

平成 30 年 4 月 30 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18018

研究課題名(和文) 混相流中で移動する物体周りの熱授受・相変化解析手法の構築

研究課題名(英文) Development of numerical method for thermos-fluid analysis around moving objects in multi-phase flow

研究代表者

高橋 俊 (Takahashi, Shun)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：60553930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：移動物体周りの気液二相流解析、また気液二相流解析と熱解析との連成解析のための計算手法開発と、それらの実験との比較検証を行った。気液二相流解析は保存型レベルセット法を活用し、高精度の差分近似と物体境界のレベルセット法による表現によって移動物体を含む固気液三相流の解析を可能とし、エンジン内のピストン・ピストンリング周りやタイヤ周りの液膜等の流れ場解析を行った。気液二相流解析と熱解析の連成解析手法の開発には、conjugate heat transferモデルとシャープな熱物性の設定方法を導入することで解析を可能とし、ヒートパイプ内部の熱流動現象の解析を実施した。

研究成果の概要(英文)：We developed numerical methods to solve a flow around moving objects in two-phase flowfield and analyze coupled phenomena of thermos-fluid problems. The two-phase flow simulation was conducted by conservative level set method for interface between gas and liquid. In addition, practical engineering applications like engine oil lubrication around piston rings and water film analysis around a tire were dealt with accurate finite difference scheme and level set method to express wall boundaries. Furthermore, thermos-fluid couple simulation for a heat pipe was carried out by conjugate heat transfer model for the interface between fluid and object and sharp interface treatment between liquid and gas.

研究分野：数値流体力学

キーワード：混相流 二相流 数値流体力学 熱流体解析

1. 研究開始当初の背景

単純な直交格子に埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method: IBM) を合わせて格子生成のコストを抑えた任意形状解析が広まりつつある昨今、直交格子法を用いた非圧縮流体の解析の著名な研究者には Peskin や Mittal を初め、国内では大阪大学の梶島ら、一方で圧縮性流体解析の著名な研究者には Iaccarino や Adams ら、国内では東北大学の大林ら、東京大学の今村らの取り組みが見られる。混相流解析では従来の Volume Of Fluid (VOF) 法から、近年は界面をよりシャープに捉えるレベルセット (Level set: LS) 法が広く用いられてきており、さらに最近では VOF 法と LS 法の利点を合わせた手法も見られている。世界的には Sussman や Fedkiw ら、日本では東京大学の姫野、京都大学の功刀、大阪府立大学の高比良をはじめとして、近年では横浜国立大学の白崎ら、東京工業大学の青木らなど多くの研究者が取り組みを始めている。LS 法は固気界面、気液界面、もしくは固固界面であっても、本質が符号付最小距離という単純な性質のためどのような界面にも適用が可能である。それを応用して Stern ら (Journal of Computational Physics 228 (2009) 6590-6616) や白崎ら (ながれ 34 (2015) 125-130) は、気液界面を含む流れ中で物体が移動する混相流内で物体が運動する連成解析を行っており、先駆的な研究を実施している。一方で、物体と流体間における熱授受、相変化のシミュレーションについては、世界的には Gibou ら、日本では理化学研究所の大西らを初めとして、流れ場ごとに種々のモデルが考案されてはいるが、相変化発生のトリガーやその扱い方において未だ開発途上の面も見受けられる。

直交格子で熱授受が困難となるのは一般に速度境界層よりも薄い熱境界層を高々二次精度ほどの壁面付近の埋め込み境界法で解像しようとするためである。IBM を用いて球周りの熱授受の解析に取り組んだ最新の研究結果では Reynolds 数が 100 未満でも二次元円柱直径に 70 セルを配置することで、ようやく熱流束が従来の研究と一致すると報告している (Luo, K. et al., International Journal of Heat and Mass Transfer 92 (2016) 708-717)。熱流束を定量的に評価するにはそもそも熱境界層を正確に解像する必要があり、等間隔直交格子を用いてそれを実現するには格子全体の規模が大きくなりがちである。しかし等間隔直交格子の利点であるソルバの簡易さと移動物体解析への適用性の高さを生かそうと思うと、熱境界層を解くことは避けては通れない。

2. 研究の目的

申請者はこれまで非圧縮性・圧縮性流体中移動物体周りの IBM、混相流解析とほぼ全ての研究を網羅してきており、手法の得失と混相流解析、移動物体解析の課題となる点を熟

知している。さらに申請者は現在、熱機関、熱輸送デバイスに関連する多くの研究テーマを担当している。二相流が関係する熱機関では液体の相変化が関係する場合が多く、その際には正確に性能を予測するために熱授受と正確な熱境界層を考慮する必要がある。そこで本研究では、熱機関内で熱授受、相変化を考慮した移動物体との連成解析手法の構築を研究目的とする。

3. 研究の方法

申請者は、熱機関、熱輸送デバイスに関連する多くの研究テーマを担当しており、その中で熱境界層の正確な解像が求められている。熱授受問題については以下の 1-3 を流れ場と温度差がある粒子を対象に研究する。申請者はこれまでロケット発射時のノズル後流中に散かれた水の微粒子と衝撃波が干渉する問題の解析を行ってきた。その問題において 1-3 の影響を検討し、解析への熱境界層の導入を目指す。次に相変化については、現在申請者が担当しているエンジン内のオイルの蒸発と、冷却塔内部の水の蒸発、ヒートパイプ内の冷媒の相変化を中心に、以下の 4-6 について取り組む。相変化問題で重要となるのは各相の質量保存で、これは近年提案されたカットセルライクな簡易な手法で再現し、過去の研究と比較して熱境界層を正確に解像して得られる差について明らかにする。

1. 熱境界層を直接解かず高精度に得られた熱流束を ad hoc に用いて与える方法
 2. 熱境界層に二次近似式を適用して高精度の埋め込み境界法を適用する方法
 3. 熱境界層を解くための境界適合格子を組み合わせたオーバーセット的な方法
 4. 針谷らが提案している潤滑オイルの燃焼の相変化モデルを二相流解析に導入する
 5. Gibou らの提案手法である sharp 界面用の相変化モデルを二相流解析に導入する
 6. 4-6 と移動物体を考慮し、エンジンピストンリングや冷却塔、ヒートパイプ解析につなげる、
- これら 6 点を研究課題と手法として捉えていた。

4. 研究成果

これまでに開発してきた圧縮性、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づいた直交格子と埋め込み境界法を適用した解析ソルバを用いた研究を実施し、当初の目標は「3. 研究の方法」に述べた通りであったが、1 は汎用性が無いため断念、2 は実施したが表面の解析精度向上は見られず、3 は検討したが層流境界層の表現に難があり中止した。結果的に熱解析に至っては先行研究を参考に conjugate heat transfer モデルとシャープな熱物性を導入することで良好な結果を得ることが出来た。次に相変化については、4 は共同研究先企業との打ち合わせ等から実施しないこと

となり、5 は検討したが完成には至らなかった。6 は保存型レベルセット法を高精度化することで図 1 から図 3 のように達成出来ており、現在は共同研究先と実験検証を行っている段階である。

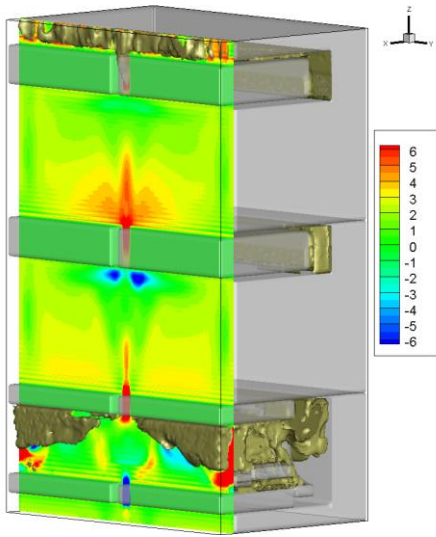


図 1 ピストンリングパック周りオイル解析
(等値面：オイル，断面：上下方向速度)

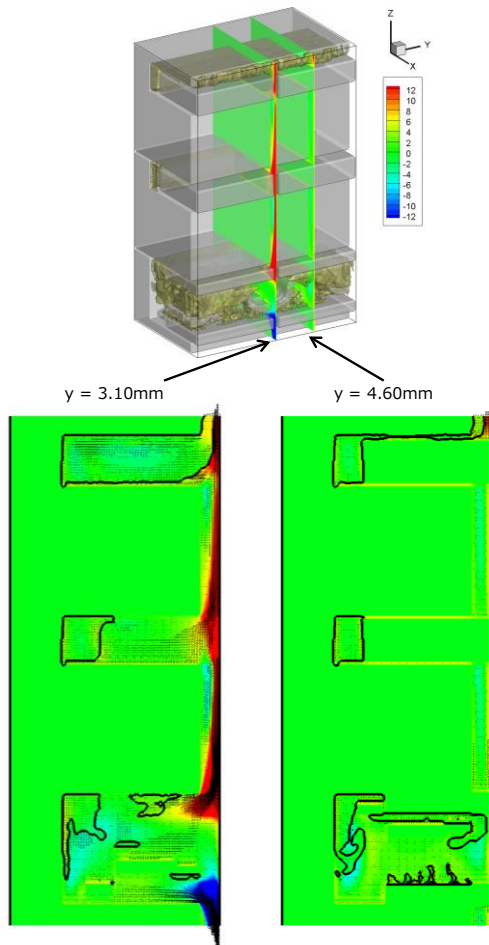


図 2 各リング背面のオイルの瞬時分布

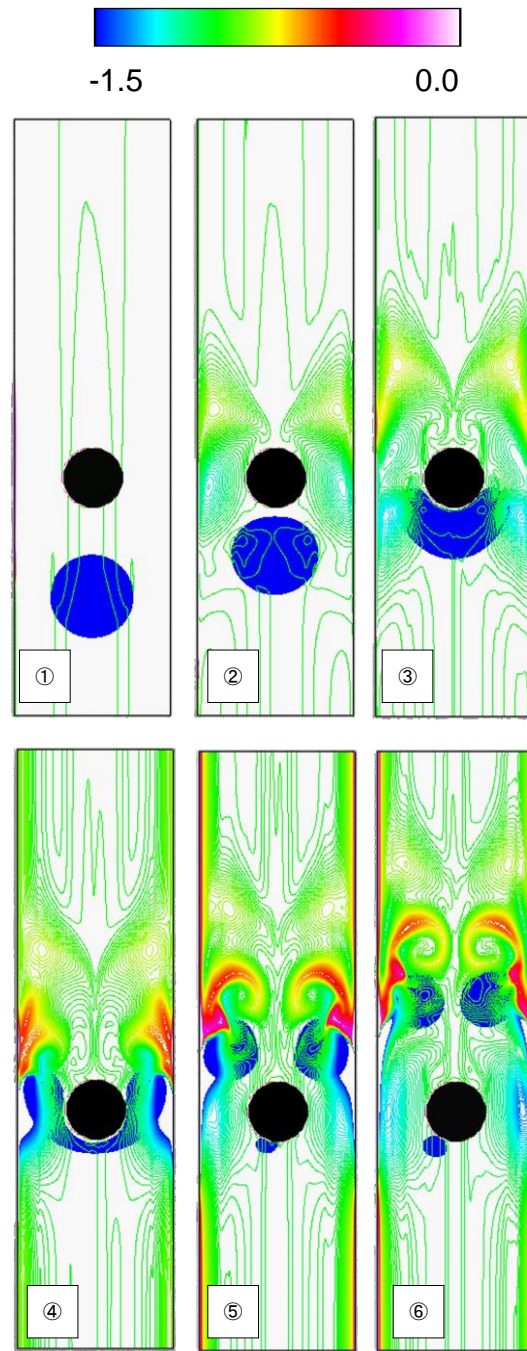


図 3 ヒートパイプ内に障害物を配置した際の無次元温度分布

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 8 件)

1. T. Nagata, T. Nonomura, S. Takahashi, Y. Mizuno, K. Fukuda, “Direct numerical simulation of flow around a heated/cooled isolated sphere up to a Reynolds number of 300 under subsonic to supersonic conditions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120:284 – 299, 2018, 査読有

2. Y. Mizuno, S. Takahashi, K. Fukuda, “Investigation of A Gas–particle Flow with Particle–particle and Particle–wall Collisions by Immersed Boundary Method”, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, Vol. 6, Issue 1, pp. 132-138, 2018, 査読有
3. M. Hosaka, T. Nagata, S. Takahashi, K. Fukuda, “Numerical Simulation On Solid–liquid Multiphase Flow Including Complex-shaped Objects With Collision And Adhesion Effects Using Immersed Boundary Method”, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, Vol. 6, Issue 1, pp. 162-175, 2018, 査読有
4. 落合成行, 畔津昭彦, 高橋俊, 山本憲司, 三原雄二, “オイル消費予測のための解析ソルバーの開発”, 月刊トライボロジー 31(10), pp.14-16, 2017 (特集記事), 査読無
5. 赤井大晃, 高橋俊, 太田匡則, “新幹線後尾部のトンネル突入による車両振動の解析”, 実験力学, Vol. 17, No. 4, pp. 312-319, 2017, 査読有
6. H. Akai, S. Takahashi, M. Ota, K. Maeno, “Effect of Expansion Wave Generated by Train Tail Entering into Tunnel on Lateral Vibration of High-Speed Train”, *Advanced Experimental Mechanics*, Vol. 1, pp. 74-79, 2016, 査読有
7. E. M. Sharify, S. Takahashi, S. Hasegawa, “Development of a CFD model for simulation of a traveling-wave thermoacoustic engine using an impedance matching boundary condition”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, 25, pp. 1026-1035, 2016, 査読有
8. T. Nagata, T. Nonomura, S. Takahashi, Y. Mizuno, K. Fukuda, “Investigation on subsonic to supersonic flow around a sphere at low Reynolds number of between 50 and 300 by direct numerical simulation”, *Physics of Fluids*, 28(5):056101, 2016, 査読有
- 〔学会発表〕 (計 44 件)
1. S. Takahashi, “Development and application of large-scale simulation of multiphase flow”, 27th Workshop on Sustained Simulation Performance, 2018
2. 高橋俊, “固気液混相流解析の工学応用”, 平成 29 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2018
3. 高橋俊, 浜渦勇輝, 野々村拓, “カットセル法に基づいた乱流壁モデルの任意形状への適用”, 日本航空宇宙学会北部支部 2018 年講演会ならびに第 19 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2018
4. S. Takahashi, T. Inoue, S. Okazaki, H. Fuke, “Prediction of Heat Transfer in a Heat Pipe by Two-phase Flow Simulation based on Conservative Level Set Method”, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2018-0503)
5. T. Nagata, T. Nonomura, S. Takahashi, Y. Mizuno, K. Fukuda, “Direct numerical simulation of flow past a sphere at a Reynolds number between 500 and 1000 in compressible flows”, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2018-0381)
6. 永田貴之, 野々村拓, 高橋俊, 水野祐介, 福田紘大, 浅井圭介, “圧縮性球周り流れの DNS ($500 \leq Re \leq 1000$)”, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017
7. 水野裕介, 久保田崇由, 高橋俊, 中篠恭一, 福田紘大, “微粒子と加工物の衝突を伴う流体構造連成解析”, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017
8. 清水健, 保坂衛, 加藤祐樹, 永田貴之, 高橋俊, 福田紘大, 古目谷暢, 木村啓志, 松崎純一, “埋め込み境界法を用いた腎臓結石の流動解析”, 日本機械学会 第 30 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 2017
9. 保坂衛, 永田貴之, 高橋俊, 福田紘大, 後藤信哉, “埋め込み境界法によるステント形状の改良に向けた血流の付着を伴う流体解析”, 日本機械学会 第 30 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 2017
10. R. Sasaki, Y. Kawamoto, Y. Akama, S. Takahashi, K. Yamamoto, M. Ochiai, A. Azetsu, “Prediction of oil behavior around piston rings by numerical analysis”, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017
11. T. Kubota, Y. Mizuno, S. Takahashi, K. Nakashino, K. Fukuda, “Flow-Structure Simulation of Shot Peening and Related Phenomena using FEM–IBM Coupling Method”, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017

12. T. Inoue, S. Ide, S. Takahashi, T. Matsui, H. Nagai, “Application of Two-phase Thermo-fluid Simulation for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe”, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017
13. M. Hosaka, T. Nagata, S. Takahashi, K. Fukuda, S. Goto, “Solid-liquid Multiphase Flow Analysis for Improvement a Medical Stent by using Immersed Boundary Method”, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017
14. 久保田崇由, 水野裕介, 高橋俊, 中篠恭一, 福田紘大, “ショットピーニングの流体構造連成解析に向けた基礎検討”, 第 55 回飛行機シンポジウム, 2017
15. M. Ochiai, A. Azetsu, K. Yamamoto, Y. Kawamomto, R. Sasaki, S. Takahashi, “Development of Tribology Simulator using FEM and CFD analyses to predict Oil behavior around Piston Ring”, 6th World Tribology Congress 2017, 2017
16. 佐々木竜一, 川本裕樹, 赤間勇太, 高橋俊, 落合成行, 山本憲司, “エンジンオイル消費予測の為の気液二相流解析”, 第 30 回計算力学講演会, 2017
17. 浜渦勇輝, 高橋俊, 野々村拓, “壁モデルとカットセルを用いた等間隔直交格子による高解像度 LES”, 第 30 回計算力学講演会, 2017
18. 井上拓哉, 高橋俊, 井出脩太, “熱輸送機器内部における気液二相流の熱伝達予測”, 第 30 回計算力学講演会, 2017
19. 清水健, 保坂衛, 加藤祐樹, 永田貴之, 高橋俊, 福田紘大, 古目谷暢, 木村啓志, 松崎純一, “埋め込み境界法による腎臓結石の流動解析実現に向けた基礎検討”, 日本流体力学会年会, 2017
20. 保坂衛, 永田貴之, 高橋俊, 福田紘大, 後藤信哉, “埋め込み境界法による血球の衝突・付着を伴う血流解析”, 日本流体力学会年会, 2017
21. 高橋俊, 井上拓哉, 岡崎峻, 福家英之, “管内の過熱の抑制に向けた熱流体解析”, 第 49 回流体力学講演会／第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017
22. 浜渦勇輝, 高橋俊, 野々村拓, “壁モデルとカットセル法による乱流計算の応用”, 第 49 回流体力学講演会／第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017
23. 高橋俊, 柴田裕矢, 井上拓哉, “円筒座標系格子における埋め込み境界法を用いた移動境界問題の数値解析法の開発”, 日本航空宇宙学会北部支部 2017 年講演会ならびに第 18 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2017
24. 浜渦勇輝, 高橋俊, 野々村拓, “カットセルベース直交格子と壁モデルによる高精度 LES”, 日本航空宇宙学会北部支部 2017 年講演会ならびに第 18 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2017
25. 川本裕樹, 高橋俊, 佐々木竜一, “ピストンリングまわりのオイル挙動予測に向けた気液二相流解析”, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 2016
26. 佐々木竜一, 川本裕樹, 高橋俊, 落合成行, 山本憲司, “気液二相流解析との連成解析に向けたピストンリング周りのオイル挙動解析”, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 2016
27. 井上拓哉, 天野京介, 伊藤慶太, 高橋俊, “保存形レベルセット法を用いた移動物体周りの二相流の解析”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016
28. 井上拓哉, 立本亘, 山本憲司, 高橋俊, “保存形レベルセット法を用いた 2 相流と構造物の連成解析”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016
29. 椿原大貴, マイクロシャリフィエストラ, 葛生和人, 高橋俊, 長谷川真也, “熱交換器の流路径を変化させた時の熱音響エンジンの熱流の数値解析”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016
30. S. Takahashi, Y. Kawamoto, Y. Mizuno, K. Fukuda, S. Obayashi, “Study for Accurate Prediction of Unsteady Aerodynamic Characteristics around Moving Objects”, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016
31. Y. Mizuno, T. Inoue, S. Takahashi, K. Fukuda, “Investigation of Incompressible Flow with Collision of Multiple Particles and Wall by using Immersed Boundary Method”, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016
32. Y. Kawamoto, S. Takahashi, R. Sasaki, I. Uchida, T. Inoue, “Development of Liquid-gas Two-phase Flow Solver towards Simulation of

- Flow around Piston Ring”, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016
33. H. Takemori, S. Takahashi, “Flow Simulation with Buoyancy Effect around a Solar Panel Mounted on a Roof”, Malaysia-Japan Joint International Conference (MJJIC), 2016
34. M. Hosaka, T. Nagata, K. Fukuda, S. Takahashi, “Two Dimensional Solid-Liquid Two-Phase Flow Simulation Including Collision and Adhesion Effects”, Malaysia-Japan Joint International Conference (MJJIC), 2016
35. 川本裕樹, 高橋俊, 佐々木竜一, 内田泉, 井上拓哉, “Sharp-interface 法による埋め込み境界法を用いた気液二相流解析”, 第 29 回計算力学講演会, 2016
36. 高橋俊, 浜渦勇輝, 野々村拓, “壁面モデルと埋め込み境界法を用いた直交格子による乱流境界層の数値計算の試行”, 第 29 回計算力学講演会, 2016
37. 保坂衛, 永田貴之, 高橋俊, 福田紘大, “埋め込み境界法を用いた衝突・付着を伴う数値シミュレーション”, 第 29 回計算力学講演会, 2016
38. 水野裕介, 井上拓哉, 高橋俊, 福田紘大, “埋め込み境界法を用いた複数微粒子が壁に衝突する非圧縮流体の 3 次元直接数値解析”, 第 29 回計算力学講演会, 2016
39. 浜渦勇輝, 水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 福田紘大, “埋め込み境界法を用いた不平等間隔直交格子による球周りの高解像度解析”, 第 29 回計算力学講演会, 2016
40. M. Sai, S. Takahashi, S. Nara, M. Miyake, Y. Inada, M. Sakai, T. Morisaka, “Numerical Analysis of the Effect of Calf’s Size on the Dolphin Drafting by Using OpenFOAM”, SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, SEB BRIGHTON, 2016
41. T. Nagata, T. Nonomura, S. Takahashi, Y. Mizuno, K. Fukuda, “Investigation on Wake Vortex Structure of a Heated/Cooled Rotating Particle in Compressible Flows by Direct Numerical Simulation”, 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, 2016
42. Y. Mizuno, S. Takahashi, T. Nonomura, T. Nagata, K. Fukuda, “Direct Numerical Simulation with Heat Transfer of Gas-Particle Flow containing Shock Waves by Immersed Boundary Method”, 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, 2016
43. Y. Mizuno, S. Takahashi, T. Nonomura, T. Nagata, K. Fukuda, “Gas-particle Flow Simulation based on Compressible Flow Solver with Immersed Boundary Method”, 28th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, 2016
44. H. Akai, S. Takahashi, M. Ota, K. Maeno, “Aerodynamic and Pressure Effects on Lateral Vibration of High-Speed Trains”, Railways 2016, 2016
- [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
6. 研究組織
- (1)研究代表者
高橋 俊 (Takahashi Shun)
東海大学・工学部動力機械工学科・准教授
研究者番号：60553930
- (2)研究分担者
()
研究者番号：
- (3)連携研究者
野々村 拓 (Nonomura Taku)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60547967
- (4)研究協力者
佐々木 大輔 (Sasaki Daisuke)
金沢工業大学・
工学部航空システム工学科・准教授

三坂 孝志 (Misaka Takashi)
産業技術総合研究所・製造技術研究部門・
機械加工情報研究グループ・主任研究員