

収量予測・情報処理・環境

移植期の現場データを用いて水稻生産地の 発育ステージ変異を推定する方法

神田英司¹⁾・鳥越洋一²⁾・小林隆¹⁾

(¹⁾ 東北農業研究センター, ²⁾ 中央農業総合研究センター)

要旨: 水稻栽培地域内に異なる発育ステージが混在することは冷温による被害程度を推定する上で問題となる。そこで、地域内の特定の発育ステージにある有効穂や穎花の存在割合を評価する手法を作成した。この手法は、地域内の個々の圃場における移植日の幅と、移植する苗の葉齢を基本とし、個々の圃場内の有効穂や穎花の発育ステージ変異と組み合わせることで、地域内の発育ステージの変異を推定するものである。この手法を1999年、2001年、2003年の青森県のアメダス地点のうち、青森、蟹田、五所川原、弘前、黒石、八戸、十和田、三沢、作柄表示地帯の青森地帯、津軽地帯、南部・下北地帯に適用し、実用性を検討した。出穂期の始期、盛期、終期の推定誤差は、1999年はアメダス指標地点の平均で2.4日、作柄表示地帯別で2.8日であった。冷害年である2003年はアメダス指標地点の平均で7.8日、作柄表示地帯別で6.5日とくに太平洋側の地帯、地点では誤差が大きかったが、日本海側の津軽地帯および五所川原、弘前では推定精度が良かった。これは太平洋側の地帯、地点では冷害回避のため深水管理で水温を高く保ったため、出穂期が早くなったものと推察される。危険期間の冷却量を推定すると不稔歩合と一定の関係がみられた。この手法でその年度の地域内の発育ステージの変異の特徴を推定することができた。

キーワード: アメダス、穎花、水稻、発育ステージ、発育ステージの変異、有効穂、冷却量。

水稻の障害型冷害、遅延型冷害など各種被害の診断には、冷温の強さ、期間、そしてそのときの発育ステージが重要となる。東北地方の冷害を監視するため、水稻冷害早期警戒システムでは東北地方の気候区分、各県の農業地帯区分、観測点周辺の市町村の水稻作付面積、冷害危険度（神田・鳥越1995）、さらには偏東風（やませ）吹走の特徴などを考慮し、東北に146あるアメダス地点から71点をアメダス指標地点として選択し、気象と生育・作柄の監視を行っている（鳥越1998）。これらの指標地点における代表品種の移植後から成熟期までの一連の発育ステージをアメダスの平均気温データを用いて追跡してきた（神田ら2000, 2002）。しかし、生育と作柄を追跡しているのはその近傍の代表品種の典型的な発育ステージであり、ひとつの圃場内についてみても、移植時の個体葉齢や株内の穂や穂内の穎花に発育ステージの変異が存在するのが実態であり、アメダス指標地点周辺の市町村や各県の作柄表示地帯においては、農家による移植期や苗質の差、品種の早晚性に基づいて圃場間にも発育ステージの変異が生じる。

圃場内の変異については、前報（神田ら2005）でこれまでに水稻冷害早期警戒システムのために作成した主稈葉齢進捗モデル、幼穂および玄米の発育モデルの3つのモデルを拡張し、圃場内における有効穂や穎花が減数分裂期などの特定の発育ステージにある割合を推定する手法を作成した。しかし、最近では冷温および高温登熟障害を回避する目的で晩期栽培が導入されるなど、地域内の圃場間における発育ステージの差が大きくなり、地域内の発育変異を正

確に把握することが被害を推定する上で不可欠となる。

従来、地域の発育変異を把握するには開発したモデルを気象メッシュで図化して地域の現状を把握するのが主流である（梅津ら1993, 矢島1994）。多くの場合は図中の全メッシュを同じ初期値とし、複数設定して複数の図を作成するか、各メッシュに初期値を設定することにより地域内の変異を取り入れて図化する必要がある。複数のメッシュ図を基に地域の状況を的確に掌握することは判断する人の技能に大きく依存する。一方、各メッシュに適切な初期値を設定するのは、その地域に初期値情報を提供可能な地理情報システム（GIS）が整備されていないと困難である。また、通常使用される気象メッシュは1 kmメッシュであり、圃場の発育変異を考慮するメッシュサイズとしては大きすぎる。

そこで、本報では障害型冷害や遅延型冷害に対する指標地点近傍の危険度や被害推定に焦点を絞り、各県の農業改良普及センターが調査する市町村および農政局の作柄表示地帯の移植期調査データに基づき、市町村および作柄表示地帯の移植日の頻度分布を設定し、ある移植日となる圃場の存在割合を決定した。これに前報（神田ら2005）で作成した圃場内変異の推定法と組み合わせて市町村および作柄表示地帯の発育ステージの変異の推定法（以下、地域モデルと称す）を作成した。この推定法の精度を特徴的な気象年次間で比較検討したところ、出穂期と成熟期にみられる変異の特徴を再現できたので報告する。

材料と方法

1. モデル計算およびモデルの検証に必要なデータ

(1) モデル計算に必要なデータ

推定する地域は、各農業改良普及センターが調査する市町村および東北農政局で調査する作柄表示地帯の2つとし、対象地域を冷害に対する危険度の高い太平洋側と低い日本海側を併せもつ青森県とした。作柄表示地帯は、青森地帯、津軽地帯、南部・下北地帯を対象とし、市町村についてはアメダス指標地点より、青森地帯から青森と蟹田、津軽地帯から五所川原、弘前、黒石、南部・下北地帯より八戸、十和田、三沢を選択した。

基本となる発育予測モデルに必要なデータのうち、移植日は、各アメダス指標地点が属する市町村の移植日の始期、盛期、終期、作柄表示地帯の移植日の始期、盛期、終期のデータを用いた。移植時葉齢は、苗質は星川（1973）を参考に稚苗3.5葉、中苗4.5葉、成苗5.5葉と区別し、青森県に関しては苗の葉齢は中苗で4.5葉と仮定した。主稈葉齢進度モデルの主稈総葉数は「むつほまれと」、「つがるロマン」とも基本的には14葉と設定したが、主稈総葉数は年次間で変動することがあるので、それによる予測精度への影響をみるため、主稈総葉数を13葉、13.2葉、13.5葉、13.8葉についても計算を行った。また、気象データは各アメダス指標地点のデータを用い、高温年であった1999年、開花期前後が冷温となった2001年、冷害年であった2003年を推定対象とした。

(2) モデルの検証に必要なデータ

検証データには東北農政局発表の「農林水産統計」から県別、作柄表示地帯別の「出穂日」「刈取日」の始期、盛期、終期を用い、さらに青森県提供の市町村別「出穂日」「刈取日」の始期、盛期、終期を用いた。なお、成熟期は籾の成熟割合が80%に達した日と定義されるが、刈取日は成熟期後に天候なども含む総合的な農家の経営的判断で決定される期日であり、成熟期とは意味を異にする。

検証に使用した各年次の気象を概括すると、1999年の夏の天候はオホーツク海高気圧の発生は一時的で東北地方は晴れて気温の高い日が多かった。2001年は、7月中旬から8月にかけてオホーツク海高気圧が発達し、東北地方は太平洋側を中心に7月中旬から8月中旬に冷温・寡照、8月下旬の冷温、また9月22、23日に極端な冷温となった。2003年は6月下旬から7月はオホーツク海高気圧が優勢となり、顕著な冷温・寡照となった。8月も断続的に冷温・寡照の状態が続いた。

2. 対象地域内の発育ステージの変異の推定法

まず、対象地域内の発育ステージの変異の推定法には、水稻の移植期から成熟期までを、移植期から幼穂形成期（幼穂長2mm）、幼穂形成期から出穂期、出穂期から成熟期の

3つの発育過程にわけてモデル化したものを用いた。これらの発育予測モデルを発育に従い順次使用し、地域内の発育ステージの変異の推定を行った。

(1) 移植期から幼穂形成期

主稈葉齢進度モデル（神田ら2000）を用い、移植期を起点として止葉展開期までの主稈葉齢を日々の気温から推定した。今回の供試品種「むつほまれと」、「つがるロマン」の主稈総葉数は14葉と設定し、葉齢指数88となる主稈葉齢で幼穂形成期に到達するとした。主稈葉齢は最低気温10℃、そして上限温度24℃とする有効温度の日々の積算値がある一定値に達したとき、1齢進むようにモデル化した。葉齢が1齢進むのに必要な有効積算温度は出葉転換点を考慮して、葉齢9.1までは一定の41.4℃・日、その後11.1葉までは葉齢とともに直線的に増加し、以後97.8℃日で一定とする関数で与えた。

(2) 幼穂形成期から出穂期

幼穂の発育モデル（神田ら2002）を用い、幼穂形成期を起点とする日平均気温10℃以上の有効積算気温（ ΣT_{10} ）から花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内容充実期と出穂期を推定した。各発育ステージに達する ΣT_{10} は、下記（4）の地域内すなわち圃場ごとの群落全体の発育ステージの変異のみを推定する場合は、それぞれ100、160、260、310℃・日とした。また、下記（5）の圃場内の各有効穂の発育ステージの変異も推定する場合は群落全体の値より20℃・日減算した80、140、240、290℃・日とした。

(3) 出穂期から成熟期

玄米の発育モデル（神田ら2005）を用い、出穂期を起点とする ΣT_{10} から乳熟期、糊熟期、黄熟期と成熟期を推定した。各発育ステージに達する ΣT_{10} は、それぞれ160、280、400、530℃・日である。なお、11月1日までに成熟期に達しない場合は未熟とした。

(4) 地域内の発育ステージの変異の推定

地域内の発育ステージの変異は、地域内に存在する各圃場ごとの発育ステージの変異として求められる。各圃場の発育ステージの変異はその圃場の移植日および移植する苗の葉齢に起因するとして推定した。各圃場の移植日は、対象地域における実測の移植日（東北農政局発表の「農林水産統計」）の始期、盛期、終期のデータを用い、平均値を盛期、始期から盛期までの期間を標準偏差（ σ ）＝（盛期－始期＋1）／2の正規分布、盛期から終期までの期間を σ ＝（終期－盛期＋1）／2の正規分布とし、この2つの正規分布を盛期で合成して表せるとした。例として青森県のアメダス指標地点近傍の移植の進捗状況（第1表）に基づき作成した十和田の移植日の頻度分布を第1図に示す。各圃場の苗の平均葉齢の変異は、その地域の平均値を中心に変動

第1表 アメダス指標地点近傍および作柄表示地帯の移植期分布.

年次	アメダス指標地点 作柄表示地帯	代表品種	当該地点の移植期		
			始期	盛期	終期
1999年	青森県	—*	5月13日	5月19日	5月25日
	青森	むつほまれ	5月16日	5月22日	5月26日
	蟹田	むつほまれ	5月15日	5月20日	5月25日
	青森地帯	むつほまれ	5月16日	5月21日	5月26日
	五所川原	つがるロマン	5月12日	5月15日	5月21日
	弘前	つがるロマン	5月16日	5月21日	5月25日
	黒石	つがるロマン	5月13日	5月18日	5月22日
	津軽地帯	つがるロマン	5月13日	5月18日	5月26日
	八戸	むつほまれ	5月16日	5月19日	5月23日
	三沢	むつほまれ	5月16日	5月23日	5月29日
2001年	十和田	むつほまれ	5月10日	5月16日	5月23日
	南部・下北地帯	むつほまれ	5月12日	5月19日	5月25日
	青森県	—	5月13日	5月18日	5月24日
	青森	むつほまれ	5月17日	5月20日	5月25日
	蟹田	むつほまれ	5月18日	5月20日	5月24日
	青森地帯	むつほまれ	5月17日	5月20日	5月26日
	五所川原	つがるロマン	5月11日	5月16日	5月21日
	弘前	つがるロマン	5月15日	5月19日	5月24日
	黒石	つがるロマン	5月13日	5月19日	5月23日
	津軽地帯	つがるロマン	5月12日	5月17日	5月23日
2003年	八戸	むつほまれ	5月16日	5月20日	5月26日
	三沢	むつほまれ	5月18日	5月22日	5月30日
	十和田	むつほまれ	5月12日	5月15日	5月22日
	南部・下北地帯	むつほまれ	5月13日	5月18日	5月26日
	青森県	—	5月10日	5月17日	5月24日
	青森	むつほまれ	5月14日	5月18日	5月25日
	蟹田	むつほまれ	5月14日	5月19日	5月25日
	青森地帯	むつほまれ	5月14日	5月18日	5月25日
	五所川原	つがるロマン	5月10日	5月16日	5月20日
	弘前	つがるロマン	5月15日	5月18日	5月25日
2003年	黒石	つがるロマン	5月11日	5月16日	5月21日
	津軽地帯	つがるロマン	5月10日	5月17日	5月21日
	八戸	むつほまれ	5月15日	5月19日	5月25日
	三沢	むつほまれ	5月17日	5月22日	5月28日
	十和田	むつほまれ	5月10日	5月15日	5月21日
	南部・下北地帯	むつほまれ	5月11日	5月17日	5月25日

* 青森県については県全体のため複数品種が対象である.

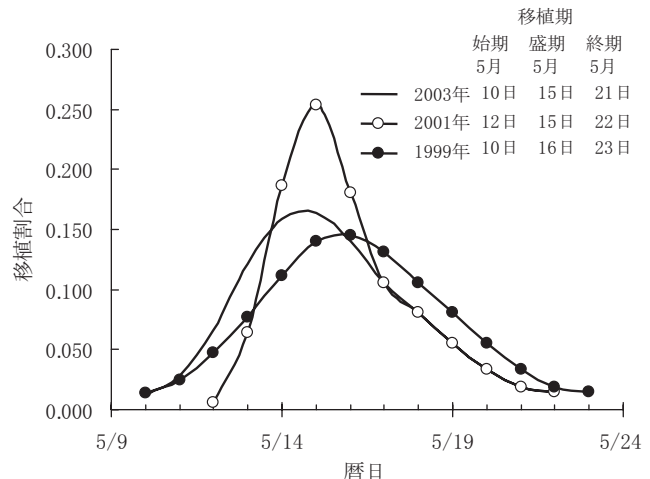
しているため、ここでは地域の平均値 4.5 葉、 $\sigma = 0.2$ とする正規分布で表せるとした.

以上の手順より推定した各圃場の葉齢と移植日を用い、葉齢と移植日の異なる圃場ごとに (1)~(3) の手法により各生育ステージへの到達日を求め、地域内の各生育ステージへの到達割合を算出した. 出穂期に達した圃場の存在割合が累積 5% 以上となる日を出穂始期、同様に 50% 以上を盛期、95% 以上を終期とし、同様に成熟期に達した圃場の存在割合が累積 5% 以上となる日を成熟始期、50% 以上を盛期、95% 以上を終期とした.

さらに、圃場ごとに障害型冷害の気温指標である、前歴期間 (幼穂形成期~花粉母細胞分化期) および危険期間 (花粉母細胞分化期~花粉内容充実期) の日平均気温 20°C 以下の有効積算気温である冷却量 (内島 1976) を算出し、地域内の冷却量の分布を推定した.

(5) 圃場内の生育ステージの変異

各圃場内についても生育ステージの変異が考えられる. この圃場内の生育ステージの変異は、①移植時の個体葉齢変異、②有効穂の幼穂形成期の到達日変異、③一穂穎花内

第1図 移植期調査より設定した移植日の頻度分布.
(青森県十和田市)

の開花日変異に起因するとして推定した (神田ら 2005).

圃場内における移植時の苗の葉齢変異は、上記 (4) で求められた各圃場の平均葉齢を中心とする $\sigma = 0.3$ の正規分布で表せるとした. 有効穂の幼穂形成期の到達日変異は、各苗の幼穂形成期を平均とする $\sigma = 3.5$ の正規分布で表せるとした. 一穂穎花内の開花日の変異は各有効穂について幼穂形成期からの ΣT_{10} を用い、式 (1) より算出した (神田ら 2005).

$$Yf = 0.0148 \times YT - 3.955 \quad (290 \leq YT \leq 370) \quad (1)$$

Yf: 累積開花穎花割合(rad), YT: 幼穂形成期からの ΣT_{10} .

穎花ごとの玄米の発育は穎花の開花日を起点とする ΣT_{10} を用い、上記 (3) の基準で乳熟期、糊熟期、黄熟期と成熟期を推定した.

地域内の有効穂および穎花の発育変異は、葉齢と移植日の異なる圃場ごとに圃場内の発育ステージの変異を求める上記の手順に従い有効穂および穎花の各生育ステージへの到達日を求め、地域内の有効穂および穎花の各生育ステージへの到達割合を算出した. 出穂期に達した有効穂の存在割合が累積 5% 以上となる日を出穂始期、同様に 50% 以上を盛期、95% 以上を終期とし、同様に成熟期に達した圃場の存在割合が累積 5% 以上となる日を成熟始期、50% 以上を盛期、95% 以上を終期とした.

障害型冷害の気温指標として、前歴期間 (幼穂形成期~花粉母細胞分化期) と危険期間 (花粉母細胞分化期~花粉内容充実期) の日平均気温 20°C 以下の有効積算気温である冷却量を算出した. さらに、幼穂形成期からの ΣT_{10} より、一般に穎花の障害不稔の発生危険期とされる花粉母細胞分裂初期~同 4 分子期の期間にある穎花の存在割合を式 (2) より暦日ごとに推定した (神田ら 2005).

$$Yd = -0.0088(YT - 167.2)^2 + 26.5 \quad (110 \leq YT \leq 230) \quad (2)$$

Yd: 危険期穎花割合(%), YT: 幼穂形成期からの ΣT_{10} .

3. 対象地域別の計算手法

対象地域別の発育ステージの計算手順は次の通りである。

(1) アメダス指標地点

アメダス指標地点のある市町村の移植日分布と葉齢分布からある移植日にある葉齢の苗を移植する圃場割合を推定した。気象データはアメダス指標地点のデータを用い、「2. 対象地域内の発育ステージの変異の推定法」に従い、市町村内の圃場、有効穂、穎花の各発育ステージの存在割合、

冷却量分布、危険期穎花割合を推定した。

(2) 作柄表示地帯および県

作柄表示地帯または県内の全ての市町村について、作柄表示地帯または県の移植日分布と葉齢分布からある移植日にある葉齢の苗を移植する圃場割合を推定した。市町村ごとに最寄りのアメダス指標地点の気象データを用い、市町村内の圃場、有効穂、穎花の各発育ステージの存在割合を推定し、各市町村の水田面積にしたがって合成し、地域内の存在割合とした。

第2表 アメダス指標地点別の有効穂の出穂期の推定結果。

年次	アメダス 指標地点	推定値			誤差			
		有効穂の出穂期			出穂期			出穂期
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	始期	盛期	終期	平均
1999年	青森	7月31日	8月2日	8月6日	1	2	0	1.3
	蟹田	8月5日	8月9日	8月12日	-2	-2	-3	2.4
	五所川原	7月28日	7月31日	8月2日	4	3	4	3.7
	弘前	7月28日	7月31日	8月3日	4	3	2	3.1
	黒石	7月29日	8月1日	8月3日	4	3	3	3.4
	八戸	8月2日	8月4日	8月6日	-1	-1	0	0.8
	三沢	8月3日	8月5日	8月8日	1	2	1	1.4
	十和田	8月1日	8月3日	8月6日	-1	-1	0	0.8
2001年	青森	8月4日	8月8日	8月13日	2	3	1	2.2
	蟹田	8月15日	8月19日	8月24日	-5	-5	-7	5.7
	五所川原	7月29日	8月3日	8月8日	5	7	5	5.7
	弘前	7月29日	8月2日	8月7日	5	3	2	3.6
	黒石	7月31日	8月4日	8月11日	4	4	-1	3.3
	八戸	8月11日	8月16日	8月22日	-5	-3	-6	4.8
	三沢	8月15日	8月20日	8月25日	-3	-3	-4	3.4
	十和田	8月6日	8月12日	8月16日	0	-2	-2	1.6
2003年	青森	8月15日	8月18日	8月22日	-4	-3	0	2.9
	蟹田	8月29日	9月3日	9月8日	-10	-11	-10	10.3
	五所川原	8月9日	8月13日	8月16日	-1	0	0	0.6
	弘前	8月8日	8月11日	8月14日	-1	1	1	1.0
	黒石	8月10日	8月14日	8月18日	-4	-5	-3	4.1
	八戸	8月25日	8月29日	9月2日	-15	-13	-9	12.6
	三沢	8月28日	9月1日	9月6日	-13	-8	-8	9.9
	十和田	8月23日	8月25日	8月30日	-11	-10	-9	10.0
誤差平均				1999年	2.6	2.3	2.2	2.4
				2001年	4.0	4.0	4.1	4.1
				2003年	9.0	7.8	6.5	7.8
				3年平均	5.9	5.2	4.6	5.3

第3表 地帯別の有効穂の出穂期の推定結果。

年次	作柄表示地帯	推定値			誤差			
		有効穂の出穂期			出穂期			出穂期
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	始期	盛期	終期	平均
1999年	青森県	7月29日	8月2日	8月6日	3	3	2	2.7
	青森地帯	7月31日	8月2日	8月9日	2	3	-1	2.2
	津軽地帯	7月28日	7月31日	8月3日	4	4	4	4.0
	南部・下北地帯	8月2日	8月4日	8月6日	-1	0	3	1.8
2001年	青森県	7月30日	8月7日	8月17日	5	2	-2	3.3
	青森地帯	8月4日	8月8日	8月19日	3	4	-4	3.7
	津軽地帯	7月28日	8月3日	8月8日	6	4	5	5.1
	南部・下北地帯	8月8日	8月15日	8月19日	-2	-2	-1	1.7
2003年	青森県	8月8日	8月17日	8月31日	-2	-4	-8	5.3
	青森地帯	8月15日	8月19日	9月2日	-3	-1	-7	4.4
	津軽地帯	8月8日	8月12日	8月16日	-2	-1	0	1.3
	南部・下北地帯	8月24日	8月27日	9月2日	-13	-11	-8	10.9
誤差平均				1999年	2.7	2.9	2.7	2.8
				2001年	4.3	3.2	3.4	3.7
				2003年	6.8	5.9	6.7	6.5
				3年	4.9	4.2	4.6	4.6

結 果

1. 出穂期、開花期および成熟期の推定

アメダス指標地点および作柄表示地帯の有効穂の出穂期(第2表、第3表)と穎花の開花期間を推定した。推定出穂期とアメダス指標地点別の出穂期との誤差平均を第2表に示す。1999年の誤差平均は、青森、八戸、三沢、十和田で2日以内、津軽の五所川原、弘前、黒石の誤差平均は3.1～3.7日であった。2001年は誤差がやや大きくなった。冷害年の2003年の各地点の誤差平均は八戸、三沢、十和田では9.9～12.6日と大きかったが、津軽の五所川原、弘前、黒石では0.6～4.1日であった。全地点の誤差平均についてみると1999年は2.4日、2001年は4.1日、2003年は7.8日であった。

作柄表示地帯別の出穂期の推定結果を第3表に示す。第2表の市町村別に比較して、出穂期間は長くなるが、各年次の出穂時期の変動傾向はアメダス指標地点別の結果と同じ傾向であった。推定出穂期を作柄表示地帯別の出穂期と比較すると、1999年は南部・下北地帯の誤差は小さく、津軽地帯の誤差がやや大きかった。2001年は1999年より誤差がやや大きかった。2003年は南部・下北地帯で10.9日と誤差が大きかったが、津軽地帯では1.3日と小さかった。

穎花の開花期間については比較する統計データがないため、詳細データを省略する。アメダス指標地点についてみると1999年の青森の穎花の推定開花期間は8月2日～8月9日、盛期は8月6日になった。開花盛期は有効穂の推定出穂期盛期よりも2日遅く、開花期間は出穂期間よりも1日長かった。同様に各地点、各年次の穎花の開花盛期は、

有効穂の推定出穂盛期より2～4日遅くなり、開花期の幅は長くなった。高温年である1999年は全ての地点で開花が早かった。2001年は1999年よりも開花が遅れ、開花期間が長くなった。冷害年である2003年は開花がさらに遅れ、八戸、三沢、蟹田では開花盛期が9月となった。

アメダス指標地点および作柄表示地帯の有効穂の成熟期および成熟期到達割合を推定した。成熟期と統計データにある刈取期が異なるため、詳細データを省略する。1999年の成熟期到達割合の分布は、成熟始期～終期は八戸では9月7日～9月15日、三沢では9月8日～9月19日、十和田では9月8日～9月18日であった。五所川原および弘前では8月29日～9月7日、黒石では9月1日～9月10日であった。2001年は三沢では成熟始期に到達せず、八戸では10月14日、十和田で10月11日に成熟始期に到達したが、盛期、終期には到達しなかった。五所川原、弘前、黒石では1999年よりも遅くなったが成熟終期まで到達した。2003年は八戸、三沢、十和田で成熟始期に達しなかった。五所川原では10月11日、弘前では9月30日、黒石では10月23日に成熟始期に達したものの、いずれの地点でも成熟終期には到達しなかった。

2. 冷温障害の危険期と冷却量の推定

アメダス指標地点と作柄地帯別の穎花の危険期と有効穂の推定冷却量を第4表と第5表に示す。穎花の危険期について、年次の特徴を概観すると、1999年は南部・下北地帯では7月25日～8月1日、津軽地帯では7月19日～7月27日、2001年は南部・下北地帯、八戸、三沢、十和田では1999年に比べてやや遅く、津軽地帯、五所川原、弘前、

第4表 アメダス指標地点別の穎花の危険期と有効穂の推定冷却量。

年次	アメダス 指標地点	推定値			冷却量					
		穎花の危険期			前歴期間		危険期間			
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	平均		平均			
1999年	青森	7月23日	7月27日	7月30日	0.0	～ 26.9	4.7	0.0	～ 0.5	0.0
	蟹田	7月28日	8月1日	8月5日	0.0	～ 30.8	3.2	0.0	～ 3.5	0.0
	五所川原	7月19日	7月23日	7月27日	0.2	～ 26.0	11.9	0.0	～ 11.9	0.4
	弘前	7月19日	7月23日	7月27日	0.0	～ 18.4	9.4	0.0	～ 11.4	0.0
	黒石	7月20日	7月24日	7月28日	0.0	～ 27.0	12.6	0.0	～ 12.1	0.2
	八戸	7月25日	7月28日	7月31日	0.0	～ 56.6	9.2	0.0	～ 3.7	0.1
	三沢	7月26日	7月29日	8月2日	0.0	～ 58.8	13.1	0.0	～ 5.4	0.0
	十和田	7月24日	7月28日	7月31日	0.0	～ 56.0	20.3	0.0	～ 10.0	0.3
2001年	青森	7月24日	7月29日	8月3日	0.0	～ 3.2	0.9	0.0	～ 1.3	0.1
	蟹田	8月1日	8月7日	8月14日	1.7	～ 11.3	6.7	2.0	～ 10.1	7.8
	五所川原	7月18日	7月24日	7月29日	0.0	～ 4.1	2.1	0.0	～ 2.3	0.4
	弘前	7月18日	7月24日	7月29日	0.0	～ 1.9	0.3	0.0	～ 0.5	0.3
	黒石	7月20日	7月25日	7月31日	0.0	～ 5.1	2.3	0.0	～ 2.2	0.8
	八戸	7月28日	8月4日	8月10日	2.3	～ 22.0	11.5	7.1	～ 15.7	14.3
	三沢	8月1日	8月7日	8月14日	3.1	～ 24.4	13.9	6.5	～ 17.6	16.0
	十和田	7月24日	7月30日	8月6日	2.6	～ 23.7	9.4	8.0	～ 16.2	12.6
2003年	青森	8月2日	8月7日	8月12日	7.0	～ 41.8	31.3	0.0	～ 35.1	5.3
	蟹田	8月15日	8月21日	8月27日	1.0	～ 69.5	10.0	7.3	～ 20.9	10.4
	五所川原	7月27日	8月2日	8月7日	12.7	～ 55.0	25.9	0.0	～ 33.3	11.1
	弘前	7月26日	8月1日	8月5日	8.6	～ 43.0	16.3	0.0	～ 26.6	12.9
	黒石	7月28日	8月3日	8月8日	14.0	～ 52.1	28.0	0.0	～ 36.9	12.4
	八戸	8月11日	8月16日	8月22日	0.0	～ 80.3	27.8	1.6	～ 18.9	13.5
	三沢	8月14日	8月20日	8月26日	1.0	～ 77.5	10.9	5.2	～ 18.3	14.2
	十和田	8月9日	8月14日	8月20日	0.2	～ 90.1	53.8	0.2	～ 46.9	12.9

第5表 地帯別の穎花の危険期と有効穂の推定冷却量。

年次	作柄表示地帯	推定値			冷却量					
		穎花の危険期			前歴期間			危険期間		
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	平均			平均		
1999年	青森県	7月20日	7月26日	7月31日	0.0	～	62.7	13.6	0.0	～ 12.7 0.1
	青森地帯	7月23日	7月27日	8月1日	0.0	～	30.8	4.4	0.0	～ 3.5 0.0
	津軽地帯	7月19日	7月23日	7月27日	0.0	～	27.0	11.2	0.0	～ 12.7 0.2
	南部・下北地帯	7月25日	7月28日	8月1日	0.0	～	62.7	19.0	0.0	～ 8.0 0.2
2001年	青森県	7月20日	7月29日	8月7日	0.0	～	27.0	5.5	0.0	～ 18.7 6.3
	青森地帯	7月24日	7月29日	8月8日	0.0	～	14.3	1.5	0.0	～ 10.6 0.8
	津軽地帯	7月18日	7月24日	7月30日	0.0	～	17.2	1.6	0.0	～ 2.3 0.5
	南部・下北地帯	7月26日	8月1日	8月8日	2.3	～	27.0	11.1	6.5	～ 18.7 13.7
2003年	青森県	7月28日	8月10日	8月21日	0.0	～	94.5	36.0	0.0	～ 46.9 11.8
	青森地帯	8月3日	8月8日	8月21日	1.0	～	69.5	29.4	0.0	～ 35.1 5.8
	津軽地帯	7月26日	8月2日	8月7日	8.6	～	55.0	23.9	0.0	～ 36.9 12.3
	南部・下北地帯	8月10日	8月15日	8月22日	0.0	～	94.5	49.8	0.2	～ 46.9 13.4

黒石ではほぼ同じであった。2003年はいずれの地帯、地点ともこの3年で最も遅かった。これは有効穂の發育ステージが危険期間にある期間よりやや変異幅が小さいが時期はほぼ同じであった。

有効穂の推定冷却量について同様にみると、危険期間の冷却量は、1999年は地帯、地点ともほぼゼロであった。2001年は南部・下北地帯と八戸、三沢、十和田で10℃・日以上であったが、津軽地帯、五所川原、弘前、黒石ではほぼゼロであった。2003年は南部・下北地帯、津軽地帯、およびそこに属するアメダス指標地点で10℃・日以上となった。次に前歴期間の冷却量については、1999年は南部・下北地帯では19.0℃・日、十和田で20.3℃・日と大きく、青森地帯および青森、蟹田では小さかったが、その他の地帯、地点は10℃・日前後であった。2001年は南部・下北地帯および八戸、三沢、十和田で10℃・日前後であったが、津軽地帯および五所川原、弘前、黒石で0.3～2.1℃・日と小さかった。2003年は全般に大きく南部・下北地帯で49.8℃・日、十和田で53.8℃・日、津軽地帯でも23.9℃・日、黒石で28.0℃・日であった。

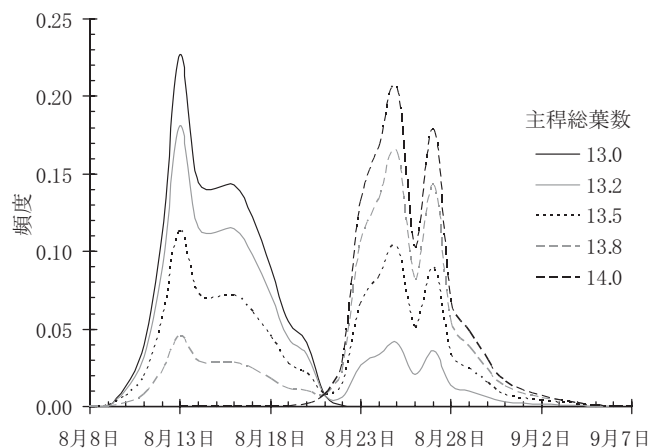
考 察

地域の各圃場における發育の変異は、地域内の各圃場の移植日と移植する苗の葉齢に起因するとしている。この移植時に決定される地域内の圃場割合に、前報(神田ら2005)で作成した圃場内におけるイネの器官形成の規則性に起因して生じる發育ステージの変異を組み合わせることで、地域内の有効穂および穎花単位での發育変異を推定するモデルとなる。これにより地域内においても有効穂および穎花単位での障害型冷害の危険期の推定や、遅延型冷害時における有効穂単位での成熟期到達割合および成熟割合の推定を行い、地域の冷温被害の判定に利用できると考える。

推定出穂期についてみると、1999年、2001年はアメダス指標地点並びに作柄表示地帯は青森県提供の市町村別並びに農政局発表の作柄表示地帯別出穂期データとほぼ同じであったが、2003年では津軽地帯は誤差が1.3日にに対し、

南部・下北地帯では10.9日、八戸で12.6日、三沢で9.9日、十和田で10.0日遅くなった。これは、前報でも論じたように冷害回避のため深水管理で水温を高く保ったため、気温での推定よりも幼穂の發育が早まり、出穂期が早くなったものと推察される。

出穂期の誤差については、主稈総葉数の年次変化も考慮する必要がある。ここでは主稈総葉数を14.0葉としているが、例えば十和田の2003年の主稈総葉数を13.0葉まで段階的に減少させると、出穂期の誤差は14.0葉の10.0日から徐々に減少し、13.0葉では1.4日となった(第2図、第6表)。つまり、2003年のような冷害年にはこれらの地域では総葉数が減少することもあると考えれば、精度は向



第2図 主稈総葉数の違いによる推定出穂分布。
(青森県十和田市:2003年)

第6表 主稈総葉数の違いによる推定出穂期と実測出穂期。
(青森県十和田:2003年)

主稈総葉数	出穂始期	出穂盛期	出穂終期	誤差
13	8月11日	8月14日	8月19日	1.4
13.2	8月12日	8月16日	8月27日	3.5
13.5	8月12日	8月21日	8月29日	5.8
13.8	8月13日	8月25日	8月30日	7.8
14	8月23日	8月25日	8月30日	10.0
実測値	8月12日	8月15日	8月21日	

上する。しかし、青森県十和田の生育観測圃の「むつほまれ」の主稈総葉数は1999年が13.0葉、2001年は12.9葉、2003年は13.2葉と、生育観測圃では実際には総葉数の減少はみられなかった。なお、青森など青森県の他の生育観測圃の「むつほまれ」の主稈総葉数の実測値も13葉に近いが、ここでは、主稈葉齢進捗モデルのパラメータを決定した東北農業研究センターの実測値から14葉を使用している。主稈総葉数の冷温による増減については、減少とする寺尾ら(1942)、薦田(1949)と、増加とする近藤(1952)の両方の報告がある。細井(1976)は、早生種は低温で増加し、晩生種は減少するとしている。Sato and Takahashi(1983)は、冷気温は葉数を増加させ、冷水温は減少させること、そして品種によりその反応性が異なることを報告している。このように、冷害年の主稈総葉数の増減については品種の早晩性などの特性が関与しているため、一定の傾向はみられないものと考えられる。

また、地域の冷却量の変異の推定結果と作況指数または不稔歩合の関係についてみると、1999年は東北農政局発表の作況指数は100~107であることから不稔発生は平年並みかそれ以下とみられ、作柄地帯別の危険期間の冷却量は $0.0\sim0.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ とほぼゼロであった。2001年は作況指数が津軽地帯は103、南部・下北地帯は92であった。これは青森県生育観測圃の不稔歩合が八戸で12.6%、十和田で6.1%、三沢で5.1%であることからみて、八戸を中心に不稔が発生したことが南部・下北地帯の作況指数低下の一因とみられる。2001年の津軽地帯の危険期間の冷却量は $1.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ だが、南部・下北地帯では $13.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きかった。2003年は東北農政局発表の不稔歩合は南部・下北地帯で49%、青森地帯で26%、津軽地帯で16%であり、危険期間の冷却量は南部・下北地帯で $13.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、津軽地帯で $12.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、青森地帯で $5.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と小さかったが、前歴期間の冷却量が大きく、南部・下北地帯で $49.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、青森地帯で $29.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、津軽地帯で $23.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であった。推定出穂期が実測より10.9日遅い南部・下北地帯では、推定した前歴期間の一部が実際には危険期間に相当し、冷却量の大きさに危険期間の冷温の影響の一部も含んでいるとみられる。このように、前歴期間および危険期間の冷却量の大きさと不稔発生には一定の関係がみられ、障害型冷害の被害推定に有用と考える。

成熟期初到達割合の推定結果についてみると、1999年は全アメダス指標地点、全作柄表示地帯で9月中旬に成熟終期に到達したが、2001年は津軽地帯では10月上旬までに成熟終期に到達したが、南部・下北地帯では成熟終期まで到達しなかった。このときの南部・下北地帯の作況指数は92であり、不稔発生とともに登熟不良が減収の一因と考えられる。2003年には津軽地帯、南部・下北地帯とも成熟終期に到達しなかった。このときの津軽地帯の作況指数は71であり、不稔歩合が16%にとどまったことから、登熟不良も大きな減収要因と考えられる。2003年の青森県では、

8月中・下旬の最低気温が 15°C 以下の強い冷温に加え、9月下旬の最低気温 10°C となる日の出現など、登熟期間全般の気温は平年より1日当たり 2°C 程度下回ったことなどにより登熟が不良となったとされている(注:青森統計・情報センター 農林水産統計2003)。さらに、津軽地帯では 2.1 mm 以上の玄米の重量比が直近の3年平均より18.7%減少し、 $1.9\text{ mm}\sim2.0\text{ mm}$ の玄米が15.3%増加するという玄米の充実低下も報告されている。このように地域の発育変異の推定を基に、成熟期到達初割合を推定することにより、遅延型冷害の被害診断を行うことが可能となる。

アメダス指標地点および作柄表示地帯の発育変異を推定するときに、地域内(圃場間)変異のみを考慮した場合と圃場内(有効穂、穎花)の発育変異を考慮した場合で出穂期や成熟期などの発育ステージ盛期はほぼ同じとなった。しかし、アメダス指標地点の発育変異の推定においては、圃場内の発育変異も考慮した推定が圃場間の変異のみ考慮した推定結果よりも発育ステージの変異の幅が大きくなった。このため、圃場内の発育変異を含めた本手法による冷却量、成熟期到達初割合の推定結果が2003年のような冷害年の被害評価に適していると考えられる。しかし、作柄表示地帯別では、圃場内の株、有効穂、穎花の発育変異まで計算した結果も圃場内の変異を考慮しない推定結果に近かった。これは、作柄表示地帯全体の発育変異には、地帯内の各アメダス指標地点の気温の差に起因する変異が圃場内での発育に起因する変異よりも影響が大きいと考えられ、作柄表示地帯別のように広域を対象に発育や被害推定を行う際は圃場内の発育変異を考慮する必要は少ないといえる。

地域内で移植時変異に比べて、危険期間や出穂期の変異がやや小さいが、これは移植期の日平均気温は危険期間や出穂期のものと比較して低く、1日あたりの発育進度が小さいためである。実際には、地域内に早晩性の異なる品種が存在し、推定よりも変異が大きくなる。これについては品種の栽培面積割合を基に主稈総葉数の初期値に反映することが可能であり、今後改善の余地がある。

早期警戒システムの目的は地域の冷温被害をリアルタイムに評価することであるため、地域内の発育ステージ割合を推定する本手法は有効である。水稻冷害早期警戒システムは農政局・県との連携で運営されているため、2003年冷害時のようにこの手法による地域の発育変異の予測が大きく外れた時は、農政局・県からの情報に基づき、幼穂形成期、出穂期などモデルを展開する各段階で修正を加えれば、より適正な評価が可能となる。

今後、冷却量と不稔発生の関係を組み込んで、地域の障害型冷害の被害診断モデルや、穎花ごとに玄米の発育ステージを追跡する遅延型冷害の被害診断モデルの作成を試みていきたい。

謝辞: 青森県の市町村別の「移植日」「出穂日」「刈取日」データは青森県農林総合研究センターより提供して頂いた。

ものである。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 星川清親 1973. 機械移植栽培のための水稻育苗の理論と技術 [4]. 農業および園芸 48 : 993-998.
- 細井徳夫 1977. 気象要因による水稻生育の変動性に関する研究. 第2報 生育温度の差異と稚苗および成苗移植栽培における品種の出穂変動. 日作紀 46 : 352-360.
- 神田英司・鳥越洋一 1995. 東北地域における水稻収量とその変動からみた冷害危険度区分. 日作紀 64 (別2) : 45-46.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2000. 水稻における葉の形成過程を考慮した主稈葉齢予測モデル. 日作紀 69 : 540-546.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2002. 有効積算気温を用いた簡易モデルの穂の発育ステージ予測への適用. 日作紀 71 : 394-402.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2005. イネの形態形成の規則性に起因する発育ステージの変異を推定する方法. 日作紀 74 : 276-284.
- 薦田快夫 1949. 水稻の冷害的異常環境に於ける生育生理研究. [1] 挿秧から出穂に至る各生育期よりの寡照冷水灌漑及び冷水灌漑に依る主幹葉数と出穂の推移. 育種研究 3 : 24-38.
- 近藤頼己 1952. 水稻品種の冷害抵抗性に関する生理學的研究. 農技研報告 D3 : 113-228.
- Sato, T. and N. Takahashi 1983. The effect of air and water temperature on the number of days to heading in Japonica rice cultivars. Japan. J. Breed. 33 : 111-118.
- 寺尾博・大谷義雄・土井彌太郎・泉清一 1942. 水稻冷害の生理學的研究 (豫報). [VIII] 挿秧より出穂に至る各期よりの各種低温の幼穂分化・出穂・稔實に及ぼす影響. 日作紀 13 : 317-336.
- 鳥越洋一 1998. 東北地域における水稻冷害早期警戒システム. システム農学 14 : 142-149.
- 梅津俊彦・木村和則・中野憲司・長谷川愿・松田裕之・太田秀樹・芳賀静雄・武田正宏・矢島正晴 1993. メッシュ気候値を活用した水稻適地区分. 第1報 好適作期の策定と適地判定. 山形農試研報 27 : 1-21.
- 内島立郎 1976. 冷温条件と水稻の不稔発生との関係についての一考察. 農業気象 31 : 199-202.
- 矢島正晴 1994. 平成の大凶作. 日本農業気象学会編. 農林統計協会, 東京. 67-81.

Method of Estimating the Variation of Developmental Stages on the Basis of the On-Site Data of Transplanting Date in Rice-Producing Areas : Eiji KANDA¹⁾, Yoichi TORIGOE²⁾ and Takashi KOBAYASHI¹⁾ (¹⁾ Natl. Agric. Res. Cent. for Tohoku Region, Morioka, Iwate 020-0198, Japan; ²⁾ Natl. Agric. Res. Cent.)

Abstract : The variation of developmental stages in rice-producing areas makes it difficult to estimate cool weather damage. We made a method to estimate the percentage of productive panicles and glumaceous flowers at a specific stage such as meiosis, in the areas around automated meteorological data acquisition system (AMeDAS) points. In this method, the variations of transplanting date and leaf age of seedlings in each area were used as the initial values. Usefulness of the method was verified by the 8 AMeDAS points and 3 cropping zones of Aomori Prefecture in 1999, 2001 and 2003. The mean error of the first, middle and last heading dates at the AMeDAS points was 2.4 days and that in the cropping zones was 2.8 days in 1999. In 2003, a year with cool-weather damage the mean error at the AMeDAS points and cropping zones was 7.8 days and 6.5 days, respectively. Especially, the mean error in the cropping zone and AMeDAS points on the Pacific Ocean side was larger than on the Japan Sea side. Because the water temperature was kept high by deep water management in the Pacific Ocean side, heading dates might be advanced. There was a correlation between cooling degree days and percentage sterility of productive panicles. In conclusion, we can estimate the variation of developmental stages in rice-producing areas by this method.

Key words : AMeDAS, Cooling degree days, Developmental stage, Glumaceous flowers, Paddy rice, Productive panicles, Variation of developmental stages.