

# バイオマス海藻の流動シミュレーションモデル

古川 正志 小川 純 山本 雅人  
渡辺美知子 澤井 秀  
北海道情報大学

Water Flow Modeling and Simulation on Biomass Seaweed

Masashi FURUKAWA, Jun OGAWA, Masahito YAMAMOTO  
Michiko WATANABE and Suguru SAWAI  
Hokkaido Information University

平成27年11月

北海道情報大学紀要 第27巻 第1号別刷

## 〈論文〉

## バイオマス海藻の流動シミュレーションモデル

古川正志\* 小川純† 山本雅人‡ 渡辺美知子§ 澤井秀\*

## Water Flow Modeling and Simulation on Biomass Seaweed

Masashi FURUKAWA\* Jun Ogawa† Masahito YAMAMOTO‡  
Michiko WATANABE§ Suguru SAWAI\*

## 要旨

本研究では、物理モデラーを用いて水中環境に海藻モデルを作成し、流体の時系列変化から得られる物理シミュレーションを実施し、海藻モデルの挙動が海藻の物理性質及び流体力に従った流動を実現できることを提案する。また、複数の海藻モデルを配置し流動シミュレーションを行い、海藻挙動の遷移とそれを構成する要素の剛体接触数、累積ちぎれ回数の時系列変化を示し、水中環境における海藻の絡みやちぎれについて考察し、海藻培養における提案シミュレーションモデルの有効性を示した。

## Abstract

This study establishes dynamic modeling of seaweed and water environment toward algal cultivation development from a viewpoint of artificial life (A-life). The algal cultivation has been attracted in term of future energy production. We model the virtual seaweed and the environment using physics engine PhysX. PhysX can execute dynamical simulation based on physical calculation. The morphology of seaweed is determined by Lindenmayer system. Three properties of seaweed, such as tear, adhesiveness and twist, are artificially introduced into the seaweed model. The water environment is constructed by modeling buoyancy, drag force and water flow. The water flow is generated by lattice Boltzmann method (LBM) known as one of fluid analysis methods. In order to verify the behavior of seaweed, two fluid simulations are executed for a plant and eight plants of seaweed. As a result, the proposed simulation method is useful to realize seaweed's adhesion, tear, and twist phenomenon in a water pool.

## キーワード

バイオマス海藻 物理モデリング 水流シミュレーション 人工生命

---

\*北海道情報大学経営情報学部システム情報学科教授, Professor, Department of Business and Information Systems (Dept. of BIS), HIU

†北海道大学情報科学研究科科学研究員, Post-Doctorial Researcher, Department of Information Science and Technology (Dept. of IST), Hokkaido University (HU)

‡北海道大学情報科学研究科教授, Professor, Dept. of IST, HU

§北見工業大学機械工学科准教授, Associate Professor, Department of Kitami Institute of Technology

## 1 緒 言

近年、地球のグローバル化に従い、膨大なエネルギー供給が必要とされ、将来的な化石エネルギー生産に対する危機意識が強まり新たな非化石エネルギーが強く望まれている。そうした中で、海藻は海水中で光と CO<sub>2</sub> を取り込み、エネルギー回収効率の高い光合成を行い、陸上植物に比べて速い成長速度を持つため注目を集めている。更に、海藻は水質の善し悪しを問わないため、環境への適応性が高く、汚染廃水を浄化しバイオエネルギーへ転換する生態機能を有している。これらの利点を生かして、海藻培養をバイオエネルギー開発、CO<sub>2</sub> 排出量削減や水質浄化などの工業的用途「Fei, *et al.* (1999)」, 「Fei (2004)」, 「Yokoyama *et al.* (2007)」で利用する目的の研究開発が取り組まれ始めている。

海藻培養における研究として、培養液中に高濃度の CO<sub>2</sub> を溶解させ貯留しておく CO<sub>2</sub> 固定化技術の開発「Hirata *et al.* (1996)」や培養海藻に光エネルギーの効率的供給を実現するフォトバイオリクターの機材開発「Zxijffer *et al.* (2010)」, 海藻の光合成における最大光吸収率の解析「Ugwu *et al.* (2008)」, 海藻から生産されるバイオオイルの純度や効能について調査しエネルギーの工業的有用性の検証「渡邊信 (2010)」, 下水道における海藻の浄化処理を利用したエネルギー変換技術の開発「Lam *et al.* (2011)」などが挙げられる。現在の研究成果では、海藻のバイオオイルが自動車の燃料として可能なことが報告されている。

しかしながら、実験的に実際の海藻を用いて多種の培養条件下における生態能力調査「Li *et al.* (2011)」や光合成効率を最適化する環境を構築するには多大な培養コストを要し、将来的にエネルギー供給を

担うような大規模培養を実現する制御技術の開発が望まれている「Pang *et al.* (2003)」。これを解決するためには、地球上と同じ仮想空間となる環境において培養シミュレータを実現し、培養コストを軽減した制御技術の開発が必要とされる。

一般的に用いられている海藻培養環境では、培養水を水槽内部で循環させ、海藻に流動力を与えて環境となる空間全体に海藻を浮遊させ、光合成による成長速度を上昇させている。このような環境の三次元空間においては高密度培養が可能となるが、成長にともない藻同士が密に接するようになり、藻間での絡みやからみによるちぎれといった現象が生じる。

また、大量の藻が絡み合うと光合成器官が他の藻により覆われてしまい光合成が行えなくなり、成長の阻害が生じる。従って、絡みやちぎれなどの藻の物理的挙動によって引き起こされる現象を解明し、これらを回避する制御技術が必要である。

本論文では、人工生命(Artificial life, A-life)の視点から、海藻培養において起こりうる物理現象を解析・予測するため、物理エンジンを用いた人工海藻と培養環境の仮想水中環境内での藻の動きをシミュレーション可能とする動的モデリングを提案し、その有効性について報告する。

物理エンジンは仮想空間内に配置された物体に対して物理法則に基づく力学演算を適用し、地球環境内での力学的な動的シミュレーションを可能とするソフトウェアである。この物理エンジンは、力学的な運動方程式を計算する他に、重力、摩擦力などの地球上の基礎的な環境に於ける力はサポートするが、流体からの影響力などについては別途独自に実装する必要がある。動的な海藻モデルの動きを実現するには、物理エンジンに独自にちぎれ、粘着力及び絡みのモデルをコーディングし、海藻の物理特性を導き出す必要がある。また、

流体運動の数値シミュレーションにより発生する流れから浮力と流体力学の分野で経験的に知られている抗力を物体に加えた海藻水中環境を構築する必要もある。

本研究では、上記のモデル化に基づく水中環境に海藻モデルを作成し、流体の時系列変化から得られる物理シミュレーションを実施し、海藻モデルの挙動が海藻の物理性質及び流体力に従った流動が実現可能なことを検証する。また、複数の海藻モデルを配置し、それらの流動シミュレーションに基づいて、海藻挙動の遷移とそれを構成する要素の剛体接触数、累積ちぎれ回数の時系列変化を示し、水中環境における海藻の絡みやちぎれについて考察し、海藻培養における提案モデルの有効性を示す。

本論分の構成は次の通りである。2章では L-システムによる人工海藻の形状決定の方法、海藻の特性となる力と流体からの影響力のモデル化の方法について述べる。3章では水流のモデリング方法を構築する方法を述べる。4章において、構築した水中環境における人工海藻の挙動シミュレーション実験の概要を示した後、実験結果とその考察を述べる。5章で結論を述べる。

## 2. 海藻のモデリング

### 2-1 L-システムによる海藻の形状モデリング

L-システム (Lindenmayer system)は特定のパラメータ集合と置換規則を定義し、それらを再帰的に適用することで、自然物の構造決定過程を文字列として表現するアルゴリズムである。このアルゴリズムの特徴は、細胞の分裂や成熟など単純な規則から複雑な生物へ成長過程のコンピュータ解析を容易とし、自然な海藻の形状を再現する方法として適している。Corbit ら「Corbit *et al.* (1993)」はすでに紅色植物

門の藻類の形態構造と発展過程を定義し、コンピュータシミュレーションにより 2次元平面上で表現する研究を実施している。そこでは L-システムによる現実の海藻の高い再現性が示されている。Sen ら「Sen *et al.* (2005)」は L-システムやセルオートマトンなどの再帰的手法を用いた樹木モデリング手法を提案しており、外部環境との相互関係を考慮モデルによる樹木が環境によって成長プロセスに与えられる影響力が報告されている。

多くの場合、緑藻や紅藻類の培養海藻に現れる線状で細い枝や芽が成長していく形状生成に関しては、L-システムの置換規則の設計・適用によりそのほぼ全ての生体構造の記述を網羅することが可能である。

本研究では、海藻の成長モデルを L-システムを用いて以下のように定義する。

$$G = (V, S, \omega, P) \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} V &= \{A, B, C\} \\ S &= \{D, E\} \\ \omega &= A \\ P &: (A \rightarrow EBA), (B \rightarrow C), (C \rightarrow D) \end{aligned}$$

である。Vは変数となる文字列、Sは普遍定数、 $\omega$ は初期状態、Pは文字の置換法則を表す。海藻モデルでは、図 1(a)に示す 4つの形状で示される剛体球を 3 自由度のジョイントで接合して作成し、L-システムにおける文字要素 A~E に対応させる (A と E は同じ形状をもつ)。モデルは 3次元空間に剛体集合 A を初期状態として配置し、置換規則に応じて図 1(b)の剛体集合の置換を行う。全ての剛体集合に対して置換が終了した時点で、海藻は 1 段階成長するものとする。初期状態から 3 段階まで再帰的に成長 (世代交代) させた海藻モデルの成長過程を図 1(c)に示す。シミュレーションには図 1(d)の L-システムを 3 世代適

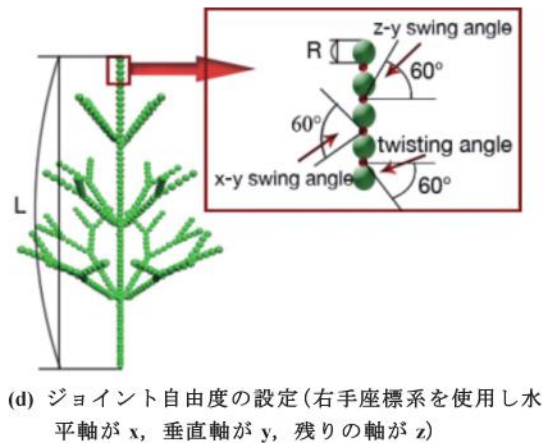
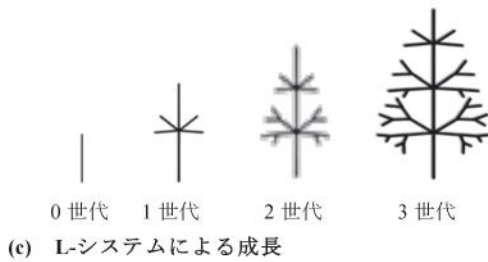
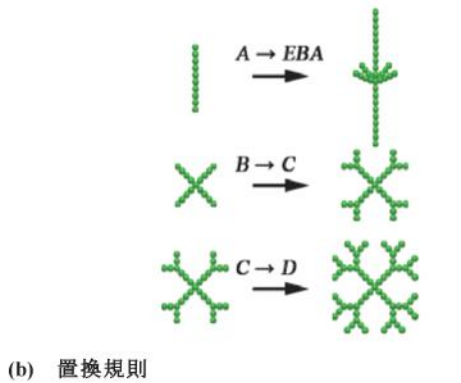
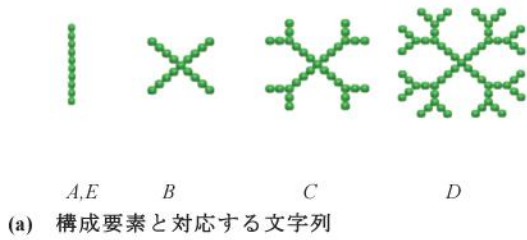


図1 L-システムによる海藻モデル

用して得られる海藻モデルを用いる。(1)式に初期条件及び置換規則を再帰的に適用して構成したモデルは、モデルの剛体部分に対してのみ力学計算を適用する。このように構成したモデルにより、擬似的に弾

性体のように高速かつ高精度な力学的計算を可能とできる。また、L-システムにおける海藻の成長規則を変更することで様々な種類の海藻の形状モデリングが可能となる。

## 2-2 海藻の物理性質

本研究では物理エンジンとして PhysX 「NVIDIA (2012)」を採用する。PhysXにはジョイントに働く外力とトルクの限界値を設定でき、限界値を超過することで接合機能を停止させ、接合機能を失わせるジョイントを作成できる。このジョイントを用いた人工海藻をモデリングし、ちぎれ現象をモデル化した。ちぎれ発生判定を(2)式の $J$ により行う( $True$ がちぎれ発生を示す)。

$$J = \begin{cases} True : |F| > F_c \text{ or } T > T_c \\ False : \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $F$ ,  $F_c$ はジョイントに加わる負荷とその許容値、 $T$ ,  $T_c$ はジョイントに加わるトルクとその許容値を示す。 $F$ ,  $T$ はそれぞれ3次元ベクトルであり、判定に用いる値はその絶対値 $|F|$ ,  $|T|$ である。ちぎれの概念図を図2.(a)に示す。

多くの海藻は特有の粘着性のある膜を有しており、その膜の粘着の度合いは海藻の種類により異なる。この膜による粘着力は他の物質への付着現象を起こす。海藻同士が水中で接触した際に、互いに引き付けあう性質は、粘着力による相互作用の結果と予想される。従って、海藻の粘着力 $F_i$ を固有の粘着度を考慮した疑似クーロン力により表現し、その大きさ $F_i$ を(3)式で計算する。

$$F_i = \begin{cases} k_A \sum_j \frac{M_i M_j}{r_{ij}^2} : r_{ij} < r_t \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$



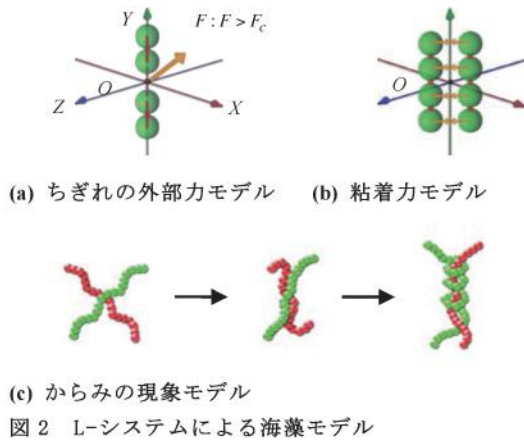


図 2 L-システムによる海藻モデル

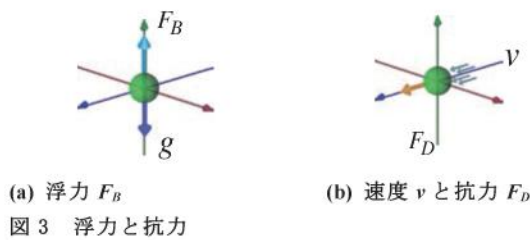


図 3 浮力と抗力

ここで、 $i$  は粘着力が働く海藻の個体、 $j$  は  $i$  の粘着の影響範囲ある海藻の個体、 $k_A$  は海藻特有の粘性係数、 $M_i$  と  $M_j$  は海藻のモデルに使用した剛体質量、 $r_{ij}$  は剛体間距離、 $r_t$  は剛体間距離の閾値である。  $k_A$  は海藻の粘着度を示し、粘着力は 2 剛体間距離  $r_{ij}$  が一定の閾値の距離  $r_t$  以内であるときのみ作用する。海藻は剛体球で構成されるため距離  $r_{ij}$  は剛体球の直径より大であり、粘着力は接触後に二度と離れなくなる癒着状態が生じないようにその上限を設定する。粘着性の概念図を図 2 (b) に示す。

絡み現象は海藻の空間移動の結果として生じるトポロジー的な位置関係である。絡み現象の検出は 3 次元空間における複数の海藻の位置関係とそれらの移動状況を把握する必要があり、厳密な計算モデルの作成が困難である。そこで本研究では、海藻の流動、粘着、接触という単純な物理的性質を用いて、図 2 (c) に示すように 2 海藻間の剛体球の接触数を計数し、接触数が一定以上に増加した時に起因する現象

として取り扱う。

### 2.3 浮力と抗力

流体からの影響力は浮力、抗力、揚力、せん断力、渦抵抗などがある。本研究では揚力、せん断力、渦抵抗は微弱で計算量も多いため考慮せず、人工海藻の流動を抗力と浮力のみを使用して行う。水流の流体運動の解析手法である格子ボルツマン法をこれらに組み合わせることで海藻周囲の流体運動の状態変化を考慮でき、精度の高い海藻の流動が解析可能となる。

浮力はアルキメデスの原理により、図 3. (a) に示すように水中の物体の中心に流体の密度に比例した鉛直上向きの力として働く。その大きさ  $F_B$  は (4) 式により計算される。

$$F_B = \rho V g \tag{4}$$

ここで  $\rho$  は液体の密度、 $V$  は物体の体積、 $g$  は重力加速度である。

流体中における物体に働く抗力は、物体周囲の流体速度と移動ベクトルとの相対ベクトルの 2 乗に比例する力として計算され、その向きは物体の進行方向の逆向きである。抗力  $F_D$  とするとその大きさは (5) 式により求められる「松尾一泰 (2007)」。

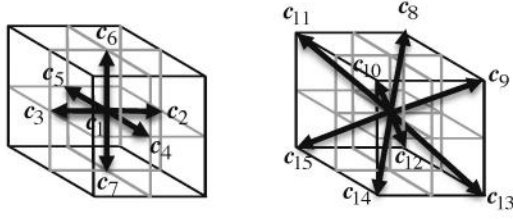
$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \tag{5}$$

ここで、 $\rho$  は液体の密度、 $A$  は抗力を受ける物体の抗力に垂直な面への投影面積、 $C_D$  は物体固有の抗力係数、 $v$  は物体と流体との相対速度である。

## 3 水中環境のモデリング

### 3-1 セルオートマトン

格子ボルツマン法の理論的な基礎は、セ



(a) 粒子速度  $c_1 \sim c_7$  (b) 粒子速度  $c_8 \sim c_{15}$   
 図4 15粒子モデルの格子内の粒子速度

ルオートマトンに基づく計算モデルである。セルオートマトンとは時間、空間、状態変数の全てをセルという格子で離散化し、セルに対し単純なルールを適用する。

セルオートマトンは自然物の構造や自己増殖機能、計算理論などの広い分野で研究されている。その理由は、モデルは単純であるが、離散化されたデータをコンピュータで容易に扱うことが可能、ルールの変更により様々な結果を生成可能、複雑系におけるパターン形成、自己組織化などに内在する特徴を実現可能、等が挙げられる。

### 3.2 格子ボルツマン法

セルオートマトンを基礎とし流体運動を粒子分布の時間発展から表現する手法として提案されたのが格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann method, LBM) である。「Hou et al. (1985)」, 「Chen et al. (1998)」, 「Macnamara et al. (1988)」. LBM は数値流体力学の分野で使用される流体の数値解析方法の一つである。

この方法は空間を規則的な格子で一様に分割・離散化し、格子内に定めた一定数の粒子運動に基づいて、連続体としての流体運動をシミュレートする。空間を離散化する作業は格子生成と呼ばれ、解析領域の次元と格子の種類によってその格子生成法は異なる。各格子内には、複数の粒子速度を定める。本研究ではよく使用される15速度モデルを採用する。すなわち、図4に示すように、格子内の粒子速度 ( $c_i; i=1, 2, \dots, 15$ ) を

$$c_i = \{(1, 0, 0), (\pm 1, 0, 0), (0, \pm 1, 0), (0, 0, \pm 1), (\pm 1, \pm 1, \pm 1)\} \quad (6)$$

の様に設定する。

座標  $\mathbf{x}$  及び時間  $t$  における速度  $c_i$  をもつ仮想粒子の速度分布関数  $f_i(\mathbf{x}, t)$  は、次の離散ボルツマン方程式に従う<sup>7)</sup>。

$$f_i(\mathbf{x} + c_i \Delta t, t + \Delta t) = \frac{\lambda - 1}{\lambda} f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{\lambda} f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) \quad (7)$$

ここで、 $f_i$  は  $i$  方向の粒子における実数値の粒子分布、 $\lambda$  は単一時間緩和係数であり、衝突を繰り返し移動する粒子は一定割合で平衡状態へと収束する。 $f_i^{eq}$  は局所平衡分布関数 (local equilibrium distribution function) と呼ばれ、平衡状態へと遷移するような粒子分布関数である。この関数は以下の(8)式で表せられる。

$$f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) = E_i \rho \left[ 1 - \frac{3}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + 3 c_i^T \mathbf{v} + \frac{9}{2} (c_i^T \mathbf{v})^2 \right] \quad (8)$$

但し、

$$E_i = \begin{cases} \frac{2}{9} & : i=1 \\ \frac{1}{9} & : i=2, \dots, 7 \\ \frac{1}{72} & : i=8, \dots, 15 \end{cases}$$

である。(8)式において、 $\rho$  と  $\mathbf{v}$  は格子内の流体の巨視的変数であり、速度分布関数  $f_i$  を用いて以下の式で定める。

$$\rho = \sum_i f_i \quad (9)$$

$$\mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \sum_i c_i f_i \quad (10)$$



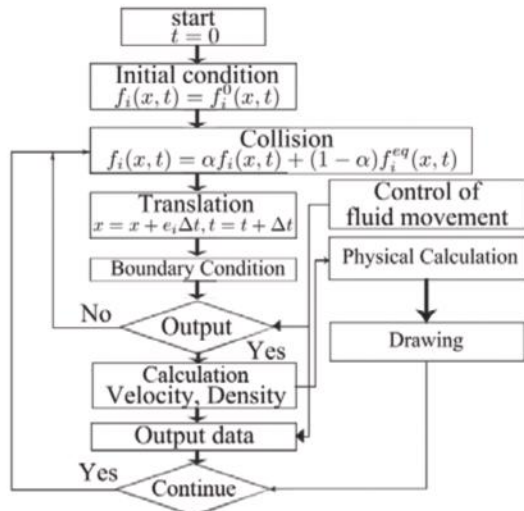
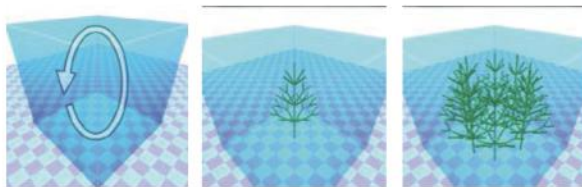


図4 LBMによる水流の計算アルゴリズム



(a) 実験水流 (b) 単一海藻 (c) 8本の海藻  
図5 シミュレーションに用いた実験環境

### 3.3 境界条件

流体運動の解析には、壁面や障害物に対する流体運動の変化を計算する境界条件も考慮する必要がある。本研究では*i*方向の粒子が壁面に向けて衝突する場合、その時点での*i*方向の粒子分布を次ステップにおいて*i*方向の格子点対称となる方向の粒子分布を割り当てる(bounce back)条件を採用する。例えば、図3において左側面に壁が存在する場合、以下のように設定する。

$$\begin{aligned} f_3(\mathbf{x}, t + \Delta t) &= f_2(\mathbf{x}, t) \\ f_{10}(\mathbf{x}, t + \Delta t) &= f_{12}(\mathbf{x}, t) \\ f_{11}(\mathbf{x}, t + \Delta t) &= f_{13}(\mathbf{x}, t) \\ f_{14}(\mathbf{x}, t + \Delta t) &= f_8(\mathbf{x}, t) \\ f_{15}(\mathbf{x}, t + \Delta t) &= f_9(\mathbf{x}, t) \end{aligned}$$

障害物に対しても同じ取り扱いを行なう。

表1 実験条件

Virtual Seaweed	
Number of rigid bodies	340
Radius of rigid bodies	0.5 m
Density	1000 kg/m <sup>3</sup>
Restitution coefficient	0.05
Force limit value of joints	10 <sup>4</sup> N
Torque limit value of joints	10 <sup>6</sup> N · m
Adhesiveness coefficient	5000
Water Environment	
Gravity acceleration	9.8 m/s <sup>2</sup>
Liquid density	1040 kg/m <sup>3</sup>
Drag coefficient	1
Relaxation frequency	0.53

### 3.4 計算アルゴリズム

LBMの計算アルゴリズムを図4にフローチャートとして示す。全格子の粒子分布を均一に設定し流体状態を初期化する。その後、任意の粒子分布の偏りと境界条件に従い、粒子分布の再配分計算を行う。再配分後の粒子分布を計算するために現在の粒子分布から各格子における流体密度と流体速度を求め、その結果を基に得られる局所平衡分布関数値を導出する。再配分された粒子分布を現在の粒子分布として更新し、同様の操作を繰り返すことで流体運動を解析する。なお、分布関数の更新式である(6)式の右辺の係数は、フローチャートでは $\alpha$ と置き換えてある。

本研究ではLBMにより壁に対応する格子における粒子分布のみを操作することで水流を発生させ、剛体の重心が存在する格子における流体速度を物体周囲の流体速度として求める。その後、求めた流体速度と物体との相対速度を(5)式の抗力計算に適用している。



海藻のモデル要素である剛体の抗力を計算する(5)式の投影面積  $A$  は、格子内に隣接する剛体が存在する場合、以下のように行なう。最初に格子内の剛体の球の投影面積を計算し、速度方向に手前のものは球全体の投影面積採用し、次に速度方向にあるものは、手前の剛体との投影面積との重なり部分を削除する。これを順に実行する。なお、抗力の作用点は、剛体の球が十分に小さいため近似的に重心に作用させる。

## 4 人工海藻の流動シミュレーション実験

### 4-1 実験方法

実験の目的は、水中環境の粒子分布を変化させて水流を作製し、その時の流動シミュレーションを行い、その挙動の時系列変化及び海藻特性を検証することで、提案する人工海藻の動的モデリング方法が海藻の挙動解析が可能であるとの有効性を示すことである。

実験は水中環境に単一の人工海藻を配置した場合と、8本の人工海藻を環状に配置した場合の2通りの条件について90秒間の海藻流動シミュレーションを行い、その挙動の遷移過程と海藻の累積ちぎれ回数及び海藻の接触数の時系列変化を調べる。

異なるモデルの配置数による実験を行うのは、まず単一の人工海藻が抗力、浮力及び海藻の物理性質を力学計算に基づいた流体の流れに従うような流動を示すことを明らかにするためである。その上で複数の海藻の性質について観察する。

シミュレーションにおける PhysX のルンゲクッタ積分の離散時間は  $1/60$  秒とした。なお、実験には  $3.40\text{GHz}$  の CPU コアを持つ Intel Core i7-2600 プロセッサを搭載した計算機を用いた。

数値シミュレーションでは立方格子状

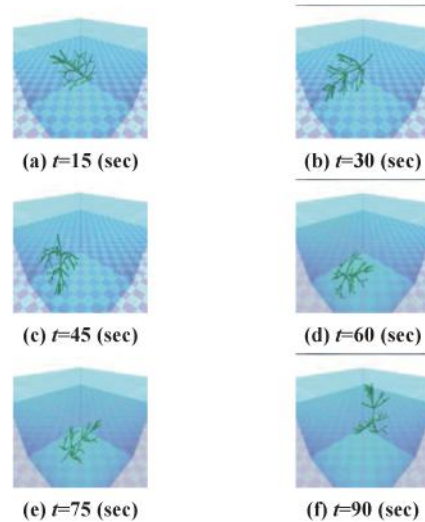


図6 単一海藻の流動シミュレーション

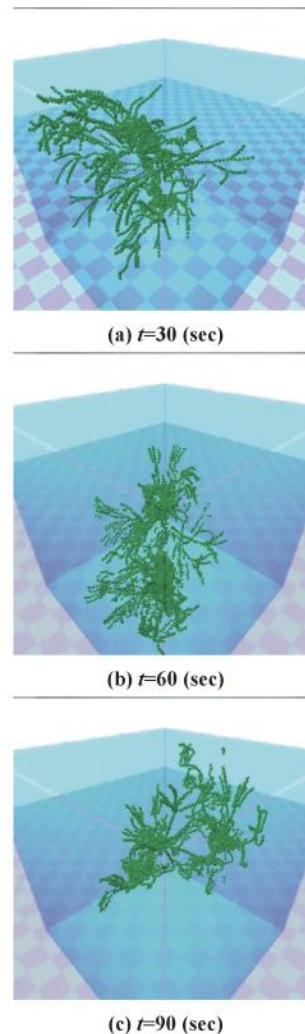


図7 8本の海藻の流動シミュレーション

の空間内部に存在する物体(海藻)のみに流体力を適用し、立方格子状水中環境を設定した。水中環境の周囲6面は静的な剛体

板で取り囲んでいる。液体の密度は  $1040.0\text{kg/m}^3$  とし、真水より重い海水に設定した。LBM で空間離散化に用いる格子総数は  $80^3$  であり、水流は図 5(a) に示す流れ方向を実現するために、左側面壁に接する図 4 に示す格子の  $c_8, c_9$  と右側面  $c_{14}, c_{15}$  に、初速  $1.4\text{m/sec}$  を与え、その以外の粒子の初期速度は 0 と設定した。人工海藻の初期配置は、単一の場合は水中環境の中央、8 本の場合についてはその中央を中心として環状に等間隔に設定した。海藻のモデルの条件及び物理定数、流体力におけるパラメータの詳細を表 2 に示す。シミュレーション実験に用いる設定値の中で力とトルクの限界値は、物理エンジンの演算処理の数値的安定化と形状に基づく剛体の配置の単純化の面から事前に実験的に求めたものを示している。海藻の密度は  $1000.0\text{kg/m}^3$  で与え、水や比較的重みのある材質から構成される物体と同程度に設定した。また、粘性値は、事前の予備シミュレーションで粘着が生じた係数を採用した。

#### 4-2 動的モデリングによる挙動検証

初期状態から時間が 15 秒から 90 秒迄の人工海藻の挙動遷移の様子を図 9 に示す。

人工海藻は 90 秒間で水中環境内部を水流方向に沿ってほぼ 2 回循環した。これから LBM により計算した水流の流体速度ベクトルが図 5 (a) の軌道を作製し、剛体周囲の流速を適切に実現し、人工海藻を構成する剛体に働く抗力計算に適用されていることがわかる。

シミュレーション後半において人工海藻の移動速度が前半と比較して上昇しており、単位時間当たりの流動距離が長くなる。これは流動により水流と海藻との相対速度が減少し、海藻に働く抗力の大きさが小さくなるためである。加えて、海藻の密度は流体の密度に対して低く設定したため、

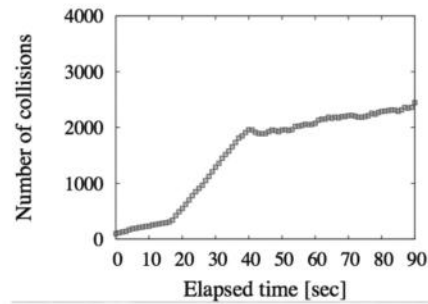


図 8 衝突回数の時系列変化

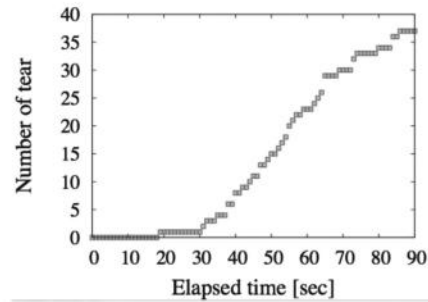


図 9 ちぎれ回数の時系列変化

鉛直上向きに浮力が働くことで浮上動作が高速に行われたことも原因である。なお、このシミュレーションに要した計算時間は 334 秒(シミュレーション時間とは異なる)であった。

#### 4-3 特性の検証結果と考察

8 本の人工海藻に対する 90 秒間の流動シミュレーションにおける 30 秒ごとの海藻の状態を図 7 に示す。

図 8 と図 9 はそれぞれ全海藻の累積ちぎれ回数と接触判定が真である対となる 2 剛体数の総和の時系列変化を示している。

累積ちぎれ回数の時系列変化から小さな階段状の変化が見られ、ちぎれが数秒間で頻繁に発生する場合と、まったく発生しない場合が混在している。つまり、人工海藻の流動では流体力及び粘着力の影響が受けやすい状態が断片的に続き、動的な環境変化に対する影響が少ない安定した状態に落ち着く状態への遷移を繰り返していることになる。

剛体接触数についても、ちぎれと同様な階段状の変化の結果が表れており、接触数

の変化が著しい増加を示す状態が続く場合と緩やかな増減もしくは不変動である場合があった。

図 8 に示した挙動の遷移を考慮すると、海藻同士の接触拡大が容易に進展して行くことが明らかであり、近接箇所に対して疑似クーロン力による引力を働かせやすい粘着力による影響が強い傾向が現れている。1 回のシミュレーションの終了までに要した計算時間は 1796 秒であり、単一海藻でのシミュレーション時間と比較して 5 倍程度の結果となった。

剛体接触数と累積ちぎれ回数の関係性について結果から、20 秒付近において接触数の急増およびちぎれが発生していることがわかる。その後 40 秒付近において接触数の急増は収束するが、ちぎれ回数は急増を続けており、この結果から高い接触数が維持される状態のときほど別の個体からの拘束を受け、移動速度と流体速度の差が大きくなり、抗力が増大することから、ちぎれが生じ易いことがわかる。したがって、密な接触状態により海藻同士が互いに拘束し合っている状態で流動を続けると海藻に加わる抗力によりちぎれが多発するという相互関係がある。

## 5. 結 言

本研究は、以下のようにまとめられる。

- (1) 海藻の形態及び物理性質をモデリングし、流体運動を考慮した流体力を適用可能な水中環境の構築を行い、海藻の動的モデリング手法を提案した。
- (2) 導入した物理性質及び流体力に基づく流動シミュレーション結果から、人工海藻がちぎれ・粘着の物理性質を反映した流動を獲得することを示した。
- (3) 海藻の物理性質の時系列変化及び挙動の遷移状況の CG アニメーション作成し、海藻の挙動にかかわる水流および複数

の海藻同士の相互関係の観察及び考察を容易にし、海藻の挙動解析に対する有効性を示した。

本論文で報告した人工海藻の動的モデリングにより、海藻培養環境の改良に向けた海藻同士の絡みの制御及び発生メカニズムの解析が可能となる。今後、これらに関する報告を行いたい。

## 謝辞

本研究は平成 25～27 年度学術研究助成基金助成金（基盤研究（C））（課題番号 25420206、人工生命技術による海藻の物理特性シミュレーション法の確立と流動制御）に基づいて実施したものである。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- (1) CHEN S. and DOOLEN G. D. (1998) “Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows,” *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol. 30, pp.329-364
- (2) CORBIT J.D. and GARBARY D.J. (1993) “Computer simulation of the morphology and development of several species of seaweed using Lindenmayer systems,” *Comput. Graphics* Vol. 17, pp.85- 88
- (3) FEI Xiu-geng (2004) “Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation,” *Hydrobiologia*, Vol. 512, pp.145-151
- (4) FEI Xiu-geng, BAO Ying and LU Shan (1999) “Seaweed cultivation: Traditional way and its reformation,” *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, Vol. 7, pp.193-199



- (5) HIRATA Satoshi, HAYASHITANI Masao, TAYA Masahito AND TONO Setsuji (1996) “Carbon Dioxide Fixation in Batch Culture of *Chlorella* sp. Using a Photobioreactor with a Sunlight-Collection Device,” *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol. 81, pp.470-472
- (6) HOU Shuling, ZOU Qisu, CHEN Shiyi, DOOLEN Gary and COGEY Allen C. (1985) “Simulation of Cavity Flow by the Lattice Boltzmann Method,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 118, pp.329-347
- (7) LAM Man Kee and LEE Keat Teong (2011) “Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME); Win-win strategies toward better environment protection,” *Biotechnology Advances*, Vol. 29, pp.124-141
- (8) LI Xin, HU Hong-ying and ZHANG Yu-ping (2011) “Growth and lipid accumulation properties of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. under different cultivation temperature,” *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 3, pp.3098-3102
- (9) MACNAMARA G. and ZANETTI G. (1988) “Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata,” *Phys. Rev. Lett* Vol. 61, Issue 11, pp.2332-2335
- (10) 松尾一泰 (2007) 「流体の力学 - 水力学と粘性・完全流体力学の基礎,」理工学社
- (11) NVIDIA (2012) //www. nvidia.com/hardware/technology/physx (5 May 2012)
- (12) PANG Shaojun and LUNING Klaus (2003) “Mass cultivation of seaweeds Current aspects and approaches,” *Journal of Applied Phycology*, Vol. 15, pp.115-119
- (13) SEN Soner I. and day A. M. (2005) “Modelling trees and their interaction with the environment; A survey,” *Comput. Graphics*. VOL. 29, pp.805-815
- (14) UGWU CU, AOYAGI H, UCHIYAMA H. (2008) “Photobioreactors for mass cultivation of algae,” *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp.4021-4028
- (15) 渡邊信 (2010) 「藻類バイオマスエネルギー技術の課題と展望,」日本機械学会誌, Vol. 113, No. 1098, pp.32-35
- (16) YOKOYAMA Shinya, JONOUCHI Katsunari and IMOU Kenji (2007) “Energy Production from Marine Biomass Fuel Cell Power Generation Driven by Methane Produced from Seaweed,” *PROCEEDINGS OF WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, Vol. 22, pp.320-323
- (17) ZXIJFFER Jan-Willem F., SHIPPERS Klaske J., ZHENG Ke, JANSSEN Marcel, JTRAMPER ohannes, and WIJFFELES René H. (2010) “Maximum Photosynthetic Yield of Green Microalgae in



Photobioreactors,” *Mar Biotechnol*,  
Vol. 12, pp.708-718