

平成21年 5月 18日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間： 2007 ～ 2008

課題番号：19860002

研究課題名（和文） 反射板を用いたPDE用デトネーション開始機構に関する研究

研究課題名（英文） Research on detonation initiation mechanism with reflecting board for pulse detonation engine

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

研究成果の概要：

本研究は、パルスデトネーションエンジンにおける、デトネーション開始機構に関する研究である。従来のプリデトネータを用いたデトネーションイニシエータに対し、本研究ではプリデトネータ出口に円盤状あるいは円錐形状反射板を設置し、且つドライバーガスをプリデトネータから過供給するという2つの方法を同時に用いる開始機構を提案した。実験と数値解析により、本開始機構を用いることにより、ドライバーガス使用量を全体の0.7～1.0%程度に抑えることができる可能であることを実証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	730,000	0	730,000
2008年度	540,000	162,000	702,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,270,000	162,000	1,432,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：パルスデトネーションエンジン，超音速燃焼，デトネーション，反射板，ドライバーガス過供給，水素-空気混合気

## 1. 研究開始当初の背景

デトネーションは衝撃波に誘導される燃焼波の伝播形態であり、その性質から可燃性混合気中を超音速で自走的に伝播し、既燃混合気は瞬時に高温高圧になる。PDEは、燃焼器内の混合気をデトネーションで間接的に燃焼させ、その既燃混合気を排出することにより推力を得る推進機関である。その特徴

として、

- 機械的圧縮機構を必要とせず、非常に簡素かつ軽量
- 地上から宇宙空間まで、広範囲な飛行条件において運用可能
- ガスタービンのブレイトンサイクルを上回る熱効率などが上げられる。

PDE に関する世界的な取り組みに関しては G.. D. Roy (2004) によるサマリー論文に詳しいが、実用レベルの PDE には、燃料密度の高い液体燃料の使用および作動周波数の向上による推力の増大、空気を酸化剤として用いるエアブリージングモードによる比推力の向上が求められる。PDE に想定されているこれらの混合気（ターゲットガス）は一般的に反応性が極めて低いため、これらのターゲットガスに対して、可能な限り小さなエネルギーですばやくデトネーションを開始させることが PDE の実用化の最重要課題である。

Frokov (2006) らは液体燃料ベースの PDE に対しシエルキンスパイラルを用いたイニシエータを使用し PDE の連続作動実験を行った。これは DDT 過程 (Deflagration to Detonation Transition) を用いるデトネーション開始方法で、図 1 上図に示すような擾乱源を燃焼器内に配置することにより、追加的なドライバーガス（後述）を機体に搭載することなくデトネーションを開始することが出来る。しかし、燃焼器内に擾乱源を配置すると吸気および排気時に障害物となり圧力損失が大きくなり推力が低下する。また DDT 過程を用いると遷移時間がかかり、作動周波数を大きくすることが出来ない。またこれらの擾乱が高温熱源となり、イレギュラーな着火の原因となる。Brophy (2006) らは図 1 下図に示すような反応性の高いドライバーガスをイニシエータに利用することにより PDE の安定した作動を実現している。この場合、ドライバーガスを機体に追加的に搭載する必要があり、比推力が低下する。Bussing(1997)らはドライバーガスを用いた場合の PDE の性能解析を行い、全体の体積の 1%にドライバーガスを使用すると比推力が 20%低下することを示した。

ドライバーガスの使用量は、図 2 上図に示すようにドライバーガス領域を主燃焼器の内径よりも細い管（プリデトネータ Helman 1986）にすることで削減できるが、図中破線内のような管路が急拡大する部分を通過するデトネーション波には伝播限界条件があり、プリデトネータ直径  $D$  はプリデトネータ出口のセルサイズ  $\lambda$  の 13 倍以上必要である。

（デトネーションが通過する壁面にすす膜を塗布しておくこと図 2 に示すようなセル模様を得られる。セルサイズとはこのセル模様の大きさでありデトネーションの強さを表す基準として用いられる。大気圧下では、水素-酸素量論混合気は約 1.5 mm、水素-空気混合気では約 10 mm である。）

## 2. 研究の目的

地上から宇宙空間までの広範囲な飛行条件下を、単一エンジンで運用できる革新的な次世代型宇宙往還機用のエンジンであるパ

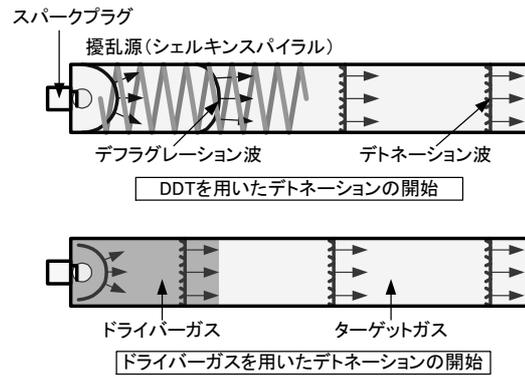


図 1 デトネーションの開始

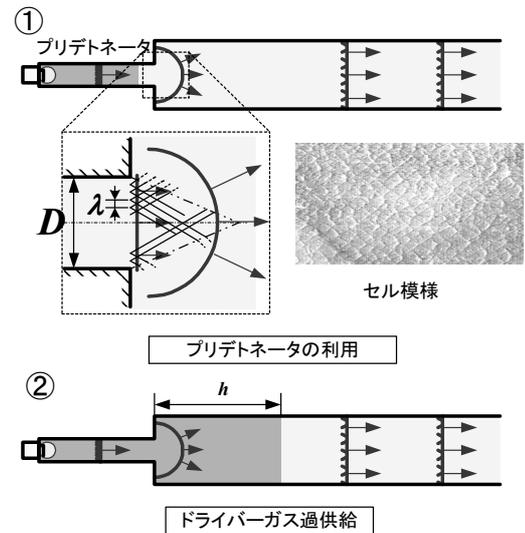


図 2 デトネーションの開始 2

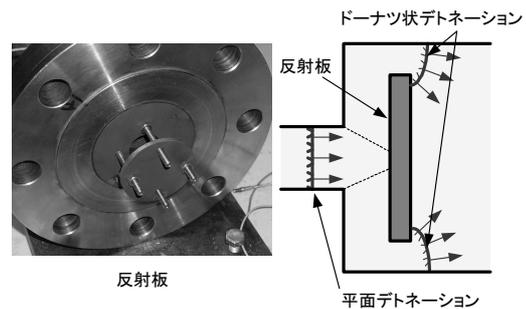


図 3 反射板

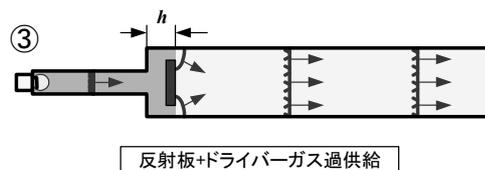


図 4 反射板と過供給

ルス detonation エンジン (PDE) において、「安定的な detonation の開始」を実現するために申請者らが開発を進めている「反射板を利用した PDE 用 detonation 開始機構 (イニシエータ)」について、これまで得られた知見をもとに、ドライバーガスの必要量を従来の 1/100 以下に削減し、推力・比推力の大幅な向上を可能にするための基盤技術を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、プリデトネータ出口の急拡大部における detonation 波の伝播促進を図るため、図 3 に示すような反射板と呼ばれる板をプリデトネータ出口部分に取り付けた。これはプリデトネータから入射する detonation 波の先行衝撃波を強制的に反射板で反射させて、その表面に高温高压の領域を発生させ、減衰する detonation 波を強制的に再開始させることを意図したものである。反射板を利用することにより限界プリデトネータ直径  $D$  はセルサイズ  $\lambda$  の 6.3 倍となり図 2-① に対しプリデトネータ直径を 1/2 に、ドライバーガス量を 1/4 にすることが出来る。一方、図 2-② に示すように急拡大部にドライバーガスを積極的に過供給することによりプリデトネータ直径を小さくすることが可能である。ドライバーガスを水素-酸素量論混合気、ターゲットガスを水素-空気混合気とするとプリデトネータ出口のセルサイズ  $\lambda$  は 1/7 になるので、臨界プリデトネータ直径  $D$  も 1/7 になる。しかし、主燃焼器に距離  $h$  過供給する必要が生じ、実際のドライバーガス削減効果図 2-① に対して 1/2~1/3 程度である。

そこで本研究では、図 4 に示すように、反射板およびドライバーガス過供給という 2 つの方法を同時に用いる方法によりドライバーガスの削減を図り、過供給距離  $h$  を変化させて伝播限界を調べた。

(2) 前述の円盤形状の反射板では、伝播限界条件において反射板後方の急拡大部において detonation 波が一旦消滅して途切れる様子が観察された。そこで、反射板後方の急拡大部における膨脹波による影響を抑え、detonation 波を持続的に伝播するように図 5 に示すような円錐形状反射板を採用して実験を行い、①と同様に、本イニシエータにおけるドライバーガスの使用量について考察を行った。

(3) 前述の円盤形状反射板の伝播限界条件における detonation 波の消滅現象を解明するために、反射板周りの detonation 波の数値解析を行った。支配方程式は二次元軸対称圧縮性 Euler 方程式に 8 化学種の質量保存を加えたものを用いた。なお、本計算コードは青山大学の林, JAXA の坪井, 両先生が開発したものである。

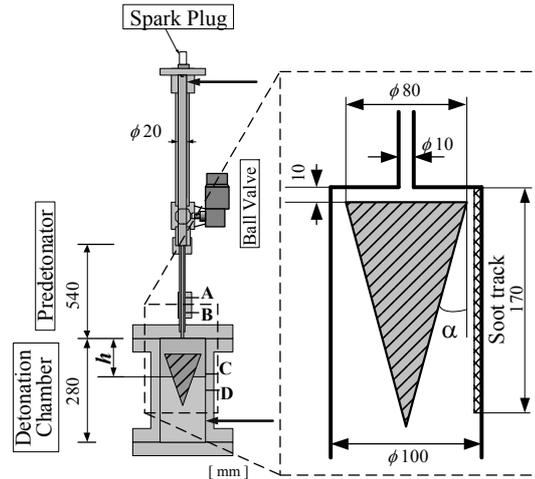


図 5 円錐形状反射板設置図

### 4. 研究成果

(1) 図 6 に過供給に必要なドライバーガスの削減量を示す。縦軸がドライバーガスの過供給距離である。○は燃焼器下流で detonation の伝播が確実に成功した場合、△は伝播成功と伝播失敗の両方が起きた場合、×は全ての実験で伝播しなかった場合を示す。反射板を装着することによって、過供給距離 30 mm でターゲットガスである水素-空気混合気への detonation 伝播が確認された。反射板を装着しない場合と比較すると、必要な過供給距離は半分に削減される。図 7 に特性過供給距離 30 mm の条件において燃焼器下流で detonation が再開始した際のすす膜を示す。ここで特性過供給距離  $h_c$  とはプリデトネータ出口からのドライバーガス過供給体積を detonation チャンバ断面積で除した値である。また、図 8 にこの条件における反射板周りの detonation 波の伝播のイメージ図を示す。プリデトネータから入射する平面 detonation 波が反射板に衝突しマッハ反射することにより、高温高压の領

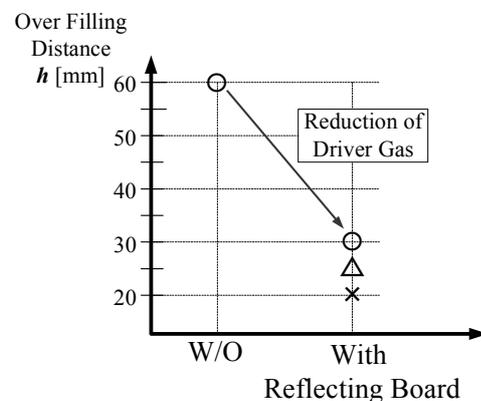


図 6 ドライバーガスの削減効果

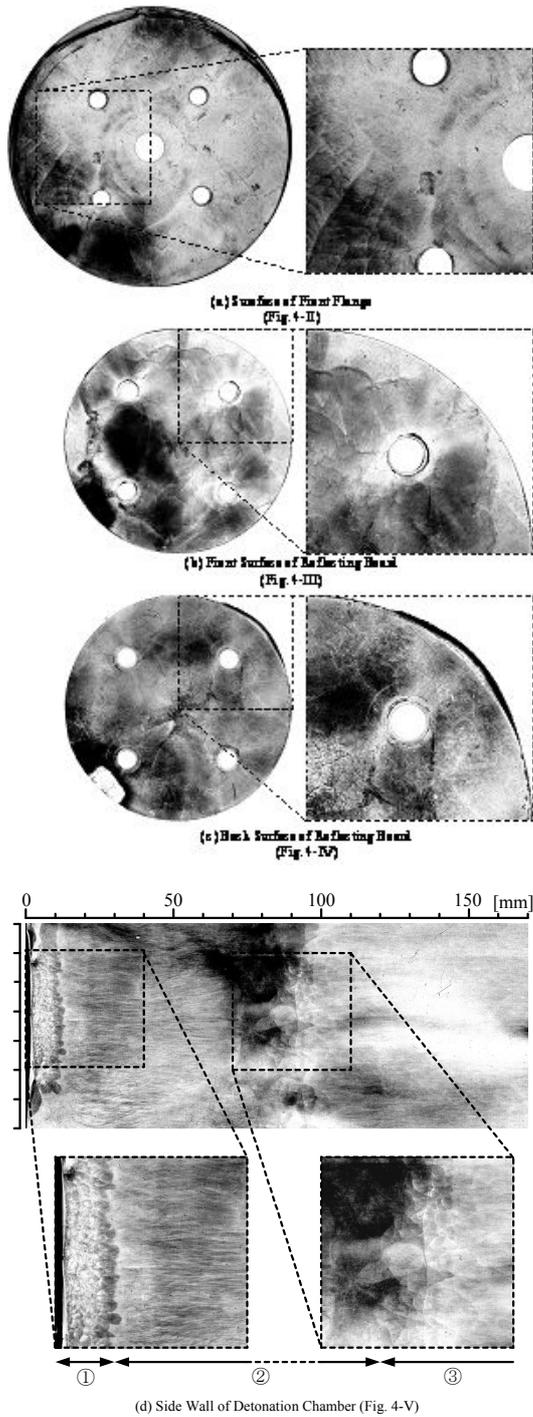


図7 すず膜模様 (特性過供給距離 30 mm)

域ができ、反射板手前で円筒デトネーション波が形成される。円筒デトネーションは半径方向に伝播し、燃焼器壁面に衝突する。衝突により再びマッハ反射を起こし、反射板と燃焼器の隙間でドーナツ状デトネーション波が形成される。ドーナツ状デトネーション波は更に下流で平面デトネーション波へ移行する。しかし、本実験で得られた結果を見ると、反射板手前において円筒デトネーション波が半径方向に伝播し、燃焼器後方において

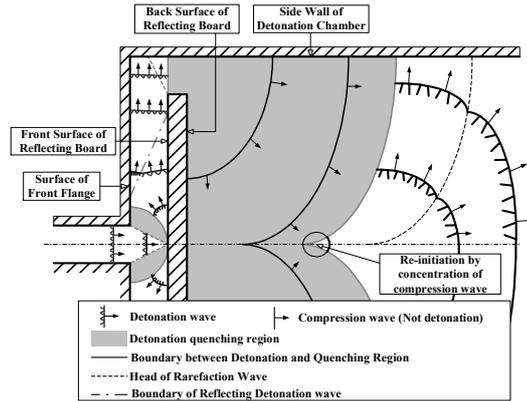


図8 反射板周りのデトネーション波挙動

は平面デトネーション波が伝播しているが、反射板と燃焼器の隙間においてはセル構造が確認されないことからドーナツ状デトネーション波の形成には失敗していると思われる。すなわち、反射板手前において円筒デトネーションの伝播に成功しても、ドーナツ状デトネーション波が確実に形成されるわけではないことがわかる。図7の反射板手前のすず膜を拡大した図を見ると、燃焼器壁面にデトネーションが衝突している様子がみられる。その後、燃焼波から乖離した強いドーナツ状圧縮波が中心方向に伝播し、反射板裏に集中することで中心軸上に高温高压の領域を作り出し、そこから球状デトネーション波が再開始したと考えられる。

(2) 図7に示すように、従来の円盤形状反射板では、反射板出口付近(左端から 10 mm)においてデトネーション波が一旦消失している。反射板直後からデトネーション波を伝播させるためには  $h_c = 100$  [mm] のドライバーガス過供給が必要であることが確認された。

1) 反射板直後からデトネーション波が持続的に伝播に成功している条件 (○), 2) 一旦消失の後再開始する条件 (△), 3) 伝播に失敗する条件 (×), 以上の3つの条件の境界を各円錐角の円錐形状反射板において調べた実験結果を図9に示す。従来形状反射板は円錐角を90度と考えて左端に載せた。前述のとおり円錐角90度の条件では  $h_c = 100$  [mm] のドライバーガス過供給が必要であるのに対し、円錐角45度以下の円錐形状反射板を設置することにより、反射板を通過するデトネーション波が持続的に伝播する限界条件の特性過供給距離を60 mm以下にすることが可能となった。また、この限界条件における特性過供給距離は円錐角が小さいほど短くなることが示された。

円錐角15度の円錐形状反射板を取り付けた場合における、デトネーション波が持続的に伝播する限界条件のすず膜模様を図10に示す。反射板前方で形成された円筒デトネ

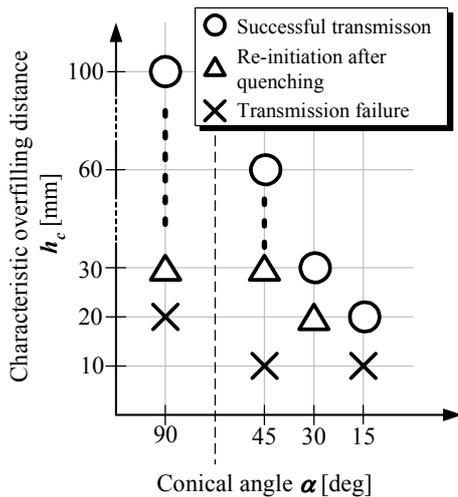


図9 円錐形状反射板を用いた場合の伝播状況

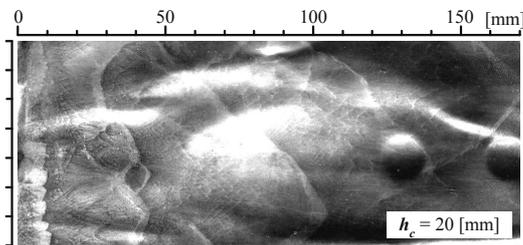


図10 燃焼器側壁のすす膜模様  
(円錐角 15 度, 特性過供給距離 20 mm)

ーション波は左端 0 mm から 10 mm までの帯状の領域に衝突している。その後、デトネーション波は消炎することなく下流に伝播し、すす膜模様では、大きいセルの中に小さなセルが描かれる様子が観察された。本条件における特性過供給距離は  $h_c = 20$  [mm] であり、従来型円盤形状反射板の特性過供給距離の 1/5 である。

本イニシエータを本研究より大口径の燃焼器に適用し、同様に円錐角 15 度の円錐形状反射板設置する場合を考える。円筒デトネーション波からドーナツ状デトネーション波に遷移する部分の断面積変化率は、大口径の方が本研究の形状よりも小さく設定することが可能であり、その結果、特性過供給距離は 20 mm より小さくすることが出来る可能性がある。デトネーションチャンバの長さはデトネーション波の理論速度と周波数の関係より 2~3 m であるので、本イニシエータを利用することにより、大口径燃焼器に対してもドライバース使用量を全体の 0.7~1.0 %程度に抑えることができると考えられる。

(3) 図 1 1 に反射板径とドライバースの関係を示す。縦軸がドライバースの特性過供給距離、横軸が反射板の径である。○は燃

焼室下流でデトネーションの伝播が成功した場合、△は伝播成功と伝播失敗の両方が起きた場合、×は全ての実験で伝播しなかった場合を示す。反射板径の変化により、燃焼室下流部におけるデトネーション伝播に必要な特性過供給距離も径が変化することが確認できる。反射板径 90 mm の場合と 70 mm の場合とを比較すると、必要な過供給距離は 2/3 に削減される。

図 1 2 に反射板径 70 mm 条件、図 1 3 に 90 mm 条件での解析結果を示す。両方の条件において、円筒デトネーションは膨張波の影響により、衝撃波と化学反応面が乖離していく。完全に消炎する前に円筒デトネーションが燃焼室壁面に衝突することによってホットスポットが形成され、ドーナツ状デトネーションが再開始している。再開始したデトネーションは、図 1 4-2 に示すように 2 つの方向に伝播していく。片方は未燃領域 (A) 方向へ、もう片方は乖離した衝撃波によって圧力が高くなった領域 (B) 方向へ伝播する。衝撃波によって圧力を高められた領域方向へ伝播するデトネーションは反射板の裏へと回り込む軌跡で伝播し、反射板の裏に衝突することで高温・高圧のホットスポットを形成して更に高圧なデトネーションを伝播させる。過去の実験においても反射板裏にセル模様を観測されたことがあり、円盤状の反射板においては、反射板裏もデトネーションの再開始に影響を与えていると考えられる。未燃領域へ伝播するデトネーションは図 1 2 (6) に示されるように、70 mm の条件においては消炎することなく伝播していく様子が確認できる。しかし、90 mm の条件では図 1 3 (6) に示されるように、消炎しかけてしまう。反射板裏で再開始したデトネーションが半径 (C) 方向に伝播することで、再び燃焼室壁面でデトネーションが伝播の様子が確認できる。この結果、両方の条件とも平面デトネーションへ遷移することが確認できる。

解析の条件では燃焼室内が全てドライバースに満たされているため、膨張波によりドーナツ状デトネーションは消炎しなかったと考えられる。実験においても燃焼室全体に水素-酸素量論混合気を充填した場合は消炎していない。実際の実験装置では反射板より下流の領域は反応性の低いターゲットガスで満たされているため、未燃領域方向へ向かうドーナツ状デトネーションは反射板通過時に完全に消炎してしまい、反射板裏へ向かうドーナツ状デトネーションも消炎し、反射板裏での再開始も起きなかったと考えられる。

以上の実験結果と解析結果から、ドライバースが十分に過供給され、反射板付近が水素-酸素量論混合気で満たされている場合、

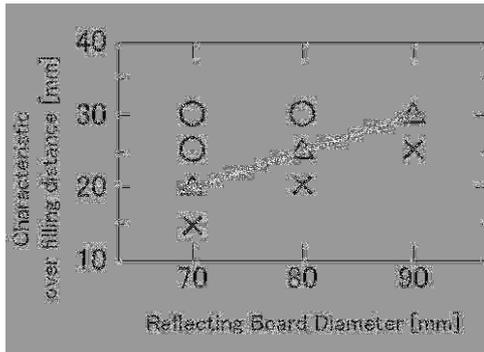


図 1.1 円盤状反射板を用いた場合の伝播状況

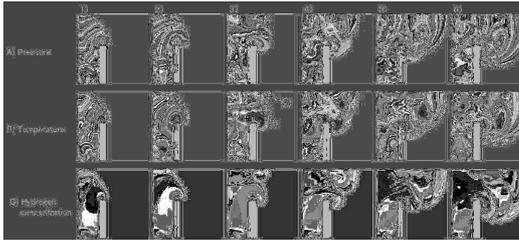


図 1.2 反射板径 70 mm におけるデトネーション波の数値解析結果

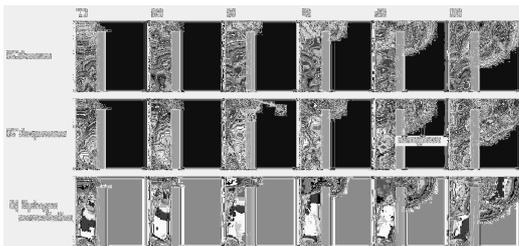


図 1.3 反射板径 90 mm におけるデトネーション波の数値解析結果

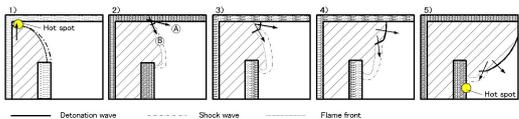


図 1.4 デトネーション波の再開機構

反射板径 70 mm, 90 mm 両方の条件でドーナツ状デトネーションは再開しているものと考えられる。実験において 70 mm では反射板通過直後にセルが観測でき、90 mm では観測できなかったことと、解析において 90 mm では一時的にドーナツ状デトネーションが消炎しかけており、70 mm では消炎の様子が見られないことから、ドーナツ状デトネーションが膨張波の影響を受けた際に燃焼室壁面と反射板の間隙がどの程度かによって消炎するかどうかが決まると考えられる。これは、プリデトネータから開放部へのデトネーションの伝播の際と同様に、セルが隙間に何

個存在できるかということがドーナツ状デトネーションの伝播維持に重要であるとい換えることができる。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

①浅田隆利, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 坪井伸幸, 林 光一, 「反射板を有する円管状燃焼器におけるデトネーション遷移過程の研究」平成 20 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, Vol. 2008 Page. 211-214, 名古屋大学 (名古屋) (2009. 03. 18).

②脇田督司, 浅田隆利, 戸谷剛, 永田晴紀, 「円錐形状反射板を用いた PDE イニシエータによるドライバーガス削減」平成 20 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, Vol. 2008 Page. 239-240, 名古屋大学 (名古屋) (2009. 03. 18).

③浅田隆利, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀, 「反射板を用いた PDE イニシエーターにおける反射板径の最適化に関する研究」, 第 47 回日本機械学会北海道支部講演会講演概要集, Vol. 47th Page. 151-152, 釧路工業高等学校(釧路市) (2008. 09. 27).

④浅田隆利, 脇田督司, 沼倉龍介, 戸谷剛, 永田晴紀, 「反射板を用いた PDE イニシエーターにおけるドライバーガス削減に関する研究」, 平成 19 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, Vol. 2007 Page. 275-278, 東京工業大学 (東京) (2008. 03. 17).

#### 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

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし