# 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

北海道大学大学院工学院　○　学生員　池田　愛子
北海道大学大学院工学院　学生員　Teeranai Srimahachota
北海道大学大学院工学研究院　会員　鄭　好
北海道大学大学院工学研究院　フェロー　蟹江　俊仁

## 1. 諸言

未舗装路(**図- 1(a)**)および積雪凍結路(**図- 1(b)**)ではタイヤ跡に沿って凹凸状の起伏が路面上に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．日本でも 1950 年代から「そろばん道路」として認知され竹下らにより研究されていた [2)]．世界有数の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自然発生し，走行車両の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．近年雪氷関連研究者の間で注目を集めている現象であるが，蟹江らによる定性的研究にとどまり，車両走行により自然発生する路面凹凸の形成機構はいまだに解明されていないため，そろばん道路への現在の対処法は経験的かつ対処療法的なものに限られている [3)]．そろばん道路生成メカニズムを科学的アプローチで解明し，新しい道路管理技術を提案することにより，道路交通の安全性と快適性の向上に寄与することが望まれている．

(a)未舗装路　　(b)積雪凍結路

**図- 1：自然発生した凹凸路面**

本研究では，乾燥砂を用いた実験によるアプローチと数値的シミュレーションの両面から乾燥砂における凹凸起伏形成機構の解明をめざす．自動車のタイヤから地面に与えられる力の影響を観察し，路面材料の変位変形挙動に関わる物性評価を行うことで，路面凹凸パターンを数学的に説明したい．

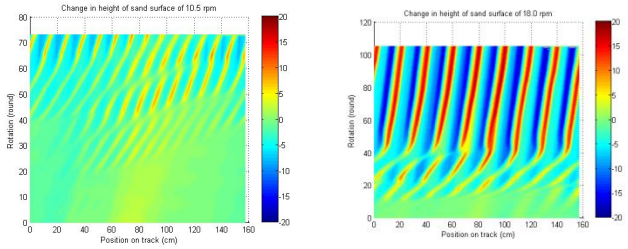
## 2. 乾燥砂を用いた再現実験

豊浦硅砂を用いて室内再現実験を行うと，凹凸起伏が確認された．室内実験装置に乾燥砂を敷き詰め作成した路面に振動子を設置し回転させた．時間が経過すると路面表面は水平状態(**図- 2(a)**)から徐々に波打ち，実験終了時にはそろばん路面となった(**図- 2(b)**)．

(a)実験前　　(b)実験後

**図- 2：室内再現実験**

観測時間とレーザーにより読み取った路面表面の高さの変位を**図- 3** に示す. 高速フーリエ変換(FFT)を用いて実験データを整理すると，**図- 4** の路面周期と凹凸波形の振幅のグラフが得られた．観測時間や路面を回す速度，振動子から路面表面にかかる力，振動子の固有周期等によってそろばん路面の周期や振幅が異なる．また，これらの要因はそろばん路面の成長にも大きく関わっている．




(a)路面周回速度 10.5rpm　　(b)路面周回速度 18rpm

**図- 3：路面表面変位のコンター図**

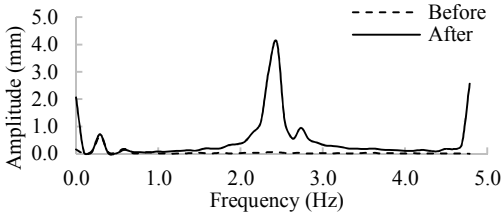



**図- 4：路面表面の周期**

## 3. 微小応力実験

室内におけるそろばん現象の再現実験に成功したため，本研究ではそろばん路面生成過程を数学的に説明するためのモデル構築を目標に，微小応力試験器を用い，自動車のタイヤが路面表面に与える静的な力と，それによる

キーワード　そろばん道路　凹凸起伏　微小応力実験　振動
連絡先　〒060-8628　北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目　北海道大学大学院工学院　TEL　011-706-6115

貫入量との関係を実験的に求めることとした．自動車のタイヤに見立てた接触子を徐々に降下させ，乾燥砂に貫入し，載荷量と貫入量の関係を計測した．接触子には，円柱型，半球型に加え，接地面からの角度が異なる三角柱型の 3 種類の形状を用意した．各形状の接触子において，それぞれ載荷と除荷を 3 回ずつ繰り返した．

実験により得られたデータを，横軸に変位(㎜)，縦軸に力(N)をとりグラフ化した．**図- 5** に自動車のタイヤと同型の円柱型接触子について 3 回の載荷の始点をそれぞれ原点にそろえたものを示す．載荷時は変位と力の関係は線形的に増加しており，徐荷時は小さな変位量でも急激な力の減少が見られる．また，それぞれの載荷の始点が一致していないことより，試料は塑性変形していると言える．さらに 3 回の載荷時を比較すると，グラフの傾きは回数を重ねるにつれて大きくなっている．これは 1 回目の載荷により試料が固められ，2 回目以降の載荷では試料が大きく変形しないことを表している．なお，他形状の接触子についても同様の結果が得られた．

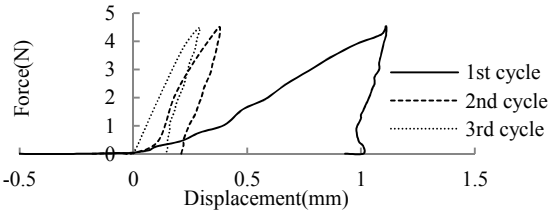



**図- 5：変位と力の関係(円柱型接触子)**

形状効果を調べるために接地面からの角度が異なる三角柱型と半球型，円柱型について，それぞれ 1 回目の載荷のグラフのみをまとめたものを**図- 6** に示す．三角柱型接触子に着目すると，先端部角度が 120 度，90 度，60 度の順にグラフの傾きが小さくなっており，先端部が尖っている接触子のほうが試料変形しやすい．さらに，三角柱型接触子，半球型接触子，円柱型接触子の順にグラフの傾きが大きくなっており，より試料変形が起こりづらいことを表す．これは接触子の試料との接地角度の違いによるものと考えられる．接地角度が小さい接触子ほど**図- 6** におけるグラフの傾きが大きく，試料変形がおこりづらいと言える．

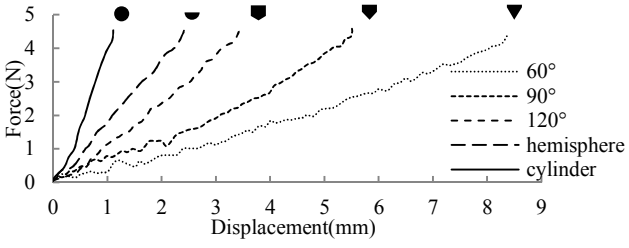



**図- 6：変位と力の関係**

## 4. 解析モデルの検討

乾燥砂路面に自然発生する凹凸起伏を数学的に説明するために，**図- 7** の室内再現実験で用いた振動子を模した**図- 8** のような 1 自由度系のモデルについて考える．

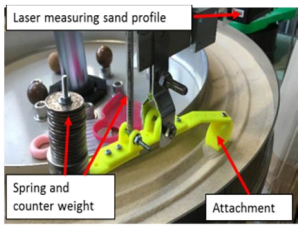



**図- 7：振動子**

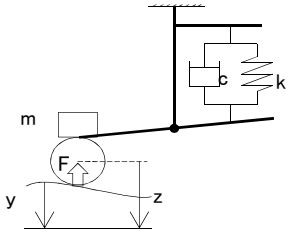



**図- 8：1 自由度振動子モデル**

自動車のタイヤに見立てた質量 $m$ の接触子は，ばねによる復元力(ばね定数 $k$ )とサスペンションによる減衰(減衰係数 $c$ )，路面からの外力 $F$ により振動する．路面表面の高さを $y$ ，接触子の位置を $z$ とし，時間 $t$ における**図- 8** の 1 自由度振動子の運動方程式を**式(1)**に示す．

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F(y,z,t) \qquad (1)$$

**式(1)**は，左辺に慣性力と復元力，減衰力を，右辺に路面からの外力を示しており，外力は説明変数が 3 つある関数である．

## 5. 結論と今後の展望

室内再現実験により，そろばん路面発生・成長への影響要因を特定することができた．また，微小応力実験から，試料は接触子の形状により異なる塑性変形を起こし，変位と力の関係が線形的であることがわかった．

今後の展望として，収集したデータを解析モデルに外力 $F$ として組み込み，接触子が路面表面から離れた場合に外力を考慮しない等，より再現実験に近い数値的シミュレーションを行いたい．また，実験試料に人工雪等を用い，乾燥砂を用いた場合との違いを考察したい．

## 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) 竹下春見，小林浩二：そろばん道路・砂利道の波，道路：road engineering & management review，Vol.54, Issue 2，pp.69-71，1954
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―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