

# 掘削工事に伴う粉塵の飛散を予測する流体計算法

Computational Fluid Dynamics method for predicting dust scattering during excavation work

土屋直也

Naoya Tsuchiya

博(工) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1, E-mail: [tsuchiya.naoya@takenaka.co.jp](mailto:tsuchiya.naoya@takenaka.co.jp))

Dust generated during earth excavation work is likely to be blown outside the construction site on windy days, raising concerns about its impact on the living environment in the neighborhood. Dust barriers have been planned as a countermeasure, and it is hoped that their installation range and height can be determined through numerical simulation. To calculate the behavior of dust blown by the wind, a calculation method was tried using the functions of commercial software and a customized calculation method. The calculation results were compared with actual measurements to examine the reproducibility of the actual phenomenon and the validity of the calculation method.

**Key Words :** Excavation Work, dust, CFD, DEM

## 1. はじめに

土砂掘削工事に発生する粉塵は、風が強い日には工事敷地外へ流され、近隣の生活環境へ影響を及ぼす。影響の度合は、環境アセスメントの技術資料において計算方法や基準値が示されている[1]。環境アセスメントは、事業規模が大きく、掘削期間を通じた評価を対象としており、一般建築工事のような近隣が近接し、短時間かつ局所的に粉塵へさらされる影響評価への適用には限界がある。また、アセスメントの評価式は、予測地点の粉塵濃度を発生地点からの1次元距離減衰式で計算しているため粉塵対策で用いられる防塵フェンスの効果を検討できない。一方、CFD（数値流体解析）は、3次元の風の流れと粒子挙動を連成した計算ができるため、密集市街地内の複雑流れ場や、防塵フェンスを越える粉塵の拡散を精緻に予測でき、粉塵予測や対策検討の計算ツールとして期待される。そこで本研究では、風に飛ばされる10～数百 $\mu\text{m}$ の多量な粉塵の予測を、汎用流体解析ソフトの機能やカスタマイズによる計算方法を試行した。計算結果は実測結果と比較し、実現象の再現性や計算方法の妥当性を検討した。

## 2. 計算概要

### (1) 計算対象

実フィールドで実施した粉塵の飛散を計測した実験を対象とした（図-1）。バックホーで土を掘り、バケットに盛った土砂を2m程度の高さから落下させる。落下時に粒径の小さい土粒子は強い風により周囲へ飛散する。強い風を模擬するため送風機を掘削位置手前に設置した。風下へ飛散する粉塵の計測は、粒径10 $\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉塵は



図-1 粉塵計測実験の様子

粉塵計で、数十 $\mu\text{m}$ の降下煤塵は水をはったパットで捕集した。

### (2) 粉塵飛散の数値計算法

以下、商用ソフトには3つの計算法がある。

#### ①LMP(Lagrange Multi Phase)

ラグランジエ法のフレームワーク内で、連続体(空気)中を移動するパーセル（粒子をグループ化した要素）の挙動を追跡する。特徴として、連続体とパーセルの相互作用は計算されるが、パーセル間の相互作用(粒子間接触力)は計算されない。

## ②DEM(Discrete Element Method)

相互作用する多数の粒子の運動をシミュレーションする。高密度の粒子流を計算するためにLMPの方法論を拡張したもの。LMPとの違いは、運動方程式に粒子間接触力が含まれ、多大な計算能力が必要になる。

## ③DMP(Dispersed Multi Phase)

オイラー法を用いて連続相の分散粒子の流れをシミュレーションする。LMPの代用として使用できるが、粒子も連続体として取り扱う点が異なる。特徴はLMPと似ており、連続体と粒子の相互作用は計算できるが、粒子間接触力は計算されない。

### (3) 計算条件

計算は、実測の状況にあわせフェンス、送風機、粉塵収集パレットをモデル化した（図-2）。バックホー本体は省略した。フェンスは、高さ3m、掘削位置から4.5mの位置に配置した。風の流れは標準 $k-\epsilon$ モデルを使った非定常計算を実行した。粉塵の発生は、以下の方法とした。

①体積発生 バケットに盛った掘削土の体積を $0.25\text{m}^3$ とし、そのうち土粒子の質量（密度 $2600\text{kg/m}^3$ ）を $300\text{kg}$ と仮定した。全ての掘削土が地面に落下するまでの時間を15秒とし、落下する $0.6 \times 1.6 \times 2\text{m}$ の範囲に $20\text{kg/s}$ の土粒子を粒径分布で与えた。粒径分布は土の粒土試験から得られた $10\mu\text{m} \sim 20\text{mm}$ の分布を設定した。土粒子は1時間step ( $\Delta t=0.01\text{sec}$ )当たり38,000個がパーセルとして投入される。

②バケット土砂落下 DEMを用い①と同じ土粒子 $300\text{kg}$ を計算するには大規模な計算となる。ここでは、DEMの特徴を把握するためバケットに盛った土粒子を $20\text{kg}$ とした。実際のバケット回転を模擬して落下させた。また、全ての粒子径 $10\mu\text{m} \sim 20\text{mm}$ をDEMで扱うには計算時間がかかるため $10\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の粒子はLMPで扱った。LMPの粒子は、バケット底面から発生させた。DEM粒子についても、粗視化粒子（パーセル）を使い計算負荷を抑えている。

### (4) 計算ケース

風下への粉塵を防ぐ効果を確認するため、フェンス有り無しの比較をcase1とcase2とした。case3は粉塵の発生が実際に近いバケットから土砂の落下を模擬したケースであり、体積領域による発生と違いを検討した。

## 3. 計算結果

### (1) フェンス有り無しの比較 (case1, case2)

図-3にフェンス無しcase1、図-4にフェンス有りcase2の計算結果を比較する。

a. 風速の分布 図中(1)及び(2)に中心鉛直断面及び地上 $1.6\text{m}$ における風速分布を示す。送風機から勢いよく噴出した風が、粉塵発生範囲で風速 $8\text{m/s}$ 程度で吹き付けている。発生領域には多量な土粒子があるため風は整流され減速している。フェンスがあるケースでは、風の流れはフェンスを越えて大きく剥離し大きな循環渦が形成されている。

表-1 検討ケース

No	計算法	粉塵発生法	フェンス
case1	LMP	体積領域	無
case2	LMP	体積領域	有
case3	DEM+LMP	バケット落下	無

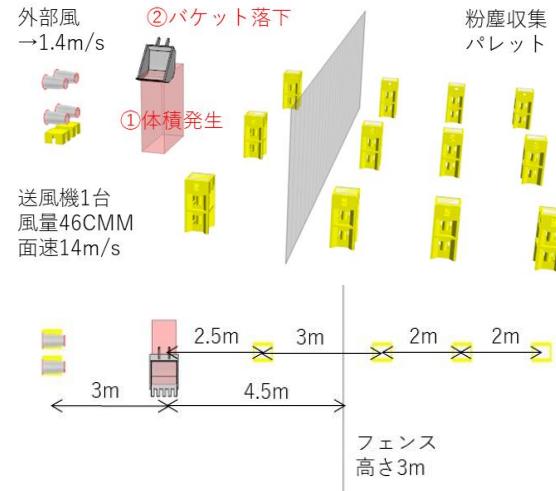
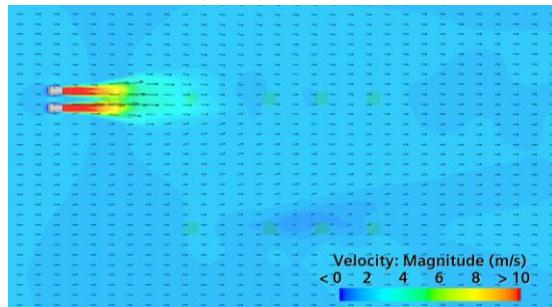


図-2 計算条件

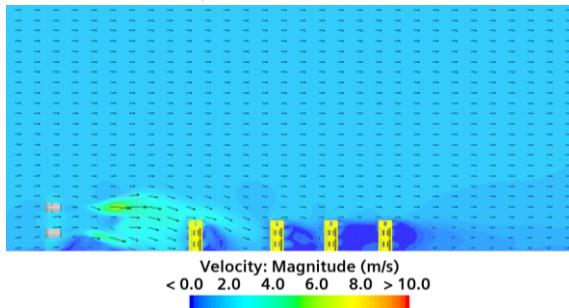
b. 粉塵の分布 図中(2)は土粒子の飛散の状況を可視化している。断面分布図は、中心 $0.3\text{m}$ 幅に含まれる土粒子を描いている。粉塵の飛散は、粉塵収集パレットのある位置では15秒ほどで風、粉塵とともに定常状態となり、その結果を描いている。送風機からの強い風が粉塵発生領域にあたり、発生領域全体から下流側へ土粒子が流される。粒径が小さいほど重力沈降速度が小さいためより遠くへ飛ばされる。送風機吹き出し速度の幅に沿って直線的に運ばれ上下左右方向へ拡散している。フェンス有りは、多くの土粒子がフェンス前で落下する。粉塵発生高さがフェンスより低いため $100\mu\text{m}$ 以上の粒子はフェンスを越えていない。 $10\sim50\mu\text{m}$ の粒子はフェンスを越える際、かなり上方に巻きあげられる。 $10\mu\text{m}$ の粒子は沈降速度が数 $\text{mm/s}$ 程度であるため、上空に舞い上がった粒子は地上に落下してくるまでに時間がかかる。

c. 質量濃度分布 図中(4)は中心断面における質量濃度分布を描いた。土粒子分布の断面図に対応し濃度の高い場所がわかる。

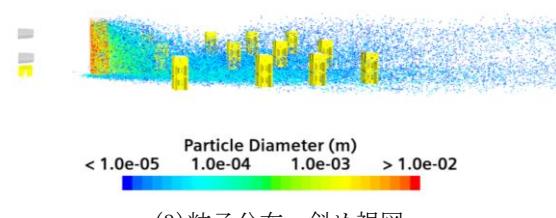
d. 実測値との比較 図-5は、パットで捕集した降下粉塵量を実測と計算で連の動作を1時間継続後、パットに溜った土粒子の質量を計っている。一方、計算は1回の落下で飛散する土粒子がパットに溜まる質量である。両者を直接比較できないため、手前のパットP1に溜まる土粒子の質量を100%としたとき下流側パットの質量を割合で示している。フェンスなしの実測値は、P1から3m下流のP2では2.3%，5m下流のP3で0.23%，7m下流のP4では0.14%となり、対数スケールで見ると線形に減少している。計算値は、捕集された土粒子の質量、減衰傾向ともに実測に良く



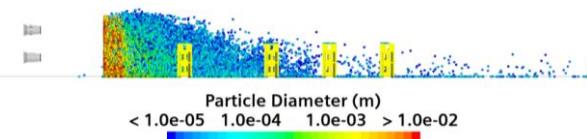
(1) 風速分布 水平面 地上1.6m



(2) 風速分布 鉛直中心断面



(3) 粒子分布 斜め視図



(4) 粒子分布 中心鉛直断面(幅0.3m)

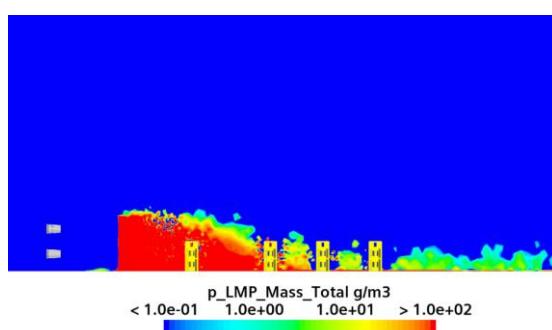
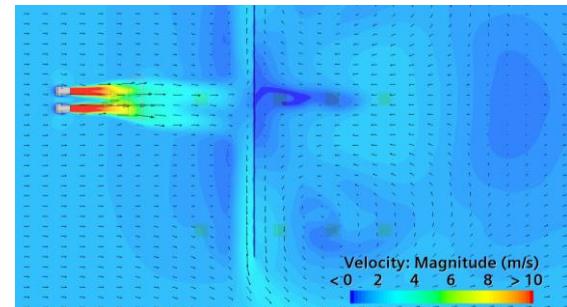
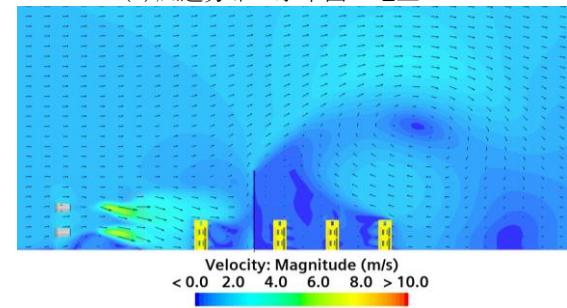
(5) 質量濃度g/m<sup>3</sup> 中心鉛直断面

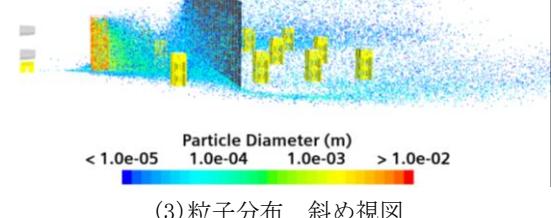
図-3 フェンス無し (case1)



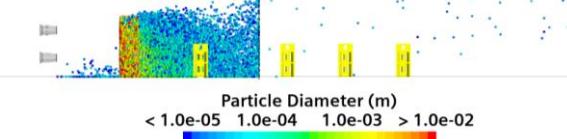
(1) 風速分布 水平面 地上1.6m



(2) 風速分布 鉛直中心断面



(3) 粒子分布 斜め視図



(4) 粒子分布 中心鉛直断面(幅0.3m)

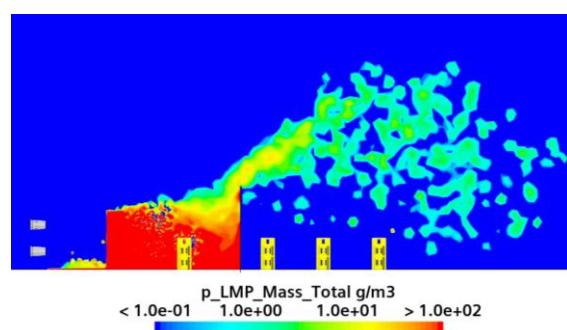
(5) 質量濃度g/m<sup>3</sup> 中心鉛直断面

図-4 フェンス有り (case2)

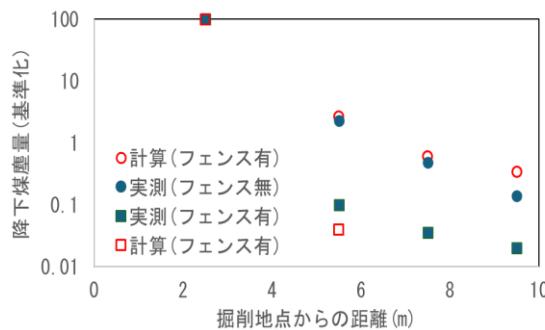


図-5 降下煤塵量 実測と計算の比較

一致している。降下粉塵の距離減衰は、外部風速（送風機風速）と土粒子の沈降速度で凡そ決まるので、計算で粒径分布を設定できていれば実測と計算が一致することは当然といえる。フェンス有りの実測値は、フェンス背後では0.1, 0.04, 0.02%となり、フェンスによる粉塵の遮蔽効果がわかる。計算値は、0.04, 0, 0%となる。実測と差はあるが、計算1回の落下では再現できない程度の微小量の差異であると考えられる。

### (3)DEMによる計算結果

DEM計算は、確定できない条件があり、少量の土粒子で試解析を行った段階である。検討中の項目を挙げる。

- ・実用計算上  $\Delta t$  を小さくできないためDEM粒子の最小粒径を2mmとしている。
- ・2mm以上の土粒子の数をすべて扱えないで粗視化（パーセル）粒子を使っている。パーセル数は412個。
- ・2mm以下の粒子は何らかのモデル化が必要となる。2mm以下の粒径をLMPで代用している。
- ・DEMの力学モデルは簡易なHertz Mindlin。バケットに土粒子を盛る初期状態、滑り落とす現象のみに着目しているため、モデル係数は反発係数を0、転がり抵抗を力に比例する値を調整している。

図-6に計算結果を示す。バケットに盛った土粒子を、バケットを回転させて落下させ、土粒子が送風機の強風にながされていく時間変化を示す。各時刻の結果は上からと横からみた図を載せる。初期状態でバケットに盛った土粒子は2-20mmであるがパーセルで置き換えられているので粒径が大きくなる。1mm以下の粒子はバケット底面から発生させているためバケット先端部から落下する粒子が多い。実際は大きな粒子に混じって落下途中に飛散する粒子がある。バケットが移動しT=10~14秒に計測バケットの上部に土粒子が飛散している。

## 4. まとめ

- (1)流体と粒子の連成解析を用い掘削に伴う粉塵の拡散予測のための計算法を試行した。
- (2)LMPは条件設定や計算が簡便で、粒子を可視化できるため定性的に飛散状況を把握しやすい。
- (3)DEMは、初期条件、接触パラメータの感度解析など計算準備に多大な労力を要する。

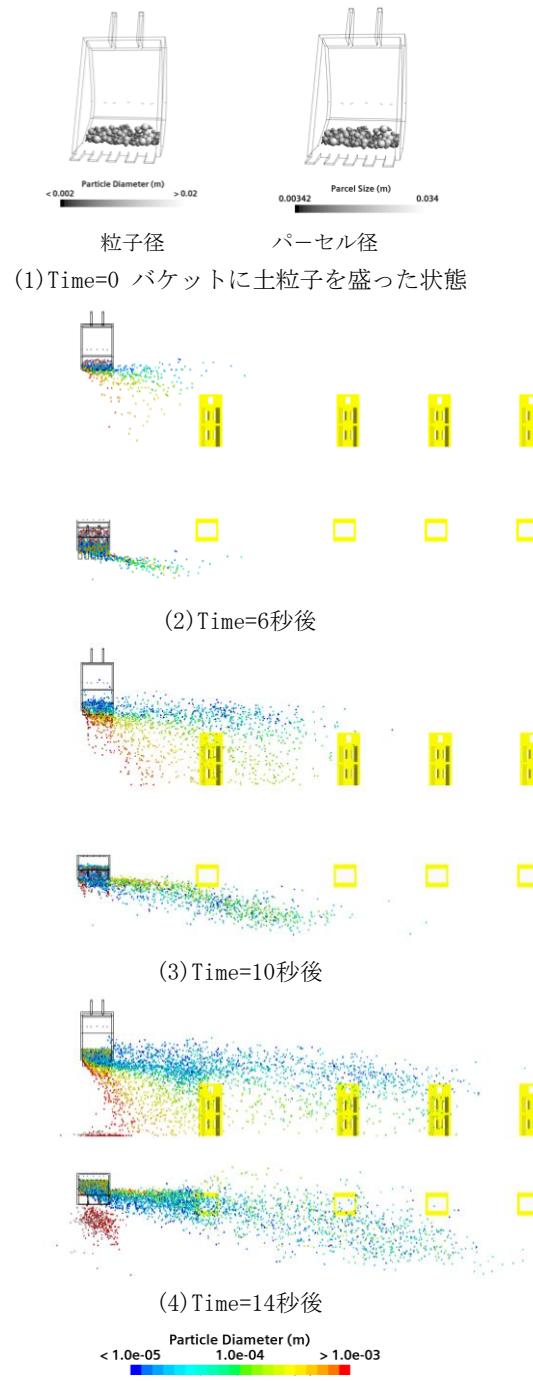


図-6 DEM計算の結果

算準備に多大な労力を要する。

- (4)DEMは  $\Delta t$  が小さくなるため扱う粒径を小さくできない。これを回避するため、粒径の小さい粒子に対してDEMからLMPに変える計算法が必要となる。
- (5)防塵壁の効果を検証した実測定と比較し、LMPの計算は定性的によい傾向を示した。
- (6)今後の課題はDEMモデル定数の調整が必要である。

謝辞: Star-CCM+使用にあたりより専門的なサポートをしていただいたSiemens長江卓也氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 国総研資料:道路環境影響評価の技術手法（平成24年度版）, 第714号, pp.2-3 1-32, 20.