

令和 7 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22H02308・23K23574

研究課題名（和文）作物の水輸送効率の最適化に向けた根の通過細胞数の遺伝学的解析

研究課題名（英文）Genetic analysis of passage cell numbers in roots: towards optimization of water use efficiency of crops

研究代表者

山内 卓樹（Yamauchi, Takaki）

名古屋大学・生物機能開発利用研究センター・准教授

研究者番号：50726966

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：植物の根から吸収された水は道管に輸送されて葉での光合成に利用される。根の内皮には、スベリンなどの疎水性の物質が蓄積して水の輸送は阻害されるが、スベリンを蓄積しない通過細胞が選択的な水の輸送を担う。多収水稻品種では標準品種と比べて通過細胞数が多いことがわかっていたが、通過細胞数を制御するメカニズムは未解明である。

本研究課題では、標準水稻品種と多収水稻品種の遺伝学的解析によって通過細胞数を制御する遺伝子座を同定した。さらに、候補遺伝子領域が光合成速度や気孔コンダクタンスを高めることを明らかにした。以上の結果から、通過細胞がイネの根において水の輸送効率に関与することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では全ての高等植物が共通してもつ根の内皮のスベリン化が植物体内における水の輸送効率に関連することを明らかにした。実際に多収水稻品種では根の内皮に占めるスベリン化されない通過細胞の数が標準水稻品種と比べて有意に多いことから、作物の通過細胞数を適切に制御することで、多収化や水輸送効率の改善による環境ストレス耐性の強化などに応用することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Water uptake from the surface of roots is transported through the epidermis and cortex to the xylem inside the stele and used for photosynthesis in the leaves. Hydrophobic substances (e.g. suberin) in the endodermis inhibit water transport, whereas passage cells that do not accumulate suberin are responsible for selective water transport. We found that a high-yielding rice cultivar has a higher number of passage cells than a standard cultivar. We identified the gene locus that controls the number of passage cells by genetic analysis of standard and high-yielding rice cultivars. Moreover, we demonstrated that the candidate gene affects the photosynthetic rate and stomatal conductance. These results suggest that passage cells contribute to water transport efficiency.

研究分野：遺伝育種科学

キーワード：イネ 根 通過細胞 光合成 画像解析 内皮 スベリン

1. 研究開始当初の背景

緑の革命では、化学肥料の大量投入によって穀物生産が飛躍的に増加した。一方、二酸化炭素の排出に起因する気候変動下では、植物バイオマスによるクリーンエネルギーを活用する脱炭素が注目されている。このような状況においては、多収や高バイオマスによる食料とエネルギー供給の安定化と気候変動耐性による農業被害の緩和や栽培不適地の有効活用を同時に実現することが求められる。本研究課題では、世界人口の約半数の主食であるイネをモデルとして、多収と気候変動耐性を併せもつ作物品種の創出に向けた研究基盤を築くことを目指した。

2. 研究の目的

国連の気候変動に関する政府間パネルは、人類活動が地球温暖化を加速させてきたことを明記した。一方、飢餓は依然として重要な課題として残されており、SDGs の開発目標には「気候変動に具体的な対策を」や「飢餓をゼロに」などが掲げられている。これらの課題を解決するためには、作物の収量を向上させて食料供給を安定化するとともに、気候変動耐性型作物を開発して農地を有効活用することが求められる。

通過細胞は、スベリンやリグニンなどの疎水性の物質の蓄積を伴わない内皮細胞であり、皮層と中心柱の間の養水分の選択的な輸送を担う(図1)。最近、通過細胞の形成(維持)メカニズムの一端がシロイヌナズナで解明され、通過細胞では複数の植物ホルモンによって、スベリンの生合成が制御されることが示された。一方、作物での研究は進んでおらず、土壌水分に应答した通過細胞数の調節メカニズムについては未解明である。

作物の収量性に直結する植物体の成長には、光合成による二酸化炭素の固定が不可欠である。光合成には水が必須であり、光合成活性を高めるためには葉に水を効率的に供給することが必要である(図1)。実際に、光合成活性の高い多収イネ品種では、地上部への水の供給能力が高い。一方、葉での水の要求は土壌水分に依存して変化する。節水型耐乾性の作物では、光合成活性は乾燥条件でも維持されるが、土壌水分の消費は抑えられる。しかし、これまでに植物の水利用効率と根における水の輸送効率の関連性は明確にされていない。

そこで本研究では、通過細胞数の調節メカニズムを包括的に理解した上で、通過細胞の機能的意義を解明し、多収かつ気候変動に耐性をもつ作物を育成する基盤を築くことを目指した。

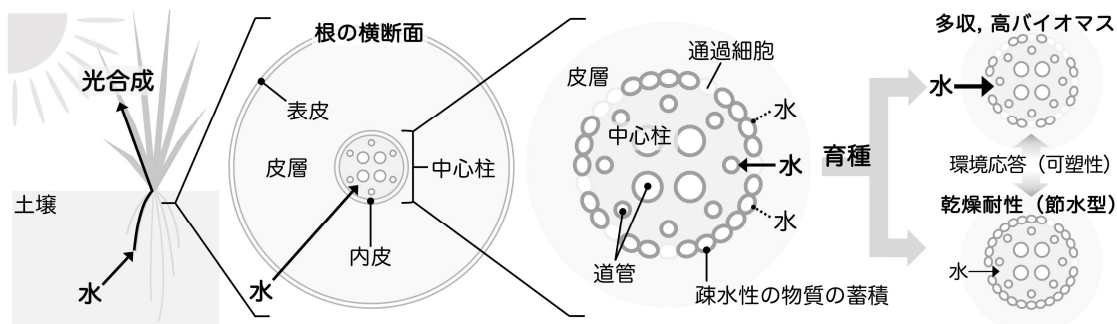


図1. 根の内皮に点在する通過細胞の生理学的な機能と農学的な意義

3. 研究の方法

多収水稻品種では、標準品種と比べて内皮に占める通過細胞の割合が多い。多収水稻品種は高い光合成活性をもつことから、水が豊富な水田で植物体を旺盛に成長させるために、根から葉への水の輸送を効率化するしくみをもつことが想定される。

一方、畑で栽培される耐乾性陸稲品種では、標準品種と比べて内皮に占める通過細胞の割合が少ない。つまり、耐乾性陸稲品種は蒸散を抑えて根から葉への水の輸送を限定し、乾燥に耐えるしくみをもつことが想定される。

そこで本研究では、多収水稻品種と標準品種の染色体断片置換系統を用いて通過細胞数を制御する遺伝子領域を同定するとともに、植物体内における水輸送効率に深く関与する気孔コンダクタンスや光合成活性の測定をおこなった。また、耐乾性陸稲品種と標準品種の交雑集団を作成して GRAS-Di による DNA マーカーの作出をおこない、通過細胞数に関する QTL 解析を実施するための基盤を構築した。

また、根の横断切片の染色画像から通過細胞およびスベリン化内皮細胞を自動で抽出するシステムを確立した上で、通過細胞数に関する遺伝学的解析を加速することを目指した。

4. 研究成果

(1) 通過細胞の自動抽出システムを利用した通過細胞数を制御する遺伝子座の同定

根の通過細胞数を制御する遺伝子座を同定するためには、多数の系統の根の通過細胞数を識別してカウントすることが求められる。一方、画像データを用いた形質評価には客観的な解析および解析作業の効率化が求められている。そこで、根の横断切片を Fluorol Yellow 088 で染色してスベリンを黄色の蛍光として検出した画像から自動で通過細胞を抽出してカウントする U-Net ベースの画像解析ツールを開発した。通過細胞数の実データと予測データを比較した結果相関係数が 0.89 を示したため、この画像解析システムを以後の実験に利用した。

多収水稻品種は標準品種と比べて不定根における通過細胞数が顕著に多いことがわかっていった。そこで、これらの 2 品種を両親とする染色体断片置換系統を用いて通過細胞数を制御する遺伝子領域の同定を目指した。標準品種を遺伝的背景とする 41 系統の染色体断片置換系統の通過細胞数を評価した結果、1 つの系統が多収水稻品種と同程度の通過細胞数であることが明らかになった(図 2)。この結果から、4 番染色体長腕の一部に座乗する遺伝子領域が多収水稻品種における通過細胞数の増加に寄与することが示された。

候補遺伝子領域が通過細胞数を制御することを検証するために、多収水稻品種の遺伝的背景で候補遺伝子領域を標準品種型で持つ系統の通過細胞数を評価した結果、標準品種と同程度の通過細胞数であることが示された。この結果から、4 番染色体長腕の一部に座乗する遺伝子領域が通過細胞数の制御に関与することが検証された。

多収水稻品種を対象とした遺伝学的解析と併行して、耐乾性陸稲品種と標準品種を交配して自殖した F4 の 96 系統を対象として GRAS-Di による DNA マーカーの作出をおこない通過細胞数に関する QTL 解析を実施するための基盤を整備した。

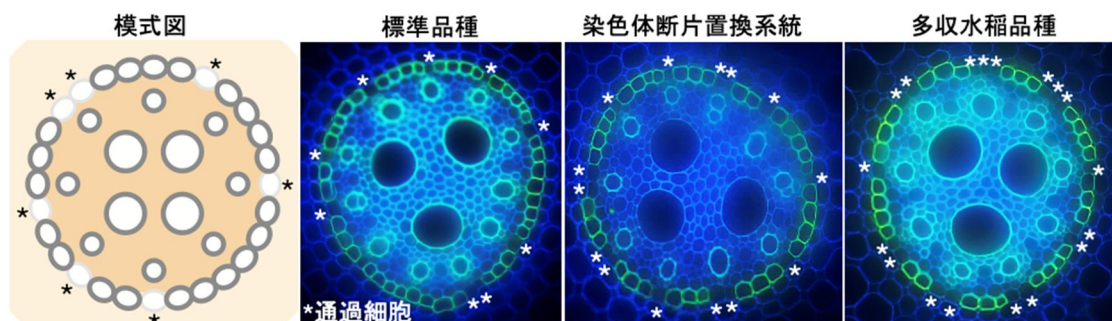


図 2. 標準品種、多収水稻品種および染色体断片置換系統における通過細胞形成

(2) 通過細胞数を制御する候補遺伝子座と水輸送および光合成の関連の解析

通過細胞数を制御する候補遺伝子領域は光合成活性に関連することが報告されていた。そこで、通過細胞数と光合成関連形質の関連を検証するため、候補遺伝子領域の置換系統と両親品種を土耕ポット栽培し、光合成速度および気孔コンダクタンスを測定した。その結果、標準品種の遺伝的背景で多収水稻品種型の候補遺伝子領域を持つ系統では光合成速度と気孔コンダクタンスが標準品種と比べて高く、多収水稻品種の遺伝的背景で標準品種の候補遺伝子領域を持つ系統では多収水稻品種と比べて光合成速度と気孔コンダクタンスが多収水稻品種と比べて低くなることが示された。これらの結果から、候補遺伝子領域が光合成速度と気孔コンダクタンスに影響を与えることが示唆された。

通過細胞数が光合成速度と気孔コンダクタンスに対して正の効果をもつことを検証するため、土耕ポット栽培した各系統の分けつ数や地上部乾物重、根の長さ、本数および地下部乾物重を評価した。その結果、多収水稻品種の遺伝的背景では地下部の乾物重が顕著に高くなることが示された一方、その他の測定項目は光合成速度や気孔コンダクタンスに関連しなかった。地下部の乾物重は気孔コンダクタンスと正の相関を示す一方、候補遺伝子領域の遺伝子型と地下部の乾物重には相関が見出されなかった。これらのことから、候補遺伝子領域が通過細胞数の制御を通して光合成速度と気孔コンダクタンスに正の効果を示すことが示唆された。

以上のように、研究期間を通して通過細胞がイネの根における水輸送効率を高め、地上部における気孔コンダクタンスや光合成速度を高める機能を持つことが示唆された。今後は、候補遺伝子領域内に座乗する責任遺伝子の決定をおこない、通過細胞数が制御されるメカニズムの解明に繋げたい。さらに、耐乾性陸稲品種と標準品種の交雑集団を用いて通過細胞数を減少させる責任遺伝子を同定することで、作物の多収と気候変動に対する耐性の強化に応用するための基礎的知見を蓄積していきたい。

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 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tanaka Wakana, Yamauchi Takaki, Tsuda Katsutoshi	4. 巻 73
2. 論文標題 Genetic basis controlling rice plant architecture and its modification for breeding	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Breeding Science	6. 最初と最後の頁 3~45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1270/jsbbs.22088	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 Li Jingxia, Ishii Takahiro, Yoshioka Miki, Hino Yuta, Nomoto Mika, Tada Yasuomi, Yoshioka Hirofumi, Takahashi Hirokazu, Yamauchi Takaki, Nakazono Mikio	4. 巻 197
2. 論文標題 CDPK5 and CDPK13 play key roles in acclimation to low oxygen through the control of RBOH-mediated ROS production in rice	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 kiae293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/plphys/kiae293	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 Jingxia Li, Nakazono Mikio, Yamauchi Takaki	4. 巻 44
2. 論文標題 Candidates for regulating cytosolic Ca ²⁺ influx during inducible aerenchyma formation under low-oxygen conditions	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Plant Cell Reports	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00299-025-03497-8	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 山内 卓樹	4. 巻 69
2. 論文標題 植物の成長と環境適応を支える根の解剖学的形質の理解に向けて	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 作物研究	6. 最初と最後の頁 21~25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18964/jcr.69.0_21	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 角クルミ, 山中碩人, 森下紘光, 三並翔哉, 石崎蒼太, 谷吉和貴, 安達俊輔, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 根の通過細胞数と葉の気孔コンダクタンスの関連の解析
3. 学会等名 第30回育種学会中部地区談話会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山内卓樹
2. 発表標題 植物の成長と環境適応を支える根の解剖学的形質の包括的理解に向けて
3. 学会等名 近畿作物・育種研究会 公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 角クルミ, 山中碩人, 森下紘光, 三並翔哉, 石崎蒼太, 谷吉和貴, 安達俊輔, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 根の通過細胞数が光合成に寄与する通導抵抗に与える影響の解析
3. 学会等名 第58回根研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 角クルミ, 森下紘光, 野下浩司, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 コシヒカリ/タカナリ染色体断片置換系統を用いた通過細胞数に関する遺伝子座の探索
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 角クルミ, 森下紘光, 野下浩司, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 イネの内皮の通過細胞数を制御する遺伝子座の探索
3. 学会等名 第29回育種学会中部地区談話会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takaki Yamauchi, Kurumi Sumi, Hiromitsu Morishita, Ole Pedersen, Yoshiaki Inukai, Mikio Nakazono
2. 発表標題 Molecular mechanisms that underlie the root cortex expansion in response to low oxygen
3. 学会等名 14th International Conference on Plant Anaerobiosis, Bamberg, Germany (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takaki Yamauchi
2. 発表標題 Root anatomical adaptation to drought and flooding: compatible or not?
3. 学会等名 The Online International Webinar on Agricultural Sciences, "Advances in Agricultural Research for People's Well Being", Online, 17 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角クルミ, 染野大輝, 田中佑, 野下浩司, 山内卓樹
2. 発表標題 スベリン化内皮細胞を検出する画像解析ツールを利用した根の通過細胞数の評価
3. 学会等名 イネ遺伝学・分子生物学ワークショップ2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 染野大輝, 山内卓樹, 野下浩司
2. 発表標題 スベリン化内皮細胞と通過細胞の数をカウントするための効率的なパイプラインの開発
3. 学会等名 2024年度日本数理生物学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 角クルミ, 山中碩人, 染野大輝, 森下紘光, 三並翔哉, 石崎蒼太, 渡邊友実加, 亀岡笑, 谷吉和貴, 安達俊輔, 野下浩司, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 多収水稻品種タカナリの根における通過細胞数の増加が光合成に寄与する通導抵抗に与える効果の解析
3. 学会等名 日本育種学会第146回講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山中碩人, 石崎蒼太, 安達俊輔, 山内卓樹, 谷吉和貴, 田中佑
2. 発表標題 葉幅を制御する遺伝子 NAL1 がイネの蒸散・水通導特性に及ぼす影響の解析
3. 学会等名 日本作物学会第258回講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 角クルミ, 山中碩人, 染野大輝, 森下紘光, 三並翔哉, 石崎蒼太, 渡邊 友実加, 亀岡 笑, 谷吉和貴, 安達俊輔, 野下浩司, 田中佑, 山内卓樹
2. 発表標題 多収水稻品種タカナリの根の通過細胞が水輸送効率に与える効果の解析
3. 学会等名 第31回育種学会中部地区談話会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takaki Yamauchi	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Springer, Singapore	5. 総ページ数 185
3. 書名 Responses of plants to soil flooding	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	田中 佑 (Tanaka Yu) (50634474)	岡山大学・環境生命自然科学学域・研究教授 (15301)	
研究 分担者	野下 浩司 (Noshi ta Koji) (10758494)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	

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
---------	---------