

補助事業番号 2022M-236

補助事業名 2022年度 水中の衝撃波とソリトンそして気泡の利活用による水管の損傷抑制と管壁洗浄の技術開発 補助事業

補助事業者名 筑波大学 システム情報系 准教授 金川哲也

1 研究の概要

水管は、ライフラインやポンプなど、我々の生活に欠かせない必需品である。本事業では、この水管に見られる損傷を抑制すると同時に、管壁の汚れを洗浄することを目指す（図1）。水管損傷の要因は、水流中における衝撃波の形成である。衝撃波は損傷を招く悪者だが、水流中に空気を流し、マイクロバブルを効果的に用いると、衝撃波をソリトンという安全な波に変換できる。一方、衝撃波を適切に利用すると管壁の洗浄も可能となる。以上のために、衝撃波とソリトンの切替を可能とする理論的基盤を確立させる。

2 研究の目的と背景

図1にも示す通り、目的は以下の2点に集約される。いずれも、衝撃波とソリトンの制御と利活用が本質であり、衝撃波とソリトンを記述可能な数理モデルを構築し、衝撃波とソリトンそれぞれの形成条件を解明する：（1）水中における気泡の振動のうち、弱い非線形性のみを上手く利用して、衝撃波をソリトンに変換し、その上で水管から放出させて損傷の懸念を排除する。本構想は前例がないため、実現に向けた基盤理論から構築する。（2）逆の原理で、水管に除去すべき汚れが存在した場合に、弱めの衝撃波の熱的散逸効果を利用して汚れを洗浄する。

3 研究内容

上記目的の（1）と（2）において鍵となるのは、衝撃波とソリトンである。そもそも、衝撃波は圧力波の非線形効果と散逸効果の釣合で、ソリトンは非線形効果と分散効果の釣合によって形成される。非線形効果に対する、散逸・分散効果の比率という意味において、形成の起源は似ているが、両波の物理的性質は全く異なる点が重要である。そこで、非線形・散逸・分散という「3性質」を求め、比較を要する。しかし、実験と数値計算からは計測値（圧力等）や波形という現実概念は判明するが3性質を求められない点が重要である（「分散計」は存在しない）。

そこで、理論的視点に立つと、衝撃波とソリトンを共に記述可能な数理モデルを創ることが可能である。それは、「弱非線形方程式」という、非線形項・散逸項・分散項の線形和で、3つの係数が3性質の大きさを表す方程式である（図2）。弱非線形方程式は、気泡流の運動全てを記述する基礎方程式系（約10連立方程式）から導くことができる。弱非線形方程式を導けたならば、3性質の係数が確定するので、3性質の大きさが判明し比較が可能となり、発展波形が予測できる（例：非線形=100、分散=99、散逸=2ならばソリトン）。仮に、係数から予

測が不可能であっても、弱非線形方程式1本の数値解析から波形が得られる。

(1) 損傷抑制

(<https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp/category/%e7%a0%94%e7%a9%b6%e5%86%85%e5%ae%b9>)

△

水に気泡を混入させると、波の分散性が現れ、分散と非線形が釣り合うとき、危険な衝撃波をソリトンに変換することができる。そこで、散逸を抑制し分散を増幅させて、衝撃波のソリトン変換によって、水管の損傷の回避を目指す。

(2) 洗浄

(<https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp/category/%e7%a0%94%e7%a9%b6%e5%86%85%e5%ae%b9>)

△

逆に、衝撃波を形成させることによって、管壁の汚れを、衝撃波の熱的な散逸効果によって洗浄する。気泡振動の振幅の適切な制御により、散逸効果の向上を狙う。

★ 衝撃波を使いたい部位と使いたくない部位での切替

アイデア

気泡を注入することで、
衝撃波を「ソリトン」へ変換する

↑

熱散逸を伴わず安定（衝撃波と真逆の性質）

➡ 僅か一本の数式を用いるだけで、
洗浄と損傷抑制のハイブリッド技術を提案する

衝撃波とソリトン双方を記述可能な
KdV-Burgers式

$$\frac{\partial p_L}{\partial t} + c_1 \frac{\partial p_L^2}{\partial x} + c_2 \frac{\partial^2 p_L}{\partial x^2} + c_3 \frac{\partial^3 p_L}{\partial x^3} = 0$$

非線形項 散逸項 分散項 ← 気泡によって現れる

★ 解くのではなく、係数 c の比較だけから波形変化が予測可能！

非線形 c_1	散逸 c_2	分散 c_3	発展波形
100	100	1	衝撃波型
非線形 + 散逸			= 衝撃波
100	1	100	ソリトン型
非線形 + 分散			= ソリトン

衝撃波

ソリトン

図1：洗浄と損傷回避のハイブリッド技術

図2：弱非線形方程式に基づく発展波形の予測

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

水管は、ライフラインは勿論、ポンプを始めとする水力機器など、我々の生活に欠かせず、世界中に実装されている。あらゆる場面で生じる水管損傷は我々の生活を不便にするばかりでなく、ターボマシンの重大事故につながる恐れを秘めるため避けねばならない。加えて、水管の汚れも、衛生面から問題視されている。

そこで、水管の損傷抑制と洗浄のハイブリッドを可能とする、前例のない新技術へと発展することを着想している(図1)。弱非線形方程式は衝撃波とソリトンの双方を記述するため(図2)、当該技術の実現のための理論的基盤を築くことができた。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

今回研究は、約15年間専念してきた、気泡流中の波動に関する基礎研究を、水管の損傷抑制と洗浄の両立という、新たな技術開発に向けた応用研究に位置づけられる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

計8編が国際一流誌に掲載された。特に代表的な成果論文は以下の4編である：

- 1) [Kanagawa, T., Ishitsuka, R., Arai, S. and Ayukai, T., ``Contribution of initial bubble radius distribution to weakly nonlinear waves with a long wavelength in bubbly liquids,`` *Physics of Fluids* \(IF2021=4.980, Q1\), Vol. 34 \(2022\), 103320.](#)
- 2) [Hasegawa, T. and Kanagawa, T., ``Effect of liquid elasticity on nonlinear pressure waves in a visco-elastic bubbly liquid,`` *Physics of Fluids* \(IF2021=4.980, Q1\), Vol. 35 \(2023\), 043309.](#)
- 3) [Kawame, T. and Kanagawa, T., ``Weakly nonlinear propagation of pressure waves in bubbly liquids with a polydispersity based on two-fluid model equations,`` *International Journal of Multiphase Flow* \(IF2021=4.044, Q2\), Vol. 164 \(2023\), 104369.](#)
- 4) [Ayukai, T. and Kanagawa, T., ``Derivation and stability analysis of two-fluid model equations for bubbly flow with bubble oscillations and thermal damping,`` *International Journal of Multiphase Flow* \(IF2021=4.044, Q2\), Vol. 165 \(2023\), 104456.](#)

7 補助事業に係る成果物

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 筑波大学システム情報系（つくばダイガクシステムジョウホウケイ）

住 所： 〒305-8573

つくば市天王台1-1-1

担 当 者： 准教授 金川 哲也（カナガワ テツヤ）

担 当 部 署： 理論混相流体力学研究室（リロンコンソウリュウタイリキガクケンキ
ユウシツ）

E - m a i l : kanagawa.tetsuya.fu@u.tsukuba.ac.jp

U R L : <https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp>