

# 静止流体中をジグザグ上昇運動する単一気泡の重心運動と界面運動

Motion of the center of gravity of a zigzag-rising bubble  
and its interfacial motion in a rest water column

○学 宮本悠樹 (静大工)

学 熊谷彰哲 (静大院)

学 安間 優 (静大院)

正 齋藤隆之 (静大工)

Yuki MIYAMOTO, Akinori KUMAGAI, Suguru ANMA, Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

**Key Words;** Multiphase flow, Single bubble, Interfacial motion, Curvature

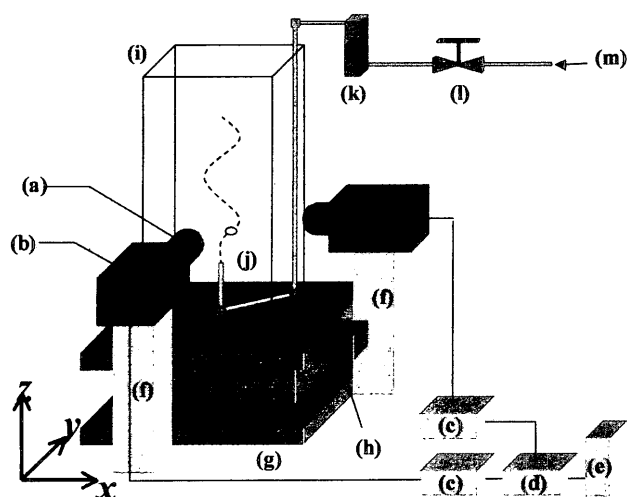
## 1. 緒言

ガスリフト効果を利用してCO<sub>2</sub>を深海に固定するシステム (GLAD システム)<sup>1,2)</sup>においては、気泡に含まれるCO<sub>2</sub>の溶解を制御しなければならない。溶解プロセスは種々のスケールにまたがるが、中でも気泡界面運動は気泡と周囲液相間の物質移動のメカニズムを解明する上で重要である。

本研究では、静止流体中をジグザグに上昇する単一気泡の微視的な界面運動を明らかにして、ジグザグ運動と界面運動との関係を考察することを目的とする。マイクロズームレンズを装着した2台の高速ビデオカメラを用いて気泡の動的な三次元形状を可視化撮影した。これを画像処理して、気泡の重心位置・弦長・気泡形状を算出して、気泡重心運動と界面運動の関係を考察する。

## 2. 実験装置と方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。150×150×300mm のアクリル製矩形水槽(i)に煮沸脱気したイオン交換水を深さ 270mm まで満たし、水槽底中央に設置した注射針(j)(内径 0.65mm)から純空気気泡(平均球等価径 2.52mm)を約 2 秒間隔で射出する。このとき気泡はジグザグ軌道を示した。ジグザグ軌道面(x-z)を Front, それに直行する面(y-z)を Side とする。Front, Side 各々に専用ストロボを光源とした高速ビデオカメラ(b)(NAC 社 HSV-500C<sup>3</sup>, 500Hz, 496×332pixel)を設置し、10.28×6.88mm の視野を同時に可視化した。

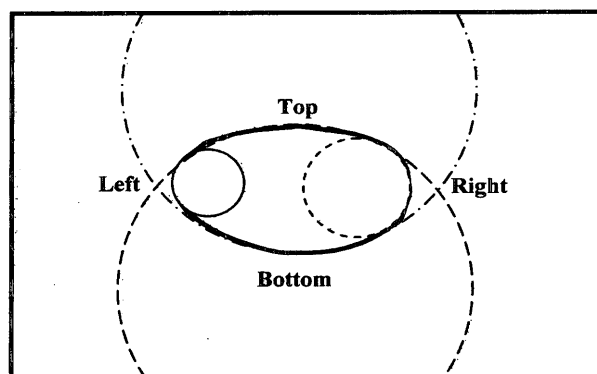


**Fig. 1: Experimental setup**

(a) Zoom lens, (b) CCD camera, (c) MEMRECAM, (d) Synchronizer, (e) Computer, (f) Multi Axis Stage, (g) Precision Labjacks, (h) Laser Displacement Sensor (i) Acrylic water vessel, (j) Needle, (k) Flowmeter, (l) Mass flow control value, (m) Cylinder

また精密ステージ(f), 精密ラボジャッキ(g)とレーザ式変位センサ(h)(KEYENCE 社製 LB-300)を組み合わせて視野の移動量を正確に測定した。

撮影点は注射針先端から 4.5mm 間隔で合計 20 点とし、注射針先端から高さ約 90mm 間を計測した。各点において気泡 30 個を可視化撮影した。画像解析して気泡を特徴付ける重心位置・弦長・傾斜角・輪郭座標を求めた。特に気泡形状においては非軸対称な形状変化を捉えるためにアスペクト比だけでなく、Fig.2 で示すように上下左右4つの曲率で表すこととした。これにより左右非対称な形状変化を容易に捉えることが可能となる。さらに気泡の重心運動に対応する各要素の変化を周波数分析して、その特性を把握した。



**Fig. 2: Bubble shape characterized via four circles**

## 3. 結果と考察

気泡重心運動の軌跡を Fig.3(a)に示す。ジグザグ運動の振幅は 6.54mm, 波長 42.6mm, 周期 141ms(周波数 7.07Hz)であった。気泡平均上昇速度 297mm/s, 気泡レイノルズ数 747, Morton 数  $2.28 \times 10^{-11}$ , Eötvös 数 0.855 である。このとき気泡形状は Bhaga and Weber<sup>3)</sup> のチャート図から扁平回転楕円体に分類されることを確認した。投影画像により気泡形状を計測することから、気泡オリエンテーションによっては短軸が真の値よりも長く計測されることがある。本研究では Side 画像における長軸の傾きが±5度以内であった。この長軸の傾きが、Front 画像による短軸計測へ及ぼす影響は 1%程度であると計算される。以上から、気泡のオリエンテーションによる短軸計測への影響は小さいと考え、補正は行わないこととした。

Fig.3(b)は Front のアスペクト比, Fig.3(c)は Front と Side の長軸の比を表している。Front のアスペクト比は、気泡射出からジグザグ運動を始めるまでの区間において急激に減少し、ジグザグ運動開始時点から周期的な変動が発生する。ジグザグ運動の開始とともに界面の周期的運動が開始する(逆に、

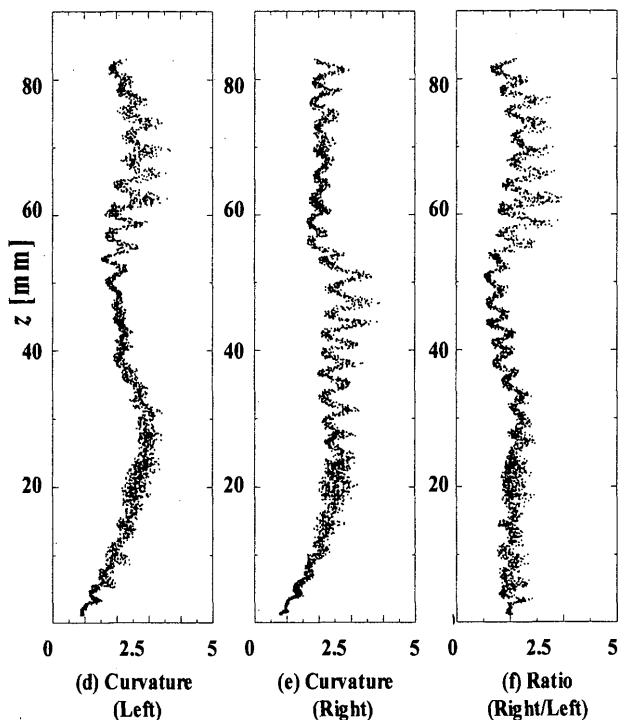
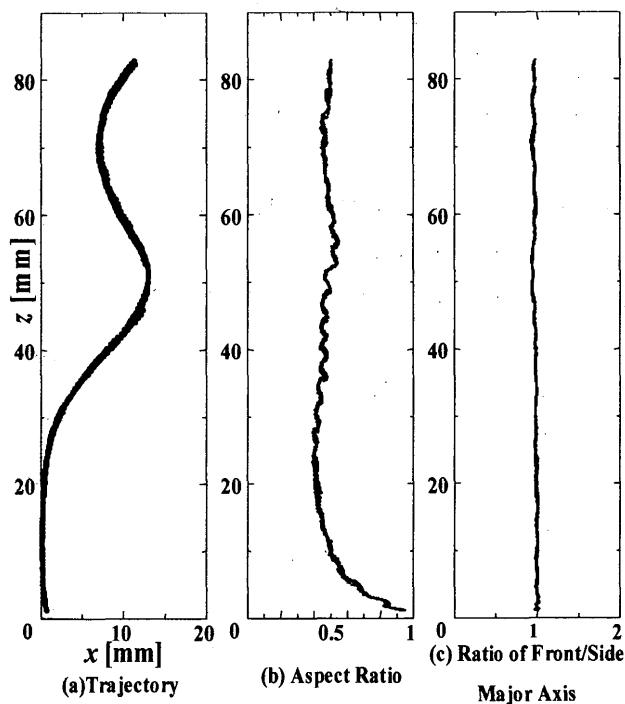


Fig. 3: Correlation analysis of the bubble interface

界面の周期的運動の開始とともにジグザグ運動が始まる)。またアスペクト比がもっとも減少する、すなわち気泡形状が最も扁平となる点は変曲点ではなくジグザグ運動を開始する点付近であることがわかる。Fig.3(c)はFrontとSideの長軸径の比を示し、その比が1前後をとっている。したがって気泡断面形状はほぼ真円を保ったままであることがわかる。なお、確認のために気泡のFrontの傾斜角が0度付近となる変曲点において水槽上部方向から気泡を撮影し(Fig.4)、その円形度( $0 < \text{円形度} \leq 1$ , 真円のとき1)を求めたところ平均0.989であった。

Fig.3(d)および Fig.3(e)は気泡の左右エッジ部における曲率の経時変化を示している。気泡が垂直に上昇する場合には左右の曲率はほぼ同程度となり、気泡形状は左右対称である。ジグザグ運動を開始すると左右の対称性が破綻する。特に

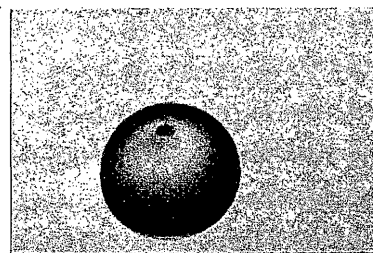


Fig. 4: The bubble image captured from over view

Right側では早い段階で周期的な変動が発生するのに対して、Left側では1回目の変曲点を過ぎてから振動が発生している。また2回目の変曲点ではRight側よりLeft側に振幅の大きな振動が発生している。これはジグザグ軌道の外側では内側よりも液相の圧力変動が大きいためであると考えられる。Fig.3(f)は気泡左右エッジ部の曲率の比を表している。ジグザグ周期と同様な大きな振動と、これにスーパーインポーズした小さな振動の二種類の振動が起こっているのがわかる。また変曲点において外側よりも内側の曲率が2倍程度高いことから、外側のエッジ部において発生する渦による液相の圧力変化の影響を受けていると思われる。このようにジグザグ軌道で上昇する気泡の界面運動は非対称であり、また周期的な変動であることが分かった。

これらを高速フーリエ変換により解析した。その解析結果の一例を Fig.5 (曲率比のFFT結果) に示す。ジグザグ周期の低周波と80~90Hzの高周波域のスペクトルが特に高いことがわかる。Fig.3(b), Fig.3(d), Fig.3(e)においても同様な結果となった。したがって気泡の形状を特徴付けるいずれの要素にも同様な高周波成分がみられたことから、本研究で対象とした気泡の界面運動においては、80~90Hzの比較的高い周波数の振動が存在することがわかった。

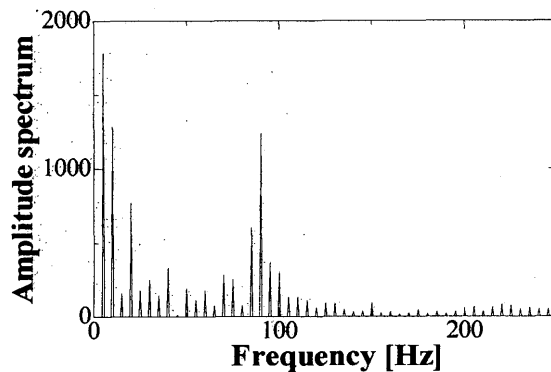


Fig. 5: Frequency analysis via FFT

#### 4. 結言

高速ビデオカメラを用いて微視的に分析を行うことで気泡の界面運動には周期性があり、またその特性を捉えることができた。これらの結果より気泡の界面運動は直線軌道の場合は点対称、ジグザグ軌道を取る場合は、軌道面を中心とする面対称であることが推測される。すなわち気泡の形状変化はジグザグ軌道面上における面対称な形状変化である。また、その変動は80~90Hzの周波数域の振動を伴うものであることが分かった。科学研究費補助金基盤(A)13355008により実施したことを付記する。

#### 5. 参考文献

- [1] T. Saito, et al.: *Environmental Science & Technology*, **34**, 4140-4145, (2000).
- [2] T. Saito, et al.: *Energy & Fuels*, **15**, 285-292, (2001).
- [3] Bhaga, D, and M. E. Weber, *J. Fluid Mech.*, **105**, 61-85, (1981)
- [4] Christoph Brucker, *Phys. Fluid*, **11**, 1781-1796, (1999).