

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02352

研究課題名（和文）助走距離の短縮と伝播の高速化によるパルスデトネーション技術の高度化

研究課題名（英文）Improvement of the pulse-detonation technology by shortening of the run-up distance and speeding up of the propagation

研究代表者

遠藤 琢磨（ENDO, Takuma）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：00211780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：デフラグレーション・デトネーション遷移（DDT）助走距離を短縮させる技術とデトネーションの平均伝播速度を高める技術について研究した。前者に関しては、火炎がT字分岐を通過するだけで顕著な加速が起こる現象を発見し、詳細に調べた。T字分岐を通過するだけでDDTが起こるケースも見られ、非常に重要な知見が得られた。後者に関しては、単独の擾乱源がデトネーションのセル構造に与える影響については定量的な知見としてまとめることができた。しかし、複数の擾乱源を設置しても擾乱源直後の一次的な減速が予想以上に顕著で、その後デトネーションの高速化は起こるものの、平均速度が定常伝播速度を超えることはなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、流路内の燃焼波に流路形状が及ぼす影響に関するものである。過去のデトネーションと流路内障害物との相互作用に関する研究では障害物がセル幅（デトネーション波面の特性長）よりも大きな場合を扱っていたが、本研究ではセル幅よりも小さな障害物を扱った。これは新たな視点の研究であり、学術的に意義深い。さらに、これまでよりも現実的な流路内障害物を模擬しており、安全の視点から社会的にも意義深い。また、本研究では火炎がT字分岐を通過するだけで火炎加速と、条件によってはデトネーションへの遷移が起こることを見出し、学術的にも安全という視点から社会的にも、基礎的な実験の成果として大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：A technology that shortens the deflagration-to-detonation transition (DDT) run-up distance and a technology that effectively accelerates a non-stationary detonation were experimentally studied. On the former, we found out a phenomenon that a flame is remarkably accelerated just passing through a T-shaped bifurcation, and studied this phenomenon in detail. In some cases, DDT occurred just downstream of the T-shaped bifurcation as a result of the flame acceleration there. Concludingly, we obtained a very important knowledge on the flame acceleration and DDT. On the latter, we studied the influences of a single small obstacle on the detonation cellular structure, and published the results. However, the effective acceleration of a non-stationary detonation by successive small obstacles was not successful because the tentative deceleration just downstream of each obstacle was more significant than the expectancy whereas the acceleration occurred after the deceleration as expected.

研究分野：反応性気体力学

キーワード：デトネーション 発生 伝播 衝撃波 火炎加速



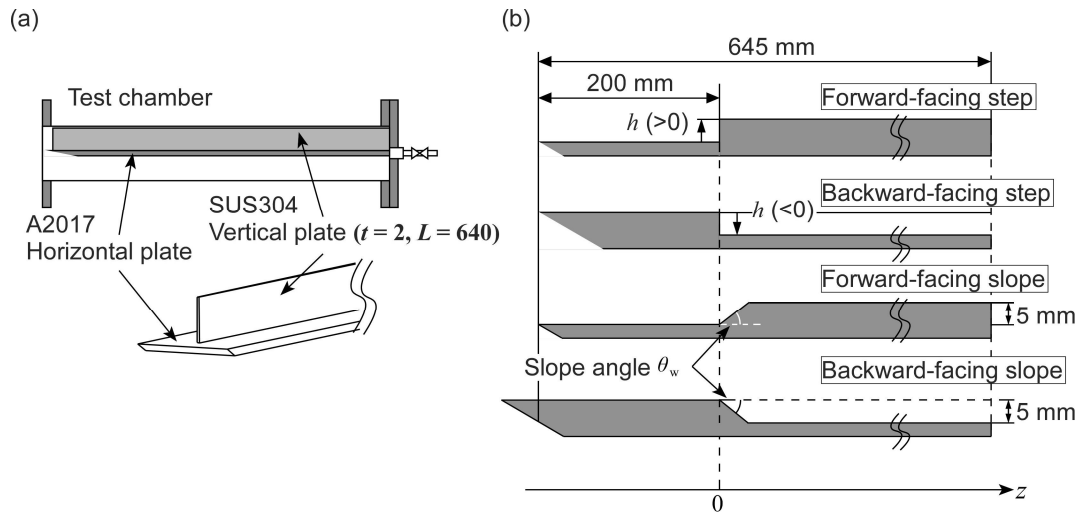


図3 研究項目2の実験配置 (a) テストチャンバー内の配置 (b) 擾乱源付きの水平板

#### 4. 研究成果

##### (1) 研究項目1

当初は、2か所で点火し、火炎と衝撃波を相互作用させることでデトネーションを起爆する計画であったが、様々な条件で実験を行う中で、図1のSP1だけで点火した場合とSP2だけで点火した場合とで、T字分岐後の伝播の様子が全く異なることが見出された。さらに、点火位置とT字分岐の間に火炎を乱すための障害棒を、本数を変えつつ設置すると、障害棒の本数によってT字分岐後の伝播の様子が変化することが明らかになった。実験で測定された、実験室系における火炎伝播速度を図4に示す。図中の $a_b$ は定圧燃焼時の既燃ガスの音速であり、デフラグレーションの最高速度の目安である。また、図中の $D_{CJ}$ は定常伝播するデトネーションの速度である。

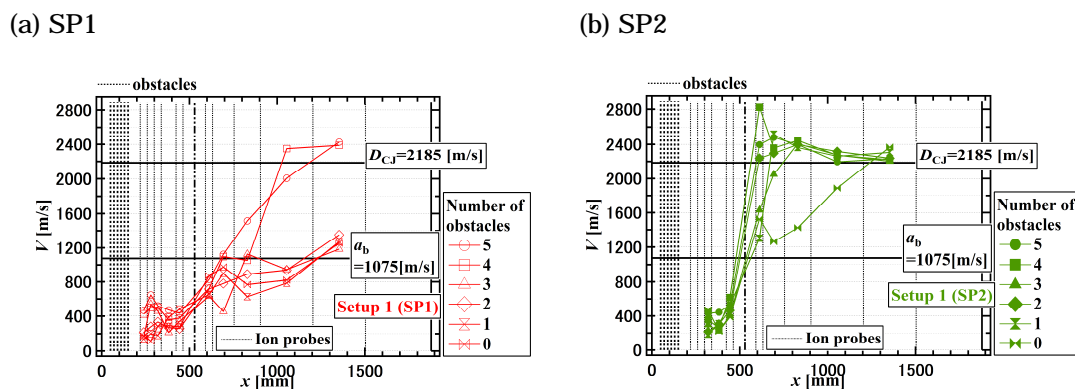


図4 研究項目1の主たる結果：図1の実験配置で測定された火炎伝播速度

横軸は、点火位置からの流路に沿った道程である。また、鉛直な二点鎖線はT字分岐の位置である。図1に示したように、SP1で点火した場合は、火炎はT字分岐を直進してテストチューブに至り、SP2で点火した場合は、火炎はT字分岐で90°向きを変えてテストチューブに至る。図4を見ると、いずれで点火した場合もT字分岐で伝播速度が大きく上がる。また、火炎を乱すための障害棒が多いほどT字分岐通過後の伝播速度が高い傾向にある。そして、このT字分岐通過時の火炎加速は、SP1で点火して火炎がT字分岐を直進してテストチューブに至る場合よりも、SP2で点火して火炎がT字分岐で90°向きを変えてテストチューブに至る場合の方が顕著であり、T字分岐に進入する前に障害棒で火炎を乱した場合には、T字分岐通過直後に既にデトネーションに遷移している。当初予期していたデトネーション起爆メカニズムではないが、この結果は新しい知見であり、今後研究を進展させていく価値があるものである。なお、この実験結果は、2023年10月にタイで開催される国際会議(Asia Pacific Symposium on Safety 2023)で発表することが決定している。

##### (2) 研究項目2

煤板に残った衝撃波三重線の軌跡を解析した結果、水平板上の擾乱源が図3(b)に示した前向きステップあるいは前向きスロープの場合には、定常伝播するデトネーションの波面がほとんど影響されないことが明らかとなった。さらに、この結果は、非常に大きな段差を持つ前向きス

テップを使った追加実験を行ったが、変わらないことが判明した。なお、この結果は、単純なモデルを使った解析によって妥当であることが示された[1]。

一方、水平板上の擾乱源が図 3(b)に示した後向きステップあるいは後向きスロープの場合には、擾乱源通過後、一度デトネーションが消失しかけ、その少し後に再活性化して定常伝播状態よりも高速で伝播することが、煤板に残った衝撃波三重点の軌跡を解析した結果、明らかとなった。図 5 に典型的な煤板模様を示す。図中、 $h$  はステップ高さを示し、負号はステップが後向き

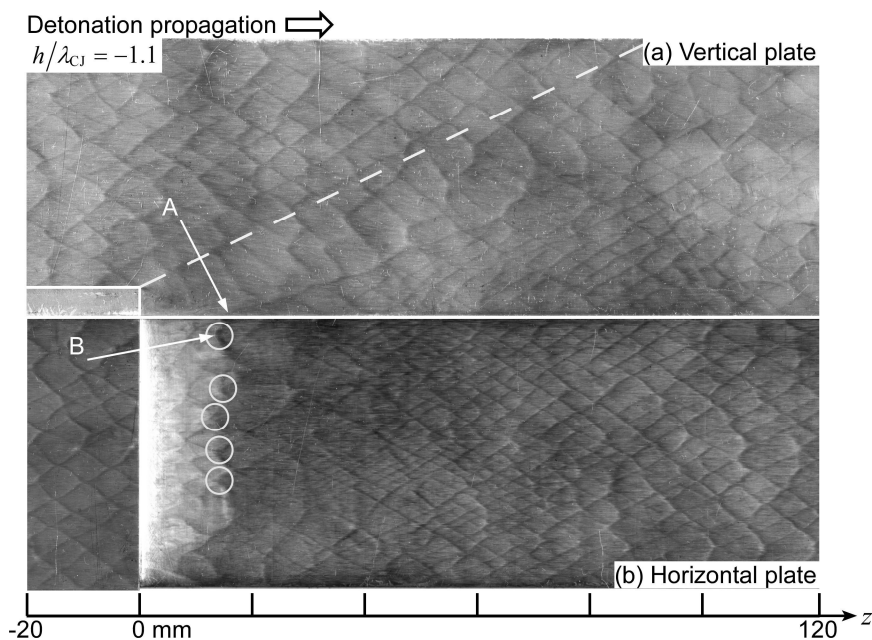


図 5 研究項目 2 で得られた典型的な煤板模様 (デトネーションは左方から入射)

[ 実験条件 : 後向きステップ , 初期圧力 30 kPa , ステップ高さ 5 mm ]

であることを意味する。また、 $\lambda_{CJ}$  は定常伝播状態にあるデトネーションのセル幅 (デトネーションの波面に沿った特性長) である。鉛直板において、位置 A から始まる強い衝撃波三重点の軌跡が認識できる。また、水平板を見ると、位置 B から始まる強い衝撃波三重点の軌跡が鉛直板の位置 A に繋がっていることがわかる。また、水平板上には位置 B に見られるような強い衝撃波三重点の軌跡の開始点が多数認識でき、これらの開始点と後向きステップの間の領域ではデトネーションが消失しかけ、これらの開始点より右では強い衝撃波三重点の軌跡が描く細かいセル模様が認識できる。このような細かいセル模様は、デトネーションが定常状態よりも高速で伝播しているときの特徴であることが知られている。なお、このような細かいセル模様は、ステップ高さが $\lambda_{CJ}$ の0.7倍以上のときのみ観測された。

強い衝撃波三重点の軌跡の開始点と後向きステップとの距離を  $z_{ra}$  とし、ステップ高さ $|h|$ との関係を、 $\lambda_{CJ}$  で無次元化して、図 6 に示す。図には Ohyagi ら[2]の実験結果も合わせて示した。黒

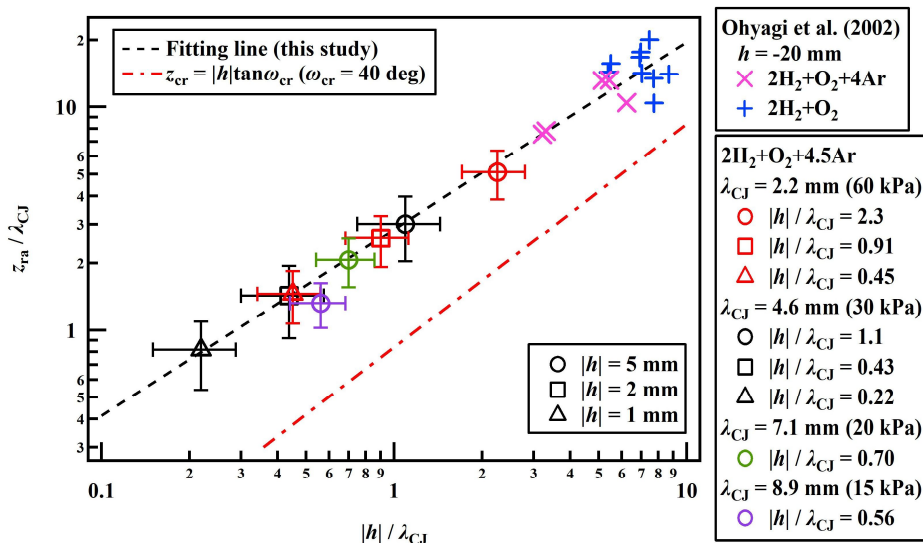


図 6 強い衝撃波三重点の軌跡の開始点と後向きステップとの距離  $z_{ra}$

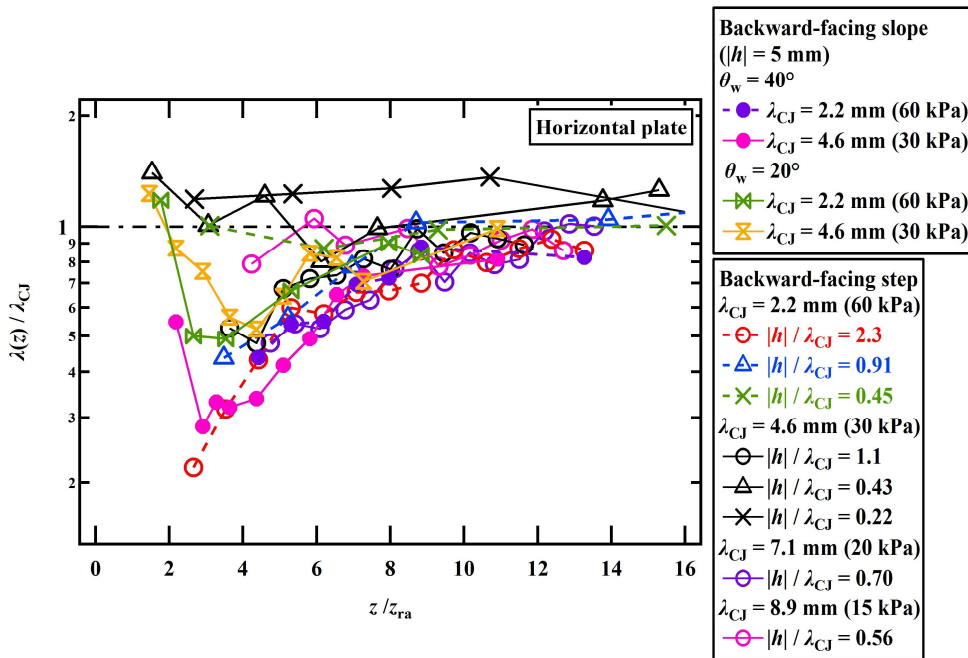


図7 セル幅が定常伝播状態の値に緩和していく様子

い破線は本研究で得られた結果をフィッティングして得た経験式:  $z_{ra}/\lambda_{CJ} = 2.7(|h|/\lambda_{CJ})^{0.80}$  である。赤い破線は、 $z_{ra}$  が大きくなるにつれて漸近すると考えられる、単純なモデル解析の結果である[1]。図7は、後向きステップおよび後向きスロープで得られた、セル幅の変化の様子である[1]。後向きステップあるいは後向きスロープを通り過ぎた後に再活性化されたデトネーションの細かいセル幅は、概ね、 $z_{ra}$  の10倍程度で定常伝播状態の値に緩和することがわかる。すなわち、デトネーションは、再活性化後、概ね  $z_{ra}$  の10倍程度の距離を高速で伝播することが明らかとなった。しかし、このような擾乱源を連続して配置した実験を行った結果、再活性化するまでの減速の影響が大きく、平均伝播速度が定常伝播速度を超えることはなかった。

< 引用文献 >

- [1] Seki, Y., Kim, W., Johzaki, T., and Endo, T., Influences of a small obstacle on the sidewall upon a detonation cellular structure, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 18, Paper No.23-00038 (2023).
- [2] Ohyagi, S., Obara, T., Hoshi, S., Cai, P., and Yoshihashi, T., Diffraction and re-initiation of detonations behind a backward-facing step, Shock Waves, Vol. 12, pp. 221–226 (2002).

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 1件）

1. 著者名 Yoko SEKI, Woogyung KIM, Tomoyuki JOHZAKI, and Takuma ENDO	4. 巻 18
2. 論文標題 Influences of a small obstacle on the sidewall upon a detonation cellular structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.23-00038	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoko Seki, Tomoaki Honda, Woogyung Kim, Tomoyuki Johzaki, and Takuma Endo
2. 発表標題 Influences of a small step on the side wall on detonation propagation
3. 学会等名 28th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤琢磨
2. 発表標題 高周波数パルスデトネーション技術の溶射への応用
3. 学会等名 溶射学会第115回（2022年度春季）全国講演大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関陽子, 本田朝暉, 金佑勁, 城崎知至, 遠藤琢磨
2. 発表標題 側壁上の擾乱が生み出すデトネーション波の乱れ
3. 学会等名 第54回流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田朝暉, 喜田祐介, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨
2. 発表標題 T字分岐における火炎加速とデトネーション起爆
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関陽子, 本田朝暉, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨
2. 発表標題 側壁上の小さい擾乱がデトネーション波のセル構造に与える影響
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤琢磨
2. 発表標題 デトネーション管の1次元理論とパルスデトネーション技術
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoaki Honda, Yusuke Kida, Wookyung Kim, Tomoyuki Johzaki, and Takuma Endo
2. 発表標題 Flame Acceleration and Detonation Initiation around a T-shaped Bifurcation
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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