

乾燥砂路面上のそろばん道路の生成過程に関する基礎的研究

Fundamental study on formation process of Washboard road on dry sand surface

北海道大学工学部環境社会工学科
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 遠藤利紗(Risa Endo)
学生員 橋本風惟(Kai Hashimoto)
池田愛子(Aiko Ikeda)
フェロー 蟹江俊仁(Shunji Kanie)

1. 緒言

積雪凍結路(図 1(a))および未舗装路(図 1(b))上を車両が繰り返し通過すると、タイヤ跡に沿って凹凸状の起伏が路面に自然発生することが確認されている¹⁾。また、鋤など農具の使用時にも農地で凹凸起伏が生成される場合がある。この凹凸起伏は「そろばん道路」と呼ばれ、多くの科学者から注目を集めている²⁾。積雪寒冷地である北海道の冬期においても積雪凍結路面にそろばん道路が生成される。そろばん道路を走行すると、車体が大きく振動し、道路利用者に不快感を与える。さらに、タイヤのグリップ力を低下させるため、制動不良によるスリップ・スピン事故を引き起こす原因として車両走行の安全性に影響を与えている。蟹江らの観測に基づき、積雪凍結路でのそろばん道路は、通常かなりの量の積雪で、0℃から-2℃の温度範囲が提示されたときに発生することが分かった³⁾。そろばん道路の形成機構はいまだ解明されていないことが多く、そろばん道路への効果的な対処法は確立されていないため、現在は経験的かつ対処療法的なものに限られている。室内再現実験や数値解析などのアプローチより、そろばん道路の生成メカニズムを解明を目指している。



(a)積雪凍結路



(b)未舗装路

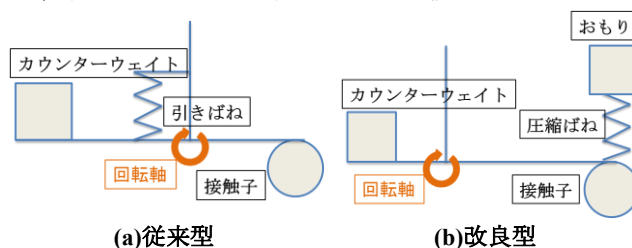
図 1:そろばん道路

本研究では、既往の研究に引き続き、直接路面に与える接地圧をコントロールできるような振動子に改良を加えることで、乾燥砂を用いた室内再現実験に注力した。自動車のタイヤが路面に与える応力と路面上の凹凸起伏の発生成長過程の関係を、より詳細に観察した。

2. 既往の室内再現実験

既往の研究において、図 2(a)に表す従来型の振動子で室内再現実験を行った⁴⁾⁵⁾。室内実験装置の乾燥砂を敷き詰めた路面に振動子を接地し、回転させると、ある臨界速度を超える周回速度で回した場合、路面表面は水平状態から徐々に波打ち、最終的には路面上に複数の凹凸起伏が形成された。実験の様子を図 3 に示す。この実験により、乾燥砂の路面上にそろばんが生成されることは確認されたものの、振動子が路面に与える接地圧が相対的

に小さいため、振動子と路面との接触が損なわれることも多かった。しかし、実際の現象において接触子が路面から離れることは考えにくく、運動中の接地圧を制御することが必要と考えた。そこで、従来型の振動子を改良し、図 2(b)に表す改良型の振動子を作成した。改良型の振動子は、路面に与える接地圧を調節するために、接触子上におもりを、接触子と反対側にカウンターウェイトを載荷できるようにした。また、振動を誘発させるために、接触子とおもりの間に圧縮ばねを載せた。



(a)従来型

(b)改良型

図 2:振動子



(a)実験前



(b)実験後

図 3:室内再現実験

3. 乾燥砂を用いた室内再現実験

3.1. 実験目的

接触子が路面に与える接地圧を変えて室内再現実験を行うことで、自動車のタイヤが地面に与える応力と凹凸起伏の発生成長過程の関係を考察する。

3.2. 実験方法

1 個 10g の錘を使い、接触子上のおもりを 1 個から 6 個、接触子と反対側のカウンターウェイトを 1 個から 9 個のさまざまな組み合わせの振動子を用いた。本実験では、実験開始時、±2mm 以内の凹凸を許し水平状態としており、±4mm 以上の複数の凹凸起伏が規則性をもって生成された状態をそろばん路面と定義した。路面周回速度は、12(rpm),15(rpm),16(rpm),18.75(rpm),20(rpm)とし、波の有無と、波が生成された場合の波数を記録した。接触子が路面に与える接地圧の計算は、モーメントのつりあい式を立て算出した。

3.3. 実験結果

接地圧を 15(mN)から 165(mN)まで 50(mN)刻みで変えて実験を行った。同じ接地圧の振動子を用いても、おもりとカウンターウェイトのバランスによって、そろばん路面を生成するものと生成しないものが観測された。

それぞれの接地圧においてより多くの周回速度でそろばん路面を生成した振動子を用いた実験のデータを用いて、接地圧ごとの周回速度とそろばん路面の波数の関係を図 4 に表す。接地圧 15(mN)は、おもり 0 個、カウンターウェイト 1 個のデータを、接地圧 65(mN)は、おもり 2 個、カウンターウェイト 4 個のデータを、接地圧 115(mN)は、おもり 4 個、カウンターウェイト 7 個のデータを、接地圧 165(mN)は、おもり 4 個、カウンターウェイト 6 個のデータを用いた。

おもり 1 個、カウンターウェイト 2 個と、おもり 2 個、カウンターウェイト 4 個のデータを用いて接地圧 65(mN)での周回速度とそろばん路面の波数の関係を図 5 に表す。また、おもり 1 個、カウンターウェイト 2 個を用いた振動子とおもり 2 個、カウンターウェイト 4 個を用いた振動子を、周回速度 18.75(rpm)で回した実験の路面表面変位コンター図を図 6 に表す。

接地圧 215(mN),265(mN)ではそろばん路面は生成されなかった。

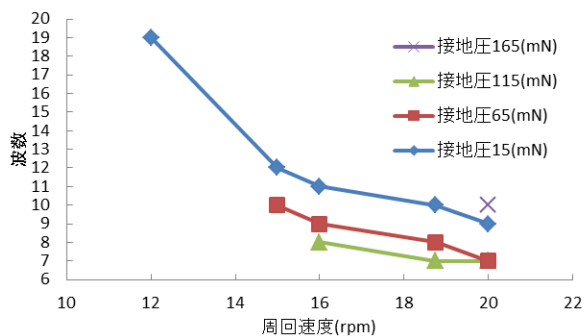


図 4: 接地圧ごとの周回速度と波数の関係

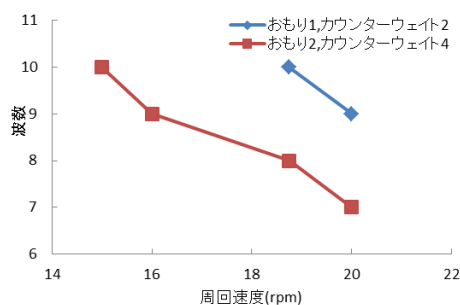
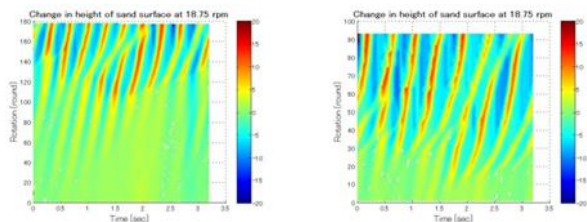


図 5: 接地圧 65(mN)における周回速度と波数の関係



(a) おもり 1 個

(b) おもり 2 個

カウンターウェイト 2 個

カウンターウェイト 4 個

図 6: 路面表面変位コンター図

3.4. 考察

図 4 より、接地圧が大きくなるにつれてそろばん路面が生成される最低周回速度が大きくなっている。これは接地圧ごとにそろばん路面が生成される臨界速度が決まっているからだと考えられる。

図 5、図 6 より、同じ接地圧でもおもりとカウンターウェイトの数が異なると、そろばん路面の波数と臨界速度も異なることが分かる。これは、おもりとカウンターウェイトの個数に依存する慣性モーメントが異なるためだと考えられる。また、カウンターウェイトが大きくなるにつれ、振動子の振動周期が大きくなるため、波数が少なくなると言える。

乾燥砂路面において、接地圧が 165(mN)より大きくなるとそろばん路面が生成されないことから、そろばん道路が生成される臨界接地圧が存在すると言える。

4. 結論

室内再現実験を行った結果、接触子が路面に与える接地圧が大きくなるにつれ、そろばん道路が生成される臨界速度が大きくなることが分かった。また、接触子が路面に与える接地圧が臨界値を超えると、そろばん道路が生成されないことが分かった。改良型の振動子の問題点として、おもりとカウンターウェイトのモーメントのつりあい式から算出した同じ接地圧でも、慣性モーメントによる振動子の振動周期の違いによって、そろばん路面の生成され方が変わる。また、圧縮ばねが振動子の振動に与える影響が未だ明らかになっていない。

5. 今後の展望

今後の展望として、振動子の問題点の解決に加え、自動車走行におけるタイヤの回転とそろばん道路生成の関係の解明のため、接触子を回転するものに変え、実験データの比較をしていきたい。また、今回は試料に乾燥砂を用いたが、湿潤砂や乾燥砂にシリコンオイル等を混合した試料を用いて路面材料の材料特性を変えることで、接触子が路面から受ける反力が上がった場合の比較を行いたい。最終的には、実際の車両走行に近い振動子と路面条件で再現実験を行うことで、路面上に生成されるそろばん道路の生成メカニズムの解明をしたい。

参考文献

- 1) Taberlet N., Morris S., McElwaine J.: Washboard road: The dynamics of granular ripples formed by rolling wheels, *Physical Review Letters* 99, 068003, 2007
- 2) 永田泰浩, 金田安弘, 富田真未: そろばん道路の発生過程について, 北海道の雪氷, 第 32 号, 80-83, 2013
- 3) 蟹江俊仁, Hao Zheng, 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, pp.55-58, 日本雪氷学会北海道支部, 2016
- 4) 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凹凸路面の実験的研究, 土木学会年次技術講演会講演概要集(CD), 2017
- 5) 橋本風惟, 池田愛子, 鄭好, 蟹江俊仁: 乾燥砂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, 土木学会年次技術講演会講演概要集(CD), 2018