

# 周囲流れ場との同時可視化計測による溶鋼中非球形粒子の運動に関する水モデル実験

松井 剛一\*・井口 学\*<sup>2</sup>

Water Model Experiment on the Motion of a Non-spherical Particle in Molten Steel Based on Simultaneous Visualization of the Particle and Surrounding Flow

Goichi MATSUI and Manabu IGUCHI

**Synopsis :** This study deals with the mechanism of small-body-falling namely the vortex-body interaction. The body is regarded as a model for non-metallic inclusions moving or floating in molten steel. In the study visualization experiments for the motion of a small thin disk falling down in water have been conducted. The motion of the thin disk and its surrounding water velocity field were simultaneously measured using the MOFIA system. The velocity field around the disk was measured by particle image velocimetry (PIV). Fluorescent tracer particles with an average diameter of 10  $\mu\text{m}$  were used to separate the wavelengths from both that of YAG laser and those of lights for images taken by a CCD camera. The three dimensional motion of the disk was reconstructed using the images of two high-speed cameras. The experimental results collectively show that the motion of the disk was affected by its density and thickness. The motion changed from two-dimensional zigzag motion to spiral motion with an increase in the density of disk. In the case of a high density disk, a chaotic motion was observed.

**Key words :** steelmaking; nonmetallic inclusion; disk; flow visualization; particle-fluid interaction; zigzag motion; spiral motion; PIV.

## 1. 緒言

流体力学と工学技術の両観点から、著者の一人は蝶の飛翔に関心を持ち、その優れた飛翔機構特性を明らかにして、工学技術に取り入れることを最終目的に実験的研究を行っている<sup>1)</sup>。その際、粒子（または気泡）運動と周囲流体との相互作用すなわち混相流動の素過程を解明するために構築した動体-流動画像解析装置 (MOFIA)<sup>2-4)</sup> を、翅の運動と周囲流れ場の可視化画像同時計測に応用して、流体力学的相互作用を明らかにしつつあるが、蝶のはばたき飛翔においても、翅の運動により形成される剥離渦が重要な役割を演じ、さらに重心の変動も伴うことからそのメカニズムはきわめて複雑となる<sup>5)</sup>。蝶の飛翔を解析するためには、そのシミュレーションとして流体中を運動する物体と物体周囲に発生する流体渦との相互作用（渦-物体相互作用問題<sup>6)</sup>）を検討する必要がある。一方、混相流素過程の基本モデルとして選んだ単一粒子（固体球、固体偏平回転楕円体、気泡）の液体中における運動について計測を行い、MOFIAの有効性を示すとともに、固体粒子/気泡とその周りの流れの流体力学的相互作用を明らかにしてきた<sup>3,4,6)</sup>。

周知のように、溶鋼中の非金属介在物の形状は球形に加えて、多面体、層状型、およびクラスター型のものも存在

する<sup>7)</sup>。しかしながら、従来の非金属介在物の動的挙動に関する水モデル実験のほとんどは球形粒子を用いている<sup>7)</sup>。主たる理由としては、非球形粒子の場合の運動が複雑で、しかも3次元的な挙動を示すことから、従来、一般的に用いられている2次元的な観察ならびに測定方法では非球形粒子の動的挙動を正確に把握することができなかったことが挙げられる。著者の他の一人はこの問題を解決すべく、非球形粒子の3次元挙動の測定が可能な計測法を探していたが、最近MOFIAの存在とその大きな潜在能力に気づいた。

MOFIAは、溶鋼中非球形非金属介在物の動的挙動解明や、溶銑予備処理でキャリヤガスとともに、あるいはインペラを用いて溶銑中へ巻き込まれた非球形粒子の動的挙動の解明に役立つと考えられる。そこで、本研究では、非球形物体の代表的なものの一つとして、固体球や楕円体よりも複雑な挙動を示すコイン、すなわち薄小円板の静止水中落下運動に着目し、MOFIAを用いて流れ場のPIV計測と物体運動の3次元計測を行った。コインの水中落下運動には直線的落下、振動、宙返り、カオスの挙動の運動形態が見られるが、その要因は十分に明らかにされていない。本研究では、薄小円板の密度と厚みがこれらの運動形態に及ぼす影響を明らかにした。

平成18年4月19日受付 平成18年7月18日受理 (Received on Apr. 19, 2006; Accepted on July 18, 2006)

\* 近畿大学生物理工学部生体機械工学科 (Department of Mechanical Engineering and Biomimetics, Kinki University, Kinokawa Wakayama 649-6493)

\* 2 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験計測装置

まず、可視化画像計測系 (MOFIA: Moving Object-Flow Image Analyzer<sup>1-4,6,8)</sup>) を構築し製作した。MOFIAは、物体の運動とその周囲流れ場を同時に全視野画像計測するハード部分とパソコンに取込まれた画像の処理をするソフト部分から成る。ハード部分は、Fig. 1 に示すように、物体運動計測用高速度カメラと照明系 (高周波蛍光灯) 2組および流れ場計測用カメラと YAG ダブルパルスレーザー系1組で構成され、撮影される画像の光の干渉を避けるために波長帯の異なる光学フィルタが各カメラと照明系に設置されている。また、レーザー光はレンズ系によりシート状に照射され、PIV 用カメラはこのシート光に垂直に、2台の高速度カメラはその光軸に対して 45° の角度で互いに直交するように設置されている。

コイン水中落下実験装置のテストセクションは長さ

1020 mm、内径 50 mm、外径 60 mmの透明アクリル製円筒管であり、円筒管の外側には円管の歪み、すなわち撮影画像の歪みを軽減するために正八角形のアクリル製ウォータージャケットが設置されている。円筒管にはトレーサ粒子を含む水、ジャケットには純水が満たされている。水中落下実験装置 (テスト円筒管とウォータージャケット) の断面と可視化画像計測系 (MOFIA 計測システム<sup>1)</sup>) の配置関係を Fig. 2 に示す。トレーサ粒子は平均粒径 10 μm の蛍光粒子 (ローダミン B: 吸収波長 540 nm, 蛍光波長 580 nm) を用いた。

実験で使用した試料 (薄小円板) の仕様は Table 1 に示すように、直径の基準を 10 mm とし、密度と厚みをパラメータとした。密度は試料円板の材質を変えることにより、SPCC (Steel Plate Cold Commercial 冷間圧延鋼板: 7840 kg/m<sup>3</sup>), アルミニウム (2700 kg/m<sup>3</sup>), アクリル樹脂 (1020 kg/m<sup>3</sup>), プラスチック (1100 kg/m<sup>3</sup>) の4通り、厚みは 0.07, 0.1, 0.5 mm の3通りとした。

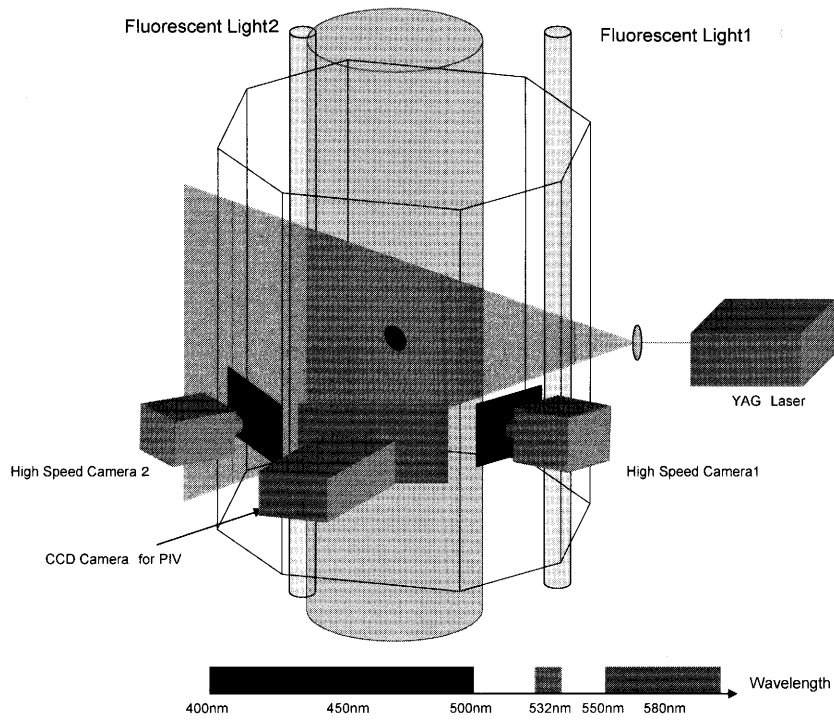


Fig. 1. Experimental apparatus and MOFIA system.

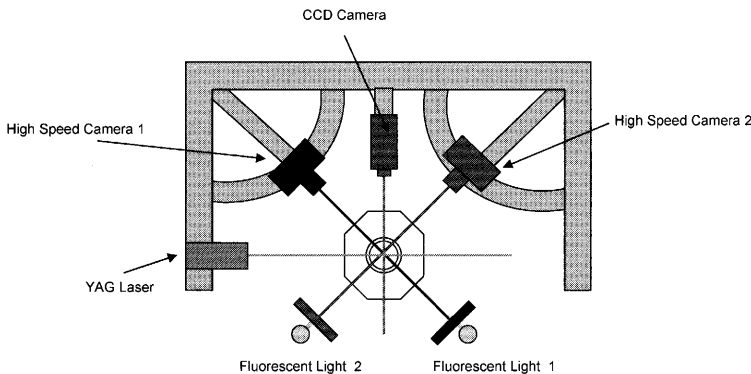


Fig. 2. Top view of experimental apparatus and MOFIA system.

Table 1. Specifications of disks.

Material	SPCC	Aluminum		Acrylic resin	Plastic
Diameter (mm)	9.65	10	10	11	10
Thickness (mm)	0.1	0.5	0.1	0.07	0.5
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7840	2700	2700	2700	1020
					1100

## 2.2 実験方法

アクリル円筒管内の水中に、薄小円板の平面が水面に垂直になるようにピンセットで挟んで水中で放し、自由落下させ、1台のCCDカメラと2台の高速度カメラの計3台で円板まわりの流れ場とその円板の挙動計測を行った。なお、YAG レーザシートによる照明はアクリル円筒管の中心を通るように照射した。画像の取得は、アクリル円筒管内水面から下方  $360 \pm 40$  mm の領域を撮影し、パソコンに取り込んだ。YAG レーザの照射は PIV 用 CCD カメラと同期するようにパルスジェネレータを介して接続され、シート光はテスト部の円筒管の中心軸を通過する。ダブルパルスの時間間隔  $\Delta t$  は 0.01 s に設定した。YAG レーザの光源は 532 nm の波長を放ち、トレーサ粒子として用いた蛍光粒子は上述のように光吸収波長 540 nm、蛍光波長 580 nm をピークとする分布をもっている。今回、PIV用カメラでは蛍光波長の光を取り込み撮影するので、他の2台のカメラの撮影画像と互いに干渉を防ぐためにそれぞれ取り込む光波長の選別が必要である。そこで、カメラ3台と蛍光灯にそれぞれに必要な波長だけを選別して取り入れるバンドパス・フィルタを各々装着することで、PIV用カメラではローダミンBの蛍光トレーサ像のみを取り込むことができるように設定する必要がある。この実験では、PIV（流れ場）と薄小円板の自由落下挙動は同時に計測されるので、撮影画像が互いに干渉しないように光学フィルタを用いて、PIV用カメラではトレーサ粒子の蛍光波長 580 nm を中心として 550 nm 以上、高速度カメラ1では 400–450 nm の波長、高速度カメラ2では 450–500 nm の波長を選別して撮影することにした。

## 2.3 解析<sup>8,9)</sup>

PIV用カメラにより取得した画像データ（流れ場）はダブルパルス間隔で撮影された原画像2枚1組のデータであり、これを画像相互相関法を用いて解析し速度ベクトル場

画像を得た。速度ベクトルデータから渦度場も得ることができる。一方、2台の高速度カメラ（カメラ1とカメラ2）で撮影したそれぞれの原画像を2枚1組として二値化などの画像処理を行い、小円板挙動の再構成3次元画像を得た。さらに、流れ場画像と小円板挙動3次元画像の合成画像を得ることにより、小円板の挙動と流れ場との相互作用を擬似3次元で可視化できるようになる。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 コインの運動とその周囲流れ場の表示<sup>8,9)</sup>

MOFIAによる撮影画像の基本はPIV原画像2枚1組と高速度画像2枚1組であり、それぞれ画像処理を行うことにより流れ場と再構成3次元画像を得、さらに流れ場にコインを組み合わせた合成画像を得る。

厚み 0.5 mm のアルミニウム円板を落下させた場合を例にとって画像の表示法を示す。

#### (1) PIV原画像と流れ場画像

Fig. 3 は PIV 原画像の1枚でありトレーサ蛍光粒子とコインが撮影されている。コインは図の横方向には中央、縦方向には下から 1/4 のところで、右上がりに白く写っている箇所にある。0.01 s 間隔で撮影された2枚の原画像を2値化処理し相互相関法による解析により流れ場画像すなわち速度ベクトル場画像を得、速度ベクトル場から渦度場画像を得る。結果の流れ場画像を Fig. 4 に示す。この流れ場における矢印は速度ベクトルを表し、濃淡（原図では赤と青）部分は、2次元速度場から計算した速度場面に垂直な渦度の成分の強弱を表しているの、濃淡（色の識別）により渦の方向と強度がわかる。

#### (2) 再構成3次元挙動画像

Fig. 5 は2枚の高速度画像を画像解析することにより得られたコインの3次元運動の再構成画像であり、(a) 側面

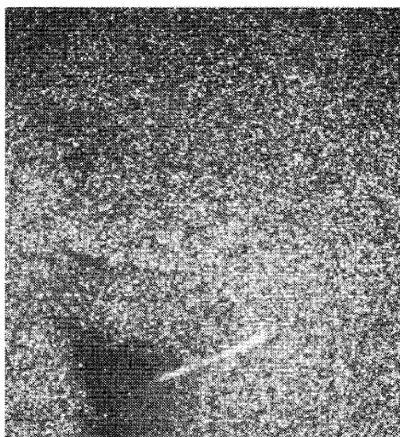
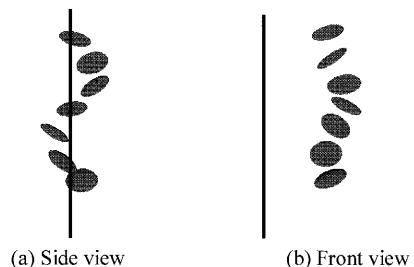


Fig. 3. Original image for aluminum disk of thickness 0.5 mm.



Fig. 4. Velocity field for aluminum disk of thickness 0.5 mm.



(a) Side view (b) Front view

Fig. 5. Reconstruction images of three dimensional falling motion of aluminum disk of thickness 0.5 mm.

図はレーザーシート光面の横側すなわち直角方向から見た画像，(b) 正面図はレーザーシート光面に向かって見た画像であり，流れ場画像面に対応する。図中の黒の実線は (a) 図ではシート光を，(b) 図では管壁を示す。レーザーシート光の位置を基準にしたコインの空間位置が算出されているので，コイン運動をどの角度からでも見られ，コイン運動の特徴を知ることができる。

(3) 合成画像

Fig. 6 は，流れ場画像に，同時刻に撮影されたコイン像を組み合わせた合成画像であり，画像を回転してどの角度からも見ることができる。

これらの画像からコインの運動と周囲流れの相互作用の特徴を知ることができる。このアルミニウム円板の場合，運動の様相や範囲（幅），流れ場との相互作用，すなわち渦を放出しながら螺旋状あるいはジグザグ状に運動しながら落下するなどのコイン運動の特性が確認できる。また，合成画像から円板の位置とその周りの流れ場が示されているので，円板の姿勢と渦の関係を明瞭に見ることができる。

現象の特徴は，主としてコイン運動の 3D 再構成画像と流れ場画像から抽出した。

3.2 密度の効果（厚み：0.1 mm）

落下挙動への密度の効果を見るために，同じ厚みのコインの挙動を比較する。厚み 0.1 mm について，密度の小さいプラスチックの場合には，Fig. 7(a), (b) に示すように側面画像では揺動し，正面画像では直線的に落下する二次元的ジグザグ運動の傾向を示す。Fig. 8 に速度場画像を示す。この場合はコインがレーザーシートから離れている状況で，縦方向に直線的に落下運動している場合に当たり，流れ場

の特徴が表れている。したがって，コイン運動によって発生する渦は明瞭には認められない。参考に，Fig. 9 に厚さ 0.5 mm のアクリル樹脂のコインがレーザーシートを横切った状態でそのまま落下していく場合の速度場を示す。両端に明瞭な渦（逆カルマン渦）と放出された渦が見られる。

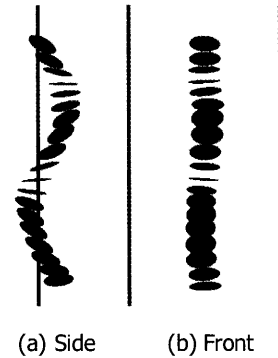


Fig. 7. Reconstruction images of three dimensional falling motion of plastic disk of thickness 0.1 mm and density 1100 kg/m<sup>3</sup>.

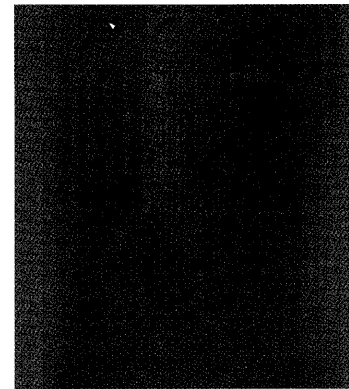


Fig. 8. Velocity field for plastic disk of thickness 0.1 mm.

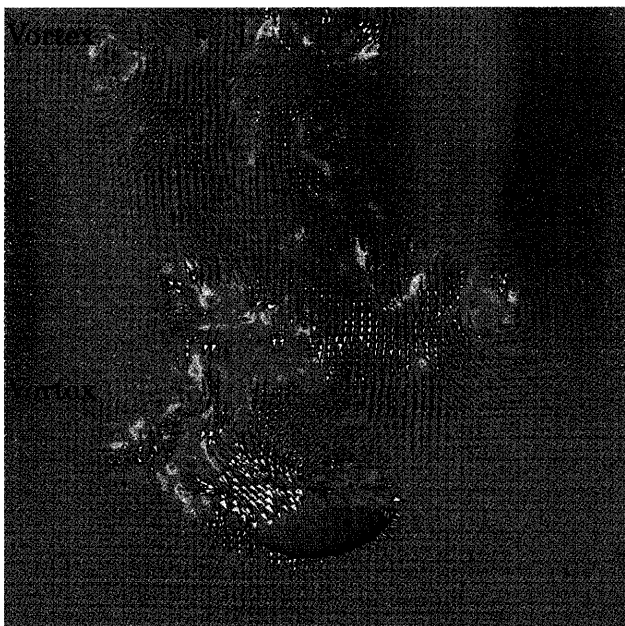


Fig. 6. Synthesized velocity field for aluminum disk of thickness 0.5 mm.

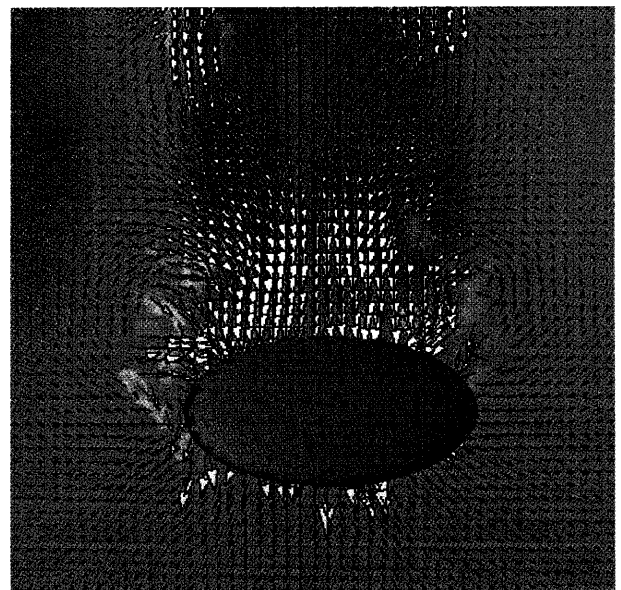


Fig. 9. Combined velocity field for acrylic resin disk of thickness 0.5 mm.

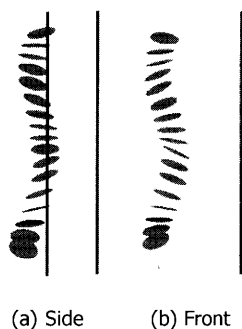


Fig. 10. Reconstruction images of three dimensional falling motion of aluminum disk of thickness 0.1 mm and density 2700 kg/m<sup>3</sup>.

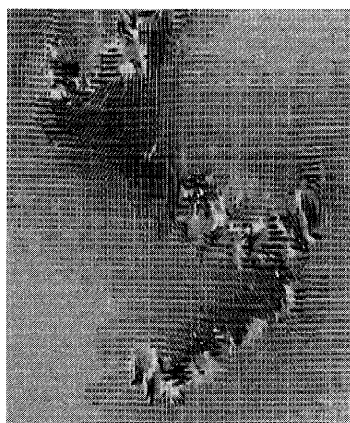


Fig. 11. Velocity field for SPCC disk of thickness 0.1 mm.

中位の密度を有するアルミニウムの場合 (Fig.10) には、ほぼ一様な振れの3次元螺旋運動を示し剥離渦も明瞭に認められた。この場合も Fig. 6 の速度場画像に示されるように、振れの最大となる位置で渦が観察されることから渦放出による反作用で方向を転換していることが分かる<sup>3,4)</sup>。さらに密度の大きい SPCC の場合には、振れ幅が大きいため流れ場と3D再構成画像が同時に得られなかったため、個別に得られた流れ場と再構成画像を Fig.11 と Fig.12 にそれぞれ示す。コインは、ブランコの揺れのように振れ、かつ振れの最大位置で宙返りして方向を転換し、複雑な3次的ジグザグ運動を示した。

厚み 0.5 mm についても、密度の大きいアルミニウム (Fig. 5) と密度の小さいアクリル樹脂の場合 (Fig.13) を比較すると、アクリル樹脂の場合のほうの振れが狭くなっている。

### 3.3 厚みの効果 (アルミニウム)

落下挙動への厚みの効果を見るために、同じ密度のコインの挙動を比較する。アルミニウムの場合、厚みは 0.5 mm, 0.1 mm, 0.07 mm の3種類である。円板はいずれも3次元螺旋状運動を示して落下し、揺れ幅もほぼ同じであり、連続的な渦放出も見られた (Fig. 5, 10, 14)。厚みの効果は弱い傾向を示している。しかし、薄くなるにつれて、落下速度が低下しジグザグ的な挙動に移る様相を示し、揺れの

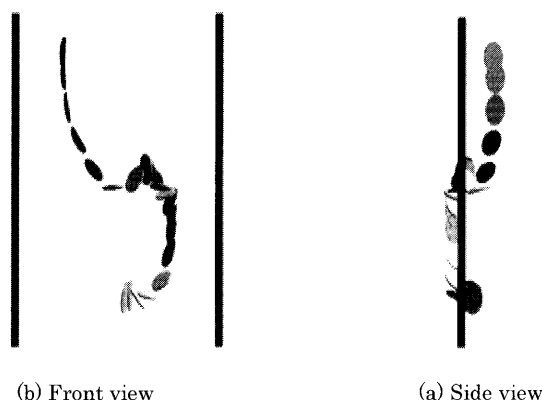


Fig. 12. Reconstruction images of three dimensional falling motion of SPCC disk of thickness 0.1 mm and density 7840 kg/m<sup>3</sup>.

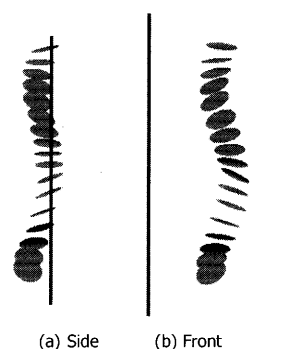


Fig. 13. Reconstruction images of three dimensional falling motion of acrylic resin disk of thickness 0.5 mm and density 1020 kg/m<sup>3</sup>.

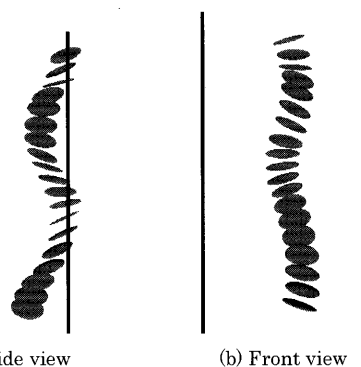


Fig. 14. Reconstruction images of three dimensional falling motion of aluminum disk of thickness 0.07 mm.

最大位置で方向を転換するが、渦放出の観測は困難であった。ただし、材質をアルミニウムで統一しているので、実際には厚みとともにコインの質量も変化しており、厳密には厚みだけの効果を検討したことにはならない。今後、材質を変えて実験を行い、厚みの効果を検討したい。

## 4. 結論

本研究では、非球形非金属介在物の最も基本的なモデルとしてコイン状円板を選び、その水中における落下運動に

ついて MOFIA を用いて実験的に調べ、粒子運動と周囲流体の速度場の特徴を包括的に捉えることができた。主な結果を以下に示す。

#### (1) 密度の効果

密度が小さい（プラスチック）場合は、2次元ジグザグ運動を示し、渦放出により方向を転換した。中位（アルミニウム）の場合は、螺旋運動を行い揺れ幅も大きく剥離渦も強く明瞭に認められた。大きい（SPCC）場合は、多様な運動を示し強い剥離渦を残した。特に、3次元ジグザグ・宙返り運動も示し、横運動では渦放出は認められず、揺れの最大位置で方向を転換した。結局、密度が大きくなるにつれ、2次元ジグザグ運動→螺旋運動→カオス運動となることが明らかとなった。

#### (2) 厚みの効果

アルミニウムの場合、厚みは 0.5 mm, 0.1 mm, 0.07 mm の3種類であり、運動はいずれも螺旋的で径方向に揺れ幅もほぼ同じであり、連続的な渦放出も見られた。ただし、薄くなるにつれて、落下速度が低下しややジグザグ的な挙動

を示し、揺れの最大位置で方向を転換するが、渦放出の観測は困難であった。結局、厚みの効果は弱いですが、薄くなるにつれて螺旋運動からジグザグ的な運動となる傾向が見られた。

### 文 献

- 1) G.Matsui, A.Shimizu and T.Miyamura: *Mem. Sch. B.O.S.T. Kinki Univ.*, **16** (2005), 59.
- 2) G.Matsui: MOFIA System, Japan Patent, Tokukai 2001-227928, (2001).
- 3) G.Matsui and H.Monji: Proc. 3rd European-Japanese Two-phase Flow Group Meeting, Certosa di Pontignano, (2003).
- 4) G.Matsui and H.Monji: *Multiphase Sci. Technol.*, **17** (2005), No. 1, 43.
- 5) M.Iima: *Nagare*, **21** (2002), 153.
- 6) H.Choi, T.Terauchi, H.Monji and G.Matsui: *An New York Acad. Sci.*, **972** (2002), 235.
- 7) Jpn. Soc. Promotion Sci. (JSPS): Recent Development in Studies of Non-metallic Inclusions in Steel, JSPS, (1994), 72.
- 8) G.Matsui, H.Monji, T.Terauchi and H.Choi: *Jikken Rikigaku (J. JSEM)*, **2** (2002), No. 3, 189.
- 9) G.Matsui: Handbook of Multiphase Flow, Asakura Book Co. Ltd., Tokyo, (2004), 86.