

開花期の高温による水稲の不稔発生の品種間差異

大戸敦也*

Varietal differences in rice spikelet sterility induced by high temperatures during flowering period.

Atsuya OTO

要約 水稲は開花期の最高気温が 34~35℃以上になると不稔粒が増加し始めるとされており、2018年の記録的な高温下では当センターの水田ほ場においても不稔の発生が確認された。本研究では、高温による不稔発生の少ない品種の育成に向けて、選抜作業における比較指標となる既存品種の開花期の高温による不稔発生の傾向を調査した。その結果、ジャポニカ品種では「笑みの絆」および「コシヒカリ」がほかの品種に比べて不稔の発生が少なく、開花期の高温による不稔に比較的強い可能性が示唆された。インディカ品種の「N22」はこれら2品種よりさらに不稔の発生が少なく、また調査期間が短かったものの不稔発生と気温の間に正の相関が認められず、開花期の高温による不稔に強いことが示唆された。

埼玉県は夏季の気温が高い地域であり、水稲の高温障害が問題となっている。特に2010年の8月半ばから9月上旬にかけての異常高温は、前年の一等米比率が97.8%であった当県の主力品種「彩のかがやき」に白未熟粒の発生を引き起こし、この年の一等米比率は0.2%、規格外は77.3%にのぼった（農林水産省2010, 農林水産省2011）。これをきっかけに当センターは「彩のきずな」（荒川ら2013）や「むさしの26号」（大岡ら2019）、「むさしの27号」（大岡ら2020）等の高温登熟耐性品種を育成してきた。水稲の白未熟粒の発生は出穂後20日間の日平均気温27℃程度以上で増加すると考えられている（寺島ら2001, 若松ら2007）のに対し、近年はさらなる高温に見舞われることも多く、品質低下のみならず不稔粒の発生による収量低下も懸念されている。実際、酷暑となった2018年には当センターの水田ほ場においても不稔粒の増加が認められた。高温による不稔発生は開花期の気温に最も影響されているとされており、開花期の最高気温が34~35℃以上になると増加を始めるとされている（Osada *et.*

al. 1973, Satake and Yoshida 1978）。2018年の当センターの水田ほ場がある熊谷市は日最高気温が35℃以上となる「猛暑日」は37日、また7月23日には全国で観測史上最高となる日最高気温41.1℃を記録するなど記録的な高温年であった（熊谷地方気象台, 気象庁）。障害型冷害等で発生する不稔はその後の生育で収量が補償されるが、高温下の不稔発生では稔実した穎花の粒厚が厚くなる補償作用は起きず、障害型冷害のように被害推定に補償効果を見込むことは過小評価となる可能性が示唆されている（荻原ら2019）。IPCCのClimate Change 2023 Synthesis Reportによると、地球温暖化は想定されたすべてのシナリオおよびモデル化された経路においても今後も続くと考えられており、本県の水稲栽培において、今後も現在の水準で収量を維持するには高温不稔の発生への対策が急務である。一方、水稲の高温不稔発生には品種間差があることが報告されている。Satake and Yoshida (1978) や Matsui (2001) は品種ごとの不稔発生の傾向を、また、Hakata *et. al.* (2017) は高温不稔耐性の評価方法

について報告しており、高温不稔に強い水稻品種を育成できれば、進行する温暖化による減収の対策になると考えられる。

国内における野外での高温不稔発生の品種間差については長谷川ら(2008)や Yoshimoto *et. al.* (2021) が報告しているが、施設内試験の報告数に比べ事例が少なく、貴重な資料である。先述の Satake and Yoshida (1978), Matsui (2001), Hakata *et. al.* (2017) はいずれも人工気象室を利用した試験であるが、人工気象室等の制御環境下での不稔発生は野外における不稔発生と比べて発生温度が低い場合があるとされており(松井 2009)、また、Satake and Yoshida (1978) の報告においても、ファイトトロン内の植物の生育と野外のそれらは異なる可能性があることから、その関係性を調査する必要があることを述べている。さらに、品種育成の過程で従来通り選抜集団を展開し、その中で高温不稔耐性を見極めを行うためには野外における既存品種の高温不稔発生傾向のデータを指標として用いる必要がある。そこで、本研究では 2018 年～2022 年の 5 年間にわたり、当センター内で栽培された既存品種の高温不稔発生状況について調査を行った。

材料及び方法

1 供試品種

供試品種には、温暖地東部地域における高温登熟性の比較品種及び Hakata *et. al.* 2017 にて高温による不稔発生が少ないと報告された「IR24」(当センター品種保存)・「IR36」(JP 番号 12502)・「N22」(JP 番号 13107)、さらに当県育成の品種・系統を用いた。

2 耕種概要

各品種・系統を 1 株当たり 3 本で、1 畦ずつ移植した(1 畦あたり 18～41 株、株間 17～18cm、畦間 30cm。)施肥は N, P₂O₅, K₂O 各成分 3kg/a を基肥として施用し、追肥は行わなかった。A 区および B 区は 5 月上旬に移植、C 区および D 区は 5 月下旬に移植、E 区は 6 月上旬に移植を行った。なお、E 区の苗はサンプリング数には充分であったが、1 畦分の株数には不足であったため区別可能な他の水稻品種の苗で補った。

3 調査方法

出穂期は全体の 40～50%が出穂(穂先が露出した時点)した日とした。また、開花盛期は出穂期～4 日後までの 5 日間とした。

各区 5 株を刈取適期にサンプリングし、罹病穂や障害穂、無効穂等を取り除いたすべての穂について調査を行った。トレース台上に穂を乗せ、空となって見えるものを不稔粒としてカウントした。なお、穂変により内部が見えないもの等については触診や穎を割るなどして内部の状態を確認した。

4 統計解析

後述の 2 つの指標を用いて不稔発生と気温の関係を回帰式に表した。不稔発生の指標としては、株当たりの不稔率(=不稔粒数/全粒数)をさらに角変換した数値を用いた。気温の指標としては、長谷川ら(2008)は 34℃を閾値とした出穂の-2 日～+2 日の Heat dose(しきい温度以上の温度の積算値)が最も不稔発生と高い相関を示したとしており、本試験においても 34℃を閾値とした 5 日間の Heat dose を気温の指標として用いた。ただし、今回は品種による出穂の揃い方の違いを考慮して、品種ごとに 出穂 -2 日～+2 日・-1 日～+3 日・0～4 日の Heat dose のうち最も不稔指数と相関の高かったものを回帰式に表した。「N22」は、正の相関が認められなかったため、参考記録として上記の中で最も傾きの数値が大きい回帰式を表した。統計解析には Microsoft Excel を用いた。

結果および考察

1 年度別の気温条件と不稔発生状況

2018 年は 7 月 11 日から日最高気温 35℃を超える日が多くなり、多くの品種が高温による影響を受けたと考えられた(図 1)。なお、7 月～8 月の間の日平均気温が 20℃を下回ることにはなかったため、障害型冷害による稔実への影響はないと考えられた(図 1)。

2019 年は 7 月 29 日まで日最高気温が 35℃未満で、2018 年の 7 月と比較すると気温が低かった(図 1)。「初星」では A 区と B 区の不稔率が高くなったが、両区の出穂 11 日前、あるいは 12 日前に日平均

気温が 20℃を下回っており、障害型冷害による不稔が発生したと考えられる(図 1・図 2)。7 月 28 日以降は日最高気温が 34℃以上に上昇し、不稔率が 10%を超える品種が散見された(図 1)。

2020 年は 8 月 10 日まで日最高気温が 35℃を超えることがなく、不稔率についてもすべての品種で 10%を超えることがなかった(図 1・図 2)。また、計測できなかった 8 月 23 日・24 日をのぞいて、7～8 月の間の日平均気温が 20℃を下回ることにはなかったため、障害型冷害による稔実への影響はないと考えられた(図 1)。「IR24」は Hakata *et. al.* (2017) では高温不稔に強いと報告されており、今回供試したが、当センターで品種保存された「IR24」では同様の結果とならなかった(図 2)。なお、同報告で高温不稔に強いとされている「N22」及び「IR36」については不稔率が比較的強く、報告と一致した。

2021 年は 2020 年と同じく 8 月 10 日まで日最高気温が 35℃を超えることがなかった(図 1)。また、7 月 1 日から「むさしの 27 号」C 区が出穂した 8 月 9 日までの日平均気温が 20℃を下回ることにはなかったため、障害型冷害による稔実への影響はないと考えられた(図 1)。この年に供試した「IR36」は 2020 年に当センターで種子生産を行ったが、2022 年の試験で出穂揃までの期間が長かったことや、異株とみられる株が出現したことから、他品種との交雑があった可能性が考えられた。

2022 年は 2020 年および 2021 年より早い 7 月 31 日以降、開花盛期の最高気温が 35℃を超える日が増えてきており、高温の影響を受けた品種が前述の 2 年より多くなった(図 1)。また、7 月～8 月の間の日平均気温が 20℃を下回ることにはなかったため、障害型冷害による稔実への影響はないと考えられた(図 1)。

2 各品種の高温不稔発生傾向

調査初年度からの 5 年間調査できた品種のうち、「ふさおとめ」・「とちぎの星」・「初星」・「あきたこまち」は不稔指数と Heat dose の相関係数が 0.7 以上と強い正の相関を示した(表 1)。一方で「コシヒカリ」・「笑みの絆」・「彩のかがやき」は相関が弱く、回帰直線の傾きも小さかったことから、気温の上昇に対する不稔の増加が緩慢であり、開花期の高温による不稔に対して比較的強い性質があると考えられ

た(表 1・図 3)。「コシヒカリ」の高温不稔耐性については過去に知見があり、Matsui *et. al.* (1997) は「コシヒカリ」が高温状況下でも柱頭に多くの花粉を付着させる能力を持つことで高温不稔を回避している可能性があるとしている。「彩のかがやき」は切片が大きいことから 34℃以下で発生している不稔が多いことや Heat dose が 0 のときの調査ができていないことが関係してこのような結果になった可能性も考えられ、実際に高温不稔に強いかは継続して調査する必要があると考えられる。他にも、「さとじまん」や「あかね空」は切片の値が大きく、不稔発生の閾値となる気温が 34℃より低い可能性がある(表 1・図 3)。西山・佐竹(1981)は 1 つの目安であるが、感受性の高い品種の高温不受精の限界温度は 32~34℃程度であるとしている。

「N22」は 2020 年からの供試となり、サンプル数が少なかったものの、調査温度域内で Heat dose の上昇に伴う不稔発生の増加が認められなかった唯一の品種となった(表 1・図 3)。Satake and Yoshida (1978) は「N22」について、開穎後、葯が穎内に留まっているうちに裂開する特性が受粉を容易にしていると述べている。

散布図に表すと、「さとじまん」など一部で Heat dose が近いにも関わらず不稔発生のばらつきが大きい部分がある(図 3)。今回の回帰式では開花期の高温以外の要素を考慮しておらず、今後、ばらつきの原因を考察してより正確な不稔発生の予測をするためには、開花期の高温とそれ以外の要因の相互作用を各品種に合わせて考慮する必要がある。前述のとおり、西山・佐竹(1981)は 1 つのめやすとして、開花期不受精の限界温度は品種の感受性により異なるとしている。また、石丸ら(2008)は「コシヒカリ」は出穂期よりも出穂前の気温と相関が強かったとしており、Satake and Yoshida (1978) は出穂後に次いで出穂 9 日前(小孢子期)も高温に感受的だったとしている。松井(2009)はこれらの結果を受け、開花期の高温に強い品種は、穂ばらみ期の感受性が相対的に強く表れると解釈できるとしている。さらに、気温以外の影響も報告されており、Matsui *et. al.* (1997) は「アキヒカリ」について、昼間の温度 37.5℃の高温条件では、相対湿度が高いほど受粉を阻害し、稔実率を低下させたとしており、同様の高温条件で、風速 0.85m/s 以上の風もやはり稔実率

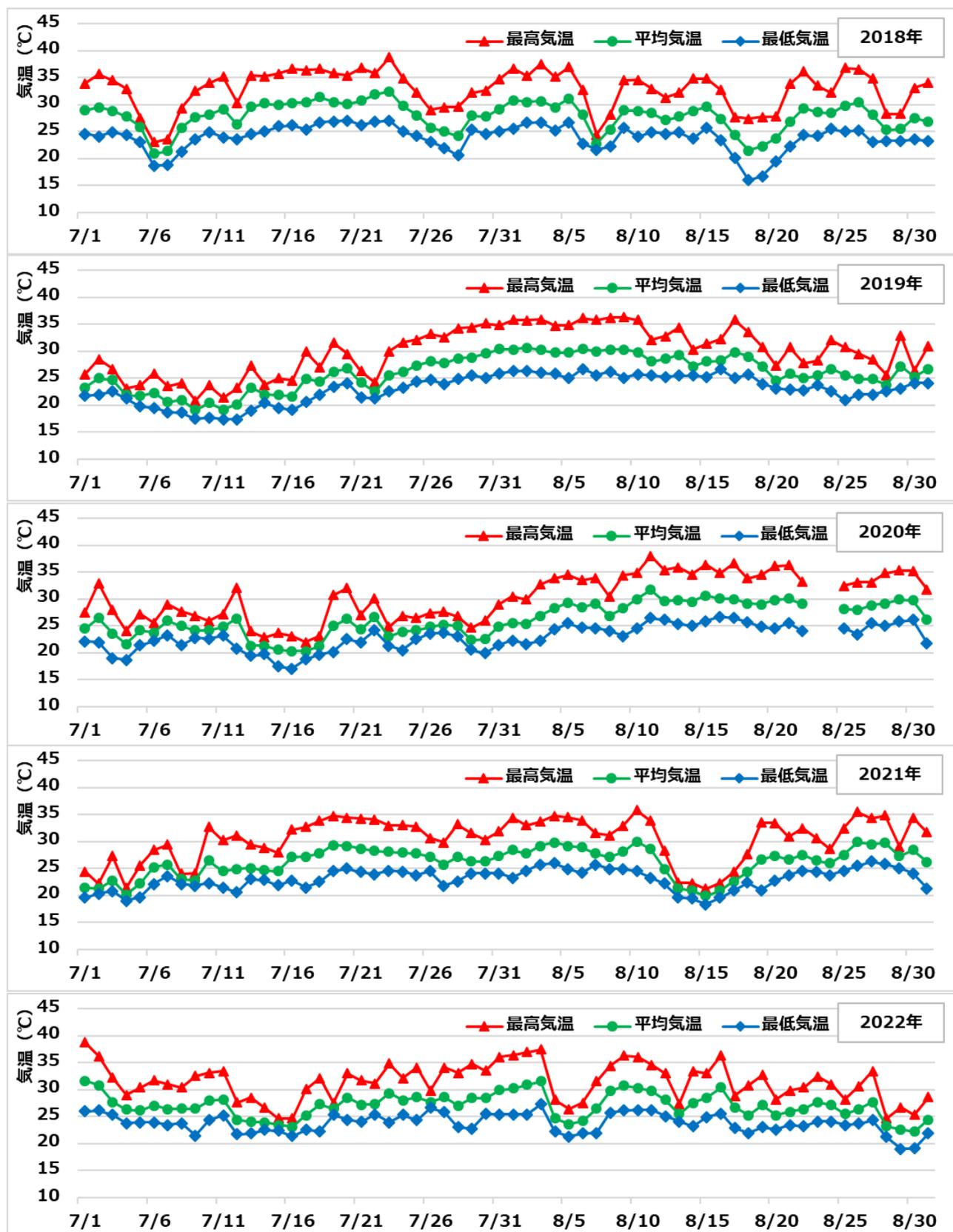
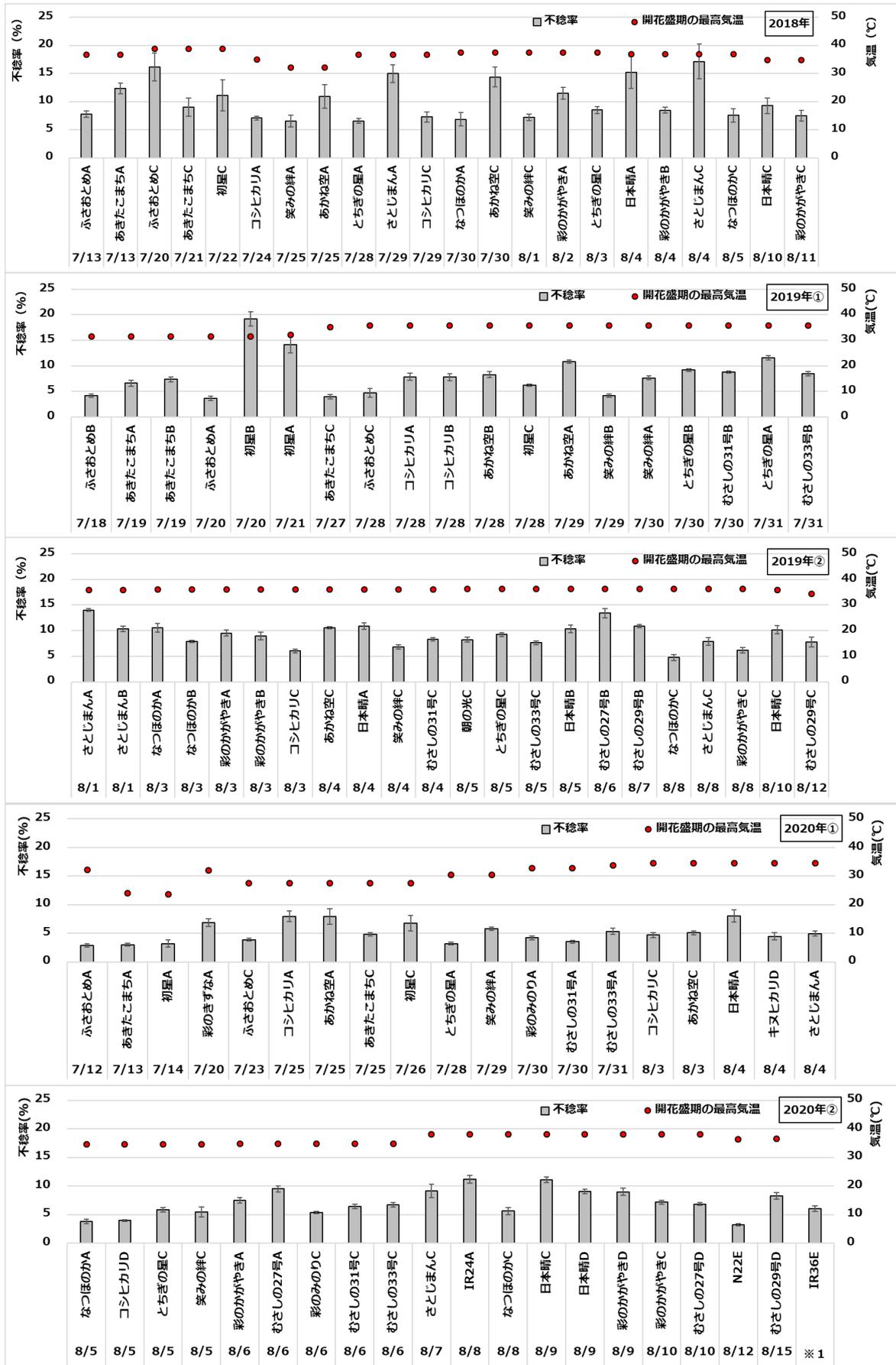


図1. 埼玉県農業技術研究センター玉井試験場内における2018年～2022年の7月～8月の気温

大戸：開花期の高温による水稻の不稔発生傾向の品種間差異



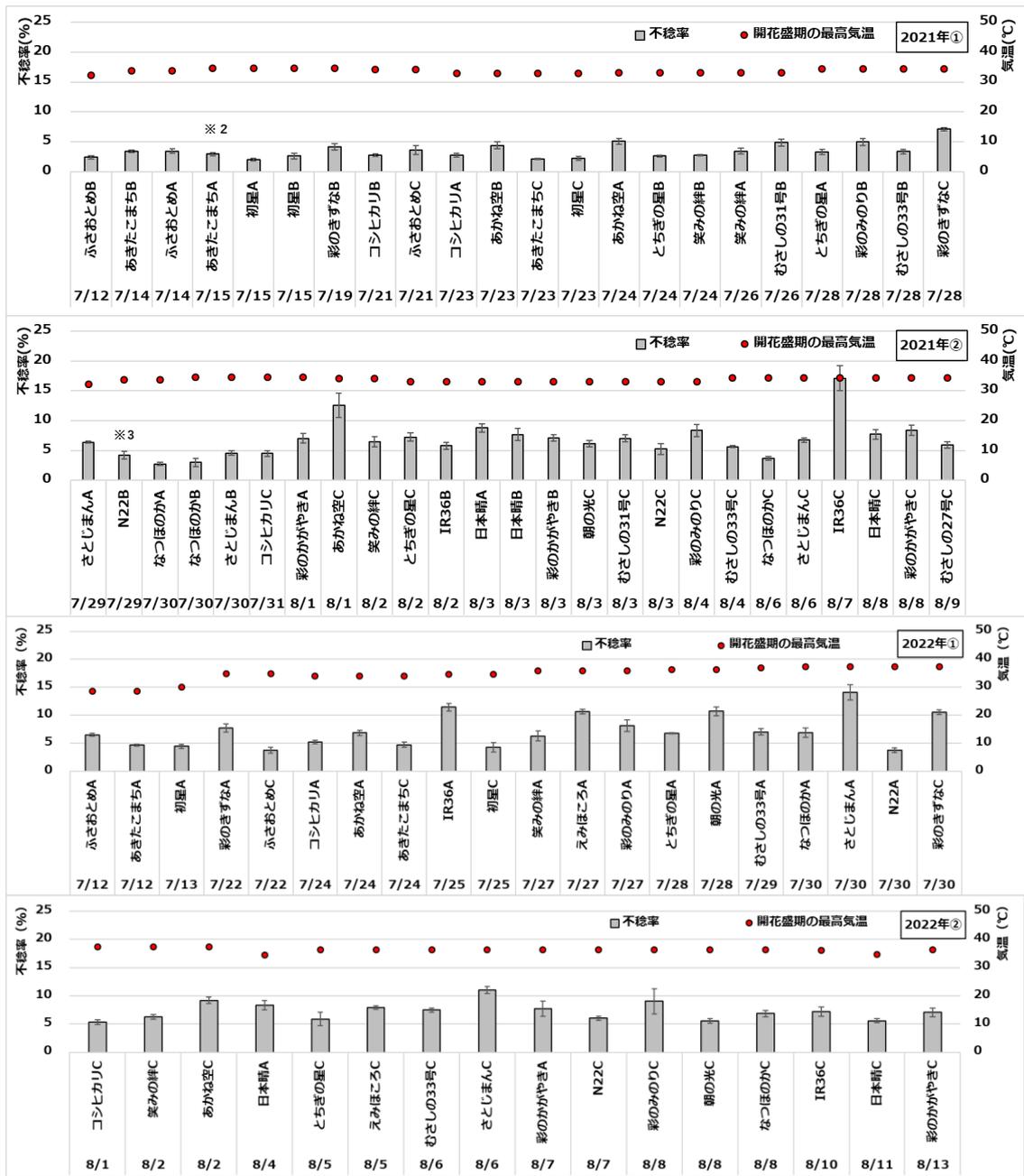


図2.各年の不稔発生状況

エラーバーは標準誤差を表す。A区およびB区は5月上旬移植、C区およびD区は5月下旬移植、E区は6月上旬移植。品種名下の日付は出穂日。開花盛期は出穂期～4日後と仮定した。※1：出穂期調査できず。※2：6株調査。※3：4株調査。※4：2019年「むさしの27号」C区は1株で計測ミスがあったため本図には記載しなかった。

大戸：開花期の高温による水稲の不稔発生傾向の品種間差異

を低下させたと報告している。大赤見ら（2011）においても、「日本晴」で同様に温度 37.5℃では相対湿度が高くなるにつれて柱頭上の花粉数が減少し、稔実率が低下することを報告されており、さらに穎花当たりの蒸散量が減少したことも確認されている。開花期の高温不稔にかかわる環境要因はこのように様々で、加えて蒸散や葯の裂開のしやすさ（Matsui and Omasa, 2002）およびタイミングにかかわる品種特性も影響すると考えられる。今後調査を継続し、これらの要素を取り入れた予測を可能にすることで開花期の高温不稔に強い品種の選抜に応用する。

3 総括

5 年間の調査結果と各品種の不稔発生傾向から、ジャポニカ品種の中では「笑みの絆」および「コシヒカリ」は開花期の高温不稔に比較的強い可能性が示唆された。また「N22」については3年間の結果ではあるが、これら2品種よりさらに高温不稔に強い可能性が示唆された。今後、開花期の高温不稔に強い水稲を選抜する際の基準品種として用いることができると考えられる。

表 1. 不稔発生（不稔指数）と 34℃を閾値とした出穂期付近 5 日間 Heat dose の回帰式

品種名	調査株数	回帰直線	相関係数 (R)	決定計数 (R ²)	Heat Dose 算出に用いた期間
ふさおとめ	50	Y = 0.97 X + 10.66	0.87 ***	0.75	-1~+3
彩のみのり	30	Y = 0.92 X + 13.02	0.54 **	0.29	0~+4
初星	45	Y = 0.87 X + 10.80	0.71 ***	0.51	-1~+3
とちぎの星	60	Y = 0.84 X + 11.50	0.80 ***	0.64	0~+4
さとじまん	60	Y = 0.84 X + 14.89	0.63 ***	0.39	-1~+3
あきたこまち	51	Y = 0.81 X + 10.70	0.83 ***	0.69	0~+4
なつほのか	60	Y = 0.71 X + 10.59	0.68 ***	0.46	-1~+3
あかね空	60	Y = 0.64 X + 15.15	0.57 ***	0.33	0~+4
えみほころ	40	Y = 0.57 X + 13.73	0.61 ***	0.37	0~+4
日本晴	65	Y = 0.56 X + 15.45	0.56 ***	0.31	-1~+3
むさしの33号	40	Y = 0.49 X + 13.05	0.69 ***	0.47	-1~+3
彩のきずな	25	Y = 0.40 X + 14.39	0.61 **	0.37	0~+4
むさしの27号	24	Y = 0.39 X + 14.77	1.2 ≤ X ≤ 10.2	0.50 *	0~+4
コシヒカリ	65	Y = 0.31 X + 12.70	0.34 **	0.12	0~+4
笑みの絆	60	Y = 0.31 X + 12.63	0.47 ***	0.22	-2~+2
彩のかがやき	70	Y = 0.22 X + 15.31	0.9 ≤ X ≤ 11.5	0.37 **	-1~+3
N22	24	Y = -0.16 X + 12.91	0.4 ≤ X ≤ 10.7	-0.29 n.s.	0~+4

※1. 5区以上調査を行ったもののみ回帰式に表した。 ※2. 「初星」で障害型冷害とみられる不稔が発生した2019年5月上旬移植の「ふさおとめ」・「あきたこまち」・「初星」のデータは除外した。 ※3. 相関係数の後ろの*, **, ***はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを表す（無相関の検定）。

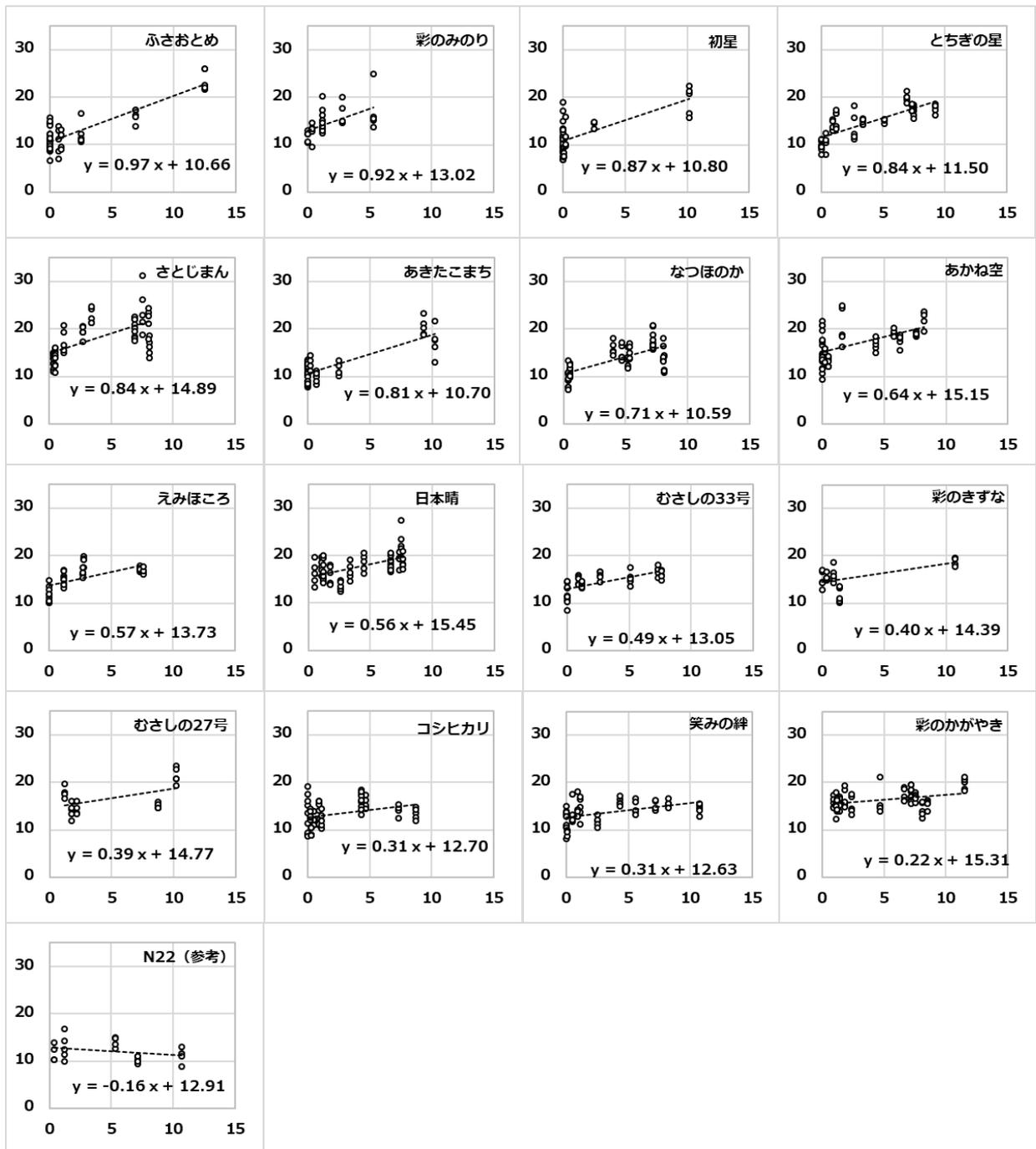


図3. 不稔発生と34℃を閾値とした出穂期付近5日間のHeat doseの散布図
 ※縦軸は不稔率(角変換), 横軸は34℃を閾値とした5日間のHeat dose.

引用文献

- 荒川誠・大岡直人・箕田豊尚・齋藤孝一郎・石井博和・上野敏昭・岡田雄二・武井由美子・重松統・矢ヶ崎健治・新井守・新井登・野田聡 (2013) : 水稻新品種「彩のきずな」の育成. 埼玉農総研研報 12, 1-9.
- Hakata M., Wada H., Masumoto-Kubo C., Tanaka R., Sato H. and Morita S. (2017) : Development of a new heat tolerance assay system for rice spikelet sterility. *Plant Methods*. 13:34.
- 長谷川利弘・石丸努・近藤始彦・内海美砂子・福岡峰彦・吉本真由美 (2008) : 2007 年の夏季高温条件における水稻稔実歩の変動要因の解析. 日作紀 77(別 1), 368-369.
- IPCC. (2023) : Climate Change 2023 Synthesis Report
- 石丸努・長谷川利弘・近藤始彦 (2008) : 2007 年におけるイネの不稔発生の実態調査. 日作紀 77(別 1), 366-367.
- 気象庁ホームページ : 平成 30 年報道発表資料 夏 (6~8 月) の天候.
<https://www.jma.go.jp/jma/press/1809/03c/tenko180608.html>. (2023 年 11 月 7 日アクセス)
- 熊谷地方気象台ホームページ : 暑さについて(暑さのデータ・暑くなる理由)
<https://www.jmanet.go.jp/kumagaya/shosai/chishiki/atsusa.html>. (2023 年 11 月 7 日アクセス)
- Matsui T., Omasa K. and Horie T. (1997) : High temperature-induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. *Jpn. J. Crop Sci.* 66(3), 449-455.
- Matsui T., Omasa K. and Horie T. (2001) : The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Prod. Sci.* 4(2), 90-93.
- Matsui T. and Omasa K. (2002) : Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to high temperature at flowering: anther characteristics. *Annals of Botany* 89, 683-687.
- 松井勤 (2009) : 開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L.) の不稔. 日作紀 78(3), 303-311.
- 西山岩男・佐竹徹夫 (1981) : イネの高温による障害の研究. *熱帯農業* 25 (1) , 14-19.
- 農林水産省 (2010) : 平成 21 年産米の検査結果 (平成 22 年 10 月 31 日現在)
- 農林水産省 (2011) : 平成 22 年産米の検査結果 (平成 23 年 10 月 31 日現在)
- 大赤見麻美・須郷速人・鈴木正一 (2011) : イネにおける開花時の温湿度が稔実に及ぼす影響. 北陸作物学会報 46, 37-41.
- 荻原均・荒井 (三王) 裕見子・小林伸哉 (2020) : 高温不稔が発生した水稻では障害型冷害とは異なり稔実した穎花の補償的な肥大が起きない事象が観察された. 日本作物学会関東支部第 109 回講演会要旨, 18-19.
- 大岡直人・荒川誠・矢ヶ崎健治・上野敏昭・岡田雄二・石井博和・箕田豊尚・齋藤孝一郎・野田聡・新井守・新井登 (2019) : 水稻新品種「むさしの 26 号」の育成. 埼玉農技研研報 18, 1-12.
- 大岡直人・大戸敦也・荒川誠・矢ヶ崎健治・齋藤孝一郎・加藤徹 (2020) : 水稻新品種「むさしの 27 号」の育成. 埼玉農技研研報 19, 1-10.
- Osada A., Sasiprapa V., Rahong M., Dhammanuvong S. and Chakrabandhu. (1973) : Abnormal occurrence of empty grains of indica rice plants in the dry, hot season in Thailand. *Proc. Crop Sci. Japan* 42(1), 103-109.
- Satake T. and Yoshida S. (1978) : High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. *Japan. Jour. Crop Sci.* 47(1), 6-17.
- 寺島一男・齋藤祐幸・酒井長雄・渡部富男・尾形武文・秋田重誠 (2001) : 1999 年の夏季高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70(3), 449-451.
- 若松謙一・佐々木修・上菌一郎・田中明男 (2007) : 暖地水稻の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響. 日作紀 76(1), 71-78.
- Yoshimoto M., Sakai H, Ishigooka Y., Kuwagata T., Ishimaru T., Nakagawa H., Maruyama A., Ogiwara H. and Nagata K. (2021) : Field survey on rice spikelet sterility in an extremely hot summer of 2018 in Japan. *Journal of agricultural meteorology*. 77(4), 262-269.