

## 移動境界流体解析を用いたオタマジャクシの 遊泳シミュレーション<sup>†</sup>

吉 村 忍\*・岡 本 真 史\*\*・山 田 知 典\*・古 泉 大 輔\*

**ABSTRACT** Visual simulation of tadpole swimming was performed in this paper. To increase the reality of visualization, computational fluid dynamics with moving boundaries was first performed to estimate accurate fluid force around a tadpole, and then simulation of rigid body motion with calculated fluid force was carried out separately. The finite element analysis with smoothing and remeshing schemes were implemented to well control the fluid mesh, following the motion of tadpole. Numerical results were visualized with texture mapping techniques. The present approach enables realistic visualization of tadpole swimming. Through the numerical examples, the implemented smoothing and remeshing schemes were robust and they can precisely describe the large deformation of tadpole's motion.

### 1. はじめに

海棲生物である魚やイルカなどは推進機構を装備した人工物に比べてはるかに効率良く水中を遊泳することが知られている<sup>1)</sup>。この生物の推進機構を模倣した魚型ロボットの開発が近年盛んに進められており<sup>2)</sup>、将来の多種多様な利用を目指して効率の向上、制御技術の高度化などが図られている。このような生物の泳動現象を解明しようとする際、計算機シミュレーションを活用することによって実際にロボットを作り実験を行うコストを削減することができる。また、実験では測定不可能な物理量を計算機上で表示することにより現象の理解を深めることも可能である。

一般の魚類、特にマグロやカツオのような高速魚の泳動をシミュレートしようとした場合、体長とその速度から概算されるレイノルズ数が非常に高い領域となり乱流を扱うことになるため複雑さが飛躍的に上がる。本研究では、周りの流れを層流として扱うことのでき

るサイズの生物として、オタマジャクシを解析対象とする。オタマジャクシは、大きく幅のある頭部と細長く伸びた尾部を持つ特徴的な構造を有しており、流体力学的に興味深い形をしている。また、農山村の景観シミュレーションにおける必要事項の一つである周囲の動植物のリアリティ<sup>3)</sup>といった観点からもその可視化は意義があると考えられる。これまで、実際のオタマジャクシの遊泳観察結果とその力学的考察を行った研究<sup>4)</sup>や、オタマジャクシまわりの移動境界流れの解析を行ったもの<sup>5)</sup>などいくつか研究が行われている。

オタマジャクシの遊泳を計算機上で再現するため、本研究では遊泳現象をオタマジャクシ周りの移動境界流れ解析とその解析結果から得られた推進力を元に静止流体中において抵抗を受けながら進む単純な剛体シミュレーションとに分離し可視化を行った。移動境界流れではこれまで多く用いられている代数的な変換による格子生成(algebraic grid generation)ではなく、完全な非構造格子を用い有限要素法による流体解析を行った。これは今後の魚型ロボット等への適用を行いう際に自由にメッシュ生成が可能となることを目指したものである。以降、第2章では本研究の中心となる有限要素法による移動境界流れ解析の概略を述べ、移動境界問題における擬似構造(pseudo elastic)支配方程式を用いた非構造格子のスムージング手法<sup>6)</sup>とリメッシング(再要素分割)について述べる。第3章において静止流体中におけるオタマジャクシの剛体運動の取り扱いに

Simulation of Tadpole Swimming by CFD with Moving Boundaries. By Shinobu Yoshimura, Tomonori Yamada, Daisuke Koizumi (Department of Quantum Engineering and Systems Science, School of Engineering, University of Tokyo) and Masafumi Okamoto (Institute of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo).

\* 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻

\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究所環境学専攻

† 2005年7月25日受付

について述べ、数値計算結果と可視化例を第4章で示す。最後に第5章において結言を述べる。

## 2. オタマジャクシ周りの移動境界流れ解析

### 2.1 オタマジャクシの運動モデル

本研究で計算対象としたオタマジャクシモデルでは体長を4.7cmとした。この値は、文献<sup>4)</sup>に記述された実測のウシガエル(*Rana Catesbeiana*)のオタマジャクシの1データから取ったものである。**図1**に示すようにオタマジャクシの頭部は長径1.8cm、短径1.0cmの橢円とし、それが途中で直線の尾部につながったものとしている。なお、本研究では前章で述べたように厳密に流体構造連成解析を行うのではなく、移動境界流れ解析と剛体運動に分離して遊泳現象をシミュレーションすることを目的としている。このため、3次元問題とした場合の解析精度向上への期待に比べ、解析時間の問題と水面を自由表面として取り扱うことによって非常に複雑な解析になるなど問題点が多いことからオタマジャクシの遊泳は2次元問題で取り扱うこととした。2次元運動を扱うにあたり、オタマジャクシは上から見たものと考える。

魚の運動形態は体の長さと変形の程度によりウナギ型(Anguilliform)推進、アジ型(Carangiform)推進、そしてハコフグ型(Ostraciiform)推進に大別される<sup>7)</sup>。この内、ウナギ型推進はウナギもしくはフナなどの淡水魚のように体が体軸にそってあまり変化せず体全体を使って推進する方式であり、粘性力を利用した運動形態であると考えられている。一方、アジ型推進は体後部のみを屈曲させ抵抗力を発生する体前部の横運動は小さく押さえられる。このため、効率的に推進力を発生できるようになっている。アジ型推進は慣性力を利用した運動形態であり、実際マグロやイルカに見られる高レイノルズ数( $10^4 \sim$ )の流体中で有効な運動である。ハコフグ型推進では体はほとんど使わず尾びれだけを動かして泳ぐ。オタマジャクシの運動はウナギ型推進にあたり、体に進行波を発生させて波打ち運動を行っている。本研究では、物理量を任意に変えられるシミュレーションという手法を生かし、オタマジャクシの運動を表現するのに現実に即したモデルとして波打ち型の運動と仮想的なモデルとして振動型の運動の2つを設定した。これらはそれぞれウナギ型、ハコフグ型の運動にあたる。また、実際にはオタマジャクシの尾の先端には筋肉がほとんど存在せず流体からの力を受けて変形・移動するため、尾の剛性が低ければ波打ち型、剛性が高ければ振動型の運動になると考えら

れる。

### 波打ち型の運動 (flapping motion)

波打ち型の運動は進行波の伝播であり、次の式のような形に表すことができる<sup>5)</sup>。

$$y(t) = h(x, t) = a(x) \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで  $a(x)$  は各位置における振幅を表す関数、  $T$  は周期を表す。ウシガエルのオタマジャクシの場合では  $\lambda$  は体長にほぼ等しいとするデータ<sup>4)</sup>に基づき、今回 のシミュレーションでは常に  $\lambda = 4.7\text{ cm}$  と設定した。

### 振動型の運動 (vibratory motion)

振動型の運動は体に位相差がないとし、式(1)を単純化した次式で表される。

$$y(t) = h(x, t) = a(x) \sin \left\{ 2\pi \left( -\frac{t}{T} \right) \right\} \quad (2)$$

これらの2つの動きによる運動の様子を**図2**に示す。

### 2.2 移動境界流体解析による推進力の計算

#### 2.2.1 支配方程式

移動境界問題を取り扱う流体の支配方程式はALE記述に基づく Navier-Stokes 方程式と連続の式とした。

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = f_i \quad (3)$$

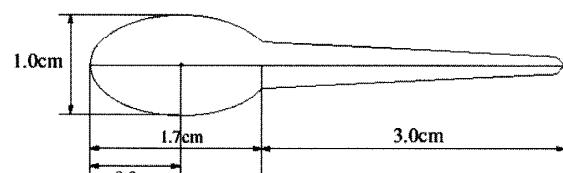
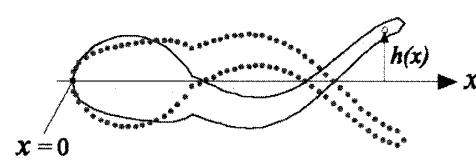
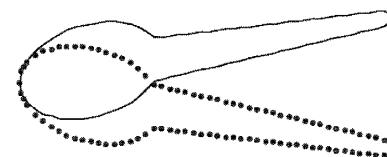


図1 オタマジャクシの解析形状モデル



(a) 波打ち型運動



(b) 振動型運動

図2 オタマジャクシの実運動(上)と仮想運動(下)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ここで  $\rho$  は密度,  $u_i$  は流速ベクトル,  $\hat{u}_i$  はメッシュ移動速度ベクトル,  $f_i$  は物体力,  $\sigma_{ij}$  は次式で与えられる応力テンソルである。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中  $\delta_{ij}$  はクロネッカーデルタであり,  $p$  は圧力,  $\mu$  は粘性係数を表す。なお、基本境界条件、自然境界条件はそれぞれ式(6),(7)のとおりである。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \Gamma_g \quad (6)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_i (= \bar{h}_i) \quad \text{on } \Gamma_h \quad (7)$$

ここで  $\bar{h}_i = \sigma_{ij} n_i$  は物体に働く表面力であり,  $\Gamma_g$ ,  $\Gamma_h$  はそれぞれ速度境界条件、表面力境界条件の与えられる境界面を表す。

## 2.2.2 安定化有限要素法による定式化

2.2.1で示した支配方程式に対して、安定化手法として SUPG (Streamline-Upwind/Petrov Galerkin) 法および PSPG (Pressure Stabilized/Petrov Galerkin) 法<sup>8~10)</sup> を用い、速度の重み関数  $w_i$ , 圧力の重み関数  $q$  として弱形式化すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w_i \cdot \rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \cdot \sigma_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega \\ & + \sum_e^N \int_{\Omega_e} \tau_{SUPG} (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left[ \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_k - \hat{u}_k) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - f_i \right) - \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \right] d\Omega \\ & + \sum_e^N \int_{\Omega_e} \tau_{PSPG} \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial x_j} \left[ \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) - \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_j} \right] d\Omega \\ & = \int_{\Omega} w_i \cdot \rho f_i d\Omega + \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma \end{aligned} \quad (8)$$

また、空間方向の離散化には3角形1次同次補間要素を用い、時間方向の離散化にはCrank-Nicolson法を用いた。ただし圧力に関しては解の振動を抑えるために完全に陰的に取り扱うこととした。

## 2.3 メッシュ制御

時々刻々と変化するオタマジャクシ境界を追従し、かつ精度のよい有限要素補間を行なうため、移動境界流体問題ではメッシュ制御が必要とされる。一般に構造変形が微小であればメッシュスマージングを行い、構造変形が大きければメッシュの再生成(リメッシング)が必要となる。

スマージングを行う場合、流体問題は式(3)によりALE法で記述されているため、メッシュ移動速度が得られれば十分である。メッシュ移動速度は速度境界条件として与えられる移動境界を追従し、かつ、解析領

域全体でメッシュのゆがみを少なくするものが求められる。このため、移動境界付近において局所的なメッシュのゆがみが発生するのを避けるため、ラプラス方程式に支配されたラプラシアンスマージングや擬似構造(pseudo elastic)支配方程式を用いたスマージング<sup>6)</sup>が用いられる。本論文では後者を採用した。このスマージング手法では流体側のメッシュを擬似的に線形構造問題の支配方程式に従うものと考え、流体一構造境界面で与えられた構造の強制変位量を擬似構造問題の境界条件として各節点におけるメッシュ移動量を求めるものである。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

ここで  $\phi_i$  を各節点の変位ベクトルあるいはスマージングによる移動ベクトル、 $\bar{\phi}_i$  を移動境界から流体問題が与えられる変形ベクトルとすると以下の境界条件が必要となる。

$$\phi_i = 0 \quad \text{on } \Gamma_g \quad (10)$$

$$\phi_i = \bar{\phi}_i \quad \text{on } \Gamma_{Interface} \quad (11)$$

ここで  $\Gamma_g$ ,  $\Gamma_{Interface}$  はそれぞれ移動境界以外の解析領域境界、移動境界を表す。求められた  $\phi_i$  から次式に従いメッシュ移動速度を求め、式(8)に代入する。

$$\hat{u}_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (12)$$

また、要素のゆがみがある一定値以上大きくなつた場合にはリメッシングも行うこととした。各要素のゆがみの判定基準として以下の式を用いた<sup>11)</sup>。

$$A_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\max(L_{ei})}{\min(H_{ej})} \quad (13)$$

ここで  $\min(H_{ej})$  はある要素においてそれぞれの稜線を底辺とした時の要素の高さの最小値、 $\max(L_{ei})$  は稜線の長さの最大値である(図3参照)。 $A_e$  は正三角形に対して1.0となる。実際の解析では  $A_e$  が5.0以下となつた場合にリメッシングを行うこととした。この値は、二等辺三角形で底角が約10度になつていて程度のゆがみに相当する。

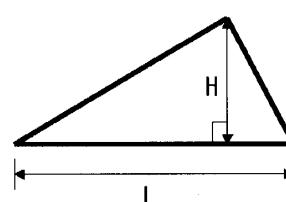


図3 要素のゆがみの定義

### 3. 静止流体中におけるオタマジャクシの剛体運動

移動境界を伴う自由遊泳問題において厳密な流体構造連成解析を行う場合は、推進の際に生じる抵抗も含めた計算を行うこととなるため、オタマジャクシが得る力は純粋な推進力となる。しかし、本研究における移動境界流れ問題ではオタマジャクシの位置を固定しその形状変更運動は移動境界としてのみ取り扱われているため、流体からの抵抗力はオタマジャクシの速度に関係しない。すなわち、推進力については第2章で述べたスキームに従って得られたものを用いるが、抵抗力については別途評価が必要となる。まず、オタマジャクシへの抵抗力  $D$  を次式で表現する。

$$D = -\frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (14)$$

ここで  $V$  はオタマジャクシの進行速度、 $A$  は進行速度に垂直な投影面積、 $\rho$  は流体の密度、 $C_D$  は抵抗係数である。ここではレイノルズ数を 7200 とした数値解析結果<sup>5)</sup>から得られている値を採用し、抵抗係数  $C_D = 0.115$  とした。

これより推進力を  $F(t)$ 、オタマジャクシの質量を  $m (= 3.8g)$  とすると剛体運動は次式で表すことができる。

$$m \frac{dV(t)}{dt} = F(t) - \frac{1}{2} C_D \rho V(t)^2 A(t) \quad (15)$$

本研究では前進差分によって時間方向の離散化を行った。

$$V_{t+\Delta t} = V_t + \frac{1}{m} \left( F_t - \frac{1}{2} C_D \rho V_t^2 A_t \right) \Delta t \quad (16)$$

また  $\Delta t$  の大きさは流体解析の 1/10 とした。

一方、回転方向の移動においても抵抗が働くため同様の定式化が必要であると考えられる。しかし、抗力係数ほど明確な既知係数がないため、簡単な指標を元にして回転角を仮定することとする。本研究では推進力の向きと頭の向きとの角度  $\phi$  に比例する方向変化量を  $d\theta$  として設定し、可視化段階で違和感がない程度の比例定数  $k (= 0.02)$  を用いることにした。

$$d\theta = k\phi \quad (17)$$

### 4. 数値計算結果

#### 4.1 移動境界流体解析

本節ではまず 2.1 節で示したオタマジャクシの泳ぎを移動境界として与えた時の流れの様子について計算、可視化した結果を示す。解析領域としてはオタマジャ

クシの体長 4.7 cm に対して 40.5 cm × 23.125 cm をとり、そのほぼ中央にオタマジャクシが存在するような配置とした。また、オタマジャクシの近傍ほどメッシュが細かくなるように 5 段階のメッシュ密度分布を与えた。境界条件としてオタマジャクシ表面は non-slip 条件、上下端は slip 条件を与え、右端(流出側)は自由境界とした。本来オタマジャクシが推進する計算を行うにあたっては静止流体中で運動する設定にするべきであるが、予備数値実験として流入の境界条件なしでシミュレーションを行ったところ非常に不安定な圧力分布が得られ力の計算が正確に行えないという問題が発生した。今回の研究においてはオタマジャクシにほとんど影響がない程度の一様流速、すなわち、計算領域の左端(流入側)から一様流速 2.0 cm/s を与えた。一般的のオタマジャクシの代表的な遊泳速度は体長の 5 倍程度<sup>4)</sup>、すなわち本解析モデルでは 23.5 cm/s 程度であり、式(14)に示した抵抗力を考えた場合、一様流速 2.0 cm/s は十分に小さいと考えられる。実際に次節で剛体シミュレーション結果から得られた推進速度との比較を行う。

振動型と波打ち型では式の形状の違いから初期メッシュが異なる。以下に示す結果においては、振動型の運動におけるメッシュは節点数 6,213、要素数 12,223 である。波打ち型では節点数 6,245、要素数 12,273 とした。全ての流体計算は  $\Delta t = 1e-3$  で行った。また、両モデルとも Pentium4 2.6GHz を用い 2 秒間、2,000 時間ステップ計算を行った。計算時間は約 8,100 秒であった。

まず、振動型に関する結果を示す。この時のオタマジャクシの泳ぎ関数は式(2)において定義した振動型の運動において各位置における振幅をあらわす関数  $a(x) = 0.2x/4.7$ 、周期  $T = 0.1$  とし次式で与えた。

$$y(t) = h(x, t) = (0.2x/4.7) \cdot \sin \{2\pi(-10t)\} \quad (18)$$

尾の先端が振幅 0.2 cm をとる動きであり、体の後ろ側ほど大きな振幅になる。この振幅は、後述の波打ち型運動の計算においてメッシュがつぶれないように余裕を持って選んだ値に合わせたものである。

尾を動かすことによって流体が尾の先端から前方に回り込み、カルマン渦と逆向きの渦が後方に剥離していく。**図 4** に最小振幅時における圧力分布を示す。また、**図 5** に示すようにオタマジャクシの下側に時計回りの渦が生じた状態で尾が下向きの速度を持ちはじめるとき、反時計回りの渦を作ろうとする力が生まれる。このため渦と渦の間に後ろ向きの流速の大きい部分が

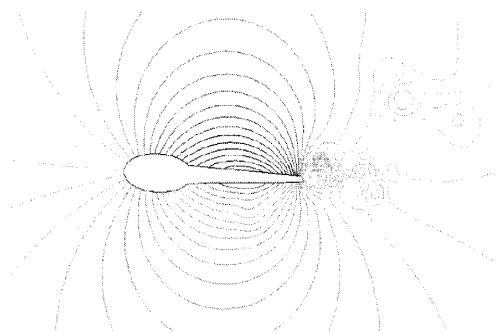


図4 1,225 時刻ステップにおける圧力センター

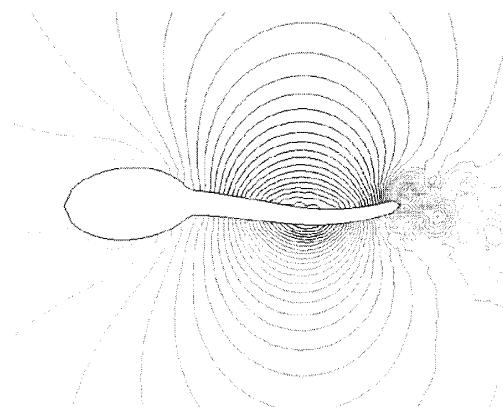


図6 1,300 時刻ステップにおける圧力センター

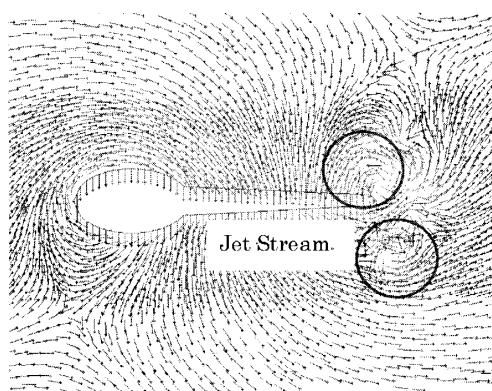


図5 振動型運動で観測されたジェット流

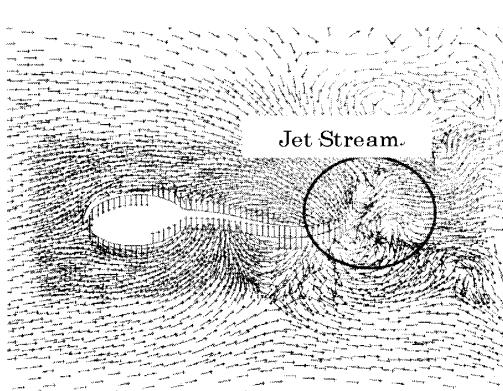


図7 波打ち型運動で観測されたジェット流

現れる。これはジェット流と呼ばれオタマジャクシの高い推進能力を生み出す力に関係するものである<sup>12)</sup>。

また、図4の圧力センターを見ると剥離した渦が右上方に存在することが分かる。オタマジャクシ後方の渦の挙動は、今回行った他のシミュレーションにおいてもしばしば上下どちらかの方向性を持っているという結果が現れており、特に振動型の運動でその傾向を顕著に見ることができた。

続いて、波打ち型の場合の結果を示す。この時のオタマジャクシの泳ぎ関数は振動型との比較のために、式(18)に対して位相差部分のみが違う形として次式で与えた。また、2.1節で述べたように  $\lambda = 4.7$  とした。

$$y(t) = h(x, t) = (0.2x / 4.7) \cdot \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{x}{4.7} - 10t \right) \right\} \quad (19)$$

図6に示す最小振幅時における圧力センターについては波打っているにもかかわらず振動型と見た目がほとんど変わらない。また、速度分布を見ると、後方に

速度の大きい部分はあるものの、尾を動かした時に渦が振動型のときに見られたような大きさで発生したりすることはなかった。また、振動型の場合と同様ジェット流を観測することができた。

#### 4.2 メッシュ制御

2.3節で述べた擬似構造支配方程式を用いたスムージングでは一部の領域のヤング率を変更することにより、より要素のゆがみに強いスムージングスキームとなることが知られている。これは移動境界付近において解析精度の問題から細かいメッシュ分割が用いられることが多く、他の部分に比べわずかな要素内におけるメッシュ移動速度差でもゆがみやすくなるのを避けるためである。非構造格子を用いたオタマジャクシ周りの流れ解析では特に大きく変動するオタマジャクシの尾の先端部で図8に示したように著しくゆがんだ要素が生成される。このため、ヤング率の非均一分布を導入した。擬似構造支配方程式を用いたスムージングは2.3節に示したように移動境界流体解析を行うために必

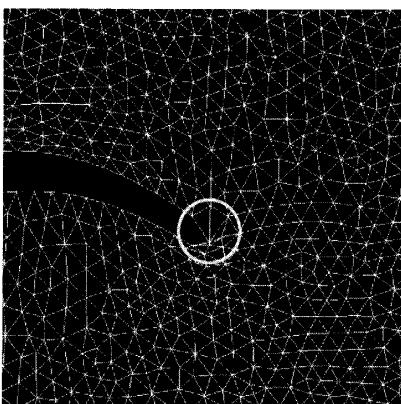


図8 オタマジャクシ尾部における要素のゆがみ

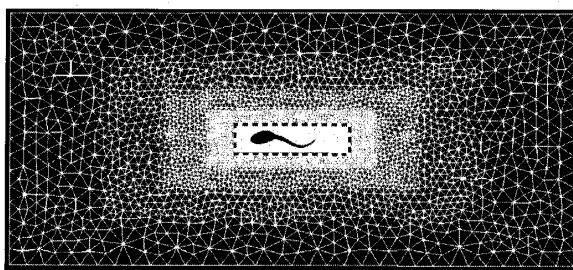


図9 ヤング率の不均一分布

要となるメッシュ移動速度を求めるためのものであり、ここで導入したヤング率の非均一分布は流体解析の精度にメッシュ形状の良化以外の影響を与えない。

図9中の破線で囲った部分が弾性体としての物性値を変更して、よりゆがみにくくした部分である。今回の検証では、ヤング率を他領域の $10^8$ 倍に設定した。表1に一様なヤング率でスムージングを行った場合のリメッシング回数と非一様なヤング率分布を用いてスムージングを行った場合のリメッシング回数との比較を示す。明らかに非一様なヤング率分布によるスムージングが要素のゆがみを低減しリメッシング回数を減らしていることが分かる。これは通常のメッシュ制御を行った場合は図8に示したように、オタマジャクシ周囲の小さな要素がオタマジャクシの動きに追随できず尾の先端で要素のゆがみが大きくなっているのに対し、オタマジャクシ周囲の小さな要素に対して大きなヤング率を与え擬似的に固くすることにより、これらの小さな要素がその形状を保ったままオタマジャクシの動きと運動する要素のゆがみがほとんど見られなくなった。このとき、オタマジャクシの運動に必要なメッシュの変形は解析領域の外周近くの比較的大きな

表1 リメッシング頻度の比較

	波打ち型運動	振動型運動
ヤング率一様分布	9	89
ヤング率不均一分布	0	61

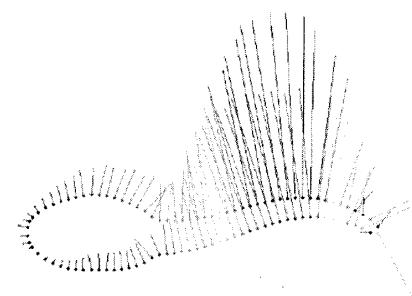


図10 オタマジャクシ周りの流体力分布

の大きい要素が吸収している。

#### 4.3 オタマジャクシの剛体運動

オタマジャクシの遊泳軌跡を求めるため、移動境界流れ解析から得られた推進力を元に剛体運動シミュレーションを行った。より現実のオタマジャクシに近づけるため振幅を体長の15%程度と大きく取り、移動境界流れ解析を行った。このとき、運動開始時に大きな動きを与えることによって不安定性が生じないように時間依存の項を導入し解析初期のオタマジャクシの運動を緩和した。

$$y(t) = h(x, t) = (1.0 - e^{-2.5t}) \cdot 0.15x \cdot \sin\left\{2\pi\left(\frac{x}{4.7} - 10t\right)\right\} \quad (20)$$

式(20)で与えられたオタマジャクシ運動から移動境界流れ解析を行った結果、図10に示すようなオタマジャクシ周りの流体力を得た。この流体力の和をオタマジャクシ重心点における推進力とし、遊泳シミュレーションを行った結果を図11に示す。初めの500ステップ程度は尾を動かしても座標がほとんど変わっていない。その後、徐々に加速し、遊泳を進めていった。また、多少の変化はあるものの概ね直進する結果が得られた。また、得られた最大推進速度は体長の11.2倍であった。この値は次式で与えられる観察結果から得られた振動数 $f$ 、体長で規格化した相対推進速度 $U$ の関係式<sup>4)</sup>から求めた値5.53に比べると2倍程度大きな値となっている。

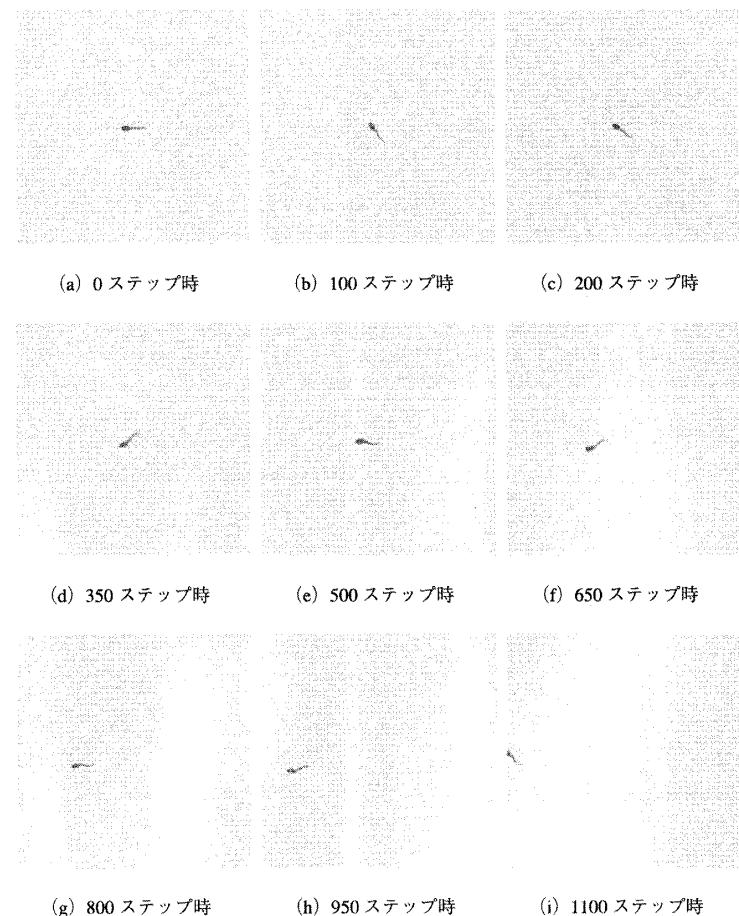


図11 オタマジャクシの遊泳運動

$$f = 1.31U + 2.75 \quad (21)$$

これは2次元解析を行ったため、推進力を過大に評価したためと考えられる。実際のオタマジャクシは厚み方向に対して一定の断面を持っていることはなく、3次元的な流体力の効果を考慮に入れる必要があることが分かる。計算結果から得られた推進速度は52.6 cm/sであり前節で流体解析の流入境界条件として与えた一様流速2.0 cm/sは剛体シミュレーション結果から得られた推進速度に比べて十分小さいことが分かる。

最後に水面のテクスチャ<sup>13)</sup>を用いて複数のオタマジャクシの遊泳シミュレーションの結果をアニメーション化したキャプチャ画像を図12に示す。このシミュレーションでは複数のオタマジャクシに異なる初速度を与え、剛体運動シミュレーションを行った。オタマジャクシ同士が衝突しないように式(17)の比例定数kの値を調節した。また、水面のテクスチャはオタマジャクシの位置のみから設定した。



図12 水面テクスチャを用いたオタマジャクシ遊泳の可視化

## 5. おわりに

本研究ではオタマジャクシの遊泳シミュレーションを行うために、オタマジャクシの運動を移動境界条件として与える安定化有限要素法流体解析とその結果得

られた推進力から剛体運動として計算されたオタマジャクシの遊泳軌跡の追跡及びその可視化を行った。

移動境界流れ解析としては安定化有限要素法、擬似構造スムージング、リメッシングを効率的に用いて、大きな振幅を持つ運動によって流体中を泳ぐオタマジャクシ周りの流れ解析が可能となった。本アプローチは他の現象への適用も容易に行うことができると考えられる。また、オタマジャクシの運動として波打ち型と振動型の2種類のシミュレーションを行った。振動型はハコフグの運動を模したものであるが、オタマジャクシの尾が十分に固く、大きな弾性変形が得られない場合にはこのような運動になると考えられる。このため、魚型ロボットを設計する場合に尾の剛性に適合した推進力のシミュレーション結果を得るためにには尾が流体からの力を受けて変形・移動する完全な流体構造連成問題として解く必要があると考えられる。

最後にもう一つの研究目的であった景観シミュレーションといった観点から考えると、波打ち型と振動型の両者を見比べると、両者とも流体解析から得られた推進力に従った運動軌跡であるにもかかわらず、やはり波打ち型のオタマジャクシ運動に対して親しみを感じた。テクスチャの利用等により、流体計算に基づいた遊泳アニメーション映像をよりもっともらしく提供することも可能となった。

#### 参考文献

- 1) 永井實：イルカに学ぶ流体力学，オーム社（1999）
- 2) 平田宏一：海上技術安全研究所における魚ロボットの開

発，[http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/fish/jsde2003\\_fish.pdf](http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/fish/jsde2003_fish.pdf)

- 3) 朱朝江，村岡一信，水野尚：空気力学に基づくトンボのビジュアルシミュレーション，芸術科学会論文誌，2-4, 146/155 (2003)
- 4) R. J. Wassersug and K. S. Ho: The kinematics of swimming in anuran larvae. *The Journal of Experimental Biology*, 119, 1/30 (1985)
- 5) H. Liu, R. J. Wassersug, and K. Kawachi: A computational fluid dynamics study of tadpole swimming. *The Journal of Experimental Biology*, 199, 1245/1260 (1996)
- 6) A. A. Johnson and T. E. Tezduyar: Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 119, 73/94 (1994)
- 7) 中島，土屋，小野：関節イルカ形水中推進機構の動力学解析(第4報)，日本機械学会論文集，B，65-629，100/107 (1999)
- 8) T. E. Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advances in Applied Mechanics*, 28, 1/44 (1992)
- 9) T. E. Tezduyar, S. Mittal, S. E. Ray, and R. Shih: Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95, 221/242 (1992)
- 10) T. E. Tezduyar and Y. Osawa: Finite element stabilization parameters computed from element matrices and vectors, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190, 411/430 (2000)
- 11) S. Sugimoto: Numerical simulation of falling leaf using the free mesh method. Master' thesis, University of Tokyo (2003)
- 12) 劉：CFDで見る生物流れ，流れ，39, [http://www.jsme.or.jp/fed/newsletters/2001\\_10/2101.html](http://www.jsme.or.jp/fed/newsletters/2001_10/2101.html) (2001)
- 13) <http://www.interq.or.jp/red/takelu/tips/tex.html>