

# 個別要素法によるテラメカシミュレーション

## Terra-Mechanical Simulation Using Distinct Element Method

加納 伸也  
Shinya Kanou  
天野 昌春  
Masaharu Amano  
寺坂 裕二  
Yuji Terasaka  
松本 典久  
Norihisa Matsumoto  
和田 達夫  
Tatsuo Wada

土砂や岩石を取り扱う機械を設計・製造している当社にとって、土砂岩石と機械との相互作用、あるいは接触問題の解析は、機械の作業効率、燃費、耐久性などの基本性能を合理的に設計する上で重要な研究課題の一つである。しかしながらこの種の問題は、“連続体”である装置・部品類と“不連続体”である土砂・岩石の両方を取り扱う必要があるため、従来のFEM解析のみでは不十分であり、長年の経験知に基づき、主に試作機による実験的な手法で解析が進められてきた。そこで我々は、連続体を取り扱う有限要素法と不連続体を取り扱う個別要素法を組み合わせた「テラメカシミュレーションツール」の開発に取り組んでいる。

本報では、ブルドーザのブレード掘削を例にその一端を紹介する。

To our company that designs and manufactures equipment for handling soil and rock, analyzing the interaction or contact between equipment and soil/rock is one of important subjects of research from the viewpoint of carrying out rational design of such basic equipment performances as work efficiency, fuel efficiency, and durability. However, since this problem requires treating both equipment/parts (“continuous object”) and soil/rock (“discontinuous object”) at the same time, it can hardly be solved by the conventional finite element method (FEM) alone. Because of this, the problem has so far been analyzed by using mainly an experimental technique and models based on empirical knowledge accumulated in the past. With the aim of addressing the problem more effectively, we are developing a terra-mechanical simulation tool which combines the FEM method for treating continuous elements and the distinct element method for treating discontinuous elements.

In this paper, we shall describe our terra-mechanical simulation method taking excavation with the blade of a bulldozer as an example.

*Key Words:* Terra-Mechanical Simulation, DEM (Distinct Element Method), Excavation Analysis, Analysis of Excavation with Blade, Analysis of Discontinuous Object, Simulation, CAE, Analysis of Soil Behavior.

### 1. 緒 言

土砂や岩石を取り扱う機械を設計・製造している当社にとって、土砂岩石と機械との相互作用、あるいは接触問題の解析は重要な研究課題の一つである。

すなわち、機械が土砂岩石にどのように力を作用し、それによって土砂岩石がどのような挙動を示し、そして機械にどのように反力をおよぼすか、これら一連の現象を解析することは、機械の作業効率、燃費、耐久性などの基本性能を合理的に設計する上で重要な情報を与えることになる。

この種の問題は、長年の経験知に基づいて、主に試作機による実験的な手法で解析が進められてきた。もし、コン

ピュータシミュレーションによる解析が可能になれば、より効率的に最適解を導くことができるが、“連続体”である装置・部品類と“不連続体”である土砂・岩石の両方を取り扱う必要があるため、市販の解析ツールだけでは対応できない。

そこで、我々は、連続体を取り扱う有限要素法と不連続体を取り扱う個別要素法を組み合わせた「テラメカシミュレーションツール」の開発に取り組んでいる。

本報では、ブルドーザのブレード掘削を例にその一端を紹介する。

## 2. 土砂・岩石の掘削解析手法

ブルドーザによる掘削作業を解析するためには、掘削される土砂・岩石の動きをある力学モデルに置き換えなければならない。しかしながら、固体の応力解析を行う弾性力学・塑性力学・材料力学、構造の応力解析を行う構造力学、流体を取り扱う流体力学、土を取り扱う土質力学はいずれも対象を連続体として解析を行うため、不連続体としての特徴を持つ土砂・岩石の動きを解析することは困難である。

そこでここでは、不連続体の動きを数学モデルとして解析可能な個別要素法を用い、土砂・岩石の掘削解析を試みることとした。

### 2-1 個別要素法とは

個別要素法 (Distinct Element Method) は 1971 年に Peter A.Cundall. によって提唱された理論であり、任意に存在する粒子を剛体要素と考え、その挙動を質点の運動方程式で表し、また接触した剛体要素間にはバネを設定することによって力の相互作用を表す。そして、各要素の運動方程式を解いて時間軸上で数値積分することによって、その挙動を解析するという手法である。個別要素法(以下 DEM と記す)の計算アルゴリズムを図 1 に、粒子剛体要素の接触に関する力学モデルの概念を図 2 に示す。

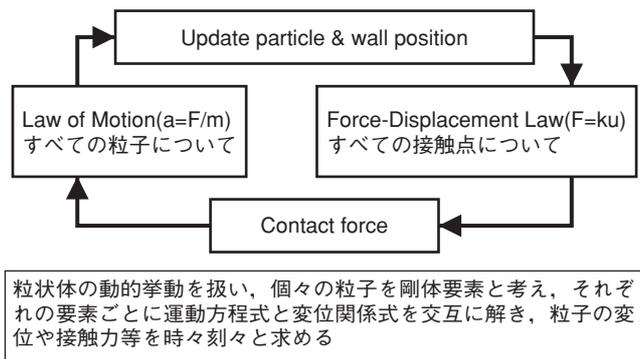


図 1 個別要素法の計算アルゴリズム

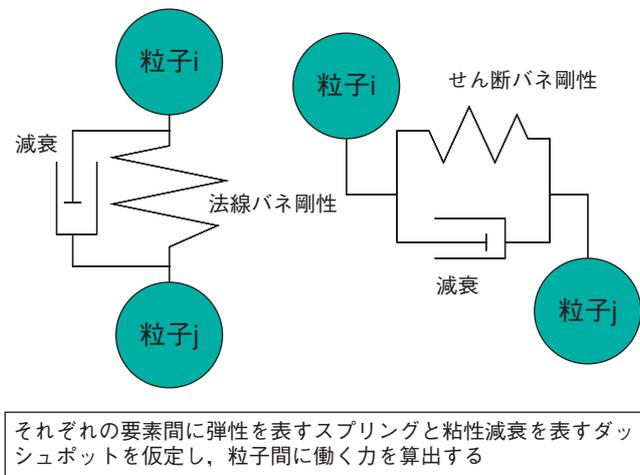


図 2 要素接触に関する力学モデル

### (1) 剛体要素の運動方程式

質量  $m_i$ 、慣性モーメント  $I_i$  のある剛体要素  $i$  についての運動方程式は次式で表される

$$F_i = m_i \cdot \ddot{u}_i \dots\dots\dots (1)$$

$$M_i = I_i \cdot \ddot{\phi}_i \dots\dots\dots (2)$$

$F_i$ : 要素に働く合力,  $M_i$ : 要素に働く合モーメント,  
 $u_i$ : 要素の変位ベクトル,  $\phi_i$ : 要素の回転変位.

変位ベクトル  $u_i$  と回転変位  $\phi_i$  は式 (1), (2) を時刻暦で数値積分することによって求めることができる。

### (2) 法線バネによって垂直方向に作用する力

図 2 に示す法線方向接触点での力学モデルは

$$\Delta \vec{e}_n = k_n \cdot \vec{u}_n \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta \vec{d}_n = \eta_n \cdot (\vec{u}_n / \Delta t) \dots\dots\dots (4)$$

$$[\vec{e}_n]_t = \Delta \vec{e}_n + [\vec{e}_n]_{t-\Delta t} \dots\dots\dots (5)$$

$$[\vec{d}_n]_t = \Delta \vec{d}_n \dots\dots\dots (6)$$

$\Delta \vec{e}_n$ :  $\Delta t$  間の垂直方向に作用するバネの力の増分

$\Delta \vec{d}_n$ :  $\Delta t$  間の垂直方向に作用する粘性抵抗の増分

$[\vec{e}_n]_t$ : 時刻  $t$  における垂直方向に作用する法線バネによる力

$[\vec{d}_n]_t$ : 時刻  $t$  における垂直方向に作用する粘性抵抗による力

$\vec{u}_n$ : 変位増分

$K_n$ : バネ定数

$\eta$ : 粘性定数

となる。ここで法線バネは引張りを認めない

### (3) せん断バネによってせん断方向に作用する力

図 2 に示すせん断方向接触点での力学モデルは

$$\Delta \vec{e}_s = k_s \cdot \vec{u}_s \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta \vec{d}_s = \eta_s \cdot (\vec{u}_s / \Delta t) \dots\dots\dots (8)$$

$$[\vec{e}_s]_t = \Delta \vec{e}_s + [\vec{e}_s]_{t-\Delta t} \dots\dots\dots (9)$$

$$[\vec{d}_s]_t = \Delta \vec{d}_s \dots\dots\dots (10)$$

$\Delta \vec{e}_s$ :  $\Delta t$  間のせん断方向に作用するバネの力の増分

$\Delta \vec{d}_s$ :  $\Delta t$  間のせん断方向に作用する粘性抵抗の増分

$[\vec{e}_s]_t$ : 時刻  $t$  におけるせん断方向に作用するせん断バネによる力

$[\vec{d}_s]_t$ : 時刻  $t$  におけるせん断方向に作用する粘性抵抗による力

$\vec{u}_s$ : 変位増分

$K_n$ : バネ定数

$\eta$ : 粘性定数

となる。ここでせん断バネは引張りを認めない。

$$[F_i]_t = [\vec{e}_n]_t + [\vec{d}_n]_t + [\vec{e}_s]_t + [\vec{d}_s]_t \dots\dots\dots (11)$$

### 3. 土砂物性値の選定

DEMを用いたブレードによる岩石・土砂の掘削解析では、表1に示すDEM解析パラメータのみを用いて岩石・土砂の動きの特性を表現しなければならない。ブレードによる掘削解析を対象とした場合、第一ステップとして解析できなければならない項目は、掘削時のブレードにかかる反力と掘削された岩石・土砂の定性的な動きである。そこでここでは、掘削時の反力を求めるためにまず必要と考えられる、土のせん断強さに対するDEM解析用物性値の算定方法と、その実施内容について示す。

表1 DEM解析パラメータ

パラメータ設定箇所	パラメータ名	単位
剛性粒子 - 剛性粒子間	剛体要素径	m
	法線バネ剛性	N/m
	専断バネ剛性	N/m
	摩擦係数	-
剛性粒子 - ブレード間	密度	kg/m <sup>3</sup>
	法線バネ剛性	N/m
	専断バネ剛性	N/m
	摩擦係数	kg/m <sup>3</sup>

#### 3-1 土のせん断強さ

土に外力が働いた場合、土の一つの面を境にすべりが生じることがある。これは、外力によって土に生じたせん断力が土のせん断抵抗を超えたことによって生じる。このせん断抵抗の最大値を土のせん断強さという。土のせん断強さは土の粒度、含水比、締固め、排水条件、堆積状態などによって変化する。

図3に示す土のせん断試験より、試料土を上下二分割できる容器に入れ、垂直荷重P<sub>N</sub>を加えたまま、水平方向のせん断力Sを与え、二つ割りにする面に沿って試料土をせん断したとする(この面をせん断面とよぶ)。

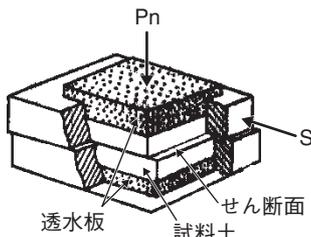


図3 土の専断試験

この時、垂直荷重を変化させて土の垂直応力σと土のせん断強さsとの関係は次式(11)、(12)、(13)で表され(せん断面積をAとする)、σとsとの間には図4に示すような直線的な関係がある。

$$\sigma = P_N/A \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (11)$$

$$s = S/A \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (12)$$

$$s = C + \sigma \tan \phi \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (13)$$

ここで C：土の粘着力、  
 φ：土のせん断抵抗角、  
 σ：垂直応力。

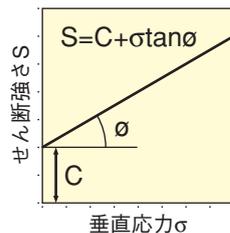


図4 土のせん断強さと垂直荷重の関係

#### 3-2 せん断強さ測定方法

上記項目に準じ、掘削試験を行う試料土のせん断強さを測定する。ただしここでは、掘削試験を行う試験環境での土のせん断強さを求めたいため、試料土を実験室に持ち込むせん断試験ではなく、野外で土のせん断強さが測定可能な簡易支持力測定器キャスポル(図5に装置概観を示す((株)マルイ製)を用いて測定することとした。キャスポルの測定原理はランマーを地面に自由落下させたときの衝撃加速度I<sub>a</sub>を測定し、I<sub>a</sub>より式(13)の粘着力Cおよびせん断抵抗角φを簡易的に求めるといものである。キャスポルを用いた掘削試験場の土の測定結果を基に計算したせん断強さSを図6に示した。実際に掘削実験に用いた土の含水率は、土の突き固め試験(JIS A 1210に準拠)で最大土密度を示した10%とした。



図5 簡易支持力測定器キャスポル概観

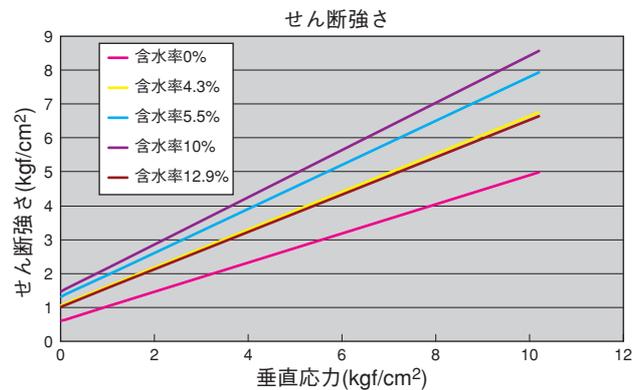


図6 キャスポルによる土の専断強さ測定結果

3-3 DEMによる土のせん断強さ解析

ブレード掘削解析を行うためには、前項の表1に示したパラメータ値を決めなければならないが、粒子-粒子間、粒子-作業機間に作用する法線およびせん断バネ剛性は、実績も多くDEM解析に一般的に用いられるコード開発元の推奨値を用いることとし、ここでは、含水率による土砂粘着力Cとの因果関係が深いと考えられる粒子間摩擦係数と、せん断抵抗角 $\phi$ に因果関係が深いと考えられる粒子径(粒子数)についてそのパラメータ値を検討することとした。

パラメータ値の算定方法は、DEMにて土のせん断試験が実行できるプログラムを作成し、3-2項と同条件にて土のせん断強さSを求め、3-2項の実験結果と比較することによって最も実験の内容を再現できる値を採用することとした。

(1) 粒子径について

粒子径の違いがせん断強さに与える影響を確認するため、垂直荷重 $P_n$ を一定として、粒子径が0.1m, 0.2m, 0.4m, の3水準に対して土のせん断試験解析を実施した。粒子の配列に関しては、粒子移動の異方性を排除するため正接する粒子が正六面体の頂点に位置するように配した。各粒子径でのせん断解析状況を図7-(a)(b)(c)に、せん断距離に対するせん断強さの粒子径別比較結果を図8に示す。図8より、粒子径によってせん断実施距離に対する粒子の乗り越え回数(グラフピーク値回数)は粒子径に依存するが、その時に発生するせん断強さはほぼ等しいことが分かる。このことから、粒子径の大きさはせん断強さに顕著に影響を及ぼさないと考えられ、後に行うブレード掘削解析では、ブレードが土に埋没している量に等しい0.1mを採用した。

(2) 粒子間摩擦係数について

次に、粒子間摩擦係数の影響について確認するためDEMによる土のせん断試験解析を実施した。

解析結果の比較を図9に示す。図9に示す垂直応力-せん断強さ曲線の結果より、摩擦係数と土のせん断強さとの間には明らかに因果関係が認められ、さらに、図6との比較を行うと、摩擦係数と含水率との間には相関関係があるように思われる。従って、摩擦係数を調節することによって、含水率による試土の粘着度を模擬できると考えた。

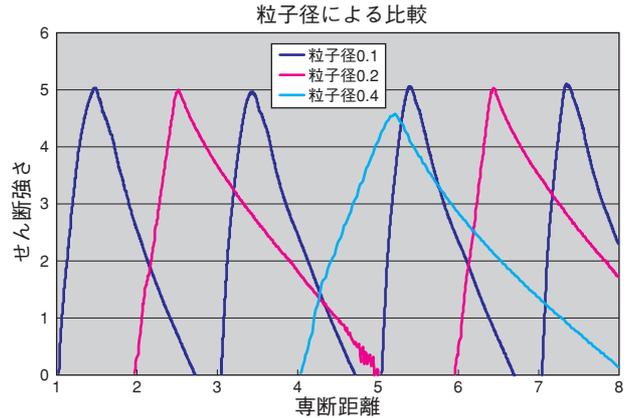


図8 粒子乗り越え時の発生専断応力

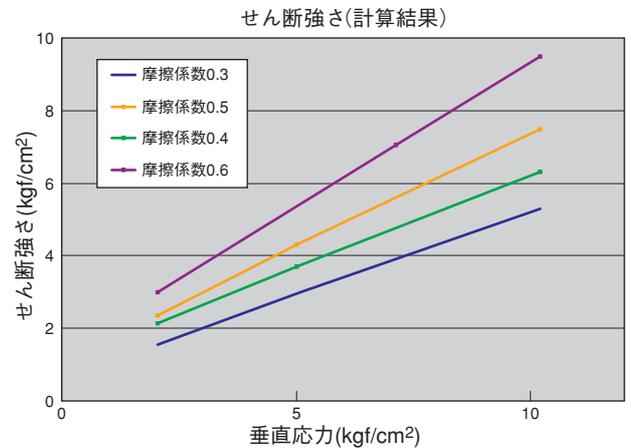


図9 摩擦係数の違いによる専断強さの差

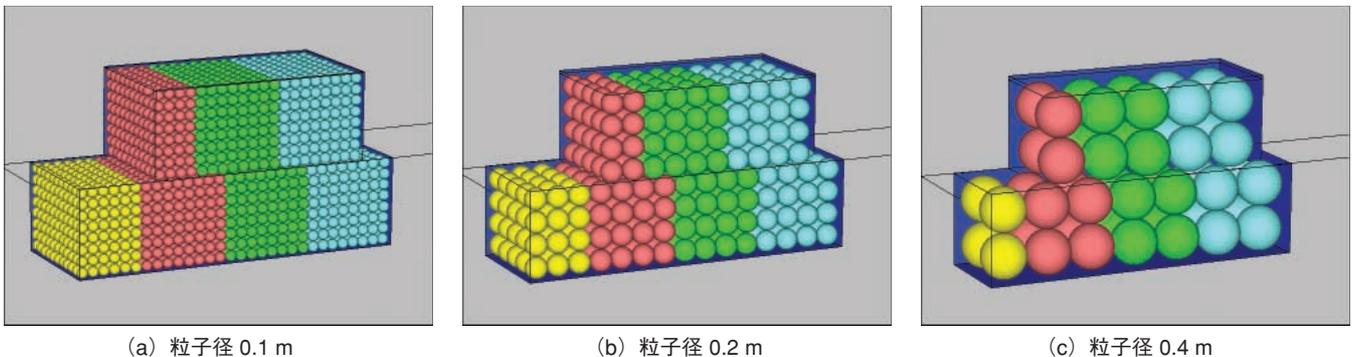


図7 DEMによる土の専断試験

ここでは、**図10**より試土の突き固め試験から決定した含水率10%のせん断強さ試験に最も解析結果が類似した摩擦係数0.55を採用することとした。

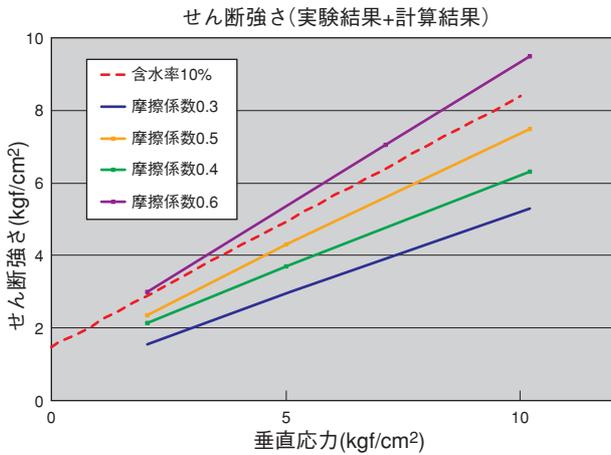


図10 せん断強さに関する解析結果と実験結果の比較

#### 4. テラメカシミュレーションの構築

前項3において求めた土砂を想定した粒子物性値を用いて、ブルドーザによる掘削試験とDEMによる掘削解析との比較をこころみた。しかしながら、DEMによる掘削解析によってブレードにかかる反力や掘削された土の動きを検討するためには、粒子を掘削するブルドーザのブレード形状が正確にモデリングされている必要がある。しかしながらDEMソフトには、粒子に外力を与えるための複雑な壁形状要素を作成する機能を備えていない。また、DEM内

で扱う壁要素は剛体要素として扱われるため、作業機の受ける土の反力によって作業機にどのような応力が発生するのかを検討することができない。そこで、個別要素法と構造解析をリンクし、テラメカシミュレーションツールを開発することによって、これらの問題を解決することとした。

##### 4-1 解析モデルの作成方法

DEM用の剛体壁要素(以下壁要素)を作成するためには、壁要素を構成する3点もしくは4点の接点(頂点)の座標値と、粒子に外力を与える面を法線方向とした半時計回りの接点の順番が必要となる。この任意の大きさの壁要素を一枚一枚手入力することによって多面体を構成し、目的とするブレード形状を作成しなければならない。しかしながら、これらの壁要素の作成手順が構造解析用のメッシュモデルのデータ内容に酷似していることに着目し、構造解析用に作成したメッシュモデルデータからDEM解析用壁要素を作成するために必要な情報を抽出するインターフェイスを作成することによって、任意の壁形状を作成することを可能とした。また、このことによって、DEM解析用モデルと構造解析用モデルが一元化できることから、DEM解析によって求められた粒子からの各壁要素接点への反力を、構造解析用の接点荷重データとして利用することで、DEM解析結果からダイレクトに構造解析を行うことが可能なテラメカシミュレーションシステムの構築を可能とした。本システムにおけるモデル作成およびデータ共有の概念を**図11**に示す。

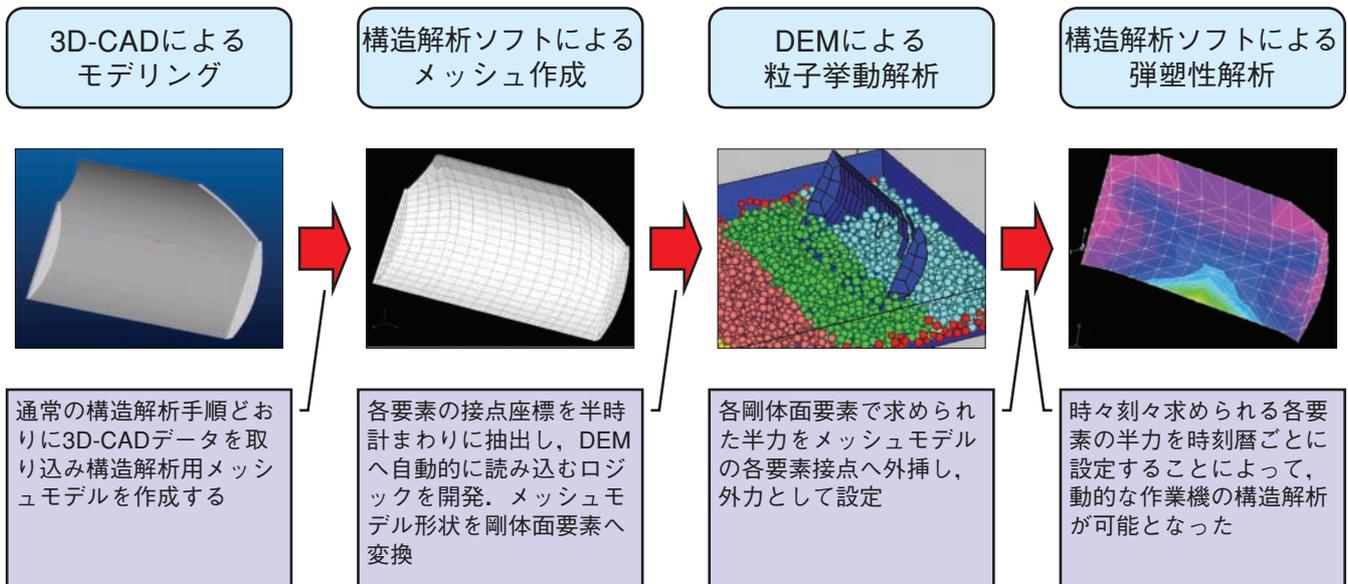


図11 テラメカシミュレーションシステムの概要

4-2 解析結果

図12に解析に用いたブルドーザ作業機3D-モデルを，図13にメッシュモデルを，図14にメッシュモデルから作成したDEM解析用壁要素モデルを示す。インターフェイスを作成したことにより，CAD-3Dモデルから構造解析用モデルを作成すると自動的にDEMで使用可能な解析モデルが作成される。

図15にDEM解析による粒子掘削状況と実際のブレードによる土砂・岩石掘削状況との比較を示す。

図15より，掘削開始から壁要素が粒子を巻き上げる様子や巻き上げられた粒子が前方へ送られながら搬送されていく様子が，実際のブレードによって掘削・搬送されていく土砂の様子とよく一致している。

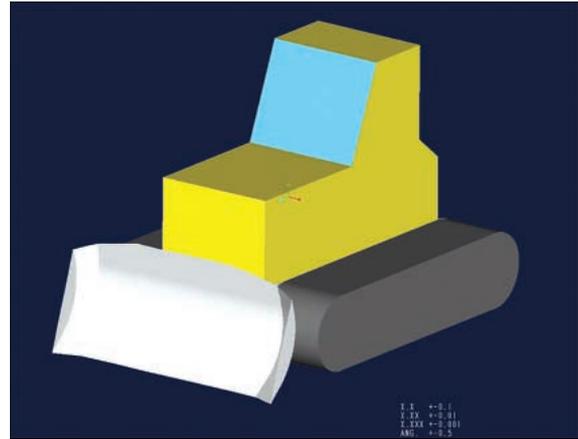


図12 ブルドーザ3D-CADモデル

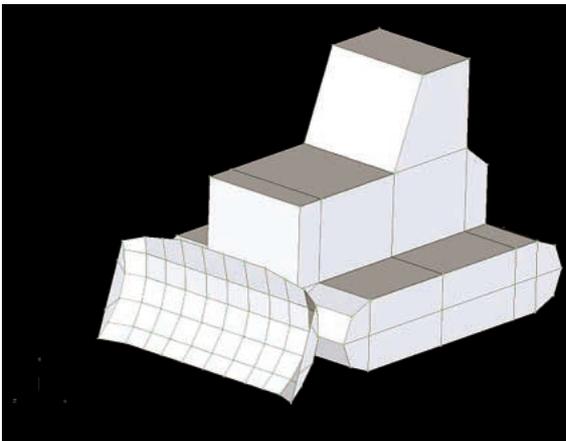


図13 ブルドーザメッシュモデル

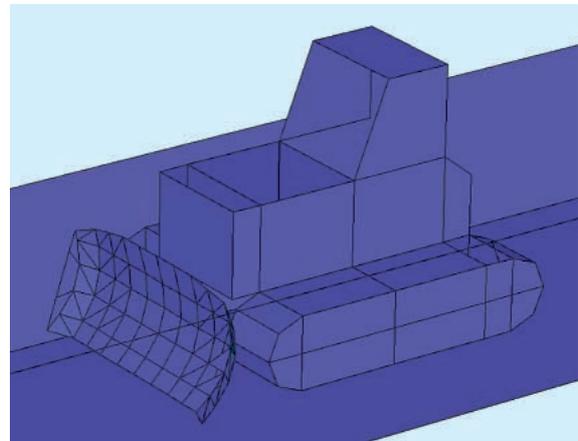


図14 DEM解析用ブルドーザ剛体モデル

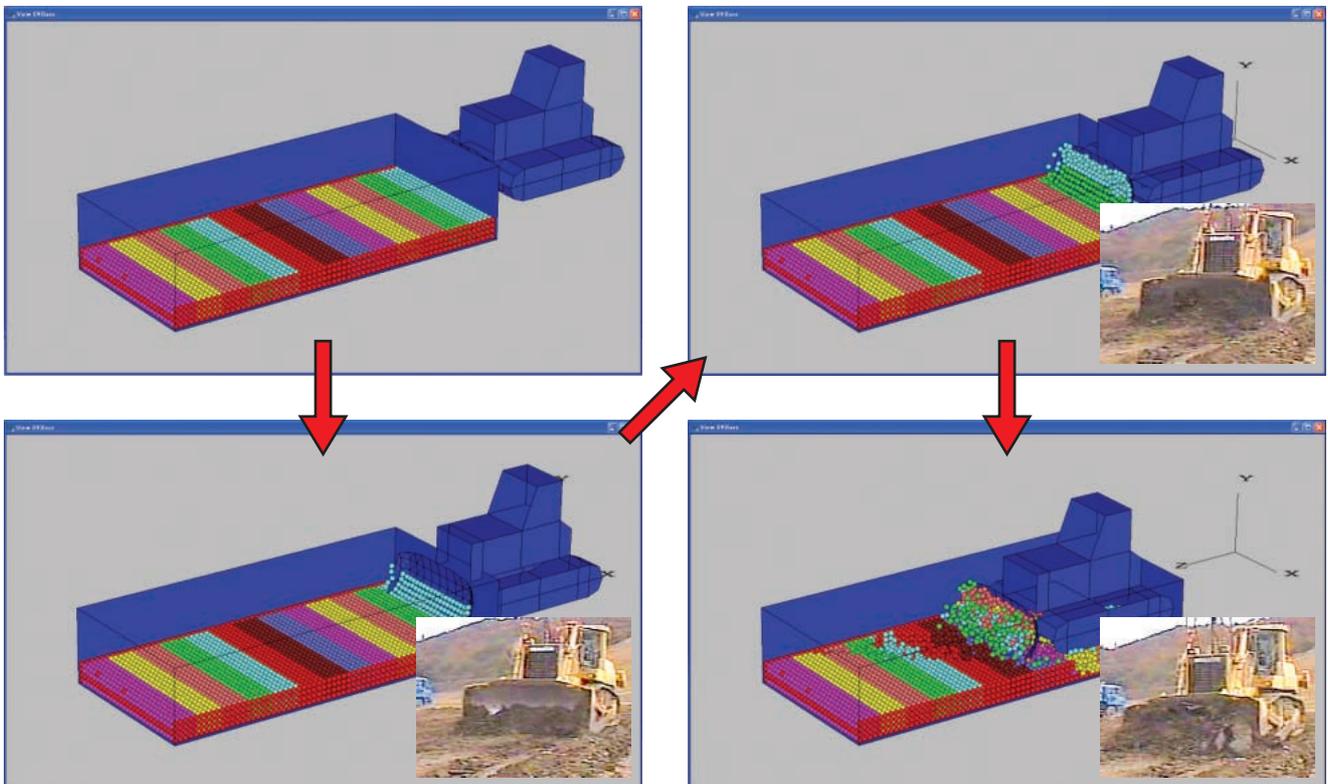


図15 粒子掘削解析と実際の掘削状況の比較

次に、掘削距離に伴いブレードが受ける反力のDEM解析結果を図16に示す。掘削開始位置から移動距離に伴う反力上昇傾向はほぼ実際の現象と一致したが、反力値そのものは実測結果からは10%程度のずれを生じた。

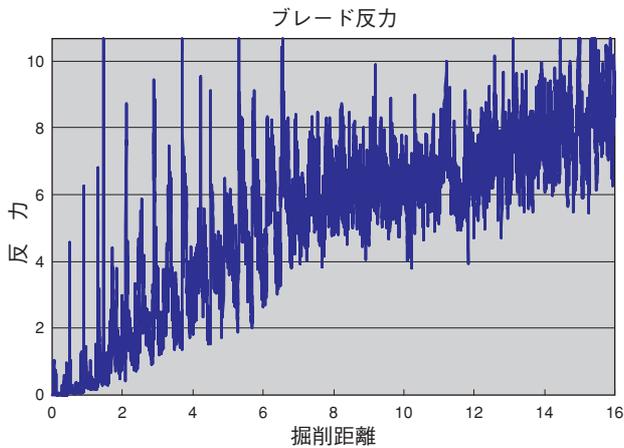


図16 ブレード反力解析結果

最後に、図17にDEM解析より求められた反力を入力荷重とする時刻暦を考慮した動的な応力解析結果を示す。これより、絶対値に関する考察はまだできないものの、掘削開始から搬送に至るまでの作業機にかかる応力の分布の変化を動的に捉えることができる。この情報は作業機を設計する上での構造評価や材料の耐摩耗性を検討し最適な設計を目指すための有用な情報になると考えられる。

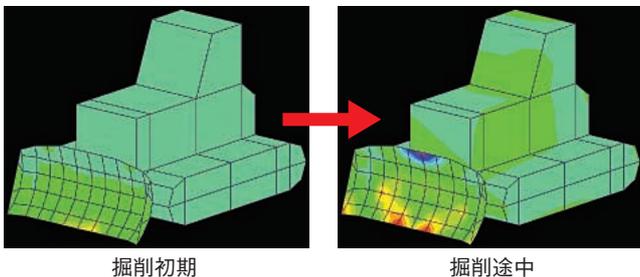


図17 DEM解析の反力を用いた動的なブレード応力解析

## 5. まとめ

連続体を計算可能な有限要素法と、不連続体を計算可能な個別要素法をリンクさせることにより、ブルドーザによる動的な掘削現象を解析可能なテラメカシミュレーションシステムを構築した。このことにより、物性値や最適なパラメータ設定による解析精度の向上活動は進めなければならないものの、土砂岩石と機械との相互作用が机上で検討できることにより、設計段階からのより現実に近い構造検討や耐摩耗材の研究開発に大きく寄与できるものとする。

## 筆者紹介



Shinya Kanou  
か のう しん や  
加納伸也 1989年、コマツ入社。  
現在、コマツ 生産本部 生産技術開発センター  
所属。



Masaharu Amano  
あま の まさ はる  
天野昌春 1989年、コマツ入社。  
現在、コマツ 生産本部 生産技術開発センター  
所属。



Yuji Terasaka  
てら さか ゆう じ  
寺坂裕二 1983年、コマツ入社。  
現在、コマツ 生産本部 生産技術開発センター  
所属。



Norihisa Matsumoto  
まつ もと のり ひさ  
松本典久 1982年、コマツ入社。  
現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター  
所属。



Tatsuo Wada  
わ だ たつ お  
和田達夫 2001年、コマツ入社。  
現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター  
所属。

## 【筆者からひと言】

土を解析するのは難しい。構造体であり流体であり、そして構造体でなく流体でなく、なかなか土を考慮した数値解析ができない。今回この問題に個別要素法という手法で挑戦し「ドンピシャ」とはいかないまでも、解析の新たな方向に一石を投げられたのではないだろうか。