

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

亀山頌太, 菊地敬太, 桧物恒太郎, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀
北海道大学 大学院

Initiation of cylindrical detonation wave in an enhanced reflection type detonation initiator in multi-cycle operation conditions

by

Shota KAMEYAMA, Keita KIKUCHI, Tsunetaro HIMONO, Masashi WAKITA, Tsuyoshi TOTANI and Harunori NAGATA
(Hokkaido University)

ABSTRACT

To achieve practical uses of large bore Pulse Detonation Engines, the authors have proposed the enhanced reflection type detonation initiator. Here, successful transmission from a planar detonation wave in a predetonator to a self-sustainable expanding cylindrical detonation wave at a cylindrical path is a key issue. In a previous single-cycle research, the authors revealed that the necessary overfilling radius of the driver gas (stoichiometric H_2-O_2 mixture) to initiate a cylindrical wave is 75 mm. The aim of this study is to investigate the effect of multi-cycle operation condition on the transmission to a cylindrical detonation wave. The result shows that a planar detonation wave with theoretical CJ speed is formed but a cylindrical detonation wave is not formed at any overfilling radius from 50 to 175 mm. Soot track records at the cylindrical path surfaces and a mixing analysis of driver and target mixtures using ANSYS FLUENT strongly indicate that residual nitrogen gases at the exit of the predetonator have a negative effect on the transmission.

1. 序論

本研究室では、大口径パルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine : PDE) の実用化のために、爆轟波管出口に反射板を設置した独自の PDE イニシエータを提案し、反射を利用した爆轟波の伝播促進に関する研究を行ってきた⁽¹⁾。過去の研究より、爆轟波管出口と反射板の間に円筒爆轟波が形成できれば反射板よりも下流へ爆轟波を伝播できることが明らかにされている⁽²⁾。桧物ら⁽³⁾はFig.1の実験装置を利用したシングルサイクル実験により、水素-酸素量論混合気をドライバーガスとして燃焼器の半径 $R = 75$ mm以上の領域に過供給することにより、ターゲットガス (水素-空気量論混合気, 窒素濃度55.6%) に爆轟波管から入射した爆轟波を伝播させ、円筒爆轟波を形成できることが明らかにした。シングルサイクル実験で使用した実験装置 (Fig.1) では爆轟波管がボールバルブにより上流部と下流部に仕切られており、上流部に高圧のドライバーガスを、下流部にターゲットガスの充填を行う。充填後にボールバルブを開放することにより上流部と下流部の圧力差により高圧のドライバーガスが燃焼器に流れ込み、ドライバーガスを過供給できる仕組みとなっている。この時使用されるドライバーガスとターゲットガスは予混合されたものであり、点火はドライバーガスが十分に過供給されるボールバルブ開放から1秒後

に行われた。

PDEの連続運転は多くの研究室で実証試験が行われているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、PDEイニシエータを利用した大口径PDEの連続運転に関する研究は十分に行われていない。PDEイニシエータを利用した大口径PDEの連続運転を実現するにあたり、連続運転条件でのドライバーガスの充填方法、混合方法が爆轟波の遷移に与える影響を明らかにすることが求められている。本研究では電磁バルブから水素、酸素を爆轟波管内に噴射、混合させ、噴射直後に点火を行う。本研究の目的は実機の連続運転に近い条件でシングルサイクル実験を行い、燃焼器に入射する爆轟波が円筒爆轟波へ遷移する際に連続運転条件が与える影響について検証することである。

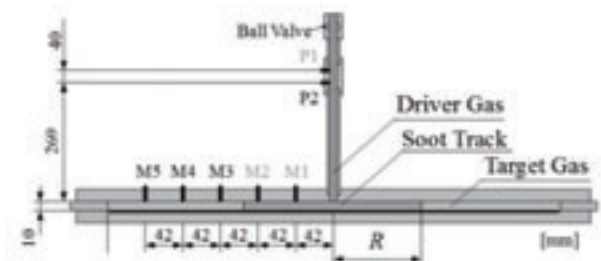


Fig.1 Over filling method⁽³⁾

2. 実験装置および実験条件

本研究で使用した実験装置の概略と寸法をFig.2に示す。実験装置は爆轟波管、燃焼器、各種ガスボンベ、点火装置、電磁バルブ、計測機器から構成される。燃焼器は内径500 mm、高さ10 mmの円筒状となっており、内径10.7 mmの爆轟波管が上部に取り付けられている。電磁バルブは燃焼器上面から414 mmの位置に垂直に取り付けられており、水素と酸素は内径4 mmのチューブを通じて爆轟波管内に供給され、各気体を対向流で衝突させ混合している。電磁バルブの直下にスパークプラグが取り付けられており、電気火花で点火される。P1, P2, およびM1~M5は圧力ポートであり、1回の実験で4箇所の圧力履歴を取得可能である。本実験では爆轟波管内でのDDTの確認および円筒爆轟波への遷移を観測するためにP1, P2, M1, およびM2で圧力の取得を行った。電磁バルブと点火装置はシーケンサ (KEYENCE KV-700) に書き込まれたプログラムに従い制御される。本研究では連続運転時の目標周波数を10 Hzとしており、吸気時間を40 ms、混合待機時間を10 msとし、点火信号送信時間に関しては、本実験ではシングルショット実験のみを行うため、200 msとして確実に点火できるシーケンスとした。プログラムのシーケンスをFig.3に示す。気体はボンベに接続されているレギュレータにより減圧された状態で電磁バルブに供給されている。ドライバーガスの過供給距離を変える場合にはバルブ開放時間は固定したまま、水素および酸素のボンベに接続されているレギュレータの2次圧力を調整することにより流入する気体体積の調節を行った。本実験で各気体は電磁バルブを通して爆轟波管に供給されるため、水上置換法により電磁バルブが40 ms駆動した際に流入する体積の量とレギュレータ2次圧力の関係をプロットし、線形近似式を得た。Fig.4に水素の測定結果を、Fig.5に酸素の測定結果を示す。縦軸がレギュレータ2次圧力、横軸が流入体積である。Fig.4, およびFig.5の測定結果より得られた水素に関する線形近似式が式(2.1)、酸素に関する線形近似式が式(2.2)であり、 x が流入体積、 y がレギュレータ2次圧力の値である。過供給距離に応じて必要な流入体積が定まるため、得られた線形近似式よりレギュレータ2次圧力の決定を行った。ターゲットガスの充填量はドライバーガス供給後の圧力が1気圧となる量とした。実験は最初に燃焼器にターゲットガスの充填を行う。ターゲットガスの充填後、シーケンサを作動させドライバーガスを供給後、点火を行う (Fig.6)。ターゲットガスは水素-酸素量論混合気を窒素希釈した予混合気である。窒素希釈率に関しては水素-空気量論混合気に相当する55.6%で行い、過供給距離は $R =$

50, 75, 100, 125, 150, および175 mm の6パターンで燃焼実験を行った。Table.1に実験で使用した過供給距離と各レギュレータの2次圧力の関係を示す。

$$y = 1.2464x + 0.1514 \quad (2.1)$$

$$y = 4.3728x + 0.1478 \quad (2.2)$$

Table.1 Table of experiment conditions

過供給距離 R mm	水素供給圧力 MPa	酸素供給圧力 MPa
50	0.25	0.32
75	0.33	0.46
100	0.45	0.62
125	0.59	0.92
150	0.77	1.24
175	0.98	1.61

伝播判断は得られた圧力履歴より爆轟波の速度を計算し、理論速度 (CJ速度) と比較したものと、煤膜のセル構造が確認できれば爆轟波であると判断を行った。煤膜は厚さ0.1 mmのステンレス板を使用し、燃焼器下面、および上面に設置する。燃焼器内の気体分布を調べるために流体解析ソフトANSYS Fluentを利用して解析を行った。燃焼器に流入する気体の流速は熱線流速計を用いてP1の位置で測定を行った。解析ではこの流速より算出した質量流束を入口条件に適用した。解析条件は過供給距離 $R = 100$ mmの条件で窒素濃度55.6%のターゲットガスへ流入するモデルとした。

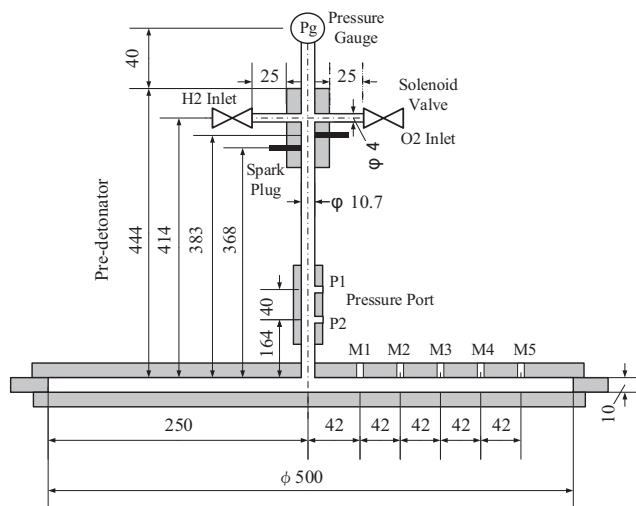


Fig.2 Schematic diagram of the experiment device

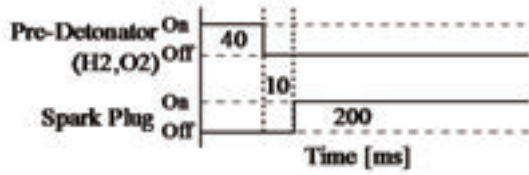


Fig.3 Ignition sequence

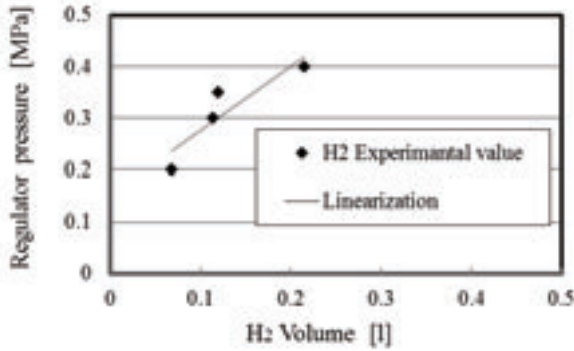


Fig.4 Influent volume of hydrogen

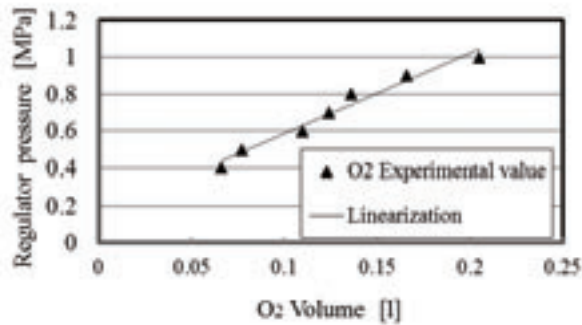


Fig.5 Influent volume of oxygen

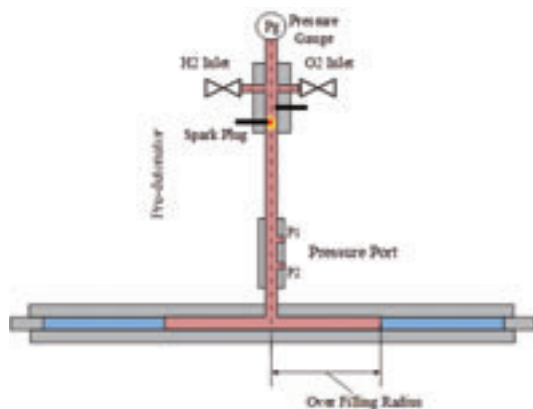


Fig.6 Schematic diagram of filling the driver gas and ignition

3. 実験結果および考察

本実験で取得された爆轟波の速度と過供給距離 R の関係グラフをFig.7 に示す. グラフは縦軸が測定された爆轟波速度であり, 横軸が過供給距離 R となっている. 各マーカーは測定時に使用した圧力ポートの場所を指している. V_{drg} はドライバーガス組成混合気の理論速度を, V_{trg} はターゲットガス組成混合気の理論速度を示している. 結果より, 過供給距離 $R = 50 \sim 100 \text{ mm}$ の条件では爆轟波管での爆轟波の速度は V_{drg} の1.2倍程度となっていることが確認された. これは圧力ポート付近で爆轟波に遷移したと考えられ, 過供給距離が小さい場合, 爆轟波管内にターゲットガスが残留し, DDT距離が長くなったためと考えられる. M1-M2 間の爆轟波速度はターゲットガスの理論速度の約0.4倍程度となっており, 得られた煤膜画像からもセル構造が確認されず円筒爆轟波に遷移できていないことが確認された. M1は爆轟波管中心から42 mmの位置にあるため, P2-M1 間は全ての過供給距離においてドライバーガスで満たされている領域であるが, 爆轟波速度は V_{drg} よりも遅い. 燃焼器に入射後の爆轟波の速度をM1-M2間の平均速度 (約800 [m/s]) と仮定するとP2-燃焼器入口速度が, P1-P2間の平均速度 (約3000 [m/s]) とほぼ一致すること, および燃焼器下面に設置された煤膜に衝突痕が存在することから爆轟波管から入射した爆轟波が壁面に衝突した後に消炎したと考えられる. 爆轟波管から入射した平面爆轟波はFig.8 に示すように, 燃焼器下面で反射後, 反射した爆轟波が燃焼器上面で再反射する過程を経て円筒爆轟波に遷移することが明らかとなっている⁽⁷⁾. 従って, 燃焼器上面と下面の煤膜画像を比較することにより, 爆轟波が消炎している場所を確認することが可能である. 燃焼器上面および下面で取得された過供給距離75 mm における煤膜画像をFig.9, 過供給距離150 mm における煤膜画像をFig.10 に示す. 過供給距離75 mm において, 燃焼器上面で取得された煤膜の一部 (Fig.9 の中心軸より上方) にセル構造がついた後に消炎していることから燃焼器下面に衝突した爆轟波が上面まで維持されているが, 再衝突後消炎していることが確認された. 過供給距離を大きくした150 mm の条件では上面でのセル構造を確認できず, 燃焼器下面に衝突後上面に爆轟波が衝突するまでの間に消炎していることが確認された.

消炎の原因として, 爆轟波管内におけるドライバーガスの混合が不十分であること, 燃焼器内での拡散による混合の影響, 急拡大部における窒素の残留が考えられた. ドライバーガスの混合に関しては, 梶物らの実験では水素-酸素量論混合気を予混合

後燃焼器内に充填していたのに対して、本実験では爆轟波管内で対向流によって混合を行っているためである。混合の影響を調査するためにターゲットガスの窒素濃度を0%として燃焼実験を行った。爆轟波速度と理論速度の比と過供給距離の関係をFig.11に、燃焼器内をドライバーガスで満たした状態で点火実験を行い得られた煤膜画像をFig.12に示す。Fig.11より、全ての過供給距離でターゲットガスへ爆轟波の伝播が確認され、爆轟波管内で混合が十分に行われていることが確認された。過供給距離125 mmにおいて爆轟波管内の爆轟波速度が速く計測された。圧力波形の立ち上がりがインパルス状であったことからDDT過程ではなく、強い爆轟波が維持されていると考えられる。燃焼器内部をドライバーガスで満たした状態で点火実験を行い、燃焼器下面で取得された煤膜画像をFig.12に示す。Fig.12より、 $R \leq 15 \text{ mm}$ の領域では小さいセル構造が $R \geq 15 \text{ mm}$ の領域でセルサイズが大きくなっていることが確認された。Fig.9において、 $R \leq 15 \text{ mm}$ の領域にセル構造が確認されるものの、 $R \geq 15 \text{ mm}$ の領域においてはセルが確認され始める位置で消滅していることが確認できる。Fig.10においては衝突痕のみが確認されており、 $R = 15 \text{ mm}$ より外側の領域で完全に消えていることが確認できる。

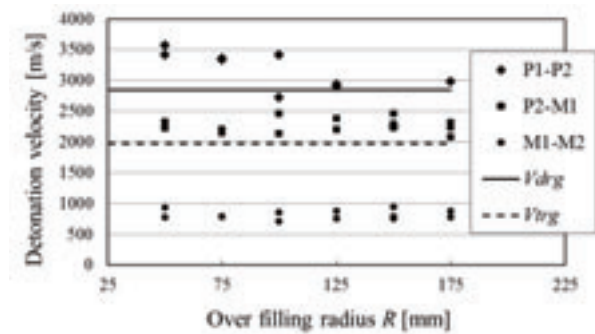


Fig.7 Relation between detonation velocity and over filling radius

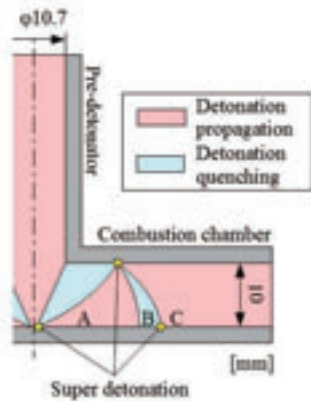


Fig.8 Mechanism of detonation transition (7)

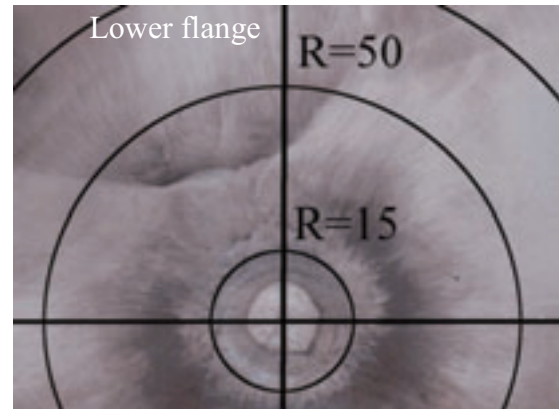
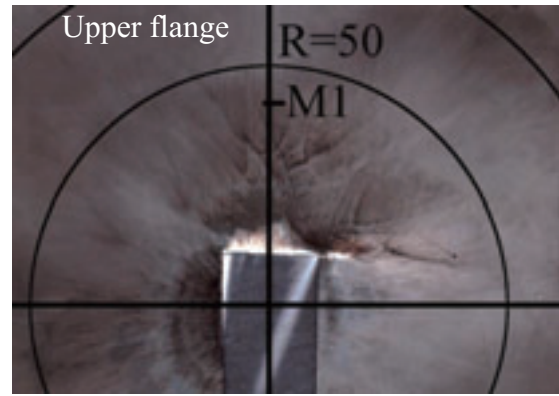


Fig.9 Soot track record at the upper flange and lower flange in case of $R = 75 \text{ mm}$

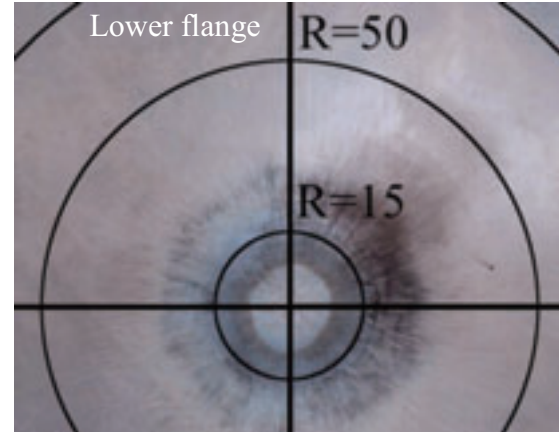
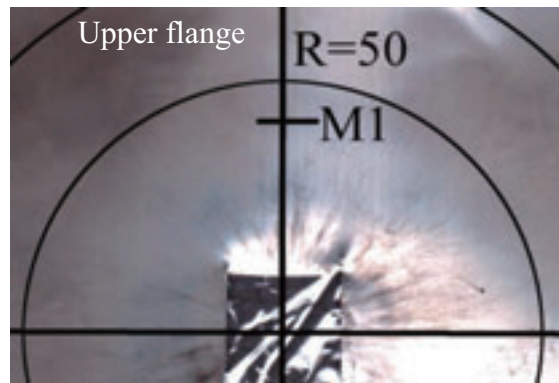


Fig.10 Soot track record at the upper flange and lower flange in case of $R = 150 \text{ mm}$

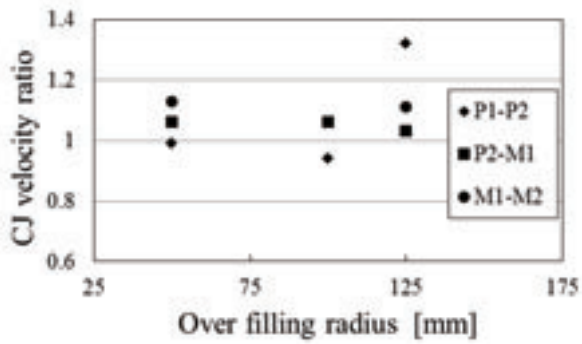


Fig.11 Relation between CJ velocity ratio and over filling radius at target gas $N_2 = 0\%$

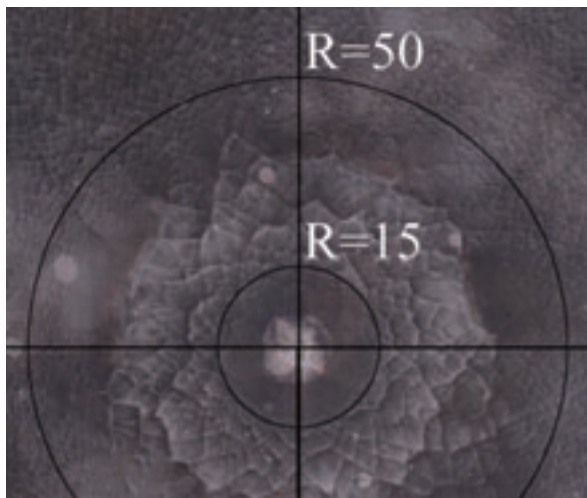


Fig.12 Soot track record at the lower flange in case of filling the driver gas

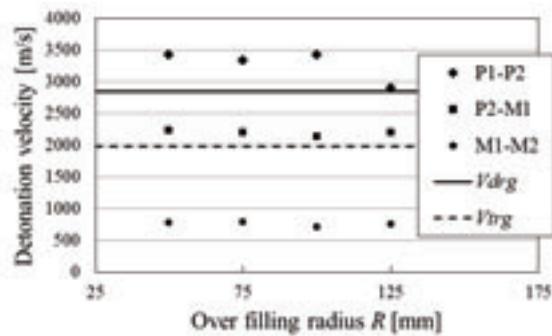


Fig.13 Relation between detonation velocity and over filling radius in the 1sec wait condition

次に、ドライバーガス充填後の燃焼器内での拡散による混合の影響を調べるために過去の実験と同様に電磁バルブ作動の1秒後に点火を行った。実験結果をFig.13 に示す。Fig.13 の縦軸は測定された爆轟波速度であり、横軸が過供給距離となっている。実験結果より、Fig.7 の結果と同様に、全ての過供給距離でターゲットガスへの伝播は確認できず、円

筒爆轟波への遷移ができていなかった。そのため、拡散による混合時間の影響はないことが明らかとなった。

これらの実験結果よりドライバーガスの充填方法の変更に伴う流速の変化が急拡大部付近のターゲットガスの残留に影響を与えたと考えられた。燃焼器内の気体濃度分布を知るために圧力ポートP1における質量流束を測定し、取得した質量流束を用いて解析を行った。解析ではFig.14 に示す燃焼器中心面（下面から5 mmの位置）における点火時の窒素モル分率を調査した。解析結果をFig.15 に示す。Fig.15 では縦軸が窒素モル分率、横軸が燃焼器の半径方向長さを示しており、実線は本実験の点火時である電磁バルブ作動後から50 ms 時点における解析結果を、点線はボールバルブを使用した過去の解析結果⁽³⁾を表しており、ボールバルブ開放から1秒後の解析結果となっている。

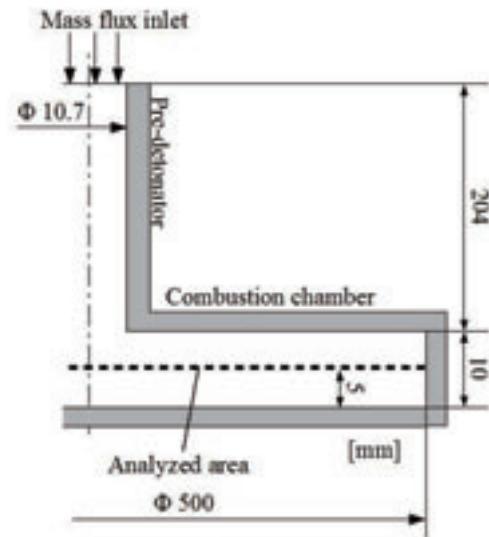


Fig.14 Schematic diagram of analysis

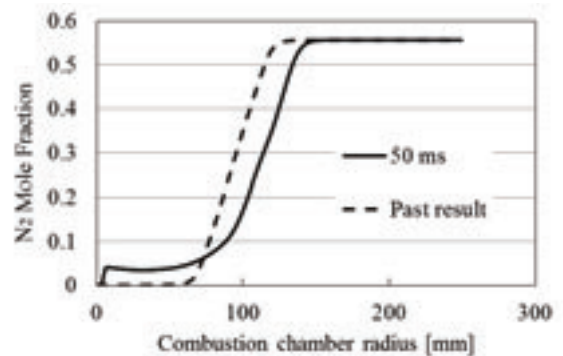


Fig.15 Relation between N_2 Mole fraction to combustion chamber radius at $R = 100, N_2 = 55.6\%$

解析結果より、本実験手法での点火タイミングでは爆轟波管直下から外側の領域に窒素が残留していることが確認された。一方の過去の実験ではターゲットガスに含まれる窒素を追い出しドライバーガスのみ領域ができていたことが確認できる。爆轟波管から入射する爆轟波を安定して円筒爆轟波に遷移させるためには、円筒爆轟波に遷移する領域 ($R \geq 45 \text{ mm}$) までドライバーガスで満たすことが重要である⁽³⁾。これらの結果より、本実験では残留した窒素により反射によって爆轟波が不安定になり、セルサイズが大きくなる $R \geq 15 \text{ mm}$ の領域でセル構造を維持することができず、消滅したと考えられる。連続運転条件では過供給距離を増やした条件でも円筒爆轟波に遷移できなかったことから、急拡大部には過供給距離に依存せず窒素が残留していると考えられる。

4. 結論

対向流混合によって爆轟波管内で十分に混合を行い、爆轟波を生成することが可能である。しかし、燃焼器内部では窒素が押し出されず、ドライバーガスが過供給されていない領域が存在している。残留した窒素が入射した爆轟波に影響を及ぼし、円筒爆轟波への遷移を阻害していると考えられる。

連続運転条件でターゲットガスへ爆轟波を伝播させるためには、急拡大部において窒素を残留させることなくドライバーガスを $R \geq 45 \text{ mm}$ の位置まで過供給する手法を検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究はJSPS科研費 25870006の助成を受けたものです。

6. 参考文献

(1) 沼倉, 脇田, 伊藤, 菅田, 永田, 戸谷, 工藤, “異種混合気を回折するデトネーション波に及ぼす反射板の伝播促進効果”, 日本燃焼学会誌第48巻145号, pp.265 - 272, 2006.

(2) WAKITA, SAJIKI, HIMONO, TOTANI and 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.

(3) 梶物, 寺坂, 脇田, 戸谷, 永田, “大口径パルスデトネーションエンジン用イニシエータにおける円筒デトネーション波の伝播に関する研究”, 第44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2012論文集, pp.73 - 78, 2013.

(4) 大深, 越智, 吉永, 八房, 遠藤, 滝, 青木, 梅田 “単気筒パルスデトネーションタービンエンジンの性能”, 第43回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.494-495, 2005

(5) 桜井, 大古, 柚木, 吉橋, 小原, 大八木, “パルスデトネーションエンジンの安定動作に関するパージ空気の噴射量および分布の影響”, 日本航空宇宙学会論文集 Vol.54, No.628, pp.204-209, 2006

(6) 中道, 松岡, 笠原, 松尾, 船木, “爆轟管同軸回転バルブを用いたパルスデトネーションエンジンの性能評価”, 航空宇宙技術 Vol.10, pp.107-112, 2011

(7) 棧敷, 寺坂, 脇田, 戸谷, 永田, “大口径平板燃焼器を伝播する円筒デトネーション波に関する研究”, 第43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2011論文集, pp.27-32, 2012.