

光合成を人為的に制御できるか？脂肪酸によって光合成活性が変化する仕組みを解明

1. 発表者：

神保 晴彦（東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 助教）

愛知 真木子（中部大学 応用生物学部 応用生物化学科 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆微細藻類や植物の光合成活性を阻害してしまう物質として、微細藻類自体が産生する脂肪酸に含まれる多価不飽和脂肪酸（注1）が知られており、今回、その阻害作用の分子メカニズムを解明した。
- ◆遊離した多価不飽和脂肪酸が、光合成の場であるチラコイド膜（注2）にある主要なリン脂質であるホスファチジルグリセロールに特異的に取り込まれることで、光合成装置を不安定化して失活させることを明らかにした。
- ◆本研究成果は、光合成微細藻類を用いたバイオディーゼルなどのバイオ燃料生産の増産に寄与することができる。また、脂肪酸は環境中で生物によって容易に分解される物質であるため、環境負荷の低い農薬や藻類防除薬として期待できる。

3. 発表概要：

脂肪酸はバイオディーゼルの原料です。世界的に脱炭素社会を目指す機運から、アメリカ合衆国や日本を中心に光合成微細藻類を用いて脂肪酸生産を行う研究が盛んに行われています。しかし、微細藻類自体が産生する脂肪酸に含まれる多価不飽和脂肪酸が光合成を阻害してしまうことから、増産の大きな課題となっていました。

東京大学大学院総合文化研究科の神保晴彦助教、和田元教授、中部大学応用生物学部の愛知真木子准教授らは、脂肪酸が光合成を阻害してしまう分子メカニズムの解明に挑みました。光合成では、光エネルギーを変換して細胞内へとエネルギーを供給しています。脂肪酸が光合成を阻害することは知られていましたが、どのような分子メカニズムで阻害するのかは明らかではありませんでした。

本研究では、光合成が過剰な光エネルギーを受けた際に失活してしまう現象（光阻害）に着目して、強光下において脂肪酸が光合成に与える影響を解析しました。その結果、脂肪酸の中でも二重結合を2つ以上もつ多価不飽和脂肪酸が、特定の膜脂質に取り込まれることで、光合成活性を阻害していることを明らかにしました。

本研究成果は、バイオ燃料の原料となる脂肪酸の増産に寄与するだけでなく、多価不飽和脂肪酸をベースとした農薬、赤潮やアオコの防除薬など、環境負荷の低い機能性分子の創出にもつながることが期待されます。

4. 発表内容：

光合成は、光エネルギーを使って水を分解し、その過程で得られたエネルギーを用いて空気中の二酸化炭素を固定しています。その結果、作り出された炭水化物や酸素は、人だけではなく、地球上のほぼ全ての生物の生存を支えています。近年、地球温暖化への危惧が急速に高まっており、二酸化炭素の排出を実質的にゼロにするために、光合成微細藻類が広く活用されています。脂肪酸は、生物の細胞内に蓄えられる脂肪や細胞を構成する生体膜の主成分である膜

脂質の合成に必要な物質で、生体内において極めて重要な働きを担っていますが、バイオディーゼルの原料にもなるため、特に生産研究が盛んに行われてきました。これまでに、アメリカ合衆国や日本でも、かなりの研究費が投じられて開発が進められてきましたが、生産された脂肪酸が光合成を阻害してしまうことが大きな課題となり、増産を進めることができませんでした。また、脂肪酸が光合成生物の生育を阻害することは明らかでしたが、その分子メカニズムについては不明でした。

そこで、東京大学大学院総合文化研究科の神保晴彦助教、和田元教授、中部大学応用生物学部の愛知真木子准教授らは、脂肪酸が光合成を阻害してしまう分子メカニズムの解明に挑みました。光合成に関わっている光合成装置（超分子複合体）の中でも、水の分解反応を担う光化学系 II (PSII) 複合体（注 3）は、過剰な光エネルギーを受けると、不活性化してしまいます（PSII 光阻害）（注 4）。本研究では、PSII 光阻害における脂肪酸の影響に着目しました。

脂肪酸には、炭化水素鎖の鎖長と二重結合の数・位置・結合様式に応じて、たくさんの種類があるため、光合成微細藻類の一種であるシアノバクテリア（注 5）に含まれる炭素数 18 の脂肪酸のうち、二重結合の数・位置・結合様式が異なる 6 種類の脂肪酸を、それぞれ細胞培養液に加えて、強光下における光合成への影響を解析しました。その結果、二重結合を 2 つ以上もつ多価不飽和脂肪酸を加えた場合に、強光下において PSII の安定性が低下し、酸素発生複合体が崩壊することで、活性が急速に低下してしまうことがわかりました。さらに、多価不飽和脂肪酸の一種である α -リノレン酸を細胞に取り込ませ、どの膜脂質に取り込まれるかを薄層クロマトグラフィーやガスクロマトグラフィーによって解析しました。シアノバクテリアや植物細胞の葉緑体のチラコイド膜は、3 種類の糖脂質と 1 種類のリン脂質、合計 4 種類の膜脂質を含んでいます。取り込ませた α -リノレン酸は、リン脂質であるホスファチジルグリセロール (PG) の *sn-2* の位置に特異的に取り込まれることがわかりました（図 1）。さらに、脂肪酸を膜脂質に取り込む際に働くアシル-ACP 合成酵素の欠損変異株では、強光下においても α -リノレン酸による PSII の阻害が起きないことから、PG への特異的な取り込みが、多価不飽和脂肪酸による PSII 活性阻害の要因であることを明らかにしました。以上のことから、 α -リノレン酸のような多価不飽和脂肪酸は、チラコイド膜にある PG の *sn-2* 位に特異的に取り込まれ、生じた多価不飽和脂肪酸を結合した PG 分子種が PSII を不安定化させて酸素発生複合体を崩壊させることで、強光下において PSII の活性を急速に低下させてしまうことがわかりました。

本研究成果から、脂肪酸を生産する際にどの脂肪酸が細胞内で作られるかを考慮することが重要であることが示唆されました。そこで、光合成生物を用いた脂肪酸生産を行う際には、多価不飽和脂肪酸の生産を抑えたり、PG への脂肪酸の取り込みを抑制したりすることで、バイオ燃料の増産に大きく寄与することが期待されます。また、脂肪酸は環境中において、微生物の働きによって分解されるという特性を持っているため、脂肪酸を基本骨格として、残留が少なく環境負荷の低い新規農薬、赤潮やアオコの防除薬などの開発にも役立つことが期待されます。今後は、より効率的に光合成を制御できる新規脂肪酸分子種の開発を目指します。

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究「光合成の修復における脂質代謝機構の解明」（研究代表者：神保晴彦、19K16161）、国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) ACT-X「環境とバイオテクノロジー」研究領域における「ケミカルバイオロジーを用いた光合成の活性制御機構の解明」（研究代表者：神保晴彦、JPMJAX20B7）、未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域における「ミルキング法によるバイオ

燃料生産の高効率化と安定化」(研究開発代表者：小俣達男、JPMJMI17EE)の支援を受け行ったものです。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*International Journal of Molecular Sciences* (9月28日出版)

論文タイトル：Specific incorporation of polyunsaturated fatty acids into the *sn*-2 position of phosphatidylglycerol accelerates photodamage to photosystem II under strong light

著者：Haruhiko Jimbo*, Koki Yuasa, Kensuke Takagi, Takashi Hirashima, Sumie Keta, Makiko Aichi, Hajime Wada*

DOI番号：10.3390/ijms221910432

6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻

助教 神保 晴彦 (じんぼ はるひこ)

Tel：03-5454-6628

E-mail：hjimbo (末尾に"@bio.c.u-tokyo.ac.jp"をつけてください)

中部大学 応用生物学部 応用生物化学科

准教授 愛知 真木子 (あいち まきこ)

Tel：0568-51-6194

E-mail：makiko (末尾に"@isc.chubu.ac.jp"をつけてください)

<報道担当>

中部大学 学園広報部 広報課

Tel：0568-51-7638

E-mail：cuinfo (末尾に"@office.chubu.ac.jp"をつけてください)

科学技術振興機構 広報課

Tel：03-5214-8404 Fax：03-5214-8432

E-mail：jstkoho (末尾に"@jst.go.jp"をつけてください)

<JST事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 先進融合研究グループ

前田 さち子 (まえだ さちこ)

Tel：03-6380-9130 Fax：03-3222-2066

E-mail：act-x (末尾に"@jst.go.jp"をつけてください)

7. 用語解説：

(注1) 脂肪酸

脂肪酸は、炭化水素鎖にカルボキシル基が結合した構造を持っており、全ての生物に必須の物質です。炭化水素鎖は鎖の長さ・二重結合の数とその結合様式(シス・トランス)・修飾に応じて、

多様な分子構造を持っています。二重結合を持つ脂肪酸を不飽和脂肪酸、その中でも特に二重結合を2つ以上もつ脂肪酸を多価不飽和脂肪酸と言います。

(注2) チラコイド膜

シアノバクテリアや植物細胞の葉緑体には光合成の場であるチラコイド膜という生体膜が存在し、その膜は糖を結合した3種類の糖脂質とリンを結合した1種類のリン脂質からなります。チラコイド膜に存在する唯一の主要なリン脂質であるホスファチジルグリセロールは、光合成の機能に必須であることがわかっています。

(注3) 光化学系II (PSII) 複合体

光合成は、光エネルギーを使って、エネルギーを生み出す反応（光合成電子伝達反応）と二酸化炭素を固定する反応（二酸化炭素固定反応）の二つに分けることができます。PSII複合体は、光合成電子伝達反応において、水を分解して、電子を抜き出す役割を担っています。また、PSII複合体が担っている過程のことをPSIIと言います。

(注4) 光化学系II (PSII) の光阻害

PSIIは、光に感受性が高い反面、容易に失活してしまいます。PSIIが失活する分子メカニズムについてはまだはっきりとはわかっていませんが、水分解を行う場である酸素発生複合体が壊れてしまうことと、その後の電子伝達を担うD1というタンパク質が壊れてしまうことが考えられています。通常、壊れたPSIIは細胞内で即座に修復されますが、修復の速度が間に合わないほどに早く壊れてしまうと、PSII活性の低下を引き起こしてしまいます。

(注5) シアノバクテリア

シアノバクテリアは酸素発生型光合成を行う原核生物です。約27億年前に誕生したバクテリアの祖先が光合成によって地球の酸素濃度を上昇させたことで、酸素呼吸を行う真核生物の誕生や生物の陸上進出を促進したと考えられています。

8. 添付資料：

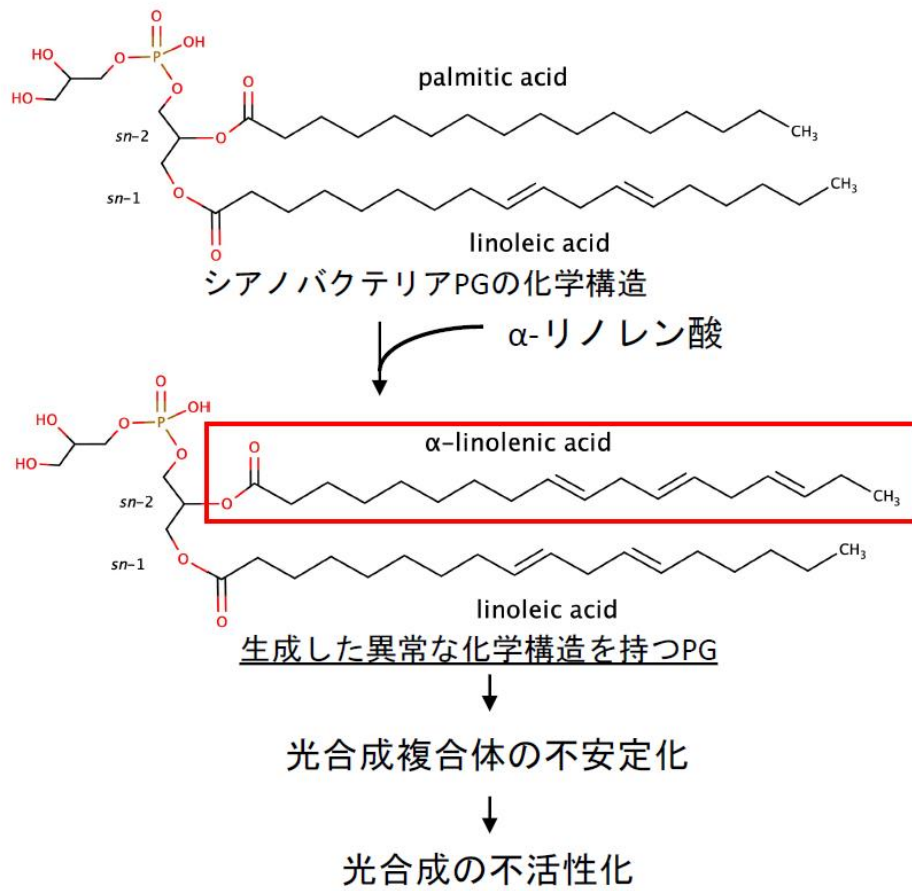


図1. α -リノレン酸はPGの *sn*-2 に特異的に取り込まれ、光合成複合体の不安定化と不活性化を引き起こす。