

## ■原著論文／ORIGINAL PAPER■

## 異種混合気間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

## Promoting Effect of a Reflecting Board on the Diffraction of a Detonation Wave through a Mixture Change

沼倉 龍介\*・脇田 督司・伊藤 雄介・菅田 成俊・永田 晴紀・戸谷 剛・工藤 勲

NUMAKURA, Ryusuke\*, WAKITA, Masashi, ITOH, Yusuke, SUGATA, Shigetoshi, NAGATA, Harunori, TOTANI, Tsuyoshi, and KUDO, Isao

北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan

2006年2月5日受付 ; 2006年4月20日受理 / Received 5, February 2006; Accepted 20 April, 2006

**Abstract :** To realize a quick initiation of detonation in insensitive fuel-air mixtures in the combustion chamber of a PDE operating in the air-breathing mode, the authors have proposed a new detonation initiator using a circular disk as a "reflecting board" near the exit of a predetonator tube. When a fuel-oxygen mixture fills the predetonator tube as a driver gas, the mixture change and the abrupt area change occur simultaneously at the exit. This paper describes the promoting effect of the reflecting board on the detonation transition through the mixture change. The combustible mixtures in the combustion chamber are stoichiometric hydrogen-oxygen mixtures diluted with nitrogen. Main results obtained in this study are in the followings: The detonation wave maintains the propagation velocity in the fuel-oxygen mixture right after the abrupt area change, this results in the increase of the distance at which the head of a rarefaction wave reaches the axis of the predetonator and the incident planar detonation wave disappears. Because the cell size right after the abrupt area change is near the size of the fuel-oxygen mixture, the cylindrical detonation wave survives the axial expansion even when the reflecting board separation is less than the propagation limit of the cylindrical detonation wave propagating in the diluted mixture.

**Key Words :** Pulse detonation engine, Shock wave, Mach reflection, reflecting board, predetonator

## 1. 緒言

デトネーション (爆轟) を燃焼器内で間歇的に発生させることにより推力を得るパルスデトネーションエンジン (PDE) が、近年航空宇宙分野における次世代推進機関の一つとして注目されている[1,2]. PDE を実用化する上での重要な課題の一つとして「デトネーションの開始」が挙げられる。デトネーションの直接開始では固体爆薬、強い電気火花などの強力なエネルギーを持った点火源からデトネーション波を直接形成させるが、このときに必要なエネルギーの最小値である臨界開始エネルギーは、空気中から酸化剤を取り入れる空気取り込み式を想定した燃料 - 空気混合気では最も反応性の高いアセチレンを用いた場合でも数百 J が必要となる[3]. 一方、弱いエネルギーによる点火で発生させたデフラグレーション波をデトネーション波へ遷移 (Deflagration to Detonation Transition, DDT) させることによ

りデトネーションを開始させることも可能だが、一般的に空気取り込み式 PDE では DDT 過程に非常に長い距離が必要となる。このように、現実的なエンジンの点火装置やサイズの範囲内において燃料 - 空気混合気デトネーションを開始・維持することが非常に困難である。この問題を解決するために、比較的短い距離でデトネーションへの遷移が可能な反応性の高い混合気をドライバーガスとして燃焼器の前半部に充填する方法がある。ドライバーガス領域で発生したデトネーション波を入射させることにより、燃焼器内に充填された反応性の乏しい混合気にデトネーション波を伝播させる。さらに、このドライバーガス領域の管径を細くしたプリデトネーターを利用する方法が提案されてきた[4,5].

このプリデトネーターと燃焼器の接合部のような急拡大する管路におけるデトネーションの挙動は基礎燃焼学的にも興味深い現象であるため、PDE にプリデトネーターを用いることが提案される以前から現在に至るまで様々な研究が行われている[6,7]. 特に急拡大部におけるデトネーション

\* Corresponding author. E-mail: dragon@eng.hokudai.ac.jp

ン波の伝播限界条件については、プリデトネーターの内径  $D$  と入射デトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  を用いて  $D \geq 13\lambda$  の関係があることが多くの研究者たちによる実験および解析によって示されている[8-10]. 混合気の組成が既知の場合、この関係を用いることにより必要なプリデトネーターの内径を容易に知ることができる. しかしながら、この関係が確認されているのは管路が同組成の混合気で満たされた条件についてである. プリデトネーター内を満たすドライバーガスと異なった組成の混合気がターゲットガスとして燃焼器内に充填されるような PDE の場合、急拡大部におけるデトネーション波の伝播挙動に加え、異種混合気間のデトネーション波伝達 (Detonation transmission, DT) が重要な要素となる.

Jones [11]や Ohyagi ら[12]は、それぞれ数値解析と実験により、細い管から入射したデトネーションが一旦消滅した後、壁面でマッハ反射した衝撃波の圧縮によりデトネーションが再開始する様子を示した. また Murray らは細い管から半径方向に長い円筒形の平行平板に入射するデトネーション波の伝播限界を観察し、細い管出口に対向する壁での反射によりデトネーション波が再開始し、伝播が促進される場合があることを示した[13,14].

著者らは、このような衝撃波の反射を積極的に利用して急拡大部におけるデトネーション波の伝播促進を図るため、反射板と呼ばれる板をプリデトネーター出口部分に取り付けた PDE イニシエータを提案してきた[15]. 本報ではこれまでに確認された急拡大部におけるデトネーション波の伝播挙動に対する反射板の効果について詳説するとともに、急拡大部における混合気組成の変化が反射板による伝播促進効果に与える影響について考察する.

## 2. 実験装置および実験条件

### 2.1 実験装置

本研究で使用する実験装置の概略を図 1 に示す. 本実験装置は主に、PDE 燃焼器を想定した主管状燃焼器と DDT により平面デトネーション波を発生させるためのプリデトネーターで構成されている. 主管状燃焼器は内径 100 mm, 全長 220 mm のステンレス製の円筒管であり、プリデトネーターには内径 20.4 mm, 全長約 3 m のステンレス製 1 インチ管を用いている. 実験に用いる予混合気はガスハンドリング装置において十分に攪拌混合され、装置内へと充填される. プリデトネーターの途中にはボールバルブが設置されており、バルブより上流部と下流部にそれぞれ異なる混合気を充填することができる. ボールバルブはタイマーにより点火の 0.5 秒前に開放され、プリデトネーターと主管状燃焼器が接続される. 本研究では上流部にはドライバーガスとして水素-酸素量論混合気を、下流部および燃焼器内には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ものを充填する. また、ボールバルブ前後に圧力差を設けることにより、バルブ開放時にプリデトネー

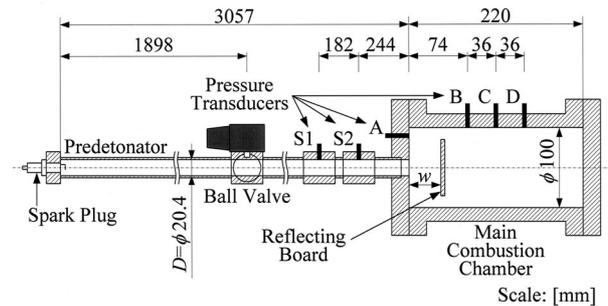


Fig.1 Experimental apparatus

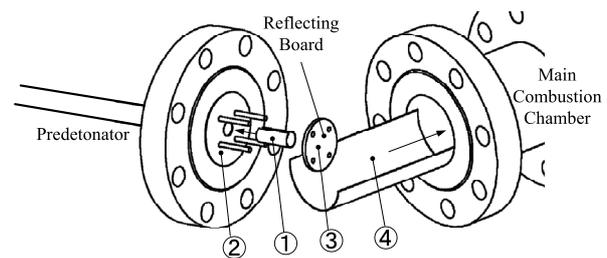


Fig.2 Position of soot tracks

Table 1 Experimental conditions

Initial pressure, $P_0$	Atmosphere
<b>Condition A: Predetonator filled partially with driver gas</b>	
Filling pressure of driver gas, $P_{driver}$	101
Filling pressure of target gas, $P_{target}$	101
<b>Condition B: Predetonator fulfilled with driver gas</b>	
Filling pressure of driver gas, $P_{driver}$	158
Filling pressure of target gas, $P_{target}$	80

Scale: [kPa(abs)]

ター全体にドライバーガスを行き渡らせることも可能となる. 各条件におけるボールバルブ開放前の充填圧 (絶対圧) をそれぞれ表 1 に示す. ボールバルブ上流部のドライバーガス充填圧を  $P_{driver}$ , ボールバルブ下流および主管状燃焼器内のターゲットガス充填圧を  $P_{target}$  とした. どちらの条件についても、燃焼器内へと入射するデトネーション波は点火直前にプリデトネーター下流部を満たす混合気の理論 CJ 状態に達していることが予備実験における伝播速度およびセルサイズの計測により確認されている. 反射板は直径 70 mm, 厚さ 5 mm のステンレス製の円板であり、図 1 に示す位置に 4 本の支持棒で取り付けられている. プリデトネーター出口から反射板までの距離  $w$  は 5 ~ 40 mm の範囲で任意に調整できる. 点火はプリデトネーター閉端部に取り付けられたバイク用点火プラグを用いて行う. 圧力測定は図 1 の測定点 Port-S1, Port-S2, Port-B, Port-C,

Port-D において行い, 測定点を通過した圧力波の到達時刻から伝播速度を算出し, CJ 速度と比較することでデトネーション波伝播の有無を判断する. 各混合気組成における CJ 速度は NASA が開発した燃焼平衡計算プログラム CEA (Chemical Equilibrium with Applications) [16]を用いて求めた. 圧力計には PCB 社製ピエゾ圧電素子型圧力センサ HM113A26 を用いる. すず膜模様は, 図 2 に示す①プリデトネーター出口, ②燃焼器前面, ③反射板両面, ④燃焼器側壁において灯油の炎で煤を塗布した薄いアルミ板を用いて採取する. 得られたすず膜模様はスキャナを用いてデジタルデータとして保存する. 入射デトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  は, プリデトネーター出口で得られたすず膜模様から任意に 30 個のセルを抽出し, 測定したセルサイズを平均した値とする.

## 2.2 実験条件

可燃性混合気には水素 - 酸素量論混合気およびそれを窒素で任意の割合で希釈した混合気を用いる. ドライバーガスの充填条件は, プリデトネーター上流部に部分的に充填する場合とプリデトネーター全体に充填する場合に分けられる. ボールバルブ開放時の初期気圧はすべて 1 atm である. 反射板距離  $w$  は 5 ~ 40 mm まで 5 mm ずつ変化させる. 反射板を装着しない条件を  $\infty$  と表記する.

## 3. 実験結果および考察

管路が急拡大する場合, 入射するデトネーション波の伝播限界はセルサイズ  $\lambda$  と管直径  $D$  を用いて  $D \geq 13\lambda$  で与えられることが知られている[8-10]. この関係が確認されているのは管路が同組成の混合気で満たされた条件についてである. 著者らが想定している PDE のように, プリデトネーター内を満たすドライバーガスと異なった組成の混合気がターゲットガスとして主管状燃焼器内に充填されるような場合には, 急拡大部におけるデトネーション波の伝播と異種混合気間のデトネーション波遷移が同時に起こる. 本章では, これまでに著者らが確認してきた急拡大部におけるデトネーション波の伝播挙動に対する反射板の効果と述べるのと同時に, 急拡大部における混合気組成の変化が反射板による伝播促進効果に与える影響について考察する.

### 3.1 反射板によるデトネーション波の伝播促進効果

プリデトネーター内のボールバルブより上流部へドライバーガスを充填した条件における, 反射板を使用した場合のデトネーション波の伝播限界条件および反射板による伝播促進効果について述べる. 各反射板距離におけるデトネーション波の伝播限界をプリデトネーター下流部および主管状燃焼器内に充填されたターゲットガスの窒素希釈率を用いて評価する. デトネーション波の伝播は主管状燃焼器側壁での圧力履歴から得られる伝播速度および燃焼器側壁

で取得されるすず膜模様から判断した.

代表的な条件 (a: 反射板距離  $w = 10$  [mm], 窒素希釈率 20 %, b: 反射板距離  $w = 20$  [mm], 窒素希釈率 35 %, c: 反射板距離  $w = 30$  [mm], 窒素希釈率 20 %) で取得された燃焼器側壁のすず膜模様を図 3 に示す. 図の大きさは横 220 × 縦 100 mm であり, 左がプリデトネーター側となっている. 破線は反射板の位置を示している. 図 3(a) では, 反射板より前方領域において燃焼器側壁に対してデトネーション波が垂直に衝突したセル模様が観察できる. デトネーション波は反射板通過後, 壁面に対して平行に伝播しており, 反射板より後方の領域では規則正しい均一なセル構造が観察

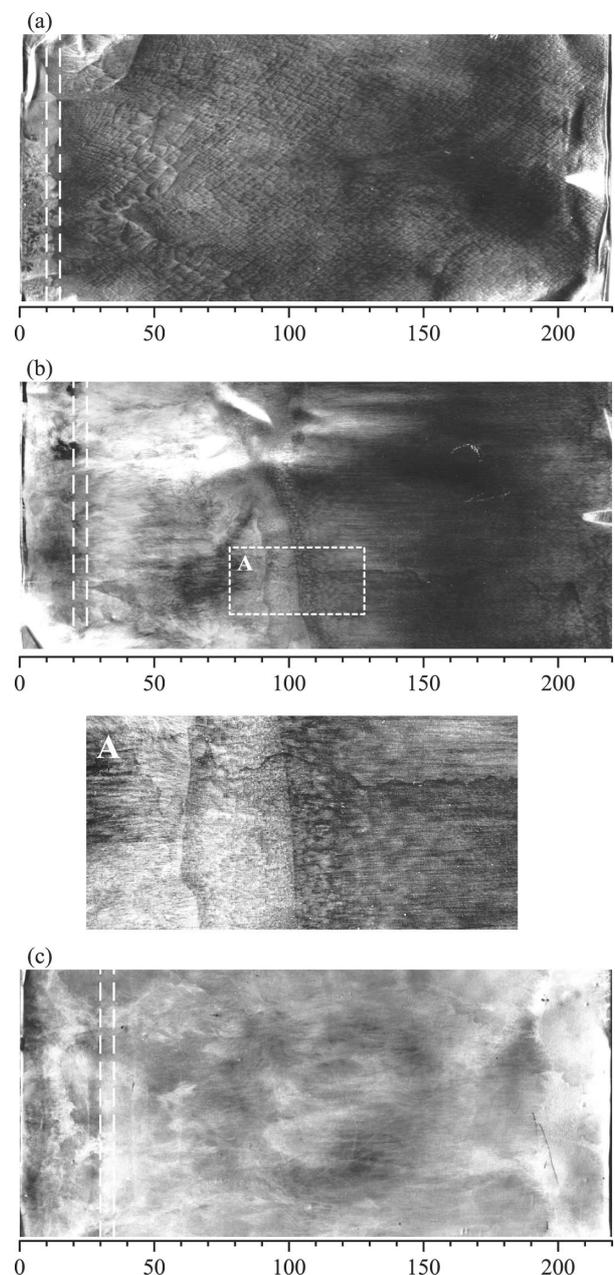


Fig.3 Soot tracks on sidewall of main combustion chamber  
(a)  $w = 10$  [mm], 20 % N<sub>2</sub>, (b)  $w = 20$  [mm], 35 % N<sub>2</sub>  
(c)  $w = 30$  [mm], 20 % N<sub>2</sub>

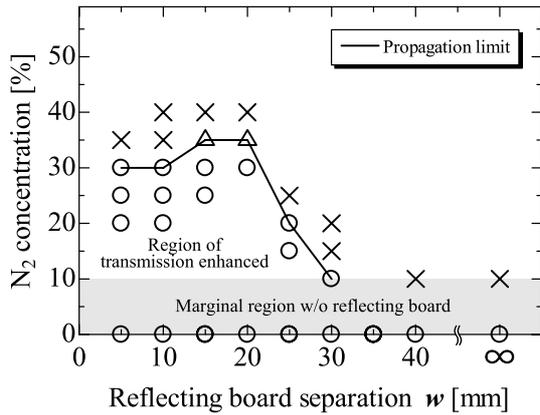


Fig.4 Transition limit as a function of reflecting board separation

されている。このようなセル模様が観察される時、側壁での伝播速度は CJ 速度と良く一致している。このような結果を○として評価する。図 3(b) では、反射板前方および反射板直後の領域ではセル構造が観察されず、デトネーション波が反射板通過時の膨張波の影響を受けて一旦消滅していると考えられる。しかし、燃焼器中央付近において突然セル構造が観察される (拡大図 A)。その後の領域では図 3(a) と同様に、規則正しい均一なセル構造が観察されている。このようなすず膜模様は主に伝播限界条件付近で観察された。この時デトネーション波の伝播速度は CJ 速度よりも速いものとなっており、overdrive 状態のデトネーション波が伝播していると考えられる。このような条件を△として評価する。図 3(c) では、燃焼器側壁ではセル構造は確認されず、速度も CJ 速度には達していなかった。このような条件を×として評価する。

各反射板距離で得られた伝播限界を図 4 に示す。反射板を装着しない場合は 0 ~ 10 % の間に伝播限界があるのに対して、反射板を距離 5 ~ 30 mm で取り付けることにより、最高で窒素希釈率 35 % までデトネーション波が再開する。伝播促進効果が最も表れるのは反射板距離 15 ~ 20 mm であり、本実験装置における最適反射板距離と言える。また、反射板距離が 20 mm を超えると急激に伝播促進効果が低下し、反射板距離 40 mm では伝播促進効果がなくなる。逆に反射板距離が小さい 5 ~ 10 mm の条件では反射板手前で円筒デトネーション波が維持されないため、反射板による伝播促進効果が低下する[16]。

3.2 反射板距離と入射デトネーション波の持続距離

反射板距離  $w = 10$  [mm], 窒素希釈率 20 %, および反射板距離  $w = 20$  [mm], 窒素希釈率 35 % で取得された反射板表面のすず膜模様を図 5 に示す。白抜きりの 4 つの円は反射板支持棒の穴である。図 5(a) では白線で示す反射板中央部にデトネーション波が垂直に衝突したセル構造が見られる。つまり、入射デトネーション波が反射板表面に到達していることを表している。この領域の外周部分で反射衝撃波による局所的な爆発が起きていると考えられ、それが白

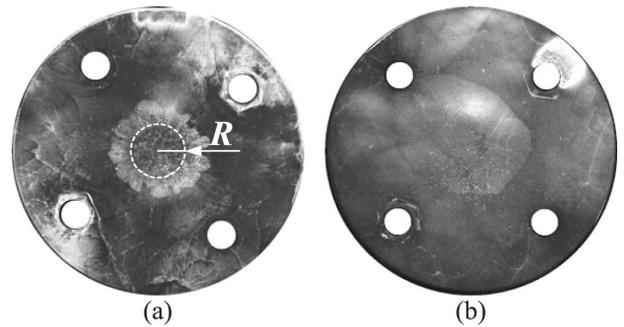


Fig.5 Soot tracks on front surface of reflecting board (a)  $w = 10$  [mm], 20 % N<sub>2</sub>, (b)  $w = 20$  [mm], 35 % N<sub>2</sub>

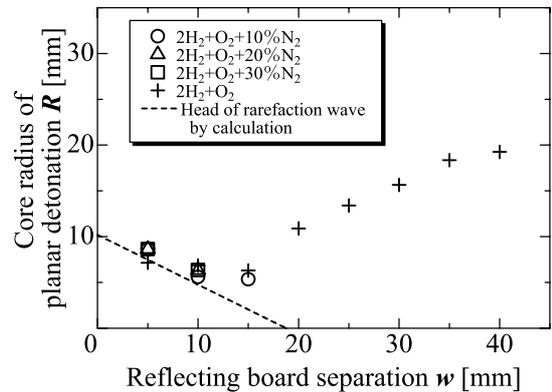


Fig.6 Measured core radius of incident planar detonation

Table 2 Calculated velocities and measured cell size

N <sub>2</sub> [%]	<i>a</i> [m/s]	<i>v</i> <sub>CJ</sub> [m/s]	<i>a</i> / <i>v</i> <sub>CJ</sub>	λ [mm]
0	1545.7	2841.8	0.54	1.22
10	1438.2	2642.7	0.54	1.27
20	1348.8	2475.2	0.54	1.73
30	1270.0	2325.7	0.55	2.19

い帯状に観察されている。白い帯の外側では非常に細かいセル構造が観察され、次第にそのサイズを大きくしながら半径方向にデトネーション波が伝播している様子が見られる。図 5(a) よりも反射板距離  $w$  が大きい条件でのすず膜模様である図 5(b) では、入射デトネーションの衝突によるセル構造は確認されなかった。

図 5(a) に示すように、入射デトネーション波によって描かれた中心領域の半径を  $R$  として、各条件において測定した結果を図 6 に示す。図中の記号はそれぞれ窒素希釈率 0 %, 10 %, 20 %, 30 % の条件を示している。図中の破線は、急拡大部における回折によって発生した膨張波が外周から管の中心軸に向かって伝播する速度と、管の中心軸を伝播するデトネーション波の CJ 速度  $v_{CJ}$  から算出した  $R$  の値である。膨張波の速度は、デトネーションで燃焼した

後の混合気組成における音速  $a$  とした。各窒素希釈率において CEA プログラム[16]によって計算した各値とプリデトネーター出口で測定したセルサイズ  $\lambda$  の平均値を表 2 に示す。各窒素希釈率で計算された音速  $a$  と CJ 速度  $v_{CJ}$  の比  $a/v_{CJ}$  は、どの希釈率に対してもほぼ 0.55 で一致している。このため、 $R$  が 0 となる長さは窒素希釈率によらず本実験装置では約 18 mm となる。実験によって得られた  $R$  は窒素希釈率 0% を除き、窒素希釈率に依らず理論的に得られる平面デトネーション波の半径とほぼ一致しており、反射板距離が約 18 mm において平面デトネーション波が消失する様子が反射板表面におけるセル模様からも確認できる。

以上のことから、プリデトネーターから入射した平面デトネーション波は膨張波によって減衰し、約 18 mm で完全に消失する。つまり、ドライバーガスおよびターゲットガスが窒素希釈された条件では、反射板距離が 20 mm 以上において反射板表面に到達する波面はデトネーション波ではなく、燃焼波が分離し減衰過程にある衝撃波であると考えられる。窒素希釈率 0% の条件で得られた  $R$  は、他の条件と同様に一旦減少するが反射板距離 20 mm 以降では逆に大きくなっており、入射デトネーション波が一旦減衰した後に反射板距離 10 ~ 15 mm 付近において球状デトネーション波が自発的に再開始した様子を示している。

Edwards ら[6]が示した入射デトネーション波の再開始位置と横波の関係についての概念図を図 7 に示す。この概念図は縦の長さが  $L$  の矩形管から入射したデトネーション波について示したものである。入射したデトネーション波は角 A 点から中心軸方向に伝播する膨張波の影響により減衰する。この膨張波の軌跡が AD である。デトネーション波の再開始は AD 上の点 C における局所的な爆発によって起こる。C 点の位置は AB の長さによって決まり、AB は間に横波が 5 個入る長さであることが示されている。図に示すように横波の間隔がセルサイズ  $\lambda$  であることより  $AB = 5\lambda$  である。局所的な爆発位置 C が D 点と一致する時がデトネーション波の伝播限界条件となる。よって縦の長さ  $L$  の矩形管から入射するデトネーション波の伝播限界はセルサイズ  $\lambda$  を用いて  $L = 10\lambda$  で表される。限界条件における局所的な爆発による再開始の位置について、矩形管と同様の考えが円管にも適用できると考えると、プリデトネーターから入射した平面デトネーション波は、出口コーナーから生じた膨張波の影響を受けて円錐状に減衰する。伝播限界条件以下においてはその後、この円錐領域の頂点で局所的な爆発により高温高压のホットスポットが形成され、これがデトネーション再開始の核となる。この核によって再開始したデトネーション波は球状デトネーション波となって伝播する。一方、伝播限界条件 ( $D = 13\lambda$ ) を超えた場合は再開始核が形成されず、回折したデトネーション波は衝撃波面と燃焼波面に分離し、いずれ消失する。円管における伝播限界はセルサイズ  $\lambda$  を用いて  $D = 13\lambda$  と表されることから  $AB = 6.5\lambda$  となり、膨張波の軌跡の傾きは先ほどの

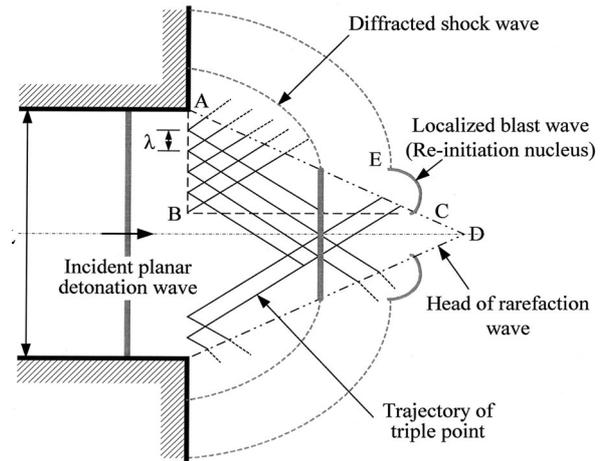


Fig.7 Schematic diagram of diffracted detonation front [6]

計算結果  $a/v_{CJ} = 0.55$  を用いると伝播限界以下の条件では出口からの距離が  $11.8\lambda$  の位置で局所的な爆発が起こることになる。また Murray ら[13]は、デトネーション波の自発的な再開始位置が常に急拡大部から  $11.5\lambda$  の位置であることを実験により示しており、Edwards らの矩形管による結果を円管に置き換えた場合と良く一致している。本実験における窒素希釈率 0% での入射セルサイズ  $\lambda$  が約 1.2 mm であることから、再開始位置は約 14 mm となる。ここで図 6 を見ると、一旦減少した半径  $R$  が再び増加し始める位置と一致していることがわかる。

以上の結果より窒素希釈なしの条件 ( $D \geq 13\lambda$ ) では、反射板による伝播促進効果が無い場合でも、入射したデトネーション波は自発的に再開始することがわかる。同条件で反射板を設置した場合、反射板距離 15 mm 以降では自発的に再開始したデトネーション波が反射板に到達していると考えられる。入射デトネーション波が伝播限界を超えている場合 ( $D < 13\lambda$ )、反射板距離 20 mm を超えた条件では入射デトネーション波が反射板に到達する前に消失し、減衰しながら伝播する衝撃波となる。衝撃波がデトネーション波を開始するのに十分な強さのマッハ反射を起こすことができる強さを保った状態で反射板に衝突した場合は、反射板によるデトネーション波の再開始が期待できるが、反射板が遠ざかるほどその可能性は低くなる。このため、入射衝撃波による強い反射効果が得られなくなり急激に伝播促進効果が低下する。つまり、反射板は平面デトネーション波が維持されている距離で設置するのが効果的であるといえる。

### 3.3 伝播促進効果に及ぼす入射デトネーション波強度の影響

前節の結果から、反射板による伝播促進効果を得るにはある程度の強さを保った状態で入射衝撃波が反射板へ到達する必要があることがわかった。本節ではプリデトネーター全体をドライバーガスで満たし、より強いデトネーション波を燃焼器内へと入射させることで反射板による伝播促

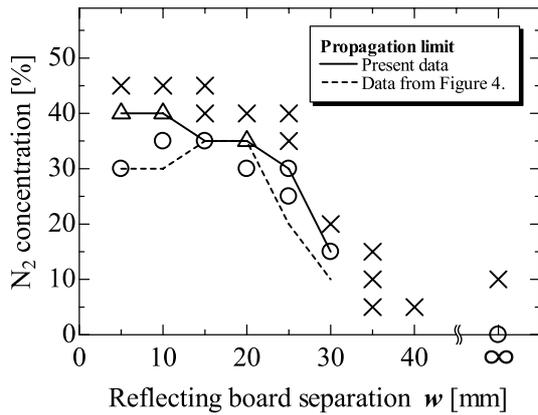


Fig.8 Transition limits as a function of reflecting board separation

進効果の改善を図るとともに、急拡大部における混合気組成の変化が反射板による伝播促進効果にどのような影響を及ぼすのかを確認する。

これまでと同様に、主管状燃焼器内に充填されたターゲットガスの窒素希釈率を用いて各反射板距離におけるデトネーション波の伝播限界を評価する。デトネーション波の伝播の有無は、主管状燃焼器側壁での圧力測定点での伝播速度および燃焼器側壁で取得されたすす膜模様から判断する。各反射板距離に対して得られた伝播限界を図8に示す。図中に示す記号の評価基準は図4と同様であり、破線は図4で得られた伝播限界を示している。反射板を装着しない場合は0～10%の間に伝播限界が存在している。反射板距離15～20mmでは先ほどと同じ窒素希釈率で伝播限界となっているが、反射板距離5～10mmでは伝播限界が上昇し、最大で窒素希釈率40%までデトネーション波が再開している。これにより最適反射板距離は5～10mmとなり、反射板距離が近ければ近いほど伝播促進効果を得ることができるという結果になっている。また、反射板距離20mm以降での急激な伝播促進効果の低下が多少緩やかになっているのがわかる。

反射板表面のすす膜模様から入射デトネーション波の衝突面の半径を測定し、入射後のデトネーション波の挙動を推察する。反射板距離  $w = 10$  [mm]、窒素希釈率35%、および反射板距離  $w = 20$  [mm]、窒素希釈率30%で取得された反射板表面のすす膜模様を図9に示す。図9(a)では、図5(a)と同様のセル模様を観察できる。図9(b)は、前節の条件ではデトネーション波の衝突が確認されなかった反射板距離  $w = 20$  [mm] における結果を示すが、中心領域のセル模様をはっきりと確認することができる。更に反射板距離が大きくなった条件 ( $w \geq 25$  [mm]) では入射デトネーション波の衝突によるセル構造は確認されなかった。先ほどと同様に、入射平面デトネーション波によって描かれた中心領域のセル模様の半径  $R$  を測定した結果を図10に示す。図中の記号はそれぞれ窒素希釈率30%、35%、40%、および45%の条件を示している。図中の実線は、CEAプログラムを用いて窒素希釈率45%について計算したデトネ

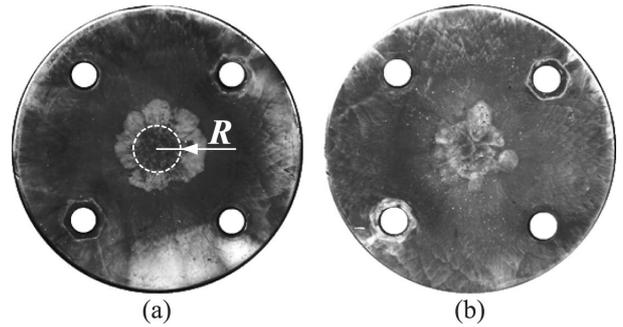


Fig.9 Soot tracks on front surface of reflecting board (a)  $w = 15$  [mm], 35%  $N_2$ , (b)  $w = 20$  [mm], 30%  $N_2$

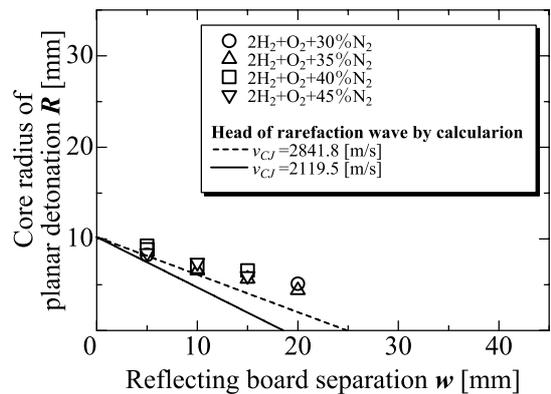


Fig.10 Measured core radius of incident planar detonation

Table 3 Sonic velocity and CJ velocities

$N_2$ [%]	$a$ [m/s]	$v_{CJ}$ [m/s]	$a/v_{CJ}$
45	1164.3	2841.8*	0.54
		2119.5	0.41

\*CJ velocity in condition of 0% $N_2$

ーション波通過後の混合気組成における音速  $a$  と、中心軸を伝播するデトネーション波のCJ速度  $v_{CJ}$  から算出した  $R$  を示している。また、破線は中心軸を伝播するデトネーション波の速度を入射デトネーション波の条件である窒素希釈率0%の条件でのCJ速度に置き換えて算出した値を示している。CEAプログラムによって計算した各値を表3に示す。

実験によって得られた  $R$  は中心軸上のデトネーション波の伝播速度を入射デトネーション波の条件におけるCJ速度に置き換えて算出した半径に傾向がより近いことがわかる。この場合  $R$  が0となる長さは約25mmであり、反射板表面におけるセル模様からも反射板距離  $w = 25$  [mm] において平面デトネーション波が消失している様子が確認できる。つまり、入射直後のデトネーション波はすぐに燃焼器内に充填された混合気組成のデトネーション波へと遷移するのではなく、遷移にはある程度の距離が必要となり、

ドライバーガスの CJ 速度に近い速度で伝播を続けるため, 膨張波が中心軸に到達するまでに入射デトネーション波が到達できる距離が 18 mm から 25 mm へ伸びたと考えられる. 図 8 において反射板距離  $w = 20 \sim 25$  [mm] で反射板による伝播促進効果の低下がやや緩やかになっているのは, 入射デトネーション波が維持される距離が伸びたことで伝播促進効果を得られる範囲が広がったためであると考えられる.

中心軸上のデトネーション波の伝播速度を入射デトネーション波の条件における CJ 速度に置き換えて算出した半径と比較しても, 実験で得られた  $R$  は計算値よりも大きな値となっており, これは膨張波到達後も暫くはデトネーション波が維持していることを示している. Conrad [17]らは緩やかな拡大部を有する矩形管を用いて, CJ デトネーション波と overdrive 状態のデトネーション波それぞれの拡大部での回折の様子を実験で可視化している. CJ デトネーション波が拡大部通過時に生じる回折の影響によって消失するような条件において, DDT 過程で生じる overdrive 状態のデトネーション波をプリデトネーターから入射させることで拡大部からの回折の影響が減少し, デトネーション波が維持されることを確認している. これは overdrive 状態のデトネーション波を入射させることで, 膨張過程で横波が回折による減衰に耐え得るほど入射デトネーションのセル構造が細くなったためと考えられている. 本実験における入射直後のデトネーション波は異種混合気間の遷移初期であり, 入射後も非常に細かいセル構造 ( $\lambda \approx 1.2$  [mm], 表 2 参照) を有していると考えられる. そのため, 回折による膨張波が到達した後も暫くデトネーション波が維持され, 実験で得られた  $R$  は計算値よりも大きな値を示している.

Murray ら[13]は入射平面デトネーション波が平行平板間において円筒デトネーション波に遷移して伝播する様子を実験により観察し, 入射デトネーション波のセルサイズと平行平板間隔の関係を用いてデトネーション波伝播状況の分類を行った. 平行平板間隔がセルサイズの 5.7 倍よりも狭い条件では, 向かい側の壁の表面における反射によりデトネーション波が再開せず, 円筒デトネーション波に遷移しない. Murray らと同様に, 本研究で得られた実験結果(図 4, 8)をそれぞれプリデトネーターから入射したデトネーション波のセルサイズで再評価し, 整理したものを図 11 に示す. 縦軸はこれまでの窒素濃度が変わって, Murray らと同様に入射デトネーション波のセルサイズを用い, 横軸は反射板距離である. 図中○がすす膜模様より判断した反射板表面における再開始, △がそれ以外の条件による再開始を示す. 図 4 を再評価した結果を灰色, 図 8 を再評価した結果を黒色の記号でそれぞれ示す. 破線は Murray らが示した  $w = 5.7\lambda$  を示しており, それよりも右側が反射によりデトネーションが再開始する領域である. つまり, 反射板距離が近い条件 ( $w \leq 5.7\lambda$ ) では, 反射板前方の領域で円筒デトネーション波は維持されない.

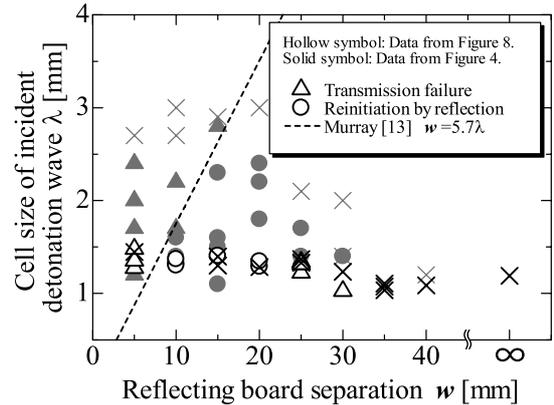


Fig.11 Transition status evaluated by cell size of incident detonation wave

窒素希釈率とセルサイズには相関関係があり, 希釈率が高いほどセルサイズは大きくなる. 急拡大部の前後が同組成の混合気によって満たされている条件では, 最大でセルサイズ約 3 mm までデトネーション波が伝播していることがわかる. 図中○の条件と△の条件の境界は, 反射板距離 15 mm までは Murray らの示した  $w = 5.7\lambda$  と良い一致をしている. 一方, プリデトネーター全体をドライバーガスで満たした条件では, 燃焼器内の窒素希釈率によらず入射セルサイズは約 1.2 mm で一定となっている. 同条件では, 入射直後もしばらく入射条件と同じセル構造を有していると考えられ, 反射板前方で円筒デトネーション波が維持される距離は  $w \approx 6.8$  [mm] 以上となる. 反射板距離  $w = 10$  [mm], 窒素希釈率 35% で得られた反射板表面でのすす膜模様を図 12 に示す. 図に示す 2 本の点線で囲まれた領域のセル構造から, 反射によりデトネーション波が再開始している様子が確認できる. しかしながら, 一旦再開したデ

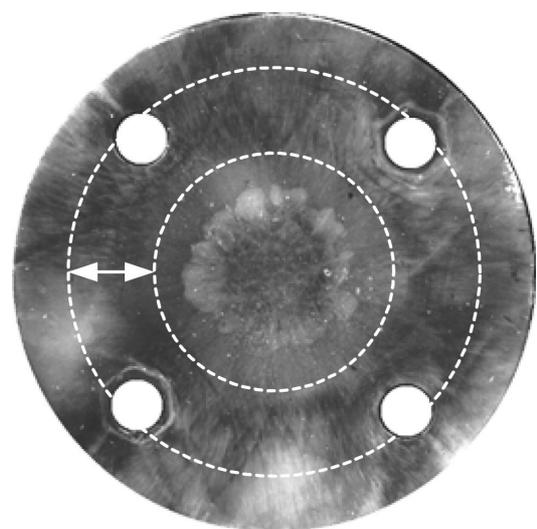


Fig.12 Soot track on front surface of reflecting board ( $w = 10$  [mm], 35%N<sub>2</sub>)

トネーション波は点線の外側で再び消滅する。強いデトネーション波が入射することにより、反射板表面における反射により一度円筒デトネーション波が再開するが、窒素希釈率の高い混合気内で維持されずに消滅してしまったものと考えられる。消滅した円筒デトネーション波は強い衝撃波となって伝播し、燃焼器側壁におけるマッハ反射により伝播を再開する。更に窒素希釈率の高い条件では図 3(b) で示したように反射板通過後に燃焼器中心軸上で再開する。このように反射板距離が小さい条件 ( $w \leq 10$  mm) でも、反射板前方の領域で半径方向にデトネーション波または強い衝撃波が維持されることで伝播促進効果が向上し、反射板距離を設置する最適値が反射板距離  $w = 5 \sim 10$  [mm] へと推移したものと考えられる。

#### 4. 結言

本報では、急拡大部におけるデトネーション波の伝播挙動に対する反射板の効果および急拡大部における混合気組成の変化がその効果に与える影響について調べた。反射板を取り付けることにより、反射板表面において衝撃波のマッハ反射によると思われるデトネーション波の再開が確認され、多くの条件で伝播促進効果があることが確認された。伝播促進効果のある反射板距離は、プリデトネーターから入射する平面デトネーション波が維持する距離と深く関係している。より強いデトネーション波を燃焼器内に入射せることで、膨張波が中心軸に到達するまでに入射デトネーション波が到達できる距離が増大するとともに、到達した膨張波によるデトネーション波の減衰が緩和される。また、入射デトネーション波のセル構造が細くなることにより、円筒デトネーション波に遷移することが可能な最小反射板距離が減少する。以上の効果により、反射板による伝播促進効果を得られる反射板距離の範囲が広がることが確認された。

#### References

1. Kailasanath, K., *AIAA Journal*, 41, 2003, pp.145-159.
2. Roy, G.D., Frolov, S.M., Borisov, A. A. and Netzer, D.W., *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 2004, pp.545-672.
3. Schauer, F.R., Miser, C.L., Tucker, K.C., Bradley, F.R. and Hoke, J.L., *AIAA Paper* 2005-1343, 2005.
4. Helman, D., Shreeve, R.P., Eidelman, S., *AIAA Paper* 86-1683, June 1986.
5. Hinkey, J.B., Bussing, T.R.A., and Kaye, L., *AIAA Paper* 95-2578, July 1995.
6. Edwards, D.H., Thomas, G.O. and Nettleton, M.A., *Journal of Fluid Mechanics*, 95, 1979, pp.79-96.
7. Shepherd, J.E., Schultz, E., Akbar, R., *Proc. 22nd Int. Symp. on Shock Waves*, 41-48.
8. Mitrovanov, V.V., Soloukhin, R.I., *Soviet Phys. Dokl.* 9 (1964) 1055.
9. Matsui, H., Lee, J.H., *Proc. 17th Symp. (Int.) on Combust.* (1978) 1269-1280.
10. Knystautas, R., Lee, J.H., Guirao, C.M., *Combust. Flame* 48 (1982) 63-83.
11. Jones, D.A., Sichel, M., Oran, E.S., *Shock Waves* 5 (1995) 47-57.
12. Ohyagi, S., Obara, T., Hoshi, S., Cai, P., Yoshihashi, T., *Shock Waves* 12 (2002) 211-226.
13. Murray, S.B., Lee, J.H., *Combust. Flame* 52 (1983) 269-289.
14. Murray, S.B., Thibault, P.A., Zhang, F., Bjerketvedt, D., Sulmistras, A., Thomas, G.O., Jenssen, A., and Moen, I.O., in: Roy, G.D., Frolov, S.M., Netzer, D., and Borisov, A.A., (Eds.), *High-Speed deflagration and detonation: Fundamentals and control. Elex-KM Publishers, Moscow*, 2001, p.139-162.
15. Wakita, M., Numakura, R., Ito, Y., Nagata, H., Totani, T., Kudo, I., *J. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.* (in Japanese), 53 (2005) 414-418.
16. Sanford Gordon and Bonnie J. McBride, *NASA Reference Publication 1311*, October 1994.
17. Conrad, C., Saretto, S.R., Lee, S.-Y., and Santoro, R.J., *AIAA Paper* 2004-3397, July 2004.