平成30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31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	全研 多	その	目的	3			
	1.	2	調査研究の概要							
2.	水素源	景えし	\着;	火影	響討	平価実験	4			
	2.	1	実験の概要							
	2.	2	実験設備と方法							
			2.	2.	1	設備	4			
			2.	2.	2	実験手順と実験条件	8			
			2.	2.	3	計測項目	9			
	2.	3	実駆	実験結果						
			2.	3.	1	予混合着火実験	10			
			2.	3.	2	水素放出着火実験	15			
3.	想定さ	れる	る大規	涀模	損傷	影における爆風圧評価モデルの適用例	39			
4.	まとめ)					43			
			4.	1	実	験結果	43			
			4.	2	爆	虱圧評価モデル	43			
			4.	3	爆	虱圧評価モデルの活用	44			
参考	含文献						46			

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、近年中の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[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と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年度の調査[2]においては、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を想定し、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、坑内に放出された水素に着火した際の爆風圧等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り、実験結果を元に、爆風圧を評価するためのモデルが提案された。

これらの調査結果を背景として、特に平成29年度調査において顕著な爆風圧が観測されたことを踏まえ、平成30年度の当調査では、掘削坑内に水素が漏えいした場合の着火影響を低減させるための措置として、大規模漏えい発生時の遮断による爆風圧抑制の効果を、実験的に把握、整理することを目的とした。

1.2 調査研究の概要

本調査研究では、掘削坑を模擬するモデル坑内での水素漏えい着火現象について、水素 供給遮断により圧力ならびに放出流量が低下した場合の坑内水素濃度分布および着火時の 爆風圧を計測し、着火影響の低減効果を確認した。

埋設導管の損傷を想定し、水素供給遮断を模擬した条件において、水素漏えい着火影響 実験を実施した。また、想定する配管長(漏えい位置から遮断弁までの距離)・供給圧・放 出孔径等から、水素供給遮断後の時間と圧力および流量低下の関係を算出し、当該算出結 果と実験結果より、遮断弁作動後の経過時間に対して着火時の爆風による周囲影響を評価 し、遮断による爆風影響の低減効果を整理した。

2. 水素漏えい着火影響評価実験

2. 1 実験の概要

掘削坑を模擬した空間 (深さ 130 cm、幅・奥行き 80 cm) 内において、供給圧力 0.1 MPa、放出孔径 10 mm の損傷を想定し、水素供給遮断時を模擬し圧力を低下させた条件において水素を放出させた。その際にモデル坑内に形成される水素濃度分布を計測した。また、水素放出着火実験として、放出した水素に着火し、発生する爆風圧および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。また、放出される水素の流速による爆風影響の変化を検討するため、放出孔径を 7 mm あるいは 14 mm とした実験も行った。さらに、放出停止後の流れのない状態を模擬した予混合着火実験として、坑内に一定濃度の混合気を調製し予混合状態で着火させた際の爆風圧と火炎伝播挙動の観測も行った。

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30年12月9日から同20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100 m以上を確保し、水素供給開始から供給終了、配管内窒素置換等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。

水素放出を伴う実験における水素供給系統の模式図を図2.2に示す。水素供給配管は呼び径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。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。

本調査研究においては掘削坑を模擬するため、地面から深さ 130 cm、平面形状が一辺 80 cm である直方体のモデル坑を用いた。水素放出実験に使用する水素放出孔は、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、フランジ中央に円形の放出孔を設けた。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。

また、放出停止後の流れのない状態を模擬した予混合着火実験においては、坑内に一定 濃度の混合気を調製した。大気との混合による濃度の変動を抑えるため、模擬坑にビニル シートを被せた状態で実験を行った(図2.3)。それぞれ流量を調節した水素と空気の混 合気を、樹脂製配管を用いて坑内へ供給した。孔内での気体の混合を促進するために気体 循環用の配管を挿入し、循環混合を行った。同配管は濃度計測のための混合気の採取にも 用いた。

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 ϕ 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、電極に印加することにより火花放電を発生させ、点火を行った。昇圧器への電圧印加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、印加時間は20 ms とした。

掘削坑近傍に設置した風向風速計により風況を観測し、風速 3 m/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 $6\sim16^{\circ}$ 、気圧は $969\sim986 \text{ hPa}$ であった。また、実験時における放出孔付近の配管内温度は $9\sim17^{\circ}$ であった。

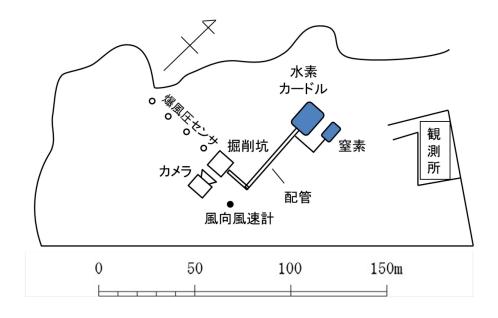




図2.1 実験場と設備類の全体配置(上)および実験場全景(下)

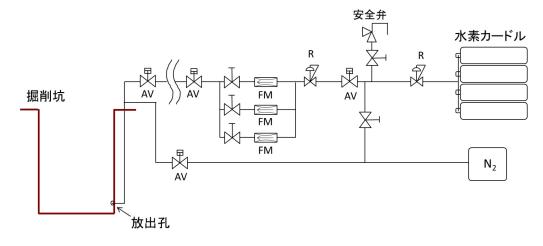




図2.2 水素供給系統(上; AV:空気圧作動弁、R:圧力調整弁、FM:流量計)と供給設備(下)



図2.3 予混合着火実験における掘削坑の様子

2. 2. 2 実験手順と実験条件

2. 2. 2. 1 予混合着火実験(放出停止後の流れのない状態を模擬)

予混合着火実験では、前述の供給配管を用いて循環混合を行いながら坑内に一定濃度の水素・空気混合気を調整した。採取した混合気の水素濃度は光学干渉式濃度計(理研計器 FI-21)によって測定した。所定の濃度の混合気が形成されていることを確認した後、循環を停止し、点火を行った。点火位置は、掘削坑底面および四方の鉛直面から等間隔(40 cm)となる位置とした。実験条件としては、水素濃度が化学量論比となる 29 vol%、可燃範囲の上限に近い72vol%、およびそれらの中間の51 vol%の三条件を設定した。

2. 2. 2. 水素放出着火実験(遮断による圧力低下を模擬)

放出孔直前に設置した遠隔操作弁の開動作により水素放出を開始した。坑内の水素濃度分布は放出開始後 5-10 秒以内に定常に達したため、放出の持続時間および着火タイミングは下記の通り設定した。濃度計測実験においては、約 60 秒間放出を継続した後、当該弁の閉動作により水素放出を停止した。着火実験においては、放出開始の約 20 秒後に点火を行い、着火後直ちに水素放出を停止した。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。水素供給圧力は、放出孔径 10 mm においては 0.002-0.1 MPa、孔径 7 mm では 0.014-0.31 MPa、孔径 14 mm では 0.002-0.022 MPa とした(いずれも±10%以下)。点火位置は放出条件ごとに複数設定した。詳細は後述する。

2. 2. 3 計測項目

2. 2. 3. 1 濃度計測

水素放出時の掘削坑内の濃度分布を計測した。気体熱伝導式水素センサー(新コスモス電機製;フルスケール 0-100 vol%、応答速度 5 秒以下)を坑内に配置し、水素が放出されている間の各位置での水素濃度を取得した。センサー設置位置を図 2.4 に示す。

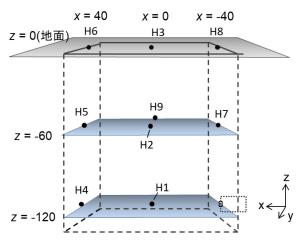


図2.4 水素濃度センサー (H1-9) の配置図 (cm) (H1-8 は放出軸を含む鉛直面上、H9 は紙面奥の面に配置)

2. 2. 3. 2 爆風圧

地面から高さ 1 m、掘削坑中心からの水平距離 5,10,20,30 m の各位置にマイクロフォン型の圧電性爆風圧センサー (PCB Piezotronics、377C10 およびプリアンプ 426B03)を設置 (図 2.1) し、着火に伴って発生する爆風圧を計測した。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。

2. 2. 3. 3 火炎撮影

掘削坑内の火炎伝播の挙動を観察するため、掘削坑の一側面にアクリル窓 (厚さ 50 mm)を設け、高速度撮影を行った。高速度カメラ (Vision Research 社 Phantom v1212、レンズ: 近赤外用 17 mm, f0.95、撮影速度 58000 fps、可視光カット用 700 nm ロングパスフィルター装着) は掘削坑中心から水平距離 2 m の位置に設置し、17 mm の広角レンズを用いて坑内のほぼ全域を視野とした(図 2. 5)。点火タイミングと撮影の同期には点火装置からの出力をパルスジェネレータによって変換した信号を用いた。

また、着火後の火炎の様子をモニターするために近赤外カメラによる放出孔付近の撮影を行った。その詳細は後述する。

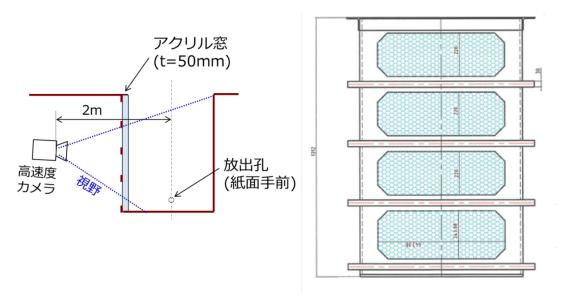


図2.5 高速度カメラの配置(左)と掘削坑窓面(右)

2. 3 実験結果

2. 3. 1 予混合着火実験(放出停止後の流れのない状態を模擬)

水素濃度が 29、51、および 72 vol%の三条件において、坑内に混合気を調整し着火した際に発生した爆風圧を計測した。各爆風圧計測点における圧力の時間履歴を図 2.6 に示す。 5 m位置における爆風過圧のピーク値(ピーク過圧)は、水素濃度 29、51、および 72 vol%の条件においてそれぞれ 4.5、3.8、および 2.4 kPa であった。各計測点におけるピーク過圧と、その距離による減衰の様子を図 2.7 に示す。いずれの水素濃度条件においても、ピーク過圧は距離にほぼ反比例して減衰する挙動を示した。

図2.7中の実線は、水素と空気の混合気が予混合爆発した場合に予測される爆風のピーク過圧である。この予測モデル(予混合爆発モデル)は以下のように構築されたものである。「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)」[3,4,5]では、ビニルシートによって囲われた 1 辺 50 cm および 100 cm 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、1 \mathbf{m}^3 の混合気から発生するピーク過圧は、距離 \mathbf{x} [\mathbf{m}] の関数として近似的に $\mathbf{1}6/\mathbf{x}$ [\mathbf{k} Pa] と表される。また、ピーク過圧の値は混合気体積のおよそ $\mathbf{1}/\mathbf{3}$ 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。さらに、立方体空間の壁面を鋼板で塞ぐことにより、着火点近傍では計測位置により爆風圧が 2 倍程度に増大することが報告されている。従って上記関係式の 2 倍に体積換算を施すことで、掘削坑内での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。すなわち、掘削坑容積を $V_{\mathbf{p}}$ [\mathbf{m}^3]とすれば本モデルのピーク過圧 $\Delta p_{\mathbf{peak}}$ は下記となる。

$$\Delta p_{\text{peak}} = 32 \ V_{\text{p}}^{1/3} \ x^{-1} \ [\text{kPa}]$$

このモデルは前年度同事業[2]において採用されたモデルの約 1.7 倍のピーク過圧を与えるが、これは前年度のモデルでは壁面の効果を露わに考慮していなかったためである。

図2.7から、本実験において計測されたピーク過圧は予混合爆発モデルにより予測される値を下回っており、従って流れのない状態における水素空気混合気の爆発によって発生する爆風圧の上限値の評価には予混合爆発モデルが適用可能であることが示唆された。また、同図には、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 TNT 等価モデル[2]による予測値も示されている。本実験で観測された爆風圧は TNT 等価モデルによって予測される値を大きく下回る結果であった。

図2.8には、高速度カメラによって撮影された火炎伝播挙動の例を示す。着火直後から火炎は球形を保ち伝播するが、その後壁面の影響を受け上方へ伝播する様子が観察された。撮影された画像から計算される火炎の伝播速度は19 m/s であり、これは水素と空気の予混合気が開放空間中で燃焼する際の伝播速度[3]とほぼ一致する。

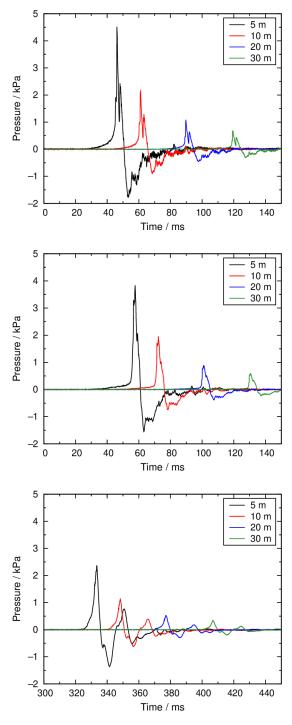


図2.6 放出停止模擬(予混合着火)実験において計測された圧力履歴 (上から水素濃度29、51、72 vol%)

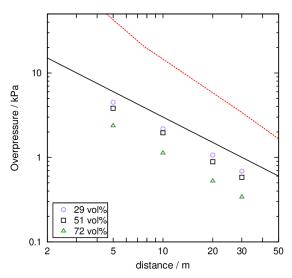


図2.7 放出停止模擬(予混合着火)実験において計測された爆風ピーク過圧 (図中の線は予混合爆発モデル(黒実線)および TNT 等価モデル(赤鎖線)による評価値)

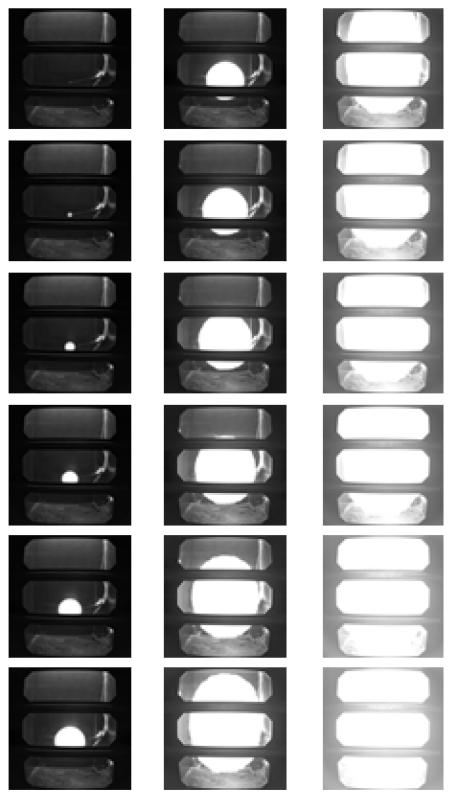


図 2 . 8 放出停止模擬(予混合着火)実験において観察された火炎伝播挙動の例 (水素濃度 29 vol%、時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

2. 3. 2 水素放出着火実験(遮断による圧力低下を模擬)

2. 3. 2. 1 水素放出時に形成される濃度分布

水素放出時に計測された各濃度計測点における水素濃度の時間履歴の例を図2.9に示す。図中の時間原点において放出孔直前の空気圧作動弁が作動し、水素の放出が開始され、その後 60 秒の時点で弁を閉じ水素の供給が停止されている。いずれの計測点においても、水素濃度は放出停止後5から10秒程度で定常に達している。定常に達した後、水素の供給を停止するまでの間の時間平均濃度を、各計測点における水素濃度とした。ただし、坑内に設置したセンサーでの計測値は時間変動がほぼなく定常値を示しているが、地面高さに設置したH3、H6、およびH8のセンサーは風の影響を受けるため変動の幅が比較的大きい。

放出孔径 10 mmにおいて水素の供給圧力を変化させたときの各計測点における時間平均された水素濃度を図2.10に示す。図中の点線は、供給圧力毎の平均値を結ぶものである。いずれの計測点においても、供給圧力を低下させるに従い水素濃度は低下する。放出坑に最も近い H1 計測点では供給圧力 0.1 MPa 時に 100 vol%であるが、調査を行った最も低い圧力 0.002 MPa では 44 vol%まで低下した。放出孔と同高さの対面位置(H4)では、0.1 MPa 時に 70 vol%、0.002 MPa では 27 vol%であった。放出孔と地面の中間の高さにある 4 つのセンサー(H2、H5、H7、H9)はどの圧力においてもそれぞれ同程度の水素濃度を示しており、この高さにおいては水平方向の水素濃度はほぼ均一であることを示唆している。地面高さのセンサー(H3、H6、H8)は風の影響のため値がばらつくが、傾向としては H6 が最も水素濃度が低く H3 と H8 は同程度であった。放出孔の対面側において地面上での水素濃度が比較的低くなる傾向は前年度事業[2]における調査結果と一致する。

次に、放出孔径 7 mm および 14 mm における水素濃度の供給圧力への依存性を図 2. 1 1 と図 2. 1 2 にそれぞれ示す。供給圧力の低下に従い各計測点での水素濃度が低下する傾向は孔径 10 mm の結果と同様である。放出孔径の違いにより同じ供給圧力であっても放出される水素流量が異なるため、形成される濃度分布の流量への依存性を図 2. 1 3 に示す。異なる孔径であっても、同流量においては水素濃度分布が概ね一致することが確認された。ただし、小孔径(7 mm)では放出孔近傍の水素濃度がやや大きくなる傾向にあった。これは同流量であっても小孔径では線流速が大きいためであると考えられる。

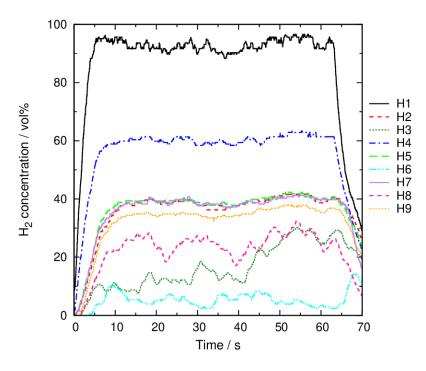


図2.9 水素濃度時間履歴の例

(放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.062 MPa、H1-H9 はセンサー位置(図 2 . 4)を示す)

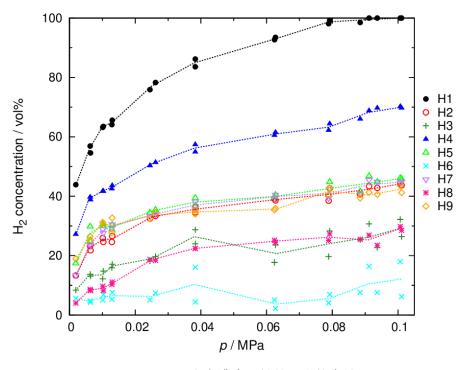


図2.10 水素濃度の供給圧力依存性

(放出孔径 10 mm、H1-H9 はセンサー位置(図 2 . 4)を示す)

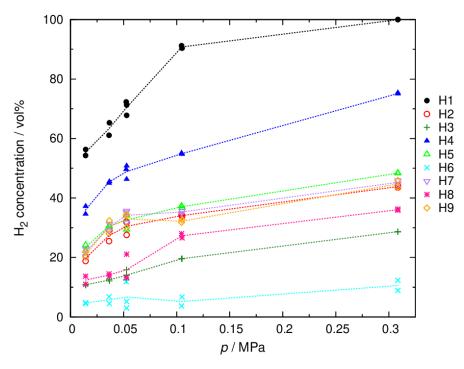


図 2 . 1 1 水素濃度の供給圧力依存性 (放出孔径 7 mm、H1-H9 はセンサー位置(図 2 . 4)を示す)

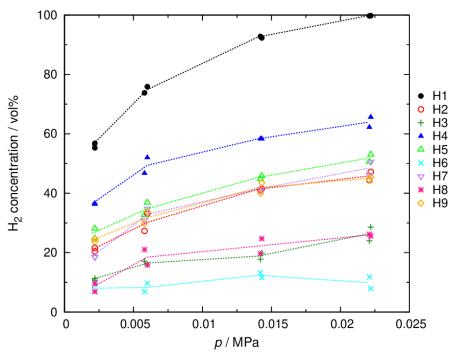


図2. 12 水素濃度の供給圧力依存性 (放出孔径 14 mm、H1-H9 はセンサー位置(図2. 4)を示す)

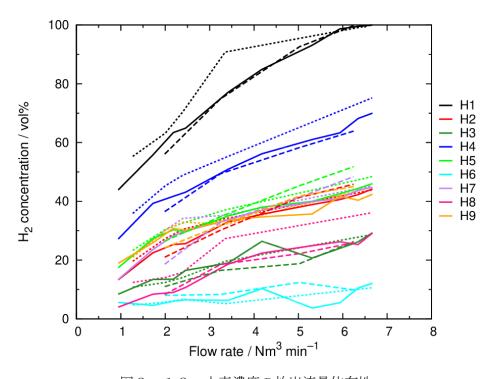


図2.13 水素濃度の放出流量依存性 (放出孔径7(点線)10(実線)14(鎖線)mm、H1-H9はセンサー位置(図2.4)を示す)

2. 3. 2. 2 放出孔径 10 mm における着火時の爆風圧と爆風波形

放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.1 MPa における、着火時の爆風ピーク過圧を図2.1 4に示す。点火位置は放出軸を含む鉛直面上にあり、座標(x [cm], z [cm])を用いて表す(図2.15)。本条件は前年度事業[2]において多数のデータを取得しており、今回は再現性の確認のため点火位置(0,-90)の一点のみ着火実験を行った。前年度と同様に、爆風ピーク過圧は予混合爆発モデルから予測される値を大きく上回り、TNT 等価モデル[2]に近い結果となった。

次に、供給圧力を 0.077、0.055、0.024、0.013、および 0.009 MPa とした場合に観測された爆風ピーク過圧をそれぞれ図 2. 1 6 から 2. 2 0 に示す。供給圧力 0.024 MPa 以上では最大爆風圧は供給圧力にほぼ依存せず、いずれの供給圧力においても予混合爆発モデルを上回り TNT 等価モデルに近い爆風ピーク過圧を観測した。爆風圧が供給圧力にほぼ依存しないことの理由としては、坑内における水素濃度は供給圧力の低下によって減少するが、その減少率は 0.024 MPa での放出時においても 0.1 MPa 時に比べ2~3割程度であり、燃焼により放出されるエネルギーの総量は大きく変化しないということが挙げられる。また、どの条件においても点火位置が放出孔高さに近い(0,-90) や (0,-120)の場合に大きな爆風圧が観測される傾向であった。このことから、点火位置が放出孔付近の流れの速い状況下にあることが大きな爆風圧をもたらす要因であると考えられる。供給圧力を 0.013 MPa とした場合、TNT 等価モデルに近い値は観測されなかったが、予混合爆発モデルをやや上回る爆風ピーク過圧が観測されている。供給圧力 0.009 MPa においては、試験を行ったどの点火位置においても着火時の爆風ピーク過圧は予混合爆発モデルを下回る結果となった。

供給圧力 0.1、0.024、0.013、0.009 MPa それぞれにおいて点火位置(0,-90)にて着火した際に観測された爆風波形を図 2.2 1に示す。また、5 m 位置で観測された爆風波形を拡大したものを図 2.2 2に示す。供給圧力 0.1 MPa では図 2.2 2 中の約 34 ms 時点において鋭い立ち上がりを持つピークが出現している。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。一方で供給圧力 0.009 MPa においては爆風波形が比較的緩やかであり、通常の予混合爆発において見られる立ち上がりと類似の波形であった。供給圧力 0.013 と 0.024 MPa では中間的な挙動を示している。前者では強いピークは現れていないが、急峻な立ち上がりを持つ小さなピークがいくつか含まれた爆風波形を観測した。後者においては 41 ms 付近でやや圧力が上昇した後、41.6 ms 時点で鋭いピークが現れている。このような挙動から、坑内における燃焼中に火炎伝播が急加速する現象が予想される。これらのことから、圧力 0.013 MPa を超える場合には火炎の加速により急峻な立ち上がりを持つ爆風ピークが出現し得るため、予混合爆発モデルを超え TNT 等価モデルに近い爆風圧を発生し得ることが想定される。

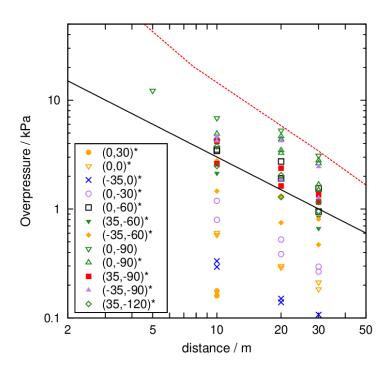
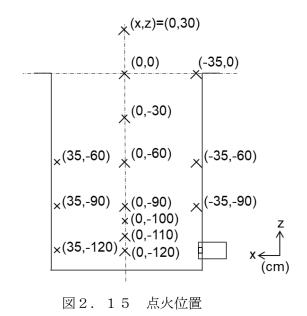


図 2 . 1 4 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.1 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (凡例は点火位置(x,z)、アスタリスク(*)は前年度事業[2]の結果、実線: 予混合爆発モデル、点線: TNT 等価モデル)



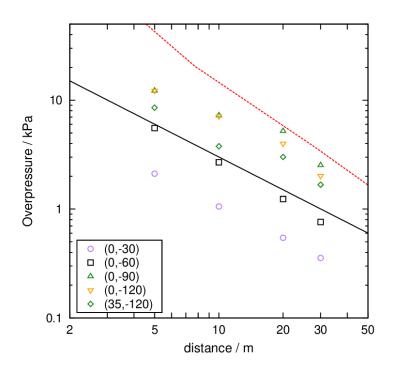


図 2 . 1 6 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.077 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

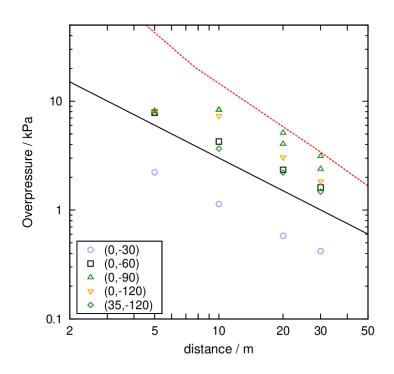


図 2 . 1 7 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.055 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

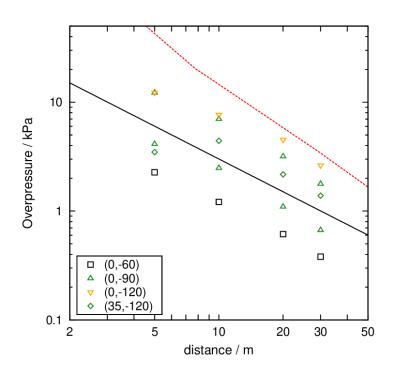


図 2. 1 8 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.024 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

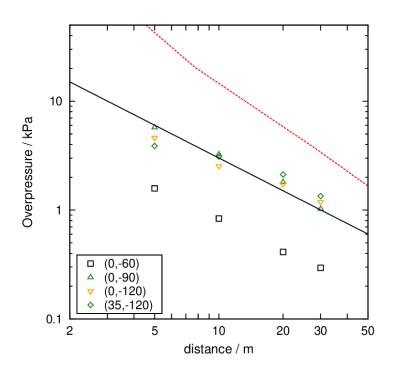


図 2 . 1 9 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.013 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

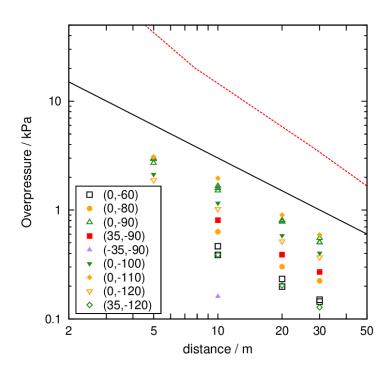


図 2 . 2 0 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.009 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

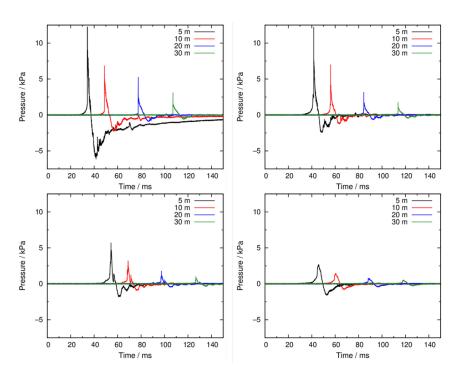


図2.21 放出孔径10 mm、水素供給圧力0.1(左上)、0.024(右上)、0.013(左下)、0.009(右下)MPaにおいて点火位置(0,-90)で着火した際の爆風波形

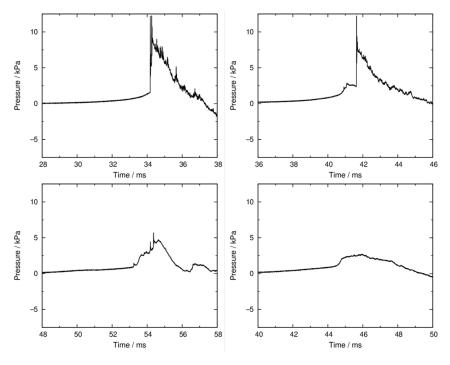


図 2 . 2 2 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.1 (左上)、0.024 (右上)、0.013 (左下)、0.009 (右下) MPa において点火位置(0,-90)で着火した際の 5 m 位置の爆風波形

2. 3. 2. 3 火炎伝播挙動

高速度カメラによって撮影された火炎伝播挙動の例として、予混合爆発モデルを超えない供給圧力 0.009 MPa における点火位置(0,-90)での撮影結果を図2.23に示す。着火直後から火炎はほぼ球形を保ち伝播するが、予混合爆発(図2.8)と比べると火炎面はやや乱れている。初期の球形伝播時の火炎の伝播速度は19 m/s であり、これは前述の予混合爆発結果と一致する。下方に伝播する火炎面が放出孔高さまで達すると噴流の影響を受けて画像の左下方向への伝播が促進されているが、全体的な火炎の挙動は予混合爆発における火炎伝播に類似する。

比較的強い爆風が観測された条件の例として、供給圧力 0.007 MPa における点火位置 (0,-90)での撮影結果を図2.24に示す。供給圧力 0.009 MPa の場合と同様に火炎は初期においてほぼ球形に拡がるが、図2.23と比較すると火炎面の乱れがより大きく、火炎面もより速く伝播している。初期の火炎伝播速度は 33 m/s であり、これは予混合爆発時の約1.7 倍である。この伝播速度の増大は、乱れにより火炎面前後の水素と空気の混合が促進されること、また乱れによる火炎面積の増加によるものであると考えられる。また、火炎面が放出孔高さまで達すると噴流の影響を受け放出孔の対面側への伝播が起こることは供給圧力 0.009 MPa の場合と同様であるが、供給圧力 0.077 MPa ではその後に火炎伝播が加速する様子が観察されている(図2.24、画像 10-11 枚目)。コマ間の火炎面位置の差から、加速時の火炎伝播速度を計算すると約 200 から 300 m/s であった。ただしこれは撮影視野方向のみの速度であり、視線方向への伝播も考慮すると実際の伝播速度はこれ以上となる可能性がある。また、その後坑内において火炎が振動する様子が観測されており、これは圧力波が坑内を反射しながら伝播していることを示している。供給圧力 0.024 MPa 以上ではいずれの圧力においても類似の挙動が観測された。

次に、異なる点火位置での撮影例として、点火位置(0,-120)および(35,-120)にて着火した場合の撮影結果を、供給圧力 0.009 と 0.077 MPa の場合について図 2. 2 5 から 2. 2 8 に示す。点火位置(0,-120)では火炎発生の初期から放出方向へ速く伝播しており、火炎が放出孔の対面に達した後は対面に沿って上方へ伝播する様子が見られた。点火位置(35,-120)では、上方および放出孔の方向へ伝播するが、流れの影響のため上方への伝播が速い。供給圧力 0.009 と 0.077 MPa の場合を比較すると、後者の方が火炎伝播は速く、また燃焼後の圧力波によるものと考えられる火炎の振動の様子も後者のみにおいて観測された。

以上のことから、水素噴流による坑内の流れが乱れることによる火炎伝播速度の増加や、 噴流が火炎面に作用することによる火炎面の乱れの増幅が火炎の加速の原因となり、鋭い ピークを有する爆風波形と爆風ピーク過圧の増大をもたらしていると考えられる。

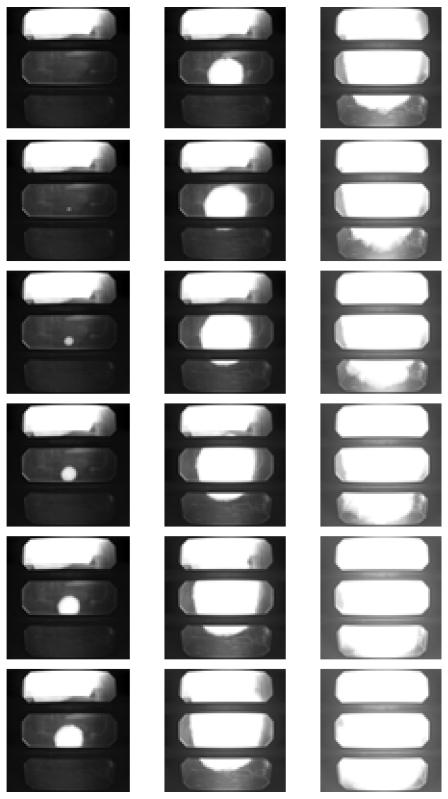


図 2 . 2 3 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.009 MPa において点火位置(0,-90)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

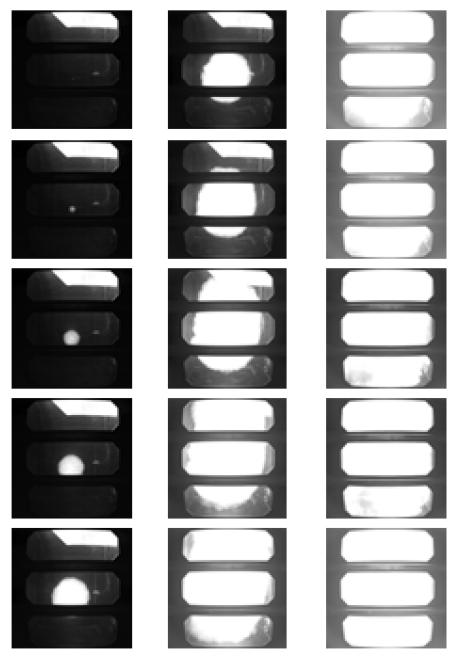


図 2 . 2 4 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.077 MPa において点火位置(0,-90)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

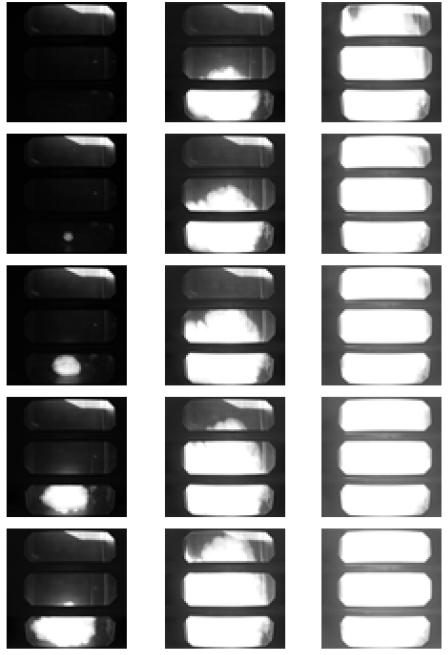


図2.25 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.009 MPa において点火位置(0,-120)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

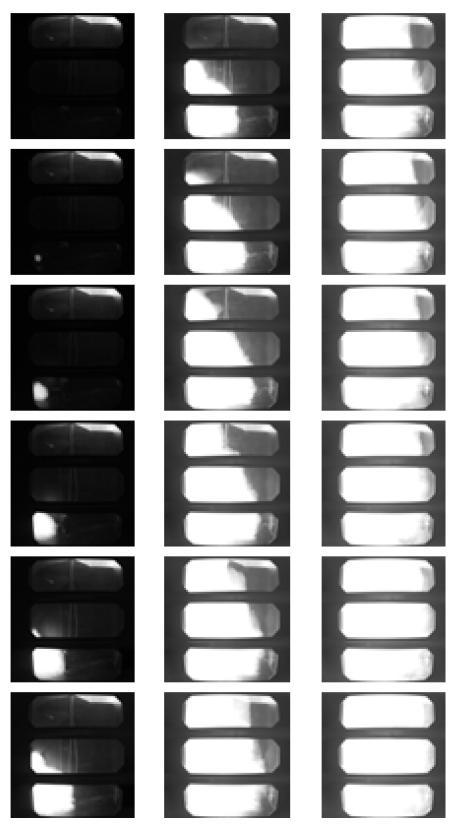


図 2 . 2 6 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.009 MPa において点火位置(35, -120)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

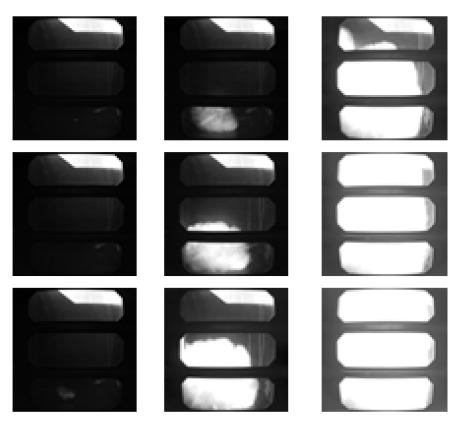


図 2 . 2 7 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.077 MPa において点火位置(0,-120)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

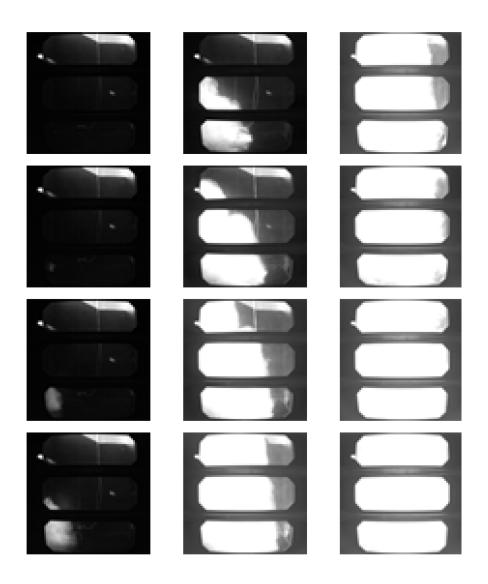


図 2 . 2 8 放出孔径 10 mm、水素供給圧力 0.077 MPa において点火位置 (35, -120)で着火した際に観測された火炎伝播挙動(時間間隔 100 フレーム(1.72 ms))

2. 3. 2. 4 異なる放出孔径における着火時の爆風圧比較とモデルの適用範囲

放出孔径 7 mm および 14 mm において計測した爆風ピーク過圧を図2.29から2.3 3に示す。放出孔径 7 mm では水素供給圧力 0.052、0.031、および 0.017 MPa において爆風圧を計測した。その結果、0.031 MPa 以上では予混合爆発モデルを超える爆風ピーク過圧が観測され、0.017 MPa では予混合爆発モデルを下回る結果であった。放出孔径 14 mm では水素供給圧力 0.007 および 0.003 MPa において爆風圧を計測し、前者は予混合爆発モデルを上回り、後者は下回った。

各放出孔径において着火実験を行った水素供給圧力・放出流量を表2.1にまとめる。表中の斜体太字で示す数値は予混合爆発モデルを超える爆風ピーク過圧が観測された条件であることを、立体で示す条件は予混合爆発モデルを下回ったことをそれぞれ表している。前出の濃度分布の計測結果の通り、坑内の水素濃度の空間分布は概ね流量を用いて整理できるため、異なる放出孔径であっても同流量では坑内の水素分布に大きな差はないと考えられる。一方で、同程度の流量においても観測された爆風圧には差が見られた。放出孔径10 mmでは流量が2.0 Nm³/minの条件では爆風圧は予混合爆発モデルによる評価値を超えないが、孔径7 mmでは流量が1.9 Nm³/minであっても予混合爆発モデルを超える爆風圧を観測した。また、同程度の流量であっても、孔径7 mm、2.4 Nm³/min(図2.29)における爆風圧は孔径10 mm、2.5 Nm³/min(図2.19)での爆風圧より大きい。従って、同流量で類似の濃度分布を有する場合であっても、放出孔径が小さいほど着火時の爆風圧が大きくなる傾向にある。放出孔径14 mmではデータ点数が少ないため明確な比較はできないが上記の傾向と矛盾しない結果が得られている。このことは、TNT等価モデルと予混合爆発モデルの適用範囲は供給圧力のみでは整理できず、圧力と流量(あるいは孔径)の両方を考慮する必要があることを示している。

そこで、各放出圧力において予混合爆発モデルを超える条件および下回る条件を、圧力と流量に対して図 2. 3 4 に示す。図中赤色で示す条件では予混合爆発モデルを超える爆風圧が観測されており、青色で示す条件では観測されていない。従って両モデルの適用条件の境界は両条件の間に位置すると考えられる。爆発影響評価ではより被害が大きくなるモデルを適用することが望ましいため、図中青色で示す条件を下回る圧力・流量の条件(図中薄青塗部分)では予混合爆発モデルを、それ以外では TNT 等価モデルを適用することが妥当であると考えられる。ゲージ圧力 p [MPa] における前者の適用範囲は、流量 Q [Nm³/min]を用いて下記の式で表される

 $p \le 0.003$: $Q \le 2.1$

 $0.003 : <math>Q \le -50p/3 + 2.15$

 $0.009 : <math>Q \le -75p + 2.675$

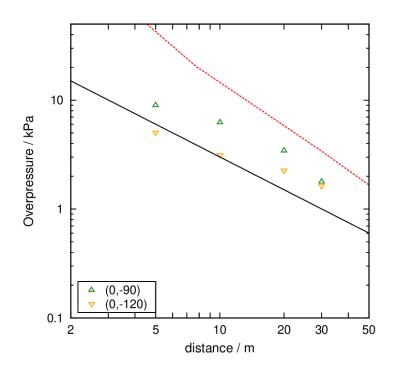


図 2 . 2 9 放出孔径 7 mm、水素供給圧力 0.052 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

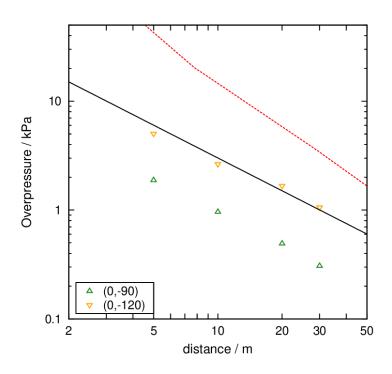


図2.30 放出孔径 7 mm、水素供給圧力 0.031 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

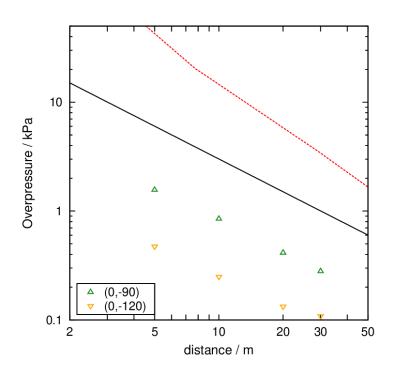


図 2 . 3 1 放出孔径 7 mm、水素供給圧力 0.017 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

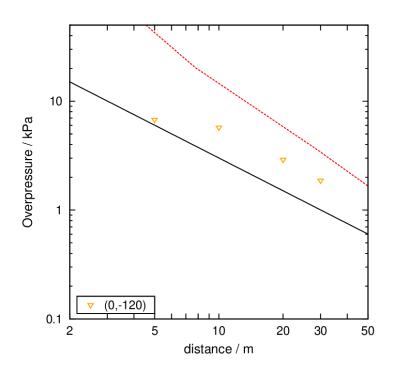


図 2. 3 2 放出孔径 14 mm、水素供給圧力 0.007 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

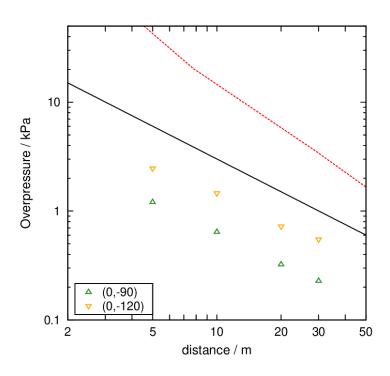


図 2 . 3 3 放出孔径 14 mm、水素供給圧力 0.003 MPa における着火時の爆風ピーク過圧 (実線:予混合爆発モデル、点線:TNT 等価モデル)

表 2. 1 各放出孔径における水素供給圧力・放出流量と適用される爆風圧評価モデル (数値が斜体太字:TNT等価モデル、立体:予混合爆発モデル)

放出孔	L径 7 mm	放出孔	径 10 mm	放出孔径 14 mm	
压力 [MPa]	流量 [Nm³/min]	圧力 [MPa]	流量 [Nm³/min]	压力 [MPa]	流量 [Nm³/min]
0.052	2.4	0.100	6.7	0.007	3.5
0.031	1.9	0.077	5.8	0.003	2.2
0.017	1.4	0.055	5.0		
		0.024	3.3		
		0.013	2.5		
		0.009	2.0		

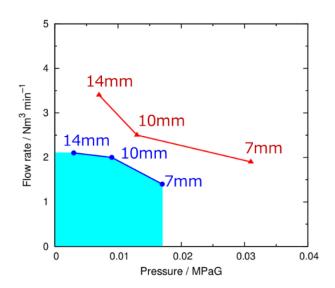


図2.34 各放出孔径において、予混合爆発モデルを超える爆風圧が観測された最低条件(▲) および予混合爆発モデルを超えない条件(●)(図中の数値は放出孔径を表す)

2. 3. 2. 5 水素供給停止後の火炎の挙動について

水素放出着火実験では、安全のために、着火後水素の供給を停止した後、数秒から数十秒経過後に管内に窒素ガスを供給し、放出孔から水素ガスを追い出すことで管内を窒素で置換した。この実験操作において、水素ガスを追い出す際に放出孔から火炎の噴出を確認した。この時の火炎の挙動を観察するため、近赤外カメラを用いて実験操作中の放出孔付近の様子を撮影した。カメラには近赤外領域に感度を有する InGaAs カメラ(浜松ホトニクス C14041-10U、レンズ:近赤外用 25 mm, f1.4、撮影則 214 fps)を用い、掘削坑中心から水平距離 1.8 m の位置に設置し、放出孔付近を視野として撮影した(図 2 . 3 5)。

放出孔径 10 mm、供給圧力 0.013 MPa において撮影された画像を図 2.3 6 に示す。着火後水素供給を停止することで視野範囲から火炎が消失するが、その後窒素ガス供給の際に放出孔から火炎が再出現している様子が記録された。他の多くの条件においても同様の挙動が観測されており、これは管内において水素火炎が持続しており、窒素供給により放出孔外に火炎と残留水素が放出されたため、残留水素が空気と混合することで持続していた火炎が拡がったものであると考えられる。

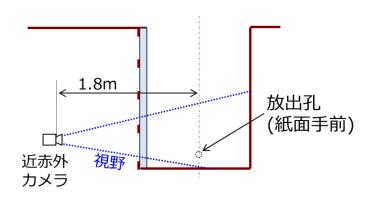


図2.35 近赤外カメラの配置

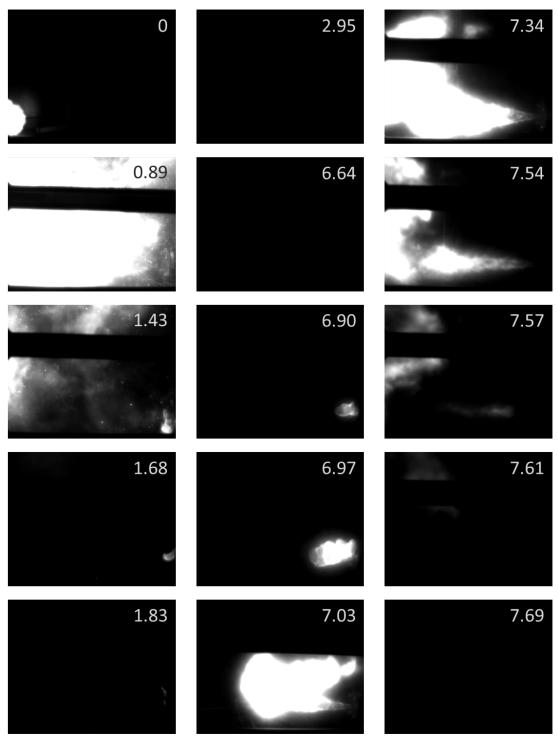


図2.36 近赤外カメラで撮影された放出孔付近における火炎の様子 (数値は経過時間[秒]を表す)

3. 想定される大規模損傷における爆風圧評価モデルの適用例

掘削坑内で水素が漏えいし着火した際に周囲へ伝播する爆風圧については、管内の水素 圧力および放出される水素の流量に依存して、TNT等価モデルあるいは予混合爆発モデル を適用することで評価できる。ここでは、実際の水素導管供給システムにおいて損傷事故 が発生した場合を想定し、損傷後緊急遮断を行った時点からの管内圧の経時変化を計算し、 各時点にて着火した場合に想定される最大爆風圧を求めた。

遮断後の管内の圧力低下は、放出される水素流量から計算される。オリフィスを通過する気体の質量流量は、通過前後で等エントロピー過程であると仮定すれば下記の式で表すことができる[6]。

$$\dot{m} = \rho A \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \frac{p}{\rho} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \right]$$

ここで、A は放出断面積、 ρ は気体密度、 γ は比熱比、p は管内圧力(絶対圧)、 p_0 は大気圧(絶対圧)である。理想気体を仮定すれば体積流量 Q は

$$Q = \frac{RT}{p}\dot{m}$$

であり、管内水素は等温であると仮定すれば、放出開始後時間tにおける管内圧力は下記の式から計算される。

$$p(t) = p(t_0) - \frac{RT}{V} \int_{t_0}^t \dot{m} dt$$

ここで、 t_0 は初期時間、Rは気体定数、Tは温度、Vは管内容積である。

適用例として、150A 導管において遮断弁までの距離が 1 km の場合に、10 mm 径の導管 損傷により管内圧力が低下する状況を想定する。管内圧力の減衰曲線を図3.1 に示す。 図中の時間原点は遮断弁が作動し供給が遮断された時間とする。この想定では管内圧力が 0.009 MPa に低下するまでは TNT 等価モデルが、それ以後は予混合爆発モデルが適用される。当該圧力に達する時間は遮断後 204 秒と計算される。同図には、10 m 位置と 30 m 位置における爆風ピーク過圧の実験値とモデルによる評価値を示してある。これらのモデルを 適用した場合、遮断後 204 秒まではそれぞれの位置において 14.6 kPa および 3.0 kPa、それ 以後はそれぞれ 3.4 kPa および 1.0 kPa の爆風ピーク過圧が想定される。

爆風が人体や構造物に及ぼす影響の指標として、目安となる値[2,7,8,9]を表3.1に示す。 これらの値の爆風圧が到達し得る距離を求め、上記と同様の導管損傷の想定例に適用した 例を図3.2に示す。遮断後204秒に適用されるモデルが切り替わるが、それまでのTNT等価モデルでは人間に直接被害を及ぼさない限界である12.3 kPaの爆風圧が11.4 m 地点まで到達し、それ以後の予混合爆発モデルでは同到達距離は2.5 m となる。また、比較のため損傷孔径を7 mm とした場合の同様の評価結果を図3.3に示す。孔径7 mm では管内圧力が0.017 MPa まで低下すれば予混合爆発モデルが適用可能となるが、孔径10 mm に比べ管内圧力の減衰速度が遅いため、モデルが切り替わる時間は遮断後351秒の時点となり、TNT等価モデルが適用される期間が損傷孔径10 mm の場合よりも長い。従って、本調査で得られた爆風圧評価モデルを導管損傷後の緊急遮断に適用する際には、想定される損傷孔径に合わせた圧力減衰挙動を計算し、それに合わせて爆風圧評価モデルの適用範囲を定める必要がある。

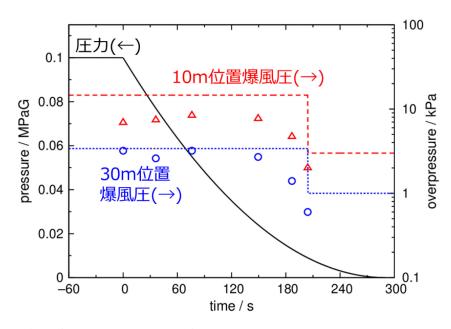


図3.1 導管損傷の想定例 (150A、遮断弁距離 1 km、放出孔径 10 mm) における管内圧力 (左軸) の減衰挙動と、モデルによって想定される爆風圧(鎖線・点線;右軸) および 爆風圧の実験値 (シンボル;右軸)

表 3. 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 Δppeak [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

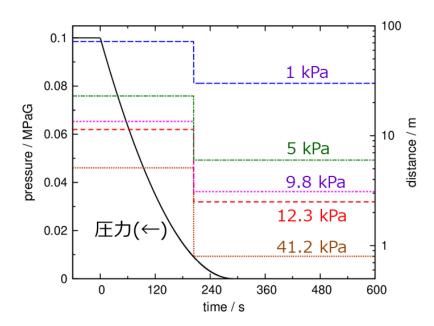


図3.2 導管損傷の想定例(150A、遮断弁距離 1 km、放出孔径 10 mm)における管内圧力(左軸)の減衰挙動と、モデルによって予想される爆風圧の到達距離(右軸)

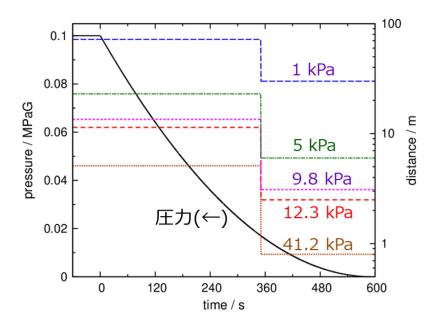


図3.3 導管損傷の想定例(150A、遮断弁距離1km、放出孔径7mm)における管内圧力(左軸)の減衰挙動と、モデルによって予想される爆風圧の到達距離(右軸)

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、掘削坑内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爆風影響を低減させるための措置として、緊急遮断弁による水素圧力低下および放出停止を想定し、遮断による爆風圧の低減効果を実験的に調査、整理した。また、爆風圧評価のためのモデルを構築し、それを導管損傷の想定例に対して適用し爆風圧の到達範囲を求めた。

4. 1 実験結果

まず、放出停止を模擬した場合の流れのない一定濃度の水素(29、51、72 vol%)と空気の混合気に着火し、着火源から水平距離 5、10、20、30 m の位置において爆風圧を測定した。その爆風ピーク過圧の上限は予混合爆発モデルにより評価可能であった。

次に、埋設導管の損傷を模擬した 7 mm、10 mm、および 14 mm 径の放出孔から一定の供給圧力で水素を放出した際に坑内に形成される水素濃度分布を測定した。水素放出時の坑内濃度分布は、放出孔近傍を除き流量で整理可能であった。

孔径 10 mm における水素放出着火実験では、供給圧力 0.1 MPa 以下の条件で実験を行い、 圧力 0.024 MPa 以上において TNT 等価モデルに近い爆風圧が観測されたが、圧力 0.009 MPa での爆風圧は予混合爆発モデルを下回る結果であった。また、圧力 0.013 MPa では両者の中 間的挙動を示した。従って、爆発影響評価では圧力 0.009 MPa が両モデルの適用範囲の境界 として適用される。

放出孔径を変化させた場合、同程度の流量では坑内には類似の水素濃度分布が形成されるが、両モデルの中間の圧力領域において小孔径で爆風圧がやや大きくなる傾向が観測された。これは、同流量であっても放出孔径が小さいほど噴出する水素の線流速が大きくなるため、坑内の流れが乱されやすく火炎が加速されやすくなるためであると考えられる。また、流れのない予混合状態からの着火では予混合爆発モデルを超える爆風圧は発生しないため、坑内に形成される流れと乱れが爆風圧を増幅させる要素であると結論される。従って、水素放出着火において TNT 等価モデルと予混合爆発モデルが適用される条件の境界は流速にも依存する。異なる放出孔径での実験結果を総合し、両モデルの適用範囲を圧力と流量の両者を用いて整理した。

4.2 爆風圧評価モデル

本調査では供給圧力 $0.1~\mathrm{MPa}$ における導管損傷時を想定した爆風圧評価モデルを使用した。その概要を整理して記す。掘削坑容積を $V_{\mathrm{p}}[\mathrm{m}^3]$ とすれば、予混合爆発モデルおよび TNT 等価モデルにおいて距離 $x~\mathrm{[m]}$ の地点で予想される爆風ピーク過圧 Δp_{peak} は下記の通り表さ

れる。

予混合爆発モデル:

 $\Delta p_{\text{peak}} = 32 \ V_{\text{p}}^{1/3} \ x^{-1} \ [\text{kPa}]$

TNT 等価モデル:

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

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

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

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

本調査で想定した模擬掘削坑(深さ 130 cm、幅・奥行き 80 cm)においては、ゲージ圧力 p [MPa] における予混合爆発モデルの適用範囲は、流量 Q [Nm³/min]を用いて下記の式で表される。

 $p \le 0.003$: $Q \le 2.1$

 $0.003 : <math>Q \le -50p/3 + 2.15$

 $0.009 : <math>Q \le -75p + 2.675$

上記範囲を超える条件においては TNT 等価モデルが適用される。

4. 3 爆風圧評価モデルの活用

埋設される150A導管が損傷した場合を想定し、遮断弁作動後の管内圧力の低下を考慮し、各時点において着火した場合に予想される爆風圧を求めた。本調査では導管径に比べ小さい径の損傷孔を想定したが、7-14 mm 程度の小孔径であっても、供給遮断後、管内圧が十分低下するまでは TNT 等価モデルで表されるような強い爆風が発生し得る。想定したケースでは、遮断弁による供給遮断後、数分間経過するまでは TNT 等価モデルが適用され、人間に直接被害を及ぼさない限界である 12.3 kPa を超える爆風圧が掘削坑から 11.4 m の地点まで到達し得る。それ以後の予混合爆発モデルでは同到達距離は 2.5 m となる。適用されるモデルが切り替わる時間は管の内容積だけではなく損傷孔径にも依存するため、モデルの適用に際しては想定される損傷孔径に合わせた圧力減衰挙動を計算し、それに合わせ爆風圧評価モデルの適用範囲を定める必要がある。管内圧低下後も水素が滞留する場合は予混合爆発モデルから予測される程度の爆風は想定される。また、本調査で扱わなかった水素火炎による熱的な影響については、平成 28 年度および 29 年度事業[1]において、それぞれ想定された実験条件において調査されており、平成 29 年度調査では、掘削坑に水素が放出さ

れ着火した場合の爆発影響は水素火炎による熱的影響に比べ広範囲に及ぶことが示されている。

本調査で得られた爆風圧モデルでは、上記の通り小孔径の損傷であっても掘削坑付近において人体に影響するような強い爆風圧が発生することが想定される。これは水素導管を埋設することによる潜在的なリスク源であるため、埋設導管の運用に際しては、他工事等による導管損傷の可能性を低減させるような事前対策や埋設形態をとることを前提とするべきである。その上で、損傷等によって水素が流出した際には、本調査で得られた爆風圧評価モデルを、避難計画や離隔距離の設定に活用することが考えられる。着火時に想定される爆風圧は遮断弁作動後も経時変化するため、遮断弁の選定や設置間隔等の設定にも活用可能である。

また、本調査においては、放出孔から水素を放出し着火させた後、供給を停止し放出孔外で火炎が消失した後でも管内には火炎が持続していた様子が観察された。これは管内に混入した空気と残留水素が存在していたためであると考えられる。導管損傷を想定した場合、このような管内への空気の混入や火炎の持続等も考慮した対応を検討する必要がある。

5. 参考文献

- [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] 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
- [3] 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
- [4] 平成24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
- [5] 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
- [6] 圧縮性流体力学 -内部流れの理論と解析-, 理工学社,1994.
- [7] 産業安全工学ハンドブック、海文堂出版(1989)
- [8] 石油コンビナートの防災アセスメント指針、消防庁(2013)
- [9] 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)