

3. ばれいしょ

1) 目的

各場の作況データ等を用いて、気象条件（主に平均気温）と収量・でん粉価、でん粉収量の関係を解析するとともに、温暖化がこれらに及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と収量等の関係解析

供試年：1990～2009年の20年

供試品種：十勝農試は「農林1号」「コナフブキ」「男爵薯」、中央・上川・北見農試は「男爵薯」

検討項目：作況調査データの上いも収量、でん粉価、でん粉収量（いも収量×でん粉価/100で算出）。

気象データ：アメダス芽室、アメダス長沼、アメダス比布、アメダス境野。

(2) 作物モデル「WOFOST」による生育予測

①概要

作物生育および乾物生産等を日単位でシミュレーションする「WOFOST」を用いて、現在および2030年代の気温および日射量から、生育ステージおよび収量の変化を予測する。また、異常高温年となった2010年についても合わせて解析を行う。

②対象地点

十勝農試（芽室）および北見農試（訓子府）

③供試気象データ

十勝農試についてはアメダス芽室、北見農試についてはアメダス境野の観測値を用いた。現在の気象データとしてアメダス月別平年値、2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRによる予測値を用いた。ただし、CCSRデータは約10 km四方を平均化した面データであり、アメダスの点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、CCSRと現在の「メッシュ気候値2000」の2次メッシュ平均値の差（日射量については比率）を求めた後、その差を対象地点アメダス平年値に加算（日射量については乗算）し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。

④生育ステージ計算の設定

WOFOSTでは、生育ステージの計算に有効積算温度を用いる。月別の気象データは日別展開され計算に用いられる。生育有効温度は、WOFOSTにおけるばれいしょの既定値をそのまま使用して、日最高最低平均気温から換算した（表IV-3-1）。生育ステージ・熟期別有効積算温度の設定を表IV-3-2に示す。萌芽期は、表IV-3-1で求めた日別の有効温度の植付

からの積算値が170℃を越えた日とし、萌芽期からの有効積算温度が150℃を越えた日から塊茎への同化産物の分配が始まるものとした。これらはWOFOSTにおけるばれいしょの既定値である。塊茎肥大開始から枯凋期に至るまでの有効積算温度の設定は、WOFOSTでは、ばれいしょの熟期別に数段階の設定が用意されている。ここでは、「紅丸」の熟期に相当する有効積算温度として、十勝農試の作況データを参考に、1675℃を設定した。

計算開始日となる植付期の現在の値は、作況平年値を参考に芽室では5月9日、訓子府では5月13日とした。植付期の平均気温平年値は芽室および訓子府では、それぞれ9.8℃および9.5℃となる。2030年代の植付期は、現在と同様および気温上昇に伴って現在の植付期と同じ気温の日まで前進した場合の二通りを設定した。

表IV-3-1 ばれいしょにおける生育有効温度の設定

生育ステージ	日最高最低平均気温(T)	有効温度
植付～萌芽	$T \leq 3^{\circ}\text{C}$	0
	$3 < T < 18^{\circ}\text{C}$	$T - 3$
	$18^{\circ}\text{C} \leq T$	15
萌芽～枯凋	$T \leq 2^{\circ}\text{C}$	0
	$2 < T < 30^{\circ}\text{C}$	$T - 2$
	$30^{\circ}\text{C} \leq T$	28

WOFOSTの既定値をそのまま使用

表IV-3-2 ばれいしょの生育ステージ別有効積算温度の設定

生育ステージ	有効積算温度(度)
植付～萌芽	170
萌芽～塊茎肥大開始	150
塊茎肥大開始～生育停止	1675

南フランス用の設定を使用（熟期は紅丸相当）

⑤ポテンシャル収量の算出

WOFOSTによる収量（塊茎の全重）は乾物で算出されるため、乾物率を20%と仮定して、生重に換算した。ここでの収量は、入力した気温と日射量の条件下で得られる最大可能収量であり、湿害、干ばつおよび病虫害による減収は考慮していない。

(3) ジャガイモ疫病の初発期予測

ジャガイモ疫病発生予察システム（FLABS：中央農試、1991）における発病好適基準から、2030年代における初発期の変化を考察した。

FLABSは萌芽日以降の日平均気温、降水量により感染好適指数を割り当て、累積値が21に達したとき

を危険期到達とし、初発日を予測するものである(表IV-3-8)。表の条件にあるように気温が高く、降水量が多くなると好適指数の値が大きくなり、危険期到達日が早くなって、疫病の発生は早まるものと予測される(表以外にも例外の条件がある)。

表IV-3-8 気温・降水量と好適指数

その日の平均気温	前5日間の降水量の合計			
	5～10mm	11～20mm	21～25mm	26mm以上
15.1～26.5℃	1	2	2	3
11.7～15℃	0	1	2	2
7.2～11.6℃	0	0	1	1

3) 結果および考察

(1) 気象要因と収量等の関係解析

十勝農試の「コナフブキ」および「農林1号」の収量、でん粉価、でん粉収量と月別の平均気温との相関を検討した結果、両品種ではほぼ同様の傾向が認められた(表IV-3-3)。すなわち、収量と気温との間には全般に低い負の相関が認められ、「コナフブキ」では9月の気温と収量との間に $r=-0.475^*$ の有意な相関が認められた。でん粉価においては気温と有意な負の相関が認められる事例が多く、特に生育後半の8・9月で相関係数が高かった。でん粉収量においても、特に生育後半の8月あるいは9月の気温と負の有意な相関が認められている。また、両品種とも気温が高いと生育期間(植え付けから枯渇までの日数)が短くなる傾向であった。

表IV-3-3 十勝農試の「コナフブキ」、「農林1号」における気温と収量等との関係

	コナフブキ(n=20)					農林1号(n=20)			
	収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯渇間の日数		収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯渇間の日数
でん粉価	0.489					0.410			
でん粉収量	0.929	0.776				0.924	0.726		
平	5月	0.035	-0.188	-0.055	-0.494	-0.035	-0.174	-0.094	-0.651
	6月	0.074	0.009	0.051	-0.425	-0.173	-0.362	-0.290	-0.304
	7月	-0.250	-0.438	-0.366	-0.169	-0.257	-0.337	-0.320	-0.161
	8月	-0.322	-0.620	-0.495	-0.529	-0.339	-0.830	-0.599	-0.445
	9月	-0.475	-0.656	-0.620	-0.570	-0.101	-0.656	-0.352	-0.294
均	5-6月	0.068	-0.108	-0.001	-0.523	-0.131	-0.336	-0.242	-0.587
	5-7月	-0.082	-0.316	-0.196	-0.618	-0.237	-0.436	-0.355	-0.532
気	5-8月	-0.209	-0.514	-0.370	-0.578	-0.326	-0.696	-0.532	-0.585
	5-9月	-0.285	-0.584	-0.455	-0.393	-0.299	-0.739	-0.530	-0.562
温	6-7月	-0.130	-0.305	-0.227	-0.542	-0.293	-0.472	-0.414	-0.310
	6-8月	-0.261	-0.537	-0.418	-0.504	-0.374	-0.759	-0.595	-0.443
	6-9月	-0.336	-0.607	-0.501	-0.472	-0.330	-0.787	-0.574	-0.436
	7-8月	-0.373	-0.692	-0.562	-0.438	-0.388	-0.782	-0.609	-0.408
	7-9月	-0.436	-0.738	-0.626	-0.454	-0.329	-0.807	-0.578	-0.406
	8-9月	-0.406	-0.679	-0.580	-0.454	-0.270	-0.821	-0.545	-0.418

注) 数字下の二重線は1%で水準で有意、一重線は5%水準で有意。

「男爵薯」における収量、でん粉価、でん粉収量と月別の平均気温との相関は、「コナフブキ」・「農林1号」の場合よりも全般に低かったが、気温とでん粉価との間に負の有意な相関が認められている(表IV-3-4)。

表IV-3-4 「男爵薯」における気温と収量等との関係

	十勝農試(n=20)					4場(n=80)		
	収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯渇間の日数		収量	でん粉価	でん粉収量
でん粉価	-0.048					-0.108		
でん粉収量	0.899	0.393				0.922	0.281	
平	5月	-0.260	0.035	-0.223	-0.520	-0.070	-0.137	-0.117
	6月	-0.023	-0.350	-0.180	-0.257	0.270	-0.333	0.136
均	7月	-0.187	-0.296	-0.287	-0.109	0.033	-0.407	-0.114
	8月	-0.157	-0.523	-0.380	-0.344	0.004	-0.315	-0.108
気	5-6月	-0.172	-0.202	-0.249	-0.478	0.138	-0.301	0.021
	5-7月	-0.231	-0.312	-0.343	-0.421	0.113	-0.413	-0.041
温	5-8月	-0.237	-0.465	-0.421	-0.460	0.082	-0.426	-0.075
	6-7月	-0.148	-0.435	-0.319	-0.243	0.185	-0.461	0.010
	6-8月	-0.180	-0.566	-0.413	-0.345	0.120	-0.449	-0.047
	7-8月	-0.219	-0.541	-0.434	-0.306	0.020	-0.424	-0.132

注) 数字下の二重線は1%で水準で有意、一重線は5%水準で有意。

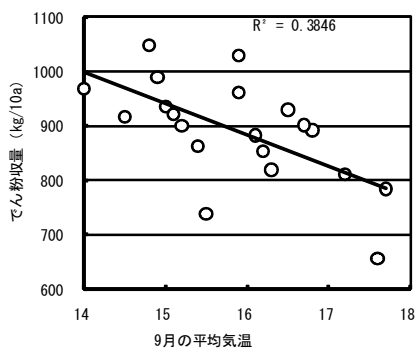
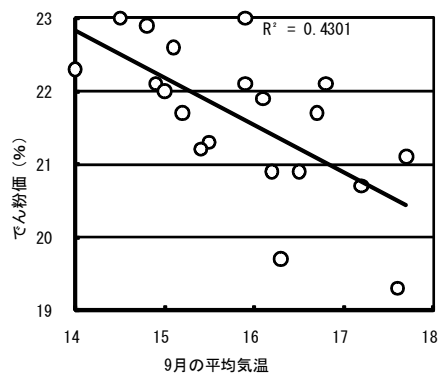
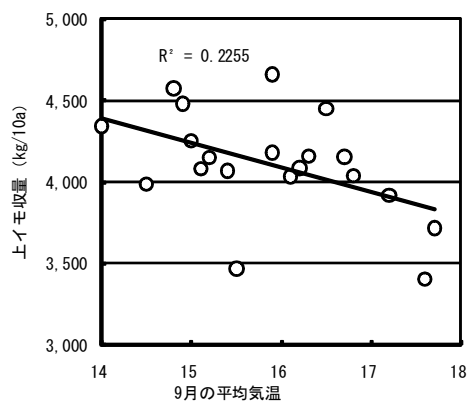
十勝農試における「コナフブキ」・「農林1号」の収量、でん粉価と、降水量、日照時間との相関を検討した(表IV-3-5)。有意な相関が認められたのは、6月の降水量と「農林1号」のでん粉価、7月の日照時間と「コナフブキ」の収量のみであり、明確な関連は認められなかった。

表IV-3-5 十勝農試における降水量、日照時間と収量等との関係

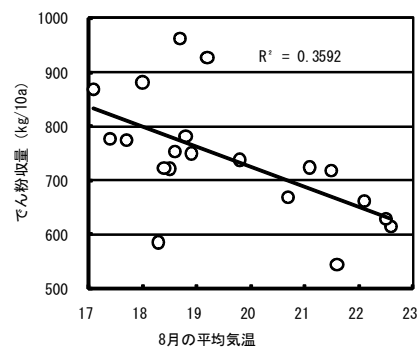
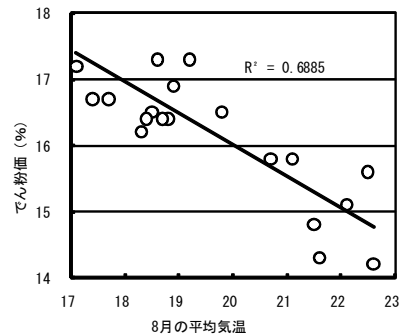
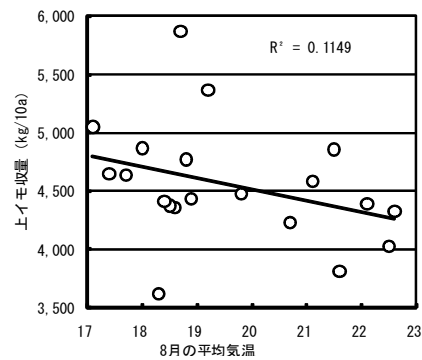
降 水 量				日 照 時 間					
コナフブキ		農林1号		コナフブキ		農林1号			
収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価		
5月	-0.06	-0.32	-0.13	-0.24	5月	-0.21	-0.04	0.17	-0.03
6月	0.31	0.29	0.15	0.52	6月	-0.23	-0.04	0.09	-0.26
7月	-0.27	0.25	0.06	0.23	7月	0.58	-0.08	0.31	-0.01
8月	0.13	0.04	-0.20	0.22	8月	0.23	-0.12	0.04	-0.37
9月	-0.22	-0.37	-0.18	-0.28	9月	0.10	0.36	0.41	0.30

注) 数字下の二重線は1%で水準で有意、一重線は5%水準で有意。

十勝農試の「コナフブキ」については9月の平均気温と、「農林1号」では8月の平均気温と収量、でん粉価、でん粉収量との関係を図IV-3-1、IV-3-2に示した。いずれの場合も相関係数は負で、気温が高まると収量、でん粉価、でん粉収量のいずれも低下すると予想される。したがって、今後の温暖化傾向はばれいしょの収量・品質を低下させると推測されるが、散布図のバラツキが大きい(相関係数がそれほど高くない)ため、低下程度を予測することは困難であった。



図Ⅳ-3-1 十勝農試の「コナフブキ」における9月の平均気温と上イモ収量・でん粉価・でん粉収量との関係



図Ⅳ-3-2 十勝農試の「農林1号」における8月の平均気温と上イモ収量・でん粉価・でん粉収量との関係

表Ⅳ-3-6 各年次における旬別平均気温の平年格差と収量及びでん粉価

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
5月上	-2.5	1.0	0.2	-2.7	-2.5	-1.0	0.9	-3.1	0.4	0.9	0.8	1.0	-2.4	2.7	1.6
5月中	-0.6	1.4	1.7	0.4	-0.2	-0.1	2.6	-5.4	-1.8	2.1	-1.8	0.0	2.8	-0.6	-1.8
5月下	-0.2	2.0	2.0	-0.2	-1.2	2.5	-0.7	1.1	-3.4	0.2	0.6	2.6	-1.0	0.3	-0.4
6月上	-2.3	1.7	1.6	-2.6	-3.5	0.6	-0.3	-1.4	-4.3	-2.8	2.1	0.3	1.5	4.0	0.6
6月中	-1.5	4.3	3.8	-1.0	0.0	0.6	-0.6	-0.4	0.5	-0.3	2.7	2.1	-0.7	-1.1	2.1
6月下	-1.2	2.5	3.3	1.0	-2.3	-0.5	-1.1	-1.3	3.1	-0.1	0.3	1.2	2.7	-3.6	-0.4
7月上	0.4	0.7	0.2	1.9	0.2	0.3	0.7	-1.9	2.0	1.4	-1.9	2.5	-0.7	-0.9	-3.3
7月中	0.5	1.5	-1.7	0.2	-0.9	3.9	2.4	3.3	1.5	-1.5	1.6	3.2	0.7	1.0	-3.5
7月下	3.8	0.3	-0.4	0.4	-4.9	2.4	2.2	0.4	2.2	-0.6	3.5	1.1	-1.4	-0.7	-4.4
8月上	2.6	0.6	-4.4	-3.4	-5.9	5.8	-3.3	-3.0	1.3	-1.8	5.9	2.9	-4.5	-1.7	0.9
8月中	0.1	0.9	-1.2	-2	-1.6	1.8	-1.3	0.7	-6.1	-0.6	3.3	1.8	-0.4	-2.7	-2.2
8月下	2.0	1.4	0.1	1.2	1.3	0.9	-0.3	-2.0	-2.4	0.5	0.5	2.0	-0.6	-1.7	-1.1
9月上	1.7	2.7	1.8	-1.5	-2.7	3.2	-1.3	-2.5	0.0	0.8	2.8	-0.3	-1.4	0.7	-1.7
9月中	1.1	0.7	0.0	-0.9	0.8	2.1	-1.3	1.4	-1.5	2.0	1.2	1.2	-0.1	-0.8	0.1
9月下	0.7	-0.2	0.0	-0.2	0.1	1.3	1.6	0.7	-0.8	2.1	1.9	0.2	-2.7	1.1	-1.2
10月上	-0.9	1.2	1.4	0.0	-0.2	2.9	-1.0	-0.2	-0.6	0.2	-0.6	1.2	-1.6	2.2	-1.6
10月中	1.7	2.2	2	0.0	-1.8	0.4	3.1	-1.2	-1.8	2.8	-1.5	-2.0	1.2	-0.1	-0.7
10月下	1.2	1.2	-0.1	2	1.8	-0.1	1.9	0.4	-1.4	1.0	2.1	-0.4	-1.0	-1.8	1.0
収量(kg/10a)	3720	3790	3870	3940	3560	3750	3930	3500	4050	4030	3840	3770	4000	4150	4120
平年比(%)	96	98	100	102	92	97	102	90	105	104	99	97	103	107	107
でん粉価(%)	16.2	17.4	18.5	18.0	18.9	16.1	17.3	16.7	18.0	17.3	16.6	16.1	18.1	17.2	17.7

注：薄い網掛けは平年より1℃以上高い 濃い網掛けは平年より1℃以上低い
 収量は統計事務所発表の十勝支庁の収量 平年比は15年間の平均値との対比
 でん粉価は十勝農試作況4品種(男爵薯・トヨシロ・農林1号・コナフブキ)の平均

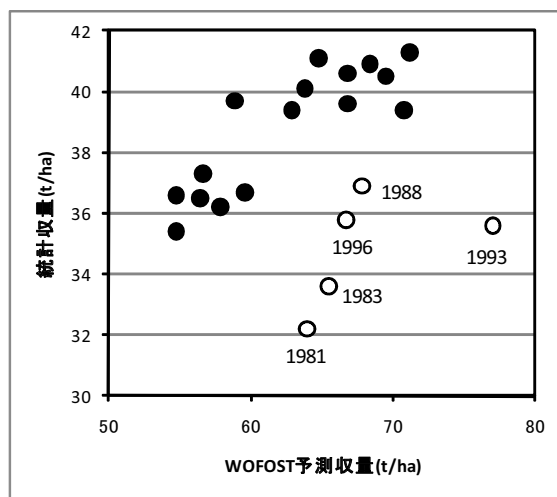
表IV-3-6に、「平成15年夏季の低温とその後の気象が農作物に及ぼした影響に関する調査報告書」(農業試験場資料33号)で検討した平均気温と収量、でん粉価との関連を示した。多収年であった2002, 2003年は初期生育に相当する時期(概ね6月まで)の気温が高く夏季の気温が低かったことが多収の要因であるとしている。1993, 1996年は夏季の気温は低かったが、初期生育に相当する時期の気温が低かったため多収にはならなかったとしている(湿害の影響もあり)。年間を通じて気温が高かった1990, 1994, 2000年の収量平年比は98, 97, 97と平年を下回った。でん粉価に関しては、夏季の気温が高い1994, 1999, 2000年で低く、夏季の気温が低い1991, 1992, 1993, 1997年で高く、夏季の気温の影響が大きいことが示されている。

以上ばれいしよに対する高温の影響は、初期生育の時期では収量にプラスの影響を与える場合もあるが、おおむね収量、でん粉価に対してマイナスの影響があるものと考えられた。

2010年の気象は、初期生育に当たる6月上旬まで低温に経過し、初期生育が遅れたところにその後の高温が影響したため収量の低下程度は大きく、十勝農試の作況では3品種(「男爵薯」、「トヨシロ」、「コナフブキ」)平均で平年比81%であった。でん粉価については、予測にあるように8月、9月の気温が高かったことから0.6~1.2%低下した。

(2) 作物モデル「WOFOST」による生育予測

生育予測に先立ち、WOFOSTの予測収量の妥当性を検証するため、アメダス芽室における1981~2001年の気象データから推定した最大可能収量(以下、単に収量)を市町村統計における芽室町のばれいしよ収量と対比した結果を図IV-3-3に示す。計算の対象とした21年中16年(図中の黒丸)では、予測収量と統計収量の傾向は概ね一致していた。予測収量に対して統計収量が大きく下回った5カ年(図中の白丸)には、8月の記録的豪雨(1981年)、冷湿害年(1983年, 1993年, 1996年)などが含まれる。なお、ここでの収量予測は「紅丸」並の熟期を仮定して行ったが、より早い熟期を仮定した場合にも、予測収量のレベルは低くなるがほぼ同様の傾向が得られる。



図IV-3-3 芽室町における予測収量と実際の収量の関係

1981年~2001年、気象はアメダス芽室、統計収量は芽室町、計算上の植付期は5月9日とした。図中の白丸は冷湿害年などである。

2030年代および2010年に対する生育予測の結果を表IV-3-7に示す。有効積算温度による生育ステージの予測を平年気象に対して行った結果を、2001年の定期作況報告における平年値(表中のカッコ内の値)と比較すると、訓子府における枯凋期(生育停止)が実測より6日遅れたほかは、概ね良く適合していた。平年における生育日数(萌芽期から生育停止までの日数)は芽室および訓子府でそれぞれ122日および130日、最大可能収量(以下、単に収量)はそれぞれ65t/ha および70t/ha と推定された。

異常高温年となった2010年における生育日数は芽室および訓子府でそれぞれ101日および104日となり、平年より21日および26日の短縮が推定された。2010年における気温・日射量から求めた収量は、50t/ha および53t/ha となり、平年(現在)比では77%および76%に相当した。要因解析のために気温を2010年、日射量を平年値とした場合の収量現在比は77%および79%となり、2010年における減収要因は気温の上昇による生育日数の短縮が主因であり、日射量の寄与は小さいものと推定された。

2030年代において、植付期を現在と同様とした場合の生育日数は、芽室および訓子府でそれぞれ114日および119日、収量現在比は85%および84%と推定された。気温の変化のみを考慮した場合の収量現在比は94%および93%となり、2030年代における収量低下の主因は日射量の減少にあると推定された。

2030年代において、植付期を気温の上昇分だけ前進させた場合の生育日数は、芽室および訓子府で11

5日および120日となり、植付期を現在同様とした場合よりも1日長くなった。また、収量現在比についても85%および86%と訓子府では若干の改善が予想された。

2030年代において、植付期を気温の上昇分だけ前進させた場合の枯凋期は芽室では9月13日、訓子府では9月18日まで早まると推定された。

秋まき小麦の播種晩限が道東で現在より11日～13日遅くなることを考慮すると、秋まき小麦の前作として利用できるばれいしょの熟期の選択肢が広がることが予想される。

表IV-3-7 WOFOST によるばれいしょ生育予測結果

入力設定				計算結果				
地点	年代	気象要素	植付期	萌芽期	生育停止	生育日数	収量 t/ha	収量 現在比
芽室	現在	平年値	5/9 (5/10)	5/30 (5/27)	9/29 (9/27)	122	65	100
	2010	気温	5/9	5/31	9/9	101	50	77
		気温・日射					50	77
	2030 CCSR	気温	5/9	5/27	9/18	114	61	94
		気温・日射					55	85
		気温					62	95
訓子府 (境野)	現在	平年値	5/13 (5/13)	6/4 (6/1)	10/12 (10/6)	130	70	100
	2010	気温	5/13	6/2	9/14	104	55	79
		気温・日射					53	76
	2030 CCSR	気温	5/13	5/31	9/27	119	65	93
		気温・日射					59	84
		気温					67	96
		気温・日射	4/30	5/21	9/18	120	60	86

植付日は各農試平年または2030年代の気温上昇に合わせて前進のいずれかを設定
生育日数は萌芽期から生育停止まで
平年値は2000年のもの、気象要素が「気温」のみの場合の日射量は平年値を仮定
訓子府の気象データは、アメダス境野で代用
収量(塊茎全重)は、乾物重での計算結果を乾物率20%と仮定して生重に換算
カッコ内は、2001年における作況平年値(生育停止の欄には枯凋期を記載)

(3) ジャガイモ疫病の初発期予測

一例として芽室町での2008年の気象条件と、温暖化した場合の気象条件(2008年の気象条件に旬別のCCSRによる予想上昇程度を加えたもの)で予測をおこなった。その結果2008年の危険期到達期は6月20日であったのに対し、温暖化後では6月16日と4日早く危険期に到達した(表IV-3-9)。

表IV-3-9 好適指数積算値の予測値

	5/31	6/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2008年	0	0	0	0	0	0	1	3	5	7	9
温暖化後	0	1	1	1	1	1	2	5	8	11	14

	6/11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2008年	11	11	12	13	14	15	16	18	20	22
温暖化後	17	17	18	19	20	21				

初発後の病害の罹病程度は、降水量がやや増加することから高くなることも考えられるが、一方気温が高くなり疫病菌の生育適温より高くなることも考えられ、一概に高くなるとはいえない。疫病の初発時期が早くなってもそれに合わせて防除を行えば、

防除回数が増え防除コストの上昇の可能性はあるが、被害は防げると考えられ、疫病の被害としてはあまり変わらないと考えられる。

その他病害としては、高温多湿で発病が助長される軟腐病の発生が多くなる可能性がある。また、九州のように高温の地帯で発生している青枯病も、現在北海道での発生は少ないが、高温多湿条件で発病が増えるため、今後発生が増えるかもしれない。

4) 温暖化に対する対応策

温暖化によってばれいしょに対しては、収量およびでん粉価の低下等の影響があると考えられる。対応策として、品種育成の面では以下のような特性を有することが必要となると考えられる。

(1) 用途にもよるが、でん粉価の最低ラインが設定されている加工用の用途、またでん粉原料用でもでん粉価が低下することは工場での製造コストに悪影響を与えることから、今後の気象変動によりでん粉価に影響を受けにくい品種、又は現在よりでん粉価の高い品種。

(2) 気温の上昇のみでなく、年次による変動も大きくなると考えられることから、気象要因の変動に対して収量の安定している品種(「紅丸」は年次安定性が高いことが知られている)。

(3) 年内での気象の変動も大きくなると考えられることから、温度、土壌水分の大きな変動によるストレスが大きくなり、中心空洞、褐色心腐等の生理障害が増えると予想される。このためこれら生理障害の発生しづらい品種。

栽培技術の面では以下のような事項が考えられる。

(1) ばれいしょの栽培では培土作業が行われており、土の断熱効果により塊茎近傍の地温の変動を緩和している。培土断面を大きくすることにより、この効果が大きくなるようにする。

5) まとめ

(1) 平均気温が馬鈴しょの生育に与える影響を検討したところ、収量・でん粉価とは負の相関関係にあり、気温が高くなると収量・でん粉価は低下すると推測される。

(2) WOFOSTによる最大可能収量の予測値は、極端な冷湿害年を除いて、過去の統計収量の変動とよく対応していた。

(3) 記録的な高温年であった2010年における気温・日射量から求めた収量は、平年(現在)比で約77%となり、減収の主因は高温による生育日数の短縮

と推定された。

（４）2030年代の収量現在比は約85%と予測され、減収要因は気温の上昇よりも日射量の減少にあると推定された。気温上昇に伴って植付期を前進させても収量現在比はほとんど変化しない。

（５）2030年代には、「紅丸」相当の熟期であって

も植付期を前進させることで生育停止日は9月中旬まで早まり、秋まき小麦の前作として利用できるばれいしょの熟期の選択肢が広がる。

（６）FLABS による2030年代の疫病初発日は、現在に比べ早まると予想された。

（松永 浩）