

X線 CT スキャナを用いた粒状集合体の内部挙動の計測手法

佐藤 宇紘^{*1}, 松本 英敏^{*1}

^{*1} 熊本大学工学部技術部

1. はじめに

熊本大学には1996年に産業用X線CTスキャナが導入され、大学各学部の垣根を越えて様々な研究に用いられてきた。その中でも岩盤・地盤工学分野においては試料内部の非破壊検査による研究が数多く行われ、この分野への適用の基礎¹⁾から先駆的研究²⁾まで大きな成果を上げている。2010年にはマイクロフォーカス型X線CTスキャナ(写真1)が新たに導入された。この新装置は従来の産業用CTに比べて解像度が高く、試料内部の細密な密度情報を得ることができる。地盤工学分野ではこの装置を利用して、これまで個別分離が難しかった土砂のような小径粒子集合体の内部観察を行い、粒子そのものの移動や空隙流体の移動を評価する研究が進められている。本技術報告では、新装置を利用した粒状集合体の内部挙動の計測手法の現状と今後の展望について、これまでに行われてきた過去の研究経緯を含めて紹介する。

2. X線CTスキャナの概要

X線CTスキャナは医療機器として一般によく知られているが、近年は様々な産業分野においても非破壊検査技術の一つとして広く利用されており、製造部門などにおいては製品内部の欠損確認などにも応用されている。X線は物質を透過する性質をもつが、物質の透過中に一部吸収され減衰する。このX線減衰量と透過物質の密度には高い相関関係があるため、この性質を利用して試料のX線透過量を計測することで内部の密度情報を得ることができる。原理について簡単なイメージを図1に示す。装置の基本動作としては、装備されたX線源から対象試料にX線を照射してその透過量を検出器で計測、記録する。試料への単方向のX線照射により得られる透過像は一般に言われるレントゲン像となるが、X線透過量を試料の全方位について計測し、逆解析により断層像として再構成したものがCT像である。CT像が示す情報は試料内部の空間密度分布の近似値として取り扱うことができる。図2に示すように、得られたCT像の密度情報について白黒の諧調表示を行うとCT画像となる。本報告内で示すCT画像については高密度部を白色、低密度部を黒色で表示している。



写真1 マイクロフォーカス型 X線 CT 装置

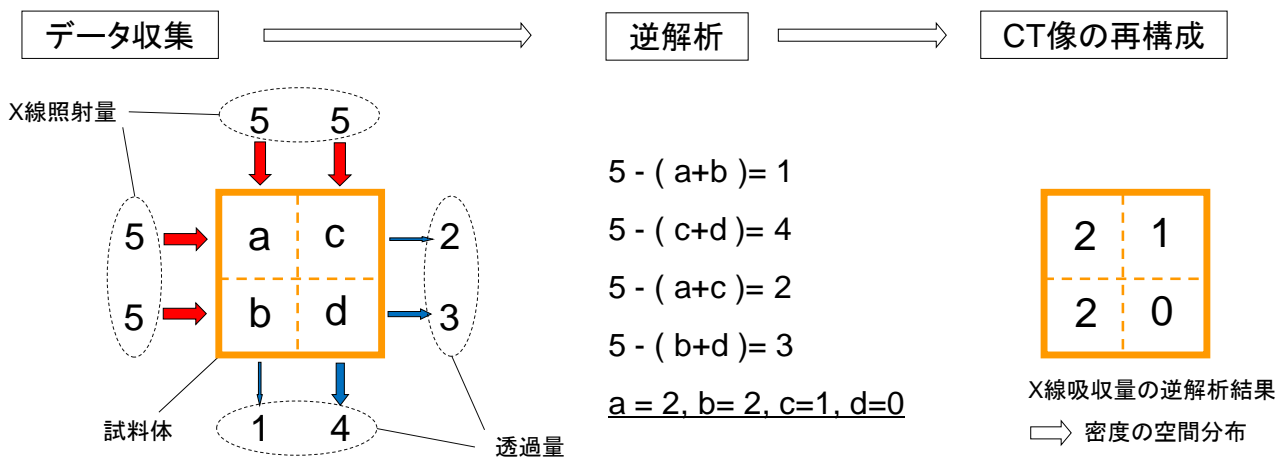
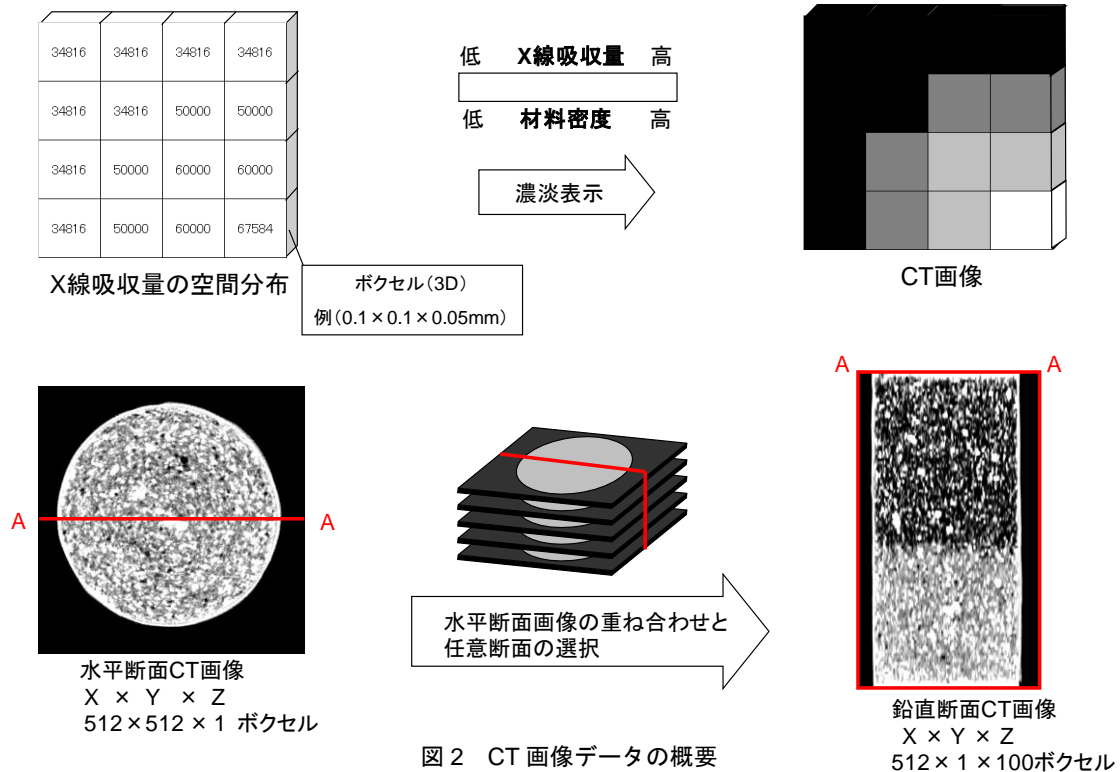


図1 X線CTの原理イメージ

CT画像：X線吸収量の空間分布を白黒濃淡で階調表示したもの



3. X線CTスキャナの地盤工学実験への適用について

X線CTスキャナを用いた実験では、装置の特性上、照射X線の一部分が試料を透過する必要があるため試料サイズや材料密度の制約を受ける。新型CT装置にて地盤材料を観察する場合には直径10cmの土槽内試料程度が観察限界となる。金属やセラミックスなどの高密度材料を多く含む試料ではさらにサイズの制約が大きくなる。また、撮像ではX線を全方位照射するための試料回転時間が必要になるため、動的な変化つまり撮像時間よりも短い時間で連続的に変化する現象については観察ができない。振動による地盤の液状化現象や短時間で移動してしまう間隙流体の観察などは評価が困難である。また、シルトや粘土のような極小径の均質な地盤材料の場合は現存の最新装置でも解像度は十分でない。粒子と空隙の密度分布の分離判別ができない試料を観察対象とする場合はマーカーなどの観察指標を混合する必要がある。さらに、試料内部の変化を観察する場合には前後の有意な密度変化が生じなければ比較ができない。つまり、飽和した試料に対する透水試験などは同密度の間隙水が次々に入れ替わっても密度差が生じないため現象の評価はできない。以上のようにCT装置の利用にあたってはいくつかの制約があるためそれらをクリアするように装置や材料、実験条件を選定する必要がある。

CTスキャナ装置の最大の利点は、従来の外部からの計測手法では得られない試料内部情報を非破壊で取得できる点にある。このため時間経過による試料内部の変化観察のために通常は試料を破壊して観察を行う実験においても同一試料を対象に定期的観察と連続実験が可能になる。また、三次元で生じる現象についても三次元のまま実験を行い観察することが可能になる。これらの利点を生かしたCT装置の地盤工学実験への適用方法について例をいくつか述べる。まず、現場からの採取試料や新しい混合地盤材料などを対象に内部の材料、空隙の分布評価に利用できる。具体的な利用例としては、地盤改良後の現場から試料をサンプリングして撮像することによって改良材の混合具合などを調べることが可能になる。さらに、サンプリング試料内部の初期状態を撮像した後に要素試験等の力学試験を実施すると、試料内部の状態と力学強度の関係が得られる。次に、有意な密度変化を伴う微小な変形、変状を試料に断続的に与え、内部変化の観察・評価に利用できる。模型地盤への载荷実験や透水試験において外部入力条件を段階的に与えてから撮像を繰り返し、土粒子の移動や空隙の密度変化について観察するものである。画像処理技術により土粒子の移動量を計測出来れば試料内部のひずみ量

の空間分布などが定量的に評価できるようになる。より具体的な利用例としては、形状などの境界条件を比較する模型基礎の載荷実験において、載荷荷重や模型の応力分布、模型基礎沈下量といった外部計測データと模型地盤内部の変状の関係を評価することなどが考えられる。

4. 粒状集合体の内部挙動追跡手法

X線CT装置の地盤工学実験への利用例は多々あるが、これまでの研究で発展してきた地盤内粒子の追跡・評価手法に注目し、それらの成果と現状について紹介する。

熊本大学で粒子追跡を行った研究には、産業用CTを用いて一次元圧縮中の山砂供試体内の特定砂粒子の移動を追跡した実験³⁾や、変形を生じる模型地盤中に並べられたセラミックマーカの移動を追跡した実験⁴⁾がある。図3は左側に示された棒状の平杭に変位を与えた過程での杭とマーカの位置関係が色の変化で表示されている。同様の研究にマイクロフォーカス型CTを用いて模型地盤内に配置された鉄粒マーカを追跡し鉛直貫入される杭基礎周辺での動きを観察した研究⁵⁾がある。図4はCT画像を加工した三次元図であるが、中央上部のかまぼこ型の白い塊はアルミ模型杭を半断面で表示したものである。周辺の白色の粒子が鉄粒であり薄灰色のバックグラウンドが砂地盤である。図はそれを二次元表示したもので図5中に示すベクトルは模型杭が画像下方向に貫入したときの粒子の杭体に対する相対移動を表示したものである。模型杭の貫入と撮像を繰り返して鉄粒マーカの相対移動ベクトルをつなげると流跡線となり、地盤が杭体に対して周辺をどのように移動したか観察できる。これらの手法はいずれも関心断面のCT画像から観測粒子を抽出して目視で粒子追跡を行っている。模型地盤の大局的変形についての評価には十分であったが、目視での追跡では観測粒子数が限られる点や追跡粒子座標の精度が低い点が課題として残った。

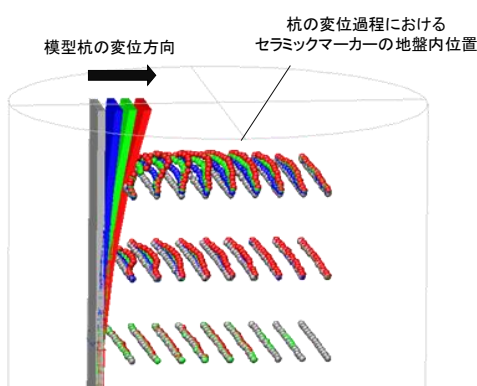


図3 模型地盤中のセラミックマーカの移動追跡⁴⁾

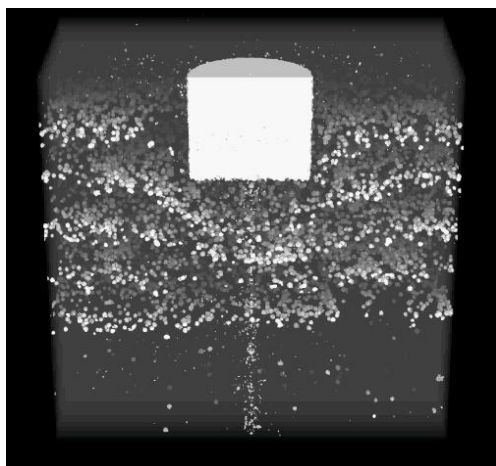


図4 模型地盤中の鉄粒マーカの3D位置表示⁵⁾

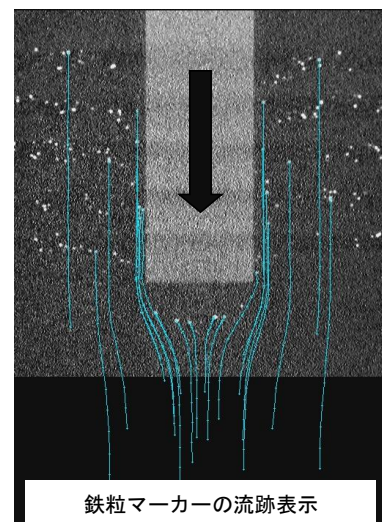
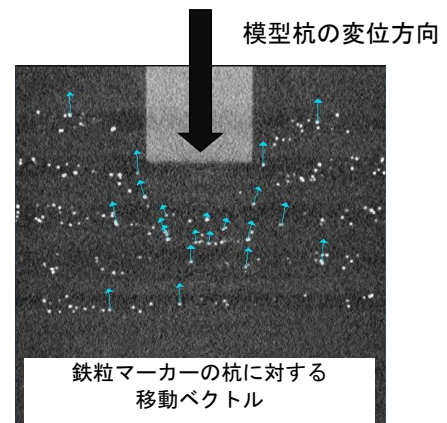


図5 模型地盤中の鉄粒マーカの移動追跡⁵⁾

以上の簡易粒子追跡手法は PTV に分類される。PTV とは Particle Tracking Velocimetry の略で、二画像間における観察粒子を対応させて変位ベクトルを得る流れ解析である。これに対して、PIV は Particle Image Velocimetry の略であり、任意点の関心画像について二画像間で相関をとり、一定範囲で最も相関が高い座標値から変位ベクトルを得る流れ解析である。PIV の優位性は変位ベクトルを取る点を任意に設定できる点にあり、試料内部の微小変形を計測するのに十分な濃度の観測点を均等に抽出できる。そこで、流体力学分野で発達している二次元流体解析の技術を利用した画像相関法 (2D-PIV) により粒子の移動量を計測する手法^{5),6)}に発展した。図 6 に示す画像は砂の三軸圧縮試験で得られた試料内部の微小変形ベクトルである。移動量の大きいベクトルは暖色、小さいベクトルは寒色で示されている。この手法を用いて図 7 に示すような 2D-PIV で得たベクトル情報を地盤メッシュに与え、変形計算並びに平面ひずみ量の定量まで検討できるようになった。

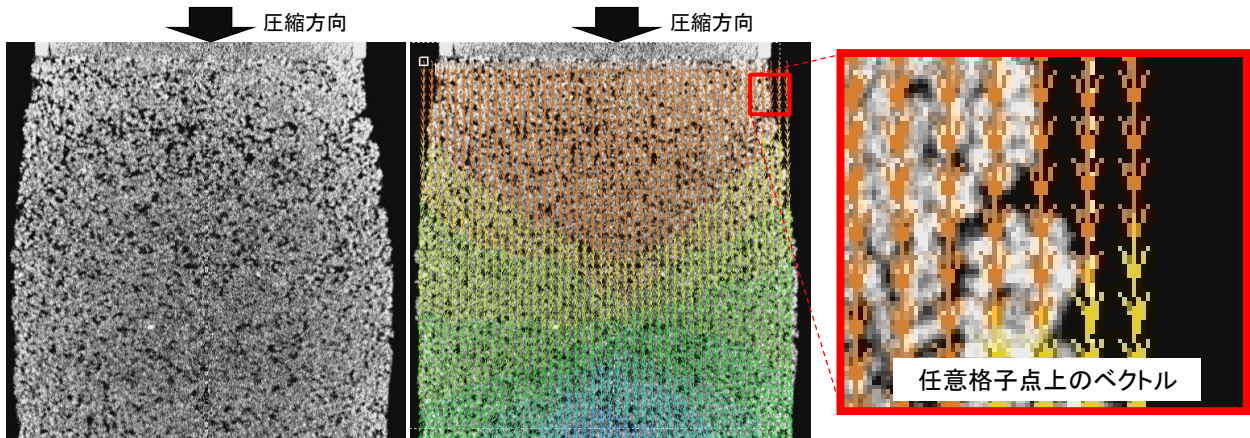


図 6 三軸圧縮試験における砂試料中心断面の 2D-PIV

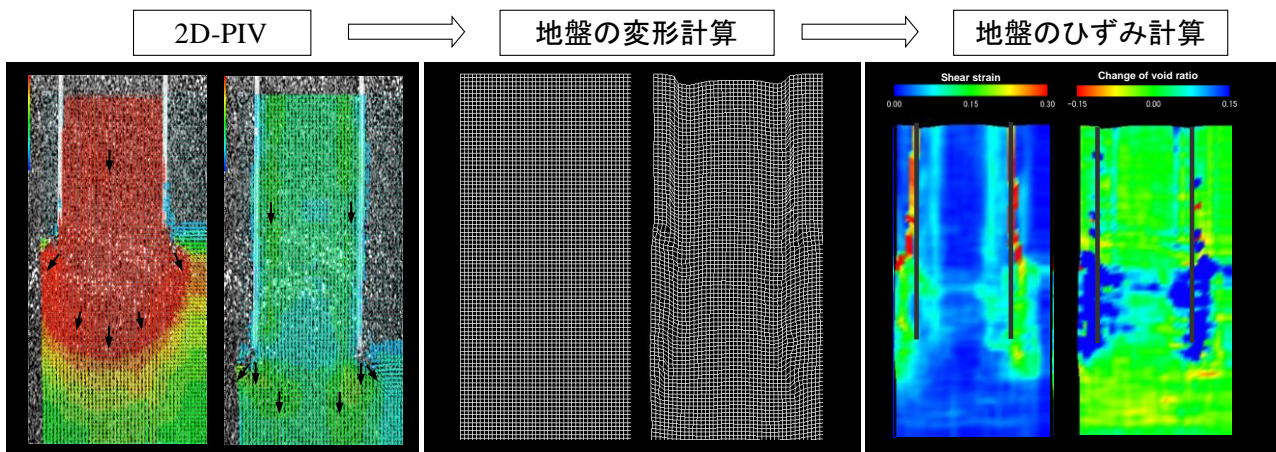


図 7 杭の鉛直貫入実験における模型地盤の平面ひずみ解析⁵⁾

しかし、この 2D-PIV では二次元の観察面の評価にとどまるため、解析の適用範囲は平面問題として取り扱える現象に限定されるという大きな制約があった。CT スキャナで得られる三次元の空間情報を最大限に分析するためにはこれらの流れ解析手法を三次元に拡張 (3D-PIV) する必要がある。その後、CT スキャナの地盤工学分野への普及や演算装置の性能向上とともに三次元の流れ解析の需要が高まり、各研究機関でプログラムの開発が進められてきた。フランスの研究チームが開発した三次元空間の画像相関流れ解析プログラム (DIC : Digital Image Correlation) を流れ解析に利用した最近の研究^{7),8)}では、三軸圧縮試験中の砂試料の内部変形について定量評価されている。図 8 は破壊が進む試料内部のせん断ひずみ分布を示している。また、図 9 は一定のせん断ひずみ量を持つ領域を抽出して三次元表示した例である。これらの解析手法により三次元で生じる現象についてもそのまま微小変形を評価することが可能になった。3D-PIV の今後の課

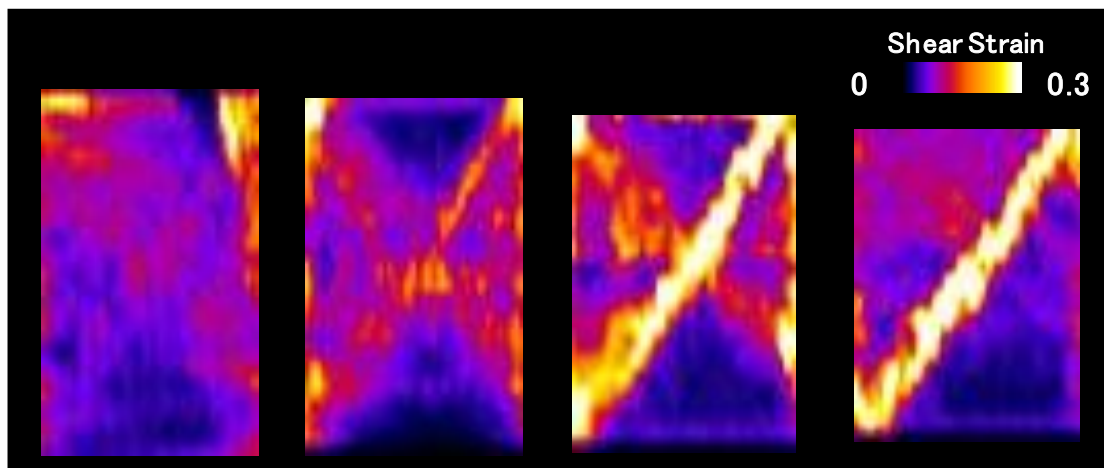


図 8 砂の三軸圧縮試験における地盤内部のせん断ひずみ分布⁸⁾

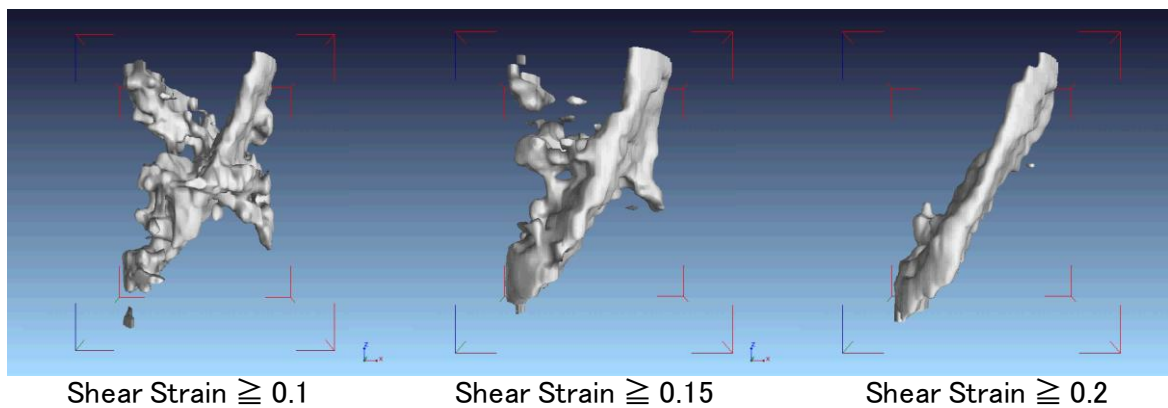


図 9 砂の三軸圧縮試験における地盤内部のせん断ひずみ分布の三次元表示⁸⁾

題として、現在の一般的な演算装置では解析に膨大な時間が必要になる点が挙げられる。CT装置のさらなる高性能化によるCT画像のデータ量増加や相関計算法の複雑化、高度化により今以上に演算にかかる負荷は高くなると考えられるため、演算装置の高性能化とプログラムの改良が期待されている。

以上の粒子追跡に関する研究経過を踏まえ、現在3D-PTVの開発を進めている。CT画像の高解像度化により、対象粒子を確実に分離することが出来れば、その後の粒子追跡のための演算処理は大幅に容易になる。また、PIVが不得手とする面状の接触境界付近の追跡精度が向上するものと考えられる。

3D-PTVによる粒子追跡を行う上での課題のひとつは、得られた画像から観測対象とする粒子を確実に分離することである。観測粒子密度が周囲の材料密度と大きく異なりかつ空間に対する存在濃度がそれほど高くなければ容易に分離できるが、観測粒子の空間濃度が高く粒子が接触している場合は分離の為に画像処理技術が必要になる。図10は砂粒子を三次元の画像処理によって分離した例であるが、元画像の拡大図を見ると複数の砂粒子が接触している。人間の場合、観察した画像は脳内で濃淡や形状などの複数の情報が同時処理されるため粒子は分離しているように見えるが、実際にデータ上で粒子分離させるには特徴抽出などのいくつかの手順を踏む必要がある。より詳しく接触点を判別するためには間隙形状に合わせた重み付けフィルターと数値分散判定の組合せによる解析処理が必要になると考えられる。

粒子追跡アルゴリズムには弛緩法を用いる。弛緩法は局所的な矛盾と解釈の曖昧さを低減する処理を局所並列的に反復することで、より大局的に整合がとれた解釈を得ようとする方法⁹⁾である。図11に弛緩法による粒子追跡のイメージを示す。CT画像から抽出された観察粒子の重心座標を用いて二画像間で得られる複数の移動ベクトル候補について一定条件のもとでの存在確率を並列反復計算することによって移動ベクトル候補からの集束決定を行うものである。

また、微小変形による特定粒子の回転現象の計測方法についても検討を進めている。均質で完全な円形粒子であればその回転量を計測することは不可能であるが、粒子内部の特徴点を抽出できれば粒子回転量を計測できる可能性がある。そこでまず、天然の地盤材料への適用の前段として粒子内部に特徴点として異なる密度の小粒子を含む人工材料を製作した。

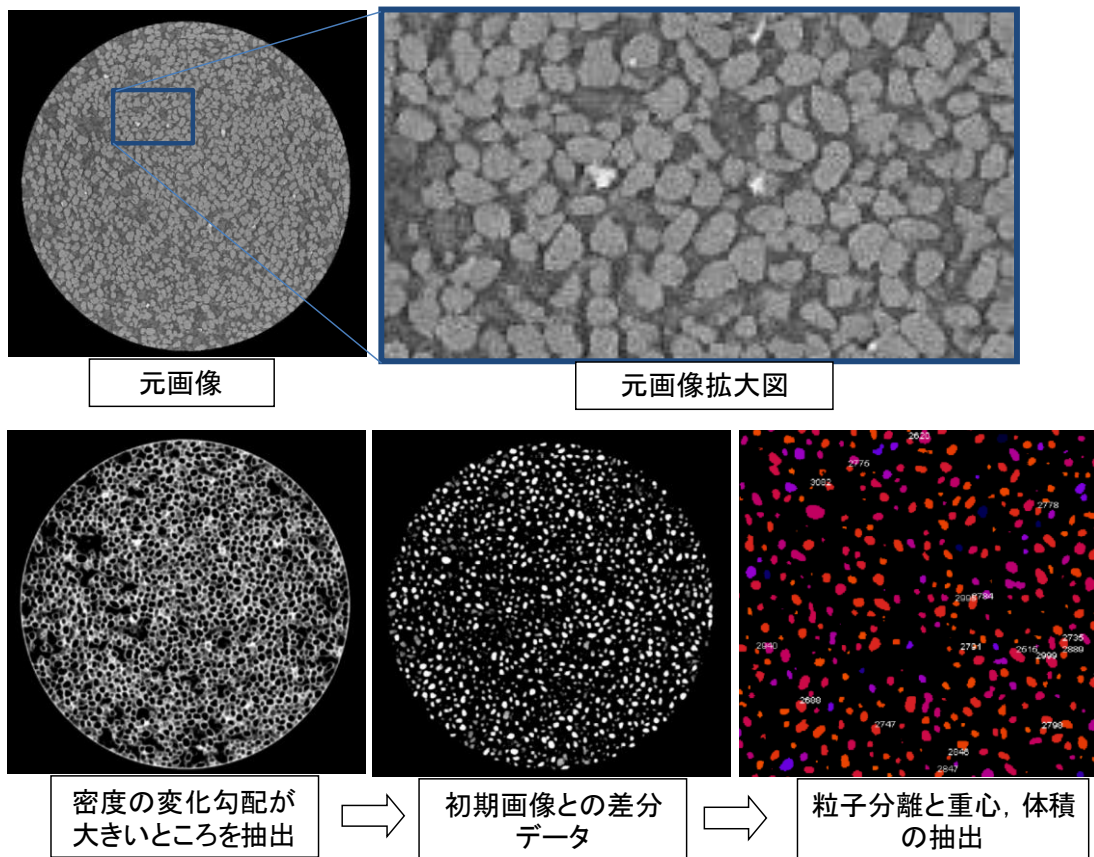


図 10 砂粒子の個別分離処理（三次元）の例

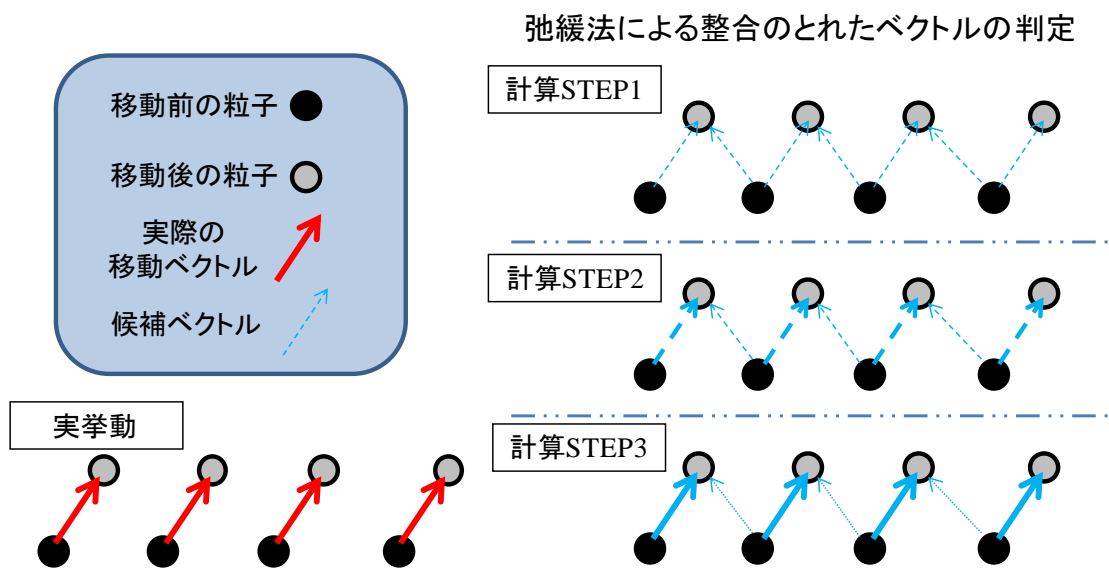


図 11 弛緩法による追跡アルゴリズムのイメージ

人工粒子の母材は一般に販売されている焼成粘土を用い、内部マーカーとして材料密度の高い鉄粒を混入した。図 12 に試作した人工粒子の写真と CT 画像を示す。写真の黄土色の部分が母材粘土であり、CT 画像中では鉄粒を含む薄灰色の粒子で示されている。写真中の黒色の点が鉄粒であり、CT 画像中では明るい白色の点で示される。鉄粒は $\phi 0.3\text{mm}$ のスチールショットブラスト材を用い、母材粘土との重量比 20% で混合している。粘土を $\phi 2\text{mm}$ 程度に造粒した後、800 度で 30 分間焼成している。母材粒子集合体の微小変形前後の CT 画像において母材粒子及び内包する複数の鉄粒マーカーの重心座標をそれぞれ抽出、追跡して母材粒子の回転量を計測する。ただし、この計測方法は粒子の回転量が大きいと誤った解析結果を得ることになるので注意が必要である。

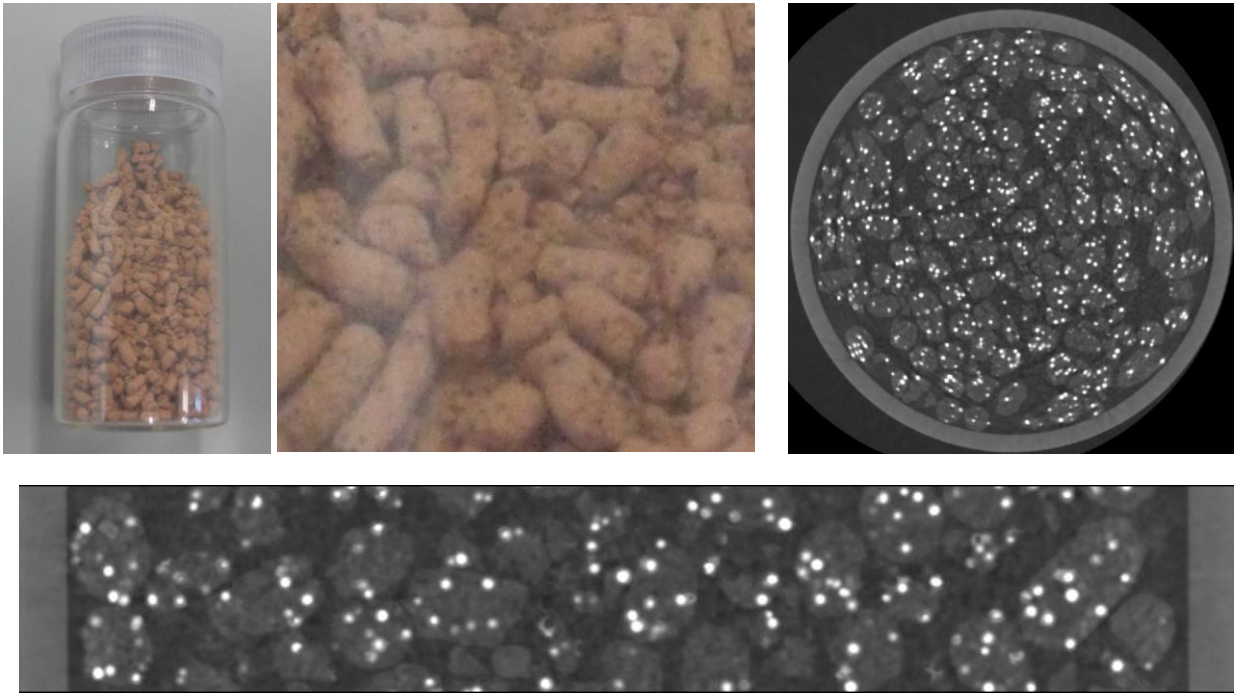


図 12 粒子内部に特徴点として鉄粒を混合した人工粒子の写真と CT 画像

5. 展望

数値解析の一種である個別要素法 (DEM) ¹⁰⁾の研究分野はアルゴリズムの高度化や演算装置の発達とともに大きく発展を遂げている。この粒子のような個別要素を対象とした数値解析技術と CT から得られる実現象の計測技術の融合技術の開発を今後のテーマのひとつとして考えている。DEM については不勉強であるため原理的に可能であるかは不明な点があるが、アイデアとしては CT 画像から得られる粒子の位置・形状・移動・回転情報を DEM 数値計算モデル中の要素粒子に入力として与え、地盤内の応力状態についての情報を出力として得ることを考えている。

謝辞 本技術報告の内容の一部は科研費 (22920006) の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 椋木俊文：地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科学学位論文，2001.3
- 2) 高野大樹：トンネルの設計・施工の高度化に関する研究-X 線 CT の適用-，熊本大学大学院自然科学研究科学学位論文，2008.3
- 3) 井上：X 線 CT 法を用いた土の構成関係同定システムの構築に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科修士論文，2005.2
- 4) Pham Dang Khoa：Investigation of soil behavior around laterally loaded pile using X-Ray CT，熊本大学大学院自然科学研究科学学位論文，2006.2
- 5) 菊池喜昭ら：開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察，独立行政法人港湾空港技術研究所資料，No.1177，2008.6
- 6) 島田里美ら：地盤材料としてのタイヤチップの一面せん断挙動 -X 線 CT の適用-，ジオシンセティックス論文集 Vol.23 pp.75-82，2008.
- 7) Hall S.A.ら：Strain localisation in sand under triaxial loading: characterisation by x-ray micro tomography and 3D digital image correlation, *Proc.of Int. Symp. on Computational Geomechanics COMGeo09*, 2009
- 8) 渡辺陽一：地盤材料を対象とした X 線 CT データの定量化に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科学学位論文，2011.3
- 9) 高木幹雄，下田陽久 監修：新編 画像解析ハンドブック，東京大学出版会
- 10) 松島亘志：DEM 技術手帳，地盤工学会誌 58(1)，116-117，2010.1