

# 論文審査の結果の要旨

氏名 幕田 寿典

本論文は、5章からなり、第1章では序論、第2章では超音波を利用した微細気泡生成現象、第3章では均一微細気泡生成現象、第4章では境界要素法による均一気泡生成シミュレーション、第5章では結論が述べられている。

第1章では、従来の微細気泡生成技術を概観し、これまでに様々な微細気泡生成技術が開発されているものの、ばらつきが大きい点、 $10\mu\text{m}$ 以下の気泡生成が難しい点などから、 $10\mu\text{m}$ 以下の気泡をばらつきなく安定して生成する方法の開発が求められているという背景が説明され、続いて超音波による微細気泡生成現象について、実験的・数値解析的に気泡が生成するメカニズムと生成特性を解明し新しい知見を得るという目的について記されている。

第2章では、超音波を印加した水中における針先での微細気泡生成現象と周波数特性について説明されている。針先から微量に水中に放出される空気に  $75\text{kHz}$  以下の低周波数の超音波を印加することで、気泡径の単純平均が  $10\mu\text{m}$  程度の微細気泡が安定的に生成できることを実験的に証明している。この方法で気泡が生成するメカニズムとして、キャピラリ波からの分裂理論と同じく、表面波からの気相の飛び出しによるものであると考察しており、その根拠として、超音波によって界面に生じる表面波は超音波周波数が低いと波長が長くなる傾向があるが、針先から放出される微細気泡の気泡径の計測

結果も超音波周波数が低いほど平均径が大きくなっている点を挙げている。

第 3 章では、水よりも高い粘度の液体で円筒型の針を用いて超音波を印加すると、ある条件下では全く径の同じ気泡が連続して生成する現象があることが実験により示されている。気泡生成に至る界面の時間的挙動、均一な気泡生成が起こる液体物性や超音波などの実験条件、気泡径の制御性についても述べられている。まず、超音波が印加された液体中の円筒形状の針先を高速カメラで針先界面に生じる表面波の挙動について撮影した結果から、4 ~ 15 $\mu\text{m}$ の均一径の気泡が超音波と同じ周期で生成し、その均一径の気泡は、針の中心に向かって表面波が伝播し、最終的にできる突起形状の界面が液体によって切り離されることによって生成すると説明されている。また、均一気泡の安定生成する条件を特定するために、各条件（超音波周波数、針径、液体の物性等）を変化させた実験を行い、Womersley数( $Wo$ )とWeber数( $We$ )で整理した結果、 $We < 300$ ,  $2 < Wo < 5$ （周波数：18.77 ~ 42.15kHz, 針内径：0.08 ~ 0.34, 動粘度：5 ~ 100 $\text{mm}^2/\text{s}$ , 表面張力：21 ~ 34 $\text{mN}/\text{m}$ ）の条件では、界面が周期的に収束し、かつ突起状の形状を形成できるため、均一径の気泡は安定して生成することを確認している。

第 4 章では、均一微細気泡生成現象が境界要素法による数値解析で再現され、界面の時間的挙動、物性値の影響、制御性について議論されている。流れ場を軸対称ポテンシャル流れと仮定して境界要素法を用いた界面挙動の数値計算を行い、界面の時間的挙動について実験結果と計算結果は良好な一致を示すことを確認している。また、界面挙動が安定した状態から徐々に動粘

度を変化させると、粘度条件が低すぎると気泡生成が不安定化し、高すぎると気泡生成が起こらない計算結果が得られ、気泡径の均一化は界面振動が周期的に安定し且つくびれが過度に減衰されない場合に起こるという実験結果を、数値計算からも立証している。さらに、実験で見られた針内圧を増加させると気泡が大きくなる傾向が、突起先端位置の上方へ移動と突起幅の増加と気泡の離脱点の位置がほとんど変化しない事に起因していることを数値計算結果により示している。

第 5 章は、結論であり、上記に研究について総括し、得られた主な結果と新しい知見についてまとめている。

本研究の第 2 章、第 3 章は竹村文男、飛原英治、松本洋一郎、庄司正弘との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験及び数値解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上のように、液中の針先に超音波を印加すると微細な気泡生成が起こる現象（微細気泡生成現象）と、液体の粘度が高く円筒形状の針を用いた条件において均一な径の微細気泡の生成が起こる現象（均一微細気泡生成現象）について、その生成メカニズムと生成特性を実験的かつ数値的に解明することに成功しており、博士（環境学）の学位を授与できると判定する。