

# 二相系格子ボルツマン法による液滴自由落下のシミュレーション

## A numerical simulation of a free-falling liquid droplet by a two phase LBM

- 黒田 明慈, 北大工院, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail:kuroda@eng.hokudai.ac.jp
- 夏目 慎也, 島津製作所
- 小林 貴洋, 北大工
- Akiyoshi KURODA, Hokkaido University, N13 W8 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, JAPAN
- Shinya NATSUME, SHIMADZU Co.
- Takahiro KOBAYASHI, Hokkaido University

The behavior of a water droplet of diameter 3.2mm falling in the still air is numerically simulated. A two phase lattice Boltzmann method is used with a new method to reconstruct the surface of the liquid droplet. Unsteady behavior of the falling droplet is reproduced and it is found that the mass conservation is highly improved by the proposed method. It is also found that the shape of the droplet oscillates largely in the initial stage of the calculation and has spindle body elongated in the vertical direction. The wake of the droplet shows the unsteady behavior which makes the droplet move in the horizontal direction.

### 1. はじめに

空気中を自由落下する液滴は、その形状や終端速度などが古くから研究対象とされてきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。数値計算では円管内を自由落下する液滴の解析が行われている<sup>(4)</sup>が、レイノルズ数が低く、軸対称性を仮定したものである。

一方近年、種々の混相流の数値解析手法が提案され、コンピュータの発達に伴って大規模な二相流計算が行われるようになった。本研究では、二相系格子ボルツマン法を用いて気体中を自由落下する液滴の 3 次元挙動の再現を試みる。

### 2. 解析系, 手法

解析対象は静止空気中を自由落下する水滴である。ただし、水滴と共に落下する計算領域を用いた。境界条件としては入口(計算領域下部)と側面で一定速度を与え、出口は自由流出とした。非対称性、非定常性が生じうることに配慮して計算は非定常、3 次元で行った。

計算には横山ら<sup>(5)</sup>によって提案された二相系格子ボルツマン法を用いた。しかし予備計算を行ったところ、横山らの方法では時間とともに質量が無視できないほど減少した。比較的長時間に及ぶ自由落下の計算では、質量、体積の保存は極めて重要である。レイノルズ数など設定条件自体が変化してしまうことになるからである。そこで本研究では次の方法で気液界面を再構築する(識別関数の値をリセットすることとした。

気相の識別関数値を  $\phi_G$ 、液相の識別関数値を  $\phi_L$ 、それらの算術平均値を  $\phi_{ave}$  とする。 $\phi < \phi_{ave}$  の領域(気相部)、 $\phi \geq \phi_{ave}$  の領域(液相部)それぞれの質量積分値を求める。時間の経過とともに質量積分値は変化する(液相部では減少し、気相部では増加する傾向がある)が、これは LBM の衝突と移動過程によって気液界面部で識別関数が拡散するためである。そこで、ある時間ステップの各相の質量積分値と初期質量積分値との偏差に応じて(比例させて)、局所の識別関数値を補正することとした。ただし  $\phi_G$ 、 $\phi_L$  をしきい値としてそれらの値を超えないものとする。密度等の値も補正された識別関数値に応じて修正する。プログラム例を図 1 に示す。

本計算では 200 ステップ毎に上記の補正を行った。補正を行った場合と行わなかった場合の全質量の変化(初期質量に対する変化率)を図 2 に示す。補正を行うことによって質量変化が抑えられ

ていることが分かる。

計算の諸元を表 1 に示す。

```

ratio=1.d0
do k = 0, kz
do j = 1, py
do i = 0, px
if(phi(i,j,k) .ge. phiave) then
phi(i,j,k)=(phi(i,j,k)-phiave)*totalLorg/totalL*ratio+phiave
else
phi(i,j,k)=(phi(i,j,k)-phiave)*totalGorg/totalG*ratio+phiave
end if

if(phi(i,j,k) .ge. phiL) then
phi(i,j,k)=phiL
else if(phi(i,j,k) .le. phiG) then
phi(i,j,k)=phiG
end if
end do
end do
end do
    
```

Fig.1 program to correct identification function  $\phi$   
totalLorg : mass of Liquid phase region at initial step  
totalGorg : mass of Gas phase region at initial step

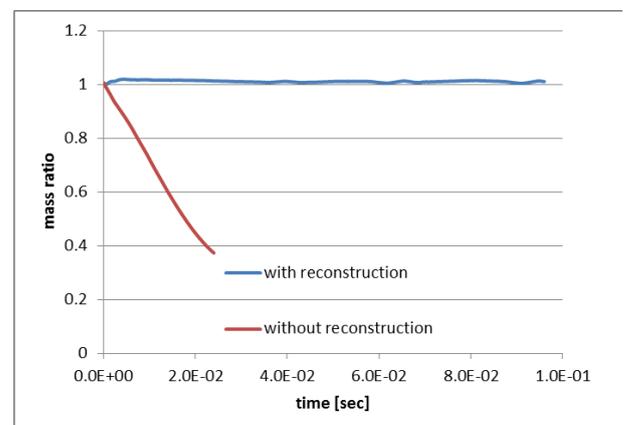


Fig.1 mass change

Table 1 specifications

materials : air and water		
density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2(air)	998.2(water)
viscosity[Pa s]	1.8e-5	8.9e-4
diameter of droplet	3.2mm	
initial velocity of droplet	-8m/s	
gravity	9.8 m/s <sup>2</sup>	
LBM parameters		
velocity of fluid particel	200m/s	
grid spacing	8e-5m	
number of grids	256×180×256	
other parameters	$\tau_f=1.0, \tau_g=1.0, \phi_G =0.2638, \phi_L=0.4031$	
	$k_f=0.06, k_g=5.01e-6, a=1.0, b=1.0, T=0.293$	
other parameters were set referring to Yokoyama et al. <sup>(5)</sup>		

### 3. 計算結果

液滴の落下速度を図 3 に示す。初期の落下速度を-8m/s としたが、いったん落下速度(の絶対値)は低下して、再び 7.4m/s まで上昇するという過程をたどっている。この計算初期の大きな変動は、初期設定速度(-8m/s)と本来の終端速度との間に差があるために空気抵抗を受けたこと、またその空気抵抗(摩擦を含む)によって液滴形状が変化したことによると思われる。落下速度はその後も一定値となることなく、2-3m/s の振幅で変化している。

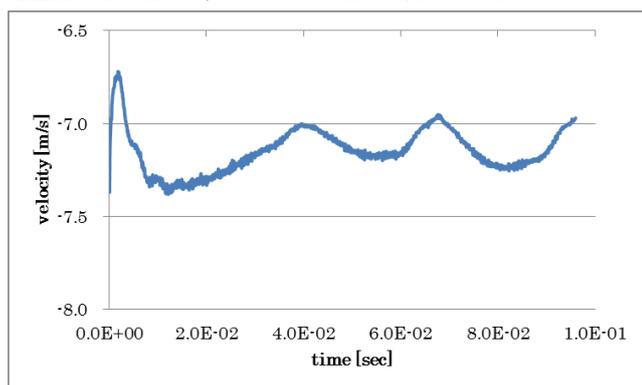


Fig.3 velocity of water drople

図 4 に液滴の落下距離を示す。図 3 では速度変動を拡大して表示しているが、概ね一定速度で落下していることが分かる。

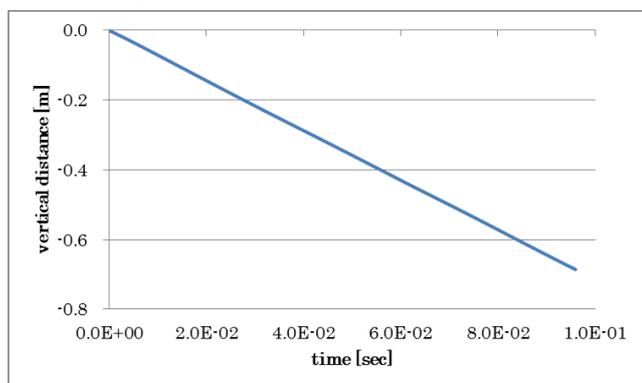


Fig.4 falling distance of the drople

図 5 は液滴の重心位置の水平方向への移動を表したものである。液滴は鉛直方向に直下するのではなく、水平方向へも移動していることが分かる。落下の初期には z 方向に往復し(図では 1 本の線に見えるが,)、やがて-x 方向へ移動し始める。

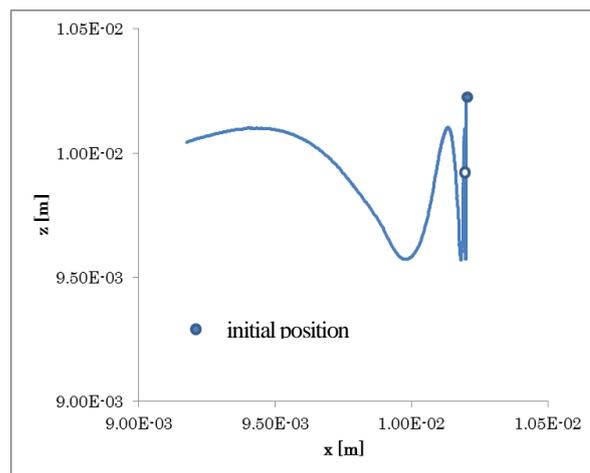


Fig.5 position of the droplet mass center in horizontal direction

図 6 に液滴の形状変化を密度の等値面として示す。また同時に液滴中心を通る断面の速度ベクトルを示す。図は x 軸方向から見たものである。またいずれも液滴に固定した座標系から観察したものである(厳密にいうと、速度ベクトルの長さについては基準を固定するために、図 3 を参考に 7.1m/s で落下する座標系から観察したものとしている)。

落下初期には縦横に伸縮する形状変化が見られるが、次第に振動は治まり、やや鉛直方向に伸びた紡錘形状となる。過去の実験的観察では、液滴は笠状に水平方向に広がる事が報告されている。今回の計算結果がその実験的知見と異なる原因については、現時点では不明である。

また、落下の初期には液滴後流には対称な渦が形成されているが、後流渦の対称性が崩れて揺動するようになる。この後流の揺動が

図 5 に示した液滴位置の変化に関係している(320.0×10<sup>-4</sup>sec は図 5 中の白抜き円の場所に相当する)。また液滴内で回転流動が生じている様子が観察される。後流が揺動しているときは液滴内の流れにも偏りが生じている。

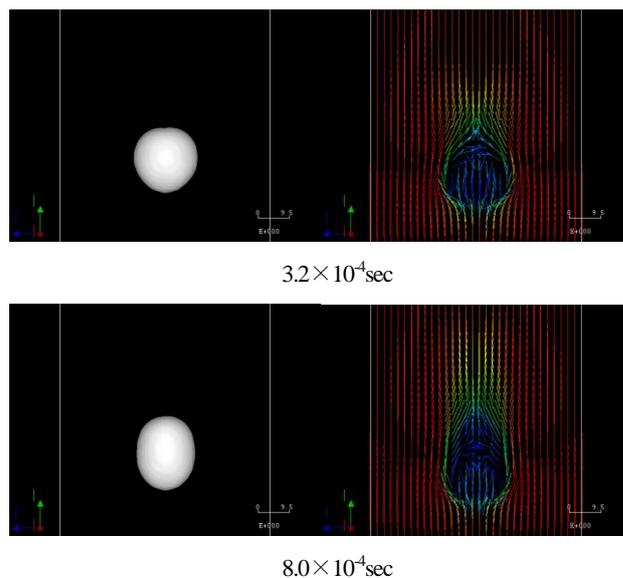
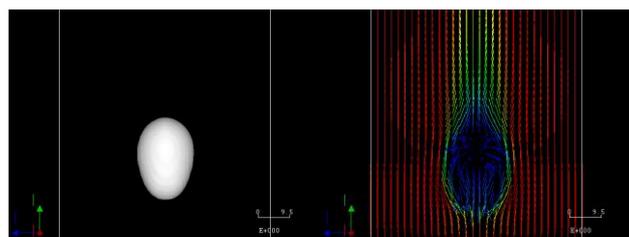
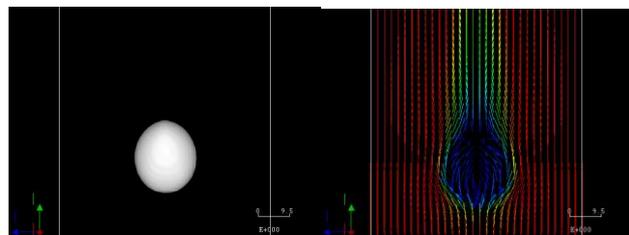


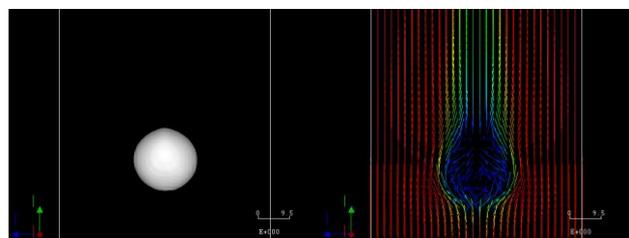
Fig.6 iso surface of density and velocity vectors  
(to be continued)



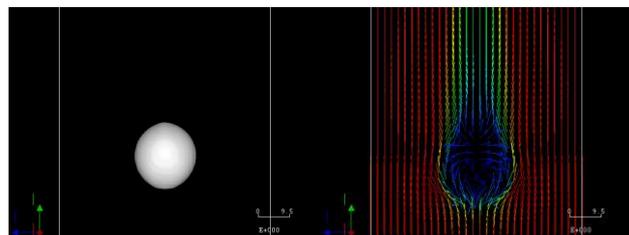
$16.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



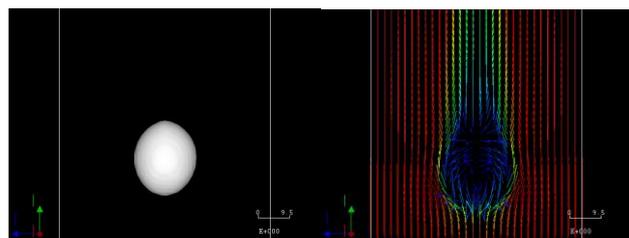
$24.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



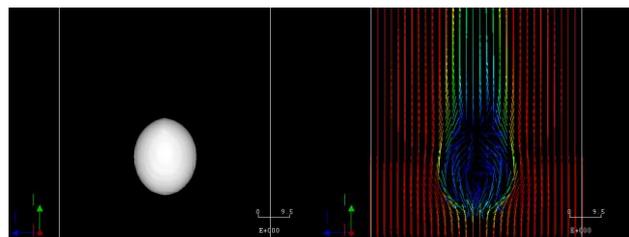
$32.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



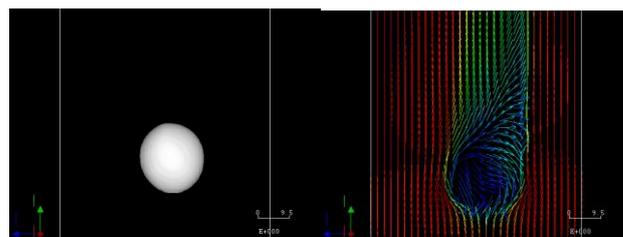
$40.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



$48.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



$56.0 \times 10^{-4} \text{sec}$



$320.0 \times 10^{-4} \text{sec}$

Fig.6 iso surface of density and velocity vectors

#### 4. 結言

稲室らによって提案された二相系格子ボルツマン法を用いて空中を自由落下する水滴の挙動を計算した。

気液界面での再構築する方法を考案して、本計算に適応した。その結果、

(1) 気液界面を再構築することによって計算領域中の質量が精度よく保存されることを示した。

(2) 落下する液滴の非定常挙動が再現された。

しかしながら、液滴形状については実験的観察と異なっていた。

本研究で使用した LBM プログラムの作成に当たって京都大学稲室隆二教授に貴重な助言を戴いた。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 岩井, 近藤, "種々の液滴の落下中の形について (2)," 天気, 23 巻 7 号 (1976), pp. 373-379.
- (2) 張, 宮川, "遷移域における落下液滴の抗力について," 八戸工業大学紀要, 第 6 巻 (1986), pp. 142-148.
- (3) Ono and Kawai, "Free Fall Mechanism of Micro Liquid Droplet," J. photopolymer science and technology, 23-3(2010), pp. 363-366.
- (4) 本間, 山端, 古閑, "円管内を自由落下する単一液滴の運動の数値解析," SCEJ 73rd Annual Meeting (Hamamatsu, 2008), A119.
- (5) 横山, 田中, 稲室, "大きな密度比の気液二相流に対する新しい二相系格子ボルツマン法の開発," 第 26 回数値流体力学シンポジウム, B03-1 (2012).