

超音速後流における乱流混合の促進

野村 聡 幸*

Enhancement of Turbulent Mixing in Supersonic Wake

Toshiyuki NOMURA

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Spanwise periodic cutouts at the end of a fuel injector in scramjet engine introduce longitudinal vortices into the wake and enhance turbulent mixing of hydrogen and oxygen. More effective mixing is expected if an oblique shock wave impinges on the wake. Thus computational investigation is made to confirm this idea in the case of a flat plate with cutouts. An oblique shock wave with no oscillation has very little effect on the wake, but the shock oscillating with a low frequency 19.1 kHz makes the core of longitudinal vortex wavy and the shear layers wrapping round it fluctuate in a complicated manner. When the shock oscillates with a high frequency 43.1 kHz, the shear layers wave quite regularly, while the core of longitudinal vortex is hardly influenced.

Key Words: turbulent mixing, supersonic wake, spanwise periodic cutouts, scramjet engine, longitudinal vortices, oblique shock wave, oscillation, shear layers

1. はじめに

スクラムジェットエンジン内で燃料の水素と超音速気流中の酸素を効果的に混合させる方法として、燃料注入装置に切り込みを設けて後流に縦渦を導入し、後流の乱流化を促進することが考えられている^{1),2)}。また、後流に斜め衝撃波が入射すると、自由剪断層との干渉により、後流の乱流化に有効なことがわかっている¹⁾。

本研究は、超音速流中に置かれた平板の後縁に切り込みを設けて後流に縦渦を導入し、さらにその後流に弱い斜め衝撃波を特定の振動数で振らせて入射させることで、後流がどのような影響を受けるか数値実験により調べた。

2. 計算法

オイラー方程式を基礎方程式とし、非粘性流束を Chakravarthy-Osher タイプの TVD³⁾ スキームで求めた。また、時間進行には陽的二段階ルンゲ・クッタ法を用いた。

計算領域を図1に示す。計算格子は x, y, z 方向それぞれに等間隔の矩形格子であり、 x 方向180点、 y 方向140点、 z 方向20点である。

初期流れとして計算領域全域に x 方向を流れ方向とするマッハ数2.5の一樣流を与えた。

境界条件として、上流、下流、上方の各境界と下方境界の斜め衝撃波入射位置より上流に初期流れと同じ一樣流を与えた。下方境界の斜め衝撃波入射位置より下流では一樣流が 5° 偏向したときの流れを与え、これにより衝撃波角 27.4° の弱い斜め衝撃波が下方境界から計算領域に入射するようにした。なお、斜め衝撃波入射位置は中心 $x=2.5$ 、振幅0.5で正弦波状に振動する。振動数は0, 19.1, 43.1kHzの3ケースを選んだ。物体面と側方境界には対称条件を課した。

3. 結果と考察

平板後縁から下流へ延びる自由剪断層と縦渦がどのような干渉し、またそれらが斜め衝撃波の入射によってどのような変化を受けるか、 z 方向のほぼ中央位置 ($z=0.475$) の

* 航空宇宙技術研究所

断面での密度分布と渦度分布を基に調べる。

3.1 斜め衝撃波が振動しないときの後流

後流の構造が強固であることとそれに入射する斜め衝撃

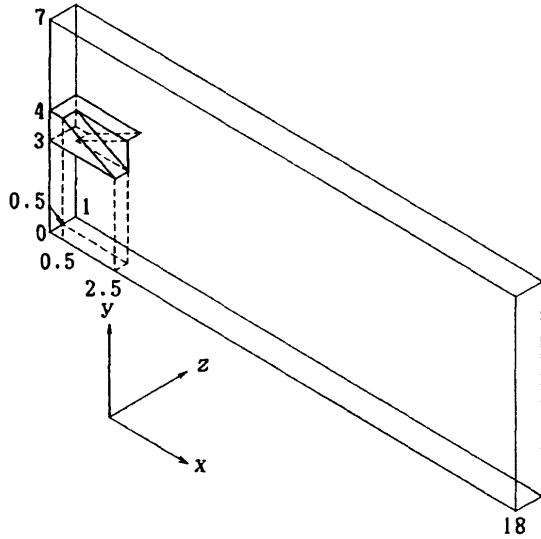


図1 計算領域

波が弱いことから、流れは定常を保つ。

図2の密度分布から、縦渦は斜め衝撃波の上流と下流でその構造を変えておらず、衝撃波から乱流化を促進するような影響は受けていない。

図3に現れている層状の渦度分布とその向きは、物体後縁から延びる剪断層が縦渦に巻き付いていることを示しており、その構造は図4のように推定される。衝撃波が剪断層に入射した直後、バロクリニックトルクによる渦度の上昇がみられるが、他に衝撃波入射による影響は現れていない。

3.2 斜め衝撃波が遅く振動するときの後流

19.1kHzで振動している斜め衝撃波入射位置が上流に移動して $x=2.5$ にきた瞬間の後流について調べる。流れは周期的となる。

図5の密度分布から、縦渦の核の部分が斜め衝撃波の振動の影響で波打っているのがわかる。さらにその縦渦の変形による影響で、縦渦に巻き付いている剪断層が歪むとともに、局部的に渦度が高くなっていることが図6に示されている。

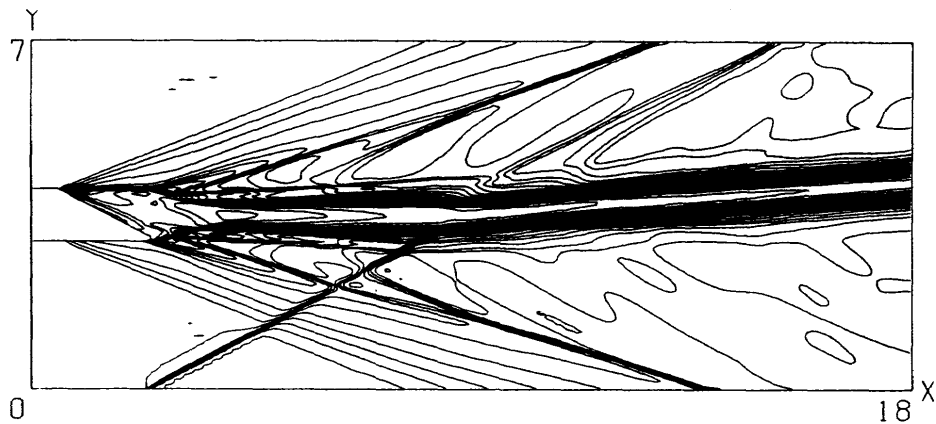


図2 等密度線図 ($z=0.475$)

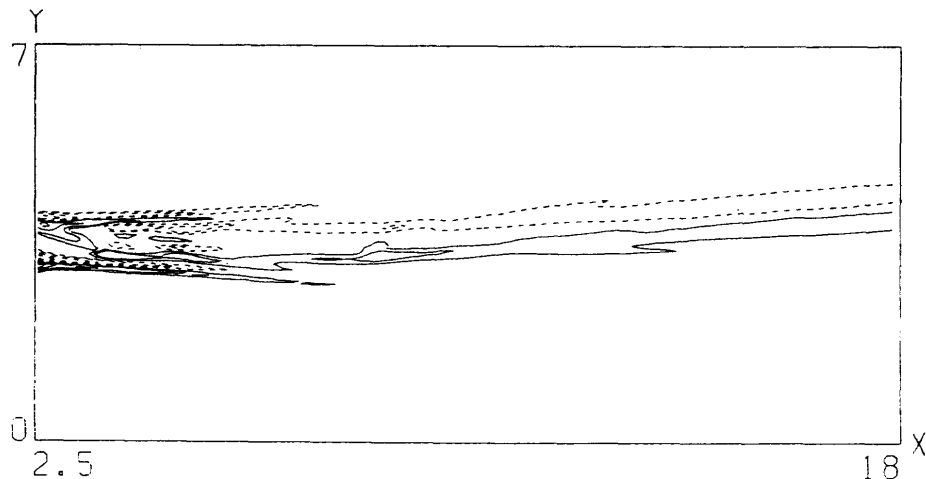


図3 等渦度線図 ($z=0.475$, 実線:反時計方向, 破線:時計方向)

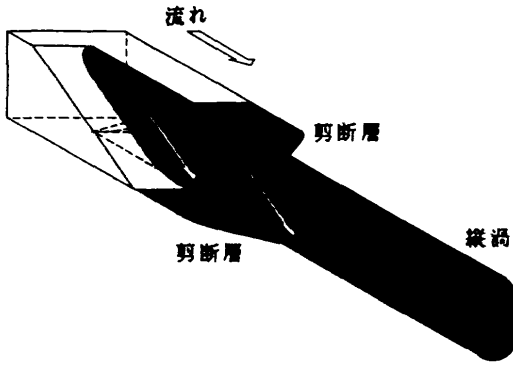


図4 縦渦に巻き付く剪断層

3.3 斜め衝撃波が速く振動するときの後流

43.1kHzで振動している衝撃波入射位置が上流に移動して $x=2.5$ にきた瞬間の後流について調べる。流れは周期的となる。

図7の密度分布が示すように、衝撃波を振動させない場合と同様、縦渦の構造は変化しない。一方、図8の渦度分布から、剪断層は衝撃波の振動の影響を受け、規則的に波打っているのが認められる。

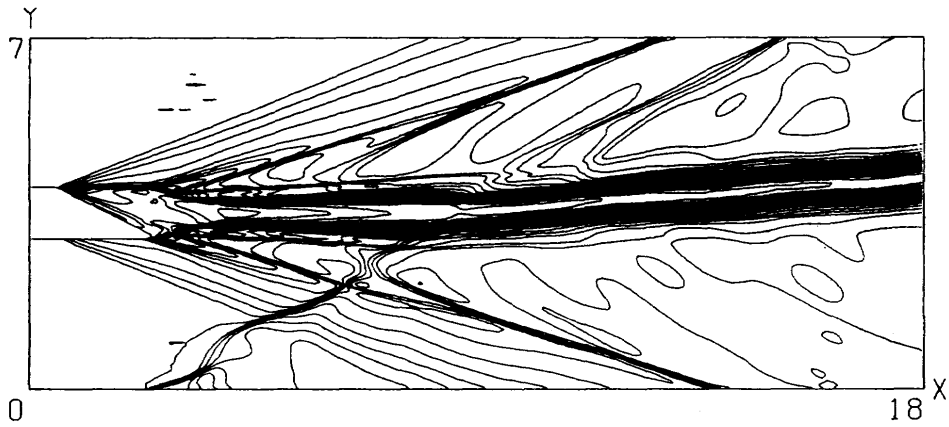


図5 等密度線図 ($z=0.475$)

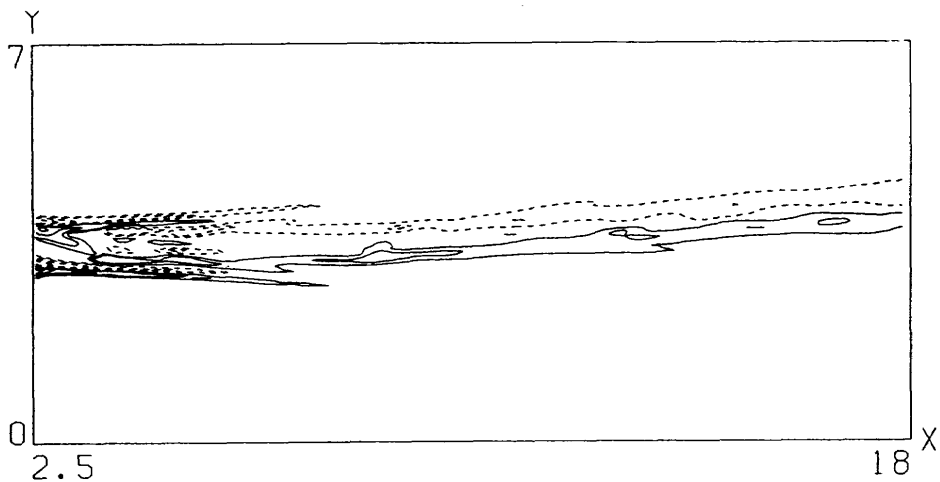


図6 等渦度線図 ($z=0.475$, 実線: 反時計方向, 破線: 時計方向)



図7 等密度線図 ($z=0.475$)

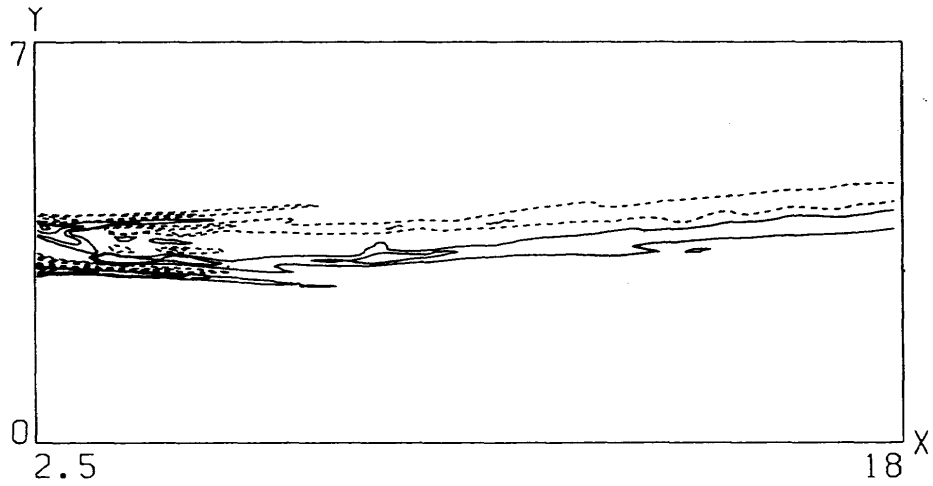


図8 等渦度線図 ($z=0.475$, 実線: 反時計方向, 破線: 時計方向)

参考文献

- 1) 西岡通男: 超音速乱流混合の制御, 「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集(第5回・第6回) SP-12 (1990), pp.39-42.
- 2) 野村聡幸, 石井隆次, 西岡通男: 超音速流における縦渦の形成, 第9回航空機計算空気力学シンポジウム論文集 SP-16 (1991), pp.123-128.
- 3) Sukumar R. Chakravarthy: Development of Upwind Schemes for the Euler Equations, NASA-CR-4043 (1987).