

## SPECT を用いた粒状体内の流れの 3 次元可視化に関する基礎研究

### A Study on Three-Dimensional Visualization of Inter-Granular Pore Flow using SPECT

珠玖隆行 Takayuki SHUKU (岡山大学工学部)  
尾鍋若奈 Wakana ONABE ((株)両備システムズ)

本ノートでは、画像診断法の一つである Single-photon emission computed tomography (SPECT) を用いて、粒状体内の流れの 3 次元可視化を試みた結果を報告する。SPECT では放射性同位体 (Radio Isotope, RI) を用いる必要があるが、本研究では RI を安全に使用するための簡易な実験系を新たに構築した。粒状体としてガラスビーズを用い、粘性流体で満たされたガラスビーズの中に RI を注入し、負圧による RI の移動を SPECT で計測した。実験の結果、SPECT によって粒状体内の流体の挙動を 3 次元的に可視化できる可能性が示された。

キーワード：浸透，粒状体，可視化，SPECT

(IGC : E-07)

#### 1. はじめに

地盤の変形や破壊などの現象のメカニズムを解明するために、種々の可視化実験が実施されてきた。よく知られているものとして X 線 CT を利用した実験を挙げることができ、例えば Ohtani et al<sup>1)</sup>や大谷・高野<sup>2)</sup>らによってその成果がまとめられている。地盤材料のみならず、流体との相互作用や粒状体内の流れの可視化に関しても、PIV や X 線 CT を応用した可視化実験が実施されてきた<sup>3)-6)</sup>。これらの実験により、通常の土質試験では観察することができない物体の内部を非破壊かつ 2 次元 3 次元的に可視化することが可能となり、メカニズムの解明のみならず、新しいモデルの提案などに大きく貢献してきた。

本ノートでは、既往の研究で用いられてきた可視化ツールの一つとして、放射線医学の分野で用いられている Single-photon emission computed tomography (以下、SPECT と略称する) に着目し、粒状体内の流体の 3 次元的な挙動を実験的に可視化できるかどうかを検討した結果を報告する。SPECT は、放射性同位体 (Radio Isotope, 以下、RI と略称する) が放出する放射線を利用して、流体の空間分布を可視化するためのトモグラフィ技術である。筆者の知る限り、SPECT を地盤工学的な現象の解明に応用した研究は報告されておらず、本研究が初めての試みである。

#### 2. SPECT による可視化実験

##### 2.1 SPECT

SPECT とは画像診断法の一つであり、生体内に投与した放射性同位体から放出されるガンマ線を検出し、

その空間分布を可視化するものである。一般的に医学の分野で利用するために開発され発展してきた方法である。本研究では、マウス用の SPECT である TriFoil Imaging 社製の TRIUMPH (FX3000) を用いて粒状体内の流体の可視化実験を実施した (写真-1)。なお、簡単のため本研究で用いた SPECT マシンを FX3000 と略記する。FX3000 は Computed Tomography (CT) と SPECT から構成される複合機であり、それぞれの基本的な仕様は表-1 の通りである。



写真-1 実験に用いた小動物用 SPECT/CT システム<sup>7)</sup>

表-1 FX3000 の仕様<sup>8)</sup>

X 線管球	管電圧 (kV)	80
	管電圧設定範囲 (kV)	40 ~ 80
	最大出力 (W)	50
	焦点寸法 (μm)	50
X 線検出器	X 線放射角度 (度)	40
	有効画素数 (μm)	2240×2344
	画素サイズ (μm)	50×50
SPECT	受光面サイズ (μm)	120×120
	空間分解能 (mm)	0.8
	Field of View (FOV, cm)	直径 12.5 長さ 12.5

## 2.2 粒状体内の3次元可視化実験

SPECT を用いた実験において、(1) 放射線を放出する RI を使うこと、(2) 使用した器具は放射性ゴミとして廃棄する必要があること、を十分考慮して実験系を構築する必要がある。本研究では、RI の漏れが生じず、密閉された状態で実験が実施できること、を条件とし、図-1 の実験系を構築した。実験容器として容量 50ml (直径 31.4mm) のシリンジを用い、その中にガラスビーズを詰めることで模擬地盤を作成した。RI として、SPECT の実験で一般的に用いられているテクネチウム 99 ( $^{99m}\text{Tc}$ ) を用いた。半減期が 6 時間と短いため、備蓄することができない RI である。SPECT の空間分解能が 0.8mm であることから (表-1)、1mm 以上の空隙が期待できる直径 11mm のガラスビーズを用いた。これまでの説明から明らかなように、SPECT で構築できる実験系は、一般的な土質試験と比較して大きく制約されることが短所であると言える。図-2 に、実験系と実験に用いた器具を示す。

SPECT による 1 枚の静止 3 次元画像を構成するためには 5 分程度の撮影時間が必要であるため、粒状体内の流体の速度をコントロールするため、粘度を調整した流体を実験に用いた。粘度調整には、粘度・調整剤 CMC (アズワン社製) を用い、実験の 2 時間前に流体 (水) と粉末状の調整剤を攪拌して粘性流体を準備した。使用した粘度・調整剤には、濃度と粘度の関係が明示されているため、その関係に基づいて任意の粘度の流体を作ることができる。本研究では、RI を用いた流下実験を複数回繰り返した結果に基づき、 $15,000\text{mPa}\cdot\text{S}$  に調整した流体を実験に用いた。本文で示す全ての結果は、上記の粘性流体を用いて実施したものである。SPECT による計測に関して、より短い時間での撮像も可能であるが、事前に実施した予備実験において、明瞭な画像を撮像するためには最低 5 分の時間が必要であることを確認している。必要な時間は用いる RI の放射能や実験系によって大きく影響されるため、実験ごとに決定する必要があることを付記する。

実験の準備は次の手順で行った。はじめに、シリンジ内をガラスビーズと粘性流体で満たし、中心に 1~2mm 程度の穴が開いたゴムキャップ (rubber cap) で閉じ chamber 1 を作る。その際、振動を与え流体内の空気をできるだけ追い出す。その後、穴の空いていないゴムキャップ) を追加でシリンジ内に挿入し、chamber 2 を作る。この段階で chamber 2 には何も入っていない。RI を chamber 1 内の流体と同じ粘度となるように調整し、さらに、RI の移動を視覚的に把握するために、絵の具で赤色を付けた。シリンジの一部に事前に直径 2mm 程度の穴を空けておき、そこから chamber 2 に RI を注入する。RI を注入した穴は、RI が漏れないように強力な粘着テープで塞いだ。ガラスビーズ、粘性流体、RI で満たされたシリンジの先端に

吸引用のチューブと吸引機を装着し、FX3000 内にセットした。

実験は次の手順で実施した。はじめに、真空ポンプによる吸引を実施し、chamber 2 の RI を chamber 1 に送り込む。RI が静止するまで約 3 分間静置し、その後、SPECT による撮像を実施した。吸引→静置→撮像を繰り返し、RI がシリンジの先端に到達した時点で実験を終了した。

以上の説明より、SPECT を用いた可視化実験における制約は以下の 4 点にまとめられる。

- (1) 実験に使用できる模型サイズの制約：SPECT は小動物用に設計されており、使用できる実験系のサイズに制約がある。
- (2) 空間分解能による制約：FX3000 の空間分解能は 0.8mm であり、実際の砂を用いた可視化実験は困難である。
- (3) 再構成にかかる時間の制約：RI の 3 次元の分布状況を再構成するために 5 分程度の撮影が必要であり、RI が流れる様子を動画のように撮影できない。
- (4) RI を用いることの制約：一度利用し RI に触れた実験器具は、廃棄する必要がある、繰り返し実験が可能な簡易で安価な実験系を構築する必要がある。

制約(4)に関しては、実験に RI を用いるという SPECT の特性上、解消することはできないが、制約の(1)~(3)に関しては、SPECT 機器の性能に直接依存する制約であるため、SPECT 機器や再構成アルゴリズムの進歩により今後解消される可能性が十分にあることを付記する。

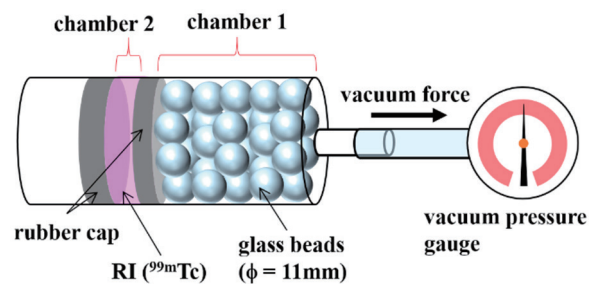


図-1 構築した実験系の模式図

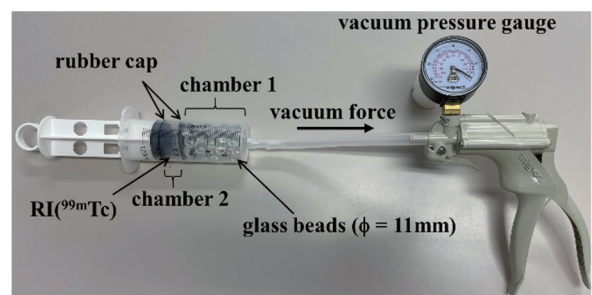


図-2 実験系と実験に使用した器具

### 3. 実験結果

先述したように、実験に用いた  $^{99m}\text{Tc}$  は放射性同位体のテクネチウムの中でも半減期が 6 時間と短く、時間に伴い放射線量も低下することから、実験条件を揃えるために、RI の 1 回の購入につき 1 回のみ実験を行うことが望ましい。本ノートでは、複数回の実験を実施した結果のうち、比較的明瞭に RI の分布状況を可視化できた 2 回の実験に関してその結果を示す。2 回の実験を便宜的にそれぞれ実験 1、実験 2 と呼ぶこととする。実験日が異なるため、FX3000 の調整に起因して、再構成された画像に若干の違いが認められるが、後述する吸引条件以外は同じ条件で実験した結果である。図-3 は、CT で再構成したシリンジ内のガラスビーズの充填状況を表している。実験 1 と実験 2 では同じ数のガラスビーズ、同じ充填方法を採用している。CT 画像により実験開始前と実験終了後の充填状況を比較したが、ガラスビーズの移動は確認されなかった。

図-4 は実験における吸引過程を示しており、横軸は吸引回数、縦軸は吸引力を表している。ここでは、1 回の吸引回数を吸引力の違いによらず 1 ステップとし、例えば、ステップ 1 (Step 1) が吸引回数 1 回目を表している。グラフの途中で段差ができていますが、これは作用させた圧力が、流体の移動や、準備中に取り除くことができなかつた流体内の気泡の影響により低下したためと考えられる。また、実験 1 と実験 2 で最終的なステップ数が異なっているが、実験 2 では実験 1 と比較して、初期に大きな吸引力を作用させているため、RI が少ないステップ数でシリンジ先端に到達したと考えられる。

図-5 は各载荷ステップにおける RI の 3 次元分布状況を表している。RI は図の右から左に向けて吸引されており、図-1 で示した吸引方向とは異なっていることに注意されたい。はじめに図-5 (a) に示す実験 1 に着目すると、Step 0 では、chamber 2 に注入された RI の分布状況が確認できる。Step 1 で吸引力を作用させると、ゴムキャップにあらかじめ空けておいた穴を通して、RI が chamber 2 から 1 へと流れ込む様子が確認できる。Step 1 から 7 まではそれほど RI の分布状況は変化しないが、これは粘性流体を用いているためであり、流体を移動させるために一定以上の吸引力が必要である。Step 8 で RI の流入量が僅かに増えるが、その後、Step 11 までほとんど変化が認められない。このような流動-静止を繰り返し、徐々に RI がガラスビーズ内に広がっていく様子が観察できる。Step 17 でシリンジ先端に到達する際には、広範囲に RI が分布している。ここで観察された現象は、実際の粒状体内を流れる流体の挙動とは大きくかけ離れているものの、本実験を通して SPECT を用いることで、粒状体内の流体の挙動を 3 次元的に可視化できることを示すことができた。これが本研究の成果である。

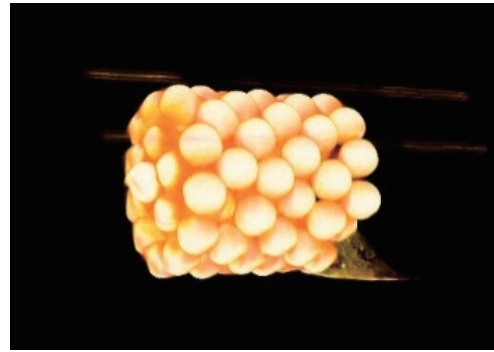
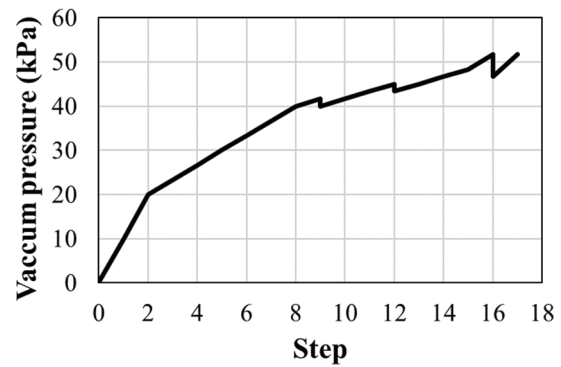
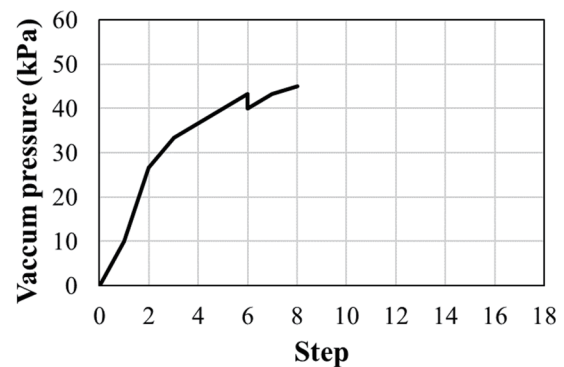


図-3 シリンジ内ガラスビーズの充填状況 (実験 1)



(a) 実験 1



(b) 実験 2

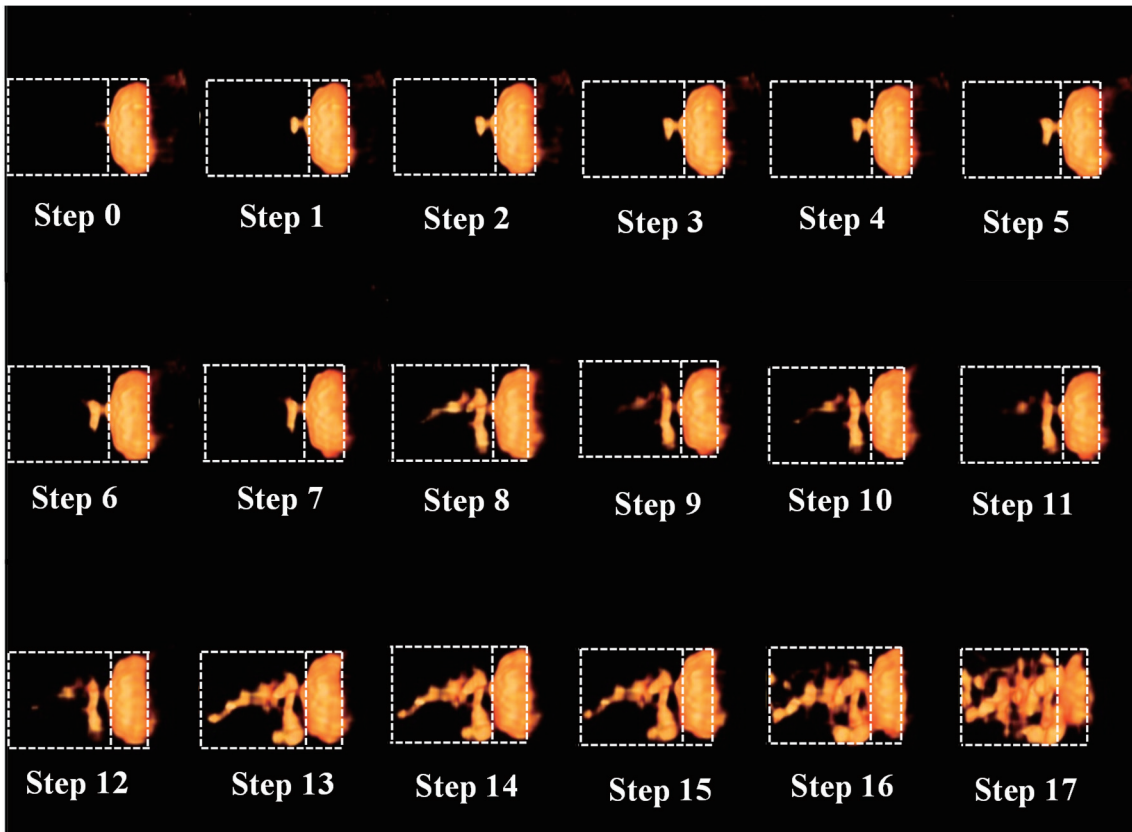
図-4 実験で用いた吸引過程

図-5 (b) は実験 2 における各ステップにおける RI の分布状況を示しているが、実験 1 と同様の傾向、流動-静止を繰り返しながら広がっていく様子が観察された。なお、画像の右下にも RI が分布しているような図になっているが、これはノイズの影響によるものであり、実際に下方に RI が流動している様子を表しているわけではない。

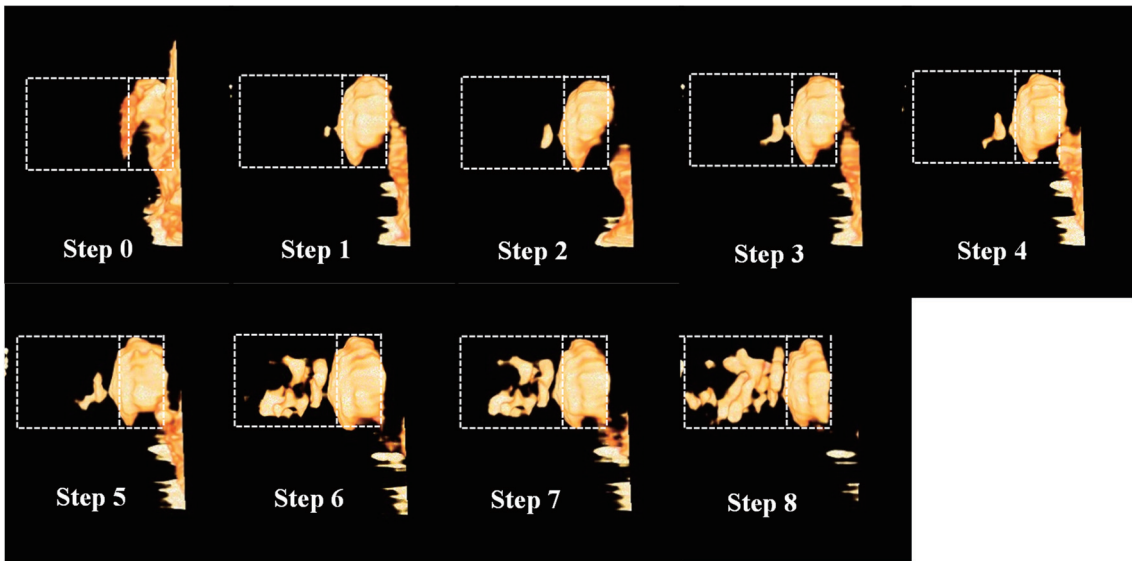
### 4. まとめ

本研究では、SPECT を用いて粒状体内を流れる流体





(a) 実験 1



(b) 実験 2

図-5 荷重ステップと RI の 3 次元分布状況

を 3 次元的に可視化するための実験方法を新たに示した。また、RI を安全に使用できる 3 次元可視化のための簡易な実験系を新たに構築した。実験には高粘性流体を利用しており、観察された現象は実際の地盤内の流体の挙動とは異なるものの、SPECT および RI を応用することにより、粒状体内の流体の 3 次元可視化が実現できることを示した。

#### 謝辞

実験の実施にあたり、長田直之先生(現 大阪大学)、花房直志先生(岡山大学)には SPECT の利用や RI の使用に際し手厚いサポートを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 20H00442 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Otani, J., Mukunoki, T., and Obara, Y. : Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soil and Foundations, Vol.40, No.2, pp.111-118, 2000.
- 2) 大谷順, 高野大樹 : 土の 3 次元挙動解明の最前線: X線 CT の適用, 地盤工学会誌, Vol.61, No.11/12, pp.6-9, 2013.
- 3) 小林俊一, 高橋源太郎, 関口秀雄 : X 線 TV 装置による粒状体地盤一流体系の動的相互作用の可視化実験法について, 応用力学論文集 Vol. 3, pp. 521-531, 2000.
- 4) 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子 : PIV による水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, I\_529-I\_534, 2017.
- 5) 竿本英貴, 松島亘志, 山田恭央 : LAT – PIV 可視化実験手法の開発と粒子 – 流体系への応用, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 601-608, 2005.
- 6) Li, L., Iskander, M. and Omidvar, M.: Visualization of inter-granular pore fluid flow, Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Phys. Model. in Geotech., 2018.
- 7) 岡山大学大学院医歯薬学総合研究科産学官連携研究センター (分子イメージング研究拠点) ウェブサイト : イメージングシステム (小動物用 SPECT/CT システム)  
<http://www.crc.okayama-u.ac.jp/equipment/imaging/other.html>, (参照 2021.5.30).
- 8) TriFoil Imaging 社ウェブサイト : TRIUMPH (FX3000),  
<https://static1.squarespace.com/static/5cf011ae271b060001ac70a6/t/5d8aaace6a16117cd87e307d/1569368788115/TriFoil+Imaging+Triumph+II.pdf>, (参照 2021.5.30).

(2021 年 6 月 14 日 受付)