

水稻白未熟粒発生予測モデル構築のための登熟期の気象条件および生育状態と白未熟粒発生状況の解析

誌名	農業気象
ISSN	00218588
著者名	脇山, 恭行 大原, 源二 丸山, 篤志
発行元	養賢堂
巻/号	66巻4号
掲載ページ	p. 255-267
発行年月	2010年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



水稲白未熟粒発生予測モデル構築のための登熟期の気象条件および生育状態と白未熟粒発生状況の解析

脇山恭行*・大原源二**・丸山篤志*

(*九州沖縄農業研究センター)

(**中央農業総合研究センター)

Developing a model to predict the incidence of immature rice kernel by analyzing the incidence of immature kernel with white portion caused by meteorological and growth conditions during the ripening period

Yasuyuki WAKIYAMA*, Genji OHARA**, and Atsushi MARUYAMA*

(*National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa region, Koshi, Kumamoto, 861–1192, Japan)

(**National Agricultural Research Center, Tsukuba, Ibaraki, 305–8666, Japan)

Abstract

Data were analyzed to develop a model for predicting the incidence of immature rice kernels with white portions of the Hinohikari cultivar. The coefficient of determination (r^2) between the incidence of white-based rice kernels and mean air temperature for 20 days after heading was high. Therefore, fitting a curve between these two parameters is a viable means of developing a prediction model for the incidence of white-based rice kernels. Milky white rice kernels are caused by high temperatures that accelerate the respiration rate of the rice plant, a lack of solar radiation, over-dense rice grains per m^2 and low leaf blade nitrogen content, as well as heat that induces some ripening damage. Using these determinants, the following evaluation indicator was proposed:

$$DMG = SR \times \alpha \times RUE / Gr$$

where SR is solar radiation, α the absorptance of solar radiation by the community of rice plants, RUE the radiation use efficiency and Gr the number of rice grains per m^2 . RUE could be influenced by air temperature and leaf blade nitrogen content. The relationship between air temperature and RUE was investigated considering the leaf color, which represents the leaf blade nitrogen content of the Koshihikari cultivar. RUE decreased with increasing air temperature and a high leaf color kept RUE high. The equations of the relationship between RUE and air temperature, and the leaf color value, express the influence of high temperature and leaf color on dry matter production. DMG of Hinohikari was successfully calculated by the same equation with an additional parameter. DMG_{HN} for Hinohikari was plotted for the incidence of milky white rice kernels. The coefficient of determination between milky white rice kernels and DMG_{HN} was high ($r^2=0.65$). The following model used to predict the incidence of milky white rice kernels was obtained:

$$I_{MWK} = 52.3 \exp(-599.9 \times DMG_{HN})$$

where I_{MWK} was the incidence of milky white rice kernels (%).

Key words: Dry matter production per grain, Immature rice kernel with white portion, Leaf color, Meteorological information, RUE.

キーワード: 気象情報, 白未熟粒, 日射利用効率, 籾あたり乾物生産量, 葉色

1. はじめに

最近、水稻の登熟期の気温が高温で推移するために白未熟粒が多発し、玄米の外観品質低下を招く、高温登熟障害の発生が各地で問題となっている (Terashima *et al.*, 2001; Kondo *et al.*, 2005; Matsumura, 2005; Morita, 2008)。外観品質の低下は、落等要因となり農家の収入の減少をもたらすため、深刻である。さらに、白未熟粒の中でも乳白粒の割合が高まると食味が低下することや (Wakamatsu *et al.*, 2006)、搗精時に砕けやすくなる等、加工時に問題が生じやすくなることが指摘されている (Morita, 2008)。

白未熟粒は、主に登熟期の生理的障害すなわち高温による転流やデンプン合成の阻害により発生するものと考えられている (Morita, 2008)。このほか、白未熟粒の中でも乳白粒や心白粒の発生は、日射不足によりデンプンの蓄積が不十分になるため (Nagato, 1952; Kondo *et al.*, 2005; Wakamatsu *et al.*, 2006)、籾数過多により籾あたり乾物生産量が不足するため (Kobata *et al.*, 2004; Matsumura, 2005; Takahashi, 2006)、登熟期に葉身中の窒素含量が減少し光合成速度が低下するため (Kobata *et al.*, 2004) と考えられている。また、水稻の収量は登熟期の気温が高いと減少する (Murata, 1964; Uchijima and Hanyu, 1967; Wakiyama *et al.*, 2003; Peng *et al.*, 2004)。このことは、登熟期の高温が呼吸速度の増加により同化産物を消耗させ、乾物生産量を減少させることを示唆するが、乾物生産量の減少は白未熟粒の発生も助長していると考えられる。

対策として、高温登熟耐性を備えた新品種の育成、灌漑水のかけ流しによる稲体熱環境の緩和、登熟期の高温を避けるために移植時期を遅らせる、葉身中の窒素含量を保つための追肥の奨励、十分な籾あたり乾物生産量を確保するための適正籾数の設定等、様々な対策が検討されている (Matsumura, 2005; Takahashi, 2006)。

対策の1つとして上げられている適正籾数の設定は、登熟期の乾物生産と深く関わっているため、乾物生産に及ぼす日射量、群落の日射吸収能、光合成速度を左右する葉身中の窒素含量の影響を考慮して行う必要があると考えられる。これらのほか、登熟期の高温は同化産物を消耗させるため、登熟期の気温の影響も加える必要があると考えられる。すなわち、適正籾数を設定するためには、気象条件や水稻の生育状態を組み入れた白未熟粒の発生予測モデルが必要である。モデルを開発することによって、登熟期の日射、気温の気象条件だけでなく、葉面積指数や葉色などの水稻の生育状態に応じた籾数設定が可能になるものと考えられる。また、対策の1つである作期移動

を実施する場合にも有益な情報を提供できるものと考えられる。さらに、外観品質低下に伴う農家の収入減に対する補償には、共済組合の利用が考えられるが、発生予測モデルを用いて収穫前におおよその白未熟粒の発生状況が予測できれば、共済申請の判断材料ともなりうる。

白未熟粒の発生予測に関する研究では、Nakagawa *et al.* (2008) の乳白粒の発生予測モデルについての報告がみられる。Nakagawa *et al.* (2008) は、ポットおよび実験圃場で栽培した水稻の生育情報をもとに、乳白粒の発生と籾あたり同化産物供給量との関係を用いた予測モデルを開発し、精度の高いことを報告している。

本研究は、生産現場で利用できる白未熟粒の発生予測モデル構築に必要な知見を得ることを目的とした。特に、白未熟粒のうち乳白粒の発生は、登熟期の乾物生産量と深く関わっていると考えられたことから、登熟期の乾物生産量と発生状況との関係を調べ、気象情報と出穂期の生育情報から発生状況を収穫前に把握できないか検討した。このため、まず①登熟期の乾物生産を、気温と葉色が日射利用効率に及ぼす影響を通して評価し、②乳白粒発生と乾物生産の関係を解析した。なお、①にはコシヒカリを②にはヒノヒカリを供試して実施した。解析に用いた気象情報と作物生育情報は、モデルの利用場面を想定して、アメダスデータと農政事務所、農業改良普及センター、農業共済組合で実施されている草丈、莖数、葉色の生育調査データを利用した。

2. 材料および方法

2.1 コシヒカリを対象にした登熟期の気温および葉色と日射利用効率との関係に関する検討

登熟期の高温や葉色は、ともに登熟期の乾物生産に影響を及ぼしており、日射利用効率 (RUE) に大きく関わっていると考えられた。そこで、高温と葉色の影響を RUE で評価するために、農家水田における調査を実施した。

調査は、2005年と2006年にコシヒカリを対象に長野県、栃木県、茨城県内のアメダス観測地点周辺の農家水田において行った。Table 1には各アメダス観測地点の緯度、経度、標高を示した。調査圃場は、各アメダス観測地点を中心とした半径5 km以内にある1点の農家水田を選んだ。

生育調査は、出穂期に草丈、莖数、地上部乾物重、葉色、移植密度を測定した。草丈、莖数、地上部乾物重は、10株を対象に測定を行った。葉色は、その10株のうち5株を対象に、1株中で最も草丈の高い茎の上位4葉の葉色を葉緑素計 (SPAD-502, コニカミノルタ) で測定し、SPAD値を記録した。なお、SPAD値はSPAD-502で測定した指示値であり、葉身中の窒素含量と相関が高い

Table 1. Location of AMeDAS observatory, Japan Meteorological Agency, close to observed paddy fields in Nagano, Tochigi and Ibaraki prefectures.

Prefecture	AMeDAS observatory	Latitude	Longitude	Elevation
Nagano	Iiyama	N36° 52.4'	E138° 22.5'	313 m
	Omachi	36 31.4	137 50.0	784
	Hotaka	36 20.6	137 52.9	540
Tochigi	Kuroiso	36 58.9	140 1.1	343
	Otawara	36 50.4	140 2.1	188
	Mooka	36 28.7	139 59.2	91
	Oyama	36 20.3	139 49.8	44
	Mito	36 22.8	140 28.0	29
Ibaraki	Shimodate	36 16.0	139 59.3	24
	Koga	36 12.1	139 43.0	20
	Hokota	36 10.0	140 31.6	32
	Shimozuma	36 10.0	139 56.8	20
	Tsuchiura	36 5.7	140 12.4	26
	Tsukuba	36 3.4	140 7.5	25
	Ryugasaki	35 53.4	140 12.7	4

(Takebe and Yoneyama, 1989)。葉色の測定は、上位4葉の各葉について葉身の先端部、中央部、基部で、葉身中央の葉脈を挟んで2カ所ずつ計6点で行い、平均した値を各葉のSPAD値とし、さらに上位4葉の平均したSPAD値を解析に用いた。また、出穂期の地上部乾物重を用いて、以下の方法で葉面積指数(LAI)を求めた。まず、生育調査で得られた株あたりの地上部乾物重に葉身乾物重の割合を乗じて葉身乾物重を求めた。次に、葉身乾物重あたりの葉面積を乗じ株あたりの葉面積を算出し、移植密度からLAIを推定した。地上部乾物重に対する葉身乾物重の割合と葉身乾物重あたりの葉面積は、一部の生育調査で求めた。すなわち、株を地際から刈り取り葉身とそのほかの部分(茎と葉鞘、穂、枯死葉)に分解し、葉面積計(面積計AAM-9型、林電工)で葉面積を測定した。続いて、葉身とそのほかの部分の乾物重を測定し、葉身とそのほかの部分を含めた地上部乾物重に対する葉身乾物重の割合と、葉身乾物重あたりの葉面積を求めた。収量調査では、坪刈りを行い玄米収量を測定した。

気温、日射量は、アメダスデータを用い、日射量は以下の式を用いてアメダスの日照時間から推定した(Kondo *et al.*, 1991)。

$$S_d/S_{d0} = 0.244 + 0.511(N/N_0) \quad 0 < N/N_0 \leq 1 \quad (1)$$

$$S_d/S_{d0} = 0.118 \quad N/N_0 = 0 \quad (2)$$

ここで、 S_d は日射量(MJ/m²)、 S_{d0} は大気上端の水平面日射量(MJ/m²)、 N はアメダスの日照時間(時間)、 N_0 は可照時間(時間)である。RUEは以下の式により求めた。

$$RUE = \frac{DM}{SR \times \alpha} \quad (3)$$

ここで、RUEは日射利用効率(g/MJ)である。DMは登熟期の乾物生産量で、本研究では水分含量を0%に変換した玄米収量(g/m²)を用い、登熟期間中に茎葉などに蓄積された同化産物(Jiang *et al.*, 1988)や出穂前に茎葉に蓄積されていた同化産物(Saitoh *et al.*, 1991)については考慮しなかった。SRは出穂期から35日間の日射量(MJ/m²)、 α は出穂期における群落の日射吸収率である。 α は以下の式より求めた(Horie and Sakuratani, 1985)。

$$\alpha = 1 - r - (1 - r_0)\tau \quad (4)$$

$$r = r_f - (r_f - r_0)\exp(-kr \times F) \quad (5)$$

$$\tau = \exp(-k \times F) \quad (6)$$

ここで、 r は群落の日射反射率、 r_0 は裸地の反射率(0.1)、 τ は群落内の日射透過率、 r_f は地面が完全に植被で覆われたときの反射率(0.22)、 kr は葉面積指数と群落の日射反射率との関係特徴づける係数(0.5)、 F は葉面積指数、 k は群落の吸光係数(0.45)である。

登熟期の生産性について、気候登熟量示数などを用いて論じる場合、出穂期から40日間 (Murata, 1964; Uchijima and Hanyu, 1967) の日射量、平均気温を利用するケースが多いが、本研究では出穂期から35日間の日射量と平均気温を用いた。これは、最も登熟期間の短かった調査水田では、登熟期間が40日に満たなかったためである。

2.2 コシヒカリから導いた気温および葉色と RUE の関係式のコシヒカリへの適用に関する検討

コシヒカリの生育、収量データを用いて導いた気温および葉色と RUE の関係式を使って白未熟粒の発生状況の解析を行うにあたり、この関係式が品種の異なるヒノヒカリへ適用可能か検討した。すなわち以下の (7) 式を用いてヒノヒカリの登熟期の乾物生産量を推定し、実測した乾物生産量と比較した。

$$DM = SR \times \alpha \times RUE \quad (7)$$

ここで、DM は推定する登熟期の乾物生産量 (g/m^2) である。SR は出穂期から35日間の日射量 (MJ/m^2)、 α は出穂期の群落の日射吸収率、RUE はコシヒカリから導いた気温および葉色と RUE の関係式から求めた値である。実測した乾物生産量には、水分含量を0%に変換した玄米収量を用いた。

2.3 農家水田における水稲の生育および玄米の外観品質調査

登熟期の気象条件および水稲の生育状態と白未熟粒発生状況の関係を解析するために、農家水田において水稲の生育および玄米の外観品質調査を実施した。調査は、2007年と2008年にヒノヒカリを対象に大分県、熊本県内のアメダス観測地点周辺の農家水田で行った。Table 2には各アメダス観測地点の緯度、経度、標高を示した。調査圃場は、アメダス観測地点を中心とした半径5 km以内にある2~3点の農家水田を選んだ。

生育調査は出穂期に行い、草丈、莖数、葉色、地上部乾物重、移植密度を測定した。気温、日射量は、アメダ

スデータを用いた。LAI、群落の日射吸収率、アメダスの日照時間から日射量の推定については2.1節で述べた方法で求めた。収穫時にはコシヒカリの調査と同様の方法で、各調査水田で玄米の外観品質調査のために坪刈りを行い、 m^2 あたりの籾数を計測するために10株を刈り取った。

2.4 ヒノヒカリを対象とした登熟期の気象条件および水稲の生育状態と白未熟粒発生状況の解析

乳白粒は、登熟期の乾物生産量の不足や日射不足により発生しやすいこと、背白粒や基白粒は、登熟期の高温により発生が増加することが報告されている (Nagato and Ebata, 1965; Takahashi, 2006; Wakamatsu *et al.*, 2007)。これらの報告から、白未熟粒は発生原因により乳白粒タイプと背白粒・基白粒タイプの2つのグループに分けられると考えられた (Takahashi, 2006; Kondo, 2007)。よって、気象条件および水稲の生育状態と白未熟粒の発生状況の解析にあたっては、白未熟粒のタイプごとに検討を行うことにした。

玄米の外観品質判定は、客観性を保つために穀粒判別器 (RGQI20A, サタケ) を用いて行った。品質判定は、玄米を1.80 mmのふるいに通し、ふるいに残った1000粒の玄米を対象に、穀粒判別器を用いて整粒、乳白粒、基白粒、腹白粒、その他未熟粒に分類し、各白未熟粒の発生率を求めた。

ただし、本研究では以下の理由により心白粒を含めた乳白粒と基白粒を解析対象とすることにした。今回使用した判別器では、背白粒は腹白粒に分類される。背白粒は高温による影響が大きいとされているが、腹白粒の発生は遺伝的な要因が大きいとされており (Ebata and Tashiro, 1973)、両者の発生要因が異なるため解析には取り上げなかった。また、心白粒は乳白粒に分類されるが、両者とも発生には日射の影響が大きいとされていることから (Nagato, 1952; Kondo *et al.*, 2005; Wakamatsu *et al.*, 2006)、乳白粒に心白粒も含めて解析することにした。

Table 2. Location of AMeDAS observatory close to observed paddy fields in Oita and Kumamoto prefectures.

Prefecture	AMeDAS observatory	Latitude	Longitude		Elevation
Oita	Nakatsu	N33° 35.1'	E131° 11.1'		11 m
	Innai	33 25.2	131 19.0		90
	Yufuin	33 15.2	131 20.8		435
Kumamoto	Kikuchi	32 56.8	130 46.9		83
	Asoothime	32 56.4	131 2.4		497
	Ue	32 13.5	130 54.3		166
	Minamata	32 12.3	130 24.4		6

白未熟粒の発生率は、登熟期の平均気温と相関が高いことが報告されている (Terashima *et al.*, 2001; Morita, 2005; Wakamatsu *et al.*, 2007)。そこで、基白粒について 2007 年と 2008 年の両年のデータを用いて、出穂 10 日前から出穂 34 日後まで、出穂期を基準に 5 日刻みに区切り、期間を 5 日間、10 日間、15 日間、最も長い期間で出穂 10 日前から出穂 34 日後までの 45 日間を設定して、各期間の平均気温と基白粒発生率との関係を調べた。

乳白粒タイプについては、登熟期の籾あたり乾物生産量を評価することにより発生状況が説明できるものと考え、以下の式で乾物生産量を評価することにした。

$$DMG = SR \times \alpha \times RUE / Gr \quad (8)$$

ここで、DMG は登熟期の籾あたり乾物生産量 (g/粒)、SR は登熟期の日射量 (MJ/m²)、 α は出穂期の群落の日射吸収率、RUE はコシヒカリから得られた日射利用効率、Gr は m² あたりの粗数である。本論文では、粗数に対する登熟期の乾物生産量を定量的に把握するために、(8) 式を用いて籾あたり乾物生産量を評価し、乳白粒発生状況との関係について解析した。

3. 結果および考察

3.1 コシヒカリを対象に調査を実施した 2005 年および 2006 年の気象条件と水稲の生育

Fig. 1 には、2005 年と 2006 年の宇都宮市における生育期間中の気温と日射量の推移を示した。日射量は 5 日間の移動平均値を示した。宇都宮市周辺におけるコシヒカリの一般的な出穂期と考えられる 8 月 5 日から 40 日間の登熟期の平均気温と日射量を計算すると、2005 年がそれぞれ 25.8℃、584.4 MJ/m² と、平年値に比べて気温は 1.3℃高く日射量も平年の 107%とやや多かった。2006 年はそれぞれ 25.5℃、530.3 MJ/m² と、気温は平年に比べて 1.0℃高かったが日射量は平年の 97%と平年並みであった。また、長野県松本市周辺におけるコシヒカリの平均的な出穂期である 8 月 10 日から 40 日間の平均気温と日射量は、2005 年はそれぞれ 23.5℃、678.0 MJ/m² で、平年に比べて気温は 0.9℃高く日射量は 103%と平年並みであった。2006 年はそれぞれ 23.5℃、691.7 MJ/m² で、気温は平年に比べて 0.9℃高く日射量は 106%とやや多かった。

2005 年と 2006 年に調査地域に接近した台風は、2005 年は 7 号と 11 号であった。台風 7 号は、7 月 26 日に千葉県鴨川市付近から房総半島に上陸し鹿島灘に抜けた。台風 11 号は、8 月 26 日に千葉市付近に上陸し鹿島灘に抜けた。2006 年は、台風 7 号が東海沖を東進し

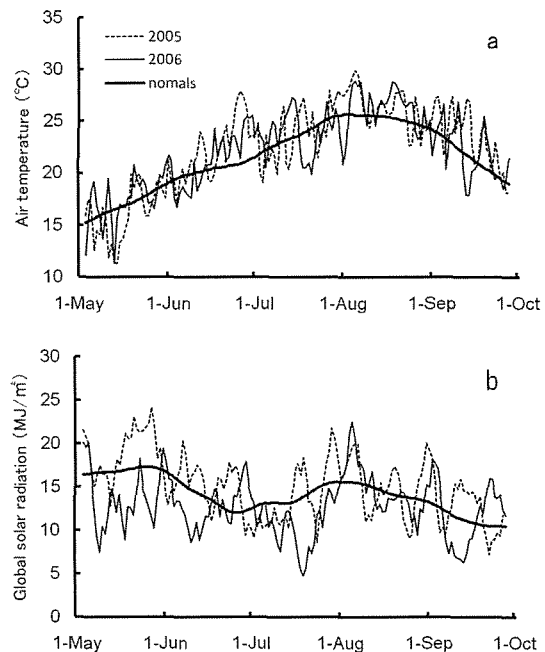


Fig. 1. Seasonal changes in air temperature (a) and global solar radiation (b) during transplanting to rice harvest time in 2005 and 2006 at Utsunomiya local meteorological observatory.

8 月 9 日に関東地方へ最も接近したが、上陸はしなかった。水稲の生育に対する台風の影響は、特に登熟期に大きいと考えられる。台風の勢力、調査地域への接近の程度、接近の時期から、2005 年と 2006 年の 2 年間で水稲の生育に最も大きな影響を及ぼした台風は、2005 年 8 月 26 日に房総半島に上陸した台風 11 号と判断されるが、台風が最も接近した茨城県龍ヶ崎市の調査水田では、収量への影響が大きいと考えられる倒伏は軽微であった。

各県の調査水田における水稲の生育をみると、2005 年の出穂期は最も早い水田で 7 月 25 日、最も遅い水田で 8 月 10 日であった。2006 年の出穂期は、それぞれ 7 月 28 日、8 月 14 日で 2005 年に比べて遅かった。出穂期は茨城県で最も早く、次に栃木県、そして長野県で最も遅かった。2005 年の収穫日は、最も早い水田で 9 月 1 日、最も遅い水田で 9 月 22 日であった。2006 年は、2005 年に比べて遅れ、それぞれ 9 月 4 日、9 月 28 日であった。収穫も茨城県で最も早く行われ、続いて栃木県、長野県の順番で行われた。登熟期間も調査水田間で差がみられ、2005 年と 2006 年の両年でみると登熟期間の最も短い水田で 38 日、最も長い水田で 45 日であった。標高が高く登熟期の気温が低い長野県や一部栃木県の調査水田で登熟期間が長く、標高が低く気温が高い茨城県の調

査水田で登熟期間が短かった。

3.2 登熟期の気温および葉色と RUE の関係

Fig. 2 には、2005 年と 2006 年にコシヒカリを対象に検討した登熟期の平均気温および葉色と RUE との関係を示した。登熟期の気温は 21.6℃～27.5℃とおよそ 6℃の幅をとることができた。RUE は 1.34～2.83 g/MJ と幅の広い値を示した。水稻の RUE について Horie and Sakuratani (1985) は、ジャポニカタイプで 1.79～1.90 g/MJ であったことを報告している。これに対し、登熟期の気温、葉色の異なる水稻で調査した結果、RUE は幅の広い値をとることが明らかになった。次に、出穂期の葉色について、SPAD 値で 30 より大きいグループと 30 以下のグループに分け、それぞれのグループの気温と RUE との関係調べた。その結果、いずれのグループも RUE は平均気温が高いほど低かった。さらに、RUE は登熟期の平均気温が同じでも SPAD 値が大きい方が、高いことが明らかになった。Horie and Sakuratani (1985) は、水稻の葉身中の窒素含量等と RUE の関係について、インディカタイプの水稻はジャポニカタイプに比べて葉身中の窒素含量が多いこと、群落内の日射透過率が高いことから RUE が高いと報告している。ダイズにおいても、葉身中の窒素含量が多いほど RUE が高いことが報告されている (Shiraiwa *et al.*, 1994)。一方で、気温と RUE との関係についての報告はあまりみあたらない。登熟期の気温が高いほど RUE が低かった原因は、気温の上昇に伴い呼吸速度が増加し、同化産物が消耗されたためと考えられる。

Fig. 2 の登熟期の気温および葉色と RUE の関係について、得られた近似式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} RUE_{Sv > 30} &= 37.9 \exp(-0.116 \times T_{RP}), \\ Sv > 30 \quad (r^2 = 0.52) \end{aligned} \quad (9)$$

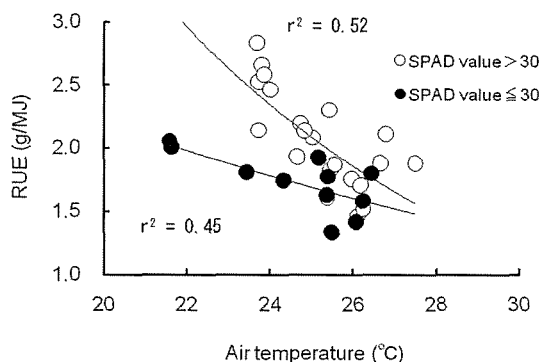


Fig. 2. Relationship between air temperature during ripening period and radiation use efficiency (RUE) considering leaf color in Koshihikari.

$$\begin{aligned} RUE_{Sv \leq 30} &= 6.34 \exp(-0.053 \times T_{RP}), \\ Sv \leq 30 \quad (r^2 = 0.45) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 Sv は SPAD 値、 T_{RP} は登熟期の平均気温、 $RUE_{Sv > 30}$ は出穂期の上位 4 葉の平均 SPAD 値が 30 より大きい場合の RUE、 $RUE_{Sv \leq 30}$ は SPAD 値が 30 以下の場合の RUE である。

3.3 ヒノヒカリを対象に調査を実施した 2007 年および 2008 年の気象条件と水稻の生育

Fig. 3 には、ヒノヒカリを対象に調査を実施した 2007 年と 2008 年の熊本市における生育期間中の気温 (Fig. 3a) と日射量 (Fig. 3b) の推移を示した。日射量は 5 日間の移動平均値を示した。2007 年の 8 月以降の気温は平年に比べてかなり高く推移し、熊本市周辺のヒノヒカリの平均的な出穂期である 8 月 25 日から 40 日間の登熟期の平均気温は、27.6℃と平年に比べて 3.2℃高かった。2008 年の登熟期の平均気温も 25.5℃と平年に比べて 1.1℃高かった。いずれの年次も登熟期の気温は平年に比べて高く推移した。2007 年の登熟期の日射量は 717.9 MJ/m² で平年の 122%と多く、2008 年は 582.3 MJ/m² で平年の 99%と平年並みであった。

生育期間中に九州へ接近、上陸した台風は、2007 年は台風 4 号と 5 号であった。台風 4 号は、7 月 14 日に

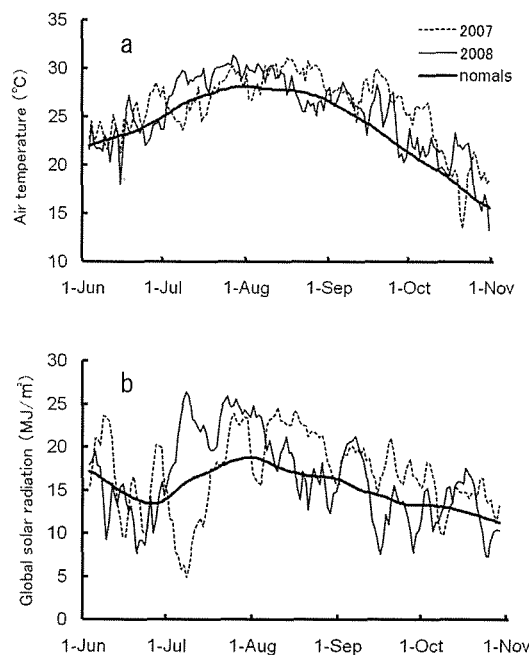


Fig. 3. Seasonal changes in air temperature (a) and global solar radiation (b) during the period from transplanting to harvest time of rice in 2007 and 2008 at Kumamoto local meteorological observatory.

Table 3. Coefficients of determination (r^2) between mean air temperature of each period and incidence of white-based rice kernel in Hinohikari.

The start day for calculating mean air temperature	The end day for calculating mean air temperature								
	-6	-1	4	9	14	19	24	29	34
-10~	0.60	0.60	0.61	0.68	0.69	0.72	0.68	0.67	0.64
-5~	-	0.51	0.57	0.63	0.67	0.71	0.68	0.67	0.67
0~	-	-	0.56	0.63	0.67	0.72	0.68	0.67	0.68
5~	-	-	-	0.62	0.67	0.73	0.67	0.67	0.69
10~	-	-	-	-	0.65	0.73	0.62	0.64	0.67
15~	-	-	-	-	-	0.53	0.50	0.59	0.63
20~	-	-	-	-	-	-	0.33	0.50	0.58
25~	-	-	-	-	-	-	-	0.48	0.52
30~	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41

Integers are the day for heading time. 0 is the heading time.

Each period is from the start day to the end day for calculating mean air temperature.

非常に強い勢力を保ったまま大隅半島に上陸し日向灘へ抜けた。8月2日には台風5号が、強い勢力を保ったまま宮崎県に上陸し周防灘へ抜けた。いずれもヒノヒカリの出穂前であったため、外観品質に及ぼす影響はほとんどないものと考えられた。2008年に接近した台風は13号で、9月18日に九州南岸沖を東に進んだが、台風の勢力は並であり調査地域から離れているため、水稲に及ぼす影響は小さいと考えられた。

2007年の調査水田におけるヒノヒカリの出穂期は、最も早い水田で8月18日、最も遅い水田で8月28日、2008年が同じく8月16日と8月30日であった。2007年の収穫日は、最も早い水田で9月26日、最も遅い水田で10月6日、2008年がそれぞれ9月26日と10月10日であった。登熟期間は、2007年が最も短い水田で36日、最も長かった水田で47日、2008年はそれぞれ38日、51日と、平年に比べてより登熟期の気温の高かった2007年が、2008年に比べて登熟期間が短かった。また、標高の高い湯布院および阿蘇乙姫のアメダス観測地点周辺の調査水田は、ほかの水田に比べて登熟期間が長かった。

3.4 登熟期の気象条件およびヒノヒカリの生育状態と白未熟粒発生状況の関係

Table 3には、目的変数を基白粒発生率、説明変数を出穂10日前から出穂34日後までの各期間の平均気温とした場合の決定係数 (r^2) を示した。その中で、出穂期から出穂19日後の20日間の平均気温のほか、出穂10日前、5日前、出穂5日後、出穂10日後から出穂19日後までの平均気温で高い決定係数がみられた。

Fig. 4には、出穂期から20日間の平均気温と基白粒発生率との関係を示した。出穂期から20日間の平均気温は22.3~27.4℃、基白粒の発生率は0.2~8.8%であ

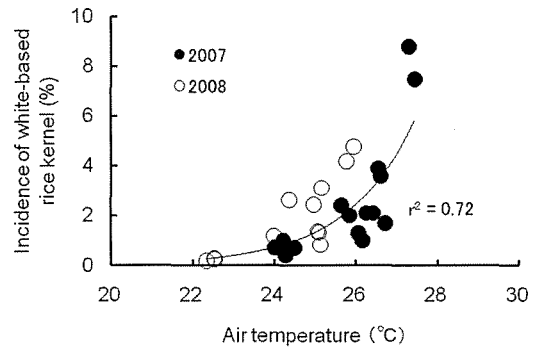


Fig. 4. Relationship between mean air temperature for 20 days from heading time and incidence of white-based rice kernel in Hinohikari.

た。2007年と2008年の発生率を比べると、登熟期の気温が高かった2007年の方が2008年に比べ発生率が高かった。2007年と2008年の各年次の気温と発生率の対応関係を比べると、若干の違いはみられるが、基白粒の発生は高温が主な原因と考えられていることや、出穂期から20日間の平均気温との対応関係がよいという報告があることから (Wakamatsu *et al.*, 2007), 出穂期から20日間の平均気温と発生率との関係式を発生予測モデルとすることができると考えられた。Fig. 4の両者の関係式は、以下のように表される。

$$I_{WBK} = 3.45 \times 10^{-7} \exp(0.607 \times T_{AH20}) \quad (r^2 = 0.72) \quad (11)$$

ここで、 I_{WBK} は基白粒発生率 (%), T_{AH20} は出穂期から20日間の平均気温である。なお、基白粒は背白粒とともに、登熟期の葉身中の窒素含量が少ないほど発生率が高まることが報告されているが (Nakagawa

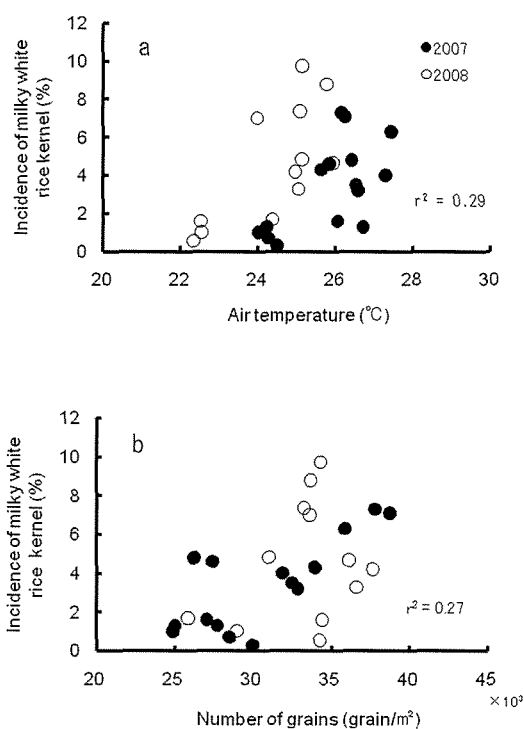


Fig. 5. Relationships between incidence of milky white rice kernel and mean air temperature (a) and number of grains per m² (b) in Hinohikari.

et al., 2006 ; Takahashi, 2006 ; Kondo, 2007 ; Wakamatsu et al., 2008), 今回の検討では葉色と基白粒発生率との間に明瞭な関係はみられなかった。

次に、出穂期から20日間の平均気温と乳白粒発生率との関係を Fig. 5a に示した。乳白粒の発生率は0.3 ~ 9.7%であった。気温が高くなるに従って発生率は高くなる傾向がみられたが、決定係数は0.29と同じ期間の平均気温と基白粒発生率との関係に比べて決定係数は低かった。2007年と2008年の各年次の気温と乳白粒発生率との関係をみると、登熟期の気温の高かった2007年よりも2008年の発生率が高く、年次によって気温と発生率の対応関係が異なる。この結果から、乳白粒発生には高温の影響だけでなく、籾数過多、日射不足、葉身中の窒素不足等のほかの要因も関わっていると考えられた。

籾数と乳白粒発生について、Kobata et al. (2004) は籾数の制限を行うことにより同化産物供給量が増加し、乳白粒発生率が抑えられたことを報告している。この報告に関して、m²あたりの籾数と乳白粒発生率との関係を Fig. 5b に示した。今回の調査でも、籾数が多くなるほど乳白粒の発生率が高まる傾向がみられた。

また、日射量と乳白粒発生率との関係についても調べ

たが、両者の間に明瞭な関係はみられなかった。しかし、登熟期の日射量も乳白粒の発生に関わっていることが報告されている (Nagato, 1952 ; Kondo et al., 2005 ; Wakamatsu et al., 2006)。そこで、日射条件の影響を評価するため、籾あたり乾物生産量を用いた解析を行うことにした。

3.5 コシヒカリから導いた気温および葉色と RUE の関係式のヒノヒカリへの適用に関する検討

続いて、コシヒカリから導いた気温および葉色と RUE の関係式 (9) および (10) は、品種の異なるヒノヒカリに対して、乳白粒発生状況の解析に利用可能であるか検討した。Fig. 6 には、(9) および (10) 式から求めた RUE を、(7) 式に入力して推定した登熟期のヒノヒカリの乾物生産量と、実測した乾物生産量との関係を示した。乾物生産量の推定精度は、RMSE が 63.6 kg/10a と利用にあたり十分な精度であると判断された。ただし、推定値は過大評価されたため推定値に係数を乗じている。乗じた係数は RMSE が最も小さくなる値とし、その値は 0.71 であった。(9) および (10) 式を用いてヒノヒカリの籾あたり乾物生産量を推定する場合、0.71 を乗じる必要があるため (8) 式を以下のように変形した。

$$DMG_{HN} = 0.71 \times SR \times \alpha \times RUE / Gr \tag{12}$$

ここで、DMG_{HN} はヒノヒカリの登熟期の籾あたり乾物生産量、SR は登熟期の日射量、α は出穂期における群落の日射吸収率、RUE は登熟期の平均気温と出穂期の葉色を (9) および (10) 式に入力して得られた値、Gr は m² あたりの籾数である。ヒノヒカリの登熟期の籾あたり乾物生産量は、(12) 式を用いて推定することにした。

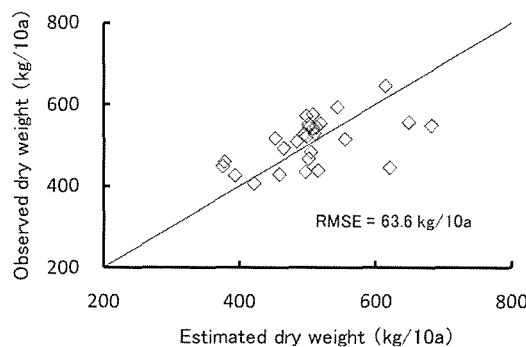


Fig. 6. Comparison between estimated dry matter production and observed dry matter production in Hinohikari.

3.6 ヒノヒカリの籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率の関係

本節では、登熟期の平均気温と基白粒発生率との関係を調べたように、目的変数を乳白粒発生率、説明変数を(12)式を用いて推定したヒノヒカリの登熟期の各期間の籾あたり乾物生産量として、両者の関係について調べた。(12)式中の RUE は、一定値とした場合と(9)および(10)式に気温と葉色を入力して計算した場合について調べた。

RUE を一定値とする場合については、2.1 節で述べた方法でコシヒカリを対象に算出した、RUE の平均値である 1.96 g/MJ を用いた。検討の結果、決定係数が最も高かったのは、説明変数を出穂 20 日後から出穂 24 日後の日射条件で推定した籾あたり乾物生産量とした場合で、決定係数は 0.42 であった。次に、決定係数が高かったのは、出穂 15 日後から出穂 24 日後の日射条件で推定した場合で、決定係数は 0.40 であった。そのほかの期間の籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との関係も調べたが、いずれも決定係数は低い結果となった。

次に、説明変数を(9)および(10)式で計算した RUE を使って推定した籾あたり乾物生産量として、決定係数を調べた。Table 4 にはその結果を示した。ほとんどの期間で、RUE を一定値とした場合に比べて、決定係数が向上した。決定係数が 0.50 を超えたのは、出穂期、出穂 5 日後、出穂 10 日後、出穂 15 日後、出穂 20 日後から出穂 24 日後までと、出穂 15 日後から出穂 29 日後までの気象条件で推定した籾あたり乾物生産量を用いた場合であった。その中で最も決定係数が高かった、出穂 15 日後から出穂 24 日後の籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との関係を Fig. 7 に示した。籾あたり乾物生産量が少ないほど発生率は高く、決定係数は 0.65 であった。

登熟期の平均気温と乳白粒発生率との関係を示した

Fig. 5a では、2007 年と 2008 年の年次によって気温と発生率との対応関係が異なった。これに対して、Fig. 7 ではややばらつきはみられるが、2007 年と 2008 年の籾あたり乾物生産量と発生率の対応関係はほぼ一致しており、籾あたり乾物生産量を評価することによって、ヒノヒカリの乳白粒の発生予測精度が高まるものと考えられた。Fig. 7 の籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との関係式は、以下のように表される。

$$I_{MWR} = 52.3 \exp(-599.9 \times DMG_{HN}) \quad (r^2 = 0.65) \tag{13}$$

ここで、 I_{MWR} は乳白粒発生率(%), DMG_{HN} はヒノヒカリの籾あたり乾物生産量である。乳白粒の発生予測は、経験的に得た(13)式を用いることによって行うことができるものと考えられる。

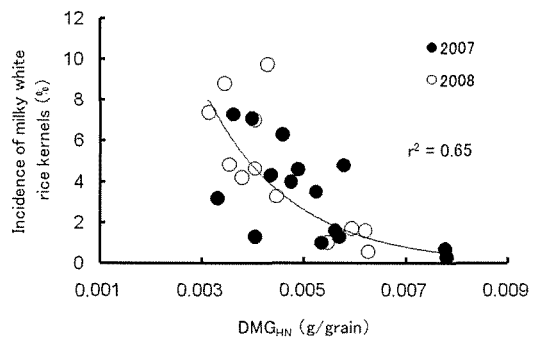


Fig. 7. Relationship between dry matter production per grain (DMG_{HN}) in the period between 15 and 24 days after heading and incidence of milky white rice kernel in Hinohikari.

Table 4. Coefficients of determination (r^2) between dry matter production per grain (DMG_{HN}) of each period and incidence of milky white rice kernel in Hinohikari.

The start day for calculating DMG_{HN}	The end day for calculating DMG_{HN}								
	-6	-1	4	9	14	19	24	29	34
-10~	0.36	0.29	0.35	0.39	0.34	0.37	0.48	0.42	0.39
-5~	-	0.19	0.32	0.37	0.30	0.34	0.48	0.42	0.38
0~	-	-	0.32	0.39	0.30	0.34	0.52	0.44	0.41
5~	-	-	-	0.32	0.21	0.30	0.55	0.44	0.40
10~	-	-	-	-	0.00	0.10	0.58	0.44	0.37
15~	-	-	-	-	-	0.17	0.65	0.51	0.45
20~	-	-	-	-	-	-	0.59	0.46	0.41
25~	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.05
30~	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08

Integers are the day for heading time. 0 is the heading time.

Each period is from the start day to the end day for calculating DMG_{HN} .

3.7 ヒノヒカリの乳白粒発生予測方法

乳白粒の発生率を(13)式で予測する場合、籾あたり乾物生産量の推定に籾数やLAIが必要となる。そこで、出穂期の生育情報を用いた籾数とLAIの推定方法について、ヒノヒカリの2007年と2008年の生育情報を用いて検討したので、その結果を述べる。

水稻の生育情報を用いた籾数の推定については、草丈、 m^2 あたりの茎数、SPAD値の積を説明変数にした推定方法がみられる(Kobayashi, 1991)。この方法が有効であるか確かめるために、両者の関係をプロットしFig. 8に示した。籾数を目的変数、草丈×茎数×移植密度×SPAD値を説明変数とした場合の決定係数は0.53と高く、両者の関係式から籾数の推定が可能であると判断された。Fig. 8の籾数推定式は以下のように表される。

$$Gr = 1.08 \times 10^{-2} \times Pl \times Tn \times Pd \times Sv + 16700 \quad (14)$$

ここで、 Gr は m^2 あたりの籾数(粒/ m^2)、 Pl は出穂期の草丈(cm)、 Tn は株あたりの茎数(本/株)、 Pd は移植密度(株/ m^2)、 Sv は葉緑素計によるSPAD値である。SPAD値は葉身中の窒素含量と相関が高いことや、籾数は穎花分化期、出穂期、登熟期の稲体中の窒素含量と相関の高いことが明らかにされていることから(Wada and Matsushima, 1962; Murayama, 1969; Wakiyama, 2005)、草丈×茎数×移植密度×SPAD値は、稲体中の窒素含量に相当するものと考えられる。LAIについても、草丈×茎数×移植密度を用いることによって推定が可能であると考えられた(Fig. 9)。LAIの推定式は以下のように表される。

$$LAI = 6.4 \times 10^{-5} \times Pl \times Tn \times Pd + 1.95 \quad (15)$$

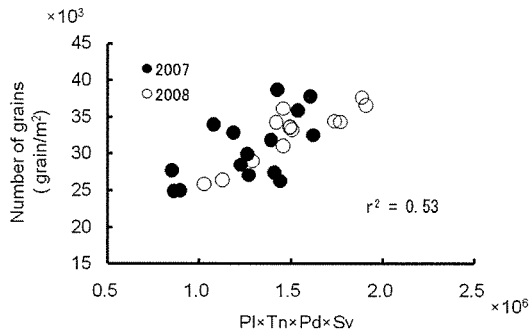


Fig. 8. Relationship between the product of plant length (Pl)×tiller number (Tn)×planting density (Pd)×SPAD value (Sv) at heading time and number of grains per m^2 in Hinohikari

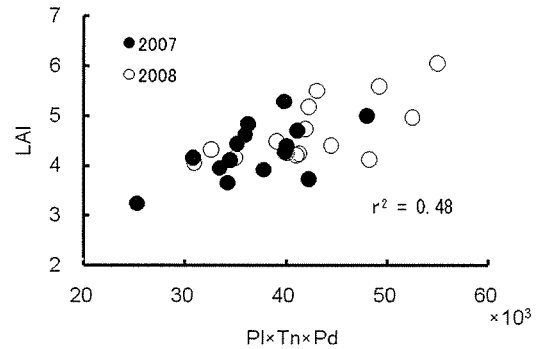


Fig. 9. Relationship between the product of plant length (Pl)×tiller number (Tn)×planting density (Pd) at heading time and LAI in Hinohikari.

ここで、LAIは葉面積指数、 Pl は出穂期の草丈(cm)、 Tn は株あたりの茎数(本/株)、 Pd は移植密度(株/ m^2)である。(14)および(15)式のような出穂期の生育情報を用いた籾数、LAIの推定式を作成しておけば、出穂期の生育情報を用いて、籾数、LAIの推定が可能であると考えられた。

ところで、籾あたり乾物生産量の推定に必要なRUEは(9)および(10)式を用いて算出するが、これらの式に入力する気温が $28.5^\circ C$ 以上になると、両式から得られるRUEの関係が逆転する。すなわち、SPAD値が30より大きい場合のRUEは、入力する気温が $28.5^\circ C$ 以上になると、SPAD値が30以下の場合のRUEより小さくなる。そのため、(9)および(10)式が適応できる気温範囲に留意する必要がある。また、(9)および(10)式は、 $21.6 \sim 27.5^\circ C$ の気温条件下で登熟した水稻の情報を用いて導いた(Fig. 2)。RUEを計算する場合は、この気温の範囲内であることが望ましいと考えられる。

最後に乳白粒の発生予測の作業手順について述べる。まず、出穂期に草丈、茎数、移植密度、葉緑素計による葉色の生育調査を実施し、得られた生育情報からLAI、籾数をそれぞれ推定する。推定したLAIから群落の日射吸収率を求める。RUEは、出穂期の葉色とアメダスの気温データを用いて計算する。アメダスデータの日照時間から推定した日射量、日射吸収率、RUE、籾数を用いて籾あたり乾物生産量を推定し、乳白粒発生率を予測する、といった流れになる。このように、本方法は出穂期の生育情報、アメダス等の気象情報を用いて、収穫前に乳白粒発生率の予測を行うことができる。

なお、今回の籾あたり乾物生産量の評価式では、生理的な障害を発生させる高温の影響については考慮していない。出穂後20日間の平均気温がおおよそ $26 \sim 27^\circ C$ を超えると、白未熟粒の発生が多くなること(Morita,

2008)に注意が必要である。このほか、風速、飽差の影響により白未熟粒の発生が助長されたことが報告されている(Oya and Yoshida, 2008)。このような点も含めて、今後さらに精度向上を図る必要があると考えられた。

4. まとめ

生産現場で利用可能な水稲の基白粒と乳白粒の発生予測モデルの構築に必要な知見を得るために、大分県、熊本県内の農家水田においてヒノヒカリを対象に調査を実施し、白未熟粒の発生状況を気象条件と水稲の生育状態から解析した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 目的変数をヒノヒカリの基白粒発生率、説明変数を出穂期から20日間の平均気温とした場合の決定係数は高く、両者の関係式を発生予測モデルとすることができると考えられた。
- (2) 乳白粒の発生には、登熟期の籾あたり乾物生産量が関わっていると考えられることから、以下の評価式を提案した。

$$DMG = SR \times \alpha \times RUE / Gr$$

ここで、DMGは登熟期の籾あたり乾物生産量(g/粒)、SRは登熟期の日射量(MJ/m²)、 α は出穂期の水稲群落の日射吸収率、RUEは登熟期の日射利用効率(g/MJ)、Grはm²あたりの籾数である。

- (3) コシヒカリを対象に、登熟期のRUEに及ぼす気温と葉色の影響について検討した結果、登熟期の気温が高いほどRUEは低く、またSPAD値が大きい方がRUEは高いことが明らかになった。登熟期の気温および葉色とRUEの関係式を用いて、登熟期の乾物生産に及ぼす高温と葉色の影響を表すことができるものと考えられた。
- (4) コシヒカリから導いた気温および葉色とRUEの関係式が、ヒノヒカリに適用可能であるか検討したところ、関係式は十分な精度で登熟期の乾物生産量を推定できることが確かめられた。ただし、コシヒカリから導いた気温および葉色とRUEの関係式を、ヒノヒカリに適用する場合、推定乾物生産量に0.71を乗じる必要がある。そのため、ヒノヒカリの籾あたり乾物生産量(DMG_{HN})は以下の式で評価することにした。

$$DMG_{HN} = 0.71 \times SR \times \alpha \times RUE / Gr$$

- (5) ヒノヒカリを対象に、RUEを一定値として推定した籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との関係について検討したところ、出穂20日後から出穂24日後までの気象条件で推定した、籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率の決定係数が最も高く、決定係数は0.42であった。

- (6) 続いて、気温および葉色とRUEの関係式を用いて推定した、ヒノヒカリの籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との関係をみたところ、籾あたり乾物生産量が少ないほど乳白粒の発生率が高く、RUEを一定値として推定した籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率の関係より決定係数が向上した。特に、出穂15日後から24日後までの気象条件で推定した、籾あたり乾物生産量と乳白粒発生率との決定係数が最も高かった。両者の関係式を用いて、収穫前に乳白粒発生率の予測が可能であると考えられた。得られた関係式は以下の通りである。

$$I_{MWR} = 52.3 \exp(-599.9 \times DMG_{HN}) \quad (r^2 = 0.65)$$

ここで、 I_{MWR} は乳白粒発生率(%)である。

- (7) 籾あたり乾物生産量の推定に必要なLAIやm²あたりの籾数は、草丈、茎数、葉色の生育情報から推定可能であることが確認できた。本方法は、出穂期の生育情報と登熟期の気象情報を用いて、収穫前に乳白粒の発生状況を把握できるものと考えられた。今回検討した乳白粒発生予測モデルは、生理的な障害を発生させる高温や、白未熟粒の発生に関わっていると考えられる風速、飽差の影響については考慮していない。今後、これらの点を含めた精度向上の方法について、検討する必要があると考えられた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、調査のための農家水田を茨城県、栃木県、長野県、熊本県、大分県の各県の農業振興事務所、農業改良普及センターよりご紹介頂きました。各機関の関係者の方々に、深くお礼を申し上げます。

References

- Ebata, M., and Tashiro, T., 1973: Studies on white-belly rice kernel. I. Varietal differences in the occurrence of white-belly kernel. *Jpn. J. Crop Sci.*, **42**, 370–376.
- Horie, T., and Sakuratani, T., 1985: Studies on crop-weather relationship model in rice. (1) Relation between absorbed solar radiation by the crop and the dry matter production. *J. Agric. Meteorol.*, **40**, 331–342.
- Jiang, C., Hirasawa, T., and Ishihara, K., 1988: Physiological and ecological characteristics of high yielding varieties in rice plants. I. Yield and dry matter production. *Jpn. J. Crop Sci.*, **57**, 132–138.

- Kobata, T., Uemuki, N., Inamura, T., and Kagata, H., 2004: Shortage of assimilate supply to grain increases the proportion of milky white rice kernels under high temperatures. *Jpn. J. Crop Sci.*, **73**, 315–322.
- Kobayashi, K., 1991: Early diagnosis of rice on number of glumaceous flower with chlorophyll meter. *Rep. Chugoku Br. Crop Sci. Soc. Jpn.*, **32**, 14–15. (小林和弘, 1991: 葉緑素計を用いた水稻の穎花数の早期診断. 日作中支集録, **32**, 14–15.)
- Kondo, J., Nakamura, T., and Yamazaki, T., 1991: Estimation of the solar and downward atmospheric radiation. *Tenki*, **38**, 41–48.
- Kondo, M., Ishimaru, T., Sanoh, Y., and Umemoto, T., 2005: Research directions on grain ripening under high temperature in rice. *J. Agric. Sci.*, **60**, 462–470.
- Kondo, M., 2007: Nitrogen management measures for developing of rice grain quality and palatability. *Agric. Hort.*, **82**, 31–34 (近藤始彦, 2007: コメの品質, 食味向上のための窒素管理技術 [I]. 一水稻の高温登熟障害軽減のための栽培技術開発の現状と課題一. 農業および園芸, **82**, 31–34).
- Matsumura, O., 2005: The quality damage in rice grain under high temperature during ripening. That background and countermeasure. *J. Agric. Sci.*, **60**, 437–441.
- Morita, S., 2005: The occurrence of immature grain with white portions and deep ditch, and grain weight decrease in rice under high temperature during ripening. *J. Agric. Sci.*, **60**, 442–446.
- Morita, S., 2008: Prospect for developing measures to prevent high-temperature damage to rice grain ripening. *Jpn. J. Crop Sci.*, **77**, 1–12.
- Murata, Y., 1964: On the influence of solar radiation and air temperature upon the local differences in the productivity of paddy rice in japan. *Jpn. J. Crop Sci.*, **33**, 59–63.
- Murayama, N., 1969: Nutriophysiology on fertilizer application and ripening for paddy rice. *J. Agric. Sci.*, **24**, 71–78. (村山 登, 1969: 水稻の施肥と登熟に関する栄養生理 (I). 農業技術, **24**, 71–78.)
- Nagato, K., 1952: On the occurrence of white core, milk-white grain, and white belly in rice plant. *Jpn. J. Crop Sci.*, **21**, 26–27.
- Nagato, K., and Ebata, M., 1965: Effect of high temperature during ripening period on the development and the quality of rice kernels. *Jpn. J. Crop Sci.*, **34**, 59–66.
- Nakagawa, H., Shirakawa, M., and Nagahata, H., 2006: Effect of potential assimilate supply and nitrogen top-dressing on the occurrence of chalky grains in rice. *Jpn. J. Crop Sci.*, **75** (ext. 2), 12–13.
- Nakagawa, H., Nagahata, H., and Tsukaguchi, T., 2008: Modeling and prediction of occurrence of chalky grains in rice. 2. A model to predict the rate of milky white grain using temperature and assimilate supply. *Jpn. J. Crop Sci.*, **77** (ext. 1), 148–149.
- Oya, K., and Yoshida, T., 2008: Effects of the period of the ventilation on occurrence of “chalky grains” in rice. *Jpn. J. Crop Sci.*, **77**, 434–442.
- Peng, S., Huang, J., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X., Centeno, G. S., Khush, G. S., and Cassman, K. G., 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 9971–9975.
- Saitoh, K., Kasiwagi, S., Kinoshita, T., and Ishihara, K., 1991: Characteristics of dry matter production process in high yielding rice varieties. IV. Dry matter accumulation in the panicle. *Jpn. J. Crop Sci.*, **60**, 255–263.
- Shiraiwa, T., Hashikawa, U., Taka, S., and Sakai, A., 1994: Effects of canopy light distribution characteristics and leaf nitrogen content on efficiency of radiation use in dry matter accumulation of soybean cultivars. *Jpn. J. Crop Sci.*, **63**, 1–8.
- Takebe, M., and Yoneyama, T., 1989: Measurement of leaf color scores and its implication to nitrogen nutrition of rice plants. *JARQ*, **23**, 86–93.
- Takahashi, W., 2006: Preventive measures for incidence of immature rice kernel with white portion on a rice variety, Koshihikari, under global warming condition. *Agric. Hort.*, **81**, 1012–1018 (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. 農業および園芸, **81**, 1012–1018).
- Terashima, K., Saito, Y., Sakai, N., Watanabe, T., Ogata, T., and Akita, S., 2001: Effect of high air temperature in summer of 1999 on ripening and

- grain quality of rice. *Jpn. J. Crop Sci.*, **70**, 449–458.
- Uchijima, T., and Hanyu, J., 1967: On the regional differences in the agro-climatic index on quantity of ripening of rice plant in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **22**, 137–142.
- Wada, G., and Matsushima, S., 1962: Analysis of yield-determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. *Jpn. J. Crop Sci.*, **31**, 23–26.
- Wakamatsu, K., Tanaka, A., Uezono, I., and Sasaki, O., 2006: Effect of shading treatment during the ripening stage on the yield, the quality of brown rice and palatability of a rice cultivar at early-season culture in warm regions. *Rep. Kyushu Br. Crop Sci. Soc. Japan*, **72**, 19–21.
- Wakamatsu, K., Sasaki, O., Uezono, I., and Tanaka, A., 2007: Effect of high air temperature during the ripening period on the grain quality of rice in warm regions of Japan. *Jpn. J. Crop Sci.*, **76**, 71–78.
- Wakamatsu, K., Sasaki, O., Uezono, I., and Tanaka, A., 2008: Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice under high temperature conditions. *Jpn. J. Crop Sci.*, **77**, 424–433.
- Wakiyama, Y., Inoue, K., and Nakazono, K., 2003: A simple model for yield prediction of rice based on vegetation index derived from satellite and AMeDAS data during ripening period. *J. Agric. Meteorol.*, **59**, 277–286.
- Wakiyama, Y., 2005: Relationship between vegetation index and number of grains on paddy rice. *J. Agric. Meteorol.*, **61**, 61–67.