



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 川原 潤也

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。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、Wood (1930) や van Wijngaarden (1972) に代表される多くの研究者によって示されており、代表的な音響特性の一つとなっている。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。均質媒質の音速は、媒質の体積弾性率と密度の比を用いて記述される。液体中にわずかに気泡を混入させたとき、混相媒質の体積弾性率は、気泡の高い圧縮性によって液体単相の体積弾性率に比べて小さくなる。これに対して、気体の密度は液体の密度に比べて小さいため、気泡の存在によって混相媒質の密度はほとんど影響を受けない。したがって、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。この結果、気泡を含む液体では音速が低下する。

気泡を含む液体を連続体とみなすためには、無数の気泡が均質に分散して液体中に存在する必要がある。これに対して、近年の機械工学に関する研究では、有限個（たとえば、5 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。このような均質とみなすことができない気泡流に対して、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。

本論文の目的は、有限個の気泡が存在する管内における圧力波の伝播を体系的に取り扱うことを可能にする理論モデルを構築し、均質とみなすことができないような気泡流の音速を議論することである。本論文では、有限個の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する。入力圧力波の周波数は気泡の固有振動数に比べて十分低く、その位相速度は液体単相の音速に一致するものとする。線形圧力波が気泡に入射することで気泡が球形振動する。このとき、気泡の球形振動によって圧力場が生じ、発生した圧力場が圧力波の伝播に影響を与える。これは、圧力波が管内の気泡によって散乱されることを意味する。管内の気泡の球形振動によって生じる散乱が圧力波の位相速度に与える影響を解析する。

本論文は全 5 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は緒論であり、気泡流に関する従来の研究を概観し、本論文の背景および目的を述べる。また、本論文における主要な仮定について説明する。本論文では、光学の理論からのアナロジーを用いて、管内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を解析する。真空中を伝播する電磁波の伝播速度は真空中の光速となる。これに対して、ある屈折率を有する物質中では、電磁波の伝播速度が物質の屈折率に応じて真空中の光速から変化する。Feynman et al. (1963) は、入力電磁波によって生じる物質中の個々の電子の振動が、物質中を伝播する電磁波の伝播速度をどのように変化させるかを明らかにした。本論文では、Feynman et al. (1963) に着想を得た気泡流の理論モデルを構築する。本論文における気泡流中の圧力波の伝播の解析では、つぎの2つを仮定する。(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。

第2章では、連続体モデルを適用することができないような気泡流中における音速の低下のメカニズムを解明する。本章では、上述の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する。理論解析の結果から、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が明らかとなる。この位相の遅れが音速の低下に与える影響を調べるため、無数の球形気泡を配置した管内における圧力波の伝播を理論解析する。解析の結果、無数の気泡の球形振動によって生じる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が明らかとなる。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。これらの理論解析の結果から、管内の気泡の球形振動によって圧力波の位相が遅れることが音速の低下の最も本質的な物理的機構であることが明らかとなる。この結果をふまえて、管内の単一気泡の球形振動によって生じる位相の遅れを考慮した圧力波の位相速度を議論する。

第3章では、10個の球形気泡を等間隔に配置した管内の圧力波の位相速度を、上述の仮定に基づいて数値的に解析する。本章の数値解析では、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（気泡間の相互作用）が個々の気泡の球形振動に与える影響を考慮する。数値解析の結果から、10個の気泡を配置した管内における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が確認できる。また、剛体壁からの反射波や気泡間の相互作用が、音速の低下を抑制する方向に働くことが明らかとなる。気泡の個数が位相速度に与える影響を調べるため、管内の最下流に配置された気泡から順に気泡の個数を減らした場合の解析を実施する。解析の結果、気泡の個数の減少に伴って、圧力波の位相速度が気泡流の音速からずれることが明らかとなる。

第4章では、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する。構築した理論モデルから、反射波が単一気泡の球形振動に与える影響は、気泡の球形振動によって生じる圧力場と反射波の総和からなる圧力場の位相を遅らせる働きをすることが明らかとなる。また、気泡の上流側および下流側における圧力波の位相速度の変化について議論する。

第5章は結論であり、本論文の総括を行う。