

木質バイオマスガス化発電排ガスの微細藻類培養への活用検討

村上 陽一郎 高地 春菜
久保田 洋 袋 昭太

概 要

脱炭素社会の実現に向け、パリ協定に基づく長期戦略が閣議決定された。その閣議決定においてCCU（Carbon Capture and Utilization）は、CO₂を資源として捉え、EOR（Enhanced Oil Recovery）やCO₂の直接利用の他にカーボンリサイクルへ期待が寄せられており、中でも微細藻類へのCO₂供給は燃料化や化学製品の合成、食料生産など様々な分野への活用が可能とされている。

本研究では、木質バイオマスガス化発電装置 Volter40 から排出されるCO₂を微細藻類であるユーグレナ（*Euglena gracilis*）およびスピルリナ（*Arthrospira platensis*）の培養に供給し、増殖促進効果を評価した。その結果、ユーグレナ培養プレ試験、本試験ともに、排ガスCO₂の供給により増殖促進効果が認められた。一方のスピルリナ培養試験では、増殖促進効果が得られるとともにユーグレナの酸性培地とは異なりアルカリ性培地であったので炭素固定量が大幅に向上した。

さらに、排ガス中の有害成分であるNO_x除去などの改質はCO₂の利用拡大に重要となるが、無機物混合木質炭化物（プライムカーボン[®]）により、その90%以上を除去する効果を実証した。

Investigation of Utilizing Exhaust Gas from Wood Biomass Gasification Power Generation for Microalgae Cultivation

Abstract

To achieve a decarbonized society, the Cabinet approved a long-term strategy based on the Paris Agreement. This strategy emphasizes Carbon Capture and Utilization (CCU), which considers CO₂ a resource. In addition to Enhanced Oil Recovery (EOR) and direct applications of CO₂, carbon recycling is highly anticipated. Among these approaches, supplying CO₂ to microalgae has shown potential for diverse applications, including fuel production, chemical synthesis, and food production.

In this study, CO₂ emissions from the Volter 40 wood biomass gasification power generator were supplied to cultures of the microalgae *Euglena gracilis* and *Arthrospira platensis* (commonly known as Spirulina) to evaluate their growth-promoting effects. The results showed that in both preliminary and main culture tests of Euglena, the supply of exhaust CO₂ enhanced growth. In the Spirulina culture tests, a growth-promoting effect was also observed. Unlike the acidic medium used for Euglena, Spirulina was cultured in an alkaline medium, significantly increasing carbon fixation.

Additionally, reforming processes, such as removing NO_x—harmful components present in exhaust gases—are critical for expanding the utilization of CO₂. This study demonstrated that over 90% of NO_x could be effectively removed using inorganic composite woody charcoal (PrimeCarbon[®]).

キーワード：CCU、木質ガス化発電排ガス、微細藻類
培養、NO_x除去

§1. はじめに

1.1 背景・目的

脱炭素社会の実現に向けてCOP21で採択された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が日本で閣議決定された。このなかでCCU/カーボンリサイクルは、二酸化炭素を資源として捉えており、活用例として素材や燃料への再利用が挙げられている¹⁾。このうち微細藻類培養は化学物質や燃料の合成、食品および飼料としての利用など様々な活用先があることから注目を集めている。

国内では微細藻類培養に火力発電所からの排ガスCO₂と排熱を利用する実証試験が実施され、高い藻類生産性と高いCO₂利用率を同時に実現できることが確認されている²⁾。

一方で排ガスに含まれる有害物質には硫黄酸化物(SO_x)、塩化水素(HCl)および窒素酸化物(NO_x)などがあり、これらは藻類培養等の生物の生育に悪影響を及ぼす恐れがある。特にNO_x除去では、実用化されている方法のうち、比較的除去率が高いとされる乾式無触媒法、乾式触媒法においても、除去後の排ガス中NO_x濃度はそれぞれ58.3ppm(NO_x除去率51.0%)、45.0ppm(NO_x除去率67.0%)でありNO_xの残留量が比較的高い³⁾。

本研究では、木質バイオマスガス化発電装置の排ガスCO₂をユーグレナおよびスピルリナ2種類の微細藻類培養に供給し、その増殖促進効果を検証した。また、NO_x除去材によりNO_xを除去した排ガスを供給する処理区を設定することで、排ガス改質による影響を検討することを目的とした。

§2. 試験材料および方法

2.1 試験材料

(1) 木質バイオマスガス化発電装置および排ガス

本試験では、固定床ダウンドラフト型のガス化炉を採用した発電出力40kW、熱回収量100kWのVolter Oy製小型木質バイオマス熱電併給装置 Volter40（以下「Volter40」とする、写真1）を用いた。発電後に排出される排ガスの性状および濃度は表1の通りで、Volter40の排気口にダクトホースを接続し、ダイヤフラムポンプを介して培養試験に供することとした。

併せてNO_x除去材の効果およびNO_xの微細藻類培養への影響を確認するため、発電排ガスから段階的にNO_x濃度を調整した排ガスも培養試験の材料とした。



写真1 小型木質バイオマス熱電併給装置 Volter40

表1 発電装置排ガスの性状および濃度

項目	単位	性状・濃度
乾き排ガス量	Nm ³ /h	40 ~ 90
水分量	%	5 ~ 15
ガス温度	℃	30 ~ 60
CO ₂ 濃度	vol%	15 ~ 18
NO _x 濃度	volppm	180 ~ 350

(2) 微細藻類

微細藻類はその栄養価および機能性の高さからユーグレナ (*Euglena gracilis*) を選定した。その後、CO₂溶解・固定効率向上のため、酸性培地で増殖するユーグレナではなくアルカリ性培地で増殖するスピルリナ (*Arthrospira platensis*) での培養試験を行った。

(3) NO_x除去材

下水からのリン回収のために開発した鉄等の無機物混合木質炭化物（プライムカーボン[®]、写真2）をNO_x除去に用いた。

本資材は木質バイオマスガス化発電の副生バイオ炭に鉄等の無機資材を混合し長さ4~10 mm程度の円柱状にペレット成形して製造したものである。事前の試験でNO_x除去効果が示唆されたことから、当試験でもNO_x除去材として選定した。



写真2 NO_x除去材（プライムカーボン[®]）

2.2 試験概要

微細藻類培養試験の概要を表2に示す。

はじめに排ガス供給条件の選定を目的として(1)ユーグレナ培養プレ試験を実施し、次に(1)で選定し

表2 微細藻類培養試験の実施概要

No.	実施試験	試験時期	試験場所	培養施設	水準数	曝気量
(1)	ユーグレナ培養プレ試験	2022 年 6～7 月	神奈川県厚木市	屋外人工気象室 2L アクリル水槽	6	0.025vvm
(2)	ユーグレナ培養本試験	2022 年 10～11 月	沖縄県石垣市	屋外 1m ³ 円柱形水槽	2	0.02vvm
(3)	スピルリナ培養試験	2023 年 4 月	沖縄県石垣市	屋外 1m ³ 円柱形水槽	2	0.02vvm

表3 ユーグレナ培養プレ試験における試験区および各ガスの混合比率

試験区	設定濃度		混合比率			
	NOx (volppm)	CO ₂ (vol%)	排ガス (vol%)	NOx 除去ガス (vol%)	産業用 CO ₂ (vol%)	大気 (vol%)
No.1	10	15	-	100	-	-
No.2	80	15	25	75	-	-
No.3	150	15	50	50	-	-
No.4	300	15	100	-	-	-
No.5	-	15	-	-	15	85
No.6	-	0.04	-	-	-	100

た条件において(2)ユーグレナ培養本試験を行った。さらにCO₂固定効率向上のために(3)スピルリナ培養試験を行った。

2.3 試験方法

以下のいずれの試験においても微細藻類の培養日数は10日とし、昼間（6：00～18：00）は試験ガスを曝気し、夜間（18：00～翌6：00）は微細藻類の沈降を防止するために大気を曝気して攪拌を行う設定とした。

(1) ユーグレナ培養プレ試験

1) 試験区の設定

排ガスCO₂による培養促進効果を確認する排ガス吹込区、対照として産業用CO₂を大気で希釈して濃度15vol%に調製したCO₂吹込区および大気吹込区を設定した。排ガス吹込区はNOxの微細藻類培養への影響を検証するために、NOxを含む発電排ガスとNOxを除去した排ガスを段階的に混合して4水準とし、CO₂吹込区、大気吹込区を含め計6試験区とした。（表3）

2) 試験系の構築

① 微細藻類の培養条件

アクリル樹脂製2L容水槽を用いて、発電排ガスCO₂による小規模な微細藻類培養試験を自然光型人工気象室内で実施した。人工気象室の気温は昼間27.6℃、夜間は26.0℃に設定した。

室内で予備培養したユーグレナ社保有の種株を、培地除去・洗浄後にCM培地（Cramer&Myers培地）

をベースに当試験用に改変したものに接種して培養試験を開始した。

② 試験ガスの調整および供給

曝気ガスは発電排ガスをダイヤフラムポンプで培養水槽近傍まで搬送し、直接または設定した試験区に応じて産業用CO₂、大気またはNOx除去ガスと混合し、ニードルバルブ付き流量計で流量制御して円柱型散気管で培養水槽に曝気した。曝気量は0.025vvm（gas Volume per liquid Volume per Minute）とした。

③ カラム通気によるNOx除去

NOx除去ガスの調製は、NOx除去材を充填した円筒形アクリル樹脂製カラム（内径30mm×高さ450mm、写真3）4本を直列に連結して、排ガス流量1.3L/min、線速度30mm/sec、カラム1本当たりの滞留時間13secの条件で発電排ガスを通気して行った。



写真3 NOx除去カラム



(2) ユーグレナ培養本試験

「(1)ユーグレナ」

2) 試験系の構築

① 微細藻類の培養条件

② 試験ガスの調整および供給

③ 実証機によるNO_x除去検証

写真4 NO_x除去実証機とユーグレナ培養試験

微細藻類培養におけるCO₂溶解・固定効率向上のため、酸性培地で増殖するユーグレナではなくアルカリ性培地で増殖するスピリリナを1m³円柱形水槽にて屋外で培養する試験を実施した。

本試験では微細藻類増殖の光合成に要する CO_2 源を、連続曝気に依らず培地に溶存させた CO_2 から供給することを目的に、あらかじめ発電排ガスの曝気により水酸化ナトリウム水溶液に CO_2 を溶解させて pH 調整してアルカリ性培地とした排ガス CO_2 吹込区を設定した。対照系は工業用の炭酸塩として重曹（炭酸水素ナトリウム）を用いて SOT 培地をベースに当試験用に改変した培地を製作し、重曹区とした。

2) 試験系の構築

① 微細藻類の培養条件

— 28 —

しいpH9.2程度まで排ガスを吹き込んだ後に重曹区と同時に行い、培養を開始した。

② 試験ガスの調整および供給

曝気ガスは、スピリリナ植種前は排ガスCO₂吹込区に発電排ガスをダイヤフラムポンプで供給して曝気した。スピリリナ植種後は両試験区ともルーツプロアで大気を曝気した。

(4) 測定方法

ガス成分および培養液の測定方法を表4に示す。微細藻類培養におけるバイオマス量の指標は、培養液中のTOCからDOCを差し引いて求めたPOCを微細藻類の炭素固定量として評価した。

表4 ガス成分および培養液の測定方法

対象	項目	方法
排ガス	CO ₂	非分散形赤外線吸収方式 (JIS B 7986)
	NO _x	化学発光方式 (JIS B 7953)
培養液	TOC 全有機炭素	燃焼酸化 - 赤外線吸収方式
培養液 ろ液	DOC 溶解性有機炭素	燃焼酸化 - 赤外線吸収方式

§3. 試験結果

3.1 ユーグレナ培養プレ試験

(1) 曝気ガスの濃度

NO_x除去カラムの入口および出口のCO₂濃度を図2に、培養水槽当たりの積算CO₂供給量を図3に示す。

試験期間における発電排ガス中のCO₂濃度は15～18%、NO_x濃度は250～310volppmであった。NO_x除去カラム出口側のCO₂濃度が試験5日目まで入口側と大きく乖離していた。これは大気の吸込みが原因と推測される。

各試験区への培養ガス供給量は、以下の計算式により目標と実績の積算値を算出した。

$$\begin{aligned} & \text{培養ガス供給量 (目標/実績)} \\ &= \text{供給ガス濃度 (目標/実測)} \times \text{流量 (50mL/min)} \\ & \quad \times 60\text{min} \times 12\text{h} \times 10\text{d} \end{aligned}$$

(2) NO_x 除去効果

NO_x除去カラム（試験区No.1）の入口および出口のNO_x濃度を図4に、積算NO_x供給量を図5に示す。

図4よりカラム入口のNO_x濃度は250～310ppm、出口のNO_x濃度は5.5～20volppmで概ね安定していた。平均NO_x除去率は96%となり、従来の乾式触媒法や乾式無触媒法と比較して高い結果を得られた。

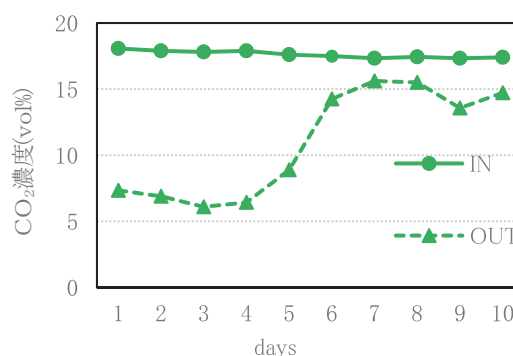


図2 NO_x除去カラムの入口および出口のCO₂濃度

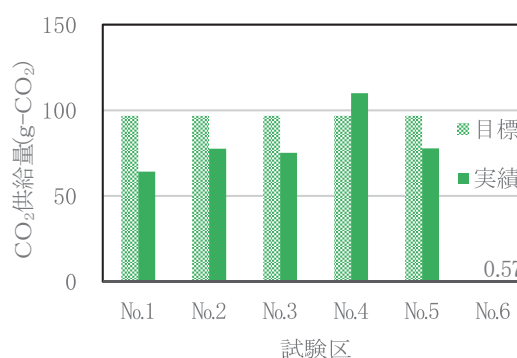


図3 培養水槽当たりの積算CO₂供給量

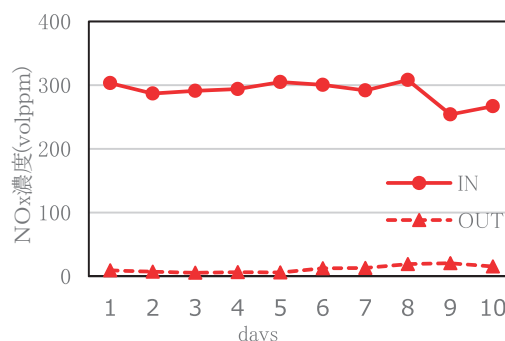


図4 NO_x除去カラムの入口および出口のNO_x濃度
(試験区No.1)

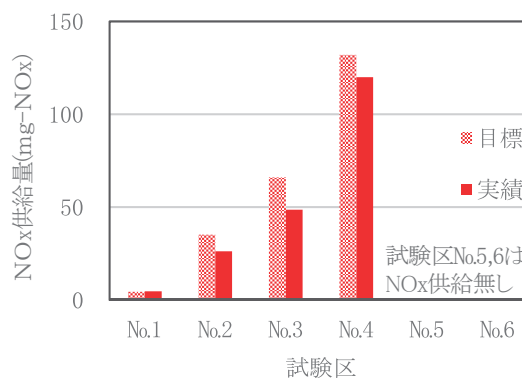


図5 培養水槽当たりの積算NO_x供給量

図 5 より各試験区とも概ね目標とする NOx 濃度に調整して培養水槽に供給することができた。

(3) 微細藻類量

試験終了時の培養水槽を写真 5 に、試験区ごとの培養水槽当たりの炭素固定量を図 6 に示す。

増殖促進効果を藻体への炭素固定量で比較した結果、大気ガス供給区（試験区 No. 6）に対し、CO₂ガス供給区（試験区 No. 1～5）で約 50～90 倍に増加した。また CO₂源として、排ガス供給区（試験区 No. 1～4）は産業用 CO₂（試験区 No. 5）と比較して 0.5～1.1 倍となり、排ガス由来の CO₂であっても、産業用 CO₂とはほぼ同等にユーグレナの増殖が促進された。

炭素固定量を NOx 供給量（試験区 No. 1～4）で比較すると、No. 2 が最も高く、No. 4（未処理排ガスのみ）が低い値となり、当試験の範囲内では、供給した NOx 濃度が微細藻類の増殖に与える影響は明瞭ではなかった。



写真 5 試験終了時の培養水槽の様子

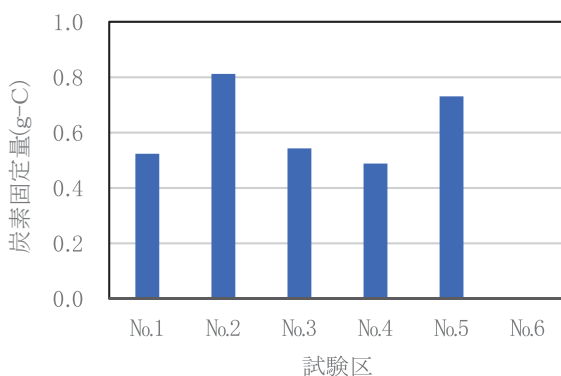


図 6 試験区ごとの培養水槽当たりの炭素固定量
(炭素固定量 = 培養液中の TOC - DOC)

3.2 ユーグレナ培養本試験

(1) NOx 除去実証機による NOx 除去効果

実証機による試験では最大 87% の除去率となり、カラム試験に近い NOx 除去率を達成することができた。

また、実証機の運用にて NOx 除去材の給排出不良やレベルセンサーの検知不良などの不具合が発生したが、改良工事などの対策を行った結果、装置性能の安定化を図ることができた。

(2) 微細藻類量

試験終了時の培養水槽を写真 6 に、炭素固定量を図 7 に示す。

1m³円柱形水槽によるユーグレナ培養では、排ガス吹込区が大気吹込区と比較して 1.6 倍の炭素固定量となり、培養促進効果を確認できた。一方でユーグレナ培養プレ試験ほどの増殖促進効果を得られなかった原因は、試験期間中の台風や驟雨による日照時間の不足が大きいと考えられる。

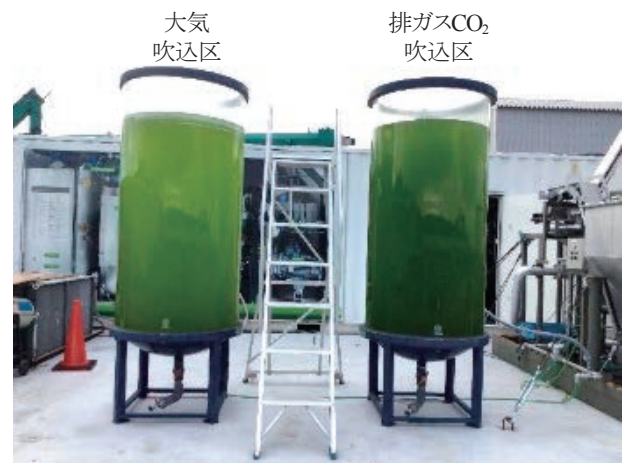


写真 6 試験終了時の水槽

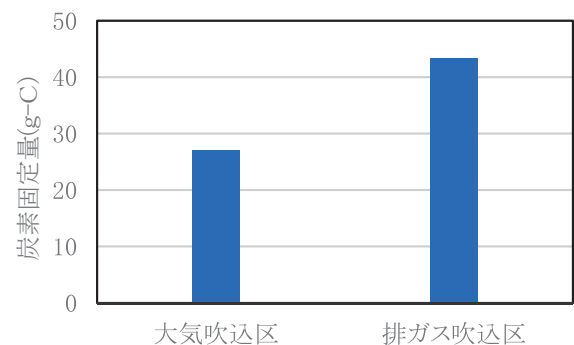


図 7 培養水槽当たりの炭素固定量

3.3 スピルリナ培養試験

(1) 微細藻類量

試験終了時の培養水槽を写真7に、炭素固定量を図8に示す。

本試験では、排ガス由来のCO₂を用いた場合においても工業用NaHCO₃培地（重曹区）とほぼ同等（重曹区の97%）の炭素固定量となり、培養促進効果を得ることができた。ユーグレナ培養本試験での排ガスCO₂供給量に対する炭素固定率0.79%と比較すると、スピルリナ培養試験では炭素固定量が86%に向上したことから排ガスCO₂活用の場においてアルカリ培地を使用することの有効性が確認できた。



写真7 試験終了時の水槽

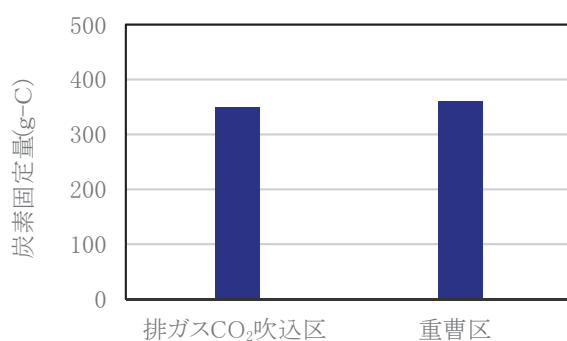


図8 試験区ごとの培養水槽当たりの炭素固定量

§4. まとめ

微細藻類培養試験やNO_x除去試験の結果から排ガスCO₂の微細藻類培養促進効果およびNO_xが微細藻類の増殖に及ぼす影響について、以下の知見を得た。

- 1) ユーグレナ培養について、排ガス由来のCO₂を曝気した場合、大気を曝気した場合に比べて微細藻類の増殖が促進された。また、産業用CO₂ボンベから希釈、調製したCO₂を使用した場合と比較して同等の効果が得られた。
- 2) スピルリナ培養について、水酸化ナトリウムのpH調整に排ガス由来のCO₂を用いた培地は、工業用NaHCO₃を用いて調製した培地とほぼ同等の増殖効果が確認できた。またユーグレナ培養プレ試験での排ガスCO₂供給量74gに対し炭素固定率0.79%、スピルリナ培養試験では排ガスCO₂供給量9,973gに対し炭素固定率86%となり、アルカリ性培地の方が酸性培地での培養と比較してCO₂供給量に対する利用効率が100倍以上向上することを確認した。
- 3) 今回の試験では微細藻類の増殖に与えるNO_xの影響を明確に確認できなかったが、供試したNO_x除去材の有効性については確認することができた。

今後は、バイオマス発電由来CO₂を安定的に供給するシステムを構築し、有用微細藻類の培養等に活用することで、生産コストの低減が期待される。一方で、NO_x除去材の実機レベルでの詳細な性能検証や、微細藻類培養へのNO_xの影響評価が今後の課題である。

謝辞

本研究に際し、株式会社ユーグレナ様、八重山殖産株式会社様より多大なご協力を得ました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略、(3)①、p22-23、2021
- 2) 増田正夫、宮下真一、藻類培養への排ガスCO₂利用の研究、第16回バイオマス科学会議、4、p5、2021
- 3) 松浦重治、稲田武彦、規制対象排ガスに対する処理技術、廃棄物学会誌、Vol.2、No.4、1.4、p326-327、1991

ひとこと

脱炭素社会の実現に向け、「地球規模の視点を持ち、地域で地道に活動する」ことで、持続可能な未来の創造に尽力してまいります。



村上 陽一郎