

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

デトネーション伝播時のセル模様に関する研究

A Study on Cellular Pattern in Detonation Propagation

石井 一洋^{1*}・森田 孝治¹・沖津 裕太¹・片岡 秀文²ISHII, Kazuhiro^{1*}, MORITA, Koji¹, OKITSU, Yuta¹, and KATAOKA, Hidefumi²¹ 横浜国立大学大学院工学研究院/工学府/工学部 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan² 釧路工業高等専門学校機械工学科 〒084-0916 釧路市大楽毛西 2-32-1
Kushiro National College of Technology, 2-32-1 Otanoshikenishi, Kushiro 084-0916, Japan

2011年4月8日受付; 2011年8月4日受理/Received 8 April, 2011; Accepted 4 August, 2011

Abstract : The present study aims to clarify the mechanism of cellular pattern formation on soot foil records in gaseous detonation propagation by applying other materials and to find alternative tools for visualization of the cellular structure. The experimental results show that the magnified images around the lighter soot track by SEM and EPMA well demonstrate local removal of soot deposit along the trajectory of the triple points. In addition, it is possible to obtain cellular patterns using CaCO₃ particles, fly ash, and heat sensitive paper, instead of soot particles coated on metal foils, while applying Al₂O₃ particles gives no characteristic pattern. The symmetrical cellular pattern with the soot foil record is shown for CaCO₃ particles and fly ash, which suggests that hydrodynamic effects are responsible for cellular pattern formation because of nonflammability of these particles. The quantitative estimation of shear stress and tensile strength of agglomerated particles explains the critical particle diameter required for particle detachment, although the shear stress is not strong enough for particle removal in cellular pattern formation. As for the heat sensitive paper, it is deduced that relatively large amount of heat is transferred to the paper near the trajectory of the triple points. The present results indicate that the soot foil technique is superior to the other methods in recording the cellular structure under wide variety of experimental conditions.

Key Words : Detonation, Cellular pattern, Soot foil record

1. 緒言

デトネーションが煤膜上を伝播した後は、セル模様と呼ばれる鱗状の模様が現れる[1-3]。このセル模様の大きさは、混合気や初期圧力に依存することからデトネーションの特性長として考えられており、煤膜法を用いて様々な条件でセルの大きさおよびデトネーションの伝播特性が調べられてきた。

煤膜法はその実験準備の容易さから気相デトネーションの研究では広く用いられており、また現状ではセルの大きさを計測する唯一の手段となっている。一方、煤膜上におけるセル模様の形成については、下記に挙げるように幾つかの説明が考えられている。

(1) 三重点背後の滑り線に沿う速度差によって発生する局所的な渦により、三重点の軌跡上の煤粒子が剥ぎ取ら

れ、セル模様が形成される[4,5]。

- (2) 煤粒子が剪断応力により移動して集積、離散することでセル模様が形成される[6,7]。
(3) 三重点の軌跡上で煤粒子が燃焼することでセル模様が形成される[8]。

上記の説明は、(1)、(2)の流体力学的要因によるもの、(3)の熱的要因によるもの、の二つに大別することができる。煤膜上のセル構造を構成する軌跡がどのような理由で描かれるかは、気相デトネーションのセル構造と直接に関係しており、その波面構造を考える上で重要となる。しかしながら、セル模様形成の説明を支持する実験的事実は十分ではないのが現状である。また、煤膜法以外にセル構造を簡便に記録する手段があれば、デトネーション波面構造に対して得られる有用な情報が増すことが期待される。

本研究の目的は、以上のような観点から、煤膜上のセル模様の形成機構について実験的に調べること、また煤膜法以外のセル構造記録方法を探ることとした。

* Corresponding author. E-mail: kazishii@ynu.ac.jp

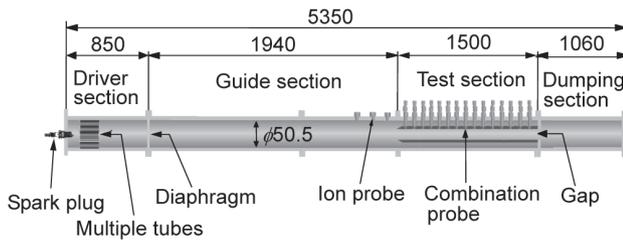


Fig.1 Experimental set-up.

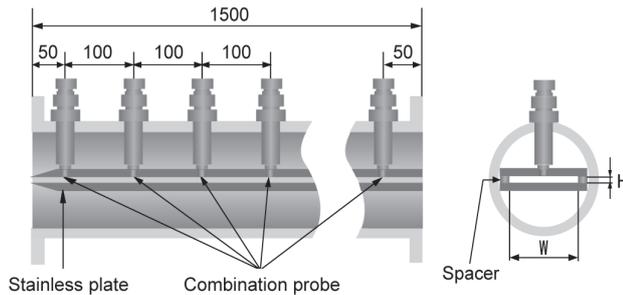


Fig.2 Schematic of test section.

2. 実験装置および実験方法

2.1. デトネーション管

実験に使用したデトネーション管の概略図を図1に示す。デトネーション管は内径が50.5 mm、全長が5350 mmであり、駆動部850 mm、導入部1940 mm、試験部1500 mm、ダンピング部1060 mmから構成されている。試験部の概略図を図2に示す。ステンレス製の2枚の板と真鍮製のスペーサーを組み合わせることで、高さ $H=3.0$ mm、幅 $W=40$ mmの矩形断面の間隙を構成し、試験部に挿入した。また間隙内では、イオンプローブと圧力プローブとを組み合わせたコンビネーションプローブ[9]を用いることで、一つの測定箇所では衝撃波面と反応面の到達を独立に検出することができる。

デトネーション管の駆動部と導入部以降とは予め隔膜で仕切られており、駆動部には初期圧力65 kPaの水素-酸素量論混合気を、導入部、試験部、ダンピング部には初期圧力39 kPaの水素-酸素-アルゴン量論混合気を試験気体として導入した。なお、アルゴンの希釈量は、0%、50%、60%、70%とした。この場合、駆動部で生じたデトネーションによって反応性の低い試験気体中でデトネーションが起動されるが、このデトネーションがオーバードリブン状態のまま試験部の間隙に射入する可能性がある。本研究では、試験部入口でのデトネーションの定常伝播を確認するために、導入部下流端のイオンプローブにてデトネーション伝播速度を求めるとともに、この部分に煤膜を設置してセルサイズを計測した。これらの値を定常伝播時のデータと比較し、すべての実験条件で、試験部入口には定常デトネーションが射入していることを確認した。また、狭い間隙内

でデトネーションを伝播させているために数%の速度欠損が生ずるものの、すべての実験条件で、デトネーションが間隙内を定常伝播していることを確認した。

2.2. セル模様の記録方法

本研究では、(1) 煤、(2) CaCO_3 粒子、(3) フライアッシュ、(4) Al_2O_3 粒子、(5) 感熱紙の5種類の媒体をセル模様の記録に用いた。これらの媒体は、試験部の間隙を構成するステンレス板の上面もしくは下面に付着もしくは接着させた。

(1) の煤の付着に際しては、市販の蝋燭の蝋を燃料とした拡散火炎を用いた。(2) の CaCO_3 粒子は、 CaCO_3 製チョーク(日本白墨工業、卵殻カルシウム10%配合)をすり鉢で細かく砕いたものを使用した。(3) のフライアッシュ(試験用ダスト10種)は、その成分が SiO_2 45%以上、 Al_2O_3 20%以上から構成されており、粒径は2~16 μm に分布しているものを用いた。(4) の Al_2O_3 粒子については、粒径1 μm 、10~20 μm 、50~75 μm の3種類を用意した。なお CaCO_3 粒子、フライアッシュ、 Al_2O_3 粒子を選定したのは不燃性であるためである。これらの微粒子の付着に際して、とくに接着剤等は使用せず重力沈降による自然付着とし、実験前にステンレス板をいったん裏返しにすることで、余剰な微粒子を取り除いた。(5) の感熱紙は市販のサーマルプリンター用のものを使用し、ステンレス板に貼り付けた。

2.3. 煤膜記録の解析方法

煤膜記録について、本研究では、レーザー顕微鏡(キーエンスVK-9700 GII)による煤堆積量の計測、X線マイクロアナライザー(EPMA)(日本電子JXA-8900R)を用いた元素分析、走査型電子顕微鏡(SEM)(キーエンスVE-8800)による反射電子像および二次電子像の撮影を行った。EPMAは、電子線が照射された試料から発生する特性X線を検出することにより、定量的な元素分析が可能である。SEMの反射電子像では、試料中の原子により発生する反射電子の量が違うことを利用し、試料の組成の違いを二次元的に表すことができる。またSEMの二次電子像では、試料表面の凹凸を立体的に把握することができる。なお、レーザー顕微鏡、EPMA、SEMによる測定では、間隙を構成するステンレスプレートの大きさの関係で直接計測ができないため、厚さ0.2 mmのアルミニウム小片に煤を付着させたものをステンレスプレートに固定してセル模様を取得した。

3. 実験結果

3.1. 煤膜記録

図3に、実験前の煤膜上の煤堆積量をレーザー顕微鏡にて測定した結果を示す。このとき、煤堆積量の有無による差違を明らかにするために、同図左部分はテープでマスクングすることで、煤が付着しないようにした。アルミニウム小片には表面粗さが存在するため、計測範囲内で最も深

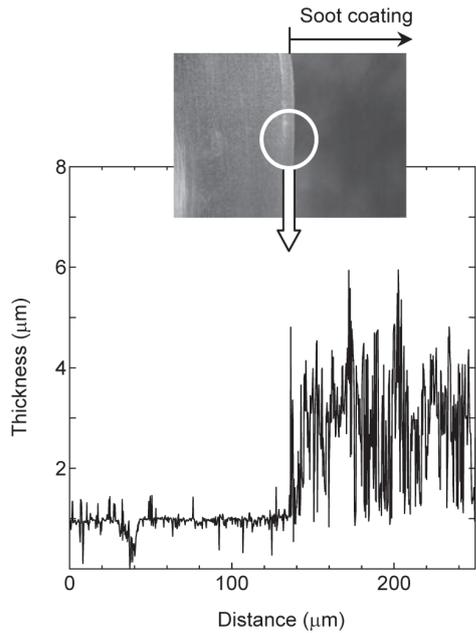


Fig.3 Thickness of soot layer measured by a laser microscope.

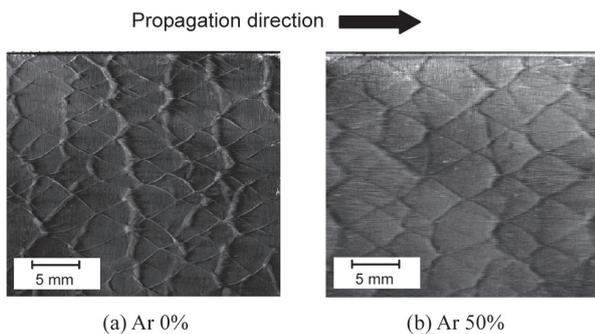


Fig.4 Soot track record. (a) Lighter track; (b) Darker track.

い部分を縦軸の厚さ原点とした。図 3 より, アルミニウム表面は概ね厚さ $1 \mu\text{m}$ に位置し, このときの煤の堆積量は約 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ であることがわかる。なお, 実験後に煤膜上のセルを構成する輪郭線付近を同様にレーザー顕微鏡にて計測しようと試みたが, 実験後は煤粒子が飛散して数 μm の堆積量は確保されず, 煤粒子が表面粗さの中に埋もれる場合もあり, 定量的な計測が困難であった。

図 4 にアルゴンの希釈率が 0% および 50% の煤膜模様の代表例を示す。アルゴン希釈率が 0% のとき, 多くの場合でセルの内部の領域に対してセルを構成する輪郭線が白く, アルゴン希釈率が 50% のときは黒く現れる傾向が見られた。またアルゴン希釈率 0% の場合, 白い線の下流側に, 線に沿うように黒い領域が現れる場合が見られた。このような煤膜記録の白い輪郭線の領域を EPMA により元素分析した結果を図 5 に示す。このとき, 特性 X 線は煤の主成分である炭素を対象にして検出を行った。一般に, 対象の元素の量が多いほど特性 X 線量が増すことから, 白い輪郭線の領域ではセルの内部に比べて, 炭素が少ないことが

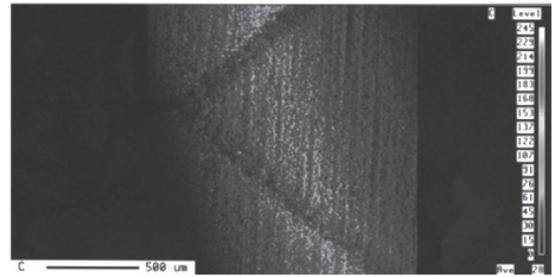


Fig.5 EPMA image of lighter track on soot foil.

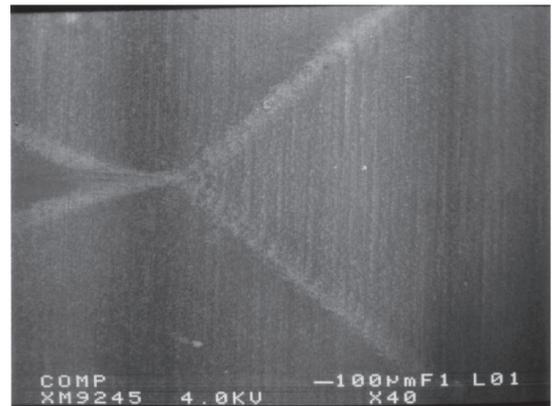


Fig.6 Back-scattered electron image of lighter track on soot foil.

わかる。

また図 6 に, 同じ領域を対象とした SEM の反射電子像を示す。同図では, セルを構成する輪郭線の部分では色が白くなっていることがわかる。SEM の反射電子は質量が重い元素ほど発生することから, 原子番号の大きい元素ほど画像上では白色に近くなる。白い線上では炭素が少ないことから, 図 6 では煤を付着させたアルミニウム小片の表面が露出し, アルミニウム原子から反射電子が生じたと考えられる。これらの結果より, 煤膜模様の白い線の領域では, デトネーションが伝播した後で煤が局所的に取り除かれたと考えられる。

図 7 に, 図 3 と同様に, 間隙を構成するステンレス板の一部をマスキングして煤を付着させ, デトネーションを伝播させた場合の煤膜記録の結果を示す。図 7(a), 図 7(b)ともにアルゴン希釈率 0% で同一の混合気条件である。また, 各写真の中心線から左側が煤を付着した部分, 右側はマスキングして煤を付着させなかった部分を表す。図 7(a) では, 煤を付着した部分とマスキングをした部分との境界が明確で, 下流方向 (左側から右側) への煤の飛散は見受けられない。なお, 右側のマスキング部分が黒いのは, 写真撮影時の照明の当て方によるもので, 実際にはステンレス特有の金属光沢がある。一方, 図 7(b) では, 黒い丸印で囲まれている部分で微量の煤が下流方向に流され, 右側のステンレス表面に飛散 (detachment) している。この相違は実験前の煤の堆積厚さの影響が大きいと考えられるが, 図 7(a) のように煤が飛散しない場合に, 明確な煤膜模様が形成されて

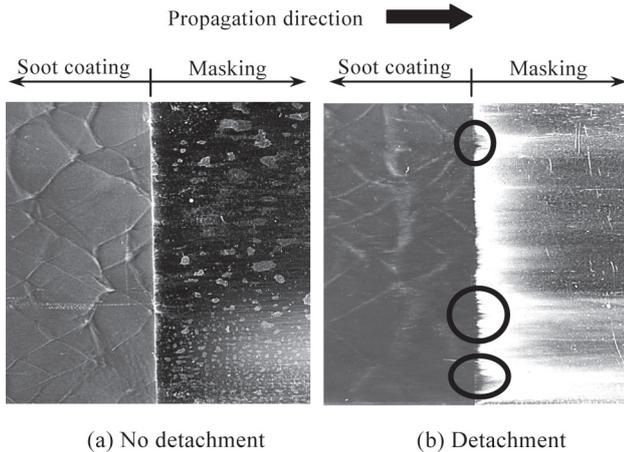


Fig.7 Soot track record for a mixture with no dilution of Ar. (a) No detachment of soot particles; (b) Detachment of soot particles indicated by solid black circles.

いることがわかる。

煤膜模様の形成については、煤粒子が剪断応力により移動して集積、離散することで形成されるとの説明がある[6,7]。この場合、煤粒子は下流に流されるとともに、煤膜記録上のセルを構成する輪郭線上では堆積量が周囲に比べて多いこととなる。しかしながら、図5に示すようにセルの輪郭線が白い煤膜記録では、輪郭線で煤堆積量が減少していること、また図7(a)に示されるように、煤粒子が移動していない場合でも煤膜模様が形成されている。これらのことから、剪断応力による煤粒子の移動があまり見られない場合でも煤膜模様が形成され得ると考えられる。また、白い輪郭線の下流側に黒い線が現れる場合においては、セルの内部の煤粒子の移動というわけではなく、白い輪郭線上で局所的に取り除かれた煤粒子が、すぐ下流に移動・堆積した可能性も考えられる。

3.2. 煤以外の微粒子によるセル模様

間隙を構成するステンレス板に、 CaCO_3 粒子、フライアッシュ、 Al_2O_3 粒子を付着させた場合の実験結果を図8に示す。この場合、微粒子はステンレス板の下面に付着させており、ステンレス板の上面には常に煤を付着させておくこ

とで、煤膜記録との対応を調べた。なお、ステンレス板の上下両面に煤を付着させた場合には、対称なセル模様[10]が得られることを事前に確認してある。

図8(a)では、煤膜記録ほど明確ではないが、セル模様特有の鱗状の模様が見られ、アルゴンの希釈率を変化させることにより、鱗模様の大きさが変化することが確認された。また、同じ実験にて取得した煤膜記録とは鱗模様が上下対称であった。これらのことから、 CaCO_3 粒子にて煤膜法と同様なセル模様が記録できることがわかる。図8(b)のフライアッシュを用いた場合では、目視ではかろうじて鱗模様が確認でき、また CaCO_3 粒子と同様に、煤膜記録との対称性からセル模様であることがわかった。しかしながら、目視においても光の当たり方加減で見え難くなることや、実験によってはセル構造が判別できない場合もあった。一方、図8(c)に示す Al_2O_3 粒子では、実験後に粒子自体は残存しているものの、粒径によらず鱗模様を確認することはできなかった。

3.3. 感熱紙によるセル模様

ステンレス板に感熱紙を固定した場合の実験結果を図9に示す。図9(a)では感熱紙全体が変色しており、とくにセル模様を見ることはできない。図9(b)は、図9(a)と同様に感熱紙全体にわたって薄い変色があるものの、セル模様のように鱗状に変色した跡が見られる。さらに図9(c)では、鱗状の変色模様が明確に確認できる。また、これらの模様の伝播方向に垂直な幅は、図9(b)では約10mmに対し、図9(c)では約16mmと、アルゴンの希釈率とともに大きさが変化している。同時に取得した煤膜記録とも対称性が得られることから、この感熱紙に現れる鱗状の模様はセル模様を示していると判断できる。なお本実験条件下では、すべての場合について変色の有無によらず感熱紙表面が燃焼することはなかった。

4. 考察

4.1. 粒子間付着力

図10に、セル模様を構成する白い輪郭線のSEM二次電子像を示す。白い輪郭線上では煤粒子が全く存在しないわ

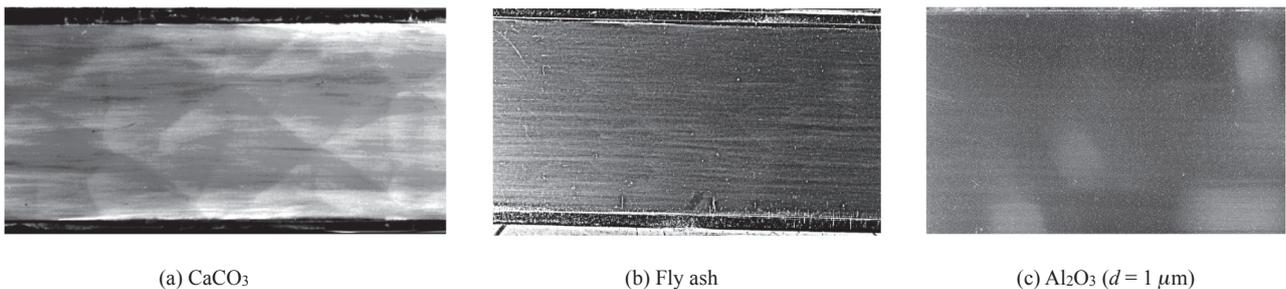


Fig.8 Images of cellular pattern after detonation propagation. No cellular pattern was obtained for Al_2O_3 particles.

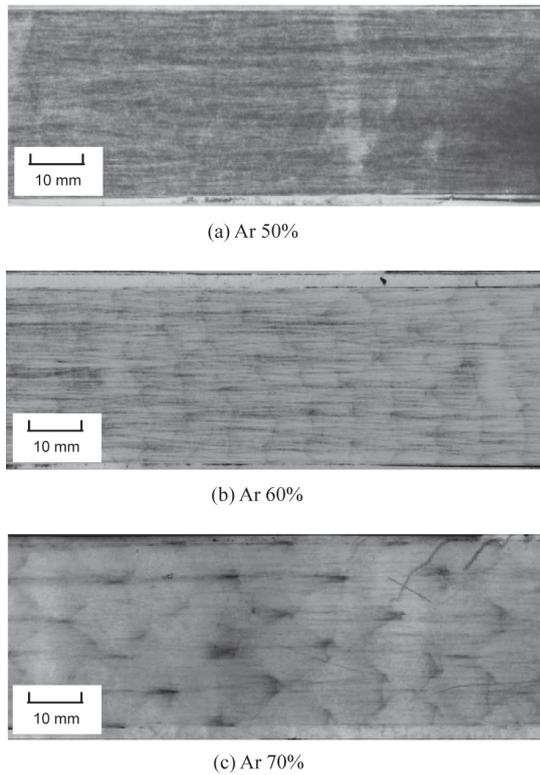


Fig.9 Images of heat sensitive paper after detonation propagation.

けではなく、ところによっては付着しており、煤粒子の相対的な数密度の相違によってセルの輪郭線が構成されていることがわかる。

前章において煤以外の微粒子を用いても同様なセル構造が得られることを示した。Terao ら[11]は、不燃性の CaO 粒子ではセル模様が現れなかったことから、煤膜記録では煤の燃焼によりセル模様が現れるとしている。しかしながら、本実験で用いた CaCO₃ およびフライアッシュも不燃性であり、この場合は流体力学的な効果によってセルを構成する輪郭線上の粒子が取り除かれていることとなる。また粒子の種類によりセル構造の見やすさが著しく異なることから、煤以外の微粒子を用いた場合、セル模様出現の有無は微粒子の付着力に大きく影響されると考えられる。

煤粒子の流れによる飛散は、壁面に付着した微粒子の再飛散現象[12-15]として取り扱うことができる。ここで、微粒子間の付着力は、主としてファンデルワールス力、液架橋力、静電気力であるが、液架橋力は湿度が 50%~60% 以下では付着力の要因とはならない[13,14]。また、静電気力よりファンデルワールス力の方が大きいとして取り扱われることが多い[16]ことから、本節では煤粒子間の付着力としてファンデルワールス力について検討を行う。球形粒子のファンデルワールス力 F_v は、ハマーカー定数を A 、接触部位における粒子の表面間距離を h とすると、次式で与えられる[16]。

$$F_v = -\frac{Ad}{12h^2} \quad (1)$$

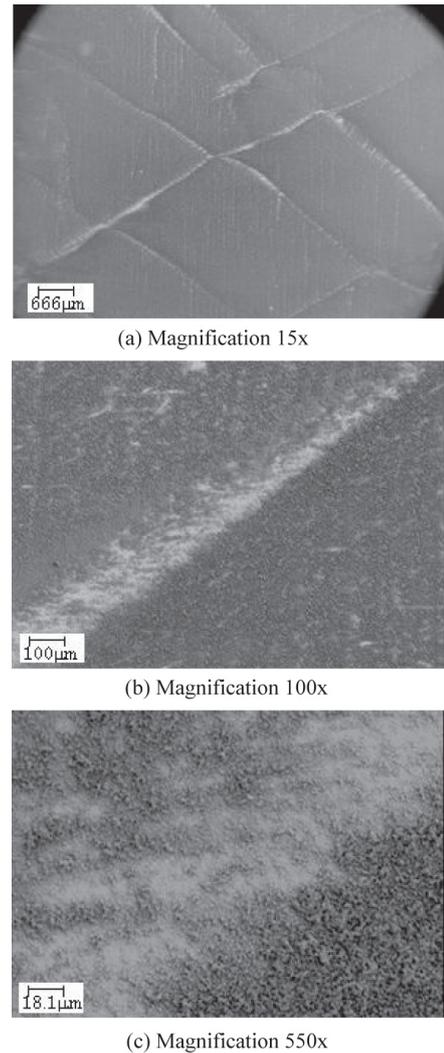


Fig.10 Secondary electron images of lighter track on soot foil.

ここで d は換算直径であり、直径 D_p の等径 2 球では $d = 1/2 D_p$ となる。また、ハマーカー定数はグラファイトの値 $A = 47.0 \times 10^{-20} \text{ J}$ [17]を用いた。なお、煤粒子は粒径が数 10 nm の一次粒子が多数凝集して形成されている。このような凝集粒子の付着強度は、近似的には Rumpf による粉体層引張破断強度 σ_p の推定式[18]で求めることができる。

$$\sigma_p = \frac{(1-\varepsilon)kF_v}{\pi D_p^2} \quad (2)$$

ここで ε は空隙率、 k は配位数であり、球形粒子のランダム充填における平均粒子配位数の結果[19]から、本研究では $k = 6$ とした。また ε と k の関係については、次の Ridgway-Tarback の実験式[20]を用いた。

$$\varepsilon = 1.072 - 0.1193k + 0.00431k^2 \quad (3)$$

以上の (1)~(3) 式から凝集粒子の付着強度を見積もることができるが、(1) 式の h の値を厳密に求めることは困難

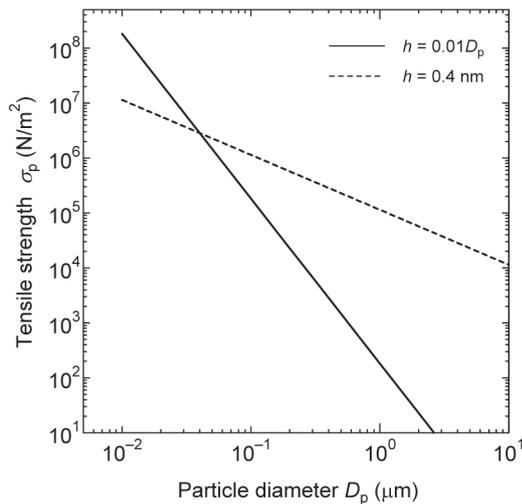


Fig. 11 Effects of particle diameter on tensile strength.

である。球形粒子同士の場合には、一般に Born の斥力を考慮して $h = 0.4 \text{ nm}$ を用いることが多い[14]ものの、凝集粒子の場合にこの値が妥当である保証はない。ここで増田らは、粒子径 $1.83 \mu\text{m}$ のフライアッシュの粉体層引張り破断強さの測定値から、 $h = 0.018 \mu\text{m}$ としており[12]、この値は D_p の 1% となっている。そこで、 $h = 0.01D_p$ と $h = 0.4 \text{ nm}$ との両方の場合について σ_p を求めた結果を図 11 に示す。

4.2. 流れによる剪断応力

壁面に付着した微粒子は、流れによる剪断応力によって除去されると考え、摩擦係数を C_f 、流体の密度を ρ 、速度を u とすると、壁面での剪断応力 τ_w は

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4)$$

となる。ここで、摩擦係数は

$$C_f = 0.664 \text{Re}^{-1/2} \quad (5)$$

で与えた[21]。また、このときの境界層の排除厚さ δ は

$$\delta = 1.7208 \sqrt{\nu L / u} \quad (6)$$

より見積もった[21]。なお、 ν は動粘性係数とし、 Re の代表長さ L は、4.3 節で述べるように、各条件におけるセル長さの半分とした。以上より、他の物理量は CJ 状態の値を用いて、アルゴン希釈率 50%、60%、70% に対して求めた τ_w 、 δ を表 1 に示す。図 11 の粉体層引張り破断強度 σ_p と表 1 の剪断応力 τ_w を対比させると、粒子の表面間距離 $h = 0.4 \text{ nm}$ の場合には、粒径が $10 \mu\text{m}$ の場合でも流れによる剪断応力では粒子を除去することはできない。これは 3.2 節の結果とは矛盾し、 $h = 0.4 \text{ nm}$ の仮定は本研究では妥当

Table 1 Estimated shear stress τ_w and displacement thickness δ .

Mixture	τ_w (N/m ²)	δ (m)
Ar 50%	1.5E+03	3.2E-05
Ar 60%	1.2E+03	3.8E-05
Ar 70%	8.1E+02	4.9E-05

ではないと考えられる。一方、 $h = 0.01D_p$ とした場合には、粒径がおおよそ $D_p > 0.5 \mu\text{m}$ であれば、 $\sigma_p < \tau_w$ となり、流れによって凝集粒子が飛散することとなる。これは、3.2 節で述べたように、粒径によらず Al_2O_3 粒子がすべて飛散したことと対応する。また、セル模様を構成する線以外の場所にある煤粒子も、実験後には飛散している事実も説明できる。一方、図 8 に示すように、 CaCO_3 粒子ではセル模様の記録に成功し、フライアッシュでも煤膜と比べて不明瞭ではあるが、セル模様が確認できる。これら粒子種類の違いによる煤膜模様の有無は、もちろん粒子付着力の差によるものではあるが、その原因は粒径分布が異なるためである可能性が高い。一般に、煤粒子は $5 \text{ nm} \sim 50 \text{ nm}$ の粒径の一次粒子と、それらが凝集した $0.1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 程度の粒子群から構成されており、質量分布では $0.1 \mu\text{m} \sim 0.3 \mu\text{m}$ にピークがあるが、粒子数分布では数 10 nm にピークがある[22]。したがって、煤膜では、比較的大きな粒子の間に微小粒子がバインダーのように付着していると考えられる。このため、煤粒子は他の粒子と比較して飛散しにくい。 CaCO_3 粒子の粒径分布は計測できていないものの、煤粒子に次いで飛散しにくい結果となったことから、 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子が多数存在していると思われる。

しかしながら粉体層引張り破断強度と剪断応力との比較は、流れによる粒子の飛散現象の説明であり、セル模様の形成を説明してはいない。図 10 に示されるように、セル模様を構成する白い輪郭線の部分では、金属表面が露出する程に煤粒子が飛散しており、それ以外の部分では煤粒子層は金属表面に残存している。ここで、(2) 式で求められる σ_p はあくまで粉体層間での引張り破断強度であり、金属表面と凝集粒子間の付着力は、粉体層引張り破断強度を上回ることを意味している。それにも関わらず、セル模様を構成する線の部分で煤粒子が飛散していることは、単純に流れによる剪断応力だけでは説明がつかない。

ところで、粉体層から突出した粒子に関して、粒子に作用する流体力に起因する曲げ応力は、粉体層引張り破断強度の数倍以上となるという報告[12]がある。衝撃波三重点背後には滑り線に沿って速度差が存在することから、流れによる剪断応力だけでなく、速度剪断場による曲げ応力が煤粒子に加わることで、三重点軌跡部分の煤粒子が飛散する可能性がある。なお、本研究での粒子径は、図 3 の煤堆積量の凹凸および図 10(c) から $1 \mu\text{m}$ の程度であり、表 1 に示す境界層の排除厚さの中に埋もれてしまう。滑り線に沿う速度剪断による曲げ応力が、煤粒子に効果的に働くのは境

界層が薄い場合であり, デトネーション波面通過から距離が離れるほど, 境界層が発達して厚くなり, 同時に滑り線に沿う速度差も粘性により小さくなっていく。また, デトネーションの伝播につれて滑り線自体も移動してゆくの, 滑り線に沿う粒子の飛散に時間がかかるとすると, セル模様を構成する白い輪郭線の中が広がり, セルの形がぼけてくることとなる。以上から, セル模様を構成する白い輪郭線での粒子飛散は, デトネーション波面通過直後から生ずると考えるのが妥当と思われる。ただし, この検証には, デトネーション波面通過後の煤膜形成過程を何らかの手段で可視化し, 煤粒子の飛散タイミングを求める必要がある。また, セル模様を構成する白い輪郭線の外側に黒い輪郭線が存在する場合もあることから, 衝撃波三重点の構造と煤膜形成を併せて検討する必要がある。

4.3. 感熱紙上のセル模様形成

感熱紙を用いてもセル模様を記録することに成功したが, 感熱紙は基紙の上にロイコ染料, 顕色剤などの発色層を塗布してあり, 加熱によって熔融状態となり, ロイコ染料と顕色剤とが接触することで発色する仕組みとなっている[23]。この場合, 明らかにセル模様は熱的影響で出現しており, アルゴン希釈率による発色の相違は, 燃焼ガスから感熱紙への伝熱量の相違に対応することとなる。そこで, 燃焼ガスから壁面への熱伝達率を見積もることとする。St をスタントン数, Pr をプラントル数, Re をレイノルズ数とすると, 高速気流の熱伝達に対して次の関係が成り立つ[24]。

$$\text{St Pr}^{2/3} = 0.332 \text{Re}^{-1/2} \quad (7)$$

なお, 図9に見られるようなセル模様は, デトネーション波面から比較的近距离にある気体からの熱伝達量の差によって生ずると考えられる。そこで, レイノルズ数を算出するときの代表長さは, 各条件におけるセル長さの半分とした。(7)式とCJ状態での状態量を用いて熱伝達率を概算した結果を表2に示す。これより, アルゴンの希釈率が増すにつれて熱伝達率は小さくなるのがわかる。実際には, デトネーション波面には衝撃波三重点があるために, 波面背後は一樣な温度分布ではないが, 図9(a)で感熱紙全体が変色しているのは, デトネーション波面背後の全域で高い熱伝達率のために伝熱量が変色閾値を越えているためと考えられる。また, 図9(c)に関しては, 他の条件よりも熱伝達率が低いため, 局所的に高温となる衝撃波三重点近傍からの伝熱量のみが変色閾値を越えたと考えられる。

以上のことから, 煤膜記録におけるセル模様形成機構について整理すると, 不燃性の微粒子を用いてもセル模様が形成されること, また衝撃波三重点近傍は高温であるものの感熱紙表面を燃焼させてはいないことから, 煤粒子の燃焼によるものとは想定しがたい。また, 4.2節で考察したように, 滑り線上の速度剪断場による曲げ応力が働くと,

Table 2 Estimated Reynolds number Re and heat transfer coefficient h .

Mixture	Re	h (W/m ² K)
Ar 50%	1.8E+04	1.9E+03
Ar 60%	2.6E+04	1.4E+03
Ar 70%	4.5E+04	9.6E+02

煤粒子の飛散はデトネーション波面通過直後から開始するため, この場合伝熱時間は短く, 煤粒子は煤膜上で燃焼する以前に飛散すると考えられる。

4.4. セル模様記録媒体

本研究では, セル模様の記録に煤粒子, CaCO₃ 粒子, フライアッシュ, Al₂O₃ 粒子, 感熱紙の5種類の媒体を用いた。煤粒子は幅広い実験条件に対応して明確な記録が可能という点で, 現状ではセル模様の記録に最も適している。CaCO₃ 粒子およびフライアッシュは, セル模様の記録は可能であるものの, 煤粒子と比較すると模様は明確でなかった。また Al₂O₃ 粒子はデトネーション通過により飛散してしまい, セル模様の記録はできなかった。ここで, 主な固体物質のハマーカー定数は 10×10^{-20} J ~ 50×10^{-20} J であり, Al₂O₃ 粒子のハマーカー定数は 15.5×10^{-20} J とグラファイトの約 1/3 の値であり[17], 煤粒子と同程度の粒子径であったならば, 十分にセル模様記録が可能と思われる。したがってセル模様の記録の可否は, 物質の種類による相違というよりは, 使用する粒子の粒径に大きく依存し, 0.1 μm ~ 0.3 μm にピークを持つような粒径分布の粒子が用意できれば, 煤粒子と同程度のセル模様記録が可能と考えられる。

また, セル模様は感熱紙を用いても記録可能であるが, 混合気条件と感熱紙の変色閾値が合致しないと, デトネーション通過により感熱紙全体が変色してセル模様が観測できない。図9に示されるように, 同一初期圧力でもアルゴン希釈率の相違によりセル模様の記録の可否が分かれ, 感熱紙はその適用可能条件が狭いと言える。

5. 結言

煤粒子ならびに CaCO₃ 粒子, フライアッシュ, Al₂O₃ 粒子, 感熱紙を用いてデトネーションの伝播時のセル模様について実験的に調べ, その形成機構について考察を行った。その結果, 以下の知見が得られた。

1. 煤膜上でセル模様を構成する白い輪郭線の部分は, 局所的に煤粒子が取り除かれている。
2. 煤粒子以外の CaCO₃ 粒子, フライアッシュ, 感熱紙を用いることでもセル模様を記録することできる。
3. 幅広い実験条件に対応して明確な記録が可能という点で, 煤粒子の使用がセル模様の記録に最も適している。
4. 粉体層引張破断強度と流れによる剪断応力との比較より, 粒子の飛散条件を示すことができるが, セル模様を

構成する白い輪郭線における粒子飛散は、流れの剪断応力だけでは説明できない。

5. 感熱紙上のセル模様は、衝撃波三重点近傍からの伝熱量が他の領域よりも多いために形成されるが、混合気条件と感熱紙の変色閾値が合致しないとセル模様の記録が難しい。

謝辞

本研究の実施にあたり、横浜国立大学機器分析 評価センターの御助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

References

- Shchelkin K.I., Troshin, Ya. K., *Gas dynamics of combustion*, Mono Book Corp., pp. 30-36 (1965).
- Strehlow, R. A., *Combust. Flame*, 12: 81-101 (1968).
- Lee J. H. S., Soloukhin, R. I., Oppenheim, A. K., *Astronautica Acta*, 14: 565-584 (1969).
- Krehl, P., Geest, van der M., *Shock Waves* 1: 3-15 (1991).
- Lee, J. H. S., *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press, pp. 159-160 (2008).
- Lam, A. K. W., Inaba, K., Pintgen, F., Wintenberger, E., Ausutin, J., Matsuo, A., Shepherd, J. E., *Proc. 19th ICDERS*, Paper No. 81. (2003).
- Inaba, K., Shepherd, J. E., Yamamoto, M., Matsuo, A., *Proc. 21st ICDERS*, Paper No. 162 (2007).
- Terao, K., Azumatei, T., *J. J. Appl. Phys.* 28: 723-728 (1989).
- Ishii, K., Grönig, H., *Shock Waves* 8: 55-61 (1998).
- Ishii, K., Shimizu, Y., Tsuboi, T., Weber, M., Olivier, H., Grönig, H., *Chemical Physics Reports* 6: 28-33 (2001).
- Terao, K., *Irreversible Phenomena*, Springer, pp. 249-250 (1991).
- Masuda, H., Matsusaka, S., Ikumi, S., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 11: 48-53 (1985).
- Kanaoka, C., Emi, H., Kikukawa, N., Myojo, T., *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 24: 233-239 (1987).
- Matsusaka, S., Masuda, H., *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 29: 530-538 (1992).
- Masuda, H., Gotoh, K., Fukada, H., Banba, Y., *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 30: 24-31 (1993).
- Israelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces* (in Japanese), 2nd ed., Asakura Shyoten, p. 174 (1996).
- The Society of Powder Technology, Japan ed., *Huntainokisobussei* (in Japanese), Nihon Kogyo Shinbunshya, p. 228 (2005).
- Rumpf, H., *Chemie Ing. Techn.*, 42: 538-540 (1970).
- Bennett, C. H., *J. Appl. Phys.*, 43: 2727-2734 (1972).
- Ridgway, K., Tarbuck, K. J., *Brit. Chem. Eng.*, 12: 384-388 (1967).
- Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill Book Company, pp. 138-141 (1979).
- Kittelson, D. B., *J. Aerosol Sci.*, 29: 575-588 (1998).
- The Chemical Society of Japan ed., *Kagakubinran Oyokagakuhen* (in Japanese), 6th ed., pp. 1291-1292 (2003).
- Holman, J. P., *Heat Transfer, Eighth Edition*, pp. 264- 268, McGraw-Hill (1997).