

2024年の夏季高温がイネの不稔に及ぼした影響

杉浦和彦¹⁾・濱頭 葵¹⁾・伊藤幸司²⁾

摘要:2024年の夏季は記録的な高温となり、イネの不稔が通常年より多く発生した。そのため、本県の主要品種の不稔率と、イネの不稔に影響するとされる出穂期の前後5日間の平均最高気温および施肥窒素量について調査した。

出穂期の前後5日間の平均最高気温は、37.9℃と平年に比べ4℃以上高い試験区もあり、高温条件での試験であった。発生した不稔は、カメムシの吸汁によるものはごく少なく、主に高温が要因であると判断された。

不稔率は、多くの試験区で10%以下であった。不稔率が10%を上回った試験区は、窒素施肥量が少ない減肥区であったことから、高温年では窒素施肥量が少ないほ場では不稔率が高まることが示唆された。一方、本県の主要品種について不稔率の品種間差は認められなかった。

キーワード:イネ、高温、不稔、窒素施肥量、品種間差異

緒言

地球温暖化による高温は農作物に対し様々な影響を及ぼしているが、イネに対しては白未熟粒の発生による外観品質低下が重要な問題となっている。今後、温暖化の進行により、さらに高温化する恐れがある¹⁾。高温は葯の開裂に影響し受精障害により不稔粒が発生することが知られている²⁾。高温不稔の感受性は、開花期が最も高く、次いで穂ばらみ期(出穂9日前)であり、その前後5日間の温度が不稔と関連する³⁾。

チャンバー実験では開花期頃の温度が34～35℃を超えると不稔粒が増加し、40℃ではほぼ全ての籾が不稔となる^{3,4)}。ほ場でも開花期の日最高気温34℃以上の積算値が不稔の発生率と関連する⁵⁾。一方、関東東海地域の同じ品種で出穂・開花時期5日間の最高気温と不稔割合を調査した結果、最高気温が38℃の高温条件において不稔率はおよそ3～11%程度に過ぎなかったことが報告されている⁶⁾。野外のほ場では気温以外の湿度や風速などの条件がチャンバー実験と比較して多様なため、気温に対する不稔率が安定しない⁷⁾ものの、出穂・開花期の最高気温は、不稔に影響を与える重要な因子であることに変わりはない。

現在、本県では高温による不稔被害は散発的な発生で大きな問題となっていない。しかし、さらに地球温暖化が進むことが予想されており、高温不稔による減収が危惧されるため、本県における高温不稔の発生状況を明らかにし、さらなる温暖化に備えた知見を得ることは重要である。本試験で

は、2024年の夏季の記録的な高温条件下での、異なる移植期における出穂期および出穂10日前の前後5日間の最高気温の平均値(以下、平均最高気温)が本県の主要品種の不稔率に及ぼす影響を調査した。合わせて、高温不稔に対する施肥窒素量の影響についても調査した。

材料及び方法

1 移植期、施肥窒素量および供試品種

試験は2024年に農業総合試験場作物研究部作物研究室(長久手市、標高94 m)および同部水田利用研究室(安城市、標高19m)のほ場で実施した。各試験区の移植期、窒素施肥量および供試品種を表1に示した。移植期は、4月の早期区、5月中旬の早植区、6月の普通期区を長久手市に、5月中旬頃の早植区を安城市に設けた。窒素施肥量は、早期区で6.6 g/m²(分施体系)とし、早期減肥区では約半量の3.2 g/m²とした。早期区は、倒伏しやすい「コシヒカリ」を栽培していることから、早植区、普通期区に比べ窒素施肥量を少なくした。早植区の窒素施肥量は10.8 g/m²(分施体系)とし、早植減肥区では約半量の5.7 g/m²とした。同様に、普通期区の窒素施肥量は10.1 g/m²(分施体系)とし、普通期減肥区では約半量の5.0 g/m²(全量基肥)とした。

2 不稔率の調査

成熟期に生育が中庸な3株を刈り取り、風乾後、目視で不

¹⁾作物研究部 ²⁾作物研究部(現尾張農林水産事務所)

表 1 移植期、施肥窒素量および供試品種

試験場所	試験区	施肥体系	移植 期	基肥 窒素量	穂肥 窒素量	計	供試品種	備考
			月 日	g/m ²	g/m ²	g/m ²		
長久手市	早期	分施 ¹⁾	4/23	3.2	3.4	6.6	なつきかり、コシヒカリ、恵糯	
	早期減肥	基肥 ¹⁾	4/23	3.2	—	3.2	あいちのかおり SBL	
	早植	分施 ¹⁾	5/17	5.6	5.2	10.8	なつきかり、コシヒカリ、あいちのか おり SBL、あいちのころ、 あさひの夢、十五夜糯、こはるもち	
	普通期	分施 ¹⁾	6/7	4.9	5.2	10.1	あいちのかおり SBL、あいちの ころ、あさひの夢	
	普通期減肥	全量基肥 ²⁾	6/4	5.0	—	5.0	恵糯、十五夜糯	肥効調節型肥料
安城市	早植減肥	分施 ¹⁾	5/9	2.7	3.0	5.7	あいちのころ、若水	

1) 分施体系 基肥:速効性肥料 N:P:K=12:13:5%、
穂肥:速効性肥料 N:P:K=16:0:16%

2) 全量基肥体系 N:P:K=16:10:14%

稈粒および総粒数を計測し、「不稈粒数/総粒数×100＝不稈率」とした。調査は、長久手市で2反復、安城市で3反復とした。早植減肥区、普通期減肥区の一部では、ほ場中央部の他に、畦畔に沿った条(以下、畔際)も調査した。

3 カメムシによる加害不稈率の調査

近年カメムシによる不稈が多発していることから、高温による不稈とカメムシの吸汁による不稈を明らかにするためカメムシによる吸汁の有無を調査した。不稈率の調査地点付近から、成熟期に生育が中庸な3穂を0.01%酸性フクシンに30分浸漬してカメムシの口針鞘を染色後、不稈粒における口針鞘数の有無を調査した。カメムシによる不稈は、「口針鞘がある不稈粒/総粒数×100＝加害不稈率」とし評価した。調査は、長久手市で2反復、安城市で3反復とした。

4 平均最高気温

高温に対するイネの稈実の感受性が高い出穂期前後5日間(出穂5日前から出穂5日後までの11日間)および出穂10日前の前後5日間(出穂15日前から出穂5日前までの11日間)の日最高気温の平均値を解析に用いた。なお、最高気温は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構が開発したメッシュ農業気象データシステムから提供された値を用いた。

結果及び考察

1 カメムシの加害による不稈調査

カメムシの加害による不稈と推定される加害不稈率は、全ての試験区で非常に少なく、最も高い普通期区の「あいちのかおりSBL」でも1.1%であった(表2)。この結果、今回の試験ではカメムシによる不稈の発生は極めて少なく、不稈の発生の多くは高温による不稈であったと判断された。

2 高温による不稈施肥法の検討

各試験区における不稈率、平均最高気温、施肥量を表2に示す。2024年における出穂期および出穂10日前の前後5日間の平均最高気温は、最も高い試験区で37.9℃および38.0℃であり、平年に比べ4℃以上高い記録的な高温年であった。不稈率は最も高い試験区では56%と多発したが、10%以下であった試験区が半数以上を占めた。一般に発生する生理的な不稈が5%程度であることを考慮すると、2024年の気象条件においても、高温に起因する不稈は多くの試験区で5%以下であったと推察される。

畦際は、ほ場中央部に比べ不稈率が高まる傾向であった。畦畔がコンクリートやアスファルトの場合、輻射熱により周囲に比べ温度が高くなり不稈率が増加する可能性がある。しかし、今回の試験ほ場では土壌畦畔であったが畔際の不稈率が高くなったほ場もあった。高温不稈は気温よりも穂の最高温度と相関が高く、葉や穂の蒸散に関わる環境応答から定式化し穂温を推定するモデルが開発されている⁸⁾。このため、輻射熱の他、風や湿度等が穂温に影響を与え、畔際の不稈率が高まった可能性があるが、今回の試験では、風速、湿度などのデータがなく穂温の推定ができず、要因を特定することはできなかった。今後はこのモデルを用いた要因の推定も必要である。

3 窒素施肥量が高温不稈に与える影響

不稈率が15%を超える試験区は、早期、早植、普通期とも窒素施肥量が約半量の減肥区であった。これら試験区は、窒素施肥量が約半量と少ない。図1に調査ほ場のうち出穂期前後5日間平均最高気温が35℃以上で畦際を除いた試験区の窒素施肥量と不稈率の関係を示した。不稈率は窒素施肥量と有意な負の相関($p<0.001$)を示した。

窒素施肥量と高温不稈の関係については、分施体系において基肥、穂肥の量を変えた試験で少窒素施肥区は標準的な窒素施肥区に比べ不稈率が高いことが報告されてい

表 2 各品種における不稔率、最高気温、施肥量

品種名	試験区	出穂期 月日	出穂期 最高気温 ¹⁾ ℃	平年差 ℃	出穂 10 日前 最高気温 ²⁾ ℃	平年差 ℃	不稔率 %	加害不稔 率 ³⁾ %	窒素 施肥量 N g/m ²	備考
なつさらり	早期	7/10	31.8	1.2	28.1	-1.1	5	0.5	6.6	
	早植	7/26	36.2	3.5	32.4	1.0	7	0.5	10.8	
コシヒカリ	早期	7/10	31.8	1.2	28.1	-1.1	6	0.0	6.6	
	早植	7/25	36.2	3.7	31.5	0.3	10	0.2	10.8	
あいちのかおり SBL	早期減肥	8/5	37.8	4.2	36.2	3.5	24	0.3	3.2	
	早植	8/14	37.9	4.4	37.9	4.3	6	0.0	10.8	
	普通期	8/23	35.6	2.8	37.9	4.3	8	1.1	10.1	
あいちのころ	早植	8/7	37.9	4.3	36.8	3.9	6	0.2	10.8	
	普通期	8/16	37.9	4.5	37.7	4.1	9	0.2	10.1	
	早植減肥	8/1	36.7	3.3	36.6	4.3	16	0.0	5.7	
	早植減肥	8/1	36.7	3.3	36.6	4.3	19	0.2	5.7	畦際
あさひの夢	早植	8/6	37.7	4.1	36.9	4.1	7	0.2	10.8	
	普通期	8/14	37.9	4.4	37.9	4.3	10	0.7	10.1	
若水	早植減肥	7/30	37.1	3.9	36.2	4.0	5	0.0	5.7	
	早植減肥	7/30	37.1	3.9	36.2	4.0	56	0.9	5.7	畦際
恵糯	早期	7/8	35.5	5.2	28.6	-0.2	10	0.0	6.6	
	普通期減肥	7/31	37.1	3.8	36.4	4.4	23	0.3	5.0	
	普通期減肥	7/31	37.1	3.8	36.4	4.4	53	0.6	5.0	畦際
十五夜糯	早植	8/16	37.9	4.5	37.7	4.1	5	0.0	10.8	
	普通期減肥	8/19	36.0	2.8	38.0	4.4	21	0.0	5.0	
こはるもち	早植	8/14	37.9	4.4	37.9	4.3	11	0.5	10.8	

気温は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構が開発したメッシュ農業気象データシステムの値を用いた

- 1) 出穂期最高気温: 出穂期を起点とし前後 5 日間の平均最高気温
- 2) 出穂 10 日前最高気温: 出穂 10 日前を起点とし前後 5 日間の平均最高気温
- 3) 加害不稔率 = 口針鞘がある不稔粒/総粒数 × 100
調査は中庸な 3 穂の不稔粒を酸性フクシンで染色し、口針鞘数を計測

る⁹⁾。また、普通期減肥区では、肥効調節型肥料を用いているが、分施肥系と同様に窒素施肥量が少ない場合で不稔が多発したことから、不稔の発生は分施肥、全量基肥を問わず窒素施肥量が関連している可能性が考えられる。窒素施肥量と不稔の関連については、報告が少ないこともあり、そのメカニズムについては明らかになっていないが、窒素施肥が葉面積の増加や気孔コンダクタンスに影響を与え、蒸散による冷却効果が不稔率の低下に作用している可能性が指摘されている⁹⁾。

4 高温不稔に対する品種間差

高温不稔に対しては、品種により発生率が異なるといわれており^{2,9,10)}、比較的高温不稔に強い品種として「あきたこまち」、「コシヒカリ」、「日本晴」が、弱い品種として「初星」、「さとじまん」がある。本研究では、窒素施肥条件、最高気温が比較的近い条件であった「なつさらり」、「あいちのかおり SBL」、「あいちのころ」、「あさひの夢」、「十五夜糯」、「こはるもち」について、不稔率が概ね 10% 以下であり品種間差は認

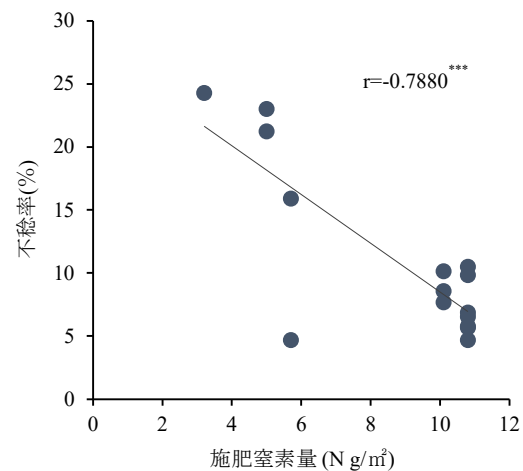


図 1 不稔率と施肥窒素量との関係

- 1) ***は 0.1% 水準で有意であることを示す
- 2) 出穂期前後 5 日間平均気温が 35℃ 以上の試験区(畦際除く)

められなかった。高温不稔に比較的強い「コシヒカリ」の出穂期平均最高気温が36.2℃の条件下で不稔率が10%であることを考慮すると、上記6品種は高温不稔に比較的強いと推察される。

5 今後の課題

開花時の高温による不稔を回避するための対策は、主に育種面から提唱されている。イネの花は正午までの時間帯に開花する場合が多いが、「密陽23号」は「コシヒカリ」よりも早い時間に開花する¹¹⁾。開花時間が早ければ高温を避けて開花・受精することができることから、早朝開花性の導入が試みられている¹²⁾。また、イネ品種「N22」、「GIZA178」から、高温不稔耐性QTL(*qHTSF4.1*)が見いだされ^{13,14)}、この導入も試みられている¹⁵⁾。一方、栽培面からの対策は、施肥窒素量が不稔に関与する報告⁹⁾のような事例しかなく、しかも「コシヒカリ」1品種のみの結果であった。今回、我々は複数品種で窒素施肥量と不稔の相関が高いことを明らかにしたことにより、高温年に窒素施肥量を減らすと不稔の危険性が高まることを指摘した。また、本県で作付けされている多くの品種について高温不稔に比較的強いことを明らかにした。

2024年の開花期最高気温は38℃に迫る気温であったが、標準的な窒素施肥量での不稔率はほぼ10%以下であり、大きな減収とはならないことが示された。だが、気温以外の要因として、湿度の低い条件では不稔粒の発生が抑制され、高湿度弱風条件では不稔が増加することが報告されている⁷⁾。高温不稔は温度だけでなく気象環境に影響を受けるため、今後とも注視していく必要がある。さらに温暖化が加速すると予想されていることから、高温不稔の予測精度向上が望まれるとともに、品種面からの対策の検討も必要であろう。

引用文献

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report(2023).
<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (2025.4DL)
2. Matsui, T., Omasa, K. and Horie, T. The difference in sterility due to high temperature during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Production Science*. 4(2), 90-93(2001)
3. Satake, T. and Yoshida, S. Hight temperature-induced sterility in indica rice at flowering. *Japanese journal of crop science*. 47(1), 6-10(1978)
4. 金漢龍, 堀江武, 中川博視, 和田晋征. 高温・高 CO₂ 環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響について. 第 2 報 収量および収量構成要素について. 日本作物学会紀事. 65(4), 644-651(1996)
5. 長谷川利弘, 石丸努, 近藤始彦, 桑形恒男, 内藤美砂子, 福岡峰彦, 吉本真由美. 2007年の夏季高温条件における水稻不稔歩合の変動要因の解析. 日本作物学会紀事. 77(別1), 368-369(2008)
6. 長谷川利弘, 吉本真由美, 桑形恒男, 石郷岡康史, 近藤始彦, 石丸努. 2007年夏季の水稻の高温不稔調査について. *農業及び園芸*(1), 42-45(2009)
7. 吉本真由美. イネの高温不稔を群落微気象モデルで解析する. 第 23 回気象環境研究会資料. 大気環境変化と植物の応答. 農業環境技術研究所, つくば 71-77(2007)
8. Yoshimoto, M., Oue, H., Takahashi, N. and Kobayashi, K. The effect of FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) on temperature and transpiration of rice panicle at flowering stage. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(5), 597-600(2005)
9. Hasegawa, T., Ishimaru, T., Kondo, M., Yoshimoto, M., Kuwagata, T. and Fukuoka, M. Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation. *Journal of Agricultural Meteorology*. 67(4), 225-232(2011)
10. 大戸敦也, 武井由美子. 2019 年における水稻の不稔発生の品種間差. 日本作物学会関東支部会報. 34, 24-25(2019)
11. 今木正, 常慶一芳, 山田一郎. 開花期の高温による水稻の稔実障害について. 島根大学農学部研究報告. 17, 1-7(1983)
12. 平林秀介, 田之頭拓, 田中明男, 竹牟禮穰, 若松謙一, 石丸努, 佐々木和浩. 日本型イネの遺伝子背景への早期開花性導入による高温不稔軽減効果. *育種学研究*. 25(2), 140-149(2023)
13. Ye, C., Argayoso, M., Redoña, E., Sierra, S., Laza, M., Dilla, C., Mo, Y., Thomson, M., Chin, J., Delavina, C., Diaz, G. and Hernandez, J. Mapping QTL for heat tolerance at flowering stage in rice using SNP markers. *Plant Breed*. 131, 33-41(2012)
14. Ye, C., Tenorio, F., Argayoso, M., Laza, M., Koh, H., Redoña, E., Jagadish, K. and Gregorio, G. Identifying and confirming quantitative trait loci associated with heat tolerance at flowering stage in different rice populations. *BMC Genomic Data*. 16, 41(2015)
15. Ye, C., Ishimaru, T., Lambio, L., Li, L., Long, Y., He, Z., Htun, M.T., Tang, S. and Su, Z. Marker-assisted pyramiding of QTLs for heat tolerance and escape upgrades heat resilience in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 135, 1345-1354(2022)