

# 油類の着火実験考察のためのCFD計算の導入について

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-30 キーワード (Ja): キーワード (En): CFD, Fires, Self-Ignition, OpenFOAM 作成者: 岡崎, 航介, 吉田, 肇, 入澤, 優磨, 櫻庭, 隆貴, YOSHIDA, Hajime, IRISAWA, Yuma, SAKURABA, Ryuki メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.15053/0000000186">https://doi.org/10.15053/0000000186</a>

## 【研究ノート】

## 油類の着火実験考察のためのCFD計算の導入について

岡崎 航介<sup>1</sup> 吉田 肇<sup>2</sup> 入澤優磨<sup>3</sup> 櫻庭 隆貴<sup>3</sup>

## Introduction of CFD Analysis for Consideration of Fuel Ignition Test

Kosuke Okazaki<sup>1</sup>, Hajime Yoshida<sup>2</sup>, Yuma Irisawa<sup>3</sup> and Ryuki Sakuraba<sup>3</sup>

## Abstract

Not a few fires in the engine room of ships are caused from the ignition of spilled oil on the hot part of machines such as turbo-chargers, boilers etc. Authors have continued to investigate ignition and combustion phenomenon of oils on the hot surface of a metal plate with various conditions of the surface and many kinds of fuels for understanding of the mechanism of fires in engine rooms. However, it could not be well-considered about flow of the air in the reaction region because of the design of the experimental apparatus, although it is important for the ignition and combustion. In this study, CFD (Computational Fluid Dynamics) calculation using OpenFOAM is introduced for consideration of experimental results of the fuel ignition tests and some simple cases are simulated.

**Keywords:** CFD, Fires, Self-Ignition, OpenFOAM

## 1 はじめに

船舶機関室火災の原因のひとつとして、ターボチャージャー等高温の物体表面に付着した燃料等の油類が発火源となるケースが少なくない。こうした火災発生のメカニズムを解明するため、筆者らはディーゼルエンジンの排気管等の断熱材に浸潤した油類が発火する状況を模した実験を数多く行い、油種、油量や加熱面温度等の条件と発火の関係について知見を積み重ねてきた<sup>1) 2)</sup>。しかしながら、実際の火災では発火場所の通風状態や形状、断熱材の種類や巻き方等、発火に影響を及ぼす要因が数限りなく存在し、それらの影響が小さくないことも明らかとなった。想定される状況ごとに膨大な数の実験をこなす、知見を積み重ねることも有益であるが、まずは普遍的な油類の自己着火メカニズムを理解することがより重要であるとの考えから、断熱材を用いずに直接試料油を高温金属容器内に滴下し、着火状況を調べる方式を採用することとした<sup>3)</sup>。こうした実験を実施する中で、油類の着火条件について、特に試料の滴下方法や、燃料油の蒸発率等を左右する高温加熱面の壁面温度とともに、その後の自己着火及び燃焼に至る化学反応の継続を左右する燃料蒸気滞留空間の温度についても把握しておくことが必要と考えるに至り、本研究では装置の改良

も行いつつこれらの検討を行った。

一方、近年では計算機の能力の向上とともに、数値シミュレーションの技術の向上、成熟により、CAEツールとして例えば構造解析や流体計算等の各種のシミュレーション手法が実用的に広く活用されており、また無償や低価格のソフトウェアも充実してきたことから誰でも簡単に数値解析に取り組める環境が整いつつある。本研究においても、実験における現象の理解、考察のためにフリーの数値計算コードであるOpenFOAMによるCFDを用いた数値シミュレーションを導入することとした。特に、実験では確認することのできない空気の流動や燃料蒸気濃度分布、燃焼化学反応の進行度と着火現象の関係についての検討を行うことができるようになることを期待している。

本報告では、CFD計算で模擬することを試みている実験についての概要と、計算を導入するにあたり検討した事項や課題についての紹介を行う。

## 2 実験装置、方法及び結果

本研究では、高温物体表面に付着した油類の着火・燃焼と壁面温度等の関係を調べるため、図1のような実験装置を用いた。この装置は、皿状の上面を持ち厚みのあ

Received November 15, 2013

<sup>1</sup> 海上保安大学校 okazaki@jcga.ac.jp

<sup>2</sup> 海上保安大学校 yoshida@jcga.ac.jp

<sup>3</sup> 海上保安大学校

る真鍮製の底部と円筒形の側壁により深さのある容器を形成し、底部の部材内部からヒータにより加熱し、測温部の温度（主に容器底面）を任意の温度に静定した状態で容器底面にシリンジを用いて試料油を滴下した際に、試料が着火するか否かを確認するものである。温度は容器底部の内部及び容器内の底面近傍、中央付近、開口部付近にそれぞれ設置した熱電対により計測する。以前の加熱容器より厚みを持たせたので試料油の滴下後も温度が安定し、またバーナ火炎ではなく電気ヒータを用いることで細かな温度制御ができるようになった。

本実験では、滴下された試料液滴は接触面からの熱伝達により温度が上昇し、試料の一部が順次蒸発して蒸気となり周囲の空気との混合により可燃性混合気を形成し、さらに底面や壁面からの熱伝達により混合気温度が上昇、酸化反応が進行し、着火・燃焼に至ると考えられる。試料滴下の際、容器底面温度をある温度以上に設定すると、試料液滴が底面に接触すると同時に、接触面との間に蒸気の膜を形成し、液滴と容器底面との摩擦がきわめて小さくなり、液滴は容器底面を滑るように動き回るようになる。さらにこの時、液滴と接触面の間に蒸気層があるために熱伝達が阻害され単位時間当たりの蒸発量が小さくなる。すなわち、壁面温度と蒸発量は比例

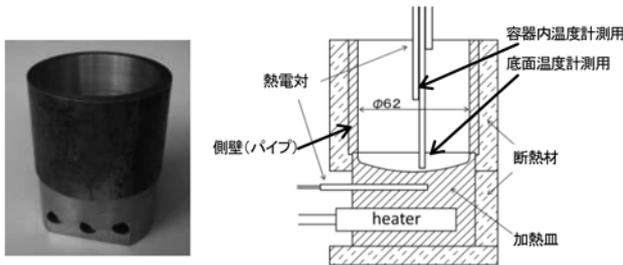


図1 油類の自己着火試験器

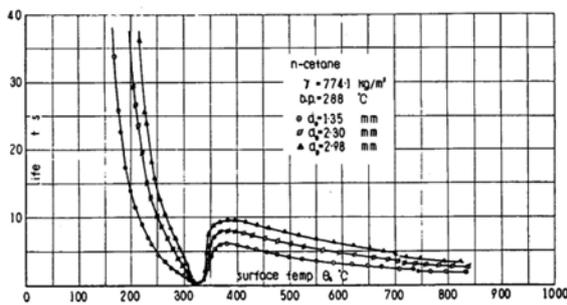


図2 液滴寿命時間と壁面温度の関係<sup>4)</sup>

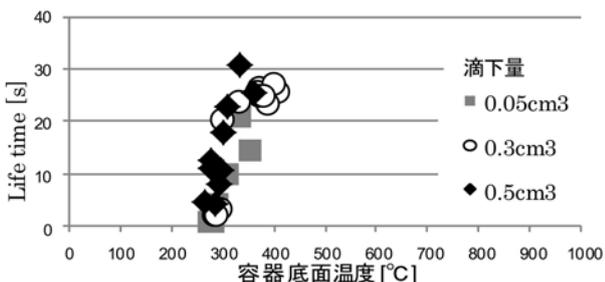


図3 液滴寿命時間と壁面温度の関係 (本実験)

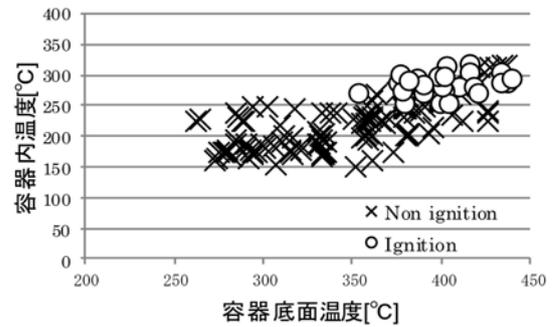


図4 接触面温度、容器内温度と着火/不着火

関係ではない。この現象はライデンフロスト効果と呼ばれるが、このことも着火条件を複雑にする要因となっている。接触面温度と液滴の蒸発速度や燃焼挙動などについてはTamuraらの報告<sup>4)</sup>に詳しいが、本研究においてもある程度同様の傾向が見られた。図2に示すグラフはTamuraらの実験結果で、高温加熱面にn-セタンの単一液滴（直径1.35[mm]、2.3[mm]、2.98[mm]の3種類）を滴下した際の液滴寿命時間と加熱面温度の関係を表しており、滴下量によらず加熱面が330[°C]付近の時に寿命時間が最小値を取り、それ以上温度が高いと寿命時間が長くなり、380[°C]付近で極大値を取ることがわかる。ここで、寿命時間が最小の点を最大蒸発率点、寿命時間が極大値を取る点をライデンフロスト点と称している。図3は本実験により得られた結果であり、試料油には軽油を用いている。最大蒸発率点は270~280[°C]付近にみられ、温度上昇とともに寿命時間が増加するというライデンフロスト効果の特徴がみられ、ライデンフロスト点については400[°C]付近とも見えるが、温度条件の範囲の狭さのために明らかでない。滴下量は0.05[cm<sup>3</sup>]、0.3[cm<sup>3</sup>]、0.5[cm<sup>3</sup>]であり、これが球状であったとした際の等価直径は2.3[mm]、4.2[mm]、4.9[mm]となるが、同程度の試料油体積に関わらず寿命時間は文献の測定値よりかなり長くなっている。これらの最大蒸発率点やライデンフロスト点の温度、液滴寿命時間の文献と本研究における測定結果の差異は、n-セタンと軽油の試料油種の違いによるもの他に、加熱面の粗さや材質の違い、温度測定方法の違いなども原因と考えられるが、さらなる検討を要する。

図4に示すのは、本実験で得られた試料油滴下時の容器底面温度及び容器内温度と試料の着火/不着火の関係を表したマップである。試料油には軽油を用いており、滴下量は0.05~0.5[cm<sup>3</sup>]の間で数種類の条件が混在しているが、ここに用いられている範囲内において滴下量の影響はほとんど見られなかったのでまとめて表示している。ここでの容器底面温度、容器内温度とは図1における容器底面に接触するように設置した熱電対及び容器の中央付近に設置した熱電対のそれぞれの試料滴

下時の測定温度を意味する。実験方法は前述の方法と同様、底面の温度を任意の温度に静定した時点で試料油をシリンジにて滴下し、着火の有無を観察するのだが、この際に試験器の側壁部分（分離可能）の加熱時間を加減し、温度を調節することで同一の底面温度にあっても容器内温度が多少異なる状態を作り出している。

図4より、着火の見られる底面温度350～450[°C]の領域においても、容器内の温度が低い条件では着火が見られないことがわかる。このことは、燃料の着火/不着火を支配しているのは接触面温度だけでなく、その雰囲気、すなわち燃料蒸気が空気と混合し、さらに加熱され化学反応を継続するための空間の状態も影響することを示している。

### 3 数値計算

ここからは今回導入することとした数値計算について述べる。上述の実験では、燃料蒸気の滞留する空間の状態が重要との結論を得たが、実験装置の性質上、空間の状態を決定づけると考えられる空気の流動等については詳細な検討を行うことが困難であることから、このような流れの把握のために数値計算を利用することとした。特に、CFD（Computational Fluid Dynamics、数値流体力学）と呼ばれる手法を用いると、流れ場を計算により求め、計算結果を3次元的に可視化することにより直感的現象理解にもつながりやすいと考えられることから、ここではフリーの数値計算コードであるOpenFOAM<sup>9)</sup>を用いて実験を模擬することを目標にCFD計算に取り組むこととした。

#### 3.1 OpenFOAM

OpenFOAMとは、GNU GPL のもとで公開されているオープンソースの数値流体力学 (CFD) ツールボックスであり、近年注目されている。「ソフトウェア」ではなく「ツールボックス」と表現されるのは、OpenFOAMが有限体積法を中心とする偏微分方程式ソルバー開発用のクラスライブラリと、それによって作られた多数のソルバーおよびツール群で構成されるからである。ユーザが自分の問題に利用するときは、必要な機能を持つソルバーを標準ソルバーから選択するか、適当な機能が標準ソルバーに備わっていない場合は、自分でソルバーを作らなければならないため、あまり使い勝手が良いとは言えないものの、慣れれば自由度の高い強力なツールとなる。

OpenFOAMのライブラリは、C++ のシンタックスを活用して高い記述性と拡張性を実現している。たとえば、ラプラス方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 (D_T T)$$

を解くためのプログラムは、以下のように記述される<sup>6)</sup>。

```

solve
(
    fvm::ddt(T)
    - fvm::laplacian(DT, T)
);

```

この数行だけで、偏微分方程式を有限体積法で陰的に離散化し、解を求めるまでを表している。このように、C++や有限体積法のプログラミングを知らなくてもわかるような表現で場の方程式を記述でき、煩雑な数値解法の詳細に立ち入らなくてもよいという特徴がある。また、OpenFOAM はこういったライブラリを利用して書かれた標準ソルバーやツールを多数備えており、標準ソルバーの中には、問題によってはそのまま適用可能なものも含まれている。

#### 3.2 計算方法

本研究の対象は、加熱容器内における油類の自己着火及び燃焼現象である。油類には軽油、重油、潤滑油などの液体燃料を想定しているが、これらが燃焼に至るまでには、まず燃料が加熱され蒸発し、燃料蒸気が周囲の空気と混合され可燃性混合気を形成し、その混合気がさらに加熱され酸化反応が進行し、着火、燃焼と続く過程を経る。これらを全て数値的に模擬することが本研究の目標ではあるが、このうち、液体からの蒸発を計算するためには液体と気体の2相を取扱い、前述のライデンフロスト効果など複雑な現象も考慮する必要があるなど煩雑なため、本研究ではこの部分を簡略化し、まずは燃料蒸気と空気との混合から混合気の着火・燃焼までを数値的に再現することとした。そのため、取り扱うのは気体のみとなり計算が簡単となる。燃料蒸気が空気と混合する際の流れは、容器内の温度分布による自然対流が支配的であると考えられること、燃料の着火自体を（着火モデルなどを用いずに）計算で予測したいことなどから、本計算に用いるソルバーは自然対流を計算でき、かつ燃料の燃焼化学反応を計算できるものであればよいということになる。

OpenFOAMにはそのまま多種多様な問題に対応できるように様々な標準ソルバーが予め用意されているが、自然対流と化学反応の両者を同時に計算できるものは含まれていないことが分かったので、本計算では独自のソルバーを構築することとした。とはいえ、標準ソルバーも全てソースコードの形で配布されているため、標準ソルバーに幾らか手を加えてコンパイルし直すだけでよい。これもOpenFOAMを用いる際の利点の一つである。ここでは、標準ソルバーのうち非常定自然対流解析用ソルバー(buoyantPimpleFoam)のコードにある運動方程式の記述を利用し、化学動力学・流体連成解析用ソル

バー(reactingFoam)の運動方程式を書き換え、新たなソルバーを作るという手法をとることとした。

自然対流ソルバーは密度差と重力の作用による対流をPIMPLE法で解くためのソルバー (PIMPLE法は圧力速度連成手法のうちPISO法とSIMPLE法を掛け合わせた解法) である。

化学動力学ソルバーには、化学反応計算コードであるCHEMKIN IIが組み込まれている。CHEMKIN IIでは、素反応式と、素反応式ごとに修正アレニウス式で表される反応速度定数を与えることで、それぞれのセル内の化学反応を解く。反応速度定数は次式で表される。

$$k = AT^b \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中のA、b、 $E_a$ を素反応式ごとに与えることとなる。これと化学種ごとに与えられる係数から熱力学関数により比熱等が求められ、中間生成物を含むすべての化学種の増減や熱量の授受、温度変化を求め、それらの解を流体計算コードに渡すことで化学反応を含む流れの計算を可能としている。

そのため、このソルバーを用いると、純粋に化学反応式のみから燃焼反応も計算されるので、恣意的な着火モデルや燃焼モデルを用いる必要はない。ただし、これを用いるためには化学反応式が判明している必要があり、C重油や潤滑油など複雑な組成をもつ油種への適用は難しいと考えられる。素反応式が判明さえしていれば何百という素反応式を考慮した化学動力学計算でも可能となるが、当然、反応式が多いほど計算負荷が増大し、またすべての化学種濃度がスカラー場として保存されるので、計算結果ファイルの容量も増大することになる。

### 3.3 計算条件

本計算では前述の実験を模擬するため前節で述べたように容器内の空気及び燃料蒸気の流動を計算する。よって図1の実験装置の容器内部空間と容器上方空間を計算領域とし、図5のような計算格子を用いた。OpenFOAMには格子作成ツールが付属しており、3次元CADデータ (STL形式) から格子を自動生成することもできるので、3DCGソフトであるblender<sup>7)</sup>を用いて作成したSTLデータを利用して計算格子を生成した。格子サイズは3mm程度、格子数は11万弱であるが、これは手持ちの計算機で現実的な時間内に計算を終えることが可能な範囲でできるだけ細くなるように設定したものである。

境界条件は図6のように、上方空間の境界は流体が自由に出入りのできる圧力境界 (大気圧)、容器の底面及び壁面にあつては流速が0の個体壁とした。またこの個体壁の温度を壁面温度 $T_w$ として固定値で与え、実験における接触面の温度を表現した。なお、簡単のため容器

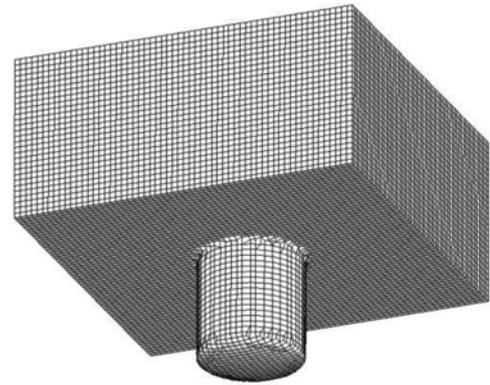


図5 計算格子

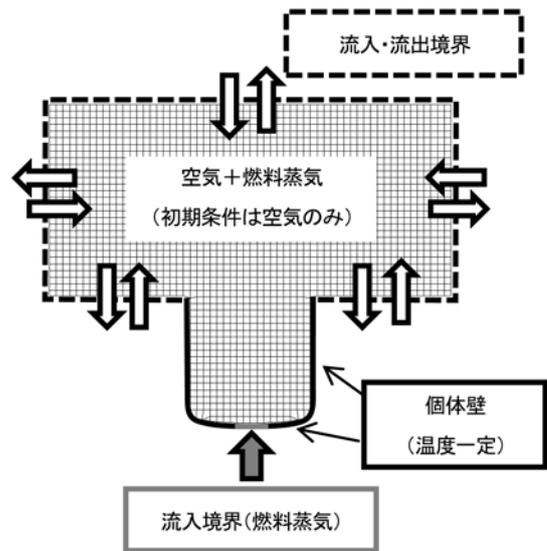


図6 境界条件 (断面図)

底面温度と容器壁面温度は同一としたため、実験で行ったような底面温度と側壁温度の違いによる影響は考察できないが、この点についても今後検討することとしたい。(上記の条件より、この計算は、図4で言えば右肩上がりの1本の線上における数点で○×の判定を行ったことに相当する。)

初期状態における領域の内部空間は一様に温度300 [K]、速度0、大気圧の空気とした。そのため、計算が開始された瞬間から対流が起こり始めるという形になり、計算開始直後は不自然な流れとなるので、次に述べる燃料の供給についてはある程度流れが安定してから開始することとした。

実験においては試料油には軽油を用い、液体状態で高温面に滴下したが、前述のとおり煩雑さを避けるために今回は燃料が気体の状態で供給されることとし、容器底面の一部を流速一定の流入境界とすることで燃料供給を模擬した。燃料種は、実験条件とは異なるが、メタンを想定した計算を行うこととした。流入境界の流速はどの計算ケースにおいても0.01 [m/s]で濃度100%のメタンが流入することとした。これは、実験における液滴寿

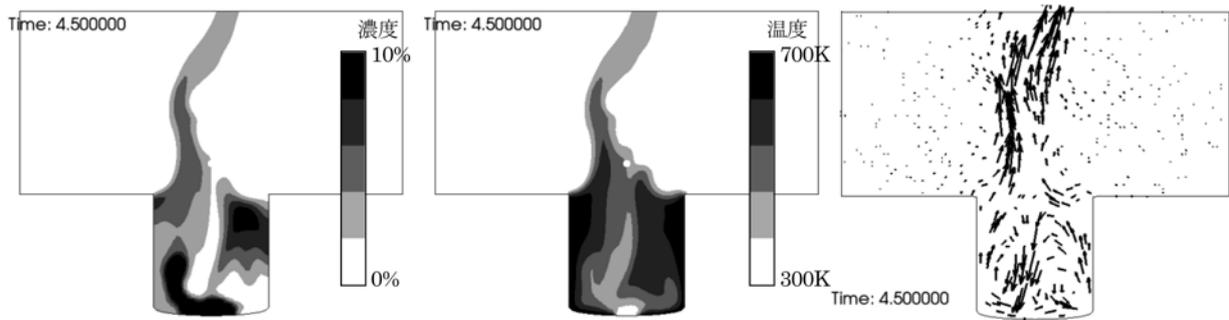
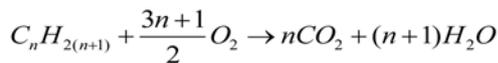


図7 自然対流による流れの挙動の確認 (容器中央断面、左から燃料濃度、温度、速度ベクトル) (Tw=700[K])

命時間から平均の蒸発速度を求め、これと同程度の質量流量となるように流入境界の流速を与えたものである。流入境界の面積は約100[mm<sup>2</sup>]である。

ここで燃料種としてメタンを想定した理由は下記による。CHEMKIN IIを用いた燃焼計算には化学反応式を与える必要があり、OpenFOAMに付属の燃料種としては水素、メタン、n-ヘプタン、イソオクタンが確認できたが、水素は燃焼機構の違いが大きすぎることから不採用とし、残る燃料種の中ではメタンのみが手持ちの計算機で比較的現実的な時間で計算を終えられる程度の反応式数であったことによる。燃料種が異なることから、得られる計算結果は実験を模擬したものとは言えなくなるが、このCFDの導入段階の目標としてはまず、実験装置を模擬したメッシュと境界条件を用い、対流による流れと混合気形成、高温壁面からの伝熱による炭化水素の自己着火現象の計算がとにかく発散せずに完了できることとし、議論を進めることとした。

燃焼計算に用いるメタンの化学反応モデルはここでは2種類用い、それぞれの計算結果の比較も行った。ひとつは一段総括反応モデルと呼ばれるもので、これは燃料が酸素と反応し二酸化炭素と水を生成する過程を一式で表現したもので、炭化水素の場合は



と表せる。これは、簡易なモデルであり、着火現象に大きく影響する低温酸化反応を考慮することができない。また、不完全燃焼によるCOの生成や熱解離によるNOxの生成などを考慮することもできない。したがって適用可能な問題は限定されるが、計算負荷が小さいため、現在でもよく用いられている。もう一つのメタンの反応モデルとして、中間生成物も含め53化学種、325反応式を考慮したGRI-Mech (米国 Gas Research Institute(現 Gas Technology Institute)が開発した天然ガス燃焼解析用の反応メカニズムモデル)を用いた。このモデルはメタンの燃焼解析には広く用いられている実績あるモデルである。ただし、この程度の反応式数でもCFD計算に用いるには負荷が比較的大きく、手持ちの計算機では1ケースあたり10日程の計算時間を要した。

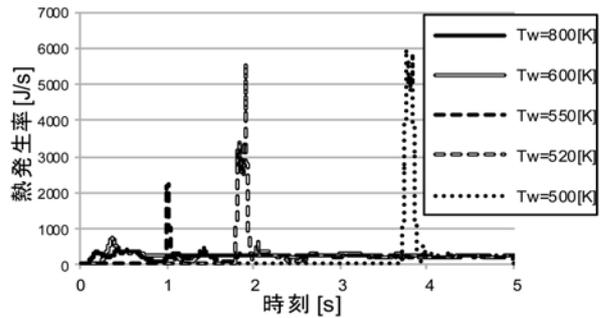


図8 熱発生率履歴 (一段総括反応)

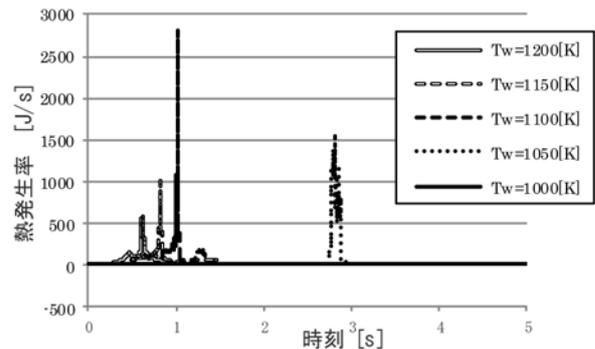


図9 熱発生率履歴 (GRI-Mech)

### 3.4 計算結果と考察

まずは自然対流が妥当に計算されるかを確認するため、化学反応計算を無効にした状態で、容器の温度設定だけで対流が生じ、燃料が混合拡散する状況を計算した。その結果について、ある時刻(t=4.5[s])の燃料濃度、温度ならびに流速についての容器中央断面における分布を図7に示す。前述のとおり、計算開始時点での各部の速度は0であるため、燃料の供給開始時刻はここではt=2.5[s]の時点としている。壁面および底面の温度Twは、700[K]としている。加熱容器の壁面付近では高温のため上昇、中央付近では低温のため下降する流れが生じており、本報告における目標の一つである対流の計算については、定量的な正確さに関する検討は今後行うとして、ひとまずそれらしい計算結果を出力していると判断できる。いずれは流れの可視化実験を行い、速度分布等を計測して計算の妥当性を確認することとした。

図8は、化学反応計算に一段総括反応モデルを用いた

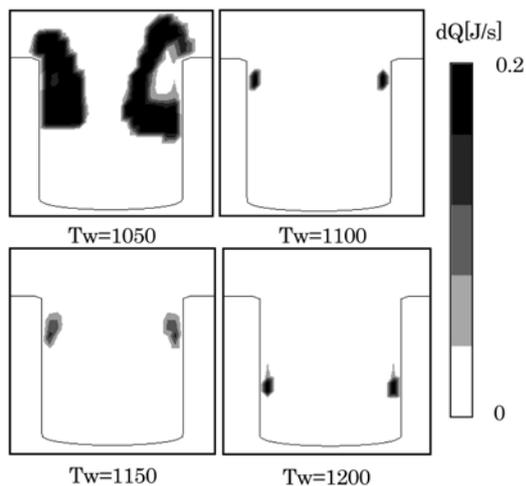


図 10 計算における着火位置 (GRI-Mech)

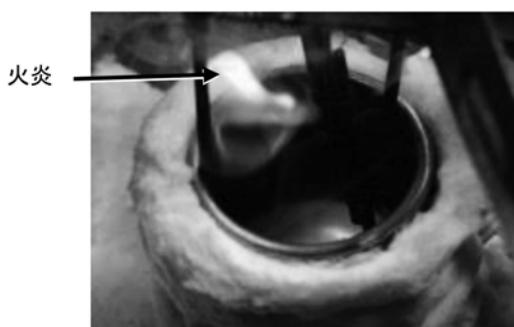


図 11 実験における着火の瞬間

場合の、熱発生率 (単位時間当たりの発熱量) の履歴を表したものである。グラフには壁面温度 $T_w$ のみを変化させた5ケースを示してある。なお、ここでは燃料のメタンを供給し始めた時点時刻0 [s]としている。グラフより、壁面温度 $T_w$ が低いほど着火遅れが長くなるのがわかる。ここには表示していないが、壁面温度を490 [K]に設定したケースでは顕著な熱発生は見られなかった。よって、これらのケースでは、着火/不着火の条件の境界は490 [K]と500 [K]の間に存在することがわかる。また、着火遅れが長いほど熱発生率の最大値が大きくなる傾向があることもわかる。これは、着火遅れ期間が長いほど、着火遅れ期間中に供給された燃料が蓄積され、一度に反応する燃料の量が増大するためである。燃焼が見られたいずれのケースにおいても、熱発生率はピークを示した後の値は一定となっており、定常燃焼状態に移行することがわかる。図9は同じように熱発生率履歴について、化学反応モデルにGRI-Mechを用いた場合に得られたものを示す。時刻については図8と同様燃料供給開始を0 [s]としている。こちらも壁面温度が低いほど着火遅れが長いことや、着火遅れが長いほど熱発生率のピーク値が高いなど、定性的には同様の傾向を示しているが、同じ燃料種 ( $\text{CH}_4$ ) を用い、条件設定も同一にしたにも関わらず、計算結果の絶対値にはかなりの違いが見られた。GRI-Mechを用いた計算では、壁面温度が

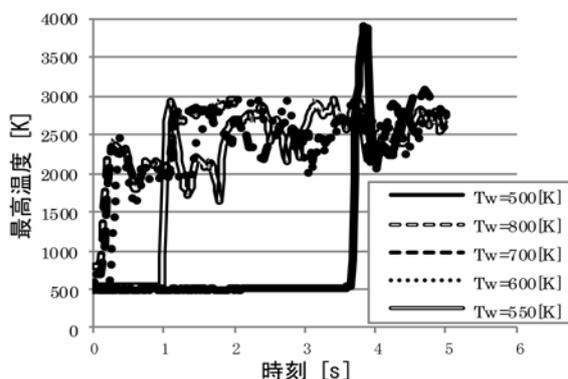


図 12 最高温度の履歴 (一段総括反応)

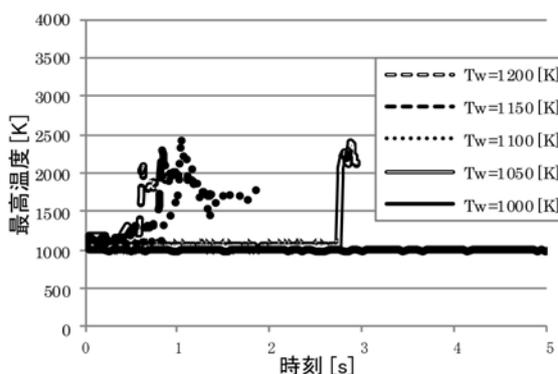


図 13 最高温度の履歴 (GRI-Mech)

1000 [K]では大きな発熱反応は起こらず、 $10^9$  [J/s]程度のごく僅かでなだらかな発熱のピークを迎えたのち、発熱量は減少に転じたため、燃焼は起こらないと判断した。Tw=1050 [K]のケースでは2.8秒程度の着火遅れの後に着火しているため、着火/不着火の境界は1050 [K]と1000 [K]の間ということになる。実際のメタンの自己着火温度は、測定方法等によりかなりの幅があると考えられるが、文献等ではおおむね600~700 [°C]とされており、GRI-Mechを用いた計算結果の方が実測値に近い挙動を示しているといえる。

図 10 は GRI-Mech において、顕著な熱発生が見られた瞬間の容器中央断面における熱発生率の分布を表したものであり、すなわち計算における着火位置ということができる。なお、Tw=1050 [K]のケースでは火炎の伝播速度が大きく、すでに着火位置付近の発熱量は低下し、発熱量の分布は中空状になっている。これらの分布を見ると、いずれも着火位置は高温の壁面付近であるが、壁面温度が高いほど容器の下方で着火する傾向があることが分かった。着火/不着火の境界付近である、最も着火遅れが長かった Tw=1050 [K]のケースでは、ほぼ容器の上端で着火していることがわかる。また、図 11 は実験における着火の瞬間の写真であるが、本実験において試料が着火したケースでは、いずれの場合もこの写真のよう

に容器開口部の壁面付近において着火が起こっており、計算と実験の両者における着火位置には符合する部分があると言える。このような位置で着火が起こるのは、図7にも見られるように、壁面付近において温度が高く分布し、燃料蒸気は壁面近くを上昇して加熱されるためと考えられる。ただし、計算モデルでは底面を流入境界としてしまったために、底面付近の温度が低く、実験と異なる状況となっていることも考えられる。また、そもそも燃料種が異なるので着火の挙動も異なる可能性は十分にあり、軽油など石油系燃料の妥当な計算方法の確立を急がねばならない。

図12及び図13にそれぞれのケースにおける最高温度の履歴を示す。これは、各瞬間において全格子点の中で最も温度が高かった点の温度を時系列につなげたものである。計算領域の中で火炎がどの位置に発生するかは条件ごとに異なるため、火炎温度の大雑把な把握、または定性的な比較のためにこのような整理をしたが、通常計測される火炎温度よりは高い温度になることに注意を要する。これらを見ると、一段総括反応モデルにおける最高温度は、GRI-Mechを用いた場合に比べかなり高くなっており、その温度は着火遅れの長いケースで最も高く、4000[K]近くまで上昇している。また、他のケースでも3000[K]程度まで温度が上昇している。量論比のメタン混合気の大気圧下における断熱燃焼温度は2200[K]程度であるので、これらの計算結果の温度は少し高すぎるように思える。一方、GRI-Mechを用いた計算では、最高到達温度は2500[K]程度であり、比較的实际の燃焼温度に近い。これらの計算結果より、一段総括反応モデルでは火炎温度を実際よりも過大に見積もる可能性があることがわかった。

#### 4 まとめ

- (1) 本研究では、高温面上に滴下した燃料の着火実験を行い、着火現象の理解には接触面温度のみならず、加熱面近傍の閉囲空間の状態の理解が重要であることがわかった。
- (2) 実験を模擬した計算を行うことを目標としてCFDコードであるOpenFOAMを導入した。実験装置を模擬したメッシュを用い、定性的には自然対流による流動や燃料蒸気と空気の混合などの現象は妥当に計算されているように見えたが、現状では液体燃料特有の流動や沸騰、蒸発といった現象の模擬や、実験と同じ燃料種の模擬ができないなど、課題が山積している。
- (3) 燃焼の計算に関してCHEMKIN IIを利用する場合、素反応式を与える必要性から、軽油や重

油、潤滑油といった複雑な組成の油種の模擬が難しいことが実用上問題であることが分かった。これらの燃料種に関しては、仮定の化学種を想定するなどのモデル化が必要と考えられる。

- (4) 模擬のできない軽油の代替としてメタン燃料を想定して行った着火・燃焼に関する計算では、燃料の化学反応機構の影響が大きく、目的に則した適切なモデルを選ぶ必要があり、今回用いたうち一段総括反応モデルは精度に問題がある場合があることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 力安, 島田, 吉田, 飯牟禮, 日本マリンエンジニアリング学会誌 Vol.37 No.11 (2002), 811.
- 2) 伊藤, 中田, 吉田, 島田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 Vol.41 No.1 (2006), 101.
- 3) 中島, 本城, 小笠原, 島田, 第79回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 (2009), 5.
- 4) Z. Tamura, Y. Tanasawa, Proc. Seventh Symposium (International) on Combustion (1959), 509.
- 5) ESI-OpenCFD website, <http://www.openfoam.com>
- 6) OpenFOAM User Guide, <http://www.openfoam.org/docs/user/>
- 7) blender foundation website, <http://www.blender.org/>