

多自由度培養海藻モデルの接触回避のための水流制御

小川 純[†] 鈴木 育男^{††} 山本 雅人[†] 古川 正志[†]

Water Flow Control for Contact Avoidance of Multi-Degree of Freedom Seaweed Model

Jun OGAWA, Ikuo SUZUKI, Masahito YAMAMOTO and Masashi FURUKAWA

[†] Hokkaido University ^{††} Kitami Institute of Technology

Seaweed cultivation has attracted attention in the field of industries in the latest years. In the seaweed cultivation, control technology for contact avoidance among seaweeds is required in order to increase photosynthesis yield. This study proposes an efficient control method on water flow using physics modeling. In order to simulate physical behavior, we model the cultured seaweed that has multi-degree of freedom, and a water environment model. Local alteration of water flow that is based on positional information of seaweed are introduced into the water environment so as to control contacting avoidance. We verify the efficiency of the control method through comparison experiment of observing the number of contacts between rigid bodies.

Key words: Seaweed Cultivation, Physics Modeling, Contact Avoidance, Lattice Boltzmann Method

1. 緒言

現在、浮遊型海藻の成長を利用した効率の良いエネルギー供給手段の実現に関する研究が世界各国で盛んに行われている¹⁾。CO₂を溶解した水中における培養海藻は陸上植物と比べ、約10倍の光合成速度で成長する。水中のCO₂濃度および培養海藻の光収率が高いほど、培養海藻の光合成速度は上昇し、エネルギー回収率が可能となる。成長効率の高い海藻培養環境の実現に向けた課題の一つとして、光バイオリアクターによる培養海藻の光収率を上昇させることが挙げられる。そのために水槽内を浮遊する培養海藻に対して、光を回収可能なように絶えず葉の表面積を確保される状態を維持するような水流制御が必要となる。培養海藻が成長し、葉の長さが一定まで達すると、水槽内における海藻の体積比率が増え、複数の培養海藻同士が絡み合ってしまう現象が起きる。絡みは接触から引き起こされる物理現象であり、その解消には培養海藻の特徴を考慮した上で、水槽内を浮遊する培養海藻の物理的な状況を把握し、接触を回避する水流の制御方法が求められる。

本研究では、水槽内を浮遊運動する多自由度培養海藻モデルの物理的位置情報を利用した水流の制御方法について提案する。物理エンジンを用いて、海藻特有の物理性質を考慮した多自由度培養海藻モデルと水中環境を実装し、物理シミュレーションを実施し、制御を加えなかった場合との比較結果を考察し、制御の有効性を示す。

2. 培養海藻と水中環境の物理モデリング

2.1 多自由度培養海藻モデル

本研究で扱う培養海藻モデルは、一本の細い葉の形状をした海藻を複数個体集め、故意に根元で一つに絡ませ、同時に複数個体の培養可能としている比較的小規模な培養環境で良く用いられる培養海藻を対象とした。培養海藻は51個の小球剛体を3自由度のジョイントで結合していくことで多自由度を実現している。作製した培養海藻を図1に示す。

実際の培養海藻に近似するため、培養海藻は接触時に引きつけ合う性質（粘着性）と葉が外力により分裂する性質（ちぎれ）

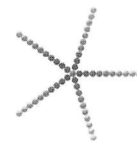


Fig. 1 Cultured Seaweed Model



Fig. 2 Physical properties of seaweed model

の二つの物理性質を導入する。粘着性の概要を図2(A)に示す。粘着性は培養海藻を構成する剛体間の接近距離 r とし、式(1)による引力を各剛体に対して適用し、実現する。

$$F_i = k_A \sum_j \frac{M_i M_j}{r_{ij}^2} \quad \text{only when } r_{ij} < r_t \quad (1)$$

また、ちぎれの概要を図2(B)に示す。剛体のジョイントに外力とトルクの制限値を設け、これらの制限値を超えた外力またはトルクがジョイントに働いたとき、ジョイントを破壊しその機能を停止させてちぎれを再現する。ジョイントの破壊させるか否かの判定をちぎれ判定として条件式(2)で定義する。

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

2.2 水中環境

培養海藻に流体の影響力として式(3),(4)で定義される浮力及び抗力に加え、流体運動を式(5),(6)で離散格子内の粒子分布の時間発展を計算する流体解析手法の一つである格子ボルツマン法を用いてシミュレートし、水中環境を構築した。(なお、格

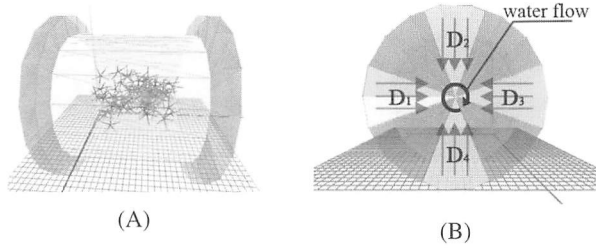


Fig. 3 Physical properties of seaweed model

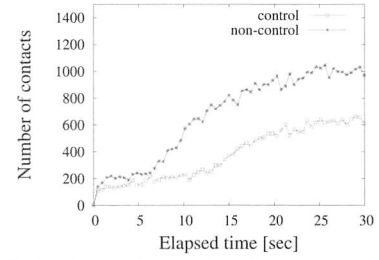


Fig. 4 Time evolution of number of contacts

子ボルツマン法の詳細は関連研究²⁾³⁾を参照。))

$$F_B = \rho V g \quad (3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2 \quad (4)$$

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) f_i(x, t) + \frac{1}{\lambda} f_i^{eq}(x, t) \quad (5)$$

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left(1 - \frac{3}{2} \bar{u}^2 + 3(\bar{e}_i \cdot \bar{u}) + \frac{9}{2} (\bar{e}_i \cdot \bar{u})^2 \right) \quad (6)$$

ρ は流体密度, V は物体の体積, g は重力加速度, A は物体の投影面積, C_D は物体固有の抗力係数, v は流体と物体の相対速度, λ は単一時間緩和係数, ω_i は重み係数, e_i は粒子の速度, u_i は流速である.

3. 水流の制御法

水中環境は図 3(A) に示す半径 50[m] の円筒型水槽の内部に構築する. 水流は円筒の中心軸を基軸として一定の回転速度 ω [rad/s] で左回転するように発生し, その流速ベクトルには微小な外乱が含む. 従って, 時間経過とともに培養海藻には壁面に向かう慣性力が働き, 壁面に沿った回転運動を行うように遷移する. 本研究では, 図 3(B) は円筒型水槽の中心軸視点で表したものである. 図 3(B) の領域 $D_1 - D_4$ において, 矢印方向に速度場を発生させる操作を加え, これらの領域に含まれる培養海藻の各剛体に対し壁面からの水流射出による速度変化を与える. 前述の水流射出における局所的に発生する速度ベクトルと回転速度 ω との合成ベクトルを領域 $D_1 - D_4$ において培養海藻に加える流速として更新し, 水流を制御する.

4. 物理シミュレーション実験

作製した培養海藻と水中環境を用いて, 円筒の中心軸を基軸として一定の回転速度 ω で左回転の水流のみを行う環境とその水流に加え位置情報に基づく水流制御を行う環境において物理シミュレーションを実施し, 培養海藻の接触状態の変化について比較する.

4.1 実験目的

局所的な接触箇所の移動速度を変化させた接触回避への影響について培養海藻の流動結果を考察する, また接触回避に有効な水流の制御方法を調査し, 効率的成長を促す海藻培養環境の実現に向けた課題の解決をはかる.

4.2 実験条件

格子ボルツマン法で空間離散化に用いる格子の総数は 50^3 個であり, 単位格子は 1 辺が 1.0[m] の立方体である. 回転速度 ω

= 2π [rad/s], 海藻の密度 $\rho_r = 998.2$ [kg/m³], 海藻の粘着係数 $k_a = 10^3$, 千切れ発生時の限界耐久力及び限界トルク $F_c = T_c = 10^3$ [N], 水の密度 $\rho = 1040.0$ [kg/m³], 抗力係数 $C_D = 1.0$, 投影面積 $A = 0.5^2 \pi$ [m²] と設定する.

4.3 実験結果

シミュレーション結果から得られた 2 つの水中環境における培養海藻の接触数の時系列変化を比較したグラフを図 4 に示す. シミュレーション時間全体を通して, 提案する水流制御を行う環境では, 接触数が非制御時より減少することが判明した.

4.4 考察

一定の回転速度 ω の水流のみが発生する環境では, 培養海藻は水流に従って流動し, 一定の接触状態を維持したまま回転運動を続ける. これは時間経過に従って, 徐々に水流の回転速度と培養海藻の移動速度の差が小さくなると抗力の影響が小さくなり, 近接状態にある培養海藻同士が粘着性による引力の影響が強くなる状態が維持されやすくなるためである.

一方, 培養海藻が水流射出領域による水流制御を加えた場合, 射出領域に通過する度に培養海藻の移動速度が断続的に変化し, それに伴う抗力の変化により接触数の減少に繋がったと推測できる. 従って, 接触部分の移動速度ベクトルを変化させることで流動する培養海藻同士の接触を回避するために必要な外力を与えることが可能となり, 絡みの解消の手段として有効である.

5. 結言

本研究において水流と培養海藻との挙動の相互関係について次のようなことが判明した.

1. 水流の流速ベクトルと移動速度ベクトルとの差が小さくなると抗力が小さくなり, 粘着性により高い接触状態が維持される.
2. 接触部分の移動速度ベクトルの変化は接触回避に必要な外力を与えるため, 接触回避の水流制御の方法として有効である.

今回扱った培養海藻は接触状態の維持は示したが, 複数の培養海藻が複雑にねじれ合う絡みはほとんど発生しなかった. 今後, モデルおよび環境を改善し, より複雑な絡み現象が発生する状況をモデリングし, その絡みの制御方法について調査する.

参考文献

- 1) 渡邊 信, 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, 2010, Vol. 113, No. 1098
- 2) S. Chen and G.D. Doolen. Lattice Boltzmann method for fluid flows, Annual Rev. Fluid Mech., 30, 329-364 (1998).
- 3) G. McNamara and G. Zanetti, Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata, Phys. Rev. Lett. 61, Issue 11, pp.2332-2335 (1988)