

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：13102  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22651063  
 研究課題名（和文） 三次元動的シミュレーション解析に基づく除雪機械の安全防護システムの探求  
 研究課題名（英文） Exploration of the Safeguarding System for Snow Removal Machinery Based on Three Dimensional Dynamic Simulation Analysis  
 研究代表者  
 阿部 雅二郎（ABE MASAJIRO）  
 長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授  
 研究者番号：60212552

研究成果の概要（和文）：除雪機械の安全性を合理的に革新するため、機械と雪よりなる力学系の解析を高精度に実行できる三次元動的シミュレーション解析方法を構築した。実際の除雪状況に近い条件下での実験解析より得られた雪の特性を用いた構築した方法による動的シミュレーション解析に除雪時動特性の実験解析を併用して総合考察した。除雪機械前方部の圧力など力情報による雪中障害物検知システムの実現可能性を示したほか、安全防護ガードも考案して試作しその有用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：To innovate on the safety of snow removal machinery rationally, we have constructed a method to conduct three dimensional and dynamic simulation analysis of dynamical systems which consist of machinery and snow. Simulation analysis by using snow characteristics obtained from experiments under the near conditions of actual snow removal together with experimental analysis were carried out and those results were studied synthetically. A system to detect objects in snow with force information like pressure on the front part of the machinery was investigated and the possibility was shown. Moreover, some guards for safety were designed and made and the availability was verified.

交付決定額

（金額単位：円）

|          | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|----------|-----------|---------|-----------|
| 平成 22 年度 | 900,000   | 0       | 900,000   |
| 平成 23 年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 平成 24 年度 | 200,000   | 60,000  | 260,000   |
| 年度       |           |         |           |
| 総計       | 3,100,000 | 660,000 | 3,760,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 社会システム工学・安全システム

キーワード：建設機械、雪氷、機械力学・制御、シミュレーション工学、安全防護

### 1. 研究開始当初の背景

わが国の重大な問題として、国土の約 6 割を占める積雪寒冷地域における除雪時の安全問題がある。また、少子高齢化社会に突入し、人力除雪範囲の縮小、熟練機械運転者不

足により、機械による除雪範囲の拡大および除雪の質の向上が強く求められている。この要望を受け、安全性の不十分な除雪機械の投入範囲が拡大されつつある。図 1 に示すように機械による除雪は、吹雪等の荒天時や夜間

に行われることが多い。ロータリ除雪機械においては、機械運転者は剥き出しの危険源である除雪装置を高速回転させ運転することとなる。現行除雪機械の安全装置は「機械を守る」ためのもので、雪以外の人間を除く硬質な障害物に除雪装置が接触した際の過負荷による機械損傷を防ぐためのものである。人間との接触による危険状態の回避は運転者が目視と勘で機械の動作を停止させることに頼っている。これは重大な危険源を有する除雪機械と人間の接触事故発生の可能性を増大させる。安全性の問題が噴出することは想像に難くないが、除雪機械の安全性に係る技術開発は停滞期にあり、遅々として進んでいない。



図1 荒天時の歩道除雪の例

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、前述した状況にあるロータリ除雪機械の安全性を合理的に革新するため、(1) 機械と雪よりなる力学系解析を高精度に実行できる「三次元動的シミュレーション解析方法」を構築すること、(2) 構築した方法による動的シミュレーション解析に除雪時動特性の実験解析を併用して総合考察し、雪中障害物検知をはじめ安全防護システムの確立に先鞭をつけることである。雪中障害物検知では、ロータリ除雪機械が意図せず発信する圧力波を活用する方法を探求する。

## 3. 研究の方法

除雪機械の中でも、特にロータリ除雪機械の安全性革新を合理的かつ効率的に推進することを目的に、その基盤として活用できるロータリ除雪機械の「三次元動的シミュレーション解析方法」を構築し解析考察する。構築する解析方法は除雪時動特性の実験解析結果により逐次検証する。接触特性モデルの動的相互作用を中心に「解析精度向上」および「解析時間短縮」のため改良する。

ロータリ除雪により生じる圧力の伝播特性を動的シミュレーション解析と実験解析により明らかにし、除雪機械の革新的な安全防護システムとして、力情報による雪中障害物検知システムの基盤構築を図る。さらに、安全防護性能と除雪性能の両立を可能とする安全防護ガードについても動的シミュレーション解析と実験解析により検討考察する。

内容の詳細は以下の通りである。

### (1) 三次元動的シミュレーション解析

動的シミュレーション解析方法は、雪のような不連続体の解析に適している個別要素法 (DEM) を基盤とする。図2に示すように、雪粒子の集合体を球要素 I、J とみなしてモデル化する。球要素モデル同士および球要素モデルと除雪機械の作業装置モデルの接触特性を、雪同士および雪と作業装置材料の動的相互作用特性に応じて、接触点三軸方向に弾性スプリング、粘性ダッシュポットおよびスライダを組み合わせて表現する。任意の三次元形状に対応できる除雪機械の作業装置およびシュートの自由曲面モデルを作成し、球要素モデルとの高速・高負荷接触時における演算を行う。除雪機械モデルおよび球要素モデルよりなる力学系モデルに対する運動方程式を導出し、数値積分して解析する。これにより、作業機械との三次元動的相互作用下における雪の高速流動特性が解析できる。除雪機械に作用する圧力等の負荷特性も解析できる。

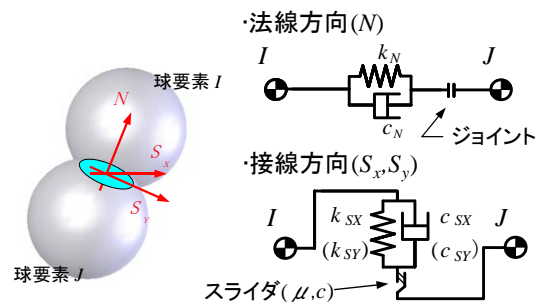


図2 球要素の三次元接触モデル

### (2) 安全防護システムの探求の方法

#### ①雪中障害物検知システム

図3に除雪機械より生み出されると考えられる圧力の伝播のイメージを示す。この圧力伝播を利用する雪中障害物検知システムを構築するため、図4に示すようなロータリ除雪機械による除雪時動特性の実験解析を構築し、三次元動的シミュレーション解析で設定する環境と同等条件下にて実施し、除雪機械と雪中障害物間における圧力伝播特性を解析する。除雪装置前方で雪に貫入するギア部前面圧力のほか、力情報としてオーガ・プロワ回転軸トルクも測定する。合わせて、除雪装置との三次元動的相互作用により生み出される雪の高速流動特性を高速度ビデオカメラを用いた解析より考察する。除雪機械による全体除雪状況の解析も同ビデオカメラを用い同時に実施する。これにより、圧力の伝播特性やトルク変動特性と雪の高速流動特性との相関性を解明し、力情報による雪中障害物検知システムの基盤構築につなげる。

## ②安全防護ガード

実用性が高い安全防護方法として、危険源である高速回転するロータリオガ部への安全防護ガードの装備が考えられるが、安全防護性能と除雪性能の両立について十分な検討が求められる。構築する三次元動的シミュレーション解析システムを活用して、実用的な安全防護ガードの形状を検討し、安全防護性能と除雪性能を両立した安全防護ガードを実験による有用性検証も行いながら検討する。

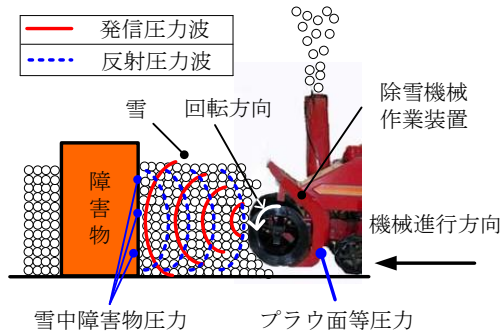


図3 圧力伝播のイメージ

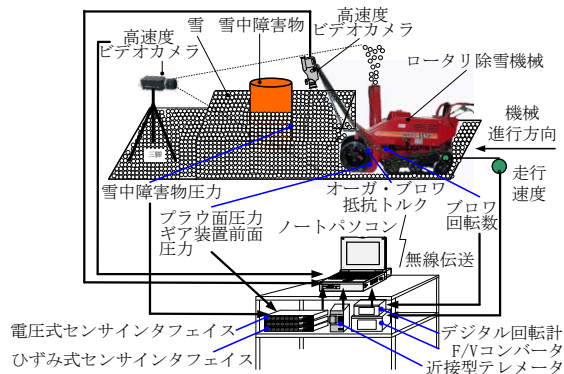


図4 ロータリ除雪時動特性の統合実験解析システム

## 4. 研究成果

### (1) 三次元動的シミュレーション解析システムの構築

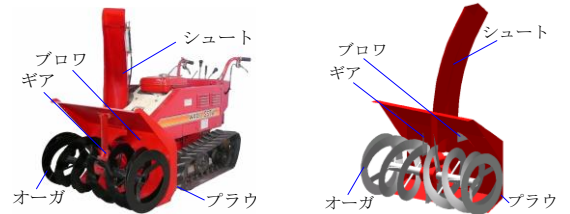
#### ①解析システムの内容

本研究では、図5(a)に示すような、熟練を必要としない各家庭においても広く用いられる家庭用自走式除雪機(和同産業株式会社、SS-7W)を解析の対象とした。ロータリ除雪機械は除雪を行う除雪部と、移動するための走行部によって構成される。ロータリ除雪機の除雪部と雪を排出するシュートを図5(b)のようにモデル化した。

図6に、構築した動的シミュレーション解析の全体フローチャートを示す。構築した動的シミュレーション解析方法より、力情報などの様々な動的シミュレーション解析結果が得られる。

## ②解析システムの高度化

動的シミュレーション解析の精度は、接触特性、球要素半径、解析の時間刻みによって大きく変化する。解析に用いる接触特性は、実際の除雪状況に近い条件下で実施する雪と機械材料間等のせん断特性等実験解析より求めた。



(a) モデル化対象実機 (b) ロータリ除雪機械解析モデル

図5 動的シミュレーション解析モデル

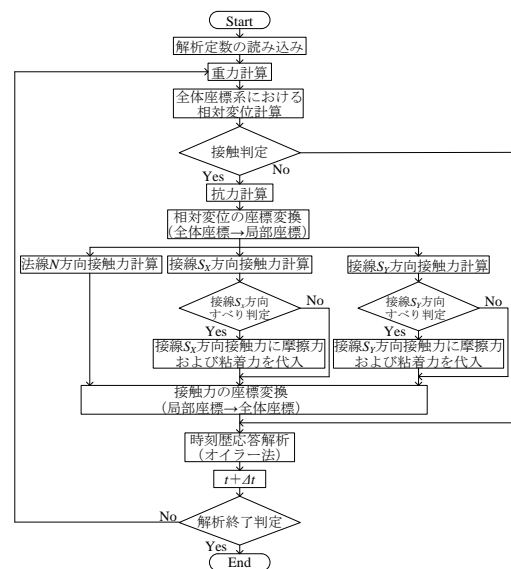


図6 動的シミュレーション解析の全体フローチャート

今後、「解析精度向上」以外に「解析時間短縮」を図るため並列化処理の検討導入も必要である。

### (2) 安全防護システムの基盤構築

#### ①雪中障害物検知システムの基盤構築

図4に示したロータリ除雪時動特性の統合実験解析システムより、動的シミュレーション解析方法の有用性を検証した後、雪中に障害物が存在した場合、除雪機械が積雪から受ける力情報を動的シミュレーション解析および実験解析し考察した。

しまり雪またはざらめ雪よりなる積雪を除去する実験解析を行った。除雪時の力情報として除雪機械のオーガ・ブロー合成抵抗トルクを測定した。除雪機械が積雪を除去する際、除雪装置前方部と雪中障害物にそれぞれ作用する圧力も測定した。図7に実験解析における圧力測定部の概略を示す。



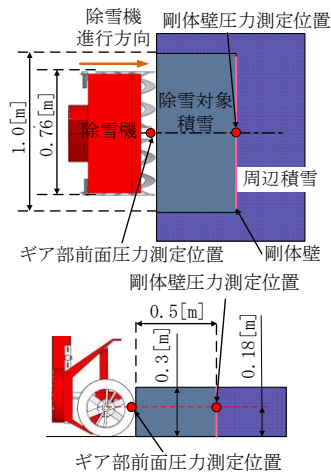


図7 圧力測定部の概略

図8にオーガ・ブロウ合成抵抗トルクと走行速度の関係について、動的シミュレーション解析結果と実験解析結果を示す。オーガ・ブロウ合成抵抗トルクは除雪機械の走行速度が大きくなると平均値および最大値はどちらも大きくなる傾向にある。図9にはギア装置前面圧力と走行速度の関係について同様に動的シミュレーション解析結果と実験解析結果を示す。走行速度によらずギア装置前面圧力の平均値は動的シミュレーション解析結果と実験解析結果はおおむね一致している。最大値は除雪機械の走行速度が大きくなると動的シミュレーション解析値が大きくなる傾向にある。

図10に除雪時における雪の流動状況について、動的シミュレーション解析結果と実験解析結果を示す。動的シミュレーション解析では、ギア装置前方の球要素はギア装置の左右のオーガによって崩された球要素とともにオーガに掻き込まれていく。一方、実験解析ではギア装置が前方の雪を圧縮していくことで、ギア装置前方の積雪が隆起している。

実験解析をより模擬できる動的シミュレーション解析とするには、球要素モデルの半径のほか、球要素モデルと除雪機械モデルの接触特性のさらなる検討が必要であるが、走行速度変化に伴うトルク等の変化の傾向はおおむね一致しており、安全防护システムの構想あるいは基本設計には本研究で構築した動的シミュレーション解析方法は有用であると考えられる。

図11に雪中剛体壁圧力と走行位置の関係を示す。動的シミュレーション解析と実験解析のいずれにおいても剛体壁圧力は除雪機械が壁に近づいたときに大きくなることから、機械除雪時に積雪に圧力が伝播していることが確認できる。ただし、除雪により生じる圧力と障害物に接近したことにより付加される圧力を区別する方法の検討が必要である。

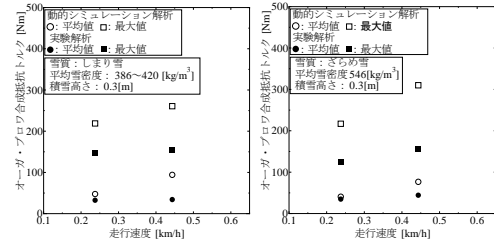


図8 オーガ・ブロウ合成抵抗トルクと走行速度の関係

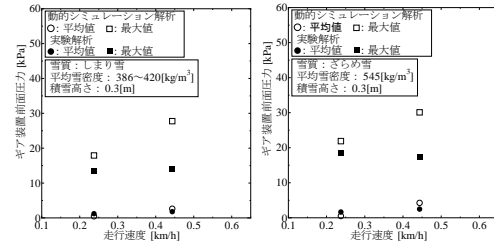
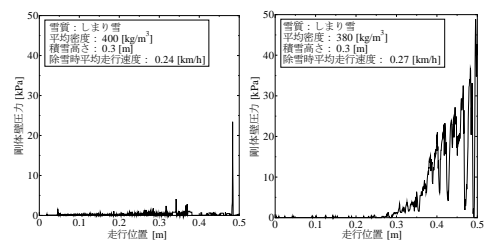


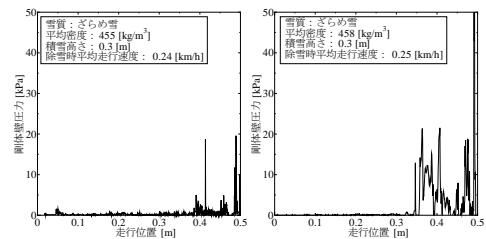
図9 ギア装置前面圧力と走行速度の関係

| 除雪距離 [m] | 動的シミュレーション解析 | 実験解析 |
|----------|--------------|------|
| 0.00     |              |      |
| 0.05     |              |      |
| 0.10     |              |      |

図10 除雪時における雪の流動状況 (雪質：しまり雪、密度：386kg/m<sup>3</sup>、積雪高さ0.4m、走行速度：0.27km/h、)



(a) 動的シミュレーション解析 (b) 実験解析



(c) 動的シミュレーション解析 (d) 実験解析

図11 雪中剛体壁圧力と走行位置の関係

以上、図 8 から図 11 に示した結果より、圧力情報を用いて除雪機前方に存在する雪中障害物を検知できるシステム構築の可能性を示した。

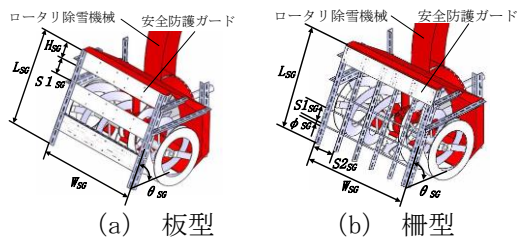
今後、雪中の圧力伝播特性や除雪時に除雪機械が受ける抵抗力をさらに詳しく解析し、力情報による雪中障害物検知システムを実用化できれば、雪中障害物と接触する前に機械運転者等に警告し、状況に応じて自動停止するシステムの開発などにつながると考えられる。

## ②安全防護ガードの設計および試作評価

実用的な安全防護対策として安全防護ガードについて検討した。危険源である雪を高速で掻き込むオーガ部に幼稚園や保育園に通うようになる3歳の幼児の頭部が巻き込まれないようなガードを設計し試作評価した。幼児の平均の頭幅(0.14m)、頭長(0.166m)として考慮した。

図 11 (a)、(b) に試作した2タイプの安全防護ガードの概略を示す。表 2 および 3 にはそれぞれの安全防護ガードの主要諸元を示す。

安全防護ガードによる除雪性能の低下はできるだけ少ないことが望まれる。安全防護ガードが除雪性能に及ぼす影響を考察するため、次式より求まる除雪能率を算出する。



(a) 板型 (b) 柵型  
図 11 安全防護ガードの概略

表 2 板型安全防護ガードの主要諸元

| 項目                                  | 値     |
|-------------------------------------|-------|
| 板長さ : $W_{SG}$ [m]                  | 0.730 |
| 板高さ : $H_{SG}$ [m]                  | 0.100 |
| 板厚 : $D_{SG}$ [m]                   | 0.003 |
| 柱の長さ : $L_{SG}$ [m]                 | 0.600 |
| 切削角 : $\theta_{SG}$ [°]             | 60    |
| 隙間 : $S1_{SG}$ [m]                  | 0.100 |
| 前面投影面積 : $A_{SG}$ [m <sup>2</sup> ] | 0.230 |

表 3 柵型安全防護ガードの主要諸元

| 項目                                  | 値     |
|-------------------------------------|-------|
| 円柱長さ : $W_{SG}$ [m]                 | 0.730 |
| 円柱直径 : $\phi_{SG}$ [m]              | 0.010 |
| 板厚 : $D_{SG}$ [m]                   | 0.003 |
| 柱の長さ : $L_{SG}$ [m]                 | 0.600 |
| 切削角 : $\theta_{SG}$ [°]             | 60    |
| 隙間(高さ) : $S1_{SG}$ [m]              | 0.100 |
| 隙間(幅) : $S2_{SG}$ [m]               | 0.150 |
| 前面投影面積 : $A_{SG}$ [m <sup>2</sup> ] | 0.120 |

$$E_{sr} = \frac{V_s \times \rho_s - V_{ls} \times \rho_s}{V_s \times \rho_s} \times 100$$

ここで、 $E_{sr}$  [%] : 除雪能率、 $V_s$  [m<sup>3</sup>] : 除雪予定体積、 $V_{ls}$  [m<sup>3</sup>] : 残雪体積、 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] : 平均積雪密度である。実験解析では、除去予定の雪質量に対する除去した雪質量の割合、シミュレーション解析では、シュートから投雪された球要素の質量を、除雪予定の球要素質量で除することによって除雪能率を算出した。

表 4 に安全防護ガードの除雪能率に及ぼす影響をまとめて示す。図 12 にはシミュレーション解析より得られた除雪能率の低下率と安全防護ガード前面投影面積の関係を示す。安全防護ガードの前面投影面積を極力小さくすることで除雪能率の低下を抑えることができる。

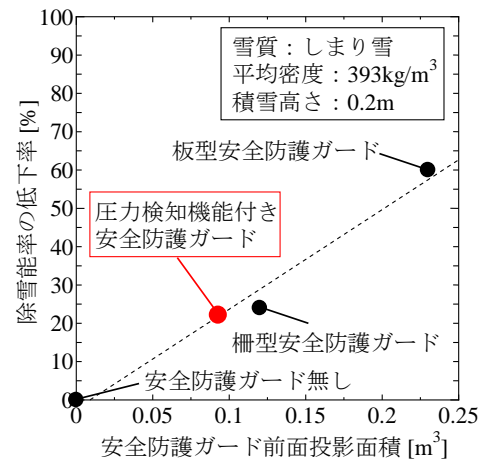


図 12 動的シミュレーション解析より得られた除雪能率の低下率と安全防護ガード前面投影面積の関係

表 4 安全防護ガードの除雪能率に及ぼす影響

| 雪質   | 密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 安全防護ガード | 低下率 [%]      |      |
|------|-------------------------|---------|--------------|------|
|      |                         |         | 動的シミュレーション解析 | 実験解析 |
| しまり雪 | 366                     | 無       | 0            | 0    |
|      | 438                     | 板型      | 60           | 47   |
|      | 355                     | 柵型      | 24           | 13   |

### ③安全防護システムの提案

①に述べた力情報による障害物検知システムと②に述べた安全防護ガードを組み合わせた安全防護システムとして、図 13 に示す安全防護システムを提案した。安全防護ガードに障害物検知用の圧力センサを取り付け、障害物を検知しながら万が一の際に障害物がオーガ部に侵入することを防ぐシステムである。表 5 に同システムの主要諸元を示す。ガードの隙間寸法は、3 歳幼児の頭部巻き込みを、ガード前面投影面積は除雪能率の大幅低下をそれぞれ防ぐよう設定した。同システムの安全防護ガード前面投影面積  $A_{SG}$  は  $0.09[m^3]$  であり、実験検討した柵型安全防護ガードのそれよりも小さい。図 12 に示した、安全防護ガード前面投影面積と除雪能率の低下率の関係より、この安全防護ガードの除雪能率低下率は約 20%と予測され、安全防護性能と除雪性能をかなり両立できる。

今後も、動的シミュレーション解析と実験解析を併用しより実用的な安全防護システムを検討していく予定である。

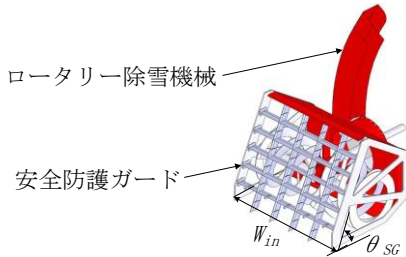


図 13 障害物検知機能付き安全防護ガード

表 5 障害物検知機能付き安全防護ガード  
主要諸元

| 項目                          | 値                   |       |
|-----------------------------|---------------------|-------|
| 内側長さ : $W_{in\_SG}[m]$      | 0.780               |       |
| 外側長さ : $W_{out\_SG}[m]$     | 0.792               |       |
| 柵縦部品                        | 最大厚み : $D1_{SG}[m]$ | 0.017 |
|                             | 長さ : $L1_{SG}[m]$   | 0.662 |
| 柵横部品                        | 最大厚み : $D2_{SG}[m]$ | 0.010 |
|                             | 長さ : $L2_{SG}[m]$   | 0.780 |
| 切削角 : $\theta_{SG}[^\circ]$ | 60                  |       |
| 隙間 (高さ) : $S1_{SG}[m]$      | 0.108               |       |
| 隙間 (幅) : $S2_{SG}[m]$       | 0.156               |       |
| 前面投影面積 : $A_{SG}[m^3]$      | 0.09                |       |

### 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 1 件)

Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Fumiyasu Saito, Keisuke Takahata, Katsumi Iwamoto, Three-Dimensional Dynamic Simulation Analysis of Snow Removal Characteristics of Rotary Equipment,

Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 5, 2011, pp. 982-993, DOI:10.1299/jsdd.5.982

[学会発表] (計 5 件)

① 藤野俊和, 阿部雅二朗, 仙尊帆, 丸藤皓平, 岩本勝美: 雪と機械材料および雪内部のトライボロジー特性 — 環状せん断特性実験解析システムの構築 —, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2012 秋, 2012. 9. 17, pp. 213-214, 室蘭

② Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Keisuke Takahata, Kunitomo Tsuyoshi: Motion and resistance characteristics of snow removal by rotary equipment, Proceedings of The 7<sup>th</sup> International Conference on Snow Engineering, 2012. 6. 7, pp. 162-175, Fukui

③ Tomoyuki Irisawa, Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Fundamental Analysis of Response Characteristics of Snow to Dynamic Compression Loadings, The 1st International GIGAKU Conference in Nagaoka, 2012. 2. 4, Nagaoka University of Technology

④ Keisuke Takahata, Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Three-Dimensional Dynamic Simulation Analysis of Snow Removal Characteristics of Rotary Equipment, Joint Seminar Between Shanghai Jiaotong University and Nagaoka University of Technology, 2010. 11. 5, Nagaoka University of Technology

⑤ Keisuke Takahata, Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Three-Dimensional Dynamic Simulation Analysis of Snow Removal Characteristics of Rotary Equipment, The 10th International Conference on MOTION AND VIBRATION CONTROL (MOVIC2010), 2010. 8. 18, University of Tokyo

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 雅二朗 (ABE MASAJIRO)

長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授

研究者番号 : 60212552

(2) 研究分担者

仲川 力 (NAKAGAWA CHIKARA)

舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号 : 70249811

藤野 俊和 (FUJINO TOSHIKAZU)

長岡技術科学大学・工学・助教

研究者番号 : 70508514