

極超音速風洞における境界層乱流遷移の Direct Numerical Simulation

報告書番号：R24JFHC0309

利用分野：事業共通

URL：<https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2024/26890/>

● 責任者

藤田直行, セキュリティ・情報化推進部スーパーコンピュータ活用課

● 問い合わせ先

松山 新吾(matsuyama.shingo@jaxa.jp)

● メンバ

松山 新吾

● 事業概要

極超音速風洞による境界層乱流遷移の試験において、風洞内に設置された模型の壁面上で乱流遷移を引き起こすきっかけとなる最初の擾乱源は風洞ノズル壁上で発達する乱流境界層が放射するノイズ(圧力擾乱など)であることが知られている。本研究では極超音速風洞においてノズル壁面上および模型壁面上で生じる境界層の乱流遷移を Direct Numerical Simulation (DNS) により再現することを目的とする。現実の極超音速風洞試験では試験気流中に含まれるノイズの影響を把握しないまま乱流遷移の計測が行われているが、本研究で実施する DNS によりノズル壁面で生じる乱流境界層によるノイズが模型上の乱流境界層遷移にどのような影響を及ぼすかを初めて理解することができ、極超音速風洞による境界層遷移の計測を高度化するために不可欠な情報となる。また、今後、民間企業での開発が予想される極超音速旅客機では抵抗・加熱増加などの観点から乱流遷移の予測が重要な課題となるが、本研究で得られる乱流遷移データは大気中の擾乱による機体壁面上の境界層遷移を理解するための重要な知見となる。

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

極超音速風洞ノズルで生じる境界層の乱流遷移過程を DNS により解析するためには、コルモゴロフスケール付近までの乱流を解像する必要がある。そのため、乱流遷移が生じるようなレベルの高レイノルズ数流れでは格子点をはるかに超えるような規模になる。このような大規模三次元の非定常解析は計算コストが非常に高く、スーパーコンピュータを使用した解析でなければ実現が不可能である。

● 今年度の成果

1. 成果の概要

本研究では、極超音速風洞で生じる境界層の乱流遷移過程を対象として DNS を実施し、現実を正確に模擬した初期擾乱を実現することを目指した。本年度の成果として、まず、極超音速風洞試験気流に含まれる乱れを DNS によって再現した結果を報告する。これは、極超音速風洞ノズルを模擬した DNS によりノズル壁面上で乱流境界層を発生させ、その乱流境界層が放射するノイズによって生じる試験気流中の擾乱を再現したものである。さらに、もう一つの成果として、風洞ノズルと計測模型の配置を模擬して向かい合わせに配置した二枚の平板を対象とした DNS 解析を実施した。この解析は、向かい合わせに配置した二枚の平板の一方（ノズル壁に相当）で人工的な擾乱を付加して乱流境界層を発生させ、その乱流境界層が放射するノイズによってもう一方の平板上（計測模型に相当）で境界層遷移を発生させたものである。

2. 解析手法

本研究では JAXA 航空技術部門において開発・整備を行っている熱化学非平衡流解析コード JONATHAN を使用して DNS を実施した。流れ場の支配方程式として三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を使用し、化学反応の生じない凍結流を仮定して密度・運動量・エネルギーの保存式を解いた。支配方程式は有限体積的手法により離散化し、対流流束を SLAU2 スキームにより計算した。空間精度の高次精度化にあたっては密度・圧力のスカラー量は二次精度の MUSCL 法、速度成分についてはリミッターの無い五次多項式により補間した。時間積分には二段階二次の Runge-Kutta 法を使用した。

3. 成果

3.1. DNS による極超音速風洞の試験気流乱れの再現

JAXA 航空技術部門に設置されている 0.5m/1.27m 極超音速風洞のマッハ 7 ノズル形状について乱流境界層の DNS を実施した。z 方向を流れ方向（ノズル軸方向）とし、スロート位置を $z=0$ として、スロートより下流の領域 ($z>0.5\text{m}$) について周方向に $1/2$ (180°) および $1/4$ (90°) 部分のみを解く、2 通りの解析を実施した。それぞれの DNS 解析に試用した総計算セル数は約 57.2 億、および、約 28.6 億セルである。

最初に、完全に流れが静止した初期状態から約 3ms の解析を実施してノズル流れが形成されたのち、 $z=0.6\text{m}$ の位置で境界層内部に擾乱を与えてノズル壁面の境界層を乱流遷移させ、さらに解析を約 12ms の間、実施した。周方向に $1/2$ (180°) 部分を解いた DNS 解析によって得られた $t=15\text{ms}$ における瞬時の流れ場を図 1 に示す。乱流境界層が放射するノイズの様子を可視化するため、密度勾配分布により疑似的なシュリーレン画像を作成した。y-z 断面 ($x=0\text{ m}$) の瞬時場から、 $z=0.8\text{m}$ 付近で境界層が乱流に遷移している様子が確認できる。疑似シュリーレン画像からは乱流境界層が放射するノイズが可視化されている。遷移の開始位置 $z=0.8\text{m}$ を先頭にして乱流遷移に伴う強いノイズがノズル中心に向かって伝播し、さらに下流では乱流境界層が発達することでノイズの構造が微細になり、流れ方向に対して約 25° の角度でノズル中心へ向かって伝播する。ノズル出口 ($z=3.258\text{ m}$) 付近、 $z=3\text{m}$ での x-y 断面の瞬時場を見ると十分に発達した乱流境界層の様子が確認できる。境界層の厚さはノズル半径に対して $1/5$ 近くにまで発達している。x-y 断面の疑似シュリーレン画像が示すように、乱流境界層によるノイズは同心円状の大きな構造ではなく、微細で断片的な波としてノズル中心に向かって伝播して収束する。

ノズル周方向の計算領域サイズによる影響を評価するため、 $1/4$ (90°) 部分のみを解いた DNS 解

析の結果を図 2 (動画により表示) に示す。周方向の計算領域が小さくなることによる影響は小さく、境界層の遷移位置や遷移した乱流境界層が放射するノイズの様子も $1/2$ (180°) の解析と類似した結果となった。

本解析では DNS により極超音速風洞の気流ノイズを再現することに成功した。今後、風洞試験により気流ノイズのスペクトルを取得するなどして DNS の検証を行う必要はあるが、DNS 解析によって得られたデータは試験気流ノイズのモデリングに利用することが期待できる。

3.2. 向かい合わせに配置した二枚の平板間で生じる境界層乱流遷移の DNS

前述したように、極超音速風洞試験においてはノズル壁面上で発達した乱流境界層からノイズが放射されて試験気流の乱れが発生し、その気流乱れを初期擾乱として風洞内に設置された模型上で境界層の乱流遷移が生じる。そのような風洞ノズル壁とノズル内に置かれた計測模型の配置を模擬して、向かい合わせに配置した二枚の平板を対象とした DNS 解析を実施した。x, y, z 方向を、それぞれ、流れ方向、壁面垂直方向、スパン方向として、下側に長さ 4m の平板を配置し (平板前縁を $x=y=0$ とする)、下流に 2.7m、垂直方向に 0.2m だけオフセットしてもう一枚の平板を配置した。本解析の総計算格子点数は約 10.6 億点である。この DNS 解析では、まず、下側に配置した平板上の境界層内部にのみ擾乱を付加して乱流境界層を発生させる。上側に配置した平板上の境界層には人工的な擾乱を付加せず、下側の平板上で発達する乱流境界層が放射するノイズによって上側の平板でも遷移が生じるかどうかを調べるものである。

DNS 解析の結果を図 3 および図 4 (動画により表示) に示す。風洞ノズルの DNS と同様に密度勾配による疑似シュリーレン画像を作成した。図の結果は境界層を視認しやすいように y 方向についてスケールを 5 倍に拡大表示している。まず、下側へ配置した平板上では擾乱を付加することによって $x=0.4\text{m}$ 付近で完全に乱流に遷移することが確認できる。また、それに伴い乱流境界層のエッジ付近から下流方向へ向かって右斜め上方向にノイズが放射されている。下側の平板上で生じた乱流境界層から放射されたノイズは上側の平板前縁に出来る斜め衝撃波を通過してそのまま境界層へ入射する。上側に配置した平板上では入射したノイズを初期擾乱としてその前縁から 0.3m 付近の位置で乱流に遷移していることが分かる。

本 DNS 解析では現実の風洞試験に近い乱流遷移過程を再現するため、境界層遷移の DNS において境界層の外部から擾乱を付加して遷移を生じさせることを試みた。二枚の平板を向かい合わせに配置して下側に配置した平板上で人工的な擾乱により乱流境界層を発生させ、その乱流境界層が放射するノイズによって上側に配置した平板上でも境界層が乱流に遷移することを確認できた。上側に配置した平板で生じた遷移の結果は実際の極超音速風洞試験における遷移 (試験気流ノイズにより風洞模型上で境界層が乱流遷移する) とかなり近い現象が再現出来ているものと思われる。本 DNS 解析の結果から実際の風洞試験で生じる乱流遷移過程の理解が進むことを期待できる。

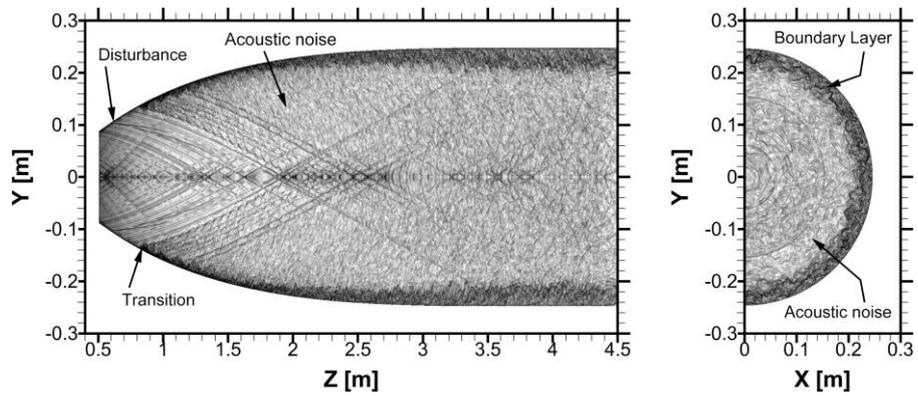


図1: 極超音速風洞ノズルの DNS 解析によって得られた $t=15\text{ms}$ における瞬時の流れ場. ノズル周方向 $1/2$ (180°) 部分を解いた DNS の結果から, 密度勾配により作成した疑似シュリーレン画像を表示.

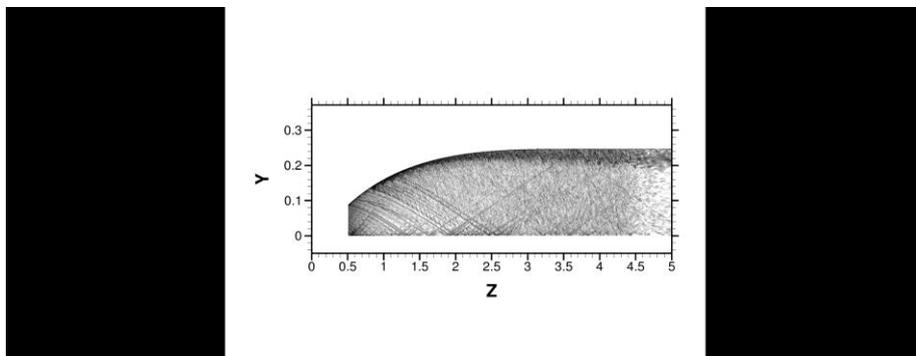


図2: ノズル周方向 $1/4$ (90°) 部分のみを解いた DNS 解析の結果. (ビデオ。ビデオは Web でご覧頂けます。)

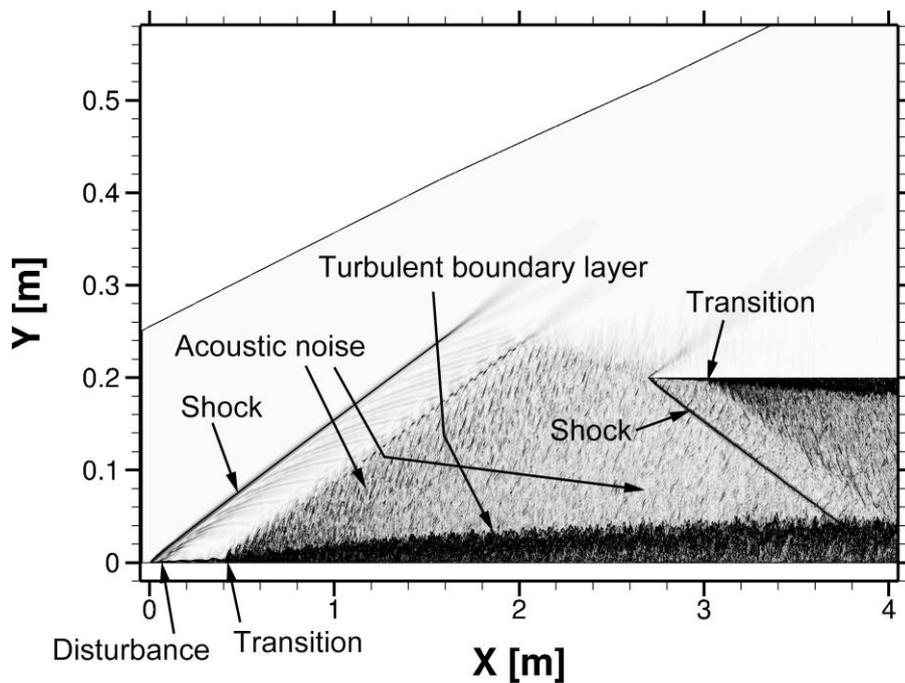


図3: 向かい合わせに配置した二枚の平板を対象とした DNS 解析の結果. 密度勾配により作成した疑似シュリーレン画像で瞬時の流れ場を表示.

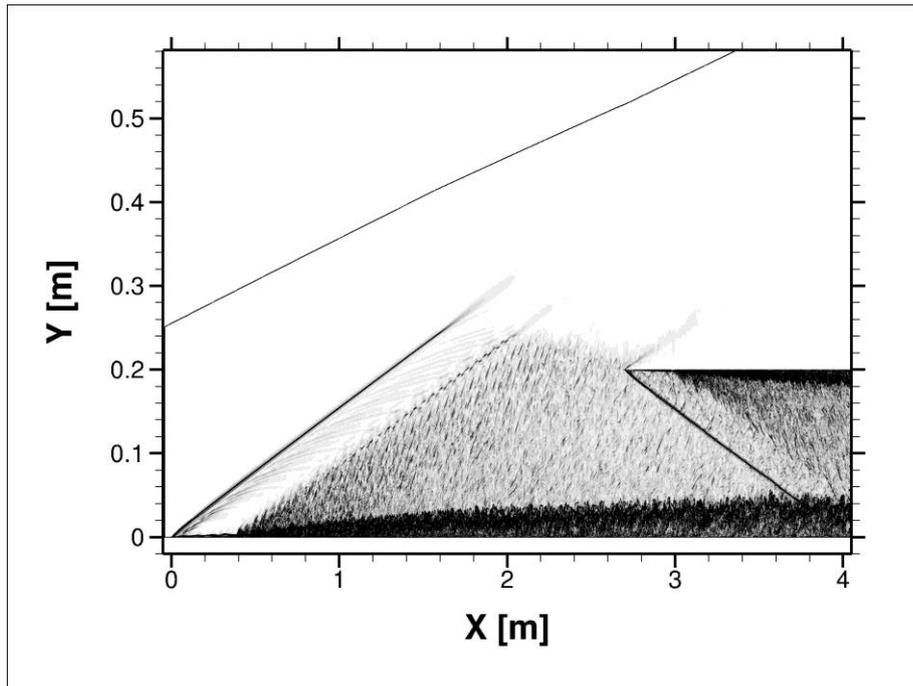


図 4: 向かい合わせに配置した二枚の平板を対象とした DNS 解析の結果. 境界層遷移過程を疑似シュリーレン画像による動画で表示. (ビデオ。ビデオは Web でご覧頂けます。)

● 成果の公表

-査読なし論文

1) 松山 新吾, "極超音速境界層遷移の DNS と風洞試験の乖離を解消するためのいくつかの試み," 可視化情報学会誌 第 45 巻 172 号, pp.3-6, 2025.

-口頭発表

1) 松山 新吾, "DNS による極超音速風洞試験気流の乱れの再現," 第 55 期 定時社員総会および年会講演会, 2024.

2) 松山 新吾, 井手 優紀, 藤井 啓介, "風洞ノズルと計測模型を全て解いた極超音速境界層遷移の DNS," 令和 6 年度宇宙航行の力学シンポジウムプログラム, 2024.

3) 松山 新吾, "大気圏突入環境下で生じる境界層乱流遷移の DNS を高忠実に実施するための諸検討," 令和 6 年度宇宙航行の力学シンポジウムプログラム, 2024.

● JSS 利用状況

● 計算情報

プロセス並列手法	MPI
スレッド並列手法	OpenMP
プロセス並列数	16340 - 32680
1 ケースあたりの経過時間	120 時間

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 0.00

内訳

計算資源		
計算システム名	CPU 利用量(コア・時)	資源の利用割合※2 (%)
TOKI-SORA	0.00	0.00
TOKI-ST	0.00	0.00
TOKI-GP	0.00	0.00
TOKI-XM	0.00	0.00
TOKI-LM	0.00	0.00
TOKI-TST	0.00	0.00
TOKI-TGP	0.00	0.00
TOKI-TLM	0.00	0.00

ファイルシステム資源		
ファイルシステム名	ストレージ割当量(GiB)	資源の利用割合※2 (%)
/home	24.50	0.02
/data 及び/data2	1,531.00	0.01
/ssd	251.00	0.01

アーカイバ資源		
アーカイバシステム名	利用量(TiB)	資源の利用割合※2 (%)
J-SPACE	2.76	0.01

※1 総資源に占める利用割合：3つの資源(計算,ファイルシステム,アーカイバ)の利用割合の加重平均

※2 資源の利用割合：対象資源一年間の総利用量に対する利用割合

● ISV 利用量

ISV ソフトウェア資源		
	利用量(時)	資源の利用割合※2 (%)
ISV ソフトウェア(合計)	0.00	0.00

※2 資源の利用割合：対象資源一年間の総利用量に対する利用割合