

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Mechanisms of Supersonic Drag Reduction using Repetitive Energy Depositions**  
(繰返しエネルギー付加による超音速抗力低減のメカニズム)

氏 名 岩川 輝

## 論 文 内 容 の 要 旨

民間超音速機の実用化には、ソニックブームによる騒音の軽減と揚抗比の向上という2つの課題がある。最新の超音速機概念設計では、CFD 技術を用いた性能評価が行われており、ソニックブームの軽減は達成されているが、揚抗比は遷音速旅客機と比べて低い値に留まっている。これは、超音速飛行時に発生する衝撃波による造波抵抗に起因しており、造波抵抗の低減は民間超音速機の実用化に向けた大きな課題である。

本論文では、造波抵抗低減手法の1つである機体前方へエネルギーを付加する手法に着目した。この方法では、無次元抗力低減量  $\Delta D$  とエネルギー付加効率  $\eta$  によって性能を評価し、工学的に有用となるためには  $\Delta D < 0$  かつ  $\eta > 1$  でなければならない。繰返しレーザーパルスを用いたエネルギー付加の手法は、実験的に  $\Delta D = -20\%$ 、 $\eta \sim 10$  という結果が得られており、有望な方法である。レーザーパルスによるエネルギー付加を用いた手法は、単パルスエネルギー付加によって抗力低減メカニズムが詳しく調べられており、エネルギー付加によって形成される高温低密度領域と衝撃波の干渉によって形成されるバロクリニック渦輪の挙動が抵抗低減に寄与していることがわかっているが、繰返しエネルギー付加では、この渦輪の挙動は詳しく調べられていない。そこで、本論文では実験、数値計算の双方を定量的に比較しながら、繰返しエネルギー付加を用いた抗力低減について詳しく調べ、そのメカニズムを明らかにすることを目的としている。

実験は、大気吸込み式超音速風洞で行い、エネルギーは高繰返しパルスレーザーから供給され、模型周りの流れはシュリーレン法で可視化し、高速度カメラでフレーミング撮影した。実験に用いた風洞は試験部断面積が小さく、風洞の不始動を起こさずに模型に加わる力を

正確に測定することが困難であったため、新たにリング型天秤を開発した。計測部の厚みや支持部の影響、ひずみゲージの大きさを考慮した解析を行い、解析結果に基づいてリング型天秤を設計、製作した。製作した天秤と鈍頭模型を用いて風洞試験を実施した結果、他の手法と同等の抗力が計測され、他の分力成分が小さく抑えられていることを確認した。

数値計算は、二次元軸対称流かつ熱量的完全気体を仮定し、エネルギー付加の計算では、エネルギーを付加しない場合の定常解を初期条件として用い、気体の加熱過程は、ガウス空間分布を仮定し、エネルギー方程式の加熱生成項に含めることで計算した。

繰返しエネルギー付加を用いた鈍頭物体の抗力低減メカニズムについて、実験、計算の双方から詳しく調べた結果、バロクリニック渦輪が衝撃層内を滞留する間に模型表面の圧力分布を変調させることで、抗力の低減がもたらされていた。渦輪が衝撃層内に滞留する時間によって抗力低減メカニズムは、(1)渦輪同士の相互作用がなく、単一パルスの重ね合わせとなる条件(5 kHz 以下)、(2)2つの渦輪同士の相互作用が現れ始め、渦輪の滞留時間が短くなる条件(5~15 kHz)、(3)常時2つ以上の渦輪が衝撃層内に滞留し、弧状衝撃波が斜め衝撃波に変形し、模型表面の圧力分布が大きく低下する条件(15 kHz 以上)の3つの範囲に分類された。また、鈍頭物体前方の衝撃層内に複数の渦輪が滞留すると、渦輪同士の干渉によって渦輪の滞留時間が短くなり、衝撃層内の圧力分布が変調される時間も短くなる傾向が見られた。

次に、円錐スパイクとエネルギー付加の組み合わせによる抗力低減効果を実験、数値計算の両面から詳細に調べた。円錐スパイクの長さ及び半頂角をパラメータとしたとき、衝撃波が定在し、流れが定常になる条件(定常モード)と、衝撃波が振動し、流れが非定常になる条件(振動モード)があり、定常モードに対するエネルギー付加の効果が顕著であった。定常モードでは、低繰返しエネルギー付加の条件で円錐スパイクとエネルギー付加の組み合わせによる効果が確認され、その効果は円錐スパイクが鈍頭模型の弧状衝撃波離脱距離よりも短い方が大きかった。しかし、高繰返しエネルギー付加では、円錐スパイクとエネルギー付加の組み合わせによる効果は小さくなり、特に 200 kHz までの高繰返しエネルギー付加した場合には、円錐スパイクの有無に関わらず抗力が一定の値に漸近する傾向があり、流れ場の違いがほとんど見られなくなった。このことから、高繰返しエネルギー付加による抗力低減効果は円錐スパイクの効果を卓越することがわかった。

本研究では、実機の 100 分の 1 程度のスケールで、最大 1 kW のエネルギー付加を行ったところ、 $\Delta D = -20\%$ 、 $\eta = 10$  という結果が得られたが、エネルギー付加による抗力低減が冪乗則に従うと仮定した場合、実機で必要となるエネルギーは数百 MW オーダーとなる。一方で、渦輪の滞留時間はスケールが大きくなるとともに長くなると予想されることから、スケールと抗力低減性能についてはさらなる研究が必要である。