

データ駆動型キャビテーションモデルと その学習データセットの構築に関する研究

岡林 希依
大阪大学 大学院工学研究科

1. はじめに

近年の画像認識技術の成功に、畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural networks; CNN) の存在がある。CNN は畳み込み演算を行う畳み込み層を複数含む構造を持ち、効率的に大規模・高次元データから特微量を抽出できる特徴がある。そのため、高次元のデータを扱う顔認証や画像のセグメンテーション等に適用されている。この流れを受け、CFD の分野でも、CNN を取り込んだ研究が盛んに行われている。現象を記述する支配方程式や数理モデルを機械学習モデルで代替する「データ駆動型モデル」はその一つである。しかし、解析対象の多くは单相流であり、気液二相流を始めとした混相流に焦点を当てたものはまだ少ない。

気液二相流の一種であるキャビテーション流れは、相変化を伴う、時空間にマルチスケールな現象であり、また強い非定常性を持つ。多様で複雑なキャビテーション流れの数値計算手法には様々な手法が存在し、全てのキャビテーション現象を統一的に表現できるモデルは今のところ存在しない。著者ら[1]はキャビテーションモデル構築のブレークスルーとして、計測データを訓練データとして教師あり学習させた「データ駆動型キャビテーションモデル」の開発を目指とした研究を行っており、CFD データを訓練データセットとしてその枠組みを示した。図 1 にその模式図を示す。

将来的に訓練データセット（図 1 の入力データと正解ラベル）となる計測データとして、現在キャビテーション流れの粒子画像流速測定法

(particle image velocimetry; PIV) により得られた速度場、高速度カメラ画像、壁面マウントされた圧力センサデータなどを想定しているが、境界層付近やキャビティ内部のデータの欠損、ノイズや観測誤差、数値計算と組み合わせる際の保存性など、機械学習モデルの訓練データとしてそのまま利用できる計測データの獲得は困難である。そこで本研究では、二次元翼周りのキャビテーション流れにアンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同化を適用することで、現在取得可能な計測データに基づいた流れ場を再現し、欠損データの補完、保存性の評価など、データ駆動型モデルの訓練データを構築する手法としての適用可能性を調査する。本稿では、双子実験によりデータ同化システムの構築と定性的な検証を行った結果を紹介する。

2. 問題設定

本研究の最終的な目標は、未だ再現精度が十分でない既存の数理モデルを用いた計算に計測データを同化することで、実現象に基づいた流れ場を表現することである。本研究では、この状況と類似した問題設定として、疑似計測データに沖田・梶島による湧き出し型の均質流体モデル[2]の計算結果、データ同化における時間発展計算に Chen & Heister による湧き出し型の均質流体モデル[3]を用いる双子実験を行う。

3. 数値計算の概要

Large-eddy simulation (LES) のフィルターを施した流れ場(\bar{u}_i, \bar{p})の支配方程式を用いる。これ以

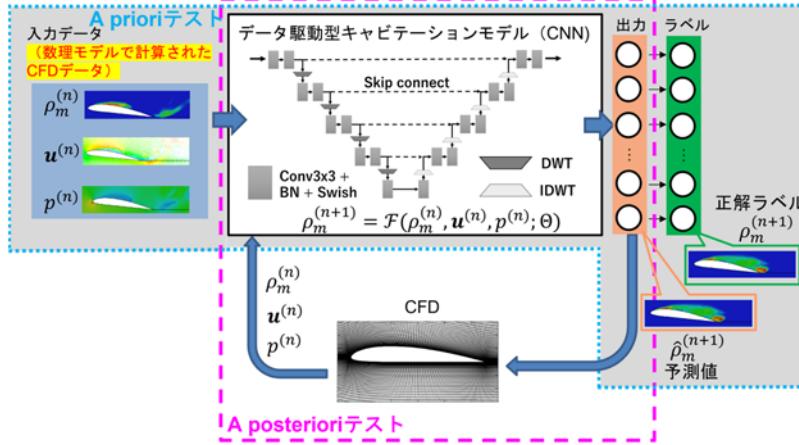


図1: CFDデータを学習するデータ駆動型キャビテーションモデルの概念図[1]

降、すべての変数は翼弦長 C 、主流流速 U_∞ および十分遠方における液相密度 $\rho_{L\infty}$ で無次元化して表され、均質流体の密度 ρ は、液相体積率 f_L と液相密度 ρ_L により $\rho \approx \rho_L f_L$ と近似される。

3.1 支配方程式

キャビテーションの体積変動に伴う液相の圧縮性を考慮するために低マッハ数近似解法[4]を用いた液相の質量保存式は次式で表される。

$$\frac{Df_L}{Dt} + f_L \left(M^2 \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

式(1)中のマッハ数 $M = U_\infty/c$ (c は音速) は計算領域全体で一様に与えられる定数である。フィルターをかけた液相の運動方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{f_L} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} f_L k_{SGS} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2 \left(\nu_{SGS} + \frac{1}{Re} \right) \bar{S}_{ij} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、式(2)の S_{ij} はひずみ速度テンソルである。乱流エネルギー k_{SGS} 、渦動粘性係数 ν_{SGS} を与える乱流モデルとして一方程式型ダイナミック SGS モデル[5]を用いる。数値計算法の詳細は文献[6, 7]を参照されたい。

以上より、システムモデルの状態ベクトルは以下のように定義される。

$\mathbf{x} = [\bar{u} \ \bar{v} \ \bar{w} \ \bar{U} \ \bar{V} \ \bar{W} \ \bar{p} \ f_L \ k_{SGS}]^T$ (3)
式(3)はすべての計算格子上の値で定義され、 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ は式(1), (2)をコロケート格子で計算する

ことに伴って現れる速度の反変成分である。

3.2 キャビテーションモデル

非定常なキャビテーション現象を再現するため、液相体積率の変化を湧き出し型の均質流体モデルで表現する。本研究では、疑似計測データに沖田・梶島による均質流体モデル[2]

$$\frac{Df_L}{Dt} = [C_g(1 - f_L) + C_l f_L](p - p_v) \quad (4)$$

(以下、OK モデル) を、データ同化システムにおける液相体積率の時間発展に Chen & Heister による均質流体モデル[3]

$$\frac{Df_L}{Dt} = C_{CH}(p - p_v) \quad (5)$$

(以下、CH モデル) を用いる。 p_v は飽和蒸気圧であり、キャビテーション数 σ で設定される。OK モデルは、線形化された Rayleigh-Plesset 方程式を元に CH モデルを改善した数理モデルであり、シートキャビティ界面の波打ちや三次元性など、複雑な現象を再現することができる(第 5 節に後述)。一方、CH モデルでは、そのような現象はほとんど再現されないところが大きく異なる。

3.3 計算条件

解析対象は、信頼できる実験データ[8,9]が得られている Clark-Y11.7%翼周りの流れである。実験条件[9]に合わせて、流体は13°Cの水とし、各物性

値もこれに従って設定する。迎角およびキャビテーション数 σ は CH モデルと OK モデルで再現される現象が大きく異なる 2° および $\sigma = 0.5$ を採用する。

3.4 疑似計測値の設定

疑似計測データとして、Tomographic PIV (TPIV) により取得する翼周りの三次元速度場と、間接的に得られる液相体積率分布を仮定する。本双子実験では、簡単のため計測位置を格子位置に対応させており、翼スパン方向に 1 格子おきに計測値を与える。このときの翼型近傍の格子配置、及び瞬時の計測領域（赤点の位置に該当）の一例を図 2 に示す。キャビティの内部のデータは粒子が入らないために欠損しているものとし、計測値を与えない。したがって、計測領域は計測データを取得する時間ごとのキャビティ形状に応じて変化する。キャビティの界面は、翼周りの時間平均的な液相体積率分布と PIV の生データの比較[10] により $f_L^{\text{interface}} = 0.75$ （黄色曲線）とする。液相体積率 f_L の計測は非常に困難だが、TPIV で粒子が存在する領域が液相であることを考えると、キャビティ界面と液相領域は間接的に推定することができる。したがって本研究では、 f_L の疑似計測値として、TPIV の計測領域の境界部に $f_L = f_L^{\text{interface}}$ 、計測領域全体に完全な液相として $f_L = 1$ を与える。サンプリング周波数は 5000Hz であり、これは本計算において 4000 タイムステップ間隔に相当する。以上より、観測ベクトル \mathbf{y}^o を次式のように設定する。

$$\mathbf{y}^o = [u^o \ v^o \ w^o \ f_L^o]^T \quad (4)$$

添え字 o (observation) は図 2 の赤点あるいは黄色曲線上で定義された値を示す。

4. データ同化手法

逐次型データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ (ensemble Kalman filter; EnKF) を基礎としたデータ同化を行う。本手法では、最小誤差分散推定を原理とし、時系列観測ベクトル \mathbf{y}^o

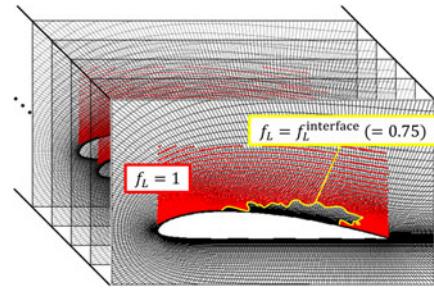


図 2：疑似計測データの領域

に基づいて状態ベクトル \mathbf{x} が逐次的に修正される。誤差分散は正規分布に基づくと仮定され、 m 個のアンサンブルメンバーにより近似される。本研究では、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF) [11]により数値計算と観測値の統合を行う。LETKF は、EnKF に局所化のアルゴリズムを取り入れ、さらにアンサンブル変換カルマンフィルタ (ensemble transform Kalman filter; ETKF) [12]のアンサンブルアップデート手法を組み込んだ手法であり、大規模な誤差共分散行列を現実的に計算化可能なサイズに削減し、計算効率を高めたものである。通常の LETKF では、格子点に基づいた直方体で構成する local patch を用いて局所化が行われる。しかし本計算では、境界付近で格子を密に詰めているために、翼近傍に近づくほど局所化のスケールが小さくなり観測が十分に同化できなくなる。本研究では、local patch を持たない LETKF[13]を用い、実質的な距離に基づいた局所化を行う。

初期アンサンブル摂動は、タイムラグアンサンブルにより、CH モデルで計算されたシート・クラウドキャビテーション 1 周期の流れをアンサンブルメンバー数だけ等間隔にずらして作成する。本研究では、局所化の効果と計算効率を考え、アンサンブルメンバー数は $m = 10$ とする。

5. 計算結果と考察

CH モデルのみのケース、OK モデルのみのケース、同化を行ったケースの比較を図 3 に示す。OK モデルのみのケースは、第 3.4 節の疑似計測値を切り出した計算結果に相当する。同化により、参照データである OK モデルの流れ場が定性的

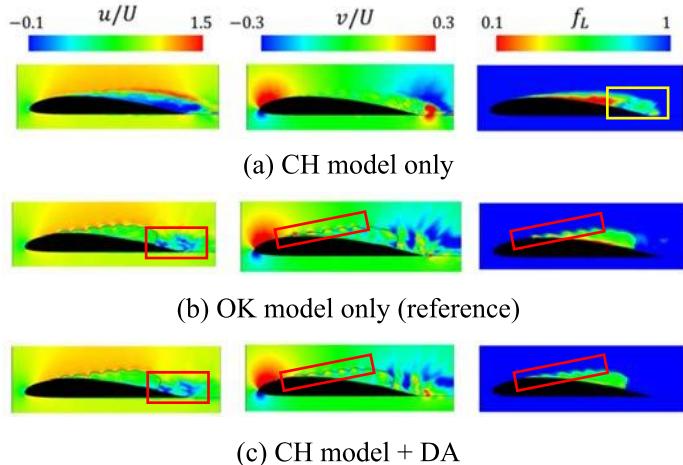


図3：(a)データ同化なし、(c)データ同化ありの各ケースと、(b)疑似計測データに対応する参照データとの比較。

に再現されている。特に、赤矩形で囲んだ翼面上の逆流領域（図3(b)(c)左、濃い青）、 $f_L = f_L^{\text{interface}}$ の付近を移流するバロクリニックトルクに起因する横渦[6,7]（図3(b)(c)中央）、波打つようなキャビテーション形状（図3(b)(c)右）などの特徴的な現象が再現されている。キャビティ内部の計測値を与えていないにも関わらず界面の波打ちが再現されたのは、計測領域境界に $f_L = f_L^{\text{interface}}$ の疑似計測値を与えたことに加え、横渦とそれに誘起される形状の波打ちの相互作用が再現されたためである。さらに、CHモデルで発生していた大規模なクラウドキャビティ（図3(a)右、黄矩形）も同化によりほぼ消滅し、参照データ（OKモデルのみ）と同程度となっている。これはPIVの観測領域全体に $f_L = 1$ を計測値として与えた効果であり、直接的観測が困難な f_L を、間接的に観測情報として取り込んだことを示している。

6. おわりに

二次元翼周りのキャビテーション流れを対象として、現在のキャビテーション流れ計測で取得可能なシートキャビティなどの気泡群や境界層にデータの欠損があるPIVデータと、PIVから間接的に取得される液相体積率分布を想定した疑似計測値を数値シミュレーションに同化させる双子実験を行った。その結果、データ同化により疑似計測値に対応する参照データの特徴的な現

象を再現することを示した。今後は構築したデータ同化システムがキャビテーションの実計測値に対しても機能するか検証する予定である。

参考文献

- (1) 野田, 岡林, 混相流, 37-1 (2023), 94-102.
- (2) 沖田, 梶島, 日本機械学会論文集B編, 68-667 (2002) 637-644.
- (3) Chen, Y. and Heister, S. D., J. Fluids Eng., 116-3 (1994) 613-618.
- (4) 稲垣ら, 日本機械学会論文集B編, 6-649 (2000) 2274-2281.
- (5) 梶島, 野町, 日本機械学会論文集B編, 69-685 (2003) 1996-2001.
- (6) 岡林ら, 日本機械学会論文集, 85-876 (2019) 19-00124.
- (7) Okabayashi, K. et al., J. Fluids Eng., 145-4 (2023) 041204.
- (8) 沼地ら, 東北大学高速力学研究所報告, 1-1 (1949) 1-16.
- (9) 渡邊ら, ターボ機械, 41-7 (2013) 440-446.
- (10) Illyushin, B. B. et al., Int. J. Heat Fluid Flow, 103 (2023) 109197.
- (11) Hunt, B. R. et al, Physica D, 230 (2007) 112–126.
- (12) Bishop, C. H. et al., Mon. Wea. Rev., 129 (2001) 420–436.
- (13) Miyoshi, T. et al., SOLA, 3 (2007) 89-92.