

# ダイズ品種の発育モデルの作成と気温上昇が発育速度に及ぼす影響の広域推定

中野聡史<sup>1)</sup>・熊谷悦史<sup>2)</sup>・島田信二<sup>1)</sup>・鮫島良次<sup>3)</sup>・大野宏之<sup>1)</sup>・本間香貴<sup>4)</sup>・白岩立彦<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 農研機構中央農業総合研究センター, <sup>2)</sup> 農研機構東北農業研究センター, <sup>3)</sup> 北海道大学大学院農学研究院,

<sup>4)</sup> 京都大学大学院農学研究科)

**要旨:** 我が国のダイズ主要品種であるリュウホウ、エンレイ、フクユタカの発育モデルを作成し、気温上昇がダイズの発育に及ぼす影響を「メッシュ農業気象データ」を用いて広域的に推定した。発育モデルによる推定値と実測値との誤差は、出芽期～開花期で1.4～2.2日、開花期～子実肥大始期で1.2～2.8日になった。また、温度勾配チャンバーにおける気温上昇処理の結果も圃場試験と同一のパラメータにより推定可能であった。気温の変化による発育速度の変化は、中生品種であるリュウホウとエンレイで大きく、晩生品種のフクユタカで小さかった。平均気温から3℃の上昇を想定した場合の発育への影響は、播種期が早く気温が低い東日本で影響が大きく、開花期が5～7日程度早まる地域もみられた。一方、播種期が遅く温暖な九州では気温上昇による発育への影響はほとんどみられなかった。東日本では発育速度の温度反応性が比較的大きい中生品種を用いていることに加え、栽培期間の気温が温度反応性の大きくなる温度域と近いため、気温上昇による発育速度への影響が大きくなったものと推察された。

**キーワード:** ダイズ, 地球温暖化, 発育速度, メッシュ農業気象データ。

21世紀末は20世紀末と比較して、日本付近の年平均気温が3℃程度上昇することが予測されている(気象庁2013)。作物の発育現象は主に気温と日長時間に支配されるため(堀江・中川1990)、気温の上昇は作物の作期や生育・収量に影響を及ぼす。気温と日長時間に対する発育の反応は作物種や品種により異なり、また非線形の反応であるため、気温上昇による発育への影響は複雑である。このような複雑な影響を評価するためにはモデルの利用が有効であり(Lagoら2008)、日々の発育速度(DVR)を気温と日長時間によるロジスティック式で表した発育モデルが提示されている(堀江・中川1990, 中川・堀江1995)。このモデルはイネを対象に作成されたが、同じ短日植物のダイズ(Sinclairら1991)、若干の修正を加えて長日植物のコムギ(Maruyamaら2010)においても適用されている。また、発育モデルの広域的な利用も行われており、山口ら(2012)は水稻の発育モデルによる出穂期予測と登熟気温に対する白米アミロース含有率の関係式を組み合わせることで、玄米白濁が少ない低アミロース米の栽培適地・適作期の広域推定を行っている。

我が国のダイズ作は各地域の気象や病虫害、輪作体系など複数の要因を考慮して品種や作期が策定されており、北海道では凍霜害を回避するために生育期間が短い早生品種、九州では虫害を回避するために晩生品種が栽培されている(斉藤・橋本1980)。そのため気温上昇がダイズの発育に及ぼす影響の評価には、地域の気象条件、品種、栽培時期を考慮する必要がある。特に気温と日長時間に対するDVRの反応は品種の早晩性により異なり、例えば日長時間の変化に対するDVRの変化(日長反応性)は晩生品種

ほど大きくなることが示されている(鮫島2000)。したがって、気温上昇がダイズの発育に及ぼす影響を評価するためには、品種に応じた発育モデルの作成と利用が必要となるが、発育モデルを用いた気温上昇の影響は限られた品種、地点での評価のみであり(鮫島2000)、品種特性や地域の気象条件を考慮した検討は十分に行われていない。そこで本研究では、我が国の主要品種であるリュウホウ、エンレイ、フクユタカを対象とした発育モデルを作成し、発育モデルと「メッシュ農業気象データ」を用いて発育の広域的な推定を行うことで、気温上昇がダイズ発育に及ぼす影響の品種特性や気象条件による違いを検討した。

## 材料と方法

### 1. 発育モデルの作成

発育モデルには、発育ステージを発育指数(DVI)で表し、DVIを日々のDVRの積算値とするDVRモデル(堀江・中川1990)を用いた。DVRは日平均気温(T、以下、気温と表記)と日長時間(L)を変数とした指数関数で表される。

$$DVR = \frac{1}{G} \times \frac{1 - \exp\{B(L - L_c)\}}{1 + \exp\{-A(T - T_h)\}}$$

ここでG、 $T_h$ 、 $L_c$ 、A、Bはパラメータであり、Gは各発育相の最小日数(日)、 $T_h$ はある日長下でDVRが1/2になる温度(℃)、 $L_c$ は発育が進む限界日長(時間)、A、Bは気温と日長時間に対する係数である。気温は日最高気温と日最低気温の算術平均値を用い、日長時間は各地の緯度から天文日長を算出して用いた(Allenら1998)。ダイズの発育ステージはFehr and Caviness(1977)の定義に従い、開花

第1表 京都とつくばにおける発育期および生育期間.

地点	年度	品種	VE (月/日)	R2 (月/日)	R5 (月/日)	VE-R2 (日数)	R2-R5 (日数)
京都	2003	エンレイ	5/25	7/ 5	7/23	41	18
			6/14	7/19	8/ 4	35	16
			7/19	8/16	8/28	28	12
		フクユタカ	5/25	7/27	8/27	63	31
			6/14	8/ 7	9/ 1	54	25
			7/19	8/27	9/12	39	16
	2004	エンレイ	5/20	7/ 2	7/24	43	22
			7/ 6	8/ 4	8/ 2	29	16
			8/11	9/ 5	9/18	25	13
		フクユタカ	5/20	7/22	8/31	63	40
			7/ 6	8/17	9/ 8	42	22
			8/11	9/12	9/29	32	17
つくば	2003	エンレイ	6/ 1	7/16	8/ 3	45	18
			6/22	8/ 3	8/21	42	18
			7/14	8/18	8/30	35	12
		フクユタカ	6/ 1	8/ 8	9/ 5	68	28
			6/22	8/20	9/ 9	59	20
			7/14	8/29	9/11	46	13
	2004	エンレイ	5/26	7/ 9	7/30	44	21
			6/22	7/30	8/18	38	19
			7/18	8/18	9/ 1	31	14
		フクユタカ	5/26	7/24	9/ 1	59	39
			6/22	8/13	9/ 8	52	26
			7/18	8/29	9/15	42	17
	2012	リュウホウ	6/21	7/30	8/13	39	14
			7/17	8/14	8/27	28	13
			6/21	8/ 1	8/22	41	21
		エンレイ	7/17	8/15	8/30	29	15
			6/21	8/14	9/10	54	27
			7/17	8/27	9/14	41	18
2013	リュウホウ	6/17	7/26	8/ 9	39	14	
		6/30	8/ 4	8/19	35	15	
		8/ 5	9/ 3	9/12	29	9	
	エンレイ	6/17	7/28	8/15	41	18	
		6/30	8/ 2	8/21	33	19	
		8/ 5	9/ 1	9/12	27	11	
フクユタカ	6/17	8/10	9/ 5	54	26		
	6/30	8/19	9/ 8	50	20		
	8/ 5	9/ 7	9/19	33	12		

期(R2)と子実肥大始期(R5)を推定対象とした。出芽期(VE)をDVI=0.0, R2をDVI=1.0, R5をDVI=1.2と定め、VE~R2とR2~R5で分割し、それぞれの期間ごとにパラメータを決定した。

各パラメータはモデル推定値と実測値の二乗平均平方根誤差(RMSE)が最小となるようにシンプレックス法により定めた。具体的には統計解析ソフトR(ver3.0.3)の

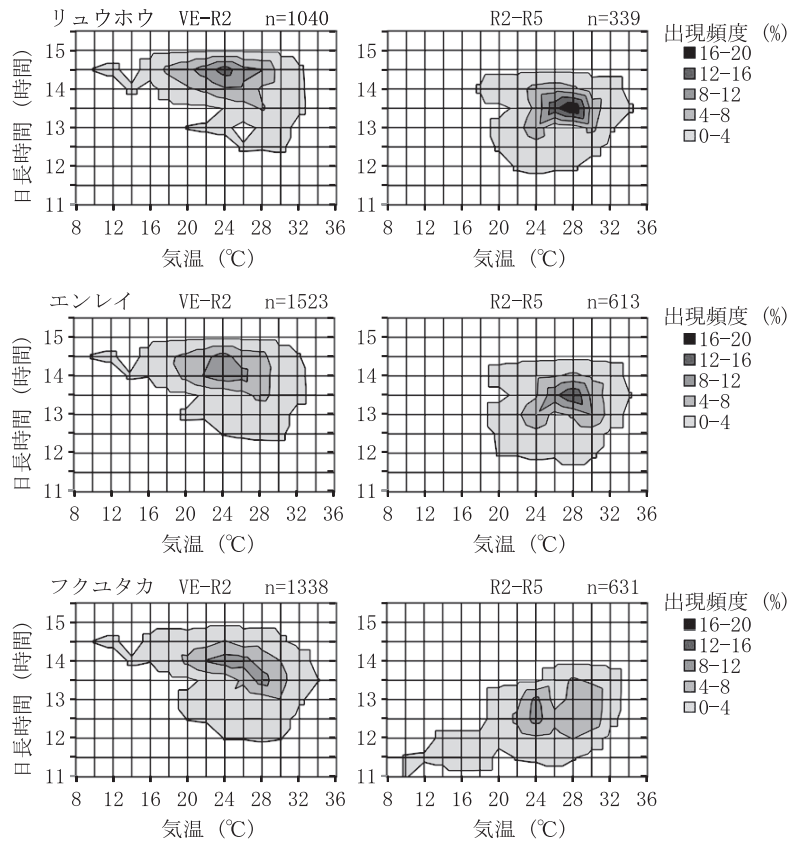
optim関数を用い、Nelder-Mead法により最適パラメータを決定した。シンプレックス法は初期値の設定により最適パラメータの決定結果が変わってくる可能性がある。ここでは、各発育相の最小日数を示すGの初期値に栽培データの最小日数を定め、その他のパラメータは推定値と実測値が大きく外れない値を初期値として定めた。また、栽培データ数が限られていることからパラメータの評価にはクロス

第2表 盛岡における発育期および生育期間.

地点	年度	温度条件	品種	VE (月/日)	R2* (月/日)	R5 (月/日)	VE-R2 (日数)	R2-R5 (日数)		
盛岡	2011		リュウホウ	5/22	7/19	8/9	58	21		
				5/31	7/22	8/14	52	23		
				6/7	7/27	8/17	50	21		
				6/10	7/27	-	47	-		
				6/15	7/31	8/18	46	18		
				6/24	8/5	8/23	42	18		
				6/24	8/5	-	42	-		
				7/5	8/11	8/28	37	17		
				7/11	8/16	-	36	-		
				7/16	8/17	9/4	32	18		
		7/24	8/26	9/10	33	15				
			エンレイ	5/23	7/22	8/17	60	26		
				5/29	7/26	8/20	58	25		
				6/8	7/30	8/23	52	24		
				6/9	7/30	-	51	-		
				6/16	8/2	8/25	47	23		
				6/24	8/6	8/31	43	25		
				6/24	8/7	-	44	-		
				7/5	8/12	9/1	38	20		
				7/11	8/17	-	37	-		
				7/15	8/19	9/4	35	16		
		7/24	8/26	9/11	33	16				
			フクユタカ	5/22	8/8	9/10	78	33		
				5/30	8/13	9/10	75	28		
				6/8	8/14	9/12	67	29		
				6/15	8/17	9/7	63	21		
				6/24	8/22	9/25	59	34		
				7/5	8/27	9/28	53	32		
				7/15	9/2	10/1	49	29		
				7/24	9/5	10/3	43	28		
盛岡 (TGC)	2011			低温区	リュウホウ	6/11	7/29	-	48	-
				中温区		6/11	7/21	-	40	-
		高温区	6/9	7/19		-	40	-		
		低温区	エンレイ	6/11	7/31	-	50	-		
		中温区		6/11	7/24	-	43	-		
		高温区		6/10	7/21	-	41	-		
		2012	低温区	リュウホウ	6/11	8/1	8/19	51	18	
			中温区		6/11	7/28	8/15	47	18	
			高温区		6/10	7/20	8/14	40	25	
低温区	エンレイ		6/11	8/3	8/27	53	24			
中温区			6/11	7/30	8/23	49	24			
高温区			6/9	7/23	8/26	44	34			
2013	低温区	リュウホウ	6/11	7/30	8/19	49	20			
	中温区		6/11	7/23	8/12	42	20			
	高温区		6/11	7/19	8/10	38	22			
	低温区	エンレイ	6/11	8/1	8/22	51	21			
	中温区		6/11	7/28	8/20	47	23			
	高温区		6/11	7/21	8/19	40	29			

VE は出芽期, R2 は開花期, R5 は子実肥大始期を示す. - は欠測値を示す.

\*: 開花期のデータは開花始 (R1) であったが, R1 の翌日には R2 に達したものと仮定した.



第1図 パラメータ決定データにおける気温と日長時間の出現日の頻度分布 (%)。n は全データ日数を示す。

バリデーション (leave-one-out 法) を用い、クロスバリデーションの推定誤差と全データに対する推定誤差の両方が最小となるパラメータを最適パラメータとした。

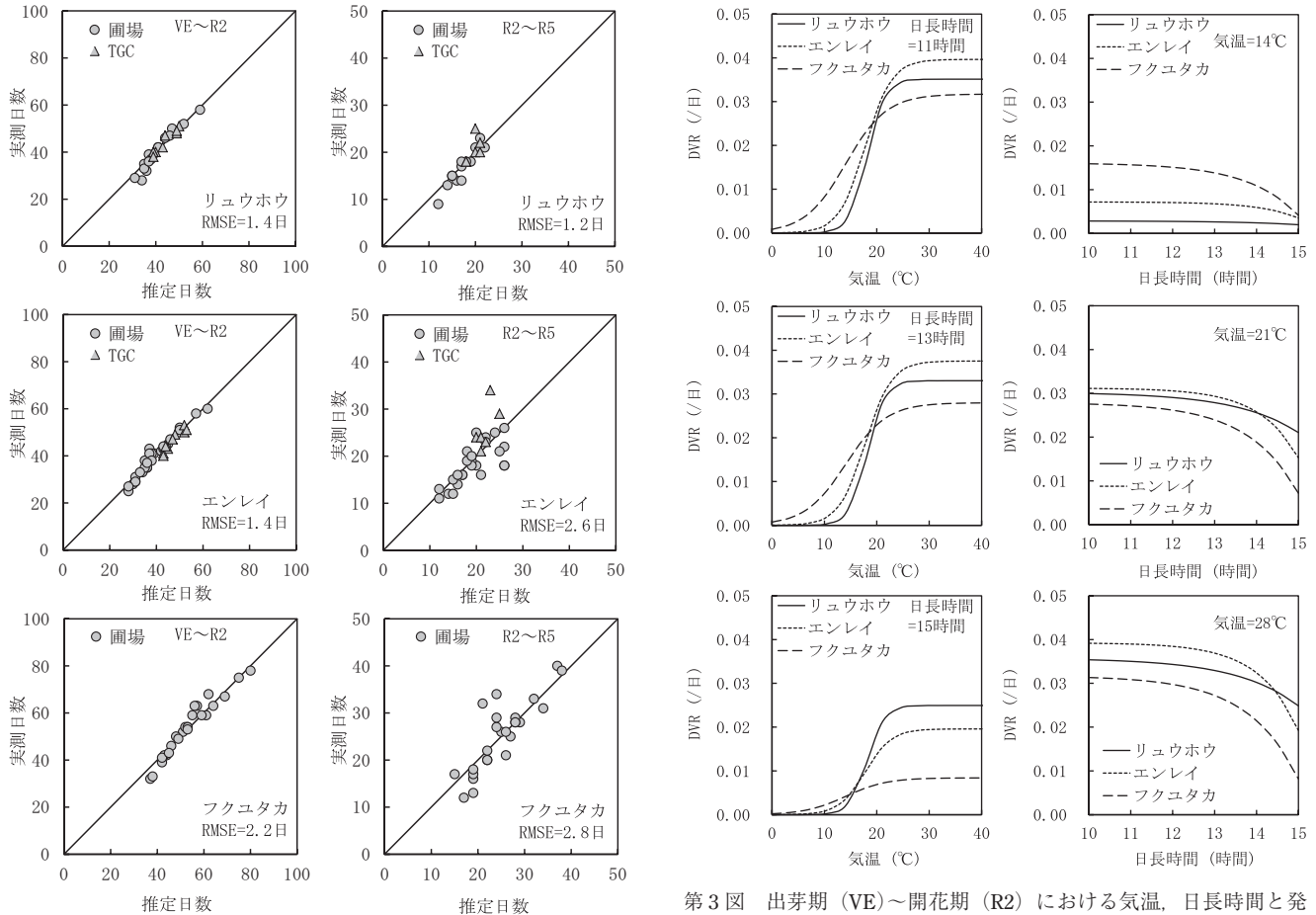
本研究で用いた品種リュウホウは東北地域、エンレイは北陸地域、フクユタカは九州、四国、東海地域で主に栽培され、2012年産全農集荷実績における生産量はそれぞれ全国5位、3位、1位である(農林水産省2014)。福井・荒井(1951)の生態型分類では、播種から開花期までの日数の長短をI~V、開花期から成熟期までの日数の長短をa~cで区別し、その組み合わせで品種の生育特性を示す。この生態型分類に従うと、エンレイはIIc、フクユタカはIVcに分類される(鄭2005)。リュウホウは明確な記述がなされていないがライデン並みの熟期であることから(中村ら1996)、IIbに分類されると考えられる(齊藤・橋本1980)。また、米国の成熟群分類に従うと、リュウホウ、エンレイ、フクユタカはそれぞれIII、IV、VIに分類される(中村ら1996、Udeら2003)。

栽培データは京都大学農学部(京都府京都市)、中央農業総合研究センター(茨城県つくば市)、東北農業研究センター(岩手県盛岡市)の3地点において、作期移動試験により取得した。リュウホウは2地点3か年の計16作期、エンレイは3地点5か年の計28作期、フクユタカは3地点5か年の計25作期の圃場栽培データを用いた(第1表、

第2表)。京都の2003年、2004年のデータは灰色低地土において、基肥を $N:P_2O_5:K_2O = 3.0\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}$  施用し、畝間65 cm、株間15 cmの1本立てで栽培した。つくばの2003年、2004年のデータは黒ボク土において、基肥を $N:P_2O_5:K_2O = 3.0\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}$  施用し、畝間70 cm、株間10 cmの1本立てで栽培した。つくばの2012年および2013年の6月17日、8月5日出芽のデータは灰色低地土、2013年6月30日出芽のデータは黒ボク土において、基肥を $N:P_2O_5:K_2O = 2.5\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}:10.0\text{ g m}^{-2}$  施用し、畝間70 cm、株間15 cmの1本立てで栽培した。盛岡の2011年のデータは黒ボク土において、基肥を $N:P_2O_5:K_2O = 3.6\text{ g m}^{-2}:27.0\text{ g m}^{-2}:10.8\text{ g m}^{-2}$  施用し、畝間100 cm、株間50 cmの1本立てで栽培した。リュウホウ、エンレイは上記に加え、東北農業研究センターにおける自然光型の温度勾配チャンパー(TGC)において3段階の温度条件を設定し、3か年のポット栽培データを取得した。2011、2012年は5Lポット、2013年は10Lポットに黒ボク土を充填後、基肥として1ポットあたり $N:P_2O_5:K_2O = 0.3\text{ g}:1.0\text{ g}:1.0\text{ g}$  を施用し、1本立てで栽培した。TGCの低温区は外気温に相当し、中温区は低温区より期間平均で $2.4^\circ\text{C}$ 、高温区は $5.1^\circ\text{C}$ 程度気温が高くなった(Kumagai and Sameshima 2014)。なお東北農業研究センターの開花期のデータは開花始(R1)であつ

第3表 出芽期 (VE)~開花期 (R2) および開花期 (R2)~子実肥大始期 (R5) の発育パラメータ.

品種	VE-R2					R2-R5				
	G (日)	T <sub>h</sub> (°C)	L <sub>c</sub> (時間)	A	B	G (日)	T <sub>h</sub> (°C)	L <sub>c</sub> (時間)	A	B
リュウホウ	27.89	18.14	16.76	0.590	0.676	9.08	16.17	16.29	0.206	0.050
エンレイ	25.05	17.80	15.63	0.398	1.071	11.29	19.68	15.26	0.737	0.080
フクユタカ	30.68	14.09	15.36	0.257	0.830	12.05	16.94	14.33	0.448	0.080

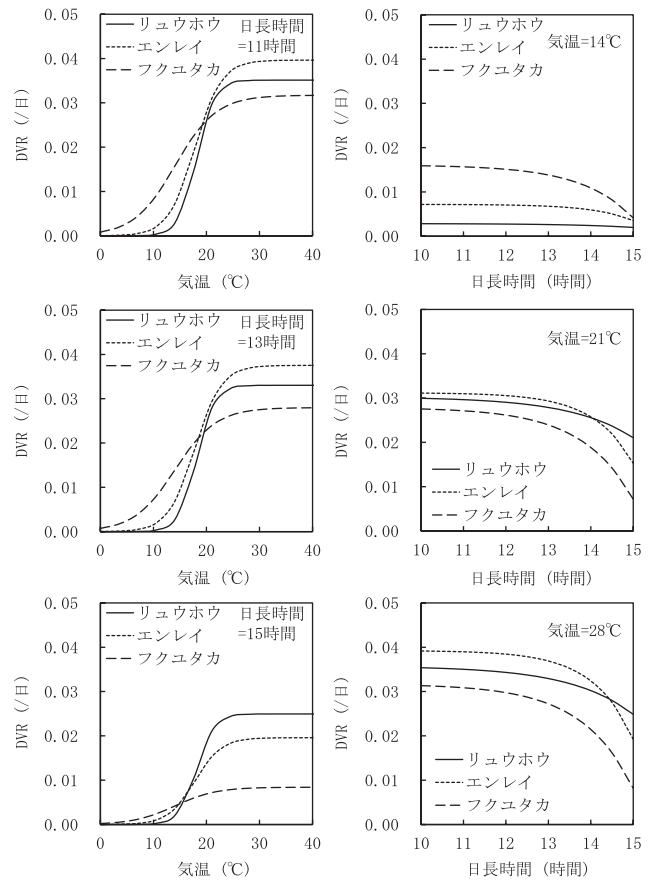


第2図 生育期間のモデル推定値と実測値の比較. 左図: 出芽期(VE)~開花期(R2), 右図: 開花期(R2)~子実肥大始期(R5).

たが、京都およびつくばでの観測から、R1の翌日にはR2に達したものと仮定してR2の日付を決定した。気象データは2003、2004年の京都、つくばについては最寄りのアメダスデータを用い、それ以外は各試験場に設置されている総合気象観測装置のデータを用いた。

## 2. 温暖化時の発育推定

本研究では+3°Cの気温上昇を想定して(気象庁2013)、温暖化時のダイズ発育の影響評価を行った。気象データは中央農業総合研究センターで整備されている「メッシュ農業気象データ」(大野2014)を用い、1980~2013年の34年分の過去データを使用した。通常時および気温+3°C時のVE~R2、R2~R5の生育日数をそれぞれ計算し、通常



第3図 出芽期(VE)~開花期(R2)における気温、日長時間と発育速度(DVR)の関係. 左図: 気温とDVRの関係, 右図: 日長時間とDVRの関係.

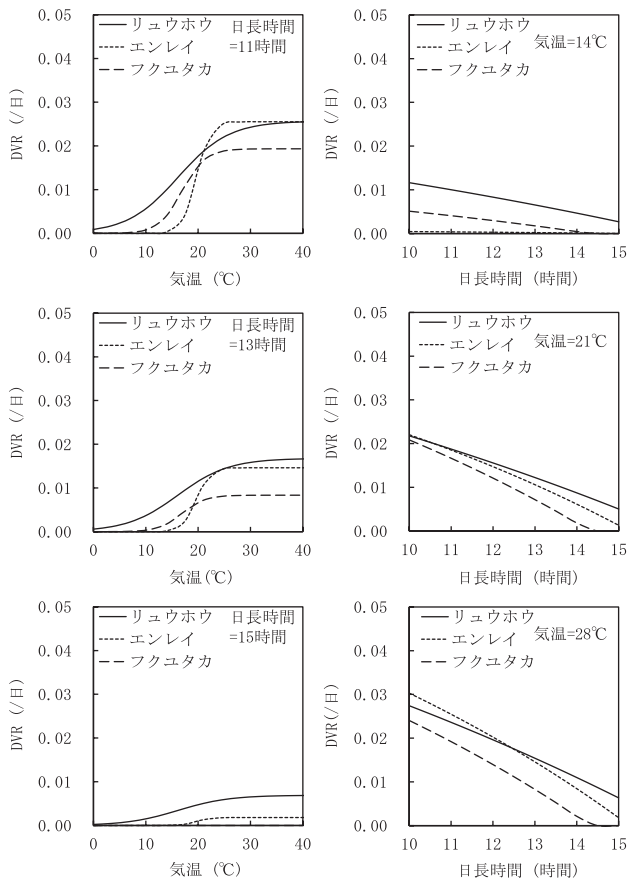
時と気温+3°C時の生育日数の差分を34年分平均して、温暖化時のダイズ発育影響評価マップを製作した。

## 結 果

### 1. 発育モデルの精度と品種特性

発育モデルのパラメータ推定に利用した栽培データの気温と日長時間のデータ範囲は品種により若干異なるが、VE~R2で気温10~34°C、日長時間12~15時間の範囲、R2~R5で気温10~34°C、日長時間11~14.5時間の範囲であった(第1図)。リュウホウ、エンレイ、フクユタカのVE~R2、R2~R5における発育モデルのパラメータは第3表のように推定された。生育日数のモデル推定値と実測値のRMSEは、VE~R2ではリュウホウ、エンレイ、フ





第4図 開花期 (R2)～子実肥大始期 (R5)における気温、日長時間と発育速度 (DVR) の関係。  
左図：気温と DVR の関係、右図：日長時間と DVR の関係。

クユタカでそれぞれ1.4日、1.4日、2.2日、R2～R5ではそれぞれ1.2日、2.6日、2.8日となった(第2図)。また、TGC栽培データが圃場栽培データから大きく外れるということはなく、両者は同一パラメータを用いて推定可能であった。

第3図、第4図に気温・日長時間とDVRの関係を示すが、第1図のデータ範囲外の部分はDVRモデルにおける気温・日長時間とDVRとの関係を適用した外挿である点に注意が必要である。VE～R2におけるDVRの品種特性は、リュウホウとエンレイのパラメータAが大きいため $T_h$ の気温付近でDVRが急激に変化するのに対して、フクユタカは気温に対するDVRの変化が緩やかであった(第3図左)。どの品種も25℃以上でDVRはほぼ最大値に達し、それ以上では気温に対する変化は小さくなった。DVRの日長反応性はDVRが大きくなる21℃以上においてエンレイとフクユタカは同様な変化を示した(第3図右)。しかし限界日長 $L_c$ が大きいリュウホウは変化傾向が異なり、14時間前後の日長時間を境に短日下ではエンレイのDVRよりも小さく、長日下ではエンレイのDVRよりも大きくなるという逆転現象を示した。

R2～R5におけるDVRの品種特性はVE～R2とは必ずし

も対応せず、温度反応性はリュウホウが小さく、エンレイが大きかった(第4図左)。DVRが大きく変化する $T_h$ の値は、エンレイが他の2品種より3℃程度高くなった。日長反応性は全ての品種で直線に近い変化となり、パラメータBは小さくなった(第4図右)。また、リュウホウとエンレイにおいてVE～R2と同様にDVRの大きさが逆転する現象がみられ、21℃では10.5時間、28℃では12.5時間の日長時間を境にDVRの大きさが逆転した。

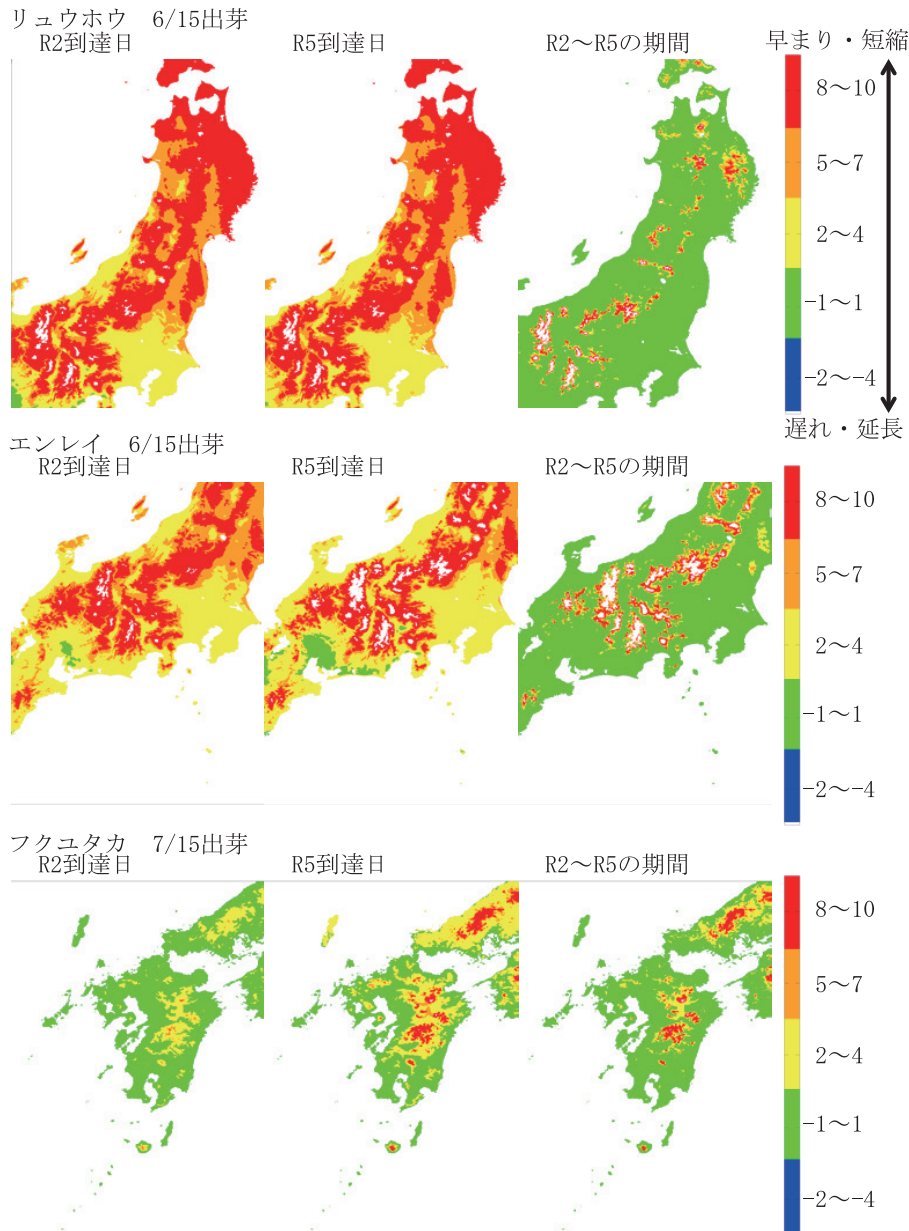
## 2. 気温上昇による生育期間の変化

現在のダイズ播種期を考慮し、東日本におけるリュウホウとエンレイは出芽日を6月15日と設定し、九州におけるフクユタカは出芽日を7月15日と設定して発育期の面的な推定を行った。リュウホウとエンレイは同じ傾向を示し、気温+3℃を想定した場合、R2は関東および北陸の平野部で2～4日早まり、より寒冷な東北や山間部で5～7日以上早まるという結果となった(第5図上、中)。一方、R2～R5の生育日数はほぼ変わらない地点が多く、結果としてR5もR2と同程度の早まりとなった。フクユタカのR2は、気温+3℃を想定した場合でも山間部以外ではほぼ変化なく、また、R2～R5の生育日数およびR5到達日もほぼ変わらない地点が多かった(第5図下)。

## 考 察

我が国の主要ダイズ品種であるリュウホウ、エンレイ、フクユタカを対象として、気温と日長時間から発育モデルの作成を行った。生育日数に対するモデル推定値と実測値のRMSEは、VE～R2で1.4～2.2日、R2～R5で1.2～2.8日となり、両期間とも推定誤差は3日以内に収まった(第2図)。品種やデータ点数が異なるため単純な比較はできないが、本研究と同じDVRモデルを用いて米国品種の開花期を対象とした推定誤差は1.6～3.2日であり(Sinclairら1991)、本研究は同程度の推定誤差となった。

VE～R2における品種特性として、晩生品種は早生品種に比べて限界日長が短く温度に対する反応性が大きいことが報告されている(Sinclairら1991)。一方、品種の早晩性による違いは日長反応性の違いに現れ、温度反応性には現れないという報告もある(Grimmら1993)。VE～R2のパラメータにおいて、晩生品種であるフクユタカの限界日長 $L_c$ がリュウホウ、エンレイより短いという点はSinclairら(1991)と一致している。しかし、フクユタカでは気温の変化に対するDVRの変化がリュウホウやエンレイより小さく(第3図)、温度反応性はSinclairら(1991)と逆の傾向である。また、日長反応性を示すパラメータBには品種の早晩性による一定の傾向は見られず、晩生品種ほど日長時間の変化に対するDVRの変化が大きくなるというGrimmら(1993)や鮫島(2000)の報告とは一致していない。一方、R2～R5における品種特性では、折れ線回帰式を用いた発育モデルにおいて、早生品種では晩生品種より

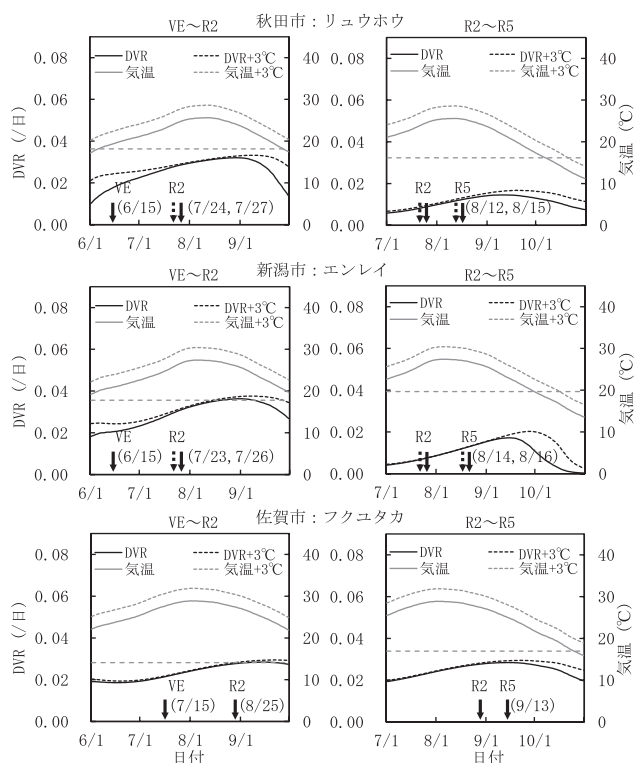


第5図 気温 +3°Cを想定した場合の開花期 (R2), 子実肥大始期 (R5) までの早まり (日数) および R2~R5の期間短縮 (日数) の推定結果. 1980~2013年の34年分の平均値.  
上図: リュウホウ, 中図: エンレイ, 下図: フクユタカ.

も最大発育速度に達する日長時間が短いことが報告されている (Grimm ら 1994). 使用しているモデルの形が異なるので直接の比較はできないが, 第4図では日長時間が短くなるほど DVR は大きくなっており, 最大発育速度を示す日長時間は示されなかった. ただし, 日長時間が長くなるほど DVR が直線的に低下する関係は Grimm ら (1994) の報告と一致するものである.

本研究における発育パラメータの品種特性が既存の研究と一致しない原因として, パラメータ決定に使用した気温と日長時間の間に相関関係が存在しており, DVR に対する気温と日長時間の影響を適切に分離できていなかった可能性が考えられる. 気温と日長時間の間に相関関係が存在

する場合には多重共線性の問題が生じ, パラメータの決定が不安定となる (Grimm ら 1994, 中川・堀江 1995). 本研究において気温と日長時間の相関係数は, リュウホウ, エンレイ, フクユタカで VE~R2 は -0.40, -0.41, -0.40, R2~R5 は 0.06, 0.08, 0.51 であった. R2~R5 のフクユタカは冬に近づくため気温の低下と日長時間の短縮に相関が生じてくるが, Grimm ら (1994) の危惧している相関係数の絶対値 0.6~0.7 より小さい. しかし, 気温と日長時間の組み合わせで見ると, データ全体としては幅広い分布を示すが, 出現頻度が高い組み合わせが存在している (第1図). 特にリュウホウではデータの偏りが大きく, モデルの当てはまり精度が高いとしても, 発育パラメータの



第6図 気温平年値(1981~2010)を用いた各品種の主産地における生育速度(DVR)の計算値および気温の推移。破線は各品種における生育パラメータ  $T_h$  の温度を示す。左図: 出芽期(VE)~開花期(R2), 右図: 開花期(R2)~子実肥大始期(R5)。↓: 平年値での生育期, ↓↓: 平年値+3°Cでの生育期, カッコ内は(平年値+3°Cでの到達日, 平年値での到達日)を示す。ただしフクユタカでは平年値と平年値+3°CにおいてR2およびR5到達日が同日であった

妥当性にはさらなる検討が必要である。ただし、第5図に示した生育期の広域的な推定では、地域が各品種の主産地を中心とした範囲に限られており、また設定した出芽日もパラメータ決定に使用した栽培データの範囲内である。したがって、気温と日長時間の関係に大きな変異はなく、もし、生育パラメータにおいて、気温と日長時間の影響が完全に分離されていないとしても、その影響は小さいものと考えられる。Sinclairら(1991)やGrimmら(1993)の推定は、000~IXの幅広い成熟群の米国品種を用いた結果を示しており、日本品種における品種特性と生育パラメータの検討においても、北海道の品種等も含めた幅広い品種での検討が必要である。

R2~R5はVE~R2に比べて生育期間が短いにもかかわらず、エンレイ、フクユタカでは推定誤差が大きくなった(第2図)。エンレイにおいてR2~R5の生育日数の推定誤差が一番大きくなった点は2012年の盛岡TGCにおける高温区であり、実測日数34日に対して推定日数23日となり推定日数が11日短くなった。これは温度上昇処理によりダイズの着莢期および莢伸長速度が低下したためと考えられる(Thomasら2010, Kumagaiら2012, Tacarinduaら2013)。

したがって、R5期の推定精度の向上には品種の遺伝要因だけでなく、高温ストレスによる生育速度の低下(Grimmら1994, Setiyonoら2007)という環境要因も考慮したモデルの作成が必要である。

生育パラメータの決定に使用したデータの栽培地点および生育時期は限られており、この生育モデルを用いて面的に、また温度上昇時を想定してダイズの生育期を推定することは、パラメータを決定したデータ範囲を超えた外挿を伴うものとなる。R2期の推定については、気温勾配が5°C前後ある盛岡のTGCにおける生育が同一の生育モデルおよびパラメータで推定可能であったことから(第2図左)、東日本における気温上昇時の予測はある程度の妥当性があると考えられる。一方、九州などより高温な地域における気温上昇のモデル推定は測定データの範囲を超えた外挿であり、高温ストレスによる生育速度の低下は考慮できず、結果の妥当性には注意が必要である。生育の面的な推定について、本研究では京都、つくば、盛岡とできるだけ幅広い地点でのデータ取得を目指したが、第5図の九州を対象とした推定には外挿による部分が多い。このように第5図の生育推定マップは精度において取り扱いに注意が必要であるが、気温と日長時間に対するDVRの非線形性を考慮するためにはモデルを用いた推定は有効であり、今後栽培データを追加することでさらなる精度の向上が期待できる。

気温+3°Cを想定した場合、東日本のリュウホウやエンレイは生育が早まりR2までの日数が短縮しているが、九州のフクユタカではほぼ変化がない(第5図)。これはDVRと気温が非線形関係であり、 $T_h$ 付近の気温ではDVRの変化は大きい、ある気温以上になるとほぼ変化しなくなるという特徴から説明できる(第3図)。

具体的な例として、気象庁の1981~2010年の気温平年値を用い、各品種の主産地および第5図で設定した出芽日を対象に、気温+3°CによるDVRの変化を試算した(第6図)。VE~R2では秋田市と新潟市の6月の気温が各品種の $T_h$ に近いため、気温+3°CによるDVRの増加が大きくなるが、佐賀市の7月の気温はフクユタカの $T_h$ より十分高いため、気温+3°CによるDVRへの影響はほとんどない(第6図左)。一方R2~R5では、秋田市および新潟市の6月15日出芽のリュウホウおよびエンレイのR2が7月下旬、佐賀市の7月15日出芽のフクユタカのR2が8月下旬となり、各地点の気温は $T_h$ より十分高いため、気温+3°CによるDVRへの影響はほとんどなくなる(第6図右)。ここで示した3品種の $T_h$ は15~20°C程度であり、生育期間の気温が $T_h$ に近くなる東日本や山間部では気温上昇による生育速度の増加が大きくなる。つまりこれらの地域では、DVRの温度反応性が大きい品種が栽培されていることに加え、温度反応性が大きくなる温度条件となっており、温暖化によるダイズの生育期間の短縮が懸念される。

生育期間の短縮が生育量不足や収量減に結びつくかは、



温暖化に伴う日射量の変化と気温上昇による葉面積展開速度への影響、気温上昇が着莢や子実肥大に及ぼす影響を考慮しなければならない。全天日射量の将来予測は気温に比べて不確実性が大きいいため、現時点で議論することは難しい(気象庁 2013)。葉面積展開は気温の関数で表されることもあり(Sinclair 1986, Setiyonoら 2008)、気温上昇により展開速度が増加することが予想される。仮に生育期間が短縮しても、葉面積展開速度が増加して積算受光日射量に変化がなければ、気温上昇の影響はそれほど考慮しなくて良いことになる。一方、葉面積展開速度の増加よりも生育期間の短縮の影響が大きく積算受光日射量が減少する場合は、播種期や栽植密度の調整により生育量を確保するといった対応が考えられる。また、気温上昇が子実肥大に与える影響としては、子実肥大速度の低下とともに粒大の低下が認められており(Thomasら 2010, Kumagaiら 2012, Tacarinduaら 2013)、子実肥大期に高温の遭遇を回避するような播種期や品種の選択が必要となる可能性もある。今後は気温上昇による生育への影響に加え、葉面積展開や積算受光日射量、子実肥大への影響を含めた総合的な評価とそのためのモデル構築が必要である。

### 引用文献

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper 56. FAO. 1-300.
- Fehr, W.R. and Caviness, C.E. 1977. Stage of soybean Development. Special Report 80. Cooperative Extension Service, Iowa State University, Ames. 1-12.
- 福井重郎・荒井正雄 1951. 日本に於ける大豆品種の生態学的研究. 1. 開花日数と結実日数による品種の分類とその地理的分布に就いて. 育種学雑誌 1: 27-39.
- Grimm, S.S., Jones, J.W., Boote, K.J. and Hesketh, J.D. 1993. Parameter estimation for predicting flowering date of soybean cultivars. Crop Sci. 33: 137-144.
- Grimm, S.S., Jones, J.W., Boote, K.J. and Herzog, D.C. 1994. Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. Agron. J. 86: 31-38.
- 堀江武・中川博視 1990. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第1報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日作紀 59: 687-695.
- 気象庁 2013. 地球温暖化予測情報 第8巻. IPCC 温室効果ガス排出シナリオA1Bを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測 1-88.
- Kumagai, E., Tacarindua, C.P., Homma, K., Shiraiwa, T. and Sameshima, R. 2012. Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature on seed production and nitrogen concentration in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). J. Agric. Meteorol. 68: 1-13.
- Kumagai, E. and Sameshima, R. 2014. Genotypic differences in soybean yield responses to increasing temperature in a cool climate are related to maturity group. Agric. For. Meteorol. 198-199: 265-272.
- Lago, I., Streck, N.A., Alberto, C.M., Oliveira, F.B. and Paula G.M.de. 2008. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red rice. Pesqui. Agropecu. Bras. 43: 1441-1448.
- Maruyama, A., Kurose, Y. and Ohba, K. 2010. Modeling of phenological development in winter wheat to estimate the timing of heading and maturity based on daily mean air temperature and photoperiod. J. Agric. Meteorol. 66: 41-50.
- 中川博視・堀江武 1995. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日作紀 64: 33-42.
- 中村茂樹・湯本節三・高橋浩司・田淵公清・足立大山・菊池彰夫・小綿美環子・番場宏治・高橋信夫・岡部昭典・渡辺巖・長沢次男・村上昭一・橋本鋼二・酒井真次・異儀田和典 1996. ダイズ新品種「リュウホウ」の育成. 東北農試研報 91: 1-11.
- 農林水産省 2014. 大豆をめぐる事情. 1-19. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/pdf/daizu\\_meguiji\\_h2606.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/pdf/daizu_meguiji_h2606.pdf) (2014/6/10 閲覧).
- 大野宏之 2014. メッシュ農業気象データ利用マニュアル. 中央農研研究資料 9: 1-77.
- 斉藤正隆・橋本鋼二 1980. 第2編 大豆栽培の基礎 I 品種の分類・分布と栽培特性 1. 品種の分類と分布. 大豆の生態と栽培技術 斉藤正隆・大久保隆弘編著. 37-62.
- 鮫島良次 2000. 気象環境要因に対するダイズの生育反応の解析およびモデリングに関する研究. 農研センター研報 32: 1-119.
- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, A.M., Cassman, K.G. and Dobermann, A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yielding conditions. Field Crops Res. 100: 257-271.
- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J.E., Cassman, K.G. and Dobermann, A. 2008. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. Field Crops Res. 108: 82-92.
- Sinclair, T.R. 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. Field Crops Res. 15: 125-141.
- Sinclair, T.R., Kitani, S., Hinson, K., Bruniard, J. and Horie, T. 1991. Soybean flowering date: Linear and logistic models based on temperature and photoperiod. Crop Sci. 31: 786-790.
- Tacarindua, C.R.P., Shiraiwa, T., Homma, K., Kumagai, E. and Sameshima, R. 2013. The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. Field Crops Res. 154: 74-81.
- 鄭紹輝 2005. 北部九州における秋ダイズの生理生態的特性. Coastal Bioenvironment 4: 29-36.
- Thomas, J.M.G., Boote, K.J., Pan, D. and Allen, L.H.Jr. 2010. Elevated temperature delays onset of reproductive growth and reduces seed growth rate of soybean. J. AgroCrop Sci. 1: 19-32.
- Ude, G.N., Kenworthy, W.J., Costa, J.M., Cregan, P.B. and Alvernaz, J. 2003. Genetic diversity of soybean cultivars from China, Japan, North America, and North American ancestral lines determined by amplified fragment length polymorphism. Crop Sci. 43: 1858-1867.
- 山口弘道・吉永悟志・白土宏之・神田英司・福島陽・福田あかり・長田健二・浅野真澄・八島由美・三上雄史・和泉佳・今川彰教・安藤正 2012. 白米アミロース含有率の推定による白濁が少ない低アミロース米生産のための栽培適地・適作期の推定法. 日作紀 81: 281-291.

**Modeling of Phenological Development Stages and Impact of Elevated Air Temperature on the Phenological Development of Soybean Cultivars in Japan** : Satoshi NAKANO<sup>1)</sup>, Etsushi KUMAGAI<sup>2)</sup>, Shinji SHIMADA<sup>1)</sup>, Ryoji SAMESHIMA<sup>3)</sup>, Hiroyuki OHNO<sup>1)</sup>, Koki HOMMA<sup>4)</sup> and Tatsuhiko SHIRAIWA<sup>4)</sup> (<sup>1)</sup>*Natl. Agr. Res. Cent., 3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, Japan;* <sup>2)</sup>*Natl. Agr. Res. Cent. for Tohoku Region;* <sup>3)</sup>*Grad. Sch. Agr. Sci., Hokkaido Univ.;* <sup>4)</sup>*Grad. Sch. Agr. Sci., Kyoto Univ.*)

**Abstract** : This study aimed to estimate the large-scale effects of elevated air temperature on the phenological development of soybean by using the agro-meteorological grid data. A logistic model has been developed for describing the developmental rate (DVR) of three soybean cultivars, Ryuhou, Enrei and Fukuyutaka. Root mean square errors of the model estimation ranged from 1.4 to 2.2 days for emergence (VE) to flowering (R2) and 1.2 to 2.8 days for R2 to beginning of seed growth (R5). The model could estimate the effect of elevated air temperature on phenological development in a temperature gradient chamber. The response of DVR to air temperature change from VE to R2 was larger in the medium cultivar, Ryuhou, Enrei, than in the late cultivar, Fukuyutaka. The elevated air temperature simulation (+3°C) resulted in shortened duration of VE to R2 in the cool, early sowing region of eastern Japan by 5 to 7 days, whereas little effect was observed in the warm, late sowing region of Kyushu, in southern Japan. This large influence of elevated air temperature on the phenological development of soybean in eastern Japan was not only because of the use of cultivars sensitive to air temperature change but also because of the range of regional air temperatures, which largely alters the DVR during the cultivation period.

**Key words** : Agro-meteorological grid square data, Developmental rate, Global warming, Soybean.

---