

氏名	田中宏明
学位(専攻分野)	博士(農学)
学位記番号	論農博第2589号
学位授与の日付	平成18年1月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	個別要素法を用いた振動式全層破碎機の土層破碎メカニズム解明に関する研究
論文調査委員	(主査) 教授 笈田 昭 教授 梅田 幹雄 教授 青山 咸康

### 論文内容の要旨

耕うん用作業機械の合理的な設計を行うためには、作業機械による土への作用メカニズムを解明し、これに基づいた設計方法を確立することが不可欠である。本論文は、振動式全層破碎機による土層破碎現象に個別要素法シミュレーションを適用し、シャンクの動作による土層内での亀裂発生や土塊の生成など、変形が大きく不連続な土の破碎挙動を再現する技術の開発に取り組んだものであり、以下の6章で構成されている。

第1章では、各種耕うん用作業機の開発例や、地域における実証試験例を概観し、数値解析技術を活用した設計の必要性を述べた。また、サブソイラによる土層破碎メカニズムを明らかにするためには、土層内での亀裂の発生から土塊の生成に至る破碎挙動を再現することが重要であると指摘し、これらを解決しうる数値解析手法として個別要素法が有望であることを述べた。

第2章では、個別要素法の基礎理論について述べるとともに、土中への金属棒の貫入を題材としたシミュレーションを行い、個別要素法の土の変形への適用性を検討した。金属棒の貫入に伴う土の分離は、要素の挙動としてうまく再現することが可能であった。しかし、作用力に大きな違いが見られたため、剛体球であるアルミナ球を用いて同様の貫入実験を行い、その結果、個別要素法が離散的な現象を模擬するには有利な方法であることや、土壌の圧縮性の再現のためには、要素間の塑性変形を考慮する必要があることなど、個別要素法の特性と問題点を示した。

第3章では、個別要素法を用いた解析を行う際に実用上の問題となる、時間刻みと計算安定性について考察を行った。具体的には、要素が接触する際には系全体のエネルギーがダッシュポットの作用により散逸するという条件から、安定計算が可能な時間刻みの上限値(安定条件)を導出し、変位の計算に修正オイラー法を用いた場合には、計算の安定性が導出した安定条件とほぼ適合することを確認し、その有用性を示した。また、時間刻みに対する計算安定性を要素挙動の点から詳細に検討し、発散から収束に至るまでの要素の挙動には一定の傾向があることや、計算安定性を簡易に評価する方法を提示し、個別要素法を使用する場合の留意点をまとめた。

第4章では、振動式全層破碎機を対象に、実機を用いた実験を行い、圃場における土層破碎状況を調査するとともに、これらの破碎現象を再現・予測するためのシミュレーションモデルを個別要素法により開発した。個別要素法は、本来、離散的な物質の挙動解析に適した方法であるため、堅く締まった土層を再現できるよう、隣接している要素を互いにばねで結合させ、要素間の作用力がある一定値を越えた場合には、この結合ばねが破壊されるアルゴリズムを組み込む改良を行った。これにより、従来の解析的手法や有限要素法では再現が困難であった、シャンクの振動による土層内での亀裂の発生や進展、さらには土塊の生成に至るまでの破碎挙動が、時刻を追った現象として再現できた。圃場実験と同様、シャンクの組み合わせを6段階に変えてシミュレーションを行ったところ、掘削調査で確認したそれぞれの土層破碎パターンとよく適合することを確認した。これにより、対象土壌に対する適切なパラメータの組み合わせを見つければ、同一土壌条件下においては、機械条件の違いによる土層の破碎特性が再現可能であることを示した。

第5章では、本手法を活用した機械設計支援技術へのステップとして、同一の土壌条件下における供試機の改良を想定し、

機械の設計パラメータを変化させた破碎シミュレーションを行うとともに、供試機の仕様を評価した。供試機の設計仕様による土層破碎状況の相違は、シャンク振動によって破壊された結合ばねの数をを用いて、数値として評価できることを示した。また、シャンクから土層に与えられた単位破碎エネルギー当たりの破壊ばね数は、設計仕様を検討する際の土層破碎性能の評価指標として有効であることを示した。一連のシミュレーション結果より、シャンク振動数は、振幅が同じなら、土層に与えられた単位破碎エネルギー当たりの破壊ばね数が11 Hz でピークを示し、想定した土壌条件下においては11 Hz での利用が適切であるという結果を得た。また、カーブドシャンクの折り曲げ角度については、単位破碎エネルギー当たりの破壊ばね数が折り曲げ角度  $20^{\circ} \sim 70^{\circ}$  において高い値を示し、供試機の折り曲げ角度  $62.7^{\circ}$  がほぼ適切な設計仕様であることを示した。これらの知見により、土層の破碎メカニズムに基づいた設計を行うことが可能であることを示した。

第6章では、本研究で得られた知見をまとめ、改良を加えた個別要素法は振動式全層破碎機による土層の破碎メカニズムの再現に高い適用性を持ち、土と機械との作用メカニズムを考慮した合理的な振動式サブソイラの設計のための数値解析技術として有用であると総括した。

### 論文審査の結果の要旨

土と農業機械との作用メカニズムは、高速かつ複雑な現象である上、目視による観察が困難であることから、これらのメカニズムをシミュレーションによって解明し、合理的かつ効率的な作業機械の設計技術へと展開することが望まれている。本論文は、振動式サブソイラの一つである振動式全層破碎機による土層破碎現象の解析に個別要素法を適用し、圃場深層での土層破碎メカニズムを再現・予測する技術としての有用性を示したものであり、評価できる点は次のとおりである。

1. 本来離散的な力学特性を持つ要素間に結合ばねを付加し、個別要素法を改良したシミュレーションモデルを開発している。これにより、従来の解析的手法や連続体を基礎とする有限要素法では再現が困難とされていた、シャンクの動作による土層内での亀裂発生や土塊生成を再現している。
2. 改良したシミュレーションモデルを実際の農業機械に応用し、その適用性を検証している。実機を用いた圃場実験では、シャンクの組み合わせを6通りに変化させることによって、様々な土層破碎パターンを把握するとともに、これに対応した破碎シミュレーションを行っている。開発したモデルはそれぞれの土層破碎パターンをうまく再現できることを示し、本手法の有用性を明らかにしている。
3. 振動式全層破碎機の改良を想定したシミュレーションを実施することにより、当該機の設計パラメータを実機では実施不可能な領域にまで拡張した条件下で破碎シミュレーションを行っている。シャンクの振動周波数およびカーブドシャンクの折り曲げ角度について、破碎エネルギーの点から推奨される機械仕様が存在すること、また、実機の仕様がほぼ妥当であることを明らかにし、機械設計技術としての可能性を示している。

以上のように本論文は、個別要素法により、土と農業機械の作用メカニズムをシミュレーションによって解析し、これに基づく合理的な耕うん機械の設計法を提示したもので、農業システム工学、テラメカニクス、およびフィールドロボティクス分野の発展、ならびにサブソイラをはじめとする土壌管理用作業機械の合理的かつ効率的な設計技術の構築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、平成17年12月13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。