

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560216

研究課題名（和文） X線ステレオ撮影による3次元マイクロPTV手法の開発

研究課題名（英文）

Development of 3D micro-PTV technique using synchrotron radiation X-ray

研究代表者

植村 知正 (UEMURA TOMOMASA)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：70029536

研究成果の概要：

本研究は放射光X線を用いて微細流路内の3次元流れを計測する技術の開発を目的としている。流れに追従するだけでなくX線で明瞭な像が得られる粒子状の微小トレーサを選出して、それを混入した流れをステレオ撮影できた。中空状の像になるトレーサを検出してそのステレオ解析できるアルゴリズムの開発に少々時間を要したが、撮影したステレオ画像からトレーサの3次元位置を決定して3次元速度の分布をPTV計測できた。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱，物質移動

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、燃料電池、生体流れ、化学分析、化学合成、微小エネルギー源などに関連して微小空間の流れ（マイクロ流れ）を実験によって調べる研究が多方面で行われている。実験計測の殆ど全ては2次元計測であり、3次元流れの計測結果と言えば定常流れを2次元的に計測した結果を積層したものである。しかし、この方式では3次元的な形の流路や非定常の流動現象を調べられない。微小流路

の研究では3次元的な流路だけではなく2次元的な流路に於いても混相流や混合現象の研究では3次元流れを計測する必要がある。

(2) 本研究を開始した平成19年には放射光X線を利用して2次元速度分布を計測した報告はすでに存在したが、3次元速度分布の計測は存在しなかったし、調査した範囲では試みた者もなかった。2次元速度分布の計測は不透明な流路内の流れをX線で検出で

きることに興味があった。

(3) 代表者は微細流路の3次元流れの計測を試みて、特殊なレンズを用いた光学的ステレオ撮影法やホログラフィを用いる方法やデフォーカス法などの可能性を模索していた。平成17年にはSPRING8に於いて微小トレーサの撮影方法を調べる実験を行った。しかし、SPRING8では静止画像の撮影しかできず、動画の撮影をできる状態ではなかった。

(4) 平成18年にAPSで放射光X線を用いた高速度撮影をしていることを知り、当該研究者を訪問して、微細流路の3次元流れをPTVで計測する研究を提案して、翌年より本課題による研究を始めた。

2. 研究の目的

本研究は放射光X線を用いて微小空間における瞬時3次元速度分布を計測できるマイクロPIV技術の開発を目的にしている。X線を用いて2方向から同期してステレオ撮影した例は殆ど存在しない。とくに、微小領域を撮影した例はない。

本研究ではステレオ撮影するためにX線を分割交差させる方法とPTV計測に適したトレーサの選択、得られた画像の解析の方法を開発しなければならない。

3. 研究の方法

画像撮影：

高解像度のX線画像を撮影できるX線源は2つある。一つは放射光X線であり、もう一つはマイクロフォーカスX線源である。放射光X線は極めて強いX線源だが、ステレオ撮影用に2本のビームを交差させる方法を開発する必要がある。一方、マイクロフォーカスX線源を2個使用すればステレオ撮影できるが、動的な現象をビデオカメラで撮影するには強度が不十分であり、ステレオX線装置は存在しないので特注開発になるため非常に高価なものになるだろう。

以上の条件を考慮して、放射光X線を2分割して交差させる手法を開発することにした。放射光X線の利用に付いては国内のSPRING8またはフォトンファクトリが考えられ、課題申請したが採択されなかった。一方、2006年に米国のアルゴンヌ研究所にあるAPS (Advanced Photon Source) の研究者 (Jin Wang, Wah-Keat Lee) にこの問題を提案したところ、この新しい計測法の実験をAPSで行うことになった。

2007年に最初の実験を行い、スペクトル幅の狭い(波長の揃った)アンジュレータX線を用いてラウエ結晶にX線を当てると、

透過する成分と回折する成分に分割できる。分割されたX線ビームをこの結晶と完全に平行なもう一枚の結晶に入射する方法でX線を交差させることができた。この結晶をダブルラウエ結晶と呼ぶことにする。

マイクロ流路をX線で透過画像を撮影することは難しくないが、流路の壁部分と流体の境界やトレーサ粒子の像を適度なコントラストで撮影することは必ずしも容易ではない。

流体と壁部分のX線吸収はほぼ同等であるため境界線は不明瞭である。また、微小なトレーサを透過するX線は減衰が少ないため粒子像のコントラストは低い。粒子像を良好なコントラストで撮影するためにphase-contrast法で撮影した。

以上のことを考慮して、微細流路には円形チューブを用いて、十分なコントラストで管路を撮影できた。管路内には高粘度(300cSt)のシリコン油を流し、トレーサにはハンダの微粒子を用いた。ハンダの微粒子は明瞭な像として撮影できたが、比重が大きいため高粘性のシリコン油中で計測領域に入る前に一方向に偏って、均一に分散させることはできなかった。2008年の再実験ではトレーサとして銀コートした微細ガラス球を用いて、コントラストと沈降の問題はほぼ解決できた。

画像解析：

計測領域内でカメラの光軸が交差するように設置し、電子顕微鏡像の較正に利用する微細な格子を撮影して、像倍率、ステレオ交差角、両カメラの位置ずれを検出できるようにした(較正画像の撮影)。

撮影したステレオ画像は平行投影画像であり、構成実験で光軸と倍率が正しく設定・補正されているなら、ステレオ対粒子は同じy座標を占める。原理的には左右の画面から粒子像を抽出し、画像間で同一粒子を対応付ける(ステレオ対応付け)ことによって粒子の3次元位置を決定できる。左右のX線ビームの一方は結晶を透過+回折(TR)、もう一方は結晶を回折+回折(RR)したもので、X線の強度も質も異なるため左右のステレオ画像の画質もまた異なる。左右のステレオ画像を同じ条件で処理すると画質の悪い方の画像(左)から抽出される粒子の数が少なくなる。その問題を解決するために、画質のよい画像(右)で抽出した粒子像をテンプレートとして、テンプレートマッチングの手法で左画面から粒子を抽出する手法を開発した。この方法は透視投影画像では適用し難いが、本研究のように平行投影画像では極め

て有用な方法である。

4. 研究成果

ダブルラウエ結晶を用いて放射光 X 線を交差させる方法を用いて 3 次元的に配置された微細管内の流れの 3 次元流動を計測できた。

図 1 に X 線を分割・交差させるのに用いたダブルラウエ結晶を示す。

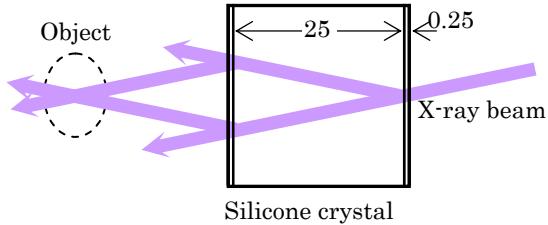


図 1 ダブルラウエ結晶

内径 0.3mm または 0.4mm のマイクロチューブ内にトレーサとして①ハンダ微粒子 ($10\text{-}25\ \mu\text{m}$), ②アルミナ粒子 ($18\ \mu\text{m}$), ③銀コート中空ガラス球 ($20\text{-}30\ \mu\text{m}$) を混入したシリコン油を流した。ハンダ粒子は比重が重いので管内に一様に分散させることはできなかった。アルミナ粒子はビジビリティも分散性も良好であったが、不定形の粒子が多く含まれており、粒子が多い状態ではステレオ対応付けが難しくなる。中空ガラス球は比重が 1 に近いので分散性がよく、整った形なのでステレオ対応付けに適している。

図 2 はマイクロチューブを交差させて、ハンダ微粒子をトレーサとして内部にシリコン油を流して撮影した X 線ステレオ画像である。トレーサ粒子が右側に偏って分布していることが分かる

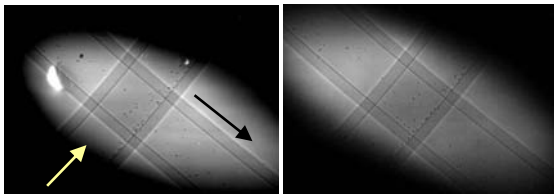


図 2 交差マイクロチューブのステレオ画像
(トレーサ：球状ハンダ微粒子)

図 3 は細い黒鉛棒に巻いたマイクロチューブ内の流れの X 線ステレオ画像である。この画像でもトレーサ粒子は右寄りになっている。それは導入管の水平部分で下方方向に沈殿したトレーサ粒子が攪拌されることなく上向き管に流入したためである。

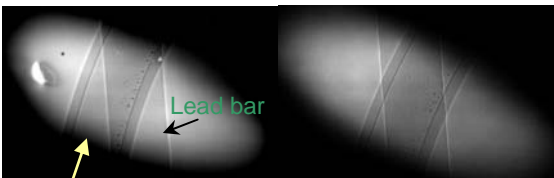


図 3 らせん状マイクロチューブのステレオ画像
(トレーサ：球状ハンダ微粒子)

粒子の偏りを防ぐには管路に入る直前に攪拌するか、使用液体に近い比重のトレーサを使用しなければならない。

図 4 は銀コート中空ガラス微小球をトレーサとして交差マイクロチューブ中の流れのステレオ画像である。

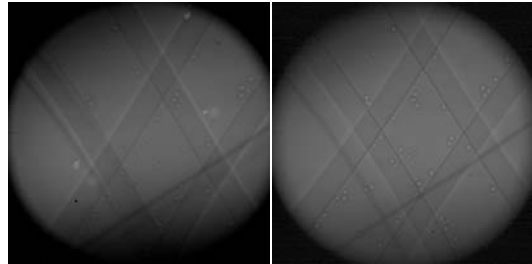


図 4 交差管のステレオ画像
(トレーサ：銀コート中空ガラス球)

図 5 に交差管内の流れを P T V によって計測した結果の一例をしめす。

手前にある管と背後の管内の流れの空間関係を明瞭に認識できる結果が得られている。

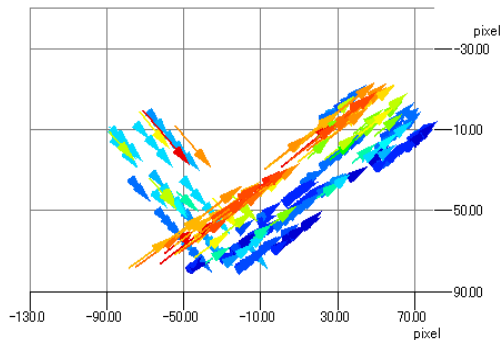


図 5 交差マイクロチューブ内の速度ベクトル

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① 植村知正, 李華傑 (アルゴンヌ国立研究所), 山本恭史, 児玉泰規, 3 次元マイクロ PIV のための X 線ステレオ画像撮影, 可視化情報 Vol.28 Suppl.1, pp 43-44, 平成 20 年 (2008.7/21).
- ② T. Uemura, W.-K. Lee (Argonne National Laboratory), Y. Yamamoto, Y. Kodama, Stereo X-ray imaging for micro 3D PIV, Proc. 14th Intl. Symp. Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Paper No.3.1.5, (2008.7/7).
- ③ 植村知正, マイクロ 3D-PIV のための

微粒子の可視化と位置計測, 日本液体微粒化学会 第16回微粒化シンポジウム基調講演, 2007.12/20, 大阪大学.

- ④ **T. Uemura**, Invitation to the world of quantitative flow visualization, The 6th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Plenary lecture, 2007.5/17, Hawaii, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植村 知正 (UEMURA TOMOMASA)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：70029536

(2) 研究分担者

山本 恭史 (YAMAMOTO YASUFUMI)

関西大学・システム理工学部・専任講師

研究者番号：90330175

(3) 研究協力者

Wah-Keat Lee

所属：米国アルゴンヌ国立研究所