

超音速ノズル角部流れの縦渦に関する数値的研究 A Numerical Study on the Corner-flow Streamwise Vortices in a Supersonic Rectangular Nozzle

○坂上昇史, 阪府大工, 堺市中区学園町1-1, sakaue@aero.osakafu-u.ac.jp
南 信智, 川崎重工業
西岡通男, 京大工, 京都市左京区吉田本町, nishioka@fluid.mbox.media.kyoto-u.ac.jp
Shoji Sakaue, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka
Nobutomo Minami, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
Michio Nishioka, Kyoto University, Kyoto, Japan

This numerical study examines the supersonic rectangular-nozzle flow by focusing attention on the development of secondary flow and corner-flow and their effects on the boundary layer instability and transition. The results show that secondary flows appear in the side wall boundary layers and form into streamwise vortices in the corner region immediately behind the throat station where the boundary layer momentum thickness Reynolds number is 400. The streamwise vortex increases in number downstream and induces a local normal-to-wall flow as large as 4% of the local mainstream. The present simulation is in good agreement with the corresponding experiment, in particular, on the appearance of cross-flow instability on the side wall boundary layer and the streamwise location where the streamwise vortex first appears. The corner-flow is found to be of extremely unstable nature suggesting that the turbulent transition observed is directly caused by the corner-flow disturbances.

境界層の乱流遷移に関する知識は、遷移予測法の確立や層流・乱流制御技術の開発、乱流モデルの構築などにおいて不可欠であるが、超音速流の場合、遷移に導く攪乱を実験で捉えることが難しく、その解明はあまり進んでいない¹⁾。そこで筆者らは超音速境界層の遷移を実験的に捉える試みを続けている^{2,3)}。これまでに、矩形断面超音速風洞（スロート断面：高さ10.7mm×幅30mm）のノズル壁境界層の遷移を調べ、それがノズル角部に生じた攪乱に起因することを示唆する結果を得た。この点を確認するため、この超音速ノズルの角部流れを数値的に調べた。

図1は、スロート下流 $x = 20\text{mm} \sim 90\text{mm}$ のノズル断面上壁角部 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ における渦度 ω_x と速度ベクトル (V, W) の分布を重ねて示す。図の暗い領域は反時計方向に回転する負の渦度をもつ。速度ベクトル (V, W) は対称条件を適用したスパン中心断面の同一 y 位置の速度ベクトルに垂直な成分を表す。ノズル上壁が下に凸の曲率をもつスロート近傍では、主流に向心力を与える圧力場が側壁境界層の低速流体に印加され、上壁角部に向かう2次流れが生じる。この2次流れが角をまわることによって、スロート下流 $x = 20\text{mm}$ 、境界層厚さ $\delta = 0.4\text{mm}$ 、運動量厚さに基づくレイノルズ数 $Re_\theta = 400$ の境界層中に渦レイノルズ数 $Re_\Gamma = \Gamma v = 900$ の縦渦が生まれる。この縦渦は局所主流の約4%の速度を壁に垂直な方向に誘起し、低速ストリークを形成するとともに成長して、新たな縦渦を近傍につくる。角部流れに生じたこれら縦渦は、その発生位置や空間スケールが実験で観察された結果とよく一致する。このように本研究は、2次流れの（横流れ）不安定性や縦渦群を伴う角部流れの特徴を明らかにして、これらが不安定性の強い流れであることを示し、筆者らの観察した超音速ノズル壁境界層の乱流遷移が角部流れの攪乱に起因することを強く示唆している。

引用文献

- 1) E. Rechetko, AIAA paper 94-0001 (1994).
- 2) 坂上, 西岡, 中村, 宮地, 日本流体力学会誌「ながれ」, 23 別冊, (2004) 146-147.
- 3) 坂上, 中村, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 24 別冊, (2005) AM05-04-008.

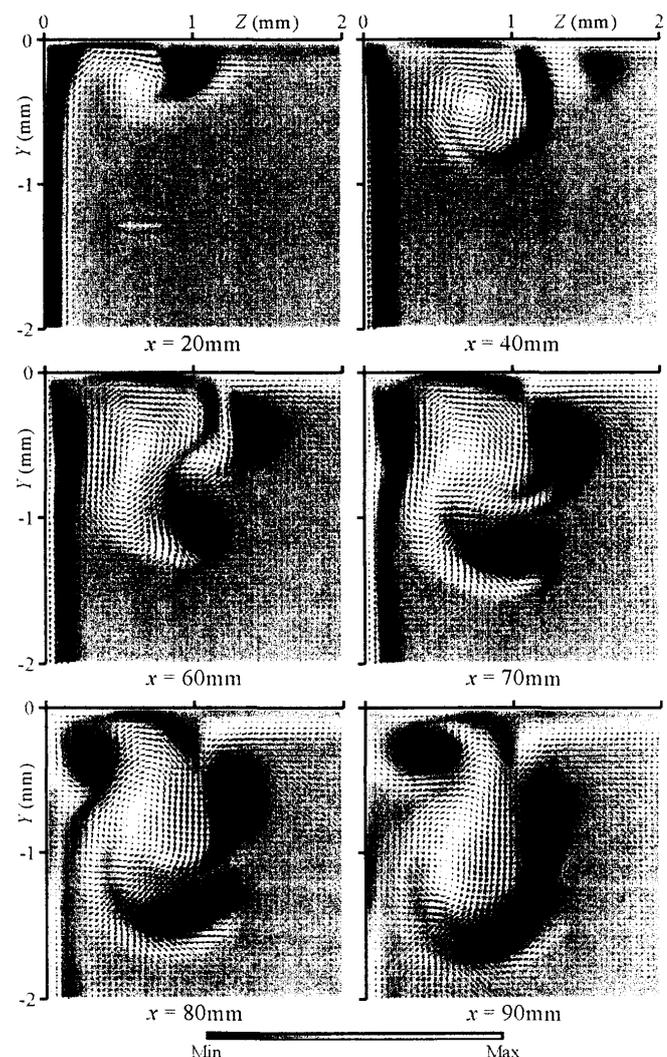


Fig.1 Development of streamwise vortices in the upper wall corner region visualized by contour map of vorticity ω_x and (V, W) velocity vector field.