

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560179

研究課題名(和文) 実用ブラフボディの戦略的空力抵抗低減制御に向けた検証研究

研究課題名(英文) Verification Study toward the Strategic Drag Reduction Control of Practical Bluff Bodies

研究代表者

坪倉 誠 (Tsubokura, Makoto)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40313366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：以下の6つの研究課題に取り組んだ。(1)簡易形状車体モデルを対象とした空力抵抗発生メカニズムの解明(2)吹き出し&吸い込み等の要素制御技術の数値モデル化(3)後ひき渦対の不安定性成長(4)簡易形状車体モデルを対象とした空力抵抗低減制御技術の提案(5)実走行状態における制御技術の効果検討(6)実車両形状モデルを対象とした戦略的空力抵抗低減制御技術の提案。簡易形状車体に対して、車両姿勢の動的変化を与えて、その空力応答特性を渦構造の非定常変化から明らかにした。この知見を実車セダン形状車体に適用し、抵抗や揚力の非定常変動と車両側面境界層や車体周りの渦構造を明らかにし、その抵抗抑制効果について考察した。

研究成果の概要(英文)：The six research topics we have involved in this project are as follows: (1)Vortex structures and the mechanisms of the aerodynamic drag acting on simplified vehicle models, (2) Mathematical models for the dynamic flow control, (3) Instability of trailing edge vortices, (4) Proposal of the drag reduction control, (5) Effect of the drag reduction control on the on-road conditions, (6) Strategic technology for the drag reduction of real vehicles. First, by imposing dynamic pitching, yawing and lane-change motions on simplified vehicle models, we have revealed how these transient aerodynamic forces are caused by unsteady flow structures around the vehicle models. Applying this knowledge acquired by the simplified models to real sedan-type vehicle shapes, we have clarified the mechanisms of how drag and lift forces change through the boundary layer and vortex structures on and around the vehicles, then examined possibility of reducing the drag by controlling eddy structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流 空力 抵抗低減 ラージエディシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

12億トンにのぼる我が国の二酸化炭素総排出量は、その約20%が運輸部門からであり(国交省2008年)ほとんどは自動車の排ガスに由来する。従って自動車産業では燃費向上が火急の課題であり、様々な試みがなされている。車両空力抵抗低減は、動力システムや車種に関わらず、かつ大規模な技術投資をすることなく燃費向上が見込める為、燃費低減の技術基盤の一つとなっている。実際、申請者の算出では、20km/L程度の低燃費車であっても、空力抵抗を2割削減することができれば、1kmの走行で5g程度のCO₂削減が可能であり、日本全体では莫大な効果が期待できる。しかし一方で、風洞実験を主体とした形状最適化による抵抗低減は、ポルテックスジェネレータ等の受動的抵抗低減技術を用いても、CD値で0.2程度で頭打ち状況を迎えつつあり、これ以上の大幅低減には新たな流体制御技術の導入が不可欠である。乱流制御に基づく能動的流体抵抗低減技術は、古典的な吹き出しや吸い込みによるせん断層制御に加えて、近年ではマイクロアクチュエータによる乱流境界層摩擦低減や、プラズマアクチュエータ・シンセティックジェットによる翼・円柱の剥離制御等、国内外で数多くの研究がなされており、要素技術としての実用化も進んでいる。自動車産業でもこれらの技術を導入する試みが数多くなされてきているが、実用化に結び付く劇的な効果は得られていないのが現状である。この原因として、流線型の航空機と異なり、自動車周り流れの複雑さが挙げられる。申請者は、非構造格子系によるLES解析の高精度化と実用化に着手し、自動車に特化した次世代非定常空力シミュレータの開発を進めてきた。風洞での実験結果と比較した結果、特に大規模渦の再現性に対してLESの有用性を実証した。そしてこの過程から、自動車周りの流れは、各部位から発生した大小様々な後引き渦が、それぞれ逆方向に回転しながら相互作用を及ぼし合う複合的な流れ構造となっていることを明らかにした。これらの結果より、要素制御技術を場当たりに導入し、局所的な境界層剥離の制御や特定の渦の抑制を行っても、全体としての抵抗発生メカニズムを理解しない限りはその効果は限定的であり、必ずしも全体としての抵抗低減に結び付かないという着想に至った。即ち、効果的な抵抗低減を実現するためには、車体全体の様々な渦の相互作用とそれによって誘起される境界層剥離メカニズムを統合的に理解した上で、より流れ制御に適した構造になるよう車体全体の流れを誘導し、その上で各渦や剥離の起点に戦略的に要素制御技術を適用する必要がある。

2. 研究の目的

自動車を想定したブラフボディを対象として、実用条件下で空力抵抗低減制御を実現す

るための物理的知見を得ることを目的とする。実用ブラフボディでは様々なスケールの後引き渦や剥離渦が相互に影響を及ぼし合っていることから、翼や円柱といった単純形状に対する既存の剥離制御技術をそのまま適用しても、その効果は望めない。本研究では、大規模LESを用いて実用ブラフボディ周りの主要渦構造を実用レイノルズ数条件で再現した上で、抵抗に寄与する各渦と境界層剥離の相互作用メカニズムを解明することで、戦略的な空力抵抗低減制御の実用化へ向けたノウハウ構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、以下の5つの研究課題を段階的に進める。

- (1) 簡易形状車体モデルを対象とした空力抵抗発生メカニズムの解明
- (2) 吹き出し&吸い込み等の要素制御技術の数値モデル化
- (3) 後引き渦対の不安定性成長
- (4) 簡易形状車体モデルを対象とした空力抵抗低減制御技術の提案
- (5) 実走行状態における制御技術の効果検討
- (6) 実車両形状モデルを対象とした戦略的空力抵抗低減制御技術の提案

4. 研究成果

2011年度は、研究計画(1)~(3)に重点的に取り組んだ。

(1)として、マツダ(株)と共同して開発した、市販セダン車の車体上部の特徴的な渦構造を再現した2種類の簡易形状車体モデルを対象に、ラージエディシミュレーション(LES)解析を実施した。まず適用したシミュレーション手法により車体周り渦構造が再現できているかを検証するために、マツダ(株)で実施された風洞実験による車体周り総圧分布の可視化結果と詳細な比較を行い、その妥当性を確認した。次に抵抗低減の発生メカニズムを解明するために、これら渦構造の相互作用について調査を行った。この結果、フロントピラーから発生する渦を強めることでリアウィンド近傍でフロントとリアピラーの渦間で強い相互作用が起こり、リアウィンド上での剥離が促進され、抵抗が増加することがわかった。次に(3)と(5)として車体をピッチおよびヨー方向に強制的に振動させることで、これら車体周り渦を励起し、その車体抵抗に与える影響を調べた。これらの結果より、車体のフロントおよびリアピラーの渦構造を変化させることで、抵抗低減制御が可能であることを確認した。

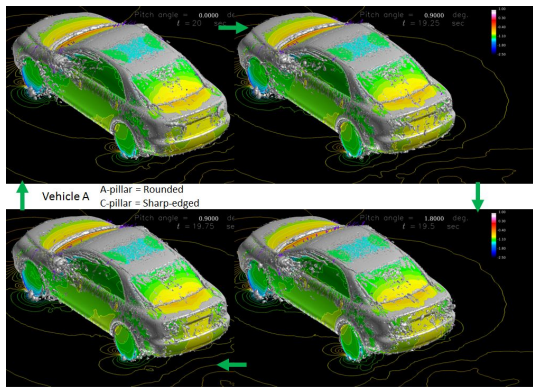


図 1 ピッチ強制加振時の車体周り渦の変化 (ピラー周りの後引き渦の相互作用)

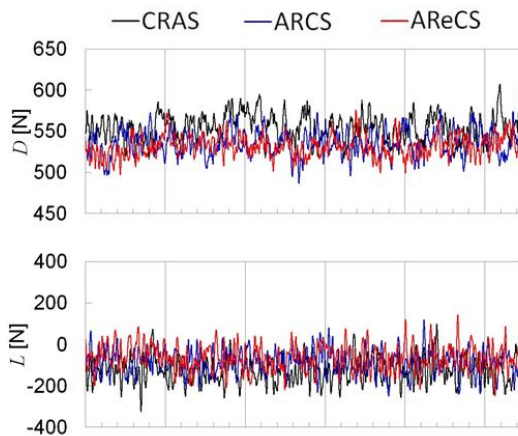


図 2 ピッチ加振時の車両に作用する抵抗と揚力の変化 (三つの異なる車種形状で比較)

2012 年度は、前年度実施した (1) ~ (3) に引き続き、(4) ~ (6) に取り組んだ。ここでは最終的な目標である戦略的空気抵抗低減

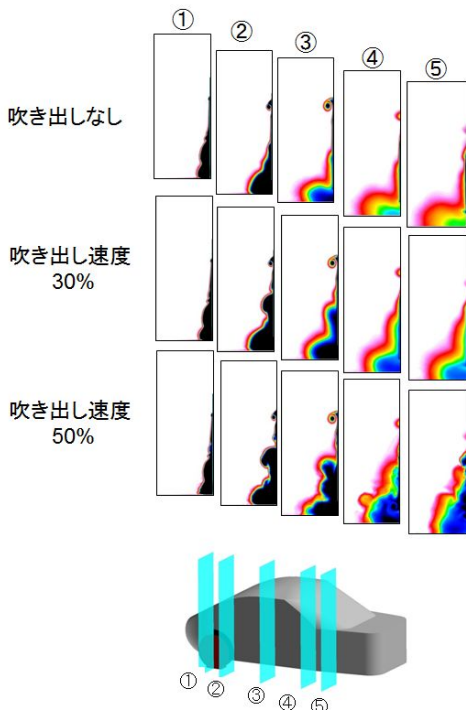


図 3 車体側面での流れの吹き出しによる側面境界層厚さの制御 (側面総圧分布) (空気抵抗とヨー運動安定性の関係)

制御技術の提案に向けて、セダン型車体周りに発生するさまざまな後引き渦構造の力学的相互作用と、これらの渦構造により引き起こされる空気抵抗と高速安定性への影響について検討を行った。まず (5) の実走行状態の模擬として、実測から得られている実車高速走行時の車体に作用する変動風周波数に対して、相当する車体ヨー角変動を周期的に与え、その空力応答特性を (4) の簡易形状車体に対して行った。ここでは特に、車体両側に発生する境界層厚さの差異が、空気抵抗とヨー運動安定性を与える影響に着目して解析を行った。車体側面の境界層厚さは特にフロントホイールハウスからの流れの吹き出しの差異に強く依存することから、この部分に対して強制的な吹き出しを与えて厚さをコントロールした。これらの結果から、側面境界層厚さをコントロールすることで、車体抵抗低減と高速安定性を両立できる可能性があることがわかった。また (6) として実車体形状に近い DrivAer モデルを用いた強制ヨー振動解析を実施した。その後、(4) の知見が (6) の実車体形状でも適用可能であるか、検討を行った。

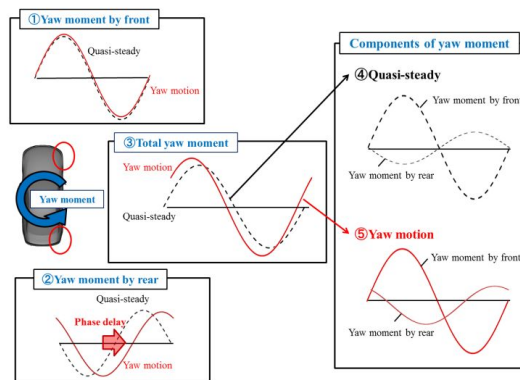


図 4 ヨー加振時の DrivAer モデルの空力応答とヨーモーメント位相ずれのメカニズム

2013 年度は、特に課題 (4) から、前年度は車体側面の境界層をコントロールすることで、車体抵抗低減と高速安定性を両立できる可能性があることがわかった。この知見を発展させ、前年に引き続き (4) ~ (6) に取り組んだ。セダン型車両を対象として、まずは比較的簡易な形状に対して LES 解析を実施し、抵抗と共に走行安定性に影響を与える揚力に着目し、両者の非定常特性と車体周りの渦構造との関係を調べた。定常流条件に加えて、実走行状態を想定した (課題 (5)) 車体ヨー角変動やピッチ角変動、さらにはレーンチェンジ動作を与え、その非定常空力応答特性を流れ場の渦構造の変化に着目して調べた。これらの結果から時間変動する抵抗値に対し

て、低抵抗と高抵抗となる場合の渦構造の差異に着目し、低抵抗状態を実現するために実現すべき渦構造の検討を行った。得られた知見を課題(6)の実車形状に適用し、実車に

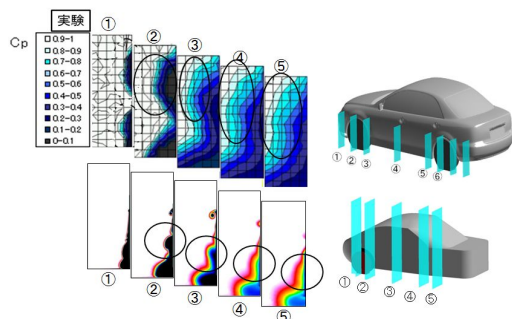


図5 解析で使用した実車形状(上)と簡易モデル(下)の側面境界層流れの再現性の比較

対する抵抗低減戦略の提案を試みた。対象は詳細に形状再現したセダン形状車体とし、直進走行時に加えて操舵運動時(課題(5))の走行状態をシミュレーションで再現し、車体に作用する抵抗や揚力の非定常変動と、側面境界層や車体周りの渦構造の変化に基づく発生メカニズムとその抵抗抑制効果について考察した。

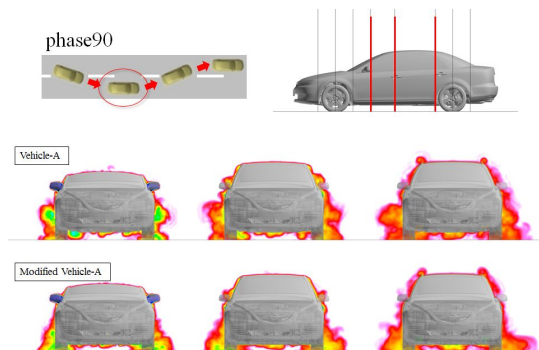


図6 実走行状態時のセダン型車両の周りの流れ構造の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. Makoto Tsubokura, Andrew Hamilton Kerr, Keiji Onishi, Yoshimitsu Hashizume: Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K-computer: Part 1 Development of the framework for fully unstructured grids up to 10 billion numerical elements, SAE International Journal of Passenger

Cars - Mechanical Systems, 査読有,7(2): 2014-01-0621(2014)

2. 岡田義浩, 農沢隆秀, 坪倉誠, 中島卓司: 自動車の高速操舵走行時の安定性に寄与する車体周りの非定常流れ特性, 日本機械学会論文集, 査読有, 第80巻, 809号, transjsme.2014fe0009, pp.1-17(2014)
3. Takuji Nakashima, Makoto Tsubokura, Mariano Vázquez, Herbert Owen, Yasuaki Doi: Coupled analysis of unsteady aerodynamics and vehicle motion of a road vehicle in windy conditions, Journal of Computers & Fluids, 査読有, vol.80(10), pp.1-9 (2013)
4. Seeyuan Cheng, Makoto Tsubokura, Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, Takuji Nakashima, and Deog Hee Doh: Aerodynamic Stability of Road Vehicles in Dynamic Pitching Motion, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 査読有, vol.122, pp.146-156(2013)
5. 池田隼, 坪倉誠, 長谷川巧, 小森谷徹, 中島卓司: 自動車横風突風遭遇時の非定常空力応答と車体形状の影響について, 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 第79巻, 806号, pp.2077-2092(2013)
6. 中江雄亮, 池田準, 安木剛, 田中博, 山下太郎, 坪倉誠, 中島卓司: 車両運動時に発生する非定常空気力と流れ場に関する研究, 自動車技術会論文集, 査読有, vol.44, No.6, pp.1471-1476 (2013) (2013年春季大会で講演)
7. 池田隼, 坪倉誠, 小林竜也, 長谷川巧, 小森谷徹: 自動車のホイール回転が車両空力に及ぼす影響に関するLES解析, ながれ(日本流体力学会誌), 査読有, vol.32, No.2, pp.107-111 (2013)
8. Seeyuan Cheng, Makoto Tsubokura, Takuji Nakashima, Takahide Nouzawa, Yoshihiro Okada: Numerical Quantification of Aerodynamic Damping on Pitching of Vehicle-Inspired Bluff Body, Journal of Fluids and Structures, 査読有, vol.30, pp.188-204 (2012)
9. Tsubokura, M., Ikawa, Y., Okada, Y., Nakashima, T., Nouzawa, T.: Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 2nd report, Numerical analysis, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 査読有, 5(1), pp.395-411(2012)

[学会発表](計27件)

1. 池田隼, 坪倉誠, 中江雄亮, 中島卓司, 山中淳, 田中博, 安木剛: 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, (2013年12月17~19日, 名古屋大学東山キャンパス(名古屋市))

2. 奈良康平, 坪倉誠, 池田隼, 竹本豊和, 大西慶治, 中島卓司, 佐々木良浩: サークット走行を模擬したフォーミュラカーの空力シミュレーション, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, (2013 年 12 月 17 ~ 19 日, 名古屋大学東山キャンパス (名古屋市))
3. Cheng See Yuan, Makoto Tsubokura, Takuji Nakashima, Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa: Transient Aerodynamics of Road Vehicles during Pitching Oscillation, 2nd International Conference on Recent Advances in Automotive Engineering & Mobility Research (ReCAR 2013) (16-18, December, 2013, hotel Furama, Kala Lumpur, Malaysia)
4. 中島卓司, 岡田義浩, 坪倉誠, 農沢隆秀, 土井康明: 自動車の旋回および滑り運動により生じる空気力について, 自動車技術会 2013 年秋季大会, 46-20135844 (2013 年 10 月 23 日 ~ 25 日, 名古屋国際会議場 (名古屋市))
5. Daiki Matsumoto, Makoto Tsubokura, Keiji Onishi, Takuji Nakashima, Thomas Indinger, Johannes Wojciak: Unsteady aerodynamics of a road vehicle with transient yaw angle change, 自動車技術会 2013 年秋季大会 (2013 年 10 月 23 日 ~ 25 日, 名古屋国際会議場 (名古屋市))
6. 藤原創太, 中島卓司, 土井康明, 岡田義浩, 農沢隆秀, 坪倉誠: 自動車が旋回および滑り運動時に生じる流体力の曳航水槽模型実験, 日本流体力学会年会 2013 (2013 年 9 月 12 日 ~ 14 日, 東京農工大学小金井キャンパス (小金井市))
7. 坪倉誠: 実車数値風洞の開発, 日本機械学会第 91 期流体力学部門講演会フォーラム「京を利用した先端的産業応用事例とスパコンによる流体力学研究の新たな展開」(2013 年 11 月 9 日 ~ 10 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡市))
8. 坪倉誠: 大規模計算の産業応用, 日本機械学会 2013 年度年次大会ワークショップ「CFD の産業活用における方向性」W011001 (2013 年度 9 月 9 日 ~ 11 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山市))
9. 坪倉誠, 大西慶治, 中島卓司: HPC-LES による自動車の次世代非定常空力解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会 J011013 (2013 年 9 月 8 日 ~ 11 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山市))
10. Jun Iketa, Makoto Tsubokura, Yusuke Nakae, Takuji Nakashima, Jun Yamamura, Hiroshi Tanaka, Tsuyoshi Yasuki: A Numerical Analysis of Unsteady Aerodynamics of Road Vehicle during Lane-Change Maneuvering, Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting, FEDSM2013-16447 (7-11 July, 2013, Hyatt Regency Lake Tahoe Resort, Spa & Casino, Incline Village, Nevada, USA)
11. Takuji Nakashima, Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, Makoto Tsubokura, Unsteady Aerodynamics Simulation of a Road Vehicle Running with Cyclic Yaw and Side-Slip Motions, 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA-2013-3041 (24-27 June 2013, Sheraton San Diego, San Diego, CA)
12. Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Okada, Y., Nakashima, T., Nouzawa, T.: Aerodynamic Pitching Stability of Sedan-Type Vehicles Influenced by Pillar-Shape Configurations, 2013-01-1258, pp.203-212, 2013 SAE World Congress, (16-18 April, 2013, Cobo Center, Detroit, Michigan, USA)
13. 池田隼, 坪倉誠, 小林竜也, 長谷川巧, 小森谷徹: 自動車のホイール回転が車両空力に及ぼす影響に関する LES 解析, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, D06-2(2012 年 12 月 19 日国立オリンピック記念青少年総合センター (渋谷区))
14. チェンシユアン, 坪倉誠, 中島卓司, 岡田義浩, 農沢隆秀: 自動車実走行時に作用する空力減衰効果とその発生メカニズム, 日本流体力学会年会 2012 (2012 年 9 月 16 日高知大学)
15. Makoto Tsubokura: High-Performance Computing Large-Eddy Simulation for Next-Generation Vehicle Aerodynamics, Korea-Japan CFD Workshop 2012 (Nov. 23rd, 2012, Busan National Univ., Korea)
16. Tsubokura, M., Kobayashi, R., Ikawa, Y., Nakashima, T., Okada, Y., Kamioka, T., Nouzawa, T.: Unsteady Aerodynamics of Road Vehicle in Dynamic Maneuvering, 30th Applied Aerodynamics Conference, AIAA2012-3128(25-28, June, 2012, Sheraton New Orleans, New Orleans)
17. Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Nakashima, T., Okada, Y., Nouzawa, T.: Effects of Transient Aerodynamics on Vehicle Stability: A Large Eddy Simulation Analysis, 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA2012-3127(25-28, June, 2012, Sheraton New Orleans, New Orleans)
18. Tsubokura, M., Cheng, S.Y., Nakashima, T., Okada, Nouzawa, T.: A Numerical Study of Transient Aerodynamics of Vehicles Subjected to Pitching Oscillation, N0030, 9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, (6-8 June, 2012,

- Macedonia Palace Hotel, Thessaloniki, Greece)
19. Tsubokura, M., Ikawa, Y., Okada, Y., Nakashima, T., Nouzawa, T.: Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 2nd report, Numerical analysis, 2012-01-0448, pp.395-412, 2012 SAE World Congress, (24-26, April, 2012, Cobo Center, Detroit)
 20. Okada, Y., Nouzawa, T., Okamoto, S., Fujita, T., Kamioka, T., Tsubokura, M.: Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 1st report, On-road analysis, 2012-01-0446, pp.355-377, 2012 SAE World Congress (24-26, April, 2012, Cobo Center, Detroit)
 21. 池田隼, 坪倉誠, 伊川雄希, 中島卓司, 農沢隆秀, 岡田義浩: 蛇行する自動車に作用する非定常空力応答に関する LES 解析, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, A05-2 (2011 年 12 月 19 日大阪大学コンベンションセンター)
 22. Makoto Tsubokura, Prasanjit Das, Tomofuyu Matsuuki, and Takuji Nakashima: Large Eddy Simulation on the Unsteady Aerodynamics of a Heavy Duty Truck in Wind Gust, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-FED, AJK2011-23034 (July 24-29, 2011, ACT City Congress Center, Hamamatsu, Shizuoka, Japan)
 23. Makoto Tsubokura, Takuji Nakashima: Development of an Unsteady Aerodynamic Simulator for Road Vehicle based on Large-Eddy Simulation, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-42010 (2011.7.24-29, ACT City Congress Center, Hamamatsu, Japan)
 24. Takuji Nakashima, Makoto Tsubokura, Syumei Matsuda, and Yasuaki Doi: Unsteady Aerodynamics Simulation of a Heavy Duty Truck in Wind Gusts Coupled with Vehicle Motion Analysis in Six Degrees of Freedom, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-FED, AJK2011-23031 (July 24-29, 2011, ACT City Center, Hamamatsu, Shizuoka, Japan)
 25. Makoto Tsubokura, Jun Ikeda, Takuji Nakashima, Kozo Kitoh, and Shinji Kitayama: On the Aerodynamics of Ground Vehicles Subjected to Crosswind Gust and its Shape Dependence, 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA2011-3670 (27-30, June, 2011, Sheraton Waikiki, Honolulu, Hawaii)
 26. Cheng Seeyuan, Makoto Tsubokura, Takuji Nakashima, Takahide Nouzawa, and Yoshihiro Okada: Large Eddy Simulation of Flow past Road Vehicles Subjected to Pitching Oscillation, 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA2011-3065 (27-30, June, 2011, Sheraton Waikiki, Honolulu, Hawaii)
 27. Takuji Nakashima, Makoto Tsubokura, Syumei Matsuda, and Yasuaki Doi: Coupled Analysis of Unsteady Aerodynamics and 6DoF Motion of a Heavy Duty Truck in Strong Wing Gusts, 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA2011-3672 (27-30, June, 2011, Sheraton Waikiki, Honolulu, Hawaii)
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/fluid/aero/>
- 6 . 研究組織
(1)研究代表者
坪倉 誠 (TSUBOKURA, Makoto)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号 : 4 0 3 1 3 3 6 6