

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：82104

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2015

課題番号：25304024

研究課題名(和文)メコンデルタの水稻2期作における雨期の低収量の土壌要因解明と対策技術の確立

研究課題名(英文) Study on the edaphic factor in low yield of rice paddy cultivated in rainy season and technical countermeasures to improve the soil condition in the Mekong Delta

研究代表者

飯泉 佳子 (IIZUMI, YOSHIKO)

国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・生産環境・畜産領域・主任研究員

研究者番号：00414996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ベトナム・メコンデルタの非酸性硫酸塩土壌地域における水稻雨期作の減収要因を明らかにし、雨期作で発生する水稻の生育障害や登熟不良を抑制する対策技術を提示することである。

雨期作の籾収量は乾期作と比較して半分程度であり、低収量の主な要因は一穂粒数の低下であった。また、雨期作の減収には土壌の還元障害(特に硫化水素)と気象要因(高温、強風、低日射)による障害の両方が関与している可能性が示唆された。今後さらなる検証が必要であるが、土壌の還元環境を緩和する水管理技術として中干、酸性化(硫酸の生成)を抑制する対策技術として乾期作収穫後の田面湛水が有効と考えられる。

研究成果の概要(英文)： This study aimed to assess the low rice yield in the rainy season and identify its causes, and to show technical countermeasures for it.

The yield of unhulled rice cultivated in the rainy season was almost half of that in the dry season. The main cause of this low yield in the rainy season was decrease in spikelet number / panicle. It is suggested that disorders to growth occurred not only by excess soil reduction but also by meteorological factors, i.e. high temperature, strong wind and low solar radiation. It was revealed that mid-term drainage in the rainy season was effective to moderate soil reduction and keeping floodwater in paddy field from harvest of the dry season cultivation to the beginning of the wet season cultivation inhibits forming acid (sulfuric acid).

研究分野：環境農学

キーワード：水稻 生育障害 水田 灌漑水管理 土壌化学 作物生理 メコンデルタ ベトナム

1. 研究開始当初の背景

ベトナムは世界有数のコメ輸出国であり、メコンデルタはベトナム最大の穀倉地帯である。メコンデルタの水稲収量を安定・向上させることは、世界の食料安全保障に大きく貢献する。同地域では、広い範囲で水稲の2(3)期作が行われているが、雨期作の収量は乾期作よりも大幅に低いことが経験的に知られている。これまで、一般に収量の差は雨期の日射量不足など気象要因の違いに起因していると考えられていた。

著者らは、ベトナム・メコンデルタにおいて同じ圃場で同じ作業員が肥培管理を行ったにも関わらず、雨期作の収量が乾期作に比べて極端に低くなることに疑問を抱き、2012年に予備的な現地調査とデータ解析を実施した。その結果、雨期の低収量は気象要因だけでは説明ができない可能性が高いこと、雨期作の収量が顕著に低い地域は酸性硫酸塩土壌の分布域と一部のみ重なっていること、などを突き止めた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ベトナム・メコンデルタの非酸性硫酸塩土壌地域における水稲雨期作の減収要因を明らかにし、雨期作で発生する水稲の生育障害や登熟不良を抑制する対策技術を提示することである。

メコンデルタは世界有数の穀倉地帯であることから、水稲雨期作の減収要因を明らかにし、生産量を増加させる対策技術を構築することができれば、国際的な食料安全保障に貢献することができる。本研究の成果は、将来きわめて広範に展開・利用されることが期待される。

3. 研究の方法

(1) 水稲雨期作の減収と環境要因の解明

ベトナム・メコンデルタの中部地域に位置するクーロンデルタ稲研究所 (CLRRI) 内に試験圃場を設営し、水稲の二期作 (雨期作と乾期作) を実施した。CLRRI の周辺では、おおよそ5月~10月が雨期、11月~4月が乾期にあたり、水稲の雨期作は4月下旬~8月上旬頃、乾期作は12月上旬~3月上旬頃に栽培される。実験に用いた水稲の品種は、現地の農家が広く使用する標準品種 OM 6976 と酸性耐性品種 OM2431 (AS996) である。施肥レベル (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O kg ha<sup>-1</sup>) は、乾期作は100-40-40、雨期作は80-40-40とした。水稲の生育調査と収量調査を実施するとともに、根の掘り取り調査を行った。また、気象要素 (気温、風速、日照) と収量の関係を解析するため、カントー市内にある測候所より気象観測データを入手した。

(2) 水稲雨期作の減収を改善する対策技術の検討

雨期作時に3種類の灌漑水管理を実施し、収量低下の要因となる土壌環境の改善効果

を評価した。水管理は、(T1) 慣行区、(T2) 雨期作中干区、(T3) 乾期作後湛水区とし、土壌の酸化還元電位、田面水や土壌間隙水のpHと電気伝導度などを継続して測定した。なお、乾期作は全ての区画で慣行の灌漑水管理を行った。稲の栽培品種と肥培管理は3(1)と同じとした。

4. 研究成果

(1) 水稲雨期作の減収と環境要因の解明

① 雨期作における減収の要因

雨期作の収量は乾期作に比較して OM6976 では50.3% (乾期作6.30 t ha<sup>-1</sup>、雨期作3.17 t ha<sup>-1</sup>)、OM2431 では51.8% (乾期作7.03 t ha<sup>-1</sup>、雨期作3.64 t ha<sup>-1</sup>)まで低下した (図1)。収量が低下した主な要因は、2品種とも一穂粒数の低下であった。また、OM2431では登熟歩合も低下していた。稲の収量は下式により求められるが、雨期作では全乾物重が低下し、収穫指数もほぼ同じように低下しており、このことが収量の大きな低下をもたらしていた (図2)。

収量 =

$$\text{単位面積あたりの全乾物重} \times \text{収穫指数}$$

乾物：植物体重から水分の重さを引いたもの  
 収穫指数：収穫部位の乾物重 / 全乾物重

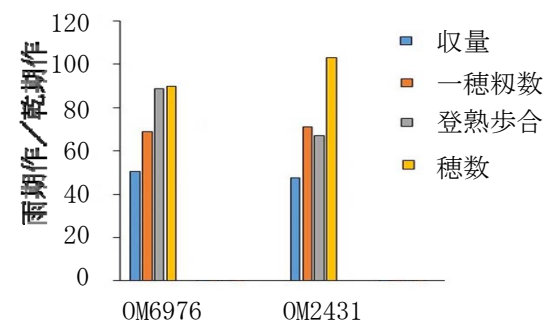


図1 収量および収量構成要素の乾期作と雨期作の比率

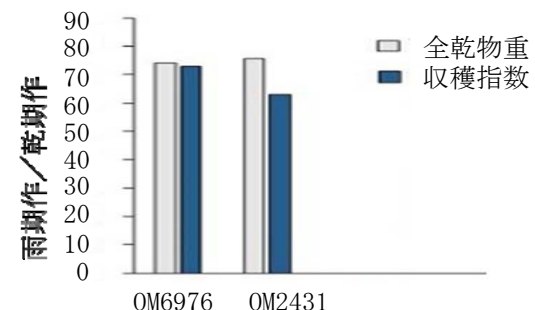


図2 全乾物重と収穫指数の乾期作と雨期作の比率

粒数の減少を穂の着粒位置別に見ると、1次粒 (1次枝梗状の粒) よりも2次粒で減少

が顕著であった。これらの結果より、雨期作においては幼穂形成から登熟初期に何らかの要因で籾数の低下が引き起こされ、それにより収穫指数が低下することが収量の大きな低下の原因となっていると考えられる。特に、2次籾の形成の抑制あるいは退化の促進が発生していると考えられる。

### ② 雨期作の減収に及ぼす土壌要因

土壌環境の影響を解析するために、幼穂形成期から成熟期にかけて根の外観観察を行った。その結果、雨期においては根表面への硫化鉄（黒色）の沈着がより多く認められた。また試薬を用いた硫化物反応（メチレンブルーによる青色の発色反応）が強い傾向にあった（写真1、写真2、写真3）。



写真1 根の観察（乾期作：2014年3月）



写真2 根の観察  
（雨期作：2014年  
8月）



写真3 硫化物反  
応（雨期作：2014  
年8月、OM2431）

水田や湿原、湖沼などのように地表面を水が覆い、その下に泥や砂などから成る土壌や堆積物がたまっている場合、土壌や堆積物の内部は無酸素状態となることが多い。酸素の欠乏した還元的环境では、微生物により酸素以外の酸化性物質（硝酸イオン、酸化態マンガン、酸化態鉄、硫酸イオン、二酸化炭素）を電子受容体として利用する嫌気呼吸が行

われる。硫酸還元細菌による異化的硫酸還元は嫌気呼吸の一種であり、硫酸イオンの酸化力を使って有機物を酸化分解し、硫化水素を生成する（永田・宮島、2009）。

本研究でも、雨期作の幼穂形成期から成熟期にかけて、稲など好気性の生物にとって有毒な硫化水素などの硫化物が発生していることが明らかとなった。今回の調査では地上部への影響は明確ではなかったが、硫化水素による障害の可能性が示唆される。土壌中の硫化水素は根への障害だけではなく、植物体地上部への侵入により幼穂形成を直接阻害すると言われており、注意深く観察する必要のある物質である。

### ③ 雨期作の減収に及ぼす気象要因

気象要素の影響を考察するため、ほぼ幼穂形成から登熟初期にあたる移植後51日から70日目の期間を対象に、各気象要素と一穂籾数との関係を解析した。その結果、この期間の平均気温や日最大風速とは負の相関関係が、また日照時間とは正の相関関係が認められた（図3-1、図3-2）。

雨期では、当然ながら低日射量が生育抑制の一因となる。乾物重の低下は低日射による光合成の低下が大きな要因と考えられる。今回、登熟歩合は1次籾、2次籾ともに低下していた。日射の不足による登熟の低下は一般に2次籾で顕著であることから、今回認められた登熟の低下は日射不足だけが原因とは考えにくい。また、今回主要な減収要因であった一穂籾数の低下については、高温や高風速の影響が示唆された。高温による一穂籾数の低下は熱帯、温帯で一般に認められる現象であり、今回の傾向と一致する。しかし、気温1℃上昇あたりの籾数の低下程度は、熱帯でIR8を用いたこれまでの報告(Yoshida 1981)では4.4%℃<sup>-1</sup>であり、今回の値は既往の研究事例よりかなり大きかった。この原因としては今回の実験に用いた品種の特性

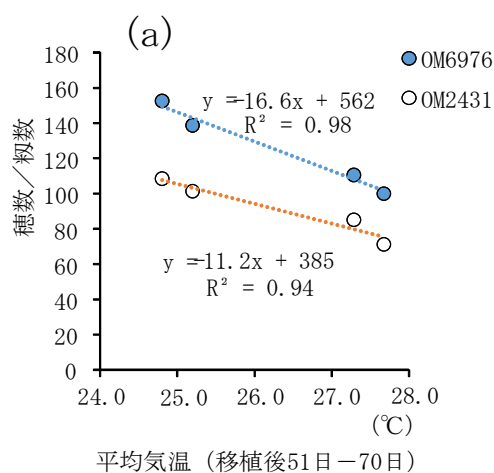


図3-1 穂数と移植後51日-70日の平均気温(a)の関係

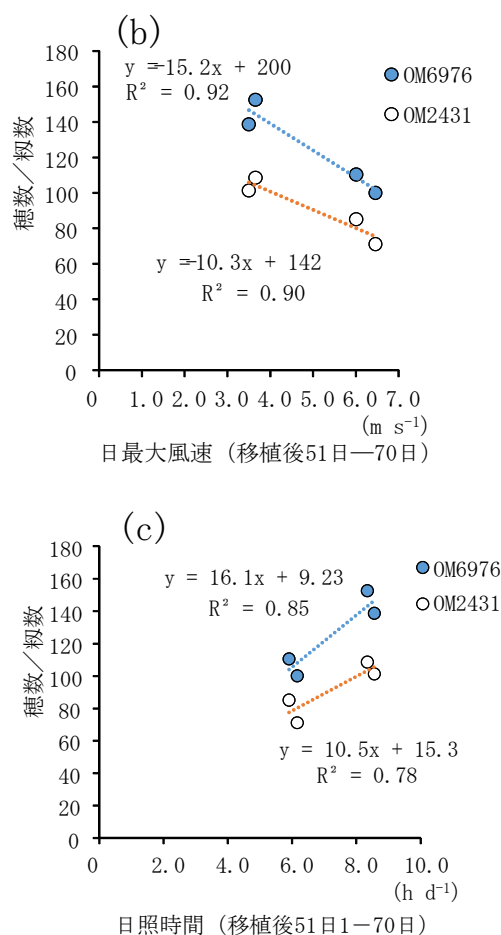


図 3-2 穂粒数と移植後 51 日～70 日の日最大風速(b)、日照時間(c)の関係

と、高温以外の気象要因や土壌要因が関与していると考えられる。気象要因としては、強風による水ストレスが関与している可能性も指摘できる。

③土壌要因と気象要因の混合・複合的な影響  
前述①と②の結果より、雨期作の収量低下には、土壌の還元障害（特に硫化水素）と気象要因（高温、強風、低日射）の両方が関与している可能性が示唆される。

(2) 水稲雨期作の減収を改善する対策技術の検討

雨期作と乾期作の栽培期間中における土壌の酸化還元電位の測定結果を図 4 に示す。乾期作では、収穫前に田面水を落水するまでの間、土壌の酸化還元電位はおよそ 0～-100 mV の範囲で推移していた。一方、雨期作では慣行の水管理において、移植開始から酸化還元電位は徐々に低下していき、30 日を過ぎた頃からマイナスとなり、60 日を経過した頃には -200 mV 近くまで低下した。乾期作と比較して、雨期作では土壌の還元状態が進行し、硫酸還元による硫化水素の生成が懸念される状態であったと推定される。このことは、

4 (1) ②で述べた土壌環境の調査結果と調和的である。

雨期作中干区では、移植後 40 日から 2 週間ほど田面水を落水した。作期中の中干は雨期作時の水田作土層の還元環境を改善するのに有効であった。

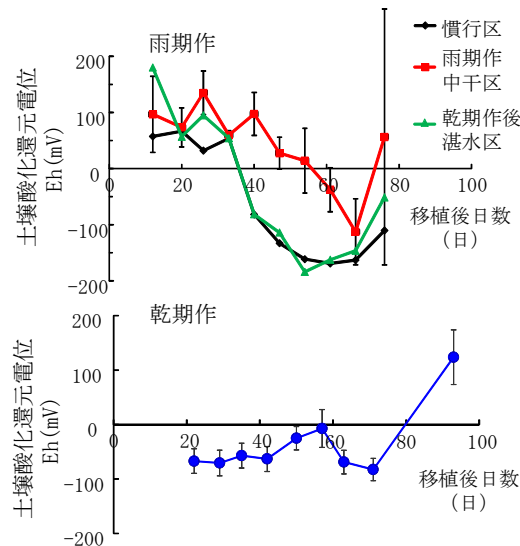


図 4 水管理の違いによる土壌酸化還元電位の変化

また図 5 は、田面水の pH と電気伝導度の変化を示している。この結果から、水稲の乾期作を収穫した後に田面湛水を行う処理 (T3) により、雨期作初期から中期にかけて発生する田面水の酸性化を改善できることが分かった。日本国内の報告事例ではあるが、土壌の pH が 4.5 以下になると、水稲に生育障害が発生することが知られている（在原、2001）。土壌 pH と土壌間隙水の pH はおおよそ近似しており、本研究では 3 処理区のうち乾期作後湛水区 (T3) のみ、土壌間隙水の pH は 4.5 を上回っていた。

電気伝導度は水中の溶存イオン量の指標となることが知られており、本研究でも水中の電気伝導度と硫酸イオン濃度は比例関係にあった。田面水の pH が低下する時期に電気伝導度が上昇していることから、田面水には硫酸が多く含まれていた可能性が示唆される。このように、乾期作の収穫後に田面湛水を行うことで、硫酸の生成を抑制できる可能性が高いと考えられる。

現地では、乾期作の収穫前に田面水を落水し、雨期作の移植前（通常は 4 月下旬頃）までそのまま休耕とする。酸性硫酸塩土壌地域の場合、表層土壌に含まれる黄鉄鉱が大気暴露などにより酸化・溶解して硫酸が生成されるため、水の pH は低下し、電気伝導度や硫酸イオン濃度が上昇する。しかし、試験圃場は酸性硫酸塩土壌地域ではなく、地下 1 m よりも深い層に黄鉄鉱が存在する地域に位置

しているため、休耕期の落水に対して注意は払われていなかった。メコンデルタでは、地表付近に露出していなくても地下に酸性硫酸塩土壌が広範に分布しているため、本研究により得られた知見は本調査地と類似する多くの地域に適用できる可能性がある。

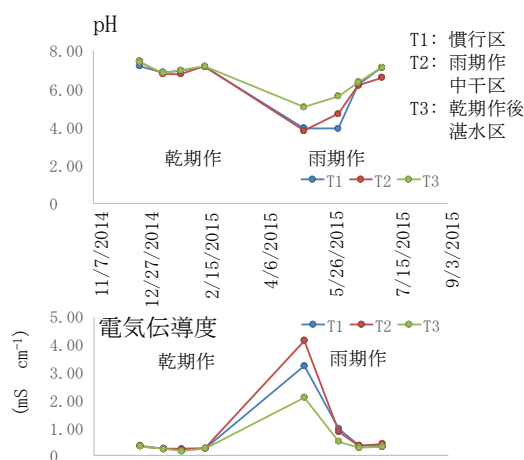


図5 灌漑水管理と田面水のpHと電気伝導度の変化

今回の調査では、これら3種類の水処理と水稻収量の関係は明確ではなかった。この要因としては、水管理のばらつきが大きかった可能性が考えられる。今後、さらなる検証が必要となるが、これらの結果から、土壌の還元環境を緩和する水管理技術として中干、酸性化(硫酸の生成)を抑制する技術として乾期作収穫後の田面湛水が有効と考えられる。

#### <引用文献>

- ①永田俊、宮島利宏(編)、流域環境評価と安定同位体—水循環から生態系まで、2009、217-219、京都大学学術出版会、京都
- ②Yoshida, S., Fundamentals of rice crop science, 1981, IRRI, Los Banos, Philippines
- ③在原克之、客土造成水田の土壌化と生産性改善、千葉農総研特報、1、2002、1-60

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ①Watanabe, T., Luu, H. M., Nguyen, N. H., Uto, O. Inubushi, K., Combined effects of the continual application of composted rice straw and chemical fertilizer on rice yield under a double rice cropping system in the Mekong Delta, Vietnam, JARQ, 査読有, 47, 397-404, 2013年

[学会発表] (計 9件)

- ①近藤始彦、飯泉佳子、渡辺武、熱帯アジアの稲作における生産制限要因と対策、日本土壤肥料学会 2016 年度大会シンポジウム「熱帯アジア地域の問題土壌と農業生産」、2016年9月20日-22日、佐賀大学
- ②Iizumi, Y., Watanabe, T., Kondo, M., Luu, H. M., Nguyen, K. T., Vu, N. M. T., Nguyen, H. C., Huynh, V. T., Improvement of low rice yield cultivated in the rainy season on the Mekong Delta, Vietnam, Meeting of JIRCAS-CTU Climate Change Project 2016-2020, Can Tho (Vietnam), 2016年6月30日
- ③Iizumi, Y., Watanabe, T., Kondo, M., Luu, H. M., Duong, H. S., Nguyen, K. T., Nguyen, H. C., Low yield improvement to the wet season rice cropping -Soil and water properties-, JIRCAS-CTU Climate Change Project, Workshop 2015, Can Tho (Vietnam), 2015年12月22日
- ④Iizumi, Y., Watanabe, T., Kondo, M., Luu, H. M., Duong, H. S., Nguyen, K. T., Nguyen, H. C., Improvement of low rice yield in wet season, JIRCAS-CTU Climate Change Project, Workshop 2015, Can Tho (Vietnam), 2015年12月22日
- ⑤Kondo, M., Iizumi, Y., Watanabe, T., Luu, H. M., Duong, H. S., Nguyen, K. T., Nguyen, H. C., Low yield improvement of the wet season rice cropping -Physiological characterization, JIRCAS-CTU Climate Change Project, Workshop 2015, Can Tho (Vietnam), 2015年12月22日
- ⑥飯泉佳子、近藤始彦、渡辺武、ベトナム・メコンデルタの水田における水・土壌環境、日本陸水学会第80回大会、2015年9月29日、北海道大学
- ⑦飯泉佳子、近藤始彦、渡辺武、水稻2期作の雨期に低収量となる水田の水・土壌環境に関する研究—ベトナム・メコンデルタ地域の事例—、日本陸水学会第79回大会、2014年9月12日、筑波大学
- ⑧Watanabe, T., Luu, H. M., Ito, O., Inubushi, K., Combined Effects of the Continual Application of Composted Rice Straw and Chemical Fertilizer on rice Yield under a Double Cropping System in the Mekong Delta, 20<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Jeju (South Korea), 2014年6月10日
- ⑨Iizumi, Y., Kondo, M., Watanabe, T., Nakagawa, H. Yoshida, H. Toriyama, K., Cause of low yield of paddy rice in the rainy season on the Mekong Delta, Vietnam, SIL XXXII Congress, Budapest (Hungary), 2013年8月5日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯泉 佳子 (Iizumi YOSHIKO)  
国際農林水産業研究センター・生産環境・  
畜産領域・主任研究員  
研究者番号：00414996

### (2) 研究分担者

近藤 始彦 (KONDO MOTOHIKO)  
名古屋大学・生命農学研究科・教授  
研究者番号：00355538

渡辺 武 (WATANABE TAKESHI)  
国際農林水産業研究センター・企画調整  
部・科長  
研究者番号：40425525