

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02396

研究課題名（和文）多孔板への噴流衝突を利用した高圧水素設備の安全性向上技術の評価

研究課題名（英文）Safety Improvement for High-Pressure Hydrogen Facilities Using Jet Impact on Porous Plates

研究代表者

朝原 誠（Asahara, Makoto）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：40633045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：噴流の速度低下（運動量欠損）は多孔板への抗力に変換されると考え、多孔板に働く抗力を測定し、開孔率、孔径が噴流の速度低下に与える影響を調査した。運動量欠損は孔径に依存せず、開孔率が小さいほど大きい結果を得た。これらの傾向は予想と一致したが、運動量欠損は開孔率よりも最大で20%ほど小さい。これは、孔側面の抵抗や、噴流軸から半径方向への速度分布と孔位置の関係が原因と考えられる。さらに、PIVにより噴流衝突における速度分布を取得した。多孔板下流では放射状に拡散しており、板無しの条件よりも噴流が半径方向に拡散することがわかった。その結果、噴流軸方向の水素到達距離が短縮されると考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水素は最小着火エネルギーが小さく、可燃濃度範囲が広いので、水素の利用拡大における爆発リスクを低減するための対策が必要不可欠となる。そこで、水素漏えい時の爆発リスクを低減する方法として、本研究で効果が実証された多孔を有する障壁を設置する。無孔障壁では、壁の上流側で可燃濃度領域が形成されやすくなるが、多孔を有する障壁では、障壁上流の可燃濃度領域を縮小でき、さらに水平方向への噴流の拡散距離を短縮できる。そのため、水素エネルギー社会における安全性を向上し、社会的な貢献が期待される。また、多孔板へ衝突する噴流における運動量欠損と孔径および開孔率との関係が明確化され、学術的な進展も得られたと考える。

研究成果の概要（英文）：We considered that the velocity reduction of the jet (momentum deficit) is converted into drag force on the porous plate, and measured the drag force acting on the porous plate to investigate the effects of opening ratio and hole diameter on the velocity reduction of the jet. The momentum deficit was independent of hole diameter, and was larger for smaller opening ratio. These trends were consistent with expectations, but the momentum deficit was approximately 20% smaller at most than the opening rate. This may be due to the resistance of the hole sides and the relationship between the velocity distribution from the jet axis to the radial direction and the hole position. Furthermore, the velocity distribution in the jet impingement was obtained by PIV. It was found that the jet diffused radially downstream of the porous plate and that the jet diffused in the radial direction more than in the condition without the plate.

研究分野：安全工学

キーワード：高圧水素噴流 多孔板 噴流衝突 水素漏えい シャドウグラフ PIV 速度分布 濃度分布

1. 研究開始当初の背景

水素は最小着火エネルギーが小さく、可燃濃度範囲が広いこと、水素の利用拡大における爆発リスクを低減するための対策が必要不可欠となる。水素ステーション等の高圧水素ガス貯蔵設備の保安規則（一般高圧ガス保安規則）として、82MPa 水素ガス貯蔵設備では「道路境界線から8m以上の保安距離の確保」が「これと同等以上の措置を講ずる」ことが定められている。しかし、敷地面積が限られている場所、特に都市部においてはこのように広大な土地を確保することは難しいため、距離確保の代替措置により安全性を維持しつつも、保安距離を縮小する方法が求められている。安全性を犠牲にせずに保安距離を縮小する方法として、漏えい水素を周辺に拡大させない、かつ、着火下限濃度（4vol%）以上にさせないことが重要である。そこで、漏えい水素の広域拡散防止と可燃濃度領域縮小化を同時に実現する方法として、多孔を有する障壁の設置に注目した。最も広域に水素が拡散すると考えられる水平方向の水素噴流に対し、垂直に障壁を設置する。ここで、無孔の障壁を設置する場合、障壁の上流側で可燃濃度領域が形成されやすくなるが、多孔を有する障壁を設置する場合には、障壁の上流における可燃濃度領域を縮小できると考える。これにより、水平方向への噴流の拡散防止と障壁上流における水素の滞留抑制を同時に実現できると予想される。

2. 研究の目的

これまで多孔板を通過する流れに関しては、多孔板の整流効果や熱伝達など、主に管内流れに対しての研究がなされているが、その一方で、多孔板を通過する自由噴流の研究例は少なく、多孔板通過による噴流の速度低下は明らかになっているものの、定式化には至っていない。そのため、本研究では、多孔板通過時の運動量欠損について調査し、運動量欠損に基づく速度予測式を導出することが目的となっている。

3. 研究の方法

噴流条件（流量）、多孔板条件（孔径、開孔率、板厚）、ノズル-多孔板距離をパラメータとして、スケール化された速度予測式を提案する。一年目は、多孔板条件（開孔率、孔径、板厚）、ノズル-多孔板距離をパラメータとして、実験装置を用いて多孔板が噴流から受ける抗力を測定し、多孔板条件ごとに、ノズル-多孔板距離と抗力係数の関係をグラフ化した。二年目は、抗力係数のグラフから特に変化が大きい条件においてPIV（Particle Image Velocimetry）による速度計測を行った。その他にも、LDV（Laser Doppler Velocimeter）計測や数値解析を行い、運動量欠損メカニズムの解明を図る予定である。

研究の着地点としては、抗力測定で推定される運動量欠損から速度分布を予測し、PIVなどによって得られる速度分布と比較する。一致しない場合には、その理由を考察する。最終的には、孔径、開孔率、板厚を変数とした速度分布予測式の導出を試み、これらの変数のみで速度分布を予測できない場合には、実験値にフィットする経験式を示す。

4. 研究成果

(1) ノズル径2mm、流量90L/minの噴流条件において、多孔板が噴流から受ける抗力を測定した。ノズル-多孔板距離は100mm~300mmの範囲で行った。この範囲は、噴流中心軸や噴流幅と使用した多孔板の大きさを考慮し、測定に影響を及ぼさないと考えられる条件として設定した。まず初めに、孔径を6mm、板厚を2mmと固定し、開孔率を変化させることで抗力を比較した。結果を図1に示す。図の縦軸は抗力、横軸はノズル-多孔板距離を示している。また、凡例の α は開孔率を表している。

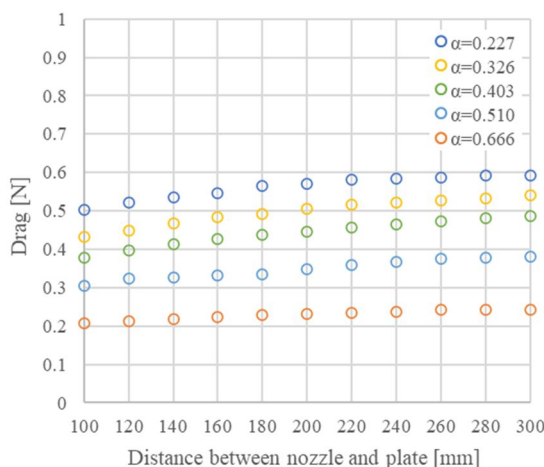


図1. 多孔板に働く抗力：開孔率比較

図から、開孔率が大きくなるにつれて抗力は小さくなっている。このことから、開孔率が大きいほど通過する噴流も多くなり、多孔板通過による運動量欠損が小さくなることわかる。

次に、開孔率と板厚の値を固定し、孔径を変化させて抗力の比較を行った。開孔率は 0.23, 0.40, 0.67 の 3 条件でそれぞれ実験を行った。板厚は 2mm とした。結果を図 2~4 にそれぞれ示す。図の縦軸は抗力係数、横軸はノズル-多孔板距離 / ノズル直径を示している。凡例の d は孔径 [mm] を表している。

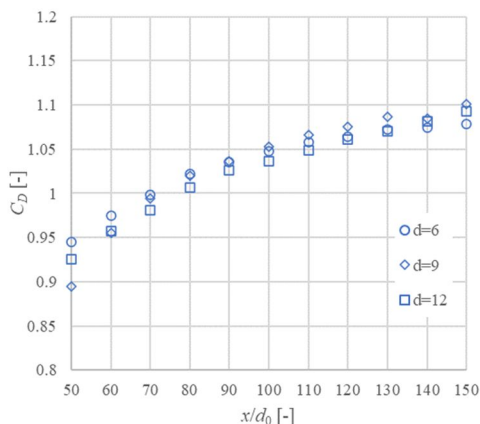


図 2 . 多孔板に働く抗力：孔径比較 ($\alpha=0.23$)

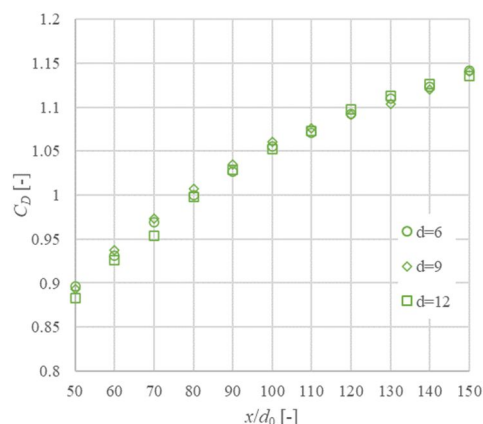


図 3 . 多孔板に働く抗力：孔径比較 ($\alpha=0.40$)

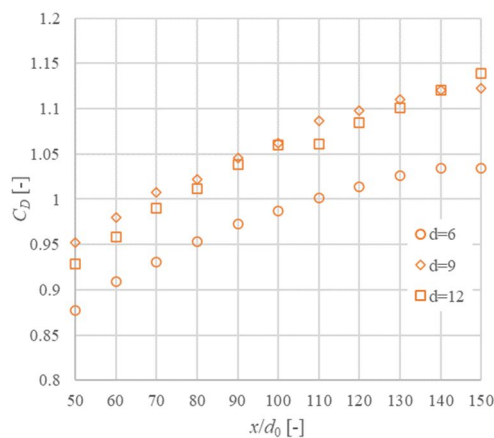


図 4 . 多孔板に働く抗力：孔径比較 ($\alpha=0.67$)

抗力係数 C_D の式を以下に示す。

$$C_D = \frac{D}{D_0(1-\alpha)}$$

D は多孔板に働く抗力、 D_0 は無孔板に働く抗力、 α は開孔率を表している。 C_D 値を定めることができれば、 C_D 値、無孔板への抗力 D_0 、多孔板に開孔率 α から多孔板への抗力を導くことが可能になる。図から、 $\alpha=0.23, 0.40$ では孔径を変化させても抗力係数はおおよそ一致していることがわかる。しかし、 $\alpha=0.67$ では $d=9, 12$ に対して $d=6$ では抗力係数が下がっている。この抗力係数が下がる現象に対する考察としては、開孔率が比較的大きい分、孔ピッチが小さくなっているため、衝突時に半径方向に広がらずに軸方向に流れる噴流が多くなっているからだと考えている。

(2) 抗力測定において変化が見られた条件 ($\alpha=0.67$) について PIV 実験を行い、多孔板通過前後の噴流の流れ場を調査した。噴流条件は、ノズル径 2mm、流量 40L/min とし、ノズル-多孔板距離は 200mm に設定した。解析範囲は縦約 60mm (板の位置から上下 3mm)、横約 60mm (噴流軸から左右 3mm) とした。PIV 解析によって得られた軸方向平均流速のコンター図を図 5~7 に示す。

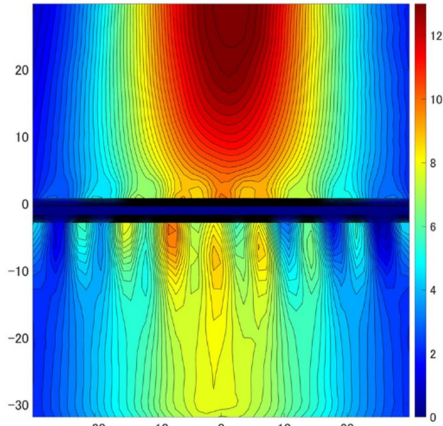


図 5 . 速度コンター (孔径 $d=6\text{mm}$)

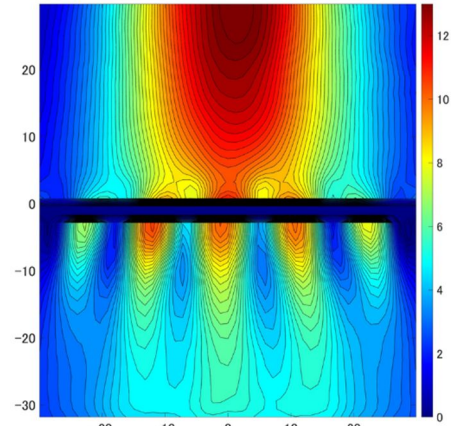


図 6 . 速度コンター (孔径 $d=9\text{mm}$)

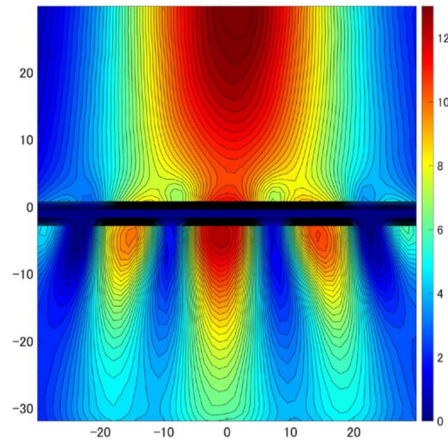


図 7 . 速度コンター (孔径 $d=12\text{mm}$)

図から、 $d=6\text{mm}$ では多孔板通過後に噴流同士が混合し、新たに群噴流を形成していることが確認できる。それに対して、 $d=9, 12\text{mm}$ では多孔板通過後に噴流が放射状にそれぞれ拡散していることが確認できる。

次に、これらの速度分布から多孔板通過前後で噴流が持つ運動量について調べた。結果を図 8 に示す。図の縦軸はノズルからの距離、横軸は噴流の運動量を示している。また、ノズルからの距離 200mm 地点に多孔板が設置されている。

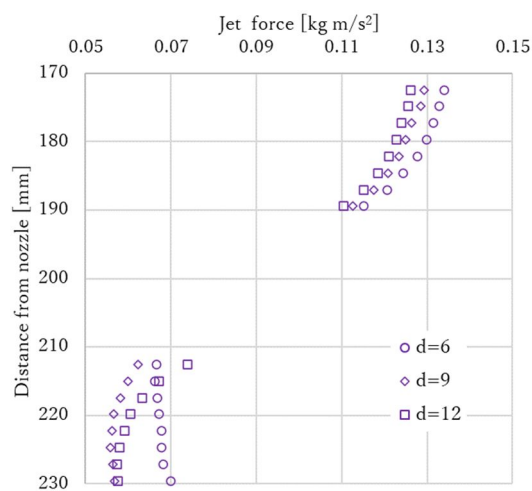


図 8 . 多孔板通過前後の噴流が持つ運動量

図より、多孔板通過後において $d=6$ の運動量は $d=9, 12$ に対して大きいことから、 $d=6$ における多孔板通過による噴流の運動量欠損は $d=9, 12$ より小さいことがわかる。多孔板通過時の噴流の運動量欠損は多孔板に働く抗力に変換されていると考えられるので、 $\alpha=0.67$ の抗力測定において $d=6$ の抗力係数が他と比べて低下するという結果は妥当であったと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asahara Makoto, Saburi Tei, Ando Toshiki, Muto Tomohiro, Takahashi Yoshiaki, Miyasaka Takeshi	4. 巻 315
2. 論文標題 Jet flame sustenance via spontaneous release of high-pressure hydrogen through a seamless tube: Relationship between burst pressure and tube length	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 123228 ~ 123228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2022.123228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Asahara, Tei Saburi, Toshiki Ando, Yoshiaki Takahashi, Takeshi Miyasaka, Shiro Kubota	4. 巻 46
2. 論文標題 Self-ignited flame behavior of high-pressure hydrogen release by rupture disk through a long tube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 123484-13500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.01.097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村上元太郎, 吉岡瞬, 姜東赫, 朝原誠, 宮坂武志, 平原裕行
2. 発表標題 多孔壁に衝突する噴流の抗力特性に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩月 一馬, 上原 拓磨, 水野 綜太郎, 朝原 誠, 宮坂 武志
2. 発表標題 82MPa高圧水素ガス設備からの水素漏えいを想定した噴流の可視化
3. 学会等名 2022年度春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉岡瞬、姜東赫、朝原誠、宮坂 武志、平原裕行
2. 発表標題 多孔板に衝突する噴流の運動量欠損と可視化実験による噴流構造の相関
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩月 一馬, 水野 綜太郎, 上原 拓磨, 朝原 誠, 宮坂 武志, 佐分利 禎, 高橋 良堯, 久保田 士郎
2. 発表標題 高压水素漏えいを想定した噴流及び 火炎の可視化
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>岐阜大学 航空宇宙推進研究室(宮坂・朝原研究室) 研究紹介「超高压水素の漏洩拡散」 https://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/Hydrogenjet_2021/hydrogenjet.html 岐阜大学 航空宇宙推進研究室(宮坂・朝原研究室) 研究紹介「高压水素の噴流拡散と燃焼に関する研究」 https://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/self-ignition.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	平原 裕行 (Hirahara Hiroyuki) (20201733)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	姜 東赫 (Kang Donghyuk) (40610366)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	
研究分担者	宮坂 武志 (Miyasaka Takeshi) (60303666)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関