

メタン・空気予混合気の着火特性に関する  
詳細素反応機構を考慮した数値解析\*松山 竜佐\*<sup>1</sup>, 山下 博史\*<sup>2</sup>, 山本 和弘\*<sup>2</sup>Numerical Study on Ignition Characteristics of Methane-air Mixture  
Using Detailed Chemical KineticsRyusuke MATSUYAMA, Hiroshi YAMASHITA\*<sup>3</sup> and Kazuhiro YAMAMOTO\*<sup>3</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Ignition is a transient combustion phenomenon and one of the most difficult and complex problems, which include a lot of physical and chemical processes, so that it has not yet been explained sufficiently. In the present study, the ignition characteristics of methane-air mixture were investigated by numerical analysis using detailed chemical kinetics. In order to clarify the effect of geometric condition of ignition source and flow field on ignition characteristics, ignition processes for 1-D plane model, 2-D plane model and axisymmetric model were examined comparatively. The following conclusions were reached: (1) Ignition characteristics are better for the case where the heat is hard to radiate to surrounding fluid, but the reaction mechanism of ignition is almost the same. (2) The elementary reactions, which are important at the moment of ignition, are as follows:  $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$ ,  $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H} + \text{H}_2$ , and  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{OH}$ . (3) The success and failure of ignition and the ignition delay depend on the supplying manners of ignition energy, especially heating time and ignition source shape.

**Key Words:** Ignition, Premixed Combustion, Detailed Elementary Chemical Kinetics, Numerical Analysis

## 1. 結 言

予混合気の着火については、特に自動車用ガソリン機関における火花点火に関連して非常に多くの研究が報告されており、Lewis と von Elbe の著書<sup>(1)</sup>には最小点火エネルギーに与える燃料の種類や当量比などの着火性、点火システムの点火能力の影響がまとめられている<sup>(2)</sup>。また、着火のメカニズムについては、従来は総括反応に基づく熱爆発理論によって、空間ゼロ次元での温度等の非定常変化に基づいて説明されていた<sup>(3)</sup>。これらの着火現象を合理的に説明するためには数値シミュレーションが非常に有効な手段であることが指摘されている<sup>(2)~(4)</sup>。既に、総括反応を用いた数値解析により、火花点火により生じた火炎核の形状や非定常挙

動に与える点火システムの影響について調べられている<sup>(5)~(6)</sup>。さらに、近年は空間多次元場において素反応機構を考慮した数値解析も行われるようになってきている<sup>(7)~(9)</sup>。たとえば、中谷らは二次元の平面あるいは軸対称場において最小点火エネルギーに及ぼす当量比の影響や点火エネルギーの大きさが火炎核に与える影響について検討している<sup>(8)~(9)</sup>。

しかしながら、着火現象は過渡現象であり、多くの物理化学現象が絡み合った複雑な燃焼現象の中でも最も困難な課題であり、これらの素反応機構を用いた数値解析でも未だ十分には解明されてはいない。そこで、本研究では、メタン・空気予混合気の着火特性について、多次元空間における非定常過程を詳細素反応機構を考慮した数値計算によって調べる。既に、前報では、二次元の平面モデルを用いて、着火に重要な素反応について検討した<sup>(10)</sup>。

この研究を踏まえ、まず着火特性に対する解析モデルの幾何学的相異の影響を確認するために、一次元、二次元の平面モデルおよび軸対称モデルを用いて比較検討した。また、点火エネルギーの総量を一定に保

\* 原稿受付 2006年4月3日。

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。<sup>2</sup> 正員、名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: yamashita@mech.nagoya-u.ac.jp

った場合の点火エネルギーの与え方, 特に加熱時間の長さや点火源形状の相異によって, 着火特性にどのような影響を及ぼすかについても検討した. さらにメタンの着火過程について, 点火エネルギーの違いにより着火する場合と着火しない場合を比較し, 着火において重要な因子について検討した<sup>(11)</sup>.

## 2. 解析モデルおよび計算方法

本研究で用いた着火過程に関する解析モデルの概略を図1(a), (b), (c)に示す. (a)は平面一次元場, (b)は平面二次元場, (c)は軸対称場のモデルである. いずれのモデルにおいても, 初期時刻には計算領域内全体に大気圧, 温度300 K, 当量比1のメタンと空気の混合気が一様に充填されているとする. この様な混合気領域の中心部に設置した点火源に, 計算開始から加熱時間 $t_i$ の間, 点火エネルギー $Q$ を供給し, その後, 点火エネルギーの供給を停止して所定の時刻まで計算を続ける. この着火過程は(a)の場合には左右, (b)の場合には左右および上下, (c)の場合には中心軸に対して対称的に起こると考える.

計算領域および計算条件は, (a)では, 左端を対称境界, 右端は自由流境界とする. 計算領域は $x=0 \sim 487$  mmで, 点火源は $x=0 \sim 1$  mmとした. 差分格子は $x$ 方向101点とし, 60点までは格子幅0.05 mmで等間隔とし, 60点以降は不等間隔とする. (b)では, 左端と下端は対称境界, 上端と右端は自由流境界とする. 計算領域は $x=0 \sim 487$  mm,  $y=0 \sim 50$  mmで, 点火源は $x=0 \sim W$ ,  $y=0 \sim H$ とした. (c)では, 下端は対称軸, 左端は対称境界, 上端, 右端は自

由流境界である. 計算領域は $z=0 \sim 487$  mm,  $r=0 \sim 50$  mmとし, 点火源は $L=1.0$  mm,  $R=0.3$  mmとした. なお, (b), (c)においては差分格子を $101 \times 101$ 点とし,  $x, z$ 軸方向は1から60点までは格子幅0.05 mmで等間隔とし, 60点以降では不等間隔とした. また $y, r$ 軸方向は1から101点まで0.05 mmの等間隔格子とした.

支配方程式はいわゆる反応性流体力学の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式, エネルギー方程式および各化学種の連続方程式であり<sup>(12)</sup>, その離散化には有限体積法を用い, 速度と圧力の連成にはSIMPLE法<sup>(13)</sup>を適用した. 対流項には一次風上差分法, 時間展開にはEulerの完全陰解法を適用し, 時間刻みは $\Delta t=1.0 \mu\text{s}$ とした. 各時間ステップにおいてSOR法による繰り返し計算を行った. 化学反応機構には53個の化学種と325組の素反応からなる詳細素反応機構GRI-Mech3.0<sup>(14)</sup>を用い, 熱化学定数にはCHEMKINデータベース<sup>(15)(16)</sup>を用いた. 輸送係数については, SmookeらのSimplified Transport Model<sup>(17)</sup>を用いた.

## 3. 結果および考察

### 3.1 解析モデルの幾何学的相異の影響

各モデルにおける最小着火エネルギーを調べるために, 加熱時間を $t_i=80 \mu\text{s}$ とし, 点火エネルギー $Q=8.0 \sim 15.0$  GW/m<sup>3</sup>の範囲で与えた. 各モデルにおける点火源は, 図1(a)の一次元平面モデルで $x=1$  mmの線分(対称性を考慮すると幅2 mm), 図1(b)の二次元平面モデルで $W=1.0$  mm,  $H=0.3$  mmの長方形(対称性を考慮すると面積 $S=1.2$  mm<sup>2</sup>), 図1(c)の軸対称モデルで $L=1.0$  mm,  $R=0.3$  mmの円筒(対称性を考慮すると体積 $V=0.18\pi$  mm<sup>3</sup>)とした.

一次元平面モデル, 二次元平面モデルおよび軸対称モデルでの点火源中心( $x=y=0.025$  mm)における加熱開始からの温度の時間変化を図2(a), (b)および(c)に示す. ここで, 加熱時間を点線で示した. いずれのモデルの場合でも加熱時間80  $\mu\text{s}$ までの間は温度が急上昇している. 加熱時間終了後, 温度の急上昇は止むが, 着火する場合は再度温度が急上昇して着火し, 着火しない場合は時間の経過につれて温度は下降し続けた. 本研究では, 加熱時間終了後において温度が急上昇した場合を着火と定義し, 加熱開始時間から温度の上がりをはじめあるいは極小となる瞬間とピークとなる瞬間の中間の時間までの間を着火遅れ時間と定義する. 着火時刻を温度が加熱終了後の最小値と最大値の平均

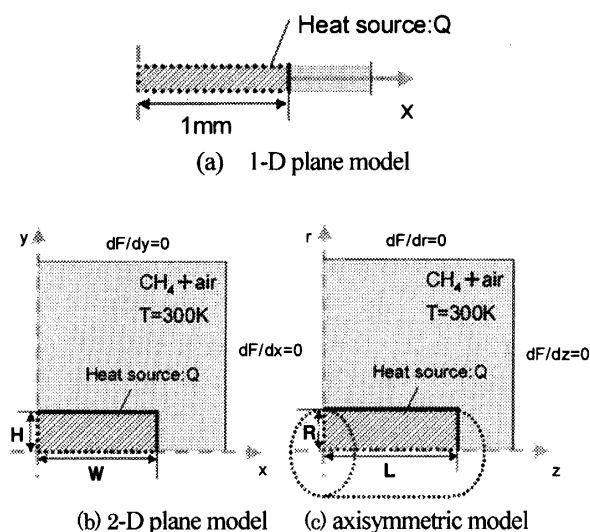


Fig.1 Schematic of analytical models

値に達する瞬間として着火遅れ時間を定義しても有意な差はなかった。なお、本研究で着火と判断した場合には、少なくとも本計算時間範囲内で自立的な火炎伝播が続いていることを確認している(図5, 7, 8, 9参照)。

最小着火エネルギーは一次元平面モデルでは  $10.0 \text{ GW/m}^3$ 、二次元平面モデルでは  $11.25 \text{ GW/m}^3$ 、軸対称モデルでは  $13.5 \text{ GW/m}^3$  となり、一次元平面モデルが最も低い値となった。このときの着火遅れ時間はそれぞれ  $270 \mu\text{s}$ 、 $140 \mu\text{s}$ 、 $90 \mu\text{s}$  となり、加熱時間における温度はそれぞれ  $1750 \text{ K}$ 、 $2050 \text{ K}$ 、 $2350 \text{ K}$  程度となった。なお、二次元平面モデルの場合には温度がわずかに低下した後着火しており、軸対称モデルの場合には加熱時間終了直後に着火している。また、着火しない場合には、加熱時間終了後、温度はしだいに低下するはずであるが、一次元平面モデルの場合にはほとんど低下しない。軸対称モデルの場合には、ちょうど化学反応による発熱と放熱がバランスする場合もあるが、最も低下速度が大きい。これらのことから、一次元平面モデルの場合には、他のモデルよりも放熱されにくくなっていることが分かる。これは一次元平面モデルでは一次元的にしか放熱しないためである。このため、点火エネルギーが低くても熱がたまりやすい状態におかれ、周囲への放熱と反応による発熱が均衡し、時間をかけて着火することになる。一方、軸対称モデルでは、軸方向だけでなく半径方向にも放射状に放熱され、着火が起こるためには他のモデルよりも多くの点火エネルギーを必要とする。また着火遅れ時間が長くなるとその間に放熱してしまうために、着火する際には着火遅れ時間が短い場合しか実現できない。

各モデルにおける着火遅れ時間と点火エネルギーの関係を図3に示す。いずれのモデルにおいても点火エネルギーが大きいほど着火遅れ時間  $t_d$  が短くなる。また点火エネルギーが大きくなると着火遅れ時間は一定値 ( $80 \mu\text{s}$  程度) に漸近する。放熱の効果が大きいモデルほど着火遅れ時間の範囲は狭く、大きな点火エネルギーを必要とすることになり、着火が起こるための条件が厳しくなっている。

次に、最小着火エネルギー条件での着火瞬間時の反応経路図<sup>(18)</sup>を一次元平面モデル ( $t = 265 \mu\text{s}$ )、二次元平面モデル ( $t = 140 \mu\text{s}$ ) および軸対称モデル ( $t = 78 \mu\text{s}$ ) について図4(a), (b) および (c) に示す。図中の矢印の太さおよび色は、各素反応における反応速度および発熱速度の大きさを示す。各素反応の反応速度および発熱速度は、一次元平面モデルと二次元平面モデルの場合にはほぼ同様の値となり、軸対称モデルの場合には2つのモデルよりも大きくなっている。着火ま

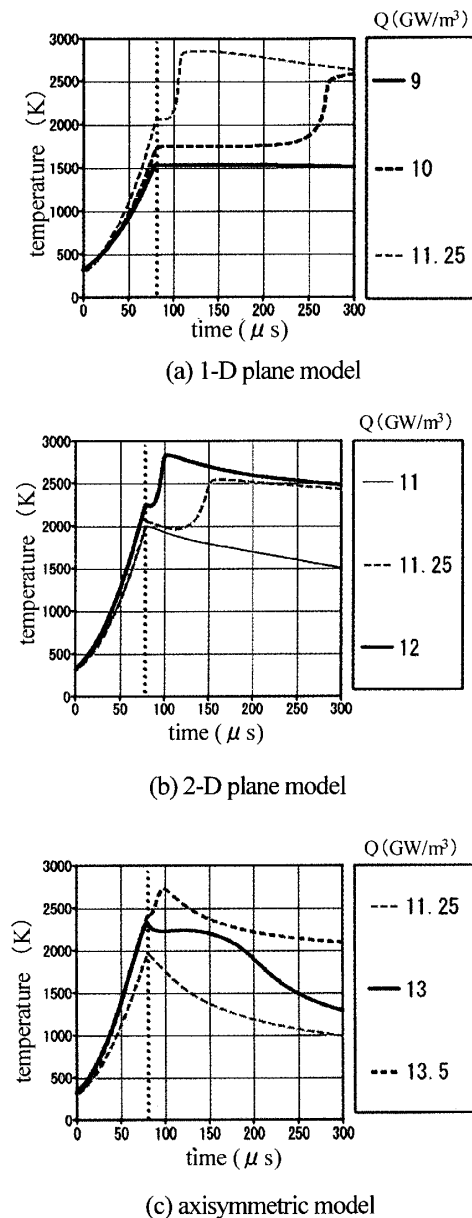


Fig.2 History of temperature at  $x = y = 0.025 \text{ mm}$  for 1-D plane, 2-D plane and axisymmetric models

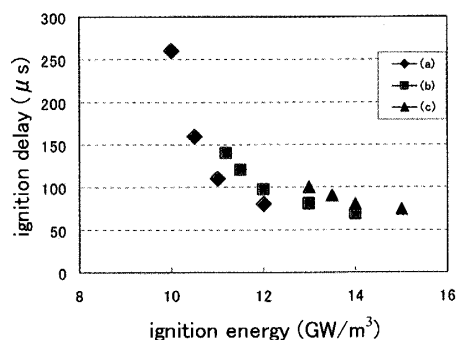


Fig.3 Ignition delay of for (a) 1-D plane, (b) 2-D plane and (c) axisymmetric models

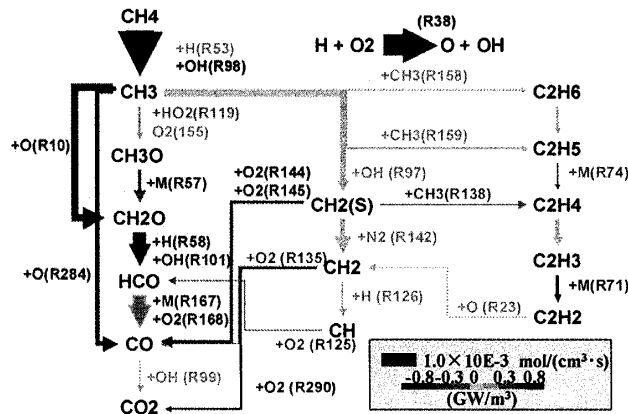
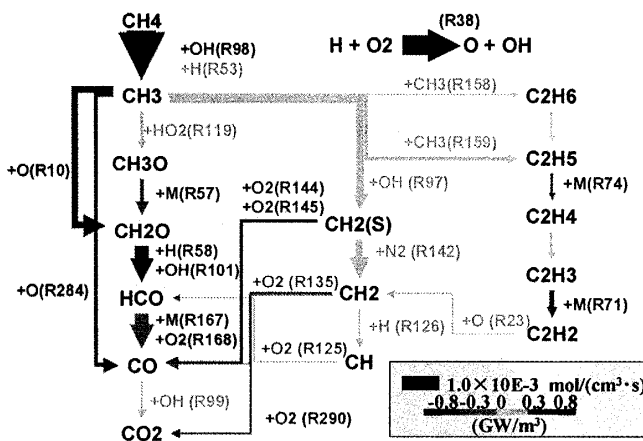
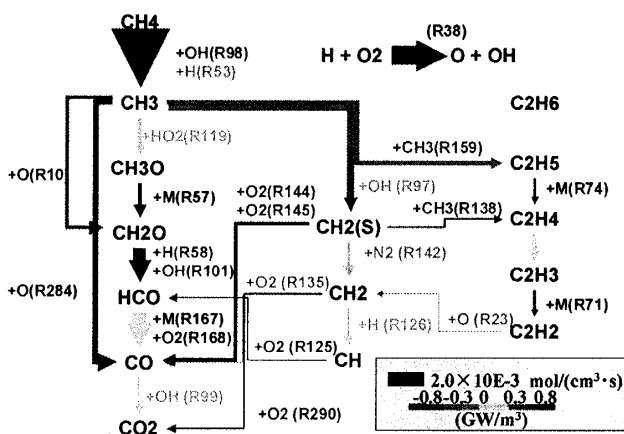
(a) 1-D plane model ( $t = 265 \mu\text{s}$ ,  $Q = 10.0 \text{ GW/m}^3$ )(b) 2-D plane model ( $t = 140 \mu\text{s}$ ,  $Q = 11.25 \text{ GW/m}^3$ )(c) axisymmetric model ( $t = 87 \mu\text{s}$ ,  $Q = 13.5 \text{ GW/m}^3$ )

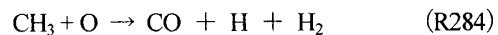
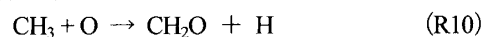
Fig.4 Reaction pass diagrams at the moment of ignition

での時間, 反応速度および発熱速度は異なるが, いずれのモデルにおいても, 着火瞬間時の反応経路図はほぼ同様である. このことから着火に至るまでの所要時間や反応の量的な差異は存在するが, 素反応論的なメカニズムはほぼ同じと考えられる.

**3.2 着火過程の素反応機構による検討** 前節で着火過程の素反応論的なメカニズムはほぼ同じと考えられることが分かったので, 以下では, 二次元平面モデルの場合について検討する. ここでは,  $W = 1.0 \text{ mm}$ ,  $H = 0.3 \text{ mm}$  の長方形点火源で, 加熱時間  $80 \mu\text{s}$  に固定し, 点火エネルギーが  $Q = 11.0 \text{ GW/m}^3$  と  $Q = 11.25 \text{ GW/m}^3$  の2条件の場合について比較検討する.

計算領域の対称面である着火源を含む断面  $y = 0.025 \text{ mm}$  における温度分布の時間変化を図5(a) および (b) に示す. 縦軸には経過時間を上方から下方に向かって示す.  $Q = 11.0 \text{ GW/m}^3$  の場合には,  $t = 80 \mu\text{s}$  までは温度は上昇するが着火には至らず, 加熱領域の境界から温度が下がり始めそのまま失活する. 一方,  $Q = 11.25 \text{ GW/m}^3$  の場合には,  $t = 80 \mu\text{s}$  までは上昇し, その後, 加熱領域の境界から温度が下がり始めるが,  $t = 140 \mu\text{s}$  前後で点火源中心から再び急激に温度上昇し着火に至る.

$Q = 11.25 \text{ GW/m}^3$  の場合の着火瞬間時における反応経路図を図4(b) に示したが, これと同じ時刻における  $Q = 11.0 \text{ GW/m}^3$  の場合の反応経路図を図6に示す. また, 時刻  $t = 140 \mu\text{s}$  における対称面  $y = 0.025 \text{ mm}$  での素反応別の発熱速度を図7(a), (b) に示す. なお, これらの図では, (b) の縦軸のスケールは(a) の約10倍で表示されている. 図4(b), 図6および図7より, 着火瞬間時にも, 定常燃焼時と同様に次の2つの反応が発熱に最も寄与することがわかる.



また, 着火時に反応速度が非常に大きい反応は次の反応であり, ラジカル生成に重要な役割を果たしている. なお, この素反応は大きな吸熱反応である.



着火瞬間には発熱速度および反応速度ともに急激に増加し, 着火に至る. 着火前では  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$  が主となっていた反応経路は,  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$  の経路を通るようになっていく. ただし, 着火瞬間には  $\text{CO}_2$  の生成はごくわずかにとどまっている. 着火瞬間においては, 全体的に発熱反応が大半を占めているが, この中で特徴的なことは, 多くの発熱反応にOおよびOHラジカルとの反応が含まれていることである.

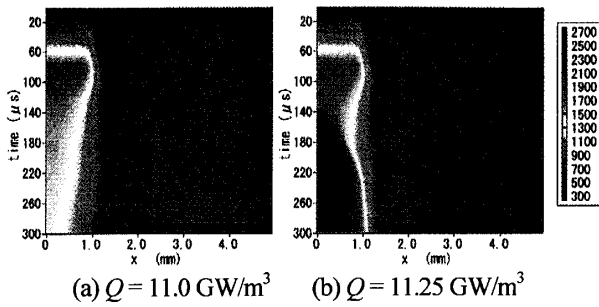


Fig.5 History of temperature in the cross-section  $y = 0.025$  mm for  $Q = 11.0$  GW/m<sup>3</sup> and 11.25 GW/m<sup>3</sup> (2-D plane model)

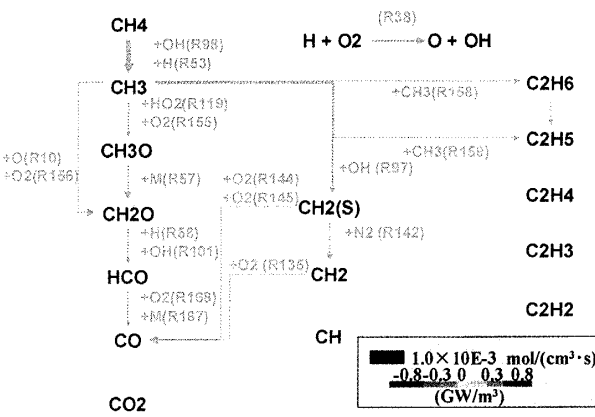


Fig.6 Reaction pass diagram at  $t = 140$  μs for  $Q = 11.0$  GW/m<sup>3</sup> (2-D plane model; corresponding to Fig. 4(b))

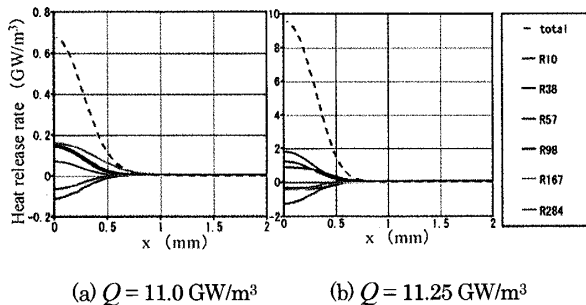


Fig.7 Heat release rate in the cross-section  $y = 0.025$  mm at  $t = 140$  μs (2-D plane model)

着火しない場合には、加熱時間までは発熱速度および反応速度はともに増加するが、加熱時間終了後は急速に減少し、 $t = 140$  μs においては図6のような反応経路図となる。この図から分かるように、着火しない場合には着火する場合とは異なり、O<sub>2</sub>を含む素反応の割合が多くなっている。ここで、 $t = 140$  μs に至るまでの両条件の点火源中心付近のOおよびOHラジカルの素反応別の質量生成速度の時間変化を図8 および

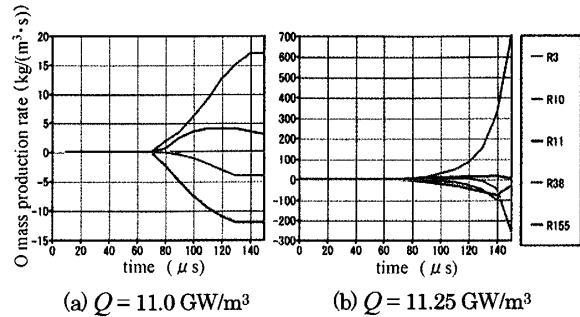


Fig.8 History of O mass production rate at  $x = y = 0.025$  mm (2-D plane model)

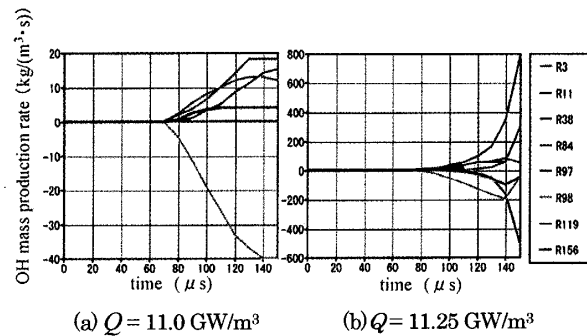


Fig.9 History of OH mass production rate at  $x = y = 0.025$  mm (2-D plane model)

9に示す。なお、これらの図では、(b)の縦軸のスケールは(a)の約30倍で表示されている。

着火に至る場合には、OおよびOHラジカルの生成速度が着火の少し前の  $t = 120 \sim 130$  μs から急激に上昇していることが分かる。一方、着火しない場合には、OおよびOHラジカルの生成速度は、 $t = 70$  μs 付近から増加を開始するが、 $t = 130$  μs 前後で停滞している。以上のことから、最小点火エネルギーを超えるエネルギーが与えられた場合には、吸熱反応である素反応 R38 が大きく進むことによって生成されたOおよびOHラジカルが、大量の発熱を伴う多くの素反応に関与することにより着火に至ることが分かる。

**3.3 加熱時間の長さの影響** 加熱時間の長さの影響の検討には二次元平面モデルを用いた。このモデルで、点火源は  $W = 1.0$  mm,  $H = 0.3$  mm の長方形とした。加熱時間全体での点火エネルギーの総量を  $Q_{total} = 0.9$  mJ/mm<sup>3</sup> に固定し、加熱時間  $t_i$  について  $t_i = 10 \sim 150$  μs の範囲で計算した。このとき、点火エネルギーは  $Q = 90 \sim 6.0$  GW/m<sup>3</sup> となり、単位時間当たりの点火エネルギーは変化する。なお、 $t_i = 80$  μs の条件は、3.1節における二次元平面モデルの最小点火エネルギー条件と同一である。

点火源中心 ( $x = y = 0.025$  mm) の温度の時間変化を図10に示す。加熱時間  $t_i = 30 \sim 120$  μs (点火エネ

ルギー $Q=60 \sim 7.4 \text{ GW/m}^3$ ) の場合には、加熱時間終了後、急激に温度が上昇し、着火している。一方、加熱時間 $t_i=20$  および $150 \mu\text{s}$  の場合には、加熱時間終了後、温度は下降し続けており、着火には至っていない。このように、点火エネルギーの総量が同じでも、加熱時間の長さにより着火の成否が分かれる。また、着火する場合でも、着火遅れ時間 $t_d$ は変化し、 $t_i=40 \mu\text{s}$  の場合に最も短く、 $t_d=100 \mu\text{s}$  程度となっている。

着火しない場合については、点火エネルギーを短時間で集中的に与えた $t_i=20 \mu\text{s}$  以下の場合、あまりに短時間のために、着火に達するまで高温の状態を保持できず、化学反応の継続に必要な反応物を十分には作り出せなかったためと考えられる。一方、点火エネルギーを長時間で少しずつ与えた $t_i=150 \mu\text{s}$  以上の条件の場合、あまりに長時間のために、周囲への熱拡散や物質拡散により熱エネルギーや反応物が流出し、着火できなかったものと考えられる。

以上のことから、点火エネルギーの総量が同じでも、加熱時間の長さによって、着火の有無が異なり、着火する場合でも着火遅れ時間が異なることが分かる。

**3.4 点火源の形状の影響** 二次元平面モデルで、点火エネルギー $Q=11.25 \text{ GW/m}^3$  および加熱時間 $t_i=80 \mu\text{s}$  を固定して、点火源の面積 $S=0.3 \text{ mm}^2$  (対称性を考慮すると4倍の $1.2 \text{ mm}^2$ ) を一定に保ちながら、 $W$  および $H$  を変えることにより点火源形状を変化させた。なお、以上の条件により、点火エネルギーの総量は $Q_{\text{total}}=0.9 \text{ mJ/mm}^3$  ( $Q_{\text{total}} \times S=0.27 \text{ mJ/mm}$ , 対称性を考慮すると4倍の $1.08 \text{ mJ/mm}$ ) となり固定されている。点火源の形状を図11に示す。形状(a)は $W=0.6 \text{ mm}$ ,  $H=0.5 \text{ mm}$ , 形状(b)は $W=1.0 \text{ mm}$ ,  $H=0.3 \text{ mm}$  (c)は $W=2.0 \text{ mm}$ ,  $H=0.15 \text{ mm}$  の場合である。なお、形状(b)

の条件は3.1節で用いた最小着火エネルギー条件と同一である。

各条件の点火源中心( $x=y=0.025 \text{ mm}$ )における温度の時間変化を図12に示す。形状(b)は3.1節で論じた最小着火エネルギー条件における場合と同じである。形状(a), (b)では $2100 \text{ K}$  前後まで上昇して着火し、形状(c)では $1750 \text{ K}$  前後までしか上昇せず、着火せずに失活する。形状(c)では、着火源が $y$ 方向には非常に薄く周囲流体との接触面積が大きくなっており、放熱の効果が大きく、点火源中心まで温度が低下し、着火に至らずに失活してしまうものと考えられる。一方、形状(a)では、着火遅れ時間は $t_d=110 \mu\text{s}$  程度となり、形状(b)の $t_d=140 \mu\text{s}$  と比べて、早く着火に至っている。これは形状(a)では接触面積が小さく、放熱による温度の低下の効果が小さいためである。

以上のことから、点火源の大きさが同じでも、その形状によって、着火の有無が異なり、着火する場合でも着火遅れ時間が異なることが分かる。

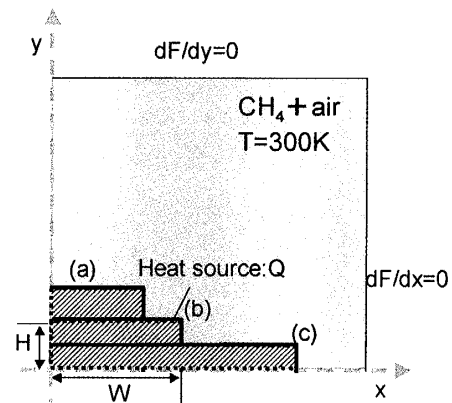


Fig.11 Schematic of analytical models (2-D plane model)

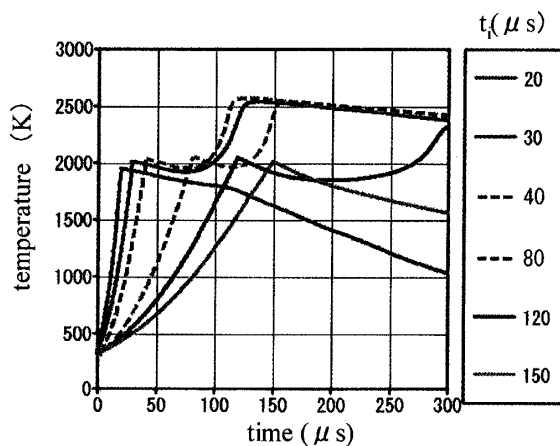


Fig.10 History of temperature at  $x=y=0.025 \text{ mm}$  (2-D plane model)

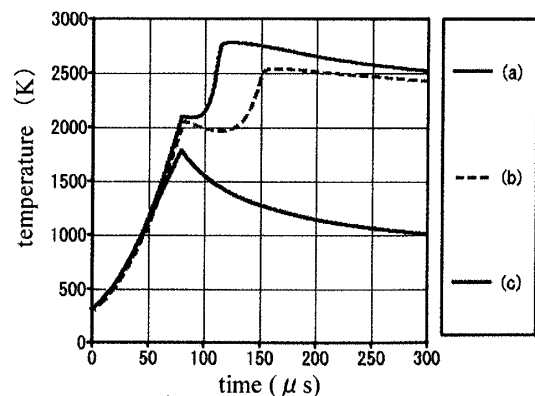
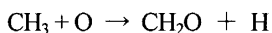


Fig.12 History of temperature at  $x=y=0.025 \text{ mm}$  (2-D plane model)

## 4. 結 論

メタン・空気予混合気の着火特性について詳細素反応機構を考慮した数値解析を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 点火源と周囲流体からなる解析モデルの幾何学的相異によって、最小点火エネルギーと点火遅れ時間が異なり、点火源から周囲流体へ放熱しにくい場合ほど着火特性がよい。
- (2) 解析モデルの幾何学的相異によって、着火特性は定量的には異なるが、その素反応論的なメカニズムはほぼ同じである。
- (3) 着火瞬間時にも、定常燃焼時と同様に、次の2つの反応が発熱に最も寄与する。



また、吸熱反応ではあるが、素反応  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{OH}$  の反応速度が非常に大きく、この反応によるラジカル生成が重要な役割を果たしている。

- (4) 点火エネルギーの総量が同じでも、加熱時間の長さによって、着火の有無が異なり、着火する場合でも着火遅れ時間が異なる。加熱時間が短すぎる場合には、着火に達するまで高温の状態を保持できず、化学反応の継続に必要な反応物を十分には作り出せないため着火できない。一方、加熱時間が長すぎる場合には、周囲への熱拡散や物質拡散により熱エネルギーや反応物が流出してしまうため着火できない。
- (5) 点火源の大きさが同じでも、その形状によって、着火の有無が異なり、着火する場合でも着火遅れ時間が異なる。周囲流体との接触面積が小さい場合には、放熱による温度の低下の効果が小さいため着火しやすい。

## 文 献

1. Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd ed., (1987), 333-361, Academic Press.
2. Japan Society of Mechanical Engineers, *JSME Combustion Handbook*, (1995), 23-25, Maruzen (in Japanese).
3. Niiooka, T., Kono, M., Sato, J., *Nenshogensho no Kiso (Fundamentals of Combustion Phenomena)*, (2001), 121-126, Ohmsha (in Japanese).
4. Kono, M., *Proc. Combust. Symp.* 43 (2005), S2-S5 (in Japanese).
5. Kono, M., Niu, K., Tsukamoto, T. and Ujiie, Y., *Proc. Combust. Inst.* 22 (1988), 1643-1649.
6. Ishii, K., Tsukamoto, T., Ujiie, Y., Kono, M., *Combust. and Flame*, 91 (1992), 153-164.
7. Thiele, M., Warnatz, J., Dreizler, A., Lindenmaier, S., Schiebl, R., Mass, U., Grant, A. and Ewart, P., *Combust. and Flame*, 128 (2002), 74-87.
8. Nakaya, S., Hatori, K., Tsue, M., Kono, M., Segawa, D., Kadota, T., *Proc. Combust. Symp.* 42 (2004), 295-296 (in Japanese).
9. Nakaya, S., Hatori, K., Tsue, M., Kono, M., Segawa, D., Kadota, T., *Proc. Combust. Symp.* 43 (2005), 416-417 (in Japanese).
10. Matsuyama, R., Yamashita, H., *Nihon Kikai Gakkai Tokai-shibu Kouen-Ronbunshu (Proc. of JSME Tokai-branch)* 54 (2005), 203-204 (in Japanese).
11. Matsuyama, R., Yamamoto, K., Yamashita, H., *Proc. Combust. Symp.* 43 (2005), 338-339 (in Japanese).
12. Yamashita, H., *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Trans. of JSME, Series B)*, 65-630 (1999), 783-789.
13. Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, (1980).
14. GRI, [http://www.me.Berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.Berkeley.edu/gri_mech).
15. Kee, R.J. et al., *Sandia Report*, SAND86-8246 (1986).
16. Kee, R.J. et al., *Sandia Report*, SAND89-8009 (1989).
17. Smooke, M. D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
18. Kita, A., Zhao, D., Yamashita, H., *Kagaku-kougaku Ronbunshu*, 30-6 (2004), 808-814 (in Japanese).