

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	西山 健太
論文題目	Analysis of Soil-Tire Interaction Using a Two-Dimensional Finite Element-Discrete Element Method (2次元有限要素-離散要素法による土-タイヤ相互作用解析)		
(論文内容の要旨) 圃場をはじめとする各種不整地で稼働するオフロード車両は、エネルギー資源の効率的な利用の観点から、最適な走行性や作業性を有することが不可欠である。京都大学農業システム工学研究室では、タイヤと下層土を有限要素法(FEM)、表層土を離散要素法(DEM)でモデル化して解析するFE-DEMを開発し、数値解析によるけん引性能予測を試みられてきたが、走行抵抗について十分な精度を有していなかった。本研究の目的は、乾燥砂を対象にしたFE-DEMの高精度化および剛性車輪から低圧タイヤまでを想定してけん引性能予測の新たなフレームワークを構築すること、また、計算負荷の大きいDEM領域を削減する要素変換手法を提案し検証することである。 はじめに、タイヤの角速度と並進速度を維持するためのアルゴリズムを改良し、欧州宇宙機関が進めるExoMars計画のローバ用の2種類の試作金属製弾性車輪の走行性能解析を実施した。PID制御モデルに基づいて車軸トルクとけん引負荷を決定しFEMタイヤに作用させることで、実験と同様な物理量を取得しけん引性能を評価することを実現した。また、車輪剛性の影響について、接地荷重に対するたわみが大きい低剛性車輪の方が、高剛性車輪と比較して優れたけん引性能を示すことが明らかになり、実験結果と定量的に一致した。さらに、重力の低下に伴い発生する力は減少するものの、沈下量はほとんど変化しないという特徴的な結果が得られ、火星重力下では、供試した2種類の弾性車輪はけん引性能にほとんど差がない可能性が示唆された。 次に、土とタイヤ間で剛体接触モードを仮定し、ラグやトレッドパターンのないスムーズタイヤの接触面で発生する法線および接線方向応力の解析を実施した。定常状態で走行中の接触応力分布を空間固定の接触線素ごとに時間平均するアルゴリズムにより、タイヤの回転角度に対する応力を算出するとともに、最大法線応力および接線応力が発生する回転角度は、過去の実験結果と同様に、滑り率の増加に伴って前方回転角度へシフトする傾向が確認された。さらに、応力分布を半経験的手法に従って積分し求めた接地荷重とけん引性能は、PID制御モデルによる解析値や実験値と概ね一致しており、提案した応力解析手法の妥当性が検証できた。 最後に、DEM計算に要する計算負荷を低減するため、タイヤ直下部のみをDEM、その他の土とタイヤをFEMでモデル化し、タイヤの移動に伴いDEMとFEMが相互変換するiFE-DEMを新たに提案した。要素変換基準はタイヤとの距離に設定し、タイヤとタイヤ前方のFEM要素との距離が基準以下になると1つのFEM要素がDEM要素集合体に置換され、反対に、タイヤ後方ではタイヤとの距離が基準以上になるとDEM要素群が1つのFEM要素に置き換わるものである。DEMモデルが適応される範囲を変えた3種類のiFE-DEMと変換を導入しないFE-DEMの4つのモデルを作成し、けん引性能や内部応力の解析を行った。その結果、提案したiFE-DEMは土に変換を用いない場合とほぼ同等の精度で解析可能であることが明らかとなった。また、計算時間は最大で約23%に短縮され、計算負荷の低減にiFE-DEMの有効性が確認できた。			

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

水田や畑作ほ場の軟弱地表面を作業走行する農用トラクタのような装輪型オフロード車両は、タイヤ接地部から十分な推進力やけん引力を得て作業走行する必要がある。このような接触相互作用を扱うテラメカニックスでは、接触面の力学現象の解明とともに省エネルギーを考慮したタイヤ開発ならびにそのけん引性能評価が近年の重要な課題である。これまで、数値解析による相互作用問題の解明では、タイヤを有限要素法(FEM)、土を離散要素法(DEM)で離散化し結合解析する有限要素-離散要素法(FE-DEM)が提案されていたが、低剛性弾性車輪における走行抵抗解析の解析精度向上が課題であった。本論文は、新たな試みとしてFEMタイヤモデルの車輪回転速度とけん引負荷を制御するPID制御モデルを導入し、強制滑り方式による実験と同様の物理量を出力しけん引性能を評価する高精度なFE-DEM解析手法を開発し、その適用性を欧州宇宙機関の火星ローバ用の剛性の異なる2種類の弾性車輪のけん引性能予測、接地面法線応力ならびに接線応力解析、さらに車輪直下でDEMモデル、その他でFEMモデルとする要素変換機能付きFE-DEMとして確認するものである。

本論文が評価できる点は、以下の通りである。

1. FEM タイヤモデルに PID 制御モデルの概念を導入し、実験と数値解析において物理量の対応を一致させるとともに、先行研究で課題となっていた滑り率に対する走行抵抗曲線の挙動予測の高精度化を試みた。これにより、けん引性能の予測結果は実験結果とほぼ同等なものが得られた。さらに、剛性の異なる2種類の弾性車輪について、地球上での実験が困難である火星重力下での車輪走行性能予測を実施し、車輪間ではけん引性能の差が小さい可能性を提示した。
2. 接地応力を、粒度の粗い土のDEM要素群との接触反力から高精度に算出可能なように時間で平均化するアルゴリズムを組み込み、FE-DEM シミュレーション上で解析可能にした。タイヤのトレッド面に3軸力センサを埋め込んで計測した既往の実験結果と比較し、滑り率や回転角度に対する応力の変動傾向が良好に一致することを確認した。
3. 大規模解析化のボトルネックであったDEMの高い計算負荷を削減するべく、タイヤ直下のみをDEMモデル、その他の土とタイヤをFEMモデルで表現し、タイヤの移動に伴ってDEMとFEMを相互変換させ、タイヤとの接触解析は連続的にDEMを用いて計算可能にした要素変換アルゴリズムを構築した。その結果、けん引性能の予測精度はDEMのみの結果とほぼ同等で計算時間を最大で約23%に短縮可能なことを示した。また、要素変換の妥当性について、タイヤや土中のせん断応力分布を可視化し、要素変換による影響はほとんど見られないことを確認した。

以上のように、本論文は従来のFE-DEMによるけん引性能解析に見られた課題をPID制御モデルの導入で解決するとともにけん引性能解析や接地応力解析の高精度化を達成したこと、またFE-DEMの計算コストを大幅に削減可能なDEMとFEMの要素変換アルゴリズムを提案しその妥当性を確認したことで、テラメカニックスにおける土-タイヤ相互作用のFE-DEM解析に飛躍的な進歩をもたらし、農業システム工学、フィールドロボティクス、生物センシング工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(農学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和元年9月24日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士(農学)の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに

掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）