

令和元年6月20日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06169

研究課題名(和文) 軟らかい地面における車輪走行メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of driving wheel mechanism on soft ground

研究代表者

山川 淳也 (YAMAKAWA, Junya)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授

研究者番号：10546138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：砂質土上の車輪走行を解明するため、複数個の荷重計を車輪踏面に連続して配置した剛性車輪を製作し、走行実験により車輪接地面の応力分布、牽引力などのデータを収集した。また、透明な側壁を通して粒子画像速度測定法(PIV)で砂の流動を観察し、砂質土内部の変形を有限要素法で数値的に解析した。剪断ひずみの大きい領域が車輪下のある深さに発生して、接触面前方まで進展する現象が見られ、剪断ひずみが増大する領域との接触で車輪表面の応力が増加する傾向にあることが分かった。剪断ひずみが増大する領域は帯状のすべり線となるが、PIVにおける砂粒子の流動速度差が大きい境界とは必ずしも一致しなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

砂質土などの軟らかい地面での車両走行において、車輪やタイヤなどの走行装置と地面による相互作用は重要な問題である。車両重量の支持力や前進のための駆動力の発生は車輪と地面の相互の関係によるが、軟らかい地面と車輪の接触によるこれらの力の発生原理が十分に解明できていない。軟らかい地面では、土砂粒子を後方に排除して車輪が著しく沈下すると走行抵抗は増加して十分な推進力が得られない。本研究は、車輪と地面の相互作用による土砂の変形・流動と車輪を前進させる駆動力の発生について解析しており、砂質土などの軟らかい地面での車両走行性を向上させることに貢献する。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the mechanism of wheels traveling on soft sandy soil, a rigid wheel with five load cells continuously arranged on the tread was constructed. Stress distribution on the contact surface of the wheel, traction force, etc. were collected through wheel drive experiments. The flow of sand was observed by particle image velocimetry (PIV) through the transparent side wall, and deformation inside sandy soil was analyzed numerically by the finite element method. It was observed that a region of large shear strain occurred at a certain depth below the wheel, and the region extended to the front of the contact surface. Contact with areas of high shear strain tends to increase the stress on the wheel surface. The region where shear strain increases is a band-like slip line, but it does not always coincide with the boundary where the difference in sand particle velocity is large.

研究分野：車両工学

キーワード：車輪 駆動力 剪断力 すべり線 砂 流動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械と地面との相互作用に関する研究はテラメカニクス^①と呼ばれ、農業機械、建設機械、宇宙開発といった様々な分野で必要とされる。近年、各国で火星や月の探査が行われており、ローバが惑星表面を自走して、地質調査やサンプル収集などが進められている。日本でも月着陸実証機の開発に着手しており、民間レベルで月面ローバの開発が進むなど、今後の月面探査への発展が期待されている。一方で、台風や地震による土砂災害の特殊な環境において使用される車両は舗装された堅固な路面だけでなく、砂や土などの軟らかい地面においても十分な走行性や作業性の確保が求められる。

(2) 軟らかい地面における車両の走行では、輪荷重に対する十分な支持力と走行抵抗に対する十分な駆動力を得ることが必要であるが、これらの発生は地面と車輪の接触の相互作用によるため、これらの力の発生の仕組みを明らかにすることが重要である。これまでに多くの研究者が車輪の牽引力や沈下に着目した研究を行なっているが、摩擦性が強い砂質土では車輪の走行実験において牽引力の発生は一様でなく変動がみられる。しかしながら、車輪下の土砂の動きを観察した研究^{②③}はあるものの、その発生を十分に検討した例はない。沈下とすべり率とともに小さい条件における数値解析で検討を行った例がわずかにあるのみである^④。軟らかい地面における車輪の走行モデルは様々に提案されているが、車輪と地面の相互作用は実験と数値解析を合わせてより詳細な解明が可能であり、その結果は走行性予測を行うための数値解析の精度向上に活かされる。土砂の力学的性質により異なることに加えて、車輪と土砂の組合せによりその性質が異なるために、走行実験によるより多くのデータ収集とともに、数値解析と合わせた検証が必要である。

2. 研究の目的

(1) 走行が困難である軟らかい地面と車輪の相互作用における走行のしくみを十分に検討するために、砂質土上での剛性車輪の走行実験を行った。車輪と砂質土の相互作用における地面の変形・流動に注目し、駆動状態における走行で側面からの映像を撮り、車輪下の砂の流動を粒子画像速度測定法（PIV）で可視化して観察を行った。

(2) 砂質土上を走行する車輪に作用する応力分布とその時間的な変化をより詳細に測定するために複数個の荷重計を車輪踏面に連続して配置した剛性車輪を製作した。自然状態における砂質土（豊浦砂）において単輪による走行実験を繰り返さない、すべり率、輪荷重等の条件を変えて、沈下量、駆動トルク、牽引力、車輪接地面の応力分布などのデータを収集した。有限要素法による数値解析で実験の再現を行い、実験で確認できない砂質土内部の変形の状態を解析し、車輪と砂面の境界に生じる応力分布と合わせて、実験で得られた計測値の解析を補完した。

3. 研究の方法

(1) アクリル板で側面を観察できる幅 100 mm、長さ 1050 mm、深さ 180 mm の容器に粒径 0.2 mm 程度でほぼ均一な豊浦砂を入れて水平にならした表面において半径 94 mm、幅 98 mm のアルミニウム車輪による走行実験を行なった。車輪はスライダで上下に自由に動くものの、前後方向には固定されており、砂槽が前後に動く構造となっているため、車輪の視点で砂の動きを観察できる。車輪と砂槽は速度の設定が可能なモーターで一定のすべり率で駆動した。砂は緩いまま締め固めず、自重で安定した自然な状態とした。カメラで撮影した走行の様子は PIV で解析した。

(2) 車輪踏面中央に 25 mm 間隔で 5 個の荷重計を配置した剛性車輪を製作した。自然状態における砂質土において単輪による走行実験を繰り返さない、すべり率、輪荷重等の条件を変えて、沈下量、駆動トルク、

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

牽引力、車輪接地面の垂直応力、剪断応力などのデータを収集した。

(3) 実験と同じ条件の車輪走行を有限要素法で数値的に再現した。数値解析には汎用ソフトウェア Abaqus を用いた。輪荷重を 80 N とし、車輪が自重で砂面に接地した後に一定のすべり率で車輪に回転速度と移動速度を与えた。車輪には自重が作用しており、前後方向の速度は指定して与えるものの、上下方向は運動方程式の解として与えられる。砂の塑性変形に必要な降伏条件は必要なパラメタの数が少なく、簡単に扱える Drucker-Prager モデルを用いた。数値解析の結果と合わせて、実験で得られたデータの解析を行った。

4. 研究成果

(1) 軟らかい砂上を走行する剛性車輪近傍では、砂の流動は様でなく、大小の流動が周期的に発生して車輪通過後の砂面に波模様を形成する。砂と接触する車輪前面の概ね周方向長さ分が回転するごとに 1 つの波形が発生する。砂の流動の変化にともない牽引力は変動するが、大きな流動が発生するときに牽引力が増加する。これは車輪と砂面の接触面における摩擦、すなわち駆動力が増加するためである。

(2) 車輪周速度一定の走行において、すべり率の増加で沈下量は増加するものの、車輪下の砂の流動厚さは減少した。しかしながら、沈下量に流動厚さを加えた砂の動きに影響を与える深さはすべり率が変化しても差異がなくほぼ一定であった。

(3) 図 1 はすべり率 10% の走行実験で計測した車輪踏面における垂直力と剪断力を示す。5 つの荷重計の垂直応力の測定値を比較すると、砂面との接触開始直後の上昇はほとんど変わらないものの、上昇途中からピークを迎えるまでの増加傾向（値の傾き）が異なっている。第 1 番目の荷重計では上昇率の鈍化が見られるのに比べて、第 2 第 5 では垂直応力の上昇率が鈍化しない。第 3 第 4 はその中間の傾向にあり、車輪と砂の接触面において垂直応力の変動を示している。すべり率 10% の走行実験では車輪通過後の砂面に明瞭な波形を確認できなかったが、砂の流れの変動が PIV で観察されており、測定値に垂直応力の変化として現れている。図 2 はすべり率 50% における垂直力と剪断力の計測値であるが、砂の流れの変動がより大きいため、荷重計で得られる測定値の差がより顕著である。

(4) すべり率の増加で車輪通過後にできる波数は密になるなど、有限要素法による数値解析において、定性的に再現ができたが、走行予測に重要な役目を果たすべき牽引力には乖離が認められた。有限要素法解析において砂の流動が大きくなる場合、要素の変形が増大して計算が破綻することがあるが、これを防いで計算を安定的に行うために小さな粘性を入

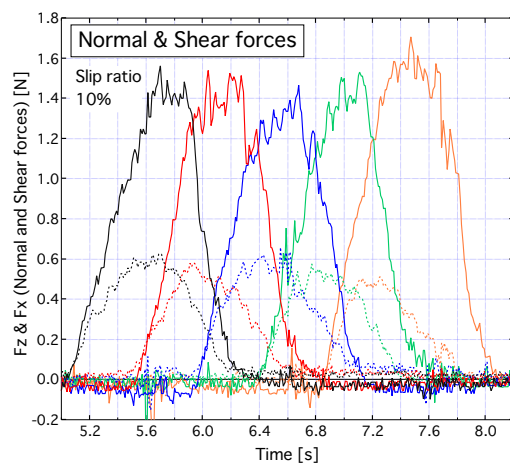


図1 すべり率 10% における車輪踏面の垂直力と剪断力

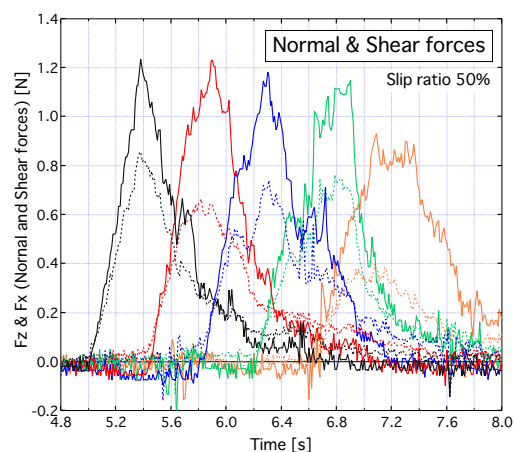


図2 すべり率 50% における車輪踏面の垂直力と剪断力

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

れている。このため、数値計算に用いた構成則モデルならびにパラメタでは剪断強度が実際の砂よりも高く見積もられ、砂の流動が抑制される。一般的な有限要素法（Lagrange 法）における解析の限界であり、さらに流動の大きな解析においては、粒子法など別の方法を用いる必要がある。

(5) 砂の流動に伴い、剪断ひずみが周辺より大きい領域が車輪下のある深さに発生して、車輪が接触する砂表面まで進展することが数値解析で見られるが、このとき、車輪と砂の接触による車輪表面の応力が増加する傾向にある。図3は有限要素法解析によるある時刻におけるすべり率50%の剪断ひずみの大きさと接触面における車輪が砂面に及ぼす垂直力を示している。剪断ひずみが大きい領域（濃い青色で表示）が車輪と接触するときに垂直力（矢印で表示）が増加することが分かる。走行実験における車輪表面の応力値は、剪断ひずみが増大する領域との接触で増加し、これにより変動していると考えられる。

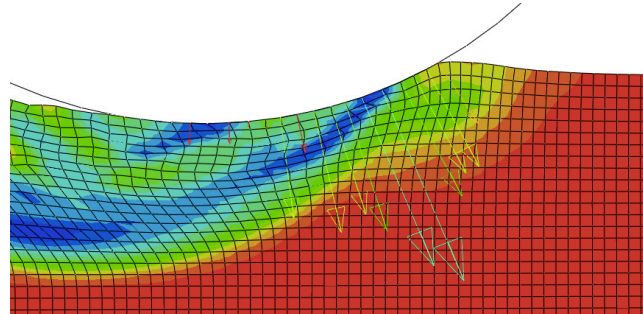


図3 すべり率50%における剪断ひずみと車輪踏面の垂直力

(6) 剪断ひずみが増大する領域は帯状をしており、すべり線と捉えることができる。PIV による砂粒子の流速はその時刻における瞬間的なものであり、剪断ひずみの大きさまでは観察できない。図4はある時刻における有限要素法解析による剪断ひずみと砂の速度分布を示している。砂の速度差が大きい境界と剪断ひずみが大きい領域は重なっていない。砂の速度差が大きい状態がある程度継続して蓄積することにより剪断ひずみが大きくなる。PIV で観測される砂粒子の速度差からすべり線を特定するには注意を要する。

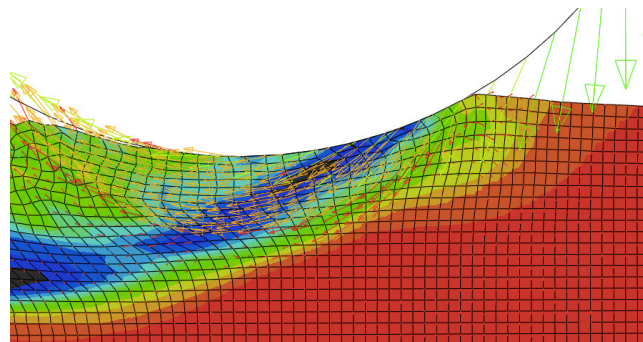


図4 すべり率50%における剪断ひずみと流動速度

<引用文献>

- ① T. Muro, J. O'Brien, Terramechanics: Land Locomotion Mechanics, CRC Press, 2004
- ② S. Chhaniyara, C. Brunskill, B. Yeomans, M.C. Matthews, C. Saaj, S. Ransom, L. Richter, Terrain trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey, J. Terramech. 49, 115–128, 2012
- ② T. Shikanai, Hashiguchi, K., Nohse, Y., Ueno, M., Okayasu, T., Precise measurement of soil deformation and fluctuation in drawbar pull for steel and rubber-coated rigid wheels. J. Terramech. 37, 21–39, 2000
- ③ C. Senatore, Wulfmeier, M., Vlahinic, I., Andrade, J., Iagnemma, K., Design and implementation of a particle of image velocimetry method for analysis of running gear–soil interaction. J. Terramech. 50, 311–326, 2013
- ④ S. Ozaki, K. Hinata, C. Senatore, K. Iagnemma, Finite element analysis of periodic ripple formation under rigid wheels. J. Terramech. 61, 11-22, 2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① 山川 淳也, 後藤 正人, 江藤 亮輔, 軟らかい砂質土を走行する車輪の解析(相互作用による砂質土の流動について) 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.83, No.852, 2017, DOI: 10.1299/transjsme.17-00188
- ② Ryosuke Eto, Kazuomi Sakata, Junya Yamakawa, Driving Force distribution Based on Tyre Energy

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

for Independent Wheel-Drive Vehicle on Rough Ground, Journal of Terramechanics, 査読有, 76, 29-38, 2018

- ③ 江藤 亮輔, 矢部 宏樹, 山川 淳也, 砂質土上における車輪形状の異なる剛性車輪の走行性能評価, テラメカニクス研究会, 査読無, 38, 37-42, 2018
- ④ 江藤 亮輔, 山川 淳也, 砂地走行用タイヤモデルを用いたスリップ制御に基づく駆動力制御に関する研究, テラメカニクス研究会, 査読無, 37, 27-32, 2017

[学会発表] (計5件)

- ① Junya Yamakawa, Ryosuke Eto, Measurement of Force on the Tread of a Rigid Wheel Traveling on Loose Sandy Soil and Sand Motion in the Vicinity of the Wheel Surface, ISTVS, 2018
- ② 江藤 亮輔, 下野 祐豪, 山川 淳也, 砂地におけるタイヤの最小回転速度を利用したスリップ抑制法, 日本機械学会 2017
- ③ 吉田昂平, 吉田秀久, 本城豊之, 歩行者の挙動を考慮した回避領域に関する一考察, 日本機械学会 2018
- ④ 山川 淳也, 江藤 亮輔, 軟らかい砂面を走行する剛体輪表面に生じる力の測定と近傍の砂の動きについて, テラメカニクス研究会 2018
- ⑤ 江藤 亮輔, 山川 淳也, 踏面形状が砂質土との相互作用に与える影響について, テラメカニクス研究会 2018

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 吉田 秀久

ローマ字氏名: (YOSHIDA, Hidehisa)

所属研究機関名: 防衛大学校

部局名: システム工学群 機械システム工学科

職名: 教授

研究者番号: 00332635

(2) 研究分担者

研究分担者氏名: 江藤 亮輔

ローマ字氏名: (ETO, Ryosuke)

所属研究機関名: 防衛大学校

部局名: システム工学群 機械工学科

職名: 助教

研究者番号: 20761480

※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。