

セメント排ガスからの藻類を用いた バイオプラスチック製造技術開発

福田 真也 高山 佳典 田中 修吉
路川 秀徳 位地 正年 渡邊 信

Development for Algae-Based Bioplastic Production Process from Cement Exhaust Gas

Shinya FUKUDA Yoshinori TAKAYAMA Shukichi TANAKA
Hidenori MICHIKAWA Masatoshi IJI Makoto M. WATANABE

Abstract

Global warming due to an increase in CO₂ emissions has become a problem in recent years. Our company has also been discharged CO₂ 5million tons / y in the Kyushu plant, and measures are needed. To solve this problem, we examined the process of culturing algae using exhaust gas from factory and producing bioplastics from their substances. Suppose CO₂ can be reused as bioplastic by this process. In that case, it can be expected to be used continuously as an alternative to conventional petroleum-derived plastics.

We have succeeded in mass culturing at the 2000 L level using flue gas at the algae culture facility constructed at the Kyushu Plant. Bioplastics also made from algae-produced paramylon and fatty acids retained sufficiently beneficial properties.

The effort to obtain bioplastics through such a process was the first attempt in the domestic cement industry. It was a precious technological development from the viewpoint of CO₂ reduction and effective utilization.

キーワード：藻類，培養，排ガス，バイオプラスチック，セメント

1. 背景

18 世紀半ばから 19 世紀にイギリスで起こった産業革命以来，人類の生産活動は飛躍的に増大すると共に環境汚染の問題もその規模を拡大し続けている。その中で CO₂ 排出量の増大による地球温暖化問題が叫ばれるようになって久しい。当社においても九州工場ではセメント製造時に年間約 500 万トンの CO₂ を排出しており，その対策が求められている。

この問題に対して我々は藻類の持つ光合成に着目した。すなわちセメント製造時に排出される排ガスの一部を藻類の培養槽に導入して藻類に排ガス中の CO₂ を吸収させることで生育させ，さらに培養した藻類が細胞中に蓄積する有用物質を利用してバイオプラスチックを製造する。従来のプラスチックは石油を原料として製造されているのに対して，本プロジェクトにおいて合成されたバイオプラスチックは藻類が排ガス中の CO₂ を原料として生成した材料で作られたもの考えることが出来る為，石油資源の代替として持続的利用が想定出来る。このようなプロセスにてバイオプラスチックを得るという取り組みは

国内セメント業界では初めての試みであり，CO₂ の削減と有効利用の観点から非常に価値のある技術開発となった。

図 1 は本プロジェクトの概要図である。九州工場でのセメント製造プロセスにおいて発生する CO₂ 排ガスを藻類培養槽に導入し，太陽光によって光合成をさせる。さらにその際に同時に発生する排熱を利用して培養槽の保温を行う事で一年を通して藻類が培養可能となる。また排熱は後段のバイオプラスチック合成の際にも再利用されて生産コストの削減に大きく貢献する。また，藻類生育の為に養分として下水ならびに下水処理の際に発生する活性汚泥を活用することで，培養工程において最大のウェイトを占める培地コストの問題を回避しうる。こうした工程を経て生産されるバイオプラスチックは従来の石油系プラスチックよりも大幅に環境負荷を低減できると予想される。

なお本開発は環境省プロジェクト「CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（藻類バイオマスの効率生産と高機能性プラスチック化による協働低炭素化技術）」として，筑波大学，日本電気(株)，藻バイオテクノ

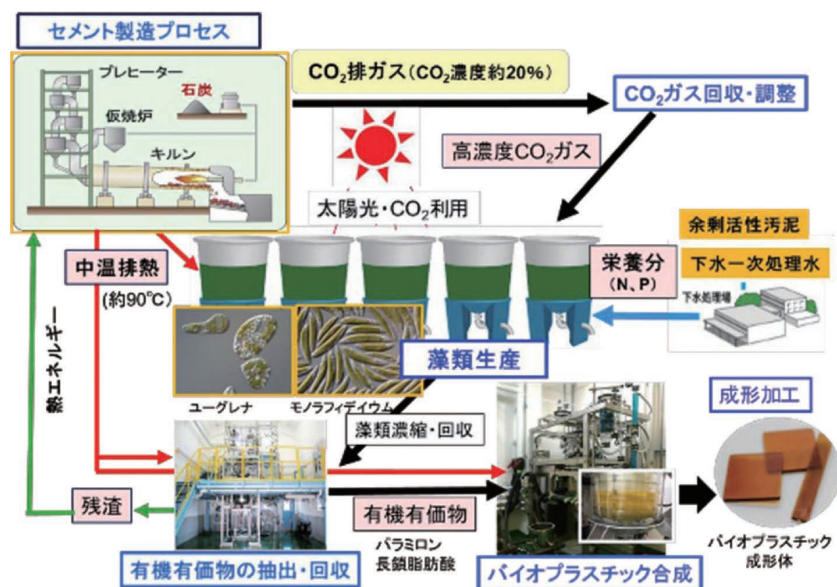


図1 プロジェクト概要
Project overview

ロジーズ(株), 当社の4者にて実施した。

2. 藻類の培養

2.1 有用物質を生成する藻類

ユーグレナグラシリス

ユーグレナ植物門ユーグレナ藻綱ユーグレナ目に属する大きさ $100\ \mu\text{m}$ 以下の鞭毛虫でミドリムシとも呼ばれる(図2左)。近年は健康食品として販売されることも多いが, バイオ燃料の原料や医療, 環境改善への応用研究なども盛んに行われている¹⁾。

葉緑体を有しており光合成で得たエネルギーを使って運動し, 細胞内にパラミロンと呼ばれる $\beta 1, 3$ -グルカン顆粒を貯蔵する事で知られる²⁾。

モノラフィディウム

緑藻植物門緑藻綱ヨコワミドロ目セレンスツルム科に属する藻類で単細胞不動性。大きさは $50\ \mu\text{m}$ 程度の両端が尖った紡錘形をしている(図2右)。細胞内に脂肪酸を貯蔵することが知られている³⁾。

2.2 藻類培養

2.2.1 培養施設

当社九州工場敷地内に $100\ \text{m}^2$ の温室を建設して 100L 培養槽 2 基と 2000L 培養槽 2 基を設置し, 350 m 離れた煙突から排ガスを各培養槽に供給するシステムを構築した(図3)。

2.2.2 培地

自然環境にある藻類とは違い, 培養中の藻類は生育に必要な養分を全て自身が存在する培養槽に満たされた水溶液から得なければならない。その為, 培養の際には培地と呼ばれる養分を豊富に含む水溶液を人工的に調製する必要がある。その中の一つ AF-6 培地の組成を表1に示す。培地は藻類種や目的に応じて実に多種多様な物が存在しており, 国立環境研究所の微生物系統保存施設のホームページには本研究で用いたユーグレナとモノラフィディウムの様な淡水性の藻類を培養する培地だけでも 68 種類が列挙されている⁴⁾。

主成分として窒素, カリウム, マグネシウムの3種類と鉄, マンガン等の微量元素にビタミン類で構成されて

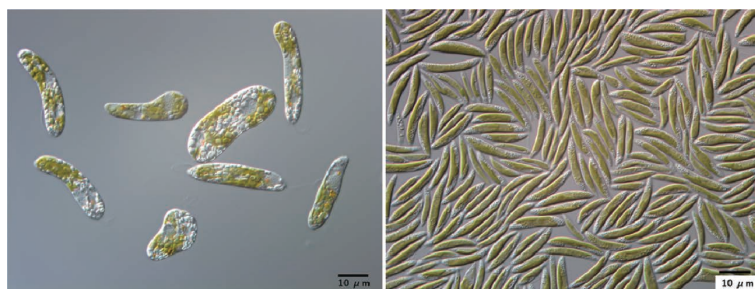


図2 培養藻類 (左: ユーグレナ 右: モノラフィディウム)

Cultured algae

Euglena gracilis (left) *Monoraphidium sp* (right)

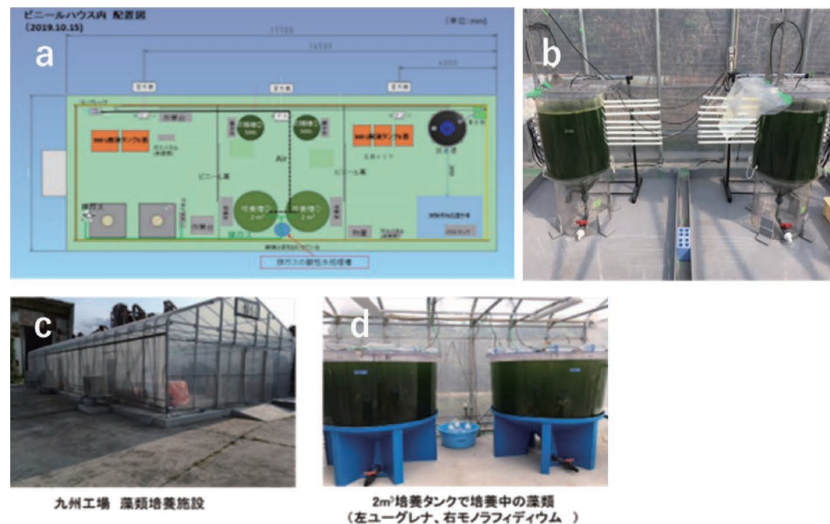


図3 九州工場藻類培養施設 (a 施設配置図 b 100 L レベル培養槽 c 施設外観 d 2000 L レベル培養槽)

Algae culture facility at Kyushu Plant

Equipment layout (a), 100 L level culture tanks (b), Facility appearance (c), 2000 L level culture tanks (d)

表1 AF-6 培地組成
Composition of AF-6 medium

Solution A	500 倍濃縮液	Solution B	1000 倍濃縮液
NaNO ₃	14 g	KH ₂ PO ₄	1 g
NH ₄ NO ₃	2.2 g	K ₂ HPO ₄	0.5 g
MgSO ₄ · 7H ₂ O	3 g	蒸留水	100 ml
CaCl ₂ · 2H ₂ O	1 g		
クエン酸鉄(Ⅲ) _n 水和物	0.2 g	Vitamine Mix	1000 倍濃縮液
クエン酸 1 水和物	0.2 g	Biotin	0.2 mg
蒸留水	200 ml	Thiamin HCl	1.0 mg
		Vitamin B ₆	0.1 mg
		Vitamin B ₁₂	0.1 mg
		蒸留水	100 ml
PIV metals	5 倍濃縮液		
FeCl ₃ · 6H ₂ O	98 mg		
MnCl · 4H ₂ O	18 mg		
CoCl · 6H ₂ O	11 mg		
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	2 mg		
Na ₂ -EDTA · 2H ₂ O	500 mg		
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	1.25 mg		
蒸留水	100 ml		

いる。他の培地も添加物や濃度に多少の差こそあれ概ね同様の組成をしている。

本プロジェクトにおいてはこれら人工培地に代わって、下水を藻類培養の培地として利用する事を想定した。下水には窒素、カリウムなどが人工培地に近似の濃度で含有しており藻類培養に利用できる。実際に筑波大学では下水を用いた藻類培養も盛んに行われており良好な成果をあげている。また、下水を培地として利用すれば下水中から窒素やカリウムを除去できるため下水浄化の助け

にもなりプロセス全体の CO₂ 削減にもつながる。

だが、現状は法令や安全性などの問題から九州工場での下水を用いた培養の実施は困難と判断せざるを得なかった。その為九州工場での培養実験は人工培地を持って行い、その結果をもとに下水を培地として利用した場合の CO₂ 削減効果を計算によって求めて評価を行う事とした。

2.2.3 九州工場での藻類培養

九州工場内の藻類培養施設において 2000 L レベルの藻

類培養を成功させる為にまずは 100 L レベル培養槽での培養を共同研究先である筑波大学のメソッドに沿う形で試行した所、以下の2点の問題で藻類の生育が阻害されるという事態が発生した。

1. 実環境との違いによるバクテリアや他の藻類の混入
2. 排ガス中に含まれる生育阻害物質

1については九州工場培養施設に隣接する用地に生育する藻類や雑木林から、風に乗った土の微粒子が飛来し培養施設内の培養槽に飛び込むことが原因と考えられた為、次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いた培養槽の滅菌洗浄の徹底と培養槽開放部にビニールカバーを取り付ける等の対応を取った。2に対しては排ガスを水フィルターで洗浄することで生育阻害物質を除くことが出来た。

上記の様な対策が功を奏し1年を見込んでいた 100 L 槽から 2,000 L 槽へのスケールアップを半年で達成することが出来、環境省プロジェクトの期間内でのスケールアップに成功した。

2.2.4 培養藻類の回収

培養した藻類を収穫する為に硫酸マグネシウムやポリグル（商標名、ポリグルタミン酸を主原料とした薬剤）を共沈剤として利用して藻類を沈殿させ、上澄みを除去して濃縮された藻類を回収した（図4）。

3. バイオプラスチック

藻類由来の原料によるバイオプラスチックの大まかな分子構造を図5に示す。基本的には骨格成分に結合したプロピオン酸をアンカーにした長鎖脂肪酸同士が結合することで骨格成分同士が結びついている。図5の構成要素の内、骨格となるパラミロンはユーグレナから、それ

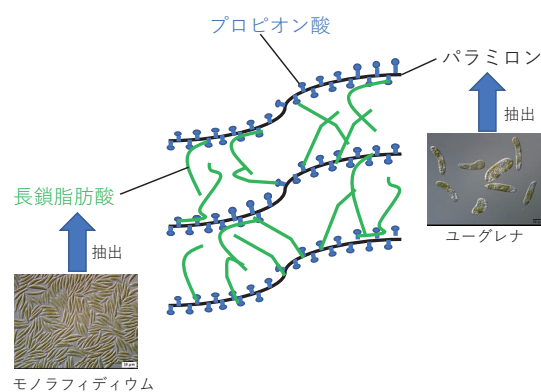


図5 バイオプラスチック分子の概要
Overview of bioplastic molecules

らを繋ぐ長鎖脂肪酸はモノラフィディウムからそれぞれ抽出し、それにプロピオン酸を第三成分として添加して合成している。藻類からの有用成分の抽出とバイオプラスチック合成は共同研究先である日本電気(株)が担当し、100 L バッチ系でのプラスチック合成を成功させている。

最終的なバイオプラスチックの性状はいずれも環境省プロジェクトの要求性能をクリアし、特に加熱流動性に関しては目標値を大きく上回るレベルを実現し、実用に耐え得るものを製造することが出来た（表2、図6）⁵⁻⁷⁾。

表2 排ガス培養藻類由来のバイオプラスチック
Properties of bioplastics made in this project

	目標値	成果値
曲げ強度	45 MPa 以上	46-50 MPa
耐熱性	100℃ 以上	96℃-100℃
加熱流動性	3 g/min 以上	88-100 g/min

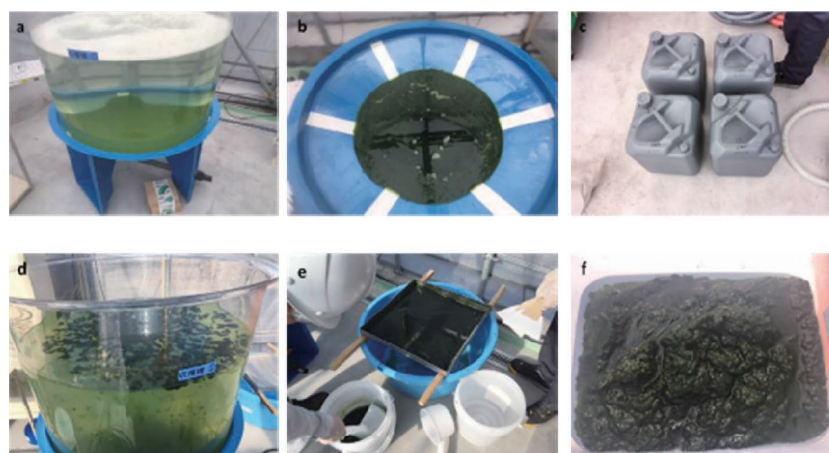


図4 共沈剤添加による藻類の沈殿（a, d）上澄み除去による濃縮（b, e）濃縮藻類（c, f）

Harvesting algae

Precipitation of algae by adding co-precipitant (a,d) Concentration of algae by removing supernatant (b, e) Concentrated algae (c, f)

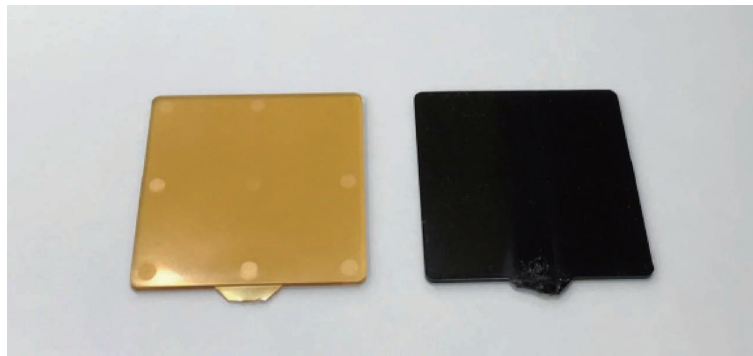


図6 藻類バイオプラスチックの形成体（一辺 10 cm 左：無着色 右：カーボン粉末を含有させて着色）

Molded algae bioplastics
100×100 (size), Uncolored (left) Colored with carbon powder (right)

4. CO₂ 収支

本プロジェクトにおけるプロセスの総合的な CO₂ 収支を表3に示した。

バイオプラスチック 1 kg を製造する際に発生する環境負荷を CO₂ 換算で算出した所、培養工程においては排ガス利用による CO₂ 固定効果および有用物質回収後の熱エネルギーの回収が CO₂ 削減に大きな効果を持ち、さらに下水利用で想定される CO₂ 削減効果を加算するとプロセス全体としてほぼ CO₂ 排出のないバイオプラスチック製造プロセスが構築できることが分かった。

5. まとめ

本プロジェクトの成果として以下の3点が挙げられる。

1. セメント排ガスを用いた 2000 L レベル藻類培養に成功
2. 1. で培養した藻類由来の原料によるバイオプラスチックの製造に成功
3. 今後、下水を培地とすることで CO₂ 排出を限りなく 0 に出来る可能性を示唆

本研究により CO₂ 排ガスを藻類を介してバイオプラスチックへ変換するプロセスにおいて 2000 L レベルの大規模培養に成功したことは、当該プロセスの社会実装に向

表3 本プロジェクトで製造したバイオプラスチックの CO₂ 収支
CO₂ balance of the bioplastics produced

工程	バイオプラスチック 1 kg あたりの CO ₂ 排出量 [Kg-CO ₂ /KgBM]	PET 1 kg あたりの CO ₂ 排出量 [Kg-CO ₂ /KgBM]
藻類培養		
材料（薬剤）	1.00	
用力	0.45	
排ガス利用による CO ₂ 固定効果	-0.49	なし
下水利用による省エネ効果	-1.68	
小計	-0.72	
有用物質回収		
材料（溶媒ロス分＋薬剤）	0.56	
残渣からの熱エネルギー回収	-2.46	なし
用力	0.68	
小計	-1.22	
プラスチック合成		
材料（他の原料＋溶媒ロス分＋薬剤）	1.80	（モノマー） 1.39
用力	0.12	（高温 高圧 真空） 1.39
小計	1.92	
合計	-0.02	2.78

けて大きな前進と考える。また、得られたバイオプラスチックの品質も良好で熱流動性に富むという面白い性質も備えている。

法令対応の難しさや安全面から今回は行わなかった下水の培地利用だが、そのCO₂削減効果は非常に大きく、その他の工程のCO₂排出を相殺する事も可能と試算する。他のバイオプラスチックの研究では藻類培養の培地として下水の利用を前提としていないが、本プロジェクトでの結果が示す通り下水利用を前提とすることで環境負荷がほとんど無いバイオプラスチックの製造の可能性が示された意義は大きい。

謝 辞

環境省プロジェクトを遂行するにあたり、様々なご指導、ご鞭撻を賜りました筑波大学 渡邊 信特命教授、環境・バイオ・プラスチックリサーチ 位地正年代表、藻バイオテクノロジー株式会社 路川秀徳研究開発部長、日本電気株式会社 田中修吉研究マネージャーに深く感謝致しますとともに、厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 株式会社ユーグレナプレスリリース, 2018年6月29日, <https://www.euglena.jp/news/180629-2/>
- 2) A. Gissibl, A. Sun, A. Care, H. Nevalainen and A. Sunna, "Bioproducts From *Euglena gracilis*: Synthesis and Applications", *Front Bioeng Biotechnol.* **15**(7), 108 (2019).
- 3) 筑波大学ホームページ, <https://www.biol.tsukuba.ac.jp/~algae/PoK/Chlorophyta/Monoraphidium/index.html>
- 4) 国立環境研究所ホームページ, <https://mcc.nies.go.jp/02medium.html>
- 5) 月刊ビジネスアイ エネコ編集部, "第63回未来の扉：藻類を使い高機能バイオプラスチック生産, CO₂を吸収した藻で、ゼロエミッションのプラ製造実現へ", 地球環境とエネルギー, **52**(6), 616, 38-41 (2019).

- 6) 山城 緑, 位地正年, 田中修吉ら, 第68回高分子学会年次大会予稿集, **68**, 1, 2Pb098 (2019).
- 7) M. Yamashiro, M. Iji, S. Tanaka and M. M. Watanabe, The 7th Conference of the International Society for Applied Phycology (ISAP2021), Special session: Algae-based bioplastics, (2021).



福田 真也 Shinya FUKUDA
機能化学領域
嘱託



高山 佳典 Yoshinori TAKAYAMA
生産技術開発領域
主任研究員

田中 修吉 Shukichi TANAKA
日本電気株式会社システムプラットフォーム研究所
研究マネージャー

路川 秀徳 Hidenori MICHIKAWA
藻バイオテクノロジー株式会社
研究開発部長

位地 正年 Masatoshi IJI
環境・バイオ・プラスチックリサーチ
代表

渡邊 信 Makoto M. WATANABE
筑波大学藻類バイオマス・エネルギーシステム
開発研究センター長
特命教授