

ポンプの損傷低減のための衝撃波の音響ソリトン変換と高速放出

筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域
助教 金川哲也

1. 衝撃波と音響ソリトン

ポンプの損傷を招く原因に、水流における衝撃波の形成が挙げられる。衝撃波は、有限振幅の音波の伝播に伴って蓄積される「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。ならば、散逸性の大きさを制御し、衝撃波を抑制することは叶わないだろうか。ここで、「分散性」という、「非線形性」と「散逸性」と並んで重要な波の性質の利用に着眼したい。図 1 に示すように、分散性と非線形性がカップリングすると、安定な波動「ソリトン」が形成される。ソリトンはもともと水面波の分野で発見されたが、最近、トンネル内の微気圧波に対して、散逸性を抑制して分散性を持ち込み、「音響ソリトン」の形成に成功した例がある[1]。

原則として、水や空気のような単相媒質において、分散性は存在しない。しかしながら、水中に多数の気泡を混入させるとき、気泡の体積振動が分散性を持ち込む[2]。そこで、気泡の振動を適切に制御し、分散性の大きさを適切に増幅させて散逸性よりも卓越させることに成功したならば、非線形性と分散性のカップリングが実現する。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、もはや、ポンプに損傷を与える悪玉ではなく、いわば優等生の形で、安定な形態のまま、ポンプからの脱出が可能となる。

2. 高速波への着眼

気泡流中の音速は例えば 50 m/s 程度と、空気中音速よりも、また水中音速よりも、極めて小さい[2]。最近、この常識を覆す「高速波」が発見された[3, 4]。「高速波」とは、その名のとおり高速伝播モードであって、水中音速 1,500 m/s を超えて伝わる波を指す(地震波でいうところの P 波に例示される)。しかしながら、高速波の実験的観測[3]において、その振幅計測値が極めて小さいことが判明しており、詳細な計測の推進が困難な状況にある。したがって、現在、理論的予測が強く望まれている。高速波の理論的知見は、線形解析に留まっており[4]、ポンプという実対象への応用を目指す上では、非線形解析が欠かせない。

本研究が、「高速」波に着目する理由は、その背景から自明といえる。衝撃波発展という危険性を秘めた波を、なぜ、あえてポンプ内に留めておくのか。安定に音響ソリトン遷移させることに成功したならば、「速やかに」ポンプから逃してあげたいに決まっているではないか。そこで、本研究の目指すところは、ポンプの損傷を招きかねない水中衝撃波を、音響ソリトンに華麗に遷移させ、ポンプから高速で放出するという、先進的技術の開発に向けた理論的基盤を構築することにある。

3. 非線形波動方程式による高速波の予測

気泡流中の波の分散性を散逸性よりも卓越させて、衝撃波の抑制の実現を目指すための最重要ポイントは、「分散、散逸、非線形」という波の3大性質の大きさの適切な把握によって、「高速波は衝撃波かソリトンのいずれに発展するのか？」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数学モデルである「非線形波動方程式」を導く。衝撃波やソリトンといった非線形波動現象は、そもそも、それぞれに固有の非線形波動方程式の解であるがゆえに、その導出を通して、気泡流の難解かつ複雑な基礎方程式系(非線形性の強い連立偏微分方程式)、すなわち、気泡流の複雑怪奇な「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のである。これは、現象の本質の抽出に他ならない。

導出にあたり、著者らが提示した、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「パラメータスケール法」を用いる[5]。これは、気泡の大きさや周波数などから構成される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。これによって、ソリトンと衝撃波の双方を記述するという、雲をつかむような方程式を、短期間で効率的に導出できて、成果の効率的な創成という、本助成の趣旨にも合致する恩恵を得る。実際に、高速波を記述する多様な非線形波動方程式として、現在、非線形 Schrödinger 方程式の導出に成功した[6]。

4. 展望

そもそも、ポンプに関連する分野において、気泡は、キャビテーションエロージョンなどの損傷を招き、「悪者」として糾弾される傾向が見受けられた。本研究では、気泡の振動を、適切な制御のもとで、積極的に有効活用するという立場において、ブレイクスルーを誘発するものといえる。

今後は、高速波のふるまいを記述する非線形波動方程式[6]を、ポンプ内で想定される気泡の大きさ、気液各相の体積分率、波の周波数などといった諸条件の下で、網羅的に数値解を求める予定である。その結果から、「いかなる条件下で、ポンプ内の圧力波は、ソリトン遷移に至るのか？衝撃波を抑制できるのか？」なる問いに回答すべく、さらなる研究を推し進める。

本研究の完成の暁に、ポンプに限らず、水道管など身の回りに溢れる水を扱う多様な流体機械の損傷が、一つでも抑制されることを夢見て、本稿の締めくくりとしたい。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人カワイサウンド技術・音楽振興財団の研究助成によって遂行されました。ここに深謝申し上げます。

参考文献

- [1] Sugimoto, N., Masuda, M., Ohno, J. and Motoi, D., “Experimental Demonstration of Generation and Propagation of Acoustic Solitary Waves in an Air-Filled Tube,” *Physical Review Letter*, Vol. 83, No. 20 (1999), pp. 4053–4056.
- [2] van Wijngaarden, L., “On the Equations of Motion for Mixtures of Liquid and Gas Bubbles,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 33 (1968), pp. 465–474.
- [3] 大谷清伸, 杉山 弘, 溝端一秀, “気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波と気泡崩壊,” *日本機械学会論文集 B 編*, 第 68 巻, 第 670 号 (2002), pp. 1646–1652.
- [4] Egashira, R., Yano, T. and Fujikawa, S., “Linear Wave Propagation of Fast and Slow Modes in Mixtures of Liquid and Gas Bubbles,” *Fluid Dynamics Research*, Vol. 34 (2004), pp. 317–334.
- [5] Kanagawa, T., Yano, T., Watanabe, M. and Fujikawa, S., “Unified Theory Based on Parameter Scaling for Derivation of Nonlinear Wave Equations in Bubbly Liquids,” *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 5, No. 3 (2010), pp. 351–369.
- [6] Yoshimoto, T. and Kanagawa, T., “Quasi-Monochromatic Weakly Nonlinear Waves of High Frequency Exceeding Eigenfrequency of Bubble Oscillations in Compressible Liquid Containing Microbubbles,” *Proceedings on Meetings of Acoustics*, Vol. 34 (2018), 045001.

原稿掲載資料：図 1 のファイル

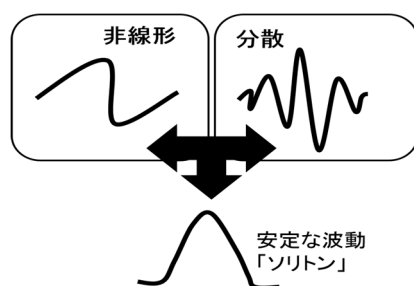


図 1: 非線形性と分散性によるソリトン形成