

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月7日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07660

研究課題名(和文) 北海道では冷夏でも日射量が多い特徴を活かせば水稲冷害を回避し高収量を得られるか？

研究課題名(英文) Could paddy rice make good yield in sunny cool summer in Hokkaido?

研究代表者

鮫島 良次 (Ryoji, Sameshima)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：70355452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：既存の水温推定モデルのパラメータを修正し、北海道内3地点の水田水温を推定したところ、二乗平均誤差と平均誤差は0.9℃、-0.3℃であった。このモデルで1991年～2015年の道内各地の水田水温を推定した。障害型冷害の危険期にあたる7月の推定水温は気温よりも1.5～2.7℃高かった。2つのモデルで冷害年の不稔率を推定し、さらに同じモデルに気温に変えて水温を入力して深水管理の効果を評価した。不稔率推定値はモデル間で差があったが、いずれのモデルも冷害年の低温感受性の高い期間に深水管理により穂を水中に位置させれば、不稔率を約20%低減できたと推定した。

研究成果の概要(英文)：Paddy water temperatures in Hokkaido were estimated by an existing model with adjusted parameters. Root-mean-square and mean error of estimated water temperatures were 0.9℃ and -0.3℃, respectively. Paddy water temperatures in 1991 to 2015 were simulated with the model. Water temperatures in July, corresponding to the sensitive period of floral sterility caused by low temperature, were higher than air temperature by 1.5 to 2.7℃. Percentages of sterility were calculated using two models, and the effect of deep-flood irrigation at the sensitive period in cool summer was estimated by inputting water temperature instead of air temperature. Although calculated percentages of sterility were different between the models, both models indicated about 20% reduction in sterility by practicing deep-flood irrigation which place the panicle in the water in the sensitive period.

研究分野：農業気象

キーワード：水稲 冷夏 冷害 不稔 深水管理 晴冷型 水田水温 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

北海道では数年に一度の頻度で夏期低温による水稲冷害の被害を受けている。これまでに、水稲の低温感受性時期(穂ばらみ期)と低温時期が重ならず、かつ十分な登熟気温を確保できる栽培スケジュールを統計的に策定するための、出穂期を基準とした計画栽培法が提案された。また、水稲冷害発生気象条件(冷害発生の閾値温度、冷害程度と冷却量の関係等)が解明され、より適切な栽培スケジュールの策定が可能となるとともに、冷害の危険性の事前予測が可能となった。冷害が予想される場合の緊急対策技術として深水管理の有効性が示された。これら多くの冷害研究がなされたにもかかわらず、現在も冷害被害は頻発している。この実態に対して、冷害被害は不可避なものではなく、特に北海道においては、障害型冷害(穂の生育時期の低温により花粉の健全な生育が阻害されてコメが稔らない不稔が発生する)は、低減できる可能性がある。その根拠は、北海道が夏期に低温となる気象条件では、低温だが日射量が平年並以上に豊富な晴冷型となる場合が多いことである(表1)。この点において北海道は、低温かつ寡照となる東北地方太平洋沿岸地域と対照的な特徴を有する。

表1. 代表的冷害年の7月平均の日照時間と気温の平年比、平年差

	日照時間の平年比					気温の平年差(°C)				
	80年	83年	88年	93年	03年	80年	83年	88年	93年	03年
札幌	1.0	1.0	1.3	1.2	1.1	-1.1	-2.3	-2.2	-1.4	-2.8
旭川	1.0	1.0	1.3	1.3	1.0	-1.4	-2.3	-1.7	-1.5	-2.6
仙台	0.7	0.8	0.3	0.4	0.3	-2.2	-2.2	-3.5	-3.6	-3.7

この北海道の気象的特徴を活用すれば、夏期低温となっても冷害(不稔)を回避可能であるだけでなく、晴冷型の気象の豊富な日射量を活用して平年並以上の収量も期待できる。

障害型冷害(冷害の主因である)が予想される場合、深水管理が唯一の強力な緊急対策技術である。この技術では、花粉の生育時期には穂は地表面から高さ20cm以下の位置にあること、および水田水温が気温より数高い場合が多いことから、水深を20cm程度に保つ深水管理により穂(花粉)を低温から守る。低温時期に日射量が多ければ、水温が高く保たれるため、高い保護効果が期待できる。ところが、深水管理は冷害回避に効果があると言われながらも、実施率は低い。例えば、2003年の北海道は、7月の平均気温の平年差が-3程度の低温であった(表1)。この年の日照時間は平年を上回ったことから深水管理の効果が期待できた。実際に、応募者らが深水管理を実施した試験水田は、20以上の水温を保ち、障害不稔を回避して平年並みの収量を得た。このように、2003年は北海道では深水管理を実施すれば冷害被害が低減できたにもかかわらず、その実施が不十分であったため(応募者らの現地調査によっても、この傾向が見られた)作況指数が73の

凶作となった。深水管理の実施を徹底するためにも、その効果と期待できる収量を数値で示す研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、過去の冷害年において、深水管理が実施された水田の水温は何であったかを推定し、それにより不稔率を何%低減できたか、そして何kg/10aの収量を達成できたかを明らかにすることを目指した。また、それに必要なシミュレーションを精度よく行うため、収量推定、不稔率推定、水温推定の各サブモデルの改良も目指した。

3. 研究の方法

(1) 水稲の不稔率と収量の推定

温度が不稔に及ぼす影響を概観するための簡易モデルを構築した。農林水産省の作物統計データを用いた。稲作面積が500haを超える北海道内の52市町村の1993年~2014年(22年間)の収量を対象とした。期間内に合併した21市町村は、合併後の8市町に合算して扱った。気象データはアメダス観測値を用いた。アメダスの設置されていない市町村については農業・食品産業技術総合研究機構・中央農業総合研究センターの提供する「メッシュ農業気象データ」を使用した(市町村役場の位置するメッシュの値)。

各年と平年の収量差が低温不稔に起因すると仮定し、気温との関係を定式化した。収量差は、22年間の平均値との差(平年差)、22年間の収量を直線回帰したトレンドとの差(トレンド差)、気候登熱量示数(羽生ら、1966)から予測した収量との差(潜在収量差)の3つを使用した。なお、平均値などを算出する際には1993年と2003年の収量データは除外した。1993年~2014年の北海道立(現・北海道立総合研究機構)中央農業試験場、上川農業試験場、道南農業試験場の主要農作物作況データに示される出穂期から、平均的な出穂期を8月1日と仮定し、障害型冷害の危険期を7月16日~25日、または7月16日~31日と設定した。

水稲のバイオマス、収量を推定するシンプルな放射量積算型のモデル(岡田、1987)を使用し(パラメータは北海道品種に合わせて修正した)、それと上記不稔率と収量の関係を組み合わせた収量推定モデルを構築した。

(2) 水田水温の推定

水温推定モデルは陸面作物生育結合モデル(Maruyama and Kuwagata, 2010)を使用した。このモデルは気温、水蒸気圧、日射量、風速の4要素のみで水温を推定でき、かつ経験的な定数を可能な限り除去した2層モデルである。

水温推定モデルの適用性を検証するため水田での気象・生育観測データを使用した。観測値、観測項目等は表2に示す。観測期間はイネの移植数日後(5月下旬、6月初旬)

～登熟期（8月下旬）である。札幌の観測値は農研機構・北海道農業研究センターの気象観測値を使用した。岩見沢、比布では水田群落内に測器を設置し気温、湿度、風速、日射量を地上2m高で、純放射量を地上1.5m高で測定した。水温は1地点につき3点測定した。それぞれ15秒に1回測定し、30分平均値をデータロガーに記録した。水田で観測を行った岩見沢（2014年、2015年）、札幌（2015年）、比布（2016年）の日平均気温、最高気温、最低気温、日平均水蒸気圧、日日射量、日平均風速をモデルに入力し、出力された日平均水温の推定値を観測値と比較した。

表2 水田圃場での観測概要

地点	観測年	品種	観測項目
札幌	1999年～2005年	きらら397・ほしのゆめ	移植日・出穂日・LAI
	2015年	きらら397・なつぼし	気温・湿度・風速・日射・純放射・水温・水深
岩見沢	2014年・2015年	なつぼし・空育181号	気温・湿度・風速・日射・純放射・水温・水深
比布	2016年	きらら397	気温・湿度・風速・日射・純放射・水温・水深

(3) 不稔による減収と温度の関係の概観および深水管理の効果の評価

構築した簡易モデルにより、収量におよぼす毎年の温度効果を概観した。

次に、Shimono et al. (2005)、および北海道立中央農業試験場（1997）のモデル（それぞれを方法(I)、方法(II)と呼ぶ）を利用して、以下の手順で不稔率の評価を行った。

- ・ 水稻生育モデルに過去の実測気温を入力して、不稔率を推定した。
- ・ 水田水温モデルを使用し、当該年の水田水温を推定した。
- ・ 水稻生育モデルに、気温に代えて水温を入力して、深水管理を実施した場合の不稔率を推定した。
- ・ 以上から、深水管理によりどれだけ不稔率を低減できたかを評価した。

前歴期間、冷害危険期を特定する必要がある。前歴期間を出穂前24日～15日、危険期を出穂前14日～8日とし、出穂日は上記の水田推定モデル内にサブモデルとして組み込まれている作物生育モデルのDVI推定値より定めた。移植期、出穂期登熟期のDVIを、それぞれ0、1、2とした。開花期は出穂前後5日間とした。

表3 気温と減収量の間の決定係数

	7/16-7/25	7/16-7/31
平年差	0.57	0.64
トレンド差	0.59	0.65
潜在収量差	0.60	0.64

4. 研究成果

(1) 不稔による減収と温度の関係の概観

気温20以下の範囲のデータを使用して収量差との関係を調べたところ、7月16日～7月25日より7月16日～7月31日の方が決定係数が強かった。収量差として、潜在収量差を採用すると最も係数が高かったが、他の方法と大差なかった（表3）。

図1に示す折れ線モデルを仮定し、市町村別、地域（太平洋側、日本海側）別に収量差がゼロとなる気温を調べたところ、大きな差は認められなかった。収量差（Y）と気温の関係は、全道平均すると、

$$Y = -79.2T + 1548.5$$

であった。

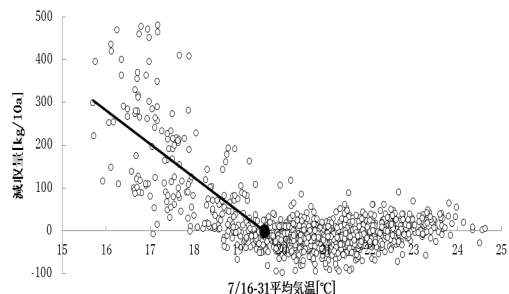


図1 気温と減収量の関係

図1の関係を詳しく見ると、1993年と2003年に大きく減収する地域（上富良野、美瑛、東川など：地域I）と、そうでない地域（滝川、月形、協和など：地域II）にわかれた。この違いには、前歴期間の温度が影響を与えている可能性が考えられた。地域Iと地域IIの7月1日～7月20日の平均気温を比較したところ、地域I（17.6）の気温の方が地域II（17.1）より高く、前歴期間の温度では地域IとIIの収量差の違いは説明できなかった。

収量推定モデルのパラメータ - を北海道品種用に修正した後、収量の年次変動を推定した（図2に一例を示す）。このモデルによる推定は、地域によっては精度が高くなく、継続して検討する。

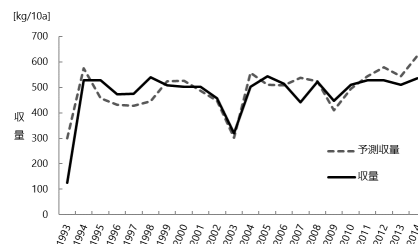


図2 モデルによる収量の推定（長沼の例）

(2) 深水管理の効果

図3に水温の観測とモデルによる計算値の推移の例を示した。水温が気温より高く、生育初期ほどその温度差が大きく、5の温度差も見られた。水温の観測値と計算値の違いは二乗平均誤差(RMSE)=1.4、平均誤差(ME)=-0.8で、過小評価傾向であった。モデル

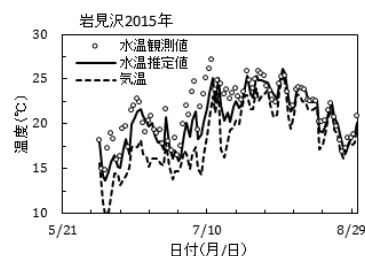


図3 気温、水温の観測値と推定値の季節変化

内の空気力学的なパラメーターおよび水稲生育パラメータを修正したところ、RMSE, MEがそれぞれ1.1, -0.5に改善した。他の地点も含めた観測値と計算値の比較を図4に示す。

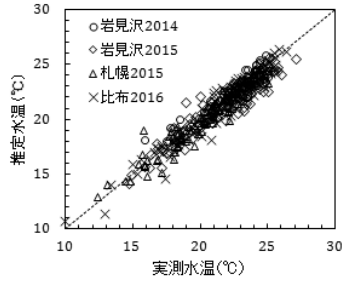


図4 水温の観測値と推定値の比較

このモデルを用いて計算した冷害年の7月の推定水温と気温の温度差を表4に示した。

	7月の水気温差(°C)					平均
	1992	1993	2002	2003	2009	
北斗	1.8	2.1	1.8	2.1	1.7	1.9
蘭越	2.1	2.4	1.5	1.7	1.8	1.9
むかわ	2.4	3.1	1.8	2.6	2.6	2.5
長沼	2.2	2.6	1.7	2.1	2.3	2.2
美唄	1.7	2.1	1.3	1.7	1.5	1.7
深川	1.5	2.5	1.7	1.7	1.7	1.8
上富良野	1.8	2.5	1.4	1.3	1.6	1.7
士別	2.4	3.3	2.4	2.3	2.2	2.5
名寄	2.1	3.3	2.3	2.0	2.5	2.4
羽幌	2.5	3.1	1.9	2.3	1.7	2.3
平均	2.1	2.7	1.8	2.0	2.0	2.1

7月は北海道の慣行栽培では冷害危険期、前歴期にあたる。この期間でも水温は気温より1.3~3.3高かった。とくに1993年に水気温差が大きかった。地点別ではむかわ, 士別, 名寄で水気温差が大きい傾向があった。この要因として気温と日射強度が関係していると考えられた。図5に冷害年の水気温差と気温・日射強度の関係を示した。気温が低く日射強度が大きいほど水気温差は大きかった($p < 0.01$)。このことから1993年に水気温差が大きかったのは低温で日射が豊富だったためと考えられ、このような晴冷型の冷害年は特に深水管理の効果が大きいと推察された。

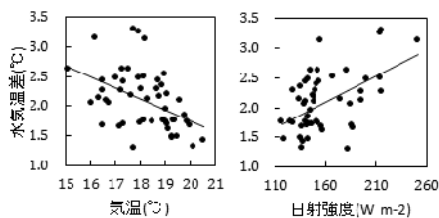


図5 水気温差と気温(左図), 日射強度(右図)の関係

図6に方法(), ()で、穂温として気温を入力計算した不稔率から、穂温として水温を入力した不稔率を差し引いた、深水管理で期待される不稔低減効果を年別に示した。いずれの方法でも穂が水温相当に保たれていれば全年, 地点平均で約20%の不稔低減が期待できた。1993年に各地の農業普及所で調

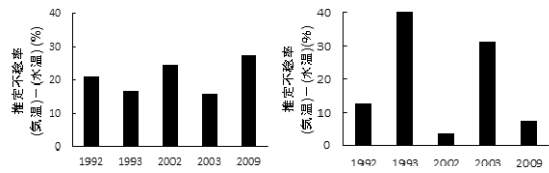


図6 冷害年別の深水管理による不稔低減効果(左図:方法(), 右図:方法())

査された不稔率(北海道立農業試験場, 1994)と, 方法(), ()による推定不稔率の比較を表5に示した。現地調査による不稔率の平均値は64%で, 方法()で計算した不稔率(気温, 水温を入力したいずれも)は, この範囲内にあった。水温を入力して方法()で推定した不稔率は現地調査の全地点平均値より23%低く, 深水管理が徹底されていれば被害が大きく低減できた可能性を示した。一方, 方法()では水温を入力した場合でも不稔率が70%前後であり, 不稔率を過大評価していた。

表5 1993年の不稔率(%)
農業普及所での実測値と推定値の比較

	実測値	気温		水温	
		()	()	()	()
北斗	96	90	84	93	41
蘭越	89	89	76	85	42
むかわ	77	90	82	95	68
長沼	76	89	79	86	28
美唄	54	82	68	71	29
深川	31	86	65	74	33
上富良野	73	88	75	86	57
士別	66	89	69	81	29
名寄	45	89	69	80	31
羽幌	34	80	37	62	49
平均	64	87	70	81	41

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 鮫島良次・石渡康介・岡田啓嗣・久富裕太, 査読有, 北海道空知の防風林が水田の環境と水稲に及ぼす影響, 査読あり, 生物と気象, 18巻, 2018年, 39-47

〔学会発表〕(計6件)

Takahashi M, Maruyama A, Sameshima R and Okada K, Effect of deep water management on reducing cool summer damage of paddy rice in Hokkaido, 査読なし, International Symposium on Agricultural Meteorology 2017, 2017年3月28日, 北里大学(十和田市).

Ishiwata K, Sameshima R and Okada K Effect of windbreak forest on paddy environment and rice growth in Sorachi, Hokkaido, 査読なし, International Symposium on Agricultural Meteorology 2017, 2017年3月28日, 北里大学(十和田市).

高橋万輝登, 丸山篤志, 鮫島良次, 岡田啓嗣, 査読無, 冷害年における北海道全域の水田水温と深水管理の効果の評価, 査読なし, 日本農業気象学会北海道支部2016年大

会，2016年12月9日，北海道大学（札幌市）

梁拓夢，鮫島良次，岡田啓嗣，水稻障害型冷害による減収量の生育モデルによる推定，査読なし，日本農業気象学会北海道支部2016年大会，2016年12月9日，北海道大学（札幌市）

Takahashi M, Maruyama A, Hamasaki T, Okada K, Sameshima R, Estimating water temperature of paddy field in Hokkaido with a coupled land surface and crop growth model，査読なし，International Symposium on Agricultural Meteorology 2016，2016年3月15日，岡山大学（岡山市）。

高橋万輝登、丸山篤志、長田亨、塚本康貴、濱寄孝弘、岡田啓嗣、鮫島良次，陸面-作物結合モデルを用いた北海道の水田水温の推定，査読無，日本農業気象学会北海道支部2015年大会，2015年12月7日，旭川クリスタルホール（旭川市）。

6．研究組織

(1)研究代表者

鮫島 良次 (Sameshima Ryoji)

北海道大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：70355452