

新潟県における 2019 年産コシヒカリの品質低下要因解析

今井康貴¹⁾・服部誠¹⁾・東聡志²⁾・土田徹¹⁾・古川勇一郎¹⁾・南雲芳文¹⁾

(¹⁾ 新潟県農業総合研究所作物研究センター, (²⁾ 新潟県農林水産部経営普及課)

要旨: 新潟県産コシヒカリの一等米比率は, 2013~2018 年まで 75% 以上で推移していたが, 2019 年は過去二番目に低い 25.0% となった. 2019 年の気象は, 7 月下旬から 8 月中旬の気温が平年より 1.4~4.0℃ 高く, 特に 8 月 14~15 日に発生したフェーンの影響で最高気温が 40℃ を超えるなど, 記録的な高温となった. 格落ち理由の多くは乳白粒の多発であったが, 粳数過剰が主要因ではないと推察された. また, 新潟農総研や県内各地域における出穂期の異なるコシヒカリで, 玄米横断面の白濁タイプの割合を調べた結果, 出穂 11~17 日後にフェーンに遭遇したサンプルにおいて複合型の白濁の発生が確認された. それらのサンプルでは背側の白濁も増加しており, 整粒比率が低かった. 新潟県産コシヒカリの出穂最盛期は 8 月 3 日であり, 大部分の地域で高温感受性の高い登熟前半において, フェーンによる著しい高温に遭遇したことにより品質が低下したことが示唆された.

キーワード: イネ, 高温, 白未熟粒, 登熟, 品質.

近年, 地球温暖化によって気温が上昇傾向にあり, 水稻生産に多大な影響を及ぼしている. 特に, 登熟期間の高温による米の品質や収量の低下が顕著な問題であり, その要因の一つとして白未熟粒の発生がある (Morita ら 2016). 過去には, 1999 年と 2010 年に全国的に登熟期間の気温が高く推移し, 白未熟粒の多発により一等米比率の著しい低下が見られた (寺島ら 2001, 森田 2012). また, 登熟期間中の高温は死米や胴割粒などの被害粒の発生も助長させることが明らかにされており, 農家の収入減少への懸念が高まっている (高橋ら 2002, 長田ら 2004, Morita ら 2016).

白未熟粒はデンプンの蓄積不良によって玄米胚乳の一部が白濁したもので, 白濁位置の違いにより乳白粒, 背白粒, 基部未熟粒などに分類される. 新潟県ではコシヒカリを主力品種と位置づけ, 品質の高位安定化に努めてきた. しかし, 近年では高温の影響で品質が不安定となっている. 2010 年には前述の高温登熟によって, コシヒカリの一等米比率は 20.3% に低下した. これを受け, 新潟県では高温登熟対応マニュアルを作成するなど, 高温登熟に耐えうる技術の開発と普及を進めてきた. 2019 年は再び高温気象となり, コシヒカリの一等米比率は 2010 年に次いで低い 25.0% となった. 2010 年の格落ち理由は乳白粒と背白粒の多発であったが (新潟県農林水産部 2011), 2019 年は乳白粒が大半を占めており, 品質低下の要因が異なることが推察される. また, 同年の北陸地方及び隣県のコシヒカリ一等米比率は, 富山県が 84.7%, 石川県が 84.7%, 福井県が 85.0%, 山形県が 91.5%, 福島県が 92.9% であり, 近隣各県でも高温であったにも関わらず, 新潟県のみが特異的に低かったことも特徴的である (農林水産省 2021).

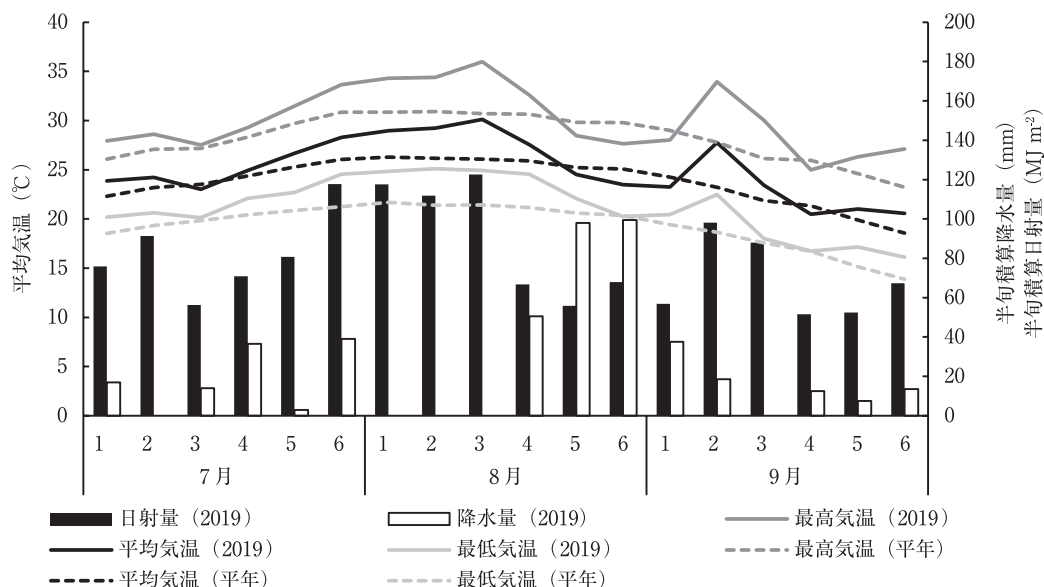
白未熟粒のうち, 乳白粒は低日射条件や粳数過剰等, 炭水化物供給不足の影響が大きい (長戸・江幡 1965, 高橋 2006). また, 乳白粒は胚乳の横断面がリング状の白濁を呈

することが一般的であるが (長戸・江幡 1965, 森田 2008), それ以外にも様々な白濁タイプの存在が確認されている (木戸・梁取 1968). さらに, 塚口ら (2012) は, 高温では胚乳の中心部や中心と背腹が白濁した複合型乳白粒が, 炭水化物供給不足ではリング状の白濁をもつ乳白粒が増加することを示した. 一方, フェーンの影響による乳白粒の発生も確認されており, 登熟初~中期のフェーンで乳白粒が多発する事例が複数報告されている (狩野ら 1991, 藪押ら 2010). 加えて, フェーンの乾燥風を要因とした乳白粒は, 水分ストレスを回避する機能が働くことでリング状に白濁することが明らかにされた (Wada ら 2011). これらのことから, 乳白粒には発生要因の異なる複数のタイプがあることが示唆されるが, 2019 年の新潟県においてコシヒカリの品質低下につながった乳白粒の白濁タイプは同定されてない.

本稿では 2019 年産コシヒカリの品質低下の実態を示すとともに, 気象条件と玄米横断面の白濁タイプから品質低下した要因を解析し, その対策の方向性についても検討する.

材料および方法

試験は 2019 年に新潟県農業総合研究所作物研究センター (新潟県長岡市, 以下, 新潟農総研) の水田圃場 (斑鉄型グライ低地土) で実施した. コシヒカリ BL (コシヒカリ新潟 BL を混合したマルチライン, 以下コシヒカリと表記) を供試品種とし, 早植え (4 月 29 日移植), 普通植え (5 月 10 日移植), 遅植え (5 月 30 日移植) の 3 作期に分けた. 窒素施用量は, 県内慣行の 5 g m⁻² とし, 早植えと遅植えでは全量基肥施用とした. 普通植えでは基肥 3 g m⁻², 出穂 3 週間前と 10 日前の穂肥各々 1 g m⁻² の分施とした. 全量基肥肥料は, 分施と同等の生育となるよう即効性窒素及び緩効性窒素の配合が適当なものを選択した. 全量肥料の配合については, N-P₂O₅-K₂O : 18-14-14% (N 原料: 速効性



第1図 2019年新潟県長岡市の気象条件。

新潟農総研に設置の気象観測装置の観測値。平年値は1981年から2010年までの30年間の平均値。横軸の数字は半月を示す。

6.6%, シグモイド型100日タイプ11.4%)である。分施肥体系で用いた肥料は、基肥 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$:10-13-10%, 穂肥 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$:12-2-8%である。成熟期(出穂後日平均気温の積算気温 1000°C 程度)に圃場内から生育中庸な稲体2株を採取・脱粒し、籾水分15%を目安に 30°C で1日程度通風乾燥させた後籾摺りを行い、1.85mmの篩にかけた。篩上に残った玄米から200粒を、森田・江原(2012)が開発した白未熟粒発生予測器(RN-850, 株式会社ケツト化学研究所)により切断し、横断面をスキャンした。横断面画像を目視により、整粒および4種の白濁タイプ(背側, リング状, 複合型, 中心)に分類した。200粒中の各白濁タイプの発生率をタイプ別白濁粒発生率として求めた。白濁タイプの分類について、複合型は背側および腹側と中心の白濁が同時に発現している粒を分類した。背側の白濁は、背側あるいは腹側が白濁している粒で、農産物検査規定に該当しないような軽微な白濁のものも計数した。また、青未熟粒およびその他未熟粒に加え、切断面より上部に白濁がある基部未熟粒等、切断面上で白濁が見られないものは全て整粒に分類した。玄米外観品質は、穀粒判別器(RGQI20A, サタケ)で測定した。試験期間中の気象データは、新潟農総研内に設置の気象観測装置の観測値を用いた。

県内15地区のコシヒカリについても玄米横断面の調査を実施した。各地域にそれぞれ設置されたコシヒカリ作況試験圃の坪刈サンプルのうち、1.85mmの篩上に残った玄米を試料に用いた。地域区分については、下越(村上, 新発田), 新潟(新潟, 新津, 巻), 中越(三条, 長岡, 柏崎), 魚沼(魚沼, 南魚沼, 十日町), 上越(上越, 上越東, 糸魚川), 佐渡の6地域とし、タイプ別白濁粒発生率や出穂期は地域ごとの平均値で示した。気象データは、各圃場近

傍の気象庁アメダス観測地点の観測値を用いた。

台風10号によって発生したフェーンは、田上(2010)のフェーンの定義を満たす日を示した。フェーンの定義は、①日最高気温が 33°C 以上、②日最小湿度が45%以下、③日平均風速が 3 m s^{-1} 、④風向SSW, S, SSE, SEが12時間以上を満たす日である。また、フェーンによる品質低下の影響を評価するため、木邨(1950)が提案した蒸散強制力(FTP)を求めた。蒸散強制力は下記の式により算出した。

$$\text{FTP} = da \times \sqrt{U}$$

U = 風速 (m/s)

$$da = Ha \times (1-h/100)$$

da = 飽差, h = 平均相対湿度 (%)

$$Ha = (1323 \times \exp((17.269 \times t)/(237.3+t)))/(273.16+t)$$

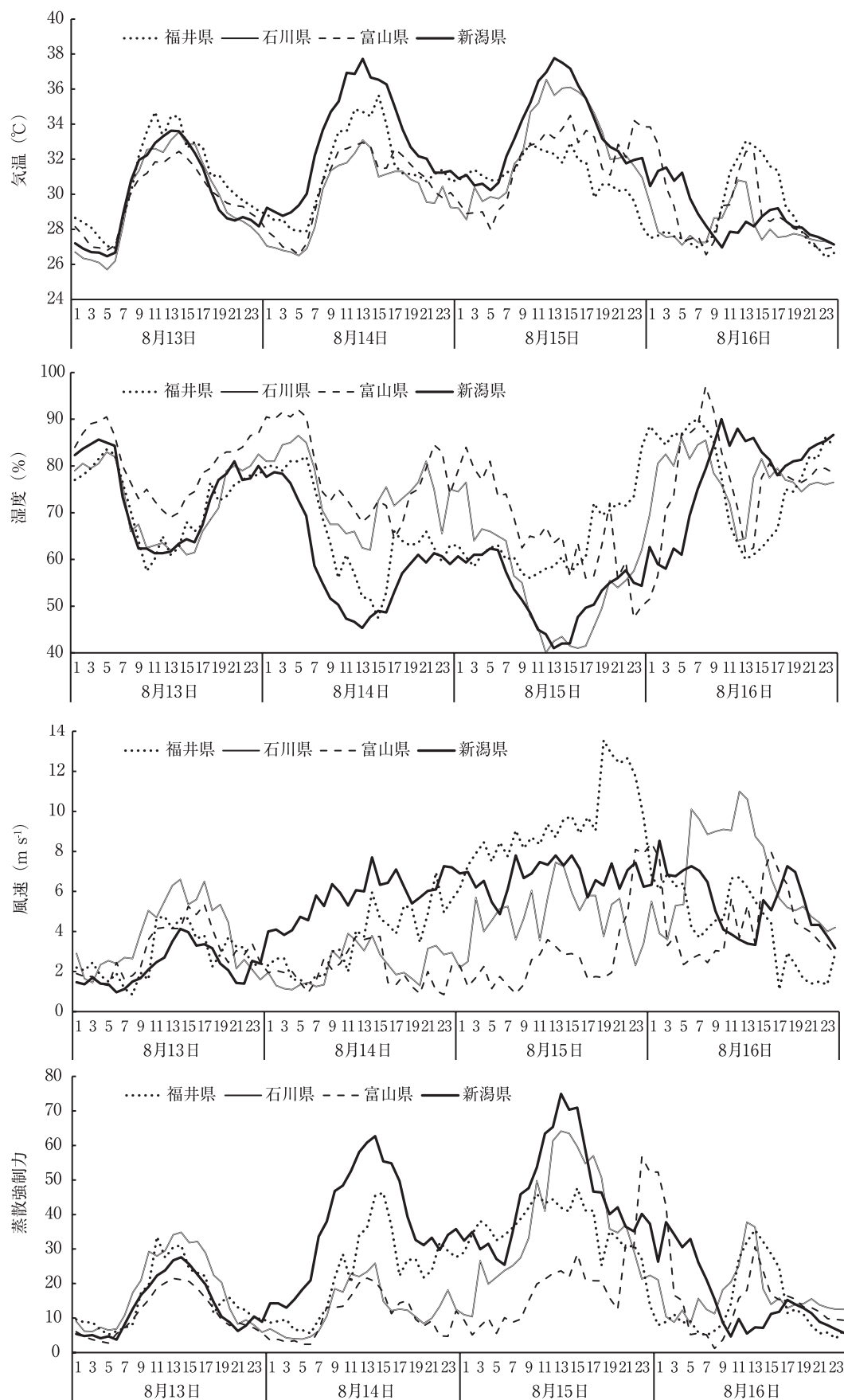
Ha : 飽和水蒸気圧 (Pa), t : 気温 ($^\circ\text{C}$)

結 果

1. 2019年の水稻登熟期間中の気象条件

2019年7月から9月の気象を第1図に示した。平均気温は、7月第5半月から8月第3半月まで平年に比べ $1.4 \sim 4.0^\circ\text{C}$ 高く推移した。また、8月第1~第3半月にかけて連続して無降雨であった。さらに、8月14~15日にかけて台風10号によるフェーンの影響で、気温が著しく高まった。特に、県内のアメダス観測地点4か所で気温が 40°C を超えたほか、最低気温も3か所で 30°C 以上となるなど記録的な高温に見舞われた。一方、8月第4半月~9月第1半月にかけては一転して降雨が続き、日照も少なく平年を下回る気温で推移した。その後、9月第2半月には再び平年を上回る高温となった。

台風10号によるフェーンは北陸地方一帯で発生したが、



第2図 北陸4県における2019年8月13～16日の気象および蒸散強制力。

気温、湿度、風速は各県のアメダス観測地点の観測値、蒸散強制力はそれらの平均値から求めた。各県の観測地点は、福井県が敦賀と福井、石川県が金沢と輪島、富山県が富山と伏木、新潟県が新潟と高田および相川である。

第 1 表 北陸 4 県の出穂最盛期と出穂期からフェーンまでの日数。

	出穂最盛期	出穂期～ フェーンまでの日数	出穂後 20 日間 平均気温 (°C)	コシヒカリ 一等米比率 (%)
福井県	8 月 2 日	13	29.9	85.0
石川県	7 月 29 日	17	29.3	84.7
富山県	8 月 1 日	14	29.4	84.7
新潟県	8 月 3 日	12	28.6	25.0

出穂最盛期は「農林水産統計 令和元年産水稻の収穫量 (北陸)」(北陸農政局) より引用。出穂期～フェーンまでの日数は、出穂最盛期からフェーン最盛期である 8 月 15 日までである。

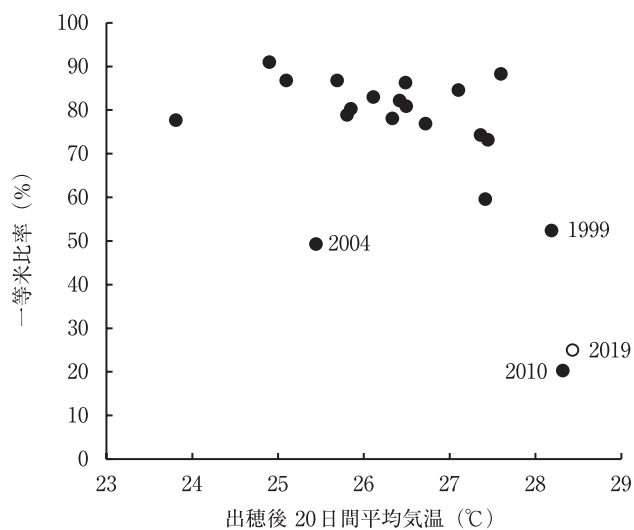
新潟県以外の北陸各県のコシヒカリ一等米比率は高く保持された。この違いを調べるため、北陸各県と新潟県の 2019 年 8 月 13～16 日の気象条件や蒸散強制力および出穂期を比較した (第 2 図)。気温については、8 月 14 日と 15 日に新潟県で最も高くなり、昼間に最高気温が約 38°C となった。次いで 14 日に福井県で、15 日に石川県でそれぞれ約 36°C となった。また、北陸全県において 14 日夜間および 15 日夜間の気温が約 30°C で推移した。16 日昼間は新潟県以外の県で 32～33°C まで気温が上昇した。湿度は、14 日に新潟県と福井県で 45～50%，15 日に新潟県と石川県で約 40% となった。風速については、新潟県で 8 月 14 日正午から 16 日 7 時まで常時風速 6～7 m/s であった。福井県は、15 日に一日中風速 8 m/s の風があり、夜間には一時 13 m/s となった。石川県は、16 日明朝から昼にかけて約 10 m/s となった。蒸散強制力については、14 日昼間に新潟県で最大 61、福井県で 46、15 日昼間に新潟県で 75、石川県で 64 と高くなった。富山県では 13～15 日夕方まで低調に推移していたが、15 日 23 時から 16 日 2 時に 47～57 まで高まった。出穂最盛期は福井県が 8 月 2 日、石川県が 7 月 29 日、富山県が 8 月 1 日、新潟県が 8 月 3 日であった (第 1 表)。出穂最盛期からフェーンまでの日数は、12～17 日の範囲であった。

2. 2019 年コシヒカリの品質低下の実態

新潟県のコシヒカリについて、過去 20 年間のコシヒカリの一等米比率と出穂後 20 日間の平均気温との関係を示した (第 3 図)。出穂後 20 日間の平均気温が 27°C 以上で、一等米比率が 60% 以下に低下する傾向が見られた。

新潟農総研の作況試験圃におけるコシヒカリの外観品質を第 2 表に示す。過去 15 年の平均と比較して、整粒は 30.2% で 40 ポイント低く、未熟粒および被害粒、死米、胴割粒は 3～21 ポイント高かった。未熟粒のうち乳白粒、基部未熟粒、腹白粒が平均値より著しく高く、それぞれ 14.3%、25.4%、4.8% であった。

乳白粒の発生要因の一つとして籾数過剰が考えられるため、整粒および乳白粒と籾数との関係を調べた (第 4 図)。籾数が増加するにつれて乳白粒率は増加、整粒歩合は低下する傾向が見られた。2019 年の籾数は 31 千粒/m² であったが、籾数と乳白粒の関係が他の年次と大きく異なり、乳白粒率が著しく高かった。



第 3 図 新潟県コシヒカリの一等米比率と出穂後 20 日間平均気温の関係 (1999～2019 年)。

コシヒカリ一等米比率の数値は「平成の米」(北陸農政局) より、2019 年は「令和元年産米の農産物検査結果確定値」(農林水産省) より引用。出穂後 20 日間平均気温は、各年次の県内出穂最盛期から 20 日間であり、県内 3 地域 (新潟、高田、相川) のアメダス観測地点の観測値を平均した。2004 年の一等米比率の低下は、7 月中旬の冠水被害や登熟期の 3 度の台風に伴う強風および潮風被害によるものである。

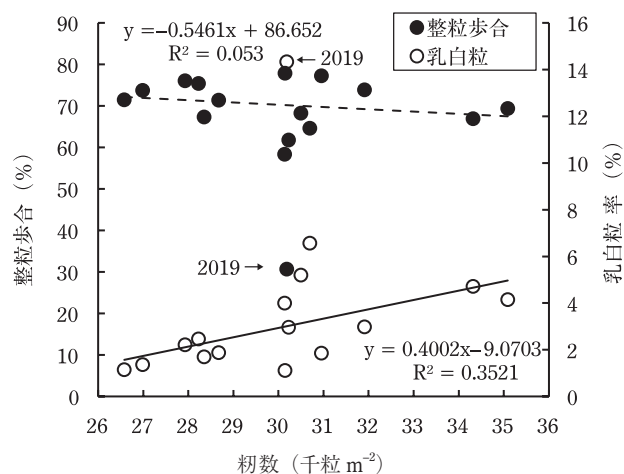
3. 品質低下の要因解析

乳白粒に発現している横断面の白濁タイプと気象との関係を明らかにするため、2019 年の新潟農総研や県内各地域で採取した玄米横断面サンプルを用い、様々な気象条件におけるタイプ別白濁粒発生率を調べた。本研究で観察された白濁タイプは、背側、リング状、複合型、中心の主に 4 種類であった (第 5 図)。新潟農総研における作期別コシヒカリの出穂期は 7 月 29 日～8 月 12 日と、作期の違いにより幅広い出穂期を得た (第 3 表)。また、出穂後 20 日間の平均気温については早植えて 29.2°C、普通植えて 28.5°C と著しく高かったが、遅植えては 25.9°C であり、作期による差が大きかった。作期ごとのタイプ別白濁粒発生率は、早植えおよび普通植えて背側の白濁が約 40～50% 発生し、さらに複合型の白濁が約 15～25% 発生した (第 6 図)。一方、遅植えては、リング状および中心の白濁が約 10% 見られたが、その他の白濁は約 1～3% と少なかった。

第2表 2004～2019年のコシヒカリ玄米外観品質.

	整粒 (%)	未熟粒 (%)					被害粒 (%)	死米 (%)	着色粒 (%)	胴割粒 (%)
		乳白粒	基部未熟粒	背腹白粒	青未熟粒	その他未熟粒				
2004	73.7	1.4	0.5	1.2	0.6	21.9	0.3	0.0	0.3	0.1
2005	76.1	2.2	0.7	0.8	1.0	16.6	1.4	0.4	0.0	1.0
2006	71.4	1.9	8.7	1.2	0.0	13.0	1.5	0.3	0.2	1.9
2007	75.4	2.5	2.2	1.4	0.2	16.4	0.8	0.3	0.0	1.1
2008	71.5	1.2	0.7	0.7	1.0	23.7	0.6	0.0	0.0	0.3
2009	77.9	1.1	0.8	0.8	0.8	17.4	0.8	0.3	0.0	0.3
2010	61.8	3.0	14.3	1.4	0.5	16.7	1.7	0.5	0.1	0.0
2011	66.9	4.7	5.9	1.9	0.4	17.2	1.6	1.1	0.1	0.5
2012	58.4	4.0	12.4	1.6	0.6	16.2	6.3	0.7	0.1	2.3
2013	68.3	5.2	7.9	1.4	2.4	11.0	1.3	1.6	0.8	0.0
2014	77.3	1.9	0.9	0.5	2.0	15.8	0.9	0.3	0.0	0.5
2015	73.9	3.0	2.6	1.3	0.6	16.2	3.5	0.5	0.0	0.3
2016	69.4	4.2	3.3	0.6	1.4	19.3	0.9	0.9	0.0	0.3
2017	64.6	6.6	1.3	2.5	1.0	22.0	1.1	0.2	0.1	1.3
2018	67.3	1.7	4.7	0.6	0.8	18.7	6.1	0.1	0.1	0.1
平均	70.2	3.0	4.4	1.2	0.9	17.5	1.9	0.5	0.1	0.7
2019	30.2	14.3	25.4	4.8	0.6	10.1	6.1	4.4	0.1	4.2

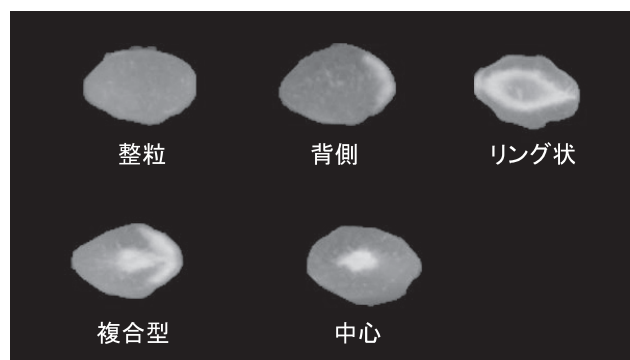
新潟農総研のコシヒカリ作況試験圃より生育中庸な3株を採取し、穀粒判別器 (RGQI20A) で測定した。平均は、2004～2018年の平均値。



第4図 2004～2019年の粒数と整粒歩合・乳白粒の関係。
試験地は新潟農総研。近似曲線に2019年の値は含まない。

フェーンの影響については、出穂後～フェーン遭遇日数が17日の早植え、13日の普通植えで背側と複合型の白濁の増加が確認された。

また、県内各地域で栽培されたコシヒカリにおいても気象、蒸散強制力、タイプ別白濁粒発生率および一等米比率を比較した。各地域の出穂後20日間の平均気温は、佐渡地域を除いて27℃以上であり、白未熟粒が増加しやすい条件(森田2008)であった(第4表)。8月13～16日の日平均気温は概ね30℃で、フェーン最盛日にあたる15日の下越・中越・佐渡地域の気温は、他地域と比較して1.3～2.7℃高く推移した。各地域の蒸散強制力については、14日未明か



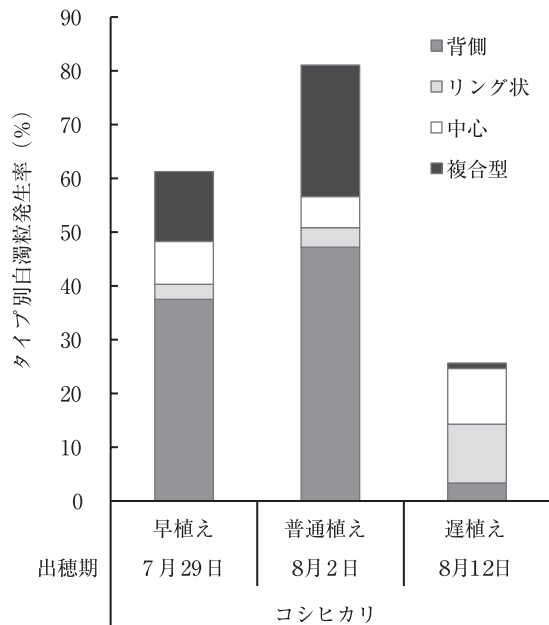
第5図 観察された玄米横断面の白濁タイプ。

第3表 コシヒカリ作期別の出穂期と気温、フェーンに遭遇した時の出穂後日数。

品種	作期	出穂期	出穂後20日間 平均気温 (℃)	出穂後～ フェーン遭遇日数 (日)
コシヒカリ	早植え	7月29日	29.2	17
	普通植え	8月2日	28.5	13
	遅植え	8月12日	25.9	3

出穂後～フェーン遭遇日数は、各品種の出穂期からフェーン最盛日8月15日までの日数。試験地は新潟農総研。

ら16日未明にかけて何れの地域でも20以上で推移した(第7図)。また、8月14日昼に新潟と上越で一時的に70.8～73.8、15日昼に新潟で86.5、佐渡で77.1、上越で61.3となった。タイプ別白濁粒発生率と一等米比率の関係につ



第6図 コシヒカリ作期別の玄米横断面のタイプ別白濁粒発生率。試験地は新潟農総研。

第4表 県内各地域の出穂後20日間平均気温と8月13～16日の日平均気温。

地域	出穂後20日間 平均気温 (°C)	日平均気温 (°C)			
		8月13日	8月14日	8月15日	8月16日
上越	28.6	29.8	30.9	32.3	28.8
魚沼	28.1	29.5	29.8	30.9	28.7
中越	28.5	29.5	32.0	33.5	29.0
新潟	27.9	29.3	31.3	31.6	27.8
下越	28.2	30.6	32.4	33.7	29.4
佐渡	26.7	29.2	33.0	33.6	28.5

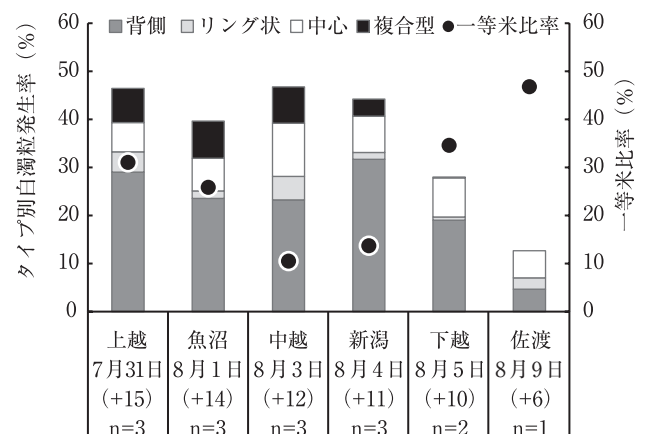
平均気温は各圃場近傍のアメダス観測地点の観測値を地域ごとに平均した。

いては、出穂期が8月4日以前であった新潟、中越、魚沼、上越地域でタイプ別白濁粒発生率の合計が40～45%と高かった(第8図)。また、これらの地域では複合型の白濁が4～8%程度確認された。一方、出穂期が8月5日以後の地域では、比較的白濁粒の発生割合が少なく、特に佐渡地域ではタイプ別白濁粒発生率の合計が15%程度にとどまった。一等米比率についても地域間差が見られ、出穂期が8月3～4日の地域で一等米比率が15%以下となった。

考 察

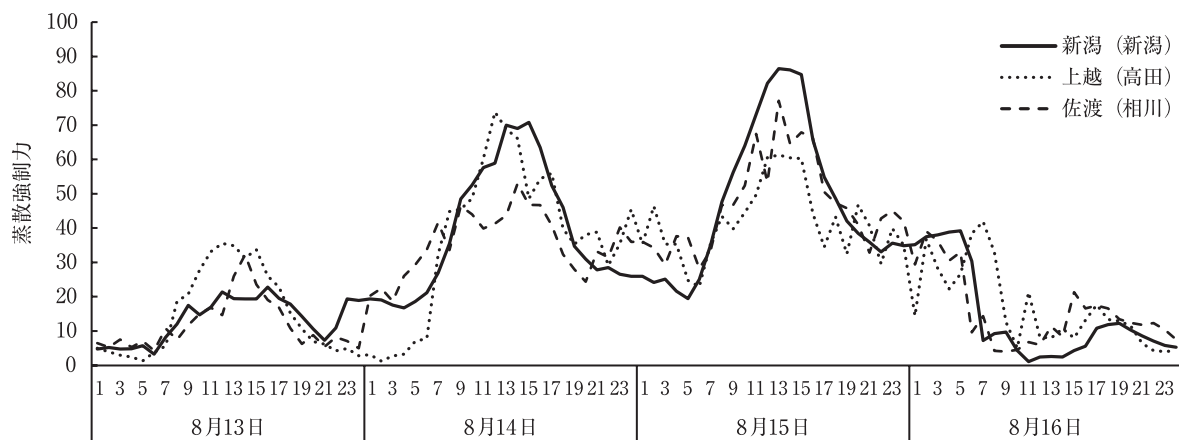
1. 北陸各県の気象条件の比較

北陸各県ではコシヒカリの作付けが50%を超えているコシヒカリの主要産地であるが、2019年産の一等米比率は新潟県のみが特異的に低かった(第1表)。北陸各県の出穂後からフェーンまでの日数は12～17日であり、何れの県でも



第8図 県内各地域の玄米横断面のタイプ別白濁粒発生率と一等米比率。

地域名の下の日付は出穂期、括弧内は出穂期からフェーン最盛日である8月15日までの日数を示す。nは各地域の調査点数を示す。一等米比率は農業改良普及センターの調査数値を地域単位で集計した。



第7図 新潟県各地域の2019年8月13～16日の蒸散強制力。

各地域の蒸散強制力は、新潟地域は新潟、上越地域は高田、佐渡地域は相川のアメダス観測値を用い算出した。

登熟前半にフェーンに遭遇していた。また、出穂後20日間の平均気温は28.6~29.9℃であり、北陸各県に共通して白未熟粒が発生しやすい条件(森田 2005)でもあった。北陸地方のフェーン発生時の気象を比較すると、新潟県は8月14、15日の両日で最高気温が最も高く、また湿度も最も低かった(第2図)。蒸散強制力について、福井県では14日に46、石川県では15日に63と何れか一日のみ上昇したのに対し、新潟県では2日連続で60~70まで上昇した。一等米比率については、各県で水稻の栽培管理方法や生産環境が異なるため一概に比較はできないが、フェーンの規模としては新潟県で特に大きく、高温や強い水分ストレス等の影響が大きかったことが示唆された。一方、高温乾燥風の強度やタイミングの違いが白未熟粒の発生や増加程度に影響した可能性もあるため、今後の解明が求められる。

2. 2010年と異なる格落ち理由について

2010年および2019年の出穂後20日間の平均気温は28.3℃、28.4℃とほぼ同等であったが(第3図)、コシヒカリの格落ち理由は異なっており、2010年産が乳白粒と背白粒(新潟県農林水産部 2011)、2019年産は乳白粒のみが多かった。背白粒は、出穂後20日間の日平均気温が27~28℃以上で急増し(若松ら 2007)、高温の時期は登熟前半の影響が大きいことが示されている(長戸・江幡 1965、若松ら 2008, 2010)、したがって、2019年は背白粒が発生しやすい条件であったと考えられる。実際に、2019年産コシヒカリの玄米横断面の調査では背白の白濁が多く見られ、また作況試験圃においても背腹白粒は4.5%と平均値より3.6ポイント高かった(第2表、第6図、第8図)。一方、登熟期の温度ストレスが強いと、それに伴って発生する未熟粒が基白粒、背白粒、乳白粒へと変化することが報告されている(Tashiro and Wardlaw 1991)。これらのことから、2010年は高温により背白粒と乳白粒が発生したが、2019年はさらに強い高温ストレスが生じたため、背白粒から乳白粒へと変化した割合が高かったと推察される。

3. 乳白粒の発生要因について

乳白粒の発生要因の一つとして籾数過剰が知られている(高橋 2006)。新潟県では高品質・良食味を確保するためのコシヒカリの適正籾数を28千粒 m^{-2} 以下に設定しており(佐藤ら 1996)、概ね適正籾数になるよう生育が制御されている。2019年は高温により生育が旺盛となる可能性が高く、籾数過剰の影響が疑われた。新潟農総研の作況試験圃におけるコシヒカリの籾数は、31千粒 m^{-2} と適正籾数よりやや多い程度であったが、乳白粒は14.3%と高かった(第4図)。過去15年間と比較すると、最も籾数が多い年次での乳白粒率は5%以下であることから(第4図)、2019年の乳白粒の多発は籾数過剰が主要因ではないと考えられた。

塚口ら(2012)は、出穂後20日間の平均気温が高くなるほど中心型乳白粒(胚乳の中心部や中心と背腹が白濁した

複合型乳白粒)が増加することを明らかにした。本稿の複合型の白濁粒は、横断面の外観上から中心型乳白粒に分類できる(第5図)。新潟県の出穂後20日間の平均気温は28.4℃と高く、複合型の白濁が増加しやすい条件であった(第3図)。しかし、新潟農総研や県内各地域のコシヒカリにおいて、複合型の白濁の発生には差が見られた。作期別コシヒカリの出穂後20日間の平均気温は、早植えが29.2℃、普通植えが28.5℃と早植えの方が高かったが、複合型の白濁は普通植えの方が多かった(第3表、第6図)。また、下越地域では出穂後20日間の平均気温が魚沼地域や新潟地域と同等であったが、複合型の白濁は見られなかった(第4表、第8図)。このことから、乳白粒の多発について、出穂後20日間の平均気温の高低とは別の要因が考えられた。

次に、出穂後の高温時期と乳白粒との関係について考察する。これまで、登熟初期に30℃以上の高温処理を行うと、背白粒や腹白粒が複合した乳白粒(高温型乳白粒)が発生すること(若松ら 2010)や、出穂後10~15日の高温処理によって乳白粒・心白粒の増加すること(松本・齋藤 2002、高橋 2006)が報告されており、出穂後10~15日は乳白粒に対する高温の感受性が高いことが推察される。新潟県ではフェーンの影響もあり8月13~16日未明に県内全域で高温となり、下越・新潟・佐渡地域では15日の日平均気温が33℃を超え、その他の地域の日平均気温も30℃以上となった(第4表)。出穂期~フェーンまでの日数が11~17日と、概ね感受性の高い時期に高温に遭遇していた作期および地域において、複合型の白濁の発生が確認された(第8図)。この時期を外れていた佐渡地域(出穂6日後)や新潟農総研の遅植えコシヒカリ(出穂2日後)では、複合型の白濁が見られなかった。したがって、登熟前半の特定の時期の著しい高温が乳白粒増加に関与した可能性がある。

フェーンによって高温とともに乾燥風が生じた(第2図)。茨城県や宮崎県では、登熟初~中期にフェーンが発生したことにより乳白粒が多発し、一等米比率が著しく低下した(狩野ら 1991、藪押ら 2010)。乾燥風の発生時期の影響については、出穂後15日前後の高温乾燥風によって乳白粒の発生が増加する(大谷・吉田 2008)。さらに、フェーンの乾燥風を要因とする乳白粒は、水分ストレスを回避する機能が働くことでリング状に白濁する(Wadaら 2011)。これらのことから、登熟前半の乾燥風により稲に水分ストレスが生じていた場合、リング状の白濁が増加することが示唆される。水分ストレスの指標となる蒸散強制力は、夜間に20~25を超えると白穂が発生する(村松 1976)など、数値が20以上であると稲に強い水分ストレスが生じていることを示す。今回のフェーンによって14日明け方から16日未明まで断続的に20以上となり、稲に強い水分ストレスが生じていたことが確認された。しかし、リング状の白濁の発生率は1~5%と少なく、これまでの報告とは矛盾した結果となった(第6図、第8図)。このことに関して、塚口ら(2012)は、出穂後20日間の平均気温が30℃以上

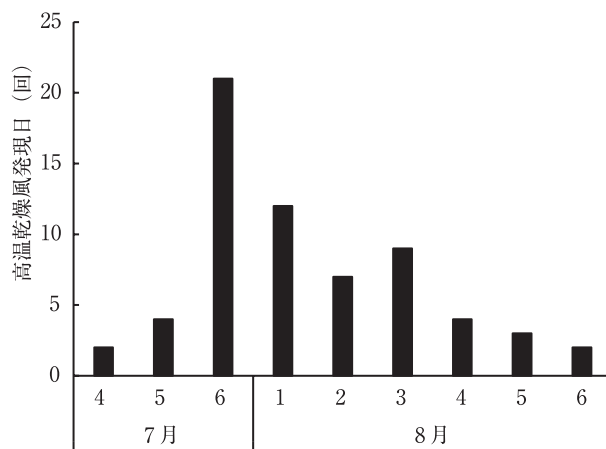
であるとリング状の白濁が形成されなくなることや、複合型とリング状の白濁の発現範囲が重なっているため視認できない可能性を示唆している。一方、県内 3 地域での蒸散強制力の比較において、佐渡地域では複合型の白濁が発生しなかったにも関わらず、リング状の白濁が見られなかった（第 7 図）。佐渡地域のフェーンに遭遇した時期は、出穂後 6 日と登熟初期であることから、登熟初期の水分ストレスはリング状の白濁の発生に影響しない可能性が考えられた。今回の高温乾燥条件では、何等かの理由によりリング状の白濁が発現しなかった、あるいは抑えられたと推察され、自然環境下でフェーンが白濁の発現に及ぼす影響は多様であることが示唆された。今後、気象再現試験により乾燥風と高温をそれぞれ切り分けた条件下で発生する白濁タイプを明らかにする必要がある。

4. 品質低下の対策技術の方向性

穂肥施用により穂揃期の葉色を高めることで、背白粒の発生が抑制されることがわかっており（若松ら 2008）、葉色の維持は高温登熟下における白未熟粒発生の対策として重要である。2010 年の新潟県では 6 月第 2 半旬以降が高温、低日照で推移し、コシヒカリの草丈が伸長したため、倒伏を懸念し 1 回目の穂肥を見送った。その後、高温気象と栄養凋落により一等米比率は過去最低の 20% となった。新潟農総研の作況試験圃では気象に関わらず 2 回の穂肥を必ず実施しているが、2010 年のコシヒカリの整粒は 61.8% と、平均と比較してわずかな低下であった（第 2 表）。よって、1 回目の穂肥を実施していれば著しい品質低下を抑えられた可能性がある。一方、2019 年では 2 回の穂肥が実施されたことに加え、高温が予想されていたため出穂期前の栄養凋落を防ぐ 3 回目穂肥を実施する指導も行ったが、一等米比率は 25.0% まで低下した。つまり、2019 年に発生したフェーンの高温乾燥風は、従来の栽培方法や対策技術では対応できない災害級のレベルであったと考えられる。今後も気候変動により、さらなる高温や気象災害が起こることが想定される（IPCC 2013）。したがって、品質低下対策の方向性としては、コシヒカリの高温感受性の高い時期からフェーンによる高温や乾燥風を避けることが効果的である。

そこで、気象庁アメダスデータから 1980 年～2020 年までの新潟観測地点の観測値を用い、田上（2010）によるフェーンの定義を参考に新潟県における高温乾燥風が発生しやすい時期を調べた。ただし、新潟観測地点では 2007 年以前の風向のデータが欠測しているため、風向以外の 3 条件が該当する日を「高温乾燥風発現日」として示した。その結果、7 月第 6 半旬から 8 月第 3 半旬の間、高温乾燥風が 7～21 回と特に多かった（第 9 図）。コシヒカリの出穂期から 10～15 日がこの時期に当たらないようにするためには、8 月 5 日以降に出穂期をずらす必要がある。

出穂期をずらす方法としては以下の二つが考えられる。一つ目は晩植による出穂期の後ろ倒しである。実際に、富



第 9 図 7 月第 4 半旬から 8 月第 6 半旬にかけての高温乾燥風発現日（1980～2020 年）。

横軸の数字は半旬を示す。高温乾燥風発現日は、アメダス新潟観測地点の観測値において、日最高気温 33℃ 以上、日最小湿度 45% 以下、日平均風速 3 m/s を満たす日とする。

山県や福井県、石川県などでは高温登熟を回避する対策技術の一つとして、出穂期を遅らせる晩植が励行・推進され、一定の効果を上げている（高橋 2006, 井上 2012, 國府 2015）。晩植は特別な技術を必要とせず、導入が簡単である点がメリットである。ただし、生育初期から気温が高いために成長が早く、茎数や穂数の減少に伴う収量低下が懸念される。したがって、収量を確保する技術を開発すること、またそれらを技術体系として普及させることが最も重要な課題となる。二つ目は、遺伝子によるコシヒカリの出穂性の改変である。先行事例としては、コシヒカリやミルキークイーンに出穂性遺伝子を導入し、出穂期のみを改変した同質遺伝子系統である「コシヒカリ関東 HD1 号」や「ミルキーサマー」などがある（竹内ら 2008, 竹内ら 2013）。出穂遺伝子 Hd1 の導入により、「コシヒカリ関東 HD1 号」は、コシヒカリより出穂期が 12 日早く、「ミルキーサマー」は、ミルキークイーンより 13 日早く、出穂期が改変されている。新潟県においては、高温乾燥風が多発する時期の 10～15 日前に出穂するような出穂遺伝子を導入することで、著しい品質低下を回避できる可能性が高まると考えられる。

謝辞：玄米断面の解析については、株式会社ケット化学研究所より測定機器を貸与いただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

引用文献

- 井上健一 2012. 福井県におけるコシヒカリの高温登熟回避の試み－“普通植え”の普及と品質食味の解析を中心に－. 北陸作報 47: 137-140.
- IPCC 2013. 第 5 次報告書 第 1 作業部会報告書政策決定者向け要約（翻訳気象庁）. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5-wg1-spmjapan.pdf> (2021 年 11 月 12 日閲覧).
- 狩野幹夫・幸田浩俊・酒井一・石原正敏・小川吉雄 1991. 平成元年産水稻の乳白米発生要因の解明. 茨城農試研報 30: 11-24.

- 木戸三夫・梁取昭三 1968. 腹白, 基白, 心白状乳白, 乳白米の穂上における着粒位置と不透明部のかたちに関する研究. 日作紀 37: 534-538.
- 木邨勇 1950. 水稻の乾風害 (白穂) について. 農業気象 5-3: 13-16.
- 國府尚夫 2015. コシヒカリの6月中旬移植栽培の検討. 石川農試研報 31: 1-5.
- 松本靖・齋藤弘文 2002. 水稻は出穂後 10~15 日の高温により白未熟粒の発生が増加する. 東北農業研究成果情報 平成 14 年度: 177-178.
- 森田敏 2005. 水稻の登熟期の高温によって発生する白未熟粒, 充実不足および粒重低下. 農業技術 60: 442-446.
- 森田敏 2008. イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日作紀 77: 1-12.
- 森田敏 2012. 水稻の高温登熟障害の克服に向けて. 北陸作報 47: 127-129.
- 森田敏・江原崇光 2012. 乳心白粒の多発を推定する装置-収穫前の玄米横断面内部の白濁から読み取る!-. 研究ジャーナル 35: 57-60.
- Morita, S., Wada, H. and Matsue, Y. 2016. Countermeasures for heat damage in rice grain quality under climate change. Plant Prod. Sci. 9: 1-11.
- 村松謙生 1976. 北陸地方におけるフェーンの発生とその水稻被害. 北陸農試報 19: 25-43.
- 長田健二・滝田正・吉永悟志・寺島一男・福田あかり 2004. 登熟初期の気温が米粒の胴割れ発生におよぼす影響. 日作紀 73: 336-342.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期間の高温が穎花の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34: 59-66.
- 新潟県農林水産部 2011. 平成 22 年度稲作概況と課題. 新潟県農林水産部編. 新潟. 89.
- 農林水産省 2021. 米穀の農産物検査結果. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/attach/pdf/index-59.pdf> (2021 年 2 月 4 日閲覧).
- 大谷和彦・吉田智彦 2008. 送風時期が水稻「白未熟粒」発生に及ぼす影響. 日作紀 77: 434-442.
- 佐藤徹・齋藤祐幸・市川岳史・種田貞義 1996. コシヒカリの食味向上に関する研究. 第1報 目標玄米窒素含有率と収量及び収量構成要素. 北陸作報 31: 18-19.
- 田上善夫 2010. 日本列島における大規模昇温とその発生要因. 富山大学人間発達科学部紀要 5: 83-99.
- 高橋渉・尾島輝佳・野村幹雄・鍋島学 2002. コシヒカリにおける胴割れ発生予測法の開発. 北陸作報 37: 48-51.
- 高橋渉 2006. 気候温暖化条件下におけるコシヒカリの白未熟粒発生軽減技術. 農及園 81: 1012-1018.
- 竹内善信・加藤浩・根本博・太田久稔・佐藤宏之・平山正賢・平林秀介・出田収・青木法明・坂井真・蛭谷武志・田口文緒・山本敏央・矢野昌裕・井辺時雄・安東郁男 2008. コシヒカリと同質の遺伝的背景を持つ極早生の水稲品種「コシヒカリ関東 HD1 号」の育成. 作物研報 9: 1-25.
- 竹内善信・安東郁男・根本博・加藤浩・平林秀介・太田久稔・石井卓郎・前田英郎・竹本陽子・井辺時雄・佐藤宏之・平山正賢・出田収 2013. ミルキークイーンの出穂性を改変した水稲品種「ミルキーサマー」の育成. 作物研報 14: 77-95.
- Tashiro, T. and Wardlaw, I.F. 1991. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. Aust. J. Agric. Res. 42: 485-496.
- 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年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70: 449-458.
- 塚口直史・山村達也・井上裕則・中川博視・村上佳矢・北恵利佳 2012. コシヒカリにおける胚乳割断面の白濁タイプが異なる乳白粒発生率の登熟温度および炭水化物供給に対する反応性. 日作紀 81: 267-274.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・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: 71-78.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・田中明男 2008. 水稻登熟期間中の高温処理時期および玄米タンパク質含有率が背白米の発生に及ぼす影響. 日作紀 77: 424-433.
- 若松謙一・田中明男・佐々木修 2010. 水稻登熟期間の時期別高温処理が玄米外観品質に及ぼす影響. 日作九支報 76: 12-14.
- Wada, H., Nonami, H., Yabuoshi, Y., Maruyama, A., Tanaka, A., Wakamatsu, K., Sumi, T., Wakiyama, Y., Ohuchida, M. and Morita, S. 2011. Increased ring-shaped chalkiness and osmotic adjustment when growing rice grains under foehn-induced dry wind condition. Crop Sci. 51: 1703-1715.
- 藪押陸幸・角朋彦・川口満・和田博史・森田敏 2010. 宮崎県における 2007 年早期水稻「コシヒカリ」の品質低下の要因. 日作紀 79 (別 2): 144-145.

Environmental Factors on the Degraded Rice Grain Quality of Koshihikari in Niigata Prefecture in 2019 : Yasutaka IMAI¹, Makoto HATTORI¹, Satoshi AZUMA², Toru TSUCHIDA¹, Yuichiro FURUKAWA¹ and Yoshifumi NAGUMO¹ ¹ *Niigata Agricultural Research Institute, Crop Research Center, Nagaoka 940-0826, Japan;* ² *Agriculture, Forestry and Fisheries Industry of Niigata Management and Extension Division*

Abstract : The percentage of first grade Koshihikari rice a paddy rice variety produced in Niigata Prefecture was over 70 from 2013 to 2018. However, the ratio in 2019 25 was the second lowest ever. In 2019, the temperature from late-July to mid-August was 1.4-4.0°C higher than usual, reaching a record high temperature due to the foehn winds that occurred from August 14 to 15. The reason for the downgrading was mostly milky white grains. Despite this observation, it was speculated that excess spikelet number was not the main factor. The pattern and proportion of cross-sectional chalkiness in brown rice grains was investigated in Koshihikari samples with different heading times. A combination of chalkiness in center, dorsal and ventral sides was confirmed in samples exposed to the foehn winds 11 to 17 days after heading time. In these samples, the ratio of dorsal chalkiness was also increased, and the ratio of perfect grains was low. Peak heading time for Koshihikari in Niigata Prefecture was August 3, suggesting that the quality deteriorated due to exposure to the foehn winds in the first half of ripening, when the rice is highly sensitive to the increase in temperatures in most areas.

Key words : Chalky kernels, Grain filling, High temperature, Quality, Rice.