

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：30115

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420206

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)DEVELOPMENT OF SIMULATION METHOD FOR SEAWEED MOVEMENT IN THE WATER FLOW

研究代表者

古川 正志 (FURUKAWA, Masashi)

北海道情報大学・経営情報学部・教授

研究者番号：70042091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：火力発電所は大量のCO₂を生成する。この廃棄物を海水に高濃度に溶融し、藻類海藻による光合成を利用することにより、CO₂の軽減とバイオエタノールの生成をできる。しかし、水槽中の海藻は成長にともないその密度が増大し、そのためにちぎれやねじれが生じ、枯れ死する場合がある。本研究は、水槽中で成長する海藻の運動物理特性を再現するシミュレーションモデルを人工生命技術に基づいて提案した。また、このシミュレーションモデルの海水の流動を実現する流れの計算法を導入し、水流の運動を実現した。この海水の流動を制御することにより、ちぎれやねじれを防ぐための海水の流動による海藻運動の制御モデル法の確立を行なった。

研究成果の概要(英文)：As a thermal power plant generates a great deal of CO₂ as waste, it is an important problem how to reduce CO₂. Alga seaweed makes use of CO₂ to grow up and generates O₂. Seawater absorbs CO₂ with high concentration. The alga seaweed in such seawater can grow up faster than the usual seawater. The biotechnological ethanol is made of alga seaweed as an eco-energy source. As the alga seaweed grows in the seawater with CO₂ high concentration, its population and density increase and cause twist phenomenon by themselves. The alga seaweed sometimes dies. To avoid it, the water flow in the seawater must be controlled. This research aims at establishing a control method of the water flow by simulation. For this purpose, the alga seaweed is modeled by use of physical modeling from a viewpoint of artificial life and simulated its movement to realize water flow by adopting fluid flow analysis method. It becomes possible to establish the water flow control method to avoid dying the alga seaweed.

研究分野：知能機械

キーワード：人工生命 物理モデリング 海藻培養 シミュレーション 格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

海藻は海水中で光と CO_2 を取り込み、エネルギー回収効率の高い光合成を行っており、陸上植物に比べ速い成長速度を持つ。これにより CO_2 の削減とバイオエネルギーの生成を同時に行うことができる(図1)。また、水質の善し悪しを問わず環境への適応性も高く、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。

海藻培養における研究として、培養液中に高濃度の CO_2 を溶解させ貯留しておく CO_2 固定化技術の開発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アクターの機材開発、海藻の光合成における最大光吸収率の解析、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の調査によるエネルギーの工業的有用性の検証、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、等が挙げられる。更に、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は難しい課題となっている。そのために、コンピュータシミュレーションを用いて仮想空間内での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なっていた。



図1 火力発電所と海藻バイオエタノールのサイクル (NHK サイエンス zero[1])

2. 研究の目的

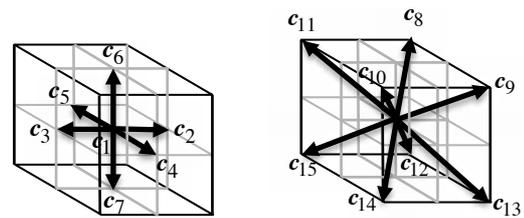
図2は高密度でタンク内に培養された海藻工場の例である。こうした工場においては、海藻が成長にともない高密度になるとちぎれ、からみの現象による致死が生じる。本研究では、人工生命(Artificial life, A-life)の視点から、海藻培養において起こりうる物理現象について解析・予測し、物理エンジンを用いた人工海藻と培養環境の動的モデリングを実現し、培養槽の水流によりちぎれ、からみを防止する制御法を確立するシミュレーションの方法論の開発が研究目的である。

3. 研究の方法

研究目的を実現するために、(1)培養海藻の物理モデラーによる形状モデリング、(2)物理モデラーによる水中環境の構築、(3)海藻のちぎれ・絡み・粘着現象もシミュレーシ



図2 海藻培養槽



(a) 粒子速度 $c_1 \sim c_7$

(b) 粒子速度 $c_8 \sim c_{15}$

図3 格子ボルツマン法に於ける15粒子モデルの格子内の粒子速度

ョンによる実現、を主な重点目標として以下のように実施した。

(1) 成長する海藻の物理モデルに基づく形状モデリング

海藻の形状(茎、葉)は、物理モデリングのプリミティブである剛体球を接続して表現する。海藻の時系列にともなう成長モデルには、L-システムと確率的構成モデルに基づく海藻の形状モデリングを導入した。前者は、主にシダ葉形状の海藻に適用し、後者は棒状成長形状に適用した。

(2) 物理モデラーによる水中環境の構築

水槽内の海藻の環境と海藻の移動を制御する水流を実現するために、セルラーオートマトンに基づく格子ボルツマン法を採用した。格子ボルツマン法は、水槽内の海水を格子に分割し、1格子についてあらかじめ定めた点(本研究では15点法)の粒子速度を局所平衡分布関数で求める方法である。1格子の粒子点を図3に示す。格子内の粒子の平均速度は、海藻をモデル化する剛体球の抗力として使用され、海藻の運動が決定する。

(3) 海藻のちぎれ・絡み・粘着現象のシミュレーション

人工的に海藻のちぎれ、絡み、粘着現象と同等の力を海藻にモデル化した。

ちぎれについては、海藻をモデル化したプリミティブである剛体球状接続部に加わる抗力とトルクの判定で与えた。判定式は以下である。

$$J = \begin{cases} \text{True} : |F| > F_c \text{ or } T > T_c \\ \text{False} : \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)において、 F 及び T は接続部の抗力、及びトルクを表し、 F_c 及び T_c はちぎれを起こす閾値である。 J の値が True のときにちぎれを生じ False のとき、ちぎれを生じないことを示している。

絡みについては、異なる個体（海藻）間の剛体球状の接触数を計測し、これが一定以上の時に絡みと判定した。

粘着力は、異なる個体間の剛体球の粘着力 F_i を疑似クーロン力により表現した。これを式(2)で計算する。

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

ここで、 M_i, M_j は異なる海藻 i と j を構成するプリミティブ剛体球の質量、 r_t は一定の距離に個体が近づいた時のみ粘着力を計算するための閾値、 r_{ij} は異なる海藻の最近接距離である。

これらを物理モデリングで設定した上で、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、そのちぎれの時系列変化を調べるシミュレーションを実施し、海藻の特性を考察した。

4. 研究成果

CO₂の削減とバイオエネルギーの効率的な生成を可能とする浮遊性海藻群（ミナミアオノリ）をシミュレーション対象とした。シミュレーション目的は、培養海藻の水流と海藻の運動可視化、ちぎれ現象の測定が目的である。これによって水流の制御法が確立される。このシミュレータの開発のために、人工生命技術の視点から、上記方法を用いて以下の成果が得られた。

(1) シミュレーション実験条件

実際に培養に使用されるミナミアオノリ（図4）をモデリングの対象とし、シミュレーションを実施した。シミュレーションに設定した物理定数等の実験条件を表1に示す。表1において、上の表は海藻の設定条件である、下の表は、培養槽の環境条件を示す。

物理モデラーには、NVIDIA社のPhysXを採用している。

シミュレーションに用いた実験水流と海藻モデルを図5に示す。水流は図5(a)に示すように縦の水流を用い、海藻はここでは1本



図4 ミナミアオノリの成長（竹中工務店（株）「平成24年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書」、p76 図5より引用）

表1 実験条件

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

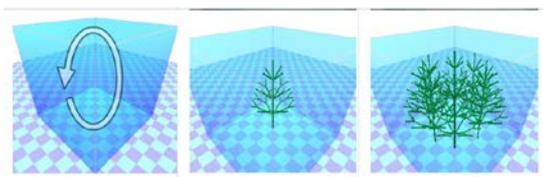


図5 シミュレーションに用いた実験環境

（図5(b)）と8本（図5(c)）を用いた。1本の時は、水流の生成と海藻の流動の検証であり、8本の時は海藻のちぎれとからみの時系列変化を調べるのが目的である。

(2) シミュレーション結果

図6に単一海藻のときの流動シミュレーションのスナップショットを示す。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。これから格子ボルツマン法により計算した水流の流体速度ベクトルが図5(a)の軌道を作成し、剛体球周囲の流速を実現し、人工海藻を構成する剛体に適切に働く抗力計算に適用されていることが検証された。シミュレーション前半に比較して、

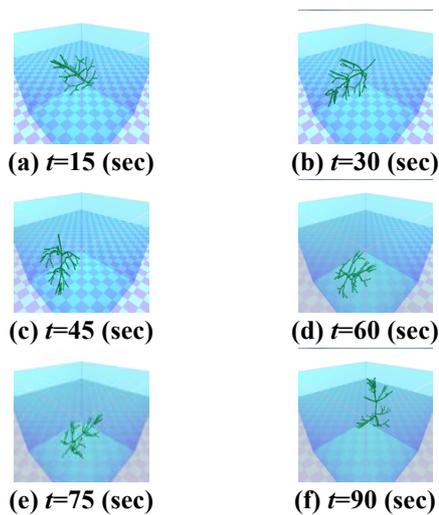


図6 単一海藻の流動シミュレーション

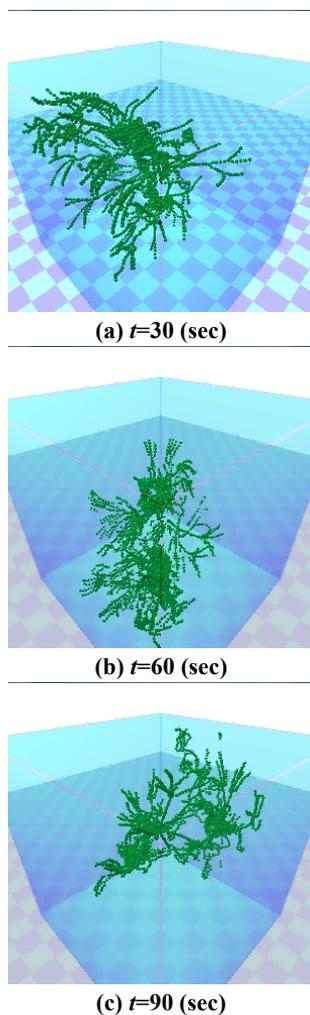


図7 8本の海藻の流動シミュレーション

後半の海藻の移動速度が上昇し、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。

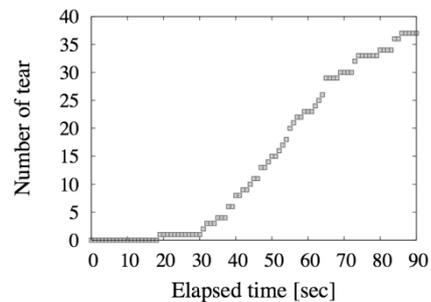


図8 ちぎれ回数の時系列変化

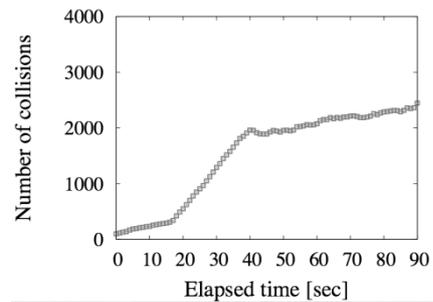


図9 衝突回数の時系列変化

図7に8本の海藻によるシミュレーションのスナップショットを示す。このシミュレーションでは全海藻の累積ちぎれ回数と接触判定がTrueである対となる2剛体数の総和の時系列変化を測定した。ちぎれ回数の累積時系列変化を図8、衝突回数の累積時系列変化を図9示す。

図8では、累積ちぎれ回数の時系列変化に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するのが分かる。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の移行とのを交互に繰り返している。

剛体接触数と累積ちぎれ回数の関係は、シミュレーション結果から、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相互関係が存在する。

図7に示したシミュレーションスナップショットの動画全体の海藻を観察すると、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る。このことは、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くなる傾向が現れることが観察できる。

成果をまとめると以下のようなになる。

1. 浮遊性海藻の形状生成モデルとして、Lシステム及び確率的構成モデルによる形状モデリングの方法論を開発した。
2. 培養海藻内での水流の流動制御をシミュレーションするために格子ボルツマン法を導入し、生成した水流に基づく浮遊性海藻の水槽内での運動をシミュレーション可能とした。
3. 浮遊性海藻の死滅の原因となるちぎれ、絡み、粘着を物理的現象として実現し、人工的にシミュレーションとして水流を発生した時に、ちぎれが定量的に観察できる技術を開発した。
4. 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。

今後、これらのシミュレーション技術は海藻培養に必要な水流制御の実現におおいに貢献することができると考えられる。

なお、本研究の実施に当たり、研究費の支給をいただいた日本学術振興会、北海道情報大学の事務局、北海道大学の関係者の方々に深く謝意を表します。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Jun Ogawa, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa, A Novel Approach to Quantitative Evaluation of Tangle Formations for Seaweeds in Stirrer Cultivation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.28, No.1, February 20, pp. 40-49 (2016), doi: 10.20965
- ② 古川正志, 小川純, 山本雅人, 渡辺美知子, 沢井茂, 北海道情報大学紀要, 確率的構成モデルに基づく海洋植物群の成長パターンとその制御, Vol.27, No.1, pp.29-40 (2015)
- ③ Jun Ogawa, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa, Estimation of Seaweed Twist Based on Diffusion Kernels in Physical Simulation, the *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.18, No.5 pp. 823-829 (2014)

[学会発表] (計7件)

- ① Jun Ogawa, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Water Flow Control for Inhibiting Seaweed Twist in Real Environment and Physical Simulation, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 20th 2015)*, pp. 291-296 (2015)
- ② Jun Ogawa, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa, Twist-state Classifier for Floating Marine Biomass based on Physical Simulation, *The 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-13)*, July 8 (2014) Padova Congress Center, Italy

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 正志 (FURUKAWA MASASHI)
北海道情報大学・経営情報学部・教授
研究者番号：70042091

(2) 研究分担者

山本 雅人 (YAMAMOTO MASAHITO)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：42092057

(3) 連携研究者

なし