

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

狭い間隙内におけるデトネーションの伝播モード

Propagation Mode of Detonation Waves in a Narrow Gap

石井 一洋^{1*}・伊藤 和久^{2**}・坪井 孝夫¹ISHII, Kazuhiro^{1*}, ITO, Kazuhisa^{2**}, and TSUBOI, Takao¹¹ 横浜国立大学大学院工学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan² 横浜国立大学大学院工学研究科 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

2004年9月2日受付; 2004年10月24日受理 / Received 2 September, 2004; Accepted 24 October, 2004

Abstract : Propagation mode of detonation waves in a narrow gap has been studied experimentally. The gap was formed by a pair of metal plates of 1500 mm in length which were inserted in a detonation tube. Two metal spacers were interposed at both side edges of the plates to arrange a gap size of 2.0 mm. The plates are supported by 15 combination probes which were composed of pressure and ion probes. Using the combination probe it is possible to detect a shock and a reaction front individually at one measurement point. A test gas was hydrogen-oxygen mixture diluted with argon or nitrogen and an initial pressure was 39 kPa. Velocity profiles and smoked foil records reveal five propagation modes in the gap: stable, quasi-stable, galloping, single head, and failure mode. In the quasi-stable mode, the propagation velocity is almost constant, while cell size on smoked foil records has larger variation as compared to the stable mode. The galloping mode shows large velocity fluctuation more than ± 500 m/s and wide variety of the cell size along the propagation direction. In the single head mode one triple point travels downstream reflecting at the sidewall. The velocity deficit normalized by the propagation velocity at the gap entrance is dependent on the gap size normalized by the cell size, although the velocity deficit has little dependency for lean hydrogen-oxygen mixtures.

Key Words : Detonation, Cell size, Propagation mode, Velocity deficit

1. 緒言

デトネーションの伝播限界条件を調べることは、防爆のための基礎的なデータを提供することとなる。円管内を伝播するデトネーションの伝播限界は古くから調べられており[1], 各種混合気に対して伝播可能な最小直径の存在が確認されている[2]. Dupréらは、直径が段階的に変化する管を用いて、セルサイズが管内周と等しい場合がデトネーションの伝播限界条件であることを系統的に調べている[3,4]. しかしながらデトネーションが間隙内に進入する場合には、セルサイズより小さい間隙長においても、速度欠損を伴うものの定常的に伝播することが可能であることがわかっている[5,6]. この場合、伝播は間隙内における衝撃波三重点の衝突・移動に支配され、いわゆる二次元デト

ネーションが形成される。速度欠損の主要な原因は、壁への摩擦損失により衝撃波面背後の運動量が失われる[7]ためであり、セルサイズという反応誘導距離と関連する量[8,9]とは物理的意味合いが異なる。速度欠損に関しては、解析的手法[10]や数値シミュレーション[2]により定量的評価が行われており、また一次元解析では、摩擦損失の付加により振動解が生ずることがわかっている[11].

これまでに著者らは、円管内に設けた長さ 500 mm の間隙に定常デトネーションを入射させ、間隙の幅および混合気組成がその後のデトネーション伝播へ及ぼす影響を調べてきた[5,6]. しかしながら間隙入射後直後では、運動量損失による衝撃波の減衰と、デトネーション波面背後の燃焼ガスによる衝撃波駆動とがバランスせずにオーバードリブン状態にあるため、混合気によっては長さ 500 mm の試験区間では定常伝播の確立に不十分となる可能性があり、また大幅な速度変動などの不安定性を示す場合については、伝播挙動の全容を把握するに足るだけの長い試験区間が必

* Corresponding author. E-mail: kazishii@ynu.ac.jp

** 現所属: 三菱重工株式会社

〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1

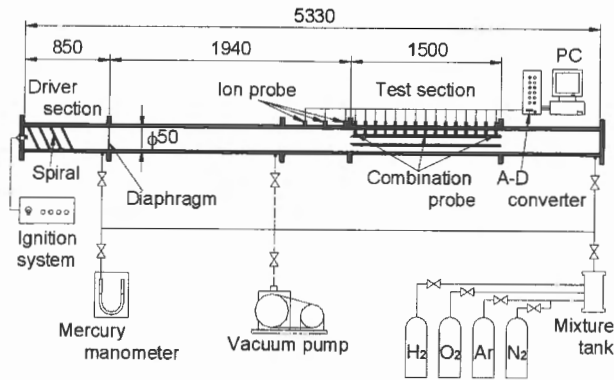


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus. Dimensions in mm.

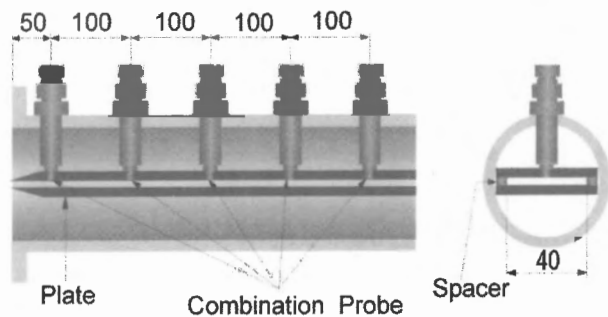


Fig. 2. Detailed construction of the test section. Dimensions in mm.

要となることがわかった。そこで本研究では、試験区間の長さを 1500 mm へと延長し、主としてその伝播挙動に重点をおいて、間隙内を伝播するデトネーションに関して実験的に調べた。当量比および希釈気体の割合を変化させることで、様々なセルサイズのデトネーションを間隙に入射させ、伝播速度およびセルサイズの変化より伝播モードの特定を行った。

2. 実験方法

2.1. 実験装置

本研究で使用したデトネーション管は Fig. 1 に示すように全長 5,350 mm、内径 50.5 mm のステンレス管である。試験部には長さ 1,500 mm、幅 46 mm の一対のステンレス板が挿入されている。Fig. 2 に試験部の詳細を示す。ステンレス板の間に金属製スペーサーを挟むことにより、横幅 40 mm、高さ方向 2 mm の間隙が構成されている。ステンレス板表面に煤を塗布することにより、間隙内のセル構造の変化を観察することができる。

試験部には、圧力プローブとイオンプローブを組み合わせたプローブ (以後、コンビネーション・プローブと呼ぶ) が、試験区間入口より 100 mm ごとに 15 個設けられている。コンビネーション・プローブの構造を Fig. 3 に示す。圧力プローブは、厚さ約 0.2 mm の受圧面を介して、円筒

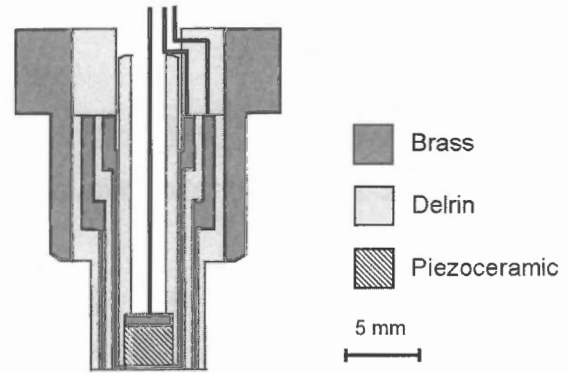


Fig. 3. Construction of the combination probe composed of an ion and a pressure probe.

形状のピエゾセラミック素子により圧力波を検知する構造となっている。またプローブ設置が間隙内におけるデトネーション挙動に影響を与えないように、イオンプローブはフラッシュマウントとする必要がある。そのため上述の受圧面が電極も兼ねており、絶縁用のデルリンを挟んだ外周の円環状の電極との間に電圧を印加している。したがって圧力波面検出部はプローブ中心、反応面検出部はその外周の円環部となり、厳密には両波面検出位置は異なるものの、ほぼ同一計測地点で衝撃波面と反応面の到達を個別に捉えることができる。なお、本圧力プローブではピエゾセラミック素子の固有振動数の補正は行っておらず、衝撃波のような急峻な立ち上がりの圧力波に対しては出力が大きく振動する結果となる。そのため本プローブでは圧力の絶対値測定は行わず、出力信号の立ち上がりから衝撃波面到達の検出のみを行っている。

2.2. 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。試験気体は水素-酸素混合気をベースとし、試験部の初期圧力は 39 kPa 一定であり、当量比およびアルゴン、窒素の希釈率を変化させることによりセルサイズを変化させた。Table 1 におけるセルサイズは間隙入射前での実測値であり、どの条件においてもセルサイズは間隙長 2 mm より大きい。なお、反応性の低い混合気の場合には、Fig. 1 に示される長さ 850 mm の駆動部に水素-酸素量論混合気を充填し、駆動部にて生じたデトネーションにより試験部にデトネーションを起動させた。このとき駆動部の初期圧力を 52 kPa~65 kPa の範囲で調整し、試験部でデトネーションが生ずる下限の圧力付近に設定した。駆動気体総発熱量に対する試験気体総発熱量の比は、Table 1 のアルゴン希釈 80% の場合で 0.61、窒素希釈 55% の場合で 1.1 である。

一般に、反応性の高い気体のデトネーションを駆動部として反応性の低い気体にデトネーションを起動させる場合には、どこまで駆動気体の影響が残存しているかという問題がある。また反応性の低い気体に対して、駆動気体を用

Table 1. Experimental conditions.

Mixture H ₂ -O ₂	Initial pressure (kPa)	Cell size λ (mm)
$\phi=0.2$	39	7.1
$\phi=0.3$		4.2
$\phi=0.5$		3.0
$\phi=0.7$		2.8
$\phi=1.0$		3.1
$\phi=1.5$		4.3
$\phi=1.7$		5.5
$\phi=2.0$		7.1
$\phi=2.3$		8.9
$\phi=2.5$		13.6
$\phi=1.0$ (Ar50%)		4.0
$\phi=1.0$ (Ar60%)		4.6
$\phi=1.0$ (Ar70%)		6.1
$\phi=1.0$ (Ar80%)		10.2
$\phi=1.0$ (N ₂ 15%)		3.8
$\phi=1.0$ (N ₂ 25%)		5.0
$\phi=1.0$ (N ₂ 40%)		7.8
$\phi=1.0$ (N ₂ 45%)		9.4
$\phi=1.0$ (N ₂ 55%)		12.8

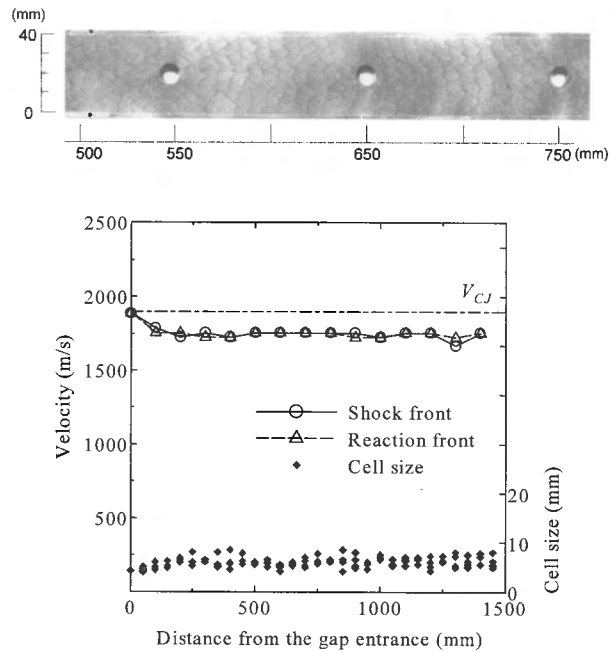


Fig. 4. Velocity profiles, variation of cell size, and smoked foiled record of the stable mode. Test gas is a stoichiometric hydrogen-oxygen mixture diluted with argon 50% in volume.

いることなく DDT (Deflagration to Detonation Transition) が生じた場合にも, 速度は定常値を示しているものの定常伝播には到っていない場合もある[12]. この場合は, 火炎伝播初期に生じた圧縮波によって予め圧縮された混合気中をデトネーションが伝播してゆくためと考えられ, 反応性の低さから DDT 距離が長くなる場合にも, 定常伝播の確認に注意を要することを示唆している. 本研究では, 伝播速度が C-J 速度とほぼ一致し, さらにセルサイズが他者の定常伝播のデータと一致するか, という双方から定常伝播の確認を行なった. 具体的には, 試験部へ入射するデトネーション速度は間隙手前の 3 個のイオンプローブにより測定し, さらに間隙直前に設置した煤膜から測定されたセルサイズを文献[9, 13-17]と比較して, 間隙入射前に定常デトネーションが確立されていることを事前に確認した.

混合気の点火は, 一時電流遮断型の点火回路を用いて管端に設置した自動車用点火栓にて行った. さらに DDT を促進させるため, 管端部にはスパイラルを挿入した.

3. 実験結果および考察

3.1. 伝播モード

本実験では, 二次元的な間隙形状における速度測定結果および煤膜記録におけるセル構造の変化から, stable, quasi-stable, galloping, single head, failure の 5 種類の伝播モードが確認された. 以下に各モードに関して記す.

3.1.1 stable モード

Fig. 4 に水素-酸素量論混合気をアルゴンで 50% 希釈し

た場合の速度履歴およびセルサイズの変化を示す. 図の横軸は間隙入り口からの距離を表している. 距離 0 における速度は, 間隙に入射するデトネーションの速度であるが, 前述の間隙手前に設置した 3 個のイオンプローブによる測定値をプロットした. これはほぼ C-J 速度を示していることがわかる. 間隙に入射して約 1 割程度速度欠損があるものの, その後は間隙内を一定の速度で伝播している. 間隙入射前のセルサイズは 4.0 mm であり, 間隙内ではセルが大きくなる傾向にあるが, ほぼ規則正しいセル構造を示している. 以上よりデトネーションは間隙内を定常伝播していると考えられる. 本実験では当量比 $\phi = 0.3 \sim 1.5$, アルゴン希釈率 50~70%, 窒素希釈率 15, 25% の場合に stable モードを示した.

3.1.2 quasi-stable モード

入射するデトネーションのセルサイズを stable モード時よりも徐々に大きくした場合にこのモードが現れた. Fig. 5 に示されるように, 伝播速度に関しては衝撃波面, 反応面ともに若干の変動があるもののほぼ一定であり, stable モードとの大きな差異は見当たらない. 一方, 煤膜記録ではセルサイズが大きくばらつくとともに, 間隙長方向に移動する三重点がステンレス板で反射する際に残す痕跡である slapping wave[18]が顕著に見られる. 間隙内では幾つかの三重点の消失とともにセルが大きくなっていくが, 側壁となる金属製スペーサーにおける三重点の反射の後に再び細かいセルが出現しており, この繰り返しが速度変動に影響していると考えられる.

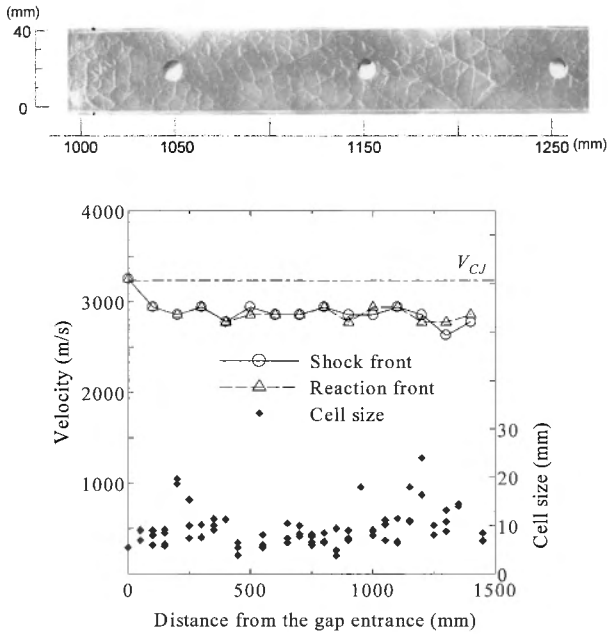


Fig. 5. Velocity profiles, variation of cell size, and smoked foiled record of the quasi-stable mode. Test gas is a hydrogen -oxygen mixture with an equivalence ratio of 1.7.

Fig. 5 の煤膜記録は間隙を構成するステンレス板の内の1枚であるが、もう1枚の煤膜記録は対称なセル構造を示している。したがって進行方向が互いに垂直な三重点がそれぞれ独立に伝播してゆく、二次元デトネーションが実現されていると考えられる。本実験のようにアスペクト比の大きいチャンネル断面においては、間隙長方向の波の伝播は抑制され、主として40 mmの間隙幅方向への三重点の伝播によってデトネーションが維持されていると考えられる。 $\phi = 0.2, 1.7, 2.0$ および窒素希釈率40%時に quasi-stable モードが現れた。

3.1.3 gallopingモード

管内を進行するデトネーションの伝播限界条件付近では、大幅な加速・減速を繰り返す galloping デトネーションが出現することが知られている[18-20]。Fig. 6 に示されるように、間隙内を伝播する場合にも同様な現象が確認された。この場合、デトネーションは間隙入射後に急激に減速し、幾つかの三重点の消失とともにセルが大きくなってゆく。その後も波面の減速が続いて1つの三重点が存在するのみとなり、衝撃波面と反応面との分離が生ずる。煤膜記録では三重点の軌跡も希薄となり、軌跡そのものが捉えきれない部分も存在した。その後は波面が加速を開始し、側壁での反射の後に細かいセルが出現し、波面の減速とともにセルが再び大きくなってゆくことを繰り返していく。Fig. 6 は煤膜記録の片側であるが、もう1枚の煤膜記録にも対称なセル構造が観察されており、この場合も二次元的現象であることがわかる。また、Fig. 7 は galloping モード

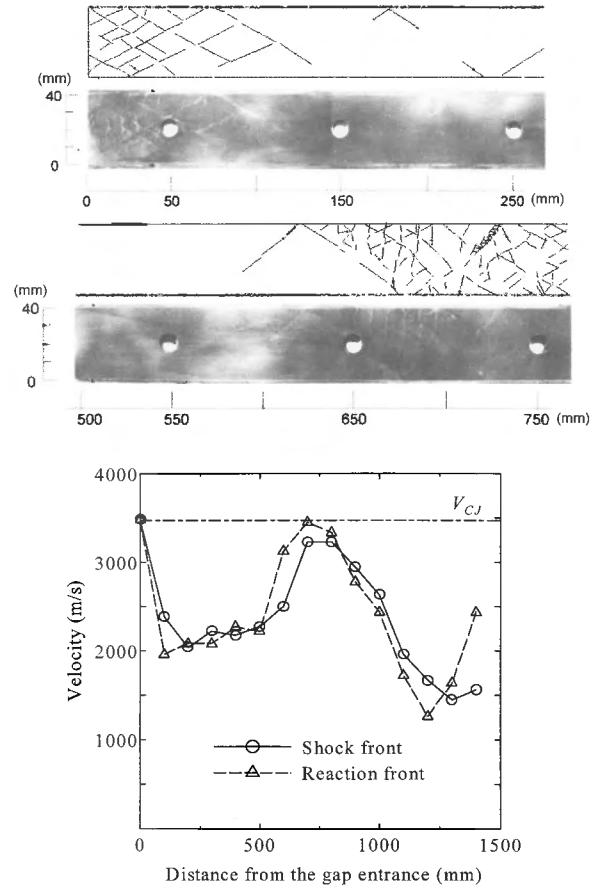


Fig. 6. Velocity profiles and smoked foiled record of the galloping mode. Test gas is a hydrogen-oxygen mixture with an equivalence ratio of 2.3.

時の同一条件における2回の結果を示しており、煤膜記録はその内の白抜きの記号に対応している。このモードでは他のモードと異なり速度履歴には再現性はない。また、一時的ではあるがC-J速度以上の伝播速度を示すこともあり、煤膜記録に示されるように細かいセルの出現とともに強いオーバードリブン状態を示している。

管内における galloping デトネーションでは、衝撃波面と反応面とが完全に分離して、三重点の伝播そのものが消失した後に反応面の加速が生じている[20]。さらにデトネーション波が再形成される箇所では DDT と同様な細かいセル構造の出現を呈しており、デトネーション波の再形成には少なくとも数 m 以上の距離を要している。本実験では、三重点の側壁における反射によりデトネーションが維持されていると考えられ、管内における galloping デトネーションと伝播機構が必ずしも同一であるとは断言できない。しかしながら、細かいセルの出現および大幅な速度変動があることから、現象的に galloping と呼ぶこととした。本実験では $\phi = 2.0 \sim 2.5$ の場合にこのモードを示した。

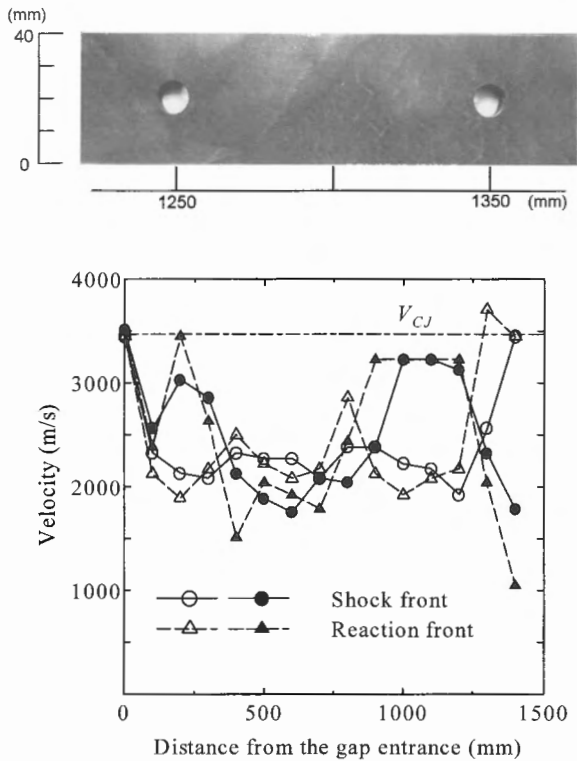


Fig. 7. Velocity profiles and smoked foiled record of the galloping mode. Test gas is a hydrogen-oxygen mixture with an equivalence ratio of 2.3. Open and solid symbols denote different tests under the same experimental condition. The smoked foiled record corresponds to the velocity profile indicated with the open symbol.

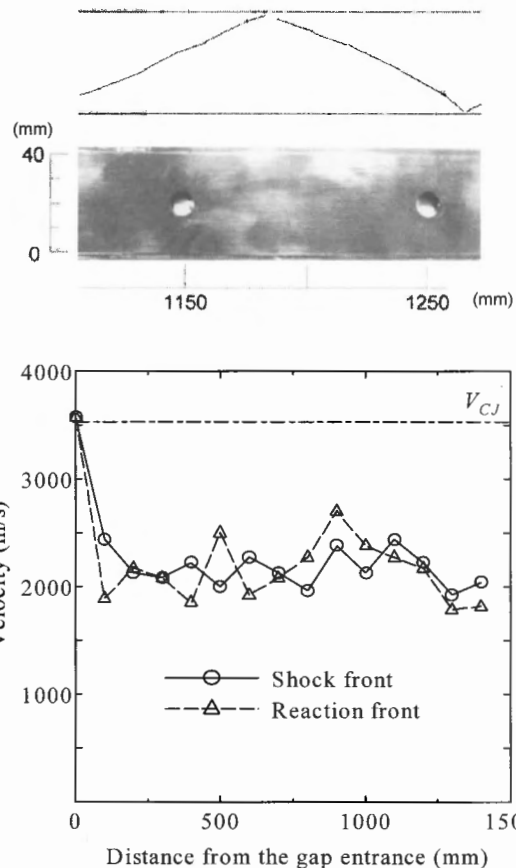


Fig. 8. Velocity profiles and smoked foiled record of the single head mode. Test gas is a hydrogen-oxygen mixture with an equivalence ratio of 2.5.

3.1.4 single head モード

前述したように, 円管内におけるデトネーションの伝播限界条件はセルサイズが内径円周と等しい場合とされている[1,2]. このときは1つの三重点が螺旋状に回転しながら伝播してゆくスピン・デトネーションとなる. また矩形断面においてもスピン・デトネーションが生ずることがわかっている[21]. 本実験では, 間隙を含む面内で移動する1つの三重点が, 側壁における反射を繰り返すことで伝播を維持するモードが存在した. Fig. 8 にその場合の煤膜記録と速度履歴の代表例を示す. 同図は煤膜記録の片側であるが, もう1枚の煤膜記録にも対称な痕跡が残されていた. これから, 三重点は断面内で回転することなく間隙面内をジグザグに移動していることがわかる. 速度履歴は細かい変動をしているが, これは直線配置したプローブにより速度測定を行ったスピン・デトネーションの場合にも見られることがある. スピン・デトネーションでは, その波面構造が単純な一次元的なものではなく, 湾曲した衝撃波面および反応面, スピンの本体である横波により構成されている[22]. したがって, プローブ位置を波面のどの部分が通過するかに応じて速度測定結果にも変動が現れることとなる. 本モードにおいても波面構造はスピン・デトネーションと同様と考えられるが, 相違点としては側壁での反射による三重点の強化があり, これが速度変動に影響している可能性が考えられる. 波面は平均してC-J速度の約6割程度の速度で伝播しており, 通常のスピン・デトネーションの伝播速度よりも遅い結果となっている.

single head モードは $\phi = 2.5$ および窒素希釈率 45% の場合に見られたが, 前者では galloping モードが生ずることもあった. このように同一条件においても2つのモードが共存する場合があり, 他に $\phi = 2.0$ では quasi-stable モードと galloping モードの両者が確認された. この原因としては間隙に入射する定常デトネーションの三重点の個数が, 実験ごとに必ずしも同一ではないことが挙げられる. すなわち, 入射する三重点の個数が比較的多い場合には, より安定なモードで伝播すると考えられ, 同一条件における複数の伝播モードの存在はデトネーション波面自体の不安定性[23-27]にも起因していると考えられる.

single head モードは $\phi = 2.5$ および窒素希釈率 45% の場合に見られたが, 前者では galloping モードが生ずることもあった. このように同一条件においても2つのモードが共存する場合があり, 他に $\phi = 2.0$ では quasi-stable モードと galloping モードの両者が確認された. この原因としては間隙に入射する定常デトネーションの三重点の個数が, 実験ごとに必ずしも同一ではないことが挙げられる. すなわち, 入射する三重点の個数が比較的多い場合には, より安定なモードで伝播すると考えられ, 同一条件における複数の伝播モードの存在はデトネーション波面自体の不安定性[23-27]にも起因していると考えられる.

3.1.5 failure モード

これはデトネーションの伝播に失敗した場合であり, 伝播モードと呼ぶことには無理がある. Fig. 9 にアルゴン希釈率 80% の速度測定結果を示す. 間隙に入射した後, デ

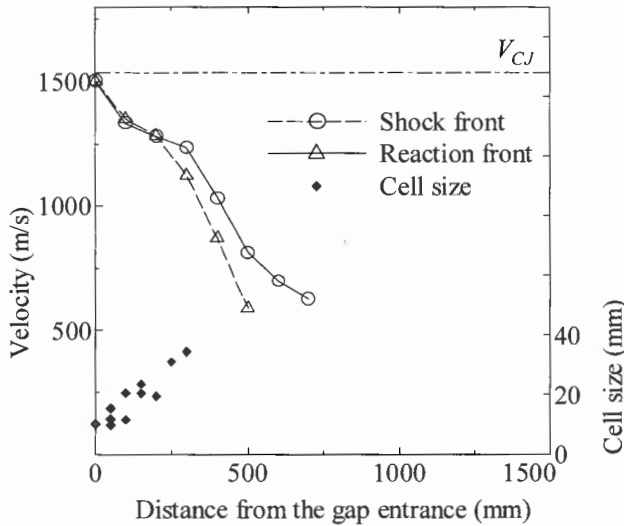


Fig. 9. Velocity profiles and variation of cell size of the failure mode. Test gas is a stoichiometric hydrogen-oxygen mixture diluted with argon 80 % in volume.

トネーションは定常伝播に至ることなく減速を続け、やがて 250 mm を過ぎた付近から衝撃波面と反応面との分離が始まり、反応面の再加速も生じない。煤膜記録においても、間隙入射後よりセルサイズが大きくなり、300 mm 付近でセル構造は消えてしまう。水素-空気量論混合気とほぼ等しい組成となる窒素希釈率 55 % についても同様の結果となった。

3.2. 速度欠損

一般に、セル構造を考慮することなく C-J 条件から熱力学的に計算される C-J 速度は、セルサイズよりも十分大きな空間を伝播するときのデトネーション伝播速度の測定値と良い一致を見る。しかしながら、狭い間隙内を伝播する場合にはデトネーションは速度欠損が生じ、C-J 速度を下回る速度で伝播することとなる。定常デトネーションを移動座標系における一次元モデルで考えれば、衝撃波面背後は亜音速であるが、その後は Taylor 膨張波により増速し、流速と局所音速が等しくなる C-J 面以降は超音速となる。この座標系では壁面はデトネーション伝播速度で下流に移動することとなり、したがって境界層がデトネーション伝播に影響を及ぼすことが可能なのは衝撃波面から C-J 面までとなる[7,28,29]。このような一次元モデルは、セル構造を考えていない点で現実的ではない。しかしながら多次元計算としても波面下流においていずれは超音速へと移行するため、いわゆる C-J 波面形状が一次元計算よりも複雑化するものの、速度欠損の機構は同様と考えられる[30]。

本研究では速度欠損 ΔV (%) を以下のように定義した。

$$\Delta V = \frac{V_0 - \bar{V}}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

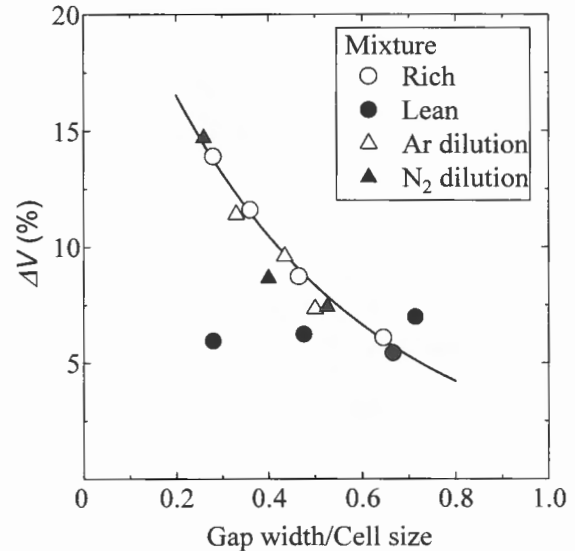


Fig. 10. Relationship between velocity deficit and normalized gap size based on cell size.

ここでは V_0 間隙入射前の速度、 \bar{V} は間隙内における平均速度である。Fig. 10 に stable および quasi-stable モード時の速度欠損を示す。ここで横軸は、間隙長を間隙入射前のセルサイズで除した無次元量としている。セルサイズは混合気固有の値であり、detonability を示す尺度として取り扱うことができる。速度欠損は混合気の粘性、C-J 面までの波面構造に依存するため、単純にセルサイズのみで整理することができるとは言い難い。しかしながら、セルサイズとデトネーション波面背後の反応誘導距離とは密接な関係があることが知られており[8, 9]、衝撃波面から C-J 面までの距離もまたセルサイズに関連することが考えられる[28]。また水素-酸素混合気では、C-J 面における粘性係数は混合気組成が異なったとしても 10 % 程度の変化を示すのみであり[5]、波面背後は複雑な波面構造に起因する乱流構造が存在する[31]ことから、むしろ乱流境界層が支配的である可能性が高い。したがって実験式的な意味合いが強いものの、Fig. 10 に示されるようにセルサイズで無次元化した間隙長で速度欠損を整理することが可能であると考えられる。

Fig. 10 において、同一セルサイズであっても希薄混合気では過濃混合気より速度欠損が少なく、また希薄側ではセルサイズを変化させても速度欠損にはあまり影響しない結果となった。これはデトネーションの波面構造に関係していると考えられ、一次元数値シミュレーションの結果では、運動量損失を付加してゆくと衝撃波面から C-J 面までの距離が短くなる[6]。混合気組成が量論比から外れるほど一般に反応誘導時間が長くなるが、一方で水素-酸素混合気に関しては等量比の増加とともに C-J 速度が増大する。そのため希薄混合気と過濃混合気で同一の反応誘導時間であったとしても、衝撃波面から C-J 面までの距離は前者の方が

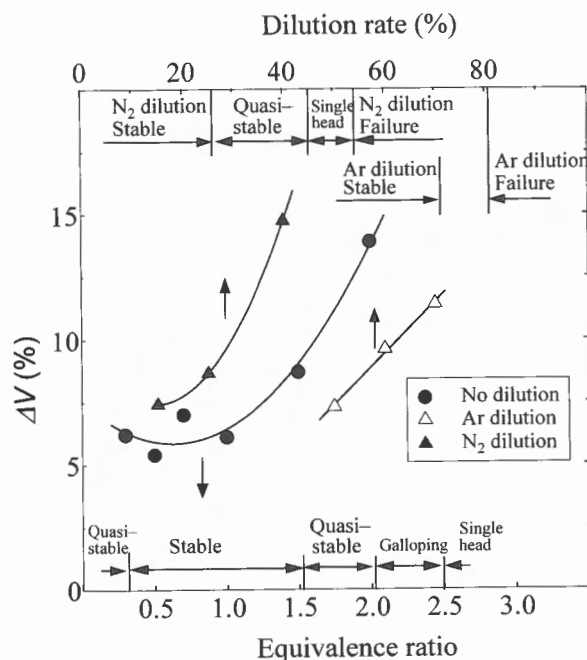


Fig. 11. Categorized propagation mode and velocity deficit for various equivalence ratios and dilution rates. The gap size is 2 mm and the gap width is 40 mm.

短くなり、主流からの運動量の損失割合も小さいと考えられる。アルゴンおよび窒素希釈の場合には、以上の説明だけでは不十分であり、セル構造を考慮に入れた解析が必要である。

Fig. 11 に当量比および希釈率を変化させた場合の速度欠損および伝播モードを示す。同一希釈率であっても、窒素希釈の場合は速度欠損が大きく、また伝播が不安定となりやすいことがわかる。管内を伝播するデトネーションに関しては、一般にアルゴン希釈の場合は煤膜記録における三重線の奇跡が明瞭であり、比較的均一なセルが得られる。それに対して窒素希釈ではセルサイズがばらつく傾向がある。これらに関して、近年 LIF 等を用いたデトネーション波面の可視化により、乱れを伴う波面構造の相違が不安定性に起因していることが明らかにされている[31]。間隙内においては、希釈気体の相違による衝撃波面構造の乱れが運動量損失に影響していることが考えられる。

本研究では、間隙断面のアスペクト比が固定された条件において実験を行っている。アスペクト比を変化させてデトネーション伝播を調べた実験では、セル構造の規則性の相違により伝播限界条件のアスペクト比依存性が異なる結果が得られている[32]。この実験では、ワイヤスクリーンを使用して管側壁における横波の反射を抑えている点異なるものの、アスペクト比によって伝播モードならびに速度欠損が異なる可能性が示唆されており、今後の検討課題である。

4. 結言

当量比および希釈率を変化させることで得られる様々なセルサイズのデトネーションを、高さ方向 2 mm、幅 40 mm の間隙内に入射させて、その後の伝播の様子を実験的に調べた。この二次元的間隙を伝播するデトネーションの速度測定および煤膜記録の結果から stable, quasi-stable, galloping, single head, failure の 5 種類の伝播モードが存在することがわかった。また本実験条件では、セルサイズで無次元化した間隙長で速度欠損を整理できるが、希薄混合気の stable, quasi-stable モードでは、速度欠損はセルサイズにあまり依存しない。さらに希釈気体の種類は間隙内の伝播に大きく影響を及ぼし、同一希釈率ではアルゴン希釈と比較して窒素希釈では速度欠損が大きく、間隙内における伝播能力が低いことがわかった。

References

1. Pusch, W., and Wagner, H. G., *Combust. Flame* 6: 157-162 (1962).
2. Agafonov G. L., and Frolov, S. M., *Combust. Explos. Shock Waves* 30: 91-100 (1994).
3. Dupre, G., Knystautas, R., and Lee, J. H. S., *Prog. Astronaut. Aeronaut.* 106: 244-259 (1986).
4. Dupre, G., Peraldi, O., Joannon, J., Lee, J. H. S., and Knystautas, R., *Prog. Astronaut. Aeronaut.* 133: 156-169 (1991).
5. Ishii, K., Shimizu, Y., Tsuboi, T., Weber, M., Olivier, H., and Gronig, H., *Chemical Physics Reports* 6: 28-33 (2001).
6. Ishii, K., Itoh, K., and Tsuboi, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2789-2794 (2002).
7. Fay, J. A., *Phys. Fluids* 2: 283-289 (1959).
8. Shepherd, J. E., *Prog. Astronaut. Aeronaut.* 106: 263-293 (1986).
9. Ohyagi, S., Ochiai, T., Yoshihasi, T., and Harigaya, Y., *JSME Trans. B* (in Japanese) 54: 3559-3564 (1988).
10. Tsuge, S., *Combust. Sci. Technol.* 3: 195-205 (1971).
11. Zhang, F., and Lee, J. H. S., *Proc. R. Soc. Lond. A* 446: 87-105 (1994).
12. Hikita, T., and Akita, K., *Nenshougairon*, p. 112, Koronasya, (1973).
13. Strehlow, R. A., Liangminas, R., Watson, R. H., and Eyman, J. R., *Proc. Combust. Inst.* 11: 683-692 (1967).
14. Barthel, H. O., *Phys. Fluids* 17: 1547-1553 (1974).
15. Manzhalei, V. I., Mitrofanov, V. V., and Subbotin, V. A., *Combust. Explos. Shock Waves*, 10: 89-95 (1974).
16. Anderson, T. J., and Dabora, E. K., *Proc. Combust. Inst.* 24: 1853-1860 (1992).
17. Kaneshige, M. J., *PhD thesis*, California Institute of Technology, (1999).

18. Edwards, D. H., and Morgan, J. M., *J. Phys. D* 10: 2377-2387 (1977).
19. Lee, J. J., Dupré, G., Knystautas, R., and Lee, J. H., *Shock Waves* 5: 175-181 (1995).
20. Ishii, K., and Grönig, H., *Shock Waves* 8: 55-61 (1998).
21. Nettleton, M. A., *Gaseous Detonations*, p.46, Chapman and Hall (1987).
22. Ishii, K., and Grönig, H., *JSME Trans. B* (in Japanese) 67: 142-147 (2001).
23. Erpenbeck, J. J., *Phys. Fluids* 7: 684-696 (1964).
24. Fickett, W., and Wood, W. W., *Phys. Fluids* 9: 903-916 (1966).
25. Abouseif, G. E., and Toong, T. Y., *Combust. Flame* 45: 67-94 (1982).
26. Short, M., Stewart, D. S., *J. Fluid. Mech.* 340: 249-295 (1997).
27. Short, M., *J. Fluid. Mech.* 430: 381-400 (2001).
28. Vasiliev, A. A., Gavrilenko, T. P., and Topchian, M. E., *Astronaut. Acta* 17: 499-502 (1972).
29. Edwards, D. H., Jones, A. T., and Phillips, D. E., *J. Phys. D* 9: 1331-1342 (1976).
30. Weber, M., and Olivier, H., *Shock Waves* 13: 351-365 (2004).
31. Pintgen, F., Eckett, C. A., Austin, J. M., and Shepherd, J. E., *Combust. Flame* 133: 211-229 (2003).
32. Radulescu, M. I., Ng, H. D., Higgins, A. J., and Lee, J. H. S., *19th ICDERS*, Paper 122 (2003).