Two-dimensional analysis of interaction between deformable hydrofoil and fluid flows in a propulsive stage

○ 中塚 啓介 (阪大院) 正 竹内 伸太郎 (阪大工)
正 梶島 岳夫 (阪大工)

Keisuke NAKATSUKA, Graduate School of Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, Osaka
Shintaro TAKEUCHI, Dept. of Mech. Eng., Osaka Univ.
Takeo KAJISHIMA, Dept. of Mech. Eng., Osaka Univ.

Numerical simulation of flow past a deformable hydrofoil in a narrow wall is carried out by an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method. The hydrofoil used is NACA0012 and the bottom half of it is oscillated at the amplitude of one fifth the stationary chord length. In this study, the phase difference between deformation and propulsion velocity is observed. It is discussed also in open space. The difference between the propulsion forces is discussed in relation to the strengths and locations of the vortices observed behind the trailing edges.

Key Words: Self Oscillation, Fish, Deformable Hydrofoil, Propulsion, Finite Difference Method, ALE Method

1. 緒言

近年, 新たな推力発生装置への応用を目的として, 魚類を代表とする生物の推力発生機構の研究が行われている。

魚類の推力発生モデルの一つに, 尾びれと体の後半部分を利用して泳ぐアジ型推進がある。著者らは前報⁽¹⁾で, 静止状態を初期値として, 翼が変形することにより前進する際の流れ場の解析を行い, 発生する後流の渦が翼の推進におよぼす影響, レイノルズ数依存性について検討を行った。

本報では, ALE法を用いて, 峽隘流路内における推進機構としての変形翼に着目し, 壁面があることによる後流渦への影響と推進性能の関係について検討した結果を示す。

2. 数値解析手法

本研究では, 流れ場を二次元非圧縮性流体と仮定した。移動変形する物体周りの流れ場を解析するため, 移動境界適合座標系を導入する。物理空間 (x, y, t) を計算空間 (ξ, η, τ) に写像すると, 変換式は以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \tau} \\ \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} & \frac{\partial \eta}{\partial \tau} & 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial \xi} & \frac{\partial \eta}{\partial \xi} & 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial \eta} & \frac{\partial \eta}{\partial \eta} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \end{pmatrix} \quad (1)$$

この関係を連続の式および Navier-Stokes 式に適用し, $t = \tau$ として以下の式を得る。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial J U^j}{\partial \xi^j} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial \xi^j} (U^j - V^j) = -\frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} \frac{\partial P}{\partial \xi^j} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \xi^j}{\partial x_k} \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{\partial \xi^l}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^l} \right)$$

ここで, U^j は反変速度, V^j は格子の反変移動速度, t は時間, p は圧力, Re はレイノルズ数である。

時間進行には部分段階法を用いた。空間差分はコロケート格子を用いた2次精度中心差分, 対流項, 粘性項及び翼の加速度に2次の Adams-Bashforth 法を用いて時間発展させた。

Fig. 1: Computational grid in open space

Fig. 2: Computational grid in narrow channel

基本となる翼型には NACA0012 翼型を用いた。格子は壁面がないケースは C 型境界適合座標 (図 1) を用い, 格子は ξ, η 方向にそれぞれ 320, 40 点取った。壁面があるケースは H 型境界適合格子 (図 2) を用い, 格子は ξ, η 方向にそれぞれ 420, 30 点取った。どちらのケースも翼表面に 160 点の格子数をとった。計算領域は, 翼弦長 L に対して, 壁面がないケースは半円部分半径を $2L$, 後流部分を $4L$ と設定した。また壁面があるケースは翼前方 L , y 方向 $0.3L$, 後流部分を $3L$ と設定した。物体の密度比は 2.0 とした。 Re は, 翼弦長 L と無次元時間 1 に L だけ推進する速度を基準として定めた。翼は前半部分は変形せず, 後半部分のみを変形させる。翼表面の点 (x, y) の変形を $x > L/2$ に対して以下の関数で与える。

$$x = x_0 \cos \{x_0/L \sin(2\pi t^*)\} \quad (2)$$

$$y = y_0 + A(t^*) x_0 \sin \{x_0/L \sin(2\pi t^*)\} \quad (3)$$

$$A(t^*) = \frac{a \{1 - \exp(-t^*)\}}{L/2 \cdot \sin(L/2)} \quad (a = 0.2) \quad (4)$$

ここで, (x_0, y_0) は図 3 に示すような無変形時の翼弦中心 C からの位置ベクトルである。振幅 $A(t^*)$ は時間とと

Fig. 3: Schematic of deformable hydrofoil

もに翼弦比の0.2倍に漸近するようにした。これは実際の魚(アジ型)の尾びれの動きに近いと報告されている(2)。式(2),(3)によれば、変形の1周期の体積変化率は3%以内であった。

速度の境界条件としては、物体表面および壁面に non-slip 条件、流入側に速度ゼロ、流出境界に自由流出を用いた。圧力の境界条件には、流入・流出で Neumann 条件、物体表面では加速度を考慮し、移動境界とそれに交差する座標軸との非直交性を補正した条件を用いた(3)。

翼が受ける推力 F_x は進行方向のみを考慮し、翼周りの圧力と、粘性応力から求め、翼の重心 T_x は次の運動方程式により推進させた。

$$\ddot{T}_x = F_x/m \quad (5)$$

ここで、 m は無次元質量である。本計算で用いた ALE 法と数値解析法の組み合わせは、別途行われた比較計算により、十分な精度が得られることを確認している(1)。

3. 計算結果

図4は、推進速度の時間変化を比較している。負の速度は図3で翼が左方向に運動していることを意味する。また、翼後端の y 方向変位の時間変化も同時に示した。図より、翼の変位と推進速度には位相差が確認できる。位相差は、壁面の有無にかかわらず約0.1周期である。

図5は時刻 $t^*=1.18$ における瞬時の速度ベクトルを比較したものである。翼の後縁は y 方向に運動中で、振幅のおよそ60%に達した瞬間である。図5(a)では、速度ベクトルを各方向とも1格子おきに描いている。図より、放出される渦は、壁面がない場合の方がより下流に配置されているのがわかる。これは、 $t^*=1.1$ から 1.18 の間の推進速度の差と対応していると考えられる。

また図6は $t^*=1.4$ で、後縁は $-y$ 方向に運動中である。図6(a)は、速度ベクトルを各方向とも1格子おきに描いている。翼の変形により放出される渦の回転方向は、先に放出された渦とは逆転しており、逆カルマン渦の配置となっている。これは、推進力を発生する渦の配置であることがわかる(4)。これらの二つの渦の間には増速流が生じている。壁面がある場合の流れ場では、あらかじめ放出されていた渦がやや上流にあるため、壁面がない場合に比べて増速流がより水平に放出されている。壁面がある場合の方が、この流れによる推進力は大きいと考えられる。

4. 結言

本研究では、魚を模擬した変形翼を用い、峽隘流路内で運動する際の流れ場の解析を行った。また壁のない場合との比較を行うことで以下のような結果を得た。

Fig. 4: Time evolution of propulsion velocities

Fig. 5: Instantaneous velocity fields near trailing edge at $t^*=1.18$ Fig. 6: Instantaneous velocity fields near trailing edge at $t^*=1.4$

(1) 自由空間中と峽隘流路内の推進では、翼の変位と推進速度の時間変化にはほぼ同じ位相差が見られた。

(2) 峽隘流路内で発生した逆カルマン渦対は、自由空間で発生したものに比べて、渦中心が上流にある。このため、渦間の増速流がより水平に放出され、この過程で翼はより強い推力を進行方向に受ける。

文献

- (1) 中塚ら, 静止流体中で変形運動する翼の推進モード解析, 第18回数値流体力学シンポ, E6-1(2004)
- (2) Bainbridge, R., The speed of swimming of fish as related to the size and to the frequency and amplitude of the tail beat, *J. Exp. Biol.* **35**, (1958), 109-133
- (3) 泉ら, 移動境界を含む流動解析の研究, 日本機械学会論文集(B編), **68**, 572, (1994), 1218-1225
- (4) 刈脇ら, ピッチング/ヒービング運動翼後流の渦構造と非定常推進力特性, 機講論(流体工学部門), 529, (2004)