レーザー干渉計測によるマイクロバブルの

幾何学的、運動学的特徴の評価

Evaluation of geometric and kinematic features of microbubbles by laser interferometry

北海道大学工学部4年 ○学生会員 大平琉偉 (Rui Ohira) 北海道大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1.はじめに

砕波あるいは強風時の外洋では、砕波に伴い大量の気泡が海 中に混入される. 混入気泡は大気-海洋間の気体、熱、運動量 輸送に大きくかかわるため、海洋環境の予測の観点で重要であ る.

Deane and Stokes(2003)¹⁾によると、砕波初期でのジェットの 水に伴う微細気泡を中心とした混入のフェーズの後、エアチュ ーブの崩壊に伴う幅広いレンジの分裂気泡が生成される.気泡 サイズ分布は、乱れによる気泡分裂の限界径(Hinzeスケー

ル)を境に小径側 $a^{-\frac{3}{2}}$,大径側に $a^{-\frac{19}{3}}$ の対数スケールで記述さ れている(ここでaは気泡半径).一方、Xiangming Yu et al. (2020)²⁾は自由水面乱流中の混入気泡について次元解析を行

い、サイズ分布が表面張力に支配される $a^{-\frac{1}{3}}$ と重力に支配され

るa⁻³の対数支配を持ち、これら異なる勾配のしきい値となる スケールもHinzeスケールとは異なることを解析的に導いてい る.これは気泡の画像解析によるDeane and Stokes (2003)の結果 の内、特に画像抽出に困難が生じる微細気泡の計測の曖昧さに 起因している可能性があり、高精度の起草計測技術の導入が望まれる.

レーザー干渉計測は、球形飛沫表面上を反射するレーザー光線と飛沫中を屈折し通過するレーザー光線との光路差に起因して生じる干渉縞から飛沫径を計測するものであり、µmスケールの微細飛沫に対しても適用可能である(Yuzuru Niwa et al.,2000³⁾)

Yuzuru Niwaら(2000)は、同計測法を気泡径計測に適用し、 矛盾なく気泡サイズを計測可能であることを明らかにしている.さらに、本計測法は画像中の干渉縞パターンの追跡により、対象気泡の速度も同時に取得可能であり、砕波混入気泡の 幾何学的、運動学的特徴の抽出に有利である.

本研究では、海洋中の気泡と同程度のサイズ分布をもつ水の 電気分解による気泡群に対してレーザー干渉計測を適用し、そ の精度並びに信頼性評価を行い、砕波気泡計測への導入を目指 すものである.

2.計測原理

本研究で使用するYuzuru Niwa (2000) が気泡径計測に適用 したレーザー干渉計測について概略する.この計測法では球形 気泡表面上を反射するレーザー光線と気泡中を屈折し通過する レーザー光線との光路差(図-1参照)によって生じる干渉縞 を高速カメラで撮影する.撮影画像をもとに、干渉縞の本数の 取得やパターン追跡を行う.それらのデータをもとに数値計算 を行い気泡径や気泡速度を導き出す.気泡径においては、図-1に示されている二つのレーザー光線のみを考え、スネルの法 則や幾何学分析を用いて気泡径を求めることができる.

$$d = \frac{2\lambda N}{m\alpha} \cdot \frac{1}{\cos(\theta/2) - \frac{\sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m\cos(\theta/2) + 1}}}$$
(1)

ここで、dは気泡径、 λ はレーザー光線の波長、Nは干渉縞の本数、mは相対屈折率、 α は画角、 θ は散乱角(図—2)を表す. λ 、m、 α 、 θ は実験装置ごとに決まった数であるので、干渉縞の本数を取得することができれば気泡径を得ることができる.



図-1 表面反射光と内部屈折光(上) (赤色;表面反射光 青色;内部屈折光)



図-2 画角と散乱角

3.実験方法

3.1レーザー干渉計測

Niwa Yuzuruら(2000)が行ったレーザー干渉計測を電気分解によ る気泡群に対して適用した.実験装置の概略を図-3に示す. 0.5%のNaCl水溶液を水槽(幅29cm,奥行き9cm)に水深20cmに なるように入れる.陽極には円柱状のチタン合金(直径 3 mm)を折り曲げたものを,陰極には円柱状の炭素棒(直径1.8 cm)を使用した(図-4).レーザー光源は波長が532nm,高速 カメラは画角が15.3°のものを使用した.レーザーをパウエル レンズにあて、シート状に変形させたもので気泡を照らす.そ れを高速カメラで撮影し、目視で干渉縞の本数を数える。得ら れた干渉縞の本数を用い、気泡径を数値計算する.

本実験では0.5%のNaCl水溶液を用いているが、溶液の絶対 屈折率を水と等しいものとみなした.したがって、相対屈折率 は水素に対する水の相対屈折率を考えた。また、実験では 0.01Aの電流を流し気泡を発生させた。



図-3 実験装置の概略図



2.5cm



図-4 陽極(上)と陰極(下)

3,2バックライト実験

レーザー干渉計測との比較を行うために行った。レーザー干 渉計測とほとんど同様のセットアップであるが、レーザーの代 わりにLEDで水槽の背後から気泡を照らし、気泡を直接高速カ メラで撮影する(図-5)。また、電流を1A流して気泡を発生 させた。撮影した画像はlevel-set法(Watanabe et al, 2015⁴⁾)を 用いてエッジを検出し、バイナリー画像に変換する。それを matlab上で解析し、気泡の直径を求める。



図-5 バックライト実験の概略図

4.結果

4.1 数値計算

図-6は(1)式を用いて行った数値計算の結果である。干 渉縞の本数Nは自然数であるので、本実験で用いた実験装置を 使用した場合、計測できる最小の気泡径は干渉縞の本数が一本 の時で、0.9175µmである。また、干渉縞の本数が80本の時、気 泡径は91.7µmとなる。



図-6 干渉縞の本数と気泡径の関係

4.2レーザー干渉計測

レーザー干渉計測を行い、実際に撮影された画像(図-7) を用いてヒストグラム(図-7)を作成した。図-8から0~4 µmのサイズが多いことが確認できる。



図-7実際に撮影された干渉縞



図-8干渉縞を用いて作成されたヒストグラム

4.3バックライト実験

バックライト実験によって作成したヒストグラム(図-9) を下記に示す。気泡径の小さい領域では気泡多く存在し、気泡 径が大きくなるにつれて次第に気泡の数が少なくなっていって いることが分かる。また、20µm以下の気泡径を測定できてい ないことも図から読み取れる。



図-9 バックライト実験によって作成したヒストグラ ム

5. 考察

結果4からバックライト実験では観測できなかった気泡サイズの領域についてレーザー干渉計測では測定できることが分かった。しかしながら、レーザー干渉計測では、干渉縞の本数を 目視で計測したことなど、得られたデータに疑問が残る。

6. まとめ

本稿では、レーザー干渉計測の原理について概説し、レーザ ー干渉計測を行った。また、その結果と比較するためにバック ライト実験も行った。それら、二つの比較から、レーザー干渉 計測が径が小さい領域の気泡を測定することに優れていること を示した。しかしながら、レーザー干渉計測では干渉縞の本数 を目視で測定したので、そのデータの正確性に疑問が残る。ま た、測定の効率面にも悪影響を及ぼしている。そこで、今後の 目標として、干渉縞の本数を計測するプログラムの導入し、サ ンプル数を増やすことを目指す。また、気泡の速度の計測も目 指していく。

参考文献

- Grant B. Deane and M. Dale Stokes : Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves , Nature Publishing Group, Vol.418, 2002
- 2) Xiangming Yu et al. : Scale separation and dependence of

entrainment bubble-size distribution in free-surface

turbulence, J. Fluid Mech., Vol.885, 2020

- Yuzuru Niwa et al. : Bubble Sizing by Interferometric Laser Imaging, 2000
- Y. Watanabe and D. M. Ingram :Transverse instabilities of ascending planar jets formed by wave impacts on vertical walls, Proc. R. Soc A471, 2015