

# 粒子画像計測法を用いた 機械と土壌の相互力学現象の理解

## 1. はじめに

砂地を移動走行する車両や土壌を掘削する土木建設機械は、走行路面あるいは掘削面が容易に変形・崩壊するため、「機械と土壌の力学現象」は複雑な相互作用のもとに成り立っている。このような不整地上の機械と土壌の相互力学はテラメカニクスと呼ばれる研究分野において、1960年代から多くの研究がなされてきた。不整地における機械システムの性能評価は、コスト面、運用面などの困難さを伴うことから、数値モデルを用いたシミュレーション検討が広く行われており、機械と土壌間における変位場あるいは応力場の時間的変化を正確に把握することが重要となる。

機械・土壌間の変位場の測定手法として、土壌を充填したガラスケースの側面から機械の運動に伴う土壌の破断面を観測するアプローチ(図1)<sup>(1)</sup>や、そのガラス面上に格子を描き、土壌の相対的な変位量を推測する方法などがあった。これらの方法は、人間の視覚によって土壌の動きを捉えるため、主観性が排除できず、おおむね定性的な観測に止まっていた。しかしながら、近年カメラ解像度や計算機の性能向上に伴って、画像中の土壌の動きに対し画像処理を施すことにより、機械と土壌の変位場の時間的変化を定量的に計測する手法が積極的に用いられている。本稿では、その代表的なものである粒子画像計測法について概説する。

## 2. 土壌における粒子画像計測法

粒子画像計測法(Particle Image Velocimetry, 以下PIV)とは、元来、流体の速度場解析に使われてきた。計測方法は、まずトレーサ粒子と呼ばれるレーザ光を反射する微小粒子を流体中に加え、その動きを高速度カメラによって捉える。各フレーム間の画像に対して、特定の窓(注目領域)を設定し、その領域内におけるトレーサ粒子の軌跡を追従する。そして、粒子の移動量と各フレームの時間差分から粒子の速度ベクトルを求めることによって

全体の速度場を計測するという原理である。

PIV計測を機械と土壌の変位場計測に応用する利点としては、土壌そのものがトレーサ粒子となること、土壌の変形速度が機械システム側の運動速度から予測可能であること、運動速度が流体分野に比べ十分遅いため、近年のデジタルカメラにも搭載されているハイスピードモードでも十分計測が可能であること、またこれに伴ってとくに専用の光源を必要としないこと、などが挙げられる。一方、土壌に対するPIV計測の制約条件としては、土壌と観測ガラス面との境界摩擦が土壌の内部摩擦に比べて十分に小さいこと(すなわち、ガラス面に粘着するような土壌は扱えない)、土壌の粒子が大きい場合、粒子自体の回転速度が加味され、大域的な土壌変形の観測に対して多義的な計測結果が出力されてしまうこと、などに留意する必要がある。

図2<sup>(2)</sup>に筆者らの研究グループにて実施した半円型シャベルによる土壌掘削時のPIV計測の一例を示す。シャベル内部に流入する土壌について、反時計回りに渦を巻く領域、よどみ点が形成される様子、シャベル先端部において土壌の変位場が伝播していく過程などを定量的に捉えることができている。なお、この解析はMATLAB toolboxとして提供されているPIVlabを用いている。

## 3. まとめ

機械システムと土壌の変位場を捉える手法として、粒子画像計測法について概説するとともに、同手法による計測結果の一例を紹介した。

機械システムと土壌との相互関係を理解するうえで、PIVと同類の計測方法としては、オプティカルフローと呼ばれる画像内の特徴点パターンをトラックし、土壌の動きを観測する方法がある。また、機械システムの接触面にも各種センサ(感圧、感光センサ)などを付加し、機械と土壌の境界面において発生している力覚情報も同時に

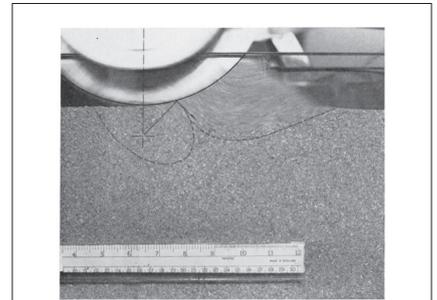


図1 車輪下部における砂の流動写真<sup>(1)</sup>

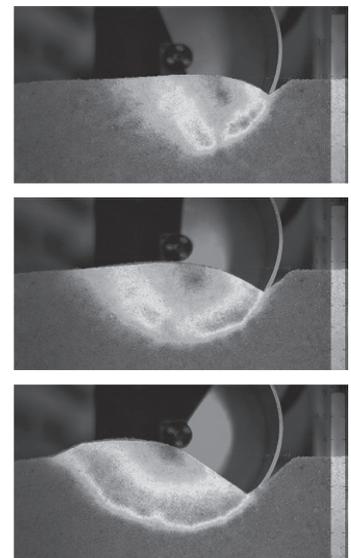


図2 半円型シャベルの土壌掘削時におけるPIV計測<sup>(2)</sup>

取得する方法などがある。このようなアプローチは機械・土壌間の力学現象をより精密に理解することができるとともに、ここで構築される数学モデルを用いて、不整地上での機械システムの正確な性能評価に大きく寄与すると考えられる。

(原稿受付 2014年3月3日)

[石上玄也 慶應義塾大学]

## ●文献

- (1) Wong, J.Y. and Reece A.R., Prediction of Rigid Wheel Performance based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses Part II, Performance of Towed Rigid Wheels, *J. of Terramechanics*, 4-2 (1967), 7-25.
- (2) Mori, D. and Ishigami, G., Soil Interaction Model of Hemispherical Sampling Device based on PIV Analysis, *Proc. of the Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space 2014* (to be presented).