

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

平成 29 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	2
1. 1 調査研究の目的	2
1. 2 調査研究の概要	2
2. 既往研究の調査	4
3. シミュレーションによる漏えい水素の燃焼・爆発影響調査	7
3. 1 数値シミュレーション手法の概要	7
3. 2 数値シミュレーション条件	7
3. 3 水素噴出シミュレーション	11
3. 4 爆風シミュレーション	20
3. 5 火炎形成シミュレーション（温度分布）	29
4. 漏えい水素への着火実験による周囲影響把握	36
4. 1 実験の概要	36
4. 2 実験設備と方法	36
4. 3 実験条件	39
4. 4 計測	41
4. 5 結果	44
4. 6 参考文献	69
5. まとめ	70

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年度においては、人為もしくは自然災害等で水素導管が損傷した際、漏えいした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、水素ガス漏えい着火による燃焼・爆発の周囲影響（爆風圧や火炎長さ等）の規模について、定性的・定量的評価に資する知見を得ることを目的としている。

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、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、損傷を模擬した漏えい孔からの水素の拡散挙動および着火時の周囲影響の評価を行った。大規模損傷を想定する場合、影響範囲が最大であると考えられる損傷形態は、他事業者による工事や災害等による配管の全破断である。しかし全破断を想定した影響評価を行うことは設備面で困難であるため、本調査研究では孔径φ10mm以下の損傷を想定した評価を行うとともに、その結果に基づき、損傷規模に応じた影響評価のスケール則を検討した。

調査項目は、（1）既往研究の調査、（2）シミュレーションによる漏えい水素の燃焼・爆発影響調査、並びに（3）漏えい水素への着火実験による周囲影響把握である。各項目について調査の概要を記す。

（1）既往研究の調査では、水素ガスの拡散挙動及び着火後の周囲影響に関する既往の研究成果について、調査・整理した。

（2）シミュレーションによる漏えい水素の燃焼・爆発影響調査については、埋設水素導管の損傷（孔径φ10mm、供給圧0.5MPa以下）を想定し、漏えい水素が大気中に拡散・着火した際の現象を理解するためにシミュレーションを実施した。漏えい量や周辺環境（主に風）が大気中へ拡散した水素濃度分布へ与える影響、および定常的な拡散状態において着火した場合、漏えい開始から着火までの時間や着火位置が火炎長さ、爆風圧等に与える影響を

評価した。また、下記（3）にて実施した実験結果を用いて実現象を再現可能であることを確認した。

（3）漏えい水素への着火実験による周囲影響把握では、埋設水素導管の損傷（孔径φ10 mm 以下、供給圧 0.5 MPa 以下）を想定し、漏えい孔径；2 ケース、供給圧；2 ケースの着火実験を実施し、供給圧、漏えい時間、着火位置が火炎形成や爆風圧などに与える影響を野外実験により調査した。

2. 既往研究の調査

本調査の実験における計測系の設定あるいは結果の整理に資する情報として水素ガスの拡散挙動及び着火後の周囲影響に関する既往の研究について調査し主要な結果を整理した。

水素噴流に関する研究は水素ステーションの安全性確保の観点から実施されたものが多く、さらなる高圧力化のために現在でも研究は継続されている。一方、本調査では中低圧水素導管供給システムの大規模損傷リスクを対象としており、想定する管内圧は既往の研究と比して小さいのに対して、評価する漏えい孔径については供給管の全破断までの影響評価を目指しており既往の研究と比して大きい。さらに本調査の大きな違いは一定の供給圧を持続させることにある。漏えい条件に違いがあるものの、噴出流量で整理された火炎長の経験式など本調査の実験条件の設定あるいは結果の考察の際に有用な情報である。

数十 MPa の圧力下での模擬漏えい孔からの水素噴流軸上の水素濃度や火炎長は平成 15 年度～16 年度の NEDO 事業「水素インフラに関する安全技術研究」にて経験式等が整理されている[2-1]。岡林らは直径 0.25～2 mm のピンホールから噴出する水素噴流軸上の濃度 C(%)を計測し、以下の経験式を得た [2-2]。

$$C = a \left(\frac{X}{\theta} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$\theta = d \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで X は放出孔からの距離、d は放出孔径、 ρ_a は大気密度、 ρ_0 は放出密度である。経験式の定数 a は 6000 と評価された。

水素噴流に着火した際の火炎長はチョーク条件を超えた条件では放出孔径に比例し、概ね流量の平方根あるいは圧力の平方根に比例して増加することが実験的に示されている。

すなわち火炎長 L_f は以下の経験式で整理されている[2-1] [2-3] [2-4] [2-5]。

$$\frac{L_f}{d} = K * P^b \quad (3)$$

ここで K と b は定数であり、表 2.1 に示すような値が示されている。火炎幅 W_f についても同様に整理されており、例えば文献[2-5]では以下の経験式が示されている。

$$\frac{W_f}{d} = 95 * P^{0.43} \quad (4)$$

着火時の火炎長の評価はナトリウム水溶液を噴霧した際の可視化画像等が用いられるが、厳密な意味で火炎を可視化することは困難である。しかしながら、高温領域の評価指標として重要と言える。

表 2.1 火炎長に関する経験式の定数

	K	b	範囲
文献 [2-1]	399	0.5	>1MPa*
文献 [2-4]	411	0.455	>0.3MPa
文献 [2-5]	520	0.45	>0.1MPa

*:参考文献の報告書中の図の実線の範囲より設定

噴出圧力を 40 MPa とし、放出ノズル径 10 mm の高圧水素ガス拡散火炎実験が実施され、火炎長等のデータとともに高さ 1 m での輻射熱も計測された[2-1] [2-6]。なお、放出ノズル径 10 mm の実験では噴出圧力は時間とともに減衰する。放出方向 10 m、放出方向に対して鉛直でかつ地面に並行な方向に 20 m 離れた位置で 3300 W/m² の輻射熱流束が計測されている。10 秒以上の暴露で火傷の始まる熱流束が 4000~5000 W/m² であるため、計測された値は人に対して安全なレベルと評価された。噴出圧力 40 MPa、放出ノズル径 1~5 mm の場合は放出流量が小さいため、噴出圧力が一定に保たれる条件として、爆風圧の距離依存が整理された。例えば放出ノズルが 5 mm の場合、放出ノズルから 20 m 程度までは距離減衰が遅いが、20 m 以上遠方では-1.5 乗程度の速い減衰傾向が示された。放出ノズルが 1 および 2 mm の場合も同様な傾向で、距離減衰の傾きは 5 mm の場合と同等であった。噴出圧力が一定の場合、流量は放出ノズル断面積に比例する。40 MPa で径が 1~5 mm の範囲で流量と最大過圧はほぼ比例の関係があることが示された。

平成 24 年度経済産業省委託事業 水素ネットワーク構築導管保安技術調査において、産業技術総合研究所は「水素拡散挙動調査」の中で水素の拡散挙動・着火影響調査を実施した [2-6]。肉厚 3.2 mm/内径 25 mm の炭素鋼管 (JIS G3452 SGP) に対して、径 0.8、2、5 および 10 mm の模擬漏えい孔を設けて、供給圧 2.5、15、100、300 kPa についてそれぞれ調査した。放出孔は管に側面に開けて、方向は地面に対して上方とした。また点火は定格 2 次出力 15 kV のネオントランスを用いた。水素拡散濃度については放出孔の真上の濃度、水平距離 1.1 m ならびに 2.1 m において高さ方向 3 m までの水素濃度を測定した。供給圧が高いほど水平方向への拡散は小さく 300 kPa、10 mm の条件で 1.1 m では水素濃度 2 vol%以下、2.1 m では検出されなかった。放出孔真上では高さ 1.2 m で 35 vol%程度、1.8 m で 28 vol%の濃度であった。

火炎長の計測は水素火炎既燃ガス中の高温水蒸気から発せられる近赤外光を観測するため、周辺可視光をカットするためのフィルターを用いた撮影と炭酸ナトリウムを噴霧して可視化する方法の 2 通りで実施した。フィルターを用いる方法では炭酸ナトリウムは噴霧しない。0.3 MPa、10 mm の条件ではフィルターを用いる方が火炎長は大きく評価された。しかしその他の噴出条件ではその反対の結果も多く、相関はなかった。最大の火炎長はフィルターを用いた方法で 4.1 m、炭酸ナトリウムは噴霧で 3.65 m と評価された。

爆風圧についてはいずれの放出条件でもピーク過圧と距離との関係は両対数グラフ上で直線的であり、いずれも距離に比例してピーク過圧が減衰する結果であった。輻射熱の測定結果でも縦軸に輻射熱を横軸に距離をとって両対数グラフで整理すると線形関係が確認され、同じ放出孔径の場合は傾きも一致した。0.3 MPa、10 mm の条件で放出孔から 1 m 離れた位置での輻射熱は 3600 Wm^2 であり、接近しても火傷を負わないと考えられる距離は概ね 3 m と評価された。

参考文献

- [2-1] 新エネルギー・産業技術総合開発機構，水素安全利用等基盤技術開発-水素インフラに関する研究開発 水素インフラに関する安全技術研究，平成 15 ～16 年度成果報告書(2005)
- [2-2] 岡林ほか，高圧水素ガスの漏洩拡散，安全工学 Vol.44 No.6 (2005) p.391
- [2-3] 武野ほか，高圧水素噴流への着火爆発及び拡散火炎に関する研究，安全工学，Vol.44 No.6 (2005) p.398
- [2-4] 岡林ほか，水素エネルギー利用における安全性評価技術の開発，三菱重工技報 Vol.44 No.1 (2007) p.17
- [2-5] T. Mogi and S. Horiguchi, J. Loss Prev. Process Ind. 22. (2009) 45-51
- [2-6] 岡林ほか，高圧水素ガス漏洩時の拡散爆発現象について，水素エネルギーシステム Vol.30 No.2 (2005) p.78
- [2-7] 独立行政法人産業技術総合研究所，平成 24 年度 経済産業省委託事業 水素ネットワーク構築保安技術調査（水素拡散挙動調査）報告書（2013）

3. シミュレーションによる漏えい水素の燃焼・爆発影響調査

3. 1 数値シミュレーション手法の概要

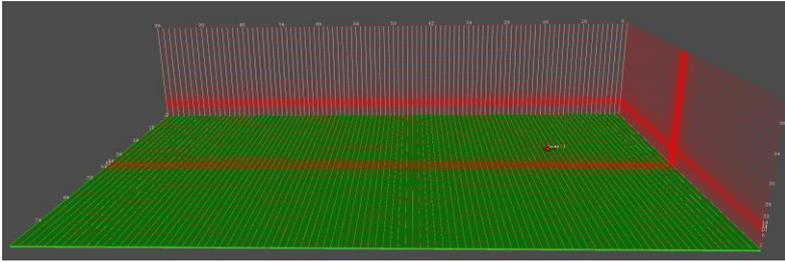
数値シミュレーションにはノルウェーの GexCon 社が開発した水素や可燃性ガスの燃焼爆発危険性解析のための数値解析ソフトウェア「FLACS」を採用した。同コードは水素の噴出漏えいからの爆発や火炎形成の問題に対して応用例が多く、HySafe(The EC Network of Excellence for Hydrogen Safety)で行われた水素放出分布を評価するプロジェクトにおいて、同ソフトによるシミュレーション結果が最も実験結果に近いと評価された実績を有する。支配方程式は質量保存、運動量保存、エンタルピー、燃料質量分率、混合分率、乱流運動エネルギー、乱流エネルギーの散逸の各輸送方程式であり、燃料質量分率の輸送方程式に燃焼モデルが組み合わされる。乱流モデルは $k-\epsilon$ 2 方程式モデルが採用されている。支配方程式の離散化は有限体積法である。層流燃焼速度は燃料と当量比に依存する。可燃性混合気体では爆発範囲外では層流燃焼速度はゼロに設定される。FLACS の燃焼モデルでは実験結果に基づく層流燃焼速度ならびに乱流燃焼速度との関係が用いられる。漏えい孔からの噴流は、漏えい孔近傍で衝撃波を伴う激しい流れ場が形成され直接精度よくシミュレートすることは技術的に難易度が高い。そのため、噴流を取り扱うシミュレーションでは簡素化された噴流モデルがしばしば採用される。FLACS でも漏えい孔からマッハディスクまでを Rankine-Hugoniot の保存則を用いて物理量を見積もり境界条件のようにマッハディスク以降の物理量を与える手法が採用されている。噴流の入力値として漏えい孔の面積と単位時間当たりの流量、あるいは流速を与えることで噴流が模擬される。

3. 2 数値シミュレーション条件

数値シミュレーションは、水素噴出、爆風、火炎形成について実施した。それぞれ、放出孔から噴出した水素の濃度分布、爆風圧評価、ならびに噴流火炎に伴う温度場の評価を目的とした。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。各シミュレーションの計算場を図 3.1~3.3 に示す。水素噴流および爆風シミュレーションでは $50 \times 30 \times 10$ m の 3 次元領域を計算場とした。水素噴流の放出方向を X 軸とし、高さ方向を Z 軸とした。放出孔位置を (0,0,1.5 m) として X,Y,Z 方向について、それぞれ -10~40 m, -15~15 m, 0~10 m の空間に格子形成した。噴流シミュレーションでは格子幅を各方向とも 0.5 m を基本として、全領域を矩形メッシュで格子形成したのち、放出孔の近傍について Y 方向、Z 方向 2.5 m の領域について 0.05 m の格子幅を設定することで水素噴流を模擬した。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て燃焼を考慮した圧縮性流れ場を再構築して実施した。X 方向 40 m に音波が伝わる時間は 0.12 秒以下であり、爆風の評価は着火後 0.12 秒までの時々刻々の物理量の変化を正確に評価する必要がある。すなわち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。そこで、各方向とも 0.1 m の格子幅を基本として計算領域全体を格子形成する。計算結果に影響

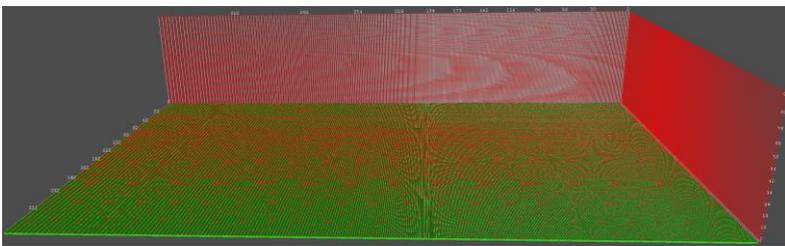
を与えない範囲で計算容量を減らし計算時間を節約するために格子形成機能である **Stretch domain** を設定した。これは擾乱の大きい場所から離れて比較的物理量の変化が小さい領域、あるいは、計算精度が重要ではない領域の格子幅を大きくとる機能である。爆風シミュレーションでは X, Y, Z 方向の最大格子幅が 0.39, 0.2, 0.15 m となるように設定し、総格子数 330 × 240 × 91 であった。火炎は爆風と比して遠方まで到達しないこと、さらに火炎形成を安定に解析するための条件を見出すために、火炎形成シミュレーションは計算領域を 20 × 10 × 10 m に縮小して実施した。

放出孔 10 mm について供給圧 0.5 MPa, 0.3 MPa のシミュレーションを実施し実験結果と比較した。また、放出孔 10 mm 供給圧 1.0 MPa のシミュレーションも実施した。さらに、噴出（水素拡散）ならびに火炎形成では風の影響を、爆風では着火位置依存、着火時間依存について検討した。なお、FLACS では着火体積のみが燃焼速度を調整する唯一のパラメータであり、本シミュレーションでは 0.1 × 0.1 × 0.1 に設定した。シミュレーションと計算条件との関係を表 3.1 に、水素噴出条件と噴出流量との関係を表 3.2 に示す。



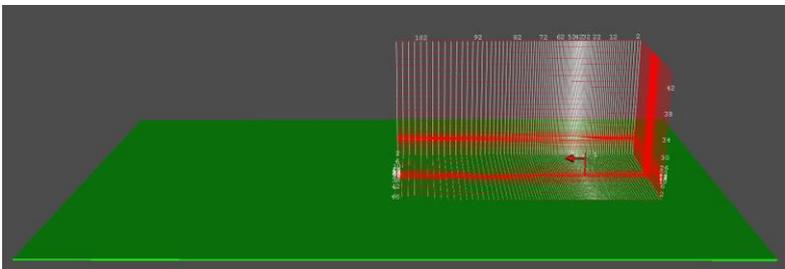
基本格子 DX=DY=DZ=0.5 m			
Min.	0.5 m	0.05 m	0.05 m
Max.	0.61 m	0.2 m	0.15 m

図 3.1 水素噴出シミュレーション計算場



基本格子 DX=DY=DZ=0.1 m			
Min.	0.1 m	0.1 m	0.1 m
Max.	0.39 m	0.2 m	0.15 m

図 3.2 爆風シミュレーション計算場



基本格子 DX=DY=DZ=0.5 m			
Min.	0.05 m	0.04 m	0.04 m
Max.	0.5 m	0.5 m	0.5 m

図 3.3 火炎形成シミュレーション計算場

表 3.1 各シミュレーションで実施した計算条件

計算条件	Φ10mm 0.5 MPa	Φ10mm 0.3 MPa	Φ10mm 1.0 MPa
噴流	○(風況影響)	○	○
爆風	○(着火位置依存) (着火時間依存)	-	-
火炎形成	○(風況影響)	-	-

表 3.2 水素噴出条件と噴出流量との関係

放出孔(mm)、供給圧(MPa)	Φ10 0.5	Φ10 0.3	Φ10 1.0
水素噴出流量(kg/s)	0.032	0.027	0.054

3. 3 水素噴出シミュレーション

図 3.4 は放出孔 10 mm、供給圧 0.5 MPa の水素噴出シミュレーションにより得られた噴出開始後 3 秒と 5 秒の 3 次元水素濃度分布を示しており、視野における濃度の最大値で表現されている。両者を比較すると水素濃度 4 vol% の領域が 3 秒後から 5 秒後にかけて上昇の傾向にあるが、6 vol% 以下の領域の変化は少ない。図 3.5 は 3 次元濃度分布を Y 軸上で切断して、0.5~5 秒までの時々刻々の濃度分布の変化を X-Z 面で表した。軸上の濃度分布は噴出開始後 1 秒程度までは放出孔前方 (X 方向) に直進するが、放出孔から 4 m 前方に離れた位置では 2 秒以降の時刻で上方に浮きがる傾向にある。2 秒後には水素濃度 10 vol% 領域、3 秒後には 6 vol% 領域が定常に達している。図 3.6 は放出孔 10 mm、供給圧 0.5 MPa および 0.3 MPa について、軸上の濃度履歴を実験とシミュレーションで比較した。同図(a)の計測点 X=1.5m を除いて濃度履歴は実験で得られた履歴の変動範囲内にあり、実験をよく再現している。図 3.7 は放出孔 10 mm について、供給圧を 1.0 MPa、0.5 MPa および 0.3 MPa とした場合の噴出開始後 5 秒の水素濃度分布を示す。3 者を比較すると、放出孔から 3 m 程度までは各条件で軸上の濃度分布に顕著な違いはない。0.3 MPa のとき、3 m 程度で濃度分布は上方へ傾く。0.5 MPa の場合は放出孔から 4 m 程度で濃度分布は上方に傾く。1.0 MPa のときは水素濃度 4 vol% 領域の上方への傾きは他の圧力と比して顕著に少ない。図 3.8 は放出孔 10 mm の水素噴出シミュレーションにより得られた軸上の水素濃度と放出孔からの距離との関係である。第 4 章の実験における整理と同様に、濃度分布が放出流量に依存するという仮定を置き、距離を放出孔直径(d) によって規格化し、さらに濃度分布が配管内圧の平方根に比例するというスケール依存性を仮定してゲージ圧力 1 MPa に換算した。同結果より供給圧 0.5 MPa のシミュレーションは実験をよく再現していると言える。供給圧 0.3 MPa の結果は実験結果との一致が見られるものの、若干濃度を高めに評価していると考えられる。また 1 MPa の結果はスケール則の結果よりも濃度を最大で 40 vol% 程度低く評価している範囲もある。

風の影響の調査するために、無風状態と水素放出方向に対して逆向きの風を吹かせる場合 (向かい風)、放出と同じ方向に風を吹かせる場合 (追い風) についてシミュレーションした。風は水素放出直後から吹き続け、高さ 1 m で風速の絶対値が 3 m/s、上方に行くほど風速が上がり、高さ 10 m で絶対値が 6 m/s となるように設定した。図 3.9 および図 3.10 に水素噴出シミュレーションにより得られた放出開始後 3 秒および 5 秒の水素濃度分布を示す。無風の場合と比較して、向かい風では X 方向の水素可燃濃度領域が半分程度になっている。しかしながら、20 vol% 以上の X 方向濃度領域は無風の場合と比して顕著な差はない。追い風の場合では X 方向の可燃濃度領域の到達距離は無風の場合と顕著な差はない。風の影響が確認されるのは半径方向の拡散が大きくなり無風の場合よりも細長い可燃領域の形状になっていることである。なお、風の影響を実験的に検証するのは現実的に困難であるため、シミュレーション結果の妥当性は確保されておらず、今後の課題である。

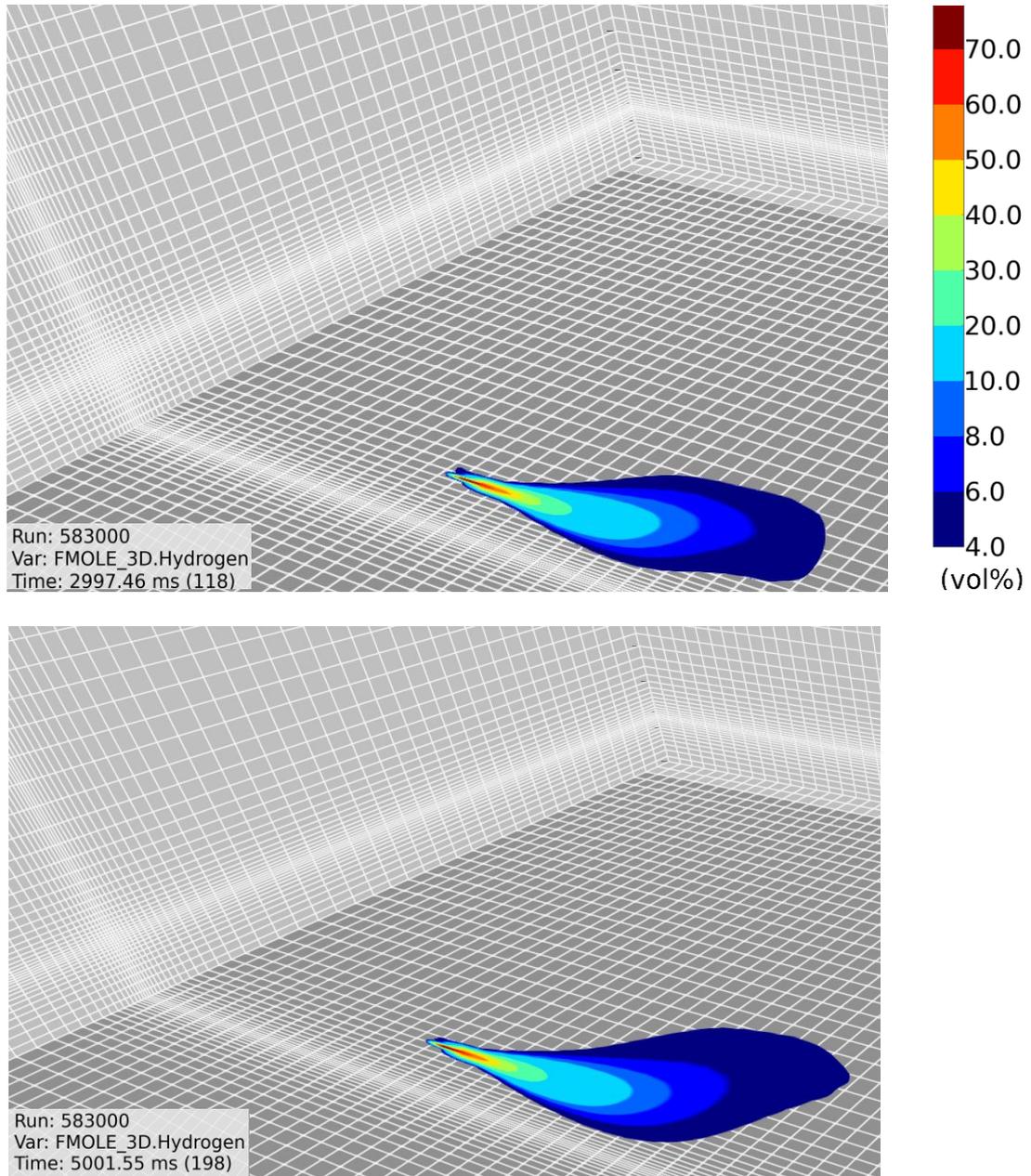


図 3.4 水素噴出シミュレーションにより得られた 3 次元水素濃度分布
 放出孔 10 mm 供給圧 0.5 MPa (上; 噴出開始後 3 秒、下; 噴出開始後 5 秒)

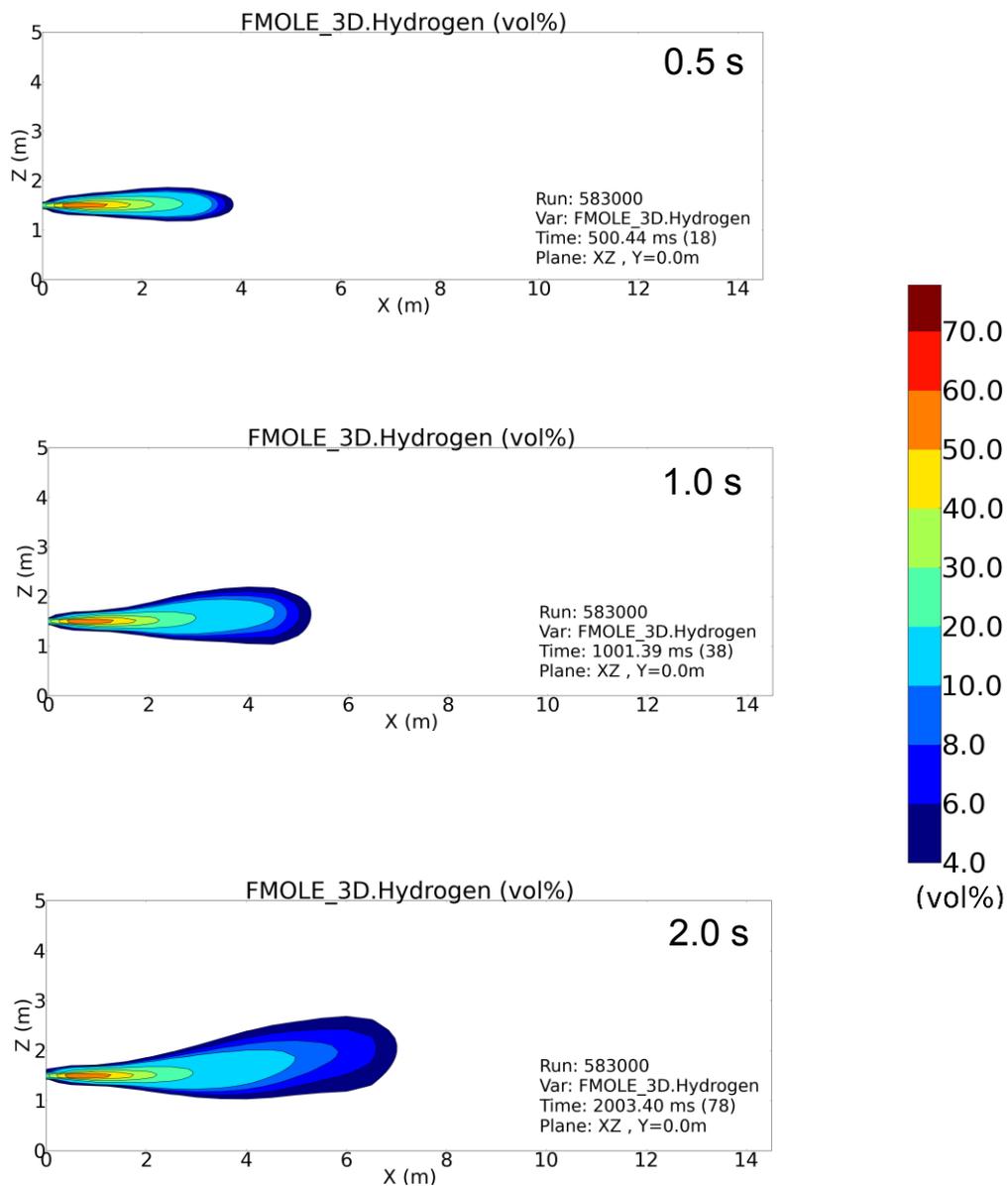


図 3.5 水素噴出シミュレーションにより得られた水素濃度分布 (X-Z 面 Y=0.0)
 放出孔 10 mm 供給圧 0.5 MPa (次ページにつづく)

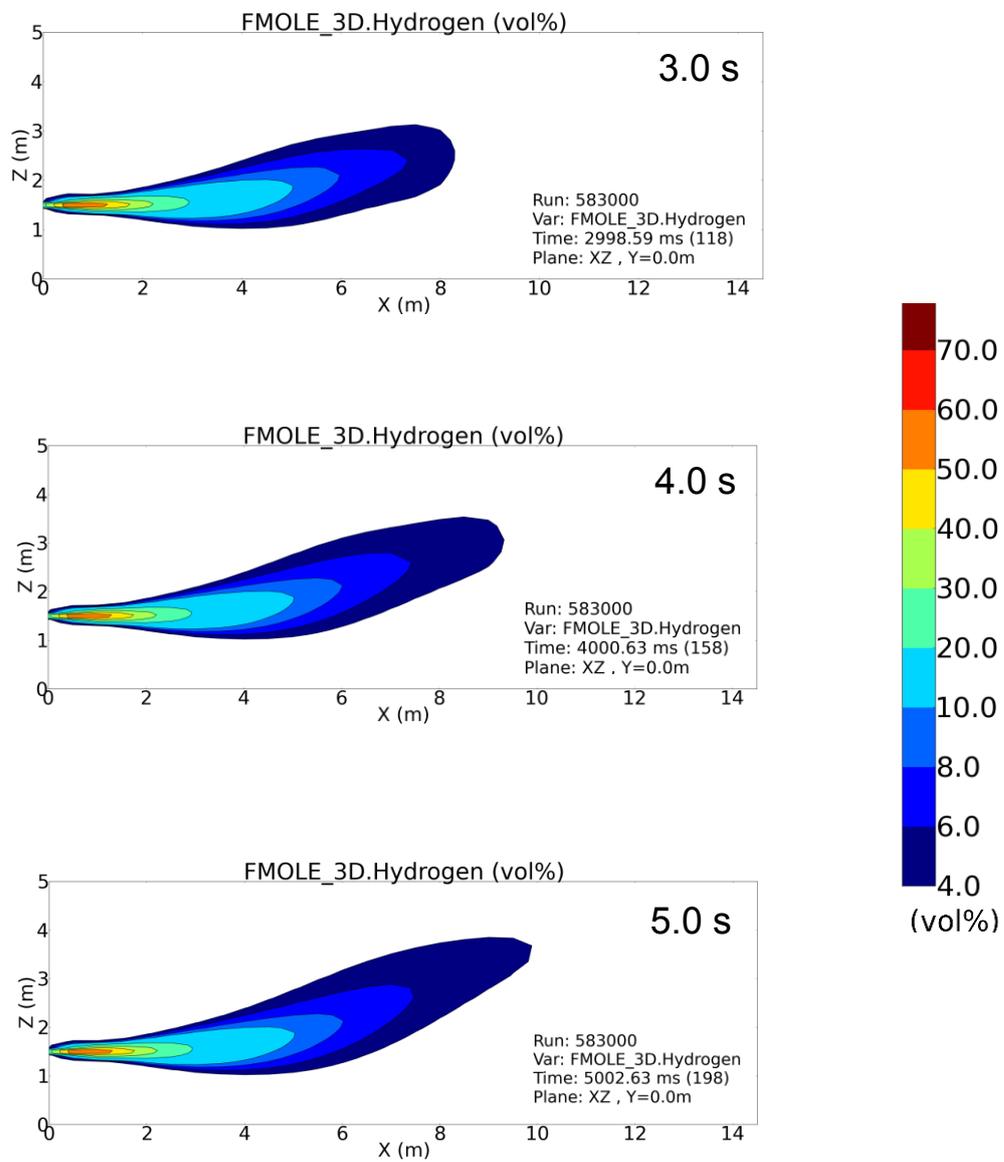
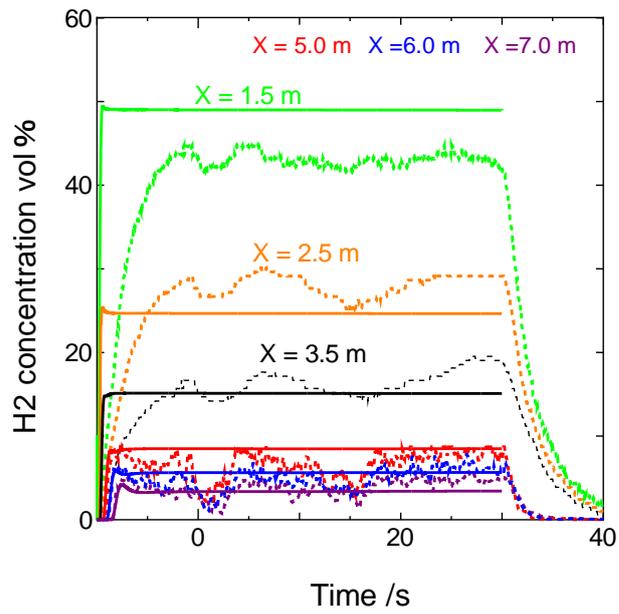
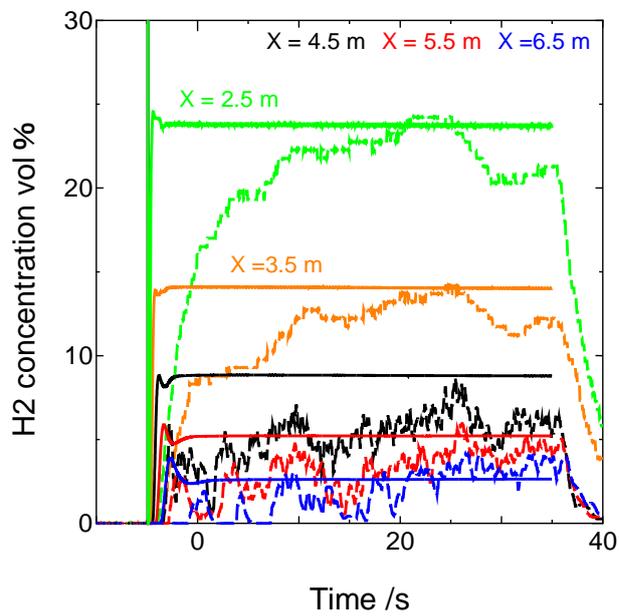


図 3.5 水素噴出シミュレーションにより得られた水素濃度分布 (X-Z 面 Y=0.0)
放出孔 10 mm 供給圧 0.5 MPa



(a) 放出孔 10 mm, 供給圧 0.5 MPa
 実線 ; シミュレーション、 破線 ; 実験



(b) 放出孔 10 mm, 供給圧 0.3 MPa
 実線 ; シミュレーション、 破線 ; 実験

図 3.6 水素噴出シミュレーションと実験との比較 (軸上の濃度履歴)

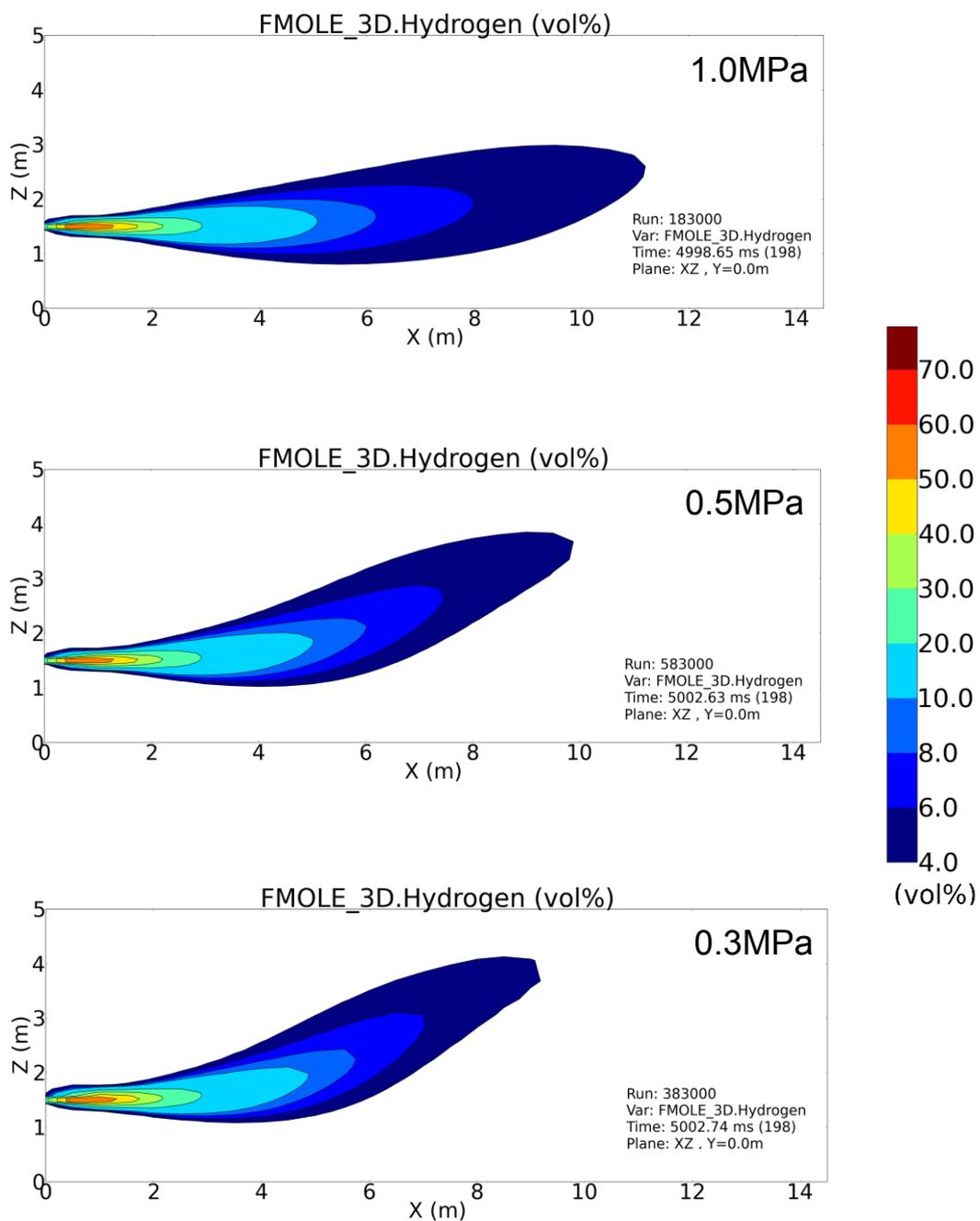


図 3.7 水素噴出シミュレーションにより得られた水素濃度分布
(放出孔 : 10 mm、供給圧 上 1.0 MPa, 中 0.5 MPa, 下 0.3 MPa)

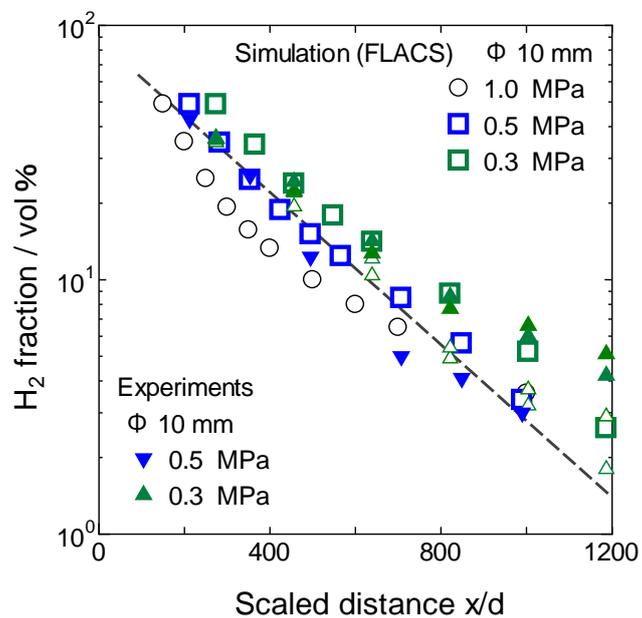


図 3.8 水素噴出シミュレーションにより得られた水素濃度と放出孔からの距離との関係
 (放出孔 : 10 mm、供給圧 1.0, 0.5, 0.3 MPa, 軸上の濃度、実験の濃度は最大値を採用)
 横軸は換算距離 (配管内圧 1 MPa 換算)

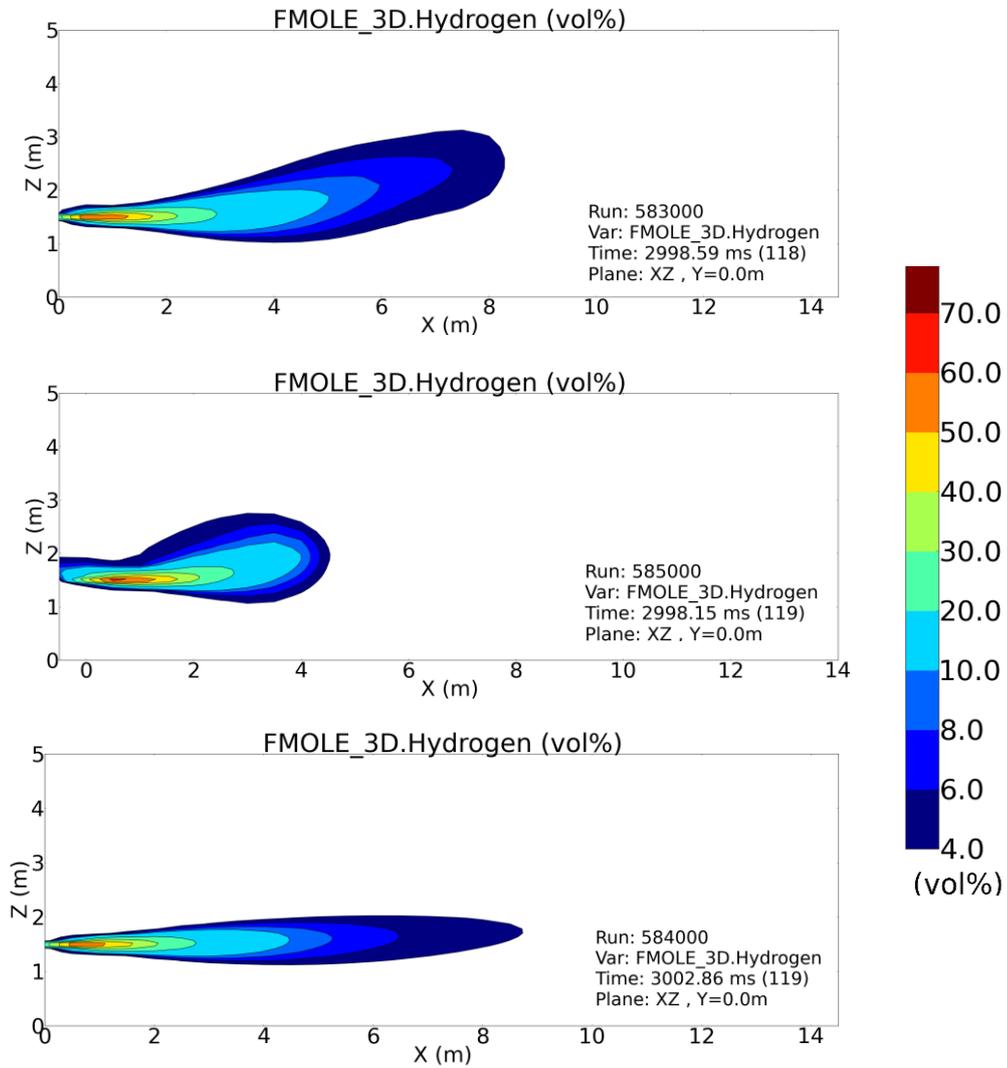


図 3.9 水素噴出シミュレーションにより得られた放出開始後 3 秒の水素濃度分布 (風の影響)

(ϕ : 10 mm、P : 0.5 MPa, 上 : 無風、中 : 向かい風、下 : 追い風)

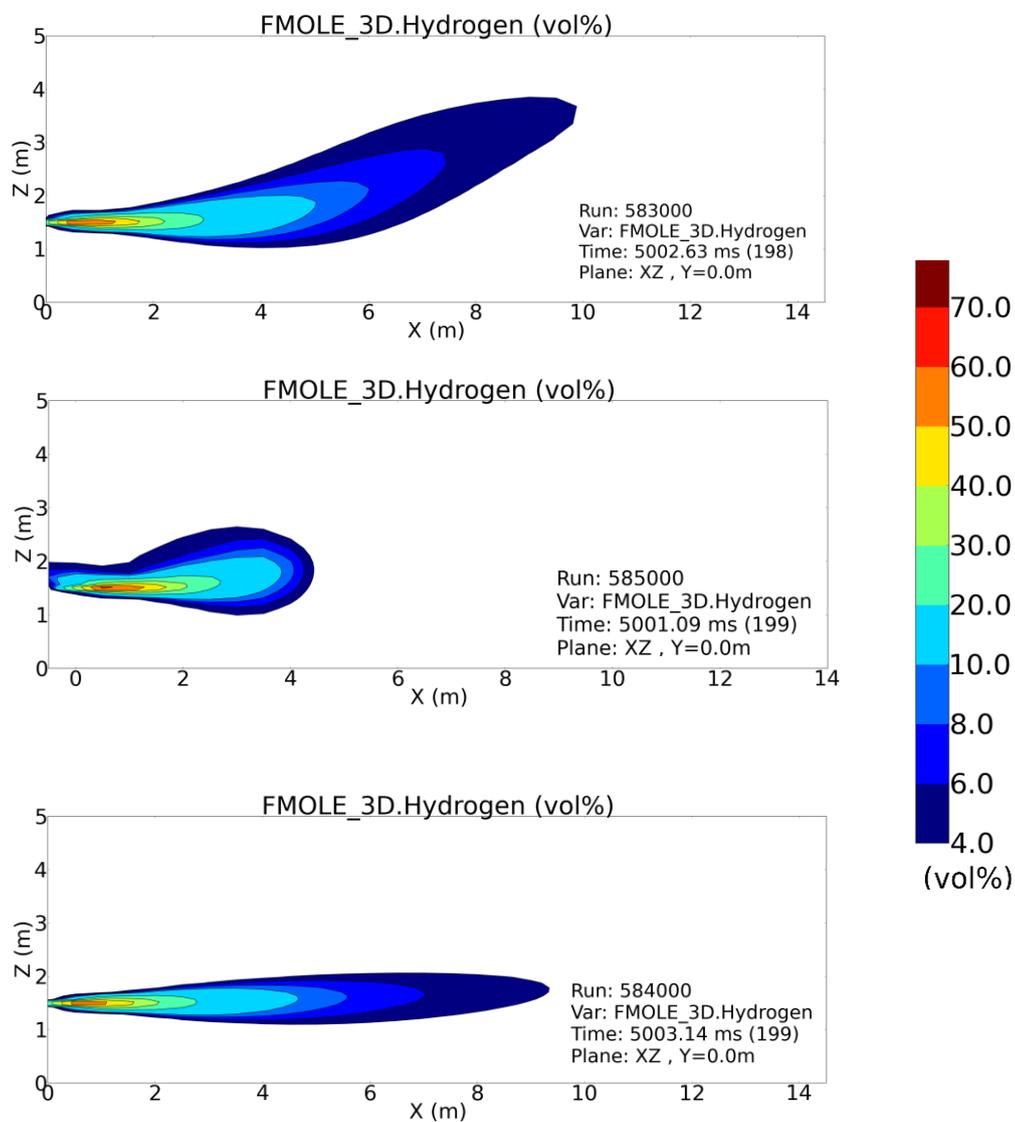


図 3.10 水素噴出シミュレーションにより得られた放出開始後 5 秒の水素濃度分布 (風の影
響)

(ϕ : 10 mm、P : 0.5 MPa, 上 : 無風、中 : 向かい風、下 : 追い風)

3. 4 爆風シミュレーション

爆風の伝播過程を図 3.11 に示す。同図は $Y=0$ の $X-Z$ 断面を切断し、爆風内部の圧力分布が確認できるようにした。各図の時間は水素放出開始後の時間であり放出開始後 3 秒で着火した。着火位置を高さ 1.5 m としたために着火後 17 ms には地面からの反射波が形成され伝播している様子がわかる。着火後 29 ms では反射波は爆風先頭のすぐ背後まで伝播しており、その背後に高圧のピークを持った波が存在する。なお、この時刻で爆風は計算領域上境界直前にあった。着火後 36 ms では爆風波は計算領域の Z 軸上境界まで到達し、希薄波が計算領域に内部にすでに影響を及ぼしている。爆風の前頭はこのとき 10 m 以上伝播しており、かつ音速以上で伝播するため、境界からの影響が爆風前頭に直接影響を与えることはない。しかしながら、固定位置で得られる爆風の圧力履歴には境界からの影響は避けられず、高さ 1.5 m で比較的着火位置に近い場所では 50 ms 程度からその影響がある。

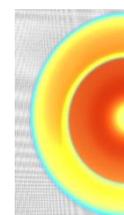
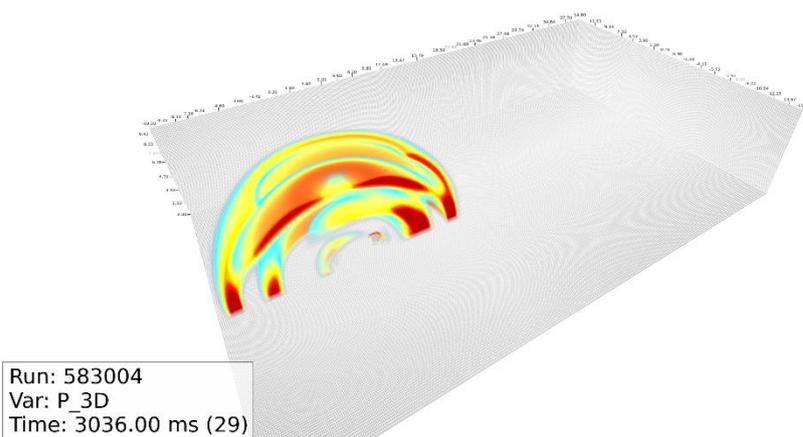
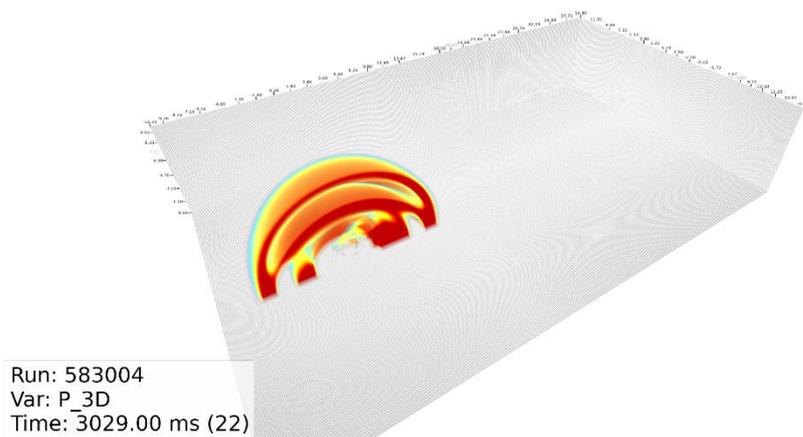
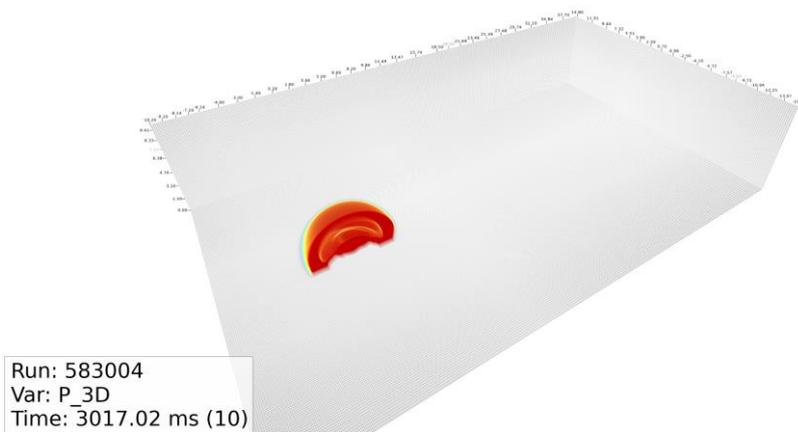
爆風圧について実験とシミュレーション結果とを図 3.12 と 3.13 にて比較した。図 3.12 の時刻ゼロは実験における火花放電開始時刻である。この時刻は水素噴流中での着火時刻とはことなるため、シミュレーションの時刻ゼロは放出孔から X 方向 7 m 位置の爆風到達時刻がシミュレーションのそれと合うように設定した。具体的にはシミュレーションの時刻はすべて、計算時間(s)から水素噴出時間の 3 s を引いた時刻に 3 ms 加えたものとした。同図(a)の 10 m 位置、ならびに(b)の Y 方向 2 m 位置における爆風の到達時刻、ならびにピーク圧ともにシミュレーションと実験とはよく一致している。ただし、図 3.10(a)においてシミュレーションでは第 2 のピークが存在することや実験で見られない負圧の持続など相違点もある。後者の負圧については発生時刻から、爆風が境界に到達した際に発生する擾乱の影響も一因と考えられる。図 3.13 に爆風ピーク圧の距離依存についてシミュレーションと実験との比較を示す。点火位置近傍から 20 m 程度までは両者に良い一致が確認される。以上より、本爆風シミュレーションは水素噴流から火花点火による爆風をよく模擬している。

図 3.14 に水素噴流により形成された水素濃度分布が燃焼により反応することで消滅していく過程を示した。燃焼は半径 1.2 m 程度広がるのに 30 ms 要し、そのとき爆風の前頭は 10m 程度まで到達している。燃焼する水素の一部だけが爆風形成へ寄与する。燃焼過程と爆風伝播過程を同時に評価することが重要である。図 3.15 は $X-Z$ 面における爆風圧の伝ば過程を示す。10 ms では着火位置を中心に球状の圧力分布となり、この時刻ですでに地面との反射は始まっている。この噴出・着火条件において、爆風前頭が遠方まで実験で確認された威力を維持して到達するために必要なエネルギーは、すでに 10 ms までの燃焼反応で解放されている。時刻 20 ms においても比較的高い圧力が着火位置の周辺で維持されており、これは燃焼反応の継続による。この高圧部は地面と反射して第 2 のピーク圧を形成する。一方、上方への反射は弱い。ただし、図 3.12(a)に示されているように第 2 のピークは実験では確認されていない。着火後 10 ms 程度の燃焼によるエネルギー解放は実験をよく模擬しているが、一方、その後の燃焼反応は定量的には実験と一致しない。また、本シミュレーションでは 30 ms 以降の燃焼は爆風後方での圧力上昇に寄与していない。

図 3.16 に Y-Z 面における爆風圧の伝播過程を示す。X-Z 面に表示した圧力分布は左右非対称であったのに対して、Y-Z 面に表示すると左右対称である。図 3.15 と図 3.16 の 30 ms の圧力分布を比較すると図 3.15 で噴出方向に伝播する爆風波先頭と図 3.14 の爆風波の先頭は概ね同程度の圧力であり、噴出方向と逆方向に伝播する爆風波先頭の圧力が若干低い。噴出方向と逆方向については爆風圧が若干小さい可能性がある。

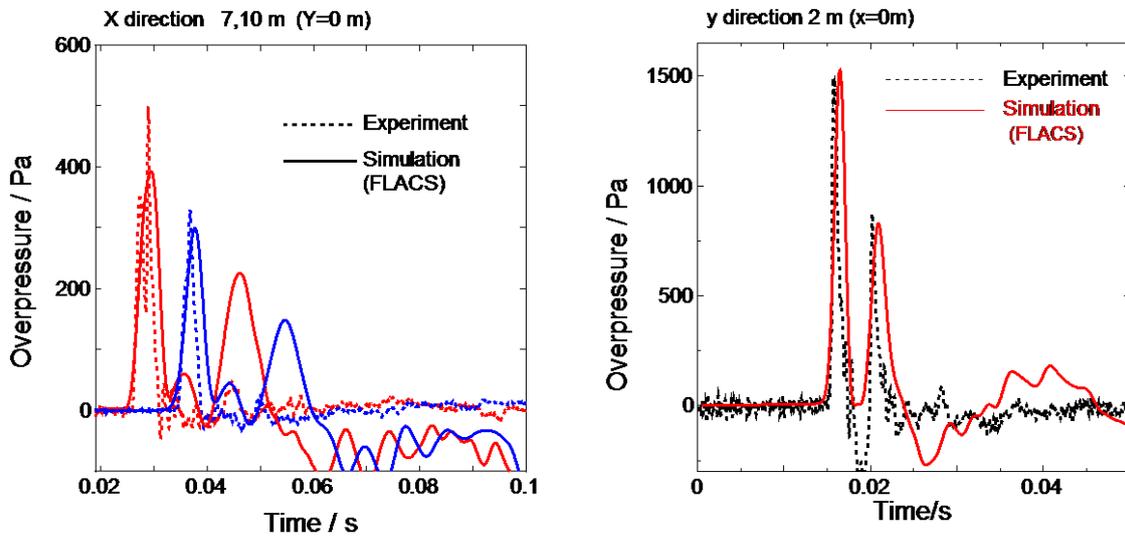
爆風シミュレーションにより爆風の着火位置依存について検討するため、着火位置を放出孔から X 方向に 0.6, 0.9, 2.0, 3.0 m と設定した。以下簡単に着火位置と呼ぶこととする。なお、実験では点火位置 2.5 m 以上では火炎が吹き消える結果が、また 2.0 m では爆風圧が小さくなる結果が得られている。図 3.17 のシミュレーション結果からは次のことが言える。着火位置 0.6 m と 0.9 m では同等の爆風が伝播する。これらの爆風挙動は実験と一致する。着火位置 2.0 m では爆風圧が大きくなり、実験結果を再現していない。着火位置 3.0 m では爆風圧が小さくなる結果となった。これは着火位置が放出孔から離れることで燃焼反応による爆風への寄与が小さくなる現象として定性的に実験を再現している。同図では距離 6 m までは着火位置 3.0 m の爆風圧が着火位置 0.6 m のそれと比して大きくなっているものの、これは着火位置から計測点の距離が相対的に近いためである。同図の距離の原点を着火位置にとると着火位置 3.0 m の結果はすべて着火位置 0.6 m の圧力を顕著に下回る。さらに着火位置を変化させたシミュレーションを実施した結果、0.5 ~ 0.9 m の範囲でピーク圧の距離減衰は同等、1.2 ~ 2 m の範囲では徐々にピーク圧が上昇し 2 m と 2.5 m は同等であった。

爆風圧の着火時期依存を検討するために、着火位置を放出孔から 0.9 m に固定して、着火時間を水素放出開始後 0.5 s、1.0 s とした場合の爆風シミュレーションを実施した。図 3.18 と 3.19 は爆風シミュレーションで得られた圧力履歴である。図 3.18 より次のことが言える。放出開始後 3 s に着火したシミュレーションでは第 2 のピークが確認されたが、着火時間 0.5 s の場合は、それは確認されず、1.0 s 後に着火した場合には 7 m 位置における圧力履歴で 100 Pa 程度の第 2 のピークが確認される。このピーク圧は放出開始後 3 s の結果よりも小さく、本シミュレーションでは燃焼の継続による第 2 波の大きさは着火までの時間に依存している。爆風先頭のピーク圧に着目すると、7 m 位置では 0.5 s 後の場合が爆風のピーク圧が若干大きく、図 3.12 (a)と比較すると放出から 3 s 後の着火のそれよりも大きい。このことは流れ場の乱れによる燃焼速度の上昇が関係していると考えられる。図 3.19 に示す放出孔から 15 m の位置に爆風圧履歴で着火時間後 0.5, 1.0, 3.0s の結果を比較した。3.0 s 後の着火のピーク圧が最も大きく、定性的には定常な水素濃度分布になった後に着火した方が爆風の減衰が遅くなるような反応を呈しているものと考えられる。



上部から

図 3.11 爆風圧の 3 次元的伝播過程 (上 ; 着火後 17 ms, 中 ; 着火後 29 ms, 下 ; 着火後 36 ms)
Y=0 断面で切断し、200 Pa 程度の圧力分布を表示 (φ 10 mm, 0.5 MPa)



(a) X方向 計測点 7, 10 m

(b) y方向 計測点 2 m

図 3.12 実験とシミュレーションとの比較 (爆風圧履歴 ($\phi 10 \text{ mm}$, 0.5 MPa))

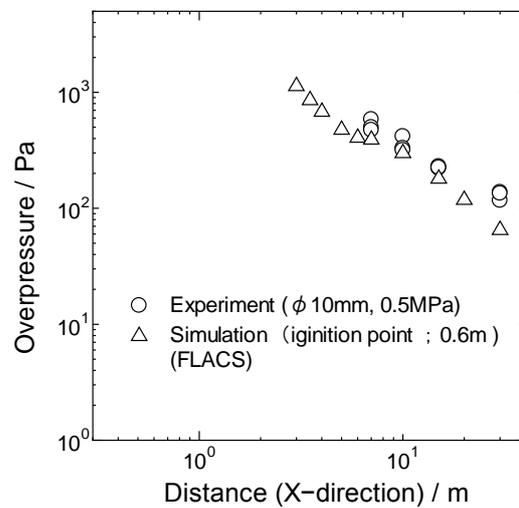


図 3.13 実験とシミュレーションとの比較 (爆風ピーク圧の距離依存 (x 方向))

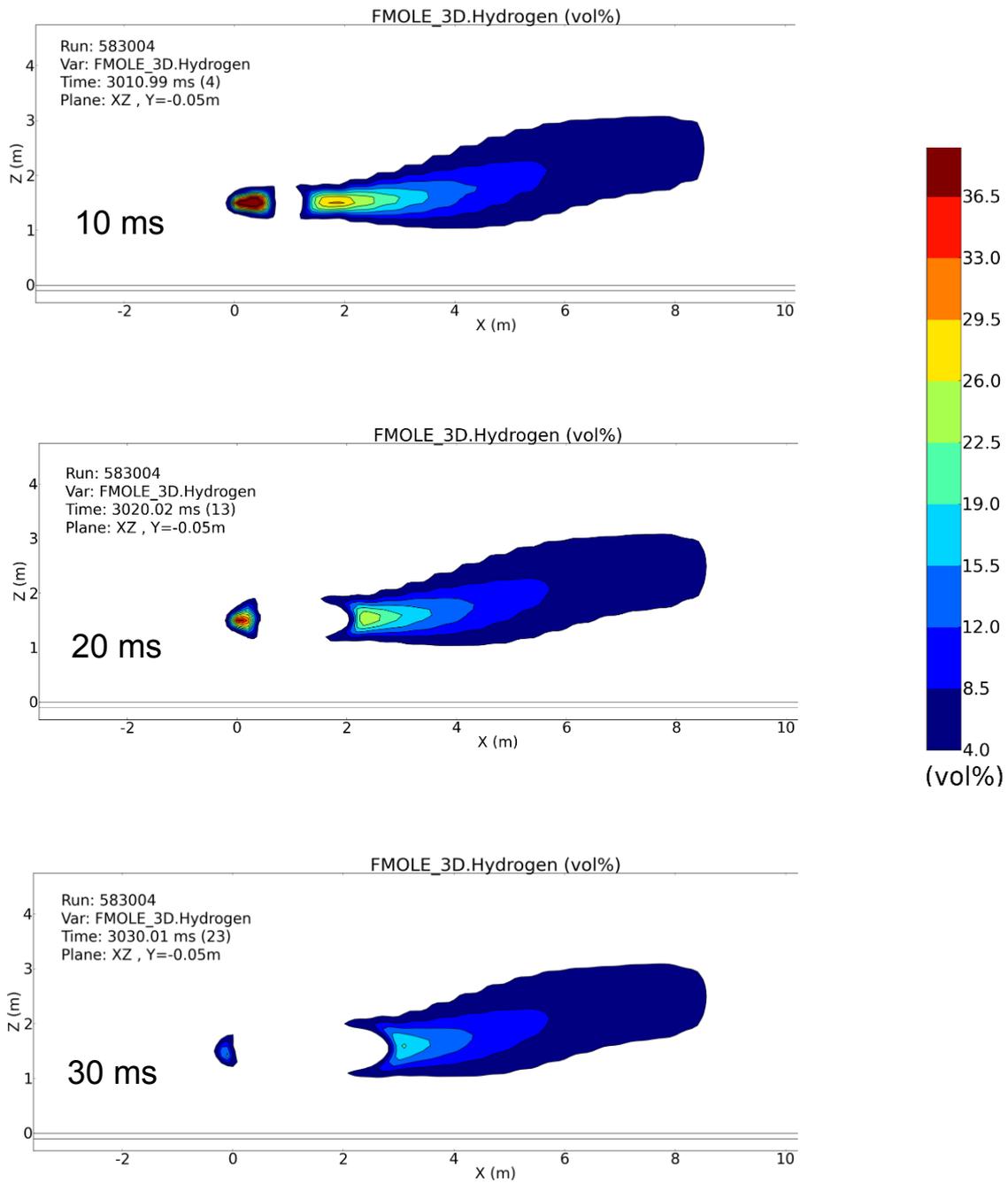


図 3.14 燃焼による水素濃度分布の消滅 ($\phi 10$ mm, 0.5 MPa)

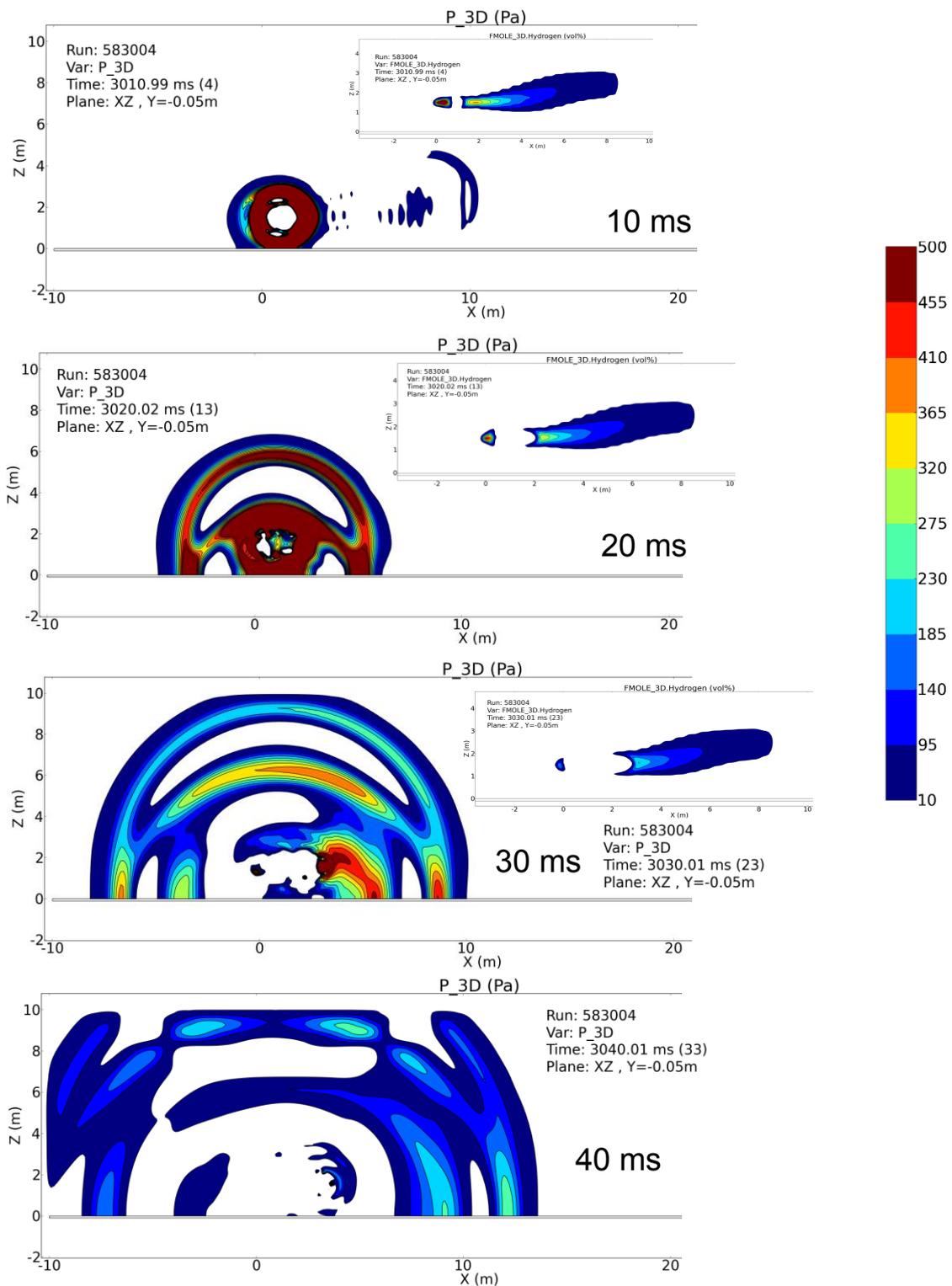


図 3.15 X-Z 面における爆風圧の伝播過程 (X-Z 面圧力分布 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

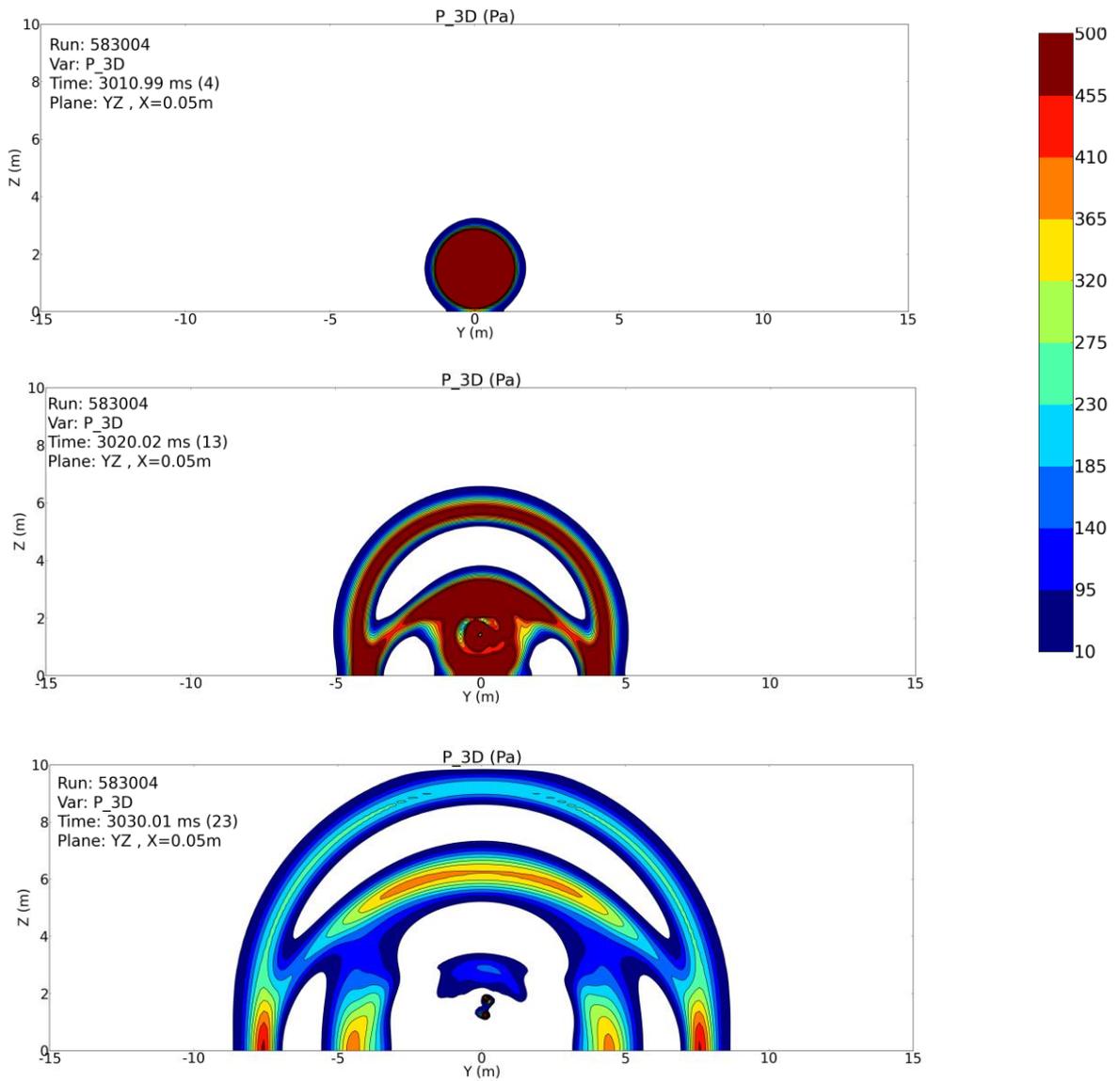


図 3.16 Y-Z 面における爆風圧の伝播過程 (Y-Z 面圧力分布 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

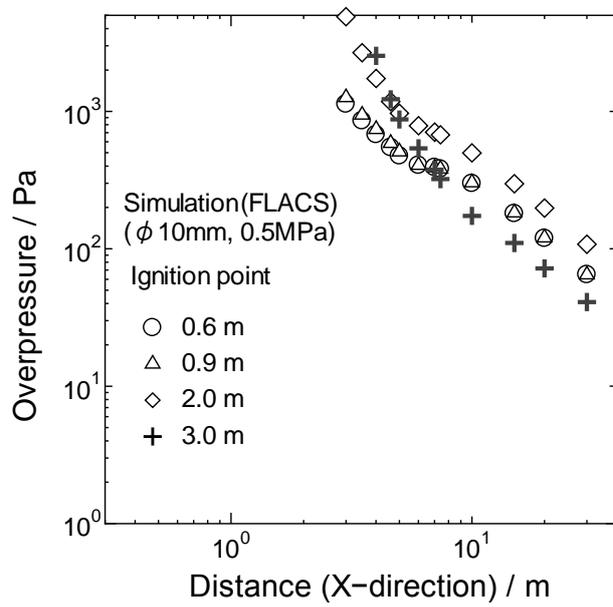


図 3.17 爆風シミュレーションによる爆風圧の着火位置依存の検討
 (φ 10 mm, 0.5 MPa)

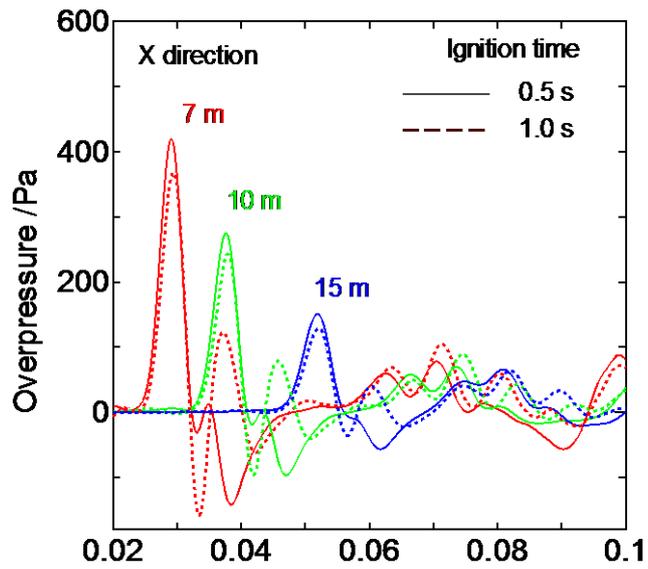


図 3.18 異なる着火時間で得られた X 方向 7, 10, 15 m 位置の圧力履歴の比較
(ϕ 10 mm, 0.5 MPa, 着火時間 放出開始後 0.5 s 1.0 s)

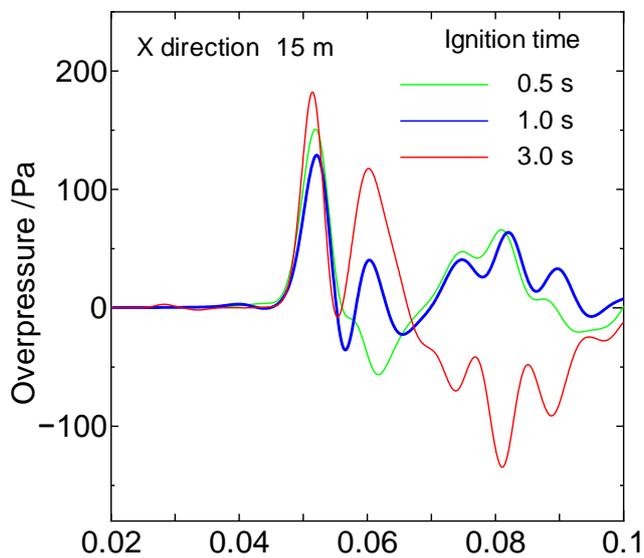


図 3.19 異なる着火時間で得られた X 方向 15 m 位置の圧力履歴の比較
(ϕ 10 mm, 0.5 MPa, 着火時間 放出開始後 0.5 s, 1.0 s, 3.0 s)

3. 5 火炎形成シミュレーション（温度分布）

火炎による周辺への温度影響を調査するために、放出孔からの水素放出開始後 1 秒に着火させた場合の温度分布を評価した。また、風の影響を調査するために、無風状態と水素放出方向に対して逆向きの風を吹かせる場合（向かい風）、放出と同じ方向に風を吹かせる場合（追い風）についてシミュレーションした。風の設定は水素噴出シミュレーションと同様である。各条件での着火後 1.7 s の X 方向速度分布を図 3.20 に示す。

図 3.21~3.23 にシミュレーションで得られた着火後 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s の計算場の温度分布を示す。それぞれ、3 次元空間で表した温度分布を $Y=0$ の断面で切断した温度の等値面である。図 3.21 は無風状態の温度分布であり、時刻 0.5 s では燃焼により形成された高温部は放出方向に卓越して広がる。時間の経過とともに高温部の先端付近から上方に浮き上がる様子が確認される。放出方向の鉛直方向を火炎半径方向と呼ぶことにする。放出方向には数 m に渡って高温領域が広がるもの、火炎半径方向への広がり小さく、70 度以上の温度領域は半径 1 m 程度であった。図 3.22 は向かい風状態の温度分布である。着火後 0.5 s までの初期の段階で高温領域先端は火炎半径方向への広がりが大きくなり始めるのと同時に浮き上がりを伴う。時間の経過とともに火炎半径方向への広がり、浮き上がりともに大きくなり、放出孔の前方 4 m 程度を除いて高温領域は全体的に後方に動く。Y 方向への 200 度以上の高温領域の広がり ±2 m 程度、上方へは 7 m を超え、さらに上方では放出孔の反対側にも及んだ。図 3.23 は追い風状態の温度分布である。他の場合と比して着火後 0.5 s の放出孔前方への高温領域の広がりが顕著に大きい。水素噴出シミュレーションと同様に、着火直前の可燃域濃度分布の前方位置を無風の場合と比較したところ顕著の差はなかった。このことから、着火直前の可燃域濃度分布のわずかな違いによる燃焼速度、ならびに着火後の風による高温領域拡大速度の違いが原因と考えられる。図 3.24 に X-Z 面で表した着火後 1.7 s の温度分布を示す。温度分布の最低値を 473 K あるいは 1273 K に設定し、X-Z 面、X-Y 面、Y-Z 面で高温領域の大きさについて調べた。表 3.3 に高温領域の拡大範囲についてまとめた。例えば X 方向すなわち放出孔前方へ 1000 °C 以上の高温領域が到達する距離は無風状態で 5 m、向かい風では 3.8 m、追い風では 6 m であった。200 °C 以上の領域が到達する距離は無風状態で 10 m、向かい風では 4 m、追い風では 15 m 程度であった。なお、高温領域の評価では温度の持続時間を考慮せず、3 秒までの温度分布をもとに瞬間的に高温になる領域を調べた。

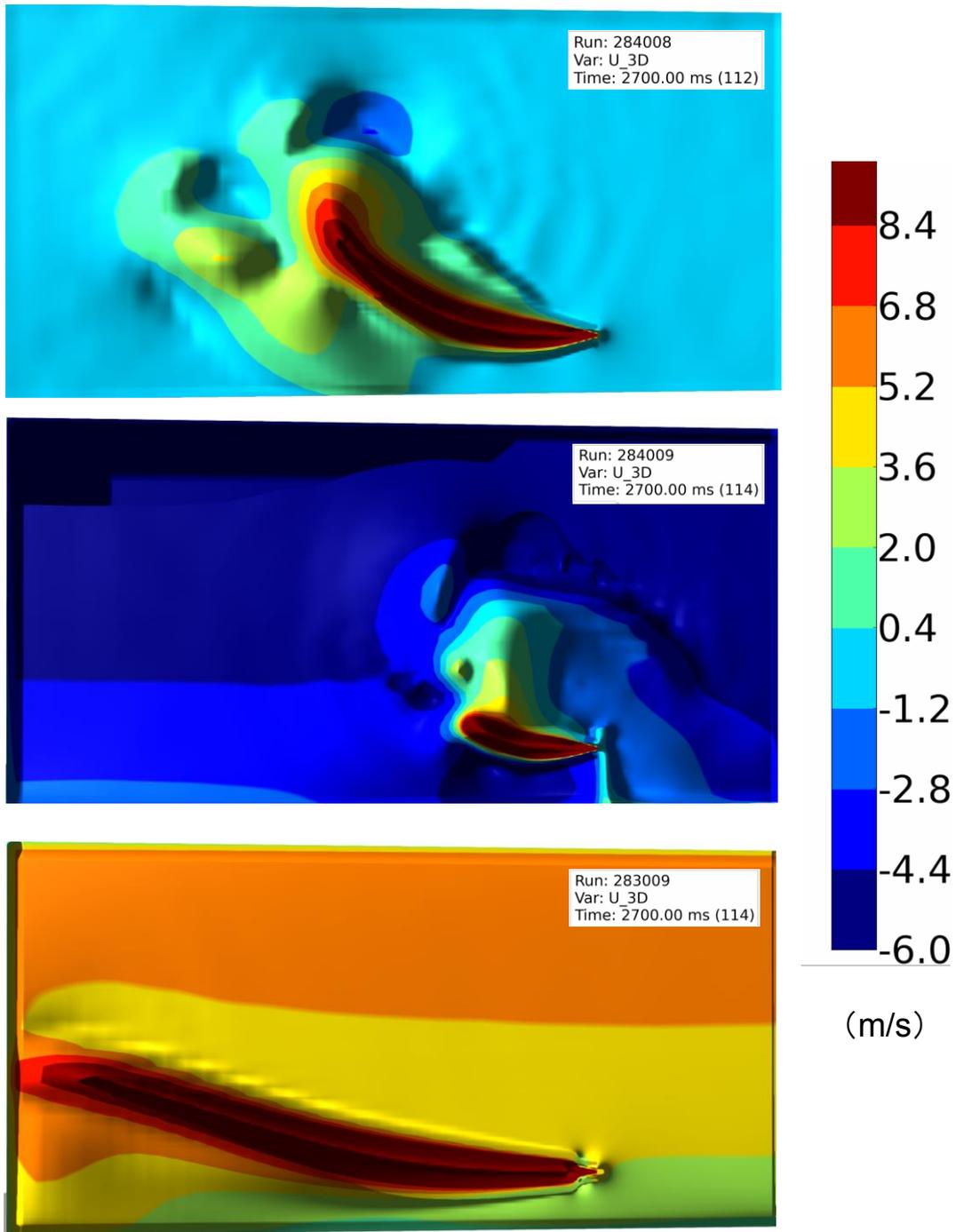


図 3.20 着火後 1.7s の X 方向速度分布 (上から 無風、向かい風、追い風 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

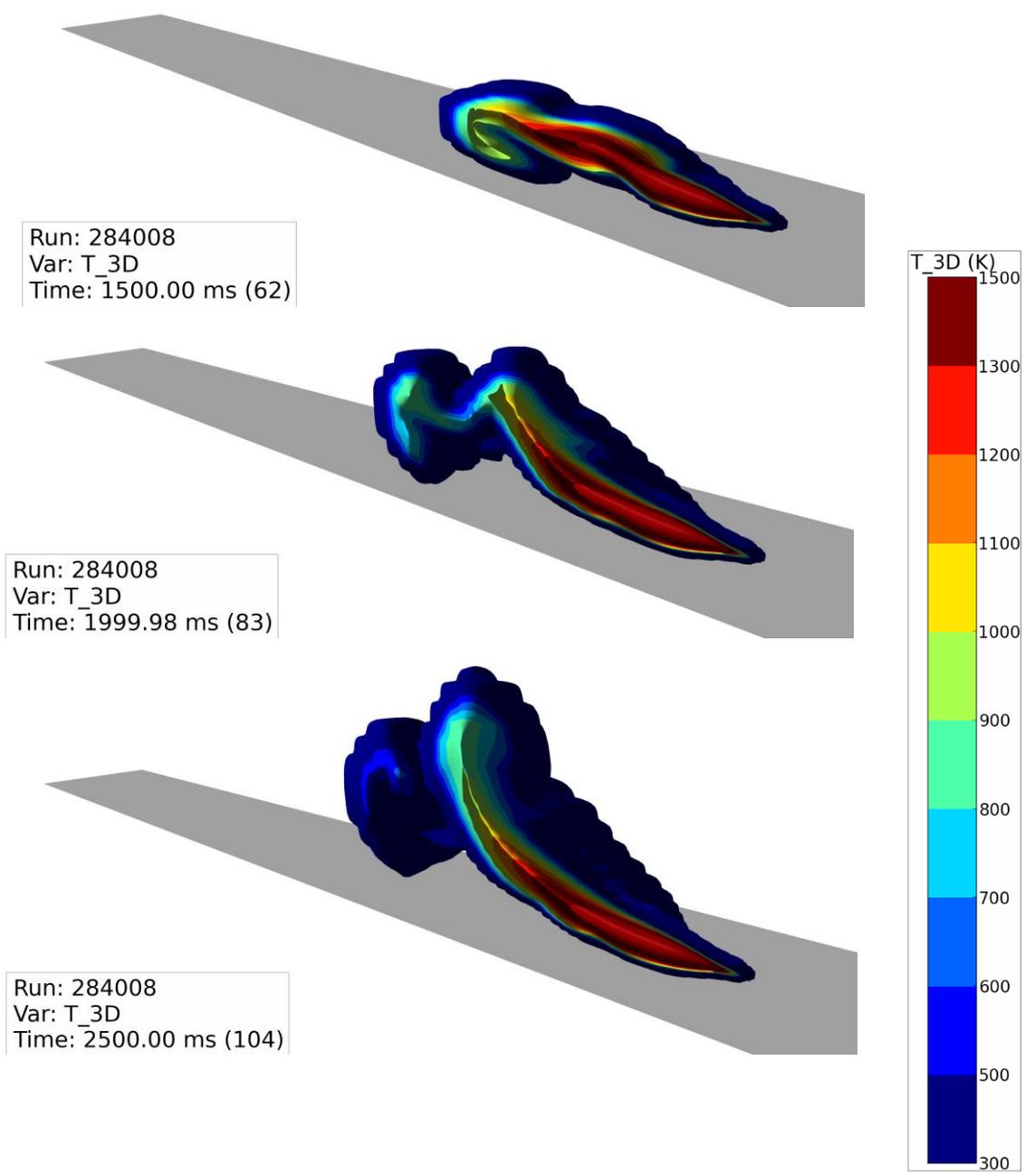


図 3.21 着火後 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s の温度分布 (無風、 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

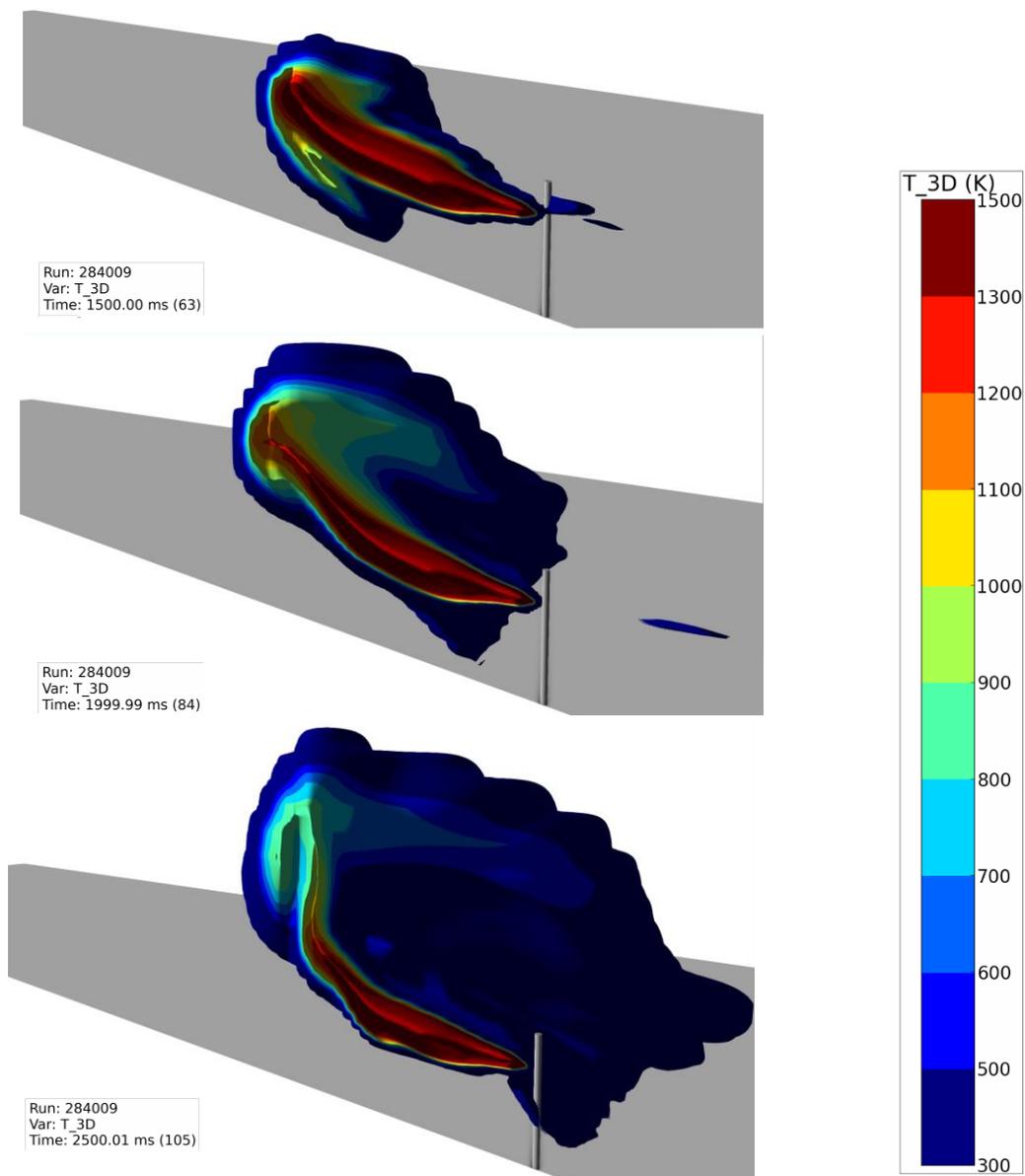


図 3.22 着火後 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s の温度分布 (向かい風 高さ 1 m で-3 m/s、 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

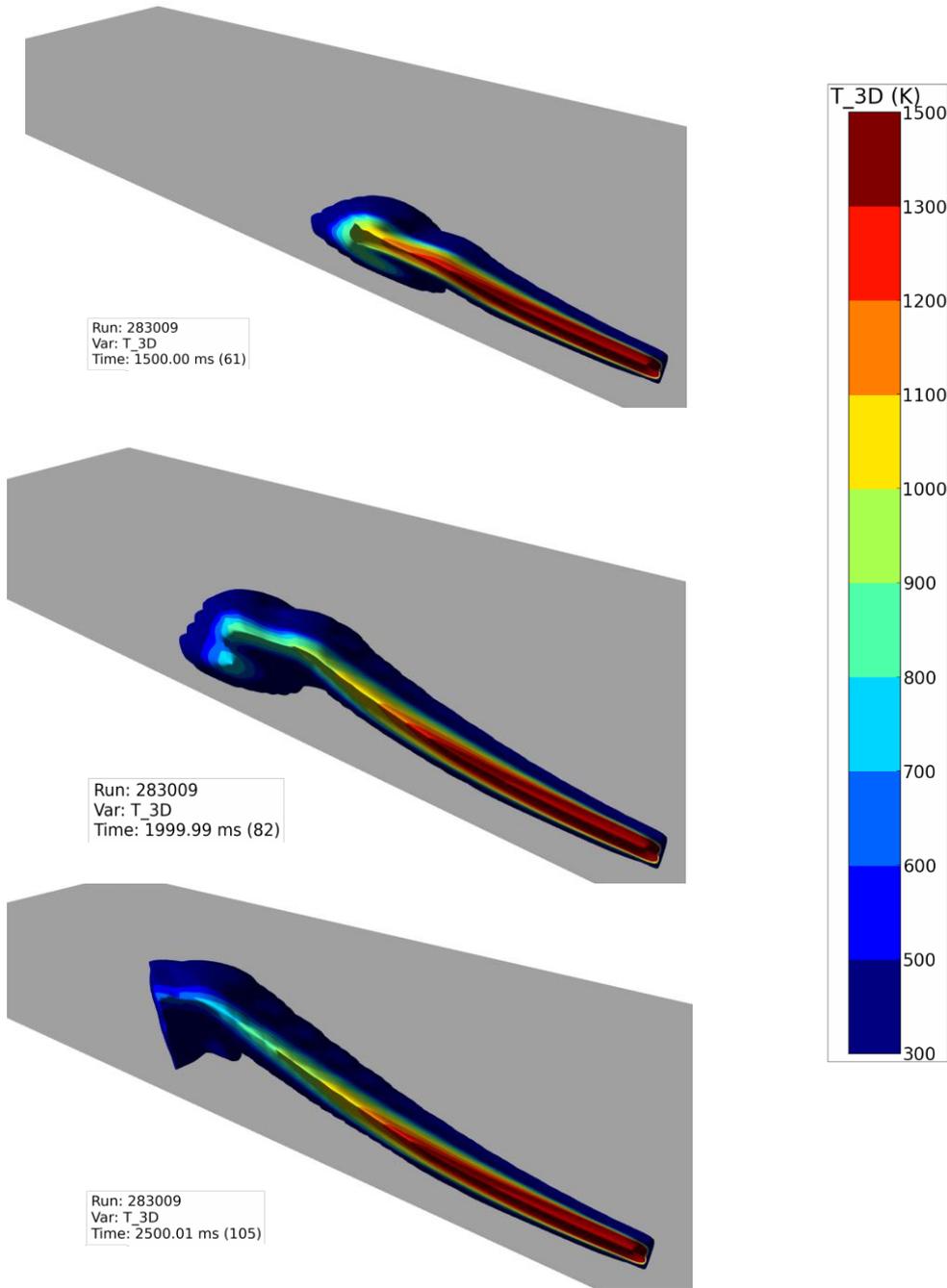


図 3.23 着火後 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s の温度分布 (追い風 高さ 1 m で 3 m/s、 ϕ 10 mm, 0.5 MPa)

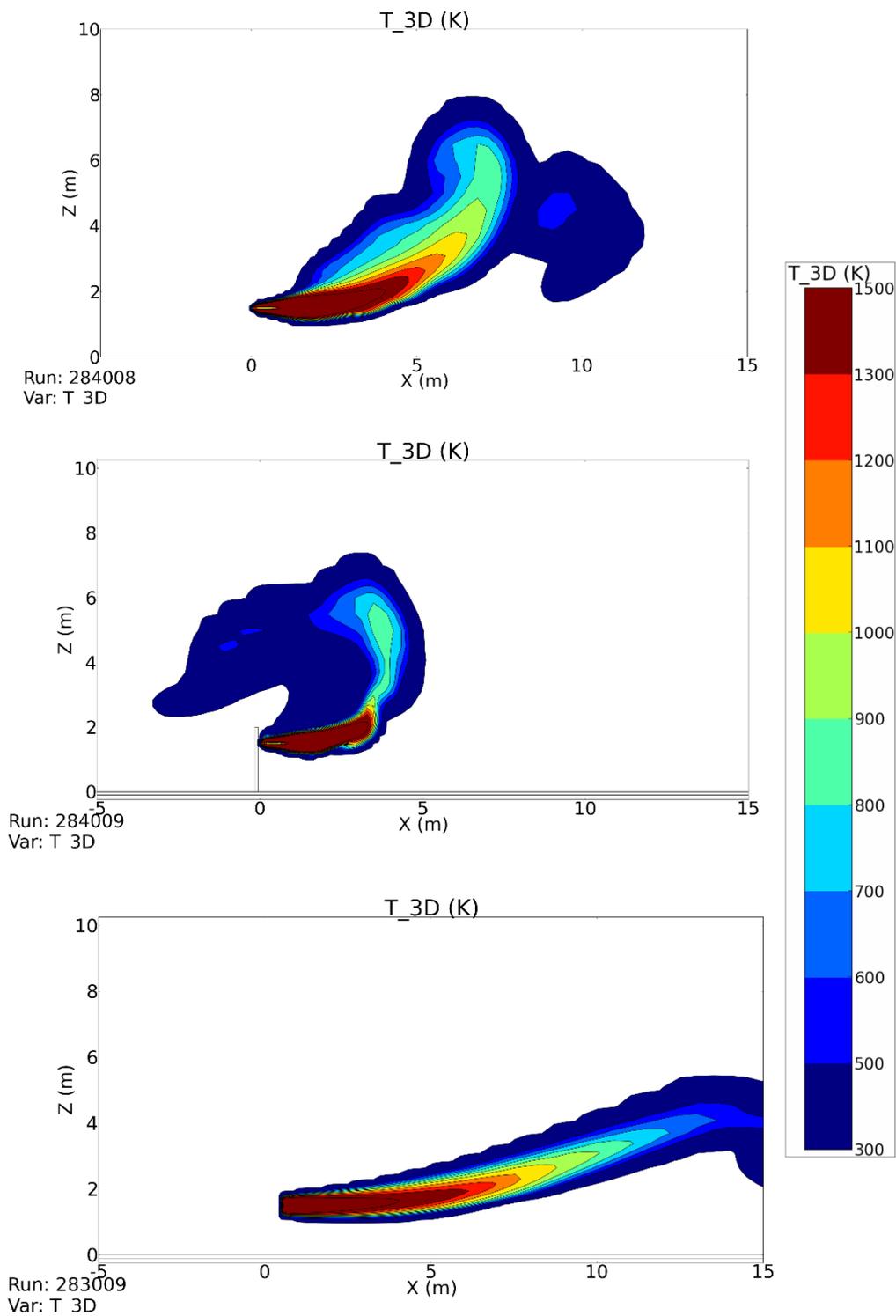


図 3.24 着火後 1.7 s の温度分布（上から 無風、向かい風、追い風 ϕ 10 mm, 0.5 MPa）

表 3.3 高温領域の拡大範囲（単位は m）
3 秒までの温度分布をもとに調べた結果

	1000 °C以上	200 °C以上
無風 X	5	10
無風 Y	±0.35	±0.6
無風 Z	2.6	8
向かい風 X	3.8	4
向かい風 Y	±0.4	±2
向かい風 Z	2.5	7
追い風 X	6	15
追い風 Y	±0.25	±0.9
追い風 Z	2	5

4. 漏えい水素への着火実験による周囲影響把握

4. 1 実験の概要

水素供給配管を模擬した配管に、損傷を模擬した漏えい孔（放出孔）を設け、孔から放出する水素を着火させ、火炎発光部のサイズ、火炎からの輻射熱、火炎下流の温度分布、および爆風過圧について測定し、周囲影響評価に資するデータを収集した。高さ 1.5 m の位置に設置された放出孔から地面に対して水平方向に水素ガスが放出され、火花放電により着火させた。放出条件は、放出孔径 ϕ 5mm および ϕ 10mm、水素供給圧 0.3 MPa および 0.5 MPa（いずれもゲージ圧）とした。

4. 2 実験設備と方法

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 28 年 9 月 26 日から同 10 月 11 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 1 km）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 4. 1 に、また水素供給および放出設備の模式図と外観を図 4. 2 に示す。水素供給を伴う実験操作は、安全のため、操作開始前にすべての人員が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、人員が待避する観測所までの距離は 50 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 100A の SGP 管（外径 ϕ 114.3 mm、肉厚 4.5 mm）とし、水素はカードル容器から、2 段の圧力調整器（一段目：ヤマト産業製 R-150H を並列に 2 基接続；二段目：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。カードル容器から、放出孔直前に設置した遠隔操作弁までの距離は約 30 m 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ボンベ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。水素供給圧は配管に設置した圧力センサー（キーエンス、AP-13S）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。ただし流量値については、流量計下流位置に設置した圧力センサーおよび熱電対で測定された圧力および温度を用いて、標準状態に換算した。熱電対には K 型シース熱電対（シース外形 ϕ 1.6 mm）を用いた。圧力調整器の特性上、出口を封止して調圧した場合、ガス放出時の流量により 2 次側圧力が低下するため、放出時に既定の試験圧力となるよう、調圧時は圧力をやや高めに（試験圧力より 0.08~0.12 MPa 程度高く）設定した。

水素放出孔は地面から高さ 1.5 m の位置に、地面に対して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、放出孔位置にてエルボー管を用いて鉛直上向きに配管を立ち上げ、その側面に放出孔を設けた。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。

点火を伴う実験においては、放出孔から所定の距離に点火用電極を設置し、水素放出開始後、放出挙動が安定した時点（放出孔近傍の圧力が一定となった時点）で点火を行った。ただし、着火時間依存実験では放出開始後の経過時間に依り点火を行った。電極には径 ϕ 1.6 mm のステンレス線 2 本を使用した。2 本のステンレス線は先端部にて 3~8 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。ただし、連続して放電をする必要がある実験では約 10 Hz の周期で断続的に放電を発生させた。

放出孔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 以下の場合のみ実験を行った。実験場の気温は 19~32 °C、気圧は 976~993 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 21~37 °C であった。

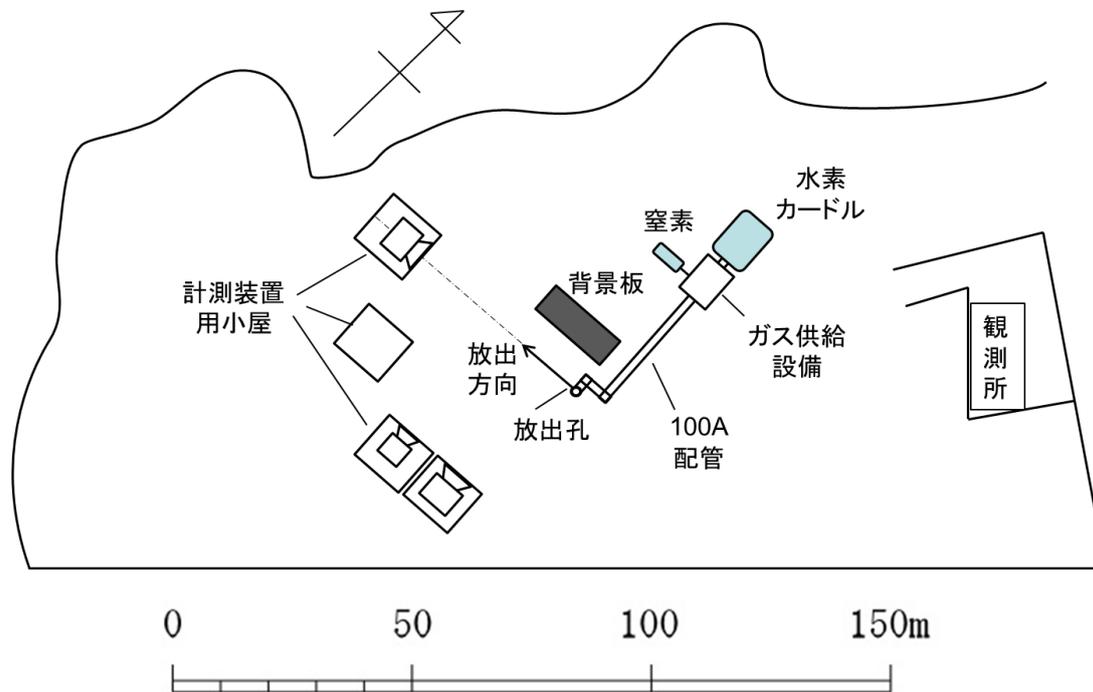


図 4. 1 実験場と設備類の全体配置

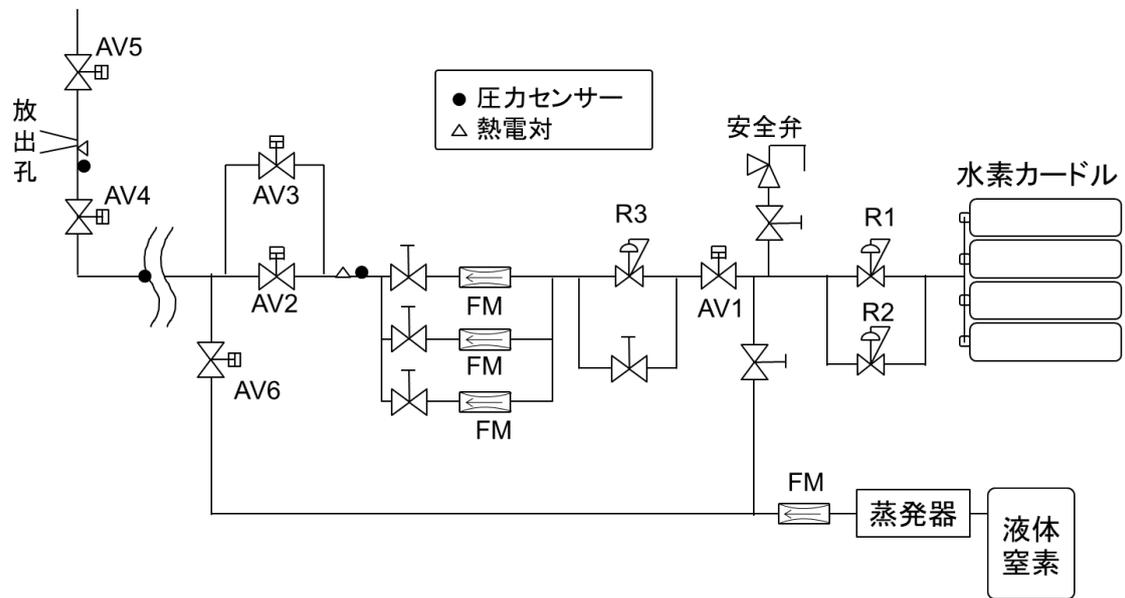


図 4. 2 水素供給および放出設備の模式図（上）と外観（下）（R1, R2 : 1 段階目圧力調整器（並列）、R3 : 2 段階目圧力調整器、AV1-6 : 空気圧作動弁、FM : 流量計）

4. 3 実験条件

実験条件は以下の通りとした。

- ・ 定常放出における着火影響実験

水素放出開始後、定常濃度分布を計測する実験、および定常濃度分布を踏まえた着火実験を行った。点火は主に放出孔からの水平距離 50 cm の位置で行った。放出条件は下記の通りである。各実験は必要に応じて複数回行った。試験圧力は水素放出時における放出孔近傍の圧力値（ゲージ圧、誤差±5%）である。

放出条件 1：放出孔径 ϕ 5 mm、圧力 0.3 MPa

放出条件 2：放出孔径 ϕ 5 mm、圧力 0.5 MPa

放出条件 3：放出孔径 ϕ 10 mm、圧力 0.3 MPa

放出条件 4：放出孔径 ϕ 10 mm、圧力 0.5 MPa

- ・ 着火位置依存実験

放出条件 2 および 4 において、点火電極の位置を変化させながら計測を繰り返し行うことで、着火位置が周囲影響に与える影響を評価した。

- ・ 放出時間依存実験

放出条件 4 において、水素漏えい開始から点火までの時間を変化させて計測を行うことで、放出開始から着火までの時間が周囲影響に与える影響を評価した。

配管圧力および放出孔径と放出流量の関係を図 4. 3 に示す。地面に対して水平方向に放出する上記の放出条件 1～4 の他に、鉛直向き配管上端フランジ（厚さ 18 mm）に径 ϕ 10 mm または ϕ 20 mm の放出孔を設け、上方に放出させる条件においても流量を計測した。それらの結果をまとめて記す。ただし、最大流量の試験においては流量計の読み値が飽和していたため、放出時間と水素カードル内圧の変化から流量を推算した。図中の線は放出孔においてチョーク条件を課した場合の計算値である。本計測結果はチョーク条件における流量と概ね一致している。ただし一部の条件においては、チョーク条件に比べ流量がやや低い傾向にある。これは、それらの条件では放出部の肉厚が孔径と同程度かそれよりも大きい（水平放出の場合は配管肉厚 4.5 mm、鉛直放出の場合はフランジ厚 18 mm）ためであると考えられる。

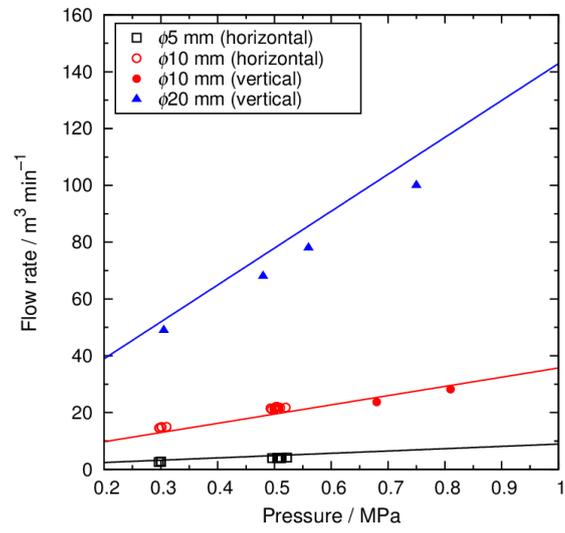


図 4. 3 配管圧力および放出孔径と放出流量の関係

4. 4 計測

計測機器類の配置概要を図4. 4に、各センサー類の設置状況を図4. 5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 は放出孔位置を原点とし、 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。以下、各センサーの番号を図4. 4の通り記す。

計測項目としては、放出した水素について、濃度センサーによる濃度分布の計測を行った。また、漏えい水素に対して、放出軸上に設置した点火電極を用いて火花放電による点火を行い、その際の火炎伝播挙動および爆風圧（音圧）、定常火炎へ移行後の火炎温度および輻射熱を計測した。各計測項目の内容を以下に記す。

(1) 水素濃度分布

水素濃度センサー（新コスモス電機、気体熱伝導式水素センサーおよび接触燃焼式水素センサー）を、放出孔から放出軸方向に6点（H1-6）設置し、各条件において漏えいした水素の軸上濃度分布を計測した。設置位置は放出軸上（ $y = 0, z = 1.5 \text{ m}$ ）、放出条件1～4においてそれぞれ $x = 0.5\text{--}3.0 \text{ m}$ 、 $0.5\text{--}3.5 \text{ m}$ 、 $1.5\text{--}6.5 \text{ m}$ 、 $1.5\text{--}7.0 \text{ m}$ とした。なお、濃度計測では点火は行わず、点火実験においては濃度センサーを待避した。

(2) 輻射熱

漏えい孔から放出軸方向に4点（R1-4）、それに垂直な方向に4点（R5-8）に輻射熱センサー（CAPTEC製 TRF-50、必要に応じて同社製アンプにより出力を増幅した）を設置し、各実験で漏えい水素に着火し火炎が形成された時の輻射熱を計測した。R1-4の設置位置は放出軸上としたが、センサー間の干渉を避けるため、非軸方向（ y ）に最大で0.4 m 離して設置した。R1-4の放出孔からの距離は、放出条件1および2では $x = 4, 6, 8, 10 \text{ m}$ 、放出条件3および4では $x = 6, 8, 10, 12 \text{ m}$ とした。R5-8については、放出軸方向距離を $x = 0.5 (\pm 0.2) \text{ m}$ に固定し、非軸方向距離を $y = 2, 4, 6, 8 \text{ m}$ とした。いずれのセンサーも高さを放出孔と合わせた（ $z = 1.5 \text{ m}$ ）。

(3) 温度

放出孔から放出軸方向に高さを変えながら9点（T1-9）または10点（T1-10）、温度センサー（K型シース熱電対、シース外径 $\phi 1.6 \text{ mm}$ ）を設置し、各実験で漏えい水素に着火し火炎が形成された時の温度を計測した。熱電対の配置位置は、影響評価に資するため火炎下流における、比較的低温の領域とした。配置の概要は図4. 4の通りである。T1-9は x, z 方向に3行3列の格子状に配置した。T1,4,7は放出孔と同高（ $z = 1.5 \text{ m}$ ）とし、T2,5,8およびT3,6,9をそれぞれより高所（最大 $z = 3.5 \text{ m}$ ）に設置した。一部の実験ではさらに高い位置にT10を設置した。各実験において頻繁に位置を変えながら計測を行ったため、配置の詳細は計測結果と合わせて記すこととする。

(4) 爆風圧

放出孔から放出軸方向に4点 (P1-4)、それに垂直な方向に6点 (うち4点 (P5-8) は放出軸に垂直な方向に同軸とした。) に爆風圧センサー (P1,5,9,10 : PCB Piezotronics、106B52) あるいは音圧センサー (PCB Piezotronics、P2,3,6,7 : 377C10 (プリアンプ 426B03) ; P4,8 : 377A13 (プリアンプ 426E01)) を設置し、各実験で漏えい水素に着火した時の爆風圧を計測した。爆風圧センサーに関しては整流板を使用し側圧を計測した。それぞれ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。P1-4 の設置位置は放出軸上としたが、他のセンサーとの干渉を避けるため、非軸方向 (y) に最大で 0.4 m 離して設置した。P1-4 の放出孔からの距離は、放出条件 1 および 2 では $x=5, 7.5, 15, 30$ m、放出条件 3 および 4 では $x=7, 10, 15, 30$ m とした。P5-8 については、放出軸方向距離を $x=0.5$ (± 0.2) m に固定し、非軸方向距離を $y=2, 6, 12, 25$ m とした。P9 は $x=0, y=2$ m、P10 は $x=2$ m, $y=2$ m の位置にそれぞれ設置した。

(5) 火炎挙動

放出孔から放出軸方向およびそれに垂直な方向に高速度カメラ (軸方向 : ヴィジョンリサーチ製 Phantom V7.3、垂直方向 : ナックイメージテクノロジー製 MEMRECAM HX-3) を設置し、各実験で放出水素に着火した時の火炎伝播の様子および形成される火炎の挙動を計測した。前者には焦点距離 300 mm、F 値 4 のレンズを、後者には焦点距離 200-400 mm、F 値 4 または 2.8 のレンズをそれぞれ使用した。水素火炎既燃ガス中の高温水蒸気から発せられる近赤外光を観測するため、周辺可視光をカットするためのフィルター (Kenko 製 PRO1DR72) を介して撮影を行った。軸方向設置位置はそれぞれ $x=50$ m、および $y=50$ m とした。撮影速度は毎秒 1000 フレーム、記録時間は着火直前から着火後約 2 秒時点までとした。本報告書に記載する撮影画像には、視認性向上のため指数 2 のガンマ補正を施してある。また、放出軸に垂直な方向には別途赤外カメラ (キヤノン製 EOS6 D、映像素子前フィルターをクリアフィルターに換装) を設置し、赤外発光部のサイズを計測した。焦点距離 200 mm、F 値 2 のレンズおよび赤外撮影用フィルター (朝日分光製 LI0750) を用いた。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° の傾きとなるように設置した。撮影画像の距離換算はスケールを用いて校正した。

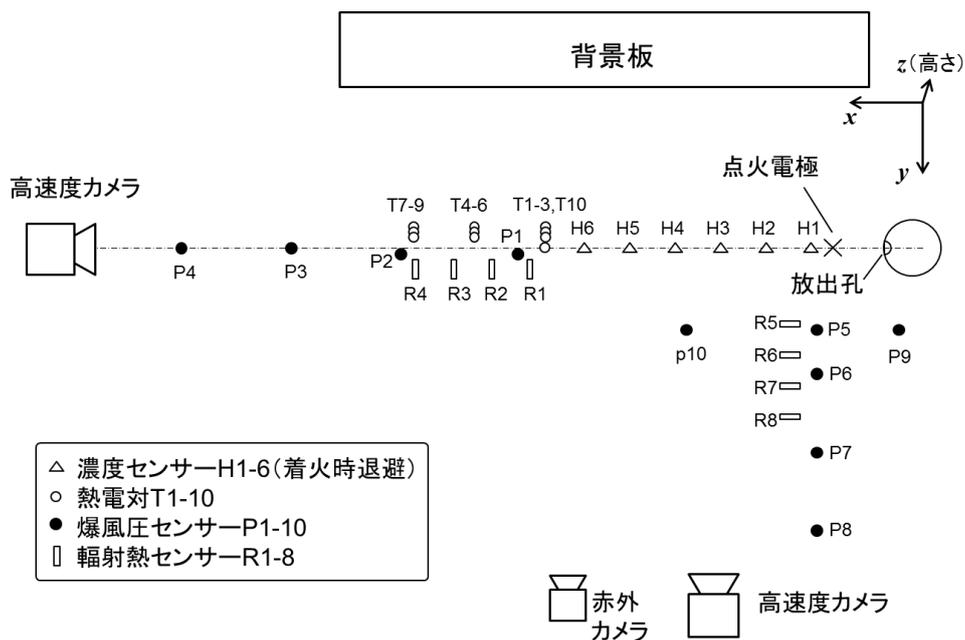


図 4. 4 計測機器類の配置

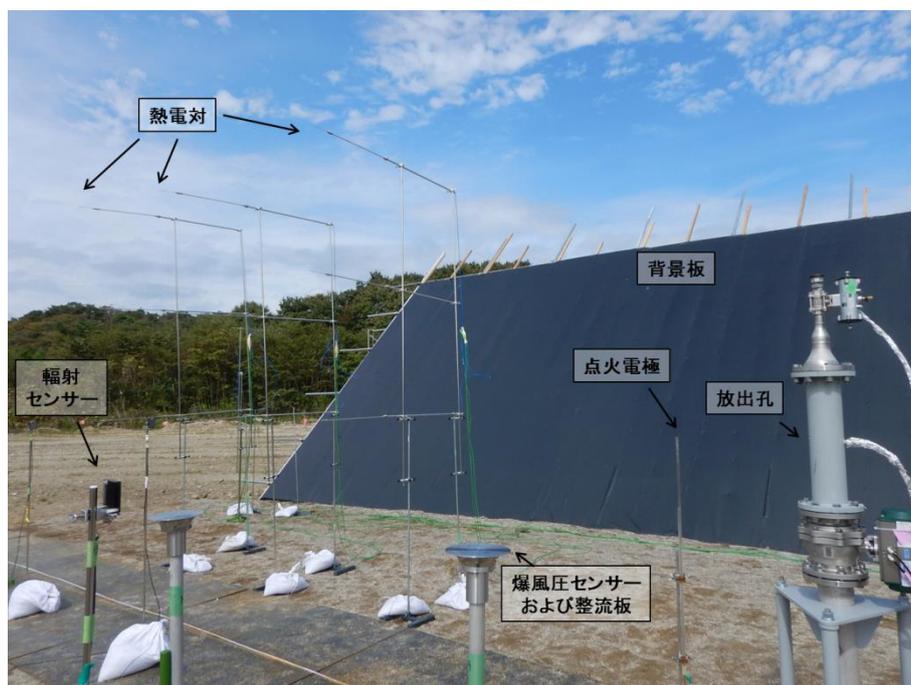


図 4. 5 センサー類の設置状況 (着火実験時)

4. 5 結果

本節では、計測項目毎にその結果を記す。火炎が定常になった後に発生する輻射熱や温度、発光挙動は着火位置や放出時間に依存しないと考えられる。従って、着火位置依存実験および放出時間依存実験におけるそれらの計測結果は、定常放出における着火影響実験とまとめて記し、前二者の実験結果は爆風圧と初期の火炎伝播挙動についてのみ個別に示すこととする。また、カメラ撮影による観測結果は、定常火炎に関する結果と動的な伝播挙動とを分けて記す。

4. 5. 1 水素濃度分布

放出条件2および4における水素濃度の時間履歴の例を図4.6に示す。放出孔近傍における配管内圧力の履歴も合わせて示す。本実験における水素放出は、放出孔直前に設けた空気圧作動弁に、放出孔から約50m離れた観測所から空気圧を送り込むことで操作して行っている。そのため、空気圧を印可するための観測所内でのバルブ操作と実際に空気圧作動弁の開動作には約10秒程度の時間遅れが生じており、また、開動作の開始から弁の全開までも5秒程度の時間を要する。従って放出開始の時間を厳密に定義することは難しく、本節では便宜上、時間原点は圧力上昇開始時点とした。放出孔径 $\phi 5\text{ mm}$ の条件では、図4.6(上)のように放出開始後に圧力が一時的にオーバーシュートする現象が見られているが、これは前述の通り、放出時の減圧を考慮し圧力調整器の設定圧を高め設定していたための過渡挙動である。放出孔径 $\phi 10\text{ mm}$ の条件ではオーバーシュートは見られなかったが、これは流量が大きいためオーバーシュート前に平衡圧力に達したためであると考えられる。

いずれの場合も、放出開始から約5秒の時点で圧力は平衡に達しており、観測された水素濃度もほぼ一定値となる結果が得られた。その後放出が終了する約40秒の時点まで水素濃度に大きな変化は観測されず、この間は定常状態を観測しているといえる。しかし、特に放出孔から遠方に設置した水素センサーでは、水素濃度の測定値に過渡的なふらつきが見られた。これは遠方では流れの乱れによる濃度変化が大きいことと、風による外乱の影響であると考えられる。従ってここでは、各計測点での代表濃度として、定常放出時の平均濃度および瞬間最大濃度を求めた。

図4.7では放出条件1～4における各計測点での水素濃度を、放出孔からの距離に対してプロットした。中抜きの点が時間平均値、塗潰された点が瞬間最大値をそれぞれ表す。いずれの条件においても、水素濃度は距離に対してほぼ指数関数的な減少を示しており、予期される通り、放出流量の増加に従いより遠方まで分布が広がっている。

ここでは、濃度分布が放出流量に依存するという仮定を置き、距離を放出孔直径(d)によって規格化し、さらに濃度分布が配管内圧の平方根に比例するというスケール依存性を仮定してゲージ圧力1MPaに換算した。結果を図4.8に示す。縦軸は対数軸である。遠方の計測値は風況の影響を受け易いため、スケール化された値も遠方においてばらつきが増大する傾向にある。全体としては概ね放出条件に依存しない分布が得られているため、本実験

条件において本スケール則は妥当であると考えられる。

水素の可燃下限濃度は 4 vol%であり、濃度の時間変動や測定誤差等も考慮して、その 1/4 の濃度 1 vol%が、可燃性ガス設備の防爆基準の検討における目安として一般的に用いられている。配管内圧力 1 MPa 換算の場合、図 4. 8 から外挿すると、平均濃度が 1 vol%となる換算距離は約 1500 である。この値は、スケール則の仮定により、圧力 0.3 および 0.5 MPa ではそれぞれ約 900 および 1100 に換算される。また、後述の着火位置依存性実験において、水素平均濃度が概ね 20%を下回る距離では、着火後、燃焼が継続しない、吹き消える現象が観測された。上記スケール則により換算すると、平均濃度が 20%となる換算距離は、圧力 0.3、0.5、および 1 MPa の場合において、それぞれ約 240、300、400 である。

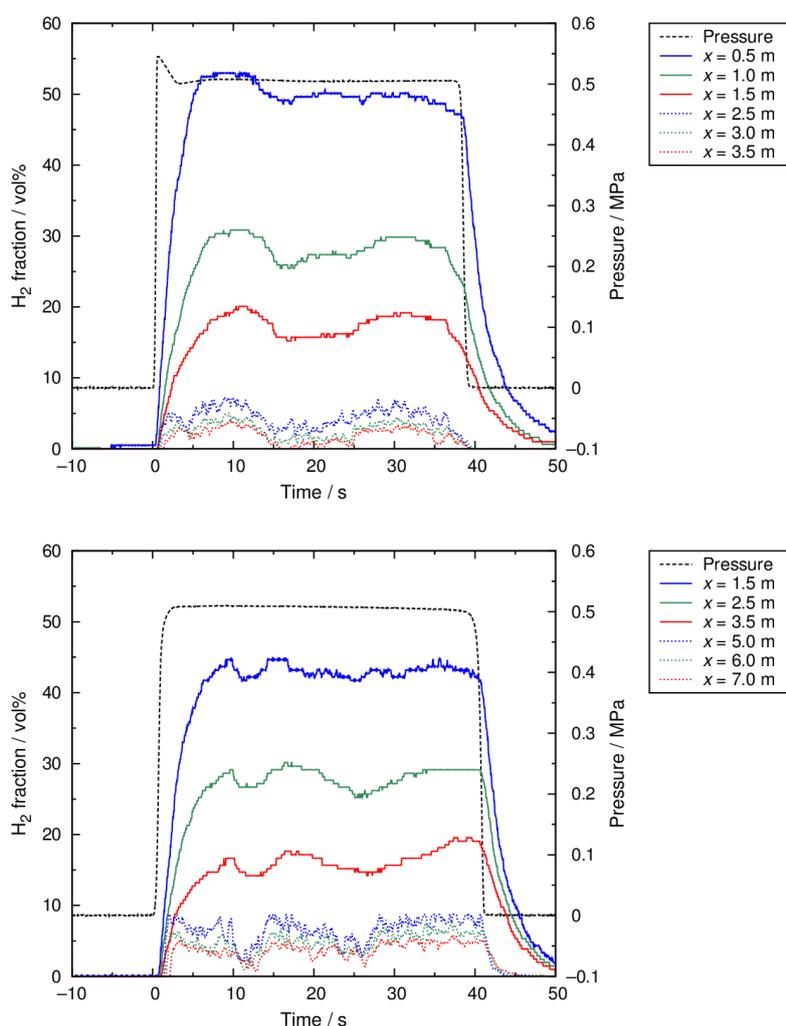


図 4. 6 放出条件 2 (上) および 4 (下) における水素濃度の時間履歴と
放出孔近傍の配管内圧力の履歴

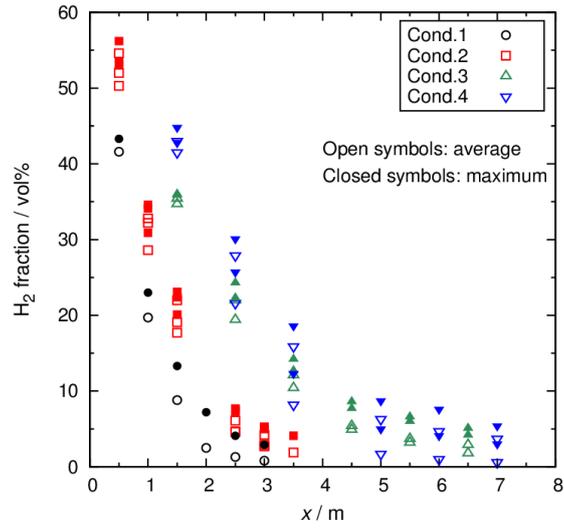


図4. 7 放出条件1～4における各計測点での水素濃度
(中抜きの点：時間平均値、塗潰された点：瞬間最大値)

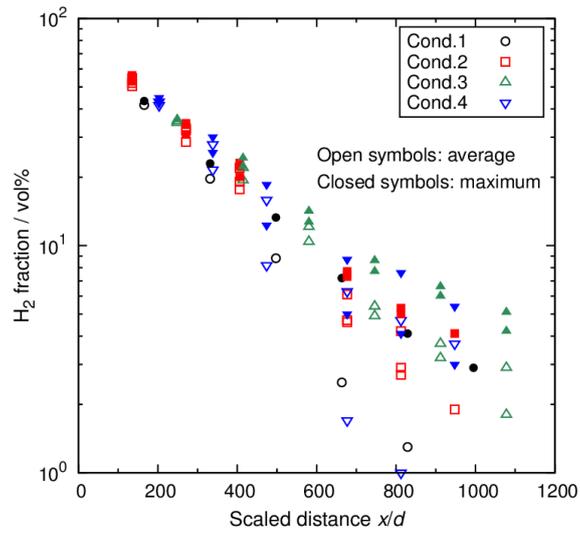


図4. 8 スケール則（本文参照）を仮定して求められた、水素濃度の
換算距離依存性（配管内圧 1 MPa 換算）

4. 5. 2 定常火炎の発光部サイズ

各放出条件における定常火炎形成後に観測された発光の様子を図4. 9および図4. 10に示す。それぞれ高速度カメラおよび赤外カメラによって観測されたものである。それぞれの画像について、放出孔からの発光の到達距離を求めた。到達距離は撮影記録時間内において発光が到達したと明確に判断できる最長の距離とした。放出条件1～4における発光到達距離は、高速度カメラ撮影ではそれぞれ1.7、1.9、2.7、および3.4 m、赤外カメラ撮影ではそれぞれ1.4、1.9、3.1、3.1 mであった。両者の差は背景光の影響、撮影コマ数、露光時間および感度によるものであると考えられる。また、火炎の乱れにより特に先端部の形状は大きく時間変動する。これらの影響を考慮し、ここでは発光到達距離 $\pm 30\%$ の誤差を設定する。記録時間内における火炎先端の到達距離の変動および2種の異なるカメラにおける結果の差異は設定した誤差範囲に収まっていることを確認した。

各火炎の発光到達距離を放出孔径で規格化した換算距離を図4. 11に示す。図中の線は高圧水素ジェット火炎において、火炎に炭酸ナトリウム水溶液を噴霧した際の可視発光部の長さを表す経験式による値である[4-1]。放出条件と計測方法に大きな違いがあるにもかかわらず、本調査研究の発光距離は経験式と誤差範囲内で一致する結果となったことから、当該経験式によるスケール則は本調査研究で想定する放出条件においても成り立つと考えられる。

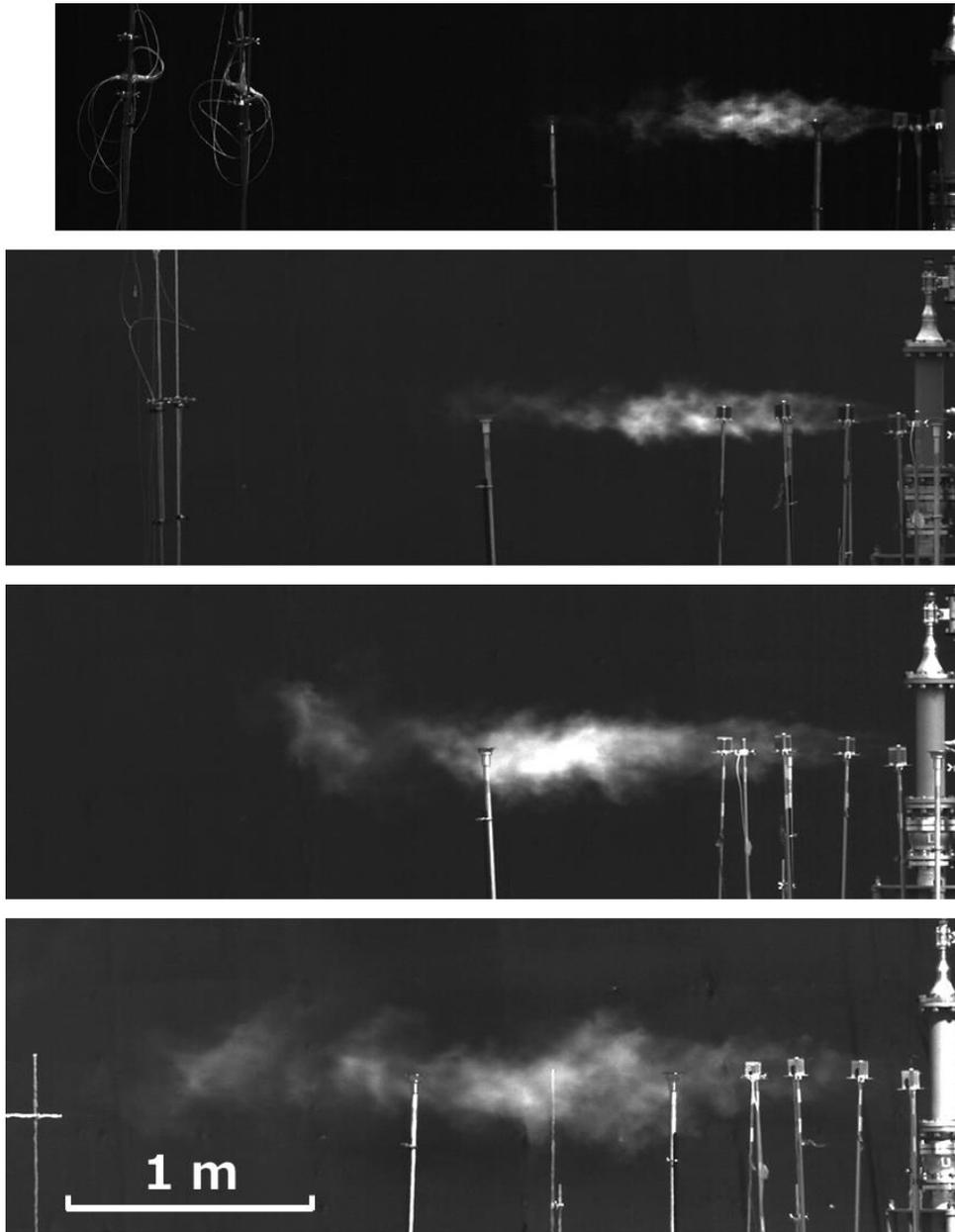


図4. 9 各放出条件（上から1、2、3、および4）における発光の様子
（高速度カメラ）



図4. 10 各放出条件（上から1、2、3、および4）における発光の様子（赤外カメラ）

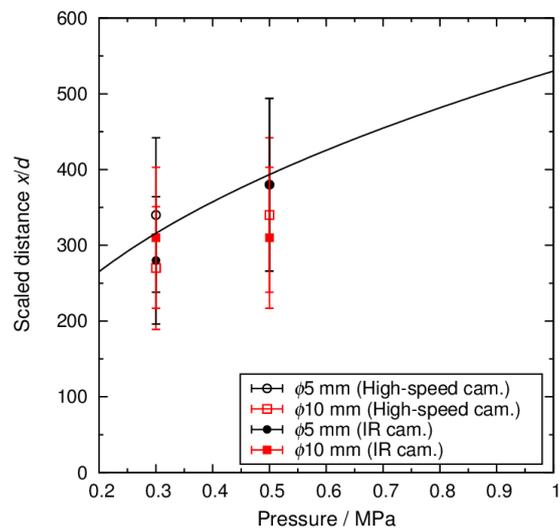


図 4. 1 1 発光到達距離とスケール則 (線は Mogi ら[4-1]による経験式を表す)

4. 5. 3 輻射熱

放出条件 2 および 4 における輻射熱の時間履歴の例を図 4. 1 2 に示す。時間原点は点火時点とした。定常火炎が形成された実験では、同じ放出条件では輻射の値は同等であった。輻射の値は点火直後から急峻に立ち上がり、水素放出が停止されるまでほぼ一定値を示し、定常火炎が形成されていることが確認できる。放出軸上で火炎に最も近い位置に配置した輻射センサー (H1) では出力の振れが大きい、これはジェット火炎の乱れによるものであると考えられる。

輻射強度の時間平均値の距離依存性を図 4. 1 3 に示す。輻射強度は対数軸で表されている。放出軸上の値および非軸(y)方向の値を分けて記してある。火炎は軸方向に長いため、x 方向と y 方向における同距離での輻射強度は一般的に x 方向の方が強い傾向にあった。

前述の水素濃度分布と同様の考え方に則り、距離をノズル直径(d) によって規格化し、さらに輻射強度の距離依存性が配管内圧の平方根に比例するというスケール依存性を仮定して圧力 1 MPa に換算した。結果を図 4. 1 4 に示す。図は両対数で表されている。放出軸(x)方向への換算距離依存性は、すべての条件において同一直線上の値で表すことが可能であった。一方で非軸方向は放出孔径により換算距離依存性が異なる結果となった。これは火炎の側面から輻射を計測する場合において、火炎サイズの変化に依らず輻射センサーの位置を固定したためであると考えられる。遠方の値ほど火炎サイズの効果は相対的に小さくなるため、互いに近い値に漸近する傾向にある。また、火炎に近い場所での非軸方向の輻射強度の換算距離依存性は、両対数グラフ上でもやや直線から逸れる結果となっているが、これも火炎の空間的広がりの影響であると考えられる。

放出軸上における 1 MPa 換算の輻射強度は近似的に $1.2 \times 10^{13} (x/d)^{-3.4} \text{ W m}^{-2}$ と表すことができる (図 4. 1 4 左の直線)。測定値からの相対誤差の根二乗平均は $\pm 18\%$ であり、その二倍の $\pm 36\%$ を近似式の誤差として設定する。発生源が点である場合は、輻射強度は距離に対して逆 2 乗の依存性を持つことが予想されるが、本実験ではより急激な減衰を示す結果が得られている。これは、水素火炎における輻射熱の発生源は主に高温の水蒸気であり、それは火炎下流において広範な空間領域に分布するため、輻射の発生源が点であるという近似が成立しないことが主要因であると考えられる。

人体に危害を及ぼすとされる輻射熱流束の閾値として、 1.6 kW m^{-2} および 4.7 kW m^{-2} が用いられる[4-2]。人体が輻射熱流束から受ける危害の程度を表す量として、熱照射量 (thermal dose) が挙げられる。これは輻射熱流束の 4/3 乗に暴露時間を乗じた値である。水素火炎からの輻射は主に赤外領域に拠るものであり、その場合、I 度、II 度、III 度の熱傷を負う目安の熱照射量はそれぞれ 105、290、1000 (kW m^{-2})^{4/3}s とされている[4-2,4-3]。熱照射量が 105 (kW m^{-2})^{4/3}s となる暴露時間は、輻射熱 1.6 kW m^{-2} の場合約 56 秒、 4.7 kW m^{-2} の場合約 13 秒である。また、後者の場合、約 37 秒の暴露で II 度熱傷、約 2 分間の暴露で III 度熱傷の目安熱照射量となる。前述のスケール則 (輻射強度近似式) に基づき、輻射強度が 1.6 kW m^{-2} および 4.7 kW m^{-2} となる換算距離を配管内圧毎に求めると、図 4. 1 5 の通りとなった。到達

距離の誤差は、前述の輻射強度の近似式とその誤差から換算することで求めることができ、その値は $\pm 11\%$ となった。この値を図4. 15中にエラーバーとして示す。

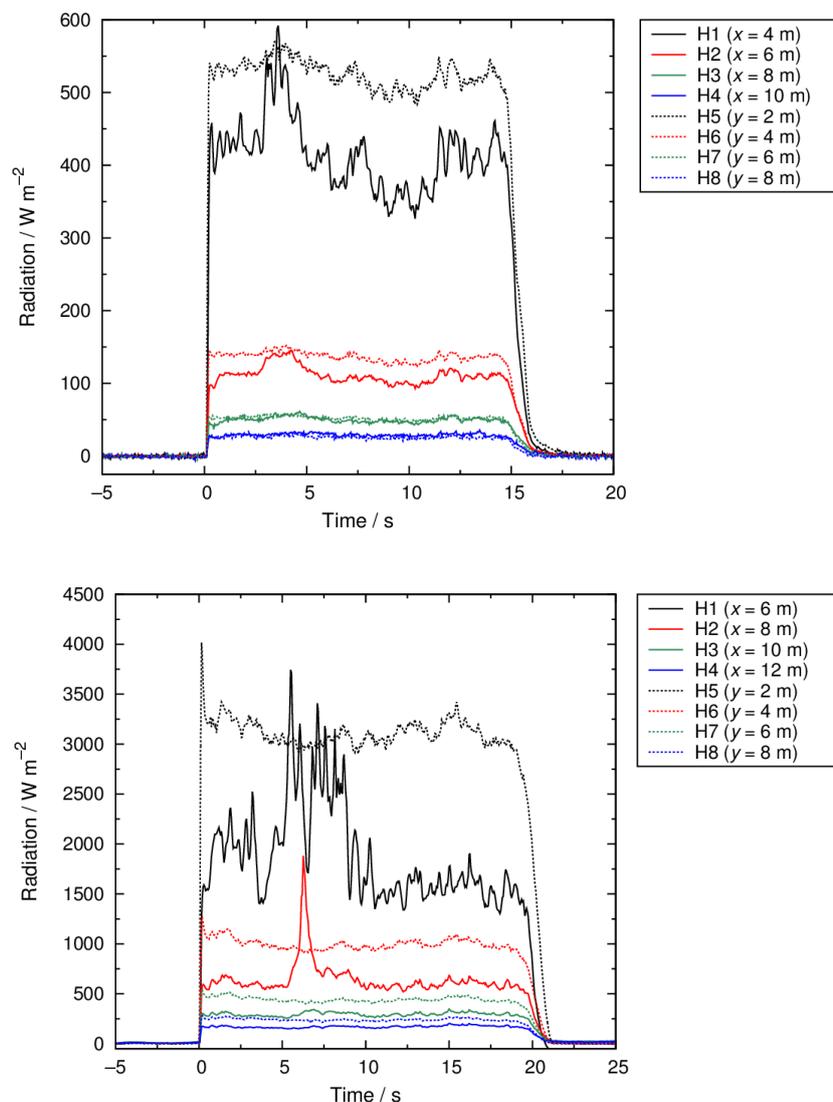


図4. 12 放出条件2（上）および4（下）における輻射熱の時間履歴

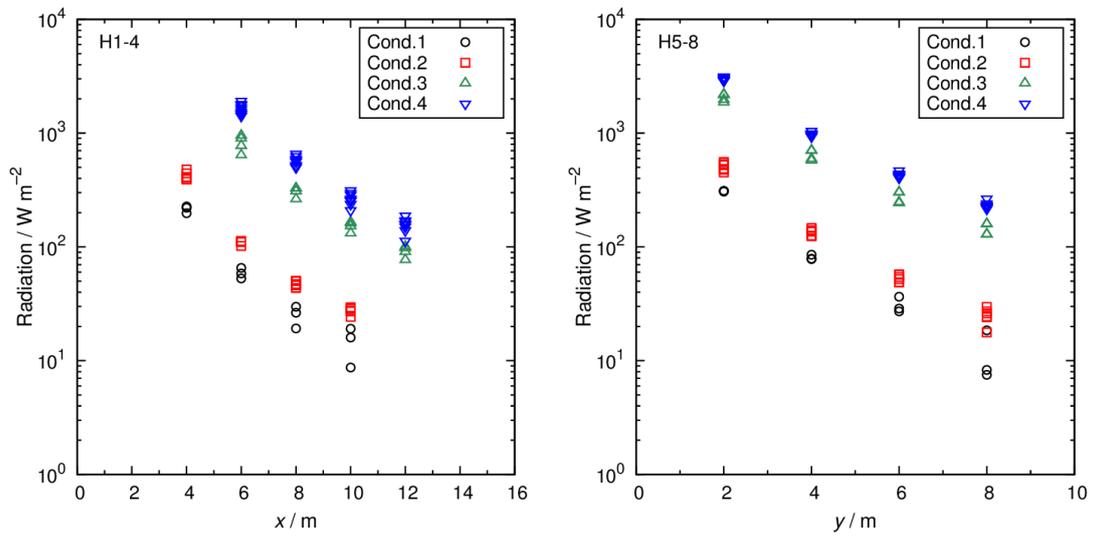


図4. 13 放出条件1～4における各計測点での輻射強度

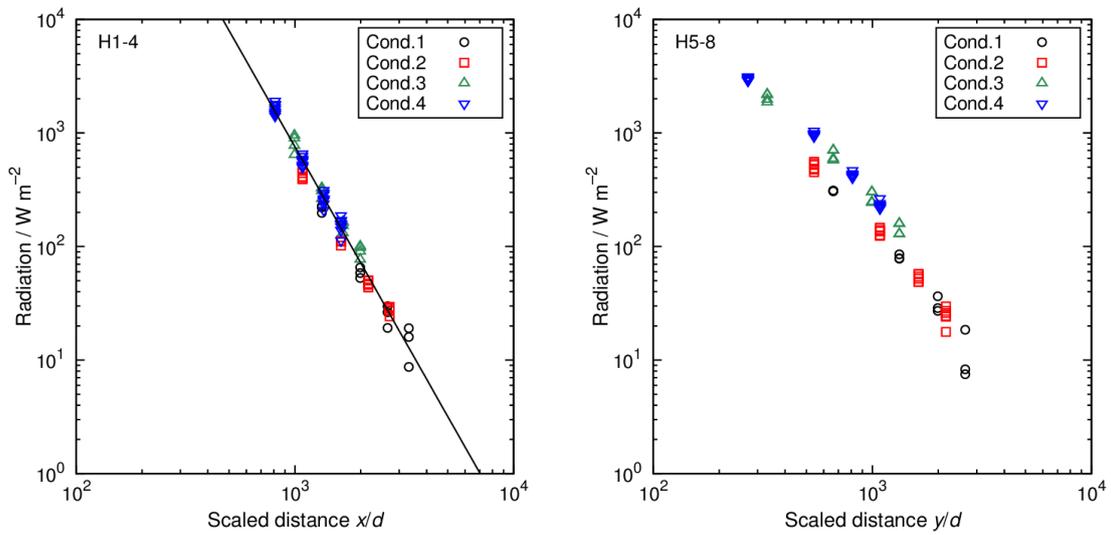


図4. 14 スケール則（本文参照）を仮定して求められた、輻射強度の換算距離依存性（配管内圧 1 MPa 換算）

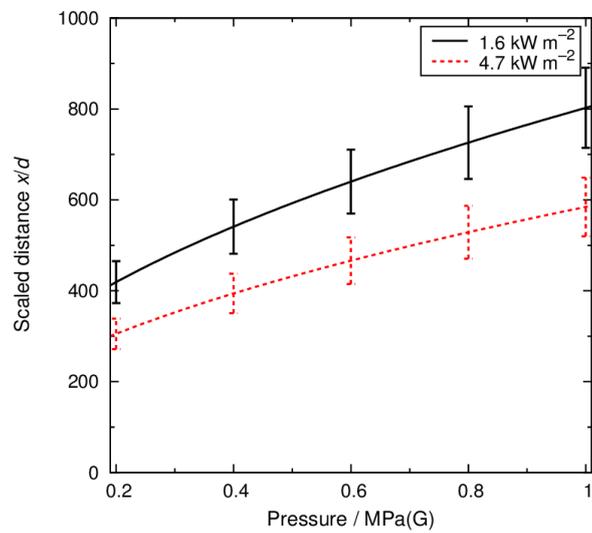


図4. 15 スケール則（本文参照）を仮定して求められた、輻射強度が 1.6 kW m^{-2} および 4.7 kW m^{-2} となる換算距離の配管内圧依存性

4. 5. 4 温度

放出条件 2 および 4 における熱電対の配置と温度の時間履歴の例を図 4. 16 と 4. 17 に示す。図示した熱電対の配置は一例であり、実験毎に位置を変化させながら繰り返し計測を行った。熱風による影響評価に資するため、計測位置は火炎下流における比較的低温の領域とした。例えば図 4. 16 の条件では、火炎の発光部の長さは 1.9 m 程度であったが、3 m の位置においても温度は約 250°C に達した。火炎下流における観測であるため、これらの計測値は流れの乱れや風況の影響を顕著に受ける。本実験における 1 回の計測時間は 10～20 秒程度であり、いくつかの条件では繰り返し測定を行っている。ここではそれらの各計測時間内における最高到達温度を用いて評価を行う。

各放出条件における到達温度の距離依存性を図 4. 18 に示す。一般的な傾向として、放出孔からの距離 x に対してほぼ単調に減少していること、放出孔からの距離が遠くなるほど、より高所での到達温度が上昇していることが示された。後者は、火炎下流では高温の水蒸気を含む空気が上昇気流を引き起こしていることに起因すると考えられる。

計測は全て風速 3m/s 以下の条件下で行っているが、風況の影響のため、同一の放出条件、同一計測位置においても計測値にばらつきが生じている。風の影響を網羅的に調査することは不可能であるため、ここでは暫定的に到達温度の最大値を用いて評価を行い、風況変化のシミュレーション結果と合わせて評価値にマージンを設定する。

一般的に、60°C 以下の温度であっても、熱源に長時間接触するにより低温熱傷を引き起こすことが知られているが、熱源が（蒸気を含む）気体であることを考慮し、ここでは暫定的に、70°C および 200°C を閾値として評価を行った。なお、前者の 70°C は、1 秒以内の接触で皮膚組織の破壊が始まる[4-4]とされる温度である。放出孔からの相対高さ 0～2 m ($z=1.5\sim 3.5$ m) における到達温度の最大値を内挿することにより、各放出条件における 70°C および 200°C 到達距離を求めた。放出条件 1, 2, 3, および 4 における 70°C 到達距離はそれぞれ 4.2, 5.8, 8.9, および 10.8 m、200°C 到達距離はそれぞれ 2.7, 3.5, 6.2, および 8.1 m と求めた。後者は赤外発光到達距離のおよそ 2 倍である。

前述の水素濃度や輻射熱の議論と同様に、放出孔径 d によって規格化された各温度の到達距離が、配管内圧（絶対圧）の平方根に比例するというスケール依存性を仮定したところ、1 MPa 換算の換算到達距離は 4 つの放出条件に依存せず、70°C で約 1500、200°C で約 950 と求めた。スケール則に基づき、到達温度が 70°C および 200°C となる換算距離を配管内圧毎に求めると、図 4. 19 の通りとなった。前述の通り、温度計測は風況影響を強く受けるため、これらの到達距離は暫定値である。本調査研究における火炎形成シミュレーションの結果、風速 3m/s 追い風の条件における高温領域の到達距離は、無風時に比べ 1.5 倍に拡大することが予測されている。従って、本影響評価では、風速 3m/s 以下を前提とした到達距離のマージンとして、実測距離に対して 1.5 倍を設定する。即ち、1 MPa 換算における 70°C 到達の換算距離を 2250、200°C 到達の換算距離を 1425 とし、それぞれ評価する。マージンを考慮した評価結果を図 4. 19 に合わせて示す。

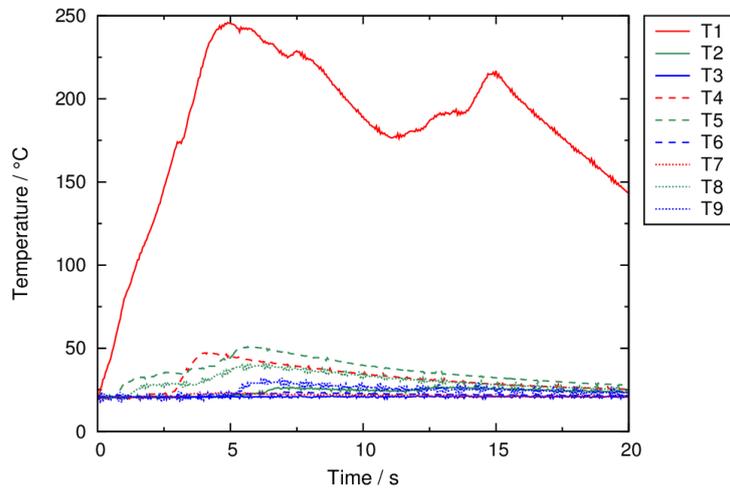
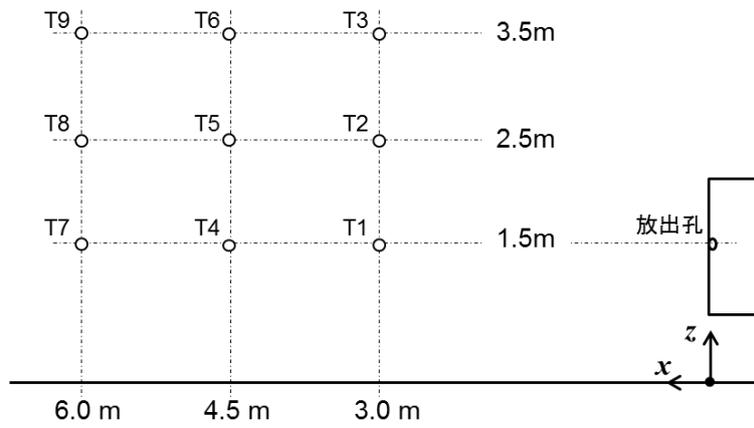


図4. 16 放出条件2における熱電対の配置（上）と温度の時間履歴（下）の例

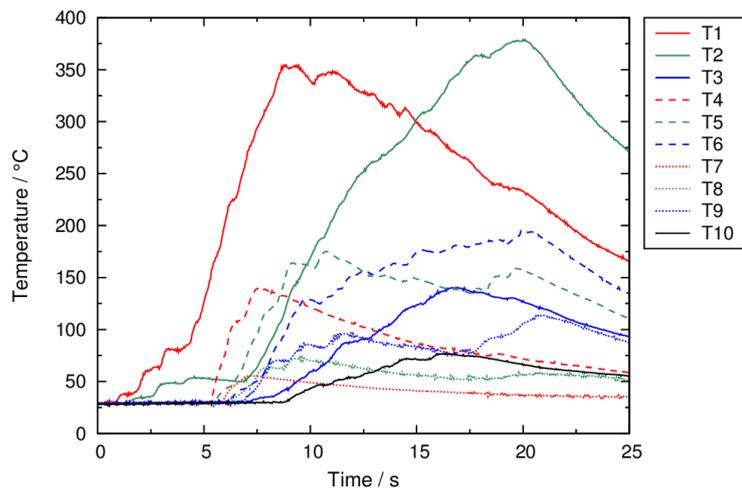
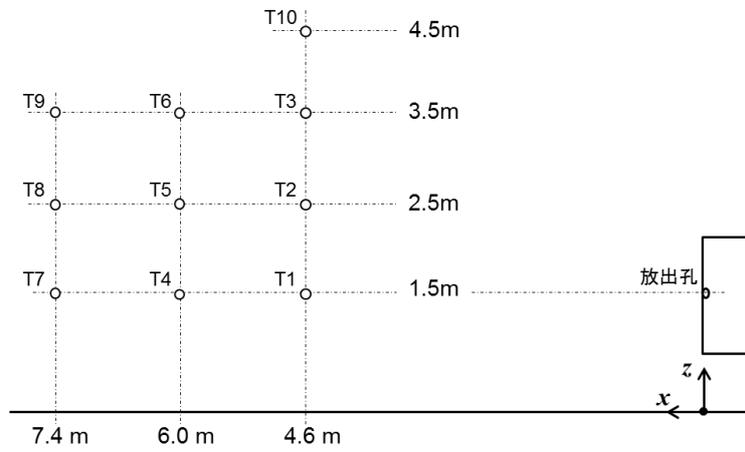


図4. 17 放出条件4における熱電対の配置(上)と温度の時間履歴(下)の例

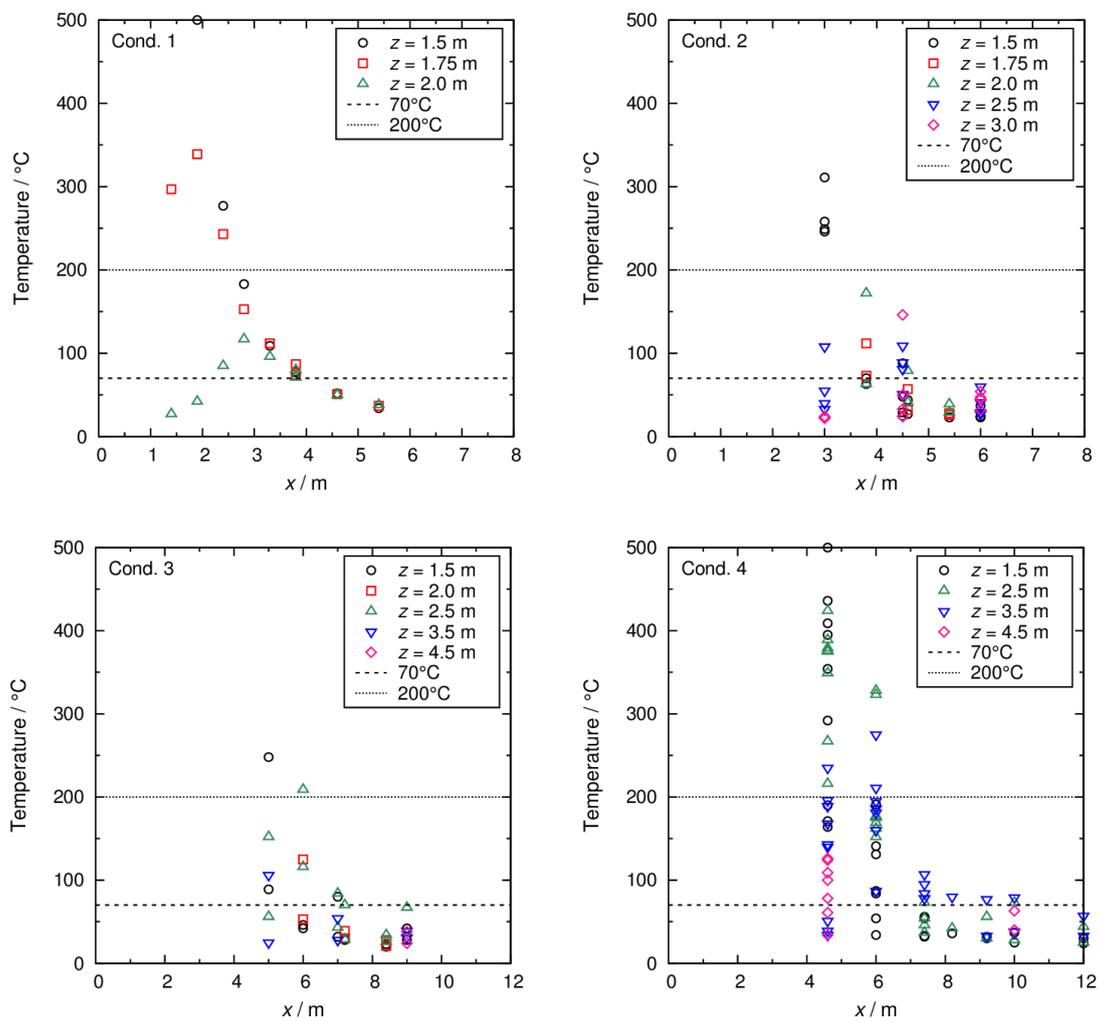


図4. 18 放出条件1 (左上)、2 (右上)、3 (左下)、および4 (右下) における到達温度の距離依存性

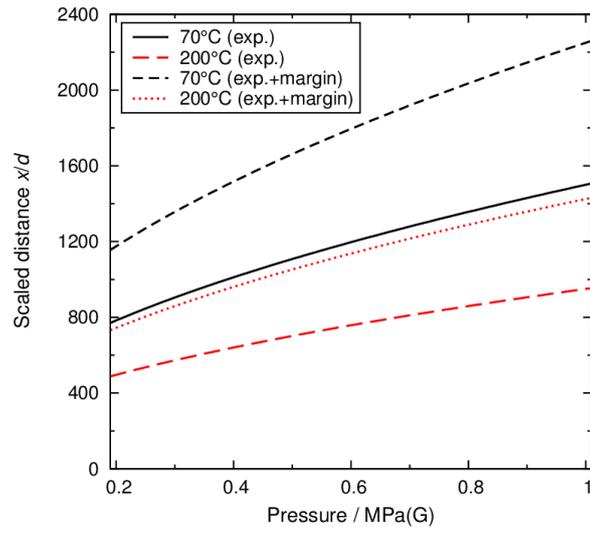


図4. 19 スケール則（本文参照）を仮定して求められた、到達温度が70°Cおよび200°Cとなる換算距離の配管内圧依存性

4. 5. 5 爆風圧

放出条件2および4における、各計測点での着火時の過圧履歴の例を図4. 20および4. 21に示す。点火位置は $x = 0.5 \text{ m}$ での結果である。火炎近傍の計測点では複数の過圧ピークが出現しているが、これは地面における反射の影響であると考えられる。過圧ピーク出現時間の位置依存性は、点火位置からの音速での圧力波の伝播に対応している。また、非軸(y)方向2 mの位置に、軸方向距離を $x = 0, 0.5, 2.0 \text{ m}$ に設置した3つの爆風圧センサーで観測されたピーク過圧はほぼ同等であり、火炎軸に垂直な方向におけるピーク過圧は、この設置位置内では軸方向距離に依存しないということが言える。

放出条件1～4における、点火位置 $x = 0.5 \text{ m}$ でのピーク過圧の距離依存性を図4. 22に示す。火炎軸(x)方向と非軸(y)方向におけるピーク過圧は、同距離ではほぼ同等であった。また、いずれの方向においても、ピーク過圧は距離に対してほぼ反比例の関係にあった。

放出条件2および4における、ピーク過圧の点火位置(x_{ign})依存性を図4. 23および4. 24にそれぞれ示す。放出条件2では、点火位置が $x = 0.25 \text{ m}$ 以下においてピーク過圧が最大となり、より遠方での着火ではピーク過圧は減少した。点火位置 $x = 1.0$ および 1.25 m においても計測を行った。後述の火炎伝播挙動の通り、 $x = 1.0 \text{ m}$ においては放電から約1.8秒間浮き上がり火炎が形成された後、定常火炎となった。一方で $x = 1.25 \text{ m}$ では、短期間浮き上がり火炎が形成された後、火炎は吹き消えた。これらの条件における過圧はいずれも背景雑音以下であった。

放出条件4では、点火位置が $x = 0.5 \text{ m}$ 以下でピーク過圧が最大となり、点火位置が遠方になるに従いピーク過圧は減少する。本放出条件では点火位置 $x = 2.5, 2.75$ および 3.0 m においても計測を行っている。 $x = 2.5 \text{ m}$ では点火直後に一瞬浮き上がり火炎が形成された後、上流に伝播し定常火炎となった。 $x = 2.75$ および $x = 3.0 \text{ m}$ では着火したものの、火炎は瞬時に吹き消えた。

二つの放出条件に共通する傾向として、ある一定距離以下で着火した場合のピーク過圧には点火位置依存性は見られないということが言える。このことから、放出孔近傍で着火し下流方向に火炎が伝播する場合にピーク過圧が最大となると考えられる。

次に、放出条件4において、放出開始から点火までの時間がピーク過圧に与える影響を計測した結果を図4. 25に示す。放出開始直後、放出開始後2秒、放出開始後定常に達した時点において、それぞれ火花点火を行った。放出開始直後の点火は、放出前から10 Hz周期で連続的に放電することで行った。放出開始後2秒時点では放出孔付近の配管内圧は上昇中であり、点火時点では約0.45 MPaであった。結果から、放出が定常となった後に着火した場合、ピーク過圧が最大となることが確認された。

最大ピーク過圧の距離依存性は近似的に $0.85 (x [\text{m}])^{-1} \text{ kPa}$ (放出条件2)および $3.4 (x [\text{m}])^{-1} \text{ kPa}$ (放出条件4)と表される。 y 方向も同様である。これらの結果から、ピーク過圧は放出孔径の2乗に比例(放出断面積に比例)するとの仮説が立てられる。また、放出条件によってピーク過圧が最大となる距離は変化するものの、同じ放出孔径におけるピーク過圧の計

測結果（図4.22）から、ピーク過圧は配管内圧（絶対圧）に比例すると推定できる。また、放出条件2および4における上記近似式について、測定値からの相対誤差の根二乗平均は $\pm 18\%$ であり、その二倍の $\pm 36\%$ を近似式の誤差として設定する。

上記スケール則の推定に基づき、いくつかの放出条件における最大ピーク過圧の距離依存性を図4.26に示す。図中の点線は16.5 kPaを表しており、この値は人体への影響として、鼓膜の損傷率が1%となる爆風圧である[4-5]。本実験における条件では1 m地点においてもピーク過圧はこの値を大きく下回るが、放出孔径の2乗に比例するという推定を行っているため、孔径の増加とともに影響範囲は急激に広がるのが分かる。最大ピーク過圧が16.5 kPaとなる距離の、配管内圧依存性を図4.27に示す。最大ピーク過圧は放出孔径の2乗に比例すると推定したため、放出孔径で規格化した換算距離で一般化することは不可能である。しかし他の影響評価結果との比較を容易にするため、ここでは16.5 kPa到達距離を、放出孔径毎に対応する換算距離を用いて示してある。

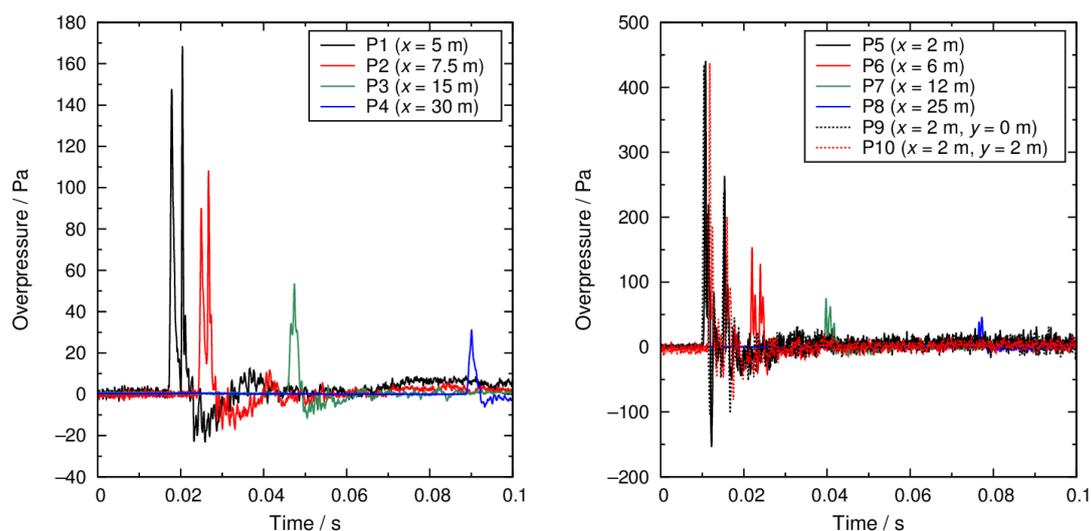


図4.20 放出条件2における着火後の過圧履歴の例
(点火位置 $x = 0.5$ m)

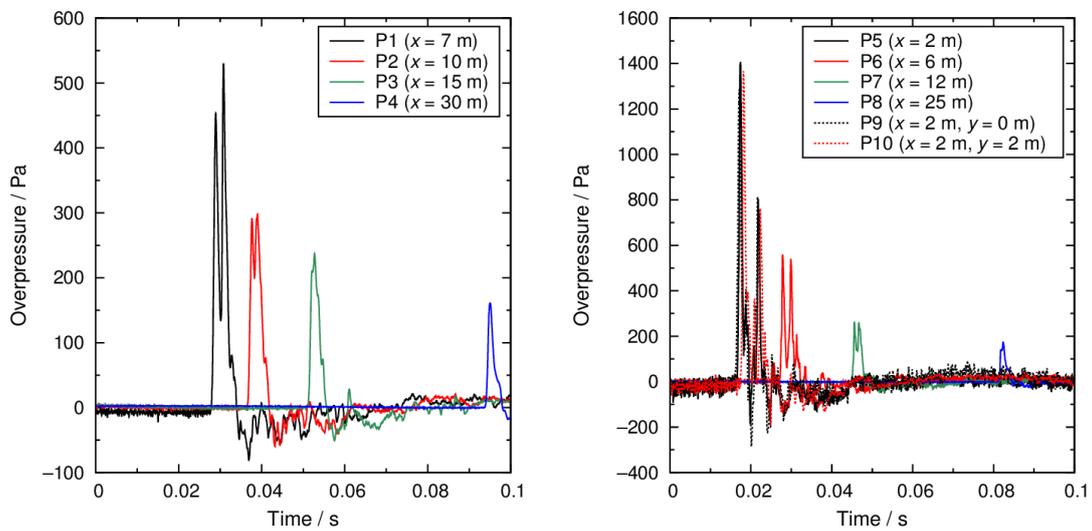


図4. 2.1 放出条件4における着火後の過圧履歴の例
(点火位置 $x = 0.5$ m)

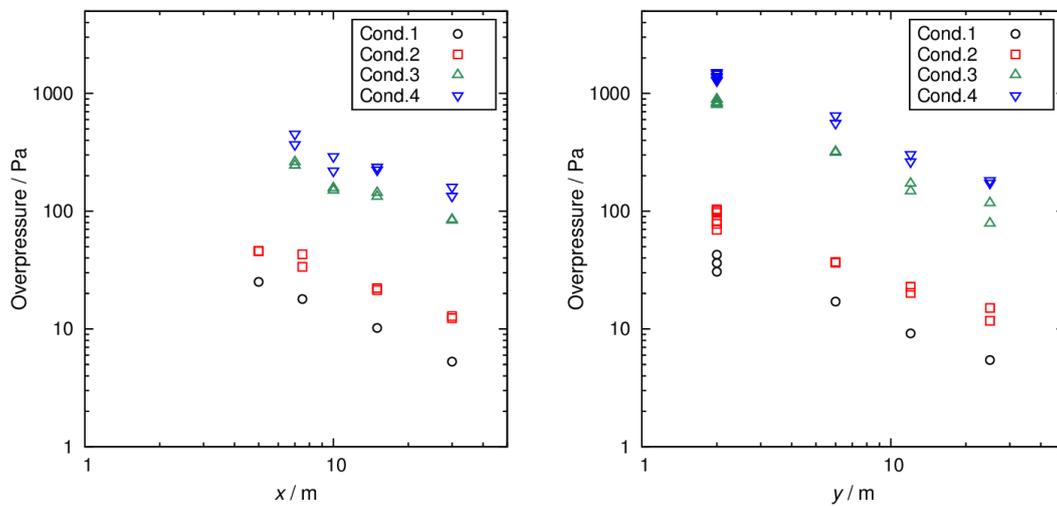


図4. 2.2 放出条件1～4におけるピーク過圧の距離依存性
(左：火炎軸方向、右：非軸方向) (点火位置 $x = 0.5$ m)

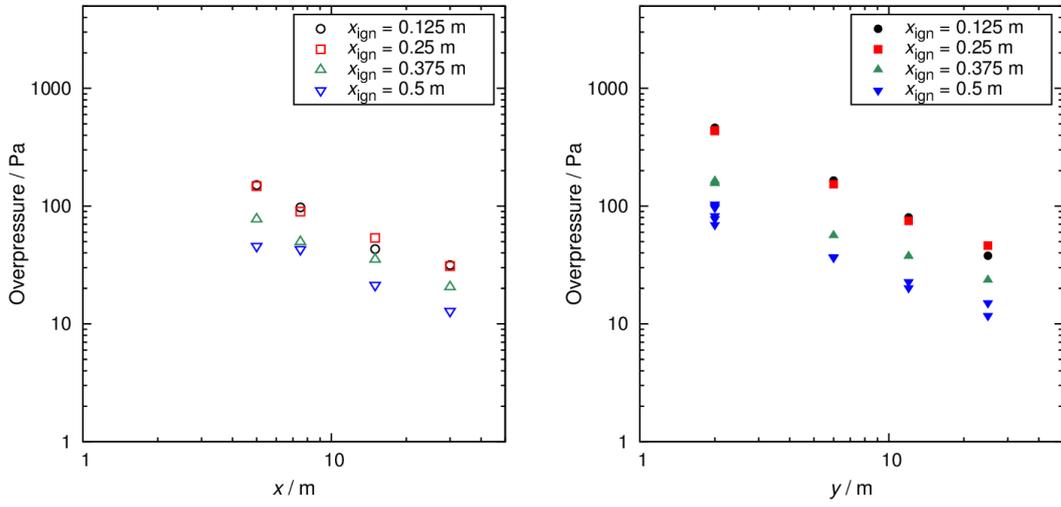


図 4. 2 3 放出条件 2 における点火位置毎のピーク過圧

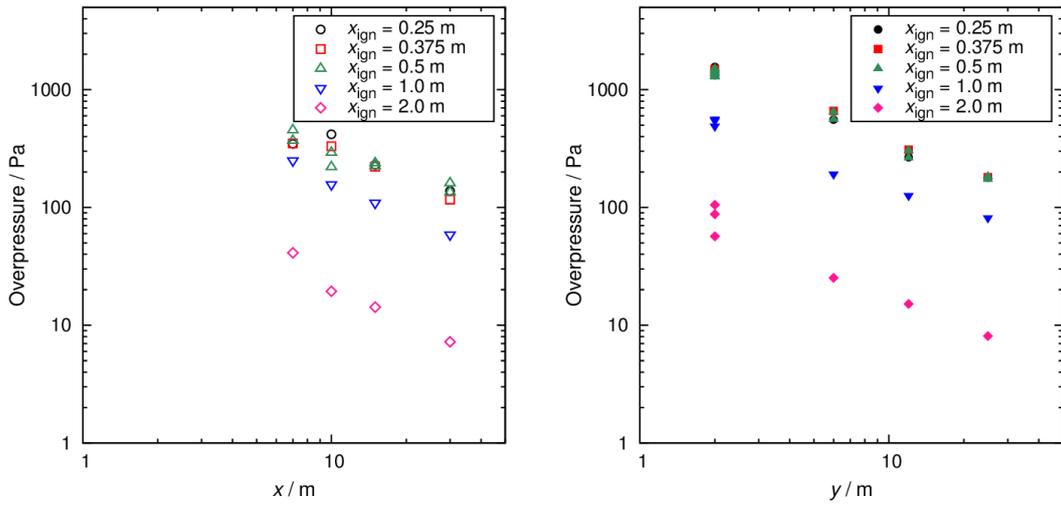


図 4. 2 4 放出条件 4 における点火位置毎のピーク過圧

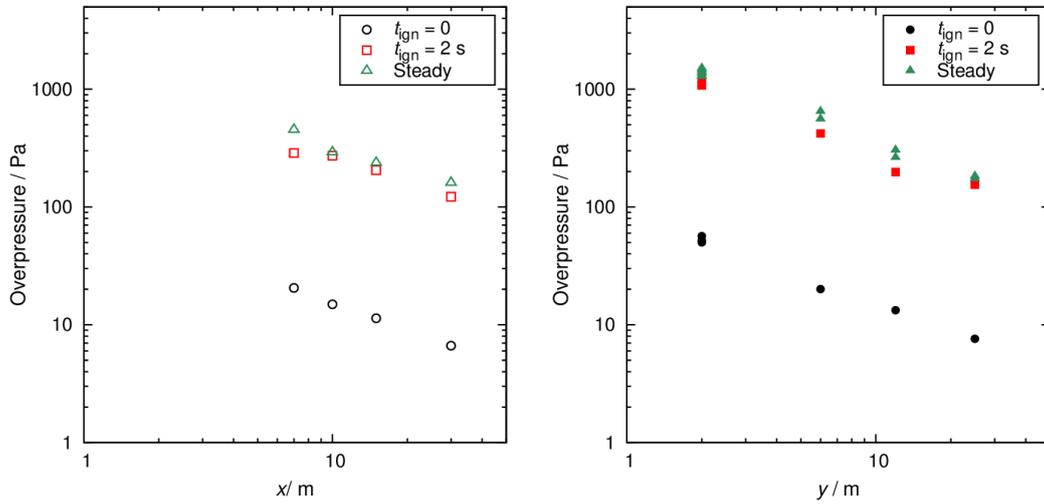


図 4. 2 5 放出条件 4、点火位置 $x = 0.5\text{m}$ における放出時間毎のピーク過圧

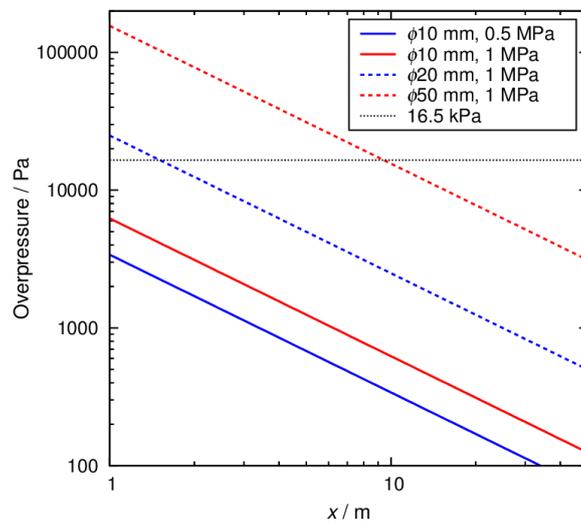


図 4. 2 6 スケール則に基づく最大ピーク過圧の推定

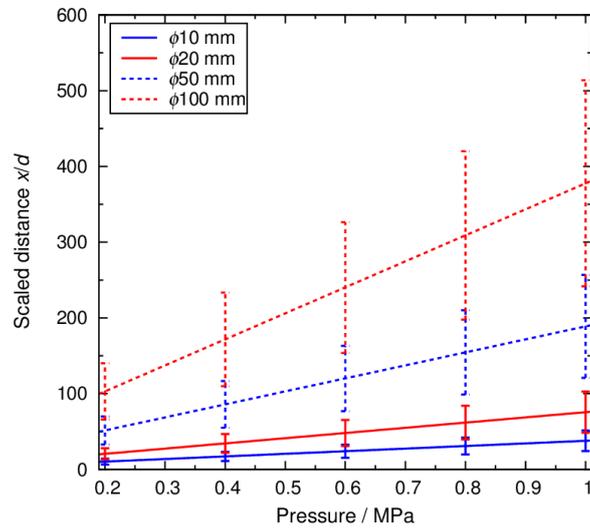


図4. 27 スケール則（本文参照）を仮定して求められた、
最大ピーク過圧が 16.5 kPa となる換算距離の配管内圧依存性

4. 5. 6 火炎伝播挙動

放出条件4、点火位置0.5 mおよび2 mにおける火炎の伝播挙動を図4. 28に示す。点火位置0.5 mでは、点火後約10–20 ミリ秒経過後に点火位置周辺において赤外発光が観測され始め、その後数十ミリ秒の時間オーダーで下流に伝播し、100 ミリ秒経過時点でほぼ定常な火炎が形成された。この傾向は0.5 m未満の点火位置における観測でも同様であり、これらの条件では上流から下流の未燃ガス方向へ火炎が伝播していると考えられ、点火位置が0.5 m以下では爆風ピーク過圧に点火位置依存性が見られなかったことに対応すると考えられる。また、この火炎伝播による発光は、一時的に定常火炎の発光到達距離より遠方まで到達する場合もあった。一方、点火位置2 mの場合、点火後数十ミリ秒経過した時点で点火位置周辺に弱い発光が観測され始め、上流へ向かい伝播した後、火炎が下流側に押し戻され、数百ミリ秒経過後の定常火炎に至る、といった一連の挙動が観測された。上流に火炎が伝播した時点では下流側の気体の多くは既燃であるため、爆風圧の発生が比較的抑えられたものと考えられる。同様の現象は点火位置1 mおよび2.5 mにおいても観測された。また、点火位置2.75 mおよび3 mにおいても点火実験を行ったが、発光は観測されなかった。これらの条件では、輻射センサーおよび熱電対の出力に一時的な反応があり、着火したとは考えられるが、火炎が直ちに吹き消えたものであると見られる。

放出条件2においても同様の観測を行った。点火位置0.125–0.25 mにおいては火炎が上流から下流に向かい伝播し定常化する様子が、点火位置0.5 および1 mにおいては点火位置から上流に向かい伝播した後定常火炎が形成される様子が観測された。ただし点火位置1 mでは、点火位置周辺において約1.8秒程度浮き上がり火炎が保持された後、上流に伝播し定常化した（浮き上がり火炎の発光は観測されず、輻射センサーの出力から形成されていることを確認した）。また、点火位置1.25 mの実験においても浮き上がり火炎が形成されたが、数秒経過後に吹き消えた。

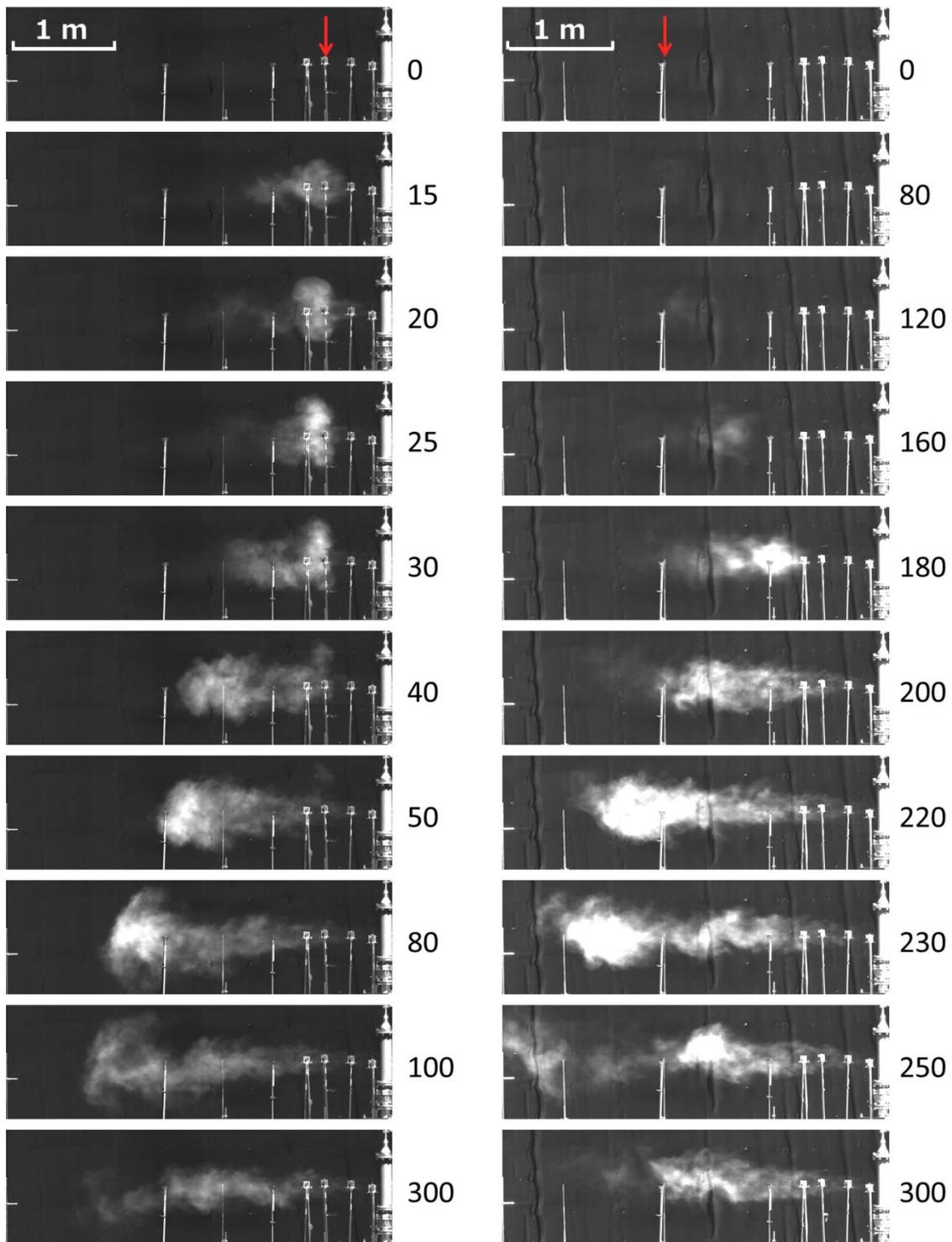


図4. 28 放出条件4、点火位置 0.5 m (左) および 2 m (右) における火炎伝播挙動
 (矢印：電極位置、数値：点火からの経過時間 (ミリ秒))

4. 5. 7 実験とスケール則の総括

水素放出および着火実験により、影響評価に関する距離の指標として、水素濃度、輻射強度、温度、ピーク過圧に関するスケール則を構築した。本実験条件における水素放出流量は、配管内圧と放出孔径から予想されるチョーク条件における流量とよく一致した。チョーク条件においては、放出流量は放出孔の最小断面積（または放出孔径の二乗）および配管内圧（絶対圧）に比例する。水素濃度、輻射強度、温度については、放出孔径で規格化された各到達距離は配管内圧の平方根で整理されたことから、これらの計測結果は放出流量の平方根に比例すると考えられる。一方で爆風ピーク過圧については放出孔径の二乗および配管内圧に比例したことから、放出流量と比例関係にあると推測される。

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、着火源を排除することは困難ではあるが、本調査研究で得られた水素濃度の計測結果およびスケール則は、水素導管の設計・施工時の技術的指針等に資する可能性がある。

着火後の周囲影響に関連する評価結果を図4. 29にまとめる。発光到達距離は直接危害程度に関わる値ではないが、比較のため示してある。人体へ与える影響として、本評価結果では、火炎下流における高温領域による影響が最も顕著であり、続き輻射強度、爆風圧の順番であった。前二者の影響範囲は発光到達距離を大きく超えており、事故発生時のリスク評価では火炎発光部の長さのみならず、これらの熱的な効果を精査し検討に取り入れる必要がある。

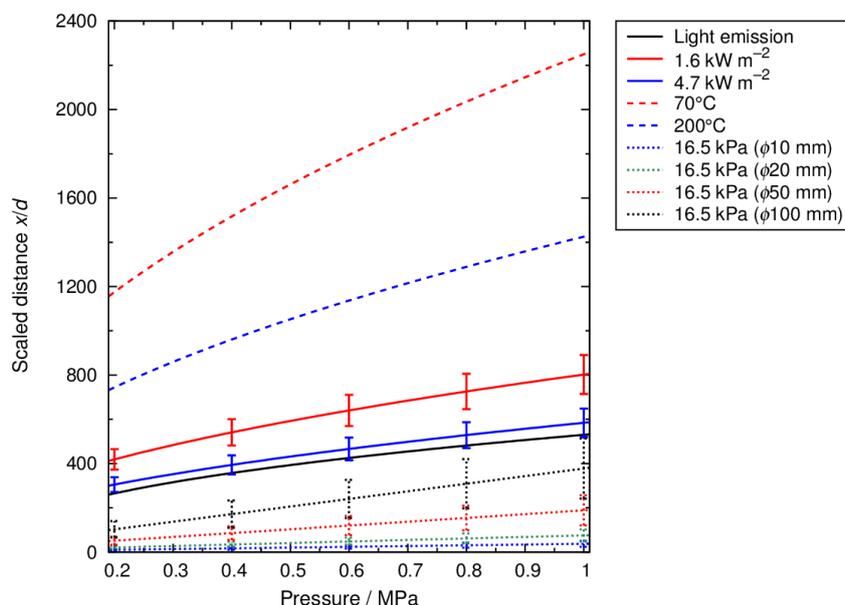


図4. 29 スケール則を用いた各周囲影響項目の評価結果

4. 6 参考文献

- [4-1] T. Mogi and S. Horiguchi, J. Loss Prev. Process Ind. 22. (2009) 45-51.
- [4-2] Sandia Report SAND2009-0874, "Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards".
- [4-3] Contract Research Reports 129/1997, "LD50 equivalent for the effect of thermal radiation on humans".
- [4-4] A. R. Moritz and F. C. Henriques, Jr., Am J Pathol., 23(1947) 695?720.
- [4-5] 産業安全工学ハンドブック (1989)

5. 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、損傷を模擬した漏えい孔からの水素の拡散挙動および着火時の周囲影響について、シミュレーション及び実験によって評価を行った。

シミュレーションでは、放出孔からの水素噴流、爆風ならびに火炎形成シミュレーションを実施し、噴出した水素濃度分布、爆風圧、ならびに周辺に形成される温度分布を調査した。水素噴出では風況影響、爆風では着火位置依存、着火時間依存、火炎形成では風況影響について検討した。放出孔 10 mm、供給圧 0.5 MPa の放出条件において、濃度分布ならびに爆風圧は実験結果と良い一致を示した。また、放出孔 10 mm、供給圧 0.3 MPa 軸上の濃度分布についても実験と良い一致を示した。以上の条件では実現象を再現可能である。毎秒 3 m 程度の風がある場合とない場合とを比較した。追い風があっても水素可燃濃度の放出孔前方への到達距離は同程度で、向かい風がある場合は無風の場合の到達距離の半分以下であった。また、着火後の高温領域拡大範囲に対する風の影響を調べた。追い風の場合、放出孔前方へ 200℃以上の温度領域が到達する距離は無風状態と比して 1.5 倍程度になる結果であった。爆風の着火位置依存では放出孔からの距離 0.6~0.9 m の位置で実験と良い一致を示した。距離 3 m まで離すと爆風圧が顕著に低下するなど定性的に実験を再現できた条件もあるが、2 m 位置では爆風圧が大きくなり採用したシミュレーションは濃度場形成にも依存する燃焼速度を模擬できなかった。

漏えい水素への着火実験による周囲影響把握では、埋設水素導管の損傷を想定し、漏えい孔径 ϕ 5 mm および ϕ 10 mm、供給圧 0.3 MPaG および 0.5 MPaG の合計 4 ケースの着火実験を実施し、放出条件や、放出時間、着火位置が火炎形成や爆風圧に与える影響を調査した。放出時間については、定常放出となった後に着火した場合に爆風圧が最大になることが確認された。また、放出孔から遠方において着火した場合、火炎が上流に伝播することで未燃ガスを消費するため、放出孔近傍での着火に比べて爆風圧が低下することが確認された。従って本調査における条件においては、定常放出時に放出孔近傍にて着火した場合、爆風圧が最大となる。

着火後の周囲影響として、輻射、到達温度、および爆風ピーク過圧を計測した。それぞれ計測値を基にスケール依存の評価式を構築し、影響評価を行った。その結果、火炎下流における高温領域の影響が最も顕著であり、続き輻射強度、爆風圧の順番であった。特に前二者の影響範囲は火炎の発光が観測された領域を大きく超えているため、事故発生時のリスク評価ではこれらの要素を取り入れる必要がある。