

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360085

研究課題名（和文）

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

研究課題名（英文）

Study on the Large-Eddy Simulation Analysis of the Unsteady Cavitating Flow System

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

研究成果の概要（和文）：

流体機械内の非定常キャビテーション現象に対して、数値シミュレーションによる解析・予測手法の高精度化を目的とし、乱流のラージ・エディ・シミュレーション（LES）のモデル、管路系の応答も考慮した不安定解析手法、相変化に伴う熱力学的効果を考慮した界面の移動モデルを検討した。その結果、乱流変調を表現するモデルの開発、旋回キャビテーションからサージに至る不安定化の再現に成功した。また、熱力学的効果に関しては研究内容を発展させて新たな研究課題に移行した。

研究成果の概要（英文）：

To improve the accuracy of the numerical simulation technique for unsteady cavitating flows in hydro-machineries, we investigated some selected topics: sub-grid scale modeling of turbulent flows; a method for analyzing the instabilities taking into account the pipeline response; and a numerical method to capture the gas-liquid interface considering the thermodynamic effects. We improved the mathematical model to represent the turbulence modulation due to the cavitation. In addition, all kind of flow instabilities observed in pumps due to the cavitation, such as rotating cavitation and cavitation surge, were successfully reproduced by our method. The issue about the thermodynamic effect has been rearranged to a new research project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	5,600,000	1,680,000	7,280,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学、流体工学

キーワード：キャビテーション、乱流、ラージ・エディ・シミュレーション、直接数値シミュレーション、渦、翼列、計算流体力学、サージ

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションは、流体機械の性能低下、

騒音、振動、壊食の原因として、船用スクリーン、ポンプ、水車、配管、バルブ、オリフ

イスなどに関連する研究の歴史は長い。また、1999年のH2ロケット8号機の打ち上げ失敗事故で第1段エンジン(LE-7エンジン)を構成する液体水素ターボポンプのインデューサーの破損の一因と指摘された。これらの現象解明と、安全かつ長寿命の流体機械設計のための基盤技術として、数値シミュレーションに対する期待は大きい。その確立のためには、主として次のような2つの問題がある。

(1) 乱流渦キャビテーションモデルの必要性：キャビテーション流れ多くは乱流状態であり、工学的に問題となる流れは強い非定常性を伴っている。したがって、単相乱流の代表的な非定常解法であるラージ・エディ・シミュレーション(LES)が最も有力な方法である。しかし、現状の多くの解析では、レイノルズ平均(RANS)モデルを非定常流れに流用している。また、LESにおいても、圧力の極小領域(格子よりも細かい渦の芯)からの初生が反映されておらず、その問題は強く指摘されている。サブグリッドスケール(SGS)乱れを考慮したキャビテーション初生、キャビテーションを考慮したSGS乱れの変調の相互作用を解明し、モデル化する試みは研究代表者らが推進中の研究が唯一のものである。

(2) 非定常キャビテーション流れ解析の新たな展開：剥離流れ、単独翼周りの流れ、翼列の流れに対して、非定常シミュレーションの研究例が増えつつある。翼列の不安定流れの解析例は、不完全な乱流モデルと数値計算法を併用している市販ソフトを利用したものを除けば、国内外の2~3例にとどまる。その中で、実験で観察されている全ての不安定モード(前回りと後回り、交互翼、非旋回で非対称)を再現した実績は、研究代表者らの結果のみと考えられる。

2. 研究の目的

乱流キャビテーションモデルに関しては、研究代表者らが作成しつつある剪断乱流の直接数値シミュレーション(DNS)データベースを用いた検証と、LES結果の実験との照合により進める。まず、単相のDNSデータベースを援用して、乱流要素渦が形成する圧力分布のモデルのチューニングを行う。次に、乱流渦キャビテーションが発生した場合の運動エネルギーと散逸率のモデルについて、DNSデータベースを用いて検証する。さらに、直線翼列に対するLESの結果を実験と比較し、既往の二次元RANS解析に比べて精度の向上を確認し、必要解像度を確定する。最後に、三次元LES解析を実施し、実験結果と比較して乱流モデルと数値計算法の妥当性を評価する。

流路系との複合解析では、配管系の要素の応答特性を反映した圧力境界条件をモデル

化し、既存の線形理論解析、参照可能な実験データと比較して評価しながら改良を進める。一方、熱力学効果との複合解析では、上述のLESプログラムに対して、温度場を考慮した低マッハ数圧縮解法を新たに導入し、流体物性を考慮できるスキームを開発する。これを二次元翼列解析に適用し、公表されている実験データとの比較により、熱効果の解析方法の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究は、基盤研究(B)「乱流渦キャビテーションに対するLES解析法の研究」(平成17~20年度)の最終年度前年度の申請であることを考慮し、研究期間の前半ではキャビテーション乱流解析技術(LESのSGSモデルと低マッハ数流れ解析法)を完成させ、後半では、翼列のキャビテーション不安定流れに対して、熱力学効果(流体物性の影響)と境界条件(上流側と下流側の応答特性)を解析する方法を開発する。

(1) キャビテーション乱流解析：二次元混合層のキャビテーション流れの実験結果を参照しながら、剪断乱流のDNSの結果を解析し、研究代表者が開発した1方程式ダイナミックモデルに組み込んだ乱流渦キャビテーションモデルのa prioriテスト(DNSにフィルターをかけた結果とモデルの相関試験)とa posterioriテスト(実際にLESを実施してDNSの結果の再現性を検証)を実施する。

(2) キャビテーション流れシステム解析：種々の局所不安定モード(剥離に伴うキャビテーション、旋回キャビテーション、交互翼キャビテーション、旋回しない不均衡キャビテーション)の解析を実施して精度を確認するとともに、ポンプ内のキャビテーション不安定に対する上流側・下流側の応答特性をモデル化して境界条件として与え、キャビテーションサージの再現性を検証する。

(3) 熱力学効果：キャビテーション流れにおいては、相変化に伴う潜熱により蒸気圧が変化するため、キャビテーションの発達も影響を受けることが指摘されている。このことを数値シミュレーションにも反映させるため、離散気泡を追跡する方法、界面を捕獲する方法に相変化に伴う熱収支を連成して解析する方法を検討する。

4. 研究成果

(1) キャビテーション乱流解析：

① SGSモデルの検証：剪断乱流のDNSの結果を解析し、1方程式ダイナミックモデルに組み込んだ乱流渦キャビテーション発生モデルのa prioriテスト(DNSにフィルターをかけた結果とモデルの相関試験)とa posterioriテスト(実際にLESを実施してDNSの結果の再現性を検証)を実施し、キャ

ビテーションによる乱流変動（乱れの増減）を記述しうるモデルを作成した。

② 直線翼列のキャビテーション不安定流れ解析：上記の LES モデルの組み込むための三次元プログラミングを行った。また、二次元単独翼まわりのキャビテーション流れに対して、弱圧縮解法に基づく三次元解析を実施するとともに、幅広いキャビテーション数に対する翼特性を最近の実験データと比較して二次元解析の信頼性を検証した。

(2) キャビテーション流れシステム解析：

① 熱力学的効果の解析のための基礎研究：流体の熱物性を考慮した解析に着手するため、蒸発および凝縮を伴う気液界面に対して、全ての相に非圧縮を仮定せず、分子動力学的に導出された境界条件を適用する方法を提案し、これを安定に計算するためのスキームの検討を進めた。

② 翼列不安定に及ぼす境界条件の影響：キャビテーション不安定に対する上流側・下流側の応答特性をモデル化して境界条件として与え、その影響の大きさを調べ、人為的に加えた流量変動による翼列流れの不安定とサージとの関係を明らかにし、サージの予測法を提案した。

なお、本研究の最終年度に後半の課題(2)①を中核とする新たな基盤研究(B)「固体壁近傍におけるキャビテーションの熱効果に関する研究」が採択され、その中で研究を継続している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- 1) Takeo Kajishima and Shintaro Takeuchi: Direct numerical simulation of multiphase flows involving dispersed components with deformable interfaces. Heat Transfer - Asian Research, 査読有, Vol.40, Issue 4, 2011, pp.387-403
- 2) Takashi Ohta, Hiroki Sakai, Kie Okabayashi, Takeo Kajishima: Investigation of interaction between vortices and cavitation in a turbulent shear layer. Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.6, No.6, 2011, pp.1021-1035
- 3) Kie Okabayashi, Takeo Kajishima: Modeling of the subgrid-scale pressure distribution in turbulent mixing layer. Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.6, No.1, 2011, pp.73-84
- 4) 梶島岳夫, 竹内伸太郎: 固気液混相流の直接数値シミュレーション. 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, Vol.76, No.765, 2010,

pp.712-719

- 5) 岡林希依, 梶島岳夫: DNS を用いたキャビテーションによる乱流変動の解析, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, Vol.76, No.764, 2010, pp.570-579, 2010
- 6) 梶島岳夫, 安柄辰, 岡林希依, 太田貴士: 二次元直線翼列において旋回する部分キャビテーションの一般性, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, Vol.75, No.756, 2009, pp.1626-1633
- 7) 岡林希依, 太田貴士, 梶島岳夫: キャビテーションと乱流要素渦の相互作用, 査読有, 混相流, Vol.21, No.5, 2008, pp.1-8

[学会発表] (計 28 件)

- 1) Byung-jin An: A Prediction Method of Cavitation Surge by Response Analysis of Flow Rate Fluctuation in a Two-Dimensional Cascade. 8th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012.3.18, Incheon, Korea
- 2) 丸谷康二: 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, 2011.12.19, 吹田
- 3) Byung-jin An: Discussion of the influence of turbulence models on unsteady cavitation flows past a hydrofoil. 3rd International Cavitation Forum, 2011.7.5, Warwick, England
- 4) 伊東隼: 分子気体力学に基づく相界面条件を考慮した圧力ベース解法による蒸発流の数値計算. 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010.12.20, 横浜
- 5) 安柄辰: 二次元翼列における流量変動に対する応答解析によるキャビテーションサージ発生予測法の検討. 第 15 回キャビテーションに関するシンポジウム, 2010.11.22, 堺
- 6) 岡林希依: 乱流渦からの初生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. 第 15 回キャビテーションに関するシンポジウム, 2010.11.22, 堺
- 7) 丸谷康二: 準線形近似した Rayleigh-Plesset の式による管内気泡流の数値解析, 第 15 回キャビテーションに関するシンポジウム, 2010.11.22, 堺
- 8) Byung-jin An: Influence of flow rate fluctuation on the rotating cavitation flows through two-dimensional cascade. International Conference on Pumps and Fans, 2010.10.18, Hangzhou, China
- 9) 岡林希依: SGS 圧力変動を考慮したキャビテーション LES モデルの考察, 日本混相流学会年会講演会, 2010.7.17, 浜松
- 10) 安柄辰: 二次元翼列における流量変動

に対する旋回キャビテーション流れ場の応答特性. 日本混相流学会年会講演会, 2010.7.17, 浜松

- 11) Jun Itoh: A pressure-based method for multi-phase thermo-fluid flow with phase change. 9th World Congress on Computational Mechanics, 2010.7.19, Sydney, Australia
- 12) Takeshi Omori: Numerical simulation of gas-liquid flows with three-phase contacts. 9th World Congress on Computational Mechanics, 2010.7.19, Sydney, Australia
- 13) Kie Okabayashi: Subgrid-scale modeling of cavitating turbulent flow in LES. and Takeo Kajishima, International Conference on Multiphase Flow, 2010.5.30, Tampa, USA
- 14) Kie Okabayashi: Development of turbulence model for cavitating flows. 2nd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2010.3.30, Yokohama
- 15) 丸谷康二: キャビテーション気泡発達挙動の線形モデルによる再現性の検討. 日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会, 2010.3.15, 神戸
- 16) Kie Okabayashi: Investigation of turbulent modulation by cavitation for subgrid-scale modeling in LES. 7th International Symposium on Cavitation, 2009-8.17, Ann Arbor, USA
- 17) Byung-Jin An: Generality in the unsteady cavitating flows in two-dimensional cascades. 7th International Symposium on Cavitation, 2009-8.17, Ann Arbor, USA
- 18) Kie Okabayashi: DNS and LES of cavitating turbulent flow. 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009.6.22, Seoul, Korea
- 19) 安柄辰: 二次元翼列のキャビテーション流れに対する流量変動の影響. 日本機械学会第87期流体工学部門講演会, 2009.11.7, 名古屋
- 20) 岡林希依: キャビテーションと乱流の相互作用. 第14回キャビテーションに関するシンポジウム, 2009.3.19, 仙台
- 21) 岡林希依: キャビテーションによる混合層乱流の変調. 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009.3.18, 東大阪
- 22) 伊東隼: レベルセット法を用いた気液二相間における熱伝達現象の数値計算. 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009.3.18, 東大阪
- 23) 岡林希依: 乱流混合層に生じるキャビ

テーションの直接数値シミュレーション. 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.12.22, 東京

- 24) Kie Okabayashi: Direct Numerical simulation of interaction between cavitation and turbulence in a mixing layer. Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, Turbulence and Complex Flows, 2008.11.18, Kobe
- 25) 安柄辰: 二次元翼列におけるキャビテーション不安定流れの解析. 日本流体力学学会年会, 2008.9.4, 神戸
- 26) Takeo Kajishima: Numerical simulation of unsteady cavitating flows in two-dimensional cascades. 2nd International Cavitation Forum, 2008.7.9, Warwick, England
- 27) Kie Okabayashi: On the subgrid scale modeling of cavitating turbulence considering fine-scale elementary vortices. 2nd International Cavitation Forum, 2008.7.7, Warwick, England
- 28) Kie Okabayashi: Direct numerical simulation of interaction between cavitation and turbulence vortices. 8th World Congress on Computational Mechanics, 2008.7.1, Venice, Italy

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

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

(3) 連携研究者

なし