

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.05.005.en

丹野 久. 日本の寒地, 北海道における 2030 年代の水稲生育への温暖化の影響予測とその対応(日语原文)[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(5): 99-113.

TANNO H. Prediction of the Influence of global warming on rice growth in the 2030s in hokkaido, the coldest region in japan and the measures to be taken for sustained production[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(5): 99-113.

# 日本の寒地, 北海道における 2030 年代の水稲生育への温暖化 の影響予測とその対応(日语原文)

丹野 久

(日本水稲品質・食味研究会, 日本東京都中央区, 104-0033)

**摘 要:** 北海道では 1980 年代から 2010 年代まで, 水稲圃場栽培期間である 5-9 月の気温は年代とともに上昇した。そこで, 直近の 2010 年代(2010-2019 年平均)と比べて, 2 つの 2030 年代の予測気象から, 既報の関係式より水稲生育を予測した。その結果, 2030 年代では 2010 年代に比べ, 限界移植日(移植早限)が水稲栽培 17 地域の平均で 8~9 日早い。また, 早限出穂期が 1~5 日早く, 晩限出穂期が 1~5 日遅く, 安全出穂期間が 2~10 日長い。出穂期は 1~3 日早い。出穂期から晩限出穂まで 2~9 日長いため, 遅延型冷害の発生がやや少ない。生育期別気象は, 出穂前 24 日以降 30 日間では生育が早いため平均気温が同じかやや低い。出穂前 10 日以降 40 日間および出穂期以降 40 日間では平均気温がやや高く, 日射量はやや少ない。そのため, 玄米収量は 96~98%とやや低く, 潜在収量性を示す気候登熟量示数は同じである。障害不稔発生に関係する穂ばらみ期冷害危険期の平均気温はわずかに低いかほぼ同じであるため, 冷害発生の危険性は残る。一方, 不稔発生をもたらす低温域の出現頻度には, 地域間で差異がある。精米蛋白質含有率は同じであるが, アミロース含有率はやや低く, やや良食味である。米粒外観品質では被害粒歩合と着色粒歩合は一定の傾向がなく, 未熟粒歩合はやや高い。精米白度は同じであるが, 玄米白度はやや高い。以上の予測に対する技術的対応方向を示した。

**キーワード:** 温暖化; 2030 年代; 出穂期; 玄米収量; 不稔発生; 米粒外観品質; 食味関連形質; 寒地

**中图分类号:** TS5-33;S511      **文献識別コード:** A      **文章番号:** 1007-7561(2022)05-0113-15

**ネットワークの最初発表時間:** 2022-09-02 15:19:53

**ネットワークの最初発表アドレス:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20220902.1120.006.html>

**投稿日時:** 2022-06-05

**作者紹介:** 丹野 久, 男, 1957 年生まれ, 博士, 教授, 研究方向は米の品質改良における育種栽培、生産技術及びその形質との関係である。E-mail: bun01\_0405@yahoo.co.jp。このコラムの背景と作者の紹介は PC13-C17 にて具体的に掲載しており, 本論文の中国語訳文は P85-P98 を参照できる。

## Prediction of the Influence of Global Warming on Rice Growth in the 2030 s in Hokkaido, the Coldest Region in Japan and the Measures to Be Taken for Sustained Production

Hisashi TANNO

(Japanese Society for Rice Quality and Palatability, Chuo-ku, Tokyo 104-0033, Japan)

**Abstract:** The mean air temperature from May to September, during which the rice plant is cultured in the paddy field in Hokkaido, has increased during the four decades from 1980 to 2019. The growth of rice in the 2030s in comparison to the most recent decade (2010—2019) was predicted using two predicted weathers for the 2030s and the previously reported relational expression. In the 2030s, the critical planting date (early limit of planting day) will be 8~9 days earlier than that in the 2010s. The early limit of heading date will also be 1~5 days earlier, and the late limit of heading date will be 1~5 days later. Therefore, the safe heading period will be 2~10 days longer and the heading date will be 1~3 days earlier. As the period between heading date and late limit of heading will be 2~9 days longer, cool summer damage due to delayed growth will decrease slightly. Concerning the weather at different growth stages, the average air temperature will be the same or lower for the earlier growth during the 30 days after 24 days before heading. During the 40 days after 10 days before heading and during the 40 days after heading, the average air temperature will be slightly higher, and the amount of solar radiation will be slightly lower. Then the grain yield will be slightly lower (96%~98%), and the agroclimatic index for expressing the potential of grain yield will be the same. As the average air temperature during the critical stage of chilling injury at the booting stage, which is related with occurrence of male sterility, will be slightly lower or the same, the risk of occurrence of cool weather damage will remain. On the other hand, the appearance frequency of low temperature, which causes sterility, will vary depending on the area. The protein content of milled rice will be the same and the amylose content will be slightly lower. Therefore, the palatability will be slightly better. On the appearance quality of rice grain, there will be no consistent tendency between the 2030s and the 2010s in the percentages of damaged grain and of colored grain, and the percentage of immature grain will be slightly higher. Although the whiteness of milled rice will be the same, the whiteness of brown rice will be slightly higher. The measures to be taken in response to the above predictions are discussed.

**Key words:** global warming; 2030s; heading date; grain yield; occurrence of male sterility; appearance quality of rice grain; palatability property; cold region

北海道は東北以南に比べ気象条件が冷涼なため、気象変動が与える水稲生育への影響が大きく、地球温暖化が水稲の生育に大きな影響を及ぼすと考えられる。すなわち、水稲の生育期間の気温上昇により移植可能日や出穂期は早まり、登熟期間である秋の気温も高くなることから、生育期間が長くなると考えられる。実際、これまで年次とともに、出穂期が早まり玄米収量が高くなっていることが認められる (図 1, 図 2)。

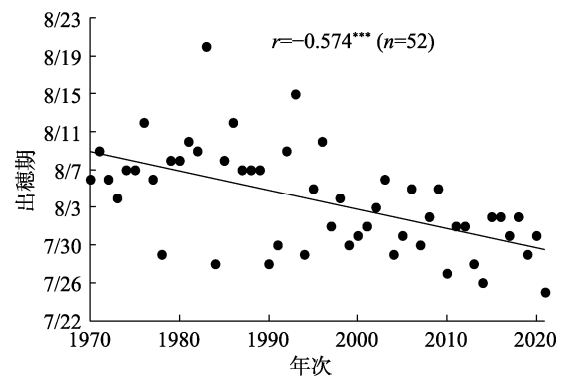


図 1 年次と出穂期との関係

実線の回帰式、傾きが -0.2046 で y 切片が 9/16。農林水産省大臣官房統計部編、水稲の耕種期日 (最盛期) 一覧表 (都道府県別) <sup>1)</sup>より作図

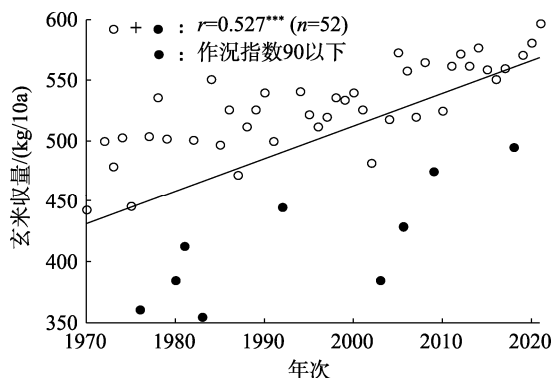


図 2 年次と玄米収量との関係

実線の回帰式,  $y = 2.6839x - 4855.8$ 。農林水産省大臣官房統計部編, 作物統計収穫量累年統計水稲 北海道<sup>[1]</sup>より作図

例えば, 東北地域の青森県, 秋田県および山形県は, 北海道よりも気温が高く多収である<sup>[1]</sup>。今後, 温暖化により北海道の気象が東北地域に近づき, さらに多収化することが考えられる。従来, 北海道では 4 年に 1 度の冷害が発生すると言われており, 北海道の作柄に大きな変動をもたらしてきた。とくに, 穂ばらみ期冷害危険期の冷温は, 不稔初の発生を助長し障害型冷害を生じさせる<sup>[2]</sup>。しかし, 近年では収量の安定化が見られ(図 2), 今後温暖化により冷害発生頻度が低下することが期待される。

一方, 米の食味に大きく影響するアミロース含有率は登熟期間の気温が高いほど低くなる<sup>[3-4]</sup>。また, 精米蛋白質含有率は, 出穂後 40 日間(以下, 登熟期と記す)の日平均積算気温(以下, 登熟気温と記す)が 843 °C, すなわち平均気温がほぼ 21 °C 以上で高いほど高くなる<sup>[5]</sup>。今後の登熟気温の上昇は, 食味に対してアミロース含有率ではプラス, 精米蛋白質含有率ではマイナスに働く可能性がある。さらに, 玄米の外観品質は, 従来低温年に登熟不良による青未熟粒や腹白米の発生が問題となったが, むしろ高温年での白未熟粒の発生が懸念される<sup>[6]</sup>。

以上のように, 温暖化により水稲の生育には大きな影響が生じることが考えられるが, その影響を明らかにした報告は乏しい。そこで, 本試験では, 水稲移植栽培での生育, 玄米収量, 穂ばらみ期冷害危険期の冷温による不稔発生リスク, 食味関連形質および米粒外観品質におけ

る 2010 年代(2010—2019 年平均)に比した 2030 年代の変化を, 既報<sup>[5, 7-10]</sup>でのこれら形質と気象値との間の関係および 2030 年の予測気象と直近の 2010 年代気象を用いて明らかにした。また, これら予測に対する技術的対応方向を示した。

## 1 方法

### 1.1 気象データ

2030 年代の予測気象と比較する直近の過去の気象は, 2010 年代, すなわち 2010—2019 年の平均を用いた。その理由は, 以下の通りである。北海道の水稲栽培 17 地域の平均により 1980—2010 年代の 10 年毎の平均値の推移を見ると, 主な水稲圃場の生育期間で出穂前の栄養成長期に当たる 5—7 月および出穂以降の登熟期に当たる 8—9 月の日平均積算気温は, いずれも年代とともに上昇した(図 3)。また, 降水量は 8—9 月ではやや明確ではないが, 5—7 月では年代とともに多くなり(図 4), 日射量はいずれの期間とも増加した(図 5)。水稲生育を扱った研究において平年の気象には, 局地的や短期的に生じた変動の影響を小さくするため, 過去 30 年を平均したアメダス平年値を多く用いている<sup>[11-13]</sup>。しかし, 過去 30 年間の長期のデータでは, 明らかに変化している直近の気象を十分反映できないと考えられる。

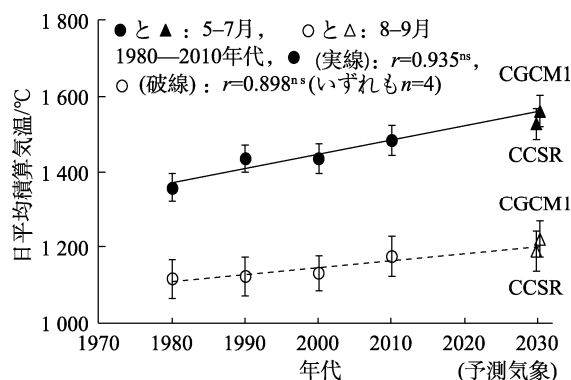


図 3 年代と 5—7 月, 8—9 月の日平均積算気温との関係(水稲栽培 17 地域平均)

1980 年代は 1980—1989 年の平均。回帰式, 実線は  $y = 3.7662x - 6083.3$ , 破線は  $y = 1.8474x - 2547.3$ 。1980—2010 年代はアメダスポイント, CCSR および CGCM1 はアメダスメッシュによる。以下の図表も同じ。エラーバーは標準偏差。

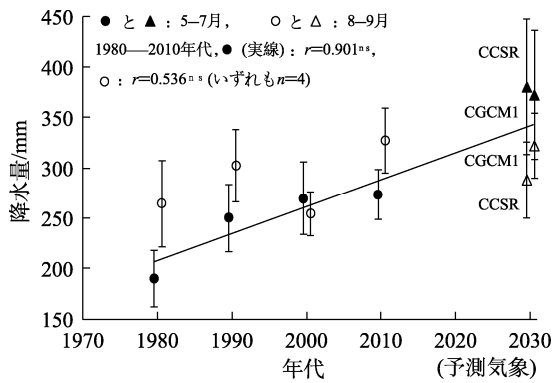


図 4 年代と 5-7 月, 8-9 月の降水量との関係 (水稲栽培 17 地域平均)

年代は図 1 脚注参照。実線の回帰式、 $y = 2.6894x - 5118.9$ 。エラーバーは標準偏差。

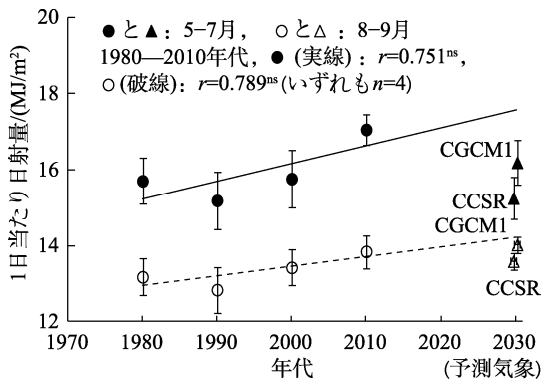


図 5 年代と 5-7 月, 8-9 月の 1 日当たり日射量との関係 (水稲栽培 17 地域平均)

年代は図 1 脚注参照。回帰式、実線は  $y = 0.0462x - 76.205$ 、破線は  $y = 0.0259x - 38.435$ 。エラーバーは標準偏差。

2030 年代の気象データは、Yokozawa et al. (2003)<sup>[14]</sup>による「気候変化メッシュデータ日本 (Mesh Climate Change Data of Japan)」全球気候モデルの中から、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の第 4 次報告書や気象庁による地球温暖化情報第 6 号での将来予測に比較的近い CCSR/NIES (以下、CCSR と記す) および CGCM1 の 2 つのモデルで計算した予測値を用いた<sup>[11]</sup>。これら 2030 年代予測気象値を 2010 年代の気象値に比べると、日平均積算気温は 5-7 月および 8-9 月ともやや高く、降水量は 5-7 月が多いが 8-9 月ではやや少ない傾向に有り、日射量はとくに 5-7 月で少ない (図 3~5)。また、2 つの予測気象では、CGCM1 は CCSR に比べ、5-7 月および 8-9 月とも日平均積算気温が高く、降水量

は 8-9 月で多く、日射量は両期間とも多い。

それら 2030 年代予測気象における北海道水稲栽培地域での 5-9 月の日平均積算気温を、2010 年代気象の東北北部の水稲栽培地域に比べると、北海道北部を除いた北海道中央部以南は、青森県でも比較的温暖な日本海側 (黒石市) よりは低いが、太平洋側 (十和田市) に近似する。また、北海道は 2030 年代予測気象の同日平均積算気温でも、青森県の南に位置する秋田県や岩手県の 2010 年代気象より明らかに低い (表 1)。

表 1 北海道の水稲栽培 5 地域および東北北部の水稲栽培 5 地域における 2010 年代 (2010—2019 年平均値) と 2030 年代予測気象 (CCSR と CGCM1) の 5-9 月日平均積算気温

地域名 (県名)	(市名)	北緯(度), 東経(度)	気象種別	5-9 月日平均積算気温/°C	
北海道 (北部)	名寄市	44.3, 142.5	2010 年代	2 525	
			CCSR	2 621	
			CGCM1	2 713	
北海道 (中央部)	旭川市	43.8, 142.8	2010 年代	2 683	
			CCSR	2 695	
			CGCM1	2 784	
北海道 (中央部)	深川市	43.7, 142.1	2010 年代	2 653	
			CCSR	2 834	
			CGCM1	2 920	
北海道 (中央部)	岩見沢市	43.2, 141.8	2010 年代	2 749	
			CCSR	2 761	
			CGCM1	2 838	
北海道 (南部)	北斗市	41.8, 140.6	2010 年代	2 756	
			CCSR	2 833	
			CGCM1	2 859	
東北北部	青森県	十和田市	40.6, 141.2	2010 年代	2 855
東北北部	青森県	黒石市	40.6, 140.6	2010 年代	2 987
東北北部	岩手県	雫石町	40.0, 141.4	2010 年代	2 956
東北北部	岩手県	北上市	39.3, 141.1	2010 年代	3 210
東北北部	秋田県	大館市	40.3, 140.6	2010 年代	3 093

東北地域の気温はアメダスポイントによる。北海道の気温は図 3 の脚注参照。

## 1.2 限界移植日, 早限出穂期, 晩限出穂期および出穂期の推定

(1) 推定の対象地域は、北海道水稲優良品種地帯別作付指標<sup>[13]</sup>における地帯区分を考慮

し、代表する 17 地域とした。後述の予算出結果は、「項目 1.4 穂ばらみ期冷害危険期の不稔発生リスクの推定」を除いて、同 17 地域の平均で示した。なお、これら 17 地域は、北見市、名寄市（風連）、士別市（士別）、旭川市、中富良野町、小平町、雨竜町、深川市、岩見沢市、新篠津村、長沼町、恵庭市、厚真町、共和町、ニセコ町、北斗市および江差町である。

(2) 限界移植日（移植早限）、早限出穂期および晩限出穂期の推定は、北海道水稲優良品種地帯別作付指標に用いられている以下の方法

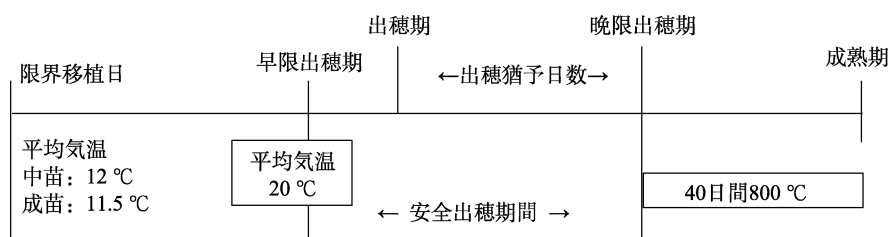


図 6 限界移植日（移植早限）、限界出穂期（早限出穂期、晩限出穂期）、出穂期および出穂猶予日数の関係<sup>[7-8,13]</sup>

限界移植日は移植日から 5 日間の平均気温で中苗が 12 °C、成苗が 11.5 °C を超える日。早限出穂期は出穂前 24 日以降の 30 日間の平均気温 20.0 °C 以下になる日。晩限出穂期は、出穂日翌日から 40 日間の日平均積算気温が 800 °C を超える日。

晩限出穂期は、北海道では従来、登熟気温 750 °C が確保できる日としてきた<sup>[7]</sup>。しかし、北海道の南に位置し、北海道よりも水稲栽培期間の気温が高い東北地域では、晩限出穂期を登熟気温 800 °C 以上が確保できる日としている<sup>[15]</sup>。近年、北海道でも登熟気温が高くなってきており、登熟気温を十分確保し米粒外観品質を向上させるため、晩限出穂期に必要な登熟気温を東北地域並の 800 °C に近づけて、北海道水稲優良品種地帯別作付指標を改定してきている<sup>[13]</sup>。そこで本報では、晩限出穂期は登熟気温 800 °C を確保できる日とした。

安全出穂期間は、両限界出穂期（早限出穂期と晩限出穂期）の間の期間である。さらに、次項(3)で推定を行った出穂期から晩限出穂期までの期間を出穂猶予日数とした。

(3) 出穂期の推定は、1 日当たり発育速度の積算値として、生育期を出芽時に 0、幼穂形成期に 1、出穂期に 2 の値となる発育指数で表す方法により<sup>[16-17]</sup> (表 2)、平均気温から出穂期

で推定した(図 6)。限界移植日は、移植以降 5 日間の日最高最低平均気温が、中苗マツト（以下、中苗と記す）では 12.0 °C、成苗ポット（以下、成苗と記す）では 11.5 °C となる日である。早限出穂期は、障害型不稔発生と関係が深い出穂前 24 日以降 30 日間（以下、障害危険期と記す）の日最高最低平均気温の平均値が 20 °C に達する日である。これは、穂ばらみ期耐冷性や強の品種（例えば「きらら 397」）で稔実歩合を 80% 確保するのに必要な気温を得る初日となる。

を推定した。対象品種は、1990 年代からの基幹品種で、2020 年でも水稲うるち面積の 11% (10,205ha) で作付けされている中生品種の「きらら 397」とし、算出に用いる品種固有のパラメータは、「きらら 397」についての既報値<sup>[16]</sup>を用いた。なお、2019 年の北海道うるち作付面積の大部分を、「きらら 397」と同じ中生品種が占めている<sup>[13]</sup>。

表 2 発育指数モデルの計算式（上段）および北海道中生品種「きらら 397」における発育速度パラメータ（下段）<sup>[16]</sup>

1 日当たり発育速度, $DVR = 1/(1 + \exp(-A(T - Th)))/G$		
発育指数, $DVI = \sum DVR$		
T: 日平均気温		
A, Th, G は品種固有のパラメータ		
DVI は出芽時、幼穂形成期および出穂期にそれぞれ 0, 1, 2 とする		
パラメータ	移植-幼穂形成期	幼穂形成期-出穂期
A	0.286 1	0.298 3
Th	17.07	15.85
G	28.95	20.93
中苗移植時 DVI	0.325 8	
成苗移植時 DVI	0.434 4	

計算開始日となる移植日は、2010 年代気象および 2030 年代予測気象とも一律に、北海道の 2010 年代の平均である 5 月 25 日とした(表 3)。苗の種類は現在の移植栽培の主体である中苗と成苗で、それぞれ 2019 年作付面積の 29%、66% を占めている<sup>[13]</sup>。ただし、後述の項目「1.3 玄米収量および気候登熟量指数の推定」でのみ、中苗と成苗を平均して算出した。

表 3 北海道、東北 6 地域および中部長野県における水稲栽培の作業季節と出穂期(月日)(2010—2019 年平均)

地域名 (県名)	北緯(度), 東経(度)		播種日	移植日	出穂期	刈取期
			平均 SD	平均 SD	平均 SD	平均 SD
北海道	43.1, 141.3	4-21	5-25	7-30	9-27	4-36
東北 青森県	40.8, 140.7	4-14	5-20	8-4	10-1	3-44
東北 岩手県	39.7, 141.2	4-15	5-17	8-5	10-3	2-86
東北 宮城県	38.3, 140.9	4-11	5-11	8-2	9-30	2-66
東北 秋田県	39.7, 140.1	4-21	5-22	8-3	10-1	2-83
東北 山形県	38.2, 140.4	4-19	5-18	8-5	10-1	2-49
東北 福島県	37.8, 140.5	4-17	5-17	8-8	10-8	1-68
中部 長野県	36.7, 138.2	4-20	5-21	8-6	9-29	1-79

緯度経度は北海道庁および各県庁所在地。農林水産省大臣官房統計部編、水稲の耕種期日(最盛期)一覧表(都道府県別)<sup>[1]</sup>により算出。

この推定した出穂期から生育期別の気象データを得て、後述する項目 1.3~1.5 において、それぞれ玄米収量および気候登熟量指数、穂ば

らみ期冷害危険期の不稔発生リスク、食味関連形質および米粒外觀形質の推定に用いた。

(4) 限界移植日、早限出穂期および晚限出穂期の算出には、従来、日最高最低平均気温を用いている。同気温はアメダス平均気温のような多数回測定値を総て平均した平均気温に比べ、7 月をピークに高く 5 月半ばと 9 月半ばでほぼ同じで、それ以前と以降では低くなることが知られている。そこで、早限出穂期の算出にはアメダス平均気温に 0.5℃を加えた値を、限界移植日と晚限出穂期の算出にはアメダス平均気温をそのまま用いた。

### 1.3 玄米収量および気候登熟量指数の推定

以下の(1)~(3)の方法により 2010 年代気象と 2030 年代の予測気象における収量性を評価した。

(1) 1999—2006 年の北海道 15 地域のデータにおいて、玄米収量と登熟期の積算日射量の比は障害危険期の平均気温との間に二次回帰の関係があり(表 4, 図 7), その二次回帰式より玄米収量を算出した。

(2) 日本全国でも多収である北海道を含む 9 地域での 1994—2021 年のデータにおいて、玄米収量と出穂前 10 日以降 40 日間の平均日射量の比は同期間の平均気温との間に二次回帰の関

表 4 本試験で用いた玄米収量, 食味関連形質および米粒外觀品質と出穂前 24~30 日間の平均気温( $x_{ct}$ ), 出穂前 10 日以降 40 日間の平均気温および平均日射量(それぞれ  $x_{dt}$ ,  $x_{dr}$ ), 出穂後 40 日間の日平均積算気温, 平均気温および積算日射量(それぞれ  $x_{ft}$ ,  $x_{ft2}$ ,  $x_{fr}$ )との間の回帰式

形質	回帰式	決定係数 ( $R^2$ )	データ			
			試験地	年次	地域	データ数
玄米収量	$y/x_{ft} = 421.89 - 0.045 6(x_{ct} - 21.0)^2$	0.321	北海道	8	15	120
玄米白度	$y = 0.015 8x_{ft} + 5.70$	0.747	北海道	8	14~15	119
精米白度	$y = 0.407 9x_{ct} + 0.008 2x_{ft} + 22.26$	0.464	北海道	8	14~15	119
未熟粒歩合	$y = 0.000 930(x_{ft} - 803.1)^2 + 9.2$	0.473	北海道	8	14~15	119
被害粒歩合	$y = -3.838x_{ct} - 0.028 36x_{ft} + 108.98$	0.629	北海道	7	14~15	104
着色粒歩合	$y = -0.085 2x_{ct} - 0.001 22x_{ft} + 2.94$	0.507	北海道	6	15	90
アミロース含有率	$y = -0.013 7x_{ft} + 31.78$	0.652	北海道	14~16	12~15	236
精米蛋白質含有率	$y = 0.000 042 5(x_{ft} - 849.4)^2 + 7.36$	0.185	北海道	14~16	12~15	236
玄米収量	$y/x_{dr} = -39.20 - 0.349 6(x_{dr} - 22.1)^2$	0.253	日本多収道県	26	9	234
気候登熟量指数 <sup>[9]</sup>	$y/x_{ft} = 1.28 - 0.019 2(21.9 - x_{ft2})^2$	-	日本全国	-	152	-

上段は 1999—2006 年<sup>[10]</sup>, 中段は 1991—2006 年<sup>[5]</sup>, 下段の玄米収量は, 農林水産省大臣官房統計部編, 水稲の耕種期日(最盛期)一覧表(都道府県別)<sup>[1]</sup>および同編, 作物統計 収穫量累年統計 水稲<sup>[1]</sup>(1996—2021 年)により算出。

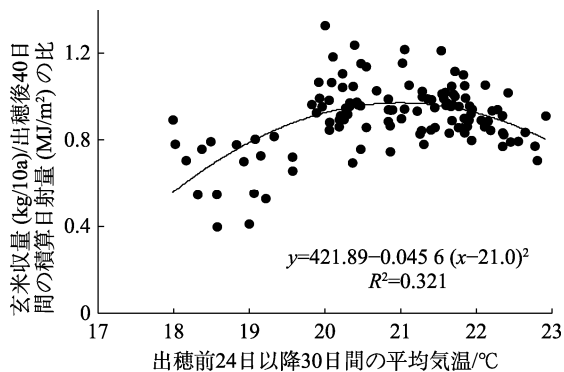


図 7 北海道における出穂前 24 日以降 30 日間の平均気温と玄米収量 / 出穂後 40 日間の積算日射量の比との間の関係  
北海道 15 地域 1999—2006 年のデータ (表 4 の上段) による。

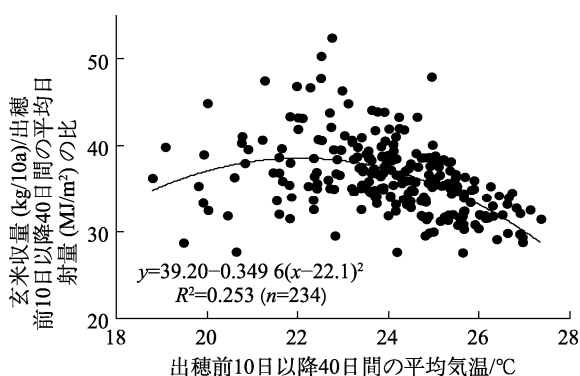


図 8 北海道を含む日本の多収 9 地域における出穂前 10 日以降 40 日間の平均気温と玄米収量 / 同期間の平均日射量の比との間の関係

1996—2021 年のデータ (表 4 の下段) による。

係<sup>[18]</sup> (表 4, 図 8) があり, その二次回帰式より, 玄米収量を算出した。

(3) 日本全国の水稲奨励品種決定試験成績データにおいて, 気候登熟量示数と登熟期の積算日射量との比は, 出穂後 40 日間の平均気温と二次回帰の関係があった<sup>[9]</sup> (表 4)。この二次回帰式は, 供試データの中で同一の登熟期の平均気温に対して, 気候登熟量示数と登熟期の積算日射量との比が最も高いデータのみにも適合するように算出している。そのため, 同式より得られる気候登熟量示数は, 潜在的な収量性を示す。

#### 1.4 穂ばらみ期冷害危険期の不稔発生リスクの推定

対象地域は, 北海道の水稲栽培地域でも作柄が安定している中央部の 3 地域 (旭川市, 深川市, 岩見沢市), およびやや不安定な地域である北部 1 地域 (士別市), 太平洋側東部 1 地域 (厚

真町), 太平洋側西南部 1 地域 (北斗市) の合計 6 地域である。出穂前 10~11 日を中心とした前後 1 週間とされる穂ばらみ期冷害危険期は, 前述の項目 1.2 (3) における方法で発育指数を算出し, 値が 1.4~1.7 となる期間とした<sup>[16]</sup>。

2030 年代の日平均気温は, 1971—2000 年の 30 カ年の観測値から作製したアメダスメッシュと 2030 年代予測気象との気温差を求め, その気温差を対象地域の最寄りのアメダスポイントの 1978—2000 年の日平均気温に加算して得た。次に, その算出した 2030 年代 (23 カ年), 2010 年代の 2010—2019 年 (10 カ年), および参考として 1978—2000 年 (23 カ年) について, 各年次の穂ばらみ期冷害危険期の平均気温を算出し, 地域別にそれらの平均と頻度分布を得た。

#### 1.5 食味関連形質および米粒外観品質の推定

食味関連形質のアミロース含有率および精米蛋白質含有率の推定は, 1991—2006 年の北海道 12~15 地域の試験データから得られた関係より, 推定した。すなわち, アミロース含有率は登熟気温との一次回帰式で, 精米蛋白質含有率は登熟気温との二次回帰式である (表 4)。

米粒外観品質の推定には, 前述の項目 1.3 (1) の玄米収量の推定と同じ 1999—2006 年の 6~8 カ年で北海道 15 地域のデータから得た次の関係を用いた。すなわち, 玄米白度は登熟気温との一次回帰式である。また, 精米白度, 被害粒歩合および着色粒歩合は障害危険期の平均気温と登熟気温との重回帰式であり, 未熟粒歩合は登熟気温との二次回帰式である (表 4)

## 2 結果および考察

### 2.1 限界移植日, 早限と晩限出穂期, 出穂期および生育期別気象の変化

2030 年代予測気象 (以下, 2030 年代と記す) の限界移植日は, 17 地域平均 (以下, 同じ) で, 中苗と成苗別にそれぞれ 2010 年代気象 (以下, 2010 年代と記す) に比較したところ, 2010 年代の 5 月 16, 15 日に比べ CCSR では 8~10 日, CGCM1 では 7~9 日早い (表 5)。

**表 5 2010 年代気象および 2030 年代予測気象における水稲の中苗, 成苗の限界移植日 (水稲栽培 17 地域平均)**

統計項目	2010 年代(2010—2019 年平均)		2030 年代予測気象			
			CCSR		CGCM1	
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
平均	5-16	5-15	5-8	5-5	5-9	5-6
標準偏差	0.80	0.96	3.1	3.3	2.2	2.4
最小値	5-15	5-13	5-2	4-29	5-5	5-2
最大値	5-17	5-16	5-14	5-11	5-13	5-10

限界移植日 (移植早限) は図 6 参照。

早限および晩限出穂期は, 2010 年代のそれぞれ 7 月 19 日, 8 月 8 日に比べ CCSR では早限が 1 日早く, 晩限が 1 日遅く, 安全出穂期間は 2010 年代の 20 日に比べ 2 日長い。また, CGCM1 では早限と晩限が 2010 年代に比べいずれも 5 日それぞれ早い遅く, 安全出穂期間は 10 日長い (表 6)。

出穂期は, 中苗と成苗別にそれぞれ比較したところ (以下, 同じ), 2010 年代の 8 月 2 日と 7 月 29 日に比べ CCSR では 0~1 日, CGCM1 ではいずれも 3 日早い。その結果, 出穂猶予日数は 2010 年代の 5~9 日に比べ CCSR では 2 日, CGCM1 では 9 日長い (表 6)。

また, 生育期別の気象において, 平均気温は障害危険期 (期間の平均) で, 2010 年代の 21.1 °C との差が CCSR では -0.3 °C とやや低く, CGCM1 では 0.0 °C と同じである。また, 出穂前 10 日以降 40 日間 (期間の平均) および登熟期 (期間の積算) では, 2010 年代のそれぞれ 21.5 °C, 829~846 °C との差が, CCSR では 0.0 °C, +2~+6 °C とほぼ同じで, CGCM1 では +0.7 °C, +34~+40 °C と高い。一方, 日射量は出穂前 10 日以降 40 日間 (期間の平均) および登熟期 (期間の積算) とともに, 2010 年代のそれぞれ 15.2, 579 MJ/m<sup>2</sup> との比で CCSR では 95%~98%, CGCM1 では 96%~99% といずれもやや少ない (表 7)。

## 2.2 玄米収量および気候登熟量示数の変化

前述の項目 1.3 の方法 (1) と方法 (2) による 2030 年代の推定玄米収量は, 2010 年代のそれぞれ 568, 581 kg/10a との比で, 方法 (1) では CCSR が 97%, CGCM1 が 99%, 方法 (2) ではそれぞれ

95%, 97% といずれもやや低い。同方法 (3) の気候登熟量示数は, 2010 年代の 723 kg/10a との比で CCSR が 98%, CGCM1 が 101% とほぼ同じである (表 8)。これら方法 (1)~(3) の 2010 年代比の平均では, CCSR が 97% とやや低く, CGCM1 が 99% とほぼ同じである。

これは, 障害危険期の平均気温は最も多収となる 21.0 °C (表 4, 図 7) に比べ, 2010 年代と CGCM1 はいずれも 21.1 °C とほぼ同じで CCSR は 20.8 °C とやや低い。また, 出穂前 10 日以降 40 日間および登熟期の平均気温において, 玄米収量および気候登熟量指数が最も高くなる 22.1, 21.9 °C (表 4, 図 8) に比べ, 2010 年代は 20.9 (登熟気温 829~846 °C の平均気温, 以下同じ)~21.5 °C, CCSR は 21.0 (835~848)~21.5 °C といずれも低く, CGCM1 は 21.9 (869~880)~22.2 °C と近似する。一方, 日射量は 2010 年代の出穂前 10 日以降 40 日間の平均日射量 15.2 MJ/m<sup>2</sup> との比で CCSR, CGCM1 がそれぞれ 95%, 96% と低く, 同様に 2010 年代の登熟期の積算日射量 579 MJ/m<sup>2</sup> との比で 98%, 99% とわずかに低い。以上のことから, CCSR では障害危険期の平均気温が低く, 出穂前 10 日以降 40 日間および登熟期の日射量がやや少ないことが, 低収量の要因である (表 7)。

さらに, 直近の北海道における玄米収量と出穂前 10 日から 40 日間の平均日射量および同期間の平均気温との間の関係を, 日本でも多収である北海道 (559 kg/10a, 2010—2021 年の平均値, 以下同じ), 東北 6 県 (550~608 kg/10a) および最も多収である中部の長野県 (613 kg/10a) の 8 地域のデータで検討した (表 9)。北海道の玄米収量は, 8 地域の中で上から 5 位にあり, 北海道の同期間の平均気温は 21.8 °C で他の 7 地域の 23.5~25.8 °C に比べても玄米収量が最も高くなる 22.1 °C (表 4, 図 8) に最も近かった。しかし, 北海道の同期間の平均日射量 16.2 MJ/m<sup>2</sup> は玄米収量 2 位の青森県 16.3 MJ/m<sup>2</sup> とともに他の玄米収量上位 3 地域の 16.8~17.6 MJ/m<sup>2</sup> よりも少なかった。また, 供試 8 地域において同期間



表 6 2010 年代気象および 2030 年代予測気象における限界出穂日, 安全出穂期間および出穂期, 出穂猶予日数 (水稻栽培 17 地域平均)

統計項目	2030 年代予測気象																				
	CCSR						CGCM1														
	限界出穂期 (月/日)	安全出穂期間 (日)	出穂期 (月/日)	出穂猶予日数(日)	限界出穂期 (月/日)	安全出穂期間 (日)	出穂期 (月/日)	出穂猶予日数(日)	限界出穂期 (月/日)	安全出穂期間 (日)	出穂期 (月/日)	出穂猶予日数(日)									
平均値	7-19	8-8	20	8-2	7-29	5	9	7-18	8-9	22	8-2	7-28	7	11	7-14	8-13	30	7-30	7-26	14	18
標準偏差	3.3	5.8	7.5	2.5	2.2	7.0	6.7	3.9	7.3	9.6	2.2	2.1	8.4	8.2	4.3	5.8	7.3	2.1	2.0	6.0	6.0
最小値	7-13	7-28	6	7-29	7-26	-8	-3	7-14	7-28	1	7-30	7-25	-10	-5	7-4	8-6	17	7-26	7-23	4	8
最大値	7-24	8-22	38	8-6	8-2	22	26	7-27	8-25	41	8-7	8-2	25	29	7-21	8-26	44	8-3	7-30	27	31

早限出穂期, 晚限出穂期, 安全出穂期間および出穂猶予日数は図 6 参照。移植日は 5 月 25 日。

表 7 本試験における玄米収量, 気候登熟量示数, 食味関連形質および米粒外觀品質の推定に用いた 2010 年代気象および 2030 年代予測気象の生育期別気象 (水稻栽培 17 地域平均)

統計項目	2010 年代気象(2010-2019 年平均)												2030 年代予測気象												
	CCSR						CGCM1						CCSR						CGCM1						
	出穂前 24-30 日間平均気温/°C	出穂前 10 日以降 40 日間平均	出穂後 40 日間積算 日平均 気温(°C)	日射量 (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 24-30 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 10 日以降 40 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂後 40 日間積算 日平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 24-30 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 10 日以降 40 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂後 40 日間積算 日平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 24-30 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂前 10 日以降 40 日間平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )	出穂後 40 日間積算 日平均 気温/°C	日射量/ (MJ/m <sup>2</sup> )			
平均値	21.1	21.5	15.2	15.2	829	846	579	20.8	21.5	14.4	835	848	566	21.1	22.2	14.6	869	880	575	21.1	22.2	14.6	869	880	575
(同上差異, 比 <sup>1)</sup> )	-	-	(100) <sup>†</sup>	-	(100) <sup>†</sup>	-	(100) <sup>†</sup>	(-0.3)	(0.0)	(95) <sup>†</sup>	(6)	(2)	(98) <sup>†</sup>	(0.0)	(0.7)	(96) <sup>†</sup>	(40)	(34)	(99) <sup>†</sup>	(0.0)	(0.7)	(96) <sup>†</sup>	(40)	(34)	(99) <sup>†</sup>
標準偏差	0.27	0.59	0.65	35.8	32.3	26.9	0.38	0.64	0.61	35.1	31.1	19.1	19.1	0.37	0.48	0.60	27.9	25.1	20.4	0.37	0.48	0.60	27.9	25.1	20.4
最小値	20.8	20.5	14.4	764	789	541	19.9	20.1	12.8	765	784	519	519	20.3	21.2	13.2	817	831	522	20.3	21.2	13.2	817	831	522
最大値	21.7	23.0	16.0	918	927	630	21.5	22.6	15.4	901	907	595	595	21.9	23.1	15.6	922	926	604	21.9	23.1	15.6	922	926	604

同上差異, 比は, それぞれ平均値において 2030 年代予測気象の値から 2010 年代気象の値を差し引いた値, および 2010 年代気象を 100 としたときの 2030 年代予測気象の比率。とくに記載が無い場合, 中苗と成苗の平均。移植日は 5 月 25 日。出穂日は表 6 を参照。

表 8 2010 年代および 2030 年代予測気象の生育期別  
気象から推定される玄米収量および気候登熟量示数  
(水稲栽培 17 地域平均) kg/10a

統計 項目	2010 年代気象(2010 —2019 年平均)			2030 年代予測気象					
				CCSR			CGCM1		
	玄米 収量 <sup>†</sup>	玄米 収量 <sup>‡</sup>	気候登 熟量 示数	玄米 収量 <sup>†</sup>	玄米 収量 <sup>‡</sup>	気候登 熟量 示数	玄米 収量 <sup>†</sup>	玄米 収量 <sup>‡</sup>	気候登 熟量 示数
平均値	568	581	723	553	551	709	562	562	731
(同上 比/%)	(100)	(100)	(100)	(97)	(95)	(98)	(99)	(97)	(101)
標準偏 差	24.8	26.6	45.8	22.4	24.0	33.8	21.1	23.4	28.2
最小値	532	534	628	502	493	626	511	507	662
最大値	608	617	792	580	591	753	595	601	772

同上記は、平均値における 2010 年代気象を 100 としたときの 2030 年代予測気象の比率。玄米収量、<sup>†</sup> および<sup>‡</sup> はそれぞれ北海道 15 地域 1999—2006 年、北海道を含む全国多収 9 地域 1996—2021 年のデータからの回帰式 (表 4) による。気象データは表 7 による。

表 9 北海道を含む日本全国の多収 8 地域における玄米  
収量および出穂前 10 日以降 40 日間での平均気温と日  
射量 (2010—2021 年平均)

地域名 (県名)	玄米収量/ (kg/10a)		出穂前 10~40 日における平均値			
			日平均気温/°C		日射量(MJ/m <sup>2</sup> )	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD
北海道	559	25.7	21.8	0.73	16.2	1.61
東北 青森県	608	13.9	23.5	1.14	16.3	1.09
東北 岩手県	550	8.7	24.9	1.06	14.9	1.68
東北 宮城県	550	6.2	24.6	0.87	15.4	2.02
東北 秋田県	579	18.6	25.2	0.86	16.8	1.62
東北 山形県	608	14.7	25.8	0.87	17.6	1.65
東北 福島県	557	4.3	24.7	1.02	16.9	1.81
中部 長野県	613	10.8	24.6	0.85	17.6	1.84

各地域の緯度と経度は表 3、玄米収量は表 4 下段の脚注を参照。

の平均日射量が多いほど玄米収量は高かった ( $r = 0.725^*$ ,  $n = 8$ )。以上のことから、北海道では日本の他の多収地域に比べて、概して同期間の平均日射量が少ないことが玄米収量の制限要因となっていると考えられる。

### 2.3 穂ばらみ期冷害危険期の不稔発生リスクの変化

2030 年代の冷害危険期の平均気温は、6 地域平均で中苗と成苗別にそれぞれ比較したとこ

ろ、2010 年代の中苗と成苗での 21.6, 21.1 °C との差が CCSR では -0.3~0 °C とわずかに低く、CGCM1 では 0~+0.1 °C とほぼ同じである (表 10)。これらの値は 6 地域での 7 月平均の 2010 年代から 2030 年代への上昇気温である CCSR 0.2 °C, CGCM1 の 0.8 °C よりも低い。この理由は、5-7 月の気温上昇により水稲の生育が早まり、冷害危険期の暦日が 2010 年代よりも早い時期、すなわちより低温の時期へ移るためであると考えられる。

2010 年代では、冷害危険期の平均気温が 19 °C や 18.5 °C の不稔発生の危険性が高い年次は中苗ではなく、出穂がより早い成苗で北部、中央部 1 地域、太平洋側東部の計 3 地域で認められた。2030 年代ではそれら危険性が高い年次は中苗と成苗にかかわらずほぼ全域で見られるが、とくに北部、太平洋側東部および太平洋側西南部で、その中でも太平洋側東部および太平洋側西南部で同年次の比率がやや高い。(表 10)。

これら太平洋西部および太平洋側西南部地域は、春から夏に吹く冷たく湿った偏東風である「やませ」の流入により、7 月の気温変動が大きい地域である。これら地域でも、2010 年代では比較的安定した気象となっているが、本試験で 2030 年代の平均気温の変動の算出に用いた 1978—2000 年のような気象変動が生じた場合には、その不稔発生への影響は 2030 年代でも小さくないと思われる。いずれにしても、不稔発生の懸念がある気温に遭遇する可能性は検討対象とした全 6 地域で認められ、障害型冷害発生リスクは 2030 年代でも残ると考えられる。

### 2.4 食味および米粒外観品質の変化

精米蛋白質含有率は 2030 年代では中苗と成苗のいずれも、2010 年代の 7.4% (17 地域平均、以下同じ) と同じである。アミロース含有率は、中苗と成苗別にそれぞれ比較したところ (以下、同じ)、2010 年代の 20.4%, 20.2% との差が、CCSR では -0.1~0 ポイントとほぼ同じであるが、CGCM1 では -0.5 ポイントと低い (表 11)。

表 10 1978—2000 年と 2010 年代気象 (2010—2019 年平均) および 2030 年代予測気象 (CCSR と CGCM1) における穂ばらみ期冷害危険期の平均気温および不稔発生の危険性が高い同冷害危険期の平均気温 19 °C 以下と 18.5 °C 以下の年次の比率

項目	気温の種別	苗種	北部		中央部		太平洋側東部	太平洋側西南部	平均	
			土別市	旭川市	深川市	岩見沢市	厚真町	北斗市		
冷害危険期の平均気温/°C	1978—2000 年	中苗	21.3	21.4	21.4	21.6	21.0	21.5	21.4	
		成苗	20.8	20.6	20.5	20.5	20.6	20.5	20.6	
	2010 年代	中苗	21.8	22.4	21.3	21.4	21.3	21.3	21.6	
		成苗	20.7	22.2	20.9	21.6	20.2	21.1	21.1	
	2030 年代予測気象	CCSR	中苗	21.5	21.5	21.6	21.7	21.6	21.4	21.6
			成苗	20.9	20.8	21.0	21.1	20.5	20.7	20.8
		CGCM1	中苗	21.7	21.7	21.8	21.9	21.6	21.4	21.7
			成苗	21.1	21.2	21.4	21.6	20.6	20.8	21.1
	平均気温 19°C 以下の年次/%	1978—2000 年	中苗	22	9	4	17	9	4	11
			成苗	17	26	13	17	22	30	21
2010 年代		中苗	0	0	0	0	0	0	0	
		成苗	10	0	10	0	20	0	7	
2030 年代予測気象		CCSR	中苗	9	0	4	4	9	9	6
			成苗	9	9	0	4	13	13	8
		CGCM1	中苗	4	4	0	4	9	9	5
			成苗	9	0	0	0	9	13	5
平均気温 18.5 °C 以下の年次/%		1978—2000 年	中苗	17	0	0	0	4	4	4
			成苗	13	9	9	9	13	17	12
	2010 年代	中苗	0	0	0	0	0	0	0	
		成苗	10	0	10	0	10	0	5	
	2030 年代予測気象	CCSR	中苗	0	0	0	0	4	9	2
			成苗	4	4	0	4	13	13	7
		CGCM1	中苗	0	0	0	0	4	9	2
			成苗	4	0	0	0	4	13	4

作柄が安定している中央部 3 地域、および比較的不安定な 3 地域を示した。穂ばらみ期の冷害危険期は発育指数 (DVI) が 1.4~1.7 に該当する期間とした (表 2)。本表での 2030 年代予測気象は、1978—2000 年の各年のアメダスポイント気温に、1971—2000 年データ観測によるアメダスメッシュの気温と 2030 年代予想気温との気温差を加算して求めた。

表 11 2010 年代気象および 2030 年代予測気象の出穂後 40 日間日平均積算気温から推定されるアミロース含有率と精米蛋白質含有率 (水稲栽培 17 地域平均) %

統計項目	2010 年代気象 (2010—2019 年平均)				2030 年代予測気象							
	中苗		成苗		CCSR				CGCM1			
	アミロース含有率	精米蛋白質含有率	アミロース含有率	精米蛋白質含有率	アミロース含有率	精米蛋白質含有率	アミロース含有率	精米蛋白質含有率	アミロース含有率	精米蛋白質含有率	アミロース含有率	精米蛋白質含有率
平均値	20.4	7.4	20.2	7.4	20.3	7.4	20.2	7.4	19.9	7.4	19.7	7.4
(同上差異, ポイント)	-	-	-	-	(-0.1)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(-0.5)	(0.0)	(-0.5)	(0.0)
標準偏差	0.49	0.08	0.44	0.06	0.48	0.07	0.43	0.05	0.38	0.07	0.34	0.08
最小値	19.2	7.4	19.1	7.4	19.4	7.4	19.4	7.4	19.1	7.4	19.1	7.4
最大値	21.3	7.7	21.0	7.6	21.3	7.7	21.0	7.5	20.6	7.6	20.4	7.6

同上差異は、平均値において 2030 年代予測気象の値から 2010 年代気象の値を差し引いた値。アミロース含有率と精米蛋白質含有率の推定式と出穂後 40 日間の日平均積算気温は、それぞれ表 4 および表 7 による。

玄米白度は 2010 年代の 18.8, 19.1 との差が、CCSR では 0~+0.1 とほぼ同じで、CGCM1 では +0.5~+0.6 と高い。精米白度は 2010 年代の 37.7,

37.8 との差が、CCSR では -0.1 とほぼ同じで、CGCM1 では +0.3 とわずかに高い (表 12)。未熟粒歩合は 2010 年代の 11.1%, 11.9% との

表 12 2010 年代気象および 2030 年代予測気象における生育期別気象から推定される玄米白度と精米白度 (水稲栽培 17 地域平均)

統計項目	2010 年代気象(2010—2019 年平均)		2030 年代予測気象									
			CCSR		CGCM1							
	玄米白度	精米白度	玄米白度	精米白度	玄米白度	精米白度	玄米白度	精米白度				
	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗	中苗 成苗				
平均値	18.8	19.1	37.8	37.7	18.9	19.1	37.7	37.6	19.4	19.6	38.1	38.0
(同上差異)	-	-	-	-	(0.1)	(0.0)	(-0.1)	(-0.1)	(0.6)	(0.5)	(0.3)	(0.3)
標準偏差	0.56	0.51	0.40	0.35	0.55	0.49	0.41	0.37	0.44	0.40	0.35	0.32
最小値	17.8	18.2	37.1	37.1	17.8	18.1	36.7	36.7	18.6	18.8	37.3	37.3
最大値	20.2	20.3	38.7	38.6	19.9	20.0	38.5	38.3	20.3	20.3	38.7	38.5

同上差異は、平均値において 2030 年代予測気象の値から 2010 年代気象の値を差し引いた値。玄米白度と精米白度の推定式および生育期別気象は、それぞれ表 4 および表 7 による。

差が、CCSR では 0~+0.2 ポイントとほぼ同じで、CGCM1 では+2.9~+3.4 ポイントと高い(表 13)。なお、この増加する未熟粒は、登熟気温の上昇により発生する白未熟粒である。被害粒歩合では 2010 年代の 3.6, 4.5%との差が、CCSR では+1.1~+1.3 ポイント, CGCM1 では-1.2~-0.8 ポイントと一定の傾向がない。着色粒歩合も 2010 年代の 0.11, 0.12%との差が、CCSR では+0.02~+0.03 ポイント, CGCM1 では-0.05~-0.04

ポイントと一定の傾向がない。

以上のことから、2030 年代は 2010 年代に比べ精米蛋白質含有率は同じで、アミロース含有率がやや低く、やや良食味である。被害粒と着色粒の発生には一定の傾向が見られないが、未熟粒がやや多くなる。また、玄米白度がやや高く、精米白度は同じである。

近年、西南暖地を中心に白未熟粒の多発による品質低下が問題となっている。これまでの報告<sup>[19-20]</sup>から、出穂後 20 日間の平均気温が 26~27 °C をこえると、検査等級が低下するまで同発生率が高くなる。しかし、本試験の 2030 年代の予測気象の中で登熟気温がより高くなる CGCM1 (表 7) では、出穂後 20 日間の平均気温は、北海道中央部の深川市で 23.5 °C, 旭川市で 22.5 °C であり、北海道南部の江差町で 23.3 °C, 北斗市で 23.0 °C であり、いずれも 26°C よりもかなり低い。以上のことから、2030 年代の平均的な気象条件において、白未熟粒の発生による検査等級の低下が生じる危険性は低いと考えられる。ただし、北海道品種は冷涼な北海道の気象条件下で選抜育成されており、東北以南の品種に比べ低い気温域で白未熟粒を多く発生させる可能性があるため、注意が必要である。

表 13 2010 年代気象および 2030 年代予測気象における生育期別気象から推定される玄米外観品質 (水稲栽培 17 地域平均 %)

統計項目	2010 年代気象 (2010—2019 年平均)						2030 年代予測気象											
	未熟粒歩合		被害粒歩合		着色粒歩合		CCSR		CGCM1									
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗						
平均値	11.1	11.9	3.6	4.5	0.11	0.12	11.3	12.0	4.7	5.8	0.13	0.15	14.0	15.3	2.5	3.7	0.07	0.09
(同上差異, ポイント)	-	-	-	-	-	-	(0.2)	(0.0)	(1.1)	(1.3)	(0.02)	(0.03)	(2.9)	(3.4)	(-1.2)	(-0.8)	(-0.05)	(-0.04)
標準偏差	3.01	3.53	1.91	1.76	0.06	0.06	2.53	2.81	2.30	2.11	0.07	0.06	3.69	3.75	1.75	1.86	0.05	0.05
最小値	9.2	9.3	0.0	0.5	0	0	9.2	9.3	0.6	1.9	0.00	0.03	9.4	10.0	0.0	0.0	0.00	0.00
最大値	21.5	23.4	7.0	7.5	0.22	0.22	18.1	19.3	10.3	11.0	0.30	0.30	22.4	23.3	7.2	8.3	0.20	0.22

同上差異は、平均値において 2030 年代予測気象の値から 2010 年代気象の値を差し引いた値。玄米外観品質の推定式および生育期別気象は、それぞれ表 4 と表 7 による。

### 2.5 いもち病の発生

2030 年代には 6, 7 月において、平均気温が 2010 年代のそれぞれ 16.1, 20.6 °C に比べ CCSR, CGCM1 ではそれぞれ +0.2~+0.3 °C, +0.9 °C 上昇し、降水量が 2010 年代のそれぞれ 86, 122 mm

に比べ 1.21, 1.54 倍, 1.20, 1.38 倍と増加する。いもち病の発生適温は 20~25 °C とされ、降水によるいもち病菌の発芽・侵入に必要な水滴の供給がその発生を助長する<sup>[21]</sup>。そのため、いもち病の初発が早まり、いもち病の発生増加は避け

られないと思われる。

### 3 2030年代の予測に基づく技術的対応方向

#### 3.1 耐冷性

2030年代では2010年代に比べ限界移植日と早限出穂期が早く晩限出穂期が遅いため、水稻の安全出穂期間が長く、遅延型冷害の危険性はやや低い。一方、春季の気温上昇のため水稻の生育が促進されることは、同一熟期の品種でみると生育期の前進により、冷害危険期の平均気温は同じかやや低いため、障害不稔発生の危険性は残る。以上のことから、今後も育成品種の障害型耐冷性向上や深水灌漑などの冷害対策技術の重要性は変わらないと考えられる。また、生育の前進により出穂期が早限出穂期よりも早くならないように、品種の早晚性、苗の種類および移植時期を適切に組み合わせる必要がある。

#### 3.2 玄米収量と作付け品種の熟期

玄米収量は、出穂前10日から登熟期にかけての日射量と障害危険期の平均気温が制限要因となり、2010年代並かやや低下すると予測された。一方、実際に一定収量を得るためには、出穂期までの栄養成長期に必要な $m^2$ 当たり初数を確保しなければならない。そのためには、移植から出穂までの期間が長いほうが有利である。そこで、2030年代までの期間も含めて、現行の栽培品種については作付けの地帯区分を気候変化に合わせて見直すとともに、生育期間が大きく延長する地帯については、一定の収量を安定して得られる出穂期を見出し、その熟期を備えた品種を育成する必要がある。

例えば、前述のように、北海道の水稻栽培地域の2030年代の水稻栽培期間の平均気温(5月-9月の日平均積算気温)は、青森県太平洋側に相当する(表1)。移植から出穂期までの期間は2010-2019年平均で、北海道が5月25日-7月30日、青森県が5月20日-8月4日であり、青森県は移植期が5日早く、出穂期が5日遅い(表3)。登熟期間に大きな差異がないとすれ

ば、生育期間は青森県が10日長い。さらに、青森県では出穂前10日以降40日間の日射量が北海道と同等であるが、玄米収量は北海道比109%と多収であった(表9)。今後、青森県の多収要因を参考にして、北海道の2030年代に必要な多収技術を明らかにする必要がある。

#### 3.3 食味および米粒外観品質

これまで北海道の水稻育種ではアミロース含有率と精米蛋白質含有率の低下を目標に行い、主にアミロース含有率を低下させることにより良食味化を成し遂げ<sup>[22]</sup>、精米蛋白質含有率の低下程度は大きくはなかった。一般に、出穂が遅い品種ほど登熟気温が低下しアミロース含有率は高くなるが、精米蛋白質含有率は低下することが認められている<sup>[4]</sup>。また、アミロース含有率を育種により低下させることは比較的容易である。以上のことから、2030年代では現在よりも長い生育期間を有効に活用し、現在の主要な中生品種よりも熟期が遅くアミロース含有率が低い品種を作付けすることにより、さらに低蛋白化による食味向上を図れる可能性がある。

米粒外観品質では、玄米白度がやや向上するが、白未熟粒の発生がやや増えると予測された。とくに、登熟期の高温の影響による発生だけでなく、生育初期の気温上昇により分げつ発生が促進され、 $m^2$ 当たり初数が過剰になることで1初当たりの登熟期の光合成量が不足し、白未熟粒が多発生する危険性が高まる。そのため、施肥量を適正にするとともに、過剰分げつが発生した場合には深水による分げつ抑制を行う<sup>[23]</sup>

現在の北海道では、粒厚選別機の篩目幅を概ね1.95 mmと広くして、登熟未了の粒を屑米として除外することにより、精玄米の外観品質を高めている<sup>[24]</sup>。今後、温暖化により初期生育が良くなり穂揃い性が高まり、登熟気温が高くなれば、従来の未熟粒が十分に登熟でき整粒となることができる。その場合、篩目幅を狭くしても高い外観品質が確保できるので、収穫した粗玄米にあわせた篩目幅の適切な調節が必要となる。

### 3.4 苗種および施肥対応

これまで北海道では生育期間が限定され、安定生産と良食味米生産のため初期生育を促進することが重要とされた。そのため、基準の栽植密度を遵守し、苗では稚苗、中苗より成苗と葉令が進み、施肥法では側条施肥など初期生育を促進する方法が奨励されている。しかし、栽植密度を高く維持することおよび葉令の進んだ苗を使用することは、育苗箱の必要な枚数は増え、後者はさらに育苗期間が長くなることから、育苗の労力とコストが生産者にとり大きい負担となる。また、春季の気温上昇により、葉令が進んだ苗では育苗ハウスでの高温により早期異常出穂を起こす危険性が高まる<sup>[25]</sup>。

一方、東北地域でも緯度が高く比較的気象が冷涼な青森県、次いで秋田県では、その他の地域と異なり稚苗よりも中苗と成苗が多い<sup>[26]</sup>。そのため、2030年代の北海道でも初期生育の重要性は変わらないと思われるが、安定生産を損なわない範囲で、葉令が小さな苗種の活用を図ることが必要と思われる。

現在の北海道ではほとんどが基肥のみの施肥による。しかし、生育期間が長い条件では、初期生育の促進により栄養成長期の途中まで肥料成分の大半を吸収してしまい、肥料切れを生じる可能性が高まることから、分施や緩効性肥料の利用場面が増えると推察される。

### 3.5 いもち耐病性の強化

いもち病の発生増加に対する防除法については、東北地域、その中でも前述したように5—9月の積算気温からみれば青森県で行われている対策を実施すれば対応可能と思われる。しかし、いもち病の発生には日射量や降水量も影響することから、それらの違いによりいもち病発生がどう変わるか留意が必要である。一方、近年は農薬散布量を少なくすることが社会から求められていることから、それに対応した防除法も合わせて検討するとともに、従来よりもいもち耐病性が強い品種を育成し普及させる必要がある。

### 3.6 その他

将来的に融雪の促進により5月の河川流量が減少することが予測されており<sup>[27]</sup>、地域によっては、灌漑用水確保の面で制約が生じる可能性を見込んでおく必要がある。

#### 引用文献:

- [1] 農林水産省大臣官房統計部編. 作況調査(水陸稲, 麦類, 豆類, かんしょ, 飼料作物, 工芸農作物)[R]. 農林水産省 統計情報 分野別分類/作付面積・生産量, 被害, 家畜の頭数など 作物統計(1996~2021). [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou\\_kome/index.html\(2022/5/25 閲覧\)](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html(2022/5/25 閲覧)).
- [2] HAYASE H, SATAKE T, NISHIYAMA I, et al. Male sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage in rice plants. II The most sensitive stage to cooling and fertilizing ability of pistils[J]. Proc. Crop Sci. Soc. Japan, 1969, 38: 706-711.
- [3] 稲津脩. 北海道産米の食味向上による品質改善に関する研究[R]. 北海道立農農業試験場報告, 1988, 66: 1-89.
- [4] 菊地治己. イネの胚乳成分に関する育種学的研究[R]. 北海道立農農業試験場報告, 1988, 68: 1-68.
- [5] 丹野久. 日本の寒地, 北海道のうるち米における精米蛋白質含有率とアミロース含有率の年次間地域間差異とその発生要因(日文)[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 66-74.
- [6] 五十嵐俊成. 高温年における米の「腹白」「乳白」などの発生について[J]. 農家の友, 2014, 66(1): 41-43.
- [7] 北海道, 北海道米麦改良協会. 水稲地帯別栽培指標の手引. 北海道の米づくり「水稲地帯別栽培指標の手引」, 「良質米安定生産技術」[M]. 札幌; 北海道米麦改良協会, 1989: 1-91.
- [8] 竹川昌和. 気象条件から求めた地帯別水稲品種選定の基準 —とくに アメダスゾーン メシユ について—[N]. 北海道立農試集報, 1991, 63:41-52.
- [9] 林陽生, 石郷岡康史, 横沢正幸, 等. 温暖化が日本の水稲栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト[J]. 地球環境, 2001, 6(2): 141-148.
- [10] 丹野久. 日本の寒地, 北海道におけるうるち米粒外観品質の年次間地域間差異とその発生要因(日文)[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 86-96.
- [11] 中辻敏朗. 温暖化気候データの整備. 北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場 志賀弘行・中辻敏朗編, 戦略研究「地球温暖化と生産構造の変化に対応できる北海道農林業の構築—気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測—」成果集 平成 23 年 10 月[R]. 北海道立総合研究機構農業試験場資料, 2011, 39: 2-6.
- [12] 丹野久. 地球温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向(2030年代の予測) 2. 水稲における影響予測[J]. 北農, 2012, 79(1): 72-81.
- [13] 北海道農政部 生産振興局農産振興課編. 米に関する資料

- [生産・価格・需要](令和3年11月)[R]. 北海道農政生産振興局農産振興課 kome 北海道の水田農業(2021). <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/nsk/kome/index3.html>(2022/5/20 閲覧).
- [14] YOKOZAWA M, GOTO S, HAYASHI Y, et al. Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration[J]. J. Agric. Meteorol., 2003, 59: 117-130.
- [15] 鎌田金英治, 福田兼四郎. 農業気象的にみた秋田県における水稲の地帯区分と冷害危険度・安全作期[N]. 秋田県農試研報, 1983, 25: 33-57.
- [16] 北海道立中央農業試験場, 上川農業試験場. 水稲の発育ステージおよび不稔歩合の推定法[R]. 北海道立総合研究機構 農業研究本部 農業技術情報広場 北海道農業試験場試験研究一覧(1997). [https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/seikajoho/h09s\\_joho/h0900022.htm](https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/seikajoho/h09s_joho/h0900022.htm)(2022/6/3 閲覧).
- [17] 堀江武, 中川博視. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第1報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適応[J]. 日作紀, 1990, 59(4): 687-695.
- [18] 村田吉男. わが国の水稲収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について[J]. 日作紀, 1964, 33(1): 59-63.
- [19] 若松謙一, 佐々木修, 上菌一郎, 等. 暖地水稲の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響[J]. 日作紀, 2007, 76(1): 71-78.
- [20] 森田敏. イネの高温登熟障害の克服に向けて[J]. 日作紀, 2008, 77(1): 1-12.
- [21] 大畑貫一. いもち病. 稲の病害一診断・生態・防除一[M]. 東京; 全国農村教育協会, 1989: 295-356.
- [22] 沼尾吉則. 北海道米の良食味品種育成について[J]. 北農, 2009, 76(3): 336-342.
- [23] 北海道立中央農業試験場, 上川農業試験場. 「きらら 397」の栽培特性[R]. 北海道立総合研究機構 農業技術情報広場 北海道農業試験場試験研究成果一覧(1992). <https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h04gaiyo/1991001.htm>(2022/5/25 閲覧).
- [24] 川村周三. 米の収穫後技術による品質・食味の向上. 松江勇次編著, 米の外観品質・食味 一最新研究と改善技術一[M]. 東京; 養賢堂, 2018: 393-417.
- [25] 北海道立総合研究機構上川農業試験場, 中央農業試験場. 成苗ポット苗における早期異常出穂抑制技術[R]. 北海道立総合研究機構 農業技術情報広場 北海道農業試験場試験研究成果一覧(2014). <http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/26/f1/12.pdf>(2022/5/22 閲覧).
- [26] 藤井薫. 寒地(東北・太平洋側)の育苗様式. 農文協編, 稲作大百科Ⅳ 栽培様式/管理の実際[M]. 東京: 農山漁村文化協会, 1990: 25-38.
- [27] 井上聡, 横山宏太郎, 大野宏之, 等. 地球温暖化にともなう国内の降雪量減少の河川への影響[J]. 地球環境, 2001, 6(2): 259-266. 完