

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15216

研究課題名(和文)形態・組織学的視点からみたイネ根系の土壌環境変化応答

研究課題名(英文)Root morphological and anatomical characteristics of rice in response to soil environmental changes

研究代表者

仲田 麻奈(Kano-Nakata, Mana)

名古屋大学・農学国際教育研究センター・助教

研究者番号：70623958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：天水田では、土壌中の水分布が空間的にも時間的にも大きく変動し、このような土壌水分変動は根系発育さらには地上部生育に影響を与える。よって土壌水分変動条件に対する根の外部形態変化と内部組織構造変化との関係性を、根齢の違いに注目して評価した。また、天水田栽培でイネ生産性の低下要因となる土壌環境ならびに気象環境の実態について調べた。その結果、根長増加と通気組織と皮層内厚壁組織の発達が土壌水分変動条件への適応性に貢献していたが、これらの反応は同じ部位で同調していなかった。フィリピンでの調査研究の結果、収量低下の主な要因は、雨季では低い日射量、乾季では乾燥と窒素欠乏の複合ストレスであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近の急速な育種学の進歩によって、根をデザインすることが現実味を帯びてきており、根系育種によってストレス耐性の付与が可能である。単に水ストレスに強いだけでなく、節水栽培適応品種の開発を通して、世界中で問題となっている深刻な水不足の解決にもつながる。作物生産活動が実際に行われているフィールドでの現象に注目することで、栽培環境にあわせた有用根系形質を抽出でき、今後実用性を有した根系育種が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Rainfed lowland rice ecosystems greatly varied in water availability and experience soil moisture fluctuations (SMF), which influence root development and then plant growth. We evaluated the root response under SMF with special emphasis on the relationship between root morphology and anatomy along root axis focusing on different ages. Also we characterized soil and climate environments in rainfed lowland fields in Philippines. The greater root elongation below the hardpan soil layer contributed to high adaptation to SMF, and this was related to root aerenchyma formation and sclerenchyma development. However, these responses were not synchronized at the same position. The field study in Philippines showed that the main limiting factor of rice yield was low solar radiation during wet season, but combination of drought and nitrogen deficiency during dry season.

研究分野：作物生産科学

キーワード：イネ QTL 通気組織 天水田 土壌水分変動 非破壊根系解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 世界のイネ生産量の大部分を占める熱帯アジアでは、自然の降雨に依存した灌漑設備のない水田(天水田)による稲作が主流であるが、単位面積当たりの収量は、灌漑設備が整っているところの約半分以下である。作物のストレス耐性に関わる形質として、これまで多大な時間と労力を必要とし敬遠されてきた根の形質に、近年急速に注目が集まっている。実際に、マーカー選抜育種法を用いた深根性遺伝子の導入によって、イネの耐旱性向上にも成功している^①。

(2) 作物の根系形態の遺伝的改良が進んでいる一方、栽培圃場における土壤環境要因の観測データは極めて限られている^②。研究代表者らのグループが、フィリピンの天水田圃場を対象にして、土壤中の水分量の推移についてモニタリングして調べた結果、土壤中の水分は降雨によって常に変動していること、さらにこの土壤水分変動は、土壤深層においても起こっており、この土壤深層は、常に最も湿潤ではないことを示す結果を得た。このような土壤環境においては、深根性が有効に機能しない可能性を示唆しており、さらには、土壤硬度は土壤水分と交互作用を有し、土壤硬度の変化による影響も考慮する必要があると考えた。

このように、天水田でみられる空間的にも時間的にもヘテロな環境に対応させた、根系の定量的な解析データは極めて限られており、とくに土壤環境ストレスに対して、根の外部形態が変化したときに、内部組織構造はどう関わっているのか、外部形態変化と内部形態変化とを結び付けて考えた研究は非常に少ない^③。また、内部形態観察においては、1本の根軸の一部分の横断切片について調べている研究が多く、基部から根端までの根軸に沿って評価をしている研究は少ない^④。

2. 研究の目的

天水田イネの生産性向上に必要な根系形質について、天水田の最大の特徴と捉える土壤水分変動に対する反応を基軸に評価し、以下の3点について明らかにすることを目的とした。

(1) 天水田で想定される土壤環境ストレス(土壤水分変動+圧縮土壌、窒素欠乏)に対する根の外部形態変化と内部組織構造変化との関わり

(2) 土壤環境ストレス適応応答反応として抽出された根系形質に関わる QTL の座上領域

(3) フィリピンの天水田圃場を対象とした、イネ生産性の低下要因となる土壤環境ならびに気象環境の実態

3. 研究の方法

(1) 土壤環境ストレスに対する根の外部形態変化と内部組織構造変化との関わり

供試材料に、農研機構次世代作物開発センターが提供している、ササニシキ/ハバタキ 染色体断片置換系統群 39 系統(S/H CSSL 39 系統)のうち、CSSL439 に注目した。CSSL439 は、研究代表者らのこれまでに予備実験の結果、土壤水分変動条件において、一貫してササニシキとくらべ地上部生育、根系発育が優れることがわかっている。

まず、非破壊的根系評価方法について検討した。市販の小型ハンディースキャナー(PSC-11U, サンワサプライ社)を用いた根系計測に最も適した根域サイズを同定するため、直径が異なる3種類の透明塩ビチューブ; 大($\phi 72$ mm)・中($\phi 56$ mm)・小($\phi 38$ mm)を用いて、土壤水分変動条件で上記のイネを生育させた。その結果、小チューブのみ、ハンディースキャナーによる非破壊的解析とサンプリングによる破壊的解析結果との間に、有意な正の相関関係が確認されたことから、小チューブの直径とほぼ同じ大きさで、より透明度が高く解析しやすいポリカーボネイトチューブ($\phi \times H = 40$ mm \times 500 mm)を使用することにした。このチューブを用いた土耕条件で、処理区に湿潤区(対照区; 圃場容水量)と、土壤水分変動区(湿潤 \rightarrow 乾燥 \rightarrow 再灌水(湿潤) \rightarrow 再乾燥)を設け、上記のイネを生育させた。また、土壌中に硬盤層を想定した圧縮土壌層を設け、水処理に加えて土壌非圧縮区(対照区)と土壌圧縮区(カオリン粘土を使用)を設定した。

生育期間中、ハンディースキャナーを用いて、チューブ側面に現れる根をスキャンし、スキャンデータから ImageJ (Ver. 1.42q, NIH, USA) による画像解析によって根系発育を定量的に評価した。また、重量法により水吸収量を、リーフポロメーター(SC-1, Decagon 社)によって気孔コンダクタンスを測定し、根系機能を評価した。サンプリングによって、乾物生産や根系発育を調べた。

根の内部組織構造評価については、根齢の違いに注目し、齢の異なる2つの根軸; 種子根(最も齢の進んだ根として捉える)・最終発根節から発根した節根(最も齢の新しい根として捉える)を対象とした。根軸に沿って切断切片の空隙率を重量法によって測定した。光学顕微鏡を用いて、根軸に沿って横断切片を作成し、通気組織面積、皮層内厚壁組織の発達程度、リグニン蓄積について調べた。

(2) 土壤環境ストレス適応応答反応として抽出された根系形質に関わる QTL の座上領域

CSSL349 にササニシキを戻し交配した BCF₂ 個体群とササニシキ、CSSL439 を供試し、上記で検討した栽培方法を用いてイネを生育させた。ハンディースキャナーによる非破壊的根系解析と合わせ、サンプリングによる根系発育調査を行い、本研究で提案する非破壊的根系評価方法が QTL 解析でも有効であるかどうかを検証した。

(3) イネ生産性の低下要因となる土壤環境ならびに気象環境の実態

フィリピン稲研究所(PhilRice ロスバニョス支場)の Roel R. Suralta 博士、Jonathan M. Niones 博士、Maria Corazon J. Cabral 氏の協力のもと、フィリピン稲研究所において圃場試験(乾季作

12~4月、雨季作6~10月)を実施した。推奨品種であるNSIC Rc158を含めた計10品種/系統を登熟期まで栽培した。イネ生育期間中の土壌中の水分分布を空間的分布、時間的变化を土壌センサー(5TE, Decagon社)を用いて追跡するとともに、それに伴った硬度の推移をコーンペネトロメーター(PhilRice所有)を用いて計測した。あわせて、気象要因として、温度・湿度・照度(おんどり, T&D社)雨量を計測した。収穫後、地上部乾物生産と収量を調べた。

4. 研究成果

(1) 土壌環境ストレスに対する根の外部形態変化と内部組織構造変化との関わり

種子根のような齢の進んだ根と比較的齢が新しい根とを比較した結果、外部形態変化だけではなく、内部組織構造変化にも大きな違いが観察され、さらには基部側と根端側においても違いが観察された。具体的には、通気組織の発達程度、皮層内厚壁組織の発達程度やそれに伴うリグニンの蓄積程度が処理や根齢によって異なり、CSSL439はササニシキと比べて土壌水分変動区の根長が大きい(とくに圧縮土壌より下層の根長)こととあわせ、圧縮土壌層の通気組織と厚壁組織層がより発達している特徴が明らかとなった。一方で、通気組織の増加部位と側根発育部位が異なっていたことから、外部形態変化と内部組織構造変化は、必ずしも同じ部位で同調して起きていないことが示唆された。

(2) 土壌環境ストレス適応応答反応として抽出された根系形質に関わるQTLの座上領域

土壌水分変動条件下において、CSSL439(ハバタキ)由来の根長(総根長、節根長、側根長など)に関わるQTLが12番染色体上長腕側の同一箇所を検出された。一方で、ハンディースキャナーを用いた非破壊的評価から検出されたQTLとサンプリングによる実測値の評価から検出されたQTLとでは、座上領域が異なっていたことから、非破壊的評価方法の改善が必要である。スキャナーで取得した画像背景の均一化や2値化時の域値設定方法などが今後の課題点である。

(3) イネ生産性の低下要因となる土壌環境ならびに気象環境の実態

乾季作は雨季作と比べて、地上部乾物生産と収量における品種間差異が大きく、G(遺伝型)×E(環境)の相互作用の効果も大きかった。また、乾季作は雨季作と比べて日射量が高く、水も窒素も十分にあれば高収量を得られること、一方で水ストレスと窒素欠乏の複合ストレスによって生産性が大きく低下することが明らかとなった。よって、雨季作では日照不足が、乾季作では乾燥と窒素欠乏が主要な生産性低下要因だと考える。さらに、高い収量安定性を示し、様々なストレスが生じる天水田条件で高い適応性を有するイネ品種/系統を抽出できた。今後は調査地点を増やし、栽培環境と品種の最適な組み合わせの提示につなげたい。

<引用文献>

- ① Uga et al., 2013. *Nat. Genet.* 45: 1097-1102.
- ② Samson et al., 2002. *Field Crops Res.* 76: 175-188.
- ③ Henry et al. 2011. *J. Exp. Bot.* 63: 4751-4763
- ④ Abiko and Obara. 2014. *Plant Sci.* 215-216: 76-83.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Mana Kano-Nakata, Tomomichi Nakamura, Shiro Mitsuya and Akira Yamauchi | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Plant Production Science | 6. 最初と最後の頁 501-509 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/1343943X.2019.1608836 | 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 Mana Kano-Nakata, Yoshiaki Inukai, Joel Siopongco DLC, Shiro Mitsuya and Akira Yamauchi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Quantitative evaluation of plastic root responses to contiguous water gradient in rice | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Plant Root | 6. 最初と最後の頁 70-78 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3117/plantroot.11.70 https://doi.org/10.3117/plantroot.11.70 | 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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mana Kano-Nakata, Roel R. Suralta, Maria Corazon J. Cabral, Tomomichi Nakamura, Arlene B. Aguelo, Via Ann Marcelo, Antoinette S. Cruz, Shiro Mitsuya, Akira Yamauchi and Jonathan M. Niones |
| 2. 発表標題 Rice yield stability and adaptability under different water and nitrogen management in rainfed lowland fields in the Philippines |
| 3. 学会等名 International Rice Research Conference 2018 (IRRC 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 仲田（狩野）麻奈・中村倫理・三屋史朗・山内章 |
| 2. 発表標題 水分供給方法の違いが根系発育反応に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 根研究学会第49回研究集会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 仲田(狩野)麻奈 |
| 2. 発表標題 水ストレス環境下におけるイネ根系の可塑性の実態解明とその生理機能 |
| 3. 学会等名 日本作物学会第247回講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 丹下美咲・仲田(狩野)麻奈・三屋史朗・山内章 |
| 2. 発表標題 小型ハンデイスキャナーによる土耕条件におけるイネ根系発育の非破壊的定量評価 |
| 3. 学会等名 日本作物学会第247回講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mana Kano-Nakata, Shiro Mitsuya, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi |
| 2. 発表標題 Root metabolic cost analysis for root plasticity expression under mild drought stress |
| 3. 学会等名 9th Asian Crop Science Association Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 仲田(狩野)麻奈・Roel R. Suralta・Maria Corazon J. Cabral・中村倫理・Via Ann Marcelo・Antoinette S. Cruz・三屋史朗・山内章・江原宏・Jonathan M. Niones |
| 2. 発表標題 フィリピンのイネ栽培圃場における気象環境ならびに栽培管理が収量性に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本作物学会第248回講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Maria Corazon J. Cabral, Hiroshi Ehara and Mana Kano-Nakata |
| 2. 発表標題 Effect of salt stress on root system developmental response and anatomical characteristics in rice |
| 3. 学会等名 根研究学会第50回記念研究集会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 名古屋大学農学国際教育研究センター ホームページ https://icrea.agr.nagoya-u.ac.jp/ |
|---|

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 | スラルタ ロエル (Suralta Roel R.) | | |
| 研究協力者 | ニヨネス ジョナサン (Niones Jonathan M.) | | |
| 研究協力者 | カブラル マリア (Cabral Maria Corazon J.) | | |