

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06142

研究課題名(和文) 安全な水素エネルギー社会の実現に向けたハイブリッドデトネーションアレスタの開発

研究課題名(英文) Development of hybrid type detonation arrestor to realize a safety hydrogen energy society

研究代表者

小原 哲郎 (Obara, Tetsuro)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80241917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：可燃性気体を扱う配管内でデトネーション波が発生した場合、配管設備に深刻な被害を及ぼす可能性があるため、デトネーション波を消炎させる技術確立することが重要となる。既存のデトネーション・アレスターには間隙は極めて小さい消炎素子が用いられており、アレスター通過時の流量が極めて小さくなるのが問題である。

本研究ではデトネーション波を回折させてデトネーション波の伝播速度を低下させた上でフラーム・アレスターを接続し、火炎を消炎させることを提案している。回折部およびフラーム・アレスターの条件を種々変化させて実験を行ったところ、流量低下の問題を回避しつつ、デトネーション波を消炎する条件を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デトネーション波は可燃性予混合気体中を超音速で伝播する燃焼波であり、デトネーション波による圧力および温度上昇により配管を破損するなどの事故が発生する可能性がある。本研究では、このようなデトネーション波が発生した場合を想定し、デトネーション波を消炎させる装置の開発を行うことを目的とした。具体的には、デトネーション波を回折させることで伝播速度を大幅に低減させた後、フラーム・アレスターに入射させることにより、デトネーション波を消炎させることができることを明らかにした。また、デトネーション波が生じない場合に流体が流れる際の流量を大幅に低下させないための条件を見出すことができた。

研究成果の概要(英文)：When a detonation wave is generated in a duct, it is possible to cause serious damage to a facility of duct. Therefore, it is important to produce a technique quenching the detonation wave. In the commercial detonation arrestor, since extremely fine mesh is used, the flow rate passing through the detonation arrestor becomes small value and this cause the problems in applying a detonation arrestor.

This research is proposing that detonation wave is decelerated by diffracting from the orifice, and it is quenched by propagating the flame arrestor. The experiments were conducted by changing the condition of diffracting orifice and flame arrestor. As a result, the conditions to quench the detonation wave without largely decreasing flow rate is clarified.

研究分野：燃焼工学

キーワード：デトネーション デフラグレーション 消炎

1. 研究開始当初の背景

可燃性の混合気体中を伝播する燃焼波は、デフラグレーション波(爆燃波)とデトネーション波(爆轟波)に大別される。このうち、デトネーション波は衝撃波により未燃気体の温度を上昇させ超音速で伝播するため、波面における温度および圧力は極めて高くなる。デトネーション波面における温度は約 3,400 K、圧力は大気圧の約 15 倍まで上昇することから、一般にデトネーション波に曝されることによる被害は甚大なものとなる。したがって、デトネーション波の伝播を阻止するためのデトネーション・アレスターを開発することが工学に課せられた喫緊の課題である。

デトネーション波が凸壁から回折する際には、衝撃波と逆の性質を持つ膨張波が生じて燃焼波面の圧力・温度が下がる。これにより反応速度が低下するため、速度低下を引き起こす。このようなデトネーション波を減速させる装置(以下、減速装置)とフレイム・アレスターを結合するというのが、ハイブリッドデトネーションアレスターである(特許出願:2016年10月28日,出願番号:特願2018-547044,登録日:2020年12月17日,特許第6811464,発明の名称:減速機構,及び減速機構付きフレイムアレスター,特許権者:金子産業株式会社,国立大学法人埼玉大学)。要するに、第1段:デトネーション波を減速装置に入射させることにより衝撃波と伝播速度の低い燃焼波に分離させ、第2段:フレイム・アレスターを用いて減速した火炎を消炎するハイブリッド構造とするのである。減速したデフラグレーション波であれば、目の粗いメッシュを用いても消炎できるので、非燃焼時における気体の流量も確保されるのである。

2. 研究の目的

本研究では、水素と空気の混合気体が着火した場合に伝播するデトネーション波を消炎(阻止)する装置、デトネーションアレスター(以下、アレスター)を開発する。具体的には、既存のアレスターが抱えている欠点を克服したハイブリッド型(デトネーション波の伝播速度を低下させる減速装置とフレイム・アレスターの結混合型)アレスターを開発する。デトネーション波をどのような形状の減速装置に入射させれば、最も伝播速度が低下するのか?この課題を明らかにすることを第1の研究目的とする。第2の目的は、ハイブリッド型アレスターを開発するための設計条件を提示することである。本研究を遂行することにより、安全な水素エネルギー社会の実現に向けて貢献しようという狙いがある。

3. 研究の方法

デトネーション波を多段のオリフィスに入射させ、デトネーション波の減速過程を明らかにする実験を行う。オリフィスの個数、オリフィスの内径を種々変化させて実験を行い、デトネーション波を効率的に減速することのできるオリフィス形状を明らかにする。また、デトネーションがオリフィスで回折する際の挙動については、シュリーレン光学系および高速度ビデオカメラを用いた可視化観察実験を行う。さらに、減速したデトネーション波をフレイム・アレスターに入射させ、火炎の消炎状態について明らかにする。フレイム・アレスターの形状を種々変化させた実験を行い、消炎の可否を明らかにする。デトネーション波の完全な消炎に成功したオリフィスおよびフレイム・アレスターの組み合わせの中で、流量が最も大きい場合を明らかにする。

具体的な実験方法は以下のとおりである。

実験には内径 20 mm の円筒管にデトネーション波を回折させる機構にフレイム・アレスターを接続した装置を用い、化学量論混合比の水素空気予混合気を充填して実験を行った。回折機構には多孔板を用い、外径の孔の径 D 、板厚 L および回折させる回数 n を種々変化させて実験を行った。さらに、フレイム・アレスターについては消炎素子の間隙 R および枚数 N を変化させた。

4. 研究成果

可燃性気体を扱う配管内でデトネーション波が発生した場合、配管設備に深刻な被害を及ぼす可能性があるため、デトネーション波を消炎させる技術を確立することが重要となる。既存のデトネーション・アレスターに用いられている消炎素子の間隙は極めて小さいため、アレスターを通過時の流量が小さくなるのが問題になっている。

本研究ではデトネーション波を回折させる機構にフレイム・アレスターを接続したハイブリッド型のアレスターを構築した。アレスター下流を伝ばする燃焼波の挙動の観察および流量を測定することで、既存のデトネーション・アレスターの流量低下の課題を改善することを目的とした。

実験には内径 20 mm の円筒管にデトネーション波を回折させる機構にフレイム・アレスターを接続した装置を用い、化学量論混合比の水素空気予混合気を充填して実験を行った。回折機構には多孔板を用い、外径の孔の径 D 、板厚 L および回折させる回数 n を変化させた。フレイム・アレスターは消炎素子の間隙 R および枚数 N を変化させた。本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 回折機構出口における火炎の伝ば速度を低下させるには、 $D=60$ mm、 $L=14$ mm、 $n=7$ の条件とすることが有効であり、火炎は回折機構入射前の約 20% にまで減速された。
- (2) 回折機構にフレイム・アレスターを接続しデトネーション波を完全に消炎させるには、以

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

下の3条件とすることが有効である。

(a) $D=60\text{ mm}$, $L=14\text{ mm}$, $n=3$, $R=0.2\text{ mm}$, $N=2$

(b) $D=60\text{ mm}$, $L=14\text{ mm}$, $n=5$, $R=0.2\text{ mm}$, $N=1$

(c) $D=60\text{ mm}$, $L=14\text{ mm}$, $n=5$, $R=0.4\text{ mm}$, $N=4$

- (3) これらの条件のうち、流量を最も大きくするには、(b) $D=60\text{ mm}$, $L=14\text{ mm}$, $n=5$, $R=0.2\text{ mm}$, $N=1$ の条件とすることが有効であり、既存のアレスターと比べて流量が約1.5倍に増加することが明らかにされた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shinichi Maeda, Masashi Fujisawa, Shogo Ienaga, Keisuke Hirahara, Tetsuro Obara	4. 巻 37
2. 論文標題 Effect of sandpaper-like small wall roughness on deflagration-to-detonation transition in a hydrogen-oxygen mixture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3609-3616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する
1. 著者名 Shinichi Maeda, Masashi Fujisawa, Shogo Ienaga, Keisuke Hirahara, Tetsuro Obara	4. 巻 Vol.37, No.3
2. 論文標題 Effect of sandpaper-like small wall roughness on deflagration-to-detonation transition in a hydrogen-oxygen mixture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3609-3616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 岩田 和也, 富田 啓太, 吉木 一秀, 前田 慎市, 小原 哲郎, 中谷 辰爾, 津江 光洋, 今村 宰, 秋濱 一弘, 山崎 博司	4. 巻 Vol.60, No.192
2. 論文標題 水素濃度勾配中において形成される球体まわりの斜めデトネーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 124-132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 前田 慎市、及川 陽介、星野 隆介、小原 哲郎	4. 巻 83
2. 論文標題 点火端が開放または閉鎖された管内を伝播するデトネーション波が管端壁面で反射した場合における反射衝撃波の伝播が管内の圧力場に与える影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00039
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.17-00039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 前田 慎市、吉木 一秀、菅野 祥一郎、富田 啓太、小原 哲郎	4. 巻 83
2. 論文標題 球形飛行体周りに形成される衝撃波誘起燃焼における非定常燃焼の発生条件	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 前田 慎市、倉持 悠希、小野 涼、小原 哲郎	4. 巻 83
2. 論文標題 凸形の火炎と平面衝撃波の干渉によるデトネーション遷移過程	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 前田 慎市、青島 亮太、黒澤 哲朗、小原 哲郎	4. 巻 83
2. 論文標題 フレームジェット対向噴射による管内へのデトネーション起爆	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 16-00269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.16-00269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Maeda, Shoichiro Kanno, Isshu Yoshiki, Tetsuro Obara	4. 巻 78
2. 論文標題 Time-resolved schlieren observations of shock-induced combustion around a high-speed spherical projectile	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 19-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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28件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Haruhiro Kawana, Wataru Kurata, Kanta Ohno, Kazuhiro Ishii, A. Koichi Hayashi, Nobuyuki Tsuboi, Kohei Ozawa, Tetsuro Obara, Shinichi Maeda, Edyta Dzieminska and Toshiharu Mizukaki
2. 発表標題 A Study on Operating Conditions of Disk-Type Rotating Detonation Engine
3. 学会等名 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Koichi Hayashi, Nobuyuki Tsuboi, Kohei Ozawa, Kazuhiro Ishii, Tetsuro Obara, Shinichi Maeda, Edyta Dzieminska, Toshiharu Mizukaki
2. 発表標題 Development of a High Efficiency System with a Rotating Detonation Engine for a Gas Turbine Engine (RDE-GTE) using Pressure Gain Combustion
3. 学会等名 AIAA 2019-1509 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 隆太, 須田 優駿, 加藤 由真, MUHAMMAD IZZUDDIN BIN ASH'ARI, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 障害物上におけるデトネーション遷移に関する可視化観察 (障害物形状の影響)
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原子内 滉也, 渡邊 一樹, 西本 光佑, 森 健吾, 岩田 和也, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 水素濃度勾配を有する可燃性混合気中における極超音速飛行体による斜めデトネーション波の起爆・安定化に関する実験研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐 一樹, 久保 隼人, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 PZT 素子を用いた圧力センサーの自作と性能評価
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤 由真, 岡田 隆太, 須田 優駿, 小原 哲郎, 前田 慎市, 中森 一郎, 桐原 亮平
2. 発表標題 連続した障害物を有する流路におけるデトネーション遷移過程の数値シミュレーション
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平原 佳祐, 色川 正弘, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 壁面上に微小な障害物を密に配置した管内における火災加速とデトネーション遷移過程
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 光一, 坪井 伸幸, 小澤 晃平, 石井 一洋, 小原 哲郎, 前田 慎市, ジェミンスカ エディータ, 水書 俊治
2. 発表標題 Disc型回転デトネーションエンジン(D-RDE)の研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津田 勇希, 小宮 淳嗣, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 直管形状のデトネーション駆動型爆風生成装置における駆動部長さが平面状爆風波の最大過剰圧に与える影響
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎 文彦, 加藤 明里, 森 美里, 前田 慎市, 小原 哲郎, 水書 稔治
2. 発表標題 5cm x 5cmデトネーション駆動型爆風模擬装置測定部における流れ場の可視化
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 明里, 森 美里, 岩崎 文彦, 沼田 大樹, 前田 慎市, 小原 哲郎, 水書 稔治
2. 発表標題 5cm x 5cmデトネーション駆動型爆風模擬装置測定部における流れ場の評価
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐 一樹, 渡辺 聡人, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 自作圧力センサーを用いたオーバードリブンデトネーション開始距離の評価
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川名 陽大, 倉田 航, 大野 寛太, 石井 一洋, 林 光一, 坪井 伸幸, ジェミンスカ・エディータ, 小原 哲郎, 水書 稔治, 前田 慎市, 小澤 晃
2. 発表標題 ディスク型燃焼器を用いた回転デトネーションエンジンに関する研究
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室井 優太, 小池 匠, 木村 朔, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 低圧縮空気源を用いた準パルプレス・パルスデトネーション燃焼器の作動実験
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野 涼, 篠崎 拓也, 小原 哲郎, 前田 慎市
2. 発表標題 平面衝撃波と干渉した火炎のデトネーション遷移過程
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 光一, 坪井 伸幸, 石井 一洋, ジェミンスカ エディータ, 小原 哲郎, 水書 稔治, 前田 慎市, 小澤 晃平
2. 発表標題 RDEを用いたガスタービンエンジン開発に向けての研究
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家永 翔伍, 平原 佳祐, 秋元 皓志, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 障害物が流路壁面上に密に配置された場合の火炎加速とデトネーション遷移
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪井 伸幸, 岩井 麻衣子, 森井 雄飛, 小澤 晃平, 林 光一, 小原 哲郎, 前田 慎市
2. 発表標題 炭化水素予混合気における衝撃波/火炎干渉に関する二次元数値解析：燃料の違いの影響
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 緒方 隆次, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 障害物を有する管内へのフレームジェット噴射によるデトネーション遷移過程
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤 明里, 森 美里, 前田 慎市, 小原 哲郎, 水書 稔治
2. 発表標題 デトネーション駆動型爆風シミュレータ製作に向けた基礎検討
3. 学会等名 平成29年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 美里, 加藤 明里, 前田 慎市, 小原 哲郎, 水書 稔治
2. 発表標題 縦型衝撃波管における微粒子拡散計測
3. 学会等名 平成29年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 慎市, 富田 啓太, 原子内 滉也, 小原 哲郎
2. 発表標題 高速ガス銃の駆動源への気体デトネーション応用
3. 学会等名 平成29年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野 隆介, 津田 勇希, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 管内の気体爆発で起爆した平面状爆風波の圧力波形に関する研究
3. 学会等名 平成29年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春山 晃寿, 上田 翔太, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 デトネーション・アレスターの開発を目指した基礎実験
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤澤 昌志, 家永 翔伍, 平原 佳祐, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 流路壁面粗さが火炎加速とデトネーション遷移に与える影響
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩田 和也, 中谷 辰爾, 津江 光洋, 富田 啓太, 吉木 一秀, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 水素濃度勾配中の球状発射体まわりに形成される自己保持斜めデトネーション
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富田 啓太, 吉木 一秀, 菅野 祥一郎, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 可燃性混合気中の超音速飛行体により誘起される振動燃焼の発生条件
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田 慎市, 星野 隆介, 大塚 一樹, 及川 陽介, 小原 哲郎
2. 発表標題 気体デトネーション波を開始源とする平面状爆風波の特性
3. 学会等名 火薬学会 2017年度春季研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

埼玉大学 大学院理工学研究科 機械科学系専攻 熱工学研究室
<http://park.saitama-u.ac.jp/~netsu/publication1-journal.html>

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	石井 一洋 (Ishii Kazuhiro) (20251754)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	前田 慎市 (Maeda Shinichi) (60709319)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	

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
---------	---------