

# 燃焼流れ

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

溝淵 泰寛\*

## Combustion Flow

\*Yasuhiro Mizobuchi, Aeronautical Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

\*E-mail : mizo@chofu.jaxa.jp

### 1 燃焼と人類の生活

燃焼現象は人類の活動の発展に大きくかかわってきました。人間を人間たらしめる重要な要素の一つが燃焼、炎の利用と言ってもいいでしょう。燃焼を操ることができるようになったおかげで調理した料理を食べることができ、陶器や鋳物など人間の生活を一変させる道具を加工することができるようになりました。70 万年くらい前のアフリカで人類は火を使っていたという説もあります。時代が進んで、産業革命においては燃焼のエネルギーを動力に替える手段として蒸気機関が生み出され、その後、現在においては自動車、発電用ガスタービン、ジェットエンジン、ロケットエンジンなどに燃焼技術が使われていることは皆さんご存知のことかと思えます。

燃焼は、今日、特に、大きな力やエネルギーを得るために必要不可欠な手段となっています。例えば、旅客機のエンジンによく使われているターボファンエンジン（ジェットエンジンの一つ）では、ファンで取り込んだ空気を圧縮機で圧縮し、この圧縮された空気とジェット燃料をまぜることにより非常に強い燃焼反応を起こします（図1）。得られた高温高压のガスの流れはタービン

を回し、その駆動力は圧縮機とファンを回します。ファンがエンジン外側を流れる空気（灰色の流れ）を加速することにより推力が発生し、また高温高压のガスが後方に噴き出されることによっても推力が発生します（黒色の流れ）。飛行機は特に離陸する時に非常に大きな推力を必要としますが、その推力はこのような仕組みで得られます。

火の便利さを知り、そして火を作ることが出来るようになった人間は火を保持しようとしたはずですが、その手法としては、たき火、炬、松明などがありました。それらから進化した素晴らしい形態の一つがロウソクです。ロウソクの燃え方については、17 世紀後半にマイケル・ファラデーが行ったクリスマス講演が有名で、その内容は「ロウソクの科学」に興味深くまとめられています。炎で温められて溶けたロウが毛細管現象によって芯を這いあがって行き、炎からの熱によって蒸発して気体の燃料になります。そして、これもまた炎からの熱によって発生した自然対流（上昇気流）によって運ばれてくる空気中の酸素と気化したロウが燃焼反応を起こして炎が形成されます。

### 2 燃焼は流れに影響される

ロウソクについての興味深い話として、その燃え方が地上と無重力状態では燃え方が全く違う事があげられます。重力がある地上では先に述べたように、ロウソクの炎が発する熱によって上昇気流が発生し、その気流から次々供給される空気中の酸素とロウソクの芯から蒸発し気化したロウが反応し燃え続けます。その結果、日ごろよく目にする黄色く縦長の炎が形成されます（図2(a)）。一方で米国スペースシャトル内での実験によれば、無重力状態ではロウソク上面に青い半球に乗ったような炎が

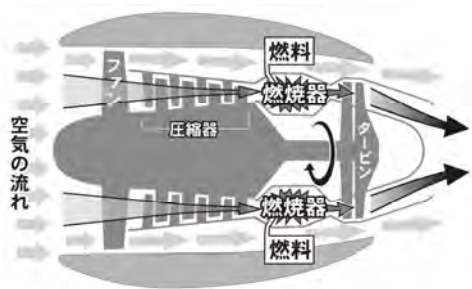
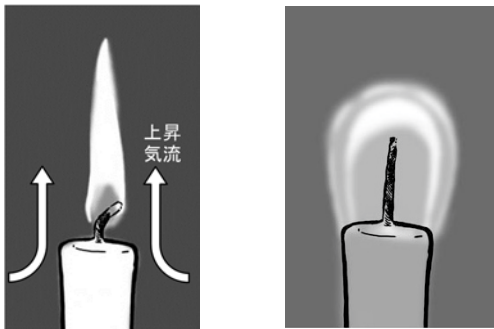


図1：旅客機エンジンの仕組み（画むさしのあつし）

観察されます(図2(b)). これは無重力下では上昇気流が発生しないこと, その結果として酸素の輸送が十分でなくなるのが原因と考えられています. 写真をご覧になりたい方は例えば, 日本宇宙少年団(JAC)のホームページ

<http://www.yac-j.com/labo/list/pdf/5.Experiment/5-15.pdf>  
やNASAのホームページにアクセスしてみてください.

ろうソクの例にみられるように, 燃焼の様子は流れの影響で大きく変化します. このことは燃焼を理解するうえで非常に重要なことですので, 後においても言及します.



(a)地上で燃えるろうソク (b)無重力下で燃えるろうソク

図2: 地上と無重力下ではろうソクの燃え方が違う

(画むさしのあつし)

### 3 炎の正体

昔の人は火が何かを知らませんでした. 例えば, ヨーロッパでは長い間, 物質を構成する四元素として土, 水, 空気と並んで火があげられていました. また人智を越えていたがゆえの火に対する畏れは, 火の神格化に至り, 火を崇拝する信仰が世界中のいたるところで起こりました.

現代の私たちは火, そして火をもたらす燃焼が何なのかおおよそ知っています. ただし燃焼現象が科学的に理解できるようになったのはごく最近で, 反応性流体力学の研究がセオドア・フォン・カルマン達によって始められた1940年代だと言われています. 燃焼現象は化学反応だけではなく流体運動と深くかかわっている現象なので, それらをつにして初めて科学的に分析できるようになったのです.

化学的立場からは, 燃焼とは発熱と発光を伴う酸化反応ということが出来ます. そして私達が火または炎として見ているものは燃焼している媒体から放射される発光です. 発光には炎色反応による発光, 固体(主にスス)輻射, 気体(二酸化炭素や水蒸気)輻射などがあります. 私たちが炎を見るとき燃焼そのものを見ているわけでは

ありません. したがって, 燃焼の様子を詳しく知るためには, 人間の目に見える情報だけではなく, 目では直接見ることができない情報を何らかの方法で取得する必要があります.

私達が視覚的に認識する炎は, ろうソクの炎のように数cmのものから山火事の炎のように数mにおよぶ大きなものまであります. しかし実際に燃焼反応が起こっている領域(反応帯といいます)は非常に狭く常温常圧状態で燃える炎では1mm以下の厚さだと言われています. 都市ガスの主成分であるメタンガスと空気の混合気が燃える計算をコンピューターで計算した結果が図3です. メタンが燃える場合には, その過程において50種類を超える化学種が現れ, 300を超える反応過程が進行しているということがわかっているのです. それら全ての効果を取り入れた1次元流体計算することによって炎の内部構造を計算することができます. 図中, 点線が炎の中での温度変化を表していて, 300Kだった混合気(図左端)が燃えることで2000Kを超える高温の燃焼ガス(図右端)になります. その温度上昇をもたらすのが実線で示された燃焼反応による発熱です. この発熱が顕著な領域, すなわち反応帯の厚さはわずか0.3mm程度であることが分かります. この反応帯の厚さは燃料の種類や燃料濃度によって変化し, 燃焼反応と流体輸送との関係から決まります.

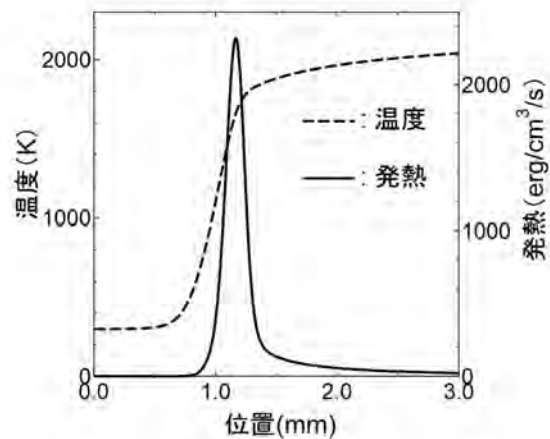
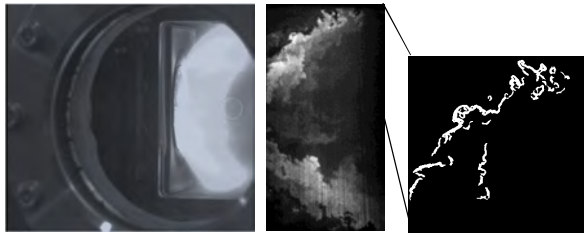


図3: シミュレーションで得られたメタン火炎構造

図4(a)は航空機用のガスタービン燃焼器の実験で撮影された炎です. 円形の観察窓から内部の炎の写した写真です. 写真左中心付近から旋回状に可燃混合気が供給され炎が形成されています. 供給器の大きさは約10cmですので炎の大きさもその程度の大きさのように見えます. この様子をレーザー光を用いた光学計測技術を用いて可視化すると別の様子が見えます. 図4(b)はある断面内にあるOHだけを発光させて撮影した写真で

す。OH が沢山存在する領域ほど白く映っています。OH は燃焼反応によって生成される化学種ですから OH が無い領域と OH が沢山ある領域の間に反応帯があると推定されます。そこで OH の発光輝度が急激に変化する領域だけを取り出して、白色で示したものが図 4 (c) です。このように、炎は人間の目には 10cm 程度の大きさに見えていても、実際に燃焼反応が進行している領域は白線で示された非常に狭い領域に限られていることが実験的な可視化によっても確認することができます。



(a)円形窓からの直接写真 (b)OH 発光 (c)反応帯  
図 4 : ガスタービン燃焼器中の炎の可視化 (提供 JAXA)

#### 4 流体輸送が炎を維持する

炎が燃え続けるためには燃料と酸化剤が持続的に炎に供給され続けることが必要です。この供給は流体の輸送現象によってもたらされます。まずは燃料と酸化剤が火炎近くまで運ばれる必要があります。これは流れの速度で運ばれる移流または対流と呼ばれる輸送です。その次に燃料と酸化剤が混ざる必要があります。これは拡散とよばれる現象によってもたらされます。拡散とは全体を均質にしようとする輸送で、濃度が濃い方から薄い方に物質が輸送されます(熱に関しては、温度が高いほうから低い方へ熱が輸送されます)。しかし通常それだけでは燃焼は起こりません。混合気の温度をある程度まで上げないと燃焼反応が開始しないからです。ガスコンロに火をつける際に火花を飛ばすのは温度を上げるためのエネルギーを与えているのです。

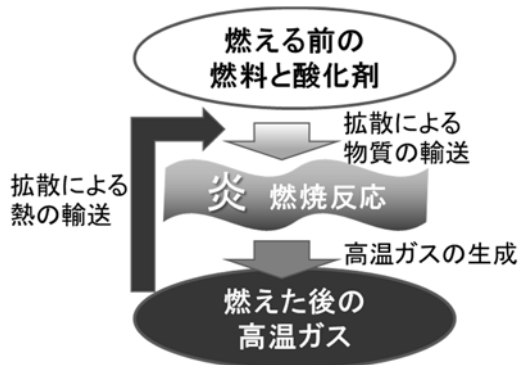


図 5 : 炎の仕組み

一旦火がついてしまえば、炎の中では混合と反応の過程が自己完結的に実現されます。燃料と酸化剤が燃焼反応によって消費され少なくなると自然と拡散現象が働き始め、周りからフレッシュな燃料と酸化剤が供給されます。供給された燃料と酸化剤は、燃えて高温になった燃焼ガスから熱拡散で熱をもらい十分に温められ燃焼反応を開始します。この仕組み(図 5)のおかげでガスコンロは最初に火花で点火すればその後は燃え続けることができます。

#### 5 予混合火炎と拡散火炎

気体燃焼の形態には大きく分けて 2 種類あります。一つはあらかじめ十分に燃料と酸化剤を混合した予混合気燃焼、もう一つは燃料と酸化剤が別々に供給され混合しながら燃える拡散燃焼です。

予混合燃焼を利用する機器の一つがガスコンロです。ガスコンロではガスと空気を十分に混ぜてから燃焼させるので予混合燃焼による火炎、予混合火炎が形成されています。この予混合火炎には伝播性があります。この場合の伝播性とは炎が高温の燃焼ガスからフレッシュな混合気に向かって燃え進むことです。ガスコンロは予め燃料ガスと空気を十分に混ぜるよう見事に設計されており、そして個々の炎では炎の伝播速度と混合気の火炎垂直方向成分がバランスするよう火炎が自然に形を変えます。そのおかげで私達は安心してガスコンロを使用することが出来ます。

予混合火炎の伝播速度は流れの中の小さな渦によって大きく変わることが分かっています。渦は流れの乱れ(乱流)が強くなるほど強く小さくなります。一般的に乱流が強くなって、小さな渦の効果が大きくなると予混合火炎の伝播速度が大きくなるようです。それは図 4 (c)の反応帯のように、くねくねと曲がることで単位体積当たりの反応帯の面積が増えて反応量が増えることが一因ではないかと言われています(図 6 (a))。乱れの強さと伝播速度の増加率の関係は燃料の種類、すなわち化学反応の種類によらないという実験結果もあり、流体の微細な挙動が予混合火炎の支配的な要素となっているこ



(a)反応帯面積が増え炎が加速 (b)炎がちぎれて消炎?

図 6 : 流体渦が燃焼を変える (a : 渦の強さが適度、b : 渦が非常に強い)

とがうかがえます。一方で、乱れが強過ぎると反応帯がちぎれちぎれになり逆に火が消えるとも言われています(図6(b))。ちぎれちぎれになると、周りを冷たいガスに囲まれて、いつかは燃え尽きるからです。しかし、その詳しいことはまだよく分かっておらず、これからの燃焼研究の課題の一つです。

拡散燃焼によって形成される火炎は拡散火炎と呼ばれます。例えば、日本の H-IIA, H-IIB ロケットの初段エンジンの燃焼器では、燃料と酸化剤が別々に燃焼器の中に噴射され、混ざりながら燃焼し拡散火炎が形成されます。拡散火炎においては燃焼反応で消費された分だけ燃料と酸化剤が炎に向かって拡散で供給されるので、結果として最もよい燃料と酸化剤の割合(理論混合比)で燃焼反応が起こります。このおかげで安定な火炎が形成されることが拡散火炎の特徴です。そのためジェットエンジンの燃焼器でもこの火炎形態が利用されています。ただし理論混合比で燃えるため火炎が高温になるので、有害な NOx が生成されやすいことに注意しなければなりません。先に言及したロウソクの炎においてもこの種類の燃焼が起こっていることを付け加えておきます。

拡散火炎の代表的な形態の一つに燃料噴流拡散火炎があげられます。この火炎はノズルから燃料ガス噴流(ジェット)を噴き出したところに点火することで得られます。燃料噴流拡散火炎は噴流速度によって大きくその姿を変えます。噴流速度が小さいうちはノズルに付着した層流拡散火炎が形成されます(図7(a))。シュリーレン法という手法で写真を撮ってみると、なめらかな表面が観察できます。だんだんと噴流速度を大きくしていくと噴流中の流れの乱れが強くなって火炎も乱流火炎の様相を示すようになります(図7(b))。更に噴流速度を

大きくすると火炎はノズルから離脱し、ある噴流速度範囲では、図7(c)のように空中に浮遊したような炎が得られます。更に噴流速度を上げると炎は吹き飛んでしまいます。図7(c)の空中に浮遊した火炎を浮き上がり火炎と呼びます。浮き上がり火炎の最上流部では予混合火炎的な火炎構造が形成されていることが分かってきており、浮き上がり火炎が拡散火炎と予混合火炎が組み合わさった複雑な火炎構造を持っていることも分かってきています。また、火炎が空中のある位置に留まっていることができるメカニズムは非常に興味深く、それを明らかにするための研究も行われています。

## 6 炎でない燃焼

超音速で移動する物体の前に衝撃波が形成されることは皆さんご存知かと思います。2013年にロシアに落下した隕石から発生した衝撃波が大きな被害を与えたことを記憶されている方も多いかと思います。衝撃波を挟んで気体は急激に高温高圧になり温度も圧力も何倍も高くなります。この衝撃波による温度上昇によって燃焼反応が開始する燃焼を爆轟(デトネーション)と呼びます。デトネーションでは衝撃波により反応開始に必要な温度が得られるので図5のような仕組みがなくても燃焼を維持することができます。従って火炎とは全く別の燃焼形態と言えます。デトネーションに対して、ロウソクのような火炎はデフラグレーション(爆燃)と呼ばれます。予混合火炎の伝播速度が数10cm/秒~数m/秒であるのに対し、デトネーション波の伝播速度は数km/秒となることが大きな特徴です。

デトネーションの発生には、爆発などにより発生する場合、予混合火炎が加速されてデトネーションに遷移する場合があります。爆発事故の際にデトネーションが発生すると高温の燃焼ガスが音速の何倍もの速さで伝播することになりますので非常に危険な状況になることが想像できます。しかし悪い面だけではなく良い面もあります。デトネーションを利用した熱機関は高い熱効率を実現できる可能性を持っています。そこで航空宇宙機の推進系への適用が研究されているところです。そこではデトネーションをいかに発生・維持させるかが重要な課題となっています。

## 7 流れで燃焼を制御

以上のように、燃焼の様子は流れによって大きく変わります。ということは、流れを操作すれば燃焼を制御することも出来るはずですが、近年そのような研究が活発に行われています。流体现象のより詳細な理解を背景とした流れの制御により、効率が高く安全で環境負荷が小さい燃焼方式が実現されることが期待されます。

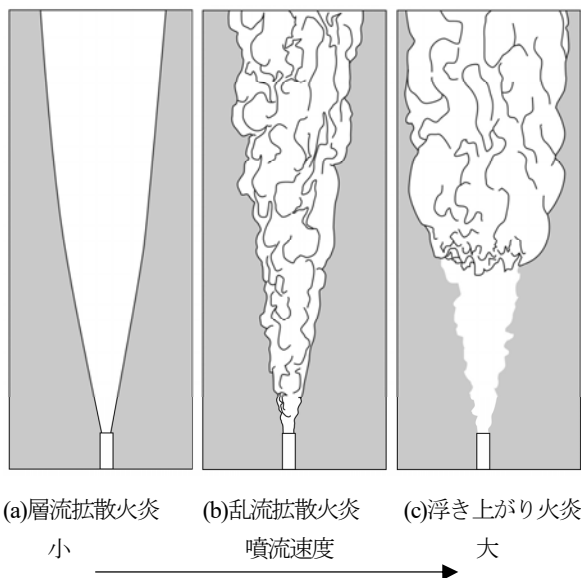


図7：噴流速度が噴流拡散火炎の様相を変える