

デトネーション駆動形衝撃波管の作動特性*

山中昭央^{*1}, 有賀洋介^{*2}, 小原哲郎^{*3}
蔡 品^{*3}, 大八木 重治^{*3}

A Study on Performance of a Detonation-Driven Shock Tube

Akio YAMANAKA, Yousuke ARIGA, Tetsuro OBARA^{*4},
Pin CAI and Shigeharu OHYAGI^{*4} Department of Mechanical Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Urawa, 338-8570 Japan

A detonation-driven shock tube firstly designed by H.-R. Yu, is considered as a useful facilities capable of producing high-enthalpy flow. In this apparatus, a strong shock wave is generated by detonating oxygen-hydrogen (oxyhydrogen) mixture and has characteristics that temperature as well as pressure of driver gas is extremely high compared with conventional shock tubes. However, a structure of detonation wave is not uniform e. g., detonation wave has three-dimensional cellular structures and multiple transverse waves. Furthermore, the detonation wave is followed by a Taylor expansion fan and performance of detonation-driven shock tube is not well understood. In this preliminary study, a detonation-driven shock tube is constructed and its performance is experimentally investigated by measuring pressure histories and a profile of ionization current behind detonation wave. As a result, (i) the pressure histories of detonation wave is clarified and it shows reasonable agreement with a result obtained by KASIMIR shock tube simulation code. (ii) A propagation velocity of detonation wave is coincided well with theoretical predictions assuming Chapman-Jouguet detonation wave. (iii) An equivalence ratio of oxyhydrogen mixture to produce a highest Mach number of the shock wave is evaluated as $\phi \approx 1.7$.

Key Words: Combustion, Detonation, Shock Wave, Shock Tube, Detonation-Driver, Mach Number

1. はじめに

スペースプレーンや次世代極超音速旅客機用のエンジンとしてスクラムジェットエンジンが注目されている。このエンジンは、超音速流中において燃料を噴射させ燃焼を行うエンジンであり、安定した保炎状態を得ることが不可欠である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このようなエンジン内における燃焼流れ場を実験室で再現するには高エンタルピー流れを生成することが必要である⁽²⁾⁽³⁾。

比較的容易に高エンタルピー流れを生成する装置として衝撃波風洞がある。これは、高圧室と低圧室の間の隔膜を瞬間的に破膜することにより形成される衝撃波を隔膜により反射させ、反射衝撃波背後の高温・高圧領域を貯気槽として高速流を駆動するものである。このような衝撃波風洞で高エンタルピー流れを生成させるには、伝ばマッハ数の高い衝撃波を発生させることが不可欠となる。一般的な単純衝撃波管では高圧室の圧力 p_4 と低圧室の圧力 p_1 の圧力比 p_4/p_1 を大きく

することにより、伝ばマッハ数の高い衝撃波を発生させることができる⁽⁴⁾。衝撃波管の単純理論より $p_4/p_1 \rightarrow \infty$ とした場合に生成される衝撃波の伝ばマッハ数 M_{Smax} は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$M_{Smax} = \frac{1}{2} \frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_4 - 1} \frac{a_4}{a_1} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_4 - 1} \frac{a_4}{a_1} \right)^2 + 1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、下付き添字 1 は低圧室側(被駆動気体)、4 は高圧室側(駆動気体)を示し、 κ は比熱比、 a は音速である。上式より、 $p_4/p_1 \rightarrow \infty$ にした場合に形成される衝撃波マッハ数は近似的に次式で表される⁽⁵⁾。

$$M_{Smax} \approx \frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_4 - 1} \sqrt{\frac{\kappa_4}{\kappa_1} \frac{w_1}{w_4} \frac{T_4}{T_1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 w は気体のモル質量、 T は絶対温度である。上式より、高圧室の気体としてモル質量の小さい気体を選び、高圧室と低圧室の圧力比をできるだけ大きく設定すれば、強い衝撃波を駆動できることになる。しかしながら、衝撃波管装置の設計条件から $p_4/p_1 \rightarrow \infty$ にすることは不可能であり、生成される衝撃波の伝ばマッハ数に上限値が存在する。例えば、高圧室と低圧室の圧力比を $p_4/p_1 = 100$ とし、駆動気体をヘリウム、被駆動気体を空気とした場合に生成される衝撃波の伝

* 原稿受付 1999年10月22日。

^{*1} 学生員, 埼玉大学大学院 (〒338-8570 浦和市下大久保255)。^{*2} 埼玉大学大学院。^{*3} 正員, 埼玉大学工学部。

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

ばマッハ数は $Ms \approx 3$ にすぎない。一方、駆動気体を酸素・水素の混合気(以下、酸水素と呼ぶ)とし、混合気を燃焼させた場合に生成されるデトネーション波背後の高温・高圧領域を貯気槽として衝撃波を生成させた場合には、比較的容易に伝ばマッハ数の高い衝撃波を生成させることができる。なぜならば、式(2)より、温度比 T_4/T_1 を大きくすることができるからである。例えば、低圧室を空気として高圧室に量論混合比(当量比 $\phi=1$)の酸水素を初期圧力 $p_{4i}=101$ kPa で充てんしデトネーション波を発生させた場合に生成される Chapman-Jouguet(以下 C-J と略す)デトネーション波背後の温度は約 3700 K である。したがって、生成される衝撃波のマッハ数を温度比のみから計算すれば単純衝撃波管に比べて約 3.5 倍の値となる。

このようなデトネーション駆動形衝撃波管は、Yu⁽⁶⁾により考案され、前述したように高圧室の初期圧力 p_{4i} と低圧室の圧力比 p_{4i}/p_1 が小さい条件でも高いマッハ数の衝撃波を生成できる。これまでに行われた研究より、酸水素混合気の点火方法や⁽⁷⁾、生成される衝撃波マッハ数を予測するうえで数値計算が有効である⁽⁸⁾ことが明らかにされている。また、断面収縮形のデトネーション管に対する数値計算も行われている⁽⁹⁾。さらに、圧力比および駆動気体の組成によってテイラリング条件を満たし、高エンタルピー衝撃波風洞に応用できることが明らかにされている⁽⁸⁾。しかし、デトネーション波は三次元構造を有し、デトネーション波背後の流れは一様性に欠けるという欠点がある⁽¹⁰⁾。また、デトネーション波に追従する Taylor 膨張波によって貯気槽の圧力、温度は時間とともに低下するため、隔膜の開口時刻を制御することが重要と考えられる。

本研究では、デトネーション駆動形衝撃波管を設計および試作し、その作動特性を明らかにするための実験を行った。まず、駆動管と衝撃波管を仕切る隔膜の破膜状況によって、生成される衝撃波のマッハ数が大きく変化すると推定されるため、隔膜の材料および隔膜に切りつける溝の深さを変化させて実験を行った。

また、実験により得られた圧力波形と衝撃波管数値計算コード KASIMIR⁽¹¹⁾ との比較も行ったので報告する。

2. 実験

2.1 実験装置 図1に実験装置の概略を示す。実験装置はステンレス製(SUS 304)で始動管(Initiation Tube, 内径 $ID=30$ mm, 長さ $L=1000$ mm), 駆動管(Detonation Driver, $ID=50$ mm, $L=4500$ mm), ダンプチューブ(Damp Tube, $ID=50$ mm, $L=2100$ mm), 衝撃波管(Shock Tube, $ID=50$ mm, $L=4200$ mm), 観測部(Observation Section)およびダンプタンク(Damp Tank, 容積 0.75 m³)から構成される。装置全体の長さは約 14 m である。始動管上部にはデトネーション波への遷移を短時間で行わせるためシェルキン・スパイラルコイルが挿入してある⁽¹²⁾。始動管上端に取付けた自動車用火プラグによって始動管の混合気が着火されると、始動管においてデトネーション波が生成される。デトネーション波は駆動管内へ伝ばし、デトネーション波背後の高温・高圧領域を貯気槽として隔膜が破膜し、衝撃波管内に衝撃波を駆動することになる。なお、駆動管を左方向に伝ばしたデトネーション波は、真空にしてあるダンプチューブ内において減衰される。

始動管には4箇所(下方向へ順に IP 1~IP 4), 駆動管には8箇所(左方向へ順に DP 1~DP 8)の測定孔が設置されている。同様に衝撃波管の測定孔を右方向へ順に SP 1~SP 4 と呼ぶ。デトネーション波および衝撃波の圧力、伝ば速度を計測するため、圧電式圧力変換器(PCB社製, Model 113 A 24, 応答時間 $1 \mu\text{s}$)を駆動管に3箇所、衝撃波管に4箇所設置した。また、燃焼波の到達を検知するため、イオンプローブを製作した始動管に4箇所、駆動管に8箇所、圧力変換器に対向させて設置した。イオンプローブは直径 1.4 mm の鉄心2本(かんげき 1.0 mm, 長さ 2.5 mm)の間に直流電圧 90 V を印加したものであり、デトネーション波背後の電離した気体が通過することにより導通状

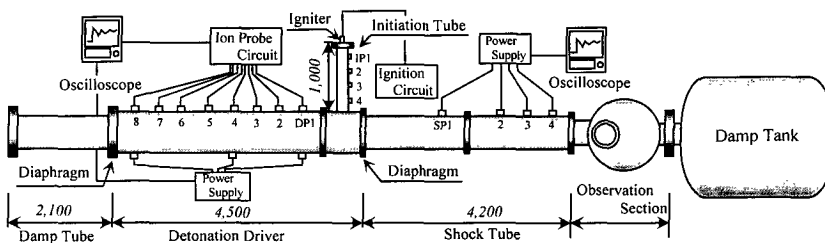


Fig. 1 Schematic diagram showing a detonation-driven shock tube

態となる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。圧力変換器およびイオンプローブからの出力はストレージオシロスコープ(横河電機社製, DL 1540)2台を用いて同時記録されコンピュータで処理した。

2.2 実験方法 実験条件を表1に示す。駆動気体は酸水素混合気であり、当量比を $\phi=1.0\sim 2.0$ の範囲で変化させて実験を行った。駆動気体の初期圧力は $101 < p_{d1} \leq 303$ kPaの範囲で変化させた。被駆動気体は空気であり、初期圧力は $p_1=11.3$ kPaで一定である。駆動管、ダンプチューブおよび衝撃波管をそれぞれ隔膜で仕切る。隔膜には厚さ75 μm のマイラー膜、または厚さ0.4 mmの銅板を用いた。銅板には破膜に要する時間を短縮するため、十字形の溝(以下十字溝と呼ぶ)が切り込んである。ただし、実験における再現性を向上させるには、十字溝の深さおよび形状を均一にする必要がある。銅板に精密な十字溝を切るための工具として空気式ダイグラインダ(日東工器社製, エアソニック L-35 R)を用いてロータリバー(刃先角90°)を約30 000 rpmで回転させ、光学ステージ(シグマ光機社製, X軸ラックピニオンステージ)を用いて銅板をスライドさせる方法を用いた。銅板に切られた溝の断面形状を形状測定装置(小坂製作所社製, Surf-corder Model SE-3 C, 計測誤差1 μm)を用いて計測した結果、平均深さに対するばらつきが約29%以下であり、ほぼ再現性よく溝が切られていることを確認した。実験では、十字溝の深さを $\delta=0.1$ mmおよび0.2 mmと変化させた。

2.3 駆動気体の作成 予備実験より駆動気体となる酸水素の混合状態を一様にするのが実験の再現

性を向上する観点から重要であることが明らかにされた。そこで、磁気駆動方式により回転させるかしくはん板を内蔵した予混合タンクを製作した。予混合タンクはステンレス製であり、内径200 mm、長さ715 mm(容積 2.25×10^{-2} m³)の容器内にかしくはん板(アルミニウム製, 600 \times 70 mm)2枚を挿入し製作したものである。回転軸には直径5 mm、長さ10 mmのネオジ磁石(Nd-Fe-B, 表面磁束密度4 000 G)が計15個埋め込まれており、回転軸にはモータ(オリエンタルモーター社製, スピードコントロールモータ)と接続させた。モータの回転速度を約23 rpmとして回転させ、混合タンク内部の酸水素の混合を促進させた。

図2は充てんされた気体の組成をガスクロマトグラフィ装置(島津製作所社製, GC-8 AIT)を用いて検定した結果を示す。縦軸は駆動気体の当量比 ϕ を示し、横軸は始動管に取付けた点火プラグからの距離 D である。酸素と水素気体の分圧をストレイン式圧力計(長野計器社製, デジタル圧力計GC-61)を用いて計測することにより、当量比 $\phi=1.0$ 、圧力101.3 kPaとなるように気体を充てんした場合の結果である。駆動管に混合タンクを介して混合気を充てんした場合(○印)と酸水素を別々に駆動管に充てんし自然に混合させた場合(▽印)の比較が示してある。これより、酸水素を直接的に駆動管に充てんし混合させた場合では、始動管および駆動管内における当量比のばらつきが大きい。一方、混合タンク内で約5 min かしくはんさせてから充てんした場合は、始動管および駆動管において当量比がほぼ一定である。この場合、当量比は $\phi=1.00 \pm 0.06$ であることを確認しており、この方法を用いて駆動気体を充てんした。

Table 1 Experimental conditions

	Driver Gas	Driven Gas
Species	H ₂ , O ₂	Air
Equivalence Ratio, ϕ	1.0 ~ 2.0	-
Pressure (kPa)	$101 < p_{d1} < 303$	$p_1 = 11.3$

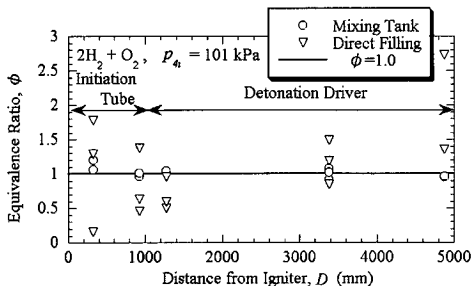


Fig. 2 Distribution of equivalence ratio ϕ varied with a distance from igniter, D ($p_{d1}=101$ kPa)

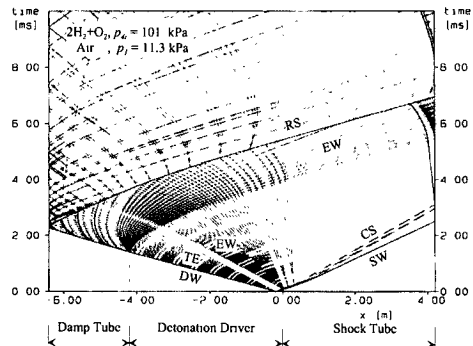


Fig. 3 Wave diagram of detonation-driven shock tube calculated by KASIMIR shock tube simulation code ($p_{d1}=101$ kPa, $p_1=11.3$ kPa, $\phi=1.0$)

3. 結果および考察

3・1 波動線図 図3に衝撃波管数値計算コード KASIMIR⁽¹¹⁾により得られたデトネーション駆動形衝撃波管の波動線図を示す。横軸はデトネーション駆動形衝撃波管の位置 x を示し、縦軸は計算開始からの経過時間である。計算の初期値は、後述する実験結果と同様であり、駆動管の気体は当量比 $\phi=1.0$ の酸水素混合気(初期圧力 $p_{i1}=101$ kPa)である。ダンプチューブ内は真空であり、衝撃波管内の気体は空気(初期圧力 $p_1=11.3$ kPa)である。駆動管と衝撃波管を仕切る隔膜は瞬間的に破膜するものと仮定し、計算を行った結果である。計算開始と同時に $x=0$ の位置からデトネーション波(DW)が左方向へと伝播する。また、デトネーション波背後には Taylor 膨張波(TE)が追従する。デトネーション波は、駆動管とダンプチューブの間で音響インピーダンスが著しく減少するのに伴い、膨張波(EW)となり右方向へと反射する。一方、デトネーション波はダンプチューブ内では衝撃波となり伝ばし、左端の管端で反射し反射衝撃波(RS)となり伝ばする様子がわかる。衝撃波管内には計算開始とほぼ同時に衝撃波(SW)が右方向へ伝ばする。衝撃波の伝ば速度は一定ではなく、計算開始直後において伝ば速度が低下する様子がわかる。これは、デトネーション波が左方向に伝ばした背後で高温・高圧となった貯気槽の長さが短いことに起因しており、隔膜が計算開始とほぼ同時刻に開放した際生じる膨張波が衝撃波に追いつくためである。また、単純衝撃波管と同様に衝撃波背後には接触面(CS)が追従する様子がわかる。計算で得られたデトネーション波の伝ば速度は 2853 m/s であり、この計算条件に対する C-J デトネーション波の伝ば速度である。また、衝撃波管内において生成された衝撃波の伝ば速度は 1589 m/s であり、伝ばマッハ数は $Ms=4.6$ に相当する。

3・2 駆動管内の圧力履歴 図4に駆動管の初期圧力が $p_{i1}=303$ kPa、当量比 $\phi=1$ の場合に始動管および駆動管に設置されたイオンプローブからの電圧信号(図4上部、IP1~IP4、DP1~DP8の順で立ち下がる)と、DP1、DP4およびDP8に取付けられた圧力変換器より得られた圧力履歴(図4下部)を示す。IP1の位置以降でほぼ一定間隔でイオンプローブの立下りが検出されていることから、点火プラグからの距離 $D<200$ mm の範囲においてデトネーション波への遷移が起きていることがわかる。また、イオンプローブの立下りと圧力の立下り時刻が一致していること、および圧力波形からは波面背後に Taylor 膨張波

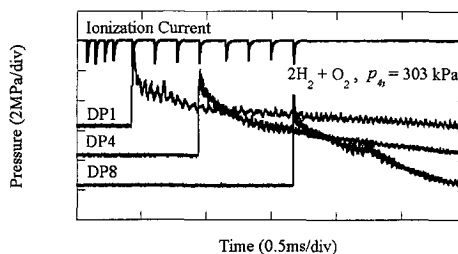


Fig. 4 Profile of ionization current (upper) and pressure histories (lower), showing the propagation of detonation wave ($p_{i1}=303$ kPa, $\phi=1.0$)

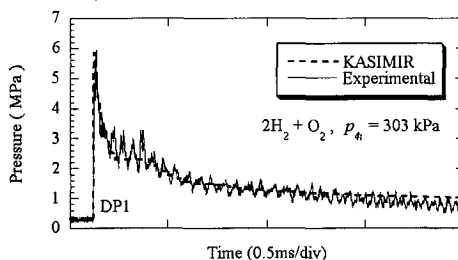


Fig. 5 Comparison of pressure histories behind detonation wave between experimental and result obtained by KASIMIR shock tube simulation code ($p_{i1}=303$ kPa, $\phi=1.0$)

が追従していると考えられることから、典型的なデトネーション波の伝ばを確認することができる。デトネーション波が DP 1~DP 8 へ伝ばするにしたがって、デトネーション波背後の最高圧力が上昇している。これは始動管から駆動管への断面急拡大部においてデトネーション波が回折し、角部より発生した膨張波の影響を受け部分的に消炎が起き⁽¹⁵⁾、一度衝撃波と火炎面に分離した後、再びデトネーション波へ遷移するためである。このような現象は後述するデトネーション波の伝ば速度を計測した結果からも明らかである。DP 8 における最高圧力は約 6.4 MPa であり、この値は化学平衡計算⁽¹⁴⁾によって得られた C-J デトネーション波背後の圧力値にほぼ等しい。

図5は、図4の DP 1 の圧力波形について、前述した KASIMIR による計算結果と比較したものである。図5より、KASIMIR により得られた圧力波形は、デトネーション波の最高圧力や Taylor 膨張波により圧力が降下する過程など、実験結果と定量的によく一致する。デトネーション波に追従する Taylor 膨張波により圧力が降下し一定になった後、隔膜が破膜して圧力が減少する挙動についても数値計算によりよく再現できている。

図6に圧力およびイオン電流波形からデトネーション

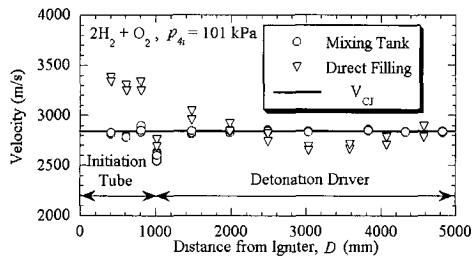


Fig. 6 Propagation velocity of detonation wave travelling inside detonation-driver, V_{CJ} indicates Chapman-Jouguet (C-J) detonation velocity ($p_4 = 101$ kPa, $\phi = 1.0$)

ン波が2点間を通過する時間を測定することにより求めたデトネーション波の伝ば速度の分布を示す。図6の横軸は点火プラグからの距離 D を示す。また、図6には混合タンクを用いて混合気を充てんした場合(○印)と酸水素を直接充てんした場合(▽印)に得られる速度分布の比較も示してある。予混合タンクを介して混合気を充てんした場合、デトネーション波の伝ば速度は一定であり、この条件におけるC-Jデトネーション波の伝ば速度2850 m/sにほぼ等しい。しかしながら、駆動管へ直接駆動気体を充てんした場合、デトネーション波の伝ば速度は一定でないことから、酸水素の混合状態がデトネーション波の伝ば速度に与える影響が大きいといえる。また、 $D=1000$ mmにおいてデトネーション波の伝ば速度が減少しているが、これは前述したように始動管から駆動管へデトネーション波が伝ばする際の断面急拡大部において、デトネーション波は衝撃波と火炎面に一時的に分離するためである⁽¹⁵⁾。しかしながら、デトネーション波は管壁などによって反射することにより、 $D=1500$ mmの位置において伝ば速度が回復していることから、C-Jデトネーション波へ速やかに遷移していることがわかる。

3.3 衝撃波管内の圧力履歴 図7に圧力変換器SP1~SP4より得られた衝撃波管内の圧力履歴を示す。初期圧力は $p_4 = 303$ kPa, $p_1 = 11.3$ kPa とし、当量比は $\phi = 1.0$ の場合の結果である。この実験条件では、伝ばマッハ数 $M_s = 5.0$ の衝撃波が生成された。圧力波形が振動しているが、デトネーション波背後の圧力振動の影響、および圧力変換器の圧力レンジが7 MPaと高く、ノイズが増幅されたためである。また、圧力変換器の受圧面が管壁面と完全な面ではないことも原因と考えられ、今後の改良が必要である。また、衝撃波がSP1~SP4へ伝ばするにしたがって圧力の低下が観察できる。これは、デトネーション駆動形衝撃波管では、デトネーション波背後の高温・高圧気体

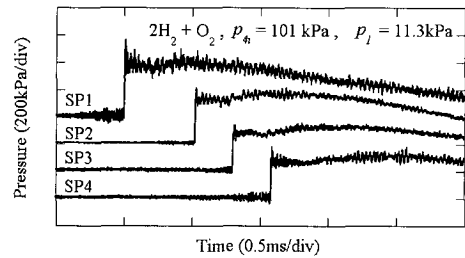


Fig. 7 Pressure histories of shock wave travelling inside shock tube ($p_4 = 303$ kPa, $p_1 = 11.3$ kPa, $\phi = 1.0$)

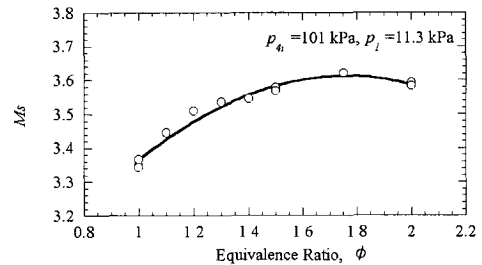


Fig. 8 Relationship between equivalence ratio, ϕ and Mach number of the shock wave M_s ($p_4 = 101$ kPa, $p_1 = 11.3$ kPa)

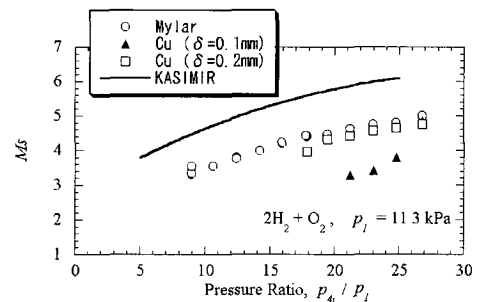


Fig. 9 Relationship of pressure ratio p_4/p_1 and Mach number of the shock wave M_s ($p_1 = 11.3$ kPa, $\phi = 1.0$)

が貯気槽となるが、貯気槽の長さが十分確保されていない状態で隔膜が開放されたため、衝撃波に追従する膨張波が次第に衝撃波に追いつくために生じる。したがって、SP3およびSP4で示した圧力波形には圧力の減衰が観察できる。図8は、当量比 ϕ に対して得られる衝撃波マッハ数 M_s の関係を示し、駆動管における初期圧力 $p_4 = 101$ kPa, 被駆動気体の初期圧力が $p_1 = 11.3$ kPa の条件である。当量比 ϕ を1よりも大きくすると、生成される衝撃波マッハ数も増加する。これは当量比が1以上、すなわち燃料過剰の状態では、燃焼後に水素が残るため駆動気体のモル質量が小さく

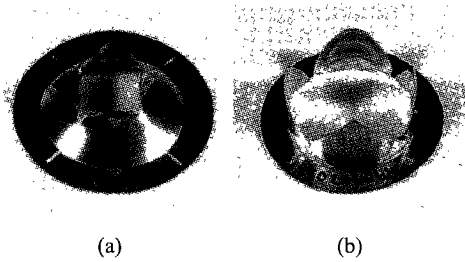


Fig. 10 Copper disk after rupturing (70 mm diameter and 0.4 mm thickness), (a) depth of ditch $\delta=0.1$ mm, (b) $\delta=0.2$ mm ($p_4=240$ kPa, $p_1=11.3$ kPa, $\phi=1.0$)

なるためであり、式(2)からも推察できる。当量比 $\phi=1.7$ 付近で衝撃波の伝ばマッハ数は極大値となり、 $\phi > 1.7$ の条件では衝撃波の伝ばマッハ数は減少する。これは、 $\phi > 1.7$ では燃焼ガスの温度が低下するためであり、式(2)において温度比 T_4/T_1 の値が減少するためと考えられる。

3.4 隔膜の違いによる衝撃波マッハ数の変化

デトネーション管と衝撃波管の間の隔膜の違いにより隔膜の開口時間が変化し衝撃波のマッハ数が変化すると考えられる。図9は駆動管初期圧力 p_{4i} を被駆動管圧力 p_1 で除した無次元圧力 p_{4i}/p_1 に対して得られた衝撃波マッハ数 M_s の関係である。駆動管と衝撃波管の間の隔膜をマイラー膜(○印)と銅板で比較しており、銅板に切る十字溝の深さを $\delta=0.1$ mm (▲印)および $\delta=0.2$ mm (□印)にした場合の比較を示す。なお、実線は前述した衝撃波管数値シミュレーションコード KASIMIR による計算結果である。隔膜にマイラー膜を用いた場合、圧力比 p_{4i}/p_1 を大きくすると衝撃波マッハ数 M_s は単調に増加した。隔膜に厚さ 0.4 mm の銅板を用いた場合、切り込まれた十字溝の深さ δ が重要なパラメータとなる。溝の深さが $\delta=0.1$ mm ではマイラー膜と比較してマッハ数が小さい。図10(a)に $\delta=0.1$ mm の場合の銅板の破膜状況を示す。銅板に切り付ける十字溝の深さが浅い場合、十字溝に沿って破膜が開始されているが開口が不十分であり開口面積も小さい(開口面積約 20.3%)。したがって、開口面積が小さいことが原因で駆動気体が開放される時間が長くなり、伝ばマッハ数の高い衝撃波が駆動されない。一方、溝の深さを $\delta=0.2$ mm とした場合の銅板の破膜状況を図10(b)に示す。圧力比が $p_{4i}/p_1 > 20$ の範囲において図10(b)に示したように銅板の破膜状況が良好であり(開口面積 100%)、衝撃波マッハ数も高い値を示した。以上より、銅板の厚さおよび溝の深さと駆動管と被駆動管の圧力比によって隔

膜の破膜状態が異なり、衝撃波マッハ数が変化する。

数値計算コード KASIMIR によって予測される衝撃波の伝ばマッハ数は、実験で得られた衝撃波マッハ数と異なる⁽⁶⁾。この原因として、(i) KASIMIR による計算では、破膜が瞬間的に行われると仮定しており、破膜に要する時間を考慮していない。(ii) デトネーション波が始動管から駆動管へ回折する際の消炎過程が KASIMIR では考慮されていないことなどが考えられる。

4. ま と め

デトネーション駆動形衝撃波管を設計および試作し、その作動特性を明らかにするためデトネーション波背後の圧力履歴およびイオン電流波形を計測した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 予混合タンクを介して酸水素をかくはん混合させてから駆動管に混合気を充てんした場合、当量比が一定となり、デトネーション波の伝ば速度も一定で C-J 理論より求めた C-J デトネーション波の伝ば速度にほぼ等しい値を示した。

(2) 酸水素の当量比が $\phi \approx 1.7$ の場合に生成される衝撃波マッハ数は極大値となることを明らかにした。

(3) 隔膜に銅板を用い、溝の深さを変化させて実験を行い、溝の深さと圧力比によって破膜の様子が異なり、生成される衝撃波のマッハ数が変化することを明らかにした。

(4) 衝撃波管数値計算コード KASIMIR を用いて生成される衝撃波マッハ数の予測を行った結果、実験結果よりも高い値を示すことを明らかにした。

本実験を行うに当たり、本学吉橋照夫、山崎次男両技官ならびに研究生金泰煥君、学部生後藤雅明君の協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Archer, R.D. and Saarlal, M., An Introduction to Aerospace Propulsion (1996), 1-35, Prentice-Hall, Inc.
- (2) Anderson, J.D., Jr., *Highersonic and High Temperature Gas Dynamics* (1989), 1-28, McGraw-Hill, Inc.
- (3) 久保田浪之介・桑原卓雄, ラムジェット工学 (1996), 1-25, 日刊工業新聞社.
- (4) 高藤亮一・ほか4名, 回折する衝撃波の挙動に関する研究(第1報, 衝撃波の回折と反射過程), 機論, 65-639, B (1999), 3602-3607.
- (5) 生井武文・松尾一泰, 衝撃波の力学 (1983), 149-199, コロナ社.
- (6) Yu, H.-R., ほか3名, Gaseous Detonation Driver for a Shock Tunnel, *Shock Waves*, 2 (1992), 245-254.
- (7) Yu, H.-R., ほか4名, Preliminary Experimental Results of the Detonation-Driven Shock Tube, *Proc. 20th Int.*

- Symp. Shock Waves, II* (1995), 1509-1514.
- (8) Lenartz, M., ほか2名, Development of a Detonation Driver for a Shock Tunnel, *Proc. 20th Int. Symp. Shock Waves, I* (1995), 153-158.
- (9) 姜宗林・ほか2名, デトネーション衝撃波管の駆動方式に関する研究, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 639-642.
- (10) Nettleton, M. A., *Gaseous Detonations: Their Nature, Effects and Control*, (1987), 42-68, Chapman and Hall Ltd.
- (11) Stoßwellenlabor, RWTH Aachen, KASIMIR Shock Tube Simulation Program, *Instruc. Manual*, (1993).
- (12) 大八木重治・ほか3名, デフラグレーションからデトネーション波への遷移過程, *機論*, 59-567, B (1993), 3552-3556.
- (13) 渡辺真次・ほか3名, フィルムデトネーション波開始過程の可視化, *機論*, 63-612, B (1997), 2700-2706.
- (14) 疋田強・秋田一雄, *燃焼概論*, (1971), 126-131, コロナ社.
- (15) 星真太郎・ほか4名, デトネーション波の回折現象に関する研究, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 313-316.
-