B216 二液界面への球体貫入に伴う現象 (第 2 報)

—発生液滴の寸法, 個数, 位置の分布—

米原 紀吉[○], 植村 知正 (関西大学), 井口 学 (北大院), 山内 慎 (関西大院)

Study on Liquid-Liquid Interface Caused by a Penetrating Sphere(Second Report)

—Diameters, Numbers, and Positions of Generated Droplets—

Noriyoshi YONEHARA, Tomomasa UEMURA, Manabu IGUCHI and Makoto YAMAUCHI

ABSTRACT

Generated droplets on liquid-liquid interface are related to problem of chemical reaction and mixture. Water and silicon oil($5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) under the room temperature are used for liquid-liquid interface. Brass spheres(with four, five and six millimeters diameter) and glass sphere(seven millimeters diameter) are employed for penetrating solid sphere. All spheres are coated with water and oil repellent paint(fluorine compound). A sphere is naturally released eighty millimeters upon the oil layer. The scene of sphere penetration is captured by use of two high-resolution video cameras (30 frames/s, 1024×1024 pixel). Two cameras are made a line square with each other. All image data of generated droplets can be caught under this experimental condition. The velocity of falling sphere and the numbers, positions, diameters, migration velocity of droplets are measured by image analyzing. The frequency distribution of diameter and positions of generated droplets are also obtained.

Key words: Image Measurement, Liquid-Liquid Interface, Droplets

1. ま え が き

二液界面を物体が通過する際の現象を常温の水と油を用いて観察し, 上層の油が下層の水層へ引き込まれる体積や表面積を計測したり, 発生する油滴の状態を捉えたことを報告してきた¹⁻⁷⁾. この研究の背景として, 銑鉄の精練に用いられるアルゴンガス吹込み法がある. すなわち汚染物質や非金属介在物の混入, 化学反応の促進等を知るために, 高温熔融状態にある銑鉄とスラグ界面をガスが通過する際の二液界面を知る必要があった. ガスのかわりに単一球を, また高温の熔融銑鉄とスラグのかわりに水と油を用いて, 上から下へ逆方向へ貫入させて考察するものである.

本報では界面で発生する微小油滴の状態に着目し, 2台のカメラを用いて3次元空間で捕捉したことを報告する. また落下固体球の表面を撥水・撥油塗料で塗布した4種類の球で試みている.

2. 実 験 方 法

外形 180mm (厚さ 3mm) の透明アクリル円筒に水を入れ, その上に深さ 80mm のシリコン油 (動粘度 $500 \text{ cSt} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) を置いて二層とする. 油の表面上 80mm の位置から単一球を自然落下させた. このとき二液界面を球が通過して行く様子を側面から直角二方向より高解

像度ビデオカメラ (30frame/s, 1/1000s, 1024 × 1024pixel) で同期撮影する。

油のみに溶ける染料を加え, 水中に発生する微小な油滴をバックライト照明によって画像取得した。円筒容器による画像のひずみを低減するため, さらに全体を大きな直方体の水槽中に置いてある。使用した落下用固体球は $\phi 4.05\text{mm}$, $\phi 5.05$, $\phi 6.07$ の黄銅 (比重 8.3) と $\phi 7.08$ のガラス (比重 2.5) の 4 種類を用いた。それぞれの表面は市販の撥水・撥油用弗素樹脂塗料でコーティングしてある。各球に対してそれぞれ 23~30 回繰返し落下実験を行った。

3. 実験結果と考察

撮影された画像から筆者らが開発した円形抽出法⁸⁾を用いて油滴の中心座標と直径を求める。この方法は原画像の円状の境界部での輝度分布曲線を 3 次曲線で近似し, その変曲点を境界点とし, 複数の直交直線との交点から円形とみなした中心座標と直径を定めるものである。しかしながら直径が 5~6 pixel 以下の小さい円を抽出することができなかったので, 微小な油滴 (この撮影条件では $\phi 1.6\text{mm}$ 以下) に対しては別途二値化ラベリング法によって求めた。後者の方法は二値化処理の閾値の設定によって直径が変わる。そのため前者と同じ対象物の直径と同じになる閾値を選んで処理を行う。これら二つの方法を適用することによって発生微粒子を全数捕捉することができた。

3.1 界面の様態

球が界面を通過する速度の大小によって, 界面下で発生する油滴の様態が異なる。速度が小さい場合はゆっくりと界面の油を長く引き伸ばした糸状の油の途中から数少ない油滴が静かに発生する。それに対して速度が大きい場合は引き込む界面下の油の長さは短く, 球に付着した油から油滴が数多く分離してゆく傾向がある。

(a)

(b)

Fig. 2 Mean number and diameter of generated droplets

3.2 落下球の速度

図 1 に各種落下球の経過時間に対する深さ位置を示す。時刻は球の先端が界面から出現する時を基準としている。黄銅球に関しては直径が大きいほど早く落下しており, 質量の小さいガラス球に関しては界面での抵抗や油の引き伸ばしのため減速し, しかも深い所では水平方向へも少しゆらいでいた。界面下に球が接しているときの球速度と球の直径および油の動粘度で Re 数を定義するといずれもほぼ層流状態といえる。

Fig. 1 Depth position of falling sphere in time

3.3 油滴の発生個数と粒径分布

図 2(a) に Re 数に対する発生個数をまた (b) には平均粒径 d/D を示す。実験は狭い Re 数の範囲にもかかわらず, 油滴の発生個数は Re 数に比例し, 粒径は反比例 (黄銅球) していることがわかる。ただし, (b) 図に関してガラス球は界面の様態から d/D の特性が異質なようである。

3.4 油滴の発生位置

すべての油滴が球形化したときの状態を選んで打点した例（ $\phi 6$ 黄銅球実験回数 30 回で発生したすべての油滴 369 個）を図 3 に示す。2 台のカメラによって 3 次元位置が計測され、ほぼ落下鉛直線に沿って発生している。

図 4 は各球を貫入させたときに油滴が発生する平均深さ Y とそのときの y 方向のばらつき σ_y および直角な水平半径方向のばらつき σ_r を示す。いずれも落下球の直径 D でそれぞれ無次元化してある。半径方向へはほぼ同じ $1D$ 程度の標準偏差で広がっているが、深さ方向には深い場所ほど広くばらついて広がって発生している。

図 5 に粒径のクラス毎の発生位置 Y/D をプロットしたものを示す。前報⁷⁾では細かい油滴は深い所で、大きい油滴は浅い所で発生した傾向を報告したが、図 5 をみる限り、ばらつきのある $\phi 4$ 黄銅球を除いた例でも必ずしも強くそのような関係あるとはいえない。この理由の一つとして、前報の球の表面はつや消し塗料のみであり（接触角が 8° ）であったのに対し、本報では撥水・撥油剤を塗布した（ 53° ）ため、球の表面性状が異なっているものと思われる。

Fig. 3 Position of generated droplets
($\phi 6.07$ Brass)

Fig. 4 Position and deviation of generated droplets

Fig. 5 mean position of generated droplets
for diameter d/D

3.5 油滴の浮遊

つぎに油滴が発生した後、時間経過とともに移動する 3 方向への速度 V_x, V_y, V_z を算出した例（ $\phi 5$ 黄銅球）⁹⁾ を図 6 に示す。図中の ϕ の値は発生した油滴の直径である。

油滴が発生した直後では x, y, z の三方向へほぼ同じオーダの速度をもってランダム運動しているといえる。その後、約 3 秒で収束静止し、垂直上方向へほぼ終端速度で上昇し始めている。細かい油滴がトレーサと考えるならおよそこの例の球の貫入による球周辺流れの乱れた流れによる微小油滴の運動を示していることになり、ランダムな速度は球の貫入速度に比べ $0.5 \sim 1.0$ 倍といえる。

Fig. 6 Velocity of migration droplets
(ϕ 5.05 Brass)

4. 結 言

撥水・撥油剤を塗布した4種類の単一球 (ϕ 4, 5, 6 黄銅球, ϕ 7 ガラス球) を用いて, 水とシリコン油 (動粘度 500 cSt) の界面を貫入させた現象を高解像度カメラ2台で同期撮影した。それぞれ約 30 回の落下実験に対し, 全数の油滴を画像計測によって3次元的に捕捉することができた。

その結果油滴直径 d は落下球直径 D に対して,

1. 油滴個数は狭い単一球 Re 数の変化でも比例して発生している。
2. 油滴直径は狭い単一球 Re 数の変化でも反比例して発生している。(黄銅球)

3. 油滴発生深さは球の種類によって決まり, 油滴粒径クラス d/D に差はない。
4. 油滴発生後 3 秒程度は3次元方向に一樣に, 貫入速度に対しておよそ 0.5~1.0 倍のオーダで動き, その後終端速度で上昇移動している。

実験の遂行や画像計測に本学卒業研究生であった黒川洋旭君の協力があつたことを記し, 感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Iguchi, K. Okita, F. Yamamoto, and T. Uemura : Behavior of a Solid Sphere passing through the Interface between Stratified Two Liquid Layers, J. of Flow Visualization and Image Proceeding, vol. 2(1995), pp. 375~391.
- 2) 米原, 山内, 植村, 重栖, 湯口 : 物体貫入時の液・液界面形状の画像計測, 日本鉄鋼協会講演論文集, vol.10, No.5(1997), p.1030.
- 3) 米原, 植村, 山内 : 物体貫入時の液・液界面現象の画像計測, 可視化情報, vol. 18, Suppl. No.1(1998), p.125~128.
- 4) 米原, 植村, 山内, 井口 : 球体貫入時の液・液界面に生じる随伴流れの計測, 機械学会関西支部 256 回講演論文集, (1998), p.6-13~6-14.
- 5) N.Yonehara, T. Uemura, M. Iguchi, M. Yamauchi : Image Measurement for Analyzing Liquid-Liquid Interface Phenomena Caused by a Penetrating Sphere. Proc. of the 11th Int. Symp. on Transport Phenomena(1998), pp.273~277.
- 6) N.Yonehara, T.Uemura, M.Iguchi, M.Ymauchi : Flow Induced by a Sphere Penetrating Liquid-Liquid Interface, Proc. VSJ-SPIE98, Yokohama(1998), pp.260~261.
- 7) 米原, 植村, 井口, 山内 : 球体貫入時に二液界面で発生する微小液滴の数と寸法の計測, 可視化情報, vol. 19, Suppl. No.1(1999), p.383~386.
- 8) 郷原, 植村, 円形パターン的高速検出と応用: 可視化情報, vol. 18, Suppl. No.1(1998), p.193~196.
- 9) 米原, 植村, 井口, 山内 : 二液界面への球体貫入に伴う液滴発生一寸法, 個数, 位置の分布一: 日本流体力学会年会 2000 講演論文集「ながれ」19 巻別冊(2000), p.455~456.