

コムギの発育段階の推定モデル

中園江¹⁾・大野宏之²⁾・吉田ひろえ²⁾・佐々木華織²⁾・中川博視²⁾

(¹⁾ 農研機構中央農業総合研究センター東海研究拠点, ²⁾ 農研機構中央農業総合研究センター)

要旨: 茨城県つくば市において複数年次、複数作期で栽培した農林 61 号、シロガネコムギ (以上、秋播性程度 II)、さとのそら (秋播性程度 IV) の発育データから、DVR (発育速度) とその積算値である DVI (発育指数) を用いた方法により、出穂期、成熟期に加えて出芽期、茎立期、開花期を推定可能な発育予測モデルを開発した。茎立期には年次および品種による差が大きく現れた。播種期が早い場合、秋播性程度の高いさとのそらは他の 2 品種よりも茎立期が遅れ、播種期が遅くなると茎立期の品種間差は小さくなった。出芽期から茎立期の発育相では気温に加えて日長の影響も取り入れた DVR 式がよく当てはまった。その他の発育相では、気温のみの DVR 式で生育期間の変化を表すことができた。播種から成熟までを、出芽期、茎立期、出穂期、開花期で分割した発育モデルにより、関東地域および全国で行われた栽培試験の出穂期および成熟期を推定したところ、茎立期、出穂期および成熟期を二乗平均平方根誤差 (RMSE) 4 から 6 日の誤差で推定可能であった。ただし、出穂期と成熟期のみを予測する目的では、播種期から成熟期を出穂期で 2 相に分割するモデルの推定精度のほうが高かった。

キーワード: 秋播性、気温、コムギ、日長、発育モデル。

近年、関東以西の温暖地においても、イワイノダイチ (田谷ら 2003) やさとのそら (高橋ら 2010) のように茎立期を早めずかつ収穫期の早い秋播型早生品種が育成されている。現在さとのそらは、長年関東を中心に栽培されてきた主要品種である農林 61 号に置き換わって急速に栽培面積を拡大している。この品種は農林 61 号と比較して茎立ちが遅い一方で出穂期および成熟期が早いという特徴があり、導入にあたって地域ごとの播種時期、栽培方法の検討が行われている (大澤ら 2010)。

コムギの茎立期は、「小麦調査基準」(農業研究センター 1986) では稈長が 2 cm となった時期とされており、冬季にロゼット状であった草型から茎が立ち上がり、生育量の急速な増加が始まる時期である。葉鞘中の幼穂はこの時期以降に地中から温度の変動の大きい地表面上に出てくるため、凍霜害が問題となる地域では、茎立期は作期策定のために考慮しなければならない重要な発育段階である。また茎立期に追肥を行う体系下では、作業計画を立てる上で前もっておよその時期を予測することが必要となる。しかし、茎立期のデータは出穂や成熟期に比べて一般的に収集されることは少なく、試験研究機関においてデータの蓄積はあるものの、発育モデルにより茎立期を推定しようとする事例は少ない。

出穂と開花がほぼ同日に起こる水稻と異なり、コムギは出穂後数日経過した後に開花する。この出穂から開花に至るまでの日数は温度条件により変化する。登熟の開始は開花とそれにとまなう受精以降となるため、登熟過程を推定するためには開花期の推定も必要となる。また開花期は赤かび病防除の適期であり (Yoshida ら 2012)、防除の作業計画を立てるためにも開花期の推定は重要である。

そこで本研究では、秋播性程度の異なる品種を対象に、作期移動試験により収集した発育データをもとに、出穂期、成熟期に加えて出芽期、茎立期、開花期を推定する発育推定モデルを作成し、他地域のデータを用いて各時期の推定精度について検証した結果について述べる。

材料と方法

1. 栽培の概要と発育データの収集

農林 61 号 (秋播性程度 II)、シロガネコムギ (秋播性程度 II)、さとのそら (秋播性程度 IV) を供試品種とし、茨城県つくば市にある中央農業総合研究センターの畑圃場 (淡色黒ボク土) およびつくばみらい市にある谷和原水田圃場 (灰色低地土) で栽培試験を行った。

各年次の播種日を第 1 表に示した。なお、本研究で示す試験年次はすべて収穫年とした。試験はすべて条播で行い、2002 年から 2004 年は条間 70 cm、1 条 5 m、1 条あたりの播種量は 17.5 g とした。2005 年以降はシードテープによる播種を行い、2008 年までは条間 30 cm、1 条 20 m、種子間隔約 3.3 cm とした (中園・大原 2010)。

2009 年から 2011 年は 1 条 10 m とした。1 試験区の面積は 2008 年までは約 75 m²、2009 年から 2011 年は約 33 m² とした。施肥は 6-9-6 化成肥料 (N, P, K をそれぞれ 6%, 9%, 6% 含む) を使用し、2008 年までは窒素成分で 6 kg/10 a 相当分を全量基肥で施用し、2009 年から 2011 年は基肥 4 kg/10 a、追肥 2 kg/10 a に分けて施用した。追肥は硫酸を用いて各区の茎立期に行った。

生育期間中に、出芽期、茎立期、出穂期、開花期、成熟期を調査した。出芽期、出穂期、開花期の判定は「小麦調査基準」(農業研究センター 1986) に従った。すなわち、出

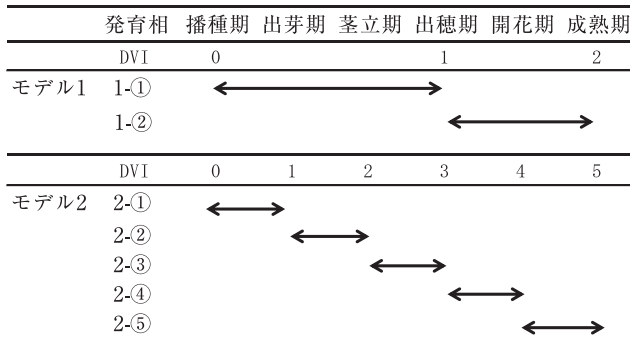
第1表 作期移動試験で得られた3品種の発育データ.

試験年次 ¹⁾	播種	出芽	農林61号				シロガネコムギ				さとのそら			
			茎立	出穂	開花	成熟	茎立	出穂	開花	成熟	茎立	出穂	開花	成熟
2002	11/9 ²⁾	—	—	4/18	4/25	6/9	—	4/15	4/22	6/7				
2003	10/23	—	—	4/21	4/30	6/14	—	4/17	4/28	6/12				
	11/19	—	—	4/30	5/7	6/19	—	4/27	5/4	6/17				
	12/16	—	—	5/5	5/11	6/20	—	5/3	5/9	6/19				
	1/15	—	—	5/7	5/11	6/21	—	5/5	5/13	6/20				
2004	10/21	—	—	4/15	4/23	6/5	—	4/11	4/21	6/3				
	12/16	—	—	4/28	5/6	6/15	—	4/26	5/4	6/13				
2005	10/26	—	—	4/25	5/3	6/17	—	4/18	4/30	6/14				
	12/14	—	—	5/4	5/13	6/24	—	5/2	5/10	6/21				
	11/25	—	—	4/30	5/9	6/20								
2006	11/22	—	—	5/4	5/13	6/22								
	12/19	—	—	5/9	5/18	6/23								
	11/8	—	—	5/1	5/11	6/20								
2007	10/26	11/2	1/29	4/15	4/28	6/9								
	11/24	12/9	3/16	4/26	5/4	6/13								
	12/20	1/15	3/31	5/3	5/9	6/17								
	1/24	2/13	4/12	5/6	5/13	6/20								
2008	10/23	10/29	2/17	4/20	5/2	6/13	2/9	4/12	4/28	6/9				
	11/5	11/13	3/10	4/25	5/4	6/15	3/8	4/19	5/1	6/13				
	11/19	12/14	3/23	5/1	5/8	6/19	3/21	4/26	5/5	6/16				
	12/4	12/27	4/2	5/4	5/12	6/21	3/29	5/1	5/8	6/17				
	12/18	1/13	4/10	5/6	5/15	6/23	4/9	5/2	5/9	6/21				
	1/16	2/21	4/15	5/9	5/17	6/24	4/14	5/7	5/15	6/24				
	<u>10/24</u>	<u>10/30</u>	<u>2/15</u>	<u>4/19</u>	<u>4/30</u>	<u>6/11</u>								
	<u>11/22</u>	<u>12/8</u>	<u>3/27</u>	<u>5/1</u>	<u>5/8</u>	<u>6/17</u>								
	<u>12/19</u>	<u>1/13</u>	<u>4/5</u>	<u>5/4</u>	<u>5/12</u>	<u>6/19</u>								
	<u>1/17</u>	<u>2/22</u>	<u>4/14</u>	<u>5/8</u>	<u>5/15</u>	<u>6/22</u>								
2009	10/21	10/26	1/13	4/14	4/25	6/6	1/16	4/9	4/20	6/3	2/14	4/12	4/22	6/5
	11/4	11/14	2/24	4/18	4/28	6/10	2/21	4/13	4/22	6/7	2/26	4/16	4/26	6/11
	11/18	12/1	3/15	4/22	5/1	6/11	3/5	4/18	4/29	6/8	3/16	4/20	4/30	6/9
	12/1	12/16	3/22	4/26	5/4	6/14	3/21	4/22	5/2	6/11	3/20	4/23	5/3	6/12
	12/16	1/9	3/30	5/2	5/7	6/16	3/29	4/27	5/5	6/13	3/29	4/28	5/6	6/14
	1/9	2/1	4/8	5/4	5/10	6/18	4/8	5/2	5/9	6/15	4/7	5/3	5/10	6/16
	1/21	2/14	4/14	5/8	5/14	6/21	4/13	5/5	5/12	6/18	4/13	5/7	5/14	6/20
	2/3	2/25	4/16	5/10	5/15	6/24	4/16	5/6	5/13	6/21	4/16	5/9	5/14	6/22
2010	10/20	10/25	* ³⁾	4/21	5/2	6/16	1/26	4/12	4/29	6/11	2/23	4/19	5/1	6/11
	11/3	11/13	3/3	4/26	5/5	6/18	3/2	4/19	5/2	6/12	3/4	4/24	5/3	6/13
	11/19	12/1	3/25	5/3	5/8	6/18	3/20	4/29	5/6	6/17	3/22	5/1	5/7	6/17
	12/2	12/16	4/4	5/6	5/12	6/19	3/31	5/2	5/8	6/19	3/29	5/4	5/9	6/18
	12/15	1/15	4/13	5/8	5/14	6/21	4/12	5/5	5/12	6/22	4/10	5/6	5/12	6/20
	1/6	2/1	4/18	5/11	5/16	6/25	4/13	5/7	5/13	6/24	4/11	5/7	5/13	6/23
	1/20	2/15	4/20	5/12	5/18	6/25	4/18	5/9	5/16	6/24	4/16	5/9	5/16	6/23
	2/1	2/26	4/23	5/15	5/21	6/26	4/21	5/12	5/18	6/25	4/21	5/12	5/18	6/24
2011	11/5	11/13	3/22	4/30	5/8	6/22					3/24	4/27	5/5	6/20
	12/7	12/23	4/12	5/7	5/14	6/24					4/8	5/4	5/12	6/22
	1/5	2/10	4/19	5/9	5/16	6/24					4/15	5/7	5/14	6/22
	<u>12/7</u>	<u>12/23</u>	<u>4/4</u>	<u>5/3</u>	<u>5/11</u>	<u>6/17</u>					<u>4/1</u>	<u>4/29</u>	<u>5/7</u>	<u>6/15</u>

下線部は水田圃場のデータ.

—は未調査, 空欄は栽培なしであることを示す.

¹⁾ 試験年次は収穫年を表す, ²⁾ シロガネコムギは11月12日に播種, ³⁾ 凍霜害の発生によりデータなし.



第1図 モデル1, 2の發育相の区切り方とDVI.

芽期は発芽可能粒数の40-50%が出芽した日, 出穂期は全茎の40-50%が出穂した日, 開花期は1穂の中央部の小花が開花した時点で開花とし, 全穂の40-50%が開花した日として達観で判定した. 子実含水率は, 各穂中央部の2小穂より第1, 2小花の子実を脱粒して新鮮重を測定後, 80℃で48時間以上通風乾燥したものの乾物重を測定し, 新鮮重に対する水分量の百分率として算出した. 成熟期については生理的成熟期前後から子実含水率の測定を行い, 含水率が30%以下になった最初の日を成熟期とした. 幼穂長および稈長は以下の方法で経時的に調査した. 1週間ないし2週間の間隔で5個体を採取し, 各個体の主茎もしくは最長茎を対象に幼穂長および稈長を調査した. ここの稈長は発根部から幼穂の基部までとし, 平均稈長が2cmになった日を茎立期とした. 当日の値がない場合は, 前後の値を直線式で補完して2cmになる日を算出した.

2. 發育モデルの式とパラメータの決定

發育段階の気象的推定方法として, 水稻をはじめとする様々な作物で用いられているDVI(發育指数)法(堀江・中川1990)を用いた. これは, DVIをDVR(發育速度)の積算値として定義し, 作物の發育は量的な変化が積み重なり, ある量に達したときに質的な変化として現れるという考え方に基づいている. 例えば出穂を發育の転換期として, 出芽から出穂までの期間を一つの發育相と考えた場合, この發育相における一日あたりの發育速度DVRを気温等の環境変数とパラメータからなる関数として表し, 出芽のDVIを0として毎日DVRを積算してDVIを求め, DVIが1になったときを出穂期とする. 發育速度DVRのパラメータは, 出芽日と出穂期, およびこの期間の環境変数の実測値から推定することができる.

本研究では, 播種期をスタートとして, 播種期から成熟期までを以下のように分割した.

モデル1: 播種期-出穂期, 出穂期-成熟期の2相

モデル2: 播種期-出芽期, 出芽期-茎立期, 茎立期-出穂期, 出穂期-開花期, 開花期-成熟期の5相

播種期のDVI=0としてそれぞれの分割点にDVIを1から5まで設定した(第1図).

日平均気温と日長を用いた發育速度式には, 堀江・中川(1990)が水稻の出穂期の推定において提案した式に, コムギが長日植物であることを考慮した修正を加えた以下の式を適用した.

$$DVR = \frac{1}{G_1} \times \frac{1 - \exp \{-B(L - L_c)\}}{1 + \exp \{-A_1(T - T_{h1})\}} \quad \text{式1}$$

ここで, L は日長時間(h), T は日平均気温(℃), A_1 は温度に対する反応係数(℃⁻¹), B は日長に対する反応係数(h⁻¹), T_{h1} はDVRが最大値の1/2になるときの気温(℃), L_c は限界日長(h), G_1 は対象とする發育相の最小日数(日)である. なお, $L < L_c$ の場合にはDVR=0とする.

日平均気温のみを用いる發育速度式には, 式1から日長項を除いた以下の式を用いた.

$$DVR = \frac{1}{G_2} \times \frac{1}{1 + \exp \{-A_2(T - T_{h2})\}} \quad \text{式2}$$

日平均気温のみを用いる發育速度式には, 以下の簡易な式も用いられている.

$$DVR = \frac{1}{TU} \times (T - T_b) \quad \text{式3}$$

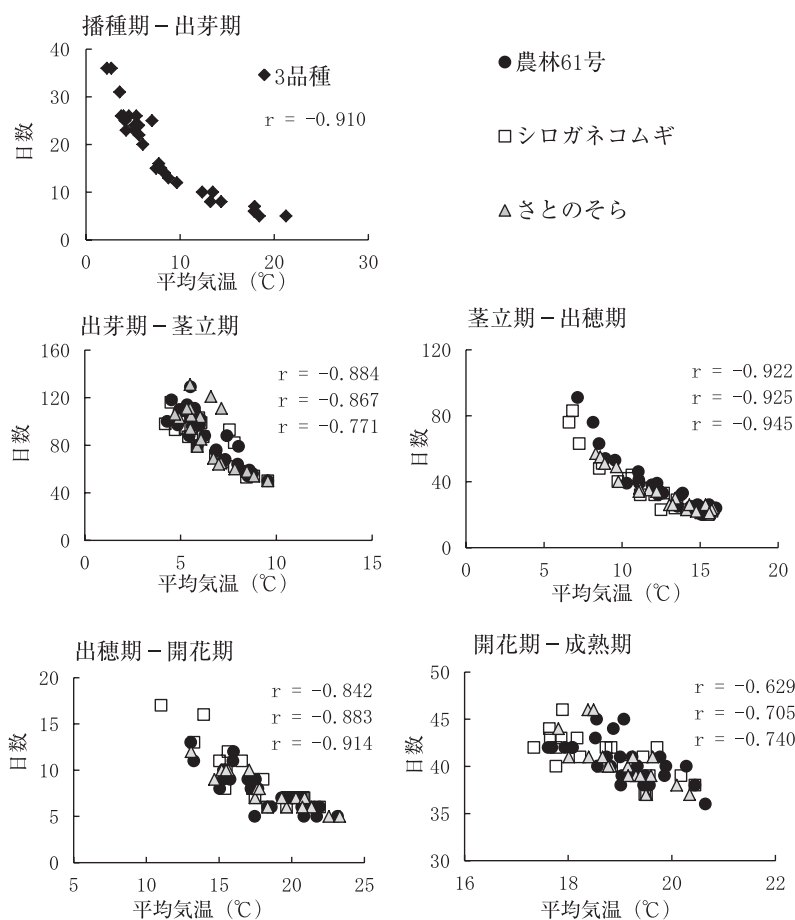
式3は, よく使われている有効積算気温による發育推定式と数学的に等価であり, TUはある發育相が完了するまでの有効積算気温, T_b は基準温度に相当する(Sameshima 1991).

播種期から出穂期の間には花芽が形成され, 栄養生長から生殖生長への転換が生じることから, 気温だけではなく日長の関与が考えられた. そこで, 播種期-出穂期(モデル1-①), 出芽期-茎立期(モデル2-②)および茎立期-出穂期(モデル2-③)には式1, 2, 3を適用した. その他の發育相には日長が関与している可能性が低いため, 気温のみの式2, 3を適用した. 圃場試験により得られた3品種の各發育段階の実測値から, 推定したDVIと実測値の残差二乗和が最小になるように, 各式のパラメータをシンプレックス法により推定した. ただし, 2002年から2006年は出芽期と茎立期を調査しなかったため, パラメータ推定には用いなかった.

各式の当てはまりの良さの評価には, 二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error, 以下RMSE)を用いた. これは, 実測値と推定値の差の二乗和をデータ数 n で除したものの平方根であり, 以下の式で表される.

$$RMSE = \sqrt{\sum (\text{実測値} - \text{推定値})^2 / n}$$

ここで, 日平均気温 T についてはメッシュ気象システム(大野ら2011)に試験圃場の緯度・経度を入力して抽出した1km×1kmのメッシュ気象データの日平均気温を用いた. 日長時間 L は可照時間とし, 緯度と暦日から計算される赤緯と時角により算出した.



第2図 各生育相の平均気温と日数の関係.

rは農林61号(上), シロガネコムギ(中), さとのそら(下)を示し, すべて0.1%水準で有意である.

3. 他の地域で得られたデータによる推定精度の検証

2. で作成したモデルの精度の検証のために, 以下の2種類のデータセットを用いた.

(1) 関東連絡試験データ

農林水産省委託プロジェクト「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発」において実施された, 関東3県(茨城, 埼玉, 栃木県)の連絡試験の結果である. この試験では2010年および2011年に各地点で10月から12月までの播種期移動試験が実施され, 出芽期, 茎立期, 出穂期, 成熟期データが収集されている.

(2) 奨励品種決定試験データ

農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所は全国の研究機関で実施された奨励品種決定試験データベースを作成している. 収量, 収量構成要素等に加えて, 出穂期および成熟期のデータも記録されている. このデータベースから, 2002年から2005年に実施された3品種のデータを抽出した. 播種日については, 栽培の詳細を記録した耕種概要から転載した.

モデル2の細分化した发育段階の推定精度を検証するために, まず関東連絡試験の農林61号およびさとのそらの

データを対象に, モデル2の发育速度式を用いて播種期, 出芽期, 茎立期, 出穂期を起点に各发育段階を推定し, 发育相毎の推定日数と実測日数との比較を行った. 次にモデル1とモデル2を用いて, 播種期を基点として連続的に出芽期, 茎立期, 出穂期および成熟期を推定し, 実測値との比較を行った. ただし, このデータセットには開花期のデータがないため, 開花期の検証には, つくば市で収集した发育データの中で, パラメータの決定に使用しなかった2003年から2006年の農林61号およびシロガネコムギの開花期データを用いた. 奨励品種決定試験データについては, モデル1とモデル2で, 播種期から連続的に出穂期および成熟期を推定し, 実測値との比較を行った.

推定精度の評価には, 2と同様にRMSEを用いた. 気象データについても2と同様に, 育成機関所在地の緯度・経度によりメッシュ気象システム(大野ら2011)から抽出した1km×1kmのメッシュ気象データを用いた.

結 果

1. 发育相別の経過日数の変化とモデル式

複数年次の作期移動試験によって, 様々な環境条件下で

第2表 發育相別の DVR 式の RMSE および選択された式のパラメータ.

品種			各式の RMSE			選択された式のパラメータ				
			式 1	式 2	式 3	G ₁	A ₁	T _{h1}	B	L _c
1-①	播種期－出穂期	農林 61 号	1.85	14.22	4.39	47.53	0.44	4.45	0.32	9.12
		シロガネコムギ	1.90	14.78	6.56	49.33	0.32	5.23	0.44	9.08
		さとのそら	2.46	14.85	6.18	46.43	1.47	2.87	0.26	9.22
			式 1	式 2	式 3	G ₂	A ₂	T _{h2}		
1-②	出穂期－成熟期	農林 61 号	－	1.42	1.43	30.37	0.27	15.89		
		シロガネコムギ	－	1.23	1.33	32.46	0.27	15.11		
		さとのそら	－	1.76	1.77	27.09	0.32	17.27		
			式 1	式 2	式 3	TU	T _b			
2-①	播種期－出芽期	3 品種	－	4.74	2.44	107.53	0.46			
			式 1	式 2	式 3	G ₁	A ₁	T _{h1}	B	L _c
2-②	出芽期－茎立期	農林 61 号	4.77	9.41	8.89	27.43	0.42	6.38	0.29	7.06
		シロガネコムギ	3.87	10.92	11.94	24.78	0.46	4.33	0.16	6.68
		さとのそら	5.32	16.87	16.35	32.00	0.70	3.20	0.28	8.40
			式 1	式 2	式 3	TU	T _b			
2-③	茎立期－出穂期	農林 61 号	1.79	1.80	2.04	234.79	5.22			
		シロガネコムギ	1.42	2.11	2.18	244.22	3.91			
		さとのそら	1.54	1.63	1.68	248.09	3.99			
			式 1	式 2	式 3	TU	T _b			
2-④	出穂期－開花期	農林 61 号	－	1.25	1.27	66.23	7.08			
		シロガネコムギ	－	1.66	1.52	60.96	8.61			
		さとのそら	－	0.99	0.96	73.96	6.24			
			式 1	式 2	式 3	G ₂	A ₂	T _{h2}		
2-⑤	開花期－成熟期	農林 61 号	－	1.45	1.51	24.56	0.16	15.66		
		シロガネコムギ	－	1.49	1.50	24.80	0.13	14.84		
		さとのそら	－	1.71	1.73	24.81	0.27	16.73		

$$\text{式 1} \quad \text{DVR} = \frac{1}{G_1} \times \frac{1 - \exp\{-B(L - L_c)\}}{1 + \exp\{-A_1(T - T_{h1})\}}$$

$$\text{式 2} \quad \text{DVR} = \frac{1}{G_2} \times \frac{1}{1 + \exp\{-A_2(T - T_{h2})\}}$$

$$\text{式 3} \quad \text{DVR} = \frac{1}{TU} \times (T - T_b)$$

L : 日長時間 (h), T : 日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

L_c : 限界日長 (h), T_b : 基準温度 ($^{\circ}\text{C}$)

TU: ある發育相に要する積算温度 ($^{\circ}\text{C}$)

G_1 : ある發育相の最小日数 (日)

T_{h1} : 發育速度が最大値の 1/2 になるときの気温 ($^{\circ}\text{C}$)

A_1 : 温度係数 B: 日長係数

RMSE はパラメータを決定したデータについての実測値と推定値の二乗平均平方根誤差を表す. — は式 1 を適用しなかったことを示す. 選択された式の RMSE を太字で示した.

の發育データが収集された. 作期移動試験で得られた 3 品種の出芽期, 茎立期, 出穂期, 開花期, 成熟期を第 1 表に示した. また播種期に対する出芽期から茎立期, 茎立期から出穂期, 出穂期から開花期, 開花期から成熟期までの各期間の平均気温と経過日数の関係を第 2 図に示した. さらに, 各相の式 1~3 の RMSE および選択された式のパラメータを第 2 表に示した.

モデル 1 では, 播種期から出穂期は式 1 の当てはまりが最もよく, RMSE は農林 61 号, シロガネコムギ, さとのそらでそれぞれ 1.85, 1.9, 2.46 日となった. また出穂

期から成熟期は式 2 の当てはまりが最もよく, RMSE は農林 61 号, シロガネコムギ, さとのそらでそれぞれ 1.42, 1.23, 1.76 日となった. ただし, 式 2 と式 3 の RMSE の差はわずかであった (第 2 表). 以下, モデル 1 をさらに細分化したモデル 2 について, 發育相別に推定精度と特徴について記す.

(1) 播種期－出芽期

出芽期にはいずれの年次, 作期においても品種間の差はなく, 3 品種とも同じ日に出芽した. 10 月から 2 月までの幅広い播種時期の差を反映して, この發育相は最も期間中

の気温の範囲が広く、最低値は 2.2°C 、最高で 21.3°C であった。播種期から出芽期の経過日数もこれに応じて変化し、最短で5日、最長で36日と大きな差が生じた(第2図)。この期間の発育速度には式2よりも式3の当てはまりが良く、決定したパラメータから出芽の基準温度は 0.5°C 、出芽に要する有効積算気温は $107.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と算出された(第2表)。

(2) 出芽期－茎立期

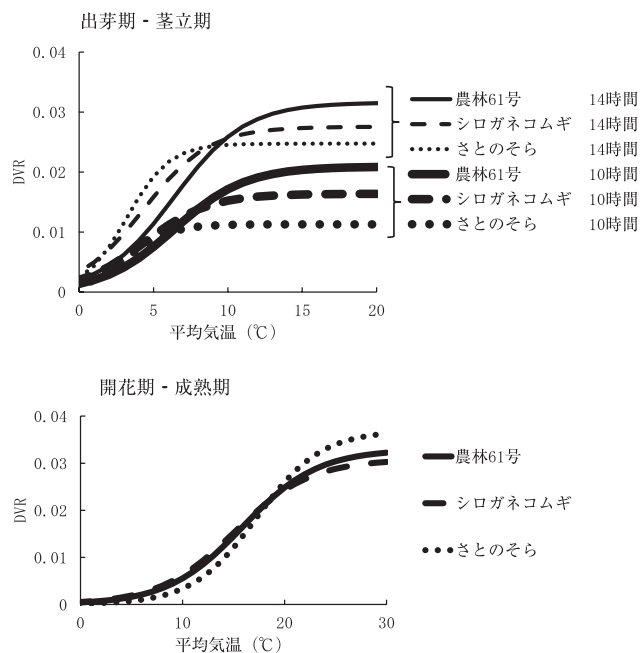
茎立期は年次による変動が大きく、2009年の11月4日播種では農林61号の茎立期は2月24日であったが、2011年の11月5日播種では3月22日であった(第1表)。10月播種のさとのそらの茎立期は他の2品種に比べて遅くなったが、播種期が遅くなるとこの差は小さくなり、さとのそらの茎立期がシロガネコムギや農林61号より早くなる場合もあった。この品種間差が逆転する播種期は年によって異なったが、つくばではおおよそ11月上旬までの播種で、さとのそらの茎立期は他の2品種よりも遅くなった(第1表)。出芽期から茎立期の日数は作期および品種による変動が大きく、気温のみの式2、3を適用した場合、推定誤差はいずれの品種においても大きくなり、最小で8.89日、最大で16.87日になった。式1のRMSEは農林61号、シロガネコムギ、さとのそらでそれぞれ4.77日、3.87日、5.32日となり最も当てはまりが良かったが、他の発育相に比べてDVR式の適合度は低かった。

播種から出穂の期間を対象にしたモデル1-①の最小日数 G_1 の品種間差は小さかったが、モデル2-②の最小日数 G_1 はさとのそらが最も大きく、次いで農林、シロガネの順に小さくなった。気温に対する反応を表すパラメータ A_1 、DVRが最大値の1/2になるときの気温を表すパラメータ T_{h1} を比較すると、さとのそらは A_1 は他の品種よりも大きい一方で、 T_{h1} は小さい値をとった。DVRの温度および日長に対する反応を第3図に示した。 G_1 、 A_1 および T_{h1} の差により、10時間日長下でのさとのそらのDVRは、約 6°C 以下の低温下では農林61号よりも大きくなったが、それ以上の温度範囲では農林61号およびシロガネコムギよりも小さくなった。14時間日長下では約 8°C を境にさとのそらと他の2品種のDVRの差が逆転した。

(3) 茎立期－出穂期

出芽から茎立期の期間と同様に、遅い播種期ではこの相の日数の品種間差は小さくなった。出穂期は全般的にシロガネコムギ、さとのそら、農林61号の順に早かったが、1月、2月の遅い播種期ではシロガネコムギとさとのそらの出穂はほぼ同じになった。農林61号が他の2品種よりも早く出穂するような例はすべての年次、作期を通じて観察されなかった。

この相の発育速度式のRMSEは、3品種とも式1が最も小さくなった。しかし、式1では推定されたパラメータが安定せず、最小日数を表す G_1 が1~2(日)となり現実には起こり得ない値となった。またさとのそらの式2におい



第3図 出芽期－茎立期および開花期－成熟期における気温－DVR曲線。
10時間、14時間は日長時間を示す。

てもパラメータが安定しなかったことから、式3を選択した。基準温度に相当するパラメータ T_b は、農林61号、シロガネコムギ、さとのそらでそれぞれ5.22、3.91、3.99となった(第2表)。

(4) 出穂期－開花期

出穂から開花に要する日数は作期により異なり、出穂期が遅く気温の高い時期に出穂した場合にはこの期間の日数は短くなり、最短は5日間であった(第2図)。特に2010年の10月20日播種のシロガネコムギでは、出穂期以降気温の低い日が継続したことから、出穂から開花までに本試験期間中では最長となる17日間を要した。この期間の発育速度は式3が最もよく当てはまった(第2表)。

(5) 開花期－成熟期

この相の経過日数は最短で38日、最長で46日であり、他の相と同様に気温が高いほど経過日数が短縮する関係があったが、相関は低かった。期間中の平均気温の幅は他の期間に比べて小さく、最大で 3°C 程度であった。これは生育の後半になるほど播種期による差が小さくなり、遭遇する気温の範囲が狭くなるためである。また同一の気温であっても登熟日数にばらつきがみられた(第2図)。出穂期と同様に、農林61号の成熟期は2009年11月4日播種を除く全ての作期で他の2品種よりも早まることはなく、農林61号に対するシロガネコムギ、さとのそらの早熟性は作期にかかわらず維持された(第1表)。式2と式3のRMSEの差は小さかったが、式2がわずかに低く、またモデル1-②でも式2が選択されたことから式2を採用した。式2の登熟期間の最短日数を表す G_2 の品種間差は小さく、

第3表 関東連絡試験データに対するモデルによる推定値の推定誤差.

RMSE1 は各發育相の日数の推定誤差, RMSE2 は播種期から推定した各發育段階の推定誤差を示す.

関東連絡試験データ						
	発育相	品種	推定対象	RMSE1	推定対象	RMSE2
モデル 1	1-①	農林 61 号	播種期 - 出穂期	2.95	出穂期	2.95
		さとのそら	(日数)	2.37	(暦日)	2.37
	1-②	農林 61 号	出穂期 - 成熟期	2.35	成熟期	2.79
		さとのそら	(日数)	5.44	(暦日)	5.50
モデル 2	2-①	農林 61 号	播種期 - 出芽期	2.46	出芽期	2.46
		さとのそら	(日数)	2.50	(暦日)	2.50
	2-②	農林 61 号	出芽期 - 茎立期	6.10	茎立期	5.95
		さとのそら	(日数)	5.54	(暦日)	4.61
	2-③	農林 61 号	茎立期 - 出穂期	4.97	出穂期	4.52
		さとのそら	(日数)	4.64	(暦日)	4.11
	2-④	農林 61 号	出穂期 - 開花期 ¹⁾	1.75	開花期	4.78
		シロガネコムギ	(日数)	2.08	(暦日)	5.74
	2-⑤	農林 61 号	出穂期 - 成熟期 ²⁾	3.51	成熟期	4.72
		さとのそら	(日数)	3.23	(暦日)	5.26

データ数 農林 61 号: 40 さとのそら: 43

¹⁾ つくばの 2002-2006 年の作期移動試験のデータを対象にした.

(データ数 農林 61 号: 12 シロガネコムギ: 9)

²⁾ 開花期のデータがないため, 出穂期から成熟期の日数を推定した結果を示す.

約 25 日となった (第 2 表).

以上の結果から, RMSE をもとに選択された各發育相の發育速度式のパラメータを第 2 表に示した. 式 3 の基準温度 T_b の 3 品種の平均値は播種期 - 出芽期, 茎立期 - 出穂期および出穂期 - 開花期でそれぞれ 0.5°C , 4.4°C および 7.3°C となり, 發育の進行とともに高くなった.

2. 他の地域で得られたデータによる推定精度の検証

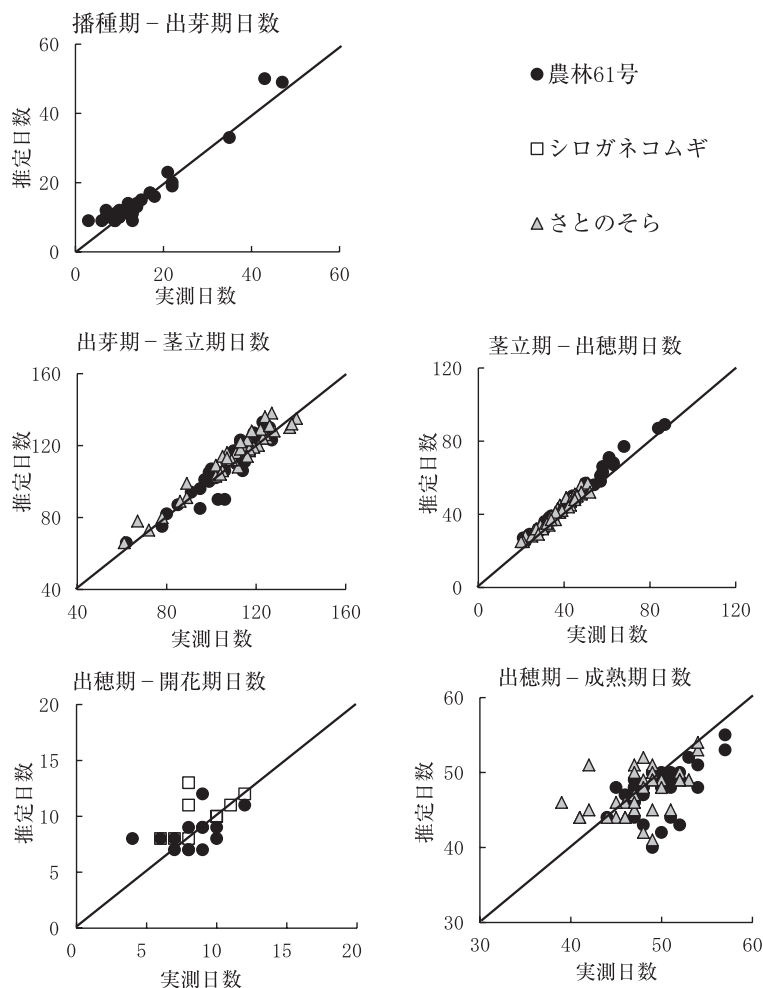
農林 61 号およびさとのそらについて, 関東連絡試験データをモデル 2 で推定したところ, 農林 61 号では播種期から出芽期, 出芽期から茎立期, 茎立期から出穂期, 出穂期から成熟期の RMSE はそれぞれ 2.5 日, 6.1 日, 4.97 日, 3.51 日となった. さとのそらでは播種から出芽, 出芽期から茎立期, 茎立期から出穂期, 開花期から成熟期の RMSE はそれぞれ 2.46 日, 5.54 日, 4.64 日, 3.23 日となった. またつくばのデータセットを用いて検証した出穂期から開花期の RMSE は, 農林 61 号, シロガネコムギでそれぞれ 1.75 日, 2.08 日であった (第 3 表, 第 4 図). これらの誤差は, 播種期から出芽期, 出芽期から茎立期, 出穂期から開花期の各相ではパラメータ決定時の誤差と同程度であったが, 茎立期から出穂期, 出穂期から成熟期の發育相は誤差が大きくなった. その中で出穂期から成熟期までの登熟期間は, 日数が比較的少ないにもかかわらず RMSE は大きくなった. 播種期を起点にしたモデル 2 による各時期の推定誤差は, 農林 61 号では茎立期, 出穂期, 開花期, 成熟期の RMSE はそれぞれ 5.95 日, 4.52 日, 4.78 日, 4.72 日となった. さとのそらでは茎立期, 出穂期,

成熟期の RMSE はそれぞれ 4.61 日, 4.11 日, 5.74 日, 5.26 日となった.

より広い地域を対象に, 播種期のデータのみから出穂期および成熟期を推定する場合の精度を検証するために, 奨励品種決定試験データベースより抽出した 3 品種の發育データを対象に, モデル 1 および 2 を用いて出穂期および成熟期を推定し, 実測値と比較した結果を第 4 表および第 5 図に示した. モデル 1 の出穂期の RMSE は, 農林 61 号は 3.19 日, さとのそらは 3.89 日, シロガネコムギは 2.74 日であった. また成熟期の RMSE は, 農林 61 号は 4.10 日, さとのそらは 6.44 日, シロガネコムギは 3.3 日であった. モデル 2 による出穂期の RMSE は, 農林 61 号は 4.33 日, さとのそらは 4.03 日, シロガネコムギは 4.8 日となり, モデル 1 よりも誤差は大きかった. また成熟期の RMSE は, 農林 61 号は 4.87 日, さとのそらは 5.93 日, シロガネコムギは 4.17 日であった.

考 察

播種から出芽までの日数は播種時期により大きく変化し, 0.5°C 以上の気温を積算し $107.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ に達した時点で出芽すると算出された. 江口ら (2000) は各發育相に有効積算温度の式を適用し, 播種期から出芽期までは 6 品種の平均値として基準温度 -0.4°C , 有効積算気温 $121.95^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ を得ている. 気温 15°C として播種期から出芽期までの日数を計算すると江口らの値では 7 日となり, 本研究の結果と同等であると考えられる. 播種期から出芽期までの日数には気温の他に地温や土壤水分も影響するこ



第4図 関東連絡試験データを用いた出芽期、茎立期、出穂期、成熟期のモデル2による推定精度の検証結果。

出穂期－開花期日数の検証はつくばの2003年から2006年の作期移動試験のデータを対象にした。

品種および生育相別のRMSEは第3表に示す。

図中の直線は $y=x$ を示す。

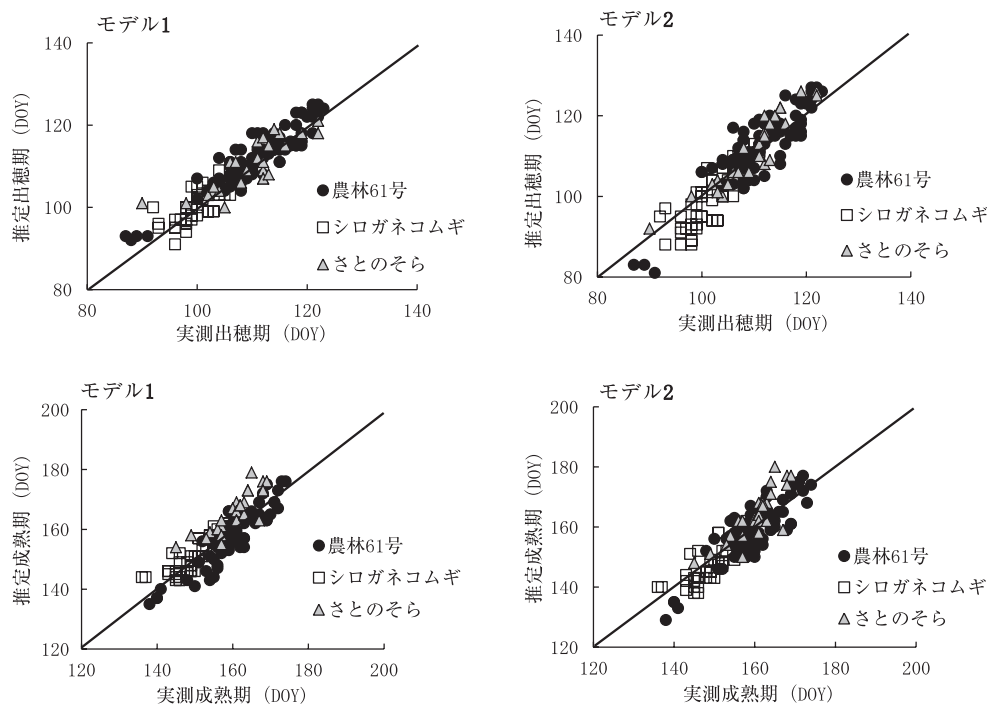
とも報告されている (Lafond and Fowler 1989)。本研究では気温のみの式3がよく適合したが (第2表)、積雪下や極端な乾燥条件においては、これら気温以外の要因がモデルの精度に及ぼす影響を検証する必要がある。

コムギは長日作物であり、幼穂の分化は長日下で促進される。出芽から茎立期の相を気温のみの式2、3にあてはめると、RMSEは9～17日と非常に大きくなることから、幼穂形成期を含む出芽から茎立期までの相は日長を考慮した式1で表すことが妥当であると考えられる (第2表)。DVRの温度反応は日長により異なるが、低温下ではさとのそらのDVRが他の2品種よりも大きく、一方である温度以上では逆に小さくなった (第3図)。DVRの温度反応曲線はパラメータ G_1 (DVRの最大値に関与)、 A_1 および T_{hl} (曲線の立ち上がりに関与) により変化し、この曲線から秋播性程度の異なる農林61号とさとのそらの茎立期の早晩を説明することができる。すなわち、早い播種期で

第4表 奨励品種決定試験データに対するモデルによる推定値の推定誤差。

奨励品種決定試験データ		
生育段階	品種	RMSE
モデル1	出穂期 農林61号	3.19
	出穂期 さとのそら	3.89
	出穂期 シロガネコムギ	2.74
	成熟期 農林61号	4.10
	成熟期 さとのそら	6.44
	成熟期 シロガネコムギ	3.30
モデル2	出穂期 農林61号	4.33
	出穂期 さとのそら	4.03
	出穂期 シロガネコムギ	4.80
	成熟期 農林61号	4.87
	成熟期 さとのそら	5.93
	成熟期 シロガネコムギ	4.17

データ数 農林61号:91 さとのそら:27 シロガネコムギ:50



第5図 モデル1、2による奨励品種決定試験の出穂期と成熟期の推定結果。

DOYは通日を表す。

品種および发育相別のRMSEは第3表に示す。

図中の直線は $y=x$ を示す。

は出芽後高温で推移するため、さとのそらのDVRは農林61号より小さく、茎立期に到達する日が遅くなる。一方遅い播種期の場合では出芽後低温で推移するためさとのそらのDVRは農林61号より大きく、茎立期に到達する日は農林61号と同じかあるいは早くなる(第1表、第3図)。Weirら(1984)は気温を変数とする式で低温要求性を表し、これを積算気温に乗ずることで出芽から二重隆起形成期(Double Ridge)を推定している。このように、低温要求性を独立した変数とすることで秋播性の違いを明確に表すことが今後の課題として挙げられる。茎立期は年次による変動が大きく、同時期播種でも年により1ヶ月程度の差が生じる場合もあった(第1表)。播種期から推定した茎立期の誤差は、農林61号およびさとのそらでそれぞれ5.95日、4.61日となり他の发育相と比較して大きいものの(第3表)、特に栽培歴の浅いさとのそらでは、发育モデルを用いることで経験的な判断よりも正確な茎立期の推定が可能となると考えられる。

10月下旬から11月上旬に播種した場合、さとのそらの出芽から茎立期の日数は他の2品種よりも長い、茎立期から出穂期までの日数は短く出穂は農林61号よりも早くなった(第1表)。これは、茎立期までの生育期間が長い一方で茎立期から出穂までの生育期間が短く、早く出穂するという秋播型早生品種の特徴が現れたものと考えられる(藤田1997)。茎立期から出穂期の发育速度式のRMSEは、3品種とも日長を考慮した式1が最も小さくなった(第2

表)。高橋・中世古(1992)は春コムギを対象にした研究で、幼穂分化期から止葉出葉期の期間は、日長を考慮した式の適合度が高いことを示しており、本研究の結果もこれと一致している。しかし、本試験では式1のパラメータの安定性が低く、関東連絡試験データで検証したところさとのそらの誤差が式2、3よりも大きくなったことから、より簡易で安定性のある式3を採用した(第2表)。茎立期には幼穂はすでに分化しており、節間や幼穂の伸長速度は温度により大きく変化することが推察される。茎立期以降の发育にも日長が関与している可能性はあるが、実用的には気温のみの簡易な式でも予測が可能であると考えられる。またさとのそらは、播種後の気温が高く茎立ちが遅れても、茎立期以降の发育速度が農林61号よりも大きく、結果として出穂が農林61号と同等もしくはやや早くなるものと考えられる(第1表)。大澤ら(2012)は、さとのそらの幼穂の伸長速度が農林61号よりも大きいことを報告しており、本研究の結果もこれを支持している。

播種から開花日を推定した場合の誤差は、農林61号で約5日、シロガネコムギで約6日となった(第3表)。赤かび病防除の効果は開花期で最大となり、開花後7日以降の防除では効果が低下することが報告されている(宮城県古川農業試験場2009)。広域を対象に防除を行う場合は機材等を事前に準備するため、防除効果を高めるためには開花日の推定精度をさらに向上させることが必要である。

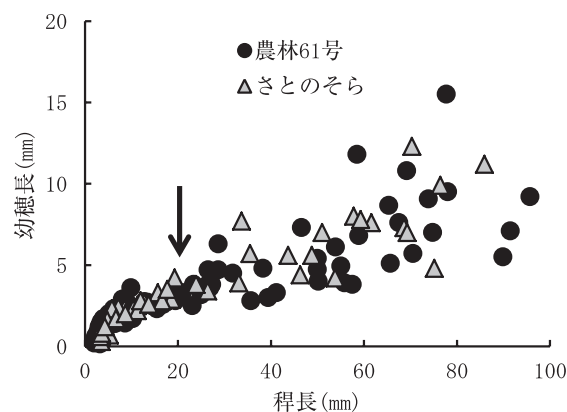
登熟相の发育速度式2のパラメータを比較すると、さと

のそらは T_{h2} , A_2 とともに他の2品種よりもやや大きいため、気温-DVR 曲線から 20°C 以上の高温下では登熟がより短縮される可能性が高いことが推察される(第3図)。Maruyama ら (2010) は秋播性程度の異なる品種を用いて出穂期から成熟期までのパラメータを決定し、さとのそらと同様に秋播性程度の高いイワイノダイチは、秋播性程度の低い品種と比較して、気温-DVR 曲線の傾きが大きいことを報告している。一方で大澤ら (2012) は、農林61号とさとのそらの登熟期間中の温度反応に品種間差が認められないと報告している。登熟の温度反応の品種間差の詳細については現時点では明らかにできなかったが、近年登熟期間中の高温による細麦の発生がしばしば問題となることから、品種間差とその機構については今後さらに研究を進める必要がある。

成熟期は、子実含水率や外観で判定されることが多いが、成熟期付近の子実含水率は降雨の有無などの気象条件により変動する(中園・大原 2010)。また倉井ら (1998) は基肥と追肥量の組み合わせにより成熟期が変動することを示している。作期の策定などの生育の概要を把握するだけでなく、収穫作業のスケジュールを策定するなどより正確に成熟期を予測するためには、これらの要因を考慮し、推定精度をさらに向上させることが必要となる。また第3表に示したように成熟期の推定精度は播種期を起点にした場合よりも出穂期を起点にした方が小さいため、実際の出穂期の情報を取り入れて予測精度を向上させることも必要であると考えられる。

コムギの出穂予測に DVR モデルを適用した例は水稻のように多くはないが、Maruyama ら (2010) は九州の品種を対象に作期移動試験によりモデルを作成し、 $\text{RMSE} = 4.2$ から 4.9 日で播種期から出穂期を予測できることを示している。本研究のモデル2による出穂期の RMSE は3品種の平均で 4.39 日となり(第4表)、Maruyama ら (2010)

と同程度の推定精度を示した。水稻では2日前後の誤差で出穂期が予測できることが示されており(川方・岡田 1989)、麦類の推定誤差はそれよりも大きい。これは、麦類の生育期間が長いこと、また移植、湛水栽培の水稻に比べて発芽の不斉や土壌水分の多寡等に起因した生育の差が生じやすいことが理由であるかもしれない。播種から出穂の間には、発芽、出芽とそれに続く栄養生長から生殖生長への転換がおこり、その後幼穂および稈が伸長して出穂にいたるという様々な現象を含むため、これらを一つの式で説明するのは、作物の生理反応を考えると適当ではない。一方、生育相を多分割すると、幼穂分化期や茎立期の観察は、出穂期より精度が劣る可能性が高く、そのためにパラメータ推定の誤差が拡大する可能性がある。また、多分割によってパラメータの推定に用いる各生育相の環境範囲が狭まり、汎用性が低いモデルとなる可能性もある。水稻の場合、中川・堀江 (1995) は出芽から出穂までの発育を幼穂形成期で区切り、前後に異なる DVR 式を適用すること



第6図 稈長と幼穂長の関係。

農林61号は2007-2010年、さとのそらは2009-2010年の調査結果より作図。

図中の矢印は茎立期を示す。

で出穂期の予測精度が向上することを報告している。本研究での出穂期の3品種平均の RMSE はモデル1では 3.27 日、モデル2では 4.39 日となり(第4表)、生育相の分割による精度の向上は認められなかった。出穂期、成熟期に限定して発育予測を行う場合には、モデル1を使用すればより精度の高い推定を行うことができるが、2つのモデルの RMSE の差は約1日であり、モデル2を用いて出穂期に加えて出芽期および茎立期の推定も連続的に行うことも可能であると考えられる。矢島 (1994) は水稻において出芽日の DVI を0、出穂日の DVI を1とした場合、幼穂形成始期と減数分裂期の DVI はそれぞれ約 0.72 , 0.88 となることを報告している。同様にモデル1で茎立期の DVI を算出したところ、農林61号、さとのそらの平均値はそれぞれ 0.54 , 0.59 となった。これらの値により関東連絡試験データの茎立期を推定すると、 RMSE は農林61号、さとのそらでそれぞれ 12.96 日、 8.67 日となり、モデル2の RMSE よりも大きいことから、茎立期の推定には茎立期で分割した発育モデルを用いることが有効であると考えられる。茎立期は凍霜害の回避の目安、踏圧の限界、追肥時期など栽培上重要な情報であり、播種限界や作業競合を勘案した生産計画や、効率的な栽培管理を行うために、さらに精度を向上させることが今後の課題である。

茎立期にはコムギの幼穂は 3 mm 前後に発達しており、形態的には幼穂形成期に相当し、穎花の各器官が分化している時期である(第6図)。本研究で茎立期の判断基準とした平均稈長が 2 cm となる日は、厳密な意味での栄養生長と生殖生長の転換点ではない。栄養生長から生殖生長への転換を外観から判別することができるのは二重隆起形成期であるが、二重隆起形成期の判別は緻密な観察を要するため、通常の栽培試験で調査されることはほとんどない。今後幅広い環境下で播種期あるいは出芽期から二重隆起形成期に達する日数のデータを蓄積することにより、栄養成長期間から生殖生长期間への転換に対する日長および気温

の影響を詳細に解析できると考えられる。

謝辞：本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」および文部科学省プロジェクト研究「気候変動適応研究推進プログラム」の成果である。また農研機構中央農業総合研究センター研究支援センター業務第1科および2科の職員の方々には栽培管理、調査等に多大なご協力を頂いた。農研機構作物研究所および全国のコムギ育種・栽培関係者の皆様には育種・栽培データの提供をご快諾いただいた。また京都大学大学院農学研究科白岩立彦教授には有益なご助言をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 江口久夫・小柳敦史・佐藤暁子・豊田政一・吉田泰二 2000. コムギの發育日数の変動要因の解析と生育期予測－發育速度の温度反応－. 日作紀 69: 229-234.
- 藤田雅也 1997. 凍霜害回避型早生コムギに関する育種学的研究. 九州農試報告 32: 1-50.
- 堀江武・中川博視 1990. イネの發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.
- 川方俊和・岡田益己 1989. 發育指数を用いた水稻の幼穂形成始期と出穂期の推定. 農業気象 45: 137-142.
- 倉井耕一・木村守・遠山明子 1998. 小麦の追肥による生育パターンの変化と追肥技術への応用. 栃木県農業試験場研究報告 47: 1-12.
- Lafond, G. and Fowler, D. 1989. Soil temperature and water content, seeding depth, and simulated rainfall effects on winter wheat emergence. *Agron. Journal* 81: 609-614.
- 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.
- 宮城県古川農業試験場 2009. コムギの赤かび病に対する防除体系. 普及に移す技術第84号 29-31.
- 中川博視・堀江武 1995. イネの發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・發育過程の気象的予測モデル. 日作紀 64: 33-42.
- 中園江・大原源二 2010. 気象データによるコムギ子実含水率の簡易推定法. 日作紀 79: 506-512.
- 農業研究センター 1986. 小麦調査基準 第1版: 1-74.
- 大野宏之・大原源二・吉田ひろえ・中園江・中川博視 2011. 週間予報とアメダス観測値を組み合わせた全国メッシュ気象データシステム. 中央農業総合研究センター成果情報.
- 大澤実・高橋利和・菅谷隆幸 2010. 異なる地域で栽培されたコムギ新品種「さとのそら」の収量性. 日作紀 79 (別2): 66-67.
- 大澤実・高橋利和・菅谷隆幸 2012. 群馬県における秋播性早生コムギ品種さとのそらの生育・収量特性. 日作紀 81: 343-348.
- Sameshima, R. 1991. A New Method for Predicting Flowering Stage in Soybean. *JARQ* 25: 149-153.
- 高橋肇・中世古公男 1992. 春播コムギ早晩2品種の發育と気温および日長との関係. 日作紀 61: 576-582.
- 高橋利和・大澤実・折茂佐重樹・成塚彰久・斎藤幸雄 2010. 小麦新品種「さとのそら」の育成. 群馬県農業技術センター研究報告 7: 1-12.
- 田谷省三・塔野岡卓司・関昌子・平将人・堤忠広・氏原和人・佐々木昭博・吉川亮・藤田雅也・谷口義則・坂智広 2003. 小麦新品種「イワイノダイチ」の育成. 九州沖縄農研報 42: 1-18.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R. and Rayner, J.H. 1984. A winter wheatcrop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci. Camb.* 102: 371-382.
- 矢島正晴 1994. 水稻の生長・収量の農業気象的予測. 日本農業気象学会編, 平成の大凶作, 農林統計協会, 東京. 67-81.
- Yoshida, M., Nakajima, T., Tomimura, K., Suzuki, F., Arai, M. and Miyasaka, A. 2012. Effect of the timing of fungicide application on Fusarium Head Blight and Mycotoxin contamination in wheat. *Plant Disease* 96: 845-851.

Modeling Phenological Development in Wheat : Kou NAKAZONO¹⁾, Hiroyuki OHNO²⁾, Hiroe YOSHIDA²⁾, Kaori SASAKI²⁾ and Hiroshi NAKAGAWA²⁾ (¹⁾National Agricultural Research Center(Tokai Branch), Tsu 514-2392, Japan; ²⁾National Agricultural Research Center)

Abstract : Between 2002 and 2011, 3 varieties of wheat, 'Norin61' (spring type), 'Shirogane Komugi' (spring type), and 'Satonosora' (winter type), were grown in the upland and lowland fields in Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan. Phenological development was divided into 5 phases: phase 1, sowing to emergence; phase 2, emergence to jointing; phase 3, jointing to heading; phase 4, heading to flowering; and phase 5, flowering to maturation. The duration of phase 2 varied with the sowing date and cultivar. In 'Satonosora', the jointing stage was later than that in the other cultivars in early sowing, but this difference diminished at late sowing. Phenological development was expressed using the developmental rate (DVR) and developmental index, which is the cumulative DVR. DVR was expressed as a function of daily mean temperature and photoperiod in phase 2, but as a function of temperature in the other phases. These models achieved a good fit for the jointing, heading, and maturity dates of each cultivar measured in a wide area in Japan, with root mean square error=4-6 days. However, a simpler 2-phase model (sowing to heading and heading to maturation) could provide better estimates for the prediction of the jointing day alone.

Key words : Developmental model, Photoperiod, Temperature, Wheat, Winter habit.