

フィルムデトネーション波開始過程の可視化*

渡辺 真次^{*1}, 小原 哲郎^{*2}
吉橋 照夫^{*3}, 大八木 重治^{*2}

Visualization of Initiation Processes of Film Detonation

Shinji WATANABE, Tetsuro OBARA,
Teruo YOSHIHASHI and Shigeharu OHYAGI

The detonation wave caused by the combustion of a liquid fuel film coated on an inner tube wall has recently attracted considerable attention because of its possible role in explosion hazards in compressed oxygen pipelines. This type of detonation is known as "film detonation" and is classified as a heterogeneous detonation. The structure of a heterogeneous detonation wave is very complex because physical processes such as momentum, heat and mass exchanges between liquid film and the gas phase are coupled with a chemical reaction. Experiments are conducted to investigate the initiation process of film detonation using high-speed schlieren photography and direct photography. It is clearly observed that a secondary shock wave caused by the combustion of liquid fuel film plays a significant role in the transition of film detonation wave.

Key Words: Detonation, Combustion Phenomena, Flow Visualization, Shock Wave, Pressure Wave

1. 緒 論

管内壁に付着した液膜状の液体燃料が燃焼することによりデトネーション波が生じることが報告されており⁽¹⁾, これをフィルムデトネーション波という。フィルムデトネーション波は燃料液膜の燃焼によって生じるエネルギーにより生成されるものであり, 燃料の蒸発, 飛散等の気液二相流を経て形成される。したがって, その形成過程や構造は気体デトネーション波に比べて複雑である。一方, フィルムデトネーション波を原因とする事故例が報告されており⁽²⁾, 圧縮空気配管壁に付着した潤滑油の燃焼に起因したものである。したがって, フィルムデトネーション波の開始過程や構造を明らかにすることは燃焼学のみならず安全工学上の観点からも重要な研究課題である。Bowen ら⁽³⁾ は噴霧デトネーションの伝ばに関する研究を行う際に, 管壁に付着した液膜の影響について調べている。わが国でも, 中野⁽⁴⁾, 大八木ら⁽⁵⁾ によって実験的研究がなされ基本的性質が調べられている。理論的には Rao

ら⁽⁶⁾, Fujitsuna ら⁽⁷⁾ の準一次元的解析であるが二次元および三次元構造については不明である。フィルムデトネーションの構造については Ragland ら⁽⁸⁾ のシュリーレン写真により, 先頭衝撃波後方にいくつかの強い二次衝撃波が観察されているがフィルムデトネーション波に遷移する過程を含めてその構造について十分明らかにされているとはいえない。

本研究ではフィルムデトネーション波の構造と開始機構を解明することを目的に高速度カメラを用い, シュリーレンおよび直接写真によって可視化したので報告する。

2. 実 験

2・1 実験装置 図 1 に実験装置の概略を示す。実験装置はデトネーション管, 圧力波と燃焼波を測定する測定系, 可視化を行う光学系から構成される。図 2 はデトネーション管の概略図である。管は, 駆動管 (長さ 500 mm), 被駆動管 (長さ 3 000 mm) およびダンプタンクで構成され, 各管の接続部はマイラー膜 (厚さ 25 μ m) で仕切られている。駆動管と被駆動管は長さ 500 mm, 内寸法 25 \times 30 mm の断面をもつ矩形管をつなぎ合せたものである。駆動管管端には点火プラグが設置され, 内部には気体デトネーション波への

* 原稿受付 1996 年 3 月 21 日。

^{*1} 学生員, 埼玉大学大学院 (〒338 浦和市下大久保 255)^{*2} 正員, 埼玉大学工学部。^{*3} 埼玉大学工学部。

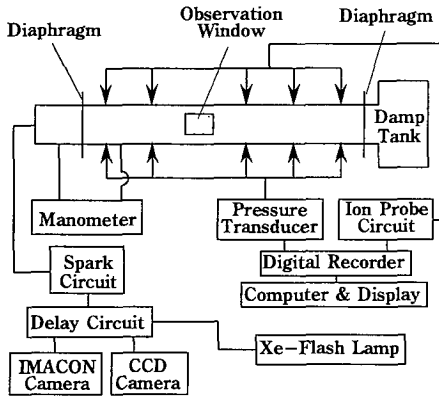


Fig. 1 Experimental set-up

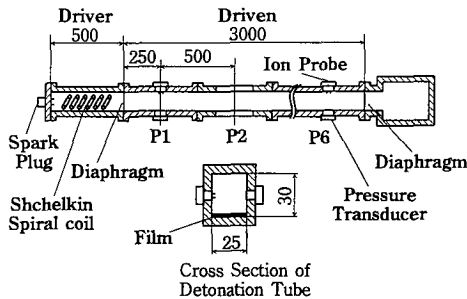


Fig. 2 Detonation tube

遷移を促進させるシェルキンスパイラルコイルが挿入されている。被駆動管を構成する6個の矩形管は、駆動管に近いほうから順にP1～P6と呼ぶ。被駆動管中央の両側面には管軸に直交して測定孔を取付け、それぞれに圧電圧力変換器(Piezo Electronics Co. Ltd., 113 A 24, 共振周波数 500 kHz)とイオンプローブとが対向して設置されている。イオンプローブは2本の鉄端子(かんげき 3 mm)に 90 V の電圧を印加したもので、燃焼波背後の電離した気体を検知することができる。さらに被駆動管には、管軸方向 200 mm、高さ方向 30 mm の光学ガラス(BK 7, 厚さ 30 mm)を管両側面中央に取付けた可視化管が設置されている。可視化管と測定管を入れ替えることにより任意の位置での現象の可視化が可能である。可視化にはシュリーレン撮影と直接撮影の2種類を用いた。光源は発光時間 200 μ s のキセノンフラッシュランプであり、イメージコンバータカメラ(Hadland Photonics Co. Ltd., IMACON 792)を用いて撮影した。どちらの撮影方法でも 50 000 こま/s(こま間隔 20 μ s)で撮影を行った。

2.2 実験方法 表1に実験条件を示す。駆動管には量論混合比の酸素素混合気体を充てんし、酸素素

Table 1 Experimental conditions

Driver	Gas	2H ₂ +O ₂
	Temperature	Room Temperature
Driven	Gas	O ₂
	Temperature	Room Temperature
	Fuel	Kerosene
	Mass	83.3 g/m ² (thickness 104 μ m)

	Driver Pressure [kPa]	Driven Pressure [kPa]
Case.1	74.6	53.3
Case.2	101.3	53.3
Case.3	152.0	53.3
Case.4	152.0	80.0

混合気の燃焼により生成される衝撃波を被駆動管に入射させた。開始エネルギーの違いによる現象の変化を調べるため被駆動管初期圧は 53.3 kPa と一定とし、駆動管初期圧を Case. 1～3 の三とおりに変化させた。また、定常デトネーション波を得るために駆動管初期圧を 152 kPa、被駆動管初期圧を 80 kPa とした Case. 4 の条件でも実験を行った。燃料は市販のケロシンを使用した。このケロシンの元素質量割合は、炭素元素 76～80%、水素元素 12.5～13% である。ケロシンは炭素数 8～16 の飽和炭化水素の混合物と考えられ、これらの初期条件下での蒸気圧から換算した蒸気の体積割合は、炭素数 8 のオクタン(C₈H₁₈)以外は希薄側の可燃限界以下である。また、オクタンはケロシン中にはわずかしき含まれておらず、これらのことから駆動管から入射した衝撃波が通過する前に被駆動管内で可燃性予混合気体となるおそれはない。ケロシンの塗布は次の方法で行った。まず、ケロシンを染み込ませたスポンジを被駆動管内で往復移動させることでケロシンを管底にのみ塗布させた。この方法により被駆動管内は均一な塗布状態になると考えられる。その平均塗布量は 83.3 g/m²(厚さ約 104 μ m)である。平均塗布量を当量比に換算すると 6～9 程度となり燃料過剰の条件であることから、塗布量のばらつきによる現象の変化は観察されなかった。

3. 結果および考察

3.1 圧力波形 図3～5は被駆動管の各測定位置(P1～P6)における圧力波形およびイオン電流波形の一例を示し、それぞれ Case. 1～3 の実験条件に対応する。横軸は点火からの経過時間であり、基準線上方に圧力波形、下方にイオン電流波形を示してある。時間の経過とともに衝撃波および燃焼波が被駆動管内を伝

ばする様子がわかる。図3~5中のS1は先頭衝撃波、S2は二次衝撃波、RWは小規模な局所爆発によって生じ後方へ伝ばする圧力波である。図3のP2ではS1からイオン電流波形が立ち下がるまでの時間間隔が長く、S2がその間に到達している。P2におけるS1は単純な衝撃波である。P3以降徐々に圧力値が上昇し、先頭衝撃波が通過してから燃焼波が到達するまでの時間は著しく短くなる。また、S1背後で圧力が振動している様子がとらえられている。この圧力振動は燃焼によって生じた横波に起因すると考えられる。燃焼波が先頭衝撃波に追いつくことにより衝撃波は加速する。P6位置では衝撃波と燃焼波が一体となって伝ばしていることから、ほぼデトネーション波へ遷移しているといえる。波面後方の規則的圧力変動は横波の存在を暗示している。図4に示したCase.2の場合、駆動管初期圧が高いため衝撃波からデトネーション波へ遷移するまでの距離が短い。また、図5に示したCase.3の場合では、P3位置ですでにデトネーション波が生成されており、ほぼ一定の速度で被駆動管内を伝ばする。また、S1背後における圧力の振動が著しいことから、波面の三次元構造が複雑であることを示す。

3・2 伝ば過程 図6と図7はそれぞれ先頭衝撃

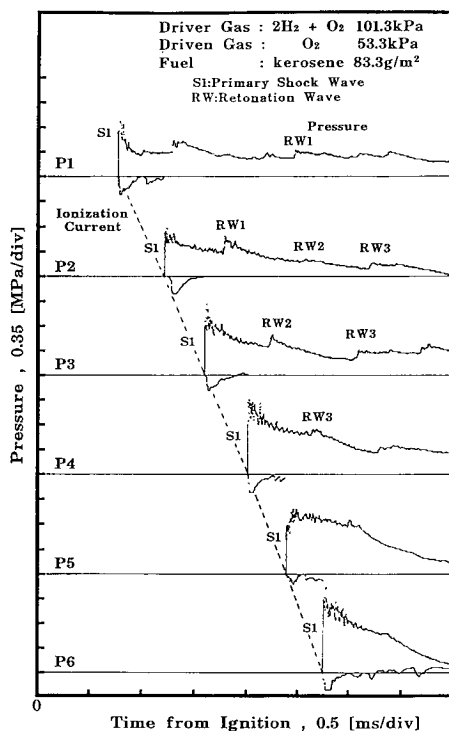


Fig. 4 Pressure histories(Case. 2)

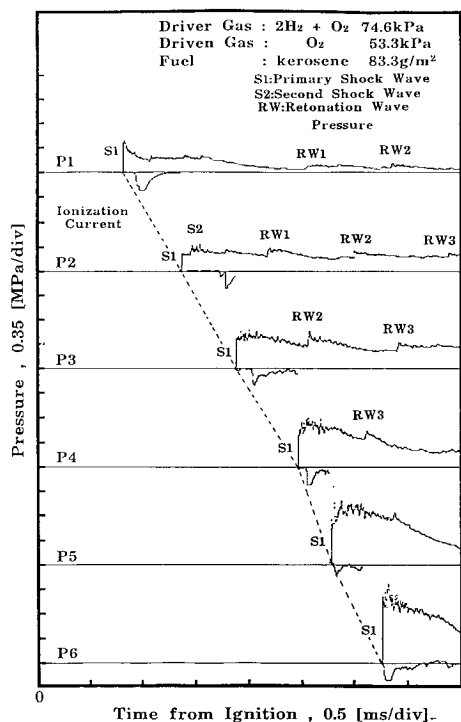


Fig. 3 Pressure histories (Case. 1)

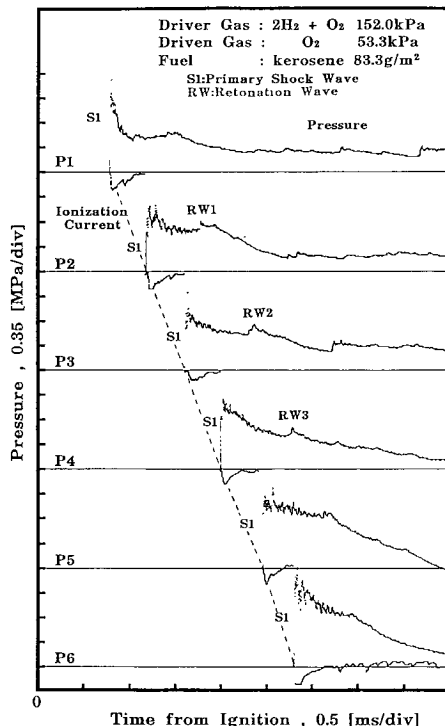


Fig. 5 Pressure histories(Case. 3)

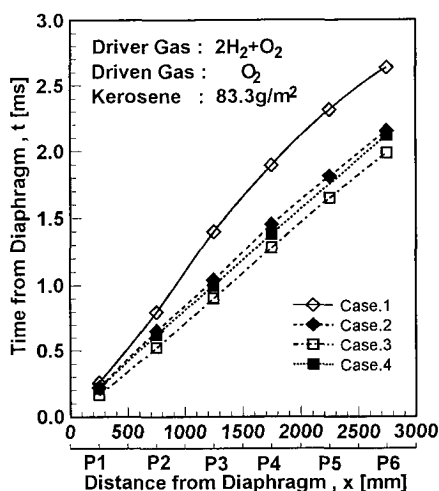


Fig. 6 Wave diagram of incident shock wave

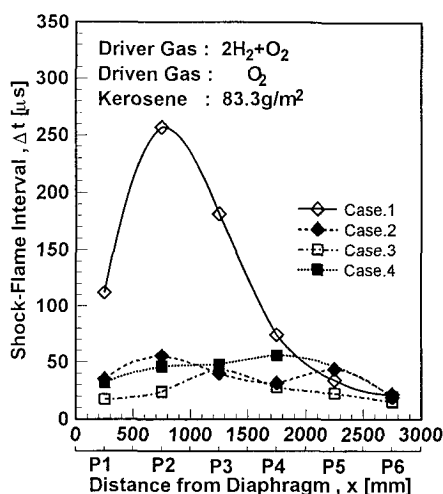


Fig. 8 Time interval between shock wave and combustion wave

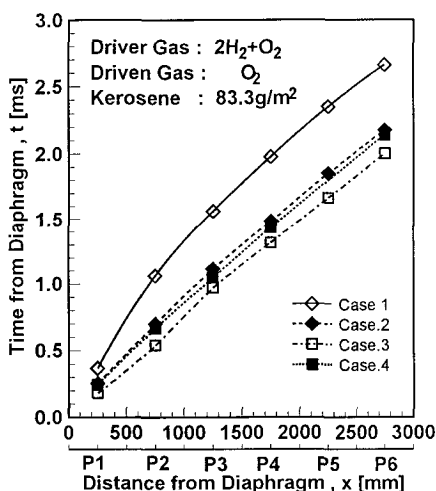


Fig. 7 Wave diagram of combustion wave

波と燃焼波の波動線図である。横軸は被駆動管の位置 x であり、縦軸は被駆動管に衝撃波が入射してから経過時間である。燃焼波は図3に示したイオン電流波形が立ち下がる時間から求めた。先頭衝撃波はCase.1以外は同程度の速度で伝ばしている。Case.1は、P4以降の速度は他の条件とほぼ同じであるが、デトネーション波へ遷移するまでの誘導距離が長い。燃焼波は先頭衝撃波とほぼ同じ傾向を示し、Case.1ではP1-P2間の伝ば速度が小さいことから、衝撃波がデトネーション波へ遷移するには燃焼波の挙動が重要であることがわかる。図8は各測定孔(P1~P6)における先頭衝撃波と燃焼波の到達時間差 Δt を示す。Case.1では、被駆動管にデトネーション波が入射し

た後 Δt が著しく大きくなる。すなわち、この実験条件では管底に塗布したケロシンが衝撃波によって着火するまでの距離が他の条件に比較して長い。

図9と図10はそれぞれ先頭衝撃波と燃焼波の平均伝ばマッハ数 M_s と M_F を示す。Case.1のP2とP3間における衝撃波のマッハ数は約2.5であり、Rankine-Hugoniotの式から衝撃波背後の圧力は0.38 MPaと見積もられる。一方、この値は図3で計測された値にほぼ等しいことから衝撃波として伝ばしていることがわかる。また、衝撃波背後のエネルギーの一部が管底に塗布したケロシン液膜の飛散、蒸発に消費される。燃焼波は減速することなく伝ばしていることから、燃焼波は徐々に先頭衝撃波に追いつき、燃焼によって生じたエネルギーが先頭衝撃波を加速させる要因になっている。Case.4では駆動管および被駆動管の初期圧が高いことから、入射される衝撃波マッハ数が4程度で、すぐに定常なフィルムデトネーション波が形成されていると考えられる。

図11は先頭衝撃波背後の圧力 P_s の管軸方向に対する変化を示す。Case.1では M_s が増加し始めるP3付近から P_s の値は大きくなり始め、伝ばするに従い徐々に増加していく。Case.2とCase.3の場合ではP3付近からは同程度の圧力であり、 M_s や圧力波形も同様であることから、P3以降では駆動管初期圧の違いは現れず、Case.2とCase.3はほぼ同じ現象である。また、Case.4は M_s はほぼ一定であるにもかかわらず、 P_s の値はわずかに変化している。これは後述するようにフィルムデトネーション波の構造に起因するものである。

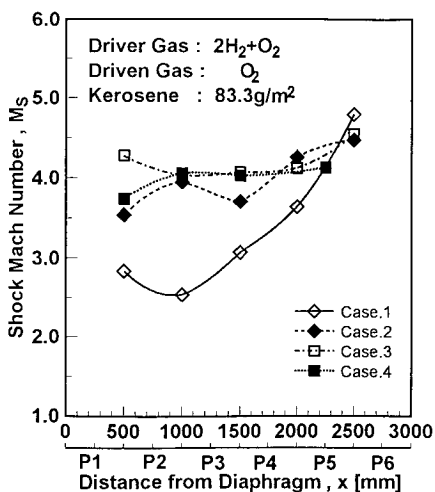


Fig. 9 Mach number of shock wave

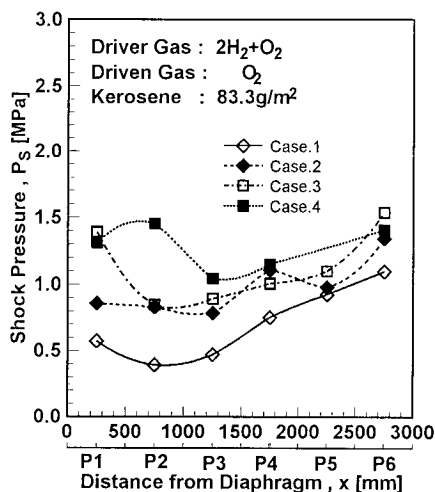


Fig. 11 Pressure distribution

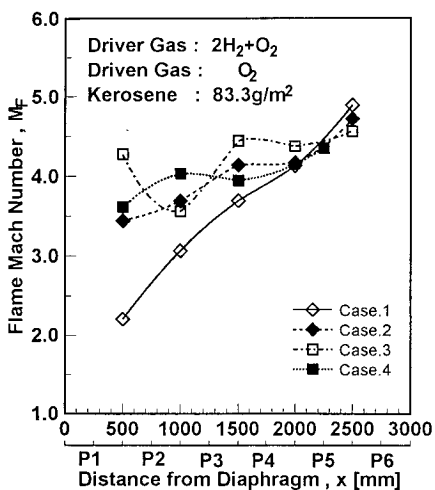


Fig. 10 Mach number of combustion wave

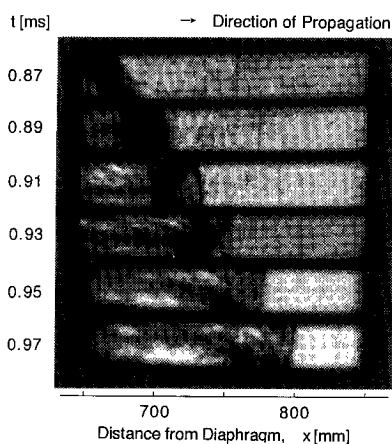


Fig. 12 Schlieren photograph (Case 1, P2)

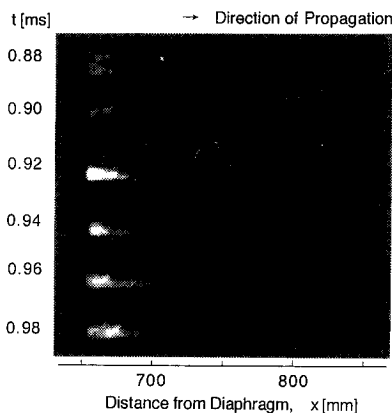


Fig. 13 Direct photograph (Case 1, P2)

3・3 フィルムデトネーション波の構造 図 12, 13 は Case. 1 の条件で P2 位置におけるシュリーレン写真と直接写真を示す。図 12, 13 には、被駆動管の位置 x およびデトネーション波が被駆動管に入射してから経過時間 t を示してある。こま間隔は $20 \mu\text{s}$ であり、1 こまの露光時間は $4 \mu\text{s}$ である。デトネーション波は写真の左から右へ伝ばする。この条件は、図 9 で示したように先頭衝撃波がいったん減速し、加速を始める位置に対応する。図 12 の $t=0.87 \text{ ms}$, $x=750 \text{ mm}$ 付近に見られる縦波は波動線図から考えて先頭衝撃波 S1 である。写真より先頭衝撃波の平均伝ばマッハ数は約 2.3 と求められ、これは図 9 に示した値と一致する。先頭衝撃波後方には平均伝ばマッハ数約

3.3の波S2が写っており、これは図3の圧力波形から二次衝撃波であると考えられる。二次衝撃波は先頭衝撃波に接近する様子がわかり、S2が先頭衝撃波S1に追いつくことで図9に示したように先頭衝撃波の加速が起るものと考えられる。また、二次衝撃波背後の管底には先端が鈍いくさび形をした領域が存在している。これはイオンプローブで検知した波と比較して必ずしも燃焼波であると断定できない。図13の直接写真では発光領域はこの付近にほとんど見えず、各時間の左端にわずかに現れるだけである。先頭衝撃

波背後で徐々に気化した燃料は液面付近で予混合燃焼し発生した燃焼ガスが衝撃波背後のガスより高温のため膨張し、前方に圧力波を吐き出す。これが二次衝撃波に成長し先頭衝撃波を追いかける。表面付近の燃焼からの発光は温度も低く微弱なため撮影できなかった。二次衝撃波後方では高温のためさらに過剰な燃料が気化し上部から流入する酸素と拡散炎を生じ発光するものと考えられる。イオンプローブは管中央に位置しているので検知した燃焼波はこの拡散炎であると考えられる。図14、15は同じCase.1でのP3におけるシュリーレン写真と直接写真である。シュリーレン写真ではP2のような弱い先頭衝撃波は存在せず、すでに二次衝撃波に追い付かれ合体したものである。 $t=1.52$ msから1.58 msの写真で衝撃波の後方50 mmほどの管底からはっきりとした舌状の暗い領域が伝ばしていくのが観察できる。これもP2におけるものと同様な予混合火炎によって生じた燃焼ガスであると考え

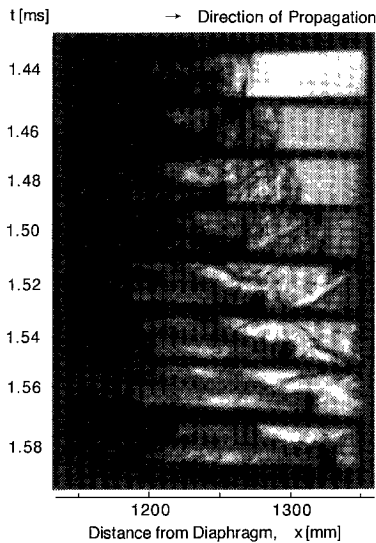


Fig. 14 Schlieren photograph (Case. 1, P3)

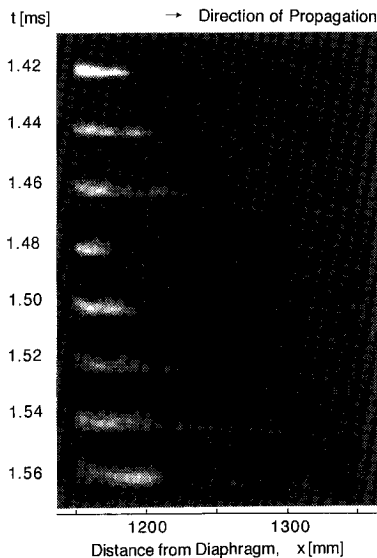


Fig. 15 Direct photograph (Case. 1, P3)

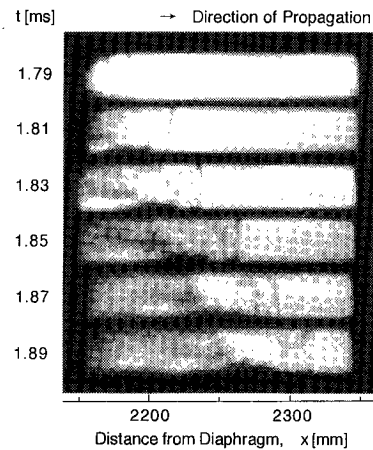


Fig. 16 Schlieren photograph (Case. 4, P5)

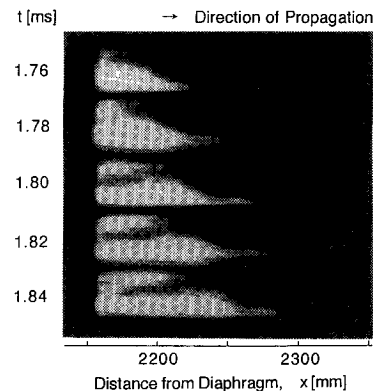


Fig. 17 Direct photograph (Case. 4, P5)

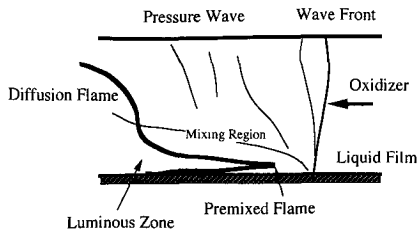


Fig. 18 Structure of film detonation wave

る。直接写真ではこの部分の発光はP2におけるものよりは強いがわずかに観測されるのみである。発光帯はシュリーレン像が管全体にわたって暗くなる後方領域で観測される。

図16, 17にCase. 4でP5位置におけるシュリーレン写真と直接写真を示す。この条件は前述したように、ほぼ定常なフィルムデトネーション波が形成された状態であり、定常なフィルムデトネーション波の構造を可視化したものといえる。シュリーレン像では先頭衝撃波、燃焼波、燃焼によって生じた圧力波が可視化されている。直接写真からわかるように発光帯は鋭いナイフエッジのように燃料表面をなめるように進行し、その後方40 mm付近から、急激に管全体に広がっていく。この位置における Δt は約20 μ sであり、イオンプローブの検知時間(図8)と対応する。この発光帯の鋭い先端部分は予混合火炎であり、後方の広がった部分は拡散炎であると考えられる。シュリーレン像と直接写真は同時に撮影しているわけでないので正確な比較ではないが拡散炎の部分の形から発光帯の先端部分は先頭波面の根元付近にあると考えられる。この予混合燃焼によって生じた圧力波が上方に伝ばし、上面で反射しながら先頭波に横波構造を与え、気体デトネーションの三重衝撃波構造のような形態を示す。ただ、フィルムデトネーションの場合は気体や分散形の不均質デトネーションと異なり、反応はつねに管底で開始する。図18にこれらの写真から推定される定常状態におけるフィルムデトネーション波の構造を示

す。これは、中野ら⁽⁴⁾の示した構造に基本的には同じであるが、横波は後方の拡散火炎の部分だけでなく、液面付近の予混合火炎の部分からも発せられ前方の先頭波へ燃焼のエネルギーを供給する役割を演じている。

4. 結 論

ケロシンによるフィルムデトネーションの開始過程をシュリーレンおよび直接写真により可視化した結果、開始過程および伝ば機構について以下のような知見を得た。

(1) フィルムデトネーションの開始過程において小規模な局所的爆発や二次衝撃波の発生を繰返しつつ定常状態に遷移していく。

(2) 開始初期においては、開始源のデトネーションによって形成された衝撃波の背後で気化した燃料が予混合燃焼し、燃焼ガスの発生により二次衝撃波が形成される。その後方にイオンプローブで検知する拡散炎の領域が形成される。

(3) 開始中期においては、二次衝撃波が一次衝撃波と合体し、その背後の液面近くで予混合火炎が発生し衝撃波は加速する。

(4) 開始終期においては、衝撃波直後の液面付近に形成された予混合火炎と後方の拡散火炎から圧力波が発生し三次元的な先頭波面を形成する。

文 献

- (1) Dabora, E. K., ほか2名, *Astronaut. Acta*, **12**-1 (1966), 9
- (2) 長谷川和俊, 安全工学, **18**-4 (1979), 216.
- (3) Bowen, J. R., ほか3名, *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, (1971), 1131.
- (4) 中野康英・ほか2名, 第16回燃焼シンポジウム講義集, (1978), 114.
- (5) 大八木重治・ほか2名, 機論, **52**-476, B (1986), 1953.
- (6) Rao, C. S., ほか, *Combust. Sci. Technol.*, **4** (1972), 209.
- (7) Fujitsuna, Y., ほか1名, *Proc. 14th Symp. (Int.) Combust.*, (1973), 1265.
- (8) Ragland, K. W., ほか1名, *J. AIAA*, **7**-5 (1969), 859.