

大気中の二酸化炭素の資源化に向けた 微細藻類の屋外安定培養技術の研究

Study of Technology for Outdoor Stable Culture of Microalgae for Recycling of CO₂ in Atmosphere

木下 翔平¹

Shohei KINOSHITA

土肥 瑞穂¹

Mizuho DOI

福島 のぞみ¹

Nozomi FUKUSHIMA

後藤 稔¹

Minoru GOTO

要 旨

カーボンニュートラル社会構築に向け、大気中の二酸化炭素を有価物へ転用可能な微細藻類を用いた二酸化炭素固定化技術の構築を目的とし、Honda オリジナル株とフラットパネル式培養槽を用い、培養条件と培養槽構造の適正化の検討をおこなった。培養条件は、栄養塩成分である窒素、カリウム、リン濃度の設定をおこなった。かくはんガイド形状を、一方向に液とガスを吐出する形状を採用することで、培養液の流れ場流速を 0.02 [m/sec] 以上を達成した。以上の培養条件の適正化により、微細藻類の生産量が向上できた。培養槽構造については、断熱層構造により、年間を通じて管理温度範囲に制御が可能となった。また、培養槽の 45 [°] チルト設置により培養槽に入射する光量を増大することができた。これらを反映した屋外培養試験から藻生産量 13.5 [g/m²/day] の見通しが得られた。この結果から DREAMO は、カーボンニュートラル燃料であるサトウキビ由来のバイオエタノールと同等以上の作付面積当たりのエタノール生産量を達成する可能性が示された。

ABSTRACT

The optimization of culture tank structure and culturing conditions was investigated using Honda's own strain of microalgae and a flat panel photobioreactor for the purpose of creating carbon dioxide fixation technology using microalgae capable of repurposing carbon dioxide in the atmosphere as a valuable resource. The aim is to build a carbon-neutral society. The culturing conditions were configured in terms of the concentrations of the nutrient salt components of nitrogen, potassium, and phosphorus. By adopting a flow guide shape that discharges liquid and gas in a single direction, a flow-field velocity of 0.02 m/sec or higher was achieved for the culture solution. This optimization of the culturing conditions successfully increased microalgae production volume. Regarding the culture tank structure, the heat insulating layer structure made it possible to maintain temperatures within the control range throughout the year. The culture tank was also installed at a 45° tilt, which successfully increased the amount of incident light in the culture tank. Outdoor culture tests incorporating these factors yielded an expectation of algae production volume of 13.5 g/m²/day. These results indicate the possibility that DREAMO will be able to achieve ethanol production volume per planted area that is equal to or better than bioethanol from sugarcane, which is a carbon-neutral fuel.

1. ま え が き

近年、カーボンニュートラル社会構築の動きや環境問題を背景に、大気中へ排出される二酸化炭素 (CO₂) を回収し、有価物へ転用する Carbon Capture and Utilization (CCU) 技術が注目されている。CO₂ の回収手法としては、

大気から直接回収する Direct Air Capture (DAC) や、火力発電所などの高濃度 CO₂ の回収をターゲットとした技術、化学吸収法、物理吸着法など様々な手法が検討されている。回収した CO₂ はドライアイス、溶接など直接的な利用やプラスチックなど化学製品や燃料、コンクリート製品などの原料として利用⁽¹⁾される。微細藻類を活用した CCU

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: shohei_kinoshita@jp.honda

技術は、光合成反応で CO_2 吸収し、生物機能で CO_2 から有価物へ変換がおこなわれるため、低エネルギーでの有価物化が期待される。

微細藻類はバイオマス間の比較において、陸上植物に比べ作付面積当たりの年間 CO_2 固定量が多い。光エネルギー利用効率は一般的な陸上植物が 4.6 [%]⁽²⁾ なのに対して、微細藻類が最大理論効率 12.0 [%]⁽²⁾ と高効率であり、 CO_2 吸収性能が優れている。前述したように微細藻類は細胞内で吸収した CO_2 を様々な有価物に変換することができる。微細藻類体内で炭水化物などの有価物原料に変換、貯蔵され、その原料からジェット燃料⁽³⁾やバイオエタノール⁽³⁾、プラスチック原料⁽⁴⁾などの工業利用や食品、医療分野に転用することが可能である。

微細藻類の培養方法は、オープンポンド方式やレースウェイ方式、フラットパネル方式などを代表とする培養方式が一般化されており、各方式について培養槽構造やシステムに関する研究の取り組みが報告⁽⁵⁾されている。本研究では、設置面積あたりの藻生産量向上を目的にフラットパネル方式を採用した。培養装置のイメージを Fig. 1 に示す。

本稿は独自開発した微細藻類株と培養槽を複数並べたフラットパネル式培養槽を用いた屋外安定培養技術の構築に向けて、培養条件と培養装置の観点で取り組みを紹介する。

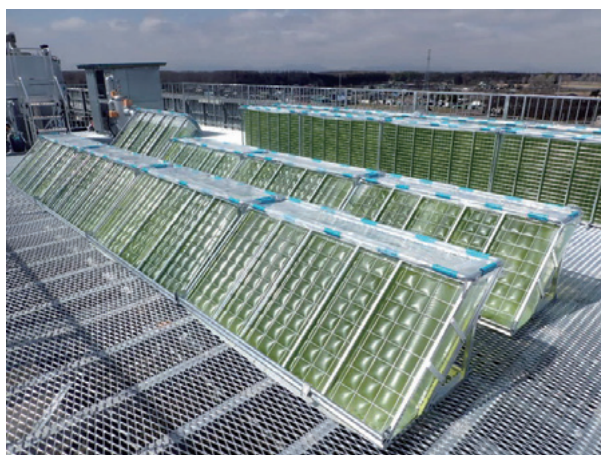


Fig. 1 Image of culture tank equipment

2. Honda DREAMO の特徴と屋外培養技術

2.1. Honda DREAMO 株の特徴

本研究で用いる微細藻類の特徴について紹介する。Honda オリジナル株 (Honda DREAMO: DREAMO) は、*Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 (国立環境研究所: 受託 NIES-2236) を親株とし、遺伝子改変をおこなわないスクリーニングによって取得されている。主な特徴^{(6), (7)}につ

いて紹介する。一つ目に、他の微細藻類と比べて単位面積当たりの藻生産量が高い点である。微細藻類は種類によって生産量は異なるが、DREAMO と同種の *Chlamydomonas* については、0.10 から 0.25 [g/L/day]⁽⁸⁾ であるのに対して屋外の環境外乱影響を受けない屋内の理想環境ではあるが、0.50 [g/L/day] と高いポテンシャルを有する。二つ目に、有価物原料となる澱粉生産量を高めることが可能である。一般的に、藻生産速度と澱粉含有率はトレードオフの関係にあるが、DREAMO は藻生産速度を維持したまま澱粉含有率向上⁽⁶⁾が可能である。三つ目に、DREAMO 親株である *Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 の細胞壁は 0.3 [μm] に対して DREAMO 細胞壁が 0.09 [μm] と薄く DREAMO 細胞内に蓄える有価成分をショートプロセスで抽出⁽⁷⁾が可能なことである。

2.2. フラットパネル式培養槽

DREAMO の培養は設置面積あたりの藻生産量向上を目的にフラットパネル式培養槽でおこなわれる。Fig. 2(a), (b) に一般的なフラットパネル式培養槽と Honda の特徴的なフラットパネル式培養槽の構造を示す。Fig. 2(a) の一般的なフラットパネル式培養槽は、槽の奥行きが 1 から 10 [cm]⁽⁵⁾ と薄く、水深を 100 [cm]⁽⁵⁾ 以下で設定した構造をとる。また、培養槽底部に設置した配管から CO_2 ガスを吐出し、培養液をかくはんすることで曝気をおこなっている。この仕組みにより、微細藻類の自然沈降を抑制している。一方、Fig. 2(b) の Honda オリジナルのフラットパネル式培養槽は、冷却水を培養槽内に貯留し水の熱容量を利用した培養液の温調エネルギーを最小限とする構造と培養液のかくはんガイドを備えた構造を特徴とする。培養槽構造は、冷却水を充填するビニール水槽と培養液を投入する培養パックがきょう体に固定され、冷却水を充填した冷却槽内に培養パックを設置した構造である。培養液のかくはんは、かくはんエネルギー削減のため、供給ガスを利用したエアリフトかくはんとしている。

Fig. 3 に装置付帯設備を示す。培養した DREAMO の回収や投入をおこなう送液ポンプと DREAMO を含む培養液を回収する沈降タンク、排ガスなど CO_2 ガスを含むガス供給に使用するブロワーで構成する。沈降タンクは、培養した DREAMO を一次濃縮として自然沈降の機能を付加させた装置である。

2.3. DREAMO 屋外培養における課題

微細藻類の生産量の向上には多くの課題⁽⁹⁾がある。Table 1 に一般的な微細藻類培養に影響を与える因子のうち、DREAMO に重要な培養因子^{(6), (7), (9)}と培養影響⁽¹⁰⁾を示す。重要因子として、栄養塩、培養液かくはん、培養液温度、光が挙げられる。

栄養塩については、栄養成分濃度を変化させることで微

Table 1 Important factors and issues of DREAMO

Factor	Culture effect	Issue	Theme
Nutrients	Nutrient depletion	Contamination proliferation	Nutrient concentration optimization
Broth stirring	Algae subsidence	CO ₂ dissolution amount, O ₂ dissolved amount, reduced light reception	Stirring speed optimization and structure
Water temperature	Water temperature rise	Increased temperature control energy	Temperature control energy minimization
Incident light	Reduced production efficiency, water temperature rise	Low utilization of incident light, water temperature rise	Incident light utilization rate upward, temperature control energy minimization

細藻類の生産量の制御が可能⁽¹¹⁾であることから、その濃度設定は重要な課題である。

培養液かくはんは、DREAMO の自然沈降による生産阻害を抑制するうえで重要な因子である。

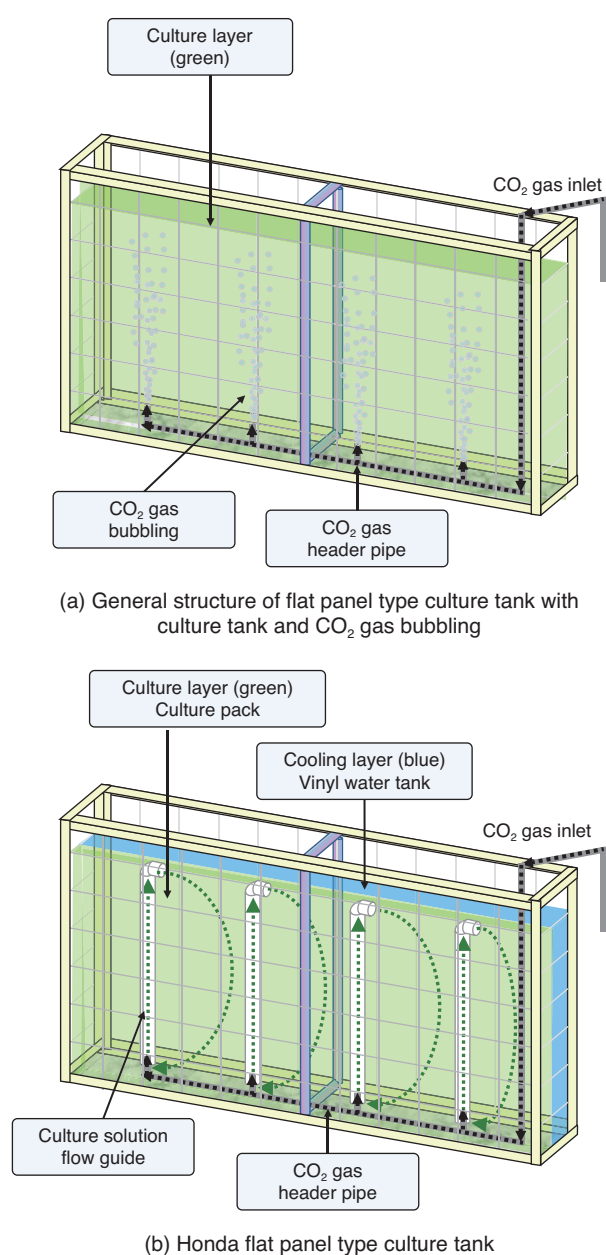


Fig. 2 Structural comparison of flat panel type culture tanks (a) and (b)

また、培養液温度は藻の生産量の減少や生態活動の低下に影響する。Fig. 4 の1週間あたりの生産量の試験結果から、DREAMO の至適温度は 20 [°C] から 35 [°C] であり、成長阻害が生じない限界温度が 40 [°C] であること、低温域は 10 [°C] 以下で生産量が低下することが明らかになっている。したがって安定した培養をするためには 10 [°C] から 35 [°C] の範囲で培養液温度を制御することが課題である。

光合成反応のエネルギー源である光は、強度を強めることは容易ではないため、多くの光量を藻にあてる検討が重要である。

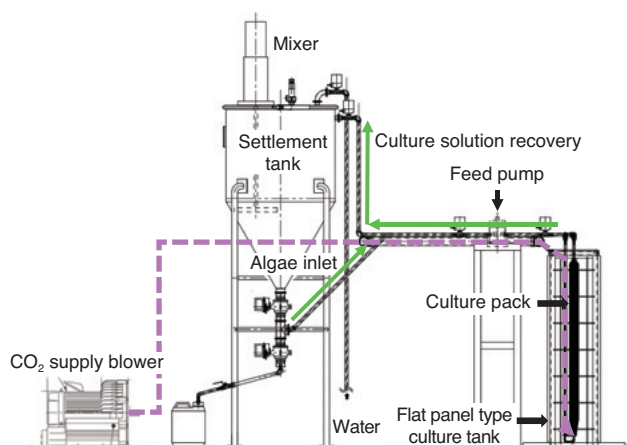
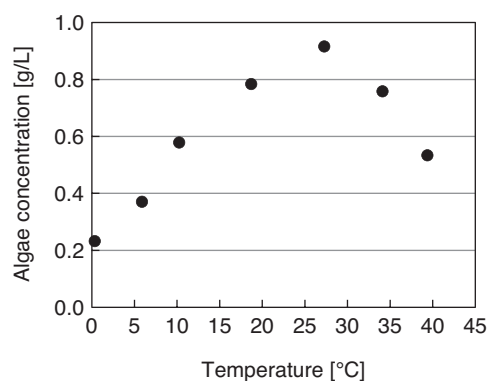

 Fig. 3 Ancillary equipment for harvesting and CO₂ supplying


Fig. 4 Temperature dependence of DREAMO production

3. 開発のねらい

本研究では、独自開発した DREAMO とフラットパネル式培養槽を用いて下記項目を検討した。

- (1) 微細藻類培養条件 (栄養塩割合および培養液かくはん速度) の検討
- (2) 温度制御と入射光量最大化が可能となる培養槽構造の検討

バイオエタノールはコーン、サトウキビを原料とすることが主流である。サトウキビ由来のエタノールはコーンに対して作付面積あたり 3 倍⁽¹²⁾の生産能力を持ち、高効率であることが知られている。そこで本研究は、サトウキビ由来のエタノール生産量 $11.2 \text{ [m}^3/\text{ha/year}]$ ⁽¹²⁾と同等の効率となる微細藻類量 $10.0 \text{ [g/m}^2/\text{day}]$ (占有面積換算)を目標値とした。

4. 微細藻類培養条件の検討

4.1. 栄養塩の検討

微細藻類培養における重要な栄養素として窒素 (N)、リン (P)、カリウム (K) などの元素が挙げられる。P は代謝反応のエネルギーとされる Adenosine Tri-Phosphate (ATP) として利用され、K などのミネラルは細胞内の化学反応を補う働きがあり、代謝反応に重要な位置付けである。一方で、細胞を構成する重要成分である N は、既に適正化した培地⁽⁷⁾を調整している。本研究では DREAMO 培養に適した P、K 濃度について検討をおこなった。

ベースとする培養液成分を Table 2 に示す。P、K はリン酸塩培地で構成されるため、P/K 比率は変更せずに、リン酸カリウム濃度を水準として DREAMO 生産量が最大となる P、K 濃度の見極めをおこなった。本試験条件と試験結果をそれぞれ Table 3、Fig. 5 に示す。リン酸カリウムが $2,000 \text{ [ppm]}$ 以下においては、リン酸カリウム濃度の低下とともに、生産量が減少する。一方で、リン酸カリウム濃度 $2,000 \text{ [ppm]}$ 以上では生産量が横ばいとなるため、リン酸カリウム濃度 $2,000 \text{ [ppm]}$ を下限値として設定した。

4.2. 培養液のかくはん条件の検討

DREAMO 生産に適した培養液のかくはんについて、培養液の流れ場流速を指標に検討をおこなった。流れ場流速の要件は DREAMO 生産効率の指標である、光合成効率 (Photosynthesis efficiency: PE) と、流れ場流速の関係から設定する。PE は式 (1) に示すように、DREAMO 生産量のエネルギー換算値と、培養期間中に受けた光量との割合と定義する。

$$\text{PE [\%]} = \frac{\text{DREAMO 生産量 [MJ/m}^2/\text{day}]}{\text{光合成有効光エネルギー [MJ/m}^2/\text{day}]}$$

Table 2 Nutrient components of culture solution

Stock liquid	Chemical formula
UREA	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Phosphate	K_2HPO_4
	KH_2PO_4
Hutner's trace elements	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	H_3BO_3
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Table 3 Typical conditions for lab-scale DREAMO culture

Factor	Unit	Value
Water temperature	[°C]	28
Incident light	[mol/day]	16
Light irradiation time	[hour-light / hour-dark]	10 / 14
Air-CO ₂ mixed gas airflow	[vvm]	0.15
CO ₂ concentration	[%]	5
Amount of culture medium	[L]	2

培養液のかくはん性向上は、自然沈降を抑制し DREAMO の生産阻害を抑制することを目的としている。目標の藻生産量を達成するために、PE の改善効果を各実施項目に割り付けた結果、かくはんによる PE 改善は 3.2% あればよいことがわかった。

培養液の流れ場流速の可視定量化は粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV 法) を用いた。測定は Fig. 6 の写真に示すかくはんガイド (a) を組付けた培養容器 (b) を用いて培養槽を模擬した測定をおこなった。培養液中に DREAMO 同等の比重及びサイズのトレーサー粒子を用いておこなった。測定においては、ガス通気をおこない、トレーサー粒子のかくはんをおこなった。高速度カメラ

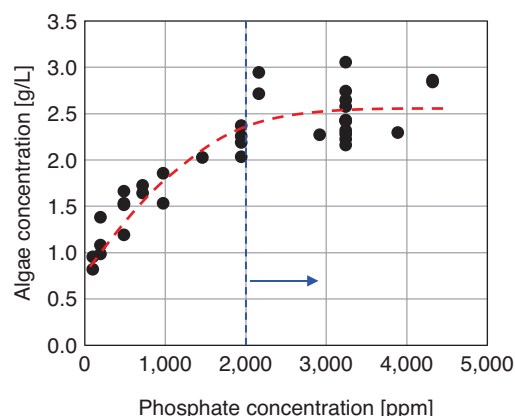


Fig. 5 Phosphate dependence of DREAMO production

ラを用いて、X 軸、Z 軸方向の粒子の速度測定をおこなった。水位による気泡拡散性の影響による、容器中の流速ばらつきを想定し、Fig. 7 の赤い四角で囲んだように高さ方向3カ所で測定を実施した。

以上の測定によって得た培養容器中の平均流速と、PE改善しとの関係を、Fig. 8 に示す。必要流れ場流速は0.02 [m/sec] 以上であれば、PE が3.2 [%] 以上改善されることを確認した。

次に、流れ場流速が0.02 [m/sec] を要件として培養液のかくはん構造について検討をおこなった。

Fig. 9 に示す (a), (b) の二種類のガイド形状の検討をおこなった。両案ともに、培養パック底部からかくはんガイド内にガス供給をおこない、かくはんガイド中に上昇速度を付け培養液に流れを作る。形状 (a) は培養槽設置面に対して垂直にガスと液体が吐出される構造である。本構造は、設置するかくはんガイドを中心に左右方向にそれぞれ流れを作り出すことを狙いとしている。形状 (b) は、一方方向に液とガスを吐出する構造とした。これは、流れを一方方向にすることで流速を強めることを狙いとした。

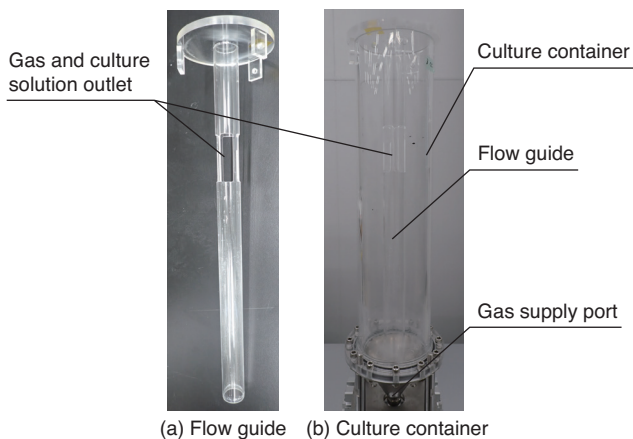


Fig. 6 Simulated culture tank test container

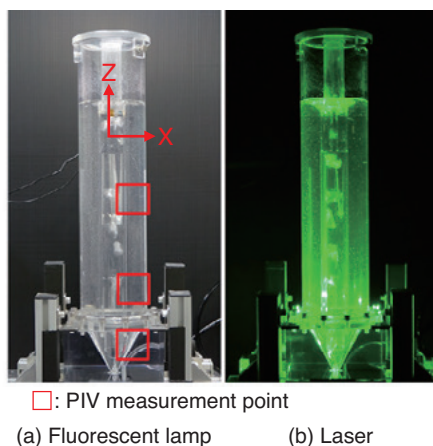


Fig. 7 Flow velocity measurement by (a) and (b)

かくはんガイド形状 (a), (b) を用いた時の流れ場流速について、Ansys 社製の Fluent を用いて数値流体計算 (CFD) により予測をおこなった。本シミュレーションは、PIV 法によって得られたガス供給を動力としたエアリフトによる培養液の体積力と藻の比重及びサイズ同等の粒子分散性を反映した培養槽全体の流れ場を予測するものである。

ガイド形状 (a), (b) のシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。エアリフトによってかくはんガイド内の流速は

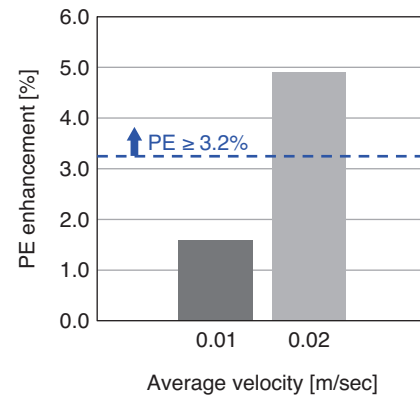


Fig. 8 Relationship between flow velocity and PE

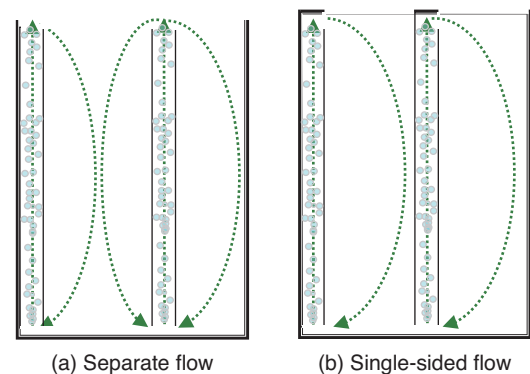


Fig. 9 Guide shape designs to make flows (a) and (b) in culture tank perpendicular to gas exhaust port

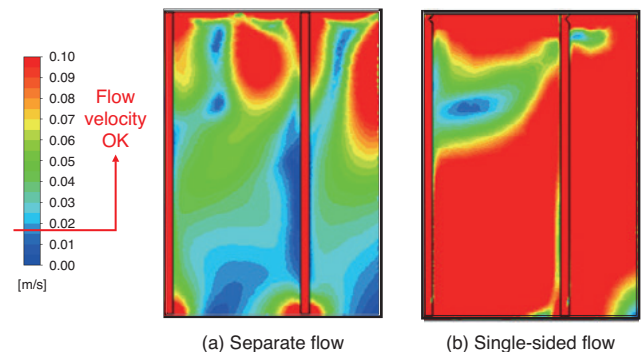


Fig. 10 Results of culture fluid flow simulations for guide shape effect

0.10 [m/sec] 以上となる。形状 (a) では、その流速が維持できる位置はかくはんガイドのガス吐出口周辺のみであり、培養パック底面周辺とガイド背面の流速は極めて低くなることが分かった。一方で、形状 (b) は培養パック全体で流速が維持できることが分かった。これは、かくはんガイドの水、ガス吐出口を一方向にしたことで、エアリフトによる流速が分散せず、減速することなくかくはんした結果と考えられる。以上の結果より、かくはんガイド形状は形状 (b) を採用した。

5. 培養槽構造の検討

5.1. 断熱層構造による温度保持

DREAMO の培養管理温度は 10 [°C] から 35 [°C] であることが明らかになっており、管理温度範囲内で制御可能な培養槽の構造について検討した。

フラットパネル式培養槽の培養液温度性能を Fig. 11 に示す。本試験は、夏季検証として国内の日射量、外気温が高い沖縄と冬季は氷点下に達する北関東で実施した。

夏季においては管理温度の上限値 35 [°C] 以下となることが確認された。一方で、低温側では管理温度との差が大きい。そこで、太陽エネルギーを活用して培養液温度を上げる装置構造を検討した。

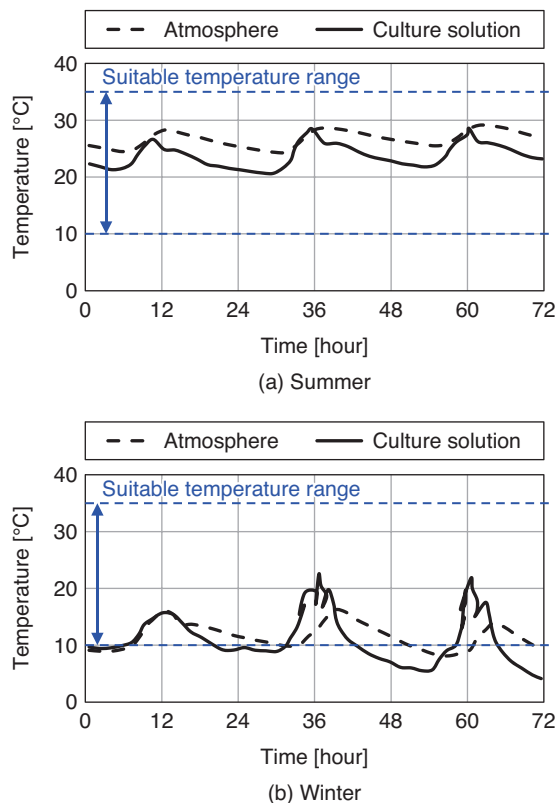


Fig. 11 Temperatures of culture tank culture solution and ambient air measured in summer and winter

手法は Fig. 12 に示すように培養槽周囲に断熱層を設け培養液温度を保持する構造とした。

断熱効果について、国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構で開示される日射量⁽¹³⁾及び外気温⁽¹⁴⁾データを用い、培養液年間温度を算出⁽¹⁵⁾した。培養液温度の変化は、太陽エネルギーによる入熱量と各時間における空気、地面への放熱量を反映しておこなった。なお、外気への放熱率など一部係数は屋外に培養槽を設置し測定した数値を反映している。

年間予測培養液温度を Fig. 13 に示す。10 月から 3 月は断熱構造を付帯し、4 月から 9 月は断熱構造を取り外すことで、年間を通じて管理温度範囲に制御可能な見通しが得られた。

5.2. 入射光量を増大させた培養槽構造

光合成反応のエネルギー源である光の入射量を増大させる培養槽構造を検討した。

光量の要件は、目標とする DREAMO 生産量から算出した必要光量を 20 [mol/day] 以上と設定した。

太陽光エネルギーを DREAMO が受光するまでの入射経

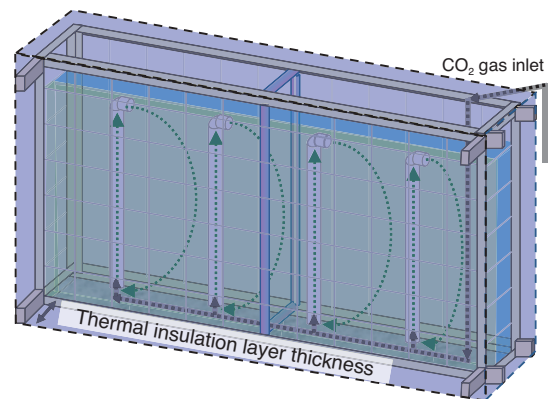


Fig. 12 Schematic representation of flat panel culture tank with heat insulating layer

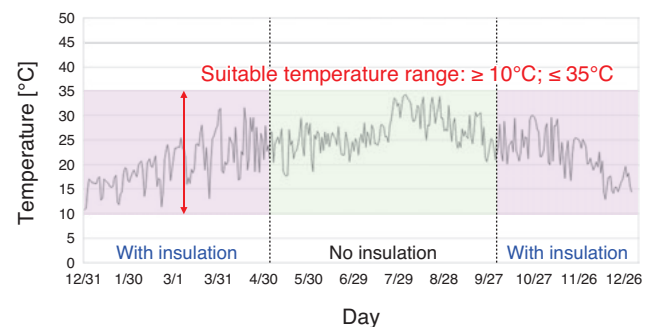


Fig. 13 Estimated annual temperatures of culture solution in North Kanto region with thermal insulation for winter period considered

路と光損失を Fig. 14 に示す。光量は培養槽を設置する面積と培養槽高さで決まる。また、各培養槽に均一な光を入射させるために、培養槽を等間隔（以下、離隔距離）で配置した。本検討では離隔距離一定を前提条件とした。検討構造案は Fig. 15 で示すように、培養槽にリフレクターを設

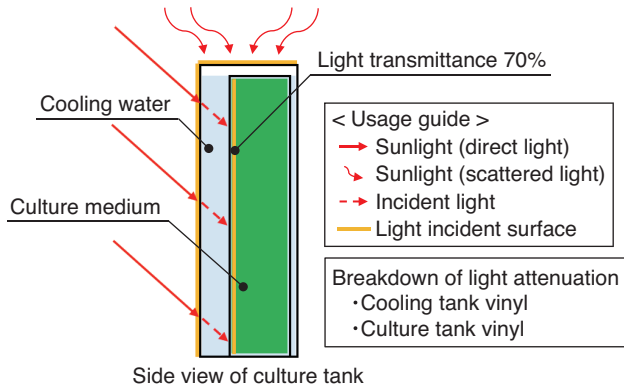


Fig. 14 Schematic representation of light loss caused by culture medium and culture tank structure

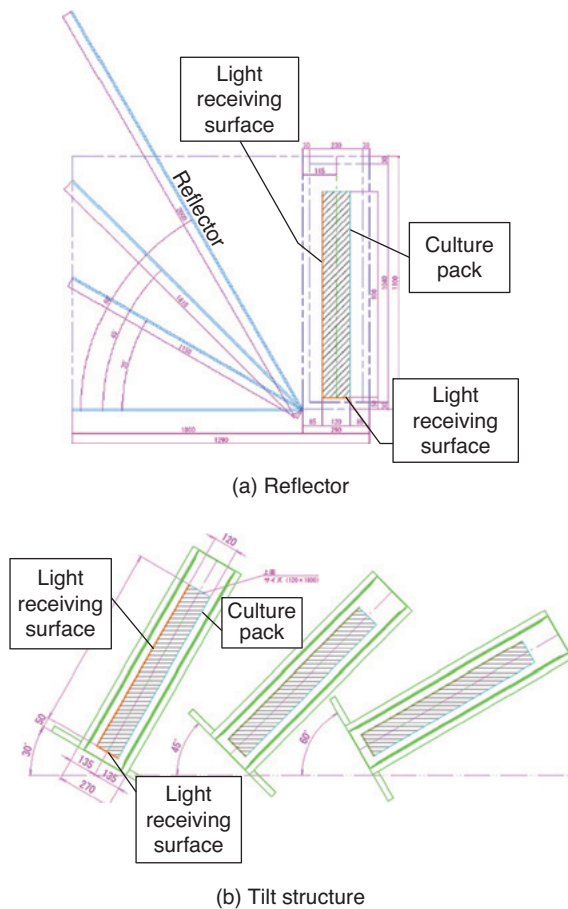


Fig. 15 Schematic representation of simulation models used for estimation of effects of (a) and (b) on flat panel photobioreactor

Table 4 Basic shape, light source, and incident light conditions for simulation model

Factor	Unit	Value
Simulation software	[-]	Zemax OpticStudio
Housing conditions		
Housing size	[mm]	L 1,800 × W 210 × H 1,000
Separation distance	[mm]	1,000
Light loss conditions		
Light transmittance	[%]	72.3
Solar conditions		
Light source	[Sun] (W/m ²)	1 (1,000)
Direct light	[%]	70
Scattered light	[%]	30

置する構造 (a) と培養槽を傾斜設置（以下、チルト）した構造 (b) の二案について検討をおこなった。

構造 (a) はリフレクターを培養槽前面（南面）に付帯し、離隔距離内に入射する光を反射によって培養槽へ入射させる構造である。構造 (b) は培養槽そのものをチルト化し培養槽への光取込効率向上を狙った構造となる。いずれの構造も角度水準 30 [°], 45 [°], 60 [°] とした。

培養槽構造ごとの光量検討は光シミュレーションによりおこなった。Zemax 社製の OpticStudio を用い、設置する培養槽に対して季節に応じた太陽高度及び日の出から日の入りまで 1 日当たりの時間変化による太陽軌道を反映し、培養パック表面に入射する光量を予測している。本検討におけるシミュレーション条件を Table 4 と Fig. 16 に示す。光源は太陽電池の性能評価規格で用いられる 1 Sun としている。なお、培養槽設置地域は栃木県宇都宮市を想定し太陽高度 / 方位は季節、時間影響⁽¹⁶⁾を反映した。

構造 (a), (b) について、実施したシミュレーション結果を Fig. 17 に示す。培養槽そのものに傾斜をつけて設置するチルト構造 45 [°] 条件が最も光量が得られ、目標である 20 [mol/day] を超えることが分かった。

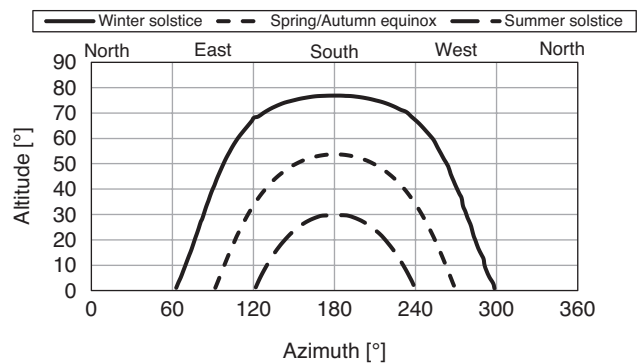


Fig. 16 Sun orientation and altitude used for optical simulations for spring and autumn, summer, and winter conditions

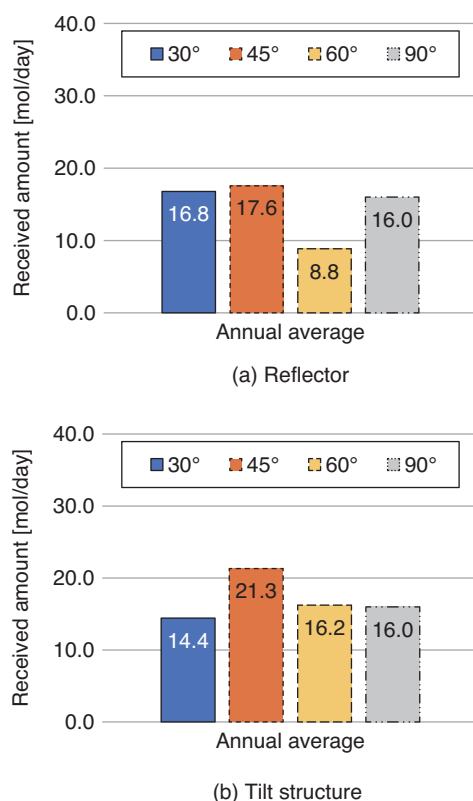


Fig. 17 Estimation of effects of (a) and (b) to enhance incident light on culture tank surface

6. DREAMO 生産量の向上結果

栄養塩成分濃度の適正化、培養液のかくはんガイド構造の検討結果を反映し、Fig. 18 のように DREAMO の屋外培養を栃木県にて実施した。本試験結果から算出した年間平均生産量 (a) および、断熱構造とチルト構造の効果を含めた場合の年間平均生産量の推定値 (b) を Fig. 19 に示す。設定した培養条件では、8.6 [g/m²/day] の生産量が得られた。さらに先述した検証結果より、培養槽の断熱層構造による培養管理温度の範囲にすることと、チルト構造



Fig. 18 Flat panel photobioreactors placed outdoors

による培養槽への光取込み量を増加させることで目標の 10.0 [g/m²/day] を上回る、13.5 [g/m²/day] の生産量が得られる見通しが立った。

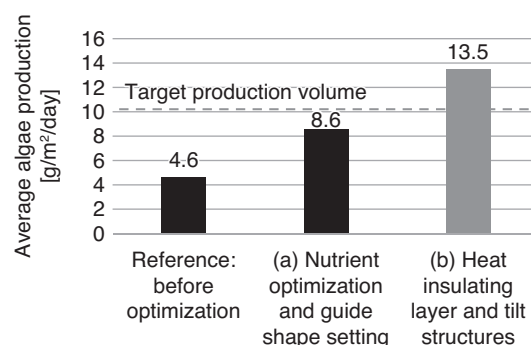


Fig. 19 Results of annual production of DREAMO estimated from outdoor experiments and public climate database

7. まとめ

屋外安定大量培養技術の構築を目的に、DREAMO とフラットパネル式培養槽を用いて、培養条件適正化と培養槽構造の適正化の検討をおこない以下の結果が得られた。

(1) 培養条件においては、栄養塩成分である P, K 濃度の適正化により生産量を向上させた。

また、培養液の流れ場流速を 0.02 [m/sec] 以上とし、一方向に液とガスを吐出するかくはんガイド形状を採用することで、効率を向上させ生産量を増加させた。

(2) 断熱層構造により、栃木県においても培養槽の温度が、年間を通じて管理範囲内に制御できることを検証した。このことにより DREAMO の成長が阻害されることなく培養できることを確認した。また、培養槽を 45 [°] チルト設置することにより、入射する光量を増大することができた。

以上の知見と培養槽構造を反映した屋外培養試験から生産量 13.5 [g/m²/day] の見通しが得られた。

DREAMO はカーボンニュートラル燃料であるサトウキビ由来のバイオエタノールと同等以上の作付面積当たりのエタノール生産量を達成する可能性が示された。

参考文献

- (1) 経済産業省: カーボンリサイクル技術ロードマップ, p. 2, (2019)
- (2) <https://www.intechopen.com/books/photosynthesis/bioenergy>
- (3) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 2 章 藻

- 類の産業利用の現状と展望, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 106-203, (2020)
- (4) 特願 2011-538386
- (5) de Vree, J. H., Bosma, R., Janssen, M., Barbosa, M. J., Wijffels, R. H.: Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors, *Biotechnology for Biofuels*, p. 6, (2015)
- (6) 特願 2018-523549
- (7) 福島のぞみ, 木下翔平, 町田賢司, 後藤稔, 塩崎諭, 土肥瑞穂: *Chlamydomonas* 変異株 (Honda DREAMO 株) の機能性と連続培養特性, *藻類*, 第 70 巻, 第 1 号, p. 72, (2022)
- (8) Gifuni, I., Olivieri, G., Pollio, A., Franco, T. T., Marzocchella, A.: Autotrophic starch production by *Chlamydomonas* species, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 29, Issue 1, p. 105-114, (2017)
- (9) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 3 章 ビジネス応用に向けた藻類の培養と生産, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 209-232, (2020)
- (10) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 3 章 ビジネス応用に向けた藻類の培養と生産, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 280-287, (2020)
- (11) Brányiková, I., Maršáľková, B., Doucha, J., Brányik, T., Bišová, K., Zachleder, V., Vítová, M.: Microalgae—Novel Highly Efficient Starch Producers, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 108, Issue 4, p. 766-776, (2010)
- (12) https://ecen.com/eee59/eee59e/sugarcane_the_best_alternative_for_converting_solar_and_fossil_energy_into_ethanol.htm
- (13) <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html>
- (14) <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/metpv.html?p=41277>
- (15) D. ハリディ, R. レスニック, J. ウォーカー, 野崎光昭 監訳: 物理学の基礎 [2] 波・熱, 株式会社培風館, p. 121-133, (2002)
- (16) <http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/etc/HP/js/sunShineAngle/ssa.html>

■ 著 者 ■



木下 翔 平



福島のぞみ



土肥 瑞 穂



後 藤 稔