

3B01 GLOFデータ同化による簡易自動車模型まわり流れのはく離予測改善

○三坂孝志（産総研），中島卓司（広島大学），清水圭吾，土黒聖斗（マツダ株式会社），
安養寺正之（九州大学），古川慈之（産総研）

GLOF Data Assimilation for Improving Flow Separation Prediction Around Simplified Automobile Model
Takashi Misaka (AIST), Takuji Nakashima (Hiroshima Univ), Keigo Shimizu, Masato Hijikuro (Mazda Motor Corp),
Masayuki Anyoji (Kyushu Univ), Yoshiyuki Furukawa (AIST)

Key Words : Flow Separation, Simplified Automobile Model, GLOF Measurement, Data Assimilation

Abstract

In this study, Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) simulations are performed to predict the flow around a simplified notchback car model using the SST $k-\omega$ turbulence model parameters optimized based on global luminescent oil film (GLOF) measurements. The SST $k-\omega$ turbulence model parameter a_1 , derived from the Bradshaw coefficient, is optimized zonally by an ensemble Kalman filter (EnKF) so that the separation location at the rear part of the car model locally matches the near-wall flow information based on GLOF measurements.

1. はじめに

自動車の空気抵抗低減は、流体現象の複雑な非線形性に関係して依然として困難な課題である。例えば、市販自動車では通常避けられない流れのはく離は空気抵抗と車両の安定性に大きく影響するが[1]、はく離を正確に予測するには風洞試験や大規模な数値流体力学 (CFD) シミュレーションが必要となる。一方、空力最適化など多数回のCFDシミュレーションが必要とされる用途では、依然としてレイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) シミュレーションも利用されており、RANSシミュレーションにおけるはく離予測精度の改善も必要とされている。そのような目的で、計測データに基づくデータ同化により、解析対象に合わせたRANS乱流モデルの最適化が行われてきている[2,3]。

本研究では、蛍光油膜 (Global Luminescent Oil Film, GLOF) 計測データに基づいて最適化されたSST $k-\omega$ 乱流モデルパラメータを用いて、簡略化されたノッチバック車モデル周りの流れを予測するRANSシミュレーションを実施する。特に、MenterのShear Stress Transport (SST) $k-\omega$ 乱流モデル[4]のパラメータ a_1 をアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) で最適化することで、流れのはく離パターンがGLOF計測データと一致するような流れ場の推定を行う。EnKFに基づくGLOF計測データ同化システムは、数値シミュレーションで生成した疑似GLOF計測データによるデータ同化実験 (双子実験) によって検証し、その後、実際のGLOF計測データに適用される。

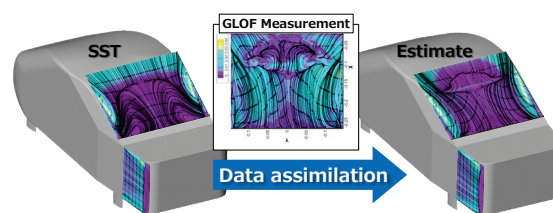


図1 GLOF計測に基づく簡易車体後部のはく離流れ予測の改善

2. 手法

図1に本研究で検討したGLOF計測に基づくパラメータ推定の概要を示す。対象として1/5サイズのノッチバック簡易自動車モデルを考え、リアウィンドウやサイドバックなどモデル後部のはく離流れに着目する。GLOFによる壁面近傍流れ計測を利用してRANSシミュレーションのはく離予測精度を向上させるためには、RANSシミュレーションのはく離挙動を効果的に変化させるRANSモデルのパラメータを特定する必要がある。本研究では、GLOF計測に基づきSST $k-\omega$ 乱流モデルのパラメータ a_1 を最適化することとした。パラメータ a_1 は乱流せん断応力と乱流運動エネルギーの相関に由来し、流れのはく離への影響はKatoらによって調べられている[2]。本研究ではさらにRumseyの修正[5]を組み込むことによって再付着の挙動を修正する。さらに、局所的な流れ構造に基づいて流れのはく離を制御できるようにするため、 a_1 を局所的に定義する。

パラメータ a_1 がモデル後流のはく離位置に十分な

影響を与えることを確認した後、RANSシミュレーションの壁面せん断応力ベクトルの向きがGLOF計測と一致するように a_1 を推定する（壁面せん断応力の大きさは同化しない）。標準的なEnKF[6]をベースとして、推定したい流れ場に適したアンサンブルを生成し、また、少ないアンサンブルメンバー数でも推定が可能となるように局所化を行う。GLOF計測による壁面近傍流れの向きのみの利用であってもCFDシミュレーションとの組み合わせにより不確実なパラメータを推定することができる点は、データ同化におけるモデルベース推定の利点である。

3. 結果

図2(a)および(b)にそれぞれリアウィンドウとサイドバックのGLOF計測結果を示す（計測断面の位置は図1を参照）。矢印付きの限界流線とカラーコンターはそれぞれ壁面せん断応力の向きと大きさを示す。図2(a)から、ループに沿った付着流がリアウィンドウ領域のはじめではなく離し、測定面の中央付近で再付着していることがわかる。この再付着挙動をSST k - ω 乱流モデルで再現するのは困難であった（図1左図を参照）。計測断面の左右両端の大きな壁面せん断応力は、リアウィンドウの側端から発生する渦によるものである。図2(b)のサイドバックに関しても、サイドバックの曲面に沿った流れが途中でなく離している。計測断面上部の大きな壁面せん断応力もトランクデッキからの渦によるものである。

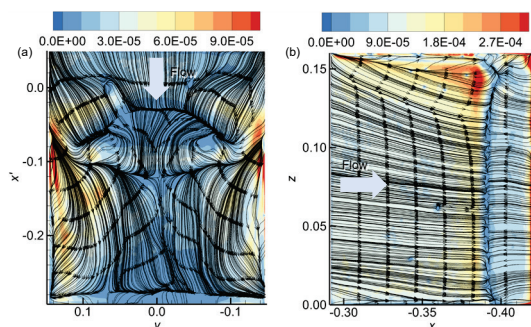


図2 GLOF計測断面における限界流線（実GLOF）

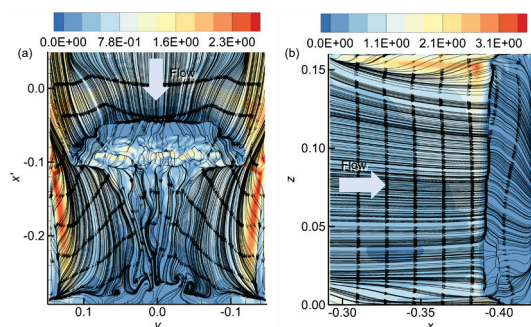


図3 GLOF計測断面における限界流線（CFD）

図3(a)は、図2(a)のGLOF計測データを同化して得られたリアウィンドウの推定流れ場である。アンサンブルメンバー数は10としている。ループ後方のはく離とリアウィンドウ途中の再付着は、GLOF計測に基づいて推定された a_1 を使用することで再現されている。トランクデッキ付近のはく離の大きさは、GLOF計測よりも推定された流れ場の方が大きくなっている。図2(a)との比較から、リアウィンドウ端から発生する渦による壁面せん断応力が、推定結果では下流に向かって長い範囲で現れていることが確認できる。図3(b)に関しても、サイドバックの曲面に沿った流れのはく離が再現できていることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、簡易車体模型まわりのはく離流れ予測を改善するため、はく離位置がGLOF計測と一致するようにSST k - ω 乱流モデルのパラメータ a_1 をEnKFにより最適化した。GLOF計測データの同化によりリアウィンドウにおけるはく離・再付着の予測が改善された。

参考文献

- [1] Nakamura, Y., Nakashima, T., Yan, C., Shimizu, K., Hiraoka, T., Matsuda, H., Kanehira, T., Nouzawa, T., “Identification of Wake Vortices in a Simplified Car Model during Significant Aerodynamic Drag Increase Under Crosswind Conditions,” *Journal of Visualization*, Vol. 25, pp. 983–997, 2022.
- [2] Kato, H., Ishiko, K., Yoshizawa, A., “Optimization of Parameter Values in the Turbulence Model Aided by Data Assimilation,” *AIAA Journal* Vol. 54, No. 5, pp. 1512–1523, 2016.
- [3] Misaka, T., Nakazawa, T., Asaumi, N., Kubo, S., Ideta, T., Obayashi, S., “Bayesian Uncertainty Reduction of Generalised k - ω Turbulence Model for Prediction of Film-Cooling Effectiveness,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 35, pp. 152–166, 2022.
- [4] Menter, F.R., “Two-Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, Vol. 32: pp. 1598–1605, 1994.
- [5] Rumsey, C.L., “Exploring a Method for Improving Turbulent Separated-Flow Predictions with k - ω Models,” NASA/TM–2009–215952, 2009.
- [6] Evensen, G., “The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation,” *Ocean Dynamics*, Vol. 53, pp. 343–367, 2003.