# 平成29年度 水素導管供給システムの安全性評価事業 (水素導管の大規模損傷リスク評価) 報告書

平成30年3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

# 目次

1.	調査研究の目的等			
	1.	1	調査研究の目的	3
	1.	2	調査研究の概要	3
2.	掘削坑で漏えいした水素の着火影響実験			
	2.	1	実験の概要	4
	2.	2	実験設備と方法	6
	2.	3	実験結果	8
	2.	4	着火影響評価モデル	34
	2.	5	参考文献	43
3.	シミュし	ر –	-ションによる掘削坑内における漏えい水素の着火	、影響調査 44
	3.	1	数値シミュレーション条件	44
	3.	2	モデル坑内における水素噴出時の水素濃度の評価	
			(水素噴出シミュレーション)	46
	3.	3	爆風シミュレーション	53
	3.	4	シミュレーション結果のまとめ	60
	3.	5	参考文献	60
4	まとめ			63
4.	よこめ			03

# 1. 調査研究の目的等

# 1. 1 調査研究の目的

「水素導管供給システムの安全性評価事業」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及びガス事業法の技術基準案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している。

その中において「水素導管の大規模損傷リスク評価」では、水素導管供給システムにおいて、大規模事故シナリオ(リスクシナリオ)の設定をもとに、事故発生時の周囲影響の定性的・定量的評価及びそれを踏まえたリスク対策(対応措置や外部影響の緩和策等の提言)に資する技術的知見を得ることとしている。平成28年度の当該事業[2-1]では、人為もしくは自然災害等で水素導管が損傷し開放空間へ漏えいした場合を想定し、漏えい水素に着火した場合の周囲影響を実験及びシミュレーションを用いて調査し、燃焼・爆発の周囲影響(爆風圧や火炎長さ等)の評価に資する知見を得た。平成29年度においては、平成28年度の調査結果を踏まえ、埋設水素導管が損傷を受ける現場として他工事現場等における掘削坑内が想定されることから、実物大掘削坑モデルにおいて埋設導管から水素が漏えいした際の着火影響実験を実施し、掘削坑の大きさが漏えい水素濃度や爆風圧等に与える影響を試験及びシミュレーションにより把握、整理することを目的とした。

# 1. 2 調査研究の概要

上記目的に資するため本調査研究では、(1)掘削坑で漏えいした水素の着火影響実験、および(2)シミュレーションによる掘削坑内における漏えい水素の着火影響調査を行った。それぞれについて調査の概要を記す。

- (1) 掘削坑を模擬する実物大掘削坑モデルを製作し、この掘削坑モデル内にて中流量 規模の漏えい条件で水素を放出して、水素拡散濃度分布を計測した。また、着火事故を想 定した点火実験を行い、火炎形成挙動や爆風圧および輻射による周囲影響を計測した。実 験条件として、掘削坑モデル(深さ 1.3 m、幅および奥行き 0.3-1.2 m)内における埋設水素 導管の損傷(供給圧 0.1-0.5MPa、孔径 φ 10mm、埋設深さ 1.2m)を想定し、漏えい流量およ び掘削坑の大きさを変化させて水素漏えい・着火影響実験を実施し、漏えい流量や掘削坑 の大きさ等が漏えい水素濃度や爆風圧等に与える影響を調査した。
- (2)上記(1)で得られた漏えい水素濃度や爆風圧等について、シミュレーションにより再現、比較検証を行い、掘削坑内における漏えい水素の着火影響について、シミュレーションが可能かどうかについて検証した。

# 2. 掘削坑で漏えいした水素の着火影響実験

# 2. 1 実験の概要

3種の大きさの異なる掘削坑モデル内において、損傷を模擬した漏えい孔(放出孔)から水素を放出し、モデル坑内外で形成される水素濃度分布を計測した。また、放出した水素を着火させ、発生する爆風圧、輻射熱、およびモデル坑外における火炎伝播挙動の観測を行い、周囲影響評価に資するデータを収集した。

# 2.2 実験設備と方法

#### 2. 2. 1 設備

実験は、日立セメント株式会社の所有する太平田鉱山(日立市諏訪町 1233)の旧堆積場を借用し、平成29年12月4日から同15日までの日程(準備及び撤収日を含む)で行った。実験に際しては、周辺民家(最短約1km)まで到達し得る騒音の程度を、既往研究の調査結果を元に事前に試算し、関連自治体等への事前説明を行った上で実施した。

実験場における設備類の全体配置の概要を図2.1に示す。水素供給を伴う実験操作は、安全のため、すべての人員が観測所に待避していることを確認した後に行った。また、水素放出孔から観測所までの距離は70m以上を確保し、水素供給開始から供給終了、配管内窒素置換までの実験操作はすべて、空気圧作動弁を介し、観測所から遠隔で行った。配管は呼び径50AのSGP管とし、水素はカードル容器から、2段の圧力調整器(1段目:ヤマト産業製 R-150Hを並列に2基接続;2段目:ヤマト産業製 R-340P)および流量計(東京計装製オリフロメータ O-187-FC-050-2N)を介して供給した。水素供給設備から放出孔直前に設置した遠隔操作弁までの距離は約30mとした。異なる実験条件に対応するため、流量計は測定レンジ毎に3系統接続し、ボール弁を用いて実験条件に応じて切り替えて使用した。

水素供給は、水素カードルと並列して連結されている窒素ガス容器から窒素ガスを配管内に導入し、内部の残存ガスを置換した後に行った。放出孔直前に設置した遠隔操作弁の直前まで水素ガスを導入した後、当該弁を開にすることで水素放出を開始した。水素供給圧および温度は配管に設置した圧力センサー(キーエンス、AP-13S)と K 型熱電対により、流量は配管上流側に設置した流量計によりそれぞれ読み取った。

本調査研究においては、3種の大きさの異なる掘削坑モデルを使用した。いずれも深さを地面より130 cm とした直方体のモデル坑であり、上面を開放、他の五面は鋼板を溶接して製作した。平面形状は幅及び奥行き方向の長さを同一とした正方形とし、その辺長さは30 cm、80 cm、および120 cm とした。以下、この辺長さを用いてモデル坑の種類を表す。水素放出孔は地面から深さ120 cm の位置に設け、水平方向にガスが放出されるよう設置した。水素供給装置からの配管の取り回しを考慮し、放出孔直前までは地面近傍に配管を設置し、放出孔近傍にてエルボー管を用いて鉛直下向きに配管を立ち下げ、深さ120 cm の位置にて

放出用フランジをモデル坑内に挿入し、フランジ中央に $\phi$ 10 mm の放出孔を設けた。フランジの放出面とフランジを挿入したモデル坑面との距離は5cm とした。本実験条件では配管内の圧力損失は小さいため、上記配管の取り回しが試験結果に影響することはないと考えられる。

点火を伴う実験においては、実験毎に異なる所定の位置に点火用電極を設置し、点火を行った。電極には径 $\phi$ 0.8mm のタングステン線2本を使用した。2本のタングステン線は 先端部にて約3 mm のギャップを有し、先端部以外は石英管によって絶縁した。 AC100V(50Hz)電源からの出力を、ネオン管用昇圧器を用いて15 kV に昇圧し、電極に印可することにより空気中で火花放電を発生させ、点火を行った。昇圧器への電圧印可はゼロクロス動作のソリッドステートリレーにより制御し、印可時間は20 ms とした。

モデル坑からの距離約8m、高さ2.3mの位置に設置した風向風速計により風況を観測し、風速3m/s 以下の場合のみ水素の供給を開始した。実験場の気温は $2\sim14$   $^{\circ}$  、気圧は $965\sim983$   $^{\circ}$   $^{\circ}$  かった。また、実験時における放出孔付近の配管内温度は $9\sim20$   $^{\circ}$  であった。

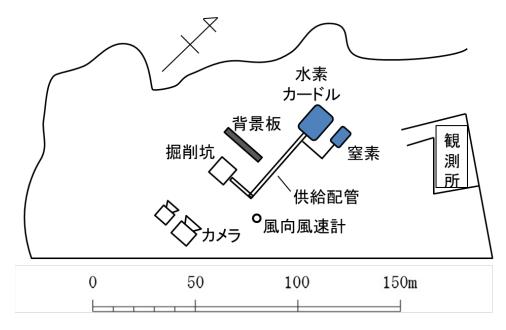


図2.1 実験場と設備類の全体配置

# 2. 2. 実験条件および計測方法

3 種のモデル坑において、 $0.1\sim0.5$  MPa(ゲージ圧、誤差 $\pm0.01$ MPa)の圧力で水素の放出を行った。それぞれのモデル坑および放出条件において、濃度計測実験と着火影響評価実験を分けて実施した。以下、モデル坑のサイズ(正方形面の辺長さ)および水素供給圧力を用いて実験条件を表す。濃度および着火影響計測を行った実験条件と各実験回数を表2.1にまとめて記す。供給圧力0.1、0.3、および0.5 MPaにおける流量は5.8-6.4、11.6-13.3、および17.9-18.8 Nm³ min-¹ であり、それぞれ放出孔において流れがチョークしていると仮定した場合の流量と誤差10%以内で一致した。

濃度計測実験においては水素を二分間放出し、モデル坑内外に配置した 21 個の水素センサーを用いて、各計測点における時間平均濃度と最高到達濃度を計測した。センサーの配置は実験結果とあわせて後述する。

着火実験では、水素放出開始後 40 秒の時点で点火を行った。濃度計測結果から、40 秒の時点では、風の影響を除き定常的な濃度分布が形成されていると考えられる。ただし 30 cm 坑における一部の実験では、風況により点火位置での濃度が大きく変動するため、着火が確認されないケースも存在した。その場合は 10 秒以上の間隔を置き、再度点火を試みた。いずれの条件においても、着火が確認された場合、点火から約 10 秒後に水素の供給を停止した。

着火実験における計測機器類の配置概要を図2.2に示す。便宜上、次の通り座標を設定する。放出孔から放出軸方向をx、放出軸に垂直かつ地面に平行な方向をy、地面からの高さをzとした。xおよびyはモデル坑中央を原点とし、xは放出方向を、yは後述の背景板と逆方向をそれぞれ正方向とした。

輻射センサー(CAPTEC 製 TRF-50)は x および y 方向の 5 m および 10 m の位置に、計 4 点配置した。各実験において着火し火炎が形成された際の輻射熱を計測した。爆風圧はマイクロフォン(PCB Piezotronics、377C10 およびプリアンプ 426B03)を用いて計測した。マイクロフォンからの出力信号はシグナルコンディショナ(PCB Piezotronics、480E09)を介し、デジタルオシロスコープを用いて記録した。マイクロフォンは x および y 方向にそれぞれ 3 点ずつ、計 6 点配置した。設置距離は 5, 10, 20 m あるいは 10, 20, 30 m とした。輻射センサーおよびマイクロフォンともに、設置高さは z=1 m とした。

放出軸方向に垂直な方向 40 m、高さ 1.5 m の位置に近赤外カメラ(浜松ホトニクス製 InGaAs カメラ C14041-10U、レンズ:50 mm, f4-8、撮影速度 213 fps、露光時間  $100 \mu$  秒)および高速度カメラ(ナックイメージテクノロジー製 MEMRECAM HX-3、レンズ:200 mm, f2.8、撮影速度 1000 fps、開放、可視光カットフィルターKenko 製 PRO1D R72 装着)を設置し、各実験で放出水素に着火した際に坑外で伝播した火炎の挙動を観察した。火炎の発光観測のため、火炎背後に背景板を置いた。爆風圧への影響を避けるため、背景版は地面に対して  $45^\circ$  の傾きとなるように設置した。

表1. 実験条件及び実験回数

坑サイズ[cm]	供給圧力[MPa]	濃度計測実験[回]	着火実験[回]			
30	0.1	3	9			
80	0.1	2	12			
120	0.1	2	9			
30	0.3	-	3			
120	0.3	1	9			
30	0.5	-	4			
120	0.5	1	4			

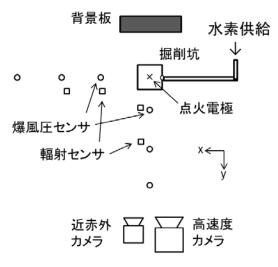


図2.2 計測配置図

# 2. 3 実験結果

# 2. 3. 1 水素濃度分布

30cm 坑を用いた計測では、放出圧力 0.1 MPa の条件で水素濃度分布の計測を行った。水素濃度センサーの配置は二通り設定した。ここではそれぞれ配置 A および配置 B と記す。それぞれの配置と濃度計測結果を図  $2.3 \sim 2.5$  (配置 A) および図  $2.6 \sim 2.8$  (配置 B) に示す。いずれの配置においても水素濃度分布は同様の傾向を示した。即ち、地面レベルより低い掘削坑内はほぼ完全に水素に置換されており、地面高さおよび掘削坑外においては空気と混合し濃度が低下している。図 2.5 および図 2.8 に見られるように、坑外での濃度分布は大きく時間変動している。特に高い位置ほど時間変動が顕著であることから、これは風の影響によるものであると考えられる(記録された風向風速との明確な相関は見られなかったが、これは風向風速計の設置位置と掘削坑設置位置での風況が一致していないことによると考えられる。)。高濃度の水素が確認されたのは主に地面高さから高さ 60cm 程度までの領域であり、瞬間的には高さ 90cm においても 30%を超える水素が検知されている。

次に、80cm および 120cm 坑を用いた計測における水素濃度センサーの配置を図 2.9 に示す。80cm 坑では放出圧力 0.1 MPa、120cm 坑では放出圧力 0.1, 0.3, 0.5 MPa の条件で濃度計測を行った。それぞれの実験における水素濃度の時間平均値および最大値を図 2.10 にまとめて示す。また、各条件における代表的な計測点における水素濃度の時間履歴を図 2.11~2.14 に、各実験における風向風速と合わせて示す。いずれの測定においても、掘削坑内の濃度分布はほぼ定常であり、また坑外(地面上)の水素濃度分布はやや時間変動がみられるものの、30cm 坑の場合に比べると増減の程度は緩やかであった。これは坑サイズが大きい方が水素が空間的に広く分布するのに対し、センサー位置が固定されているため、相対的に風による濃度変動が抑えられるためであると考えられる。水素濃度は、80cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件では底面付近において  $70\sim100\%$ 程度、高さ z=-60cm 位置で約 50%、地面レベルにおいて  $20\sim30\%$ 程度であった。同放出圧力における 120cm 坑での濃度は、80cm 坑での結果に比べ全体的に低下しているが、これは坑サイズが大きいため空気流入の影響を受けやすくなったためであると考えられる。120cm 項においても放出圧力を増加させると水素濃度は増加し。放出圧力 0.5 MPa においては、80cm 坑での放出圧力 0.1 MPa における結果とほぼ同様の濃度分布が形成されていることが確認された。

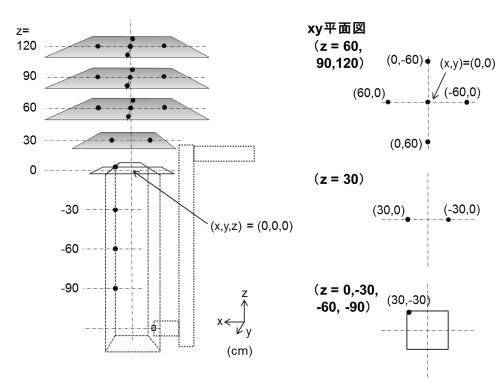


図2.3 30cm 坑を用いた濃度計測における水素濃度センサー配置 A

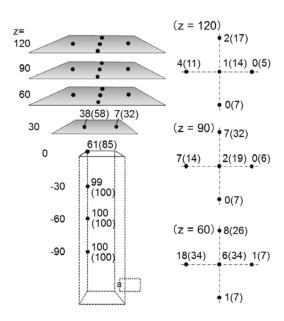


図 2.4 30cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果 (センサー配置 A): 各計測点における時間平均濃度および最大到達濃度 (括弧内)

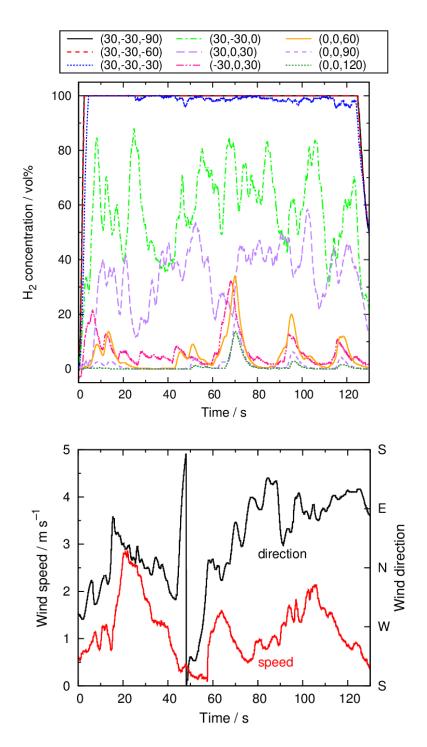


図 2.5 30cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果 (センサー配置 A): 代表的な計測点(x, y, z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

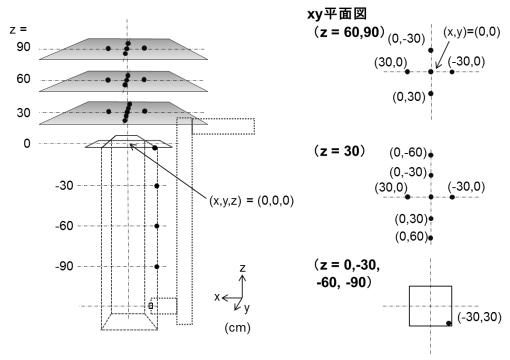


図2.6 30cm 坑を用いた濃度計測における水素濃度センサー配置 B

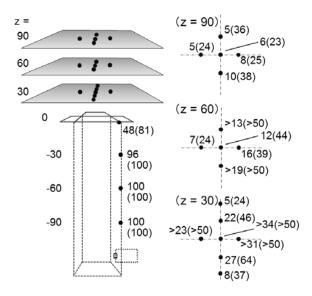


図 2.7 30cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果 (センサー配置 B): 各計測点における時間平均濃度および最大到達濃度 (括弧内)

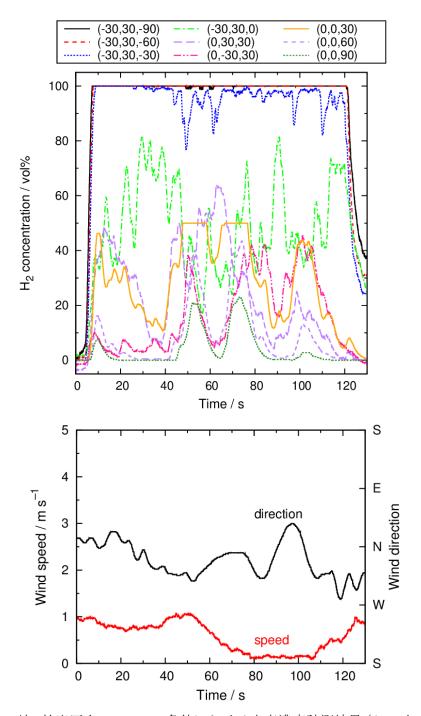


図 2.8 30cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果 (センサー配置 B): 代表的な計測点(x, y, z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

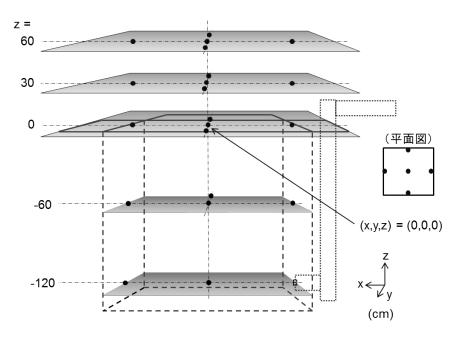
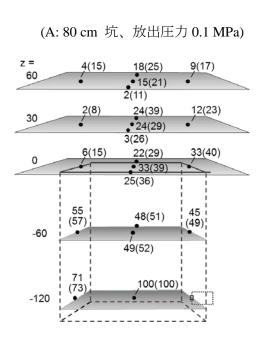
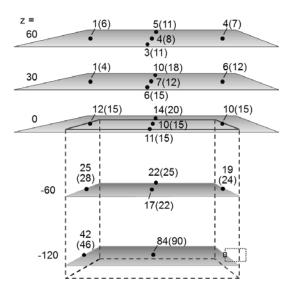


図2.9 80cm および 120cm 坑を用いた濃度計測における水素濃度センサー配置



# (B: 120 cm 坑、放出圧力 0.1 MPa)



(C: 120 cm 坑、放出圧力 0.3 MPa)

(D: 120 cm 坑、放出圧力 0.5 MPa)

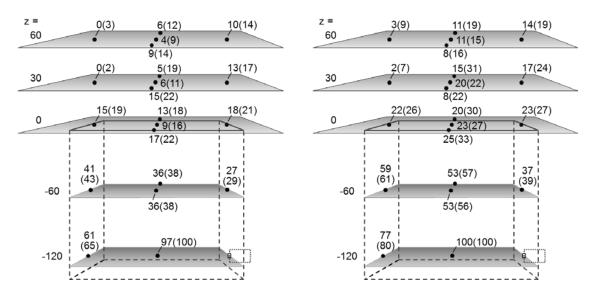


図 2. 1 0 80cm 坑および 120cm 坑における水素濃度計測結果:各計測点における時間平均濃度および最大到達濃度(括弧内)

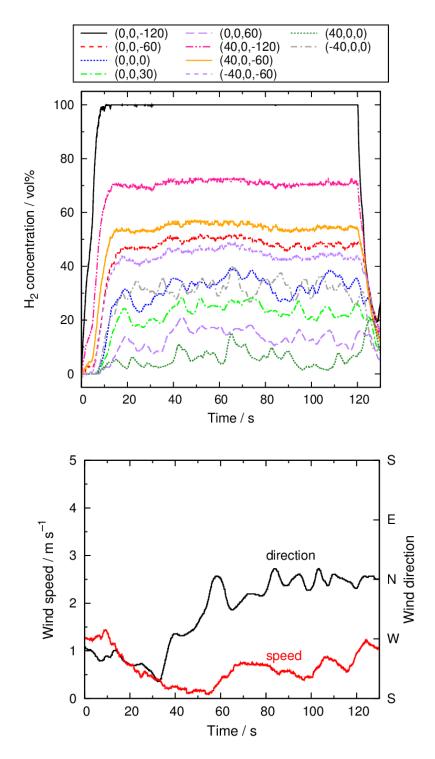


図 2. 1 1 80cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果:代表的な計測点(x,y,z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

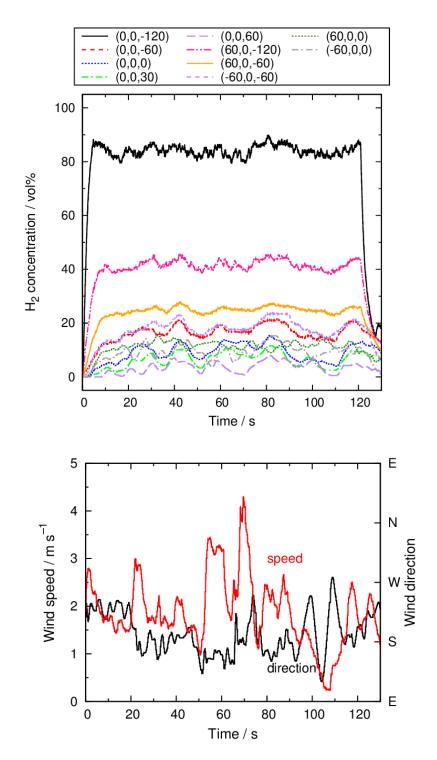


図 2 . 1 2 120cm 坑、放出圧力 0.1 MPa の条件における水素濃度計測結果 : 代表的な計測 点(x,y,z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

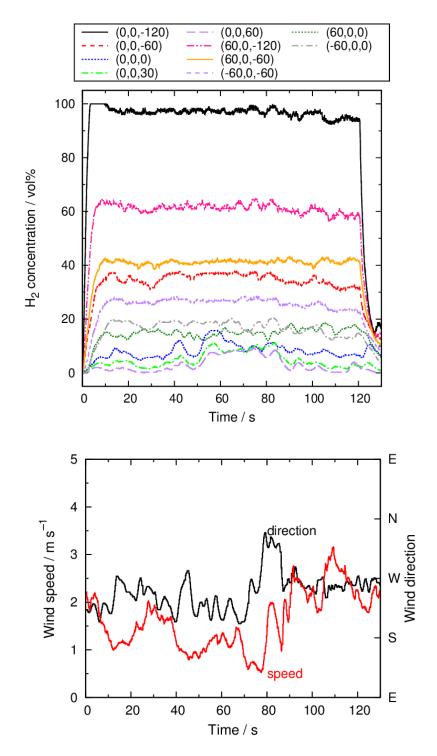


図 2 . 1 3 120cm 坑、放出圧力 0.3 MPa の条件における水素濃度計測結果 : 代表的な計測 点(x,y,z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

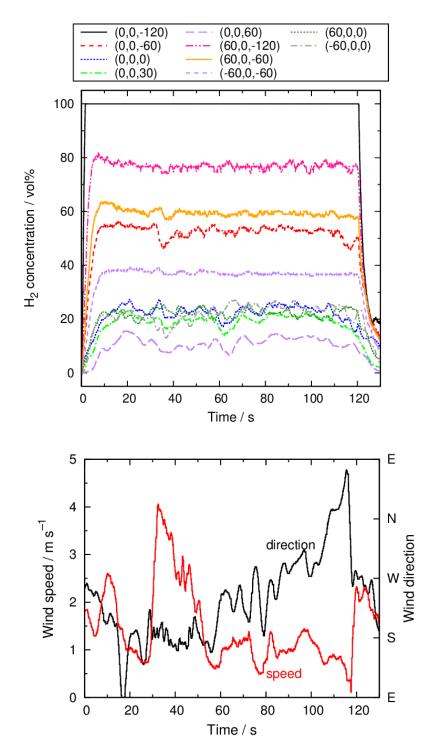


図 2 . 1 4 120cm 坑、放出圧力 0.5 MPa の条件における水素濃度計測結果 : 代表的な計測 点(x,y,z)における水素濃度の時間履歴および風向風速計により記録された風向と風速

# 2. 3. 2 輻射

各計測点において観測された輻射強度の例として、80 cm 坑、放出圧力 0.1 MPa における結果を図 2. 1 5 に示す。この図では点火のタイミングを時間原点としている。点火直後に混合気の爆発における大きな輻射が瞬間的に発生した後、数秒後に定常火炎に移行し、その後は水素の供給を停止するまでの間、ほぼ定常的な輻射が観測されている。輻射による周囲影響は輻射強度と時間に依るものであるため、ここでは輻射強度の値として、定常火炎における輻射の時間平均値を用いる。

すべての着火実験における輻射強度の値を図2.16に示す。定常的な火炎からの輻射は点火位置に依存しないため、各条件(坑サイズ、放出圧力)におけるすべての点火位置における計測結果をまとめて示してある。同放出圧力では坑サイズが大きいほど計測された輻射は低下しているが、これは坑内において形成されている火炎からの輻射が計測点まで届かないことに起因すると考えられる。図中の線は、開放空間への水素放出・着火において構築されたスケール則(平成28年度事業における成果[2-1])から予測される輻射強度である。今回の輻射計測の結果はいずれも、このスケール則未満か、最大でも同程度であった。従ってモデル坑において着火した場合の輻射影響は、開放空間への水素放出・着火におけるスケール則を上限値として評価することが可能であると考えられる。

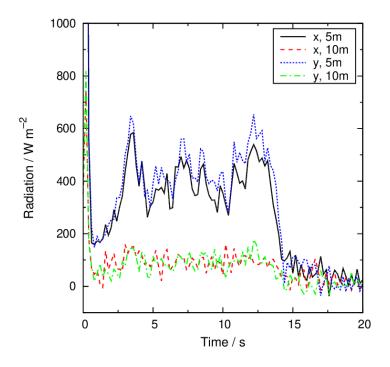


図2.15 各計測点における輻射強度の時間履歴(80cm 坑、水素放出圧力 0.1 MPa)

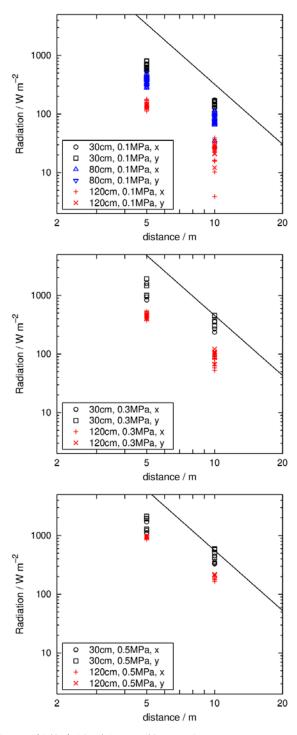


図 2. 16 輻射強度の距離依存性(上から放出圧力 0.1、0.3、および 0.5 MPa における結果;図中の実線は各圧力における開放放出時のスケール則[2-1]による値)

# 2. 3. 3 爆風圧および火炎伝播挙動

30cm 坑を用いた実験において観測された爆風によるピーク過圧を図 2. 1 7 に、点火位置の模式図と合わせて示す。点火位置は、濃度計測の結果を踏まえ水素空気混合気濃度が可燃範囲内である位置の中から複数設定した。30cm 坑の場合は、坑の中心軸上、高さ 0~60 cm の位置とした。爆風圧の例として、放出圧力 0.1 MPa、点火位置(x,z)=(0,30cm)における過圧の時間履歴を図 2. 1 8 に示す。図に見られるように、爆風圧は観測点の方向に依存しなかったため、図 2. 1 7 では x, y 各方向における結果を区別せずに示してある(以下同様)。また、x 方向 10m 位置におけるピーク過圧と、点火時に風向風速計設置位置において計測された風速の関係を図 2. 1 8 に示す。本結果からは明確な風速への依存性は確認されていない。

図2.17中の線は、開放空間への水素放出・着火において構築されたスケール則(平成28年度事業における成果[2-1])から予測されるピーク過圧である。30cm 坑での実験において観測されたピーク過圧は、このスケール則と似た傾向を示し、その最大値は当該スケール則の二倍以内であった。従って30cm 坑における爆風影響は、開放放出時のスケール則の二倍の値を用いて評価することが妥当である。

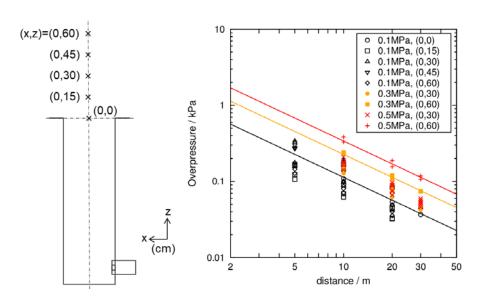


図 2. 17 30cm 坑を用いた着火実験における点火位置および観測されたピーク過圧(実線は下から放出圧力 0.1、0.3、0.5MPa における開放放出時のスケール則[2-1]による値)

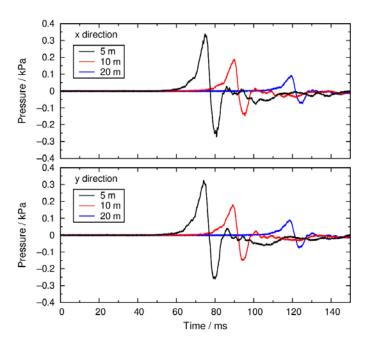


図 2.18 30cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、 点火位置 (x,z) = (0,30cm))

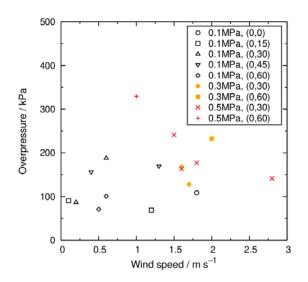


図2.19 30cm 坑を用いた着火実験において観測されたピーク過圧と点火時の風速

次に、80cm 坑、放出圧力 0.1 MPa における点火位置と爆風ピーク過圧を図 2.2 0 に示す。点火位置は放出軸と鉛直面で構成される平面上(y=0)に設定した。この条件では爆風圧は点火位置に強く依存し、傾向としては坑底面に近い位置で点火するほど、強い爆風圧が観測された。また、いずれの点火位置においても、開放放出時のスケール則[2-1]を上回る過圧が計測されている。

点火位置( $\mathbf{x}$ , $\mathbf{z}$ ) = (0,0) および (0,-90cm) における過圧の時間履歴を図2. 21と2. 22にそれぞれ示す。前者では過圧の立ち上がりはミリ秒以上の時間オーダーであり、これは通常の予混合爆発において見られる立ち上がり[2-2,2-3]と類似のものである。一方で後者の点火位置における過圧はほぼ瞬時に立ち上がっている。それぞれのデータのピーク過圧付近を拡大したものを図2. 23および2. 24に示す。後者のデータでは  $\mathbf{10}_{\mu}$  秒未満の時間スケールで圧力波が立ち上がっていることが確認できる。これは、音速に近い、あるいは音速を超える速度で火炎が伝播したことを示唆している。鋭い立ち上がりは、緩慢な圧力上昇の後に発生しており、通常の燃焼(爆燃)から、通常よりも燃焼速度の速い燃焼あるいは爆轟への転移が起こったと考えられる。また、図2. 24に示す実験ではモデル坑の損傷が確認された。

上記二条件において、赤外カメラで撮影した着火時の火炎伝播の様子を図2.25と図2.26にそれぞれ示す。二つの点火位置における観測では初期の火炎の伝播速度に差があり、点火位置(0,-90cm)における着火ではより速く火炎が広がっている様子が捉えられている。両条件において高速度カメラによって撮影された初期の火炎伝播挙動を図2.27に比較して示す。火炎伝播速度の差が顕著に現れていることが確認できる。このような高速の火炎伝播を伴う燃焼について、後述の爆風圧評価モデルとの比較によって示されるように爆轟へ転移している可能性もあるが、ここではこの燃焼形態を「速い燃焼」と記す。

図2.23、2.24と同様の図を、点火位置(x,y) = (0,-60cm)、(35cm,-60cm)、(-35cm,-60cm)、および(35cm,-120cm)での結果についてそれぞれ図2.28~2.31に示す。点火位置によって圧力波の形成挙動が異なることが確認できる。図2.28(点火位置(0,-60cm))では初期(10m 地点)に二つの波が形成されているが、20m 地点では後続の波が先行する波に合流し単一の立ち上がりを持つ圧力波が形成されている。同じ高さにおいて放出孔を有する壁面付近(図2.29;点火位置(-35cm,-60cm))で点火した場合では、比較的滑らかな波が先行し、それを鋭い立ち上がりを持つ波が追随しているが、遠方では前者の波面も鋭い立ち上がりに移行している。一方で同じ高さにて対面付近(図2.30;点火位置(35cm,-60cm))で点火した場合は、同じく二つの波が発生しているが、その間隔は図2.29の場合よりも広く、また先行する波の波面の成長も見られていない。図2.31には、放出孔と同じ高さにおいて対面付近(点火位置(35cm,-120cm))にて点火した際の過圧履歴を示す。この場合も複数の圧力波が形成され、伝播している。

計測結果をまとめると、高さ z = -60cm 以下で点火した場合に鋭い立ち上がりを持つ圧力 波が観測されており、また、特に放出孔との対面付近での点火の場合は段階的に圧力波が 発生していることが確認された。これらのことから、坑内の流速分布が燃焼形態に影響を 及ぼしており、特に放出孔近傍の高速流に火炎が干渉すると速い燃焼に転移すると考えら れる。

120 cm 坑における各放出圧力条件での点火位置と爆風ピーク過圧を図2.3 2にまとめて示す。80 cm 坑における結果と同様に、爆風圧は点火位置に依存することが確認された。80 cm 坑の場合とは異なり、120cm 坑の場合、放出圧力 0.1 MPa では鋭い立ち上がりを持つ圧力波は観測されず、ピーク過圧も80cm 坑での結果より低い値となった。一方で放出圧力0.3 MPa では、点火位置が z=-90cm 以下の条件で鋭い過圧ピークが観測されており、放出圧力0.5 MPa では z=-60cm において同様に鋭い過圧ピークと強い圧力波が観測された。なお、0.5 MPa では点火位置(0,-60cm)の着火実験でモデル坑が破損(図2.33)したため、実施できなかったより底面に近い点火位置での着火実験ではより強い過圧が発生する可能性がある。80 cm 坑における結果との比較から、鋭いピークを有する速い燃焼への転移は、モデル坑のサイズと水素放出圧力の関係に左右される現象であることが確認された。

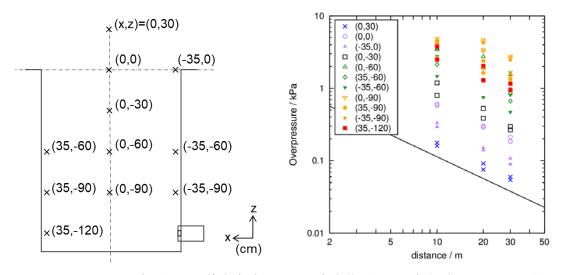


図 2 . 2 0 80cm 坑を用いた着火実験における点火位置および観測されたピーク過圧(実線は放出圧力 0.1MPa における開放放出時のスケール則[2-1]による値)

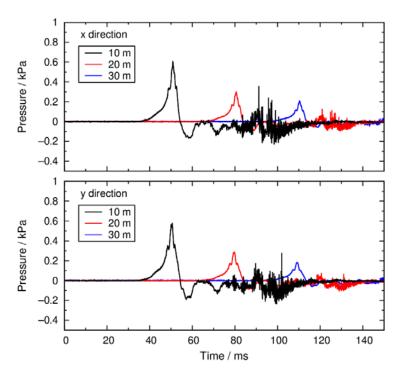


図 2 . 2 1 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、 点火位置 (x,z)=(0,0))

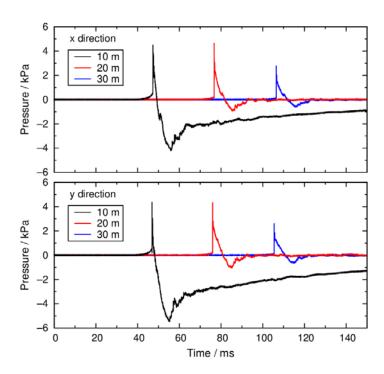


図 2 . 2 2 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、 点火位置 (x,z) = (0,-90cm))

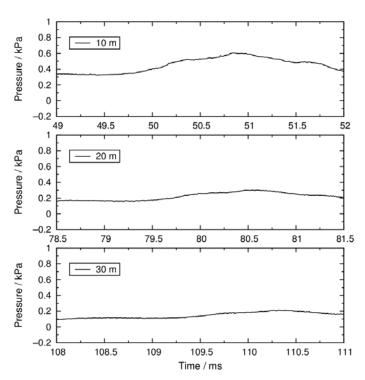


図2.23 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例(図2.21と同データ、x 方向、ピーク過圧付近を拡大)

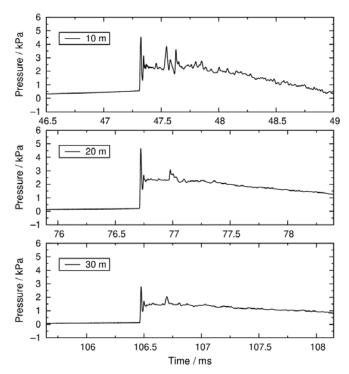


図2.24 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例(図2.22と同データ、x 方向、ピーク過圧付近を拡大)

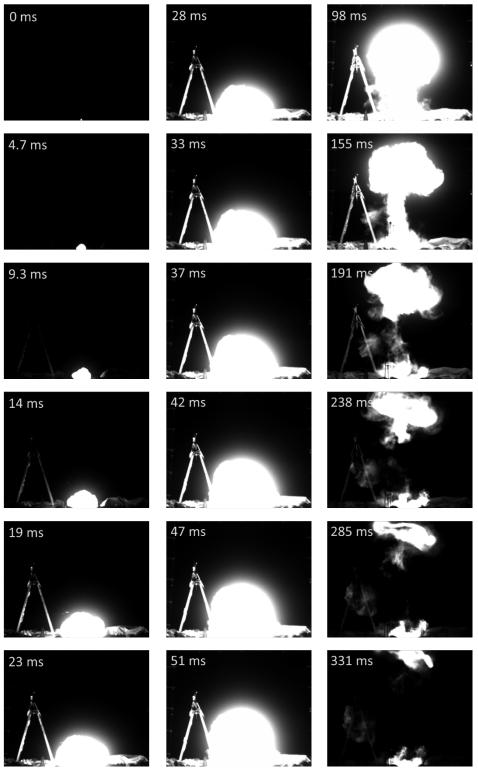


図 2 . 2 5 80cm 坑を用いた着火実験における火炎伝播挙動(放出圧力 0.1MPa、点火位置 (x,z)=(0,0)、赤外カメラ撮影)

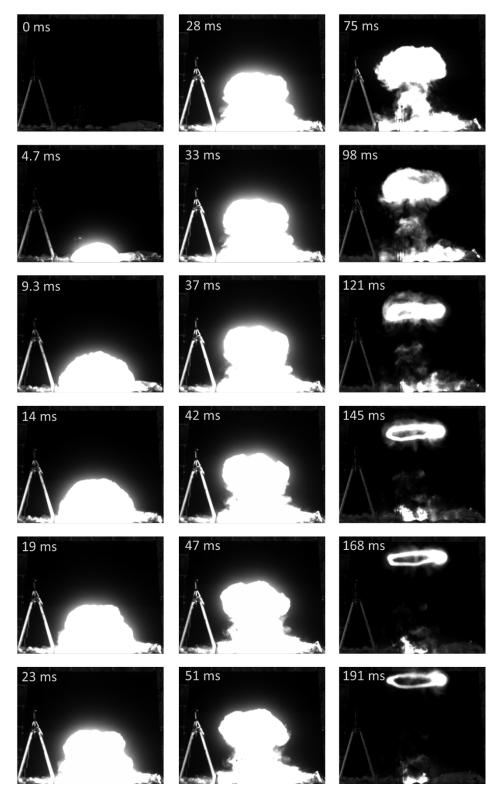


図 2. 2 6 80cm 坑を用いた着火実験における火炎伝播挙動(放出圧力 0.1MPa、点火位置 (x,z) = (0,-90cm)、赤外カメラ撮影)

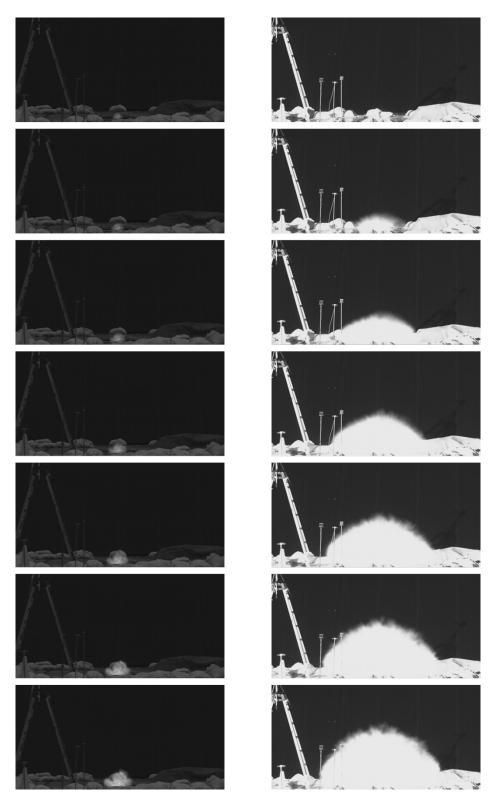


図 2 . 2 7 80cm 坑を用いた着火実験における火炎伝播挙動(放出圧力 0.1MPa、左列 : 点火位置(0,0)、右列 : 点火位置(0,-90cm)、高速度カメラ撮影、1 ms/コマ)

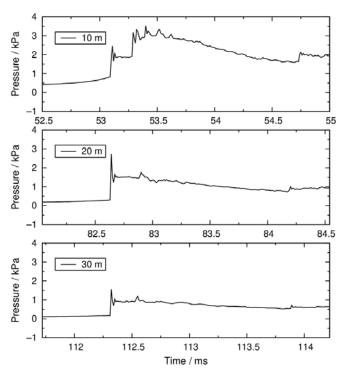


図 2 . 2 8 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1 MPa、点火位置 (x,z) = (0,-60 cm)、x 方向、ピーク過圧付近)

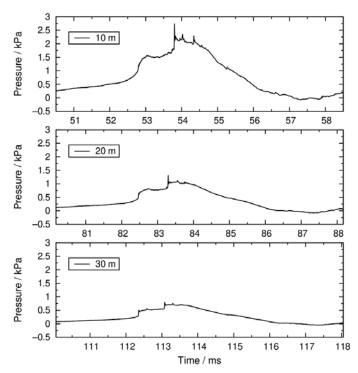


図 2 . 2 9 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、 点火位置 (x,z) = (-35cm,-60cm)、x 方向、ピーク過圧付近)

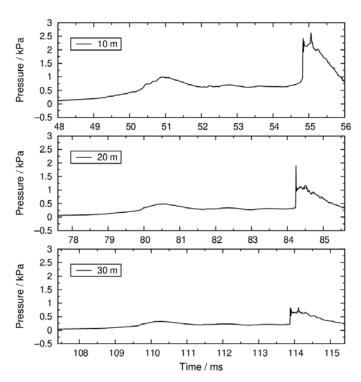


図 2.30 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、 点火位置 (x,z) = (35cm, -60cm)、x 方向、ピーク過圧付近)

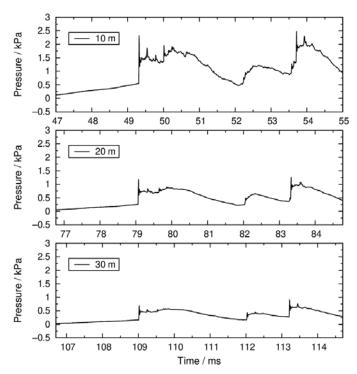


図 2.31 80cm 坑を用いた着火実験における爆風過圧の時間履歴の例 (放出圧力 0.1MPa、点火位置 (x,z) = (35cm,-120cm)、x 方向、ピーク過圧付近)

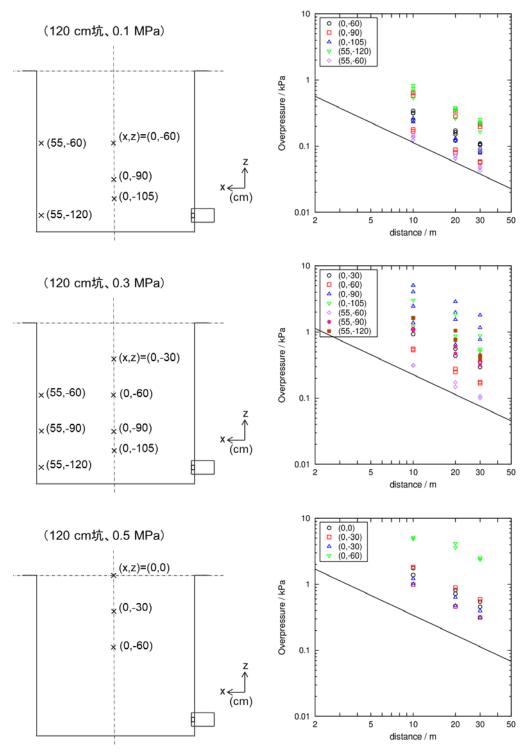


図 2.3 2 120cm 坑における着火実験における点火位置および観測されたピーク過圧 (上から放出圧力 0.1、0.3、および 0.5MPa; 図中の実線は各放出圧力における開放放出時のスケール則[2-1]による値)





図 2 . 3 3 120cm 坑、放出圧力 0.5 MPa、点火位置(0, -60cm)での着火実験において破損したモデル坑の様子

# 2. 4 着火影響評価モデル

# 2. 4. 1 爆風ピーク過圧の評価モデル

前項に記した爆風ピーク過圧を評価するためのモデルについて検討する。まず爆風圧を 評価する 3 つのモデルについて記述し、次に実験結果との比較によりそれらの適用性を検 討する。

# (A) TNT 等価モデル

蒸気雲爆発等のガス爆発における爆風圧を算定するためのモデルの一つとして、TNT 等価モデル[2-4,2-5]が挙げられる。TNT 等価モデルでは、爆発中心からの距離 R と、等価のTNT 換算質量  $W_{\text{TNT}}$  を用いて以下の関係式を仮定する。

$$R = \lambda W_{\text{TNT}}^{1/3}$$

ここで $\lambda$ は爆風圧に関連する換算距離(単位  $m \log^{-1/3}$ )であり、実験的に得られている関係線図から求めることができる。

ガス爆発においては、TNT 換算質量は爆発に寄与するガスの燃焼熱量 Q と TNT 収率 $\gamma$ から求めることができる。水素の燃焼においては水素 1 mol あたり 242 kJ の熱が発生する。

$$H_2 + 0.5O_2 = H_2O (gas) + 242 kJ/mol$$

化学量論混合比 (水素 29.5%) の水素・空気混合気が体積  $V[m^3]$ に充填されているとすると、その燃焼により発生する熱量は

$$Q [kJ] = 71.4 \, pV / RT$$

と求められる。ここで p は圧力[Pa]、R は気体定数[J K-1 mol-1]、T は温度[K]である。TNT 換算質量は

$$W_{\text{TNT}} [\text{kg}] = \gamma Q / 4184$$

である。ここでは TNT 収率を  $\gamma=1$  として換算距離 $\lambda$ を算出する。この値は混合気が爆轟を起こしたときに発生する爆風圧を再現することが知られている[2-6,2-7]。体積としては、掘削坑外の濃度分布も考慮し、掘削坑容積  $V_p$  [ $m^3$ ]の 1.5 倍の値を用いる。換算距離と爆風圧の関係[2-4,2-5]から、本実験条件におけるピーク過圧 $\Delta P_{peak}$  は、距離 x [m]の関数として以下のようにあらわすことができる。

 $\Delta p_{\text{peak}} = 358 (1.5V_p)^{0.467} x^{-1.40} [\text{kPa}] \qquad (\Delta p_{\text{peak}} < 3.4 [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 277 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.440} \ x^{-1.32} \ [\text{kPa}]$   $(3.4 \le \Delta p_{\text{peak}} < 20 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 570 \ (1.5V_p)^{0.562} \ x^{-1.69} \ [\text{kPa}]$   $(20 \le \Delta p_{\text{peak}} < 64 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 916 (1.5 V_p)^{0.687} x^{-2.06} \text{ [kPa]}$   $(\Delta p_{\text{peak}} \ge 64 \text{ [kPa]})$ 

# (B) 予混合爆発モデル

「石油精製業保安対策事業(高圧ガスの危険性評価のための調査研究)」[2-2,2-3]では、

ビニルシートによって囲われた 1 辺 50cm および 100cm の立方体空間中に水素と空気の混合気を充満させ、空間中央で点火することで予混合爆発(爆燃)を発生させ、周囲に伝播する爆風圧を計測している。それらの結果から、爆風圧は距離に対して反比例の関係にあり、1m³の混合気から発生するピーク過圧は、距離 x [m]の関数として近似的に 16/x [kPa]と表される。また、ピーク過圧の値は混合気体積のおよそ 1/3 乗に比例することが報告されている結果から読み取れる。従って上記関係式に体積換算を施すことで予混合爆発により発生する爆風圧を見積ることができる。TNT 等価モデルと同様に、体積としては、掘削坑外の濃度分布も考慮し、掘削坑容積  $V_p$ の 1.5 倍の値を用いて評価する。従って本モデルのピーク過圧は下記となる。

 $\Delta p_{\text{peak}} = 16 \ (1.5V_{\text{p}})^{1/3} \ x^{-1} \ [\text{kPa}]$ 

# (C) 開放放出時のスケール則(二倍)

平成 2 8 年度水素導管供給システムの安全性評価事業(水素導管の大規模損傷リスク評価)では、水素を開放空間に放出し着火させた場合の爆風圧を計測し、そのスケール則を構築した。爆風ピーク過圧は放出孔の断面積および水素放出圧力に比例する形で表すことができ、本実験条件(放出孔  $\phi$  10、供給圧力 0,1MPa)ではその値は距離 x [m]の関数として  $\Delta p_{peak}$  [kPa] = 1.13 / x と表すことができる。 30cm 坑における結果から、孔内が水素で置換され、ほぼ地面上のみに混合気が形成される場合、そこに着火した際に生じる爆風圧は、当該スケール則の二倍以下であった。従って、上記関係式の二倍となる以下の式を本モデルの評価値とする。

 $\Delta p_{\rm peak} = 2.3~x^{-1}~[{\rm kPa}]$  (放出孔  $\phi$  10、放出压力 0.1 MPa)  $\Delta p_{\rm peak} = 4.5~x^{-1}~[{\rm kPa}]$  (放出孔  $\phi$  10、放出压力 0.3 MPa)  $\Delta p_{\rm peak} = 6.8~x^{-1}~[{\rm kPa}]$  (放出孔  $\phi$  10、放出压力 0.5 MPa)

# 2. 4. 2 爆風ピーク過圧評価モデルの適用

まず図2.34では、30cm 坑を用いた着火実験におけるピーク過圧と、開放放出時のスケール則から予想される爆風圧の二倍を比較する。前述のとおり観測値はスケール則の二倍を下回っており、水素放出時に掘削坑内の空気濃度が0になるような小サイズの掘削坑では当モデルにより爆風圧の上限を評価することが妥当であると考えられる。

次に図2.35では、80cm および 120cm 坑での実験結果と、TNT 等価モデルおよび予混合爆発モデルから予想される爆風圧を比較する。まず 80cm 坑、放出圧力 0.1 MPa では、TNT 等価モデルが実験値のほぼ上限に相当することが確認された。本モデルでは爆轟時の TNT 収率に相当する $\gamma=1$  を採用しており、そのモデルに匹敵する程度の爆風圧が発生した実験条件も存在していたことから、当該実験条件においては火炎伝播形態が爆轟に転移した可能性がある。

また、予混合爆発モデルではいくつかの実験値を過小評価しているが、鋭い過圧ピークが観測されなかった点火位置高さ z = -30cm 以上のデータについては、モデルにより予想される値以下の爆風圧に収まっている。120cm 坑における結果についても同様に、鋭いピークが観測された場合は TNT 等価モデルによって、それ以外の場合は予混合爆発モデルによって、それぞれピーク過圧の上限値を評価できることが確認された。

上記の結果から、坑サイズに応じた爆風圧の評価モデルを以下の通り提案する。まず本調査の主たる放出条件である放出孔 $\phi$ 10mm、放出圧力 0.1 MPa では、30 cm、80 cm、および 120 cm のモデル坑において、それぞれ、開放放出スケール則の二倍、TNT 等価モデル、および予混合爆発モデルによって爆風圧の上限値を評価することができる。実験による評価結果は 3 種のモデル坑サイズに限られるため、各モデルの適用範囲の境界は明確ではない。そのため、境界付近ではより爆風圧がより強く算出されるモデルを適用することが妥当である。従って、適用可能な爆風圧モデルは、モデル坑の辺長さ L を代表長さとして用いて、以下のように整理される。

放出孔 <u>φ 10 mm、放出圧力 0.1 MPa における爆風圧評価モデル</u>

(L: 掘削坑代表長さ、V<sub>p</sub>: 掘削坑容積[m³]、x: 距離 [m])

 $L \leq 30$  cm: 開放放出スケール則の二倍

 $\Delta p_{\text{peak}} = 2.3 \ x^{-1} \ [\text{kPa}]$ 

30 cm < L < 120 cm: TNT 等価モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 358 \ (1.5 V_{\text{p}})^{0.467} \ x^{-1.40} \ [\text{kPa}] \ (\Delta p_{\text{peak}} < 3.4 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 277 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.440} \ x^{-1.32} \ [\text{kPa}]$   $(3.4 \le \Delta p_{\text{peak}} < 20 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 570 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.562} \ x^{-1.69} \ [\text{kPa}]$   $(20 \le \Delta p_{\text{peak}} < 64 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 916 (1.5 V_{\text{p}})^{0.687} x^{-2.06} [\text{kPa}] \qquad (\Delta p_{\text{peak}} \ge 64 [\text{kPa}])$ 

L≥120 cm: 予混合爆発モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 16 (1.5 V_p)^{1/3} x^{-1} \text{ [kPa]}$ 

また、120cm 坑を用いた実験結果から、適用可能なモデルは放出条件に依存することが示された。ここでは暫定的に、異なる流量における爆風圧評価モデルを下記の通り提案する。 平成 2 8 年度事業の結果[2-1]から、開放空間へ水素を放出する場合、その放出軸上での水素濃度分布は概ね放出流量の平方根に比例することが確認されている。今回観測された燃焼形態の違いは、水素濃度および流速の空間分布に依るものであると考えられる。従ってここでは、掘削坑の代表長さ L に依存するモデルの適用範囲の境界が、放出流量の平方根に比例すると仮定する。放出流量は、放出孔径と、放出圧力(絶対圧)の平方根に比例する[2-1]ため、放出孔径 d、放出圧力(絶対圧) $p_{abs}$ におけるモデルの適用範囲は下記の通りとなる(開放放出スケール則については爆風圧の評価値も流量に依存する形で表される[2-1])。図 2 . 3 6 に、本実験条件における適用範囲を図示する。これらの適用範囲は 120cm 坑における放出圧力 0.3 および 0.5 MPa での測定結果と矛盾しないが、放出流量に対する依存性は限られた実験結果からの推測によるものであり、下記評価式の妥当性については更なる検討を要する。

## 放出孔径 d [cm]、放出圧力 $p_{abs}$ [MPa(abs)]における爆風圧評価モデル

(L: 掘削坑代表長さ、V<sub>p</sub>: 掘削坑容積[m³]、x: 距離 [m])

 $L/d \le 67 p_{abs}^{1/2}$ : 開放放出スケール則の二倍

 $\Delta p_{\text{peak}} = 11.3 \ d^2 p_{\text{abs}} x^{-1} \ [\text{kPa}]$ 

67  $p_{abs}^{1/2} < L/d < 268 p_{abs}^{1/2}$ : TNT 等価モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 358 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.467} \ x^{-1.40} \ [\text{kPa}] \qquad (\Delta p_{\text{peak}} < 3.4 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 277 \ (1.5V_p)^{0.440} \ x^{-1.32} \ [\text{kPa}]$   $(3.4 \le \Delta p_{\text{peak}} < 20 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 570 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.562} \ x^{-1.69} \ [\text{kPa}]$   $(20 \le \Delta p_{\text{peak}} < 64 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 916 (1.5 V_p)^{0.687} x^{-2.06} \text{ [kPa]} \qquad (\Delta p_{\text{peak}} \ge 64 \text{ [kPa]})$ 

 $L/d \ge 268 p_{abs}^{1/2}$ : 予混合爆発モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 16 (1.5 V_p)^{1/3} x^{-1} \text{ [kPa]}$ 

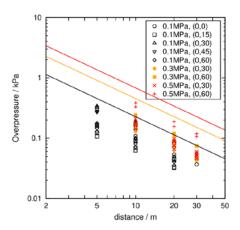


図2.34 30cm 坑を用いた着火実験におけるピーク過圧(シンボル)と、開放放出時のスケール則から予想される爆風圧の二倍(実線;下から放出圧力0.1、0.3、0.5MPa)の比較

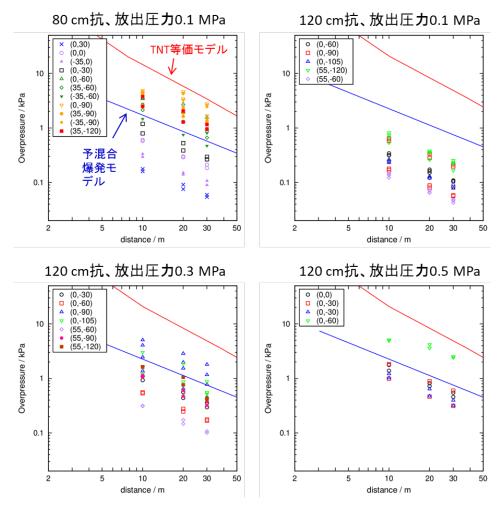


図2.35 80cm および 120cm 坑を用いた着火実験におけるピーク過圧(シンボル)と、TNT 等価モデルおよび予混合爆発モデルから予想される爆風圧の比較

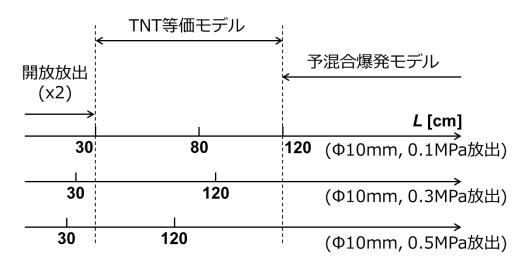


図2.36 爆風圧モデルの適用範囲と実験における放出条件の関係図

### 2. 4. 3 爆風による周囲影響

爆風が人体や構造物に及ぼす影響は多様であり、その目安となる値についても文献により開きがある[2-5,2-8,2-9,2-10]。ここでは、まず人体に直接被害をもたらす指標[2-9]として、肺が破れる可能性のある 41.2 kPa、および人体に被害を及ぼさない限界とされる 12.3 kPaを比較対象として用いる。また、高圧ガス保安法・コンビナート等保安規則では、既存および新規製造施設が保安物件から確保する必要がある距離を設定するための限界値を 11.8 および 9.8 kPa としている[2-9]。平成 13 年に改訂された「石油コンビナートの防災アセスメントの策定指針」においてもこの値が採用されていたが、続く平成 25 年の改訂[2-9]においては構造物の破損等により二次的に人が負傷する可能性も考慮し、特に爆発が想定される施設の周辺に多くの一般家屋が存在するような場合には 2-5 kPa 程度の値を爆風圧の基準値として設定することが提案されている。さらに、圧縮水素スタンドにおける技術基準では、漏洩した水素が着火した際に発生する爆風圧が、人および建物に与える影響を保安上支障のないレベルに止めることを条件としており、爆風圧が 1 kPa 以下となることを離隔距離の設定において採用している [2-10]。

図2.37に、放出孔径10 mm、放出圧力 0.1 MPa における各爆風圧モデルによる評価値と、表2.1に記す指標との比較を示す。ここで TNT 等価モデルは 80cm 坑、予混合爆発モデルは 120cm 坑に対して爆風圧をそれぞれ算出している。それぞれのモデルによる評価値が指標値と対応する距離を表2.2にまとめて示す。また、爆風圧が指標値と一致する距離の、モデル坑サイズ (代表長さ L) への依存性を図2.38に示す。最も深刻なケースである TNT 評価モデルにおいては、人体へ直接被害を及ぼさない限界距離は 10 m を超る。前年度事業における開放空間への放出・着火影響評価の結果[2-1]から同事業において構築されたスケール則を用いて予測すると、本放出条件において、1.6 および 4.7 kW m²の輻射強度となる距離はそれぞれ 3.4 および 2.5 m であり、また火炎下流における到達温度が 70℃および 200℃となる距離は 9.6 および 6.1 m であった。従って、掘削坑を模擬した空間に水素が放出され着火した場合の爆発影響は、開放空間への放出時の熱的影響に比べ広範囲におよぶことが示された。構造物等の破損等によって二次的に人が負傷する可能性を考慮すると、危害を及ぼし得る距離はより広範囲となる。また、本調査研究では他業者による工事や災害などに起因する水素導管の大規模損傷シナリオを想定しており、本シナリオでは最悪ケースとして導管が破断されるケースも考えられる。

表 2. 1 爆風圧による影響に関する代表的な値および基準値 [2-8,2-9,2-10]

爆風圧 Δp <sub>peak</sub> [kPa]	内容
41.2	肺破れることあり
12.3	人間に直接被害を及ぼさない限界
9.8	高圧ガス保安法・コンビナート等保安規則における保安物件
	との距離の基準 (新規製造施設)
2-5	石油コンビナートの防災アセスメント指針による基準値
1	圧縮水素スタンドにおける火気離隔距離および敷地境界距
	離の基準値

表 2. 2 放出孔径 10 mm、放出圧力 0.1 MPa における各爆風圧モデルによる爆風圧の到 達距離(TNT 等価モデルは 80cm 坑、予混合爆発モデルは 120cm 坑での値)

爆風圧 Δppeak [kPa]	TNT 等価モデル	予混合爆発モデル	開放放出(×2)
41.2	5.1 m	0.5 m	0.1 m
12.3	11.4 m	1.8 m	0.2 m
9.8	13.5 m	2.3 m	0.2 m
5	22.5 m	4.5 m	0.5 m
2	43.8 m	11.3 m	1.1 m
1	71.8 m	22.6 m	2.3 m

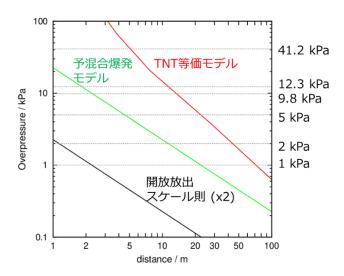


図 2. 3 7 放出孔径 10 mm、放出圧力 0.1 MPa における各爆風圧モデルによる爆風圧の評価値(TNT 等価モデルは 80cm 坑、予混合爆発モデルは 120cm 坑での値)と爆風圧の指標との比較

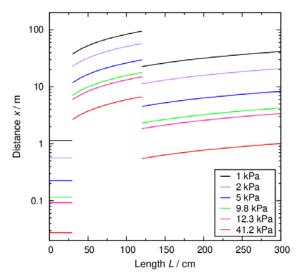


図 2. 3 8 放出孔径 10 mm、放出圧力 0.1 MPa における各爆風圧モデルによる評価値が 爆風圧の指標と一致する距離の坑サイズ(代表長さ L)依存性

## 2. 5 参考文献

- [2-1] 平成28年度水素導管供給システムの安全性評価事業(水素導管の大規模損傷リスク評価)報告書
- [2-2] 平成23年度石油精製業保安対策事業(高圧ガスの危険性評価のための調査研究)報告書
- [2-3] 平成25年度石油精製業保安対策事業(高圧ガスの危険性評価のための調査研究)報告書
- [2-4] 安全工学講座(2) 爆発、安全工学協会(1983)
- [2-5] 三宅淳巳「水素の爆発と安全性」、水素エネルギーシステム Vol.22, No.2 (1997), pp.9-17.
- [2-6] Wakabayashi et al., Sci. Tech. Energetic Materials 68 (2007) 36.
- [2-7] Dobashi et al., Proc. Combust. Inst. 33 (2011) 2295.
- [2-8] 産業安全工学ハンドブック、海文堂出版(1989)
- [2-9] 石油コンビナートの防災アセスメント指針、消防庁(2013)
- [2-10] 高圧ガス保安法 圧縮水素スタンド 技術基準解説、高圧ガス保安協会 (2016)

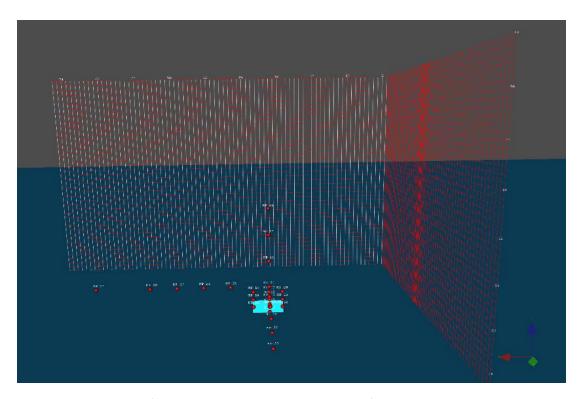
# 3. シミュレーションによる掘削坑内における漏えい水素の着火影響調査

数値シミュレーションにはノルウェーの GexCon 社が開発した水素等可燃性ガスの燃焼 爆発危険性解析のための数値解析ソフトウェア「FLACS」を用いた。同コードは水素の噴 出漏えいからの爆発や火炎形成の問題に対して応用例が多く、HySafe(The EC Network of Excellence for Hydrogen Safety)で行われた水素放出分布を評価するプロジェクトにおいて、 シミュレーション結果が最も実験結果に近いと評価された実績を有する。FLACS が採用し ている物理モデル等については平成28年度の報告書あるいは文献を参照されたい[3-1.3-2]。 平成 28 年度の当該事業では同コードを使用して、水素が開放空間へ噴出した場合を想定し、 漏洩水素の濃度分布と着火時の爆風圧や温度分布について評価した。平成 29 年度の本事業 では、本報告書に記載されている実験で得られた漏えい水素濃度や爆風圧等について、シ ミュレーションによる再現計算を試み、掘削坑内における漏えい水素の着火影響について、 シミュレーションが可能かどうかについて検証した。水素の燃焼速度は他の一般的な可燃 性ガスと比して速いことは知られているが、開放空間における着火時には、特に強い着火 減を用いない限り、爆燃の燃焼形態を呈する。また、管内など狭い空間では火炎が加速さ れ爆轟に転移することも知られている。前章に記載されている通り、本事業における実験 では、水素噴流が生じているモデル坑内で着火を行った場合、速い流れ場や壁に囲われた 状況などの影響で燃焼形態が爆轟に転移する可能性が示唆されている。一方、FLACS はエ ントロピーの上昇を伴う爆轟現象を模擬できない。

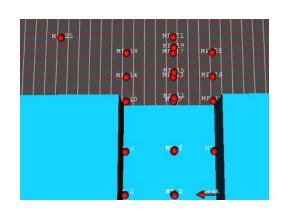
### 3. 1 数値シミュレーション条件

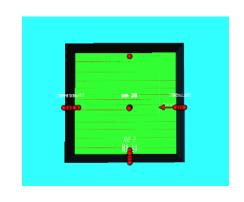
数値シミュレーションでは、モデル坑内に水素を放出させた場合の水素濃度分布、ならびに坑内あるいは抗の直上で着火した場合に発生する爆風圧の評価を実施した。本シミュレーションで考慮する気体は水素と空気のみである。また、すべてのシミュレーションで風速ゼロの条件とした。モデル坑の形状は実験と同様とした。モデル坑の辺長さ1.2 m の場合の計算場を図3.1に示す。計算場は15×11×10 m の3次元領域とした。水素の放出方向をX軸とし、高さ方向をZ軸とした。放出孔位置を(0,0.6,0.1 m)としてX,Y,Z方向について、それぞれ-5~10 m,-5~6 m,0~10 m の空間に格子形成した。高さ1.2 m の剛体ブロックを計算場全体に配置し、XY面で1.2×1.2 m の全領域を空間とすることで、モデル坑を設定した。モデル坑内における水素噴出時の水素濃度の評価(水素噴出シミュレーション)では、0.2 m の格子幅を基本とし、水素放出孔近傍のみ FLACS の Refine gird 機能を用いてY,Z 方向について0.06 m とし、格子を密に形成した。爆風シミュレーションは水素噴出シミュレーションで得られた3次元空間の物理量を初期値とし、燃焼を考慮した圧縮性流れ場を再構築して実施した。また、濃度場の評価と比して空間、時間ともに高解像度が要求されるため、各方向とも0.1 m あるいは0.05 m の格子幅として計算領域全体を格子形成した。放出条件は実験結果を参照し、放出孔10mmについて、供給圧0.1 および0.5 MPa

に対して、それぞれ流量 0.092、0.027 kg/s を与えることで噴流を模擬した。モデル坑は一辺が 1.2 m の場合について噴出ならびに爆風シミュレーションを実施した。



(a) 計算場全体(中央の水色の部分がモデル坑)





(b) モデル坑内および近傍(側面)

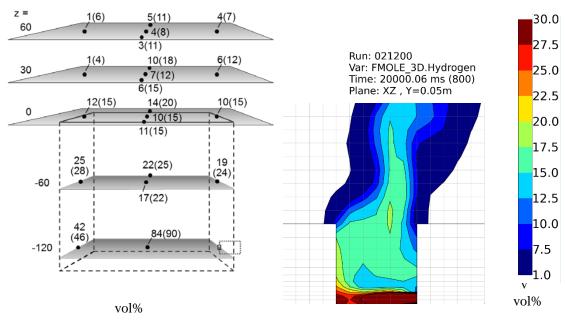
(c) モデル坑内近傍 (上面)

図3.1 計算場(モデル坑長さ1.2 m の場合) 赤い点はデータ取得位置、赤の矢印は水素放出孔位置と方向を示す

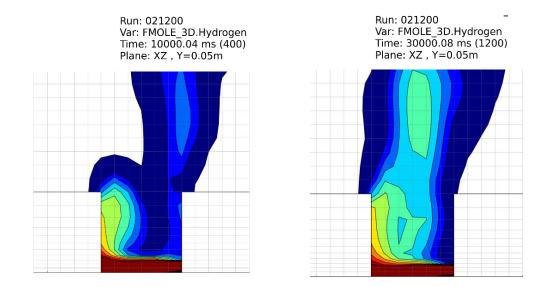
## 3. 2 モデル坑内における水素噴出時の水素濃度の評価(水素噴出シミュレーション)

モデル坑辺長さ 1.2 m, 供給圧 0.1 MPa の場合について、水素濃度分布の計算結果を図3. 2に示す。同図(a)は実験結果であり、計測点で得られた水素濃度(vol%)の時間平均値と最大 値(括弧内)が示されている。放出孔は右下に設置されており放出の向きは紙面右から左 である。次の傾向があった。モデル坑内(地面から-60 cm)における計測点では、放出孔側 の壁面近傍よりも放出孔の対面近傍の方が水素濃度が高い傾向にある。これに対して、モ デル坑の上方、地面から高さ 30 cm と 60 cm の位置では、放出孔側の方が対面に比べ水素濃 度が高い。一方、図3.2(b) $\sim$ (d)はシミュレーションで得られた濃度分布の図であり、Y=5 cm における XZ 断面(放出方向・高さ方向)上の分布を表している。同図により実験で 確認されたモデル坑内とその上部における水素濃度分布の傾向を定性的に解釈できる。す なわち、放出孔から反対の面に衝突した後、水素濃度の分布は鉛直上向きではなく、放出 方向とは逆の向きに傾きつつ上方に広がっていく様子が計算された。図3.3は水素放出 から 40 s 経過するまでのモデル坑付近の速度ベクトルを 10 s 間隔で示す。モデル坑上方で の流れは、放出の方向とは逆の向きに傾いて上方に向かう。この流れ場が上述の濃度分布 を形成していると考えられる。また、流れは次のように成長していくと推察される。放出 孔から発生する速い流れは、対面の壁に衝突して同心円状に壁に沿う流れを形成する。こ の時、上方に向かう流れは減速しながらモデル坑の上面に到達する。これに対して、紙面 に対して奥行き方向に向かう壁に沿った流れは、それぞれの方向にある二つの壁と衝突し、 その結果、元の放出方向とは逆向きの流れが出現する。モデル坑の上部に行くほど全体的 に放出方向とは反対の流れ場が形成され、その結果、上方への流れは鉛直ではなく放出方 向とは逆に傾いた流れとなる。

モデル坑辺長さ 1.2 m, 供給圧 0.5 MPa の場合について、水素濃度分布と速度ベクトルの計算結果を図 3. 4 に示す。同図(b)(c)は供給圧 0.1 MPa の条件の結果と同様の傾向を示している。同図(d)には地表面における XY 断面の速度ベクトルを示しており、地表面では放出方向と逆向きの速度場が形成されていることを確認できる。



- (a) 実験結果(図2.10の図を再記)
- (b) シミュレーション結果(10s)



- (c) シミュレーション結果 (20 s)
- (d) シミュレーション結果 (30 s)

図3.2 水素濃度分布(モデル坑長さ  $1.2 \, \text{m}$ , 供給圧  $0.1 \, \text{MPa}$ ) 水素放出方向は紙面右から左、XZ 断面、高さ  $3 \, \text{m}$  まで表示

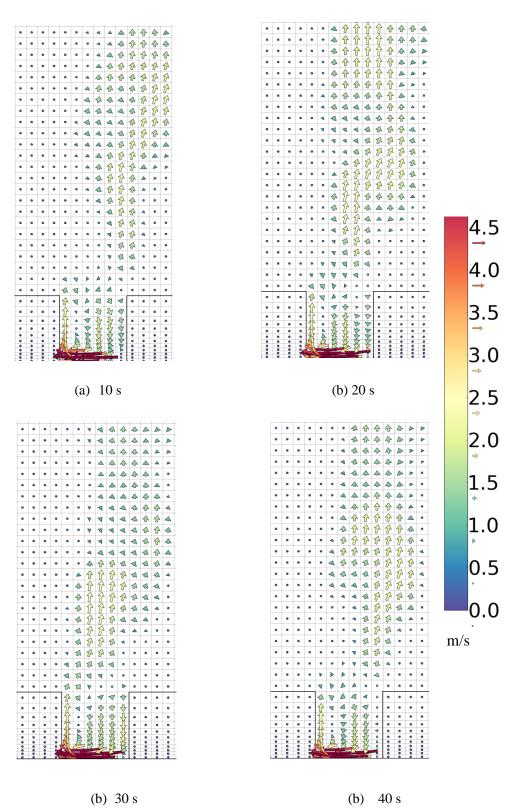


図3.3 モデル坑付近の速度ベクトル(モデル坑長さ1.2 m, 供給圧0.1 MPa) 水素放出方向は紙面右から左, XZ 断面、高さ6 m まで表示、無風条件

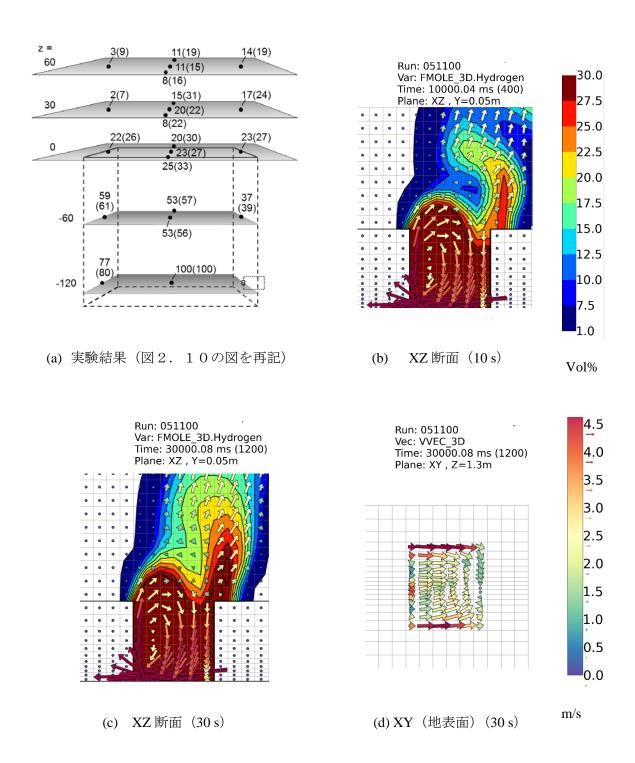
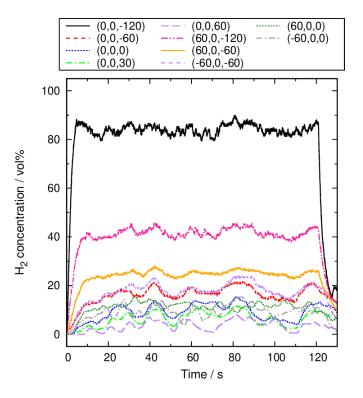
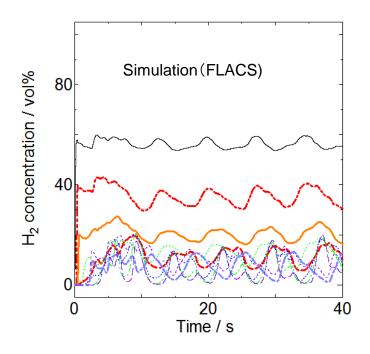


図3.4 水素濃度分布(速度ベクトルを併記)(モデル坑長さ1.2 m, 供給圧0.5 MPa) 水素放出方向は紙面右から左, XZ 断面、高さ3 m まで表示、無風条件

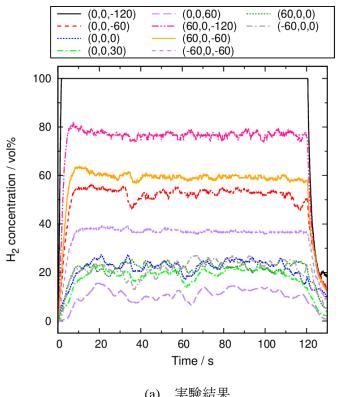
図3.5と3.6では、モデル坑内およびその上方で得られた水素濃度の時間履歴につ いて、実験結果とシミュレーション結果を比較した。図3,5は供給圧0.1 MPa、図3.6 は 0.5 MPa の結果である。 供給圧 0.1 MPa の場合については、 計測点 (0,0,-120) すなわち、 モデル坑の中心で地面から高さ-120 cm の位置を除き、実験結果とシミュレーション結果は 良い一致を示した。例えば計測点 (60,0,-120) では、実験とシミュレーションともに水素 濃度は 40 vol%程度であった。放出孔の近傍では、実験とシミュレーションで得られた水素 濃度に 20 vol%程度の比較的大きな差があるが、これはシミュレーションの計算格子幅が放 出方向に 0.2 m あり、局所的な水素濃度分布を満足に計算できていないことによると考えら れる。図3.6は供給圧0.1 MPaでの計算と同様の計算格子で実施された供給圧0.5 MPaの 計算結果であるが、0.1 MPa の条件より、実験結果とシミュレーション結果の違いは大きい。 例えば、計測点(0,0,-120)における実験結果は水素濃度がほぼ100 vol%であったのに対して、 シミュレーションは 70 vol%程度と計算されている。これは計算格子の粗さに原因すると考 えられる。計測点が(0,0,60)の位置では、実験とシミュレーションともに水素濃度は図中に 示す他の点での濃度より低くなっているが、実験では 10 vol%程度で推移するのに対して、 シミュレーション結果では 17 vol%で安定する。-60 よりも高い位置では実験とシミュレー ションで得られた水素濃度は比較的よく一致した。



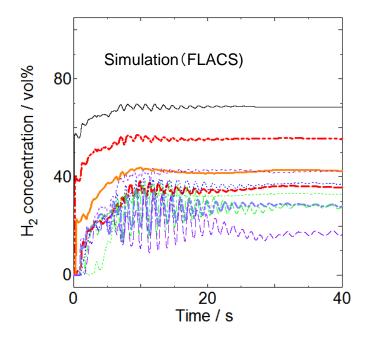
(a) 実験結果 (図2. 12の濃度履歴を再表示)



(b) 水素噴出シミュレーション結果 図3.5 実験と数値シミュレーションで得られた濃度履歴の比較 (モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPa)







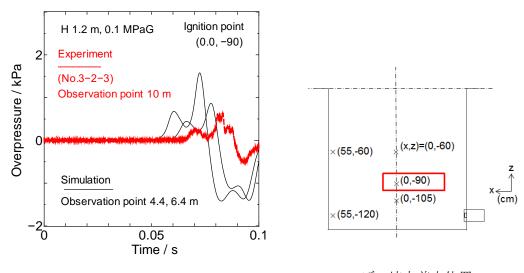
(b) 水素噴出シミュレーション結果

図3.6 実験と数値シミュレーションで得られた濃度履歴の比較 (モデル坑長さ 1.2 m, 供給圧力 0.5 MPa)

#### 3.3 爆風シミュレーション

モデル坑辺長さ 1.2 m, 供給圧力 0.1 MPa の条件で、前節に記載した計算で得られた濃度 場を初期値として、爆風シミュレーションを実施した。実験より、爆風圧は着火位置に大きく依存することが明らかになっており、着火位置の違いによる爆風圧の違いについても 調査した。図 3. 7 は、点 (0,0,-90) を着火位置とした場合の実験結果と数値シミュレーション結果の比較である。実験ではモデル坑から計測点までの距離が 10 m であるが、シミュレーションでは計算場を放出孔から 10 m としたために、境界からの影響を避けるために データ取得点を放出孔から 5 m,7 m (モデル坑中心からそれぞれ 4.4 m,6.4 m) の位置に設定した。データ取得点を複数個所設定することで圧力の距離減衰を評価できるため、実験 結果と比較可能と考えられる。実験結果とシミュレーション結果とを比較すると、データ取得点における圧力の減衰傾向は、10 m 位置での実験結果とを比較すると、データ取得点における圧力の減衰傾向は、10 m 位置での実験結果に合う結果となった。また、圧力の時間履歴の形状についても良い一致が確認された。すなわち、両者とも波頭を二つ持つ特徴的な波形となった。なお、着火については火花放電後、実際に着火する時刻や初期の段階での火炎形成過程を正確に評価できないため、圧力到達時刻の厳密な比較は困難である。そこで、爆風ピーク圧の距離減衰について実験結果とシミュレーション結果を比較する。

図3.8では、モデル坑内にて異なる3点でそれぞれ着火した場合の爆風ピーク圧の距離減衰を、実験とシミュレーションで比較した。ピーク圧の距離に対する傾きはすべての条件で良い一致を確認できる。さらに、着火点(0,-90)と(55,-60)については定量的にも良く一致している。一方、着火点(0,-105)の場合については、シミュレーションのピーク値の方が高くなった。これは、モデル坑内における水素濃度履歴の比較において、放出孔近傍において実験値との違いが確認されたことに関係すると示唆される。



モデル坑内着火位置

図3.7 実験と数値シミュレーションで得られた圧力履歴の比較 (モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPa, 着火位置(0,-90))

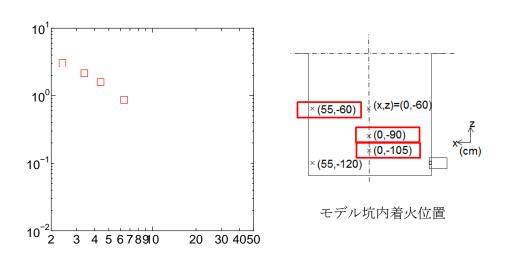


図3.8 ピーク圧の距離減衰に関る実験と数値シミュレーションの比較 (モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPa)

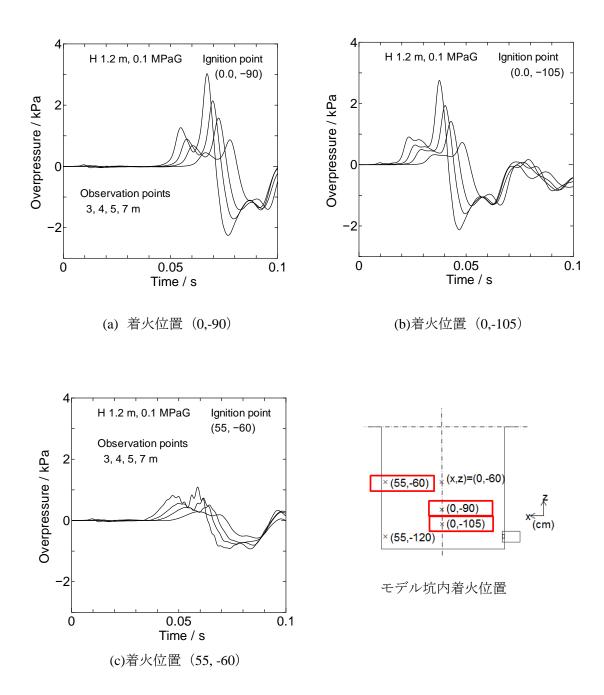


図3. 9 着火位置の違いによる爆風圧の影響 (3,4,5,7 m 位置における圧力履歴) (モデル坑長さ 1.2m, 供給圧力 0.1 MPa のシミュレーション結果)

モデル坑の外に伝播する爆風は、坑内の流れ、圧力波と壁との干渉や、火炎の加速など様々な要素に影響され、着火位置によってその状態は変化する。そこで、その爆風に影響を与える因子について、モデル坑内各点の圧力、ならびに水素濃度の変化をもとに考察する。モデル坑内には図3.10に示すように出力点をそれぞれ、グラウンド(地表面レベル)中央に1点、グラウンド-60 cm 面に4点、グラウンド-120 cm 面に3点設定した。図3.13では、各面の中央の水素濃度履歴を太線で示した。

モデル坑内各点での圧力履歴は、地表面モデル坑中央(赤太線)を除いた線は概ね重なっている。これに対して、水素濃度履歴では各点の反応は異なる時間で進行する。本条件では圧力波が火炎よりも速く伝播する通常の爆燃を呈している。着火位置(0,-90)および(0,-105)ともに内圧は2回上昇している。(0,-90)の場合、内圧は時刻47.6 msに最大となるが、水素濃度履歴から考えると、グラウンド-120 cm モデル坑中央とグラウンド-60cm モデル坑中の水素濃度がほぼゼロになる時刻と、内圧がピークに達する時刻がほぼ一致しており、これら二つの点はいずれのも着火点から30cmの位置にあり、同程度の速度で火炎が伝播したものと見積もられる。地表面中央やモデル坑の壁近傍において水素濃度が急減する時刻と、内圧二つ目のピークの間には5~10 msの時間差がある。また、すべてのモニター位置において水素濃度の減少が完了する時刻60 msでは、モデル坑内は各点で負圧となっている。従って二つ目の内圧上昇は坑内水素の燃焼に直接起因するものではないと推測される。同様の挙動は着火位置(0,-105)でも確認される。

着火点から各点に火炎が伝播すると、その状況に応じた速度で反応が進行し水素が消費される。2点間の水素濃度の履歴より、火炎の伝播速度を見積もることができる。着火位置 (0,-90) の場合において、モデル坑中央の 3 つの太線に着目しモデル坑高さ方向に伝播する火炎を考える。緑太線、黒太線ともに、着火点から 30cm 離れており水素濃度は 45 ms 程度の時刻で、概ね同時に減少する。5%まで減少した時刻は 45.9 ms である。一方、赤太線(地表)で 5%になる時刻は 52.7 ms であり、2点間の距離から推測すると火炎伝播速度は 88 m/s となり、速い爆燃といえる。この間に燃焼による圧力上昇があり、例えばモデル抗中央から発生した圧力波が音速で伝播し、壁で反射され中央に戻るまでに要する時刻は、水素空気混合気体の音波を約 1km/s として 1.2 ms になる。上記の火炎伝播速度を用いて計算すると、1.2ms の間に火炎が伝播する距離はおよそ 10 cm である。従って伝播火炎は壁から反射した圧力波の影響を受け加速された可能性もある。各高さにおける断面で、それぞれ中央から壁まで距離は 60 cm であり、緑線、黒線ともに赤い太線より遅れて反応している。よって火炎伝播速度は中心における高さ方向より水平方向の方が遅い。黒線が 5 %になる時刻は 57.3 ms であり水平方向の火炎伝播速度は 55 m/s 程度と評価できる。

着火位置(0,-105)では着火位置に近いグラウンド-120 cm 中央(緑太線)が他の点より 反応が早く始まり、グラウンド-60cm 中央(黒太線)、地表面中央へと燃焼反応領域が伝播 している様子が確認される。地表面中央の反応が終わるのと同時刻でグラウンド-120,-60 の各位置に火炎が到達して、時刻 30 ms 程度で容器内の燃焼反応は終了していると考えられ る。モデル坑内の2回目の圧力上昇はその後に発生する。一方、着火位置(55,-60)の場合は、着火点に近い点で、水素濃度約20%から反応して0%になるまでの時間に30ms程度要している。上述の二つの着火位置の場合と比して、火炎の伝播が非常に遅いことが読み取れる。当該条件では燃焼による水素の消費が遅く、燃焼エネルギーの爆風への寄与が他の着火位置よりも小さくなっていると考えられる。

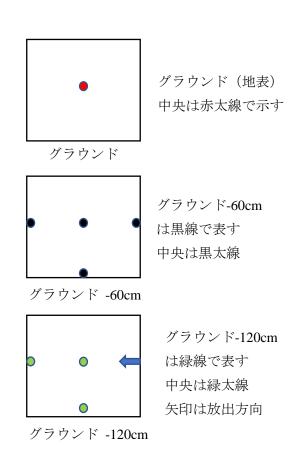


図3.10 (図3.11) の圧力・水素濃度履歴出力点の説明

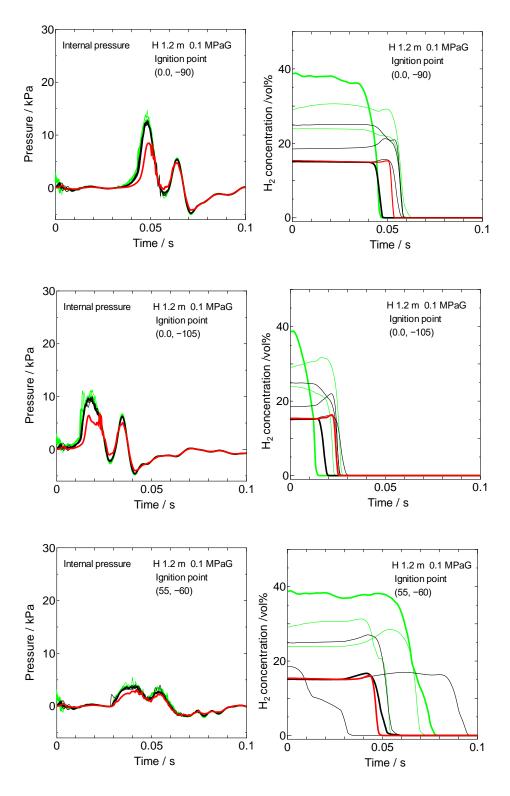


図3. 11 モデル坑内各点の圧力上昇と水素濃度履歴 (モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPaのシミュレーション結果) 出力点は図3. 10の通り

図3.12には、モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPa、着火位置(0,-90)のシミュレーションで得られた時々刻々の水素濃度(左側)と圧力(右側)を、モデル坑近傍について示した。着火して40 ms後までに燃焼反応による緩やかな水素濃度の減少が確認され、同時刻でモデル坑底部の圧力上昇が始まる。次の5 msで水素濃度がゼロ近くになる部分が確認され、この時点でモデル坑内の圧力は急激に上昇し、坑内最大圧力に近づく。さらに5 ms経過した50 ms時点では、モデル坑外まで圧力が伝播しているため、この段階までの燃焼のエネルギーが第1波目のピーク圧に寄与すると考えられる。時刻60 msになると、図3.11(0,-90)の圧力履歴のように坑内は負圧になっており、過膨張のために圧力波が坑内へ逆向きに伝播する。同時刻には抗の上部に局所的に圧力が高い部分が確認される。この時点では坑上部に存在する水素が燃焼している。時刻64 msには坑内の2回目の圧力上昇を生じるており、これが第2波に寄与している

図3.13は上述と同条件での、爆風の伝播挙動である。坑内圧が極大値をとる2つの時刻、および7m位置のデータ取得点に2回目のピークが到達する時刻における爆風圧分布を示してある。モデル坑内に存在する水素の一部が燃焼し坑内圧力が上昇し爆風圧第1波を形成する。坑上部に押し上げられた可燃濃度の水素の燃焼により、坑内の圧力が再上昇し爆風圧第2波が形成され、波頭を二つ持つ特徴的な圧力履歴が形成される。

### 3. 4 水素漏洩着影響調査 シミュレーション結果のまとめ

モデル坑辺長さ 1.2 m 供給圧 0.1 MPa、0.5 MPa の条件で、水噴出漏洩シミュレーションを実施し、モデル坑の地表面より上方に生成される水素濃度分布、ならびに坑内の濃度履歴を実験と比較した。坑内に生じる流れの影響でモデル坑上部では、水素は放出方向とは逆に傾いて上昇する。この現象は実験で得られたモデル坑上部の濃度分布を説明できる。モデル坑内の各点で濃度履歴について実験と比較した。その結果、計算格子サイズの影響を顕著に受ける放出孔近傍を除いて、良い一致が確認された。着火による爆風圧の評価では、ピーク圧の距離に対する減衰はすべての条件で良い一致を示し、定量的にも実験と良く一致する条件があった。同シミュレーション結果により、着火の際モデル坑内で起こる現象と爆風圧との関係を整理し、モデル坑内で着火した場合の爆風圧の発生メカニズムを示した。

# 3. 5 参考文献

[3-1] 平成28年度水素導管供給システムの安全性評価事業(水素導管の大規模損傷リスク 評価)報告書

[3-2] FLACS v10.5 User Manual, GexCon AS, Bergen Norway, 2016

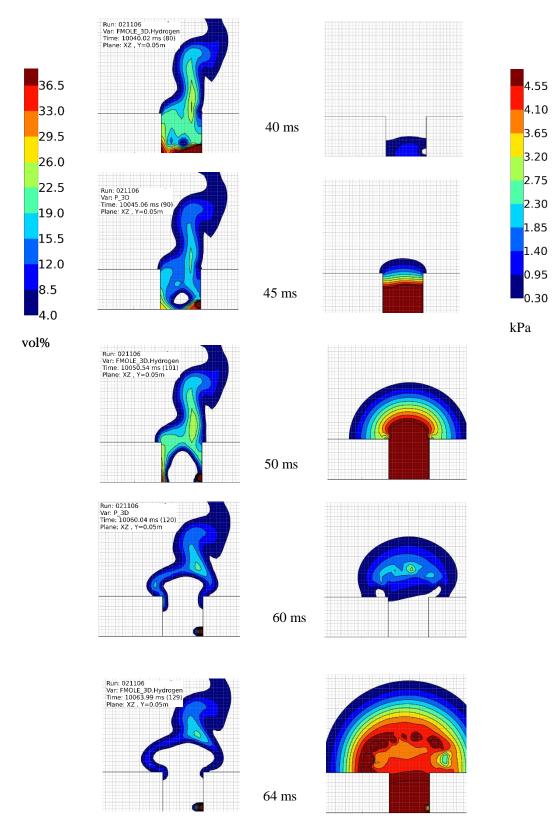


図3.12 モデル坑内近傍における濃度分布と圧力分布の時間変化 (モデル坑長さ  $1.2\,\mathrm{m}$ , 供給圧力  $0.1\,\mathrm{MPa}$  のシミュレーション結果)

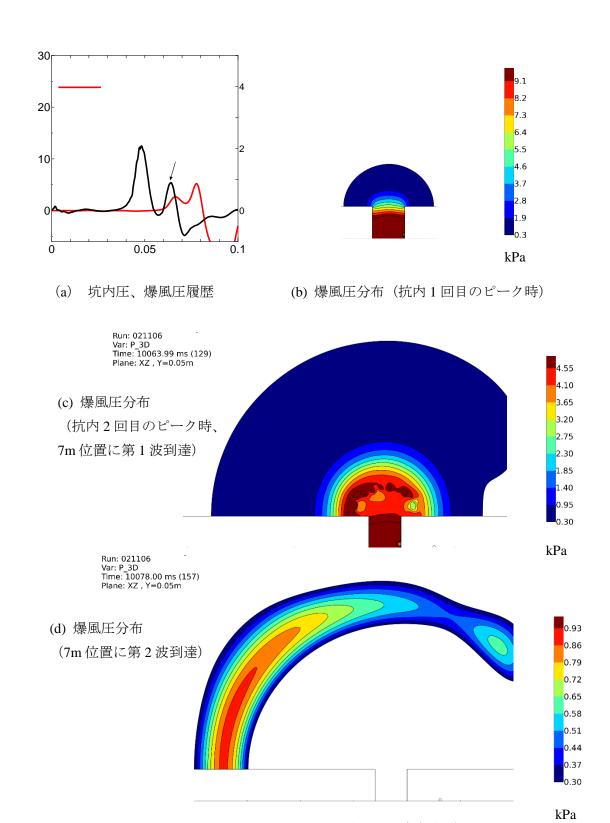


図3. 13 爆風圧の伝播挙動 (モデル坑長さ1.2 m, 供給圧力0.1 MPaのシミュレーション結果)

### 4. まとめ

水素導管供給システムにおける大規模損傷シナリオを想定した場合に考慮すべき事項として、他工事等による掘削坑を模擬したモデル坑中において埋設導管が損傷することを想定し、坑内に放出された水素が着火した際の周囲影響を評価した。その結果、モデル坑のサイズと水素放出流量によって異なる燃焼挙動を示すことが明らかとなった。実験結果を元に、爆風圧を評価するためのモデルを提案した。放出孔 $\phi$ 10mm、放出圧力 0.1 MPa の放出条件では、着火時の距離 x における爆風圧の上限値は、モデル坑の辺長さ L を代表長さとして用いて、以下のように表すことができる。

### 放出孔 φ 10 mm、放出圧力 0.1 MPa における爆風圧評価モデル

(L: 掘削坑代表長さ、 $V_p$ : 掘削坑容積[ $\mathbf{m}^3$ ]、x: 距離 [ $\mathbf{m}$ ])

 $L \leq 30$  cm: 開放放出スケール則の二倍

 $\Delta p_{\text{peak}} = 2.3 \, x^{-1} \, [\text{kPa}]$ 

30 cm < L < 120 cm: TNT 等価モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 358 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.467} \ x^{-1.40} \ [\text{kPa}]$   $(\Delta p_{\text{peak}} < 3.4 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 277 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.440} \ x^{-1.32} \ [\text{kPa}]$  (3.4 \le \Delta p\_{\text{peak}} < 20 \ [\text{kPa}])

 $\Delta p_{\text{peak}} = 570 \ (1.5V_{\text{p}})^{0.562} \ x^{-1.69} \ [\text{kPa}]$   $(20 \le \Delta p_{\text{peak}} < 64 \ [\text{kPa}])$ 

 $\Delta p_{\text{peak}} = 916 \ (1.5 V_{\text{p}})^{0.687} \ x^{-2.06} \ [\text{kPa}]$   $(\Delta p_{\text{peak}} \ge 64 \ [\text{kPa}])$ 

L≥120 cm: 予混合爆発モデル

 $\Delta p_{\text{peak}} = 16 (1.5V_p)^{1/3} x^{-1} \text{ [kPa]}$ 

また、これらの爆風圧評価モデルの適用範囲は水素放出条件に依存することが確認され、 放出流量への依存性を含む暫定的な評価式が提案されたが、限られた実験結果からの推測 によるものでありその妥当性については更なる検討を要する。

爆風圧の評価結果、特に TNT 等価モデルで表される「速い燃焼」が発生する条件での結果を考慮すると、一般的な公道への導管埋設環境において、周辺の人や建屋等へ与える影響を最小限に止めることは困難である場合も想定される。水素導管の埋設においては、大規模損傷事故が発生しないよう事前対策を行うことを前提とすべきであるが、その上で、万が一事故が発生した場合にその影響を最小限とするよう備えるべきである。その一つとして、「速い燃焼」が生じないよう漏洩検知と連動した緊急遮断等の措置を講じることが考えられ、その効果を検証することが望まれる。また、「速い燃焼」が発生しない場合においても、予混合爆発モデルでは構造物に影響し得る爆風が遠距離まで到達することも想定されるため、事故発生時のリスク評価では、提案する爆風圧モデルによって評価される爆風影響を考慮すべきである。

数値解析では漏えい水素濃度や爆風圧等について、実験と比較し、いくつかの条件で良い一致を得た。また、当該計算における爆風圧の発生メカニズムを示した。