

高濃度ウルトラファインバブル生成装置の開発と

レーザ回折・散乱法を用いた個数濃度の測定

Development of high-concentration ultrafine bubble generator and measurement of number concentration by laser diffraction method

小林秀彰(IDECA), 前田重雄(IDECA), 西原一寛(IDECA), 藤田俊弘(IDECA),

丸山充 (島津製作所), 島岡治夫 (島津製作所)

KOBAYASHI Hideaki, MAEDA Shigeo, NISHIHARA Ikkan, FUJITA Toshihiro, MARUYAMA Mitsuru, SHIMAOKA Haruo

Abstract Superior ultrafine bubbles generation technology has been developed by optimizing the ultrafineGaLF construction, resulting in far higher ultrafine bubble concentration. Laser diffraction method will be an extremely effective with fine bubble measurement method once the technology is mature, as it can be used over a wide range of particle diameter and number concentration without significant pre-processing. The ultrafine bubble water generated with this technology was measured for number concentration using laser diffraction method, and was found to have an ultrafine bubble concentration of over $1\text{E}9$ bubbles/mL. A comparison of experimental results showed that laser diffraction method is more accurate than particle tracking analysis in terms of measuring bubble diameter distribution and number concentration.

Keywords: Ultrafine bubbles, Laser diffraction method, ultrafineGaLF, Number concentration

1. 緒言

GaLF (Gas Liquid Form) 方式は、加圧溶解法による気泡生成方式の一種であり、管路断面積の増減作用によりファインバブルを生成する方式である[1]。直径 $1\mu\text{m}$ 以下のウルトラファインバブル (UFB) を含有する水の応用分野として植物栽培、医療、食品、薬品、半導体製造、太陽電池製造などの幅広い分野で研究が進められている。UFB の産業応用を進めるためには、UFB の更なる高濃度化と UFB 特性を定量的に評価する手法が必要不可欠である。

当社ではこれまでに気体吸引部分を拡大管路から平行管路への変更、気液溶解管路の流速・圧力などの最適化、管路出口の減圧部分に平行部を設けて減圧時の流速を安定させるなどの改良を行い、Fig. 1 に示す流量 $0.24\text{ m}^3/\text{h}$ の第3世代の UFB 発生装置 (ultrafineGaLF) を開発した。この UFB 発生装置においては 1mL あたり 1.0×10^8 個以上の UFB を生成することが可能である[2]。

また、これまで高精度計測技術の確立に向けた検討を行ってきた。2009 年頃より GaLF 方式により生成した UFB の測定を 5 種類 10 台の異なる計測装置を用いて行うこと

で、直径 $100 \sim 200\text{ nm}$ 程度で UFB が存在することを定量的に明らかにした[3]。

レーザ回折・散乱法については、2012 年に粒子トラッキング解析法による個数濃度と散乱光強度の関係を導出することにより定量測定の可能性について検討を行った。個数濃度と散乱光強度は正の相関があることを確認しており、レーザ回折・散乱法による個数濃度計測の可能性を示唆した[4]。2015 年には異なる濃度の UFB を含有した水の個数濃度の測定を行い、粒子トラッキング解析法による同一サンプルの測定結果との比較を行った。その結果、UFB 径分布および個数濃度ともにほぼ一致しており、レーザ回折・散乱法はファインバブルの測定に非常に有効であることがわかった[5]。

本研究では、構造を最適化することにより、従来よりも高濃度のウルトラファインバブルを生成可能な第4世代の装置を開発し、レーザ回折・散乱法を用いて個数濃度を測定することにより装置性能を確認するとともに粒子トラッキング解析法による結果との比較を行った。

	3rd generation	4th generation
	ultrafineGaLF (FZ1N-02)	ultrafineGaLF (FZ1N-10)
Pump type	Rotary vane pump (Carbon)	Multistage centrifugal pump (Stainless steel)
Wetted parts	Stainless steel	Stainless steel
Water flow rate	$0.24\text{ m}^3/\text{h}$	$1.0\text{ m}^3/\text{h}$
Important notice	When foreign material gets mixed, an impeller is damaged, and carbon may get mixed with the bubble water	There is little possibility of carbon mixture from the generator
Appearance of the UFB generator (GaLF)		

Fig. 1 Comparison of the 3rd generation and the 4th generation of GaLF.

2. UFB 生成システム

近年, UFB の応用分野の拡大とともに UFB の高濃度化が期待されている. このため圧送用のポンプ形式を見直すとともに気体吸引器, ミキシングボックス, 管路出口の減圧ノズルを最適設計することにより UFB 個数濃度を大幅に向上した第 4 世代の GaLF 方式を開発した. また Fig. 1 に示すように UFB 生成流量も第 3 世代に比べて約 4 倍の $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ を実現した. 第 4 世代の GaLF 方式では第 3 世代で使用していたカーボンペーンを有するポンプに替わり多段渦巻きポンプを用いることにより, 可能な限り UFB 生成時の異物の混入を防いだ構造となっており, 応用範囲の拡大に寄与している.

3. UFB 計測装置

UFB の粒子径分布測定には島津製作所製ファインバブル径測定システム SALD-7500X10 を用いた. Fig. 2 は SALD-7500X10 の測定部の構成図である. セル中のファインバブルにレーザ光が照射され, ファインバブルから散乱された光はレンズによって集光された後に, 散乱角度に依存した光強度分布パターンを結像する. 光強度分布パターンを複数の検出素子から構成される前方散乱光センサおよび側方・後方散乱光センサで検出し, 解析することによってファインバブル径分布 (バブル径と個数濃度) を求める. 粒子径と濃度が既知である標準粒子を用い校正と Mie 散乱理論に基づく補正を組み合わせることで測定条件を最適化することで, 個数濃度として粒子 (バブル) 量を求めることが可能である[6].

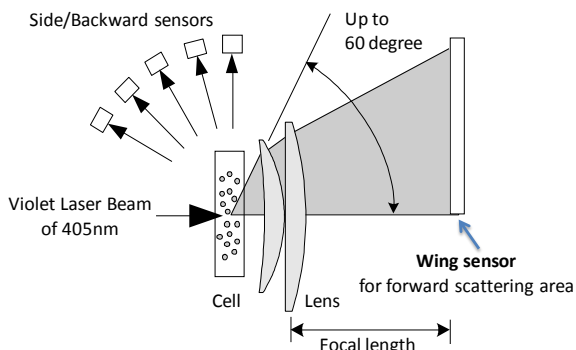


Fig. 2 Schematic image of laser diffraction system for measuring of fine bubbles.

4. 実験方法

UFB は第 3 世代および第 4 世代の ultrafineGaLF を用い作製した. 原料水としてはバックグラウンドとして検出される粒子数をできるだけ少なくするため超純水 (Milli-Q 水), バブルを生成するためのガスとしては空気を用いた.

作製した UFB 水を SALD-7500X10 を用いて計測し, 径分布および個数濃度を算出した. さらに同一サンプルを粒子トラッキング解析法を原理とした NanoSight NS500 を用いて計測を行い, レーザ回折散乱法と粒子トラッキング解析法の比較を行った.

5. 実験結果および考察

Fig. 3 は第 3 世代および第 4 世代の ultrafineGaLF により生成したサンプルをレーザ回折・散乱法を用いて測定した

UFB 径分布である. 縦軸は 1 mL あたりに含まれる個数濃度を示している. 粒子トラッキング解析法による UFB からの散乱光画像も併せて示す. なお第 4 世代の散乱光画像は, UFB が高濃度であり画面全体に UFB が存在するため, 白く見える画像となっている.

今回開発した第 4 世代の ultrafineGaLF は第 3 世代に比べて高濃度の UFB を生成できていることがわかる. 粒子トラッキング解析法を用いた高濃度 UFB の計測には希釈処理が必要であり, 高濃度の UFB を生成可能な第 4 世代の ultrafineGaLF の評価には, 希釈処理無しに計測が可能なレーザ回折・散乱法が適している.

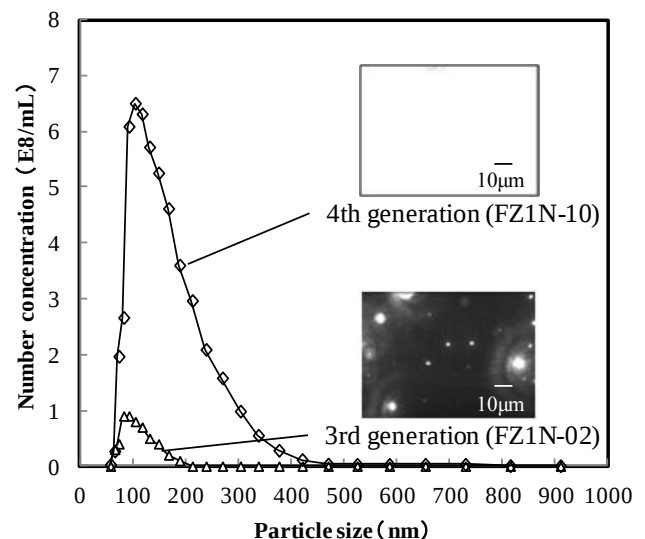


Fig. 3 Size distribution of UFBs measured by particle tracking analysis method and scattered-light image.

6. 結言

UFB 生成装置 ultrafineGaLF の構造を最適化し流量を拡大することにより, 従来よりも高濃度の UFB を生成可能な第 4 世代の ultrafineGaLF を開発した. レーザ回折・散乱法を用いて個数濃度を測定したところ, 第 3 世代に比べて非常に高濃度の UFB が生成されていることを確認した. 粒子トラッキング解析法による散乱光画像との比較においても, 高濃度の UFB が生成されていることが確認された.

参考文献

- [1] 柏雅一ほか, 日本混相流学会年会講演会 pp.428-P429 (2011).
- [2] 前田重雄ほか, 日本混相流学会年会講演会 pp.430-431 (2011).
- [3] 前田重雄ほか, 混相流シンポジウム 2014 講演論文集, D124 (2014).
- [4] 小林秀彰ほか, 日本混相流学会年会講演会 2012 講演論文集, pp. 38-39 (2012).
- [5] 小林秀彰ほか, 混相流シンポジウム 2015 講演論文集, E115 (2015).
- [6] Totoki, S. et al., Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol. 104, 618–626 (2015).