

平成 29 年度経済産業省委託事業

平成 29 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 30 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	土壌試料の選定	5
2.2.1	土壌試料	5
2.2.2	土壌試料の基本物性測定	6
3.	水素ガス漏えい量の計測	8
3.1	漏えい量計測装置と実験方法	8
3.1.1	漏えい量計測装置の設計製作	8
3.1.2	実験条件の設定方法	11
3.1.3	実験方法の妥当性	12
3.2	実験結果	15
3.3	考察	15
3.4	まとめ	17
4.	地中及び大気中の水素濃度分布計測（実フィールド試験）	18
4.1	実フィールド試験装置の製作	18
4.1.1	土壌槽及び気密ブースの設計製作	18
4.1.2	埋設配管の設計製作	21
4.1.3	安全対策	23
4.2	地中水素ガス濃度の計測方法	30
4.2.1	センサの選定	30
4.2.2	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	31
4.3	大気中水素ガス濃度の計測手法	33
4.3.1	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	33
4.3.2	ガス可視化・濃度計測装置の構成	36
4.3.3	ガス濃度の定量化	38
4.4	実フィールド試験装置構成	41

4.5	実フィールド試験における地中の水素濃度分布計測	45
4.5.1	水素ガスセンサの配置	45
4.5.2	地中水素濃度計測結果	46
4.5.3	考察	49
4.5.4	まとめ	59
4.6	実フィールド試験における大気中の水素濃度分布計測	60
4.6.1	観測領域	60
4.6.2	可視化及び濃度分布計測結果	61
4.6.3	考察	64
4.6.4	まとめ	64
4.7	漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測	64
4.7.1	実験方法	65
4.7.2	実験結果	65
4.7.3	考察	69
4.7.4	まとめ	69
5.	シミュレーション解析の基礎検討	70
5.1	概要	70
5.2	解析モデル	71
5.3	土壌試料の透気係数計測	73
5.3.1	透気係数計測装置の製作	73
5.3.2	透気係数計測方法	75
5.3.3	透気係数計測結果	75
5.4	土壌試料の拡散係数計測	77
5.4.1	拡散係数計測装置の製作	77
5.4.2	拡散係数計測方法	79
5.4.3	拡散係数計測結果	80
5.5	解析条件	83
5.6	解析結果	84
5.7	再現性の評価	87
5.8	感度解析（異なる水素放出条件における解析）	91
5.8.1	解析モデル	91
5.8.2	解析条件	91
5.8.3	解析結果	93
5.9	まとめ	99

6. 総括	101
-------------	-----

[参考文献]

[付 録]フィールド試験結果

Ⅰ. 地中の水素濃度分布計測結果	105
Ⅱ. 大気中の水素濃度分布計測結果	135
Ⅲ. 漏えい停止後の地中の水素濃度分布計測結果	140

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か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、「②漏えい位置を的確に特定」、「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29年度においては、前年度（平成28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、より実運用時に近い条件下での地中及び大気中（地表面近傍）での拡散挙動を確認するため、一般的な道路構造部へ使用される実際の土砂を用い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、整理する。

1.3 実施方法

(1) 水素ガス漏えい量の計測（基礎試験）

埋設水素導管が腐食等により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、一般的な埋設土を充填した容器に水素を流して漏えい量を確認する基礎試験を行った。

基本条件として、損傷形状：ピンホール $\phi 1.0\text{mm}$ 、供給圧力：2.5kPa、転圧状態：乾燥密度 1.74g/cm^3 について漏えい量を計測し、基本条件に対し、損傷形状を変化させた場合（ピンホール： $\phi 1.5\text{mm}$ 、 $\phi 2.0\text{mm}$ ）、供給圧力を変化させた場合（5.0kPa、10kPa）、転圧状態を変化させた場合（乾燥密度： 1.81g/cm^3 、 1.92g/cm^3 ）について漏えい量計測を実施し、地中における漏えい量について整理した。

(2) 地中及び大気中（地表面近傍）の水素濃度分布計測（実フィールド試験）

一般的な埋設土を用いた地中模擬層（舗装は考慮しない）を製作し、深さ 0.7m からの漏えい水素の地中及び大気中（地表面近傍）における拡散挙動（濃度分布）を計測した。試験は、水素ガス漏えい量 4 パターン（供給圧力：2.5kPa、5kPa、7.5kPa、10kPa）について、漏えい開始からの経時変化を計測し、地中及び大気中への拡散挙動について整理した。

(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、一般的な埋設土中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。

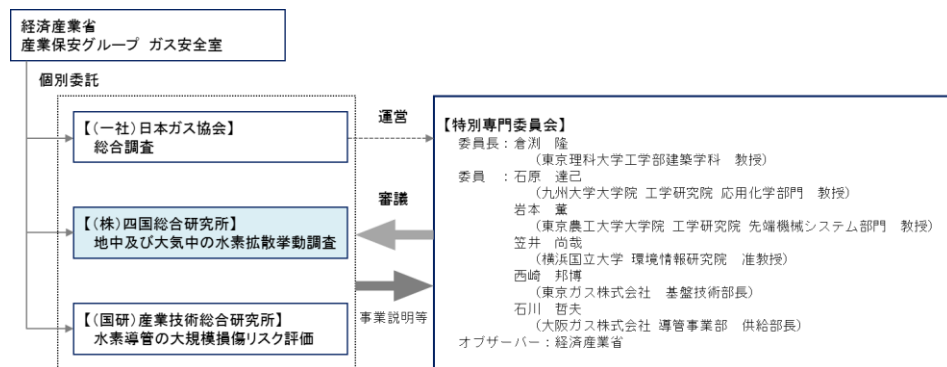


図 1-4-1 事業実施体制

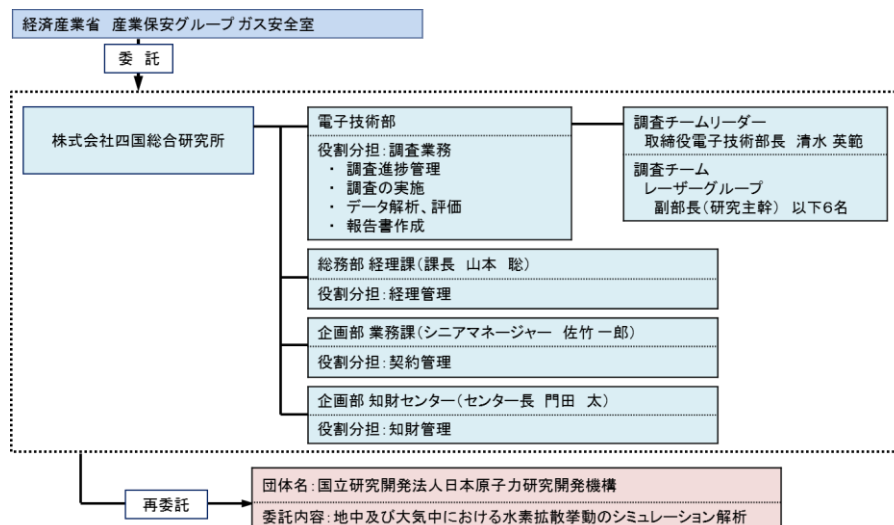


図 1-4-2 調査実施体制

表 1-4-1 実施スケジュール

実施項目			開始	終了	平成29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		H29.7	H29.8	■											
2	水素漏えい量の計測	(1) 実験装置設計	H29.7	H29.7	■											
		(2) 実験装置製作	H29.8	H29.9	■											
		(3) 漏えい量計測実験	H29.9	H29.10	■											
		(4) 解析, 評価	H29.10	H29.11	■											
3	地中および大気中の水素濃度分布計測	(1) 予備実験	H29.7	H29.10	■											
		(2) 実験装置設計・製作	H29.7	H29.12	■											
		(3) 水素濃度分布計測	H29.12	H30.1						■	■					
		(4) 解析, 評価	H30.1	H30.2							■	■				
4	シミュレーション解析と再現性評価	(1) 解析条件検討	H29.7	H29.10	■											
		(2) シミュレーション解析	H29.11	H30.1					■	■	■					
		(3) 再現性評価	H30.1	H30.2							■	■				
5	委員会		-	-	8/2				11/16			2/14				
6	総合調査受託者との会議		-	-	7/14				10/13		11/2	1/11				
7	報告書作成		H30.2	H30.3									■			

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、当社を主体として、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国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への再委託とする体制の下実施した。

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、一般的に道路舗装等に用いられる土壌を用いて、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 地中における水素漏えい量の計測（流量計測）
- ② 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、地中及び大気の空間を模擬するための容器を製作し、容器内の地中模擬槽に一般的な埋設土である真砂土を転圧充填し、容器の底面から腐食漏えい等を想定した放出口を介して導入した水素ガスの流量を計測した。

②については、実フィールド試験として埋設環境を模擬した土壌槽を製作し、水素漏えい箇所が地表面から深さ 0.7m 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。土壌槽には一般的な埋設土である真砂土を転圧充填し、土壌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ガス濃度の変化として計測した。

③については、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析であり、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

No.	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	供給圧力	転圧状態 (乾燥密度)	①流量計測	②濃度計測	③CFD
1-(1)	真砂土	ピンホール φ1.0mm	2.5kPa	1.74g/cm ³	○	—	—
1-(2)		ピンホール φ1.5mm		1.74g/cm ³	○	—	—
1-(3)		ピンホール φ2.0mm		1.74g/cm ³	○	—	—
1-(4)		ピンホール φ1.0mm	5.0kPa	1.74g/cm ³	○	—	—
1-(5)		ピンホール φ1.0mm	10.0kPa	1.74g/cm ³	○	—	—
1-(6)		ピンホール φ1.0mm	2.5kPa	1.81g/cm ³	○	—	—

1-(7)		ピンホール φ1.0mm	2.5kPa	1.92g/cm ³	○	—	—
2-(1)	真砂土	ピンホール φ1.0mm	2.5kPa	1.81g/cm ³	—	○	○
2-(2)			5.0kPa		—	○	—
2-(3)			7.5kPa		—	○	○
2-(4)			10.0kPa		—	○	—

①の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φ1.0mm、φ1.5mm、φ2.0mm の3パターンとした。供給圧力については、中低圧での水素配管供給を想定し、2.5kPa、5.0kPa、10.0kPa の3パターンとした。土壌試料の選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者との協議により決定した。

2.2 土壌試料の選定

2.2.1 土壌試料

本調査では、土壌試料として一般的な埋設土として使用されている真砂土を用いて、地中における水素拡散挙動の本質的な特徴を明らかにする。

真砂土は、花崗岩の風化により生成される砂であり、採取する地域により粒径分布に差異はあるが、一般に 10μm～数 mm の幅広い粒径分布を有することが特徴である。これらの粒子は、粒径によって表 2-2-2 に示すように区分される。

表 2-2-1 粒径による土質区分

粒径[mm]																	
0.005		0.075		0.25		0.85		2		4.75		19		75		300	
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石								
		砂				礫				石							
細粒分		粗粒分										石分					

表 2-2-2 の区分によれば、真砂土は中砂（粒径 250μm～850μm）及び粗砂（粒径 850μm～2mm）の構成比率が高いとされている^[1]。

図 2-2-1 に本調査において用いた真砂土の外観を、表 2-2-1 及び図 2-2-2 に構成粒子粒径に関する質量分率の実測結果をそれぞれ示す。

図 2-2-2 に示すとおり、本調査において用いた真砂土の粒径分布実測結果は一般的な真砂土のものと同様の特徴を有している。したがって、本試料を用いて各種実験を行うこととした。

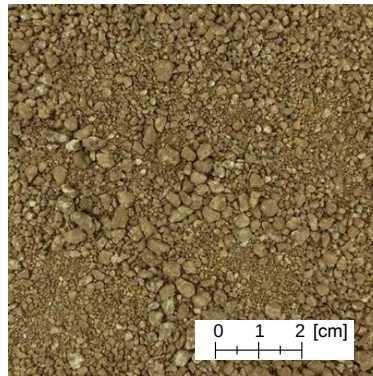


図 2-2-1 真砂土の外観

表 2-2-2 真砂土の粒径分布実測データ

粒径 [mm]	通過質量百分率 [%]
0.075	8.1
0.106	9.1
0.25	15.4
0.425	24
0.85	41.5
2	72.5
4.75	99.1
9.5	100

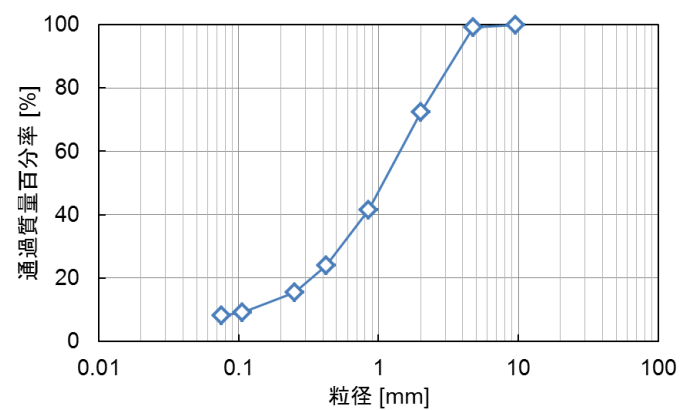


図 2-2-2 真砂土の粒径分布実測結果

2.2.2 土壌試料の基本物性測定

本調査の実験内容①漏えい量計測については、計測条件のパラメータとして損傷形状、供給圧力に加え、転圧状態を変化させる。土壌の転圧状態すなわち締固め度は、現場に

おける土の乾燥密度を突固め試験から得られた最大乾燥密度で除して得られる数値により評価[2]されるため、本調査における転圧状態は乾燥密度の値により議論する。

①の漏えい量計測では乾燥密度がパラメータの一つであり、②の濃度計測においても乾燥密度を計測して実験結果の整理を行う。また、③のシミュレーション解析と再現性評価では、実験と同一条件でシミュレーション解析を実施するため、実験時の土壌の状態を正しく計測する必要がある。

本調査では土壌の状態を、表 2-2-3 に示す試験項目、試験方法、細目、数量により得られた基本物性と、第 5 章において述べる透気係数及び拡散係数の実験値により得られた数値により特定した。

表 2-2-3 土壌の基本物性計測の試験項目

試験項目	試験方法	細目	数量
(a)土粒子の密度試験	JIS A 1202	3 個/試料	1 試料
(b)土の含水比試験	JIS A 1203	3 個/試料	1 試料
(c)土の粒度試験	JIS A 1204	0.5～2kg	1 試料
(d)土の突固め試験	JIS A 1210	径 10cm、2.5kg	1 試料
(e)現場密度試験	JIS A 1214	1 点/箇所	3 箇所

土壌の基本物性において、試験項目(a)、(b)、(d)については土壌そのものが有する物理的な特性であるため、本調査においては経時的な変化を考慮しない。一方、試験項目(b)により得られる含水比と、試験項目(e)により得られる密度のうちの湿潤密度は、土壌に含まれる水分量に依存するパラメータであるため、時間経過により変化するパラメータである。本調査における実フィールド試験は比較的長時間の計測を行うため、これらの時間変化の実験結果への影響を考慮する必要がある。ここでは、比較的含水比の低い真砂土を用いることにより、実験中における土壌の状態の変化を抑えると共に、実験の前後に取得した各パラメータの平均値を、実験時における土壌の状態とした。

以上の概念により得られた、本調査に用いた真砂土の基本物性を表 2-2-4 に示す。なお、粒度試験結果については、前項表 2-2-2 及び図 2-2-2 に記載したとおりであった。

表 2-2-4 真砂土の基本物性

項目	計測値
土粒子の密度	2.674g/cm ³
最大乾燥密度	1.796g/cm ³
粒度分布	表 2-2-2 及び図 2-2-2 に記載のとおり

3. 水素ガス漏えい量の計測

本章では、埋設水素導管が損傷した場合の水素ガス漏えい量についての知見を得ることを目的として、一般的な埋設土を充填した容器に水素を放出し、漏えい量を確認す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。

3.1 漏えい量計測装置と実験方法

3.1.1 漏えい量計測装置の設計製作

本調査において、埋設水素導管が損傷した場合を模擬し、地中への水素ガス漏えい量を計測するための実験装置を設計製作した。実験装置の構造と実験方法を図 3-1-1 に、実験装置外観を図 3-1-2 にそれぞれ示す。

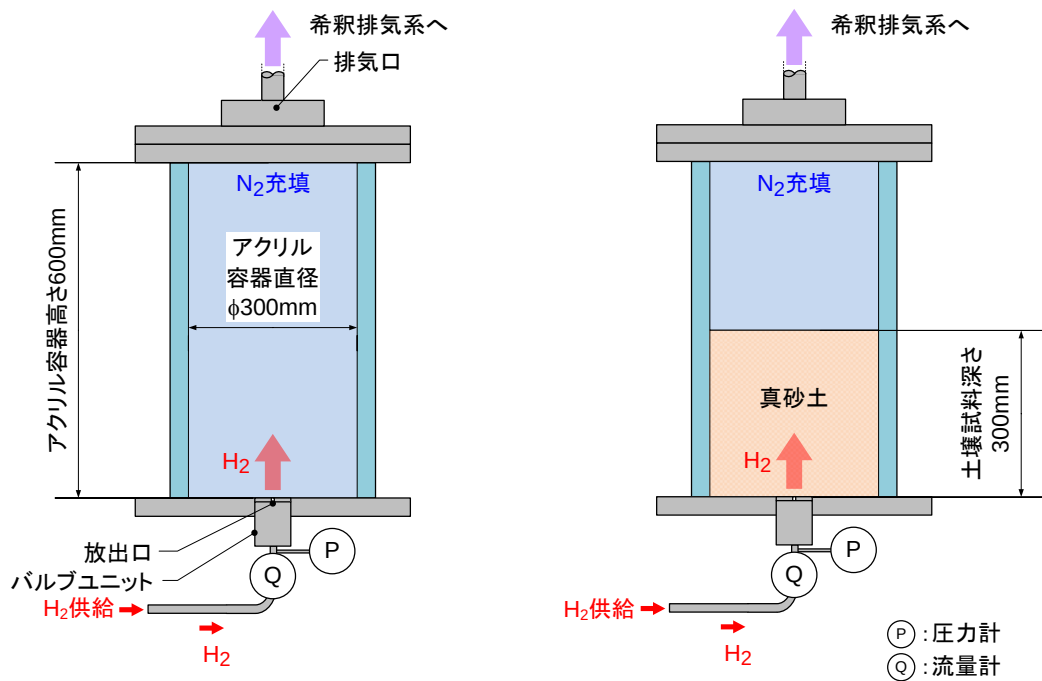


図 3-1-1 漏えい量計測における実験装置の構造と実験方法
(左：大気放出時、右：地中放出時)

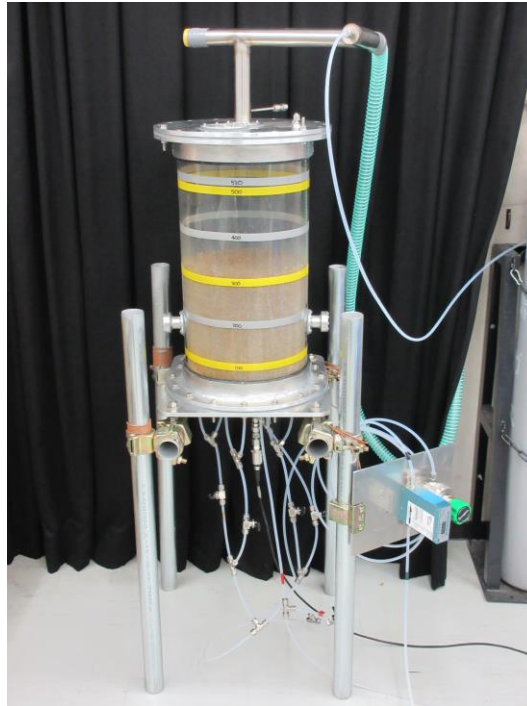


図 3-1-2 漏えい量計測実験装置の外観

漏えい量計測装置は、水素ガスを放出する空間を形成する内径 300mm 高さ 600mm の円筒型アクリル容器と、所定の放出条件で水素ガスを放出するバルブユニットから構成され、放出口直近に流量計及び圧力計、天板に排気口が配置されている。

漏えい量計測の実験方法は、アクリル容器内に所定の供給圧、損傷形状（放出口径）の水素放出条件において水素ガスを放出し、その際の流量及び圧力を計測する。これに対し、アクリル容器内に所定の転圧状態で真砂土を堆積させた上で、同一の水素放出条件下において水素ガスを放出し、その際の流量及び圧力を計測する。両者を比較することにより、土壌の体積による流量及び圧力の変化を明らかにするものである。

本実験については、アクリル容器内を窒素 100%の状態として水素放出を行い、作業中における安全性を確保した。真砂土充填の際は、土壌中を含む空間の窒素パージが必要となるため、本装置底板に窒素パージ用の放出口を 4 箇所配置した。

また、排気ガスは窒素と水素の混合ガスとなるが、実験条件によっては、排気ガス中の水素ガス濃度が爆発下限界濃度とされている 4%を超える場合がある。したがって、排気ガスは排気口下流側に設置した希釈排気装置により水素濃度 4%以下に希釈した上で、大気放出した。なお、希釈用窒素ガスとの混合に伴い、計測中のアクリル容器内への干渉が懸念されたことから、ここでは、第 4 章において後述する希釈排気装置を製作し、実験作業時の安全性を確保した。

アクリル容器内への水素放出を行うためのバルブユニットの構造及び、アクリル容器接続部の構造を図 3-1-3 に、バルブユニット外観を図 3-1-4 にそれぞれ示す。

図 3-1-3 に示すように、本実験におけるバルブの開閉は、先端にシリコンゴムが取付けられたシリンダアクチュエータの上下摺動により行う方式とした。放出口形状の変更は、所定の形状のピンホールが加工された円板を選択し、適宜バルブ上面に取付けることにより行った。同円板は板厚 2mm のステンレス鋼材を使用し、レーザ加工により $\pm 20\mu\text{m}$ 以下の精度で放出口の加工が施されている。バルブユニット内には、 $\phi 48\text{mm} \times 60\text{mm}$ の空間があり、実験開始時は、同空間を純水素ガスで満たすため、ガスの導入及び排気口を配置した。

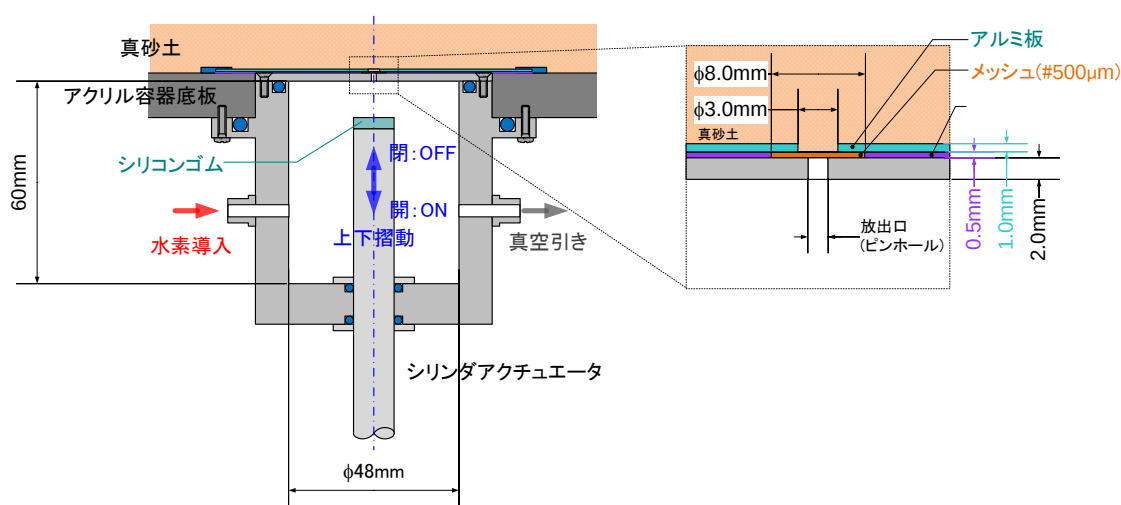


図 3-1-3 バルブユニットの構造（左）と亚克力容器との接続部の構造（右）

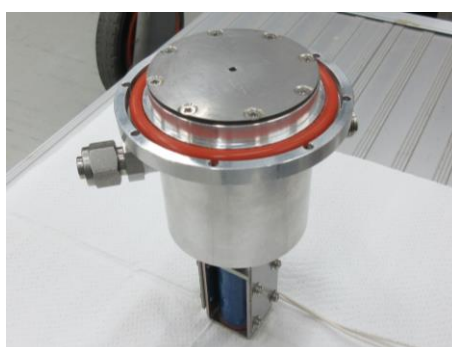


図 3-1-4 バルブユニット外観

実験時の作業効率を勘案すると、地中模擬槽内に土壌試料が積まれた状態で、放出口形状を変更する、即ちバルブユニットが取外しできる必要がある。また、放出口への土壌試料の落下は、水素放出条件に影響を及ぼす可能性があるため、これを防止する必要がある。したがって、ここでは図 3-1-3 に示すように、バルブユニットを容器底板の裏面より取り付ける構造とした。放出口表面は、直径 8mm の 500 μm ステンレス製メッシ

ユで覆い、バルブユニット内への土壌試料の落下を防止した。メッシュは貼付けに必要な最小限の面積で配置し、その周囲をシリコンゴム膜で囲うと共に、放出口部を除くこれらの上面を薄いアルミ板で覆うことで、メッシュの存在による水素噴流への干渉を抑制した。同一の供給圧力、放出口形状において、放出条件の変化を確認したところ、メッシュの有無により、圧力及び流量の指示値に変化は認められなかった。したがって本構造により容器内への水素放出を行った。

3.1.2 実験条件の設定方法

本実験における損傷形状、供給圧力、転圧状態の各パラメータの設定方法は以下のとおりである。

(1) 損傷形状

バルブユニットの放出口を各条件に対応したピンホールが加工された部品に交換する。

(2) 供給圧力

土壌層が積層されていない状態におけるバルブユニット直近に配置した圧力計の指示値が、所定の値となるように調整する。

(3) 転圧状態

一般に、土壌の転圧状態、即ち締固めの状態は、個々の土壌試料毎に異なる特性を有するため、突き固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）により個別に評価されている。本実験に用いた真砂土に関する突き固めによる土の締固め試験結果を図 3-1-5 に示す。

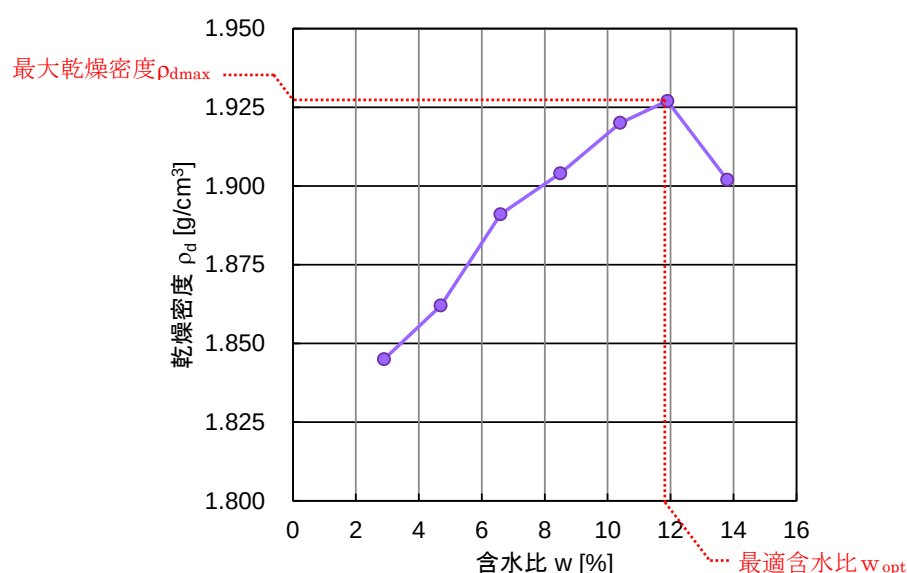


図 3-1-5 本実験に用いた真砂土の突き固めによる土の締固め試験結果

図 3-1-5 は、JIS 規格に定められた所定の突き固め方法により、本試験に用いた土壌試

料の乾燥密度と含水比の関係を示している。土壌試料は、最適に締固まる条件において乾燥密度が最大値をとり、最大乾燥密度と呼ばれている。また、その際の含水比は最適含水比と呼ばれ、両者の条件が実現された状態、即ち最適含水比状態の土壌試料を最適に締め固めた際に、用いた土壌試料の強度が最も高くなる。本土壌試料では、最適含水比が約 12%、最大乾燥密度は約 1.925g/cm^3 である。このように、転圧状態は、土壌の含水比と締固めの程度（転圧の程度）によって定まり、その強度は乾燥密度の値として示すことができる。

したがって、本実験では、以下の手順により転圧状態を調整した。

- ① 同一の真砂土を用いて、土壌試料調達時の水分を含む試料、最大乾燥密度に対応する最適含水比分の水分を含む試料、及び両者の中間に当たる含水比分の水分を含む試料の 3 種類の含水比状態の試料を準備する。
- ② アクリル容器内に試料を充填し、ランマにより厚さ 30cm まで転圧を施した後、転圧された土壌試料からコア抜きにより一部をサンプリングする。
- ③ サンプルから水分を除去することにより、乾燥密度を求め、得られた乾燥密度を、本実験における転圧状態を示す値として用いる。

なお、これらの作業は JIS 規格に定められた器具及び手順に準じて実施した。

3.1.3 実験方法の妥当性

本実験は、水素放出時の流量及び圧力について、大気開放時及び土壌試料充填時をそれぞれ比較するものであるが、土壌試料充填時の計測において、土壌試料とアクリル容器壁面等との境界面付近に、本来の土壌層と比較して密度が低い領域が存在し、その領域を優先して水素が流出することにより、本来の土壌層による流量及び圧力の変化が計測されないことが懸念された。

したがってここでは、図 3-1-5 に示すように、別途大型のアクリル容器を準備して同様の実験を行い、同一の実験条件における結果を比較することにより、実験方法の妥当性を評価した。評価結果を表 3-1-1 に示す。

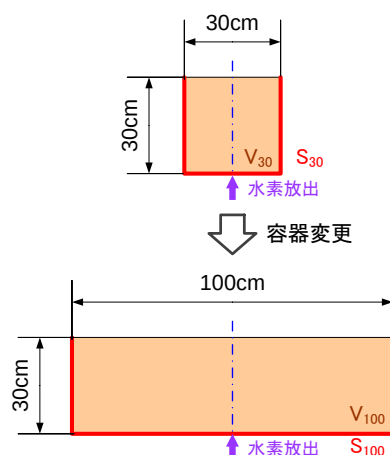


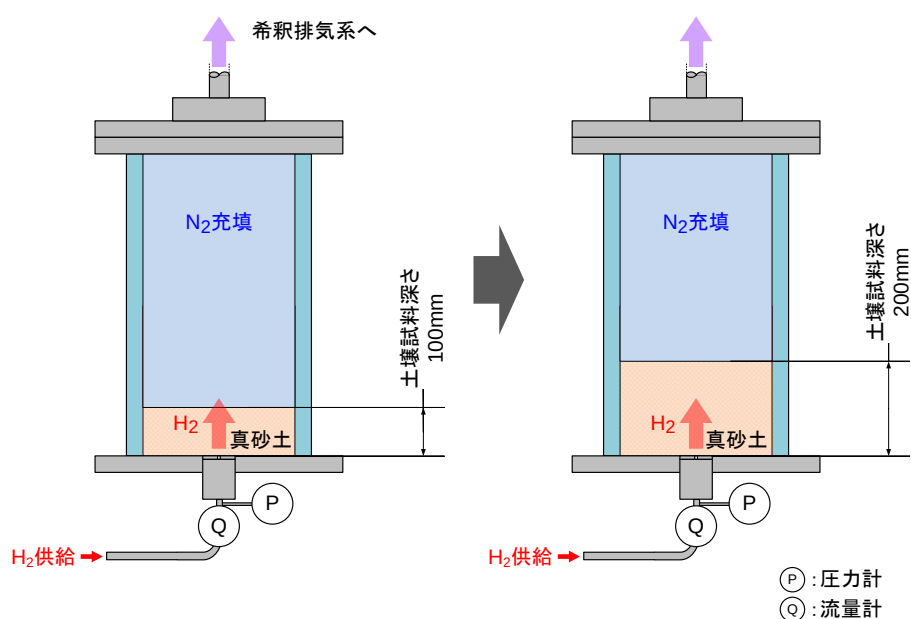
図 3-1-5 容器壁面付近低密度層の影響評価

表 3-1-1 容器壁面付近低密度層の影響評価結果

パラメータ	容器サイズ	土壌層なし L=0[mm]	土壌層あり L=300[mm]	変化率 L=300[mm] /L=0[mm]
圧力 P [kPa]	小容器 ($\phi 300$ [mm])	4.97	5.46	1.1
	大容器 ($\phi 1000$ [mm])	4.99	5.44	1.09
流量 Q [L/min]	小容器 ($\phi 300$ [mm])	9.99	9.53	0.95
	大容器 ($\phi 1000$ [mm])	10.51	10.26	0.98

表 3-1-1 に示すように、本調査における漏えい量の計測では、小容器と大容器の変化率の結果の差は僅かであり、概ね一致する結果であった。したがって、漏えい量計測については直径 300mm の容器を用いることとした。

本実験において計測する流量及び圧力は、積層する土壌層の厚さに依存するものと考えられるため、実験に先立ち、土壌層が存在する場合における、水素放出流量及び圧力の土壌層厚さとの相関を確認した。実験方法を図 3-1-6 に、実験結果を図 3-1-7 にそれぞれ示す。



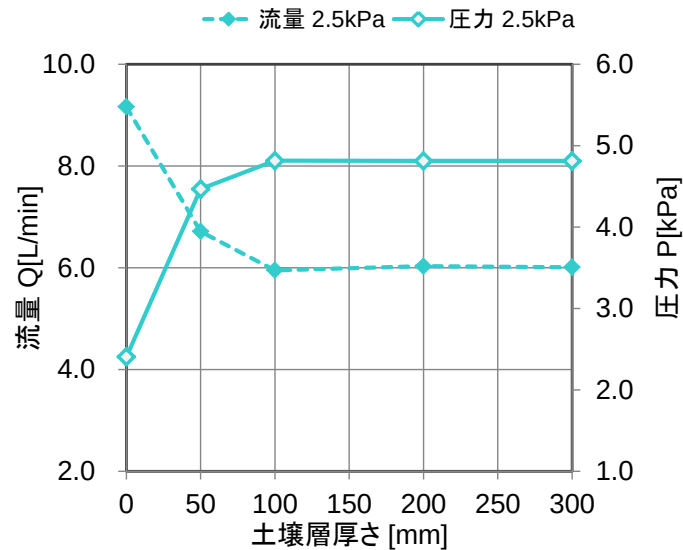


図 3-1-7 実験結果：水素放出流量及び圧力と土壌層厚さ依存性確認

図 3-1-6 に示すとおり、本実験は、単一の水素放出条件（ここでは供給圧力 2.5kPa、損傷形状ピンホールφ1.0mm とした）について、アクリル容器内に積層する土壌試料の厚さを変化させ、各条件における流量及び圧力を計測するものである。ここで、土壌の厚さは 50、100、200、300mm で変化させた。

図 3-1-7 に示すように、流量については土壌厚さ 100mm まで減少し、その後収束する傾向にある。また、圧力については、反対に土壌厚さ 100mm まで増加し、その後収束する傾向にあることが確認された。

一般に、ある流れ場に対し、抵抗となる物体の量が増加した場合、これに伴う流量及び圧力の変化は抵抗体の増加に追従するものと考えられる。一方、本実験において得られた結果は、土壌層の厚さが一定値を超えると、流量及び圧力の変化が収束しているように見える。これは、土壌厚さ 100mm 以上の条件では、土壌層の増加に伴う流量の減少、或いは圧力の増加量が計測誤差程度の極微量となっているため、見かけ上収束しているように見えるものと解される。これらの流量及び圧力の変化は、放出流量が大きくなる程、また土壌試料の空隙率が大きくなる程、より顕著に変化する傾向にある[3]が、本実験における水素放出条件は比較的低い流量であり、且つ、真砂土は比較的高い空隙率の土壌試料となっているため、いずれの放出条件においても、同様の結果を示すものと推察される。

したがって、本実験では土壌層厚さを、流量及び圧力の変化が十分に小さくなり、見かけ上収束する 300mm に設定し、土壌層がない場合と、土壌層が 300mm 積層された場合における流量及び圧力を計測することとした。

3.2 実験結果

地中における水素漏えい量計測の実験結果を土壌試料の転圧状態（乾燥密度）及び放出口の損傷形状（ピンホール開口面積）により整理した結果を図 3-2-1、図 3-2-2 にそれぞれ示す。

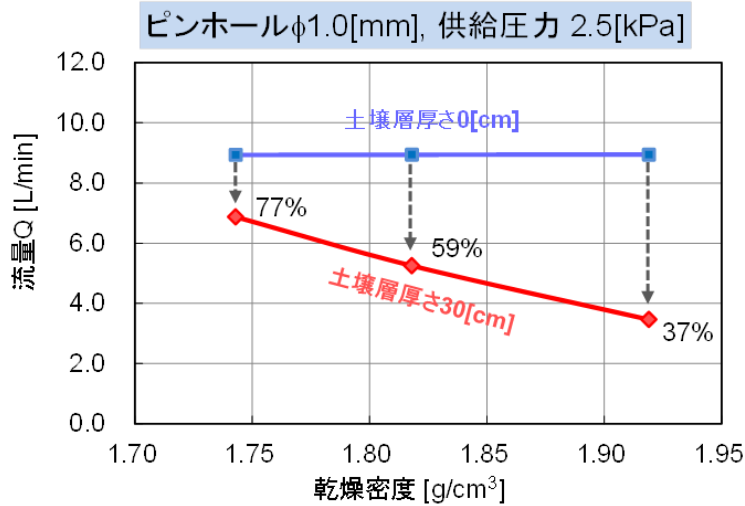


図 3-2-1 流量減少率の転圧状態（土壌乾燥密度）依存性

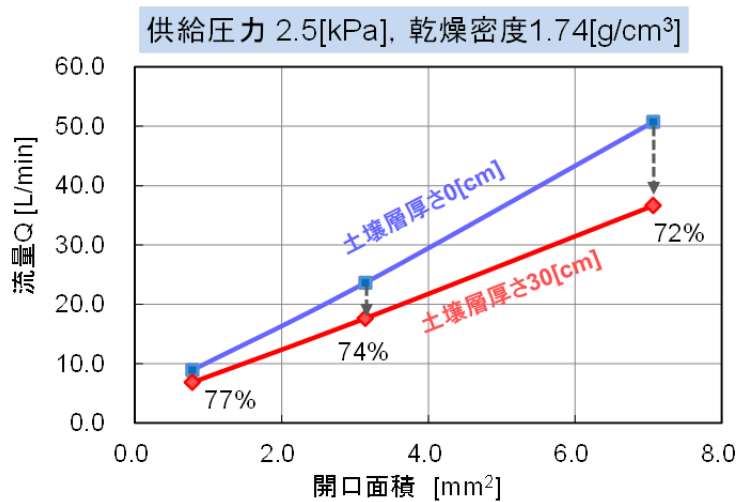


図 3-2-2 流量減少率の損傷形状（放出口面積）依存性

3.3 考察

前項の実験結果に基づき、土壌試料による水素漏えい量の変化について以下の傾向にあると言える。

- ・ 放出条件（損傷形状，供給圧力）を固定して，乾燥密度(転圧状態)を変化させた場合，埋設時の流量減少率は高い相関を示した。
- ・ 乾燥密度（転圧状態）依存性についてみると，乾燥密度が上昇することで，漏え

い流量が大幅に低下する傾向が確認され、本調査で用いた真砂土について、最も締め固められた条件（乾燥密度 1.92g/cm^3 ）では、土壌の堆積によって、水素漏えい流量が大気開放時に対し約 37%に低下した。

- ・ 開口面積（損傷形状）依存性についてみると、大気開放中では、一般に漏えい量は開口面積に比例するが、土壌層が堆積した場合においてもその比例関係は概ね維持されている。

これらの結果は、同様のデータを蓄積することにより、将来的に、供給中の水素流量の変化や、導管が埋設されている個所の土壌パラメータのデータを取得しておくことにより、埋設状態の導管の損傷の程度を予測することができる可能性を示唆している。この点について、4 章において後述するフィールド試験における土壌乾燥密度と水素漏えい量の関係を事例に考察する。

フィールド試験において、サンプルされた土壌試料の乾燥密度は 1.811g/cm^3 であり、水素漏えい量は 1.93L/min であった。図 3-2-2 における結果に照らした場合、水素漏えい量は約 5.5L/min と推察されるが、大きく乖離している。この点については、次のような要因が考えられる。

- ・ 本章における実験および、4 章において後述するフィールド試験共に、深さや場所により、土壌の乾燥密度が異なっており、1 つの代表点で比較を行うことが困難である。
- ・ フィールド試験では、十分な転圧作業がなされているが、本章における実験では小スケールであるがゆえに、壁面付近の転圧が十分でない可能性がある。
- ・ 地中における水素放出口への土被り状態の差異等により水素放出条件が異なる可能性がある。
- ・ 本調査において転圧状態の指標として用いた乾燥密度は、転圧状態（締め固めの程度）を示す値として現在の道路工事等の現場において一般的に用いられているものであり、施工における仕様上の達成基準として例えば、「最大乾燥密度の 90%以上」等と定められている。しかしながら、乾燥密度の値により一意的に土壌の状態が決定できるのは、最大乾燥密度の場合のみであり、その他の場合は複数の含水比条件を取り得るため、乾燥密度と含水比の両者の情報が必要となる。また、土壌試料によっては図 3-1-5 に示す明確なピークを示さない場合も有り得る。

これらの状況から、次のようにデータ整備を行うことによって、埋設状態の水素導管の損傷状態の予測に資することができる可能性があるものと考えられる。

- (1) 乾燥密度、含水比の両パラメータに対する流量又は圧力の変化を 3 次元的なデータベースとして蓄積する。
- (2) 5 章において後述する透気係数等、別のパラメータにより整理する。

ただし、(2)については、現状において透気係数が転圧状態を示すパラメータと直接リンクしていない（透気係数の値のみで転圧状態を表すことができない）ため、乾燥密度

等の値と対応させる必要がある場合は、(1)のように、乾燥密度、含水比の両パラメータに対する透気係数のデータベースを別途取得する必要がある。また、現時点において規格化された計測手法や汎用の計測装置がないため、この点にも留意し、検討する必要がある。

3.4 まとめ

本章では、各種放出口形状、供給圧力、転圧状態の条件下において、土壌試料がない大気開放時の水素放出流量及び圧力と、土壌試料を積層した場合における水素放出流量及び圧力を計測し、以下の結果を得た。

- ・ 放出条件（損傷形状、供給圧力）を固定して、乾燥密度を変化させた場合、埋設時の流量減少率は高い相関を示した。
- ・ 乾燥密度（転圧状態）依存性についてみると、締固め度が上昇することで、漏えい流量が大幅に低下する傾向が確認され、本調査で用いた真砂土について、最も締め固められた条件（乾燥密度 1.92g/cm^3 ）では、土壌の堆積によって、水素漏えい流量が大気開放時に対し約 37%に低下した。
- ・ 開口面積（損傷形状）依存性についてみると、大気開放時、一般に漏えい量は開口面積に比例するが、土壌層が堆積した場合においても相関は維持されている。

これらの結果により、各パラメータの変化に伴う水素漏えい量について、定性的な特性や、本調査の条件下における変化量の程度を明らかにした。また、埋設水素導管の損傷時に、損傷の程度を見積もるための可能性について考察を加えた。

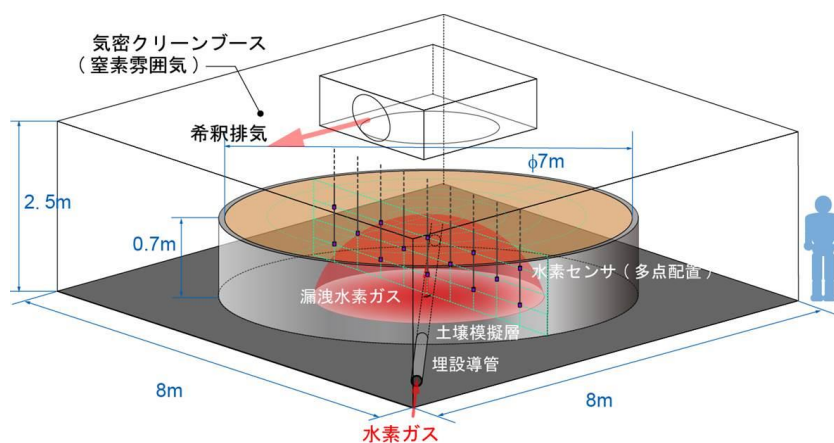
4. 地中及び大気中の水素濃度分布計測（実フィールド試験）

4.1 実フィールド試験装置の製作

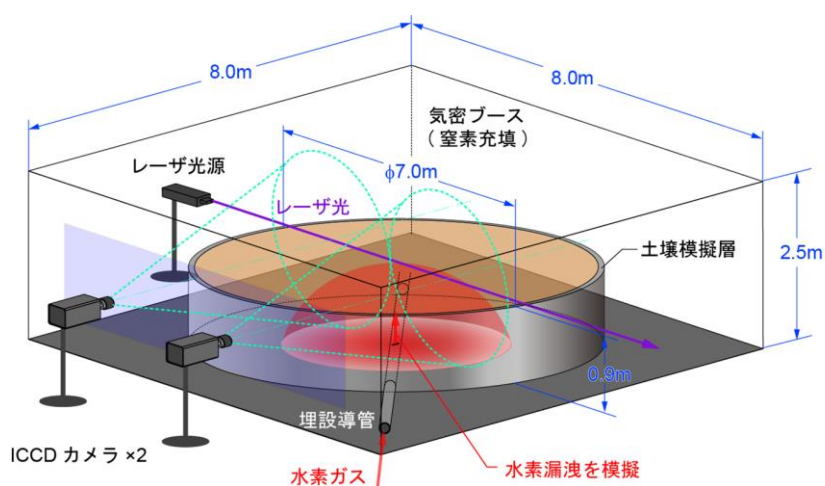
4.1.1 土壌槽及び気密ブースの設計製作

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 4-1-1 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。

- ・ 土壌槽に充填する土壌は一般的な埋設土である真砂土を用いるが、本調査においては一般的な埋設土中での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ため、比較的含水比の低い土壌を充填し水分の影響が少ない状態にて計測を実施する。
- ・ 土壌層の転圧はランマを用いて行い、実運用に近い道路舗装の埋戻土層を再現する。ただし、上記の理由により水締めは行わない。
- ・ 土壌槽の形状は、内部に大量の土壌を充填し、ランマにより締固めを行うため、強度補償の観点から円筒形とする。
- ・ 土壌槽の直径は、表 2-1-1 に示した実フィールド試験条件にて可能な限り水素ガスが壁面に到達しない状態で計測を実施することを目的とし、 $\phi 7\text{m}$ とした。
- ・ 土壌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 $\phi 1\text{mm}$ 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壌層深さを想定して、地表面から放出口までの埋設深さを 0.7m 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壌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、後述する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。
- ・ また、レーザ光照射により発生する水素ガス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する。観測窓は水素分子のラマン散乱波長（ 416nm ）に対し高い透過特性を持つ必要があるため、紫外側可視波長域において分光透過特性が良い透明ガラス材を用いた。



(a)地中における水素濃度分布計測イメージ



(b)大気中における水素濃度分布計測イメージ

図 4-1-1 実フィールド試験装置概要

図 4-1-2 に土壌槽の製作工程を示す。土壌槽のコンクリート壁の高さは 0.85m であり、埋設管は施工した放出口までの深さが 0.7m となるよう高さ方向の位置を調整し、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埋戻しを行った。実フィールド試験は安全面を考慮し、土壌槽及び気密ブース内を窒素パージした状態にて実施する。そのため、埋設管に影響を及ぼさない土壌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 4-1-2 (d))。



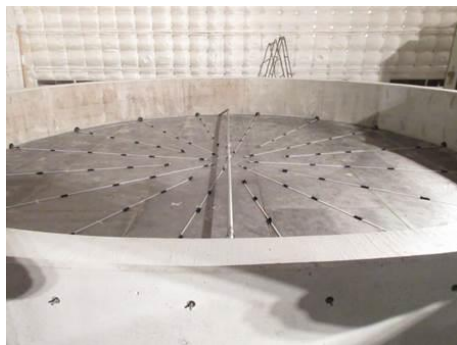
(a)



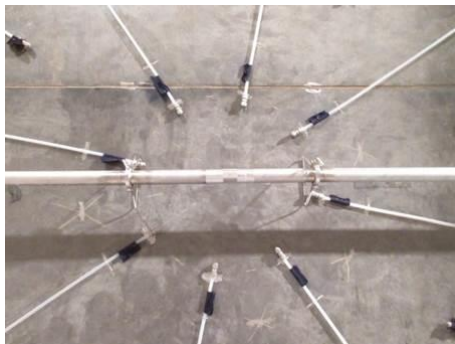
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

図 4-1-2 土壌槽の製作工程

(a)鉄板敷設 (b)配筋、型枠工事 (c)脱型・コンクリート出来形
(d)埋設導管、ページライン敷設 (e)埋設導管・水素放出口 (f)埋戻し

また、気密ブースの製作工程を図 4-1-3 に示す。気密ブースにはラマンイメージングによる計測に適した紫外側可視波長域において透過特性が高く、更にカメラの視野を遮ることのないサイズのガラス窓板を施工した (図 4-1-3(d))。



図 4-1-3 気密ブースの製作工程

(a)鉄骨施工 (b)軽鉄施工 (c)ボード施工 (d)クロス施工・ガラスはめ込み

4.1.2 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 4-1-4 に、放出口近傍の埋設管設置概要を図 4-1-5 に示す。また、埋設配管の外観を図 4-6-1 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が異なるため、本調査においては、図 4-1-4 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 4-1-5 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 150mm 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φ1mm）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 0.28mm の SUS304 製メッシュを取付けた。

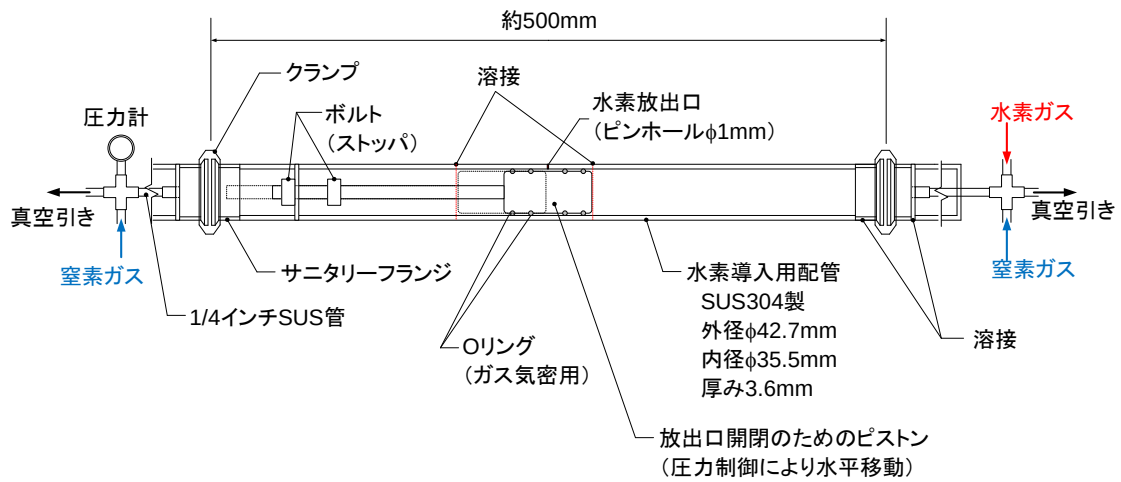


図 4-1-4 埋設配管の水素放出機構

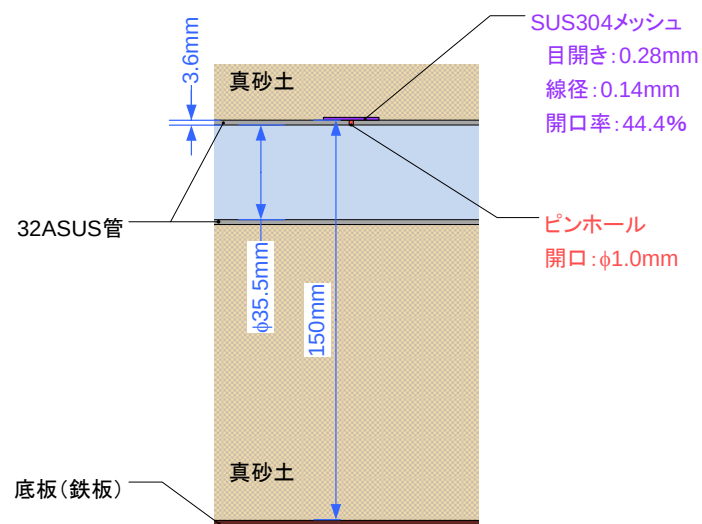


図 4-1-5 埋設配管設置概要 (放出口近傍)

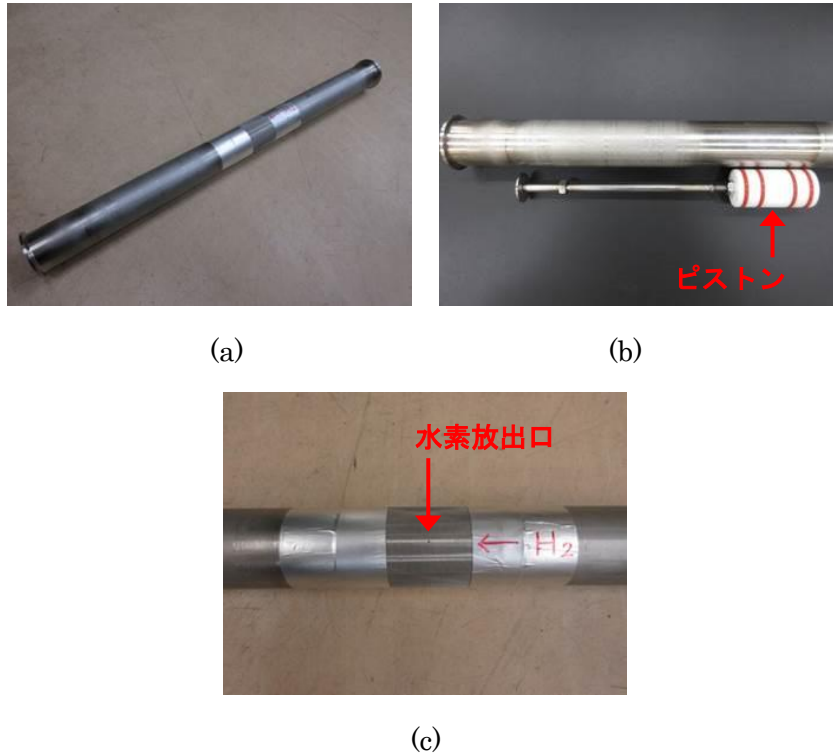


図 4-1-6 埋設配管外観
(a)バルブ機構部 (b)シリンダ・ピストン (c)水素放出口

4.1.3 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。

(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（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

土壌試料として真砂土を用い、容器内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。

③ 支燃物質：酸素（空気）→窒素

土壌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、土壌槽及び気密ブース

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：28.8g/mol、窒素：28g/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ることができる。

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 4-1-7 に実フィールド試験装置の安全設備概要を、図 4-1-8 に実験場の安全設備概要を示す。また、図 4-1-9 に安全設備の外観を示す。

実験開始時における土壌槽及び気密ブース内の無酸素状態については、図 4-1-7 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。また、土壌試料の採取等、気密ブースへ立ち入る必要がある場合は、土壌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 4-1-8 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。

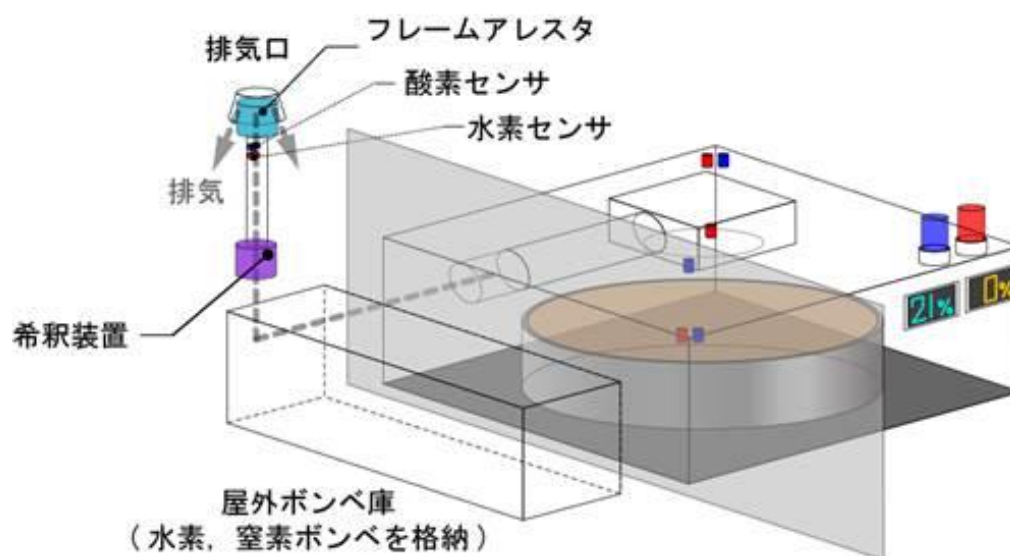


図 4-1-7 実フィールド試験装置の安全設備概要

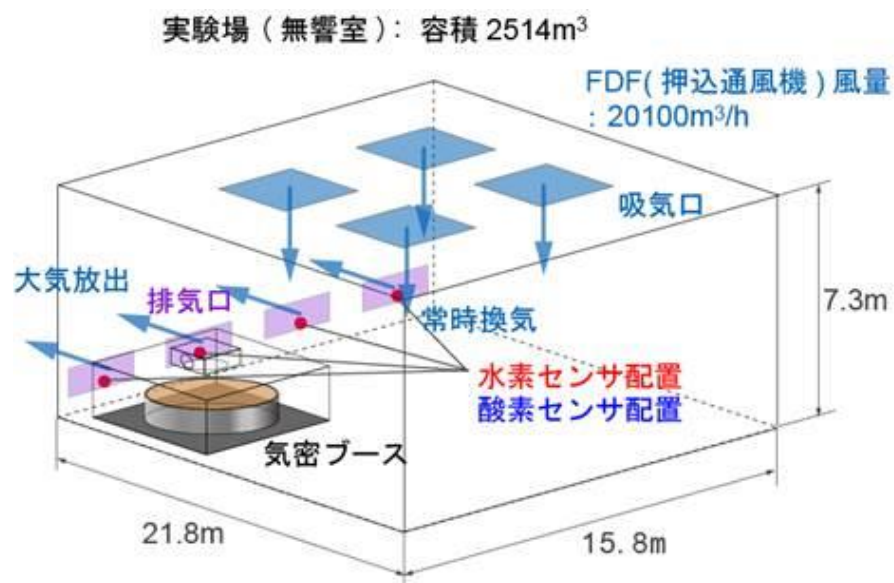
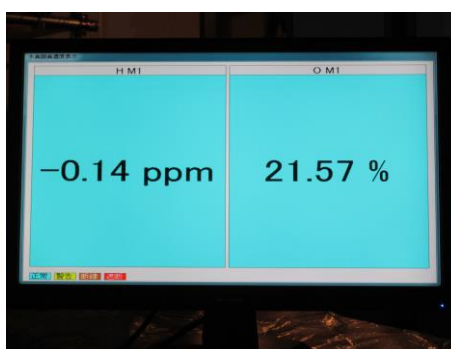


図 4-1-8 実験場の安全設備概要



(a)



(b)



(c)



(d)



図 4-1-9 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 4-1-10 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。

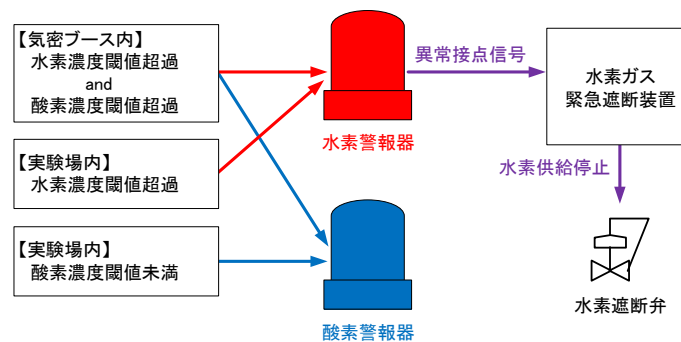


図 4-1-10 安全設備の警報発報条件

(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 4-1-11 に、ガス供給系の外観を図 4-1-12 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 本が格納されている。窒素ペ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。水素および窒素はボンベ庫内の圧力調整器を介し、実験場内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。

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。

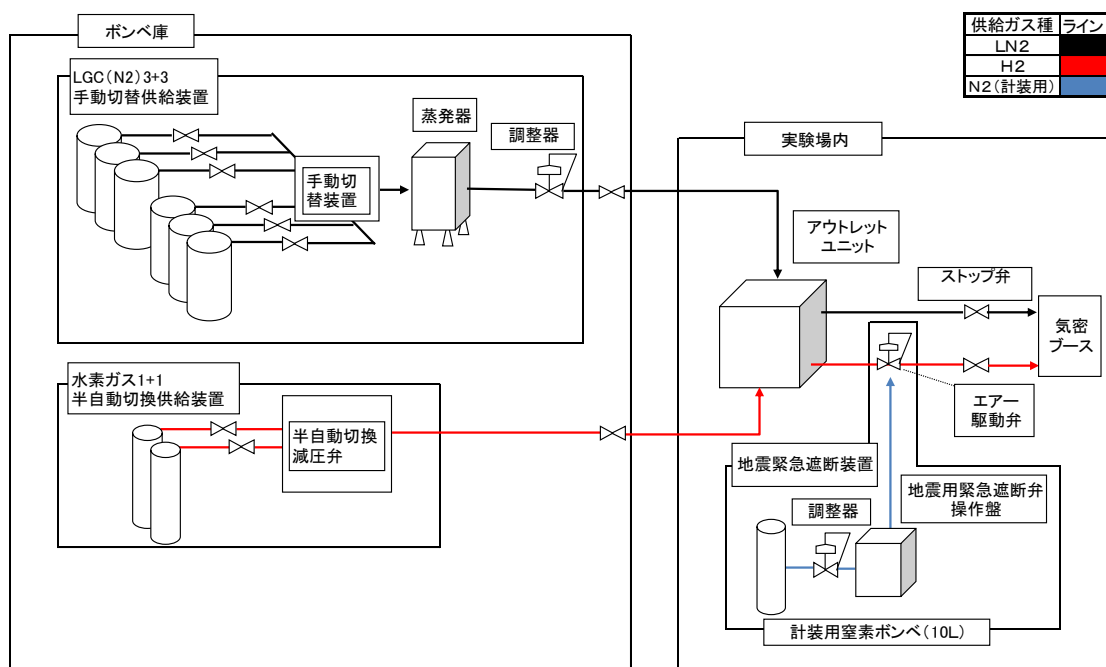


図 4-1-11 ガス供給系構成図



(a)



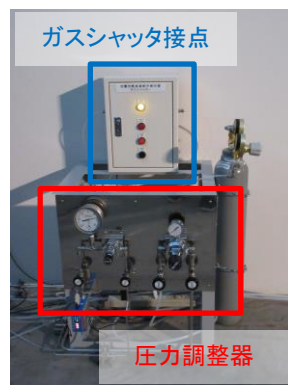
(b)



(c)



(d)



(e)

図 4-1-12 ガス供給系外観

(a)ポンペ庫 (b)地震計 (c)窒素供給系 (d)水素供給系
(e)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ガスの放出に伴い、屋外排気口から窒素ガス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。無論、大気放出するにあたっては、水素ガス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 4-1-13 に示す手法を用いて、水素ガス濃度を 1%以下に希釈し、排気を行った。

気密ブース上部の放出口に対し上流側から、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、気密ブース天井部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 10kPa の条件において排気ガス中の水素濃度が 1%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 4-1-14 に示すとおり、排気口直前にはフレイムアレスタを組込み、万一に備えた逆火防止機能を付加した。

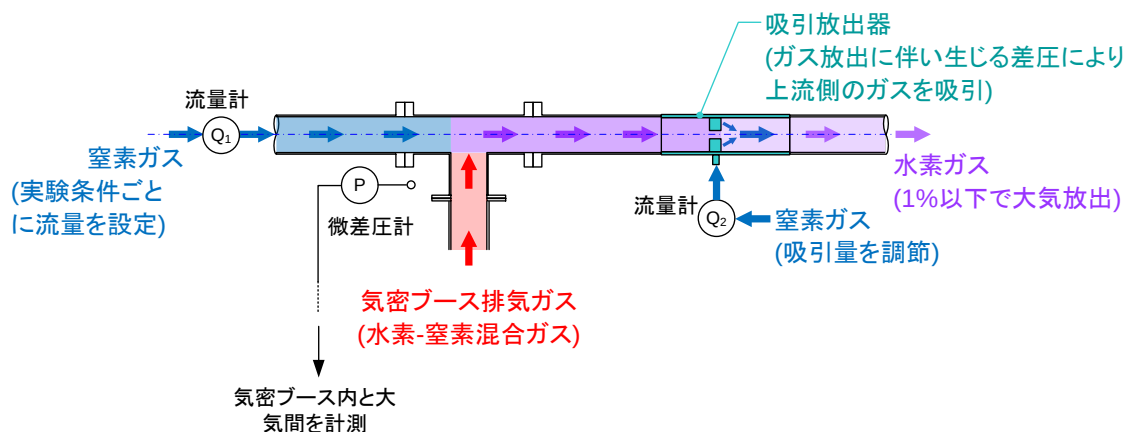


図 4-1-13 本実験における水素希釈排気方法



図 4-1-14 フレームアレスタ内蔵排気口外観

4.2 地中水素ガス濃度の計測方法

4.2.1 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ガス濃度の経時変化を計測することで、地中模擬槽全体に亘る水素拡散挙動を把握する。前節で述べたとおり、本実験では、容器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 4-2-1 に整理した。

表 4-2-1 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	○高感度・高選択性	現時点では定量化が

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	○温度・湿度依存性大 ○60%応答：3秒以下	困難
--------------------------------	---------------------------	----

表 4-2-1 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、地中における水素ガス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及び寸法を図 4-2-1 に示す。

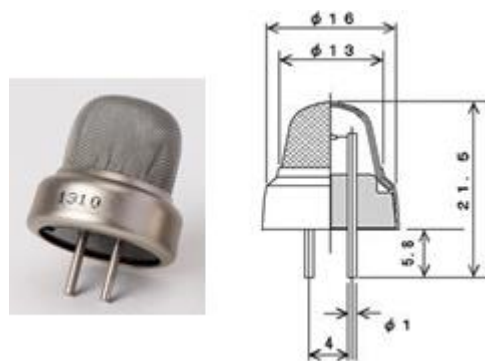


図 4-2-1 気体熱伝導式ガスセンサの外観と寸法
(株式会社ネモトセンサエンジニアリング/NAP-21A)

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、水素を検出する場合、二酸化炭素の場合と比較して感度良く、速い応答で検知することができる。

4.2.2 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）を一對として使用し、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が行われ、その後所定の流量で水素ガスが導入されるが、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℃に対し 18.5℃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。

フィールド試験に先立ち、上記の用法に照らし、18.5℃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 4-2-2 に高濃度域までの検量線取得結果を、図 4-2-3 に低濃度域の検量線取得結果を示す。

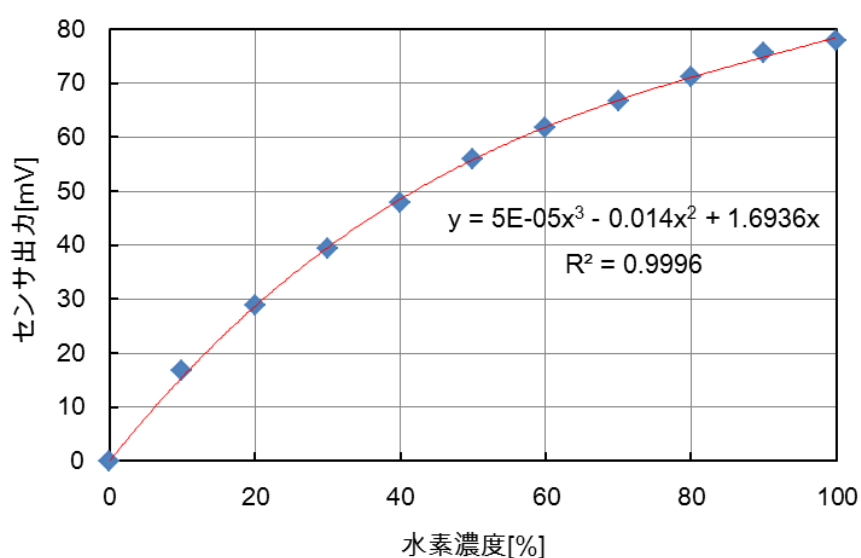


図 4-2-2 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性
(高濃度域)

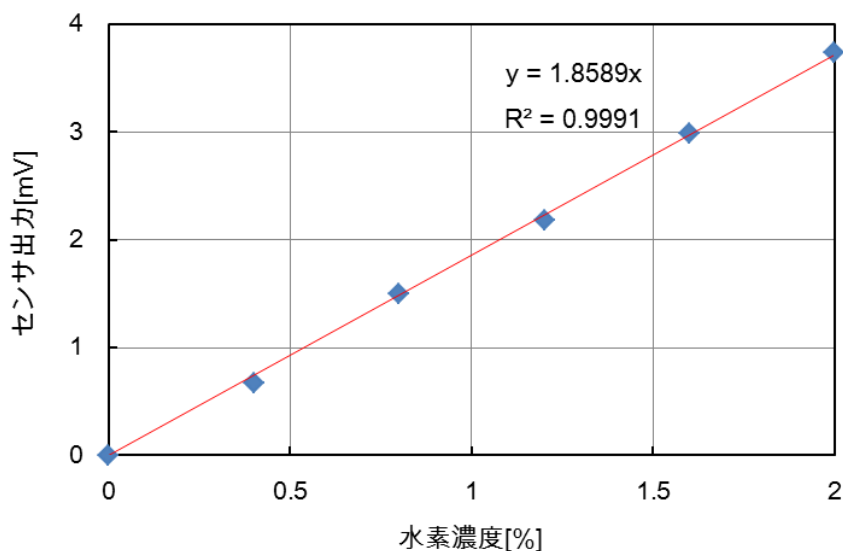


図 4-2-3 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性
(低濃度域)

図 4-2-2 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、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 4-2-3 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处理回数に依存し、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 秒として平均化处理回数を設定し、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。

4.3 大気中水素ガス濃度の計測方法

4.3.1 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、気密ブース内の大気模擬層における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ことが多い。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個配置する必要がある、

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 4-3-1 に、光学的に流れを可視化する代表的な手法を挙げる。

表 4-3-1 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、

- ・ 物理量としてガス濃度が計測できる
- ・ 水素ガスと窒素ガスの濃度が分離して計測できる

機能が要求される。このため本調査では、ガス分子のラマン散乱光を捉えるレーザ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、後述する気密ブース側壁にレーザ光透過用の石英窓を配置し、レーザ光軸に対し直角方向となる側壁面に、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 4-3-1 に示す。

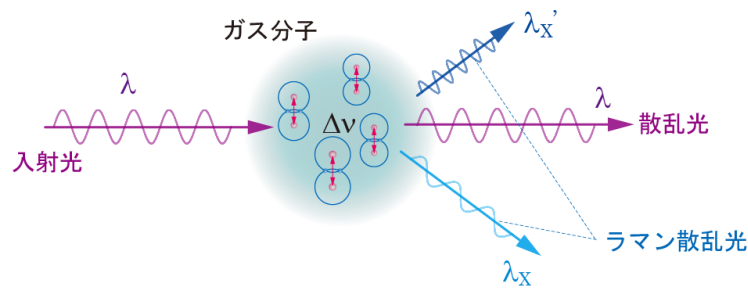


図 4-3-1 ラマン散乱の概念

ラマン散乱は分子による光の非弾性散乱の一種であり、入射光のエネルギーが分子の内部エネルギーに奪われることによって、入射した光の波長と異なる波長の光が散乱する現象である。分子の内部エネルギーは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。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 $\Delta v = \Delta E / \eta$ (η : 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 4-3-2 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 4-3-2 に水素、窒素のラマンスペクトル例をそれぞれ示す。

表 4-3-2、図 4-3-2 に示すように、ラマン散乱光は入射レーザ光波長 (355nm) に対して 30nm 以上離れた波長に生じる。このため、それぞれの水素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 4-3-2 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	Δv [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

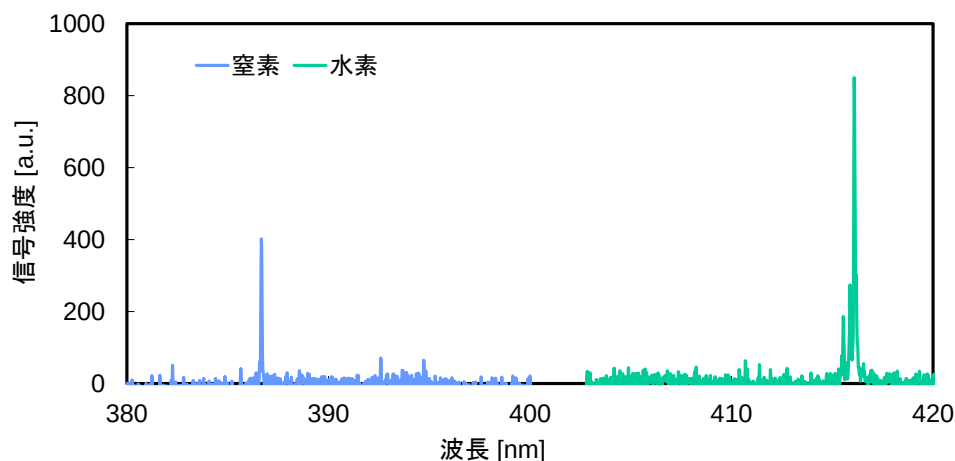


図 4-3-2 同一密度の水素及び窒素のラマンスペクトル例

4.3.2 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 4-3-3 に本調査に用いるガス可視化・濃度分布計測方法を、表 4-3-3 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 355nm）を用い、直径 $\phi 15\text{mm}$ のレーザ光を石英窓を介し気密ブースの地表面上に照射し、気密ブース外部からラマン散乱光を撮像した。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つながり、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 15mm、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 2.5m となるが、本調査では、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、計 5m 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 415.9nm、半値全幅 10nm 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 カメラのシャッタ開放のタイミングをレーザ光のパルス発振と同期させ、ICCD カメラの露光時間を観測領域を考慮し 30ns とした。

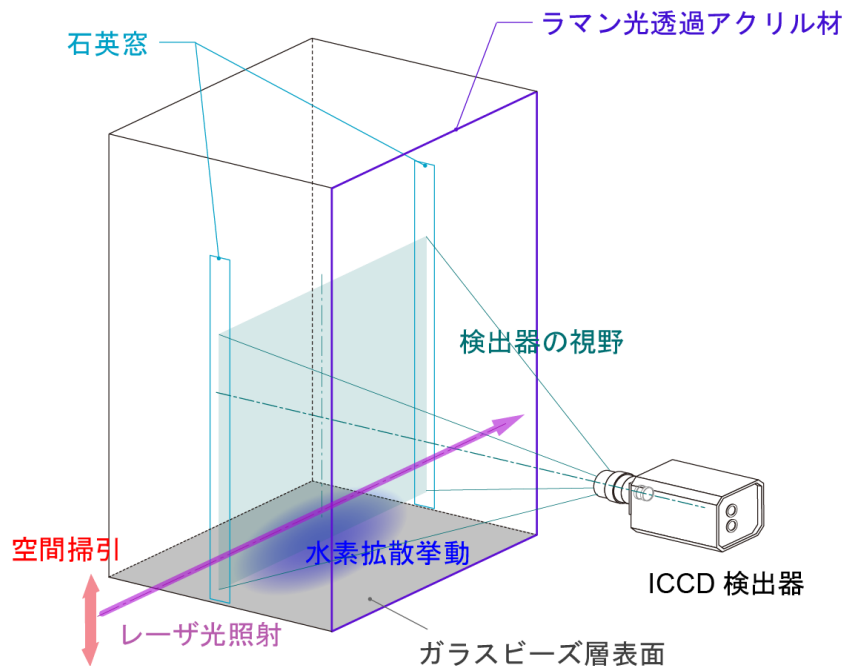


図 4-3-3 大気中における水素ガス可視化・濃度分布計測方法

表 4-3-3 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	80[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	18mm-Gen III HBf
分解能	16bit
カメラレンズ	
メーカー/型式	Nikon/Ai Nikkor 35mm 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
平滑化处理	ガウシアン 5×5

4.3.3 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、

$$P_{ij} = \eta P_{0ij} K G_{ij} \Delta L N \frac{A}{r^2} \sigma e^{-2 \int_0^r [\alpha_L(r') + \alpha_H(r')] dr'} \quad (4.3.1)$$

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(4.3.1)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、事前に既知濃度の水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 4-3-4 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 30shot (時間分解能 1fps) 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。

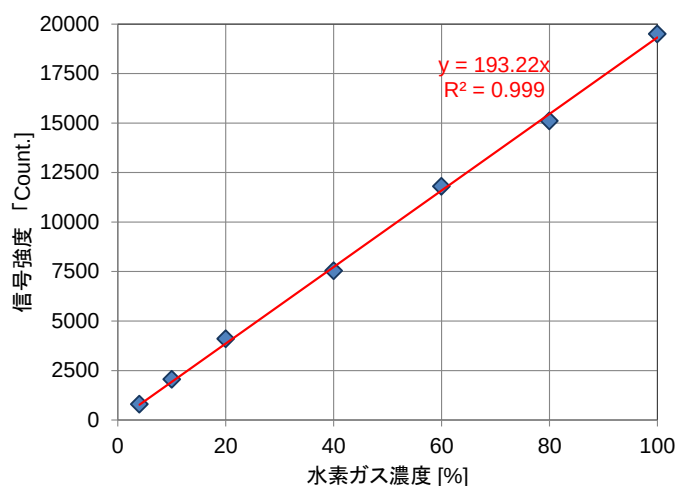


図 4-3-4 ラマン散乱光信号強度の水素濃度依存性

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、計測環境にかか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、か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 4-3-5 に用いたガウシアンフィルタのパラメータを示す。

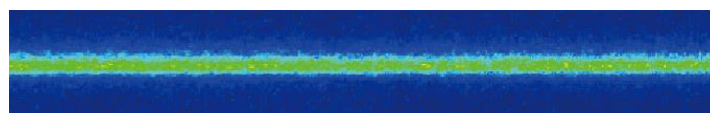
$\frac{1}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{6}{256}$	$\frac{4}{256}$	$\frac{1}{256}$
$\frac{4}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{4}{256}$
$\frac{6}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{36}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{6}{256}$
$\frac{4}{256}$	$\frac{16}{256}$	$\frac{24}{256}$	$\frac{16}{256}$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

図 4-3-5 5×5 ガウシアンフィルタマスクパラメータ

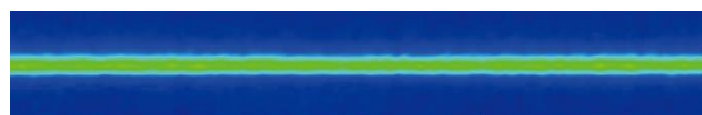
ガウシアンフィルタは各要素の和が 1 となるように重み付けされており、画像処理に
おけるノイズ除去手法として一般的に用いられるものである。図 4-3-6 に水素ガスのラ
マン散乱光画像へのガウシアンフィルタ適用画像例を示す。図 4-3-6(a)についてみると、
背景領域においても離散化した輝点を確認される。これは前述の I.I.によるノイズ成分で
あり、熱雑音により発生した光電子が増倍され、輝点として画像に反映されたものであ
る。このノイズは、同様に水素ガスのラマン散乱光画像における水素ガス分布領域の輝

度にも重畳されている。これに対し、図 4-3-6(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 4-3-6 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

4.4 実フィールド試験装置構成

以上、前節までに示した、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 4-4-1 に示す。気密ブース内に配置されるセンサは、

- ・ 地中水素ガス濃度計測用：気体熱伝導式ガスセンサ
- ・ 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温度、圧力、流量センサの出力をデータロガーにより記録した。用いたセンサ及び記録計の仕様を表 4-4-1 に整理した。また、ICCD カメラによる大気中水素ガス可視化画像は、専用の PC に画像として記録した。

実フィールド試験装置外観を図 4-4-2、大気中濃度計測表示部外観を図 4-4-3、地中濃度計測装置表示部外観を図 4-4-4、実フィールド試験レーザ装置外観を図 4-4-5、実フィールド試験 ICCD カメラ外観を図 4-4-6 にそれぞれ示す。

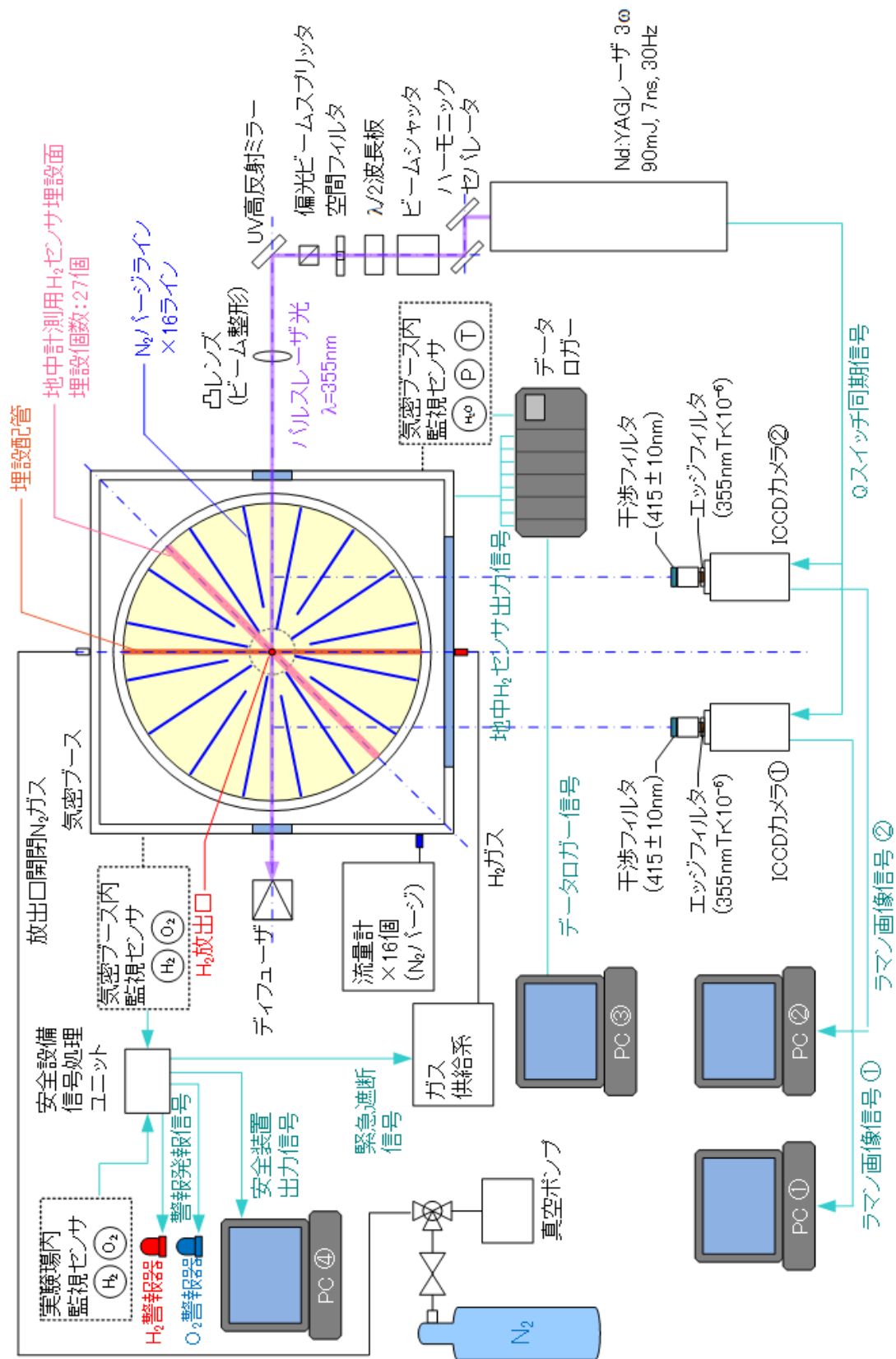


図 4-4-1 実験装置の全体構成図

表 4-4-1 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：0～20L/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：5～50L/min センサ方式：フロート式 測定精度：±6.0%FS
圧力センサ (バルブ部)	KP15-17G (長野計器)	圧力レンジ：0～20kPa 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：±50kPa 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：－100～500kPa 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：±200Pa 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：±1V、±6V/FS 熱電対測定範囲：-270<TS≤1370℃ 湿度測定範囲：0～100%

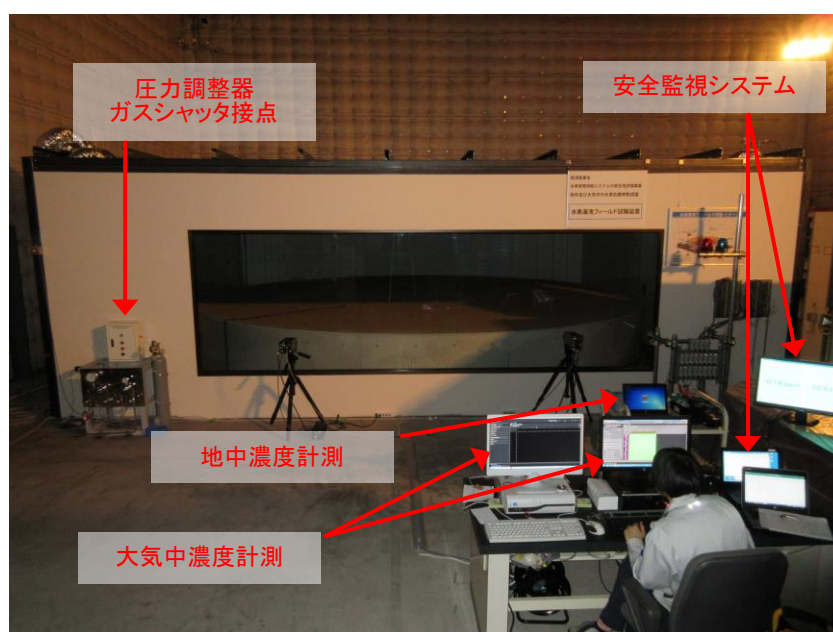


図 4-4-2 実フィールド試験装置外観



図 4-4-3 大気中濃度計測表示部外観



図 4-4-4 地中濃度計測装置表示部外観

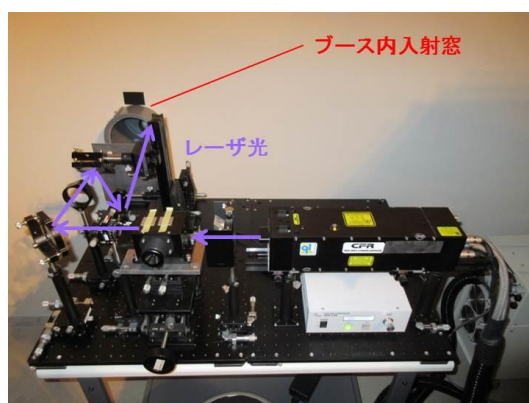
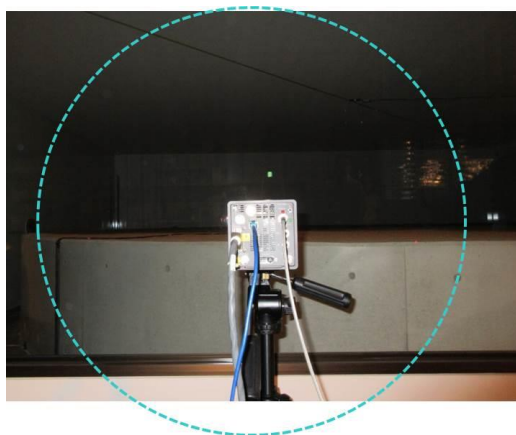


図 4-4-5 実フィールド試験レーザ装置外観



視野直径 $\phi 2.5\text{m}$ /台

図 4-4-6 実フィールド試験 ICCD カメラ外観

4.5 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、地中模擬層内の土壌試料中に多点配置した気体熱伝導式水素ガスセンサによる地中水素ガス濃度の計測結果を示すと共に、地中に漏えいした水素ガスの本質的な挙動について考察した。

4.5.1 水素ガスセンサの配置

本調査における地中水素ガス濃度計測では、気体熱伝導式ガスセンサを直接土壌試料中に埋設する。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 4-5-1 に示す。

図 4-5-1 に示すとおり、センサの土壌中での設置箇所については、計測点として 20 点（①～⑳）、挙動の対称性を確認するための 7 点（㉑～㉗）を配置し、水素拡散の縦方向、横方向の進行具合を比較するために、放出口を中心とした同心円状の配置をベースとした。また、放出口付近における挙動の詳細を確認するため、放出口付近にセンサを密に設置した上で、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た。また、センサ㉑および㉗を壁面に沿って設置することで、水素ガスの壁面への到達の有無を確認した。

本実験では、地中水素ガス濃度計測と同時に、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。このとき、センサの配線が、ICCD カメラによる撮像における外乱光の要因となる可能性がある。したがって、センサは、レーザ光軸に対し 45° ずらした面内に配置し、大気中水素計測への干渉を抑制した。

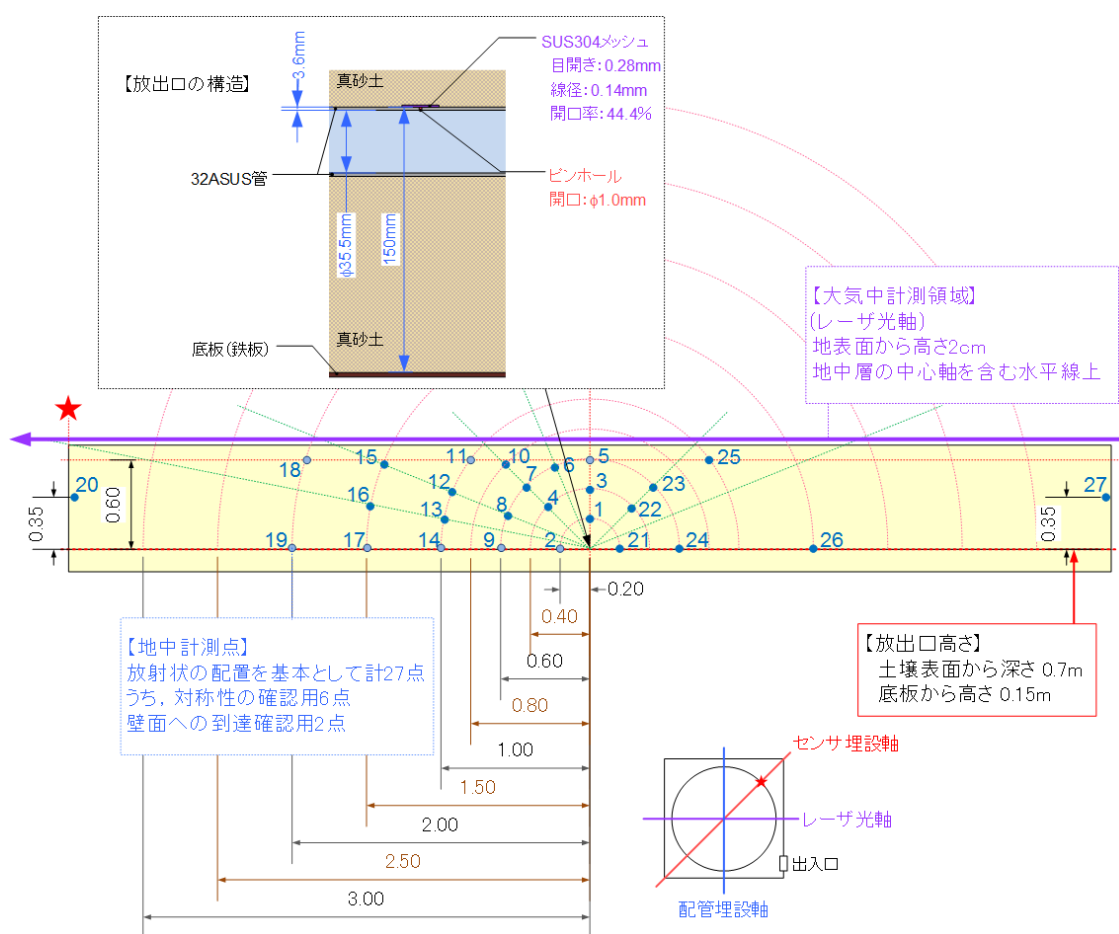


図 4-5-1 地中水素ガス濃度計測におけるセンサの配置

4.5.2 地中水素濃度計測結果

前述の配置により表 2-1-1 に示した No.2-(1)～(4)の条件下において実施した地中水素ガス濃度計測結果を図 4-5-2～図 4-5-5 にそれぞれ示す。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置いては、立ち上がりから緩やかに濃度が上昇する傾向にある。

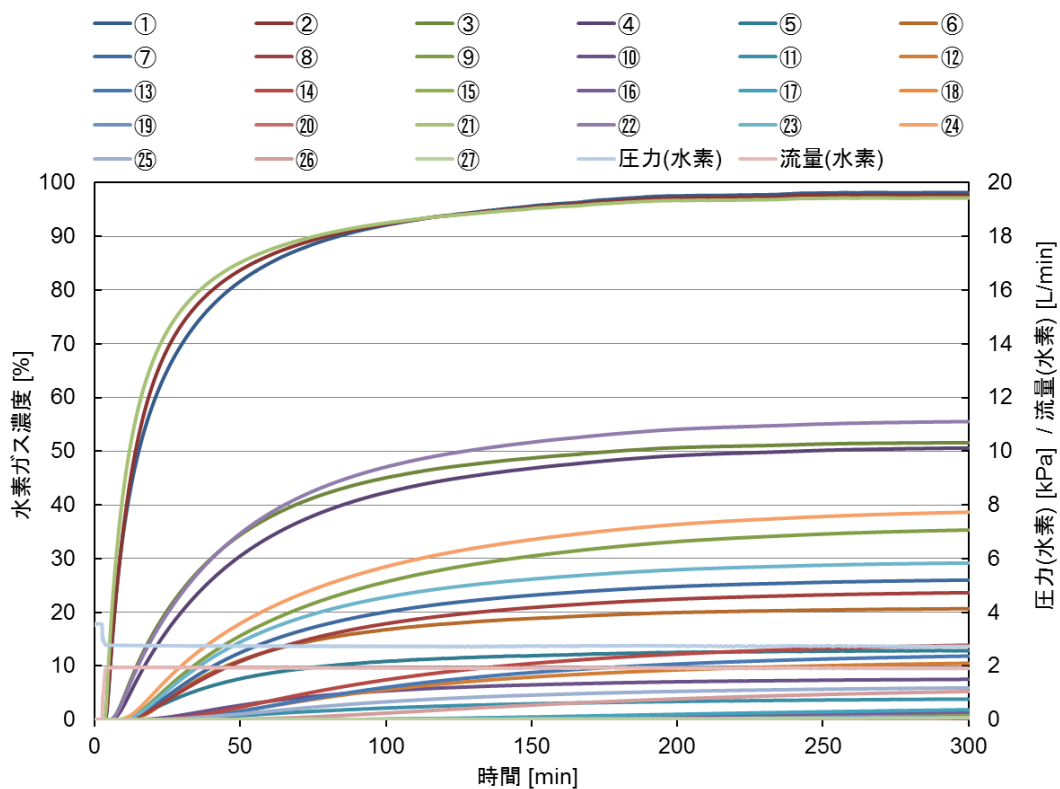


図 4-5-2 地中水素ガス濃度計測結果（供給圧力 2.5kPa、ピンホールφ1.0mm）

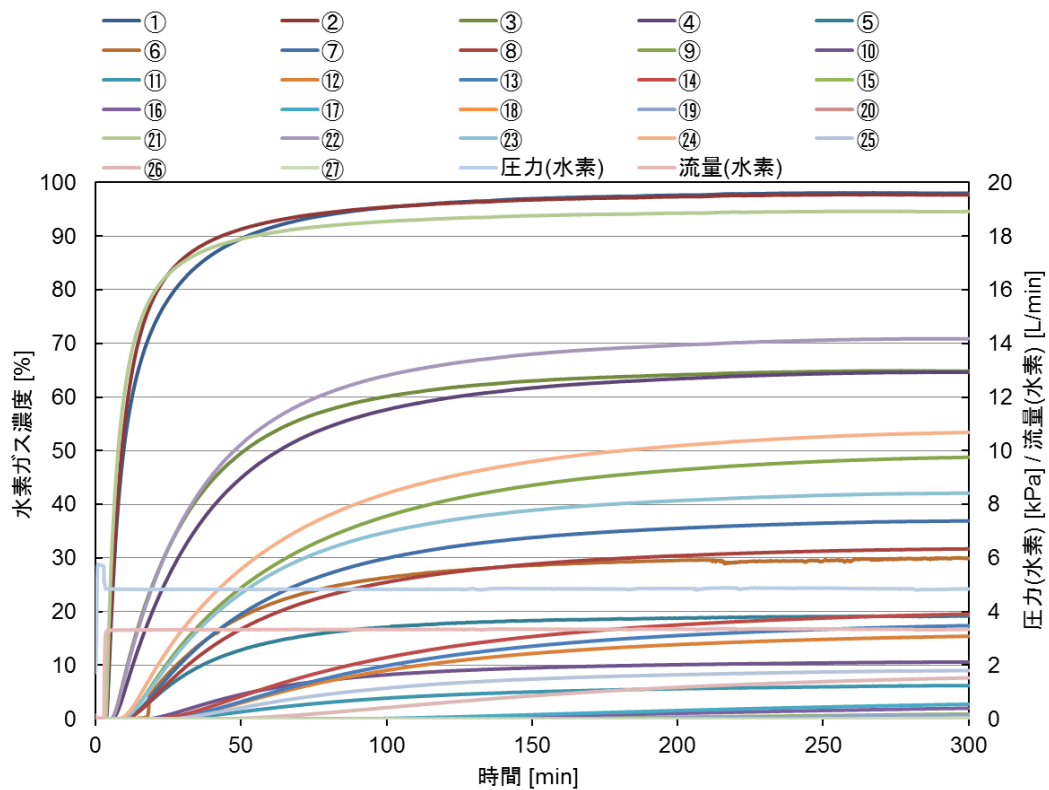


図 4-5-3 地中水素ガス濃度計測結果（供給圧力 5.0kPa、ピンホールφ1.0mm）

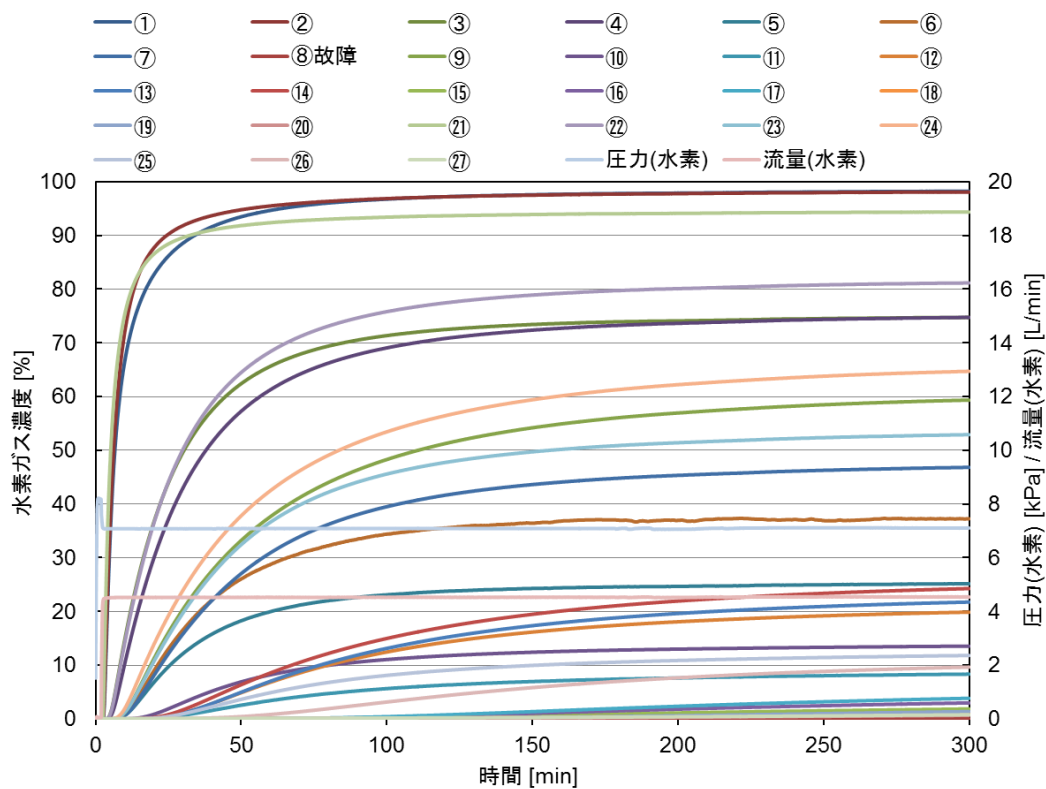


図 4-5-4 地中水素ガス濃度計測結果（供給圧力 7.5kPa、ピンホール ϕ 1.0mm）

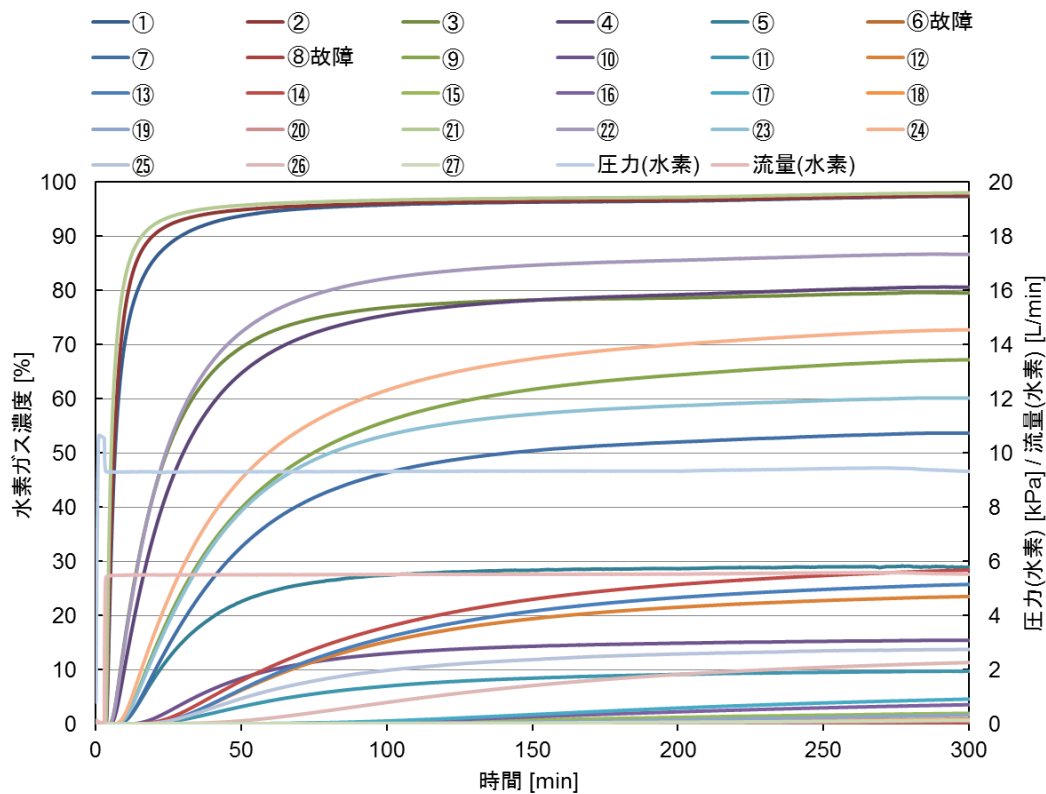


図 4-5-5 地中水素ガス濃度計測結果（供給圧力 10.0kPa、ピンホール ϕ 1.0mm）

4.5.3 考察

前項に示した地中水素ガス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。ここでは図 4-5-6～図 4-5-8 において、各計測点における水素ガス濃度の経時変化について、各供給圧力条件における結果を比較した。また、図 4-5-9～図 4-5-12 において、各観測点のカラードット表示により、地中水素濃度空間分布の経時変化を示した。また、カラードットの彩度と濃度の相関はカラーバーに示した。図 4-5-1 に示したように、地中の水素センサ配置面内の水素放出軸右側には、対称性を確認するために 7 点のみセンサ(②⑦)が配置されているが、図 4-5-9～図 4-5-12 では、視認性を向上するため、左右対称に配置されていない計測点についても、片側の計測結果と等しいものとしてカラードットを表示した。経過時間はバルブ開放から 10min 後を起点に 10min、50min 以降は 50min 毎に 300min 後までの結果を示している。また、図中の破線は放出口を中心とした各計測点までの直線距離を示すものであり、50min 後の図中に具体的な数値を示している。

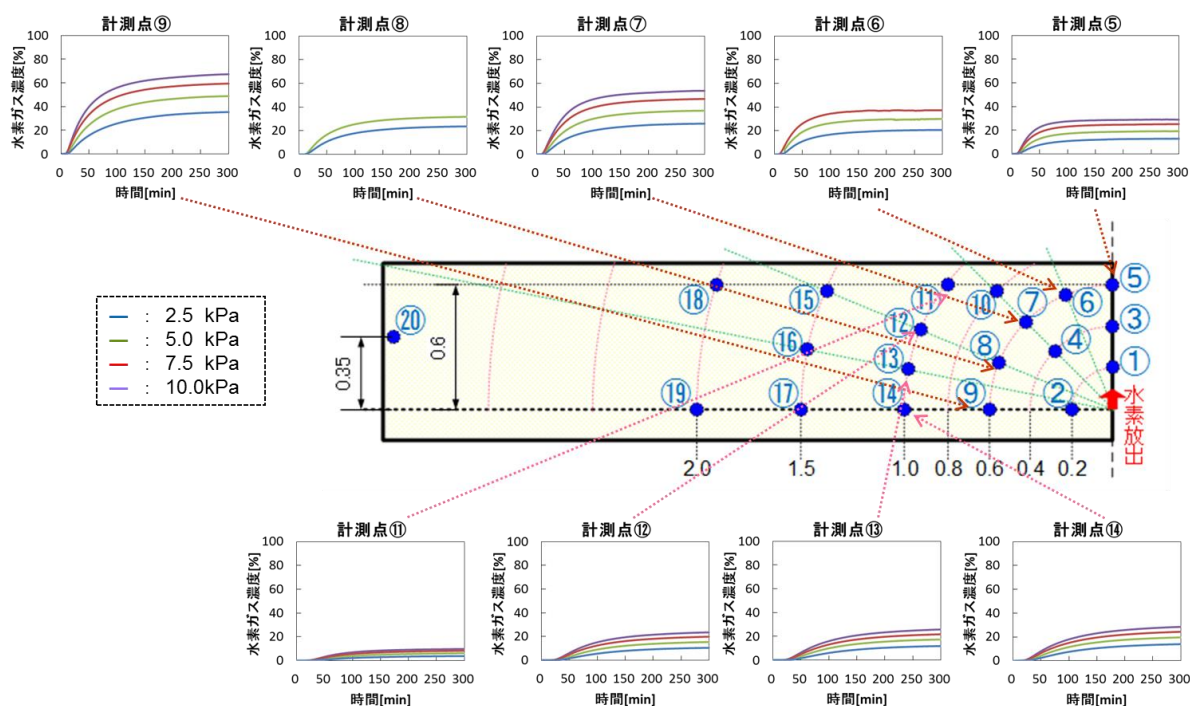


図 4-5-6 地中水素ガス濃度計測結果（計測点⑤～⑨、⑪～⑭）

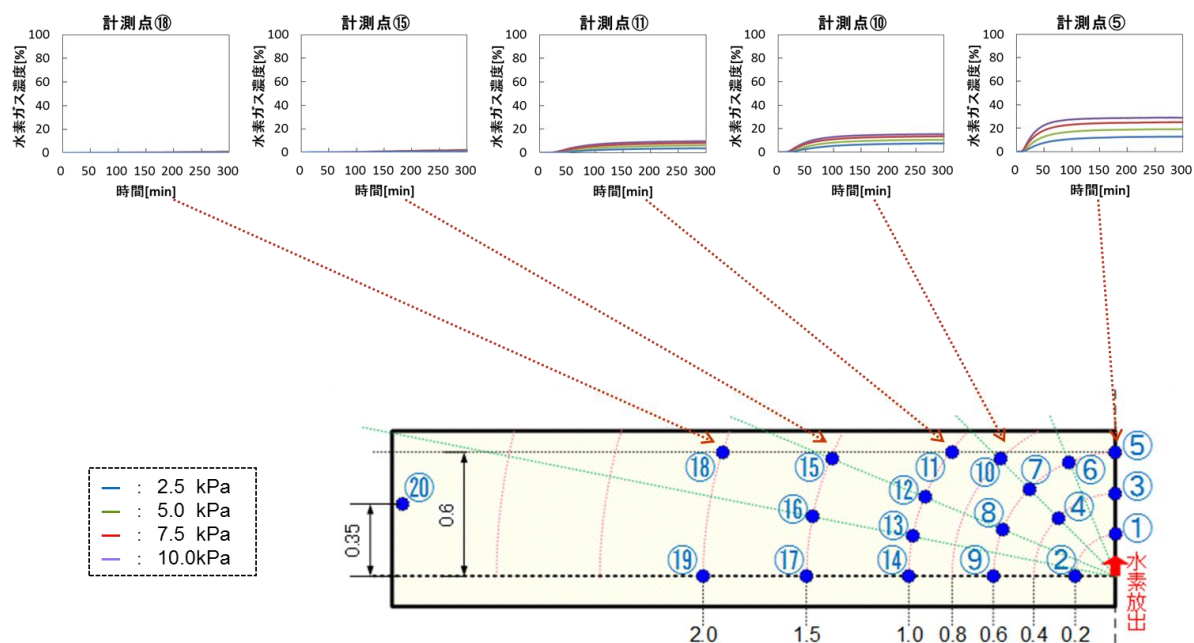


図 4-5-7 地中水素ガス濃度計計測結果（計測点⑤、⑩、⑪、⑮、⑱）

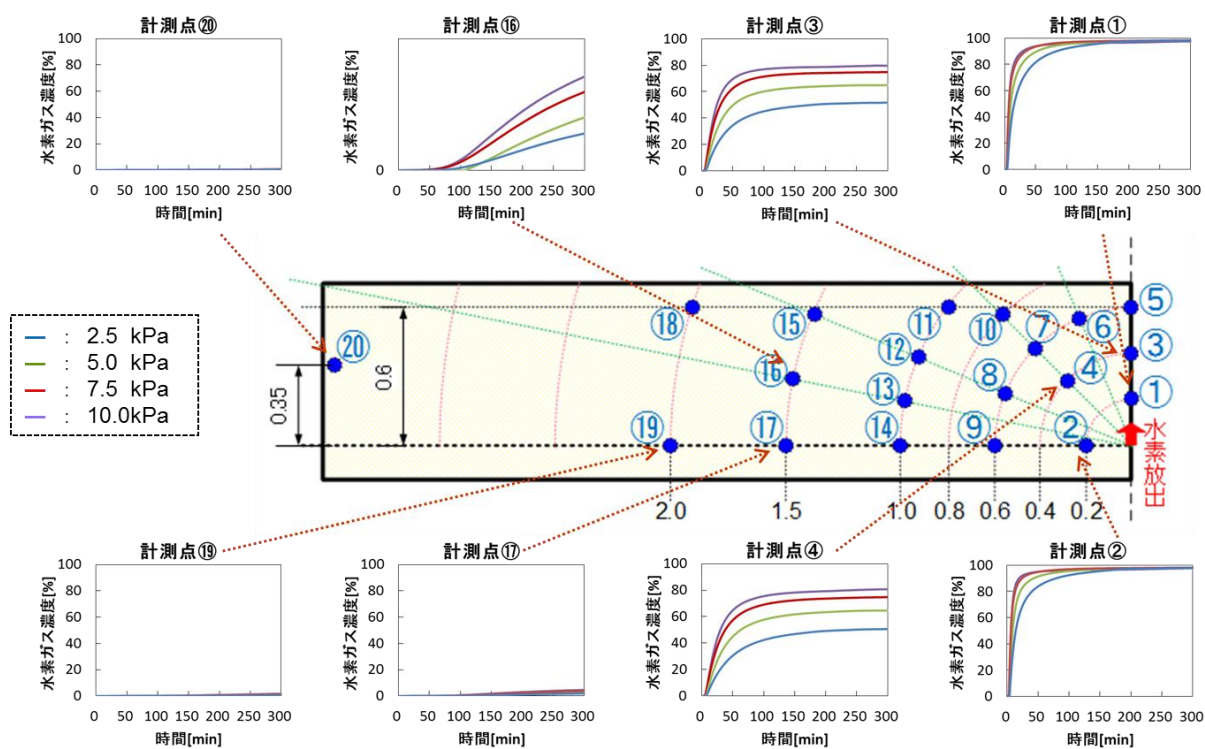


図 4-5-8 地中水素ガス濃度計計測結果（計測点①～④、⑮、⑰、⑲、⑳）

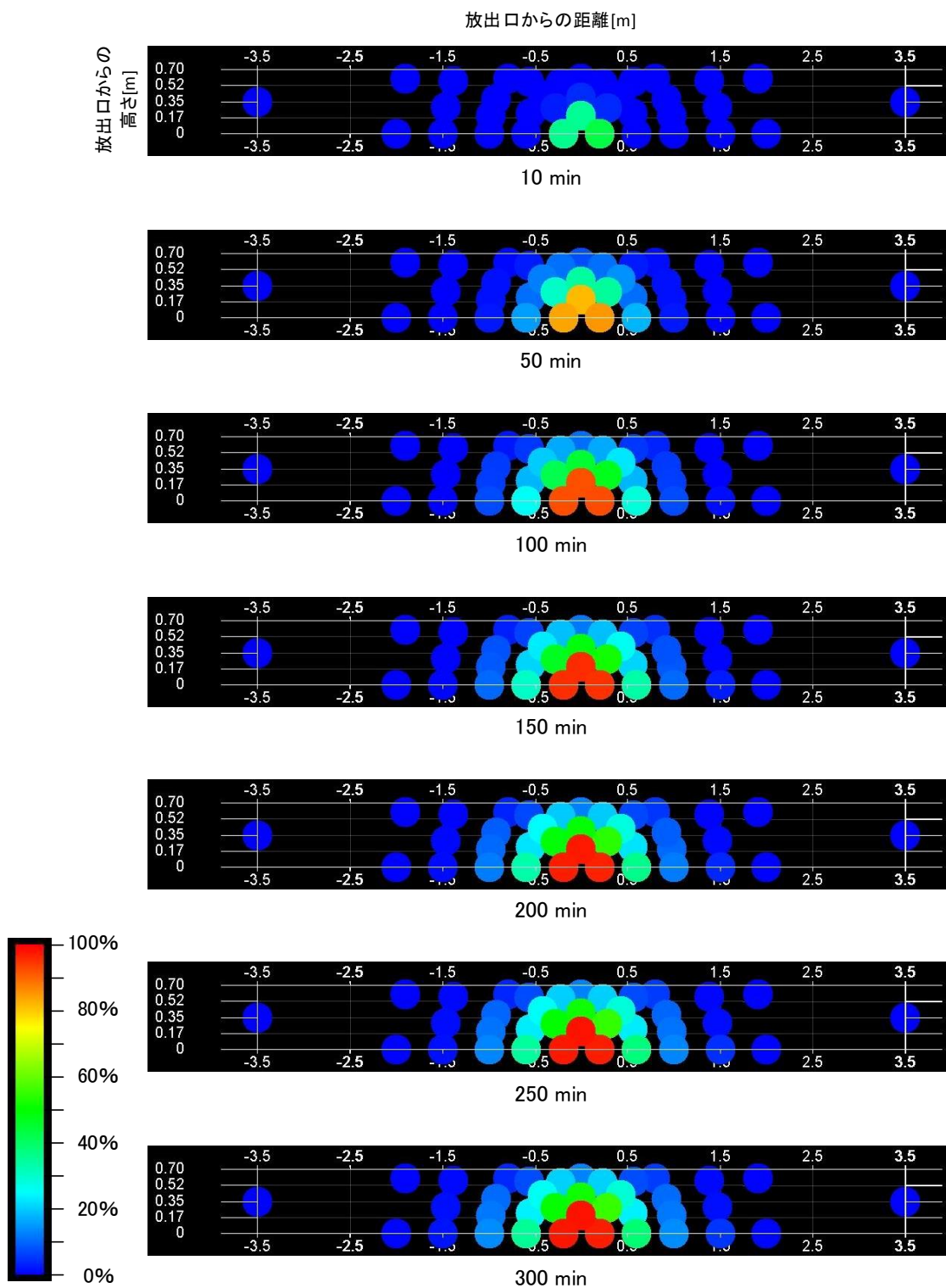


図 4-5-9 地中水素ガス濃度経時変化
(供給圧力 2.5kPa、ピンホールφ1.0mm)

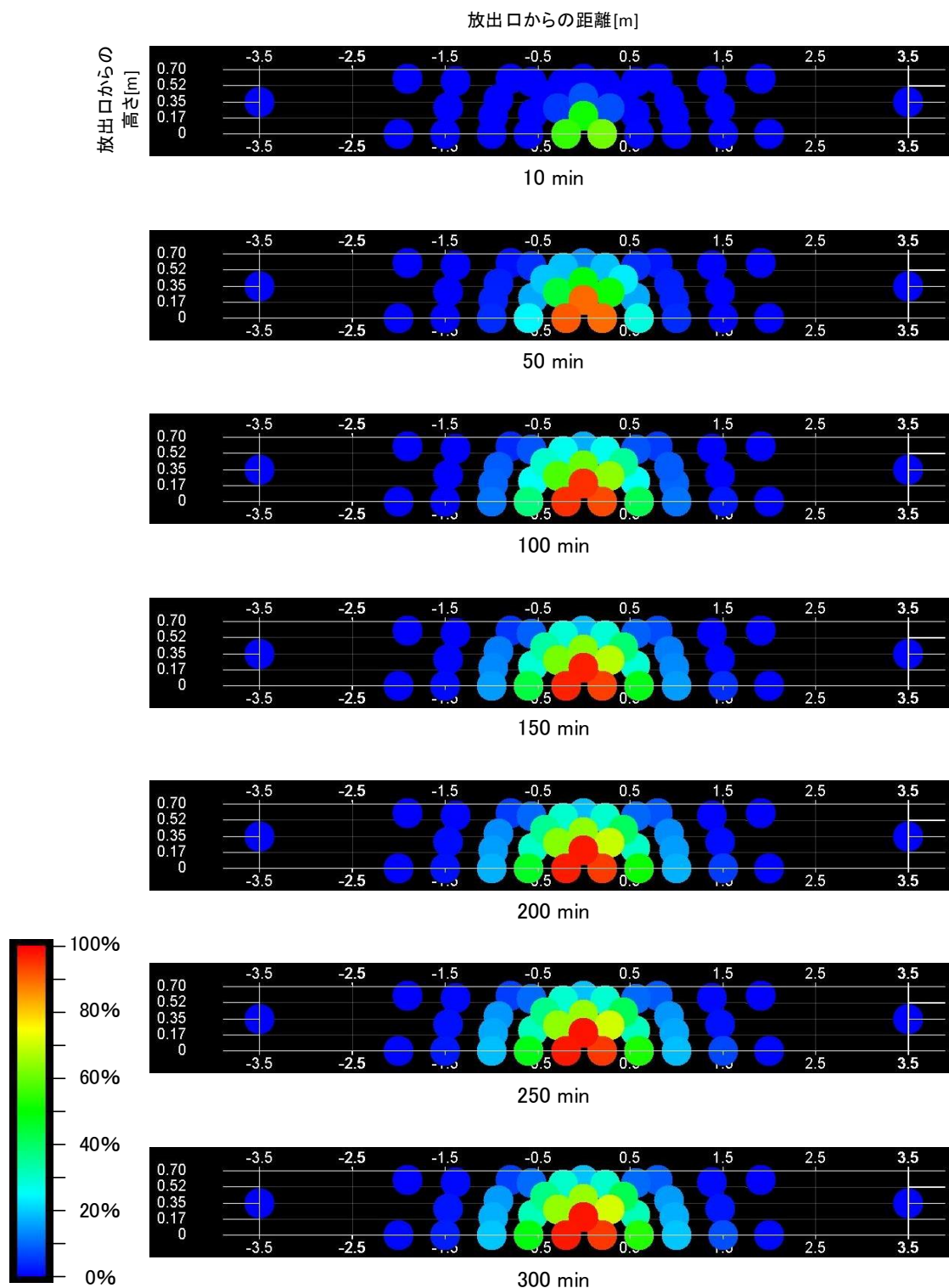


図 4-5-10 地中水素ガス濃度経時変化
(供給圧力 5.0kPa、ピンホールφ1.0mm)

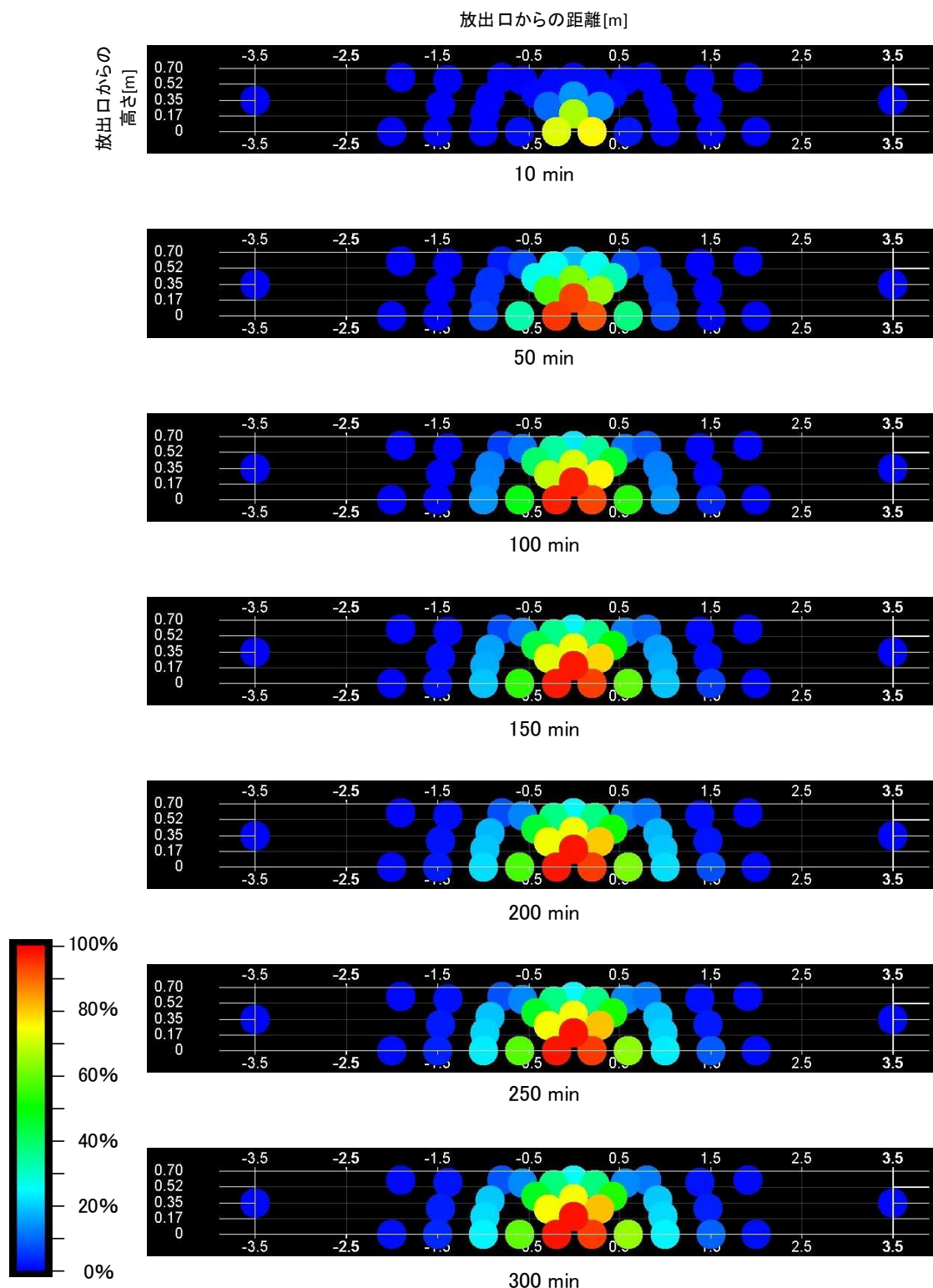


図 4-5-11 地中水素ガス濃度経時変化
(供給圧力 7.5kPa、ピンホールφ1.0mm)

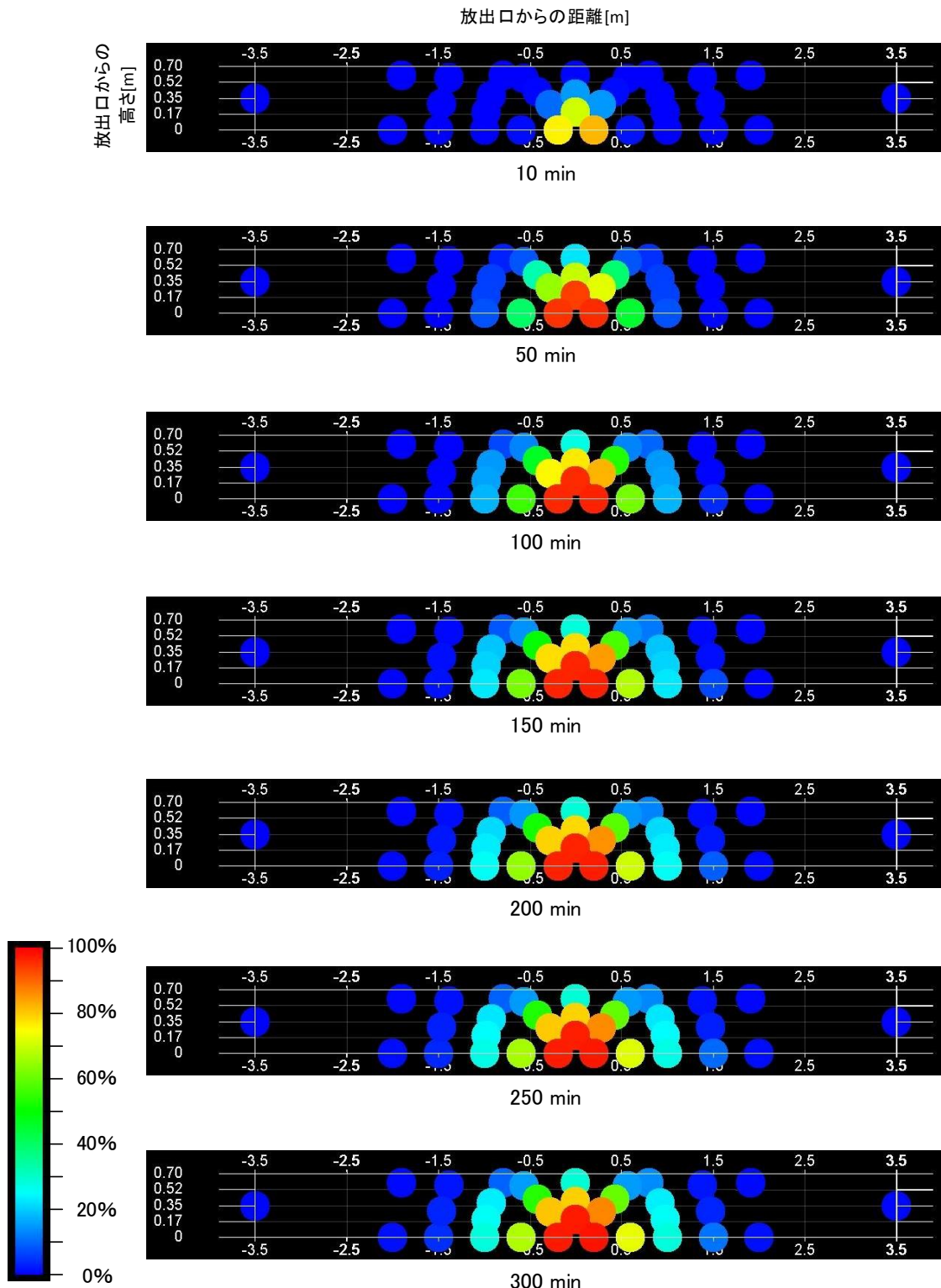


図 4-5-12 地中水素ガス濃度経時変化
(供給圧力 10.0kPa、ピンホールφ1.0mm)

図 4-5-6 は、放出口から 0.6m 及び 1.0m の同心円状に配置されたセンサの出力を比較したものである。いずれの計測点においても共通する経時変化の特徴として、濃度の立ち上がり直後は比較的急峻な濃度上昇となり、その後勾配が緩やかになり、概ねある一定値に収束する傾向にある点が挙げられる。また、供給圧力、即ち流量の増加に伴い、絶対値は増加するものの、経時変化の特徴はほぼ一致している。

濃度の空間的な分布に注目すると、いずれの同心円上においても、地表面付近を除き概ね類似する絶対値で推移していることから、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ことがわかる。詳細に見ると、最も深い位置に配置されている⑨及び⑭が先行している傾向にある。

地表面付近においては、大気側窒素ガスとの置換が活発になることから、比較的低濃度で収束するものと考えられる。また、地表面から深まるほど、その効果が弱まるため、深い位置において水素濃度の上昇がやや先行する。

全体として、いずれの計測点についても、水素ガス放出後 300min において周囲の窒素ガスとの置換がバランスし、濃度値が収束していることから、各計測点の到達濃度に注目する。

図 4-5-13、図 4-5-14 は、それぞれ放出口から 0.6m (⑤～⑨)、1.0m (⑪～⑭) の円周上に配置されたセンサの到達水素濃度と供給圧力の相関を示したものである。

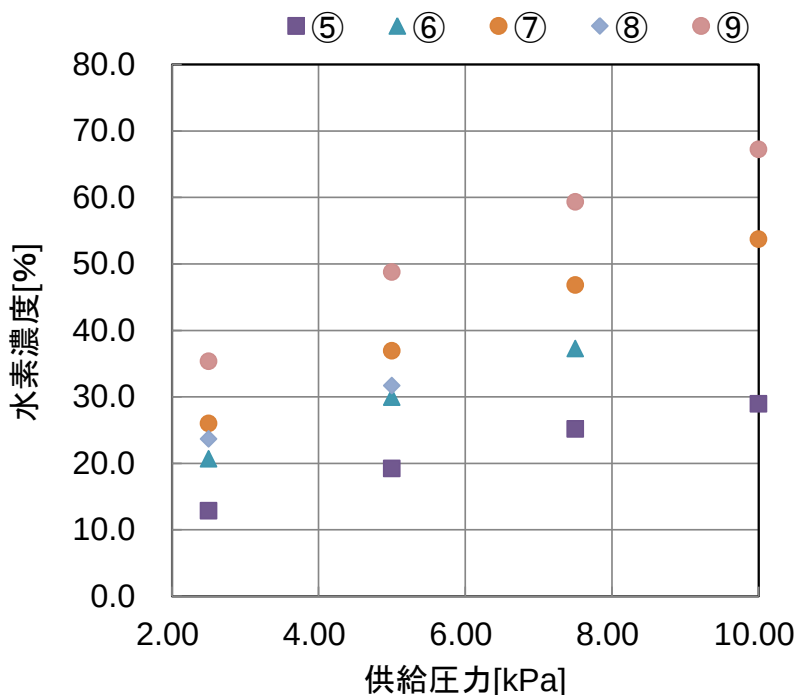


図 4-5-13 放出口から半径 0.6m の円周上に配置した各センサの到達水素濃度と供給圧の相関（データの欠損はセンサの故障による）

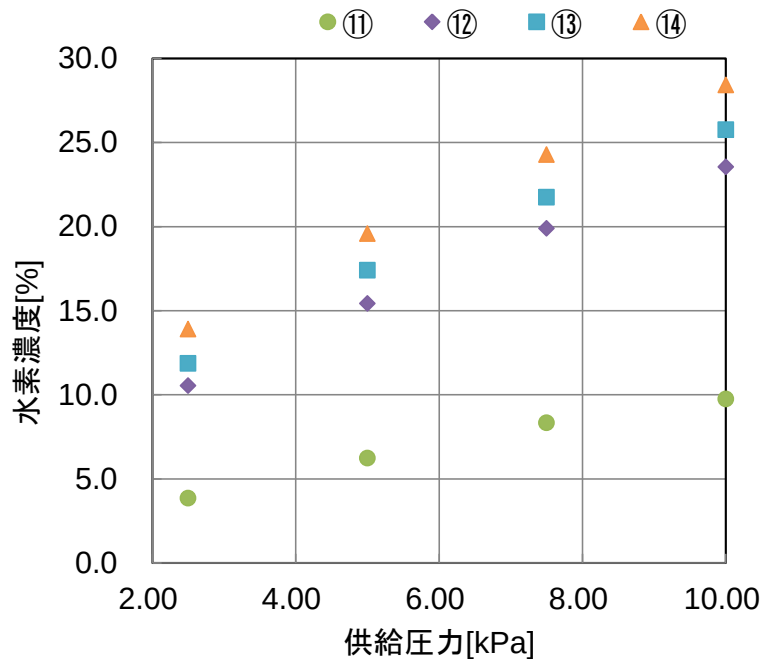


図 4-5-14 放出口から半径 1.0m の円周上に配置した各センサの到達水素濃度と供給圧の相関

図 4-5-13 についてみると、供給圧力と到達濃度は本調査の範囲では概ね線形の相関にある。地表面直近に配置された⑤の計測点のみ供給圧の上昇に伴い、勾配が緩やかに変化している。到達濃度は、最も深い位置にある⑨の観測点が最も高濃度となり、⑤を除く他の 3 点は、5～10%の差異で比較的近い値を取っている。

図 4-5-14 についてみると、上述と同様の特徴を示すが、地表面付近となる⑪の計測点を除く 3 点の到達濃度がより近付くことがわかる。即ち、放出口から離れるに従い、より同心円状の空間分布に近付く傾向にあることがわかる。

次に、地表面付近の観測点（⑤、⑩、⑪、⑮、⑱）と最深部の観測点（②、⑨、⑭、⑰、⑲）の到達濃度と供給圧力の相関を図 4-5-15 及び図 4-5-16 にそれぞれ示す。但し、地表面付近の計測点において、観測点⑩は観測点⑤、⑪、⑮に比して土壌表面から 3.4cm が、観測点⑮は観測点⑤、⑪、⑮に比して土壌表面から 2.6cm がセンサ埋設深さである。

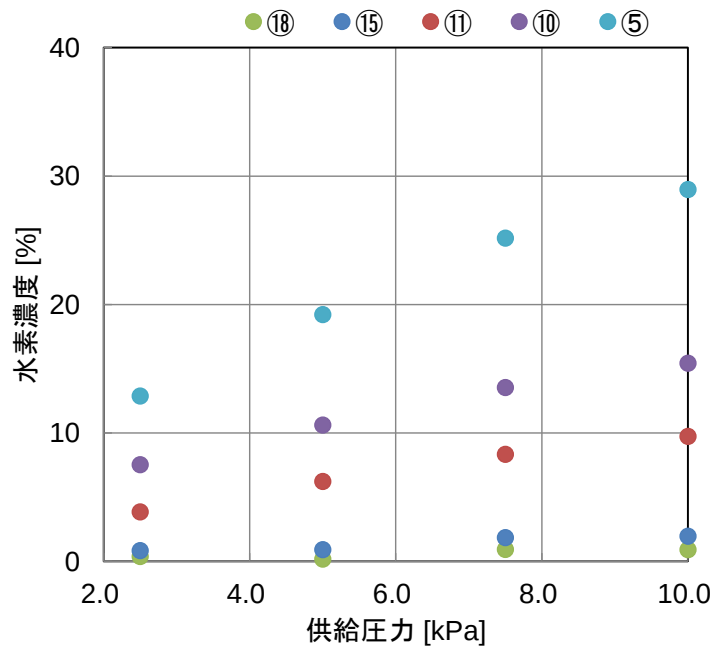


図 4-5-15 地表面付近の観測点（⑤、⑩、⑪、⑮、⑱）の到達水素濃度と供給圧の相関

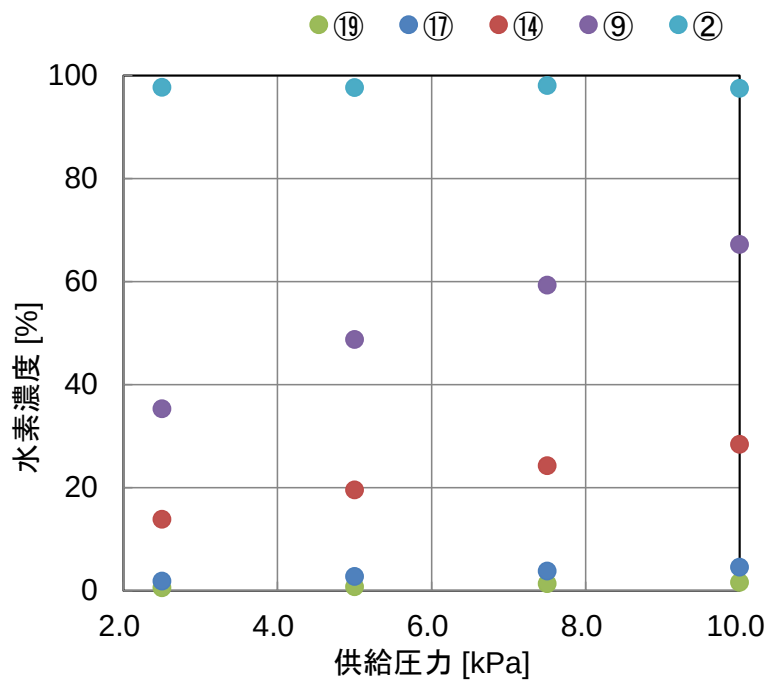


図 4-5-16 最深部の観測点（②、⑨、⑭、⑰、⑲）の到達水素濃度と供給圧の相関

図 4-5-15 についてみると、供給圧力との関係は前述のとおりであるが、到達濃度は、比較的低く、水素放出軸から離れた観測点⑮、⑱では、本実験の範囲では水素濃度 4%以下に留まっている。

図 4-5-16 についてみると、放出口直近の計測点②ではいずれの条件でもほぼ濃度 100% 近くまで上昇している一方で、放出口から離れた計測点⑰では約 4%、⑲では 2%以下に留まっている。これらの計測結果を基に、到達濃度の空間分布をそれぞれ図 4-5-17（地表面付近）及び図 4-5-18（最深部）に示す。

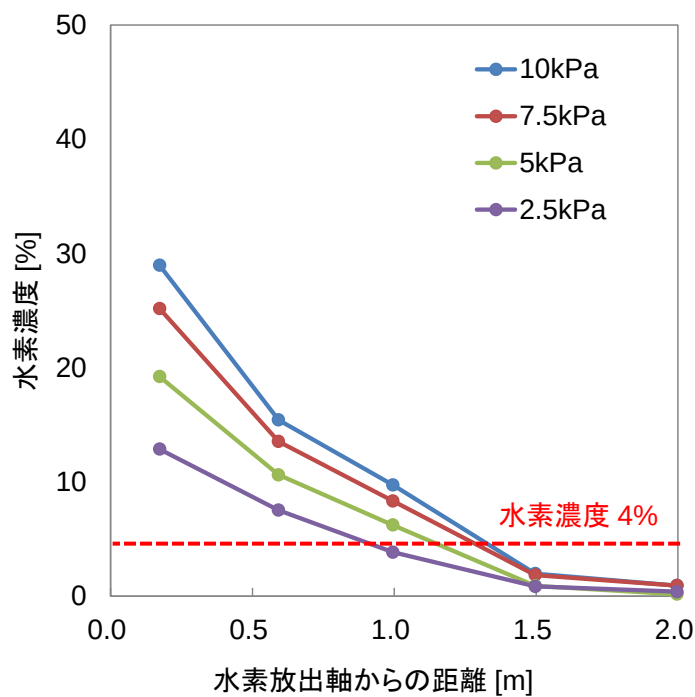


図 4-5-17 地表面付近の観測点（⑤、⑩、⑪、⑮、⑱）の到達水素濃度の空間分布

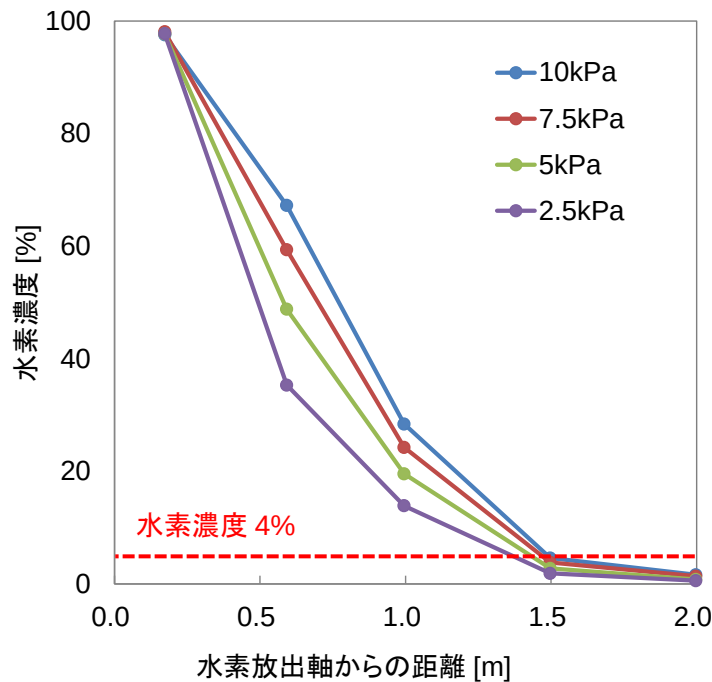


図 4-5-18 最深部の観測点（②、⑨、⑭、⑰、⑲）の到達水素濃度空間分布

図 4-5-17、図 4-5-18 によると、本実験条件の範囲において、水素濃度が爆発下限界濃度 4%以上に至る領域は、最深部において放出口から半径約 1.5m、地表面付近において半径約 1～1.5m の範囲でとなり、概ね平衡状態に至るものと考えられる。

4.5.4 まとめ

真砂土を転圧充填した地中模擬層に気体熱電動式ガスセンサを 27 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。

- ・ いずれの計測点においても共通する経時変化の特徴として、濃度の立ち上がり直後は比較的急峻な濃度上昇となり、その後勾配が緩やかになり、概ねある一定値に収束する傾向にある。
- ・ 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。詳細に見ると、最も深い位置の観測点が先行する傾向にある。
- ・ 地表面付近においては、大気側窒素ガスとの置換が活発になることから、比較的 low 濃度で収束する。また、地表面から離れるほど、その効果が弱まるため、深い位置において水素濃度の上昇がやや先行する。

- ・ 全体として、いずれの計測点についても、水素ガス放出後 300min において周囲の窒素ガスとバランスし、濃度値が収束する。
- ・ 供給圧力と到達濃度は本調査の範囲では概ね線形の相関にある。
- ・ 本実験条件の範囲において、水素濃度が爆発下限界濃度 4%以上に至る領域は、最深部において放出口から半径 1.5m、地表面付近において半径 1～1.5m の範囲でとなり、平衡状態に至る。

4.6 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、レーザラマンイメージングにより、地中を通過し地表面から大気中にし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。

4.6.1 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 355nm のレーザ光を大気中模擬層内に照射し、水素分子から生じるラマン散乱光（波長 416nm）を容器の外部から 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。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。ここでは、図 4-6-1 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、容器の断面の中心を通る土壌試料表面から 20mm の位置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 秒である。

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層を形成しているが、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 100mm)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。

したがって、本実験における大気側の観測は、地中において水素濃度の変化が収束する水素放出後 300min までの間を対象とし、その挙動を明らかにした。

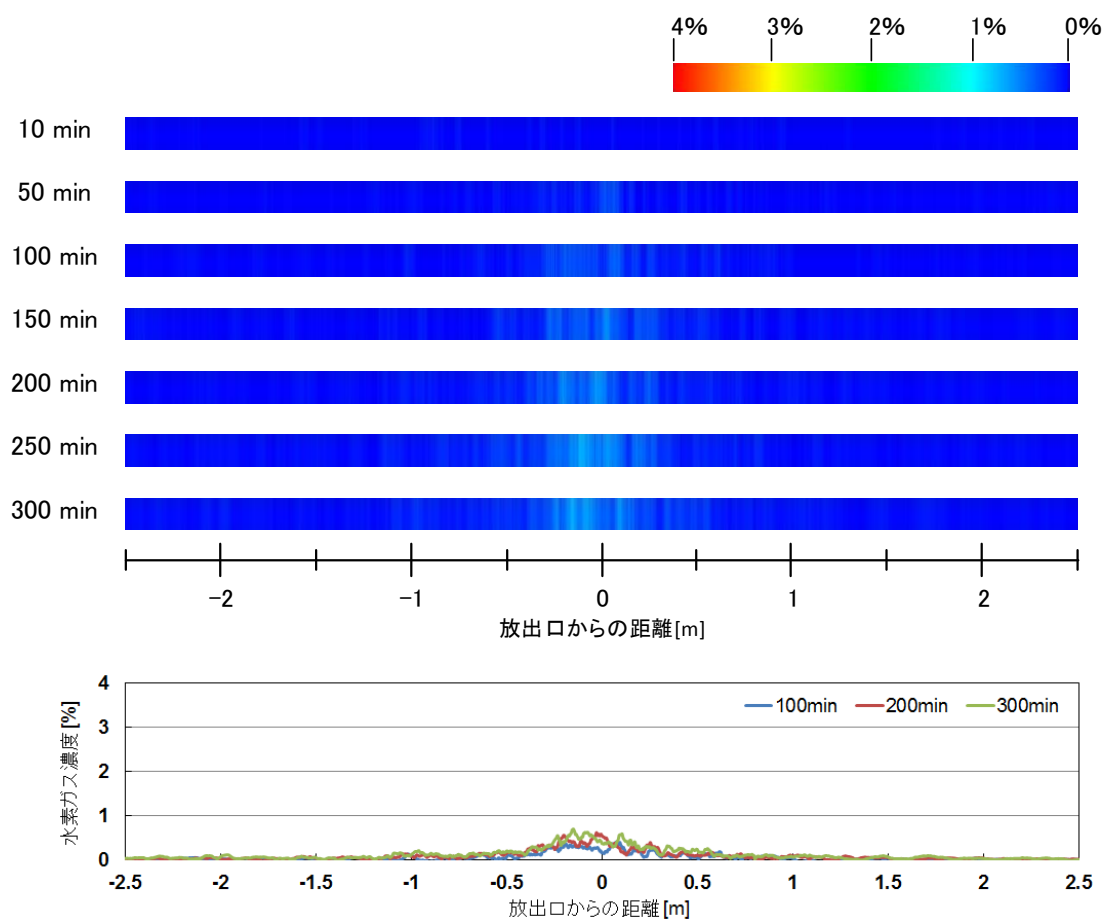


図 4-6-2 大気中水素分布の経時変化の可視化画像と空間濃度分布
(供給圧力 2.5kPa、ピンホールφ1.0mm)

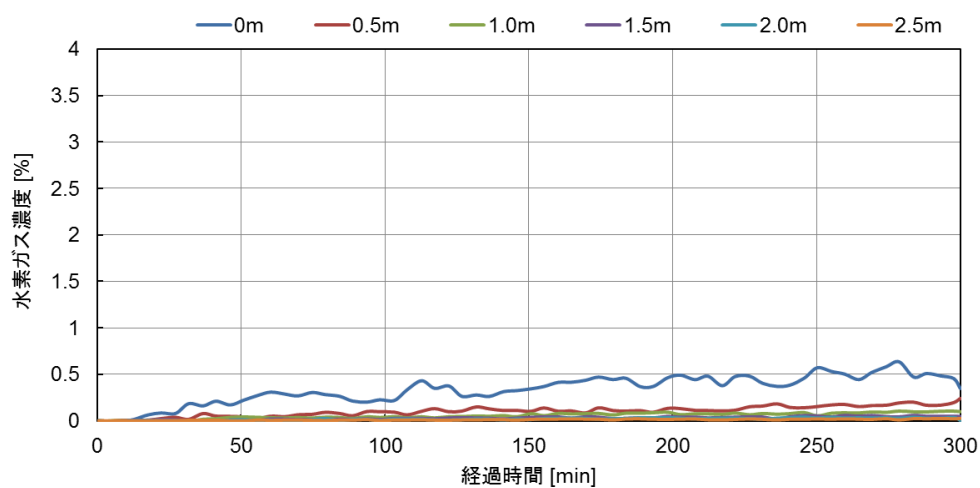


図 4-6-3 大気中水素分布の経時変化
(供給圧力 2.5kPa、ピンホールφ1.0mm)

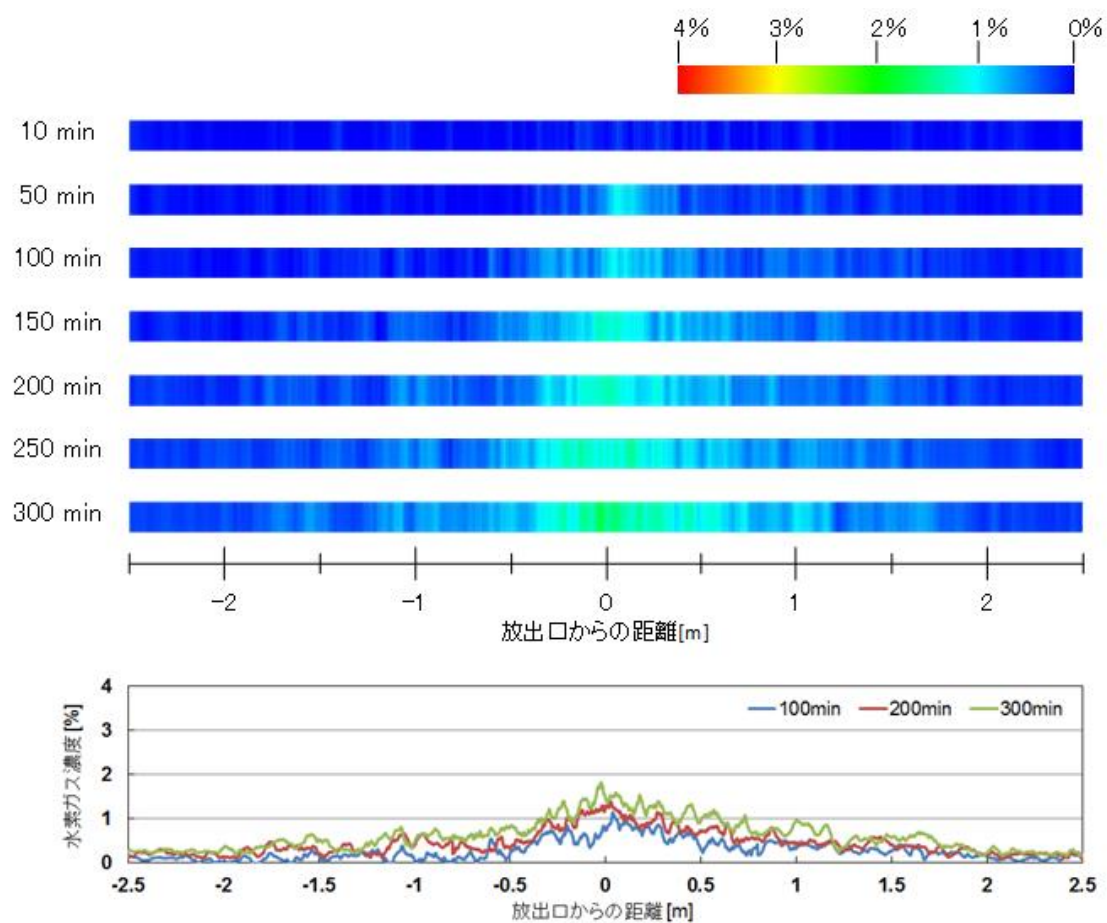


図 4-6-5 大気中水素分布の経時変化の可視化画像と空間濃度分布
(供給圧力 7.5kPa、ピンホール ϕ 1.0mm)

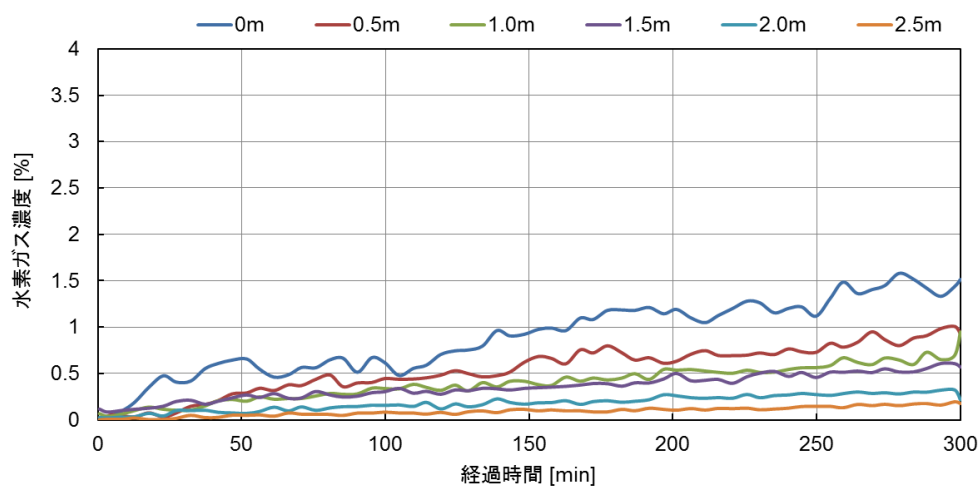


図 4-6-6 大気中水素分布の経時変化
(供給圧力 7.5kPa、ピンホール ϕ 1.0mm)

4.6.3 考察

前項に示した大気中水素ガス可視化・空間濃度分布計測結果を基に、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、放出口直上において最も高い濃度を示し、中心から離れるに従い、ガス濃度が低下する正規分布状の空間分布を示している。地中水素濃度計測における地表面近傍において、水素濃度は 10~30% 程度に至っていたのに対し、地表面上 20mm 付近では放出口直上において 1~2% 程度の低濃度で推移する。本実験における観測時間 (300min) の範囲内では、供給圧力 2.5kPa の条件で到達濃度は約 0.8%, 7.5kPa の条件で約 1.5% となっており、いずれも爆発下限濃度に至っていない。

経時変化について見ると、放出口直上である観測点⑧では、初期に比較的急峻に濃度上昇が進み、その後緩やかな変化へと推移する傾向にある。他の観測点についても、濃度の絶対値は低いものの同様の傾向を示した。

本実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いる。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、本実験で観測された 1~2% 濃度レベルの水素が滞留することは考えられない。

4.6.4 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、土壌試料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。
- ・ 地放出口直上において最も高い濃度を示し、中心から離れるに従い、ガス濃度が低下する正規分布状の空間分布を示している。
- ・ 本実験条件の範囲では、地表面付近では放出口直上において 1~2% 程度の低濃度で推移し、爆発下限濃度には至らない。
- ・ 経時変化について見ると、初期に比較的急峻に濃度上昇が進み、その後緩やかな変化へと推移する傾向にある。
- ・ 大気中における水素濃度の上昇は、地中における水素濃度の上昇が平衡状態に至った後に、ある値に収束するものと考えられる。
- ・ 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、本調査における漏えい量のレベルにおいて、地表面付近で 1~2% 濃度レベルの水素が滞留することは考えられない。

4.7 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。

4.7.1 実験方法

前述のフィールド実験装置を用いて、図 4-7-1 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。

図 4-7-1 に示すとおり、供給圧力 10kPa の条件下において 300min のフィールド実験を終えた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ジを開始し、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。窒素パージ量は 40L/min に設定した。

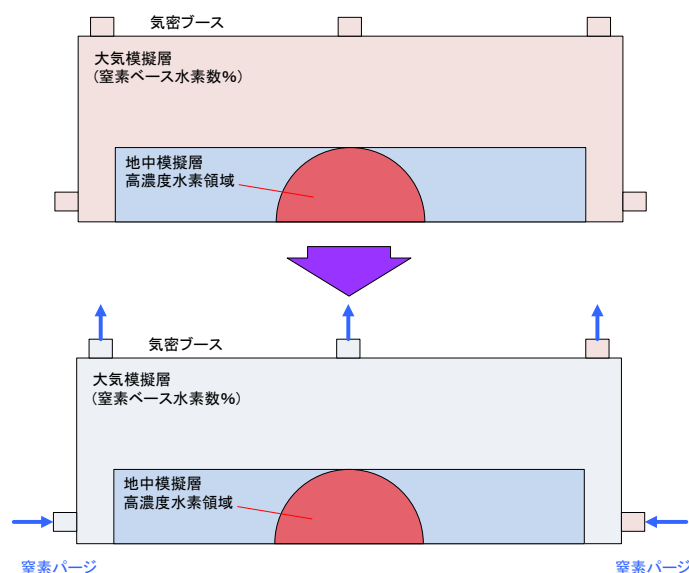


図 4-7-1 漏えい停止後の地中における水素濃度分布の計測方法

4.7.2 実験結果

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 4-7-2 に放出口から距離 0.6m 及び 1.0m の各計測点の結果を、図 4-7-3 に地表面付近の各計測点の結果をそれぞれ示す。また、図 4-7-4 及び図 4-7-5 にカラードット表示による水素濃度分布の可視化画像を示す。

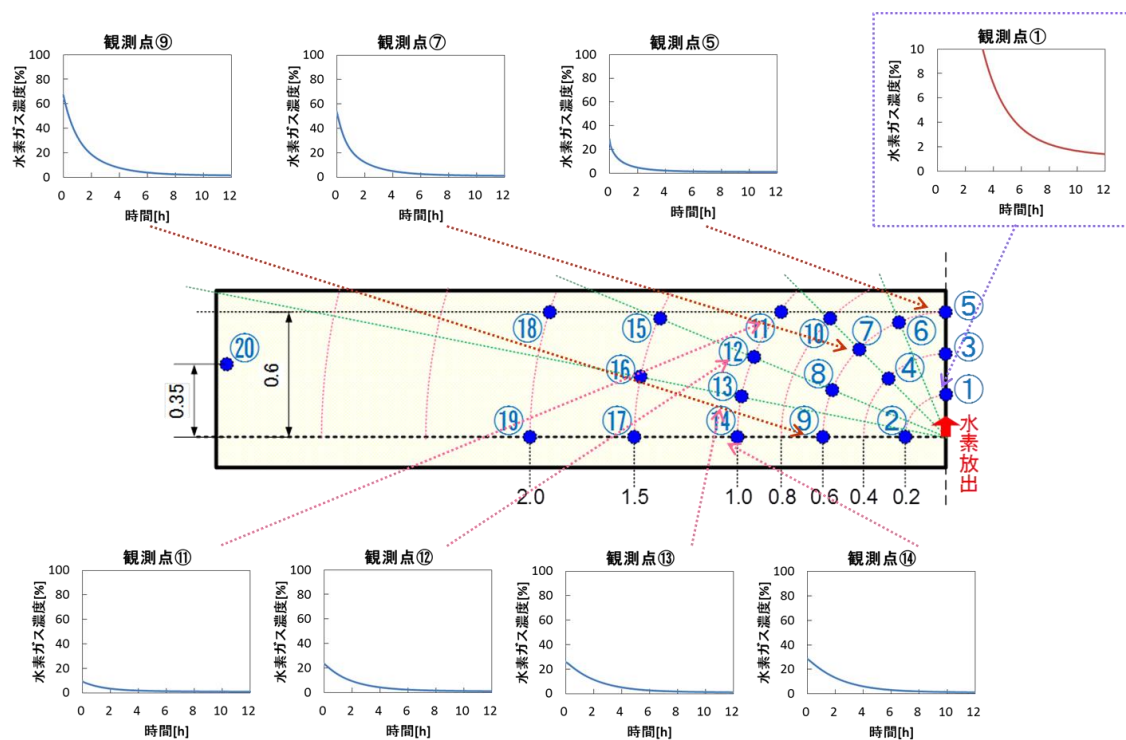


図 4-7-2 漏えい停止後の地中における水素濃度分布
(放出口から距離 0.6m 及び 1.0m の観測点における水素濃度の経時変化)

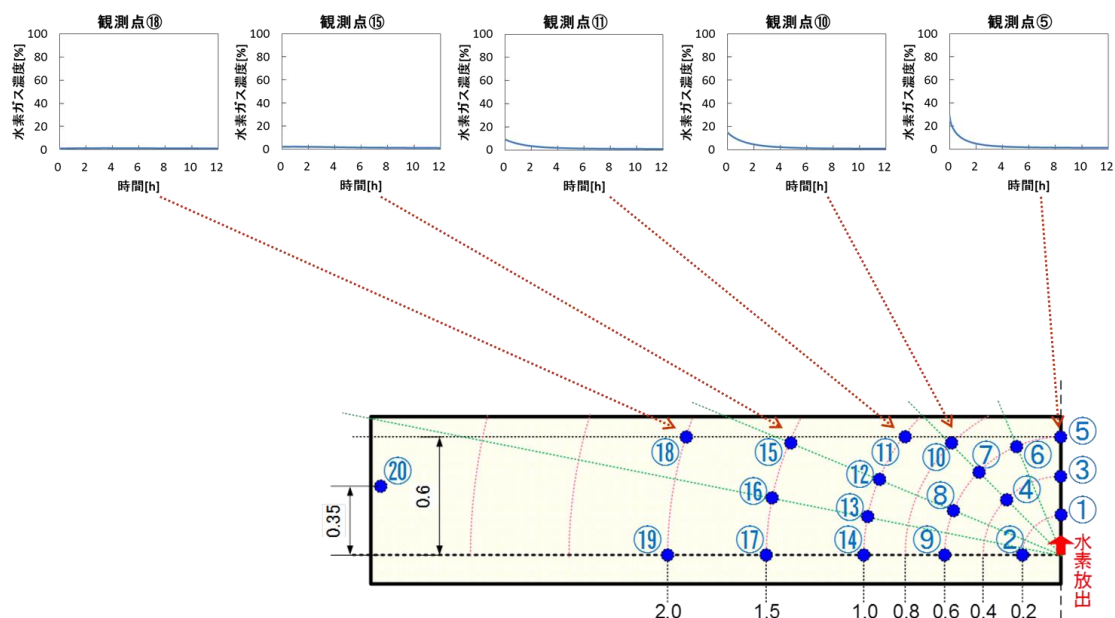


図 4-7-3 漏えい停止後の地中における水素濃度分布
(地表面付近の計測点における水素濃度の経時変化)

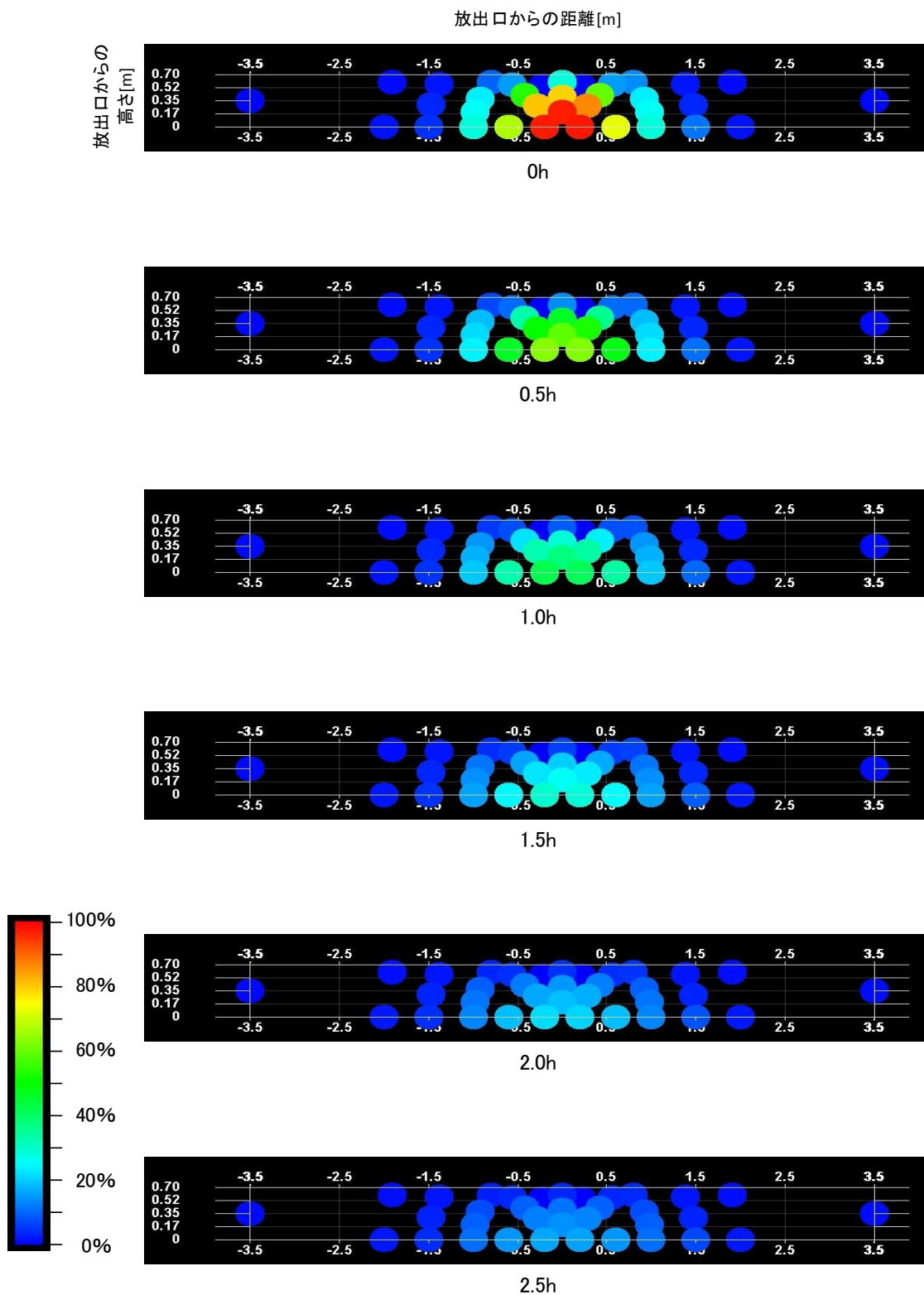


図 4-7-4 漏えい停止後の地中における水素濃度分布の可視化画像
(漏えい停止直後～2.5h 後)

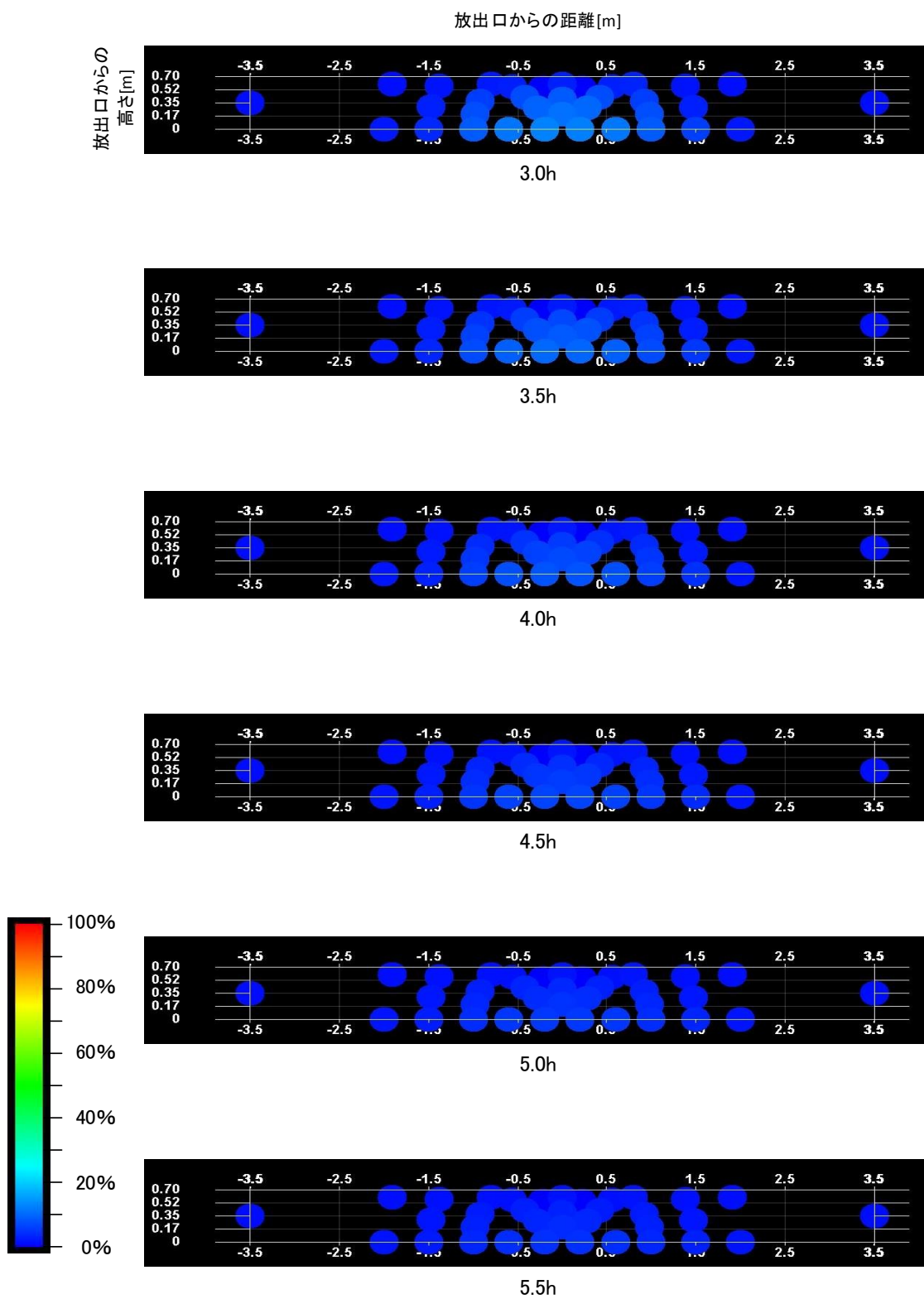


図 4-7-5 漏えい停止後の地中における水素濃度分布の可視化画像
(漏えい停止後 3.0～5.5h 後)

4.7.3 考察

図 4-7-2、図 4-7-3 によれば、水素漏えい停止直後から、全ての計測点において水素濃度の低下が開始している。詳細には、漏えい停止後約 10 分で、全ての計測点の水素濃度が低下し始める。水素濃度の減少は、到達濃度が高い程、また、地表面に近いほど急峻に進み、漏えい停止後約 5 時間が経過すると、全ての計測点における水素濃度が 4%を下回ることがわかる。

4.7.4 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、水素の消散挙動として以下の結果を得た。

- ・ 漏えい停止後約 10 分で、全ての計測点の水素濃度が低下し始める。
- ・ 水素濃度の減少は、到達濃度が高い程、また、地表面に近いほど急峻に進行する。
- ・ 漏えい停止後約 5 時間が経過すると、全ての計測点における水素濃度が 4%を下回る。

5. 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、前章に示した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、地中模擬層内及び大気中模擬層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。

5.1 概要

本解析には ANSYS 社の汎用流体解析コード FLUENT^[4]を用いた。シミュレーションの基礎方程式を以下に示す。土壌試料の影響は、主に運動方程式中に抵抗力として導入され、充填層内を流れる混合ガスの浸透性を表す透気係数 K は、層流から乱流にわたって適用範囲の広い Ergun の提案式^[4]を用いた。

(1) 質量保存則

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g) = Q_g \quad (5.1.1)$$

(2) 運動方程式

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\rho_g}{\varepsilon} u_g u_g \right) = -\varepsilon \nabla p_g + \nabla \cdot (\mu_g \nabla u_g) - \left(\frac{\varepsilon \mu_g}{K} u_g \right) + \varepsilon g \quad (5.1.2)$$

(3) ガス種 i の輸送方程式

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g Y_i) + \nabla \cdot (\rho_g u_g Y_i) = \nabla \cdot (\varepsilon D_{i,m} \nabla Y_i) + Q_i \quad (5.1.3)$$

ここに

ε : 空隙率

ρ_g : 密度 [kg/m^3]

u_g : 流速 [m/s]

p_g : 圧力 [Pa]

μ_g : 粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

Q_g, Q_i : 漏洩量 [$\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$]

K : 透気係数 [m^2] $\left(= \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \right)$ ^[5]

d_p : 粒径 [m]

g : 重力加速度 [m/s^2]

Y_i : ガス種 i の質量分率

$D_{i,m}$: 有効拡散係数 [m^2/s] ($= \frac{2\varepsilon}{3-\varepsilon} D_i$) [6]

D_i : 分子拡散係数 [m^2/s] [7]

土壌中の透気係数及び有効拡散係数は、数値モデル[8],[9]も幾つか散見されるが、土壌構造（単粒や団粒）や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、実験において得られたデータを反映し、シミュレーションを行う。

5.2 解析モデル

解析モデルを図 5-2-1 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 7 m、高さ 0.85 m の円筒形であり、土壌槽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 2.5 mm 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。実験において土壌槽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 10 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。

本解析における解析モデルの全体メッシュ図は図 5-2-2 に示すとおりであり、試験では、土壌内を貫通する配管上部に施工されたピンホール漏えい口（ $\phi 1\text{mm}$ ）から水素ガスが土壌槽内に噴出されている。ピンホール漏えい部では、噴出速度が非常に大きく、圧力変動が大きい圧縮性流体の挙動を示すと考えられるが、本計算対象となる土壌槽内は、非常に緩慢なガスの拡散的な流れに支配されていることから漏えい点近傍の急激な圧力変動を解像するメッシュサイズを計算体系全体に適用することは計算コストの観点でも実用的ではないことから、質量流量を保存するかたちで漏えい口近傍の計算メッシュに質量ソース（場合によって運動量も加味）を分布させる計算手法を用いた。この手法は、土壌内の拡散現象に限らず、高圧の圧縮水素タンクから大気中へのピンホール漏えい拡散による安全解析等においても適用事例がみられる。

本解析では、計算体系が大型容積で試験時間も長いことから、計算空間の対称性と計算コストを考慮して、1/4 分割の部分モデルを抽出した。その際、配管表面に沿って選択拡散される懸念もあるため貫通する配管もモデル化した。

また、実験との比較のため計測点を図 5-2-3、図 5-2-4 に示すように土壌槽内、上部空間合せて計 33 点設定した。なお、実験においては、各計測点は、同一平面上に存在するが、前述したとおり、本解析における解析モデルは 1/4 モデルとしており、土壌中の測定点のうち、測定点 1～20 を鋼管と同一平面、測定点 21～27 を鋼管と垂直に交わる平面に設定した。また、空間中の測定点 28～33 は鋼管と同一の平面上に設定している。

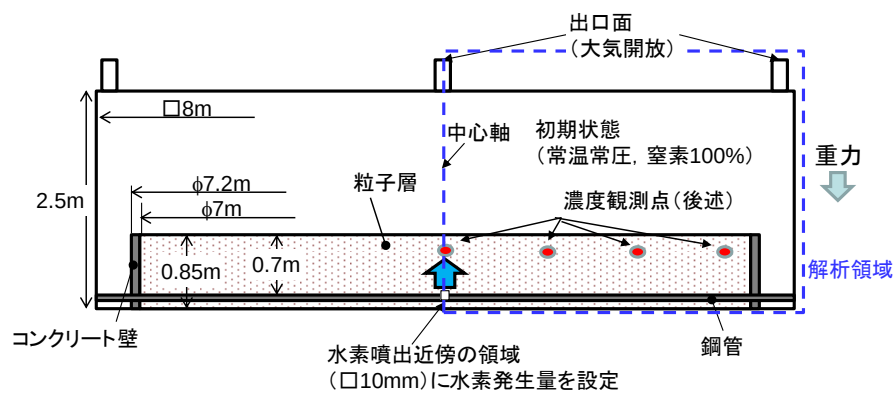


図 5-2-1 CFD シミュレーションの解析モデル

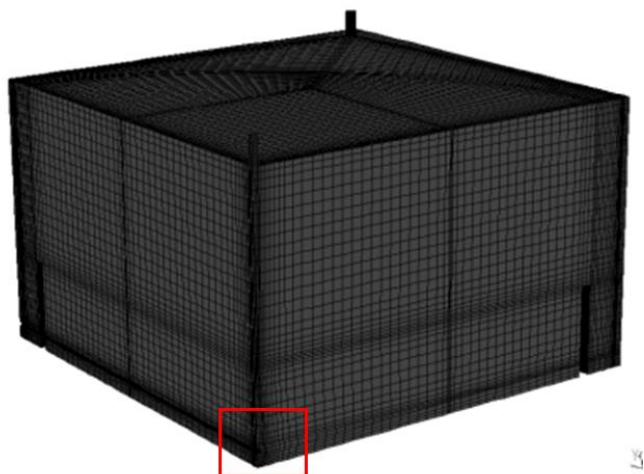


図 5-2-2 フィールド試験解析モデル（ベースモデル）全体メッシュ図

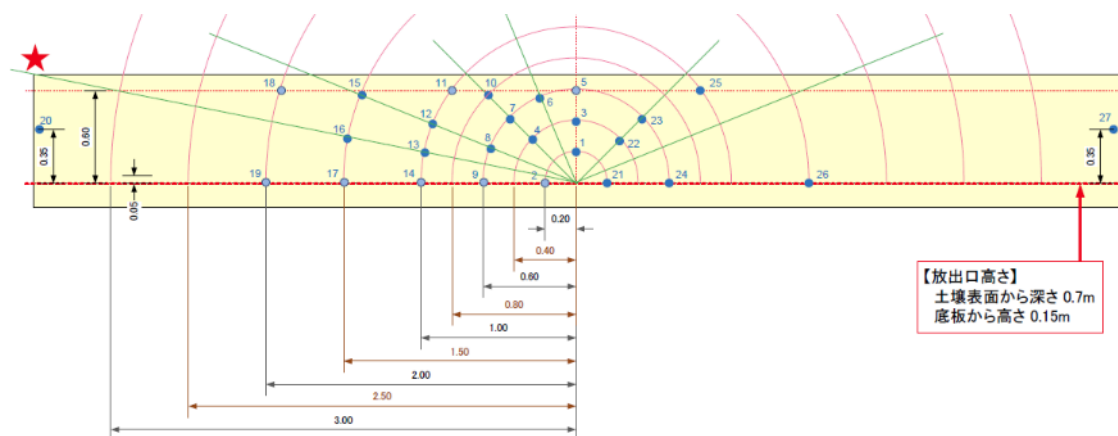


図 5-2-3 フィールド試験解析モデル土壌中の計測点

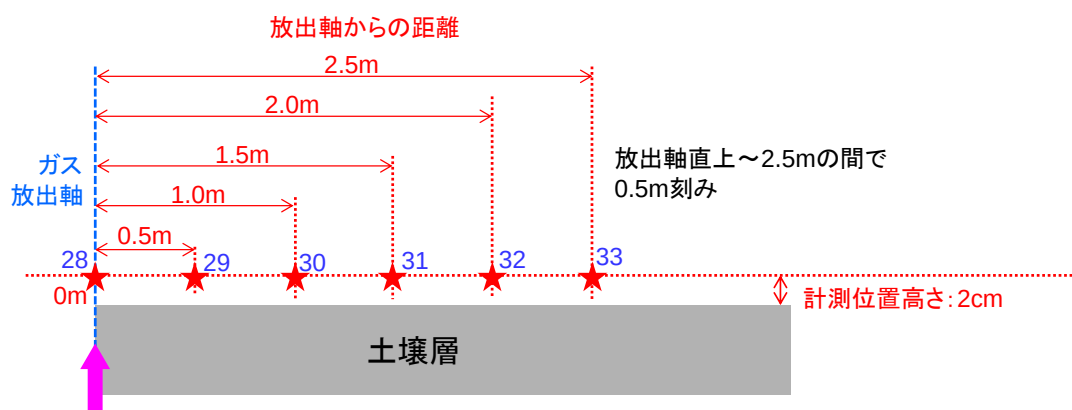


図 5-2-4 フィールド試験解析モデル上部空間の計測点

5.3 土壌試料の透気係数計測

本節では、土壌試料の透気係数の計測について述べる。計測装置及び透気係数の算出方法については、平成 18・19 年度「地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査水素漏えい検知技術調査（水素漏えい検知評価試験等）」（JFE テクノリサーチ株式会社）^{[10][11]}を参考に実施した。

5.3.1 透気係数計測装置の製作

透気係数計測装置の構成を図 5-3-1 に、外観を図 5-3-2 に示す。土壌試料を充填する容器には、ステンレス製の円筒管（SUS304、呼び径 50A、内径 $\phi 52.5\text{mm}$ ）を使用し、Oリングとネジによって圧着し気密した。また、図 5-3-3 に透気係数計測に用いた土壌サンプルの例を示す。

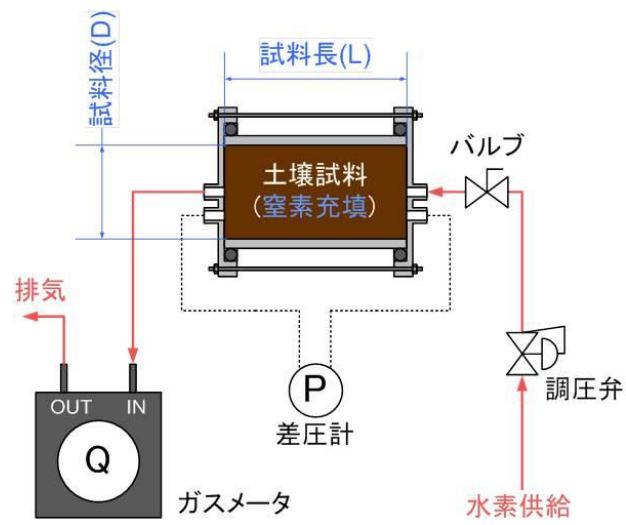


図 5-3-1 透気係数計測装置の構成

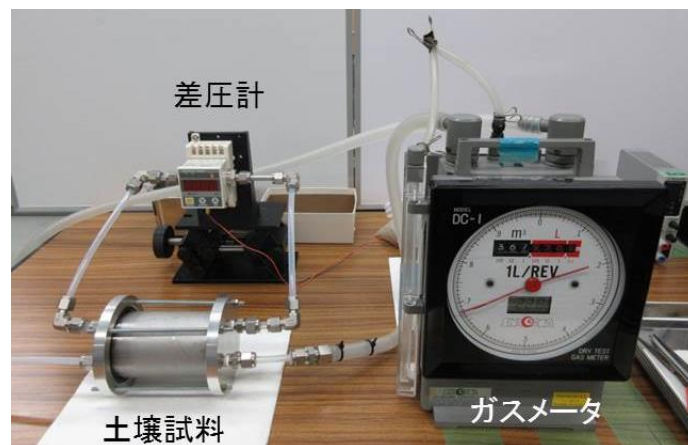


図 5-3-2 透気係数計測装置の外観

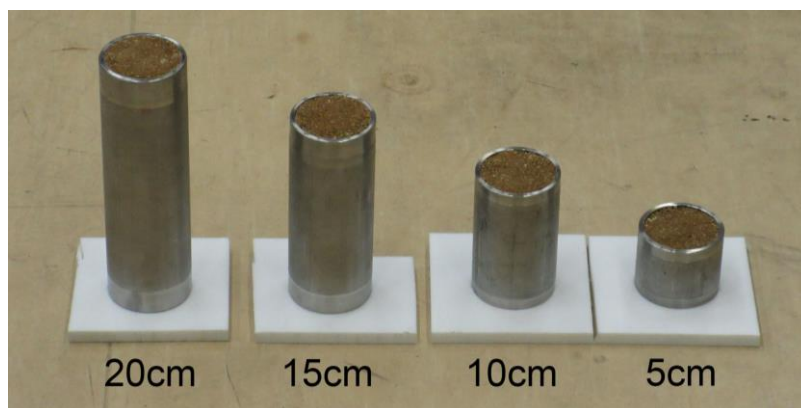


図 5-3-3 土壌サンプル例

5.3.2 透気係数計測方法

(1) 土壌試料の採取および計測容器への充填

本試験容器内の土壌試料は、次の手順で採取し計測容器へ充填した。

- ①採土器を使用して計測点の土壌試料を採取し、密度を求める。
- ②計測点の土壌サンプルを採取し、含水比の変化を防ぐため、ジップロックに入れて保存
- ③ ①で求めた密度に合わせて、②で採取したサンプルを転圧しながら計測容器に詰める。

(2) 計測手順

- ① 窒素ページ
- ② 水素供給弁（水素ガス背圧 0.03MPa）を開き、上流側と下流側の差圧が目標値となるよう開度を調整
- ③ 差圧及び流量が一定になったことを確認し、計測開始
 - ・開始時の差圧、ガスメータの値を記録
 - ・終了時の差圧、ガスメータの値を記録
 - ・開始から終了までに要した時間をストップウォッチにより計測し記録
- ④ 各差圧目標値につき、手順②～③を実施
 - ※ 5 点程度目標値を設定し、平均して透気係数を算出した。
- ⑤ 実験終了後、窒素ページ

(3) 透気係数の算出

透気係数は式(5.3.1)により算出する。

$$k = - \frac{Q \cdot \mu}{A \cdot \frac{dp}{dx}} \quad (5.3.1)$$

k : 透気係数 [cm²]

Q : 流量 [cm³/s]

μ : 粘性係数 [Pa・s]

A : 試料断面積 [cm²]

dp/dx : 圧力勾配 = 差圧[Pa] / 試料長さ[cm]

5.3.3 透気係数計測結果

実際に透気係数の計測を行うと、試料の長さによって計測結果に違いが生じることが分かった。そこで、適切な計測容器の長さを決定するため、ガラスビーズ（UB-2022LN、φ1200μm）を試料として透気係数の計測を行い、容器長の変化による計測への影響を調べた。その結果を図 5-3-4 に示す。

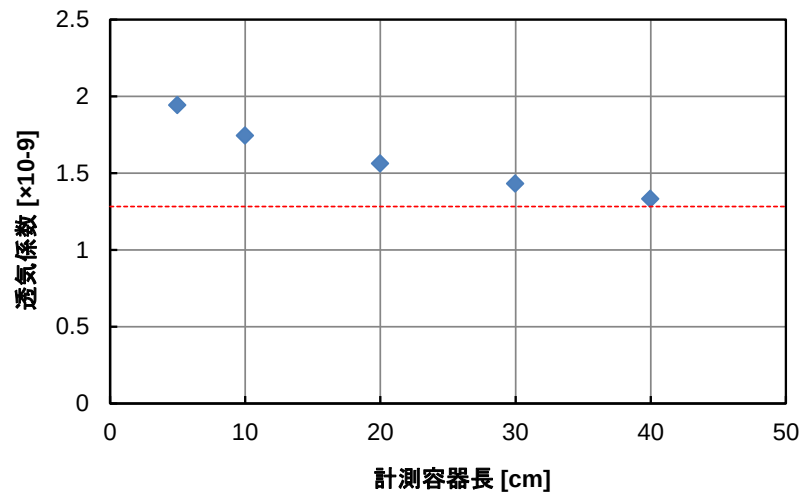


図 5-3-4 透気係数の試料長依存性（ガラスビーズ）

図中の赤い破線は計算によって求めたガラスビーズの透気係数 $1.282 \times 10^{-9} \text{m}^2$ であり（参考文献[5]による）、容器長が長くなるにつれて計算値に近づく傾向が見られた。これは、容器長が短い場合には、ガスが容器内の中心付近のみを透過するため、試料断面積の値が正しく反映されないことに起因すると考えられる。

次に、本試験で使用する真砂土を使用して同様の試験を実施した。その結果を図 5-3-5 に示す。

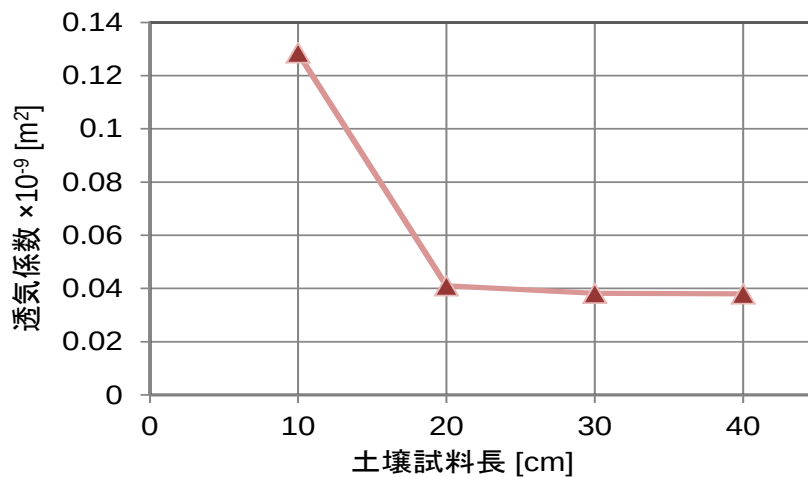


図 5-3-5 透気係数の試料長依存性（真砂土）

真砂土の場合には、ガラスビーズの場合と比較して、より急峻に計測値が収束する傾向が見られた。よって、ここでは、長さ 30cm の容器を用いて透気係数の計測を行うこととした。

5.4 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」農環研報、15、pp1-66(1998)^[12]他^{[13],[14],[15]}を参考に実施した。

5.4.1 拡散係数計測装置の製作

拡散係数計測装置の構成を図 5-4-1 に、外観を図 5-4-2 に示す。また、図 5-4-3 に拡散係数計測に用いた土壌サンプルの例を示す。

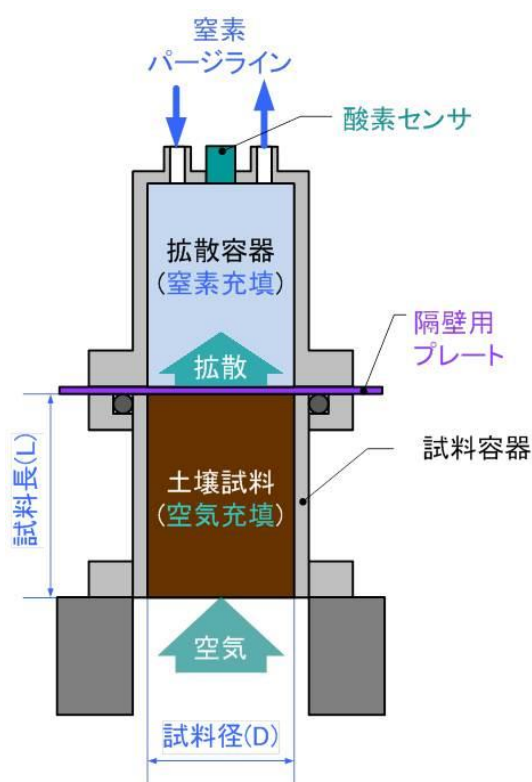


図 5-4-1 拡散係数計測装置の構成

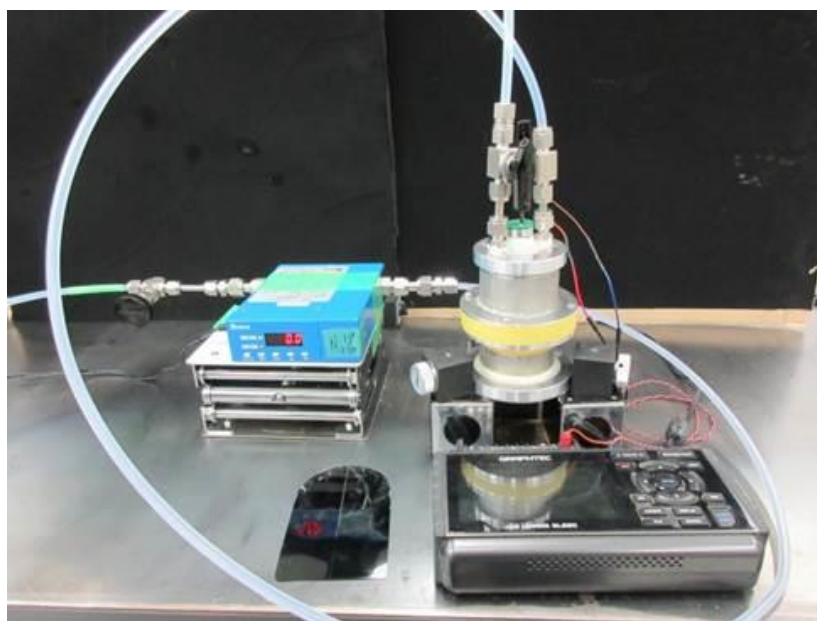


図 5-4-2 拡散係数計測装置の外観



図 5-4-3 土壌サンプル例 (φ5.25cm×15cm)

装置は窒素を充填した拡散容器から試料容器に窒素を拡散させ、拡散容器内の酸素濃度を測定する構造となっている。ステンレス製の試料容器部、拡散容器部、およびそれぞれの容器を遮断している隔壁用プレートからなり、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連続させる。試料容器は円筒形（SUS304、呼び径 50A、内径φ5.25cm）であり、底部には土壌試料の落下防止のメッシュを敷設し、リング状のステンレス金具によって固定する。拡散容器の内径は試料容器の内径と同じ 5cm であり、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絶した状態でボルトにより固定する。

拡散容器には酸素濃度センサと窒素置換用パージラインを設置する。酸素濃度センサには光明理化学工業製 OC-6B (φ2.0×2.08cm) を用いた。この測器はガルバニ電池式の

酸素センサであり、測定範囲 0～100%、90%応答が 10 秒以内となっている。

5.4.2 拡散係数計測方法

(1) 計測手順

- ① 試料を試料容器に十分に転圧しながら詰める。
- ② 試料容器と拡散容器を接続後、容器間に隔壁用プレートを挿入し、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し、酸素ガス濃度がゼロになるまで容器内を窒素ガスで置換する。
- ④ 隔壁用プレートを引抜き、土壌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。

(2) 拡散係数の算出

拡散法により、拡散量 N は式(5.4.1)で与えられる。

$$N = -D_e \frac{dC}{dZ} \quad (5.4.1)$$

D_e : 自由大気中の拡散係数^[16]

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すみ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(5.4.2)が近似的に成り立つ。

$$\frac{C(t) - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{\exp(-D_e \alpha_1^2 \cdot t / \theta_a)}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \quad (5.4.2)$$

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(5.4.3)を満たす α_n の 1 番目の正の根である^[17]。

$$\alpha \tan(\alpha \cdot L_S) = \theta_a / L_A \quad (5.4.3)$$

式(5.4.2)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。

$$\ln \frac{C(t)-C_i}{C_0-C_i} = \frac{D_e \alpha_1^2}{\theta_a} t + \ln \left[\frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{1}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \right] \quad (5.4.4)$$

式(5.4.4)の右辺第 2 項は時間変化しない定数項であるため、式(5.4.4)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(5.4.5)の左辺値の差から以下のように求められる。

$$-\frac{D_e \alpha_1^2}{\theta_a} = \frac{\ln(C_i - C(t_2)) - \ln(C_i - C(t_1))}{t_2 - t_1} \quad (5.4.5)$$

t_1, t_2 : 任意時間 ($t_1 < t_2$)

式(5.4.5)を D_e について整理し、各パラメータに測定値を代入すれば、土壌試料の拡散係数が求められる。

$D_{e\pm}$ 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、土壌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(5.4.6)で求める。

$$D_a = D_0 \cdot \frac{1013}{P} \cdot \left(\frac{T}{273.15} \right)^n \quad (5.4.6)$$

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 : 測定時の気圧

T : 測定時の温度

5.4.3 拡散係数計測結果

はじめに、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) 及び $\phi 512 \mu\text{m}$ (不二製作所社製 FGB35) 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。図 5-4-4 拡散係数計測における酸素濃度の経時変化事例、表 5-4-1 拡散係数計測結果をそれぞれ示す。

図 5-4-4 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。得られたデータから、ある 2 点における酸素濃度を抽出し、その勾配から拡散係数を求めることができる。

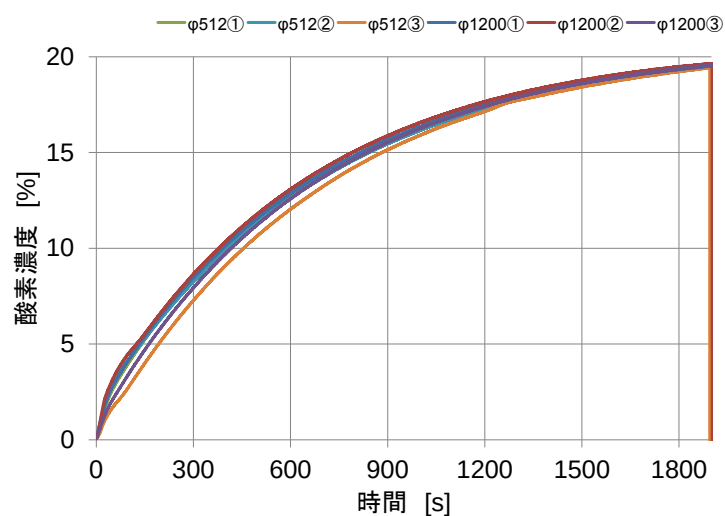


図 5-4-4 拡散係数計測における酸素濃度の経時変化事例

表 5-4-1 拡散係数計測結果

	拡散係数 [m^2/s]	計算値との比
計算値 $\phi 512\mu\text{m}$, $\phi 1200\mu\text{m}$	$2.165\text{E-}05$	---
計測値 $\phi 512\text{①}$	$1.368\text{E-}05$	0.63
計測値 $\phi 512\text{②}$	$1.325\text{E-}05$	0.61
計測値 $\phi 512\text{③}$	$1.362\text{E-}05$	0.63
計測値 $\phi 1200\text{①}$	$1.355\text{E-}05$	0.63
計測値 $\phi 1200\text{②}$	$1.397\text{E-}05$	0.65
計測値 $\phi 1200\text{③}$	$1.395\text{E-}05$	0.64

表 5-4-1 に示すとおり、複数回の計測結果について、変動係数は約 0.017 となっており、良好な再現性が得られている。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、これについても実験結果と一致している。

一方で、計算値（参考文献[7]による）と比較すると、いずれの結果についても、概ね 6 割程度の低い値となった。

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。実験結果を図 5-4-5 に示す。

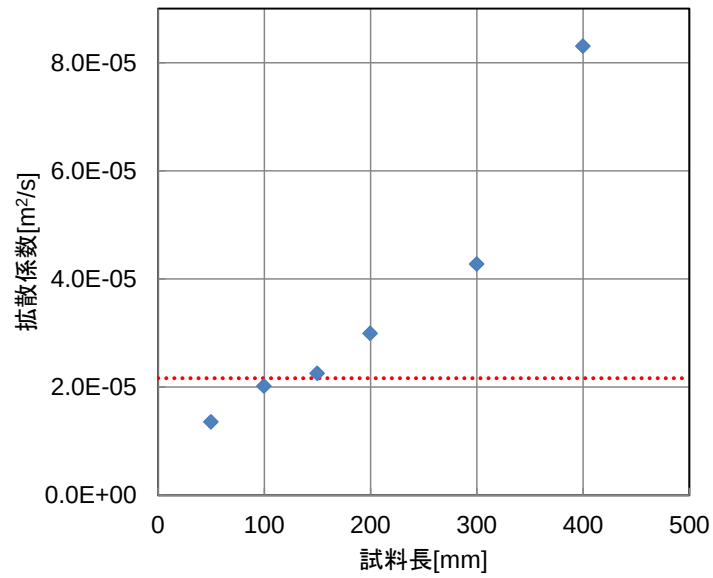


図 5-4-5 拡散係数測定値の試料長依存性（ガラスビーズ）

図中の赤い破線は計算によって求めたガラスビーズの拡散係数である（参考文献[7]による）。文献[12]によると拡散係数は試料容器長に依存しないとされている。一方、本実験結果では試料容器長が長くなるに従い、拡散係数が増加する結果となった。

土壌試料を真砂土として同様の実験を行った結果を図 5-4-6 に示す。

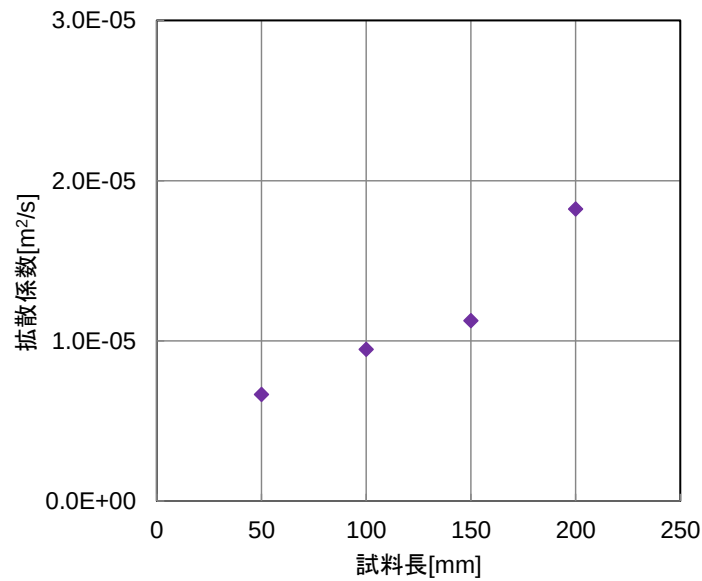


図 5-4-5 拡散係数測定値の試料長依存性（真砂土）

図 5-4-5 に示すとおり、土壌試料を真砂土とした場合についても、同様の傾向が確認された。文献に示される結果との差異が生じた要因については、今後検討が必要であるが、ここでは、ガラスビーズを用いた実験において、計算値に最も近い計測結果が得られた長さ 150mm の試料容器を用いて拡散係数の計測を行うこととした。

5.5 解析条件

解析条件を表 5-5-1 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 5-5-1 に示すとおり、流量（圧力）について 2 ケース実施した。透気係数及び拡散係数は、実験により得られた表 5-5-2 に示す値を用いている。なお、本解析では、透気係数及び拡散係数は、土壌槽内で一様としている。空隙率は、実測した土壌物性より算出した値である 0.3148 を使用している。また、水素-窒素の 2 成分系の分子拡散係数については、0.736 cm²/s (@16℃) を用いた^[7]。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 5-5-1 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 【実験値】
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 5-5-2 フィールド試験解析の解析パラメータ（実測値）

条件番号	供給圧力 [kPa]	流量 [L/min]	備考
①	2.74	1.93	地質パラメータ適用 実測値を適用
②	7.09	4.53	地質パラメータ適用 実測値を適用

表 4-3-3 フィールド試験解析の土壌パラメータ

試料	真砂土(5mm)
空隙率	0.3148
透気係数 [m^2]	5.010E-11
拡散係数 [m^2/s]	1.126E-5
含水比	0.0345
飽和度	0.189

5.6 解析結果

各条件における水素濃度分布図を図 5-6-1～5-6-4 に示す。図 5-6-1 及び図 5-6-2 は条件①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を示す。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 150 分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、放出口に近接する位置においても、約 85%に留まる。図 5-6-3 及び図 5-6-4 は条件②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を示す。条件①と比較すると、各測定点の定常水素濃度が上昇しており、放出口に近接する位置ではほぼ 100%の水素濃度となる。

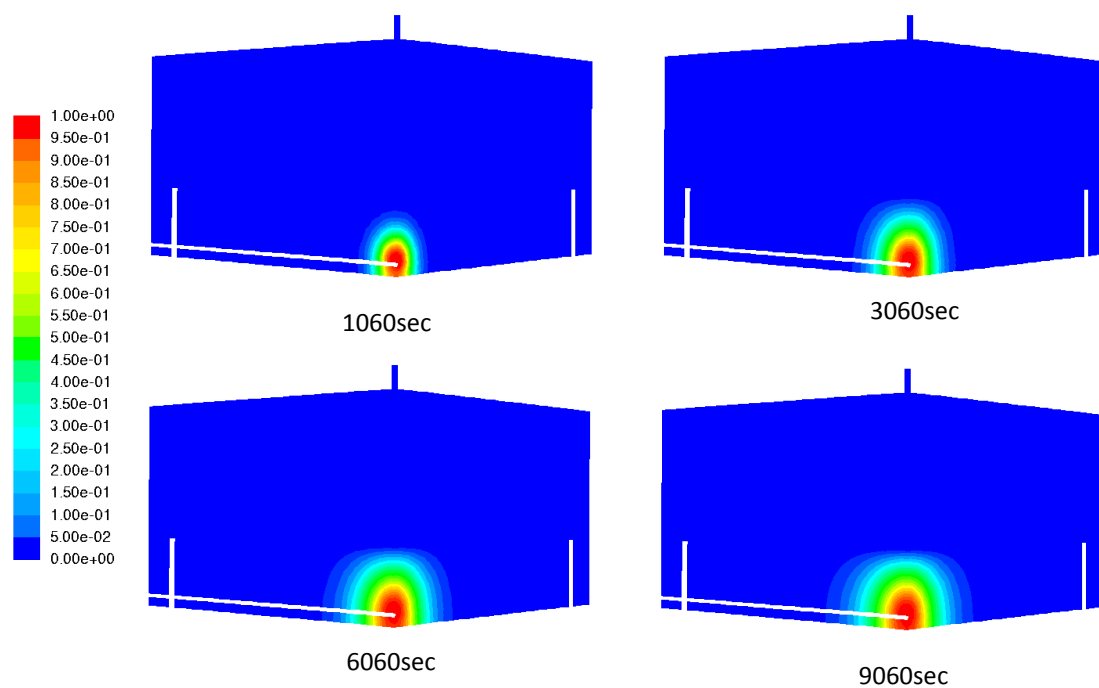


図 5-6-1 フィールド試験解析水素濃度分布（条件①：水素放出圧力 2.5kPa）

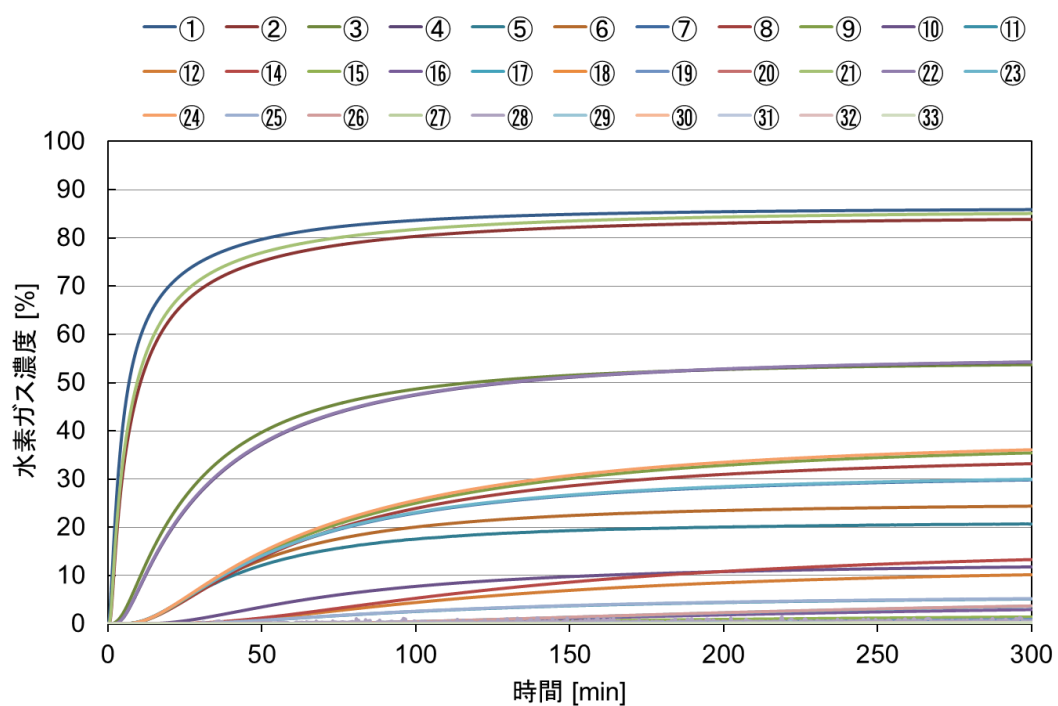


図 5-6-2 フィールド試験解析における各計測点の水素濃度推移
（条件①：水素放出圧力 2.5kPa）

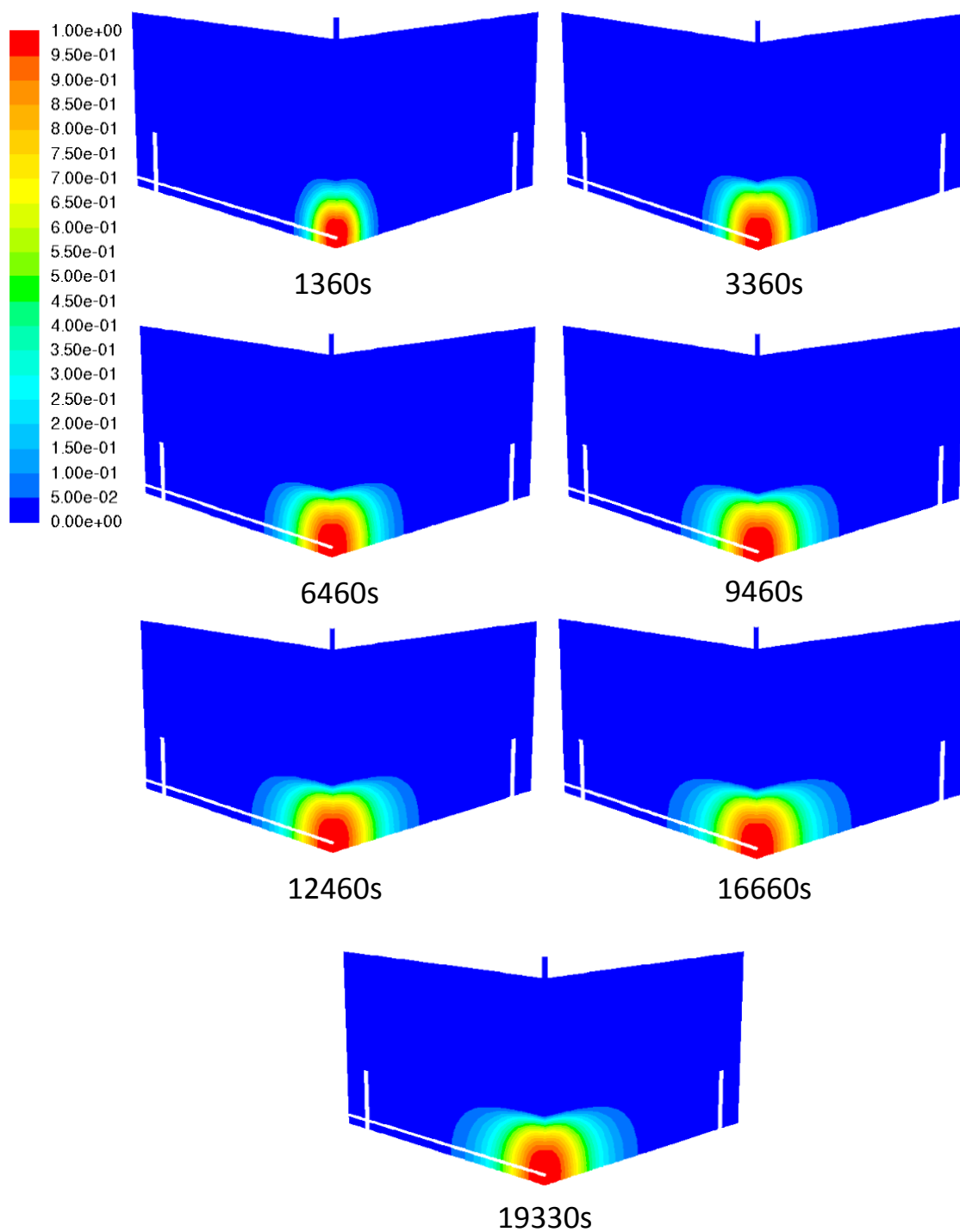


図 5-6-3 フィールド試験解析水素濃度分布
(条件②：水素放出圧力 7.5kPa)

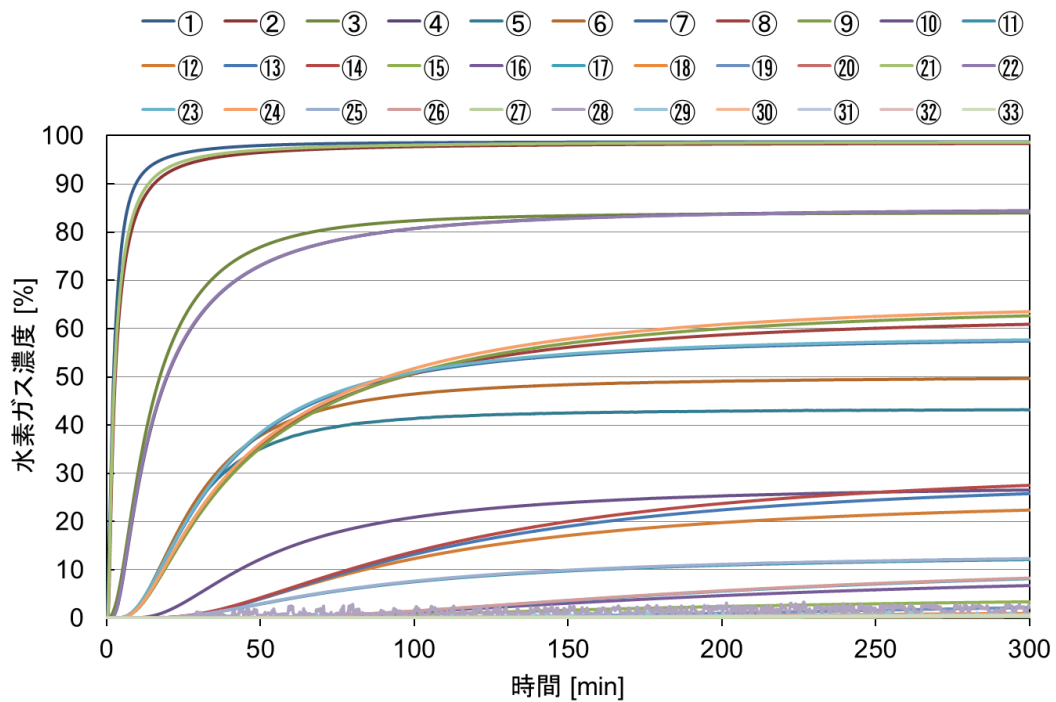


図 5-6-4 フィールド試験解析における各計測点の水素濃度推移
(条件②：水素放出圧力 7.5kPa)

5.7 再現性の評価

図 5-7-1、図 5-7-2 に、地中模擬層内における計測点①、②、⑤、⑥、⑨、⑪、⑫と大気中模擬層内の計測点⑲～⑳における水素濃度の推移について示す。

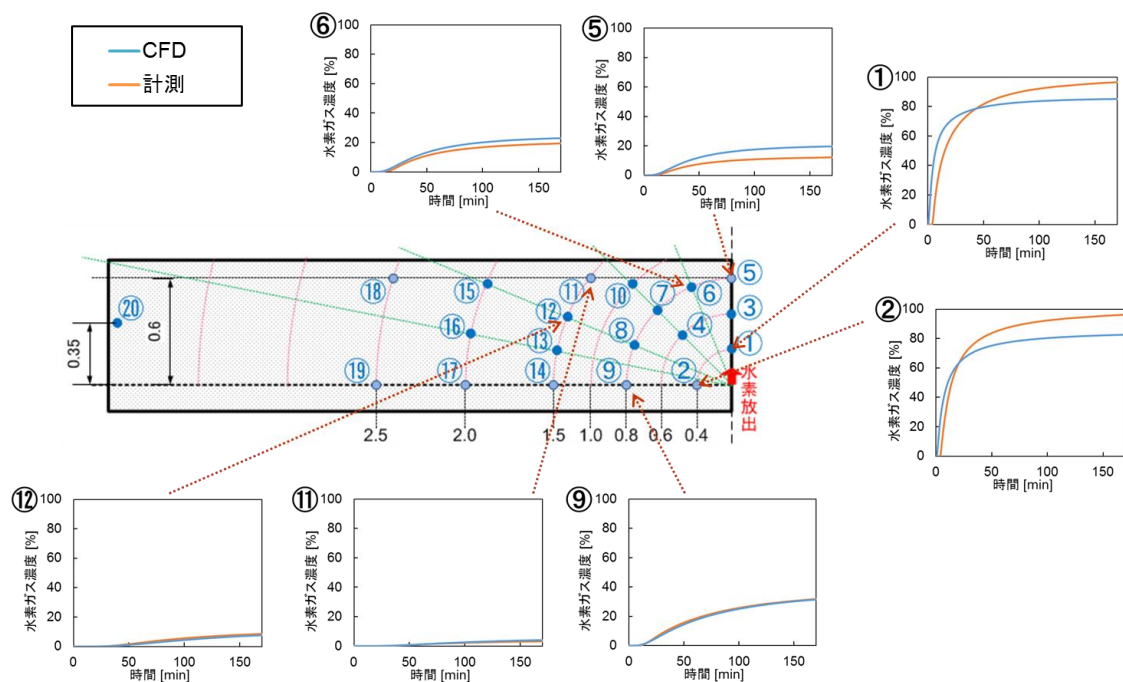


図 5-7-1 地中水素拡散挙動の実験とシミュレーション解析の比較
(条件①：水素放出圧力 2.5kPa)

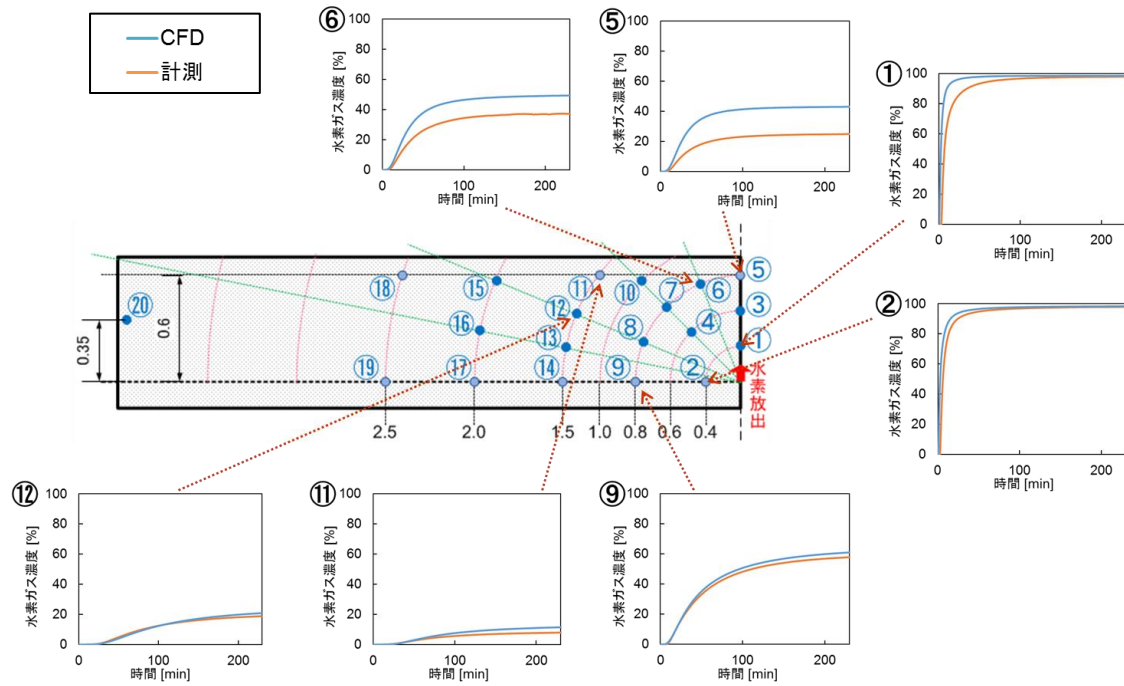


図 5-7-2 地中水素拡散挙動の実験とシミュレーション解析の比較
(条件②：水素放出圧力 7.5kPa)

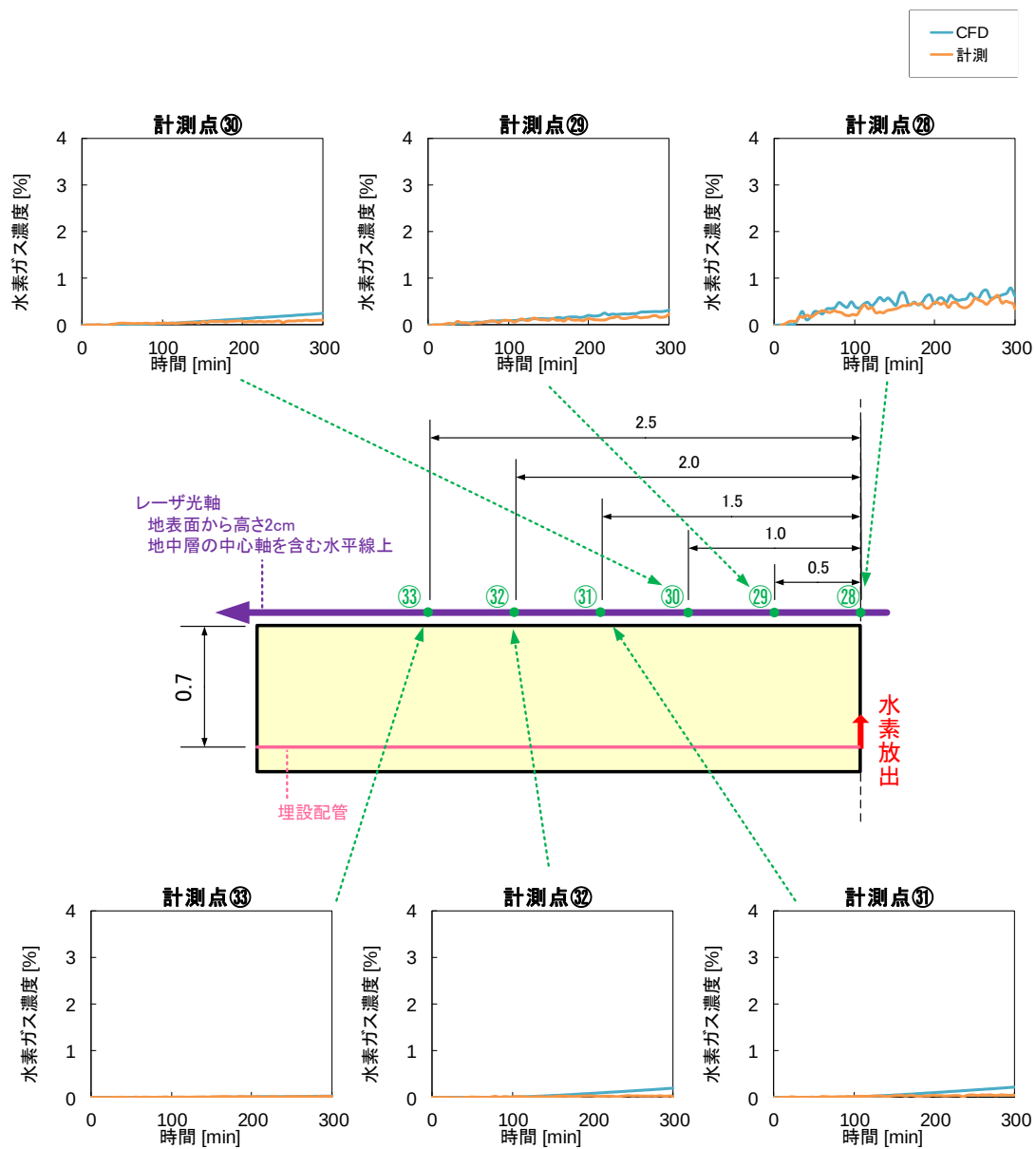


図 5-7-3 大気中水素拡散挙動の実験とシミュレーション解析の比較
(条件①：水素放出圧力 2.5kPa)

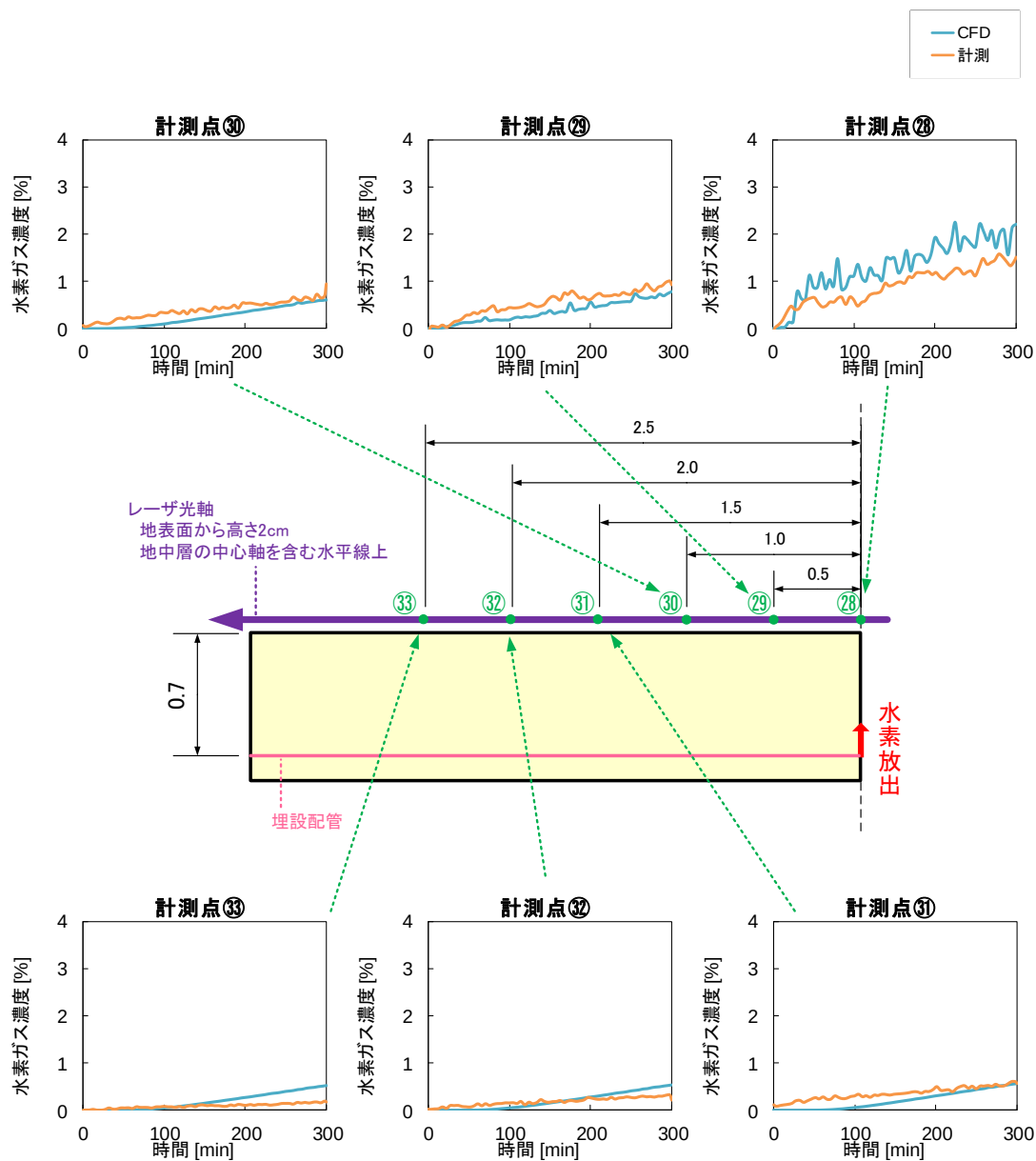


図 5-7-4 大気中水素拡散挙動の実験とシミュレーション解析の比較
(条件②：水素放出圧力 7.5kPa)

地中における水素拡散挙動について、放出口近傍では、バルブ解放の直後から急峻に水素濃度が上昇しある程度濃度が上昇した時間から緩やかな濃度上昇に推移する。一方、放出口から離れた位置では、時間経過とともに緩やかに水素濃度が上昇する。大気中における水素拡散挙動について、放出口直上の計測点での濃度上昇が顕著であり、放出口から 1.5m 以上離れた位置における濃度上昇は僅かである。実験との比較では、概ね一致しているが、地中における放出口直上位置において、最大 20%程度の相違が生じる結果

となった。この原因として、水素放出条件（放出口サイズ、放出方向）、実土壌パラメータの相違、実験系の水分による影響が推定される。これらは今後の検討課題である。

大気中における水素拡散挙動についても、経時変化の勾配、濃度のオーダー共に良好に再現されている。一部両者に差異が見られる計測点があるが、上述のとおり、地中における再現性をより高めていくことで、改善が見込めるものと考えられる。

5.8 感度解析（異なる水素放出条件における解析）

5.8.1 解析モデル

解析モデルは 5.2 節と同様のモデルで実施した。

5.8.2 解析条件

解析条件は、表 5-5-1 に示した条件と同様である。感度解析項目として、噴出口での運動量、噴出口位置・サイズ、及び噴出方向を設定した。感度解析項目を表 5-8-1 に示す。

まず、実際にはある運動量を持った噴出状態が想定されることから、噴出口領域において鉛直上向きに運動量を与えた条件として、2 ケース（Z momentum = 0.52、10.35 N/m³、条件番号：②-A1、②-A2）について感度解析を実施した。

また、5.2 節に示したとおり本解析では、計算体系が大型容積で試験時間も長いことから、計算空間の対称性と計算コストを考慮して、1/4 分割の部分モデルを抽出しており、その際、配管表面に沿って選択拡散される懸念もあるため貫通する配管もモデル化した。そのため、配管表面の漏えい口に近接するメッシュは配管表面形状に平行な格子形状となっており、容器試験に比べてメッシュの影響が懸念される。図 5-8-1 に基本条件解析の漏えい口近傍のメッシュ図を示す。基本条件解析では、計算負荷を考慮し比較的粗い計算格子を用いているため、解析における噴出口領域もそれに伴い□10mm 程度と実験より大きい領域を有している。ベースケースである条件番号②は漏えい口が対称面の交差する軸上（中心軸上）になることから対称面の特異性の影響を懸念して、中心軸から配管円周方向に 5mm 程度ずらした位置をピークとする質量ソースを設定した。条件番号②-A1、②-A2 の質量ソースのピーク設定は条件番号②と同様である。また、条件番号②-B1 は放出口の直近に質量ソースのピークを設定した場合である。さらに、放出口領域のサイズをおよそ□5mm とし、漏えい口近傍のセルサイズを細分割して質量ソースのピークを配管表面の漏えい口近傍に近づけた場合（②-B2）を設定し、感度解析を実施した。漏えい口近傍細分割メッシュ図を図 5-8-2 に示す。

表 5-8-1 感度解析項目

条件番号	流量 [L/min]	圧力 [kPa]	単位体積当りの 質量流量 [kg/m ³ ・s]	Z momentum [N/m ³]	備考
②	4.53	7.09	1.03	0	【ベースケース】 Z 方向運動量 (0m/s) 放出口サイズ (□10mm)
②-A1	4.53	7.09	1.03	0.52	Z 方向運動量 (0.5m/s) 放出口サイズ (□10mm)
②-A2	4.53	7.09	1.03	10.35	Z 方向運動量 (10m/s) 放出口サイズ (□10mm)
②-B1	4.53	7.09	1.03	0	放出口位置修正 放出口サイズ (□10mm)
②-B2	4.53	7.09	1.03	0	放出口位置修正 放出口サイズ (□5mm)

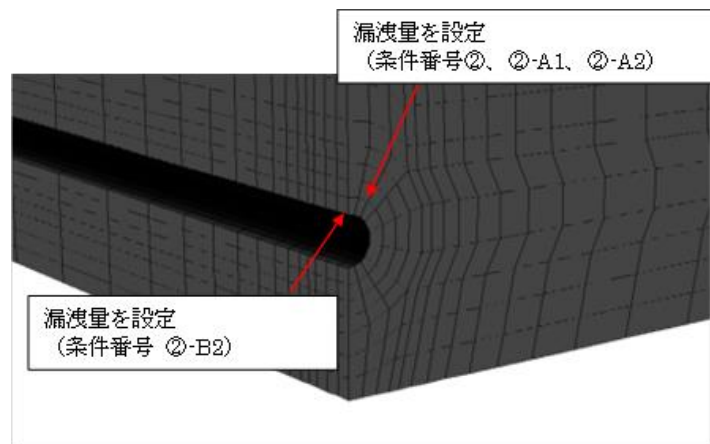


図 5-8-1 フィールド試験解析モデル 漏えい口近傍メッシュ図

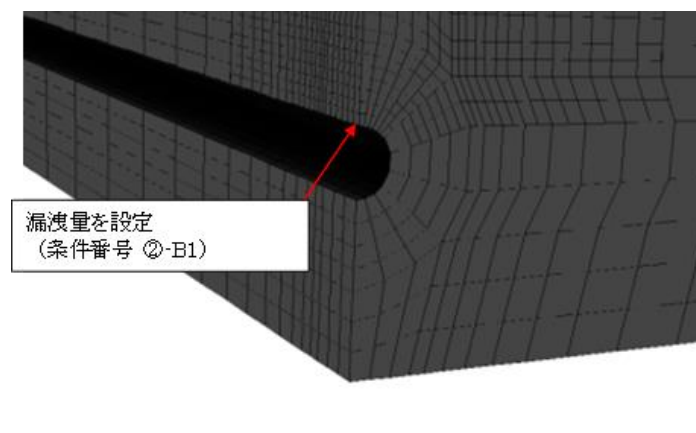


図 5-8-2 フィールド試験解析モデル 漏えい口近傍細分割メッシュ図

5.8.3 解析結果

図 5-8-3～5-8-5 に②を基本条件とした噴出口運動量に関する感度解析である②-A1、②-A2 条件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比較を示す。ベースである②と比較し、放出口領域における運動量を与えた 2 ケースいずれも相違は認められず、解析上、運動量の影響はほとんど無いことが分かった。これは、放出時に運動量を有していても、土壌層により直ちに減衰することによると考えられる。

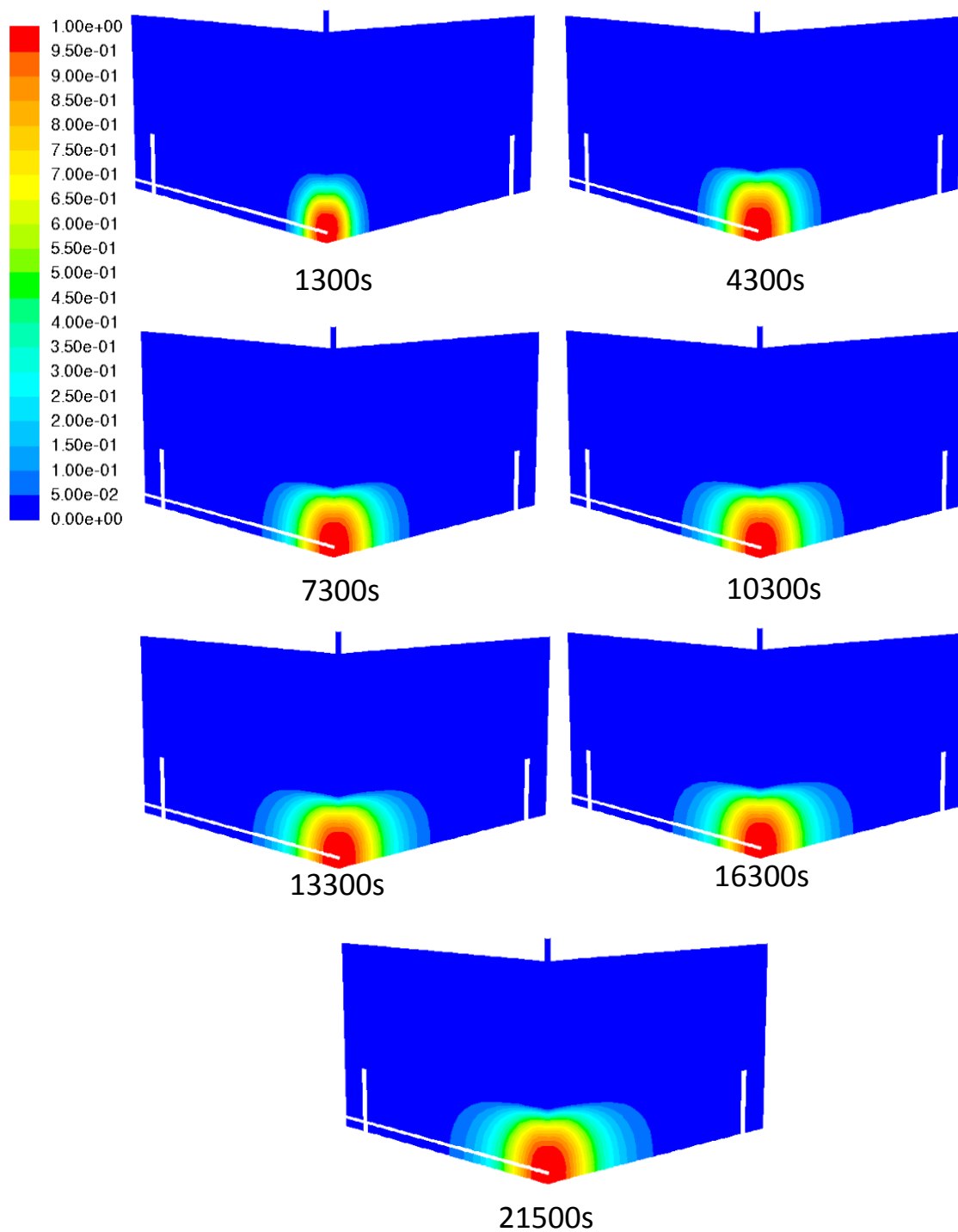


図 5-8-3 フィールド試験解析水素濃度分布 (条件②-A1)

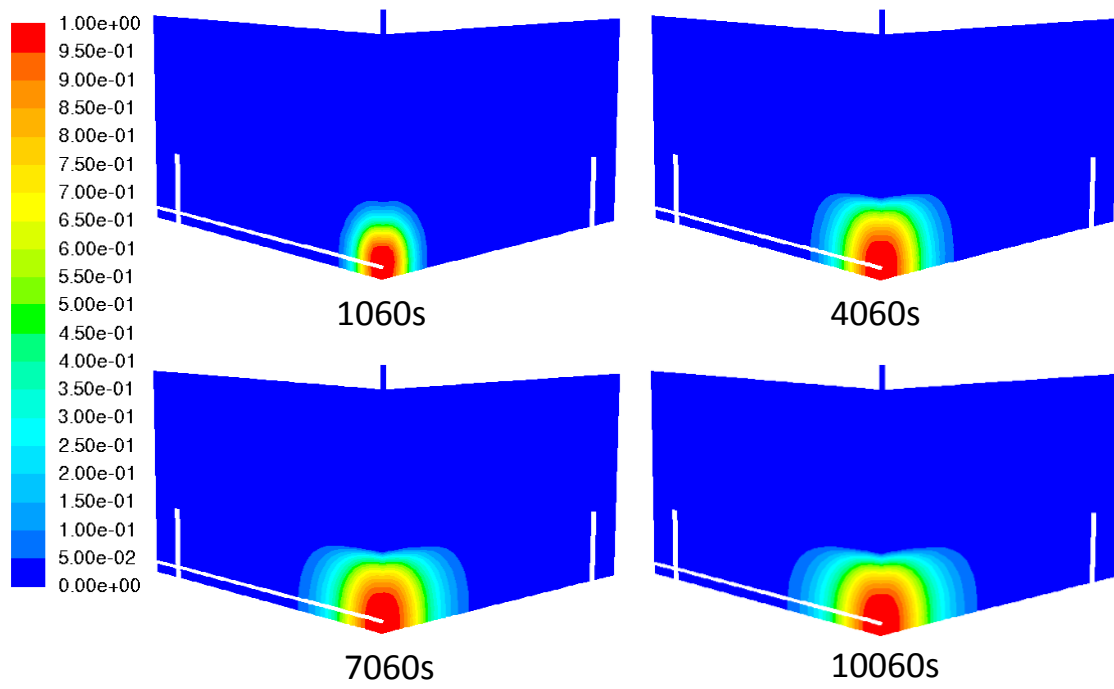


図 5-8-4 フィールド試験解析水素濃度分布 (条件②-A2)

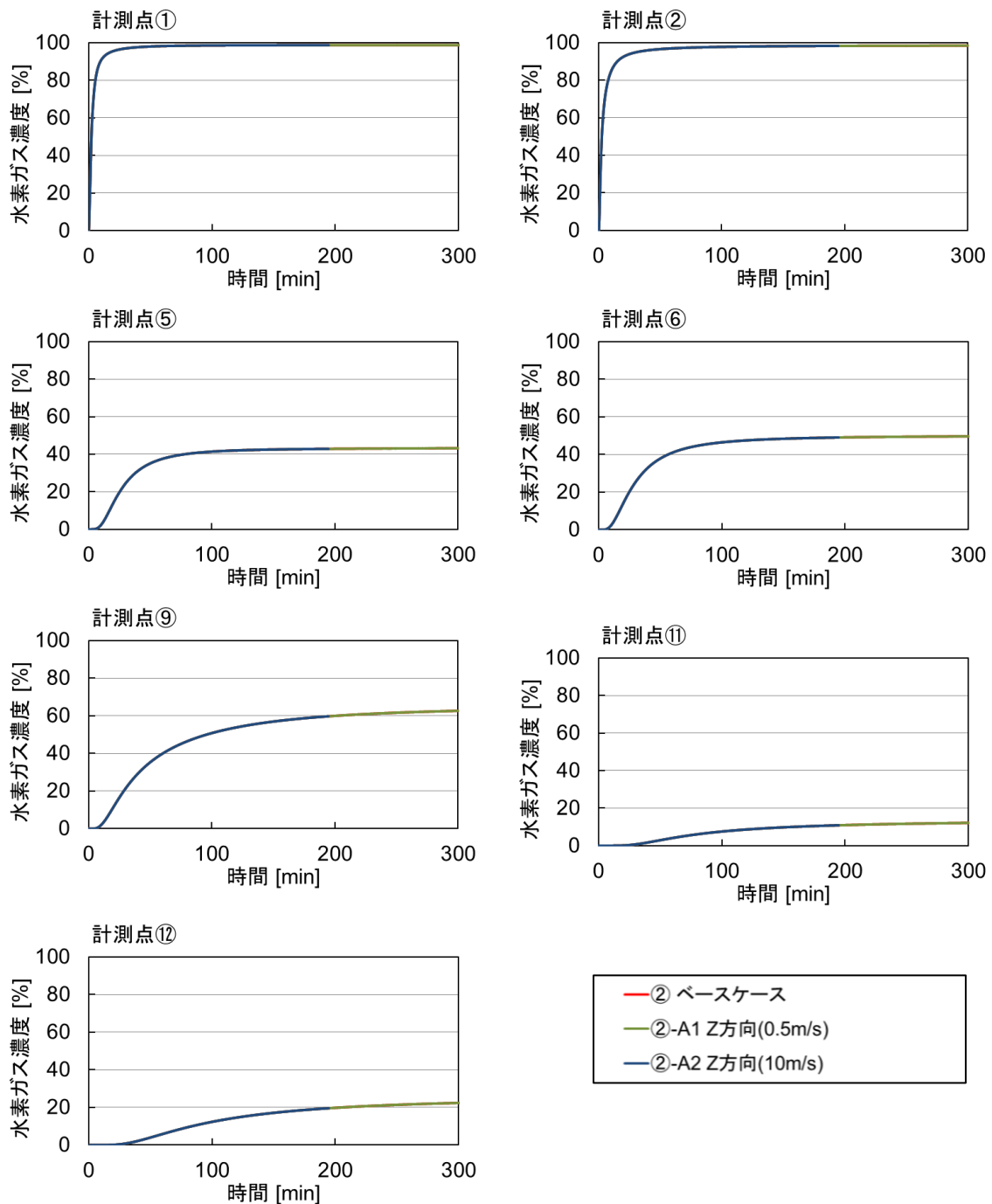


図 5-8-5 フィールド試験解析における各計測点の水素濃度推移比較
(条件番号：②、②-A1、②-A2)

図 5-8-6～5-8-8 に、②を基本条件とした噴出口位置・サイズに関する感度解析である ②-B1、②-B2 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比較を示す。ベースである②と比較し、定常水素濃度が低下する傾向が認められたが、放出口付近の計測点①及び計測点②では差異は小さく、計測点⑤及び計測点⑥において約 10%の差異

が生じる結果となった。結果として実験結果に近い濃度推移を示した。計測点⑨、計測点⑪、計測点⑫では、ベースケースに比べ低い濃度推移を見せるものの、その低下量は微々たるものである。また、放出口サイズの影響は、②-B1 及び②-B2 の比較から両者に差異は認められず、放出口のサイズは解析結果への影響は少ないことが確認された。

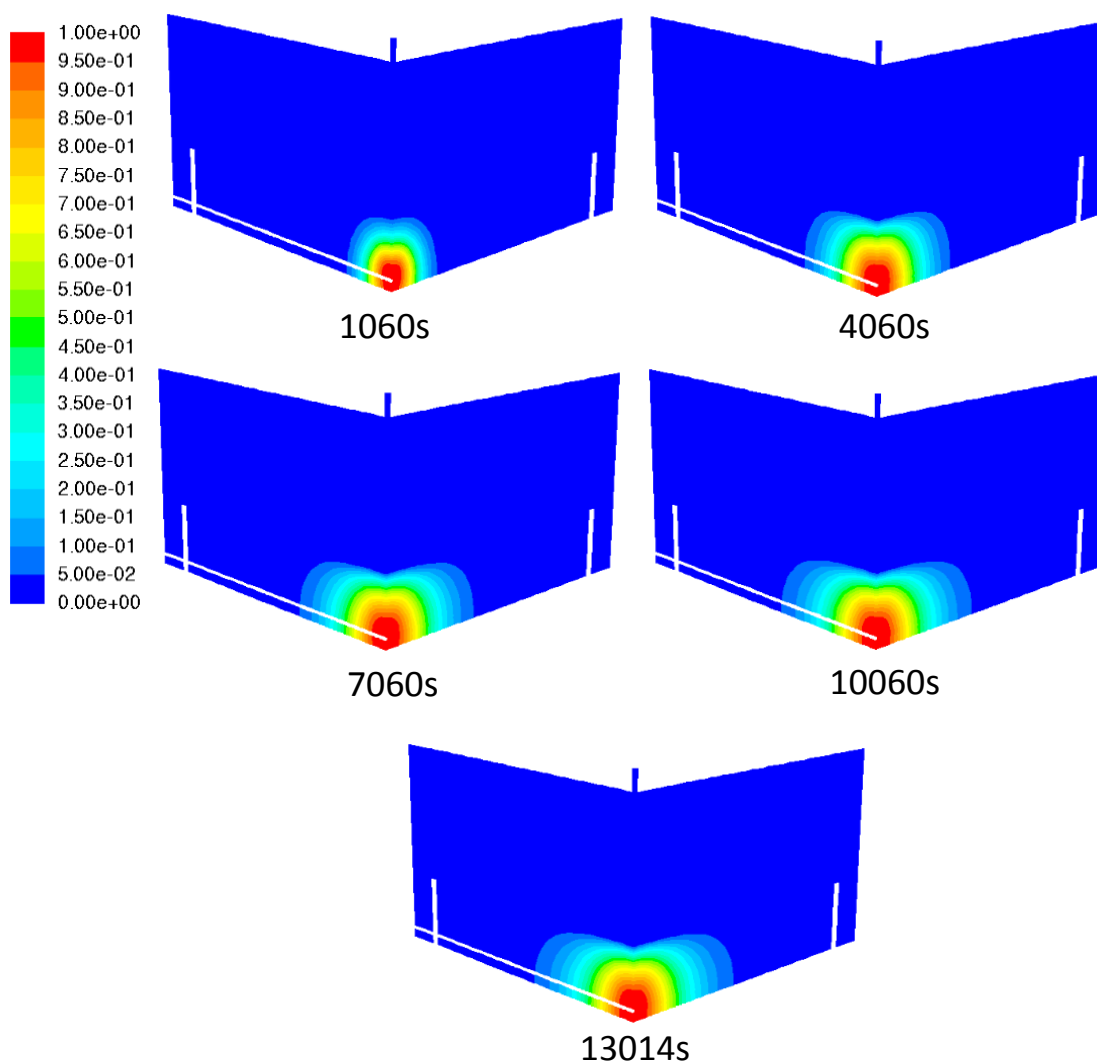


図 5-8-6 フィールド試験解析水素濃度分布（条件②-B1）

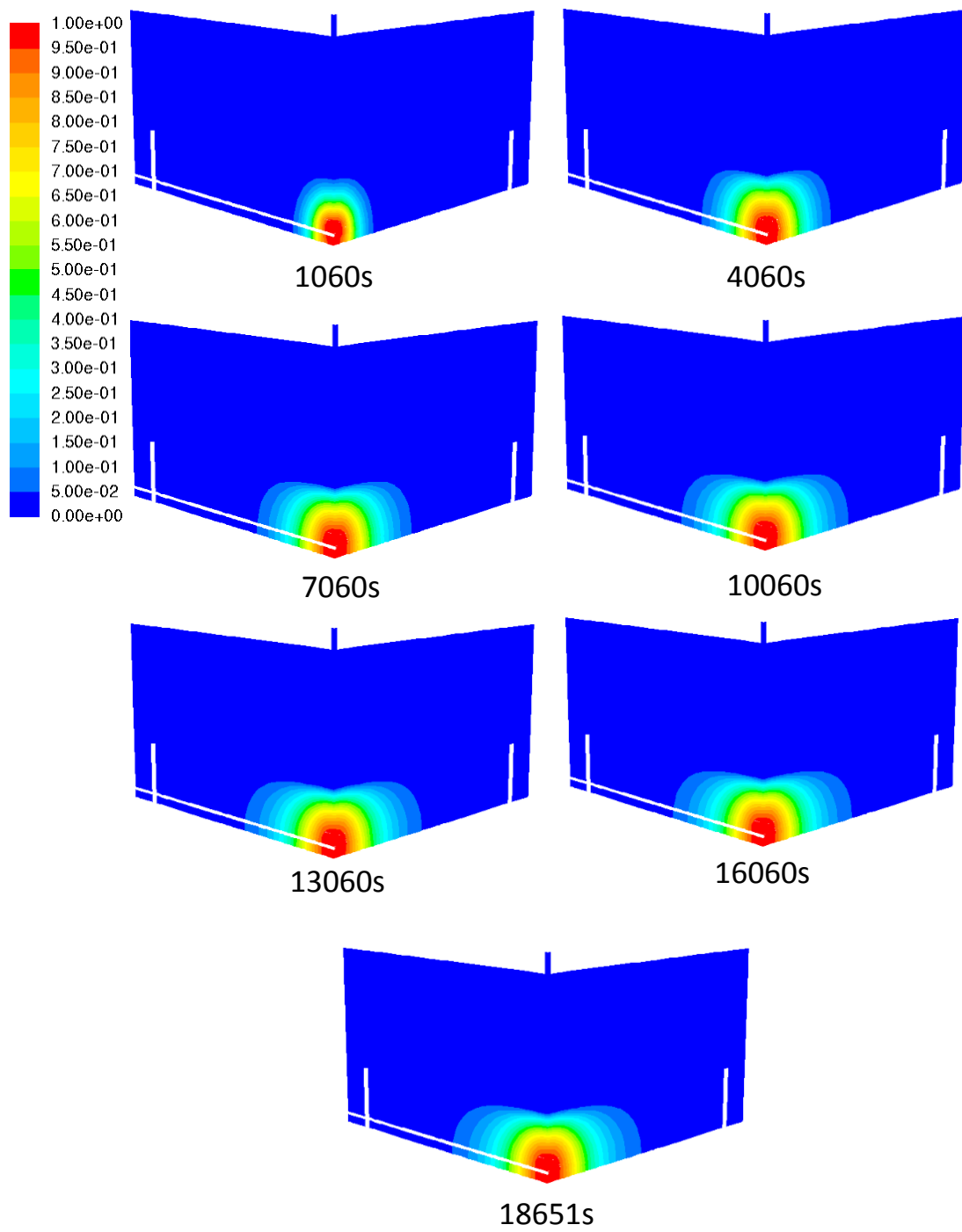


図 5-8-7 フィールド試験解析水素濃度分布 (条件②-B2)

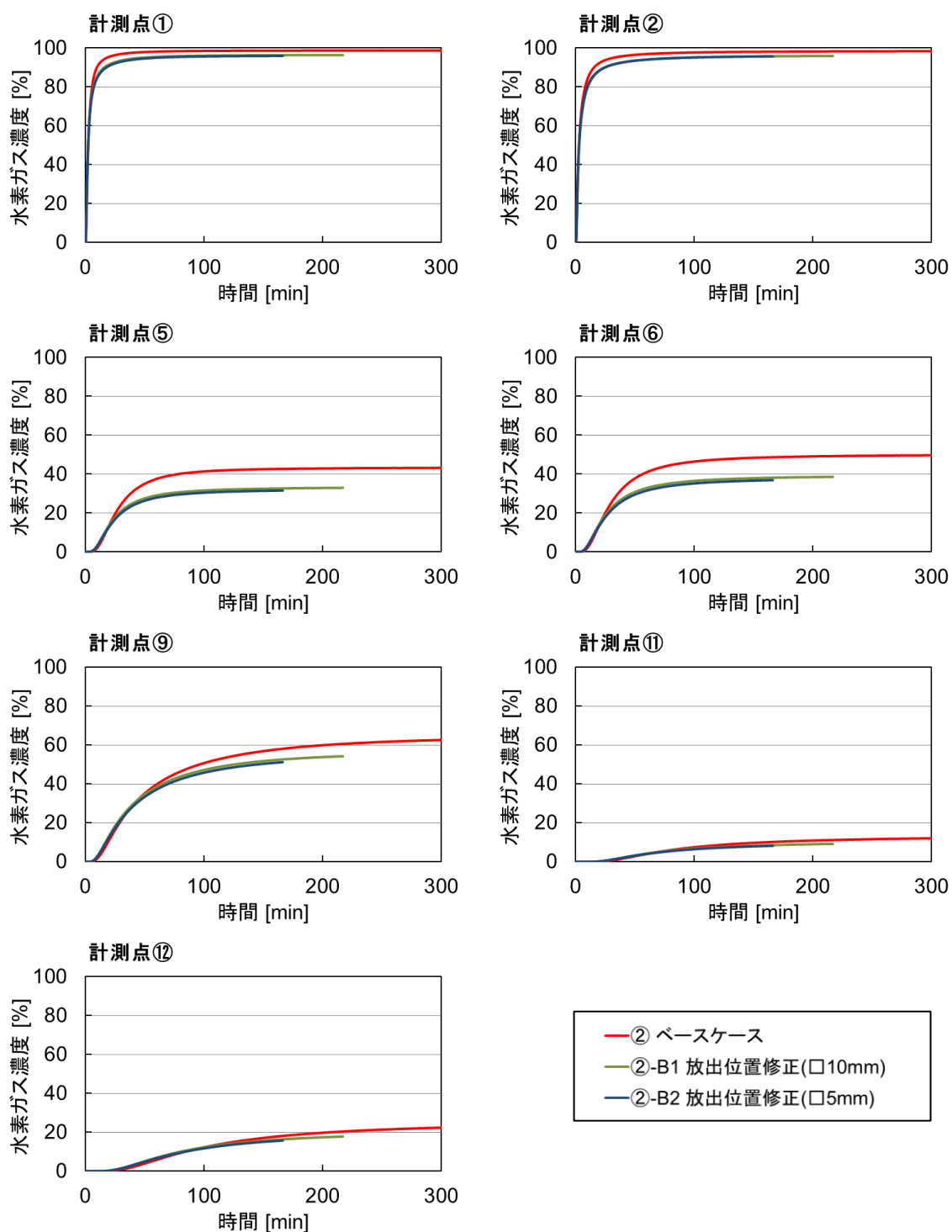


図 5-8-8 フィールド試験解析における各計測点の水素濃度推移比較
(条件番号：②、②-B1、②-B2)

5.9 まとめ

実験装置及び実験条件を正確に反映した CFD 解析を実施し、予備試験モデル、及び、実フィールド試験モデルの充填層内、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。実験との比較から、水素の拡散挙動を概ね良好に再現し、また、放出口のサイズ、放出運動量、今回の感度解析では顕著な違いは認められず、解析結果に対する影響は小さいと考えられる。また、放出方向については、一部計測点において定常濃度の低下が認められたものの、径方向への拡がりに相違は認められない。一方、実験結果と解析結果に相違が認められる点もあり、実土壌パラメータの相違、実験系の水分による影響などについて今後の検討課題として挙げられる。

6. 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の検討において、より実運用時に近いスケールでの地中及び大気中（地表面近傍）での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実際の土砂（真砂土）を用い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。得られた結果を総括すると以下のとおりとなる。

(1) 水素ガス漏えい量の計測（基礎試験）

実フィールド試験の実施に先立ち、埋設水素導管が腐食等により損傷した場合の水素ガスと漏えい量についての知見を得るために、真砂土を充填した容器に水素を流し、漏えい量を確認する基礎試験を実施した。

試験条件として、損傷形状 3 パターン（ピンホール $\phi 1\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$ ）、供給圧力 3 パターン（ 2.5kPa 、 5.0kPa 、 10.0kPa ）、転圧状態 3 パターン（乾燥密度： 1.74g/cm^3 、 1.81g/cm^3 、 1.92g/cm^3 ）を変化させ、地中の漏えい量について整理し、以下の知見を得た。

- ・ 放出条件（損傷形状、供給圧力）を固定して、乾燥密度（転圧状態）を変化させた場合、埋設時の流量減少率は高い相関を示した。
- ・ 乾燥密度（転圧状態）依存性についてみると、締固め度が上昇することで、漏えい流量が大幅に低下する傾向が確認され、本調査で用いた真砂土について、最も締め固められた条件では、土壌の堆積によって、水素漏えい流量が大気開放時に対し約 37%に低下した。
- ・ 開口面積（損傷形状）依存性についてみると、大気開放時、一般に漏えい量は開口面積に比例するが、土壌層が堆積した場合においても相関は概ね維持された。一方で、水素漏えい量と土壌層の転圧状態の相関関係を明らかにするにあたり、以下の課題が顕在化した。

- ・ 深さや場所により、土壌の乾燥密度が異なっており、1 つの代表点で比較を行うことが困難である。
- ・ 実験装置の規模により、同一の転圧状態が再現されない場合がある。
- ・ 地中における水素放出口への土被り状態の差異等により水素放出条件が異なる可能性がある。
- ・ 本調査において転圧状態の指標として用いた乾燥密度の値により一意的に土壌の状態が決定できるのは、最大乾燥密度の場合のみであり、その他の場合は複数の含水比条件を取り得るため、乾燥密度と含水比の両者の情報が必要となる。

これらの結果により、各パラメータの変化に伴う水素漏えい量について、定性的な特性や、本調査の条件下における変化量の程度を明らかにした。

(2) 地中及び大気中（地表面近傍）の水素濃度分布計測(実フィールド試験)

実際の土砂（真砂土）を用いた実フィールド試験として、地中での水素拡散挙動が確認できる規模（直径 $\phi 7\text{m}$ ）の地中模擬層を製作し、深さ 0.7m からの水素の拡散挙動（濃度分布）及び大気中（地表面から鉛直上方 2cm の位置）への拡散挙動（濃度分布）について調査を実施した。

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（27 点）を行った。

試験条件として、水素ガス漏えい量 4 パターン（供給圧力として 2.5kPa 、 5.0kPa 、 7.5kPa 、 10.0kPa ）を変化させ、地中及び大気中（地表面から鉛直上方 2cm の位置）への拡散挙動を整理し、以下の知見を得た。

[地中における水素拡散挙動]

- ・ いずれの計測点においても共通する経時変化の特徴として、濃度の立ち上がり直後は比較的急峻な濃度上昇となり、その後勾配が緩やかになり、概ねある一定値に収束する傾向にあった。
- ・ 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した。詳細に見ると、最も深い位置の観測点が先行する傾向にあった。
- ・ 地表面付近においては、大気側窒素ガスとの置換が活発になることから、比較的低濃度で収束した。また、地表面から深まるほど、その効果が弱まるため、深い位置において水素濃度の上昇がやや先行した。
- ・ 全体として、いずれの計測点についても、水素ガス放出後 300min において周囲の窒素ガスとバランスし、濃度値が収束した。
- ・ 供給圧力と到達濃度は本調査の範囲では概ね線形の相関にあった。
- ・ 本実験条件の範囲において、水素濃度が爆発下限界濃度 4% 以上に至る領域は、最深部において放出口から半径 1.5m 、地表面付近において半径 $1\sim 1.5\text{m}$ の範囲となり、平衡状態に至った。

[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、土壌試料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。
- ・ 地表面付近では、放出口直上において最も高い水素濃度を示し、水平方向では、中心から離れるに従い、ガス濃度が低下する正規分布状の空間分布を示した。
- ・ 本実験条件の範囲では、地表面付近では放出口直上において $1\sim 2\%$ 程度の低濃度で推移し、爆発下限界濃度には至らなかった。
- ・ 水素濃度の経時変化について見ると、初期に比較的急峻に濃度上昇が進み、その後緩やかな変化へと推移する傾向にあった。
- ・ 大気中における水素濃度の上昇は、地中における水素濃度の上昇が平衡状態に至った後に、ある値に収束するものと考えられる。
- ・ 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、本調

査における漏えい量のレベルにおいて、地表面付近で 1~2%濃度レベルの水素が滞留することは考えられない。

[漏えい停止後の地中における水素拡散挙動]

- ・ 漏えい停止後約 10 分で、全ての計測点の水素濃度が低下し始めた。
- ・ 水素濃度の減少は、到達濃度が高い程、また、地表面に近いほど急峻に進行した。
- ・ 漏えい停止後約 5 時間が経過すると、全ての計測点における水素濃度が 4%以下となった。

(3) シミュレーション解析の基礎検討

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、実際の土砂（真砂土）を用いた際の地中の拡散挙動およ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。

- ・ 実フィールド試験装置及び実験条件を正確に反映した CFD 解析を実施し、予備試験モデル、及び、実フィールド試験モデルの充填層内、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。
- ・ 実験との比較から、水素の拡散挙動を概ね良好に再現しており、解析方法・条件が妥当であり 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ことを確認した。
- ・ シミュレーションにあたっては、モデル化する土壌試料の透気係数及び拡散係数を実測により求める必要がある。
- ・ 透気係数は、サンプル試料長依存性を有し、真砂土を土壌試料とした場合、本調査では 30cm の試料長が必要であることを実験的に示したが、試料直径依存性など、他のパラメータによる計測結果の変動を確認することが課題として挙げられる。
- ・ 拡散係数は、文献資料においてサンプル試料長依存性はないものとされていたが、本調査においてはサンプル試料長によって計測値が変化する結果となり、ガラスビーズを用いた予備試験において計算値に近い計測値が得られた試料長 15cm を採用した。今後、文献資料との差異を明確化した上で計測手法の見直しを図ると共に、拡散係数の拡散挙動への影響の程度を CFD 解析により確認し、拡散係数計測の必要性を明らかにすることが、課題として挙げられる。
- ・ CFD 感度解析の結果により、特に放出口の位置及び流量に対する感度が高いことが分かった。
- ・ 放出口のサイズ、放出運動量、今回の感度解析では顕著な違いは認められず、解析結果に対する影響は小さいことを確認した。
- ・ 放出方向については、一部計測点において定常濃度の低下が認められたものの、径方向への拡がりに相違は認められなかった。
- ・ 一部、実験結果と解析結果に相違が認められる点もあり、実土壌パラメータの相違、実験系の水分による影響などが、今後の検討課題として挙げられた。

[参考文献]

- [1] 古河幸雄 他：「コンクリート用細骨材としてのまさ土の利用に関する基礎研究」，土木学会論文集(2003)
- [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] Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer (1991)
- [5] 南一郎：「プラントエンジニアリングメモ 固定層の圧力損失」，化学装置 12 月号，pp.10~11(2016)
- [6] ANSYS FLUENT ユーザーズガイド
- [7] 「伝熱工学資料（改訂第 4 版）」，日本機械学会(2009)
- [8] 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」”，土壤の物理、No.128、P39~46、(2014)
- [9] 海野 将孝他、“土壤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 回土壤物理学学会シンポジウム (2006)
- [10] 平成 18 年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査（地中内水素拡散試験）」JFE テクノリサーチ株式会社 pp.7-11~7-12
- [11] 平成 19 年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査（水素漏えい検知評価試験等）」JFE テクノリサーチ株式会社、pp.7-19~7-25
- [12] 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、pp1-66(1998)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] MHK-工房 <http://www.mhk-koubou.com/>
- [16] 「化学便覧 基礎編Ⅱ」，日本化学会
- [17] 大江修造：「物性推算法」，データブック出版社(2002)

[付 録] フィールド試験結果

I. 地中の水素濃度分布計測結果

表 I-(1) 図番号と実験条件一覧表

図 No.	供給圧力	経過時間 (min)	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	転圧状態 (乾燥密度)
I-a-1	2.5kPa	10~80	真砂土	ピンホール φ1.0mm	1.81g/cm ³
I-a-2		90~160			
I-a-3		170~240			
I-a-4		250~300			
I-b-1	5.0kPa	10~80			
I-b-2		90~160			
I-b-3		170~240			
I-b-4		250~300			
I-c-1	7.5kPa	10~80			
I-c-2		90~160			
I-c-3		170~240			
I-c-4		250~300			
I-d-1	10.0kPa	10~80			
I-d-2		90~160			
I-d-3		170~240			
I-d-4		250~300			

表 I-(2) 表番号と実験条件一覧表

表 No.	供給圧力	計測点	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	転圧状態 (乾燥密度)
I-a-1	2.5kPa	①～⑨	真砂土	ピンホール φ1.0mm	1.81g/cm ³
I-a-2		⑩～⑮			
I-a-3		⑯～⑳			
I-b-1	5.0kPa	①～⑨			
I-b-2		⑩～⑮			
I-b-3		⑯～⑳			
I-c-1	7.5kPa	①～⑨			
I-c-2		⑩～⑮			
I-c-3		⑯～⑳			
I-d-1	10.0kPa	①～⑨			
I-d-2		⑩～⑮			
I-d-3		⑯～⑳			

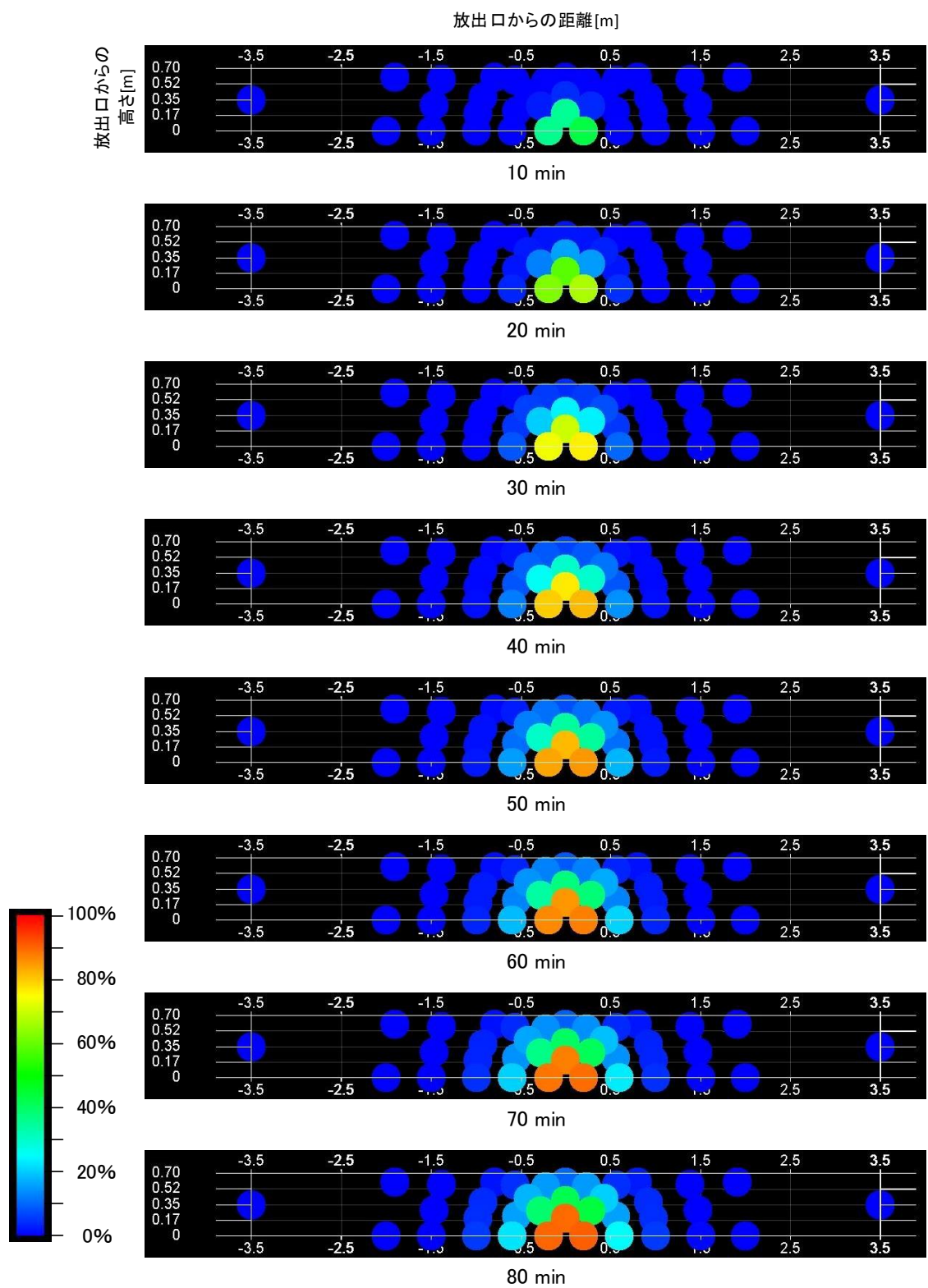


図 I -a-1 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (10~80min)

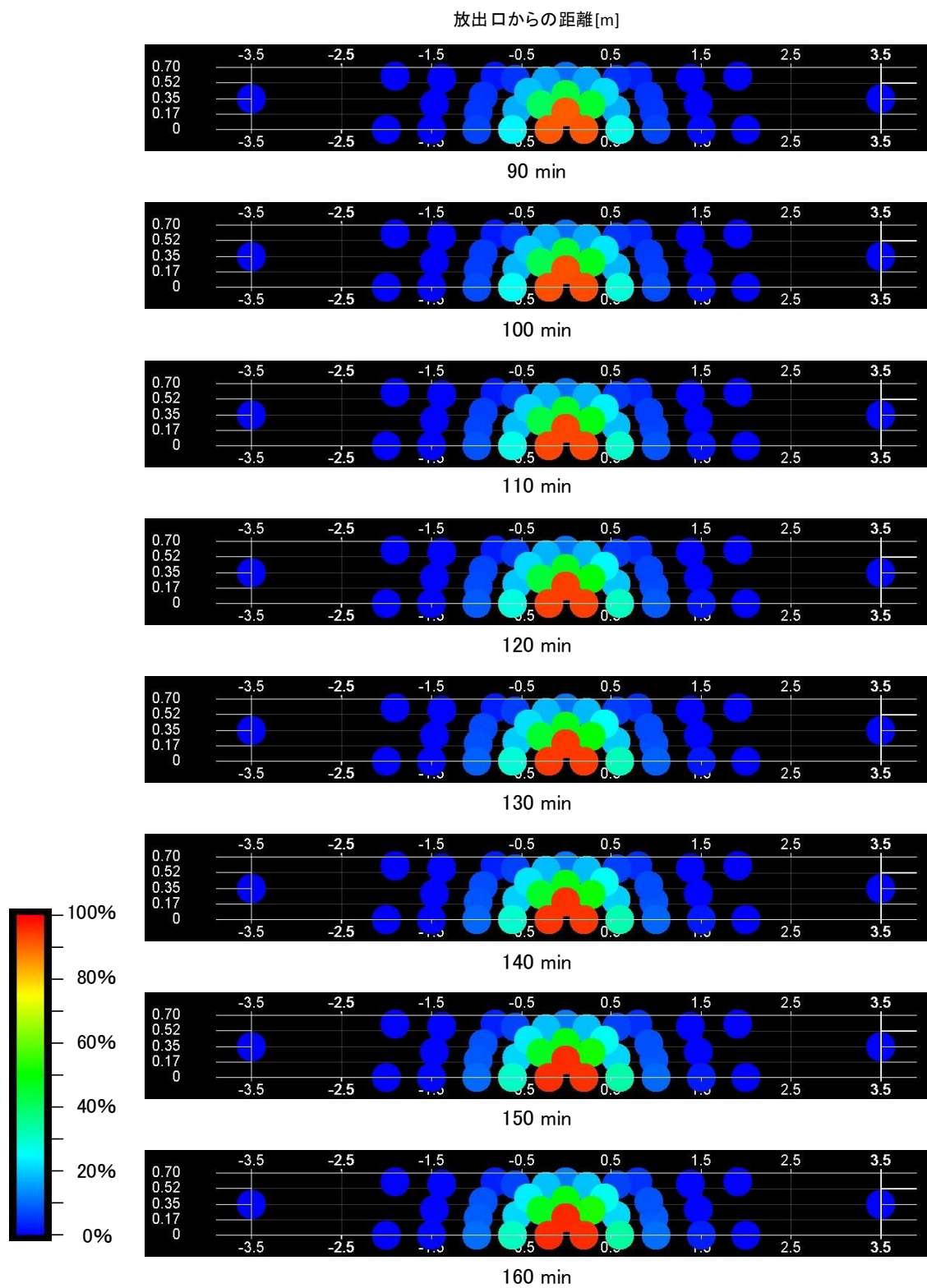


図 I -a-2 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (90~160min)

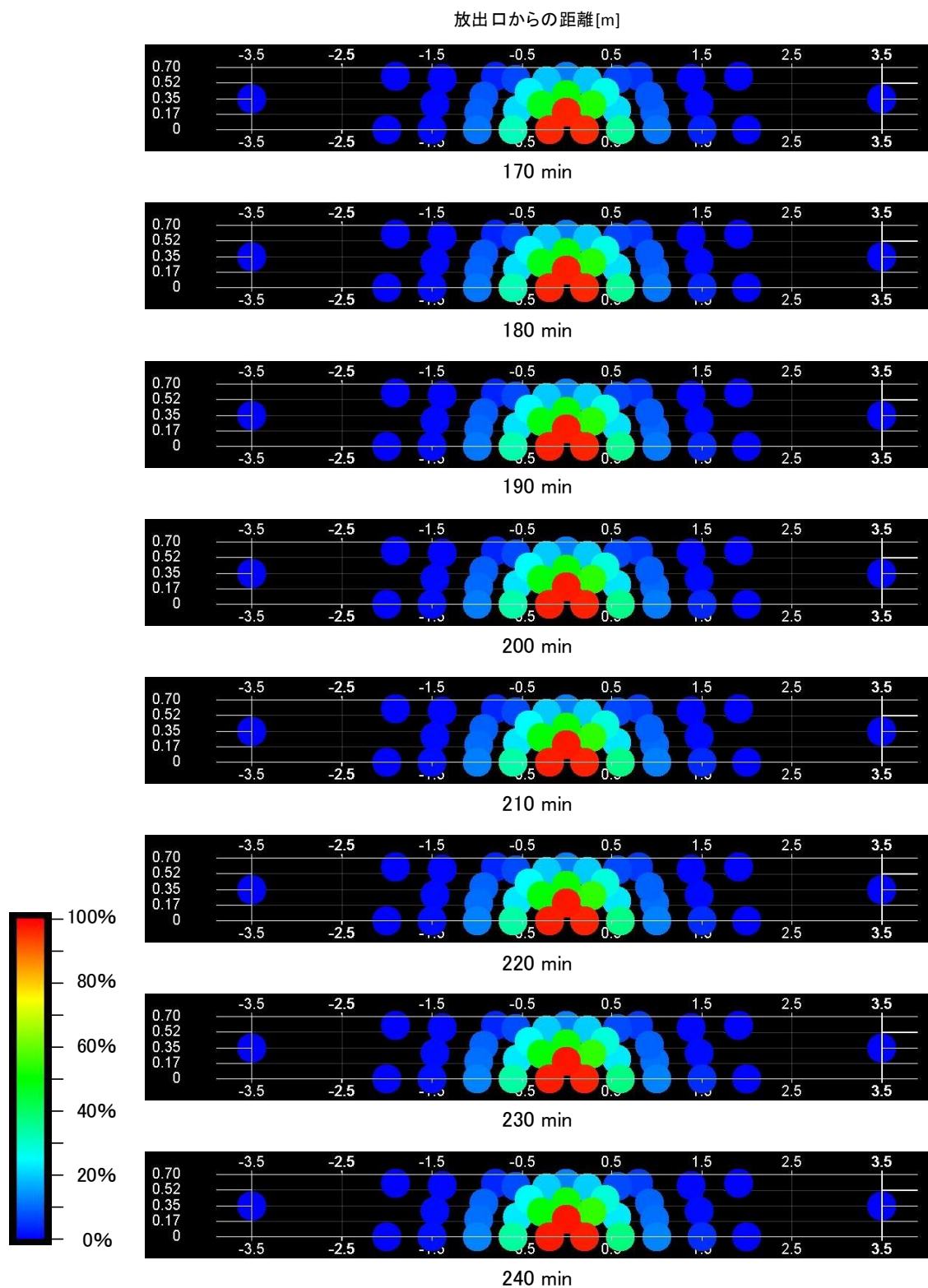


図 I -a-3 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (170~240min)

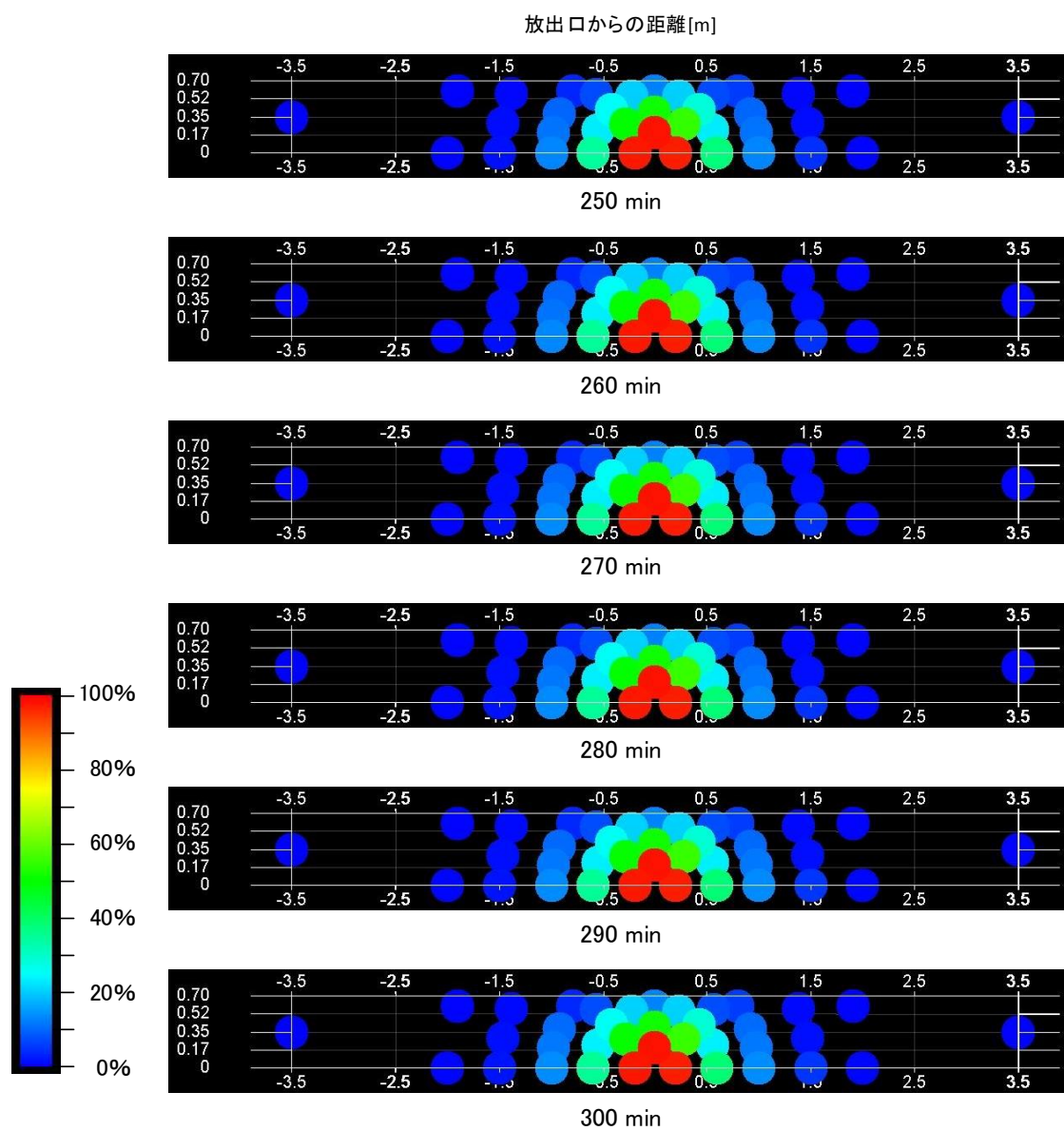


図 I -a-4 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (250～300min)

表 I -a-1 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①～⑨）

時間 [min]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
10	35.4	36.2	4.2	2.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
20	58.8	62.6	16.0	12.7	2.0	1.8	2.5	2.0	3.6
30	70.0	73.7	24.1	20.2	4.4	5.6	6.4	5.4	8.4
40	76.9	79.8	30.0	26.0	6.3	8.7	9.8	8.4	12.4
50	81.6	83.7	34.4	30.5	7.7	11.1	12.5	10.9	15.6
60	85.0	86.5	37.7	34.0	8.7	12.8	14.7	12.9	18.4
70	87.5	88.5	40.3	36.8	9.4	14.2	16.4	14.5	20.6
80	89.4	90.1	42.2	39.0	10.0	15.2	17.9	15.8	22.6
90	91.0	91.3	43.8	40.9	10.5	16.1	19.1	17.0	24.3
100	92.1	92.3	45.1	42.3	10.9	16.8	20.1	17.9	25.7
110	93.1	93.1	46.1	43.6	11.2	17.4	20.9	18.7	26.9
120	93.8	93.8	46.9	44.6	11.4	17.8	21.6	19.4	28.0
130	94.5	94.3	47.6	45.4	11.6	18.2	22.2	19.9	28.9
140	95.1	94.9	48.2	46.2	11.8	18.6	22.7	20.5	29.8
150	95.6	95.4	48.7	46.8	11.9	18.9	23.2	20.9	30.5
160	96.1	95.9	49.2	47.4	12.1	19.1	23.6	21.3	31.1
170	96.6	96.3	49.6	47.9	12.2	19.4	23.9	21.6	31.7
180	97.0	96.7	50.1	48.4	12.4	19.6	24.3	21.9	32.3
190	97.3	97.0	50.4	48.8	12.5	19.8	24.6	22.2	32.8
200	97.5	97.2	50.7	49.2	12.6	20.0	24.8	22.5	33.2
210	97.6	97.2	50.8	49.4	12.6	20.1	25.0	22.7	33.5
220	97.7	97.3	51.0	49.6	12.7	20.2	25.2	22.8	33.8
230	97.7	97.3	51.1	49.8	12.7	20.3	25.3	23.0	34.1
240	97.9	97.5	51.2	50.0	12.8	20.4	25.5	23.1	34.4
250	98.1	97.6	51.3	50.2	12.8	20.4	25.6	23.2	34.6
260	98.1	97.7	51.4	50.3	12.8	20.5	25.7	23.4	34.8
270	98.1	97.7	51.5	50.4	12.8	20.6	25.8	23.5	34.9
280	98.1	97.7	51.5	50.5	12.8	20.6	25.9	23.5	35.1
290	98.1	97.7	51.6	50.5	12.9	20.6	25.9	23.6	35.2
300	98.1	97.7	51.6	50.6	12.9	20.7	26.0	23.7	35.3

表 I -a-2 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度計測値（計測点⑩～⑱）

時間 [min]	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.9	0.2	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
40	1.8	0.5	0.8	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
50	2.7	0.8	1.6	1.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
60	3.5	1.1	2.5	2.5	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0
70	4.1	1.4	3.4	3.5	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0
80	4.6	1.7	4.2	4.4	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0
90	5.0	2.0	5.0	5.3	6.6	0.1	0.1	0.1	0.0
100	5.4	2.2	5.6	6.0	7.4	0.1	0.1	0.1	0.0
110	5.7	2.4	6.2	6.7	8.2	0.1	0.1	0.2	0.1
120	5.9	2.6	6.7	7.3	8.9	0.1	0.2	0.3	0.1
130	6.1	2.7	7.2	7.9	9.5	0.2	0.3	0.3	0.1
140	6.3	2.9	7.6	8.4	10.0	0.2	0.3	0.4	0.1
150	6.5	3.0	8.0	8.8	10.5	0.3	0.4	0.5	0.1
160	6.6	3.1	8.3	9.2	10.9	0.3	0.5	0.6	0.1
170	6.8	3.2	8.6	9.5	11.3	0.3	0.5	0.7	0.1
180	6.9	3.3	8.8	9.8	11.6	0.4	0.6	0.8	0.1
190	7.0	3.3	9.1	10.1	12.0	0.4	0.7	0.9	0.2
200	7.1	3.4	9.3	10.4	12.2	0.5	0.8	1.0	0.2
210	7.2	3.5	9.5	10.6	12.5	0.5	0.8	1.1	0.2
220	7.2	3.5	9.6	10.8	12.7	0.6	0.9	1.2	0.2
230	7.3	3.6	9.8	11.0	12.9	0.6	1.0	1.3	0.2
240	7.3	3.6	9.9	11.2	13.1	0.6	1.1	1.4	0.3
250	7.4	3.7	10.1	11.3	13.3	0.7	1.1	1.5	0.3
260	7.4	3.7	10.2	11.4	13.4	0.7	1.2	1.6	0.3
270	7.5	3.8	10.3	11.6	13.6	0.7	1.2	1.6	0.3
280	7.5	3.8	10.4	11.7	13.7	0.8	1.3	1.7	0.4
290	7.5	3.8	10.4	11.8	13.8	0.8	1.3	1.8	0.4
300	7.5	3.9	10.5	11.9	13.9	0.9	1.4	1.9	0.4

表 I -a-3 供給圧力 2.5kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①⑨～②⑦）

時間 [min]	①⑨	②⑩	③⑪	④⑫	⑤⑬	⑥⑭	⑦⑮	⑧⑯	⑨⑰
10	0.0	0.0	43.2	3.9	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	66.8	15.4	3.1	4.8	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	76.5	23.7	7.7	10.2	0.2	0.0	0.0
40	0.0	0.0	81.8	29.9	11.5	14.5	0.6	0.0	0.0
50	0.0	0.0	85.1	34.7	14.5	17.9	1.1	0.1	0.1
60	0.0	0.0	87.5	38.4	16.9	20.8	1.6	0.2	0.1
70	0.0	0.0	89.2	41.3	18.8	23.2	2.1	0.4	0.1
80	0.0	0.0	90.6	43.7	20.4	25.3	2.6	0.7	0.1
90	0.0	0.0	91.7	45.6	21.8	27.0	3.0	1.0	0.1
100	0.0	0.0	92.5	47.1	22.8	28.5	3.3	1.2	0.1
110	0.0	0.0	93.2	48.3	23.7	29.8	3.7	1.6	0.1
120	0.0	0.0	93.8	49.4	24.5	31.0	3.9	1.9	0.1
130	0.0	0.1	94.2	50.2	25.1	31.9	4.2	2.2	0.1
140	0.1	0.1	94.7	51.0	25.7	32.8	4.4	2.5	0.1
150	0.1	0.1	95.2	51.7	26.2	33.6	4.6	2.7	0.1
160	0.1	0.1	95.5	52.3	26.6	34.2	4.8	3.0	0.1
170	0.1	0.1	95.9	52.8	27.0	34.9	4.9	3.2	0.2
180	0.1	0.1	96.3	53.3	27.4	35.4	5.1	3.5	0.2
190	0.2	0.1	96.5	53.7	27.7	35.9	5.2	3.7	0.2
200	0.2	0.1	96.7	54.1	27.9	36.4	5.3	3.9	0.2
210	0.2	0.1	96.7	54.3	28.2	36.7	5.4	4.1	0.2
220	0.3	0.1	96.7	54.5	28.3	37.1	5.5	4.3	0.2
230	0.3	0.1	96.8	54.7	28.5	37.3	5.5	4.4	0.2
240	0.3	0.2	97.0	54.9	28.6	37.6	5.6	4.6	0.3
250	0.4	0.2	97.1	55.1	28.8	37.8	5.7	4.7	0.3
260	0.4	0.2	97.1	55.2	28.9	38.1	5.8	4.8	0.3
270	0.5	0.2	97.2	55.3	29.0	38.2	5.8	5.0	0.3
280	0.5	0.2	97.1	55.4	29.1	38.4	5.9	5.1	0.3
290	0.5	0.2	97.1	55.5	29.1	38.5	5.9	5.2	0.3
300	0.6	0.3	97.1	55.5	29.2	38.7	5.9	5.3	0.4

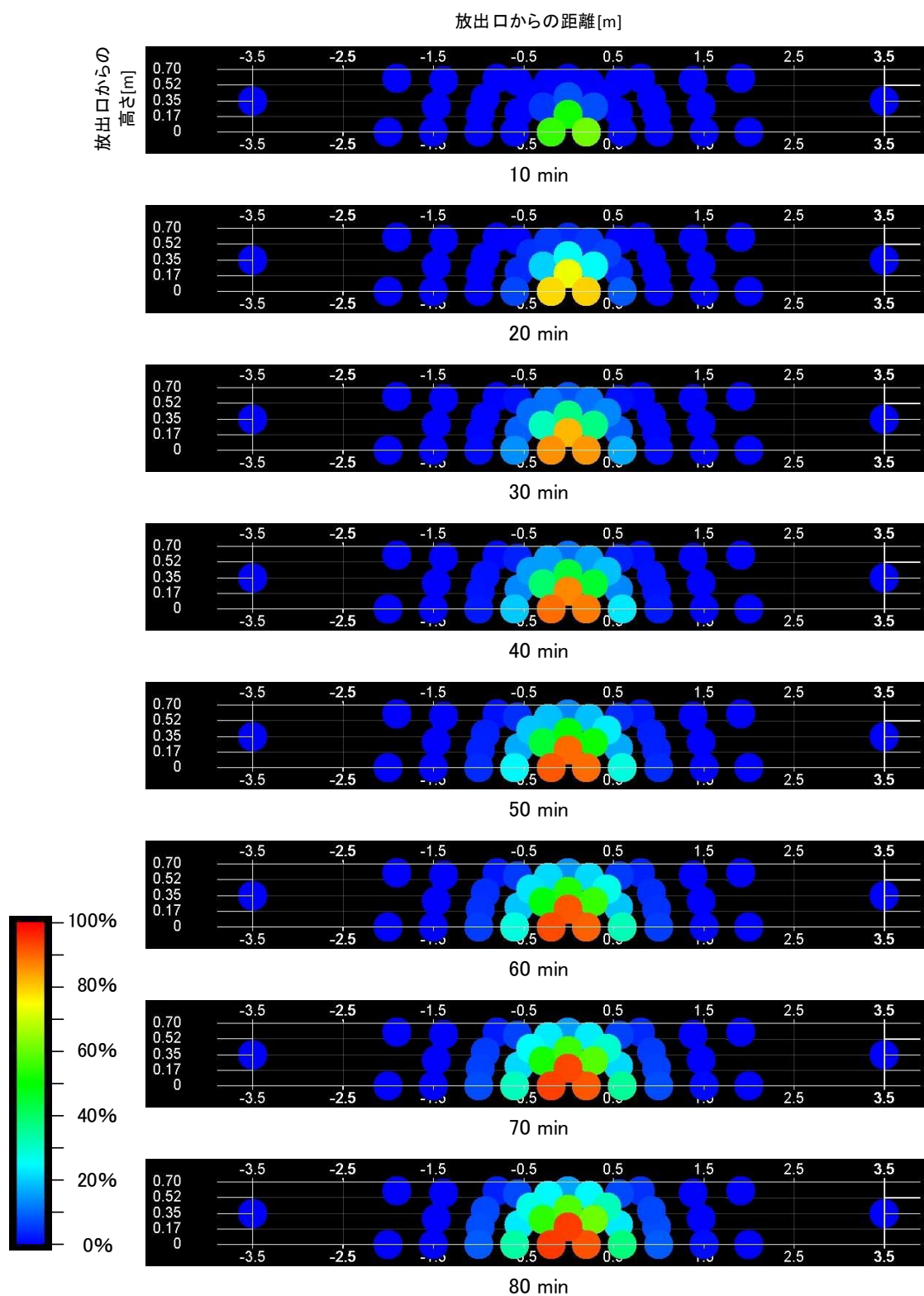


図 I -b-1 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (10~80min)

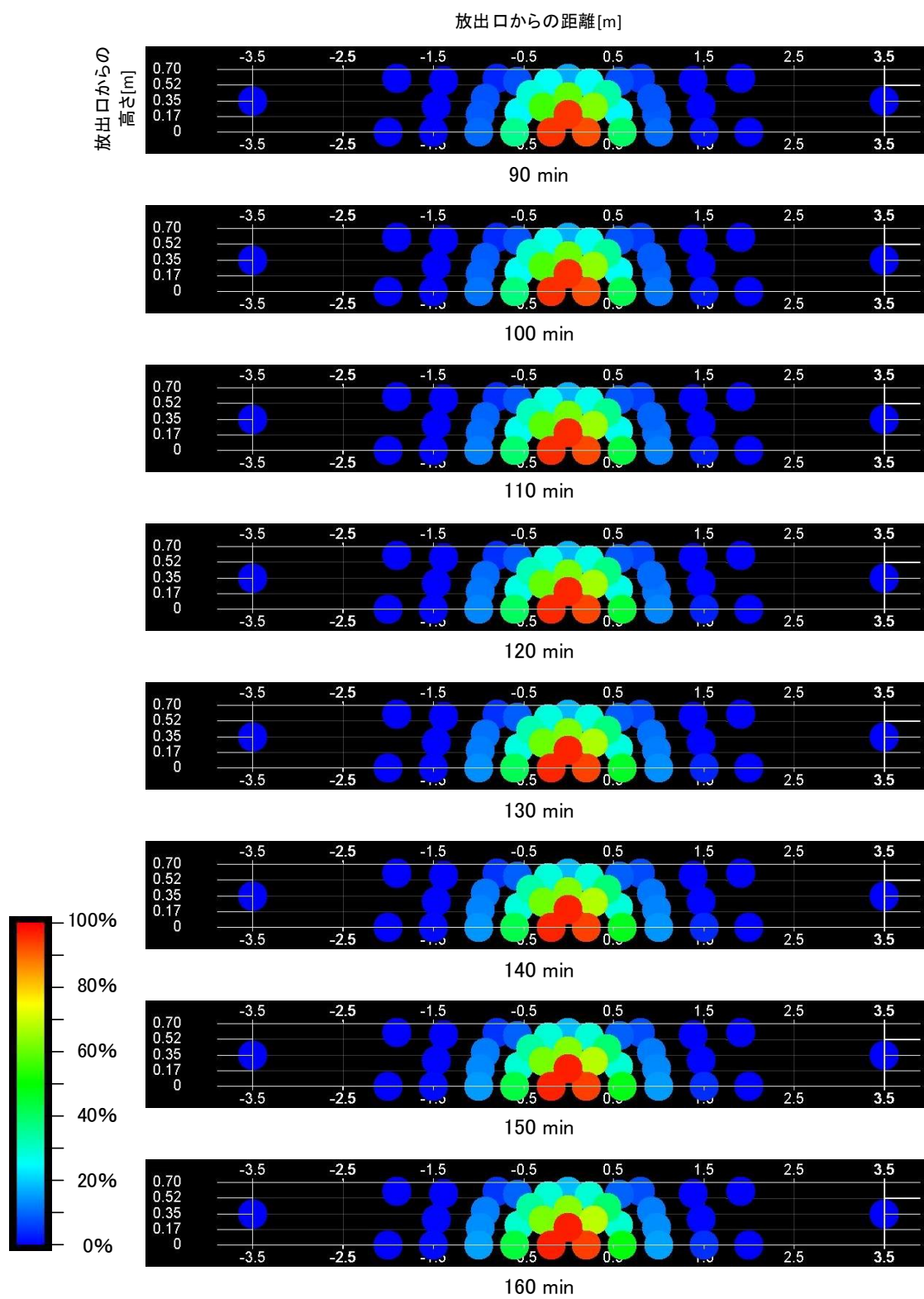


図 I -b-2 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (90~160min)

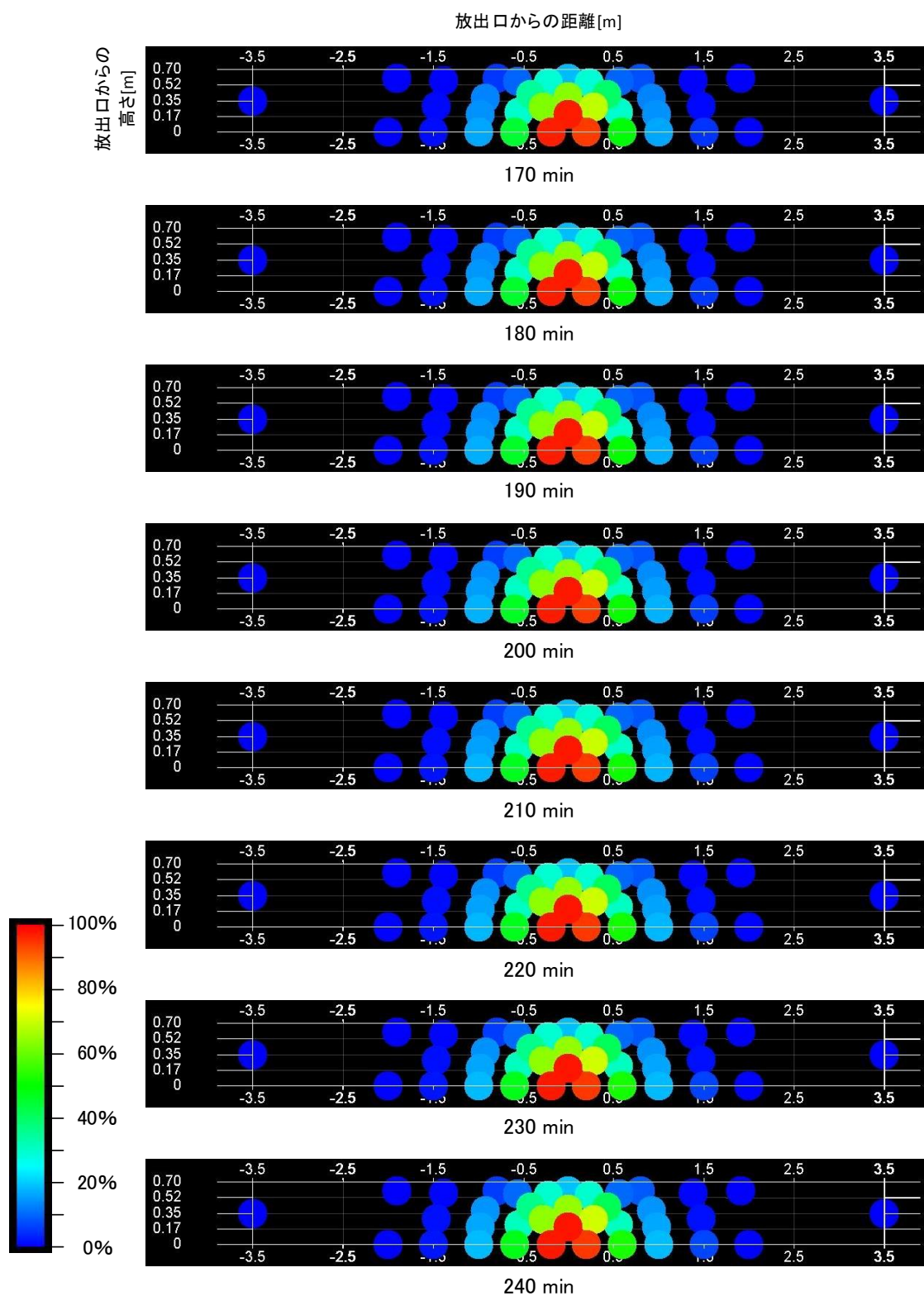


図 I -b-3 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (170~240min)

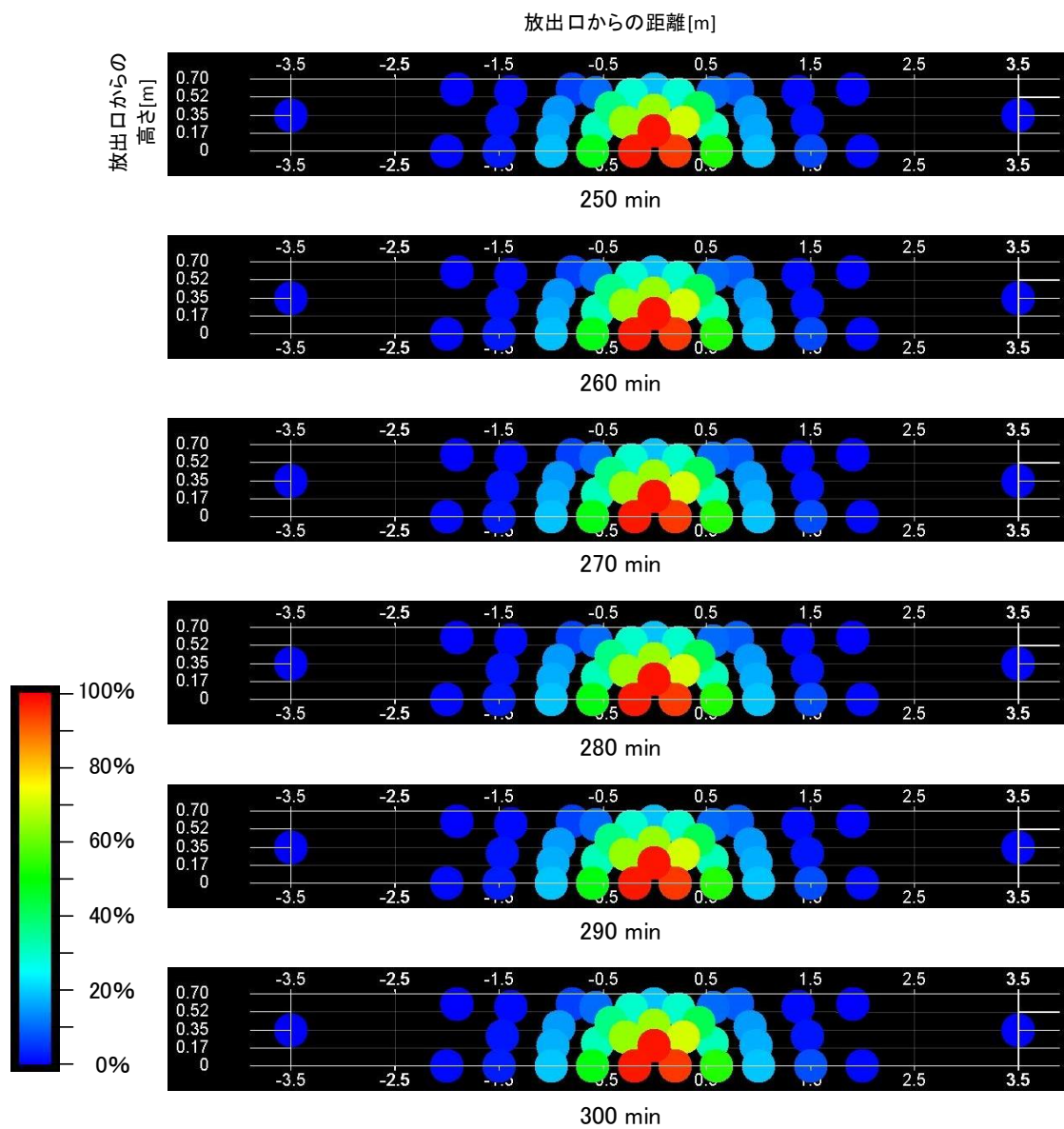


図 I -b-4 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (250～300min)

表 I・b-1 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①～⑨）

時間 [min]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
10	51.6	55.1	8.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
20	73.3	78.6	25.6	20.6	3.8	5.3	4.7	4.0	6.8
30	81.8	85.8	36.9	31.6	8.0	11.2	10.7	9.3	14.1
40	86.5	89.2	44.5	39.4	10.9	15.5	15.7	13.5	19.9
50	89.5	91.3	49.6	44.9	12.9	19.0	19.5	16.8	24.5
60	91.5	92.7	53.1	49.0	14.3	21.4	22.6	19.3	28.2
70	93.0	93.7	55.8	52.1	15.3	23.2	25.1	21.4	31.3
80	94.0	94.4	57.6	54.4	16.1	24.5	27.1	23.1	33.9
90	94.8	95.0	59.0	56.2	16.7	25.6	28.7	24.4	36.0
100	95.3	95.4	60.1	57.7	17.1	26.3	30.0	25.5	37.8
110	95.8	95.8	60.9	58.8	17.5	27.0	31.0	26.4	39.3
120	96.2	96.1	61.6	59.7	17.8	27.5	31.9	27.2	40.7
130	96.5	96.3	62.2	60.5	18.0	28.0	32.7	27.8	41.8
140	96.8	96.6	62.6	61.1	18.2	28.3	33.3	28.4	42.7
150	97.0	96.8	63.0	61.7	18.3	28.6	33.8	28.9	43.6
160	97.1	96.9	63.3	62.2	18.5	28.9	34.3	29.3	44.3
170	97.3	97.1	63.6	62.5	18.5	29.1	34.7	29.6	44.9
180	97.4	97.1	63.8	62.9	18.7	29.3	35.0	29.9	45.5
190	97.5	97.2	64.0	63.1	18.7	29.4	35.3	30.2	46.0
200	97.6	97.3	64.1	63.4	18.8	29.5	35.5	30.4	46.4
210	97.7	97.4	64.3	63.6	18.9	29.6	35.8	30.6	46.8
220	97.9	97.6	64.5	63.9	18.9	29.3	36.0	30.8	47.2
230	97.9	97.6	64.6	64.1	19.0	29.4	36.2	31.0	47.5
240	98.0	97.7	64.7	64.2	19.0	29.5	36.3	31.2	47.8
250	98.1	97.7	64.8	64.4	19.1	29.4	36.5	31.3	48.0
260	98.1	97.7	64.8	64.5	19.1	29.5	36.6	31.4	48.2
270	98.1	97.7	64.9	64.5	19.1	29.7	36.7	31.5	48.4
280	98.1	97.7	64.9	64.6	19.2	30.0	36.8	31.6	48.6
290	98.0	97.7	64.8	64.6	19.1	30.0	36.9	31.7	48.7
300	98.0	97.7	64.8	64.6	19.2	29.9	36.9	31.7	48.8

表 I・b-2 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点⑩～⑱）

時間 [min]	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	1.6	0.1	0.4	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
40	3.2	0.7	1.6	1.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0
50	4.6	1.3	3.0	3.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0
60	5.7	2.0	4.5	4.8	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	6.6	2.6	5.9	6.3	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0
80	7.3	3.1	7.1	7.7	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0
90	7.8	3.5	8.1	8.9	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0
100	8.2	3.9	9.1	9.9	11.5	0.0	0.0	0.1	0.0
110	8.6	4.2	9.9	10.9	12.4	0.0	0.0	0.2	0.0
120	8.9	4.5	10.6	11.7	13.3	0.0	0.1	0.3	0.0
130	9.1	4.7	11.2	12.4	14.1	0.0	0.2	0.5	0.0
140	9.3	4.9	11.7	13.0	14.8	0.0	0.4	0.6	0.0
150	9.5	5.0	12.2	13.6	15.4	0.1	0.5	0.8	0.0
160	9.7	5.2	12.6	14.1	15.9	0.1	0.6	1.0	0.0
170	9.8	5.3	13.0	14.5	16.4	0.2	0.7	1.1	0.0
180	9.9	5.4	13.3	14.9	16.8	0.2	0.8	1.3	0.0
190	10.0	5.5	13.6	15.2	17.2	0.3	0.9	1.4	0.0
200	10.1	5.6	13.9	15.5	17.5	0.3	1.1	1.6	0.0
210	10.2	5.7	14.1	15.8	17.8	0.4	1.2	1.7	0.0
220	10.3	5.8	14.3	16.1	18.1	0.5	1.3	1.8	0.0
230	10.3	5.8	14.5	16.3	18.4	0.5	1.4	2.0	0.0
240	10.4	5.9	14.7	16.5	18.6	0.6	1.5	2.1	0.0
250	10.4	6.0	14.8	16.7	18.8	0.6	1.6	2.2	0.0
260	10.5	6.1	15.0	16.9	19.0	0.7	1.7	2.3	0.0
270	10.5	6.1	15.1	17.0	19.2	0.8	1.8	2.4	0.1
280	10.6	6.2	15.2	17.2	19.3	0.8	1.8	2.6	0.1
290	10.6	6.2	15.3	17.3	19.4	0.9	1.9	2.7	0.2
300	10.6	6.2	15.4	17.4	19.6	0.9	2.0	2.8	0.2

表 I -b-3 供給圧力 5.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①⑨～②⑦）

時間 [min]	①⑨	②⑩	③⑪	④⑫	⑤⑬	⑥⑭	⑦⑮	⑧⑯	⑨⑰
10	0.0	0.0	61.2	7.7	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	79.5	25.3	6.5	8.8	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	85.1	37.2	13.5	16.8	0.2	0.0	0.0
40	0.0	0.0	87.9	45.4	19.0	23.0	1.1	0.0	0.0
50	0.0	0.0	89.5	51.2	23.4	28.0	2.1	0.1	0.0
60	0.0	0.0	90.6	55.4	26.9	32.0	3.1	0.4	0.0
70	0.0	0.0	91.4	58.5	29.6	35.2	3.9	0.8	0.0
80	0.0	0.0	91.9	60.8	31.7	37.9	4.6	1.2	0.0
90	0.0	0.0	92.4	62.6	33.5	40.2	5.2	1.6	0.0
100	0.0	0.0	92.8	64.0	34.8	42.0	5.7	2.1	0.0
110	0.0	0.0	93.0	65.1	36.0	43.6	6.2	2.6	0.0
120	0.0	0.0	93.3	66.1	36.9	45.0	6.6	3.1	0.0
130	0.0	0.0	93.5	66.8	37.7	46.1	6.9	3.5	0.0
140	0.0	0.0	93.7	67.5	38.3	47.1	7.2	3.9	0.0
150	0.0	0.0	93.8	68.0	38.9	48.0	7.4	4.3	0.0
160	0.0	0.0	93.9	68.5	39.4	48.7	7.6	4.7	0.0
170	0.1	0.0	94.0	68.8	39.8	49.4	7.8	5.0	0.0
180	0.1	0.0	94.1	69.1	40.1	50.0	8.0	5.3	0.0
190	0.2	0.0	94.2	69.4	40.4	50.5	8.1	5.6	0.0
200	0.2	0.0	94.3	69.7	40.7	50.9	8.2	5.9	0.0
210	0.3	0.0	94.3	69.9	40.9	51.3	8.3	6.1	0.0
220	0.3	0.0	94.5	70.1	41.2	51.7	8.5	6.4	0.0
230	0.4	0.0	94.5	70.3	41.3	52.0	8.6	6.6	0.0
240	0.4	0.0	94.5	70.5	41.5	52.3	8.7	6.8	0.0
250	0.5	0.0	94.6	70.6	41.7	52.6	8.8	7.0	0.0
260	0.5	0.0	94.6	70.7	41.8	52.8	8.8	7.1	0.0
270	0.6	0.0	94.6	70.8	41.9	53.0	8.9	7.3	0.1
280	0.7	0.0	94.6	70.9	42.0	53.2	9.0	7.4	0.1
290	0.7	0.0	94.5	70.8	42.0	53.3	9.0	7.5	0.1
300	0.8	0.0	94.6	70.9	42.1	53.4	9.0	7.7	0.2

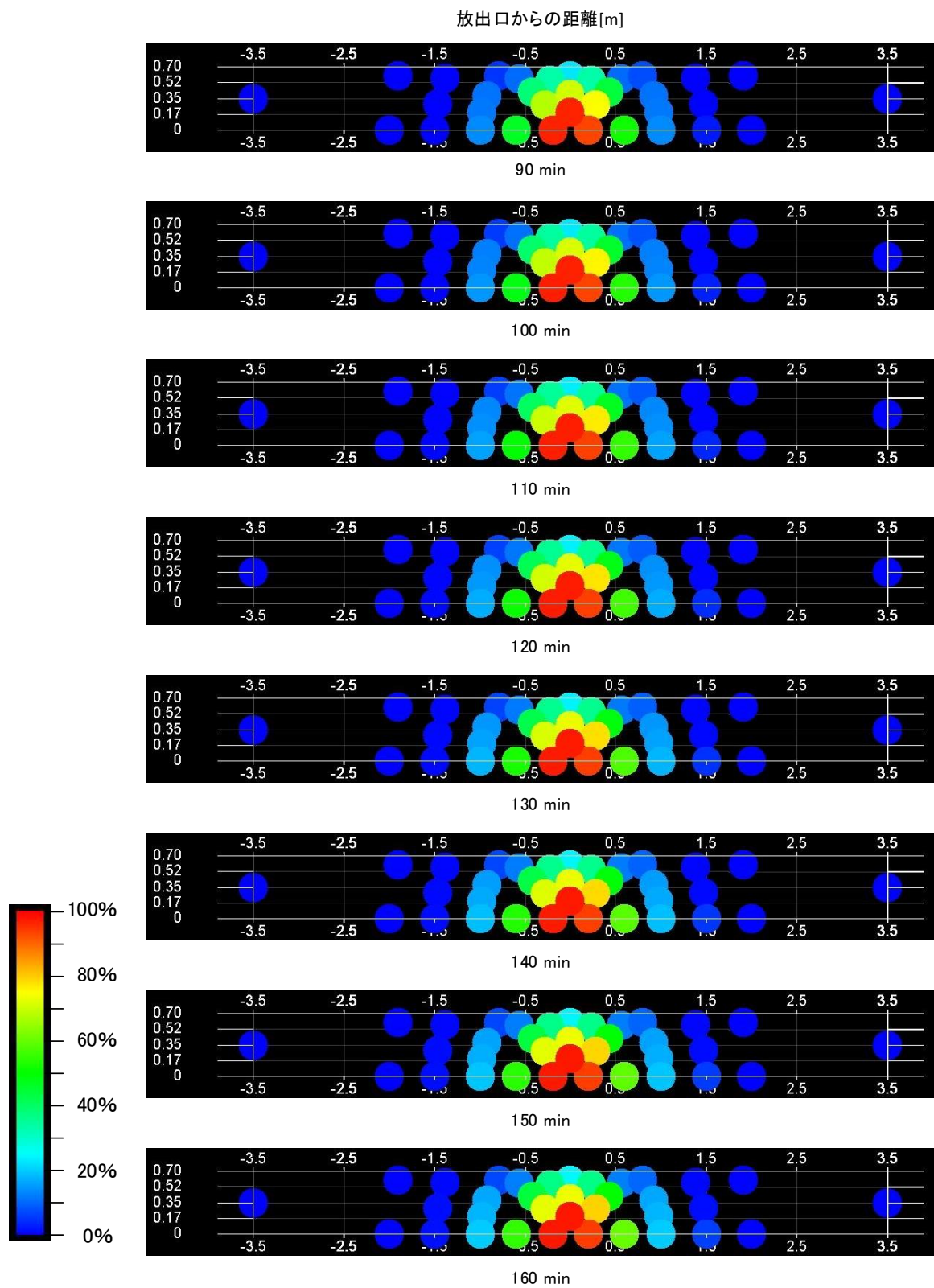


図 I -c-2 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (90~160min)

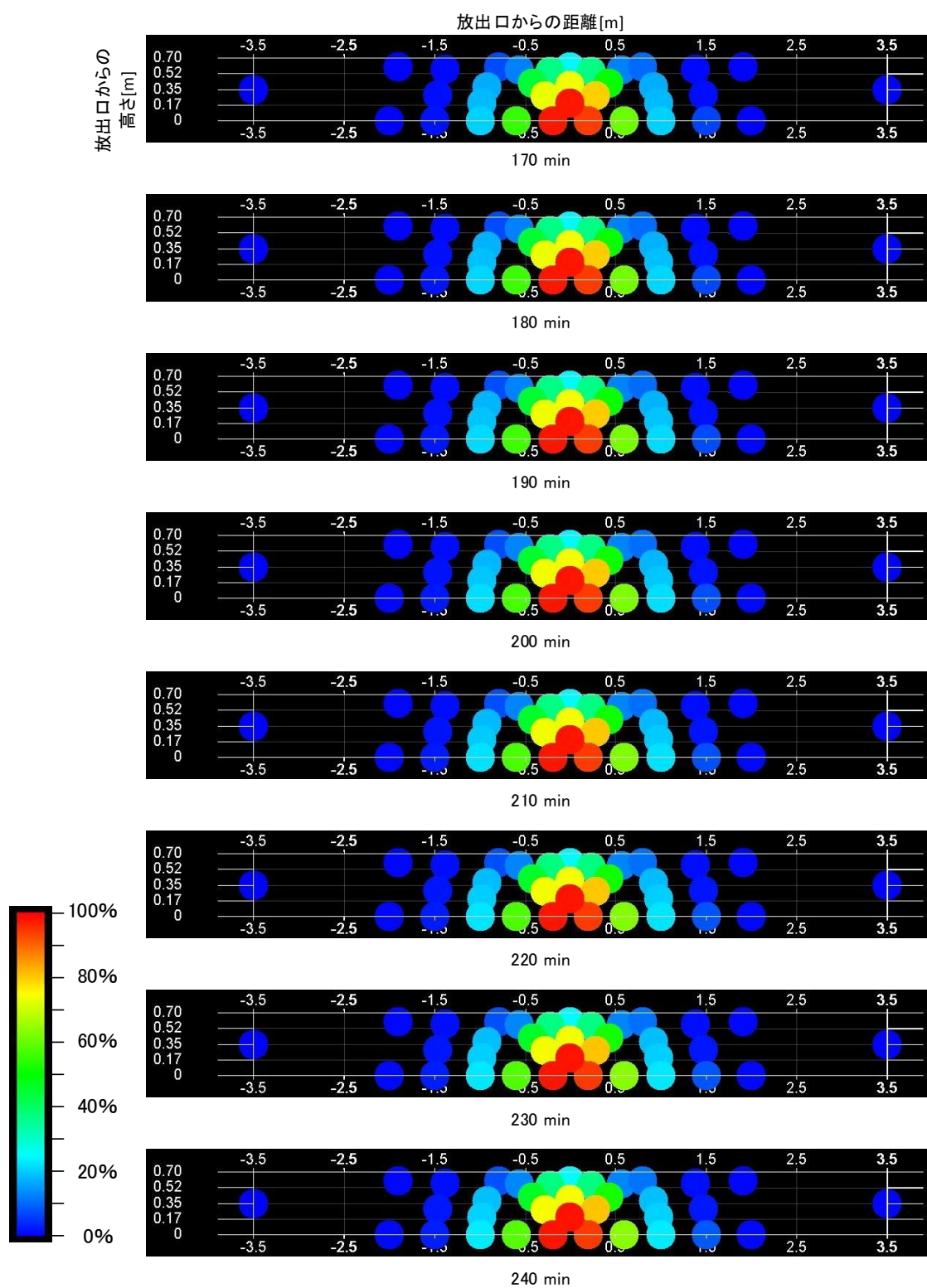


図 I -c-3 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (170~240min)

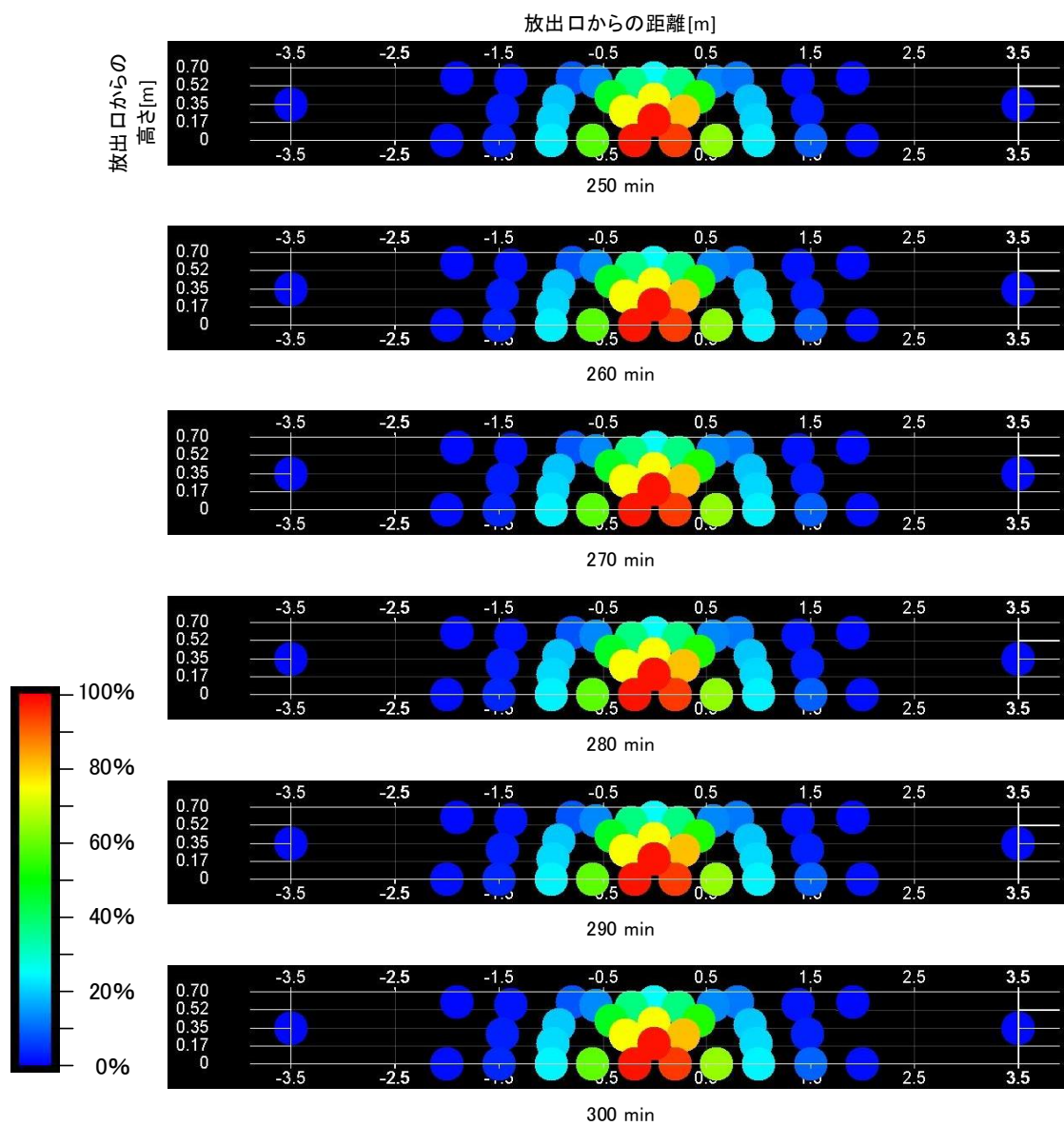


図 I -c-4 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度経時変化 (250～300min)

表 I -c-1 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①～⑨）

時間 [min]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
10	66.6	72.0	14.8	10.3	0.6	0.8	0.6	-	1.2
20	82.7	87.7	36.6	29.9	6.8	9.0	8.1	-	11.2
30	88.6	91.8	49.6	43.0	12.2	16.6	15.8	-	20.4
40	91.6	93.7	57.5	51.5	15.8	22.2	22.1	-	27.6
50	93.5	94.8	62.4	57.3	18.3	26.1	27.1	-	33.2
60	94.7	95.5	65.6	61.3	20.0	28.8	30.9	-	37.6
70	95.5	96.0	67.9	64.1	21.2	30.8	33.9	-	41.2
80	96.0	96.3	69.4	66.2	22.0	32.2	36.2	-	44.0
90	96.5	96.6	70.5	67.8	22.6	33.5	38.1	-	46.4
100	96.8	96.9	71.3	69.1	23.1	34.4	39.5	-	48.3
110	97.0	97.0	72.0	70.0	23.5	35.0	40.7	-	49.9
120	97.2	97.2	72.5	70.8	23.8	35.6	41.7	-	51.3
130	97.4	97.3	72.9	71.4	24.0	36.0	42.4	-	52.4
140	97.5	97.4	73.2	71.9	24.1	36.2	43.1	-	53.4
150	97.6	97.5	73.4	72.4	24.3	36.4	43.6	-	54.2
160	97.7	97.6	73.6	72.7	24.4	36.8	44.1	-	54.9
170	97.7	97.7	73.8	73.0	24.5	37.0	44.5	-	55.5
180	97.8	97.7	73.9	73.3	24.6	37.0	44.8	-	56.1
190	97.9	97.8	74.0	73.5	24.6	36.8	45.1	-	56.6
200	97.9	97.8	74.1	73.6	24.7	36.9	45.3	-	57.0
210	97.9	97.8	74.2	73.8	24.7	37.1	45.6	-	57.3
220	98.0	97.9	74.3	74.0	24.8	37.3	45.7	-	57.6
230	98.0	97.9	74.4	74.1	24.9	37.1	46.0	-	58.0
240	98.1	98.0	74.5	74.2	24.9	37.1	46.1	-	58.2
250	98.1	98.0	74.5	74.4	25.0	36.9	46.3	-	58.5
260	98.1	98.0	74.6	74.5	25.0	37.0	46.4	-	58.7
270	98.2	98.0	74.6	74.6	25.0	37.3	46.5	-	58.9
280	98.2	98.1	74.7	74.6	25.1	37.3	46.6	-	59.1
290	98.2	98.1	74.7	74.7	25.1	37.3	46.7	-	59.2
300	98.2	98.1	74.7	74.8	25.2	37.3	46.8	-	59.3

表 I -c-2 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度計測値 (計測点⑩～⑱)

時間 [min]	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.9	0.1	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
30	3.0	0.7	1.1	1.1	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
40	5.2	1.6	2.9	2.9	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	6.9	2.6	4.9	5.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0
60	8.2	3.4	6.8	7.0	8.6	0.1	0.0	0.1	0.0
70	9.2	4.1	8.5	8.9	10.5	0.1	0.1	0.1	0.1
80	10.0	4.7	10.0	10.5	12.2	0.1	0.1	0.2	0.1
90	10.6	5.2	11.3	11.9	13.7	0.2	0.2	0.3	0.1
100	11.1	5.6	12.5	13.1	15.0	0.2	0.3	0.4	0.1
110	11.4	6.0	13.4	14.2	16.1	0.3	0.4	0.6	0.1
120	11.8	6.3	14.3	15.2	17.1	0.4	0.6	0.8	0.2
130	12.0	6.5	15.0	16.0	18.0	0.5	0.7	0.9	0.2
140	12.2	6.8	15.6	16.7	18.8	0.6	0.9	1.1	0.2
150	12.4	7.0	16.2	17.4	19.5	0.7	1.0	1.4	0.3
160	12.6	7.1	16.6	17.9	20.1	0.8	1.2	1.6	0.3
170	12.7	7.3	17.1	18.4	20.6	0.9	1.4	1.8	0.3
180	12.8	7.4	17.5	18.9	21.1	0.9	1.5	2.0	0.4
190	12.9	7.5	17.8	19.3	21.6	1.0	1.7	2.2	0.4
200	13.0	7.6	18.1	19.6	21.9	1.1	1.8	2.4	0.5
210	13.1	7.7	18.4	19.9	22.3	1.2	2.0	2.5	0.5
220	13.1	7.8	18.6	20.2	22.6	1.3	2.1	2.7	0.6
230	13.2	7.9	18.8	20.5	22.9	1.4	2.2	2.9	0.6
240	13.3	8.0	19.0	20.7	23.1	1.4	2.3	3.0	0.7
250	13.3	8.0	19.2	20.9	23.4	1.5	2.5	3.2	0.7
260	13.4	8.1	19.3	21.1	23.6	1.6	2.6	3.3	0.7
270	13.4	8.2	19.5	21.3	23.8	1.7	2.7	3.5	0.8
280	13.5	8.2	19.6	21.5	24.0	1.7	2.8	3.6	0.8
290	13.5	8.3	19.8	21.6	24.1	1.8	2.9	3.7	0.9
300	13.5	8.3	19.9	21.7	24.3	1.9	3.0	3.8	0.9

表 I -c-3 供給圧力 7.5kPa における地中の水素濃度計測値 (計測点⑭～㉓)

時間 [min]	⑭	⑮	⑯	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗
10	0.0	0.0	75.3	14.2	1.2	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	86.5	36.4	10.7	13.8	0.2	0.0	0.1	0.1
30	0.0	0.0	89.6	50.2	19.7	24.0	1.0	0.1	0.1	0.1
40	0.0	0.0	91.0	58.8	26.9	31.8	2.3	0.2	0.2	0.1
50	0.0	0.0	91.8	64.5	32.4	37.8	3.6	0.4	0.4	0.1
60	0.0	0.0	92.4	68.4	36.6	42.5	4.9	0.8	0.8	0.1
70	0.0	0.0	92.7	71.1	39.8	46.2	5.9	1.3	1.3	0.1
80	0.0	0.1	93.0	73.1	42.2	49.1	6.8	1.9	1.9	0.1
90	0.0	0.1	93.2	74.7	44.1	51.5	7.5	2.5	2.5	0.1
100	0.1	0.1	93.4	75.8	45.6	53.4	8.1	3.1	3.1	0.2
110	0.1	0.1	93.5	76.7	46.8	55.1	8.6	3.7	3.7	0.2
120	0.1	0.1	93.7	77.5	47.7	56.4	9.0	4.3	4.3	0.2
130	0.2	0.1	93.8	78.0	48.5	57.6	9.4	4.9	4.9	0.2
140	0.2	0.1	93.8	78.5	49.2	58.6	9.7	5.4	5.4	0.2
150	0.3	0.2	93.9	78.9	49.7	59.4	10.0	5.8	5.8	0.3
160	0.3	0.2	94.0	79.2	50.2	60.1	10.2	6.3	6.3	0.3
170	0.4	0.2	94.0	79.5	50.6	60.8	10.4	6.6	6.6	0.3
180	0.4	0.2	94.1	79.7	50.9	61.3	10.6	7.0	7.0	0.3
190	0.5	0.3	94.1	79.9	51.2	61.8	10.7	7.3	7.3	0.4
200	0.6	0.3	94.1	80.1	51.4	62.2	10.9	7.7	7.7	0.4
210	0.7	0.3	94.2	80.2	51.6	62.6	11.0	7.9	7.9	0.4
220	0.7	0.4	94.2	80.4	51.8	62.9	11.1	8.2	8.2	0.5
230	0.8	0.4	94.2	80.5	52.0	63.2	11.2	8.4	8.4	0.5
240	0.9	0.4	94.2	80.7	52.2	63.5	11.3	8.6	8.6	0.5
250	1.0	0.5	94.3	80.8	52.4	63.8	11.4	8.8	8.8	0.6
260	1.1	0.5	94.3	80.9	52.5	64.0	11.5	9.0	9.0	0.6
270	1.1	0.5	94.3	81.0	52.6	64.2	11.6	9.2	9.2	0.6
280	1.2	0.6	94.3	81.1	52.7	64.4	11.7	9.4	9.4	0.7
290	1.3	0.6	94.3	81.1	52.8	64.6	11.7	9.5	9.5	0.7
300	1.4	0.7	94.4	81.2	52.9	64.7	11.8	9.6	9.6	0.8

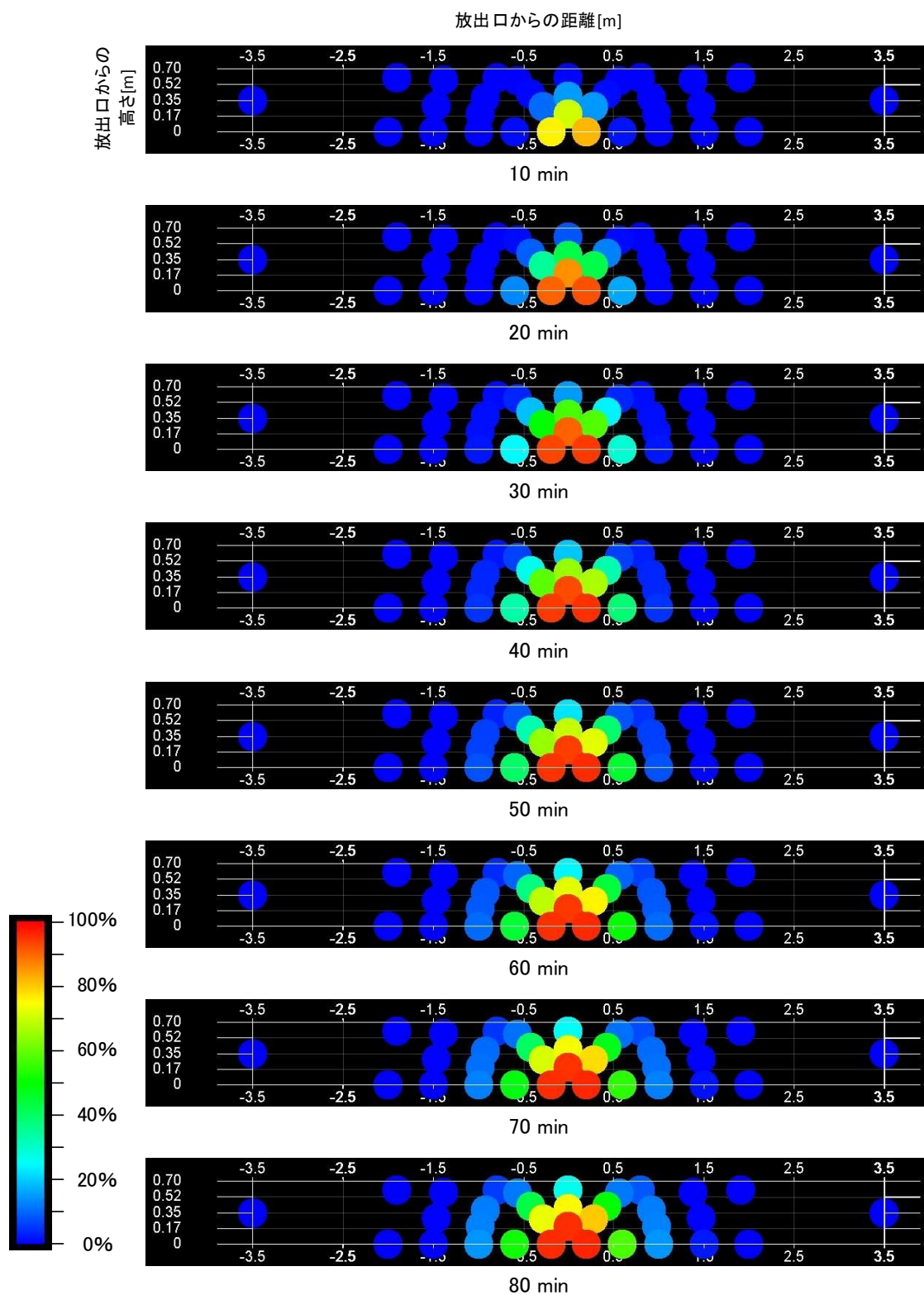


図 I -d-1 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (10~80min)

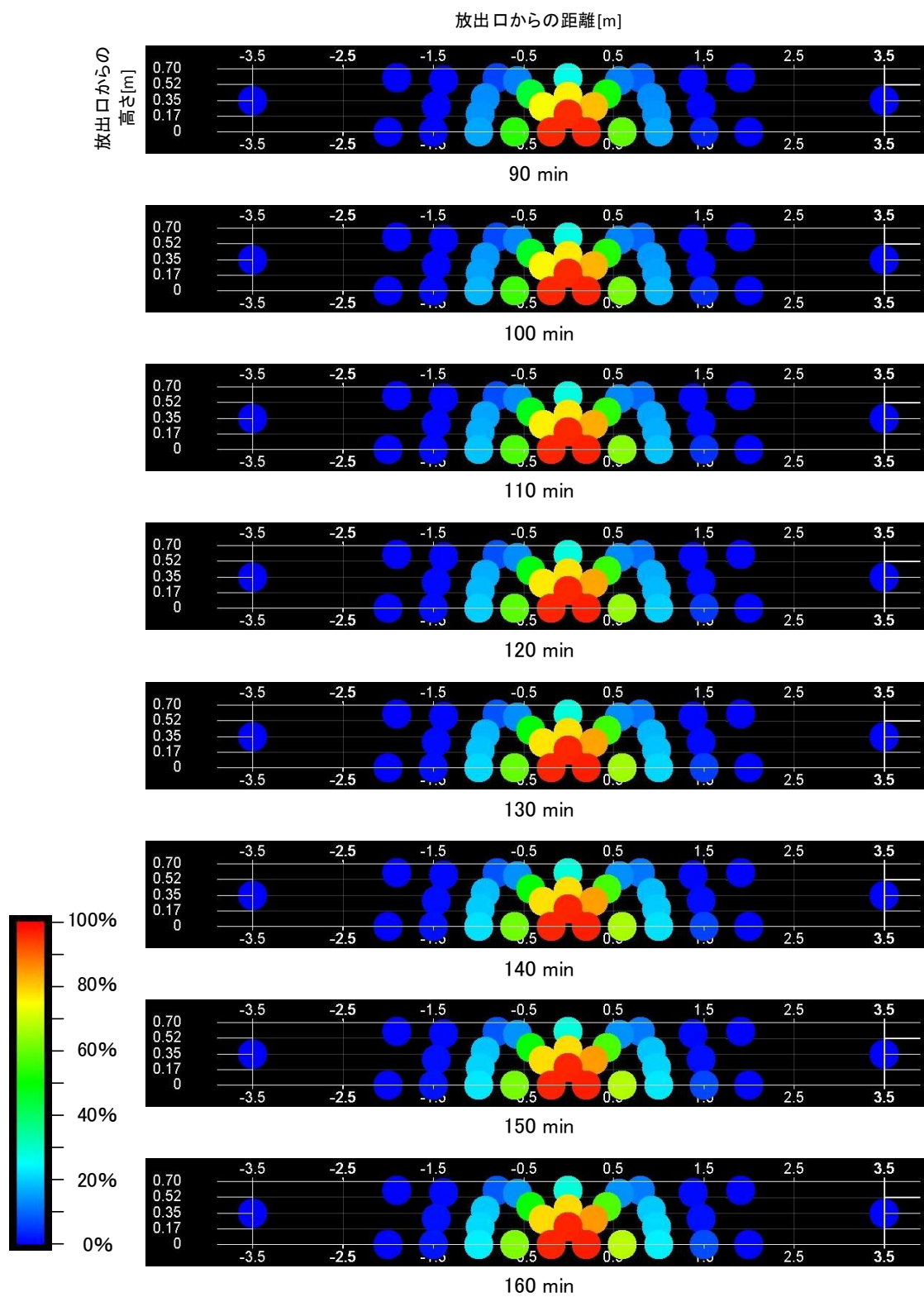


図 I -d-2 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (90~160min)

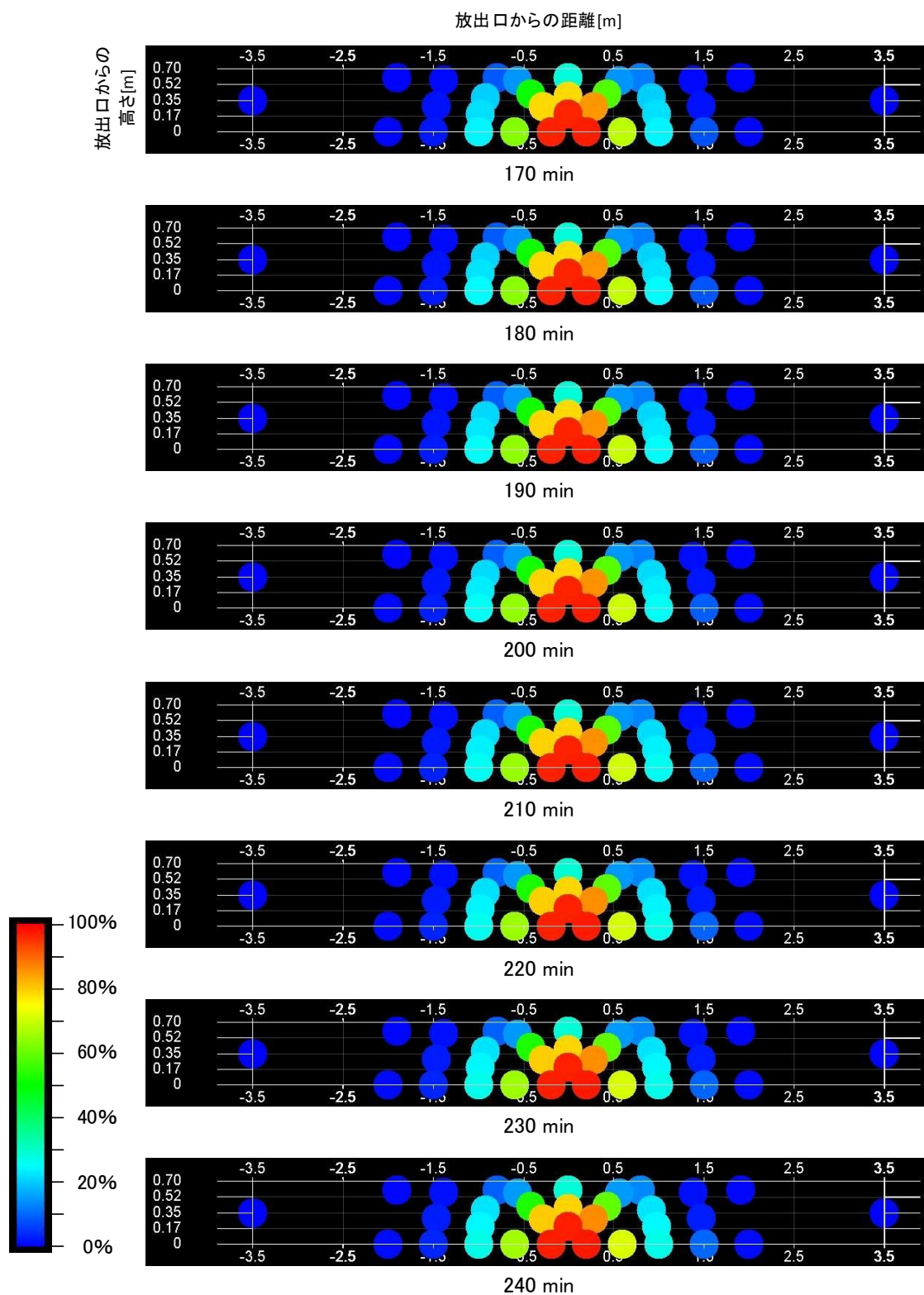


図 I -d-3 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (170~240min)

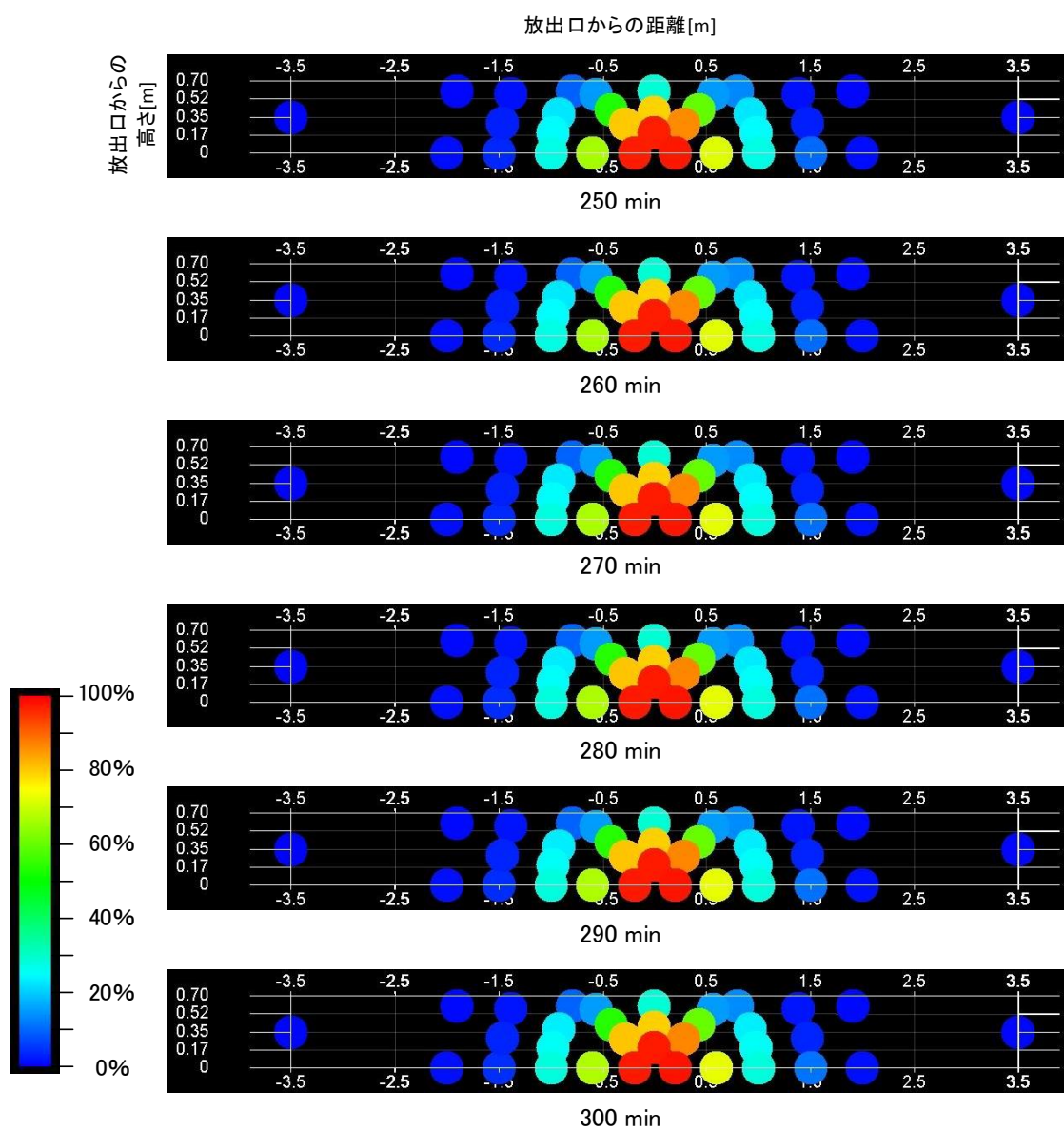


図 I -d-4 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度経時変化 (250~300min)

表 I -d-1 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点①～⑨）

時間 [min]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
10	70.3	76.2	15.5	10.5	0.5	-	0.5	-	1.0
20	85.7	90.3	42.6	35.0	8.4	-	9.5	-	13.4
30	90.3	93.1	57.0	50.0	15.2	-	19.0	-	24.8
40	92.6	94.3	64.9	59.0	19.7	-	26.7	-	33.4
50	93.8	94.9	69.5	64.7	22.6	-	32.6	-	39.9
60	94.6	95.3	72.4	68.6	24.4	-	37.1	-	44.8
70	95.1	95.6	74.2	71.2	25.7	-	40.4	-	48.5
80	95.4	95.8	75.4	73.0	26.5	-	43.0	-	51.5
90	95.6	96.0	76.3	74.4	27.1	-	44.9	-	53.9
100	95.8	96.1	76.9	75.5	27.5	-	46.4	-	55.9
110	96.0	96.2	77.3	76.3	27.8	-	47.6	-	57.5
120	96.1	96.3	77.7	76.9	28.0	-	48.5	-	58.9
130	96.2	96.4	77.9	77.5	28.1	-	49.3	-	60.0
140	96.3	96.4	78.1	77.9	28.4	-	49.9	-	61.0
150	96.3	96.5	78.3	78.2	28.4	-	50.4	-	61.8
160	96.4	96.5	78.4	78.5	28.5	-	50.9	-	62.5
170	96.4	96.6	78.5	78.7	28.6	-	51.2	-	63.1
180	96.5	96.6	78.5	78.9	28.6	-	51.5	-	63.6
190	96.5	96.6	78.6	79.1	28.7	-	51.8	-	64.0
200	96.5	96.7	78.6	79.2	28.7	-	52.0	-	64.4
210	96.6	96.8	78.7	79.4	28.8	-	52.3	-	64.8
220	96.7	96.8	78.9	79.6	28.9	-	52.5	-	65.2
230	96.8	97.0	79.0	79.8	28.9	-	52.7	-	65.6
240	96.9	97.1	79.1	80.0	29.0	-	52.9	-	65.9
250	97.0	97.2	79.3	80.2	29.0	-	53.1	-	66.2
260	97.2	97.3	79.4	80.3	29.0	-	53.3	-	66.5
270	97.3	97.3	79.5	80.5	28.9	-	53.4	-	66.7
280	97.4	97.5	79.6	80.6	29.1	-	53.6	-	67.0
290	97.4	97.5	79.6	80.7	29.1	-	53.7	-	67.1
300	97.4	97.5	79.6	80.6	29.0	-	53.7	-	67.2

表 I -d-2 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点⑩～⑱）

時間 [min]	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1.0	0.1	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
30	3.8	0.8	1.4	1.4	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
40	6.4	2.0	3.7	3.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0
50	8.4	3.2	6.2	6.4	8.0	0.0	0.0	0.1	0.0
60	9.9	4.3	8.6	8.9	10.5	0.0	0.1	0.1	0.0
70	11.0	5.2	10.6	11.0	12.8	0.0	0.1	0.2	0.0
80	11.9	5.9	12.4	12.9	14.7	0.1	0.2	0.3	0.0
90	12.5	6.5	13.9	14.6	16.4	0.1	0.3	0.4	0.0
100	13.0	7.0	15.2	16.0	17.9	0.2	0.4	0.6	0.0
110	13.4	7.4	16.3	17.2	19.2	0.3	0.6	0.8	0.1
120	13.7	7.8	17.3	18.3	20.4	0.5	0.7	1.0	0.1
130	14.0	8.0	18.1	19.3	21.4	0.6	0.9	1.2	0.2
140	14.2	8.3	18.8	20.1	22.2	0.7	1.1	1.5	0.2
150	14.3	8.5	19.4	20.8	23.0	0.8	1.3	1.7	0.2
160	14.5	8.6	20.0	21.5	23.7	0.8	1.5	2.0	0.3
170	14.6	8.8	20.4	22.0	24.3	0.9	1.7	2.2	0.3
180	14.7	8.9	20.9	22.5	24.8	1.0	1.9	2.5	0.3
190	14.8	9.0	21.2	23.0	25.3	1.1	2.1	2.7	0.4
200	14.9	9.1	21.6	23.3	25.8	1.2	2.2	2.9	0.4
210	15.0	9.2	21.8	23.7	26.1	1.3	2.4	3.2	0.5
220	15.1	9.3	22.1	24.0	26.5	1.4	2.6	3.4	0.5
230	15.1	9.4	22.4	24.3	26.8	1.5	2.7	3.5	0.6
240	15.2	9.5	22.6	24.6	27.1	1.6	2.9	3.7	0.6
250	15.3	9.5	22.8	24.8	27.4	1.6	3.0	3.9	0.6
260	15.3	9.6	23.0	25.1	27.6	1.7	3.1	4.0	0.7
270	15.3	9.6	23.1	25.3	27.9	1.8	3.2	4.2	0.8
280	15.4	9.7	23.3	25.4	28.1	1.9	3.3	4.3	0.8
290	15.4	9.7	23.4	25.6	28.3	1.9	3.5	4.5	0.9
300	15.4	9.7	23.5	25.8	28.4	2.0	3.6	4.6	0.9

表 I -d-3 供給圧力 10.0kPa における地中の水素濃度計測値（計測点⑭～㉓）

時間 [min]	⑭	⑮	⑯	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗
10	0.0	0.0	82.0	15.0	1.1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	92.2	42.7	12.8	16.5	0.2	0.1	0.1	0.1
30	0.0	0.0	94.3	58.0	24.0	29.1	1.2	0.1	0.1	0.1
40	0.0	0.0	95.3	66.9	32.8	38.4	3.0	0.3	0.3	0.1
50	0.0	0.0	95.7	72.3	39.3	45.3	4.7	0.6	0.6	0.1
60	0.0	0.0	96.1	75.9	44.0	50.4	6.2	1.1	1.1	0.1
70	0.1	0.0	96.3	78.3	47.4	54.2	7.4	1.8	1.8	0.1
80	0.1	0.0	96.5	80.0	49.9	57.3	8.4	2.5	2.5	0.1
90	0.1	0.0	96.6	81.3	51.9	59.7	9.3	3.2	3.2	0.1
100	0.1	0.0	96.7	82.2	53.3	61.6	9.9	4.0	4.0	0.1
110	0.1	0.0	96.8	83.0	54.5	63.2	10.4	4.7	4.7	0.1
120	0.2	0.0	96.9	83.5	55.3	64.6	10.9	5.4	5.4	0.1
130	0.2	0.1	97.0	84.0	56.1	65.7	11.3	6.0	6.0	0.1
140	0.3	0.1	97.0	84.4	56.7	66.6	11.6	6.6	6.6	0.2
150	0.3	0.1	97.1	84.7	57.2	67.4	11.9	7.1	7.1	0.2
160	0.4	0.1	97.1	84.9	57.6	68.1	12.2	7.6	7.6	0.2
170	0.5	0.1	97.1	85.1	58.0	68.7	12.4	8.0	8.0	0.2
180	0.6	0.1	97.2	85.3	58.3	69.2	12.6	8.4	8.4	0.3
190	0.7	0.2	97.2	85.5	58.5	69.7	12.8	8.8	8.8	0.3
200	0.8	0.2	97.2	85.6	58.7	70.1	12.9	9.1	9.1	0.3
210	0.9	0.2	97.3	85.7	58.9	70.5	13.0	9.5	9.5	0.3
220	0.9	0.3	97.4	85.9	59.2	70.8	13.2	9.7	9.7	0.4
230	1.0	0.3	97.5	86.0	59.3	71.2	13.3	10.0	10.0	0.4
240	1.1	0.3	97.6	86.2	59.5	71.5	13.4	10.2	10.2	0.4
250	1.2	0.3	97.7	86.3	59.7	71.8	13.5	10.5	10.5	0.5
260	1.3	0.4	97.8	86.5	59.9	72.1	13.6	10.7	10.7	0.5
270	1.4	0.4	97.9	86.6	60.0	72.3	13.6	10.9	10.9	0.6
280	1.5	0.4	98.0	86.7	60.1	72.5	13.7	11.0	11.0	0.6
290	1.5	0.5	98.0	86.7	60.2	72.7	13.7	11.2	11.2	0.7
300	1.6	0.5	98.0	86.7	60.2	72.8	13.8	11.3	11.3	0.7

Ⅱ．大気中の水素濃度分布計測結果

表Ⅱ 図番号と実験条件一覧表

図 No.	供給圧力	経過時間 (min)	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	転圧状態 (乾燥密度)
Ⅱ-1	2.5kPa	10~300	真砂土	ピンホール φ1.0mm	1.81g/cm ³
Ⅱ-2	5.0kPa				
Ⅱ-3	7.5kPa				
Ⅱ-4	10.0kPa				

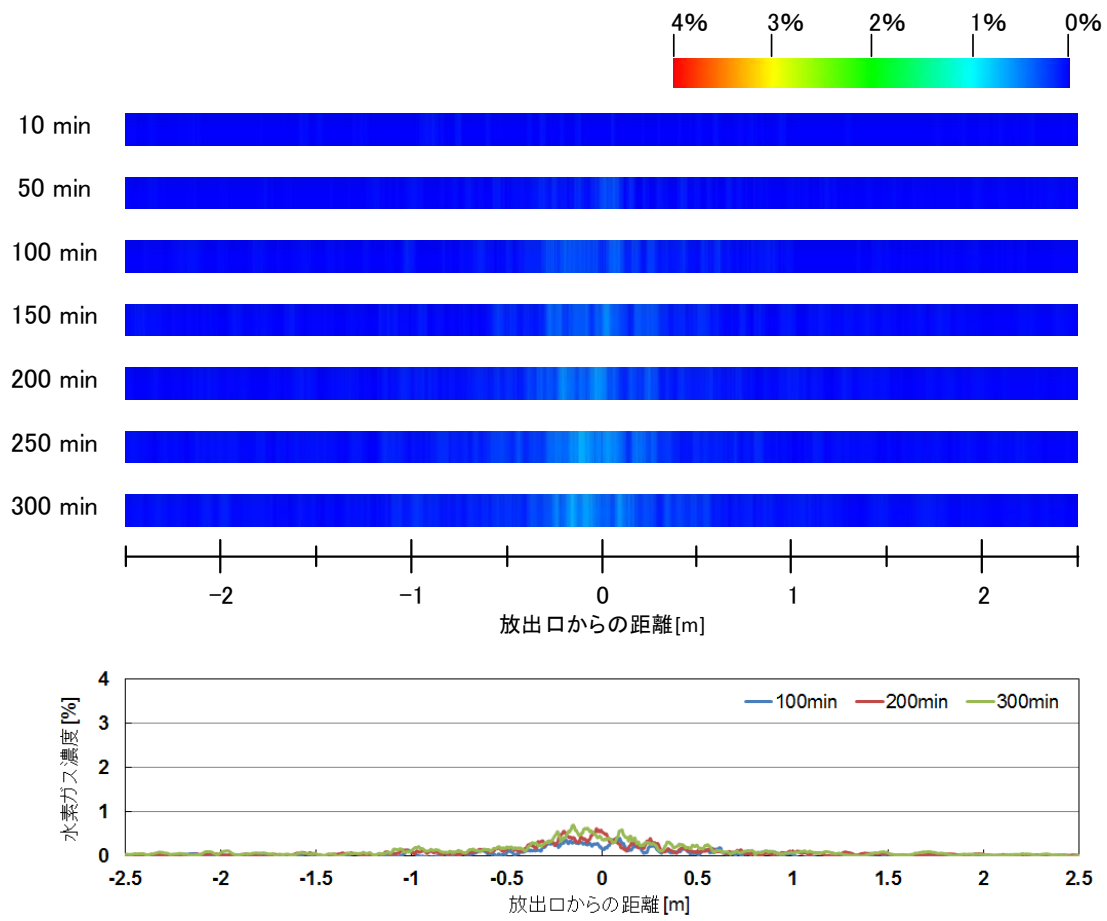
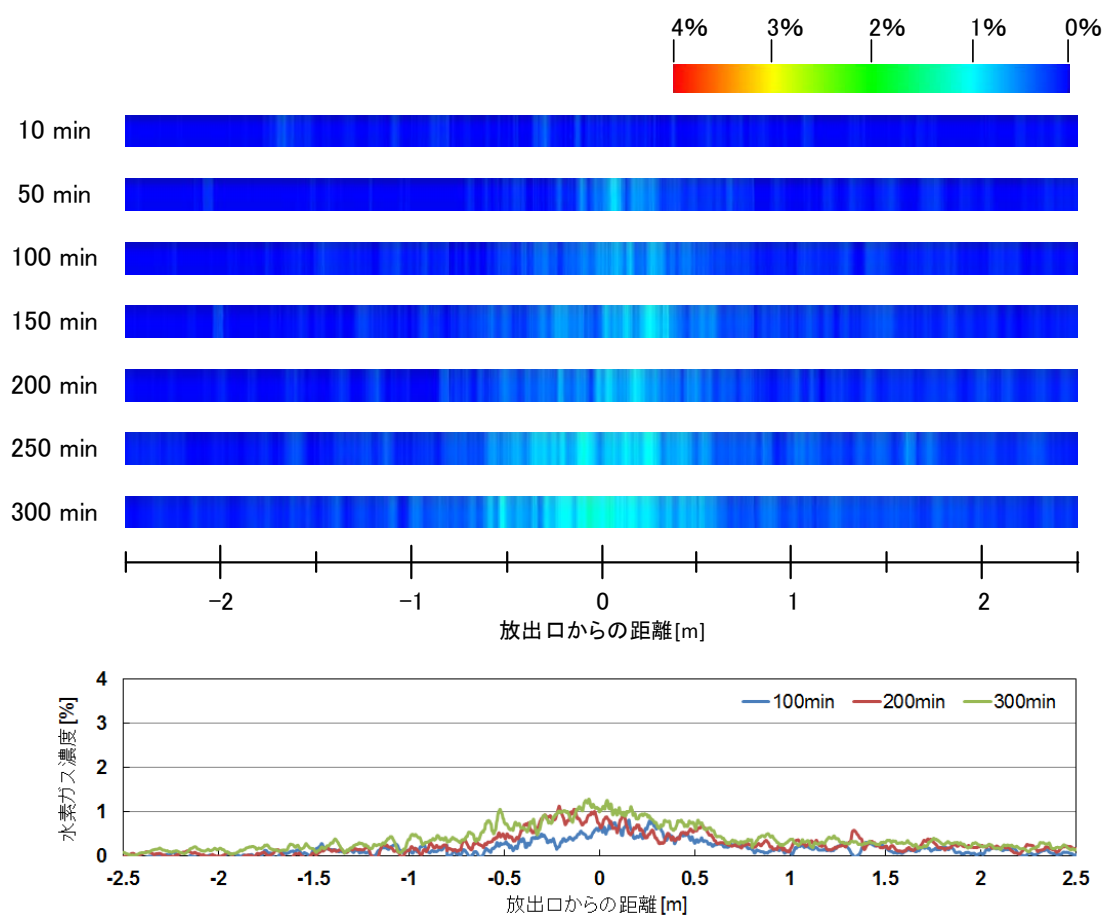


図 II -1 供給圧力 2.5kPa における大気中の水素濃度経時変化 (10～300min)



図Ⅱ-2 供給圧力 5.0kPa における大気中の水素濃度経時変化（10～300min）

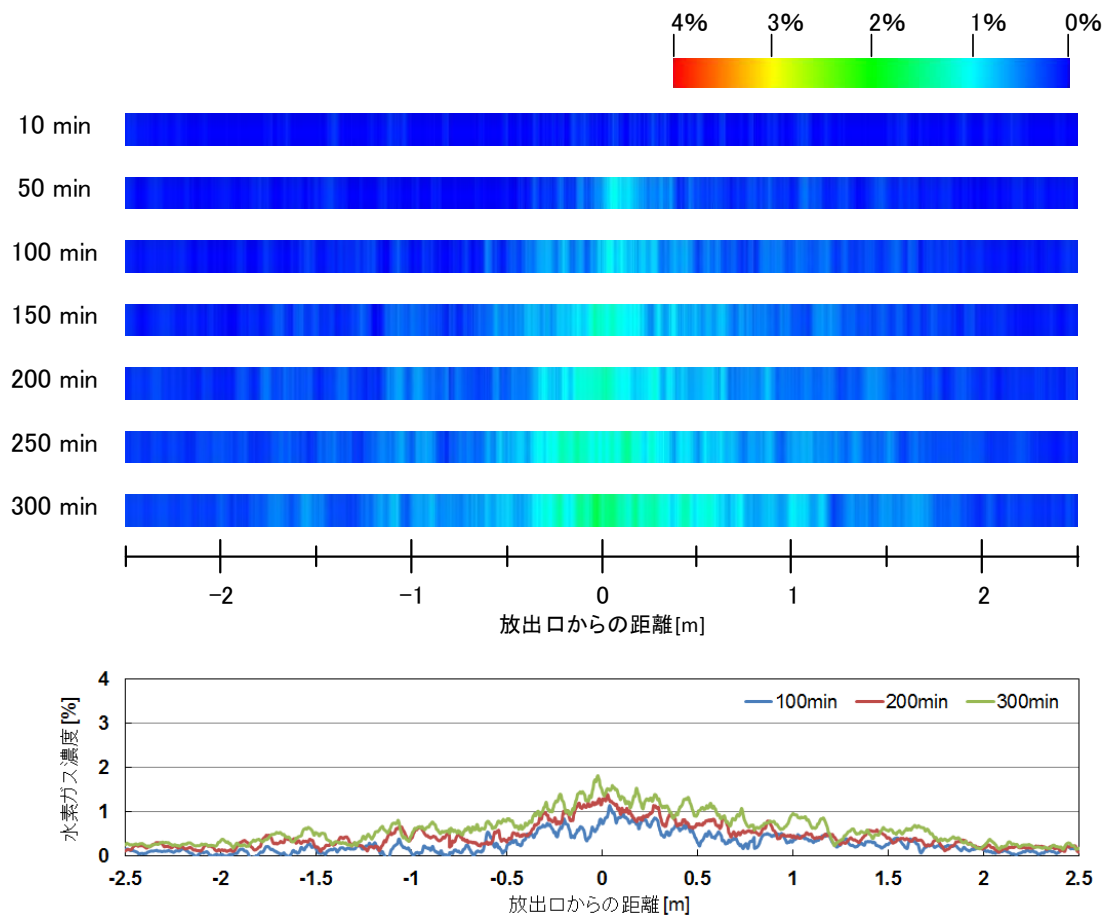


図 II -3 供給圧力 7.5kPa における大気中の水素濃度経時変化 (10~300min)

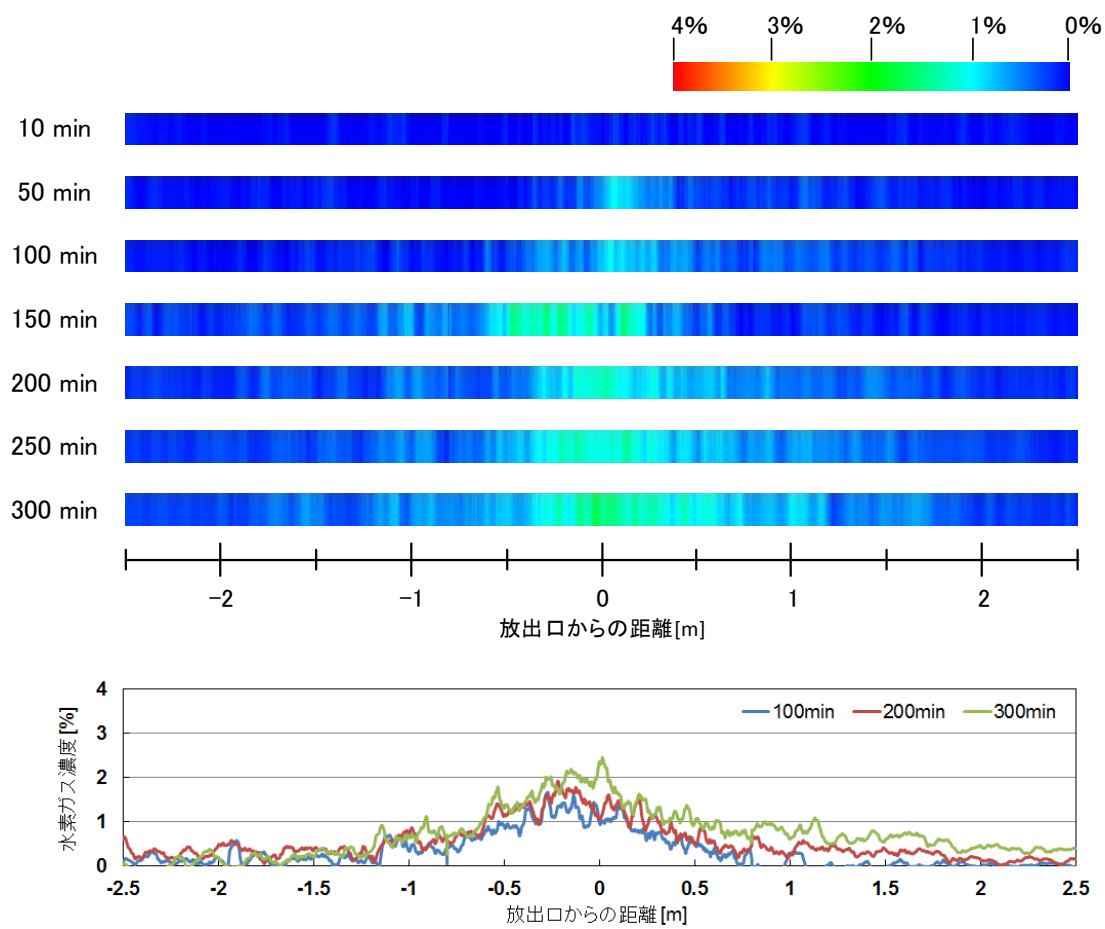


図 II-4 供給圧力 10.0kPa における大気中の水素濃度経時変化 (10～300min)

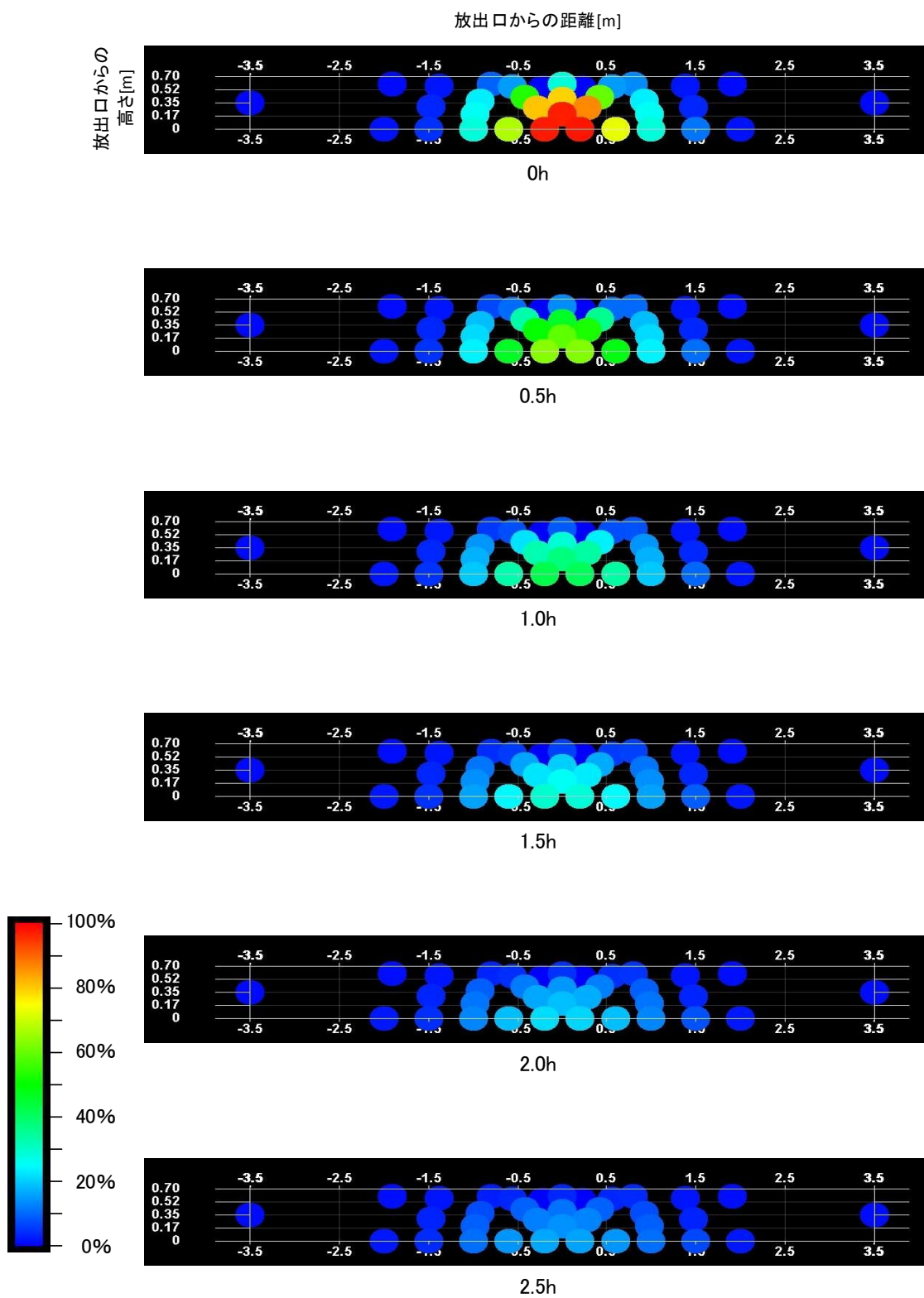
Ⅲ. 漏えい停止後の地中の水素濃度分布計測結果

表Ⅲ-(1) 図番号と実験条件一覧表

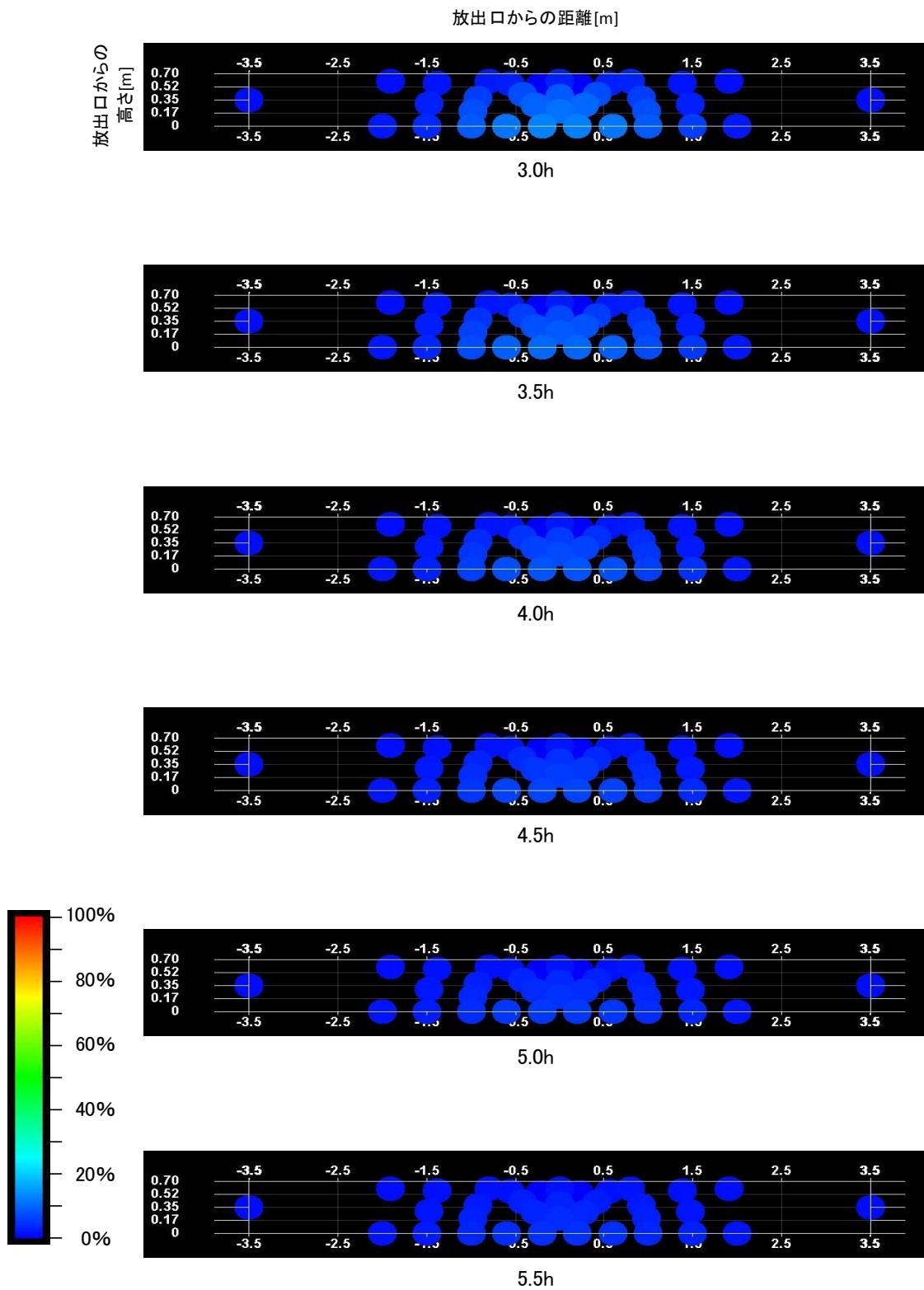
図 No.	供給圧力	経過時間 (min)	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	転圧状態 (乾燥密度)
I-e-1	10.0kPa 終了後	0~2.5h	真砂土	ピンホール φ1.0mm	1.81g/cm ³
I-e-2		3.0~5.5h			

表Ⅲ-(2) 表番号と実験条件一覧表

表 No.	供給圧力	計測点	土壌試料	損傷形状 (放出口形状)	転圧状態 (乾燥密度)
I-e-1	10.0kPa 終了後	①~⑨	真砂土	ピンホール φ1.0mm	1.81g/cm ³
I-e-2		⑩~⑮			
I-e-3		⑯~⑳			



図Ⅲ-1 供給圧力 10.0kPa 終了後の地中の水素濃度経時変化 (0~2.5h)



図Ⅲ-2 供給圧力 10.0kPa 終了後の地中の水素濃度経時変化 (3.0～5.5h)

表Ⅲ-1 供給圧力 10.0kPa 終了後の地中の水素濃度計測値（計測点①～⑨）

時間 [h]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
0	97.0	97.3	79.3	80.5	28.5	0.3	53.6	-	67.1
0.5	59.3	63.4	46.2	50.4	13.8	0.2	33.3	-	46.3
1	37.7	42.4	29.2	32.6	9.0	0.2	22.4	-	33.2
1.5	25.9	29.7	20.2	22.6	6.4	0.2	16.2	-	24.6
2	18.9	21.8	14.9	16.5	4.8	0.1	12.3	-	18.7
2.5	14.4	16.5	11.3	12.6	3.8	0.1	9.6	-	14.7
3	11.2	12.9	8.83	9.79	3.1	0.09	7.63	-	11.7
3.5	8.92	10.2	7.02	7.77	2.62	0.07	6.16	-	9.41
4	7.2	8.25	5.67	6.28	2.28	0.06	5.05	-	7.69
4.5	5.89	6.72	4.65	5.14	2.02	0.05	4.19	-	6.35
5	4.91	5.55	3.88	4.28	1.83	0.04	3.53	-	5.31
5.5	4.14	4.64	3.29	3.62	1.69	0.03	3.03	-	4.49

表Ⅲ-2 供給圧力 10.0kPa 終了後の地中の水素濃度計測値（計測点⑩～⑱）

時間 [h]	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
0	15.4	9.7	23.6	25.9	28.6	2.1	3.7	4.8	1.0
0.5	10.6	7.1	18.7	21.6	24.0	2.1	3.8	4.9	1.1
1	7.8	5.5	14.7	17.5	19.7	2.2	3.8	4.9	1.2
1.5	5.9	4.3	11.7	14.2	16.2	2.1	3.7	4.8	1.3
2	4.6	3.5	9.3	11.5	13.2	2.1	3.6	4.6	1.3
2.5	3.6	2.9	7.5	9.4	10.9	2.0	3.3	4.3	1.3
3	2.98	2.46	6.12	7.66	8.96	1.89	3.1	3.97	1.34
3.5	2.49	2.14	5.03	6.29	7.41	1.79	2.85	3.64	1.34
4	2.12	1.91	4.18	5.2	6.16	1.7	2.61	3.32	1.34
4.5	1.84	1.72	3.52	4.35	5.16	1.62	2.39	3.02	1.33
5	1.63	1.59	2.99	3.66	4.36	1.54	2.2	2.75	1.31
5.5	1.47	1.48	2.58	3.13	3.72	1.47	2.03	2.52	1.29

表Ⅲ-3 供給圧力 10.0kPa 終了後の地中の水素濃度計測値（計測点⑭～㉓）

時間 [h]	⑭	⑮	⑯	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗
0	1.7	0.6	97.8	86.5	60.0	72.7	13.8	11.5	0.8	
0.5	1.9	0.7	62.8	52.6	35.9	48.4	10.3	11.0	0.9	
1	2.1	0.8	41.3	33.7	23.7	34.0	8.0	10.1	1.0	
1.5	2.2	0.9	28.7	23.3	16.9	24.8	6.3	9.1	1.1	
2	2.3	1.0	21.1	17.1	12.6	18.9	5.0	8.1	1.1	
2.5	2.3	1.0	16.1	13.0	9.6	14.7	4.1	7.1	1.2	
3	2.27	1.09	12.6	10.1	7.52	11.8	3.43	6.16	1.22	
3.5	2.21	1.12	10.1	8.04	5.95	9.5	2.91	5.34	1.25	
4	2.14	1.14	8.18	6.48	4.77	7.77	2.52	4.63	1.26	
4.5	2.05	1.15	6.71	5.3	3.86	6.41	2.22	4.03	1.27	
5	1.96	1.16	5.57	4.39	3.18	5.35	1.99	3.53	1.26	
5.5	1.88	1.15	4.68	3.7	2.66	4.52	1.82	3.11	1.25	