不均質デトネーション波の開始過程*
(ケロシンの噴霧と液膜の場合)

大八木 重治**, 吉橋 照夫***, 針谷 安男**

The Initiation Process of Heterogeneous Detonation Waves
(Kerosene Spray and Film)

by Shigeharu OHYAGI, Teruo YOSHIHASHI, and Yasuo HARIGAYA

Experiments were performed on the initiation of a heterogeneous detonation wave propagating through mixtures of liquid fuel and a gaseous oxydizer. The liquid fuel tested was kerosene in the forms of a spray and a film attached on tube walls. The ignition was performed by oxyhydrogen detonation. The effects of the content of oxygen in the oxydizer were investigated. It was found that for pure oxygen as an oxydizer, detonation waves were established by the combustion of kerosene, but for an oxydizer with a small amount of oxygen, only low Mach number shock waves with combustion waves following after were formed. For the former case, the ignition was initiated by the strong shock wave front, but for the latter case, the liquid phase seemed to be ignited by the combustion products of the initiator gas.

Key Words: Combustion, Detonation Wave, Heterogeneous System, Spray, Film

1. 緒 言

酸化性気体中に存在する液体または固体の可燃物による不均質デトネーション波については、可燃性気体のような均質の場合と比較して、多くの複雑な過程を含むため、その開始限界、開始過程を解明することが難しい。不均質デトネーションには、凝縮相が、微粒子の形で酸化性気体中に存在する場合（噴霧デトネーション）と、伝ば管内壁に付着した膜の形で存在する場合（フィルムデトネーション）の代表的な2形態があり、それぞれ盛んに研究されてきた^{(1)~(5)}。このような燃料と酸化剤の形態の違いによりデトネーション波の特性や伝ば機構も異なっているが、一般に、気体デトネーションのような均質系のデトネーションに比べて、先頭衝撃波背後の非平衡領域が長く、その構造が複雑である。特に、液体燃料の場合は、液体部分の物理的粉碎過程と気化過程の後に、自発火による局所的爆発が起こり、それによって生じる二次衝撃波が先頭衝撃波にエネルギーを供給することにより、自己持続的デトネーション波を生じると考えられている。本研究

は、不均質デトネーション波の特性と開始限界、開始過程の燃料、酸化剤の組成、開始源のもつエネルギー、燃料形態の違いなどとの関係を明らかにする目的の研究の第1段階として、ケロシン液滴と液膜を燃料とした管中の不均質デトネーション波の開始過程を、酸素気体デトネーションを開始源として測定した。

2. 実験装置および方法

図1に装置の概要を示す。デトネーション管は、25 mm×30 mm のく形断面をもち、長さ3000 mm のステンレス鋼管で、実験室内に鉛直に設置されている。その上部には、内径18 mm、長さ800 mm のステンレス鋼の円管が、本体と45°の傾きで接続してあり、本体とは、マイラ膜（厚み25 μm）で仕切ることができる。この円管（駆動管）には、可燃性気体を導入し、これをスパーク点火することにより、気体デトネーションを生じさせ、く形断面管（被駆動管）中に、爆風を形成させる。図2に示すのは、被駆動管中に、単一粒径の液滴列を噴射する装置の概要であるが、これはRayleigh⁽⁶⁾の噴流の不安定性の解析に基礎を置く毛管噴流振動法により、単一粒径、単一間隔の液滴列を形成する。この装置は、図1に示すように、デトネーション管の最上部に取付けられる。燃料は、窒素ガスに

* 昭和60年11月14日 第934回講演会において講演、原稿受付 昭和60年5月25日。

** 正員、埼玉大学工学部（〒338 浦和市下大久保255）。

*** 埼玉大学工学部。

より圧送され、浮子式流量計で流量をモニタしながら深さ 3 mm の浅皿形の燃料容器に導かれる。この容器の上面は、真ちゅう膜でできており、スピーカからの振動がこの膜に伝えられる。容器底部に取付けられたステンレスチューブより噴出する噴流は、この振動により規則正しく微粒化される。液滴の径、液滴間間隔は、噴流の直径、噴出速度、加振振動数により決まるが、長さ 3 m の管中に、一様間隔で落下させるためには、噴出速度をその液滴の最終落下速度と等しくしなければならない。このため、液滴径を決めると液滴間間隔も自動的に決まってしまう。

表 1 に今回実験を行った実験条件をまとめて記す。開始源（着火源）は、初期圧 101.3 kPa、当量比 1 の酸素-水素混合気体デトネーション波を用いた。その開始エネルギーは、被駆動管中に不活性気体を導入し、非反応性の爆風を形成させ、その減衰傾向を測定することにより算出した⁽⁷⁾。酸化剤は、初期圧 101.3 kPa の酸素-窒素混合気体であり、窒素の酸素に対するモル比 β をパラメータとして変化させた。供試燃料ケロシンは、炭素数 9~10 のパラフィン系炭化水素を主成分とする液体燃料で、沸点は約 420~530 K である。ケロシンを用いた理由は、入手しやすい工業上重要な燃料であることと、いくつかの実験報告⁽⁴⁾が存在することのためである。燃料液滴は、内径 0.6 mm のステンレスチューブより噴射される噴流に 1.2 kHz の振動を与えることにより形成され、噴出速度は、ほぼ、この液滴の最終落下速度に等しい。表 1 中に記した液滴径、液滴間間隔の値は、流量と振動数から計算したものである。

が、形成された液滴列を直接写真撮影した結果からもほぼ確認されている。しかしながら、一様間隔の液滴列の状態が保たれるのは、落下距離ほぼ 1.5 m までであり、それ以降では左右に広がり管壁をぬらしてしまう。したがって、今回の実験では、測定区間に、噴霧と管壁に付着した液膜の両者が存在し、その結果、液滴群による噴霧デトネーションと、一部管壁に付着した燃料によるフィルムデトネーションの両者が起こる可能性が存在する。また、1 回の実験終了後の状態では、管壁に未燃の燃料が残存して付着しているため、酸化剤を再び充てんし、酸素-水素デトネーション波により着火し、形成される燃焼波についても測定を行った。この後者の実験を 2~3 回繰返しもはや燃焼波が観測されなくなった時点で、再び液滴を噴射し、次の条件での測定に移った。

測定は、図 1 に示す測定点 P 1 から P 5 に、圧力変換器（PCB 社、共振周波数 500 kHz）とイオンプローブをそれぞれ対向する位置に装着し、圧力波および燃焼波を検知する。イオンプローブは、2 本の鋼線を管中に 2 mm 程度突き出させる形のもので、両線間に 90 V の電圧を印加し、高温の燃焼ガスに接触すると導通し、電圧降下を生ずることから、燃焼波の到達時期を検知するものである。各センサから得られる電圧

表 1 実験条件

Initiator	Stoichiometric Oxyhydrogen Mixture	
	Initial Pressure	101.3 kPa
	Initiation Energy	245 kJ/m ²
Oxydizer	O ₂ + 8N ₂	
	$\beta = 0, 1, 1.5 \text{ and } 2$	
	Initial Pressure	101.3 kPa
Droplets	Diameter	0.97 mm
	Spacing	2.3 mm
	Injection Velocity	2.77 m/s
	Material	Kerosene

図 1 実験装置の概略図

図 2 液滴形成装置概略図

信号は、波形記憶装置（時間分解能 $1\mu\text{s}$ ）に取り込まれ、XY レコーダなどに出力される。

3. 実験結果および考察

3.1 圧力波形 図3に測定点 P 4（被駆動管上端部より 2250 mm 下方）において検知した圧力波形を示す。左側が、液滴を噴射している状態、右側が、左側の測定終了直後、再び酸化剤気体を導入して着火した場合の波形である。後者の実験では、燃料は、液膜としてのみ存在する。 $\beta=0$ （純粋酸素）の酸化剤の場合には、両者とも強い先頭衝撃波面をもち、波面後方で強く振動しながら最高圧力に達し、その後、徐々に減衰する。一見して、液膜（右側）のほうが最高圧が高く、変動も大きい。 β を増加させた場合の最高圧力の低下も液膜のほうが少ない。燃料の絶対量が必ずしも同一ではないので、一概にどちらの形態のほうが燃焼性が良いとは言えないが、少なくとも今回の実験における液滴群の量では、 $\beta \geq 1$ の酸化剤では、デトネーションと呼べるほどの燃焼波は発達していない。両者とも、先頭衝撃波が弱まるほど、その後方の二次衝撃波が相対的に強くなり、液滴、液膜の粉碎、自発火等の非平衡過程の生ずる領域の拡大を示している。また、液膜のほうの波形に見られる規則的圧力変

動は、管壁近傍に生じた強い衝撃波がスピンすることにより生じたものと思われる。

3.2 伝ばマッハ数の変化 図4, 5に先頭衝撃波の伝ばマッハ数の伝ば距離に対する変化を示した。伝ば距離は、測定点 P 1からの距離で表し、マッハ数は、二つの近接する測定点間の衝撃波到達時刻の差を、測定し計算したものである。基準となる音速は、前方の気体成分の音速を用いた。図4は、液滴の場合であるが、 $\beta=0$ では、伝ば距離の増加とともに、マッハ数が増加し、加速状態にあるが、ほぼ、マッハ数4~5の状態となり、典型的な気体デトネーションのマッハ数に近い。あと1~2mの管長があれば、定常伝ばの状態に到達するものと思われる。 β を増加させるとマッハ数は、急激に低下し、2~3の擬定常伝ば状態が見られるが、 $\beta=2$ となると、圧力波形から考えても、非反応の衝撃波として減衰するものと考えられる。このマッハ数の変化に対しては、管内の液滴が、必ずしも一様状態でないことの影響も大きいものと考えられる。図5は、フィルムの場合であるが、液滴の場合に比べて、 $\beta=1\sim 2$ で、距離0~1.5mまでの加速傾向が大きい。1.5m付近で、ほぼ、定常になっている。 $\beta=0$ では、液滴の場合と同様に、全区間、加速状態にあり、マッハ数5以上の定常デトネーション

図3 圧力波形の代表例(初期圧 101.3 kPa, 測定点 P 4)

波が期待される。この実験は、もともと、一様な液膜状態をねらったものではないが、先立って行った実験に比べて反応性に富んでおり、管内に、ほぼ一様に燃料が分散されているものと推測される。メタンなどの気体デトネーションの直接開始においては、自発火による急激な加速が見られる⁽⁸⁾が、本実験で観測された不均質デトネーションの開始過程は、気体のそれに比べて、加速が緩やかであることが特徴的である。液滴

と液膜の違いは、必ずしもその形態による違いではなく、絶対量と管内の一様性による違いのほうが大きいものと考えられる。

3・3 着火遅れ 図6に、イオンプローブでとらえた燃焼波の到達時期と、その前方の衝撃波面到達時期との差として定義した着火遅れを、衝撃波面温度の逆数に対し、いわゆる、アレニウスプロットしたものを示した。温度は、波面圧力から、衝撃波として計算したものである。また、圧力波形が、2段階衝撃波的構造を示す場合、先頭衝撃波より、二次衝撃波の影響が強いと考えられるため、二次衝撃波を基準に考えた。ばらつきが大きくて、はっきりしたことは言明できないが、一般に、衝撃波面温度が高いほど、着火遅れは短くなる。また、ほぼ、900 Kを境にして、傾向が異なり、いわゆる見かけの活性化エネルギーが異なるようである。900 K以上(横軸が $1.1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 以下)では、着火遅れは、0.02 ms以下であり、活性化エネルギーは、ほぼ、40 MJ/kmol程度である。この領域の実験点は、ほとんど、 $\beta=0$ と1のものであり、マッハ数が3以上の強い衝撃波を伴う場合である。図6中、黒丸印は、河田ら⁽⁹⁾によるデカン($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$)液滴(単一)の着火遅れであり、ほぼ、近い傾向を示している。河田らは、この着火には、液滴周囲の気相着火が支配的であると考察している。本実験からは、直接、着火過程に関する結論を出すことはできないが、900 K以上

図4 伝ばマッハ数の変化(液滴)

図5 伝ばマッハ数の変化(液膜)

図6 着火遅れと衝撃波温度

の強い衝撃波によって液体が微細化され着火することにより、着火遅れが短くなり、デトネーションと呼んでよい強い燃焼波が形成されるものとする。900 K 以下では、活性化エネルギーは、ほぼ 10 MJ/kmol と小さくなり、温度が相当低いにもかかわらず比較的短い着火遅れで着火する。この状態では、先頭衝撃波の力のみで着火するとは考えられず、次々と着火する液体燃料周囲から発生する圧力波や燃焼波が、未燃の液体燃料に強く影響を及ぼしているものと考えられる。つまり、着火に用いた酸水素デトネーションの生成物が、液体燃料に直接接触することにより、着火が開始して、衝撃波後方の流れに影響されて、次々と伝ば火炎のように燃焼波が移行しているものと考えられる。この領域でのマッハ数は小さくデトネーションとは呼び難いが、衝撃波後方の燃焼波により、ある程度、エネルギーを受け取り、擬定常的な衝撃波と燃焼波の複合波を維持するものと考えられる。

4. 結 言

縦置型のデトネーション管を用いて、ケロシンと酸素-窒素混合気体よりなる不均質系混合物中におけるデトネーションの開始現象を、酸水素デトネーション波を開始源として用いることにより、実験的に調べ、以下の知見を得た。

(1) 酸化剤中の酸素濃度が大きいほど、デトネーションへの移行は早まる。液滴列を管中に形成した場合、 $\beta=2$ では、有効な燃焼波は形成されなかったが、

液膜のみの場合では、比較的、強い燃焼波が得られた。一方、 $\beta=0$ に対しては、双方とも強い燃焼波が得られ、デトネーションが発生した。

(2) デトネーションと言える強い燃焼波が得られる場合、燃料は先頭衝撃波により着火し、着火遅れは、20 μ s 以下であるのに対し、マッハ数 2~3 の弱い燃焼波では、先頭衝撃波によって着火しているとは言えず、遅れも 0.1 ms 程度で、衝撃波温度に対する依存性が小さい。

終わりに、本研究は、一部、岩谷科学技術助成金の補助を受けて行われたことを記し、ここに感謝する。

文 献

- (1) Nicholls, J. A., Dabora, E. K. and Ragland, K. W., *NASA CR-272* (1965).
- (2) Ragland, K. W., Dabora, E. K. and Nicholls, J. A., *Phys. Fluids*, 11-11 (1968), 2377.
- (3) Bowen, J. R., Ragland, K. W., Steffes, F. J. and Loflin, T. G., *Proc. 13th Symp. (Int) Combust.*, (1971), 1131.
- (4) Bar-Or, R., Sichel, M. and Nicholls, J. A., *Proc. 18th Symp. (Int) Combust.*, (1981), 1599.
- (5) Ohyagi, S., *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut Astronaut.*, 24-66 (1982), 227.
- (6) Rayleigh, J. W. S., *Proc. London Math. Soc.*, 10-4 (1878), 4.
- (7) 大八木・吉橋・針谷, 日本航空宇宙学会誌, (昭 60), 掲載予定.
- (8) Ohyagi, S., Yoshihashi, T. and Harigaya, Y., *AIAA Prog. Aeronaut Astronaut.*, 94 (1984), 3.
- (9) 河田・吉沢・黒川, 日本航空宇宙学会誌, 22-251 (昭 49), 585.

討 論

〔質問〕 吉澤 善男〔東京工業大学工学部〕

(1) 貴研究で用いられているケロシンはかなり蒸気圧の高い燃料であるので本研究で扱われている現象にはあらかじめ気相中に蒸発、混合している燃料蒸気が影響すると思われるがいかがか。

(2) 貴研究の系は定常伝ば状態に到達していないので先頭衝撃波と二次衝撃波はかなり速度が異なる場合もあると考えられる。着火遅れ時間など粒子時間を算出する場合にはこの点についての考慮が必要と考えられるがいかがか。

〔回答〕 (1) ケロシンは、炭素数 8~17 の鎖状飽和炭化水素を含む混合物質であり、特に、デカン、ノナンの割合が大きいと思われる。デカンの場合、蒸気圧が、293 K の時、約 0.1 kPa であり、雰囲気圧が 101.3 kPa の酸素であっても可燃範囲には入っていない。

い。オクタンになると、蒸気圧が 1.3 kPa 程度になるので、希薄側の可燃範囲に入る可能性がある。しかし、このような予混合気は、液相表面の近傍にしか存在していないと考えられるので、着火には関係するものの、高速の燃焼波の伝ばを支えるのは、衝撃波や燃焼波自身により気化させられた燃料の燃焼であると考えられる。

(2) 二次衝撃波が観測される状態では、先頭衝撃波に比べ、二次衝撃波のほうが強く、伝ば速度も速い場合が多く、液相の着火について強い影響を与えるものと考え、二次衝撃波到達時刻より燃焼波が到達する時刻までを着火遅れ時間と定義している。しかしながら、二次衝撃波が顕著に現れる場合には、衝撃波加熱によるよりは、後方の燃焼ガスにより着火すると思われるがよいと思われる。