

研究論文

水素／空気火炎ジェット着火の当量比・オリフィス径の依存性に関する数値解析

尾藤萌^{*†}, 朝原誠^{**}, 山田英助^{**}, 林光一^{**}

^{*}青山学院大学大学院理工学研究科 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1

[†]Corresponding author: hajime19890912@gmail.com

^{**}青山学院大学理工学部 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1

Phone: 042-759-6509

2013 年 7 月 19 日 受付 2014 年 9 月 8 日 受理

要旨

火炎ジェット着火は、火炎がある燃焼室内で着火しそして伝播してオリフィスやノズルを通過後、別の燃焼室内に伝播する時に観測される現象で、急激な圧力上昇や非常に速い燃焼速度を持つ火炎のジェットになる。この火炎ジェット着火の実験による研究は、国内外で多々行われており、当量比やオリフィス径などのパラメータが着火現象に影響を及ぼすことが判明しているが、ジェット着火の詳細なメカニズムは十分に理解されていないのが現状である。そこで本研究では、オリフィスで仕切られた二つの燃焼室に満たされている水素／空気予混合気体の当量比と二つの燃焼室を結ぶオリフィス径をパラメータとし、それらがジェット着火現象にどのように影響を及ぼすかを市販のCFD++コードによって数値的に調べた。その結果、当量比が大きくなると、火炎の伝播速度が速くなり、Driver Chamber (DC) からReceiver Chamber (RC) に火炎が流入するタイミングが速くなり、ジェット着火現象の時間遅れがあったが、両方の場合にジェット着火は見られた。実験では、この条件で火炎がRCに到達する前にRC内で着火が起こるAuto Ignitionが見られているが、数値解析では確認されていない。また、数値解析では、実験と同様にオリフィス径の違いによって着火現象が変わることが示され、本論文ではその詳細な議論がなされた。

1. 緒言

ジェット着火は、現在「安全」と「エンジン」の二つの領域において研究が盛んである。「安全」については、原子炉における水素爆発の問題がその中でも重要課題であるが、多くの研究は「エンジン」に集中している。特に、ジェット着火を用いて、内燃機関の燃焼効率を上げる問題である。これに関しては、1976年にGussak¹⁾がAvalanche Activated Combustion (AAC) という考え方を発表して、なだれのように燃焼が起こるという現象を説明している。その後、Oppenheim²⁾は、ジェット着火の中にこのAACという現象を見ているとした。彼らは、ジェット火炎がDriver Chamber (DC) からReceiver Chamber (RC) にオリフィスを通して入った時に、小さいいくつかの火炎核があちこちから発達して、大きな一つのジェット状の火炎体になるという考え方で説明している。現在、内燃機関における燃焼に関してこの考え方が広まってきている。その後、1985年にMittiniti³⁾は、水素／空気混合気体を副燃焼室に、メタン／空気予混合気体を主燃焼室に入れて火炎ジェット着火の実験を行い、火炎核となる活性基化学種の影響だけでなく、乱流の渦によりジェット着火が促進されることを述

べている。1989年にOppenheim⁴⁾は、内燃機関内での燃焼にこのジェット着火の現象を応用し、パルス的に火炎ジェットを内燃機関の燃焼容器内に噴出することで、その燃焼効率を上げることに成功している。1999年に、末武⁵⁾が原子炉内のコンパートメントにおけるジェット火炎現象を調べるためにこの火炎ジェット着火の実験と計算を行い、高速のジェット火炎が形成されることを確認している。2000年には、Hayashi⁶⁾が、実際にジェット着火を2気筒エンジンに適用して、非常に高い燃焼圧力を得ている。また、浅見⁷⁾がジェット着火の特性を見るためにLIF計測を行い、火炎がオリフィス通過後に一度消炎していることを確認している。原子炉内のこのようなジェット火炎伝播の研究で、Jordan⁸⁾も同じようなジェット着火の実験を行い、当量比とオリフィス径によっては、ジェット着火する条件とジェット着火しない条件があることを示している。彼らのグループ（ミュンヘン工科大学）は、原子炉の事故で、ジェット着火が非常に重要であることを述べている。その他のジェット着火の研究はOppenheimのグループとHayashiのグループによる、内燃機関の燃焼に対する応用研究で、例えば最近の研究では、Carpio⁹⁾が水素／

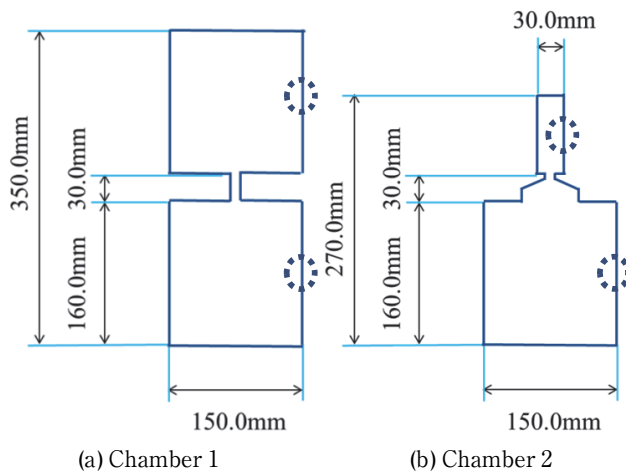


Figure 1 Numerical configurations of two different two-dimensional combustion chambers.

空気混合気内での高温ジェット着火における臨界ジェットの半径を数値的に求めている。最近のエンジンの研究では、Boretti¹⁰⁾が、水素を使ってディーゼルエンジンに直接ジェットを噴出させて着火を試みている。現状では、ジェット着火のメカニズムが十分には解明されていない。

本研究では、火炎ジェット着火の詳細機構を、市販ソフトを使って数値的に明らかにすることを目的とした。今回は、水素／空気混合気の当量比とオリフィス径をパラメータとして、これらのパラメータがジェット着火にどのような影響を与えるのかを調べる。また、実験では得られているAuto-Ignition（オリフィスのある壁で仕切られた二つの燃焼室の一方の燃焼室（DC）で着火して出来た火炎が、オリフィスを通過してもう一方の燃焼室（RC）に伝播する前に、このRCで着火が起こる）が計算で得られるのかを確認する。

2. 火炎ジェット着火の概要・理論

火炎ジェット着火の概要は緒言で述べたようなものであ

る。ここではさらに末武⁵⁾の分類したジェット着火過程について詳細に説明する。Figure 2 は末武の実験で確認された燃焼形態を横軸オリフィス径、縦軸当量比でまとめたものである。この際の実験容器はRCを小さくした (Figure 1b) の実験容器を用いている。1 つ目のタイプ (Jet Ignition) は一般的なジェット着火であり、DCで発生した火炎が、オリフィスを通過し、RCで爆発的に燃焼するという現象である。2 つ目のタイプ (Auto Ignition) はDCで発生した火炎がオリフィスを経過する前に、RCで着火するという、自着火に似た現象である。最後の 3 つ目のタイプ (Transient Ignition) は 1 つ目のタイプと 2 つ目のタイプが混合しており、どちらかに区別することができないものである。どのタイプも高い熱効率を持ち、その応用が期待されている。しかし、末武の研究では着火形態がこの 3 つのタイプに分かれる原因を突き止めることはできなかった。また、浅見⁷⁾は、末武と同様の実験容器を用いてLIF計測を行い、圧縮波や容器の天井がよどみ点となることで断熱圧縮され、ジェット着火に至ると推測した。しかし、ジェット着火機構の最終的な結論には至っていない。

また、Jordan⁸⁾も火炎ジェット着火の実験を行っており、当量比と閉塞率（オリフィス径）をパラメータとして、ジェット着火する領域とジェット着火しない領域に分かれることを確認している。Jordan⁸⁾は火炎ジェット着火が乱流のみでなく、中間生成物が相互作用することによって、ジェット着火が起きていることを示唆している。

3. 数値解析法

本研究では、汎用数値計算ソフトCFD++¹¹⁾を用いて計算を行った。支配方程式には圧縮性Full Navier-Stokes方程式を用いた。数値解析手法には、対流項にHartenタイプのTVDスキーム、時間積分にはMerkleとAthavale¹²⁾ (1987) が紹介し、RaiとChakravarthy¹³⁾によって非定常圧縮性問題に応用された、Dual Time Steppingを使った時

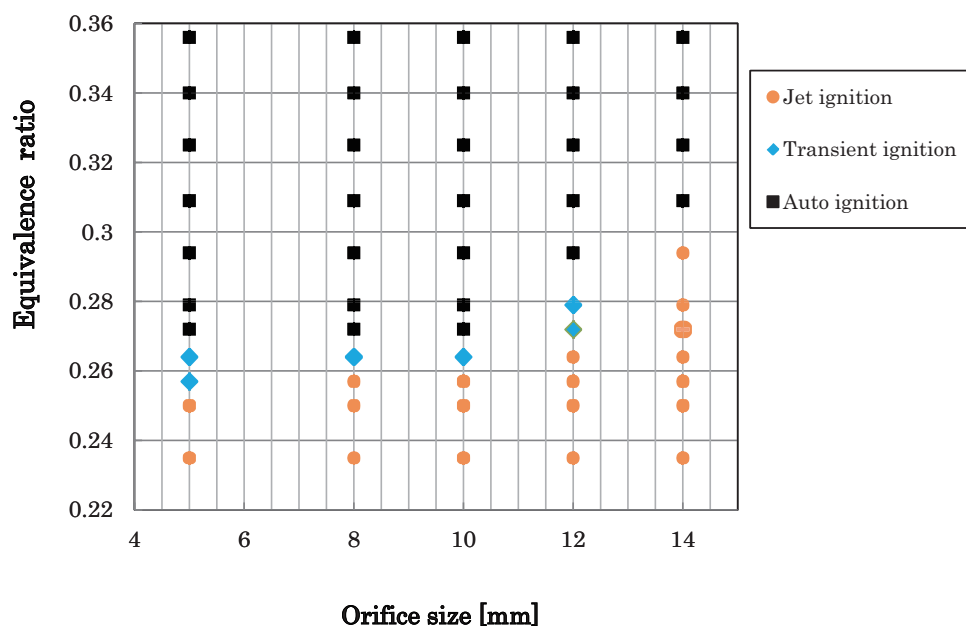


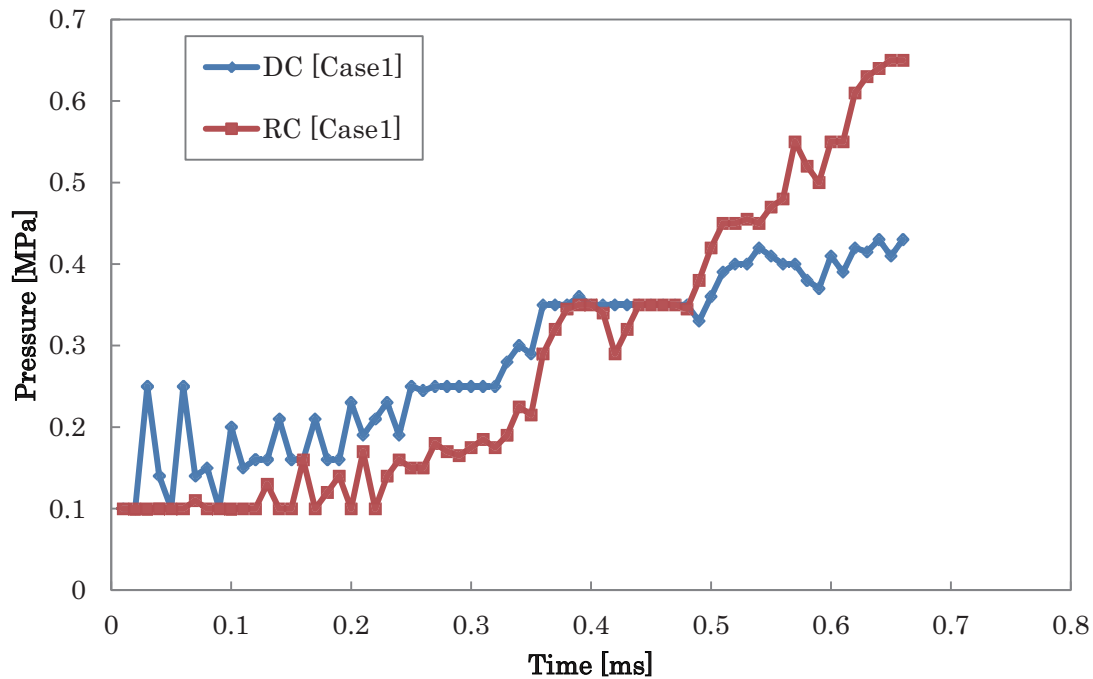
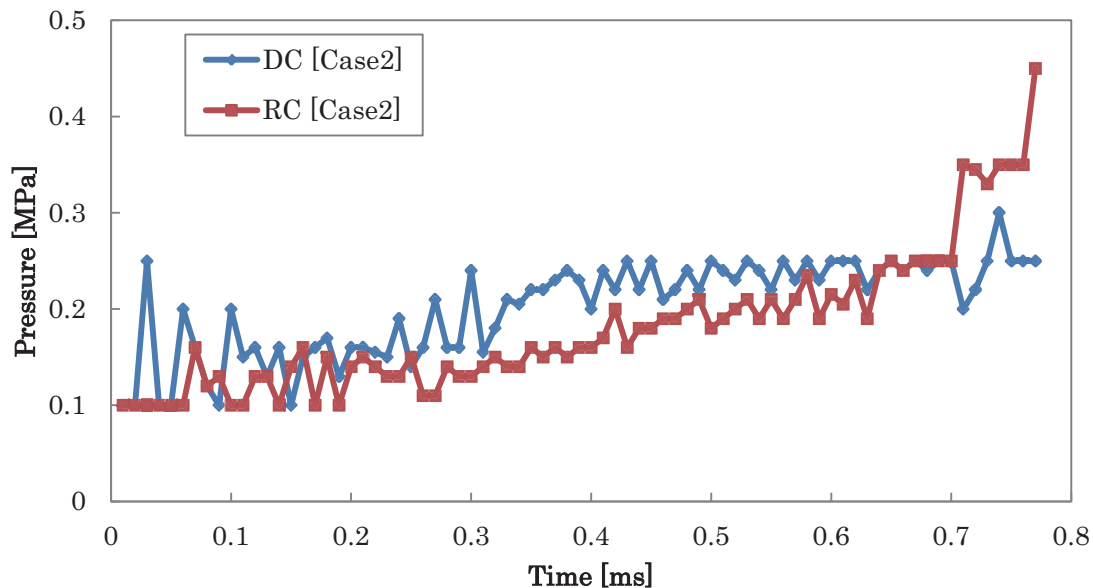
Figure 2 Map of jet ignition system obtained from the Schlieren movies using Chamber 2²⁾.

Table 1 Initial conditions for the present numerical simulation.

	Case1	Case2	Case3	Case4
Orifice size [mm]	10.0	10.0	5.0	14.0
Initial pressure [MPa]	0.10	0.10	0.10	0.10
Initial temperature [K]	293	293	293	293
Equivalent ratio	0.404	0.340	0.340	0.340

間陰解法を用いた。これは、擬似時間 τ を仮定して、時間積分項が差分化される。差分化の時に用いられた擬似時間微分 $\Delta\tau$ は、最終的にはゼロか、ある小さい値よりは小さくなり、一時的な時間には物理的に影響を与えない。Dual Time とは、 $\Delta\tau$ と Δt の二つの時間を使うことからきている。

また、燃料には水素、酸化剤には空気を、乱流モデルには Germano¹⁴⁾ の One equation LES model を用いた。末武⁵⁾ の使用した燃焼容器を 3 次元実スケールで模擬することは、計算コスト上厳しいため、本解析では 2 次元の燃焼容器でジェット着火を再現した。また、化学反応モデルには、化学種数 9、素反応数 18 の詳細化学反応モデル¹⁵⁾ を用いて計算を行った。今回は当量比、オリフィス径をパラメータとしている。当量比においては燃焼下限界に近い 0.340, 0.404 で計算し、オリフィス径に関しては、5 mm, 14 mm で計算し、それらの依存性を確認した。また、模擬する実験容器においては、オリフィス径の依存性を確認するために、RC を小さくした容器 (Figure 1b) を模擬している。その他の初期条件は以下の Table 1 に記されたようになっている。

(a) Case1 ($\phi = 0.404$)(b) Case2 ($\phi = 0.340$)**Figure 3** Time history of pressure profiles at DC and RC for (a) case1 ($\phi = 0.404$) and (b) case2 ($\phi = 0.340$) using Chamber 1.

4. 計算結果

本論文では、以下に述べるように、当量比とオリフィス径のジェット着火に対する影響を調べた。当量比の依存性に対しては、DCとRCが同じサイズの燃焼器を用い、オリフィス径の依存性に対しては、RCがDCの10分の1の小さい燃焼器でのジェット着火を調べた。

4.1 当量比の依存性

この当量比の依存性の問題では、DCとRCの大きさが同じChamber 1 をモデルとした数値シミュレーションを行った。計算条件は、表 1 で示されているCase 1 とCase 2 の場合である。Figure 3 は、Figure 1 aのRCとDCの右側の壁の円形破線で囲まれた位置における圧力履歴を示している。この結果より、当量比 ϕ が0.404のCase 1 ならびに0.340のCase 2 の両方ともに、DCの底壁で着火してから火炎がRCにオリフィスを通して伝播するまで、DCでの圧力がRCに比べて高くなっているが、DCでの圧力とRCでの圧力がある時間で入れ替わるのがFigure 3 から分かる。つまり、両方の条件でジェット着火が起きていることが確認できる。この圧力変化が起こるのは、Case 1 の場合は450–500 μ sのあたりで、Case 2 の場合は650–700 μ sのあたりである。この圧力の入れ替わり時間の違いは当量比の違い（つまり、初期エネルギーの違い）から来るもので、当量比が大きいCase 1 の方が火炎が速くRCに伝播し、RCの圧力を上げることになる。

Figure 3 の結果はジェット着火の大きな特徴の一つであり、RCでの燃焼速度が速いことから予想できる。Figure 4 の温度分布をみると、当量比の大きいCase 1 では、DCでの火炎がRCとの仕切り壁に到達した時間が、DC下壁での着火から330 μ sの時間が経っているが、Case 1 に比べて当量比の少し小さいCase 2 では、火炎が仕切り壁に到達する時間が450 μ sとCase 1 に比べて長くなっている。この結果から、Case 1 におけるDCでの火炎伝播速度の方が、Case 2 におけるDCでの伝播速度よりも速いと理解できる。このことは、当量比の関係から、初期エネルギーが大きいほどそこでの伝播速度が速くなるということで、十分予測できることである。

Figure 5 は、Case 1 とCase 2 のOH質量分率の分布を表したもので、Case 1 では火炎がDCからRCに火炎の切れ目もなく伝播しているのに対し、Case 2 では、火炎がオリフィスを通じた後で、オリフィス内と出た直後付近で消炎したようになっている。この消炎は、浮き上がり火炎（非予混合燃料が酸化剤中にノズルやオリフィスを通して、ある条件下でそのような浮き上がる火炎を形成する場合）のようにはなっているが、本研究の場合は予混合火炎で、消炎は急な膨張で温度が低下して起こったと考える。つまり、そのために仕切り壁の中では、Case 2 の場合OHの分布が非常に低くなっている。これは、Case 2 において当量比が小さいことで火炎が弱く、オリフィス通過時に生じる速度の増加（膨張）に伴う温度低下がCase 1 よりも火炎に効いていると考える。また、Case 2 では火炎がRCに伝播する前に既燃ガスがRCに流入しているように見える。これらの既燃ガスには活性基（ラジカル）が含まれ

ており、これらのラジカルが再着火を助ける役目をすると考ええる。この再着火が強いジェット着火を生じることになる。実験で得られたジェット着火のマップを示すFigure 2²⁾に見られるように、Case 2 の数値解析条件では、Auto ignition（自着火：火炎がDCを伝播してRCに入る前にジェット着火が起こる場合）が起こる領域になっており、実験と数値解析に差が出ていることが理解できる。この違いの理由はたくさんあるが、まず計算が2次元で行われており、RCでの上部角での圧縮現象が十分に解析されていないこと、化学反応は詳細な反応機構を用いているが、高压の三体反応の取り扱いが十分でないなどがあげられる。この結果として、数値解析ではAuto ignitionがどの当量比に対しても（数値解析では、0.340と0.404の二種類しか計算していないが）その時間的な遅れなどがあるが、いわゆるジェット着火になっている。

本計算ではRCでのジェット軸での圧力と温度分布の時間履歴のデータはないが、同じ混合条件（ $\phi = 0.404$ ）で同じサイズの燃焼器に対して、違うプログラム²⁾（特に、今回との大きな違いは、このときは乱流モデルが使われていない）による2次元計算結果では、(a) RCの側壁の中間付近での圧力履歴と (b) ジェット中心軸上でRC天井付近での圧力履歴及び (c) ジェット中心軸上でRC天井付近での温度履歴は、Figure 6²⁾のようになっている。サイズの違いから一対一の比較はできないが、Figure 6 – (a) の側壁での圧力で、RCでの圧力の上昇がみられない $t = 20$ msにおいて、Figure 6 – (b) のジェット軸中心でRCの天井付近では、すでに圧力が0.22 MPaになっており、 $t = 30$ msでは、0.3 MPaになっている。この場合、Figure 6 – (c) でみられるように温度は $t = 20$ msで375 K、 $t = 30$ msで430 Kほどになっている。この計算では、DCでの火炎がオリフィスを通してRCに噴出する時間が約31 msであるので、火炎がオリフィスを通りぬける前に、RCの天井付近の温度が上昇していることが理解でき、Auto ignitionの可能性を示唆していることが十分にわかる。

4.2 オリフィス径の依存性

このオリフィス径の依存性の問題では、Figure 1 に示されているRCがDCより小さい（面積比で10分の1）Chamber 2 を用いたシミュレーションを行った。計算条件は、表 1 におけるCase 3 とCase 4 で、当量比 ϕ は0.340、オリフィス径が5 mm (Case 3) と14 mm (Case 4) の場合を比較した。Figure 7 とFigure 8 は、それぞれのCaseの燃焼器内の温度分布および密度分布の時間履歴を示している（Case 3 が (a) でCase 4 が (b)）。これらの結果から、オリフィス径が5 mmのCase 3 ではジェット着火が確認されたが、オリフィス径が14 mmのCase 4 ではRC内で火炎の伝播が20 msでもそれほど進んでいないことが図から分かる。この結果の主たる原因の一つは、オリフィスでのチョーク（閉塞）現象で、オリフィスが小さいほど(Case 3)、オリフィスを通じた火炎はオリフィス通過中または通過後に消炎し、ジェット着火になりやすい。Case 4 の14 mm径のオリフィスの場合は、オリフィスでそれほどチョークしていないので、単なる火炎の通過

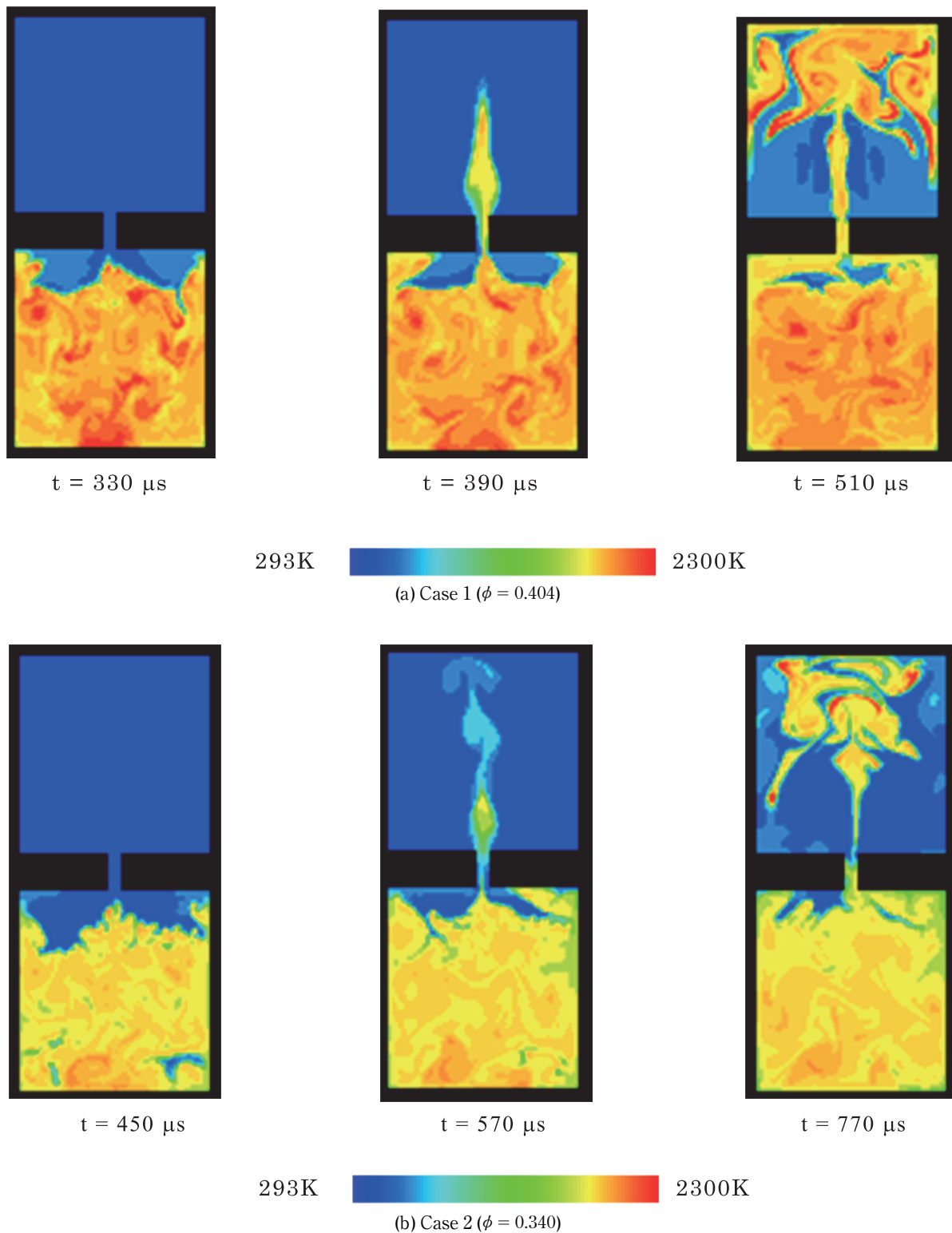


Figure 4 Time history of temperature distributions in Chamber 1.

という現象に近くなっている。RCでのDCからの未燃ガスならびに一部の既燃ガスの流れがジェット性であるかどうかで、RCでの混合度やFigure 6 で見られたRCの天井での圧力、温度の上昇といった現象が生じるかどうかに関係すると思われる。

Figure 9 はオリフィス径が 5 mm (Case 3) と 14mm (Case 4) におけるDCとRCでの圧力履歴を示している。数値計算による圧力測定の場合は、Figure 1 - b) に示されているDCとRCの右側壁面の中央部である。この圧力履歴の

結果を見ると、ジェット着火が起こったオリフィス径 5 mmの場合と起こらなかったオリフィス径 14mmの場合で、 $t = 18\text{ms}$ の到達圧力にはほとんど差がなかったものの、圧力履歴の様子が少し違うことが分かる。Figure 9 - a)の $d_{\text{orifice}} = 5 \text{ mm}$ のCase 3 の場合は、圧力履歴が全体に滑らかで、RCに伝播した $t = 10\text{ms}$ 以後ではほとんど振動していない。これに対し、 $d_{\text{orifice}} = 14\text{mm}$ のCase 4 の場合は、全体にその圧力履歴が振動している。この現象は、まず初めにオリフィス径が大きい方がDC内での燃焼が速く、それ

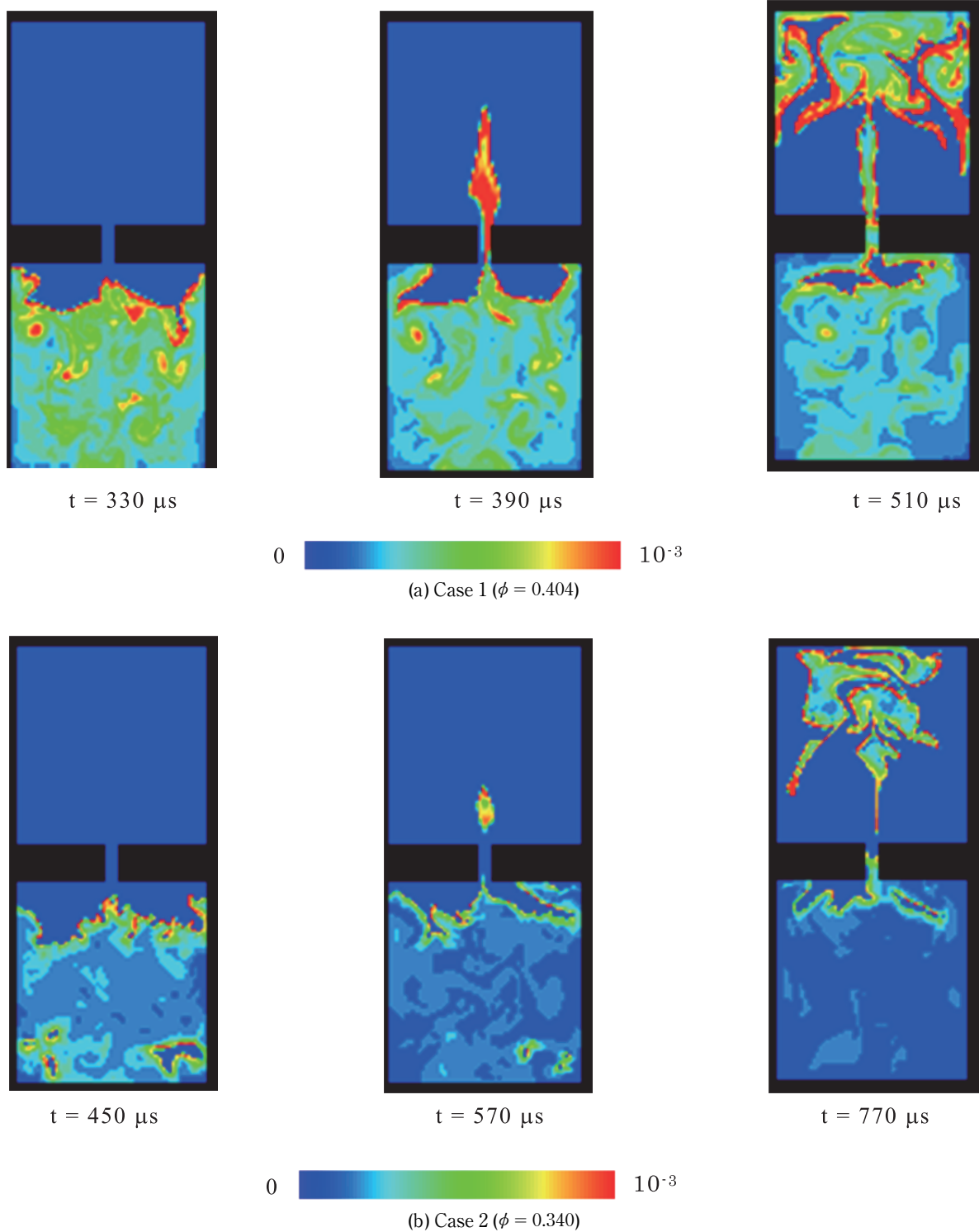


Figure 5 Time history of OH mass fraction distributions in Chamber 1.

だけDC内の圧力上昇が大きくなっている ($t=40\text{ms}$ で既に 0.22MPa に達している)。そして、火炎がオリフィスを通り抜けてRCに伝播しようとした時 ($t=8.5\text{ms}$)に、RC内の圧力がDC内の圧力より 0.03MPa ほど高くなりRC内を伝播しにくい状態になる。その 0.5ms 後に再びDC内の圧力が 0.29MPa になり、RC内の圧力より 0.03MPa ほど高くなって (つまり、火炎がDCからRCに伝播しやすくなり)、RCに伝播する。そしてRC内の圧力が再びDC内の圧力より高くなるという繰り返しを行っている。このように、DC内とRC内の相対圧力が変わること、Figure 9 - bに

示されるように圧力振動が起こったと考えられる。オリフィス径が 5mm の場合は、このような圧力差があまり生じず、DCとRCの圧力が同じように上昇することで、双方の圧力上昇が起こっている。つまり、双方の燃焼室での燃焼があまり強い圧力差を生じずに起こったと考える。このような圧力履歴のもとで、オリフィス径が 5mm の場合には、ジェット着火に必要なジェットがRC内で現れ (Figure 7 - aとFigure 8 - aの $t=10\text{ms}$ でのRC内で見られる)、Case 1 やCase 2 ほど強くはないが、Case 3 でジェット着火が起こっていると考えられる。

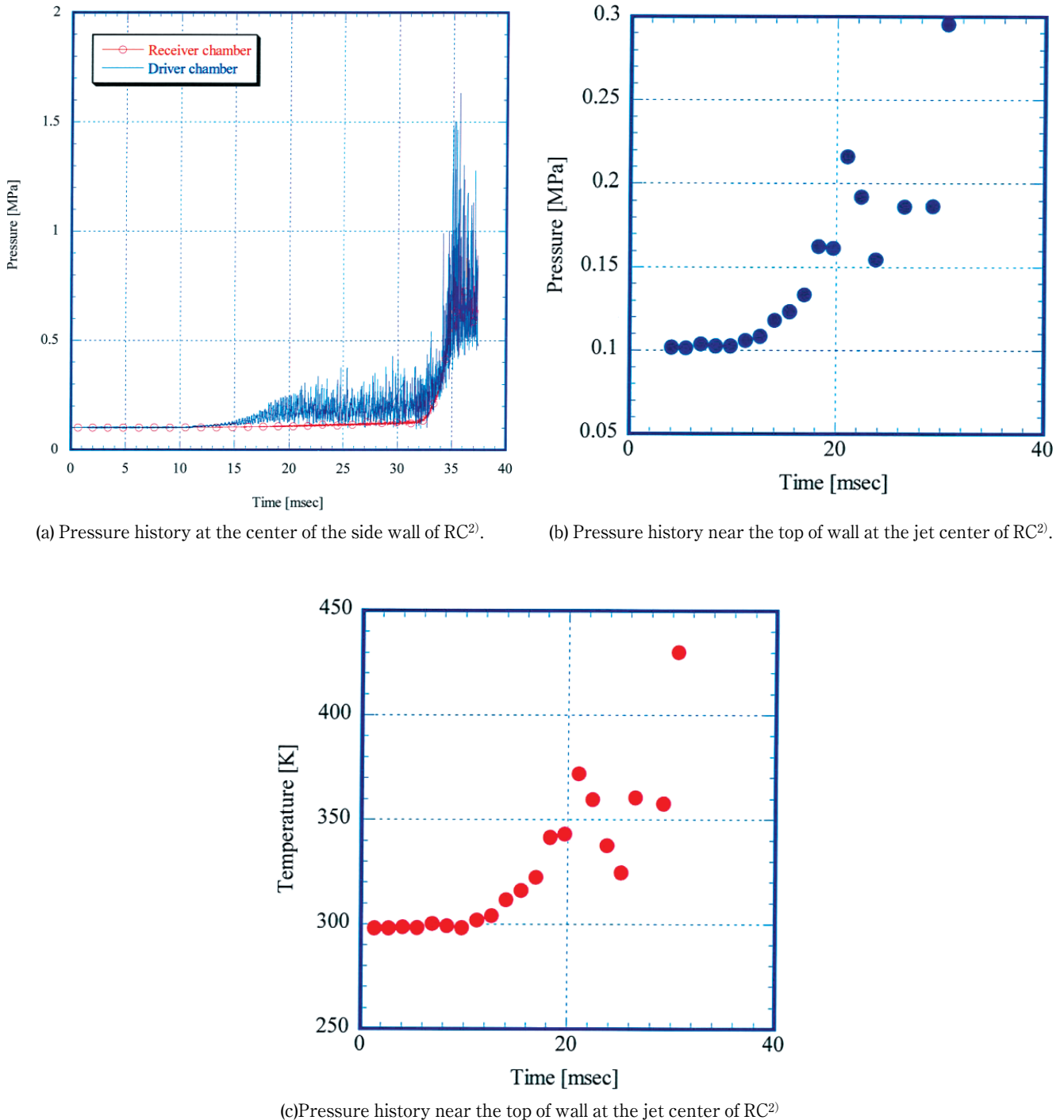


Figure 6 Comparison between (a) pressure history at the side wall center, (b) pressure history near the top wall at the jet axis, (c) temperature history near the top wall at the jet axis, for the case of $\phi = 0.404^{(2)}$.

5. 結言

二室間をオリフィスで結んだ燃焼容器内をDriver Chamber (DC) からReceiver Chamber (RC) に伝播する火炎のジェット着火現象を当量比ならびにオリフィス径をパラメータとして、CFD++という市販のソフトを用いて数値解析を行った。特に本研究では、実験で行われた二つの燃焼器の形状について、ジェット着火が起こる場合の火炎の伝播構造と起こらない伝播構造などを議論した。また、実験で見られたAuto ignition現象についても議論した。

結果として以下のことが分かった。

(1) DCとRCの燃焼室サイズが同じ燃焼器モデルでは、同

じオリフィス径 (10 mm) に対して、0.340 と 0.404 の二つの当量比の両方の場合にジェット着火が起こることを確認した。ただし、この二つの場合の違いはジェット着火が起こる時間であり、当量比の大きい場合の方が小さい場合より早く起こることを確認した。

(2) 面積比でRCがDCの10分の1の場合の同じ当量比 (0.340) に対して、オリフィス径が5 mmと14 mmの場合にジェット着火の存在の有無を調べ、オリフィス径が5 mmの場合に、弱いジェット着火が起こることを確認した。14 mmのオリフィス径では、オリフィス径のサイズとRCのサイズならびに燃焼と流体力学の相互干渉からジェット着火が起こらないことが判明した。

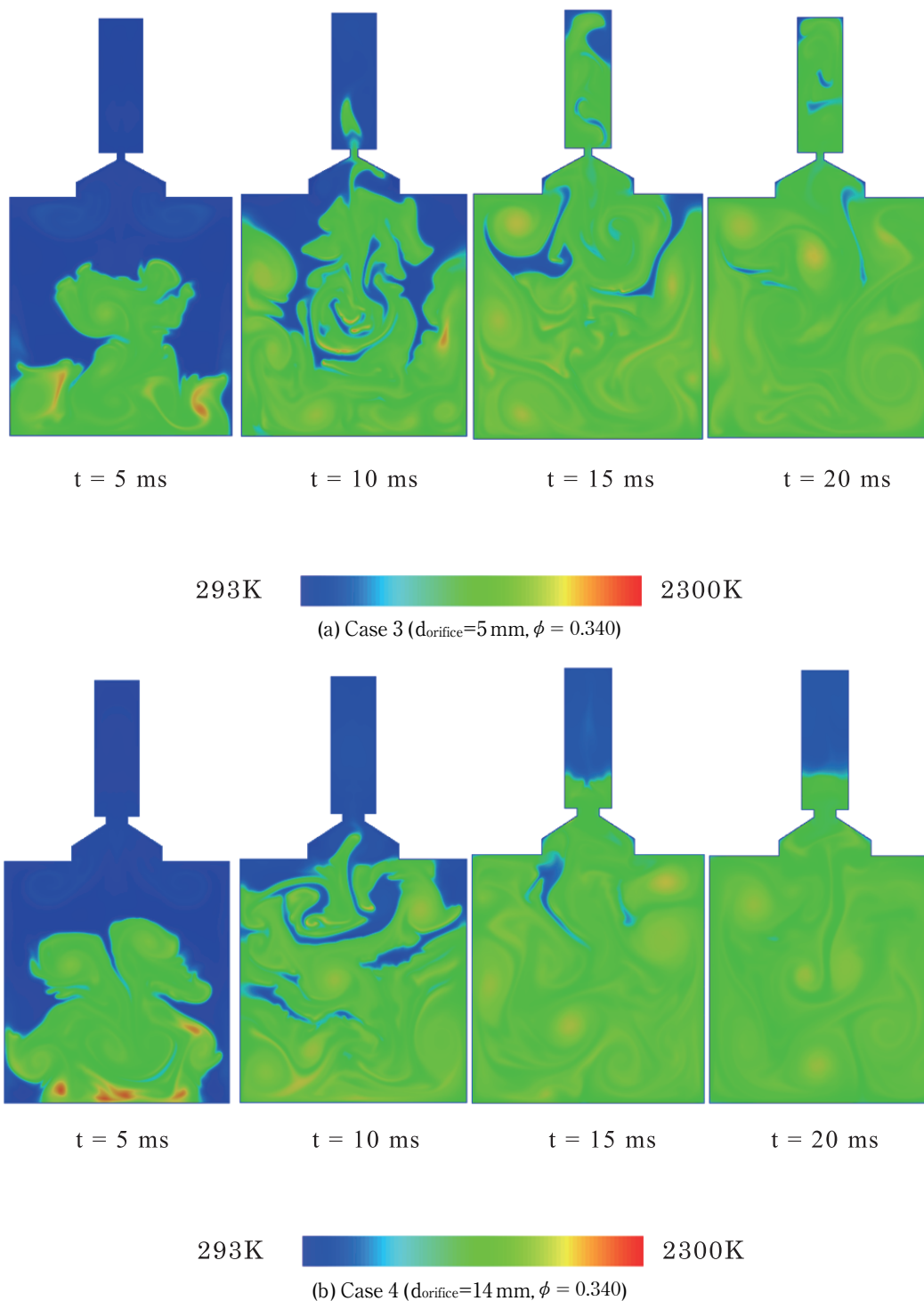


Figure 7 Time history of temperature distributions in Chamber 2.

(3) 実験で見られた火炎がオリフィスを通過する前にRCで着火が起こるAuto ignitionの現象は、今回の計算では確認できなかった。これは、2次元計算であると同時に、計算条件などの理由によると判断できる。

引用文献

- 1) L.A. Gussak, SAE Transactions, Paper Number 750890, (1975)
- 2) A.K. Oppenheim, K. Teichman, K. Hom, H.E. Stewart, SAE Technical Paper 780637, (1978)
- 3) D. N. R. Mittinti, E. K. Dabora, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics Vol.105, Dynamics of Reactive System Part I: Flames and Configurations; Part II: Modeling and Heterogeneous Combustion, 38–68, (1985)
- 4) A.K. Oppenheim, J. Beltramo, D.W. Faris, J.A. Maxson, K. Hom, H.E. Stewart, SAE Technical Paper 890153, (1989)
- 5) M. Suetake, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, (2000) (in Japanese)
- 6) A.K. Hayashi, K. Matsuura, S. Baba, SAE Technical Paper 2000-01-0199, (2000)
- 7) K. Asami, K. Sakamoto, A. K. Hayashi, Proceedings of Seventh General Meeting, Kanto-Section, The Japan Society of Mechanical Engineers, Paper No.508, 397–398,

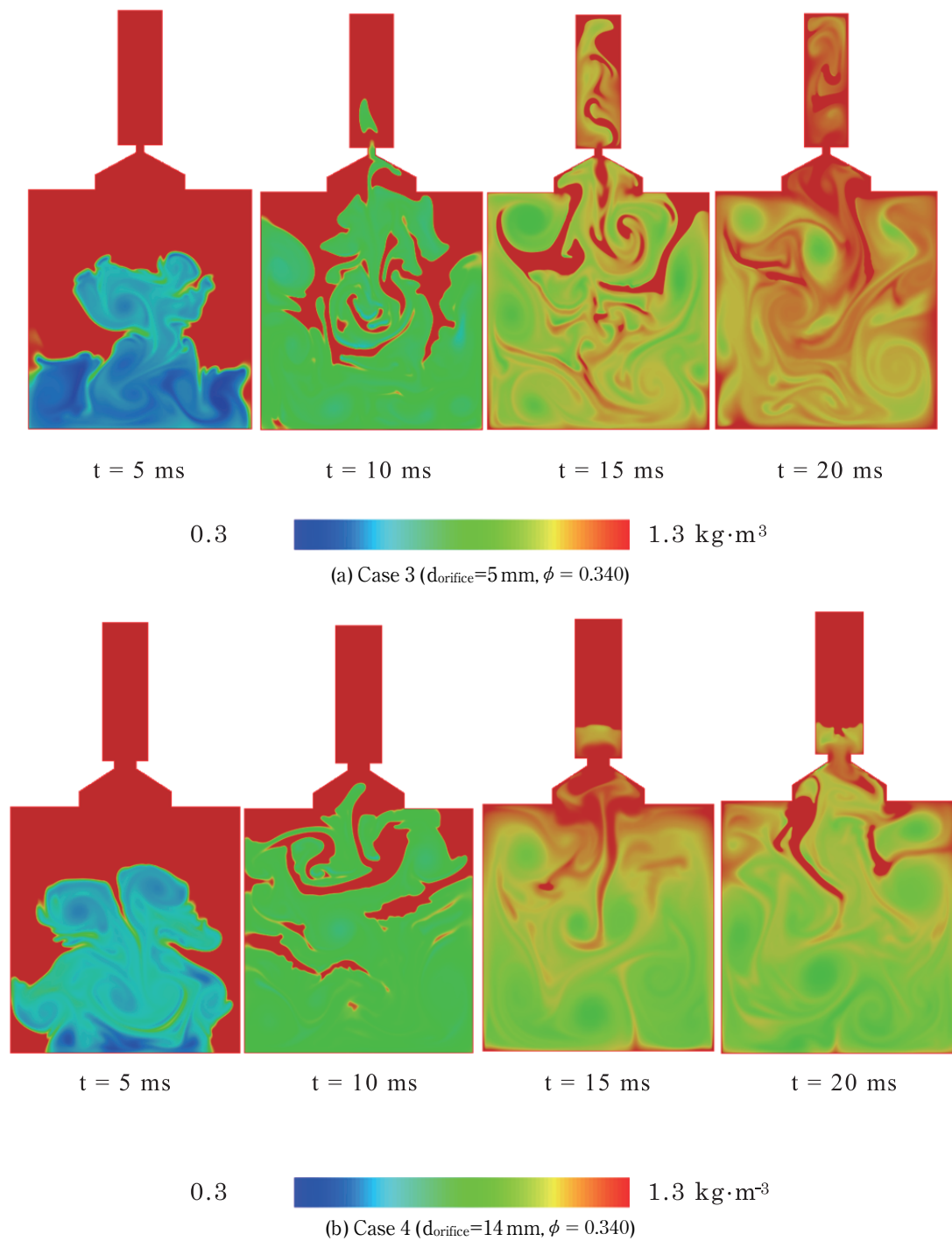


Figure 8 Time history of density distributions in Chamber 2.

- (2001)
- 8) M. Jordan, Ph.D. Thesis, Technische, Universitat Munchen, (1999) (in German)
 - 9) J. Carpio, I. Iglesias, M. Vera, A.L. Sanchez, A. Linan, International Journal of Hydrogen Energy, 38, 3105–3109, (2013)
 - 10) A.A. Boretti, International Journal of Hydrogen Energy, 37, 13555–13563, (2012)
 - 11) <http://www.metacomp.com>(Metacomp Technologies Inc. : Website)
 - 12) L. Merkle, M. Athavale, AIAA Paper 87–1137, (1987)
 - 13) M. M. Rai and S. R. Chakravarthy. An implicit form for the osher upwind scheme. AIAA Journal, 24, 735–743, (1986)
 - 14) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W.H., Physics pf Fluids, A(3), 1760–1765(1991)
 - 15) J. P. Drummond, R. C. Rogers and M. Y. Hussaini, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 64, 39–60, (1987)

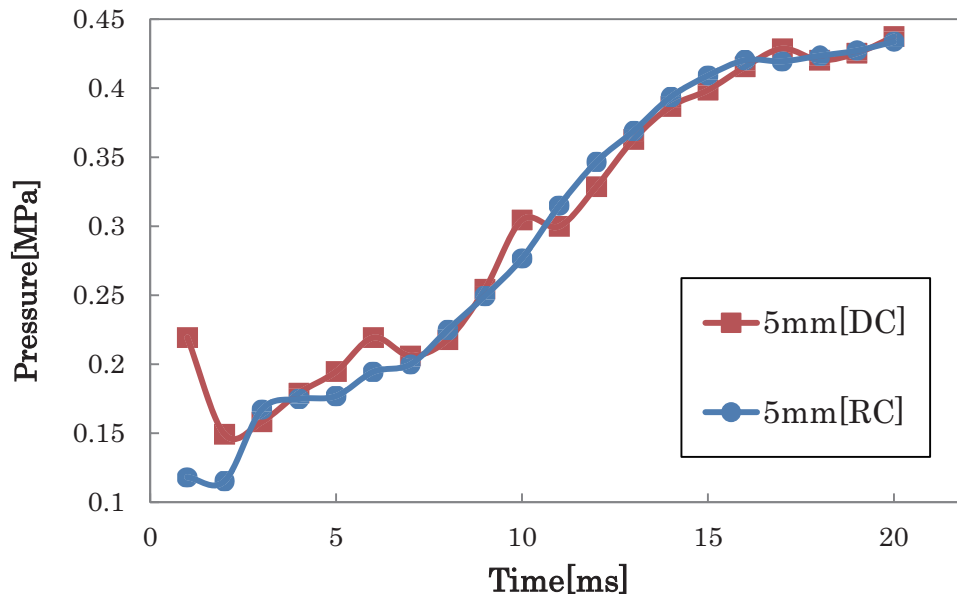
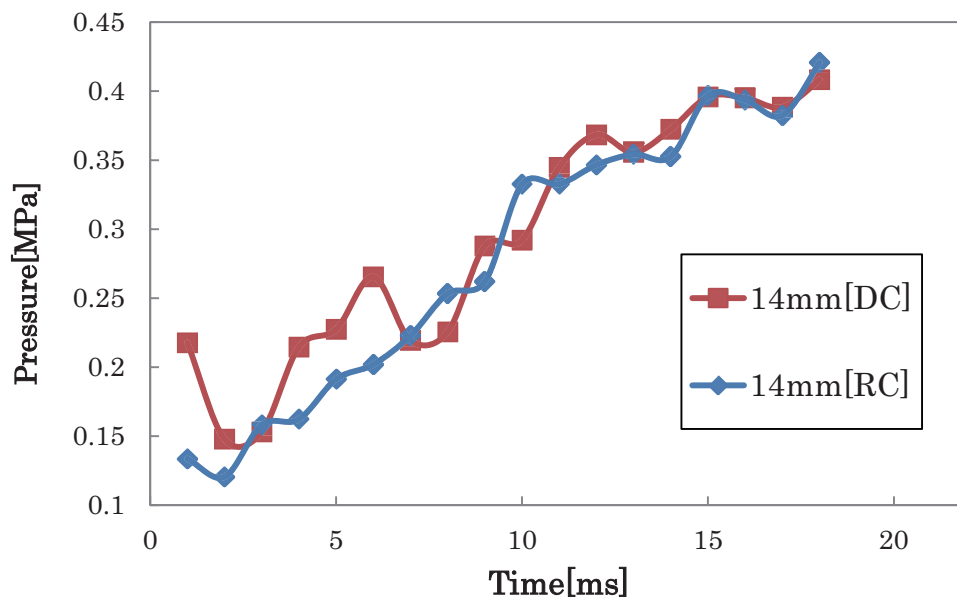
(a) Case 3 (d_{orifice}=5 mm, $\phi = 0.340$)(b) Case 4 (d_{orifice}=14 mm, $\phi = 0.340$)

Figure 9 Time history of pressure at the center position of the walls for DC and RC for case 3 (d_{orifice}=5 mm and $\phi = 0.340$) and case 4 (d_{orifice}=14 mm and $\phi = 0.340$).

Numerical study of hydrogen / air flame jet ignition for the dependence of the equivalent ratio

Hajime Bitoh^{*†}, Makoto Asahara^{**}, Eisuke Yamada^{**}, and Koichi Hayashi^{**}

Jet ignition is a phenomenon that flame is ignited to propagate in a driver chamber (DC) and after it passes through an orifice or nozzle, it may or may not distinguish once and becomes a stronger jet flame in a receiver chamber (RC). Experimental study of flame jet ignition is performed at many places in Japan and foreign countries to find out that equivalence ratio and orifice diameter influence jet ignition phenomena. However the detailed mechanism of jet ignition has not been clarified well. The present study shows numerically the influence of equivalence ratio of hydrogen/air mixture and orifice diameter between two rooms (DC and RC) on jet ignition using two different combustion chamber models and a commercial code of CFD++. The results show that so-called auto-ignition, an ignition occurs before flame goes into RC from DC, is not seen in all cases, but usual jet ignition is seen for two equivalence ratios (0.340 and 0.404). The jet ignition is not seen when the orifice size of 14.0mm and the smaller size of RC than DC are used. In the case of jet ignition it is found that the disturbances by unreacted mixture and pressure waves from DC provide the jet ignition atmosphere in RC.

Keywords : jet ignition, numerical simulation, hydrogen, navier-stokes equations, full reaction mechanism

*Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University
5-10-1 Fuchinobe, Chuo-Ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5258, Japan

† Corresponding author : hajime19890912@gmail.com

**Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University
5-10-1 Fuchinobe, Chuo-Ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5258, Japan
Phone : +81-42-759-6509