

PIVのキャビテーション流れへの応用

Application of PIV to Cavitation Flow

○ 加藤 一彦 (都科技大工) 高阿田 勉 (都科技大工) 加村 亮子 (都科技大工)
正 小原 弘道 (都科技大工) 松平 晏明 (都科技大工)

Kazuhiko KATO*, Tutomu TAKAADA*, Akiko KAMURA*
Hiromichi OBARA* and Yasuaki MATUDAIRA*

* Department of Systems Engineering Science, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, Tokyo 191-0065, Japan

We propose the new PIV image processing method to apply to the cavitation flow field. Two CCD cameras take each image shots of good quality utilizing the difference of the scatter light intensity between the seeding particles and the bubbles. From the image of the seeding particles, the cavitation aspect information such as the void fraction and the cavity boundary is obtained by using the binary process of the light intensity. From both images of the seeding particles and the bubbles, two velocity informations are obtained individually inside or outside area of the cavity by using the cross correlation method and composed into one. For the evaluation of this PIV measurement and processing, the experiment was carried out about the wake vortex cavitation flow behind a wedge. And also, the cavity area and the void fraction map, the vector map and the vorticity map were discussed in detail.

1. 緒言

キャビテーション流れは、相変化および確率統計的な事象を伴う複雑な気液二相流である。この問題に関し、写真撮影や可視化手法による流れ構造の解明¹⁾などの報告はあるが、その流れ場の詳細な構造の定性・定量的な計測・評価は十分とは言えない。近年、粒子画像流速計(PIV: Particle Image Velocimetry)の普及と一般化に伴い、PIVはレーザー誘起蛍光法(LIF)などの複合計測や単気泡など²⁾に着目したより詳細な気液二相流への応用化が進められている。しかしながら、複雑な気泡群によって構成されるキャビテーション流れに適用した応用例は少なく、そのPIV計測・画像処理技術の確立が早急に求められている。

本報告では、キャビテーション流れにおけるシーディング粒子と気泡群の持つ散乱光強度の違いを利用し、2台のCCDカメラを用いてPIV計測し、粒子または気泡に対して個々に良質な画像情報を取得・処理する手法を提示する。これより、シーディング粒子に着目した取得画像より、キャビテーション様相情報と信頼性の高いキャビティ外部域の速度情報を得る。一方、気泡群に着目した取得画像より、キャビティ内部域の速度情報を得る。さらに、これらを再構築し複合的なキャビテーション流れ場情報を得る手法である。実験例として、Wedge後流渦キャビテーションを対象とし、そのキャビティ境界の設定・ボイド率分布および速度・渦度分布を明らかにし、本計測および画像処理法の信頼性、妥当性を評価・検証する。

2. 実験装置と方法

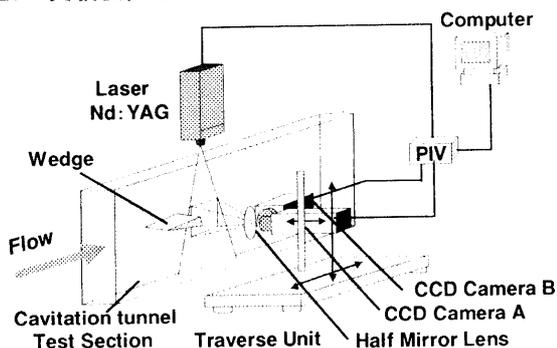


Fig.1 PIV measurement system

図1に示す計測装置は流路に水平・垂直に配置された2台のCCDカメラとハーフミラーならびにPIV処理装置(FlowMap, Dantec社製)により構成されている。なお、シーディング粒子は水性の修正液を用いている。本手法を検証するための実験は、流速分布が一様である二次元測定部(幅80×高さ500×長さ1500mm)を有する回流水槽(臨界レイノルズ数 2.8×10^5)にWedge(頂角 $\beta=10^\circ$, 翼弦長 $c=50\text{mm}$, 翼幅 $b=80\text{mm}$, 材質ステンレス鋼SUS304)を取り付けて行った。なお、Wedge後端位置を座標原点とした。

実験は、レイノルズ数 $Re=3.2 \times 10^5$ (乱流域)において、ノンキャビテーション域(キャビテーション係数 $\sigma=3.0$)、後流渦キャビテーション域($\sigma=0.7$)について行った。計測領域は、キャビテーション放出様相を捉えるために $(x,y)=(25,0)$ を中心とする $48 \times 48\text{mm}$ について行った。

PIV計測に際し、キャビテーション流れにおけるシーディング粒子と気泡群の持つ散乱光強度の違いに着目し、CCD-Aは良質なシーディング粒子画像が得られる絞り値 $F=2.8$ にて行った。一方、CCD-Bは良質な気泡群画像を取得するため、キャビテーション様相にあわせて絞り値 F を調整して行った。

3. キャビテーション様相と速度情報の画像処理法

図2のSTEP1はキャビテーション領域とその情報抽出のための手順を示す。まず、キャビテーション様相画像(CCD-A)の処理過程は①背景情報に紛れたバックグラウンドノイズとシーディング粒子情報の除去、②この画像情報よりグレースケールの濃度ヒストグラムを算出し、二値化処理法(モード法)により濃度ヒストグラムのしきい値 $T_1=105$ を決定、③気泡群の特定(二値化処理)、④気泡群の各速度算出格子($32 \times 32\text{Pixel}$)と同一断面内のボイド率の評価を行う。したがって、ボイド率は被写界深度から算出される測定体積内における二次元的なボイド率として定義する。次に⑤キャビティ境界設定のため、ここではボイド率のしきい値を $T_2=50\%$ にて二値化処理する。

図3のSTEP2は一般に用いられる相互相関法による速度情報算出手順を示す。シーディング粒子画像(CCD-A)と気泡群画像(CCD-B)から個々に相互相関法により速度情報(A),(B)を算出し、移動平均有効化処理を施す。ここで、速度情報中の黒線は、STEP1において特定したキャビティ境

界, 灰色の四角印は速度ベクトルの補正が必要な過誤または信頼性の低いベクトル個所, 黒い破線は Non.C.における時間平均的な死水域の領域を示している。また, 翼下面側の速度情報は翼上面からのレーザシート照射条件により良好には取得されていない。

STEP3 は, 速度情報再構築手順である。STEP1 で特定したキャビティ境界を利用し, STEP2において算出したキャビティ外部域の速度情報(A)と内部域の速度情報(B)を再構築・合成することにより, より信頼できるキャビテーションの速度情報を得る。さらに, この速度情報より無次元渦度分布が得られる。

STEP1 Image of process of cavitation aspect

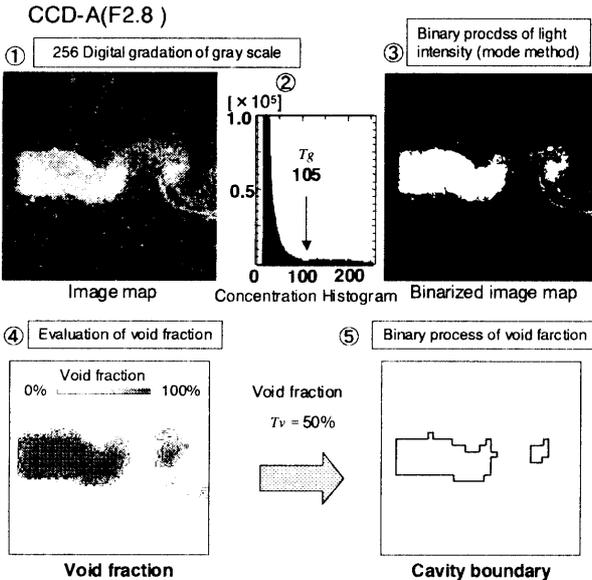
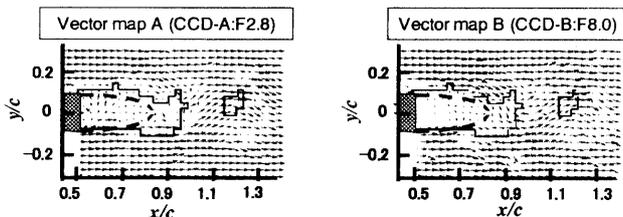


Fig.2 Image processing of cavitation aspect

STEP2 Process of velocity information



STEP3 Reconstruction to new vector map

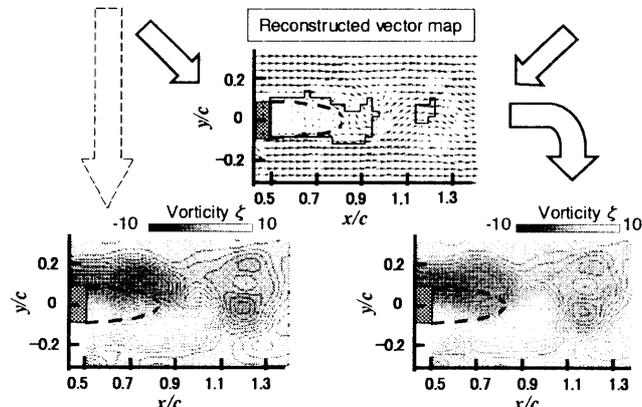


Fig.3 Image processing of vector information

4. 画像処理法の評価と検証

図3の最下段左(波線矢印)に従来の CCD-A のみの速度情報から算出される渦度分布と最下段右の再構築された渦

度分布を比較してみる。これより, 再構築された渦度分布は未処理の渦度分布に比し, 上側はく離せん断層またはキャビティ境界付近の渦層は薄くなり, 死水域内側移動している。また, 死水域後端の渦形成域 ($x/c=0.95$)にある渦キャビテーションがより集中してくる。このことは, このキャビテーション流れの全領域で適切に速度情報が得られた結果であることを意味している。

図4は, Non.C. ($\sigma=3.0$)および後流渦キャビテーション域 ($\sigma=0.7$)における本画像処理法の結果を示す。Non.C.における速度場情報a)より, Wedge後端からの放出渦に起因する規則的な交番流が存在し, 渦度分布b)は死水域後端の渦形成域より, 明確な大規模渦を放出を示している。一方, 後流渦キャビテーション域では, キャビテーション気泡群c)はNon.C.の死水域を完全に覆っており, ボイド率より翼後端から $x/c=0.9$ 付近および $x/c=1.1$ にキャビティが形成されていることが分かる。前述したように, ここで用いたボイド率は, 測定体積内の気泡体積を直接求める厳密な意味でのボイド率とは異なり, 画像処理からの間接かつ相対的な値である。しかしながら, このボイド率分布の提示は, キャビテーション様相と速度場の相関をリアルタイムで知り得る有効な情報となる。次に, 速度情報d)より, キャビティの後端部 ($x/c=1.0$) 付近にはく離せん断層に沿った強い流れが存在する。また, 渦度分布e)より, 上側のはく離せん断層による渦層の後端部 ($x/c=0.9$) に, 脱落する渦キャビテーション, および $x/c=1.1$ に, すでに放出された渦キャビテーションが現れているが, Non.C.に比し不規則かつ小規模な渦となっている。

以上より, 本キャビテーション様相と速度情報の複合的な画像処理法は複雑かつ統計確率的な事象であるキャビテーション流れ構造を明らかにする有効な手法の一つと言える。

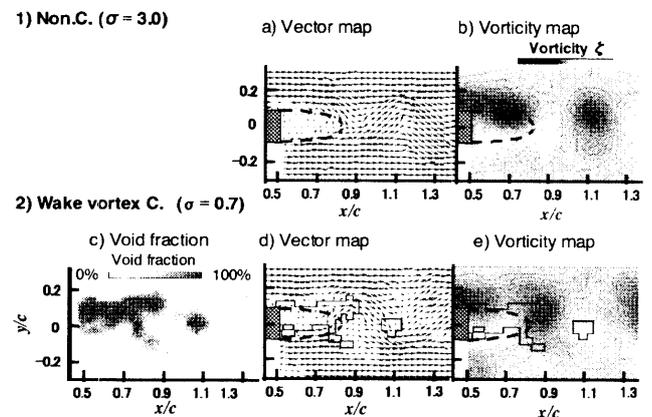


Fig.4 Cavitation aspect and velocity information

5. 結言

キャビテーション流れにおけるシーディング粒子と気泡群の持つ散乱光強度の違いに着目し, 2台の CCD カメラを用いて PIV 計測し, 粒子または気泡に対して個々に良質な画像情報を取得・処理する手法を提示した。これより, キャビテーション様相情報と信頼性の高い速度情報の複合的なキャビテーション流れ場情報を同時に得る可能性を示した。さらに, Wedge 後流渦キャビテーションを対象として, そのキャビティ境界の設定・ボイド率分布および速度・渦度分布を明らかにし, 本計測および画像処理法の信頼性, 妥当性を評価・検証した。

参考文献

1) 佐藤恵一, 星野宏介, 太田博章: 流路壁面近傍ではく離渦キャビテーション気泡の分裂・崩壊過程, 日本機械学会論文集(B編), Vol.64, No.622(1998)pp.1689-1696.
2) 菱田公一: 粒子画像流速計(PIV)の複合計測, ながれ, Vol.18(1999)pp.206-214.