

令和 7 年 6 月 16 日現在

機関番号：23401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K05587

研究課題名（和文）イネが過湿ストレスを感知する分子メカニズムの解明

研究課題名（英文）Understanding the molecular mechanism to sense environmental triggers to acclimate to waterlogging in rice

研究代表者

塩野 克宏（Shiono, Katsuhiko）

福井県立大学・生物資源学部・教授

研究者番号：20610695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：我が国では水田転換畑で問題となる畑作物の耐湿性向上が求められている。湿生植物が形成する酸素漏出バリアは耐湿性の重要形質であるものの、その感知誘導に関わる制御機構は未解明のままである。本研究では、水田転換畑における耐湿性向上を目指し、イネの酸素漏出バリア形成を誘導する環境因子として硝酸態窒素の減少を特定し、ABAシグナリングを介したバリア誘導機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、湛水初期に起きる土壌中の硝酸濃度の低下が、イネにおける酸素漏出バリア形成を誘導する環境因子（物質）であることを特定した。さらに、その誘導には、植物ホルモンであるアブシシン酸（ABA）が関与していることを明らかにした。これにより、湿生植物のモデル植物であるイネにおけるバリア形成の分子メカニズムを解明できた。

本成果は、気候変動に伴って頻発する大雨により国内外で深刻化している畑作物の湿害問題に対し、畑作物の耐湿性向上を目指した新たな育種戦略や農業技術の開発に資する基盤的知見を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：In Japan, many upland crops are grown in paddy-converted fields. Therefore, improving the waterlogging tolerance in field crops is necessary. Although a barrier to radial oxygen loss (ROL) is essential for waterlogging tolerance, the regulatory mechanisms involved in its sensing induction remain unclear. In this study, we identified low nitrate conditions under waterlogged soil as an environmental cue to induce the formation of an ROL barrier in rice. We clarified the mechanism of barrier induction through ABA signaling in rice.

研究分野：植物分子遺伝学

キーワード：酸素 センシング 湿害 洪水 根

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の食糧自給率を向上させるためには、水田転換畑における畑作物の耐湿性向上が求められている。しかし、ほとんどの畑作物には強い耐湿性をもつ育種材料が存在しないうえ、植物の耐湿性メカニズムには未解明な点が多く、耐湿性品種の育成は困難な状況にある。

酸素漏出バリアは、過湿土壌で植物が生存するための「鍵」となる耐湿性の重要形質である(Pedersen et al., 2021)。これまでに、国内外の複数の研究グループが、湛水ストレスに応答してバリアを形成するイネやニカラグアのテオシントを材料に、バリア形成メカニズムの解明に取り組んでいるが、その感知・形成制御メカニズムは分かっていなかった。

申請者はこれまでに、耐湿性の重要形質である酸素漏出バリアがアブシジン酸(ABA)によって制御されることを明らかにしていた(Shiono et al., 2022)。しかし、その上流に位置する環境変化の感知機構については依然として不明な点が多い。湛水土壌に特徴的な、酸素濃度の低下やエチレンの増加はバリアを誘導しないことが知られている(Colmer et al., 2006)。また、湛水土壌で増加する有毒物質(有機酸や二価鉄)がバリア形成を誘導することは報告されているものの(Colmer et al., 2019, Mongon et al., 2014)、湛水条件でそれら有毒物質が増加するには数週間が必要であるが、イネは数日でバリア形成を完了する(Shiono et al., 2011)。

そのため、湛水初期において他の物質(環境因子)がバリア形成を誘導している可能性がある。しかし、そのような環境因子は特定されておらず、環境要因の感知およびバリア形成制御のメカニズムはブラックボックスのままであった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、湛水初期においてイネの酸素漏出バリア形成を誘導する環境因子(物質)およびその物質を感知する組織を特定することである。また、通常はバリアを形成しない畑作物であるオオムギにおいて、環境感知機構および ABA シグナリング経路がどの程度保存されているかを明らかにする。

3. 研究の方法

湛水初期の土壌において、分子状酸素が消失した後に生じる低硝酸状態が、酸素漏出バリアの形成に関与するかを検討した。まず、湛水土壌を模擬した嫌気還元の水耕液(Stagnant 溶液)における窒素化合物の変動を測定した。次に、硝酸濃度をさまざまに調整した条件でイネを栽培し、バリアの形成を評価した。さらに、ABA と低硝酸状態の関係を明らかにするため、フルリドンを水耕液に添加し、バリア形成への影響を評価した。一方、バリアを自然には形成しないオオムギに対し、外生的に ABA を処理することでバリア形成が誘導されるかどうかについても調査した。

4. 研究成果

後期条件下で通常の水耕液(Standard)により栽培したイネは酸素漏出バリアを作らなかった(図1の Standard 状態)。しかし、水耕液中の硝酸濃度を段階的に低下させたところ、外皮におけるスペリン化がみられるようになり、無硝酸条件では好氣的環境にも関わらず酸素漏出バリアが形成された(図1の Absence of NO_3^-)。

さらに、イネがバリアを形成する嫌気還元的な水耕液(Stagnant 状態)において、過剰に硝酸を添加し高濃度に維持したところ、酸素漏れの多い不完全なバリアしか形成されなかった。Stagnant 条件下では数日以内に硝酸濃度が低下することから、湛水初期に生じる低硝酸状態が酸素漏出バリアの誘導因子となることが示唆された[研究成果: Shiono et al. (2024)]。

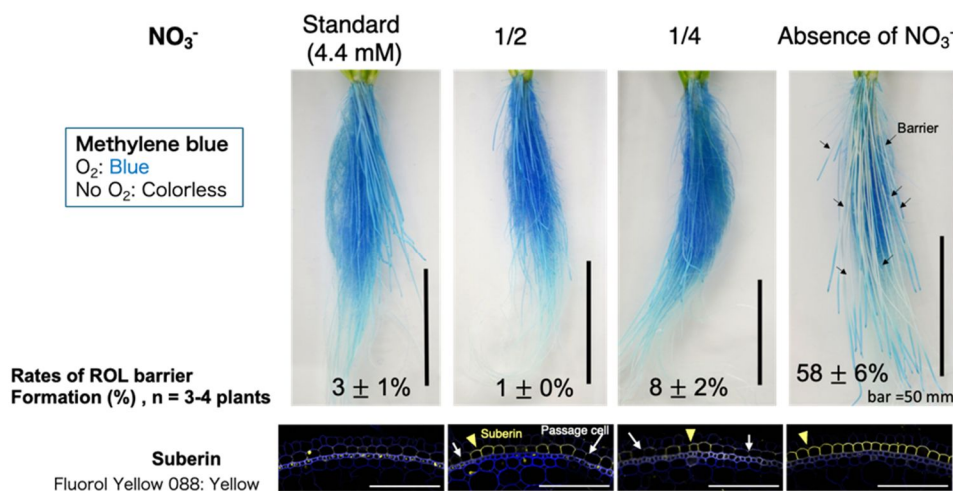


図1 硝酸態窒素の濃度低下によって酸素漏出バリアが誘導される (Shiono et al., Plant Physiol 2024 を一部改変)

加えて、低硝酸状態でフルリドンを外生的に添加したところ、濃度依存的にバリア形成と外皮のスベリン化が抑制された。これに対し、ABA を補填投与すると、バリア形成は回復した。これらの結果は、低硝酸状態によるバリア形成が ABA を介して制御されていることを示唆している。また、本研究では低硝酸状態を感知している組織の特定を目的として、スプリットルートシステムを用いた実験を試みたが、結果の再現性が得られず、研究期間内には組織の特定には至らなかった。

バリアを自然には形成しないオオムギに ABA を外生投与したところ、外皮におけるスベリン化が確認され、酸素漏出バリアが誘導された[研究成果: Shiono and Matsuura (2024)]。これは、オオムギにおいても ABA を介したバリア形成の潜在能力が備わっていることを示す興味深い結果である。

以上の結果により、湿生植物のモデル植物であるイネにおける酸素漏出バリア形成の誘導に関する分子メカニズムが明らかになった。本研究成果は、気候変動に伴って頻発する大雨により深刻化している国内外の畑作物における湿害問題に対し、耐湿性強化を目指す新たな育種戦略や農業技術の開発に資する基盤的知見を提供するものであり、学術的にも社会的にも高い意義を有する。

< 引用文献 >

- Colmer TD, Cox MCH, Voeselek LACJ. 2006.** Root aeration in rice (*Oryza sativa*): evaluation of oxygen, carbon dioxide, and ethylene as possible regulators of root acclimatizations. *New Phytologist*, **170**: 767-777.
- Colmer TD, Kotula L, Malik AI, Takahashi H, Konnerup D, Nakazono M, Pedersen O. 2019.** Rice acclimation to soil flooding: Low concentrations of organic acids can trigger a barrier to radial oxygen loss in roots. *Plant, Cell & Environment*, **42**: 2183-2197.
- Mongon J, Konnerup D, Colmer TD, Rerkasem B. 2014.** Responses of rice to Fe²⁺ in aerated and stagnant conditions: growth, root porosity and radial oxygen loss barrier. *Functional Plant Biology*, **41**: 922-929.
- Pedersen O, Sauter M, Colmer TD, Nakazono M. 2021.** Regulation of root adaptive anatomical and morphological traits during low soil oxygen. *New Phytologist*, **229**: 42-49.
- Shiono K, Ejiri M, Sawazaki Y, Egishi Y, Tsunoda T. 2024.** Low nitrate under waterlogging triggers exodermal suberization to form a barrier to radial oxygen loss in rice roots. *Plant Physiology*, **196**: 551-563.
- Shiono K, Matsuura H. 2024.** Exogenous abscisic acid induces the formation of a suberized barrier to radial oxygen loss in adventitious roots of barley (*Hordeum vulgare*). *Annals of Botany*, **133**: 931-940.
- Shiono K, Ogawa S, Yamazaki S, Isoda H, Fujimura T, Nakazono M, Colmer TD. 2011.** Contrasting dynamics of radial O₂-loss barrier induction and aerenchyma formation in rice roots of two lengths. *Annals of Botany*, **107**: 89-99.
- Shiono K, Yoshikawa M, Kreszies T, Yamada S, Hojo Y, Matsuura T, Mori IC, Schreiber L, Yoshioka T. 2022.** Abscisic acid is required for exodermal suberization to form a barrier to radial oxygen loss in the adventitious roots of rice (*Oryza sativa*). *New Phytologist*, **233**: 655-669.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shiono Katsuhiko, Matsuura Haruka	4. 巻 133
2. 論文標題 Exogenous abscisic acid induces the formation of a suberized barrier to radial oxygen loss in adventitious roots of barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Annals of Botany	6. 最初と最後の頁 931 ~ 940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/aob/mcae010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuhiko Shiono, Masato Ejiri, Yuto Sawazaki, Yuka Egishi, Tomonori Tsunoda	4. 巻 196
2. 論文標題 Low nitrate under waterlogging triggers exodermal suberization to form a barrier to radial oxygen loss in rice roots	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 551 ~ 563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plphys/kiac278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 江尻真斗・塩野克宏	4. 巻 32
2. 論文標題 野生イネ <i>Oryza glumaepatula</i> の種子根の形態・解剖・組織学的特徴	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 根の研究	6. 最初と最後の頁 4 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3117/rootres.32.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shiono Katsuhiko, Koshide Akiko, Iwasaki Kazunari, Oguri Kazumasa, Fukao Takeshi, Larsen Morten, Glud Ronnie N.	4. 巻 13
2. 論文標題 Imaging the snorkel effect during submerged germination in rice: Oxygen supply via the coleoptile triggers seminal root emergence underwater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2022.946776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石川愛佳, 清水香那, 江尻真斗, 緒方是嗣, 山本卓志, 平修, 塩野克宏
2. 発表標題 サイトカインは外皮のスベリン化を介したイネのRadial Oxygen Lossバリア形成に関与する
3. 学会等名 第57回根研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩野克宏, 清水香那, 石川愛佳, 江尻真斗, 緒方是嗣, 山本卓志, 平修
2. 発表標題 イネの酸素漏出バリアの形成にはサイトカインを介した外皮のスベリン化が必要である
3. 学会等名 第144回日本育種学会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩野克宏, 藤原七海, 芝日菜子, 小栗一将, 江上泰広, Ronnie N Glud
2. 発表標題 植物科学研究で花ひらく2次元オプトードの現在と未来
3. 学会等名 第19回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩野克宏, 江尻真斗, 西嶋遼, 馬場美幸, 芝日菜子, 山形悦透, 三浦孝太郎
2. 発表標題 アマゾン川流域に自生する野生イネ <i>Oryza glumaepatula</i> の恒常的な酸素漏出バリア形成に関わる遺伝子領域の同定
3. 学会等名 第145回日本育種学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 塩野克宏, 清水香那, 石川愛佳, 江尻真斗, 緒方是嗣, 山本卓志, 平修
2. 発表標題 サイトカイニンを介した外皮のスベリン化がイネの酸素漏出バリア形成に関与する
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 塩野克宏, 芝日菜子, 藤原七海, 江上泰広
2. 発表標題 酸素の時空間的イメージング技術(2次元酸素オプトード)でみえる! 水中でのイネの出芽・定着と酸素ダイナミクス
3. 学会等名 第257回日本作物学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 江岸祐夏, 江尻真斗, 沢崎雄登, 塩野克宏
2. 発表標題 過湿環境で変動する窒素肥料成分はイネの酸素漏出バリア形成に影響を与えるのか?
3. 学会等名 第58回根研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩野克宏, 江尻真斗, 宮下智貴, 宇賀優作
2. 発表標題 野生イネ <i>Oryza glumaepatula</i> × 台中65の異種染色体部分置換系統を用いた土壌還元ストレス耐性遺伝子の探索
3. 学会等名 第142回日本育種学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塩野克宏
2. 発表標題 根圏土壌の酸化状態を可視化する！~2次元酸素オプトードによる酸素イメージングの挑戦~
3. 学会等名 令和4年度農業・工業原材料生産と光技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芝日菜子, 越出晃子, Morten Larsen, 岩崎和也, 深尾武司, 小栗一将, Ronnie N. Glud, 塩野克宏
2. 発表標題 酸素の時空間的イメージング: 2次元酸素オプトードによるイネの冠水発芽 - 発根過程における酸素動態の可視化
3. 学会等名 第64回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩野克宏, 芝日菜子, 江尻真斗
2. 発表標題 酸素の時空間的イメージング技術（2次元酸素オプトード）で水中でのイネの発芽・定着過程を再評価!
3. 学会等名 日本育種学会 第143回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江岸祐夏, 塩野克宏
2. 発表標題 過湿土壌で増加するアンモニアはイネの酸素漏出バリア形成の誘導に影響を与えるか?
3. 学会等名 第56回根研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芝日菜子, 江尻真斗, 塩野克宏
2. 発表標題 植物生理学的の研究にも応用できる2次元酸素オプトード: 植物根の酸素放出量パターンの可視化
3. 学会等名 第18回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP https://sites.google.com/g.fpu.ac.jp/kankyo/home?authuser=0
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	平 修 (Taira Shu)		
研究協力者	森 泉 (Mori Izumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	University of Bonn	University of Gottingen		
オーストラリア	University of Western Australia			
デンマーク	University of Southern Denmark			