

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04951

研究課題名（和文）複数時系列データの位相的データ解析による船体汚損の評価モデルの研究

研究課題名（英文）Study on hull fouling evaluation model by topological data analysis of multiple time series data

研究代表者

亀山 道弘（Kameyama, Michihiro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40373427

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：実海域に浸漬させて作成したフジツボ類などの水生生物の付着状況が異なる円筒表試験体と凹凸のない基準の円筒試験体を対象に、回転円筒試験装置を用いて回転数を変えて表面摩擦係、回転トルク及び消費電力などの運転状態を清水中で計測し、時系列データを取得した。計測した時系列データのアトラクタを対象にパーシステントホモロジーを適用して回転トルクなどの運転状態の特徴値を抽出し、回転円筒試験体の表面凹凸量の違いを識別する学習モデルをサポートベクトルマシンを用いて作成した。回転円筒試験の時系列データなどを対象に作成した学習モデルを適用した結果、本解析手法が試験体の表面状態の違いを的確に識別できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時系列データに基づいて状態の違いを識別する手法として統計的手法や大量の学習データに基づいて識別する手法が多く開発されているが、本研究で開発した手法は時系列データの形に着目して状態診断を行うため、診断した根拠を理解し易いという特徴を有している。そのため、多岐にわたる複数の時系列データ毎に本解析手法を適用して得られる診断結果を組み合わせた学習データを作成することで、より複雑な状態の診断が可能となると考えられる。様々な外力に暴露される実船の運航データなどへの本開発手法の適用を通じて、船舶運航時の水生生物の付着などによる船体汚損を判断する手法の開発に役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：We used a rotating cylinder test apparatus using fresh water to measure , under various rotating speed, operating conditions such as surface friction coefficient, rotational torque, and power consumption of cylindrical test specimens with different attachment states of aquatic organisms such as barnacles created by immersing them in actual marine environments . We obtained time-series data and applied persistent homology to the attractors of the measured time-series data to extract characteristic values of the operating conditions such as rotational torque, and created a learning model to identify differences in surface irregularities of the rotating cylinder test specimens using support vector machines. Applying the learning model created using time-series data from the rotating cylinder test, we confirmed that this analysis method can accurately identify differences in the surface conditions of the test specimens.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：パーシステントホモロジー アトラクタの再構成 時系列データ 摩擦抵抗 回転円筒試験 フジツボ

1. 研究開始当初の背景

船体にフジツボ類等の水生生物が付着した船舶では船体の摩擦抵抗が増加し、燃料消費量や二酸化炭素の排出量などが増加する。また、国際海事機関 (IMO) は水生生物の船体付着による越境侵入を防止するために船体汚損防止のためのガイドラインを作成するなど、船舶の水生生物の船体付着による船体汚損に関して、より厳格な管理を求めている。一方、水面下で生じる船体外板への水生生物付着を船舶の航行中に確認することは困難であり、航海・機関、気象・海象などの運航データに基づいて船体への船体汚損を診断する方法の確立が求められている。

2. 研究の目的

水生生物の船体付着は摩擦抵抗を増加させ、航海での主機出力/速度比などの変化傾向から船体への水生生物の付着状況を航海中に推定できる可能性がある。しかし、主機出力/速度比などは積載状態や波浪、風力、潮流などの外力や船舶の経年変化などには多くの変動の影響が含まれる。そのため、本研究は、運航の時系列データを対象に位相的データ解析 (Topological data analysis:TDA)を適用して、船体表面の状態変化を判断する実船で適用可能な解析方法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

船体汚損による摩擦抵抗の変化が船舶の運航状態に与える影響を再現する回転円筒試験装置を使用し、円筒試験体の表面粗度やフジツボ等の付着量などをパラメータとして比較試験を行い、試験装置の出力、回転トルクや消費電力などの時系列データを取得した。複数の時系列データを対象にパーシステンスホモロジーを適用して円筒試験体の表面状態の違いをパーシステント図などで識別し、パーシステント図に現れる特徴に基づいて機械学習を用いて表面状態を分類する方法を作成した。

(1) 回転円筒試験

① 試験装置

回転円筒試験装置は電動モーターにトルクメータを介して接続した円筒試験体を試験水槽内 (内側円筒) で回転させ、回転数や回転トルクなどの計測を行う。試験装置の概略図を図1に示す。円筒試験体と恒温水槽 (外側円筒) は塩ビ製とし、黄銅製の試験水槽と恒温水槽との間の循環水を冷却装置で循環させて試験水槽の水温を制御する。

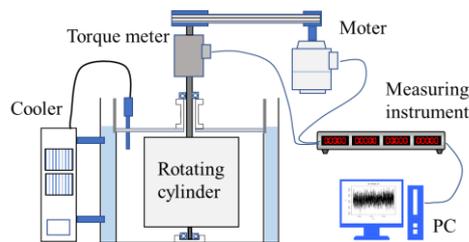


図1 回転円筒試験装置

② 試験条件

円筒試験体の寸法と主な試験条件を表1に示す。計測項目は回転トルク、回転数、水温、電流、電圧、電力の6項目とし、データのサンプリング間隔は3秒とした。なお、試験水槽内の液体にはイオン交換水を使用し、試験開始時の水温は20°Cとした。

表1 回転円筒試験の試験条件

円筒試験体寸法 mm	D314/H300
回転数 rpm	50~700
試験時間 min.	100

③ 円筒試験体

円筒試験体は実海域で浸漬させて円周表面にフジツボ類などの水生生物を付着させた3体 (呼称:S4, S5, S6) と比較用として浸漬させない1体 (呼称R1) とした。円筒試験体を図2に示す。試験体S4は底径6mm程度のフジツボ類が大量に付着し、表面凹凸が最も激しい。また、試験体S5は付着初期の1mm程度のフジツボ類が大量に付着し、試験体S6では主にゴカイ類が均一的に付着し、6mm程度のフジツボ類が疎らに付着している。



(試験体 R1)

(試験体 S4)



(試験体 S5)

(試験体 S6)

④ 試験結果

表面状態の異なる円筒試験体 (R1, S4, S5, S6) の回転円筒試験での回転トルクや電力などの計測値と計測値などに基づいて算出した表面摩擦係数の計測結果を図3に示す。なお、レイノルズ数と表面摩擦係数はサンプリング時毎の計測値に基づいて以下の式により計算して求めた。

図2 円筒試験体

$$\text{レイノルズ数 } Re = \frac{\omega R_i d}{\nu}$$

$$\text{壁面せん断応力 } \tau = \frac{T_m}{2\pi R_i^2 L}$$

$$\text{表面摩擦係数 } C_f = \frac{2\tau}{\rho(R_i\omega)^2}$$

ここで、

- R_i : 円筒試験体の半径(m)
- L : 円筒試験体の高さ(m)
- d : 外側円筒と円筒試験体のすきま (m)
- ν : 動粘性係数(m²/s)
- ρ : 試験水槽の液体密度(kg/m³)
- T_m : 回転トルク(Nm)
- W : 電動モーターの消費電力(W)
- ω : 円筒試験体の回転角速度(rad/s)
- Re : レイノルズ数
- τ : 壁面せん断力 (N/m²)
- C_f : 表面摩擦係数

なお、試験水槽内の清水の密度と動粘性係数は ITTC (国際試験水槽会議) に基づくデータを使用し、水温の最低単位の 0.1°C未満については、内挿して求めた。

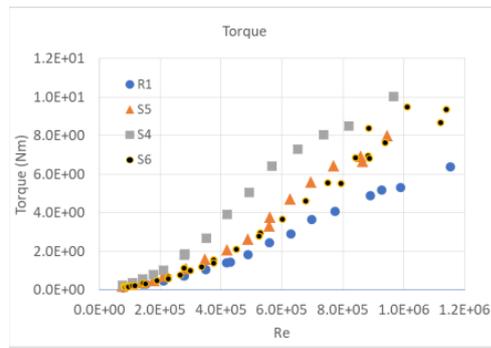
回転円筒試験の結果、全体的にはレイノルズ数の増加に伴い回転トルクと電力は増加したが、表面摩擦係数は急速な減少からやや減少気味の横ばいへと変化する傾向となった。レイノルズ数 6×10⁵程度 (回転数 400rpm) では各円筒試験体の表面摩擦係数は試験体 R1 が最も小さく約 2.2×10⁻³, S4 が最大で約 5.9×10⁻³, また試験体 S5 と S6 が約 3.5×10⁻³程度となった。試験体 S4 の表面状態の粗い S4 が他の円筒試験体に比べ回転トルク、電力及び表面摩擦係数の各計測項目で最も大きな値を計測し、表面凹凸のない円筒試験体 R1 が最も小さな値となった。試験結果の表面摩擦係数は試験体表面のフジツボ類などの付着状況に即した結果となった。なお、図 3(c) 表面摩擦係数のレイノルズ数 6×10⁵程度以上で試験体 S4 の値が低下しているのは、試験時の試験水槽内の水位が低下した影響と考えられる。

⑤ 時系列データ

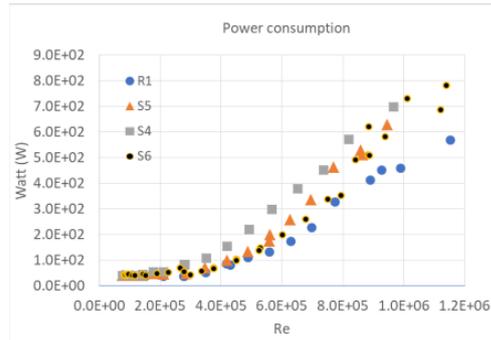
回転円筒試験で得られた時系列データのうち、回転トルクの平均値が同じ 1.0Nm の試験体 R1 (回転数: 250rpm) と S4 (回転数: 150rpm) の計測値の時系列データとヒストグラムを図 4 に示す。回転トルクの平均値が同じであっても、表面凹凸のない試験体 R1 に比べ、表面凹凸が大きい試験体 S4 の時系列データのヒストグラムの分布の幅が広がるなど、円筒試験体の表面状態により、回転トルクなどの時系列データの形に違いが生じた。

(2) 解析手法

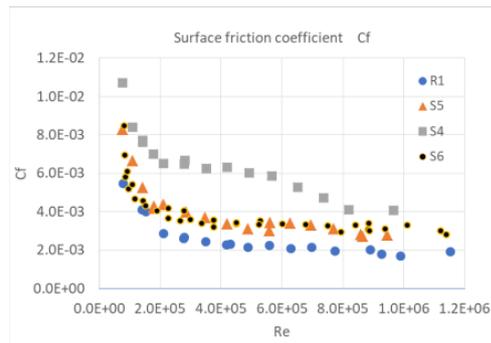
回転円筒試験で得た回転トルクの時系列データを対象に時間遅れ座標系にアトラクタを



(a)回転トルク T_m

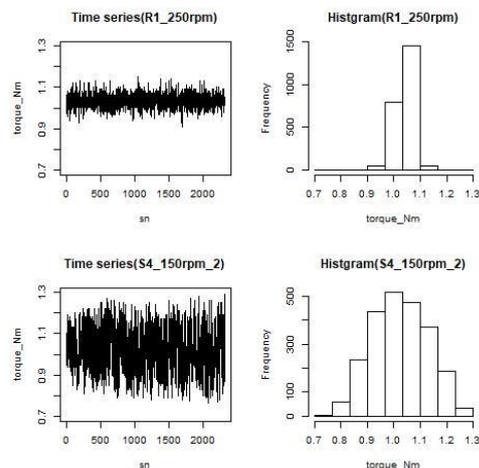


(b)電力 W



(c)表面摩擦係数 C_f

図 3 回転円筒試験の計測結果



(左:時系列データ, 右:ヒストグラム)

図 4 回転トルクの時系列の比較 (上段: R1, 下段: S4)

再構成し、パーシステントホモロジーを適用してアトラクタの点データの位置関係を示すダイアグラム図を作成した。パーシステントホモロジーの1次元のダイアグラム上で特徴点を抽出し、特徴点の配置パターンに基づいて時系列データの形状の違いを識別し、フジツボ類の付着状況を評価する手法を作成した。本研究での解析条件を以下に示す。

① アトラクタの再構成

ある決定論的法則に従って状態が時間的に変化していく系では、運動状態の記述に必要な状態変数は複数存在する。しかし、観測される時系列データは基本的に1つの変数に着目しており、力学的系全体の遷移を示してはいない。一方、力学的系の観測時系列から再構成状態空間への変換が埋め込み（数学的構造間の構造を保つような単射）であることが明らかになっている。アトラクタの再構成に必要な埋め込み次元は Takens の埋め込み定理を満たす必要があるが、本研究での埋め込み次元は最小値の3次元とした。

時系列データを高次元位相空間内に埋め込むにあたっては、埋め込みに用いる時間遅れを決定することが重要となる。本研究では、機械学習モデルの特徴値の配置パターンの作り易さを考慮して、最小値の1と2の2値の時間遅れを設定した。

回転トルクの時系列データを対象に再構成したアトラクタの一例として、時間遅れ1のアトラクタを図5に示す。表面凹凸のないR1試験体に比べてフジツボ類が付着したS4試験体のアトラクタは長く伸びた形状となり、時系列データの形の違いを示している。

② パーシステントホモロジー

パーシステントホモロジー（Persistent homology, PH）では、データの空間的配置での「距離（0次元）」、「リング（1次元）」などのホモロジー的な幾何的特徴を定量的に抽出する。パーシステントホモロジーの解析結果は、「リング」などの発生(birth)とその消滅(death)を基準に2次元の点の集合としてダイアグラムなどで示される。ダイアグラムの横軸 birth と縦軸 death の対角線に近い(death-birth が小さい)点はノイズと考えられ、離れた点は幾何学的構造の特徴を表している。

本研究では時系列データを再構成したアトラクタを対象に、幾何モデルにアルファ単体複体を用いてパーシステントホモロジー1次元(リング)で解析を行った。試験体 R1 と S4 の回転トルクのアトラクタ(時間遅れ1)の解析結果を図6に示す。試験体 R1 のダイアグラムに比べ、試験体 S4 ではダイアグラムの対角線に沿って広く分布する結果となった。また、時間遅れ2のダイアグラムは、時間遅れ1に比べて全体的に分布の幅が狭まる結果となった。

③ 機械学習モデル

機械学習のための特徴値は、対象データの幾何学的構造の特徴を表すパーシステ

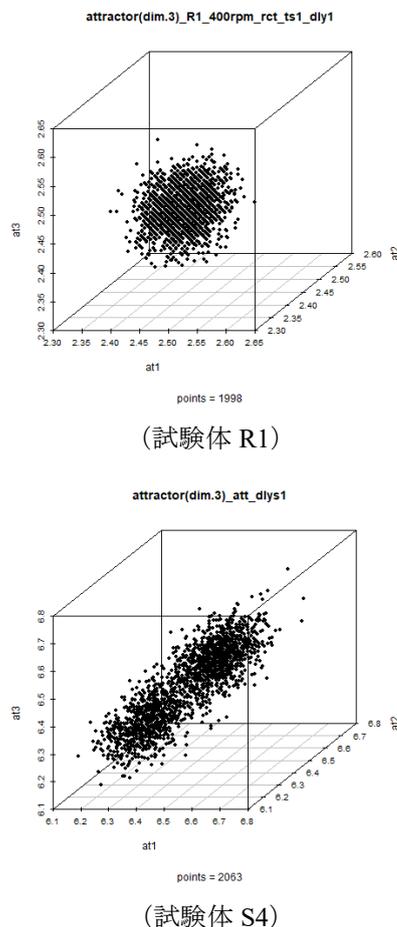


図5 再構成したアトラクタ

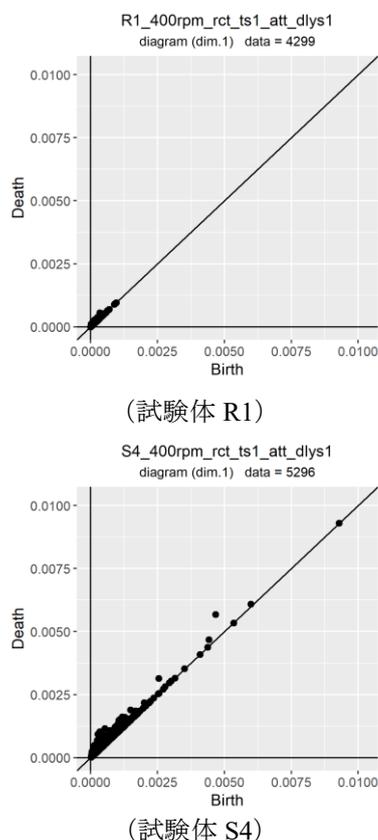


図6 パーシステントホモロジー（1次元）
（アトラクタの時間遅れ1）

ントホモロジー（1次元）のダイアグラムの対角線から最も離れた（death-birthの大きい）点とし、時間遅れ毎に抽出した。抽出した特徴値の一例（回転数400rpm）を図7に示す。試験体の代表的な回転数毎に特徴値を抽出し、特徴値の配置パターンに基づいて機械学習モデル作成した。機械学習モデルにはサポートベクターマシン（SVM）を使用し、学習データはダイアグラム上の特徴値の点の周辺近傍に発生させた乱数を利用して作成した。本研究では試験体の表面汚損の異常の有無と汚損程度を推定するため、表面凹凸のない試験体 R1 と初期の汚損状態の試験体 S6 の回転トルクの時系列データに基づいて、代表的な8つの回転数毎に評価モデルを作成した。

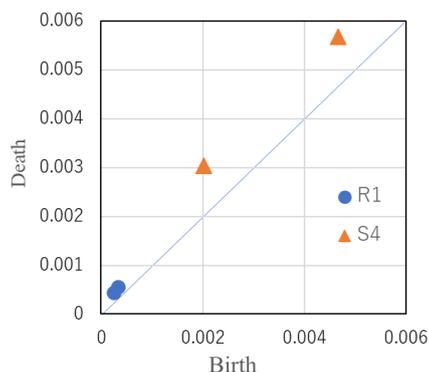


図7 特徴値の設定

試験体の表面汚損の異常の有無を評価するため、試験体 R1 に基づく評価モデルを用いて実施した評価結果を表2に示す。試験体 R1 モデルでは一部の回転数で表面凹凸のない自己評価に間違いが発生したが、表面汚損のある試験体(S4,S5,S6)では試験体 R1 とは異なる状態として評価し、概ね試験体表面の異常状態を検出できると考えられる。また、試験体 S4 モデルでは、表面凹凸のない R1 と汚損状況の異なる試験体(S4,S5)をモデル S6 とは違う状態として評価したことから、異なる汚損状況モデルを作成することで、汚損状況の推測が可能になると考えられる。

表2 評価結果（異常有無）
—R1 モデル—

回転数 (rpm)	円筒試験体	
	R1	S4, S5, S6
50	G	R
100	R	R
200	R	R
300	G	R
400	G	R
500	G	R
600	G	R
700	G	R

(備考)
G：R1と同じ状態
R：R1とは異なる状態

4. 研究成果

回転円筒試験で得た回転トルクの時系列データを対象として、時間遅れ座標系にアトラクタを再構成し、パーシステントホモロジーを適用して円筒試験体の表面状態の違いを評価する手法を作成した。本解析手法を用いることで、限られた学習用データであっても円筒試験体の表面状況を推定できることが明らかになった。一方、特徴値や学習データの作成方法及び使用する機械学習モデルによって評価結果に違いが生じることもある。そのため、複数の評価モデルを組み合わせることで推定結果の精度をより高めることが可能になると考えられる。今後、本研究で開発した評価手法の適用を実船データへの適用を図ることで、船舶の航行中であっても船体表面の状態変化を判断できる評価手法への発展を期待することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	藤本 修平 (Fujimoto Shuhei) (80586686)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	谷口 智之 (Taniguchi Tomoyuki) (20782460)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	西崎 ちひろ (Nishizaki Chihiro) (70570993)	東京海洋大学・学術研究院・准教授 (12614)	

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