

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

デトネーション波と衝撃波の干渉現象に関する研究

A Study on Interaction Phenomenon of a Detonation Wave with a Shock Wave

永井 厚司^{1*}・横川 真人²・吉橋 照夫³・小原 哲郎⁴・大八木 重治⁴NAGAI, Koji^{1*}, YOKOKAWA, Masato², YOSHIHASHI, Teruo³, OBARA, Tetsuro⁴, and OHYAGI, Shigeharu⁴

¹ 埼玉大学大学院理工学研究科生産科学専攻 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Graduate School of Production Science, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

² 埼玉大学大学院理工学研究科機械工学専攻 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Graduate School of Mechanical Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

³ 埼玉大学総合研究機構 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Innovative Research Organization, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

⁴ 埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Division of Human-centered Production Science, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

2009年1月28日受付; 2009年5月2日受理/Received 28 January, 2009; Accepted 2 May, 2009

Abstract : By using the sooted plate technique, a detonation cellular pattern is recorded. The cell width λ is a parameter that depends on the chemical reaction rate of the mixture. Therefore, many studies have been carried out to measure the cell width under various mixture conditions. Hence, it can be expected that the cell width is a function of the local thermodynamic properties of the mixture. In the present study, which is a fundamental study on detonation cellular structure, we focused on the change in the detonation cellular structure with change in the local thermodynamic properties. In this study, the change is made by a head-on collision with a shock wave. A detonation wave collides with shock waves of the different strength in stoichiometric hydrogen-oxygen mixtures. The change in the cell width is measured on the basis of the soot track record. It is clearly observed that the cell width changes after the collision. The cell width decreases with increasing shock wave strength. The relation between the cell width and pressure and temperature of the stoichiometric oxyhydrogen mixture is obtained under the present experimental conditions.

Key Words : Detonation wave, Cellular structure, Shock wave

1. 緒言

デトネーション波は可燃性媒質中を超音速で伝ばする燃焼波である。デトネーション波は、衝撃波のような平面波ではなく、入射波、反射波(横波)、マッハ軸から成る三重衝撃波構造をもつ。デトネーション管の側壁にすずを塗布したプレートを設置した場合には、その上に三重点の軌跡である魚のうろこ状のセル模様が描かれる。この一つのセルの伝ば方向に対する垂直方向の最大幅はセル幅 λ と呼ばれ、混合気体の反応速度により変化するパラメータであり、十分大きな管で、かつ十分発達したデトネーション波であればセル幅は一定であり、管の寸法やデトネーション開始

方法等の外部的条件に依存せず、混合気体の化学的熱力学的状態によって決定される。また、デトネーション波の開始や伝ば可能な条件はこのセル幅に依存することから、様々な気体の条件下でセル幅を調査し、それらの関係を明らかにすることは安全工学的にも燃焼学的にも重要である。これまでに気体の種類や当量比、初期圧、初期温度等を変化させた際のセル幅の調査結果が数多く報告されており、デトネーションデータベースとしてまとめられている[1]。例えば、酸水素予混合気については室温におけるセル幅 λ が初期圧のほぼ -1.2 乗に比例する[2]ことが確かめられている。これらのような定常 C-J デトネーションに対するセル幅については多く議論されている。しかしながら、デトネーション波の楔上でのマッハ反射におけるセル幅の変化[3,4]、デトネーション再開始時のオーバードリブンデト

* Corresponding author. E-mail: s05d2002@mail.saitama-u.ac.jp

ネーションにおけるセル幅の変化, 衝撃波や燃焼波との干渉時におけるセル幅の変化などの非定常な状態におけるデトネーションについては定常な場合と異なり興味深い現象である. 著者ら[5]は, デフラグレーション波とデトネーション波の干渉現象について調べ, 火炎とその前方の衝撃波をすす膜法により可視化した. デトネーション波は初期圧 70 kPa で C-J デトネーション速度は 2800 m/s 程度であり, 約 20 cm の幅を伝ばした場合約 70 μ s で通過することから, 露光時間約 70 μ s の瞬間写真と同様に, その瞬間の火炎面と衝撃波面の存在を確認できるはずである. 得られたすす膜からはデトネーション波と衝撃波, 火炎との衝突面とセル幅の変化が観察され, 高速シュリーレン写真[6,7,8]のイメージに似たものであった. セル幅から火炎前方の状態及び形成された衝撃波後方の状態を推測しようと試みたが, 圧力のみならず温度等のパラメータが関与しており定量的に示すことは容易ではない. さらに, この衝撃波は火炎が加速することにより圧縮波が成長したものであり, 平面波ではなく, 壁面との反射波も生じるなど理想的な平面衝撃波ではない. そこで, まず平面衝撃波とデトネーション波の干渉現象によるセル幅の変化を調査することを試みた. Ng ら[9]は, C-J デトネーション波と平面衝撃波との正面衝突現象について調査し, 衝撃波後方の高温高压気体中をデトネーション波が透過することによってより微細なセルが形成されることを実験的に示し, 理論計算や数値計算との比較を行い, 反応動力学モデルによりデトネーション波の反応領域, 緩和期間等について議論している. Botros ら[10]は, デトネーション波と衝撃波の正面衝突によるすす膜及び流しシュリーレン実験結果と化学反応解析結果を比較し, 衝突後のセルの遷移について議論している. このようにデトネーション波前方の気体の状態や流れが変化すればそれに伴ってセル構造も変化するので, 気体の状態や流れの変化とセルサイズの関係及びセル構造の変化過程を明らかにすることは重要であると考えられる. しかしながら, C-J デトネーションが衝撃波と正面衝突後どのようにしてセルがより細かいセルへ遷移するのか, セルサイズはどのように変化するのか, そして衝撃波後方の定常な状態に落ち着くのか, また火炎により生成される圧縮波が成長した衝撃波と干渉した場合にはセルがどのように変化するのかなど, 議論されていない. また, このことはセル幅を測定することにより逆にその過程における状態変化を推定することも可能であることを意味している. 本論文では, 初めに管内を伝ばする火炎によって形成される衝撃波にデトネーション波が干渉した場合のセル幅の変化を調べた結果を示し, 次にデトネーション波が衝撃波と干渉する場合にセル幅が前方気体の状態によって, どのように変化するか検討した結果を示す. 特に, 衝撃波と干渉時の圧力履歴及びすす膜上のセルサイズを測定し, 気体の圧力, 温度及び流れの変化が, セル構造に及ぼす影響やセル構造の変化過程について検討することを目的とした.

2. 実験装置及び実験方法

図 1 に衝撃波を伴うデフラグレーション波とデトネーション波の干渉実験に用いた装置の概略を示す. デトネーション管は長さ 500 mm, 内寸 30 mm \times 25 mm のステンレス製の矩形管 6 本をフランジで結合したもので, 全長は 3000 mm となっている. 実験は管内部に化学量論酸水素混合気を充填し, 管の両端に設けられた点火プラグにより管の左側からデフラグレーション波を, 右側からはデトネーション波を伝ばさせる. 右側管端にはデトネーション波に素早く遷移させるために, 長さ 500 mm のシェルキンスパイラルが挿入してある. 図 1 の P2 で示される窓部にはすすを塗布したアルミニウム板 (220 mm \times 50 mm, 厚さ 0.3 mm) を設置することができる. このセクションで衝撃波及び火炎とデトネーション波を衝突させるために, 遅延回路を用いて両端で点火するタイミングを調整できるようになっている. また, 管の側壁には圧力変換器とイオンプローブを対向して取り付けることができ, 圧力波と燃焼波の到達を検知できる. なお, この両者の信号がマイクロ秒のオーダーで一致することでデトネーション波と判断する. 圧力変換器は左側管端 250mm の位置から 500 mm 間隔で設置することができる. ただし, 可視化窓部には, すすを塗布したアルミニウム板を設置しているため, イオンプローブは設置されておらず, 圧力変換器のみとなる. 可視化窓部の位置やイオンプローブ, 圧力変換器の位置などは条件によって随時変更する. 供試気体は, 初期圧 $p_0 = 25 \sim 70$ kPa の範囲で変化させて実験を行なった.

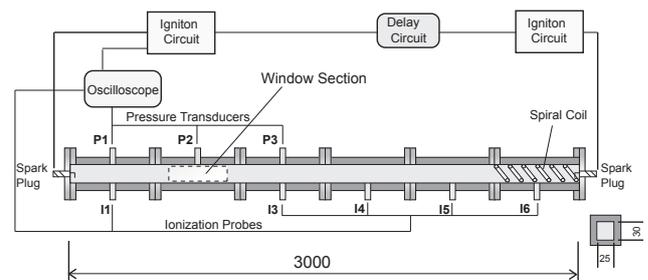


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus used for studying the interaction of a detonation wave with a deflagration wave

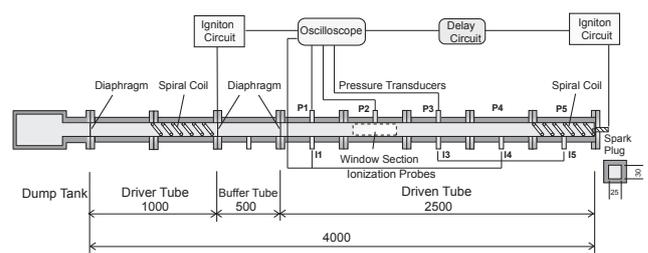


Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus used for studying the interaction of a detonation wave with a shock wave

Table 1 Experimental conditions

Driver gas	2H ₂ +O ₂
Initial pressure	40 - 80 kPa
Buffer tube	He+0.39N ₂
Driven gas	2H ₂ +O ₂
Initial pressure	30 kPa

次に図 2 に衝撃波とデトネーション波の干渉実験に用いた実験装置を示す。衝撃波の生成はデトネーション駆動型を採用した。デトネーション管は前述と同じ内寸 30 mm×25 mm のステンレス製の矩形管である。装置はダンプタンク、駆動管 (1.0 m)、緩衝管 (0.5 m)、被駆動管 (2.5 m) で構成され、各セクションは隔膜で仕切られている。駆動管内には化学量論酸水素混合気を充填する。また、駆動管に隣接する緩衝管にはヘリウムと窒素の不活性混合気を充填し、被駆動管には化学量論酸水素混合気を充填する。なお、緩衝管内の不活性混合気は供試気体と音響インピーダンスを合わせ、緩衝管と被駆動管との隔膜にはポリ塩化ビニリデン樹脂製の食品用ラップフィルムを採用することで反射波の影響を排除している。駆動管右端の隔膜付近で混合気を点火することでデトネーション波を発生させ、デトネーション波背後に生成される高温高压気体により衝撃波を駆動する。この衝撃波は緩衝管を経て被駆動管内へと伝ばする。一方、この衝撃波と衝突させるデトネーション波は被駆動管の右側管端より開始される。駆動管及び被駆動管の右端にはシェルキンスパイラルを挿入してある。図 2 の P2 の可視化窓部には図 1 と同様にすす膜板を設置することができる。このセクションで衝撃波とデトネーション波を衝突させるために、遅延回路を用いて駆動管及び被駆動管で点火時期の調整を行った。また、駆動管内の初期圧を変えることで衝撃波の強さを変化させた。実験条件を表 1 に示す。衝撃波背後の温度や流速は、P2 の圧力変換器で検知される衝撃波の圧力値をもとに計算した。

3. 実験結果及び考察

3.1. 衝撃波を伴うデフラグレーション波とデトネーション波の干渉

図 3 に衝撃波を伴う加速中のデフラグレーション波とデトネーション波の干渉実験における圧力履歴の一例を示す。初期圧 $p_0 = 70$ kPa, 左側管端の点火プラグで火炎を形成後、時間 757 μ s 後に右側管端の点火プラグで火炎を形成し、シェルキンスパイラルを用いてデトネーション波に遷移させた場合である。波形は上から順に I1, I6, I5, I4, I3 のイオン電流, P1, P2, P3 の各々の圧力波形を示している。圧力波形から、最初に左側管端から弱い先行衝撃波 (SW) が伝ばする。イオンプローブの I1 の立ち下がりから

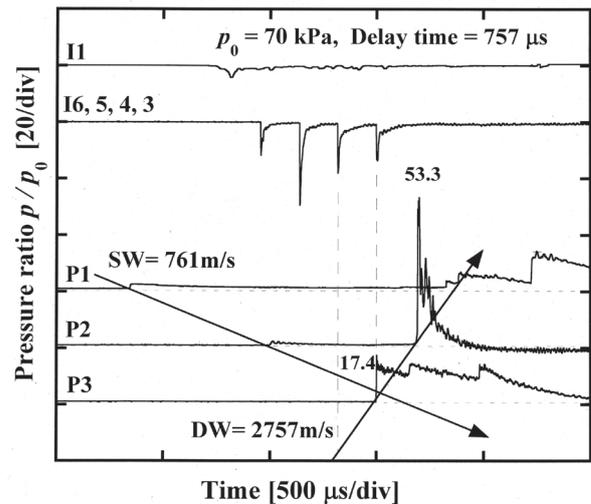


Fig.3 Pressure histories corresponding to the interaction of a detonation wave with a deflagration wave

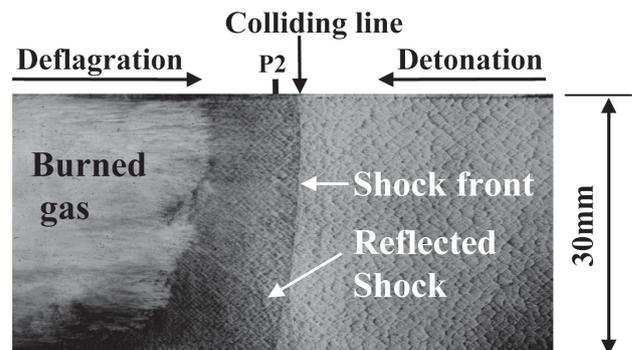


Fig.4 Soot track record corresponding to the interaction of a detonation wave with a deflagration wave at P2, $p_0=70$ kPa, delay time= 757μ s

衝撃波後方を火炎が伝ばしていることがわかる。先行する衝撃波は右側管端より伝ばしてきたデトネーション波 (DW) と P3 の若干左側で衝突する。その後、デトネーション波は P2 へ到達し、初期圧の 53.3 倍という非常に高い圧力上昇が発生している。この混合気の STANJAN コード[11] で計算した C-J デトネーション速度は 2822 m/s, 無次元 C-J デトネーション圧力は 18.6 である。右側から伝ばしてくるデトネーション波は、各々 I6, I5, I4, I3 でイオン電流の立ち下がりが認められ、I3 では圧力波形の立ち上がり P3 と一致している。P3 での無次元圧力は 17.4, P5-P3 間の平均伝ば速度は 2757 m/s であり、P3 までに C-J デトネーションに遷移したデトネーション波が P3 付近で衝撃波と衝突し、さらに、P2 付近で左側から伝ばしてきたデフラグレーション波と衝突し、高い圧力上昇を示したものと考えられる。この後、デトネーション波は燃焼気体中を伝ばするため減衰し、P1 では衝撃波として観察される。図 4 にこの圧力波形と同時に得られた P2 を可視化窓部とした場合のすす膜模様を示す。この画像は、白黒反転しているため

黒い部分ほどすすがより剥がされたことになる。なお、コントラスト及び明るさを調整して画像処理を施している。P2 付近から色調の変化するやや曲った境界があり、その左側の領域ではセルは細かくなっている。デトネーション波はこの面で左側から伝ばする火炎直前に形成された衝撃波と衝突し、衝撃波後方で状態が変化するためセルサイズが変化したものと考えられる。また、この境界の左側に下方から V 字型に別の境界がみられる。これは、先頭衝撃波が曲率を持っているため、下部壁面で反射した痕跡と考えられ、反射衝撃波左側ではさらにセルは小さくなっている。さらにその左側の領域ではセルは消失している。これはその領域ではすでに反応すべき気体がないことを示している。ここで、初期圧の約 50 倍という高い圧力が生じているのは、左側から伝ばする火炎がデトネーションへ遷移する際の局所爆発が起きる前の強い衝撃波により、圧力が約 2 倍の媒質中にデトネーション波が透過したためと思われる[6,7,8].

3.2. 衝撃波とデトネーション波の干渉

3.2.1. 圧力履歴

図 5 に実験で得られた圧力波形を示す。初期圧は駆動管 60 kPa, 被駆動管 30 kPa とし、点火の遅延時間を 600 μ s とし、デトネーション波を開始させた場合の圧力波形及びイオン電流波形である。波形は上から順に I3 及び I4 のイオン電流, P1, P2, P3 の各々の圧力波形を示している。圧力波形から、P1-P2 間の平均伝ば速度より求めたマッハ数 $M = 1.26$, P2 での圧力 p_2 を初期圧 p_1 で除した圧力比 $p_2/p_1 = 3.4$ の衝撃波 (SW) が被駆動管内を伝ばする。その後、遅延時間後に被駆動管右側管端で点火され、衝撃波に対向して P3 から P2 へデトネーション波 (DW) が伝ばする。P3 の圧力波形の立ち上がりとは I3 のイオン電流波形の立ち下がりが一致していることから P3 では確実にデトネーション波が伝ばしていると判断できる。また、イオン電流波形からこのデトネーション波の P4-P3 間での平均伝ば速度は 2667 m/s, この条件における STANJAN コードで計算した C-J デトネーション速度 2776 m/s に近いことからほぼ定常なデトネーションであると言える。このデトネーション波は P2 よりも若干右側の位置で衝撃波と衝突し、透過デトネーション波として伝ばし、P2 では初期圧の 38.5 倍もの圧力にまで達する。その後、P1 では圧力及び伝ば速度は減少している。これは破膜後に被駆動管内に流入した緩衝管内の不活性気体との接触面の影響で透過デトネーション波の圧力及び伝ば速度が減衰したものと考えられる。

図 6 に衝撃波とデトネーション波の $x-t$ 波動線図を示す。横軸は距離、縦軸は時間である。実験値には図 5 の圧力波形の結果と遅延時間を変えて衝突位置の異なる 3 つの結果も含まれている。それぞれの衝突位置を基準として距離と時間変化により実験値をプロットした。実線及び破線等は理論値を示している。入射デトネーション波の C-J デトネーション速度は STANJAN コードで計算した。また、衝

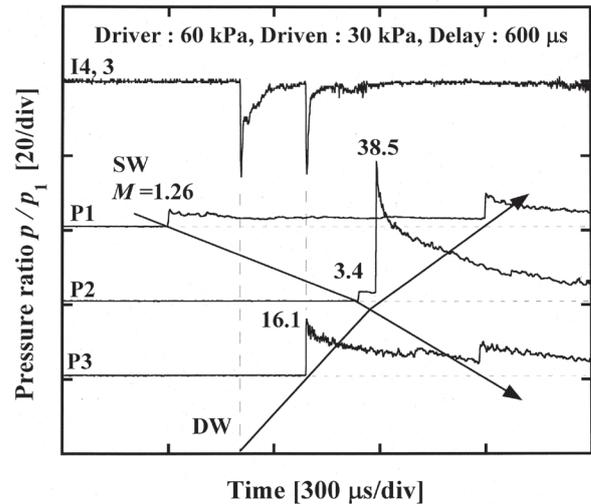


Fig.5 Pressure histories corresponding to the interaction of a detonation wave with a shock wave

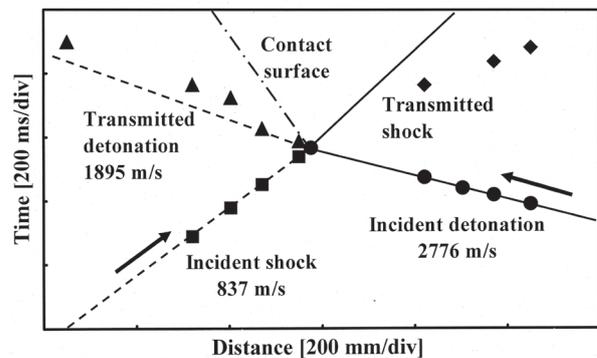


Fig.6 $x-t$ diagram showing a comparison between experimental data and theoretical results of the interaction of a detonation wave with a shock wave

突後の透過デトネーション波及び透過衝撃波に関する理論解析は Ng ら[9]の理論式を用いた。この解析では衝突前に入射衝撃波及び入射デトネーション波背後の流れは一樣とし、希薄波は考慮していない。また、未燃気体と既燃気体を異なる完全気体として扱い、それぞれの比熱比を $\gamma_r = 1.40$, $\gamma_p = 1.22$ とした。衝撃波及びデトネーション波に関する Hugoniot の関係式を衝突後の透過衝撃波と透過デトネーション波に適用し、衝突後の接触面前方で圧力と速度が一樣になるという条件から透過デトネーション波及び透過衝撃波のマッハ数を決定する。透過 C-J デトネーション波については波面背後の希薄波を断熱膨張と仮定する。条件を満たす理論解は C-J デトネーションとオーバードリブンデトネーションの 2 つが求められた。図は C-J デトネーションの理論解である。2 つの解による透過衝撃波の伝ば速度の差は 1% 程度である。透過デトネーション波 (破線) は 1895 m/s と、衝撃波後方の対向する流れのために入射デトネーション波 (実線) の 3 割程度減速している。干渉直後の透過デトネーション波の軌跡からは実験値と理論値はほ

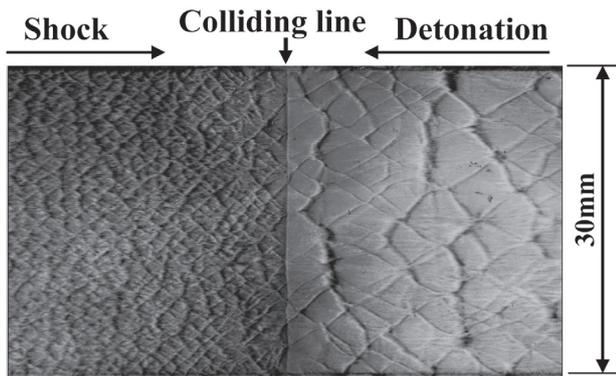


Fig.7 Soot track record corresponding to the head-on collision of a detonation wave with a shock wave

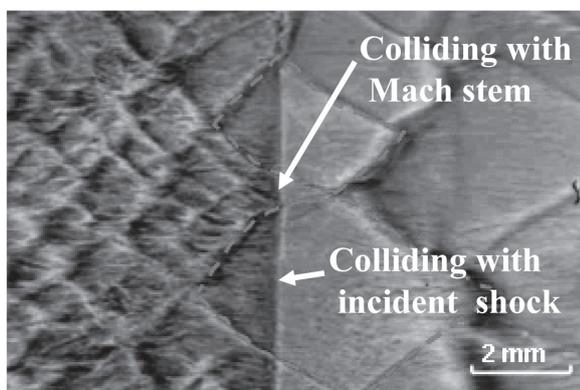


Fig.8 Enlarged image of the soot track record

ば一致しているが、その後実験値は速度が減速している。これは、図5でも議論した不活性気体との接触面の影響によるものと推察される。一方、衝突後の透過衝撃波の理論値は減速しているが、実験値は伝ば速度が増加している。図5におけるP2, P3の圧力波形でも示されるとおり入射 detonation 波背後の圧力は一定ではなく減衰しており、希薄波の影響がある。それにもかかわらず、理論計算ではこの希薄波の影響を無視しているためと考えられる。それゆえに伝ば速度の理論値は小さくなり、入射 detonation 波背後の希薄波により、衝撃波の伝ば速度は対向する流れが減速しているために、実験値の伝ば速度は増加していると考えられる。

3.2.2. すず膜模様及びセルサイズの変化

図7にP2におけるすず膜模様を示す。圧力比 $p_2/p_1 = 2.7$ の衝撃波と detonation 波が正面衝突した場合のものである。画像は、図4と同様に白黒反転し、コントラスト及び明るさを調整して画像処理を施している。すず膜には垂直な線があり、その左側の領域では細かいセルが形成されていることがわかる。セルサイズと誘導反応帯長さは線形に比例する[12]ことが知られており、反応速度が大きければ誘導反応帯長さは短くなることから、気体の反応速度が

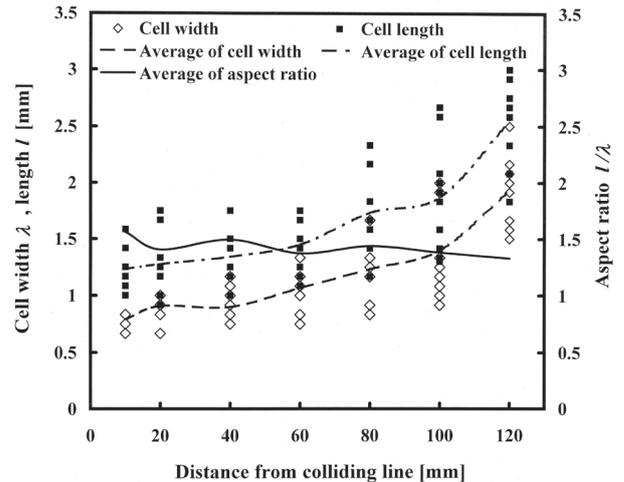


Fig.9 Cell width and length behind shock wave

大きいほどセルサイズはそれに反比例して小さくなるといえる。したがって、図7のこの垂直な線の位置で衝撃波と detonation 波は衝突し、透過 detonation 波が衝撃波背後の高高温高圧の未燃気体中を伝ばしたことによって微細なセルが形成されたと考えられる。図8には干渉時のセル構造が変化する様子を見るためにすず膜の一部を拡大したものを示す。これから、微細なセルは中央の入射 detonation 波のセルの頂点直後であるマッハ軸の位置から広がっていることがわかる。その上下の detonation 波の入射波と干渉した位置からは発生していない。セルの頂点は detonation 波面で横波同士が衝突する位置であり、その直後に形成されるマッハ軸は強く背後の火炎は入射波背後よりも密着していると考えられ、 detonation 波が衝撃波と干渉した場合にはこの位置で新たなセルが開始する可能性が高いと考えられる。

図9に detonation 波と衝撃波の衝突位置からの距離に対する干渉後のセル幅及びセル長さ(伝ば方向のセルの長さ)の関係を示す。圧力比 $p_2/p_1 = 3.4$ の衝撃波と干渉した場合である。測定値をプロットし、その平均値を破線と一点鎖線で示す。また、セル幅とセル長さの比をセルのアスペクト比とし、平均値を実線で示す。図より衝突面から60~80 mm 付近からセル幅及びセル長さが大きくなる傾向がある。セルのアスペクト比に関しては若干の変動はあるもののほぼ一定である。図5のP1における圧力履歴からわかるように、衝撃波の生成は detonation 駆動型を採用しており、衝撃波の背後では圧力が完全に一定ではなく徐々に減衰しているため、セルサイズは大きくなると考えられる。衝撃波背後では圧力だけではなく混合気の温度も上昇しており、本実験における衝撃波の圧力と温度の範囲は、 $1.0 \leq p_2/p_1 \leq 5.0$, $1.0 \leq T_2/T_1 \leq 1.8$ である。温度上昇による衝撃波背後のセルサイズの影響について検討する。ここで、入射 detonation 波によって形成されたセルのセル幅を λ_1 、衝撃波と干渉後の透過 detonation 波に

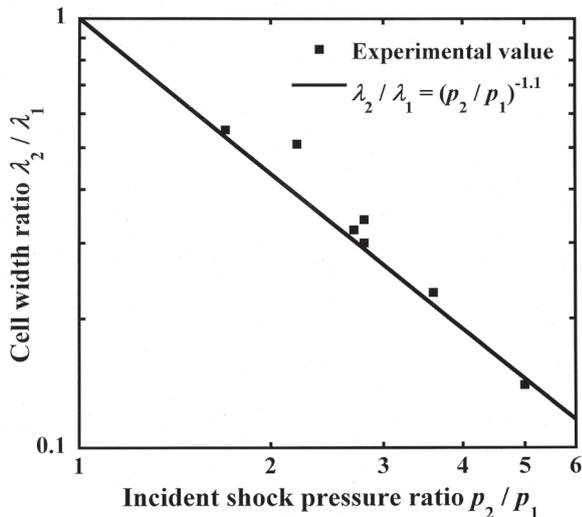


Fig. 10 Relationship between cell width ratio λ_2/λ_1 and incident shock pressure ratio p_2/p_1

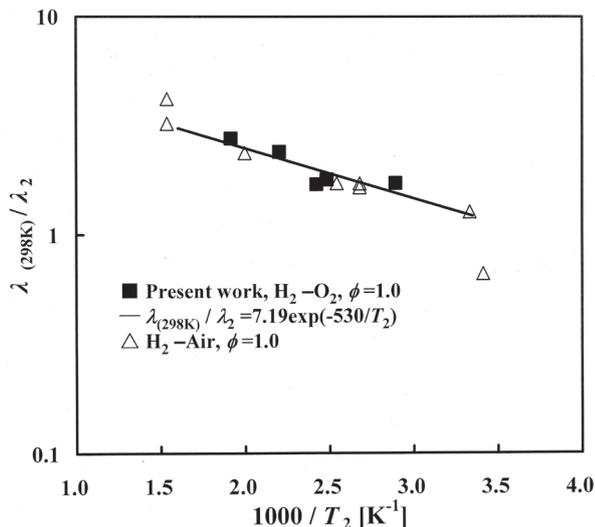


Fig. 11 Relationship between cell width ratio $\lambda_{(298K)}/\lambda_2$ and temperature

よって形成されたセルのセル幅を λ_2 とする。図 10 に衝撃波と干渉前後のセル幅の比 λ_2/λ_1 と入射衝撃波の圧力比 p_2/p_1 の関係を示す。この図は酸水素混合気、室温約 298 K で一定とした場合のセル幅の圧力依存性を示しており、 $\lambda = Ap_1^{-1.1}$ (A は定数、 p_1 は初期圧) の関係が成り立ち、実線は衝撃波干渉前後でそれぞれ無次元化し、 $\lambda_2/\lambda_1 = (p_2/p_1)^{-1.1}$ を表わしている。実験結果と比較して大きな差はない。したがって、この条件ではセル幅 (反応速度) に対して衝撃波背後の温度上昇よりも圧力上昇の影響の方がより支配的であるといえる。このことは、化学反応速度の理論計算からも衝撃圧縮によるセルサイズの縮小は温度よりも密度の上昇がはるかに顕著な効果がある[10]と矛盾しない。

反応速度定数については温度の指数関数を含むアレニウス関数で表される。活性化エネルギー E と気体の温度 T の比 E/T の変化が小さければセルサイズに及ぼす影響も小さ

いと推測される。デトネーションデータベース[1]から化学量論酸水素混合気に対する室温約 298 K での実験データからセル幅と圧力の関係は $\lambda_{(298K)} = 189p_1^{-1.1}$ [mm] で近似できる。ここから室温における密度とセル幅の関係が求められる。同じ気体密度の条件で室温におけるセル幅 $\lambda_{(298K)}$ と衝撃波背後の高温下におけるセル幅 λ_2 の比を $\lambda_{(298K)}/\lambda_2$ とする。図 11 に温度の逆数に対するこのセル幅の比を表したものを示す。なお、この温度は衝撃波関係式を用いて圧力の値から計算したものである。結果は $\lambda_{(298K)}/\lambda_2 = 7.19\exp(-530/T_2)$ で近似でき、ほぼアレニウス式を満足し、活性化温度は 530 K となった。Stamps ら[13]や Ciccarelli ら[14]による化学量論水素-空気混合気における、初期圧を大気圧として初期温度を変化させた場合の結果をともに示すと、ほぼ同じ活性化エネルギーであることは興味深い。まとめると、化学量論酸水素混合気のセル幅は、本実験範囲で

$$\lambda(p, T) = 26p[\text{kPa}]^{-1.1} \exp(530 / T[\text{K}]) \quad [\text{mm}]$$

という関係式で表すことができる。

4. 結言

デトネーションセルが前方気体の状態によって、どのように変化するかを明らかにすることを目的とし、管内を伝ばする火炎によって形成される衝撃波、衝撃波管で形成された衝撃波とデトネーション波が正面衝突する場合について、化学量論水素-酸素混合気を用いて実験的に検討し、以下の知見を得た。

- (1) 管内を伝ばする火炎によって形成される衝撃波とデトネーション波が干渉した場合、伝ばするデトネーション波のセル構造の変化により、衝撃波の形状と位置を知ることができる。
- (2) 衝撃波管により形成された衝撃波とデトネーション波を正面衝突させることにより、衝撃波の強さに対してセル幅がどのように変化するかを観測した結果、圧力についてはべき乗に反比例して減少し、温度に対してはアレニウスの式で整理できることが明らかにされ、セル幅を圧力と温度の関数で示すことができる。
- (3) 衝撃波とデトネーション波の正面衝突後におけるセル構造の変化過程にマッハ軸が関与している可能性が高く、衝突後のセル幅とセル長さの比がほぼ一定であることが確かめられた。

References

1. Kaneshige, M., Shepherd, J.E., *Technical Report FM97-8, GALCIT*, (1997).
2. Ohyagi, S., Ochiai, T., Yoshihashi, T., Harigaya, Y., *JSME Trans. B. (in Japanese)* 54: 3559-3564 (1988).

3. Ohyagi, S., Obara, T., Nakata, F., Hoshi, S., *Shock Waves* 10:185-190 (2000).
4. Ohyagi, S., Hoshi, S., Obara, T., Cai, P., Yoshihashi, T., *Combustion Science and Technology* (in Japanese) 7: 249-263 (2000).
5. Nagai, K., Yokokawa, M., Yoshihashi, T., Obara, T., Ohyagi, S., *Proceedings of the 21st ICDERS*, Poitiers, France, CD-ROM:183 (2007).
6. Urtiew, P. A., Oppenheim, A. K., *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, 295:13-28 (1966).
7. Ohyagi, S., Yajima, S., Obara, T., Yoshihashi, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 59: 3552-3556 (1993).
8. Obara, T., Yajima, S., Yoshihashi, T., Ohyagi, S., *Shock Waves* 6:205-210 (1996).
9. Ng, H.D., Botros, B.B., Chao, J., Yang, J.M., Nikiforakis, N., Lee, J.H.S., *Shock Waves* 15:341-352 (2006).
10. Botros, B.B., Ng, H.D., Zhu, Y., Ju, Y., Lee, J.H.S., *Combustion and Flame* 151: 573-580 (2007).
11. Reynolds, W.C., *Technical Rept. A-3991*, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford Univ. (1986).
12. Shchelkin, K.I., Troshin, Ya.K., *Gasdynamics of Detonations*, Mono Book Corp. (1965).
13. Stamps, D.W., Tieszen, S.R., *Combustion and Flame* 83:353-364 (1991).
14. Ciccarelli, G., Ginsberg, T., Boccio, J., Economos, C., Sato, K., Kinoshita, M., *Combustion and Flame* 99:212-220 (1994).