

## バイオ燃料の生産に重要な酵素のはたらきを解明

### 1. 発表者：

工藤 恒（東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系 大学院生）  
名和良太（東京大学教養学部 基礎科学科 学部生（当時））  
林 勇樹（東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系 助教）  
新井宗仁（東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系 准教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆軽油相当の炭化水素の生産に関わる、ラン藻がもつ酵素のはたらきを解明しました。
- ◆この酵素を構成するアミノ酸配列を変えると、炭化水素の生産を効率化できるだけでなく、生産される炭化水素の長さも調節できることを発見しました。
- ◆本成果は、再生可能エネルギーであるバイオ燃料の生産の効率化や、凍りにくい燃料の生産に応用でき、地球温暖化の防止にも貢献しうると期待されます。

### 3. 発表概要：

藻類であるラン藻（注1）は、光合成によって大気中の二酸化炭素を吸収し、軽油燃料に相当する炭化水素を生産できます。そのため、ラン藻によって生産されるバイオ燃料は、地球温暖化の防止に有効な再生可能エネルギーとして注目されています。近年、ラン藻による炭化水素の生産に関わる酵素（注2）が同定されましたが、その酵素の詳細なはたらきは未解明でした。

東京大学大学院総合文化研究科の工藤恒大学院生と新井宗仁准教授らの研究グループは、この酵素を構成するアミノ酸配列（注3）を変えたときに、酵素のはたらきがどのように変化するかを詳細に調べました。その結果、この酵素のアミノ酸配列を変えると、炭化水素の生産を効率化できるだけでなく、生産される炭化水素の長さも調節できることを発見しました。本研究の成果は、再生可能エネルギーであるバイオ燃料の生産の効率化や、凍りにくい燃料の生産に応用でき、地球温暖化の防止にも貢献しうると期待されます。

本研究成果は2016年11月1日付でオープンアクセス誌「バイオテクノロジー・フォー・バイオフューエルズ」オンライン版に掲載されます。

### 4. 発表内容：

#### 研究背景

現在、世界のエネルギー消費は、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料が主流です。しかし、これらの化石燃料は将来的に枯渇する恐れがあるため、新しい代替エネルギーを普及させることが世界的な課題となっています。代替エネルギーとして注目されているのが、生物由来物質を燃料として用いる「バイオ燃料」です。藻類などの生物の中には、軽油や重油に相当する炭化水素を生産できるものがあります。しかも、これらの生物は、燃料の燃焼によって大気中に放出された二酸化炭素を吸収して光合成を行い、再び炭化水素（燃料）を生産できます（図1）。そのため、藻類が生産するバイオ燃料は、大気中の二酸化炭素の増加を防ぎ、地球温暖化の防止に有効な再生可能エネルギーとして期待されています。

藻類の一種であるラン藻は、軽油に相当する炭化水素（炭素数15と17）を生産できることが知られています。近年、ラン藻による炭化水素の生産には、アシル（アシル輸送タンパク質

(ACP)還元酵素(AAR)と、アルデヒド脱ホルミル化オキシゲナーゼ(ADO)という2つの酵素が関わるということが明らかになりました(図2)。酵素AARは、生物が脂肪酸を合成する途中で作るアシルACPを基質(原料)として、アルデヒドを生産します。次に酵素ADOは、このアルデヒドを原料として、軽油に相当する炭化水素を生産します。これらのラン藻の酵素を大腸菌内に導入すると、大腸菌も炭化水素を生産できるようになることから、これら2つの酵素は炭化水素生産の鍵となる酵素です。これまでに、酵素ADOの立体構造やはたらきは明らかになりつつあります。しかし、酵素AARの詳細なはたらきは未解明でした。

## 研究内容

本研究グループは、酵素AARを構成するアミノ酸配列を変えたときに、酵素のはたらきがどのように変化するかを詳細に調べました。ラン藻には多くの種類があり、それぞれがもつ酵素AARは、互いに少しずつ異なるアミノ酸配列から構成されています。そこで、代表的な12種類のラン藻を選び、それらがもつ酵素AARのはたらきを詳細に比較しました。具体的には、それぞれの酵素AARを、異なる大腸菌内に、酵素ADOとともに導入した後、生産された炭化水素の量と種類を調べました。

その結果、酵素AARのアミノ酸配列が異なると、炭化水素が生産される効率(活性)が大きく異なり、図3のAとBのように生産効率の高い酵素AARと、図3のCからKのように生産効率の低い酵素AARがあることが明らかになりました。また、効率の低い酵素AAR(図3のJ)のアミノ酸配列を人工的に改変して、生産効率を約12倍も向上させることにも成功しました。このときにアミノ酸配列を改変した部位は、酵素AARのはたらきを決める上で重要な部位であると考えられます。このように、酵素AARのアミノ酸配列を変えると、炭化水素の生産を効率化できることを発見しました。

さらに、酵素AARのアミノ酸配列が異なると、生産される炭化水素の種類が異なることも明らかになりました(図4)。興味深いことに、海洋性のラン藻がもつ酵素AARでは、主に短い炭化水素(炭素数15)が生産されたのに対し、淡水性のラン藻がもつ酵素AARでは、主に長い炭化水素(炭素数17)が生産されました。すなわち、ラン藻の生育環境に応じて、酵素AARが利用する基質(原料)が異なることが示唆されました。このように、酵素AARのアミノ酸配列を変えると、生産される炭化水素の長さを調節できることを見出しました。

## 研究の意義・今後の展望

本研究で発見した効率の高い酵素AARを用いることにより、ラン藻などの生物を用いたバイオ燃料の生産を効率化できると期待されます。また、炭化水素の長さを短くすると凝固点が下がり、凍りにくくなります。それゆえ今後、酵素AARのアミノ酸配列を改変し、生産される炭化水素をさらに短くすることにより、凍りにくい寒冷地用の軽油燃料を生産できるようになると期待されます。本研究成果は今後、再生可能エネルギーであるバイオ燃料の生産に応用でき、地球温暖化の防止にも貢献しうると期待されます(図1)。

本成果は、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業個人型研究さきがけ(新井准教授)、文部科学省と日本学術振興会の科学研究費補助金(新井准教授と林助教)、および、ホクト生物科学振興財団助成、矢崎科学技術振興記念財団研究助成、ゼネラル石油研究奨励財団研究奨励助成(林助教)の支援を受けたものです。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Biotechnology for Biofuels」 (2016年11月1日(火) オンライン)

論文タイトル：Comparison of aldehyde-producing activities of cyanobacterial acyl-(acyl carrier protein) reductases

著者：Hisashi Kudo, Ryota Nawa, Yuuki Hayashi, Munehito Arai\*

DOI 番号：10.1186/s13068-016-0644-5

アブストラクト URL：

<https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-016-0644-5>

## 6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系

准教授 新井 宗仁 (あらい むねひと)

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

Tel：03-5454-6751

E-mail：arai@bio.c.u-tokyo.ac.jp

## 7. 用語解説：

注1) ラン藻

藻類の一種。シアノバクテリアともいう。光合成によって酸素を生み出す細菌であり、海水中や淡水中などに生息する。植物がもつ葉緑体の起源と考えられている。

注2) 酵素

化学反応を触媒するタンパク質のこと。

注3) アミノ酸配列

タンパク質は、多数のアミノ酸が鎖のようにつながった長いひも状の高分子である。生物は基本的に20種類のアミノ酸を用いており、これらがさまざまな順番で連結されることによって、多様な種類のタンパク質がつくられる。このときにアミノ酸が連結される順番（並び方）のことを、アミノ酸配列と呼ぶ。一般に、アミノ酸配列が同じタンパク質は、同じかたちと同じはたらきをもつ。一方、アミノ酸配列を少し変えると、酵素がはたらく効率や、酵素が用いる原料（基質）などを改変できる。しかし、アミノ酸配列を大幅に変更すると、酵素としてのはたらきを失ったり、全く別のはたらきをもつタンパク質になったりする。

8. 添付資料：

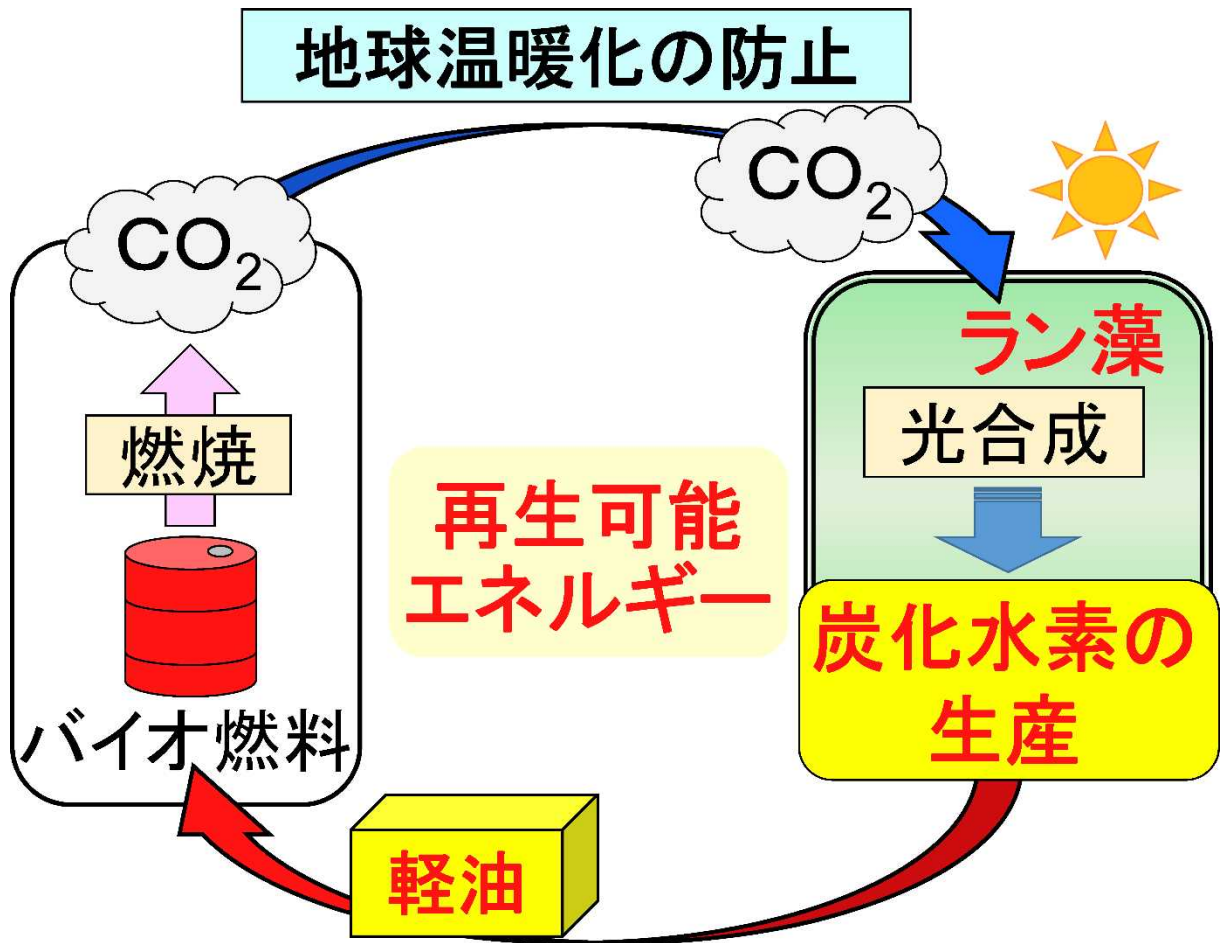


図1. ラン藻を利用したバイオ燃料生産の仕組み。ラン藻は光合成によって大気中の二酸化炭素を吸収し、軽油に相当する炭化水素を生産できる。このようなバイオ燃料が燃焼されると二酸化炭素が大気中に放出されるが、ラン藻はこれを吸収して光合成を行い、再び炭化水素（軽油燃料）を生産できる。そのため、ラン藻が生産するバイオ燃料は、大気中の二酸化炭素の増加を防ぎ、地球温暖化の防止に有効な再生可能エネルギーとして期待されている。

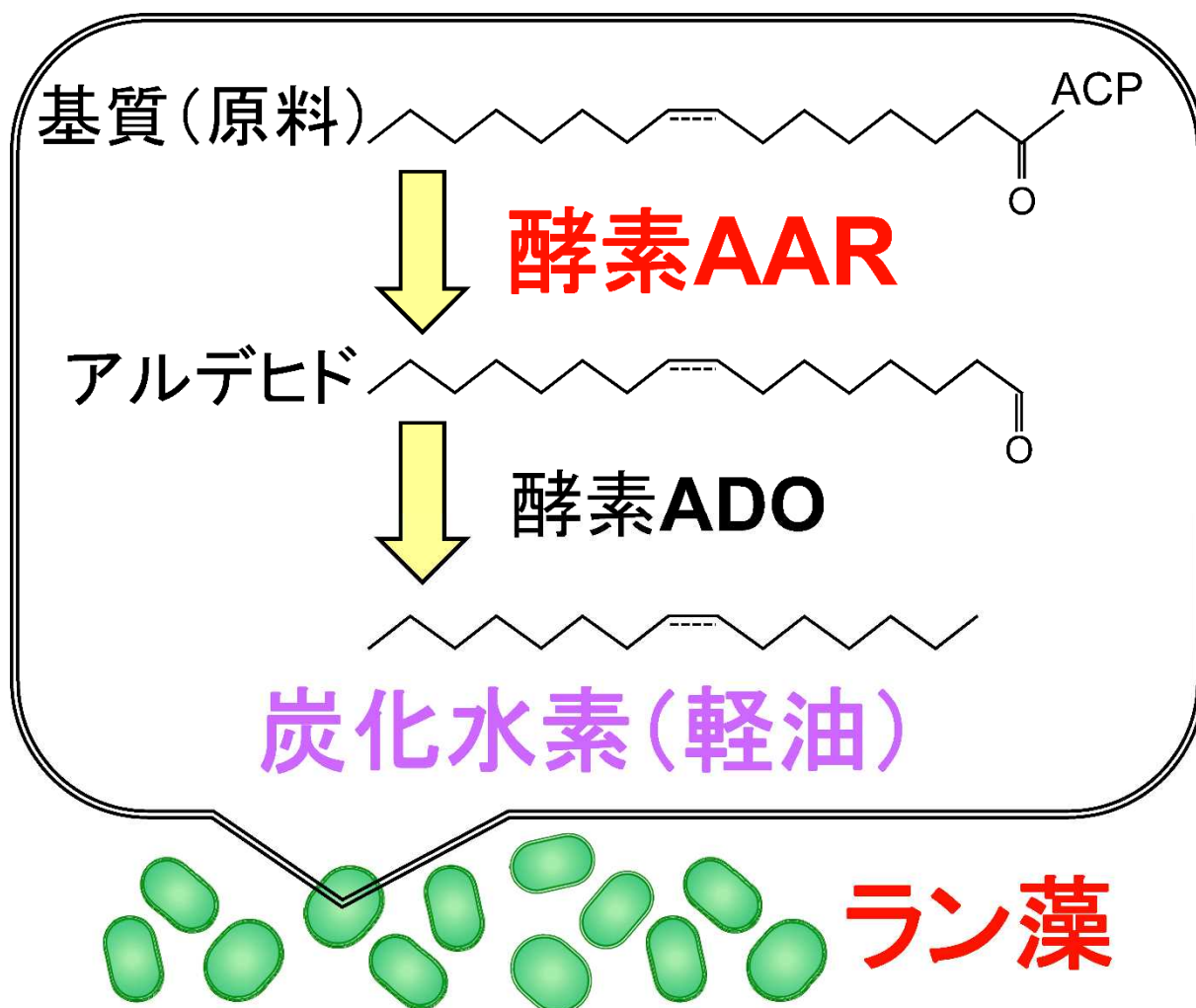


図2. ラン藻は2つの酵素 AAR (アシル (アシル輸送タンパク質(ACP)) 還元酵素) と ADO (アルデヒド脱ホルミル化オキシゲナーゼ) を用いて軽油相当の炭化水素を生産できる。酵素 AAR は、生物が脂肪酸を合成する途中で作るアシル ACP を基質 (原料) として、アルデヒドを生産する。次に酵素 ADO は、このアルデヒドを原料として、軽油に相当する炭化水素を生産する。

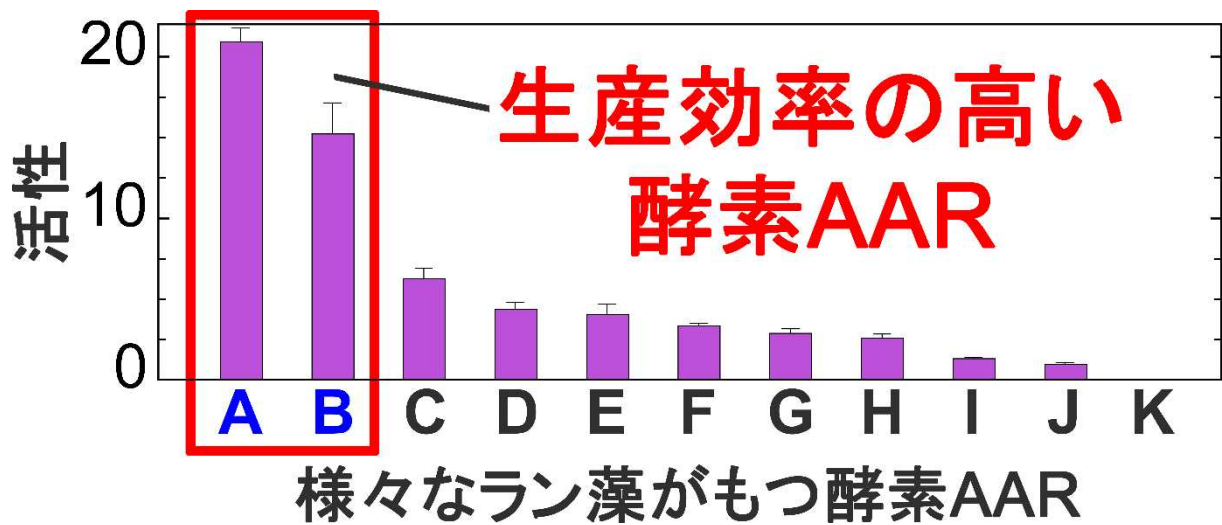


図3. さまざまなラン藻がもつ酵素 AAR の生産効率 (活性) を比較した結果。横軸の記号 A ~ K は、下記のラン藻がもつ酵素 AAR を表しており、それぞれのアミノ酸配列は互いに少しずつ異なっている。縦軸の値は、効率の低い酵素 AAR (J) の活性を 1 とした。A, *Synechococcus elongatus* PCC 7942 ; B, *Prochlorococcus marinus* str. MIT 9313 ; C, *Gloeobacter violaceus* PCC 7421 ; D, *Nostoc punctiforme* PCC 73102 ; E, *Synechococcus* sp. PCC 7336 ; F, *Synechococcus* sp. RS9917 ; G, *Synechococcus* sp. CB0205 ; H, *Thermosynechococcus elongatus* BP-1 ; I, *Microcystis aeruginosa* ; J, *Synechocystis* sp. PCC 6803 ; K, *Prochlorococcus marinus* subsp. *pastoris* str. CCMP1986.

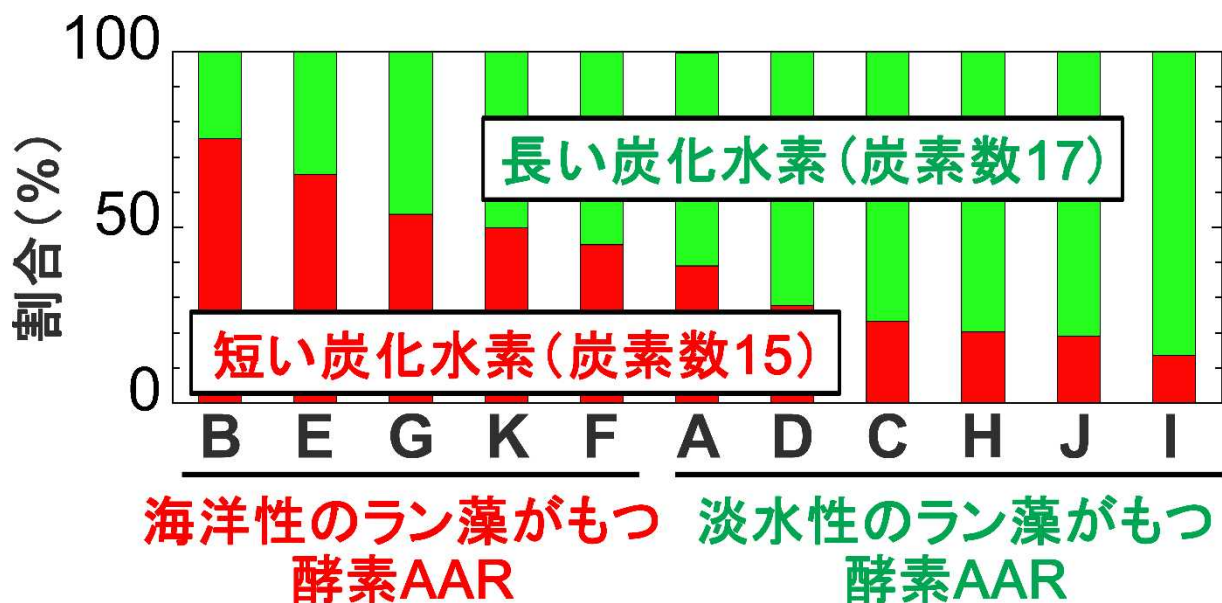


図4. さまざまなラン藻がもつ酵素 AAR を用いたときに生産された炭化水素の種類。海洋性のラン藻がもつ酵素 AAR では、主に短い炭化水素 (炭素数 15) が生産されたのに対し、淡水性のラン藻がもつ AAR では、主に長い炭化水素 (炭素数 17) が生産された。横軸の記号の意味は図3と同じ。