

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870006

研究課題名(和文)円筒デトネーション波を用いた大直径デトネーションイニシエータの開発

研究課題名(英文)Development of Large Diameter Detonation Wave Initiator Using Cylindrical Detonation Wave

研究代表者

脇田 督司(Wakita, Masashi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80451441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、著者が提案するパルスデトネーションエンジン用イニシエータによる大直径デトネーション波生成の一般則を導くことを目的として、本イニシエータ内を伝播する円筒デトネーション波の伝播限界、および円筒デトネーション波から円環デトネーション波への遷移条件を調査した。円筒波の伝播限界は流路幅と曲率とセルサイズの比によって決定され、閾値は1/16である。また、円筒波から円環波への確実な遷移条件は、円環流路幅を円筒流路幅の半分以下にし、かつセルサイズの4倍程度を確保することである。

研究成果の概要(英文)：To derive universal rules for large diameter detonation initiation in our enhanced reflection type large bore PDE initiator, the propagation limit of a diverging cylindrical detonation wave, and the necessary condition for transition from a cylindrical wave to a toroidal detonation wave were investigated in this research. The main results of this research are as follows: 1) the propagation limit of the cylindrical wave depends on the ratio of wave curvature to detonation cell size, and the threshold value of this ratio is 1/16, 2) the necessary condition for a successful transition from cylindrical to toroidal detonation is to make the toroidal path width less than half of the cylindrical path width, and to make the cylindrical path width wider than about four times that of the detonation cell size.

研究分野：燃焼工学

キーワード：パルスデトネーションエンジン デトネーション イニシエーション

1. 研究開始当初の背景

デトネーションを利用したパルスデトネーションエンジン (PDE) は、衝撃波に誘導される超音速燃焼であるデトネーションを利用して推進剤を間欠的に燃焼させて推力を得る推進機関であり、高熱効率、高比推力でありながら構造が極めて単純という特長がある。PDE 実用化の課題の一つに大推力化がある。点火源からデトネーションが生成されるまでの距離は、燃焼室口径に比例して増大するため、大直径のデトネーション波の生成は極めて困難である。よって、小口径燃焼器を多気筒化して大推力を得る方法が一般的に用いられる。しかし、PDE システム全体を見た場合、燃焼室はより大口径かつ小気筒数が望ましい。例えば 100 倍の推力を得るため小口径燃焼器を 100 気筒にすると、冷却が必要な燃焼器側壁の面積は 100 倍となるのに対し、口径 10 倍の大口径 PDE 燃焼器を実用化すれば、同じ推力で冷却面積を多気筒式の 1/10 に抑えることが出来る。また、冷却配管などの設置が必要な冷却面が全て外周部となり、構造が単純という PDE 最大の利点を損なわない。そこで著者らは大直径のデトネーション波を容易に生成可能な「円筒波を用いたデトネーションイニシエータ (図 1)」を開発している。本イニシエータでは、プリデトネータとドライバーガスにより生成した平面波 (A) を反射体で反射拡大し、円筒波 (B)、円環波 (C)、大直径平面波 (D) に順次変換する。特長として、1) 反射体による反射効果により、平面波 (A) のプリデトネータ出口部における伝播効率が拡大管と同等であるにもかかわらず、**ドライバーガスの使用量を大幅に削減可能**であり、2) 有効拡大角が 60 度以下である拡大管に比べ**全長が極めて短くコンパクト**、3)**極めて単純な構造で円環波 (C) の爆縮効果を得ることが出来る事**、などが挙げられる。そして最大の特長は**大口径燃焼器への適用が容易**という点である。本イニシエータにおけるデトネーション波の面積拡大は円筒波 (B) が主に担っているが、拡大する円筒波の面積変化率は中心が最も大きく、半径が大きくなるに従い小さくなる。この性質より、一旦中心から自律的に伝播を始めた円筒波は消炎することなく半径方向に無限に拡大可能である。この円筒波を生成するために必要な中心部のドライバーガス充填半径  $R$  は目標とする大口径燃焼器の直径に依存せず一定となる。よって、一般的な方法では大口径化するほどドライバーガスの量が增大するのに対して、**本イニシエータはドライバーガスの使用量が口径によらず一定であり、大口径化するほどドライバーガスを使用することによる PDE の比推力低下を防ぐことが出来る。**

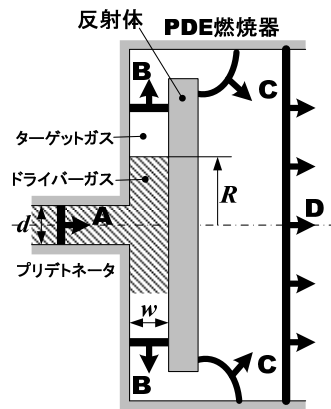


図 1 円筒波を用いたデトネーション開始機構

2. 研究の目的

著者らのこれまでの研究では、流路幅  $w$  を平面波 (A) から円筒波 (B) へのドライバーガスにおける伝播限界流路幅 (10 mm) に設定したが、ターゲットガス領域に伝播した円筒波 (B) の 1 つのセル構造が流路幅  $w$  より大きい場合、伝播が維持できず消炎してしまうことが判明している。より反応性の弱い大きなセルサイズを持つターゲットガスにまで適用範囲を拡大するためには、ターゲットガスの反応性に応じて流路幅やドライバーガス充填半径等を適切に設計する必要がある。そこで本研究ではあらゆるターゲットガスに適用可能な大直径デトネーション波生成条件の一般則を導くために、以下の 2 つの目的を設定した。

(1) 円筒波 (B) の生成条件に及ぼす流路幅  $w$  とドライバーガス充填半径  $R$  の影響を調べ、円筒デトネーション波への遷移条件の一般則を導く。

(2) ターゲットガス組成における円筒波 (B) から円環波 (C) への遷移条件に与える流路形状の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 円筒デトネーション波への遷移条件を調べるために、図 2 示すような平板燃焼器を用いた。燃焼実験においては、流路形状の変数としてプリデトネータの直径  $d$ 、流路幅  $w$  をとる。直径  $d$  は 10 mm と 20 mm、流路幅  $w$  は 3 mm、10 mm、15 mm をである。流路幅  $w$  が 3 mm の条件は、水素酸素量論混合気で全体を満たした場合でも平面波 A から円筒波 B へのデトネーション波の遷移が中心部で失敗するため、円筒流路中心部直径 300 mm が流路幅 10 mm となるようなドーナツ状の中子を製作して実験を行った。燃焼実験にあたって、ドライバーガスとして水素酸素量論混合気、ターゲットガスとして水素酸素量論混合気を窒素またはアルゴンによる希釈した混合気を用いた。ドライバーガスはボールバルブによって区切った燃焼器の上流部に

燃焼室より高圧の条件で充填することで燃焼室内に充填する。各混合気の充填圧は分圧法によって計算を行った。燃焼室内のデトネーションの伝搬の成否は燃焼室内に設置した煤膜と、図2に示すP1,2,M1,2,3,4ポートに設置した圧力ポートで取得する圧力の立ち上がりから測定する伝播速度とデトネーション波の理論伝播速度(CJ速度)との比較から行った。

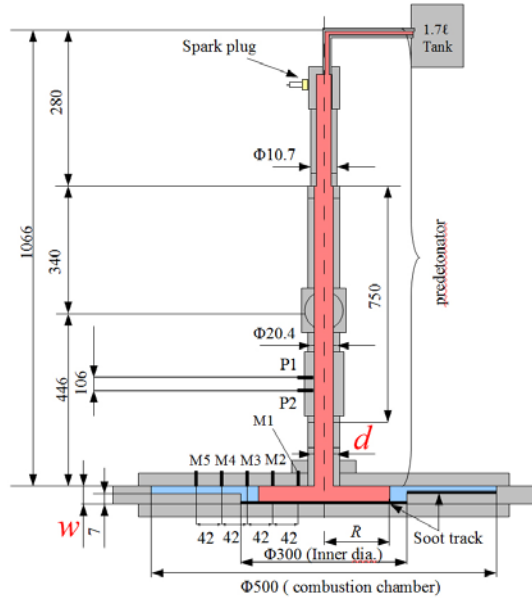


図2 円筒平板燃焼器

(2) 円筒波 (B) から円環波 (C) への遷移条件の調査に使用した実験装置の概要を図3に示す。プリデトネータは全長 920 mm、内径 20.4 mm の SUS304 製 1 inch 管であり、上端部から 700 mm の位置にボールバルブを取り付けたものである。燃焼室は半径 150 mm、高さ 150 mm の円筒状である。燃焼室内壁 M1~M8 には圧力ポートであり、一回の実験で四カ所の圧力履歴の取得が可能である。反射体は A5052 製の高さ 119 mm の円柱状であり、燃焼室の底に設置される。反射体上面に A5052 製の厚さ 5 mm または 10 mm の板を複数枚重ねボルトで固定することで、反射体上面の円盤状流路の幅  $W$  を変更する。反射体の最上面には厚さ 1 mm の A5052 製の板をアルミテープで固定する。本研究では  $W = 5, 10, 15$ , および 20 mm として実験を行った。反射体側面の環状流路幅  $L$  を変更するため、直径 280 mm ( $L = 10$  mm), 260 mm ( $L = 20$  mm), および 240 mm ( $L = 30$  mm) の 3 種類の反射体を用意した。本実験ではドライバーガスとして水素 - 酸素量論混合気, ターゲットガスとして水素 - 酸素量論混合気を窒素希釈したものを使用し、希釈率を調整することでセルサイズを変更する。ドライバーガスをボールバルブより上流部分に、ターゲットガスをボールバルブより下流部分にそれぞれ充填し、ボールバルブを解放することでドライバーガスを燃焼室の円盤状流路内に過供給する。ドライバーガスの過供給半径  $R$  に関

しては、安定した円筒波の形成条件である  $R \geq 75$  mm を基にして行った円筒波の形成実験の結果から決定する。円筒波の形成実験に関しては後述する。円筒波の形成実験から決定した、円環波形成の各実験条件における開放前のボールバルブの上下流部それぞれの充填圧を表2に示す。ボールバルブ解放後の燃焼器の内圧は 1 atm とし、点火にはプリデトネータ上端部に設置したスパークプラグを使用する。デトネーション波の伝播判断には圧力履歴から得られるデトネーション波の速度と理論速度 (CJ 速度) との比較、および煤膜によるセル構造の観測を用いる。煤膜は図4に示すように、①反射体上面、②反射体側面、および③燃焼器側面に設置し、円盤状流路および環状流路におけるセル構造を取得する。反射体上面煤膜の最外周部で 40 点程度セルを取得し、その平均値を実験ごとのセルサイズとする。

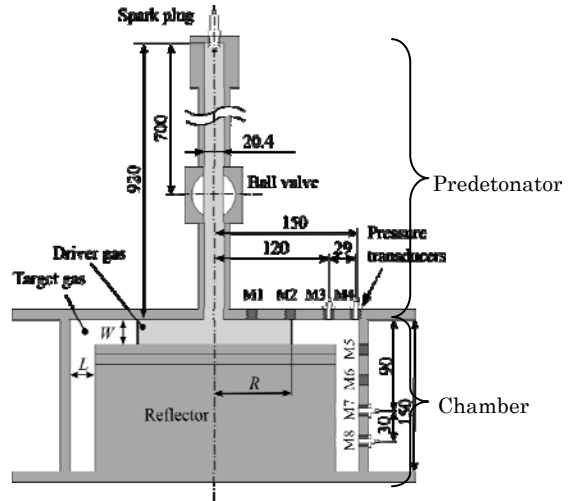


図3 φ300 mm 燃焼器

表1 充填圧

Cylindrical channel width $W$ [mm]	Overfilling radius $R$ [mm]	Driver gas (H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ) section pressure [kPa]	Target gas (H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> ) section pressure [kPa] ( $L = 10 / L = 20 / L = 30$ [mm])
5	100	113	88 / 94 / 96
10	100	121	82 / 89 / 92
15	100	129	78 / 86 / 89
20	75	123	85 / 90 / 92

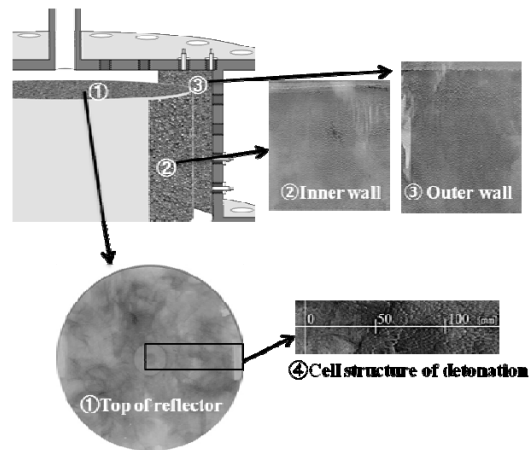


図1 すず膜取得位置

#### 4. 研究成果

(1) 流路幅  $w$  が 10 mm と 15 mm 場合の伝播の可否を図 5 および図 6 に示す。この図では、円筒燃焼器側面半径のすす膜模様で、中心から半径 200 mm の位置でデトネーションのセル構造が観察された条件を Go, されない条件を Nogo とした。縦軸はターゲットガスの  $W/\lambda$ , 横軸はドライバーガスの過供給半径である。両条件とも過供給半径が 100 mm よりも小さい場合は Go/Nogo の閾値が、過供給半径が増大するに従って減少しているが、100 mm 以上では一定となる。中心から拡大する円筒デトネーション波は半径が小さい中心付近では波面の拡大の影響（曲率の影響）を大きく受けるが、半径が大きくなるにしたがってその影響が弱くなり、より安定的に伝播するようになる。よって、過供給距離が 100 mm 以下の条件では、その曲率の影響を大きく受ける部分のドライバーガス充填半径が大きいほどよりターゲットガスにデトネーション波が伝播しやすくなるものと考えられる。一方、過供給距離が 100 mm 以上の伝播限界が一定となる原因として 2 つの仮説が考えられた。一つ目の仮説は、ターゲットガスのセルサイズが流路幅よりも大きくなり、デトネーションのセル構造が維持できなくなるために伝播限界が決まる ( $w/\lambda$  が伝播限界を決める) という仮説。二つ目の仮説は伝播判断をしている半径 200 mm の位置における曲率がターゲットガスのセルサイズに対して一定以上となることで拡大に耐えられず伝播限界が決まる ( $\lambda/r$  が伝播限界を決める) という仮説である。過供給距離が 100 mm 以上における境界値は、両条件ともおおむね  $w/\lambda = 1.5$  である。よって  $w/\lambda$  が伝播限界を決めていると考えられるが、この境界付近の窒素濃度は前述の通り 55.6% 付近であり、この付近のセルサイズは窒素濃度に対する感度が非常に高く、境界が  $\lambda/r$  で決まるか  $w/\lambda$  で決まるかは一概には判断できなかった。そこで、本研究では、研究の方法でも述べたとおり、流路幅 3 mm を実現できるドーナツ状中子を作成して、同様の伝播実験を行った。図 7 は過供給距離 100 mm における各流路幅における伝播限界を窒素希釈率で評価したものである。縦軸が窒素希釈率、横軸が流路幅である。一見してわかるとおり、度の流路幅でも伝播限界の閾値は 55.6% で一定である。一方、図 8 は図 7 を  $w/\lambda$  で評価したものである。この図より、伝播限界の  $w/\lambda$  の値は、一定ではなく、流路幅が増大するにつれて増加していることが分かった。以上の結果より、円筒デトネーション波の伝播限界はターゲットガス（水素・酸素量論混合気を窒素希釈）の窒素希釈率が 50% と 55.6% の間にあり、流路幅に依存しないことが明らかになった。伝播判断位置は  $r = 160$  mm, 窒素希釈率 50% ~ 55.6% のセルサイズは約 10 mm であることより、伝播限界を決める閾値  $\lambda/r$  は 1/16 である。

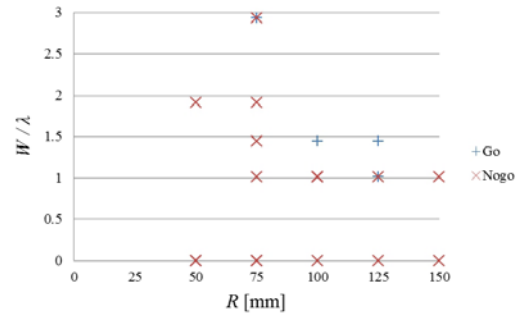


図 5 流路幅 10 mm における伝播の可否  
セルサイズによる評価

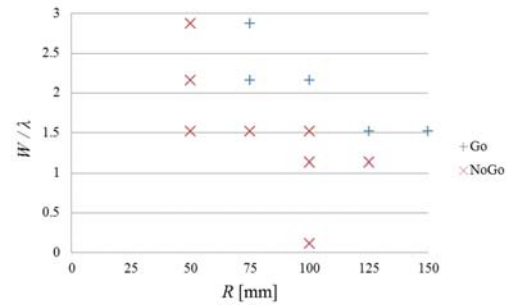


図 6 流路幅 15 mm における伝播の可否  
セルサイズによる評価

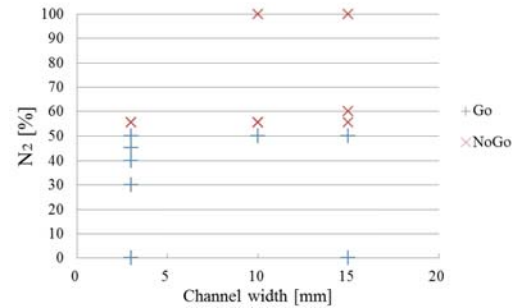


図 7 過供給距離 100 mm における各流路幅  
における伝播限界（窒素希釈率評価）

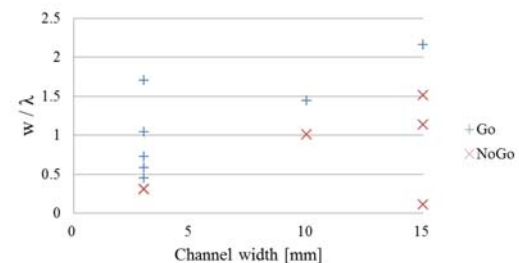


図 8 過供給距離 100 mm における各流路幅  
における伝播限界 ( $w/\lambda$  評価)

(2) 研究の方法 (2) で得られた成果について述べる。  $L = 10$  mm の条件における実験

より、円筒波から円環波への遷移において、すず膜模様により図9に示す3つ遷移パターンが観察できた。

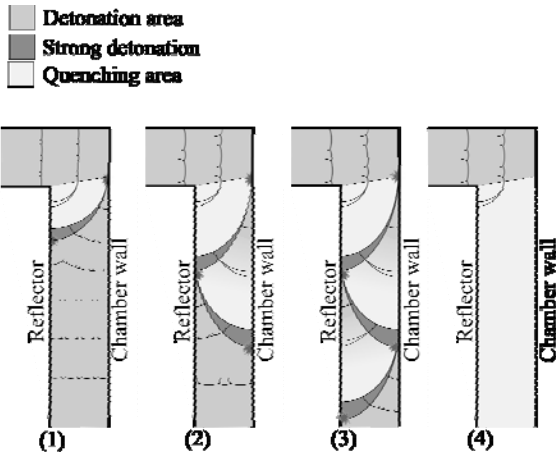


図9 各パターンの概念図

$L = 20$  および  $30$  mm の条件においても  $L = 10$  mm の条件と同様の伝播パターンが観測できた。  $L = 10, 20, 30$  mm の条件におけるデトネーション波の反射位置を測定した結果を図10に示す。図10では横軸が環状流路幅  $L$ 、縦軸が燃焼室上面からデトネーション波の反射位置までの距離を示している。図中のプロットは反射回数の違いを示しており、d2 および d4 は反射体側面で起きる二回目と四回目の反射の位置を、d3 および d5 は燃焼室壁面で起きる三回目と五回目の反射の位置をそれぞれ示す。図中の直線は各プロットの最小二乗法による近似直線である。図10より、 $L$  が大きくなるほど反射が起きる位置は下流へと移動することが分かる。そのため、 $L$  を大きくするほど、反射体の長さが必要となる。

$L = 10, 20, 30$  mm の各条件における実験結果を、横軸に  $W$ 、縦軸に窒素希釈率をとって整理したものを図11～13にそれぞれ示す。  $L = 10$  mm の場合ではそれぞれの伝播パターンの境界は  $W$  によらず、ほぼ一定である。  $L = 20$  mm の場合では  $W = 5$  mm の条件を除いて、窒素希釈率の違いによる円環波遷移への影響は見られなかった。  $W = 5$  mm の条件において円環波への遷移条件が厳しくなっているのは、 $L$  に対して  $W$  が小さくなることで、円筒波が燃焼室壁面に到達せず、最初の反射を起こす前に消滅する場合があるからである。また、  $L = 20$  mm の条件では伝播境界が  $L = 10$  mm の場合よりも窒素希釈率の高い方にシフトしている。これは、  $L$  が増加すると環状流路に入射した円筒波が燃焼室壁面に衝突・再開するまでの距離が長くなり、未燃焼ガスの予圧縮領域が広がるため、予圧縮領域を横切る強いデトネーション波が衝突・再開しやすくなるからである。  $L = 30$  mm の条件においても同様の現象が見られ、

伝播境界が一定となるのは  $W = 15$  mm 以上の条件であり、伝播境界はより窒素希釈率が高いほうにシフトしている。

すべての条件における実験結果を横軸に  $W/L$ 、縦軸に  $L/\lambda$  をとって整理したものを図14に示す。図14では  $W/L > 0.5$  の条件において、安定遷移の境界が  $L/\lambda = 3.5$  となっていることが分かる。一方、  $W/L < 0.5$  の領域においては一定の伝播限界を得ることができない。これは円筒波が燃焼室壁面に衝突する前に膨張波の影響を受けて消滅し、再開が起らない条件によるものである。

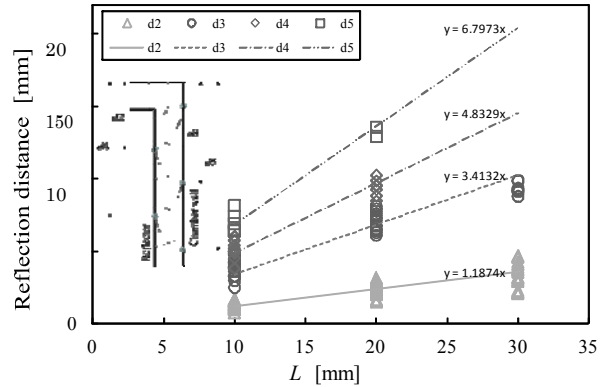


図10 反射位置

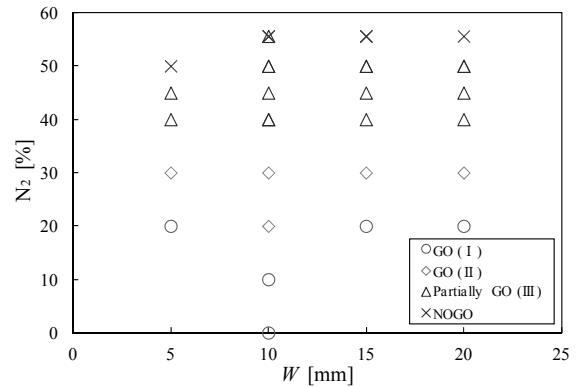


図11 デトネーション波の伝播状況  
( $L = 10$  mm)

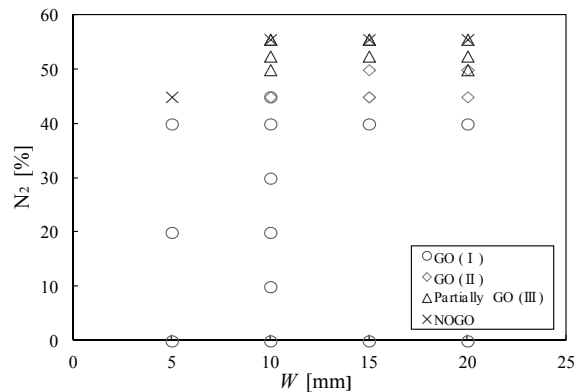


図12 デトネーション波の伝播状況  
( $L = 20$  mm)

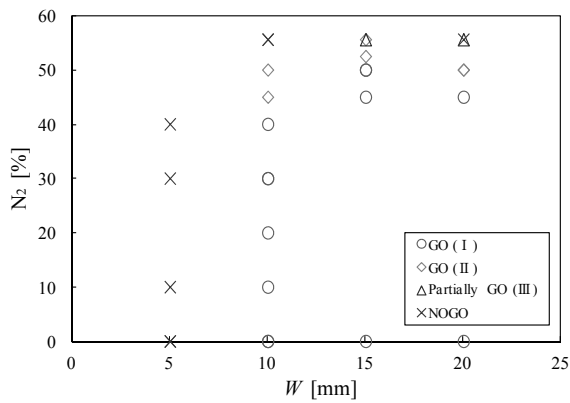


図2 デトネーション波の伝播状況  
( $L = 30 \text{ mm}$ )

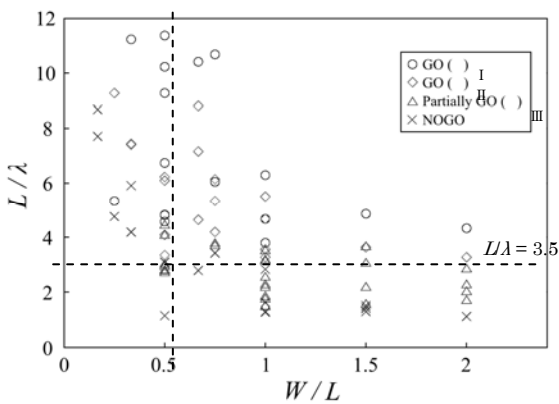


図14  $L/\lambda$  と  $W/L$  による伝播評価。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Masashi WAKITA, Kazuya SAJIKI, Tsunetaro HIMONO, Tsuyoshi TOTANI and Harunori NAGATA, “Influence of detonation cell size on propagation of cylindrical detonation wave”, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 12, No. ists29 pp.Pa\_1-Pa\_7, (2014). (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Shota KAMEYAMA, Shun NAWATA, Tsunetaro HIMONO, Keita KIKUCHI, Masashi WAKITA, Tsuyoshi TOTANI and Harunori NAGATA, “Influence of Channel Width on Propagation of Cylindrical Detonation Wave”, Proc. 30th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 神戸コンベンションセンター, Kobe, Japan (2015. 7. 8).

- ② Masashi Wakita, “RECENT PROGRESS ON DEVELOPMENT OF PULSE DETONATION ENGINE INITIATOR USING REFLECTOR IN HOKKAIDO UNIVERSITY”, 2014 International Workshop on Detonation for Propulsion (2014 IWDP), Warsaw, Poland (2014. 6. 24).
- ③ 菊地敬太, 亀山頌太, 松物恒太郎, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 反射体を用いた PDE イニシエータの円錐部の短縮が爆轟波の伝播に与える影響, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, Page. 332-333, 岡山コンベンションセンター, 岡山市 (2014. 12. 4)
- ④ 亀山頌太, 菊地敬太, 松物恒太郎, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 反射を利用した爆轟波生成装置の連続運転条件における円筒爆轟波の生成, 第 46 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2014 講演集(CD-ROM), 2E03(JSASS-2014-2125), 弘前文化センター, 弘前市(2014. 7. 4)
- ⑤ 松物恒太郎, 菊地敬太, 亀山頌太, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 円筒波の起爆と希釈燃料への伝播に流路幅が与える影響, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 3A2-5, 青山学院大学 相模原キャンパス, 相模原市 (2014. 3. 7).
- ⑥ 松物恒太郎, 菊地敬太, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 円盤状流路に入射する平面デトネーション波の半径方向に伝播する円筒波への遷移にプリデトネータ直径が与える影響, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, Page. 544-545, 大田区産業プラザPio, 東京都大田区(2013. 12. 6)
- ⑦ Masashi Wakita, Kazuya Sajiki, Tsunetaro Himono, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Effects of diluent gas on toroidal detonation wave propagation through gradual expanding channel”, Proc. 24th International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems (24th ICDERS), Taipei, Taiwan (2013. 8. 2).
- ⑧ Masashi Wakita, Kazuya Sajiki, Tsunetaro Himono, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Influence of detonation cell size on propagation of cylindrical detonation wave”, Proc. 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 名古屋国際会議場, Nagoya, Japan (2013. 6. 6).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

脇田 督司 (WAKITA MASASHI)

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80451441