

jh210013-NAH

アメンボの水面走行のシミュレーション

青木 尊之（東京工業大学）

概要

アメンボの水上走行は、表面張力が支配的な流体構造連成問題の典型例である。アメンボの脚の太さは $100\mu\text{m}$ 程度であり、水との相互作用を計算するには少なくとも $10\mu\text{m}$ 以下の格子解像度で計算する必要があるが、1 ストロークで 5cm 以上の距離を移動する。8 分木データ構造に基づいた AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法を用い、アメンボの脚の近傍に高解像度格子を動的に配置し、効率的な計算を行っている。また、弱圧縮性流体計算手法を用いて非圧縮性気液二相流を計算し、Phase Field 法の保存形 Allen-Cahn 方程式で気液界面を捕獲している。アメンボと水との相互作用には、Direct Forcing Immersed Boundary 法を用いている。中脚をボートのオールと同じように前後させることでストロークを与え、自由推進のシミュレーションを行った。GPU を用いてシミュレーションを行い、妥当な推進速度と脚回りの水面の変位による毛管力で推進力が駆動されていることを明らかにした。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

青木 尊之（東工大）：研究総括および計算手法から GPU 実装に至る詳細な指示

今井 陽介（神戸大）：バイオメカニクスの観点からの解析

渡辺 勢也（九大）：複数 GPU の MPF に基づいた動的負荷分散

松下 真太郎（東工大）：Height Function による表面張力計算の高精度化

杉原 健太（JAEA）：計算結果の可視化

長谷川 雄太（JAEA）：GPU コードの最適化

Marlon Arce Acuna（東工大）：結果の可視化

Yos Sitompul Panagaman（東工大）：接触角の検証

YANG Kai（東工大）：運動量保存型弱圧縮性気液二相流体計算スキームの開発

Dawei SHEN（東工大）：符号付距離関数の再初期化の高効率化

他 6 名

2. 研究の目的と意義

流体の気液界面では、スケールが小さくなると表面張力が支配的になってくる。野外では、水より重い比重の体で構成されるアメンボが水没することなく、スイスイと水面を動き回る光景をよく目にする。地球上において、水と空気という生命活動で最も必須な要素が接する領域で活発に行動する小型の水棲生物は、表面張力を有効に利用して生息している。アメンボの脚は 6 本であるが、前の 2 本は獲物の捕獲などに用いることが多く、残りの 4 本の脚の周りの表面張力で体重を支えている。走行する際の推進力はボートのオールを漕ぐよう真ん中の 2 本の脚を前後に移動させ、漕いだ後には水面から離し前方に戻す動作を行っている。アメンボの脚は非常に細く、水面に接している面積は少ないにも関わらず十分な浮力を得ている。ミクロに観ると非常に細い体毛が集合し、マクロには強い撥水性（大きな接触角）を持っているため、大きな表面張力を発生させることができる。また、かなり高速で走行することができ、表面張力で浮揚している態勢は走行に対して抗力が小さいと予想される。マクロなスケールでの計算を行うため、アメンボの脚に対して 150 度の接触角を設定し、脚の先端は円柱の形状を仮定する。

本研究では、アメンボを題材とし、小型の水棲生物や稼働部を持つ構造物がどのように水上を任意に走行することができるのかを解明するために、これまで開発してきた弱圧縮性気液二相流計算手法および計算コードをベースに接触角と移動境界を精度よく扱えるような新しいコードを開発し、①任意形状の物体と水面の接触角を精度よく計算する手法の開発、②水面だけでなく移動物体の近傍に Octree アルゴリズムに基づいて再帰的に高解像度格子を動的に割り当てる AMR(Adaptive Mesh Refinement) 法の導入、③物体（具体的にはアメンボの脚）と水面との接触面積に対する表面張力による浮力の評価、④移動する物体（具体的にはアメンボの脚）と水面の相互作用を解明し、水面でのアメンボの自由走行のシミュレーションの実行と実際の走行速度の比較によりアメンボの推進機構の解明を行う。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

研究代表者のグループはこれまで大規模計算（HPC 分野）で多くの実績があり、GPU コンピューティングの研究を牽引してきた。本共同研究の体制は、バイオメカニクス分野を専門とする研究者に加わってもらい、アメンボの運動について助言をもらうことができた。HPC 分野の研究者と計算バイオメカニクス分野の研究者が連携することで初めて GPU スパコンを用いたアメンボの水上走行のシミュレーションを達成することができる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規の研究課題である。

5. 今年度の研究成果の詳細

①任意形状の物体と水面の相互作用を精度よく計算する手法の開発

気液界面および液体と物体の表面との接触を表現するための Phase Field 法の保存型 Allen-Cahn 方程式の時間発展を解いている。Phase Field 関数 ϕ は、 $\phi = 0$ を気相、 $\phi = 1$ を液相、 $0 < \phi < 1$ を気液界面と定義し次式を用いて時間発展を行う。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u\phi) = \gamma \left[\varepsilon \nabla \cdot (\nabla \phi) - \nabla \cdot \left\{ \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right\} \right]$$

γ は易動度に関するパラメータ、 ε は界面幅に関するパラメータを表す。右辺の拡散項と逆拡散項がバランスするため、界面幅 δ がほぼ一定に保たれる。本研究では界面幅 δ が格子幅 Δx の 3 倍となるようにパラメータ ε の設定を行っている。右辺には法線ベクトルが含まれるため、界面近くで急激な勾配を持つことから幾何計算が不正確になり、形状精度が悪化し易い。そこで、界面の法線ベクトルの計算に等符号付き距離関数の性質を持つ Level Set 関数 ψ を用いることで、高精度な幾何計算を実現した。Level Set 関数 ψ は Phase Field 関数とともに移流させ、数十ステップごとに再初期化計算を実行する。接触角 θ は、気液界面を表すレベルセット関数 ψ を用いた接触角の評価手法を用いて次式により物体内へ外挿される。

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + (u_{ext} \cdot \nabla) \psi = 0$$

τ は仮想時間刻みであり、本研究では $\tau = 0.5\Delta x$ とする。また、 u_{ext} は気液界面を表すレベルセット関数 ψ の外挿方向を表す単位ベクトルである。

これまで移動物体周りに格子細分化を行ってきたが、弱圧縮性流体計算では導入していなかった。n ステップでは物体内部で計算する必要のなかったセルが n+1 ステップでは物体の移動により流体計算を行うセルになり、そのセルに n ステップの値を設定しなければならない「refill 問題」が発生する。これまでは複雑形状の物体に対して Image Point を用いた Ghost Cell による Immersed Boundary Method (IBM) を用いていたが、本研究では図 1 のように物体表面に

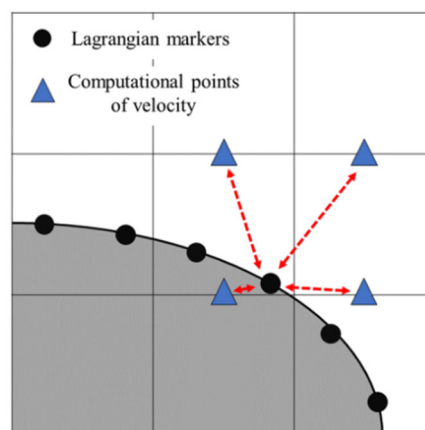


図 1 Direct Forcing IBM

ラグランジュ・マーカーを置く Direct Forcing IBM を採用した。この方法の利点は、物体表面で境界条件を満足しつつ物体内部まで流体として解いて計算するため、 Δt の小さい弱圧縮性流体計算手法では事実上 refill 問題が発生しないことである。

アメンボの脚に加わる表面張力 F_{cap} は、図 2 に示すように気液三相が接触する境界において気液界面の接線方向に作用する。特に物体が撥水性である場合には、水面に押し付けた際に気液界面の接線方向が上向きになることで表面張力 F_{cap} が浮上力として作用するようになる。Phase Field 法では $0 < \phi < 1$ を満たすような有限の厚さの領域を界面とみなしていることから、本来は線分力である表面張力を面積力として扱う。変数 ϕ を Lagrangian Marker 上に投影することで、物体に加わる表面張力 F_{cap} は次式のように表される。

$$F_{cap} = \sum_k^N \frac{6}{\varepsilon} \sigma \{ \phi(1 - \phi) \}^2 \hat{t}_k \Delta S_k \sin \theta$$

$\hat{t}$ は気液界面の接線方向を表す単位ベクトル、 θ は接触角である。

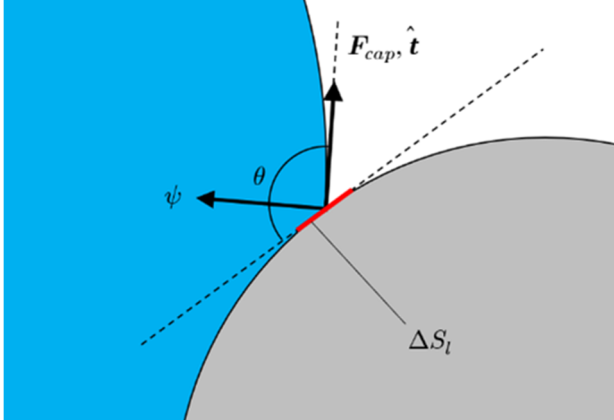


図 2 物体に作用する毛管力

②水面だけでなく移動物体の近傍に高解像度格子を動的に割り当てる AMR 法の導入

これまで気液界面を高解像度で計算するために AMR 法で格子細分化を行ってきたが、今回は直径 $100\mu\text{m}$ という細い脚で水面と相互作用するため、動く脚の近傍にも動的に格子細分化を行った。アメンボの脚と水面の両方に対して高解像度格子を割り当てた結果を図 3 に示す。

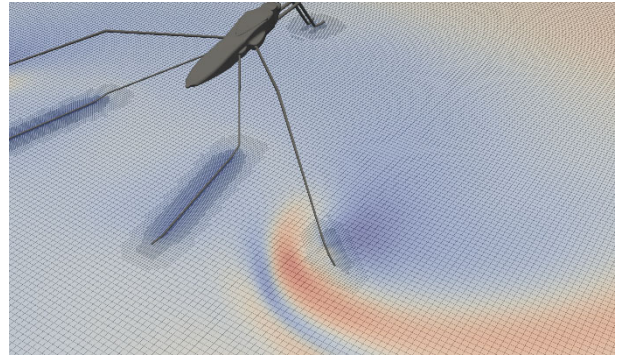


図 3 移動するアメンボの脚と水面に割当てた高解像度格子

気液界面は密度変化が非常に急峻で変動も大きいいため、細分化された最細格子を割り当てることは妥当である。一方、アメンボのような走行範囲が広い場合には水面の面積が大きく、全てに最細格子を割り当てると計算コストの観点で非常に厳しい。そこで、アメンボから遠方の領域では、気液界面に対しても格子解像度を低下させ計算効率の向上を図る。

気液界面においてレベル差を設ける場合には、界面捕獲手法等の計算に必要となる界面幅 δ を AMR 法のリーフ毎の格子幅 Δx に適合させる必要がある。隣接リーフとの間にレベル差が存在する場合に界面幅 δ を滑らかに遷移させるために、図 4 に示すような疑似格子幅 Δx_{ps} を導入する。疑似格子幅 Δx_{ps} は隣接リーフとの間にレベル差が存在しない場合には一定値となる一方で、隣接リーフとの間にレベル差が存在する場合には線形に遷移する。

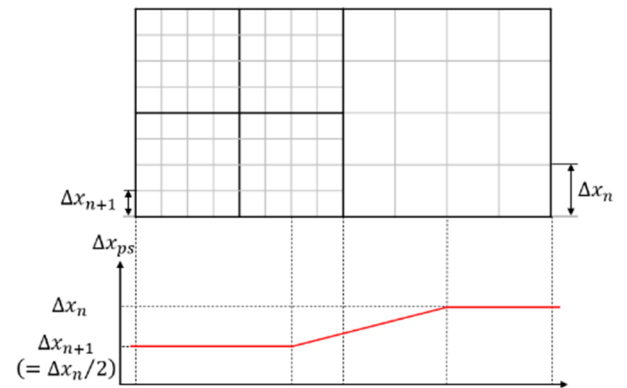


図 4 気液界面での疑似格子幅の導入

③物体（具体的にはアメンボの脚）と水面との接触面積に対する表面張力による浮力の評価

アメンボが水面に直立できるメカニズムとして、

脚が撥水性であることにより表面張力を上向きの浮上力として利用していることに加えて、主に体重を支えている後脚と水面の接触線が十分に長いことが挙げられる。アメンボの後脚のうち大部分を占める脛節と附節が水面と接していることから、理論上は後脚 1 本で体重の 3 倍以上の負荷を支持することが可能であり、浮上性能は十分にある。また、脚先の折れ曲がりも浮上性能に影響し、脚先における濡れが防止され水面との接触線を維持することが可能となる。

アメンボの脚の浮上性能の確認のために、後脚を模した円柱の浮上計算を行った。計算領域は $25\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ とし、上側 $1/2$ を気相で、下 $1/2$ を液相でそれぞれ満たした。ここで、計算領域の境界条件は、アメンボの後脚を模した円柱が接する壁面を **Symmetric** 条件、その他の壁面を **No-slip** 条件とした。気相と液相には、空気と水の物性値を用いたほか、重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ とし、アメンボの後脚を模した接触角 $\theta = 120^\circ$ の円柱を中心位置が $(12.5\text{mm}, 0.0\text{mm}, 2.5\text{mm})$ となるように設置した。後脚の直径 $D = 100.0\mu\text{m}$ 、長さ $L = 10.0\text{mm}$ としたほか、アメンボの体重 $M = 40.0\text{mg}$ とし、その半分を円柱に付加した。計算格子は、木構造の数を $5 \times 1 \times 1$ 、最大レベル $n_{\max} = 7$ とした。これにより、円柱には直径当たり約 10 格子が割り当てられる。

脚の折れ曲がりによる脚先からの濡れ防止効果を確認するために、円柱の両端 1.0mm に対して曲がり角 θ_g を設け、 $\theta_g = 0.0^\circ, 10.0^\circ, 20.0^\circ, 30.0^\circ$ の 4 通りに対して行った計算結果を図 5(a)~(d) に示す。

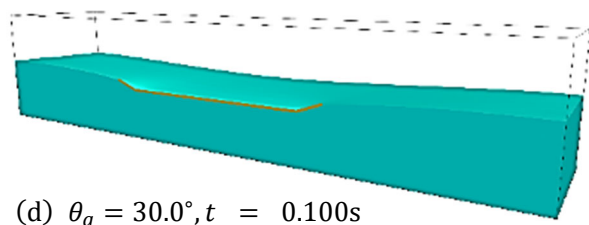
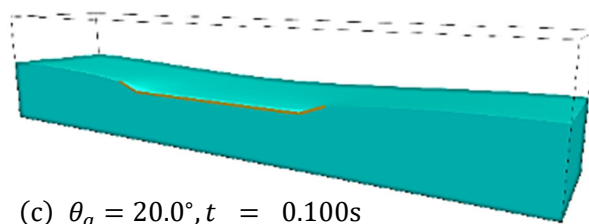
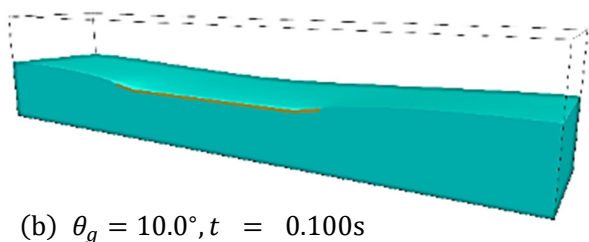
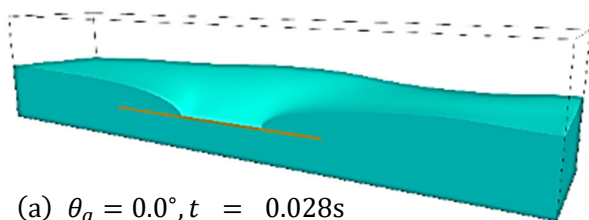


図 5 円柱にかかる表面張力の評価

円柱の曲がり角 $\theta_g = 0.0^\circ$ の場合には、時刻 $t = 0.028\text{s}$ において円柱両端から水没しており、接触線長さが大幅に減少した。これに伴い、浮上力として利用できる表面張力が低下し、水中に沈降した。一方で、円柱の曲がり角 $\theta_g = 10.0^\circ \sim 30.0^\circ$ の場合には、時刻 $t = 0.100\text{s}$ においても両端からの濡れを防止しており、接触線長さを維持した。これにより、浮上力として利用できる表面張力が保たれ、水面に安定して浮上し続けた。以上の結果より、アメンボの後脚には体重を支えるだけの浮上力が作用すること、脚先の折れ曲がり接触線長さの維持に寄与することを確認した。

④アメンボの水面走行計算

水面走行計算に用いるアメンボの 3 次元形状データを図 6 のように作成した。後脚の直径 D および長さ L は③と同じ値を用いたほか、水面と接する前脚・中脚の附節は直径 $D = 190.0\mu\text{m}, 100.0\mu\text{m}$ 、

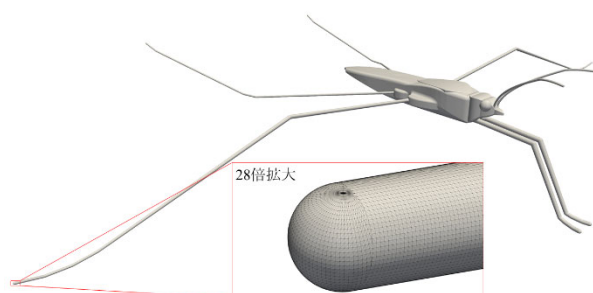


図 6 アメンボの 3 次元形状

長さ $L = 1.1\text{mm}$ 、 3.0mm とした。ここで各脚を模した円柱の両端には、③の結果より濡れ防止のために曲がり角 $\theta_g = 10.0^\circ$ を設けた。また、中脚の転節から附節の中心までの距離 $L_m = 18.5\text{mm}$ とした。本研究では水面と接する部位以外が受ける空気抵抗の影響が小さいと仮定し、胴体などの部位は流体計算に反映していない。

計算領域は $240\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$ とし、上側1/2を気相、下1/2を液相でそれぞれ満たした。計算領域の境界条件は、アメンボの中心位置に一致する壁面を Symmetric 条件、その他の壁面を No-slip 条件とした。気相と液相には空気と水の物性値を用いたほか、重力加速度を $g = 9.8\text{m/s}^2$ とした。アメンボの3次元形状データを中心位置が $30.0\text{mm} \times 0.0\text{mm} \times 10.0\text{mm}$ となるように設置し、アメンボの体重 $M = 40.0\text{mg}$ の半分を付加したほか、全ての脚における接触角 $\theta = 120^\circ$ とした。計算格子は、木構造の数を $6 \times 2 \times 1$ 、最大レベル $n_{max} = 9$ とした。これにより、脚周りには直径当たり 10.2 格子が割り当てられる。本計算では、アメンボの回転運動は考慮せず、並進運動に関してのみ運動方程式を解いている。

本計算では、計算開始直後から $t_0 = 0.05\text{s}$ までアメンボを自由運動させた後、中脚を動作させることでアメンボを遊泳させた。中脚の運動は実際のアメンボと同様に、中脚の角速度 $\omega(t)$ が線形的に増加するように設定した。中脚はストローク開始時刻 $t = t_0$ に初期角度 θ_0 から後方に運動した後の時刻 $t = t_s + t_0$ で最大角度 $\Delta\theta + \theta_0$ となり、時刻 $t = 2.0t_s + t_0$ で再び初期角度 θ_0 に戻る。本計算では $\Delta\theta = 90.0^\circ$ 、 $t_s = 0.1\text{s}$ とした。中脚の角速度 $\omega(t)$ および角度 $\theta(t)$ の時間推移は図7のようになる。

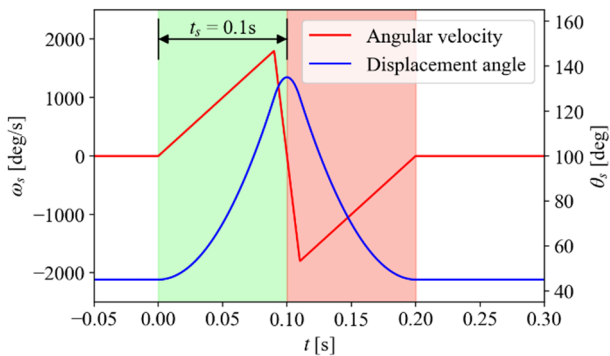
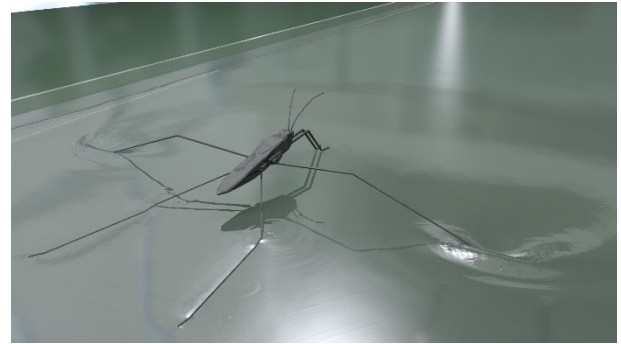


図7 アメンボのストローク・ダイアグラム

ここで、図中緑色の領域はストローク期間、赤色の領域はバックストローク期間である。以上の運動を0.4s毎に繰り返すことで複数回のストローク計算を行った。代表的な時刻における界面の様子を図8(a)～(d)に示す。



(a) $t = 0.0\text{s}$



(b) $t = 0.07\text{s}$



(c) $t = 0.09\text{s}$



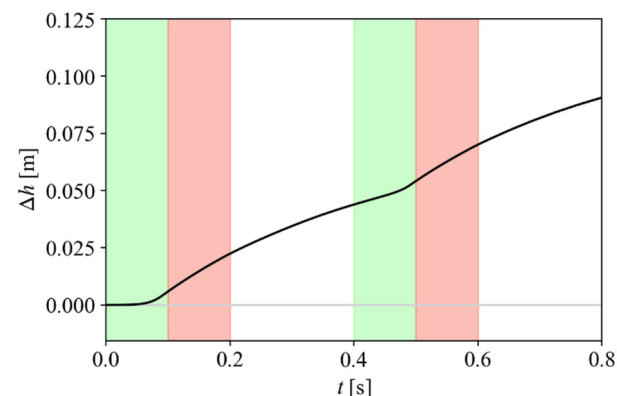
(d) $t = 0.20\text{s}$

図8 アメンボの水上走行の様子

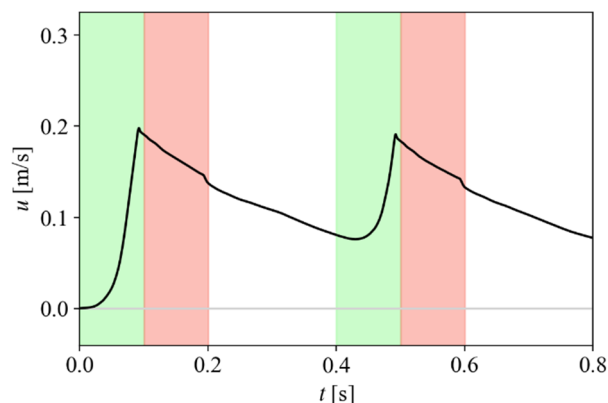
また、計算開始から 3 回目のストローク開始直前までのアメンボの移動距離 Δh 、速度 u 、加速度 a 、推進力の時間推移を図 9 に示す。ここで、1 回目のストローク開始時刻を 0s としている。ストローク期間において、加速度 a は中脚の角速度 $\omega(t)$ とともに増加する。この時、表面張力 F_{cap} が推進力の大半を占めるようになる。中脚の運動に伴い表面波が発生することで、中脚前後における表面張力の不均衡が発生するためだと考えられる。中脚前後における水面プロファイルに注目すると、ストロークの進行に従い中脚の後方に表面波が形成される様子が見られる。特に時刻 $t = 0.09s$ で中脚後方における水面が最も隆起していることから、中脚後方に加わる表面張力のうち水平方向の分力が小さくなる。これにより中脚前方に加わる表面張力が支配的となり、推進力が発生するようになる。また、アメンボ中脚は投影面積が小さいことから面積力である流体力 F_l の影響が小さく、線分力である表面張力 F_{cap} が大きく超過すると考えられる。

逆ストローク期間においては、加速度 a は常に負の値を取り、速度 u は全体を通じて一定の割合で低下する。この時、流体力 F_l は抵抗力の大半を占めているが、これは水面に接している前脚および後脚が水から受ける抵抗力に由来する。ただし、水から受ける抵抗力は脚の投影面積が小さいことから、ストローク時における推進力と比較して絶対値が小さい。これにより逆ストローク期間中においても、アメンボの速度を極端に低下させることなく推進を継続することを可能としている。また、逆ストローク期間終了後においても流体力 F_l を受けて減速し続けるが、速度 u の低下に伴い流体力 F_l は小さくなり、次第に減速は緩やかになる。

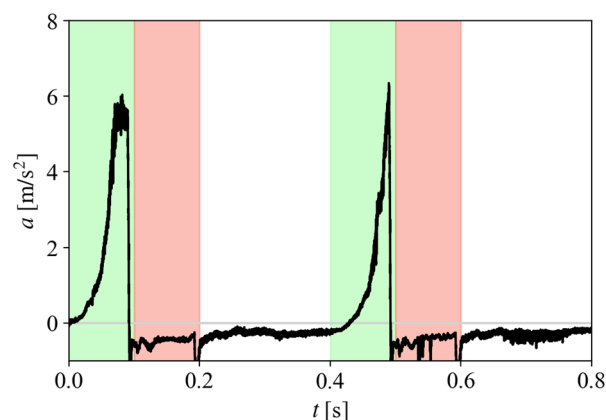
本計算ではアメンボの回転運動を考慮していないが、実際には前脚と後脚におけるモーメントが不均衡である。水面走行中に姿勢制御を行うには、アメンボはストローク時に中脚を水面に押し付けて胴体のピッチ角を上げ、逆ストローク時に前脚の水没を防止していると考えられる。



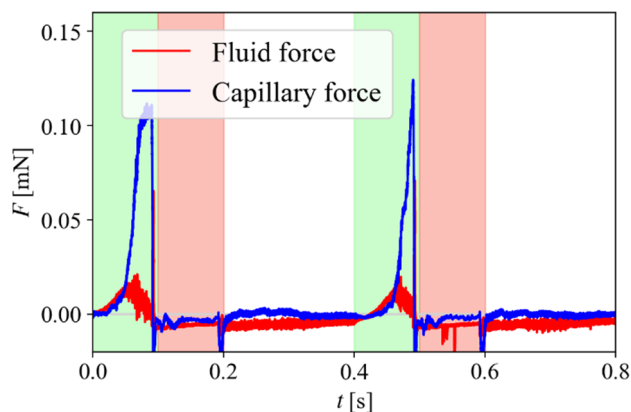
(a) 移動距離



(b) 移動速度



(c) 移動加速度



(d) 推進力

図 9 アメンボが受ける力と運動

以上からアメンボの水面走行計算を行い、ストローク時には表面波の発生に伴う中脚前後の表面張力の不均衡を利用して推進力を得ていることに加えて、逆ストローク時には抵抗を殆ど発生させずに効率の良い推進を実現していることを確認した。

今回の数値解析と実際のアメンボの遊泳における推進速度を比較したものを表 1 に示す。実際のアメンボの推進速度が広範な値を取ることが分かるが、これは観察個体の体重やストローク期間が文献によって様々であるためだと考えられる。ここで、体重およびストローク期間が今回の数値解析に最も近い Lu らの結果に着目すると、推進速度が近い値となっていることが分かる。このことから、今回の数値解析においてアメンボの水面走行時の物理現象を再現できていると考えられる。

表 1 アメンボの水面走行計算と実際のアメンボにおける推進速度の比較

	体重	推進速度	ストローク 期間
Lu [※1]	35.0mg	12.3cm/s	0.15s
Hu[※2]	5±1mg	60±10cm/s	0.014-0.096s
Tomas [※3]	4.85mg	40.5cm/s	0.01s
解析結果	40.0mg	20.3cm/s	0.1s

[※1] Lu, H., Zheng, Y., Yin, W., Tao, D., Pesika, N., Meng, Y. and Tian, Y., Propulsion Principles of Water Striders in Sculling Forward through Shadow Method, *J. Bionic. Eng.*, Vol.15, pp.516-525, 2018.

[※2] David, L.H. and John W.M.B., The hydrodynamics of water-walking arthropods, *J. Fluid Mech.*, Vol. 644, pp. 5-33

[※3] Thomas S., Maxence, A., Précillia, C., Elie, R., Jérôme, C. and Michael, B., Unsteady wave pattern generation by water striders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 848, pp. 370-387.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本研究では最終的にアメンボの水上走行のシミュレーションまで到達したので、かなりの研究目的は達成したと言える。当初予定していた研究計画に対し、1Q で①を実施し、撥水性の強い物質をコーティングした球形粒子の水面での反発軌道を実験との比較を行い再現できることを確認した。2Q では②と③を計画通り実施した。3-4Q で④アメンボの水上走行

のシミュレーションを実行した。一方、複雑形状の IBM による境界条件の設定には非常に多くの条件分岐と逐次処理を含むため、roofline モデルに対して十分な実行性能は得られず、今後の課題とした。

今後の展望として、今回の計算で考慮していないアメンボの重心周りの回転運動を入れると、より一層現実に近い結果になると予想される。さらに、脚の柔軟性や前脚及び後脚の運動を考慮することで、より詳細な現象の解明に繋がることが期待できる。

7. 研究業績一覧

(1) 学術論文 (査読あり)

[1-1] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki: Gas-liquid two-phase flows simulation based on weakly compressible scheme with interface-adapted AMR method, *J. Comput. Phys.*, Vol. 445, 15 Nov 2021, 110605
(<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110605>)

[1-2] Seiya Watanabe, Takayuki Aoki: Large-scale flow simulations using lattice Boltzmann method with AMR following free-surface on multiple GPUs, *Comp. Phys. Comm.*, Vol. 264, 107871
(<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.107871>)

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり) なし

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[3-1] Takayuki Aoki: AMR-based Simulations for Fluid-Structure Interaction on GPU
Supercomputers, Parallel CFD 2021, 19 May 2021 (Plenary Talk)

[3-2] Kai Yang, Takayuki Aoki: GPU-based cell-centered AMR for two-phase flow simulation using an iterative pressure-evolution projection method, Parallel CFD 2021, 19 May 2021

[3-3] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki: A Simulation of Thin Liquid Film Forming with Surfactants by Fully Explicit Gas-liquid Two-phase Solver with Interface-adapted AMR Method, 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (25th ICTAM 2020+1_Virtual), 22 Aug 2021

[3-4] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki: High Resolution Two-phase Flow Simulations based on Weakly Compressible scheme with Interface-adapted AMR Method, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP22), Online, February 2, 2022

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [4-1] 青木律也, 青木尊之, 松下 真太郎, Kai Yang: 移動境界を含んだ気液二相流シミュレーション, 日本計算工学会・第 26 回計算工学講演会, 2021 年 5 月 28 日
- [4-2] 吉泉 瑛, 青木尊之, 松下 真郎: AMR 法を用いたアメンボの水面走行の数値シミュレーション, 日本計算工学会・第 26 回計算工学講演会, 2021 年 5 月 28 日
- [4-3] 青木尊之: 第二階層 GPU スパコンを用いた混相流シミュレーション, 第 4 回 HPCI コンソーシアムシンポジウム, 2021 年 10 月 28 日 (基調講演)
- [4-4] 青木尊之: 弱圧縮性計算手法による実問題の流体シミュレーション, オープン CAE シンポジウム 2021, 2021 年 12 月 4 日 (基調講演)
- [4-5] 吉泉 瑛, 青木尊之, 松下 真郎, 杉原健太: アメンボの水面走行の弱圧縮性流体計算手法と AMR を用いたシミュレーション, 日本流体力学会・第 35 回数値流体シンポジウム, 2021 年 12 月 15 日

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)

吉泉 瑛, 青木 尊之, 杉原 健太, 松下 真太郎: 第 35 数値流体力学シンポジウム・ベスト CFD グラフィックス・アワード・2 位