

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04087

研究課題名(和文)パルスパワー入射による熱・流体・構造連成現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of fluid-structure-thermal interaction induced by pulse power input

研究代表者

因幡 和晃 (Inaba, Kazuaki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：00408725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：流体から固体または固体から流体へと波動が伝播する連成現象の解明を目指し、固体の表面状態や種類を変えて固液連成界面における波動伝播現象の学理確立を目的とした研究を行った。固体表面近傍で、気泡が崩壊する際のジェット生成方向を予測し、衝撃荷重が気泡の固有振動数などによって振動することを見出した。また、薄板や厚肉板の空気中での理論をもとに流体と接する板の振動特性を予測する理論を構築し、過渡的応答と衝撃力推定のための理論式を導出した。さらに、機能傾斜材料管の自由振動の理論式を導出し、熱・流体・構造連成問題について、流体の数値解析結果を用いて疲労への影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体中の応力は、3次元ベクトル成分を持ち、流体中の圧力は静水圧成分としてのスカラー量として定義される。本研究では、このような二つの媒体を伝播する波動が固液連成界面をどのように伝わり、また界面で入射・反射が生じるかに着目して研究を実施したものである。このような状況は、流体中でキャビテーション気泡が生成・崩壊した場合や、爆発などが生じて衝撃波や圧力波が伝播する際に観察される。発電所やプラントの配管系で生じるほか、流体ポンプや自動車の燃料噴射、ブレーキシステムなどでも問題となることから、社会の幅広い分野での工業的応用が可能となる研究である。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the examination of the coupled phenomenon of wave propagation from fluid to solid or solid to fluid, we conducted research to build the theory of wave propagation phenomenon at the solid-liquid coupled interface by changing the surface state and type of solid. We predicted the direction of jet formation when bubbles collapse near the solid surface and found that the impact load vibrates due to the natural frequency of the bubbles. In addition, based on the theory of thin and thick plates in air, we constructed a theory to predict the vibration characteristics of plates in contact with fluid, and derived theoretical formulas for transient response and impact force estimation. Furthermore, the theoretical formula of the free vibration of the functionally graded material pipe was derived, and the effect on fatigue was evaluated for the thermal-fluid-structural coupling problem by comparing with numerical simulations.

研究分野：機械工学，材料力学，流体力学，計算工学

キーワード：流体構造連成 キャビテーション壊食 サーマルストライピング

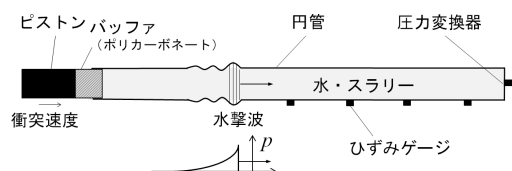
### 1. 研究開始当初の背景

2001年11月に浜岡原子力発電所一号機で発生した水素爆発が原因の配管破断事故は、放射線により生成した可燃性酸水素混合気が着火し爆燃・爆轟したことが原因と報告されている。管路端部に水が存在しており、水素爆発の衝撃が水撃波動として伝播し被害が拡大した可能性もある。水撃波動は、流体中の圧力波と固体中の応力波・曲げ波とが相互に連成しながら伝播する流体構造連成問題であり、パルスパワー（衝撃荷重）が流体から固体あるいは固体から流体へと伝わり、ときに界面における破壊（流体側：キャビテーション、固体側：き裂進展、壊食）を引き起こす。

このような連成問題は、爆発などの極限状態のみの問題ではなく、水力発電所等のタービンや、化学プラント、揚水機場等におけるポンプなどの大型機器から、自動車のエンジンの燃料噴射部、ブレーキの制御システム、建設機械の油圧システムなどでも幅広く生じることが報告されている。現状、これらの問題に対しては、多くの費用と時間をかけて試行錯誤し、実験で問題が生じないことを確認した後、実機製造の工程に進むといった開発が行われている。また、高度成長期に製造されたインフラとして揚水機場のポンプを更新するには膨大な予算が必要となるため、延命化に向けた補修技術の確立も求められている。デジタルツインを実現し、コンピュータシミュレーションで大半のデザインプロセスを完了するには、複雑な連成現象を解明し、適用限界を明らかにすることが必要不可欠である。本研究では、流体から固体へとパルスパワーが伝わる過程での熱・流体・構造連成現象の学理確立を目指している。

### 2. 研究の目的

研究代表者（因幡）は、配管内での爆発事故を想定し、水撃波面における流体構造連成現象の解明や被害低減のための研究（若手(B) H.24-H.26「水撃の流体構造連成におけるバンドギャップ効果の検証」、若手(A) H.26-H.29「固液連成界面における波動伝播現象の解明」）を行ってきた。固液界面の連成現象は、主として流体の圧力で管（構造）が膨らみ、管が膨らむことで管内の圧力が減少する相互作用で説明できる。一連の研究を通じて、水撃波面の力学を考察する際に、波面上流側と下流側の十分遠方における力のつり合いを考えて一次的に取り扱う理論の限界を指摘し、水撃波動の計測と可視化を行うことで、管が膨らむ際に慣性が無視できず水撃波面背後で管ひずみや圧力が一次元解に対して振動して二次元軸対称、あるいは三次元構造となることを明らかにしている。さらに管内に水と音響インピーダンス（密度と音速の積）に近いポリカーボネート粒子が存在する場合でも、強い反射が起こり、金属粒子が存在する場合と同程度の管ひずみ（被害）が発生することを明らかにした。このように流体中を伝播する圧力波と固体中を伝播する応力波が連成する現象は、流体のパルスパワーが固体へ伝わり生じるキャビテーション壊食のメカニズムとも密接な関係があり、固液連成界面での波動伝播現象を解明することで、極限事故における被害を正確に予測したり、新しい波動制御や被害低減を可能にしたりする革新的な技術を創出することを目的としている。

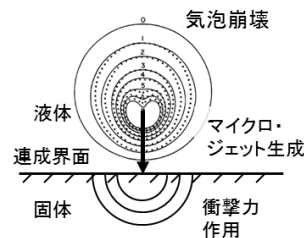


研究代表者（因幡）は、配管内での爆発事故を想定し、水撃波面における流体構造連成現象の解明や被害低減のための研究（若手(B) H.24-H.26「水撃の流体構造連成におけるバンドギャップ効果の検証」、若手(A) H.26-H.29「固液連成界面における波動伝播現象の解明」）を行ってきた。固液界面の連成現象は、主として流体の圧力で管（構造）が膨らみ、管が膨らむことで管内の圧力が減少する相互作用で説明できる。一連の研究を通じて、水撃波面の力学を考察する際に、波面上流側と下流側の十分遠方における力のつり合いを考慮して一次的に取り扱う理論の限界を指摘し、水撃波動の計測と可視化を行うことで、管が膨らむ際に慣性が無視できず水撃波面背後で管ひずみや圧力が一次元解に対して振動して二次元軸対称、あるいは三次元構造となることを明らかにしている。さらに管内に水と音響インピーダンス（密度と音速の積）に近いポリカーボネート粒子が存在する場合でも、強い反射が起こり、金属粒子が存在する場合と同程度の管ひずみ（被害）が発生することを明らかにした。このように流体中を伝播する圧力波と固体中を伝播する応力波が連成する現象は、流体のパルスパワーが固体へ伝わり生じるキャビテーション壊食のメカニズムとも密接な関係があり、固液連成界面での波動伝播現象を解明することで、極限事故における被害を正確に予測したり、新しい波動制御や被害低減を可能にしたりする革新的な技術を創出することを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (i) 固体表面（コーティング材）近傍での気泡崩壊現象の数値解析と衝撃力評価

固体壁近傍で気泡を生成・崩壊させて衝撃力を測定する数値解析を行い、過去の実験や理論と比較する。気泡が崩壊する際に生じる流体ジェットが固体壁に衝突する際に、連成界面が移動することで界面破壊が起こり（新たなキャビテーションの生成）、固体に作用する衝撃力は低下する可能性があるが、流体と固体が乖離したあとで再衝突すると衝撃力としては増加する可能性もある。これらのことから、固体の種類を剛性の高い鋼からチタン、アルミなど柔らかい金属へと変化させつつ、高分子材料まで変化させて数値解析で衝撃力を評価する。



#### (ii) 熱・流体・構造連成を考慮した薄板・厚板の過渡応答と傾斜機能材料管の活用

流体と接する薄板や厚板の固有振動や過渡応答の理論解を導出することは一般に複雑であるが、流体をポテンシャル関数で表し、Kirchhoff 理論による薄板や Mindlin-Reissner 理論に基づく厚板の運動方程式と境界条件から、流体と接しているときの板の振動（Wet モード）が接していないときの板の振動（Dry モード）の重ね合わせで得られると仮定することで、解析を容易にし、固有振動や過渡応答の理論式を導出した。

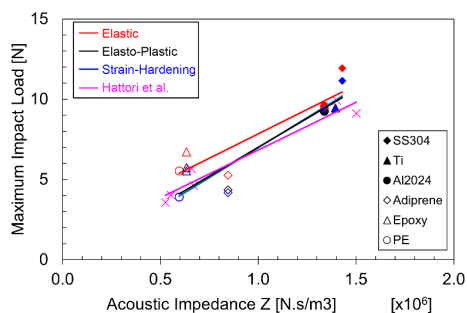
また、組成が連続的または段階的に変化する傾斜機能材料の管に関して、数値解析で取り扱うための多層モデルを提案し、円管の固有振動数や過渡的熱伝導の理論解と比較することで多層モデルの妥当性を検証するとともに、サーマルストライピングが生じる T 字合流管の熱流体構

造連成解析を行って、鋼とセラミックスによる傾斜機能材料の疲労寿命評価を行った。

#### 4. 研究成果

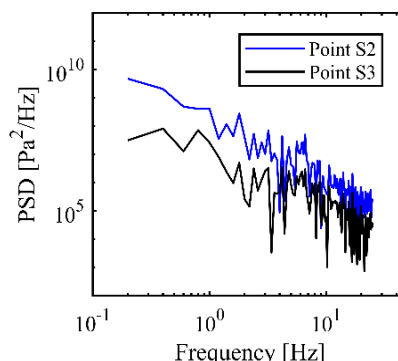
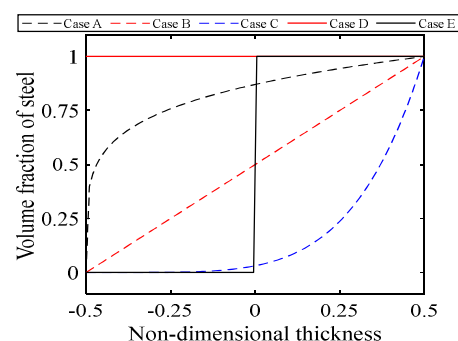
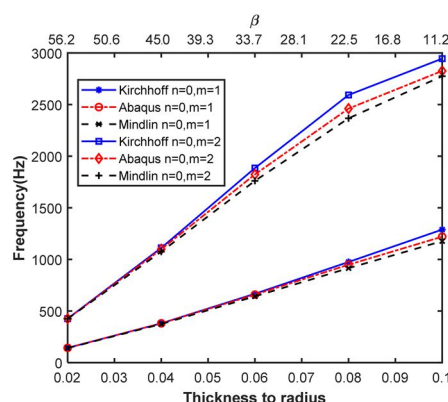
##### (i) 固体表面（コーティング材）近傍での気泡崩壊現象の数値解析と衝撃力評価

単一気泡を、細長い管内の固体表面の近くに配置し、衝撃波を伝播させて気泡を崩壊させ、3種類の材料構成式（弾性、弾完全塑性、ひずみ硬化）を用いて、様々な金属やポリマーについて気泡崩壊時の衝撃力を評価した。弾塑性およびひずみ硬化の構成式を用いた場合、実験的に測定された衝撃力と音響インピーダンスの傾向と数値解析で確認された衝撃力が同様の傾向となることを確認した。また、衝撃エネルギーの評価を行った結果、金属では異なる材料構成式を使用しても塑性変形が生じないことから有意差が生じないことを確認した。一方、ポリマーでは、弾性と弾完全塑性、ひずみ硬化モデルで不一致が確認された。衝撃エネルギーから推定された見かけのヤング率を分析した結果、金属の気泡崩壊衝撃荷重による損傷は疲労破壊が支配的となるのに対し、ポリマーの場合は降伏の影響を強く受けることを確認した。



##### (ii) 熱・流体・構造連成を考慮した薄板・厚板の過渡応答と傾斜機能材料管の活用

連成を支配する因子として流体が充填された円管に用いられるものを拡張する。流体が充填された円管の水撃波速度の Korteweg モデルを考えると、連成因子は、流体と固体の音速比、密度比、形状因子の積として表される。円板流体系の場合、流体内の圧力伝播の振動を考慮して、円板の厚さに対する流体の高さの比を形状因子として考える。その結果、連成因子は音速比と密度比と形状因子となる。連成因子が大きい場合は、相互作用が強い（連成が強い）場合を意味し、小さい場合は相互作用が弱い場合を意味する。理論解と四辺形平板有限要素（MITC4）を用いた数値解析結果より、固有振動数はよく一致し、Wet モードの板のたわみが Dry モードの重ね合わせで得られるという仮定の妥当性を確認した。また、流体と接する薄板の過渡応答は、Kirchhoff 理論と Mindlin-Reissner 理論で大きな差異は確認されなかったが、板の厚さを増やしたところ、Mindlin-Reissner 理論の方が Kirchhoff 理論よりも予測精度が高くなることを確認した。さらに、板の材料物性の影響を考察するため、板と流体の物性を変化させて板の固有振動数を評価したところ、ポアソン比、板の密度、流体の密度の増加に伴い板の固有振動数が減少し、ヤング率の増加に伴い固有振動数が増加することを明らかにした。



3次元弾性論から導出した傾斜機能材料円管の理論解における固有振動数を、円管の厚さ方向に4, 8, 16層に分割して厚さ方向の組成変化を再現した数値解析結果と比較することで、8層以上で固有振動数とモード形状が予測できることを確認した。次に、円管の過渡的熱伝導の理論解と数値解析結果を比較することで、8層以上で温度分布が理論解とよく一致することを示すとともに、連続的な組成変化はべき乗則の指数によって定義できるが、べき指数が5のときに定常解に到達するまでの時間が長くなり温度変動の影響を低減できることを明らかにした。鋼とセラミックスの傾斜機能材料管を用いた数値解析により、流体が混合する際に生じる温度変動がサーマルストライピングとして支配的な周波数であり、熱応力解析から配管の内側表面では流体の温度変動が支配的であるが、配管の外側表面では材料の組成変化に応じて温度変動が減少することを示した。また、配管の疲労寿命をレインフロー法で評価することで、鋼の影響で平均応力が低くセラミックスの影響で応力振幅も小さくなることを示すとともに、鋼に対してセラミックスの割合が多くなるべき指数5のときに疲労寿命が長くなることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ji Ming, Inaba Kazuaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Efficient and Flexible Finite Element Procedure for Free and Forced Vibration Problems of a Plate Coupled With Fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/PVP2020-21535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Su Ziyi, Inaba Kazuaki, Karmakar Amit, Das Apurba	4. 巻 -
2. 論文標題 Free Vibration and Thermal Fluid Structure Interaction Simulation of Functionally Graded Pipe by Modeling As Layered Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/LEMP2020-8506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ji Ming, Inaba Kazuaki	4. 巻 143
2. 論文標題 Efficient Theoretical and Numerical Methods for Solving Free Vibrations and Transient Responses of a Circular Plate Coupled With Fluid Subjected to Impact Loadings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Pressure Vessel Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4050319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kojima Tomohisa, Inaba Kazuaki	4. 巻 183
2. 論文標題 Numerical analysis of wave propagation across Solid-Fluid interface with Fluid-Structure interaction in circular tube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Pressure Vessels and Piping	6. 最初と最後の頁 104099 ~ 104099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijpvp.2020.104099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ji Ming, Inaba Kazuaki, Triawan Farid	4. 巻 85
2. 論文標題 Vibration characteristics of cylindrical shells filled with fluid based on first-order shell theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 275 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfluidstructs.2019.01.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 SU Ziyi, INABA Kazuaki, KARMAKAR Amit, DAS Apurba	4. 巻 15
2. 論文標題 Analytical and numerical study of vibration and transient heat conduction in a functionally graded pipe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Su Ziyi, Inaba Kazuaki, Triawan Farid	4. 巻 6
2. 論文標題 Strain history of 3D printed bilayer structure with flexible elastomer and shape memory polymer filaments during thermal tensile test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 643 ~ 652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40964-021-00185-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Su Ziyi, Inaba Kazuaki, Karmakar Amit, Das Apurba.
2. 発表標題 Fluid Structure Interaction Simulation of Thermal Striping in a T Junction Pipe Made of Functionally Graded Material
3. 学会等名 Advances in Functional Materials 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rubani Firly, Kazuaki Inaba, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto, Keisuke Hayabusa, Hiroaki Nakamoto.
2. 発表標題 Evaluation of the Kelvin Impulse on Single Bubble Shock-Induced Collapse Near Flexible Boundaries,
3. 学会等名 11th International Symposium on Cavitation (CAV2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rubani Firly, Kazuaki Inaba, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto, Keisuke Hayabusa, Hiroaki Nakamoto.
2. 発表標題 Wavelet Analysis of Impact Force Due to Single Bubble Shock-Induced Collapse Near Rigid and Coated Surfaces,
3. 学会等名 11th International Symposium on Cavitation (CAV2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学因幡研究室 <a href="http://www.koubutsu.esd.titech.ac.jp/">http://www.koubutsu.esd.titech.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------