

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02964

研究課題名(和文) 2018年と2019年に岐阜県中濃においてイネ高温不稔被害の程度を決定した要因

研究課題名(英文) Factors determining the occurrence of floret sterility in rice in Chuunou area in Gifu prefecture in 2018

研究代表者

松井 勤 (MATSUI, Tsutomu)

岐阜大学・応用生物科学部・教授

研究者番号：70238939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：猛暑年であった2020年、岐阜県中濃地域の晩生水稲に大規模な不稔が発生した。2018年、2019年に中濃地域に発生した水稲不稔を理解するうえで、2020年の不稔発生の原因究明は重要な意味を持つと考え、2020年の水稲不稔発生に関する調査を研究内容に加え、不稔発生の地域的な分布、水田内の不稔発生の空間分布を知るための稲穂の面的なサンプリングおよび気象データの収集を行った。2020年のような猛暑年であっても高温そのものによる水稲の不稔の発生はそれほど多くなく、現時点では水管理や防除を徹底することで不稔の発生を相当抑え込むことができると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間中の2020年に中濃地域に大規模な水稲不稔被害が発生した。この被害状況を調査することは2018年、2019年に発生した不稔の発生要因を解明するうえで極めて重要と考えられたために研究内容に2020年の不稔発生の状況の調査を加えた。これまでの水稲の高温不稔研究は生理学的なものが多く、圃場で発生した水稲の高温不稔の調査としては極めて大雑把なものがわずかにあっただけである。今回の研究期間中、2020年に中濃地域に大規模に発生した不稔は、高温のみが原因の不稔の発生ではなかったと考えられるが、圃場で発生した大規模水稲不稔を詳細に追いかけたケーススタディーとして学術的に貴重な資料であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In 2020 summer, severe rice sterility occurred in Chuunou area of Gifu prefecture; partially due to high temperatures at reproductive stage of late rice. To understand the mechanism of high temperature-induced sterility in rice, we conducted survey of the floret sterility and collected meteorological data. We also checked tolerance of rice floret of popular cultivars in Gifu prefecture against the high temperatures at reproductive stage using growthchambers and built a simple simulation model that estimate the occurrence of high temperature-induced sterility based on the response of cultivars to the high temperatures. Our simulations showed that the occurrence of sterility due to high temperature was about 20% of total sterility. We thus concluded that we can prevent most part of occurrence of sterility with careful control of water and insect pest.

研究分野：作物学

キーワード：岐阜県 水稲 高温不稔

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

応募者らは、模擬温暖化条件下・制御環境条件下でのイネの生育試験と作物モデルによるシミュレーションの結果から、地球の温暖化により日本のような温帯でもイネの高温不稔の発生が増加することを予測し、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の4次報告書に反映された (IPCC 2007) . 実際、中国長江中下流域では、イネ高温不稔の発生頻度が増しており、多くの農家水田で稔実率が低下する現象が報告されていた (Wang 2004 等) .

中国における非常事態と IPCC の4次報告を受け、IRRI (国際イネ研究所) は2007年3月高温対策戦略決定のための緊急ワークショップを開催。温暖化対策研究を開始し、世界各国から耐性品種を取り寄せ、世界の高温地域でその評価試験を始め (IRRI, 2007) , 豊富な材料を背景に、高温耐性への分子生物学的な研究に強力に投資し、論文を発表していた。しかし、温暖化への対策技術に結び付くような成果には至っていなかった (Jagadish et al. 2010) .

他方、応募者らは、中国の研究者と協力し、高温不稔を頻発するハイブリッドライスの脆弱性の仕組みを圃場実験で解明し、さらに育種現場での調査を通じて高温に強いハイブリッドライスの育種法を提案した。国内では、農業環境技術研究所と協力し、高温耐性形質の探索・評価を進め、高温耐性が葯の形、穂の高さなどの形態的特性に左右されることを示した。

これまで、様々な分野の研究者が種々の手法を用いて、圃場レベルから生理・分子レベルまで幅広いスケールでイネの高温不稔の発生や耐性のメカニズムの解明に取り組んできた。イネ高温不稔研究の目的は発生被害を防ぐことであり、本来、現場で発生する高温不稔現象と照らし合わせながら目標を定め、その研究成果は現場で検証されるべきである。しかし、これまでにそのような研究例はなく、多くの研究は、単にイネを高温にさらし、データを収集し、その後は検証もなく、やりっぱなしという状態であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、岐阜県中濃南部地域において、高温不稔の深刻な被害が認められた水田と認められなかった水田を比較することで被害の差異を決定する要因を明らかにし、それに基づいて今後日本の各地で深刻な問題となる可能性が指摘されているイネの高温不稔の発生に対する現場での対策技術を考案し、さらに、高温不稔研究に求められるものを明確にすることである。

3. 研究の方法

研究期間中の2020年に中濃地域の水稲に大規模な不稔が発生した。研究期間中に大規模な不稔が発生した機会を生かすために、2020年の不稔調査と解析を研究内容に加えた。

(1) 2020年中濃地域の晩生水稲に発生した大規模不稔に関する調査

不稔発生の概要の調査

発生の全容を把握するために、岐阜市から中濃一帯の晩生水稲が栽培されている水田について可能な限り広く不稔の発生程度を調査した。

2020年に不稔の発生が中濃北西部において初めて確認されたのが9月中旬の頃であり、その後、不稔被害が中濃地域一帯に及び可能性が明らかになったのは、9月末のことであった。10月中旬までにはどの地域でも収穫が始まるために、全容把握の考査のための時間は2~3週間程度と考えられた。このため、調査のためにいちいち水田管理者にサンプリングの許可を得ることは難しく、不稔発生程度の調査は目視により行った。

まず、自家用車で水田地帯を巡回し、立毛の水田を見つけた場合に水田の周囲を徒歩により一周し、4辺から穂を目視し、水田の平均的な不稔発生率を評価し、0~30%、20~40%、40~60%、60~80%、80~100%に分類し、記録した。

気象条件の調査

中濃地域の近年水稲の高温不稔が発生していると考えられる地区の水田に気象観測装置 (HOBO 製リモートロガー-RX3003 + 超音波式風向風速スマートセンサー-S-WCG-M003 + 高分解能温度湿度センサー-S-THB-M002 + 日射センサー-S-LIB-M003 + ソーラーラジエーションシールド RS3-B) を設置し、水稲の生殖成長期の気温、相対湿度、風速、風向を計測した。風速風向センサー、温湿度センサー、日射センサーの高さは地表よりそれぞれ220、205、183cmとした。

不稔発生田での不稔被害の分布

大きな不稔被害が認められた水田のうち、管理者・所有者から許可をいただけた一部の水田については、水田より面的に稲穂のサンプリングを行った。すなわち、水田面に数メートル間隔で格子線を引き、その交点より9穂ずつサンプルを得た。9穂について触診と目視により稔実調査を行い、2穂をランダムに選び酸性フクシンで染色した後、穎果上のカメムシの口針鞘を調査した。

(2) 岐阜県水稲奨励新種の開花期の不稔から見た高温感受性

岐阜県の奨励品種として広く栽培されている水稲8品種 (うち性6品種、もち性2品種) を供試材料として使用した。播種後6.0葉齢程度まで育った苗を5000分の1aワグネルポットに円

形に 20 本移植し，屋外栽培圃場にて開花期まで栽培を行った．開花期の材料に対して人工気象機を用いて昼温 35，37.5，40 で 3 日間の高温処理を施した．処理期間中に開花した穎花を毎日各処理区からポットごとにサンプリングし，葯長，不裂開の数，裂開長，柱頭に付着した花粉の数，柱頭上で発芽した花粉の数を計測した．処理が終了したポットは屋外に戻し，成熟期まで栽培し不稔の調査を行った．

(3) 岐阜県水稲奨励品種の高温感受性の時期と程度の品種間差異

岐阜県水稲奨励品種である 11 品種を含む，水稲 13 品種（うるち性 8 品種，もち性 4 品種，酒米 1 品種）を供試材料とした．大規模な不稔が発生した 2020 年に岐阜県中濃地域で計測された気象データに基づき，グロスチャンパーを用いて最高気温（13:00～16:00）が 35，37，39 の 3 処理区を設け，高温処理を施した．処理期間を 6 日とし，出穂のおよそ 24 日前から開花終了まで 3 日ごとに処理することで様々な生育ステージの材料に高温条件を与えた．処理区あたり 1 ポットを用いた．出穂期には穂ごとに出穂日を書いたタグを付け，高温処理後，屋外で成熟まで栽培した後に穂ごとに稔実調査を行った．稔実は完全受精，偽稔（子房が空であるもの），登熟不十分，稔実の 4 段階で評価され，完全不受精と偽稔を不稔とした．

(4) 感受性の時期と程度に基づく高温不稔発生の予測

2020 年の高温でどの程度の不稔が生じるかを評価する目的で，気温条件から高温不稔の発生を予測するモデルを作成した．モデルでは，開花期（flowering stage），穂ばらみ期（booting stage）それぞれ，方形水田の気温，またはチャンパー内温度の 13:00～16:00 の平均値について，閾値温度（ T_{cf} ， T_{cb} （ $^{\circ}\text{C}$ ））以上の温度の積算温度（ HD_f ， HD_b ）を計算し，積算温度の合計値から不稔の発生を予測する．積算温度は以下の式で求めた：

$$HD_{f(b)} = \sum_{i=a-n}^{a-m} \max(T_i - T_{cf(b)}, 0) \quad (1)$$

T_i は i の日の 13 時から 15 時の平均気温（ $^{\circ}\text{C}$ ）， a は出穂日であり， m ， n は今回の実験により得られたデータから品種ごとに感受性の時期を推定し，積算期間を設定したものである．

積算温度にもとづき，稔実率（Sterility rate）を予測する式は以下のとおりである：

$$SR = pHD_f + qHD_b + r \quad (2)$$

SR は不稔率のロジット変換値， p ， q はパラメータである．式（1），（2）によって予測した値と実験で得られた実測値との RMSE が最小となるような開花期と穂ばらみ期の傾き（ p ， q ）とそれぞれの閾値（ T_{cf} ， T_{cb} ），切片（ r ）を e エクセルの機能ソルバーにより求めた．

作成した式に，2020 年の中濃地域の気象データをあてはめて稔実率を推定した．ロジット変換値から稔実率への変換式は以下のとおりである：

$$\text{推定稔実率}(\%) = (\exp(SR)) / (1 + \exp(SR)) \times 100 \quad (3)$$

4. 研究成果

(1) 2020 年中濃地域の晩生水稲に発生した大規模不稔に関する調査

晩生水稲品種の不稔の発生は，富加町大山周辺，坂祝町深萱周辺，川辺町福島周辺，岐阜市福富周辺の水田に集中していた．いずれの地区にも山が近いという特徴があり，大山，深萱，福富には山の東部に位置するという共通の特徴が認められた．気象観測器を設置した地点では，8 月 14～18 日，20～21 日および 29～31 日に連続して日最高気温が 36 度に達していた．中濃地域の晩生水稲の主力品種であるハツシモの出穂期は 8 月 24～29 日であったと推定されることから，それぞれの高温期間はハツシモの穂孕期と開花期に相当したと考えられた．

不稔が発生した大山地区に近い大平賀，井之上では，最も日最高気温が高かった 8 月 14～18 日の日最高気温の平均値は，37.2 および 37.0 で他の 2 地点に比べて日最高気温が 0.5～1.0 度ほど高く，期間中の日中の平均風速は大平賀，井之上では 1.6 および 1.4 ms^{-1} と他の地点より 1 ms^{-1} 程度小さかった．この期間の日中の風向は主として西～南西風であった．

イネの体温は気温だけでなく，日射や風速の影響を強く受ける．高気温に加えて風速の低さはイネの体温の上昇の要因となる．不稔の発生から見た水稲の高温感受性は開花期と穂孕期に強くなることが明らかにされている．穂孕期の高温感受性の程度についてはよくわかっていないが，開花期と穂孕期が高温期間とよく一致していたこと，高温時に稲体温度が上昇する条件が整っていたことから，稲体温の上昇が局地的な不稔の発生要因の一つかもしれないと考えられた．

圃場での不稔の発生状況，穎果上のカメムシの口針鞘の観察から，圃場で発生した不稔穎花の半数程度にカメムシの口針鞘が認められた．このことから発生した不稔の半数程度はイネカメムシの吸汁害による可能性がある．また，不稔が発生した水田では中干が 8 月 15 日ごろまで行われていた．この時期は晩生水稲品種の穂ばらみ期に相当することから，中干に伴う干ばつストレスも関与している可能性が考えられた．

(2) 岐阜県水稲奨励新種の開花期の不稔から見た高温感受性

高温処理により不稔率は有意に増加し，不稔の発生に関して有意な品種間差異が認められた．また，不稔が 50% に達する温度の品種間差異は最大で 3.1 $^{\circ}\text{C}$ に達した（36.5～39.6 $^{\circ}\text{C}$ ）．不稔率と柱頭上の花粉発芽数が 10 粒未満の穎花の割合の間には 3 区全体（ $R^2=0.870^{***}$ ），37.5 区（ $R^2=0.547^*$ ）および 40 区（ $R^2=0.457^*$ ）で相関が認められ，不稔の発生は柱頭上の花粉発芽数の減少によって決定されると考えられた．柱頭上で花粉発芽数が 10 粒未満の穎花の割合と柱頭上で花粉付着数が 20 粒未満の穎花の割合との間でも 3 区全体（ $R^2=0.940^{***}$ ），37.5 区

($R^2=0.777^{***}$)および40区($R^2=0.743^{***}$)で強い相関が認められ、柱頭上での花粉の発芽の安定性は受粉の安定性によって決定されると考えられた。さらに、柱頭上での花粉付着数が20粒未満の穎花の割合と葯の不裂開の割合との間には3区全体($R^2=0.721^{***}$)と37.5区($R^2=0.796^{***}$)で強い相関が認められ、受粉の安定性は葯の不裂開の数によって説明することができた。一方で、柱頭上での花粉付着数が20粒未満の穎花の割合と葯基部の裂開長との間にはいずれの区でも有意な相関関係は認められなかった。これまでの研究によると、高温条件下で葯基部の裂開長が $300\ \mu\text{m}\sim 600\ \mu\text{m}$ の範囲のとき受粉の安定性と葯基部の裂開長との間に強い相関があることが明らかになっているが、今回の実験では高温条件下で葯基部の裂開の範囲は $500\ \mu\text{m}\sim 700\ \mu\text{m}$ と大きな裂開であったことから、この裂開範囲が安定した受粉のための花粉の放出に十分な範囲であったために相関が弱くなり、有意な相関関係が認められなかったと考えられた。以上より、岐阜県の水稲奨励品種の高温耐性の品種間差異に関して、葯の不裂開が強く関与していると考えられた。

(3) 岐阜県水稲奨励品種の高温感受性の時期と程度の品種間差異

開花期の高温により、稔実率が有意に低下したが、稔実率に有意な品種間差異は認められなかった。穂ばらみ期の高温処理では、高温により稔実率の有意な低下および稔実率の有意な品種間差異が認められ、高温により早生品種のあきたこまち、たかやまもちの稔実率が明らかに低下したのに対し、晩生品種のハツシモ、みのにしきの稔実率は大きくは低下しなかった。

(4) 感受性の時期と程度に基づいた高温不稔発生程度の評価

作成した高温不稔発生予測モデルに2020年の中濃地域の夏の気温をモデルにあてはめた結果、晩生品種の出穂期にあたる8月下旬に出穂した場合、品種によっては33%程度の不稔の発生が推定されたが、晩生の主力品種のハツシモでは、不稔の発生は15%程度と推定された。この結果から、2020年に中濃地域の晩生水稲に発生した大規模不稔は高温のみによるものではなく、他の要因の関与が推察された。

まとめ

2020年中濃地域で晩生水稲に大規模な不稔が発生した。発生水田は、風が弱く、気温が高く、稲体の温度が上がりやすい位置にあったこと、高温期が晩生水稲の穂ばらみ期および開花期に当たったことから、高温が不稔の原因の一つと考えられた。

岐阜県の水稲奨励品種の開花期の高温耐性の品種間差異は、高温条件下での葯の裂開不良の程度とそれによる受粉の不安定化の品種間差異によっていることが分かった。

制御環境でのデータに基づき作成した高温不稔の発生評価モデルによれば、2020年の気温条件で発生する高温不稔はそれほど多くなく、不稔の大発生には気温以外の要因がかかわっていることが示された。生産者への聞き取りの結果、不稔が大発生した水田では、中干が8月15日ごろまで行われていたことがわかっている。聞き取りの結果とカメムシの口針鞘に関する調査から、不稔の大発生には、中干による干ばつストレスとカメムシの吸汁害がかかわっていると考えられた。このことから、水管理と害虫防除を適切に行うことで、2020年の中濃地域の晩生水稲に発生した不稔を相当軽減できた可能性がある。

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 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsutomu Matsui, Kazuhiro Kobayasib, Mayumi Yoshimotoc, Toshihiro Hasegawac, Xiaohai Tian	4. 巻 249
2. 論文標題 Dependence of pollination and fertilization in rice (<i>Oryza sativa</i> L.) on floret height within the canopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Field crops research	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） 10.1016/j.fcr.2020.107741	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 該当する

1. 著者名 Tsutomu Matsui, Kazuhiro Kobayasi, Mayumi Yoshimoto, Toshihiro Hasegawa, Takashi S.T. Tanaka, Xiaohai Tian	4. 巻 267
2. 論文標題 Factors determining the occurrence of floret sterility in rice in a hot and low wind paddy field in Jiangnan Basin, China.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Field crops Research	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） 10.1016/j.fcr.2021.108161	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0件

〔図書〕 計0件

〔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 貴 (Tanaka Takashi) (20805436)	岐阜大学・応用生物科学部・准教授 (13701)	
研究分担者	小林 和広 (Kobayasi kazuhiko) (90234814)	高根大学・学術研究院農生命科学系・准教授 (15201)	

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