

# 円筒 detonation 波の伝播限界へ流路幅と円筒波面の曲率が与える影響

松物恒太郎, 亀山頌太, 大関敦, 榎並聖也, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀  
北海道大学

## Influence of channel width and curvature of cylindrical detonation wave on propagation limit

by  
Tsunetaro HIMONO, Shota KAMEYAMA, Atsushi OZEKI, Takaya ENAMI,  
Masashi WAKITA, Tsuyoshi TOTANI, Harunori NAGATA

### ABSTRACT

To realize practical use of a Pulse Detonation Engine, reliable initiation of detonation waves is important and the amount of oxidizer for initiation is needed to decrease to get high specific impulse. So the authors propose a detonation initiator to solve these problems. In this initiator, detonation waves propagate around a reflector through some transition. First, planar detonation waves transit to cylindrical detonation waves. Second, cylindrical detonation waves transit to toroidal detonation waves. Finally, toroidal detonation waves propagate to planar detonation waves propagating large bore chamber. In the propagation and transition process, the propagation limit of cylindrical detonation waves is unclear even though there is some hypothesis. That is to say, cylindrical detonation waves are quenched by its curvature or the formation of their cell structure is inhibited by narrow channel. In this paper, cell sizes are correlated to threshold condition for quenching. The proportion of cell sizes to the channel width of planer channel and the radius of cylindrical detonation waves are researched. It became obvious that cylindrical detonation waves can propagate stably if the proportion of the cell size to the radius of cylindrical detonation waves is larger than 25 and have the potential to survive and propagate if the proportion of the cell size to the radius of cylindrical detonation waves is larger than 17.

### 1. 序論

航空宇宙推進機関としてのパルス detonation エンジン (Pulse Detonation Engine, PDE) の実用化のために研究が盛んにおこなわれている<sup>(1)</sup>。PDE での detonation 波の開始には、デフラグレーション波を detonation 波に遷移させる Deflagration to Detonation Transition (DDT) 過程が用いられることが多い。DDT に要する距離を短縮する方法として管径の小さい爆轟波管 (Predetonator) に反応性の高いドライバーガスを充填する方法がある。しかし、Bussing ら<sup>(2)</sup>による研究により、Fig. 1 に示すように PDE の燃焼器の体積に対して 1% の酸化剤が搭載されることで比推力が 20% 低下することが指摘されており、現在、PDE の実用化への課題の一つとして、比推力を損なわずに燃焼室内に detonation を開始することが求められている。

本研究室では Murray<sup>(3)</sup> らの研究に注目し、detonation の反射による形態遷移を利用し、燃焼器内の酸化剤量の削減を可能とするイニシエータの開発を行っている<sup>(4)</sup>。Fig. 2 にこのイニシエータの概念図を示す。まず、爆轟波管出口近傍に反射体を設置することで、反射体と燃焼室壁面間に形成される円盤状流路を伝播する円筒 detonation 波を形成する。その後、拡大する円筒 detonation 波が壁面へと衝突し、リング状の下流へと伝播する円環 detonation 波への遷移する。最終的に、円環 detonation 波が拡大、リングの中心部分に向けて収束し、燃焼室内を伝播する平面 detonation 波を形成する。この伝播の過程では平面波から円筒波への遷移過程によって酸化剤の削減が可能となっている。管内から開放空間へと入射する detonation 波の伝播には水素酸素量論混合気のような不安定性混合気では管に 13 λ の直径が必要だが、この遷移過程で求められる直径は 6.3 λ であり、爆轟波管内の酸化剤体積を半分以下に削減することが可能になる。しかし、遷移過程での消炎を防ぐために Fig. 3 に示すように爆轟波管から円筒 detonation 波の形成される円盤状流路の一部までドライバーガスを供給する必要が生じる。ここで、燃焼器内の酸化剤の削減のため、円筒 detonation 波の形成のために必要とされるドライバーガスの量と、伝播の行

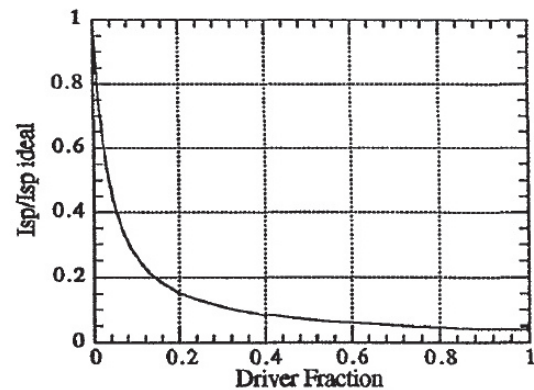


Fig. 1 ドライバーガス量による比推力の変化(2)

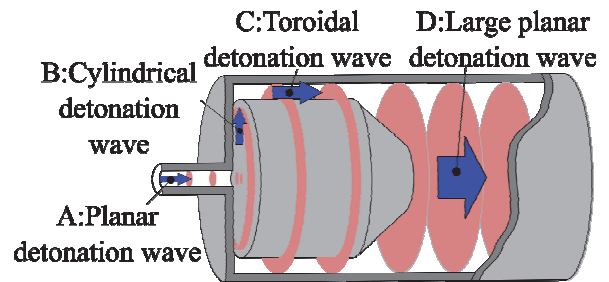


Fig. 2 イニシエータ概念図

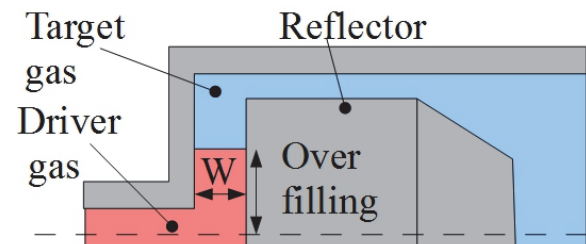


Fig. 3 ドライバーガス充填位置

われる混合気の希釈率が実験的に求められており、それぞれについて伝播限界が得られている<sup>(6)</sup>。しかし、伝播限界を支配する要素についていくつかの仮説が得られているが、十分に明らかにはなっていない。

伝播限界の生じる理由として、デトネーション波の開始直後など、伝播の過程で波面の面積が拡大する条件では伝播が困難になることが知られている。平面デトネーション波からの遷移直後の円筒デトネーション波は大きな曲率を持っており、オーバードリブン状態でこの領域を伝播する。杉山ら<sup>(6)</sup>は曲率を持つデトネーション波の CJ 速度によって規格化された速度が円筒波面の曲率  $r$  とセルサイズ  $\lambda$  の比、 $r/\lambda$  に依存することを示し、伝播が維持可能な範囲を  $r/\lambda > 27.2$  と示した。オーバードリブン状態の終了後、波面の曲率によるデトネーション波の存在可能な条件を満たすまでに消失することが消失原因の一つとして予想される。また、消失の原因として、以下のことが考えられる。デトネーション波のセルサイズは流路の形状に関する伝播の指標として広く用いられているが、円盤状流路内に形成される流路内での伝播限界は取得されていない。過去の研究<sup>(6)</sup>での伝播限界条件では常に流路幅  $w$  と  $\lambda$  に対して  $w/\lambda = 1$  となっているが、伝播の行われる混合気の希釈率に対しての検証は不十分である。本研究ではこの二つの要因について実験的に検証を行った。

## 2. 実験装置及び実験条件

本研究で使用した実験装置は爆轟波管、燃焼室、燃焼室外縁部に設置する障害物、各種ガスボンベ、ガスハンドリング装置、真空ポンプ、差圧調整用タンク、点火装置、各種計測機器からなる。本研究での実験装置及び実験条件は、前節に示した二つの要因に対応して二つに分けられる。流路形状による消失限界の検証に用いる燃焼器の概形を Fig. 4 に、波面曲率による消失限界の検証に用いる燃焼器の概形を Fig. 5 に示す。P1, P2, および M1-M6 はピエゾ圧電素子型圧力センサ (PCB piezotronics HM113A24) が接続可能である。爆轟波管上流部には DDT の促進のためシェルキンスパイラルを設置している。シェルキンスパイラルは、直径 3.18 mm の鋼管を用いて平均ピッチ 2 mm で製作したものをを用いている。混合気の充填圧はすべての実験条件で 1 atm である。

流路幅とセルサイズとの比による伝播限界の調査では、燃焼室中心部で形成された円筒デトネーション波を障害物によって形成される 1 mm または 3 mm の流路に入射させ、伝播の可否を判断する。燃焼室の形状は、Fig. 4 に示すように中心から 150 mm の位置までが流路幅  $w = 10$  mm の円盤状流路である。中心部で形成された円筒デトネーション波は、燃焼室中心から 150 mm から 250 mm の位置までに形成される流路幅  $w' = 1$  mm または 3 mm の流路に入射する。この実験では、混合気境界部で生じる密度、反応性の変化による円筒波面への影響の排除のために、燃焼器内を単一の混合気で満たして実験を行う。混合気には遷移が生じる条件で最も大きなセルサイズが確認された水素酸素量論混合気に 20% の窒素を希釈した混合気を用いる。セルサイズの測定は、爆轟波管出口、燃焼室底面、障害物上に設置した煤膜によって行う。燃焼室内でのデトネーション波の伝播判断は障害物上で取得したセルサイズで行う。障害物上の全面にセルが確認された場合を伝播成功と判断する。ただし、障害物上で取得したセルサイズが拡大し続けている場合、伝播に伴いその後消失すると仮定し、消失と判断している。

曲率についての調査での燃焼器の概念図を Fig. 5 に示す。燃焼器内部はボールバルブによって遮断されており、上流に高圧でドライバーガスを、下流に低圧でターゲットガス

を充填し、バルブの開放によってドライバーガスを燃焼室内に充填する。ドライバーガスとして水素酸素量論混合気を、ターゲットガスとして水素酸素量論混合気を窒素で希釈した混合気を用いる。ドライバーガスが充填された領域で形成された円筒デトネーション波をターゲットガスへと伝播させる。燃焼器内の二種の混合気が等しい圧力になった時の燃焼室中心から混合気境界部までの距離を過供給距離と呼称する。過供給距離は 0 mm から 150 mm までとした。また、水素酸素量論混合気の窒素希釈率を 0% から実験装置内でデトネーション波の伝播が確認できなくなる

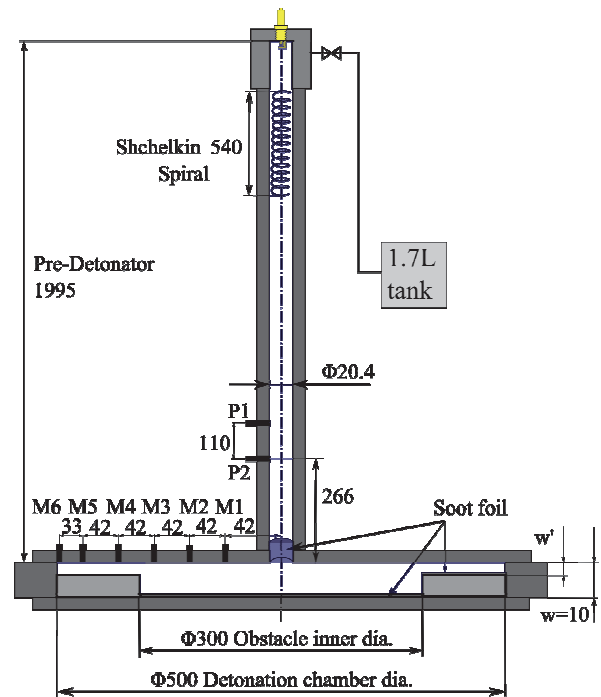


Fig. 4 流路形状に対する伝播限界の検証用の実験装置概念図

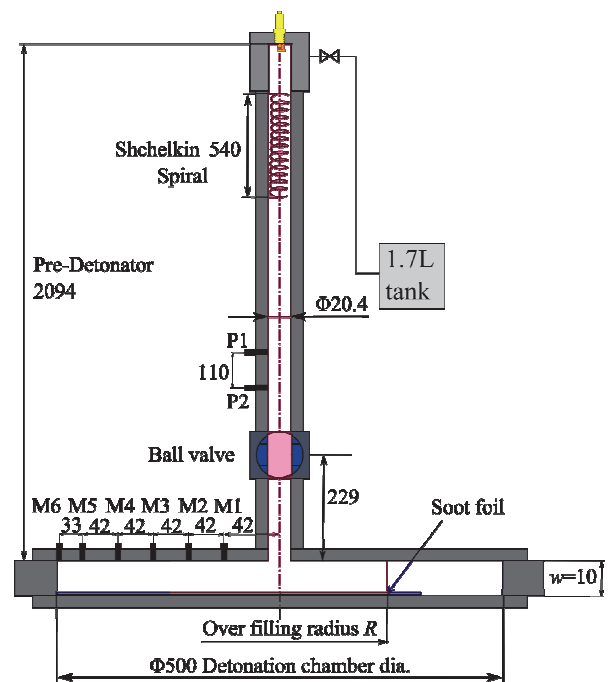


Fig. 5 円筒波面曲率に対する伝播限界の検証用の実験装置概念図

60%までの範囲で変化させる。バルブ開放 1 秒後に爆轟波管端のスパークプラグによって着火が行われ、DDT が開始する。

3. 流路幅による限界

爆轟波管出口で取得した本実験でのセルサイズと先行研究において同様の圧力、混合気で取得されたセルサイズを Fig. 6 に示す。本実験では希釈率 20%のデトネーション波のセルサイズは約 1.4 mm となっている。希釈率に対するセルサイズの変化の傾向は先行研究とよく一致しているが、セルサイズの値は先行研究に比較して小さい値となっている。これは、取り扱っている混合気が不安定性混合気であり、煤膜上で個々のセルの識別が困難であること。そのために煤膜の画像データ上のセルサイズの取得位置に作図した線に交わる横波の間隔をセルサイズとしていることから、先行研究より小さい値が取得されたと考えられる。

燃焼室内で取得されたセルサイズを Fig. 7 に示す。縦軸にセルサイズ、横軸に燃焼器中心からセルサイズ取得位置までの距離を示す。エラーバーとして取得されたセルサイズの標準偏差を示す。グラフ中の破線は 150 mm の位置を示しており、破線左側では流路幅  $w = 10$  mm, 右側では流路幅  $w = 1$  mm, 3 mm の領域でのデータを示している。Fig. 7 から、障害物到達まではほぼ等しい値のセルサイズが取得されており、流路形状の変更が生じる位置まではほぼ等しい状態で障害物上に到達しているといえる。障害物上からはセルサイズの傾向に変化が生じている。 $w' = 3$  mm の条件ではセルサイズには変化が見られないが、 $w' = 1$  mm の条件ではセルサイズは障害物上で約 2.4 mm で定常な値を示しており、流路形状の影響の影響からセルサイズが拡大していることがわかる。 $w' = 1$  mm の結果から、少なくとも  $w' / \lambda = 0.42$  ではセルサイズの拡大から消炎に向かっていることが示唆されるものの、円筒デトネーション波が伝播可能であることが示され、過去の実験結果<sup>(5)</sup>での伝播限界の支配要因ではないことがわかった。 $w' = 1$  mm の結果で、流路形状によるセルサイズへの影響が確認できることから、流路形状がセルサイズに対して十分に小さい条件では消炎が生じると考えられるが、本研究では流路幅による円筒デトネーション波の伝播限界は取得できなかった。

4. 曲率による限界

Wakita<sup>(6)</sup>らは観測範囲にセルが確認された条件を伝播成功と判断したが、円筒波の一部に消炎が生じたとき、その後伝播に伴い円筒波面が形成されるかは明らかになっておらず、また、不完全に形成された円筒波面から壁面との衝突によって円環波の形成が行われるかも明らかになっていない。そのため、本研究では観測範囲内の一部で消炎が生じている条件を消炎として示す。この伝播判断での円筒デトネーション波の伝播限界を Fig. 8 に示す。縦軸にターゲットガスの窒素希釈率、横軸に過供給距離  $R$  を示す。この結果から、円筒デトネーション波が消炎を生じず燃焼室内を安定に伝播可能であるのは窒素希釈率 50%までであることがわかる。伝播限界の限界付近での伝播に伴うセルサイズの変化を Fig. 9, 10, 11 に示す。縦軸にセルサイズ、横軸に燃焼器中心からのセルサイズ取得位置を示す。Fig. 9 に示すように、安定な伝播の確認される窒素希釈率 50%の混合気への伝播ではセルサイズは燃焼室中心から 125 mm の位置から測定範囲全域で約 4 mm で安定した値をとり、安定に伝播する。また、Fig. 10 に示すように、伝播限界である窒素希釈率 55.6%の条件で確認された伝播条件では、セルの増大後にセルが縮小し、安定な伝播に遷移しつつあることがわかる。一方、Fig. 11 に示すように、窒素希釈率

が 55.6%以上の混合気への伝播で、消炎が確認された条件では、セルサイズが拡大を続け、約 9 mm 程度まで拡大した時点で消炎が確認されている。

燃焼器内で拡大する円筒デトネーション波は正の曲率を持ったデトネーション波として扱うことが可能であり、杉山<sup>(6)</sup>が提唱した気体デトネーション波の準定常 1 次元モデルを参考とした。Fig. 12 に杉山らの行った数値解析のモデルを示す。解析の結果、杉山らは衝撃波面半径  $R_s$  とセルサイズ  $\lambda$  の比が 27.2 を下回るとき、方程式の解が存在せず、デトネーション波が伝播を維持することができなく

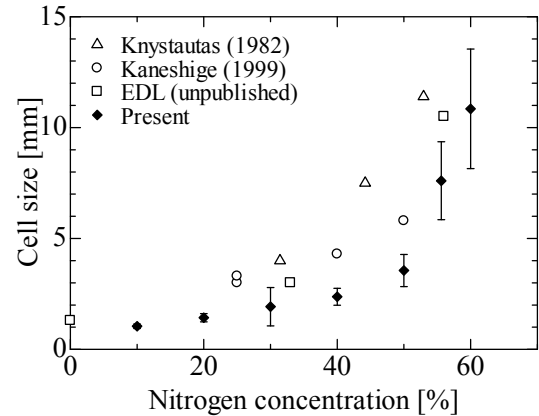


Fig. 6 爆轟波管出口でのセルサイズ

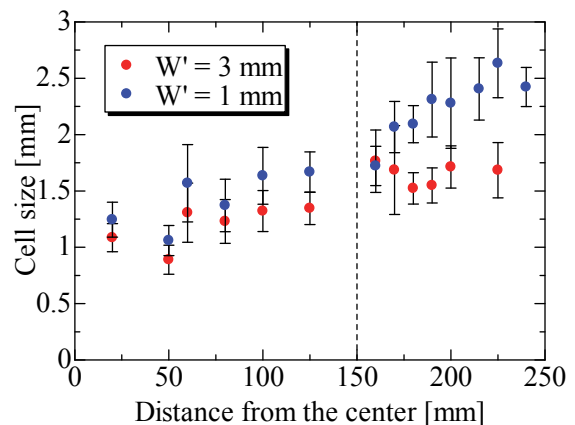


Fig. 7 障害物上でのセルサイズ

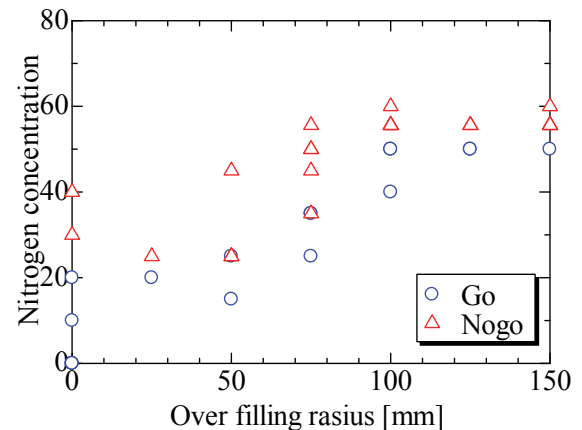


Fig. 8 希釈混合気への伝播に要するドライバーガスの充填範囲



なることを示した (Fig. 13). そこで, 本研究では消炎限界条件での煤膜上から取得されるデトネーション波セルサイズから, 消炎限界の指標として  $r/\lambda$  を用いて円筒デトネーション波の伝播, 消炎限界を検証する. まず, 煤膜上での消炎判断の例を Fig. 14 に示す. 煤膜上に示すように, セルが確認されなくなった位置を消炎位置とし, Fig. 14 のように円筒波面の一部が消炎し, 波面のほかの領域が伝播している場合では, 最も中心に近い位置で消炎している箇所を消炎位置とする. Fig. 15, 16 にそれぞれ伝播限界条件で, 煤膜内で伝播が確認された領域, 消炎が確認された領域での  $r/\lambda$  の伝播に伴う変化を示す. それぞれのグラフ内の斜め線は窒素希釈率 55.6%(ターゲットガス) の条件で爆轟波管内で取得されたセルサイズと円筒デトネーション波半径から算出した円筒デトネーション波が安定に伝播する条件での  $r/\lambda$  の予想値である. Fig. 15 から, 伝播の確認された条件では  $r/\lambda$  はターゲットガスへの伝播後から減少し, セルサイズの増加が開始していることがわかる. その後, ある点から  $r/\lambda$  は増加をはじめ, 安定に伝播している. ただし, うち一点では  $r/\lambda$  が大きく上昇していることがわかる. これは, 本実験で用いている混合気が不安定性の混合気としての特性を持つため, 局所的にオーバードリブン状態での伝播を行ったものと考えられる. この結果から,  $r/\lambda = 17$  の条件で円筒波が消炎を生じずに安定な伝播に至ることが確認されている. また, Fig. 15 に示す条件でのセルサイズは, Fig. 10 に示している. Fig. 16 から, 消炎が確認された条件では Fig. 15 のように  $r/\lambda$  の増加が生じることがなく, 消炎していることがわかる. この結果から, 消炎が  $r/\lambda = 25$  の条件から生じることがわかる. これは上述した杉山らの理論解析による結果に極めて近い結果であるといえる. 次に, 爆轟波管出口で取得されたセルサイズと本実験で取得した  $r/\lambda$  の境界値である 25 から, 各窒素希釈率について  $r/\lambda = 25$  となる点を円筒デトネーション波の伝播限界とともに Fig. 16 に示す. 縦軸に混合気の希釈率, 横軸に過供給距離を示す. 実線の右側の領域が, 境界値から得られた, 円筒波面半径が十分大きく, 円筒波面の存在可能な範囲を示している. この結果から, 希釈率 55.6% の条件では,  $R > 190$  mm の領域で消炎を生じずに伝播が可能となると考えられる. また, 希釈率 60% の条件では  $R > 271$  mm の領域から消炎を生じずに伝播が可能になると考えられる.

## 5. 結論

円盤状流路内での円筒デトネーション波の伝播限界の決定要因について, デトネーション波の伝播する流路幅, 円筒デトネーション波の波面の持つ曲率とセルサイズの関係に注目して実験的に調査を行い, 円筒波の伝播限界の決定要因を明らかにした.

流路幅 1 mm, 3 mm の流路に円筒デトネーション波を注入し, 伝播の可否を検証した. セルサイズに対して約 0.4 倍の流路幅に対しても伝播が確認され, 伝播限界を取得した条件では流路幅に対する伝播条件は満たされていることがわかった. 流路幅に対する伝播限界となるセルサイズの観測には至らなかったが, 流路形状の影響により流路幅 1 mm の流路でセルサイズの増大が確認されており, 伝播が困難になっていることがわかる.

波面曲率とセルサイズからの伝播限界の検証によって,  $r/\lambda > 25$  を満たすとき, 円筒デトネーション波が持続的に伝播可能であることが実験的に明らかとなった. また,  $r/\lambda < 25$  の条件では消炎が確認され始め,  $r/\lambda > 17$  以上の条件では  $r/\lambda < 25$  以下の領域から伝播しうることが確認された.

## 6. 参考文献

- (1) G.D. Roya, S.M. Frolovb, A.A. Borisovb, D.W. Netzerc “Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective” *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) 545–672.
- (2) Bussing, T. A. R., Bratkovich, T. E. and Hinkey Jr, J. B., “Practical Implementation of Pulse Detonation Engines.” AIAA Paper 97-2748, 1997.
- (3) Murray, S. B. and Lee, J. H. “On the transformation of planar

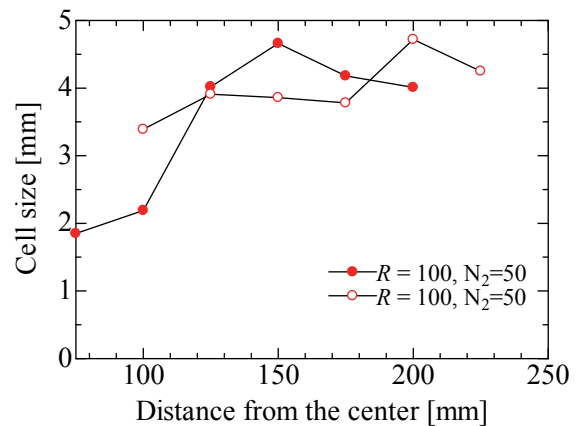


Fig. 9 安定伝播条件での伝播に伴うセルサイズの変化

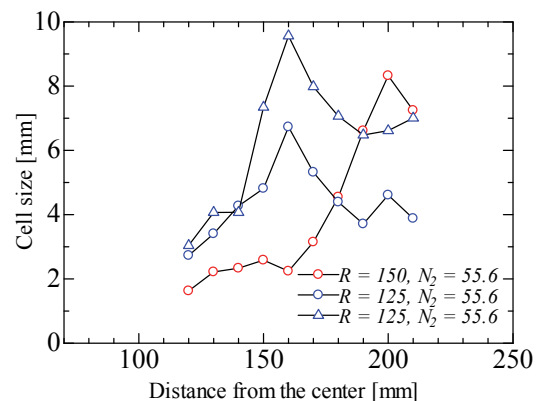


Fig. 10 伝播境界条件における伝播時のセルサイズの変化

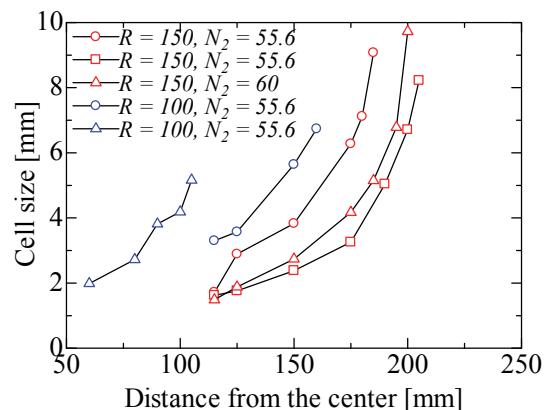


Fig. 11 伝播境界条件における消炎時のセルサイズの変化

detonation to cylindrical detonation,” Combust. Flame, 52, 1983, pp. 269-289.

(4) Masashi Wakita, Tsunetaro Himono, Keita Kikuchi, Shota Kameyama, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Influence of gradual expanding channel cutoff on propagation of the toroidal detonation wave” 25th ICDERS.

(5) Masashi Wakita, Masayoshi Tamura, Akihiro Terasaka, Kazuya Sajiki, Tsuyoshi Totani, Harunori Nagata “Development of Pulse Detonation Engine Initiator Using Reflector for Large Bore Combustor” TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 10 (2012) No. ists28 p. Pa\_31-Pa\_36.

(6) Yuta Sugiyama “Numerical Study on Propagation Behaviors of Gaseous Detonation in Two- and Three- Dimensional Tubes” Graduate School of Science and Technology Keio University, 2013.

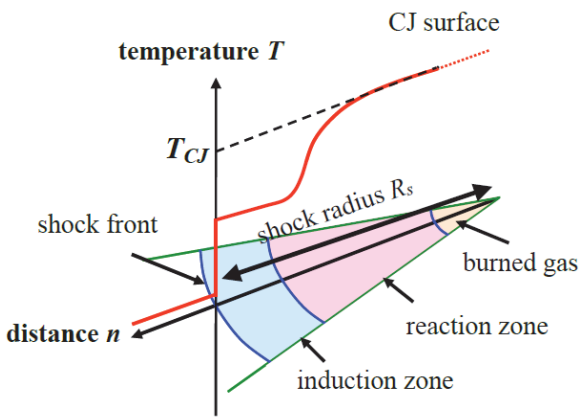


Fig. 12 曲率を持った準定常1次元解析の概念図(6)

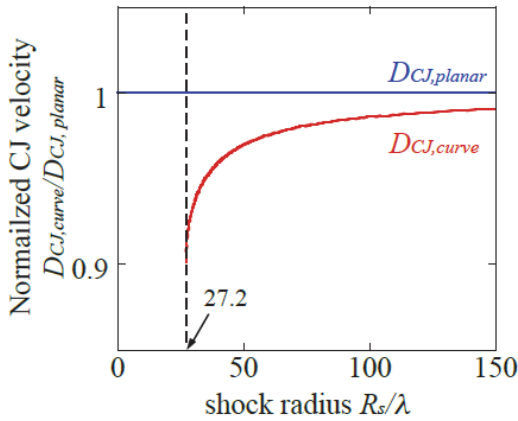


Fig. 13 準定常1次元解析によるCJ解の存在範囲(6)

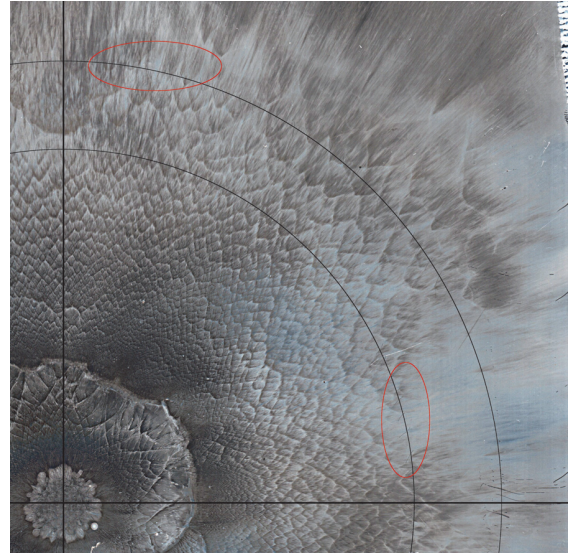


Fig. 14 デトネーション波消炎判断の例

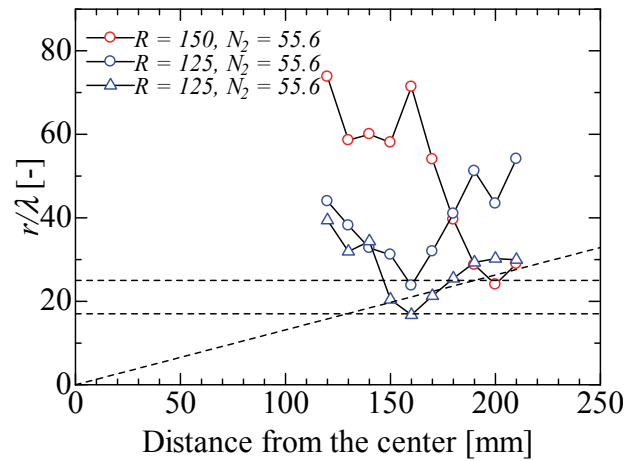


Fig. 15 伝播境界条件における伝播時の伝播に伴う  $r/\lambda$  の変化

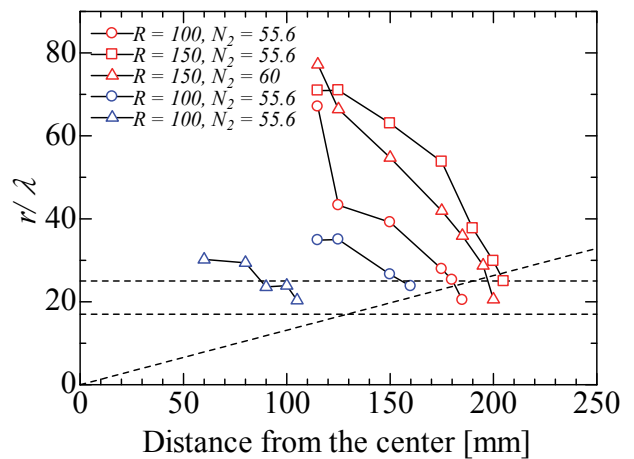


Fig. 16 伝播境界条件における消炎時の伝播に伴う  $r/\lambda$  の変化

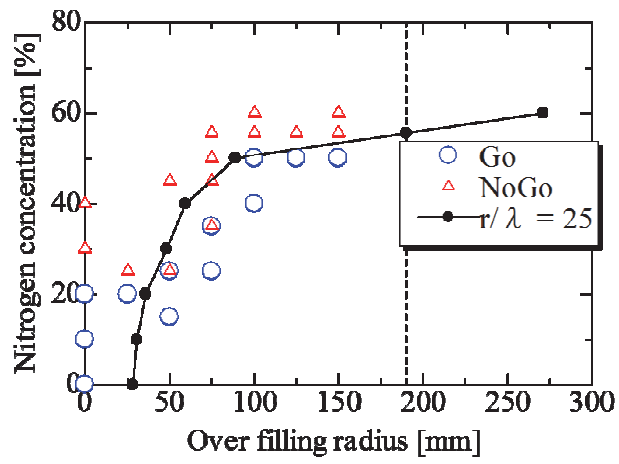


Fig. 17 円筒波面デトネーション波の存在可能範囲