

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

炭化水素を添加したアセチレン-空気混合気のデトネーション特性  
Detonation Properties of Acetylene-Air Mixtures with Additive of Hydrocarbon石井 一洋<sup>1\*</sup>・秋吉 剛典<sup>1</sup>・高田 知洋<sup>1</sup>・村山 元英<sup>2</sup>ISHII, Kazuhiro<sup>1\*</sup>, AKIYOSHI, Takenori<sup>1</sup>, TAKADA, Tomohiro<sup>1</sup>, and MURAYAMA, Motohide<sup>2</sup><sup>1</sup> 横浜国立大学大学院工学研究院/工学府 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷常盤台 79-5  
Yokohama National University, 79-5 Tokida-dai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan<sup>2</sup> 石川島播磨重工業株式会社航空宇宙事業本部 〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷 229  
Ishikawajima-Harima Heavy Industry, 229 Tonogaya, Mizuho-machi, Nishitama-gun, Tokyo 190-1297, Japan

2007年11月17日受付; 2008年2月20日受理/Received 17 November, 2007; Accepted 20 February, 2008

**Abstract** : Deflagration-to-detonation transition (DDT) of methane-acetylene-air and propane-acetylene-air mixtures was experimentally studied to extend availability of pulse detonation engines using liquid fuels. The detonation tube has a total length of 7194 mm and an inner diameter of 50 mm. Volumetric percentage of acetylene in the mixed fuels ranged from 0 % to 100 % under the condition that total equivalence ratio was kept constant of 1.0. The experimental results show that increase in volumetric percentage of acetylene causes faster flame acceleration and earlier detonation transition. DDT was observed for the methane-based mixtures containing acetylene of more than 50 % in fuel and for the propane-based mixtures with acetylene of more than 20 %. Cell size of methane-acetylene-air mixtures and propane-acetylene-air mixtures increased with decrease in volumetric percentage of acetylene in the mixed fuel. Cell size of methane-acetylene-air mixtures was found to be proportional to the calculated reaction induction length in the case that volumetric percentage of acetylene was more than 60 %, whereas the ratio of the calculated reaction induction length to the cell size was dependent on volumetric percentage of acetylene for propane-acetylene-air mixtures.

**Key Words** : Detonation, Mixed Fuel, DDT, Cell Size

## 1. 緒言

高効率かつシンプルなエンジンとして注目されているパルスデトネーション・エンジン (PDE) の航空機用エンジン適用を検討する上では、燃料貯蔵スペースを小さくするために液体燃料の使用が望ましい。とくに航空燃料である Jet-A と空気の混合気に関するデトネーション特性[1,2]および点火特性[3,4]は近年精力的に調べられている。しかしながら、混合気自体のデトネーションへのなり難さから、酸素を使用したプリデトネータ[5,6]もしくは強力な点火源[7]が必須となっているのが現状である。

アセチレンは炭化水素系燃料の中で最もデトネーションへの遷移が容易なものの一つであり、アセトンなどの有機溶媒に可溶性を有する。したがってアセチレン溶解燃料は、プリデトネータ等を使用することなく PDE メインチューブ内でデフラグレーションからデトネーションへの

遷移 (以後 DDT) が可能な液体燃料の有力候補と考えられる。

この場合、PDE メインチューブ内では液体のアセチレン溶解燃料を噴霧することとなるが、加圧により溶解していたアセチレンは速やかに気化する。また、アセトンなどの比較的蒸気圧の高い溶解燃料を用いることで、アセチレンと有機溶媒ガスの混合燃料と空気との混合気形成される。混合燃料のデトネーション特性については、メタン-空気混合気のエタンを添加した場合の直接起爆に必要な爆薬量を調べた結果、燃料中のエタン体積割合が 10 % 以上となるとデトネーションへのなり易さが大きく変化することがわかっている[8]。一方、プロパン-プロペン混合燃料のデトネーションへのなり易さはプロパンとほぼ同じであると報告されている[9]。水素-炭化水素混合燃料に関しては、デトネーション速度は CJ 速度と良く一致し[10]、メタンに少量のブタンを添加することでデトネーション遷移時間が短縮されることがわかっている[11]。近年は混合燃料の PDE 適用を目的として水素-炭化水素混合燃料のデト

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

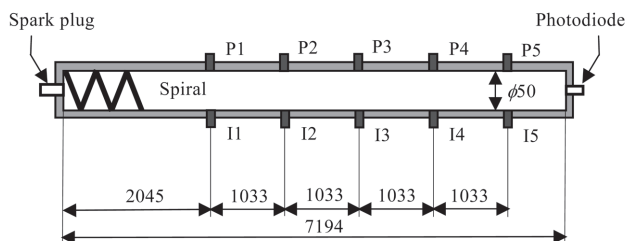


Fig.1 Schematic of detonation tube. P and I denote pressure and ion probe, respectively. Dimensions in mm.

ネーション特性に関する研究が行なわれている[12].

本研究では, アセチレン溶解燃料の DDT 研究の手始めとして, 通常はデトネーション起動が困難とされる炭化水素燃料を有機溶媒にみため, アセチレンとの混合割合を変えることによりデトネーションへの遷移特性およびセルサイズがどのように変化するか実験的に調べた.

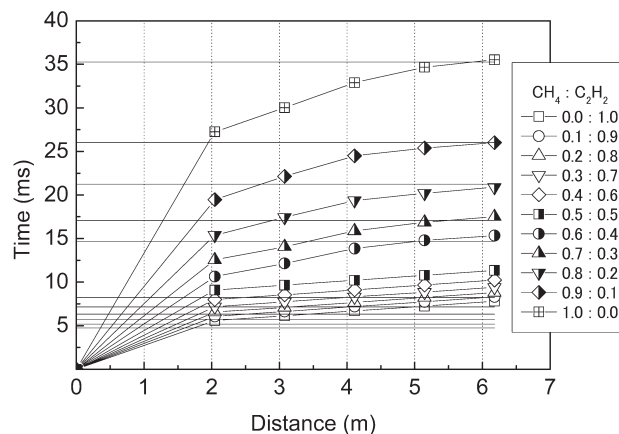
## 2. 実験装置および方法

### 2.1. デトネーション管

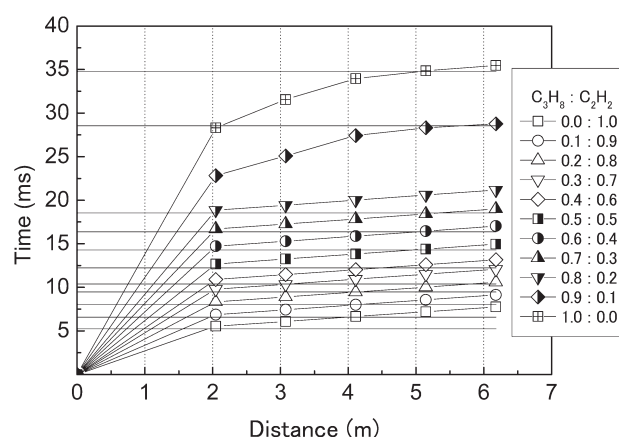
本研究で使用したデトネーション管は, 図 1 に示すように全長 7194 mm, 直径 50 mm のステンレス管である. 衝撃波面および反応面の挙動を個別に捉えるために, 圧カプローブおよびイオンプローブを管端より 2045 mm の位置から 1033 mm おき 5 箇所を設置した. これらのプローブは 60 度の挟み角で同一断面に配置した. 圧カプローブの上流側 3 箇所は PCB 社製の汎用圧力変換器 HM113A24 を用いた. 下流側 2 箇所にはピエゾ・セラミックディスクを基にした圧カプローブを用い, 圧力波到達のみの検知を行った. イオンプローブは, 設置による擾乱を減らすために同心円タイプの電極を有するものを使用した. また, デフラグレーションからデトネーションへの遷移過程における自発光信号[13,14]を得るために, 下流管端にはフォトダイオードを設置した. さらに混合燃料のセルサイズについて調べるために, 管端から 6000~6600 mm の区間にすずを塗布した厚さ 0.3 mm のアルミニウム板を挿入した.

混合気の供給に関しては, アセチレンはマスフローコントローラにて流量制御し, 他のガスについてはニードルバルブにてチョークさせて流量がニードルバルブ上流圧のみに依存するようにした. これらのガスはあらかじめ真空中に排気したデトネーション管内に, 内径約 4 mm, 長さが約 7 m の配管を通して拡散混合させながら, 一定流量にて約 15 分の時間をかけて管内圧力が 100 kPa となるまで充填した.

混合気の点火は, 管端フランジに設けた自動車用点火プラグにより 1 次電流遮断型の点火回路を用いて行った. さらに DDT 促進のため, 長さ 1500 mm, ピッチ 45 mm, ブロッキング比 0.44 [15]のシェルキンスパイラルを点火側管端から 16 mm の位置に挿入した.



(a)  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$



(b)  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$

Fig.2  $x-t$  diagram of flame front for  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures.

### 2.2. 実験条件

本実験では,  $\text{CH}_4\text{-Air}$  混合気,  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air}$  混合気をベースとして添加するアセチレンの割合を変化させた. 燃料全体に含まれるアセチレン体積割合は 0% から 100% まで 10% ずつ増加させた. このとき混合気全体の当量比は 1.0 で一定とした. 実験に際しては, 初期温度, 初期圧力はそれぞれ室温, 100 kPa とした. 実験は各条件あたり 4 回ずつ行い, その平均値を用いて評価した.

## 3. 実験結果

### 3.1. 火炎面の挙動

図 2 にイオンプローブ信号から求めた火炎面の  $x-t$  ダイアグラムを示す. 同図において縦軸は管端における火花放電開始からの時間経過を意味し, 図中の水平線は, 各条件におけるフォトダイオード出力信号の立ち上がりの時刻を表している. アセチレン体積割合が  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気で 50% 以上,  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気では 20% 以上の条件で, 管端から 2 m 以降は火炎面軌跡が直線的である. これはデ

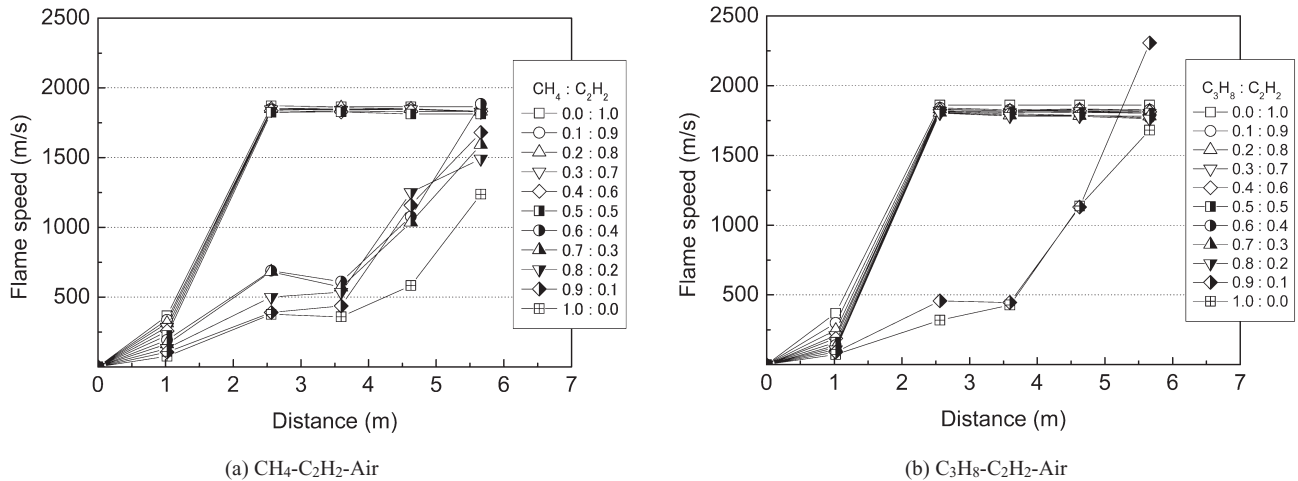


Fig.3 Flame speed with various acetylene concentration for  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures.

トネーションが定常伝播しており、DDT はそれ以前に生じたことを示唆している。デトネーション遷移時には火炎面からの自発光量が急激に増大する[13,14]ことから、フォトダイオードの立ち上がり時刻がデトネーション遷移を示していると考えられる。火炎面軌跡とフォトダイオード出力信号の立ち上がり時刻との交点から、この場合の DDT 距離は 1.7 m~1.9 m と見積もられる。しかしながら管端から 2 m までは火炎の加速過程とデトネーション伝播過程の両者が含まれる。したがって、図 2 における火炎面軌跡は実際には上に凸の曲線となり、これを直線近似して求めると DDT 距離を過大評価することとなる。本研究では DDT 距離を正確に特定することはできないが、シェルキンスパイラルの長さが 1500 mm であることから、デトネーション遷移はシェルキンスパイラルの出口近傍で起こったと言える。

また図 2 では、アセチレン体積割合が多いほどデトネーション遷移時刻が早くなっており、これはアセチレンとメタンおよびプロパンの燃焼速度およびデトネーションへのなり易さの差異に起因するものと考えられる。一方アセチレン体積割合が  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気で 40 % 以下、 $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気では 10 % 以下の条件で、フォトダイオード出力の立ち上がり時刻において、火炎面は管端から 5 m ~ 6 m にあることがわかる。

図 3 に火炎速度の履歴を示す。前述しているが、アセチレン体積割合が  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気で 50 % 以上、 $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気では 20 % 以上の条件で、管端から 2 m 以降では定常なデトネーションが得られていることがわかる。AISTJAN [16]により求めた初期温度 293 K、初期圧力 101 kPa における CJ 速度は、 $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気で 1802 ~ 1865 m/s、 $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気で 1799 ~ 1865 m/s の範囲にあり、いずれもアセチレン体積割合が増えるにつれて CJ 速度は単調に増加する傾向を示した。デトネーション速度の実験値は CJ 速度とは最大  $\pm 1\%$  の範囲で一致し、アセチレン体積割合の増加とともにデトネーション速度が増加

することも確認された。また図 3(a) においてアセチレン体積割合が 40 % 以下の場合、管端から約 2.5 m の位置から火炎速度が一時的に減速もしくは停滞している。管端から約 3.6 m における火炎速度は 500 m/s 程度であり、それ以降で再び加速している。これは本研究で用いたシェルキンスパイラルの長さが 1500 mm であり、火炎がスパイラルを抜けたことにより火炎の乱れが弱まり、乱流燃焼速度が一時的に低下したためと思われる。しかしながらアセチレン体積割合が 40 % の場合には、最終的な速度はほぼ CJ 速度を示していることから、デトネーションに遷移していると考えられる。アセチレン体積割合 30 % 以下の場合には、管端から 5.7 m においても CJ 速度には至らず、火炎速度からはデトネーション遷移を確認できない。

図 3(b) の  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  の場合、アセチレン体積割合 10 % で前述の火炎速度の停滞が確認されるが、管端から 5.6 m の位置では速度は 2300 m/s に達し、強いオーバードリブン状態であることがわかる。アセチレン体積割合 0 %、すなわち  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air}$  量論混合気では最終的な火炎速度は 1680 m/s であり、確実にデトネーションに遷移したとは言い難い。

### 3.2. 先行衝撃波面の挙動

図 4 は圧力プローブ信号から求めた先行衝撃波の速度履歴を示す。同図では管端から約 2.5 m 以降しか速度をプロットしていない。本研究では管端から 2045 mm の位置に一番目の圧力プローブを設置しているが、火花放電からこのプローブが圧力波を検出するまでの時間を用いて単純に平均速度を算出すると、条件によっては音速を下回ることもあった。先行衝撃波は点火直後から形成されるわけではなく、火炎伝播が進行し、既燃ガスの膨張により生ずる圧縮波が重なり合って形成されると考えられる。音速以下の衝撃波速度をプロットすることは物理的に不合理であり、また本研究では先行衝撃波形成位置および時間を求めてはお

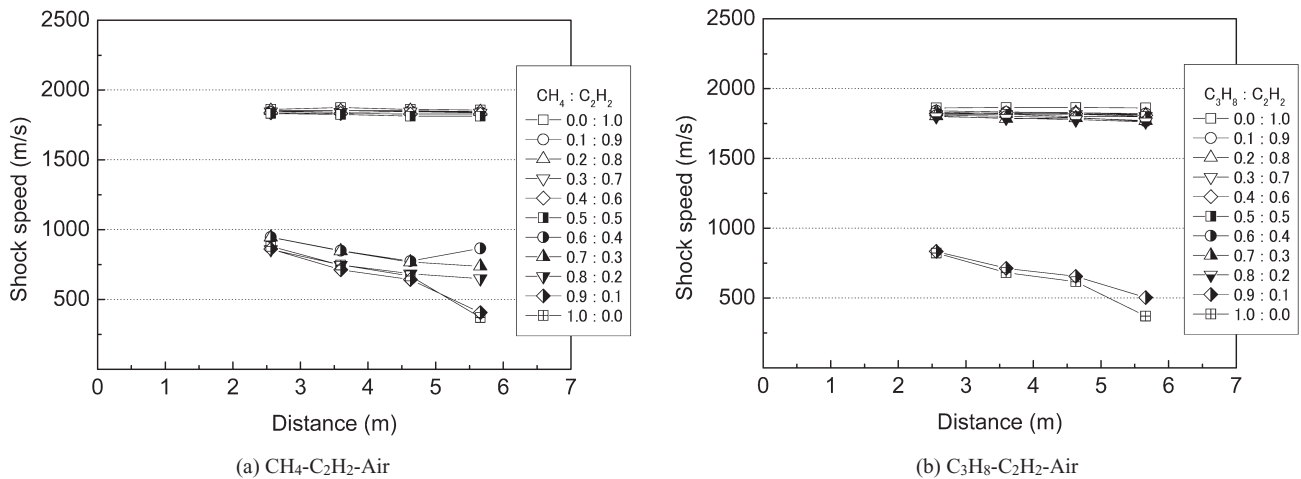


Fig.4 Speed of leading shock wave with various acetylene concentration for CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-air mixtures and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-air mixtures.

らず, 先行衝撃波形成位置から一番目のプローブまでの平均衝撃波速度を求めることはできない. したがって図 4 では, 二番目と三番目の圧力プローブ間の平均伝播速度をもって先行衝撃波速度のプロットを行なった.

アセチレン体積割合が CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Air 混合気で 50% 以上, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Air 混合気では 20% 以上の条件で, 管端から 2 m の位置ですでにデトネーションに遷移していることから, この場合は先行衝撃波というよりはデトネーションの伝播速度を捉えていることとなる. 上記の条件よりもアセチレン体積割合が少ない場合には, 先行衝撃波は管端から約 2.5 m 以降で徐々に減速している. これは火炎面の加速により生じる圧縮波が弱いこと, すなわち単位時間当たりの発熱量増加が小さいことを意味し, 図 3 に示す火炎面の減速, 停滞と対応している. また図 3 では火炎面は減速後に再び加速しているが, 先行衝撃波の再加速は図 4(a) のアセチレン体積割合 40% の場合のみ確認され, それ以外の場合では単調に減少している.

DDT 過程では必ずしも単一の先行衝撃波が形成されるわけではなく, 火炎面前方に複数の先行衝撃波が形成される場合がある[17]. 図 5 にアセチレン体積割合 30% の CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Air 混合気の圧力履歴を示す. 前述したように, 下流側 2 箇所の P4, P5 における圧力プローブはピエゾセラミックディスクを基にしており, 両者の感度も異なり, 圧力の定量的な評価には適さない. 図 5 において, P3 で見られる先行衝撃波通過後の圧力上昇は, P4 では第二の先行衝撃波となり, 図 3 で見られる火炎の再加速により第二の先行衝撃波が形成されたと考えられる.

またデトネーション管下流端が閉じられている場合, 管端で反射した先行衝撃波が火炎面と干渉して DDT 過程に影響を及ぼす場合がある. 先行衝撃波の速度から計算すると, 図 2 のフォトダイオードの立ち上がり時刻において, デトネーション遷移が確認されたすべての条件で先行衝撃波は管端に到達していない. したがって, 本実験では先行

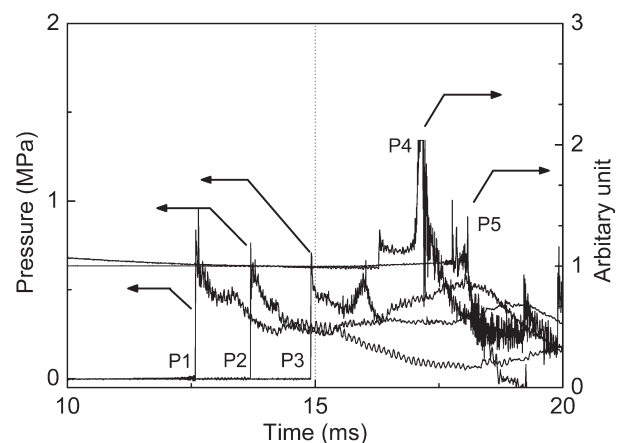


Fig.5 Pressure histories for CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-air mixture containing acetylene of 30% in volume.

衝撃波の管端での反射は DDT 過程に影響していないと言える.

### 3.3. セルサイズ

図 6 に定常なデトネーションに遷移した条件で測定したセルサイズを示す. 本実験ではすす膜を管端から 6000 mm ~ 6600 mm の位置に設置したが, 定常なデトネーションに遷移した場合でも管端からの反射波によりすす膜が破損することがあったため, 中間の 6200 ~ 6400 mm の区間で確認されたセルを対象としてセルサイズを評価した. また図中のエラーバーは評価したセルの最大値と最小値を表し, その算術平均をプロットした. CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Air 混合気, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Air 混合気ともにアセチレン体積割合が減少するにつれてセルサイズが増大する傾向は一致している.

本研究で使用したデトネーション管の内径は 50 mm であり, セルサイズによっては管内径の影響を受けていることが予想される. ここで内径 55 mm のデトネーション管に

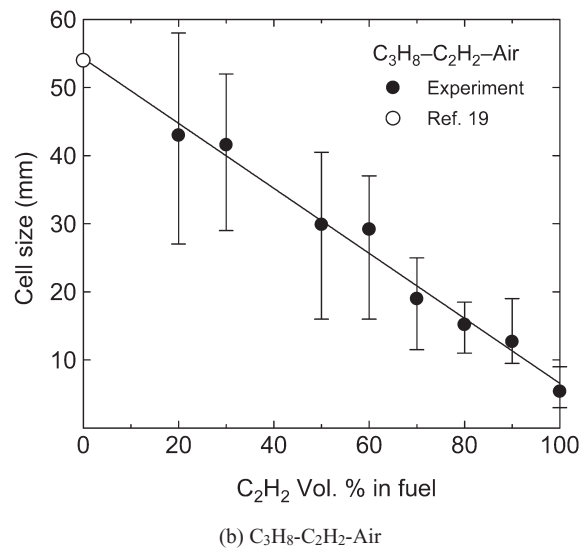
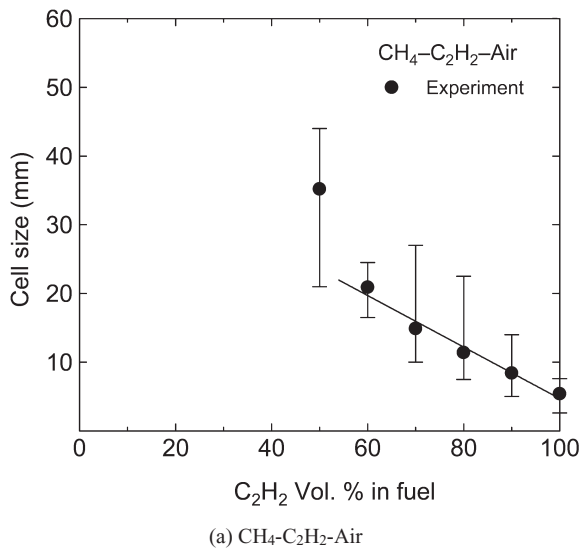


Fig.6 Effects of acetylene concentration on cell size of  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures.

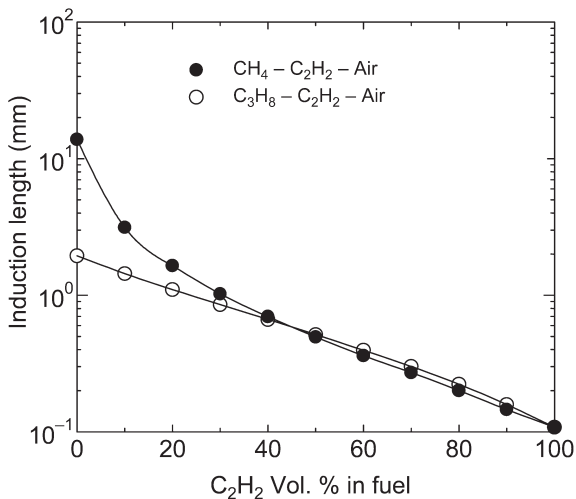


Fig.7 Effects of acetylene concentration on calculated induction length for  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures.

て水素-空気混合気および DME-空気混合気のセルサイズを調べた研究[18]では、内径 100 mm の管で取得したセルサイズとの比較から、30 mm 以下のセルサイズは管内径の影響を受けていないと報告されている。燃料種が本研究とは異なるものの、管内径の半分以下のセルサイズに対してデータは有効と考え、 $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気では、アセチレン体積割合 60% から 100% の範囲では、セルサイズはアセチレン体積割合の減少とともに直線的に増大していると見受けられる。しかしながらアセチレン体積割合 0%、すなわち  $\text{CH}_4\text{-Air}$  量論混合気のセルサイズは約 320 mm [19]であり、アセチレン体積割合 50% 以下に対して直線的な外挿が成り立つとは言えない。

一方  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気では、アセチレン体積割合 70% まではデータは有効と考えられ、これよりアセチレン体積割合が少ない場合には管内径の影響を受けていると考え

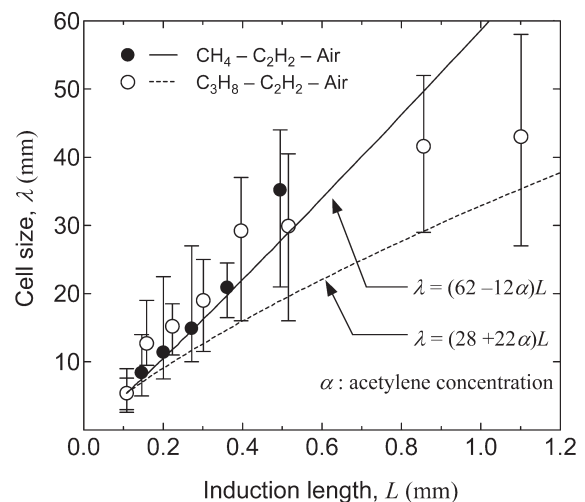


Fig.8 Relationship between measured cell size and calculated induction length for  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_2\text{H}_2\text{-air}$  mixtures with various concentration of  $\text{C}_2\text{H}_2$ .  $\alpha$  denotes a volumetric acetylene concentration in fuel, ranging from 0 to 1.

られる。しかしながらアセチレン体積割合 0%、すなわち  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air}$  量論混合気のセルサイズ 54 mm [20]から判断すると、アセチレン体積割合 100% に至るまで、セルサイズはアセチレン体積割合に対して直線的に変化していると予想される。また同一アセチレン体積割合で比較すると、アセチレン体積割合 60% 以上では  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気の方がセルサイズが小さい。これは燃料中のアセチレン体積割合が同じであっても、全当量比は 1.0 としているために、混合気中のアセチレン量は  $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-Air}$  混合気の方が多くなるためと考えられる。

図 7 に Shepherd が開発した 1 次元 ZND デトネーションの波面構造プログラム ZND [21,22]により求めた反応誘導

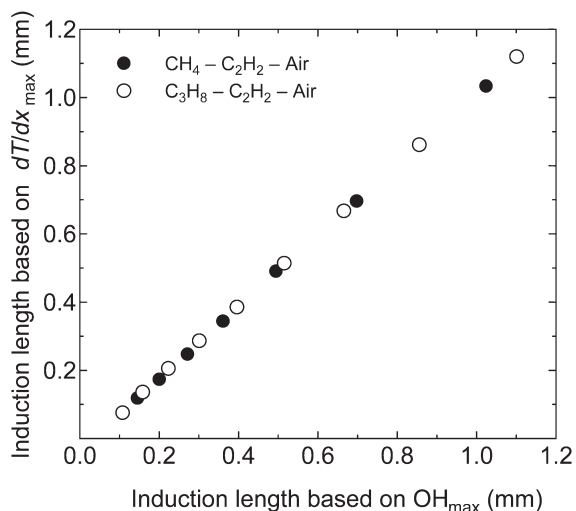


Fig.9 Induction length calculated from position of maximum temperature gradient and of maximum OH concentration.

距離を示す。反応モデルには Konnov のモデル Release 0.4 [23]を用いた。また反応誘導距離は衝撃波面から OH 濃度が最大となる地点までの距離[2]とした。このようにして求めた反応誘導距離と実験から得られたセルサイズの関係を図 8 に示す。ここで、反応誘導距離とセルサイズとは各種混合気に対してほぼ比例関係にあると取り扱えるが、比例定数の値は混合気によって異なることが知られている [19,22]。図 6 におけるアセチレン体積割合とセルサイズとの直線性関係から、比例定数もアセチレン体積割合に対して直線的に変化すると仮定して求めたセルサイズと反応誘導距離の関係を図 8 に示してある。具体的には、 $CH_4-C_2H_2-Air$  混合気に対しては、アセチレン体積割合 60 % と 100 % の比例定数 55 と 50 を直線近似し、 $C_3H_8-C_2H_2-Air$  混合気に対してはアセチレン体積割合 0 % と 100 % の比例定数 28 と 50 を直線近似した。

図 8 において、 $CH_4-C_2H_2-Air$  混合気に対して反応誘導距離が約 0.4 mm 以下の範囲、すなわちアセチレン体積割合 60 % 以上では、セルサイズと反応誘導距離がほぼ比例している。この場合、比例定数の値は 50 ~ 55 とアセチレン体積割合にあまりよらないが、図 6(a) および図 7 から、アセチレン体積割合に対して直線的に変化しているセルサイズと、指数関数的に変化している反応誘導距離が比例することは不合理となる。図 6(a) でセルサイズがアセチレン体積割合に対して指数関数的に増加していると捉えると矛盾は無いが、本研究におけるセルサイズの有効範囲からは必ずしもそのようには断言できない。一方  $C_3H_8-C_2H_2-Air$  混合気では、ばらつきを考慮しても反応誘導距離から予測したセルサイズは実験値を下回っている。このことはアセチレン体積割合 0 % と 100 % の間で比例定数が単純に直線変化せず、途中で最大値をとることを意味している。比例定数のこのようなふるまいは現時点では不明であるが、メタンとプロパンの反応機構の差に一因があると思われる。

反応誘導距離に関しては、温度勾配が最大となる地点までの距離という定義によりセルサイズと関連付けている例 [24,25]もあるが、OH 濃度が最大となる地点までの距離とした方がセルサイズと反応誘導距離の関係の直線性がよいという報告[2]もある。本研究では図 8 に示されるように、反応誘導距離の両定義による値に大きな差異は無い。したがって図 7 に見られる反応誘導距離が長くなった場合のセルサイズに対する非直線性は、反応誘導距離の定義によるものではなく混合気固有のものと考えられる。

#### 4. 結言

$CH_4-C_2H_2-Air$  混合気および  $C_3H_8-C_2H_2-Air$  混合気に関して、当量比を 1.0 に固定した条件でアセチレン体積割合を変化させてデトネーション特性を調べた結果、以下のことがわかった。

1. 燃料中のアセチレンの体積割合が多いほど火炎の加速が著しく、デトネーション遷移時間が短い。
2.  $CH_4-C_2H_2-Air$  混合気および  $C_3H_8-C_2H_2-Air$  混合気ともに、セルサイズはアセチレンの体積割合の減少とともに増大する。
3.  $CH_4-C_2H_2-Air$  混合気では、アセチレン体積割合 60 % 以上の場合、反応誘導距離とセルサイズがほぼ比例関係にあるが、 $C_3H_8-C_2H_2-Air$  混合気に関しては、反応誘導距離に対するセルサイズの比がアセチレン混合割合に依存する。

#### References

1. Akbar, R., Thibault, P. A., Harris, P. G., Lussier, L.-S., Zhang, F., Murray, S. B., Gerrard, K., AIAA-2000- 3592 (2000).
2. Austin, J. M., Shepherd, J. E., *Combust. Flame* 132: 73-90 (2003).
3. Dean, A. J., Penyazkov, O. G., Sevruk, K. L., Varatharajan, B., *Proc. Combust. Inst.* 31: 2481-2488 (2007).
4. Strelkova, M. I., Safonov, A. A., Sukhanov, L. P., Umanskiy, S. Ya., Deminsky, M. A., Zizin, A., Kirillov, I. A., Potapkin, B. V., Dean, T., Varatharajan, B., Tentner, A., *Proc. 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Paper 130 (2007).
5. Brophy, C. M., Netzer, D. W., Sinibaldi, J., Johnson, R., *High-Speed Deflagration and Detonation*, ELEX-KM Publishers, pp. 207-222 (2001).
6. Panicker, P. K., Li, J.-M., Lu, F. K., Wilson, D. R. AIAA-2007-0237 (2007).
7. Hinckley, K. M., Chapin, D. M., Tangirala, V. E., Dean, A. J., AIAA-2006-1026 (2006).
8. Bull, D. C., Elsworth, J. E., Hooper, C., *Combust. Flame* 34: 327-330 (1979).
9. Elsworth, J. E., Eyre, J. A., *Combust. Flame* 55: 237-243

- (1984).
10. Takita, K., Tsukamoto, T., Hasegawa, S., Niioka, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 58(554): 3195-3200 (1992).
  11. Takita, K., Niioka, T., *Shock Waves* 6: 61-66 (1996).
  12. Yoshida, A., Okuda, Y., Yatsufusa, Y., Endo, T. Taki, S., Aoki, S., Umeda, Y., *Proc. 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Paper 77 (2005).
  13. Ishii, K., Grönig, H., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 67(657) 1244-1249 (2001).
  14. Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I., Dorofeev, S., *Shock Waves* 14: 205-215 (2005).
  15. Lindstedt, R. P., Michels, H. J., *Combust. Flame* 76: 169-181 (1989).
  16. Tanaka, K., *Proc. Forty-Fourth Symp. (Jpn.) Combust.* (in Japanese), pp. 330-331 (2006).
  17. Laderman, A. J., Oppenheim, A. K., *Proc. Roy. Soc. A* 268: 153-180 (1962).
  18. Fujii, A., Tsuki, M., Onishi, S., Sato, R., Nishimura, H., Endo, T., Taki, S., *Proc. Forty-Fifth Symp. (Jpn.) Combust.* (in Japanese), pp. 80-81 (2007).
  19. Knystautas, R., Guirao, C., Lee, J. H., Sulmistras, A., *Prog. Astronaut. Aeronaut.*, 94: 23-37 (1984).
  20. Lee, J. H. S., *Ann. Rev. Fluid Mech.* 16: 311-336 (1984).
  21. Shepherd, J. E., *Prog. Astronaut. Aeronaut.* 106: 263-293 (1986).
  22. Browne, S., Shepherd J. E., California Institute of Technology, GALCIT Report FM2006.007 (2005).
  23. Konnov, A.A., Detailed reaction mechanism for small hydrocarbons combustion, Release 0.4, <http://homepages.vub.ac.be/~akonnov/> (1998).
  24. Westbrook, C. K., Urtiew, P. A., *Proc. Combust. Inst.* 19: 615-623 (1982).
  25. Ciccarelli, G., Ginsberg, T., Boccio, J., Economos, C., Sato, K., *Combust. Flame* 99: 212-220 (1994).