

平成30年1月25日
兵庫県立大学
京都大学
科学技術振興機構（JST）
（協力）姫路市

「珪藻のフィジオロミクスに基づく褐色のエネルギー革命のためのパイロットプラントの完成」

～培養コストの大幅低減による低炭素社会実現と有用物質の生産～

ポイント

- ・ 陸上作物よりも単位面積当たりの燃料生産性が高い微細藻類は、次世代の持続可能エネルギー生産生物として期待されており、同時に温室効果ガスである二酸化炭素を低減させる高い効果も期待されます。中でも珪藻は地球上の光合成の約25%を担っており、再生可能資源生物としてポテンシャルが高いと言えます。しかし、微細藻類を産業的に利用するためには、培養コストが高い、超大型培養系における培養条件が確立していない、形質転換微細藻類の野外解放系で大量培養時の拡散防止措置などの手立てが確立していないという問題が残されています。
- ・ このような問題を解決するためには、微細藻類の光合成機能や細胞内生理を理解するという基礎科学的研究と合わせ、パイロットプラントを用いた実地試験が欠かせません。
- ・ 低炭素化社会を実現するために、珪藻の光合成機能を利用して二酸化炭素を有用物質に変換するための実証パイロットプラントが姫路市の協力により、下水処理施設「大的析水苑」の一面に完成しました。
- ・ 今後、この実証パイロットプラントにおいて、下水に含まれる窒素分などを珪藻培養の栄養塩（肥料）として利用することにより、培養コストを大幅に下げて現実的成本で燃料、医薬品原料、養殖用餌料等を生産するとともに、下水処理にかかる負荷を低減する仕組みが確立される予定です。

珪藻は地球上の光合成の約25%を担っていて、バイオ燃料、医薬品原料、養殖用餌料等の有用物質を生産する藻として注目されていましたが、培養コストが高く課題となっていました。兵庫県立大学大学院生命理学研究科の菓子野康浩准教授、京都大学大学院生命科学科の伊福健太

郎助教らの研究グループは、低コストで珪藻を大量培養するための要素実験などを行い、その結果に基づきパイロットプラントを設計・建設していましたが、この度、完成しました。

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発（ALCA）の一環で行われています。

<研究の背景と経緯>

ALCAの研究課題「珪藻のフィジオロミクスに基づく褐色のエネルギー革命」で研究の柱となる微細藻の一種、珪藻は、地球上の光合成、つまり光合成的CO₂固定の約25%を担っており、熱帯雨林の光合成量に匹敵するほどの生産性を有します。そして、脂質、DHA/EPA、シリカ、抗酸化能の高いフコキサンチン等の有用物質も産生します。本研究課題は、弱い光環境に最適化した生物である珪藻の光合成機能を強化して、明るい環境下でも光による光合成阻害を回避しつつ迅速に増殖し、効率的に有用代謝産物や油脂を生産する細胞へと分子育種することを目指しています。このために、珪藻細胞の生理学的機能を統合的に理解（フィジオロミクス）するとともに、遺伝子工学的形質転換技術やゲノム編集技術の構築を進めてきており、昨年度（2016年度）からALCAの「実用技術化プロジェクト」に移行しました。現在、大量培養が可能な微細藻類は数えるほどですが、そうした実用微細藻類では実用的な遺伝子工学的技術は確立されていません。本研究課題では、海洋性珪藻の一種で、牡蠣のような二枚貝やエビの養殖の餌料としても用いられているツノケイソウ（図1）を用い、実用的な遺伝子工学的技術を開発しました（特許出願済み）。そして、麦角菌由来の脂肪酸水酸化酵素の遺伝子をツノケイソウに送り込んで発現させ、本来珪藻が合成することができないリシノール酸を生産させることも可能となりました。リシノール酸は、プラスチック原料としても使われる有用物質です。これにより、光のエネルギーを使ってCO₂を各種の有用物質に変換する実用的な生物学的プラットフォームができたこととなります。

一方、野生のツノケイソウ（野生株）を用いた実験では、野外で5トンレベルの開放系培養実験を行い、昼夜で光強度が大きく変動し、それに伴って温度も変わるという自然環境下での疎放的培養を可能にしました。加えて、海産の珪藻にも関わらず、ゲリラ豪雨や台風で塩濃度が下がっても増殖を維持できるというロバスト性も確認しました。

そこで、大量培養後の有用物質抽出過程の効率化も進めました。一般的には、大量の水の中から微細藻の細胞を集め、乾燥させて細胞を破碎し、有用物質を抽出・精製する一連の工程は、手間がかかる上に多大な

エネルギー投入が必要です。つまり、多大なCO₂の放出と表裏一体となっています。本研究課題では、このような問題を解決するため、珪藻細胞を集めることなく細胞を破碎すると同時に油脂やフコキサンチンのような有用物質を濃縮・回収するという、マイクロバブル処理による基盤技術を確立しました（特許出願済み）。その上で、より大型化して実用的な技術への展開のために装置の改良を進めています。

このように、社会実装するための基盤技術は着実に構築されつつありますが、培養コストが高い、超大型培養系における培養条件が確立していない、形質転換微細藻類の野外解放系で大量培養時の拡散防止措置などの手立てが確立していないという問題が残されています。

<研究および設備の内容>

本研究課題では、ツノケイソウが海洋性珪藻にもかかわらず、増殖および油脂生産性の塩濃度依存性が小さく、下水の汚水等と混合して効率的に培養可能であることを見出しています。作物が肥料を必要とするように、微細藻類が光合成的に増殖するためには栄養塩として窒素分やリン酸が必要です。下水の汚水には、富栄養化物質であるリン酸や窒素分が含まれています。つまり、下水処理場で珪藻を培養すれば、培養の高コストの主要因である栄養塩を汚水から得ることができるとともに、汚水から富栄養化物質を除去することができるので下水処理の負荷を低減する効果も期待できます。下水処理負荷の低減は、CO₂排出の削減となる上に、汚水処理の過程で活性汚泥や消化槽から発生するCO₂を光合成に利用することでさらなる低炭素化に繋げることができます。しかし、実際に実用化するためには、パイロットプラントを用いて培養実験を行い、最適化する必要があります。

そこで、兵庫県姫路市の協力を得て、姫路市東端の沿岸部にある大的析水苑内の土地に珪藻培養設備を設置し、処理場に流入する汚水、および汚水処理により発生するCO₂を用いた培養実験を開始するに至りました。この施設（図2）は2棟の温室からなります。温室は、光透過特性を考慮したフィルムによって覆われています。それぞれの温室の中には約3.5 x 6メートルのプール型培養槽、約2 x 10メートルのレースウェー型培養槽が設置されており、5～8トンの培養を行うことができます。培養槽には、下水処理場の初沈後の汚水を汲み込むための導水システムと、処理場脇の滲から汽水を汲み込むための導水システム、下水処理の曝気槽からCO₂を多く含む空気を送り込むシステムとが繋がっています。そして、水温、気温、光強度、通気中のCO₂濃度といった物理化学的環境因子を測定するセンサーが設置され、自動的に記録することができます。

<今後の展開>

この施設を用いて「野生株」を培養し、汚水と海水との混合比や通気方法、年間を通じた培養条件の最適化、細胞破碎と有用物質回収のためのマイクロバブル処理のシステム化、帯電性ナノバブルの利用、トータルのコスト評価、CO₂低減効果の評価等を行い、増殖特性と物質生産の効率化を目指した実験が進められます。さらに、培養実験は「野生株」で行われますが、将来の形質転換株培養のために、形質転換株を大量に培養する際の設備上の問題点が洗い出されることになっています。

このようにして、太陽光による光合成を通じて大気中CO₂や下水処理場・火力発電所等から排出されるCO₂を有用物質や油脂に転換して社会に提供するシステムを具現化・社会実装し、エコフレンドリーな低炭素化社会の実現を目指した研究が進められていきます（図3、4）。

<参考図>

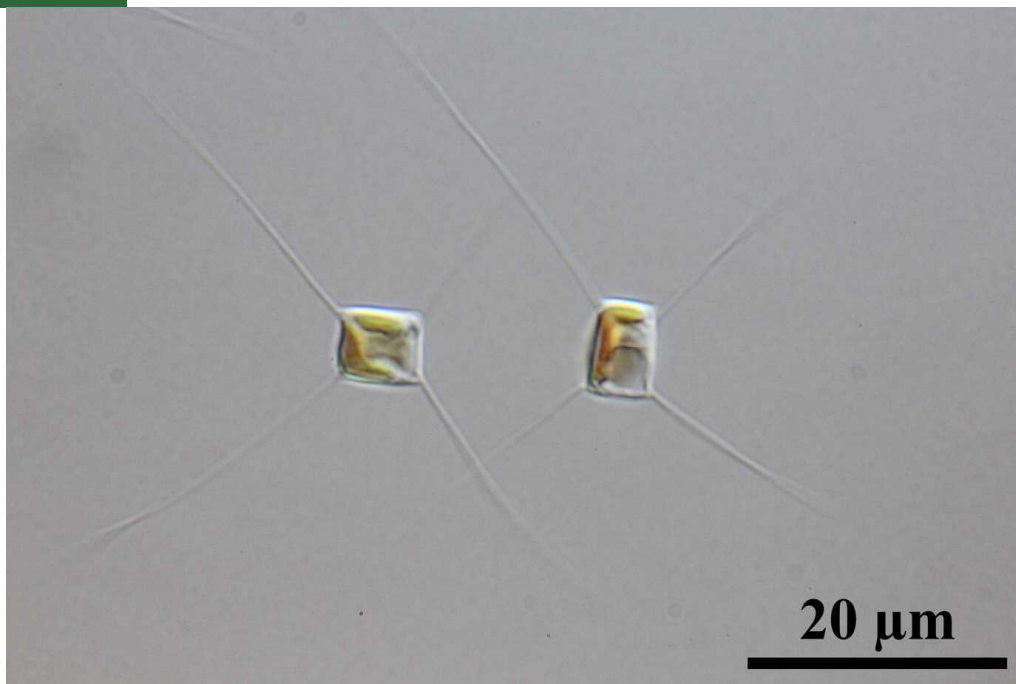


図1 ツノケイソウ



全体外観



レースウェイ型水槽



現場実験室および制御盤



プール型水槽

図2 姫路市の下水道センター・大的析水苑に完成した培養施設

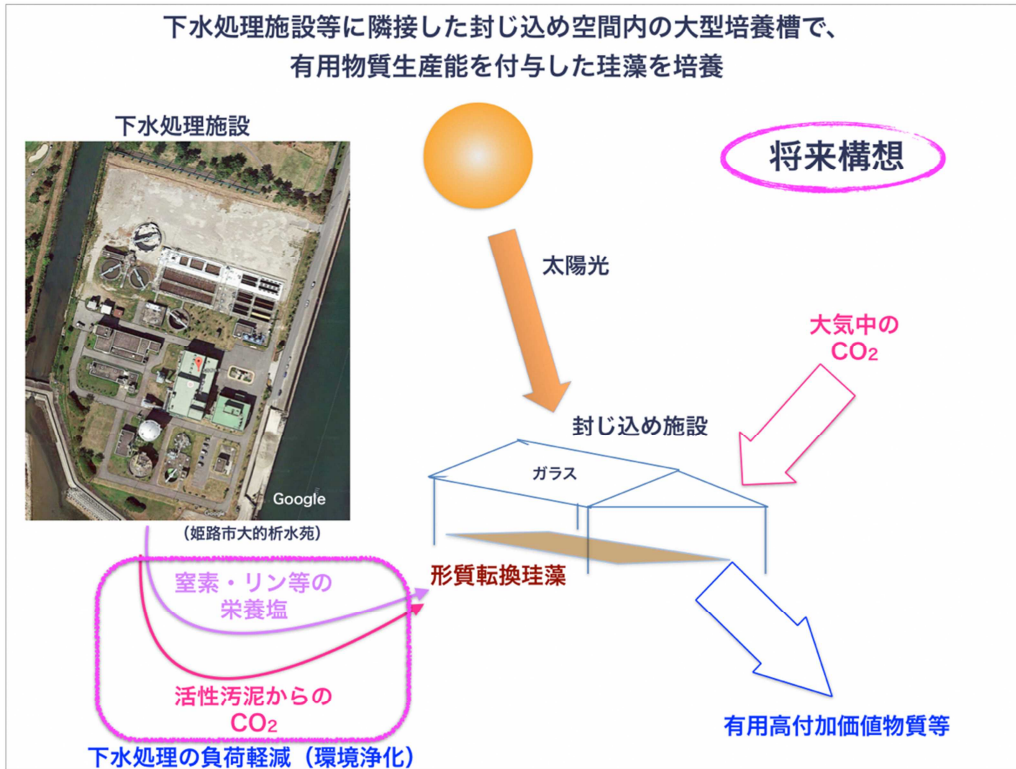


図3 下水処理場と共存する培養システムの将来構想

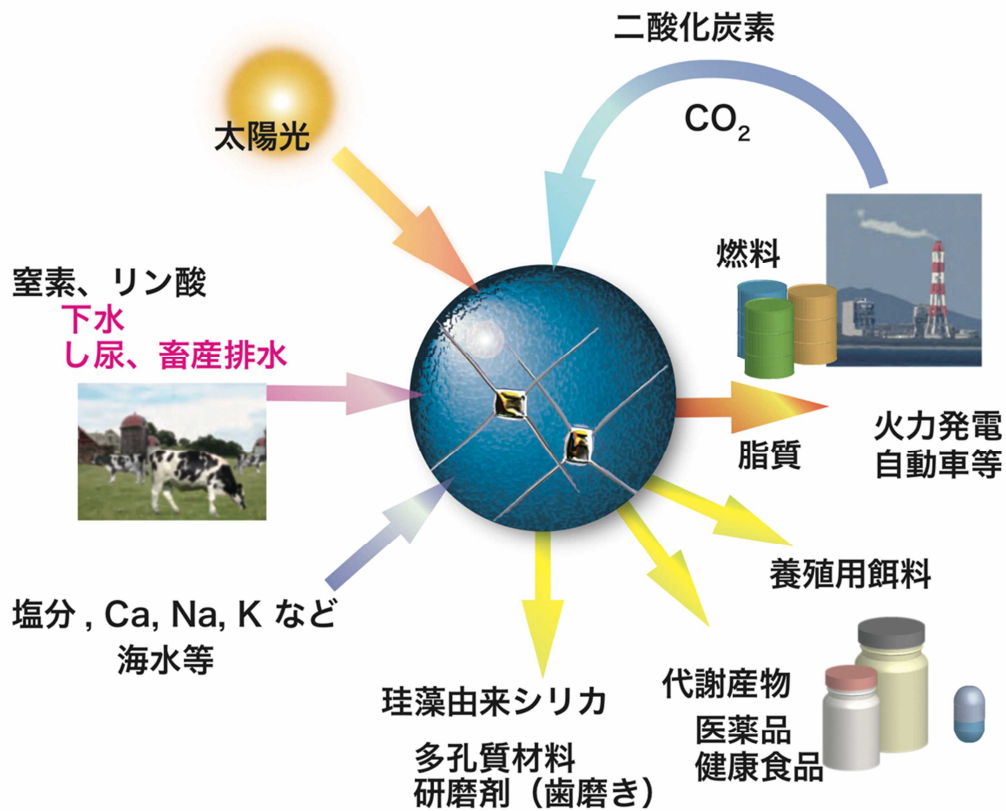


図4 珪藻を軸にした再生可能物質生産に基づく低炭素社会

< 参考論文 >

Tokushima H, Inoue-Kashino N, Nakazato Y, Masuda A, Ifuku K & Kashino Y (2016) Advantageous characteristics of the diatom *Chaetoceros gracilis* as a sustainable biofuel producer. *Biotechnol Biofuels* **9**: 235. (DOI: 10.1186/s13068-016-0649-0)

Ifuku K, Yan D, Miyahara M, Inoue-Kashino N, Yamamoto YY & Kashino Y (2014) A stable and efficient nuclear transformation system for the diatom *Chaetoceros gracilis*. *Photosynth Res* **123**: 203-211. (doi:10.1007/s11120-014-0048-y)

Kajikawa M, Abe T, Ifuku K, Furutani KI, Yan D, Okuda T, Ando A, Kishino S, Ogawa J & Fukuzawa H (2016) Production of ricinoleic acid-containing monoestolide triacylglycerides in an oleaginous diatom, *Chaetoceros gracilis*. *Sci Rep* **6**: 36809. (DOI: 10.1038/srep36809)

菓子野康浩、伊福健太郎 (2017) 珪藻のバイオファクトリー化を目指した基盤技術の開発 -珪藻バイオファクトリー-、*化学と生物* **55** (11): 759-766.

伊福健太郎、菓子野康浩 (2017) 「実用珪藻 *Chaetoceros* 属の新しい応用利用に向けた技術開発」*ケミカルエンジニアリング 特集「バイオサイエンスを支える革新技术」* **62** (9): 15-21.

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

兵庫県立大学大学院生命理学研究科 准教授 菓子野康浩

電話: 0791-58-0185 e-mail: kashino@sci.u-hyogo.ac.jp

京都大学大学院生命科学研究科 助教 伊福健太郎

電話: 075-753-6384 e-mail: ifuku@kais.kyoto-u.ac.jp

<JST事業に関すること>

江森 正憲 (エモリ マサノリ)

科学技術振興機構 環境エネルギー研究開発推進部 低炭素研究担当

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel: 03-3512-3543 Fax: 03-3512-3533

E-mail: alca@jst.go.jp

<報道担当>

兵庫県立大学産学連携・研究推進機構

特任教授兼リサーチ・アドミニストレーター 上田澄廣

電話：079-283-4560

e-mail：sumihiro_ueda@ofc.u-hyogo.ac.jp

事務担当：兵庫県立大学社会貢献部産学連携・研究支援課

課長 後藤綾一

電話：078-794-6694

e-mail：ryouichi_gotou@ofc.u-hyogo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel：03-5214-8404 Fax：03-5214-8432

E-mail：jstkoho@jst.go.jp