

管の断面積変化が気泡流中の圧力波の減衰に寄与することを方程式で解明

管内を流れる気泡を含む液体では、その中を伝播する圧力波が減衰します。この現象を表す方程式を理論的に構築し、液相の粘性や圧縮性に加えて、管の断面積の変化も寄与することを発見しました。また、管の断面積の変化率が圧力波の減衰に関する重要なパラメータであることが分かりました。

管内を流れる気泡を含む液体（気泡流）の中を伝播する圧力波は、液体単相中とは様相が異なり、その伝播過程を正しく理解し、制御することが求められています。中でも、圧力波が減衰する現象は、伝播過程を解明する上で重要であり、減衰要因の解明や減衰のメカニズムを正しく理解する必要があります。特に管の断面積が変化する場合に、気泡流中を伝播する圧力波が影響を受けやすいことが知られていますが、その減衰メカニズムは解明されていません。

そこで本研究では、断面積が変化する管内での気泡流中の圧力波伝播を表す方程式を理論的に構築しました。その結果、管の断面積の変化が、気泡流中の圧力波の減衰に寄与することを新たに発見しました。また、液相の粘性や圧縮性などの他の減衰要因との定量比較から、管の断面積の変化率が圧力波の減衰に関する重要なパラメータであることを示しました。

本研究の成果は、気泡流中の圧力波の減衰について新たな基礎的知見を提供するものです。また、管の断面を特定の形に限定していないため、断面積が急激に変化する縮小拡大管を用いた気泡生成などへの応用も期待できます。

研究代表者

筑波大学システム情報系

金川 哲也 准教授

研究の背景

気泡を含む液体（気泡流）中を伝播する圧力波^{注1)}は液体単相中とは様相が異なり、その伝播過程を正しく理解し、制御することが求められています。例えば、ターボ機械で見られるキャビテーション^{注2)}による気泡流の発生時には、生じた気泡の崩壊とともに圧力波が伝播し、機械を損傷してしまう恐れがあります。特に圧力波の減衰は重要なプロセスの一つであり、その要因の解明や減衰のメカニズムを正しく理解する必要があります。

縮小拡大管（ベンチュリ管）^{注3)}に代表されるような、断面積が変化する管内における液体の流れでは、断面積の縮小部で流速上昇に伴う圧力低下で気泡流が形成され、拡大部で圧力が回復し気泡が崩壊することにより気泡流中を圧力波が伝播することがあります。また、圧力波が気泡生成に影響を与えることも報告されています。しかし、圧力波の伝播過程は完全に解明されておらず、またその減衰要因についても完全な解明には至っていません。

研究内容と成果

本研究では、管の断面積を新たな変数として基礎方程式系^{注4)}に組み込み、気泡の運動方程式などを含む9本の方程式に対し理論近似を行うことで、気泡流中の圧力波伝播を表す1本の非線形の方程式を導出しました。

その結果、管内の気泡流中の圧力波伝播を、これに影響を及ぼすさまざまな要因をパラメータとして定式化することに成功し、圧力波の減衰には、液相の粘性や圧縮性といった主要な減衰要因の他、断面積の変化も寄与することが分かりました。これは、断面積が縮小する場合には波を増幅させ、拡大する場合には波を減衰させるという、直観的な説明とも整合性があります（参考図）。さらに、縮小拡大管を想定し、液相の粘性および圧縮性と断面積変化の減衰への影響を定量的に比較したところ、断面積が急拡大する場合に、断面積変化が粘性および圧縮性よりも影響が大きくなることが分かり、断面積の変化率が重要なパラメータとなることが判明しました。

今後の展開

これまで、断面積変化が気泡流中の圧力波に与える影響を定式化し、定量的に評価する研究例は少なく、本研究成果は、気泡流中の圧力波の減衰について、新たな基礎的知見を提供するものです。

今回構築した方程式では、管の断面を特定の形に限定していないため、縮小拡大管を用いた気泡生成などの応用にも適用できる一方、相変化などの実用的に重要な要素は組み込まれていません。今後、より実現象に近いモデルの構築や、実際の応用例に対する実現象の再現などを目指します。

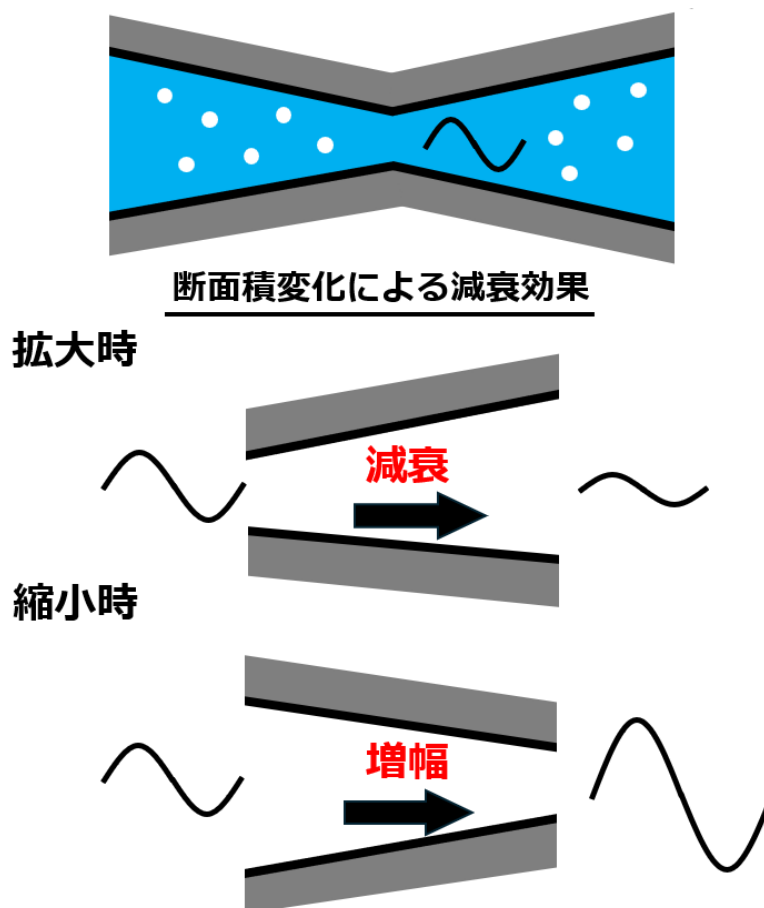


図 本研究の概要図（上段）と主要な結果（中段・下段）

（上段）本研究では、断面積が変化する管内の気泡流中を伝播する圧力波を状況を設定した。

（中段・下段）断面積変化は拡大時に圧力波を減衰させ、縮小時に増幅させるという、直観にも整合する現象を数理的に証明した。

用語解説

注1) 圧力波 (pressure wave)

流体中の圧力の変化が縦波として伝わること。音波や衝撃波は圧力波の一種といえる。

注2) キャビテーション (cavitation)

例えば、羽根車を回転させて流体にエネルギーを与えるターボ機械や縮小拡大管など、局所的に圧力が低下することで気泡が発生する現象。圧力が回復すると気泡は崩壊し、その時に圧力波が伝播することがある。

注3) 縮小拡大管 (converging-diverging tube)

縮小部と拡大部を有する管のこと。ベンチュリ管ともいう。縮小部で流体の速度が上昇すると圧力が低下するため、その圧力差から流量測定などに用いられる。取り扱いが容易なことから、縮小拡大管内のキャビテーションを利用した気泡生成の研究も注目されている。

注4) 基礎方程式系 (set of basic equations)

質量・運動量・エネルギーの保存法則に基づいた基本的な支配方程式（バランス方程式）であり、各保存法則を表現する連立の偏微分方程式を指す。

研究資金

本研究は、JSPS 科研費 (22K03898)、NEDO 官民による若手研究者発掘事業マッチングサポートフェーズ (JPNP20004)、大学×国研×企業連携によるトップランナー育成プログラム TRiSTAR (文部科学省：世界で活躍できる研究者戦略育成事業) の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Elucidation of pressure wave attenuation due to cross-sectional area change in bubbly flow

(断面積の変化による気泡流中の圧力波の減衰の解明)

【著者名】 K. Watanabe, T. Kanagawa, and T. Ayukai

【掲載誌】 *International Journal of Multiphase Flow*

【掲載日】 2025 年 1 月 22 日

【DOI】 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2025.105138

問合わせ先

【研究に関すること】

金川 哲也 (かながわ てつや)

筑波大学 システム情報系 准教授

URL: <https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp