

作物生理・細胞工学

イネ穂ばらみ期耐冷性の地域間の変動要因と栄養生長期の温度環境の関係

神田英司¹⁾・木村利行²⁾・及川あや³⁾・大川茂範⁴⁾・佐々木次郎⁴⁾・浅野真澄⁴⁾・佐藤雄幸⁵⁾・
金和裕⁵⁾・藤井弘志⁶⁾・藤村恵人⁷⁾・鈴木幸雄⁷⁾・濱寄孝弘⁸⁾・根本学⁸⁾・下野裕之⁹⁾

¹⁾ 東北農業研究センター, ²⁾ 青森県産業技術センター, ³⁾ 岩手県農業研究センター, ⁴⁾ 宮城県古川農業試験場,
⁵⁾ 秋田県農林水産技術センター, ⁶⁾ 山形大学, ⁷⁾ 福島県農業総合センター, ⁸⁾ 北海道農業研究センター, ⁹⁾ 岩手大学農学部

要旨: イネの穂ばらみ期耐冷性が栄養成長期の気象条件により変動するか評価した。北海道・東北の6地点(2008年)、7地点(2009年)の水田に設置した同一土壌、肥料を使用したポットに品種「ひとめぼれ」を移植し、それぞれの地点で生育させ、幼穂形成期に、ポットを掘り上げ、耐冷性検定を冷水深水法にて実施した。耐冷性検定した不稔歩合は、両年ともに地域により有意に異なった。その不稔歩合の変動の多くの部分を栄養成長期の温度環境で説明でき、栄養成長期の温度が低い地域で不稔歩合が高い、すなわち穂ばらみ期耐冷性が弱いことを明らかにした。

キーワード: 穂ばらみ期耐冷性, 不稔, 水稲, 水温。

寒冷地の稲作において、穂ばらみ期の低温を原因とする障害型冷害は、現在においても大きな問題の一つである(下野2008)。冷害年において、地域により冷害の被害程度に大きな変異があり、その差異を生じる原因の解明は、これまで生殖成長期間中の2つの時期、(1)小孢子初期を中心とする穂ばらみ期の温度環境(Satake 1976)ならびに(2)幼穂形成から小孢子初期までの前歴期の温度環境(Satakeら1988)との関連から進められてきた。しかしながら、それら2つの時期の温度環境のみでは冷害の被害程度のすべての変異を説明できない(Shimonoら2007)。

最近になり、著者らの研究グループが、幼穂が形成される前の栄養成長期の水温が耐冷性に作用することを明らかにした(Shimonoら2007, Shimono and Kanda 2008, Shimonoら2011, Matsumuraら2011)。Shimonoら(2007)は、1993年の大冷害の被害について、シミュレーションモデルを用いた解析で、地域による不稔歩合の変動の多くの部分は生殖成長期の冷却量で説明できるが、その関係の残差が栄養成長期の気温により説明できることを示した。実証試験として、異なる2地点の水田(八戸と盛岡)に、同一条件のポットを埋め込んだ単年度試験において、盛岡で生育させたイネの穂ばらみ期耐冷性が八戸より高く(Shimono and Kanda 2008)、地域間で耐冷性が変動することを示した。しかしながら、その試験は単年度かつ2地点のみの比較であった。本研究では、北日本の広域かつ年次を越えた地域間の栄養成長期の気象環境の違いが耐冷性に作用するかについて、北海道～東北の6～7地点の2年間の連携試験から評価した。研究手法は、Shimono and Kanda (2008)にならない、気象以外の要因を同一にし(土壌、肥料、苗)、幼穂形成前までの地点での気象環境の違いが耐冷性に作用す

るかを検討するとともに、その要因を解析した。

材料と方法

2008年は、東北地方の6地点(青森県黒石市(青森県産業技術センター)、秋田県秋田市(秋田県農林水産技術センター)、岩手県北上市(岩手県農業研究センター)、宮城県大崎市(宮城県古川農業試験場)、山形県鶴岡市(山形大学)、福島県郡山市(福島県農業総合センター))、2009年は、北海道の1地点(北海道札幌市(北海道農業研究センター))を加えた7地点の水田圃場で実施した。水稲品種「ひとめぼれ」(耐冷性:極強)を5月中旬(2008年は山形5月12日、他の5県では5月15日、2009年は青森県は5月14日、岩手県は5月15日、北海道は5月20日、その他の4県は5月13日)に1/5000 aワグネルポットに1本植えした各3ポットを各地の水田に埋め込み、幼穂形成期(幼穂長1mm)まで栽培した。なお、ポットには2008年は「水稲育苗用培土ほくほく培土」(鹿沼産業)を3.3 L (N 1.4 g, P₂O₅ 3.6 g, K₂O 3.6 g) 充填し、苗は東北農業研究センター(2008年)ならびに岩手大学(2009年)にて育成した同一苗(4葉期)を用いた。幼穂形成期は、発育診断用として、上記の3ポットに加えて、同一培土を用い、1ポットあたり2～3個体を植え付けし、埋め込んだ各1～2ポットの植物体を用いて、継続的な破壊調査から特定した。2009年は、ポットには肥料(N 0.6 g, P₂O₅ 0.6 g, K₂O 0.6 g)を混和した「水稲育苗用無肥量培土」(アイケイ社製)を充填し、苗は岩手大学にて育成した同一苗を用いた。両年ともに、各地の水田の水稲の生長点付近の水温をデータロガー(TR-52, ティアンドデイ)にて1点のみ計測するとともに、その他の気象データは最寄りのア

第1表 各地点の水田における栄養成長期の気象条件.

年次	地点	気温 (°C)	水温 (°C)	風速 (m s ⁻¹)	日照時間 (h)
2008	青森	17.7	20.8	3.6	6.0
	岩手	19.0	21.8	1.7	5.5
	宮城	18.5	21.8	2.8	5.3
	秋田	19.3	21.1	3.8	5.6
	山形	19.6	21.1	2.0	5.9
	福島	19.5	22.0	3.0	5.7
2009	北海道	16.5	20.2	3.1	3.8
	青森	17.8	20.4	3.9	5.2
	岩手	19.3	21.6	1.6	5.2
	宮城	18.5	21.6	2.8	5.0
	秋田	19.0	20.9	3.8	5.5
	山形	19.6	22.2	2.0	5.5
福島	19.3	21.5	3.2	4.8	
相関係数	2008	-0.68**	-0.38ns	0.46*	0.31ns
	2009	-0.63**	-0.54*	0.27ns	-0.55**

相関係数は、各年次について、不稔歩合との間での値を示す (n=18 (2008), n=21 (2009)),

** P<0.01, * P<0.05, ns 有意差なし. 気象要素はすべて栄養成長期 (移植~幼穂形成) の平均値を示す.

メダス地点のデータ (青森県=黒石, 岩手県=北上, 宮城県=古川, 秋田県=秋田, 山形県=鶴岡, 福島県=郡山) ならびに北海道農業研究センター (札幌) のデータを取得した.

生殖成長期の障害型不稔誘導処理は、両年とも、東北農業研究センター (岩手県盛岡市) のガラス温室にて、幼穂形成期から出穂揃い (すべての穂が水面上にでる) まで、恒温水槽 (1 m × 1 m × 水深 30 cm) を用いて行った。設定水温は、2008 年は 19.3°C, 2009 年は 18.8°C とした。設定水温の 2 年間での違いは 2008 年の不稔歩合の発生が少なかったためである。制御のための水温は白金抵抗温度計 (R902-31, チノー社製) にて、2 秒間隔で計測し、設定温度以上で冷水 (18°C) を入れ、水温を低下させる一方、水温が設定以下でヒーターにより加温し、精密な制御を行なった (標準誤差 0.05°C 以下)。すべての穂について出穂日を特定するとともに、収穫期には、それら穂の長さを計測後、籾数ならびに不稔籾数を計測した。株当たりの穂数、籾数、一穂籾数、不稔歩合 (株あたり全不稔籾 / 全籾数) を算出した。なお、不稔籾はライトテーブル上で判別した。

統計解析は、2 元配置の分散分析で、年次と地域、またそれらの交互作用をエクセル統計 2008 (SSRI 社製) を用い、各地の水田に無作為に配置した 3 個体 (=ポット) を反復とし実施した。なお、分散分析は、2 ヶ年実施した東北地方の 6 地点のデータを用いた (単年度試験の北海道を除く)。また、気象要因と不稔歩合の関係を全データを用いた単相関で解析した。

結 果

栄養成長期 (移植から幼穂形成期) の平均気温をみると、

年次間で大きな違いがみられなかった。一方、地域間では大きな変異がみられ、北海道、青森県が、山形県や福島県より 2~3°C, 低かった (第 1 表)。水温はほぼ気温と同様の傾向を示すものの、気温より水温が数度、高かった。風速は岩手県で低く、青森県、秋田県で高い傾向を示した。日照時間は宮城県が低い傾向を示した。

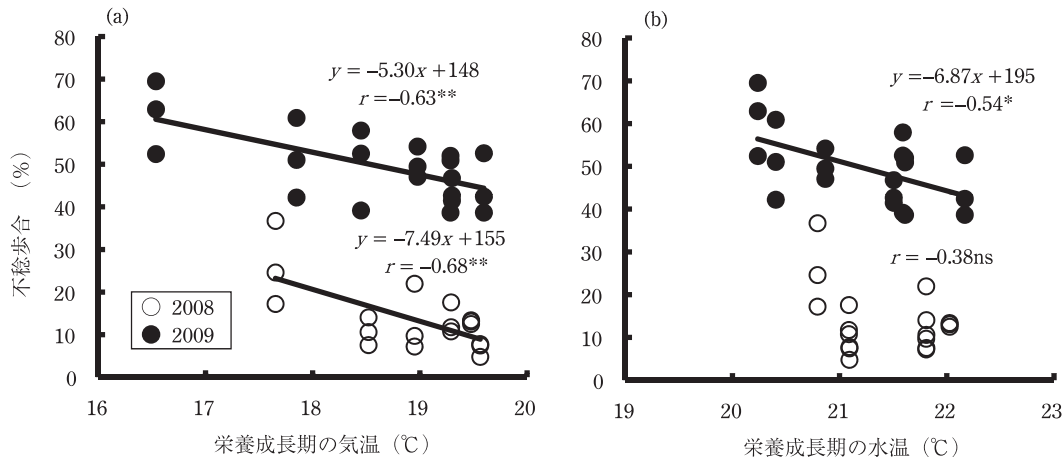
幼穂形成日は、気温と水温が低い地域ほど遅く、7 月中旬から下旬まで地域による変異がみられた (第 2 表)。出穂日は幼穂形成日とほぼ同様の傾向を示すものの、障害型不稔誘導処理の水温が低かった 2009 年が 2008 年より遅れる傾向があった。株あたりの穂数は、年次間で有意な違いがみられ、施肥 N 水準の高かった 2008 年が 2009 年に比べて有意に多かったものの、地域による影響は有意でなかった。株あたり籾数も同様の傾向を示した。一方、一穂籾数ならびに穂長は、2009 年が 2008 年に比べて高い値を示した。株あたり籾数は、穂数が多かった 2008 年が 2009 年より有意に多く、地域間では有意差は認められなかった。不稔歩合は、年次間で有意な違いがみられ、障害型不稔誘導処理の水温が低かった 2009 年が 2008 年に比べて高い値を示した。地域間でも有意な効果が認められ、北海道、青森県が高い不稔歩合を示した。しかし、年次と地域の交互作用は有意でなかった。

栄養成長期の気象条件による不稔歩合の変動要因を解析するため、不稔歩合と気象要素との関係をみると、年次を超えて、気温との間で有意な負の相関関係が認められた (第 1 表, 第 1 図)。水温との間についても同様に負の相関関係が認められるものの、2008 年は有意でなかった。他の気象要素として、風速との間では年次を超えた正の相関関係が認められるものの、日照時間との間では一定した傾向は

第2表 障害型不稔誘導処理が北日本の各地点で生育させたイネの生育ステージと収穫期の形質に及ぼす影響。

年次	地点	幼穂形成日	出穂日	穂数 (株あたり)	籾数 (株あたり)	一穂籾数	穂長 (cm)	不稔歩合 (%)
2008	青森	7/18	9/1 ± 0	31 ± 6	2150 ± 478	67 ± 3	15.6 ± 0.1	26 ± 6
	岩手	7/18	8/16 ± 1	30 ± 6	2004 ± 544	64 ± 7	17.6 ± 0.6	11 ± 2
	宮城	7/18	8/22 ± 2	37 ± 3	2717 ± 164	74 ± 2	16.9 ± 0.1	13 ± 2
	秋田	7/18	8/27 ± 1	32 ± 5	2067 ± 371	65 ± 3	16.1 ± 0.4	13 ± 5
	山形	7/15	8/10 ± 4	24 ± 6	1324 ± 335	55 ± 1	16.7 ± 0.2	7 ± 1
	福島	7/15	8/17 ± 3	35 ± 6	2169 ± 405	62 ± 1	16.1 ± 0.1	13 ± 0
2009	北海道	7/31	9/6 ± 0	12 ± 2	995 ± 149	81 ± 7	17.5 ± 0.6	62 ± 5
	青森	7/21	8/29 ± 1	11 ± 1	1003 ± 104	94 ± 2	17.7 ± 0.4	51 ± 5
	岩手	7/14	8/24 ± 1	18 ± 1	1567 ± 103	85 ± 4	17.4 ± 0.5	47 ± 4
	宮城	7/14	8/27 ± 3	15 ± 1	1443 ± 92	99 ± 4	18.6 ± 0.4	50 ± 2
	秋田	7/14	8/23 ± 3	17 ± 1	1558 ± 66	92 ± 5	17.9 ± 0.5	50 ± 6
	山形	7/10	8/25 ± 1	16 ± 1	1680 ± 43	104 ± 7	17.4 ± 0.5	45 ± 4
福島	7/10	8/25 ± 1	12 ± 1	1162 ± 148	93 ± 5	17.5 ± 0.5	44 ± 2	
分散分析	年次	-	**	***	**	***	***	**
	地点	-	***	ns	ns	ns	ns	*
	年次 × 地点	-	**	ns	ns	*	*	ns

平均値 ± 標準誤差 (n=3). *** P<0.001, ** P<0.01, * P<0.05, ns 有意差なし. 分散分析は、分散分析は、東北6地点の2カ年について実施した(北海道を除く).



第1図 栄養成長期に異なる地点で生育させたイネの不稔歩合と栄養成長期の平均気温(a)と平均水温(b)の関係。不稔歩合は、生殖成長期の障害型不稔誘導処理を個体のデータを示す。 ** P<0.01, * P<0.05, ns 有意差なし。

認められなかった。

考 察

2年間における6~7地点の気象条件の違いを利用した本試験により、幼穂形成前の栄養成長期間中の温度環境が穂ばらみ期耐冷性を変動させることを実証した(第2表)。これまで、人為的に水温に作用する試験から栄養成長期の水温の重要性を指摘してきたが(水温を制御したポット試験(Shimonoら2007, Matsumuraら2011, Shimonoら2011)、圃場での加温試験(Shimonoら2011)など)、今回の試験は、完全な自然条件での北日本全域をカバーした結果であり、今後、冷害年の被害解析ならびにリスク評価を行う上で非

常に重要な基礎的知見となった。すなわち、本知見は、同一の穂ばらみ期の低温条件においても栄養成長期の温度が低ければ、その冷害リスクは高いことを示しており、栄養成長期の温度環境を考慮した冷害被害の解析やリスクマップの策定が望まれる。

本試験において、圃場条件における地域間の耐冷性の変動の多くの部分を栄養成長期の温度環境で説明することができたが、その中で、水温より気温と不稔歩合の相関が高かった(第2表, 第1図)。これまでの精密なポット試験により、イネの栄養成長期の温度環境、特に水温が気温より、穂ばらみ期耐冷性に強く作用することを実証しており(Shimonoら2007)、この結果とは異なる。現在のと

ころ、栄養成長期の水温が穂ばらみ期耐冷性に及ぼす作用の生理的メカニズムは不明であるが、既報で栄養成長期の低水温により耐冷性が低下した植物体の幼穂形成時点の炭素 / 窒素比 (C/N 比) が高いことを報告している (Shimono ら 2007)。これは、施肥窒素量に関する試験報告とは相反するものの (天野・森脇 1984)、大気中 CO₂ 濃度が高まると耐冷性が低下するという報告と合致する (Okada ら 2005, Shimono ら 2008)。すなわち、耐冷性は、植物体の C/N 比が直接的に作用するのではなく、それに伴う生理的な変化が作用していることを示唆する。本試験は、既報のような制御環境におけるポット試験 (Shimono ら 2007) とは異なり、多くの気象要素が日々変動する圃場条件であることから、他の気象要素の相互作用を受けた可能性もある。今後、栄養成長期の温度環境がどのように耐冷性に関わるのか、詳細なメカニズムの解明が必要となる。

加えて、本試験では、水温を各地点で 1 点のみしか計測していない。水温は、同一水田内でも水深の違いなどにより大きな変異があることが知られている (矢吹 1958)。特に、水管理は、各地の慣行法に則り、通常の中干しを実施しており、その最中はセンサーが空気中に露出した状態となった地点も想定され、水深の関係から異なる温度対象を計測した可能性がある。今後、群落圃場条件で評価を行う場合は、水温の測定点数を増やし、水田全体を代表する水温ならびに地温の計測の必要性を示している。

栄養成長期の水温 1℃あたりの不稔歩合の低下程度は、本研究では 4~7% と推定された (第 1 図)。その影響の程度は、これまでの知見とほぼ一致した (Shimono ら 2007, Shimono and Kanda 2008, Shimono ら 2011)。本知見は、他の気象環境が温度環境とともに、大きく変動する中での結果であることから、日照時間や風速などの他の要因より、温度要因が支配的であることを実証した。

引用文献

- 天野高久・森脇良三郎. 1984. 水稻の冷害に関する栽培学的研究 第 2 報 穂孕期不稔に関する葉身の限界窒素含有率. 日作紀 53 : 1-6.
- Matsumura, H., K. Suzuki, and H. Shimono 2011. Water temperatures during vegetative growth affect cold tolerance at booting stage of rice under controlled environmental conditions. *J. Agric. Meteorol.* (in press).
- Okada, M., H. Shimono, Y. Yamakawa, M. Inoue, and K. Kobayashi. 2005. Effects of elevated CO₂ on floral sterility of rice plants caused by low temperature. *J. Agr. Meteorol.* 60 : 589-592.
- Satake, T 1976. Determination of the most sensitive stage to sterile-type cool injury in rice plants. *Res. Bull. Hokkaido Nat. Agric. Exp. Stn.* 113 : 1-44.
- Satake, T., S.Y. Lee, S. Koike, and K. Kariya. 1988. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practices—effects of the temperature and depth of water before the critical stage. *Jpn. J. Crop Sci.* 57 : 234-241.
- Shimono, H., M. Okada, E. Kanda, and I. Arakawa 2007. Low temperature-induced sterility in rice : Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. *Field Crops Res.* 101 : 221-231.
- 下野裕之. 2008. 地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響. 日作紀 77 : 489-497.
- Shimono, H., and E. Kanda. 2008. Does regional temperature difference before the panicle initiation affect the tolerance for low temperature-induced sterility in rice? *Plant Prod. Sci.* 11 : 430-433.
- Shimono, H., M. Okada, Y. Yamakawa, H. Nakamura, K. Kobayashi, and T. Hasegawa. 2008. Rice yield enhancement by elevated CO₂ is reduced in cool weather. *Global Change Biology* 14 : 276-284.
- Shimono, H., A. Ishii, E. Kanda, M. Suto, and K. Nagano 2011. Genotypic variation in rice cold tolerance responses during reproductive growth as a function of water temperature during vegetative growth. *Crop Sci.* 51 : 290-297.
- 矢吹万寿. 1958. 水田水温に関する研究. 大阪府立大学紀要 7 : 113-146.

Factors Responsible for Regional Variation of Cold Tolerance in Rice in Northern Japan : Eiji KANDA¹⁾, Toshiyuki KIMURA²⁾, Aya OIKAWA³⁾, Shigenori Ookawa⁴⁾, Jiro SASAKI⁴⁾, Masumi ASANO⁴⁾, Yukou SATO⁵⁾, Kazuhiro KON⁵⁾, Hiroshi FUJII⁶⁾, Shigeto FUJIMURA⁷⁾, Yukio SUZUKI⁷⁾, Takahiro HAMASAKI⁸⁾, Manabu NEMOTO⁸⁾ and Hiroyuki SHIMONO⁹⁾ (¹⁾National Agric. Res. Center for Tohoku region; ²⁾Aomori Pref. Industrial Technology Res.; Center; ³⁾Iwate Agric. Res. Center; ⁴⁾Miyagi Pref. Furukawa Agric. Res. Center; ⁵⁾Akita Pref. Agric. For. Fish. Res. Center; ⁶⁾Fac. Agric., Yamagata Univ.; ⁷⁾Fukushima Agricultural Technology Center; ⁸⁾National Agric. Res. Center for Hokkaido region; ⁹⁾Fac. Agric., Iwate Univ.)

Abstract : The effects of climate conditions during vegetative growth on cold tolerance of rice at the booting stage were examined. Rice cultivar 'Hitomebore' was grown in Hokkaido-Tohoku region at six locations in 2008 and seven locations in 2009, where the soil and applied fertilizer were identical. A cold tolerance test was conducted during the reproductive growth after panicle formation under deep cold water conditions. The sterility significantly varied with the location in both years. It was closely and negatively correlated with air and water temperatures before the panicle formation stage. These results indicate that the air and water temperatures before panicle formation can explain the variation of cold tolerance and that a lower temperature during the vegetative growth stage decreases the cold tolerance.

Key words : Cold tolerance, Spikelet sterility, Rice, Water temperature.