

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23780258

研究課題名（和文）多様な土壌条件に対応し得る三次元耕うんシミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of three-dimensional tillage simulator for various soil conditions

研究代表者

岡安崇史（OKAYASU TAKASHI）

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：70346831

研究成果の概要（和文）：耕うんは作土を作物の栽培に適した状態に調整する重要な農作業のひとつである。近年では、土壌-耕うん機器間の相互作用の解明や耕うん機器の開発時間ならびにコスト削減のため、数値解析手法の開発が試みられている。本研究では、三次元個別要素法に基づく土壌耕うんシミュレータの開発を行い、プラウ表面に作用する土壌抵抗や土壌の切削現象を解析した。さらに、解析結果と実測結果の比較・照査により、両者が定性的に一致することを示した。

研究成果の概要（英文）：Tillage is one of important operations to improve and maintain crop soil condition in farmland. Developments of numerical analysis method have been tried to clarify the mechanism for soil-tillage interaction phenomena and to reduce the developing time and costs in the present. In this study, the soil tillage simulator was developed based on a three-dimensional discrete element method. Soil resistances acting on plow surface and soil cutting phenomena were estimated in the simulation. The simulated results agreed qualitatively with the test results.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：耕うんシミュレータ、プラウ耕、三次元個別要素法、パラメータ同定、三次元スキャナ、耕うん実験装置、計算力学

1. 研究開始当初の背景

土壌踏圧は、土壌を構成する土粒子間の間隙の減少ひいては透水性の低下により、土壌の強度が増大する現象であり、作物根の活性と伸長、養水分や空気の保持と移送に大きな影響を及ぼす。その過程は、まず、土壌の弾性的・塑性的変形、土壌構造の破壊、間隙水や間隙空気の圧力変化と排除等が複合的に生じ、さらに土壌の種類や含水量、外力の大きさや作用形態によって、その発生状況は多様に変化する。我が国は気候的にも多水分状態で土壌が圧縮されることが多く、土壌の物

理性の劣化を招いている。また、畑地における作土層の減少は水田以上に深刻化しており、昨今の農業機械の大型化、農作業の省力化や環境保全型農業の推進に伴う省力耕うん作業の普及などは、圃場における土壌踏圧をより進行させている（図1参照）。

一方、耕うんは、農業生産プロセスで固結した土壌の切削・破碎や作物残渣、雑草等を土壌中へ埋没させることが目的であり、農業生産には欠くことのできない極めて重要な作業である。このため、国内外で広く研究が行われている。近年では、作業の省力化や環

境保全型農業への関心の高まりなどから、省動力で土壌環境改善効果の高い耕うん技術（例えば、省耕起、浅耕、部分浅耕等）が開発されている。これらの耕うん技術は実機試験や栽培試験等によって、その効果が実証されているものの、これらの耕うんメカニズムについてはプロセス全般を解明するまでには至っていない。このため、近年では、個別要素法等の数値シミュレーションを用いて、耕うん現象を再現・解析しようとする試みが行われている。同手法は個々の粒子の運動方程式を解くことにより粒状集合体の力学挙動を計算できるので、耕うんのような土壌の切削・破壊現象の現実的表現には極めて有効である。

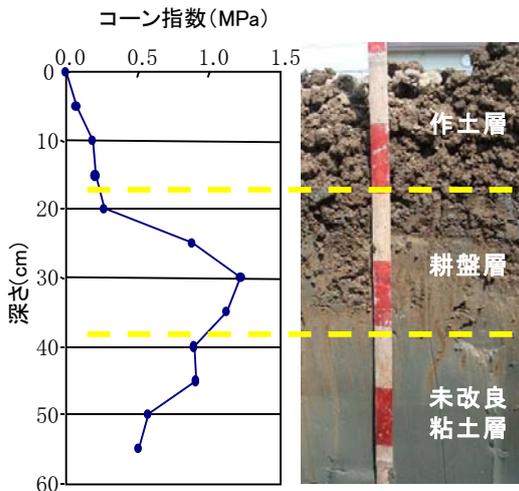


図1 踏圧により耕盤の発達した土壌

2. 研究の目的

本研究では、土壌と耕うん機器の力学的相互作用である耕うんのメカニズムやそのプロセスの解明を行うため、数値計算力学的手法の一手法である三次元個別要素法を用いた耕うんシミュレータの開発を試みた。本シミュレータを用いて、サイドディスクによる小明渠作溝およびはつ土板ブラウによる耕うんの様子を再現するとともに、得られた結果を実測結果と比較・照査することにより、その妥当性を検討した。

3. 研究の方法

図2および表1に小明渠作溝解析に用いたモデルおよび解析パラメータをそれぞれ示す。本解析には、市販の3次元個別要素解析コードであるPFC3D (ITASCA)を採用した。図中のサイドディスクの形状モデルは設計図面から作成した。土壌モデルは、粒子間にフォークトモデル、スライダモデル、ボンド要素モデル（本研究では粘性土壌の表現にPFC3Dに付属するパラレルボンドモデルを採用）を用いることにより、粒子間の反発、粘性、摩擦、固着等の力学挙動を再現できる。

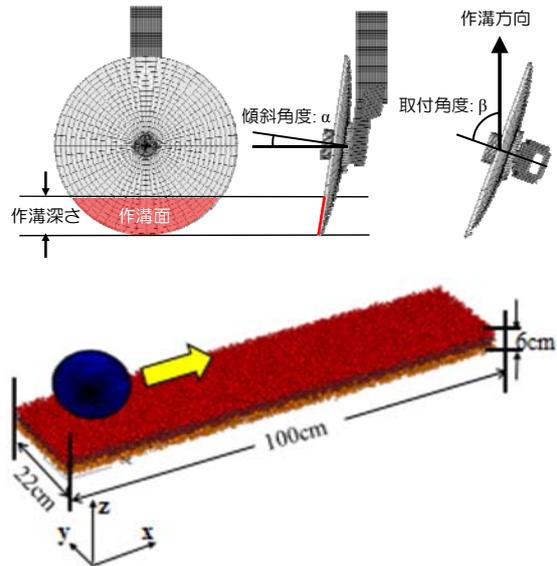


図2 個別要素解析モデル

表1 解析条件

| 土壌モデル | |
|---------------------------|---------------------|
| 粒子径(mm) | 2-6 |
| 粒子密度 (kg/m ³) | 2640 |
| 法線方向バネ定数(kN/m) | 1.0×10 ³ |
| 接線方向バネ定数(kN/m) | 2.5×10 ² |
| 減衰比 | 0.3 |
| 摩擦係数 | 1.0 |
| サイドディスクモデル | |
| 作溝深さ (cm) | 3.5 |
| 傾斜角度: α (°) | 0 |
| 取付角度: β (°) | 65, 70, 75 |
| 作溝速度 (cm/s) | 5.4 |
| 法線方向バネ定数(kN/m) | 1.0×10 ⁵ |
| 接線方向バネ定数(kN/m) | 1.0×10 ⁵ |
| 減衰比 | 0.3 |
| 摩擦係数 | 0.5 |

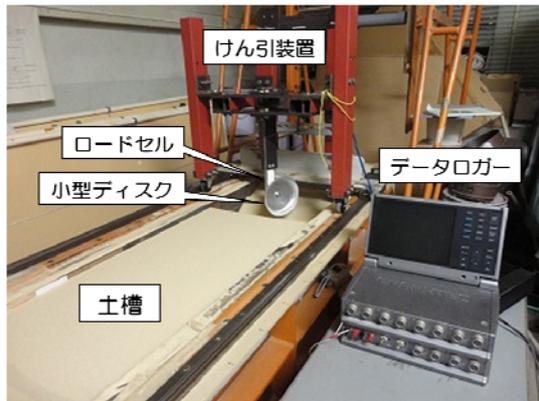


図3 耕うん実験装置の構成

一方、耕うんシミュレータの解析精度を評価するために、耕うん実験装置を作製した。図3に実験装置の構成を示す。本装置は、耕うん装置のモデルを装着可能なけん引装置、土槽、データロガ（データ記録装置）から構成される。実験は、豊浦砂（粒径約 0.1～

0.4mm)を土槽に充填し、けん引装置に装着した耕うん装置モデル(図はサイドディスクの小型模型を装着している)を一定速度で移動させることにより、耕うんの様子を再現した。耕うん装置モデルに作用する土壤抵抗は、けん引装置のフレームに取り付けたロードセル(荷重測定器)により測定した。実験では、ディスクの取付角度(表1参照)を変えて、計3回ずつ実験を行った。測定結果はデータログで記録した。耕うん実験終了後、三次元レーザスキャナを用いて土壤表面を上方より撮影することにより、作溝痕断面の形状を測定した。

4. 研究成果

図4に小明渠作溝時のディスク表面荷重の解析結果を示す。表面荷重は取付角度の減少により小さくなる傾向を示す一方、表面荷重は上下に激しく振動する結果となった。これは解析時間の関係から土壤モデルの粒子サイズを小さくできなかったためと考えられた。図5に同様の条件で行った小明渠作溝実験の結果を示す。実測結果では、表面荷重は解析結果に比べて振動が少なく、若干大きいものの、取付角度との関係は概ね一致することがわかった。

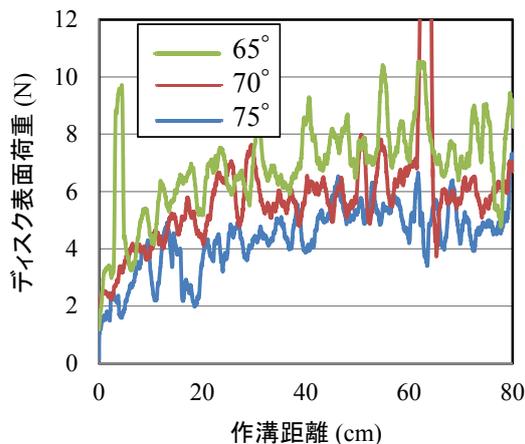


図4 小明渠作溝時のディスク表面荷重の変化(解析結果)

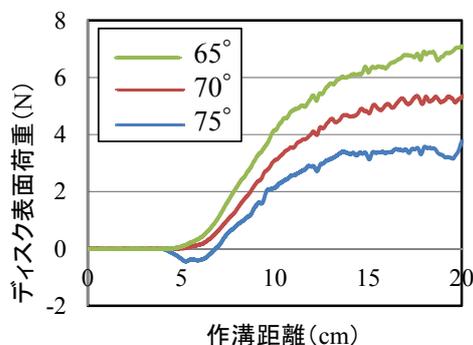


図5 小明渠作溝時のディスク表面荷重の変化(解析結果)

図6に三次元スキャナで測定した作溝断面の比較結果を示す。本結果からわかるように作溝断面のパターンはおおよそ一致することがわかった。図7に示されるように作溝痕の形状を定義し、各取付角度の解析および実験結果から算出した各特徴量の比較結果を表2に示す。作溝幅については、両者に差異が認められたが、その他の値については明瞭な差異は認められなかった。作溝幅に差異が生じた原因としては、解析で用いた土壤の粒子サイズが実験で用いた豊浦砂の粒子サイズに比べ大きく異なる点が考えられた。

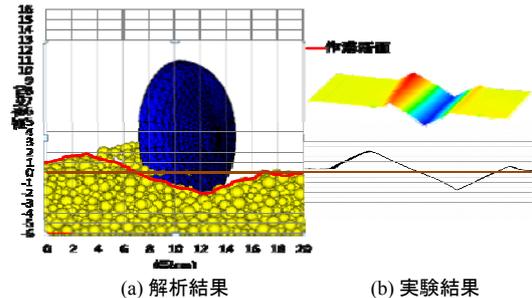


図6 三次元スキャナで測定した作溝断面の比較結果

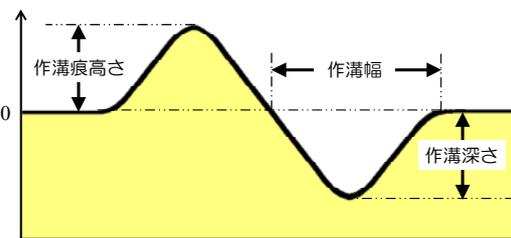


図7 作溝痕形状の定義

表2 各取付角度の解析および実験結果から算出した作溝痕特徴量の比較結果

| $\beta = 65^\circ$ | 解析結果 | 実験結果 |
|--------------------|------|------|
| 作溝深さ (mm) | 22 | 21.2 |
| 作溝痕高さ (mm) | 21 | 22.4 |
| 作溝幅 (mm) | 100 | 80 |
| $\beta = 70^\circ$ | 解析結果 | 実験結果 |
| 作溝深さ (mm) | 18 | 17.5 |
| 作溝痕高さ (mm) | 20 | 21.1 |
| 作溝幅 (mm) | 90 | 71.4 |
| $\beta = 75^\circ$ | 解析結果 | 実験結果 |
| 作溝深さ (mm) | 19 | 17.6 |
| 作溝痕高さ (mm) | 15 | 14.9 |
| 作溝幅 (mm) | 80 | 63.3 |

次に土壤物性の違いが耕うん特性に及ぼす影響について調べた。図8に解析に用いた土壤モデルとプラウモデルの概要を示す。プラウの形状は九州大学附属農場で実際に使用されているはつ土板プラウを採寸し作成した。粘性土壤の表現には、粒子間の荷重とモーメントを一定の値まで拘束することのできるパラレルボンドモデルを用いて表現

した。解析では、粒子を充填した仮想土壌層内に、プラウモデルを横断させることによりプラウによる耕うん状態を再現した。

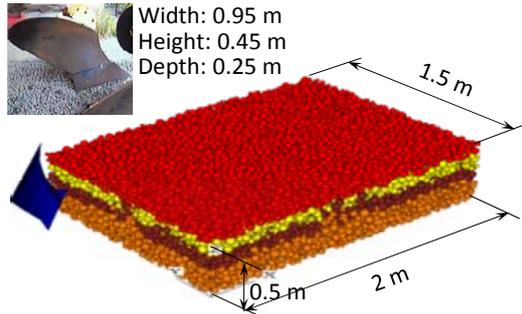


図8 土壌およびプラウモデルの概要

図9に土壌物性の違いが耕うん特性に及ぼす影響を示す。本図から明らかなように、粒子間に粘性力を持たない砂質土壌に対しては、単に土壌が切削方向右側に切り開かれるのみで、下層土壌を表層へ移送し反転させる十分な能力を持たないことがわかる。一方、粘性土壌の場合には、プラウの切削面に沿って下層土塊が右上方向に移送され、表層土壌の上に反転堆積できている様子が再現できている。

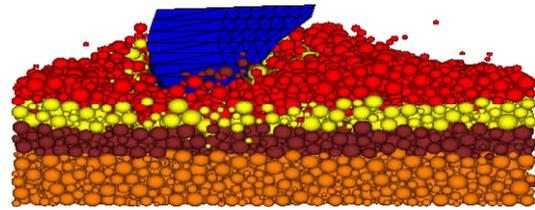
図10に耕深の違いがけん引抵抗に及ぼす影響を示す。けん引抵抗の進行方向および側方分力は耕深の増加とともに指数関数的に増加している様子がわかる。一方、鉛直分力には耕深の違いによる明瞭な差異は認められなかった。また、けん引抵抗を耕うん断面積で割った値で定義される比抵抗は、今回の解析条件では耕深15cm程度で最小値となることがわかった。本結果は、川村(農業機械学会誌, 17(3), 75-77, 1956)が行った実験とも傾向が一致している。

以上のように、開発した耕うんシミュレータを用いることにより、耕うん現象をある程度予測できることを示した。今後は、土壌モデルの精緻化や個別要素解析の高速化を行い、シミュレータの精度向上を図って行きたいと考える。

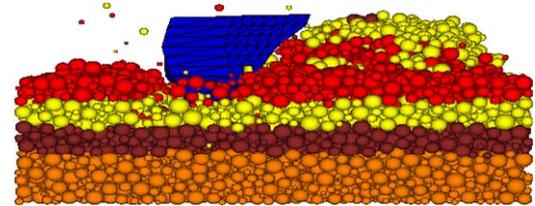
5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4件)

- (1) 大庭裕史, 岡安崇史, 寺尾悠希 (計7名2番), 小明渠作溝用サイドディスク設計のための有限要素法の適用性に関する研究, 査読有, 農業機械学会誌, 74(3), 207-212, 2012.
- (2) Okayasu, T., Morishita, K., Terao, H. (計6名1番), Modeling and prediction of soil cutting behavior by a plow, Proceedings of International Conference of Agricultural Engineering (CIGR2012), 査読無, Web, 6ページ, 2012.



(a) 砂質土壌



(b) 粘性土壌

図9 土壌粘性が耕うん特性に及ぼす影響

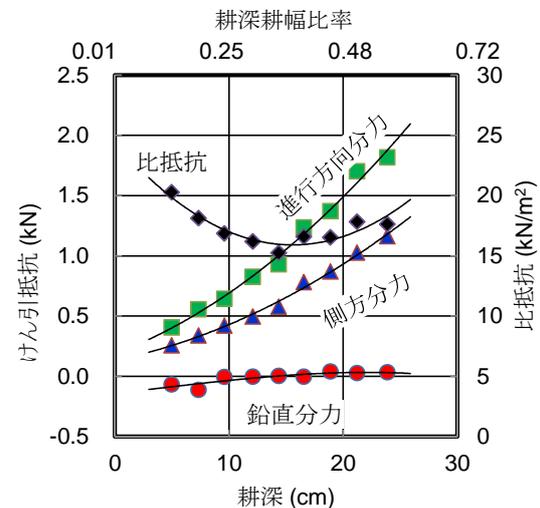


図10 耕深の違いによるけん引抵抗の変化 (解析結果)

(3) Terao, H., Okayasu, T., Fukuda, K. (計6名2番), Strength evaluation of bearing in sidedisk for cutting small ditches by finite element method, Proceedings of International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Bio-systems Engineering (ISMAB2012), 査読無, CD-ROM, 6ページ, 2012.

(4) Fukuda, T., Okayasu, T., Tsuchiya, K. (計7名2番), Modeling and Prediction of the Mechanical Interaction between Soil and Tillage Tool by DEM, Proceedings of International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD11), 査読有, 6ページ, 2013 (掲載可).

[学会発表] (計 6件)

- ①寺尾悠希, 岡安崇史, 大庭裕史 (計6名2番), 三次元有限要素解析による小明渠作溝

用サイドディスク軸受部の強度評価，第 65 回農業機械学会九州支部例会，那覇市，2011.

②岡安崇史，大庭裕史，寺尾悠希（計 6 名 1 番），小渠作溝用サイドディスク設計への三次元有限要素法の適用とその評価，第 70 回農業機械学会年次大会，弘前市，2011.

③森下健，岡安崇史，深見公一郎（計 5 名 2 番），個別要素法 (DEM) を用いた耕うん現象の予測とその妥当性の評価，第 70 回農業機械学会年次大会，弘前市，2011

④福田稔久・岡安崇史・寺尾悠希（計 6 名 2 番），摩擦接触を考慮した小渠作溝用サイドディスクの 3 次元構造解析，第 66 回農業機械学会九州支部例会，宮崎市，2012.

⑤寺尾悠希，岡安崇史，福田稔久（計 6 名 2 番），摩擦接触を考慮したサイドディスク軸受部の構造解析，農業環境工学関連学会 2012 年合同大会，宇都宮市，2012.

⑥岡安崇史，福田稔久，森下 健（計 6 名 1 番），耕うん現象の三次元シミュレーションとその妥当性評価，農業環境工学関連学会 2012 年合同大会，宇都宮市，2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡安崇史 (OKAYASU TAKASHI)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：70346831