

液体ロケットエンジンに発生するキャビテーションの諸問題

流体研伝統のキャビテーションを最先端環境で研究する

伊賀由佳助教

— キャビテーションとは、液体の流れの中で圧力が低下し液体中に気泡が発生する現象（空洞現象）で、流体科学の大きなテーマの一つです。流体科学研究所は太平洋戦争時に設立されたのですが、最初の研究課題の一つは、当時の電源開発に関する流体機械の小型化に伴うキャビテーションの問題でした。それ以来、キャビテーション研究は流体科学研究所の重要研究課題の一つになっています。

— 私の研究テーマは、液体ロケットエンジンという超高速かつ極低温の環境下で発生するキャビテーションです。ロケットエンジン・ターボポンプは水素が毎分42,000回転、酸素が18,000回転、さらに液体水素の温度は -253°C 、液体酸素は -183°C です。このレベルの超高速・極低温液体となると、通常の液体では予測できないような現象が発生します。液体ロケットの推進剤中で起こるキャビテーション現象を解明することは、まさに世界最先端の研究です。

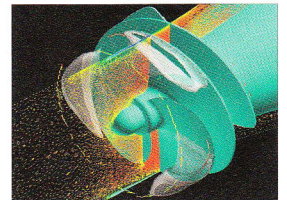
— かつてのキャビテーション研究は、理論的予測を実験で確認し、実験で得られた結果を理論化するという、理論と実験の二本立てでした。コンピュータの計算能力が飛躍的に発展した現在では、理論、実験、計算の三つの方向から問題にアプローチできるようになり、また、実験の計測技術も向上し、その結果、かつてはキャビテーションを二次元・時間平均的に理解するしかなかったのが、不規則に起きる非定常キャビテーションの三次元性を理解することができるようになりました。

— 川の流れを例えに引けば、普通に川が流れている状態が定常流、堤を壊し

て洪水になったのが非定常流なのですが、洪水状態、つまり河川流の事故が理解できるようになったのです。キャビテーションでも事情は河川と同じことで、事故のほとんどは非定常なキャビテーションによって発生します。計測・計算機技術の発展によって、キャビテーションに起因する事故を予測できるようになり、事故を防止する手段を講じることが可能になったのです。

— 1999年にHIIロケットの一段目のエンジンが破損し、地上からの指令で爆破されるという事故が起きました。ターボポンプの入り口に設置されているインデューサの羽根が、液体水素のキャビテーションが引き起す振動によって破損し、これが事故の原因だったと推定されています。キャビテーションが事故原因だったわけです。

— 最近、宇宙航空研究開発機構（JAXA）・角田宇宙センター（宮城県角田市）の液体ロケットエンジンの実験設備で、極低温インデューサの研究が行えるようになりました。私たちはこの研究に、計算の側面から協力しています。この共同研究によって、液体ロケットエンジンの信頼性を高め、次世代、次々世代の液体ロケットの設計に、私たちの研究が活かされることを期待しています。



インデューサ内部流れの数値解析

超音速燃焼の研究

極超音速機のエンジン内部で起きる超音速の燃焼を解明する

中村寿助教

— 私が研究しているのは、音速の10倍で飛ぶ極超音速ジェットエンジンの燃焼器に関する基礎研究です。スクラムジェット（Supersonic combustion ramjet）エンジンと呼ばれています。現在使われているターボファンジェットエンジンは圧縮機を使って空気を圧縮するのですが、スクラムジェットエンジンでは空気吸入口から直接超音速の空気を取り入れ、そこに燃料を噴射して燃焼させます。理論的にはマッハ12程度までの速度が得られると期待されています。このエンジンを使えば、東京—ニューヨーク間を2時間で飛ぶ事ができます。その時、世界はより身近なものになるでしょう。

— スクラムジェットのもう一つの用途は、宇宙空間と地表との間を何度も往復できる宇宙往還機（スペース・プレーン）です。スペースシャトルやHIIなどのロケットエンジンは内部に大量の酸素を積んでいますが、スクラムジェットなら大気圏内を飛ぶときは大気中の酸素を利用できます。ペイロードが大幅に向上し、一回の飛行で宇宙空間に大量の荷物を送ることが可能になるわけです。地球と宇宙の距離が飛躍的に短くなります。

— スクラムジェットエンジンの開発には沢山の課題が山積していますが、私が研究しているのは、エンジン内部に吹いている超音速の風のなかでどうやって燃焼を継続させるのかという問題です。風が吹くとマッチの炎は

簡単に吹き消されますが、それと同じことが数マッハの風が吹くスクラムジェットエンジン内部でも起きます。炎をどう保持するのかが、超音速燃焼の最初の課題なのです。

— マッチを手で囲ってやると強風の下でも炎は消えませんが、それと同じように、数マッハの風の吹くエンジン内部に亜音速（音速以下）の風しか吹かない部分を人為的に作ります。そうすれば火種が保持されます。しかし、超音速流のなかに亜音速部分を作るとはエンジン効率を低下させます。炎の保持とエンジン効率は相矛盾（トレードオフ）する関係にあるわけです。従って、その間の最適解を求めることが我々の仕事になるのです。

— 2004年にNASAがスクラムジェットエンジンを搭載したX-43Aという実験機の飛行に成功し、翌年にはマッハ9.6を記録しています。10秒程度エンジンを稼働させただけで、スクラムジェットの可能性は実証されました。炎の保持に次いで、燃焼の制御が次の課題として浮上しているのですが、我々はその研究にも取り組んでいます。スクラムジェットエンジンを含めて、燃焼工学という分野では流体研は世界最先端の研究をしています。



衝撃波の入射位置に依存する保炎と消炎

Incident shock wave downstream of injection slot

Incident shock wave upstream of injection slot