

ハウレンソウ自動収穫機における土中での根切り刃運動による土の挙動解析

藤澤彰宏^{*1}, 千田有一^{*2}, 飯塚浩二郎^{*3}

Behavior analysis of soil by motion of a root-cutting blade in soil for an automatic spinach harvester

Akihiro FUJISAWA^{*1}, Yuichi CHIDA^{*2} and Kojiro IIZUKA^{*3}

^{*1} Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, Nagano, 380-8553, Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Shinshu University

4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, Nagano, 380-8553, Japan

^{*3} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567, Japan

Received 16 August 2013

Abstract

Soil behavior generated by a root-cutting blade moving under the ground of an automatic spinach harvester for spinach for eating raw is analyzed in this paper. It is difficult to harvest spinach for eating raw by using automatic harvester because stems and leaves of spinach are soft and easily bruised. Thus the harvester which can be widely used among farmers has not been developed. To overcome the difficulty, we have been developing the automatic spinach harvester which does not bruise spinach. A trajectory of a root-cutting blade is very important to achieve this automatic harvesting without bruising spinach because the motion of cutting the root of spinach is influenced by soil which the blade presses and moves in. In this paper, accordingly, some characteristics in the behavior of soil caused by the moving blade are clarified by using the distinct element method (DEM) to investigate the automatic harvesting. In conclusion two important characteristics, the velocity of the moving blade and the volume of soil in the passage field the blade moved, are pointed out and described.

Key words : Agriculture robot, Automatic spinach harvester, Motion analysis, Behavior analysis of soil, Distinct Element Method (DEM)

1. 緒 論

生食用ハウレンソウの収穫には、全工程に対して84%もの労力を必要とするために(長野県農業経営指標, 2014), 機械による自動化が望まれている。そのため、さまざまなハウレンソウ収穫機が開発されてきたが(小林, 1998)(吉田他, 2000)(西澤, 2012)(ひらかさねと, 2015), これらの収穫機では収穫時にハウレンソウを傷つけやすいなどの問題点があった。これらの収穫機がハウレンソウを傷つける要因は、根切り後のハウレンソウを回収するために把持したり、ブラシ等によってかきこむなど作物に大きな外力を作用させることにある。そのため、収穫時にハウレンソウを傷つけない自動収穫機が開発されている(平野他, 2013)。その収穫機では根切り刃を土中に侵入させ、クローラーによって前進しながら、根切り刃でハウレンソウの根を押し切り、根切り刃後方の適切な位置に配置したベルトコンベアによって回収する収穫方法を用いている。この際、地表面の凹凸や土中の



Fig. 1 The developed automatic harvester.

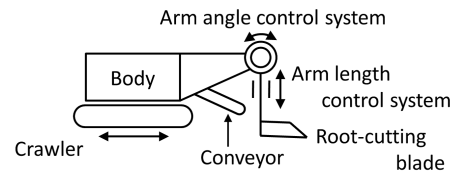


Fig. 2 The schema of the developed automatic harvester.

障害物による根切り刃の深さの変化を自動制御によって補正するために、根切り刃を取り付けているアームを伸縮させる機構（アーム長制御機構）と根切り刃を取り付けているアームの角度を変化させることで根切り刃の向いている角度を変化させる機構（角度制御機構）を有している。これらの機構を用いたもっとも簡易な根切り動作は、角度制御機構を用いて刃先角度を一定に保ったまま、土中の根切り刃を一定速度で地表面に対して並進させる動作である（並進動作）。しかし、この動作では根切り刃によって土が隆起しかつ前方に押し出され、根切りしたハウレンソウの回収を困難にする問題が確認された。本問題は西澤（2012）によっても指摘されており、ここでは把持等の妥協的な解決手段を用いていた。本問題に対して、平野他（2013）によって角度制御機構に正弦波状の入力を印加することによりアームを一定周波数で正弦波状に動作させながらクローラーで前進して根を押し切る根切り動作（円弧動作）が提案され、根切り後に把持を必要とすることなくハウレンソウをベルトコンベアへ回収できることが実験的に示されている。しかし、把持を必要としない回収を可能とする要因までは解明していない。そこで本論文では、根切り刃が土に及ぼす影響を解析し、円弧動作が並進動作に比べ把持を伴わない収穫に有利となる要因を明らかにする。根切り刃のような剛体と土の相互作用は、テラメカニクスや耕うん等の分野で研究が進んでいる。テラメカニクスの分野においては、タイヤ-砂地盤間における砂地盤のせん断特性の実験的評価（水上他，2015），月面を覆う細かい砂礫であるレゴリスを想定したヒダ付きタイヤによる土の締固めの実験的評価（飯塚，久保田，2012），砂地盤への過渡的な沈下を考慮した車輪の動力学モデルの提案（水上他，2012）のように、車輪のような地表面を推移する剛体と表層土との力学的解析や実験的評価，個別要素法による解析（中嶋，2006）が存在する。一方、耕うん等の分野では、トラクタ等へ取り付けられ圃場の地中深くへ溝掘りをする器具である振動式サブソイラによる耕うん時の切削抵抗に関する研究（酒井，1992），振動式サブソイラが深層土へ与える影響の解析（田中，2006），油圧ショベルの掘削作業の最適化計算（吉田他，2012），ブレード形状の違いによる耕うんの解析（山本他，2012），ブルドーザーによる耕うんの解析（Tsuji et al., 2012），トラクタ等へ取り付けられ圃場の土起こしをするための器具であるプラウによる耕うんの解析（Shmulevich et al., 2007）のように、深層土における剛体にかかる反力や剛体による土の大変位を力学的解析や実験，個別要素法によって評価する研究が多い。しかし、これらの先行研究ではハウレンソウ収穫時における根切り刃による土の変位のような、土中の剛体と土の細かい挙動については十分な議論がなされていない。本論文では、根切り動作による土の挙動を個別要素法を用いることによって細かく解析することで、その特徴を明確にする。

2. 開発した収穫機と収穫動作

2.1 開発した収穫機

ハウレンソウ収穫機は、根切り，回収，搬送という3つの作業手順を要求される。まず，ハウレンソウの根を根切り刃によって切断し，次に根切り後のハウレンソウを搬送機構に乗せて回収し，最後にコンテナに搬送する。現在，さまざまなハウレンソウ収穫機が考案されているが（小林，1998）（吉田他，2000）（西澤，2012）（ひらかさねと，2015），以下の制約条件を伴っている。

- 圃場の環境，ハウレンソウの品種の制約を伴う
- 土中に障害物が存在する場合においては，ハウレンソウを痛めることなく根切りできず，茎を切るなどにより商品価値を損なう場合がある

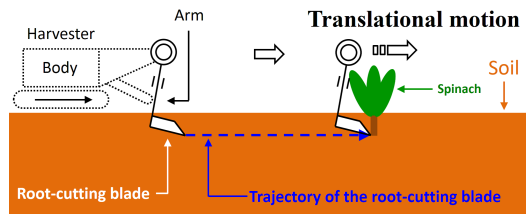


Fig. 3 The schema of the arm motion and the trajectory of the root-cutting blade in the translational motion.

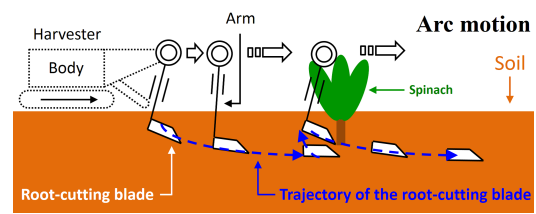


Fig. 4 The schema of the arm motion and the trajectory of the root-cutting blade in the arc motion.

- 回収時に伴う把持等の行為により、茎や葉を痛める場合がある

そこで、これらの制約条件を克服するハウレンソウ収穫機を開発している（平野他，2013）．図1に開発したハウレンソウ収穫機を，図2に開発したハウレンソウ収穫機の模式図を示す．開発した収穫機では，クローラーの推進力によって土中に侵入させた根切り刃を推移させることでハウレンソウの根を押し切り，直後の適切な位置に配置されたベルトコンベアによって回収してゆく．図2の角度制御機構を用いて根切り刃を地表面下向きに維持することにより，クローラーの推進力に伴って根切り刃に対して鉛直下向きの力が加わるようにしておくことで，根切り刃を土中に侵入させることができる．また，地表面の凹凸や土中の障害物の影響を抑制し常に根切り刃を地表面から一定の深さで推移させるために，地表面を検出する変位センサと図2のアーム長制御機構を用いた自動制御が施されている．

2.2 並進動作と円弧動作の概要

ハウレンソウ圃場において，並進動作と円弧動作とよぶ根切り動作による収穫実験をそれぞれ実施した．各動作の詳細は3章に示し，ここでは概略のみ述べる．並進動作とは，根切り刃を土中に侵入させ，根切り刃を地表面下向きに設定し，地表面と並行に根切り刃を推移させ，根を押し切る収穫方法である．図3に並進動作におけるハウレンソウ収穫機の動作と根切り刃の軌道の概要を示す．この並進動作による圃場実験では，土中を推移している根切り刃によって，前方の土をハウレンソウへかぶせてしまい，根切り後のハウレンソウをベルトコンベアによって回収できないという現象が生じた．その結果，並進動作では収穫困難となる状況がしばしば発生した．本問題は，西澤（2012）によっても指摘されており，そこではブラシによる強制的な回収により，ハウレンソウに大きな外力を加えている．一方，円弧動作とは根切り刃を土中に侵入させ，角度制御機構を用いてアームを一定周波数で正弦波状に動作させながら，クローラーを一定速度で進行させることにより，土中で根切り刃に円弧のような軌道を描かせる動作である．図4に円弧動作におけるハウレンソウ収穫機の動作と根切り刃の軌道の概要を示す．円弧動作では，前方のハウレンソウに土をかぶせることなく，根切り後のハウレンソウを成功裏にベルトコンベアに乗せることができた．さらに，円弧動作は並進動作に比べハウレンソウを収穫できる確率が高く，収穫困難となる状況はほとんど発生しなかった．以上の違いをそれぞれの動作における土の隆起の大きさの違いに起因すると考察し，土の隆起を実験によって計測した．実験は，次のように実施した．まず，土中に根切り刃を侵入させ，それぞれ並進動作と円弧動作をさせた．そして，それぞれの動作において1[m]進むごとに根切り刃の上面から隆起した土の頂上までの鉛直方向長さを測り，5[m]進めたときの平均をとった．結果として，土の隆起の高さは並進動作のときに平均77.7[mm]，円弧動作のときに平均73.7[mm]となり，土の隆起の大きさに有意な差異は認められなかった．したがって，円弧動作の優位性は土の隆起の大きさに起因するものではなく，他の要因によるものと考えられる．そこで，本論文では円弧動作の優位性について根切り動作とそれに伴う土の移動の観点で解析をし，その特徴を明らかにする．以下に，これまで得られた経験的知見をまとめておく．

- 円弧動作は並進動作よりもハウレンソウの収穫に成功する確率が高い
- 円弧動作は並進動作に比べ，土を前方にかぶせにくい
- 土の隆起の大きさは並進動作と円弧動作において有意な差異はない

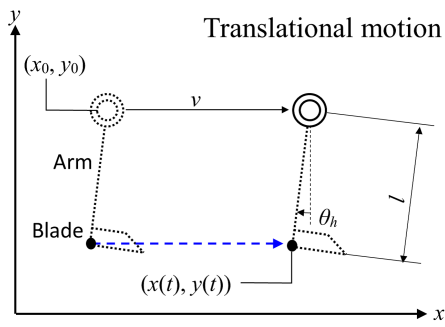


Fig. 5 The arm motion of the translational motion.

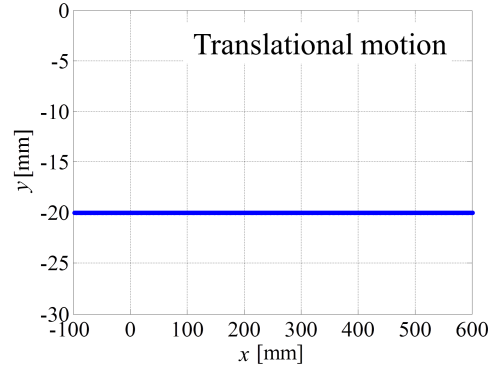


Fig. 6 A trajectory example of the translational motion using in the simulation.

Table 1 Parameters of the translational motion.

(x_0, y_0)	Initial position of rotation center of the arm	(0, 485)	[mm]
$(x(t), y(t))$	Top position of the arm		[mm]
v	Velocity of the crawler	60	[mm/s]
θ_h	Angle of the root-cutting blade	5	[deg]
l	Arm length	508	[mm]

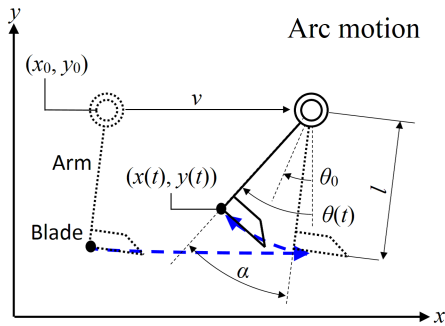


Fig. 7 The arm motion of the arc motion.

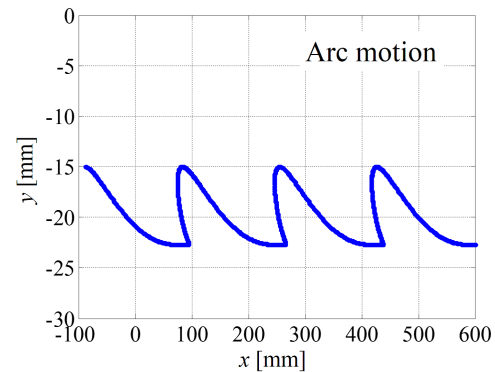


Fig. 8 A trajectory example of the arc motion using in the simulation.

3. 解析対象とする根切り動作

3.1 並進動作

並進動作の軌道を生成するための根切り刃の模式図を図5に示す。解析に用いる並進動作のパラメータを表1に示す。図5の θ_h はアームのy軸からの傾きであり、根切り刃のx軸からの傾きに対応する。また l はアーム長、 v はクローラーの推進速度である。このとき、根切り刃の根元に固定した点 $(x(t), y(t))$ は図6の軌道に沿って推移する。

3.2 円弧動作

図7に円弧動作の軌道を生成するためのアームの動作の模式図を示す。ただし、 θ_0 はアームに加える正弦波入力振幅の中心、 (x_0, y_0) はアームの回転中心の初期位置、 l はアーム長、 v はクローラーの推進速度、 $\theta(t)$ はアームのy軸からの回転角度である。円弧動作は次のようにして実現する。まず、アームの回転軸に正弦波の指令値を加えて一定周波数で正弦波状に動作させることで、根切り刃の角度を正弦波状に変化させる。同時に、クロー

Table 2 Parameters of the arc motion.

(x_0, y_0)	Initial position of rotation center of the arm	(0, 485)	[mm]
$(x(t), y(t))$	Top position of the arm		[mm]
$\theta(t)$	Angle of the arm from a vertical line		[deg]
θ_0	Center angle of the arc motion	5	[deg]
v	Velocity of the crawler	60	[mm/s]
l	Arm length	508	[mm]
α	Amplitude of the swinging arm	5	[deg]
f	Frequency of the swinging arm	0.35	[Hz]

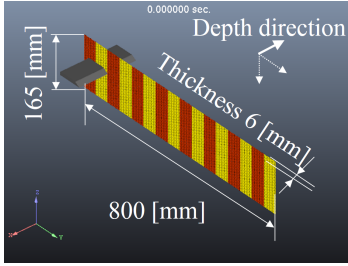


Fig. 9 The sketch of the environment for the simulation.

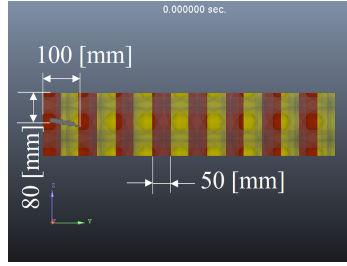


Fig. 10 The side view of the environment for the simulation.

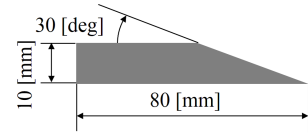


Fig. 11 The specification of the root-cutting blade.

ラーを一定速度で前進させる。このとき、アームの幾何学的関係より根切り刃根元の位置 $(x(t), y(t))$ は

$$x(t) = x_0 - l \sin \theta(t) + vt \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 - l \cos \theta(t) \quad (2)$$

$$\theta(t) = \alpha \sin 2\pi ft + \theta_0 \quad (3)$$

となる。ただし、 α [deg], f [Hz] は角度制御機構に加える正弦波入力の振幅と周波数、 t [s] は時間である。式 (1) ~ (3) を表 2 のパラメータに基づいて計算すると、図 8 に示す $(x(t), y(t))$ の軌道が生成される。以後、すべての円弧動作のパラメータは表 2 を用いる。

4. 解析方法とパラメータ設定

4.1 解析方法

根切り刃の運動に伴って発生する土の挙動を解析することにより、実験結果の評価をする。土の挙動の解析には、粉体の解析法でありさまざまな実績がある個別要素法 (DEM) や不連続流体を取り扱うことが可能な MPS 法 (山本他, 2012) が知られている。どちらも、解析対象を細かい粒子に分割することによって数値計算する方法である。このうち、MPS 法はナビエーストックス方程式に基づくため、本論文のように液体を対象としない粒子運動の解析には必ずしも適さない。そこで、本論文では DEM を利用する。DEM の利用環境として汎用パッケージソフトウェアが存在するため、本論文では汎用パッケージソフトウェアである Particleworks[®] に実装されている 3 次元 DEM 機能を使い、コンピュータ上に土壌と根切り刃を再現して並進動作と円弧動作のシミュレーションをする。図 9, 10 に構築した環境を示す。まず土壌は、直方体の容積を有する静止した透明なポリゴンの容器の中に粒子群を格納することによって再現する。計算時に、土壌を構成する粒子が透明な容器の壁面をすり抜けることがないようにするために、容器の壁厚は粒子に対して十分大きく設定する。また、計算中に容器から粒子が零れ落ちることが無いよう、容器の高さも十分大きく設定する。本解析において着目すべきは図 10 の根切り刃上部における粒子の 2 次元的な定性的変位であるため、奥行方向への粒子の変位は評価しない。一方、Particleworks[®] の DEM は 3 次元であるが、奥行方向を 6 [mm], 20 [mm] で解析したところマクロ的には土の挙動は同様の傾向を示した。そこで、本論文では 3 次元解析における計算時間の短縮を考慮し、仮想的な容器の奥行については 6 [mm] とした。一方、根切り刃は図 9 の中を左奥から右手前へと推移するが根切り刃の進行方向と根切り刃下部には十

Table 3 Parameters of a particle of soil in the simulation.

ρ_s	Density of particle	2550	[kg/m ³]
D_p	Diameter of particle	3	[mm]
μ_{sc}	Static friction coefficient between particle and the square container	0	[-]
μ_{dc}	Dynamic friction coefficient between particle and the square container	0	[-]
K	Spring constant	44800	[N/m]
E_r	Coefficient of restitution	0.0001	[-]
μ_{ss}	Static friction coefficient between particles of soil	0.9	[-]
μ_{ds}	Dynamic friction coefficient between particles of soil	0.85	[-]
μ_{sb}	Static friction coefficient between particle and the root-cutting blade	0.4	[-]
μ_{db}	Dynamic friction coefficient between particle and the root-cutting blade	0.25	[-]

分な大きさを確保することで、仮想的な容器が定性的な解析結果に影響しないようにする。また土の挙動の視認性を向上させるために、図 10 に示すように粒子は 50 [mm] ごとの縞模様にする。解析で設定した根切り刃の断面は図 11 に示すものであり、2 章における収穫機の根切り刃と同一である。その他の解析条件として、計算は可変ステップであり、初期時間増分を 0.005 [s]、初期粒子間距離を 3 [mm] に設定し、根切り刃は仮想容器を貫通させており、並進動作においては 0.5 [s] に、円弧動作においては 1.5 [s] 後に根切り刃の運動が開始するように設定している。また、DEM の計算をより安定させるため、可変ステップにおける 1 ステップをさらに固定 10 ステップに分割する機能を用いている。なお、仮想容器内における粒子の初期配置は、仮想容器の奥行きが 6 [mm] のときは図 10 において縦 57 個、横 265 個に配列された粒子群を奥行方向中央に 1 列配置した設定とした。一方、仮想容器の奥行きが 20 [mm] のときには縦 51 個、横 265 個に配列された粒子群を奥行方向 5 列配置した。その際、粒子群の奥行方向中心と仮想容器の奥行方向中央が一致するように設定した。いずれの場合も初期状態の根切り刃と干渉する粒子のみ間引きした。

4.2 解析のために設定すべきパラメータの概要

表 3 に解析で設定したパラメータを示す設定したパラメータは、粒子の密度 ρ_s 、粒子の直径 D_p 、粒子と仮想的に設定した容器の間の静止摩擦係数 μ_{sc} と動摩擦係数 μ_{dc} 、バネ定数 K 、反発係数 E_r 、粒子間の静止摩擦係数 μ_{ss} と動摩擦係数 μ_{ds} および粒子と根切り刃の間の静止摩擦係数 μ_{sb} と動摩擦係数 μ_{db} である。これらのパラメータはハウレンソウ圃場の土を可能な限り再現した値とならなければならない。このうち、 ρ_s は土の直接的な計測によって設定することができるが、その他のパラメータは容易に決定することができないため、試行錯誤的に決定する。試行錯誤において妥当なパラメータを探索しやすくするため、土と関連が深い安息角を用いて土の相互作用を決定するパラメータである K 、 E_r 、 μ_{ss} 、 μ_{ds} を決定したのち、圃場実験における土の隆起の様子シミュレーション結果を比較することで土と根切り刃の間の相互作用を決定するパラメータである μ_{sb} 、 μ_{db} を決定する。

4.3 ρ_s の設定

土の密度 ρ_s は、JIS A 1202 に基づく測定によって決定する。ただし、異なる 3 つの圃場における土の密度の平均値として求めた。その際、有効数字を考慮して 4 桁目を四捨五入した。その結果、 $\rho_s = 2550$ [kg/m³] となった。この値の妥当性について考察する。まず標準的な土壌において、豊浦標準砂は 2600 [kg/m³] (地盤工学会, 2009)、軽石を含むシラス土は 1800 [kg/m³] (地盤工学会, 2009) である。またいくつかの論文データによれば、振動式サブソイラによる土壌の挙動解析 (田中, 2006) やブレードによる耕うんの解析 (Shmulevich et al., 2007) に 2000 [kg/m³] という値が用いられている。これらの値と比較した場合、オーダーが同じであり、大きな違いが無いため妥当であると考えられる。以降の解析では、 $\rho_s = 2550$ [kg/m³] とする。

4.4 D_p と μ_{sc} 、 μ_{dc} の設定

およそ圃場の土の粒子直径を反映しつつ土の隆起を再現できる粒子直径として、 $D_p = 3.0$ [mm] を仮定する。先行研究では、粒子直径としてブレードによる解析で $D_p = 1.4 \sim 2.2$ [mm] が用いられ (Shmulevich et al., 2007)、ブ

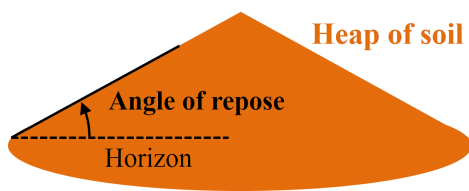


Fig. 12 Definition of an angle of repose.



Fig. 13 The angle of repose in the experiment.

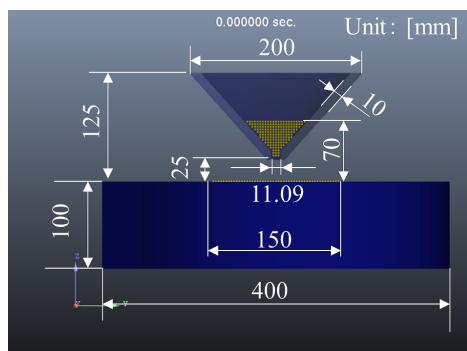


Fig. 14 Conditions of simulations for the angle of repose.

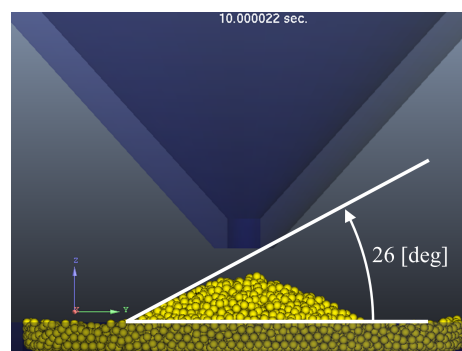


Fig. 15 A simulation result of the angle of repose.

ルドーザーによる土の移動の解析で $D_p = 4$ [mm] が用いられている (Tsuji et al., 2012) . 本論文で仮定した粒子直径は, これらに用いられている値と大きな違いがないため妥当であると考えられる. 一方, μ_{sc} と μ_{dc} は, DEM で解析するために便宜的に設定した仮想的な容器壁面との摩擦係数であり, 本来の圃場においてこのような容器壁面は存在しないことから, $\mu_{sc} = 0$, $\mu_{dc} = 0$ と設定した.

4.5 K , E_r , μ_{ss} , μ_{ds} の設定

バネ定数 K , 反発係数 E_r , 粒子間の静止摩擦係数 μ_{ss} , 粒子間の動摩擦係数 μ_{ds} は, DEM において土の特性を表すパラメータであるが, 計測によって求めることは容易ではない. そこでこれら 4 つのパラメータを基礎的な実験結果と DEM によるシミュレーション結果が可能な限り合致するように設定する. まず, 漏斗状の容器から圃場の土を流下させ, 図 12 のような円錐状の土の山を形成する. 図 12 において, 土の山の水平面からの傾斜を安息角という (Duran 他, 2002) . 図 13 に 20 [cm] 程度の高さから土を流下させて形成した土の山を示す. 図 13 から安息角を読み取ると 35 [deg] であった. Duran 他 (2002) によれば, 安息角は μ_{ss} のみに影響するパラメータであるが, いくつかのシミュレーション結果によれば, μ_{ss} のみならず他のパラメータも影響することが判明した. これは, DEM において真球かつ非粘着性粒子を仮定しているために, 安息角形成時に流下してくる粒子と, すでに流下し堆積している粒子との衝突により, 流下してくる粒子が堆積している粒子上で静止することなく転がることで粒子の山が形成されにくくなることに起因すると考えられる. そこで, 安息角の大きさをを用いてこれら 4 つのパラメータを設定する. ただし, μ_{ds} については, 静止摩擦係数と動摩擦係数の関係から $\mu_{ds} < \mu_{ss}$ と仮定した. 次に, DEM を用いた数値シミュレーションによって土の山の形成を再現し, 数値シミュレーションによる安息角が実験による安息角と可能な限り合致するように各パラメータを試行錯誤によって決定する. 図 14 に安息角を求めるための数値シミュレーションの環境を示す. 試行錯誤の結果, $K = 44800$ [N/m], $E_r = 0.0001$, $\mu_{ss} = 0.9$, $\mu_{ds} = 0.85$ となった. なお, シミュレーションにおける粒子の山は図 15 となり, 安息角を読み取ると 26 [deg] で

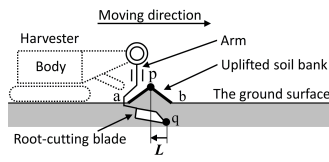


Fig. 16 The definition of the translational position of a uplifted soil bank.

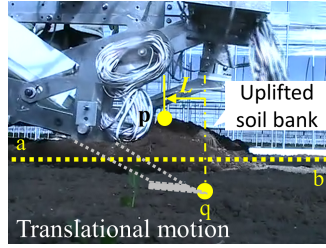


Fig. 17 The uplifted soil bank by the translational motion in the experiment.

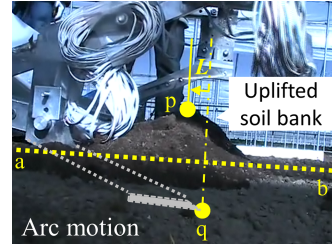


Fig. 18 The uplifted soil bank by the arc motion in the experiment.

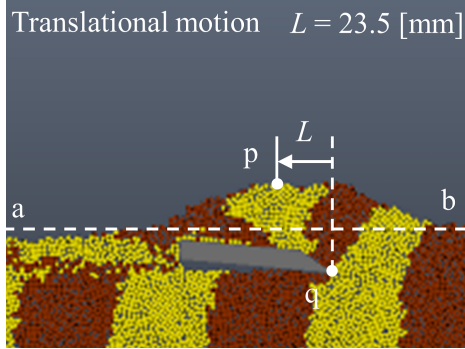


Fig. 19 The uplifted soil bank by the translational motion in the simulation.

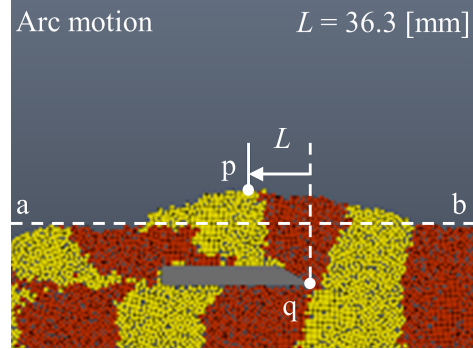


Fig. 20 The uplifted soil bank by the arc motion in the simulation.

あった。これら設定した値の妥当性を、他の文献データとの比較により考察する。 K は、振動式サブソイラによる耕うんの解析(田中, 2006)において 900000 [N/m], ブルドーザによる土の挙動解析(Tsuji et al., 2012)においては最大 800 [N/m] である。以上から, K は $800 \leq K \leq 900000$ の条件を満たしていれば, 定性的な解析結果に影響がない妥当な値であると考えられる。本論文における $K = 44800$ [N/m] はこの条件を満たしているため, 妥当であると考えられる。反発係数 E_r は, 減衰比 ζ_r に変換して他の文献と比較する。 E_r から ζ_r への変換は, 大町, 荒井(1986)の $\zeta_r = \sqrt{\frac{(\ln E_r)^2}{\pi^2 + (\ln E_r)^2}}$ という方法を利用し, $\zeta_r = 0.9465$ という値を得た。この値をもとに他の文献と比較すると, 田中(2006)は $\zeta_r = 1$ に設定し, 吉田他(2012)は $\zeta_r = 0.6 \sim 1$ に設定していることから, ζ_r は $0.6 \leq \zeta_r \leq 1$ を満たしていれば妥当であると考えられる。本論文ではこれを満たしており, ζ_r は妥当な値の範囲にあるため, 反発係数 $E_r = 0.0001$ は妥当な値であると考えられる。さらに μ_{ss} は, 標準的な土壌である豊浦標準砂と笠岡粘土においてそれぞれ $\mu_{ss} = 1.087, 0.541$ (梅崎他, 2008) である。また, Tsuji 他(2012)の粘着力を考慮しない場合の μ_{ss} と同一の値であることから, 他の文献とオーダーのずれがないため, 本論文の $\mu_{ss} = 0.9$ は妥当な値であると考えられる。

4.6 μ_{sb} と μ_{db} の設定

粒子と根切り刃の間の静止摩擦係数 μ_{sb} と粒子と根切り刃の間の動摩擦係数 μ_{db} は, 容易な計測によって求めることが困難であるため, 圃場実験結果とシミュレーション結果が可能な限り一致するように μ_{sb} と μ_{db} を設定する。圃場実験結果によれば, 図 16 に示すように根切り刃上部に土が隆起する。図 16 において, 点 p, q, a, b は土の隆起の指標となる点である。ここで, 点 p は土の隆起の頂点, 点 q は根切り刃の先端, 直線 a-b は地表面(水平面), L は点 p と点 q の間の水平方向の距離である。圃場実験における土の隆起の形状は画像データによって取得した。図 17 は並進動作, 図 18 は式(3)において $\theta(t) = 0$ [deg] となる時の円弧動作における土の隆起の画像データの例である。各画像において L はそれぞれ 62.2 [mm], 18.5 [mm] となり, 両者とも点 p は点 q よりも後方に位置している。このように, 点 p が点 q よりも後方に位置し, なおかつ L が実験結果に近い値となるよう, μ_{sb} と μ_{db} をパラメータとして DEM による解析をし, この 2 つのパラメータを試行錯誤的に決定した。その結果, $\mu_{sb} = 0.4, \mu_{db} = 0.25$ となった。このとき, DEM による土の隆起の形状は図 19 と図 20 となり, 点 p は点 q よりも後方に位

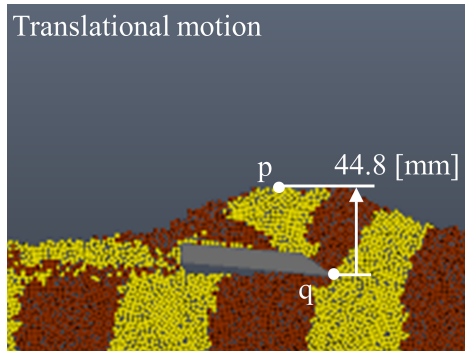


Fig. 21 A result of the simulation by the translational motion using the DEM.

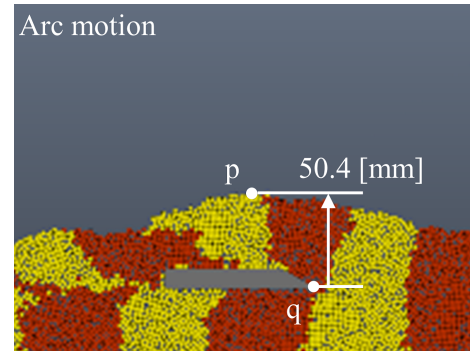


Fig. 22 A result of the simulation by the arc motion using the DEM.

置している。ただし、並進動作、円弧動作におけるそれぞれの L は 23.5 [mm], 36.3 [mm] となっており、必ずしも値まで一致していない。しかしながらこれは図 17, 18 の点 p の位置の計測誤差やパラメータ設定の影響も大きいと考えられる。さらに、本論文では並進動作と円弧動作における土の移動の特徴を解析できればよいため、土の定性的な挙動の解析ができればよい。図 19, 18 では土の隆起の有無や土の隆起と根切り刃の先端との位置関係が保たれており、本論文の目的の意味ではマクロ的に土の挙動が再現できていると考えられる。これらの値の妥当性を、他の論文データにより考察する。まず一般的な土壌と鋼材間の μ_{sb} は、豊浦標準砂と笠岡粘土においてそれぞれ $\mu_{sb} = 0.40$, $\mu_{sb} = 0.41$ (梅崎他, 2008) となる。ただし、梅崎他 (2008) は摩擦角 ϕ で μ_{sb} を記述しているため、本論文では $\mu_{sb} = \tan \phi$ (デュラン他, 2002) を用いて μ_{sb} へ変換している。また、ショベルカーによる掘削 (吉田他, 2012) では $\mu_{sb} = 0.3$ である。以上から、 μ_{sb} は $0.3 \leq \mu_{sb} \leq 0.41$ を満たしていれば妥当であると考えられる。本論文では $\mu_{sb} = 0.4$ であることから、妥当な値であると考えられる。また、 μ_{db} は動摩擦係数なので $\mu_{db} < \mu_{sb}$ であることが望ましいが、本論文ではこの点も満たしている。

5. 解析結果

5.1 解析結果の概要

4章で述べた解析条件を用いて、並進動作と円弧動作による土の隆起状況を DEM によって解析した。ただし、DEM のパラメータは表 3 の値を用いた。図 21 は並進動作、図 22 は円弧動作における結果である。以降では図 21 および図 22 の結果に基づいて、並進動作と円弧動作の得失について検討する。なお、図 21 と図 22 において点 p は隆起の頂点を、点 q は根切り刃先端を示している。図 21 と図 22 の結果は、根切り刃の一連の動作に伴い、点 p と点 q の鉛直方向距離が最大となった状態を示している。

5.2 粒子の隆起の高さの評価

図 21 と図 22 において、点 p と点 q の鉛直方向距離はそれぞれ 44.8 [mm], 50.4 [mm] となる。これは、2.2 節で述べた土の隆起の量に対応している。よって、解析結果は土の隆起の大きさに有意な差異が認められない点において圃場実験の結果を再現している。

5.3 粒子の層に対する傾きの評価

図 21 と図 22 において、根切り刃の先端の点 q における土の層の傾きに注目する。そのため、新たに補助線 s-t を加えた図を図 23, 24 に示す。図 23 は並進動作、図 24 は円弧動作の解析結果である。各図において、補助線 s-t の鉛直軸からの傾きを ϕ_h , ϕ_a とすると、 $\phi_h = 33$ [deg], $\phi_a = 21$ [deg] となり、 $\phi_h > \phi_a$ となることが判明した。 ϕ_h , ϕ_a の値が小さいことは、根切り刃上部の土が前方へ押し出されにくいことを意味する。したがって、 $\phi_h > \phi_a$ であることより、円弧動作のほうが根切り刃によって土を前方に追い出しにくいといえ、収穫に有利であるといえる。

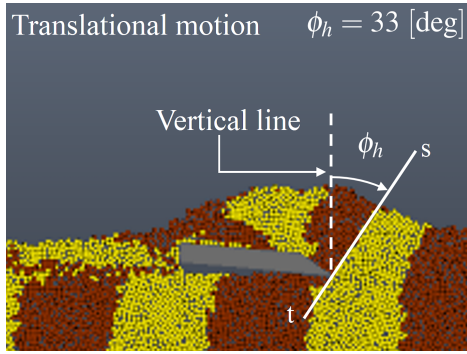


Fig. 23 Evaluation of the angle of the boundary line in the translational motion.

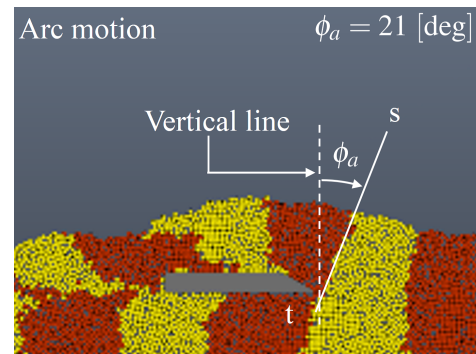


Fig. 24 Evaluation of the angle of the boundary line in the arc motion.

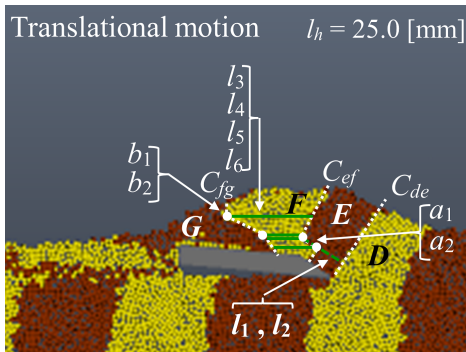


Fig. 25 Evaluation of the compression of soil in the translational motion.

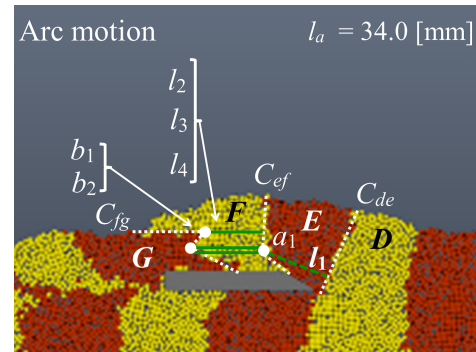


Fig. 26 Evaluation of the compression of soil in the arc motion.

5.4 粒子の層に対する圧縮の評価

図 21 と図 22 において、土に着色して表示している縞の帯の厚さが根切り刃上部において異なっている。これは、根切り刃上部の水平方向への粒子の圧縮量に差異があることを意味する。これを明確化するため、図 21 と図 22 に対して新たに補助線を加えた図を図 25 と図 26 に示す。図 25 は並進動作、図 26 は円弧動作の解析結果である。図 25 と図 26 の補助線は次の手順に従ってひかれている。図 25 については、根切り刃上部層の土を根切り刃先端部から後方部に向かって E 層、F 層とし、E 層の前方を D 層、F 層の後方を G 層とする。このとき、D 層と E 層、E 層と F 層および F 層と G 層との境界線をそれぞれ C_{de} 、 C_{ef} 、 C_{fg} とする。補助線は、E 層については C_{ef} の折点 a_1 、 a_2 から C_{de} に対して垂直に l_1 、 l_2 がひかれ、F 層については C_{ef} の折点 a_1 、 a_2 から C_{fg} に向かって l_5 、 l_6 が、また C_{fg} の折点 b_1 、 b_2 から C_{ef} に向かって l_3 、 l_4 が水平にひかれている。図 22 に対して同様の補助線を加えると図 26 となる。図 26 については、E 層に対しては C_{ef} の折点 a_1 から C_{de} に対して垂直に l_1 がひかれ、F 層に対しては C_{ef} の折点 a_1 から C_{fg} に向かって l_4 が、また C_{fg} の折点 b_1 、 b_2 から C_{ef} に向かって l_2 、 l_3 が水平にひかれている。図 25 と図 26 において、それぞれの補助線 l_i のすべての長さの平均値は、並進動作で $l_h = 25.0$ [mm]、円弧動作で $l_a = 34.0$ [mm] となった。 l_h と l_a は、水平方向に圧縮された層の厚さを示す指標と考えることができる。そこで、初期状態における層の厚さ 50 [mm] と圧縮後の層の厚さの平均値 l_h 、 l_a を用いて圧縮率 β_h および β_a を

$$\beta_h = \frac{50 - l_h}{50} \times 100 [\%], \quad \beta_a = \frac{50 - l_a}{50} \times 100 [\%]$$

と定義すると、図 25 における圧縮率は $\beta_h = 50.0$ [%] となり、図 26 における圧縮率は $\beta_a = 32.0$ [%] となる。すなわち $\beta_h > \beta_a$ となり、円弧動作のほうが圧縮率が小さくなることが判明した。水平方向における粒子の層の圧縮は、根切り後のハウレンソウの根の部分の土を硬くし回収を妨げる原因となりうるため、可能な限り小さいことが望ましい。よって、この観点においても円弧動作のほうが回収に有利であるといえる。

Table 4 Influence of velocity of the crawler by the translational motion.

	v [mm/s]	ϕ_h [deg]	l_h [mm]	β_h [%]
Case T0	60	33	25.0	50.0
Case T1	120	22	28.1	45.4
Case T2	240	17	33.6	38.8
Case T3	480	9	46.5	30.8

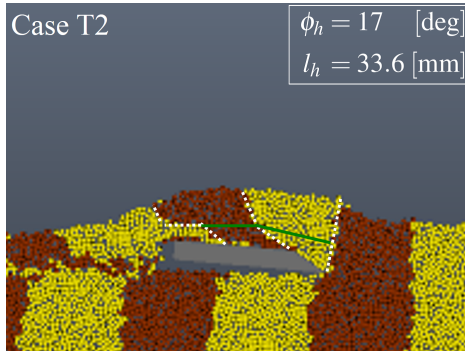


Fig. 28 Result of the simulation in Case T2.

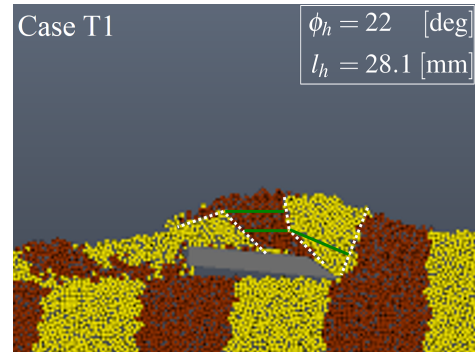


Fig. 27 Result of the simulation in Case T1.

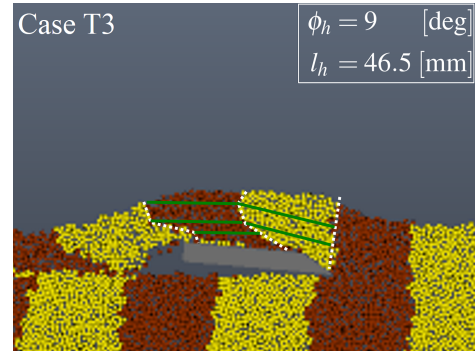


Fig. 29 Result of the simulation in Case T3.

6. 考 察

6.1 クローラーの移動速度 v の影響

根切り動作における土と根切り刃の相互作用には摩擦の影響が大きいと考えられる。摩擦力に影響を及ぼすパラメータとして、クローラーの移動速度 v が考えられる。そこで、並進動作と円弧動作において、クローラーの移動速度を新たに3種類に設定し、その影響を調べる。解析の環境と粒子のパラメータは4章と同一とし、クローラーの移動速度 v のみを変えた結果を表4、5に示す。ただし、表4は並進動作の結果であり、表5は円弧動作の結果である。また、Case T0とCase A0は5.3、5.4節の結果である。さらに、図27、28、29に並進動作の結果の図を、図30、31、32に円弧動作の結果の図を示す。それぞれの図は、最も土の隆起が大きくなった際の状態を示す。5.3、5.4節と同様の方法で ϕ_h 、 l_h 、 β_h 、 ϕ_a 、 l_a 、 β_a を求めると表4と表5の各値となり、並進動作においてクローラーの推進速度を上げると境界線の傾き ϕ_h と圧縮率 β_h は小さくなり、回収に有利に作用することが判明した。また、円弧動作については、 v と ϕ_a に v と ϕ_h のような単調減少な関係は見られないが、 v を上げることで ϕ_a 、 β_a が小さくなり、回収に有利に作用することが判明した。さらに、Case T1とCase A1、Case T2とCase A2、Case T3とCase A3を比較すると、全ての場合において $\phi_h > \phi_a$ 、 $\beta_h > \beta_a$ となり、並進動作よりも円弧動作のほうが回収に有利に作用することが判明した。

以上をもとに、並進動作と円弧動作について改めて考察する。並進動作中の根切り刃の移動速度は、クローラーの移動速度 v のみによって決まるが、円弧動作中の根切り刃の移動速度は、クローラーの移動速度 v に加えアームを振る周速度の2つの速度の和となる。そのため、クローラーの移動速度 v が同じ場合、アームを振る周速度の分だけ円弧動作のほうが土壌をせん断する速度が速く有利な条件となる。そのため、円弧動作のほうが収穫に有利に機能したと考えられる。

6.2 根切り刃が通過する体積に関する考察

根切り刃が押しつけた土は、根切り刃の上方または前方へ移動することから、根切り刃が押しつける土の量は少ないほど有利と考えられる。根切り動作は図5あるいは図7の $x-y$ 平面内の2次元運動ととらえることができることから、 $x-y$ 平面で根切り刃が通過する面積は根切り刃の奥行方向の長さまで考慮した3次元空間におい

Table 5 Influence of velocity of the crawler by the arc motion.

	v [mm/s]	ϕ_a [deg]	l_a [mm]	β_a [%]
Case A0	60	21	34.0	32.0
Case A1	120	7	47.6	4.8
Case A2	240	9	51.1	-2.2
Case A3	480	7	50.7	-1.4

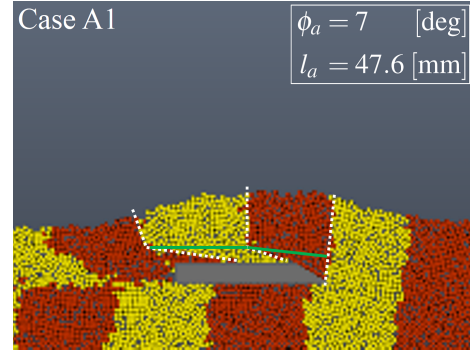


Fig. 30 Result of the simulation in Case A1.

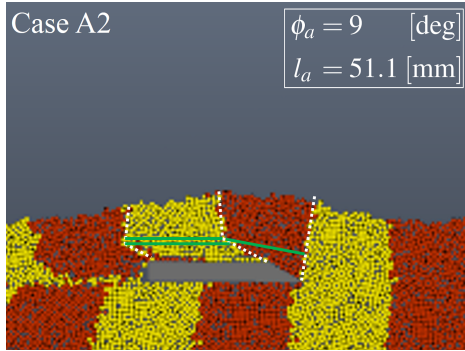


Fig. 31 Result of the simulation in Case A2.

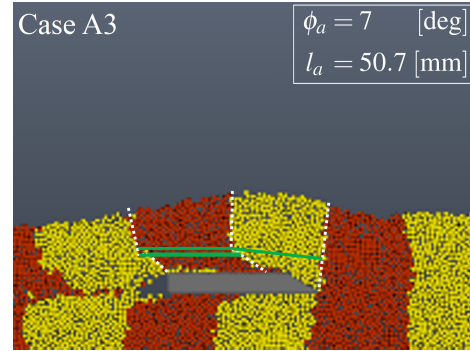


Fig. 32 Result of the simulation in Case A3.

Translational motion

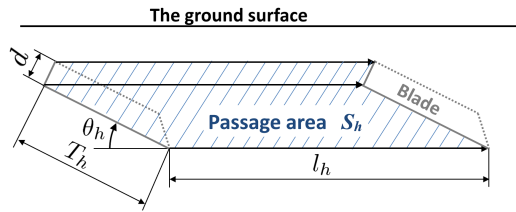


Fig. 33 Passage area of the translational motion.

Arc motion

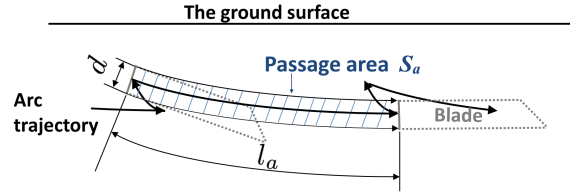


Fig. 34 Passage area of the arc motion.

て根切り刃が押しける土の体積に比例する。そこで、根切り刃が通過する面積の観点から根切り動作を考察する。図 33 は並進動作において根切り刃が通過する面積の模式図である。ただし、 $d = 10$ [mm] は根切り刃の厚さ、 $T_h = 80$ [mm] は根切り刃の幅、 $l_h = 174.7$ [mm] は並進動作における根切り刃の移動距離、 $\theta_h = 5$ [deg] は並進動作における根切り刃の地表面からの傾きである。並進動作においては、根切り刃が地表面へ露出しハウレンソウを傷つけることが無いよう、根切り刃に対して常に鉛直下向きの力が加わるようにするために、根切り刃は地表面下向きとなっている。圃場実験では、 $\theta_h = 5$ [deg] は根切り刃進行に伴って刃が地表面に露出しない最小値であった。根切り刃の断面形状は図 11 と同一である。このとき根切り刃の通過面積 S_h は、図 33 における幾何学的関係から

$$S_h = l_h d \cos \theta_h + l_h T_h \sin \theta_h$$

によって求めることができ、 $S_h = 2959$ [mm²] となる。次に、円弧動作について考える。図 34 に、根切り刃の通過面積の模式図を示す。ここで、 l_a は円弧動作における根切り刃の移動距離を表す。また、 l_a については並進動作と円弧動作の評価が対等となるようにするために、水平進行方向への移動距離は l_h とした。このとき、根切り刃の通過面積 S_a は、根切り刃の進行方向への移動量が支配的であると近似して考えると、図 34 より

$$S_a = l_a d$$

により求められる。 l_a は4章の解析で使用した軌道を数値積分することによって取得し、 $l_a = 174.9$ [mm] となった。このとき、根切り刃の通過面積は $S_a = 1749$ [mm²] となり、 $S_h > S_a$ であることがわかる。これより、円弧動作の通過面積のほうが小さいことがわかり、円弧動作のほうが回収に有利に機能したと考えられる。

7. 結 論

本論文では、根切り刃の並進動作と円弧動作の2つの動作を対象に、土への影響をDEMを用いて解析して考察することで、自動収穫に有利になる要因を明らかにした。解析結果から、円弧動作が土の圧縮などの観点において有利に作用することを明らかにした。さらに、いくつかの考察から、根切り刃が土をせん断する速度と根切り刃が押しよける土の量が回収を有利にする上で重要な要因であることが明らかとなった。これらの得失を考慮し、収穫に最適な根切り動作を提案することが今後の課題である。

謝 辞

本研究の圃場実験実施については、JA 全農長野殿、JA 長野八ヶ岳殿、株式会社西澤電機計器製作所にご協力いただきました。また、土の密度の測定試験においては、信州大学工学部土木工学科河村隆准教授および戸谷憲之技術員にご協力いただきました。記して謝意を表します。

文 献

- J. デュラン, 中西秀, 奥村剛, 粉粒体の物理学, 吉田書店 (2002).
ひらかさねっと, available from <<http://www.hirakasa.net>> (参照日 2015 年 3 月 6 日).
平野幸助, 中村雄太, 土屋貴司, 千田有一, 寫田武司, 藤ヶ崎静男, 北沢進, 軟弱野菜自動収穫機における根切り刃の2自由度制御機構の設計と制御, 第56回自動制御連合講演会 (2013), pp.1038–1042.
飯塚浩二郎, 久保田孝, 軟弱地盤走行のための月面探査ローバ用走行系検証, 科学・技術研究, Vol.1, No.1 (2012), pp.49–55.
小林由喜也, 簡易型ハウレンソウ収穫機の開発 (第1報), 農業機械学会誌, Vol.60, No.2 (1998), pp.103–110.
水上憲明, 石上玄也, 吉光徹雄, 久保田孝, 車輪走行実験による沈下過渡状態におけるせん断変形モデル有効性の評価, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00514.
水上憲明, 吉光徹雄, 久保田孝, 動的沈下を考慮に入れたテラメカニクスに基づく車輪モデルの提案, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.788 (2012), pp.1109–1118.
長野県農業経営指標, available from <<http://www.pref.nagano.lg.jp/nogi/keiei/keiei-top.html>> (参照日 2014 年 6 月 27 日).
中嶋洋, 離散要素法による土と車輪の相互作用の解析, 農業機械学会誌, Vol.68, No.4 (2006), pp.9–12.
西澤准一, ハウレンソウなど軟弱野菜の加工向け専用収穫機の開発と普及への取り組み, 農林水産技術研究ジャーナル, Vol.35, No.11(2012), pp.37–41.
大町達夫, 荒井靖博, 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, Vol.32A (1986), pp.715–723.
酒井憲司, 振動式サブソイラの加振効果に関する研究, 北海道大学農学部邦文紀要, Vol.18, No.3 (1992), pp.1–52.
Shmulevich, I., Asaf, Z. and Rubinstein, D., Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method, Soil & Tillage Research, Vol.97, No.1 (2007), pp.37–50.
田中宏明, 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, 京都大学博士論文 (2006).
地盤工学会 地盤調査法改定編集委員会, 地盤材料試験の方法と解説 二分冊の1, 地盤工学会 (2009), p.101.
Tsuji, T., Nakagawa, Y., Matsumoto, N., Kadono, Y., Takayama, T. and Tanaka, T., 3-D DEM simulation of cohesive soil-pushing behavior by bulldozer blade, Journal of Terramechanics, Vol.49, No.1 (2012), pp.37–47.
辻内伸好, 小泉孝之, 赤塚遼多, 個別要素法を用いたグロウサ地盤間相互作用解析, 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.765 (2010), pp.193–201.
梅崎健夫, 河村隆, 林錦華, 服部晃, 岡本功一, 土と摩擦低減材を塗布した鋼材の接触面における摩擦特性, 第43回地盤工学研究発表会 (2008), pp.1411–1412.
涌井太, 嘩道佳明, 軟弱地盤特性を考慮したタイヤ地盤系の運動解析, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.777 (2011), pp.280–290.

- 山本洋佑, 佐藤貴之, 安楽元気, 粒子法を用いた土壌耕うんの動的挙動シミュレーション, *Honda R&D technical review* (2012), pp.135–141.
- 吉田達哉, 小泉孝之, 辻内伸好, 陳侃, 中本洋造, 油圧シヨベルの掘削作業における効率向上の検討, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.78, No.789 (2012), pp.292–302.
- 吉田智一, 窪田潤, 前岡邦彦, ホウレンソウ収穫技術の開発 (第 1 報), *農業機械学会誌*, Vol.62, No.3 (2000), pp.149–156.

References

- Duran, J., Nakanishi, H. and Okumura, T., *The physics of the particulate object*, Yoshioka Shoten Publishing (2002)(in Japanese).
- Hirakasa-net, available from < <http://www.hirakasa.net> > (accessed on 6 March, 2015) (in Japanese).
- Hirano, K., Yuta, N., Tsuchiya, T., Chida, Y., Shimada, T., Fujigasaki, S. and Kitazawa, S., Design and control of two-degree-of-freedom position control mechanism of a root cutting blade in a spinach harvester, the 56th Japan Joint Automatic Control Conference (2013), pp.1038–1042 (in Japanese).
- Iizuka, K. and Kubota, T., Study on locomotion systems of lunar exploration rover on loose soil, *Studies in Science and Technology*, Vol.1, No.1 (2012), pp.49–55 (in Japanese).
- Kobayashi, Y., Development of simplified spinach harvester(Part 1), *JOURNAL of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, Vol.60, No.2 (1998), pp. 103–110 (in Japanese).
- Mizukami, N., Ishigami, G., Yoshimitsu, T. and Kubota, T., Evaluation of the shear deformation model in the process of wheel sinking by the wheel experiment, *Transaction of the JSME*(in Japanese), Vol. 81, No. 825 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00514.
- Mizukami, N., Yoshimitsu, T. and Kubota, T., Proposal of terramechanics-based wheel model for dynamic sinkage, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.78, No.788 (2012), pp.1109–1118 (in Japanese).
- Nakashima, H., An analysis of soil-wheel interaction by the discrete element method, *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, Vol.68, No.4 (2006), pp.9–12 (in Japanese).
- Nishizawa, J., Development and utilization of harvesting machine for spinach and other tender greens for processing use, *Research Journal of Food and Agriculture*, Vol.35, No.11 (2012), pp.37–41 (in Japanese).
- Nagano-ken Nougyou keiei sihyou, available from < <http://www.pref.nagano.lg.jp/nogi/keiei/keiei-top.html> > (accessed on 27 June, 2014) (in Japanese).
- Ohmachi, T. and Arai, Y., How to determine mechanical properties for distinct element method, *Journal of structural engineering*, Vol.32A(1986), pp.715–723 (in Japanese).
- Sakai, K., The study on the vibrating soil cutting of vibrating subsoiler, *Hokkaido university collection of scholarly and academic papers*, Vol.18, No.3 (1992), pp.1–52 (in Japanese).
- Shmulevich, I., Asaf, Z. and Rubinstein, D., Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method, *Soil & Tillage Research*, Vol.97, No.1 (2007), pp.37–50.
- Tanaka, H., Study on the solution of soil loosening mechanism by a vibrating wide subsoiler by means of the Distinct Element Method, *Doctoral Thesis at Kyoto University* (2006) (in Japanese) .
- The Japanese Geotechnical Society, *Japanese Standards and Explanations of Laboratory Tests of Geomaterials*, The Japanese Geotechnical Society (2009), p.101 (in Japanese).
- Tsuji, T., Nakagawa, Y., Matsumoto, N., Kadono, Y., Takayama, T. and Tanaka, T., 3-D DEM simulation of cohesive soil-pushing behavior by bulldozer blade, *Journal of Terramechanics*, Vol.49, No.1 (2012), pp.37–47.
- Tsujiuchi, N., Koizumi, T. and Akatsuka, R., Analysis of interaction between grouser and soil using DEM (Distinct Element Method), *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.76, No.765 (2010), pp.193–201 (in Japanese).
- Umesaki, T., Kawamura, T., Lin, J., Hattori, A. and Okamoto, K., Skin friction between soil and steel covered by a chemical agent, *The Research 43rd Research meeting of Japanese Geotechnical Society* (2008), pp.1411–1412(in

Japanese).

- Wakui, F. and Terumichi, Y., Numerical simulation of tire-ground system considering soft ground characteristics, Transaction of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.77, No.777 (2011), pp.280–290 (in Japanese).
- Yamamoto, Y., Sato, T. and Anraku, G., Dynamic simulation of soil cultivation using particle method, Honda R&D technical review (2012), pp.135–141 (in Japanese).
- Yoshida, T., Koizumi, T., Tsujiuchi, N., Chen, K. and Koizumi, Y., Examination of effective improvement in digging operation for hydraulic excavators, Transaction of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.789 (2012), pp.292–302 (in Japanese).
- Yoshida, T., Kubota, J. and Maeoka, K., Development of harvesting technology for spinach (part1), Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, Vol.62, No.3 (2000), pp.149–156 (in Japanese).