

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03819

研究課題名（和文）流体励起振動問題における異種材料複合構造体の最適設計法の開発とルアー設計への応用

研究課題名（英文）Design optimization of composite structures composed of dissimilar materials in flow induced vibration problem and its application to lure design

研究代表者

史 金星（SHI, JINXING）

公立小松大学・生産システム科学部・准教授

研究者番号：30744669

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）：本研究では、流体励起振動問題に着目し、異種材料複合構造体における新たな構造最適設計手法を開発した。まず、弱連成の流体-構造連成解析により、ジグヘッドソフトルアーを例として異種材料からなる構造体の流体励起振動が再現できた。次に、構造最適設計で解析結果を用いて、ラテン超方格法とRBFネットワークに基づく応答曲面を作成した。その後、大域的な応答曲面を探索しつつ、最適解の精度を向上させるために、密度関数を用いて設計変数空間内での疎な領域および応答曲面内での最小値を新たなサンプル点とし、応答曲面の逐次更新を行った。設計例により、提案した構造最適設計法は目的関数を明確的に最小化することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体励起振動は土木、建築、機械、航空、船舶、原子力などのあらゆる分野で発生するため、構造の性能・信頼性設計に避け通ることのできない重要な課題である。しかし、乱流と振動の複合現象の複雑さのため、それに対応可能な構造最適設計手法の開発は大きく立ち遅れている。本研究では、既存の構造最適設計手法の適応が難しい流体-構造連成解析に着目し、流体励起振動問題における異種材料複合構造体の新たな構造最適設計手法を開発した。一方、市販の釣りルアーは設計者の経験と勘のみで設計され、振動不足など問題がある。そこで、実用例として、最適な流体励起振動が表現可能なルアーの構造設計を行い、釣果の向上を図ることができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the flow-induced vibration (FIV) problem and developed a new structural design optimization method for composite structures composed of dissimilar materials. First, employing weakly coupled fluid-structure interaction analysis, we replicated the FIV of composite structures, using vibration lures and jig head soft lures as design examples. Next, in the structural design optimization, the response surface based on Latin Hypercube Sampling and RBF network was created using the analytical results. Then, to improve the accuracy of the optimal solution while searching the global response surface, sparse regions in the design variable space and the minimum value in the response surface are set as new sample points using a density function. Hence, the response surface was updated sequentially. The results of design examples show that the proposed structural design optimization method can minimize the objective function successfully.

研究分野：設計工学、計算力学、材料力学

キーワード：構造最適設計 流体励起振動 異種材料複合構造体 ルアー 数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 流体励起振動とは、流速、構造物の形状、固有振動数の関係で流れが引き起こす構造物の自励振動である。すなわち、流れに置かれた構造物の固有振動数付近の周期的な流体力が作用し、構造物が大きく振動する現象である。特に、複雑な形状の構造物では、流れの後に発生する渦によって生じる渦励振が起こる場合もある。この流体励起振動の発生機構を解明するため、流体-構造連成解析(流体の流動と構造物の変形の相互作用を考慮した解析)が必要不可欠である[1]。流体励起振動の発生は構造物の形状に強く依存しているため、流体励起振動問題における構造物の形状最適化技術の開発は流れに置かれた構造物の安全・安定に非常に役立つと考えている。

(2) 近年、コンピュータの性能向上により、CAE (Computer Aided Engineering) に基づく理論的に有限要素解析と数理的な最適設計手法を組み合わせる構造最適化技術が実用段階にある。構造最適化は設計変数により寸法最適化、形状最適化およびトポロジー (位相) 最適化に分類される。さらに、形状最適化において、形状変数の設計空間により離散系と分布系に分類される。しかしながら、離散系形状最適設計手法は感度解析に計算コストを要するため、大規模な自由度を有する設計への適用は難しい。これに対し、分布系形状最適設計手法 (例えば、力法[2-4]) は勾配法に基づき、パラメータ化が不要で多自由度な (滑らかな) 自由境界の形状設計が可能であるなどの利点があるものの、定式化から感度計算までにやや難解な数学処理が必要である。

(3) 異種材料複合構造体は異なる材料の力学的・物理的性質の組み合わせにより、新たな機能を作り出すことができるため、機械、建築など様々な分野で利用されている。一方、ルアーフィッシングはミミズ等の餌釣りとは異なり、ルアーを用いて魚を狙う釣りであり、ゲームフィッシングとしても全世界中で人気のある釣り方である。ルアーとは魚の餌を模したものであり、構造に工夫を凝らして水中に波動や音を出す「疑似餌」のことを指す。素材の違いにより、プラスチックや金属などを利用したハードルアーとラバーや柔らかい樹脂などで出来たソフトルアーの二種類に大別される。ルアーフィッシングで扱いやすく最も人気がある定番ルアーであるバイブレーションルアーとジグヘッドソフトルアーは異種材料からなるため、本研究の実用例とする。ただし、従来のルアー設計では、材質・形状・重さのすべてを設計者の経験や勘で決めており、理論的な設計はほとんどなされていない。従って、市販のハードルアーの一部には、振動不足や狙うレンジをコントロールしにくいものがある。

2. 研究の目的

流体励起振動は土木、建築、機械、航空、船舶、原子力などのあらゆる分野で発生するため、構造の性能・信頼性設計に避け通ることのできない重要な課題である。しかし、乱流と振動の複合現象の複雑さのため、それに対応可能な構造最適設計手法の開発は大きく立ち遅れている。本研究では、既存の構造最適設計手法の適応が難しい流体-構造連成解析を注目し、流体励起振動問題における異種材料複合構造体の革新的な構造最適設計手法の開発を目指している。また、釣りルアーの流体励起振動を注目し、開発する構造最適設計手法をルアー設計に応用する。新しい優れたルアーの最適設計により、ルアー設計技術を向上させる。

3. 研究の方法

(1) ルアーの水中運動を時間応答の流体励起振動により再現するために、流体解析により流速と圧力を構造解析において変位・変形を逐次求める弱連成流体-構造連成解析を用いた。また、構造場の界面と流体の界面を一致させるために ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法を採用した。ALE 法とは流体粒子の運動を記述する節点が空間に固定されているオイラー法と、流体粒子と節点が動くラグランジュ法との中間的手法であり、境界の移動に対して要素を変形させることは必要であるが、要素の歪みを抑えることが可能であり、それぞれの長所を生かし、短所を最小限に抑えた手法である。

(2) 構造最適設計では応答曲面法と RBF ネットワークを用いた逐次近似最適化手法を組み合わせで行った。応答曲面法において、ボックスベンケン計画法やラテン超方格法を使用した。一方、逐次近似最適化 (Sequential Approximate Optimization :SAO) とは、ある最適問題を解くにあたり、何らかの最適化手法を直接最適化問題に適用し、最適解を求めるのではなく、まずはいくつかのサンプル点とその応答値から目的関数や制約条件を近似する応答曲面を作成、一度応答曲面の最適解を求める。次に、いくつかのサンプル点を逐次的に追加して応答曲面の精度を向上させながら、最終的に精度の高い大域的最適解を求めようとする [5]。そこで、大域的最適解を求めるため、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。

4. 研究成果

(1) バイブレーションルアーの水中運動再現および構造最適設計[6]において、バイブレーションルアーにおける有限要素析モデルの作成、忠実な水中運動再現および構造最適設計を行った。具体的には、図1のフローチャートに示すように、市販のバイブレーションルアーから有限要素モデルを作成するため、3D スキャナーを用いて点群データを読み込み、stl データからサーフェスを作成し、左右対称の3次元有限要素モデルを構築した。バイブレーションルアーの水中運動再現において、リアルな解析条件により安定な流体励起振動を得るため、釣り糸の末端をバネ要素で拘束し、釣り糸のたわみを抑える手法を提案し、安定な流体-構造連成解析が行えた。また、構造最適設計ではボックスベンケン計画法に基づき、設計変数を3つ与え、アイの位置（ルアーと釣り糸の接合部分）及び集中質量のX方向の位置及びZ方向の位置と設定し、応答曲面を作成した際に目的関数を一次流体励起振動数最大化と設定し、バイブレーションルアーのアイの位置及び重りの位置を変動させることにより、一次流体励起振動数の最大化ができた。その際に、バイブレーションルアーの水中運動特性に対してアイの位置と集中質量の位置における影響も解明された。

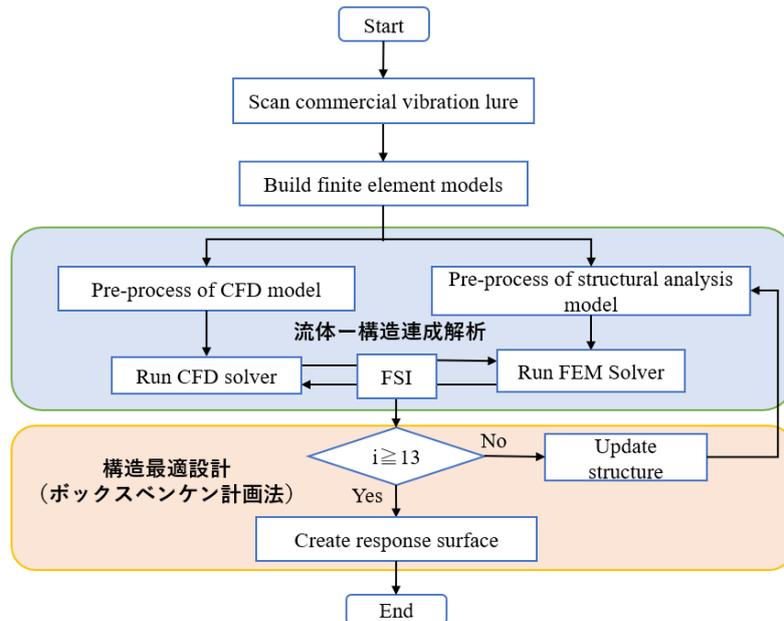


図1 バイブレーションルアーの構造最適設計のフローチャート

(2) ジグヘッドソフトルアーの水中運動再現および構造最適設計において、市販のジグヘッドソフトルアーの有限要素析モデルを作成し、その流体励起振動解析により水中運動が再現できた。また図2のフローチャートに示す異種材料からなるルアーの構造最適設計システムを構築した。流れとして、

STEP.0 2つ設計変数（ソフトワームのヤング率と尻尾長さを調整する拡大係数）の上限値と下限値を決め、実験計画法の一つであるラテン超法格法（Latin Hypercube Design :LHD）のサンプリング手法を用いて、複数の初期サンプル点（シミュレーションを行う設計変数の組合せ点）を決定する。

STEP.1 サンプル点で決定した設計変数の値から、ジグヘッドソフトルアーの流体励起振動解析を行い、目的関数の値を評価する。目的関数は一次流体励起振動数をスケールした小魚の尻尾部の振動数の同定（差の2乗）を提案した。

STEP.2 サンプル点とその応答値の組合せができたため、応答曲面を構成する。この際、応答曲面の作成にはガウス関数を基底関数としたRBFネットワークを用いて行った。

STEP.3 応答曲面の最適解を求める。この際、応答曲面の作成にガウス関数を基底関数として用いたため、多峰性関数になりやすい。それに対して、大域的最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用いて最適解を求めた。

STEP.4 終了判定を行う。終了条件は、大域的な応答曲面を把握しつつ、最適解の精度を向上させるために、15回解析を回した時点で、目的関数の値が0.01を下回ることにした。

STEP.5 単一目的の最適設計問題では局所的精度向上を狙うため、Step3で得られた応答曲面の最適解を追加する。同時に、局所的最適解に陥らないため、密度関数を構築・最適化して、サンプル点の疎な領域にサンプル点追加する。すなわち、合計で2点のサンプリング点を追加する。

STEP.6 STEP.1に戻る。

構造最適設計の結果により、目的関数を最小化したとともに、最適な設計変数が得られた。

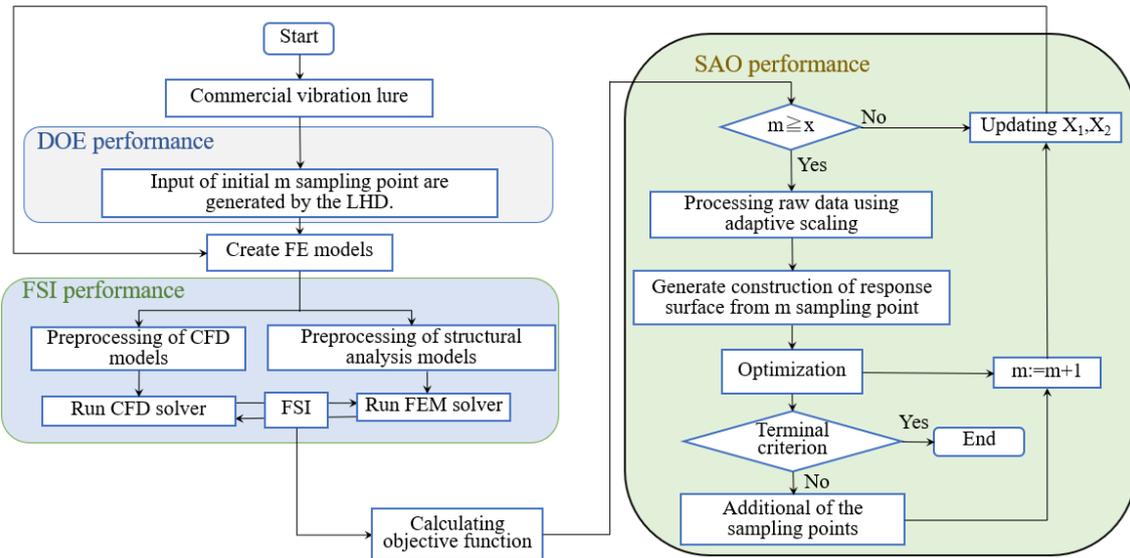


図2 ジグヘッドソフトウェアの構造最適設計のフローチャート

<引用文献>

- [1] 中村晶, 岡島厚, 円柱状構造物の流体励起振動, INSS Journal, 7, 201-215, 2000.
- [2] 畔上秀幸, 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集 A 編, 64, 165-172, 1994.
- [3] Kiriyama Y, Katamine E, Azegami H, Shape optimisation problem for stability of Navier-Stokes flow field, Int J Comput Fluid D, 32, 68-87, 2018.
- [4] 片峯英次, 尾関優汰, 非定常粘性流れ場における形状同定問題の解法, 日本機械学会論文集, 84, 868, 2018.
- [5] Kitayama, S., Arakawa, M. and Yamazaki, K., Sequential approximate optimization using Radial Basis Function network for engineering optimization, Optim Eng, 12, 535-557, 2011.
- [6] 史金星, 山田陸人, 流体-構造連成解析によるバイブレーションルアーの水中運動再現および構造最適設計, 日本機械学会論文集, 89, 922, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 史 金星, 下田 昌利, 酒井 忍	4. 巻 87
2. 論文標題 パイプレシヨナルアーのフリーフォルム最適設計における基本的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00203	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 史 金星,	4. 巻 89
2. 論文標題 流体 - 構造連成解析によるパイプレシヨナルアーの水中運動再現および構造最適設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.23-00054	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Jin-Xing Shi, Masatoshi Shimoda, Shinobu Sakai
2. 発表標題 Free-form optimization of vibration lures under real loading conditions for maximizing their fundamental frequencies
3. 学会等名 14th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 陸人, 史 金星, 酒井 忍
2. 発表標題 流体構造連成解析によるパイプレシヨナルアーの水中運動再現
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jin-Xing Shi, Kana Yoshizumi, Masatoshi Shimoda, Shinobu Sakai
2. 発表標題 Shape Design Optimization of 3D Continua with Initial Compressive Stress in Eigenvalue Problems
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rikuto Yamada, Jin-Xing Shi, Shinobu Sakai
2. 発表標題 Optimal Design of Vibration Lures based on Fluid-Structure Interaction Analysis
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田陸人, 史金星, 酒井忍
2. 発表標題 CAEに基づくパイプレーションルアーの構造最適設計
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 史金星, 山田陸人
2. 発表標題 フィッシングルアーの構造・形状最適設計に関する研究の検討
3. 学会等名 日本機械学会 第14回最適化シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 陸人, 史 金星
2. 発表標題 一次流体励起振動周波数最大化を目的としたハードルアーの構造最適設計
3. 学会等名 日本機械学会 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 陸人, 史 金星
2. 発表標題 流体 - 構造連成解析によるソフトルアーの構造最適設計
3. 学会等名 日本機械学会 第33回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田 陸人, 史 金星
2. 発表標題 逐次近似最適化によるフィッシングルアーの構造最適設計
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2024年合同講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

史 金星 (Researchmap) https://researchmap.jp/jinxing.shi/research_projects/32228539

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
---------	---------