

寒冷地における気象変動が水稲の生育・収量に及ぼす影響の解析

下野 裕之 (岩手大学農学部)

shimn@iwate-u.ac.jp

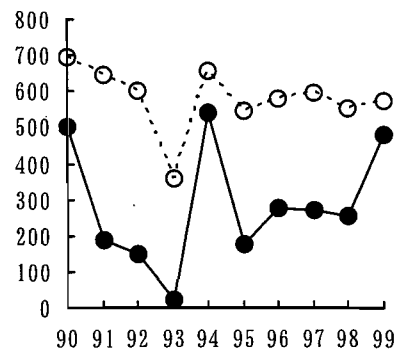
寒冷地における水稲生産は生育の様々な段階で遭遇する低温により阻害される。将来に予測される気候変動下の寒冷地において安定的な水稲生産を行なうため、水稲の気象応答を定量化するとともに、将来の生育・収量に及ぼす影響を予測し、有効な適応技術を開発することが望まれる。本研究では、冷水掛け流し実験、開放系大気 CO₂ 増加 (Free-air CO₂ enrichment, FACE) 実験など、屋外での環境操作実験を主な手段として、群落条件での水稲の環境応答を定量化・モデル化し、現在の水稲生産の変動要因を解析するとともに、将来予測される気候変動が寒冷地の水稲収量に及ぼす影響を評価した。

1. 灌漑水温が寒冷地の水稲生産に果たす役割

生育期間の大部分を湛水条件下で生育する水稲にとって水温は主要な温度要因である。特に寒冷地においては、水温と気温の差が極めて大きいことから、水稲の生育・収量の気象応答を評価するためには、水温の影響を取り入れることが重要である。これまでに多くの水温制御実験は行なわれてきたが、圃場群落条件での生理・生態形質の十分なデータがなかった。そこで、圃場条件で冷水掛け流しを利用した低水温処理試験を行い、水温に対する水稲の応答を調査し、その試験結果に基づき水温の影響を取り入れた簡易な生育・収量予測モデルを作成し (文献 1, 2), 北海道内の生育・収量の地域間差異の要因をモデル解析した。

まず、田面水の保温効果を示すために水温と気温が同一温度と仮定してシミュレーションを行ったところ

($T_w = T_a$), 実際の水温条件 ($T_w > T_a$) に比べて収量は半減したことから (第 1 図), 寒冷地の稲作における灌漑水の保温効果は極めて大きいことがわかった (文献 3)。また、地球温暖化による気温上昇が寒冷地の水稲生産に及ぼす影響をモデル解析した。気温が 3°C 上昇し、他の気象要素は変化しない場合 ($T_a + 3^\circ\text{C}$) には、水温の 0.9°C 上昇, 収量の 6% 増加が予測されたが、気温上昇とともに日射量が 30% 低下する場合 ($T_a + 3^\circ\text{C}$ & $R_d - 30\%$), 水温は変化せず, 収量は 30% の低下, また気温上昇とともに風速が 30% 増加する場合 ($T_a + 3^\circ\text{C}$ & $W_s + 30\%$), 水温上昇が抑制され, 収量増加が半減することが予測された (第 1 表)。以上, 寒冷地の水稲の生産性に水温が強く作用することを明らかとすると



第1図. 灌漑水温による保温効果が北海道における水稲生産に果たす役割のモデル解析。

$T_w > T_a$: 対照, $T_w = T_a$: 水温と気温が同一とした場合のモデルでの計算結果 (札幌, 1990-99). 値は10年間の平均値。

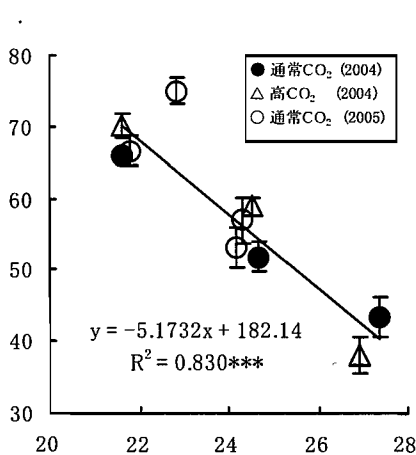
第1表. 気温上昇 ($T_a + 3^\circ\text{C}$) とそれに伴う日射量 (R_d) と風速 (W_s) の変化が田面水温と水稲の収量に及ぼす影響のモデル解析 (1990-1999年, 札幌, きらら397)。

シナリオ	水温 ($^\circ\text{C}$)	収量 (g m^{-2})
通常	21.2	581
$T_a + 3^\circ\text{C}$	+ 0.9	+ 6%
$T_a + 3^\circ\text{C} \& R_d - 30\%$	- 0.1	- 30%
$T_a + 3^\circ\text{C} \& W_s + 30\%$	+ 0.4	+ 3%

ともに、気象変動の影響を評価するためには、水温の影響を考慮する必要があることを定量的に明らかとした。

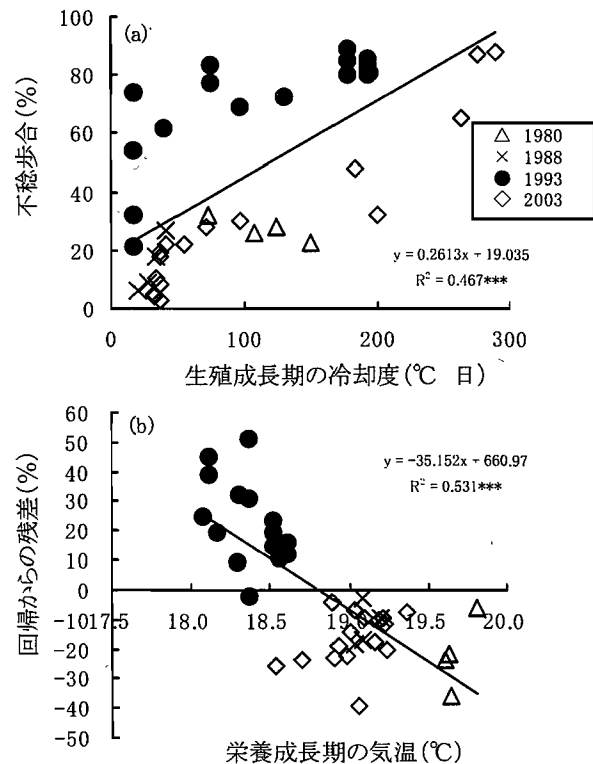
2. 水稲の穂ばらみ期耐冷性に幼穂形成以前の水温が及ぼす影響

寒冷地の水稲の収量の最大の変動要因である穂ばらみ期の障害型冷害に関しては、これまで取り上げられなかった幼穂形成以前の前歴温度に着目し、穂ばらみ期の耐冷性が幼穂形成以前の低水温によって弱まることを明らかにした(第2図)(文献4)。この知見に基づき、東北地方の過去の冷害年における不稔発生と気象要因との関連を年次について解析したところ、1993年の大冷害では、生殖成長期間の低温に加えて幼穂形成以前の温度の低さが被害を助長した可能性(第3図)ならびに地域間での冷害被害程度の違いにも幼穂形成以前の温度環境が関与した可能性を指摘した。実際に、気温条件の異なる2地点(盛岡と八戸)において幼穂形成前を生育させると、穂ばらみ期耐冷性が低下することを報告した(文献7)。



第2図. 栄養成長期の水温が水稲の穂ばらみ期耐冷性に及ぼす影響(2004-2005)。

値は生殖成長期(幼穂形成以降)に冷害誘導処理を行ったときの不稔歩合を示す。なお栄養成長期の低水温のみでは不稔歩合は10%程度の通常レベルであった。



第3図. 過去の冷害年の要因解析(1980, 1988, 1993, 2003)。

(a) 生殖成長期の冷却度と不稔歩合の関係。(b) (a)の回帰直線からの残差と栄養成長期の気温の関係。

3. 地球温暖化にともなう気温とCO₂濃度上昇が寒冷地水稲の生育・収量に及ぼす影響

将来に予測される地球温暖化が寒冷地の水稲生産への影響について、気温上昇と大気CO₂濃度の上昇の影響について調査・解析した。まず、気温上昇の影響について、わが国の多地点の過去70年間の気温上昇の傾向を月別に解析したところ、平均気温は全国的に上昇しているものの北日本の夏には顕著な気温上昇がないことを示した(第2表)(文献6)。この知見に基づき、近い将

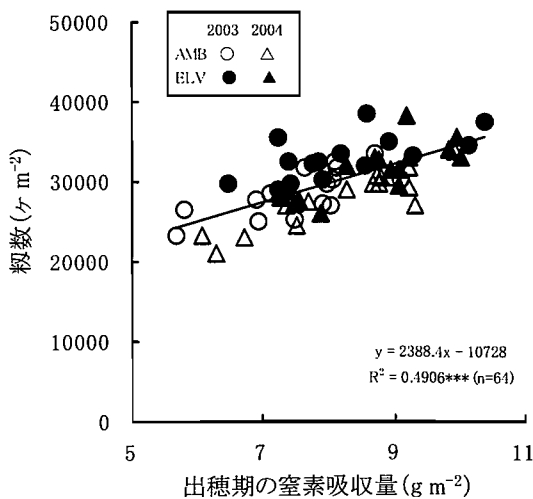
来においても春は昇温するが夏が昇温しない場合の影響をモデル解析した。その結果、品種や作期を変更しない条件では、春のみの昇温によって発育ステージが前進し、穂ばらみ期の障害型冷害のリスクが高まることを予測した。また、地球温暖化にともない寒冷地のイネの栽培可能期間の延長しているものの、栽培時期の適応は行われておらず、そのギャップが広がっていることを指摘した（文献10）。

第2表. 過去70年間の月別平均気温の変化傾向(°C/10年)(1937~2006年)。

地点	年平均	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
札幌	0.25 ***	0.40 ***	0.36 **	0.29 ***	0.26 ***	0.23 ***	0.22 ***	0.04 ns	0.04 ns	0.24 ***	0.31 ***	0.32 ***	0.33 ***
旭川	0.17 ***	0.32 **	0.29 **	0.26 ***	0.23 **	0.22 **	0.15 *	-0.05 ns	-0.03 ns	0.11 ns	0.14 *	0.26 ***	0.20 ns
八戸	0.17 ***	0.29 ***	0.30 ***	0.24 ***	0.20 **	0.14 ns	0.11 ns	-0.06 ns	-0.04 ns	0.17 *	0.21 ***	0.20 **	0.26 **
盛岡	0.14 ***	0.24 **	0.25 **	0.19 **	0.20 **	0.12 *	0.16 **	-0.03 ns	-0.03 ns	0.14 *	0.14 *	0.10 ns	0.24 **
仙台	0.21 ***	0.33 ***	0.33 ***	0.27 ***	0.27 ***	0.19 **	0.14 *	-0.02 ns	-0.01 ns	0.17 **	0.28 ***	0.26 ***	0.35 ***
秋田	0.21 ***	0.28 ***	0.32 ***	0.28 ***	0.27 ***	0.27 ***	0.19 **	0.02 ns	0.06 ns	0.23 ***	0.24 ***	0.20 **	0.26 **
酒田	0.21 ***	0.28 ***	0.30 ***	0.25 ***	0.29 ***	0.32 ***	0.22 ***	0.04 ns	0.09 ns	0.18 **	0.19 **	0.16 *	0.24 **
福島	0.13 ***	0.13 **	0.14 **	0.14 **	0.14 **	0.20 ***	0.10 *	0.07 ns	0.11 *	0.09 *	0.17 ***	0.15 ***	0.14 **
水戸	0.16 ***	0.23 ***	0.24 **	0.21 **	0.22 **	0.18 **	0.15 *	0.03 ns	0.08 ns	0.15 *	0.17 **	0.15 *	0.16 *
富山	0.19 ***	0.24 **	0.29 **	0.26 **	0.27 **	0.26 **	0.14 **	0.05 ns	0.17 **	0.19 **	0.22 **	0.16 *	0.13 ns
神戸	0.21 ***	0.26 ***	0.29 ***	0.22 **	0.27 ***	0.25 **	0.26 **	0.15 *	0.17 **	0.22 **	0.23 ***	0.20 **	0.20 **
高知	0.24 ***	0.27 ***	0.28 **	0.19 **	0.26 ***	0.25 **	0.25 **	0.23 **	0.24 **	0.24 **	0.25 **	0.20 **	0.21 *
鹿児島	0.35 ***	0.39 ***	0.41 ***	0.31 ***	0.39 ***	0.35 ***	0.30 **	0.26 **	0.30 **	0.34 ***	0.42 ***	0.37 ***	0.38 ***
平均値	0.20	0.28	0.29	0.24	0.25	0.23	0.18	0.06	0.09	0.19	0.23	0.21	0.24

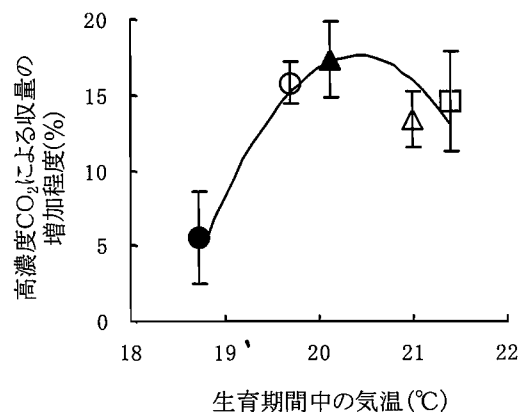
値は温度と年次間の関係の線形回帰の傾きを10年単位に換算したものを示す。***, **, *, 0.1%水準, 1%水準, 5%水準で有意。ns; 有意でない。

大気CO₂濃度の上昇が寒冷地の水稻に及ぼす影響については、岩手県雫石町のFACE実験によって実証的に調査した。熟性の異なる北日本の水稻主要4品種を、外気CO₂よりも200ppm高いCO₂条件で栽培したところ、収量は対照区に比べて高まったが、その程度は品種により異なる(3-18%)こと、高濃度CO₂による収量応答が高い品種は生育前期の生育応答が高いことを開放系圃場条件で明らかにした(第4図)(文献8)。また、過去5年間のFACE実験について、気象条件との関係を解析すると、低温年には高濃度CO₂による増収程度が通常年に比べて有意に低くなることを明らかにした(第5図)(文献5)。高濃度CO₂により水稻の気孔コンダクタンスが低下するものの、Ball-Berryモデルを用いて解析したところ、時刻により高濃度CO₂への応答が異なることを明らかにした(第6図)(文献9)。

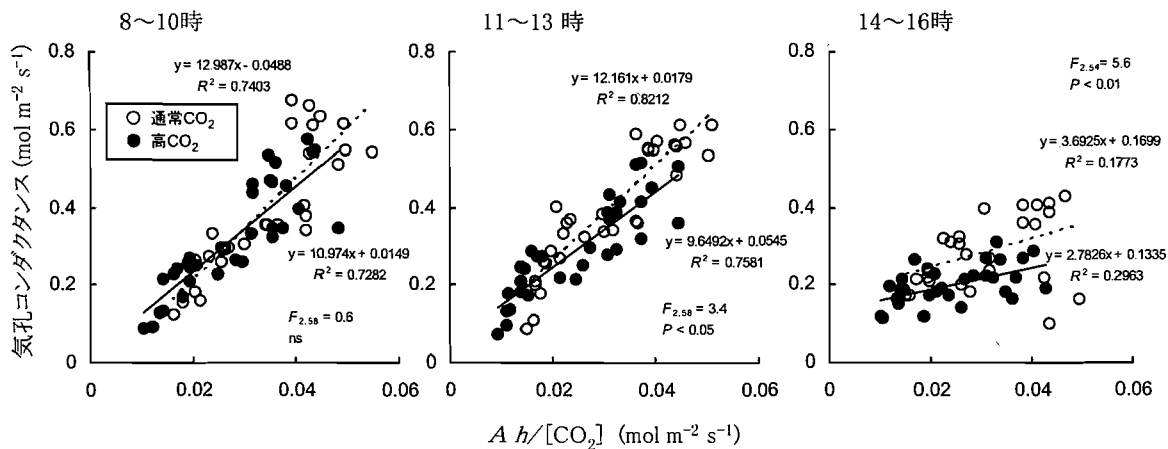


第4図. 異なるCO₂濃度条件で生育した水稻の窒素吸収量と粒数の関係。

全4品種(きらら397, かけはし, あきたこまち, ひとめぼれ)を込みにした結果。



第5図. 高濃度CO₂が水稻の収量増加に程度に気温が及ぼす影響。品種「あきたこまち」



第6図. 高濃度CO₂がイネの気孔コンダクタンスに及ぼす影響.

X軸はBall-Berryモデル, A 光合成速度, h 相対湿度, $[CO_2]$ 大気CO₂濃度。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、長谷川利拡（農業環境技術研究所）、岩間和人（北海道大学）、岡田益己（岩手大学）、小林和彦（東京大学）、James A. Bunce (USDA) 諸先生より、ご指導と激励を賜った。また、農学進歩賞に推薦いただいた日本作物学会および岩手大学農学部に厚く御礼申し上げます。

引用文献

1. Shimono H., Hasegawa T., Moriyama M., Fujimura S. and Nagata T. (2005) Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice. *Agron. J.* 97 : 1524-1536.
2. Shimono H., Hasegawa T. and Iwama K. (2007) Modeling the effects of water temperature on rice growth and yield under a cool climate: I. Model development. *Agron. J.* 99 : 1327-1337.
3. Shimono H., Hasegawa T., Kuwagata T. and Iwama K. (2007) Modeling the effects of water temperature on rice growth and yield under a cool climate: II. Model application. *Agron. J.* 99 : 1338-1344.
4. Shimono H., Okada M., Kanda E. and Arakawa I. (2007) Low temperature-induced sterility in rice: evidence for the effects of temperature before panicle initiation. *Field Crops Res.* 101 : 221-231.
5. Shimono H., Okada M., Yamakawa Y., Nakamura H., Kobayashi K. and Hasegawa T. (2008) Rice yield enhancement by elevated CO₂ is reduced in cool weather. *Global Change Biology* 14 : 276-284.
6. 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 日本作物学会紀事 77 : 489-497.
7. Shimono H. and Kanda E. (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.
8. Shimono H., Okada M., Yamakawa Y., Nakamura H., Kobayashi K. and Hasegawa T. (2009) Genotypic variation in rice yield enhancement by elevated CO₂ relates to growth before heading, and not to maturity group. *J. Exp. Bot.* 60 : 523-532.
9. Shimono H., Okada M., Inoue M., Nakamura H., Kobayashi K. and Hasegawa T. (2010) Diurnal and seasonal variations in stomatal conductance of rice at elevated atmospheric CO₂ under fully open-air conditions. *Plant Cell Environ.* 33 : 322-331.
10. Shimono H., Sawano S. and Kanno H. (2010) Can the cropping schedule of rice be adapted to changing climate? A case study in cool areas of northern Japan. *Field Crops Res.* 118 : 126-134.