

登熟段階別の気象要因がコムギの穂発芽発生に及ぼす影響

中園江・大野宏之・吉田ひろえ・中川博視

(中央農業総合研究センター)

要旨：登熟期間中の気象がコムギの穂発芽の発生に及ぼす影響について、ガラス室および圃場で栽培した穂発芽耐性の異なる農林 61 号とシロガネコムギを対象に解析した。開花期から成熟期の間に採取した穂を吸水させ、15℃、10 日間過湿状態に置いた時の穂全体の発芽率を穂発芽率として解析の対象とした。ガラス室において開花期から成熟期までの気温を 13℃から 25℃の範囲で一定に制御した結果、登熟期間中の平均気温と成熟期の穂発芽率には有意な正の相関が認められた。圃場では年次や作期により登熟期間中の気温および降水日数、積算降水量は変動し、登熟期間中の平均気温と成熟期の穂発芽率の相関はガラス室と比較して低かった。開花から成熟までの登熟段階を、気温から推定した子実含水率により 10%毎に区分し、段階別の気象と成熟期の穂発芽率との関係について解析した結果、2 品種に共通して子実含水率 50%から生理的成熟期までの平均気温と穂発芽率に有意な正の相関が認められた。農林 61 号では、同じ登熟段階の降水日数と穂発芽率との間にも正の相関が得られた。また積算降水量はいずれの段階においても穂発芽率との相関は認められなかった。これらのことから、子実が急速に乾燥する直前の時期の高温と雨ぬれの継続により、成熟期の穂発芽の発生危険度が高まることが示唆された。

キーワード：気温、休眠、降水、コムギ、子実含水率、穂発芽。

コムギの気象災害には雪害、風水害、凍霜害、湿害、干害があるが、降雨による被害が大きいことが特徴である。特に収穫期の降雨は登熟の阻害、粒の褪色、倒伏等を引き起こし、さらに甚だしい場合は穂の状態で種子が発芽してしまう「穂発芽」が発生し、一等比率の大幅な低下の主要因となる(平野 1971)。本州では収穫期と梅雨期が重なることが多いため、降雨の合間を縫って収穫作業が行われることが多い。またコムギの大産地である北海道では、一般的には梅雨はないとされるものの、梅雨前線の北上により天候が不順になり、収穫期にあたる 7 月中旬から 8 月上旬にかけて降雨に遭遇することにより被害が発生する場合がある(中津 2000)。

穂発芽を回避し高い品質を確保するためには、早生品種や穂発芽耐性品種の開発が最も有効であると考えられる(柳沢 2004)。技術的な対策としては秋播き性コムギを利用した早播きによる収穫期の前進(Fukushima ら 2005)、高水分コムギの収穫技術の開発(金井ら 2006)などの取り組みが行われている。これらに加えて子実含水率や降水確率等の作物、気象情報を総合して穂発芽の発生危険度を予測し、適期収穫を支援することが挙げられる。穂発芽の発生危険度をあらかじめ予測することができれば、早めの収穫や分別収穫の判断をする場合の有力な情報となり、品質の低下を防ぐことができるものと考えられる。北海道では気象条件から低アミロコムギ(α -アミラーゼ活性の高いコムギ)の発生を予測する式が開発され、生育の早晚マップとともに収穫順序決定の参考資料として用いられている(奥野ら 2005, 中津ら 2006)。本州ではこのような取り組みは少ないが、今後農地の集積が進み、多くの圃場を一元管理

する体制下では、穂発芽の発生危険度を考慮した効率的な収穫スケジュールを策定する技術が必要になると考えられる。

穂発芽の発生には種子の休眠性が関連しており、発芽の程度は種子自体の持つ休眠性と、休眠を打破し発芽を促す気象条件との組合せで決まる(土屋 1982)。種子の休眠性には大きな品種間差があることが報告されており、日本では休眠性が高い穂発芽耐性の品種が育成されてきた(星野ら 1989)。一方で、同一の品種であっても休眠性は登熟期間中の気象条件によって変動し、品種間差などの解析を困難にしている。

登熟期間中の気象と休眠性の関係については、気温の影響が最も大きく、一般的に登熟期間の高温は休眠性を低下させることが知られている(Reddy ら 1985, Lunn ら 2002)。また気温の影響は登熟段階によって異なることが示唆されており、桑原・前田(1979)は人工気象室で登熟期間中の気温を制御した試験結果から、登熟前半が高温、後半が低温という条件下で休眠が強くなったことを報告している。これらの報告の多くは日数を基準として示されているため、登熟日数が異なる場合の結果を直接比較することが難しい。一方、子実の含水率は子実の登熟過程に対応させることができ、また気温を用いて推定することが可能であるため(中園ら 2006, 中園・大原 2010)、子実含水率を基準に登熟段階を区分すれば、様々な条件下で行われた実験の結果を比較することに役立つと考えられる。

本研究では穂発芽の発生に影響する登熟段階と気象要因を特定するために、本州で栽培されている穂発芽耐性の異なる 2 品種を供試し、環境制御や作期移動試験により登熟

第1表 ガラス室試験における温度設定条件と発育段階および成熟期の穂発芽率.

試験年次 ¹⁾	播種日 ²⁾	温度処理区 最高/最低気温 (平均気温)	品種	開花日	成熟日	登熟日数 (日)	成熟期穂発芽率 (%)
2002	12月7日	19/10℃ (15℃)	農林61号	4月12日	6月7日	56	0.1
			シロガネコムギ	4月8日	6月4日	57	51.3
		24/15℃ (20℃)	農林61号	4月9日	5月18日	39	7.5
			シロガネコムギ	4月7日	5月16日	39	46.9
2003	11月19日	16/10℃ (13℃)	農林61号	4月12日	6月13日	62	0.0
			シロガネコムギ	4月9日	6月10日	62	16.3
		26/20℃ (23℃)	農林61号	4月12日	5月16日	34	56.1
			シロガネコムギ	4月9日	5月14日	35	89.7
2004	11月26日	23/14℃ (17℃)	農林61号	4月4日	5月21日	47	23.9
			シロガネコムギ	4月1日	5月17日	46	69.3
		31/22℃ (25℃)	農林61号	4月5日	5月2日	27	75.7
			シロガネコムギ	4月2日	4月29日	27	96.0

¹⁾ 試験年次は収穫年を示す.

²⁾ 播種年は試験年次の前年である.

期間の気象条件を変えて、種子の休眠性と登熟期間の気象との関係を解析した.

材料と方法

1. 栽培の概要

農林61号 (穂発芽性: 難) およびシロガネコムギ (穂発芽性: やや易) 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) および作物地域性解析実験棟 (以下、ガラス室) で栽培試験を行った. 圃場試験は2003年から2010年、ガラス室試験は2002年から2004年 (以下、年次は収穫年次とする) に実施した. 圃場試験では、10月下旬から翌年2月上旬の範囲内で、2週間から4週間の間隔で各年次につき2~8回の播種を行った. ただし、2004年については10月下旬と12月中旬の2回の播種とした. ガラス室試験では、2001年12月7日、2002年11月19日、2003年11月26日に播種した.

ガラス室での栽培方法は中園ら (2006) と同様で、開花期までは側窓と天窓を開放し、気温の制御は行わなかった. 開花期間中は18℃一定に制御し、2品種の開花が終了した日から、日平均気温が所定の気温になるように最低気温と最高気温を設定したプログラム運転により、気温の制御を行った. 各年次に低温区と高温区の2区を設定し、2002年は平均気温15℃および20℃、2003年は13℃および23℃、2004年は17℃および25℃に制御した.

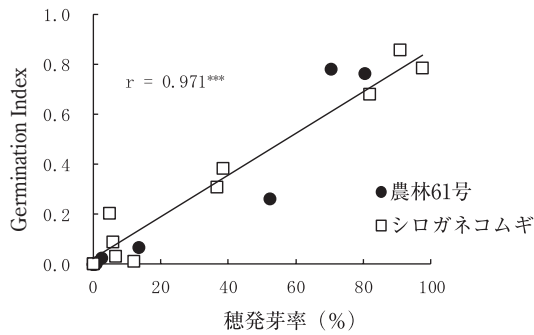
圃場試験はすべて条播で行い、2003年および2004年は条間70 cm、1条5 m、1条あたりの播種量は17.5 gとした. 2005年以降はシードテープによる播種を行い、2008年までは条間30 cm、1条20 m、種子間隔約3.3 cmとした (中園・大原2010). 2009年および2010年は1条10 mとした. 1試験区の面積は2008年までは約75 m²、2009年および

2010年は約33 m²とした. 施肥は化成肥料6-9-6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年および2010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.

穂の中央部に位置する数個の穎花から葯が抽出した日を開花日とした. 圃場、ガラス室ともに、開花日以降数日間隔で開花日の同じ穂を1サンプルあたり10本採取し、5本を子実含水率測定の対象試料に、残りの5本を発芽率調査の対象試料とした. ガラス室では3つの土枠からそれぞれ1サンプルを採取した. 圃場試験では、2008年までは1試験区の3カ所から、2009年以降は3試験区の各1カ所からサンプルを採取して3反復とした. 子実の含水率は、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.

2. 発芽試験

採取した穂を、子実が十分吸水するように15℃の水に24時間浸漬した後、穂の乾燥を防ぐために密閉容器中に立て、15℃一定に制御した恒温器で10日間おいた後、発芽率を調査した. 発芽率の調査対象は各小穂の第4小花までを対象とし、調査全粒数に対する発芽粒数の百分率を算出した. 以下、この値を「穂発芽率」とする. 2002年には、高温区のガラス室 (平均気温20℃) で栽培した材料を対象に、穂発芽率と同時にシャーレ試験による発芽率の調査も行った. 1サンプルにつき5本の穂を採取し、穂中央部の小穂の第1、2小花の子実を調査対象とした. 蒸留水7 mlを加えた9 cmシャーレの濾紙上に脱粒した種子を40粒置床し、15℃の恒温器に入れ、置床後10日まで毎日発芽粒数を調査した. 毎日の発芽粒数から発芽指数



第1図 穂発芽率とシャーレ発芽試験で算出した Germination Index の関係。

*** は 0.1%水準で有意であることを示す。

(Germination Index, 以下 GI とする) を以下の式より算出した (Hagemann and Cihra 1984)。

$$GI = (10 \cdot n_1 + 9 \cdot n_2 + \dots + 1 \cdot n_{10}) / (10 \cdot 40)$$

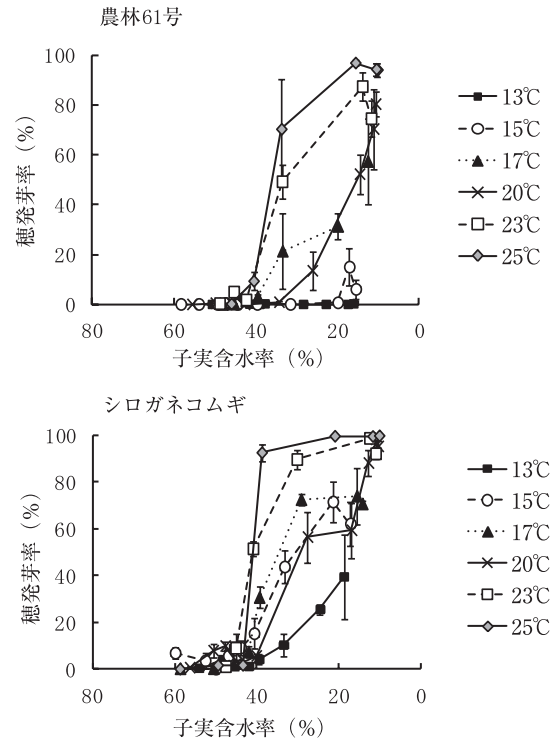
ここで, n_1, n_2, \dots, n_{10} は 1 日目の発芽粒数, 2 日目の発芽粒数 ... 10 日目の発芽粒数を示す。

3. 成熟期穂発芽率と登熟期間中の気象の関係の解析

子実含水率が 30% 以下になった最初の日を成熟期とし, その時の穂発芽率を成熟期穂発芽率とした。成熟期の穂発芽率の測定値がない場合は, その前後の穂発芽率と含水率のデータを直線で補完して求めた。

登熟期間別の気象条件と休眠性の関係を解析するために, 開花期から成熟期までの登熟期間を, 子実の含水率および生理的成熟期 (Physiological Maturity, 以下 PM) に基づいて区分した。開花期から子実含水率 70% まで, 70% ~ 60%, 60% ~ 50%, 50% ~ PM, PM ~ 成熟期の 5 段階である。なお, ここでの PM は子実乾物重が最大値の 95% に達した日としており, 子実含水率では約 41% に相当する。本試験では開花期および子実含水率を実測しているが, 開花期のデータがない場合にも適用できるように, 出穂から開花までに必要な積算気温値を $130^\circ\text{C} \cdot \text{日}$ として開花期を推定した。また子実含水率は推定した開花期を 0, PM を 1 とする発育指数 (DVI) の考え方をういて, 日平均気温により算出される DVI と子実含水率の関係式により推定した (中園ら 2006)。2007 年までの子実含水率についてはこれまでに推定値の精度の検証を行っているため (中園・大原 2010), 2008 年から 2010 年までの 2 品種の子実含水率の実測値を検証の対象とした。

推定した子実含水率により, 登熟期間を開花期から子実含水率 70%, 70% ~ 60%, 60% ~ 50%, 50% ~ PM, PM ~ 成熟期の 5 段階に区分した。段階別に算出した平均気温, 降水日数および積算降水量と, 成熟期穂発芽率との単相関を求めた。ここでの降水日は日降水量 1 mm 以上の日とした。次に, 有意な相関が確認された気象要素について, 成熟期穂発芽率を目的変数, 段階別の気象値を説明変数として重回帰分析を行った。変数の選択にはステップワイズ法

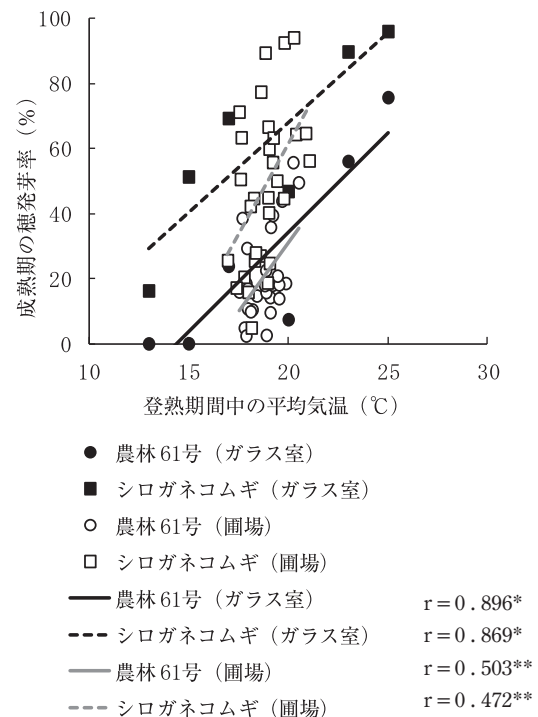


第2図 ガラス室試験における登熟気温別の穂発芽率の推移。

登熟の進行に伴い子実含水率は低下するため, x 軸は反転している。

各プロットは 3 反復の平均値を示す。

図中の縦棒は標準誤差を示す。



第3図 登熟期間中の平均気温と成熟期の穂発芽率の関係。

* は 5%水準, ** は 1%水準で有意であることを示す。

第2表 圃場試験における発育段階と成熟期の穂発芽率.

農林 61 号						シロガネコムギ					
試験年次 ¹⁾	播種日 ²⁾	開花日	成熟日	登熟日数 (日)	成熟期 穂発芽率 (%)	試験年次	播種日	開花日	成熟日	登熟日数 (日)	成熟期 穂発芽率 (%)
2003	10 月 22 日	4 月 29 日	6 月 13 日	45	29.4	2003	10 月 22 日	4 月 27 日	6 月 11 日	45	71.2
	11 月 18 日	5 月 6 日	6 月 18 日	43	35.8		11 月 18 日	5 月 3 日	6 月 16 日	44	89.4
	12 月 15 日	5 月 10 日	6 月 19 日	40	55.7		12 月 15 日	5 月 8 日	6 月 18 日	41	92.5
	1 月 14 日	5 月 10 日	6 月 20 日	41	49.5		1 月 14 日	5 月 12 日	6 月 19 日	38	94.1
2004	10 月 20 日	4 月 22 日	6 月 4 日	43	38.6	2004	10 月 20 日	4 月 20 日	6 月 2 日	43	63.4
	12 月 15 日	5 月 5 日	6 月 14 日	40	22.6		12 月 15 日	5 月 3 日	6 月 12 日	40	77.4
2005	10 月 25 日	5 月 2 日	6 月 16 日	45	16.0	2005	10 月 25 日	4 月 29 日	6 月 13 日	45	50.6
	11 月 24 日	5 月 8 日	6 月 19 日	42	14.8		12 月 13 日	5 月 9 日	6 月 20 日	42	59.9
	12 月 13 日	5 月 12 日	6 月 23 日	42	39.5	2008	10 月 22 日	4 月 27 日	6 月 8 日	42	25.6
2006	11 月 7 日	5 月 10 日	6 月 19 日	40	9.6		11 月 4 日	4 月 30 日	6 月 12 日	43	15.9
	11 月 21 日	5 月 12 日	6 月 21 日	40	15.3		11 月 18 日	5 月 4 日	6 月 15 日	42	44.7
	12 月 18 日	5 月 17 日	6 月 22 日	36	43.9		12 月 3 日	5 月 7 日	6 月 16 日	40	42.3
2007	10 月 25 日	4 月 27 日	6 月 8 日	42	4.9		12 月 17 日	5 月 8 日	6 月 20 日	43	27.0
	11 月 23 日	5 月 3 日	6 月 12 日	40	2.6		1 月 15 日	5 月 14 日	6 月 23 日	40	50.0
	12 月 19 日	5 月 8 日	6 月 16 日	39	14.3	10 月 20 日	4 月 19 日	6 月 2 日	44	20.5	
	1 月 23 日	5 月 12 日	6 月 19 日	38	18.6	11 月 3 日	4 月 21 日	6 月 6 日	46	25.5	
2008	10 月 22 日	5 月 1 日	6 月 12 日	42	18.6	2009	11 月 17 日	4 月 28 日	6 月 7 日	40	28.0
	11 月 4 日	5 月 3 日	6 月 14 日	42	17.0		11 月 30 日	5 月 1 日	6 月 10 日	40	44.9
	11 月 18 日	5 月 7 日	6 月 18 日	42	10.5		12 月 15 日	5 月 4 日	6 月 12 日	39	55.8
	12 月 3 日	5 月 11 日	6 月 20 日	40	15.8		1 月 8 日	5 月 8 日	6 月 14 日	37	66.6
	12 月 17 日	5 月 14 日	6 月 22 日	39	18.1		1 月 20 日	5 月 13 日	6 月 20 日	38	40.3
	1 月 15 日	5 月 16 日	6 月 23 日	38	18.2		2 月 2 日	5 月 14 日	6 月 23 日	40	63.3
							2010	10 月 19 日	4 月 28 日	6 月 10 日	43
						11 月 2 日		5 月 1 日	6 月 11 日	41	4.9
						11 月 18 日		5 月 5 日	6 月 16 日	42	18.7
						12 月 1 日		5 月 7 日	6 月 18 日	42	24.7
						12 月 14 日		5 月 11 日	6 月 21 日	41	44.7
						1 月 5 日		5 月 12 日	6 月 23 日	42	64.4
						1 月 19 日		5 月 17 日	6 月 24 日	38	64.7
						1 月 31 日		5 月 20 日	6 月 25 日	36	56.2

¹⁾ 試験年次は収穫年を示す.²⁾ 1月, 2月以外の播種年は試験年次の前年である.

(変数増減法)を用いた. なお, 気象データはつくば(館野)の地上気象観測値を使用し, 統計解析には統計解析ソフトウェア JMP (SAS Institute JAPAN, ver.8.0.1)を用いた.

結 果

1. ガラス室における穂発芽率の推移

ガラス室では4月上旬から中旬に開花し, シロガネコムギは農林61号よりも開花日, 成熟日ともに2~4日早かった. ガラス室の幅広い登熟気温条件下では, 開花日から成熟日までの登熟日数は気温が高いほど短縮し, 最短で27日(25℃), 最長で62日(13℃)という大きな差が生じた(第1表). 2002年にガラス室で実施したシャーレによる発芽試験の結果から算出したGIと, 穂発芽率には高い相関が

認められた(第1図).

登熟期間中の平均気温別の穂発芽率の推移を第2図に示す. 2品種共に子実含水率40%付近までの穂発芽率は低い, 子実含水率が40%以下に低下すると穂発芽率は急激に上昇した. 上昇の程度は気温が高いほど大きく, 25℃および23℃で登熟した場合, 穂発芽率は急速に100%近くに達した. 15℃および13℃で登熟した場合, 農林61号の穂発芽率は低く推移し, 特に13℃では調査期間中にほとんど発芽が認められなかった. 同じ登熟段階のシロガネコムギの穂発芽率は農林61号よりも高く, 13℃でも穂発芽率の上昇がみられた. 登熟期間中の平均気温と成熟期の穂発芽率には2品種共に有意な正の相関が認められた(第3図). 回帰直線の傾きは農林61号では6.1, シロガネコムギで

第3表 圃場試験における登熟段階別の気象値.

品種	気象要素		登熟段階 ¹⁾					
			開花-成熟	開花-70%	70-60%	60-50%	50-PM	PM-成熟
農林 61 号	平均気温 (°C)	最高	20.5	18.4	20.1	21.0	22.2	25.6
		最低	17.5	14.3	15.7	15.6	17.1	18.5
		平均	18.9	16.6	17.8	18.6	19.9	21.4
	降水日数 (日)	最高	20	9	5	5	6	4
		最低	9	2	0	0	1	0
		平均	15	5	3	2	3	2
	積算降水量 (mm)	最高	237	125	88	98	97	85
		最低	69	15	0	0	3	0
		平均	176	66	39	22	34	16
シロガネコムギ	平均気温 (°C)	最高	21.1	19.3	20.6	21.7	24.2	24.7
		最低	17.0	14.8	13.4	15.8	16.3	18.2
		平均	18.8	16.7	17.8	18.8	19.7	21.0
	降水日数 (日)	最高	21	8	5	5	7	5
		最低	12	2	0	0	1	0
		平均	16	5	3	2	4	2
	積算降水量 (mm)	最高	237	128	79	106	88	67
		最低	69	10	0	0	2	0
		平均	170	61	30	29	35	15

¹⁾ 子実含水率で区分した登熟期の発育段階.

は5.5であり、それぞれの回帰直線の傾きをt検定により検証したが、有意差は認められなかった ($p < 0.05$). また回帰直線の切片についても同様に有意差は認められなかった ($p < 0.05$).

2. 圃場における穂発芽率の推移

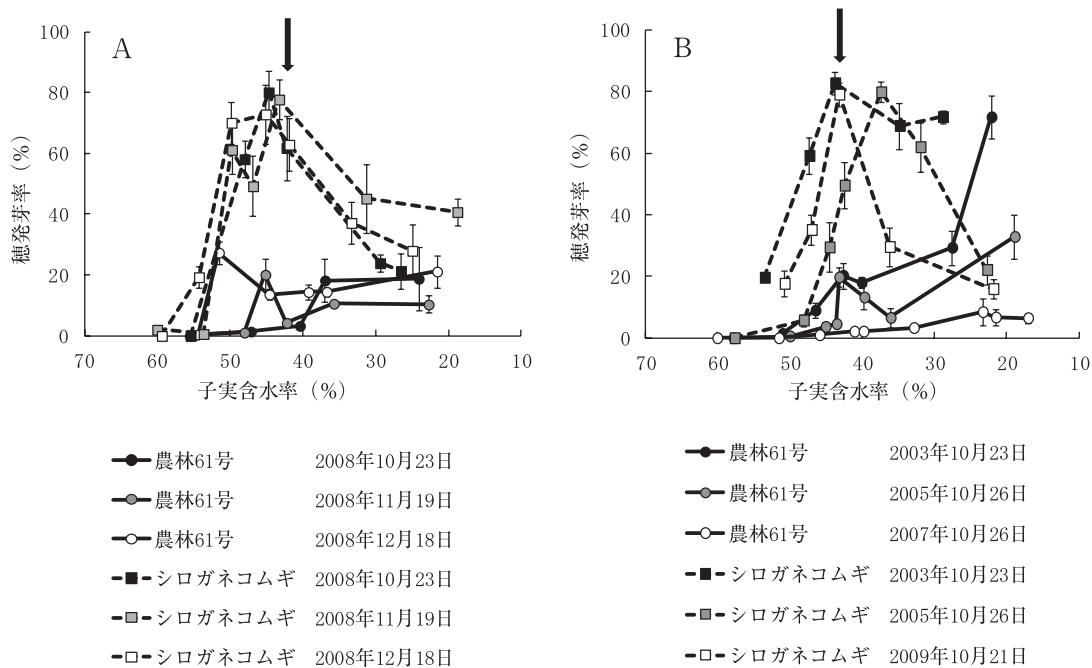
ガラス室と同様に、シロガネコムギの開花日、成熟日は農林61号よりも早くなったが、2003年の1月播種の開花日、2008年1月播種の成熟日のようにシロガネコムギが農林61号よりも遅い場合や同日の場合もあった(第2表). 複数年次の作期移動試験により、開花から成熟期までの登熟期間の平均気温の幅は農林61号で3°C、シロガネコムギでは4.1°Cとなった. 登熟日数には農林61号で7日、シロガネコムギで9日の差が生じた. 同様に登熟期間の降水日数および積算降水量にも作期による差が生じ、それぞれの幅は農林61号で11日、178 mm、シロガネコムギで9日、178 mmとなった(第3表).

登熟の進行に伴う穂発芽率の推移を、データの一部を抜粋して第4図に示す. 穂発芽率の推移は同一の収穫年であっても作期により異なり(第4図A), また同一の作期であっても年次により異なるパターンを示した(第4図B). 農林61号については、子実含水率約50%から発芽試験による穂発芽が観察されたがその程度は低く、PM以降の穂発芽率はやや低下もしくは一定になった後、再び上昇するというパターンが多くみられた. またPM前の発芽率の上昇がほとんど見られず、その後の上昇も小さく、成熟期穂

発芽率が低い作期もあった(第4図B, 2007年10月26日播種). シロガネコムギについては、子実含水率50%からの穂発芽率の上昇が農林61号よりも大きく、その後高い穂発芽率を保つ場合(第4図B, 2003年10月23日播種)と、低下する場合(第4図B, 2009年10月21日播種)があった. またPM前の発芽率の上昇には作期により差がみられた. シロガネコムギは全体的に発芽率が農林61号よりも高く推移し、成熟期の穂発芽率は農林61号では最大で55.7%, 最小で2.6%, シロガネコムギでは最大で94.1%, 最小で4.9%であった(第2表).

推定開花日とその実測値との二乗平均平方根誤差(以下、RMSE)は農林61号で1.2日、シロガネコムギで1.9日となった. 開花日からPMまでの子実含水率推定値と実測値とのRMSEは、農林61号で2.12%, シロガネコムギで1.79%となり、登熟期間の子実含水率は気温を用いて高い精度で推定可能であることが示された(第5図).

圃場試験においても開花から成熟期までの平均気温と、成熟期の穂発芽率の間には有意な正の相関がみられたが、相関係数はガラス室よりも小さくなった(第3図, 第4表). 推定した子実含水率により10%の幅で区分した各登熟期間の気象条件と、成熟期の穂発芽率との相関は登熟段階によって異なった. 気温については、2品種ともに開花から70%, 70%~60%, 60%~50%の段階では、期間中の平均気温と穂発芽率に有意な相関はみられなかったが、50%~PMの段階では有意な正の相関が認められた. PMから成熟期の段階では、農林61号のみ相関が有意であった. 降



第4図 圃場試験における穂発芽率の推移。

Aは試験年次が同じで播種日が異なる場合, Bは播種日がほぼ等しく試験年次が異なる場合を示す。

登熟の進行に伴い子実含水率は低下するため, x軸は反転している。

凡例の年月日は播種日を示す。

図中の矢印は生理的成熟期 (PM) を示す。

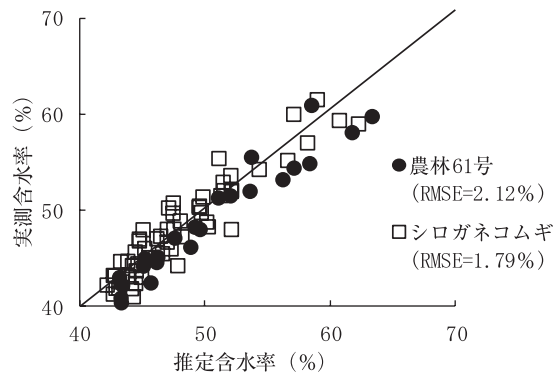
各プロットは3反復の平均値, 縦棒は標準誤差を示す。

水については, 農林61号では50%~PMの段階の降水日数のみ, 穂発芽率との有意な相関がみられた。一方シロガネコムギでは, 降水日数, 積算降水量ともにいずれの段階においても穂発芽率との有意な相関がみられなかった (第4表)。重回帰分析の結果選択された説明変数は, 農林61号では50%~PMおよびPM~成熟の平均気温, 60%~50%および50%~PMの降水日数となった。シロガネコムギは50%~PMの平均気温, 70%~60%, 60%~50%および50%~PMの降水日数となった。選択された説明変数による重回帰式の決定係数は農林61号で0.624, シロガネコムギでは0.601であった (第5表)。

考 察

子実の休眠性の評価には, シャーレに置床した種子の発芽粒数を毎日調査し, 早く発芽した粒数に重みをつけてGIを算出する方法 (Hagemann and Cihra 1984) が広く使われているが, 脱粒や置床に時間がかかるため多くの試料を調査することが難しい。本試験で解析の対象とした穂発芽率とGIには高い相関が認められたことから, より簡易な方法で得られる穂発芽率を用いても休眠性の評価が可能であると考えられた。

ガラス室での栽培試験の結果より, 登熟期間中の気温と成熟期の穂発芽率には明確な正の相関があり, 登熟期の高温が休眠性を低下させるという従来の知見と一致していた



第5図 子実含水率の推定値と実測値。

2008, 2009年の圃場試験のデータを対象にした。

図中の直線は $y = x$ を示す。

RMSE: 二乗平均平方根誤差 $= \sqrt{\sum (\text{実測値} - \text{推定値})^2 / n}$ 。

(Reddy ら 1985, Lunn ら 2002)。農林61号では, 本試験で設定した温度範囲で最も低い13℃で登熟した場合, 穂発芽率の調査期間中はほとんど発芽しなかった。この種子を調査終了後収穫し, 室温で保存した後に発芽試験を行ったところ, 全ての種子が正常に発芽したことから, 低温下で登熟した種子の発芽率の低さは, 発芽力の喪失によるものではなく, 休眠の強さによるものであると考えられる。品種別に求めた回帰直線の傾きには有意差がなく, 登熟温度の上昇に対する穂発芽率の上昇が品種間で異なるとは判定

第4表 成熟期の穂発芽率と登熟段階別の気象値との相関係数.

品種		登熟段階					
		開花-成熟	開花-70%	70-60%	60-50%	50-PM	PM-成熟
農林 61 号	平均気温 (°C)	0.503**	-0.015	0.346	0.046	0.526**	0.548**
	降水日数 (日)	0.351	0.002	-0.053	0.136	0.534**	0.014
	積算降水量 (mm)	-0.220	-0.180	-0.176	0.079	0.058	-0.166
シロガネコムギ	平均気温 (°C)	0.472**	0.198	0.262	0.141	0.490**	0.291
	降水日数 (日)	0.122	0.171	-0.036	-0.073	0.164	-0.117
	積算降水量 (mm)	-0.200	-0.003	0.099	-0.127	-0.187	-0.146

** は 1%水準で有意であることを示す.

第5表 成熟期の穂発芽率と登熟段階別の気象値の重回帰分析の結果.

品種	説明変数		偏回帰係数	p 値	決定係数 R ²	データ数
	気象要素	登熟段階				
農林 61 号	平均気温 (°C)	50-PM	4.200	0.027	0.624	28
		PM-成熟	2.958	0.049		
	降水日数 (日)	60-50%	2.720	0.038		
		50-PM	2.722	0.011		
シロガネコムギ	平均気温 (°C)	50-PM	9.549	<.0001	0.601	30
	降水日数 (日)	70-60%	5.045	0.012		
		60-50%	6.737	0.019		
		50-PM	6.704	0.003		

できなかった. また切片にも有意差がなかったことから, 同一温度下での穂発芽率に品種間で差があるかどうかは判定できなかった. しかし同一温度下で農林 61 号の穂発芽率がシロガネコムギを上回ることではなく, 2 品種の穂発芽耐性の差は登熟期間の温度条件が異なっても維持されることが推察される.

圃場試験では, 試験期間を通じた登熟期間中の平均気温の差は温室よりも小さかったが, 成熟期の穂発芽率には大きな差が生じた. 登熟期間中の平均気温と成熟期の穂発芽率には正の相関がみられたものの, 相関係数はガラス室よりも低くばらつきが大きかった. これは, 圃場の気温の範囲が狭いことも一因であるが, ガラス室にはない気温の変化や雨が影響しているためと考えられ, 圃場において複数年次で穂発芽率の検定や比較を行うときの結果の不安定性を表しているものと考えられる. さらに, 登熟段階別の平均気温と穂発芽率の相関分析から, 開花から子実含水率 50% までの平均気温と, 収穫期の休眠性には関連がないことが示唆された. 一方で子実含水率が 50% から PM までの期間の平均気温と穂発芽率の相関は, 穂発芽耐性の異なる農林 61 号, シロガネコムギに共通して高いことから, この期間が気温に対して特に感受性の高い時期であると考えられる. このような気温感受性の高い時期の存在についてはいくつかの報告があり, コムギでは開花後 30-50 日 (Biddulph ら 2007), 30-40 日 (Strand 1989), PM 前 14 日間 (Nielsen ら 1984), 成熟期前 5 日間 (Osanai ら 2005)

等がある. またオオムギでは開花からの積算気温で登熟期間を区分することにより, 気温に対する感受性の高い時期が特定されており, 品種間差はあるが開花後 250-350°C・日の範囲の高温が休眠性を弱めることが報告されている (Gualano and Benech-Arnold 2009). これらの時期は, 品種や栽培条件が大きく異なるため単純に比較することは難しいが, いずれも登熟後半という点で本試験の結果と一致している.

種子休眠の形成および維持には, 植物ホルモンであるアブシジン酸 (ABA) 量と, ABA に対する感受性の強弱が関与していると考えられている. コムギ種子の ABA 量は登熟の進行に伴い増加し, およそ開花後 35 から 40 日の時期に最大となった後減少していく (Walker-Simmons 1987, Suzuki ら 2000). 一方 ABA に対する感受性は, 開花後約 40 日までは保たれるが, それ以降徐々に低くなるというパターンを示すことが報告されている (Walker-Simmons 1987). これらの報告では開花後日数と子実含水率の関係は明記されていないが, ABA 量および ABA に対する感受性は PM 付近を境に変化することが推察される. 休眠の強い品種と弱い品種を比較すると, ABA 量の最大値に大きな差はないが, 強い品種は最大値後の減少が小さく高いレベルの ABA 量を保ち (Suzuki ら 2000), 感受性の低下も緩やかである (Walker-Simmons 1987). また高温下で登熟した種子の ABA 量は急激に低下するのに対し, 低温下では長い期間一定のレベルを保つことも報告されている (Walker-

Simmons and Sasing 1990). このような品種および環境による ABA 量と ABA に対する感受性のパターンの変化が、本試験で示された品種、作期による穂発芽率の推移の差異に関係し、最終的に成熟期の穂発芽率に大きな幅が生じたと考えられる。なお、同じガラス室を使用して 13℃ および 25℃ で登熟した農林 61 号とシロガネコムギの種子を解析した結果から、登熟気温に依存して発現量が変動する遺伝子が同定され、休眠性への関与が示唆されていることから (Nakamura ら 2011)、この遺伝子に着目した穂発芽耐性品種の開発が期待される。

農林 61 号では、雨の影響が大きい時期は、気温に対する感受性の高い時期と同様に子実含水率が 50% から PM までの期間であり、登熟の後半になるほど影響が大きいという従来の報告と一致していた (中津ら 2006)。King (1993) は、登熟後期に行った高湿度処理により子実の乾燥が阻害され、休眠性が低下することを示している。また佐藤ら (2004) は、子実粒重最大期に相当する成熟期前 5-6 日の降水が、子実含水率の低下を阻害することにより α -アミラーゼ活性を高め、粉の最高粘度が低下することを報告している。本試験の子実含水率 50% から PM までの期間は上記の報告の登熟段階よりも早く、子実水分は登熟の進行に伴い徐々に低下していく時期であり (中園ら 2006)、この期間の日数と降水日数には相関がなかった (データ省略)。このことから、本試験において降雨は子実の乾燥速度にはほとんど影響していなかったと推察される。その他に降雨は気温の変化を介して間接的に休眠性に関与することも考えられるが、今回の結果では気温と降水日数の相関は認められなかった。種子の休眠は胚だけではなく、種皮色の色素、種皮の物理性などの胚以外の部分も関与することが示されている (Torada and Amano 2002)。八田ら (2010) は登熟後期に遭雨処理を行ったコムギ子実で外皮部の脆弱化を観察している。農林 61 号の穂発芽率は積算降水量よりも降水日数との相関が高いことから、子実周囲に水分が多い状態が続くことが、これらの胚以外の組織の性質を変えることにより、休眠を弱めている可能性も考えられる。一方、シロガネコムギでは単相関分析では降水日数、降水量ともに穂発芽率との有意な相関はみられなかったものの、重回帰分析では子実含水率 70% 以降の降水日数が選択され、その標準偏回帰係数は農林 61 号と同様に子実含水率 50% から PM までの期間が最も高かったことから、降雨は休眠に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。降雨の影響と品種間差については、穂や子実の濡れ時間による評価や、雨よけ試験等を行いさらに検討する必要がある。

登熟の進行に伴う発芽率の推移を示した報告は非常に多いが、その多くは登熟の進度や各種の処理の時期を開花後日数や成熟期前日数等の日数で表している。また“成熟期”の定義が文献により異なる場合もあり、栽培条件が大きく異なる場合に結果を相互に比較するには注意が必要である。日数は特に計算の必要がなく使いやすい登熟段階の指

標であるが、子実含水率は子実の生理的な状態をより反映した指標になると考えられる。本試験では子実含水率 10% の幅で登熟期間を区分したが、これは気温の経過にもよるがおおよそ 7 日の幅に相当する。これよりも細かい幅で分割し解析している報告もあるが、子実含水率の推定誤差が約 2% あることを考慮すれば、10% の幅で区分することは妥当であると考えられる。

本州の温暖地で登熟期間にあたる 5 月は気温の変動の大きい月であり、特に 5 月下旬から 6 月上旬は梅雨入り時期と重なり天候が不順になることが多い。このため、感受性の高い子実含水率 50% から PM までの気象条件は年次や作期により大きく変化すると考えられる。穂発芽の発生危険度を推定する重回帰式の決定係数は農林 61 号で 0.624、シロガネコムギで 0.601 とやや低いものの、出穂期からの日平均気温を用いる子実含水率の推定方法と併せて、穂発芽発生の危険度が予測できる可能性が示された。本試験では一定の条件で人工的に発生させた穂発芽率を解析の対象としたが、今後はこの結果をもとに、実際の穂発芽発生の危険度を気象値から予測する方法を開発する予定である。

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」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。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

- Biddulph, T.B., J.A. Plummer, T.L. Setter and D.J. Mares 2007. Influence of high temperature and terminal moisture stress on dormancy in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 103 : 139-153.
- Fukushima, A., O. Kusuda, M. Furuhashi and H. Nakano 2005. Phenological development and its relationship with temperature of winter wheat Iwainodaichi for early sowing in the southwestern part of Japan. *Plant Prod. Sci.* 8 : 152-156.
- Gualano, N.A. and R.L. Benech-Arnold 2009. Predicting pre-harvest sprouting susceptibility in barley : Looking for “sensitivity windows” to temperature throughout grain filling in various commercial cultivars. *Field Crops Res.* 114 : 35-44.
- Hagemann, M.G. and A.J. Cihra 1984. Evaluation of methods used in testing winter wheat susceptibility to preharvest sprouting. *Crop Sci.* 24 : 249-253.
- 八田浩一・関昌子・小田俊介 2010. コムギ (*Triticum aestivum* L.) 種子の遭雨による外皮部の様相変化と小麦粉色相への影響. *日作紀* 79 : 137-141.
- 平野寿助 1971. 小麦登熟期の遭雨による品質低下とその機作に関する研究. *中国農業試験場報告 A* 20 : 27-78.
- 星野次汪・友岡憲彦・福永公平・瀬谷秀文 1989. コムギの穂発芽検定法と難穂発芽性遺伝子源の系譜. *育種* 39 : 365-372.
- 金井源太・玉城勝彦・長崎祐司・佐竹隆顕 2006. 普通コンバインによる高水分小麦収穫－作業条件による品質改善の可能性－. *農業機械* 68 : 87-95.

- King, R.W. 1993. Manipulation of grain dormancy in wheat. *J. Exp. Bot.* 44 : 1059-1066.
- 桑原達雄・前田浩敬 1979. コムギの穂発芽性に関する研究. 1. 登熟中の温度条件と休眠形成の関係. *育種* 29(別 1): 26-27.
- Lunn, G.D., P.S. Kettlewell, B.J. Majour and R.K. Scott 2002. Variation in dormancy duration of the U.K. wheat cultivar Hornet due to environmental conditions during grain development. *Euphytica* 126 : 89-97.
- Nakamura, S., F. Abe, H. Kawahigashi, K. Nakazono, A. Tagiri, T. Matsumoto, S. Utsugi, T. Ogawa, H. Handa, H. Ishida, M. Mori, K. Kawaura, Y. Ogiwara and H. Miura 2011. A Wheat homolog of MOTHER OF FT and TFL1 acts in the regulation of germination. *Plant Cell* 23 : 3215-3229.
- 中津智史 2000. 北海道における低アミロ小麦の発生とその要因に関する研究. *北海道立農業試験場報告* 93 : 1-60.
- 中津智史・松永浩・沢口敦史・柴田秀己・道場琢也 2006. コムギ品種ホクシンを対象とした成熟期前後の気象条件による低アミロコムギの発生予測手法. *日作紀* 75 : 90-96.
- 中園江・井上君夫・脇山恭行・大原源二 2006. コムギの登熟過程の温度反応に基づく生理的成熟期と子実含水率の推定法. *日作紀* 75 : 526-534.
- 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.
- Nielsen M.T., McCrate A.J., Heyne E.G. and G.M. Paulsen 1984. Effect of weather variables on preharvest sprouting of hard white winter wheat. *Crop Sci.* 24 : 779-782.
- 奥野林太郎・岩田幸良・鮫島良次・中津智史・道場琢也・柴田秀己 2005. 衛星リモートセンシングおよび気象メッシュデータを活用した小麦適期収穫支援システム. 平成16年度新しい研究成果－北海道地域－ : 37-41.
- Osanai, S., Y. Amano and D.J. Mares 2005. Development of highly sprouting tolerant wheat germplasm with reduced germination at low temperature. *Euphytica* 143 : 301-307.
- Reddy, L. V., R. J. Metzger and T. M. Ching 1985. Effect of temperature on seed dormancy of wheat. *Crop Sci.* 25 : 455-458.
- 佐藤大和・内村要介・緒方武文・松江勇次・陣内暢明 2004. 九州におけるコムギ粉の最高粘度の年時間変動とその登熟ステージ別の降雨との関係. *日作紀* 73 : 23-28.
- Strand, E. 1989. Studies on seed dormancy in small grain species. II. Wheat. *Norwegian J. Agricultural Sci.* 3 : 101-115.
- Suzuki, T., T. Matsuura, N. Kawakami and K. Noda 2000. Accumulation and leakage of abscisic acid during embryo development and seed dormancy in wheat. *Plant Growth Regulation* 30 : 253-260.
- 土屋俊雄 1982. 穂発芽の国際シンポジウムから. *北海道立農試資料* 15 : 33-48.
- Torada, A. and Y. Amano 2002. Effect of seed color on seed dormancy in different environments. *Euphytica* 126 : 99-105.
- Walker-Simmons, M. 1987. ABA levels and sensitivity in developing wheat embryos of sprouting resistant and susceptible cultivars. *Plant Physiol.* 84 : 61-66.
- Walker-Simmons, M. and J. Sesing 1990. Temperature effects on embryonic abscisic acid levels during development of wheat grain dormancy. *J. Plant Growth Regulation* 9 : 51-56.
- 柳沢朗 2004. 穂発芽耐性評価と穂発芽性極難系統の育成. *冬作物研究* 4 : 13-20.

Effects of Meteorological Factors During Grain Development on Pre-harvest Sprouting in Wheat : KOU NAKAZONO, HIROYUKI OHNO, HIROE YOSHIDA and HIROSHI NAKAGAWA (*National Agricultural Research Center, Tsukuba 305-8666, Japan*)

Abstract : The effects of meteorological factors during grain filling and maturation on pre-harvest sprouting in wheat were examined by glasshouse and field trials for several years using two cultivars with different levels of sprouting tolerance, 'Norin 61' (resistant) and 'Shirogane-Komugi' (susceptible). The risk of pre-harvest sprouting was evaluated from the percentage of kernels germinated from the spikes detached and incubated for 10 days at 15°C. Germination percentages at harvest time were positively correlated with temperature during maturation in both trials. However, in the field trials there were large variations in germination percentages and the correlation coefficient was smaller than that in the glasshouse trials. A simple statistical correlation analysis revealed that the average temperature from the time with 50 kernel water content to physiological maturity significantly correlated with pre-harvest sprouting. In addition, germination percentage increased with increasing number of rainy days during that period but there was no significant correlation between germination percentage and total precipitation in Norin 61. These results indicate that the high temperature and prolonged wetness just before rapid decline of kernel moisture increase the potential risk of pre-harvest sprouting.

Key words : Dormancy, Germination, Kernel water content, Precipitation, Pre-harvest sprouting, Temperature, Wheat.