

水素ガスの爆発事故対策に関する研究（その1）

— 水素ステーションの爆発事故に対する障壁設置の効果 —

諏訪 好英 米澤 健次
小野 佳之

Countermeasures to Accidents Due to Hydrogen-Gas Explosion (Part 1)

— Effect of protective walls against explosion accidents in hydrogen refueling stations —

Yoshihide Suwa Kenji Yonezawa
Yoshiyuki Ono

Abstract

This research was conducted as a consignment business from NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), and its purpose was to enhance the safety of hydrogen facilities such as hydrogen refueling stations. Characteristics of the hydrogen explosions were studied using the experimental data conducted by IAE and SRII, and the numerical simulations of shock wave propagation by the explosion were performed to study the effect of protective walls. The results of the numerical simulations agreed closely with the experimental results. As a result of the simulations of various conditions, it was found that the reduction effect of explosion overpressure greatly depends on the height of the wall, but not on its configuration.

概 要

本研究ではNEDO（（独）新エネルギー・産業総合開発機構）の委託を受け、水素供給ステーションなど水素関連設備の安全性向上を目的とした一連の検討を進めている。本報では、爆発事故を想定して実施された既往の実験結果をもとに爆発衝撃圧の伝播特性に関する数値シミュレーションを行い、障壁による圧力低減効果を考察した。数値シミュレーションの結果は既往の実験結果ともよい一致を示し、障壁による衝撃圧低減効果は障壁の断面形状によらず、その高さに大きく依存することがわかった。

1. はじめに

水素エネルギーは化石燃料に依存しないこと、環境影響がほとんどないことから、次世代エネルギーとして最も有望と言われている。現在、燃料電池自動車をはじめとする水素利用技術が実用段階となりつつあり、各地で水素供給ステーション等の実証プラント建設が進められている。普及段階では、より多くの水素インフラ施設が整備されていくものと予想されるが、水素は本来引火性、爆発性の高い物質であるため、安全技術の確立と関連法規の規制再点検が普及に向けた当面の最重要課題である。特に将来、これらの水素インフラ施設が一般の生活・居住域近くに広く浸透していった場合、保護すべき周辺の人的、物的財産は第三者の所有物であり、安全の確保は社会的な義務として重要となってくることが考えられる。

本研究では、水素ガスの爆発衝撃圧力に関する伝播特性およびこれによる構造物破壊現象等に関する基礎的な現象解析を実施している。本報では、既往の水素ガス爆

発実験結果に基づく考察と数値シミュレーションに基づき検討した障壁による衝撃圧力の低減効果について報告する。

2. 水素ガスの爆発衝撃圧力に関する考察

2.1 爆発に伴う圧力波形

平成13年度に実施されたNEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）のWE-NET (World Energy Network) IIタスク2において、IAE（（財）エネルギー総合工学研究所）がSRII (Stanford Research Institute International) と共同で実施した半開放系(平坦地表面で周囲に障害物が無い場合)における水素ガス爆発実験の結果が報告されている^{1,2)}。この実験は、容積5.3m³の立方体テント(2.25m×2.25m×1.05m)内に常圧水素ガスを充填し、テント膜の除去と同時に起爆させたときの爆発衝撃圧力等を周囲40mまでの範囲における各点で計測したもので、初期水素ガス濃度、着火方法等を変化させ、さまざまな条件で爆発させたときの結果が得られている。

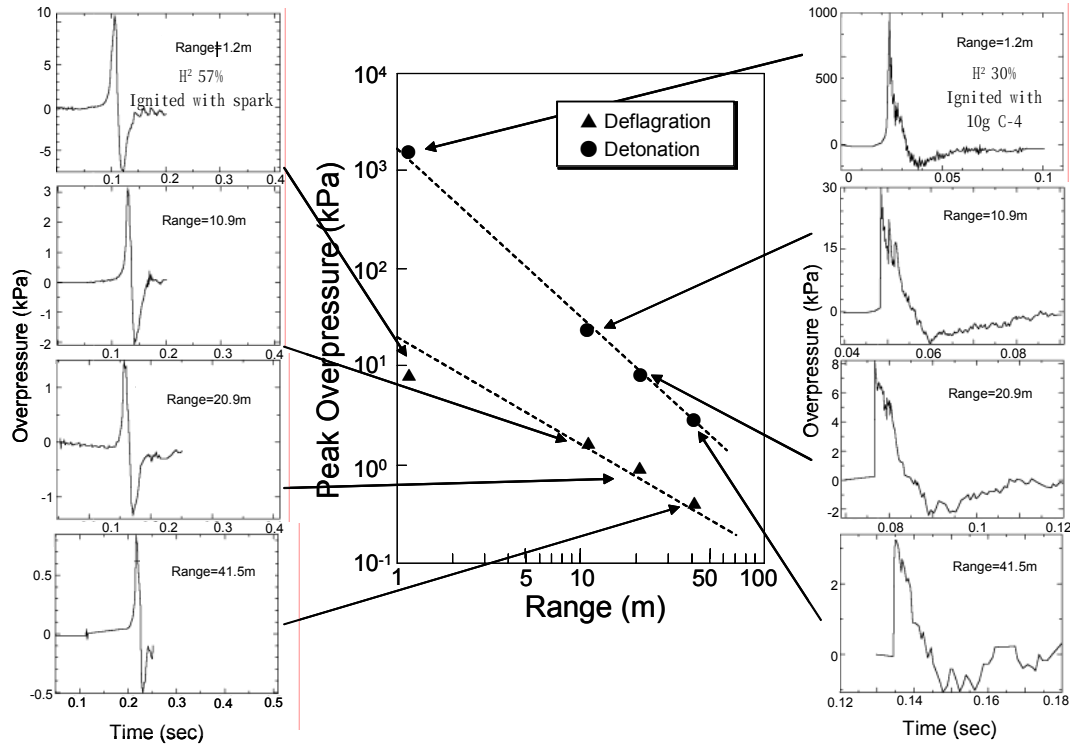


Fig. 1 水素ガスの爆発による衝撃圧力の伝播状況（文献1の結果を再整理したもの）
Propagation of Overpressure caused by the Explosion of Hydrogen Gas (Adapted from paper[1])

IAE-SRIIの実験結果を、爆発源からの距離ごとのピーク圧力としてまとめたものをFig.1に示す。水素ガスの爆発現象には、比較的緩やかな爆燃(deflagration)と反応の激しい爆轟 (ばくごう: detonation)とが知られている³⁾。Fig.1においても、爆轟による衝撃圧力のピークは爆燃の場合に比べ1桁以上大きな値を示しており、爆燃、爆轟の違いを明確に読み取ることができる。また図には代表的な測定点での圧力の時間変化を併記してあるが、両者の圧力波形にも大きな違いが認められる。すなわち、爆燃の場合には、同程度の大きさの正圧、負圧が交互に現れる典型的なN型波形が認められるのに対し、爆轟による圧力波形では、ピーク圧力までの立ちあがり非常に急峻な三角波であり、正圧域がこれに続く負圧域に比べ卓越している。これらは、爆轟条件にいて高速で伝播する燃焼反応によるものと考えられ、IAE-SRIIの実験でも、水素テント内に設置したイオンペン計測結果から2,000m/s近い反応伝播速度が得られている。

2.2 爆発衝撃波の伝播特性

Fig.1には爆発源からの距離ごとに観測された圧力波形を併記したが、爆燃の場合、爆轟の場合とも波形の特徴は爆発源近傍から遠方までほとんど変化しないことである。爆発燃焼反応の過程で形成された衝撃波は強いソリトン性を有しており、十分遠方までその波形を持続するものと考えられる。

IAE-SRII実験結果について、各測定点における正圧ピークおよび負圧ピークの通過時刻から、これらの伝播速度を計算した結果、爆燃、爆轟条件のいずれの場合も

Table 1 基礎方程式
Fundamental Equations

連続の式	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$
運動量方程式	$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (p+q)}{\partial x_i} + \frac{\partial \pi_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{i,3} \rho g$
エネルギー方程式	$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \frac{\partial \rho I u_i}{\partial x_i} = -(p+q)D + \pi_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$
$p = p(\rho, I), \quad \pi_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \pi_{ii} = 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda D$ t: 時間, x: 座標, u: 速度, ρ: 密度, π: 応力, p: 流体圧力, q: 人工的な粘性圧力, g: 重力加速度, I: 内部エネルギー, D: 速度の発散量, λ: 粘性係数 μ: せん断粘性係数	

水素テント外部における衝撃波伝播速度は330～340m/sの範囲にあり、ほぼ音速となっていることがわかった。このことから、水素ガスの爆発燃焼反応はテント内およびその近傍で既に終了し、その後は空気中を衝撃波が伝播する現象に移行しているものと考えられる。

3. 爆発衝撃波の数値シミュレーション⁴⁾

3.1 数値シミュレーションによる現象の再現性

IAE-SRIIの実験と同様の系を想定し、体積モル濃度30%、容積5.3m³の水素ガスを爆轟条件で爆発させた場合の衝撃波伝播過程を数値シミュレーションした。基礎方程式はTable 1に示したとおりである。解析にはLos Alamos研究所の公開コードBAAL⁵⁾を用い、ICed-ALE法^{6),7)}

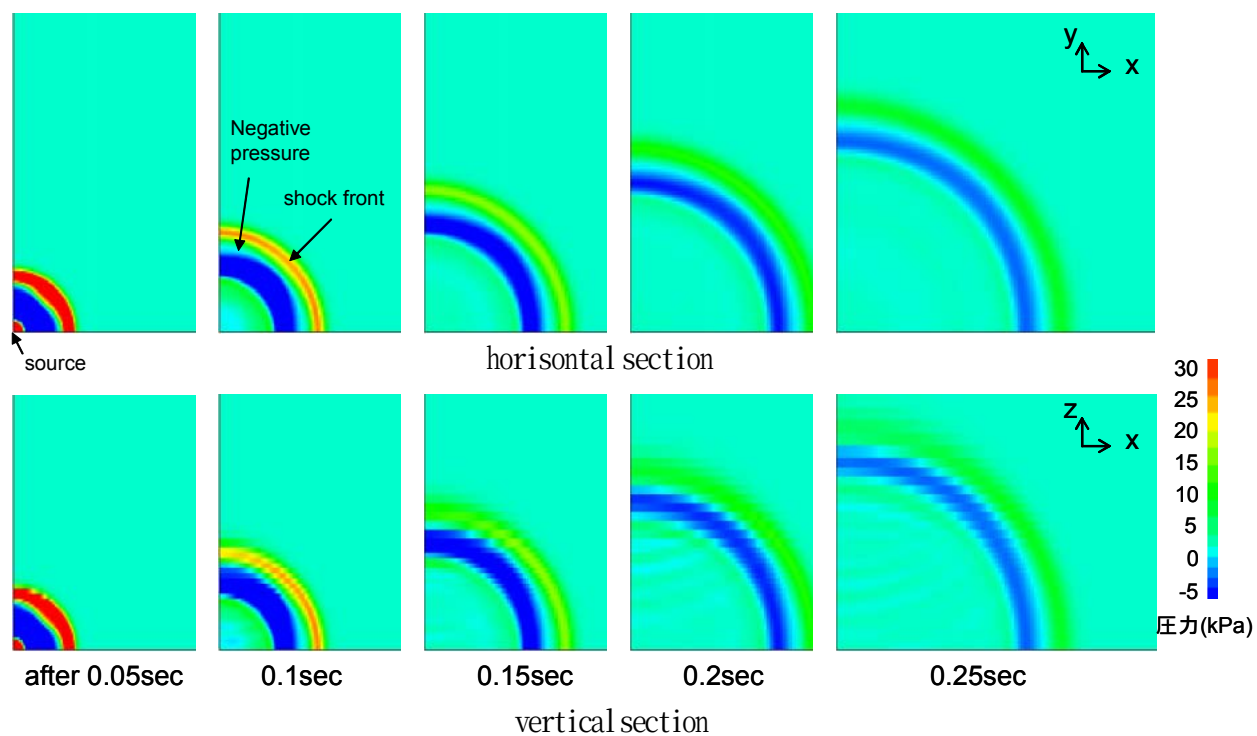


Fig.2 半開放空間での水素の爆発衝撃波伝播状況シミュレーション結果
Simulated Propagation of Shock Wave caused by the Explosion in Semi-Open Space

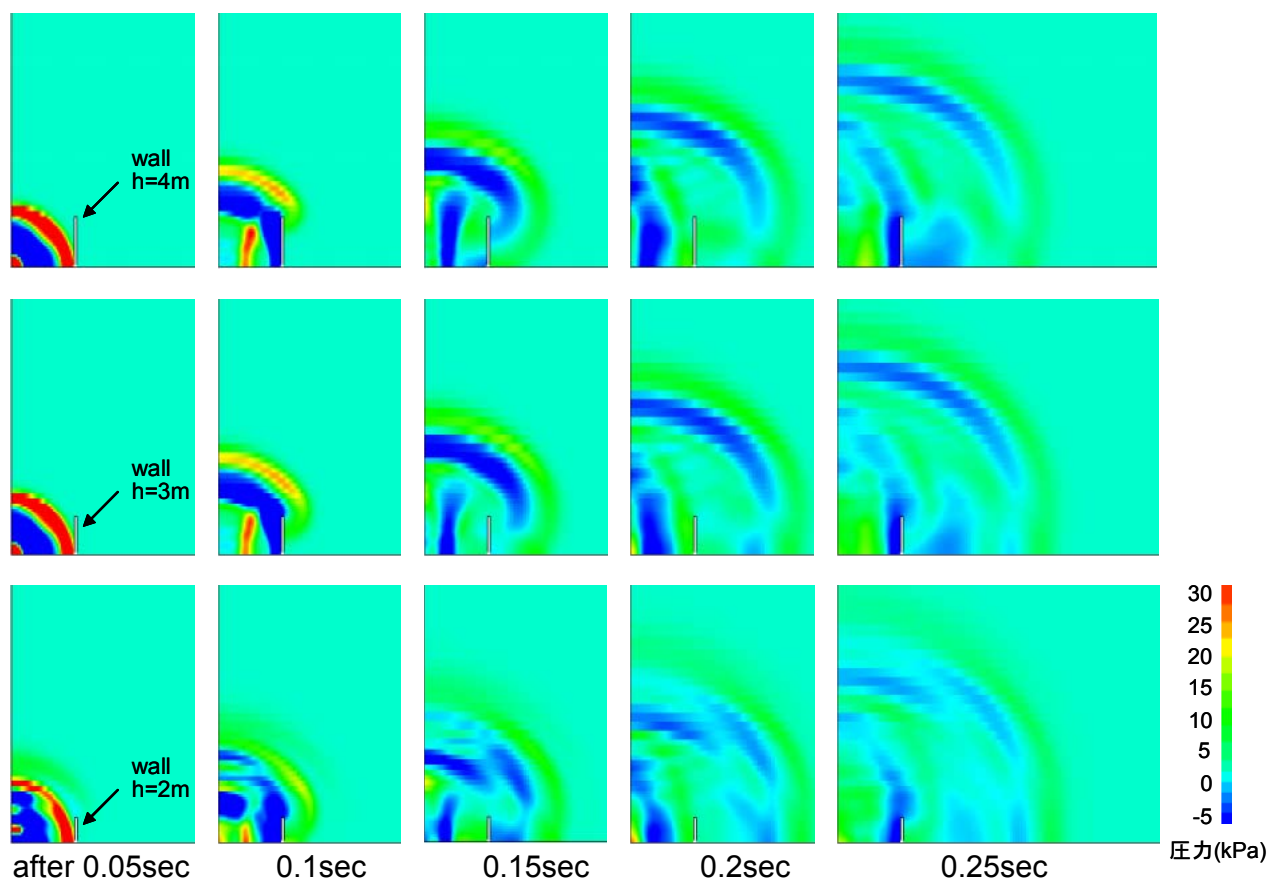


Fig.3 障壁を設置した場合の爆発衝撃波伝播状況シミュレーション結果
Simulated Propagation of Shock Wave when the Protective Walls are constructed

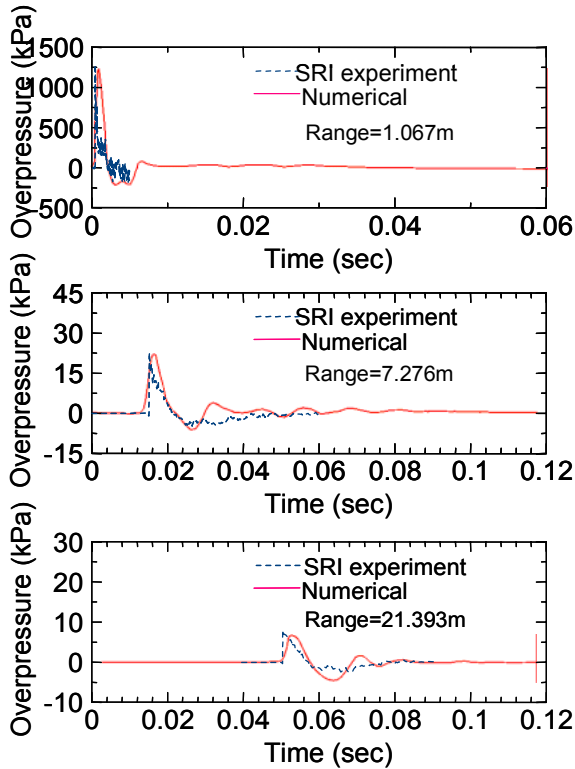


Fig.4 圧力波形の数値シミュレーション結果
Simulated Waveform of the Overpressure

による非定常解析を実施した。解析には爆発源の中心を通る鉛直断面を対称面とした4分割モデルを用い、水平方向50m、上空40mまでを解析領域とした。計算格子数は $150 \times 150 \times 100$ 、爆発源から障壁近傍までの領域については格子幅を細かく、遠方および上空では徐々に大きくなるように格子分割を行った。障壁表面の最小格子幅は0.1m、上空の最大格子幅は1.5mである。なおここでは、爆轟による反応そのものは扱わず、Fig.1に示した実験結果の圧力減衰カーブから予測される初期圧力(1,300kPa)が水素tent内に瞬時に生じるものと仮定し、その後の衝撃波伝播状況を解析することとした。

半開放系における爆発を想定したときの数値シミュレーション結果をFig.2に示す。図は爆発源を通る鉛直断面、水平断面内圧力分布の時系列変化を示している。本シミュレーションでは、初期水素位置としてIAE-SRIIの実験系と同様に立方体領域を想定したが、爆発後すぐに圧力分布は同心半球状となり、周囲に伝播していくことがわかる。

Fig.4は、数値シミュレーションにより得られた各点での圧力の時間変化である。爆発衝撃波は特に圧力の立ち上がりにおいて非常に急激な変化を示すため、数値シミュレーションにより波形そのものを精度よく再現することは困難である。しかしFig.4によれば、数値シミュレーションの結果は、圧力のピークやその距離減衰特性に関する実験結果を全体的によく再現している。したがって、次節で述べる応用的な解析を行うことは十分に可能であるといえる。

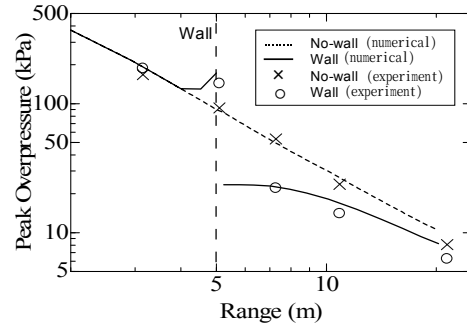


Fig.5 各位置における圧力ピークの実験との比較
Comparison of Simulated and Experiments on the Maximum Overpressure Distribution

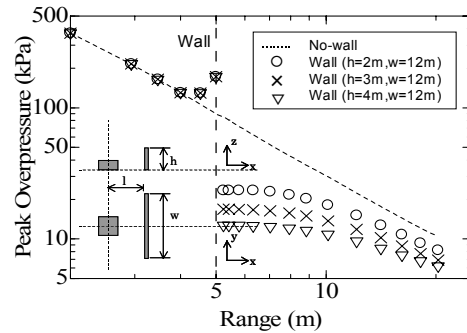


Fig.6 障壁高さを変えた場合の圧力ピーク値の比較
Comparison of Maximum Overpressure Distribution for Walls with Different Height

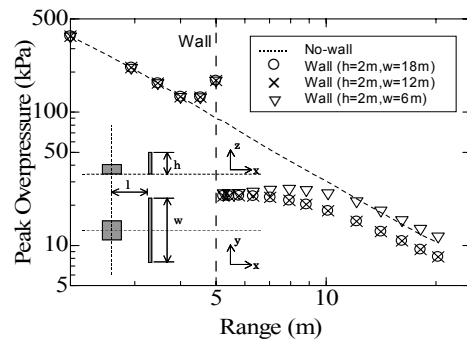


Fig.7 障壁高さを変えた場合の圧力ピーク値の比較
Comparison of Maximum Overpressure Distribution for Walls with Different Width

3.2 障壁による衝撃圧力低減効果

一般高圧ガス保安規則では、鉄筋コンクリート製、コンクリートブロック製などの障壁構造を規定しているが、いずれも高さが2m以上であることを必要としている⁸⁾。3.1節と同様の系において爆発源から5mの位置に高さ2~4m、幅12mの障壁を設けた場合を想定し、シミュレーションを実施した。なおここでは障壁を剛体と仮定し、地表面に対しても剛に固定されているものとした。

鉛直断面圧力分布の時系列変化として整理した結果をまとめてFig.3に示す。障壁を設置した場合、Fig.2に認められた同芯半球状の圧力分布が大きく崩れ、障壁前面では反射波の発生を、また障壁背面では衝撃波の回り込みおよびこれに伴う複雑な分布状況を生じることがわ

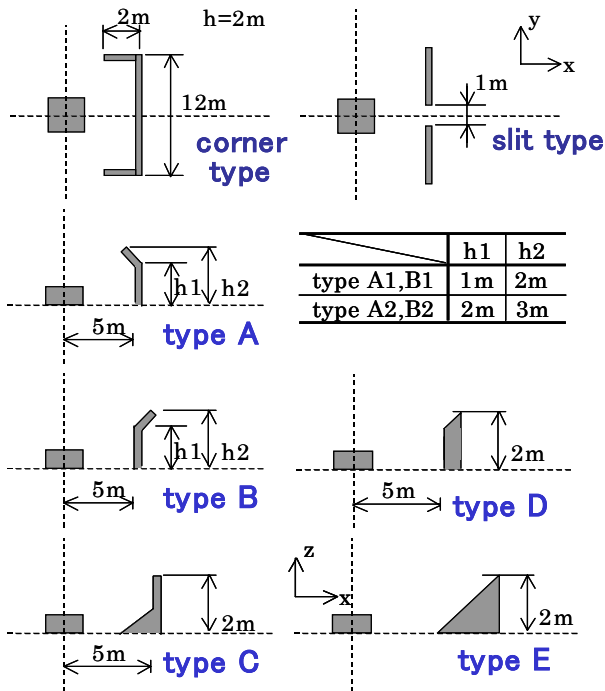


Fig.8 想定した障壁形状

Studied Layouts and Sections of Protective Walls

かった。

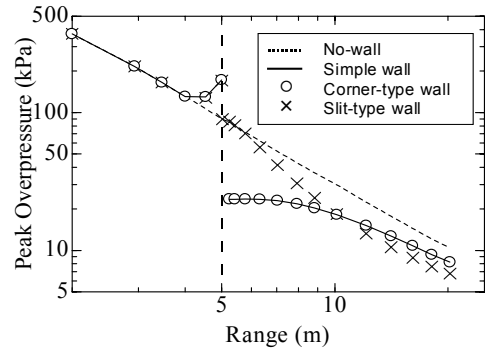
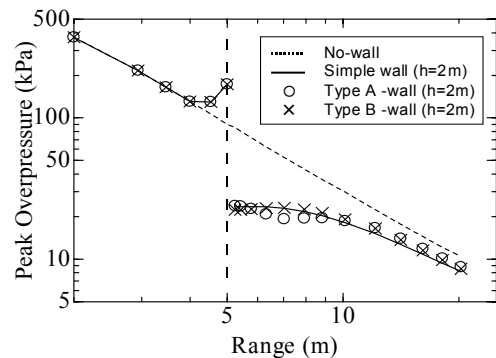
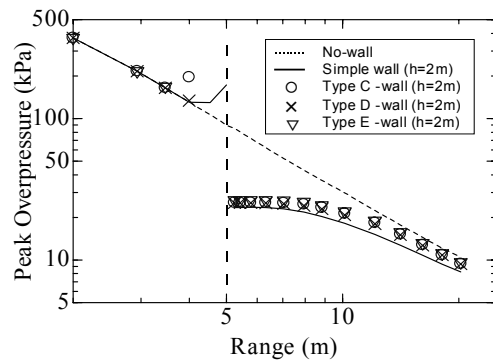
高さ2mの障壁を設置した場合について爆発源からの距離ごとに圧力ピークを集計した結果をFig.5に示す。障壁を設置した場合、その前面に圧力上昇が認められ、障壁を設置すると、その背面および後流側10m程度までの領域で圧力ピークが低下している。同様の障壁を設置した場合については、既にIAE-SRIIによる実験が行われており、Fig.5にその結果を併記した。シミュレーション結果は障壁前面の圧力上昇について若干大きめの値を示したが、障壁後流側における圧力低減効果については実験結果と定量的によく一致した。

Fig.6は障壁高さを変化させた場合のシミュレーション結果である。障壁後流側5mにおける圧力低減効果を、
 [障壁を設置した場合のピーク圧力]

／ [障壁無しの場合のピーク圧力] (1)

として評価すると、障壁高さ2mの場合0.65, 3mの場合0.50, 4mの場合0.40であり、障壁後流側の圧力は障壁が高いほど低減され、より効果的な防御効果を期待できることがわかった。

Fig.7は幅の異なる障壁を用いた場合について解析した結果である。障壁高さが同一(2m)で幅の異なる場合を比較すると、障壁幅が12m以上のときにはほぼ同等な圧力低減効果が得られるが、障壁幅6mのときには十分な効果が得られていない。これは、衝撃波の障壁背面への回り込みが水平方向にも生じるためと考えられ、障壁には十分な幅を確保する必要があることがわかる。また、障壁幅を12mとして平面形状をコの字型に配置した場合などについても、同様のシミュレーションを実施したが、同一高さで平面形状が直線的な場合と同等の圧力低減効果を得た。


 Fig.9 障壁平面形状が異なる場合の圧力ピーク値の比較
 Comparison of Maximum Overpressure Distribution for Different Wall Layouts

 Fig.10 障壁断面形状が異なる場合の比較(その1)
 Comparison of Maximum Overpressure Distribution for Different Wall Sections (1)

 Fig.11 障壁断面形状が異なる場合の比較(その2)
 Comparison of Maximum Overpressure Distribution for Different Wall Sections (2)

3.3 様々な障壁構造による圧力低減効果の違い

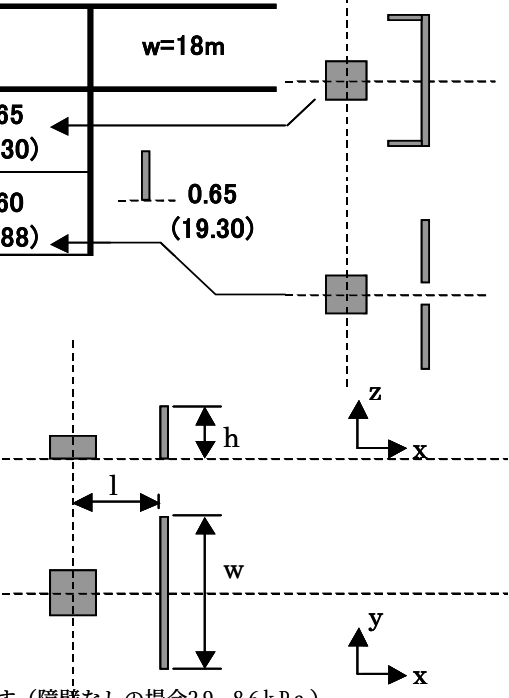
Fig.8に示すように、平面形状、断面形状の異なる様々な障壁構造について同様の数値シミュレーションを実施し、圧力低減効果を比較した。各ケースについての解析結果をFig.9～Fig.11に、また3.2節と同様の方法で圧力低減効果を評価して比較したものをTable 2に示す。

今回検討した範囲では、障壁断面形状を変化させた場合についても同一高さの障壁であればほぼ同等な圧力低減効果が得られており、障壁の防御効果は障壁の高さに最も大きく依存することがわかった。

Table 2 各種障壁による衝撃圧力低減効果（障壁後流側5m地点での圧力低減率）
Reduction Effect of explosion overpressure with various Protective Walls
(Evaluated with Reduction rate of Maximum Overpressure at 10m away from the wall)

	w=6m	w=12m		w=18m
h=2m	 0.90 (26.92)	 0.65 (19.30)	0.65 (19.30)	 0.65 (19.30)
		 0.64 (19.18)	0.60 (17.88)	
		 0.65 (19.32)		
h=3m		 0.50 (14.86)		 0.65 (19.30)
		 0.47 (14.16)		
h=4m		 0.47 (14.11)		 0.65 (19.30)
		 0.40 (11.91)		

()内は同一地点におけるピーク圧力(kPa)を表す(障壁なしの場合29.86kPa)



4. まとめ

IAE-SRIIによる既往の実験結果をもとに、水素ガスの爆発に伴う衝撃圧力の特性を考察した。その結果、爆発現象により形成される圧力波形は爆轟、爆燃の違いにより大きく異なるが、その波形はかなり遠方までその特徴を保存したまま伝播すること、爆発燃焼反応は爆発源から数m離れた地点で終了し、その後は衝撃波が音速で伝播すること、などの知見を得た。また、衝撃波伝播状況の数値シミュレーションを実施し、障壁による圧力低減効果について考察した結果、今回比較検討した範囲では、圧力低減効果は障壁の高さに大きく依存し、障壁断面形状などによらないことがわかった。

水素ガスに対する関連法規の規制再点検では、CNGとの比較が重要な参考例のひとつと思われるが、WE-NET IIで実施された各種検討結果^{1), 9)}では、化学量論比でほぼ等価な発熱量を有する水素ガスと天然ガスの爆発圧力について水素の方が一桁大きな値を示すことが報告されている。今後、想定される爆発事故の規模に対してどの程度の障壁高さが必要となるのか検討していく予定である。

謝辞

本研究はNEDO（(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構）からの委託を受け、「水素安全利用等基盤技術開発—水素インフラと建築構造物の耐爆、耐震性の研究開

発」の一環として実施したものである。本研究の実施にあたりご指導をいただきましたNEDO, IAE, SRII, (財)石油産業活性化センターの関係者の方々、および本委託業務に関する評価・サポート委員会委員の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成13年度成果報告書NEDO-WE-NET-0102.
- 2) 佐藤，千葉：水素の爆発実験，水素エネルギーシステム，Vol.28, No.1(2003).
- 3) 橋口，堀口：水素の爆発危険性，化学工業資料，Vol.18, No.2(1983).
- 4) 諏訪，米澤：水素爆発による鉄筋コンクリート造構造物への影響予測(その1)，第23回水素エネルギー協会大会(2003), pp.57-60.
- 5) Pracht, W.E. and Brackbill, J.U.: BAAL: A code for calculating three-dimensional fluid flows at all speeds with an Eulerian-Lagrangian computing mesh, Los Alamos National Laboratory Report, LA-6342 (1976).
- 6) Amsden, A.A., Ruppel, H.M. and Hirt, C.W.: SALE: A Simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, Los Alamos National Laboratory Report, LA-8095 (1980).
- 7) Amsden, A.A. and Ruppel, H.M.: SALE-3D: A Simplified ALE Computer Program for Calculating Three-Dimensional Fluid Flow, Los Alamos National Laboratory Report, LA-8905 (1981).
- 8) 経済産業省資源エネルギー庁原子力安全・保安院保安課：一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について - 例示基準 -, 22 障壁 (平13).
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成14年度成果報告書NEDO-WE-NET-0202.