

LAT - PIV 可視化実験手法の開発と粒子-流体系への応用

Development of LAT - PIV Visualization Technique for Particle-Fluid System

竿本英貴*, 松島亘志**, 山田恭央**

Hidetaka SAOMOTO, Takashi MATSUSHIMA and Yasuo YAMADA

*正会員 産業技術総合研究所 活断層研究センター (〒 305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7)

**正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)

Mechanical behavior of particle-fluid systems is extensively studied in various engineering field such as geotechnical engineering, mechanical engineering and powder technology. Although observation of complicated behaviors including interaction between particles and pore fluid is essential, very few efficient techniques are available for this purpose. From this point of view an observation technique based on LAT(Laser-Aided Tomography) and PIV(Particle Image Velocimetry) was developed and applied to the permeability experiments involving a seepage failure. The LAT - PIV technique enables us to visualize not only the particle motion but also the pore fluid motion and evaluate them quantitatively.

Key Words : Visualization, LAT - PIV, Particle - Fluid System

1. はじめに

粒子と流体からなる系に関する研究は、土木工学分野のみに限らず、粉体工学、機械工学などの分野においても積極的に研究が進められているが、系の振舞いは実に多種多様で複雑である。地盤工学の対象とする地盤は、それ自体が土粒子と間隙水からなる系であり、液状化現象や高速土砂流動、ボイリング現象など様々な現象が両者の相互作用として生じている。これらの現象を的確に理解するためには、粒子と流体の相互作用を詳細に観察することが不可欠であるが、系内部の観察・計測に適用できる手法は限定されている上、間隙流体速度などの物理量計測も同時に行うのは難しいのが現状である。粒子-流体系の内部の観察手法は、MRI や X 線といった不可視光を用いる手法と、光学的に工夫を施した試験体の内部をレーザー光などの可視光を用いて可視化する手法の二つに大別できる。

X 線は、地盤材料の間隙特性やせん断帯の進展状況の可視化など、主に固体力学を基礎とした研究分野でよく利用されている。これらの例として、Otani¹⁾の研究や Kiyama²⁾らの研究がある。粒子と流体の挙動を X 線を用いて可視化する試みも、小林ら³⁾によって行われており、砂地盤模型内における透水による浸透破壊過程を可視化している。しかしながら、X 線は密度差をもとに粒子部分と間隙流体部分の観察を行うため、密度が様な間隙流体の挙動を把握することは一般に困難である。MRI は多孔質体内の間隙流体流速の計測に用いられており、Ogawa ら⁴⁾はガラス粒子からなる多孔質体中の間隙流体の三次元流速分布を高解像度の可視化画像から求めている。MRI は実験装置が高価で

あり、一般的に時間分解能が粗いという短所を有している。

一方、光学的な工夫を施した試験体にシート状にしたレーザー光を照射し、系内部を観察する方法を適用したのものには、Matsui ら⁵⁾の研究などがある。この研究では、パイレックスガラスで作成した球を流路に充填し、屈折率を調合した間隙流体(ヨウ化ナトリウム水溶液)の挙動を PIV(Particle Image Velocimetry)を用いて計測している。また、移動固体と周辺流体の挙動を可視化した例としては、泳いでいる魚の挙動とその周辺に発生する流れをステレオ PIV により三次元的に同時に可視化した Sakakibara ら⁶⁾の研究がある。このように、PIV を基礎とした可視化および計測は流体力学の分野で盛んに用いられているが、流体挙動の把握に重点が置かれており、粒子の挙動に焦点をあてた例は少ない。

このような観点から、本研究では、粒子-流体系の粒子部分に粒状体の可視化実験手法の一つである LAT(Laser-Aided Tomography)^{7),8),9)}を、間隙流体部分には流体力学の分野で広く用いられている可視化実験手法の PIV をそれぞれ適用することにより、可視光を用いて粒子と流体の挙動を同時に観察・計測することができる可視化実験手法、LAT - PIV を開発した。さらに、LAT - PIV 可視化実験手法を透水・ボイリング試験に適用し、従来から計測されている平均流速・動水勾配関係に加え、間隙を通過する流体の挙動や、ボイリング時の粒子と流体の挙動双方を可視化・計測することを試みた。

2. LAT - PIV 可視化実験手法

LAT - PIV 可視化実験手法は、粒状体内部を可視化することを目的として開発された LAT と、流体力学の分野でよく用いられる可視化手法 PIV を併用する手法であるが、ともにレーザー光を使用しており、比較的容易に組み合わせることができる。LAT は Konagai ら⁷⁾により開発された手法であり、これまでに粒状体内部の三次元構造の可視化⁸⁾やフーチング貫入に伴うせん断帯の発生・進展解析⁹⁾などに応用されてきている。LAT では光学ガラスをクラッシャーで粉碎した後、ボールミルで角をとったガラス粒子を用いて試験体を作り、間隙をガラス粒子と同じ屈折率をもつ流体で満たし実験を行う。ガラス粒子の屈折率と等しい間隙流体には 2 種類のシリコンオイル (信越シリコン、HIVAC-F-4 および KF-56) を重量比約 2:5 で混合して用いている。自然可視光のもとでは、ガラス粒子は視認できないが、シート状にしたレーザー光を可視光を試験体に透過させると、ガラス粒子輪郭が浮かび上がる。レーザーシートをスライドさせることにより、任意断面における粒子の配置状態を把握することができる。

一方、PIV では流体中にトレーサ粒子と呼ばれる極めて小さい粒子 (通常は直径数十ミクロン) を流体に無数に混入する。次いで流体にレーザーシートを通すと、シート上に存在するトレーサ粒子が光ってパターンを形成する。このパターンの挙動を計測することで流体の速度場を求めることができる。したがって、本研究における試験体は粉碎した光学ガラス粒子、ガラス粒子と同じ屈折率を持つ間隙流体、流体挙動を把握するためのトレーサ粒子からなっており (図-1)、可視化される画像は LAT と PIV 双方の特徴を併せ持つ (図-2)。図-2 において、斑点状に光っているのが、間隙流体に混入したトレーサ粒子であり、斑点が無い領域は粉碎した光学ガラス粒子を示している。試験体に照射する

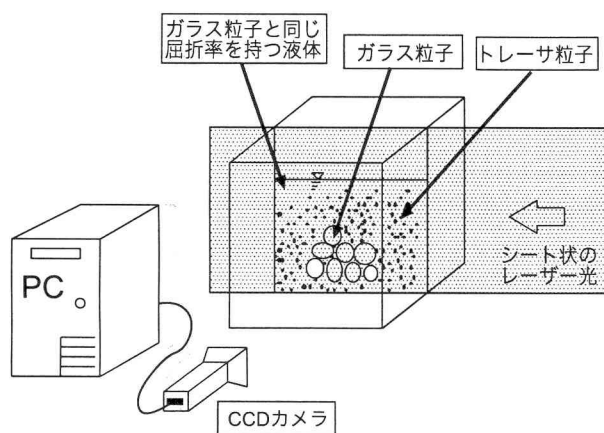


図-1 LAT - PIV における試験体の概要

レーザーシートは、レーザー発振器 (MELLES GRIOT

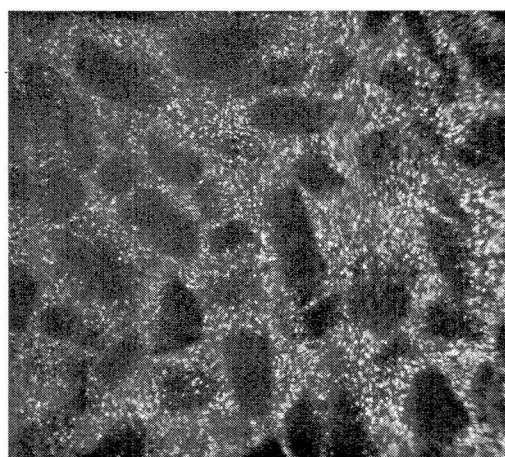


図-2 LAT - PIV 可視化画像の例

社製 58-GSS-305, Nd:YVO₄ 結晶) の線状の光 (緑色, 波長 752nm) をシリンドリカルレンズに通すことにより生成している。可視化画像記憶装置には、500FPS の高速モノクロ CCD ビデオカメラ (REDLAKE 社製 Motionpro) を用いており、面計測に適したテレセントリックレンズを装着している。モノクロ CCD カメラを用いる場合、トレーサ粒子とガラス粒子の輪郭は同じように白く光って区別しにくい。後で画像解析を行う場合に都合が悪い。本研究ではレーザーシート上で赤く光る蛍光トレーサ粒子を自作して用いることにより、色覚的に間隙流体領域とガラス粒子領域を分離している。蛍光トレーサ粒子は、ローダミン 6G 粉末をエタノールにより溶解し、その溶液に通常の PIV で用いられるトレーサ粒子を浸して着色することにより作成することができる¹⁰⁾。蛍光トレーサ粒子を使用することにより、カメラのレンズに緑色をカットするロングパスフィルタを設置して撮影した場合には、間隙流体領域のみを可視化することが、赤色をカットするロングカットフィルタを付けければガラス粒子輪郭のみが可視化可能となる。

3. 透水・ボイリング可視化実験

3.1 実験装置の概要と用いた材料物性

開発した可視化実験手法を透水・ボイリング実験に適用し、系のマクロな挙動 (平均流速、動水勾配) と系内部のミクロな挙動 (間隙流速、粒子挙動) の計測を行った。図-3 は、ポンプ、バルブ、アクリル製容器 (断面積 100mm×100mm, 高さ 400mm)、および給油タンクからなる実験装置の概要を示している。バルブの開閉により蛍光トレーサを混入したシリコンオイル (屈折率調合済み) を任意の流量で循環させることができ、壁面には圧力を計測用に 2 本の圧力計 (SSK, P208-01) を設置している。アクリル製容器底部のシリコンオイ

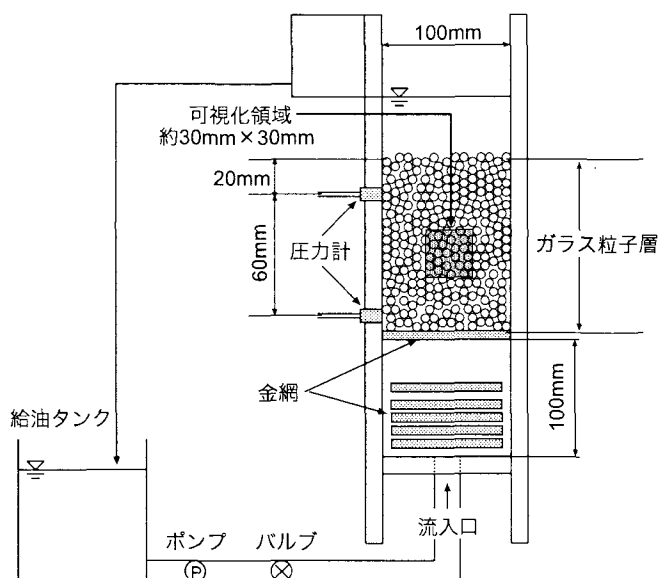


図-3 実験装置の概要

ル流入部には、流体力によりガラス粒子層に局所的な破壊が発生するのを防ぐ目的で1mm格子の金網を何枚も敷き詰め、シリコンオイルを整流している。試験体は粒径が2mmから5mmのガラス粒子群から成っており、ガラス粒子をシリコンオイル中に自由落下させ、上側の圧力計に対して20mmのかぶりとなるまで堆積させた後に上面をならして作成した。用いた材料の物性は表-1の通りである。なお、蛍光トレーサ粒子の密度、粒径はそれぞれ1.02g/cm³、40μmである。

表-1 材料の物性

物性 \ 材料	ガラス粒子	シリコンオイル
密度 (g/cm ³)	2.52	1.02
屈折率	1.514	1.514
粒径 (mm)	2~5	—
動粘度 (mm ² /s)	—	20.6
最大間隙比	0.90	—
最小間隙比	0.59	—

3.2 実験手順と撮影条件

実験は、レーザーシートを壁面より30mm試験体内部に入った位置に常に照射した状態で、以下の手順に基づいて行った。「手順1. バルブを少し開けて透水をはじめ、圧力差が一定となるまで待ち、圧力差と平均流速を測定する。」「手順2. 高速モノクロ CCD ビデオカメラで試験体内部を撮影する。」「手順3. さらにバルブを少し開けて、手順1および手順2を繰り返す。」手順2において撮影した画像は、撮影倍率が 5.53×10^{-2} mm/pixel、画像サイズが540pixel(29.86mm)×480pixel(26.54mm)である。今回は動水勾配を変化させて行く途中で20回

計測を行っており、各時点について数百から数千枚の時系列画像を撮影している。各動水勾配時点における撮影条件は表-2のとおりである。

表-2 各動水勾配における撮影条件

	動水勾配	FPS	shutter speed(s)
No.1	0.030	60	1/480
No.2	0.078	100	1/700
No.3	0.113	125	1/875
No.4	0.161	200	1/800
No.5	0.217	250	1/750
No.6	0.258	250	1/750
No.7	0.308	250	1/750
No.8	0.347	250	1/750
No.9	0.395	400	1/800
No.10	0.437	400	1/800
No.11	0.485	400	1/800
No.12	0.545	400	1/800
No.13	0.608	500	1/500
No.14	0.712	500	1/500
No.15	0.606	500	1/500
No.16	0.670	500	1/500
No.17	0.650	500	1/500
No.18	0.637	500	1/500
No.19	0.653	500	1/500
No.20	0.685	500	1/500

4. 実験結果と考察

4.1 平均流速－動水勾配関係

系のマクロな挙動の特徴を示すことを目的として、平均流速－動水勾配関係を求めたものが図-4である。

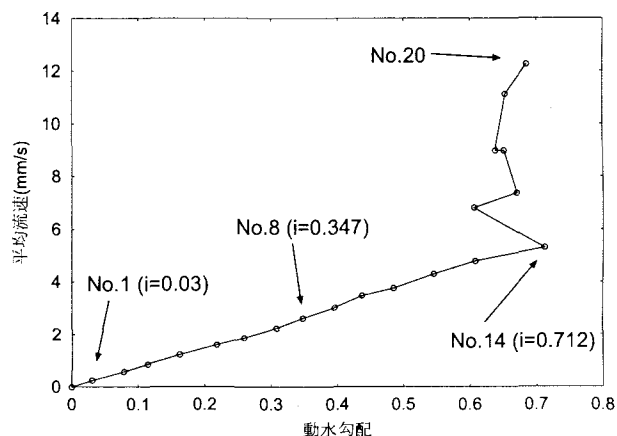


図-4 平均流速－動水勾配関係

動水勾配が 0.7 付近で平均流速が急激に増加しているが、これは試験体内部でボイリングが生じたためである。ボイリングが発生する条件は、試験体の間隙比 e とガラス粒子のシリコンオイルに対する比重 G_s から求まる限界動水勾配 $((G_s-1)/(1+e))$ により推定することができる。ガラス粒子の最大・最小間隙比を用いることにより、ボイリングが発生すると考えられる動水勾配の範囲を求めることができ、0.78~0.92 となる。実験結果と比較すると、実測値が最大間隙比を用いて計算した限界動水勾配よりもやや小さくなっているものの、概ね予測できている。

ボイリング時のデータを除外すれば、平均流速と動水勾配はほぼ線形関係にあり、線形近似によって透水係数を求めると、 $7.68 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ となる。透水係数の推定式には、有効径の二乗に比例した式 (Hazen の式や Taylor の式など) が用いられることが多いが、本研究の試験体のように粒状材料の形状や、間隙流体の密度や粘度が通常の土質材料と異なる場合には、適用に問題がある。Darcy 則を拡張した式の一つである Ergun の式¹¹⁾は、間隙流体の密度や粘度、試験体の間隙率、粒子の形状などをパラメータとしており、レイノルズ数/(1-間隙率)なる値が 0 から 2000 程度となる場合に比較的良好な動水勾配-平均流速近似を与える。そこで、Ergun の式と実験から得られた平均流速-動水勾配関係の比較を行い、Ergun の式の適応性を調べてみた。Ergun の式は

$$i = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{\rho g(\phi d_m)^2 \varepsilon^3} v + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{g(\phi d_m) \varepsilon^3} v^2 \quad (1)$$

で与えられ、ここで、 i は動水勾配、 v は平均流速を表しており、 ρ 、 μ はそれぞれ間隙流体の密度と粘度である。式中にある 150 や 1.75 は不変の定数であり、Hazen の式や Taylor の式にある粒子構造の形状に関する (未定) 係数ではない。また、 ε 、 ϕ 、 d_m はそれぞれ間隙率、粒子の球形度、平均粒径である。球形度 ϕ は、真球の場合に 1.0 となり、砂のような不規則な粒子では、0.6 から 0.8 程度の値を取る (crushed glass=0.65, rounded sand=0.83 など¹²⁾¹³⁾)。最大間隙比を間隙率に変換した後 Ergun の式に代入し、球形度 ϕ が 0.60, 0.704, 0.80 の各ケースについて実験結果と併せて描いたものが図-5 である。ここで、球形度 0.704 はボイリング部分を除いたデータに対して非線形フィッティングにより求めた値である。球形度が 0.6 と 0.8 の各場合について透水係数を求めるとそれぞれ、 $5.53 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 、 $9.76 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ となり、透水係数の取りうる範囲は狭い。Ergun の式の第二項にある二次項が影響を及ぼしてくるのは、動水勾配が 1 に比べて十分大きな場合であり、屈曲のセンスはボイリング場合とは逆である。しかしながら、ボイリングが発生するまでは、Ergun の式により平均流速-動水勾配関係を比較的良好な精度で予測可能といえる。

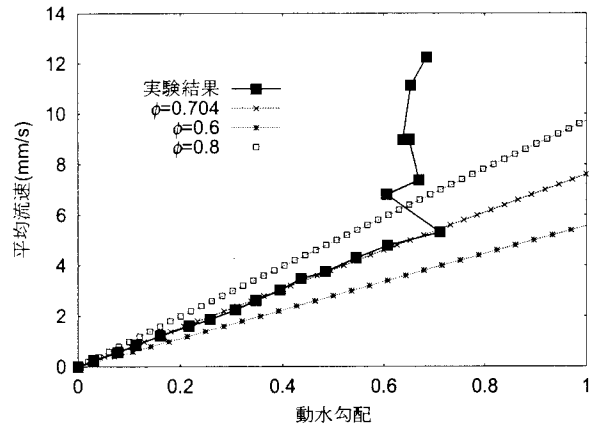


図-5 実験結果と Ergun の式との比較

4.2 透水時における試験体内部での間隙流体挙動

図-4にある、No.1(動水勾配 0.03) 時点において、高速 CCD ビデオカメラから得られた画像に PIV 画像処理 (サブピクセル予測パターン解析) を施すことにより、間隙流体の流速を計算機により自動的に計測し、流速ベクトルを描いたものが、図-6 である。画像間隔が 33msec である画像群について、時間方向に 10 回解析を行い、これらの平均値をとって 7885 本のベクトルを求めたが、図では間引いて表示している。図の縦横枠の数値は画像の座標値 (単位は mm) を表し、グレースケール (単位は mm/s) は流速ベクトルの大きさを表している。なお、パターン解析には $33 \times 33 \text{pixel}$ (1.82mm 四方) のウィンドウを用いた。

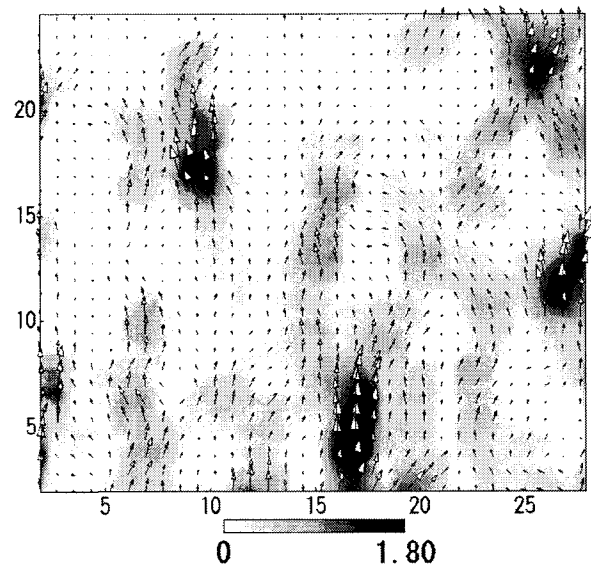


図-6 No.1 時点での流速場、画像間隔 33msec

レーザーシート面上の流速場は、場所ごとに異なっており、たとえ小さい動水勾配であっても、試験体内を

一様に流れているわけではない。また、レーザーシート面外方向にも図-6 に示した程度に流速のムラが存在している。このような流速分布は、固相の配置に大きく依存すると考えられるが、固相が破壊されない透水時では、図-6 で流速が大きい箇所や小さい箇所はほとんど変化しない(図-7、図-8)。

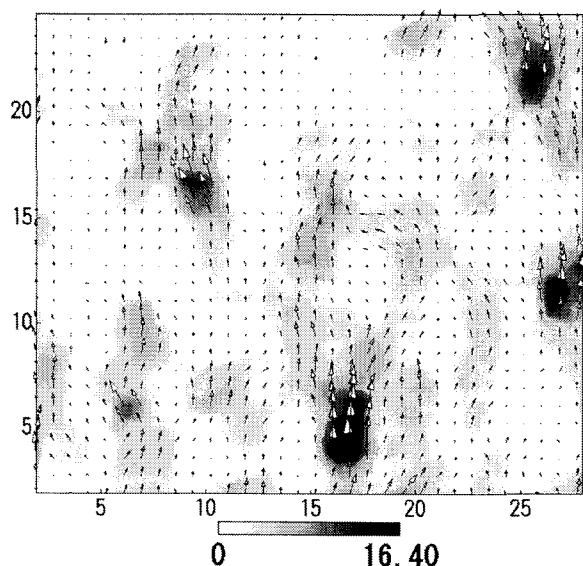


図-7 No.8 時点での流速場、画像間隔 4msec

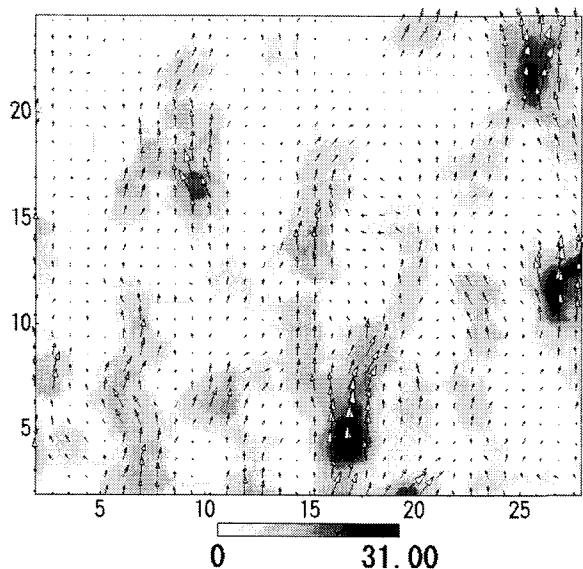


図-8 No.14 時点での流速場、画像間隔 2msec

画像解析の精度を検討するため、No.1 から No.14 における解析結果(各 7885 本の流速ベクトル)から、鉛直方向流速成分を算術平均して平均流速を求め、実測した平均流速と併せてプロットしたものが図-9 である。動水勾配が 0.2 付近の領域から、両者の解離がはじまり、最終的には、画像解析値が実測値に対して約 20%程度小さくなっている。両者が解離していく原因としては、

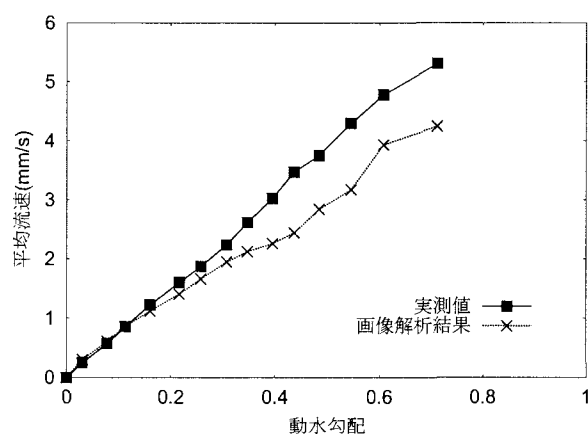


図-9 平均流速の実測値と画像解析値

一断面のみの計測に起因することや、CCD ビデオカメラの撮影間隔の影響などが考えられる。流路の変化は、レーザーシート面内の二次元計測では詳細に把握することはできず、三次元計測が必要となるが、撮影間隔に起因する誤差は多少抑制することができる。すなわち、動水勾配が上がるにつれて、試験体内部の流速は大きくなり、流速分布の取り得る範囲も大きくなるが、ビデオカメラの撮影間隔は一定であり、この撮影間隔に適応する流速レベルのみが、正確に計測されていることになる(速い流れ用に撮影間隔を設定すると、遅い流れは止まってしまい、計測できない)。したがって、撮影間隔が異なる数台のビデオカメラで同一領域の画像をそれぞれ取得し、各々の撮影間隔に適応する流速ベクトルを重ねてやることにより精度が上がると考えられる。本研究では、高速ビデオカメラにより連続的に画像を撮影しており、離散的にはあるが画像間隔を任意に調節することができる。No.14 時点で、連続的に撮影した画像(画像番号 1 から 20)を用いて、画像番号 10 を中心に画像間隔を 10 段階に変化させ、それぞれについてパターンマッチングを行った(1 段階から 10 段階、 $1\Delta t$ から $18\Delta t$: 10-11, 9-11, 8-12, 7-13, 6-14, 5-15, 4-16, 3-17, 2-18, 1-19)。結果として、画像解析から求めた鉛直方向平均流速は 4.36mm/s(補正前は 4.25mm/s)となり、若干実測値(5.31mm/s)に近くなったものの、顕著な精度向上は見られなかった。このことから、撮影した面以外の箇所における平均流速が、実測値よりも大きくなっている可能性がある。

図-10 には No.1, No.8, No.14 時点における鉛直方向流速の頻度分布をそれぞれ示しており、横軸は鉛直方向流速をそれぞれの時点での平均流速(画像解析値)で除した値を、縦軸には頻度を全計測点数(7885 点)で除した値をとっている。動水勾配が違うことによる分布状況の差異は顕著ではなく、いずれの時点においても、負の鉛直方向流速が若干含まれている。本論文で

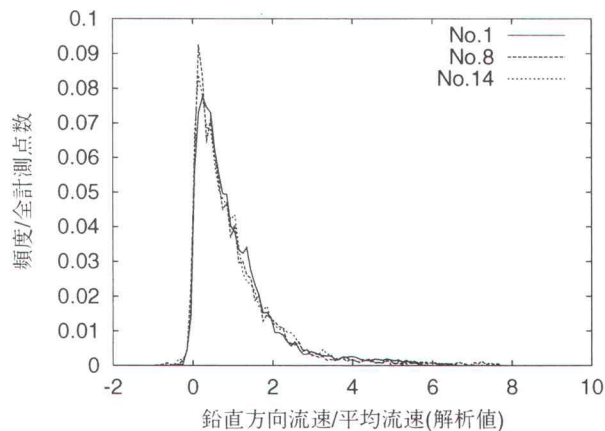


図-10 鉛直方向流速分布

は示していないが、粒径が5から10mmのケースについても同様の実験を行っており、目視ではあるが、可視化画像から局所的な負の流速の存在を確認している。分布状況に関しては、平均流速を中心とする正規分布ではなく、片側に尾を引いた分布となっており、正規分布よりも対数正規分布に近い。また、いずれの時点においても、計測された最大鉛直方向流速は平均流速の6から8倍程度の範囲にある。ここで示した流速の分布情報は、時間スケールが長い地下水汚染の拡散過程などを考える上では、重要な役割を果たすと考えられ、本手法でしか得ることができない情報である。

4.3 ボイリング時における試験体内部の挙動

図-4にあるNo.20時点では、ボイリングが生じ、試験体内部では、ガラス粒子層が完全に破壊され、ある箇所ではシリコンオイルとともに上昇するが、他の箇所では沈降するというように、レーザーシート面内外で複雑なふるまいが観察される。ここでは、No.20時点で撮影した画像群200枚(0.4秒間)を用いて、ボイリング中である間隙流体の流速場を求めた。なお、画像間隔は、画像解析に耐え得る画像を取得するために、カメラ性能の上限である1/500秒に設定している。図-11の左列は、水みちと考えられる強い上昇流が発生している時のスナップショットを示しており、流れは画像下側から上側に向かっている。また、右列は左列に対応する時刻での、間隙流体の速度場を表しており、カラーは流速ベクトルの大きさを表している。上昇流は $20\text{mm} \leq x \leq 25\text{mm}$ の範囲で生じていることがわかる。上昇流の幅に関しては、様々なサイズのものを観察しており、決まった幅の上昇流がいつも現れるとは限らない。また、モデル底部で、棒を貫入して少しの外乱を与えると、確実に棒の近傍から上昇流が発生するため、ガラス粒子層底部における局所的な間隙比と密接な関係があると考えられる。

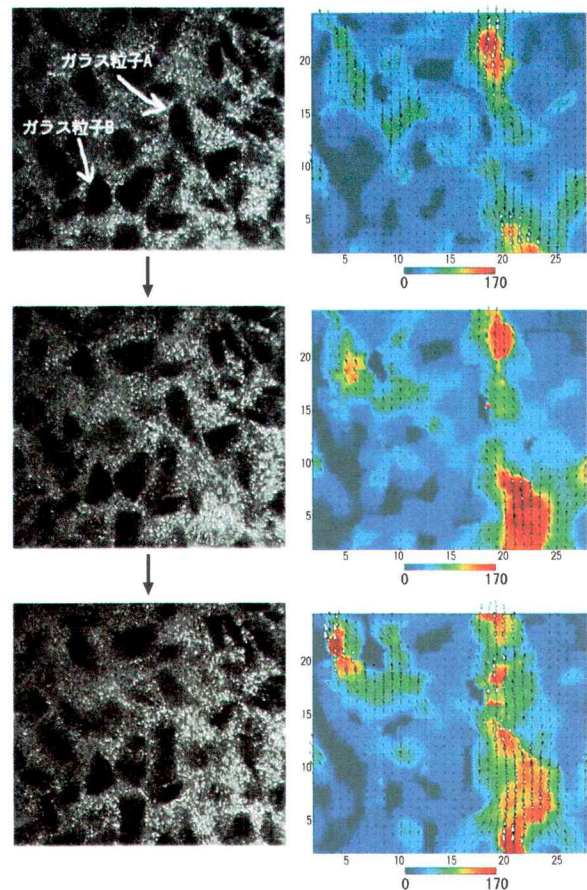


図-11 ボイリング時の時系列変化の一例 (時刻は上から、0.198, 0.252, 0.306秒)

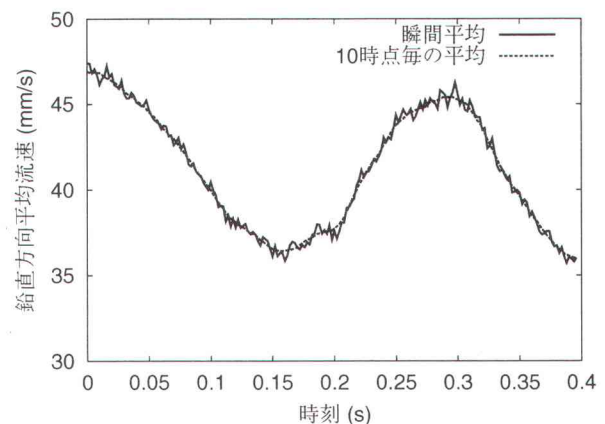


図-12 鉛直方向平均流速 (画像解析結果)

図-12は、画像解析から得られる鉛直方向平均流速値についての経時変化を示している。流速の平均値ですら、ボイリング中には一定とならず、絶えず変動していることがわかる。時系列全体にわたる時間平均値は 41.29mm/s であり、実測値(12.26mm/s)の約3.4倍を示している。時刻0.2秒から0.3秒にかけては、強い上昇流が計測されているが、撮影を始めた初期段階の

方が平均流速は大きい。撮影開始時点近くでは、流速が30～60mm/sの頻度が大きく、平均値はこの範囲の影響を強く受ける。時刻0.252秒では、強い上昇流の存在のため、140～165mm/sの頻度が多少大きくなるものの、15～40mm/sの範囲内にある頻度が著しく大きく、この影響で上昇流が観測されていない初期段階より平均流速が小さく計測される。

局所的な流速の最大値を調べるために、各時刻で最大流速をピックアップし、経時変化として描いたものが図-13である。時刻0.2秒から0.3秒にかけては、強い上昇流の影響で、最大流速が大きくなっており、10時点分の時間平均最大流速は、0.264秒でピーク値203.07mm/sを取る。このピーク値とガラス粒子の平均粒径、およびシリコンオイルの粘度から求まるレイノルズ数は約35であり、ボイリングが生じてはいるものの、流れは十分に層流の範囲内にあるといえる。

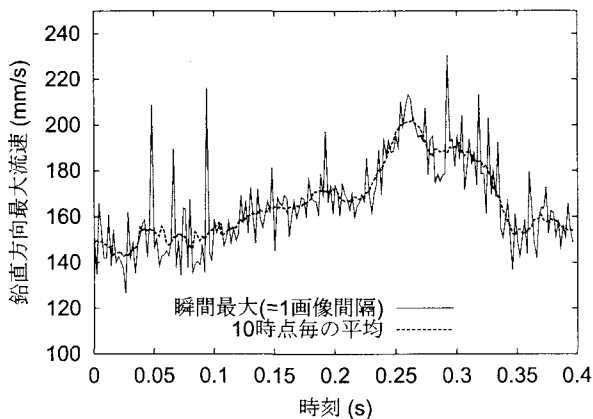


図-13 最大鉛直方向流速の経時変化

4.4 ガラス粒子挙動の計測

本手法の特徴を活かし、ボイリング中におけるガラス粒子の挙動を計測することを試みてみた。流速はPIV画像解析プログラムにより、自動的に算定することができるが、ガラス粒子の運動を計算機により自動的に計測することはできず、目視による検討が必要である。本研究では、LAT画像解析用に開発された、GUIを備えた半自動輪郭抽出プログラム¹⁰⁾を用いて、図-11の左列上に示したガラス粒子AおよびBの挙動を計測した。ガラス粒子Aはボイリングの上昇流域、ガラスBは上昇流域以外に存在しており、レーザーシート面外に抜け出るような三次元的な挙動は他の粒子に比べて小さい上、長時間撮影されている(ガラス粒子Aは時刻0.0～0.40秒、ガラス粒子Bは時刻0.12～0.40秒)。図-14は時間間隔0.04秒毎にガラス粒子AおよびBの輪郭を画像から時系列として抽出したもので、ガラス粒子Aについては10個、粒子Bについては8個の輪郭データが得られている。間隙流速と同様に、ガラス粒子についても上昇流中にあるガラス粒子Aとそうで

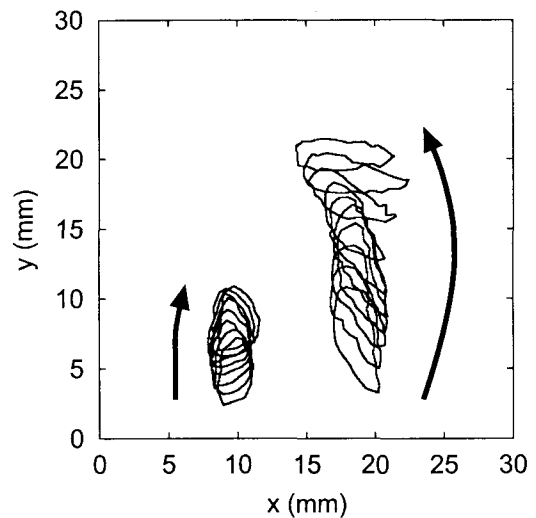


図-14 ガラス粒子AとBの経時変化

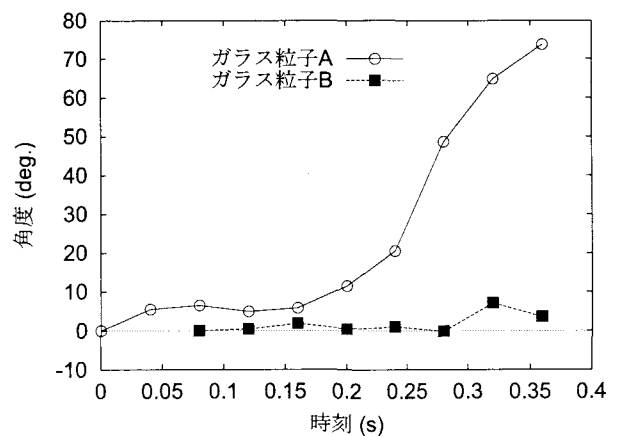


図-15 ガラス粒子AとBの回転量

ないガラス粒子Bの挙動の差は明かである。ガラス粒子Aは、ゆっくりと反時計回りに回転しながら上昇し、最後の段階近くで激しく反時計回りに回転し極端に向きを変えている。画像を観察している限りでは、トルクは粒子同士の接触により与えられたものではなく、下方よりの強い上昇流に起因するものと考えられる。他方、ガラス粒子Bはほとんど回転せず、ガラス粒子Aに比べてゆっくりと上昇している。また、ガラス粒子Aを急激に回転させた強い上昇流の影響により、少し右側にスライドする傾向を示している。次に、これらのガラス粒子が、どの程度回転したのかを、輪郭データを用いて求めた(図-15)。ここで、回転量は反時計回りを正としている。ガラス粒子Aは、時刻0.24秒から時刻0.36秒にかけて、急速に反時計回りに約45度回転し、解析時間中ではトータルで約70度反時計回りに回転している。ガラス粒子Bは、時刻0.28秒では反時計回りに約7度回転し、その後時計回りに約3.5度回転しているという結果が得られた。以上のように、本

可視化手法を用いることにより、間隙流体の挙動のみならず、ガラス粒子の挙動も定量化することが可能となる。

5. 結論

LAT と PIV を組み合わせた可視化実験手法を開発し、透水・ボイリング試験を通じて手法の精度の検討および試験体内部の可視化・計測を行った。

本研究から得られた成果は以下の通りである。

1. Ergun の式は、間隙流体が水ではない場合においても、平均流速と動水勾配関係を比較的良好な精度で与える。ただし、ボイリング現象は説明できない。
2. 透水時における間隙流体の流速頻度分布は、流速/平均流速なる値で整理した場合、動水勾配によらずほぼ同一の分布となる。また、この頻度分布は平均流速を中心とする正規分布にはならず、平均流速の 8 倍程度まで尾を引くような分布形態となる。
3. ボイリング中に、水みちと考えられる強い上昇流を可視化し、この時点における流速場を計測することができた。
4. ボイリング時において計測面内のガラス粒子の挙動を画像解析により定量化することができた。

このように、本手法を通じて得られたデータは、透水・拡散問題に関する現象の解明や、数値解析コードの検証のための情報として利用することができる。

今後は、精度の検証をさらに進めた後、上述 2 番目の知見が三次元計測結果においても成り立つかどうかを検討する。透水問題のように定常過程であれば、レーザーシートをスライドさせることにより、計測可能であるが、ボイリングのようにガラス粒子と流体が同時に挙動する場合には三次元計測は困難である。したがって、開発手法を三次元的な計測手法へと拡張する方法を摸索することが今後の課題となる。まずはステレオ PIV によりレーザーシート面内流速成分のみならず、面外流速成分も計測することからはじめたい。

謝辞

本研究で使用した蛍光トレーサ粒子を作成するにあたり、防衛大学校、宮田喜壽 助教授、末次大輔 助手 両先生のお取り計らいにより、防衛大学校の実験施設を使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J.Otani: State of the art report on geotechnical X-ray CT research at Kumamoto University, International Workshop on X-ray CT for Geomaterials - GeoX2003 -, pp.37-69, 2003.
- 2) Kiyama,S., Aoyama,S.: Microscopic Investigation from Crack Propagation to Shear Band of a Gravel Soil at Uniaxial Compression by CT Image, International Workshop on X-ray CT for Geomaterials - GeoX2003 -, pp.37-69, 2003.
- 3) 小林俊一, 高橋源太郎, 関口秀雄: X線 TV 透視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, 土木学会 応用力学論文集, Vol.3, pp.521-531, 2000.
- 4) Kuniyasu Ogawa, Takeshi Matsuka, Shunichiro Hirai and Ken Okazaki: Three-dimensional velocity measurement of complex interstitial flows through water-saturated porous media by the tagging method in the MRI technique, Meas. Sci. Technol., 12, pp.172-180, 2001.
- 5) Matsui, G. et al: Flow Characteristics in Channel with Local Blockage Packed with Spheres, 5th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, pp.24-28, 2001.
- 6) Sakakibara, J., Nakagawa, M., Yoshida, M.: Stereo-PIV study of flow around a maneuvering fish, Experiments in Fluids, 2004.
- 7) 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, Vol.9, No.3, pp.192-201, JSCE, 1992.
- 8) 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, 第 6 回コンピュータビジュアライゼーションシンポジウム論文集, pp.37-40, 2000.
- 9) Matsushima, T., Saomoto, H., Tsubokawa, Y., Yamada, Y.: Grain Rotation versus Continuum Rotation during Shear Deformation of Granular Assembly, Soils & Foundations, Vol.43, No.4, pp.95-106, 2003.
- 10) 竿本英貴: 粒子一流体系に関する可視化実験と数値解析, 筑波大学博士論文, 2004.
- 11) SABRI ERGUN: Fluid Flow Through Packed columns, Chemical Engineering Progress, Vol.48, No.2, pp.89-94, 1952.
- 12) McCabe, Smith and Harriott: Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, 2000.
- 13) R.H. Perry, D.W. Green, J.O. Maloney: Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 1997.
- 14) Nian-Sheng Cheng: Application of Ergun Equation to Computation of Critical Shear Velocity Subjected to Seepage, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 129(4), pp.278-283, 2003.
- 15) M. ラッフェル, C.E. ヴィラート, J. コンペンパンス (小林敏雄監修, 岡本孝司, 川橋正昭, 西尾茂 訳): PIV の基礎と応用, シュプリンガーフェアラーク東京, 2000.

(2005 年 4 月 15 日 受付)