

収量予測・情報処理・環境

コムギの発育日数の変動要因の解析と生育期予測

—発育速度の温度反応—

江口久夫*・小柳敦史・佐藤暁子・豊田政一・吉田泰二

(農業研究センター)

要旨:コムギの発育相の長さにおよぼす温度の影響を明らかにするために、ほ場試験とポットを用いた人工気象条件の試験を実施し、各発育相における発育速度 (DVR) と温度の関係を比較、検討した。播種—出芽相における DVR と温度の関係は直線がよく適合し、有効積算温度曲線があてはまる関係であった。出芽—幼穂分化相では秋播性と感光性の低い一部の品種を除いて、直線の適合は悪く、高温で DVR の停滞と低下がみられた。幼穂分化—出穂相以降の生育相では直線がほぼ適合した。ただし、ほ場試験の出穂—開花相、開花—成熟相では 22°C 以上の高温により DVR が若干促進される傾向がみられた。ほ場試験における有効積算温度式の最低有効温度は品種や年次よりも発育相によって大きく異なった。出穂—開花相でもっとも高く (6.3°C)、次いで開花—成熟相、幼穂分化—出穂相の順で、播種—出芽相でもっとも低かった (-0.4°C)。最低有効温度が品種により変わらないものと仮定すると、品種間差は有効積算温度値により比較できた。以上のように、発育速度と温度の関係は発育相や品種により異なり、一つの式で表現するならば、直線がもっとも単純で、よく適合する関係と思われた。

キーワード:コムギ, 最低有効温度, 生育期予測, 成熟期, 発育相, 発育速度 (DVR), 発育日数, 有効積算温度。

作物の生育日数と温度の関係については、De Wit ら (1970) が発育速度 (DVR) と発育指数 (DVI) の概念を提唱し、解析と論議が容易になった。古くから用いられている有効積算温度曲線は DVR と温度の関係でみると直線になる。堀江ら (1987) は DVR と温度の関係は低温域における発育速度の停滞と高温域における停滞・低下を考慮に入れると S 字曲線状になるとしている。DVR と温度の関係が S 字曲線・指数曲線・放物線のいずれであっても、日数と温度の関係でみると有効積算温度曲線と似た双曲線状になる。この関係の解析には DVR と温度の関係の形状を確認することが重要と思われる。コムギの場合に幼穂の分化と発達は日長と春化の影響を受けることが知られている。温度との関係は、これらの複雑な発育反応や品種生態を解明する手段として使用できるような、できるだけ単純で分離できる関係が望ましい。

著者らは、コムギの生育相の長さが播種期や年次により変動するのは気象要因、特に平均気温の影響によるものであることを前報 (江口・島田 2000) のほ場試験において明らかにした。本報告では人工気象条件下でのポット試験の結果を加え、各生育相の長さや温度の関係を解析した。

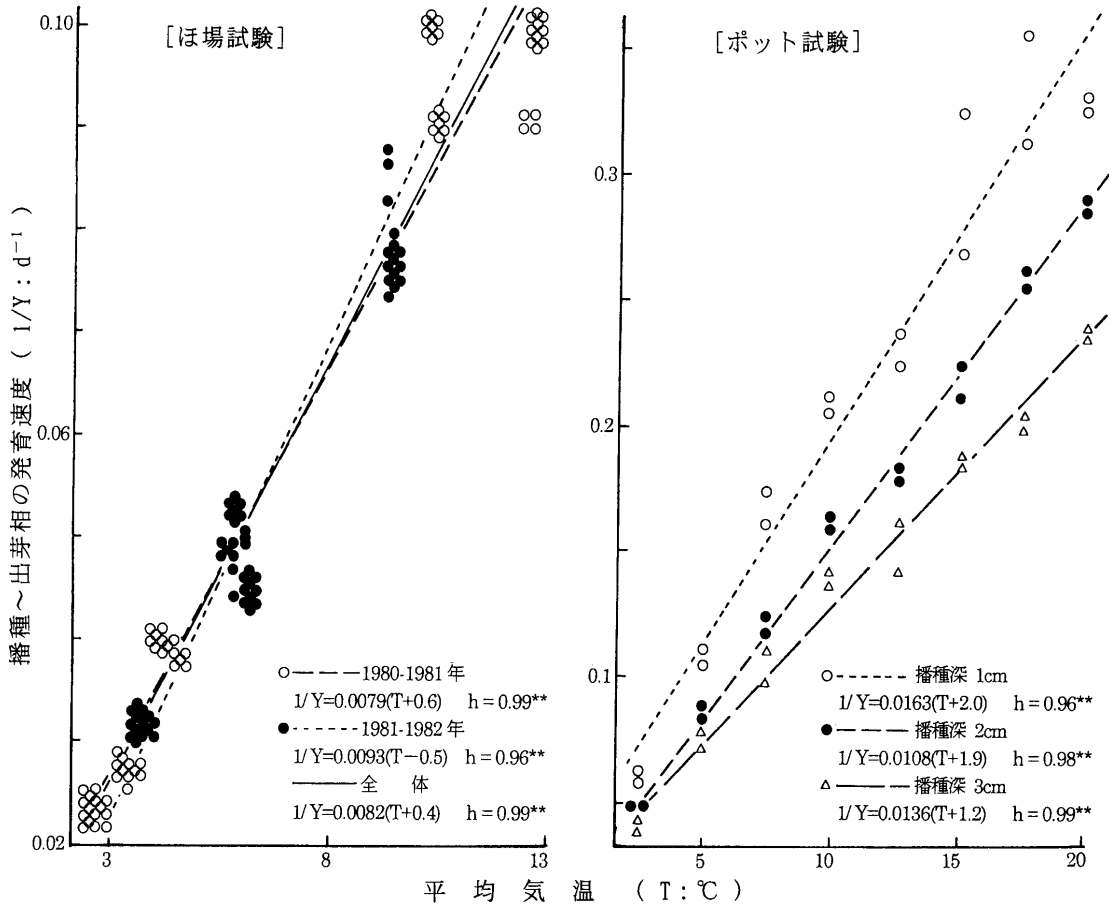
材料と方法

ほ場試験:1978 年から 1982 年の 4 年間に中国農業試験場 (広島県福山市) の灰色低地土の転換畑ほ場において、農林 61 号、農林 72 号、ミクニコムギ、オマセコムギ、ゴガツコムギ、中国 114 号を供試し、播種量 200 粒/m² で条間 30 cm のドリル播、11 月中旬から 3 月中旬の 5 播種期に播種し、施肥量は 3 要素各 0.7 kg/a、節間伸長期に窒

素 0.2 kg/a を追肥した (江口・島田 2000)。

ポット試験:出穂期以前の試験は 1985~1986 年に農業研究センターにおいて、1/5000 a ワグナーポットに淡色黒ボク土の畑土を充填し、三要素成分で各 0.3 g、苦土石灰 1 g を施用、節間伸長期頃に窒素成分 0.2 g を追肥した。温度処理にはメタルハライドランプを主光源にした 3~6 万 lx の人工光のグロースキャビネットを使用した。播種~出芽期の試験では農林 61 号と農林 35 号を供試し、未催芽種子を播種深 1, 2, 3 cm に 6~10 粒/ポットを播種した。昼温 (12 h) /夜温 (12 h) を 5/0, 10/0, 10/5, 15/5, 15/10, 20/10, 20/15, 25/15°C としたグロースキャビネット内で播種から出芽まで生育させた。出芽~幼穂分化期の試験では農林 61 号、農林 35 号、アサカゼコムギ、中国 114 号を供試し、催芽種子を播種した。昼温 (10 h) /夜温 (14 h) を 10/0, 15/5, 20/10, 25/15°C に設定し、日長は白熱灯 (200 lx) を夜温時に 2 時間補光 (12 h) と無補光 (10 h) とした。幼穂分化~出穂期の試験も同じ品種を供試し、幼穂分化期まで 20/10°C, 12 h 日長条件で生育させた後、15/5, 17/7, 20/10, 22/12, 25/15°C の温度、12 h の日長条件で比較した。

出穂以降の試験は 1973~1974 年に 1/5000 a ワグナーポットに灰色低地土の水田土を充填し、シラサギコムギ、極早生—2、国分坊主、ナンブコムギ、農林 2 号を供試し、出穂期以前の試験と同様に播種、施肥した。グロースキャビネットの主光源は水銀灯を使用し、昼温 (12 h) を 12.5, 17.5, 22.5, 27.5°C、夜温 (12 h) を 7.5, 12.5, 17.5, 22.5°C とし、その 16 組み合わせの温度、12 h の



第1図 播種～出芽相における発育速度と平均気温の関係。
h: 有効積算温度式の相関指数。

日長条件で比較した。処理期間以外は自然光のファイトトン (10～20℃サインカーブの変温) で生育させた。

調査と計算: 主茎を対象に各生育期を調査し、その平均値を求めた (江口・島田 2000)。回帰の計算は、各生育相の長さ (日数: Y) の逆数である発育速度 (DVR) を求め、その期間の平均気温 (T) との一次回帰式を最小二乗法により算出した ((1)式)。

$$1/Y = (T - BT) / HU \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = HU / (T - BT) \dots\dots\dots (2)$$

得られた一次回帰式の勾配が有効積算温度 (HU) の逆数、DVR (1/Y) = 0 のときの平均気温 (T) の値を最低有効温度 (BT) として、有効積算温度曲線の式 (2) が求められる。相関指数 (h) は全平方和に対する (2) 式の回帰平方和の比の根として求め、残差分散に対する回帰分散の比 (F 値) で検定した (嶋崎 1968)。

結 果

播種～出芽相: 1980～1982年の2年間のほ場試験における播種～出芽日数では、品種間差は有意ではなく、播種期間差は1月17日播種でもっとも長く、約30日かかった (表省略)。DVRと温度の関係 (第1図左) は年次によって若干の差があったが、ほぼ直線が適合する関係であっ

た。

グロースキャビネットを用いたポット試験のDVRと平均気温の関係を第1図右に示した。昼夜温較差が5℃と10℃の場合があったが、平均気温とほぼ直線の関係で、その差は認められなかった。また、播種深によって異なった勾配 (有効積算温度が異なる) の回帰直線を示し、播種深1cmの増減に対し有効積算温度 (HU) 値が16.7℃Cd増減した。最低有効温度 (BT) は-1.2～-2.0℃で、差は小さかった。

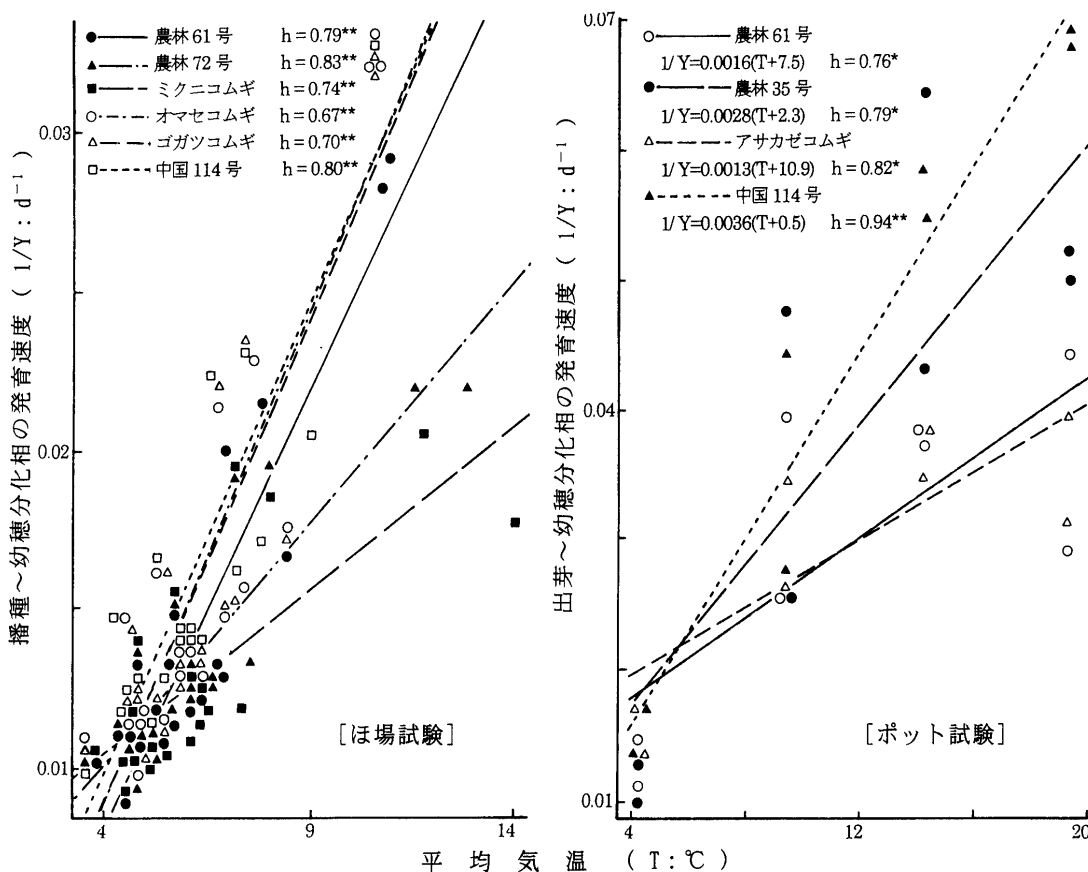
播種 (出芽) ～幼穂分化相: 4年間のほ場試験における播種～幼穂分化相のDVRと温度の関係を第2図左に、回帰関係を第1表に示した。表には積算温度曲線 ((2)式) で算出した相関指数 (h) を示した。直線の適合は悪く、特に秋播性が高いミクニコムギと農林72号は10℃を越える高温で速度が低下し、放物線状になった。

ポット試験の出芽～幼穂分化相のDVRと温度の関係を第2図右に示した。秋播性のあるアサカゼコムギと農林61号が12℃以上の高温でDVRの停滞と低下を示した。秋播性は低い感光性が高い農林35号も似た傾向を示した。秋播性・感光性ともに低い中国114号はほぼ直線が適合した (h=0.94)。

第1表 発育相の長さ (Y) とその期間の平均気温 (T) の有効積算温度式 ($Y=HU/(T-BT)$)、最低有効温度 (BT) を品種別に求めた場合と全体の BT 値を用いた場合の有効積算温度値 (HU) の比較。

品種	播種～幼穂分化相			幼穂分化～出穂相			出穂～開花相			開花～成熟相		
	h	HU	BT	h	HU	BT	h	HU	BT	h	HU	BT
農林 61 号	0.79	356.2	1.1	0.98	485.6	1.5	0.81	72.4	6.5	0.87	633.1	2.1
(全体の BT)	0.85	455.3	-0.4	0.99	464.7	1.9	0.82	74.5	6.3	0.87	651.4	1.6
農林 72 号	0.83	656.7	-2.7	0.99	465.4	1.5	0.91	82.4	6.5	0.77	538.7	3.5
(全体の BT)	0.76	492.7	-0.4	0.99	444.1	1.9	0.91	84.6	6.3	0.78	602.9	1.6
ミクニコムギ	0.74	953.6	-6.0	0.95	337.2	3.7	0.87	83.3	5.3	0.90	508.3	5.2
(全体の BT)	0.63	526.8	-0.4	0.98	415.8	1.9	0.84	76.0	6.3	0.89	634.6	1.6
オマセコムギ	0.67	313.5	1.2	0.98	446.4	1.7	0.90	82.4	6.0	0.88	553.2	3.8
(全体の BT)	0.80	416.5	-0.4	0.98	436.3	1.9	0.90	80.4	6.3	0.88	632.6	1.6
ゴガソコムギ	0.70	320.2	1.2	0.97	413.6	1.7	0.88	98.1	4.6	0.90	703.0	-0.9
(全体の BT)	0.81	417.0	-0.4	0.97	403.0	1.9	0.85	82.5	6.3	0.89	614.6	1.6
中国 114 号	0.80	332.4	0.7	0.99	411.0	1.6	0.82	86.8	6.1	0.93	691.0	-0.6
(全体の BT)	0.85	398.6	-0.4	0.98	396.4	1.9	0.82	85.6	6.3	0.92	612.0	1.6

相関指数 (h) は回帰/残差の分散比 (F 値) がすべて 1%水準で有意。

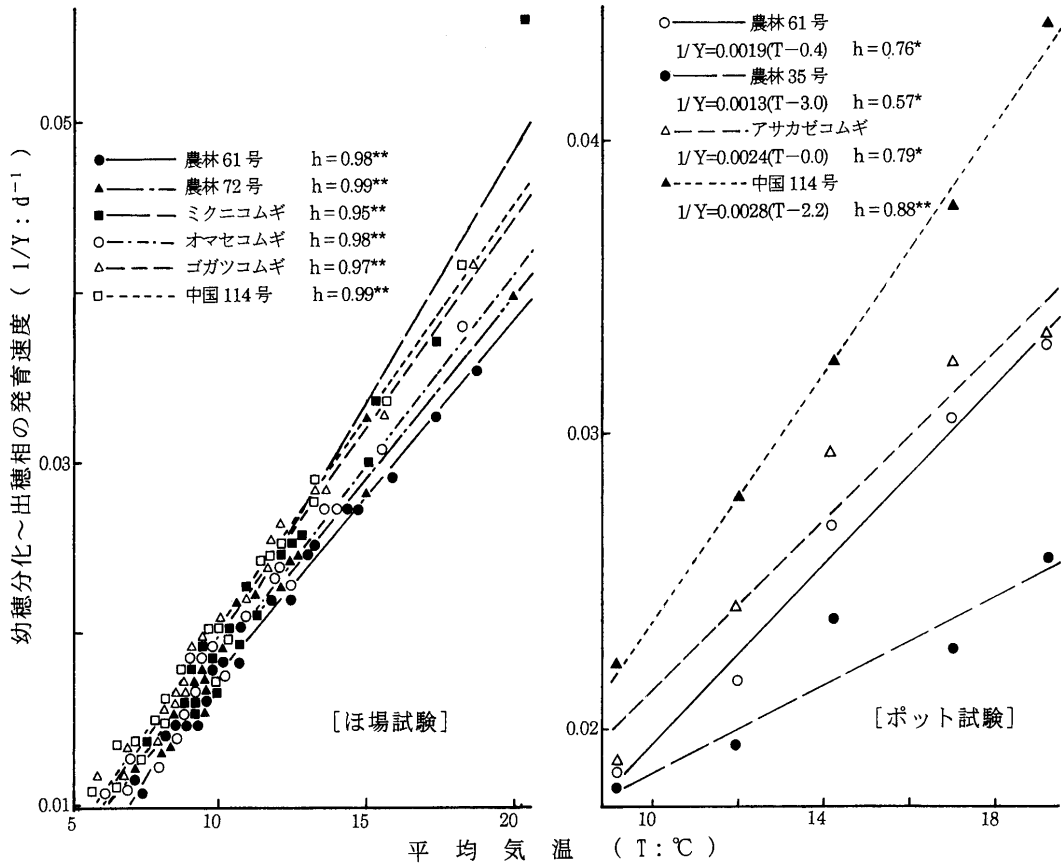


第2図 播種～幼穂分化相 (ほ場) と出芽～幼穂分化相 (ポット) における発育速度と平均気温の関係。
h: 有効積算温度式の相関指数。

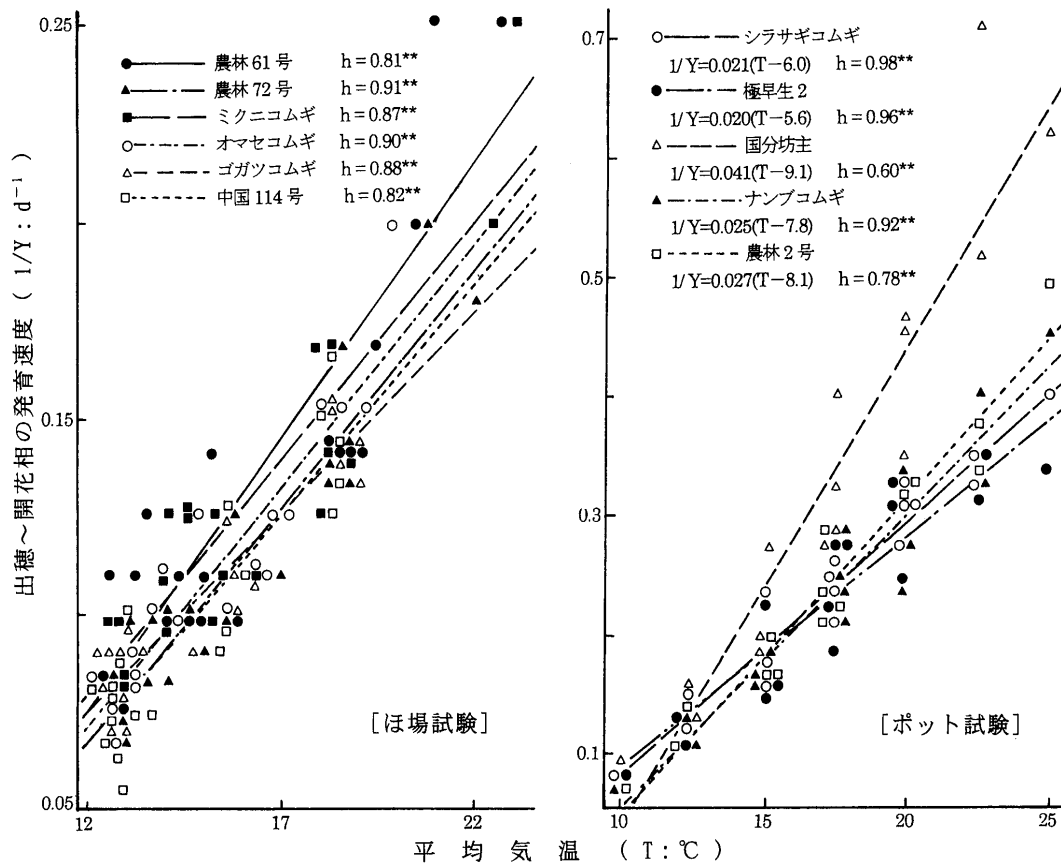
幼穂分化～出穂相: ほ場試験における DVR と温度の関係はすべての品種で直線がよく適合した (第3図左)。第1表に示した有効積算温度曲線式の適合も高く (h=0.95~0.99), BT 値もミクニコムギを除いてほぼ一定の値であった。BT 値が品種により変わらないと仮定して、全体の回帰から得た BT 値を代入して再計算した回帰の相関指数は低下しなかった。また、得られた回帰式の HU 値により品種間の比較が容易になった。

ポット試験の DVR と温度の関係 (第3図右) は、アサカゼコムギと農林 61 号がやや S 字状の形状を示した。品種間差は HU 値 (勾配) で大きく、BT 値で小さかった。

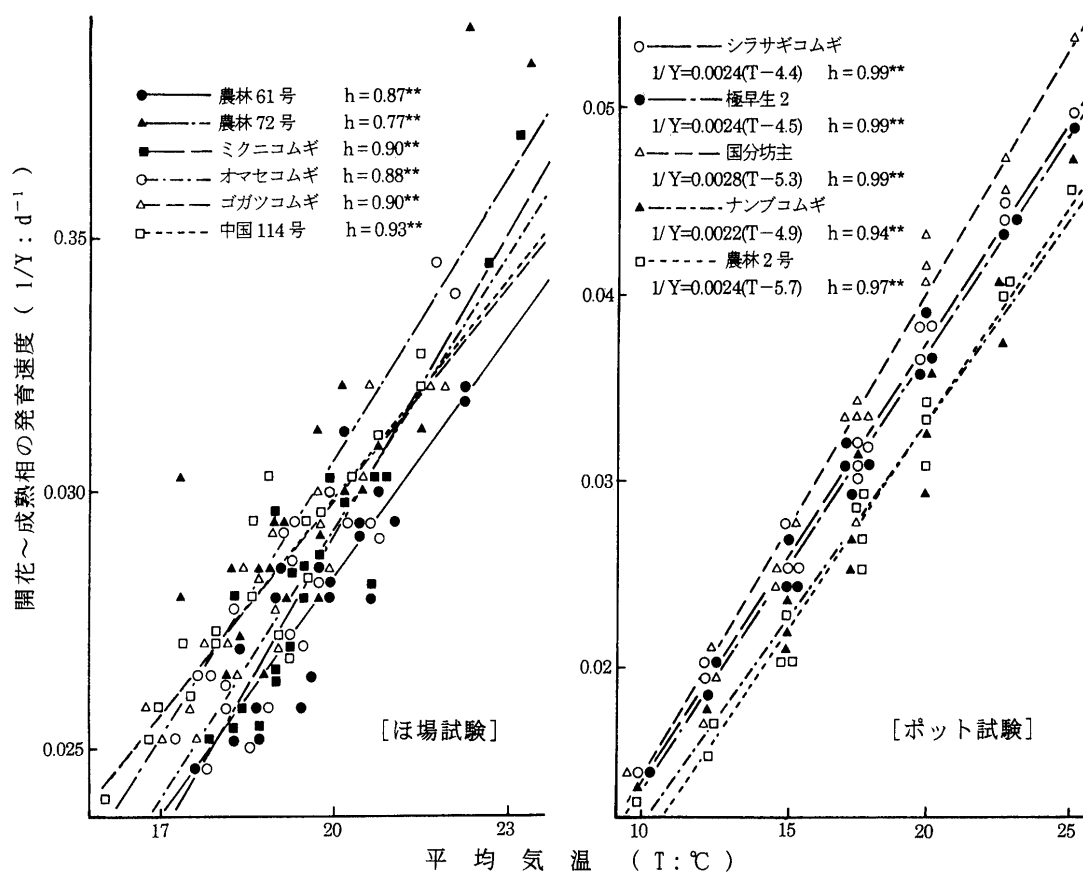
出穂～開花相: ほ場試験における出穂～開花相の DVR と温度の関係は、農林 61 号とミクニコムギにおいて 20°C 以上の高温で DVR の促進がみられ、やや指数曲線状を示した (第4図左)。第1表に示した BT は 4.6~6.5°C で、



第3図 幼穂分化～出穂相における发育速度と平均気温の関係。
h: 有効積算温度式の相関指数。



第4図 出穂～開花相における发育速度と平均気温の関係。
h: 有効積算温度式の相関指数。



第5図 開花～成熟相における発育速度と平均気温の関係。

h: 有効積算温度式の相関指数。

品種間差は小さく、値は他の生育相よりも高かった。

ポット試験における DVR と平均気温との関係 (第4図右) は直線が適合し、昼温と夜温の影響差も認められなかった。BT 値の品種間差は 5.6~9.1°C、値は他の生育相より高かった。

開花～成熟相: ほ場試験の結果はかなり変動が大きく、農林 72 号とミクニコムギでは 22°C 以上の高温で DVR の促進がみられ、指数曲線状を示した (第5図左)。BT 値の品種間差はやや大きかった。

ポット試験では、昼温と夜温の差は認められず、平均気温で代表される関係であり、直線がよく適合した ($h=0.94\sim 0.97$, 第5図右)。BT 値の品種間差も 4.5~5.7°C で、差は小さかった。

考 察

本試験の播種～出芽相における DVR と温度の関係は直線がよく適合し、ノンパラメトリック法でトウモロコシの全生育期間の曲線を求めた田村ら (1989) の結果と一致した。本試験では限界に近い低温条件下で生育させた例も含まれるが、低温における DVR の停滞は認められなかった。

出芽 (播種)～幼穂分化相では、品種により 11~16°C 以上の高温で DVR の停滞と低下がみられた。ポット試験

の一部品種は S 字曲線状を示した。これらの傾向は秋播性のある品種、感光性の高い品種で著しい傾向があり、単純な温度のみの反応とは確認できなかった。幼穂分化と発達に関係した生育相では、イネの出芽～出穂期 (堀江・中川 1990)、トウモロコシの出芽～絹糸抽出期 (田村ら 1989)、春コムギの播種～出穂期 (竹沢ら 1989) が S 字曲線状、イネの移植～幼穂形成期 (石橋ら 1990)、幼穂形成～出穂期 (山本 1992) が放物線状、また、ダイズの播種～開花期 (鮫島・岩切 1987)、イネの幼穂形成～出穂期 (石橋ら 1990) が直線状になるなど、作物や品種により異なった形状となることが報告されている。

出穂～開花相、開花～成熟相ではほぼ直線が適合したが、ほ場試験では 22°C 以上の高温で DVR の促進がみられた。これらの生育相では直線が適合する報告が多く、春コムギの止葉出葉～開花期と開花～成熟期 (高橋・中世古 1992)、コムギの出穂～開花期 (橋本ら 1966)、イネの出穂～成熟期 (宮川 1994) 等の例と一致している。また、高温における DVR の促進はトウモロコシの絹糸抽出～黄熟期 (田村ら 1989, 井上 1987) の例と一致し、コムギの開花～成熟日数が 27°C 以上の高温で急速に短縮する現象 (Johnson and Kanemasu 1983) とも一致する。

生育相によって DVR と温度の関係が異なるのは、田村ら (1989) も指摘しているように、一つの数式で表すことに無理があるのではなからうか。生育期予測や、生理現象

の解析手段として用いるのであれば、簡単な式で温度反応の特性を示す有効積算温度式は有効な方法と思われる。

本試験で得られた有効積算温度式の最低有効温度 (BT) は出穂～開花相でもっとも高く、次いで開花～成熟相、幼穂分化～出穂相の順であった。同様な関係は江幡 (1990) がイネにおいて止葉抽出～出穂期がもっとも高く、前後に低くなることを報告している。また、本試験では BT 値に品種間差がないと仮定すれば、有効積算温度 (HU) により品種間の比較が可能であるとした。しかし、サイズで品種別に求めた DVR と温度の直線で勾配 (1/HU) に差がない (鮫島・岩切 1987)、日本型イネはインド型イネに比べ登熟期の下限温度が低い (江幡 1990) などの報告があるので、BT 値の品種間差は今後の検討課題と思われる。また、BT 値の低い品種があれば早生化の母本として有望であろう。

引用文献

- De Wit, C.T., R. Brouwer and F.W.T. Penning de Vries 1970. The simulation of photosynthetic systems. Proc. of the IBP/PP Technical Meeting, PUDOC, Wageningen. 47—60.
- 江幡守衛 1990. 有効積算温度とイネの生長. 第2報 イネの出穂・開花および登熟における有効積算温度. 日作紀 59: 233—238.
- 江口久夫・島田信二 2000. コムギの発育日数の変動要因の解析と生育期予測—発育日数の実態と早生化—. 日作紀 69: 49—53.
- 橋本隆・江口久夫・平野寿助 1966. 小麦早熟育種における交配親の選択について (第4報) 短期開花および短期成熟性の品種間差異とその検定方法の検討. 中国農試報 A13: 87—110.
- 堀江武・中川博視・吉良知彦 1987. イネの発育過程のモデル化と予測

- に関する研究 (2) 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日作紀 56(別1): 208—209.
- 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.
- 井上吉男 1987. トウモロコシ発育動態の定量的解析とそのモデル化. 農研センター研報 7: 41—68.
- 石橋栄二・桐山隆・田村良文・金野隆光・小野祐幸 1990. ノンパラメトリック回帰を用いた温度影響評価による水稻の生育期予測. 日作紀 59: 443—449.
- Johnson, R.C. and E.T. Kanemasu 1983. Yield and development of winter wheat at elevated temperatures. Agron. Jour. 75: 561—565.
- 宮川修一 1994. タイにおけるイネの潜在生産量の評価. 熱帯農業 38: 26—32.
- 鮫島良次・岩切敏 1987. 気象と大豆の生育動態に関する研究 (1) 開花までの期間における発育速度と日長・気温の関係. 農業気象 42: 375—380.
- 嶋崎昭典 1968. 相関と回帰. 農林水産技術会議事務局監修, 農林水産試験研究のための統計的方法. 農林統計協会, 東京. 34—54.
- 高橋肇・中世古公男 1992. 春播コムギ早晩2品種の発育と気温および日長との関係. 日作紀 61: 576—582.
- 竹沢邦夫・田村良文・小野祐幸 1989. 作物の発育ステージのノンパラメトリック推定の有効性. 農業気象 45: 151—154.
- 田村良文・清野裕・門馬栄秀・小野祐幸・金野隆光 1989. サイレージ用トウモロコシの発育ステージ予測と栽培適地判定図の作成. 農研センター研報 17: 55—81.
- 山本良孝 1992. 水稻の発育段階予測法の改善とその生育診断への応用 (1). 農及園 67: 25—30.

Thermal Response during the Phenological Development of Wheat: Hisao EGUCHI*, Atsushi OYANAGI, Akiko SATO, Masakazu TOYODA, and Taiji YOSHIDA (*Natl. Agr. Res. Cent., Tsukuba 305-8666, Japan*)

Abstract: A field experiment and several controlled environmental experiments were conducted to study the thermal response during the phenological development of wheat. The varietal differences in the relationship between developmental rate (DVR) and mean temperature were calculated by using linear regression in each phase. The relationships between DVR and mean temperature were linear ($r > 0.96$) in the S-E phase (from sowing to emergence) in both the field and the controlled environment, D-H phase (from double ridge to heading) in the field environment, and H-A (from heading to anthesis) and A-M phases (from anthesis to maturity) in the controlled environment. However, in the E-D phase (from emergence to double ridge), the regression curves were parabolic. Particularly, photosensitive cultivars and cultivars with a high vernalization requirement expressed severe depression of DVR at and above 15°C mean temperature. In H-A and A-M phases of the field experiment, an accelerated DVR was observed above 22°C. The base temperature (at which DVR=0 in the linear equation) differed with the phases; it was lowest in the S-E phase (-0.4°C) and highest in the H-A phase (6.3°C). Since the differences of base temperature among cultivars were relatively small, it was possible to quantify genotypic trait as the thermal unit (reciprocal of the slope) by setting the same BT value. The DVRs of S-E, H-A, and A-M phases could be predicted from mean air temperature by using a simple linear equation. It was concluded that this equation is the most convenient method of evaluating the thermal response during phenological development of wheat within the normal temperature range.

Key words: Base temperature, Developmental rate (DVR), Phase, Phenological development, Prediction, Temperature, Thermal unit, Wheat.