

土の構造とメカニクス—ミクロからマクロへ—

2. 土の微視的構造を探るための実験的研究 (その5)

松島 亘 志 (まつしま たかし)
筑波大学講師 機能工学系

小長井 一 男 (こながい かずお)
東京大学教授 生産技術研究所第1部

2.4 LATを用いた三次元粒状体内部構造および粒子運動の可視化

2.4.1 はじめに

本節で紹介するLAT: Laser-Aided Tomography (レーザー援用トモグラフィ^{90)~94)}は、粒状体を構成する不規則形状粒子の三次元的な微視構造、およびそれが力を受けたときの三次元的運動(回転も含む)を可視化する技術である。このような研究はこれまでほとんど行われておらず、特に三次元粒状体内部の粒子回転の可視化は、「粒状体の力学において粒子回転が重要な役割を果たす」という、粒状体のマイクロメカニクスの知見に立てば、極めて有効な技術であるといえる。本節ではまず、LATの原理、最近開発されつつあるLAT画像解析法について解説し、次に本手法を平面ひずみ圧縮試験に適用する試みについて述べる。そして、今後LATへの適用が期待される、レーザーを用いたその他の研究手法について紹介する。

2.4.2 LATの原理^{90),91)}

LATの可視化の原理は、X線CT^{95),96)}やMRI⁹⁷⁾などと比べて単純である。LATでは粒状材料としてガラスブロックを粉砕して作製したガラス粒子を用いる。そして、これをガラスと全く同じ屈折率を有する透明な液体で飽和させる。この状態ではガラス粒子は見えなくなり、模型は透明になる。そこへシート状にしたレーザーを通すと、ガラス粒子表面で光が散乱することにより、レーザーの通った断面内の粒子の輪郭のみが浮かび上がる(図-2.38, 2.39)。ガラス粒子の表面で光が散乱する理由は、粉砕したガラス表面が化学的に活性化し、その光学的特性がわずかながら変化するためと考えられている。ガラス粒子は気泡などの含まれていない均質なものが望ましく、現在はBK7という光学ガラスを粉砕して用いている。粉砕はジョークラッシャーを用いているが、得られる粒子形状は非常に鋭角的になる。そのため、適宜ボールミルを用いて角張りを取る工夫をしているが、さまざまな粒子形状を自由に再現するまでには至っていないのが現状である。用いる液体としては、ガラス粒子の屈折率よりも高い屈折率を持つ液体と低い屈折率を持つ液体を混合させて、ガラス粒子と同じ屈折率を実現しているが、ガラス粒子の屈折率が波長514.5 nmの緑色のレーザー光に対して1.5194と通常の液体と比べて高いので、用いる液体は非常に限定される。現在のところ、

低粘性の液体としてはテトラリンとテレピンオイルという有機溶剤を、準静的な実験では、活性度の低い2種類のシリコンオイルを用いている。なお、液体の屈折率は温度によって変化するので、実験室の温度管理が重要となる。

レーザーシートの通す位置を変化させ、模型をスキャンしながら通常のカメラで断面撮影することにより、三次元的な粒子構造を取得することが可能となる。ステップモーターなどを用い、断面スキャンと撮影をコンピューター制御することも可能で、短時間でデータを取得することができるため、地震動などを対象とした動的試験にも十分対応可能である。データの解像度はスキャンする断面間距離と、レーザーシートの幅に依存するが、

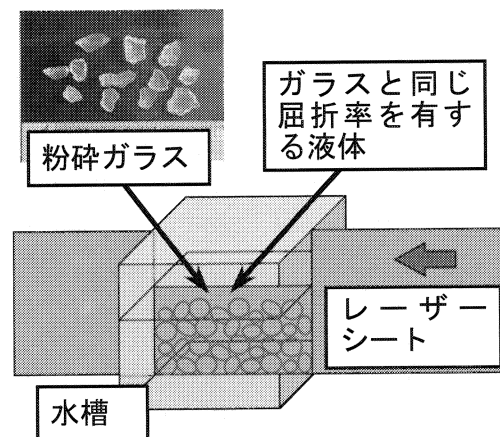


図-2.38 LATの原理

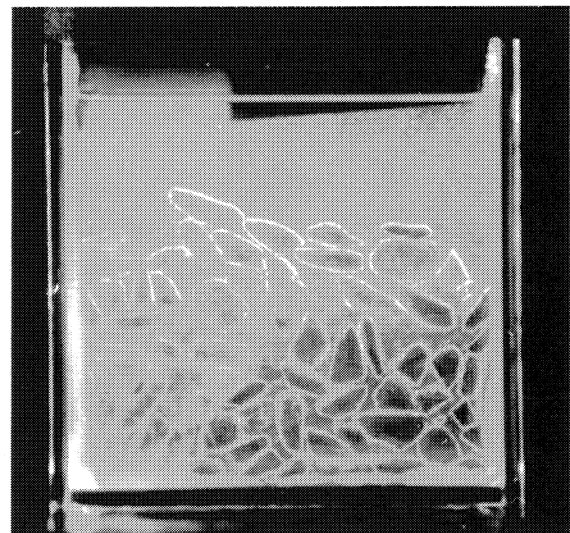


図-2.39 LATで得られる断面画像の例

本質的なのは後者である。現在は凸レンズを用いるのみで対処しており、シート幅は0.5~1 mm程度となっている。

2.4.3 LAT 画像解析法^{93),94)}

前節に示した方法によって得られる多量のLAT画像から定量的な粒子情報を取得するためには、画像解析が不可欠である。その鍵となるのが粒子の輪郭抽出法であるが、LAT画像の輪郭抽出における問題点としては、(1)粒子形状が複雑であるため、多くの既存の画像処理法が使えないこと、(2)輪郭のみが光っているため、暗い部分が粒子内部なのか間隙なのかの判断の自動化が困難であること、(3)粒子間接点で粒子輪郭が重なるため、通常の間接点追跡法を用いると、別の粒子の輪郭への乗換えが発生すること、などが挙げられる。現在のところ、輪郭抽出の完全自動化は難しく、以下のように画像処理業者がある程度補助をする半自動化アルゴリズムを採用している。

図-2.40において、作業者はまず粒子の中心付近の点A、粒子を楕円形で近似したときの長軸、短軸を示す輪郭線上の点B、Cをそれぞれ指定する。すると、プログラムは線分AB方向を基点として、反時計回りに増分に対象線分を設定し、その線分上の輪郭点を抽出してゆく。例えば、線分ADの方向では、線分上の各点における画像のGreen輝度 $f(r)$ (r は点Aからの距離)を計測し、これに一つ前の線分での輪郭点の結果を考慮する関数 $g(r)$ および、設定した近似楕円に関する関数 $h(r)$ を掛け合わせた、 $f(r)g(r)h(r)$ が最大になる点を輪郭点とする。 $g(r)$ は輪郭点の連続性を保ち、 $h(r)$ は輪郭線の発散(別の粒子輪郭への乗換え)を防ぐ効果がある。 $g(r)$ および $h(r)$ は、以下のような関数である(図-2.40参照)。

$$g(r) = \begin{cases} 1 & ((1-\alpha)r_p \leq r \leq (1+\alpha)r_p) \\ 0 & (r < (1-\alpha)r_p, r > (1+\alpha)r_p) \end{cases}$$

$$h(r) = \begin{cases} 1 & (0 \leq r \leq \overline{AE}) \\ 1 - \beta(r - \overline{AE}) & (r > \overline{AE}) \end{cases}$$

ここに、 r_p は一つ前の線分での輪郭点と点Aとの距離、 α, β は定数である。定数は、試行錯誤により $\alpha=0.1, \beta=1.0$ に設定した。

実際は、LAT画像の品質によって、このアルゴリズムではうまく輪郭抽出ができない場合が出てくるので、最後に目視によるチェックと、適宜修正を加えている。この修正はプログラム上で簡単にできるようにしてある。目視のチェックでは大まかな形状はチェックできるが、細かい凹凸はチェックできない。大ざっぱに言って、最大で粒径の5%程度の誤差は含まれる可能性がある。

以上のような粒子輪郭抽出の簡単な例として、立方体ガラス容器に5.0~10.0 mmにふるいわけられたガラス粒子を緩づめに詰めたサンプルの画像解析例を示す。レーザーはガラス容器の一面に平行に入力し、2 mm幅でスキャンし、画像撮影を行った。図-2.41はそのうちの断面およびその画像解析例を示している。容器の縁は不透明になっているので粒子輪郭が取得できず、中央

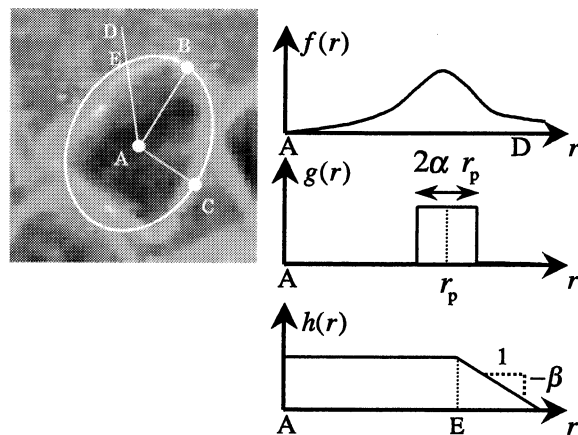


図-2.40 粒子輪郭抽出アルゴリズムの説明図

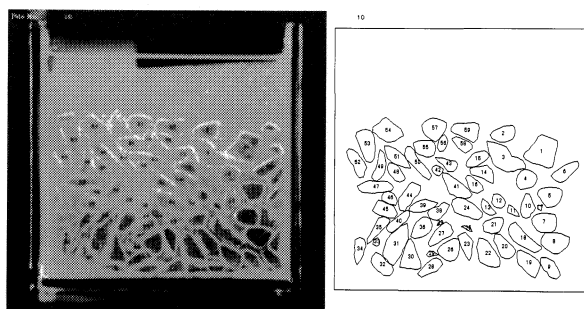


図-2.41 LAT画像(左)と解析された輪郭図(右)

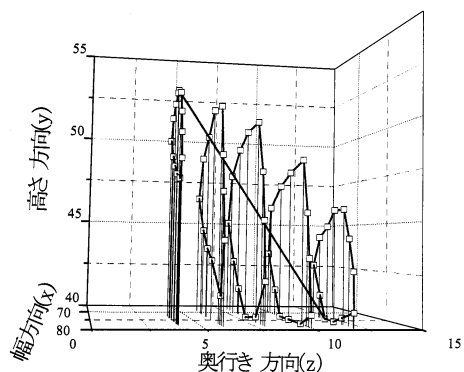


図-2.42 断面間の粒子輪郭の統合(直線は長軸を表す)

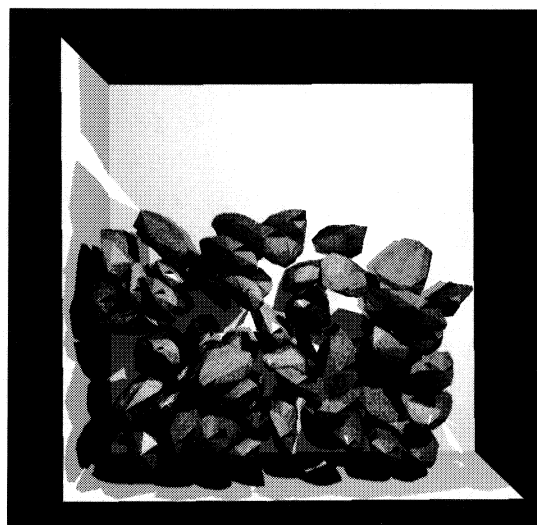
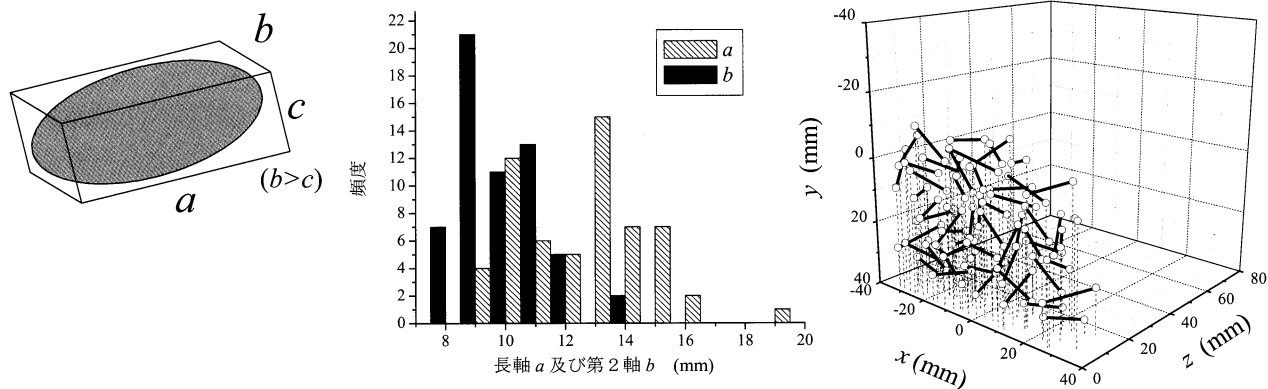


図-2.43 ある断面内を通る粒子の形状と配列



図—2.44 LAT 画像処理によって得られた粒子形状の統計と配向情報

部分の粒子のみの輪郭抽出を行っている。粒子の大きな形状と位置はよく再現されている事がわかる。

この輪郭抽出によって得られたデータから、さまざまな微視的パラメーターが簡単に計算できる。例えば、ある領域内の間隙比が知りたいときには、粒子内部を塗りつぶして、粒子部分の画像ドットの総数と、間隙部分のドット数の比を取ることで計算できる。図—2.41の中央部では0.728が得られている。次に、図—2.42に示すように、隣り合った断面での粒子輪郭情報を統合することで、粒子の三次元形状データが得られる。図—2.43は、ある断面内を通る主な粒子についての三次元形状および配列を示している。更に、粒子の三次元的な配向の情報は、長軸 a ・第2軸 b を以下のように定義することで求められる(図—2.44)。まず長軸 a は、三次元粒子の輪郭点のうち、最も遠い2点をもって定義する(図—2.42参照)。次にその長軸に垂直な平面への輪郭点の投影を考え、その中で最も遠い2点をもって軸 b を定義する。最後に、 a と b の両方に垂直な条件より最後の軸 c を決定する。図—2.44(b)には、図—2.43に示された粒子についての軸 a, b の頻度分布を示している。軸 b の頻度分布は、ふるい目の最長長さがふるい目の $\sqrt{2}$ 倍(正方形の対角線の長さ)であることを考えると、妥当な範囲にあるといえる。さらに図—2.44(c)には、粒子長軸の三次元的な配向を示している。ここでは z 軸が奥行き方向を表している。

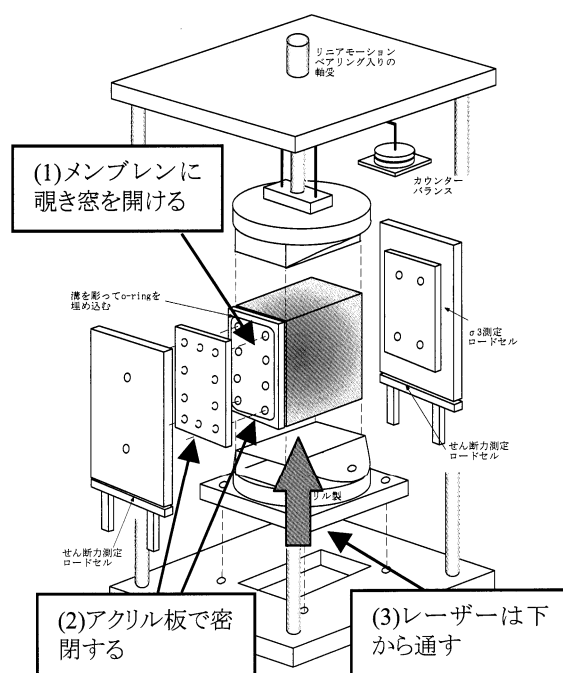
このように、「三次元粒状体内部の不規則形状粒子の形状および配列情報の取得」という、これまで測定困難であった情報を取得できることが本手法の特徴である。次項ではさらに、粒状体変形するときの三次元粒子運動の可視化について述べる。

2.4.4 LAT平面ひずみ試験

粒状体のマイクロメカニクスの主眼は、ミクロからマクロへの橋渡しであるから、微視的なパラメーターと同時に、粒状体全体としての力学的挙動が得られるような実験が有効である。そこで、LATを要素試験に適用することが考えられた。LAT試験では、レーザーを照射する方向と、断面を観察する方向の2方向が透明である必要がある。しかし、透明で十分な強度を有するゴ

ム膜(メンブレン)が存在しないことから、三軸圧縮試験などには適用できない。一方、平面ひずみ(PSC)試験には、以下に示すような工夫を施すことによって適用が可能となった。

図—2.45は、LAT実験用に開発されたPSC試験機の模式図である。試験機は拘束圧を供試体内部からの負圧によってかけるタイプの単純な装置である。粒状材料は直方体状(高さ200mm, 奥行き160mm, 幅80mm)で、メンブレンに包まれ、負圧によって自立している。レーザーシートは、台座(ペDESTAL)をアクリル製にすることで、供試体下部から供試体前面に平行に照射される。さらに、可視化される断面を観察するために、供試体前面のメンブレンに、あらかじめ長方形ののぞき穴をあけ、それを2枚のアクリル板で挟み込んで密閉する。そして、さらに供試体の前面と背面を拘束板で挟み込む(前面の拘束板もアクリル製)ことで、平面ひずみ状態を実現する。供試体に軸力がかかるキャップとペDESTALは、アクリル板に接触しないようにしてあるが、



図—2.45 LAT/PSC 試験機の模式図

メンブレンを挟み込む2枚のアクリル板のうち、内側の板は粒子に直接接触しているため、供試体の変形とともに大きな摩擦力がかかる。この点は通常のPSC試験と異なるので、その影響と対策について今後詳細に検討する必要がある。

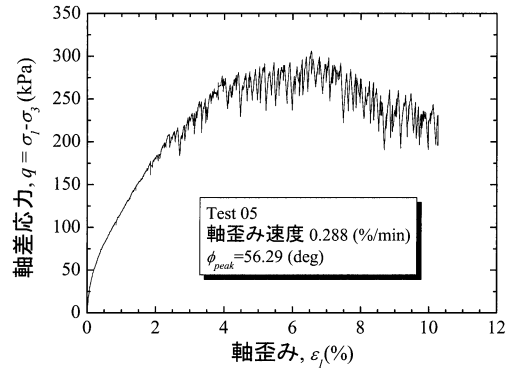
供試体は、前述のように2種類のシリコンオイルを調整してガラスと同じ屈折率にした液体によって飽和させる必要がある。その際、供試体内にトラップされる気泡の量を極力減らすために、あらかじめ液体に溶けやすいCO₂を数時間供試体内に通し、十分脱気しておくことが有効である。

以下に示す実験結果は、貧配合のガラス粒子 ($D_{50} = 7.3 \text{ mm}$) を空中落下法によって密結めにして作成した供試体に対する結果である。拘束圧は78 kPa、軸ひずみ速度は0.228%/min.で行った。図-2.46は、通常の試験で得られるような、マクロな応力-ひずみ関係とダイレイタンシー特性である。得られた応力-ひずみ曲線は非常にぎざぎざしているが、このようなぎざぎざは、供試体サイズに対して粒径が大きいときに共通して現れる。ピーク時の内部摩擦角 ϕ_{peak} はおよそ56°と、地盤材料に比べて大きな値になっているが、これは主に粒子形状が非常に鋭角的であることによると考えられる。最大ダイレイタンシー角 $\nu_{d,\text{max}}$ は、およそ22~23°とやはり大きく、一方、粒子間摩擦角とかかわりのある ($\phi_{\text{peak}} - \nu_{d,\text{max}}$) は約33~34°となり、地盤材料のそれと変わらない結果が得られている。

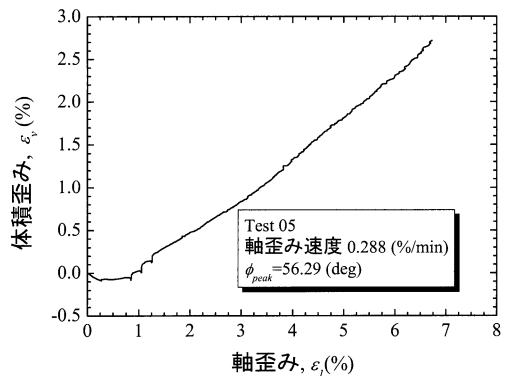
LATによって得られる断面画像は図-2.47(a)のようになる。画質の問題から、ここでは代表的な46個の粒子について、図-2.47(b)に示すように輪廓を取得した。同じ断面位置で、軸ひずみ ε_a における各粒子の輪廓が図-2.47(c)となっている。各々の粒子の断面形状に大きな変化が無いことから、粒子の σ_2 方向（観察している方向：平面ひずみ状態なのでマクロな変位は0）の変位はそれほど大きくないことがわかる。しかし、後述す

るように粒子の回転は三次元的に生じており、断面内以外の回転も活発に生じている。図-2.47(d)は断面内の粒子中心の移動と長軸の回転を表したものである。ここに示される情報のうち、まず粒子中心の変位情報を基に、最小二乗法により求められた供試体内の変形場が図-2.48(a)である。これと変形後の供試体の形状（図-2.48(b)）を比較してみると、大局的な一致が見られる。

さらにこの変形場を基に、各格子点での最大せん断ひずみを求め、その大きさと方向を示したものが図-2.49

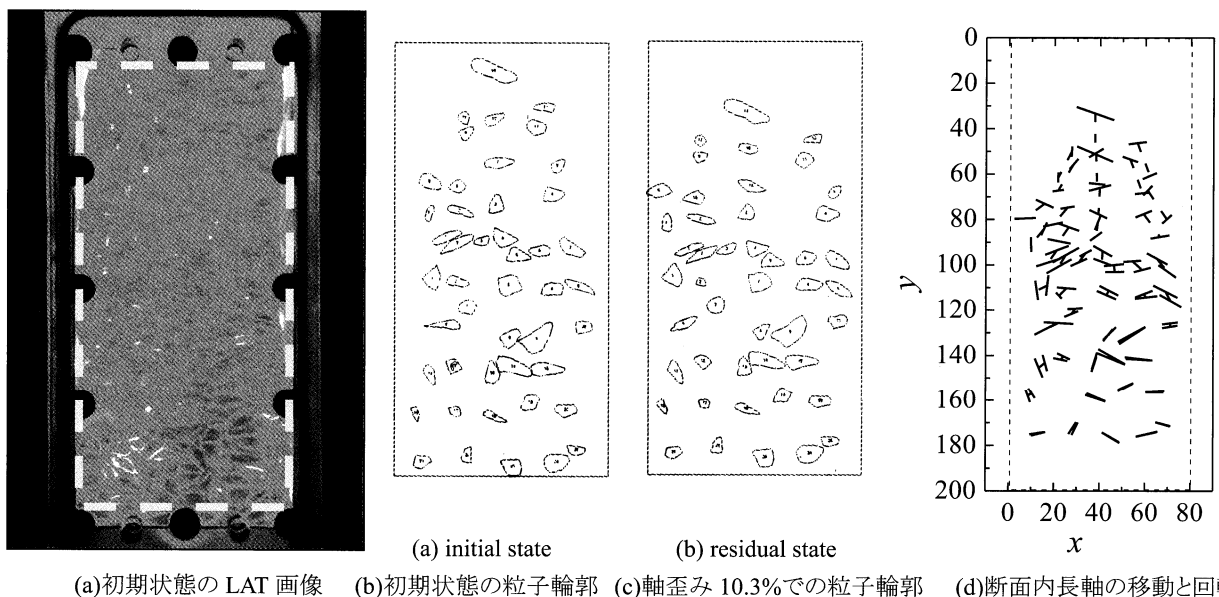


(a) 軸差応力-軸歪み関係



(b) ダイレイタンシー特性

図-2.46 LAT/PSC試験で得られたマクロな力学特性



(a)初期状態のLAT画像 (b)初期状態の粒子輪廓 (c)軸歪み10.3%での粒子輪廓 (d)断面内長軸の移動と回転

図-2.47 ある断面内の粒子情報取得のプロセス

(a)である。供試体左上隅から中央右側へ、ひずみの局所化領域が観察できる。また、図—2.49(b)には、粒子回転との比較のために、連続体として計算される剛体回転量(図—2.48(a)に示された格子の剛体回転量:反時計回りが正)を示した。これは粒子の回転に関する情報とかかわりなく、粒子中心の変位量から計算された値であることに注意が必要である。

次に、粒子の回転情報について、変位と同様に最小二乗法によって求めた連続場の分布(反時計回りが正)を図—2.49(c)に示す。供試体左右上端付近では基になる粒子の情報不足しているために、不当に大きな粒子回転が現れているが、それを除けば、図—2.49(a)(b)で示されたのと同様のひずみの局所化領域で、粒子は時計回りに活発に回転していることがわかる。せん断の方向から考えて、時計回りの回転が卓越するのは妥当な結果であると考えられる。これと図—2.49(b)に示した連続体の剛体回転量を比較してみると、2倍以上の粒子回転がせん断層内で発生している。実際、図—2.49(b)(c)の元画像をみても、この程度の回転は生じている事がわかるが、正確な議論は、今後、より小さな粒子を用いた実験において、三次元回転を考慮しながらなされる必要がある。なお、二次元粒状体(円形)を用いた既往の実験および解析結果^{98),99)}では、連続体の剛体回転量の1倍から2倍の平均粒子回転を起こすと報告されている。

最後に図—2.50は同程度の粒径の粒子を用いた別の実験結果であるが、平面ひずみ状態であっても、粒子回転は三次元的に生じていることがわかる。

2.4.5 レーザースライス法を用いたその他の研究例

ここでは、レーザーによる断面の可視化法を用いて行われたその他の研究のうち、今後のLATへの適用が期待される二つの実験について簡単に紹介する。

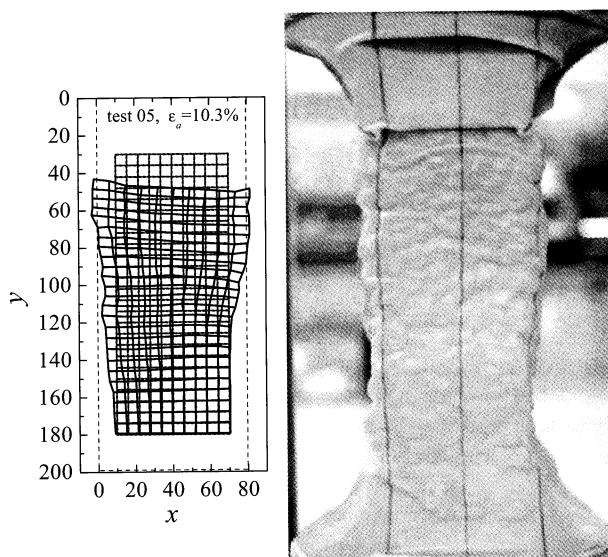
(1) 光弾性ガラスによる応力の可視化

Allesma (アレスマ)^{100),101)}は、光弾性ガラスを用いて、三次元粒状体中の粒子間に働く応力の可視化に成功している。LATにこの手法が適用できれば、粒子構造および粒子運動という幾何学的な微視的パラメーターに加え、接触力という微視的な力の情報も得られ、粒状体

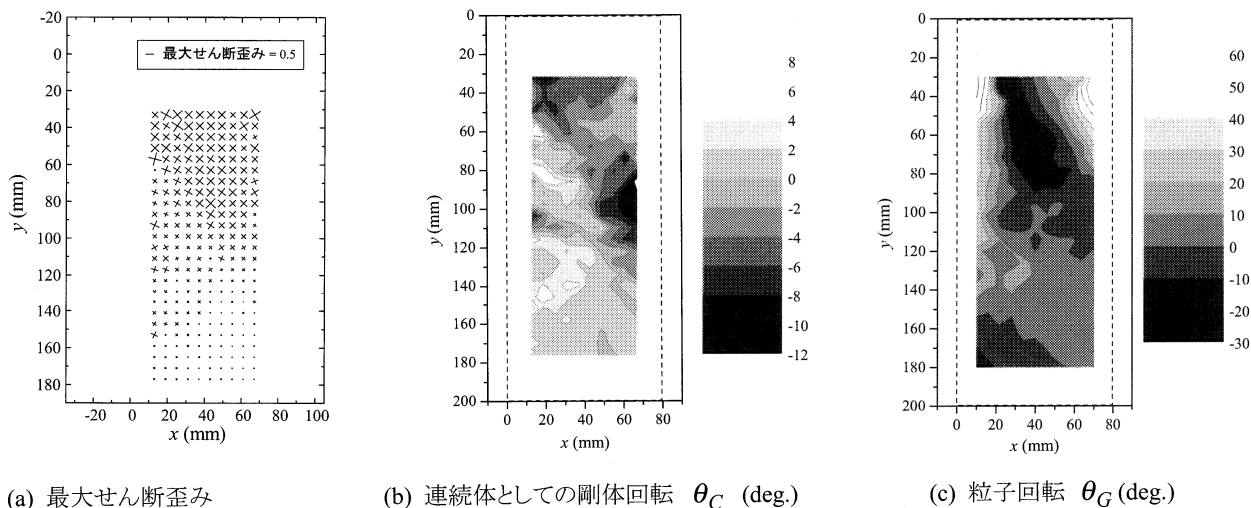
のマイクロメカニクス研究により多くの情報を提供できると考えられる。

(2) 流体運動の可視化

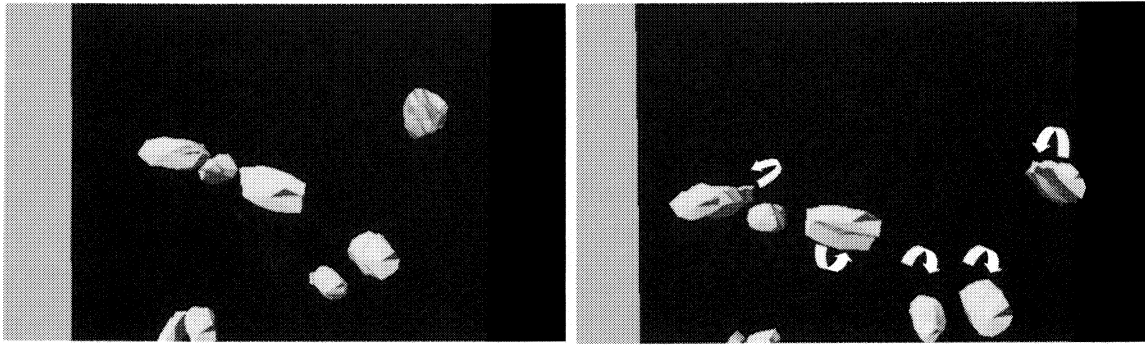
流体工学の分野では、レーザーによる流体運動の可視化は広く行われている。特にステレオPIVという手法^{102),103)}は、流体の三次元的な運動を可視化する新しい実験手法であり、現在精力的に研究がなされている。また、固定された三次元粒子群の中の流れについて、やはりガラス粒子と、それと同じ屈折率を有する液体の組合せにより、可視化が行われている¹⁰⁴⁾。地盤工学の分野では、特に液状化挙動と絡んで、間隙水の運動が問題となる。液状化の場合、粒子の運動が間隙水の運動を引き起こし、それがまた粒子を動かすという、いわゆる連成問題であり、このようなマイクロな可視化が行われた例は皆無である。一方、数値解析では、個別要素法を用いて簡易に流体の影響を考慮する手法^{105),106)}、より厳密な定式化による手法¹⁰⁷⁾などが提案されており、これらの検証のためには「粒子運動と流体運動の可視化実験」が不可欠である。LATにおいて、液体にマーカーを混入させることで、原理的には可視化が可能であると考えられ



図—2.48 粒子中心変位より求められた変形図



図—2.49 最小二乗法によって求められた運動学的諸量の供試体内分布図



図一2.50 平面ひずみ試験供試体内部の三次元的回転（供試体前面から見た図）

る。

2.4.6 おわりに

粒状体のマイクロメカニクス研究の分野では、近年のコンピューターの発展とともに、次節で述べられるような数値粒子法を用いた研究が盛んで、さまざまな手法でさまざまな検討がなされている。これらの研究が盛んになればなるほど、手法の検証のための実験的研究の必要性が増してくる。一方で、最新のコンピューター環境をもってしても、本節で紹介したような不規則形状三次元粒子を扱った数値解析¹⁰⁸⁾はほとんど行われていないのが現状である。その意味では、多くの新しい知見が実験により得られ、それを数値解析に反映させるという方向性も重要になると考えられる。

参考文献

- 90) Konagai, K., Tamura, C., Rangelow, P. and Matsushima, T.: Laser-Aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fabric of Granular Assemblage, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE*, Vol. 9, No. 3, 193s~201s, 1992.
- 91) Konagai, K., Matsushima, T. and Sato, T.: Dependence on Frequency of Dynamic Inter-particle Dislocation within a Slope, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE*, Vol. 11, No. 2, pp. 93s~101s, 1994.
- 92) Konagai, K.: Visualization of fabric by Laser-Aided Tomography, *Mechanics of Granular Materials: An Introduction*, M. Oda and K. Iwashita eds., A. A. Balkema, pp. 248~257, 1999.
- 93) 松島亘志・石井高幸・小長井一男：LATによる3次元粒状体内部構造の可視化と定量化，*日経サイエンス* 8月号，p. A14, 2000.
- 94) Matsushima, T., Ishii, T. and Konagai, K.: Observation of Grain Motion in the Interior of a PSC Test Specimen by LAT, *Soils and Foundations*, (投稿中), 2001.
- 95) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Geotechnique*, Vol. 46, No. 3, pp. 529~546, 1996.
- 96) 大谷 順・尾原祐三・菅原勝彦・椋木俊文：地盤工学における産業用 X線 CT スキャナーの適用，*土と基礎*，Vol. 48, No. 2, pp. 17~20, 2000.
- 97) Nakagawa, M., Waggoner, R. A. and Fukushima, E.: Non-invasive measurement of fabric of particle packing by MRI, *Mechanics of Granular Materials: An Introduction*, M. Oda and K. Iwashita eds., A. A. Balkema, pp. 240~248, 1999.
- 98) Bardet, J. P. and Proubet, J.: A Numerical Investigation of the Structure of Persistent Shear Bands in Granular Media, *Geotechnique*, Vol. 41, No. 4, pp. 599~613, 1991.
- 99) Calvetti, F., Combe, G. and Lanier, J.: Experimental micromechanical analysis of a 2D granular material: relation between structure evolution and loading path, *Mech. Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 2, pp. 121~163, 1997.
- 100) Allesma, H. G. B.: Optical analysis of stress and strain in photoelastic particle assemblies, Doctor thesis, Delft University of Technology, 1987.
- 101) Allesma, H. G. B.: Using image processing in analyzing stresses in photoelastic granular material, *Proc. 10th Int. Conf. on Experimental Mechanics*, Lisbon, pp. 113~118, 1994.
- 102) Prasad, A. K. and Adrian, R. J.: Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Exp. Fluids*, Vol. 15, pp. 49~60, 1993.
- 103) 可視化情報学会編：PIVハンドブック，森北出版，2002.
- 104) 松井剛一：粒子充填層内における乱流熱輸送に関する研究（文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）研究成果報告書（課題番号：10480114）），2001.
- 105) Hakuno, M. and Tarumi, Y.: A granular assembly simulation for the seismic liquefaction of sand, *Proc. JSCE*, No. 398/ I-10, pp. 129~138, 1988.
- 106) 川口寿裕・田中敏嗣・辻 裕：離散要素法による流動層の数値シミュレーション（噴流層の場合），*日本機会学会論文集（B編）*，Vol. 58, No. 551, pp. 2119~2125, 1992.
- 107) Glowinski, R., Pan, T.-W., Hesla, T. I. and Joseph, D. D.: A distributed Lagrange multiplier/fictitious domain method for particulate flows, *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 25, pp. 755~794, 1999.
- 108) Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete element modeling for irregularly-shaped sand grains, *Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Meststat (ed.), 2002.