

DBD プラズマアクチュエータを用いた流れ制御技術の高度化に関する研究

報告書番号：R24JACA26

利用分野：JSS 大学共同利用

URL：https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2024/27500/

● 責任者

立川智章, 東京理科大学

● 問い合わせ先

立川智章(tatsukawa@rs.tus.ac.jp)

● メンバ

小川 拓人, 立川 智章, 瀧川 圭太, Tan Kevin

● 事業概要

航空機などへの利用が期待される誘電体バリア放電 (DBD) プラズマアクチュエータを用いた能動的流れ制御技術の確立, 実流れへの適用を目的とする. 今年度はこれまで取り組んできた翼周り流れの制御に加えて, 複雑な剥離現象を生じる流れに対する流れ制御の高忠実シミュレーションを行い, 流体制御デバイスの適用可能範囲を広げ, 能動的流体制御技術の向上に取り組む.

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

JAXA スーパーコンピュータで計算実績が豊富な圧縮性流体解析ソルバ LANS3D を用いて大規模 3 次元非定常流れシミュレーションを実施するため

● 今年度の成果

これまで本課題では, プラズマアクチュエータ (PA) を用いた翼面上の流れの剥離制御手法の研究を行ってきた. NACA0015 翼周りの流れ (レイノルズ数: 63,000) に対する剥離制御においては, 高忠実度シミュレーションにより得られた流れ場の考察に基づき, これまで高迎角で有効とされてきた無次元バースト周波数よりも高い, 無次元周波数 18 による制御が有効である可能性を示した. 今年度は, 翼周りの流れと比べてより複雑な剥離現象が生じる Ahmed モデル周りの流れの制御に取り組んだ. Ahmed モデルは, 丸みを帯びた先頭部, 長い胴体, 後方で斜めに切り落とされたスラント部, そして垂直な後端部から構成される. 簡易的な形状であるが, モデル後方では, 航空機や飛翔体においても観察される複雑な 3 次元流れを形成する. 本研究ではモデル後方の複雑な流れの制御に取り組むことで, PA の実利用に向けて有用な知見の獲得を目指す. 本研究ではスラント部の傾斜角を 25 度に設定し, 特にモデル後方に発生する剥離や縦渦を含む複雑な流れに注目し, PA を用いた流れ制御を試みた. スラント部における流れの制御を目的として, 図 1 に示すように複数の PA 設置条件を検討した. 具

体的には、ルーフ部後端に設置し、主流方向と逆向きに誘起流を発生させる PA1_Counter, スラント部前縁に設置し、主流方向に誘起する PA2, 同じ位置で主流方向と逆向きに誘起する PA2_Counter の 3 条件である。さらに、それぞれの条件に対して誘起流の強さを増加させたケースを PA_Strong とした。PA を設置していない基準となるケースは Base と呼ぶ。計算格子は約 5.8 億点で, Ahmed モデル高さを基準にレイノルズ数は 200,000 とした。支配方程式は 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い, 空間差分法には 6 次精度コンパクト差分法($\alpha=0.48$)を, 時間積分法には, ADI-SGS 陰解法(内部反復 5 回)を用いた。時間刻み $\Delta t=5.0 \times 10^{-4}$ とし, 乱流解析手法として Implicit LES を用いた。流入マッハ数は 0.2 とし, 比熱比は空気の $\gamma=1.4$, プラントル数は $Pr=0.72$ とした。

図 2 に Base における流れ場の様子を示す。等値面は速度勾配テンソルの第二不変量で, 速度の絶対値によって色付けされている。スラント部中央には大規模な剥離領域が形成されており, またスラント部の左右端部からは縦渦が発生している様子が確認できる。これらは, 実験的にも知られるスラント角度 25° の Ahmed モデル特有の流れ構造であり, 数値シミュレーションによって流れが再現されていることがわかる。図 3 にスラント部中央断面の速度分布を示す。PA2_Strong のケースがスラント部における剥離を最も効果的に抑制できており, 次いで PA1_Counter_Strong, PA2 の順に剥離領域が小さくなる。一方, PA2_Counter および PA2_Counter_Strong のケースでは, 逆に剥離領域が拡大している。これらの結果から, スラント部の剥離に関しては主流方向に流れを誘起する制御が一概に効果的であるとは言えないことがわかる。特に, PA1_Counter_Strong のケースでは, ルーフ部後端で一度剥離が発生した後, 再付着し, スラント部に沿う流れが形成されることで, スラント部全体での剥離領域が縮小していることは特筆すべき点である。

スラント部の端部から発生する縦渦周辺の渦度絶対値の分布を図 4 に示す。PA2_Counter_Strong ではスラント部の後縁に近づくにつれて渦が減衰していることが確認される一方, スラント部の剥離抑制効果が高かった PA1_Counter_Strong では端部から発生する縦渦にほとんど効果を及ぼしていないことがわかる。この違いは, スラント部の剥離剪断層と縦渦との位置関係に起因すると考えられる。縦渦の生成に寄与する端部周辺の流れの構造をより詳細に調べ, 適切に剪断層を制御することで, 間接的に縦渦を制御できる可能性がある。

以上のように, Ahmed モデル周り流れの制御を行うことで, PA を用いてスラント部の剥離抑制が可能であることがわかった。また, スラント部の流れを剥離させることで, 縦渦を弱めることも可能であることがわかった。縦渦への影響は制御条件によって大きく異なり, モデル端部周辺の流れとスラント部の剥離剪断層との関係を明らかにすることで, より良い縦渦の制御法についても今後議論したいと考えている。

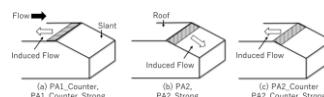


図 1: PA 設置条件

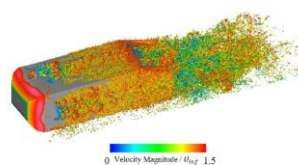


図 2: Base における瞬間場 (等値面は速度勾配テンソルの第二不変量)

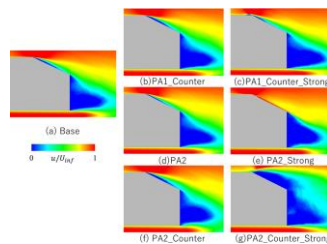


図 3: モデル中央断面の主流方向速度分布

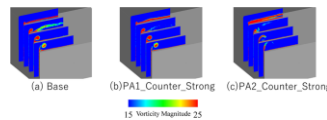


図 4: 縦渦周辺の渦度絶対値分布

● 成果の公表

-口頭発表

瀧川圭太, 浅田健吾, 立川智章, 渡部航太朗, 藤井孝藏, “DBD プラズマアクチュエータを用いた Ahmed model スラント部流れ制御の LES 解析”, 第 38 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2024 年 12 月

-ポスター

瀧川圭太, 浅田健吾, 立川智章, 藤井孝藏, “DBD プラズマアクチュエータによる Ahmed model スラント部の流れ制御”, 日本機械学会流体力学部門 プラズマアクチュエータ研究会 第 11 回シンポジウム, オンライン, 2025 年 1 月

● 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	自動並列
プロセス並列数	79 - 269
1 ケースあたりの経過時間	24 時間

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 0.46

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	12,498,425.60	0.57
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	40.00	0.03
/data 及び/data2	35,400.00	0.17
/ssd	0.00	0.00

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	0.00	0.00

※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