

マイクロバブルを用いた液滴の微粒化

富山大学工学部
工学科 機械工学コース
川口 清司

はじめに

液体の微粒化技術は現在、内燃機関・噴霧塗装・農業・化学・食品・医療品など多くの分野に応用されており、環境問題や省エネルギーの問題にも直接関係している。例えば、内燃機関のような連続燃焼装置では、液体燃料を効率よく燃焼させるために、まず液体を微細な噴霧にし、燃料の表面積を増加させて蒸発の促進を図る必要がある。また、農業分野では農薬を散布する際に少量の農薬を広い面積に様に散布するために、農薬の微粒化が必要になる。その他、医薬品や食料品製造分野では顆粒体を製造する際に、液滴を乾燥させて固体粒子を生成する噴霧造粒法が用いられているが、微粒化した液滴を大量に製造する必要がある。

上記の問題を解決するために、低コストで噴霧可能な微粒化装置が求められているが、大きな液体の状態から直接小さな液滴を生成することは困難で

あり、外力を加えて液体を液膜あるいは液柱、さらに細い液糸に変化させ界面の不安定性などを利用して液滴へと分裂させる必要がある。そのため、課題は多くのエネルギーが必要となることである。

近年、マイクロバブルと呼ばれる直径が数十 μm 以下の微細気泡が注目されている。このマイクロバブルは、直径が数 mm のミリバブルにはない様々な特性を有しており、例えば水の浄化作用、油水分離作用、生物の成長促進、摩擦抵抗の低減作用等が報告されている (S. Deutsche *et al.* 2004; 後藤 2006)。このマイクロバブルを液体中に混入させることにより、液体の微粒化効果が期待できる。

そこで、本稿では水を対象として、マイクロバブル径やボイド率を変えた場合、マイクロバブル混入水を噴射することによって、更なる微粒化が可能かどうかを検討した研究 (川口 2020) について紹介する。

1. マイクロバブル発生方法

先述したようにマイクロバブルは広い範囲で応用されているが、図-1に主なマイクロバブル発生方法について示す。多孔質膜に存在する微細孔から空気を押し出す多孔質方式、水の中に空気を注入してモータにより空気を微細気泡に分裂させる機械方式、ベンチュリー管を用いて気泡を崩壊・収縮させてマイクロバブルを発生させるベンチュリー方式、図-2に示すような空気と水の二相流を高速で旋回させ速度差によって生まれるせん断力で気泡を微細化させる二流体ノズル方式 (旋回流方式)、その他に加圧して空気を溶解させた水を減圧することで過飽和を起こし気泡を析出させる加圧溶解方式などがある。

一般に微細で均一なマイクロバブルを発生させるためには、高圧を発生させるポンプと大掛かりな装置が必要となるため、マイクロバブル発生装置の

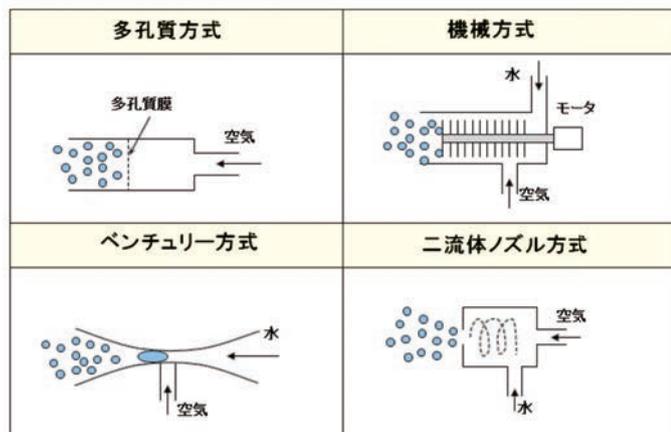


図-1 マイクロバブル発生方法

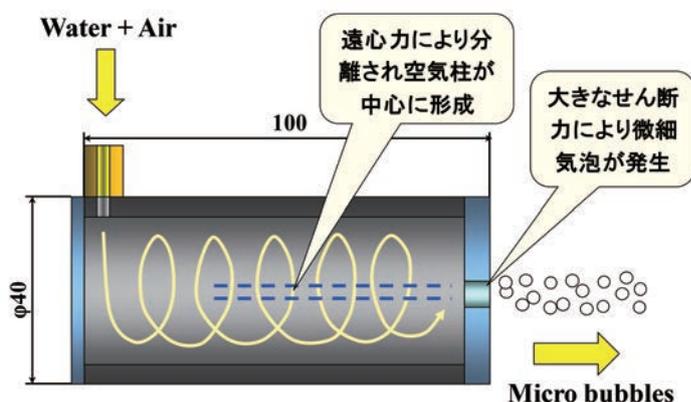


図-2 旋回流式マイクロバブル発生器

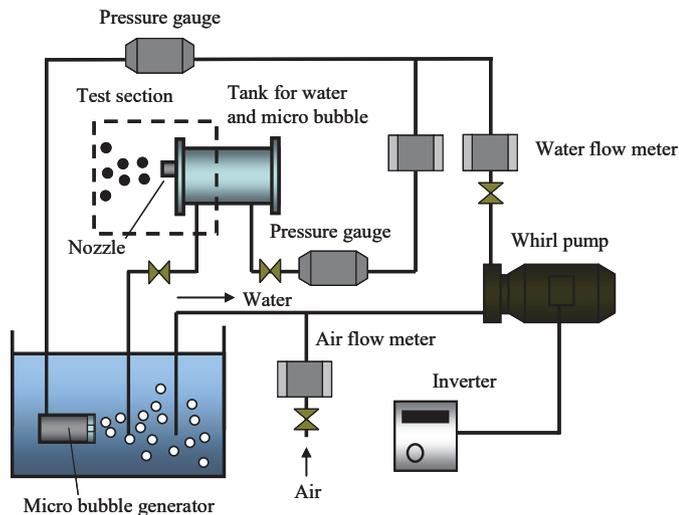


図-3 マイクロバブルを用いた液滴微粒化実験装置

導入や長期にわたって駆動させる場合に、設置場所やコストの面が課題として挙げられる。マイクロバブルを発生させる際の圧力を低減することは、使用するポンプを小さくすることができ、安価な渦巻きポンプで代用が可能となるため、コストや設置場所などの面で有利になると考えられる。本研究で取り扱う旋回流方式は、他の発生方式と比較して簡単な構造で微細な気泡を発生させることができ、さらなる低圧力化を見込むことができると考えられる。

2. マイクロバブルを用いた液滴の微粒化方法

マイクロバブルを用いた液滴微粒化実験装置の全体図を図-3に示す。実験装置はマイクロバブル発生セクションと液滴微粒化を行うテストセクションから構成される。

マイクロバブル発生セクションでは、マイクロバブルを水槽の中で発生させるために、旋回流式マイクロバブル発生器を用いた。この発生器は中空円錐状の渦流室側面に偏心させて設けた流入口から水と空気が供給され、渦流室内部で高速の旋回流が形成される構造となっている。そのために、高い

吐出圧を発生できる渦流ポンプを用いて、高圧水をマイクロバブル発生器へ供給している。渦流ポンプの回転数はインバーターで調節し、バルブで圧力を調節すると共に、高精度面積式流量計を用いて供給水の流量を測定した。マイクロバブル発生器へ供給する水の圧力は、精密ブルドン管圧力計で測定した。空気はポンプの吸い込み側から吸入負圧を利用して水に混入される。吸入空気流量は、流量測定のために設けた高精度面積式流量計に付加されたバルブによって調節する。

液滴微粒化を行うセクションでは、ポンプから吐出されたマイクロバブル混入水がバブル混入水槽に供給される。供給水量はバルブで調節され、高精度面積式流量計を用いて測定する。また、供給圧力は精密ブルドン管圧力計を用いて測定する。バブル混入水槽の端面には微粒化を行うためのアトマイジングノズルが設けられている。本実験ではアトマイジングノズルとして、低圧力噴霧時に比較的均一な粒子径を得ることができ、かつ良好な噴霧状態を維持することができるホロコーン型渦巻噴射弁を使用した。図-4にホロコーン型渦巻噴射弁の構造を示す。オリフィス径は0.51mm、スプレー角は45～95°である。

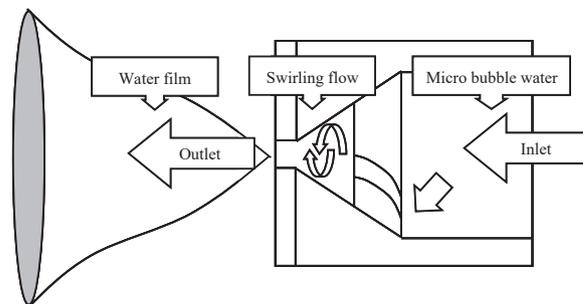


図-4 ホロコーン型渦巻噴射弁の構造

3. マイクロバブルの気泡径とボイド率測定

水槽内におけるマイクロバブルの水に対する充填率であるボイド率の測定画像を図-5に示す。ボイド率は0.05%、マイクロバブル平均直径は44.1 μmである。通常の撮影では焦点深度以外のマイクロバブルまで撮影されているが、画像処理によって焦点深度内のマイクロバブルのみを選択的に取り出して測定をすることが可能である。このとき、マイクロバブルの平均直径は実質的には体積の大きさを表しており、ボイド率にも影響を及ぼす。すなわち両者は相関関係にあるといえる。したがって、小さな平均直径を持つマイクロバブルを発生させた場合、

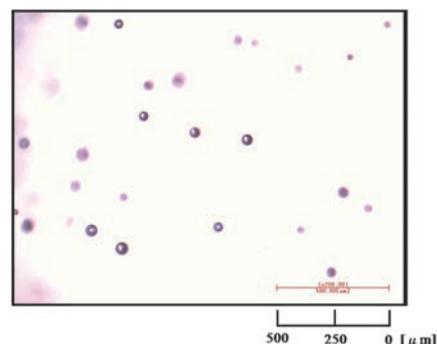


図-5 ボイド率の測定画像
(ボイド率 $\epsilon = 0.05\%$, 平均マイクロバブル直径 DMB=44.1 μm)

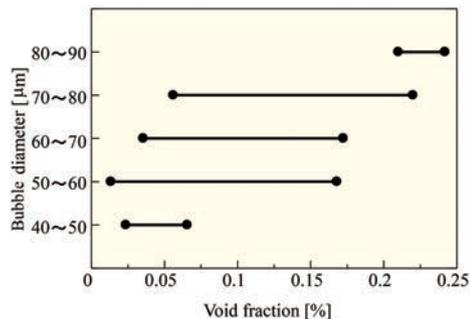


図-6 マイクロバブル平均直径に対するボイド率変化域

高いボイド率を実現するには大きな平均直径を持つマイクロバブルの場合より単位体積あたりの水に対する含有個数が多くなければならない。実験によって明らかになった各マイクロバブル平均直径に対するボイド率変化域を図-6に示す。図よりマイクロバブル平均直径 $D_{MB}=40\sim 50\ \mu\text{m}$ のものは高ボイド率になることは難しく、また $D_{MB}=80\sim 90\ \mu\text{m}$ のものが低ボイド率になることも難しいと言える。

4. 液滴径測定

図-7～図-10にマイクروسコープで撮影した液浸法による液滴採取

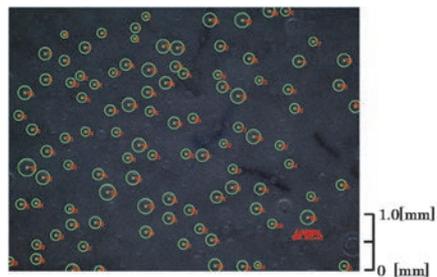


図-7 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.2\text{MPaG}$ におけるマイクロバブル無し)

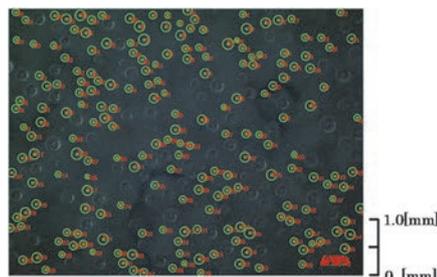


図-8 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.2\text{MPaG}$ におけるマイクロバブルあり)

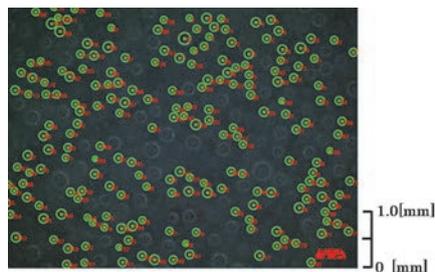


図-9 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.4\text{MPaG}$ におけるマイクロバブル無し)

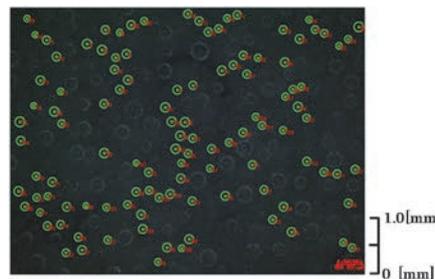


図-10 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.4\text{MPaG}$ におけるマイクロバブルあり)

取画像を示す。図-7は噴射圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ におけるマイクロバブル無しの条件、図-8は噴射圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、ボイド率 $\varepsilon=0.059\%$ 、マイクロバブル直径 $D_{MB}=51.1\ \mu\text{m}$ の条件である。画像を比較すると直径の小さい液滴が増えていることがわかる。また、図-9は $P_s=0.4\text{MPaG}$ におけるマイクロバブル無しの条件、図-10は $P_s=0.4\text{MPaG}$ 、 $\varepsilon=0.064\%$ 、 $D_{MB}=53.2\ \mu\text{m}$ の条件である。圧力エネルギーが大きいので、初期液滴直径が小さくなるために、画像のみから微粒化効果を確認することは難しい。

図-11～図-14に $P_s=0.2\text{MPaG}$ と 0.4MPaG において、マイクロバブル無しと有りの条件における液滴径分布を示す。図-11と図-12を比較すると、 $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、マイクロバブル有りの場合、液滴径が小さくなり、液滴径の下限値も小さくなるのがわかる。これは小さなマイクロバブルが多数混入して、噴霧される液滴全体に対し、平均直径を低減する効果があるためと考えられる。図-13と図-14を比較する

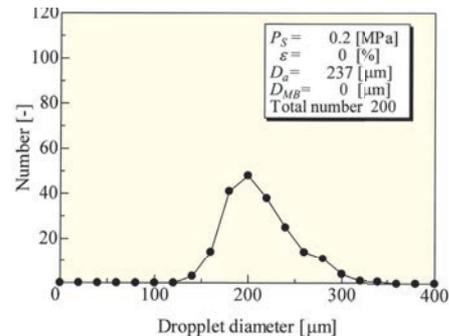


図-11 液滴径分布 ($P_s=0.2\text{MPaG}$ 、マイクロバブル無し)

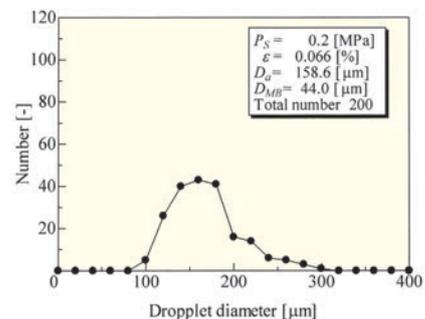


図-12 液滴径分布 ($P_s=0.2\text{MPaG}$ 、マイクロバブルあり)

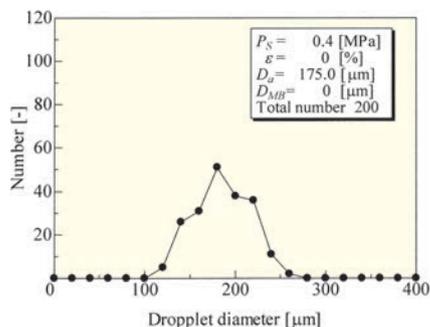


図-13 液滴径分布 ($P_s=0.4\text{MPaG}$ 、マイクロバブル無し)

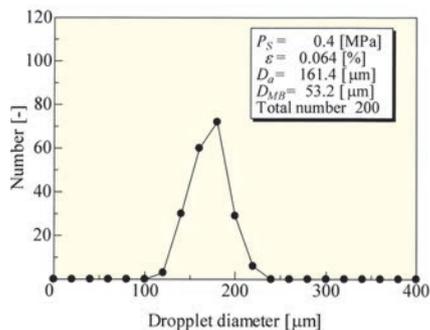


図-14 液滴径分布 ($P_s=0.4\text{MPaG}$ 、マイクロバブルあり)

と、 $P_s=0.4\text{MPaG}$ 、マイクロバブル有りの場合、液滴径の低減は顕著ではないが、ヒストグラムの尖度が増す。これは大きな液滴が、マイクロバブルの

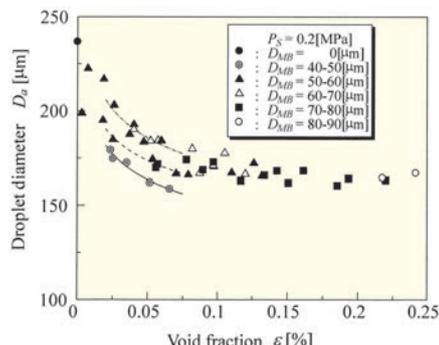


図-15 ボイド率と平均液滴径の関係 ($P_s=0.2\text{MPaG}$)

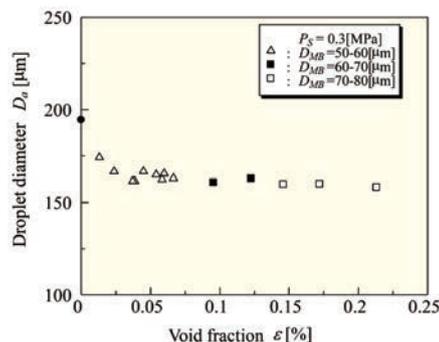


図-16 ボイド率と平均液滴径の関係 ($P_s=0.4\text{MPaG}$)

効果によって微粒化されたためと考えられる。

5. 液滴径とボイド率の関係

上記の液滴径分布から得られたボイド率、マイクロバブル平均直径、平均液滴径の関係を図-15と図-16に示す。噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ において、ボイド率の増加に伴い平均液滴径が減少する。マイクロバブルが液系等に混入した場合、混入した箇所において分裂が発生すると考えられる。従って、ボイド率が大きいということはマイクロバブル径が等しい場合はバブルの個数が多いということであるから、それだけ多くの細かい液滴に分裂することになる。微粒化現象が顕著に現れるのはボイド率 $\varepsilon=0\sim 0.1\%$ ほどの間で、それ以降は目立った微粒化は見られない。これはある一定の液滴径になった場合、表面張力が液滴体積に対して安定するため、分裂促進が行なわれない

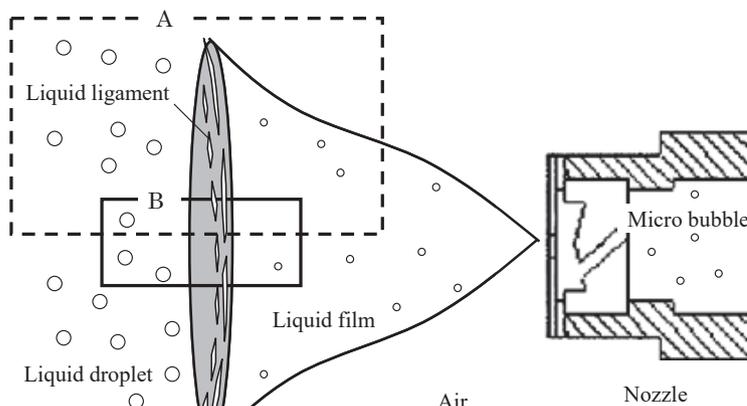


図-17 撮影箇所

ことが考えられる。

次にマイクロバブル平均直径が小さいほど、同程度のボイド率に対しては液滴微粒化効果が著しい。この理由としては、マイクロバブル平均直径が小さい方が単位体積あたりのマイクロバブル個数が増え、一つ一つのマイクロバブルが及ぼす影響が増えるからである。

$P_s=0.4\text{MPaG}$ においては噴霧圧力が高く、マイクロバブル無しの条件でも平均液滴径が小さくなるため、マイクロバブルの微粒化への影響が顕著ではない。そのため、微粒化促進効果を得る場合は低圧力状態において、圧力エネルギーなど他の微粒化要因が支配的ではない場合が好ましいと思われる。

6. 噴霧画像の撮影

図-17にハイスピードカメラによって撮影を行なった箇所の詳細を載せる。セクションAでは噴霧を行なった際の中空円錐噴霧の輪郭及び液膜から液系、さらに液滴への分裂観察、セクションBでは液系内のマイクロバブルの混入状態を確認するための観察を目的として実験を行なった。

図-18に、噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ における噴霧直接観察画像(セクションA)を示す。図には(a)マイクロバ

ブル無しの噴霧と、(b)マイクロバブル混入噴霧を示す。これらの画像から、50倍での噴霧観察ではマイクロバブルの効果を確認できなかった。このことから微粒化効果はさらに微視的な領域で起こっていると思われる。また、噴霧は液膜部分、液系部分、および液滴部分で構成されており、ノズル先端からまず液膜が中空円錐状かつ薄膜状態で回転噴霧され、不安定状態から液系に分裂し、さらに空気との摩擦せん断力などによって液滴が生成されるというメカニズムである。(a)、(b)の両方の画像から、液膜や液系先端に至るまでは液滴への分裂現象が起こらないことが確認できる。したがって、外力的な作用が最も現れる場所も液系先端位置、または液滴内部であるといえる。

図-19に液系直接観察画像(セクションB)を示す。画像の条件として、写真-7(a)には噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、ボイド率 $\varepsilon=0.05\%$ 、平均マイクロバブル直径 $D_{MB}=40\sim 50\mu\text{m}$ での液系、写真-7(b)には $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、 $\varepsilon=0.05\%$ 、 $D_{MB}=60\sim 70\mu\text{m}$ での液系を示す。これらの画像から、液系内部にマイクロバブルが混入している様子が見て取れる。このことから、水槽内、及びボイドタンク内に充填されているマイクロバブルの状態がそのまま液膜

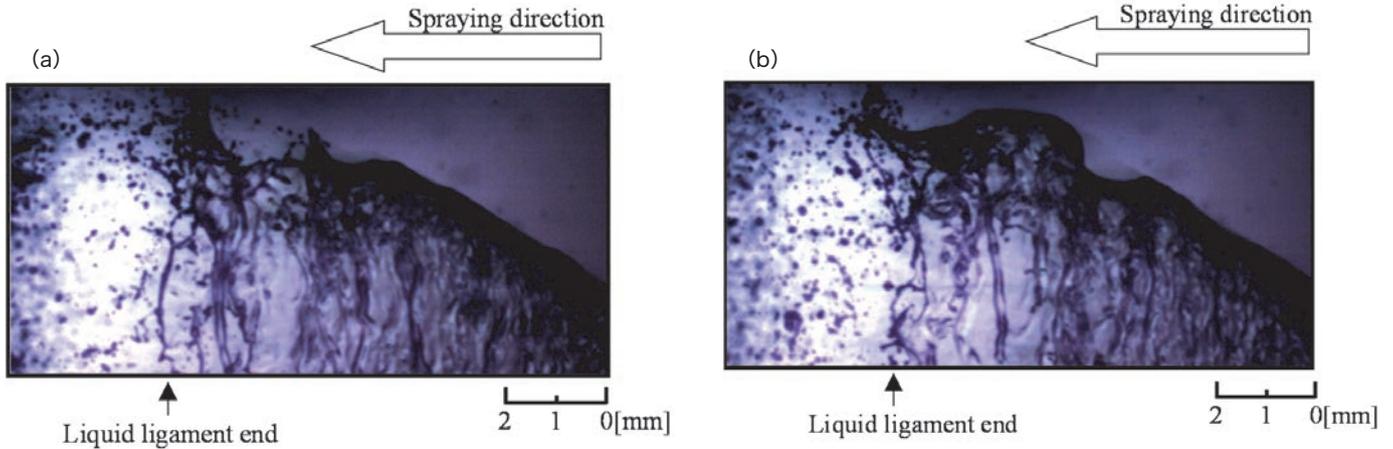


図-18 噴霧直接観察画像 (セクション A)
 (a) マイクロバブルなし
 (b) マイクロバブルあり

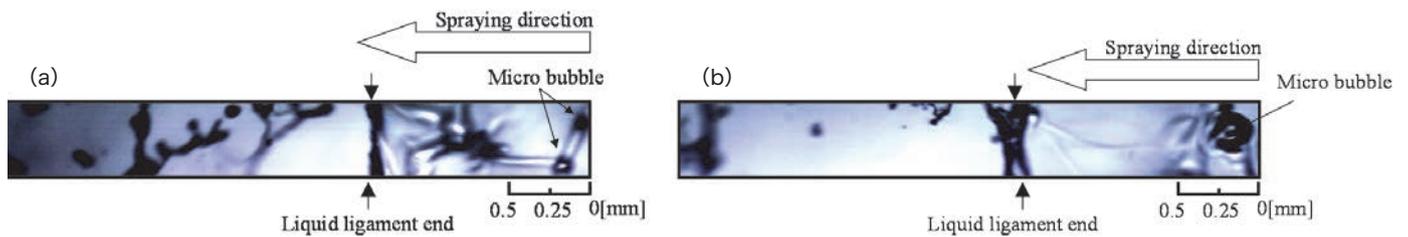


図-19 噴霧直接観察画像 (セクション B)
 (a) $D_{MB} = 40 \sim 50 \mu m$
 (b) $D_{MB} = 60 \sim 70 \mu m$

や液系内に混入すると考えられる。したがって液系内部に混入するマイクロバブルの直径としては妥当であると考察できる。

$\epsilon = 0.1\%$ 以上の高ボイド率状態においては、 $\epsilon = 0.1\%$ の状態とマイクロバブルの直径、マイクロバブル個数など、マイクロバブルの混入状態に大きな変化は見られなかった。したがって直接観察画像からも、図-15と図-16における $\epsilon = 0.1\%$ 以降の微粒化促進効果における停滞が説明できる。

おわりに

マイクロバブルと呼ばれる直径が数十 μm の微小気泡を用いて、渦巻き型噴射弁からマイクロバブル混入噴霧水を噴霧することによって、微粒化効

果を調べた結果、マイクロバブルを利用した水滴の微粒化を行う場合、0.2～0.3MPaG程度の低噴射圧での噴霧が、他の外力の影響を受けず顕著に微粒化されることを明らかにした。噴霧圧力 $P_s = 0.2MPaG$ の低圧力噴霧を行う場合、マイクロバブル混入噴霧水を使用することによって、最大32%の微粒化効果を得ることができた。

本研究の成果を活用することによって、水と同程度の低粘性の液体を用いる場合、低圧力で微粒化が可能であり、ポンプの低消費電力化やポンプの小型・軽量化、および低コスト化が期待できる。

また、応用分野については、自動車の車体や建築・土木構造物等の表面塗装において、均一な塗装面が要求されるために塗料の微粒化が必要な塗装分

野、少量で広い面積を消毒するために散布する農薬の微粒化が要求される農業分野、液滴を噴霧して乾燥させて大量の顆粒体を製造する医薬品や食料品製造分野等、幅広い応用分野が挙げられる。

引用文献

- Deutsch *et al.* 2004. Microbubble drag reduction in rough walled turbulent boundary layers with comparison against polymer drag reduction, *Experiments in fluids*, 37(5), 731-744.
- 後藤世至男 2006. マイクロバブルを用いた油汚染土壌浄化と油分解機構. *混相流学会論文誌* 20(1), 39-49.
- 川口清司・加瀬篤志 2020. マイクロバブルを利用した液滴の微粒化 (気泡径とボイド率が液滴径に及ぼす影響). *産業応用学会論文誌* 8 (2), 173-180.