

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360085

研究課題名(和文) 固体壁近傍におけるキャビテーションの熱的効果に関する研究

研究課題名(英文) Study of thermodynamic effects on the cavitation near the solid wall

研究代表者

梶島 岳夫 (TAKEO, KAJISHIMA)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30185772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,900,000円

研究成果の概要(和文)：ポンプなどの高速回転羽根車やバルブなどの狭隘部を液体が通過する際、圧力低下による気化のため、空洞現象(キャビテーション)が発生することがある。キャビテーションは、機器性能の低下、騒音や振動、さらに機器の損傷の原因となる場合がある。本研究では、キャビテーションによる不安定現象の解明や流体機械の設計の援用を意図し、実用的なキャビテーション乱流解析法の開発を目的としている。非定常乱流の計算法であるラージエディシミュレーションを基盤として、キャビテーションを扱うため界面の運動や変形、さらに相変化を精度良く解析できる手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In the cascade of high-speed pumps or narrow passage like a valve, cavitation phenomena are observed in low pressure region of liquid flow. Cavitation causes the performance reduction, noise and vibration, sometimes resulting in damage of fluid machineries. The objective of this research project is to develop a method for the numerical simulation of cavitating turbulent flows, which is applicable to better understanding of cavitation phenomena and design tool of fluid machineries. First, we improved our original method, namely the large eddy simulation (LES) for turbulent flows. Simultaneously, we developed elemental techniques to deal with motion, deformation and phase change at the liquid-vapor interface, which are to be integrated to our LES code.

研究分野：流体工学

キーワード：キャビテーション 気泡 気液界面 相変化 計算流体力学 乱流

## 1. 研究開始当初の背景

ポンプなどの高速回転羽根車やバルブなどの狭隘部を液体が通過する際、圧力低下による気化のため、空洞現象(キャビテーション)が発生することがある。キャビテーションは、機器性能の低下や騒音、さらに機器の損傷の原因となる場合がある。1999年のH-IIロケット8号機の打ち上げ失敗は、液体燃料ポンプのインデューサーのキャビテーション不安定流れと密接に関連していると指摘されている。

液体燃料ポンプの場合、実験はコストや安全性の観点から困難が多いため、数値シミュレーションによる現象解明と設計支援が求められている。その際、まず、流体機械内の流れは不可避的に乱流状態となることを考慮する必要がある。さらに、極低温流体を扱う機器においては相変化による熱的な影響も無視できないといわれる。以上の背景から、乱流および熱的効果を考慮したキャビテーション流れの解析方法の開発が緊急かつ重要な課題である。

キャビテーション乱流に対する総合的な解析方法が構築されれば、流体機械の性能や信頼性の向上のみならず、キャビテーションを利用した医療応用や精密加工に対しても波及効果が期待される。

キャビテーションをともなう流れ、単一キャビテーション気泡の挙動については、各々のスケールに閉じた解析方法はよく研究されている。しかし、それぞれにおいて新たな未解決課題に直面しているだけでなく、両者のスケールが隔絶しているために、中間領域の解析や連成解析は達成されていない。広範なスケールに及ぶキャビテーション乱流の解析に対する研究課題は以下のようにまとめられる。

(1) キャビテーション流れの解析においては、気泡群を統計的に処理して気液を均質流体として扱う方法が大半である。そのため、大きな空洞を作る場合の界面現象は厳密に扱われない。一方、気泡モデルは、物理的根拠は明確であるが、微細な球形気泡と見なされる適用範囲はかなり限定される。したがって、現在のところ、壁面付着型の大規模キャビテーションが卓越する領域で発生する流体機械の性能急変(例えば翼揚力のブレイクダウン特性)を再現できていない。

(2) 壁近傍での単一のキャビテーション気泡の挙動については、気泡の大きな歪みとそれに続く強いジェットが発生が観察されている。崩壊時のマイクロジェットによる壁面への衝撃に対する数値シミュレーションでは、固体内部の応力波伝播も含めて解析され、多くの知見が得られている。一方、熱力学的には、ソノルミネッセンスと気泡内部温度の関係、球形気泡における温度境界層の影響、液体金属の熱膨張による衝撃波の研究例が見られるが、固体壁近傍での測定や解析はほとんど見当たらない。

## 2. 研究の目的

構築すべき解析手法に対する目標として、次の2項目を設定した：(1.1) 界面の運動を固定格子で高精度に捕獲し、熱および物質移動を保存則に整合させ、さらに物理的仮定の少ない方法で界面張力や固体壁面の濡れ性(動的接触角)などを表現する；(1.2) 相変化を伴う気液界面での分子論に基づく熱および物質移動理論を、解適合格子を必要としない上述の高精度捕獲法に組み込み複雑形状界面に適応させる。

解析する対象の目標として、次の2項目を想定した：(2.1) 翼面上のシートキャビテーションに関して、界面の波動と熱および物質移動、界面と固体壁との接触線の運動など、界面現象を考慮した解析を行う；(2.2) 固体壁近傍で崩壊する気泡に対して、内部温度場の高精度解析と、熱放射も含めた固体壁との熱的相互作用を解析し、固体壁に対する熱的衝撃を評価する。

本研究では、以上の目標に向けた個別の要素技術開発と、独自に構築してきた非定常乱流計算コードへの統合を視野に、キャビテーション乱流解析技術の進展を図ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

多彩な流動様式を示すキャビテーション乱流における熱流動を扱うには、多くの要素技術を新規に開発し、さらに統合する必要があるため、研究期間内に構築されるソフトウェアのスペックを具体的に設定することは困難である。本研究は、研究代表者らが推進していた基盤研究(B)「キャビテーション不安定流れシステムのLES解析に関する研究」(平成20~23年度)の最終年度を切り上げて発足したものであり、先行研究において開発している乱流解析法を基盤コードとして発展させることにした。

具体的には、気液界面の相変化に対する物理的仮定の少ない境界条件、移動界面を高精度に捕獲する方法、表面張力や濡れ性など気液ならびに固気液の境界現象の解析法を新規に開発し、可能なものから適宜上述の基盤コードに組み込む手順を計画した。

## 4. 研究成果

(1) キャビテーション乱流の解析については、先行研究である基盤研究(B)「キャビテーション不安定流れシステムのLES解析に関する研究」でのコード開発を引き継ぎ発展させた。単独翼に対するベンチマーク問題(Clark翼周りのキャビテーション乱流)に対しては、キャビテーション数の低下にともなう揚力のブレイクダウン特性を良好に再現するとともに、図1のように翼面近傍の乱流渦とキャビティ成長の関係をとらえられる高解像度計算を実現した(雑誌論文、学会発表)。

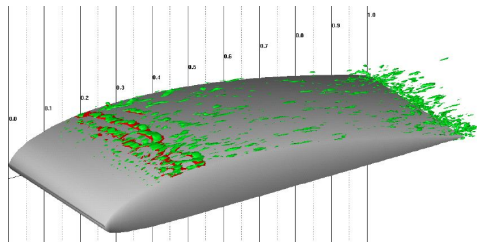


図1: 渦(緑)とキャビティ発生領域(赤)

翼列における不安定流れに対しては、旋回キャビテーションのような羽根車で局所的に発生する不安定の他、キャビテーションサージのような流路システムの不安定の解析も実施した(雑誌論文、学会発表)。同時に、液相の弱い圧縮性も考慮するため、低マッハ数領域での乱流のラージエディシミュレーションの高精度化も行った(雑誌論文、学会発表)。また、キャビテーション発生時の微細気泡群から大規模なキャビティへの成長までを接続するモデルの構築を試み、ベンチュリー管内流れに適用できた(学会発表)が、翼および翼列への応用は今後の課題として残った。

(2) 界面運動と界面を通しての熱および物質の移動に関しては、それぞれの要素技術の開発が進展し、緩慢な時間変化の現象での検証は実施できたが、キャビテーションのような急激は変化に対する適用性や上述の乱流解析コードへの組み込みは部分的にとどまった。特に、相変化に対する従来の解析で用いられていた潜熱を含めた収支計算に変わり、分子論的に導出された気液界面の相変化境界条件の導入は本研究の最重要課題であった。比較対象となる実験データの参照が可能であった凝縮問題に対しては、新規解法の組み込みは十分な進展があった(雑誌論文、学会発表)。しかし、キャビテーションを想定した条件では、非常に細かい時間刻みを要し、次元計算でもなお計算負荷が大きく(学会発表)、本研究で最終目標とした実用計算への組み込みには計算負荷の低減が不可欠である。気液界面の追跡に関しては、物質移動をとまなう気泡の挙動解析法(雑誌論文)、壁近傍で大変形する気泡に適用可能な方法(学会発表)、固体表面での気液界面の運動(濡れ)を解析するための接触近傍の応力分布など、さまざまな視点で要素技術を開発した。

以上、乱流の非定常解析法であるラージエディシミュレーションを進展させ、翼周りのキャビテーション乱流の再現精度の向上に成功した。一方、界面現象については、より厳密な物理モデルや計算方法を進展させ個別の現象の再現精度を高めたが、キャビテーション流れの解析コードに組み込むには親和性や計算負荷の観点から一層の検討が必要である。本研究における成果は、上記の個別の雑誌論文や学会発表の他、総説・解説においても言及している。

なお、本研究は当初は4年計画で開始した

が、上述の進捗状況に鑑み、移動する界面での熱移動を効率的に扱い、多数の界面が存在する大規模な系への適応性を高める方法の開発に集中すべきとの判断に至り、これを主テーマとして、最終年度を繰り上げて新規の基盤研究(B)を開始した。本研究で残された課題は、同じ研究組織によって、その中で引き続き検討される予定である。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計9件)

得津裕太郎, 大森健史, 梶島岳夫: 上昇する気泡周りの流れと物質移動に関する数値シミュレーション, 混相流(査読有) Vol.24, No.5, pp.539-547, 2011

Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi: Direct numerical simulation of multi-phase flows involving dispersed components with deformable interfaces, Heat Transfer - Asian Research(査読有) Vol.40, Issue 4, pp.387-403, 2011

Takashi Ohta, Hiroki Sakai, Kie Okabayashi, Takeo Kajishima:

Investigation of interaction between vortices and cavitation in a turbulent shear layer, J. Fluid Sci. Tech.(査読有) Vol.6, No.6, pp.1021-1035, 2011, DOI: 10.1299/jfst.6.1021

Tsubasa Ohshima, Takeo Kajishima: Numerical simulation of flow with phase change using phase boundary conditions based on the kinetic theory of gases, J. Fluid Sci. Tech.(査読有) Vol.7, No.3, pp.421-433, 2012, DOI: /10.1299/jfst.7.421

Byungjin An, Takeo Kajishima: Transition from rotating cavitation to cavitation surge in a two-dimensional cascade, J. Fluid Sci. Tech.(査読有) Vol.8, No.1, pp.20-29, 2013, DOI: 10.1299/jfst.8.20

梶島岳夫, 竹内伸太郎, 大森健史: 粒子流・気泡流の数値計算, ながれ(査読有) Vol.32, No.3, pp.227-232, 2013

Tsubasa Ohshima, Takeo Kajishima: Computations of flow with phase change by implicit coupling of VOF method and boundary conditions based on the kinetic theory, J. Fluid Sci. Tech.(査読有) Vol.9, No.2, JFST0016, 2014 DOI: 10.1299/jfst.2014jfst016

Changhwa Han, Takeo Kajishima: Large eddy simulation of weakly compressible turbulent flows around an airfoil, J. Fluid Sci. Tech.(査読有) Vol.9, No.4, JFST0063, 2014, DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0063

梶島岳夫: キャビテーション乱流の数値シミュレーションの現状. ターボ機械

(査読無) Vol.42, No.11, pp.688-693, 2014

[学会発表](計 18件)

Byungjin An, Takeo Kajishima: Discussion of the influence of turbulence models on unsteady cavitation flows past a hydrofoil, 3rd Int. Cavitation Forum 2011, No.IIA-1, 2011

Tsubasa Ohshima, Takeo Kajishima: Numerical simulation of film condensation using VOF method with phase boundary conditions based on the kinetic theory of gases, Asian Symp. Comput. Heat Transfer, No.132, 2011

丸谷康二, 梶島岳夫: 準線形近似した Rayleigh-Plesset の式によりベンチュリ管内の気泡の初生を考慮した流れの数値解析, 第25回数値流体力学シンポジウム, C07-4, 2011

丸谷康二, 梶島岳夫: ベンチュリ管内のキャビテーション流れの数値解析, 日本機械学会関西支部第87期定時総会講演会, p.1.37, 2012

Byungjin An, Takeo Kajishima: A Prediction Method of Cavitation Surge by Response Analysis of Flow Rate Fluctuation in a Two-Dimensional Cascade, 8th JSME-KSME Thermal and Fluids Eng. Conf., GSF26-015, 2012

Byungjin An, Takeo Kajishima: Numerical analysis of cavitating flow field with flow rate fluctuation model in a two-dimensional cascade, 8th Int. Symp. Cavitation, No.257, 2012

Takeo Kajishima, Koji Marutani: Combination of bubbly flow model and cavity source model for the practical numerical simulation of cavitating flows, 8th Int. Symp. Cavitation, No.251, 2012

Tsubasa Ohshima, Takeo Kajishima: Numerical simulation of film condensation using phase boundary conditions derived from kinetic theory of gases, Int. Comput. Mechanics Symp. 2012, No.MS12-3-1, 2012

安柄辰, 梶島岳夫: 二次元翼列における流量変動モデルを用いたキャビテーションサージの数値解析, 第16回キャビテーションに関するシンポジウム, No.S1-10, 2012

Takeshi Omori, Takeo Kajishima: Templated and object-oriented design for shared multiphysics software development, 4th Int. Conf. Comput. Methods, ID.131, 2012

Kyohei Izumi, Takeo Kajishima: Numerical method of moving interface

accompanied with evaporation using boundary conditions based on molecular gas dynamics, 4th Asian Symp. Comput. Heat Transfer and Fluid Flow, ASCHT0188-T02-1-P, 2013

Tetsuya Oshio, Takeo Kajishima: Large eddy simulation of turbulent cavitating flow around a hydrofoil, 4th Asian Symp. Comput. Heat Transfer and Fluid Flow, ASCHT0175-T02-1-P, 2013

Changhwa Han, Takeo Kajishima: One-equation subgrid scale model for large eddy simulation of weakly compressible flow, 8th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, P23, 2013

大塩哲哉, 梶島岳夫: 1方程式型ダイナミック SGS モデルを用いた翼周りのキャビテーション乱流に対する LES, 日本機械学会 流体工学部門講演会, No.0435, 2013

大塩哲哉, 梶島岳夫: LES を用いた Clark-Y11.7%翼周りのキャビテーション乱流に対する非定常解析, 日本機械学会 関西支部第89期定時総会講演会, No.144-1, p.8.19, 2014

Tsubasa Ohshima, Takeo Kajishima: Study on computational method of filmwise non-equilibrium condensation, 15th Int. Heat Transfer Conf., No.IHTC15-9887., 2014

梶島岳夫: 翼まわりのキャビテーション乱流の LES について, 第17回キャビテーションに関するシンポジウム, No.39, 2014

Kohei Suzuki, Takeshi Omori, Takeo Kajishima: Development of numerical method for two-phase flows on three-dimensional arbitrarily-shaped polyhedral meshes: 67th Annual Meeting of the American Phys. Soc. Division of Fluid Dynamics, DFD14-2014-000938, 2014

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梶島 岳夫 (KAJISHIMA Takeo)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30185772

### (2) 研究分担者

竹内 伸太郎 (TAKEUCHI Shintaro)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50372628

大森 健史 (OMORI Takeshi)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70467546