

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13863

研究課題名(和文) 溶存気体効果を考慮した革新的キャビテーション相変化モデルの開発

研究課題名(英文) Development of Phase Change Model of Cavitation with An Effect of Precipitation of Dissolved Gas

研究代表者

伊賀 由佳 (Iga, Yuka)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：50375119

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)：減圧沸騰実験装置を用い、溶存気体量が多いほど見かけの相平衡圧力が高くなることを実験的に示した。次に、キャビテーションタンネルにおいて、運転中の溶存酸素量(DO値)をモニタリングできるように増設工事を行い、DO値の低下をモニタリングすることに成功した。

析出と蒸発を局所のボイド率による関数によって1つの項で表現した見かけの相平衡モデルによる解析を行った。析出に寄与する流動刺激として7種類の乱れの要素を気体分離圧とし、結果を比較した。既存のキャビテーションモデルでは再現できなかった非定常キャビテーション流れにおけるキャビティ体積の過小評価と、それに伴う翼揚力の過小予測を解決した。

研究成果の概要(英文)：A first, depression evaporation test was done. It was shown that vapor pressure becomes higher according with increase of dissolved air. Next, dissolved oxygen (DO) measuring apparatus was added cavitation tunnel. The DO value can be measured in during operation of cavitation test.

Next, numerical analysis of cavitation was done with taking into account of precipitation of dissolved air. In the present homogenous model of cavitation, because gas liquid interface is coarse grained, precipitation and dissolution can not be treated in the model. Then macroscopically pseudo phase equilibrium model with local void fraction is considered. Precipitation pressure was modeled by using seven types of dynamic stimulations. In the numerical result, under estimation of cavity volume and lift of hydrofoil by existing cavitation model was revised and the accuracy of estimation of cavitation is improved.

研究分野：流体機械

キーワード：キャビテーション 溶存気体 析出 数値解析

1. 研究開始当初の背景

キャビテーション流れのCFD(数値流体力学)に関して、現在、国内で入手可能なほとんどの汎用ソフトウェアや、大学等研究機関の内製コードは、最も単純な流れ場と言える単独翼まわりのキャビテーション流れであっても、時間平均揚力が実験値と大幅に異なる値を予測する場合があることがわかってきた(図1)。具体的には、非定常性の強い高迎角・遷移キャビテーション状態において、ブレイクダウン(キャビテーション数 σ の低下に伴いある σ で時間平均揚力が急激に低下する)を早めに予測してしまうという傾向がある(図1)。この非定常キャビテーションの再現は、CFDの分野に残された課題であると言え、それが、流体機械の設計におけるCFD普及の大きな障害となっている。予測が困難な条件ではキャビティ体積を過小予測することと、既存のキャビテーションモデルが全て静止気液界面の相平衡に基づくモデルであることから、申請者は、流動を伴う気液界面での相変化は、溶存気体の析出により、非平衡状態であたかも安定しているような状況になると大胆な仮説を立て、予備実験(減圧沸騰実験)により定性的な流動の影響の証拠を得、さらに予備CFD計算(見掛けの相平衡モデル[2])によりキャビティ体積の改善傾向を得た。

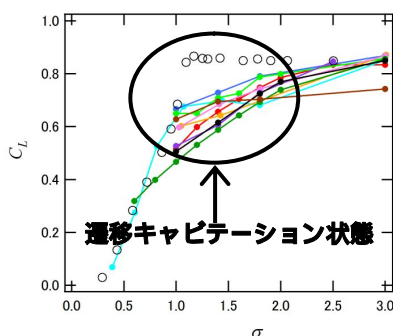


図1 大学等6研究機関と汎用ソフトウェアベンダー4社によるベンチマーク計算結果 - 時間平均揚力特性[1]

2. 研究の目的

予備実験で定性的に得られた相非平衡性に及ぼす流動の影響について、乱れや渦に関連

する各種流動因子について、相非平衡性を求める。その非平衡状態を見掛けの平衡状態としてモデリングし、既存の相平衡に基づくCFDコードにそのまま搭載可能な革新的相変化モデルを開発する。開発したモデルを内製のキャビテーションCFDコードに組み込み、実験値や既存の相平衡モデルによる計算結果との比較により、見掛けの相平衡モデルの有効性を評価する。

静止気液界面では相平衡に至った際の静圧は必ず飽和蒸気圧であるが、複雑な流動場が気液界面に作用した場合、巨視的に見て、常に非平衡で、あたかも安定しているかのように振る舞う、すなわち「飽和蒸気圧とは異なる静圧下で見掛けの相平衡状態になる」という仮定を本研究課題では立てた。これを実験的に証明し、革新的相変化モデルを開発するというのが、本研究の挑戦である。相非平衡を分子レベルで解析したのでは、キャビテーション流れのような巨視的な流れ場は再現できない。そこでこの「見掛けの相平衡」という考え方が必要となってくる。この流動場の相変化に及ぼす影響は、流動場でのキャビティの初生の実験[3]などでその可能性が知られていたが、発達した、非定常のキャビテーションに関しては、これまで全く議論されてこなかった。そこを本研究で解明できれば、既存のモデルとは全く異なった思想の革新的キャビテーション相変化モデルが開発できると期待できる。

[1] Kato, C., Proc. AJK2011-FEDSM, Hamamatsu (2011), No. AJK2011-06084.

[2] Iga, Y., Proc. CAV2012, Singapore (2012), No.160.

[3] Arakeri, V. H., and Acosta, A. J., J. Fluids Eng., (1973), pp. 519-527.

3. 研究の方法

本研究では、水の減圧沸騰実験を通じて、流動場が気液界面の相非平衡性に及ぼす影響を解明する。予備実験で、密閉容器中の静止し

た気液界面と、回転を伴う気液界面では、相変化の速度が異なり、かつ、回転が速い方が相変化の際の蒸気の圧力が高くなる事が定性的に示された。本研究では、様々な形態の定常・非定常キャビテーションにおける、溶存気体量の析出の速度を定量的に測定、比較することによって、流動が析出を伴う気液界面の相非平衡状態に及ぼす影響を明らかにする。また、静止気液界面の「相平衡」に対して、この流動・乱れを有する気液界面の相非平衡性を「見掛けの相平衡」として仮定し、これまで CFD で用いられて来た相平衡モデルにそのまま適用可能な、革新的相変化モデルの開発を目指す。

4. 研究成果

まず、先行実験と同じ減圧沸騰実験装置を用い、流動を伴う水道水の減圧沸騰実験を行い、溶存気体量が多いほど、見かけの相平衡圧力が高くなることを実験的に示した(図2)。この結果は、蒸発の際の蒸気圧に溶存気体の析出が影響していることを指している。

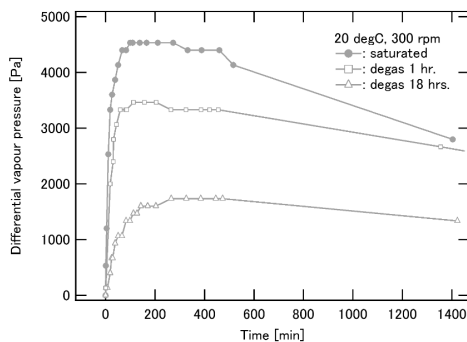


図2 静止気液界面と回転気液界面の蒸発時の蒸気圧力の差の時間変化(脱気時間による比較)

次に、キャビテーションタンネル(図3)において、運転中の溶存酸素量(DO値)をモニタリングできるように増設工事を行った。キャビテーション発生状態での運転中は、脱気運転状態になり、溶存気体の析出が起こるため、DO値も時間とともに低下していく。増設工事は本研究費のみでは難しかったため、他の

研究費で行った。そのため、非定常性によるDO値低下速度の比較までは行えなかったが、運転中にDO値の低下をモニタリングすることには成功した。今後、様々な形態の定常・非定常キャビテーションにおける、溶存気体量の析出の速度を定量的に測定、比較することによって、流動が析出を伴う気液界面の相非平衡状態に及ぼす影響を明らかにしたい。



図3 キャビテーション運転中の溶存酸素量のモニタリングを行ったキャビテーションタンネル

次に、溶存気体析出の効果を考慮した数値解析を行った。均質媒体モデルではそもそも気液界面を解像できないため、析出・溶解を陽的に取り扱えないということを鑑み、析出と蒸発を局所のボイド率による関数によって1つの項で表現し、混合気体の質量保存式に適用した見かけの相平衡モデルによる解析を行った。このモデルでは、キャビテーションの発生初期であるボイド率の低い領域と、キャビテーションが十分に発達したボイド率の高い領域では蒸発が支配的かつ飽和蒸気圧における相平衡状態となり、その中間のボイド率の気液界面が多いと考えられる状態では気体の析出の影響が大きいと仮定した。流れ場は、数値予測が難しいとされる高迎角のNACA0015単独翼まわりの非定常キャビテーションとした。析出に寄与する流動刺激として7種類の乱れの要素を気体分離圧、すなわち析出の閾値としてモデリングを行い、非定常キャビテーション流れにおいて結果を比較した。その結果、析出に寄与する要素として、速度の歪み率を用いたモデルが

最も実験と結果が一致した。図4は第2不変量で析出領域をモデル化し、析出速度に相当するモデル定数を変化させた場合のNACA0015 翼表面時間平均圧力分布を示す。見かけのそう平衡モデルを適用しない結果よりも、キャビティ長さが十分長くなり、実験値に近い結果となっているが、キャビティ内部の翼前縁近傍で蒸気圧の過大評価しており、改善の余地が見られる。

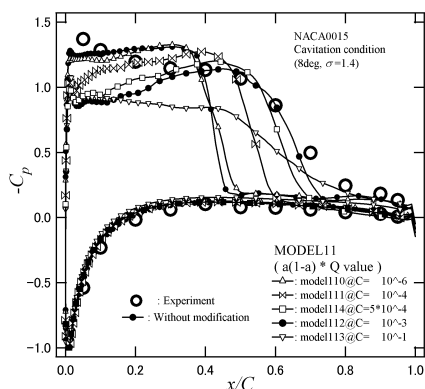


図4 翼表面時間平均圧力分布(NACA0015, AoA=8deg, $\sigma=1.4$, $U=10$ m/s)

これにより、これまで既存のキャビテーションモデルでは再現できなかった非定常キャビテーション流れにおけるキャビティ体積の過小評価と、それに伴う翼揚力の過小予測を解決でき、流体機械の数値解析の精度向上に貢献できるものと考えている。

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 1 件)

1. Shun KASHIWADA, Yuka IGA, “Consideration of a Phase Change Model Based on Apparent Phase Equilibrium”, Journal of Physics, Conference Series, 査読有, 656 (2015), No. 012129, doi:10.1088/1742-6596/656/1/012129.

[学会発表](計 4 件)

1. Yudai MATSUURA, Kento KUMAGAI, Yuka IGA, “Numerical Modeling of Gaseous Cavitation in CFD of Hydraulic Oil Flow Based on Dynamic Stimulation”, Proceedings of the 2017 Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control”, FPMC2017, Sarasota, FL (USA), 2017.10.16-19, No. FPMC2017-4219. (発表確定)
2. 松浦優大, 熊谷賢人, 伊賀由佳, 「溶存空気の析出を考慮した油中キャビテーションの数値解析」, 日本機械学会東北支部 第52期総会・講演会, 東北大学(仙台), 2017.3.14, No.168.
3. 伊賀由佳, 松浦優大, 立石佐太郎, 「油中キャビテーションの数値解析モデルの検討」, キャビテーションに関するシンポジウム(第18回), 九州大学(福岡), 2016.12.8, No.0010.

4. Shun KASHIWADA, Yuka IGA, “Consideration of a Phase Change Model Based on Apparent Phase Equilibrium”, International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne (Switzerland), 2015.12.7, No. 012129.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

伊賀 由佳 (IGA, Yuka)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号：50375119

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()