



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Theoretical Study on the Speed of Sound in a Bubbly Liquid [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	川原, 潤也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12302号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61856
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Junya_Kawahara_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 川原 潤也

審査担当者 主 査 教 授 渡部 正夫
副 査 教 授 大島 伸行
副 査 教 授 村井 祐一
副 査 准教授 小林 一道

学位論文題名

Theoretical Study on the Speed of Sound in a Bubbly Liquid

(気泡流の音速に関する理論的研究)

気泡が存在する管内における圧力波の伝播は、マイクロバブルを用いた血管造影検査や原子力発電所の配管内の流れの制御などの機械工学に関する技術の基礎として重要な物理現象である。これらの技術の発展には、気泡を含む液体の音響特性を理解することが不可欠である。液体中に存在する気泡は、液中の音速、分散、吸収等の音響特性に大きな影響を及ぼす。気泡流の音速は、液体あるいは気体単相の音速よりも大きく低下することが知られており、特に、気泡の固有振動数に比べて十分低い周波数を有する線形圧力波の位相速度である気泡流の音速は代表的な音響特性の一つとなっている。気泡流に関する従来の研究では、無数の気泡が均質に分散した液体を連続体と仮定し、媒質の体積弾性率と密度の比を用いて記述することで、気泡の存在によって生じる音速の低下のメカニズムを説明してきた。わずかに気泡を含む液体は、体積弾性率が小さく密度が大きい混相媒質としてみなされるため、気泡を含む液体では音速が低下すると説明される。

近年の機械工学に関する研究では、有限個の気泡を配置した管内における圧力波の伝播が解析されている。このような連続体とみなすことができない離散的な気泡流に対して、連続体の仮定に基づく物理モデル (以後「連続体モデル」とよぶ) を適用することはできない。連続体モデルを適用することができない気泡流中の圧力波の伝播は、主に直接数値計算によって解析されている。しかし、これらの研究では、有限個の気泡が存在する管内の圧力波の伝播を体系的に取り扱うことができる理論モデルの提案には至っていない。このため、気泡が 1 個あるいは数個しか存在しない管内の圧力波の伝播から、無数の気泡が分散している管内の圧力波の伝播までを体系的に取り扱うことを可能にする理論モデルの構築が求められている。

本研究ではまず、物質中の光速理論のアナロジーを用いて、矩形管内の有限個の気泡の球形振動によって生じる散乱の影響を考慮した圧力波の伝播の理論モデルを構築した。気泡流中の圧力波の伝播の解析では、つぎの 2 つを仮定した: (i) 管内の全圧力場は、入力圧力波と個々の気泡が作り出す圧力場の総和として与えられる。 (ii) 個々の気泡が作り出す圧力場の位相速度は、入力圧力波と同様に液体単相の音速に一致する。これらの 2 つの仮定に基づいて、単一球形気泡を配置した矩形管内における平面圧力波の伝播を理論的に解析した結果、管内の気泡の球形振動によって生じる圧力場が圧力波の位相を遅らせることを明らかにし、この位相の遅れによって圧力波の波長が見かけ上短くなることを明らかにした。この見かけ上の波長が短くなった圧力波の位相速度が、連続体モデルに基づいて導出される気泡流の音速と一致することを示した。これらの理論解析によって、離散的な

視点から気泡流中の音速の低下の最も本質的な物理的機構を明らかにすることに成功した。

つぎに、有限個の気泡が存在する管内の圧力波を検討するため、10 個の球形気泡を等間隔に配置した矩形管内の圧力波の位相速度を数値的に解析した。特に、剛体壁からの反射波や周囲の気泡の球形振動によって生じる圧力場が個々の気泡の球形振動に与える影響（気泡間の相互作用）が音速の低下にどのように寄与するかを解析し、圧力波の位相速度が、液体単相の音速から連続モデルに基づく気泡流の音速に変化することを確認した。また、剛体壁からの反射波や気泡間の相互作用が、位相速度の低下を抑制する方向に働くことを明らかにした。

最後に、剛体壁からの反射波が単一気泡の球形振動に与える影響を考慮した理論モデルを構築した。構築したモデルを用いて、気泡の周囲の位相速度の変化について解析した結果、気泡の上流側では位相速度が一度低下し、その後液体単相の音速まで過渡的に変化することを明らかにした。

これを要するに、著者は連続体モデルを適用することができない気泡流中の圧力波の伝播を体系的に扱うための新しい理論的枠組みを提出し、離散的な視点から気泡流中の音速の低下の最も本質的な物理的機構を解明した。この理論的な枠組みに基づく数値解析によって、気泡間相互作用が気泡流中の音速の低下を抑制することを明らかにした。さらに、管内の有限個の気泡によって位相速度が気泡流の音速から液体単相の音速まで過渡的に変化することを明らかにし、過渡的な音速の変化を記述する理論モデルを提案した。これらの研究成果は、気泡を含む流れにかかわる流体力学に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。