

## 粒状体構造模型の動的挙動の可視化

Visualization of Dynamic Behaviors of Granular Structure Models

小長井 一 男\*・田 村 重四郎\*

Kazuo KONAGAI and Choshiro TAMURA

## 1. は じ め に

粒状体からなる構造物の地震時挙動を把握するため、今までに実験、統計理論、数値解析等により研究が試みられているが、模型実験は基本的な性状に関する資料を定性的にも定量的にも与えることができる。著者らは、ガラス粒状体からなる模型をこれと等しい屈折率を持つ液中に浸し可視化する手法が、これまでの実験では得がたい模型内部で進行する現象を把握しようものとの着想を得て、その実用化を検討してきた。そして、ガラス粒状体模型に出力の大きいレーザー光シートを照射し、単色光源を用いて、粒子の複雑な形状や粒状体全体の挙動をもリアルタイムで克明に可視化し記録する手法を開発したので、ここにその概要を紹介する。

## 2. 手 法 の 概 要

透明な単独の固体を、屈折率の等しい液中に浸し、固体内部を観測する手法そのものは光弾性等の分野で浸漬法あるいは液浸法とよばれて古くから知られている。またこの手法を数多くの粒状体からなる模型の実験に拡張する試みも若林<sup>1)</sup>、Allersma, H. G. B.<sup>2)</sup>や浦<sup>3)</sup>などによって手掛けられている。しかし、屈折率の分散性が粒状体と浸漬液とで異なること、粒状体材料内部のわずかな屈折率の非均質性が累積されること、揮発、化学変化などで次第に浸漬液の光学的性質が変化するなど技術的な課題が必ずしも十分に解決されておらず、いずれも比較的小さいスケールの模型、あるいは供試体の静的な実験への適用に限定されている。振動台上に構築するような規模の粒状体模型の、しかも高速の現象を映像として記録するためには模型材料にかなり厳しい条件が求められることになる。浸漬液については以下のような条件を具備していることが必要である。

- (1) 無色透明で光の透過率が極めて高いこと、  
 (2) 液体が化学的に安定で、沸点が高く長期にわたり光

\*東京大学生産技術研究所 第1部

学的性質に変化のないこと、

- (3) 屈折率の温度依存性が小さいこと、  
 (4) 粘性が小さく Reynolds 数を大きくできること、  
 (5) 大量に使用するため安価で毒性が少ないこと、

ガラスを液浸の対象とすると屈折率は1.4~1.9の範囲となり油脂類や芳香族炭化水素などの中から適切な浸漬液を探しうる見込みがある。著者らは上記(1)~(5)の条件を考慮し、高屈折率側の浸漬液にはテトラリン、低屈折率を持つ浸漬液としてテレピン油を採取した。共に無色透明で、沸点が高く、粘性の小さい安価な有機溶剤である。両者の屈折率の温度依存性を図1に示す。これは実験に使用した Ar レーザー光の波長514.5nm に対する実測値であり、通常用いられるナトリウム燈の D 線に対する値よりわずかに高くなっている。両者とも温度の上昇に従ってゆるやかにその値を下げていくため、液体の温度管理には細心の注意を払う必要がある。2液の混合液体の屈折率 $n$ は次式を用いて極めて正確に求めることを実測により確認している。

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{(1-c)n_1^2 - 1}{\rho_1 n_1^2 + 2} + \frac{c n_2^2 - 1}{\rho_2 n_2^2 + 2}$$

ここに  $n, \rho$  : 混合液の屈折率, 密度 $n_1, \rho_1$  : テトラリンの屈折率, 密度 $n_2, \rho_2$  : テレピン油の屈折率, 密度 $c$  : テレピン油の重量%

テトラリンとテレピン油を混ぜて浸漬液とすることからガラス材料としては屈折率が両者の間にあるものを自由に選びうる。この範囲で脈理等の屈折率の不均質な部分がなく、しかも比較的安価で大量に入手できるBK7と称される光学ガラス( $n=1.5204$ )を採用した。ガラスブロックは鉄製容器内の浸漬液中で、ハンマーの打撃により粉碎される。液中で粉碎することでガラス破断面の濡れ性の悪化をかなり改善することが可能となる。このように注意深く作製されたガラス粒子もその破断面を微視

的にみれば衝撃的外力的作用による密度変化が生じ、化学的にもかなりアクティブで、溶剤内や周辺環境のさまざまな成分が吸着されている<sup>4)</sup>。このためガラス粒子の表面には極めて薄い表面層が存在する。このような表面層は本来の浸漬法の目的からすれば決して望ましいものではないが、実用上大きな問題となることはなく、単色光源下で浸漬液の屈折率を厳密に調整しさえすれば、ガラス粒子の存在は容易に判別し難いものとなる。さらにこうした層が存在することで、ここに単色光を薄いシート状にして透過させその出力を大きく上げた場合、ガラス粒子の表面を光シートが横切るところで光の散乱が明瞭に認められるようになり、模型の任意断面で鮮やかな緑の輝線に縁取られたガラス粒子の動きを観測することができるようになる。

実験装置の概要を写真 1 に示す。実験系は模型を浸漬する水槽 (44cm×87cm×40cm) と光学系、レーザーからなる。レーザーは総合出力 4 W の Ar イオンレーザーであり 514.5nm の波長では 1.7W 以上の出力が得られる。光学系を構成するレンズにはすべて誘電体多層膜減反射コーティングが施されており、514.5nm での反射率は入射角 0~15° の範囲で 0.4% を越えない。

### 3. 模型実験

この水槽内に平均粒径約 1 cm~2 cm のガラス粒状体を用いて写真 2 に示すように高さ 20cm、勾配 1 : 1.5 の

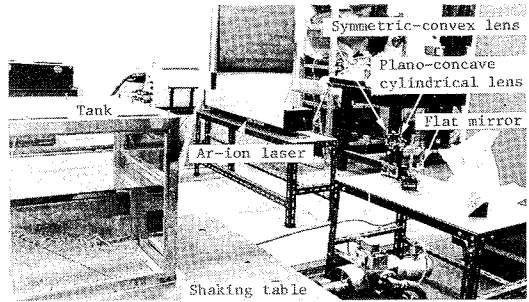


写真 1 粒状体模型可視化実験装置

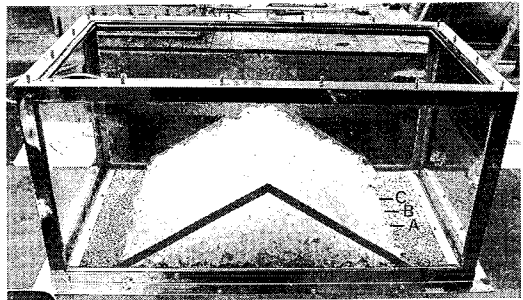


写真 2 粒状体模型

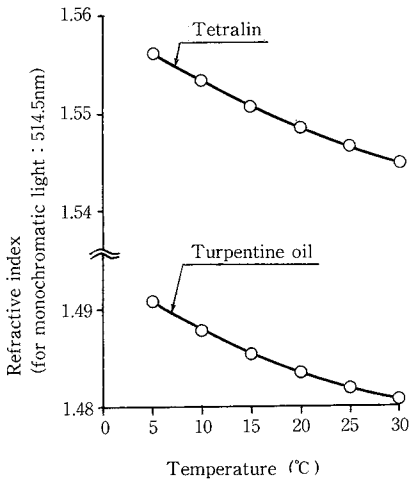
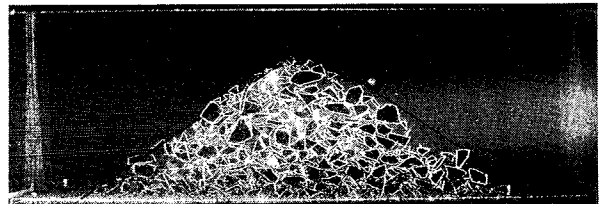
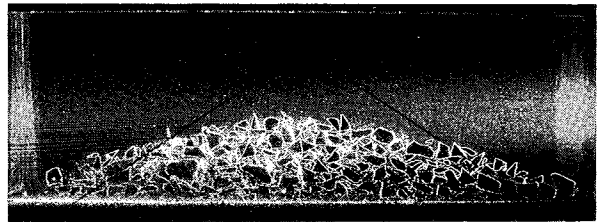


図 1 屈折率の温度依存性



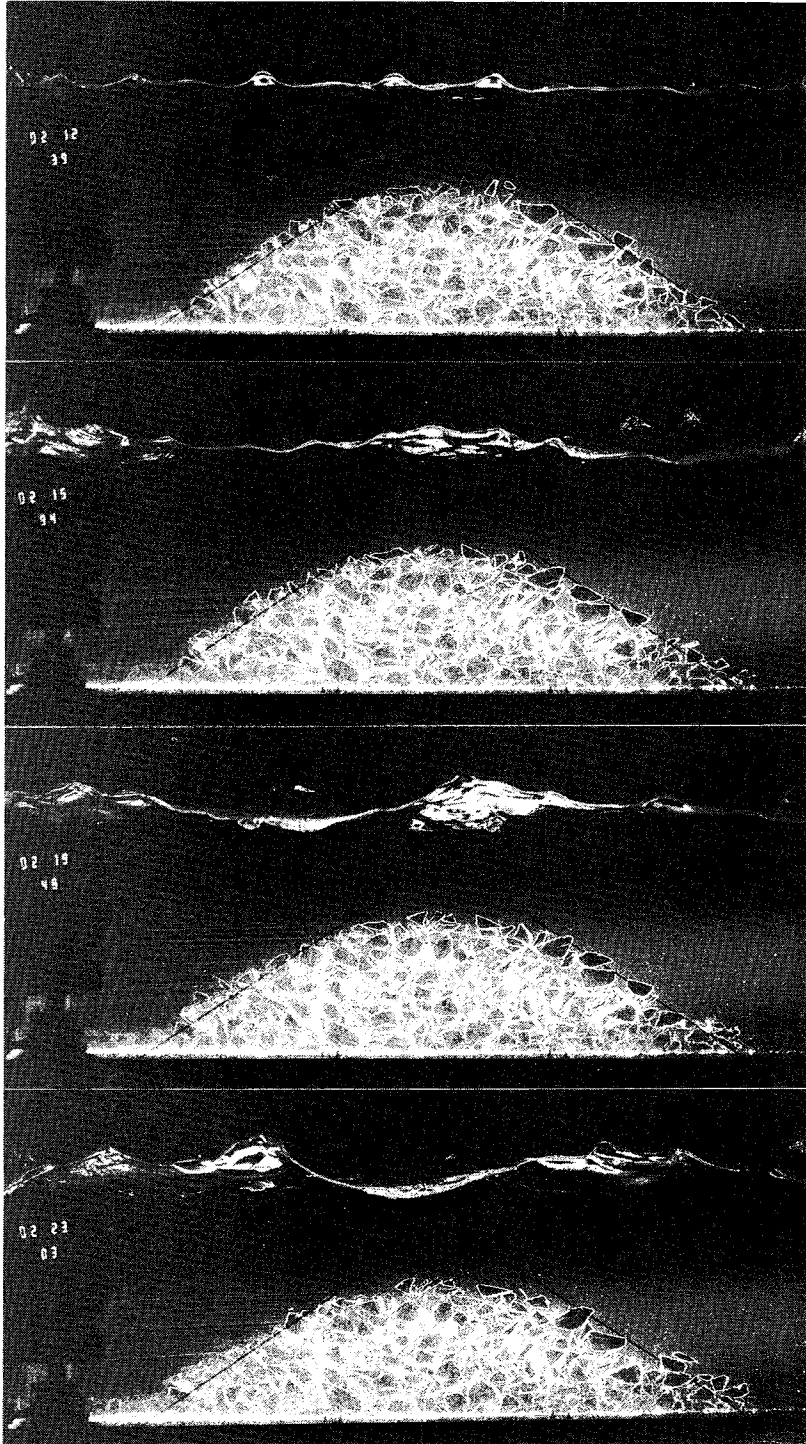
a



b

(撮影条件 F5.6・1/1秒 ASA100, Arイオンレーザー514.5nm・1W シート幅約25cm)

写真 3 堤体断面 (a : 破壊前, b : 破壊後)



(撮影条件 55mm, F2.8・1/250秒, フィルムTMAX P3200 増感現像 ASA12500程度, Ar  
イオンレーザー514.5nm・1.7W シート幅約25cm)

写真4 堤体断面の破壊過程

堤体を作製した。この模型のさらに 5 cm 上部まで浸漬液を満たし、これを振動台上で堤軸直角方向に加振した。加振に先立ち堤体内の数断面にレーザー光シートを透過させ、内部の様子を観察した。写真 3 (a) はこのうちの中央断面の様子を示すものである。緑色の輝線に縁取られた多数の粒子の配列、接触状況がつぶさに観測できて興味深い。粒子の中には周辺のどの粒子とも接触せず浮き上がって見えるものもあるが、当然これは粒子がレーザー光シート面外の支点で支えられていることを示している。

レーザー光シートを中央断面に透過させた状態でこの模型を堤軸直角方向に 5 Hz の正弦波で加振した。振動台の加速度振幅をおよそ 3 分の間に 0 から 300gal まで上昇させ、このなかの 150gal 以降の破壊過程を高速度カメラ (Photo-sonic 16mm 1W)、および連写式のカメラを用いて撮影した。写真 4 は連写式のカメラで撮影されたものの中から 3 秒間隔で 4 コマを抽出し現像したものである。堤体内の粒子は加速度振幅の上昇にともない表面に近いものほど徐々にその配列をかえ、これが 1 つの粒子を堤外に押し出すように動いていく。そしてこの粒子が斜面上を滑落するのをきっかけに比較的大きな崩壊が発生する。

振動台を停止した後の中央断面の様子を写真 3 (b) に示す。大きく左右に広がった堤体内は加振前と較べて、特に中心部から底部にかけて細粒分が混入し密度が増しているのがわかる。本実験では表層の滑落は視認されなかったが、表面の挙動は従来の玉砂利のフィルダム模型の振動実験の際の表面の挙動に類似していることが認められた。

#### 4. ま と め

ここでは粒状体模型内部で進行する動的挙動の可視化について新たな手法の提案を行った。これは、透明な光学ガラスの粒状体を、粘性が小さく屈折率の等しい無色透明な液に浸したうえで、レーザー光のシートを透過させた時にガラス表面で起こる散乱光を可視化に利用するものである。この手法によれば、任意断面の複雑な粒子の動きを散乱光の輝線に縁取られた図形の運動として明瞭に把握しうるのみならず、このレーザー光のシートを前後に走査すれば複雑な粒子形状を凹部も含めて計測することができ、多方面での応用が期待される。

終わりに、本研究の一部は本研究所・選定研究費により行われたものであり、この研究を遂行するにあたって、本所第 1 部黒田助教授、第 2 部浦助教授、第 4 部安井助教授、岩本講師、第 5 部村井教授、龍岡助教授、加藤助教授から御協力、御助言を頂いた。また実験を行うにあたっては大学院学生 Jose Daniel Ortiz 君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。(1988年9月9日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Wakabayashi, T.: Photoelastic Method for Determination of Stress in Powdered Mass., Jour. Physical Society of Japan, Vol. 5, No. 5, 1950.
- 2) Allersma, H.G.B.: Photo-elastic Stress Analysis and Strain in Simple Shear, "Deformation and Failure of Granular Materials", IUTAM Conf., Rotterdam, pp. 345-353, 1982.
- 3) 浦環, 坂巻隆: 粉粒状体の三次元切削に関する研究, 日本機械学会論文集, 第467号 C 編, pp. 1876-1884, 1985.
- 4) 土橋正二: ガラス表面の物理化学, 講談社, 1986.