

jh170046-NAJ

大規模シミュレーションによる マイクロデバイスを利用した輸送機器設計革新技術の産業利用拡大

浅田健吾（東京理科大学）

DBD プラズマアクチュエータと呼ばれるマイクロ流体制御デバイスの幅広い利用分野での産業応用に向けて、地上の輸送機器やその付属物などの剥離流れの制御技術確立に取り組む。当デバイスは主に航空工学分野で発展してきたため、これまでの応用先は翼型のような“流線形”物体流れがほとんどであった。本課題では、これまでの翼流れ研究で得られた知見をもとに、当デバイスによる剥離制御技術を“非流線形”流れに適用するための指針を与えることを目指す。本課題では乱流の微小な変動も予測可能な Large-eddy simulation (LES) を用いて詳細な流れ場理解を行うことで目標達成に取り組む。平成 29 年度は自動車モデル流れの LES を実施し、DBD プラズマアクチュエータの自動車流れへの適用可能性を示した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

- 浅田健吾：流体計算実施
- 滝沢寛之：計算コードチューニング協力
- 小林広明：計算コードチューニング協力
- 江川隆輔：計算コードチューニング協力
- 磯部洋子：計算コードチューニング協力
- 藤井孝藏：流体計算実施
- 立川智章：データマイニング
- 小川拓人：流体計算実施

2. 研究の目的と意義

「形状工夫」という既存の輸送機器・流体機器の設計概念を越える革新的なアイデアとして「マイクロデバイスによる流体制御を前提とした流体機器設計」がある。厚さ数百マイクロメートル以下という非常に薄い電

氣的マイクロデバイスに生ずるバリア放電 (DBD) を利用した流れ制御技術[1]のシミュレーションによる機能評価には局所的に生ずる乱流現象の詳細を正確に把握する必要がある[2]。HPCI 戦略プログラム (分野 4「次世代ものづくり」課題 1) において、主に翼型形状を対象としたシミュレーションにより限界が見えてきた輸送機器の更なる性能向上が示された[3]。特定の条件下ではあるが、小さなエネルギー投入で流体性能を数倍に高める可能性とデバイスのデザインガイダンスが示され、実験でも実証されたことから、戦略プログラム終了後も「翼型」を利用する MAV、ドローンなどの小型航空機や送風ファン、風車などへの応用研究などが産業界との連携のもとで進みつつある (TBS「夢の扉」にて紹介)。

一方、このような薄型のマイクロデバイスは一般の大規模な流れの剥離も制御できるため、鉄道や自動車、さらには流れに晒される 3 次元的一般物体の抵抗低減などにも利用可能である。自動車メーカーなどが当該研究者と共同して試行的な実験を開始したが、基本的な流れ制御の方針自体が不明確なままであり、「翼型」以外への適用は未だ手探りの状況にある。本課題では、プラズマアクチ

ューータと呼ばれるこのマイクロデバイスの地上の輸送機器やその付属物などを対象に幅広い利用分野での産業応用に向けたデバイスの設計指針を得ることを目指す。平成 29 年度は自動車を模擬したモデル周り流れを制御対象とし、後流の干渉など流れ特性を確認、これまでの知見を活かして流れ制御の考え方とマイクロデバイスの設計指針を示すことを目指した。3 次元かつ物体近傍で時間的に変動する流れの現象記述が不可欠であるため、シミュレーションには計算機負荷が非常に高い Large-eddy simulation (LES) 手法の利用が求められる。

2 次元の「翼型」を利用する流体機器は少なくないが、純粋な 3 次元形状からなる流体機器/輸送機器はそれ以上に多い。自動車や高速列車自体だけでなく、ミラー、タイヤ、パンタグラフカバーなどそこに付属するさまざまな突起物だけを取り出しても、その抵抗低減の効果は十分な意義を有する。当該研究対象であるプラズマアクチュエータは既存の物体形状に貼り付けるだけで機能するデバイスであり、効果が確認できれば容易に適用試験の実施が可能となる。本課題の成果により将来このデバイスが多く輸送機器に用いられるようになれば燃費向上による大幅なコスト削減が可能となり、エネルギー消費を抑えるという大きな意味で社会への貢献とすることが出来る。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本課題で実施する 3 次元的な形状周り流れの LES は計算コストが非常に高い。申請者らのグループが開発してきた高解像度の手法によって、計算機要求は一般に普及している 2 次精度の手法に比べて数十分の一に減らすことが可能であるが、それでも JHPCN が提供する規模の計算資源が必要である。また、この高解像度手法はステンシルの拡がりが大きいため既存の手法に比べて分散メモリー

やキャッシュのマネジメントに困難さがある。これまでも戦略プログラムの中で並列性能向上に様々な工夫をしてきたが、今回、京以外の計算機利用にあたってハードウェア・ソフトウェアの双方に知見を持つ計算機側の研究者によるプログラム高速化に関する技術支援が不可欠である。限られた資源を成果に結びつけるには局所メモリーが大きく、使用ノード数を抑えることのできるベクトルマシン利用が望ましいため、東北大学の SX-ACE の利用を希望した。シミュレーションには流体解析ソルバー LANS3D/PD (プラズマモデルを組み込んだ LANS3D) を使用するが、今回の申請において特にコアや ADB の仕組みの有効利用の観点で SX-ACE 特有の更なるチューニングを期待した。実際に拠点の計算機を運営する専門家と議論を行いながらプログラムの高速化が行えるため、HPC 利用側がこの点を「学ぶ」という観点も含め本研究課題の申請が最適と考えている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題のため、該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

平成 29 年度は対象となるモデル形状の選定、計算フレームワークの確立から DBD プラズマアクチュエータを付加したシミュレーションまでを行った。

図 1 に対象とする Ahmed model の概略図を示す。Ahmed model は簡略化した自動車モデルで、過去に多くの実験、シミュレーションが行われている。前方は R をもった鈍頭形状で、後方は自動車のリアガラスを模擬した角柱を切り落としたような形状になっている。図 2 に Ahmed model 周り流れの概略を示す。前方から衝突した流れが逆圧力勾配でわずかに剥離後、乱流遷移し、後方で大きく流れが剥離する。後方の上面からはスパン方向に軸をもつ大規模な渦が、物体側面と上面の角

からは流れ方向に軸をもった大規模な渦が生成される。これらの大規模渦が低圧領域を形成し、本物体流れの空力抵抗を増加させている。本課題ではこれらの大規模渦をプラズマアクチュエータで制御することで空力抵抗低減を目指している。

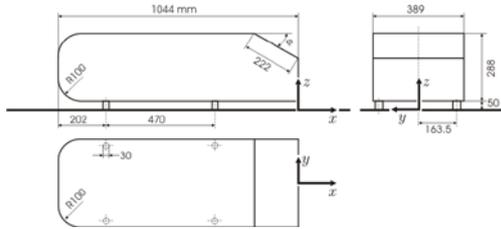


図 1：簡略化自動車モデル (Ahmed model: [4])

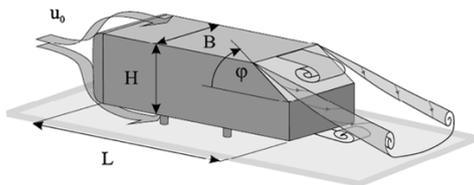


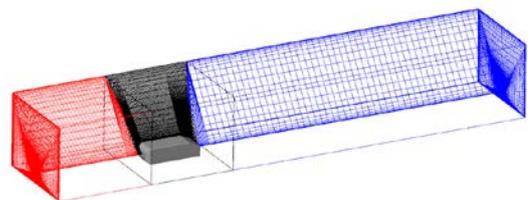
図 2：Ahmed model 周り流れ[5]

平成 29 年度はまず、計算フレームワーク確立のために格子トポロジーの検討を行った。上半期に図 3 に示す 3 つの領域からなる格子 (計算格子 A) とロバストな低解像度スキーム (対流項に MUSCL 法 [6] を用いた SHUS [7], 粘性項に 2 次精度中心差分) を用いた予備計算を実施した。LES を実施するためには高解像度スキームを用いる必要があり、下半期の初期段階においてスキームを変更した計算を実施した。計算格子 A において高解像度スキームを使用した場合、格子の歪みが大きくストレッチ比が急激に変わる箇所では計算が破綻するため、継続した計算を行う事ができなかった。そこで、図 4 に示す 5 つの領域からなる格子 B を新たに作成し、高解像度スキームを用いた計算を実施した。

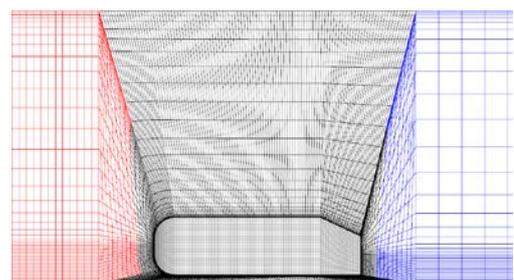
3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として空間差分に高解像度スキーム

である compact 差分法 [8], 時間積分には ADI-SGS [9] を使用し、音速基準の無次元時間刻みを 4×10^{-4} (クーラン数は約 4) とした。また、モデル高さ H 基準のレイノルズ数は参照研究 [10] に合わせ、 $Re_H = 2.0 \times 10^5$ とし、マッハ数は計算効率を考慮し、実際よりも高い 0.2 とした。

図 4 に示すように格子 B はモデル近傍の境界層を解像する格子 (Zone 1: 黒), 上流部 (Zone 2: 青) と下流部 (Zone 3: 赤), 外部領域 (Zone 4: 緑), 床境界領域 (Zone 5: 水色) の計 5 ゾーンからなっている。計算領域は参照実験 [11] の風洞と同等の領域とし、流入領域から総格子点数は約 1150 万点 (表 1) である。格子 B は外部領域とモデル近傍格子を分離したことによって格子の歪みを改善することができ、高解像度スキームを用いても安定して計算することが可能となった。



(a)



(b)

図 3：計算格子 A (5 点毎)

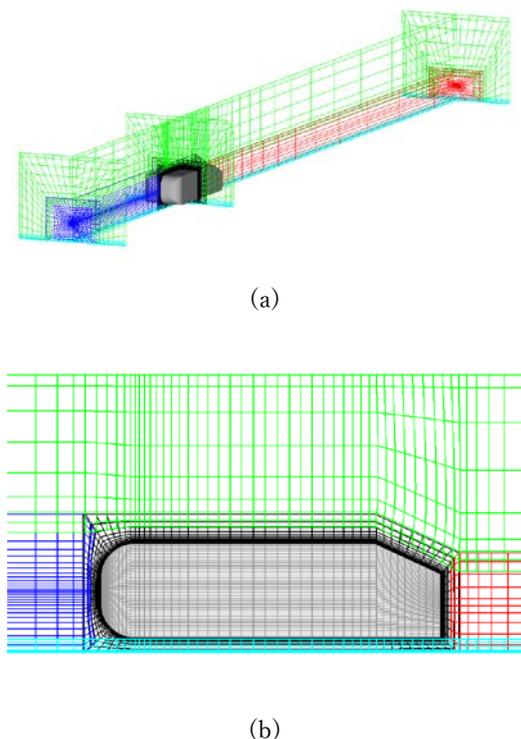


図 4：計算格子 B (5 点毎)

表 1：格子点数

	jmax x kmax x lmax	Number of grid points
Zone 1	301 x 210 x 101	6,384,210
Zone 2	59 x 210 x 70	867,300
Zone 3	109 x 210 x 26	595,140
Zone 4	355 x 147 x 39	2,035,215
Zone 5	355 x 113 x 40	1,604,600
Total	N/A	11,486,465

図 5 に高解像度スキームを用いて得られたシミュレーション結果を示す。速度勾配テンソルの第 2 不変量によって渦構造を可視化し、長手方向速度 u で色付けしている。得られた流れ場は過去の研究 [5] で知られている流れの特徴を示している。モデル前方では、図中左側から流れてきた一様流がモデルに衝突、曲げられることで加速し、逆圧力勾配によって剥離した後に乱流に遷移する。モデル後方では、斜めに切り落とされた部分（スラント部）で流れが一旦剥離し、再付着した後に後縁で大きく剥離する。また、スラント部が始

まる箇所から長手方向に軸をもつ大規模な渦が 2 つ生成されている。これら乱流遷移や流れ方向の大規模な渦は上半期に行った低解像度のシミュレーションでは確認できず、適切な格子解像度と高解像度スキームを用いることではじめて得られたものである。平成 29 年度はこの流れを基準とし、プラズマアクチュエータを用いてスラント部からの剥離流れ制御を試みた。

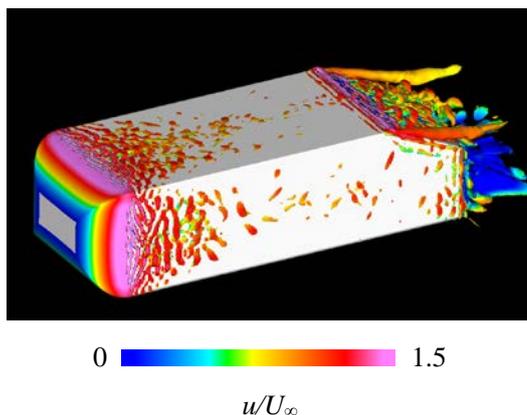


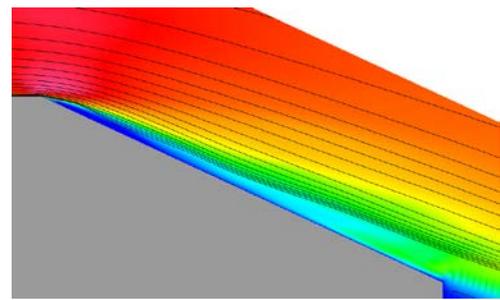
図 5：瞬間流れ場 (DBDPA-OFF)

本研究ではプラズマアクチュエータのモデルとして Suzen らのモデル [12] を使用し、アクチュエータの出力を決めるパラメータ Dc を 0.1 とした。この値はこれまで行ってきた翼流れ制御 [2] において一様流 U_∞ とアクチュエータの誘起流速 u_{BD} の比が $u_{BD}/U_\infty \sim 0.5$ となる現実的な値である。図 6 にプラズマアクチュエータモデルが生成する長手方向体積力分布を示す。今回は手始めにスラント部始点付近からの剥離を制御する事を考え、図 6 に示すようにスラント部始点付近にプラズマアクチュエータを設置した。プラズマアクチュエータの駆動条件として、過去の翼流れ制御 [2] で効果的であったバースト駆動を用いた。バースト駆動は周期的にアクチュエータの on と off を切り替える駆動方法で、一組の on と off を一周期と考え、対応する周波数をバースト周波数と呼ぶ。今回はバースト周波数として一様流と代表長基準の無次

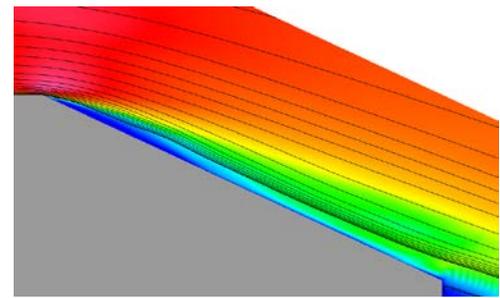
元周波数で 6 を用いた。また, on と off の時間比を表すパラメータであるバースト比 BR を 0.1 とした。

図 6 に制御ありとなしのケースの時間平均流れ場を示す。流線とともに流れ方向速度で色付けしている。制御あり/なしにかかわらず, スラント角部で剥離泡 (青色で示される部分) が見られるが, 剥離制御ありのケース (DBD-ON) では流線がわずかながら物体表面に引きつけられているような流れ場となった。

以上のように平成 29 年度は, DBD プラズマアクチュエータの産業利用拡大を目指し, 自動車モデル流れ制御の高解像度シミュレーション実施のフレームワークを確立した。また, プラズマアクチュエータを用いた剥離制御流れのシミュレーション実施により, 自動車流れに対する同デバイスの利用可能性を示した。



(a) DBDPA-OFF



(b) DBDPA-ON

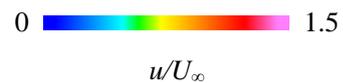
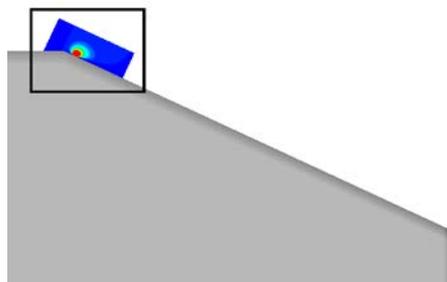
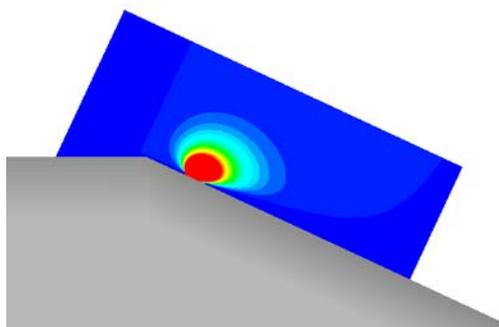


図 6 : 時間平均流れ場 (中央断面)



(a) スラント部



(b) 拡大図

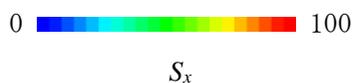


図 6 : DBDPA 体積力分布

参考文献

1. T. C. Corke et al., "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control," Annual Review of Fluid Mechanics., Vol. 42, pp. 505-529, 2010.
2. 藤井孝藏, 浅田健吾, 「DBD プラズマアクチュエータによる剥離制御メカニズムバースト波解析が語るもの」, 『ながれ』, 29, pp259-270, 2010.
3. K. Fujii, "High-performance computing based exploration of flow control with micro devices," Royal Society, Philosophical Transaction A, Vol.372, 20130326, 2014.
4. C. Hinterberger, M. García-Villalba, W. Rodi, Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body. In "Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics / The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains", R. McCallen, F. Browand, J. Ross (Eds.), Springer Verlag, ISBN: 3-540-22088-7, 2004.

5. S. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, "Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake," SAE Technical Paper 840300, 1984.
6. B. van Leer, "Towards the Ultimate Conservation Difference Scheme. IV. A New Approach to Numerical Convection," Journal of Computational Physics, Vol.23(3), 276-299, 1977.
7. E. Shima and T. Jounouchi, "Role of CFD in Aeronautical Engineering (No.14) -AUSM type Upwind Schemes-"
8. S. K. Lele, "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," J. Comput. Phys. 103, 16-42, 1992.
9. S. Obayashi, K. Fujii, and S. Gavalì, "Navier-Stokes simulation of wind-tunnel flow using LU-ADI factorization algorithm," nasa-tm-100042 (NASA, 1988).
10. S. Krajnović, L. Davidson, "Flow Around a Simplified Car, Part 1: Large Eddy Simulation," ASME. J. Fluids Eng., 127(5), 907-918, 2005.
11. H. Lienhart, and S. Becker, "Flow and Turbulent Structure in the Wake of a Simplified Car Model," SAE paper no. 2003-01-0656, 2003.
12. Y. B. Suzen and P. G. Huang, "Simulations of flow separation control using plasma actuator," AIAA-2006-877, 2006.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

平成 29 年度は研究の立ち上げとして、自動車モデル流れの LES を実施する一連のフレームワークを確立した。LES の実施によって乱流遷移や流れ方向に軸をもつ大規模な渦等、制御対象となる自動車モデル流れの特徴的な流れ場を得ることができた。高次精度スキームでの計算実施に時間がかかったために当初予定していたようにプラズマアクチュエータの駆動条件として複数の条件を試した上で効果的な制御手法を提案するまでには至らなかったが、自動車流れにおけるプラズマアクチュエータを用いた剥離制御の

可能性を示すことができた。

今後は実験との定量的比較や格子解像度の影響を検討するとともに、プラズマアクチュエータの設置位置や駆動条件を変更することで、同デバイスのより効果的な利用方法を提案いく。また、平成 29 年度の成果をもとに追加のシミュレーションを行い学会発表や学術論文への投稿を行っていきたいと考えている。

7. 研究成果リスト

- (1) 学術論文
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
- (4) 国内会議発表
- (5) その他（特許、プレス発表、著書等）