

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

Dynamic Simulation of Soil Cultivation using Particle Method

山 本 洋 佑*
Yosuke YAMAMOTO

佐 藤 貴 之*
Takayuki SATO

安 樂 元 気*
Genki ANRAKU

要 旨

耕うん機の耕うんロータは各地域の土壌条件に適した形状であることが望まれる。耕うんロータを効率的に設計するためには、さまざまな土壌条件に対して机上検討を可能とする動的挙動予測技術が求められる。

しかし、土壌耕うんは土の変形・破壊・攪拌を伴う動的な現象であり、従来の CAE 技術で一般的に用いられる有限要素法や有限体積法のような計算格子を用いる手法でこのような現象を取り扱うことは困難である。

そこで本研究では、大変形や破壊現象の解析に適した手法である粒子法を用いて三次元流体・構造解析シミュレータの開発を試みた。開発にあたり、土と剛体の境界をポリゴンで表現することで解析精度の向上を図った。また、土の崩れ方を忠実に再現するため、土の圧密の影響を考慮した破壊条件モデルを構築し、土質特性の計測によってシミュレーションの入力条件を決定した。

耕うん爪単体と耕うんロータでのシミュレーションを実施し実験と比較したところ、土の崩れ方や耕盤形状の様子が両者で一致することがわかった。本研究で開発したシミュレータによって土壌耕うんを机上で再現することが可能となり、耕うん機の効率的な開発に有効であると考えられる。

ABSTRACT

It is desirable for the rotors used in tillers to be shaped appropriately for the specific characteristics of soils in different regions. A technology for the prediction of the dynamic behavior of soils that makes it possible to study soils with varying characteristics on a computer is therefore demanded for the efficient design of tiller rotors.

However, soil cultivation is a dynamic phenomenon involving the deformation, breakage, and agitation of the soil, and it is challenging for methods that use grids, such as the finite element methods and finite volume methods generally used in conventional CAE technologies, to treat phenomena of this type. The research discussed in this paper therefore attempted to develop a simulator for three-dimensional fluid-structure analysis using the particle method, a method suited to the analysis of large-scale deformation and breaking phenomena. In conducting this development, analytical accuracy was increased by reproducing the boundaries between soil and rigid bodies using polygons. In addition, to make it possible to faithfully reproduce the break-up behavior of soil, a model of soil break-up conditions that considered the effect of soil consolidation was formulated, and measurements of soil properties were conducted in order to provide input conditions for the simulation.

Comparison of the results of simulations of a single tiller tine and an entire rotor with test results demonstrated that results matched for the break-up behavior of the soil and the shape of the plough pan. The simulator developed in the research discussed here has made it possible to reproduce soil cultivation on the desktop, and it is believed that it will be effective in helping to enable the efficient development of tillers.

1. ま え が き

耕うん機に装着されている耕うんロータは回転により土を耕す機能を備えているが、土壌の性質は地域ごとに異なるためその地域の土壌に適した耕うんロータの開発が求められる。耕うんロータを効率的に開発するために、さまざまな土壌条件における土の動的挙動予測技術が求められる。

耕うん機の開発において、従来から強度・剛性解析といった CAE 技術が活用されてきた。その一方で、耕うん後の耕土の様子を机上で検討することは困難であった。その理由として、土壌耕うんでは土の変形や破壊を再現する必要があるが、従来の計算格子を用いる手法では変形量が大きくなるにしたがって計算格子のゆがみが著しくなると計算が破綻するためである。

*汎用 R&D センター

上記のような問題を解決できる計算手法として粒子法が近年注目されている。従来の計算格子を用いる手法と異なり、粒子法は空間中を自由に移動可能な粒子を用いて連続体を離散化する。各粒子同士は格子のように隣接点との接続情報を持たないため、粒子が初期配置から大きく移動しても計算が破綻することはない。そのため自由表面問題や大変形・破壊を伴う現象を容易に取り扱うことができ、流体や構造体の動的な解析に適用されている⁽¹⁾。粒子法に分類される計算手法として、DEM(Discrete Element Method)、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)、MPS(Moving Particle Semi-implicit)などがある⁽²⁾。

本研究では土壌耕うんを机上で再現するため、MPS法^{(2), (3)}を用いて汎用R&Dセンター独自の三次元流体・構造解析シミュレータの開発を試みた。シミュレータの精度向上のために、剛体境界の取り扱いに関する改良をおこなった。また、土は圧密の影響によって局所的に強度が変化するため、土の崩れ方を忠実に再現可能とする土の破壊条件モデルを構築した。

2. シミュレータ概要

2.1. 粒子法(MPS法)の概要

本研究では粒子法の一つであるMPS法を計算手法として採用した。MPS法は非圧縮性流体解析の半陰的アルゴリズムとして1995年に開発され、構造解析および流体・構造連成解析にも適用できることが知られている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。MPS法はラグランジュ法で記述された方程式を離散化する手法である。具体的には連続体を粒子で表現し、粒子間相互作用モデルを用いて偏微分方程式を離散化する。粒子間相互作用モデルには式(1)に示す重み関数を用いる。

$$w_{ij}(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & r \leq r_e \\ 0 & r > r_e \end{cases} \quad (1)$$

r は粒子 i と粒子 j の間の距離、 r_e は影響半径と呼ばれ、粒子間相互作用の及ぶ範囲を表す。Fig. 1に影響半径の概念図を示す。各粒子に対して影響半径の内側の粒子のみの間で粒子間相互作用モデルが適用される。影響半径を大きく

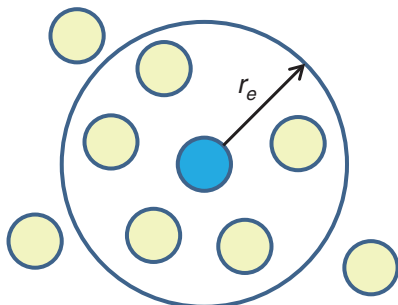


Fig. 1 Effective radius for MPS method

するほど近傍粒子の数が増えて計算精度が向上するが、計算時間も増大する。そのため、計算精度と計算時間の兼ね合いから適切な値を設定する必要がある。

MPS法では方程式の中に表れる勾配、ラプラシアン、および発散などの演算子を粒子間相互作用モデルによって離散化する。変数 ϕ またはベクトル $\vec{\phi}$ に対する勾配モデル、ラプラシアンモデル、発散モデルは重み関数を用いて以下のように定義される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} w_{ij} \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \Lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w_{ij} \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot \vec{\phi} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\vec{\phi}_j - \vec{\phi}_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w_{ij} \quad (4)$$

ここで粒子の位置ベクトル $\vec{r}$ 、空間の次元数 d とする。 Λ は次のように定義する。

$$\Lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w_{ij} |\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{\sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (5)$$

また、粒子 i の位置における粒子数密度を次のように定義する。

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w_{ij} \quad (6)$$

これは粒子 i 近傍におけるすべての粒子間の重み関数の和である。式(2)、(3)、(4)中の n^0 は初期状態における $\langle n \rangle_i$ であり、計算中は常に同じ値を使用する。

MPS法で流体を取り扱う場合、支配方程式は非圧縮性流れにおけるNavier-Stokes方程式(7)、(8)を用いる。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (8)$$

ここで時刻 t 、速度 $\vec{v}$ 、圧力 P 、密度 ρ 、動粘性係数 ν 、外力 $\vec{f}$ とする。式(7)、(8)に対して粒子間相互作用モデルの勾配モデル式(2)とラプラシアンモデル式(3)を用いて離散化する。MPS法のアルゴリズムでは、式(8)の圧力項以外について陽的に計算をおこない、次ステップにおける仮の速度を求める。その後、式(5)で算出される各粒子の粒子数密度が n^0 となるよう圧力を陰的に計算し、速度を修正する。

MPS法で構造体を取り扱う場合、式(9)に示す弾性体の支配方程式を用いる。

$$\rho \frac{\partial v_\alpha}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\lambda \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta} + 2\mu \varepsilon_{\alpha\beta}) \quad (9)$$

ここで密度 ρ 、速度 v 、位置 x 、ひずみテンソル ε であり、 δ はクロネッカのデルタである。 λ と μ はラメの弾性定数であり、ヤング率 E およびポアソン比 ν を用いて次のように表わされる。

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

式 (9) のひずみテンソルは Fig. 2 に示す粒子間相対変位を用いて定義する。粒子 i と Step 1 にある粒子 j の間の初期相対位置ベクトル $\vec{r}_{ij}^0$ に対し、粒子 j が Step 2 の位置に移動して $\vec{r}_{ij}$ となると、その差を粒子間相対変位ベクトル $\vec{u}_{ij}$ とする。さらにこれを $\vec{r}_{ij}$ に対する垂直成分 $\vec{u}_{ij}^n$ とそれ以外の成分 $\vec{u}_{ij}^s$ に分ける。この粒子間相対変位を初期粒子間距離で除算したものを MPS 法におけるひずみテンソルとして定義する。式 (9) の右辺の算出にはひずみテンソルの発散が必要となるため、粒子間相互作用モデルの発散モデル式 (4) を用いて離散化し、陽的に計算することで次ステップにおける各粒子の速度、位置を算出する。

さらに、MPS 法では粒子間の回転運動についても考慮する。粒子に働くせん断方向の力 $\vec{F}_{ij}$ と、それによって発生するモーメント $\vec{M}_{ij}$ を次のように定義する。

$$\vec{F}_{ij} = \frac{2dm}{\rho n^0} \frac{\vec{\tau}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}^0|} w_{ij} \quad (12)$$

$$M_{ij} = |\vec{r}_{ij} \times \vec{F}_{ij}| \quad (13)$$

ここで、粒子一つの質量を m 、粒子 i と粒子 j の間に働くせん断応力を $\vec{\tau}_{ij}$ とする。なお $\vec{\tau}_{ij}$ は式 (9) の右辺括弧内第 2 項により算出される。角運動量保存のため、発生したモーメントを打ち消すように粒子 i と j に対し半分ずつトルクを与える。

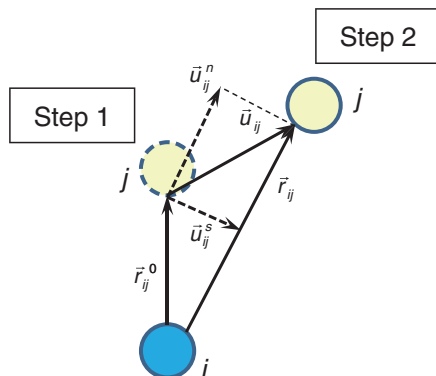


Fig. 2 Relative interparticle displacement

$$I \frac{\partial \omega_i}{\partial t} = -\frac{1}{2} \sum_{j \neq i} M_{ij} \quad (14)$$

ここで粒子一つの慣性モーメントを I 、角速度を ω とする。MPS 法では各粒子に回転の自由度を与えることで、大変形に対しても粒子間相対変位ベクトルから剛体回転成分を取り除いてひずみを計算することができる。

2.2. 精度向上のための改良

2.2.1. 剛体境界の取り扱い

一般に粒子法では剛体境界も粒子で表現する。本研究において剛体境界とは耕うん爪を意味する。境界が複雑な形状を持つ場合、その形状を正確に表現するには粒子解像度を高くする必要があるがこれは計算時間の増大を招く。この問題については、局所的に粒子解像度を変化させる手法や境界に粒子を用いない手法が提案されている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。特に境界を粒子ではなくポリゴンモデルで表現する手法は計算に必要な粒子数を削減できるため、計算負荷を低減することができる。ただし、曲率を精度良く再現するためにはポリゴンと粒子の相互作用に注意が必要である。

本研究ではポリゴンモデルを用いて境界を表現し、ある粒子に影響を及ぼすポリゴンをその粒子の速度ベクトルを用いて決定した。粒子とポリゴンモデルの関係を Fig. 3 に示す。境界は微小三角形要素 (ポリゴン) で構成され、ポリゴンは粒子が一定距離内に近づいた場合に反発力を与える境界として作用する。粒子の速度ベクトル方向に存在し、かつ粒子との距離がもっとも小さいポリゴンがその粒子に影響を及ぼす境界として選択されるため、曲率の大きい箇所でも一つの粒子に対して二つ以上のポリゴンが反発力を与えることはない。

2.2.2. 土の挙動を再現するための破壊条件モデル

土は微視的には土粒子、水、空気といった要素で構成されており (Fig. 4)、それらの比率や幾何学的配置によって特性が変化する^{(8), (9)}。引張力や圧縮力がかかることで土が変形した場合、空隙率が変化するため硬さや強度が変わることがある。数値解析では式 (9) に示す支配方程式に従う均質な連続体を仮定しているため、土の構成要素を考慮した特性を忠実に再現することは困難である。本研究では土壌の崩れ方を再現するため、破壊条件の改良を試みた。

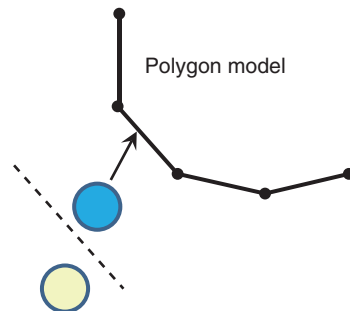


Fig. 3 Particle and polygon models

通常、MPS 法における構造体の破壊は粒子間の距離で判定をおこなうが、粒子間の応力テンソルを用いて次のような相当応力を定義した⁽¹⁰⁾。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma^n^2 + \sigma^s^2)} \quad (15)$$

ただし、 σ^n は粒子間の垂直方向の偏差応力、 σ^s は垂直方向以外の偏差応力である。これはミーゼスの相当応力と同等であり、平均垂直応力の影響を受けない。しかし、土はその構造から圧密によって特性が変化することが考えられる。そこで次のように相当応力を修正した。

$$\bar{\sigma}' = \bar{\sigma} - \alpha \sigma_m \quad (16)$$

ただし、 σ_m は平均垂直応力、 α は平均垂直応力の影響度を調整するための係数である。修正相当応力が破断強度を超えたときに破壊が生じるとした。 σ_m が正のときは引張力、負のときは圧縮力がかかることを表す。引張力がかかると修正相当応力が減少するため、強度が下がる。逆に圧縮力がかかると修正相当応力が増加して強度が上がる。引張力や圧縮力による強度変化で土の圧密の再現を図った。

2.3. シミュレータについて

本研究では、シミュレータ開発言語として Fortran90 を採用した。プログラム行数は約 7,000 行である。計算速度向上のため、OpenMP による並列化をおこなっている。

2.1. 節で述べた通り、動的な流体解析、構造解析またはそれらの連成解析が可能である。現在取り扱える物質はニュートン流体と弾性体であるが、プログラムによるカスタマイズが可能である。

形状入力について、粒子として取り扱う流体や構造体は三次元の点列データを作成し入力する。ポリゴンモデルについては 3D モデルから生成した STL モデルをそのまま入力データとして使用することができる。格子法などで発生する 3D モデルから品質の良いメッシュデータを作成する作業は不要である。ポリゴンモデルには一定速度の平行移動や回転運動を設定できる他、より複雑な動きもプログラムにより実現することができる。

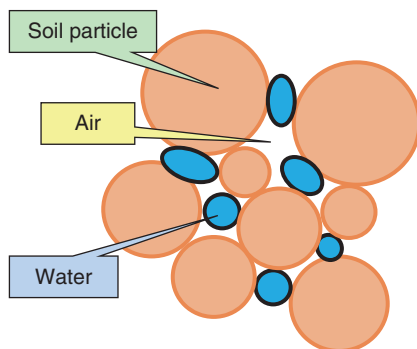


Fig. 4 Microscopic structure of soil

3. 土壌耕うん解析

3.1. 耕うん機について

Fig. 5 に自走型耕うん機の外観を示す。耕うん機下部にはロータと呼ばれる土を耕すための部品が装着されている。耕うん後の耕土の様子は作物の育成に重要な要素であるため、耕うんロータの性能評価は必要不可欠である。

3.2. 土質特性の計測

土壌耕うんのシミュレーションをおこなうにあたり対象とする土壌の特性を計測する必要がある。本研究では一軸圧縮試験によって土壌の変形係数と破断強度の計測をおこない、シミュレーションに反映した。また、取り扱う土壌を定量的に分類するために土の粒度試験をおこなった。

試験方法は JIS A 1216 に準拠して実施した⁽¹¹⁾。円柱状に圧縮した土にオートグラフで荷重をかけたとき、Fig. 6 に示すようなひずみと圧縮応力の関係が得られる。圧縮応力の最大値が破断強度となり、その 50% の圧縮応力となる点での勾配から変形係数を求めることができる。今回は粘土質土壌を対象とした。これは土壌硬度が高く、崩れにくいという特徴を持つ。実際の圃場の含水比と密度に合わ



Fig. 5 External appearance of tiller

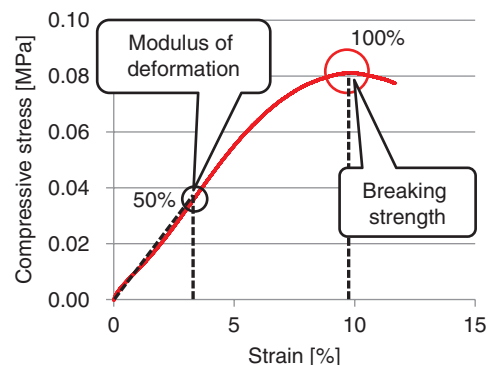


Fig. 6 Stress-strain diagram for soil

せて試験片を作成し一軸圧縮試験をおこなった。試験片によりばらつきはあるが、対象の土壌では変形係数 0.7-1.5 MPa, 破断強度 0.06-0.10 MPa となることを確認した。

また、土壌の特性はそれを構成している土粒子サイズの組成が大きく影響するため、JGS 0131 に準拠した粒度試験⁽¹²⁾をおこない、それに含まれる土粒子サイズを確認した。採取した土壌サンプルを分散剤で水に分散させて懸濁液を作り放置する。分散している土粒子は時間の経過とともに沈降し懸濁液の密度が変わる。土粒子の沈降速度はサイズが大きいほど早く小さいほどおそいため、時間経過に対する密度変化の割合から土粒子サイズの組成を知ることができる。浮ひょうを用いて各時刻の密度を計測し、ストークスの法則により Fig. 7 に示す粒径加積曲線を得る。今回対象とした粘土質土壌 (Clay soil) と、それと異なる特性を持つ黒土 (Black soil) に対して粒度試験を実施した。構成している土粒子の粒度が小さいほど粘土質土壌に近い特性を示す。Fig. 7 より、今回対象とした粘土質土壌は黒土よりも細かい土粒子で構成されていることを定量的に確認することができた。

3.3. 爪単体解析

まず、粒子で構成された直方体の土壌モデルに対して、耕うん爪単体を 10 rpm で回転させて破壊するシミュレーションを実施した。粒子間距離は 5 mm, 粒子数は約 50,000 個とし、弾性体として解析した。2.2.2. 項で記した破壊条件の異なる 2 ケースで比較をおこなった。Case 1 では式 (16) の α を 0 とし圧密の影響を考慮せず、Case 2 では式 (16) の α を 1 とし圧密の影響を考慮した。破壊条件以外についてはすべて同じ条件で解析を実施した。土の物性値については 3.2. 節で計測した粘土質土壌を想定して決定した。実際の土の崩れ方と比較するため、粘土質土壌で作成した直方体の試験片に対して 1 本の爪を回転させる実験をおこない (Fig. 8), 実験の土の崩れ方と解析結果の土の崩れ方を比較した。

実際の土壌による実験結果を Fig. 9 に示す。爪から離れた箇所でも破壊が起こり、広範囲の領域を持ち上げるように削り取る様子が観察された。土壌耕うんの解析結果を Fig.

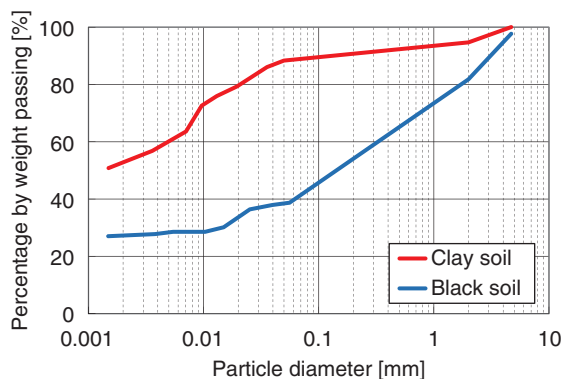


Fig. 7 Particle size distribution curve

10 に示す。Case 1 では爪近傍で土の破壊が起こるため、削り取られる土塊の形はほぼ爪の幅に近くなっている。一方、Case 2 では爪から離れた箇所でも破壊が起こるため、Case 1 よりも削り取られる土塊が大きい。この結果から、圧密を考慮した条件である Case 2 の方が、実際の土の崩

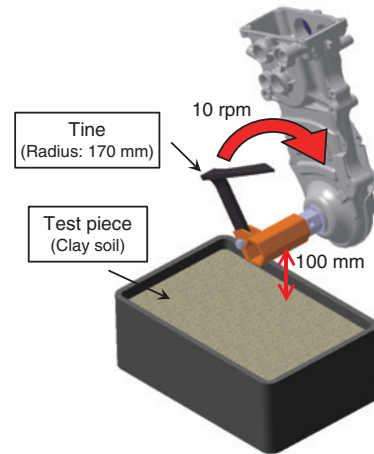


Fig. 8 Experimental apparatus for single-tine unit



Fig. 9 Soil behavior using actual machine

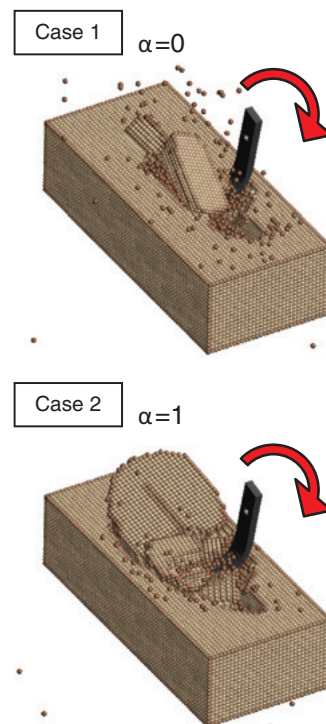


Fig. 10 Analytical results for single-tine unit

れ方に近い挙動を示すことがわかった。定量的な比較として、土の崩れ方の数値化や爪にかかる荷重による評価が今後の課題である。

3.4. 耕うんロータ全体の解析

次に耕うんロータ全体の解析をおこない、実際の耕うん機で耕うんした後の耕盤形状との比較をおこなった。耕うんロータは Fig. 11 のように複数の耕うん爪がホルダに配置された構成となっており、左右一組でミッションケースの両側に装着される。Fig. 12 に耕うんロータ全体の解析の様子を示す。異なる 2 種類の形状の耕うんロータで解析を実施し耕盤形状の比較をおこなった。Fig. 13 に示すように A 形状では耕盤中央に土が残っているのに対し、B 形状では平らになっていることがわかる。A 形状、B 形状ともに爪先端が回転中心から最も遠い点であるが、A 形状では爪先端が耕うん機中央のミッションケースから離れているのに対し、B 形状ではミッション

ケースに近い位置に爪の先端がある。そのため、A 形状では耕盤中央に土が残るが B 形状では中央の土を崩すことができると考えられる。Fig. 14 に実際の耕うん機で耕うんした後の耕盤形状の様子を示す。シミュレーションと同様に、A 形状では耕盤中央に土が残っているのに対し、B 形状では土が残っていないことがわかる。ロータ全体においても実験とシミュレーションで定性的に傾向が一致する。

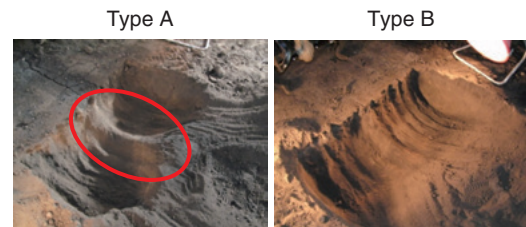


Fig. 14 Results for soil cultivation by actual machine

4. まとめ

粒子法を用いた耕うん機の土壌耕うんシミュレーション技術の開発において、以下の結論を得た。

- (1) MPS 法によって土を粒子で再現し、剛体境界をポリゴンで表現することで、耕うん爪による土の破壊や攪拌のような動的な現象を比較的安定して計算することができる。
- (2) 土の崩れ方を忠実に再現するため、圧密を考慮した破壊モデルの構築と実際の土壌の土質特性の計測をおこなった。その結果、爪単体における土の崩れ方や耕うん後の耕盤形状はシミュレーションと実験で定性的に一致する。
- (3) 本研究の成果によって土壌耕うんを机上で再現することが可能となり、耕うんロータの効率的な開発に有効であると考えられる。

参考文献

- (1) Yamamoto, Y., Sato, T., Anraku, G.: Dynamic Simulation of Water and Soil Using the Particle Method, SAE paper, 2011-32-0563(2011)
- (2) 越塚誠一: 粒子法 (計算力学レクチャーシリーズ), 日本計算工学会, p.1-139(2005)
- (3) 越塚誠一: 粒子法による流れの数値解析, ながれ 21, p.230-239(2002)
- (4) 宋武燮, 越塚誠一, 岡芳明: MPS 法による弾性構造体の動的解析, 日本機械学会論文集 (A 編) 71 巻 701 号 (2005-1), p.16-22(2005)
- (5) 田中正幸, 益永孝幸, 中川泰忠: 解像度可変型 MPS 法, Transactions of JSCES, Paper No.20090001(2009)

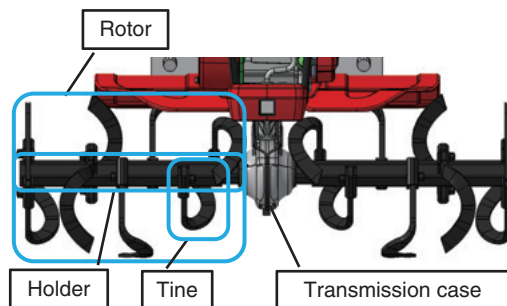


Fig. 11 External appearance of rotor



Fig. 12 Analysis of entire rotor

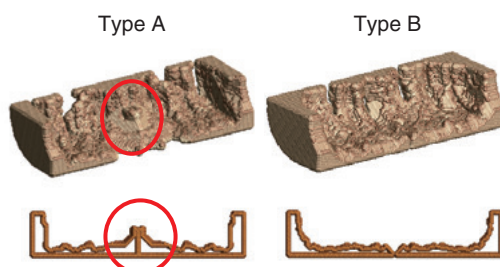


Fig. 13 Analytical results for soil cultivation

- (6) 飯田恵一郎, 秋元博路 : MPS 法を用いた水上滑走シミュレーション, 第 17 回数値流体シンポジウム, D4-3(2004)
- (7) 原田隆宏, 越塚誠一, 島崎克教 : MPS 法における壁境界計算モデルの改良, Transactions of JSCEs, Paper No.20080006(2008)
- (8) 村山朔郎 : 土の力学挙動の理論, 技報堂出版, p.1-23, p.119-221(1990)
- (9) 山口柏樹 : 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, p.1-32, p.91-106, p.141-194(1969)
- (10) 富田佳宏 : 弾塑性力学の基礎と応用, 森北出版株式会社, p.25-64(1995)
- (11) JIS A 1216: 土の一軸圧縮試験方法, p.1-5(2009)
- (12) JGS 0131: 土の粒度試験方法, p.23-33(2008)

■ 著 者 ■



山本 洋佑



佐藤 貴之



安楽 元気