A 2 0 5

放射光 X 線を利用した P I V 用画像撮影 —混相流への適用を目指して—

植村知正[○], 山本恭史 (関西大学), 西尾茂 (神戸大学), 村田滋 (京都工芸繊維大学),

上杉健太朗 (高輝度光科学研究センター)

PIV Imaging for Multiphase Flow Measurement Utilizing Synchrotron Radiation X-ray

Tomomasa Uemura, Yasufumi Yamamoto, Shigeru Nishio,
Shigeru Murata and Kentaro Uesugi

ABSTRACT

In order to measure three dimensional multiphase flows in a micro scale space, the stereo micro PIV method using synchrotron radiation X-ray is expected to be developed. Selection of tracer particles, and imaging method are discussed in this paper. A stereo matching technique for parallel projected stereo pictures is also examined.

Keywords: X-ray, multiphase flow, stereo imaging, micro PIV

1. 緒 論

マイクロ P I V ではかなり微細なトレーサを使用するため可視光ではトレーサからの散乱光量の低下と回折現象のために撮影が困難になる。さらに、高い像倍率での撮影では被写界深度が極めて浅くなるため、2次元計測に限られるなどの問題がある。X線を利用できれば波長が短いので微細なトレーサでも明瞭に撮影できる可能性があり、透過投影画像では被写界深度の問題が解消されるので、3次元計測も期待できる。さらに、X線を利用して P I V 画像を撮影すれば、不透明な物体内部の流動を計測できる可能性もある。

一方では、X線イメージングでは可視光線にはない不便がある。たとえば、X線に対するレンズやミラーは可視光線のそれらのように簡単に使えるものは無いし、性能も限られている。さらにX線の波長はきわめて短いので可視光線のように回折ほとんど起こらないが、通常のX線源では光源寸法が大きいため、まるで拡散光源でシャドウグラフを撮影するような状況になり、微細な物体の影は撮影できない。平行性と単色性の高い放射光X線があるが、利用できる設備が限られているので誰でも使える状況にないことが問題にある。

前報¹⁾では放射光X線を用いて種々の物質の細線や微小粒子を3種類の撮影法で撮影し、微小物体に適した撮影条件を調べた。Lee と Kim は直径 $3\ \mu\text{m}$ のアルミナ微粒子をトレーサとして直径 $750\ \mu\text{m}$ のテフロン細管内の流動を放射光X線を用いて計測している²⁾。透過X線による画像を P I V 解析しているので、光軸方向の速度が重複して検出されており、速度分布の計測としては問

題がある。X線を用いた P I V 計測で光軸方向位置も含めて計測した結果は著者らの知る範囲内でまだ行われていない。この問題点は放射光X線によるステレオ画像を撮影できれば解決できるだろう。なお、アメリカでは'96年頃に放射光X線を用いて透過X線画像による P I V 計測例があるとの解説記事もある。

X線 P I V のもう一つの特徴は不透明な壁で囲まれた内部の流動の計測である。X線ステレオ P I V を実現できれば、気液混相流において気泡に妨げられずに速度分布を計測できる。本論文では、気体と液体の混合物を放射光X線で撮影して、P I V 解析することを目的として、P I V 画像撮影に関する基礎的な問題を検討する。

2. 実験方法

2.1 X線の屈折効果の検討

X線は不透明な物体をほとんど直進透過するが、ごくわずかなではあるが屈折する。物質のX線に対する屈折率を表1に示す。図からわかる様にX線の屈折率は空気や真空を1とすれば、1より僅かに小さいので、屈折方向は可視光線の場合とは逆である。ただ、屈折による光線の方向変化は極めて小さく、物体を透過したX線による投影画像歪は無視できる程度である。X線の屈折は可視光に於けるシャドウグラフのように、物質境界のコントラ

Table 1 Example of δ values, $\lambda = 0.062\ \text{nm}$

Water	Polyethylene	Silicone	Iron
5.8×10^{-7}	5.0×10^{-7}	1.2×10^{-6}	3.8×10^{-6}

Refraction Index $n = 1 - \delta$

ストを強調する作用がある。物体を透過するX線の屈折とその投影像の輝度分布の概念を図1に示す。ただし、実際の屈折角はごく僅かであり、1 m後方での偏移が1 μm 程度である。また、水—空気、水—シリコン境界での屈折を基準(=1)にすれば、シリコン—空気境界では約2倍、鉄(重金属)—空気境界では約6倍であり、これは可視光線の屈折よりも物質による相違が大きいことを示しており、この点は混相流の撮影に適している。

Fig.1 Refractive characteristics of X-ray

Fig.2 Epoxy resin bar as a multi-phase flow model with inclusions;
(a) Tungsten particles and bubbles, and
(b) Porous silica

Fig.3 Synchrotron X-ray picture of a bubble and agglomerated tungsten powders in epoxy resin

Fig.4 Synchrotron X-ray picture of porous silica particles in epoxy resin.

2.2 混相流のモデルと微粒子のX線撮影

3次元PIVのためには、同時に2方向以上から撮影する必要があるが、現状では同時に複数のビームラインを組み合わせる利用できないので、実際の流動現象をステレオ撮影できない。そこで、微小粒子(タングステン微粒子, 多孔質シリカ)を混入したエポキシ樹脂を直径約0.7mmの棒状に成型して、液体中に微小トレーサと気泡が浮遊した状態を模擬した。図2にその外観を示す。このエポキシ棒を45度ずつ回転させて、4方向からステレオ画像を撮影した。図3はタングステン微粒子(1 μm)を混入したエポキシ樹脂を放射光X線で撮影した画像である。タングステン微粒子は凝集して塊状になっている。上部の明るい円形はエポキシ樹脂に混入した気泡であり、図1で説明したようにX線の屈折の影響で輪郭の内側が明るくなっている。これに対して、注意深く見ると、黒い塊状の境界部分は少し明るく縁取られているように見える。

図4は多孔質シリカを混入したモデルを撮影した画像である。多数の明るい点はシリカ粒子である。多孔質のシリカ粒子は大量の空気を含んでいるため気泡と同様の凸レンズ的な作用をしていると思われる。ただ、気泡とは違って境界は不明瞭になっている。

3. 実験結果

1. ステレオ対応付け

モデル棒を4方向から撮影した画像から粒子の3次元位置を決定する方法について述べる。一般的なステレオ計測では透視投影画を用いるため、粒子の見かけ上の位置はカメラからの距離の関数となり、ステレオペア画像の像倍率は同じではない。これに対して、平行な直進ビームの透過X線で撮影した平衡投影画像ではステレオペア画像の像倍率は等しく、粒子のy座標は撮影方法にかかわらず、その粒子の位置を反映している。平行投影画像のステレオ対応付けではy方向の像倍率が等しいため、y方向の僅かな位置ずれを検出するだけでy座標は正確に一致する。

平行投影画像を用いたステレオ対応付け法を図5で説明する。最初に、次に述べる方法でステレオペア画像中から目印になる基準位置を選び出す。一般的には、撮影画面内にあらかじめどの方向からも見える点や線状の目印を設定する。本論文では特別な基準点は設けていないので、タングステン粒子の画像では気泡の底点を基準にしている。また、多孔質シリカの画像では特定の点ではなく、目立った粒子の中からy座標位置が誤差の範囲内で一致するものをステレオ対応候補として抽出して、矛盾無く対応付けられる組み合わせを試行錯誤的に決定できる。

基準位置を決定できれば、すべての粒子の画面内位置は先に決定した基準位置を原点とする座標で表現する。図5は3方向から撮影した平行投影画像を用いて粒子の3次元位置を決定する方法を示している。

1) 最初にそれぞれの画面内で粒子を抽出し、画面の座標系で粒子位置を表し(基準位置がある場合は、各画面内で基準位置を原点とする座標系)、粒子はy座標位置に関してソートしておく。

2) 次に、 $\theta = 0$ 度と 90 度の画面で抽出された粒子のy座標位置が一定の誤差の範囲内で一致する粒子を仮の対応粒子として抽出する。その際、対応粒子の候補を項1個に限定する必要は無い。

3) 基準位置がない場合は、対応候補が少なく、粒子像が明瞭な粒子同士で対応付けられるものを、ステレオ対応粒子として、それらのy座標位置のずれが少ないものを仮の基準粒子として登録しておく。 $\theta = 45$ 度の画面から抽出した粒子から、上記の仮の基準粒子に対応付けられる粒子を選びだし、図5のようにそれぞれの画面から抽出した候補粒子からの推定位置が3次元空間で一致するものを選び出し、それに対応する各画面上の位置を基準位置と決定する。

4) 2つの画面から抽出した(y座標の等しい)対応付け候補の中から決まる交点が、第3の画面から、y座標の一致する粒子を選び出して、それから決まる線が先の交点を許容誤差の範囲内で一致すればその粒子の位置が確定したとみなす。

図6に上述の方法で決定したシリカ粒子の位置を示す。各画面からおおよそ130個の粒子を抽出した中から、16個の粒子をうまく対応付けることができた。残念ながら対応付け効率が良いとは言えないが、あらかじめ較正することなく、簡単なデータ処理でステレオ対応付けることができた。粒子画像の質が必ずしもよくないことが低い対応付け効率の原因の一つとしての挙げられる。

4. 結論

放射光X線を用いて直径0.7mmのエポキシ樹脂棒内に分散した微小粒子の画像をステレオ撮影し、平行投影ステレオ画像を解析して、微小粒子の3次元位置を計測

できた。また、空気、プラスチック、シリカ、重金属などが混合した場合でも明瞭に分離できることを確認できた。

参考文献

- 1) 植村, 山本, 村田, 西尾, 井口, 上杉, X線ホログラフィを利用したPTV計測の可能性の検討, 可視化情報, vol.25, Suppl.1(2005), pp.203-206.
- 2) Lee S.-J. and Kim G.-B., Velocity Field Measurements of Flow in Various Microchannels, 可視化情報 vol.22 Suppl.1(2002), pp.29-32.
- 3) Lee S.-J. and Kim G.-B., X-ray particle image velocimetry for measuring quantitative flow information inside opaque objects, Appl. Phys. 94-5 (2003), pp.3620-3623.

Fig.5 Stereo matching using three parallel projection pictures.

Fig.6 Three dimensional positions of measured particles.