

MPFI粒子法を活用したLBM連成による 自動車の床下部品への着雪シミュレーション方法の開発

Development of a Simulation Method for Snow Deposition on Vehicle Underfloor Components
by Coupled LBM and MPFI Particle Method

大島康裕¹⁾, 西森久雄¹⁾, 今井悠介¹⁾, 越塚誠一²⁾, 柴田和也²⁾

Yasuhiro OHSHIMA, Hisao NISHIMORI, Yusuke IMAI, Seiichi KOSHIZUKA and Kazuya SHIBATA

1) トヨタ自動車株式会社 (〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1, E-mail: yasuihiro_ohshima@mail.toyota.co.jp)

1) トヨタ自動車株式会社 (〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1, E-mail: hisao_nishimori@mail.toyota.co.jp)

1) トヨタ自動車株式会社 (〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1, E-mail: yusuke_imai@mail.toyota.co.jp)

2) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: koshizuka@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: shibata.kazuya@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

We have coupled MPFI particle method and LBM to analyze snow deposition on vehicle underfloor components. Since under-floor parts of a vehicle are greatly affected by aerodynamic forces when the vehicle is running, predicting the behavior and location of snow deposition on under-floor parts of a vehicle is an important issue from the viewpoint of improving vehicle performance and durability. In the proposed method, the fluid behavior around the underfloor of an automobile is analyzed using LBM, and based on the results, the motion and adhesion behavior of snow are analyzed using the MPFI particle method. The analytical results were validated by comparing them with experimental data.

Key Words : MPFI method, LBM, Verification and Validation, Vehicle Development, Snow Deposition

1. 序論

現在、自動車業界は「CASE」と呼ばれる技術革新を背景に、100年に一度の大変革の時代を迎えている。このような状況において、車両開発の効率化が求められており、従来の車評価からシミュレーションへの置き換えが急務となっている。シミュレーションの活用により、試作回数の削減や開発期間の短縮が可能となり、その有効性を確保するためには、検証と妥当性確認 (Verification & Validation, V&V) が重要である。これまでに我々は、被水シミュレーション方法の開発として、飲料水のこぼれ解析やタイヤからの水・泥の巻き上げ解析方法などを開発してきた^{[1][2][3]}が、車両床下部品への着雪現象の解析については、開発が出来ていない状況であった。(図1)

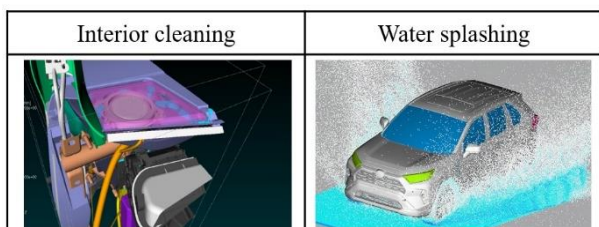


図-1 水かかり解析例

車両床下部品は走行中の空力の影響を大きく受けるため、着雪の挙動と着雪部位の予測は車両性能や耐久性向上の観点から重要な課題であり、本稿では、タイヤから巻

き上げられた雪が車両床下部品へと着雪する現象を対象とし、着雪解析方法の開発および実車評価との相関検証を実施した。

2. シミュレーション方法検討手順

本稿では、車両床下部周辺の流体挙動を格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) を用いて解析し、その結果を基に、MPFI法 (Moving Particle Full-Implicit) を適用し、雪の運動および付着挙動を解析した。本稿では解析方法の構築にあたり、以下の手順にて検討した。

手順1. タイヤからの水の巻き上げ解析 MPS-LBM 連成: 流体挙動と粒子運動の相互作用を考慮した方法

手順2. 非ニュートン流体解析: 雪のレオロジー特性を考慮した流動解析

手順3. タイヤからの雪の巻き上げ解析 MPFI-LBM 連成: MPFI法を活用し、雪の付着挙動を高精度に解析する方法。

本稿における数値解析では、粒子法のプログラムとして商用コードParticleworks ver.8.0.0を用いた。使用した計算機は、Intel(R) Xeon(R) W-2123 (3.6GHz) のCPU、メモリー 64GBを搭載したパーソナルコンピューター1台である。並列計算は行わず、単一のCPUのコアで計算した。

3. タイヤからの水の巻き上げMPS-LBM連成解析手法検討

(1) 解析方法

従来、タイヤからの水の巻き上げ解析では、粒子法（Moving Particle Simulation, MPS）を用いた解析手法を使用してきたが、着雪現象を高精度にシミュレーションするためには、走行中の空力の影響を適切に考慮する必要がある。手順1ではMPSとLBMを連成することで、タイヤ周辺の流体挙動をより詳細に解析し、従来のMPSのみを用いた手法と比較し、本手法の有効性を検証した。

また、MPS^{[4][5]}は、式(1)、(2)に示す支配方程式を粒子間相互作用モデルで離散化し、流体挙動を粒子の運動によって計算する方法である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}_g \tag{2}$$

ここで、式（1）の D/Dt はラグランジュ微分、 ρ は密度[kg/m³]、式（2）の \vec{u} は速度ベクトル[m/s]、 μ は粘性係数[Pa・s]を表す。右辺の第1項は圧力項、第2項は粘性項、第3項は外力項を表す。

また、LBMは、流体の挙動をシミュレーションする数値計算法の一つであり、離散的な粒子分布関数を基に流れ場を計算する点に特徴がある。この手法では、計算領域を格子状に分割し、各格子点において仮想的な粒子の分布を考え、時間発展を通じて流体の動きを再現する手法である。

(2) 解析モデル及び解析条件

手順1では、実車環境を模擬するために以下の解析モデルおよび条件を設定した。（図2、表1）具体的には、実車の3D形状を基に車両モデルを構築し、現実に近い条件下でのシミュレーションを実施した。タイヤモデルについては、回転運動を考慮することで、実際の走行時の挙動を再現させた。また、水膜モデルとして、タイヤの接地面に

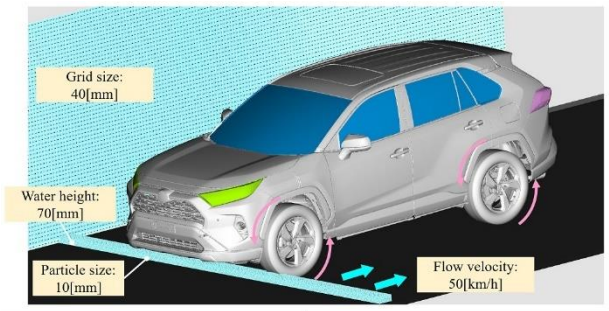


図-2 水かかり解析モデル

水粒子を配置し、走行時の水の挙動を解析できるように設定した。

表-1 水かかり解析の条件設定

Analysis conditions	Unit	Setting value
Water height	mm	70
Flow velocity	km/h	50
Tilt angle	deg	0
Particle contact angle	deg	70
Slip coefficient for wall surface	-	4
Particle size	mm	10
Wind speed	m/s	0,13.8
Grid size	mm	40
Minimum grid size	mm	10

(3) 解析結果及び考察

解析結果を図3に示す。

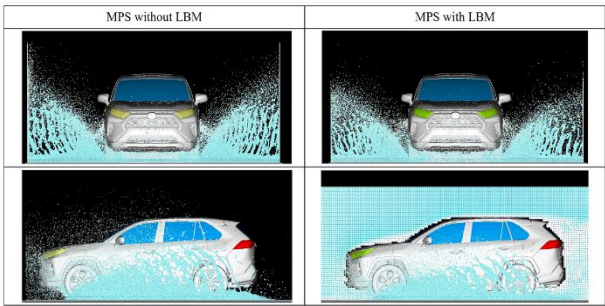


図-3 LBM 連成有無による水の巻き上げ解析結果

図3の結果を基に、車両側面への水撥ね高さおよび車両後方への水撥ね距離をプロットしたものを図4に示す。さらに、図4の結果をもとに、LBM連成の有無による水撥ね高さおよび距離の違いを比較した結果を図5に示す。

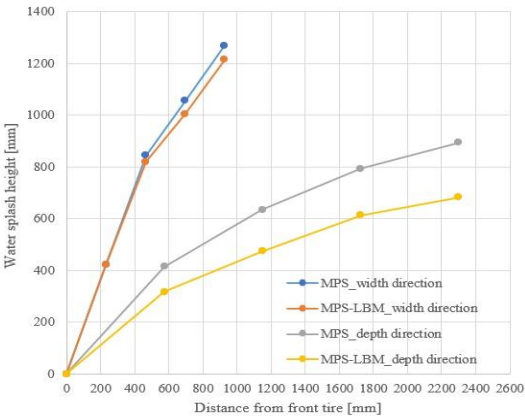


図-4 LBM 連成有無による水撥ね高さ比較結果

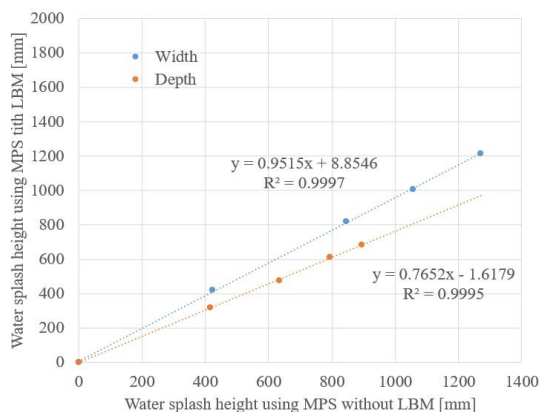


図-5 LBM 連成有無による水撥ね高さの相関検証結果

相関検証結果より、車両側面への水撥ね高さはLBM連成の有無にかかわらず同等であった。一方で、車両後方への水撥ね距離は、LBM連成を適用した場合により遠くまで飛散することが確認された。これは、水粒子と気流が同一方向に作用することで合力が生じたためと考えられる。

4. 非ニュートン流体解析方法検討

(1) 解析方法

手順2では、雪のレオロジー特性を考慮した解析手法を構築し、実際の着雪現象に近い挙動を再現するため、雪の粘塑性挙動を適切に再現可能な流体モデルを採用した。これにより、圧縮やせん断応力に応じた雪の流動特性を表現することが可能となる。また、解析手法としては、MPFI-LBM連成解析手法を適用した。本手法を用いることで、雪の非ニュートン流動特性に考慮しながら計算の安定性を確保した着雪シミュレーションを実施することが可能となる。

本流体モデルは、降伏応力を超えたときに流動を開始する特性を持つ流体を表すモデルである。このモデルは、ニュートン流体のように小さな力ですぐに変形するのではなく、一定の応力が加わるまでは剛体のように振る舞い、それを超えると粘性流体のように流れ始める。一方、流動が開始した後は、ニュートン流体と同様に応力と変形速度の関係に従って流れるが、その粘性は流体ごとに異なり、流れの特性を決定する重要な要素である。本稿では、塑性粘度 η_p [Pa・s]、付着力 c [Pa]、内部摩擦角 ϕ [deg]についてパラメータスタディを実施し、実際の着雪現象に近い挙動の再現を行った。

(2) 解析モデル及び解析条件

解析モデルには車両部分モデルを用いて検討を行った。また、タイヤモデルについては回転運動を考慮した解析を実施した。さらに、雪モデルに関しては、タイヤの接地面に雪粒子を配置し、その挙動を解析した。(図6)

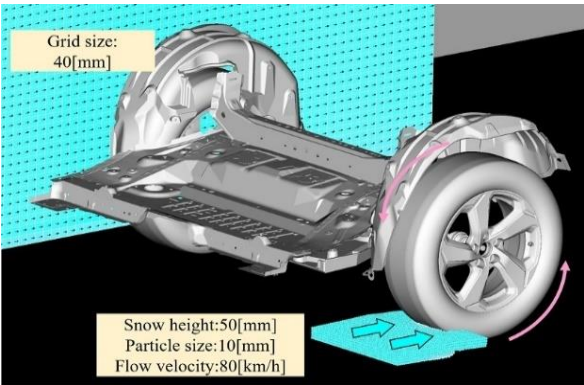


図-6 非ニュートン流体解析モデル

表-2 非ニュートン流体解析の条件設定

Analysis conditions	Unit	Setting value
Snow height	mm	50
Flow velocity	km/h	80
Tilt angle	deg	0
plastic viscosity	Pa・s	1-100
Adhesion	Pa	1.E-6 - 1.E+1
Internal friction angle	deg	0
Particle size	mm	10
Wind speed	m/s	22.2
Grid size	mm	40
Minimum grid size	mm	10

(3) 解析結果及び考察

パラメータスタディは20ケース程度実施した。図7にパラメータスタディにおける着雪の傾向を示す。

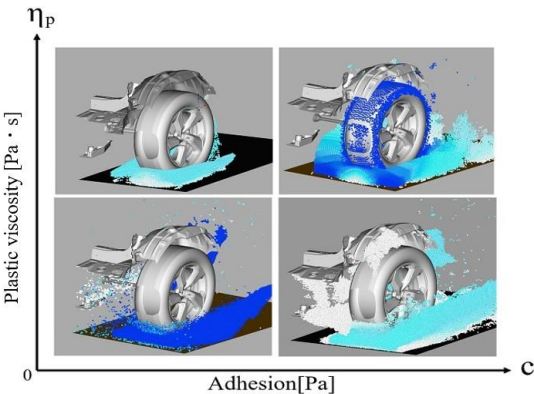


図-7 パラメータスタディにおける着雪の傾向

結果から分かるように、付着力が大きいほど着雪量は増加する。また、塑性粘度が高いほどタイヤからの巻き上げが抑制されることが分かり、パラメータスタディの結果、床下部品への着雪量が最も多かった付着力：1.E-5 [Pa]、塑性粘度：5 [Pa・s]と決定した。(図8)

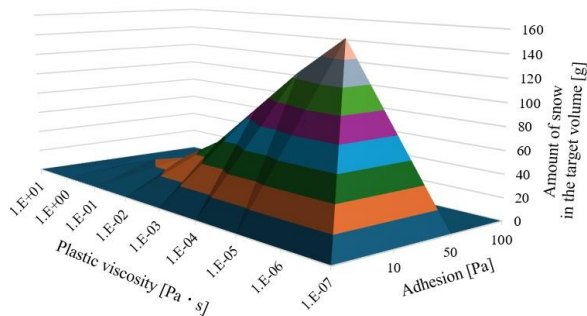


図-8 パラメータスタディにおける着雪の傾向

5. タイヤからの雪の巻き上げMPFI-LBM連成解析方法検討

(1) 解析方法

手順3では、タイヤ周辺の雪の巻き上げおよび着雪現象を解析するために、手順1において実施したLBM連成解析の手法を基に、手順2で構築したMPFI非ニュートン流体モデルでの解析手法を結合させたMPFI-LBM連成解析手法を用いて、タイヤから巻き上げられた雪の挙動の再現を実施した。

(2) 解析モデル及び解析条件

手順3では、フルビークルモデル（図9、図10）にて解析検討を実施した。雪モデルに関しては、フロントタイヤ及びリアタイヤの接地面に雪粒子を配置し、その挙動を解析した。解析条件を表3に示す。

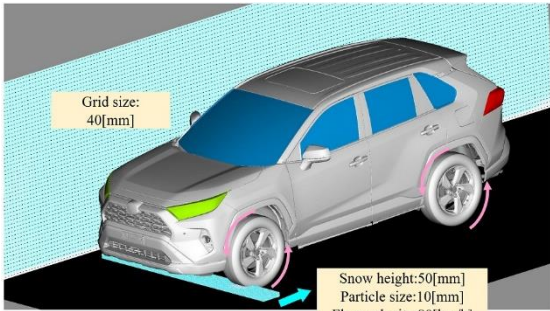


図-9 雪の巻き上げ解析モデル

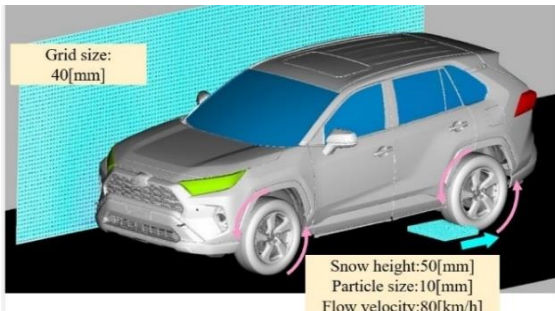


図-10 雪の巻き上げ解析モデル

表-3 雪の巻き上げ解析の条件設定

Analysis conditions	Unit	Setting value
Snow height	mm	50
Flow velocity	km/h	80
Tilt angle	deg	0
plastic viscosity	Pa · s	5
Adhesion	Pa	1.E-5
Internal friction angle	deg	0
Particle size	mm	10
Wind speed	m/s	22.2
Grid size	mm	40
Minimum grid size	mm	10

(3) 解析結果及び考察

LBM有無の解析結果を図11に示す。

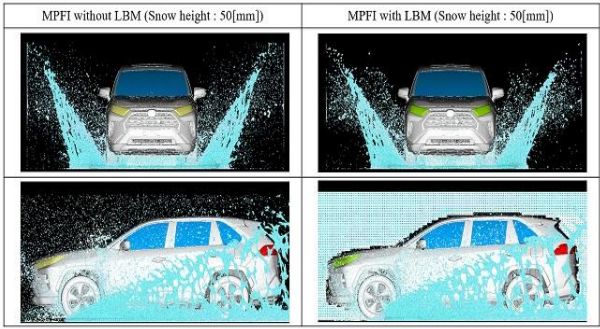


図-11 LBM 連成有無による着雪解析結果

図11の結果を基に、車両側面への雪撥ね高さおよび車両後方への雪撥ね距離をプロットしたものを図12に示す。さらに、図12の結果をもとに、LBM連成の有無による水撥ね高さおよび距離の違いを比較した結果を図13に示す。

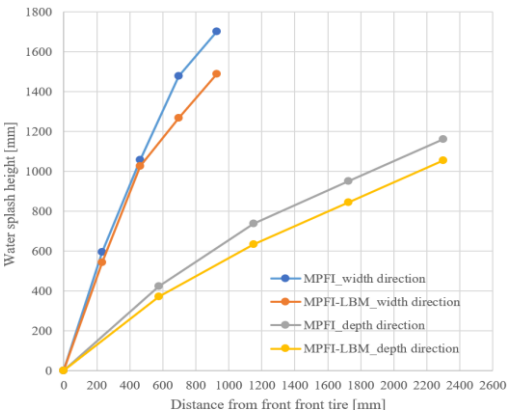


図-12 LBM 連成有無による雪撥ね高さ比較結果

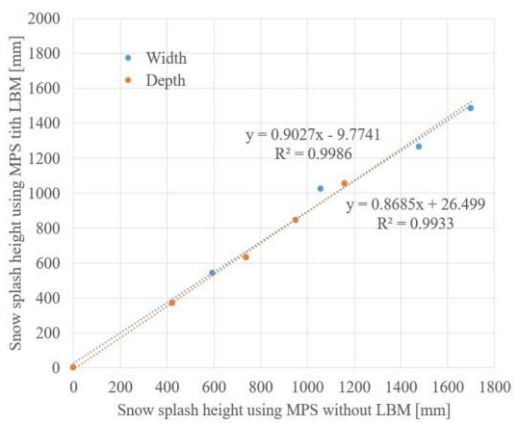


図-13 LBM 連成有無による雪撥ね高さ比較結果

関連検証結果より，水撥ね解析結果と同様の傾向が見られることがわかる．

次に，床下部品への着雪状況の結果を示す．（図14）

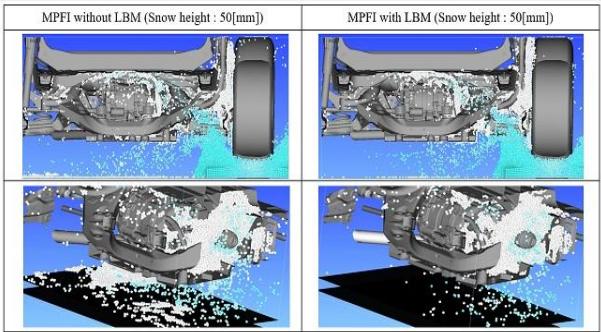


図-14 LBM 連成有無による床下部品への着雪解析結果

結果より，LBM連成を適用した場合により車両後方で飛散することが確認され，これはフロントタイヤからの水の巻き上げ解析結果の傾向と同様であることが分かった．

最後に，床下部品への着雪状況を実車と比較した．（図15，図16）

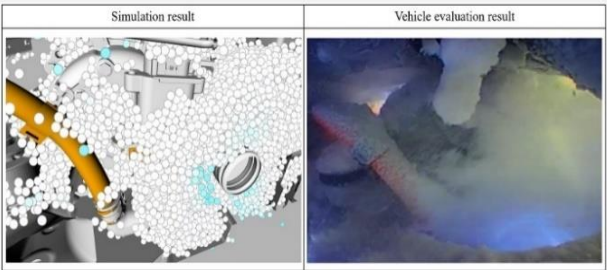


図-15 解析結果と実車評価結果の着雪分布

実験データと比較したところ，雪の付着状況に高い相関を示した．特に，ビンガム流体モデルとMPFI法の組み合わせにより，実験結果と同様な着雪分布が得られた．また，塑性粘度と付着力のパラメータが着雪挙動に与える

影響が明確となり，適切な設定値を用いることでより実際の現象に近いシミュレーションが可能であることが確認された．

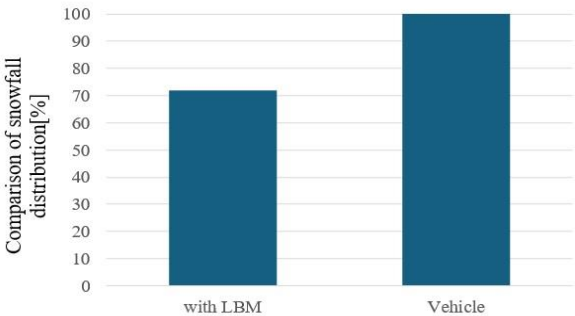


図-16 解析結果と実車評価結果の着雪分布の比較

6. まとめ

本検討の結果，MPFI-LBM連成解析による雪の巻き上げおよび着雪現象の再現性が確認された．手順1で実施したLBM連成解析の手法と，手順2で構築した雪の物理モデルを統合することで，より現実的な挙動を再現できることが示された．この結果を踏まえ，MPFI-LBM連成解析手法が雪の巻き上げや着雪現象の再現において非常に有効であることが確認された．今後は，走行条件に応じた雪の挙動の予測精度をさらに向上させるための改良を進める予定である．

参考文献

[1] 大島康裕，田中直樹，本多孝充，西森久雄，粒子法を活用した耐被水性能の全体最適搭載設計手法の開発，自動車技術会秋季大会学術講演会，20226051，2022
 [2] 大島康裕，田中直樹，吉村悠太，西森久雄，粒子法を活用した車両走行時の部品水かかりスパコンレス解析手法の開発，自動車技術会春季大会学術講演会，20235330，2023
 [3] 大島康裕，西森久雄，今井悠介，釜谷大志，粒子法を活用した車室内結露水による部品水かかり解析手法の開発，自動車技術会春季大会学術講演会，20245027，2024
 [4] 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平，粒子法入門，丸善
 [5] 越塚誠一，粒子法，丸善，2005
 [6] 越塚誠一，よくわかる粒子法（MP S）と自動車開発への適用事例，自動車技術会春季大会フォーラム，20094309
 [7] 川上浩，笠原巧，鈴木隆，粒子法（MP S）を使った冠水路解析の実用化実験，自動車技術会春季大会フォーラム
 [8] 渡辺治行，池尾正弘，浅井幹雄，渡澄敏雄，自動車の防錆評価における被水解析技術の開発，自動車技術会春季大会学術講演会，20215194，2021
 [9] 石井英二，杉井泰介，粒子法による表面張力モデルの

- 開発, 日本機械学会論文集, 78, No.794, pp.40-55, 2012
- [10] 近藤雅裕, 堀越誠一, 滝本正人, MPS法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデル, 日本計算機工学会論文集, 20070021, 2007
- [11] 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介, 根本征樹, 降雪風洞と連携した着雪シミュレータの開発, 計算工学講演会論文集, A0702, 2019
- [12] 結城光司, 山本誠, MPS法を用いたNACA翼におけるSLD着氷シミュレーション, 計算力学講演会講演論文集, 27, 2014
- [13] 鎌田慈, 室谷浩平, 中出孝次, 高橋大介, 佐藤研吾, 根本征樹, 鉄道車両に用いる着雪シミュレータの開発(その1)―実験による着雪発達条件の検討―, 日本雪氷学会誌, Vol83, 2021
- [14] 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 鉄道車両に用いる着雪シミュレータの開発(その2)―実験から導き出した着雪発達条件を用いた着雪解析手法の検証―, 日本雪氷学会誌, Vol83, 2021
- [15] Masahiro Kondo, A physically consistent particle method for incompressible fluid flow calculation, Computational Particle Mechanics, Vol8, pp.69-86, 2021
- [16] American Society of Mechanical Engineers, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, 2006
- [17] 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹, 工学シミュレーションの品質保証とV&V, 丸善出版, 2013
- [18] 日本原子力学会, シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015, AESJ-SC-A008:2015, 2016
- [19] Y. Tao, K. Shibata and S. Koshizuka, A Bingham Snow Model for Train Safety Built Using the Moving Particle Semi-implicit Method, Transactions of JSCES, Paper No.20170010, 2017