ビデオ画像の処理による固液二相流の管内固体濃度分布の推定に関する基礎的研究*

高橋 弘¹ 松井 啓朗² 益山 忠³

[UDC 622.693.4]

Fundamental Study to Estimate the in-situ Solid Concentration Profile for Solid-Liquid Flows by Video Image Processing

by Hiroshi TAKAHASHI¹, Hiroaki MATSUI¹ and Tadashi MASUYAMA¹

1. Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980

In order to know flow patterns and in-situ solid concentration profiles in an opaque pipe, it is necessary to view the flow with X-ray or neutron radiography, and to process the obtained image. As the fundamental study of this purpose, the in-situ solid concentration in a transparent acrylic pipe has been estimated by processing optical video images. The result of the image processing has been compared with the actual solid concentration profile which was obtained by the rapid shut-off method. The comparison indicates that if we can estimate the amount of overlapped particles with adequate threshold values, the image processing gives accurate in-site solid concentration profiles.

KEY WORDS: Image Processing, Solid-Liquid Flow, In-situ Solid Concentration Profile, Pressure Loss, Flow Pattern

1. はじめに

固体粒子の水力輸送システムを計画・設計する場合、輸送動力の算定が特に重要である。この輸送動力は、一般に固液二相流の流動による圧力損失を基に算定されるため、従来より圧力損失に関する研究は数多く行われてきている¹⁾。これらの研究では、圧力損失の実験値は固体粒子の吐出体積濃度（以下、単に吐出濃度と記す）を基に整理されてきた²⁾。しかしながら、圧力損失は管内の粒子の流動と密接な関係があることから、近年、圧力損失を管内の固体体積濃度（以下、単に管内濃度と記す）で整理しようとする試みが行われており³⁾⁴⁾、また管内濃度で整理した方が圧力損失の実験点のばらつきが小さくなるという報告もある⁵⁾。

以上のように、圧力損失の解析に管内濃度を用いる利点がいくつか報告されているが、一般に管内濃度の測定は吐出濃度の測定に比べて困難であることから、最近ではプローブ法、サンプリング法などの管内濃度測定法が研究されている⁶⁾。なお、これらの方法は測定が直接的ではあるが、流れに接触型の測定法であるため、管内の流れを乱すという欠点を有する。

ところで、圧力損失は管内の流動状態と密接に関係していることは既に知られており、各流動状態に対する圧力損失の計算式もいくつか報告されている⁷⁾。換言すれば、管内の流動状態が分かれば、これらの式を用いて圧力損失を計算により推定することが可能となる。一方、定常状態における管内の流動状態は、鉛直方向の管内固体濃度分布と関連しており⁸⁾、また管内固体濃度分布が分かれば、平均の管内濃度も計算することができる。

さて、管路が透明管であれば、肉眼観察あるいはビデオ撮影な

どにより管内の流動状態を把握することが可能である。しかしながら、一般の配管では、ほとんどの場合、不透明な管が用いられていることから、管内の流動状態を知るためには、何等かの方法で管内を可視化する必要がある。可視化手法としては、X線透過法あるいは中性子ラジオグラフィ法⁹⁾などが提案されている。これらの方法は、X線あるいは中性子を管路に照射し、センサが管路を通過してきたX線あるいは中性子を感知して、これらの減衰の度合から管内の画像を得ようとするものであり、狭間隙水路における気液二相流動の画像は既に得られている⁹⁾。これらの方法は、前述の方法と異なり非接触型であり、管内の流れを乱さず、さらに管路内の現位置で測定が行えるという大きな特徴を有する。従って、これらの画像を処理することにより、不透明管内の濃度分布ひいては定常状態における流動状態を推定することができると思われる。

近年、画像処理技術の進展により、さまざまな分野で画像処理が用いられてきている。例えば、上述した狭間隙水路における気液二相流動では気泡の重なりはないので、簡単に空間平均のボイド率（気泡の体積率）が得られている。実際の円管路では、ボイド率の計算には気泡の重なりを評価する必要がある。従って、今後、気泡の重なりを評価できれば、ボイド率分布の推定が可能になると考えられる。ボイド率分布は固液二相流における濃度分布に相当するが、画像処理により固液二相流の流動を解析する研究のほとんどは粒子の運動軌跡を追跡するものであり、濃度分布の推定に関する研究は見受けられない。しかしながら、上述したように濃度分布は流れの圧力損失と密接な関係があるため、濃度分布の推定は特に重要であると考えられる。

よって、本研究は不透明管内の固体濃度分布を推定するための基礎的研究として、光学的手法により得られた透明管内の固液二相流の可視化画像を用いて、粒子の重なりを定量的に評価することにより管内濃度分布の推定を行うこと、さらに縮切法により測定した管内濃度分布に関する実験結果と推定値とを比較す

* 1990年5月25日受付 9月21日受理 資源・素材学会平成2年度春季大会にて講演

1. 正会員 工博 東北大学助手 工学部資源工学科

2. 正会員 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻

3. 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科

キーワード：画像処理、固液二相流、濃度分布、圧力損失、流動状態

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

ることにより、画像処理の有効性について検討することを目的としたものである。

2. 実験装置、実験方法および試料

本実験に用いた装置の概略を図1に示した。図に示されるように、本実験装置は混合槽、ポンプ、電磁流量計、濃度分布測定装置およびビデオ撮影装置（NAC社製 HSV-400）から構成されている。ビデオ画像撮影区間には内径49.8 mmの透明アクリル管を用い、さらに円管路のレンズ効果による画像の歪みを除去するためにウォータージャケットを設けた。なお本実験では上述したように光学的手法により管内の可視化を行ったが、X線透過法あるいは中性子ラジオグラフィ法に対応させるため、可視化は透過光方式によった。すなわち、⑦のストロボスコープからの光を⑨の反射板でウォータージャケットの方向に反射させて管内の可視化を行い、透過光を管軸と同じ高さにレンズを合わせたビデオカメラで直接撮影した。なお本実験の場合、光の強度が濃度分布の推定に大きく影響することから、ストロボスコープからの光は半透明樹脂板を透過させ、なるべくウォータージャケットに均一に照射されるように工夫した。また撮影区間全体を暗幕で覆い、天候の変化による影響を除去した。

本撮影システムの場合、撮影スピードはボタンの切り替えにより200コマ/秒と400コマ/秒のどちらかを選択するようになっているが、本実験における最大の管内平均流速（2.4 m/s）を考慮し、本実験においては200コマ/秒とした。

実験値と推定値との比較検討により画像処理の有効性について

考察するため、縮切法により管内濃度分布の測定を行った。その測定部の詳細を図2に示した。測定部は内径54.2 mm、長さ100 mmの真鍮管であり、厚さ0.4 mmの板で鉛直方向に7つの区間に分割されている。各区間の断面積の総和は、ビデオ撮影区間に用いたアクリル管の断面積にほぼ等しくなっている。測定区間の上流と下流にはバルブが設けられており、この2つのバルブを瞬時に締め切り、7つに分割された空間に存在する粒子の質量を測定することにより、管内濃度分布が求められる。この分割の区間数は、濃度分布の測定精度の観点からはなるべく多い方が望ましい。一方、粒子群が測定部を滑らかに流動するためには区間数はなるべく少ない方が望ましい。本実験においては実験に用いた粒子径を考慮に入れ、分割の区間数を7つとし、各々の区間の鉛直方向の長さを一定に設定した。

実験は、初めにポンプの回転数および混合槽中の粒子量を調節して所定の平均流速および濃度に設定し、ウォータージャケットの部分でビデオ撮影を行った。次に、⑤のバルブを瞬時に締め切り、管内濃度分布の測定を行った。

実験に用いた粒子は、直径2.24 mmの球形ガラスビーズであり、比重は2.49である。

さて、一般に粗粒子の水力輸送では、輸送速度は経済的な理由から撓動層をとまなう流れにおいて設定されるため、本実験での流送条件は撓動層をとまなう流れの範囲内に限定した。

3. ビデオ画像の解析方法

画像解析に用いた処理のブロックダイアグラムを図3に示した。

Fig. 2 Details of measuring device for in-situ solid concentration profile.

Fig. 3 Block diagram of image analysis system.

解析に用いた画像処理システムはピアス社製 LA-525 であり、ビデオ撮影システムは NAC 社製 HSV-400 である。ビデオ撮影された画像は、その任意の静止画像が LA-525 本体に画像データとして読み込まれ、ホストコンピュータである PC-9801 VM (NEC 社製) を用いて、種々の処理を行った。

管内濃度分布推定のために行った画像処理のフローチャートを図 4 に示した。画像処理を用いて管内濃度分布を推定する場合、特に重要な点は、奥行き方向の粒子の重なりをいかに定量的に評価するかであり、これが本研究で最も工夫した点でもある。X線

透過法あるいは中性子ラジオグラフィ法などでは、X線あるいは中性子の強度が粒子の数、すなわち奥行き方向の粒子の重なり程度によって異なる。これは、今回実験に用いた光透過方式では、光の強度の大小に相当する。従って、本解析では、粒子の重なり度を光の強度により定量的に評価することにした。

本解析では、入力画像は 512×512 の画素に分割され、それぞれの画素に対して光の強度に応じて、0～255 の範囲内で階調値が与えられる。粒子の重なり度合いにより階調値が変化することから、初めに粒子の重なりを評価するためのしきい値の決定を行った。この処理の流れは、図 4 の左側に示されている。しきい値の決定には種々の方法が提案されているが¹⁰⁾、ほとんどの場合、経験的に決定されている。本解析では、定量的評価を目的としているため、予備実験として図 5 に示すように供試管とおなじアクリル管の中心部にガラスビーズを奥行き方向に 0 から 15 個を 1 列に並べ、この管をビデオ撮影し、得られた画像を処理することにより粒子の重なり度合いに応じたしきい値の決定を行った。すなわち、入力画像に対して平滑化 (ノイズの除去)、対象部分の抽出、管の上下端の反射・影の補正を施し、さらにその結果をフロッピーディスクにファイル出力した。ただし、この予備実験では、図 5 に示すように粒子を管の中心に設置したため、管の上下端の反射・影の補正を施しても、粒子部分の画像にはほとんど影響は無いことが確かめられた。以上の処理は、すべて LA-525 に既に用意されているメニュープログラムで行った。

図 6 は、しきい値決定用の画像および画素のヒストグラムを示したものである。ただし、ヒストグラムは画像中の線分上の画素について示したものである。画像が黒いほど、すなわち光の強度が小さくなるほど階調値は小さくなる。つまり、階調値 0 は黒に、255 は白に対応する。図 6 の画像中の線分に掛かる円形図形は、上から粒子の重なりが 0 から 15 個の粒子の画像を示している。ただし、粒子の重なりが少ない場合は、光の透過性がよいので、粒子の輪郭が鮮明には写っていない。それぞれの画像に対する階調値は、粒子の重なりが大きくなるほど小さくなっていることが分かる。すなわち、この階調値の違いにより、粒子の重なり度を推定することが可能である。ただし、本実験の範囲内では、13 個以上の重なりに対しては階調値の明確な違いが得られなかったため、数枚の画像から得られる値の平均をとって、重なりが 12 個

Fig. 4 Flow chart of image processing.

Fig. 5 Schematic diagram of apparatus used to determine the threshold values. From 0 to 15 particles are arranged in a line.

Fig. 6 Histogram of pixel value for the determination of threshold values for each overlapping of particles: The overlappings of particles are from 0(Top) to 15(Bottom).

Table 1 Threshold values used in this analysis.

i	S_i
1	200
2	140
3	120
4	100
5	90
6	80
7	70
8	60
9	50
10	40
11	30
12	20

Fig. 7 Pipe section for the estimation of in-situ solid concentration profile by image processing.

までのしきい値を算出した。その結果は、表 1 に示す通りである。実際の管内の流動では、粒子が奥行き方向に 1 列に並ぶことはなく、並び方はランダムになるため、表 1 の値をそのまま用いることは必ずしも適切ではない。しかしながら、ランダムな並びのため粒子の重なりが不完全でも、その重なり合った部分のみに注目すれば、その部分は 1 列な並びと等価である。従って、この重なった粒子部分の評価に表 1 の値を用いても大きな誤差は生じないと考え、本解析では表 1 に示される値を用いて濃度分布の推定を行うことにした。

濃度分布を推定する際の処理の流れは図 4 の右側に示した通りである。ただし、本実験で用いたような沈降性の粒子は管の上部にまでは分布しないが、光の反射や影の影響により画像が暗くなる（階調値が小さくなる）と、コンピュータはこの部分を粒子と判断して処理する。従って、本解析は原画像を見て、粒子の分布範囲を確認しながら、特に管の上部について慎重に反射・影の補正を行い、管の上部で粒子濃度が検出されないようにした。推定方法の概念は、図 7 に示すように画像を検査方向（本実験の場合は鉛直方向）に n 分割し（本研究では $n=20$ ）、各段に対して平均の濃度を求めるものである。すなわち、 n 分割 j 段目の全画素において重なり i 個を表すしきい値 S_i と $i-1$ 個の重なりを表すしきい値 S_{i-1} との間にある画素数を P_i とすると、 j 段目の空間に含まれる粒子の数 N_j は次式のようにになる。

$$N_j = \frac{P_1 + 2P_2 + \cdots + mP_m}{P_s} = \frac{\sum_{i=1}^m i \cdot P_i}{P_s} \quad \cdots (1)$$

ただし、 P_s は粒子 1 個の投影面積を表す画素数である。また本解析では上述のように $m=12$ とした。従って、 j 段目の空間における濃度は次式で与えられる。

$$q_j = \frac{N_j (\pi/6) d_s^3}{A_j L} = \frac{(\pi/6) d_s^3 \sum_{i=1}^m i \cdot P_i}{A_j L P_s} \quad \cdots (2)$$

対象としているウィンドウ内の全体の画素数を P_T とすると、 P_s は次式で示される。

$$P_s = P_T \cdot \frac{(\pi/4) d_s^2}{DL} \quad \cdots (3)$$

従って、 j 段目の空間における粒子濃度 q_j は次式のように得られる。

$$q_j = \frac{(2/3) d_s D \sum_{i=1}^m i \cdot P_i}{A_j P_T} \quad \cdots (4)$$

これらの諸式は、 n 分割した j 段目に含まれる粒子体積を用いて濃度分布の推定を行うものであり、 n 分割した j 段目に個々の粒子が完全に含まれていなくても成り立つ。つまり、1 個の粒子が j 段目と $j+1$ 段目に重なって存在している場合、1 個の粒子体積を j 段目と $j+1$ 段目に分割して各段ごとの体積を計算するため、これらの諸式は粒子の存在位置の影響は受けないことになる。なお、濃度分布を推定するための種々の処理は、ホストコンピュータで計算を行った。

Glass Bead $D=49.8\text{mm}$
 $d_s=2.24\text{mm}$ $V_m=1.2\text{m/s}$
 $S=2.49$ $C_v=5.0\%$

Fig. 8 Hard copy of solid-liquid flow in a pipe.

Fig. 9 Comparison between the estimations and the experiments for in-situ solid concentration profile: Circles and triangles indicate the experiments and the estimations, respectively.

Fig. 10 Comparison between the estimations and the experiments for in-situ solid concentration profile: Circles and triangles indicate the experiments and the estimations, respectively.

Fig. 11 Comparison between the estimations and the experiments for in-situ solid concentration profile: Circles and triangles indicate the experiments and the estimations, respectively.

4. 推定値と実験値との比較検討

図8にビデオ撮影された管内の流動状態の1シーンをハードコピーした結果を示した。濃淡が粒子の重なり具合を示し、濃い部分ほど粒子の重なり具合が大きいことを示している。図9から図11に管内濃度分布の推定値と締切法による実験値とを比較検討した結果を示した。図中の○印は実験値をまた△印は推定値を示している。推定値は上述した方法に従って求めたものであるが、管底部の粒子濃度が高い部分は、図8に示されるように画像がかなり黒くなってしまい、粒子の重なり判別が困難であった。本実験では、上述したように摺動層をとともう範囲内で流送実験を行うようにしたため、管下部の粒子濃度は最粗充填濃度にほぼ近い値であると推察される。従って、階調値が20以下を示した画素に対しては、この部分の濃度は最粗充填濃度（本実験に用いた粒子では0.6）であるとして計算した。図に示されるように推定値と実験値とはほぼ一致しており、従って、適切なしきい値を用いれば、画像処理により管内濃度分布の推定を行うことができると考えられる。ただし、本解析ではアクリル管、ガラスビーズおよび清水における光の屈折率の違いによる影響については考慮されていない。これについては今後の課題であると考えられる。

さて、不透明管内の固液二相流の固体濃度を知るためには、X線透過法あるいは中性子ラジオグラフィ法により管内を可視化し、得られた画像の処理により粒子の重なりを評価する必要がある。この時の処理において、しきい値は経験的に決定される。本研究では、そのための予備的作業として、このしきい値を光学的画像を用いて決定した。ただし、この値は粒子の種類あるいは実験条件等によって異なると思われる。それゆえ、今後多くの実験が行われ、しきい値決定のための多くの情報収集が必要である。

5. む す び

不透明な金属管内の流動様式あるいは管内濃度を知るためには、X線透過法あるいは中性子ラジオグラフィ法等により管内を可視化し、その画像を処理する必要がある。本実験では基礎的研究として透明アクリル管および光学的手法により管内の流動状態の可視化を行い、固体濃度分布の推定を行った。さらに推定値と実験値との比較検討を行った。その結果、適切なしきい値を用いて粒子の重なり具合を定量的に評価すれば、画像処理により管内濃度分布の推定が可能であることが確かめられた。なお、今後はより多くの実験を行い、適切なしきい値を決定するための情報収

集に努めたい。

最後に、本研究を遂行するに当たり、有益なご助言を頂いた八戸工業大学教授川島俊夫先生に謝意を表する。また本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究(B)課題番号：01460206）にやったことを付記し謝意を表する。

主 な 記 号

A_j : j 段目の空間の断面積	[m^2]
C_v : 吐出体積濃度	[-]
D : 管内径	[m]
d_s : 粒子径	[m]
L : 測定区間の長さ	[m]
m : 画像中の粒子の重なり数	[-]
N_j : j 段目の空間に含まれる粒子数	[-]
P_i : i 個の粒子が重なっている画素数	[-]
P_s : 1 個の粒子を表す画素数	[-]
P_T : 対象としているウィンドウ内の全画素数	[-]
q : 局所管内固体濃度	[-]
q_j : j 段目の空間における管内固体濃度	[-]
S : 粒子の比重	[-]
S_i : i 個の粒子の重なりに対応するしきい値	[-]
V_m : 管内の混相流の平均流速	[m/s]

参 考 文 献

- 例えば、スラリー・カプセル輸送技術要覧、99～105、1984、開発問題研究所
- 例えば、Durand, R.: Int. Assoc. Res. 5th Congr. Minneapolis, 89～103, 1953
- 八木得次・奥出 律・宮崎昭司・是石昭夫：港湾技術研究所報告、11[3]、2～35、(1972)
- Wani, G. A., Mani, B. P. Rao, D. S. and Sarker, M.: J. of Pipelines, 3[3], 215～222, (1983)
- Khan, A. R., Firie, R. L. and Richardson, J. F.: Chem. Engng Sci., 42[4], 767～778, (1987)
- Nasr-El-Din, H. Shook, C. A. and Colwell, J.: Proc. Hydrotransport 10, Paper F1, 191～198, (1986)
- Turian, R. M. and Yuan, T.: AIChE J., 23[3], 232～243, (1977)
- Graf, W. H.: Hydraulics of Sediment Transport, 462～468, (1971), McGraw-Hill
- 三島嘉一郎ら：混相流のグラフィック・シミュレーションと可視化に関する研究会第1回資料、1～7, (1988)
- 鳥脇純一郎：画像理解のためのデジタル画像処理 (I), 135～139, (1988), 昭晃堂