

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580359

研究課題名(和文) 要素変換機能を導入した有限要素-離散要素法の開発とテラメカニクスへの適用

研究課題名(英文) Development of a FE-DEM analysis with element transfer function and its application to contact problems in terramechanics

研究代表者

中嶋 洋(Nakashima, Hiroshi)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80172302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：離散要素法(DEM)は、オフロード路面と走行装置や機具の接触問題を容易に解析できる手法である。一方、土粒子のオーダを用いた詳細なDEM解析は全粒子の接触判断と接触力計算を要するため、今日でも不可能である。この問題を解決するため、DEM領域を縮小する有限-離散要素解析(FE-DEM)も提案されている。本研究では、FE-DEMにおいて、土のFEモデルとDEモデルの間で要素を変換し、DEM領域を最小限に留める方法を提案した。タイヤのけん引性能解析に要素変換機能付きの2次元FE-DEM解析を行ない、性能解析結果は要素変換機能なしのものと同等、計算速度は最大で約29倍にできることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The discrete element method (DEM) has become popular as a numerical tool to analyze the contact problems between off-road terrain and running devices or working tools of off-road vehicles. However, DEM analysis using the elements of real soil particles has not yet been realized, since DEM is based on the computation of contact judgment and contact reaction for all elements in the analysis. To realize the above-mentioned contact analysis, an approach such as FE-DEM analysis has been proposed by our group. In this study, a new idea of transferring elements between DEM and FEM is proposed so that the total number of necessary DEM elements around contact area can be reduced. A simple example of traction performance analysis of an agricultural tire was demonstrated by FE-DEM with the proposed element transfer function. The result of the analysis showed that the elapsed time of computation could be reduced to about 29 times smaller than the conventional FE-DEM with sufficient accuracy.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学

キーワード：シミュレーション工学 テラメカニクス GPU 有限要素法 離散要素法 要素変換 けん引性能 農用タイヤ

1. 研究開始当初の背景

典型的なテラメカニックスの問題として、タイヤ型車両である農用トラクタなどが屋外ほ場土のような軟弱路面を走行する際には、タイヤの構造ならびに土壌条件と相まって、支持荷重下において発揮する車軸トルクに対して土-タイヤの接触面に相対滑りが発生し、入力された駆動エネルギーを消費する。資源の有効利用の観点からは、消費エネルギーの少ない作業走行を実現するタイヤの開発が望ましい。

オフロードタイヤの走行性能において、要求されるのは低い走行抵抗と高いけん引性能であり、一般的には、ラグ高さを増加させることで、けん引性能を確保することが可能であるが、同時に高いラグは走行抵抗を増加させる要因であることも知られている。様々な設計要因の最適な組み合わせをもとにタイヤの性能を十分発揮させるには、性能支配因子に着目した多くの数値解析が必要である。

本研究では、研究代表者がすでに試みている FE-DEM 解析において、計算時間を要する DEM 解析をタイヤの走行時に最も影響を受けるタイヤ下の土の接触近傍に限定的に適用することとし、随時有限要素モデルを離散要素モデルに変換して土-タイヤの接触問題を解析し、タイヤの土からの離脱後は土の離散要素をもとの有限要素に再変換するという概念に思い至った。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの FE-DEM 解析において、主として走行装置と接する土上層部に配置した DEM モデルを装置との接触領域近傍のみに限定配置し、残りを全て FEM 要素とし、タイヤ転動に併せて FEM DEM FEM へと要素変換を適宜適用することにより、高速かつ高精度なオフロードタイヤの走行力学モデリング手法の開発を試みるものである。テラメカニックスにおける具体的例題として、タイヤと土の接触問題に適用するとともに検証実験を行ない、提案する手法の数値解析精度と解析の長所と短所を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 既に開発している FE-DEM 解析の適用性の拡大として、剛体接触モードのみならず弾性接触モードにおいても十分な解析精度を有することを確認する。また、今後の PC 利用による 3 次元解析のための基礎準備として、GPU を利用する DEM の高速並列解析プログラムを開発する。

(2) 要素変換機能は、変換前後において FEM 要素と DEM 要素間の変位、応力の連続性が問題となる。なお、応力については、FEM 要素内部の応力と DEM の接触表面での表面応力が各要素の大きさによらず同じ考えで処理できるかは詳細に時間をかけて検討す

る必要があるため、今回は、取り扱いの容易な要素変位の連続性に着目し、FEM と DEM 要素間接触での微小重合を許容する従来の FE-DEM 接触解析における接触処理の流れを採用するものとする。この方法により要素変換機能を取り入れた FE-DEM 解析のプログラムを開発する。

(3) 数値解析速度に対する要素変換機能の効果を確認するため、テラメカニックスの典型的な問題であるタイヤと土の接触問題解析を実施し、変換機能という追加処理時間の増加が解析速度に及ぼす影響を明らかにする。また、農用タイヤのけん引性能計測実験を行ない、様々な実験条件での数値解析検証用データを取得する。

4. 研究成果

(1) 既に開発済みの 2 次元 FE-DEM 解析用プログラムの弾性タイヤへの適用性を高めるため、FE-DEM の接触アルゴリズムの見直しと解析用パラメータの見直しを行なった。アルゴリズムの見直しについては、通常のペナルティ法による接触力計算方法、FE 要素側に仮想 DEM 要素を埋め込んで接触力計算を行なう方法の 2 種類を検討した。また、時間積分について、FEM において厳密に中央差分法を適用することとした。DEM 解析用パラメータについては、特にタイヤ滑り率の増加に対する走行抵抗の挙動の変化を調査した。その結果、やや非現実的ではあるが、小さいバネ定数を線形接触モデルバネに適用すると妥当な走行抵抗挙動が得られる可能性を見出した。また、今後の FE-DEM における高速計算の実現に備えるべく、各種並列計算手法についての検討を実施した。計算時間を要する DEM 領域の解析時間短縮を図る手法として、CPU レベルでの並列処理を実現する OpenMP、また最近の PC に搭載されている GPU 利用による並列数値解析について調査した。OpenMP 利用並列解析では、DEM による車輪の走行解析と履板の推進性能解析に適用した。並列処理用に特化したアルゴリズムは用いていないため、例えば OpenMP による車輪性能解析の 6 スレッド並列処理では約 2.3 倍の高速化に留まった。また、GPU 利用並列解析では土の切削問題を対象として、土要素に複合球モデルを用いた切削抵抗の DEM 解析を実施した。開発した解析プログラムは十分な精度を有することを平刃による乾燥砂の切削実験データにより確認するとともに、同一球を 3 個連結したモデルが実験の切削抵抗挙動を最もよく再現できること、また GPU の利用により解析速度が約 5 倍高速化可能なことを明らかにした。

(2) 変位に基づく要素変換について、タイヤの接近する FEM から DEM 要素への変換は、図 1 のように直線で表現される有限要素領域を同要素の x ならびに y 軸方向の最大座標値、最小座標値で決まる正規区画で囲み、その内部に発生させた DEM 要素がもとの FEM 要

素の中に含まれる部分を抽出することで DEM を割り付ける。

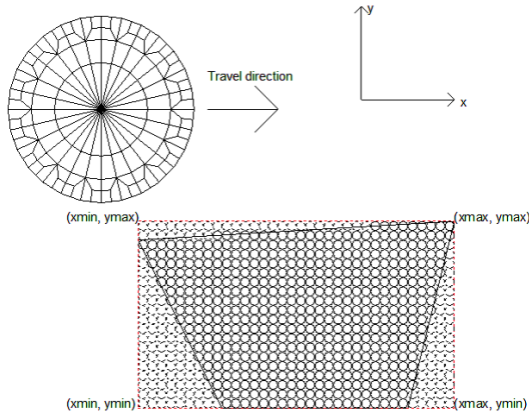


図 1 有限要素から離散要素への変換

また、タイヤ通過後の DEM 要素から FEM 要素への変換は、図 2 のように、ある大きさの DEM 要素群を包括するように FEM 要素 1-2-3-4 を作成し、その内部の DEM 要素位置のみを作成した FEM 要素の内部に割り付けるとともに、これらの FEM 内部の DEM 要素は以降の DEM 要素接触計算には使用せず、FEM 要素の変形に伴い、FEM 節点情報から単に DEM 要素の変位を更新する方法とした。

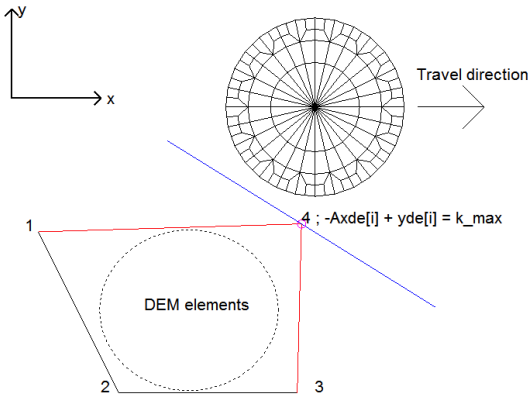


図 2 離散要素から有限要素への変換

(3) タイヤは有限要素モデル，土は一層のみからなる土槽モデルとした簡単なタイヤ-土の相互作用問題を設定する．図 3 のように，土層の土モデルの要素変換をタイヤ下の領域に適用する方法として，タイヤ直径分の直下の領域に適用する場合(図 3b)，タイヤ直径の 2 倍の領域に適用する場合(図 3c)を想定し，比較用として要素変換を入れない場合(図 3a)の三種類の解析について，計算精度と計算時間を調査した．タイヤのけん引性能解析結果を以下に示す．

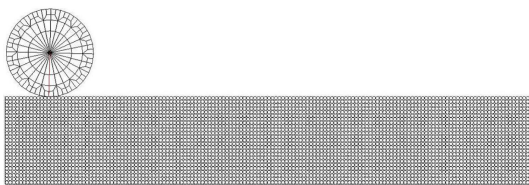


図 3(a) FE-DEM 解析(FE-DEMO)

図 4 に，研究代表者のグループが行なった過去のけん引性能計測実験で得られたトレ

ッドパターンのないスムーズタイヤのけん引性能の例を示す．タイヤの滑りが増加するにつれて，推進力(赤)が増加し，走行抵抗(緑)の絶対値も増加し，両者の差であるけん引力(青)がある値に漸近することが明らかである．なお，本研究においてもタイヤの空気圧を変化させた場合のけん引性能計測を行ない，同じスムーズタイヤを用いた接地荷重と空気圧条件では図 4 と同等の実験結果が得られたことを付記しておく．



図 3(b) 要素変換付 FE-DEM 解析(FE-DEM1)

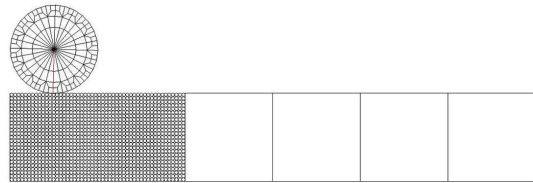


図 3(c) 要素変換付 FE-DEM 解析(FE-DEM2)

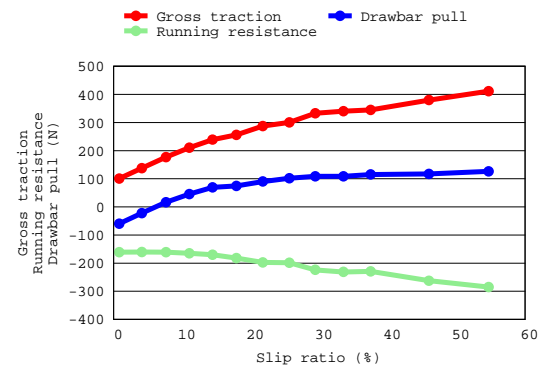


図 4 農用タイヤのけん引性能実験結果例

図 5 に FE-DEMO の解析結果を示す．図 4 の実験結果と同様に，赤が推進力，青がけん引力，緑が走行抵抗を表す．本研究では，走行抵抗挙動が実験と同様な傾向を示すことを目標としたため，土の DEM モデルで用いる線形バネのバネ定数を低下させている．その結果，図の走行抵抗挙動は図 4 で示すものと概ね一致したものとなった．推進力，けん引力ともオーダ的には実験結果とほぼ同じことも確認される．

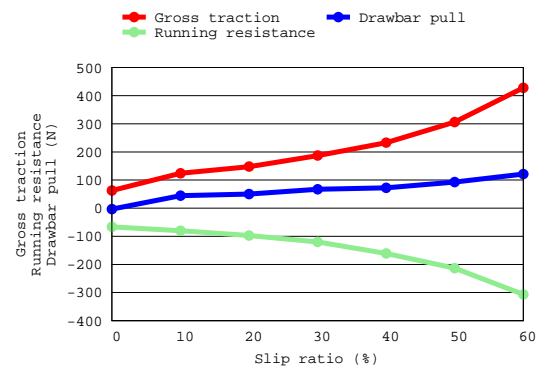


図 5 けん引性能解析結果(FE-DEMO の場合)

図6に小規模な要素変換機能を取り入れたFE-DEM1のけん引性能解析結果を示す。なお、FE-DEM1では、タイヤの移動とともに逐次要素変換を行うものであるが、図3(b)に示したようにDEM領域は小規模であり、かつタイヤの前方に存在するFEMは1要素のみというものである。図6のように、全体的なけん引性能は走行抵抗も含めて図5の場合と同様な傾向を示しており、変位のみに着目した要素変換を導入しても要素変換の有無による結果の相違は無いことが明らかである。

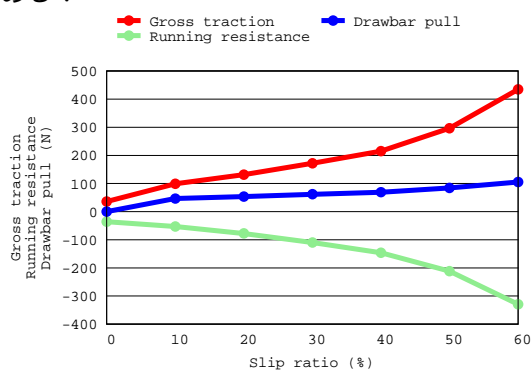


図6 けん引性能解析結果(FE-DEM1の場合)

図7はタイヤ直径の2倍の領域を要素変換するFE-DEM2のけん引性能解析結果である。図6の結果と同様に、FE-DEM2においてもFE-DEM0と同様のけん引性能結果となり、要素変換を取り入れても解析結果は同様な傾向が得られることがわかる。なお、図5~7の走行抵抗結果は、図4の実験結果よりも滑り率が大のときに絶対値が大きくなっていること、また解析結果の推進力も滑り率が大のときに増加が加速されているような傾向がある。これらを踏まえて、今後FE-DEMの解析精度を更に向上するために基本的なアルゴリズムの再検討を行なうとともに、本研究で実施した要素変換機能を導入する場合も開発した解析プログラムのアルゴリズムの再点検を行ない、けん引性能解析の更なる高精度化を図る必要がある。

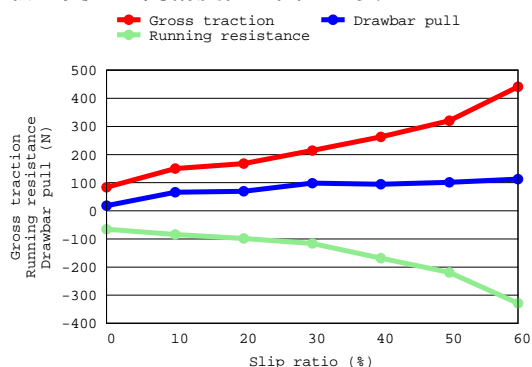


図7 けん引性能解析結果(FE-DEM2の場合)

要素変換を取り入れたFE-DEM解析の全計算時間は、図8に示すように要素変換機能のない通常のFE-DEM0が最も時間がかかり310,044 ms、FE-DEM1の場合10,569 ms、またFE-DEM2の場合は33,602 msであっ

た。これより、要素変換の前後に追加される処理に計算時間を要するものの、本研究で提案している要素変換を取り入れる方がDEM領域を縮小できることと相まって、結果的にFE-DEMの高速数値解析が実現することが明らかとなった。また、FE-DEM1、FE-DEM2の加速比は、FE-DEM0に対してそれぞれ29.3倍、9.2倍であった。

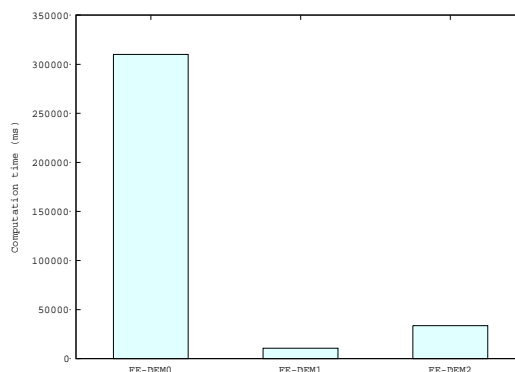


図8 要素変換機能有する場合の解析時間

以上のように、FE-DEM解析に要素変換機能を取り入れることで当初の予想どおり数値解析が高速化できることが確認できた。今後3次元化が実現できれば更に実際的な問題への適用が期待される。なお、本研究では有限要素と離散要素間での応力場の連続性の考察を行なっていないが、変位の連続性のみでも定性的に一致した解析結果を得ることが可能であった。より厳密な議論をするためには要素変換前後での応力場の検討を行なう必要があると判断される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

吉田泰基, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: FE-DEMによる車輪の走行性能解析と要素変換機能の検討, テラメカニクス, 査読無, 34, 2014, 113-118.

Ikuya Ono, Hiroshi Nakashima, Hiroshi Shimizu, Juro Miyasaka, Katsuaki Ohdoi: Investigation of elemental shape for 3D DEM modeling of interaction between soil and narrow cutting tool, Journal of Terramechanics, 査読有, 50(4), 2013, 265-276.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2013.09.001>

小野智美, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: FE-DEMによる弾性車輪のけん引性能解析, テラメカニクス, 査読無, 32, 2012, 21-26.

〔学会発表〕(計10件)

吉田泰基, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: FE-DEM解析における要素変換機能の検討, テラメカニクス研究会第34回研究会, 2013年12月14日, 沖縄県石垣市.

中嶋 洋, 吉田泰基, 清水 浩, 宮坂寿郎,

大土井克明: 車輪走行性能の DEM 解析における並列計算について, テラメカニックス研究会第 34 回研究会, 2013 年 12 月 14 日, 沖縄県石垣市.

H. Nakashima, T. Yoshida, X.L. Wang, H. Shimizu, J. Miyasaka, K. Ohdoi: Calibration of model parameters in 2D DEM for soil-grouser system, 7th Americas Conf. ISTVS, November 5, 2013, Tampa, USA.

中嶋 洋, 吉田泰基, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 離散要素法と有限要素法の要素変換解析の試み—予報: 物理量の対応, 農業食料工学会第回年次大会, 2013 年 9 月 12 日, 北海道帯広市.

中嶋 洋, 吉田泰基, 小野育也, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: FE-DEM 解析における新たな試み(予報), テラメカニックス研究会第 33 回研究会, 2012 年 10 月 12 日, 宮城県南三陸町.

I. Ono, H. Nakashima, H. Shimizu, J. Miyasaka, K. Ohdoi: Effect of elemental shape on cutting resistance in DEM analysis of soil-blade system, 12th European Conference of ISTVS, September 26, 2012, Pretoria, South Africa.

小野育也, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 3次元離散要素法による乾燥砂を用いた平刃切削の抵抗カシミュレーション—計算における粒子形状の影響について—, 農業環境工学関連学会 2012 年合同大会, 2012 年 9 月 12 日, 栃木県宇都宮市.

中嶋 洋, 吉田泰基, 王 秀崙, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 履板の推進力解析への離散要素解析の適用に関する検討, 農業環境工学関連学会 2012 年合同大会, 2012 年 9 月 12 日, 栃木県宇都宮市.

小野智美, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: FE-DEM による弾性車輪のけん引性能解析, テラメカニックス研究会第 32 回研究会, 2011 年 11 月 18 日, 広島県呉市.

中嶋 洋, 王 秀崙, 吉田泰基, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 履板の推進力へのグローサパラメータの影響の DEM 解析, テラメカニックス研究会第 32 回研究会, 2011 年 11 月 18 日, 広島県呉市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 洋 (NAKASHIMA HIROSHI)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号: 80172302