

## 燃焼現象を基礎から解明する二つの研究

— 化学という視点から見ると、燃焼は酸化ということになります。例えば、燃焼によってメタン ( $\text{CH}_4$ ) が酸化されれば、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) と水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) が出来ます。これは非常に単純なプロセスのように見えますが、実はメタンが燃えて二酸化炭素と水が出来るというのは、化学反応の過程を省略して最終生成物を示しているに過ぎないのです。現実にはメタンが燃焼する過程では、炭素、酸素、水素が組み合わさった数十種類もの化学物質が生成され、相互に反応しています。その全体が燃焼という化学的現象なのです。だから、燃焼は化学という側面だけから見ても非常に複雑な過程なのです。

— それだけでありません。燃焼には熱の発生に加え、熱と分子の移動を伴いますから、移動論という視点が必要です。燃焼はエネルギー変換ですから、熱力学は必須です。最後に、これが私たちの仕事なのですが、燃焼研究には流体科学からのアプローチも不可欠です。燃焼に必要な燃料や空気は液体や気体の流れですし、燃焼によって発生する炎は高温の気体の流れそのものだからです。

— こういふ事情ですから、20世紀の前半までは、燃焼現象は、化学、熱力学、流体力学、移動論という異なった分野の学者たちによって、別々のアプローチで研究されていました。燃焼学と呼べるような統一された科学にはなっていないのです。

## ジェットエンジンとロケットの研究が燃焼の科学を発展させた

— この状況を一変させたのが、フォン・カルマンというハンガリー人科学者でした。1953年、カルマン教授は燃焼現象を統一的に記述する方程式系を確立したのです。この方程式系には、質量保存、エネルギー保存、化学反応という燃焼に関わるすべての項が含まれています。この方程式系が示されたことによって、数学的に解くことや、燃焼現象を数値計算によってシミュレートする可能性が示されたのです。燃焼の科学は、このカルマンの方程式系から始まったといっても過言ではないと私は思います。ちなみに、カルマン博士は航空力学の発展に大きな役割を果たし、流体科学では有名なカルマン渦列に名前を残した人物です。カルマン渦列とは、流れが抵抗体に衝突したときに、抵抗体の背後に渦が左右交互に放出される現象です。大きなスケールでは、高い山を持っている孤立した島、例えば韓国の濟州島や日本の屋久島などは、その風下にカルマン渦の形をした雲海がしばしば発生することで有名です。

— この時代に燃焼の研究が急速に発展した背景には、米ソ冷戦が進行するなかでジェットエンジンやロケットエンジンの開発に国家予算が投入されたことがあります。一般のボイラーと比べますと、燃焼室単位体積あたりの発生熱量はジェットエンジンでは約100倍、ロケットエンジンでは約10,000倍にも達します。これだけ大きなエネルギーが発生するので、デリケートなエンジンの部材は高温・高圧・高速の流れによって深刻なダメージを受ける事もありますし、そもそもそれほどの大量の燃料を、短時間に燃焼させる技術はかつてありませんでした。

— それまでのレシプロエンジンの経験的技術だけでは、ジェットエンジンやロケットエンジンの燃焼を制御できなくなったのです。20世紀の後半から燃焼の研究が世界各国で盛んに行われるようになったのには、カルマン教授の燃焼方程式系の確立に加えて、ジェットエンジンとロケットエンジンという新技術の登場が背景にあったのです。

— 科学研究では、出発点は基礎研究です。流れの研究で言えば層流の研究が基本形で、乱流の研究は、より複雑化した応用形とも言えます。水道の蛇口を少しだけひねると、水が一本の太い糸のように何の乱れもなく落下する時があります。これが層流です。蛇口をさらに開けると、水の流れは一瞬にして乱れて、時には周囲に飛び散ったりします。これが乱流です。燃焼でいえば、風のない時に、まったく揺らぎなくロウソクの炎が立ち上っている状態が層流で、息を吹きかけて空気を乱した時にロウソクの炎が揺らぐ状態が、乱流です。

— 日常的に見られる流れのほとんどすべては乱流ですが、層流を研究することは流れを解明するための基礎です。燃焼という火炎の流体についても同じことで、層流燃焼を研究することから燃焼研究が始まるのです。

— 層流火炎を調べてみますと、熱の発生源は1mm以下の薄いブルーの発熱帯です。これは高温領域で発生したOHという分子のある領域にほぼ一致し、実験室で理想的な層流火炎を生成させますと、OHによる三角形の薄いブルーの発熱帯が美しく輝いているのが観察できます。

— 乱流火炎は非常に激しい凹凸の形をしているのですが、その一部を取り出すと層流火炎と同じ薄いブルーの発熱帯が存在していることがわかります。従って、層流火炎を数学的に記述することは、乱流火炎を数学的に解くことにつながるわけです。乱流火炎の燃焼速度を燃料や混合気濃度に依存せず統一的に表すため、まず層流火炎の燃焼速度を測定または計算し、この数値を分母に使う方法があります。30気圧までの高圧下における乱流燃焼速度を厳密に測定し、層流燃焼速度で無次元化して圧力の影響を初めて明らかにしたのは私たち流体科学研究所でした。

— 私たちがやっている燃焼に関わるもう一つの基礎研究は、微小重力下での燃焼研究です。燃焼によって発生するガスは温度が高いため密度が低下します。1Gの重力加速度が働いている地上環境では、密度の変化に応じて大きな自然対流が発生します。多くの場合、炎が伝播してゆく速度は自然対流の速度より速いのですが、自然対流が働いて炎の形が大きく変わったり、その影響が大きいと火炎が消えてしまうこともあります。

— 微小重力環境、例えば、炭鉱の堅穴の中を自由落下する円筒の内部や、スペースシャトルのなかなどでは、重力が0に近いわけですから、自然対流が発生しない理想状態での炎の伝播が見られるわけです。層流燃焼の知識によって乱流燃焼の理解が進んだように、微小重力下という理想的環境で、燃焼の本質が見られるのです。層流燃焼研究と微小重力下での燃焼研究は、燃焼研究の基本として大変重要です。

## 極超音速スクラムジェットエンジンの研究

— 私の研究室は「極限反応流研究分野」といいます。極限とは、高温、高圧、高速ということで、反応流とはその極限流のなかで化学反応が起っているということです。こういう研究室の名前を象徴するのが、「スクラムジェットエンジン」の研究です。

— 現在主流になっているターボジェットエンジンでは、軸流コンプレッサーを使って空気を圧縮して燃焼室に送り込み、高温・高圧の燃焼ガスを作り出しています。これに対して、スクラムジェットは空気吸い込み型のエンジンで、超音速の空気を吸い込み、超音速のまま