

〔研究ノート〕

# 燃焼室の形状や壁面熱伝達が燃焼速度に及ぼす影響について (第1報)

清水 良\*

\*日本文理大学工学部機械電気学科

## Effects of Combustion Chamber Shape and Wall Heat Transfer on Burning Velocity (1st Report)

Ryo SHIMIZU\*

\*Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Engineering, Nippon Bunri University

### 1. はじめに

地球温暖化に対し、CO<sub>2</sub>の削減が必須な状況だが、その排出量の多くを占める自動車に対しても、各国で厳しい規制がかけられ、急務となっている。これに対し、電動化などが著しく増加しているが、多くの代替燃料（カーボンフリー／ニュートラル燃料）の研究などもあり、図1のように、2050年予想でも、内燃機関が主流と言われている<sup>(1)</sup>。

このため、高圧縮によるHCCIの実用化やライトサイジング化、高タンブル燃焼など多くの研究が進められ、熱効率の向上を果たしてきた。しかし、これらはいずれも高圧縮比化や急速燃焼を狙った仕様で、その場合発生する高負荷でのノッキングなどの弊害には、部分的に制御デバイスを用いてミラーサイクル、大量EGR（排気ガス再循環）等のリーン化を行い、燃焼速度をスローに、着火性を低めて対策している。

一方、今後拡大していく代替燃料は水素も含め、多様化し、当面は既存燃料も含め共存／併用されると考えられ、これらの燃料にマルチに対応する必要がある。しかし、これまでの熱効率改善を狙ったエンジンでは、そもそも、燃焼速度向上等を必要とせず、よりスロー燃焼させ着火しにくくしないと成立しない水素のような燃料で

は、制御デバイスのみでの対応は不可能である。従って、燃焼室などのエンジンベースを水素のような燃料に対応しつつ、現行の化石燃料由来のものにも対応できるもの（燃料のマルチ化）にしなければならない。

本報告では、この課題解決に貢献するべく昨年からスタートした研究の初報として、狙いや、テーマに至った学術的背景、実験装置や今後進めていく研究における課題（実験／解析面）への対応について紹介する。また、これまでの予備実験を経ての新たな着目点、今回取り上げた研究の着眼点の妥当性（特に着火源速度の依存性）ということについて、確認結果を述べていく。

### 2. 研究の狙い

#### 2-1 ロータリーエンジンの特徴

燃料のマルチ化について、過去、唯一ロータリーエンジンのみが実現できており、特に水素燃料に対し、通常のレシプロエンジンよりは有利だとされている<sup>(2)</sup>。しかし、筆者はこの水素ロータリーエンジン開発を経験しているが、実際には次に述べる通説のような理由で水素に有利ということはなく、メカニズムはわかっていない。この一般的な通説とは、「燃料が供給される吸気行程の場所と燃焼する場所が異なっている（燃焼室が移動する）ため、吸気温度や燃焼室自体の温度が低く自着火

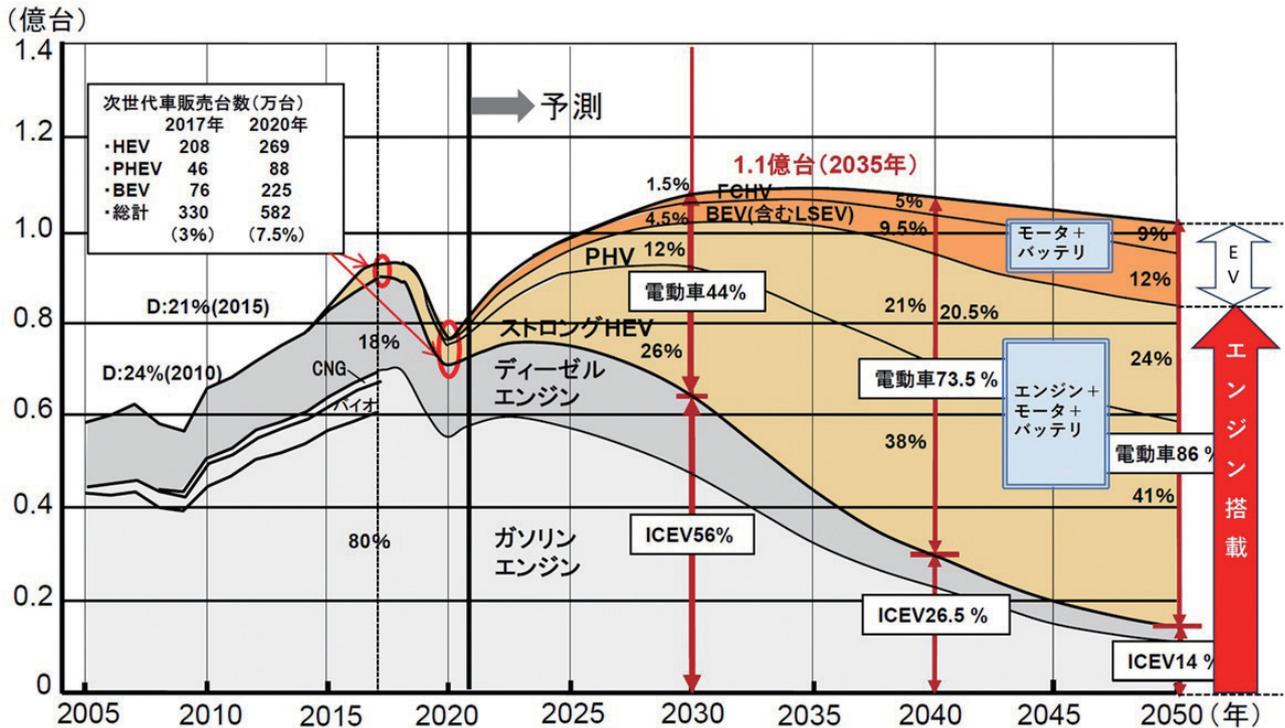


図1. 台数構成予想 (2022年秋季大会 Technical Review<sup>(1)</sup>より)

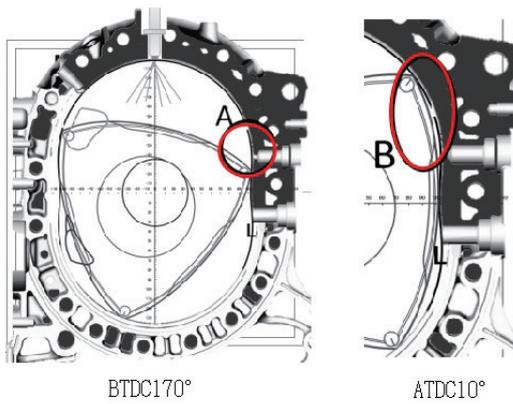


図2. ロータリーの燃焼室

(ノッキング／異常燃焼) しにくい」というものである。しかし、実際には吸気行程の際の端部は(図2のA部)燃焼する領域であり、加えてロータリーはレシプロエンジンの2倍の頻度で爆発(1回/1回転)するため、燃焼室壁面などの温度は高い(異常燃焼の点火源となる点火プラグも)。また、図2のB部は燃焼の際、ロータリーエンジン特有の回転方向へのスキッシュ流のため、火炎伝播が遅く、最後に燃焼する領域(図2では下方から上方へ火炎が伝播)で、ノッキングが発生する部分である。この傾向はレシプロエンジンにおいても同

様ではあるが、ロータリーエンジンでは、さらにこの領域が圧縮TOP以降も容積が減少、圧縮される場所で自着火しやすいにもかかわらず、多少のリーンやEGRによって、水素でのノッキングが対策できることから、何らかの自己着火を防止する作用があると考えられる<sup>(3)</sup>。

つまり、レシプロエンジンと異なる大きな特徴である燃焼室形状(狭小／くさび型)と火炎の着火源(点火プラグやノッキングの1つの因子であるヒートポイント含め)が幾何学的に移動していくことが、ノッキングや異常燃焼を引き起こす圧力波や着火エネルギー、火炎速度等に影響していると考えられる<sup>(4)</sup>。

2-2 本研究の特徴と狙い

本研究では燃焼室形状が各種燃料での燃焼速度や着火性能へ与える影響と、着火源速度が着火性に及ぼす影響を調べ、何故ロータリーエンジンで併用が実現できたのか、そのメカニズムを明らかにし、エンジン設計のための要件となる指標を構築する。

2-2-1 燃焼室形状に関して

水素のような燃焼速度の速いものと旧来の化石燃料との両立を図ることを目指すため、従来の燃焼研究とは異なり、より燃焼速度が遅い燃焼室、つまりロータリーエ

ンジンのような等容度の低い（狭小）もので、形状の影響を中心に調べていく。また、昔から一般的にくさび型の燃焼室がノッキングに強いと言われているように狭小化することで、何らかの自着火への影響があることは明らかであり、形状による圧力波の変化が注目すべきポイントと考えている。

### 2-2-2 着火源速度に関して

筆者が過去行ったプラズマジェット点火の研究において、図3(a)のように水素であれば噴出直後から着火しているが、メタン等の炭化水素になると、図3(b)の模式図のようにプラズマの活性種（着火源）の噴出速度が速すぎて着火せず、対向壁へ衝突／散乱、減速後に着火する現象を確認している<sup>(5)</sup>。このように混合気に対する着火源速度が速いと着火できないという知見を得たが、燃焼速度が低下する方向であったためそれ以上の研究は行わなかった。一方多くの研究も着火性や火炎伝播をいかに高めるかを目的に、ガス流の中の点火プラグ、乱流場での着火など、流動により着火源の相対速度を変化させている。しかし、常にガス流動（乱流強度など）と合わせて評価されており、純粹に着火源速度のみに着目したものは見当たらない。今回の研究では混合気中に着火源をプラズマジェットのように射出し、その速度影響のみを調べていく。

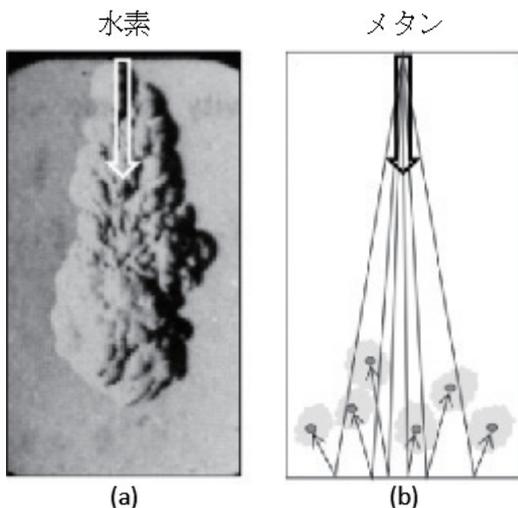


図3. プラズマジェット点火

## 3. 実験方法

### 3-1 燃焼室形状の影響

図4の固定燃焼容器（燃焼室大きさ：幅80mm、高さ14mm、奥行14mmの直方体）を用い、一方の端面より



図4. 燃焼室

自動車用点火コイルを使い点火、その後の火炎成長の様子について観察を行う。この時、燃焼室内に形状を変更するためブロック等挿入し、くさび型を中心にその形状を数種類変更しながら、当量比等の条件も変えて実験する。同時に圧力計測も行うが、将来的には壁面や空間温度の計測による熱損失の評価も付加していく。また、燃焼観察は図5の実験装置に示すシュリーレン撮影用の光学系を構築し、高速度カメラ（最速8510コマ/秒）を用いて行う。



図5. 燃焼室形状実験装置

### 3-2 着火源速度の影響

実際に着火源を高速に移動させるには機械的運動（ロータリーエンジンのような）があるが、点火装置そのもの、もしくは燃焼室を移動させるのは大がかりな装置が必要で、かつ高速化は極めて困難である。このため、今回はプラズマジェット点火のように、何らかの方法で着火源を射出する方法を選択した。また極力着火源そのものの移動速度のみをパラメータとして分離（ガス流動を与えない）すべく、プラズマジェットのように活性種を噴出させる（どうしても周辺流動が発生する）のではなく、着火源そのものを飛散させる。具体的には発火石を用い、静止混合気中に飛散させて着火する際の速度を計測し、その影響を確認する。この飛散速度を狙いの値にするのは困難であるが、発火石の飛散装置の摺動速度を可変することでこの発火石粒子の主速度をコントロールできる。この発火装置を図6に示す。

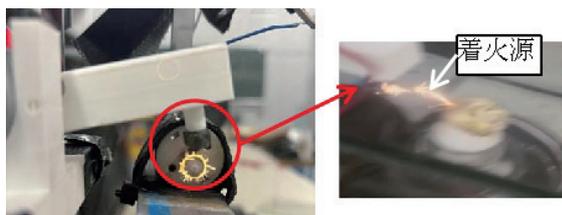


図6. 着火源射出装置

速度については飛散する粒子を撮影（シュリーレン法）し、移動距離から算出を行い、着火するか否かの分布を調べる。光学系を含めた装置全体図を図7に示す。

なお、本来は燃焼室と同様、気体燃料で実験できるように密閉容器で実施したいが、発火装置を組み込んで密閉させるには大型容器となるため、まずはこの着火源速度が影響因子となり得るかを確かめることとし、装置が簡単な開放容器で行うこととした。従って、静止混合気は液体燃料の気化で作っている。

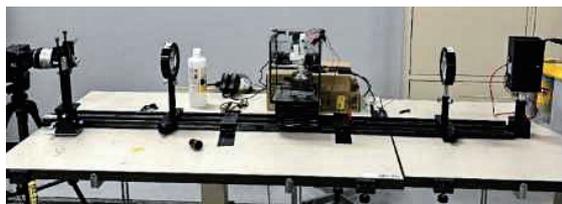


図7. 着火源速度実験装置

まとめると、着火源を射出～着火する様子（ほぼオイルライターのイメージ）を高速度撮影し、速度と着火性の関係を確認するということである。

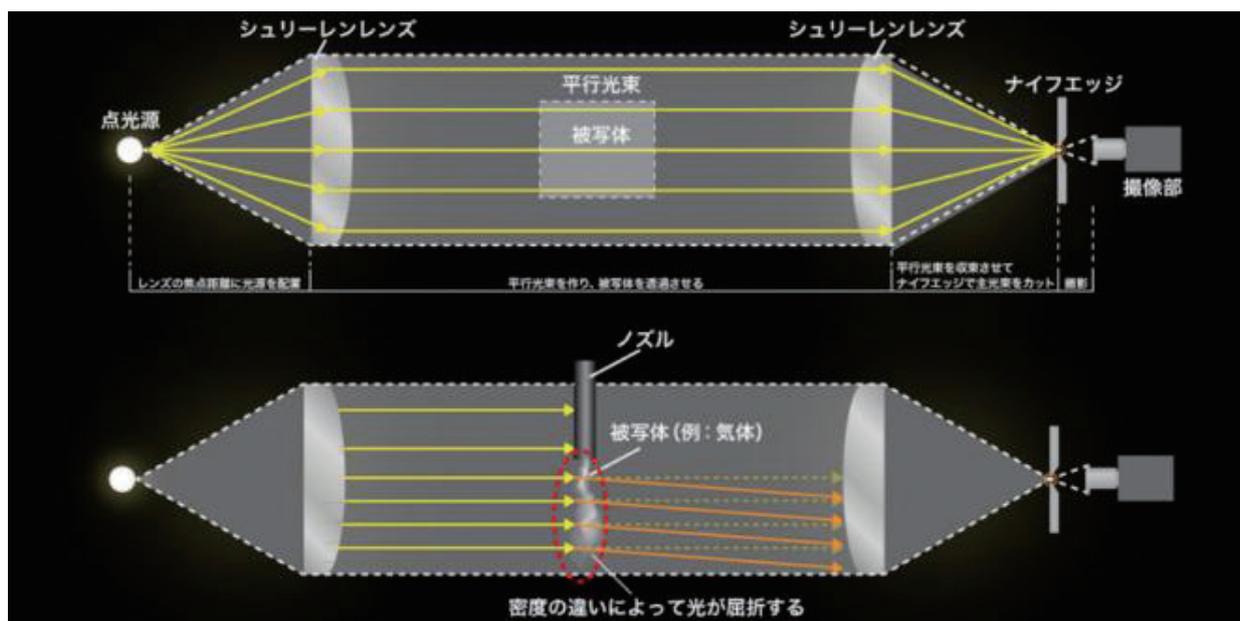
### 3-3 シュリーレン法

シュリーレン法は、気体や液体（もしくは透明体）の密度変化を可視化する方法である。ほぼ無色である燃焼の様子や気流の変化（流れ）、などの観察に用いられる。凹面鏡、レンズ、ナイフエッジ、点光源などからなる装置を用いる。図8にその原理を示す<sup>(6)</sup>。

- ✓点光源から発進した光は、レンズで平行な光（平行光束）になる。
- ✓平行な光は、被写体を通過して再びレンズで焦点を結び像を作る。レンズによって作られた平行な光の領域が、観察エリアとなる。
- ✓被写体を観測エリアに設置して、平行な光を通過させることで現像を観察する。

平行な光は、被写体の密度勾配によって屈折して、再び集光して結像する。屈折した光が結像する位置に置かれたナイフエッジで主光束がカットされ、シュリーレン像としてカメラに映し出される。これにより透明な気体・液体・個体の不均質な状態が、密度勾配として映し出され、密度勾配によるわずかな屈折率の変化を、平行な光により大きな明暗の差に変えて観測できる。

同様な光学系で、シャドウグラフ法があるが、こちらはナイフエッジがない。このため、シュリーレン法が密度勾配（一次微分）に応じて明暗が発生し可視化されるのに対し、密度勾配の変化（二次微分）に応じて明暗が生まれるところが大きな違いである。

図8. シュリーレン法原理（カトウ光研 HP<sup>(6)</sup>より）

### 3-4 画像処理

燃焼室形状の影響についての実験はシュリーレン法により可視化した燃焼の様子を高速度カメラで撮影する。このとき、火炎面の移動速度など、数値化する必要があるが、撮影の1コマずつからこの面を計測しなければならない。このため、この自動化に向け、燃焼画像を処理し、数値化するシステムの構築にも取り組む。現時点は図9のように画像を二値化する際の各種フィルタの選定までは完了しており、今後、この処理の際に設定するパラメータの自動化（機械学習を想定）や、撮影動画からの自動切り出し、数値化を行う機能を実現していく。

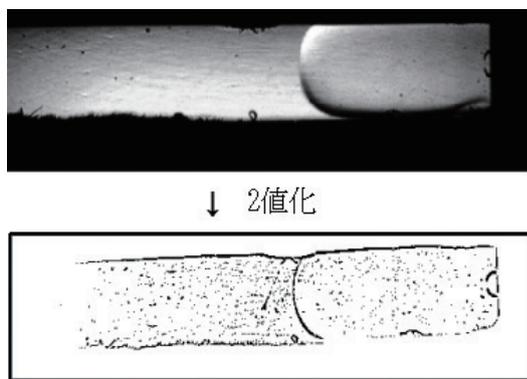


図9. 画像処理

## 4. 実験結果（予備実験）

### 4-1 燃焼室形状の影響

燃焼室形状について影響の評価を今後、進めていくが、まずそのスタートとして、現状燃焼室（直方体）でのベースデータのための実験を行った。まだ、準備途上のため圧力計測ができていないが、シュリーレン撮影には成功し、いくつか着目点を見出した。また燃料としては入手性の良いブタンを使用した。これについても今後多種の燃料での実験を進めていく。

今回の予備実験で撮影された各当量比での燃焼画像を図10, 11に示す。いずれも8510fpsで撮影し、その100コマ（一部50コマ）おきの画像を代表として示す。いずれも画像の右端から点火栓の火花で点火し、左端に向け火炎成長する様子を撮影している。またこの燃焼容器は容器側面が全面ガラスであるため、壁面に火炎が接触する部分までの観察が可能である。

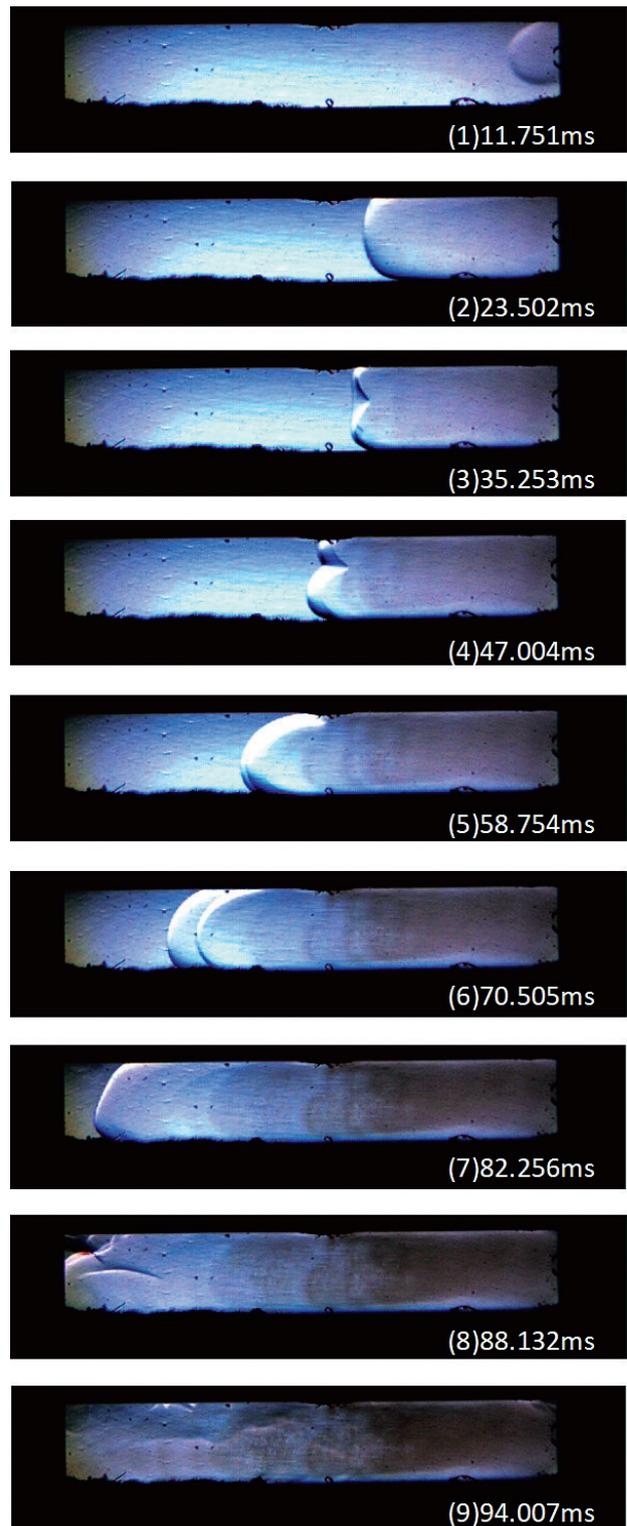


図10. 燃焼画像（当量比=1.4）

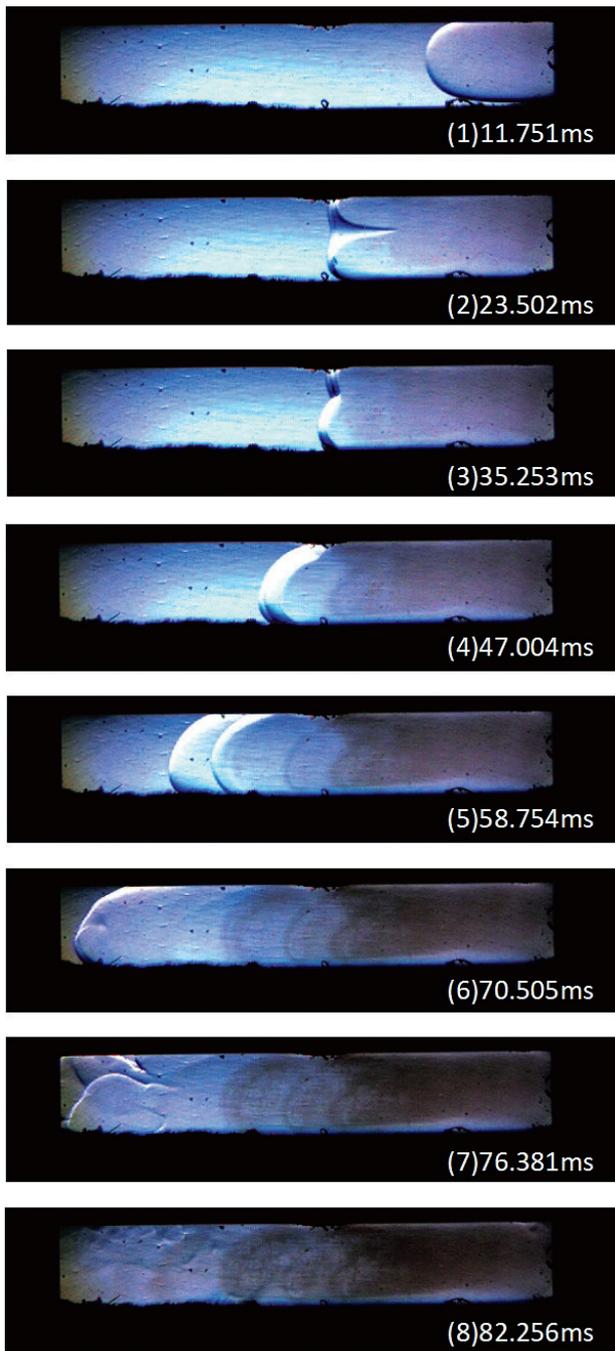


図11. 燃焼画像 (当量比=1.6)

図10, 11, いずれの場合も点火から200ms程度までは火炎が左方に向かってほぼ等速で進行していく。この間の、上下燃焼室面に到達した直後の初期の火炎面の進行(移動)速度は比較的安定しており、燃焼速度と相関があると考えられるため、これと当量比の関係を図12に示す。ほぼ当量比=2あたりでピークを迎え、その後低下していく。一般的な燃焼速度ではこのピークは当量比が1付近とされているが<sup>(7)</sup>、今回このような過濃混合

気領域にピークが生じたのは、混合気形成の際に、空気とブタンを別々に導入しており、一応、数分放置後に実験を行ってはいるものの、まだ均一化に至っていないことが原因と推定される。

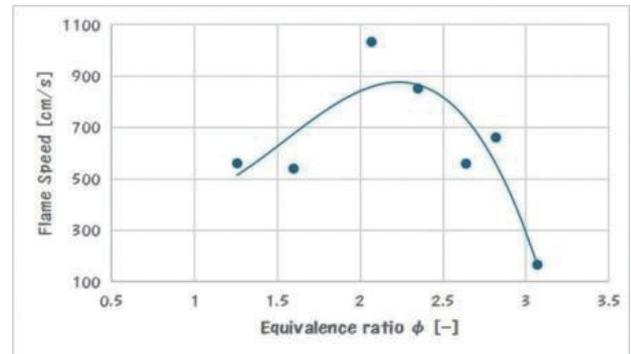


図12. 火炎面移動速度

その後の火炎成長であるが、対抗壁からの圧力波の反射波を受けたかのようにスローダウン、もしくは停止し、その後また進行をはじめ、加減速を繰り返しながら進行していく。また、この進行がスローダウンし始めたところから、定容容器の燃焼波形で一般的にみられるくさび型火炎に移行し始めるが、いずれの当量比でも容器下方の火炎成長が速いため、くさび型は解消される。これは、先にも述べたように、混合気の不均一が原因(上方が希薄混合気)であり、この均一化を実現することが、今後の実験上での課題である。

いずれにせよ、未燃部分での気柱振動の影響のように火炎進行の速度が一様でなく、大きく変動することは、燃焼速度に少なからず影響していると考えられ。形状によって変化することが予想される。また、仮に気柱振動のような現象であれば、燃焼終わりの部分での圧力変化にも影響を及ぼすため(水撃現象のような)、いわゆる自着火を引き起こすような急激な圧力変化が生じる可能性もある。図13は図10の(7)以降の様子を5コマ(0.6msおき)毎に示したものであるが、燃焼室左上に急激な右方向への流れが発生しており、左上端部で自着火していると推測される現象が観察された。図11の条件ではこの現象は確認できておらず、この発生有無が何に起因するのかが、1つの研究の着目点と考える。また、壁面熱流速も乱流により増大すると考えられ、冷却損失という観点からもその影響度の大きさに注目したい。

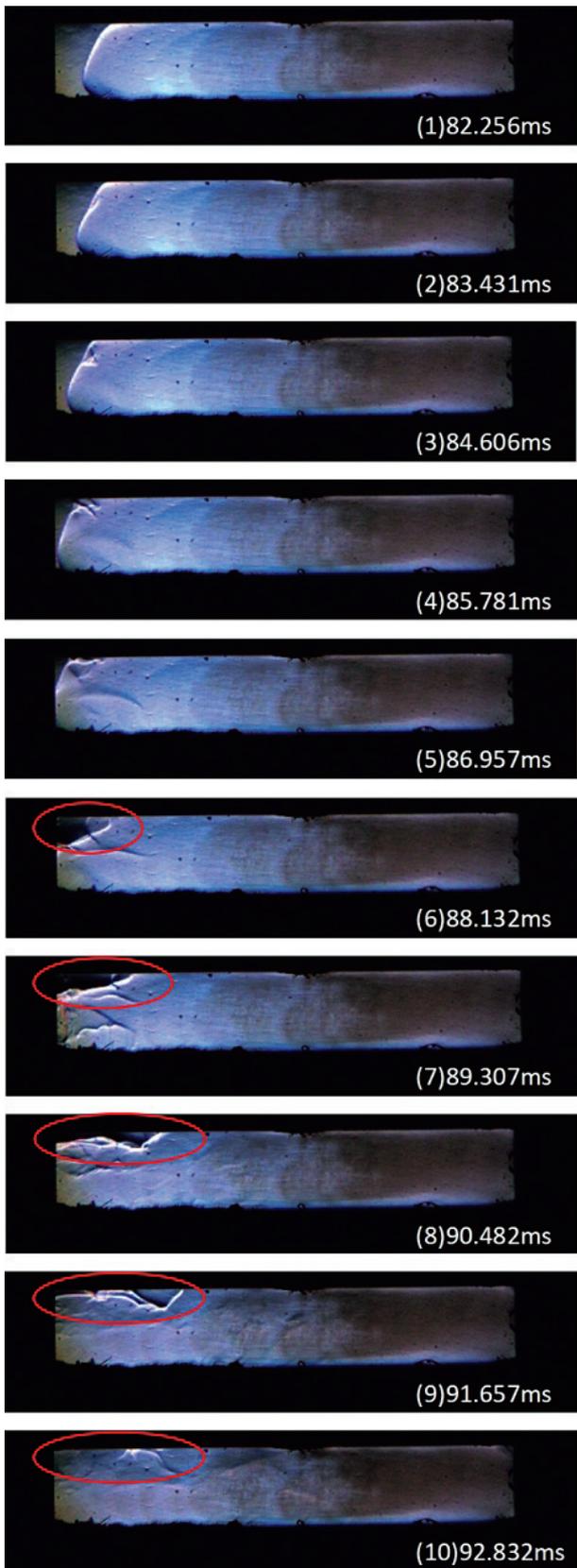


図13. 燃焼終わり画像（当量比=1.4）

#### 4-2 着火源速度の影響

着火源として発火石を用い、それを回転やすりに接触させ、メタノール蒸気中に飛散させて着火する様子を4400fpsの高速度カメラでシュリーレン法により撮影した。その結果を図14に示す。

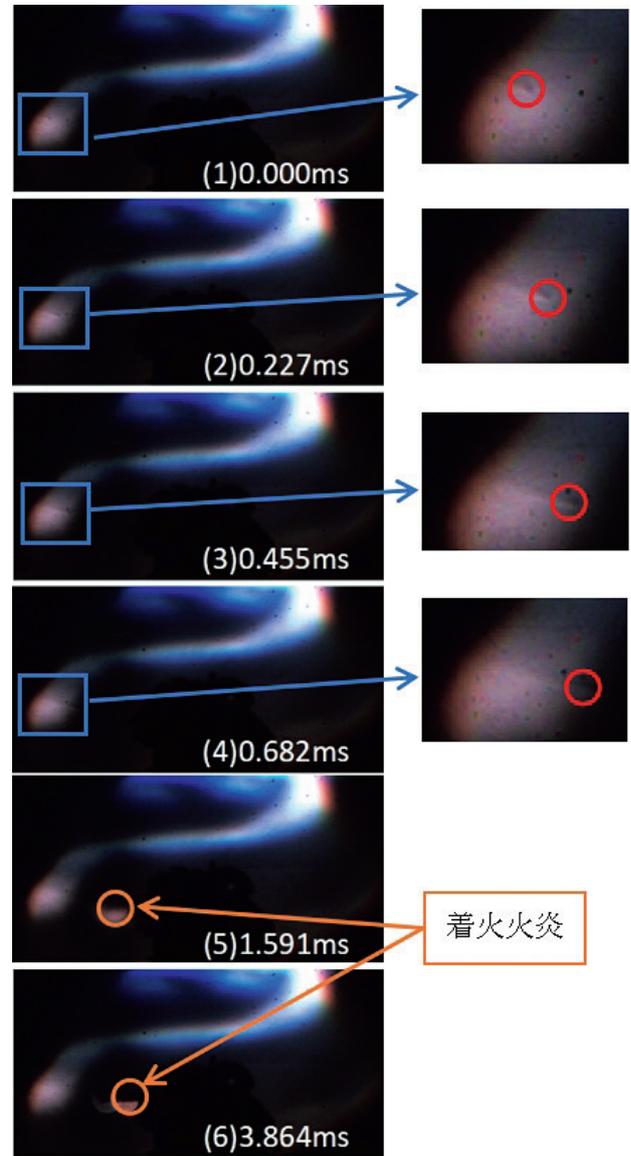


図14. 着火源速度の影響

図14(1)~(4)の右側は着火源（赤丸）付近の拡大図で、(5)(6)は着火した直後の画像である。左方から着火源を飛散させており、ほぼ画像全体がメタノール蒸気のある混合気領域となっている。画像には1つしか映っていないが、連続して着火源（発火石の粒子）を射出している。今回の予備実験の撮影で発火石の粒子の飛散の様子を観察することができ、各コマ毎の移動距離から、その粒

子の速度を求めることが可能であるということが確認できた。着火した、着火できなかった時の実験について、各々13回の速度分布を図15に示す。

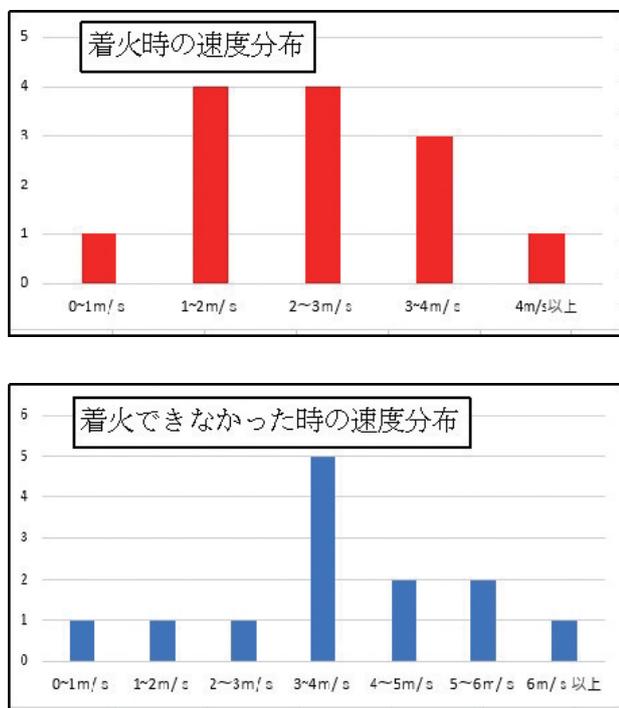


図15. 速度分布

着火できた場合は概ね、4 m/s 以下の速度であり、着火できない場合は比較的高流速側に分布している。データ数が少ないことや、撮影画像がまだあまり鮮明でないことから、明確には着火源の速度影響があるとは言えないが、少なくともその可能性は確認された。なお、粒子速度の算出は図14での例と同様な位置で計測した結果に基づいてはいるが、着火点含めて、すべて厳密に同じ位置というわけではなくばらつきがある。また、自然気化した混合気は位置によって濃淡があるため当量比はばらつく。よって着火有無にはこの影響も考えられる。従い、飛散経路を同一に近づけ（飛散方向を絞る）、気化状態も安定させ、速度の計測を行っていく必要がある。

## 5. 今後の予定

### 5-1 実験上の課題対応

〈燃焼室形状の影響について〉

圧力計測の準備もあるが、実験精度という観点で、次の2つが課題である。

- ① 当量比の精度：混合気生成する際に当量のボタンは体積比5%程度で、燃焼室容積も小さい（15.7 cc）ためボンベからの接続管に残るボタン容積の影響を受け、希薄側にズレが生じる。
- ② 燃焼波面の移動速度の算出：計測を撮影画像1コマずつを人力で行っており、読み取り誤差が生じる。また膨大な時間を要す。

①については、配管系含めた実験装置の改良と現在の分圧による調量方法から定容積導入方法への変更を検討している。また②については、すでに進めている画像処理の自動化を継続して実施していく。

〈着火源速度について〉

着火源速度はどうしてもばらつくため、統計的に有意となるn数を確保していくが、それに加えて、次の2つが課題である。

- ① 撮影画像の不鮮明：光学系の調整が不足しており、画像全体が暗い。また開放容器なので室内風の影響を避けるために設置したガラス板で図16のような乱反射が発生している。



図16. 乱反射

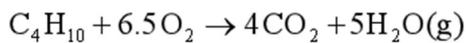
- ② 着火時の当量比ばらつき：発火石の飛散方向には何ら制約するものがないため、広範囲に飛散している。このためメタノール蒸気の濃度分布の影響を受ける。

①については、すでに光学系の調整中で、光学経路のガラス板も削除するよう装置改造を進めている。②については何らかの飛散方向を絞るようなガイドを設置するとともに、蒸気の安定化を図っていく。

5-2 解析

まだ予備実験が終わり、研究を進めていく価値がありそうだとことが見いだせたに過ぎない状況だが、今後のデータ分析や解析の方向性について以下述べる。特に燃焼室の影響は、ノッキングや異常燃焼、冷却損失の増加を引き起こすであろう燃焼終端での自己着火に着目していく。おそらく圧力起因と考えるが、局所的な高圧が終端部に生じていると推定されたため、まずはそのメカニズムモデル構築として次のように進めている。

はじめに、燃焼時の反応熱による圧力上昇と反応による分子数増加のどちらが圧力に影響するかを考える。今回使用したブタンの反応式は以下で



燃焼により、7.5mol→9 molと20%分子量は増加する。しかし、当量のブタンの場合、体積比で言えば燃焼前でもわずか3.2%であり、この分子量増加分の圧力影響はわずかである。

次に終端圧力（自着火）を考える場合、熱損失（冷却）の影響もあると考えられるので、これが燃焼終端までほぼ無視できるか（定容容器の層流燃焼の場合、壁面に静止ガス層があるので、燃焼終了時に一気に冷却損失を受けるといった形態も考えられる）どうかであるが、今後行う圧力計測の結果が、断熱で考えた場合の圧力上昇に対し、どのくらい低いかで、この影響度を概略見ることが可能である。そこで、ブタンの断熱火炎温度を算出し、これから最終的な到達圧力上昇を考えていく。ブタンの燃焼による反応熱は標準生成エンタルピーを用いて、次のように算出できる。

$$\Delta H_r = (4 \times \Delta H_{f,CO_2} + 5 \times \Delta H_{f,H_2O(g)}) - (\Delta H_{f,C_4H_{10}} + 6.5 \times \Delta H_{f,O_2}) [kJ/molF]$$

この反応熱がすべて、燃焼容器内のガスの内部エネルギーに変化（つまり完全断熱）したとすれば、

- 定容容器の容積:  $V [m^3]$
- 既燃ガス平均分子量:  $M [kg/mol]$
- 密度:  $\rho [kg/m^3]$
- 定容比熱:  $C_{vEX} [kJ/kgK]$

温度上昇:  $\Delta T [K]$ は

$$\Delta H_r \times \frac{\rho V}{M} = \rho V C_{vEX} \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{\Delta H_r}{M \times C_{vEX}}$$

燃焼室全体としては、この反応熱により、温度上昇（圧力上昇）し、その温度は断熱火炎温度以上（分母が定圧比熱→定容比熱）になり、数千Kに達する。このため燃焼途上であっても、未燃部分の圧力は非常に高圧となり、着火点より温度も相当高くなると考えられる。したがって、圧力計測をするまでもなく、この仮定は現実的ではない。つまり、相当量の冷却が生じながら燃焼は進行していると考えらるべきである。

一方、この冷却損失を考慮することは現実的に困難であるため、計測する圧力を活用したモデルを考える。そのアプローチとしては、将来のエンジン電子制御への展開も視野に入れ、次のように制御工学の伝達関数の導出、もしくはオブザーバ理論の適用を検討する。具体的には、燃焼が進行する際に、火炎面にはシュリーレン撮影に見られるよう密度勾配があり、これは既燃と未燃ガスの境界と考えられる（混じりあっていない）。そこで、既燃部分と未燃部分とに分け、既燃部分が燃焼して膨張し、未燃部分を圧縮していくというように考える。また、圧力は音速で伝播するものの、今回の容器であれば初期火炎が発生し、その圧力が反対側の端面に到達するまで、0.2~0.3msであり、この反射波であれば1ms以内の周期の振動となるはずだが、燃焼波面が振動しているのはもっと長い周期（数10ms）なので単純な圧力波の影響ではなく、気体の移動、つまりばねの振動のような現象と推定される。そこで図17のように未燃部分を1つの空気バネにとらえ、火炎面により、この空気バネに圧力（入力）が加わる。その際に燃焼終端位置（つまり燃焼室の火炎進行方向の壁面近傍）での圧力を出力として、その伝達関数を考える。

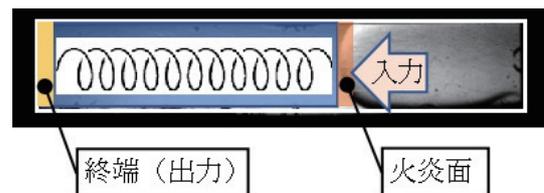


図17. 伝達関数モデル

図17の右側から未燃ガスが押され、その気体分子が左方に押されるが、その慣性力分、伝わる力が小さくなり、結果、終端に到着し弾性衝突して反射するも、応答遅れが発生する。しかし、この場合、高次モデル（図17だと2次だが）であれば、固有振動数付近に共振が現れるため、この条件がそろると、高圧が生じてしまう、もしくは運動量による水撃のような現象が発生すると予測する。このモデルの場合、慣性項を織り込むために何らかの質量が必要であるが、まずは未燃ガスの質量が均一に分布していると仮定する。棒材を圧縮振動させるモデルに近いが、燃焼が進むにつれ、未燃部分のバネ定数が変化していくところが特異なモデルである。また、反射波ということを考えて、図18のような連成モデルにすべきとも考えられるが、まずは単純バネモデルで進め、実験検証の後、検討を行う。

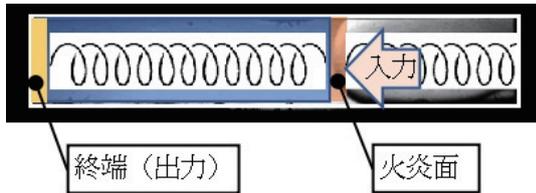


図18. 連成モデル

着火源速度については、発火石粒子の熱容量と冷却を考慮したモデルで燃焼開始できるエネルギーを有しているか、どのくらいでエネルギーが消失するのか、ということを考えていく。具体的には乱流熱伝達モデルと粒径等の計測による熱容量の推定となるが、これから温度持続時間（着火のエネルギー保持時間）を明らかにするとともに混合気への熱移動量を見積もって、着火有無を推定していく。

## 6. 最後に

燃焼に関する研究がようやくスタートした。筆者は過去ロータリーエンジンの開発に従事していたが、非常に独特な構造であり、特に燃焼に関しては先人たちのデー

タの積み上げはあるものの未解明な部分も多く、なかなか予想通りにいかないことが多々あった。また、構造的に熱効率の改善には限界があると感じていた。しかし、水素含めた燃料のロバスト性の高さは明らかであり、これからの時代を考えると非常に有効なエンジンである。従って、このメカニズムの解明を行い、エンジン構造や電子制御に技術を提供していきたいと考える。

なお、今回の研究を行うにあたり、種々の実験装置を貸与いただき、また多くのアドバイスもいただきました九州大学の北川教授に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 藤村, 「差し迫る気候危機の中, CO<sub>2</sub>削減は待ったなし」, 2022年秋季大会 Technical Review (2024年6月20日)
- (2) 斎藤, 桜井, 赤星, 内田, 菅, 木ノ下, 「ノルウェー仕様のRX-8ハイドロジェンREの開発」, マツダ技報, No. 28, P39-43, (2010)
- (3) 奥井, 高橋, 香川, 田端, 「ロータリーエンジンの火炎伝ばに及ぼす点火プラグ配置の影響」, マツダ技報, No. 27, P142-147, (2009)
- (4) 寺島, 「ノッキング現象における末端ガス非一様自着火と圧力波発生機構」, 日本燃焼学会誌, 第57巻, 181号, P206-213, (2015)
- (5) E.Murase, K.Hanada, R.Shimizu, "Combustion Enhancement of Lean Mixtures by Plasma Jet Ignition", 1987 ASME・JSME Thermal Engineering Joint Conference, (1987)
- (6) <https://www.kk-co.jp/visible/schlieren/>, カトウ光研 HP 「シュリーレン法の原理」 (2024年6月20日)
- (7) 酒井, 三好, 「飽和炭化水素の化学構造と層流燃焼速度の関係」, 自動車技術会論文集, (2019) 50.1号 p. 25-30

(2024年6月26日受理)