

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

桧物恒太郎, 棧敷和弥, 脇田督司, 戸谷剛, 永田晴紀
北海道大学大学院

Propagation Characteristics of Cylindrical Detonation Wave in Detonation Initiator for Large Bore Pulse Detonation Engines

by

Tsunetaro HIMONO, Kazuya SAJIKI, Masashi WAKITA, Tsuyoshi TOTANI, Harunori NAGATA

ABSTRACT

Detonation initiation is one of the most important problems of pulse detonation engines. A reflector installed near a predetonator exit is effective to maintain detonation waves. The incident detonation waves from the predetonator transform its shape from planar detonation wave to cylindrical detonation wave and from cylindrical detonation wave to toroidal detonation wave around the reflector. To prevent the detonation wave downstream of a reflector from disappearing, it is important to form a cylindrical detonation waves upstream of the reflector. To define the minimal quantity of driver gas to form cylindrical detonation waves and to make sense of the mechanism that determine the quantity, the authors uses a large-bore plate combustor and varied the following parameters to find the quantity to form a cylindrical detonation wave : the quantity of driver gas and nitrogen concentration. To evaluate the quantity of the driver gas, the authors uses overfilling radius. The over filling radius is the radius of the cylinder that is equal to the driver gas filled in the combustion chamber. Results indicate that the mixing between driver gas and target gas is critical to successful transmission. To form the cylindrical detonation wave reliably, the concentration of driver gas must be maintained at a high level so that the cell size doesn't become large.

1. 序論

次世代航空宇宙推進機関として注目されているエンジンの一つとしてパルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine, PDE) がある。PDE の実用化には多くの技術的課題が存在するが、本研究は重要な課題の一つである「デトネーションの開始」に注目するものである。PDE ではデフラグレーションをデトネーションに遷移させる 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 (DDT 距離) を短縮する方法として管径の小さい管に反応性の高いドライバガスを充填する方法が考案されている。しかし、この手法では管径の急拡大部での消炎とドライバガスに使用する酸化剤の搭載による比推力の低下という問題がある⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究室では Murray⁽³⁾ らの研究に注目し、爆轟波管 (predetonator) 出口近傍に反射板を設置することで、衝撃波の反射によるデトネーション波の再開始機構を利用する PDE イニシエータを考案し、爆轟波管内径およびドライバガスの使用量の削減に成功した⁽⁴⁾。また、爆轟波管と反射板の間で円筒デトネーション波を形成することで、デトネーション波の形態を平面デトネーション波から円筒デトネーション波、円環デトネーション波へと形態を変えながら燃焼室下流へ伝播させることで大口径の燃焼室へ平面デトネーション波を伝播させることが可能となっている (Fig. 1)。さらに、流路幅と混合気組成が一定の領域では生成された円筒デトネーション波は半径方向に伝播するため、ドライバガスからターゲットガスへ円筒波を伝播させることによってガスの全量に対するドライバガスの割合を削減することが出来るといった利点もある。PDE の大口径化には高推力化、構造の単純化といった利点があり、燃焼室の口径が大きくなるほど、この方法によってドライバガスの使用割合を減らすことが出来る (Fig. 2)。本研究ではターゲットガスへデトネーション波を伝播させるために燃焼器内に充填する必要があるドライバガスの量を明らかにする。次に、燃焼室内のターゲットガスの濃度に対して数値解析を行い、ターゲットガスへのデトネーション波の伝播に必要なドライバガスの量を検証した。

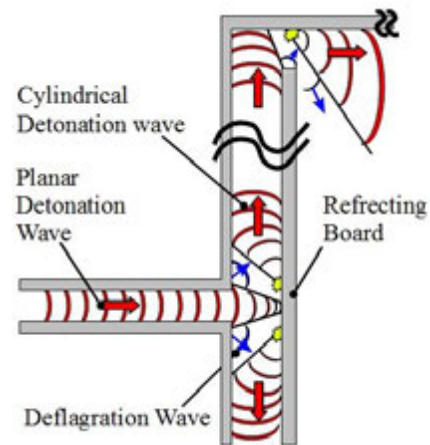


Fig. 1 Mechanism of propagation of detonation wave in vicinity of the reflecting board

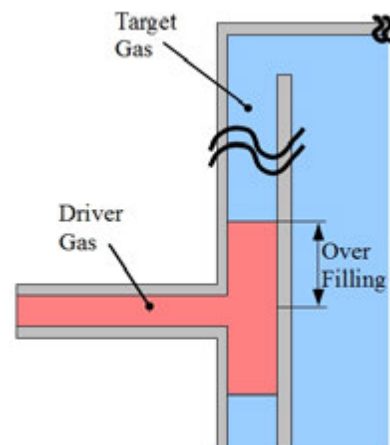


Fig. 2 Necessary quantity of driver gas to form cylindrical detonation waves

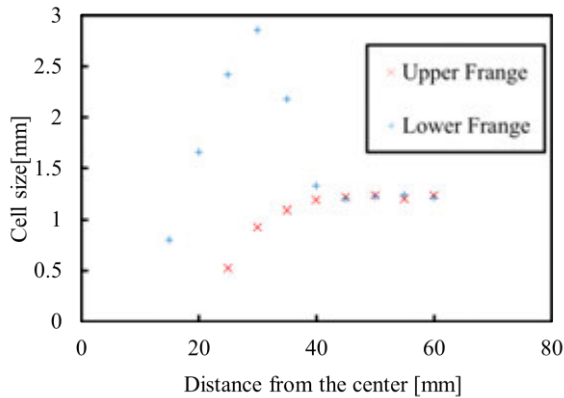


Fig. 6 Relation between cell size and distance from the center

次に、過供給半径 R およびターゲットガスの窒素濃度を変えて実験を行った。Fig. 7～15 および Table. 1～3 に各過供給半径で取得された煤膜、圧力履歴、燃焼器内の概略図、それぞれの対応する位置での混合気組成における C-J 速度との速度比 v/v_{CJ} を示す。これらのターゲットガスの窒素濃度は 55.6 %，過供給半径 R はそれぞれ 50 mm，75 mm，100 mm である。煤膜に示した破線がドライバーガスの過供給半径を表す。すべての過供給半径で爆轟波管出口付近でセルを確認できる。Fig. 7 では 20～30 mm の位置で Fig. 4 にみられない消炎と再開始が見られる。20～30 mm の位置ではどの条件でも等しくドライバーガスによって満たされていることを想定しているが、この結果からドライバーガスとターゲットガスの混合が生じていることが示唆される。Fig. 7 の煤膜から、領域 A と B の境界で半径方向に広がるデトネーション波が消炎し、領域 B と C の境界で燃焼室上面での反射によって生じたホットスポットからの再開始が生じていることがわかる。また、M4，M5 ポートの圧力履歴と伝播速度からデフラグレーション波に移行していることがわかる。Fig. 10 では爆轟波管出口での消炎は見られないが、ターゲットガスへの伝播は $R = 50$ mm の場合と同様に失敗している。また、Fig. 10 と同条件で伝播に成功したケースも多い。Fig. 13 ではターゲットガス領域にセル模様が確認され、デトネーション波の伝播が見られる。また、伝播速度に要する判断もデトネーション波の伝播の成功を示している。 $R = 125$ mm， $R = 150$ mm の場合も伝播速度、セル模様どちらの伝播判断でも伝播の成功が確認されている。

煤膜を設置しない場合では、M4～M5 間においてセル模様の確認された条件で最も速度が小さかった $v/v_{CJ} \geq 0.85$ を伝播の成否の基準として、伝播判断を行う。Fig. 16 に縦軸をターゲットガスの窒素濃度、横軸を過供給半径として伝播の成否を示す。伝播成功を□，伝播失敗を◆で表す。 $R = 125$ mm， $[N_2] = 60\%$ および $R = 150$ mm， $[N_2] = 65\%$ の条件で成功が見られるが、成功した回数は三回中一回であること、圧力計が取り付けられている位置にドライバーガスの充填の偏りが現れた可能性があること、また、ドライバーガス領域から圧力計までの距離が短いため、円筒波が完全に消炎する前に圧力計を通過した可能性を考慮するとターゲットガス全体に伝播した可能性は低いと思われる。そのために、この結果を無視すれば $R \geq 75$ mm での伝播限界は窒素濃度に依らず一定となっている。ドライバーガスのみを充填した場合、安定な円筒デトネーション波の形成に必要な距離は 45 mm であった。この過供給距離の違いはドライバーガスの充填時に燃焼室内で気体の混合が生じ、純粋なドライバーガスによって満たされている領域が小さ

くなっているためと考えられる。伝播限界が $[N_2] = 60\%$ で一定となるのは、Fig. 17 に示すように窒素濃度の上昇に伴いセルサイズが大きくなるために、流路幅 10 mm に対して伝播可能なセルサイズを超えてしまったためと考えられる。

過供給終了時の燃焼室内の混合気の分布状況の把握のために汎用熱流体解析コードを用いて CFD 解析を行った。計算領域を燃焼器のポート P1 より下流とし、軸対称 2 次元流れと設定した。解析に使用した計算格子の格子点数を 1/4 にしたものを Fig. 18 に示す。ノードの総数は約 3 万，格子は爆轟波管出入口および壁面には 1 層目が 0.1 mm，成長率 1.1，10 列の境界層の格子を設置し、それ以外の場所には格子幅 0.5 mm の正方形格子を用いた。乱流モデルは標準 $\kappa-\epsilon$ モデルを使用し、非定常 2 次元解析を行う。時間刻みは 1.0^{-2} 秒とし、混合気間の密度差の影響を考慮するため鉛直方向下向きに重力加速度 9.81 m/s^2 を設定した。熱および化学反応は考慮せず、計算領域内の絶対圧の漸増を伴う時間依存の圧縮性流れを扱う「浮動基準圧力」を用いて解析を行った。CFD 解析には FLUENT 社の汎用熱流体解析ソフト Fluent 13 を使用した。メッシュ生成には同社の GAMBIT を用いて長方形格子を生成した。各過供給量に対して算出したドライバーガスの流入質量を各物性値とともに Table. 4 に示す。Table. 4 に載っていない物性値に関しては FLUENT に設定された値を用いた。

各過供給半径での燃焼室底面から 5 mm の高さでの窒素濃度を Fig. 19 に示す。ターゲットガスの窒素濃度は $[N_2] = 55.6\%$ である。縦軸が窒素濃度、横軸が燃焼室中心からの距離を示す。窒素濃度は過供給半径からおよそ 50 mm 内側ではほぼ 0 % になっていることがわかる。次に、安定な円筒波の形成に必要な距離である燃焼室中心からの距離 45 mm の位置での各過供給半径での窒素濃度を Fig. 20 に示す。燃焼室内での気体の混合によって、過供給半径 75 mm の場合 $[N_2] = 4.6\%$ となっているが、Fig. 17 からセルサイズは窒素濃度 0 % の場合とほぼ等しいため伝播への影響は生じなかったものと考えられる。

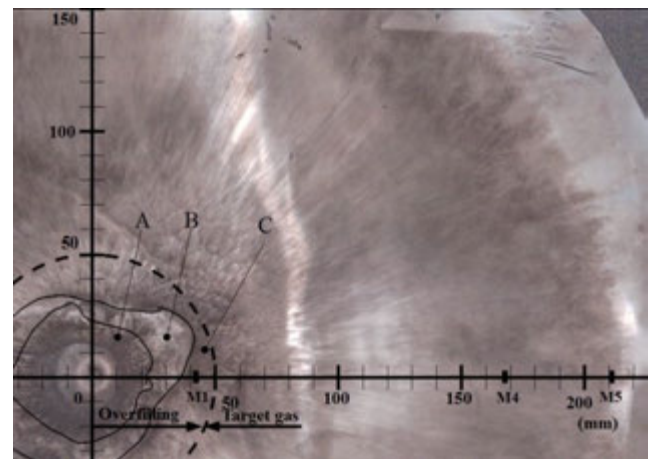


Fig. 7 Soot track record in case of 1 atm,
 $R = 50$ mm, $[N_2] = 55.6\%$

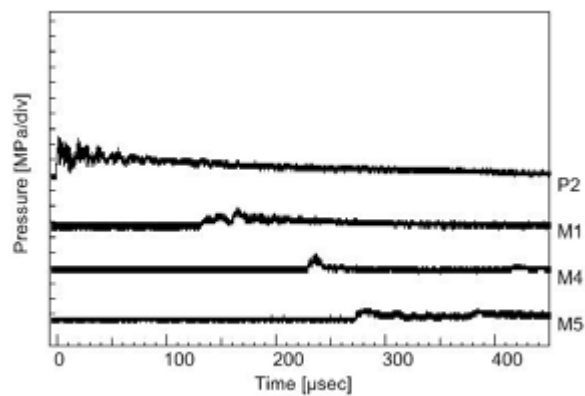


Fig. 8 Pressure profiles in case of 1 atm,
 $R = 50\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

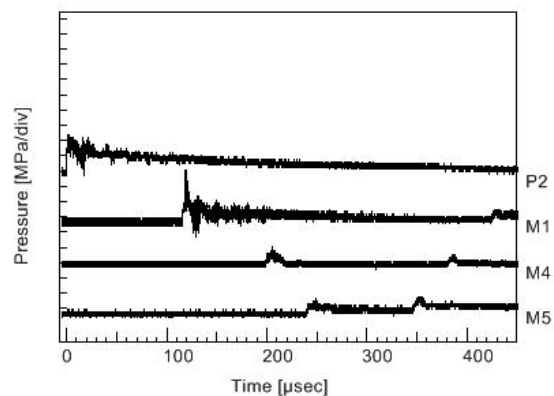


Fig. 11 Pressure profiles in case of 1 atm,
 $R = 75\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

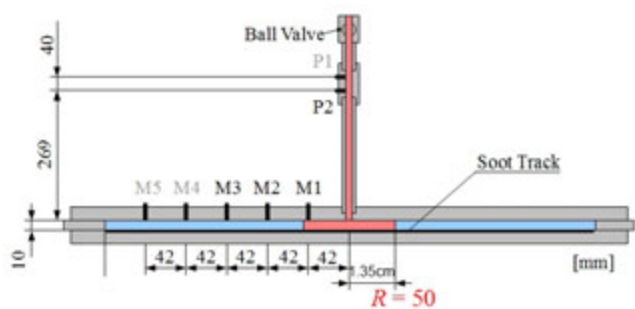


Fig. 9 Schematic illustration of filled combustion chamber in case
of 1 atm, $R = 50\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

Table. 1 wave speed in case of 1 atm, $R = 50\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

port	P2-M1	M1-M4	M4-M5
v/v_{cj}	0.82	0.66	0.49

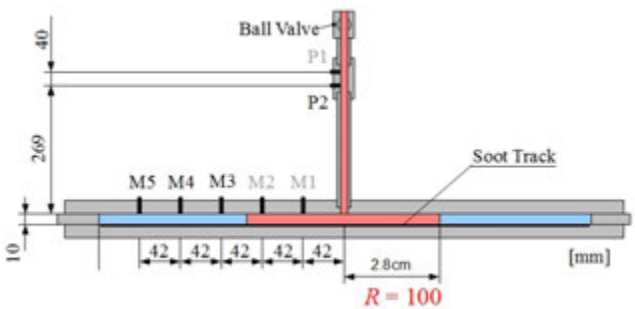


Fig. 12 Schematic illustration of filled combustion chamber in
case of 1 atm, $R = 75\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

Table. 2 wave speed in case of 1 atm, $R = 75\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

port	P2-M1	M1-M4	M4-M5
v/v_{cj}	0.96	0.71	0.50

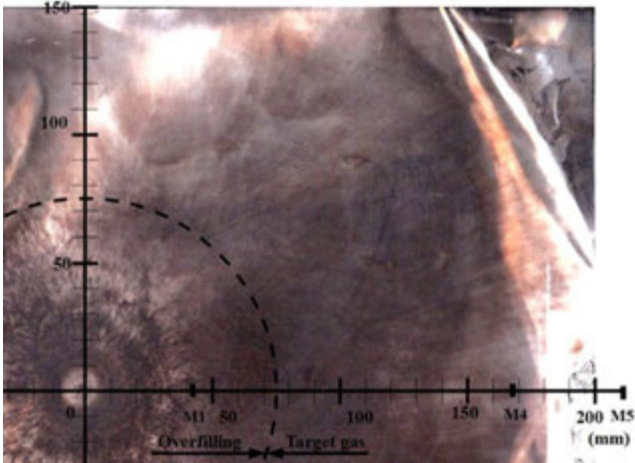


Fig. 10 Soot track record in case of 1 atm,
 $R = 75\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

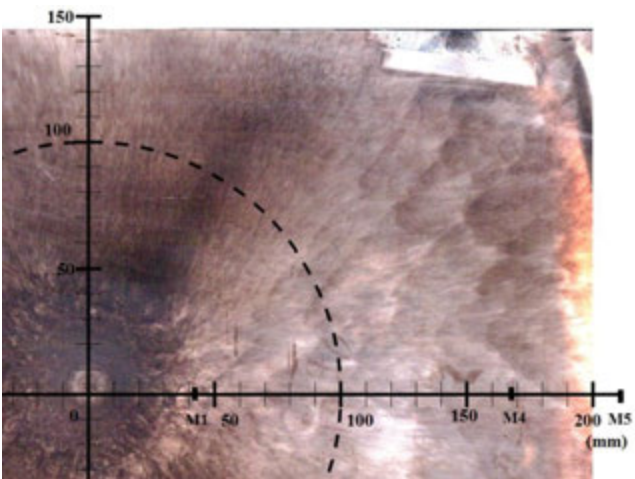


Fig. 13 Soot track record in case of 1 atm,
 $R = 100\text{ mm}$, $[N_2] = 55.6\%$

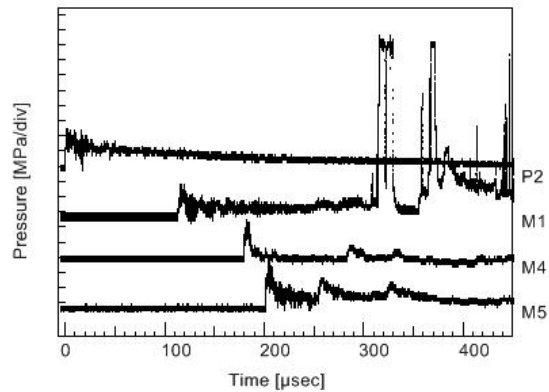


Fig. 14 Pressure profiles in case of 1 atm, $R = 100$ mm, $[N_2] = 55.6\%$

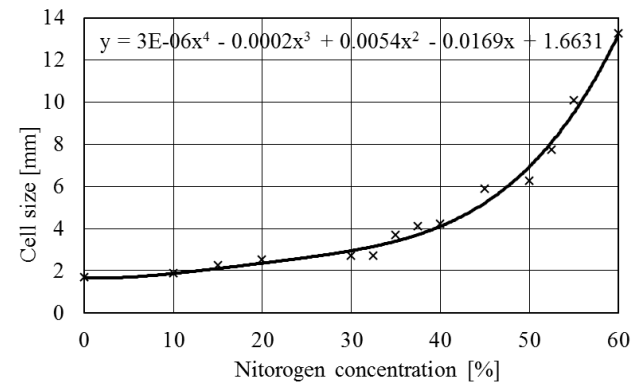


Fig. 17 Relation between nitrogen concentration and cell size in case of 1 atm

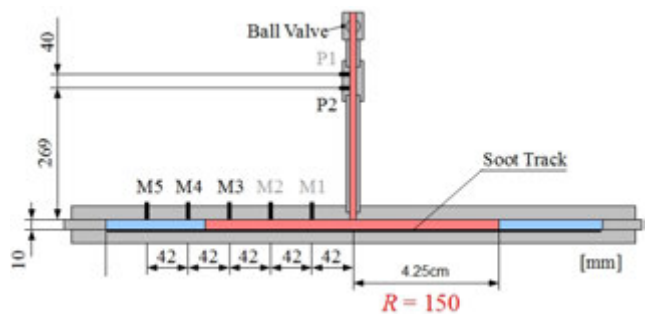


Fig. 15 Schematic illustration of filled combustion chamber in case of 1 atm, $R = 100$ mm, $[N_2] = 55.6\%$

Table. 3 wave speed in case of 1 atm, $R = 100$ mm, $[N_2] = 55.6\%$

port	P2-M1	M1-M4	M4-M5
v/v_{cj}	0.96	0.84	0.96

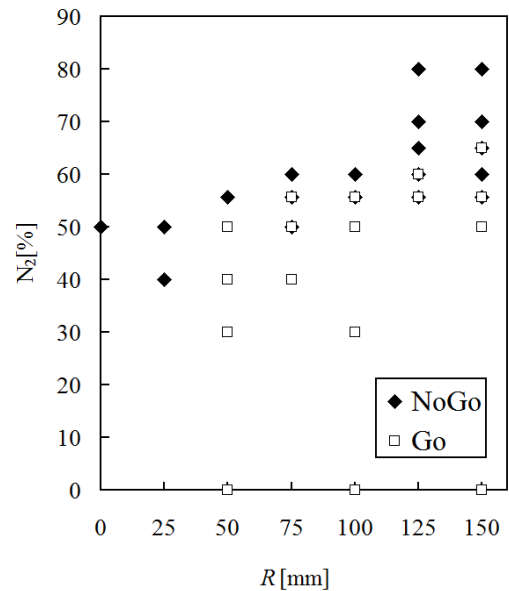


Fig. 16 Dependence of the nitrogen concentration in overfilling radius of initial pressure in case of 1 atm

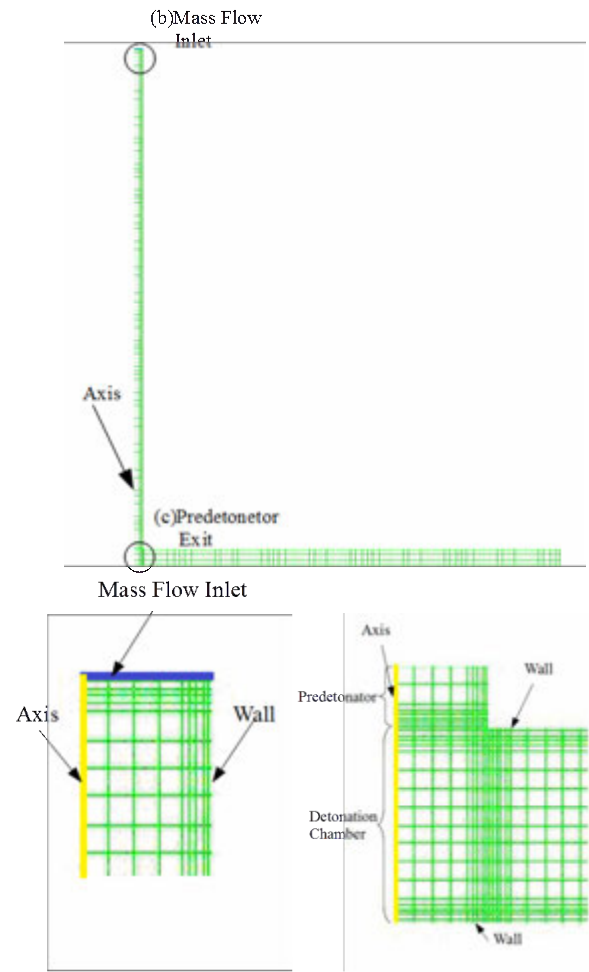


Fig. 18 Computational grids

Table. 4 Input condition of mass flow inlet

Initial Pressure P_0 , kPa (abs.)	101.3	101.3	101.3
Overfilling radius R , mm	50	100	150
Total mass flow \dot{m} , g	0.057	0.175	0.371
Filling pressure P_{driver} , kPa (abs.)	107	118.7	138.2
Volume of driver gas section V , m^3	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
Temperature T , K	293.15	293.15	293.15
Universal gas constant R_u , J/kmol/K	8314.3	8314.3	8314.3
Mean molecular weight M , kg/kmol	12.01	12.01	12.01
(Hydrogen-oxygen mixture)	12.01	12.01	12.01

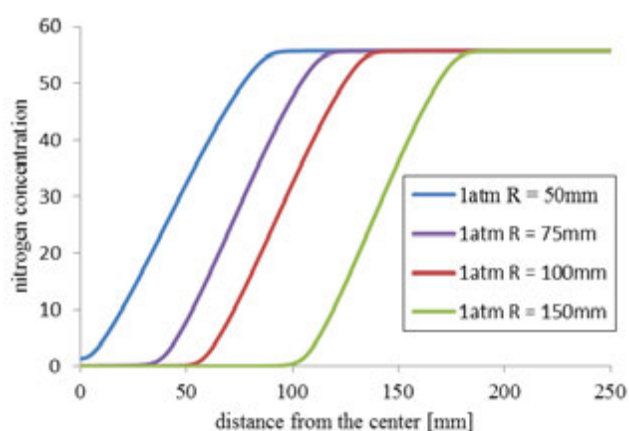


Fig. 19 Relation between nitrogen concentration and distance from the center

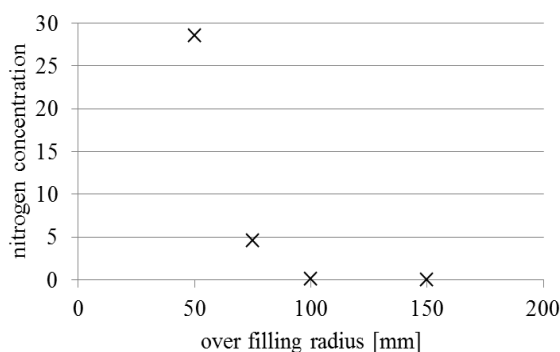


Fig. 20 Relation between nitrogen concentration and over filling distance in case of distance from the center is 45 mm

4. 結論

充填圧 1 atm では水素－酸素量論混合気をドライバーガスとした場合、過供給半径が 75 mm 以上となるように充填することで水素－空気量論混合気に安定した円筒デトネーション波を伝播させることが可能であると明らかになった。

燃焼室内のターゲットガスの濃度に対して数値解析を行った。得られた結果から、安定な円筒デトネーション波の形成に必要な位置での窒素濃度がほぼ 0 % となるまでドライバーガスを過供給することで安定な円筒デトネーション波を形成することが出来ることが明らかになった。

5. 謝辞

本研究は科学研究費補助金（若手研究（B）課題番号 21760646）の助成を受けたものである。

6. 参考文献

- (1) Aarnio, M J, Hinkey, J B and Bussing, T R A, “Multiple Cycle Detonation Experiments During the Development of a Pulse Detonation Engine,” AIAA Paper 96-3263, 1996.
- (2) R. Knystautas, J. H. Lee, and C. M. Guirao, “The Critical Tube Diameter for Detonation Failure in Hydrocarbon-Air Mixtures,” Combustion and Flame, vol.48, 1982, pp. 63-83.
- (3) Murray, S. B. and Lee, J. H. “On the transformation of planar detonation to cylindrical detonation,” Combust. Flame, 52, 1983, pp. 269-289.
- (4) M. Wakita, R. Numakura, T. Asada, M. Tamura, T. Totani, H. nagata, “Driver Gas Reduction Effect of Pulse-Detonation-Engine Initiator Using Reflecting Board,” Journal of Propulsion and Power, 27, 2011, pp-162-170