

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04512

研究課題名（和文）キャビテーションが生じる状況下の物体表面損傷に関する予測法の創出

研究課題名（英文）Prediction of material surface damage under cavitating flow

研究代表者

川島 久宜（Kawashima, Hisanobu）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：50399531

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）：キャビテーションをともなう流れでは、気泡の崩壊により物体表面の塗装の剥離や損傷が確認されている。これらの要因として、キャビテーションエロージョンであることが推測されるが、キャビテーションが直接的な原因とは断定されていない。本研究は小型回流水槽を用いたモデル実験により、塗装を施した縮流モデルをキャビテーション状況下に曝し、塗装の損傷とキャビテーションの因果関係を調べる。また、縮流モデルにPVDF（ポリフッ化ビニルデン）を埋め込み、多点衝撃力計測と高速度カメラを用いた同時計測を行い、塗装の剥離位置とキャビテーションの崩壊による強い衝撃力計測位置が一致することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビテーションは液体を搬送する流体機械には少なからず発生する身近な現象である。キャビテーションの物理現象を調べるため、これまで気泡力学、流れの可視化などが実施されてきた。ここでは、工業分野で実際に問題となる物体表面に塗装した塗膜の剥離に注目した。可視化計測、力計測、塗膜試験など様々な試験を実施し、塗装の剥離はキャビテーションの崩壊に強く影響を受けることが判明した。

研究成果の概要（英文）：The paint peeling and material surface damages has been observed in cavitating flows. It has been not clearly yet although the cavitation erosion due to the bubble collapse causes these damages. The high-speed water channel was used for experimental study. The painted contraction model was installed in the flow channel to generate cavitation. And the painted model was exposed in cavitation and the peeling area and position are measured. The multi-point impact force measurement and image capture with high-speed camera were carried out in simultaneous and it was confirmed the cavitation collapse causes the paint peeling at material surface.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 キャビテーション 気泡 可視化計測

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流体機械に発生するキャビテーションは機器の性能劣化を引き起こすことが知られている。キャビテーションは高速現象の一つとして知られており、また、熱物質輸送をとまなう複雑な現象である。

ここでは船舶の船外機に生じるプロペラの塗装の剥離に注目した。小型船外機に使用されるプロペラには、表面の損傷防止を狙い塗装を施したものがあつた。しかし、船外機使用後に塗装の一部が損傷する事例が報告されている。その原因はキャビテーションエロージョンによるものと推測されているが、実際にキャビテーションが原因であるとは同定されておらず、また、損傷の予測するためには情報が不足している。本研究では、小型回流水槽に縮流モデルを設置することで、縮流モデルからキャビテーションを発生させるモデル実験を実施し、損傷予測法を検討することに注目した。

2. 研究の目的

キャビテーションによる流体機械の性能低下は、液体を用いる流体機械にとって長年の課題である。ここでは小型船舶の船外機に生じるプロペラに施された塗装の剥離を研究対象とする。小型船舶のプロペラには、プロペラ表面損傷を保護する目的として塗装が施されることがあつた。塗装の剥離にはプロペラの運転状況、形状など様々な因子が影響することが予想でき、これらの影響を理解することは産業界に有益な知見となる。本研究では、小型高速回流水槽の流路に塗装を施した縮流モデルを設定しプロペラに施した塗装の剥離の要因について、キャビテーションとの因果関係を実験的に調べる。また、キャビテーションによる物体損傷の要因として、キャビテーションの崩壊が強く影響を与えることが考えられる。そこで、縮流モデルの衝撃力分布の計測と高速度カメラによる可視化を行い、塗装剥離への影響について調べることを目的とする。

3. 研究の方法

図1に本実験に用いた小型高速回流水槽の概略図を示す。本装置は貯水タンクに貯められた水をインラインポンプにより流路内に搬送する。流路内の流速は、ポンプの回転数をインバータにより制御する。また、流路の一部には流量計が設置されており流量をモニタしている。

ポンプ出口には長さ26 mm×26 mmの正方形断面を持つアクリル製流路が設置されており、その後端に縮流モデルが設置可能なアクリル製可視化部を設置した。可視化部内に設置される縮流モデルは翼モデルNACA0020を参考にして曲線部を直線近似したものを使用した。縮流モデルは幅26 mmであり、前縁から0.5の勾配で高さ18 mmまで変化する。頭頂部は8 mmの平坦部を持ち、その後、-0.2の勾配で斜辺を持つ形状とした。縮流モデルはアルミ合金(A5052)から機械加工により削り出し、その後、モデル表面にアルマイト処理を施した。

塗装の剥離試験を行う際には、縮流モデル表面に下処理を施した後、玩具に使用される塗料をスプレーガンを用いて塗布した。塗装が施された縮流モデルを流路内に設置し、一定時間キャビテーションに曝した後にデジタル一眼レフカメラを用いて縮流モデルの塗装の状態を撮影した。その後、実験前と実験後の塗装の剥離位置、剥離面積を画像処理により算出し、塗装の剥離状態を定量評価した。

縮流モデルに発生するキャビテーションの様子を高速度カメラを用いて可視化計測を行った。撮影には、光源を高速度カメラの対向に配置するバックライト法を用いた。撮影された画像に対しキャビテーションの発生から崩壊挙動を観察し、画像処理を用いてモデルから発生するキャビテーションの規模などを算出した。

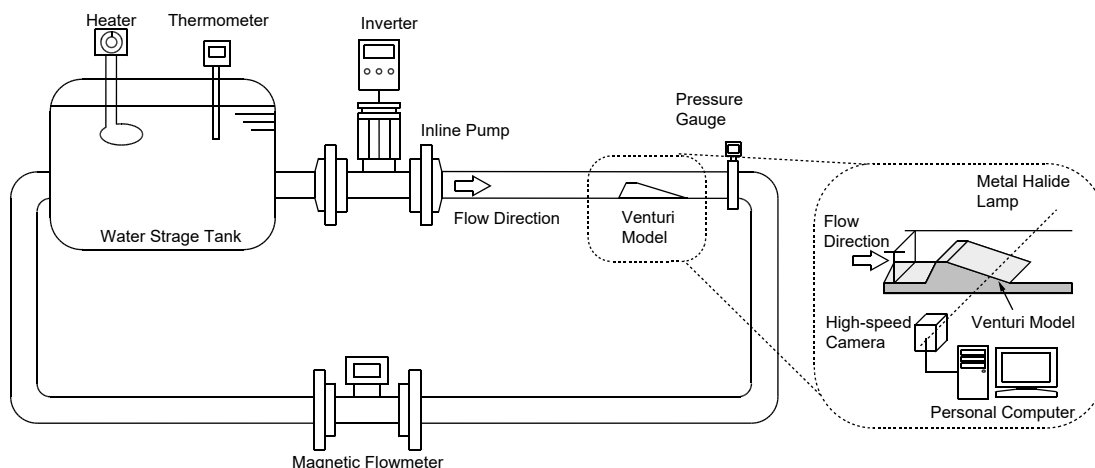


図1 小型高速回流水槽概略図

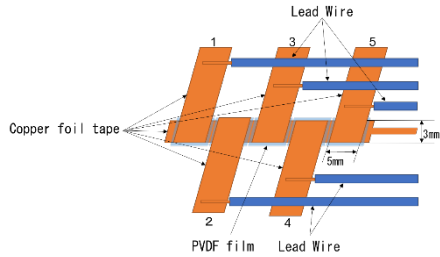


図 2 衝撃力計測センサの構造

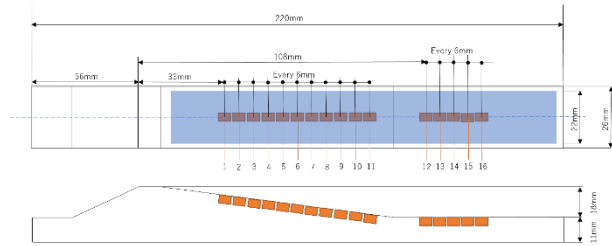


図 3 PVDF フィルムセンサ取付位置

縮流モデルに塗布した塗装の剥離を引き起こす要因として、キャビテーションの崩壊が強く影響することが予想される。そこで、縮流モデルに働く衝撃力を計測するため、PVDF フィルムを用いて衝撃力センサを製作した。図 2 に製作した衝撃力センサの概略を示す。センサは受力面側の銅箔テープを幅 5 mm に幅 3 mm×5 mm に切り出された PVDF を配置し、背面に幅 3 mm の銅箔テープで挟み込むことで製作した。キャビテーションの規模、崩壊位置は流路を流れる流速に影響されるため計 16 個のセンサを作成した。センサは互いの出力が干渉しないよう、受力面の銅箔テープと PVDF フィルムは独立しており、一方の銅箔テープ（陰極）は共通とした。作成された衝撃力センサを縮流モデルに埋め込み、各銅箔テープに接続された導線からの信号をデータロガに記録した。図 3 に縮流モデルに設置した衝撃力計測位置を示す。縮流部頭頂部上流端を基準として、33 mm 下流からモデル斜面に沿って計 11 個、その後の水平部に 5 個のセンサを設置した。

4. 研究成果

(1) 可視化計測結果の一例として、縮流モデルに流入する代表流速が 5.4 m/s とした場合の縮流モデルに発生するキャビテーションの様子を図 4 に示す。本実験は、水路内を水が回流していることから、キャビテーションは連続して縮流モデルから生じている。図 4 は頂部上流端にキャビテーションが発生した時刻を 0.0 ms とし、キャビテーションの成長、崩壊する一連の挙動を示している。ここでは図中の赤丸で囲んだキャビテーションに注目して一連の挙動を説明する。

気泡は縮流モデル頭頂部先端から発生し (0.0 ms)、その後、下流に向かって成長する。1.6 ms の画像を見ると、注目している気泡の前方には大きな気泡の塊 (クラウドキャビテーション) が下流へと流れていることがわかる。4.5 ms では注目している気泡の前方にあるクラウドキャビテーションが崩壊し、その後、崩壊にともなうリエントラントジェットが縮流モデルの斜面に沿いながら頭頂部に向かって生じていることが確認できる (5.3 ms, 7.9 ms)。11.4 ms ではリエントラントジェットが斜面上端に達し、赤色の丸で囲ったキャビテーションをモデルから剥離する。13.8 ms ではモデルから剥離したクラウドキャビテーションがモデルの斜面に沿って下流へと流れ、16.1 ms では流路断面の拡大による圧力回復により崩壊すると言った一連の挙動が確認できる。

(2) 図 5 にキャビテーションの崩壊時における可視化画像と塗装が施された縮流モデル表面の写真を示す。図 5(a) は代表速度が 4.8 m/s であり、図 5(b) は代表速度が 5.1 m/s の場合の結果である。どちらも上図はクラウドキャビテーションが崩壊する際の可視画像であり、下図は縮流モデルをキャビテーション流れに 30 分曝した後の塗装の様子である。図より塗装の損傷位置とクラウドキャビテーションの崩壊位置は概ね一致しており、両者に相関があることがわかる。

画像解析より縮流部頭頂部から成長したキャビテーションの主流方向長さ、流路下流へと

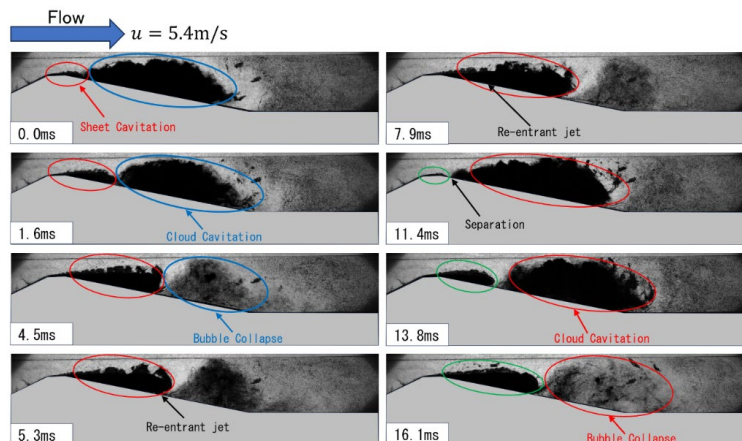


図 4 縮流モデルに発生するキャビテーションの様子

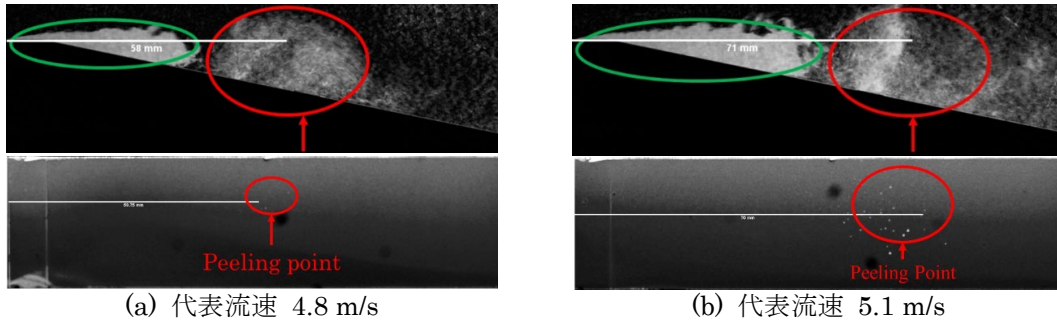


図 5 キャビテーション崩壊と塗装状態

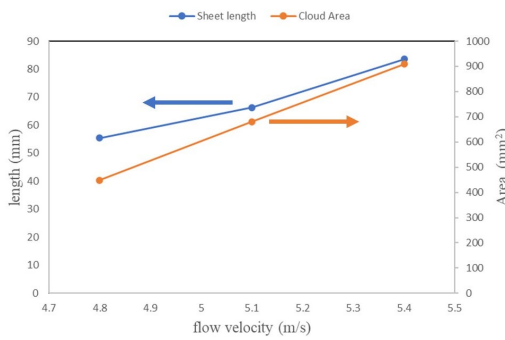


図 6 代表流速に対するキャビテーションの諸量

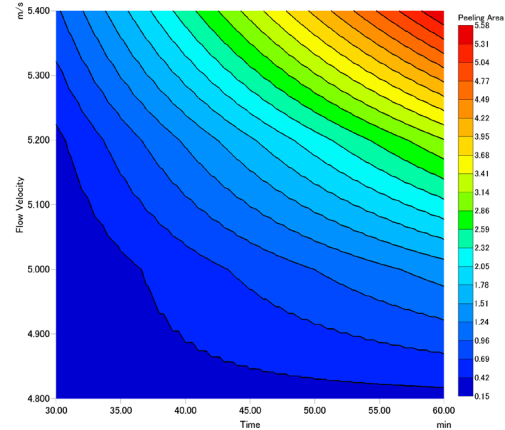


図 7 塗装剥離の予測図示結果

放出されたクラウドキャビテーションの規模を算出した結果を図 6 に示す。図よりキャビテーションの長さや放出されたキャビテーションの規模はそれぞれ代表速度に対して正の関係があることが確認できる。一方、モデル表面に塗布された塗料の剥離面積は、流速の二乗に比例していた。剥離面積とキャビテーションの諸量結果との間に不明な点があり、今後これらの関係を解き明かすことが必要となる。

次にこれまでに得られた塗装の剥離に関する損傷推定の一例を以下に示す。ここでは剥離面積が時間の一次関数で与えられると仮定する。

$$S = at \quad (1)$$

傾き a は流速に影響されることが予想でき、流速に対して二次関数で与えられると仮定する。

$$a = c_2u^2 + c_1u \quad (2)$$

式(1)に式(2)を代入し、実験結果から係数を求め計算した結果を図 7 に示す。図 7 のようなチャート図はプロペラのメンテナンスなどに有効利用できることが期待できる。

(3) 衝撃力計測結果を図 8 に示す。上図はキャビテーションが縮流部上端から発生し、下流で崩壊する一連の挙動に対する 16 個のセンサの出力結果をコンタ図で示した結果である。この場合、キャビテーションは縮流部頭頂部で発生してから約 16 ms 後に崩壊が生じていることが確認できる。図 7 下図は、15.8 ms から 16.8 ms の間を拡大表示した結果である。下図より 10 番目のセンサ位置で崩壊したことが確認できる。同じセンサの出力結果を見ると、崩壊は一度ではなく、短い時間の間に複数回生じていることが確認できる。さらに、崩壊したキャビテーションは下流へと流れ 13 番目、14 番目のセンサ付近で再度崩壊する様子が見て取れる。これらの強い衝撃力の計測結果は、塗装の剥離位置と一致しており、キャビテーションの崩壊が塗装剥離を生じさせる要因の一つであると言える。

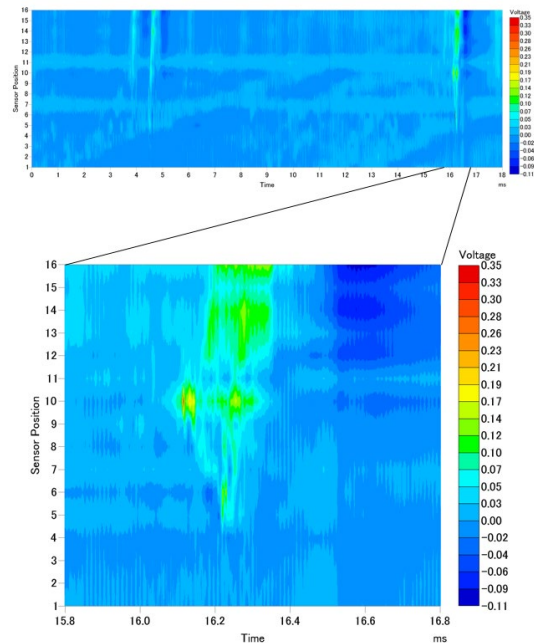


図 8 衝撃力センサの計測結果

(代表速度：5.4 m/s)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大野 遥加, 川島 久宜, 渡辺 敏夫, 佐藤卓弥, 石間 経章
2. 発表標題 多点型力センサを用いたキャビテーション崩壊時の衝撃力分布計測
3. 学会等名 第92回マリンエンジニアリング学術講演会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kobyashi, D. Kawashima, H., Watanabe, T., Sato, T., Ishima, T.
2. 発表標題 Peeling of Coating Film at Constriction Model Surface by Cavitation
3. 学会等名 16th Int. Symp. on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ono, H., Kawashima, H., Watanabe, T., Sato, T., Ishima, T.
2. 発表標題 Impact force measurement at contraction model surface in cavitating flow
3. 学会等名 4th International Conference On Engineering and Computing Technologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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