

水素噴流における火花点火燃焼過程の CFD 解析 *

川那辺 洋^{*1}, 加藤 享^{*2}, 塩路 昌宏^{*1}

CFD Analysis of Combustion Process in an Ignited Hydrogen Jet

Hiroshi KAWANABE^{*3}, Akira KATO and Masahiro SHIOJI

^{*3} Graduate School of Energy Science, Kyoto University.
Yoshida Hon'machi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

Flow and spark-ignited combustion process of a high-speed unsteady hydrogen jet are investigated using incompressible-flow type CFD with $k-\epsilon$ turbulence model and flamelet concept. The pseudo-nozzle concept is applied to the inlet condition with large pressure gradient. The flame propagation process is described using the flame area evolution (FAE) model. The result shows that the incylinder pressure and flame propagation process are successfully described for experimental data. Furthermore, the flame propagation process in a jet is investigated. In addition, effects of ignition timing and igniting position on combustion process are also examined.

Key Words: Jet, Turbulent mixing, Numerical Simulation, Hydrogen, Flame propagation, CFD

1. ま え が き

近年、水素を燃料としたエンジンでは、高効率化および燃焼の制御を目指して、筒内へ直接噴射して形成された混合気火花点火する方式 (DI-SI) が注目されている⁽¹⁾。このような機関では、水素を圧縮行程において比較的高い圧力で噴射し、噴流により混合気を形成するものであり、点火時における混合気の分布がその後の燃焼過程に大きく影響を与える。すなわち、燃料を吸気管において供給した場合、負荷が高く総括当量比の高い条件では、急激燃焼を引き起こしノッキングに類似した燃焼となる⁽²⁾。このような場合には熱損失が増大し、熱効率が著しく低下するだけでなく、燃焼室の損傷を招く可能性がある。このため、高負荷における燃焼の緩慢化を狙って、噴射により制御

することが試みられている。筆者らはこれまで、水素 DI-SI エンジンの性能および排気特性を調べ、高出力でかつ高効率にできる可能性を示した⁽³⁾。さらに、噴流に点火した際の燃焼過程を明らかにするために、定容容器を用いた基礎的な実験を行うとともに、とくに急激燃焼抑制のための点火条件について検討した⁽⁴⁾。これら燃焼過程は噴流によって形成される流動および混合気分布の影響を大きく受ける。しかし、その詳細については十分に明らかではない。これらについて検討するには数値流体力学的手法 (CFD) が有効な手段となる。Messner らはエンジン筒内の混合気形成過程を CFD を用いて検討し⁽⁵⁾、点火燃焼過程についても計算を試みている。しかし、混合気形成および燃焼機構については不明な点が多い。

そこで本研究では、定容容器内に噴射された水素噴流の流動および火花点火燃焼過程を $k-\epsilon$ 乱流モデルおよび火炎伝播モデルに基づいた CFD により解析する。これにより、点火時期および位置を変更した際の火炎伝播過程を検討するとともに、その燃焼機構を明らかにする。

* 原稿受付 年 月 日.

*1 正員 京都大学エネルギー科学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町).

*2 学生員 京都大学エネルギー科学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町).

E-mail: kawanabe@energy.kyoto-u.ac.jp

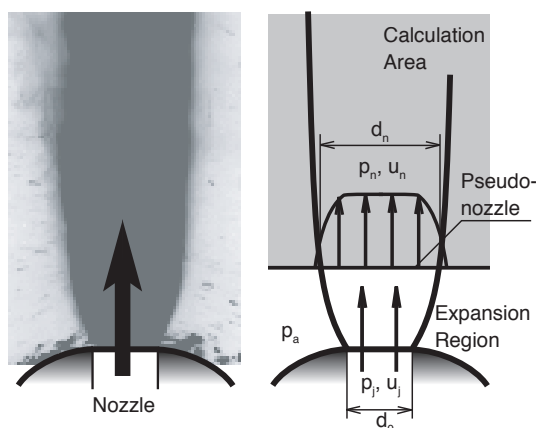


Fig. 1 Schematic diagram of grid system

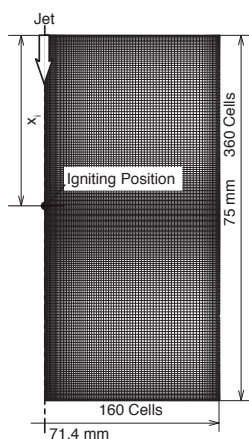


Fig. 2 Schematic diagram of grid system

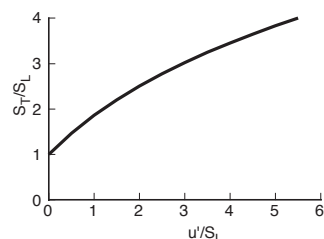


Fig. 3 Change of S_T/S_L against u'/S_L

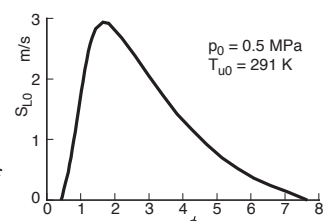


Fig. 4 Change of S_{L0} against ϕ

Table. 1 Calculation Conditions

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Δt_i (ms)	0.3	0.8	1.8	1.8	1.8
x_i (mm)	35	35	35	5	65

2. 計算対象および燃焼モデル

2.1 計算対象および方法 ここで計算の対象は、定容容器中に水素を高速で噴射し、噴流軸上で点火したのちの火炎伝播過程であり、計算条件は筆者が行った、水素噴流の点火実験を参照して設定した。すなわち、定容容器は円筒状で、その直径は 71.4 mm、長さは 75 mm とし、その内部を温度 $T_i = 300$ K、圧力 $p_0 = 0.5$ MPa の空気で満たすとともに、容器端面の対称軸上に取り付けた直径 0.8 mm のノズルより圧力 $p_j = 8$ MPa でより水素を噴射した。また、点火はノズル下流 x_i の軸上で噴射開始から Δt_i 後に行う。本研究で対象とした計算条件を表 1 にまとめた。Case 1～3 は点火時刻を変化させたものであり、Case 3～5 は点火

位置を変化させたものである。

噴射の際のノズル出口近傍に生じる大きな圧力勾配の存在する領域については既報において用いた仮想ノズルを仮定した⁽⁶⁾。これは、噴流流体がノズル出口直後に周囲流体と同じ圧力にまで急速に断熱膨張すると考え、それより下流の流動を解析の対象とするものである。図 1 はこの様子を模式的に示したものである。(a) のレーザシート法によるメタン噴流の可視化画像によると、ノズルのすぐ下流で急激に噴流の直径が増しており、この部分を断熱膨張している領域と考える。その際、噴流が膨張して周囲圧力と等しくなった位置における噴流の直径 d_n は、ノズル出口における流速 u_j を噴射圧力 p_j での音速、仮想ノズルにおける流速 u_n を周囲圧力 p_a での音速として、理想気体を仮定すると次式で与えられる。

$$d_n = d_0 \sqrt{C_n \frac{p_j}{p_a} \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}} \quad (1)$$

ここで d_0 はノズル径、 C_n は流量係数、 γ は燃料の比熱比である。 $d_0 = 0.8$ mm、 $C_n = 0.86$ とし式 (1) より算出した仮想ノズル直径 d_n は 2.26 mm であり、ノズルにおける平均流速 u_n はその場の音速として 1320 m/s とする。

計算は筆者らが既に提案している軸対称 2 次元非圧縮コードを基礎とし⁽⁶⁾、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを適用する。すなわち、連続の式、運動方程式、乱れエネルギー k 、 k の消散率 ϵ 、比エンタルピ h 、混合分率 m_f に関する各保存式により計算する。なお、圧力解法には SIMPLER、対流項には風上 1 次差分、拡散項には中心 2 次差分を用いる。計算格子については図 2 に示すように 160×360 の 2 次元直交不等間隔格子を、ノズル出口および点火栓近傍における格子の大きさが最小となるように与えた。なお、格子間隔については本論文の条件では噴流の発達過程および燃焼過程に影響を与えない程度に十分に小さいことを確認した⁽⁷⁾。また、実際の噴射弁におけるニードルの動きを模擬して、計算では軸方向速度を噴射開始から 0.15 ms までの間は時間に比例して増加させ、それ以降は一定値とする。なお、壁にはすべり条件を与え、壁熱流束は 0 とする。

2.2 燃焼モデル 各計算格子における反応速度を定めるための乱流燃焼モデルについては、しわ状層流火炎片を仮定するとともに、計算格子における既燃ガスの質量分率を表すパラメータである燃焼進行度 b を導入する。さらに、その輸送を考慮するとともに b が増加する速さ R_f が未燃ガス密度 ρ_u 、乱流燃焼速度

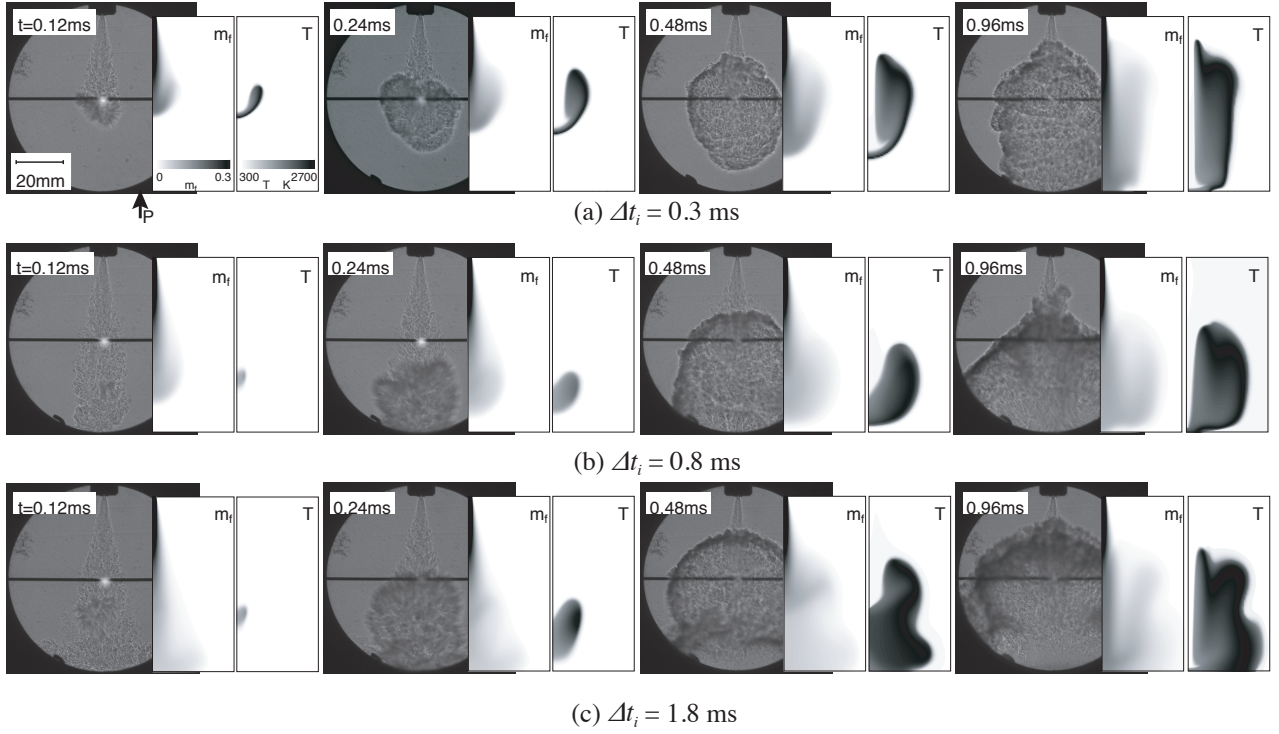


Fig. 5 Distributions of m_f and T with Shadowgraph images

S_T および b の空間勾配に比例するとして次式で表す⁽⁸⁾

$$R_f = \rho_u S_T |\nabla b| \quad (2)$$

さらに, S_T は層流燃焼速度 S_L および乱れ強さ u' を用いて次式により計算する⁽⁹⁾.

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \left[\frac{2u'}{S_L} \left\{ 1 - \frac{S_L}{u'} \left(1 - \exp\left(-\frac{u'}{S_L}\right) \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (3)$$

このとき, u'/S_L に対する S_T/S_L の変化を図3に示す. また, S_L における未燃ガス温度 T_u および圧力 p に対する変化は以下の実験式により求める⁽¹⁰⁾.

$$S_L = S_{L0} \left\{ 1 + \beta \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \right\} \left(\frac{T}{T_{u0}} \right)^\alpha$$

$$\alpha = 1.54 + 0.025(\phi - 1),$$

$$\beta = 0.43 + 0.003(\phi - 1) \quad (4)$$

ただし, ϕ は当量比, S_{L0} は T_{u0} および p_0 のときの層流燃焼速度であり, $T_{u0} = 291$ K, $p_0 = 0.5$ MPa としたときの ϕ に対する変化を反応動力学⁽¹¹⁾ を用いて求めた. 図4はその結果であり, $\phi = 0.4 \sim 7.6$ 近傍が可燃範囲となり, $\phi = 1.8$ 付近で最大となることから分かる. 点火は, 点火栓近傍の b を 1 とすることによって与える. なお, 本計算の燃焼領域における p の変化は 0.5 MPa から 1 MPa 程度であり, このモデルの適用範囲内であると考えられる. また, ここでは主に壁面から離れた領域における燃焼過程を対象としているので, 乱流モデルおよび燃焼モデルについて壁面近傍における修正等は加えていない.

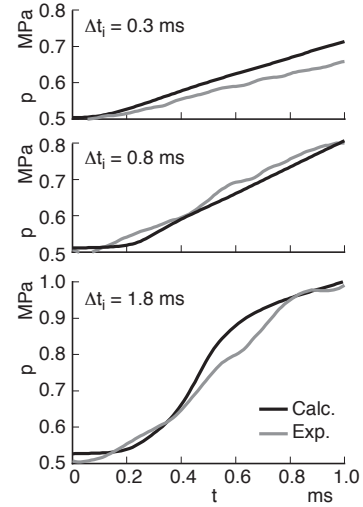


Fig. 6 Time histories of p

3. 計算結果

以上の方法に基づき, 噴射開始から点火までの期間 Δt_i を変化させた際の火炎発達過程の時間変化を計算した. 図5は (a) Case 1 $\Delta t_i = 0.3$ ms, (b) Case 2 $\Delta t_i = 0.8$ ms および (c) Case 3 $\Delta t_i = 1.8$ ms における混合分率 m_f および温度 T の点火後の時刻 t における分布の時間変化であり, 同様の条件における可視化実験の結果を併せて示す. ここで, $\Delta t_i = 0.3$ ms は噴流の先端がほぼ点火栓に達したときに点火する条件であり, $\Delta t_i = 0.8$ ms は噴流内部に点火する条件, $\Delta t_i = 1.8$ ms はある程

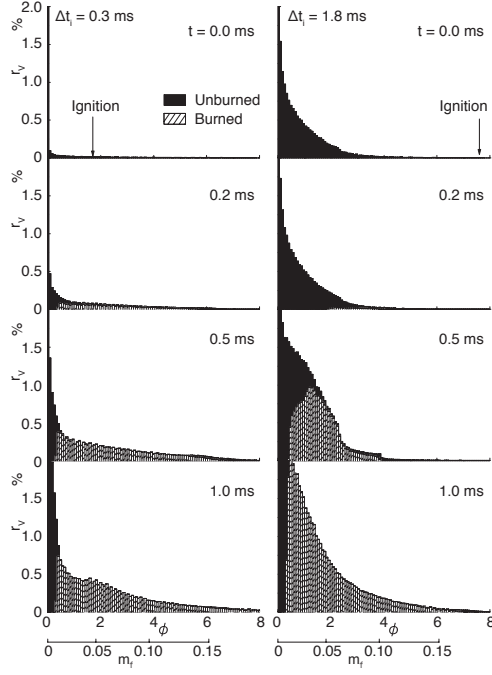


Fig. 7 Volumetric histogram of equivalence ratio ϕ

度混合気が形成された後に噴流内部において点火する条件に対応している。(a) $\Delta t_i = 0.3$ ms では点火直後に火炎が噴流先端の外縁に薄い層状に拡がり、それが時間とともに大きくなる。これは噴流先端に生じた環状渦まわりに燃焼が進行することに対応しており、その後、火炎は噴流境界付近を上流に向かって進行する。(b) $\Delta t_i = 0.8$ ms では、点火直後から火炎が拡がるまでにやや時間を要し、噴流先端の内部に既燃領域が広く分布する点が (a) とは異なる。さらに、(c) $\Delta t_i = 1.8$ ms では点火後、下流に流された混合気から燃焼し始め、その後既燃部は素早く拡がり、 $t = 0.48$ ms では噴流内部に広く分布する。また、(a) では点火位置・時刻における当量比がおおよそ 1.8 であるために素早く燃え広がるのに対して、(b) および (c) では 7.4 程度であり、火炎核の形成が遅い。

図 6 は容器内の圧力 p の時間 t に対する変化であり、実験において図 5 中の P 点で計測された結果を併せて示す。これによると、いずれの条件においても計算は実験結果をよく表していることが分かる。すなわち、 $\Delta t_i = 0.3$ ms では時間に対してほぼ線形に上昇し、

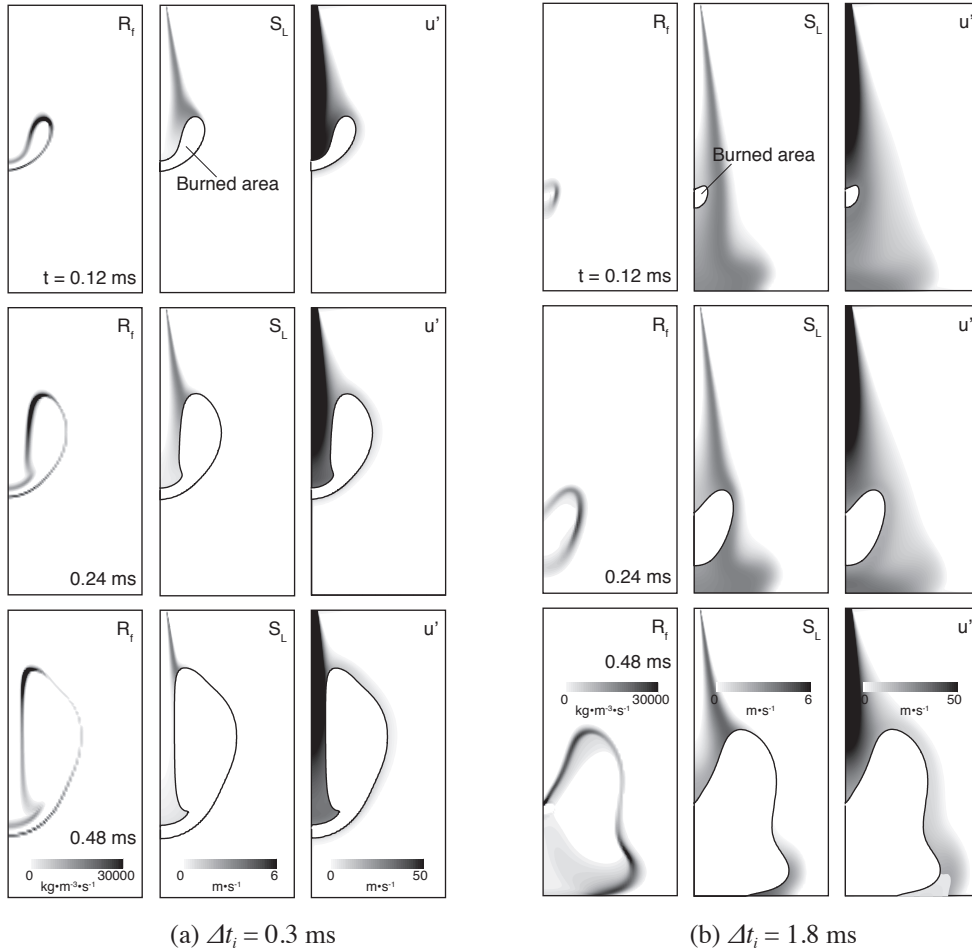


Fig. 8 Distributions of heat release rate R_f , laminar burning velocity S_L and turbulence intensity u'

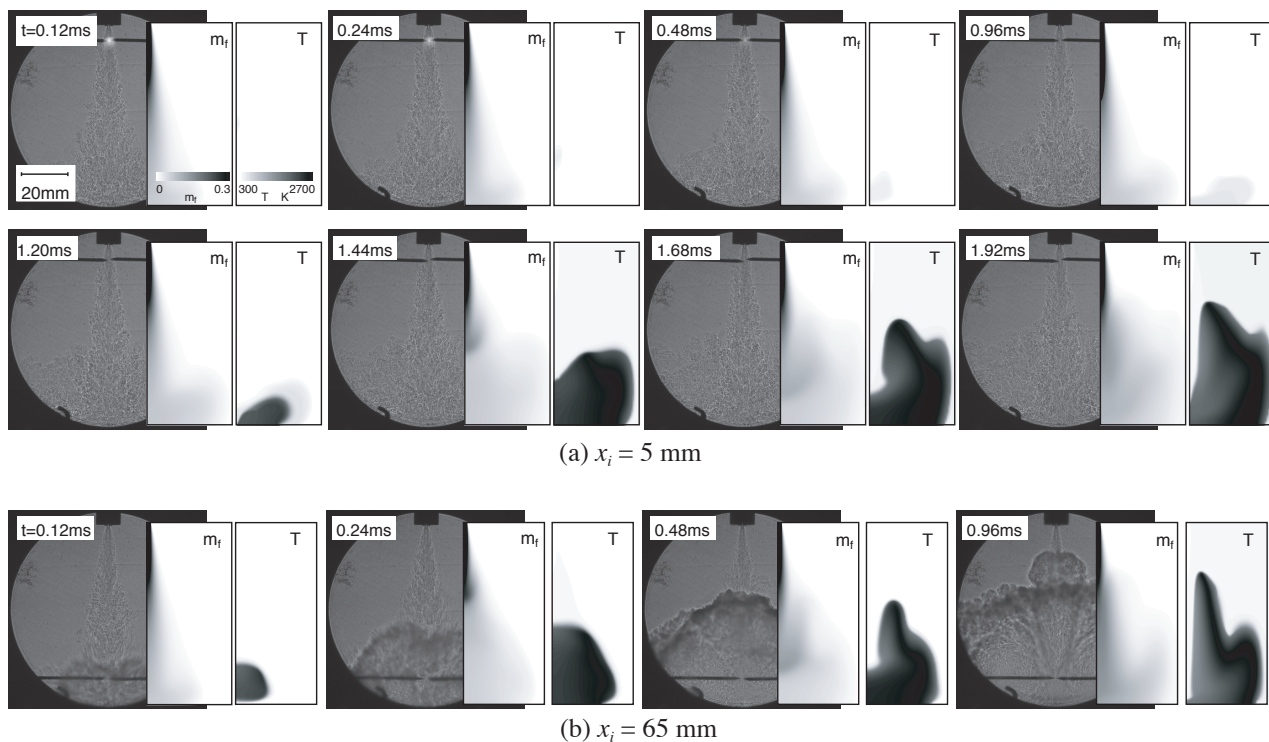


Fig. 9 Effect of igniting position ($\Delta t_i = 1.8$ ms)

$\Delta t_i = 0.8$ ms では初期において圧力上昇が緩やかな期間があった後、 $t = 0.2$ ms あたりより時間に比例して圧力が上昇する．これに対して、 $\Delta t_i = 1.8$ ms では $t = 0.2$ ms までほとんど圧力が変化せず、その後 0.7 ms くらいにかけて急激に圧力が上昇する．これは図 5 の (c) において急激に既燃部が広がるのに対応している．

噴流内の混合気形成状況を明らかにするために、混合気の当量比 ϕ に対する体積ヒストグラムの時間変化を算出した．図 7 はその結果であり、 $\Delta t_i = 0.3$ ms および 1.8 ms について示す．なお、図中のハッチングは既燃部、黒塗りは未燃部を表すとともに、点火位置の当量比も併せて示す． $\Delta t_i = 0.3$ ms では、層流燃焼速度が最大になる $\phi = 1.8$ 付近で点火しているが、その時点で混合気が十分に分布していないために、その後、噴流によって燃料が供給され、乱流混合によって混合気が準備されると同時に燃焼が進行する．これに対して $\Delta t_i = 1.8$ ms では点火位置において $\phi = 7.4$ であり、燃焼速度の高い $\phi = 1.8$ 近傍の混合気に達するまでに時間を要する．しかし、その間に混合気が形成されるために、 $t = 0.2$ ms 以降に一気に燃え広がる様子が分かる．

この急激に圧力上昇する際の火炎伝播の様子を明らかにするために、図 8 に (a) $\Delta t_i = 0.3$ ms および (b) $\Delta t_i = 1.8$ ms における燃焼進行度の生成速度 R_f の空間分布を火炎面の位置と併せて示す．また、 R_f の値が反応あるいは乱流のいずれに影響を受けているかを検

討するために、層流燃焼速度 S_L および乱れ強さ u' の分布をあわせて示す．これによると (a) では点火直後より噴流先端の比較的 S_L の大きな外縁に沿って R_f の値が大きくなり、その後の火炎の発達は噴流上流より混合気が供給される速さに律速される．これに対して (b) では点火直後においてすでに可燃予混合気が十分に準備されているために、火炎 前方に S_L の大きな領域が広がっており、その領域に向けて火炎が伝播している様子が分かる．また、いずれの条件においても R_f の高い領域は u' の高い領域に対応しておらず、層流燃焼速度の高い領域に向かって主に燃焼が進行することが分かる．

最後に点火位置を変更して、点火ポイントにおける乱流特性がその後の燃焼予測に与える影響を調べる．図 9 はその結果であり、 $\Delta t_i = 1.8$ ms について噴流上流で点火する (a) Case 4 $x_i = 5$ mm と下流の (b) Case 5 $x_i = 65$ mm について m_f および T の分布の時間変化を実験で得られたシャドウグラフと比較して示す．(b) の計算結果では実験をおおむね再現しているが、(a) では実験では火炎が観察されないのに対して、計算では長い点火遅れの後に火炎が急激に広がる．これは、計算において点火過程に既燃部を強制的に与えたためであり、高温部の拡散による失火を表現できなかったものと考えられる．このような、失火過程を検討するためには、点火および燃焼のより詳細なモデリングが必要であろう．

4. ま と め

以上、定容容器内に噴射された水素噴流の流動および火花点火燃焼過程を $k-\varepsilon$ 乱流モデルおよび火炎伝播モデルに基づいた CFD により解析した。これにより、実験結果をほぼ記述でき、とくに点火時刻による火炎伝播過程の変化に関して以下のことが明らかになった。

- (1) 噴流発達初期において先端付近で点火をする場合、火炎は噴流先端の外縁に拡がり、その後、噴流境界を上流に向かって伝播する。これは、わずかに形成された噴流先端部の予混合気に火炎伝播した後、噴流による燃料の供給に律速された燃焼になるためである。
- (2) ある程度発達した噴流の中心部で点火をする場合は、燃焼初期は流動に流されるとともに、緩やかに火炎が拡がった後、急激な燃焼に至る。
- (3) 水素の層流燃焼速度が大きいために、噴流内における火炎伝播過程においては、主に層流燃焼速度の大きい領域に向けて火炎が伝播する。

記 号

b :	燃焼進行度
C_n :	ノズルにおける流量計数値
d_n :	仮想ノズル直径
d_0 :	ノズル直径
h :	エンタルピー
k :	乱れエネルギー
m_f :	混合分率
p_a :	雰囲気圧力
p_f :	燃料噴射圧力
p_0 :	容器内圧力の初期値
R_f :	燃焼進行度の生成率
r_v :	混合気のヒストグラム
S_L :	層流燃焼速度
S_T :	乱流燃焼速度
t :	点火後の時刻
T_i :	容器内温度の初期値
u_n :	仮想ノズル位置における流速
u' :	乱れ強度
x_f :	ノズルから点火位置までの距離
Δt_f :	噴射開始から点火までの時間間隔
γ :	燃料の比熱比
ε :	乱れエネルギーの消散率
ρ_u :	未燃ガスの密度
ϕ :	当量比

文 献

- (1) Rottengruber, H. et. al., A High-Efficient Combustion Concept for Direct Injection Hydrogen Internal Combustion Engines, *Proceedings of 15th World Hydrogen Energy Conference*, 28J-01 (2004), pp 1-13.
- (2) Kawasaki, K., Shioji, M., Eguchi, S. and Ogata, T., Optimal Use of Hydrogen and Natural-Gas Blended Fuel in a Gas Engine, *JSAE Transaction*, Vol. 34, No. 3 (2003), pp 11-16.
- (3) Shioji, M., Mohammadi, A., Nakai, Y., Ishikura, W. and Tabo, E., Performance and Combustion Characteristics of a Direct Injection SI Hydrogen Engine, *Proceedings of the 18th Internal Combustion Engine Symposium (Int.)*, Paper 20056094.
- (4) Shioji, M., Matusi, Y., Kajiwar, R., Mohammadi, A., *JSAE Transaction*, Vol. 37, No. 1 (2006), pp13-18.
- (5) Messner, D., et. al., Application and Validation of the 3D CFD Method for a Hydrogen Fueled IC Engine with Internal Mixture Formation, *SAE Paper No.* 2006-01-0448.
- (6) Kawanabe, H., Naito, Y. and Ishiyama, T., Numerical Analysis for Mixing Process of High-speed Unsteady Jets Using PDF-CFD Model, *SAE Paper No.* 2006-01-1193.
- (7) Kawanabe, H., Naito, Y., Kosaka, H. and Shioji, M., CFD Analysis of a High-speed Unsteady-jet, *Heat Transfer--Asian Research*, Vol. 36, No. 1 (2007), pp 1-12.
- (8) Kawanabe, H., Shioji, M., Tsunooka, T. and Ali, Y., CFD Simulation for Predicting Combustion and Pollutant Formation in a Homogeneous-Charge Spark-Ignition Engine, *Proceedings of COMODIA 98* (1998), pp233-238.
- (9) Lewis, G. and Elbe, G., *Combustion, flames and explosions of gases 2nd Ed.* (1961), Academic Press.
- (10) Iijima, T and Takeno, T., Effects of temperature and pressure on burning velocity, *Combustion and Flame*, 65 (1986), pp35-43.
- (11) Lawrence Livermore National Laboratory, "Hydrogen, 2004". (online), available from <https://www-pls.llnl.gov/?url=science_and_technology-chemistry-combustion-hydrogen>, (accessed 2010-7-21).