

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14888

研究課題名（和文）キャビテーション乱流を統一的に表す非定常解析法

研究課題名（英文）Unified method for unsteady analysis of cavitating turbulent flow

研究代表者

岡林 希依（OKABAYASHI, Kie）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40774162

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）：ロケットエンジンのターボポンプを始めとした流体機械に悪影響を及ぼす発泡現象であるキャビテーションの数値シミュレーション技術として、マイクロな気泡から物体表面上に生じるマクロなシート状の気膜に至るまで様々なスケールをもつ個々のキャビテーション現象を表現し、かつ現実的な負荷で計算することができる工学的に実用的な数理モデル（数値シミュレーションを行うために必要な方程式）とその計算手法を開発した。

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様々な形態が存在し、それに付随する現象も多岐にわたるが、それらを統一的に表すことができる普遍的な数理モデル（数値シミュレーションを行うために必要な方程式）は存在しない。本研究では流体機械の一要素である翼の周りにおける多様なキャビテーション流れをシミュレートする数理モデルを開発し、普遍的な数理モデル開発への道筋を示した。また、本モデルにより流体機械の解析精度の向上が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：As a numerical simulation technique for cavitation, which is a phase change phenomenon that has harmful effects on fluid machinery such as rocket engine turbopumps, we have developed an engineering practical mathematical model (equations necessary for numerical simulation) and calculation method that can represent individual cavitation phenomena of various scales, from micro-scale bubbles to macro-scale sheet-like gas films on the surface of objects, and can be calculated under realistic computational cost.

研究分野：数値流体力学

キーワード：キャビテーション 乱流 翼 Large-eddy simulation 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションは流体機械の作動に様々な悪影響を及ぼす。実験はコストや安全性の面で問題を抱えており、現象解明と安全な機器設計のための基盤技術として、数値解析に対する期待は大きい。キャビテーション流れは相変化を含み時空間スケールも多様である。またそのほとんどは乱流状態にある。したがって、キャビテーションモデルと乱流モデルが必須である。産業界で広く用いられているのは、気液の混合体の密度を解く均質流体モデルと、Reynolds-averaged numerical simulation (RANS) を組み合わせた計算であり、先行研究例のほとんどがこの方法である[1]。これらの解析法は流れ場をそれなりに再現するが、様々な物理現象を簡略化しており、その問題は強く指摘されている。例えば、均質流体モデルは気液界面を考慮しないため(これは相ごとの運動方程式を解く二流体モデル[2 など]でも同様)、流線がシートキャビティを迂回せず、内部を通過することが翼の揚力特性の精度を低下させる[1]。また、乱流モデルに関しては、流れの強い非定常性を考慮すると、RANS よりも非定常解法である Large-eddy simulation (LES) などを用いることが理想的であり、より現象を反映する。実験において、乱流渦からのキャビテーション初生およびキャビテーションによる乱流変調が観察されており、これらが流れに大きく影響する[3 など]。しかし、現状の非定常解析[4]では、subgrid-scale (SGS) の乱流渦は粘性近似されており、キャビティ発生源の低圧部を考慮できない。

現状の解析では、対象とする現象、解析の目的、計算機資源などに応じて適宜モデルを選択している。例えば、RANS と均質流体モデルは、コストは低い非定常性の考慮や定量的精度を犠牲にしている。揚抗力特性を改善しようとして、界面捕獲・追跡型のモデルを用いると、代わりに他の現象の再現を犠牲にする。これらはしかし、本来は普遍的な一つのモデルで表せることが理想である。現象が簡略化されたことで再現精度を悪化させることは、信頼性において重大な問題であるが、すべての現象を解くことが不可能なのは言うまでもない。この部分に学術的進展が必要である。

2. 研究の目的

キャビテーション乱流において観察されるマルチスケールの現象を統一的に扱うことができる、工学上実用的な非定常解法を確立することを目的とする。モデルの基盤として、従来多用されている均質流体モデルを用い、その計算負荷の軽さを活かす一方、再現が難しいマクロスケールの気膜周りの流れについては気液界面を捕獲することで、定量的な精度を向上させる。また、これまで単相のモデルが流用されてきたキャビテーション乱流の LES に、ミクロスケールの乱流渦キャビテーションの効果を取り入れる。

3. 研究の方法

(1) ハイブリッドモデル

図1に示すように、界面追跡モデルと内部モデルに囲まれる部分を計算領域外とするように、シートキャビティの振動的な動きに合わせて格子の生成を繰り返し、シートキャビティを迂回する流れを再現する。界面追跡はラグランジュ的に行い、追跡点が存在する計算セルのボイド率の値に応じて追跡点を壁面垂直方向に移動させる。計算負荷を考慮して、界面追跡と格子生成は 100 タイムステップおき、スパン方向に均一に行う。内部モデルは界面追跡モデルを閉じ、均質流体モデルと自然に接続するために設定した。すなわち、内部モデルはリエントラントジェット最前線の位置に応じて前後に移動し、界面追跡したシートキャビティがキャビティ振動、リエントラントジェット、クラウドキャビティの放出などの非定常現象を阻害しないようにする役割がある。

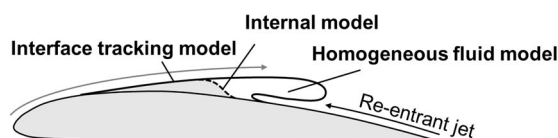


図1. ハイブリッドモデルの概念図

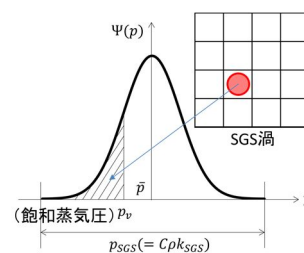


図2. SGS 渦の圧力の極小領域を考慮するための確率密度関数の概念図

(2) 乱流要素渦を考慮したキャビテーション LES モデル

LES では grid-scale 渦は直接計算するが、SGS 渦は粘性性としてモデル化するため、SGS 渦による局所的な低圧を考慮できず、SGS 渦からのキャビティ発生を考慮することができない。そこで、図2の概念図に示すように、計算セル内の圧力の分布を表す確率密度関数 (Probability density function; PDF) $\Psi(p)$ を用いる。すなわち、計算セルにおける圧力がフィルター平均圧力 \bar{p} から圧力変動 p_{SGS} の分だけ広がりを持っていると仮定し、飽和蒸気圧 p_v を下回る圧力を取る確率 (図2の斜線部) で SGS 渦の圧力の極小領域を表現しようとする PDF モデルを導入する。確率密度関数 $\Psi(p)$ はフィルター平均圧力 \bar{p} を平均とするガウス分布であると仮定する。その標準偏差を決定する圧力変動 p_{SGS} は、研究代表者が先行研究[6]で報告

している SGS 乱流エネルギー k_{SGS} との相関式から求める。基盤となる乱流モデルは渦粘性係数を求めるために k_{SGS} の輸送方程式を扱う一方程式型ダイナミックモデル[7]であり、この輸送方程式を時間積分して得られた k_{SGS} を p_{SGS} の算出に用いる。PDF モデルをなく離乱流となる迎角 20° の翼周りのキャビテーション流れ場に適用し、その効果を、モデルを適用しない場合と比較することにより評価した。

4. 研究成果

(1) ハイブリッドモデル

ハイブリッドモデルの導入で、図 3 のように、シートキャビティを流線が迂回し、その後方の剥離域と圧力低下が再現された。キャビティ長さが伸びることによって揚力が増加した結果、揚力特性の定量的再現精度は向上した。それと同時に、

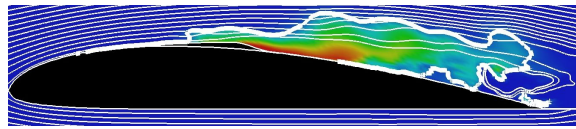


図 3. ハイブリッドモデルによりシミュレートされた流線と非定常キャビテーション現象

同時に、キャビティ振動などの非定常モードをシミュレートすることが可能となった。一方で、最大キャビティ長さは伸びたものの、剥離によりリエントラントジェットの前進行が促進され、常にシートキャビティに覆われる領域(最小キャビティ長さ)が過小評価されるようになることも明らかとなった。したがって、界面追跡による揚力特性の改善効果は予想よりも大きくならなかった。この結果から、揚力特性の定量的再現精度向上には、流線の他にリエントラントジェット最前線付近のキャビティの再現性も考慮すべきであることが示唆された。

(2) 乱流要素渦を考慮したキャビテーション LES モデル

SGS 渦の低圧部からのキャビティ発生を予測するセルは PDF モデルを適用しなくてもキャビティが発生・成長するセルと同程度存在し、キャビティの発生量に影響を及ぼしていることが示唆された。流れ場の時系列的な観察から、シートキャビティの振動・クラウドキャビティの放出、はく離泡におけるキャビティの成長、翼端渦からの初生などの現象は PDF モデルの有無に関わらずほぼ同様であった。しかしながら、PDF モデルを用い

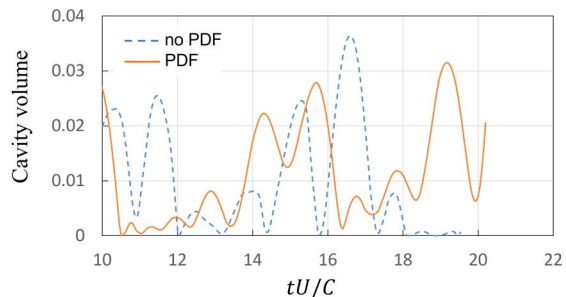


図 4. 計算領域内のキャビティ体積の時間変化

ない場合にはキャビティが完全に消滅する時間があるのに対し、PDF モデルを適用した場合には、主に前縁付近のシートキャビティが存在し(図 4)、計算領域内で完全に消滅する時間は短くなった。これは、図 5 に示すように、翼前縁付近においては、はく離せん断層に生じる SGS 乱流エネルギーが比較的大きいため、PDF の分散も大きくなり、PDF モデルの狙い通りにセル内の圧力が飽和蒸気圧を下回る効果が出たためと考えられる。

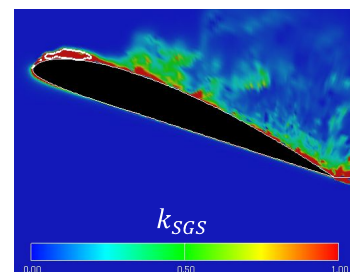


図 5. せん断層とキャビティ (前縁付近の白線)

(3) 様々なキャビテーション形態を统一的に表すモデル

以上の手法を組み合わせることで、マルチスケールのキャビテーション現象を条件に合わせてモデルを切り替えることなく统一的に表すことができることを示すことが目的であったが、研究期間内にそこまで到達することはできなかった。しかしながら、図 6 に示すように、リエントラントジェット最前線付近には乱流エネルギーの高い部分があり、微細乱流渦由来のキャビティの初生を捉えることで、上記 4.1 で問題として残った、最小キャビティ長さを維持できる見込みが出てきた。このことから、ハイブリッドモデルに PDF モデルを組み合わせることで、解析精度向上が見込めると推測している。

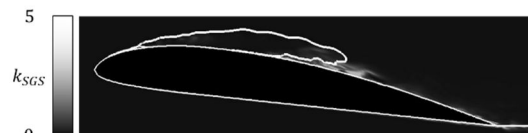


図 6. シートキャビティとその下流の SGS 乱流エネルギー分布

< 引用文献 >

- [1] Kato, C., Industry-University Collaborative Project on Numerical Predictions of Cavitating Flows in Hydraulic Machinery: Part 1-Benchmark Test on Cavitating Hydrofoils -, Proc. of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, No. AJK2011-06084, 2011, 445-453.
- [2] Tamura, Y. et al., Cavitating Flow Simulations Based on the Bubble Dynamics, Proc. 4th Int. Symp. Cavitation (CAV2001), No. B5001, 2001.
- [3] Iyer, C. O. and Ceccio, S. L., The Influence of Developed Cavitation on the Flow of a Turbulent Shear

Layer, Physics of Fluids, Vol.14, No.10, 2002, 3414-3431.

[4] 岡林 希依, 稲岡 拓也, 羅 文暘, 梶島 岳夫, 低迎角における翼周りのキャビテーション乱流の非定常解析, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 876, 2018, 1-17.

[5] 沖田 浩平, 梶島 岳夫, 翼まわりの非定常キャビテーション流れの数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 68, No. 667, 2002, 637-644.

[6] 岡林 希依, 乱流要素渦を考慮したキャビテーション LES モデル開発に関する研究, 大阪大学博士論文, 2011.

[7] 梶島 岳夫, 野町 貴行, ダイナミック手法により生成項を求める 1 方程式型サブグリッドスケールモデル, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 685, 2003, 1996-2001.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Okabayashi Kie, Furukawa Ayumu, Otsu Takeshi, Kajishima Takeo | 4. 巻 145 |
| 2. 論文標題 Large Eddy Simulation Study on the Relationship Between Large-Scale Turbulence Vortices and Unsteady Cavitation Around a Hydrofoil | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4056525 | 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 岡村俊吾, 岡林希依 | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 翼周りのシートキャビティ界面を追跡するキャピテーションモデルの開発と翼性能の定量的精度への影響の調査 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 混相流 | 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） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 岡林希依 | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 SGS渦からの初生を考慮したキャピテーションLES モデルによる翼周りにはく離乱流場の解析 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 ながれ | 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） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 岡林希依 | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 キャピテーション流れに特化した乱流解析法 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 ターボ機械 | 6. 最初と最後の頁 656-666 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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 岡林 希依, 稲岡 拓也, 羅 文暘, 梶島 岳夫 | 4. 巻 85 |
| 2. 論文標題 低迎角における翼周りのキャピテーション乱流の非定常解析 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 日本機械学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 1~17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00124 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 岡村俊吾, 岡林希依 |
| 2. 発表標題 界面追跡によりシートキャピティ周りの流線を再現するキャピテーションモデルの検討 |
| 3. 学会等名 混相流シンポジウム2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岡林希依 |
| 2. 発表標題 SGS渦からの初生を考慮したキャピテーションLESモデルの改良 |
| 3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shungo Okamura, Kie Okabayashi |
| 2. 発表標題 Large-eddy Simulation of Cavitating Flow using Both Homogeneous Fluid Model and Interface Tracking Model |
| 3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 岡林希依, 梶島岳夫 |
| 2. 発表標題 シートキャピティ周りの流線に基づくキャピテーションモデルによる翼周り流れの非定常解析 |
| 3. 学会等名 混相流シンポジウム2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岡林希依, 梶島岳夫 |
| 2. 発表標題 乱流要素渦を考慮した翼回りキャピテーション乱流の非定常解析に関する研究 |
| 3. 学会等名 第20回キャピテーションに関するシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 岡林希依, 古川歩夢, 大津雄, 梶島岳夫 |
| 2. 発表標題 キャピテーション乱流の非定常解析における翼性能再現性向上のための検討 |
| 3. 学会等名 混相流シンポジウム2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古川歩夢, 岡林希依, 梶島岳夫 |
| 2. 発表標題 シートキャピティ周りの流線に基づくキャピテーションモデルの検討 |
| 3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岡林 希依, 羅 文暘, 大津 雄, 梶島 岳夫 |
| 2. 発表標題 高迎角における翼周りのキャピテーション乱流のLarge-eddy Simulation |
| 3. 学会等名 混相流シンポジウム2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大津 雄, 岡林 希依, 梶島 岳夫 |
| 2. 発表標題 迎角20度のClark-Y11.7%翼周りのLarge-eddy simulation |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Wenyang Luo, Kie Okabayashi |
| 2. 発表標題 Large-eddy Simulation of Cavitating Turbulent Flow around a Clark-Y11.7% Hydrofoil |
| 3. 学会等名 15th Asian International Conference on Fluid Machinery (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大津 雄, 岡林 希依, 梶島 岳夫 |
| 2. 発表標題 SGS渦からのキャピティ初生を考慮した翼周りキャピテーション乱流のLES |
| 3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 羅 文暘, 岡林 希依, 梶島 岳夫 |
| 2. 発表標題 翼周りのキャピテーション乱流のLESで生じる横渦の発生周期 |
| 3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| researchmap https://researchmap.jp/okakie 大阪大学 流体物理学領域HP http://www-fluid.mech.eng.osaka-u.ac.jp/index-ja.html |
|---|

| | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|
| 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 |
|---------|---------|