

れる。ドライバーガスの過供給は Fig. 2.2 のようにボールバルブより上流側に高圧のドライバーガスを、ボールバルブより下流側には低圧のターゲットガスを充填し、ボールバルブの開放後、両者の差圧によりドライバーガスが過供給される。ボールバルブ開放後の燃焼器内の全圧は 1 atm となる。この時、ドライバーガスが燃焼器内に円筒状に広がると仮定し、この円筒の底面の半径 R をドライバーガスの過供給距離と定め、過供給量を決定した。ボールバルブ開放前のドライバーガスとターゲットガスの初期圧力を各過供給距離毎にまとめると Table. 2.1 のようになる。爆轟波管側壁の C1, C2 及び燃焼室壁面上の M1~5 には圧力計を取り付けることができ、一度の実験につき同時に 4 点の圧力履歴を得ることができる。圧力計の位置は条件により適宜変更し、得られた圧力履歴から算出したデトネーション波の伝播速度を水素 - 酸素量論混合気の C-J 速度と比較する。燃焼室を構成する燃焼器下側のフランジ上に煤膜を取り付け、煤膜の履歴からデトネーション波の伝播を判断する。煤膜を塗布する金属板には厚さ 0.1 mm のステンレス板を使用した。

Table. 2.1 Initial pressure of driver and target gas.

	R = 100 mm	R = 125 mm	R = 150 mm
P1[kPa]	191	239	308
P2[kPa]	85.0	74.4	65.7

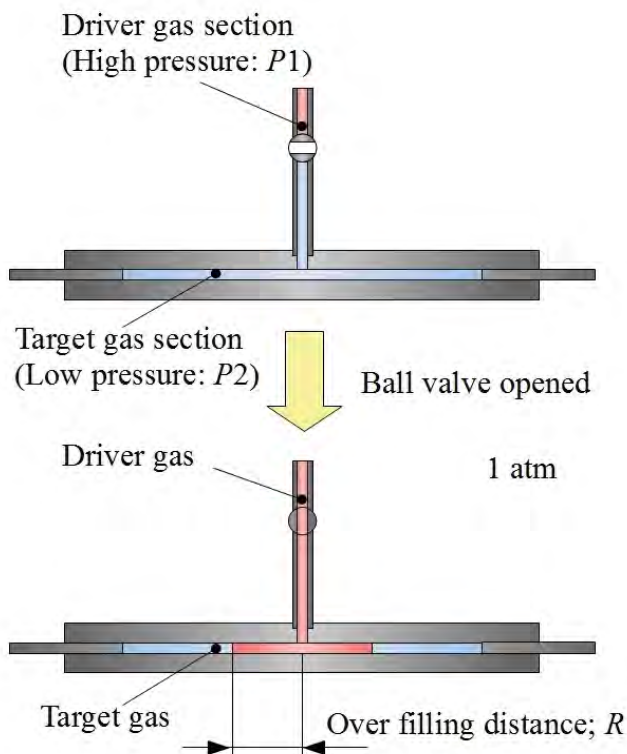


Fig. 2.2 Overfilling distance.

3. 実験結果, 考察

実験ではまず初期圧力を 1 atm, ボールバルブの開放後、点火するまでの時間 t を 1 s に固定した。予備実験として、燃焼器内をドライバーガスで満たした条件で実験を行った。このとき得られた結果を Fig. 3.1, 3.2 及び Table. 3.1 に示す。Fig. 3.1 は得られた煤膜, Fig. 3.2 は得られた圧力波の波形を示している。波形から得られた速度は Table. 3.1 に示されている。Fig. 3.1 の煤膜から、入射したデトネーション波

は一度消炎してから再開始しており、中心から 75 mm 付近の位置でセルサイズがほぼ均等となり、安定した円筒デトネーション波となって伝播していることが分かる。また、Table. 3.1 から入射したデトネーション波はほぼ C-J 速度で伝播していることが分かる

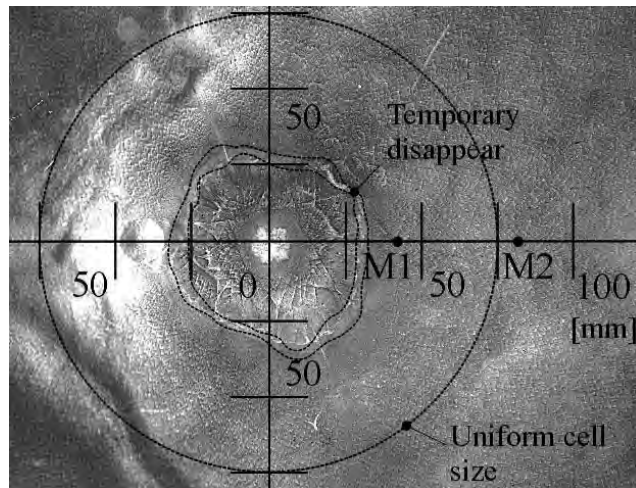


Fig. 3.1 Soot track record from back wall; filling the combustor with driver gas.

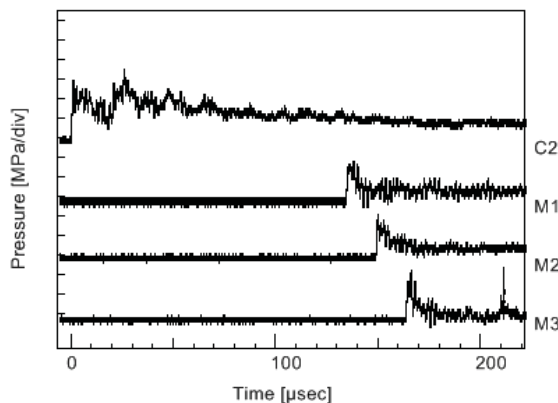


Fig. 3.2 Pressure profile; filling the combustor with driver gas.

Table. 3.1 Wave speed; filling the combustor with driver gas.

	C2-M1	M1-M2	M2-M3
V [m/s]	2689	2957	2838
V/V_{ci}	0.95	1.04	1.00

予備実験からドライバーガスの過供給距離を 75 mm 以上にすることで安定した円筒デトネーション波を形成し、ターゲットガスに入射することができると考えられる。そこで、ターゲットガスの窒素希釈率を $[N_2] = 55.6\%$ とし、ドライバーガスの過供給距離 R を変化させ、実験を行った。得られた結果をまとめると Table. 3.2 のようになる。この結果から $[N_2] = 55.6\%$ の条件では過供給距離が 125 mm 以上の条件で円筒デトネーション波の形成に成功していることが分かる。

Table. 3.2 Experimental result; 1 atm, $t = 1$ s.

	R = 100 mm	R = 125 mm	R = 150 mm
$[N_2] = 55.6\%$	No Go	Go	Go

$R = 150 \text{ mm}$ の条件で得られた結果を Fig. 3.3, 3.4 及び Table. 3.3 に示す. Fig. 3.3, 3.4 からこの条件では円筒デトネーション波が形成され, 燃焼器全体に伝播している様子が分かる.

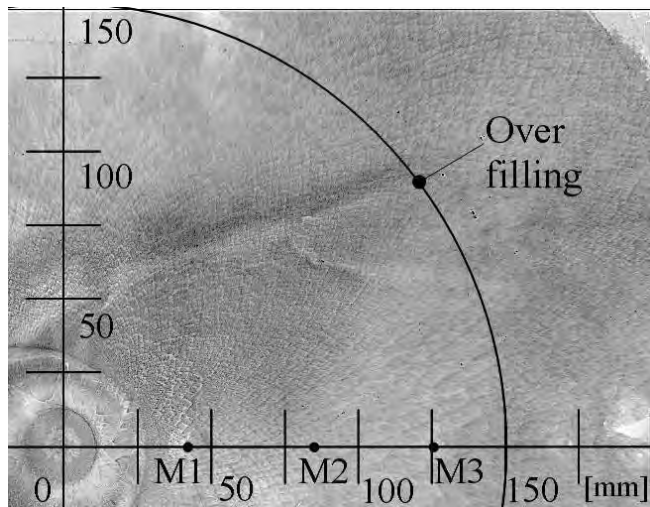


Fig. 3.3 Soot track record from back wall; $[N_2] = 55.6 \%$, $R = 150 \text{ mm}$, Go.

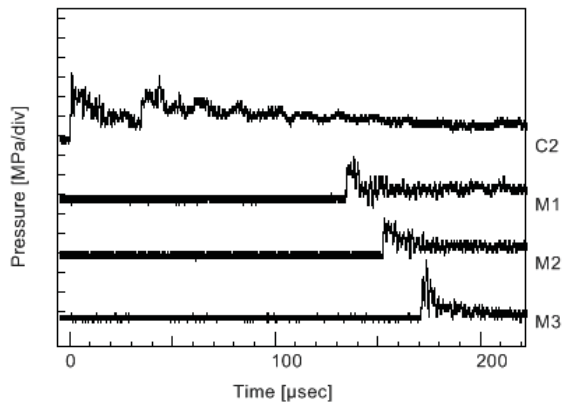


Fig. 3.4 Pressure profile; $[N_2] = 55.6 \%$, $R = 150 \text{ mm}$, Go.

	C2-M1	M1-M2	M2-M3
$V \text{ [m/s]}$	2699	2340	2289
V/V_{ci}	0.95	0.82	0.81

次に, $R = 125 \text{ mm}$ の条件で得られた結果を Fig. 3.5, 3.6 及び Table. 3.4 に示す. この条件では M_3 付近にドライバーガスとターゲットガスの境界があるので Table. 3.4 の M_3 - M_5 間の V/V_{ci} にはターゲットガス組成の C-J 速度と比較した値を括弧付きで載せている. Fig. 3.5, 3.6 から, この条件でも円筒デトネーション波の形成に成功している様子が分かる. また, Table. 3.4 から形成されたデトネーション波は M_3 - M_5 間でターゲットガス組成の C-J 波となって伝播していると考えられる.

$R = 100 \text{ mm}$ の条件で得られた結果を Fig. 3.7, 3.8 及び Table. 3.5 に示す. Fig. 3.7, 3.8 からこの条件では轟波管出口付近で消失している. これは, 入射したデトネーション波が燃焼器下側のフランジに衝突し, 円筒デトネーション波へ遷移する際に半径方向への拡大に耐えられなかったためと考えられる.

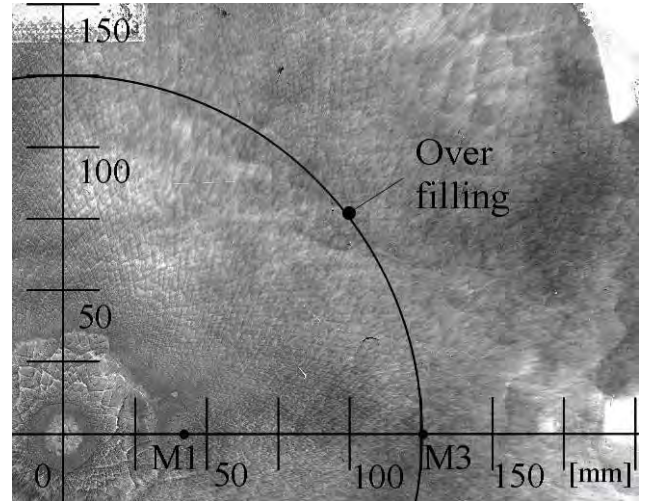


Fig. 3.5 Soot track record from back wall; $[N_2] = 55.6 \%$, $R = 125 \text{ mm}$, Go.

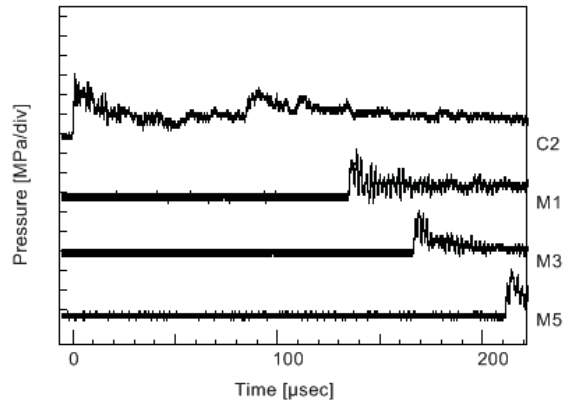


Fig. 3.6 Pressure profile; $[N_2] = 55.6 \%$, $R = 125 \text{ mm}$, Go.

	C2-M1	M1-M3	M3-M5
$V \text{ [m/s]}$	2697	2625	1871
V/V_{ci}	0.95	0.93	0.66(0.95)

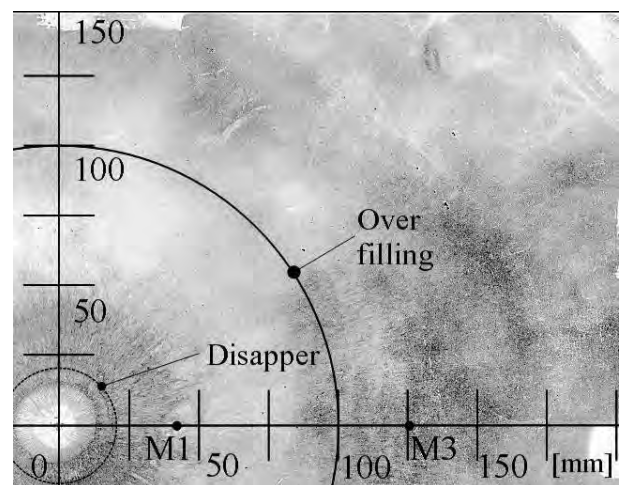


Fig. 3.7 Soot track record from back wall; $[N_2] = 55.6 \%$, $R = 100 \text{ mm}$, No Go.

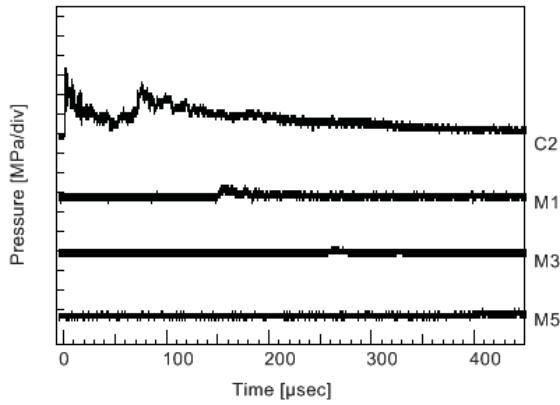


Fig. 3.8 Pressure profile; [N2] = 55.6 %, R = 100 mm, Go.

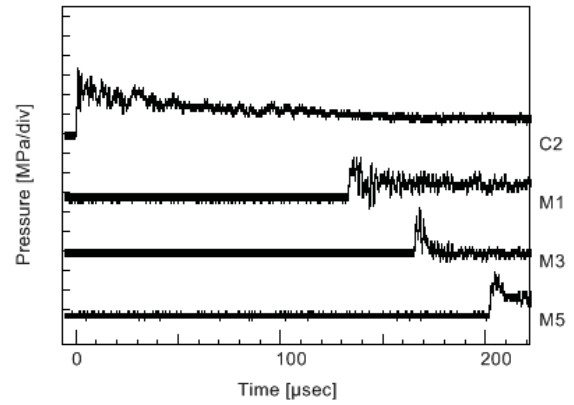


Fig. 3.10 Pressure profile; [N2] = 55.6 %, t = 10 s, Go.

Table. 3.5 Wave speed; [N2] = 55.6 %, R = 100 mm, Go.

	C2-M1	M1-M3	M3-M5
V [m/s]	2446	772.8	-
V/V_{cj}	0.86	0.27	-

Table. 3.7 Wave speed; [N2] = 55.6 %, t = 10 s, Go.

	C2-M1	M1-M3	M3-M5
V [m/s]	2712	2692	2373
V/V_{cj}	0.96	0.95	0.84

ドライバーガスの過供給距離を変更する実験では $R = 100$ mm の条件で円筒デトネーション波の形成に失敗した。この原因としてドライバーガスとターゲットガスの混合の影響が考えられた。そこで、混合が円筒デトネーション波の形成に与える影響を検証する実験として、ボールバルブが開放されてから点火するまでの時間を変更する実験を行い、時間の経過による混合の進行と円筒デトネーション波の形成の関係を考察する。実験では初期圧力を 1 atm、過供給距離を 150 mm に固定し、ボールバルブが開放されてから点火するまでの時間 t を 10 s, 20 s に変更し、実験を行った。得られた結果をまとめると Table. 3.6 のようになる。

Table. 3.6 Experimental result.2

	$t = 10$ s	$t = 20$ s
[N2] = 55.6%	Go	No Go

$t = 10$ s とした時の結果を Fig. 3.9, 3.10 及び Table. 3.7 に示す。この条件では円筒デトネーション波の形成に成功しており、煤膜や圧力波の波形、速度を比較しても $R = 150$ mm, $t = 1$ s の結果と大きな違いは見られなかった。

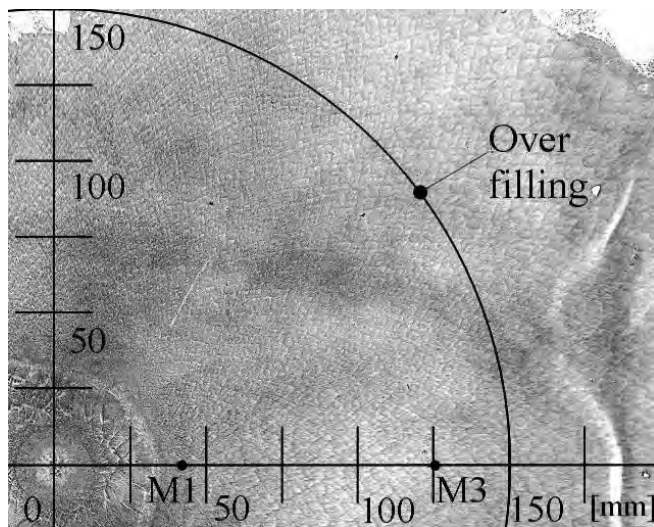


Fig. 3.9 Soot track record from back wall; [N2] = 55.6 %, t = 10 s, No Go.

次に $t = 20$ s とした条件で得られた結果を Fig. 3.11, 3.12 及び Table. 3.8 に示す。Fig. 3.11, 3.12, Table. 3.8 から、この条件では入射したデトネーション波は燃焼器に入射した後、轟波管出口付近で消失していることが分かる。煤膜上に入射したデトネーション波が燃焼器下側のフランジに衝突した跡が見られることから、過供給距離を 100 mm とした時の結果と同様に円筒デトネーション波への遷移時に半径方向への拡大に耐えられなかったために消失したと考えられる。

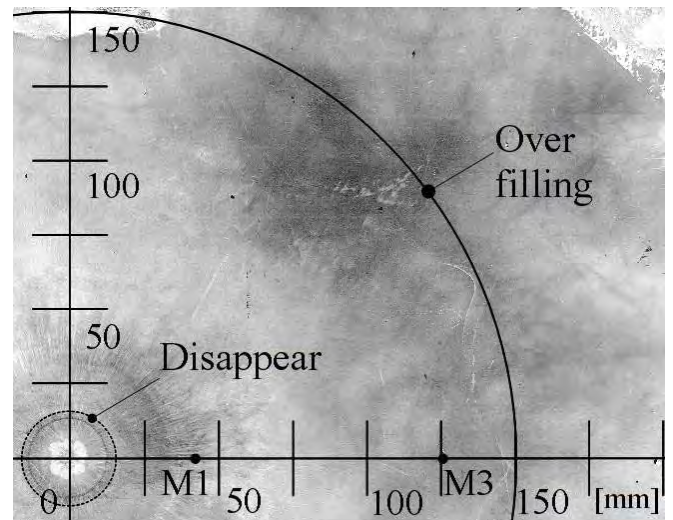


Fig. 3.11 Soot track record from back wall; [N2] = 55.6 %, t = 20 s, No Go.

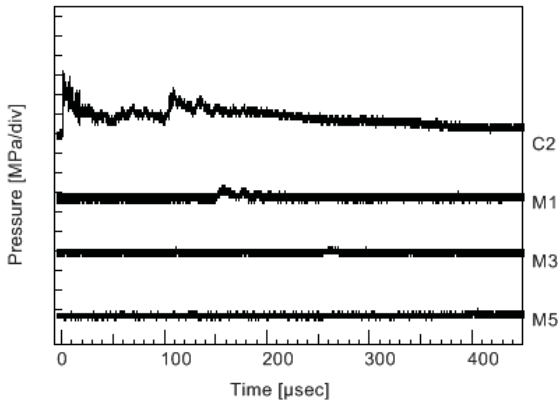


Fig. 3.12 Pressure profile; [N2] = 55.6 %, $t = 20$ s, No Go.

Table. 3.8 Wave speed; [N2] = 55.6 %, $t = 10$ s, Go.

	C2-M1	M1-M3	M3-M5
V [m/s]	2425	816.3	-
V/V_{Cj}	0.85	0.29	-

ボールバルブが開放されてから、点火するまでの時間を変更する実験では時間による現象の変化は $t = 20$ s の条件でしか見ることはできなかった。そのため、混合の影響は時間の経過による混合の進行によるものではなく、ボールバルブの開放後、ドライバーガスがターゲットガスを押し込む際に現れていると考えられる。

円筒デトネーション波へ遷移が生じる際に得られる典型的な煤膜の例を Fig. 3.13 に示す。この煤膜を見ると、円筒デトネーション波が形成されるとき、煤膜上には A~C の3つの領域からなる二重の円構造が現れることがわかる。また、Fig. 3.1 及び Table. 3.1 のように円筒デトネーション波が形成される条件では煤膜上に一時的に消炎している領域が存在しているが、圧力波の速度は常に C-J 速度付近で伝播している。このことから、デトネーション波の伝播メカニズムは次のように説明することができる。

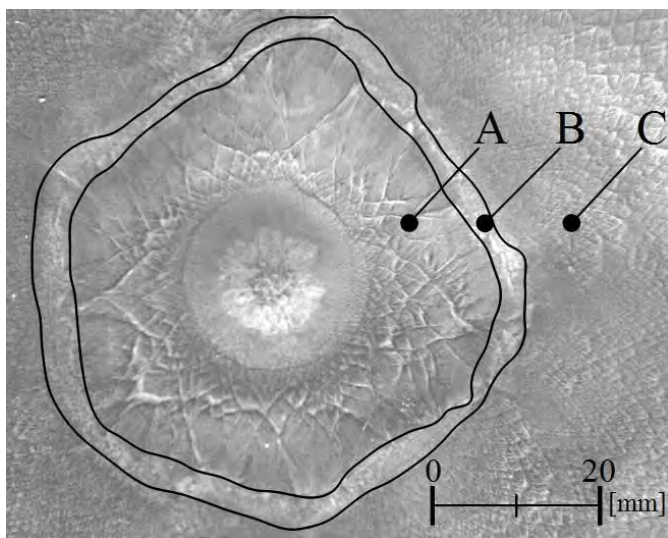


Fig. 3.13 Soot track showing successful transmission.

領域 A では入射した平面デトネーション波が燃焼室下側のフランジに衝突し、半径方向に広がっていく様子を示している。領域 B は半径方向に広がるデトネーション波が維

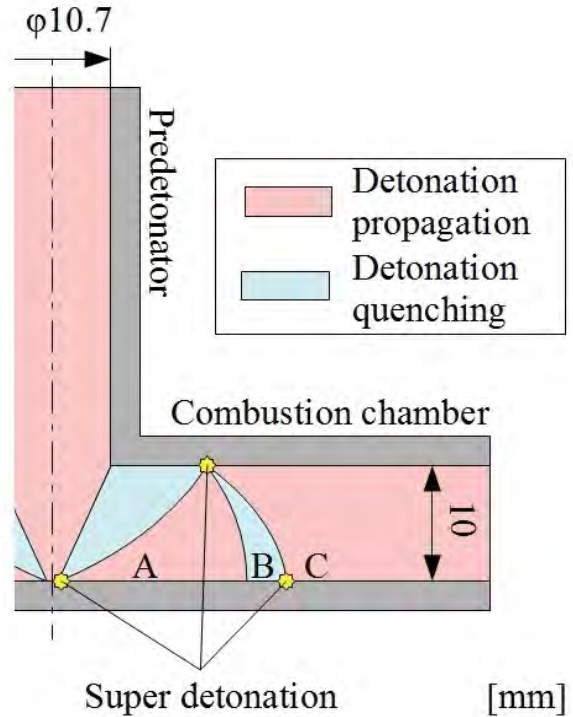


Fig. 3.14 Mechanism of detonation transition.

持できずに消炎している様子を示している。領域 C では燃焼器上側のフランジで反射によって生じたスーパーデトネーションによりデトネーション波が再開始する (Fig.3.14)。再開始したデトネーション波は円筒デトネーション波として半径方向に向かって伝播していく。入射した平面デトネーション波はこのように2回の反射により円筒デトネーション波へと遷移する。

実験で得られた煤膜を比較すると、円筒デトネーション波が形成される条件で見られる二重の円構造は点火までの時間や過供給量に依らず中心から 25 ~ 50 mm の位置に現れていることが分かる。過供給量を小さくした $R = 100$ mm の条件では円筒デトネーション波への遷移が起らなくなっていることから円筒デトネーション波への遷移には、二重の円構造に対して十分に大きな過供給距離のドライバーガスが必要となるといえる。

4. 結論

本論文では爆轟波管出口付近に反射板を使用した PDE イニシエータにおける更なるドライバーガスの削減のため、大口径の平板燃焼器を用いて円筒デトネーション波の形成に必要なドライバーガスの過供給量を検証した。円筒デトネーション波が形成される条件では燃焼器下部の壁面上に爆轟波管出口の中心から 25 ~ 50 mm の位置に二重の円状の構造が現れ、中心から約 75 mm の位置で安定した円筒デトネーション波が形成される。ターゲットガスとして水素-酸素量論混合気を [N2] = 55.6 % まで窒素希釈した混合気を使用し、ドライバーガスの過供給量を変更する実験では $R = 125$ mm 以上の条件では円筒デトネーション波の形成に成功した。しかし、 $R = 100$ mm の条件ではドライバーガスの過供給距離が安定した円筒デトネーション波の形成される領域を超えているにもかかわらず、円筒デトネーション波の形成に失敗した。これはドライバーガスとターゲットガスの混合が円筒デトネーション波の形成に影響を与えているためと考えられた。ボールバルブを開放し、点火するまで

の時間 t を変更する実験から混合による影響は過供給時にドライバーガスがターゲットガスを押し込む際に現れると考えられた。そのため、ターゲットガスにデトネーション波を入射する際はドライバーガスとターゲットガスの混合を考慮し、ドライバーガスの過供給距離を二重の円構造に対し十分に大きくする必要があったと考えられた。

本論文では円筒デトネーション波の形成に必要な条件を実験的に検証し、結果、未燃混合気の混合状態が円筒デトネーション波の形成に影響を与えている可能性が考えられた。そのため、今後はドライバーガスとターゲットガスの混合による未燃混合気の状態の変化と円筒デトネーション波の形成の関係を見るために気体の混合に関する数値解析と水を利用した混合の可視化により、未燃混合気の状態を解析的、実験的に明らかにする。また、円筒デトネーション波の挙動について更なる知見を得るために円筒デトネーション波の可視化を行う。

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

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. S., “On the transformation of planar detonation to cylindrical detonation,” Combust Flame, vol. 52, 1983, pp. 269-289.
- 4) M. Wakita, R. Numakura, Y. Itoh, S. Sugata, T. Totani, H. Nagata, “Detonation Transition Limit at an Abrupt Area Change Using a Reflecting Board,” Journal of Propulsion and Power, 23, 2007, pp. 338-344.
- 5) 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