

藻類培養への排ガス CO₂ 利用の研究

増田正夫・宮下真一

Study on Using CO₂ in Exhaust Gas for Algae Culture

Masao Masuda・Shinichi Miyashita

微細藻類は、将来の有望なバイオマス燃料として期待されている。一方、産業分野から排出される排ガス中の CO₂ の有効な利用先の一つとして藻類バイオマスが挙げられる。本研究では、火力発電所からの実排ガス CO₂ と廃熱を同時利用した藻類培養効果を確認し、併せて、実排ガスの CO₂ 利用率を把握することを目的とした。その結果、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を確認した。また、培養池を廃熱で加温・冷却することにより、40%以上の高い CO₂ 利用率を実現できることを確認した。

1. はじめに

植物は太陽光を利用して二酸化炭素を固定化して炭水化物を合成する光合成を営み、その副産物として炭水化物、タンパク質や脂質を産生する。なかでも微細藻類は、生産面積当たりのオイル生産能力が、脂質を多く含む作物よりも数 10 倍から数 100 倍も高いので、広い耕作地を必要としない。また食糧と競合しないことなどから、特に欧米において将来の有望なバイオマスとして期待されている¹⁾²⁾。我が国では、藻類バイオマス燃料の実用化の目途を 2030 年頃として、数多くの藻類関連プロジェクトが稼働している。これらのプロジェクトでは、オイル生産能力の優れた藻類の生産効率化が主要な課題であるが、藻類燃料単価は、現状でおおむね 300~1,000 円/L-Oil と見積られている³⁾。

筆者らは、2013~2015 年度の福島復興プロジェクト（復興庁を経由した経済産業省によるプロジェクト）を経て、2016~2018 年度の「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金」事業（経済産業省資源エネルギー庁によるプロジェクト）に参加して、福島県の土着藻類を対象に、バイオ燃料生産コスト低減を目的に、藻類培養工程における廃熱の利活用の研究を進めてきた。その結果、廃熱利用を想定した培養池の加温・冷却により、培養池の平均温度が 20℃前後になると藻類の生産性が向上すること、廃熱の利用方法としては吸着材による熱搬送が適していることなどを確認した⁴⁻⁸⁾。

一方、工場や発電所などの排ガスから CO₂ を回収・搬送・利用することは、今やグローバルな課題となっている。IEA（国際エネルギー機関）によると、世界のエネルギー起源 CO₂ 排出削減量のうち、2050 年に CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）に期待されている割合は 14%（年間 40 億 ton-CO₂）、バイオマスに期待されている割合は 12%（年間 35 億 ton-CO₂）にもおよぶ⁹⁾。これを図 1 に示す。日本からの年間 CO₂ 排出量が 18 億 ton-CO₂（2018 年）であることを踏まえると、将来に向けた CCUS やバイオマスへの期待の大きさが伺える。現在、既に多くの CCU を目的とした研究開発が行われている¹⁰⁻¹²⁾。しかしなが

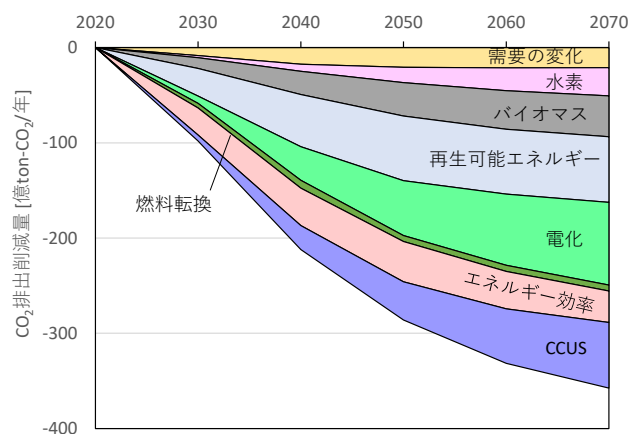


図1 世界のエネルギー起源 CO₂ 排出削減貢献量⁹⁾

※第 16 回バイオマス科学会議（2021/1/20-21）で発表した内容を加筆修正したものである。

ら、それらの技術の多くは発展途上であり、実用化には依然として時間を要する。また、CO₂の回収・搬送・利用の過程で、新たに多量のCO₂が排出されるならば本末転倒になる。したがって、当面の有効なCO₂利用先の候補として、農作物や藻類などのバイオマスへの利活用が挙げられる。これらの用途ならば、革新的な技術開発をせざとも、余計に多くのCO₂を排出せずに、CO₂を有価物に固定化できる可能性が高い。

筆者らは、現実的で確実な実排ガスCO₂の利用先の一つとして、藻類バイオマスへの利活用を想定した。しかしながら、工場や発電所などからの実排ガスを藻類培養に利用した研究はこれまで殆ど見当たらない。そこで、本研究では、火力発電所からの実排ガスCO₂と廃熱を同時利用した藻類培養効果を確認し、併せて、実排ガスのCO₂利用率を把握することを目的とした。

2. 実験

2.1 実験条件

東北電力株式会社および一般社団法人藻類産業創成コンソーシアムと協働で、原町火力発電所内（福島県南相馬市原町区金沢字大船）で実験を実施した。藻類は、福島県の土着藻類を用いた。

表1に実験条件を示す。実験は、夏期・秋期・冬期にそれぞれ約1ヵ月強にわたって実施した。発電所内のビニールハウス内に、パドル式水車を備えたレースウェイ型水槽（受光面積3.5m²、水深0.2m、水量700L、流速350~400mm/s）を設置して培養を行った。ビニールハウスは、横窓を常に開放状態として屋外とほぼ同じ環境下とした。

2.2 実験方法

実験は、発電所からの実排ガスを藻類培養池へ24時間投入した。実験の概要を図2に示す。発電所の煙突下部に設置された小口径の分岐口から耐熱樹脂チューブで排ガスを取り出し、コンプレッサで吸引して培養池に直接バブリングした。培養池への排ガス通気量は0.5L/minと2.0L/minの二通りで行った。排ガス中のCO₂濃度はいずれの場合もほぼ15%であった。

また、培養池は、廃熱利用を想定して加温・冷却を行った。但し、加温・冷却のための熱源は廃熱ではなく、ここでは別途に熱源機器を設置して実験を行った。廃熱利用を想定した場合、目まぐるしく変動する自然環境下において、培養池の水温を一定に制御するのは現実的ではないと考え、所定の温度・流量（20℃・9L/min）で熱交換器に水を循環させるだけのシンプルな方法を採用した。

表1 実験条件

	夏期	秋期	冬期
実験期間	2018/8/22 ~9/26 (36日間)	2018/10/3 ~11/5 (34日間)	2018/11/21 ~12/25 (35日間)
培養池	レースウェイ型オープンポンド 受光面積3.5m ² 、水量700L		
排ガス通気量	0.5L/min、2.0L/min		
排ガスCO ₂ 濃度	約15%		
熱交換器	伝熱面積0.81m ²		
通水温度	20℃ (主に冷却)	20℃ (加温・冷却)	20℃ (主に加温)
通水流量	約9L/min		

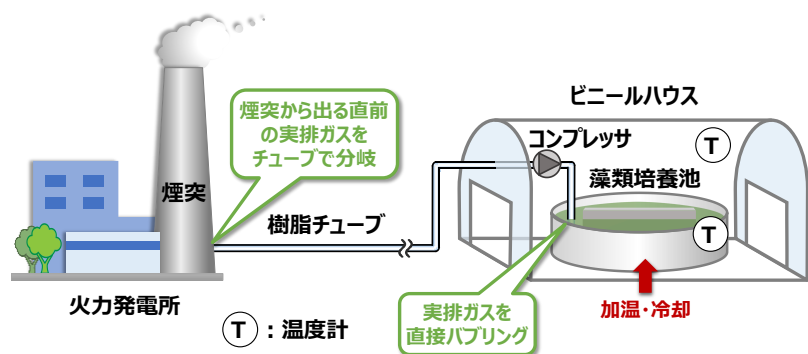
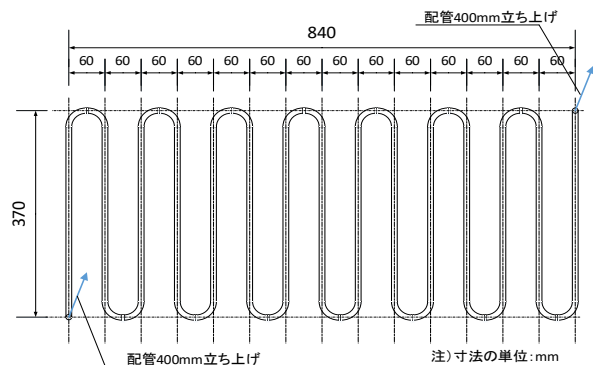


図2 実験の概要



SUS316 3/8inch (外径9.53mm、内径9.46mm、肉厚0.035mm)
配管長さ:1セットで約6800mm (直管は2000mm)

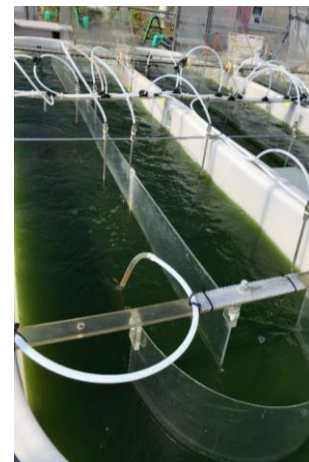
図3 培養池の加温・冷却で使用した熱交換器



(A) 発電所の煙突とビニールハウス



(B) 藻類培養池の熱交換器



(C) 藻類培養池への排ガス投入

写真1 実験の様子

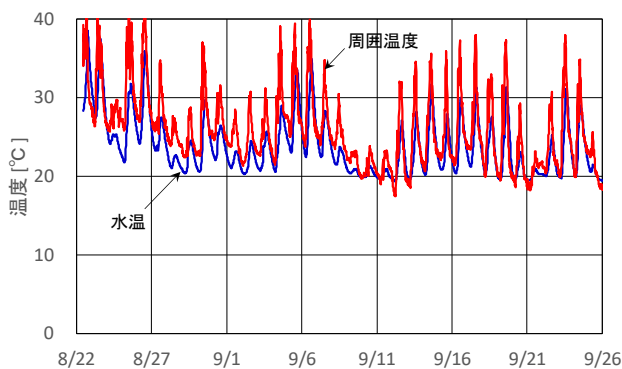
熱交換器は、これまでの藻類培養池の加温・冷却実験における伝熱性能の実績に基づき、SUS製の伝熱面積0.81m²のU字型の熱交換器を設計・採用した。これを図3に示す。

計測対象としては、培養池の水温を水中用サーミスタ温度計（精度±0.3℃）、周囲の気温をサーミスタ温度計（精度±0.3℃）、加温・冷却のための配管内の水温度をT型シース熱電対（精度±0.3℃±読み値の0.3%）、配管内流量を電磁流量計（精度±0.6% of F.S. (50 L/min)）で測定した。データは全て10分間隔で計測した。実験の様子を写真1に示す。

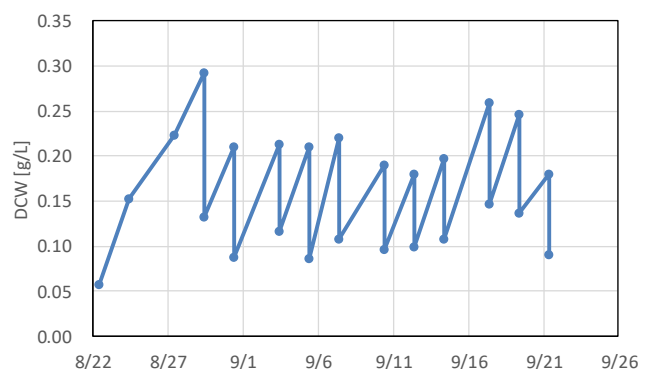
3. 実験結果

3.1 夏期の実験結果

夏期（2018/8/22～9/26）の冷却実験の結果を図4に示す。20℃の水を熱交換器に循環させることで3.5m²培養池を冷却した。図4(1)に示すように、周囲温度が30～40℃の猛暑の中、熱交換器による冷却効果により、培養池は20～30℃に冷却されていた。ここでは水温を所定の温度に制御している訳ではないので、昼と夜で水温は大きく変動していた。図4(2)がDCW（固形物の乾燥重量）の測定結果である。水温が大きく変動していた割に、試験を開始してから終了するまで、DCWは比較的安定に推移していた。なお、DCWが2～3日おきに大きく変動したのは、これまでの藻類培養の実績に基づき、藻類をHRT（Hydraulic retention time：水理的滞留時間）=4日で培養したからである。培養池の半分を2日（週末を挟んだ際は3日）おきに収穫して、残りの培養池に水を追加投入して培養を継続したために、このような波形になった。

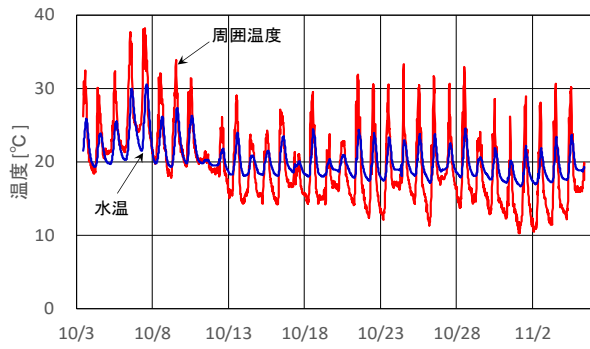


(1) 培養池の水温と周囲温度

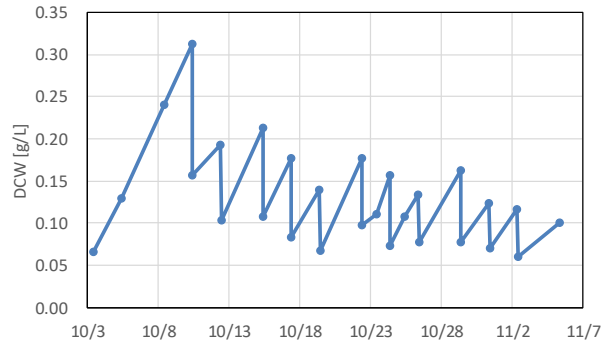


(2) DCWの推移

図4 夏期の実験結果

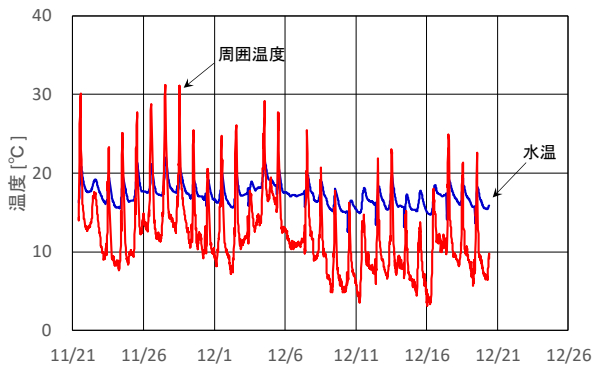


(1) 培養池の水温と周囲温度

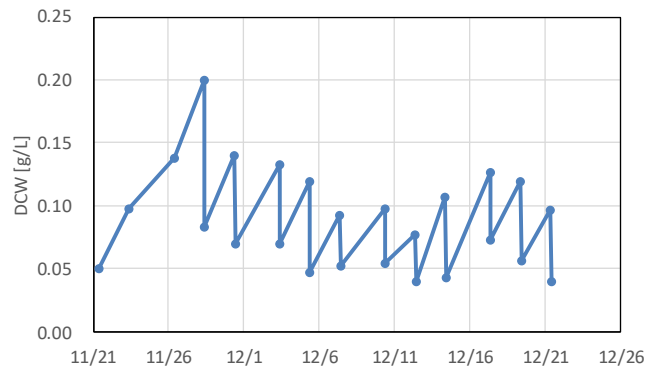


(2) DCW の推移

図5 秋期の実験結果



(1) 培養池の水温と周囲温度



(2) DCW の推移

図6 冬期の実験結果

3.2 秋期の実験結果

秋期 (2018/10/3~11/5) の加温・冷却実験の結果を図5に示す。20°Cの水を熱交換器に循環させることで3.5m²培養池を加温・冷却した。図5(1)に示すように、周囲温度が10~38°Cと大きく変動する中で、熱交換器による効果により、培養池は18~30°Cに加温・冷却されていた。秋期は、夏期よりも昼夜による水温の変動幅は小さくなっていった。図5(2)がDCWの測定結果である。実験の前半よりも後半の方がDCWは低下していた。これは、前半の平均水温が20°Cを越えていたのに比べて、後半の平均水温は20°Cを下回っていたためであり、20°Cを下回る水温だと、わずかな温度差で、DCWに大きく影響することがわかった。

3.3 冬期の実験結果

冬期 (2018/11/21~12/25) の加温・冷却実験の結果を図6に示す。20°Cの水を熱交換器に循環させることで3.5m²培養池を加温した。図6(1)に示すように、周囲温度が5~30°Cと大きく変動する中で、熱交換器による加温効果により、培養池は16~20°Cに加温されていた。冬期は、昼夜による水温の変動幅が秋期よりもさらに小さくなっていった。図6(2)がDCWの測定結果である。水温が安定していたにもかかわらず、試験の後半の方がわずかにDCWは低下していた。これは、日没が早くなり日射量が低下したことによる影響が大きいものと推察された。

3.4 総合的な評価

これまでの実験結果を全て整理したものを図7に示す。この図の横軸は、収穫から次の収穫までの平均水温であり、縦軸は、収穫から次の収穫までの一日当たりm²当たりのDCW増加量である。

大きな三角のプロットが今回の夏期・秋期・冬期の実験結果である。参考までに、小さなプロットを併記したが、これらは、本実験の前に実施した無機と有機(酢酸)の栄養を加えた培養実験の結果である。有機の栄養を加えると、CO₂を別途に供給しなくても、藻類の生産性がほぼ倍になることを事前に確認している。火力発電所の実排ガスを吹き込んだ培養では、有機の栄養を加えなかったにもかかわらず、それに匹敵する高い生産性を挙げており、年間を通じて5~

10g/(m²・day)の藻類生産量を見込めることがわかった。

次に、各実験期間を通してのCO₂利用率を算出した。これを表2に示す。日中の通気量に対するCO₂利用率は、夏期の実験で41.9%、秋期の実験で43.3%という非常に高い値が得られた。

まだ培養の実施例は少ないものの、夏期から秋期の加温・冷却しなかった時と比べて、加温・冷却した際のCO₂利用率は約1.8倍に向上した。これは、培養池の加温・冷却が藻類の生産性を高められたので、より多くのCO₂を利用でき、結果的にCO₂利用率を高められたことを意味するものである。排ガス通気量を最適化すれば、さらに利用率を高めることも可能と考える。

なお、ここで算出したCO₂利用率は、開放系水槽に通気した実排ガスの炭素の総量とDCWの増加量から単純に計算した見かけのCO₂利用率である。培養液と大気とのガス交換は考慮していない。また、実験期間中でバイオマス中の炭素量も一定と仮定して算出した。

本来は、水中の溶存CO₂濃度、さらにはHCO₃⁻とCO₃²⁻も含めた全炭酸濃度を昼夜で測定し、そのときの温度やpHを含めた培養環境が光合成の有無でどのように変化したか把握しなくては、正確なCO₂利用率を算出することはできないものとする。これらは今後の課題とする。

4. おわりに

本研究により、藻類培養に火力発電所の実排ガスと廃熱を同時利用することで、高い藻類生産性と40%以上の高いCO₂利用率を同時に実現できることを確認した。

以上のことから、今後益々注目されるであろうCCU技術の一つとして、藻類バイオマスへのCO₂利用が有力な選択肢の一つになる可能性は高いと考える。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁による「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金(2016~2018)」の成果の一部である。関係者各位に感謝の意を表す。

文献

- 1) 渡邊信ほか:藻類ハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2012).
- 2) 渡邊信:新しいエネルギー藻類バイオマス, みみずく舎, p.106, (2011).
- 3) 高橋惇:微細藻類バイオマスの燃料化技術, 高砂熱学工業技術研究所報 No.32, pp.59-84, (2018).
- 4) 増田正夫, 高橋 惇:藻類バイオマス培養への排熱利用の研究, 第 29 回環境工学総合シンポジウム 2019, pp.156-159,

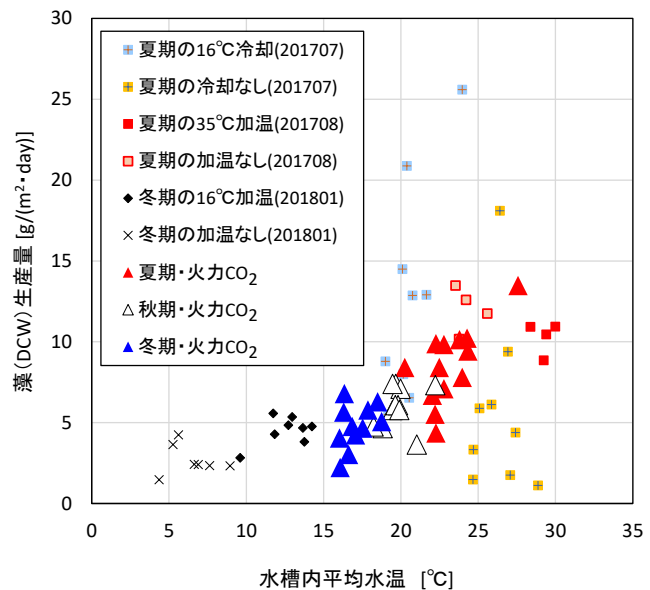


図7 秋期の実験結果

表2 CO₂利用率の結果

実験期間	加温・冷却	排ガス通気量 [l/min]	CO ₂ 利用率 [%]	
			24時間通気量に対して	日中の通気量に対して
2017/11/7 ~11/14	なし	2.0	3.7	9.2
2018/8/22 ~9/26	あり	2.0	6.7	13.3
	あり	0.5	21.1	41.9
2018/10/3 ~11/5	あり	0.5	19.4	43.3

- (2019).
- 5) 増田正夫:藻類培養への排熱利用の研究, 第 15 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.5-6, (2019).
 - 6) 増田正夫, 高橋惇:微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業における廃熱利用の研究, 高砂熱学工業技術研究所報 No.33, pp.51-58, (2019).
 - 7) 増田正夫, 宮下真一:藻類培養への廃熱の回収・搬送・利用の研究, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.55-56, (2021).
 - 8) 宮下真一, 増田正夫:藻類培養への廃熱・排ガス CO₂ 利用の研究, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.57-58, (2021).
 - 9) IEA:Energy Technology Perspectives 2020, (2020).
 - 10) 経済産業省資源エネルギー庁:CO₂ 回収, 利用に関する今後の技術開発の課題と方向性, 次世代火力発電協議会(第2回会合)資料1, (2015).
 - 11) 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット:CCUS/カーボンリサイクル, 第 1 回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ, (2020).
 - 12) 経済産業省資源エネルギー庁:カーボンリサイクル技術事例集, (2020).

ABSTRACT

Microalgae are expected as promising biomass fuels. On the other hand, algae biomass is one of the effective uses of CO₂ in industrial exhaust gas. The purpose of this study is to confirm the algae cultivation effect using waste heat and CO₂ in the actual exhaust gas from a thermal power plant at the same time and to determine the CO₂ utilization rate of the actual exhaust gas. As a result, it was confirmed that high algae productivity and high CO₂ utilization rate could be simultaneously achieved. We also verified that heating and cooling the culture pond with waste heat improved the CO₂ utilization rate by 40% or more.
