

Simpackを用いた鉄道車両の排雪走行シミュレーション

Snowplow simulation of railway vehicles using Simpact

室谷浩平¹⁾，秋山裕喜²⁾，高垣昌和³⁾

Kohei Murotani, Yuki Akiyama and Masakazu Takagaki

1) 博(情報理工) 鉄道総合技術研究所 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38, E-mail: murotani.kohei.03@rtri.or.jp)

2) 博(工学) 鉄道総合技術研究所 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38, E-mail: akiyama.yuki.78@rtri.or.jp)

3) 博(工学) 鉄道総合技術研究所 上席研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38, E-mail: takagaki.masakazu.93@rtri.or.jp)

When a train runs on snow-covered tracks, railway vehicles behave in various ways depending on the snowplow force caused by accumulated snow. In this study, to verify and solve problems that occur when snowplow running, we developed a simulator that combines a snowplow simulator using a particle method with a vehicle dynamics simulator using Simpact. We consider the behavior of railway vehicles at various running speeds and snowplow depths.

Key Words : Snowplow, Vehicles dynamics, Simpact

1. はじめに

鉄道車両が軌道上の積雪に対して進入し、スノーブレードで排雪する場合、車両に作用する力により車輪とレール間にはたらく上下方向の力である輪重が減少する可能性がある(図-1)。そのため、新幹線では現車を用いた排雪試験などの結果を基に軌道上の積雪深に応じた速度規制等による対応がなされている。しかしながら、現車試験では十分な試験回数を実施することは困難であるため、様々な場面における排雪走行の安全性が検証されているとは言い難い。そこで、本研究では、現車試験を補完できる排雪シミュレータを開発することを目的としている。

これまで、我々は排雪力測定試験装置を用いて排雪実験を実施し、その実験を再現する排雪シミュレータを開発し、実験結果とシミュレーション結果を比較することで、排雪シミュレータの妥当性を確認してきた[1,2]。

今回は、これまで開発した排雪実験を再現した排雪シミュレータを、一般の鉄道車両に適用できるようにするために、内製プログラムの車両運動シミュレータから商用ソフトのSimpactに置き換えた。Simpactは、様々な条件の下での鉄道車両の走行シミュレーションを実施できるように多くの機能を備えている。本稿では、排雪シミュレーションの概要を説明した後、Simpactとの連成方法を示



図-1 排雪シミュレーションのCG画像

し、最後に解析例を示す。

2. 排雪シミュレーション

排雪シミュレーション[1,2]は、軌道上に積雪した雪をスノープラウにより軌道外へ排雪する現象を再現する。雪にかかる力の大きさにより、雪の状態は変化する。かかる力が小さいと雪は変形しないが、ある一定の力がかかると変形しだす。さらに大きな力がかかると、大きく変形し、形状を維持できなくなると、雪粒子に分離して飛散していく。排雪シミュレーションでは、「ある一定の力がかかるまでは変形しないが、その値を超えると変形する」性質をビンガム流体モデルによりモデル化し、「さらに大きな力がかかると、大きく変形し、雪粒子に分離して飛散していく」性質を粒子法によりモデル化した。ビンガム流体モデルは、ある一定の値の応力になるまでは変形は発生せず、その値を超えた応力がかかると変形が発生する流体モデルのことである。粒子法は、一般的に用いられる計算対象を格子に分割して計算する手法とは異なり、計算対象を粒子に分割して計算する手法である。激しい流れや、分離・結合を繰り返す現象、衝突を伴う現象を扱うことを得意とする計算手法である。排雪シミュレーションでは、スノープラウと雪の衝突を扱うのに加え、雪が分離・飛散する現象を扱うので、粒子法を用いるのに適している。

雪にビンガム流体モデルを適用する研究は多くあり[3]、ビンガム流体モデルに必要な物性値が測定されている[4]。ビンガム流体モデルを粒子法により定式化した例には、地滑り[5]、雪崩[6]、鉄道車両の排雪現象[7]がある。

図-2は排雪シミュレーションの初期状態、図-3は排雪シミュレーションの結果である。実際の排雪現象では、静止したスノーベッドに走行するスノープラウが突入する現象を扱う。一方で、排雪シミュレーションでは、シミュレーション空間をできるだけ小さい空間に限定したいため、図3のように、静止したスノープラウに、速度をもったスノーベッドが衝突する解析に変換した。図-3では、30m/sの速度をもった雪粒子が、スノープラウに衝突して飛散する様子を観察することができる。

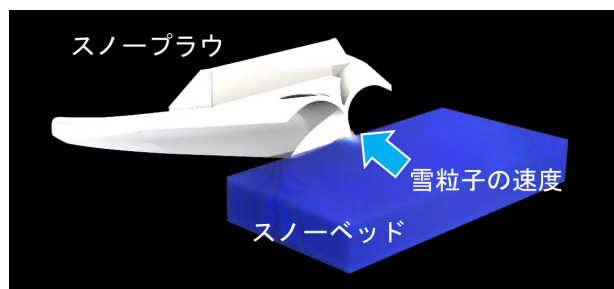


図-2 排雪解析の初期状態

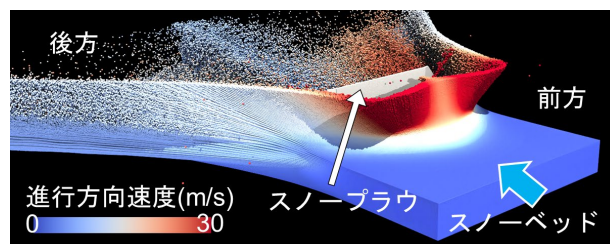


図-3 排雪解析の結果

図-4は、スノープラウにかかる単位面積当たりの排雪力を可視化した結果である。スノープラウ前面とおさえ翼にかかる排雪力が大きいことが分かる。おさえ翼に下から上に向かって排雪力がかかるので、スノープラウに上方向の力がかかることが分かる。さらに、排雪シミュレーションを用いれば、図-4のようなスノープラウにかかる排雪力の分布を求めることができるので、スノープラウ製作の際の部材強度の検討ができるようになる。

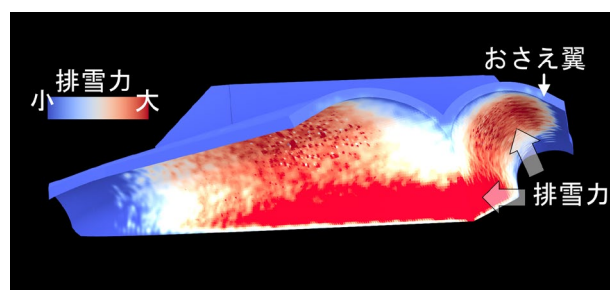


図-4 スノープラウにかかる単位面積当たりの排雪力

3. 連成シミュレーション

スノープラウにかかる排雪力は、鉄道車両の運動にさまざまな影響を与える。ここでは、排雪シミュレーションにより計算されたスノープラウへの排雪力を車両運動シミュレーションに渡し、車両運動シミュレーションで計算された車両の姿勢・移動量を排雪シミュレーションに渡す「排雪シミュレーションと車両運動シミュレーションの連成シミュレーション手法」を開発した(図-5)。以後は略して、「連成シミュレーション」と呼ぶ。なお、車両運動シミュレーションとは、外力による鉄道車両の運動の変化を再現するためのシミュレーション手法であり、ここではマルチボディダイナミクスを用いている。

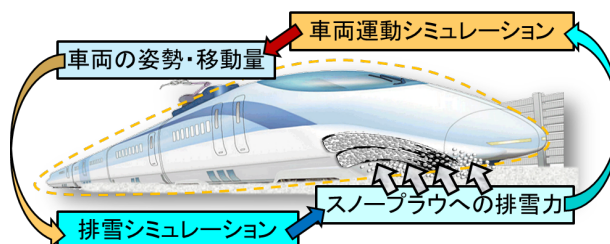


図-5 連成シミュレーション手法の概要

4. 鉄道シミュレータを用いた連成シミュレーション

これまでの研究[1,2]で開発した連成シミュレータに用いた車両運動シミュレータは、Fortranによる鉄道総研の内製プログラムであった。排雪シミュレータはC言語による鉄道総研の内製プログラムであるので、車両運動シミュレータと一括してコンパイルすることで、1つのプログラムとして実行することができた。しかしながら、車両運動シミュレータが内製プログラムであるため、鉄道車両のモデルや走行条件を変更する際に新たな開発と検証が必要となる。そこで今回は、車両運動シミュレータを汎用的な商用ソフトであるSimpackに置き換えることで、様々な鉄道車両や走行条件に対応できるようにした。

図-6は排雪シミュレータと車両運動シミュレーションの連成シミュレーションの実行環境を示している。排雪シミュレーションは、計算コストが大きいためスパコンで実行する必要がある。一方で、SimpackはWindowsの計算機で実行する必要がある。連成シミュレーションでは、それぞれのシミュレータを実行するタイミングの管理とデータ通信に鉄道シミュレータを用いている。

鉄道シミュレータ[8]とは、鉄道総研が開発を進める、鉄道に関するシミュレーションの質の向上と効率化を図るために開発されたシミュレーションシステムである。鉄道シミュレータでは、①個別のシミュレータによる単独実行および複数のシミュレータによる連成実行するための「共通プラットフォーム」、②連成シミュレーションを制御するための「連成マネージャー」、③連成シミュレーションにも対応した「統合可視化ツール」が整備されている。今回は、これまで開発してきた排雪シミュレータを共通プラットフォームに組み込み、連成マネージャーを用いて商用ソフトのSimpackと連成シミュレーションを実施する。

図-7は、排雪シミュレーションと車両運動シミュレーションの連成シミュレーション用の鉄道シミュレータのワークフローである。初期設定、連成シミュレーションの設定、車両運動シミュレーションの設定、排雪シミュレーションのパラメータを設定して、連成シミュレーションのワークフローを作成することで、それぞれのシミュレーションの実行順序を定義する。

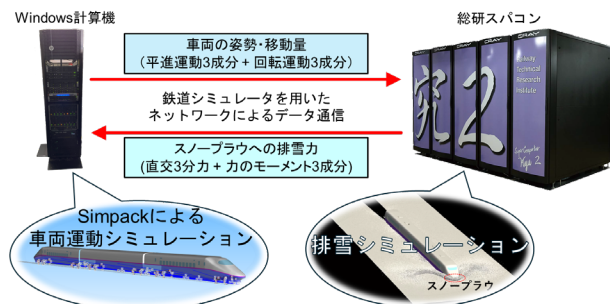


図-6 連成シミュレーションの実行環境

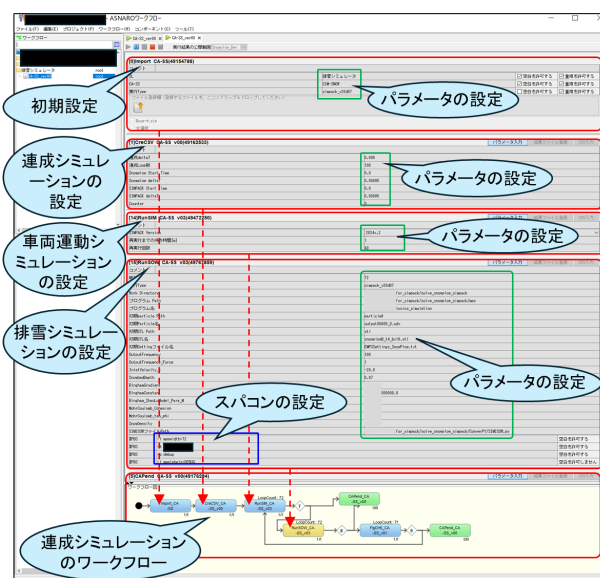


図-7 鉄道シミュレーのワークフロー

5. シミュレーション結果

本章では、Simpackによる連成シミュレーションの結果を示す。図-8は車両運動シミュレーションに用いた鉄道車両モデルと座標系を示している。鉄道車両モデルの構造、車両諸元、形状は、一般的な新幹線車両を模擬した鉄道総研オリジナルのモデルである。なお、今回は3両編成でシミュレーションを実施している。本稿では、排雪シミュレーションの座標系と車両運動シミュレーションの座標系を、理解しやすいように同じ座標系で示す。これは、Simpackのz軸は鉛直下向きが正である座標系を図-8のように変換していることを意味している。排雪シミュレーションでは、ざらめ雪を想定した物性値として、雪密度 490kg/m^3 、塑性粘性係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ 、粘着力 100 Pa 、内部摩擦係数 0.2 を用い、粒子の直径を 1cm とし、進行方向 3.2m 、枕木方向 3.2m 、鉛直方向 1.2m の領域で計算を実施している。車両運動シミュレーションでは、車両に初速 20m/s をあたえ、スノーベッドに突入すると、排雪シミュレーションで計算された排雪力が加えられる。計算時間間隔は 5.0×10^{-5} とし 0.5 秒間のシミュレーションを行った。

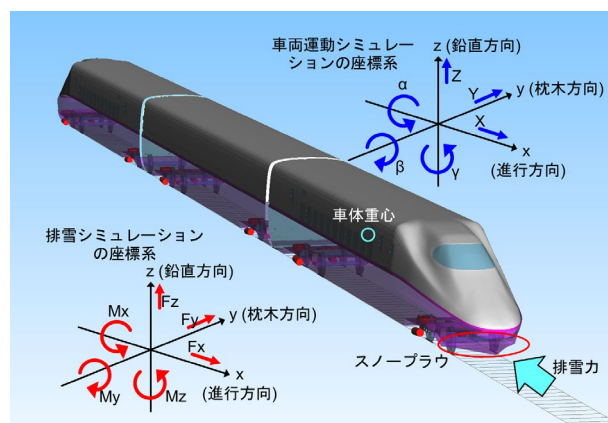


図-8 鉄道車両モデルと座標系

本章では枕木方向にスノーベッドが偏っている場合のシミュレーションを実施する．図-9は，スノーベッドを偏らせた場合のスノープラウ正面に直接当たる場所に記した様子である．なお，排雪深は16cmとしている．図-10は，シミュレーション結果である．スノーベッドがある側から，ない側に排雪された雪が流れて行っていることがわかる．

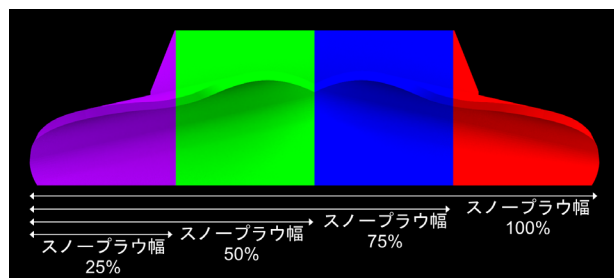
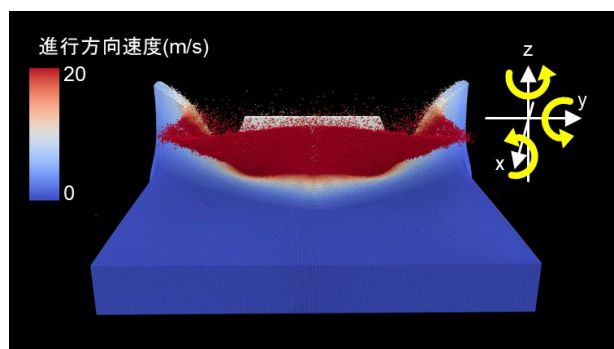
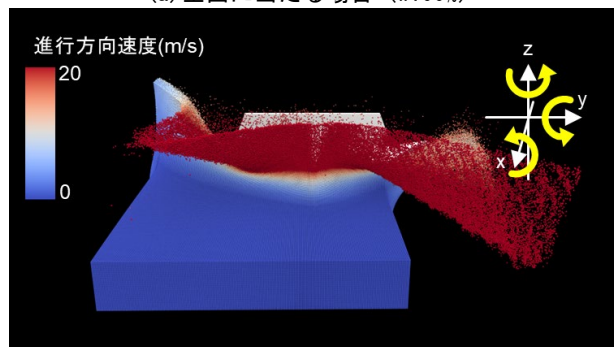


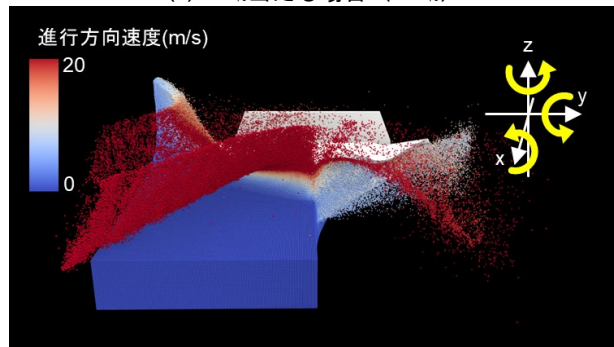
図-9 スノーベッドを偏らせた場合のスノープラウ正面に直接当たる場所



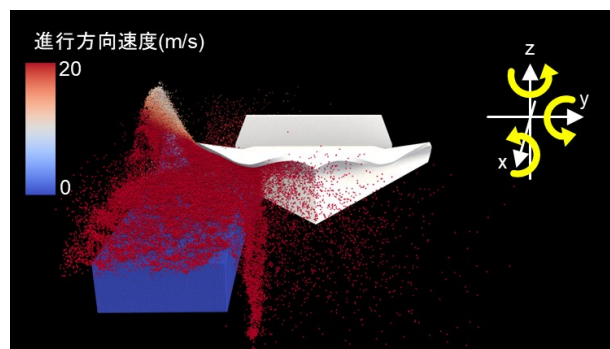
(a) 全面に当たる場合 (w100%)



(b) 75%当たる場合 (w75%)



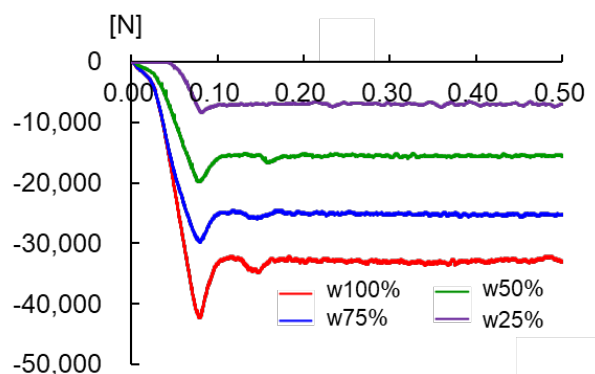
(c) 50%当たる場合 (w50%)



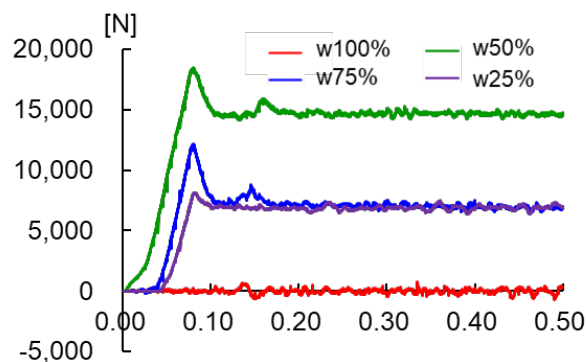
(d) 25%当たる場合 (w25%)

図-10 シミュレーション結果

図-11は，スノープラウにかかる並進力 (F_x, F_y, F_z) と力のモーメント (M_x, M_y, M_z) である．並進力 F_x と F_z は，スノープラウ正面に直接当たる面積が大きくなるほど，大きくなる傾向にあることが分かる．枕木方向にスノーベッドが偏っている場合のシミュレーションでは，スノープラウの右側と左側の差の面積に応じて F_y, M_x が発生することが分かる．ここではw75%とw25%はほぼ同程度の力が発生している．



(a) F_x



(b) F_y

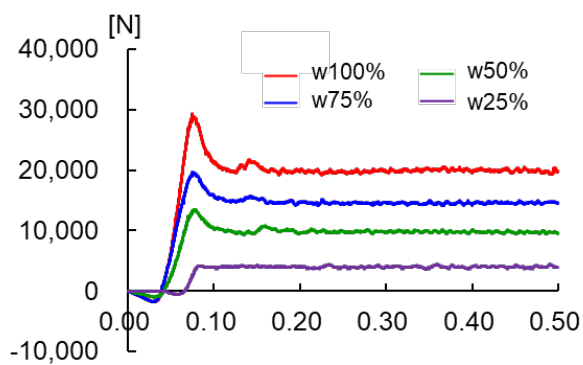
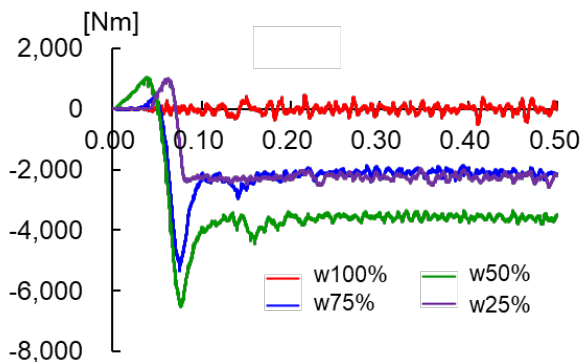
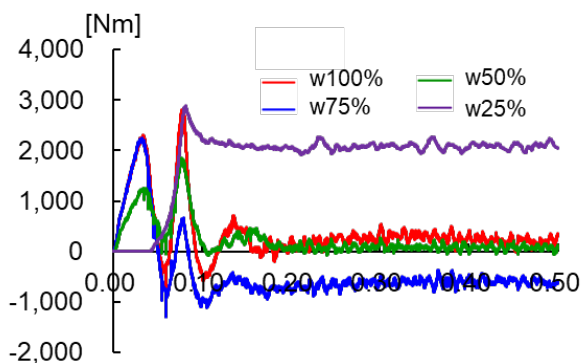
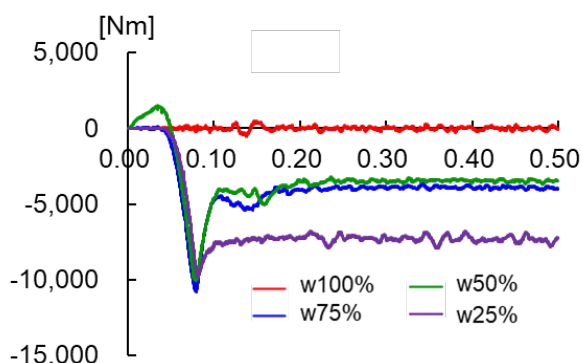
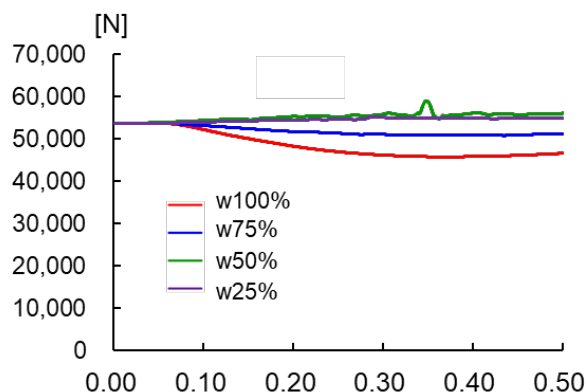
(c) F_z (d) M_x (e) M_y (f) M_z

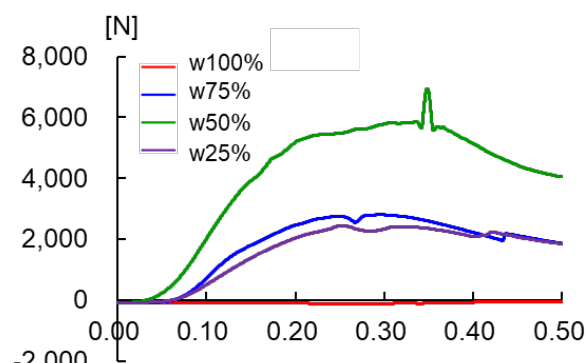
図-11 スノープラウにかかる並進力 (F_x, F_y, F_z) と力のモーメント (M_x, M_y, M_z)

図-12は、先頭車両の第1台車前輪の輪重（車輪とレール間にはたらく上下方向の力）、横圧（車輪とレール間にはたらく左右方向の力）、脱線係数（脱線に対する走行安全性の評価指標で、横圧を輪重で除した値）である。輪重は

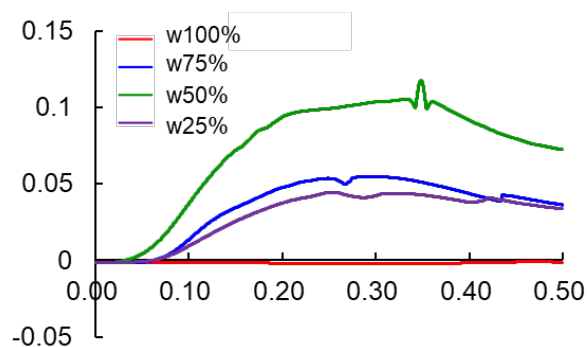
初期の54kNから時間経過とともに減少する傾向にある。横圧と脱線係数は、概ね F_y に応じた力により発生していることが分かる。脱線係数は、中央から半分が雪である場合に、最も大きくなり0.12程度になることが分かる。



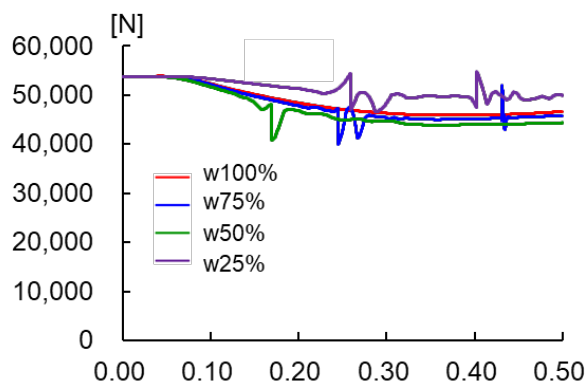
(a) 左車輪輪重



(b) 左車輪横圧



(c) 左車輪脱線係数



(d) 右車輪輪重

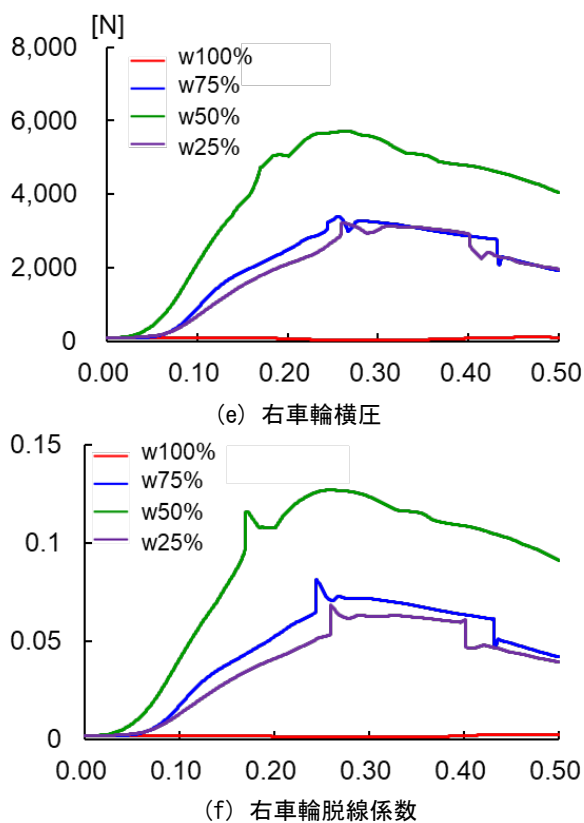


図-12 輪重、横圧、脱線係数

6. まとめ

これまでの研究で開発した連成シミュレータに用いた車両運動シミュレータは、Fortranによる鉄道総研の内製プログラムであった。排雪シミュレータはC言語による鉄道総研の内製プログラムであるので、車両運動シミュレータと一括してコンパイルすることで、1つのプログラムとして実行することができた。しかしながら、車両運動シミュレータが内製プログラムであるため、鉄道車両のモデルや走行条件を変更する際に新たな開発と検証が必要となる。そこで今回は、車両運動シミュレータを汎用的な商用ソフトであるSimpackに置き換えることで、様々な鉄道車両や走行条件に対応できるようにした。

排雪シミュレーションは、計算コストが大きいためスパコンで実行する必要がある。一方で、SimpackはWindowsの計算機で実行する必要がある。連成シミュレーションでは、それぞれのシミュレータを実行するタイミングの管理とデータ通信に鉄道シミュレータを用いた。その結果、鉄道シミュレータのワークフローを変更すれば、パラメータ設定や連成方法などを簡単に変更することが可能となった。

解析例として、枕木方向にスノーベッドが偏っている場合のシミュレーションと実施した。進行方向の並進力と鉛直方向の並進力はスノープラウ正面に直接当たる面積が大きくなるほど大きくなる傾向にあることが分かった。枕木方向の並進力は、スノープラウの右側と左側に当たる雪の面積差に応じて発生することが分かった。その

ため、スノーベッド全面に右側ら25%当たる場合と75%当たる場合は、同程度の枕木方向の並進力が発生することが分かった。その結果、スノーベッド全面に右側から25%当たる場合と75%当たる場合は、同程度の横圧が発生し、同程度の脱線係数となることが分かった。このようにして、仮想的な条件においても、脱線係数などを求めることが可能となり、走行安全性の評価に用いることができるようになった。

参考文献

- [1] 室谷浩平, 石井秀憲, 鎌田慈, 辻澁樹, 坂本裕一郎: 排雪模型実験によるスノープラウの排雪シミュレーションの開発, 雪氷研究大会, 2022.
- [2] 室谷浩平, 齋藤理沙, 坂本裕一郎, 石井秀憲, 鎌田慈, 辻澁樹: 排雪模型実験による排雪走行時の車両運動解析手法の開発, 雪氷研究大会, 2023.
- [3] 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫: 基礎雪氷口座第Ⅲ巻「雪崩と吹雪」, 古今書院, 2000.
- [4] 上石勲, 町田敬, 小田憲一, 山口悟, 佐藤篤司: 雪粒同士の結合が弱い湿雪の粘着力と内部摩擦角の測定. 雪氷研究大会, 2009.
- [5] 五十里洋行, 後藤仁志, 新井智之: 粒子法型非ニュートン流体モデルによる地滑り津波解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68 巻, 2 号, pp.I_66-I_70, 2012.
- [6] 齋藤佳彦: Explicit-MPS 法による雪崩数値シミュレーションの検討, 雪氷, 84 巻, 4 号 pp.263-281, 2022.
- [7] Tao, Y., Shibata, K. and Koshizuka, S.: A Bingham Snow Model for Train Safety Built Using the Moving Particle Semi-implicit Method, *Transactions of JSCEs*, Paper No.20170010, 2017.
- [8] 上半文昭: 鉄道シミュレータの構築, 鉄道総研報告, Vol.34, 8, pp.1-4, 2020.