

(1) 超高速・超音波を用いたキャビテーションの制御、
(2) 気泡液体中の衝撃波に粘性と熱が及ぼす効果、
(3) 気泡流中の超音波と流れの関係の解明

(1) Theoretical Analysis on Nonlinear Modulation of High Speed Ultrasound in Compressible Liquids Containing Many Microbubbles, (2) Thermal and Viscous Damping of Propagation Process of Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Liquids, (3) Two Types of Evolution Equations for Weakly Nonlinear Waves in Bubbly Flows: Effect of Initial Flow Velocities on Pressure Waves

H31海自18

派遣先 第48回 国際騒音制御工学会議 (スペイン・マドリッド)

期 間 2019年6月15日～2019年6月20日 (6日間)

申請者 筑波大学 システム情報系 助教 金 川 哲 也

海外における研究活動状況

研究目的

ポンプの損傷を招く要因として、ポンプ内部を流れる水中の衝撃波形成がある。衝撃波は損傷を招く悪者だが、衝撃波をソリトンという安全な波に変換し、ポンプから速やかに放出できれば、ポンプを損傷から救うことができる。本研究の目的は、この夢を実現化するための「流れ制御」の理論的基盤創成にある。

海外における研究活動報告

ポンプに代表される水力機器の損傷を招く要因として、ポンプ内部水流中の「衝撃波」形成がある。衝撃波は損傷を招く悪者といえるが、衝撃波を、「ソリトン」という安全な波に変換し、ポンプから速やかに放出できたならば、ポンプを損傷から救うことができる。この構想の実現に向けた、流れ制御の理論的基盤創成が、本研究の目的である。

非線形音響理論によれば、衝撃波は波の「散逸性」に起因し、ソリトンは「分散性」に起因する。それゆえ、分散性の大きさを散逸性の大きさよりも増幅させることができれば、衝撃波のソリトン遷移が実現できる。実際に、空

気中では、今世紀に衝撃波のソリトン遷移の成功例があり (Sugimoto et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2001)、その成果が新幹線トンネル等にも実装されつつある。しかし、水と空気では、全く状況が異なる。水中の音波 (圧力波) には、原則として、分散性は存在しないからである。

一体どのようにして、分散性を持ち込めばよいのだろうか。ここで「気泡」の出番である。単なる水ではなくて、沢山の気泡を含む水中において、気泡が振動すれば、分散性が発現するからである (van Wijngaarden, *J. Fluid Mech.*, 1968)。このような意図的な気泡混入によって、分散性を適切に増幅できたならば、衝撃波を抑制する革新的技術開発が可能となる。その前段階として、気泡流 (多数の気泡を含む水の流れ) 中における、散逸性と分散性の大きさを見積もる必要がある。これらが、圧力波が衝撃波とソリトンのどちらに発展するかを決定づけるからである。したがって、これを記述する方程式の導出から研究を始め、「『どのような大きさの気泡をどのくらい』水に混ぜれば、衝撃波のソリトン遷移が可能なのか?」への定量的解答の提示を目指す。

長年、気泡流中の音速は、高々100 m/s程度と知られてきた。しかし、新たなモードとして、

水中音速1,500 m/sを超えて伝播する「高速波」の存在が、最近報告された(Nigmatulin, 1991 など)。この「高速波」を、上記の衝撃波のソリトン遷移へと活用しない手はない。なぜなら、衝撃波へと発展する可能性を秘めた危険な波を、無事にソリトンに遷移できたならば、それを、ポンプから「できる限り早急に逃がすべき」だからである。しかし、高速波の伝播特性の理論的研究は、殆ど線形解析に留まっており、実現象理解のためには「非」線形解析が急務である。

以上を踏まえ、本渡航においては、以下3件の最新成果に関する発表を行った：

1. 高速波の伝播過程の解明：上記、高速で伝わる音波が、2種類の非線形Schrödinger方程式に従うことを示した。
2. 熱と粘性が及ぼす影響：非線形波動方程式に基づく研究において無視されてきた、バルクの粘性および熱伝導性を考慮した解析を行った。圧力波の衝撃波への発展を危惧する観点から、波面における熱と粘性による強い散逸効果を調べたことは意義深い。
3. 流れの速度が波に及ぼす影響：高速で流れるポンプ内の水流を適切にモデリングすべく、液相と気相の初期流速として非一様分布を仮定し、波に及ぼす影響を解明した。

渡航後の精査を経て、全ての成果が、下記のとおり、査読付雑誌論文の計4編(1) -4) の形で発刊されたことを申し添え、貴財団のご高配に、改めて深謝申し上げます。

**この派遣の研究成果等を発表した
著書、論文、報告書の書名・講演題目**

[査読付論文]

- 1) 前田泰希, 金川哲也, 気液各相の初期非一様流速分布を有する気泡流中圧力波の弱非線形理論, 混相流, 34 (1), pp.140-147, 2020
- 2) 亀井陸史, 金川哲也, 気泡流中の短波の弱非線形伝播に粘性と熱伝導性が及ぼす影響に関する理論的研究, 混相流, 34 (1), pp.148-157, 2020

- 3) 坪亮輔, 慶本天謹, 金川哲也, 内山祐介, 圧縮性気泡流中を水中音速超で高速伝播する2種類の高周波圧力波に対する弱非線形理論, 混相流, 34 (1), pp.166-179, 2020
- 4) 亀井陸史, 鮎貝崇広, 金川哲也, 気泡流中の長波の弱非線形伝播に粘性と熱伝導性が及ぼす影響に関する理論的研究, 土木学会論文集A2 (応用力学), 75 (2), pp.499-508, 2019

[査読付き国際会議論文]

- 1) Kanagawa, T., Yoshimoto, T. and Akutsu, R., 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, 2019
- 2) 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, 2019
- 3) 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, 2019

[国内学会講演]

- 1) 坪亮輔, 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, 2019-08
- 2) 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, 2019-08 [ベストプレゼンテーションアワード受賞]
- 3) 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, 2019-08
- 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, 2019-08 [優秀講演賞受賞]
- 5) 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, 2019-08 [優秀講演賞受賞]