B206

マイクロフォーカスX線源による微小物体の撮影

植村 知正[○] (関大), 山本 恭史 (関大)

High Resolution Imaging of small objects using a micro-focus X-ray source

Tomomasa UEMURA, Yasufumi YAMAMOTO

ABSTRACT

In order to make the X-ray micro-PIV technique as a common technology, the alternative X-ray source to Synchrotron Radiation (SR) facility is indispensable. The characteristics of micro-focus X-ray (MFX) source are examined for the micro-PIV. The MFX source seems better than the SR, in respect of the availability, the flexibility for PIV systems, and image enlargement. X-ray PIV is the only method that provides us with a method to realize three-dimensional micro-PIV measuring flows in complex channels. The spatial resolution, intensities, and imaging methods are discussed. Three dimensional shape of a spiral shape of fine metal wire is reconstructed from a two-dimensional micro-focus X-ray picture.

Keywords: Micro-focus X-ray, particle image, thin wire, three-dimensional PIV, Refraction contrast image

1. 緒 論

微小空間の流れ場の実験研究の手段としてマイクロPIVは不可欠の計測手法である。現在のところ、微小空間の2次元流れの計測についてはほぼ完成された観があるが、微小空間の3次元流れの計測については計測例がいくつか報告されているが、まだ解決すべき問題は少なくない。微小空間で3次元流れの計測に使用されているPIVは画像撮影法によって下記のように分類できるだろう。

a) 焦点位置走査, b) ステレオ撮影, c) デフォーカス法, d) ホログラフィ, e) X線

これらの中で、焦点位置走査法は瞬時の3次元流れを計測できない。b)～d)の方法については瞬時の3次元流れの計測例が報告されている。しかし、これらの計測手法では側壁付近の一定の領域は、①壁による視野隠蔽、②壁の干渉の妨害などのため計測できない。また、3次元的に曲った流路や交差する流路も流れを撮影できない。このような問題についてはX線なら流路や壁を透過して撮影できるのでPIV計測の実現の可能性がある。X線PIVを実現するためには、トレーサを記録できる程度の高解像度かつ高コントラストの画像撮影と、トレーサの3次元位置の測定、運動を検出できる撮影速度などの問題を解決しなくてはならない。X線マイクロPIVの計測例 (A. Lanzillotto et.al(1996)¹⁾, S.J.Lee (2002)²⁾が報告されている。両者ともに、放射光X線を用いて

サブmm程度の直径の円管内の流れを計測しているが、透過投影画像をPIV解析しているため、得られたのは3次元の速度分布を2次元面に投影した速度分布である。可視光線のPIVではトレーサ像を撮影するには高解像度の記録メディアを用いなければならない。これに対してX線PIVでは微細なトレーサのX線が像の撮影のためには、X線がトレーサを透過する際の極めて僅かの減衰を検出できる高ダイナミックレンジの記録装置と境界強調作用のある屈折コントラスト法での撮影必要であろう。屈折コントラスト法(位相コントラスト法とあまり区別されない)とは可視光線におけるシャドウグラフと同様の原理で、平行なX線が物体境界で僅かに屈折して物体の輪郭部分の明暗が強調される撮影条件である。通常のX線源ではこの撮影に必要な「平行性の良いX線」が得られないので放射光X線が用いられる。

放射光X線を利用して断面計法 $250 \times 100 \mu\text{m}$ の矩形管内の二相流のボイド分布を計測した報告⁴⁾がある。この例では、3秒とやや長い露光時間で撮影し、管路内の平均的なX線透過の分布を計測している。

これらの研究では、トレーサやマイクロチャンネルなどのX線像を得るために、放射光X線による位相コントラスト法で撮影している。位相コントラスト法で撮影すれば管路壁や微小なトレーサのX線像を撮影できるが、3次元マイクロPIV計測を実現するには、1) 画像の輝度が低いため一般に露光時間が長くなる、2) 奥行き方向

の位置計測の方法がない, 3)放射光施設は数が少なく, 利用者也限定されるなどの問題点がある。

本研究では放射光X線に代わって, マイクロフォーカスX線によってPIV画像の撮影の可能性を検討する。マイクロフォーカスX線源とは, 非常に細い電子ビームをターゲットに当てる方式によって非常に小さい一点からX線が放出される構造のX線発生装置である。その線源寸法は大きいもので $50\mu\text{m}$ 程度, 小さいものではサブミクロンの線源寸法の製品がある。X線では可視光線のような性能の良いレンズやミラーが存在しない。そのため放射光X線で微小物体を撮影する場合は検出器上に平行投影された画像を拡大することになる。寸法の小さい一点から発生したマイクロフォーカスX線によって微小物体を撮影すれば, 検出器上には拡大投影されるので, 拡大用の光学系を必要としないという利点がある。

2. X線源の検討

X線を用いてPIV画像を撮影する場合には, トレーサを表現できる解像度と周囲から識別できるコントラストで撮影できなければならない。微小な物体を透過する際のX線の減衰量が少ないためコントラストが非常に弱い。あるいは輝度差を検出できない。さらに, 線源直径が粒子直径に近い大きい場合には半影のため粒子像が消える。非常に平行性の高い放射光X線では半影の問題はない。さらに, 物体境界におけるX線が屈折する現象のために, シェドウグラフのように粒子境界が強調された画像(屈折コントラスト画像)が得られる。

通常のX線源は線源寸法が大きいので, 微小な物体は半影に埋もれて高解像度の画像記録機器を用いても撮影できない。マイクロフォーカスX線は白色光源のようにマルチスペクトルであるが, X線の波長が極めて短いので非常に直進性の高いビームが得られるため, 物体をある程度線源から離せば半影の問題は問題にならない。また, 屈折コントラスト画像の撮影も可能である。たとえば, 下記のURLにはマイクロフォーカスX線で撮影したハエの頭部が掲載されており, 微細構造が鮮明に撮影されている。

http://www.comet.ch/fileadmin/filelibrary_user/FEINFOCUS_BUFF/Market_Solutions/Application_Biological.pdf

3. 撮影例

マイクロフォーカスX線は図1に示すように1点からコーンビーム状に広がっている性質を生かして容易に拡大像を撮影できる。撮影対象を線源近くに置くcase Aの場合は像倍率は $E_1 = c/a$ であらわされるから, a を小さくすることによって拡大率を大きくできる。また, 半影現象を軽減するにはcase Bのように撮影対象を線源から少し離して置けばよい。X線の屈折を利用して屈折コントラスト法で微小粒子を撮影する場合は, 物体と検出

Fig.1 Explanation of enlarged imaging using a micro-focus X-ray source.

E: magnification factor, $E_1 = c/a$, $E_2 = c/b$

S: Micro-focus X-ray source

Fig.2 Thin wires image taken by micro-focus X-ray.

器の距離 $c - b$ を数 $100 \sim 1000\text{mm}$ 程度に設定すれば屈折効果が得られるようである。

トレーサのX線画像を撮影するためにトレーサの物質はX線の透過減衰が大きく, 屈折率の高い物質であることが望ましい。一般にプラスチックのように炭素と水素で構成される物質は映りが悪いので, 原始番号の大きい金属/酸化金属がトレーサに向いている。S.J. Leeらは直径 $3\mu\text{m}$ 程度の酸化アルミニウムを用いている。マイクロフォーカスX線源(線源径約 $1\mu\text{m}$)で撮影した金属細線の画像を図2に示す。太く見える縦線は直径 $50\mu\text{m}$ のチタン線, 少し細い斜めの線は直径 $12\mu\text{m}$ のステンレス線である。この画像は市販のマイクロフォーカスX線装置を利用して撮影した吸収コントラスト

Fig.3a Solder paste on a glass plate taken by a micro-focus X-ray with 25 μm focus size.

Fig.3b Solder particles observed using a microscope.

Fig.4 A micro-focus X-ray picture of a thin wire wound on a cylindrical tube.

Fig.5. Schematic explanation of a procedure to recover three-dimensional shape of a spiral wire.

ト画像であり、屈折コントラスト画像の特徴である境界強調効果は見られない。この画像からトレースとして原始番号の大きい金属を使用すれば吸収コントラスト法でも $10\mu\text{m}$ 程度の寸法のトレースを鮮明に撮影できる可能性を示唆している。

図3aはガラス板上に薄く塗ったハンダペーストをマイクロフォーカスX線で拡大撮影したもの、画像中の丸い黒点はハンダの微粒子である。図3bはハンダペーストに混入されているハンダ微粒子の顕微鏡画像であり、直径約 $10\sim 30\mu\text{m}$ の球形粒子である。この微粒子はマイクロフォーカスX線に対して十分鮮明なコントラストで撮影されることが分かる。

4. 3次元情報の復元

マイクロフォーカスX線を用いれば回折の極めて少ない投影画像を撮影できるので、奥行きのある空間の投影が像を明瞭に（ボケ無く）撮影できる。このことはX線源をステレオ配置すれば3次元マイクロPIVを実現できることを意味している。X線による3次元マイクロPIVは複雑な形状の微小流れや不透明な物体内の3次元流れの計測を可能にする。現在のところ標準的なマイクロフォーカス装置でステレオ撮影できるものは存在しないが、被写界深度の深いX線画像から3次元形状を簡単に復元できる。図4は肉厚の薄い円筒にらせん状にまきつけた金属細線を撮影した画像である。この画像中の細線は円筒面に沿って巻きついているので、図5に示すように円筒の中心軸が判れば、円筒の中心軸からの距離 y から円筒上の緯度＝奥行き方向 r 位置を知ることができる。このようにして復元した軸方向からみた螺旋状細線を図6に示す。この方法は3次元マイクロ空間において3次元位置計測の校正手法として利用できる。

Fig.6 A spiral wire plotted on a r - y plane.

5. 結 論

- ・ マイクロフォーカス X 線源を用いれば, X 線 PIV を実現できる.
- ・ トレーサとして X 線の透過減衰の大きい金属粒子を用いれば, 吸収コントラスト画像でも PIV 画像を撮影できる.
- ・ 螺旋状の細線を用いて, X 線画像から計測空間での 3 次元位置を較正する方法を示した.

参 考 文 献

- 1) An Investigation of Microstructure and Microdynamics of Fluid Flow in MEMS, Ann-Marie Lanzillotto, Tzong-Shyng Leu, Michael Amabile, Richard Wildes, Jhon Dunsmuir, AD-Vol.52, Proc. ASME Aerospace Div., 1996, pp.789-796.
- 2) 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.
- 3) Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays, T.J. Davis, D. Gao, T.E. Gureyev, A.W. Stevenson, S.W. Wilkins, Nature vol.373, 16 Feb.,(1995), pp.595-598.
- 4) Multiphase Flow visualization in microchannels using X-ray tomographic microscopy(XTM), S. Waelchli, M.Stampanoni, Ph. Rudolf von Rohr, Institute of Process Engineering, Swiss federal Institute of Technology(ETH), Zurich, paper VIII-2-02, PROC. ISMNT-1, 2003.