

令和元年6月17日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01278

研究課題名(和文) 車両走行により自然発生する路面凹凸パターン：安全性向上に向けた科学的形成機構解明

研究課題名(英文) Spontaneous Corrugation on Road Surface due to Moving Vehicles: Scientific Study on the Formation Mechanism for Safety

研究代表者

蟹江 俊仁 (Kanie, Shunji)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：10332470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：理論・実験・実地観測という3つのアプローチによる理論と立証の繰返しにより、凹凸パターンの静的分布形態や動的成長過程を含めた形成機構の科学的解明に取り組んだ。特に路面材料については、砂、粘土、粒状体、人工雪など様々な素材を適用し、その湿潤度や密度、温度条件等を変化させながら、形成機構に関わる影響因子の特定や、数理・物理モデルに基づく予測・制御方法の提案を試みた。その結果、パターン形成問題についての物理的な面からの現象説明は大きく進んだものと考えている。また積雪凍結路面に発生するそろばん道路についても、発現の予測や予報も可能となり、今後の道路管理に必要な情報提供が可能なレベルに到達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凹凸発生メカニズムに関する物理的現象面からの説明は、概ねできるようになったと考えており、数値シミュレーション結果も妥当な結果を示している。また、発生に関わる予測や予報も実用レベルに近いところまで完成しており、冬季の積雪凍結路面における道路管理に有効な情報提供ができるようになったと考える。また、物理現象面での説明が概ね可能になったことから、抑止や防止に関わる知見も得られたと考えており、冬季道路利用者の安全性向上に寄与できるものと信じている。

研究成果の概要(英文)：This research consists of theoretical study, reproduction experiment and on-site observation. In the experiment, various road materials such as dry sand, silt, glass beads and artificial snow are adopted to reproduce the spontaneous corrugation with varying their density, water content and temperature to observe the formation mechanism. Because of this research, the physical process of formation is almost explained by a numerical simulation based on the experimental results. In addition, it becomes possible to forecast the occurrence by comparing the on-site observation with the meteorological data obtained at the closest station.

We believe that the findings through this research contribute to provide important information for road administration during winter.

研究分野：構造工学、寒地環境工学

キーワード：そろばん道路 積雪凍結路面 走行車両 生成メカニズム 安全性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車の繰返し走行により、未舗装路で自然発生する周期的な凹凸起伏は、「洗濯板道路 (Washboard road)」として知られている (写真-1)。この現象により走行車両には小刻みな振動が発生する上、タイヤと道路との接地面積を大幅に減少させ、タイヤのグリップ力を著しく低下させるなど、走行快適性と安全性に大きな影響を与えることになる。しかし、その発生機構の科学的解明は未だされておらず、近年では農地におけるトラクターの鍬の稼働効率向上等に関わる研究等にとどまっている。

一方、自動車の走行により積雪・凍結路面に自然発生する凹凸起伏は「そろばん道路 (写真-2: 提案者らの観測結果)」と呼ばれ、走行車両の制動不良やスピン事故などの深刻な車体制御問題の原因として、広く認知されている。この現象はスパイクタイヤが使用禁止となり、スタッドレスタイヤが広く普及するようになって以降、特に顕在化してきているとも言われており、雪氷関連の研究者の間でも近年特に注目を集めている。しかし、気象条件や路面条件等と観測結果との比較検証による定性的研究までにとどまっており、形成機構の科学的解明にまで踏み込んだものはない。



写真-1 凹凸起伏が自然発生した未舗装路の一例



写真-2 積雪凍結路面の凹凸起伏の観測結果 (そろばん道路)

このような背景のもと、提案者らはこれらの現象が、「離散粒状体と仮定できる砂利やグラベル」と、「凍結・融解作用等を経て離散的にも連続体的にも挙動する雪氷」という素材特性面での大きな相違点を有しながらも、非線形科学に属する自己組織的なパターン形成問題であるという共通点に着目し、平成 26-27 年度の挑戦的萌芽研究テーマ「悪路で自然発生する波状起伏の機構解明とそれに基づく道路管理技術の新構築」を通じて、科学的アプローチによる形成機構の解明に挑んできた。

この挑戦的萌芽研究では、理論・実験・実地観測という異なる三つのアプローチから、凹凸パターンが自然発生する機序解明に取り組み、それぞれに貴重な知見を得ることができた。まず、理論的アプローチでは、車両のサスペンションによる上下振動と車重による路面圧縮効果、ならびに砂利/雪氷の飛散・変形効果を取り入れた数理モデルを構築し、時間的・空間的な調和振動解の誘導を経て、影響因子の物理的意味や相互作用について検証を行った。一方、実験的なアプローチでは、車両を模した振動子が砂や雪氷といった整形路面上を走行することにより、凹凸起伏が自然発生的に形成される室内実験装置の製作に成功し (写真-3)、再現性の高い実験が行われている。実地観測においては、国道管理者のもとで路面管理技術を研究する協力者とともに、冬期間の連続的な路面観察を実施し、気温・路温・降雪量・積雪量等との関連性を精査してきた。

これらの学術的背景に基づき、実験における人工雪の導入や環境因子の変化などを広範に研究し、すでに手掛けている数理モデルの改良や実地観測との比較検証などを重ねることにより、世界初の機構解明に繋がるものと自信を深めており、その成果は今後の道路交通の安全性向上に大きく寄与するものと確信するに至った。

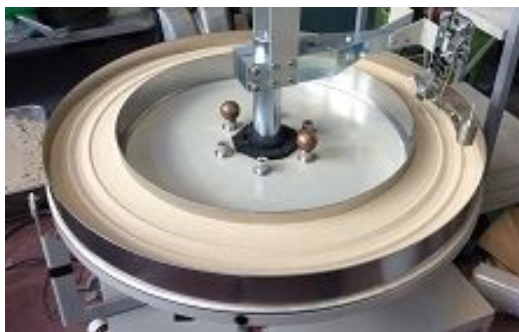


写真-3(a) 実験開始直前の室内実験装置

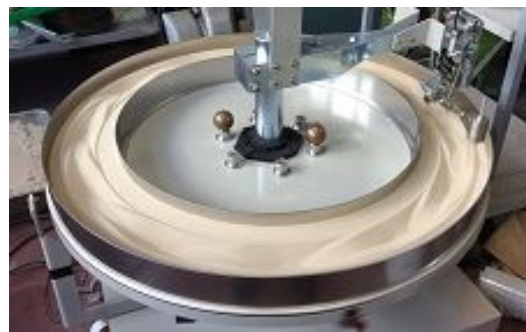


写真-3 (b) 自然発生した波状起伏の様子

2. 研究の目的

アスファルトやコンクリートなどで舗装された路面でも、その表面に積雪や凍結が見られる場合、自動車の繰返し走行により原因不明の周期的な凹凸パターンが、自然発生的に形成されることが知られている。一方、農道や林道、発展途上国における未舗装路などでも、同様の凹凸起伏が発生しており、これらの形成機構を科学的アプローチで解明する。これにより、これまで経験的かつ対処療法的にしか対処できなかった従前の道路管理技術に対し、本研究の成果を活かした新しい道路管理技術を提案し、安全性向上に寄与することを目的とする。

本研究課題は、砂利やグラベルと言った未舗装道路を構成する材料から、舗装路面上の積雪・凍結氷といった、一見すると異なる素材特性を有しながら、自己組織的なパターン形成問題であるという数理・物理現象面での共通点に着目して、その形成機構を科学的アプローチで解明しようとするもので、他に類似研究のない世界でも初めての独創的な試みである。また、すでに試験的に作製した室内実験装置は、砂や雪氷といった幅広い材料の適用が可能で、常温から低温まで温度管理ができる恒温室内で行う実験と、冬期間の連続的な観測記録の検証は、複雑かつ多数の影響因子による感度分析評価から、様々な物理過程をもたらす普遍則の導出にもつながり、現象論を超えた新たな法則や知の獲得を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究は、理論・実験・実地観測という3つのアプローチによる理論と立証の繰返しにより、凹凸パターンの静的分布形態や動的成長過程を含めた形成機構の科学的解明を目指すものである。特に路面材料については、砂、粘土、粒状体、人工雪（高分子吸水ポリマー）など様々な素材を適用し、その湿潤度や密度、温度条件等を変化させながら、形成機構に関わる影響因子の特定や、数理・物理モデルに基づく予測・制御方法の提案を試みた。これらの成果が、積雪・凍結路面や未舗装道路における安全性と快適性維持のための管理指針作成の一助となることを目指すものである。以下に3つのアプローチを具体的に記す。

- (1) 理論：数理・物理モデルの構築と解の誘導、および数値シミュレーションコードの開発
- (2) 実験：独自に作製した実験装置による様々な環境条件下での成長過程の再現実験実施
- (3) 観測：定点カメラによる未舗装路・積雪凍結道路における動態観測と分布計測調査の実施

4. 研究成果

自己組織的なパターン形成問題としての数理・物理現象を再現するために、車両に見立てた振動子（写真-4）の接地圧や固有周期を変化させながら多数の実験を行なった。その結果、最も現象の再現性の高い乾燥砂を用いた実験においては、接地圧に応じて凹凸発生が生じる臨界速度が存在するということが判明した。生成された凹凸の一例を写真-5に示す。これらの実験結果は、ランニングスペクトルとして整理し、発現から成長するまでの過程を観察することに成功した。図-1はとられたランニングスペクトルの一例で、グラフの横軸は周回する路面の位置を表し、縦軸は周回するごとに経過していく時間を表している。回転初期（グラフの底辺付近）では一切の起伏がない状態を表す緑色だが、周回を重ねて上方に移動すると徐々に谷（青色）と山（赤色）が形成されていくことがわかる。図-1(a)はタイヤに見立てた円柱型接触子が乾燥砂路面上を移動した時のもの、また図-1(b)は鍬や鋤をイメージした楔型接触子が飽和砂路面上を移動した時に生成されたものである。いずれの場合においても、最終的にはほぼ同一の場所にとどまって凹凸が成長していくが、そこに至るまでの遷移区間においては、凹凸が下流側に移動しながら成長していくことがわかる。このような遷移状態の存在は、凹凸の発生が認められたほとんどのケースで観測された現象であるが、成長速度や最終的な凹凸の大きさには様々なバリエーションがあることが判明した。また発生する凹凸の周波数は振動子の固有周期に完全に一致するものではなく、それよりもやや大きな周波数に概ね収束することが観測された。

一方、路盤材の材料や性質（含水率や人工雪・自然雪の場合の温度）によって凹凸のできやすさには大きな違いがあることも判明した。このため、数理モデルの構築に必要と思われる静的および動的貫入試験も実施し、物理的な性質の差異を検証することとした。この実験は、再現実験に用いる振動子と全く同じ形状を有する接触子を、さまざまな路盤材に静的および動的に貫入させることによりその抵抗力と変形性能を確認するもので、後述する数理モデルの構築に大いに役立つものとなった。



写真-4 接地圧と固有周期が制御可能な振動子

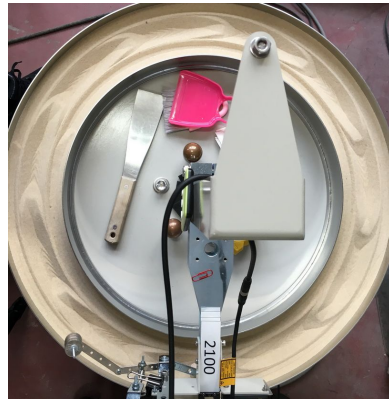
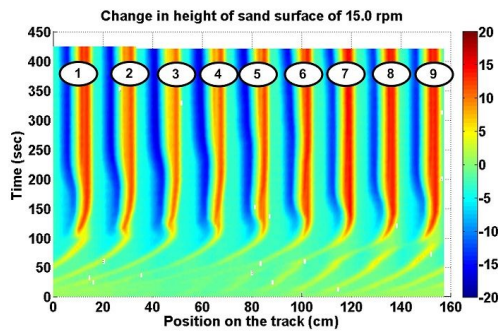
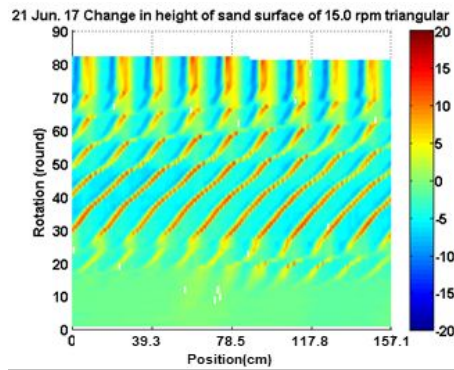


写真-5 発生した凹凸の観測結果の一例



(a) 円柱型接触子による乾燥砂上の凹凸



(b) 楔型接触子による飽和砂上の凹凸

図-1 生成された凹凸のランニングスペクトルの一例

観測については、日頃より積雪凍結路面上での凹凸発生が見込まれる地点を選定し、冬の2シーズンにわたり2台のタイムラプス・カメラを設置し観測を行なった(写真-6、写真-7)。この地点では、通行車両が毎回この付近で停車することや、通過交通量が入出構管理ゲートにより把握できる利点があり、いつどのような条件下で凹凸が発生し、また成長するのかわつぎに観察できた。観測結果は最寄気象台の気象データと比較することで、積雪凍結路面上での発生条件を絞り込むことが可能となった。その結果、次のような条件が必要となることが判明した。

ある程度まとまった降雪量(積雪 12cm 程度以上)があり、融解により積雪量が徐々に減少していくトレンドにあること。

大気温度が0 から-2 のレンジにあること

時間交通量で 100 台程度の交通量があり、停止と発進を繰り返すこと



写真-6. 観測地点(出入構ゲート)



(a) 取付高 2.5 m



(b) 取付高 0.7 m

写真-6. 観測用タイムラプス・カメラ

この結果を受けて、積雪凍結路面上での凹凸発生の予報を試みることにした。気象台の予報では通常「降雨量」の形で情報が提供されるため、予想される気温のデータを基に「予想降雪量」に直し、2シーズンにわたる予報を実施した。また、このような現象に興味を持っている一般の人にも協力をお願いし、積雪凍結路面でいわゆる「そろばん道路」が認められた場合には、撮影時間と場所などの情報とともに、SNS サイトに投稿してもらうようにした。これらの観測と SNS による情報収集の結果、予報に対する的中率も確認することができた。現在のところ発生予報の的中率は 50%程度であるが、正確な予報を阻む要因は「予想降雪量」にあり、これが正確に予測できるようになれば、凹凸の発生予報は相当に高い精度で可能になるものと考えている。

実験や観測の実施に併せて、数理モデルの構築も検討してきた。これらの成果を反映した数理モデルとして、物理現象としての説明が行いやすい乾燥砂を用いた場合の数値シミュレーションモデルを構築した。これは、車両に見立てた振動子が路盤材と接触・貫入する際の相互作用を、非線形バネを有するバネ・マスモデル(図-2)で表現したもので、発生から成長までの過程を概ね追うことができるようになった。図-3に示すのはシミュレーション結果の一例である。実際に実験で観測された結果よりも生成までにやや時間がかかっていることや、凹凸の大きさについてはやや小さめではあるものの、実験で見られた波長の波が再現されており、物理現象面を再現するモデルとしては概ね妥当なものと考えている。ただし、積雪凍結路面に発生するそろばん道路の場合は、単なる物理現象としての評価だけでは説明がつかず、凍結融解に関わる熱化学的な現象の究明や、結晶変態・付着成長・焼結といった雪と氷にまつわる独特の現象についてもさらなる検討が必要である。

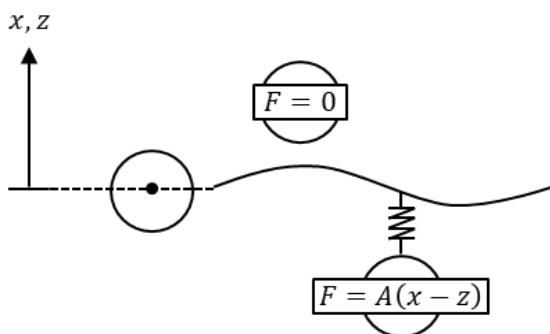


図-2 数値シミュレーション物理モデル

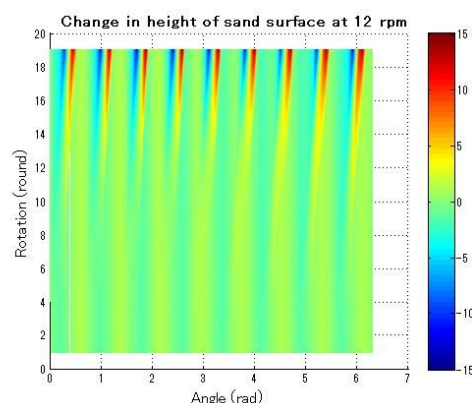


図-3 生成されたランニングスペクトル

本研究の成果として、パターン形成問題についての物理的な面からの現象説明は大きく進んだものと考えている。また積雪凍結路面に発生するそろばん道路についても、発現の予測や予報も可能となり、今後の道路管理に必要な情報提供が可能なレベルに到達したと考えている。しかし、積雪凍結路面に発生する事象を科学的に究明するためには、凍結融解過程における詳細な熱化学的検証がさらに必要と考えられ、今後の課題としていきたい。

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 3件)

- (1) Aiko Ikeda, Kai Hashimoto, Teeranai Srimahachota, Hao Zheng and Shunji Kanie: Fundamental Study on Spontaneous Corrugation Pattern on Dry Sand due to Moving Vehicle, MATEC web Conf. Vol.258, 05020, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925805020>, 2019 (査読有)
- (2) Teeranai Srimahachota, Hao Zheng, Motohiro Sato, Shunji Kanie and Hiroyuki Shima: Dynamics of Washboard Road Formulation Driven by a Harmonic Oscillator, Vol. 96, pp.1-7, Physical Review E, 10.1103/PhysRevE.96.062904, 2017 (査読有)
- (3) 蟹江俊仁, Zheng Hao, 横見瀬大地, 金田安弘, 永田泰浩, 正木智: そろばん道路の発生過程とその条件: 定点カメラ観測に基づく一考察、北海道の雪氷, Vol. 35, pp55-58, 2016 (査読無)

【学会発表】(計 10件)

- (1) 遠藤利紗, 橋本風惟, 池田愛子, 蟹江俊仁: 乾燥砂路面のそろばん道路の生成過程に関する基礎的研究: 土木学会北海道支部技術研究発表会、苫小牧工業高等専門学校(苫小牧市) 2019年1月26日
- (2) Aiko Ikeda, Kai Hashimoto, Teeranai Srimahachota, Hao Zheng and Shunji Kanie: Fundamental Study on Spontaneous Corrugation Pattern on Dry Sand due to Moving Vehicle, The 4th SCESCM, Gaja Madah University, Yogyakarta, Indonesia, 7th, September, 2018
- (3) 橋本風惟, 蟹江俊仁, 鄭好: 乾燥砂路面上のそろばん道路: 簡易室内実験による基礎的研究, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, I-527, 土木学会, 2018年8月29日
- (4) 橋本風惟, 池田愛子, 鄭好, 蟹江俊仁: 乾燥路面上のそろばん道路: その動的変形に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部技術研究発表会、北海道大学(札幌市) 2018年1月30日
- (5) 池田愛子, Srimahachota Teeranai, 鄭好, 蟹江俊仁: 車両走行により乾燥砂路面に自然発生する凹凸起伏に関する基礎的研究, 平成29年度土木学会全国大会第72回年次学術講演会、九州大学(福岡市) 2017年9月4日

- (6) Teeranai Srimahachota、蟹江俊仁：Washboard road: Corrugation on Dry Granular Sand and Snow Road Bed、平成 29 年度土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会、九州大学(福岡市)、2017 年 9 月 11 日
- (7) 池田愛子、Teeranai Srimahachota、鄭好、蟹江俊仁：車両走行により自然発生する乾燥砂路面凹凸パターンの実験的研究、土木学会北海道支部技術研究発表会、北見工業大学(北見市)、2017 年 2 月 4 日
- (8) Teeranai Srimahachota、Hao Zheng、Motohiro Sato、Shunji Kanie：Washboard road: Effect of Natural Frequency to the Dynamic Behavior of Sand Surface、土木学会北海道支部技術研究発表会、北見工業大学(北見市)、2017 年 2 月 4 日
- (9) Teeranai Srimahachota、Shunji Kanie：Washboard road: Displacement Amplitude and Frequency of Sand Bed、平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会、東北大学(仙台市)、2016 年 9 月 7 日
- (10) 蟹江俊仁、Zheng Hao、横見瀬大地、金田安弘、永田泰浩、正木智：そろばん道路の発生過程とその条件：定点カメラ観測に基づく一考察、雪氷学会北海道支部研究発表会、北海道大学学術交流会館(札幌市)、2016 年 5 月 14 日

〔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〕

Facebook サイト「そろばん・評判・見張り番!」: 一般からの写真・情報収集用

<https://www.facebook.com/groups/201709790166110/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：佐藤 太裕

ローマ字氏名：Motohiro Sato

所属研究機関名：北海道大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁): 00344482

研究分担者氏名：島 弘幸

ローマ字氏名：Hiroyuki Shima

所属研究機関名：山梨大学

部局名：総合研究部

職名：准教授

研究者番号(8桁): 40312392

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：金田 安弘

ローマ字氏名：Yasuhiro Kaneda

研究協力者氏名：永田 泰浩

ローマ字氏名：Yasuhiro Ngata

研究協力者氏名：正木 智

ローマ字氏名：Satoshi Masaki

研究協力者氏名：M. Ahmer Wadee

ローマ字氏名：M. Ahmer Wadee

研究協力者氏名：Havard Ostlid

ローマ字氏名：Havard Ostlid

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。