

令和元年6月27日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18008

研究課題名(和文)不均質音速理論とベンチュリ管実験の融合による「高濃度・気泡流音響学」の開拓

研究課題名(英文) Development of an Acoustics of Bubbly Flows in a High Void Fraction by Integrating Inhomogeneous Theory of Sound Speed and Venturi-Tube Experiment

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：気泡流のボイド率が大きくなると、音速の理論予測値と計測値に乖離が生ずるといふ問題点がある。本研究は、理論・数値予測と実験事実を融合し、この差異の解消を目指し、新学術体系「高濃度・気泡流音響学」の創成を目指すものである。高濃度の条件下で、以下の成果が得られた：(1)実験として、気泡崩壊の観測、圧力分布計測、音速の算出を行った。(2)理論解析として、散逸性の効果および流速の非一様分布の影響を考慮し、数学モデルを構築した。(3)数値解析として、上記(2)で導いた非線形波動方程式を解き、圧力分布と音速の数値予測を行った。(4)理論・数値解析から得られた結果の多くが実験事実と一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気泡を含む水の流れの研究において、気体の占める割合は1%程度に小さいことが当たり前であったが、泡の有効活用を目指す観点からは、沢山の泡を含む「高濃度気泡流」に挑む必要がある。しかし、10%を超える高濃度の場合、音速の理論予測値と実験事実の間に大きな乖離があった。本研究は、厳密な数学的理論解析と精密な計測を適切に組み合わせ、上記乖離の原因を指摘すると同時に、乖離の多くの解消に成功した。

研究成果の概要(英文)：A large difference between theoretical and experimental values of speed of sound in bubbly flows in a high void fraction should be corrected. The purpose of this study is to improve this difference by integrating a theory and an experiment. The main results are as follows: (i) The observation of bubble collapse, and the measurement of speed of sound and the pressure distribution, were experimentally performed; (ii) Nonlinear wave equations were theoretically derived especially focusing on a wave dissipation effect and a nonuniform distribution of flow velocity; (iii) The pressure distribution and the speed of sound were numerically predicted by solving the above-mentioned nonlinear wave equations; (iv) Theoretical and numerical values almost coincided with experimental values.

研究分野：流体力学、非線形波動

キーワード：音速 ボイド率 気泡流 圧力波 ソリトン 衝撃波 非線形波動 非線形音響学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

気泡流(気泡を含む液体の流れ)中の音波伝播を扱う「気泡流音響」の分野は、50年以上の歴史を有する基礎科学であると同時に、最近では医療や洗浄などの応用に基礎知見を還元しつつある(van Wijngaarden, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1972のような先駆的の古典から Delale (ed.), *Bubble Dynamics and Shock Waves*, Springer, 2013などの新刊まで)。van Wijngaardenは、気泡流の気相と液相をひとまとめに体積平均化し、単相流の方程式のように扱う「均質流モデル(類似モデルに「混合体モデル」があり、両者を区別することも多いが、本報告書内では同一視する)」なる著名な数学モデルを提唱した。均質流モデルに基づく「均質流音速」によれば、気泡流中の音速は、たとえば50 m/s程度と、水中よりもまた空気中よりも劇的に低下する。さらに、音速がボイド率(気相の体積分率)に強く依存することも重要な事実である。以上の意味で、気泡流中の音速とは、気泡流を象徴する物理量の1つであって、音速への理解を深めることは、気泡流現象の本質の理解につながる。

気泡流音響を調べる際に均質流音速を利用する研究者は枚挙に暇がない。多くの研究者が、音速の実験的計測値と均質流音速(理論値)を比較し、定性的・定量的によく一致することを示してきた(松熊ら, 混相流, 2013; 上澤ら, 混相流, 2014など)。しかしながら、「なぜ一致するのか?」への答えが見つかっていない。そもそも均質流モデルは、個々の気泡同士が十分に離れていることや気泡の空間分布が一樣であることを前提とするが、気泡の崩壊や分裂を伴う実験系に対しても、均質流音速は、なぜか実験値とよく一致する。ここに、van Wijngaardenの平均化に対する天才的発想を垣間見る一方で、代表者はブラックボックスを感じていた。

代表者らは、最近の理論解析において、ボイド率が「10%超」という高濃度の気泡流においては、均質流(混合体)モデルが適用困難であることを示唆する結果を得ていた(金川ら, 機論B, 2010)。一方、上澤らの実験結果(2014)によれば、均質流音速(理論値)と音速計測値(実験値)は、ボイド率が小さな場合には確かによく一致しているが、例えば8%においては、理論値が40 m/s程度で実験値が60 m/s程度と、実に20 m/sものズレが生じていた。そこで、ボイド率のオーダが、概ね「10%超」となるととき、以下の疑問が生じた:(i) 均質流音速を万能と信じてよいのか? 適用限界はないのか? (ii) 適用限界があるのなら、それは、定性的・定量的にどの程度か? (iii) 理論と実験の両者が、偶然にも、2010年代前半という同時期に、「10%超のときに適用困難」という共通の認識に辿り着いているが、これは単なる偶然なのか?

これらの懐疑が、研究開始当初の背景であり、「高濃度・気泡流音響学」なる新たな分野の開拓を決意するに至った動機であった。

### 2. 研究の目的

気泡流のボイド率が概ね10%を超えるとときに、音速の理論値と実験値が乖離する。本研究の目的は、「なぜ?」乖離するのかを解明し、この乖離を解消することを通して、気泡流現象の理解の深化を目指し、「高濃度・気泡流音響学」なる新たな学術体系を構築することにある。

### 3. 研究の方法

- (1) [実験] ベンチュリ(縮小・拡大)管を用いて、高濃度気泡流中の圧力と音速を計測する。
- (2) [理論解析] 流速分布を考慮した非線形波動方程式、および、音速の理論式を導出する。
- (3) [数値解析] 上記(2)を数値的に解いて、圧力波形を描き、音速の数値解を求める。
- (4) [総括] 圧力波形と音速の実験値と理論値を比較し、高濃度・気泡流音響学を創成する。

### 4. 研究成果

#### (1) 実験的計測:

ベンチュリ管内に水と空気を流し、気泡流中を伝播する圧力波の局所的なボイド率と圧力分布を計測した。同時に、管内の圧力伝播に大きな影響を及ぼす、気泡崩壊現象の可視化観測を行った。さまざまな初期ボイド率の条件下において、音速の計測値を網羅的に整備した。その結果、ボイド率が概ね10%を超過するとき、均質流音速(van Wijngaarden, 1972)の適用限界が示唆された。

#### (2) 理論解析:

上記(1)で判明した、高濃度の条件下における実験事実在即した理論創成に向けて、まず、液相バルクの粘性と熱伝導性、および、流速の非一様分布が、重要な役割を果たすことを見出した。その上で、気泡流の基礎方程式系に対して、多重尺度法に基づく漸近解析を実行した。その結果、実験結果を説明する非線形波動方程式の導出に成功した。成果のうち、1つは Korteweg-de Vries-Burgers (KdVB) 型、もう1つは非線形 Schrödinger (NLS) 型の方程式だが、代表者らの先行研究(Kanagawa, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2015; Kanagawa et al., *J. Fluid Sci. Technol.*, 2010)で導かれた類似の方程式と比較して、諸係数の変化と補正項の発現が明らかになった。さらに、線形近似から得られる音速の関数形が変化したことも重要な事実である。

#### (3) 数値解析:

有限差分法を用いて、上記(2)で導かれた KdVB 方程式と NLS 方程式を数値的に解き、上記(1)で得られた計測値との比較を行った。代表者らの先行研究(2010)において、非線形性・散逸性・

分散性がバランスすることは、定性的知見として留まっていたが、本数値解析によって、これら3つの効果が、非線形性、分散性、散逸性という順番で現れるという結果を定量的に整理できた。また、この順番は、初期波形にほぼ依存しないことも判明した。得られた数値解から、圧力波形の速度を求めた結果、上記(1)で得られた音速計測値と概ね一致した。なお、本数値解析の成果は、2019年6月時点では未公表に留まっているが、同年8月以降に複数の国内学会での発表(下記5節:[学会発表](1)(2)(3)(7)、いずれも採択済)を経て、結果の精査後、速やかに学術雑誌に論文投稿の予定である。

#### (4) 総括と展望：

上記(1)(2)(3)のとおり、実験事実の多くが、理論解析の結果と整合し、裏付けがとれた。ただし、理論解析が当初計画以上に進展したことから、理論予測結果のいくつかは、未だ実験的に検証されていない状況にある。したがって、実験的研究をさらに推し進める必要があるが、本成果のように、あくまでも、理論・数値解析と実験の相補の観点から、厳密な理論構築および精密な計測実験を遂行すれば、「高濃度・気泡流音響学」の完全なる創成までの道のりは険しくはないだろう。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 25 件)

- (1) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡流中における粘性と熱伝導を伴う音波伝播を記述する2種類の非線形波動方程式, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無 (2019), 掲載決定.
- (2) 前田泰希, 金川哲也: 初期流速が存在する気泡流中の長波と短波を記述する二種類の非線形波動方程式, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無 (2019), 掲載決定.
- (3) 慶本天謹, 金川哲也: 気泡流中を水中音速超で高速伝播する高周波圧力波を表す非線形波動方程式の導出, 混相流, 査読有, 第33巻(2019), pp. 77-86. [DOI] 10.3811/jjmf.2019.006
- (4) Kanagawa, T., Akutsu, R. and Yoshimoto, T.: Theoretical Analysis on Nonlinear Modulation of High Speed Ultrasound in Compressible Liquids Containing Many Microbubbles, *Proceedings of the 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 査読有 (2019), #2087, Total 8 Pages.
- (5) Kanagawa, T. and Kamei, T.: Thermal and Viscous Damping of Propagation Process of Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Liquids, *Proceedings of the 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 査読有 (2019), #2088, Total 9 Pages.
- (6) Kanagawa, T. and Maeda, T.: Two Types of Evolution Equations for Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Flows: Effect of Initial Flow Velocities on Pressure Waves, *Proceedings of the 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 査読有 (2019), #2090, Total 9 Pages.
- (7) Kamei, T. and Kanagawa, T.: Two Types of Nonlinear Pressure Waves in Bubbly Liquids Incorporating Viscosity and Thermal Conductivity, *Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019*, 査読有 (2019), #4663, Total 7 Pages.
- (8) Yoshimoto, T. and Kanagawa, T.: Weakly Nonlinear and High Speed Propagation of Quasi-Monochromatic High Frequency Waves in Compressible Bubbly Liquids, *Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019*, 査読有 (2019), #4682, Total 5 Pages.
- (9) Maeda, T. and Kanagawa, T.: An Effect of Flow Velocity on Propagation Properties of Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Flows, *Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019*, 査読有 (2019), #4774, Total 10 Pages.
- (10) Akutsu, R., Kanagawa, T. and Uchiyama, Y.: Derivation of an Amplitude Equation for Weakly Nonlinear Pressure Waves of a Very High Frequency in a Compressible Liquid Containing Many Microbubbles, *Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019*, 査読有 (2019), #4776, Total 6 Pages.
- (11) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡を含む水中を伝わる非線形音波に粘性と熱伝導性が及ぼす影響の理論的研究, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 第119巻(2019), pp. 11-13.
- (12) Kanagawa, T.: Nonlinear Schrödinger Equation for a Fast Pressure Propagation in Bubbly Liquids, *AIP Conference Proceedings*, 査読有, Vol. 1978 (2018), #210004, Total 4 Pages. [DOI] 10.1063/1.5043849
- (13) Yoshimoto, T. and Kanagawa, T.: Quasi-Monochromatic Weakly Nonlinear Waves of High Frequency Exceeding Eigenfrequency of Bubble Oscillations in Compressible Liquid Containing Microbubbles, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 査読有, Vol. 34 (2018), #045001, Total 5 Pages. [DOI] 10.1121/2.0000819

- (14) Akutsu, R., Kanagawa, T. and Uchiyama, U.: Multiple-Scales Analysis on High Speed and High Frequency Pressure Waves Induced by Liquid Compressibility in Bubbly Liquids, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 査読有, Vol. 34 (2018), #045031, Total 5 Pages. [DOI] 10.1121/2.0000901
- (15) Kanagawa, T. and Yoshimoto T.: High Speed and Weakly Nonlinear Propagation of Quasi-Monochromatic Acoustic Waves in Bubbly Liquids, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 査読有, Vol. 18 (2018), pp. 192-199.
- (16) Kanagawa, T., Yoshimoto, T. and Akutsu, R.: An Effect of Liquid Compressibility on Acoustic Wave Propagation in Bubbly Liquids, *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation*, 査読有 (2018), Total 4 Pages.
- (17) 金川哲也, 慶本天謹: 気泡を含む圧縮性液体中を高速で伝播する準単色圧力波の弱非線形変調, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 第118巻 (2018), pp. 17-21.
- (18) 慶本天謹, 金川哲也: 気泡を含む圧縮性液体中における高速準単色波の弱非線形伝播, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 第2076巻 (2018), pp. 88-99.
- (19) 坏 亮輔, 金川哲也: 気泡を含む圧縮性液体中を高速で伝播する高周波数圧力波の多重尺度解析, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 第2076巻 (2018), pp. 100-106.
- (20) Kanagawa, T.: Theoretical Study on a Fast Propagation of Pressure Waves in Bubbly Liquids, *Extended Abstract of the 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 査読有 (2017), #1011, Total 5 Pages.
- (21) Fujii, K., Kanagawa, T., Uesawa, S., Kaneko, A. and Abe, Y.: Measurement of Sound Speed of Bubbly Flows with a High Void Fraction in a Venturi Tube, *Extended Abstract of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 査読有 (2017), #1264, Total 5 Pages.
- (22) Kanagawa, T.: Weakly Nonlinear Formulation on Acoustic Waves in Liquids Containing Many Spherical Gas Bubbles, *Proceedings of the 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 査読有 (2017), #110, Total 7 Pages.
- (23) Kanagawa, T., Fujii, K., Uesawa, S., Kaneko, A. and Abe, Y.: Inhomogeneous Theory Based on Sound Speed Measurement for Mixture of Water and Many Microbubbles in a Converging-Diverging Tube, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 査読有, Vol. 17 (2017), pp. 68-72.
- (24) Fujii, K., Kanagawa, T., Uesawa, S., Kaneko, A. and Abe, Y.: Propagation Characteristics of Acoustic Waves in Non-Dilute Bubbly Flows in a Venturi Tube, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering*, 査読有 (2017), #P-39, Total 5 Pages.
- (25) Kanagawa, T.: An Effective Equation for Fast Propagation of Pressure Waves in Compressible Liquids Containing Microbubbles, *Extended Abstract of 2017 Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, 査読有 (2017), pp. 25-28.

[学会発表](計 34 件)

- (1) 金川哲也, 鮎貝崇広: 気泡を含む水中を伝わる音響ソリトンの数値シミュレーション, 日本音響学会 2019 年秋季研究発表会 (2019).
- (2) 鮎貝崇広, 金川哲也: 気泡流における圧力波の弱非線形伝播の数値解析, 日本機械学会 第 32 回計算力学講演会 (2019).
- (3) 鮎貝崇広, 金川哲也: 気泡を含む水中を伝播する非線形圧力波とソリトンの数値計算, 日本機械学会 2019 年茨城講演会 (2019).
- (4) 前田泰希, 金川哲也: 気泡流の流速分布が非線形音響波に及ぼす影響に関する解析, 日本機械学会 2019 年茨城講演会 (2019).
- (5) 藤本あや, 金川哲也: 気液界面における質量流束を考慮した気泡流中の弱非線形圧力波の理論解析, 日本機械学会 2019 年茨城講演会 (2019).
- (6) 亀井陸史, 金川哲也: 多数の空気泡を含む水中における非線形圧力波 ~ バルク粘性と熱伝導性が与える影響の理論的考察 ~, 日本機械学会 2019 年茨城講演会 (2019).
- (7) 鮎貝崇広, 金川哲也: 気泡を含む水中における圧力波の弱非線形伝播の数値シミュレーション, 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- (8) 坏 亮輔, 慶本天謹, 金川哲也, 内山祐介: 気泡流中を超高速で伝わる圧力波を記述する 2 種類の非線形 Schrödinger 方程式, 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- (9) 藤本あや, 金川哲也: 気泡流中において物質輸送を伴う非線形圧力波の理論的研究, 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- (10) 谷田部貴大, 金川哲也: 抗力を受ける並進気泡から放射される音波の弱非線形理論, 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- (11) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡流のバルク粘性と熱が非線形圧力伝播に及ぼす影響の理論解析, 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- (12) 前田泰希, 金川哲也: 気泡流中の非線形音波と流速の関係の理論的解明, 混相流シンポジウム 2019 (2019).

- (13) 坏 亮輔, 慶本天謹, 金川哲也, 内山祐介: 気泡流中における超高速圧力波の弱非線形伝播の理論予測, 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム (2019).
- (14) 前田泰希, 金川哲也: 初期流速を伴う気泡流中を伝わる圧力波の弱非線形理論解析, 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム (2019).
- (15) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡流中における平面圧力波の弱非線形伝播に粘性と熱伝導性が及ぼす影響, 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム (2019).
- (16) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡を含む水中を伝わる非線形音波に粘性と熱伝導性が及ぼす影響の理論的研究, 超音波研究会 (2019).
- (17) 前田泰希, 金川哲也: 気泡流中の非線形圧力波の伝播に流速が与える影響に関する理論的研究, 日本機械学会関東学生会第 58 回学生員卒業研究発表講演会 (2019).
- (18) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡流中の非線形圧力波に粘性と熱伝導性が与える影響の理論解析, 日本機械学会関東学生会第 58 回学生員卒業研究発表講演会 (2019).
- (19) 金川哲也, 前田泰希: 気泡を含む水中における 2 種類の非線形音波の理論解析～流れの速度が音に与える影響～, 日本音響学会 2019 年春季研究発表会 (2019).
- (20) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡流中を伝わる非線形圧力波に粘性と熱伝導性が及ぼす影響, 第 32 回数値流体力学シンポジウム (2018).
- (21) 坏 亮輔, 金川哲也, 内山祐介: 気泡を含む圧縮性液体中を超高速で伝わる超高周波・超音波の多重尺度理論, 日本機械学会第 96 期流体工学部門講演会 (2018).
- (22) 慶本天謹, 金川哲也: 圧縮性気泡流中における超高速・準単色波動に関する非線形解析, 日本機械学会第 96 期流体工学部門講演会 (2018).
- (23) 亀井陸史, 金川哲也: 気泡を含む液体中の弱非線形波動における粘性と熱伝導の効果, RIMS 研究集会「非線形波動現象の数理に関する最近の進展」(2018).
- (24) 前田泰希, 金川哲也: 気泡流中の波動伝播に初期流速が与える影響, RIMS 研究集会「非線形波動現象の数理に関する最近の進展」(2018).
- (25) 慶本天謹, 金川哲也: 水中音速を超えて気泡液体中を伝わる高周波の圧力波の非線形伝播, 混相流シンポジウム 2018 (2018).
- (26) Yoshimoto, T. and Kanagawa, T.: Quasi-Monochromatic Weakly Nonlinear Waves of High Frequency Exceeding Eigenfrequency of Bubble Oscillations in Compressible Liquid Containing Microbubbles, *21st International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA21)* (2018).
- (27) Akutsu, R., Kanagawa, T. and Uchiyama, Y.: Multiple-Scales Analysis on High Speed and High Frequency Pressure Waves Induced by Liquid Compressibility in Bubbly Liquids, *21st International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA21)* (2018).
- (28) 金川哲也, 慶本天謹: 気泡を含む圧縮性液体中を高速で伝播する準単色圧力波の弱非線形変調, 超音波研究会 (2018).
- (29) Kanagawa, T.: Nonlinear Schrodinger Equation for a Fast Pressure Propagation in Bubbly Liquids, *15th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM2017)* (2017).
- (30) 慶本天謹, 金川哲也: 気泡を含む圧縮性液体中を高速で伝播する非線形波動 (1) 強分散性の長波, RIMS 研究集会「非線形波動現象の数理とその応用」(2017).
- (31) 坏 亮輔, 金川哲也: 気泡を含む圧縮性液体中を高速で伝播する非線形波動 (2) 弱分散性の短波, RIMS 研究集会「非線形波動現象の数理とその応用」(2017).
- (32) 金川哲也, 他 3 名: 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).
- (33) 藤井啓太, 金川哲也, 他 4 名: ベンチュリ管内の気泡流を利用した洗浄における可視化計測, 関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会 (2017).
- (34) 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 (172nd Meeting of ASA)* (2016), 招待講演

[ その他 ]

ホームページ:

[ 筑波大学・金川研究室 ] <http://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp/>

[ 筑波大学・研究者総覧 ] <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/3535/>

[ Researchmap ] <https://researchmap.jp/read0156453/>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。