

水稻の高温登熟障害と早期警戒システム

農業・食品産業技術総合研究機構
九州沖縄農業研究センター 脇山恭行

1. はじめに

19世紀以降、人間の経済活動が活発になり、大気中の二酸化炭素濃度が高くなるに伴って気温も上昇している。日本における観測では、最近100年間の気温上昇率は 1.1°C に達している(気象庁, 2008)。気温の上昇は作物の生産に大きな影響を与えている。水稻では、登熟期の気温が高く推移するため、登熟過程で障害がおり玄米が白濁化する白未熟粒の発生、いわゆる高温登熟障害が大きな問題となっている。図-1には、1990年～2010年の各地域の1等米比率の推移を示した。特に、西日本では1等米比率が低く推移しているのがわかる。1等米比率の低下は、白未熟粒の多発が大きな原因とされている。

品質の低下は、米の買い取り価格の低下、食味の低下、加工時砕けやすくなるなどの問題を招く。この問題に対して、高温登熟耐性を有した新品種の育成をはじめ、様々な対策技術の開発が検討されている。ところで、気象庁では異常天候早期警戒情報をWeb上で公開し、予測された2週先の気温情報をもとに、高温および低温に関わる警戒情報を発表している(前田, 2010)。この情報を用いて、適切な肥培管理や水管理を行うことで高温登熟障害の発生を回避できないか考えた。東北農業研究センターでは、1993年に発生した冷害を機に早期警戒システムを構築し、冷害時に被害軽減のための情報を発信している。冷害時に警戒システムから発信された農作物被害軽減情報に応じて対策を講じる

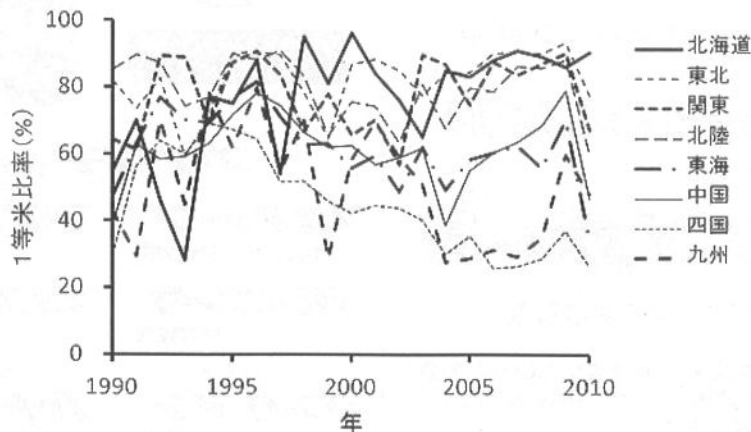


図-1 1等米比率の推移

ことで災害回避が可能となった(菅野, 2008)。西日本で深刻な問題となっている高温登熟障害に対しても、早期警戒情報を発令し、対策を実施するといったシステムを構築することによって、被害軽減をはかれるものと考えられる。

本稿では、高温登熟障害に対応した早期警戒システムを構築するために必要な白未熟粒発生予測モデル(脇山ら, 2010)と早期警戒情報の発令に続く対策について述べる。

2. 早期警戒システムと白未熟粒発生予測モデル

図-2には早期警戒システムを利用した高温登熟障害回避の流れを示した。まず、気象予測情報を用いたモデルによる白未熟粒の発生予測、早期警戒情報の発令、対策の実施、それによる被害の回避となる。システムには、白未熟粒の発生予測モデル、対策技術の開発が必要であるが、まず警戒発令に必要な白未熟粒発生予測モデルについて述べる。

(1) 白未熟粒の発生原因

白未熟粒で白濁した部位が観察されるのは、デンプンの蓄積が不十分なため空隙が残り光が乱反射を起こすためとされている。白未熟粒は、白濁の部位によって乳白粒、心白粒、腹白粒、背

白粒、基白粒に分類される。白未熟粒の発生原因は、主に登熟期の高温による転流やデンプン合成の阻害などの生理的障害と考えられている(森田, 2008)。この他、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(長戸, 1952; 近藤ら, 2005; 若松ら, 2006)、籾数過多により籾あたり同化産物供給量が不足するため(小葉田ら, 2004; 松村, 2005; 高橋, 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(小葉田ら, 2004)と考えられている。また、登熟期の高温は呼吸速度の増加により同化産物を消費させると考えられる(村田, 1964; 内島・羽生, 1967; Peng et al., 2004)。呼吸による同化産物の消費は白未熟粒の発生も助長していると考えられる。

図-3には九州で広く栽培されているヒノヒカリを対象に2007年と2008年に調査した登熟期の気温と乳白粒の発生率との関係を示した。白未熟粒の発生原因は、主に高温とされている。気温が高いほど乳白粒の発生率が高い傾向がみられるが、両者の決定係数は0.29と低い。また、2007年はヒノヒカリの登熟期にあたる8月から9月の気温が高温となったが、2007年よりも

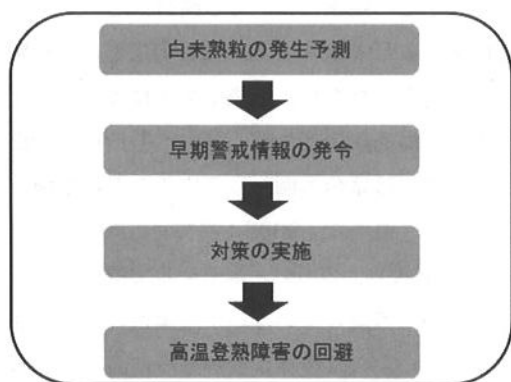


図-2 水稻高温登熟障害のための早期警戒システム

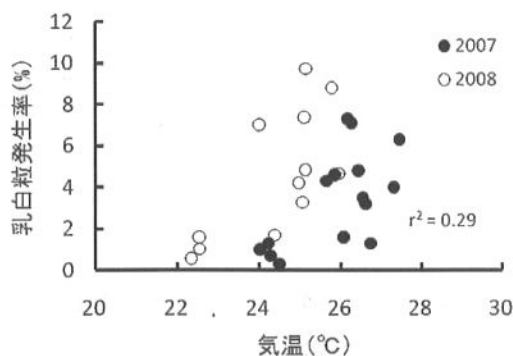


図-3 登熟期の平均気温と乳白粒発生率との関係

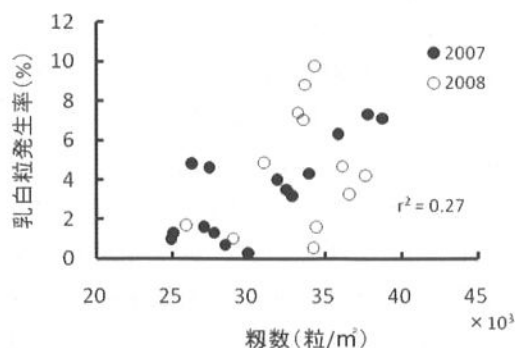


図-4 籾数と乳白粒発生率との関係

2008年の方が乳白粒の発生率が高かった。図-4には m^2 あたりの籾数と乳白粒発生率との関係を示した。籾数が多くなるほど発生率は増えている。しかし、気温との関係と同様に決定係数は低い。これらの結果から、気温や籾数だけでは乳白粒の発生予測はできないものと考えられた。

(2) 発生原因からみた白未熟粒のタイプ

これまでの研究から白未熟粒は発生原因によって2つのタイプに分けられることがわかってきた。1つは発生には登熟期の気温の影響が大きいとされている基白粒、背白粒タイプ、もう1つは気温の他、日射量、籾数、葉色等が関わっている乳白粒、心白粒タイプである。これらのことから、白未熟粒を2つのタイプに分けて、予測モデルを構築することにした。それぞれの白未熟粒発生予測モデルを構築することで予測精度が向上するものと考えられたためである。

(3) 基白粒、背白粒タイプの発生予測モデル

図-5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。平均気温が高いほど発生率は高く、平均気温が $26^{\circ}C$ を超える

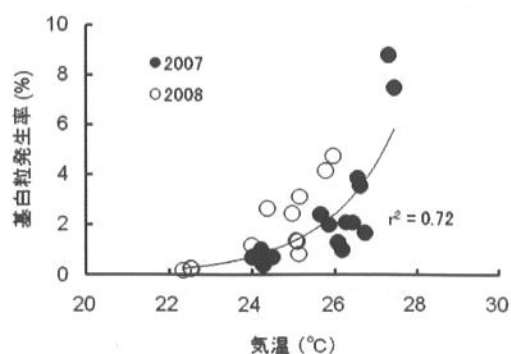


図-5 出穂期から20日間の平均気温と基白粒発生率との関係

あたりから、急激に発生率が高くなっている。基白粒や背白粒は登熟期の気温が高いほど発生率が高まるということが報告されている（長戸・江幡，1965；高橋，2006；若松ら，2007）。このことから、登熟期の平均気温と基白粒発生率の関係を発生予測モデルとすることにした。基白粒の発生予測モデルは以下のように表される。

$$I_{WBK} = 3.45 \times 10^{-7} \exp(0.607 \times T) \quad (1)$$

ここで、 I_{WBK} は基白粒発生率(%), T は出穂期から20日間の平均気温である。

平均気温の計算期間については、出穂期から20日間の平均気温の他、他の期間での平均気温と発生率との関係についても検討した。しかし、出穂期から20日間の平均気温と発生率との相関が最も高かったため、予測モデルにはこの期間の平均気温を用いている。なお、基白粒や背白粒の発生には葉色も関わっていることが指摘されている（中川ら，2006；高橋，2006；近藤，2007；若松ら，2008）。本モデルでは葉色の影響について考慮していないが、葉色の影響を加えることによって予測精度がさらに高まると考えられる。

(4) 乳白粒, 心白粒タイプの発生予測モデル

乳白粒や心白粒の発生には, 先に述べたように, 気温の他, 日射量, 籾数, 葉色などが関わっているとされている。高温は呼吸速度を促進させ同化産物を消耗させる。日射量の不足は同化産物量の低下につながる。籾数過多は籾あたり同化産物供給量の低下をもたらす。葉色の低下は光合成速度の減少による同化産物量の低下を招く。このように乳白粒や心白粒の発生に関わる要因は, 登熟期の同化産物量と深く関わっていると考えられた。そこで, 登熟期の同化産物量を評価することで発生を説明できるものと考え, 以下の評価式を提案した。

$$DMG = SR \times \alpha \times RUE / Gr \quad (2)$$

ここで, DMGは籾あたり同化産物供給量 (g/粒), SRは日射量 (MJ/m²), α は出穂期の群落の日射吸収率, RUEは群落に吸収された日射がどれくらい同化産物に結びついたかを表す日射利用効率 (g/MJ), Grはm²あたりの籾数である。一方で, 発生原因の1つである同化産物の消耗をもたらす高温の影響は, (2) 式中のRUEで表すことができないうか検討した。RUEは以下の式より求められる。

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

表-1 出穂期の葉色を考慮した登熟期の気温とRUEの関係式

$$RUE_{Sv30<} = 37.9 \exp(-0.116 \times T) \quad (4)$$

$$RUE_{Sv30\geq} = 6.34 \exp(-0.053 \times T) \quad (5)$$

RUE_{Sv30<}は出穂期の主稈上位4葉の平均SPAD値が30より大きいときのRUE,

RUE_{Sv30 \geq} はSPAD値が30以下のRUE, Tは登熟期の平均気温。

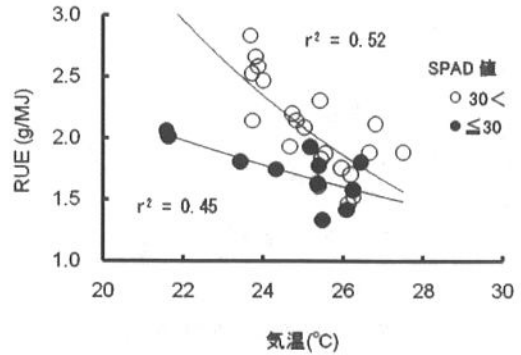


図-6 登熟期の平均気温とRUEの関係

ここで, DMは登熟期の同化産物量として玄米収量を用いた (g/m², 水分含量0%)。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である。図-6には葉色を考慮して, 気温と(3)式により求めたRUEとの関係を示した。SPADによる葉色値が30より大きい場合と30以下の場合に分けて両者の関係をみると, 気温が高いほどRUEが低く, また葉色値が高い方がRUEは高く保たれることがうかがえる。表-1には, 図-6の気温とRUEの関係式を示した。この関係式を用いて, 登熟期の同化産物量に及ぼす気温と葉色の影響を評価できるものと考えられた。

次に, 籾あたり同化産物供給量すなわちDMGと乳白粒(心白粒も含む)の発生率との関係を図-7に示した。DMGが少ないほど乳白粒の発生率が高く, 両者の決定係数も0.65と高い。気温と乳白粒発生率の関係を示した図-3では,

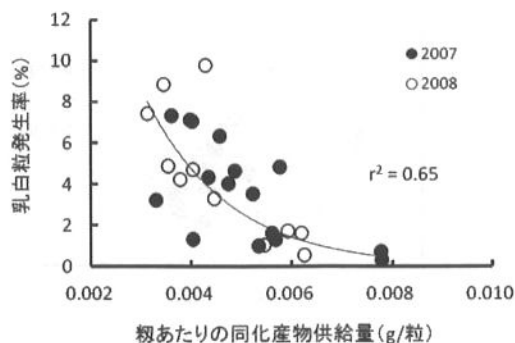


図-7 登熟期の籾あたり同化産物供給量と乳白粒発生率との関係

年次によって両者の対応関係が異なり決定係数も低かったが、籾あたり同化産物供給量を用いることで両者の決定係数は向上した。籾あたり同化産物供給量を用いて、乳白粒の発生予測を行うことができるものと考えられた。図-7の籾あたり同化産物供給量と乳白粒発生率との関係式を乳白粒発生予測モデルとすることにした。予測モデルは以下のように表される。

$$I_{MwK} = 52.3 \exp(-599.9 \times DMG) \quad (6)$$

ここで、 I_{MwK} は乳白粒発生率(%)である。

3. 早期警戒システムと高温登熟障害対策技術

高温登熟障害の対策技術には、耐性品種の育成の他、登熟期の高温を避けるための晩期化、稲体の温度を下げるためのかけ流しや早期落水防止等の水管理、登熟期に十分な同化産物を供給させ器官の老化を防ぐための追肥の実施、籾数制御等があげられる。西日本でも、恒常的に発生している高温登熟障害に対応した早期警戒システムを構築することによって、白未熟粒の発生状況を予測することが可能となり、上記の対策にいち早く取りかかることができるようにな

るものと考えられる。

2010年の夏期は全国的に記録的な猛暑となった。本稿で述べているモデルから予測されるように、基白粒や背白粒が多発し、1等米比率が大きく低下した。さらに、基白粒や背白粒の発生は稲体の窒素含量にも左右されることから、2010年は追肥の実施、施用量によって基白粒や背白粒の発生に大きな差が出たことが指摘されている。中でも安定的に高品質な生産を続けてきた北陸地域では、基白粒や背白粒が多発し、著しい品質の低下がみられた。この原因として追肥施用の判断が難しかったことが上げられている(北陸農政局, 2011)。また、2010年の高温登熟障害の発生原因に関する解析結果は、肥培管理技術の高度化による高温登熟障害の回避の可能性を示唆しているが、森田(2011)は気象庁の気象予測情報を用いた肥培管理により被害が軽減したことを報告している。気象予測情報を利用して白未熟粒の発生状況を予測し、この予測結果に基づいて適切な肥培管理を実施することにより被害回避が可能になるものと考えられる。今後は、高温登熟障害に対応した肥培管理技術の開発も重要である。

肥培管理によって高温登熟障害を回避する場合、食味に大きな影響を及ぼす玄米中のタンパク含量について考慮する必要がある。そのため、玄米中のタンパク含量を適正に保つための窒素施用量の設定に関する検討も必要である。また、対策技術の1つである水管理では、入水、落水のタイミングにより水田の熱環境を適正に管理し発生低減をはかることができないか、水田微気象モデル(丸山ら, 1998)を用いた定量的な検討も必要であると考えられる。



図-8 農業気象災害に対応した全国版早期警戒システム (AMATERAS)

4. おわりに

最近の研究で、乳白粒の発生には登熟期の高温乾燥風も大きく関わっていることがわかってきた(大谷・吉田, 2008; Wada et al., 2011)。今後は、この要因についてもモデルに組み入れ、精度向上を図る必要がある。なお、本稿で述べた白未熟粒発生予測モデルは、ヒノヒカリを対象に構築したが、白未熟粒の発生原因は同じであるので、他品種への適用も可能であると考えられる。

農研機構(農業・食品産業技術総合研究機構)では、Web上における農業気象災害のための全国版早期警戒・栽培支援システムの構築に取り組んでいる(図-8)。警報発令のための各種農業気象災害予測モデル、作物モデル、災害回避のための対策技術などをシステムに装備し、農業気象災害に備えようとするものである。今回紹介した白未熟粒発生予測モデルや開発を進めている対策技術もこのシステムに組み込まれる予定である。

引用文献

- 北陸農政局, 2011: 北陸地域における平成22年産米の品質の概要と今後の対応方針について. 北陸農政局23年1月31日プレスリリース資料.
- 菅野洋光, 2008: 気象予測データを利用した農作物被害軽減情報サービスの開設. 農業および園芸, 83, 241-249.
- 気象庁, 2008: 我が国における気候変動の現状と見通し. 気象庁刊行物, 1-23.
- 小葉田亨・植向直哉・稲村達也・加賀田恒, 2004: 子実への同化産物供給不足による高温下の乳白米発生. 日本作物学会紀事, 73, 315-322.
- 近藤始彦, 2007: コメの品質, 食味向上のための窒素管理技術〔1〕-水稲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-. 農業および園芸, 82, 31-34.
- 前田修平, 2010: 世界の異常気象発生メカニズムと農業研究機関と連携した意志決定に利用しやすい気象情報の開発. 農研機構シンポジウム要旨集, 5-6.
- 丸山 篤志・大場 和彦・黒瀬 義孝, 1998: 平衡水温モデルによる異常気象年の水田水温の推

- 定. 農業気象, 54, 247-254.
- 松村 修, 2005: 高温登熟による米の品質被害
—その背景と対策—. 農業技術, 60, 437-441.
- 森田 敏, 2008: イネの高温登熟障害の克服に
向けて. 日本作物学会紀事, 77, 1-12.
- 森田 敏, 2011: 水稲高温対策において臨機応
変な気象対応型栽培法は可能か?. 日本農業
気象学会 2011 年全国大会講演要旨, 189.
- 長戸一雄, 1952: 心白・乳白米及び腹白の発生
に関する研究. 日本作物学会紀事, 21, 26-27.
- 長戸一雄・江幡守衛, 1965: 登熟期の高温が穎
果の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日本作
物学会紀事, 34, 59-66.
- 中川博視・白川美翠・永島秀樹, 2006: 炭水化
物供給可能量と穂揃期窒素追肥がイネの白未
熟粒の発生に及ぼす影響. 日本作物学会紀事,
75 (別2), 12-13.
- 大谷 和彦・吉田 智彦, 2008: 送風時期が水稲
「白未熟粒」発生に及ぼす影響. 日本作物学会
紀事, 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.
- 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.
- Hiroshi Wada, Hiroshi Nonami, Yoshiyuki
Yabuoshi, Atsushi Maruyama, Akio
Tanaka, Kenichi Wakamatsu, Tomohiko
Sumi, Yasuyuki Wakiyama, Makoto
Ohuchida, and Satoshi Morita, 2011 :
Increased Ring-Shaped Chalkiness and
Osmotic Adjustment when Growing Rice
Grains under Foehn-Induced Dry Wind
Condition. *Crop Science*, 51, 1703-1715.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・田中 明, 2007:
暖地水稲の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼ
す影響. 日本作物学会紀事, 76, 71-78.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・田中 明, 2008:
水稲登熟期の高温条件下における背白米の発
生に及ぼす窒素施肥量の影響. 日本作物学会
紀事, 77, 424-433.
- 脇山恭行・大原源二・丸山篤志, 2010: 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. 農業気象, 66, 255-267