

階層直交格子を用いた自動車の空力 - 運動連成フレームワークの構築

The framework for a coupled mechanical motion and aerodynamics simulation of a road vehicle using hierarchical cartesian grid

○野本 庸太郎, 神大院, 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: yotaro_nomoto@stu.kobe-u.ac.jp
Rahul Bale, R-CCS, 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26, E-mail: rahul.bale@riken.jp
大西 慶治, R-CCS, 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26, E-mail: keiji.onishi@riken.jp
坪倉 誠, 神戸大, R-CCS, 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp
Yotaro NOMOTO, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo
Rahul Bale, R-CCS, 1-1, 7-1-26 Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe-shi, Hyogo
Keiji ONISHI, R-CCS, 7-1-26 Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe-shi, Hyogo
Makoto TSUBOKURA, Kobe University, R-CCS, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

The ground vehicle driving stability often gets disturbed by unsteady aerodynamic forces as a consequence of atmospheric disturbances along with the vehicle motion. In the present work, in-house developed fluid analysis software "CUBE" is employed for a detailed analysis of full-scale road vehicle motion. It builds a framework, for both mechanical motion and aerodynamic simulation, using the hierarchical cartesian grid. This numerical setup can perform a coupled analysis by considering the various aspects like wheel rotation, tire steering angle, suspension mechanism, driver's reaction, etc. Thus, we report a novel coupled numerical approach to perform complicated vehicle simulations to obtain more detailed as well as precise flow field information. The present approach also enables to evaluate the change in aerodynamic forces along with vehicle motion. This numerical strategy is used to simulate the double-lane-change cases in the present work in order to understand the unsteady aerodynamic effects on vehicle stability.

In the present study, we found that aerodynamic effect changes greatly with vehicle motion. As a result, we were able to reproduce on the simulation that there was a difference in driver response.

1. 緒言

走行中の自動車に作用する非定常空気力は、環境性能や操縦安定性などに大きな影響を与えることが知られている。池田^①は自動車のレーンチェンジ運動を対象に空力 - 運動連成解析を行い、非定常空気が操縦安定性に大きな影響を与えていることを示した。また松田^②は空力 - 運動連成解析を行い、非定常空気が乗り心地に対して与える影響について評価した。しかし、これらの研究では、詳細実車形状を利用した流体解析は行われなかった。なぜなら計算格子として、境界適合の非構造格子を利用したためである。境界適合非構造格子では車両運動に合わせた格子変形が必要となる。車両の回転運動や、タイヤ操舵角、ホイールの回転など複数の運動が組み合わさった車両運動を再現した場合、詳細実車形状では格子品質を維持することができず計算を行うことが困難であった。そのため、形状を簡略化した簡易モデルを用いた解析が行われた。

太田^③は商用運動解析ソフトウェア"CarSim"を利用して空力運動連成解析を行った。商用運動解析ソフトウェアは完成車メーカーでの開発に利用されており、サスペンション機構などを考慮した車両運動を高精度に再現することが出来ることが知られている。しかし、商用運動解析ソフトウェアはスーパーコンピュータの OS に用いられる Linux への対応が限定的である。そのため、空力運動連成解析を行うためには「スーパーコンピュータ上での流体解析」と、「Windows ワークステーション上での車両運動解析」を同時に実行し、毎ステップ通信を行う必要がある。この方法では、二台の計算機を常時通信し続けなければならないという計算機運用上の問題や、データ通信によって計算速度が低下するなどの問題を抱えており、2WAY 連成解析のためのハードルが高い。

本研究では、詳細実車形状での運動を伴う流体解析が可能であ

る CUBE^④と Linux に対応したオープンソースの車両運動解析ソフトウェア Project Chrono^⑤を利用することで、これらの課題を解決し、実車詳細形状でも解析が可能な、自動車の空力-運動連成フレームワークの構築を行い、非定常空気が車両運動やドライバーの反応に与える影響を評価した。

2. 解析手法

2.1 フレームワーク概要

本研究で構築したフレームワークは、流体解析ソフトウェア (CUBE) 内部に車両運動解析ソフトウェア (Chrono) を実装することで、同一計算機上で車両空力解析と車両運動解析を連成させる。空気を考慮して運動応答を確認する手法には 1WAY (一方向解析) と 2WAY (双方向解析) に分けられる。Fig.1 に 1WAY 解析の流れを示す。1WAY 解析とは、事前に車両運動解析を行い車両姿勢変化の時系列データを取得し、そのデータをもとに、車両姿勢を変化させながら流体解析を行う手法である。Fig.2 に 2WAY 解析の流れを示す。2WAY 解析とは、毎ステップごとに CFD を用いて求めた空気を外力として挿入した車両運動解析を行い、次ステップ車両の姿勢を計算する。求めた姿勢を空力解析に送り、次ステップの空力解析を行う方法である。本研究では、2WAY 解析を行うことの可能なフレームワークを CUBE と Chrono を利用して構築した。

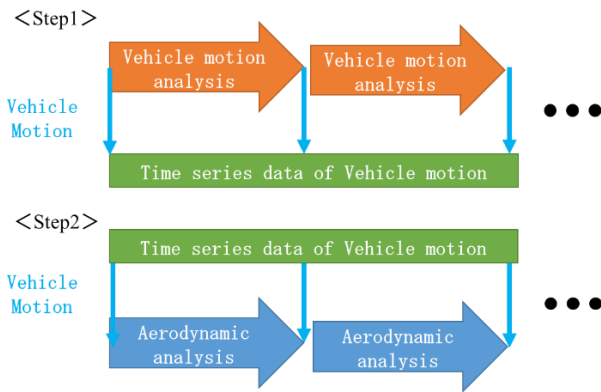


Fig. 1 1WAY coupling

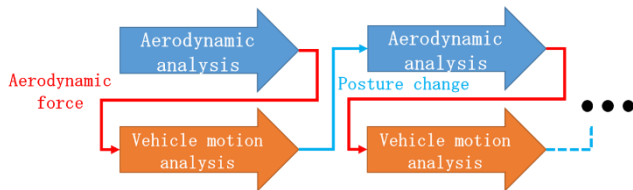


Fig. 2 2WAY coupling

2.2 空力解析

本研究で行う空力解析には、理化学研究所と神戸大学で共同開発を行っている CUBE を用いた。CUBE は境界非適合型の階層直交格子と埋め込み境界法(Immersed Boundary Method : IBM)が用いられている。階層直交格子は境界適合格子ではないため、非構造格子が必要となる車両の運動に伴う格子変形を行う必要がない。そのためエンジンルーム内や床下形状などが再現された複雑な実車形状モデルを用いて、ホイール回転やタイヤ操舵角なども再現した車両運動を再現して流体解析を行っても、格子の変形を行わないため、計算を行うことが可能である。なお CUBE を用いた流体解析による精度検証が N.Jansson ら⁽⁴⁾によって行われており、適切な最小セルサイズや時間刻みを用いた場合、実験値と比較しても精度よく解析を行うことができることが報告されている。

本研究では乗用自動車の運動を対象とするため、想定される最大主流流速は 55 m/s(=200 km/h)程度である。したがって大気を非圧縮性流体と仮定し、基礎方程式として、連続の式(1)と、IBM による外力項を付加した Navier-Stokes 方程式(2)を用いた。

計算コストなどの面から、車両が走行する全領域に対して計算格子を生成(Fig. 3)することは非現実的である。そこで車両運動を「前後左右の並進運動」と「上下並進運動と回転運動」に分けた。前者は非慣性座標系に基づく手法を適用した。後者に関しては、IBM を用いた移動境界手法を適用した。これにより、車両近傍のみに格子を生成(Fig. 4)し、車両の並進運動に合わせて計算格子を並進移動(Fig. 5)させることで、空力解析を実施した。なお、空間離散化には有限体積法を、対流項離散化には QUICK スキームを、粘性項の離散化には二次精度中心差分を用いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{IB} \quad (2)$$

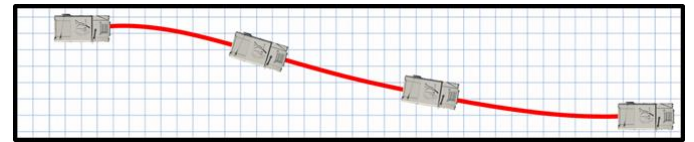


Fig. 3 Mesh generation for all traveling areas

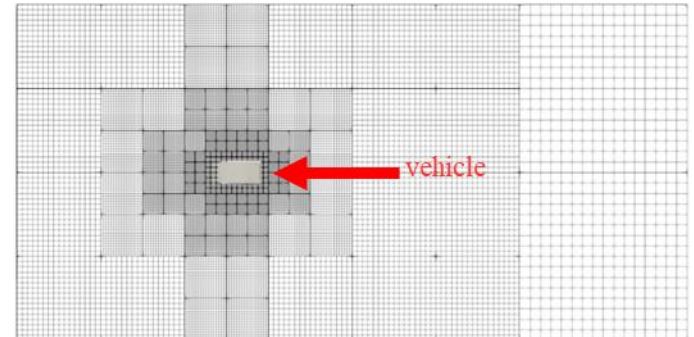


Fig. 4 Mesh generation only near the vehicle

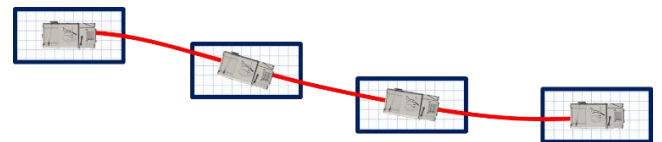


Fig. 5 Mesh moving according to the translational movement of the vehicle

2.3 運動解析

本研究では、University of Wisconsin-Madison と University of Parma-Italy を中心に開発が進められているオープンソースソフトウェアである Project Chrono(Chrono)⁽⁵⁾を用いて運動解析を行った。Chrono は C++ で記述されたオープンソースソフトウェアであるため、Linux 上での動作が可能である。また商用運動解析ソフトウェアとは異なり、ソースコードを修正することが可能であるため、CUBE との連成解析用に最適化させることも容易である。本フレームワークでは Chrono を CUBE 内部に実装することで、同一スーパーコンピュータ内で連成解析を完結させた。

Chrono は車両の姿勢変化に影響を与えるサスペンション機構や、エンジンやトランスミッションを模擬したパワートレインモデル、タイヤモデル、ドライバーの操作反応を再現するドライバーモデルなどが実装されている。M.Taylor ら⁽⁶⁾による検証では、他の商用運動解析ソフトウェアと比較して、同等な精度で車両運動解析結果が得られている。

3. 解析条件

3.1 解析対象車両

本研究では解析対象として HMMWV(High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle=高機動多用途装輪車両)を用いた(Fig. 6)。車両寸法は全長 L=4.73 m, 全幅 W=2.56 m, 全高=2.16 m 前面投影面積 S=3.73 m², ホイールベースは l=3.38 m である。

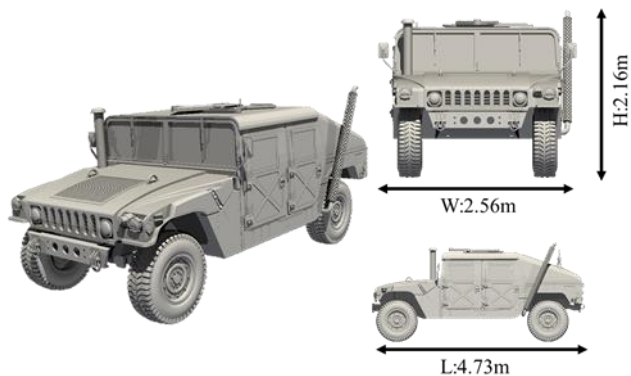


Fig. 6 Model of HMMWV

3.2 流体解析領域・計算格子・解析条件

本研究で用いた計算格子を Fig. 7 に示す。解析領域は Building Cube Method(BCM)⁷⁾に基づき、cube と呼ばれる部分領域に分割される。cube 内部はさらに各軸方向 16 等分の cell に分割される(Fig. 8)。今回の解析における最小の cell サイズは 3cm である。

格子形状は物体形状や変形に依存しないため、車両運動で車両が移動する可能性のある領域すべてに対して、最小サイズの cell を配置して解析を行った。ヨー運動によって車両が回転移動する可能性があるため、追加で最小サイズのセルを配置した領域を Fig. 9 の赤領域で示す。

境界条件としては、流入境界には、シャシーの X,Y 方向並進運動に対応する流速を流入させた。床面と上面には滑りなし境界を、その他の境界に対しては速度のノイマン境界を用いた。解析条件を Tab. 1 に示す。

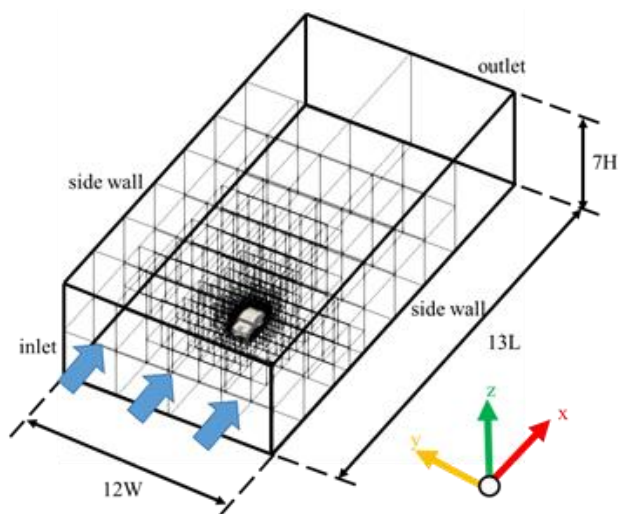


Fig. 7 Computational domain and cubes

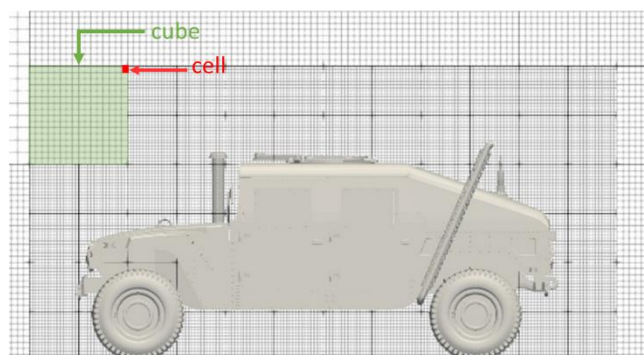


Fig. 8 cube and cell near the vehicle

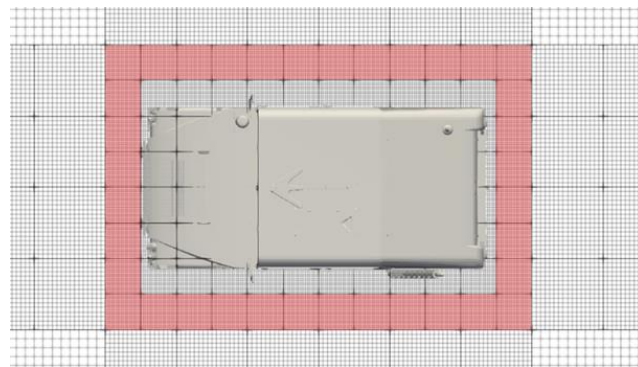


Fig. 9 Cell subdivision for moving geometry

Tab. 1 Physical conditions

Time step	5.0×10^{-4}
Reynolds number	3.73×10^6
Inlet(U_0)	12.0m/s
Density	1.20kg/m^3
Viscosity	$1.92 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$

3.3 車両運動解析

本研究では、12m/s で走行する車両を対象として解析を行った。走行経路は ISO Double lane change(ISO-DLC)を対象とした。ISO-DLC の経路を Fig. 10 に示す。なお走行経路は 3 次ベジエ曲線を用いて数学的に与えた。また、車両の各コンポーネントのモデルを Tab. 2 に、ステアリングとサスペンションのモデルを可視化したものを Fig. 11 に示す。

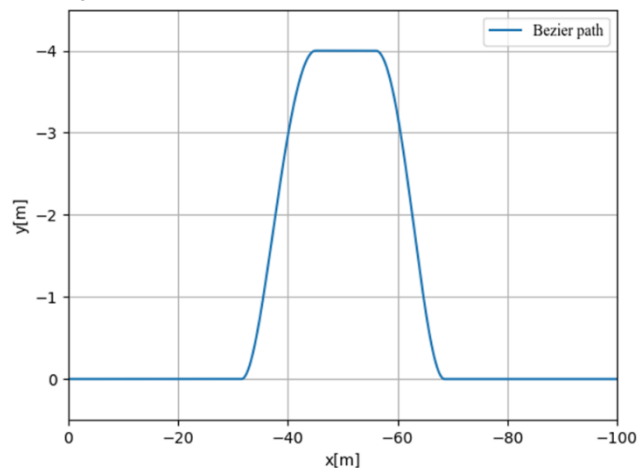


Fig. 10 ISO-DLC path represented by Bezier curve

Tab. 2 Components of the vehicle

Component	Model format
Driveline	Rear Wheel Drive
Powertrain	CVT (6.2L V8 Diesel)
Steering	Pitman Arm
Suspension(front)	Double Wishbone
Suspension(rear)	Double Wishbone
Tire	Magic Formula ⁽⁸⁾

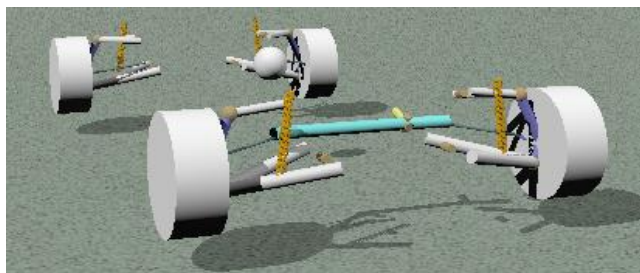


Fig. 11 Visualization of vehicle mechanism

4. 空力-運動連成解析結果

4.1 空力シミュレーションの結果

空力-運動連成解析によって得られた空気抵抗係数に対して 0.05 s ごとの時間平均処理を施したものを Fig. 12 に示す。スリップ角は車両の実際の進行方向と車両の中心軸が成す角のことである (Fig. 13)。スリップ角が生じない場合、主流は車両の側面に直接衝突しないため、大きな横力は発生しない。スリップ角が生じた場合、車両側面部に対して主流が直接衝突することにより、大きな横力を生じさせる (Fig. 14)。直進走行中の ~2.5 s と 7.0 s 頃では、スリップ角がほとんど生じていないため、横力はほとんど発生していない。しかし、車両運動に伴い、スリップ角が、正負に生じると、横力もスリップ角に合わせて正負に変動した。これは車両運動によって変化するスリップ角と、生じる横力の関係性の傾向をとらえることが出来ていることにより生じた変動であるといえる。

$z=0.6$ m の断面で流れ場の可視化結果を Fig. 15 に示す。各時刻における可視化結果の左上には、その時刻における車両姿勢の可視化結果を併記した。車両のヨー運動やタイヤ操舵角などを再現しながらも、計算格子を変形させていないため、解析の間において格子品質を低下させることなく計算が実行できることが示されている。

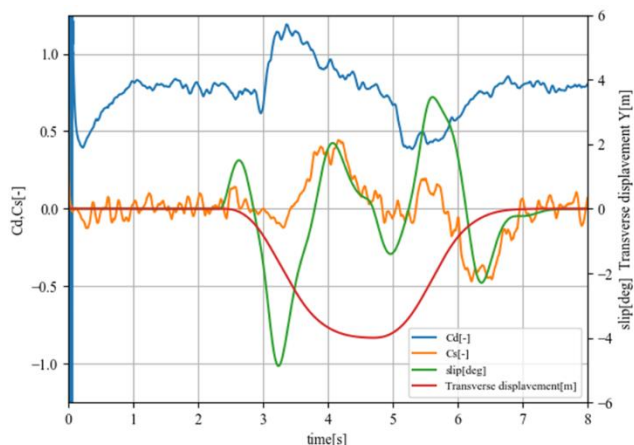


Fig. 12 Aerodynamic coefficient and vehicle attitude

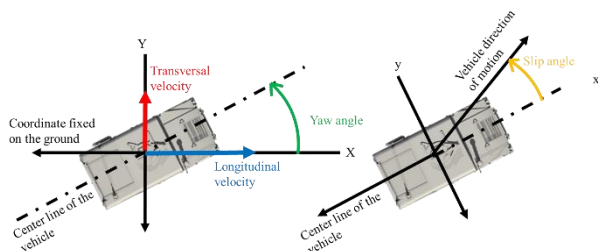


Fig. 13 Definition of slip angle

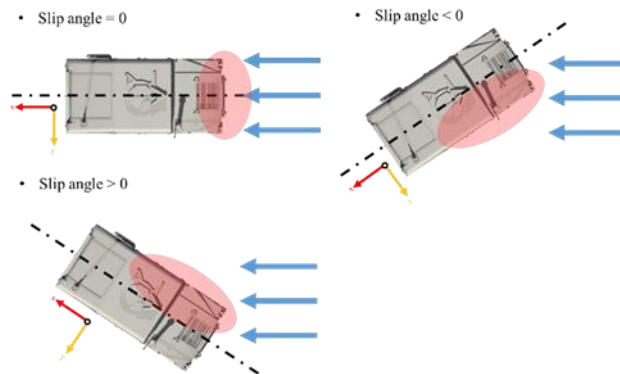


Fig. 14 Lateral force generated by slip angle

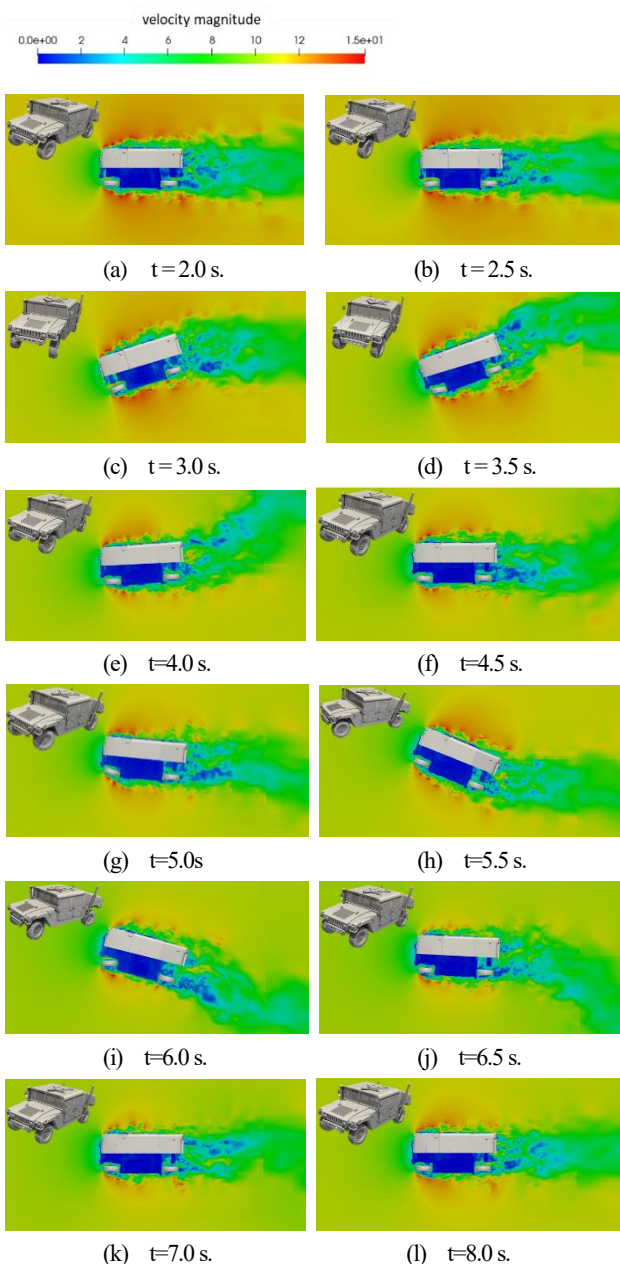


Fig. 15 Flow field visualization ($z=0.6$)

4.2 ドライバーの操作反応に対する比較

空力-運動連成解析を行った場合と、運動解析のみを行った場合でのドライバーの操作反応を Fig. 16 に示す。破線は空力-運動連成解析を行った場合の結果を、実線は運動解析のみを行った場合の結果を表している。本解析では、走行速度が 12 m/s と比較的低速であったため、走行軌跡に大きな変化は見られなかった。しかし、空気抵抗の影響により、アクセルとステアリングの操作量には差異が生じていた。つまりドライバーの操舵反応に対しても非定常空気が影響を与えていることが分かる。この影響は 1WAY 連成解析では影響を考慮できないため、2WAY 連成解析で初めてドライバーの反応に対しても評価が可能になったといえる。

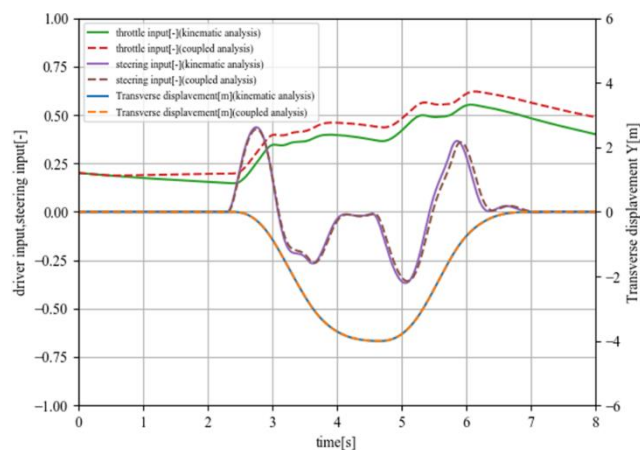


Fig. 16 Difference in driver's response due to aerodynamic force

5. まとめ

本研究では同一計算機上での実車詳細形状が利用可能な自動車の空力-運動連成解析を 2WAY で行うことのできるフレームワークの構築を行った。このフレームワークを用いて実際にダブルレーンチェンジ解析を行い、空気力によってドライバー反応が変化することを再現することができた。つまり、このフレームワークを用いることで、実車詳細形状モデルを用いて、非定常空気が車両運動やドライバーの操作反応に与える影響を評価することが可能になった。今後は本フレームワークを拡張し、横風時のドライバーの反応を考慮した操縦安定性評価や、乗り心地の評価など、従来の手法では不可能であった評価を行い、自動車開発に貢献することを目指す。

参考文献

- (1) 池田, 坪倉, 中江, 中島, 山村, 田中, 安木 “自動車レーンチェンジ運動中の空力安定性に関する LES 解析”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演論文集(2013), A09-1
- (2) 松田, “乗り心地評価に向けて非定常空気を考慮した 6 自由度車両運動シミュレータの開発”, 修士論文(2016), 広島大学
- (3) 太田, “車両運動連成解析による自動車すれ違い・追い越され時の非定常空力シミュレーション”, 修士論文(2015), 北海道大学
- (4) Jansson, N., Bale, R., Onishi, K., and Tsubokura, M., “CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations.” The International Journal of High Performance Computing Applications, 33,no.4(2019),p678-698.
- (5) Tasora,A, Serban,R, Mazhar,H, Pazouki,A, Melanz,D, Fleischmann,J, Taylor,M, Sugiyama,H, and Negrut,D, “Chrono: An open source multi-physics dynamics engine” High Performance

- Computing in Science and Engineering – Lecture Notes in Computer Science(2016), pages 19–49. Springer
- (6) Taylor,M, Serban,R and Negrut,D, “Basic Comparison of Chrono::Vehicle and ADAMS/Car”, Simulation-Based Engineering Lab University of Wisconsin-Madison, Technical Report TR-2016-15(2016)
 - (7) Nakahashi,K, Kim,L.S., “Building-Cube Method for Large-Scale, High Resolution Flow Computations,” AIAA Paper(2004) 2004-0423, (2004)
 - (8) Bakker, E., Pacejka, H., and Lidner, L., "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Technical Paper 890087, 1989