

チューブ型フォトバイオリアクターによる微細藻類の屋内 連続培養とCO₂固定性能の評価※

嶋原 亜土・三宅 友香・増田 正夫

Evaluation of Indoor Continuous Cultivation and CO₂ Fixation Performance of Microalgae using Tube-type Photobioreactor

Ado Shigihara・Tomoka Miyake・Masao Masuda

建築物居室におけるCO₂濃度の上昇は在室者の認知機能を低下させる要因であり、その抑制技術の高度化が求められている。本研究では高い光合成能を有する微細藻類を用いた屋内設置用チューブ型フォトバイオリアクター(TPBR)を構築し、CO₂固定性能および培養特性を総合的に評価した。屋内環境下で得られたデータの解析により、TPBRのCO₂除去効率は65~97%、CO₂固定速度は0.33~0.48 g L⁻¹ d⁻¹と高い固定性能を示した。循環流量の増加は光環境と物質移動を改善し、比増殖速度の向上および倍加時間の短縮に寄与した。一方、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を低下させ、比増殖速度の律速要因として作用した。また、溶存CO₂濃度は光合成応答の変化を適切に捉え、運転状況の最適化の指標として有用であることが示された。さらに、TPBRは機能性のみならず視覚的な訴求性も備えており、環境インスタレーションとして建築空間への導入可能性が高いことが展示評価から確認できた。

1. はじめに

建物居室における温度・湿度、騒音、照度および空気清浄度は、在室者の健康および快適性に直接的な影響をおよぼす主要な環境要因である。特に空気清浄度は、室内環境の健全性を評価する上で代表的な指標であり、在室者の健康状態や快適性に直結する。これを維持するためには、汚染物質の発生源を制御することに加え、適切な換気によって室内空気を外気と入れ替えることが不可欠である。換気は、室内の二酸化炭素(CO₂)や揮発性有機化合物(VOCs)、微粒子状物質(PM)などを希釈・排出する手段であり、空気清浄度の維持において中心的な役割を果たす。なかでもCO₂濃度は換気状態の評価に用いられる主要な環境評価項目であり、その基準値は「建築物における衛生的環境の確保に関する法律(建築物衛生法、1970年公布)」により1,000ppm以下と定められている^{1,2)}。この環境を保つのに必要な換気量の算出は、大気中のCO₂濃度と人の代謝により体外に放出されるCO₂量を基に行われている³⁾。温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)が開示しているデータによれば、2023年時点における大気中CO₂の世界平均濃度は約420ppmであり、産業革命前に280ppm程度であったCO₂濃度は現在年間2ppm以上の速度で増加している⁴⁾。一方、人体の呼気に含まれるCO₂濃度は、身体活動の程度に応じて変動する。例えば、換気を行わずに軽作業を実施した場合、室内のCO₂濃度は約40,000ppmに達することが報告されており、これは先の大気中CO₂濃度の約100倍に相当する⁵⁾。このため、多くの人々が集う会議室のような気密性の高い空間において適切な換気量が設定されていなければ、建物居室内のCO₂濃度は容易に基準値を超過する。CO₂濃度が1,000ppmを超過すると、倦怠感や頭

※本論文は、日本農芸化学会 2025 年度大会講演論文を加筆修正したものである。

痛、集中力の低下などの症状が現れることがこれまで多数報告されており、これにより在室者の業務パフォーマンスなどに著しく影響をおよぼす可能性がある⁶⁻⁸⁾。厚生労働省が毎年度行っている特定建築物を対象とした立ち入り調査の集計結果によれば、室内のCO₂濃度が基準値を超過した割合(不適率)は、1992年度から2017年度にかけて断続的に上昇傾向を示し、最大で27.7%に達した。特に学校や事務所では、不適率が他の用途に比べて高い傾向にあったが、新型コロナウイルス感染症の流行を契機に感染症対策の一環として換気を積極的に行うようになったこともあり、近年では減少傾向に転じている⁹⁾。高气密建築や省エネルギー設計が進む現代では、居室内のCO₂濃度の適切な管理が健康維持と快適性確保の観点から不可欠となっている。

一方で、換気量の増大は空調機のエネルギー消費量の増大に直結することから、大気中や居室空間のCO₂濃度の低減を目的とした回収・固定技術の開発が進められている。これらの技術には、物理化学的手法(固体材料を用いた吸着¹⁰⁾、アミン溶液による化学吸収¹¹⁾)に加え、生物学的手法として高等植物¹²⁾ やバイオフィリアクターを用いた微細藻類による光合成固定¹³⁾が採用されている。特に微細藻類は、陸上植物と比較して約10~50倍のCO₂固定能を有することが知られており¹⁴⁾、光合成反応により生成される炭水化物は、近年では農業分野の肥料用途から食品分野(サプリメント等)、さらにはバイオオイルを介した熱・電力変換プロセスまで幅広く活用されている。また、CO₂固定に伴って生成される酸素(O₂)を含む空気は、換気用途としての利用が可能である。例えば、エアハンドリングユニット(AHU)を介して建物居室に導入することで、室内空気質の改善に寄与し得る¹⁵⁾。このため、建物居室空気由来のCO₂を高効率に回収・濃縮し、それを微細藻類を用いた生物固定システム(フォトバイオフィリアクター)へ供給することで、O₂リッチかつ低CO₂濃度の空間を創出できれば、環境配慮型社会に資する新たな資源循環システムとなる可能性がある(図1)。さらに、フォトバイオフィリアクターは先端的な生物工学的機能を備えると同時に、都市空間における視覚的・環境調和的な付加価値を提供する「環境インスタレーション」として機能し得る点が特徴である。特に、微細藻類に由来する色彩動態と光の制御技術を組み合わせることで、居住者の心理的安定や癒し効果を誘発するこ

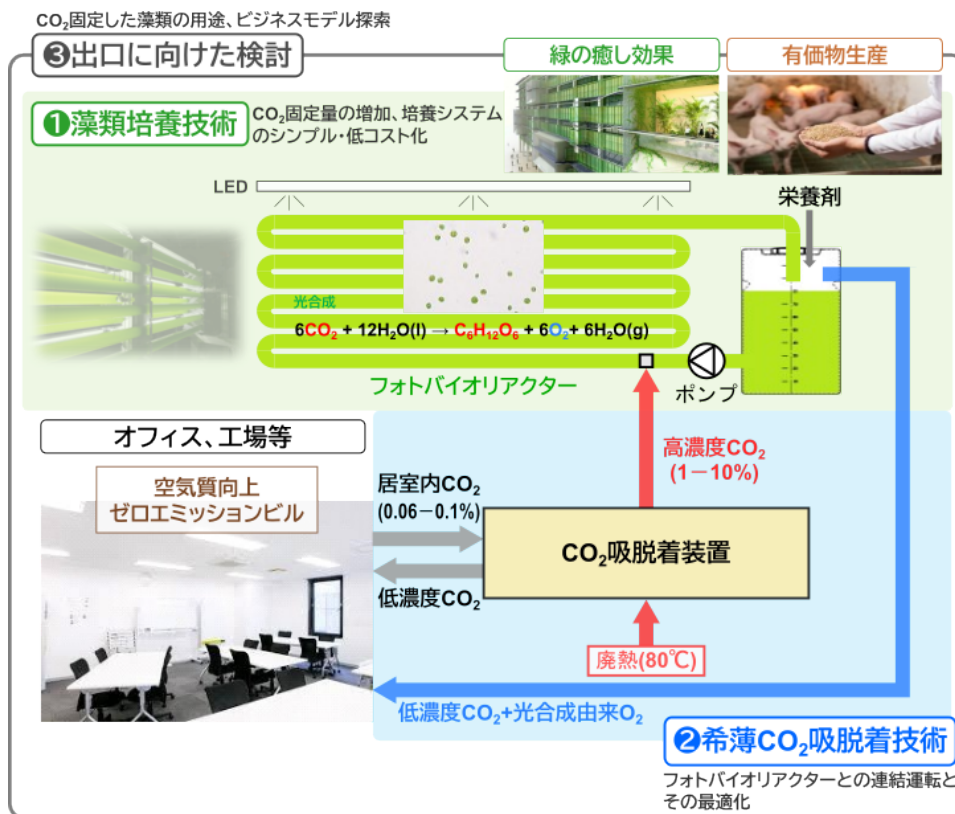


図1 システム概要図

とが期待され、Well-beingを志向した都市空間設計や室内インテリアに対して新たな価値を提供し得る。

本研究は、オフィス労働者の生産性およびウェルネスの向上と、カーボンニュートラルの達成を同時に実現する建築設備の開発を最終目的としている。現状における主要な技術課題としては、以下の三点が挙げられる。すなわち、(i)CO₂固定量の増大と培養システムの簡素化・低コスト化を目指した藻類培養技術の高度化、(ii)CO₂吸脱着装置とフォトバイオリアクターを連結運転するための希薄CO₂吸脱着技術の確立、(iii)CO₂を固定した藻類バイオマスの用途開拓および事業性を見据えた出口戦略の構築である。課題(i)に関して、前報では屋外(温室)に設置したチューブ型フォトバイオリアクター(TPBR)と高温耐性微細藻類を用いてCO₂固定実験を実施し、3か月にわたる長期連続培養を達成したことを報告した¹⁶⁾。しかし、当該実験は温湿度・光環境・培養液水温に対する積極的な制御を行わず、太陽光の明暗サイクルおよび気象条件に依存した自然変動下で運転したため、微細藻類の倍加時間およびCO₂固定速度は日々大きく変動し、安定した成長特性を得るには至らなかった。

上記課題を踏まえ、環境条件をより精密に制御可能な屋内培養へと移行し、屋外培養で顕在化した変動要因の排除を図った。屋内環境では、光強度・光スペクトル・明暗周期を任意に設定できるほか、培養液水温やCO₂給気量を高精度に制御することが可能となる。これにより、微細藻類の成長特性に影響を及ぼす因子を個別に評価できるだけでなく、倍加時間およびCO₂固定速度の変動要因を低減し、より安定的な成長特性の把握が可能となる。さらに、開発を進めているTPBRは、課題(iii)に関連して環境インスタレーションとしての利用も想定している。そのため、外観意匠への配慮、光環境への影響評価、室内空気質および心理的效果といった建築環境工学的観点からの検討も必要となる。したがって、屋内培養条件の確立は、微細藻類の成長管理の高度化に資するだけでなく、建築空間と調和する装置開発の基盤技術としても重要である。

本報では屋内設置用TPBRの開発に必要な基礎データを取得することを目的として、微細藻類の連続培養実験を実施し、気相CO₂濃度や溶存酸素(DO)濃度、溶存CO₂濃度、濁度、光量およびpHのリアルタイム計測結果から成長速度およびCO₂固定速度などを算出・評価した結果について報告する。また、環境インスタレーションとしての可能性を広く紹介する目的で、2025年5月に開催された葉山芸術祭(神奈川県葉山町)においてTPBRの写真パネル等の展示を行ったので、その概要についても併せて報告する。

2. 試料と方法

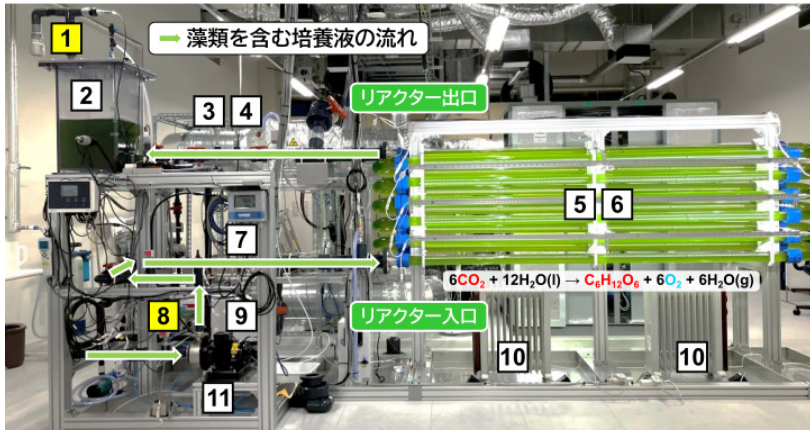
2.1 微細藻類株

供試微細藻類には、野外からの大規模探索により単離された*Chlorella sp.*株を採用した。本株は多様な環境条件下での培養が可能であり、かつ高効率にCO₂を生物固定する能力を有する。また、光補償点が低く、強光照射を必要としない特性も有しているため、低照度環境下でも安定した光合成活性を維持できる。CO₂固定化実験に必要な量の藻類培養液を確保するため、種藻の培養はオートクレーブにより滅菌処理したMC+培地(窒素、リン、硫黄およびマグネシウムを主成分とする緑藻の増殖に特化した培地)¹⁷⁾を用いて行い、LED照射下で滅菌フィルターを介した空気を供給しながら段階的にアップスケーリングした。

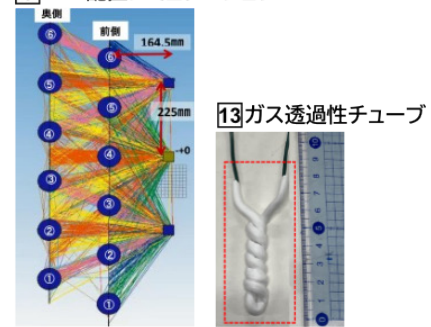
2.2 TPBRの製作

微細藻類の培養方法は、開放型であるオープンボンド方式やレースウェイ方式および閉鎖型である管状方式に大別され、各方式に基づくシステム設計に関する研究開発が進められている¹⁸⁾⁻²⁰⁾。開放型システムは、閉鎖型システムと比較してコスト面や運用管理面で優位性を有している。その一方で、培養可能な藻種が限定されることや雑菌などの混入といったコンタミネーションリスクが高いこと、さらに曝気方式では供給したCO₂の約99%が大気中に放出されるため²¹⁾、CO₂利用効率が低いといった課題も存在する。現在開発しているTPBRは閉鎖型藻類培養システムの一つで、外来微生物によるコンタミネーションリスクや培養液の蒸散損失を大幅に低減できる点が特長である。また、都市部や屋内空間など設置面積に制約のある環境においても高い適性を有している。

入口 出口
8と**1**の気相CO₂濃度差: CO₂固定量に比例



6 LED配置シミュレーション



- | | | | | |
|--|--|-----------------|--|--|
| 1 排気
CO ₂ 濃度計 (CO ₂ -outlet) | 2 膨張タンク
濁度計、水位計 | 3 培養液水温計 | 4 7 溶存酸素濃度計
4: DO-outlet. 7: DO-inlet | 5 フォトバイリアクター
ガラス管全長 (体積): 34 m (100 L) |
| 6 高効率白色LED
24 h連続照射 | 8 CO ₂ / Air給気
CO ₂ 濃度計 (CO ₂ -inlet) | 9 栄養剤タンク | 10 オイルヒーター | 11 循環ポンプ |
| 12 pH計 | 13 溶存CO ₂ 濃度計 | | | |

図 2 屋内設置用 TPBR の構成

製作した屋内設置用 TPBR(培養液体積: 約 100 L)は、主に多段式ガラス管(外径: 65 mm、長さ: 34 m)、循環ポンプ、栄養剤タンクおよび膨張タンクから構成されており、高砂熱学イノベーションセンターのラボ棟居室内に設置した(図 2)。光源には、電力使用量が少なく植物工場において広く利用されている高発光効率型白色 LED を採用した。照度分布のシミュレーション結果に基づき、これらの LED をガラス管と平行に配置し、24 h 連続照射を行った。実験期間中の培養液水温は、主に室内空調、LED 発光熱、さらにガラス管下部に廃熱を模擬して設置したオイルヒーターからの熱供給に依存し、特別な温度制御は行わなかった。培養状況を監視するため、培養液流路および膨張タンクには図 2 に示す各種センサーを配置した。これらのセンサーから取得した連続データはプログラマブル・ロジック・コントローラー(PLC)により収集・記録され、制御プログラムに基づき培養から収穫(TPBR から培養した微細藻類を排出する工程)までのサイクル運転を自動的に繰り返し実施できるシステム構成とした。また、長運転においては、活性の低下した細胞や死細胞が核となり、ガラス管内壁面にバイオフィームが形成される傾向がある²²⁾。このバイオフィームは管内への光透過を著しく阻害し、結果として光合成活性の低下を介して微細藻類の増殖速度を減衰させる。このような問題に対処するため、TPBR にはスポンジボールを用いた管内洗浄機構を導入した。スポンジボールは流体の圧力を利用して管内を移動しながら、内壁面に付着したバイオフィームや堆積物を物理的に除去することが可能である。この洗浄機構の実装により、ガラス管部の光透過性が維持され、培養環境の長期安定化が図られている。

2.3 TPBR による微細藻類の培養

TPBR と微細藻類によるCO₂固定化実験は、2024 年 10 月から 2025 年 3 月にかけて実施した。培養システムの運転開始に先立ち、2.1 項で述べた種藻を所定の初期濁度となるよう純水とともに TPBR 内へ投入し、さらにホウ素や鉄などの必須微量元素を含む液肥(窒素:リン:カリウム=6:10:5)を添加して培養液とした。培養期間中は、建物居室空気からのCO₂回収・濃縮を想定した約 2.5%(v/v)のCO₂-空気混合ガス(入口側気相CO₂濃度: CO₂-inlet)を連続的に供給した。あわせて、培養液のpH、溶存酸素濃度(入口: DO-inlet

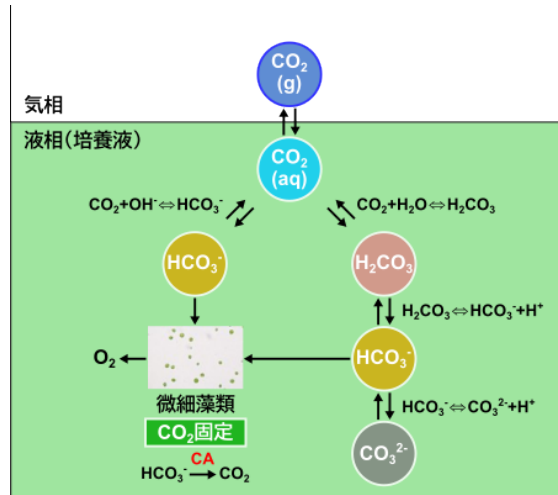


図3 微細藻類培養系におけるCO₂の気液移行と無機炭素種の化学平衡モデル

／出口：DO-outlet)、溶存CO₂濃度、濁度(微細藻類の増殖指標)、水温および光量、さらに膨張タンクから排出されるガスのCO₂濃度(出口側気相CO₂濃度：CO₂-outlet)を連続的に測定した。取得したこれらのデータは、培養条件の最適化に加え、後述する溶存CO₂濃度の算出およびCO₂固定化効率の評価に関する基礎情報として活用した。

2.4 溶存CO₂濃度の測定

微細藻類の光合成反応においては、培養液中に溶解しているCO₂、いわゆる溶存CO₂(CO₂(aq))が炭素固定の基質として利用される(図3)。TPBRへ供給されるCO₂ガスの濃度および流量はあくまで供給条件を示す指標に過ぎず、実際に微細藻類が利用可能な炭素量はCO₂(aq)濃度によって規定される。

CO₂(aq)は水和反応を介して炭酸(H₂CO₃)および重炭酸イオン(HCO₃⁻)と平衡関係にあり、培養液のpHに応じて無機炭素種の分布が変化する。微細藻類はCO₂(aq)の拡散的取り込みに加え、HCO₃⁻の能動輸送(炭素濃縮機構、CCM)によりその細胞内へ無機炭素を取り込むが、いずれも最終的には炭酸脱水酵素(CA)の作用によってCO₂に変換され、Rubiscoによるカルボキシル化反応に供給される²³⁾。溶存CO₂が不足すると光合成速度が律速となり、バイオマス生成速度の低下に加え、過剰光条件下では光阻害の発生リスクが増大する。そのため、CO₂供給量の調整のみでは光合成の実態を適切に評価することはできず、培養液中のCO₂(aq)濃度のリアルタイム測定が不可欠となる。

一般的に、CO₂(aq)濃度の測定手法としては、炭酸系化学平衡に基づく計算により間接的に推定する方法²⁴⁾と濃度センサーを用いて直接的に測定する方法²⁵⁾の二つが広く知られている。しかし、前者は算出に必要となる全炭酸濃度やアルカリ度を別途手分析によって求める必要があり、迅速な経時変化を把握するには適さない。一方、後者に関する取り組みとして、センサー部に気液平衡器を組み込み、気相と液相との間に気液平衡状態を形成した上で、平衡状態に達した気相中CO₂を測定する手法が開発されている²⁶⁻²⁷⁾。この方法は、測定の応答性に優れ、培養プロセスにおけるCO₂(aq)の動態をリアルタイムに評価する手段として有用である。そこで本手法を参考に、通気性撥水チューブ、エアポンプおよびCO₂濃度計を組み合わせた閉鎖回路を構築した。撥水チューブを培養液中に浸漬すると、チューブ内部の気相と培養液との間で気液平衡が成立し、内部の気相中のCO₂濃度は液相中のCO₂濃度と等しくなる。この気相CO₂を非分散赤外分析法(NDIR)センサーにより測定することで、液相側の溶存CO₂濃度の連続的な把握が可能となる。

培養液中のCO₂(aq)濃度は、気液平衡下において気相CO₂の分圧(p^*CO_2 [Pa])に比例する(ヘンリーの法則)。TPBRのガラス管部において培養液を流動させつつ気液平衡を形成し、測定により得られた気相CO₂の分圧から式(1)を用いて溶存CO₂濃度(CO₂(aq) [mol m⁻³])を算出した。

$$[CO_2]_{aq} = H \times p^*CO_2 \quad (1)$$

ここで、 H [mol m⁻³ Pa⁻¹]はヘンリー定数であり、その値は水温(T [K]、ここでは培養液の水温)の関数として知られているため、式(2)に示す経験式²⁸⁾を用いて水温補正を行った。

$$\ln H = -58.0931 + 90.5069 \times \frac{100}{T} + 22.294 \times \ln\left(\frac{T}{100}\right) \quad (2)$$

なお、CO₂濃度計の指示値は、湿潤ガス中のCO₂モル分率に基づく湿潤ガス基準の表記上のCO₂分圧(pCO_2 [Pa])であり、乾燥ガス基準の実効分圧とは異なる。したがって、ヘンリーの法則へ適用するためには、式(3)のように大気圧(P [Pa])および飽和水蒸気圧(e [Pa])を用いた補正が必要となる。

$$p^*CO_2 = (P - e) \times pCO_2 \quad (3)$$

ただし、 e は T に依存するものの、通常の培養条件(20~30°C)においては P のおよそ1~3%程度にとどまるため、補正項としての寄与は相対的に小さい。したがって、式(3)中の p^*CO_2 は下記式(4)のように、

$$p^*CO_2 \approx pCO_2 \quad (4)$$

と近似することができ、これを式(1)に代入すると

$$[CO_2]_{aq} = H \times pCO_2 \quad (5)$$

が得られる。

2.5 微細藻類の生長測定

培養液中の藻体濃度は、懸濁物質による光散乱量として測定される濁度と正の相関を示す。本研究では、この関係を利用し、濁度測定値から藻体濃度を迅速に推定する手法を採用した^{16),29)}。また、微細藻類の増殖特性を評価する上で主要なパラメータである比増殖速度(μ [h⁻¹])は、対数増殖期における藻体量の指数関数的増加を前提とし、式(6)に基づいて算出した³⁰⁾。

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{t_2 - t_1} \Leftrightarrow N_2 = N_1 e^{\mu(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

ここで、 N_1 および N_2 はそれぞれ対数増殖期における時刻 t_1 (h)および t_2 (h)における藻体濃度(g L⁻¹)である($N_2 > N_1$, $t_2 > t_1$)。さらに、上式において藻体濃度が2倍、すなわち $N_2/N_1=2$ となるのに要する時間を倍加時間(t_d [h])と定義すると、これを式(7)で表すことができる。

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (7)$$

微細藻類培養における生産性を評価するため、バイオマス生産能力($P_{Biomass}$ [g L⁻¹ d⁻¹])をその指標として用い、式(8)を用いて算出した。

$$P_{Biomass} = \frac{N_t - N_0}{t - t_0} \quad (8)$$

ここで、 N_t および N_0 はそれぞれ培養時間 t (d)および培養初期時間 t_0 (d)における藻体濃度(g L⁻¹)である。さらに、炭素固定能を評価するためのCO₂固定速度(FR_{CO_2} [g L⁻¹ d⁻¹])は、式(9)のように表すことができる³¹⁾。

$$FR_{CO_2} = P_{Biomass} \times f_c \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_c}\right) \quad (9)$$

ここで、 f_c [% (w/w)]は元素分析計で測定した藻体中の炭素含有率、 M_{CO_2} [g mol⁻¹]および M_c [g mol⁻¹]はそれぞれCO₂および炭素の分子量である。なお、微細藻類によるCO₂の利用特性を評価するため、TPBRのCO₂-inletおよびCO₂-outletを連続的に測定し、CO₂除去効率(RE_{CO_2} [%])を式(10)のように評価した³²⁾。

$$RE_{CO_2} = \left(1 - \frac{CO_{2-outlet}}{CO_{2-inlet}}\right) \times 100 \quad (10)$$

3. 結果と考察

3.1 微細藻類の生長およびCO₂固定

図4に、微細藻類の培養期間中に連続取得した各種モニタリング項目の経時変化の一例を示す。本検討

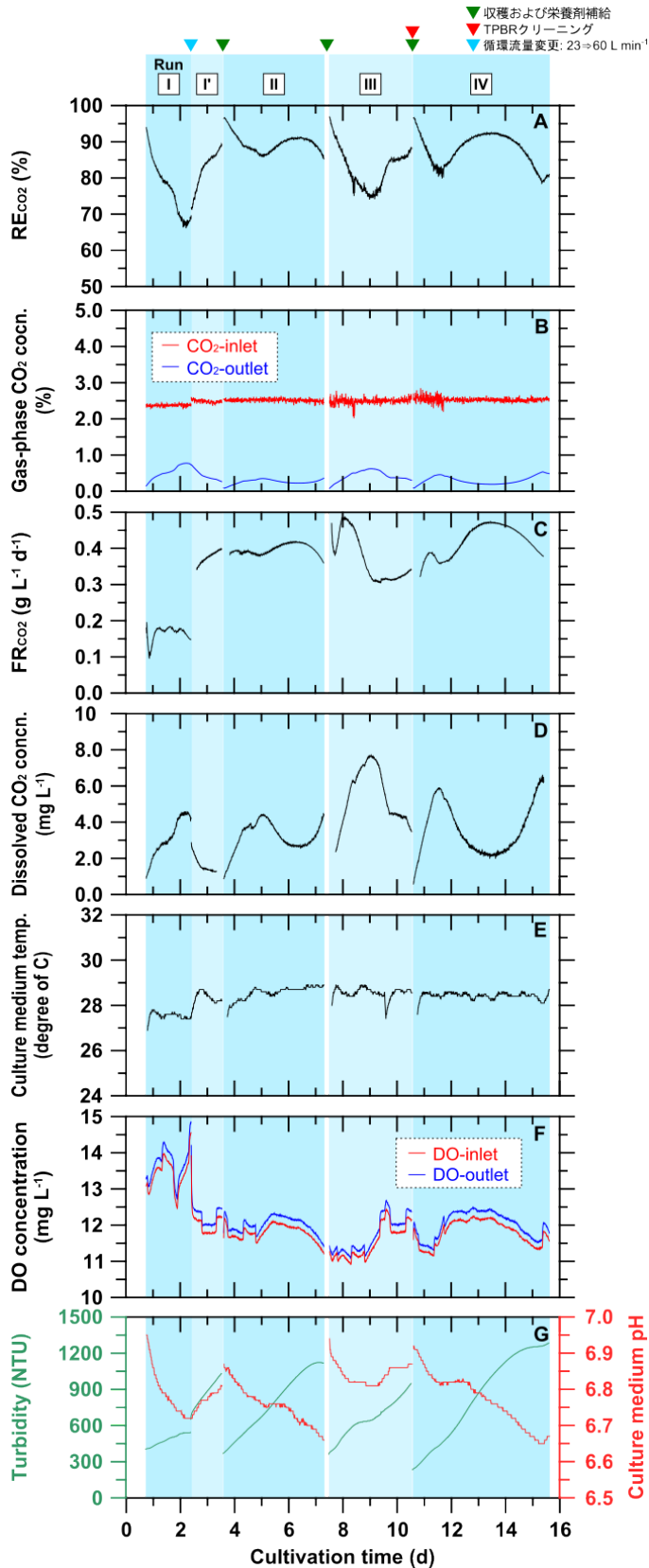


図4 培養期間中のCO₂除去効率(A)、気相CO₂濃度(B)、CO₂固定速度(C)、溶存CO₂濃度(D)、培養液水温(E)、溶存酸素濃度(F)、濁度および培養液pH(G)の変化

では、16日間で5系列(Run I、I'およびII~IV)のCO₂固定実験を実施した。なお、Run Iを除き、各系列の実験終了時には、TPBRからの収穫および栄養剤の補給を実施した。図4Eより、いずれの実験系においても培養液の水温は期間を通じて大きな変動は見られず、およそ28±1°Cで安定して推移した。CO₂-空気混合ガスを一定流量で連続給気した条件下では、気液二相流によるCO₂自然溶解が進行するため、培養液pHは全系列で低下傾向を示した。一方、濁度は培養時間の経過とともに増加し、特に増殖期には指数関数的な上昇が確認された(図4G)。また、循環流量を23 L min⁻¹で運転したRun Iでは濁度増加率が低く推移したが、流量を60 L min⁻¹へ増加させたRun I'では増加率が明確に改善した。これは、循環促進によりTPBRのガラス管部における光強度分布が均一化され、細胞が高光領域と低光領域を高速に移動することで光阻害を回避しつつ光合成効率が向上したことが主要因と考えられる。さらに、流量増加により液側境界膜が薄くなり、CO₂供給や溶存酸素除去、栄養塩輸送といった物質移動が改善され、光合成および代謝活動が阻害されにくくなったことも寄与している。これらの複合的効果により、循環流量の増加は培養効率向上に有効に作用したと考えられる。なお、TPBRにおける入口・出口間の溶存酸素濃度差(ΔC_{DO}=DO-outlet-DO-intlet)は一貫して正值を示したことから(図4F)、光合成反応に伴うO₂生成が継続的に生じていたことに加えて、気液間のガス交換プロセスが良好に機能していたことが示された。

気相中のCO₂濃度の変化から算出したRE_{CO2}は65~97%と高く(図4A、B)、このことはTPBRへ給気されたCO₂の大部分が微細藻類の光合成活性によりCO₂が吸収、固定されたことを示唆している。また、藻体濃度と炭素含有率に基づくFR_{CO2}は0.33~0.48 g L⁻¹ d⁻¹であり(図4C)、これはShaikhら(2016)による既報値³³⁾と比べ3倍以上高い固定性能であった。

Run IIIにおいては、Run Iを除く他の系列と比較して濁度の増加が明らかに抑制されており、これに伴いFR_{CO2}も相対的に低下した。実験後の目視による観察から、ガラス管内壁に形成されたバイオフィームが光透過を阻害しており、これが主たる要因であると判断された。光環境の劣化は微細藻類の光合成速度を直接的に制限するため、

表 1 各実験系列における比増殖速度および倍加時間

Exp. No.	μ (d ⁻¹)	t_d (d)	t_d (h)
Run I	0.20	3.4	82
Run I'	0.43	1.6	38
Run II	0.40	1.7	41
Run III	0.35	2.0	48
Run IV	0.53	1.3	31

増殖速度の抑制に寄与する³⁴⁾。実際、Run IIIの比増殖速度は Run IIと比較して12.5%ほど低い値を示したが、ガラス管内壁の洗浄後に実施した Run IVでは増殖速度および濁度上昇挙動が顕著に改善した(表1)。これらの結果は、TPBR を用いた長期連続培養において光透過性の維持がCO₂ 固定性能の安定確保に不可欠であることを示唆するものであり、運転管理として定期洗浄の実施あるいは材料選定や流体設計による付着抑制機構の導入が必要であると考えられる。

3.2 溶存 CO₂ 濃度と増殖挙動の関係

Run IIおよび Run IVでは、培養液 pH がそれぞれ 6.76 および 6.82 を下回った時に濁度が急激に上昇し、これと同時に CO₂(aq)濃度が低下する挙動が確認された(図4D および図5)。CO₂(aq)は微細藻類の光合成における主要な無機炭素源であることから、当該時期には光合成活性が増大し、炭素同化速度が CO₂ の供給速度を上回った可能性が高い。このことは、CO₂(aq)が増殖の律速因子となる局面が存在することを示唆している。一方、Run IIIでは同様の関係は明瞭に認められず、濁度増加と CO₂(aq)の動態が一致しなかった。これは 3.1 項で述べたように、ガラス管内壁に形成されたバイオフィームによる光透過性の低下が光合成速度を制限し、CO₂(aq)消費が頭打ちとなったためと推察される。以上の結果から、CO₂(aq) を連続的に監視することは、光伝達阻害や増殖低下、炭素供給不足などの「サブオプティマル条件」を早期に検知する指標として有用であると考えられる。特に、光合成活性が高い条件では CO₂(aq)濃度の急減が増殖促進の兆候となり得る一方、光制限下では増殖遅延の兆候として読み取れるため、運転状態の把握および制御最適化において重要なパラメータとなる。

3.3 倍加時間

表1に示す通り、比増殖速度から算出した倍加時間は、Run IVにおいて最短値である31hを示した。一般的に、倍加時間が短い微細藻類は、単位時間当たりのCO₂ 固定速度が高くなる傾向にある³⁵⁾。これは、急速な細胞分裂に伴う炭素同化需要の増大に応じて、Rubisco を含むカルビン-ベンソン回路関連酵素群およびCCMの発現が誘導されるためである。その結果、カルビン回路の炭酸固定反応の回転率が向上し、細胞あたりの無機炭素取り込みフラックスが増大する³⁶⁾。本研究においてTPBRのCO₂ 固定速度をより一層高めるには、倍加時間を20h、さらにはその先の10h程度へと短縮することが必要となる(図6)。倍加時間の改善に寄与する因子としては、ガラス管内径や循環流量、培養液水温などが挙げられ、照射分布の均質性、CO₂の溶解・輸送プロセスならびに培養液の流れ方に直接的な影響をおよぼす。これらは、光合成速度および物質移動速度を規定する主要な操作因子であることから、適切な制御や設計変更により増殖環境の最適化が期待できる。今後は、各因子について定量的な感度解析を進め、システム応答を明らかにした

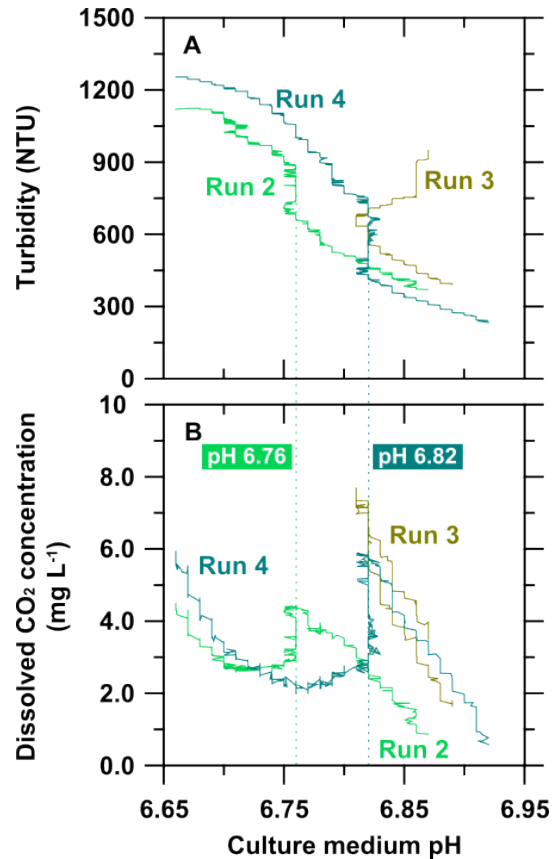


図5 培養液 pH に対する濁度(A)および溶存 CO₂ 濃度(B)の関係

上で、運転条件と装置形状の最適組み合わせを探索する必要があり、このことが CO₂ 固定性能と運転安定性を両立した高効率バイオリアクターの構築につながると考えられる。

3.4 環境インスタレーション – 葉山芸術祭での展示 –

本研究で開発中の TPBR は、単なる機能的装置としての位置づけにとどまらず、空間的価値を付与し得る環境アートとしての潜在性も有している。そこで、2025 年 5 月 3 日から 6 日にかけて神奈川県葉山町で開催された「第 33 回葉山芸術祭」において、環境インスタレーションとして TPBR の写真パネルと動画展示を行った(写真 1)³⁷⁾。その結果、来場者からは「観葉植物の代替として設置したい」「海外市場でも受容性が高いのではないか」など、意匠性や存在感に対する肯定的評価が多数寄せられ、TPBR が一般市民の美的感性にも訴求し得ることが確認された。また、来訪者の中には大学研究者を含む専門家もおり、学術分野との新たなネットワーク形成につながった点も成果として挙げられる。以上より、開発中の TPBR は環境技術と芸術性を融合させることで社会的受容性を高め、導入障壁を低減し得る多面的価値を有することが示唆された。

3.5 今後の課題

TPBR に関する今後の課題として、光環境や循環流量、CO₂ 供給条件といった主要な操作因子が微細藻類の生育挙動に及ぼす影響を整理し、長期的な培養性能を維持するための最適運転条件を確立することが挙げられる。また、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を低下させ培養効率を阻害するため、付着抑制技術や洗浄手法の改良によって光学特性を安定して維持することも求められる。さらに、CO₂(aq)を含む各種連続測定データを統合し、培養状態の変動を迅速に把握・対応できる監視・制御技術の構築が重要となる。

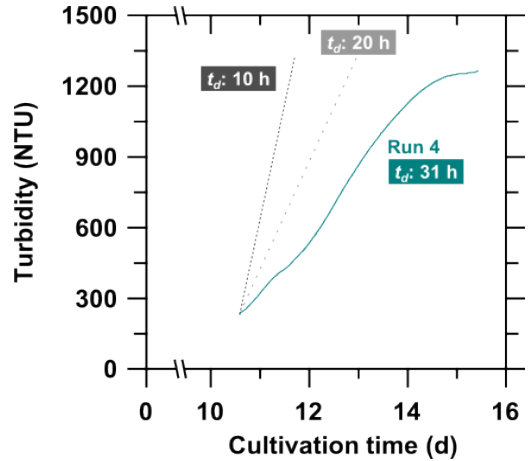


図 6 各倍加時間に対する藻類増殖曲線
(倍加時間 10 h および 20 h は予測曲線)

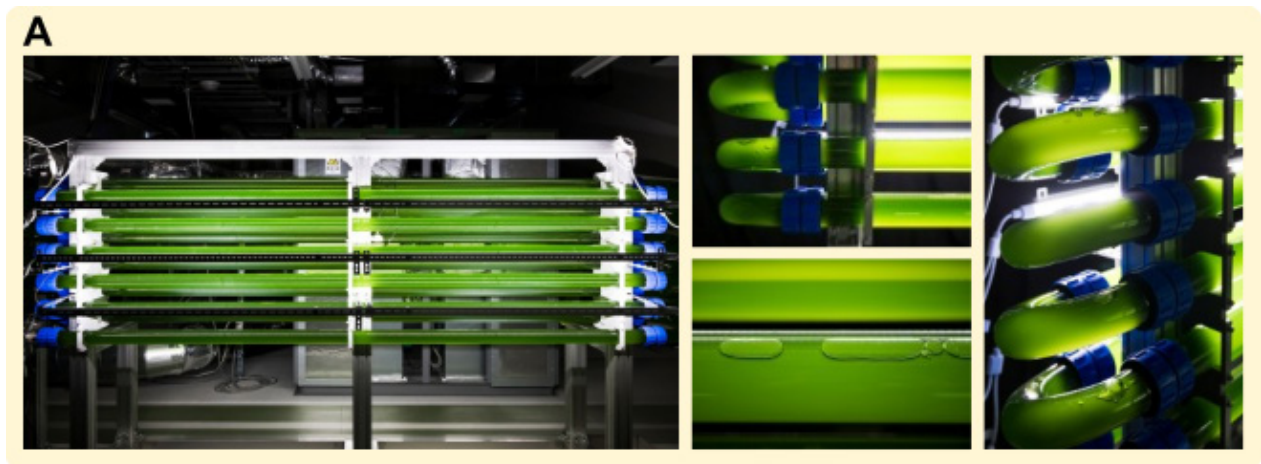


写真 1 葉山芸術祭における TPBR の写真(A)と微細藻類(B)の展示および動画の投影(C)

一方で、微細藻類によって固定される CO₂ 量を上回るエネルギーが培養工程やその後の脱水・濃縮工程において消費され、結果としてプロセス全体の CO₂ 排出量が増加するようであれば、本来の環境負荷低減という目的は達成されない。1990 年代以降、微細藻類を用いた高付加価値物質の生産を目的とした培養施設が世界各地で展開されており、これらは資源循環の促進およびバイオ産業の持続的な発展に資する重要な技術として位置づけられている。しかしながら、その評価指標は目的生産物の収率および経済性に偏重し、CO₂ 収支といった観点十分に考慮されていない場合が多い。したがって、今回のようなシステム全体の環境負荷低減効果を定量的に評価するためには、ライフサイクルアセスメント(LCA)の導入が不可欠である。特に、CO₂ 固定量とプロセス全体における CO₂ 排出量とのバランスを明確にすることが本システムを確立する上で重要な指標となる。このような背景から、CO₂ 収支の改善に寄与する培養工程におけるエネルギー源の選定(再生可能エネルギーの導入など)や脱水・濃縮工程における省エネ化についても、現在検討を進めている。さらに、収穫により得られた CO₂ 固定後の微細藻類バイオマスについては、低エネルギー消費での有効利用を目指し、具体的な用途の検討を進めている。その一環として、障壁の低い土壌改良材や肥料、さらには飼料への適用可能性に着目し、その有効性を評価する実験を計画、準備しているところである。一方で、環境インスタレーションとしての利用可能性が示唆された点を踏まえ、建築空間との調和性や意匠的価値を定量的に評価する枠組みを構築し、機能要件とデザイン性を統合した装置設計へ発展させることも重要な検討課題の一つである。

4. おわりに

本研究では、オフィス労働者の生産性・ウェルネス向上とカーボンニュートラルを両立する建築設備の開発を念頭に、優れた光合成能を持つ微細藻類と独自設計した TPBR を用いて、屋内における連続培養および CO₂ 固定化技術の確立に必要な基礎データの取得およびその解析を行った。その結果、TPBR における CO₂ 除去効率は 65~97%、CO₂ 固定速度は 0.33~0.48 g L⁻¹ d⁻¹ に達し、高い CO₂ 固定性能が確認された。また、循環流量の増加は光環境と物質移動を改善し、比増殖速度の向上と倍加時間の短縮に寄与した。一方で、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を阻害し、成長および固定性能を著しく低下させることが示され、長期安定運転には適切な洗浄・付着抑制技術が不可欠である。さらに、CO₂(aq)のリアルタイム測定により、光合成活性の変動や増殖律速の生じる条件を容易に把握できることが示され、運転最適化の有効な指標となることが明らかとなった。一方で、TPBR は環境インスタレーションとしての視覚的価値も有し、屋内・都市空間への意匠的統合が可能であることが展示評価により示すことができた。

以上の知見より、TPBR は微細藻類による CO₂ 固定の高効率化と、建築空間における環境価値の創出を同時に達成し得る技術基盤として有望であることが示された。今後はこれらの技術的課題を克服しつつ、設置場所を踏まえた運用モデルの構築や LCA に基づく環境負荷の定量的評価が実用化に向けた重要なステップとなる。本システム自体は、CO₂ 濃度の低い環境を求める建築用途、特に教育施設や宿泊施設などにおいて導入ニーズが見込まれており、国際的な動向を注視しながら開発と展開を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) 東賢一：室内環境における二酸化炭素の吸入曝露によるヒトへの影響, 室内環境, 21(2), 113-120(2018).
- 2) 原史朗：室内 CO₂ 濃度を換気の指標として利用する研究, https://www.caicm.go.jp/action/survey/covid19-ai.jp/ja-jp/presentation/2020_rq2_infection_prevention/articles/article010/index.html
- 3) 公益社団法人空気調和・衛生工学会：室内空気質のための必要換気量, 換気設備委員会・室内空気質小委員会委員会成果報告書参考資料 4(2016).
- 4) 気象庁 HP：https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- 5) 落合のり子, 山下一也, 阪本功, 濱村美和子, 福澤陽一郎, 橋本由里, 松岡文字, 恩田 晴夫：講義室利用時の二酸化炭素濃度と空気環境改善対策, 島根県立大学短期大学部出雲キャンパス研究紀要, 4, 39-45(2010).
- 6) 高橋正好：二酸化炭素と人体, 安全工学, 37(5), 352-357(1998).
- 7) Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J.D.: Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of Green and Conventional office environments. *Environ. Health Perspect.*, 124(6), 805-812(2016).
- 8) 小崎智照, 松澤七海, 百岳香奈：高濃度の二酸化炭素が覚醒と精神作業能へ与える影響, 人間工学, 58(2), 76-83(2022).
- 9) 鍵直樹, 金勲, 下ノ蘭慧, 中野淳太, 海塩渉: 令和 5 年度厚生労働科学研究費補助金 (健康安全・危機管理対策総合研究事業) 分担研究報告書 1. 特定建築物の報告統計, 13-17(2024).
- 10) Wang J., Huang L., Yang R., Zhang Z., Wu J., Gao Y., Wang Q., O'Hare D., Zhong Z.: Recent advances in solid sorbents for CO₂ capture and new development trends. *Energy Environ. Sci.* 7(11), 3478–3518(2014).
- 11) Ooi Z.L., Tan P.Y., Tan L.S., Yeap S.P.: Amine-based solvent for CO₂ absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chin. J. Chem. Eng.* 28(5), 1357–1367(2020).
- 12) Shishegaran A., Shishegaran A., Najari M., Ghotbi A., Boushehri A.N.: Effect of plants on an environment with high carbon dioxide concentration. *Cleaner Eng. Technol.* 1, 100002(2020).
- 13) Alami A.H., Alasad S., Ali M., Alshamsi M.: Investigating algae for CO₂ capture and accumulation and simultaneous production of biomass for biodiesel production. *Sci. Total Environ.* 759, 143529(2021).
- 14) Batista A.P., Ambrosano L., Graça S., Sousa C., Marques P.A., Ribeiro B., Botrel E.P., Neto P.C., Gouveia L.: Combining urban wastewater treatment with biohydrogen production—an integrated microalgae-based approach. *Bioresour. Technol.* 184, 230–235(2015).
- 15) Do C.V.T., Dinh C.T., Dang M.T., Tran T.D., Le T.G.: A novel flat-panel photobioreactor for simultaneous production of lutein and carbon sequestration by *Chlorella sorokiniana* TH01. *Bioresour. Technol.* 345, 126552(2022).
- 16) 嶋原亜土, 三宅友香, 増田正夫, 増田篤稔：チューブ型フォトバイオリアクターを用いた微細藻類による CO₂ 固定化技術の開発, 高砂熱学イノベーションセンター報, 38, 133-141(2025).
- 17) 瀧本善之, 村上仁一, 山田文博：特開平 10-155478(1998).
- 18) Borowitzka M.A.: Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *J. Biotechnol.* 70, 313-321(1999).
- 19) Richardson J.W., Johnson M.D., Outlaw J.L.: Economic comparison of open pond raceways to photo bioreactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Res.* 1, 93-100(2012).
- 20) Rebollosa Fuentes M.M., Garcia Sánchez J.L., Fernández Sevilla J.M., Acien Fernandez F.G., Sánchez Pérez J.A., Molina Grima E.: Outdoor continuous culture of *Porphyridium cruentum* in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. *J. Biotechnol.* 70, 271–288(1999).
- 21) Padhi D., Kashyap S., Mohapatra R.K., Dineshkumar R., Nayak M.: Microalgae-based flue gas CO₂ sequestration for cleaner environment and biofuel feedstock production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 32, 13539–13565(2025).
- 22) Giuseppe Torzillo G., Zittelli G.C.: Tubular Photobioreactors in Algal Biorefineries, 187-212(2015).
- 23) Spalding M.H.: Microalgal carbon-dioxide-concentrating mechanisms: *Chlamydomonas* inorganic carbon transporters. *J. Exp. Bot.* 59(7), 1463-1473(2008).

- 24) 藤井智康, 駒井幸雄, 藤原建紀: 大阪湾沿岸域の二酸化炭素の挙動, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 67(2), 911-915(2011).
- 25) 須藤雅夫, 市川祥久, 居波永治, Irvan, 岡島敬一, 鈴木款, 皆川昌幸, 金森敏幸: 海洋二酸化炭素の連続計測のための光ファイバーセンサーの開発, 日本海水学会誌, 54(1), 21-29(2000).
- 26) 片山博之, 烏谷隆: 疎水性多孔質膜を用いた小型海洋溶存二酸化炭素分圧計測装置の開発, 九州大学応用力学研究所報, 17, 53-63(1999).
- 27) 遠藤徹, 田中俊之, 大谷壮介, 藤田哲朗, 矢持進: 通気性撥水チューブを用いた水中二酸化炭素濃度の計測手法の有効性検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69(2), 1251-1255(2013).
- 28) Weiss R.F. Carbon dioxide in water and seawater. The solubility of nonideal gas. Mar. Chem. 2, 203-215(1974).
- 29) 工業用水・工場排水試験方法-第1部一般理化学試験方法 JIS K 0102-1 14.1, (2021).
- 30) 小西正朗, 堀内淳一: 細胞の増殖を捉えるー計測法から比速度算出までー, 生物工学会誌, 93(3), 149-152(2015).
- 31) Do C.V.T., Nguyen N.T.T., Tran T.D., Pham M.H.T., Pham T.Y.T.: Capability of carbon fixation in bicarbonate-based and carbon dioxide-based systems by *Scenedesmus acuminatus* TH04. Biochem. Eng. J. 166, 107858(2021).
- 32) Pruvost J., Le Gouic B., Cornet J.-F.: Kinetic modeling of CO₂ biofixation by microalgae and optimization of carbon supply in various photobioreactor technologies. ACS Sustain. Chem. Eng. 10(38), 12826-12842(2022).
- 33) Razzak S.A., Ali S.A.M., Hossain M.M., Nzila Mouanda A.: Biological CO₂ fixation using *Chlorella vulgaris* and its thermal characteristics through thermogravimetric analysis. Bioprocess Biosyst. Eng. 39, 1651-1658(2016).
- 34) Wang S.-K., Stiles A.R., Guo C., Liu C.-Z.: Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. Eng. Life Sci. 14, 550-559(2014).
- 35) Sanaye Mozaffari Sabet N., Golzary A.: CO₂ biofixation at microalgae photobioreactors: hydrodynamics and mass transfer study. Int. J. Environ. Sci. Technol. 19, 11631-11648(2022).
- 36) Hwangbo K., Lim J.-M., Jeong S.-W., Vikramathithan J., Park Y.-I., Jeong W.-J.: Elevated inorganic carbon concentrating mechanism confers Tolerance to high light in an arctic *Chlorella sp.* ArM0029B. Front. Plant Sci. 9, 590(2018).
- 37) 葉山芸術祭 HP : <https://hayama-artfes.com/?program=2025ep46>

ABSTRACT

Elevated CO₂ concentrations in indoor environments impair the cognitive performance of occupants therein; therefore, advanced technologies that suppress such increases are required. Herein, utilizing microalgae with a high photosynthetic capacity, we developed an indoor tube-type photobioreactor (TPBR) and comprehensively evaluated of its CO₂ fixation performance and cultivation characteristics. Data analyses under indoor environmental conditions demonstrated that the TPBR achieves a CO₂ removal efficiency of 65–97% and CO₂ fixation rate of 0.33–0.48 g L⁻¹ d⁻¹, indicating high carbon-fixation capability. Increasing the circulation flow rate yields improved light environment and mass transfer, resulting in enhanced specific growth rates and shortened doubling times. Conversely, biofilm formation on the inner surface of the glass tubes reduced the light transmittance and acts as a limiting factor for the specific growth rate. Moreover, dissolved CO₂ concentration effectively captured changes in the photosynthetic response, demonstrating the utility of the TPBR as an indicator for optimizing operational conditions. Finally, in addition to its functional performance, the TPBR exhibited strong visual appeal, and exhibition-based evaluations confirmed its high potential for integration into architectural spaces as an environmental design element.