

酸素予混合気体への衝撃波入射により生じる燃焼波の伝ば形態*

小原哲郎^{*1}, 栗原慶博^{*2}
落合俊幸^{*3}, 大八木重治^{*1}Propagation Behavior of Combustion Wave Induced by a Shock Wave
Propagated into a Premixed Gas of Oxygen and HydrogenTetsuro OBARA^{*4}, Norihiro KURIHARA,
Toshiyuki OCHIAI and Shigeharu OHYAGI^{*4} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

In this paper, experimental results were reported to investigate a behavior of combustion wave when a shock wave was transmitted into a combustible premixed gas of oxygen and hydrogen. In general, phenomena occurring in the premixed gas would be classified into four types, i.e. (a) the shock wave was just transmitted without causing ignition for the shock wave propagated with low-Mach number, (b) the gas was ignited behind the shock wave and a deflagration wave was propagated following the shock wave, (c) the deflagration wave was transited to a detonation wave behind the shock wave, (d) a detonation wave was directly initiated just behind incident shock wave having high-propagation Mach number. In this study, a shock wave produced by a detonation-driven shock tube was transmitted into a premixed gas of oxygen and hydrogen varied with an equivalence ratio, initial pressure of premixed gas and Mach number of the shock wave. As a result, the phenomena of combustion wave were classified using a cell-size of steady-propagating detonation wave. For sensitive gases having small cell-size, the detonation wave was directly initiated behind the shock wave even though the Mach number of the shock wave was relatively low. Empirical equations to evaluate a Mach number and temperature behind shock wave were obtained, which are threshold parameters to cause detonation wave behind transmitted shock wave.

Key Words: Detonation, Shock Wave, Ignition, Combustion, Shock-Induced Combustion

1. はじめに

可燃性予混合気体が充填された管内に衝撃波が入射した場合、混合気において生じる現象は入射する衝撃波の伝ばマッハ数の増加に伴い、以下に示すように Type (a) から Type (d) に変化すると予想される⁽¹⁾。

- (a) Non-Ignition: 入射する衝撃波の伝ばマッハ数が低く衝撃波背後の温度が自己着火温度に達しない場合、混合気は着火せず衝撃波のみが混合気中を伝ばする。
- (b) Deflagration: 衝撃波背後で混合気が着火し、伝ば速度の低いデフラグレーション波が衝撃波に追従する形態で伝ばする。

- (c) DDT: 混合気が着火することにより生じたデフラグレーション波がデトネーション波へ遷移する DDT (Deflagration to Detonation Transition) 現象が生じ、デトネーション波が混合気中を伝ばする。
- (d) Direct Initiation: 衝撃波の伝ばマッハ数が十分高い場合には、衝撃波が混合気に入射した直後にデトネーション波が直接開始される。

混合気中に衝撃波が入射した際、これら Type (a)~(d) の伝ば形態の中でいずれが生じるのかは、混合気充填されている管の内径や長さなどの物理的条件によって左右される。これら以外にも混合気を構成する燃料や酸化剤の種類、初期圧、初期温度、入射衝撃波マッハ数などによって燃焼波の伝ば形態が変化するため複雑である⁽¹⁾。混合気が量論混合比の水素-空気であり標準状態であれば、その自己着火温度は 560~600°C の範囲である⁽²⁾。例えば、衝撃波背後の温度が 600°C となる入射衝撃波マッハ数を Rankine-Hugoniot の関

* 原稿受付 2007年10月18日。

^{*1} 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(☎ 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)。^{*2} 学生員, 埼玉大学大学院理工学研究科。^{*3} 埼玉大学工学部機械工学科。

E-mail: tobara@mech.saitama-u.ac.jp

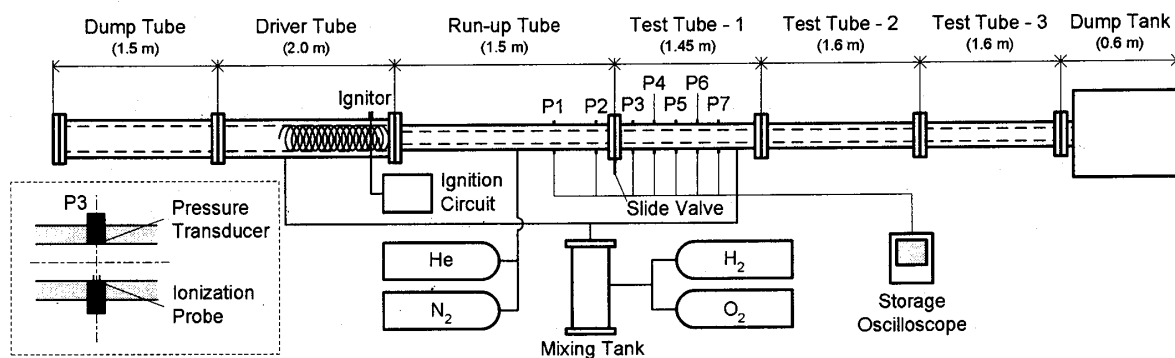


Fig. 1 Schematic diagram of detonation driven shock tube; a shock wave produced by a detonation tube is propagated into run-up tube and test tube filled with premixed gas of oxygen and hydrogen. Measuring stations named from P1 through P7 are mounted in run-up tube and test tube.

係式⁽³⁾から求めると約3.2となる。したがって、衝撃波が伝ばマッハ数3.2以上の速度で水素-空気混合気に入射すれば、混合気は衝撃波背後で着火すると考えられる。しかしながら、混合気が着火した場合においてもType (b)~(d)のいずれの伝ば形態となるかを予測することは困難であり明らかにされていない。また、衝撃波が可燃性混合気に入射した場合にデトネーション波を生じさせる衝撃波マッハ数のしきい値を求めることは、安全工学上の見地⁽¹⁾およびパルスデトネーションエンジンへの応用⁽⁴⁾を考えた場合にも重要となる。

これまで、可燃性混合気の着火限界や着火遅れ時間を調べる実験の多くには衝撃波を管端で反射させた反射衝撃波背後の状態量が用いられている^{(5)~(7)}。また、混合気の着火遅れ時間について可視化観察結果に基づいた報告^{(8)~(9)}、水素-空気混合気に蒸気を混合させ、衝撃波とリング状の物体が干渉した際のDDT過程について報告されている⁽¹⁰⁾。しかしながら、入射衝撃波背後において可燃性混合気の着火過程について調べた研究は比較的少なく^{(1)~(12)}、十分明らかにされていない。本論では、衝撃波管^{(13)~(15)}を用いて生成された衝撃波を酸素-水素(以下、酸水素と略す)混合気が充填してある管内に入射させ、その際に誘起される燃焼波の伝ば形態についてある物理量を用いて整理することを目的とする。具体的には、管内に充填する酸水素混合気の当量比 ϕ 、初期圧 p_1 および伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を変化させて実験を行ったので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1は、実験に用いた衝撃波管装置の概略を示す⁽¹⁾。装置は、駆動管(左から順にダンプチューブ、デトネーション管)、被駆動管(助走管、スライドバルブ、計測管1~3)およびダンプタンクで構成され、全長は約10.5 mである。計測管1~3に酸

水素混合気を充填し、駆動管で発生させた衝撃波を図の左方向から入射させる実験を行った。

計測管内に伝ばマッハ数の比較的高い衝撃波を入射させるため、デトネーション駆動方式を採用している⁽¹³⁾。デトネーション駆動管内に酸水素混合気を充填し駆動管右端において混合気を点火することで駆動管内を左方向へ伝ばするデトネーション波が生成させる。デトネーション波背後の気体は高温高圧状態となるので、この気体を貯気槽とすることにより伝ばマッハ数の高い衝撃波を右方向へと駆動することができる⁽¹³⁾。なお、駆動管内の点火端付近には点火端からデトネーション波が生成されるまでの距離を短くすることを目的にスパイラル状のコイルが挿入してある。

被駆動管は、不燃性気体を充填する長さ1.5 mの助走管、スライドバルブおよび酸水素混合気を充填する長さ4.65 mの計測管で構成され、内径 d は20 mmである。助走管は、酸水素混合気を充填した計測管に対して一定速度で伝ばする衝撃波を入射させる役割を果たす。助走管と計測管の間には、内径20 mmの孔を設けたスライドバルブを挿入し両気体を分離した。スライダを手動にて移動させることによりバルブを開放後、1 s以内に駆動気体を点火した。なお、前報⁽¹⁾では内径20 mmのボールバルブを使用していたが、助走管と計測管に異なる気体を充填する過程でバルブ内の流路が真空になっており、バルブ開放後に両方向から気体の流れ接触面を乱すことを防ぐためボールバルブからスライドバルブに変更している。

2.2 実験方法 助走管には測定孔が2箇所に設けてあり、それぞれP1およびP2と呼ぶ。計測管1には、左端からの距離200 mmの位置から200 mmごとに測定孔が計5箇所に設けてあり、それぞれP3~P7と呼ぶ。測定孔P1~P7にはピエゾ式圧力変換器(PCB Piezotronics, Inc., Model 113A24, 立上がり時間1 μ s

Table 1 Experimental conditions of gases filled in a driver tube, run-up tube and test tube.

Tube	Parameter	Condition
Driver Tube	Premixed Gas	$H_2 + O_2 / (2\phi)$
	Equivalence Ratio, ϕ	1.0
	Initial Pressure, p_{4i} [kPa]	60 ~ 330
	Initial Temperature, T_{4i} [K]	300 ± 5
Run-up Tube	Premixed Gas	$He + xN_2$
	Molar Ratio of Nitrogen to Helium, x	0.14, 0.22, 0.29, 0.39, 0.57, 0.98
	Initial Pressure, p_1 [kPa]	25, 50, 75, 100
	Initial Temperature, T_1 [K]	300 ± 5
	Mach Number of Incident Shock Wave, M_{si}	1.43 ~ 3.15
Test Tube	Premixed Gas	$H_2 + O_2 / (2\phi)$
	Equivalence Ratio, ϕ	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0
	Initial Pressure, p_1 [kPa]	25, 50, 75, 100
	Initial Temperature, T_1 [K]	300 ± 5
	Mach Number of Transmitted Shock Wave, M_{st}	1.45 ~ 3.25
	Temperature behind Transmitted Shock Wave, T_2 [K]	372 ~ 826

以下)を取付け、圧力を計測した。なお、計測管1の測定孔には図1左下に示すようにイオンプローブが圧力変換器に対向して取付けてある。イオンプローブは2本の鉄芯間(間隙約0.8 mm)に90 Vの電圧を印加したものであり、燃焼波背後の導電性を有する既燃気体が鉄芯間を通過することで、鉄芯間が導通状態となる特性を利用して燃焼波の到達を検知する仕組みである。したがって、圧力の立上がりイオンプローブの出力時刻が一致していれば、衝撃波と燃焼波が一体化して伝ばしていることになり、伝ばする波をデトネーション波と判別することができる。圧力変換器およびイオンプローブからの信号をストレージオシロスコープ(横河電機, DL-750P, 最高サンプリング10 MS/s)を用いて記録した。実験開始時には、ダンプチューブと駆動管の間に厚さ75 μm 、駆動管と助走管の間および計測管3とダンプタンクの間には厚さ50 μm のマイラー膜をそれぞれ挿入した。

実験条件を表1に示す。駆動管には量論の酸水素混合気を充填し、初期圧 p_{4i} を60~330 kPaの範囲で変化させることにより入射衝撃波マッハ数を変化させた。助走管にはヘリウムと窒素の混合気($He + xN_2$)を充填し、初期圧は計測管の初期圧と等しく設定した。計測管1~3には酸水素混合気を充填し、当量比 ϕ を0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0の6通り、初期圧 p_1 を25, 50, 75, 100 kPaの4通りの中から15条件を選択して実験を行った。

衝撃波が助走管から計測管に入射する際、助走管内部に充填した気体と計測管に充填した気体の音響イン

ピーダンスが等しくない場合には、その接触面において反射衝撃波や膨張波が発生するため、計測管内に入射した衝撃波背後の状態は様とならない。したがって、計測管に充填する酸水素混合気の当量比に対応し計測管と助走管に充填する気体の音響インピーダンスが一致するようにヘリウムに対する窒素の混合比 x を変化させて実験を行った⁽¹⁾。

助走管内を伝ばする入射衝撃波マッハ数 M_{si} は測定孔P1とP2の圧力波形の立上がり時間差から求められる。助走管と計測管に充填した気体の初期温度は等しいので、衝撃波関係式を用いて入射衝撃波マッハ数 M_{si} より計測管内に入射した伝達衝撃波マッハ数 M_{st} が求められる⁽¹⁾。本実験では、計測管内を伝ばする伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を1.45~3.25の範囲、すなわち伝達衝撃波背後の温度 T_2 を372~826 Kの範囲で変化させた。なお、実験は各気体を管内に充填してから15分以上放置してから行っているため、充填した気体の温度は室温($T_1 = 300 \pm 5$ K)に等しいと考えられる。

3. 実験結果

まず、計測管に充填する酸水素混合気の当量比 ϕ を1.25、初期圧 p_1 を50 kPaで一定として伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を変化させた場合の圧力波形を示し燃焼波を分類する。次に、当量比 ϕ の違いによるDDT過程の差異について示し、酸水素混合気の初期圧 p_1 および当量比 ϕ と伝達衝撃波マッハ数 M_{st} の違いによって生じる燃焼波を分類する。

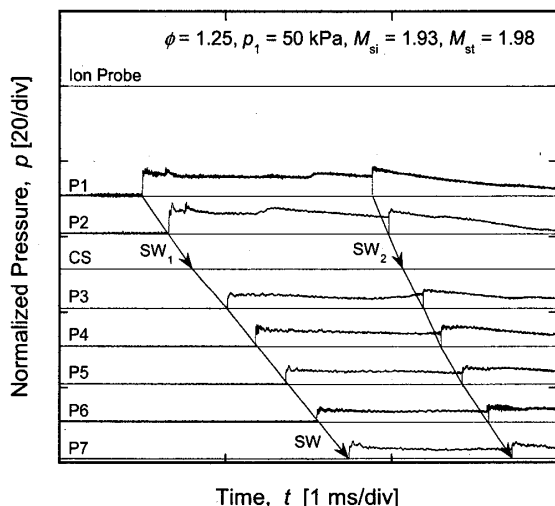


Fig. 2 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower), type (a): non-ignition ($\phi = 1.25$, $p_1 = 50$ kPa, $M_{si} = 1.93$, $M_{st} = 1.98$).

3-1 衝撃波マッハ数の違いによる燃焼波の分類
酸水素混合気へ衝撃波が入射した際、本実験条件下では前述した4形態のうちType (a): Non-Ignition, Type (c): DDT, Type (d): Direct Initiationが観察され、Type (b): Deflagrationは観察されていない。以下にType (a), (c), (d)それぞれの燃焼波が生じた場合について述べる。

3-1-1 Type (a): Non-Ignitionの場合 図2は、実験で得られたイオン電流波形(上部)、および圧力波形(下部P1~P7)の一例である。縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧力、横軸は時間である。測定孔P1~P7に圧力変換器を取付けてあり、測定孔間の距離に比例して圧力波形の原点を移動してある。なお、スライドバルブ(ヘリウム-窒素混合気と酸水素混合気の接触面)の位置をCSで示してある。計測管に充填した酸水素混合気の当量比 $\phi = 1.25$ 、初期圧 $p_1 = 50$ kPaの条件である。助走管内を伝ばする衝撃波マッハ数 $M_{si} = 1.93$ より酸水素混合気に入射した伝達衝撃波マッハ数は $M_{st} = 1.98$ と求められる。これより、伝達衝撃波背後における気体の温度は $T_2 \approx 497$ Kと見積もられる。伝達衝撃波背後の温度 T_2 は衝撃波マッハ数 M_{st} の値より衝撃波背後の温度を仮定し、Hugoniotの式を満たす温度を繰返し計算により求めている。衝撃波が伝ばすることにより測定孔P1およびP2の圧力は急峻に立上がり、衝撃波SW₁はヘリウム-窒素混合気から酸水素混合気に入射する。測定孔P1およびP2の位置を入射衝撃波から約1.4 ms遅れて第2の衝撃波SW₂が伝ばする。これは、デトネーション波が図1に示した駆動管内を左方向へ伝ばした後、駆動管とダ

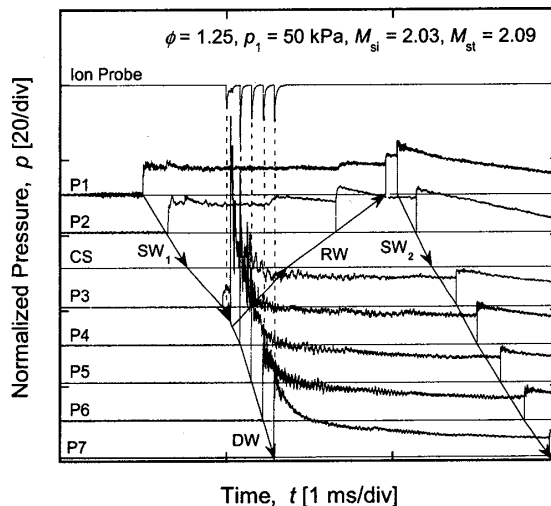


Fig. 3 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower), type (c): DDT ($\phi = 1.25$, $p_1 = 50$ kPa, $M_{si} = 2.03$, $M_{st} = 2.09$).

ンプチューブを仕切る隔膜で反射した反射衝撃波が先行衝撃波SW₁に追従して伝ばするためである。伝達衝撃波が計測管内を伝ばすることにより、測定孔P3~P7の位置では圧力が順に立上る。しかし、イオンプローブからの出力は検知されていないことから、衝撃波が入射しても酸水素混合気は着火せず衝撃波SWのみが伝ばする。伝達衝撃波背後の温度 T_2 が497 Kと低いため、自己着火温度に達しないためと考えられる。したがって、この実験条件に対する結果は前述した伝ば形態のうちType (a)のNon-Ignitionに分類される。反射衝撃波SW₂の伝ばマッハ数は伝達衝撃波SWに比べて高い。これは、伝達衝撃波が伝ばすることによって酸水素混合気の温度が上昇して音速が高くなるためである。

3-1-2 Type (c): DDTの場合 図3は、酸水素混合気の当量比および初期圧は図2と等しく、入射衝撃波マッハ数を $M_{si} = 2.03$ 、伝達衝撃波マッハ数を $M_{st} = 2.09$ ($T_2 \approx 523$ K)とした場合の波形である。入射衝撃波マッハ数が図2に比較し高いため、衝撃波背後の圧力値も高くなる。測定孔P1およびP2の圧力波形については図2と同様であるが、測定孔P3の位置では圧力の最初の立上がりの直後に鋭い圧力上昇が検知されている。この圧力上昇と同時にイオンプローブの出力が確認できる。したがって、この条件では酸水素混合気が衝撃波背後で着火しデトネーション波DWが伝ばしたと考えられる。また、測定孔P4における圧力上昇値はChapman-Jouguet(以下、C-Jと略す)値を大きく上回ることから、デフラグレーション波がデトネーション波に遷移するDDT現象がP3とP4の測定

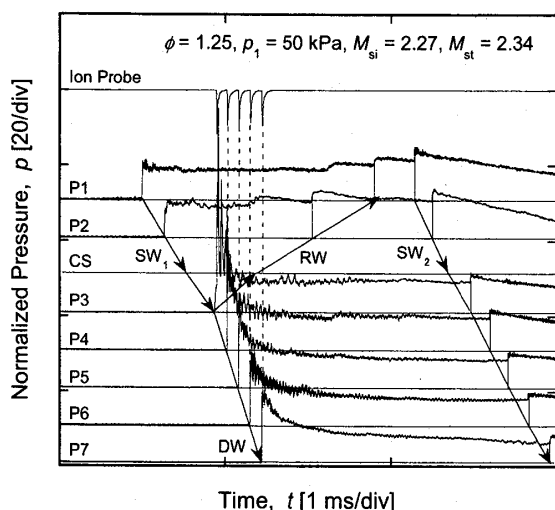


Fig. 4 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower), type (d): direct initiation ($\phi = 1.25$, $p_1 = 50$ kPa, $M_{si} = 2.27$, $M_{st} = 2.34$).

孔の間で生じ過駆動(Overdriven)状態のデトネーション波がP4の測定孔を伝ばしたと考えられる。さらに、DDT過程において生じた局所爆発によるレトネーション波RWが既燃気体中を伝ばする。したがって、この伝ば形態はType(c)のDDTに分類される。

3-1-3 Type (d): Direct Initiation の場合 図4に入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 2.27$ 、伝達衝撃波マッハ数 $M_{st} = 2.34$ ($T_2 \approx 585$ K)とした場合の同様の波形を示す。この条件では、衝撃波が計測管に入射した直後の測定孔P3において圧力は急峻に立上がる。また、測定孔P3の位置における圧力の立上がりとイオンプローブの出力時刻が一致していることから、酸水素混合気は伝達衝撃波が入射した直後に着火し、デトネーション波DWが直接開始したと考えられる。測定孔P3はスライドバルブから200 mm下流の位置に取付けられており、この位置でデトネーション波の伝ばが確認できた場合にデトネーション波が直接開始したと分類する。したがって、この実験条件は前述した伝ば形態の(d) Direct Initiationに分類される。また、デトネーション波DWは計測管内をほぼ一定の速度 $D \approx 2.85$ km/sで伝ばしており、この速度はC-Jデトネーション波速度($D_{CJ} = 2.99$ km/s)⁽¹⁶⁾にほぼ等しい。

3-2 当量比の違いによるDDT過程の差異 図5に酸水素混合気の当量比を $\phi = 1.25$ 、初期圧を $p_1 = 25$ kPaとした場合の波形を示す。入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 2.21$ 、伝達衝撃波マッハ数 $M_{st} = 2.28$ ($T_2 \approx 570$ K)における波形である。測定孔P3とP4の間でDDTが生じており、デトネーション波DWがP4~P7へと伝ばするため、Type(c)の伝ば形態に分類される。

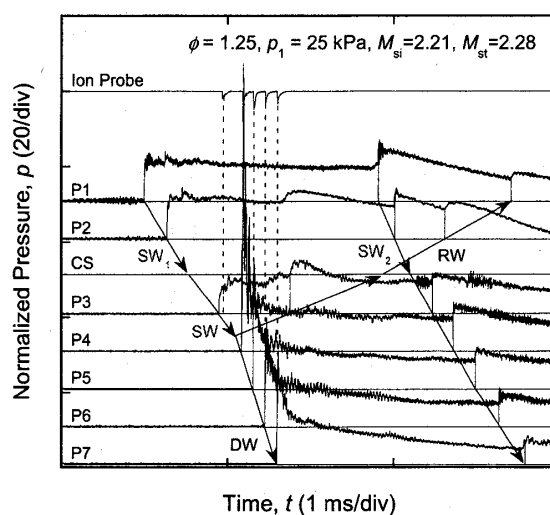


Fig. 5 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower), type (c): DDT ($\phi = 1.25$, $p_1 = 25$ kPa, $M_{si} = 2.21$, $M_{st} = 2.28$).

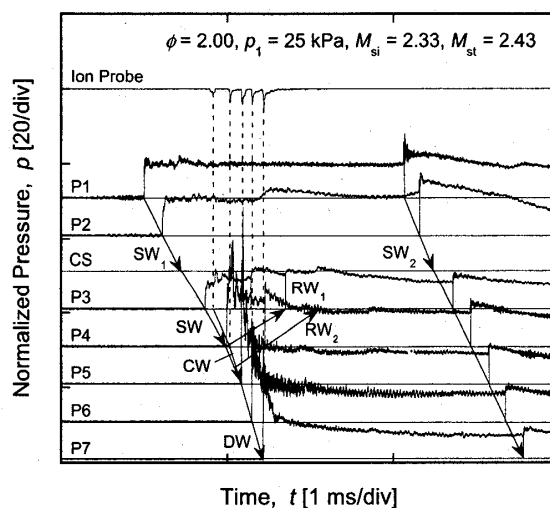


Fig. 6 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower), type (c): DDT ($\phi = 2.00$, $p_1 = 25$ kPa, $M_{si} = 2.33$, $M_{st} = 2.43$).

測定孔P4における圧力波形は、この位置をOverdrivenデトネーション波が伝ばしていることを示し、急峻な圧力上昇が観察される。また、DDTが生じた際に測定孔P3~P1の順でレトネーション波RWの伝ばを確認することができる。

図6は図5と同じ初期圧であるが、当量比を $\phi = 2.0$ とした場合の波形である。入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 2.33$ 、伝達衝撃波マッハ数 $M_{st} = 2.43$ ($T_2 \approx 610$ K)の場合である。この圧力波形においても衝撃波が測定孔P3~P7に伝ばする過程でDDTが生じておりType(c)の伝ば形態に分類されるが、DDT過程は図5の場合と異なる様相を呈する。測定孔P3~P4の位置では、衝

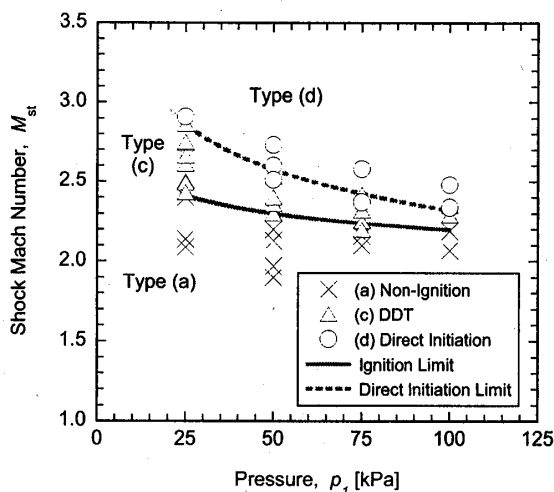


Fig. 7 Classification of combustion wave using Mach number of transmitted shock wave M_{st} and initial pressure of test gas p_1 ($\phi = 2.0$).

衝撃波の立上がりとイオンプローブの出力時刻が一致しておらず、衝撃波 SW と燃焼波 CW は分離して伝ばしている。測定孔 P4 付近では一度目の局所爆発が生じ急峻な圧力上昇が生じるとともに、上流の測定孔 P3 の圧力波形ではレトネーション波 RW_1 の伝ばが観察される。さらに、測定孔 P5 では二度目の局所爆発が生じ、レトネーション波 RW_2 の伝ばが測定孔 P3 の圧力波形から確認できる。酸水素混合気の当量比 ϕ が 2.0 と高く反応性が低いため、一度目の局所爆発ではデトネーション波が開始されるには至らず、二度目の局所爆発によってデトネーション波が開始したと考えられる。したがって、デトネーション波の遷移距離は図 5 と比較して長い。

3.3 初期圧と当量比の違いによる燃焼波の分類

図 7 は酸水素混合気の当量比を $\phi = 2.0$ で一定とし、初期圧 p_1 を変化させた場合の燃焼波の分類図である。縦軸は伝達衝撃波マッハ数 M_{st} 、横軸は初期圧 p_1 である。図中の×印は Type (a): Non-Ignition, △印は Type (c): DDT, ○印は Type (d): Direct Initiation の伝ば形態となったことを示す。また、実線は Type (a) の酸水素混合気が着火しない場合と Type (c) の DDT が生じた場合の境界、点線は Type (c) と Type (d) のデトネーション波が直接開始した場合の境界をそれぞれ示す。図より、初期圧を増加させるにしたがってデトネーション波が開始される伝達衝撃波マッハ数は減少しており、その傾向は負の傾きとなる。酸水素混合気の初期圧を増加させることによって反応性が増すため、伝達衝撃波背後の温度が低い状態でもデトネーション波が開始することを示す。さらに、酸水素混合気の反

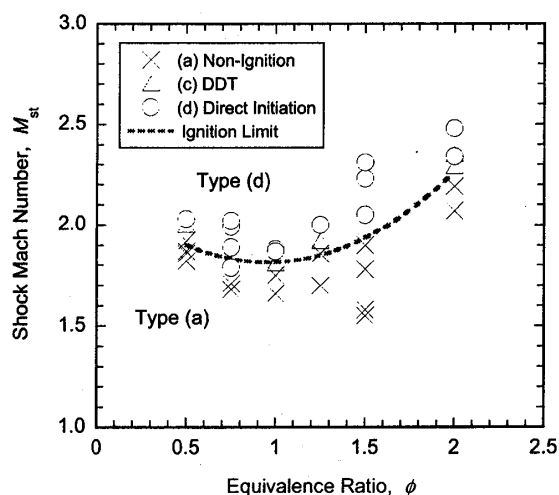


Fig. 8 Classification of combustion wave using Mach number of transmitted shock wave M_{st} and equivalence ratio of test gas ϕ ($p_1 = 100$ kPa).

応性が高い場合には DDT によってデトネーション波が開始するマッハ数の範囲が狭い。これは、反応性の高い気体が着火した場合にはデトネーション波が直接開始されやすいことを意味する。

図 8 は図 7 とは逆に酸水素混合気の初期圧 p_1 を 100 kPa で一定とし当量比 ϕ を変化させた場合である。実線は混合気が着火する場合のしきい値を示すが、初期圧が比較的高いため、デトネーション波が直接開始する機会が多い。衝撃波の入射によって酸水素混合気が着火する伝達衝撃波マッハ数の極小値はほぼ量論の混合比で得られ、伝達衝撃波マッハ数が $M_{st} > 1.7$ ($T_2 > 436$ K) の場合に混合気は着火する。

4. 考 察

酸水素混合気へ衝撃波が入射した際、衝撃波背後において生じる燃焼波の伝ば形態について、客観的な物理量を用いて整理しておくことは安全工学上の観点から重要である。計測管内を伝ばする燃焼波の伝ば形態については、混合気を構成する燃料・酸化剤の種類、当量比 ϕ 、初期圧 p_1 および伝達衝撃波マッハ数 M_{st} が関与すると考えられ複雑である。ここでは、酸水素混合気の初期条件、伝達衝撃波マッハ数および衝撃波背後の温度等を用いてデトネーション波が生じる条件を整理することを考える。酸水素混合気の初期条件に依存する代表長さとしては、これまでに実験的に求められている定常デトネーション波のセルサイズ λ を用いる⁽¹⁾⁽¹⁷⁾。

図 9 は、縦軸に伝達衝撃波マッハ数 M_{st} の対数、横軸に計測管の内径 d をセルサイズ λ で除した無次元

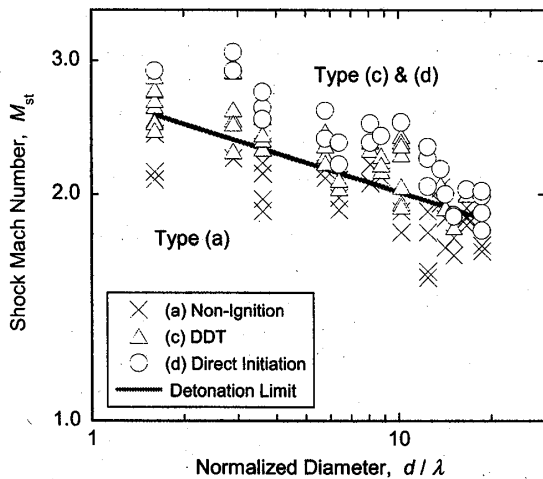


Fig. 9 Classification of combustion wave using Mach number of transmitted shock wave M_{st} and non-dimensional diameter d/λ .

内径 d/λ の対数をとって伝ば形態を整理してある。無次元内径 d/λ はデトネーション波が定常状態で伝ばする際に管直径に形成されるセルの個数を示すが、酸水素混合気ではセルサイズ λ は初期圧 p_1 の約 1.1 乗に反比例して小さくなるため⁽¹⁸⁾、酸水素混合気の実験速度に比例する。また、セルサイズ λ は 1 次元デトネーション波モデルにおいて衝撃波から反応が開始されるまでの誘導反応帯長さにも比例することが明らかにされている⁽¹⁸⁾。したがって、横軸 d/λ の値が大きくなることは酸水素混合気の実験速度が高くなりデトネーション波が生じやすい混合気であることを示す。図には Type (a): Non-Ignition と Type (c): DDT の伝ば形態が生じた場合の伝達衝撃波マッハ数のしきい値が実線で示してある。このしきい値は、Type (a) が生じたマッハ数の最高値と Type (c) が生じたマッハ数の最低値の平均値どうしを最小二乗法により結んであり、伝達衝撃波マッハ数がこのしきい値以上となればデトネーション波が生じることを意味する。前述したように伝達衝撃波マッハ数 M_{st} の増加にしたがって燃焼波の伝ば形態は Type (a), (c), (d) の順に変化する。酸水素混合気の実験速度が増すことによりデトネーション波が直接開始する場合と DDT を介してデトネーション波が開始する伝達衝撃波マッハ数は減少する。また、無次元内径 d/λ が増加することにより DDT によってデトネーション波が開始する伝達衝撃波マッハ数の範囲が狭くなる。すなわち、混合気の実験速度が高く $d/\lambda \approx 18$ の場合には Type (c): DDT の範囲が存在せず、Type (a) か Type (d) の伝ば形態しか生じていない。これは、混合気の実験速度が高いため伝達衝撃波背後において開始反応が誘起されればデトネーション波が直接開始する

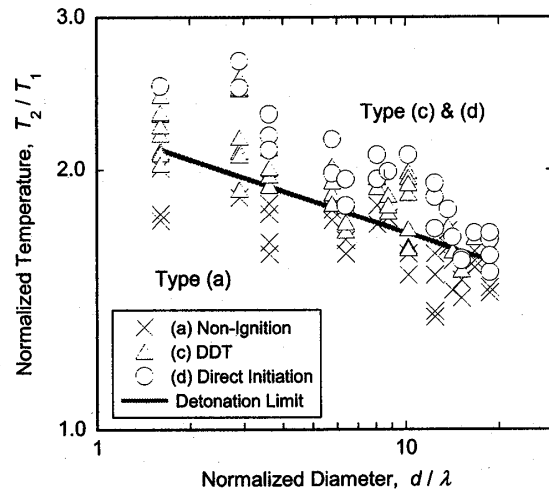


Fig. 10 Classification of combustion wave using non-dimensional temperature behind transmitted shock wave T_2/T_1 and non-dimensional diameter d/λ .

ことに相当する。図に示すように、衝撃波が酸水素混合気に入射することによってデトネーション波が発生する場合の伝達衝撃波マッハ数 M_{st} のしきい値は両対数グラフにおいてほぼ直線上に分布する。これより伝達衝撃波のしきい値 \tilde{M}_{st} を次式で示すように無次元内径 d/λ に対するべき関数で表すことができる。

$$\tilde{M}_{st} = \tilde{M}_{st}^0 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^\alpha \quad (1)$$

ここで、上添え字 0 はデトネーション波のセルサイズ λ が管内径 d に等しく $d/\lambda = 1$ (定常デトネーション波の伝ば限界) である場合の値を示す。式 (1) の係数は最小二乗法によってそれぞれ $\tilde{M}_{st}^0 \approx 2.71$, $\alpha \approx -0.13$ と求められる。式 (1) を用いることにより初期圧 $p_1 = 25 \sim 100$ kPa, 当量比 $\phi = 0.5 \sim 2.0$ の範囲における酸水素混合気に入射した衝撃波の場合、デトネーション波が生じる伝達衝撃波マッハ数のしきい値を求めることができる。

図 10 は、縦軸に伝達衝撃波背後の温度 T_2 を初期温度 T_1 で除した無次元温度として伝ば形態を整理した結果である。伝達衝撃波マッハ数 M_{st} より前述した方法を用いて温度 T_2 を求めている。また、同図にはデトネーション波が生じる場合の無次元温度のしきい値が実線で示してある。図より、反応性が高い混合気では伝達衝撃波背後の温度が低い状態でもデトネーション波が開始できることを示す。また、前述したように反応性が高い気体において生じる伝ば形態には Type (a): Non-Ignition と Type (d): Direct Initiation の 2 形態となり、反応性が低い気体では Type (c): DDT に

よるデトネーション波の開始形態が加わる。デトネーション波が生じるしきい値となる無次元温度を \tilde{T} で表せば、 \tilde{T} の対数は無次元内径 d/λ の対数に対してほぼ直線上に分布する。これより、無次元温度のしきい値 \tilde{T} を次式のべき関数で表すことができる。

$$\tilde{T} = \tilde{T}^0 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^\beta \quad (2)$$

上式の係数はそれぞれ $\tilde{T}^0 \approx 2.24$ および $\beta \approx -0.12$ と求められる。初期圧 p_1 が 25 ~ 100 kPa, 当量比 ϕ が 0.5 ~ 2.0 の範囲における酸水素混合気体へ衝撃波が入射した場合、伝達衝撃波背後の温度が式 (2) で求められるしきい値以上であればデトネーション波が直接開始するか、あるいは DDT 過程によって開始することを示す。

5. ま と め

酸水素予混合気体へ衝撃波が入射した際、衝撃波背後で生じる燃焼波の伝ば形態の整理を行うことを目的に実験を行った。混合気の当量比 ϕ , 初期圧 p_1 および伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を変化させて実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本実験条件下において、燃焼波の伝ば形態は伝達衝撃波マッハ数の増加とともに Type (a): Non-Ignition, Type (c): DDT, Type (d): Direct Initiation の順に変化する。
- (2) 反応速度が低い酸水素混合気の場合、デトネーション波が DDT を介して開始される過程において複数回の局所爆発を伴うことがあり、その際には複数のデトネーション波が既燃気体中を伝ばする。
- (3) 衝撃波が酸水素混合気に入射した際に生じる燃焼波の伝ば形態を混合気が充填された管の無次元内径 d/λ および管に入射する伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を用いて分類できることを述べた。
- (4) デトネーション波が開始されるためのしきい値となる伝達衝撃波マッハ数を求める実験式 (1) および伝達衝撃波背後の温度を求める実験式 (2) を明らかにした。

謝 辞

本実験を行うにあたり、本学 吉橋 照夫 技師の協力を得た。ここに付記し謝意を表す。

文 献

- (1) Obara, T., et al., Behavior of Combustion Wave induced by Propagation of Shock Wave into Premixed Gas of Hydrogen and Oxygen, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.727 (2007), pp.871-878.
- (2) Kobayashi, K., et al., *Combustion Engineering, Fundamental and Applications*, (1988), p.41, Rikogakusha Publishing.
- (3) Ikui, T. and Matsuo, K., *Mechanics of Shock Waves*, (1983), pp.67-68, Corona Publishing.
- (4) Sakurai, T., et al., Investigation of the Purge Process on the Multi-Cycle Operations of a Pulse Detonation Engine, *Trans. of the Japan Society for Aeronautical and Space Science*, Vol.48, No.160 (2005), pp.78-85.
- (5) Meyer, J.W. and Oppenheim, A.K., On the Shock-Induced Ignition of Explosive Gases, *Proc. 13th Symp. (Int.) on Combustion*, (1970), pp.1153-1164.
- (6) Chue, R.S., et al., Transition from Fast Deflagration to Detonation under the Influence of Wall Obstacles, *AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.153 (1992), pp.270-282.
- (7) Wang, B.L., et al., Experimental Studies on Transition from Deflagration to Detonation in Lean H₂-air-steam Mixtures, *Proc. 22nd Int. Symposium on Shock Waves*, Vol.1 (1995), pp.279-284.
- (8) Brown, C.J. and Thomas, G.O., Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures, *Combustion and Flame*, Vol.117 (1999), pp.861-870.
- (9) Brown, C.J. and Thomas, G.O., Experimental Studies of Ignition and Transition to Detonation Induced by the Reflection and Diffraction of Shock Waves, *Shock Waves*, Vol.10 (2000), pp.23-32.
- (10) Gelfand, B.E., et al., Detonation and Deflagration Initiation at the Focusing Shock Waves in Combustible Gaseous Mixture, *Shock Waves*, Vol.10 (2000), pp.197-204.
- (11) Steinberg, M. and Kaskan, W.E., The Ignition of Combustible Mixtures by Shock Waves, *Proc. 5th Symposium (Int.) on Combustion*, (1954), pp.664-672.
- (12) Urtiew, P.A. and Oppenheim, A.K., Detonation Ignition induced by Shock Merging, *Proc. 11th Symposium (Int.) on Combustion*, (1966), pp.665-670.
- (13) Yamanaka, A., et al., Study on Performance of Detonation-Driven Shock Tube, *JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal Engineering*, Vol.45, No.2 (2002), pp.425-431.
- (14) Kim, T.-H., et al., Experimental Study on Flow Field behind Backward-Facing Step using Detonation-Driven Shock Tunnel, *J. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.52, No.608 (2004), pp.385-392.
- (15) Obara, T., et al., Experimental Study on a Flow Field behind Backward-Facing Step using Detonation-Driven Shock Tunnel, *Proc. 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, Montreal*, (2005), CD-ROM.
- (16) Reynolds, C.W., STANJAN, <http://ww2.mne.ksu.edu/chapman/thermo2/download.html/>.
- (17) Ohyagi, S., Fundamentals and Recent Advances in Detonation Researches I, Basic Theory and Experiments of Gaseous Detonations, *Nensho Kenkyu (Combustion Research)*, Vol.124 (2001), pp.17-34.
- (18) Lee, J.H.S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.16 (1984), pp.311-336.