

技術論文

個別要素法（DEM）を用いた作業機性能可視化技術の確立

Development of Equipment Performance Visualization Techniques Based on Distinct Element Method (DEM)

武藤 真一
Shinichi Mutou
渋谷 俊英
Toshihide Shibuya

鉱山などの土木工事で使用されるダンプトラックにおいて従来、積込性・排土性・運土などの性能は出図・試作後に実機試験で確認していた。しかし開発機種が性能アップの為に大幅な設計変更をする場合、その性能評価を事前に予測することは個々の経験に委ねるしかなくかなり困難な問題であり、現実では実機試験後に形状の見直し・再出図・再実機試験を繰り返すことを余儀なくされている。ダンプトラックにおいて積込時の荷こぼれ及び運搬登坂時の荷こぼれを精度よく予測することは、納入した現場での作業効率・生産効率、更に言い換えればお客様の満足度につながる重要事項であり、開発部門としても最重要事項である。そこで近年導入した個別要素法を用いた解析ソフトPFCを用いて土の挙動を可視化し、FEAと同様に机上にてダンプトラック作業機性能の事前検討が出来る技術を確認し、検証を行った。

本報告では個別要素法を紹介するとともに、その適用事例としてダンプトラックのボディを例に取り、形状差異による性能差を検証できる手法を報告する。

With dump trucks for mining and other applications in civil engineering work projects, pre-shipment performance evaluation such as of loadability, dumpability and haulability has been made using prototypes following the release of relevant drawings. This also holds true with subsequent substantial redesigning for performance upgrade where a cycle of shape review following prototype trials, the release of revised drawings and further trials has to be repeated: pre-trial performance estimation is extremely difficult and tends to rely largely on individual experience. Accurate estimation of earth spills from dump trucks during loading or uphill haulage operation is important as it leads to operational efficiency and productivity at work sites and ultimately to customer satisfaction, one of the most important targets for those involved in product development. With the above in mind, the authors established the technique to visualize the earth behavior using the recently introduced analysis software PFC (Particle Flow Code), which utilizes the distinct element method. This technique can estimate the dump truck performance on the desk in the same way as FEA technique. The authors then performed the verification using this technique.

This report briefly explains the distinct element method and, as an example of its applications, techniques to verify the performance difference between variously shapes like dump truck bodies.

Key Words: 作業機, 可視化, 事前検討, 個別要素法 (DEM), 土砂

1. はじめに

鉱山などで大規模工事に使用されているダンプトラックは、油圧ショベルあるいはホイールローダによって掘削された土砂を積込・運搬・排土する建設機械であり、土砂を積込む部分をボディと呼ぶ。ボディには、積込時及び運搬登坂時にボディ内部から土砂の荷こぼれが少ないこと、及び排土時ボディ内の土砂流れがスムーズである形状が望まれている。しかし、そのようなボディを多数設計・出図し、実機試験によって性能を比較・検証し

て性能の良いものを取捨選択することは事実上困難である。そのため、コンピュータシミュレーションによる机上検討にて、最適と考えられるボディを予め絞り込むことができれば、大幅な開発工数の短縮にもなる。そこで近年、土砂などの粉体を扱う解析手法として個別要素法（DEM:Distinct Element Method）に注目し¹⁾、その解析ソフトであるPFC（Particle Flow Code）をコマツで導入し検証の準備を進めて来た。

個別要素法とはCundall²⁾によって提案された解析手法

で、解析対象を微小な粒子の集まりと考え、粒子個々の運動を解析することで集合体全体の挙動や反力を解析する手法である。この手法は有限要素法とは違いメッシュを生成させる必要はなく、要素の配置変えも容易に表現することができる。また、粒子個々を実土砂として模擬できることから、土砂形状を限りなく実際に近い形状にすることができる。

ただし次のような問題があり、本研究は実形状のモデル化に至っていない。

最小粒子単位が球の為、複雑な土砂形状を再現するためには複数の球粒子を組み合わせた粒子群（以後結合粒子と呼ぶ）が必要となる。この結合粒子を数千・数万規模で扱う場合、計算負荷は飛躍的に増大し計算の長時間化となる。

そこで本研究では結合粒子ではなく、単体球粒子のサイズを細かくすることによって土砂の再現を狙っている。単体球粒子の直径を計算負荷との兼ね合いから250mmに設定した。

個別要素法の力学モデルを図1に示す。

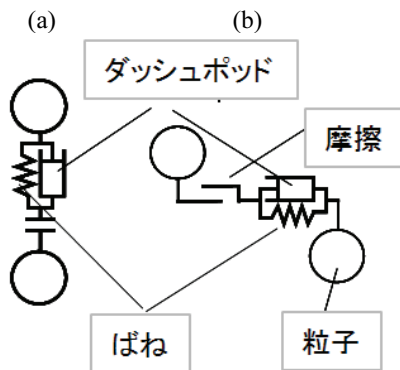


図1 個別要素法モデル図 (a)法線方向 (b)せん断方向

個別要素法では1個の要素を1個の球体粒子としている。粒子間の相互作用は、ばね剛性、減衰、摩擦を用いて表現される。

しかし、この分野に関して幾多の研究がなされた現在でもこれまで、圧密状態の粉体については、多くの研究がなされている^{3), 4)}が、圧密状態でない粉体について解析する手法は未だ確立されていない。そのためボディへの土砂積込時及び土砂運搬登坂時の荷姿・荷こぼれを、現実と定量的に一致させるパラメータ（個別要素法では、形状・サイズ・ばね定数・摩擦係数・反発係数・比重・加速度減衰・接触減衰を入力）が分かっていない。また、土砂の性状（形状・サイズ・材質・摩擦係数・含水率・締め固め度等）でもパラメータは変動する。これらのパラメータのいくつかは、場所が違えば違うものになり同一の場所でも日々変動している。

本研究ではある特定の土砂に関してのみ合わせこみをするような検討は避け、絶対評価は出来ないにしても相対評価できるようなパラメータを探すことで荷こぼれメカニズム及び土砂挙動を解明することを試みている。

2. 個別要素法による相対比較計算（積込解析）

2.1 事前検討事項

従来無かった手法の為、解析に関して事前に検討すべき項目があり段階に沿って検討する。

第一段階としてベースとなる粒子のパラメータを検討する。

①形状：初期形状として扱いやすさから球粒子を用いる。これに関しては、前にも述べたが解析で用いる粒子形状と計算負荷の問題より、実現場での土砂形状にすることは事実上不可能である。

②パラメータ：パラメータに関しては、メーカーサポート及び世の中で行われている個別要素法の解析を参考に決めた。

③粒子サイズ：形状と同様に実サイズの計算が不可能なため計算可能なサイズ（直径250mm）を選択する。

第二段階としてボディへ積込む側となる油圧ショベルバケット（以後HEバケット）の充填荷姿から、検証することとする。フィールド内にHEバケットをモデル化し、設置する。その後HEバケット上に相当量の粒子を生成させ、自由落下にてHEバケット内に粒子を充填させる。このとき落下せずHEバケット内に残った粒子の荷姿と、実際の現場での画像から取り出した荷姿を比較し図2に示す。

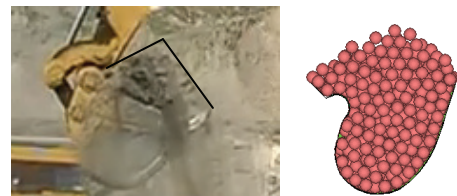


図2 実機荷姿と個別要素法で計算した荷姿

図2において完全に一致はしていないが、ほぼ等しい荷姿となっていることが分かる。第二段階として合格と考え次段階へ進むものとする。

第三段階としてダンプボディへ上述HEバケットで積込む。しかし、実作業現場での積まれ方は、千差万別であるので、ビデオからのオペレータの積込み操作を参考に1杯目の積込位置を決め、次の積込からはボディ内の積まれた粒子の状態、最適な位置に粒子の充填されたHEバケットを自動的に設置して、積込むものとした。そのロジックにより、計算時に各積込回数時のHEバケットの位

置を決めなくて良くなり、積込解析の自動計算につながった。

図3にこれらの手法を入れた後の実機の積込後の荷姿と個別要素法で計算した積込後の荷姿を示す。

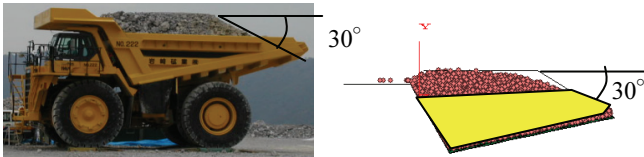


図3 実機荷姿と個別要素法で計算した荷姿

図3より積込後の荷姿は、対象現場により異なるため一概には言えないがほぼ近いものになっていることが分かる。よってこれらの段階を踏まえ実形状の相対評価に十分なものになったと判断し検討を始めた。

なお、図4のようにボディは、左右対称であることと、計算時間短縮の観点から右半分のハーフモデルで解析することとする。

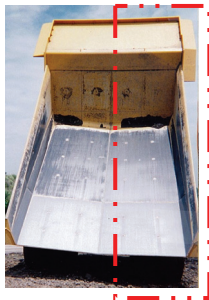
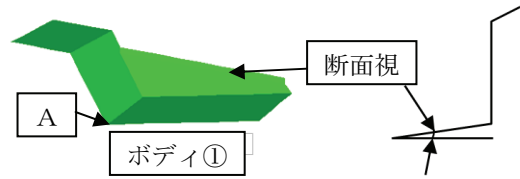


図4 実機と計算で用いる範囲

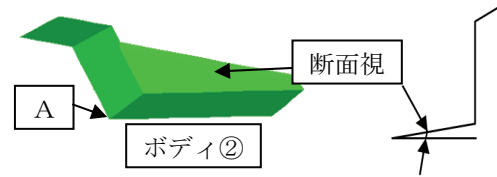
2.2 計算に用いたボディ

計算に用いるボディ①～④を図5に示す。



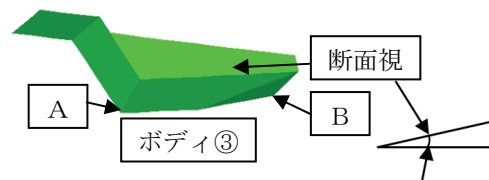
ボディ①：形状ベースモデル

A点に向かって前後左右とも傾いている。



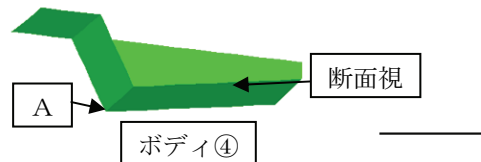
ボディ②：全長と全幅変更モデル

ボディ①に対して全長を長くし全幅を狭くしたものの



ボディ③：後端面変更モデル

ボディ①に対して全長・全幅は同じで後端B部を折り曲げたもの



ボディ④：全幅変更，幅方向フラットモデル

ボディ①に対して全長は同じで左右方向の傾きを無くし，全幅が広いもの

表にまとめると以下となる。

	全長	全幅	前後傾斜	左右傾斜	後端形状
ボディ①	—	—	有	有	折曲無
ボディ②	長い	狭い	↑	↑	↑
ボディ③	同じ	同じ	↑	↑	折曲有
ボディ④	同じ	広い	↑	無	折曲無

注) 表中の全長・全幅の表記はボディ①に対してとする。

図5 計算に用いたボディ形状と断面形状
(前後の傾斜に沿って見る)

2.3 積込解析ロジック

2.3.1 HE バケットへの粒子の充填

フィールド内にHEバケットを設置後、上空に相当量の粒子を生成し、自由落下による充填を行う。安定した状態の位置を1杯目のHEバケットの位置とする。(1杯目のHEバケット位置の決め方に関しては、次項目2.3.2を参照)

充填前後の状態を図6に示す。

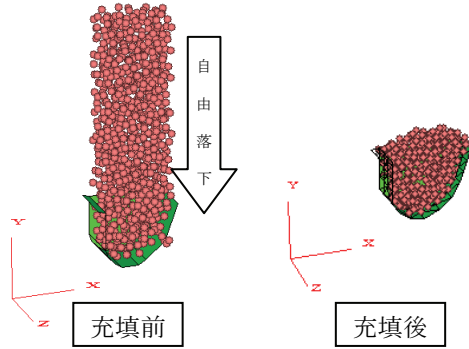


図6 充填前後の状態

充填後安定した状態の粒子の情報(座標位置・粒子サイズ等)は再使用するため保存する。(理由に関しては後述)

2.3.2 HE バケット回転中心設定(1杯目)

1杯目の回転中心位置は、ビデオで確認した平均的な前後方向・高さ方向の位置とする。

HEバケットとボディの位置関係を図7に示す。

(図中寸法はすべて原点からの距離)

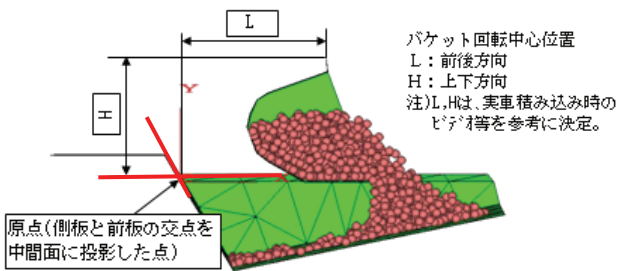


図7 HEバケットとボディの位置関係

2.3.3 HE バケット回転中心設定(2杯目以降)

2杯目以降の回転中心位置は、ユーザが任意に決めるのではなく、オペレータの実作業(積込まれた土砂の状況により位置を微調整する)を模擬するため、シミュレーションも同様に積込まれた粒子の状況で、次のバケットの位置を決定するようなロジックとした。

詳細図を下図に示す。

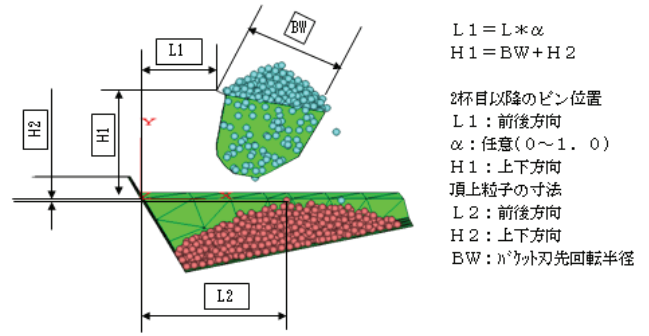


図8 HEバケットとボディの位置関係

図8において、1杯目が積み込まれた後に粒子山の頂点(図中のL2とH2であらわされる点)に対して、前後方向は係数 α をかけた点、高さ方向はバケット刃先回転半径BWを加えた点に、2杯目のHEバケットの回転中心を設定する。以後は、このロジックに従って5杯目まで積込んだ時点で、計算は終了となる。

ボディ形状の評価は、側方及び後方からこぼれおちた粒子数を、カウントすることにより優劣を決める。もしくは、全積込粒子数に対するこぼれた粒子の割合(荷こぼれ率と呼ぶ)から、ボディ形状の優劣の評価をする。

2.4 解析フローチャート

これらの一連のロジックを解析フローチャートにまとめると図9のようになる。

なお、積込解析時にキャプチャ画像により動画を作成するため計算後に積込時の状況を見ることも可能である。

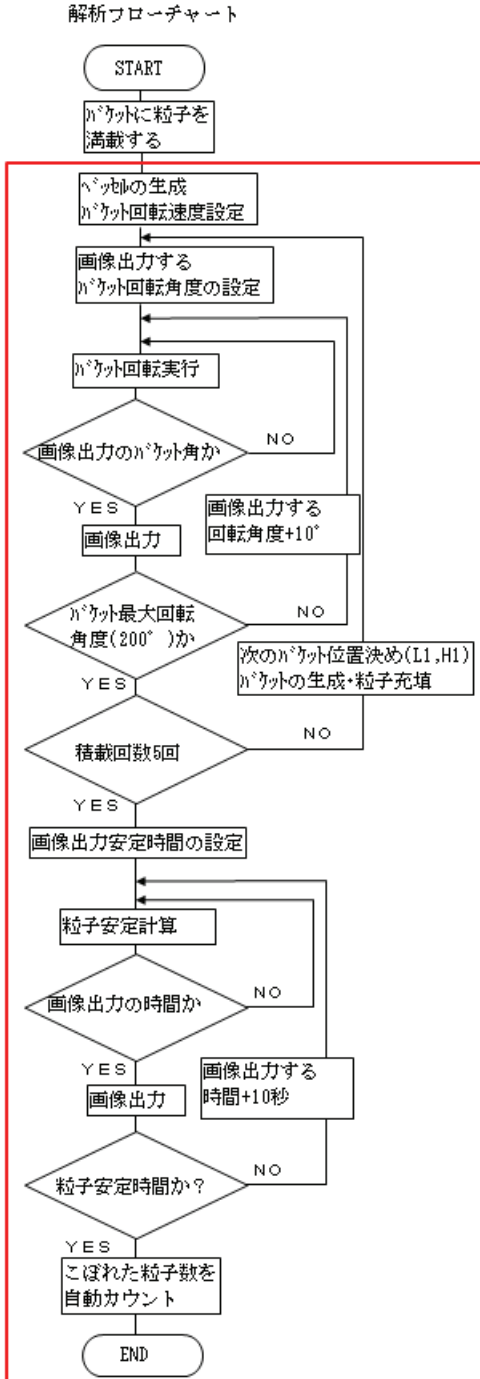


図9 解析フローチャート

水準が多くある場合は、図中の赤枠内の計算のみで水準計算することが可能である。

3. 実車への適用事例（ダンプトラック）（積込解析）

2.で述べたロジックに従って、前述の4水準のボディに対して、HEバケットに充填された粒子で積込解析を行い、形状差異による荷こぼれの違いを検討した。

3.1 積込1杯目

1杯目を積んだ後の結果を図10に示す。

ボディ③に関しては、後端部の折れ曲がりにより粒子は前方よりに積まれる。

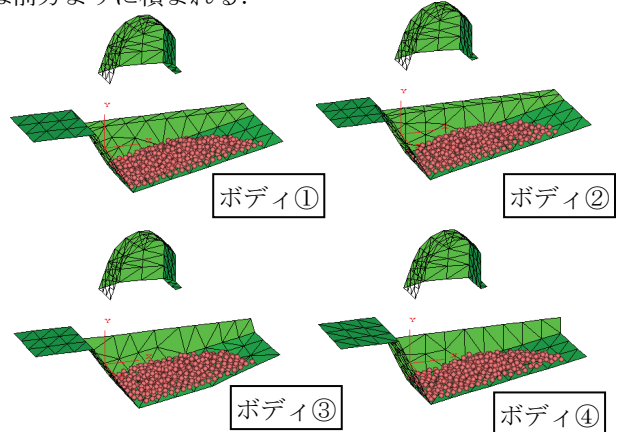


図10 1杯目積込後各ボディ状態

3.2 積込2杯目

2杯目を積んだ後の結果を図11に示す。

ボディ③に関しては、やはり後端部の折れ曲がりにより粒子は前方よりに積まれる。

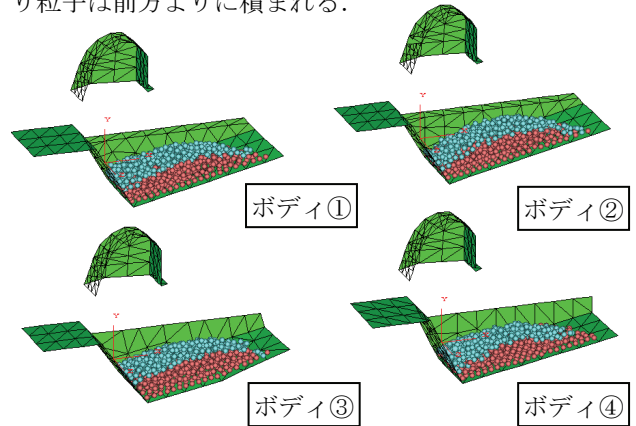


図11 2杯目積込後各ボディ状態

3.3 積込3杯目

3杯目を積んだ後の結果を図12に示す。

ボディ①に関しては、全長が短い影響で後端まで粒子が到達している。ボディ②が最も後端の余裕がある。

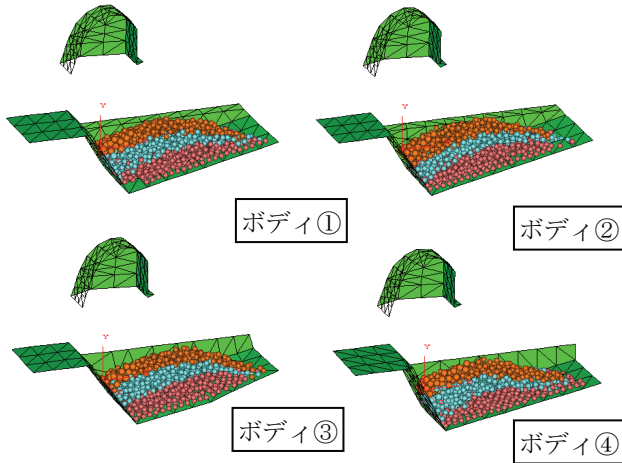


図12 3杯目積込後各ボディ状態

3.4 積込4杯目

4杯目を積んだ後の結果を図13に示す。

4杯目まで積んだ状態では、どのボディも荷こぼれは、発生していないが、前面板付近の余裕がボディ④に関しなくなりかなり前よりに荷が存在する。

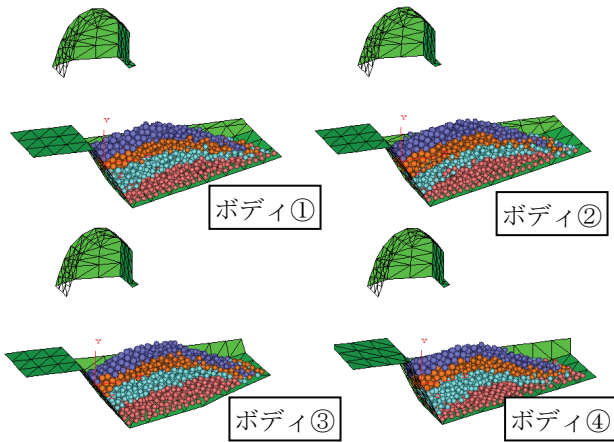


図13 4杯目積込後各ボディ状態

3.5 積込5杯目

5杯目を積んだ後の結果を図14に示す。

各ボディともに側方からの荷こぼれが発生している。5杯目後はボディ形状で荷姿にかなり差異がみられる。

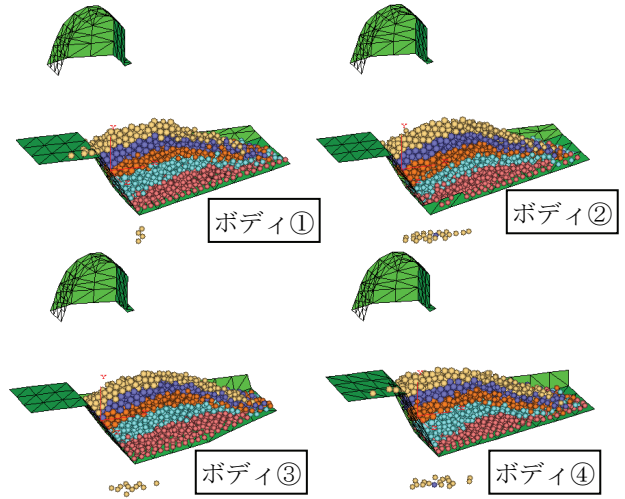


図14 5杯目積込後各ボディ状態

3.6 安定計算後

5杯目を積んだ後の各ボディ内の粒子の安定した結果を図15に示す。

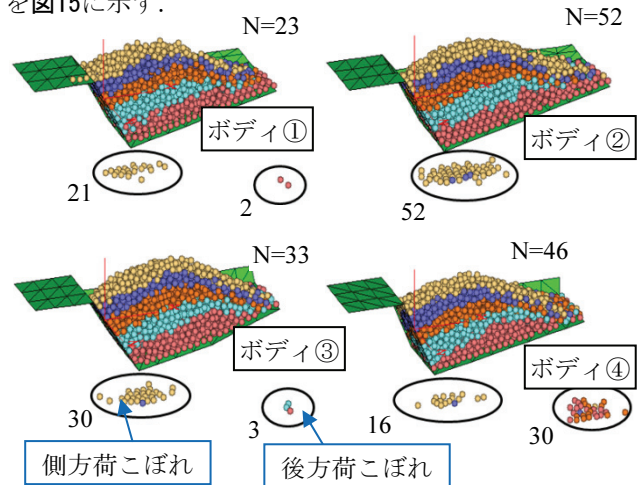


図15 ボディ形状の差異による最終結果の差異

ボディ①に対して

- ・ボディ②は、幅を狭くした影響で、横からの荷こぼれが多くなっている。
 - ・ボディ③は、後端を曲げた影響で前後方向の荷の安定性は増したが、その分左右方向の安定性が崩れ横からの荷こぼれが若干増える。
 - ・ボディ④は、左右方向の傾きを無くしたため、後端での荷の安定性が崩れ後方への荷こぼれが増える。
- よってこれら4水準間での差異を検証することができた。

3.7 積込解析まとめ

ボディ①をベースにボディ②～ボディ④に形状を変更し、積込解析を行った結果、形状差異によるボディ①に対する荷こぼれ結果の差異を可視化する事が出来た。このことから積込解析の有用性を確認できた。

4. 個別要素法による相対比較計算（登坂解析）

4.1 事前検討事項

ダンプの作業には、積込とは別に運土するために登坂する作業がある。この部分の形状差異も、設計としては必要なパラメータであり、気にしなければいけない点である。これに関し、前述の粒子を積込んだボディをそのまま利用して登坂解析し、後方からの荷こぼれを検討できるようにすれば、より実車に近いシミュレーションが再現できると考えた。そこで積込んだボディの位置はそのままに、全体にかかる重力の方向を、通常の下向きから登坂路の傾斜角相当後方へ傾けた角度にすることで、ボディ自体を傾けずに、登坂時の荷こぼれを検討できるようにロジックを組んだ。扱う粒子が球であるので転がりやすさは制御できるものではないが、相対的に形状によって登坂時の荷こぼれしやすさを見ることはできると判断し検討を始めた。

4.2 計算に用いたボディ

計算に用いるボディは積込解析で用いたボディと同様だが異なる点としてより実車の現象に近い登坂解析とするため積込解析後の粒子積載状態から登坂解析を始めることとする。

4.3 登坂解析ロジック

積込解析時、ボディは平地設置状態である。この状態では重力は下向きに当然働く。この状態から登坂時の重力方向を傾斜角に合わせて車体後方へ向けることであたかも静的に登坂している状態となる。説明図を図16に示す。

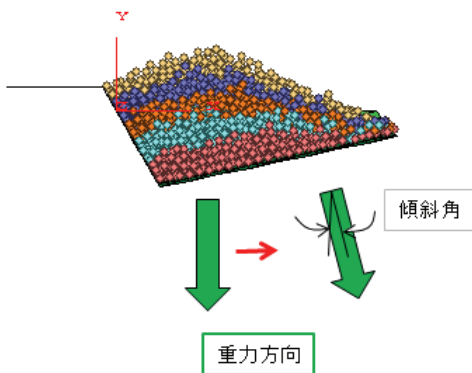


図16 重力方向の変更の考え方

5. 実車への適用事例（ダンプトラック）（登坂解析）

5.1 登坂解析

前述の登坂解析を積込解析同様に5の積込解析の結果ボディ①～④に当てはめて相対比較した。

登坂解析した結果を図17に示す。

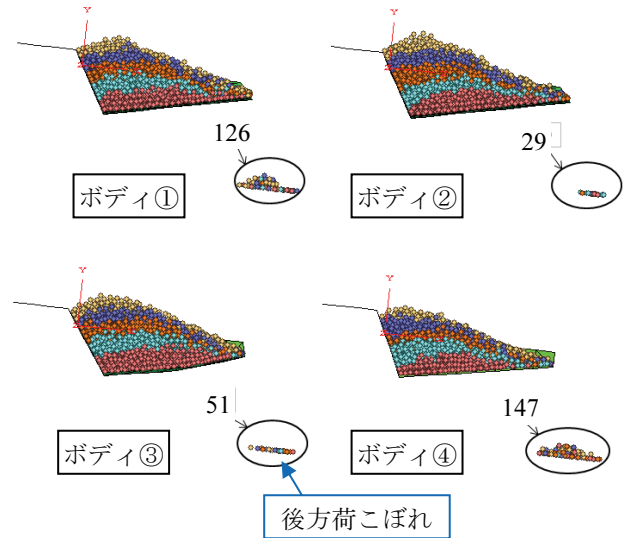


図17 ボディ形状の差異による最終結果の差異

全てのボディに関して積まれた荷は登坂により後方へ重心移動する。

ボディ①に関しては全長が短いため後方への荷こぼれが多くなる。

ボディ②に関しては全長が長い後方への荷こぼれは起こりにくくなっている。

ボディ③に関しては後端が折れ曲がっているため重心移動に対して粒子移動を抑制させているため荷こぼれが少なくなっている。

ボディ④に関しては左右方向の傾斜が無いいため他ボディと比べ荷の安定性が薄く後方へ荷こぼれが最も多くなっている。

5.2 登坂解析まとめ

3.の積込解析を行った後に、そのまま登坂解析した結果、積込解析と同様に形状差異によるボディ①に対する後方荷こぼれ結果の差異を可視化する事が出来た。このことから登坂解析の有用性を確認できた。

6. 考察

積込解析結果・登坂解析結果から、形状の差異による結果の差異を可視化する事ができた。しかしながら、積込解析では最も荷こぼれの少なかったボディ①が、登坂

解析では後方への荷こぼれが逆に多くなった。これはボディの全長が他に比べて短いためであると推測するが、今後のボディ開発を進める上でこの両方の解析を同時に行うことでより最適なボディ設計につながると考える。

7. 今後の予定

今回適用した機種以外のダンプトラックボディに関しても順次適用する。

参考文献

- 1) 武川順一ほか，“個別要素法による真三軸圧縮試験”（最新の岩石力学のトピックス I, 最新の岩石力学のトピックス），日本材料学会，学術講演会講演論文集
- 2) Cundall P. A., “A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rocksystem”, Symposium ISRM, Proc. 2 pp.129-136 1971
- 3) 海津浩一ほか，“拡張個別要素法による熱強化ガラスの衝撃破壊解析”，日本機械学会，年次大会講演論文集，2004(1) pp.35-36 20040904
- 4) 海津浩一ほか，“拡張個別要素法による三次元衝撃破壊解析”，日本機械学会，機論.A, 72(718) pp.836-842 20060625

筆者紹介



Shinichi Mutou

武藤 真一 1993年，小松メック入社。
現在，コマツ 開発本部 建機第二開発センタ所属。



Toshihide Shibuya

渋谷 俊英 1984年，コマツ入社。
現在，コマツ 開発本部 建機第二開発センタ所属。

【筆者からひと言】

CAEソフトウェアの技術革新は目覚ましく，従来では可視化不可能と思われていた分野でも可能となりつつある現在，しっかりとアンテナを張り巡らし時代の流れに取り残されないように日々努力し，設計品質及びお客様満足度向上に貢献したい。