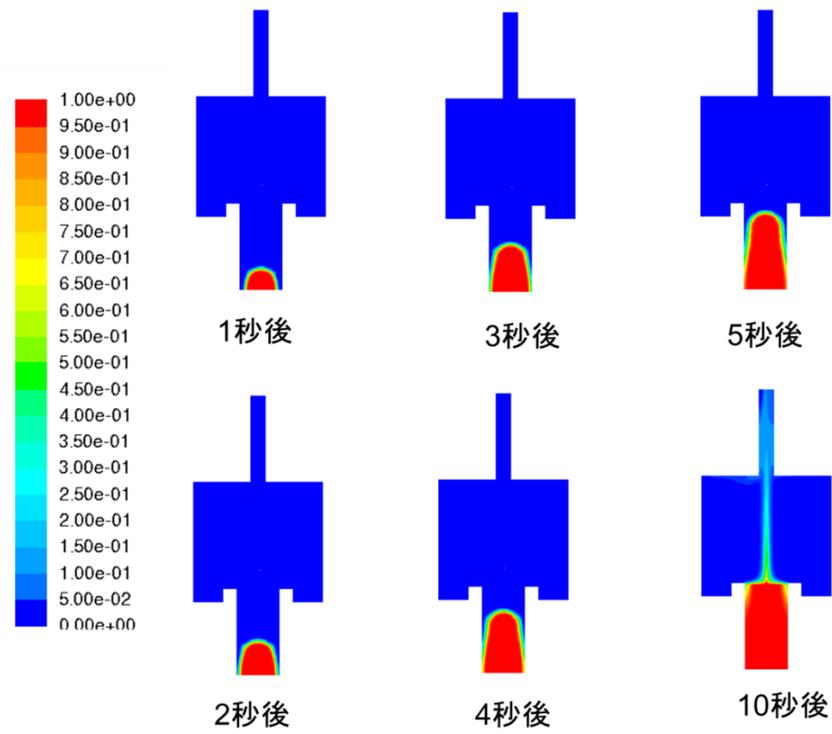


図 7-5-11 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 (ケース⑥)

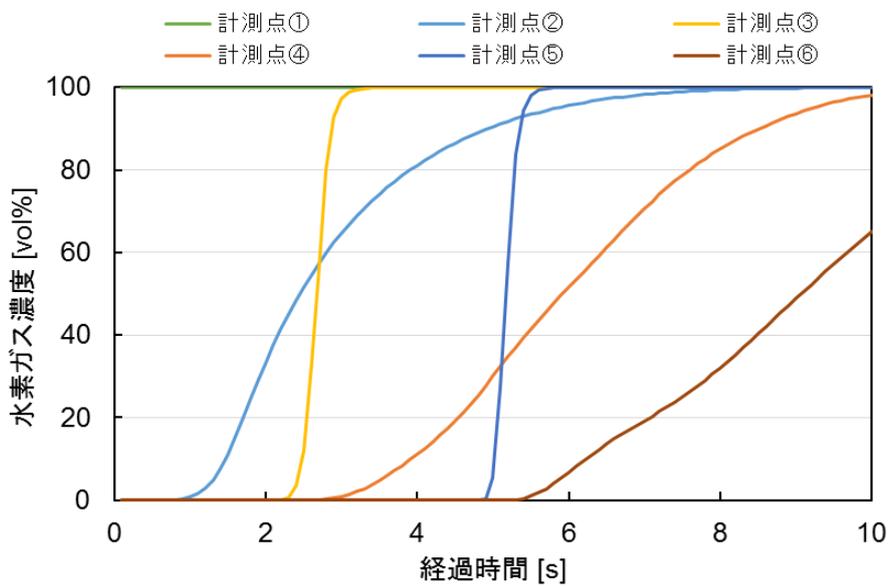


図 7-5-12 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 (ケース⑥)

7.5.2 拡散特性の影響についての試算

本試験体系の照合解析では、漏えい口直上の水素濃度について、計算値の過大評価が見られる。その原因の一つと考えられる漏えい口直上で生じる浮力の影響を低減するため、土中におけるガスの移流に伴う分散挙動^[19]を導入した場合の効果を検討した。分散効果は、巨視的には一様な多孔質体内の流においても、微視的には構造体（土粒子）の存在により速度場が大きくゆがめられていることから、この微視的なゆがみに起因する拡散混合である。熱移動でも同様に“熱分散”という概念が導入され、みかけの熱伝導率（有効熱伝導率）として様々な相関式が提案されている^[17]。したがって、温度場と相関のある濃度場においても、下式のように、分散係数（分散長）を導入することで、移流に伴って拡散移動と同形式でまとめられる。本検討では、各種土壌から得られた実験相関式^[20]から算出される数値（0.02）を代表値として、その前後2ケース（0.002、0.2）を選定した。但し、ANSYS/FLUENTにて分散効果を導入する場合には、化学種保存式(7.1.3)の拡散項（分散項）をソース項として再構築する必要がある。そのため、計算が不安定化することから、本検討では簡易的に流速ベクトルを流速のスカラー値（絶対値）として導入することとした。

$$D_{i,m}: \text{有効拡散係数} \quad [m^2/s](= D_i/\varepsilon + D_e)$$

$$D_e: \text{分散係数} \quad [m^2/s](= \alpha \times u_i)$$

図 7-5-13～7-5-18 に各分散係数の容器内水素濃度の経時変化を示す。分散の効果は漏えい部近傍の最大流速地点で最も大きく拡散が進むことで、濃度は平坦化し、浮力を抑制する効果があることを確認した。これにより、漏えい直上部の急峻な濃度勾配が緩和されて実験値に近づく傾向を示し、分散効果が漏えい口直上の水素濃度の過大評価の原因の一つであることが確認された。

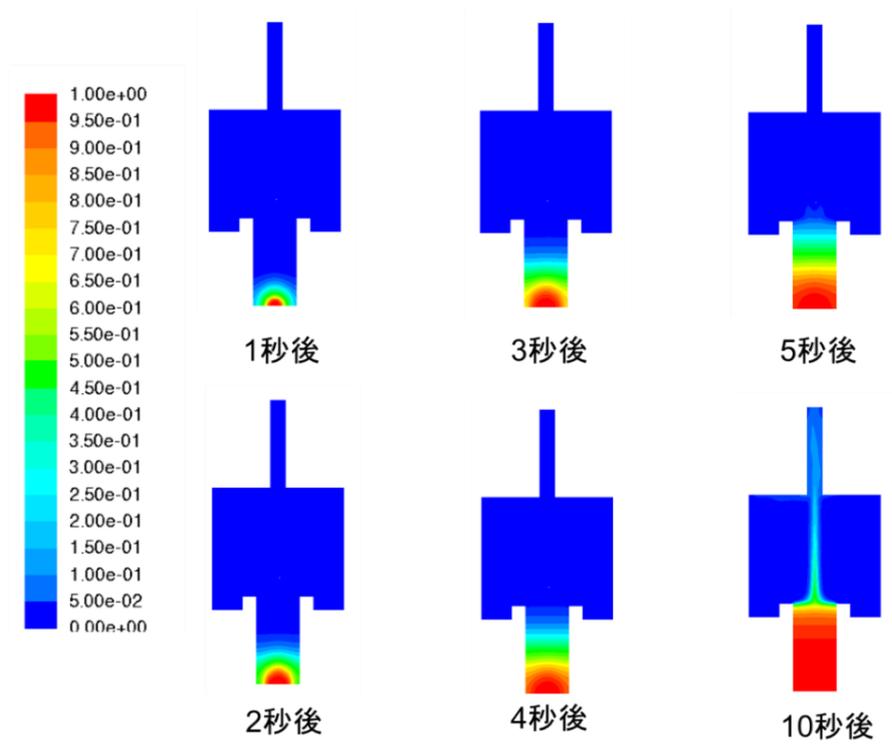


図 7-5-13 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 ($\alpha=0.02$)

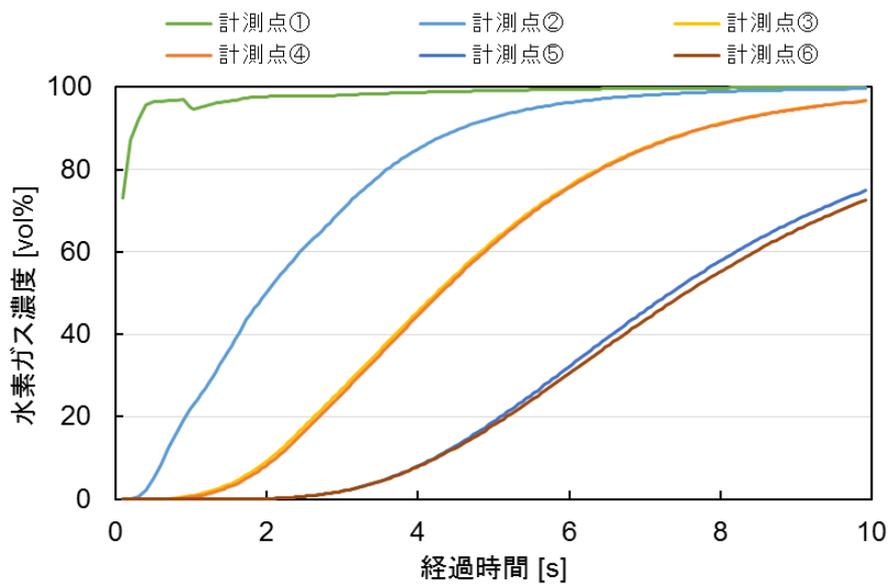


図 7-5-14 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 ($\alpha=0.02$)

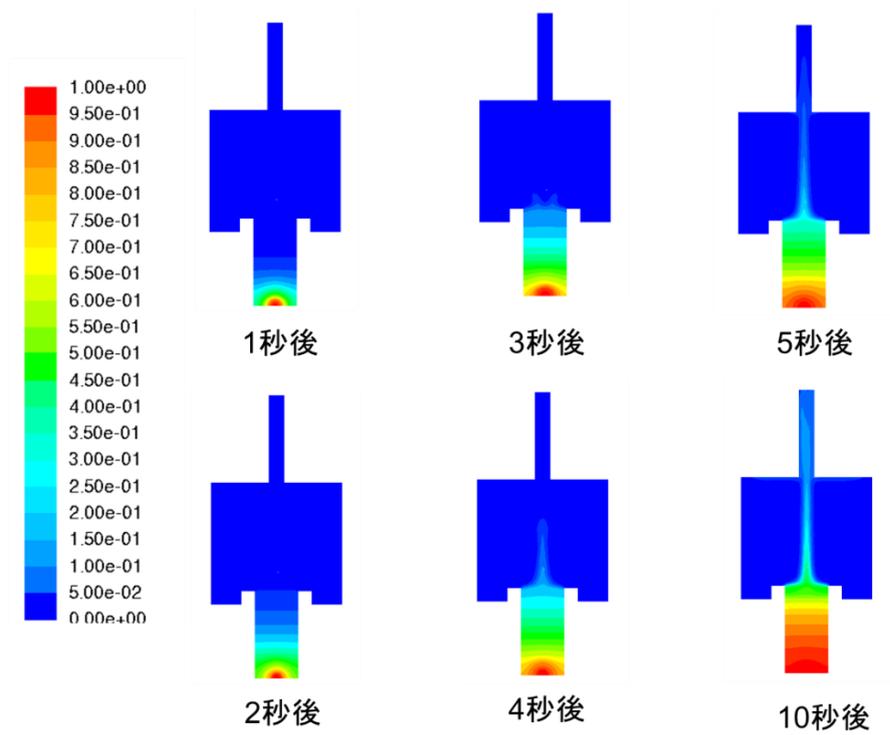


図 7-5-15 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 ($\alpha = 0.2$)

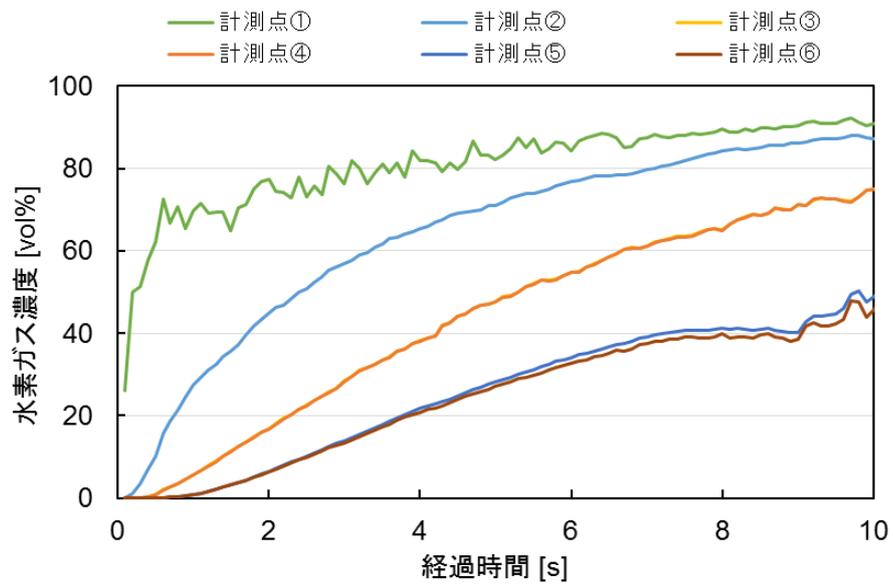


図 7-5-16 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 ($\alpha = 0.2$)

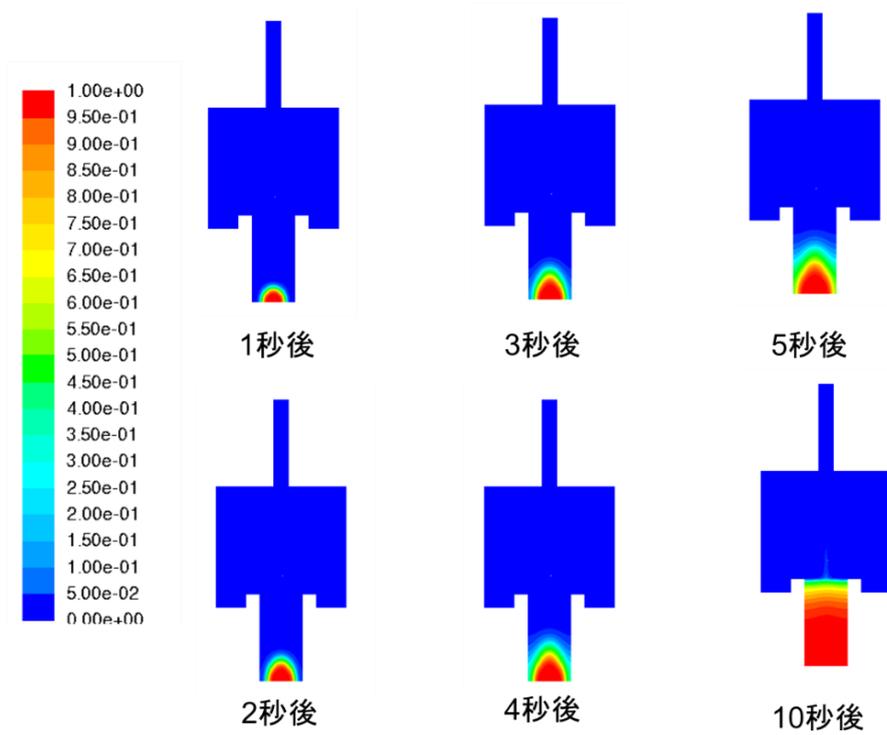


図 7-5-17 小規模試験モデル解析 水素濃度分布 ($\alpha = 0.002$)

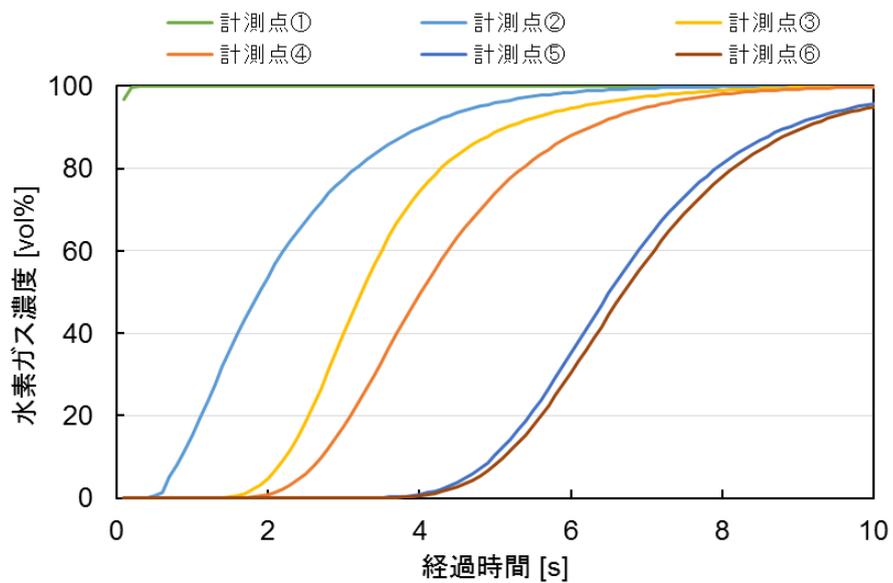


図 7-5-18 小規模試験モデル解析 各計測点における水素濃度推移 ($\alpha = 0.002$)

7.5.1 項、7.5.2 項の感度解析を通して、単層では水素ガスの高い拡散性と浮力による駆動力のバランスが容器内の濃度分布を決定していることから、放出口直上部近傍の水分や土壌変化による拡散性を優位にする土壌パラメータの影響^[21]に加え、水素ガス圧入部での窒素と水素の混合拡散挙動を明らかにして漏えい量モデル（境界条件）を現実になら近づけていくことで、必要に応じて、さらに濃度分布の精度改善が期待できると考えられる。複層の場合では、積層された効果の組み合わせに留意する必要がある。

7.6 まとめ

実フィールド試験で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検証を行い、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した際の地中の拡散挙動及び大気への拡散挙動についてシミュレーションが可能かどうかについて検証した結果、以下の知見を得た。

- ・ 試験装置及び試験条件を正確に反映した CFD 解析を実施し、小規模試験モデル、及び、フィールド試験モデルの積層される充填層内、及び上部空間の水素濃度分布、各測定点における水素濃度推移を解析的に明らかにした。
- ・ 試験との比較から、水素の拡散挙動を概ね良好に再現しており、解析方法・条件を適切に設定することで CFD シミュレーションにより充填層内、及び上部空間の水素拡散挙動を把握できる見通しを得た。
- ・ 小規模試験では、放出口近傍の試験体系のモデル化が、フィールド試験では、それに加えて土壌パラメータの状態変化の影響等が今後の検討課題として挙げられる。
- ・ 今後は、課題の解決を進めると共に、数少ない土壌サンプルを基に、実現象の大局的理解や鍵となるパラメータの影響抽出等を視野にシミュレーションモデルのさらなる構築を行い、様々な条件下での現象を把握するためにシミュレーションの活用を進めていくことが有益と考えられる。

8. 総括

本調査では、地中埋設導管からの水素漏えい時における対応措置を検討するために、実運用時を模擬したスケールでの地中及び大気中（地表面近傍）における水素拡散挙動を確認することを目的として、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した実フィールド試験及びシミュレーションを行い、水素ガスの拡散挙動を把握、整理した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 小規模容器による基礎試験

下記(2)の実フィールド試験におけるデータ収集と(3)のシミュレーション解析に向けた条件の検討を目的とした基礎試験として、小規模容器（内径 ϕ 100×高さ 200 mmの地中模擬槽及び縦300×横280×高さ300 mmの大気模擬槽により構成）を用いて、舗装有無の条件下での水素ガスの拡散挙動を確認した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土（真砂土）とし、舗装は一般的な道路構造部へ使用される舗装（密粒度アスファルト混合物（13））とした。

試験条件として、水素ガス漏えい量（4パターン程度）を変化させ、水素ガスの拡散挙動について整理した。具体的には、水素放出条件として、放出口形状（配管の損傷形状）は、腐食による配管の損傷を想定したピンホール ϕ 1.0 mmとし、供給圧力は、中低圧での水素配管供給を想定した2.5 kPa、5.0 kPa、7.5 kPa、10.0 kPaの4パターンとして漏えい量を変化させた。

本基礎試験の結果として次の成果を得た。

① アスファルト舗装の有無による水素拡散挙動の差異

- ・ 地中水素拡散挙動については、真砂土のみの場合が濃度の立ち上がり及び濃度上昇が最も速く、真砂土上にアスファルトを敷設すると、濃度の立ち上がりが遅くなり、濃度上昇勾配が緩やかとなった。
- ・ 大気中水素拡散挙動については、真砂土のみの場合が試料上の平均濃度値の立ち上がりが最も速く、60秒後の到達濃度が最も高くなった。真砂土上にアスファルトを敷設すると、試料上の平均濃度値の立ち上がりが遅くなり、60秒後の到達濃度が低くなった。

② アスファルト舗装の厚さが水素拡散挙動に及ぼす影響

- ・ 地中水素拡散挙動については、アスファルトの厚さの増加に伴い、濃度の立ち上がりが遅く、濃度上昇勾配が緩やかとなった。
- ・ 大気中水素拡散挙動については、アスファルトの厚さの増加に伴い、試料上の平均濃度値の立ち上がりが遅くなり（アスファルト150 mmについて2.5 kPaの場合に対し5.0 kPaの場合約5秒遅れ）、60秒後の到達濃度が低くなった（アスファルト150 mmについて2.5 kPaの場合と5.0 kPaの場合の濃度差約3%）。

③ 実フィールド試験における水素供給圧力の検討

- ・ アスファルト 150 mm を用いた試験において、供給圧力 2.5 kPa の流量 (1.14 L/min) に対し 10.0 kPa の流量 (4.08 L/min) は約 3.6 倍となり、明確な流量差を確認できたため、実フィールド試験における供給圧力条件を 2.5 kPa、10.0 kPa の 2 パターンとして実施することとした。

④ 実フィールド試験における地中水素センサ埋設点の最適化

- ・ 得られた透気係数・拡散係数を基にシミュレーション解析にて予備解析を実施し、実フィールド試験の水素拡散挙動を予測することにより、実フィールド試験における地中水素センサ埋設点の最適化を図った。
- ・ アスファルトを敷設した場合、真砂土層のみの場合と比較して、水素ガスの水平方向への拡散が顕著であったため、土壌層全体に等間隔で水素ガスセンサを配置し、地中水素ガス濃度経時変化を計測することとした。

以上のとおり、アスファルトが水素拡散挙動に及ぼす基本的な特徴を定性的に明らかにし、以降で実施する、実フィールド試験の試験条件や計測方法の検討に反映させた。

(2) 実フィールド試験（地中及び大気中（地表面近傍）の水素濃度分布計測）

上記(1)の基礎試験結果を踏まえ、実フィールド試験として、地中及び大気中での水素の拡散挙動が確認できる規模（直径 ϕ 7 m）の地中模擬層を製作し、土砂部分 0.7 m、舗装（路盤含む）0.5 m とし、深さ 1.2 m からの漏えい水素の拡散挙動（濃度分布）及び大気（地表面から鉛直上方 20 mm の位置）への拡散挙動（濃度分布）について調査を実施した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、舗装は一般的な道路構造部へ使用される舗装とした。具体的には、車道舗装 50 型をモデルとして、路盤とアスファルトを単層化した、路床 700 mm（真砂土を使用）、碎石層 350 mm（粒度調整再生碎石（RM-3）を使用）、アスファルト層 150 mm（密粒度アスファルト混合物（13））とした。

地中における深さ方向及び水平方向の濃度分布を計測するため、地中に水素センサの多点埋設（40 点）を行った。また、大気中における拡散挙動の可視化及び濃度分布の計測はレーザ光を地表面近傍に水平方向に照射し、水素分子からのラマン散乱光を画像として捉えるラマンイメージング技術を用いて行った。

試験条件として、水素ガス漏えい量（2 パターン：2.5 kPa、10.0 kPa）を変化させ、地中及び大気中への拡散挙動について立ち上がりからの経時変化を確認する。うち、1 パターン（漏えい量 10.0 kPa）で、水素供給停止後の挙動について、その傾向を確認した。

実フィールド試験の結果として、次の成果を得た。

① 地中における水素拡散挙動

- ・ 地中における水素ガスの広がり、ほぼ同心円状の挙動を示す。
 - ・ 本試験条件の範囲において、水素濃度が爆発範囲となる領域は水素放出開始から徐々に拡大し、供給圧力 2.5 kPa では凡そ 21 時間後、10.0 kPa では凡そ 11 時間後に土壌模擬層内のほぼ全ての領域が 4%以上の濃度となった。
 - ・ 本試験条件の範囲において、放出口近傍（～0.5 m 程度）では水素放出開始から、急激に濃度が上昇する。
 - ・ 放出口からの離隔距離 0.5 m 程度～1.5 m の範囲では、放出開始からの濃度上昇勾配が急峻であり、およそ 5 時間程度で濃度上昇の変曲点に達し、その後濃度が徐々に上昇する。
 - ・ 放出口からの離隔距離が 1.5 m より離れた範囲では、放出開始から条件に応じ数時間の遅延時間を経た後（2.5 kPa の場合 3 時間、10.0 kPa の場合 1 時間程度）、徐々に水素濃度が上昇する。
 - ・ 同流量にて水素を放出した条件について、舗装有無による水素拡散挙動を比較すると、舗装が有る場合、水素の閉じ込め効果が大きく、水平方向への拡散が促進され、高濃度の水素が検出される範囲が拡大する。
- ② 大気中における水素拡散挙動
- ・ ラマンイメージングにより、アスファルト舗装を通過して大気中に拡散する水素ガスの挙動を可視化し、空間濃度分布を計測することに成功した。
 - ・ 地表面の水素濃度空間分布は、本試験の計測条件の範囲内（放出口からの水平距離 2.5 m 以内）においてはほぼ一様であった。
 - ・ 本試験の観測時間内において、供給圧力 2.5 kPa では水素濃度が 4%を超過することはなかったが、供給圧力 10.0 kPa においては凡そ 17 時間で水素濃度が 4%を超過した。
 - ・ 水素濃度の経時変化について見ると、時間の経過と共に徐々に単調に上昇する。
 - ・ 実際の屋外環境においては、大気層は風や擾乱、物体の移動等により絶えず流れが発生しており、本調査における漏えい量の条件下で、%オーダの濃度の水素が滞留する可能性は極めて低いものと考えられる。
- ③ 漏えい停止後の地中における水素拡散挙動
- ・ 壁面付近では、漏えい停止からおよそ 5 時間程度の間、水素ガス濃度が減少することなく漏えい停止時よりも濃度が上昇した。
 - ・ 実現場においては舗装による水素ガスの閉じ込め効果が大きく、水素ガスの漏えい停止後もガスが地中に留まり、爆発濃度範囲内である状態が長時間持続する。
 - ・ 地中にガスの拡散を阻害する埋設物などが有る場合等、条件によっては、漏えい停止時よりもガス濃度が高濃度となる場合もあり、復旧作業の際には注意が必要である。

(3) シミュレーション解析の基礎検討

上記(2)で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検証を行い、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した際の地中の拡散挙動及び大気への拡散挙動についてシミュレーションが可能かどうかについて検証した結果、以下の知見を得た。

- ・ 試験装置及び試験条件を正確に反映した CFD 解析を実施し、小規模試験モデル、及び、フィールド試験モデルの積層される充填層内、及び上部空間の水素濃度分布、各測定点における水素濃度推移を解析的に明らかにした。
- ・ 試験結果との比較により、水素拡散挙動が概ね良好に再現されていることを検証した。解析方法・条件を適切に設定することで CFD シミュレーションにより充填層内、及び上部空間の水素拡散挙動を把握できる見通しを得た。
- ・ 小規模試験では、放出口近傍の試験体系のモデル化が、フィールド試験では、それに加えて土壌パラメータの状態変化の影響等が今後の検討課題としてあげられる。
- ・ 今後は、課題の解決を進めると共に、数少ない土壌サンプルを基に、実現象の大局的理解や鍵となるパラメータの影響抽出等を視野にシミュレーションモデルのさらなる構築を行い、様々な条件下での現象を把握するためにシミュレーションの活用を進めていくことが有益と考えられる。

本事業は、「水素導管供給システムの安全性評価事業（維持管理工法の水素適用性評価（地中及び大気中の水素拡散挙動調査）」）として、平成 28 年度から 30 年度の 3 箇年に亘って実施した。その中で、初期に極めて理想的な条件から水素拡散挙動の把握を進め、本年度の実現場を模擬した条件下における水素拡散挙動の調査に至った。

平成 28 年度は、理想的な条件下における水素拡散挙動を明らかにするために、土壌試料としてガラスビーズを用いた小規模試験を実施し、水素が地中模擬槽において同心円状に広がることや、大気中へ拡散する水素濃度について放出口直上が最も高い正規分布状の空間分布なること等、基本的な拡散挙動の特徴を実験的に明らかにした。また、実験装置構成を反映した 3 次元軸対称モデルを作製し、解析パラメータとして、水素放出条件（供給圧力、流量等）や充填層パラメータ（透気係数、拡散係数、空隙率等）を与え、CFD 解析を実施し、シミュレーション解析により理想的な条件下における水素拡散挙動の再現が可能であることを明らかにした。

平成 29 年度は、平成 28 年度の調査内容を踏まえ、一般的な埋設土である真砂土を用いた実フィールド規模の実験を実施し、真砂土を用いた場合においても地中模擬槽において水素が同心円状に広がることや、その広がり漏えい量依存性を明らかにした。大気中へ拡散する水素についても、ガラスビーズを用いた場合と同様に放出口直上が最も高い正規分布状の空間濃度分布となることを確認し、その広がり漏えい量依存性を明

らかにした。漏えい停止後の水素拡散挙動についても確認し、真砂土中に拡散した水素の濃度が徐々に低下する経時変化を明らかにした。また、実フィールド試験装置の構成を反映した 3 次元軸対称モデルを作製し、解析パラメータとして、水素放出条件（供給圧力、流量等）、土壌層パラメータ（透気係数、拡散係数、空隙率等）を与え、CFD 解析を実施した。土壌層条件のうち、透気係数と拡散係数について、平成 28 年度はガラスビーズの粒径から算出した計算値を用いたが、平成 29 年度は透気係数計測装置と拡散係数計測装置をそれぞれ設計、製作し、実際に用いた真砂土の透気係数及び拡散係数を実験的に求め、それらを用いて CFD 解析を実施し、シミュレーション解析により実際の土壌を用いた場合においても水素拡散挙動の再現が可能であることを明らかにした。

平成 30 年度は、真砂土上に一般的な道路構造部に使用される舗装を施し、より実運用に近い条件下における水素拡散挙動について調査した。その結果、地中においてはガラスビーズや真砂土の場合と同様に水素が同心円状に拡散することが確認された。大気中への水素拡散については、舗装を施した場合、ガラスビーズや真砂土の場合とは大きく特徴が異なり、放出口上を原点とした半径 2.5 m の範囲内の地表面付近では一様の濃度分布となることを明らかにした。漏えい停止後の水素拡散挙動についても確認し、舗装を施した土壌中に拡散した水素の濃度が徐々に低下する経時変化を観測し、舗装が無い場合に比べ長時間水素が地中に留まることを明らかにした。また、実フィールド試験装置の構成を反映した 3 次元軸対称モデルを作製し、解析パラメータとして、水素放出条件（供給圧力、流量等）、真砂土層、碎石層、アスファルト層の各層の地質パラメータ（透気係数、拡散係数、空隙率等）を与え、CFD 解析を実施した。各層の地質パラメータのうち、透気係数と拡散係数は、平成 29 年度と同様に実験的に求めた値を反映し、シミュレーション解析により舗装を施した場合においても水素拡散挙動の再現が可能であることを明らかにした。

これらの 3 箇年の調査事業を通じて得られた成果は、万一ガス漏えいが発生した場合の「①漏えいを迅速に検知」⇒「②漏えい位置を的確に特定」⇒「③遮断等の措置」⇒「④漏えい箇所の修理」といった対応への活用がなされる。以下にその一例を示す。

- ・ 漏えいの迅速な検知

埋設導管の損傷による水素漏えいを迅速に検知するためには、水素センサの設置が有効であると考えられる。水素センサの配置箇所や配置間隔は、漏えい検知の迅速性を大きく左右するため、様々な条件における水素拡散挙動に照らし、総合的に検討されるべきであると考えられる。

本調査では、土壌や舗装が空間的に均質である、など比較的理想的な条件下ではあるが、水素拡散挙動がシミュレーション解析によって良好に再現できることを示した。したがって、本調査において用いたシミュレーション解析手法をベースとして、各種漏えい条件下における基本的な水素拡散挙動を推定することで、水素セン

サの配置箇所や配置間隔等の最適化に役立つものと考えられる。

また、これまでに、地中における埋設物、障害物等の存在による水素拡散挙動に関する再現性評価はなされていないが、今後の課題として、これらの点を明らかにすることで、シミュレーション解析の有効性が更に向上すると共に、漏えいした水素の意図的な誘導を実現する構造などを検討することで、迅速な漏えい検知に役立つものと考えられる。

- ・ 漏えい位置の特定

地中における水素漏えい位置を特定するためには、地中、特にアスファルト層よりも深い層に水素センサを埋設配置する方法が現実的である。本調査における試験結果等によると、地中の複数点における水素濃度経時変化の相対的な比較から、漏えい位置の推定が可能であると考えられる。

一方、一般的に用いられる吸引式水素センサを用いて、舗装の有る実現場において地表面付近の水素濃度から漏えい位置を特定することは困難である。本調査の試験結果等によると、アスファルトの影響により、地表面付近では水素濃度分布のコントラストが著しく低下することが明らかになっており、加えて風や大気の大擾乱等によって大気との混合が促進されるためである。

このため、地表面付近の水素濃度から漏えい位置を推定するためには、広範囲に亘る地表面上の水素濃度の2次元空間分布を計測する必要があると考えられる。本調査における大気中水素濃度分布計測に用いたレーザ計測手法と原理的には同一であるが、LIDAR (Light Detection and Ranging : 光による検知と測距) 技術によって水素のラマン散乱光を遠隔から検知する技術を用いることで、地表面上における漏えい水素の2次元空間分布計測が原理的には可能であり、このようなりモートセンシング技術を進化させることで、将来的に地上において地中のガス漏えい位置の特定が実現できる可能性があるものと考えられる。

- ・ 遮断及び漏えい箇所の修理等の措置

本調査により、漏えい停止後も地中に水素が滞留する状況が明らかになった。特に、アスファルト舗装のある環境では、比較的長時間に亘り地中における水素は危険濃度範囲にあることを示した。漏えい検知時の水素供給の遮断は当然迅速になされる必要があるが、その後の修理等の措置へ移行する際は、安全に作業を開始するために必要な待機時間の検討材料として、本調査の成果を活用することができる。また、地中水素濃度を素早く低下させる構造や安全な工法の検討の際に、水素漏えい停止後の基本的な拡散挙動として活用することができる。

なお、これらの措置には漏えい箇所的な確な特定が必要不可欠であるが、前述のように、センサ配置の最適化等によって安全かつ効率的な遮断、修理等の措置が可能となる。

以上のとおり、本調査の成果活用事例について示した。

このように、本調査では、大規模実フィールド試験装置の構築、レーザ等を用いた各種計測技術およびシミュレーション解析手法により、地中及び大気中における水素拡散挙動について従来にない極めて貴重なデータを蓄積することができた。前述の事例に限ることなく、本成果が広く有効活用され、将来の水素エネルギー利用社会における安全性の向上に資することができれば幸いである。

[参考文献]

- [1] 小谷 昇他：「図解 土木講座 アスファルト混合物の知識」(改訂3版)，技報堂出版株式会社(2010)
- [2] 北口久雄：「水素用ガスセンサの現状と課題」，水素エネルギーシステム，Vol.30, No.2 (2005)
- [3] R. M. Measures：“ Laser Remote Sensing “， John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- [4] 遅沢省子氏「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用」農環研報， 15, pp.1-66(1998)
- [5] K. Kawamoto, P. Moldrup, P. Schjonning, B. V. Iversen, D. E. Rolston, and T. Komatsu:”Gas Transport Parameters in the Vadose Zone : Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles”, Published in Vadose Zone Journal, No.5, pp.1194-1204 (2006)
- [6] 赤木寛一 他：「ガスの土中での移動特性」，第 45 回地盤工学研究発表会， D-02, pp.867-868(2010)
- [7] 濱田洋平 他：「遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定」，筑波大学陸域環境研究センター報告， No.7, pp.71-86(2006)
- [8] MHK-工房 <http://www.mhk-koubou.com/>
- [9] 宮崎毅，西村拓：「土壌物理実験法」，東京大学出版会
- [10] 「化学便覧 基礎編Ⅱ」，日本化学会
- [11] 大江修造：「物性推算法」，データブック出版社(2002)
- [12] ANSYS FLUENT ユーザーズガイド.
- [13] 岡本英樹他：“地中での漏えいガスの拡散挙動に関する実証研究 数値シミュレーションモデルを用いた適用性検証”，安全工学， pp.38-46,(2009).
- [14] Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer (1991).
- [15] 濱本昌一郎，西村 拓：“古典を読む R.J.Millington and J.P.Quirk 著「多孔質媒体中の物質移動」”，土壌の物理， No..128, P39-46(2014)
- [16] 海野将孝他：“土壌保水特性に基づくガス拡散係数の予測モデルの提案と検証”，第 48 回土壌物理学学会シンポジウム(2006)
- [17] 日本機械学会，伝熱工学資料 (改訂第 4 版)，日本機械学会(2009)
- [18] 中山頭：“多孔質伝熱のモデリングの進展”，日本機械学会熱工学コンファレンス (2005)
- [19] 日比義彦他：“土壌の通気帯におけるガス成分の分散現象に関する室内実験”，土木学会論文集 G, Vol.63, No.1, pp.30-39(2007).
- [20] Muhammad Naveed,et.al.,：“Gas Dispersion in Granular Porous Media under

Air-Dry and Wet Conditions”, Soil Si.Am.J.Vol 76, pp845-652 (2011)

- [21] 新家憲司：“土壤層に流体を圧送したとき発生する圧力（第1報）－水分を含む土壤に気体を流した場合－，農業機械学会誌，Vol.41，No.4，pp542-552 (2011)

[付 録] 試験結果

I. 小規模容器による基礎試験結果（大気中水素拡散挙動の可視化）

表 I-(1) 表番号と実験条件一覧表

図 No.	供給圧力	土壌試料
I-1	2.5 kPa	真砂土のみ
I-2		真砂土+コート
I-3		真砂土+アスファルト 25 mm
I-4	5.0 kPa	真砂土+アスファルト 100 mm
I-5		
I-6		
I-7	10.0 kPa	真砂土+アスファルト 150 mm
I-8	2.5 kPa	
I-9	5.0 kPa	
I-10	7.5 kPa	
I-11	10.0 kPa	

- ・小規模試験における大気中水素濃度計測の結果を 10 秒ごとに抜粋して掲載した。
- ・視認性向上のため、縦方向のみ約 4 倍に拡大した。

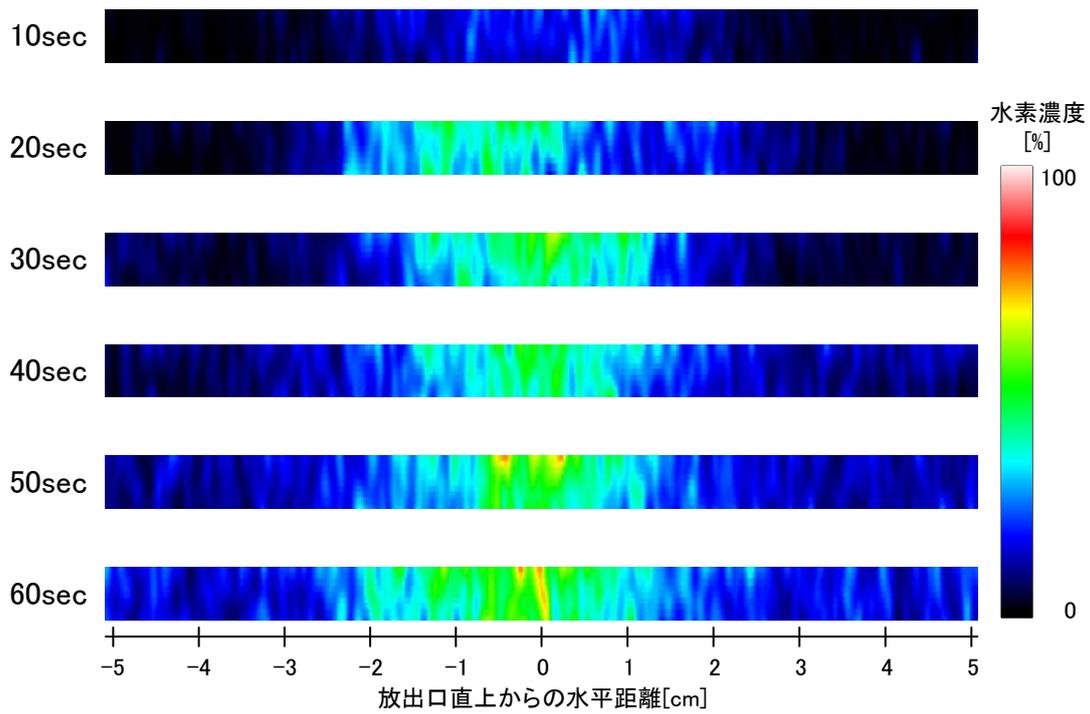


図 I -1 大気中の水素濃度経時変化
(10~60 sec、真砂土のみ、供給圧力 2.5 kPa)

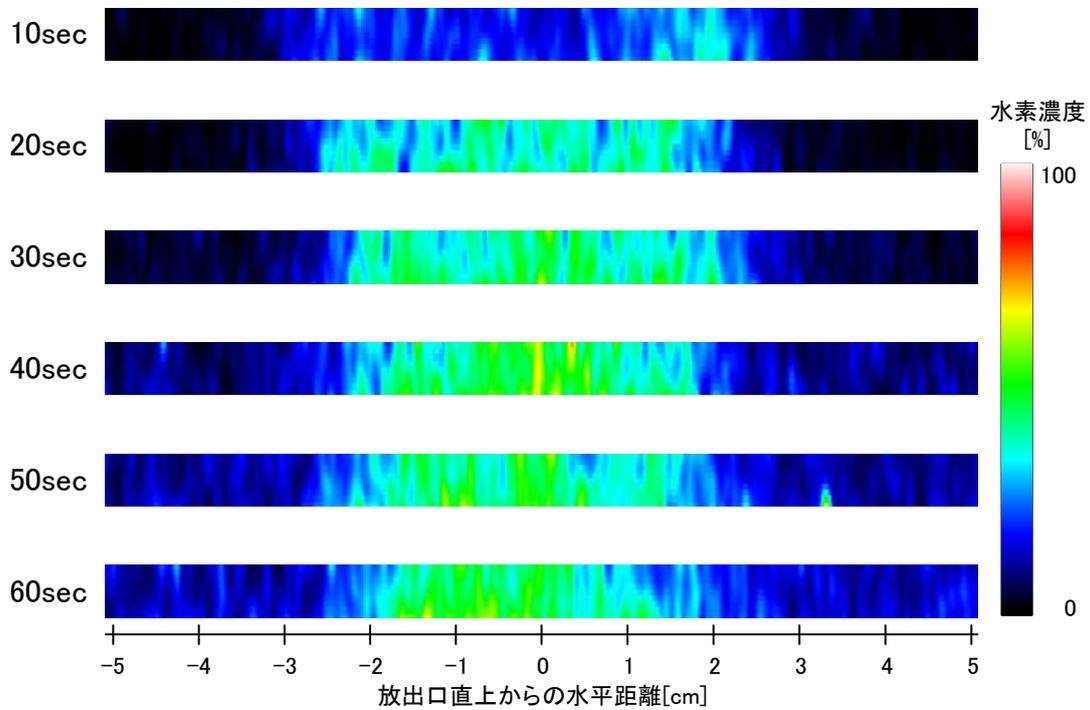


図 I -2 大気中の水素濃度経時変化
(10~60 sec、真砂土+コート、供給圧力 2.5 kPa)

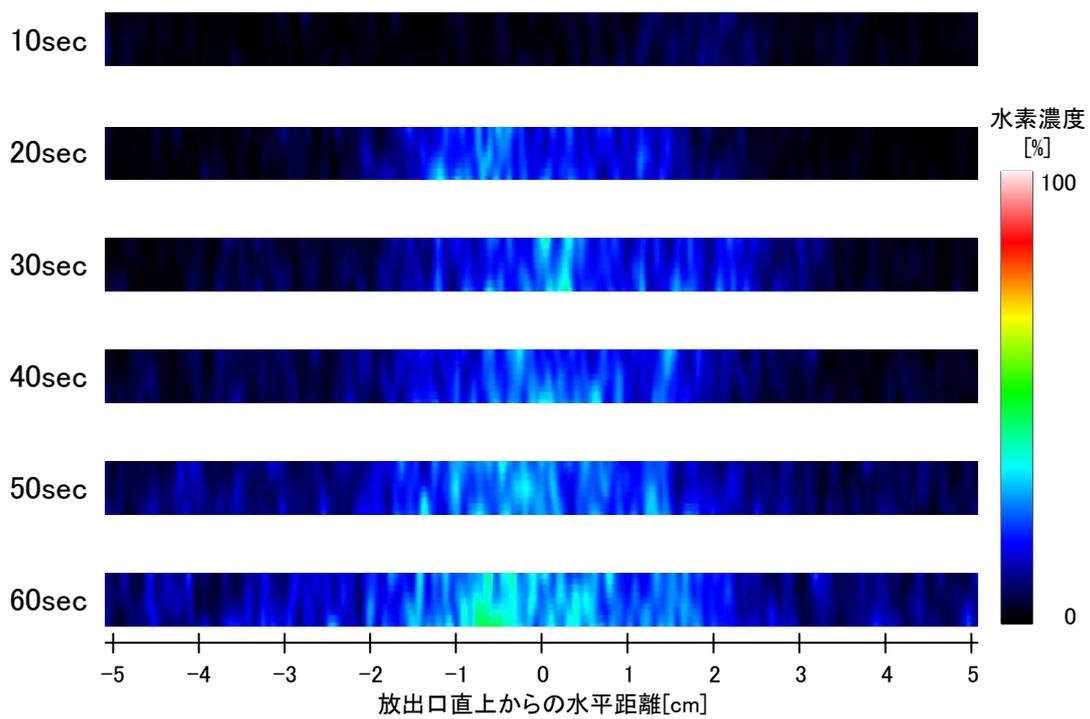


図 I -3 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 25 mm、供給圧力 2.5 kPa)

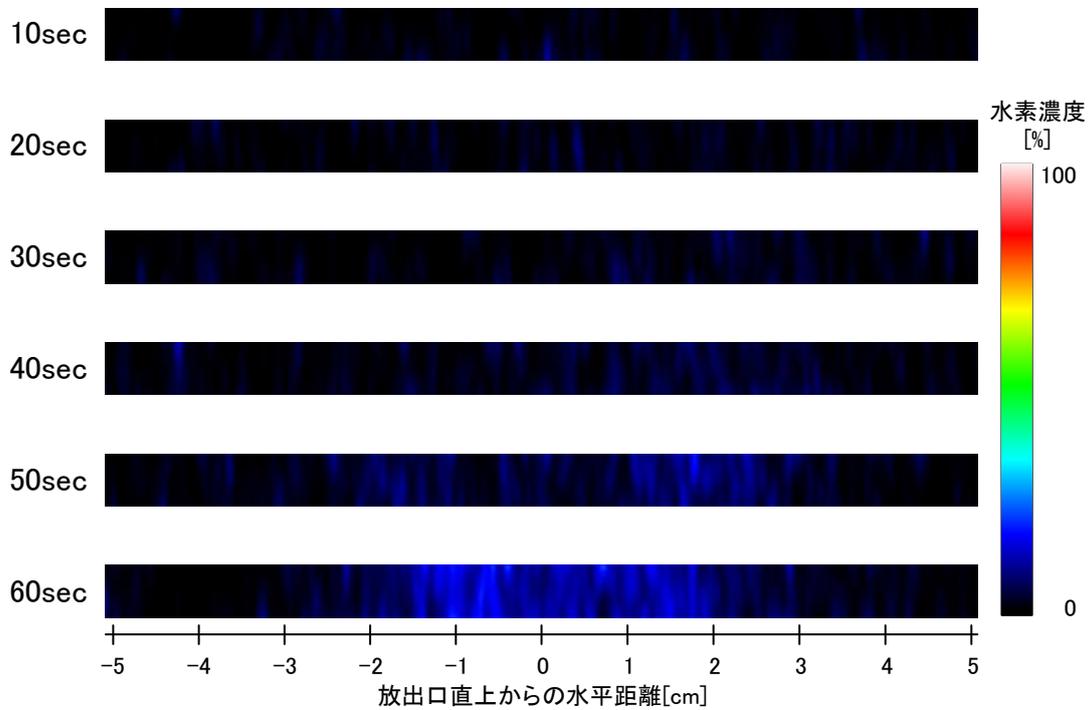


図 I -4 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 100 mm、供給圧力 2.5 kPa)

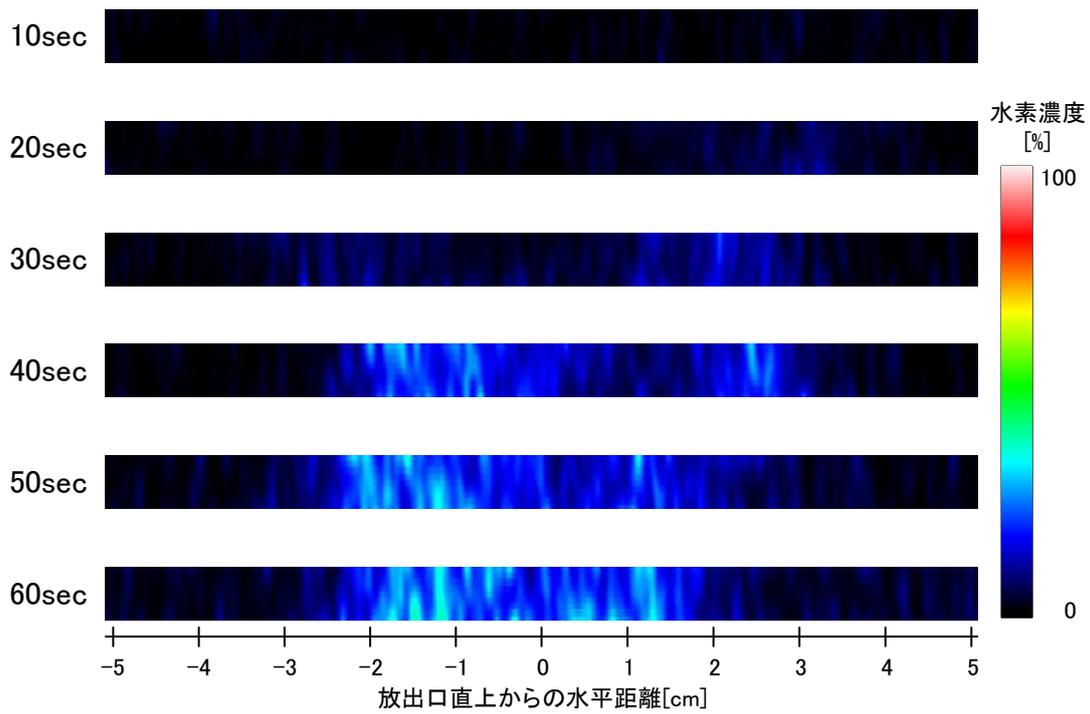


図 I -5 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 100 mm、供給圧力 5.0 kPa)

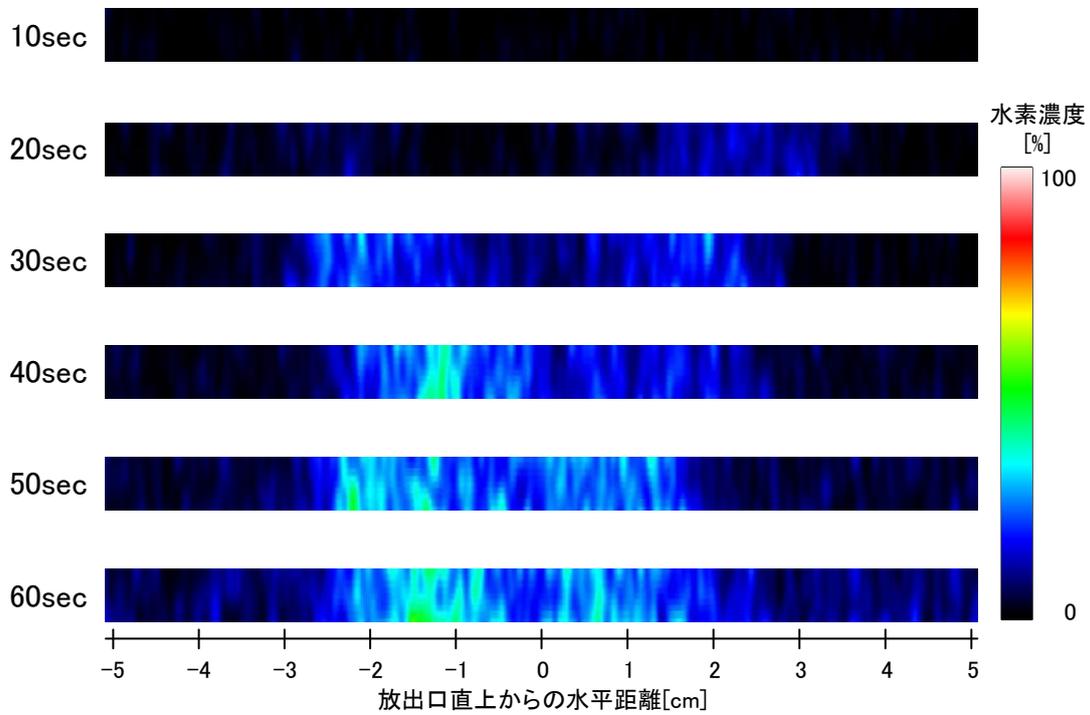


図 I -6 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 100 mm、供給圧力 7.5 kPa)

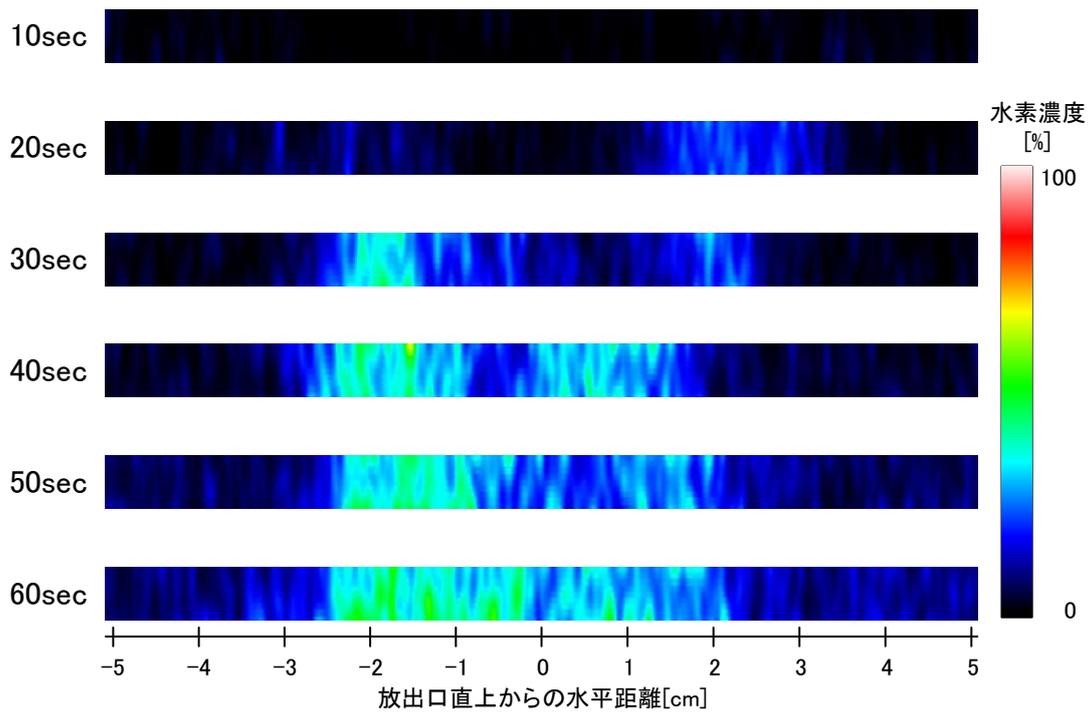


図 I -7 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 100 mm、供給圧力 10.0 kPa)

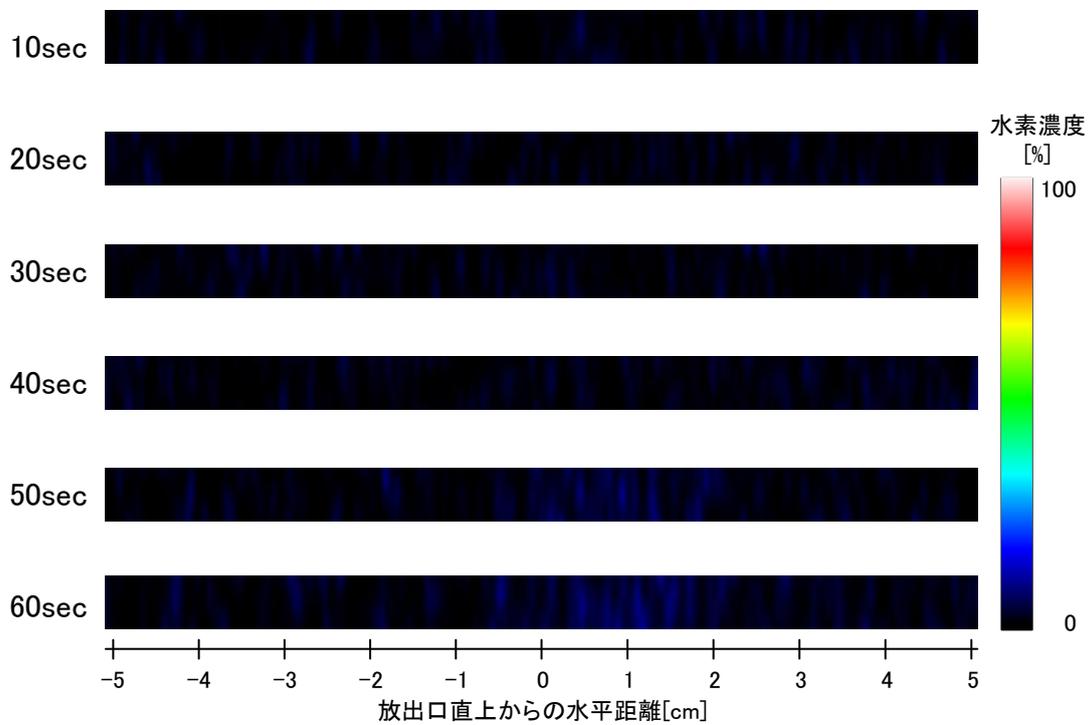


図 I -8 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 150 mm、供給圧力 2.5 kPa)

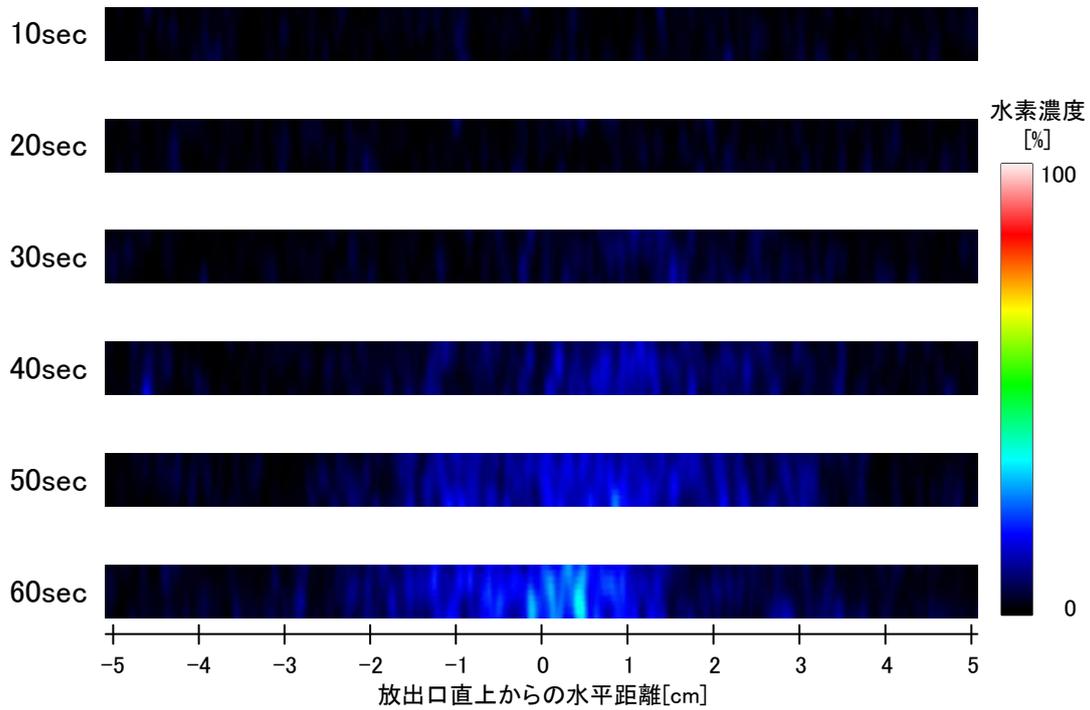


図 I -9 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 150 mm、供給圧力 5.0 kPa)

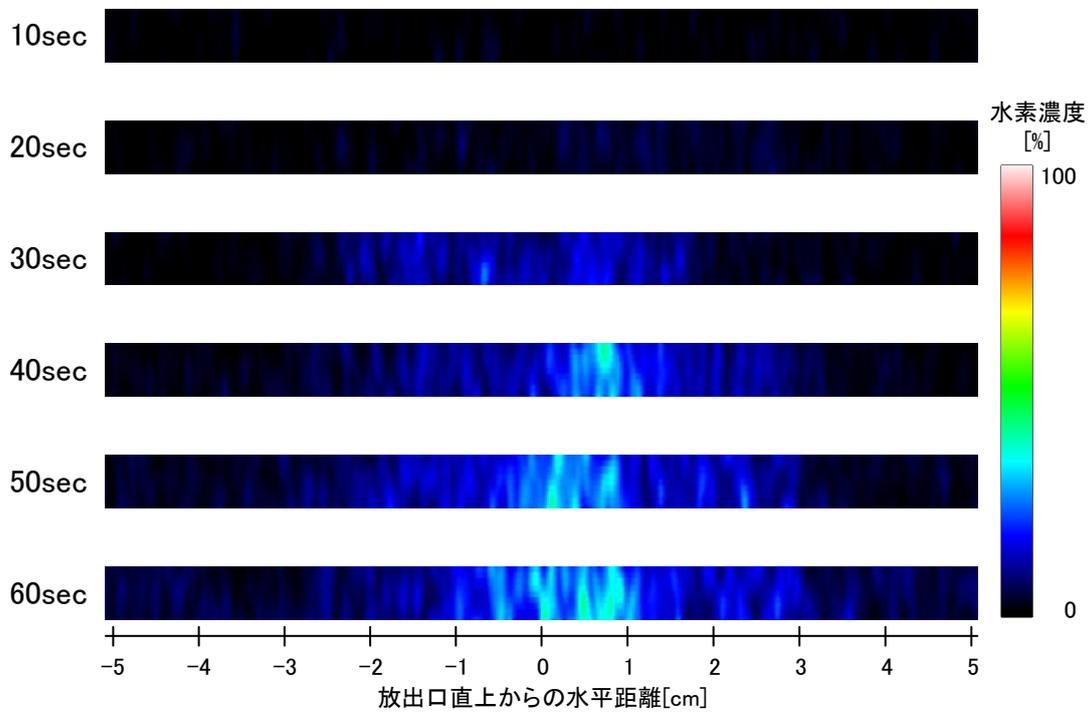


図 I -10 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 150 mm、供給圧力 7.5 kPa)

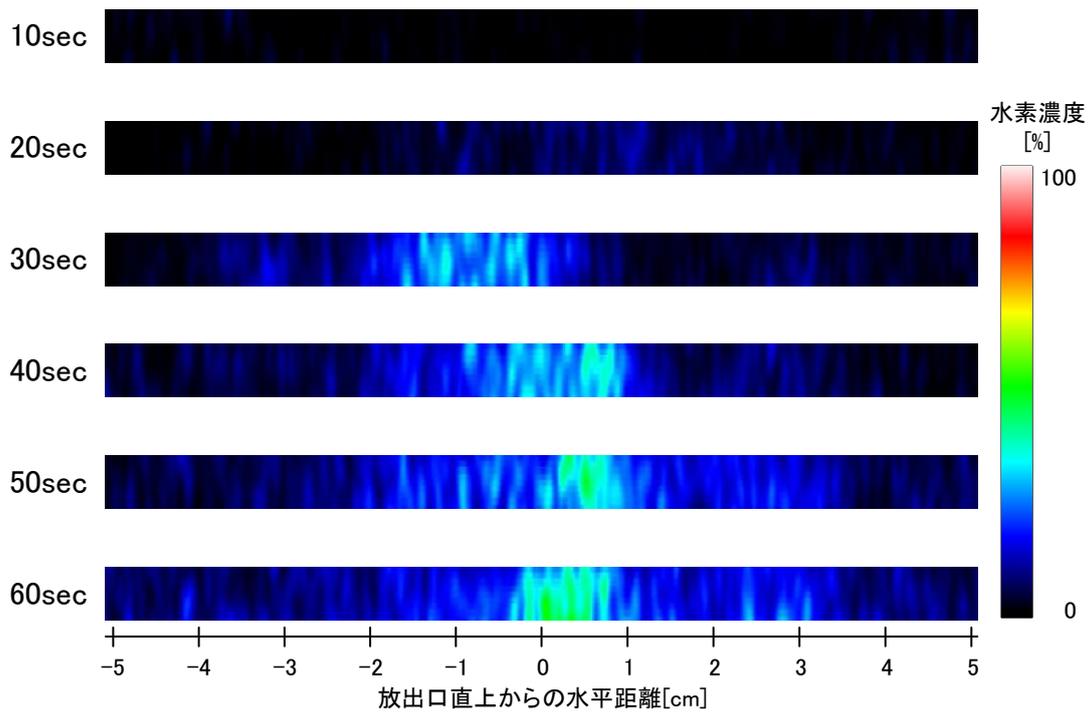


図 I -11 大気中の水素濃度経時変化
 (10~60 sec、アスファルト 150 mm、供給圧力 10.0 kPa)

Ⅱ. 実フィールド試験の地中水素濃度分布計測結果

表Ⅱ-(1) 表番号と実験条件一覧表

表 No.	供給圧力	計測点
Ⅱ-1	2.5 kPa	①～⑳
Ⅱ-2		㉑～㉔
Ⅱ-3	10.0 kPa	①～⑳
Ⅱ-4		㉑～㉔

表Ⅱ-1 供給圧力 2.5 kPa の地中の水素濃度計測値 (1 時間ごと、計測点①～⑳)

時間[h]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳
1	82.6	89.7	46.1	52.6	32.2	27.4	29.3	36.0	14.8	5.1	5.4	-	0.3	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
2	86.2	91.5	57.6	63.6	49.4	42.4	43.4	48.9	30.6	17.5	17.4	-	3.3	2.9	3.3	0.4	0.4	0.5	0.0
3	87.7	92.3	62.6	68.4	57.6	49.7	50.3	55.0	39.1	26.1	25.8	-	8.2	7.0	7.5	1.6	1.4	1.7	0.2
4	88.6	92.7	65.3	71.2	62.3	54.0	54.4	58.7	44.4	31.7	31.5	-	12.7	11.1	11.5	3.3	2.9	3.3	0.6
5	89.1	93.1	67.1	73.0	65.3	56.8	57.3	61.3	47.8	35.5	35.6	-	16.4	14.6	14.9	5.2	4.6	5.0	1.2
6	89.5	93.4	68.3	74.3	67.4	58.7	59.3	63.2	50.3	38.3	38.6	-	19.5	17.5	17.7	7.0	6.2	6.6	1.9
7	89.8	93.6	69.1	75.2	68.8	60.2	60.9	64.7	52.1	40.4	40.9	-	21.9	20.0	20.0	8.7	7.8	8.2	2.7
8	90.0	93.7	69.8	75.9	69.9	61.3	62.1	65.9	53.4	42.0	42.8	-	24.0	22.0	22.0	10.1	9.2	9.6	3.5
9	90.2	93.9	70.3	76.5	70.8	62.2	63.1	66.9	54.6	43.3	44.3	-	25.6	23.7	23.7	11.5	10.4	10.9	4.3
10	90.4	94.1	70.7	77.0	71.5	62.9	64.0	67.7	55.5	44.4	45.6	-	27.1	25.2	25.2	12.7	11.6	12.1	5.1
11	90.5	94.2	71.1	77.4	72.0	63.5	64.7	68.4	56.2	45.3	46.6	-	28.3	26.5	26.4	13.7	12.6	13.2	5.9
12	90.6	94.3	71.4	77.8	72.5	64.0	65.3	69.0	56.9	46.1	47.6	-	29.4	27.7	27.6	14.7	13.6	14.2	6.7
13	90.8	94.4	71.6	78.1	72.9	64.5	65.9	69.5	57.4	46.8	48.4	-	30.4	28.7	28.6	15.6	14.5	15.1	7.4
14	90.8	94.5	71.8	78.4	73.3	64.9	66.3	70.0	57.9	47.4	49.1	-	31.3	29.6	29.5	16.4	15.3	16.0	8.1
15	90.9	94.6	72.0	78.6	73.5	65.2	66.7	70.4	58.3	47.9	49.7	-	32.1	30.4	30.4	17.2	16.1	16.8	8.8
16	91.0	94.7	72.2	78.9	73.8	65.5	67.1	70.8	58.7	48.3	50.3	-	32.8	31.2	31.1	17.9	16.8	17.5	9.5
17	91.0	94.7	72.3	79.0	74.0	65.7	67.4	71.1	59.0	48.8	50.8	-	33.4	31.9	31.8	18.5	17.5	18.2	10.1
18	91.0	94.7	72.4	79.1	74.1	65.9	67.7	71.3	59.3	49.1	51.2	-	34.0	32.6	32.5	19.2	18.1	18.9	10.7
19	91.0	94.7	72.4	79.2	74.2	66.1	67.9	71.5	59.5	49.4	51.7	-	34.6	33.2	33.1	19.7	18.7	19.5	11.2
20	91.0	94.7	72.5	79.2	74.3	66.3	68.0	71.8	59.7	49.7	52.1	-	35.1	33.8	33.7	20.3	19.2	20.1	11.8
21	91.0	94.6	72.5	79.2	74.4	66.4	68.2	72.0	59.9	50.0	52.4	-	35.6	34.3	34.2	20.8	19.8	20.7	12.3
22	91.0	94.5	72.5	79.2	74.5	66.5	68.4	72.1	60.0	50.2	52.7	-	36.0	34.8	34.8	21.3	20.3	21.3	12.9
23	91.0	94.5	72.6	79.3	74.5	66.6	68.5	72.3	60.2	50.5	53.0	-	36.5	35.3	35.3	21.8	20.8	21.8	13.3
24	91.0	94.5	72.6	79.3	74.6	66.7	68.7	72.5	60.3	50.7	53.3	-	36.8	35.7	35.7	22.2	21.3	22.3	13.8

表Ⅱ-2 供給圧力 2.5 kPa の地中の水素濃度計測値 (1 時間ごと、計測点㉑~㉔)

時間[h]	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴	㊵	㊶	㊷	㊸	㊹	㊺	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	1.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	10.9	3.6	0.5	0.1	0.0	0.0	17.8	4.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	24.4	20.5	9.4	2.2	0.4	0.1	0.0	26.9	8.1	1.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.8	0.1	0.2	0.2	0.1	31.3	27.4	14.8	4.6	1.1	0.3	0.1	33.1	11.9	3.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.6	0.3	0.4	0.4	0.2	35.8	32.0	19.0	7.0	2.1	0.7	0.2	37.5	15.0	4.8	1.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	2.4	0.7	0.8	0.7	0.4	38.9	35.3	22.2	9.2	3.1	1.2	0.4	40.7	17.7	6.4	1.8	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	3.3	1.1	1.2	1.2	0.7	41.2	37.8	24.8	11.2	4.1	1.8	0.6	43.1	19.9	8.0	2.6	0.6	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	4.2	1.6	1.8	1.7	1.1	42.8	39.5	26.7	12.8	5.1	2.3	0.9	45.0	21.7	9.4	3.4	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	5.1	2.2	2.4	2.3	1.6	44.0	40.9	28.3	14.2	6.0	2.9	1.2	46.6	23.3	10.7	4.1	1.4	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
10	6.0	2.8	3.0	3.0	2.1	45.0	41.9	29.6	15.4	6.8	3.5	1.5	47.8	24.6	11.8	4.9	1.9	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
11	6.9	3.4	3.7	3.7	2.7	45.7	42.8	30.6	16.4	7.5	4.0	1.9	48.9	25.8	12.8	5.6	2.3	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
12	7.7	4.0	4.4	4.4	3.3	46.5	43.7	31.6	17.4	8.3	4.6	2.3	49.8	26.8	13.7	6.3	2.8	1.5	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
13	8.6	4.7	5.1	5.1	3.9	47.0	44.3	32.4	18.2	9.0	5.1	2.7	50.6	27.7	14.6	7.0	3.4	1.7	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
14	9.3	5.3	5.8	5.9	4.5	47.4	44.7	33.1	18.9	9.6	5.6	3.0	51.2	28.5	15.4	7.6	3.9	2.0	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
15	10.1	6.0	6.5	6.6	5.1	47.8	45.2	33.7	19.6	10.2	6.2	3.4	51.8	29.3	16.1	8.2	4.4	2.3	1.3	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
16	10.8	6.6	7.2	7.3	5.7	48.1	45.6	34.2	20.2	10.7	6.6	3.8	52.3	30.0	16.7	8.8	5.0	2.5	1.4	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
17	11.5	7.2	7.8	8.0	6.4	48.4	45.9	34.7	20.7	11.3	7.1	4.2	52.8	30.6	17.3	9.4	5.5	2.8	1.5	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
18	12.2	7.8	8.5	8.7	6.9	48.7	46.3	35.2	21.3	11.8	7.6	4.5	53.2	31.2	17.9	9.9	6.0	3.1	1.6	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
19	12.8	8.4	9.1	9.3	7.5	48.9	46.5	35.6	21.8	12.3	8.0	4.9	53.5	31.7	18.5	10.4	6.5	3.4	1.7	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
20	13.4	8.9	9.7	10.0	8.1	49.1	46.8	36.0	22.2	12.7	8.4	5.3	53.9	32.2	19.0	10.9	7.0	3.6	1.8	1.1	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
21	14.0	9.5	10.3	10.6	8.7	49.2	47.0	36.4	22.7	13.2	8.8	5.6	54.2	32.7	19.4	11.4	7.4	3.9	1.9	1.1	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
22	14.5	10.0	10.9	11.2	9.2	49.2	47.1	36.6	23.1	13.6	9.2	5.9	54.4	33.1	19.9	11.8	7.9	4.2	2.0	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
23	15.1	10.5	11.4	11.8	9.7	49.2	47.2	36.9	23.4	14.0	9.6	6.3	54.7	33.5	20.3	12.3	8.3	4.4	2.1	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
24	15.6	11.0	11.9	12.3	10.2	49.3	47.3	37.1	23.7	14.3	9.9	6.6	54.9	33.9	20.7	12.7	8.7	4.6	2.2	1.3	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0

表 II-3 供給圧力 10.0 kPa の地中の水素濃度計測値 (1 時間ごと、計測点①～⑳)

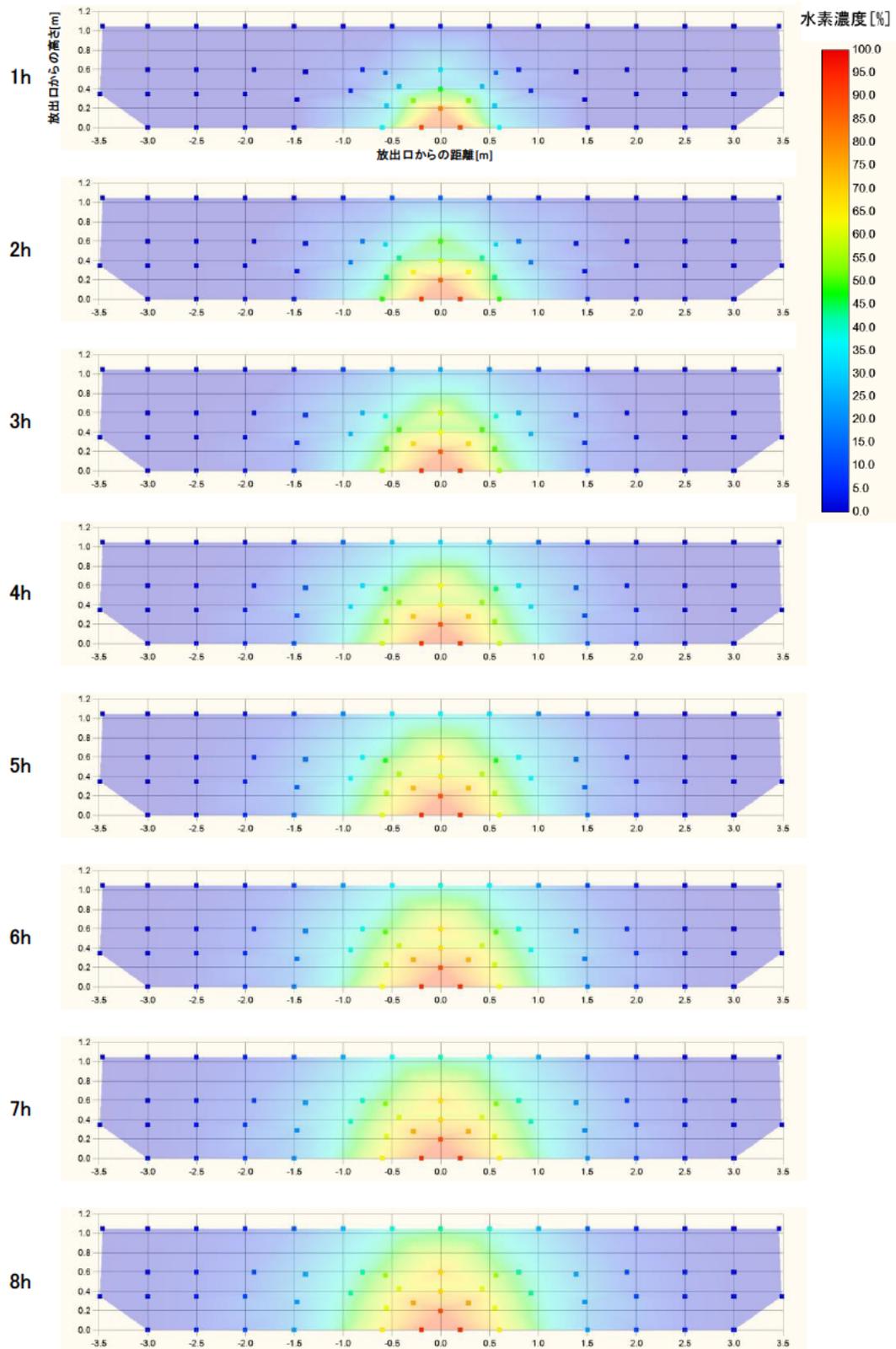
時間[h]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳
1	93.6	95.4	72.4	80.6	63.7	55.9	61.3	71.1	38.7	19.3	20.6	-	1.7	1.5	2.3	0.1	0.1	0.2	0.0
2	94.2	95.7	79.0	86.4	80.8	71.2	74.9	81.5	60.4	43.1	44.2	-	14.3	11.9	13.3	2.2	1.8	2.2	0.3
3	94.6	96.2	80.9	88.3	86.1	76.4	79.8	85.3	68.8	54.3	56.0	-	26.3	22.6	23.0	7.0	5.7	6.1	1.0
4	94.8	96.5	81.7	89.1	88.3	78.7	82.1	87.1	72.7	60.0	62.6	-	34.6	30.4	30.0	12.1	10.0	10.4	2.5
5	95.0	96.7	82.1	89.5	89.3	80.1	83.5	88.3	74.8	63.4	66.7	-	40.4	36.0	35.1	16.5	14.0	14.2	4.4
6	95.1	96.9	82.4	89.8	89.9	80.8	84.4	89.1	76.1	65.5	69.4	-	44.6	40.1	39.1	20.1	17.3	17.5	6.4
7	95.3	97.0	82.6	90.1	90.3	81.4	85.1	89.6	77.0	67.1	71.4	-	47.8	43.4	42.3	23.0	20.1	20.3	8.4
8	95.4	97.2	82.7	90.2	90.6	81.8	85.5	90.1	77.7	68.2	72.8	-	50.3	46.0	44.9	25.5	22.5	22.8	10.3
9	95.4	97.3	82.8	90.4	90.8	82.1	85.9	90.4	78.2	69.1	74.0	-	52.3	48.2	47.1	27.6	24.6	24.9	12.1
10	95.5	97.4	82.9	90.4	90.9	82.3	86.2	90.7	78.6	69.8	75.0	-	54.0	50.1	49.0	29.4	26.4	26.7	13.7
11	95.6	97.4	82.9	90.5	91.0	82.5	86.5	90.9	78.9	70.4	75.7	-	55.5	51.7	50.6	31.0	28.0	28.4	15.3
12	95.6	97.5	83.0	90.6	91.1	82.6	86.7	91.1	79.1	70.8	76.4	-	56.8	53.1	52.1	32.4	29.5	30.0	16.7
13	95.6	97.5	83.0	90.6	91.1	82.7	86.8	91.2	79.3	71.2	76.9	-	57.8	54.4	53.4	33.6	30.8	31.4	18.1
14	95.6	97.5	83.0	90.7	91.1	82.8	86.9	91.3	79.5	71.6	77.4	-	58.8	55.5	54.6	34.8	32.0	32.6	19.3
15	95.6	97.5	83.0	90.7	91.2	82.9	87.1	91.4	79.7	71.9	77.9	-	59.7	56.5	55.8	35.9	33.1	33.9	20.5
16	95.6	97.3	82.9	90.5	91.1	82.9	86.9	91.4	79.7	72.1	78.2	-	60.5	57.4	56.7	36.9	34.2	35.0	21.7
17	95.6	97.4	83.0	90.6	91.2	83.0	87.2	91.6	79.9	72.4	78.7	-	61.3	58.4	57.8	37.8	35.2	36.1	22.7
18	95.7	97.5	83.0	90.7	91.2	83.1	87.3	91.7	80.1	72.7	79.1	-	62.1	59.3	58.7	38.7	36.1	37.1	23.8
19	95.7	97.5	83.1	90.7	91.3	83.2	87.4	91.8	80.2	72.9	79.4	-	62.8	60.2	59.7	39.6	37.0	38.1	24.8
20	95.7	97.5	83.1	90.7	91.3	83.3	87.5	91.9	80.3	73.2	79.7	-	63.5	60.9	60.5	40.4	37.9	39.0	25.7
21	95.6	97.5	83.0	90.7	91.2	83.3	87.5	91.9	80.3	73.3	80.0	-	64.1	61.6	61.3	41.2	38.7	39.9	26.6
22	95.6	97.5	83.1	90.7	91.3	83.3	87.6	92.0	80.4	73.5	80.3	-	64.7	62.3	62.1	42.0	39.5	40.8	27.4
23	95.6	97.4	83.0	90.7	91.3	83.4	87.7	92.1	80.5	73.7	80.6	-	65.2	63.0	62.8	42.6	40.3	41.6	28.2
24	95.6	97.4	83.0	90.7	91.3	83.4	87.7	92.1	80.6	73.8	80.8	-	65.8	63.6	63.5	43.3	41.0	42.3	29.0

表Ⅱ-4 供給圧力10.0 kPaの地中の水素濃度計測値 (1時間ごと、計測点㉑～㉔)

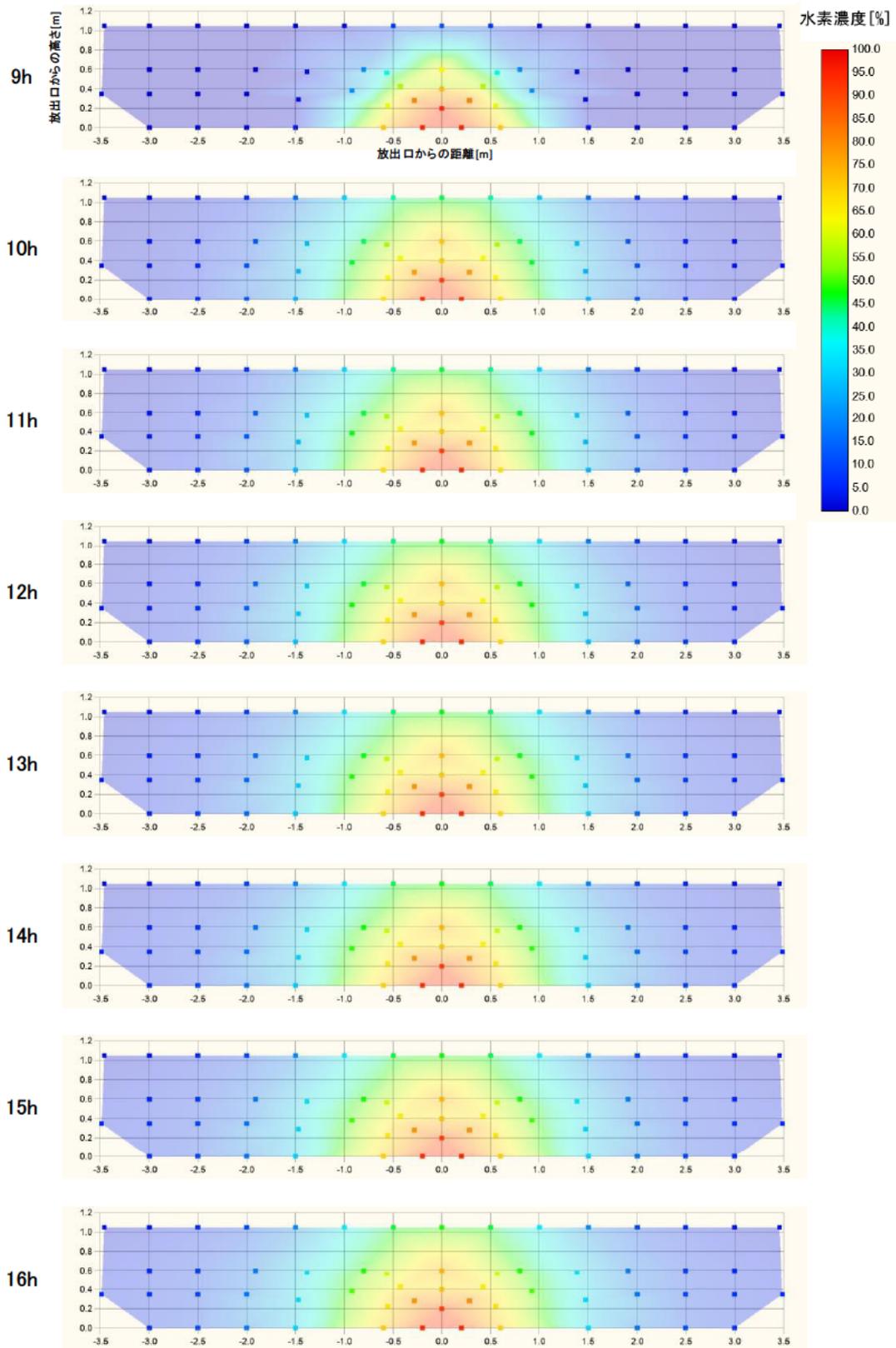
時間[h]	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴	㊵	㊶	㊷	㊸	㊹	㊺	
1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	8.1	1.5	0.1	0.0	0.0	0.0	19.5	3.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
2	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	44.6	37.9	17.4	3.3	0.4	0.1	0.0	46.6	15.1	2.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	3.4	0.0
3	1.4	0.2	0.2	0.2	0.1	63.2	56.8	34.1	11.3	2.5	0.5	0.1	60.9	24.7	6.3	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	10.4	0.0	0.0	0.0	10.4	0.0
4	3.1	0.6	0.7	0.7	0.3	71.9	66.4	45.4	19.1	5.6	1.6	0.3	68.7	31.5	11.0	2.4	0.2	0.2	2.4	0.3	16.9	0.2	0.2	0.3	16.9	0.2
5	5.1	1.4	1.5	1.4	0.7	75.9	71.4	52.5	25.1	8.9	3.0	0.8	73.3	36.6	15.2	4.4	0.4	0.4	4.4	0.7	21.9	0.4	0.4	0.7	21.9	0.4
6	7.2	2.4	2.6	2.5	1.5	78.0	74.2	57.3	29.6	12.0	4.5	1.4	76.3	40.5	18.7	6.4	0.8	0.8	6.4	1.3	25.6	0.8	1.3	25.6	0.8	0.8
7	9.3	3.6	3.9	3.8	2.4	79.2	76.0	60.6	33.0	14.6	6.1	2.1	78.3	43.5	21.6	8.4	1.2	1.2	8.4	2.2	28.4	1.2	2.2	28.4	1.2	1.2
8	11.3	5.0	5.4	5.3	3.6	80.0	77.2	63.1	35.7	16.9	7.6	3.0	79.8	46.0	24.1	10.2	1.8	1.8	10.2	3.2	30.6	1.8	3.2	30.6	1.8	1.8
9	13.2	6.4	6.9	6.9	4.9	80.4	77.9	64.8	37.8	18.8	9.0	3.9	80.9	48.0	26.1	12.0	2.3	2.3	12.0	4.4	32.3	2.4	4.4	32.3	2.4	2.4
10	15.0	7.9	8.5	8.5	6.3	80.5	78.4	66.1	39.6	20.4	10.3	4.8	81.8	49.8	27.9	13.5	2.9	2.9	13.5	5.6	33.6	3.0	5.6	33.6	3.0	3.0
11	16.7	9.3	10.0	10.1	7.7	80.7	78.8	67.2	41.1	21.9	11.5	5.7	82.5	51.3	29.4	15.0	3.6	3.6	15.0	6.8	34.8	3.7	6.8	34.8	3.7	3.7
12	18.2	10.8	11.6	11.7	9.1	80.7	79.1	68.1	42.3	23.2	12.7	6.6	83.1	52.6	30.8	16.4	4.3	4.3	16.4	8.1	35.8	4.3	8.1	35.8	4.3	4.3
13	19.7	12.1	13.0	13.3	10.5	80.7	79.2	68.7	43.4	24.4	13.7	7.5	83.5	53.8	32.0	17.6	4.9	4.9	17.6	9.3	36.6	5.0	9.3	36.6	5.0	5.0
14	21.0	13.4	14.4	14.8	11.8	80.7	79.3	69.4	44.4	25.5	14.8	8.3	83.8	54.8	33.2	18.8	5.5	5.5	18.8	10.5	37.3	5.6	10.5	37.3	5.6	5.6
15	22.3	14.7	15.8	16.2	13.1	80.7	79.5	70.0	45.3	26.5	15.8	9.2	84.2	55.8	34.2	19.9	6.2	6.2	19.9	11.6	38.0	6.2	11.6	38.0	6.2	6.2
16	23.6	15.9	17.1	17.5	14.4	80.5	79.5	70.4	46.1	27.4	16.7	10.0	84.5	56.6	35.1	21.0	6.8	6.8	21.0	12.7	38.6	6.8	12.7	38.6	6.8	6.8
17	24.8	17.1	18.3	18.9	15.6	80.5	79.7	71.0	46.9	28.4	17.6	10.8	84.8	57.5	36.1	21.9	7.4	7.4	21.9	13.7	39.2	7.4	13.7	39.2	7.4	7.4
18	25.9	18.2	19.5	20.1	16.7	80.6	79.9	71.5	47.8	29.3	18.5	11.6	85.1	58.3	36.9	22.9	8.0	8.0	22.9	14.7	39.8	8.0	14.7	39.8	8.0	8.0
19	27.0	19.2	20.7	21.4	17.9	80.6	80.0	72.0	48.5	30.1	19.3	12.3	85.3	59.0	37.7	23.8	8.7	8.7	23.8	15.7	40.3	8.6	15.7	40.3	8.6	8.6
20	28.0	20.3	21.7	22.5	18.9	80.4	79.9	72.3	49.2	30.9	20.1	13.1	85.6	59.7	38.5	24.6	9.2	9.2	24.6	16.6	40.8	9.1	16.6	40.8	9.1	9.1
21	29.0	21.2	22.8	23.6	20.0	80.3	79.9	72.6	49.8	31.6	20.9	13.8	85.7	60.4	39.2	25.4	9.8	9.8	25.4	17.4	41.3	9.7	17.4	41.3	9.7	9.7
22	29.9	22.2	23.8	24.7	20.9	80.2	79.9	72.8	50.3	32.3	21.5	14.4	85.9	61.0	39.9	26.2	10.2	10.2	26.2	18.3	41.6	10.2	18.3	41.6	10.2	10.2
23	30.8	23.0	24.7	25.7	21.9	80.1	79.9	73.2	50.9	33.0	22.3	15.1	86.1	61.6	40.6	26.9	10.8	10.8	26.9	19.0	42.1	10.7	19.0	42.1	10.7	10.7
24	31.6	23.9	25.6	26.7	22.8	80.0	79.9	73.4	51.4	33.6	22.9	15.7	86.2	62.2	41.2	27.5	11.3	11.3	27.5	19.8	42.4	11.2	19.8	42.4	11.2	11.2

表Ⅱ-(2) 表番号と実験条件一覧表

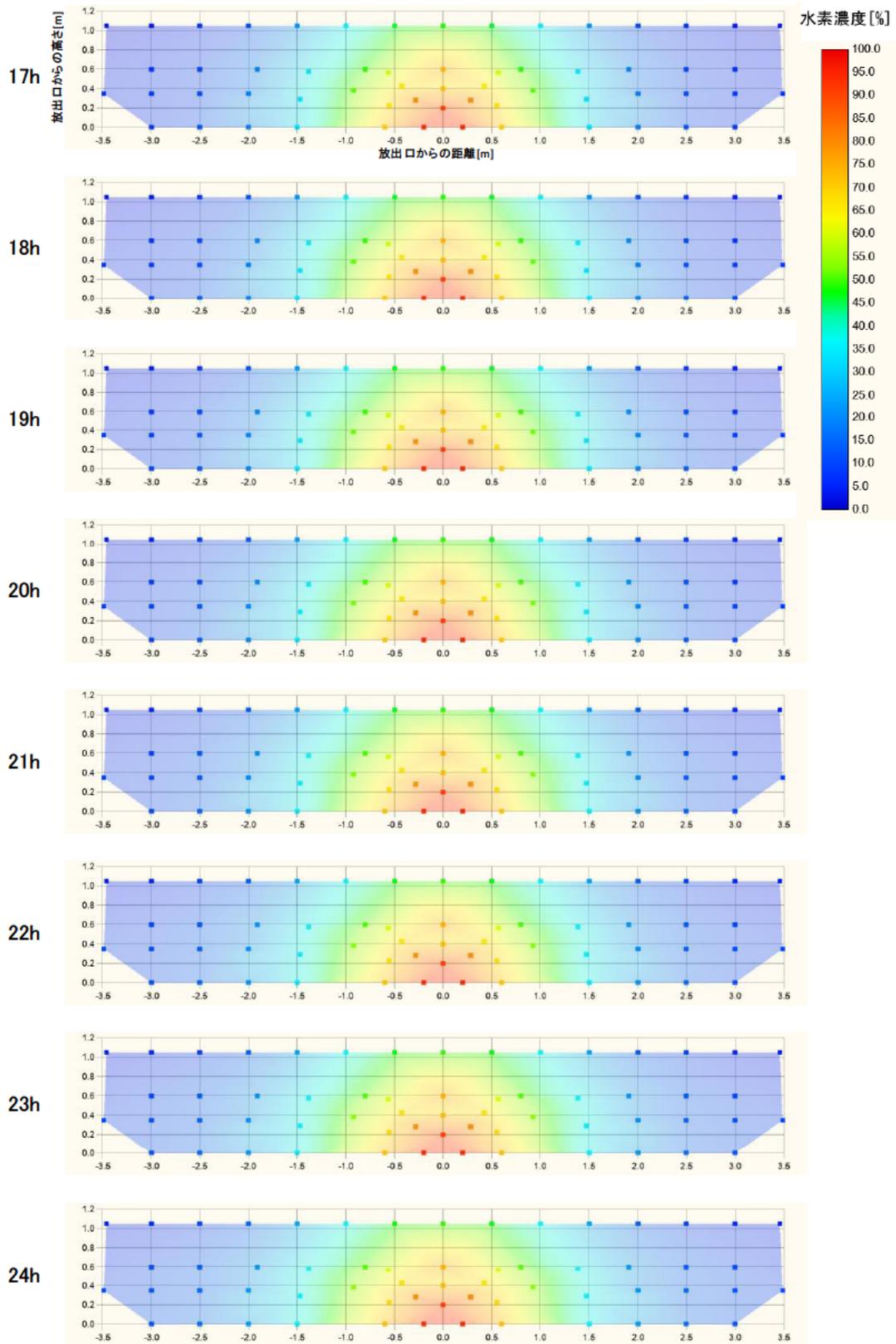
図 No.	供給圧力	経過時間
Ⅱ-1	2.5 kPa	1～8 h
Ⅱ-2		9～16 h
Ⅱ-3		17～24 h
Ⅱ-4	10.0 kPa	1～8 h
Ⅱ-5		9～16 h
Ⅱ-6		17～24 h



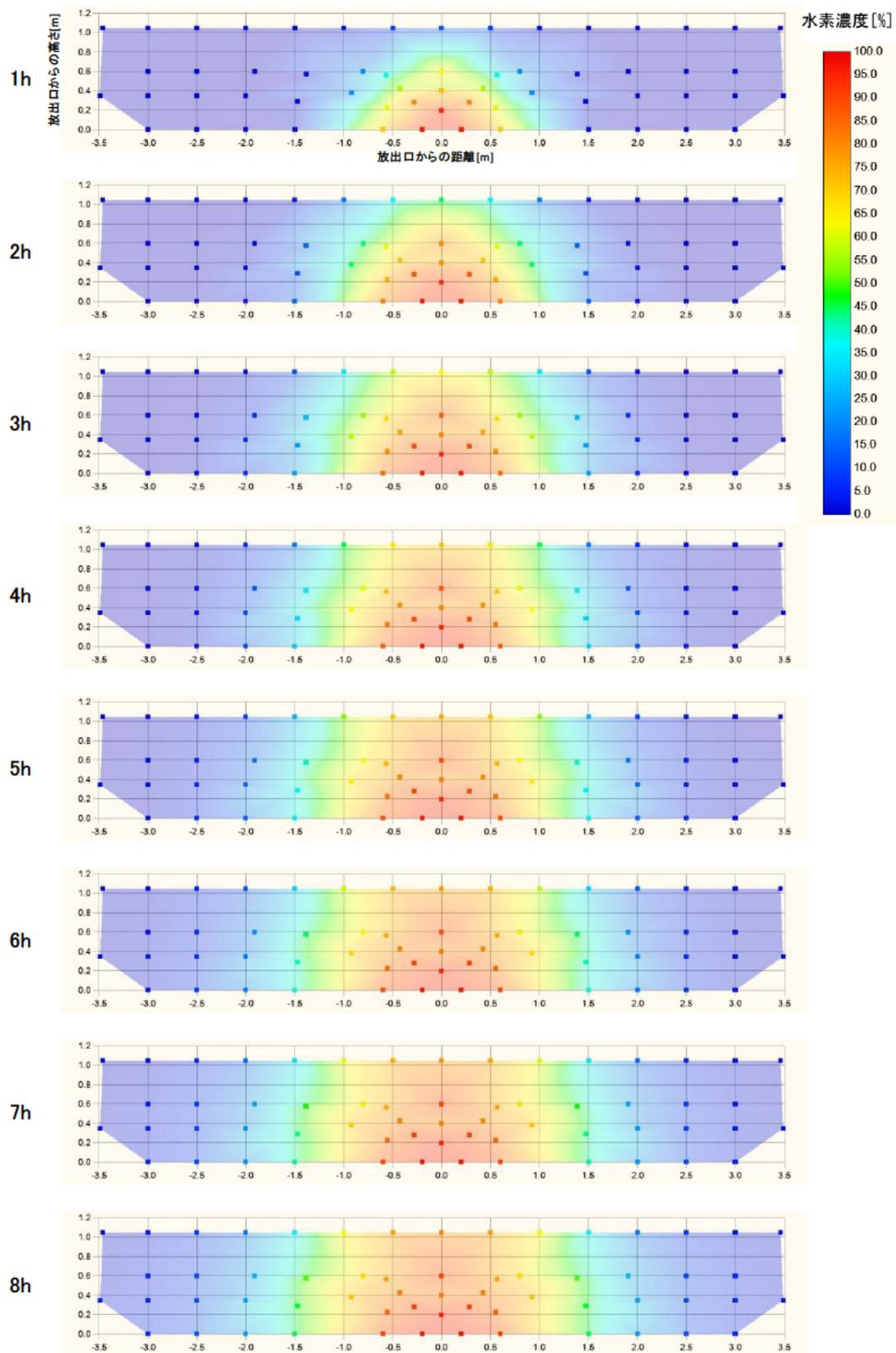
図II-1 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 1~8 h)



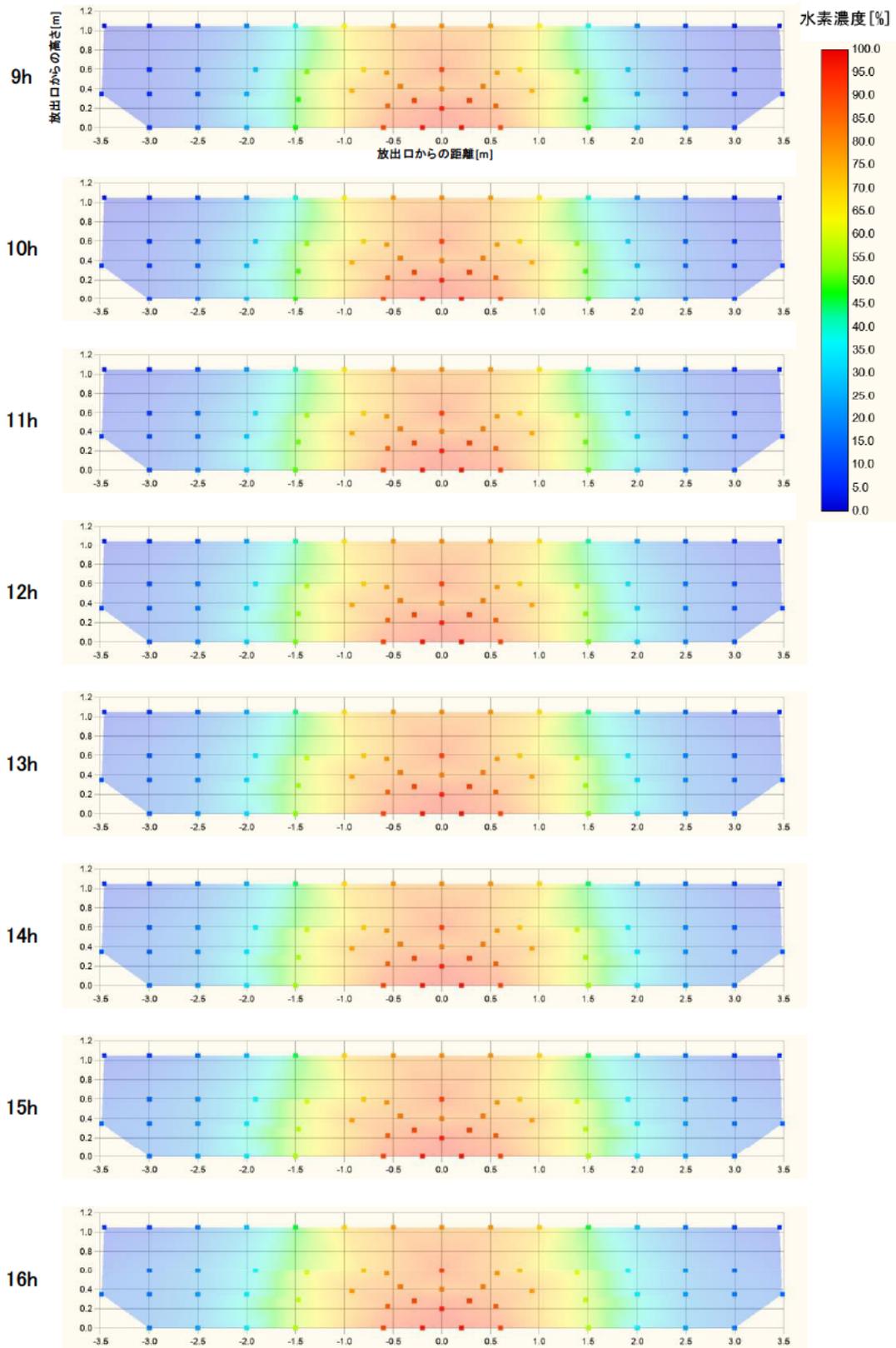
図Ⅱ-2 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 9~16 h)



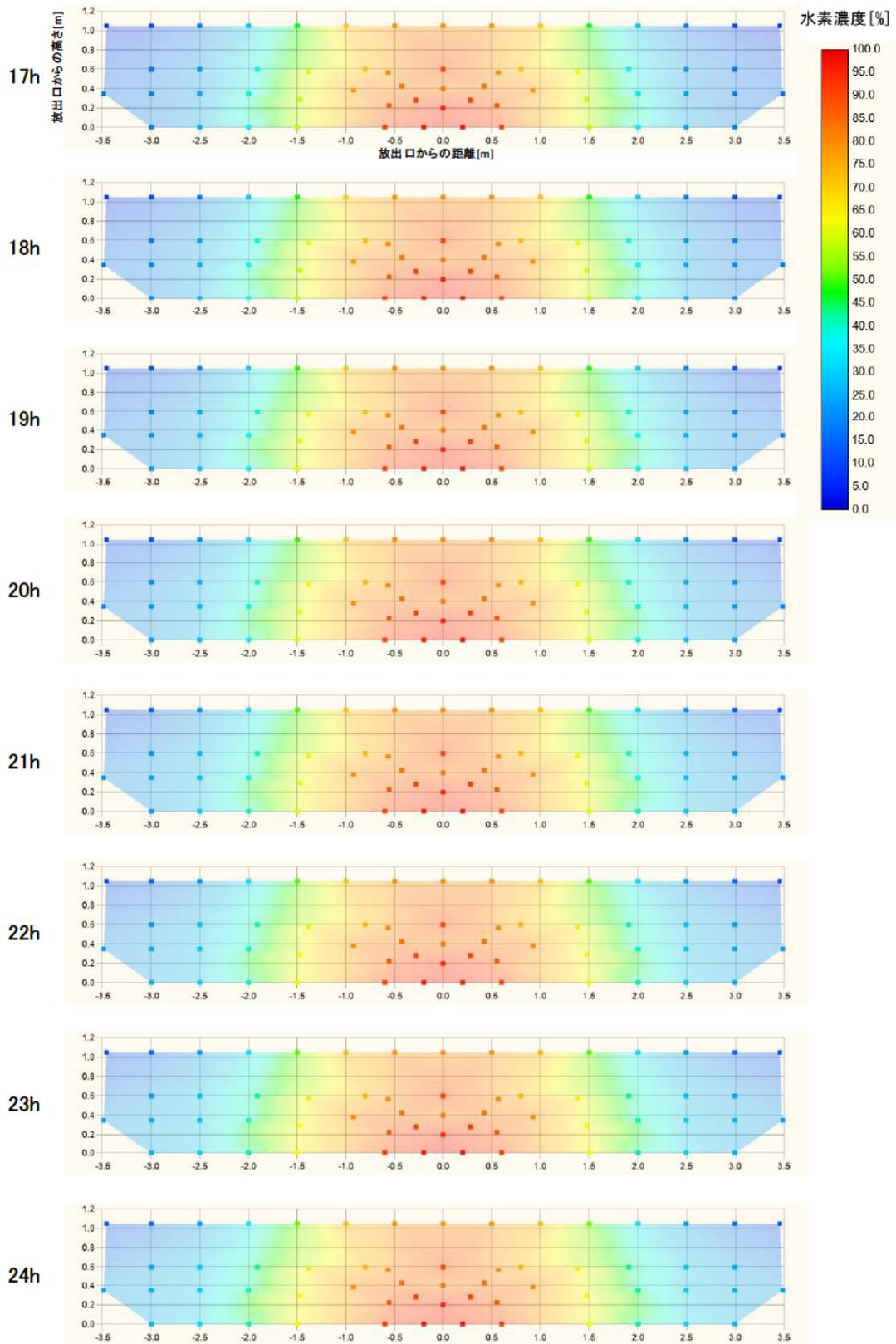
図II-3 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 2.5 kPa、経過時間 17~24 h)



図II-4 水素濃度経時変化のカラープロット
 (供給圧力 10 kPa、経過時間 1~8 h)



図Ⅱ-5 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 10 kPa、経過時間 9～16 h)



図Ⅱ-6 水素濃度経時変化のカラープロット
(供給圧力 10 kPa、経過時間 17~24 h)

Ⅲ. 漏えい停止後の地中の水素濃度分布計測結果

表Ⅲ-(1) 表番号と実験条件一覧表

表 No.	供給圧力	計測点
Ⅲ-1	10.0 kPa	①～⑳
Ⅲ-2		㉑～㉔

表Ⅲ-1 供給圧力 10.0 kPa 供給停止後の地中の水素濃度計測値 (3時間ごと、計測点①～⑳)

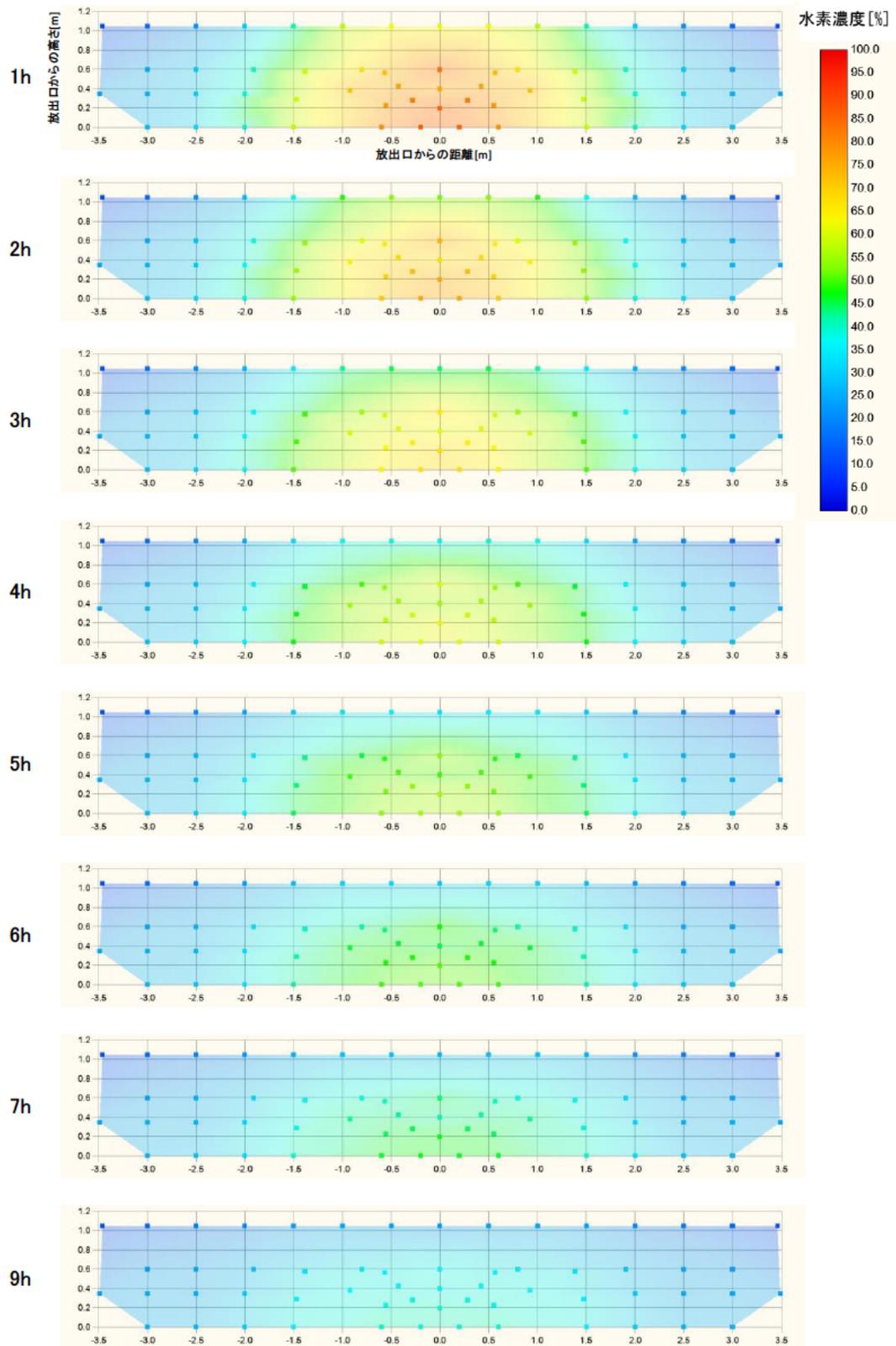
時間[h]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	
3	67.8	67.7	60.7	65.0	65.7	61.2	62.8	64.4	59.0	54.6	59.0	-	49.5	50.1	50.2	36.1	35.7	37.5	27.2	28.2
6	50.3	50.3	45.1	48.6	47.8	46.0	48.0	49.7	44.4	41.9	45.7	-	39.9	41.4	42.0	31.2	31.4	33.3	25.4	26.3
9	39.4	39.4	35.3	38.3	37.0	36.4	38.5	40.0	35.1	33.7	37.0	-	33.3	35.1	35.9	27.5	27.9	29.7	23.6	24.4
12	32.2	32.2	28.8	31.4	30.0	29.9	31.8	33.2	28.9	28.1	30.9	-	28.5	30.3	31.1	24.4	25.0	26.5	21.8	22.5
15	27.0	27.1	24.2	26.5	25.1	25.2	27.0	28.2	24.5	23.9	26.4	-	24.8	26.5	27.3	21.8	22.5	23.9	20.0	20.6
18	23.2	23.3	20.8	22.8	21.5	21.7	23.3	24.3	21.1	20.7	22.9	-	21.8	23.4	24.2	19.6	20.3	21.5	18.3	18.9
21	20.2	20.3	18.2	19.9	18.7	19.0	20.4	21.3	18.5	18.3	20.2	-	19.5	20.9	21.6	17.7	18.4	19.5	16.8	17.3
24	17.9	18.0	16.1	17.6	16.5	16.8	18.1	18.9	16.4	16.2	17.9	-	17.5	18.7	19.4	16.0	16.7	17.7	15.4	15.8
27	15.9	16.1	14.4	15.7	14.7	15.0	16.1	16.8	14.7	14.6	16.1	-	15.7	16.9	17.5	14.5	15.2	16.0	14.0	14.5
30	14.3	14.5	12.9	14.1	13.2	13.5	14.5	15.1	13.2	13.1	14.5	-	14.2	15.2	15.8	13.2	13.8	14.6	12.8	13.2
33	12.9	13.1	11.7	12.7	11.9	12.2	13.1	13.6	11.9	11.9	13.1	-	12.9	13.8	14.3	12.0	12.6	13.3	11.7	12.1
36	11.6	11.9	10.6	11.5	10.8	11.0	11.8	12.2	10.8	10.8	11.8	-	11.7	12.5	13.0	11.0	11.5	12.1	10.7	11.0
39	10.6	10.8	9.6	10.4	9.7	10.0	10.7	11.1	9.8	9.8	10.7	-	10.7	11.4	11.7	10.0	10.5	11.1	9.8	10.1
42	9.6	9.8	8.8	9.4	8.9	9.1	9.7	10.0	8.9	8.9	9.8	-	9.7	10.3	10.7	9.2	9.6	10.1	9.0	9.2
45	8.7	8.9	8.0	8.5	8.1	8.3	8.8	9.1	8.1	8.1	8.9	-	8.9	9.4	9.7	8.4	8.8	9.3	8.2	8.4
48	7.9	8.2	7.3	7.8	7.3	7.6	8.0	8.3	7.4	7.4	8.1	-	8.1	8.6	8.8	7.7	8.0	8.5	7.5	7.7
51	7.2	7.5	6.7	7.1	6.7	6.9	7.3	7.5	6.8	6.8	7.4	-	7.4	7.8	8.0	7.0	7.4	7.8	6.9	7.1
54	6.6	6.8	6.2	6.5	6.2	6.4	6.7	6.9	6.3	6.2	6.8	-	6.8	7.2	7.3	6.5	6.8	7.1	6.4	6.5
57	6.1	6.3	5.7	6.0	5.7	5.9	6.1	6.3	5.8	5.7	6.2	-	6.2	6.6	6.6	5.9	6.2	6.5	5.9	6.0
60	5.6	5.8	5.2	5.5	5.2	5.4	5.6	5.7	5.3	5.3	5.7	-	5.7	6.0	6.1	5.5	5.7	6.0	5.4	5.5
63	5.1	5.3	4.9	5.1	4.8	5.0	5.2	5.3	4.9	4.9	5.2	-	5.3	5.5	5.6	5.0	5.3	5.5	5.0	5.1
66	4.7	4.9	4.5	4.7	4.4	4.6	4.8	4.8	4.5	4.5	4.8	-	4.9	5.1	5.1	4.6	4.9	5.1	4.6	4.7
69	4.3	4.5	4.1	4.3	4.1	4.2	4.4	4.4	4.1	4.1	4.4	-	4.5	4.7	4.7	4.3	4.5	4.7	4.2	4.3
72	4.0	4.2	3.8	3.9	3.7	3.9	4.0	4.1	3.8	3.8	4.1	-	4.1	4.3	4.3	4.0	4.2	4.3	3.9	4.0
75	3.7	3.8	3.5	3.6	3.5	3.6	3.7	3.7	3.5	3.5	3.8	-	3.8	3.9	3.9	3.7	3.9	4.0	3.6	3.7
78	3.4	3.6	3.3	3.3	3.2	3.3	3.4	3.4	3.3	3.3	3.5	-	3.5	3.6	3.6	3.4	3.6	3.7	3.4	3.4
81	3.1	3.3	3.0	3.1	3.0	3.1	3.1	3.2	3.0	3.0	3.2	-	3.3	3.4	3.3	3.1	3.3	3.4	3.1	3.1
84	2.9	3.1	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	3.0	-	3.0	3.1	3.0	2.9	3.1	3.2	2.9	2.9
87	2.7	2.8	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.7	-	2.8	2.9	2.8	2.7	2.8	2.9	2.7	2.7
90	2.5	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	-	2.6	2.7	2.6	2.5	2.6	2.7	2.5	2.5

表Ⅲ-2 供給圧力 10.0 kPa 供給停止後の地中の水素濃度計測値 (3時間ごと、計測点②①～④①)

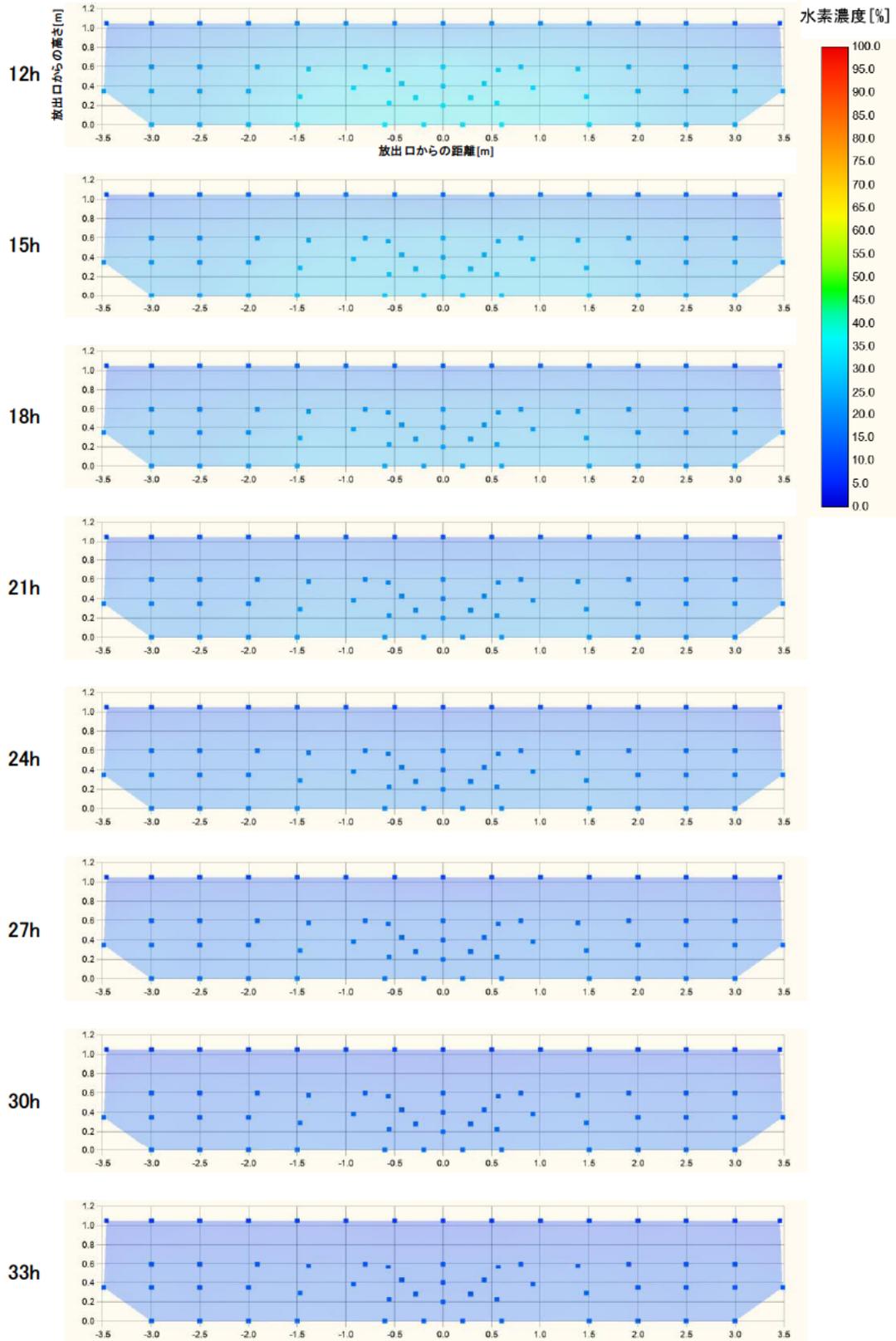
時間[h]	②①	②②	②③	②④	②⑤	②⑥	②⑦	②⑧	②⑨	③①	③②	③③	③④	③⑤	③⑥	③⑦	③⑧	③⑨	④①	
3	30.5	24.0	26.1	27.5	23.5	44.1	45.1	42.2	34.0	25.0	19.9	15.2	10.7	58.8	47.1	34.8	25.6	20.4	29.0	11.0
6	28.6	23.5	25.6	26.9	23.4	29.4	30.7	30.4	26.9	21.7	18.7	15.0	11.0	43.0	38.4	29.7	23.4	20.2	22.4	11.2
9	26.5	22.6	24.5	25.7	22.7	22.0	23.2	23.8	22.4	19.2	17.5	14.6	11.0	33.7	32.1	25.8	21.4	19.3	18.5	11.0
12	24.4	21.4	23.1	24.2	21.6	17.7	18.7	19.7	19.2	17.2	16.3	13.9	10.8	27.6	27.4	22.7	19.5	18.2	15.9	10.7
15	22.4	20.0	21.6	22.6	20.2	14.8	15.6	16.9	16.8	15.5	15.1	13.1	10.4	23.3	23.7	20.1	17.7	16.9	13.9	10.2
18	20.5	18.6	20.0	20.9	18.8	12.9	13.6	14.8	15.0	14.0	14.0	12.3	9.9	20.2	20.8	17.9	16.1	15.6	12.4	9.6
21	18.7	17.2	18.5	19.2	17.4	11.3	11.9	13.2	13.4	12.7	12.9	11.4	9.2	17.7	18.5	16.1	14.7	14.3	11.2	8.9
24	17.1	15.9	17.0	17.6	16.0	10.1	10.6	11.8	12.1	11.5	11.8	10.5	8.5	15.7	16.6	14.5	13.3	13.1	10.1	8.2
27	15.7	14.6	15.6	16.2	14.7	9.1	9.5	10.7	10.9	10.5	10.8	9.6	8.0	14.1	14.9	13.1	12.1	11.9	9.2	7.6
30	14.3	13.4	14.3	14.8	13.4	8.2	8.6	9.7	9.9	9.5	10.0	8.9	7.4	12.7	13.5	11.9	11.0	10.9	8.4	7.1
33	13.1	12.3	13.1	13.5	12.3	7.5	7.8	8.8	9.1	8.7	9.2	8.2	6.8	11.5	12.2	10.8	10.0	9.9	7.7	6.6
36	12.0	11.3	12.0	12.3	11.3	6.9	7.1	8.1	8.3	7.9	8.4	7.5	6.3	10.4	11.1	9.8	9.1	9.1	7.1	6.1
39	10.9	10.3	11.0	11.3	10.3	6.3	6.5	7.4	7.6	7.3	7.8	6.9	5.9	9.5	10.1	8.9	8.3	8.3	6.5	5.6
42	10.0	9.5	10.1	10.3	9.4	5.8	6.0	6.8	6.9	6.6	7.1	6.4	5.4	8.6	9.2	8.1	7.6	7.6	6.0	5.2
45	9.2	8.7	9.3	9.4	8.6	5.3	5.5	6.3	6.4	6.1	6.6	5.9	5.0	7.9	8.4	7.4	7.0	6.9	5.6	4.8
48	8.4	8.0	8.5	8.6	7.9	4.9	5.0	5.8	5.8	5.6	6.1	5.4	4.6	7.2	7.7	6.8	6.4	6.3	5.1	4.5
51	7.7	7.3	7.8	7.9	7.3	4.5	4.6	5.3	5.4	5.1	5.6	5.0	4.3	6.6	7.0	6.2	5.8	5.8	4.8	4.2
54	7.1	6.7	7.2	7.2	6.7	4.3	4.3	4.9	5.0	4.7	5.2	4.7	4.1	6.0	6.4	5.7	5.4	5.3	4.5	3.9
57	6.5	6.2	6.6	6.7	6.2	4.0	4.0	4.6	4.6	4.4	4.8	4.3	3.8	5.6	5.9	5.2	4.9	4.9	4.2	3.7
60	6.0	5.7	6.1	6.1	5.7	3.7	3.7	4.3	4.3	4.0	4.5	4.0	3.5	5.1	5.5	4.8	4.6	4.6	3.9	3.5
63	5.5	5.3	5.6	5.7	5.2	3.4	3.4	3.9	3.9	3.7	4.2	3.7	3.3	4.7	5.0	4.5	4.2	4.2	3.6	3.2
66	5.1	4.9	5.2	5.2	4.8	3.2	3.2	3.7	3.6	3.4	3.9	3.4	3.1	4.4	4.6	4.1	3.9	3.9	3.4	3.0
69	4.7	4.5	4.8	4.8	4.5	3.0	3.0	3.4	3.4	3.2	3.6	3.2	2.9	4.0	4.3	3.8	3.6	3.6	3.2	2.9
72	4.3	4.2	4.4	4.4	4.1	2.8	2.8	3.2	3.1	3.0	3.4	3.0	2.7	3.7	4.0	3.5	3.3	3.4	3.0	2.7
75	4.0	3.9	4.1	4.1	3.8	2.6	2.6	3.0	2.9	2.8	3.2	2.8	2.5	3.4	3.7	3.2	3.1	3.1	2.8	2.5
78	3.7	3.6	3.8	3.8	3.6	2.5	2.4	2.8	2.7	2.6	3.0	2.6	2.4	3.2	3.4	3.0	2.8	2.9	2.6	2.4
81	3.4	3.3	3.5	3.5	3.3	2.3	2.2	2.6	2.5	2.4	2.8	2.4	2.2	3.0	3.1	2.8	2.6	2.7	2.4	2.2
84	3.2	3.1	3.2	3.2	3.1	2.1	2.1	2.4	2.4	2.2	2.6	2.3	2.1	2.7	2.9	2.6	2.4	2.5	2.3	2.1
87	2.9	2.9	3.0	3.0	2.9	2.0	1.9	2.2	2.2	2.1	2.4	2.1	1.9	2.5	2.7	2.4	2.2	2.3	2.1	2.0
90	2.7	2.7	2.8	2.8	2.7	1.9	1.8	2.1	2.0	1.9	2.3	2.0	1.8	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.0	1.9

表Ⅲ-(2) 表番号と実験条件一覧表

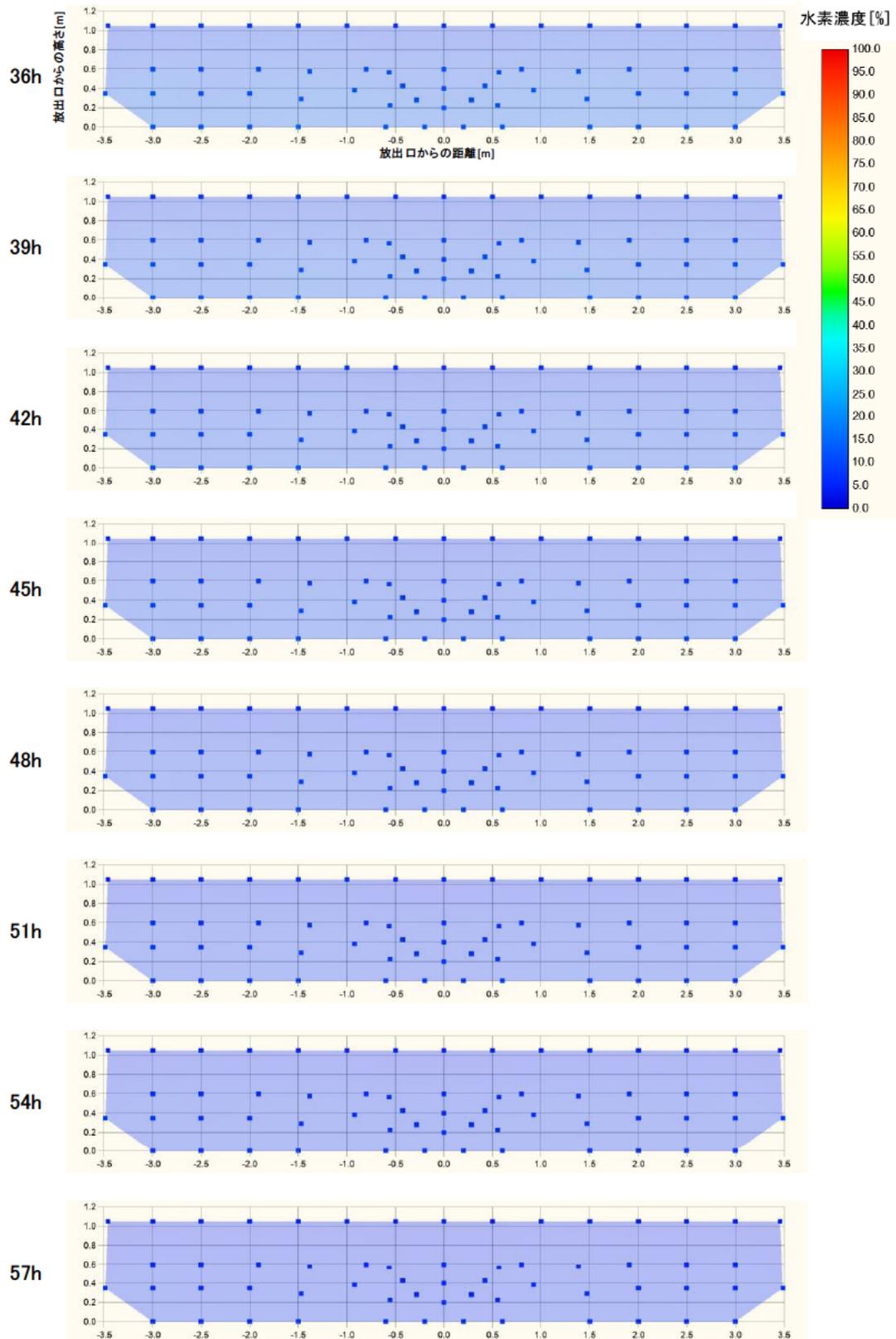
図 No.	供給圧力	経過時間
Ⅲ-1	10.0 kPa	1~9 h
Ⅲ-2		12~33 h
Ⅲ-3		36~57 h
Ⅲ-4		60~81 h
Ⅲ-5		84~90 h



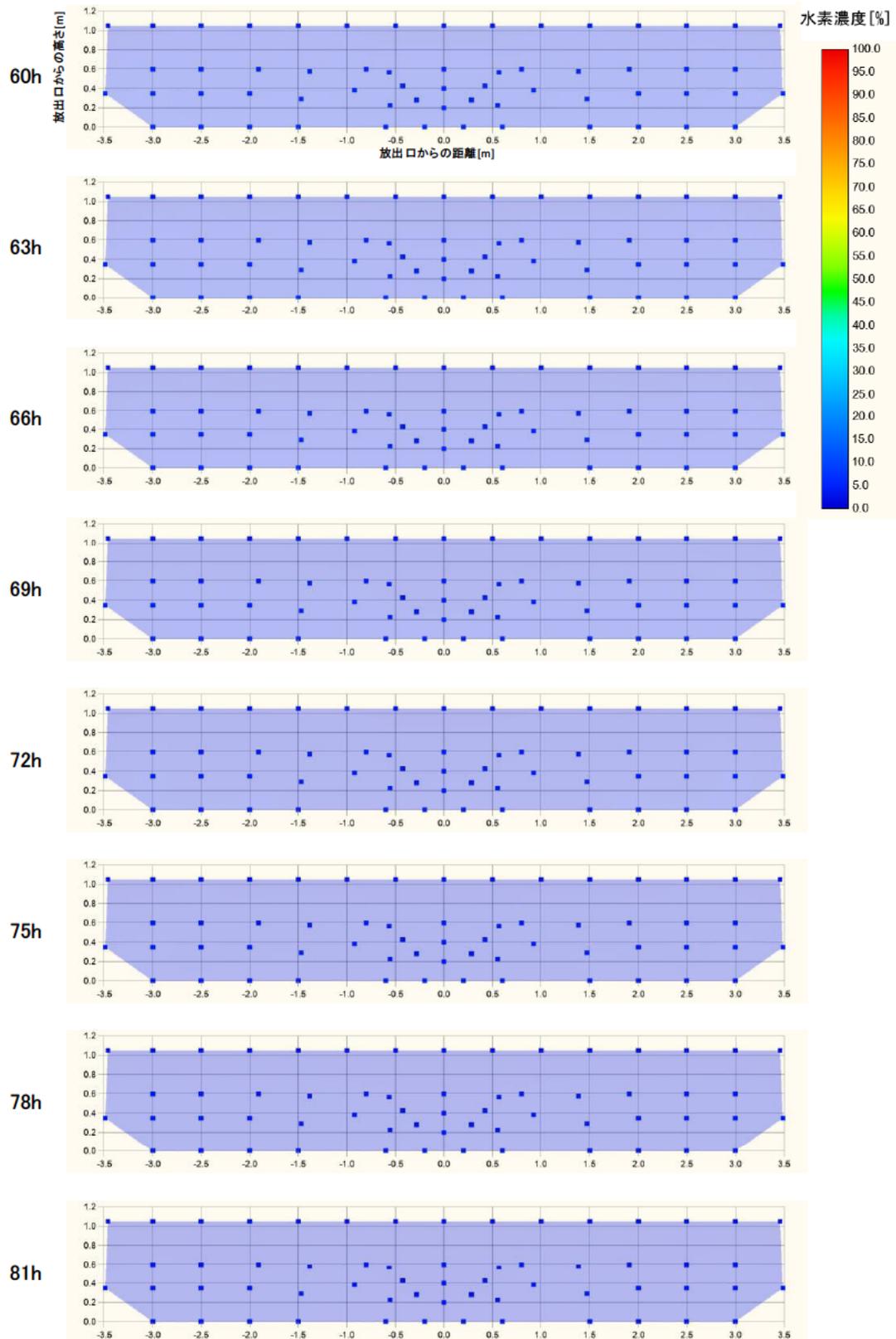
図III-1 水素濃度経時変化のカラープロット
(10 kPa 供給停止後、経過時間 1~9 h)



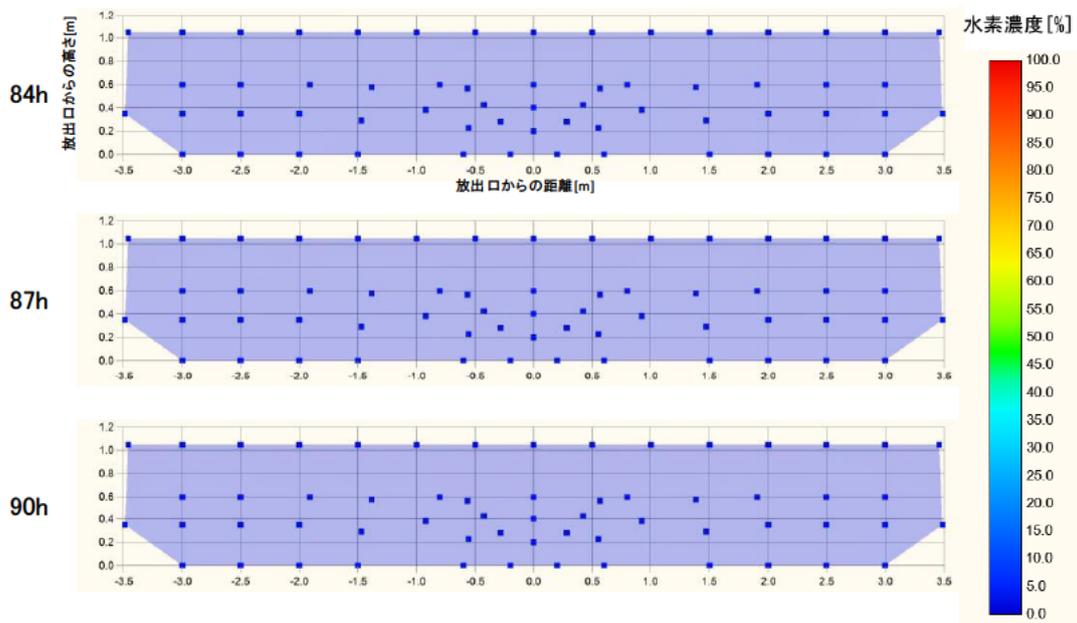
図III-2 水素濃度経時変化のカラープロット
(10 kPa 供給停止後、経過時間 12~33 h)



図III-3 水素濃度経時変化のカラープロット
(10 kPa 供給停止後、経過時間 36~57 h)



図III-4 水素濃度経時変化のカラープロット
(10 kPa 供給停止後、経過時間 60~81 h)



図III-5 水素濃度経時変化のカラープロット
(10 kPa 供給停止後、経過時間 84~90 h)