

学 位 論 文 題 名

高速回転切削過程における形成土塊の運動学的考察

学位論文内容の要旨

本論文は、7章から構成され、表9、図72、引用文献105編を含む160頁の和文論文であり、別に11編の参考論文が添えられている。

本研究は、不均一で非線形性を有する土に焦点をあて、高速回転切削により形成された土塊の形状やその投てき運動を明らかにすること、すなわち土の状態・運動解析を起点として、深耕アップカッターロータリ耕うんの耕うんづめ形状及び耕うん方法を改善する目的で実施されたものである。

高速回転切削機構における土塊運動の時空的な階層構造を検討するために切削土塊の大きさを基準にとり、それよりも小さなレベルにおける土塊内部のミクロ的な挙動とそれよりも大きなマクロ的な土塊運動について現象の詳細な観察から研究を開始した。土塊形成と土塊の運動から耕うん現象を帰納的に解析するためには、形成された土塊に切削履歴が乱されることなく忠実に保持されていることが条件となる。このような土塊を得るための耕うん切削刃として、すくいづめを装備した深耕アップカッターロータリ耕うん装置を供試した。また、切削された土塊には切削時の耕うんづめと土との相互作用の履歴が残される必要があることから粘性土を供試した。得られた結果は次のように要約される。

1. 高速回転切削による土塊形成

実機アップカッターロータリ耕うん装置を使用して耕うん実験を行い、高速回転切削による土塊の切削現象を観察した。

耕うん土塊の顕著な特徴は、土塊表面に周期的な細かい亀裂が発生していることであった。この亀裂間隔の周期特性は、耕うんづめ振動周波数の約120Hzとほぼ等しい周波数領域にあり、亀裂形成は耕うんづめの振動と関連のあることが認められた。また、耕うんづめ1本の耕うん抵抗波形から、回転角をパラメータとする耕うん抵抗の変動特性を検討した結果、2～3回転以内の連続した領域における切削抵抗特性の間に相互相関性が認められた。また、耕うん抵抗はその直前の耕うん抵抗の影響を強く受けるマルコフ連鎖であることが結論づけられた。

2. 形成土塊の幾何学

耕うん作用の結果としての土塊内部の応力挙動と土塊運動の記述にはフラクタル解析手法を用いることを試みた。

土塊輪郭線、土塊表面の亀裂線と亀裂分布に自己相似性が確認され、それぞれ固有のフラクタル次元が求められた。その結果、土塊形状にフラクタル性が確認された。また、土

塊亀裂分布のフラクタル次元を亀裂の存在確率として、不可逆な亀裂の発生、発達過程のシミュレーションを行った。亀裂の発生・発達はランダムウォーク過程であり、亀裂の形成は一種の相転移現象とみることができることを明らかにした。

3. 土塊亀裂の力学

耕うん土塊表面の亀裂の機能について、土塊の破壊という面から力学的な定量評価を行った。

亀裂のある土塊は、亀裂の生じていない土塊に比べて約 20%の曲げモーメントで亀裂から破壊することがわかった。また、亀裂のある土塊は土塊表面の亀裂により破壊面（＝亀裂部）における応力拡大係数は小さく、エネルギー解放率は大きく、亀裂は容易に拡大されることが示された。土塊の乾燥に関しては、土塊内部の水分移動をともなう減率乾燥期間において亀裂の効果が顕著に現れ、亀裂の土塊乾燥への効果が示された。また、土塊は吸水により亀裂部の拡大を生じて容易に2つ以上に破壊した。ロータリ耕耘作業において土塊が形成されるような土壌条件下では、切削された土塊表面に亀裂が存在することによって、土塊に及ぼされる微少な応力作用あるいは降雨などによって亀裂破壊の促進が十分期待されることが確認された。

4. 土塊の運動学

高速回転切削の模型実験装置を製作し、1本の耕うんづめに作用する正確な耕うん抵抗特性とその土塊の投てき特性の評価を行った。

耕うんづめのすくい面の長さを短くすることで、耕うん抵抗の低減が図られることがわかった。また、切削された土塊の投てき現象の観察から、細長いスライス状土塊が形成されるような粘性土の切削と投てきに関する新しい剛体投てきモデルを提案した。このモデルは、投てき時の土塊の運動を自己回転、慣性モーメントなど剛体の力学で表したものである。このモデルにより、粘性土の耕うん投てき現象の理論的解析が可能となり、耕うんづめの設計理論をさらに前進させることを可能とした。

5. 深耕ロータリ耕うんの運動量

土壌切削は土塊が角運動量を得る過程、投てきは土塊が角運動量を消費する過程という新しい視点から検討を行い、ロータリ耕うん条件の最適化を図った。この場合、耕うん抵抗の評価には、耕うん抵抗波形の時間積分値を採用し、1回の切削における耕うん軸周りの角運動量（力積のモーメント）と定義した。

その結果、現在の耕うん軸回転速度を高くした方が切削作用からのエネルギーは投てき作用へ効率的に使われることが明らかとなった。さらに、耕うん過程と投てき過程の角運動量比及び切削土塊の投てき軌跡から耕うんづめ先端の周速度は約 5.5～6.0 m/s 付近まで高めることが可能であるという結果を得た。これは、現状の実機アップカットロータリ耕うん装置よりも 40%以上の高速回転である。このような耕うん条件を採用することによって、エネルギー的により効率的で高速なロータリ耕うん作業を達成することができることがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 寺 尾 日出男

副 査 教 授 高 井 宗 宏

副 査 教 授 太 田 義 信 (岩手大学連合農学研究科)

副 査 助教授 野 口 伸

学 位 論 文 題 名

高速回転切削過程における形成土塊の運動学的考察

本論文は、7章から構成され、表9、図72、引用文献105編を含む160頁の和文論文であり、別に11編の参考論文が添えられている。

本研究は、不均一で非線形性を有する土に焦点をあて、高速回転切削により形成された土塊形状とその投てき運動を明らかにし、深耕アップカッター耕うんづめ形状及び耕うん方法を改善する目的で実施されたものである。

高速回転切削機構による土塊運動の時空間的な階層構造を検討するため、切削土塊の形成における土塊内部のミクロ的な応力挙動とマクロ的な土塊の運動について、耕うん現象の詳細な観察から研究を開始した。土塊形成とその運動から、耕うん現象を帰納的に解析するためには、形成された土塊に切削履歴が乱されることなく保持されていることが条件となる。そのため深耕アップカッター耕うん装置と粘性土を供試して得られた結果は、次のように要約される。

1. 高速回転切削による土塊形成

実機による耕うん実験において高速回転切削による土塊の切削現象を観察した。耕うん土塊の顕著な特徴は、土塊表面な細かい亀裂が発生していることであった。この亀裂間隔の周期特性は、耕うんづめの振動周波数の約120Hzとほぼ等しい周波数領域にあり、亀裂形成は耕うんづめ振動との関連が認められた。また、耕うんづめ1本の耕うん抵抗波形から、回転角をパラメータとする耕うん抵抗の変動特性を検討した結果、2～3回転以内の連続した領域における切削抵抗特性間には相互相関性が認められ、耕うん抵抗はその直前の耕うん抵抗の影響を受けるマルコフ連鎖であると結論づけた。

2. 形成土塊の幾何学

土塊内部の応力挙動と土塊運動の記述にはフラクタル解析手法を用いた。その結果は、土塊輪郭線、土塊表面の亀裂線と亀裂分布に自己相似性が確認され、それぞれ固有のフラクタル次元が求められた。また、土塊亀裂分布のフラクタル次元を亀裂の存在確率として、不可逆な亀裂の発生および発達過程のシミュレーションを行った結果、亀裂の発生とその

発達ランダムウォーク過程として表され、亀裂の形成は一種の相転移現象と見なせることを明らかにした。

3. 土塊亀裂の力学

亀裂のある土塊は、亀裂が生じていない土塊に比べて、約 20%の曲げモーメントで破壊する。また、亀裂のある土塊は表面亀裂（破壊面）の応力拡大係数は小さくて、他方、エネルギー解放率が大きく、亀裂は容易に拡大されることを示した。土塊を乾燥させた場合、減率乾燥期間において亀裂の効果が顕著に現れ、亀裂による土塊乾燥速度の効果が認められた。また、土塊は吸水により亀裂部の拡大を生じて容易に破壊した。ロータリ耕耘のような条件下では、切削された土塊表面に亀裂が数多く存在することにより、土塊に及ぼす微少な応力作用や降雨によって亀裂破壊の促進がなされることを指摘した。

4. 土塊の運動学

高速回転切削の模型実験装置を製作し、1本の耕うんづめに作用する耕うん抵抗特性と形成土塊の投てき特性の評価を行った。その結果、耕うんづめのすくい面長さを短くすることで、耕うん抵抗の低減が得られた。また、切削土塊の切削・投てき現象の観察から、細長い土塊が形成される粘性土に関する新しい剛体投てきモデルを提案した。これにより、粘性土の耕うん現象の理論的解析が可能となり、耕うんづめの設計理論を前進させた。

5. 深耕ロータリ耕うんの運動量

土壌切削は土塊が角運動量を得る過程、投てきは土塊が角運動量を消費する過程という新しい視点から、ロータリ耕うん条件の最適化を試みた。この場合、耕うん抵抗は、耕うん抵抗波形の時間積分値を採用し、1回の切削における耕うん軸周りの角運動量（力積のモーメント）と定義した。その結果、現在の耕うん軸回転速度を高めることにより、切削作用からのエネルギーは投てき作用に効率的に消費されることを明らかにした。

また、切削過程と投てき過程との角運動量の比較、及び切削土塊の投てき軌跡から、耕うんづめ先端の周速度は約 5.5~6.0 m/s 付近まで速めることが可能であるという結果を得た。これは、現状の実機アップカットロータリ耕うん装置よりも約 40%以上の高速回転となり、このような耕うん条件を採用することで、より効率的なロータリ耕うん作業を達成できる可能性を明らかにした。

以上のように、ロータリ耕うん装置による高速切削過程で形成される土塊の運動に着目して力学的解析を試み、運動学的及びエネルギー両面からロータリ耕うんづめの設計指針と耕うんの評価モデルを提示した本研究は、学術的にも高く評価されるとともに実用的にも価値あるものと判定された。よって、審査員一同は、片岡 崇が博士（農学）の学位を受ける十分な資格を有するものと認めた。