

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13681

研究課題名（和文）新たな手法として気体爆轟を用いた爆風シミュレータ：実現象再現度の飛躍的向上

研究課題名（英文）Novel blast simulator using gaseous detonation: significant improvement in reproducibility of blast wave phenomena

研究代表者

前田 慎市 (Maeda, Shinichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60709319

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：爆風現象を模擬し、その被害低減手法の研究に役立つ目的で、実験室内で簡便に実際の爆風現象に近い状況を再現するため、気体爆轟（デトネーション）を利用した新しい形式の爆風シミュレータを提案した。水素、エチレン、またはアセチレンと酸素を爆発性混合気として使用して、高速度カメラを用いた爆風波の可視化観測および圧力計測が可能な爆風シミュレータを構築し、100 kPaを超える最大過剰圧を有する衝撃波、およびそれに続いて爆風現象に特徴的な圧力が大気圧以下まで減衰する負圧領域を再現できることを実証した。さらに、気体爆轟で生成される爆風の強さを整理するための物理パラメータを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、実験室レベルの簡易な手法で爆風現象を精緻に模擬できる爆風シミュレータを実現できる可能性が実証された。爆風による被害は衝撃波による圧力上昇のみならず、その後の負圧領域も影響することが近年知られており、本研究の手法により爆風の特徴をよく再現した実験が可能となり、その被害低減手法の研究を前進させるのに役立つと考えられる。また爆風シミュレータの構築に至る過程で、気体爆轟により生成される爆風の強さを詳細に検討した結果は、気体爆轟のエネルギーが空気中へ爆風として変換される物理機構の理解を深化させた。

研究成果の概要（英文）：The novel blast simulator using a gaseous detonation was proposed to reproduce blast wave phenomena easily in laboratory-scale experiments for the purpose of contributing to the research for a mitigation technique of blast wave injuries. Using hydrogen, ethylene, or acetylene and oxygen as explosive mixtures, we constructed the blast simulator that enables optical observations using a high-speed camera and pressure measurement of the blast wave. We demonstrated that the blast simulator can reproduce the shock wave with a maximum overpressure exceeding 100 kPa and the subsequent negative pressure region where the pressure decays to below atmospheric pressure, which is characteristic of the blast wave phenomena. In addition, the physical parameters for organizing the strength of the blast wave produced by the gaseous detonation were clarified.

研究分野：気体爆轟（デトネーション）、高速流れ場中の燃焼、高速燃焼やガス爆発

キーワード：爆轟（デトネーション） 爆風波 爆風シミュレータ 衝撃波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

爆発物による大規模なテロ事件や偶発的な爆発事故を背景として、爆発により人体が受ける損傷(爆傷)の低減手法や治療法の確立が望まれる。爆傷の大部分は、衝撃波に先導された爆風による臓器の損傷や飛散物などによる外傷であり、爆発源から半球状に広がって広範囲に被害をもたらす。爆風による圧力変化の特徴は、衝撃波による急激な上昇(最大過剰圧)とそれに続く減衰(正圧領域)、さらに大気圧以下への下降(負圧領域)である。このような圧力や気流の急激な変化が、複合的に人体や構造物へ与える影響を解明するための基礎的な実験研究では、爆風を実験室内で再現する爆風シミュレータが必要となる。

固体爆薬を用いれば実現象に近い再現ができるが、その取り扱いに関わる法的規制や実験設備の制約があるため、多くの実験研究において、爆風シミュレータとして衝撃波管が用いられてきた。古典的な扱いやすい衝撃波の発生法ではあるが、衝撃波背後の圧力変化は爆風との乖離が大きい。管内へ一様に充填された圧縮ガスを膨張させて衝撃波を発生させる基本原理ゆえに、衝撃波のすぐ背後に急激な膨張領域を生成しづらく、明確な負圧領域が得られていない実験がほとんどである。衝撃波だけでなく、その背後を含めて爆風の特徴を満たす圧力変化を再現できれば、爆風負荷を正確に把握し、その被害の予測や効果的な低減手法の開発を大きく前進させる手段となる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、爆轟(デトネーション)と呼ばれる爆発的な気体燃焼を応用した爆風シミュレータを構築し、従来の衝撃波管と比べて、より高いレベルで爆風の圧力変化を再現することを目的として研究を行った。デトネーションは、強い衝撃波と燃焼領域が一体となって音速の4~7倍で定常伝播するもので、後方に高圧の燃焼ガスとその急激な膨張を伴う。このような急峻な圧力分布を持つ燃焼ガスで大気中へ衝撃波を生成すれば、爆風の特徴を満たす衝撃波背後の圧力変化を生成できると考えられる。もちろん可燃性混合気の手扱いは注意を要するが、この手法により固体爆薬と比べて取り扱いやすく、衝撃波管が抱える本質的な問題点を解決できる可能性がある。本研究では、基礎的な学術研究に適した爆風シミュレータとして、可視化観測や計測機器の配置に適した直管状の装置を想定して、具体的には以下の目的で研究を行った。

(1)円管内を伝播するデトネーション波を、同じ内径の円管内に充填した大気中へ入射させ、生成される爆風波を評価する。このようなシンプルな構成の実験を通して、直管内におけるデトネーションによる爆風生成の物理機構に着目する。

(2)(1)の成果を発展させ可視化観測部を備えた爆風シミュレータ装置を構築し、生成される爆風波を評価する。とりわけ、一般的に衝撃波後方で負圧領域が生じづらい直管状の装置内で効果的に負圧領域を生じさせる手法について検証する。これにより、管内を伝播する平面状爆風波で実際の球状に伝播する爆風波に類似した圧力波形を得る手法を構築する。

3. 研究の方法

前節の2つの研究目的に対する研究方法について順番に述べる。

(1)一様な内径の円管を用いた爆風生成実験

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は可燃性混合気を充填したデトネーション管(内径50 mm)、大気で満たした爆風管(内径50 mm×長さ5100 mm)で構成される。2つの管は初期には厚さ25 μmの隔膜で仕切られており、デトネーション管の左端でデトネーション波を起爆し図の右側へ伝播させ、爆風管へ入射させる。これにより爆風管内の大気中に下流方向へ伝播する衝撃波(爆風波)を生成する。生成された爆風波の特性が様々な条件にどのように影響されるかという知見を通して爆風生成の物理機構を考察するため、主に以下の3つの条件を変更した。

デトネーション管の左端(点火端)を閉止した場合(Close条件)、または厚さ25 μmの隔膜で仕切ってダンプチューブを接続し、その内部を真空引き(Vacuum条件)、または大気充填(Atmosphere条件)した場合

デトネーション管に充填する可燃性混合気の組成(水素・酸素、エチレン・酸素、アセチレン・酸素)と初期圧力を変更した場合

デトネーション管の長さを40 mm~3670 mmの間で変化させた場合

デトネーション管の側壁に設置された圧力変換器とイオンプローブにより、デトネーション波の発生を確認した。爆風管の側壁には圧力変換器とフォトダイオードを設置し、爆風波の圧力履歴とデトネーションの既燃気体の発光を捉えた。

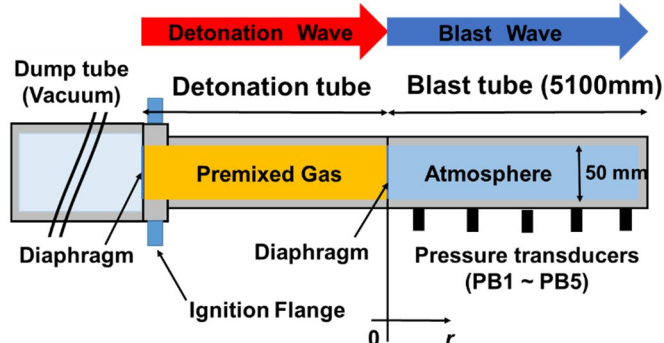


図1 一様な内径の円管を用いた爆風生成実験の概略図

(2) 可視化観測部を備えた爆風シミュレータ装置の構築

実験装置の概略図を図2に示す。実験装置は可燃性混合気を充填した Driver section (断面 5 mm × 100 mm の直方体の空間に、内径 8 mm の円管で構成される起爆用のデトネーション管が接続されている)、大気で満たした可視化観測部を有する Test section (断面 100 mm × 100 mm の直管)、Dump section (断面 100 mm × 100 mm の直管) によって構成される。各 Section 間は初期には厚さ 25 μm の PET 隔膜で仕切られている。Driver section の起爆用デトネーション管でデトネーション波を発生させ、その下流の直方体の空間内へ入射させる。これにより、Driver section の断面 5 mm × 100 mm のスリット状出口から Test section の大気中へデトネーション波を入射させ、下流方向へ伝播する衝撃波(爆風波)を生成する。

デトネーションの起爆を迅速かつ確実にするため、可燃性混合気として初期圧力 100 kPa のアセチレン・酸素混合気を使用した。また、爆風の負圧領域を効果的に生成するために、Dump section 側の Driver section の出口は、固体壁で閉じた場合 (Close 条件) だけでなく、PET 隔膜で仕切って Dump section も大気で満たした (Atmosphere 条件) および PET 隔膜で仕切って Dump section を真空引きした場合 (Vacuum 条件) の 3 つの条件で実験を行った。Driver section の出口断面と Test section の管断面が異なるため、Test section の入口には図2に示すような直線状の拡大ノズルを設置し、Driver section の出口で生成された爆風波ができる限りスムーズに Test section の管断面へ広がるようにした。Driver section の起爆用デトネーション管の閉管端には、デトネーション波が発生していることを確認するために圧力変換器を、Test section の管壁には生成された爆風波の圧力波形を計測するために圧力変換器を 4 ヶ所設置した。Test section の入口から圧力計測位置までの距離を変化させるため、Test section の入口から最初の圧力変換器までの距離を 4 通り (A: 155 mm, B: 1115 mm, C: 2115 mm, D: 3115 mm) に変化させた Test section を用いた。

4. 研究成果

前節の 2 つの研究方法で得られた研究成果について順番に述べる。

(1) 一様な内径の円管を用いた爆風生成実験

図3に爆風管内で計測した圧力履歴の一例を示す。図3aはデトネーション管の点火端を真空引きしたダンプチューブに開放した Vacuum 条件での結果であり、図3bは点火端を閉じた Close 条件の結果である。横軸の時刻はデトネーション波が爆風管の入口に到達した時刻を 0 としている。どちらの条件でも、デトネーション波の入射によって爆風波が生成され、上流から順に設置された圧力変換器 PB1 ~ PB5 の順に(d)で示した衝撃波による不連続な立ち上がりとし、その後の急激な膨張領域が確認できる。しかしながら、図3aの Vacuum 条件では衝撃波が(d)のみであるのに対して、図3bの Close 条件では(d)の後方に不連続な圧力上昇(e)および(f)が観測される。これは、デトネーション管内で生じるデトネーション遷移現象や隔膜の存在が原因で生じる衝撃波が、閉管端により反射されて爆風管へ入射したために生じたと考えられる。図3bのデトネーション管長さ 2140 mm の Close 条件では衝撃波(d), (e), (f)が間隔をあけて伝播しているが、デトネーション管が短くなるに従ってこれら衝撃波の間隔は狭まり、やがて衝撃波(e)が衝撃波(d)に追いつく場合が見られた。この場合、先頭の爆風波(d)の最大過剰圧の減衰履歴は単調にならず、また衝撃波後方の膨張領域の圧力履歴も単調にならない。従って、図3aの Vacuum 条件では衝撃波後方に負圧となる領域が得られていることから考えても、爆風現象の模擬という観点では Vacuum 条件が適していることが分かった。よって以降では、Vacuum 条件の結果のみについて議論する。

デトネーション管長さ L 、および可燃性混合気の組成と初期圧力を変化させた様々な条件において、図3のような爆風の圧力履歴から最大過剰圧の減衰履歴を抽出したものが図4である。縦軸は大気圧で無次元化した最大過剰圧 P であり、横軸は爆風管入口からの距離 r を無次元化した換算距離 (Scaled distance) R である。本研究では、この平面状爆風波の強さの減衰傾向を整理するための換算距離として、以下を提案した。

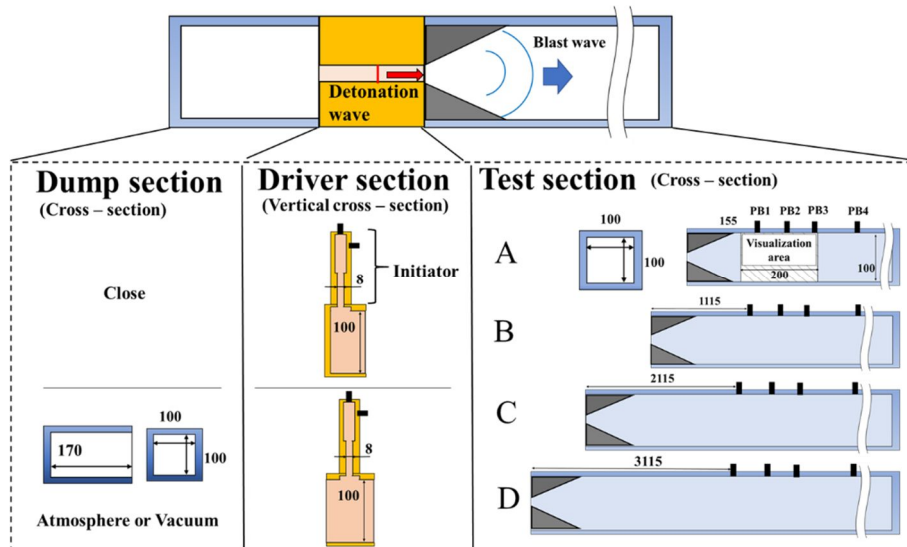


図2 可視化観測部を備えた爆風シミュレータ装置の概略図

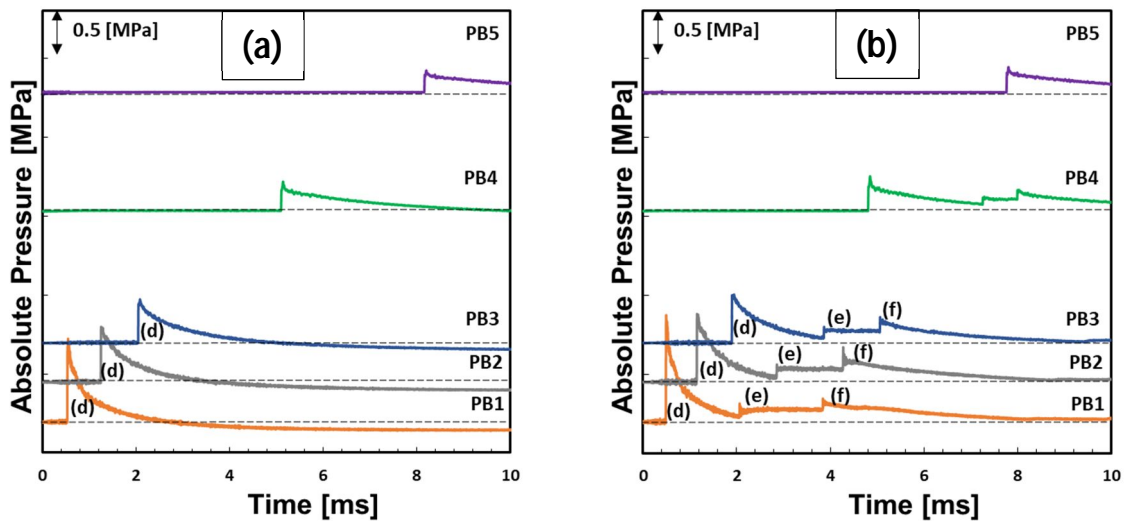


図3 初期圧力 20 kPa のアセチレン・酸素混合気を長さ 2140 mm のデトネーション管に充填した条件において、爆風管内で計測した圧力履歴。(a) : Vacuum 条件, (b) : Close 条件。爆風管入口からの距離は、PB1 : 405 mm, PB2 : 905 mm, PB3 : 1405 mm, PB4 : 3075 mm, PB5 : 4575 mm。

$$R = \frac{r}{E/p_{\text{atm}}}, \quad E = p_{\text{CJ}} \frac{u_{\text{CJ}}}{D_{\text{CJ}}} L$$

ここで、大気圧 p_{atm} 、単位面積当たりの爆風源のエネルギー E である。デトネーション波面上の既燃ガスが Chapman-Jouguet 状態の流速 u_{CJ} と圧力 p_{CJ} によって大気になす単位面積あたりの仕事を爆風源のエネルギーと考え、またデトネーション管長さ L をデトネーション波の伝播速度 D_{CJ} で割った特性時間 L / D_{CJ} が爆風波を駆動する有効時間と考えた。図4より、非常にシンプルな換算距離の表式によって最大過剰圧が概ね 1 本の曲線として整理できることが分かった。

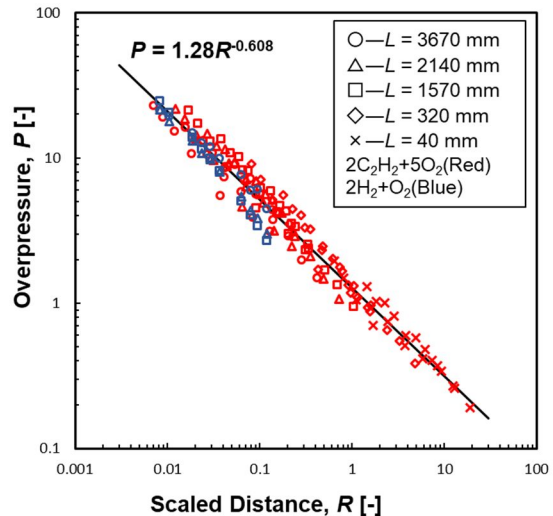


図4 換算距離で整理した最大過剰圧

(2) 可視化観測部を備えた爆風シミュレータ装置の構築

図5に、Test section 入口から約 155 mm 下流で撮影した(a) Close 条件, (b) Vacuum 条件, (c) Atmosphere 条件における時系列のシュリーレン画像を示す。1~3 枚目の画像を見ると、条件によらず先頭衝撃波、ノズル出口で生じた反射衝撃波、および Driver section と Test section を仕切りに使用した PET 隔膜の破片が観測された。4 枚目の画像を見比べると、Atmosphere 条件では他の 2 条件と比べて多くの衝撃波が先頭衝撃波に追従し、複雑な衝撃波系を形成している。Atmosphere 条件では Dump section 内に大気が満たされているため、Dump section 内にも Test section と同様に爆風波が駆動される。従って、この爆風波が Dump section の壁面と反射し、その反射衝撃波が Test section 内に伝播してきたものと推測される。5 枚目の画像を見比べると、Close 条件および Atmosphere 条件では既燃ガスが観測領域まで流入しているのに対して、Vacuum 条件では既燃ガスが観測されなかった。これは、Driver section が真空引きされた Dump section へ開口することにより、Driver section 内に Dump section へ向かう流速が誘起され、Test section 内への既燃ガスの流入が抑制されたものと考えられる。

続いて、図6には Close 条件, Vacuum 条件, Atmosphere 条件における Test section 入口から 315 mm, 1115 mm, 3115 mm の位置で得られた圧力波形を示した(図中に示した破線の黒丸部分の立ち上がりは、Test section の閉管端からの反射衝撃波である)。図6より、爆風波の正圧部分の圧力波形は条件によらず概ね一致しているが、Vacuum 条件においては Close 条件および Atmosphere 条件には見られない負圧領域が形成され、さらに負圧領域の後半において圧力回復も見られる。ただし、Dump section で強制的に負圧まで膨張させているため、圧力は時間経過しても大気圧まで回復せず、大気圧以下のある圧力へ漸近する。以上のことから、Vacuum 条件においては負圧領域を伴う典型的な爆風波に近い圧力波形が得られた。

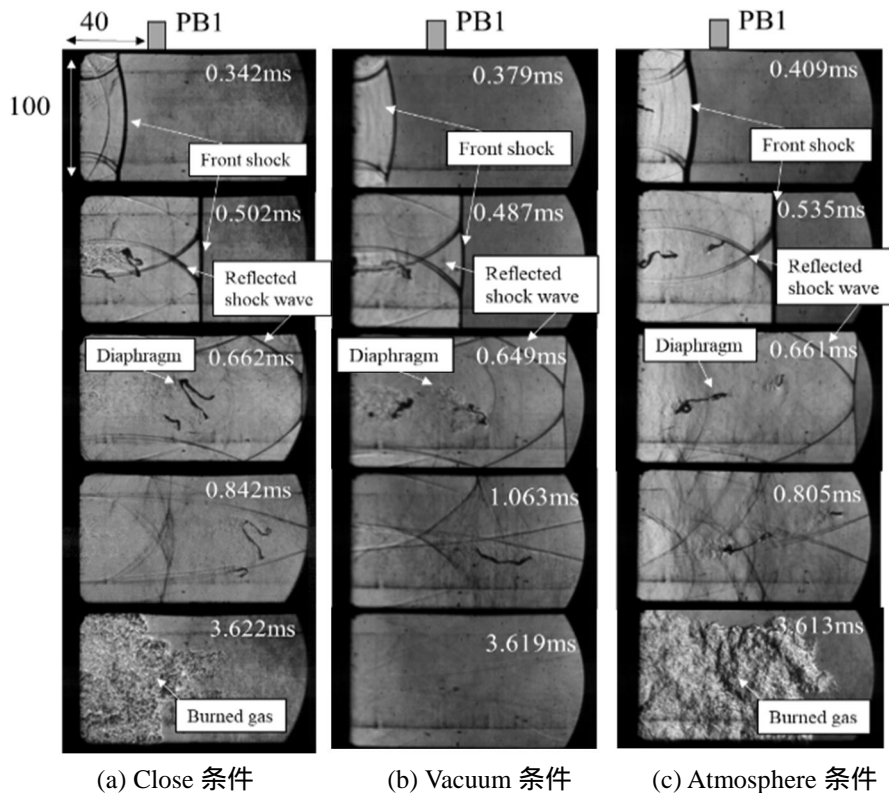


図5 生成された爆風波の時系列シュリーレン撮影結果

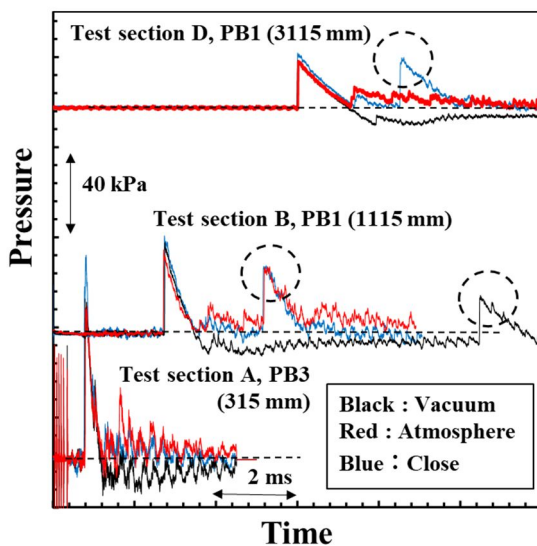


図6 生成された爆風波の圧力波形

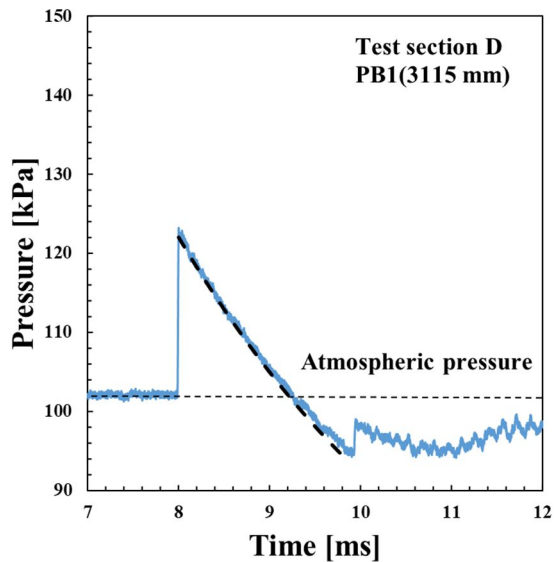


図7 圧力波形の計測結果と Friedlander の式 (破線) の比較

そこで Vacuum 条件で得られた平面状爆風の圧力波形において、典型的な爆風の圧力波形の実験式として知られる Friedlander (Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol.186, No.1006, pp.322-344, 1946)の式と比較した。図7が本研究における典型的な計測結果 (Test section 入口から 3115 mm 下流) と Friedlander の式を比較した結果である。正圧領域において両者はよく一致しており、実験から得られた圧力波形が時間に対して指数関数的に減衰していることを示す。負圧領域においても計測結果に見られる不連続な圧力上昇までは両者がよく一致している。以上より、Vacuum 条件では圧力波形の正圧部および負圧部ともに、概ね典型的な爆風波の圧力波形を再現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 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） 10.1016/j.proci.2018.07.119	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小宮 淳嗣, 竹原 智輝, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 気体デトネーションを用いた平面状爆風波の生成装置における爆風特性に関する基礎実験
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 慎市, 色川 正弘, 種市 大輝, 小原 哲郎
2. 発表標題 壁面上に微小な障害物が密に配置された管内における火炎加速過程の実験的調査
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小宮 淳嗣, 津田 勇樹, 前田 慎市, 小原 哲郎
2. 発表標題 気体デトネーションを用いた爆風生成装置の構築に向けた基礎実験
3. 学会等名 火薬学会 2020年度春季研究発表会
4. 発表年 2020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炎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 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 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 Shinichi Maeda, Masashi Fujisawa, Shogo Ienaga, Keisuke Hirahara, Tetsuro Obara
2. 発表標題 Effect of sandpaper-like small wall roughness on deflagration-to-detonation transition in a hydrogen-oxygen mixture
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2018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/
--

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

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