

令和 6 年 9 月 26 日

## 有害赤潮プランクトンの活性酸素放出と光合成の関係解明 — 魚毒性診断技術の確立に向けて —

### 1 ポイント

- 有害赤潮プランクトンのシャットネラは養殖業に甚大な被害を及ぼしています。シャットネラが細胞外に大量に放出する活性酸素は、魚毒性と高い相関関係にあります。
- 魚毒性の高い株では、光合成で作られる還元力を使って活性酸素を産生しています。活性酸素の産生は、光合成能力の維持や競合生物の排除など赤潮形成にとって様々なメリットがあります。
- 活性酸素の産生量は、光合成の制御を受けるために、光などの環境条件の影響を多大に受けると考えられます。

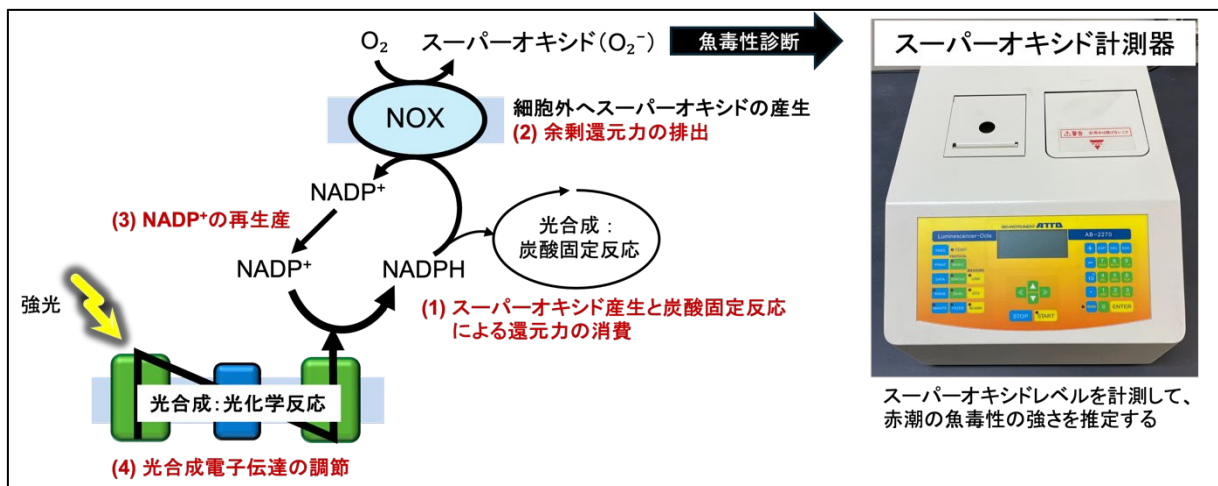


図 シャットネラのスーパーオキシド産生の仕組みと魚毒性診断技術の概要

### 2 概要

埼玉大学大学院理工学研究科の西山佳孝教授の研究グループは、水産研究・教育機構水産技術研究所と共同で、高い魚毒性を有する有害赤潮の原因プランクトンのシャットネラについて、魚毒性の原因の可能性がある活性酸素の大量放出が、光合成能力を強光から保護する仕組みに関わっていることを明らかにしました。赤潮の魚毒性がどのような条件で高くなったり低くなったりするのかはまだ詳細が解明されていませんが、本研究成果はその仕組みの解明へ向けた重要な知見となります。

本成果は、2024年9月13日に有害・有毒藻類専門誌『*Harmful Algae*』で公開されました。

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568988324001458>

### 3 研究の背景

主に西日本で夏場を中心に頻発する赤潮は、水産養殖業へ甚大な被害を与えています。現在、赤潮が発生した際には、養殖魚の赤潮耐性を上げると考えられている餌止めなどの対策が講じられています。しかしながら、赤潮が長期化すると養殖魚が痩せるなどの品質低下などにつながりますので、このような対策は可能な限り最小限にとどめることが求められています。そこで、赤潮プランクトンの密度だけではなく、魚毒性を計測して把握することができれば、赤潮による魚類のへい死リスクを正確に評価することができ、的確な対策に結びつくことができると考えられます。代表的な有害赤潮原因プランクトンであるシャットネラは、細胞の外に活性酸素の一種であるスーパーオキシドを大量に放出することが知られています。スーパーオキシドは魚類へい死の要因となる可能性があります。シャットネラが何故、どのような仕組みでスーパーオキ

シドを産生しているのかは不明でした。その仕組みを明らかにすることは、シャットネラによる赤潮の魚毒性を把握するためには不可欠だと考えられます。

#### 4 研究内容

シャットネラでは、スーパーオキシドが NADPH oxidase (NOX) という酵素によって、細胞内の還元力である NADPH を利用して産生されることが推定されていますが、厳密に証明はされていませんでした。本研究では、シャットネラから NOX を含む膜画分を抽出して、スーパーオキシド産生を調べてみたところ、スーパーオキシドが NADPH に依存して産生されることや、NOX に特異的な阻害剤で抑制されることを明らかにしました。

さらにシャットネラのスーパーオキシド産生の詳細なメカニズムを調べるために、魚毒性の高い培養株(強毒株)と魚毒性の低い培養株(弱毒株)を比較しました。強毒株はスーパーオキシドを大量に産生しますが、弱毒株はスーパーオキシドを強毒株の 1/100 以下しか産生せず、スーパーオキシド産生量と魚毒性の間に高い相関関係が見られています。

一方で、弱毒株は強毒株よりも増殖が速く、その原因が光合成能力にあることがわかりました。光合成には光エネルギーを NADPH や ATP に変換する光化学反応と、その NADPH や ATP を利用して二酸化炭素を糖に変換する炭酸固定反応があります。弱毒株は光合成の炭酸固定反応の活性が強毒株よりも高いことを突き止めました。そこで、弱毒株について NADPH を消費する炭酸固定反応を阻害剤で抑制すると、スーパーオキシドの産生量が 2 倍ほど増加することがわかりました。したがって、シャットネラのスーパーオキシド産生には、光化学反応で作られた NADPH が利用されていることが示唆されました。

すなわち、シャットネラの強毒株は光合成による炭酸固定能力を犠牲にしながらスーパーオキシドを大量に放出していることとなります。本研究では、シャットネラのスーパーオキシド産生がシャットネラ自身にどのようなメリットがあるのかを推定しました。光合成の炭酸固定反応を阻害すると、スーパーオキシドをほとんど産生しない弱毒株でのみ NADPH の酸化型である  $\text{NADP}^+$  の量が減少していることがわかりました。 $\text{NADP}^+$  量の減少は、強光条件下でも見られますが、光化学反応にとって致命的で、一般に強光下では光合成活性が大きく低下してしまいます。シャットネラは、光化学反応で生み出した NADPH を炭酸固定反応だけでなく、バイパス経路としてスーパーオキシドを産生することで、 $\text{NADP}^+$  の再生を促進し、強光下でも円滑な光合成を可能にしていると考えられます。すなわち、光合成で過剰な還元力が生み出されると、光合成能力が酸化によるダメージを受けますので、余分の還元力がスーパーオキシド産生によって消費されることは、過剰な還元力を細胞外へ排出する役割を担っていることが考えられます。

シャットネラが放出するスーパーオキシドは、殺菌作用を有するほどの量ですので、外敵(動物プランクトンや藻類を死滅させる細菌、ウイルスなど)に対する防御機構として働いていることが考えられます。それに加え、本研究で明らかになった光合成能力を強光から保護するメリットは、様々な植物プランクトンが競合する真夏の海洋表層で、優占して増殖するための重要な戦略だと考えることができます。強毒株によるスーパーオキシド産生は、シャットネラにとって上記2つのメリットが存在するからこそ、他の生物や人間の経済活動に害を及ぼすほどの大量になると考えられます。

また、シャットネラ赤潮の魚毒性は、環境条件によって大きく変化すると考えられています。本研究によって、シャットネラは光合成で作られた還元力を使ってスーパーオキシドを産生していることが明らかとなりましたので、海洋環境では、絶えず変化する光などの環境条件がシャットネラの光合成量とスーパーオキシド産生を左右することで、魚毒性の強弱を変化させる可能性が考えられます。

#### 5 今後の展開

現在、赤潮が発生した際には、赤潮プランクトンの細胞密度を基準に魚類へい死のリスクを評価しています。しかしながら、シャットネラがスーパーオキシドを産生する量や魚毒性は環境条件によって大きく変動しますので、正確な魚類へい死リスクを把握するには、魚毒性そのものを計測する必要があります。本研究グループでは、魚毒性と高い相関関係にあるスーパーオキシドレベルを魚毒性の指標として、赤潮の魚毒性を診断する技術開発に取り組んでいます。本研究により、スーパーオキシド産生量に変化する要因を科学的根拠に基づいて判断することが可能になりますので、今後の赤潮被害予測等の技術開発が加速することが期待されます。

## 6 論文情報

雑誌名	<i>Harmful Algae</i>
論文名	Production of extracellular superoxide contributes to photosynthesis via elimination of reducing power and regeneration of NADP <sup>+</sup> in the red-tide-forming raphidophyte <i>Chattonella marina</i> complex
	赤潮形成藻シャットネラ・マリーナにおける細胞外スーパーオキシド産生は還元力の排出とNADP <sup>+</sup> の再生で光合成に寄与する
著者	Koki Yuasa, Takayoshi Ichikawa, Yuma Ishikawa, Haruhiko Jimbo, Maki Kawai-Yamada, Tomoyuki Shikata, Yoshitaka Nishiyama* (*責任著者)
DOI	10.1016/j.hal.2024.102712
URL	<a href="https://doi.org/10.1016/j.hal.2024.102712">https://doi.org/10.1016/j.hal.2024.102712</a>

## 7 研究支援

本研究は、文部科学省 科学研究費助成事業(科研費)学術変革領域研究(A)「あらゆる地球環境で光合成を可能とする超分子構造制御(光合成ユビキティ)」、科学研究費助成事業(科研費)学術変革領域研究(A)「ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学(ジオラマ行動力学)」、平成 30 年度～令和 4 年度水産庁委託事業「漁場環境改善推進事業」、令和 5 年度～水産庁委託事業「豊かな漁場環境推進事業」の支援を受けて行われました。

## 8 用語解説

### (1) 赤潮

海でプランクトンが大量に増殖して、海水が着色する現象を言います。河川等からの栄養塩流入がある閉鎖的な沿岸域で発生することが多く、有害な植物プランクトンによる赤潮は魚介類のへい死を引き起こし、養殖業に甚大な被害を及ぼしています。

### (2) 植物プランクトン

光合成を行う水中に漂っている微生物のことを示し、大きさは 1 μm から 1 mm 以上のものまで多種にわたり、鞭毛などを使用して自身で遊泳できる種類もいます。微細藻類とも呼ばれます。

### (3) シャットネラ

ラフィド藻に属する海洋性の植物プランクトンで、西日本を中心とした沿岸域で赤潮を形成します。極めて魚毒性が高く、高密度化すると養殖している魚類をへい死させ、甚大な漁業被害を及ぼします。

### (4) 魚毒性

水中に存在する成分が、魚類のへい死や障害を引き起こす毒性のことを言います。

### (5) スーパーオキシド

酸素分子がより反応性の高い化合物に変化したものの総称を活性酸素と言ひ、スーパーオキシドはその内の一種です。酸素分子に一電子が渡り、不完全に還元されることで生成されます。様々な生体分子を酸化して傷害を与えます。

### (6) NOX

スーパーオキシドを産生する酵素 NADPH oxidase の略称。植物プランクトンから哺乳類まで幅広い生物が持っています。殺菌作用を持ち、動物では免疫機能として働きます。細胞内の NADPH から酸素分子へ還元力を受け渡すことでスーパーオキシドを生成します。

### (7) 光合成

光を利用して糖などの生体に必要な有機物を作り出す反応。光化学反応では、光エネルギーを利用して ATP と還元力である NADPH を生産します。炭酸固定反応では、光化学反応で生み出さ

れた ATP と NADPH を利用して、二酸化炭素から糖を合成します。また、光化学反応では水を分解して酸素を生み出すことで、人類を含む地球上のすべての好気生物の呼吸を支えています。

#### (8) NADP<sup>+</sup>の再生

生体内のあらゆる化学反応の還元力として利用される NADPH は、別の分子に還元力を受け渡すと、酸化型の NADP<sup>+</sup>に変化します。光合成の光化学反応では、水から引き抜いた電子を NADP<sup>+</sup>に受け渡すことで NADPH を生成しています。光合成反応が円滑に進むためには、NADP<sup>+</sup>を枯渇させないように NADPH から NADP<sup>+</sup>を再生することが重要です。

#### (9) 還元力の排出

生体内で還元力が蓄積すると酸素分子を不完全に還元してしまい、活性酸素が多量に生成して酸化ストレスが生じます。その結果、多くの生体分子がダメージを受けてしまいます。特に、光合成では、強光が当たると還元力が大量に作られるため、過剰な還元力を排出する必要があります。還元力を持った活性酸素を細胞外へ放出することは、余分の還元力を排出する機能と言えます。

## 9 問い合わせ

### (研究について)

埼玉大学大学院理工学研究科

担当教員 西山 佳孝(ニシヤマ ヨシタカ)

環境応答研究室ウェブサイト:

<https://park.saitama-u.ac.jp/~kankyo/nishiyama/index.html>

水産研究・教育機構 水産技術研究所

担当職員 湯浅 光貴(ユアサ コウキ)