様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２９　年　　６　月　１９　日現在

機関番号：　１２１０２
研究種目：　若手研究(B)
研究期間：　2014～2016
課題番号：　２６８２００４０

研究課題名（和文）気泡振動の能動的制御による水中衝撃波のソリトン遷移を狙う非線形音響理論

研究課題名（英文）Nonlinear Acoustic Theory toward a Transformation Technique from Shock Wave into Soliton by Active Control of Bubble Oscillations in Water

研究代表者

金川　哲也（KANAGAWA, Tetsuya）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：８０７２６３０７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,000,000円

研究成果の概要（和文）：ポンプの中を流れる水中において、しばしば、衝撃波という「危険な」波が形成される。これを、ソリトンという「安全な」波に変換できれば、ポンプの損傷を抑制することが可能となる。本研究の目的は、この革新的技術開発のための理論的基盤の創成にある。気泡流中において、水中音速1,500 m/sを超えて伝播するという、水の圧縮性の効果が招く高速伝播圧力波を用いて、ソリトン遷移した衝撃波をポンプ内から速やかに逃がすという着想に基づき、高速伝播圧力波の非線形伝播の理論解析および数値解析を行った。今後、本理論の実験的検証研究や、次世代のポンプへの実装を目指した産学連携研究といった、さらなる進展が期待されるだろう。

研究成果の概要（英文）：Shock waves sometimes are observed in an inner flow of fluid machinery (e g., pumps) and recognized as a risk factor. The aim of this study is to establish a theoretical basis of a transformation technique from shock wave into soliton that leads to suppress the damage to pumps. A fast propagation mode with the phase velocity of 1,500 m/s of pressure waves induced by the consideration of compressibility of liquid phase in liquids containing many spherical gas bubbles is focused. This attention is essential from the viewpoint of a rapid elimination of a dangerous wave in pumps. The nonlinear evolution equations were then theoretically derived via the method of multiple scales and numerically solved via a finite difference method. An experimental verification and incorporation of abovementioned results into future pumps will be carried out.

研究分野：　流体力学

キーワード：　気泡流　気泡力学　非線形音響学　非線形波動　衝撃波　ソリトン　音響ソリトン　分散性波動

１．研究開始当初の背景

(1)流体機械とソリトン：

ポンプに代表される水を扱う流体機械の内部流れにおいて、衝撃波の形成が、機器の損傷を招く槍玉に挙げられている。非線形波動の代表例の一つである衝撃波は、有限振幅の圧力伝播に伴って蓄積される音波の「非線形性」と波面における「散逸性」の競合によって形成される。流体機械の安全性や最適設計の観点から、水中衝撃波の抑制策はないだろうか。すなわち、波の散逸性の大きさを適切に抑制・制御することは叶わないだろうか。

非線形波動論において、「分散性」とは、「非線形性」と「散逸性」と並んで重要な波の性質である。分散性が非線形性と競合するとき、「ソリトン」という安定な波動が形成される(図 1)。孤立波ともよばれるソリトンは、大元は、水面波(長波)の分野で発見されたが（Russell, 1834)、非線形波動理論の研究の進展によって、いまや、プラズマ・光・弾性波などの多様な非線形分散系におけるソリトンの形成が明らかとなっている。

「流体機械とソリトン」、両極端にあるかの響きをさせる 2 点が結ばれた瞬間である。

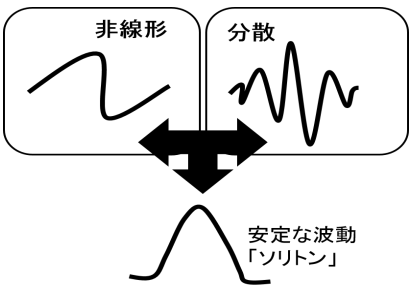


図 1: 非線形性と分散性によるソリトン形成

(2)気泡振動が導く分散性の巧妙：

非線形波動論の大家の杉本らは、トンネル内の微気圧波の問題で、散逸性を抑制して分散性を持ち込み、音響ソリトン形成を実現させた(Sugimoto et al., 1999)。しかし、水や空気のような単相媒質は、そもそも散逸系であって、音波の伝播過程において分散性は原則として現れない。それゆえ、単相水中を伝わる音波は、非線形発展によってやがてその波形を歪ませ、波面における散逸性が非線形性と競合し、衝撃波形成に至る。

水中に多数の気泡（マイクロバブル）を混入させると、どうなるだろうか。気泡流（多数の気泡を含む水）中を伝わる非線形音響波においては、気泡の体積振動が分散性を持ち込み、なんと、水面波の分野で導かれた KdV 方程式がモデルとして適合するのである(van Wijngaarden, 1968)。KdV 方程式とは、ソリトン厳密解を持つ非線形波動方程式の代表例の一つである。

気泡の存在そしてその体積振動が、音波の伝播過程において分散性を生む。ならば、気泡の振動を能動的に制御できないだろうか。それによって、気泡振動に伴う分散性の大きさを適切に増幅させ、それを散逸性よりも卓越させることができたならば、非線形性と分散性のカップリングが期待される。そのとき、音は衝撃波ではなく（音響）ソリトンへと遷移する。それゆえ、流体機械の内部流において、損傷を与える悪玉を演ずることなく、いわば優等生の形で、安定な形態のまま内部流から脱出することが期待される。

そこで、水中に気泡を意図的に混入させて、その振動を能動的に制御することによって、波に分散性の効果を持ち込み、分散性を散逸性の効果よりも卓越させて衝撃波を防ぐ―ここに本研究の背景そして動機がある。

(3)主役を演ずる非線形波動方程式：

気泡流中の非線形波動は、流体機械に限らず、環境や医療などにも関連深く、応用技術の安全性や経済性の根幹となるべき基礎的理解が強く望まれている。非線形波動方程式とは、非線形方程式でありながら、厳密解が存在する場合もあり、数値計算負荷も低い特徴を有する。それゆえ、多様な非線形波動方程式を導くことは、多様な応用に資する形での非線形波動の理論的予測を与えうる。

気泡は、その崩壊や激しい体積振動による低環境負荷洗浄といった、善の面への報道に力が注がれてきたように見受けられる。しかし、流体機械の分野では、これまで、機器の損傷を招く悪玉としての言及が多かったのではないか。その歴史を本研究が一新する。ポンプ中の気泡振動を、あえて有効に利用して、衝撃波のソリトン遷移を狙うという着想は、本研究の大きな独創性といえる。

(4)高速波に託された願い：

気泡流中の非線形波動の多数の理論研究において、水の圧縮性は、空気泡の圧縮性に比べて極めて小さいことを根拠に、長年無視され続けてきた。しかしながら、圧力波は密度波であるがゆえに、水の圧縮性は、確実に音の伝播に寄与する。実際、水の圧縮性こそが、「高速波」なる新たなモードを発現させることが最近指摘された（Egashira et al., 2004 など)。

そもそも、気泡流中の音速は 50 m/s 程度と、空気単相および水単相音速よりも極めて小さい(van Wijngaarden, 1968)。水の圧縮性が招く「高速波」は、その名の通り高速伝播モードであって、液単相音速 1,500 m/s を超えて伝わり、地震波でいうところのいわば P 波に相当する。この意味で、気泡流中の従来の非線形波動理論の常識を覆す波である。

高速波には実験的観測例もあるが（大谷ら, 2002)、その振幅計測値が極めて小さいがゆえに、詳細な計測を推し進めることが困難な状況にある。したがって、まずはその伝播特性の理論的予測が望まれており、それによって実験的検証への指針を与える相乗効果も生まれるだろう。

本研究が「高速」波に着目する理由は、その背景を鑑みれば、必然極まりない。衝撃波発展という危険性を秘めた波を、なぜ、敢えて流体機械内に留めておくのか。安定にソリトン遷移させることに成功したならば、一刻も早く流体機械内から逃してあげたいに決まっているではないか。この願いからである。

２．研究の目的

多様な流体機械において問題視されている水中衝撃波を、音響ソリトンに華麗に遷移させるという、高度な先進的技術の開発に向けた理論的基盤を構築することが、本研究の目的である。

気泡振動の能動的制御によって、波の分散性を散逸性よりも卓越させて、衝撃波を抑制する手法の確立を目指す。その最重要ポイントは、「分散・散逸・非線形」の 3 性質の大きさの正確かつ適切な把握によって、高速波が、衝撃波かソリトンのいずれになるのかの予測にある。そこで、分散・散逸・非線形の相対的大きさを明瞭な形で表現可能な簡易モデルとしての「非線形波動方程式」に主眼をおく。その意義は以下のように集約される：非線形波動現象は、それぞれに固有の非線形波動方程式の解である。したがって、その導出を通して、気泡流の難解かつ複雑なモデル方程式系（非線形性の強い連立偏微分方程式）、すなわち、気泡流の複雑な「全ての」ふるまいの中から、顕著な特徴をもち、応用上も有用な波動現象「だけ」を、簡易モデルの形で抽出できる。これは、現象の本質の抽出に他ならない。

３．研究の方法

対象は、水の圧縮性の効果が招く高速伝播モードにおける圧力波「高速波」である。手法に、代表者らが提示した、気泡流中の圧力波を記述する非線形波動方程式の統一的導出方法として、多重尺度法という特異摂動法に基づく「パラメータスケーリング法」を利用する(Kanagawa et al., 2010)。これは、気泡流中の波動現象で重要な、気泡径・波長・周波数などから構成される多様な無次元数の大きさの組合せを、波の無次元振幅すなわち非線形性の大きさを基準として見積もる操作から、散逸性と分散性の非線形性に対する相対的大きさの系統的記述手法である。

高速波を記述する多様な非線形波動方程式群を理論的に導いた後に、そのソリトン解（厳密解）および近似解（数値解）を求める。

４．研究成果

多数の球形微細気泡を含む圧縮性液体中における進行波の非線形伝播を理論的に調べた。主要な成果を以下にまとめる：

(1)高速波の非線形伝播の開拓：

液体の圧縮性の効果が導く高速伝播圧力波の有限振幅伝播を記述する弱非線形波動方程式を導出し、その数理的構造を明らかにした。ここでは、液体の圧縮性の大小に応じて、分散性と散逸性の大きさが劇的に変化するため、その取扱いにおいては、いくつかの周波数帯に分類することが重要となる。2 つの周波数帯、すなわち、波長の短い弱分散帯（図 2 の Band A）および波長の長い強分散帯（図 2 の Band B）に分割し、それぞれの領域を記述する非線形波動方程式を導いた。

(2)多次元性と非一様性への挑戦：

圧力波伝播の「多次元性」および気泡分布の「非一様性」は、流体機械内の実現象への応用の観点から重要極まりない。そこで、多次元性と非一様性の大きさを、分散性や散逸性と同じく、非線形性を基準に見積る方法論を提示した。流体力学の理論解析において、Mach 数などの無次元数の大きさの見積もりや、無次元数を如何に定義するかの重要性はいうまでもない。しかし、単相流に比べて、気泡流はスケールが複雑に絡み合うため（例えば、長さスケールでは、気泡径・気泡間距離・波長など）、そもそも無次元数の定義に枚挙に暇がないのである。多次元性への拡張の第一歩として、準一次元への拡張を考えた。パラメータスケーリング法に、音源の大きさと代表的波長の比という第 4 の分数の付加という工夫を施すことで、その拡張に成功した。それを利用して、気泡の数密度が小さな非一様性を有する気泡流中において、弱い回折の効果を伴う圧力波の準一次元弱非線形伝播を記述する 2 種類の非線形波動方程式を導いた(Kanagawa, 2015)。その数値解析を行い、波の準一次元性と気泡数密度の非一様性が、圧力波の伝播に与える影響を解明した。

以上のとおり、概ね、当初計画のとおりに研究を進め、研究成果を創成できた。中でも、様々な非線形波動方程式を、系統的かつ効率的に導出できた点は特筆すべきである。なぜなら、現象の本質を司るパラメータの適切な設定に基づいて、闇雲かつ膨大になりかねない摂動計算の効率的な実行に成功したからである。系統化と効率性の重要性はいうまでもない。なぜなら、この両者こそが、定められた研究期間内における、当初計画そして予想される結果に即した研究成果の創成という、最大の恩恵をもたらしたからである。

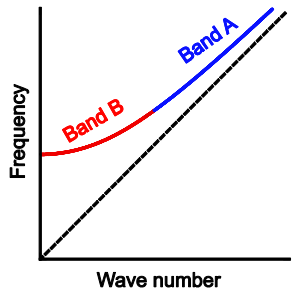


図 2: 高速波の Band A と Band B への分割

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計１件）

Kanagawa, T., Two Types of Nonlinear Wave Equations for Diffractive Beams in Bubbly Liquids with Nonuniform Bubble Number Density, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 査読有, Vol. 137 (2015), pp.2642-2654.
DOI: 10.1121/1.4916371
https://tsukuba.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=34533&file_id=17&file_no=1

〔学会発表〕（計８件）

① Kanagawa, T., Theoretical Study on a Fast Propagation of Pressure Waves in Bubbly Liquids, *The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市), 2017 年 10 月, 発表確定
② Kanagawa, T., Weakly Nonlinear Formulation on Acoustic Waves in Liquids Containing Many Spherical Gas Bubbles, *The 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2017 年 8 月, Hong Kong (China), 発表確定
③ Kanagawa, T., An Effective Equation for Fast Propagation of Pressure Waves in Compressible Liquids Containing Microbubbles, *2017 Japan-U.S.Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, 2017 年 6 月 22 日, 北海道大学 (北海道札幌市)
④ 金川哲也, 谷内 潤, 金子暁子, 阿部 豊, 微細気泡を含む圧縮性液体中における高速伝播圧力波を記述する方程式, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府豊中市)
⑤ Kanagawa, T., Two Types of Propagations of Nonlinear Sound Beams in Nonuniform Bubbly Liquids, *The 5th Joint meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan*, 2016 年 11 月 29 日, Honolulu (USA), 招待講演
⑥ Kanagawa, T., Systematic Theory on Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Liquids: Comparison between Mixture and Two-Fluid Models, *2015 Japan-U.S.Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, 2015 年 5 月 14 日, Lafayette (USA)
⑦ 金川哲也, 気泡流中の非線形波動の多重尺度解析(衝撃波のソリトン遷移への展望), 機械工学における力学系理論の応用に関する研究会, 2015 年 3 月 29 日, 京都大学(京都府京都市)
⑧ Kanagawa, T., Finite Amplitude Propagation of Acoustic Waves in Bubbly Liquids Based on Nonlinear Evolution Equations, *The 9th International Conference on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications*, 2014 年 9 月 23 日, Baltimore (USA)

〔その他〕
ホームページ：
http://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp

６．研究組織

(1)研究代表者

金川　哲也（KANAGAWA, Tetsuya）
筑波大学・システム情報系・助教
研究者番号：80726307