デトネーション波の可視化*

大八木 重治**

Visualization of Detonation Waves

Shigeharu OHYAGI

1. はじめに

デトネーション波（爆轟波）とは可燃性媒質中を伝播する燃焼波の一形態である。媒質は気体、液体、固体を問わない。また、気体と固体または液体などの混相媒質でも可能である。燃料成分と酸化剤成分が予め混合した媒質中の燃焼波はデトネーションとデフラグレーション（爆燃波または火炎波）に分類され、前者は媒質に対し超音速で、後者は亜音速で伝播する。媒質が気体の場合、これら燃焼波の性質は気体の流れに大きな影響を受け、特にデトネーション波は衝撃波の複雑な構造を持つ波であり、その現象的解明には流れの可視化が重要な手段として利用されてきた。

デトネーション現象の詳細な解説は本稿の目的ではなく、Lewis & von Elbe¹⁾、Strehlow²⁾など著明な燃焼学の教科書に譲るが、デトネーション研究に大きな貢献をなした「すす膜法」、および、「高速シュリーレン法」について、著者の所属する研究室で、行われてきた研究の成果³⁾⁻¹¹⁾を示しながら解説を行うことを目的とする。

2. 実験装置

デトネーションの実験は通常、デトネーション管と呼ばれる長い管を用いて行われる。管の断面寸法は気体の種類、状態によって決まる最小寸法以上である必要があり、長さは、デトネーション開始方法により異なるが、やはり、気体の種類、状態により決まる長さ以上である必要がある。著者の所属する研究室では1980年初頭に、内径30 mmの円形断面、長さ約4000 mmの管をステンレスで製作し、実験を開始した。円管のためシュリーレン用可視化部はなく、主にDDT (Deflagration to Detonation Transition) や直接開始 (Direct Initiation) の研究に利用した。すす膜法については後述する。続いて、内寸法25 mm×30 mmの矩形断面を持つ長さ3000 mmの管を製作し、可視化を可能にした。可視化窓は高さ30 mm、長さ200 mmで、BK7の光学ガラスを備えている。ただ、当初、カメラや光源が不備で可視化は限定的なものであった。1990年に埼玉大学に「超高速画像

解析記録装置」が導入されたことにより本格的な高速シュリーレン撮影による可視化が可能になった。この装置は、イメージコンバーター式高速カメラとCCDカメラによる画像記録装置を組み合わせた当時としては最新鋭のシステムで現象と同時に取り込んだ画像を観察することができる。カメラ自体は毎秒2000万コマまでの画像を数枚取り込むことができ、付属のキセノンフラッシュランプによりシュリーレン撮影が可能になった。

Fig. 1に、システムの構成例を示す。可視化窓前方に置かれたフォトセルによりトリガー信号を発生し、3チャンネルディレーパルスジェネレーターに入力し、キセノンフラッシュランプ、イメージコンバーターカメラ、CCDカメラを設定時間に起動させる。凹面鏡は口径200 mm、焦点距離2000 mmである。この可視化システムを用いることにより、DDT過程に及ぼす障害物の影響に関する研究^{3),4)}、ダストデトネーションの開始過程に関する研究⁵⁾、フィルムデトネーションの研究⁶⁾、デトネーションの直接開始過程の研究⁷⁾、デトネーション波の構造、反射、回折に関する研究⁸⁾⁻¹¹⁾などを行ってきた。

3. すす膜

すす膜法とは、デトネーション管内壁面に塗ったすすの上に、デトネーション波が書く魚の鱗のような模様からデトネーション波の流れの構造を推測する方法である。この方法は、衝撃波に対して1875年にAntolikが開発したもので、Machのマッハ反射の発見に利用されたも

Fig. 1 High-speed Schlieren System

* 原稿受付 2000年7月1日

** 正会員 埼玉大学 工学部

のである¹²⁾。デトネーションについてこれを用いたのは Schshelkin であり, Strehlow らによって活用され, デトネーションの三次元構造の研究に多大な貢献がなされた。

デトネーション波は衝撃波と燃焼波によって構成される波であるが, 単なる平面波ではなくて, 伝ば方向(縦方向)に垂直な方向(横方向)に伝ばする衝撃波の存在する三重衝撃波構造を呈し, 入射波, 反射波, マッハ軸という三個の衝撃波がある程度規則正しく運動することによりある準定常的伝ば状態を実現している。Fig. 2 に概略図を示す。この時, 三個の衝撃波が交差する三重点付近がもっとも高圧で流れ速度も大きいので壁面剪断応力が大きく, 付着したすすが最も多く剥がされるのですすの上に白い筋が書かれるものと考えられる。ただ, すす模様の形成については諸説あり, 高温のためすすが燃焼するとも考える研究者もいる。

すす模様を採取するためには管の内面にすすを塗布する必要がある。矩形管であれば, 可視化窓を利用して, ガラス面や金属面にすすを塗り, 実験後, その面をはずしてみれば良い。円管の場合は, 厄介であるが, 著者の研究室では, 落合ら¹³⁾が 0.4 mm の厚みのアルミ板を管の内面に合わせるように丸め, その状態ですすを塗布し, 管内に挿入する方法を開発した。特に固定することはないが 0.4 mm ぐらいの板厚で多少大きめに作ると内面

Fig. 2 Schematics of Detonation Cells (TP:triple point, IW:incident wave, RW:reflection wave, MS:Mach stem)

Fig. 3 Soot-Track Record of Argon-Diluted Oxyhydrogen Mixture in a Rectangular Tube (30 mm × 25 mm)

にきつく押し付けられデトネーションの伝ばにより, ずれることはない。ただ, 板厚をさらに薄くすると強度が不足し板は大きく変形してしまう。Fig. 3 は 30 mm × 25 mm の矩形管で採取したすす模様である。この方法だと実験後すす膜を展開し, スプレーラッカーで固定した後写真撮影するが, 特に円管の場合完全に平面に戻せないため光が反射して写し込まれてしまう。魚の鱗のように見えるのが三重点の軌跡であり, ひとつの鱗をセルと呼ぶ。このセルの幅をセルサイズと呼び気体の化学的性質のみで決まるパラメーターである。一般に化学反応速度が速い気体ほどセルサイズが小さい。つまり, セルサイズは気体の反応性の指標でありデトネーション波に対するすす膜法は定量的な流れの可視化になっている。落合ら¹³⁾は水素/酸素混合気体について初期圧, 当量比をパラメーターにしてセルサイズを測定し反応誘導帯厚みと比例関係にあることを示し, その比例定数を求めた。セルは多くの場合 Fig. 2 のように規則的でなく, そのセルサイズと云っても一定ではない。実際の測定法は, 画面の中で 10 個以上のセルを任意に選び, ネガを拡大して, それらのサイズを測定し, 平均を取ると言うものである。Shepherd et al.¹⁴⁾はこの画像をデジタル化し, 2 次元の FFT により, セルサイズを算出すると言う方法を採用している。確かに, その方が主観を排除できるが, 実際はノイズの問題等もあり, 正確に求めるのは難しい。セルの不規則性は気体の種類に依存する。Strehlow¹⁵⁾は, アルゴンで大希釈した水素/酸素混合気体では比較的規則的なセルが得られること, また, 管を 2 次元にする, つまり, 断面の縦横比の大きな矩形管を用いると正確で美しいセルが得られることを示している。著者らは, アルゴンで希釈した水素/酸素系混合気体について先に述べた矩形管と円管を用いて管側面と管端面でのすす模様を調べた。管端面のすす模様を調べたのは三重衝撃波構造が三次元的にどのようなになっているかを調べるためである。Fig. 4 にその一例を示すが, 希釈無しあるいは窒

Fig. 4 Soot-Track Record on End Plate of Rectangular Channel (25 × 230 mm) by Argon Diluted Oxyhydrogen Mixture

素で希釈したものにくらべて規則的にはほぼ正方形のセルが並んでいる。各セルの周囲には長方形の縁取りのようなセルが囲んでいる。Fig. 3をセルの平面図とすれば、Fig. 4はセルの正面図である。立面図も平面図と同じ形であるから、三次元的な形状としてはFig. 5に示す（セルの半分を示す）ようにセルサイズを一辺とする正方形を底面とする四角錐とセルサイズを底辺とする二等辺三角形4面からなる四面体の組み合わせで構成されている。縁取りは四面体のセルによるものである。管断面が正方形でなく長方形であることにより完全に規則的に並ぶことができず、実際は歪んだ形になるがセルサイズが管の寸法に比べ十分大きければその効果は小さい。アルゴン希釈でないとセルの形は不規則になる。

混合気体により先頭衝撃波背後の温度、圧力が変化し、それによって着火機構が変化し、安定な着火をする場合と不安定な着火をする場合があるためと思われる。Fig. 6は、内径30mmの円管端面のすす模様である。この場合はアルゴンで希釈しても、不規則な形状のセルができる。Fig. 4とFig. 6は同条件の気体であり、平均的セルサイズは同一である。端面におけるすす模様は側面の場合と異なり瞬間的な衝撃波の位置を記録している。爆発したように白くすすが剥がされている部分は「三重線」が重なって真の三重点になった位置で強い爆発が起きた跡である。この爆発は端面で反射していることの影

Fig. 5 Schematics of Three-Dimensional Cells Pattern

Fig. 6 Soot-Track Record on End Plate of Circular Tube (30mm in dia.) by Argon Diluted Oxyhydrogen Mixture

響であり、伝ばの途中では起きないであろう。

数値シミュレーションでもすす模様を書くことができる。Taki & Fujiwara¹⁶⁾は、1次元ZND構造を人為的に乱すことにより2次元構造を持つ準定常デトネーションをMacCormack-FCT法を用いて、数値的に再現することに成功した。最近では、William et al.¹⁷⁾が3次元計算でFig. 5に示すような構造を計算している。計算ですす模様を再現するには、模様が三重点の軌跡であるという推定に基づき、また、三重点では圧力が非常に高くなることを利用し、各時刻で圧力がある閾値を超える点をプロットし、それを繋げていくことで作製することができる。Fig. 7にそのようにして書かれたすす模様の一例を示す。左端では一次元的な波面であったものが人為的な擾乱によって三重点が形成され鱗状の模様を形成してゆく様子がわかる。計算上の乱れによって若干セルの形が乱れている箇所もあるが概ね一定の大きさのセルが形成されていることが分かる。この計算では2段階反応モデルを用いているため気体の種類による規則性の変化は表現できない。適切な素反応システムと、熱化学物性値を用いた3次元計算であれば実験で明らかになったアルゴン希釈の規則的セル形成も再現できるであろう。

4. シュリーレン法

衝撃波や燃焼波を含み、密度の大きく変化する流れ場の可視化法としてシュリーレン法は現在でも有力な武器である。しかしながら、デトネーション波の三次元構造に関するシュリーレン写真はあまり使用されない。すなわちStrehlow²⁾などのような有力な教科書でさえ、デトネーション3次元構造のシュリーレン写真は掲載されていない。もちろん、Soloukhin¹⁸⁾の教科書にはスピンドトネーションのシュリーレン写真があり、正田・秋田¹⁹⁾の燃焼概論には東大正田研究室で撮影された波面先端部のシュリーレン写真が掲載されている。このように有名な写真が少ないというのは3次元構造はシュリーレン撮影に向いていない対象であるからであろう。まず、第一に速度が速く高速シャッターが要求される。デトネーション速度は典型的には $3\text{ km/s} = 3\text{ mm}/\mu\text{s}$ であり、 $1\mu\text{s}$ のシャッター速度でも3mm動いてしまう。ただし、これについては、100 nsのパルスレーザーを光源として使うとか、20万コマ以上のコマ速度の高速度カメラを用いるとかすれば何とかできる。実際、Urtiew & Op-

Fig. 7 Numerical Soot-Track Record

penheim²⁰⁾は、Q-スイッチルビーレーザーを高速カメラに同期させて、すばらしいシュリーレン写真を撮影している。ただし、彼等の対象は3次元構造ではなく、デトネーションの開始である。火炎から爆轟への遷移においては、先行する衝撃波、追従する火炎などシュリーレンにはお誂え向きの対象が存在し、それらの干渉により「爆発の中の爆発」あるいは「局所爆発」が発生するというドラマチックな現象を見るにはシュリーレン法が適切である。

デトネーションは速い現象というだけでなく3次元であることがシュリーレンには適さない。つまり、Fig. 2のような図は断面図であり、シュリーレンは投影図である。ただ、奥行きが十分うすい管を用いるかセル構造の規則的な混合気体で正方形断面の管を用いればまじな写真になるはずである。

Fig. 8は、先に述べた実験システムでイメージコンバタースカメラで撮影したものである。4コマの画像は間隔が $20\mu\text{s}$ で露光時間が $4\mu\text{s}$ である。ナイフエッジは鉛直方向に切っており、黒いほぼ鉛直な筋がデトネーション先頭波面であり、その後ろに水平に伸びるうすい線が反射波である。セルサイズは約3mm程度であり、反射波の数と対応がつく。マッハ軸や入射波などの構造は時間的にも空間的にも解像されていない。ただ、先頭波面全体の形状、位置は確定できるのでおおまかな動き、速度などはこの画像から読み取ることができる。この写真の混合気体は水素/酸素/アルゴン(2:1:6)からなり、セルは規則的であるがこの写真ではその区別はできない。

Fig. 9は、2次元の数値シミュレーションによる数値シュリーレン画像である。鉛直方向にナイフエッジを切ったことを想定し、水平方向の密度勾配をグレースケールで示したものである。Fig. 7のすず模様に対応した計算条件であり、8個のセルを作りながら伝播するデトネーション波を良く表している。

Fig. 8 Typical Schlieren Photographs of Detonation Wave in $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 6\text{Ar}$, 40 kPa (Interframe $20\mu\text{s}$, Exposure Time $4\mu\text{s}$)

Fig. 10に、アルゴンでより希釈した水素/酸素/アルゴン(2:1:24)の同様な写真を示す。この場合はセルサイズが管の高さより大きく、この管内では定常デトネーションが得られない。この画像は減衰中の衝撃波、燃焼波の複合波のものである。コマ間隔を $5\mu\text{s}$ 、露光時間を $1\mu\text{s}$ にしてあり、時間的解像度はFig. 8より4倍高くしてある。この画像では、曲率をもった先頭波と3重点らしきもの、後方に強い密度変化領域が見て取れる。

開始方法はデトネーションドライバーによる直接開始であり、ドライバーにより生じたオーバードリブンデトネーション(過大爆轟)が減衰して、衝撃波と燃焼波に乖離して行く様子を捉えたものである。やはり、波面構造は3次元であり、観察されるいくつかの波は紙面垂直方向にいくつか重なっている。

Fig. 11は、2次元の数値シミュレーションによる数値シュリーレン画像であり、衝撃波と反応波の関係を定性的ながら現象をよく再現している。

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14は、デフラグレーション(火炎)からデトネーションへの遷移過程(DDT過程)における典型的な現象を示している。まず、Fig. 12は、左端の点火プラグにより点火された直後の火炎であり、

Fig. 9 Numerical Schlieren Image of Two-Dimensional Detonation Wave

Fig. 10 Typical Schlieren Photographs of Detonation Wave in $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 24\text{Ar}$, 53.3 kPa (Interframe $5\mu\text{s}$, Exposure Time $1\mu\text{s}$)

Fig. 11 Numerical Schlieren Image of Two-Dimensional Decaying Shock-Flame Complex

Fig. 12 Typical Schlieren Photographs of Deflagration Wave in Argon-Diluted Oxyhydrogen Mixture (Interframe $20 \mu\text{s}$, Exposure Time $4 \mu\text{s}$)

弾頭型の層流火炎で伝ば速度も大変遅い。Fig. 13 は、加速した火炎が乱流火炎に移し、その前方にいくつかの衝撃波を発生しながら伝ばしている状態である。全体として毎秒数百メートルの速さで伝ばする高速乱流火炎である。Fig. 14 は、さらに加速し、衝撃波が強化され、乱流反応帯が衝撃波直後に形成され、局所的爆発 (localized explosion) によってデトネーション波が形成される瞬間の画像である。3 コマ目、4 コマ目は局所爆発で生じた後方伝ば衝撃波 (Retonation) が壁でマッハ反射しながら伝播する様子を示している。前述した Urtiew & Oppenheim²⁰⁾ はこの DDT 過程を非常に鮮明なシュリーレン写真で解明し、4 つのタイプ、すなわち、衝撃波面で局所爆発が起きてデトネーションにいたる場合、火炎面で局所爆発が起きる場合、衝撃波背後の接触面で起きる場合、衝撃波と火炎面の間で起きる場合に分類しているが Fig. 14 の場合は火炎が衝撃波に追い付いたと

Fig. 13 Typical Schlieren Photographs of Shock-Flame Complex in Argon-Diluted Oxyhydrogen Mixture (Interframe $20 \mu\text{s}$, Exposure Time $4 \mu\text{s}$)

Fig. 14 Typical Schlieren Photographs of Transition to Detonation in Argon-Diluted Oxyhydrogen Mixture (Interframe $20 \mu\text{s}$, Exposure Time $4 \mu\text{s}$)

ころで局所爆発を生じた例である。このほかにも、デトネーション波と障害物の干渉過程として、楔による反射、ステップ背後での回折、不均質デトネーションの例として、ダストデトネーション、液膜デトネーションの伝ば過程等をシュリーレン法により可視化しているがそれらについては各文献を参照願いたい。最近では、イメージコンバーター式カメラと同等以上の機能を有する CCD カメラが出現し、時間分解能、空間分解能の優れたシステムが構築できるようになっているのでより鮮明な画像を容易に得ることができると思われるが、今回紹介したシステムでも使い方によって十分現象を捉えられると思われる。

5. 最後に

高速燃焼現象であるデトネーションの可視化について、すす膜法、イメージコンバーターカメラを使用したシュ

リーレン法, および, 数値シミュレーションによる方法について, 得られた画像を示した. これらの方法は古典的なものであり, レーザーを利用した種々の方法を今後開発すべきであるが現在のところはレイリー散乱を用いた密度画像が得られている段階である. また, カメラ技術自体の発展も著しく, それらを利用してデトネーションという複雑現象をさらに解明されることが期待される.

最後に, 今回示した可視化画像は, 実験装置の製作や計測機器, カメラ等の保守管理を担当する埼玉大学工学部技術部, 吉橋照夫氏および実際に実験を遂行された多くの大学院生, 卒業研究生の努力の結果であることを記し, 深甚なる謝意を表する.

参考文献

- 1) Lewis, B., von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosion of Gases, 3rd Ed., Academic Press (1987).
- 2) Strehlow, R. A.: Combustion Fundamentals, McGraw-Hill, New York (1984).
- 3) 大八木重治, 矢島智, 小原哲郎, 吉橋照夫: デフラグレーション波からデトネーション波への遷移過程 (障害物の影響), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 59, No. 567 (1993) pp. 3552-3556.
- 4) Obara T., Yajima S., Yoshihashi T., Ohyagi S.: A high-speed photographic study of the transition from deflagration to detonation wave, Shock Waves, Vol. 6, Issue 4 (1996) pp. 205-210.
- 5) Ohyagi, S., Suzuki, S., Yoshihashi, T.: A study of the initiation process of dust layer detonation, Proc. 19th Int. Symp. on Shock Waves IV, edited by Brun (1993) pp. 477-482.
- 6) 渡辺真次, 小原哲郎, 吉橋照夫, 大八木重治: フィルムデトネーション波開始過程の可視化, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 63, No. 612 (1997) pp. 2700-2706.
- 7) 小林祐一, 吉橋照夫, 大八木重治: 気体デトネーション直接開始過程の可視化, 日本機械学会講演論文集, No. 940-30, Vol. II (1994) pp. 134-136.
- 8) Ohyagi, S., Obara, T., Yoshihashi, T., Nakata, F.: Reflection of detonation waves by wedge, Proc. 21st Int. Symp. on Shock Waves I, edited by Houwing (1997) pp. 331-336.
- 9) Ohyagi, S., Obara, T., Yoshihashi, T., Hoshi, S., Masaki, T.: Three-dimensional structure of detonations, Proc. 22nd Int. Symp. on Shock Waves I, edited by Hillier (1999) pp. 247-250.
- 10) Ohyagi, S., Obara, T., Nakata, F., Hoshi, S.: A numerical simulation of reflection processes of a detonation wave on a wedge, Shock Waves, Vol. 10, Issue 3 (2000) pp. 185-190.
- 11) 大八木重治, 星真太郎, 小原哲郎, 蔡品, 吉橋照夫: 気体デトネーションの構造とその反射・回折現象, 燃焼の科学と技術, Vol. 7 (2000) pp. 249-263.
- 12) Reichenbach, H.: 120 years of shock-wave visualization-a fascinating activity, Otto Laporte Lecture in Proc. 20th Int. Symp. on Shock Waves I, edited by Sturtevant (1995) pp. 17-29.
- 13) 大八木重治, 落合辰夫, 吉橋照夫, 針谷安男: 酸水素混合気のデトネーションセルサイズ, 誘導反応帯長さと臨界開始エネルギーの関係, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 54, No. 508 (1988) pp. 3559-3564.
- 14) Shepherd, J. E., Moen, I. O., Murray, S. B., Thibault, P. A.: Analyses of the cellular structure of detonations, Proc. 21st Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1986) pp. 1658-1694.
- 15) Strehlow, R. A.: Multi-dimensional Wave Structure, Astronautica Acta, Vol. 15 (1969) p. 346.
- 16) Taki, S., Fujiwara, T.: Numerical Simulation on Triple Shock Behavior of Gaseous Detonation, Proc. 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1982) pp. 1671-1681.
- 17) Williams, D. N., Bauwens, L., Oran, E. S.: Detailed Structure and Propagation of Three-dimensional Detonations, Proc. 26th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1996) pp. 2991-2998.
- 18) Soloukhin, R. I.: Shock Waves and Detonations in Gases, Mono Book Co. 1966.
- 19) 疋田強, 秋田一雄: 燃焼概論, コロナ社, 1961.
- 20) Urtiew, P. A., Oppenheim, A. K.: Experimental Observations of the Transition to Detonation in an Explosive Gas, Proc. Roy. Soc. London Ser. A, Vol. 295 (1966) pp. 13-28.

口絵1 デトネーション伝ば過程の数値シミュレーション密度画像

左から右へ伝ばする時系列データ，波面先頭をほぼ固定して窓の位置をずらして観察，青い部分は未反応部分(1)，一旦消えそうになるが下面からの爆発波(2)が上面に反射し，再びより強い爆発(3)を生じて，再びデトネーション構造をつくる過程(4)。

(口絵1 埼玉大学工学部 大八木 重治)

(本文 297 頁参照)