

埼玉県におけるコムギの生育，収量および収量構成要素と 気象変動の関係

誌名	日本作物學會紀事
ISSN	00111848
著者名	箕田,豊尚 小林,和彦 平沢,正
発行元	日本作物學會
巻/号	84巻3号
掲載ページ	p. 285-294
発行年月	2015年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



埼玉県におけるコムギの生育、収量および収量構成要素と気象変動の関係 —畑作試験圃場におけるコムギ「農林 61 号」の 45 年間の栽培試験に基づく解析—

箕田豊尚^{1,2)}・小林和彦³⁾・平沢正²⁾

(¹⁾ 埼玉県農業技術研究センター, (²⁾ 東京農工大学連合農学研究科, (³⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科)

要旨：年次変動する気象条件や進行する温暖化に対応したコムギ栽培技術を開発していくためには、気象変動がコムギの生育と収量に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。研究の端緒として、埼玉県農業試験場の畑圃場において、1951 年から 1996 年まで 45 年にわたり同一条件で栽培したコムギ「農林 61 号」の生育、収量および収量構成要素と生育期間の気象の関係を解析した。その結果、年数経過に伴って出穂期、成熟期のいずれも早まり、出穂期から成熟期までの日数が延長したが、稈長、収量および収量構成要素には年数経過に伴う一定の変化傾向は認められなかった。これらの生育・収量変化と気象変動との関係を重回帰モデルによって解析したところ、播種から出穂期までの日数は 11~4 月の平均気温と有意の負相関があり、播種から成熟期までの日数は 11~4 月の平均気温および 5 月の平均気温と有意の負相関のあることが見いだされた。稈長は 1~4 月の総降水量と 3 月の平均気温と有意の正相関があった。収量は 11~12 月の平均気温および出穂期から成熟期までの総降水量と有意の負相関が見いだされ、これは 1 穂粒数が 11~12 月の平均気温および 5 月の降水量と有意の高い負相関があるためであった。本研究の結果から、変動する気象条件下で安定して多収を得るためには、1 穂粒数を安定して確保するための冬季の栽培技術と 5 月の圃場排水技術の開発、そして倒伏を防ぐための稈長制御技術の開発が重要であることが推察された。

キーワード：温暖化、気象変動、重回帰分析、収量、収量構成要素、生育反応、長期試験、畑作コムギ。

埼玉県は日本のコムギの主要生産地の一つであり、コムギは水稻との二毛作における冬作の土地利用型作物として重要な位置を占めている。2010 年に策定された食料・農業・農村基本計画では、日本の食料自給率向上に向けてコムギの生産量を 2008 年の 88 万 t から 2020 年の 180 万 t へと大幅に引き上げることとされている。この目標を達成するためには作付面積の拡大と合わせて単収を増加させることが重要である。コムギ単収は日本全体で見れば統計開始時から右肩上がりに増加しているが、都府県に限ると 2000 年の 388 kg/10a をピークに横ばいから減少傾向である（農林水産省 2013）。さらに天候等により収量の年による変動が大きい。収量の安定と増加のためには、現在の栽培条件を的確に把握し適切な栽培技術や品種の開発が必要となる。

作物の栽培条件の中で気象は重要な環境要因の一つである。特に近年は温暖化が問題となっている。日本の年平均気温は、過去 100 年あたり約 1.15℃ の割合で上昇しており、将来予測によると 2100 年には全国的に年平均気温が 2.5~3.5℃ 上昇する。また、温暖化による気温上昇は低緯度より高緯度、夏季より冬季が大きいと予測されている（気象庁 2013）。日本のコムギ栽培に温暖化が及ぼす影響については、中園 (2011) が播種~出穂期の短縮化、西尾ら (2011) が登熟日数の短縮と千粒重の減少、福嶋 (2012) が 1 穂小花数の増加と千粒重の減少を報告している。埼玉県においてコムギではまだ温暖化に起因すると考えられる問題は顕在化していないが、最近 10 年間 (2003~2012 年) のコム

ギの収量の推移は明らかな減収傾向を示しており変動も大きい（農林水産省 2013）。気象変動に対する小麦の生育や収量の反応を明らかにしておくことは、コムギの安定多収に向けた栽培技術の改良とともに、温暖化に対応した栽培技術の開発にも重要である。前報（箕田 2010）では、埼玉県農業試験場において 1951 年から 1996 年まで同一品種、同一栽培条件で行われた長期試験結果を整理し、コムギの播種から出穂期までの温度の上昇が収量を低下させることおよび出穂期以降の降水量の増加が収量を低下させることを単相関分析によって明らかにした。本報では、コムギの生育と収量に気象変動が及ぼす影響のしくみを詳細に明らかにするために、月別の気象と生育、収量および収量構成要素の関係を重回帰モデルで解析した。

材料と方法

1. 試験圃場と試験期間

本研究の圃場試験は 1951 年 11 月~1996 年 6 月の 45 年間にわたって、埼玉県熊谷市の埼玉県農業試験場（現埼玉県農業技術研究センター玉井試験場）の細粒褐色低地土（新戒統）の畑圃場において行われた。圃場は 1000 m² で、45 年間同一であった。夏作はなく、圃場を半分に分け、オオムギとコムギで 1 年ごとにローテーションした。品種はコムギ「農林 61 号」を用いた。試験は 1 品種 1 区制とし、1 区は 84 m²~120 m² でそれを 4 ブロックに分割しサンプリングを行った。

2. 栽培方法

播種は11月1日を播種基準日として、おおよそ前後3日以内に行った。整地後、基肥として麦わら堆肥を750 gm²となるよう敷きこみ、その上に硫安、過リン酸石灰、塩化カリを、N、P₂O₅、K₂O成分でそれぞれ5.6 gm²、6.0 gm²、4.5 gm²施用した。

埼玉県農業試験場で前年に採種した種子を用いた。試験開始時は唐箕選および塩水選（比重1.22）で選種した種子を用い、1979年から遺伝的なばらつきがより少ない原種を用いた。条間60 cmとし、各条溝の上に播種板を用いて幅12 cm、3条、播種間隔4.2 cmの千鳥穴をあけ、1粒点播で播種した。播種量は108粒 m²であった。追肥として、2月下旬～3月中旬に、硫安をN成分で1.9 gm²施用した。

種子消毒は試験開始時からしばらくは冷水温浸法及び薬剤浸漬処理を行ったが、1979年から種子粉衣に切り替えた。生育期間中は、必要に応じて、うどんこ病、赤かび病に対して薬剤散布を行った。

除草は試験開始時から1978年までは中耕を兼ね人力で生育期に3回行った。1979年以降は除草剤を用い播種後土壌処理を行い、併せて中耕を生育期に3回行った。土入れは1979年までは2月11日にじょれんで1回行い、踏圧は1979年まで1月11日と2月11日頃に人力で行った。1980年以降は土入れ、踏圧を行わなかった。

3. 収量と収量構成要素

稈長、穂長は子実成熟期に各ブロックから1畦10個体について計測しその平均値とした。穂数は子実成熟期に各ブロックから1畦50 cmの間を計測しその平均値とした。

収量調査は子実成熟期に各ブロックから5 m²を採取し、1週間程度乾燥した後、脱穀して唐箕にかけて屑粒等を除き、子実を乾燥箱に広げて天日乾燥後に子実収量を求めた。子実水分の高い場合は平型乾燥機で通風乾燥した。1979年から子実収量は水分換算12.5%とした。1穂粒数は収量を穂数と1粒重の積で除して算出した。

4. 気象データと統計解析方法

気温、降水量、日照時間は熊谷地方気象台の観測値（気象庁1951～1996）を用いたが、1960年以前の日平均気温および日照時間は埼玉県気象月報（熊谷地方気象台1951～1960）を用いた。出穂期までの平均気温および降水量は、播種期を11月1日として日ごとのデータを使用し算出した。

試験期間45年間の気象の長期変化傾向の解析は、試験開始年からの経過年次を説明変数とし、播種期である11月から翌年5月までの各月および月を組み合わせた種々の期間内の平均気温、総降水量および総日照時間（以下、単に平均気温、降水量、日照時間という）を目的変数として、単回帰分析を行った。また、播種から成熟期までの全生育期間、播種から出穂期までの期間および出穂から成熟期ま

での期間と各期間の平均気温、降水量および日照時間についても単回帰分析を行った。生育および収量構成要素に対する気象要素の影響の評価には、重回帰分析モデルを作成し、最も適合度の高いモデルを求めた。収量は穂数、1穂粒数、1粒重の3つの収量構成要素の積で表される。積のままでは1つの収量構成要素に及ぼす気象要素の影響が他の収量構成要素の値に依存するので、結果の解釈が容易でない。ところが、収量を対数変換すれば、対数変換した収量構成要素の和で表せるので、気象要素の影響を収量構成要素ごとに解釈できる。そこで対数変換した収量構成要素を気象要素で回帰することにより、収量と収量構成要素に及ぼす気象変動の影響を解析した。統計ソフトはJMP® 10.0.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)を用いた。

結 果

1. 長期試験の結果

第1表に、埼玉県農業試験場畑圃場で実施した長期試験の結果を示した。1952年から1996年までの45年間で、出穂期は4月5日～5月4日の範囲にあり、成熟期は6月6日～6月21日の範囲にあった。これを1月1日を1とした日数、DOY (day of year) で示すと、出穂期DOYは95日～125日の範囲にあり、成熟期DOYは157日～172日の範囲にあった。稈長は76 cm～101 cmの間にあり、収量は313 gm²～596 gm²の間で変動した。穂数、1粒重、1穂粒数はそれぞれ398本 m²～684本 m²、27.3 g～44.6 g、17.9粒～31.9粒の範囲にあった。

2. 気象要素の長期変化

(1) 気温

経過年数に対し有意な線形の上昇傾向を示したのは、1月の平均気温 ($r=0.352$) と5月の平均気温 ($r=0.339$) であった（第2表）。1月の平均気温の試験期間中の平均は3.34℃で気温の上昇率は0.027℃/年、5月の平均気温の試験期間中の平均は17.56℃で気温の上昇率は0.021℃/年であった。また複数月の組み合わせでは11～1月 ($r=0.362$)、2～5月 ($r=0.343$)、11～5月 ($r=0.411$) など、1月と5月のどちらかあるいは両方を含む期間の平均気温は、すべて有意な線形の上昇傾向を示した。逆に1月も5月も含まない11～12月、2～3月、2～4月、3～4月の期間の平均気温には、有意な相関関係はなかった。生育の全期間の平均気温 ($r=0.445$) は、前報（箕田2010）で示したように有意な線形の上昇傾向を示した。

(2) 降水量

第2表に示した通り、どの期間においても経過年数と有意な相関関係は認められなかった。

(3) 日照時間

第2表に示した通り、出穂から成熟期間の日照時間 ($r=0.337$) のみ、経過年数に対し有意な線形の増加傾向を示した。

第1表 45年間の長期試験で得られたコムギ「農林61号」の生育、収量および収量構成要素の結果。

年次	出穂期 (月/日)	成熟期 (月/日)	出穂期 DOY (日) ¹⁾	成熟期 DOY (日) ¹⁾	出穂期から成熟期 まで日数 (日)	稈長 (cm)	収量 (gm ⁻²)	穂数 (m ⁻²)	1粒重 (10 ⁻³ g)	1穂粒数 ²⁾
1952	4/29	6/15	120	167	47	97.6	533	633	40.4	20.8
1953	4/28	6/15	118	166	48	99.3	449	-	40.1	-
1954	4/18	6/13	108	164	56	96.4	470	417	40.7	27.7
1955	4/20	6/12	110	163	53	99.7	505	600	35.4	23.8
1956	4/21	6/9	112	161	49	92.4	413	513	36.5	22.0
1957	4/26	6/15	116	166	50	89.3	467	490	37.5	25.4
1958	4/22	6/11	112	162	50	81.3	388	407	42.3	22.6
1959	4/20	6/9	110	160	50	94.9	395	497	41.9	19.0
1960	4/20	6/12	111	164	53	82.2	397	463	36.5	23.5
1961	4/21	6/7	111	158	47	94.1	584	543	41.4	26.0
1962	4/21	6/11	111	162	51	76.4	402	527	37.1	20.6
1963	4/20	6/16	110	167	57	89.1	420	543	30.9	25.0
1964	4/16	6/8	107	160	53	88.1	473	503	37.1	25.3
1965	4/26	6/15	116	166	50	80.4	376	447	36.1	23.3
1966	4/25	6/21	115	172	57	96.4	457	487	37.2	25.2
1967	4/19	6/10	109	161	52	92.2	356	447	-	-
1968	4/20	6/12	111	164	53	80.4	456	447	36.3	28.1
1969	4/20	6/11	110	162	52	84.0	345	450	35.8	21.4
1970	4/28	6/18	118	169	51	86.1	425	460	35.2	26.2
1971	4/18	6/15	108	166	58	90.8	555	500	37.0	30.0
1972	4/22	6/10	113	162	49	100.6	557	463	39.9	30.1
1973	4/13	6/11	103	162	59	91.9	470	559	34.2	24.6
1974	4/26	6/17	116	168	52	84.1	417	409	34.2	29.8
1975	4/24	6/12	114	163	49	90.4	552	541	36.8	27.7
1976	4/22	6/14	113	166	53	90.5	409	477	31.6	27.2
1977	4/25	6/11	115	162	47	95.8	512	537	33.6	28.4
1978	4/17	6/9	107	160	53	90.4	313	538	27.3	21.3
1979	4/11	6/7	101	158	57	97.4	525	560	36.7	25.5
1980	4/14	6/6	105	158	53	90.0	423	523	32.5	24.9
1981	4/24	6/16	114	167	53	97.5	503	544	36.2	25.6
1982	4/13	6/8	103	159	56	88.3	482	398	42.7	28.3
1983	4/20	6/8	110	159	49	95.1	428	470	34.9	26.1
1984	5/4	6/18	125	170	45	88.2	596	513	37.3	31.2
1985	4/25	6/11	115	162	47	98.6	539	477	35.5	31.9
1986	4/25	6/13	115	164	49	92.0	505	558	34.3	26.4
1987	4/19	6/6	109	157	48	85.1	473	508	36.4	25.6
1988	4/19	6/9	110	161	51	92.3	458	684	37.4	17.9
1989	4/9	6/12	99	163	64	97.9	402	404	37.8	26.3
1990	4/5	6/6	95	157	62	99.5	328	461	32.5	21.9
1991	4/11	6/7	101	158	57	94.0	447	468	39.6	24.1
1992	4/8	6/9	99	161	62	94.8	372	474	33.3	23.6
1993	4/8	6/9	98	160	62	98.0	524	471	42.2	26.4
1994	4/12	6/6	102	157	55	91.1	323	469	37.2	18.5
1995	4/9	6/7	99	158	59	91.2	418	475	39.7	22.2
1996	4/15	6/14	106	166	60	85.4	485	415	44.6	26.2

¹⁾ DOYは1月1日を1とした時の出穂期あるいは成熟期までの日数を示す。

²⁾ 1穂粒数は、収量を(穂数×1粒重)で除して求めた。

³⁾ 収量、穂数および千粒重は前報(箕田2010)を引用した。

第2表 コムギ生育期間中平均気温、降水量および日照時間の試験期間中平均値と経過年数との相関係数.

月 / 期間	月 / 期間平均気温		月 / 期間降水量		月 / 期間日照時間	
	平均値 (°C) ¹⁾	相関係数 ²⁾	平均値 (mm) ¹⁾	相関係数 ²⁾	平均値 (h) ¹⁾	相関係数 ²⁾
11月	10.61	0.240	56.0	0.103	176.3	-0.015
12月	5.70	0.211	26.7	-0.143	205.7	0.052
1月	3.34	0.352*	27.1	-0.157	216.5	-0.085
2月	4.04	0.194	38.8	0.020	194.5	-0.002
3月	7.15	0.161	63.9	0.149	205.4	-0.173
4月	12.90	0.271	82.8	-0.022	190.6	0.149
5月	17.56	0.339*	113.9	-0.173	202.4	-0.105
11~12月	8.16	0.267	82.7	0.015	382.0	0.023
11~1月	6.55	0.362*	109.9	-0.051	589.5	-0.032
11~2月	5.93	0.355*	148.7	-0.035	793.1	-0.028
11~3月	6.17	0.343*	212.6	0.035	998.5	-0.109
11~4月	7.29	0.370*	295.4	0.021	1189.1	-0.048
11~5月	8.76	0.411**	409.3	-0.078	1391.5	-0.090
12~1月	4.52	0.337*	53.9	-0.207	422.2	-0.028
12~2月	4.36	0.324*	92.7	-0.137	616.8	-0.022
12~3月	5.01	0.312*	156.6	-0.038	822.2	-0.107
12~4月	6.63	0.344*	239.4	-0.040	1012.8	-0.045
12~5月	8.84	0.392**	353.3	-0.145	1215.2	-0.091
1~2月	3.69	0.320*	66.0	-0.076	411.1	-0.052
1~3月	4.85	0.299*	129.9	0.037	616.5	-0.148
1~4月	6.86	0.337*	212.7	0.015	807.1	-0.072
1~5月	9.00	0.390**	326.6	-0.103	1009.5	-0.124
2~3月	5.60	0.207	102.8	0.123	399.9	-0.125
2~4月	8.03	0.273	185.5	0.070	590.5	-0.038
2~5月	10.41	0.343*	299.4	-0.062	792.9	-0.095
3~4月	10.02	0.271	146.7	0.075	396.0	-0.049
3~5月	12.54	0.358*	260.6	-0.074	598.4	-0.108
4~5月	15.23	0.365*	196.7	-0.166	393.0	0.007
播種~成熟期	9.37	0.445**	461.4	-0.228	1450.0	-0.130
播種~出穂期	6.84	0.251	265.9	-0.077	1120.8	-0.291
出穂~成熟期	17.55	0.071	195.5	-0.215	328.5	0.337*

¹⁾ 試験期間 45 年間の期間内平均値.

²⁾ 数値右側の * は 5% 水準, ** は 1% 水準で有意であること, 無印は有意でないことを示す.

3. コムギの生育と収量の長期変化

(1) 生育

第1図に単回帰分析結果を示す通り, 出穂期と成熟期は有意な早期化を示した(A, B). 一方, 出穂から成熟期までの期間は有意に長くなった(第1図C). 出穂期 DOY の試験期間中の平均は 109.6 日で出穂期が経年的に日数が短くなった早期化率は 0.26 日 / 年, 成熟期 DOY の試験期間中の平均は 162.6 日で成熟期の早期化率は 0.10 日 / 年だった. そして出穂から成熟期までの日数の試験期間中の平均は 56.1 日で経年的に日数が長くなった延長率は 0.16 日 / 年だった. 稈長は経過年数に対し有意な相関はなかった ($r=0.127$).

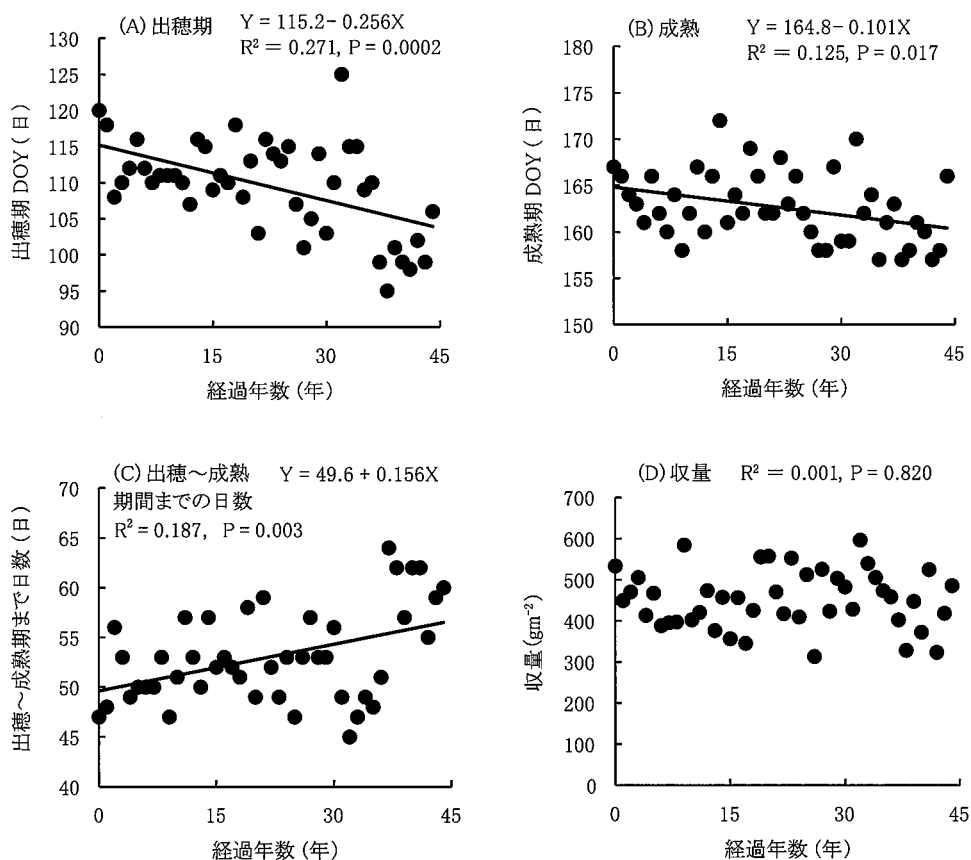
(2) 収量と収量構成要素

子実収量は経過年数に対し有意な相関はなく(第1図D), m^2 あたり穂数 ($r=-0.127$), 1粒重 ($r=-0.089$), 1穂粒数 ($r=0.097$) のいずれも経過年数に対して有意な相関はなかった.

4. 気象要素とコムギの生育および収量との関係

(1) 気象要素と発育速度

出穂期 DOY は, 11~4月までのすべての月(第3表)の平均気温および11~4月までのいずれの期間の平均気温とも, 有意な負の相関があった. 特に, 11~4月までの期間の平均気温 ($r=-0.830$) および12~4月までの期間の平均気温 ($r=-0.834$) との相関が最も高かった. また出穂



第1図 経過年数と出穂期，成熟期，出穂～成熟期間までの日数および収量の単回帰分析。

- 1) 1951年を0年とした。
- 2) R^2 は決定係数，P はモデルの有意確率を示す。

期 DOY は1月の日照時間 ($r=0.356$) と有意な相関があり，複数月では11～1月までの日照時間 ($r=0.410$) と最も高い相関があった。降水量との間にはどの時期とも有意な相関はなかった。最も適合度が高いモデルを第4表に示す。本モデルでは11～4月の期間の平均気温が高いほど出穂期が早まる。

成熟期 DOY は，11～5月までのすべての月の平均気温，および11～4月までのいずれの期間の平均気温とも，有意な負の相関があった(第3表)。特に11～4月までの期間の平均気温 ($r=-0.676$)，11～5月までの期間の平均気温 ($r=-0.740$)，12～5月までの期間の平均気温 ($r=-0.722$)，3～5月までの期間の平均気温 ($r=-0.716$) と相関が高かった。また成熟期 DOY は1月の日照時間 ($r=0.328$) と有意な相関があり，複数月では11～1月の日照時間 ($r=0.432$) と最も高い相関があった。降水量との間にはどの時期とも有意な相関はなかった。最も適合度が高いモデルを第4表に示す。本モデルでは11～4月の期間の平均気温が高く，5月の平均気温が高いほど成熟期が早まる。なお，11～4月の平均気温と5月の平均気温との間の相関は低く ($r=0.251$)，両者はほぼ独立に成熟期に影響する。

第3表 出穂期 DOY および成熟期 DOY と気象要素の相関係数。

気象要素	期間	単相関係数 ²⁾	
		出穂期 ³⁾	成熟期
平均気温	11月	-0.299*	-0.369*
	12月	-0.553***	-0.574***
	1月	-0.611***	-0.369*
	2月	-0.626***	-0.335*
	3月	-0.562***	-0.450**
	4月	-0.489***	-0.504***
	5月	-	-0.556***
	11～4月	-0.830***	-0.676***
	11～5月	-	-0.740***
	12～4月	-0.834***	-0.647***
	12～5月	-	-0.722***
3～5月	-	-0.716***	
日照時間	1月	0.356*	0.328*
	11～1月	0.410*	0.432**

¹⁾ 相関係数が有意な気象要素および月を示すとともに，複数月にまたがる期間は相関係数の絶対値が最も大きく，有意な期間を示した。

²⁾ 数値右側の*は5%水準，**は1%水準，***は0.1%水準で有意であることを示す。

³⁾ 出穂期の最遅が5/4のため，5月はほとんど影響がないことから5月を含む期間は-で示した。

第4表 出穂期および成熟期と気象要素の関係において最も適合度の高かった回帰モデル.

目的変数	説明変数	回帰係数 ¹⁾	係数のP値	係数の95%信頼区間 ²⁾	R ² ³⁾	モデルのP値
出穂期	切片	167.8	<.0001	[155.7, 179.9]	0.689	<.0001
	11~4月までの平均気温	-8.0	<.0001	[-9.6, -6.3]		
成熟期	切片	218.6	<.0001	[202.9, 234.3]	0.602	<.0001
	11~4月までの平均気温	-3.2	<.0001	[-4.3, -2.1]		
	5月平均気温	-1.9	0.0001	[-2.8, -1.0]		

¹⁾ 重回帰モデルの場合は偏回帰係数.

²⁾ 信頼区間は[下限, 上限]を示す.

³⁾ R²は決定係数, 重回帰モデルの場合は自由度調整済決定係数を用いた.

第5表 稈長, 収量, 1粒重および1穂粒数と気象要素の相関係数.

気象要素	期間	平均気温	降水量	日照時間	稈長	収量	1粒重	1穂粒数
平均気温	11月		0.477***	-0.368*	-0.011	-0.410**	-0.304*	-0.387*
	12月		0.361*	-0.375*	0.096	-0.383**	0.002	-0.518**
	3月		0.144	-0.393**	0.415*	-0.108	0.163	-0.116
	11~12月		0.452**	-0.372*	0.054	-0.471**	-0.172	-0.532**
降水量	2月	0.317*		-0.625***	0.467**	0.151	0.077	0.240
	3月	0.144		-0.616***	0.375*	-0.063	-0.074	-0.245
	4月	0.207		-	0.380*	0.013	-0.264	0.113
	1~4月	0.260		-0.662***	0.608***	0.042	-0.077	0.016
日照時間	1月	-0.473**	-0.622***		-0.267	0.038	-0.303*	0.149
	2月	-0.262	-0.625***		-0.319*	0.095	-0.058	0.044
	11~1月	-0.448**	-0.284		-0.302*	0.180	0.009	0.311*
	11~3月	-0.544***	-0.527***		-0.477**	0.173	-0.027	0.291
	4~5月	0.168	-0.258		-0.052	0.094	0.368*	0.060

1) 相関係数が有意な気象要素および月を示すとともに, 複数月にまたがる期間は相関係数の絶対値が最も大きく, 有意な期間を示した.

2) 数値右側の*は5%水準, **は1%水準, ***は0.1%水準で有意であること, 無印は有意でないことを示す.

(2) 気象要素と稈長

稈長は, 3月の平均気温 ($r=0.415$), 2月の降水量 ($r=0.467$), 3月の降水量 ($r=0.375$), 4月の降水量 ($r=0.380$), 2月の日照時間 ($r=-0.319$), 11~1月の日照時間 ($r=-0.302$) および 11~3月の日照時間 ($r=-0.477$) と有意な相関があり, 特に, 1~4月の期間の総降水量との相関が $r=0.608$ と最も高かった (第5表). 最も適合度が高かったモデルを第6表に示す. 本モデルでは 1~4月の降水量が多く, 3月の平均気温が高いほど, 稈が長くなる. なお, 2月の日照時間が2月の降水量と相関があった ($r=-0.625$) ため, 日照時間は本モデルに加えなかった.

5. 気象要素と収量, 収量構成要素

(1) 収量

収量は 11月の平均気温 ($r=-0.410$), 12月の平均気温 ($r=-0.383$) および 11~12月の期間の平均気温 ($r=-0.471$) と有意な負の相関を示した (第5表). 降水量および日照時間はいずれの期間でも有意な相関を示さなかった. 最もよく適合したモデルを第6表に示した. 降水量は

単独では有意な相関が無いが, 11~12月の期間の平均気温との組み合わせにより, 出穂期から成熟期までの総降水量が収量に負の影響を及ぼすことが示された.

(2) 収量構成要素

穂数はいずれの期間をとってもどの気象要素とも有意な相関はなかった.

1穂粒数は, 11月の平均気温 ($r=-0.387$), 12月の平均気温 ($r=-0.518$) および 11~12月の期間の平均気温 ($r=-0.532$) と有意な負の相関があり, 11~1月の日照時間 ($r=0.311$) と有意な正の相関があった (第5表). 降水量および日照時間はいずれの期間でも有意な相関を示さなかった. 最もよく適合したモデルでは, 第6表に示すように, 11~12月の期間の平均気温が低く, 5月の降水量が少ないと1穂粒数が多くなる.

1粒重は, 11月の平均気温 ($r=-0.304$), 1月の日照時間 ($r=-0.303$) と有意な負の相関があり, そして 4~5月の期間の日照時間 ($r=0.368$) と有意な正の相関があった (第5表). 最も適合したモデルでは, 第6表に示すように 4~5月の総日照時間が長くなると1粒重が大きくなる.

第6表 稈長および収量構成要素と気象要素の関係において最も適合度の高かった重回帰モデル.

目的変数	説明変数	回帰係数 ¹⁾	係数のP値	係数の95%信頼区間 ²⁾	R ² ³⁾	モデルのP値
稈長	切片	69.5	<.0001	[59.8, 79.3]	0.425	<.0001
	1~4月の総降水量	0.047	<.0001	[0.026, 0.067]		
	3月平均気温	1.7	0.017	[0.317, 3.006]		
収量	切片	7.2	<.0001	[6.7, 7.6]	0.366	<.0001
	11~12月の平均気温	-0.109	<.0001	[-0.156, -0.062]		
	出穂~成熟期の総降水量	-8.66e-4 ⁴⁾	0.001	[-1.37e-3, -3.61e-4]		
1粒重	切片	-3.7	<.0001	[-4.1, -3.4]	0.136	0.014
	4~5月の総日照時間	1.08e-3	0.014	[2.31e-4, 1.93e-3]		
1穂粒数	切片	4.1	<.0001	[3.7, 4.4]	0.375	<.0001
	11~12月の平均気温	-0.092	<.0001	[-0.131, -0.053]		
	5月の降水量	-8.66e-4	0.007	[-1.48e-3, -2.54e-4]		

¹⁾ 重回帰モデルの場合は偏回帰係数.

²⁾ 信頼区間は[下限, 上限]を示す.

³⁾ R²は決定係数, 重回帰モデルの場合は自由度調整済決定係数を用いた.

⁴⁾ 数値右側のe+nは数値×10のn乗であることを示す. 表中以下同じ.

考 察

1. 気象要素の経年変化とこれが生育、収量と収量構成要素に及ぼす影響

(1) 気象要素

コムギの生育期間中の気温は45年間で有意に上昇した. これは1月と5月の気温の上昇が顕著なためである. 埼玉県県の平均気温は1897年から2011年までの期間ではどの季節においても長期的に有意な上昇傾向を示しており(気象庁2012), 本試験期間では冬と春のみであるが, これと一致している. 埼玉県の降水量に関しては長期的にも有意な傾向はなく(気象庁2012), 本試験期間でも同様であった. 日照時間に関しては1899年から2012年の113年間では冬に長期的に有意な上昇傾向が認められているが(r=0.246), これよりも対象期間が半分以下と短い本試験期間ではこのような傾向は認められなかった.

(2) 発育と成長

出穂期は試験開始から終了までの45年間で11.5日早期化し, いっぽう成熟期は4.5日早期化しており(第1図), これらの変化は平均気温の上昇によると考えられた(第4表). 従来より, コムギ産地において近年(1983年~2005年)の気温上昇により生育期間(播種~出穂)が短縮していること(中園2011), 「農林61号」において播種期あるいは出芽期から出穂期までの日数と平均気温に有意な負の相関があること(飯塚ら1987, 中嶋ら1988), 「農林61号」を含むコムギ6品種の発育相が平均気温と高い負の相関関係のあること(江口・島田2000)など, 本研究と同様の結果が報告されてきた.

一方, 出穂期の早期化に比べると成熟期の早期化は緩やかであり, 出穂期から成熟期までの日数は45年間で7日間長くなった. 中園(2011)も, 出穂から収穫までの期間が短縮している産地はなく逆に関東を中心に登熟日数が増

加している産地もあるとしている. 出穂期から成熟期までの期間の総日照時間が増加しているが(第2表), 1日あたりの日照時間は経過年数に対して有意な相関はない(r=0.086)ので, 登熟期間の延長によりその間の総日照時間が増加したものと考えられる. また, 第4表に示した成熟期のモデルの11~4月の平均気温の回帰係数(-3.184)は, 出穂期のモデルの同じ回帰係数(-7.991)の約4割しかなく, 第1図で示した気温上昇にともなう成熟期の促進は出穂期の促進よりも小さい. また, それぞれの係数の95%信頼区間は成熟期のモデルで[-4.3, -2.1], 出穂期のモデルでは[-9.6, -6.3]であり明らかに出穂期のモデルの係数が大きいといえる. 「農林61号」では, 出穂期までの発育速度は温度上昇とともに直線的に増加するが, 出穂~成熟期の登熟過程では高温域で発育速度がむしろ低下すること(小林ら1991)が示されており, 温度域により発育促進効果は異なる. 登熟期間の気温は, 出穂までの気温よりも高く, そのために出穂が早まる割に成熟期が早まらず, 結果として登熟期間が延びたとも考えられる.

稈長には長期変化傾向はみられなかった. 稈長は1~4月の総降水量および3月の平均気温と有意な関係があったが(第5表), どちらの気象要素も経過年数に伴う変化傾向がなかったためと考えられた. 稈長に対する気象要素の影響について, 福嶋(2012)は作期試験の結果から高温ほどコムギの稈長が短くなるとしており, 田谷ら(1981)は3~4月に低温, 多照の年ほど長稈傾向が認められたとしている. これらに対して, 本研究の結果は3月の高温で稈長が長くなることを示したが, これは温度勾配チャンバー試験によって高温ほどコムギの草丈が長くなることを示したOh-eら(2006)の結果に近い. なお, 3月は関東においてコムギの茎立ち後最も稈長が伸長する時期にあたり, この時期の気温上昇は稈の伸長を促すと考えられる. 稈の伸長は, 1~4月の総降水量の増加によっても促される結果と

なったが、小柳・川口 (2009) は茨城県南部の水田圃場において土壌水分と草丈に有意な負の相関を認めている。この相反する結果は排水性の劣る水田圃場と異なり、本研究で用いた畑圃場は排水性が良いため土壌水分が過多になりにくいことが一因であると考えられる。また、この期間は降水量と日照時間に有意な負相関 (第5表) があるため、多雨による稈の伸長促進には低日射の影響も大きく関与している可能性がある。

(3) 収量と収量構成要素

収量には長期変化傾向がみられなかった。出穂から成熟期までの日数が延びると収量が増加すると一般的に考えられているが、本研究では登熟期間の長さとの相関は低かった ($r=-0.281$)。登熟期間の延長が収量を増加させる理由の一つとして、登熟期間の延長による千粒重の増加があげられる (Gibson and Paulsen 1999, 西尾ら 2011) が、本研究では千粒重の増加も認められなかった。収量は、出穂前に茎葉に蓄積され出穂後に穂へ再転流する同化産物量と、出穂後に同化されて穂に蓄積する同化産物量とで決まり、前者の再転流による同化産物量は収量の2~3割を占める (Gebbing and Schnyder 1999)。本研究では出穂が早まったために、出穂前に茎葉に蓄積された同化産物量は減少した可能性があり、その結果登熟期間が延びて増加した出穂後同化産物量の効果が相殺された可能性がある。

箕田 (2010) は前報で気温の上昇、そして出穂期から成熟期の降水量の増加により収量が低下することを示したが、さらに本研究によって収量に影響する要因が11~12月の平均気温と出穂期から成熟期までの総降水量であることが示された (第6表)。11~12月の平均気温も出穂期から成熟期までの総降水量も、長期変化傾向を示さなかったため (第2表)、年平均気温が長期的に上昇しつつあるにもかかわらず、コムギ収量に長期変化傾向がみられなかったものと考えられる。また、1 m²あたり穂数、1粒重、および1穂粒数のいずれも長期変化傾向を示さなかった。

2. 気象変動が収量と収量構成要素に及ぼす影響

従来、気温と収量に負の相関があること (近藤・飯塚 1979)、登熟期間中の降水量とコムギの収量に負の相関がみられること (安達 1952, 木村・田中丸 1999, 松江ら 2001, Nakagami 2004, 箕田 2010) などが知られていた。こうした相関の生じるしくみを、気象変動が収量構成要素に及ぼす影響から以下考察する。

穂数と気象要素との間に明確な関係は認められなかった。降水量の多い暖地では穂数と降水量に負の相関があることが認められているが (田谷ら 1981, 田中・大隈 1990)、関東では穂数と気象要素に明確な関係はこれまでも認められていない。

1穂粒数は11~12月までの平均気温が高くなるほど、また5月の降水量が多くなるほど減少した (第6表)。播種直後の11~12月平均気温が1穂粒数に影響を及ぼすしく

みとして、この時期の平均気温が高いと茎数の増加等により1月の生育量が大きくなることがあげられる。1月の幼穂の発育段階は、「農林61号」と秋播性程度の等しい「チクゴイズミ」についての豊田ら (2003) の観察結果に基づく有効積算温度から、本試験では1月の後半にはおおよそ小花の分化開始期からその前にあたると考えられる。Toyota (2001) は窒素追肥が小花の分化や発育を推進させるとしており、小花の分化開始期に茎数などの生育量が多いと窒素を消費することで小花の分化数が減少し、1穂粒数が減少することになるものと推察される。1穂粒数が決定する上でもう一つの重要な時期は開花2~3週間前である (Fischer and Stockman 1980, Brooking and Kirby 1981, Thorne and Wood 1987)。この時期の小花の生存率には穂の窒素含有率が深く関係する (Abbate 1995)。播種直後の高温により生育が旺盛となり土壌中の窒素を多く消費することによって、生育が進んだ開花2~3週間前に植物体の窒素含有率が低下し、それにより小花の生存率が低下する可能性が考えられる。

5月の降水量が多いと1穂粒数が減少することについては、降雨が多い時には日照時間も減少する。遮光処理により稔実小穂あたりの粒数が減少する (佐藤ら 1993) ことから、降雨の多い条件では日照時間が少なくなることによって1穂粒数が減少することが考えられる。また、開花直後から粒の成長が始まる時期に当たる5月の降雨が、赤かび病等を助長することで粒の充実を抑制したり1穂着粒数を減少させた (吉田・福岡 1964) 可能性もある。一方で多雨は土壌水分を介して地下部にも大きな影響を及ぼす。土壌水分の多い条件では、根系の発達不良、根の活性低下などを介して登熟期の葉の老化が促進される (Nakagami 2004)。さらに土壌水分が過多になると土壌の還元化が進行する (山崎 1952)。これらの影響による同化産物の減少が、1穂粒数の低下を引き起こすものと考えられる。

1粒重は4~5月の総日照時間が多いほど増加することが認められたが (第6表)、決定係数 ($R^2=0.115$) は低く他の要因も大きく関与していると考えられた。4~5月の期間は出穂前20日頃から出穂後40日頃にあたる。田谷ら (1981) は1粒重が登熟期間の日照時間と正の相関があることを示したが、本研究では出穂期から成熟期の日照時間と1粒重には相関が無かった ($r=-0.100$)。1粒重が登熟期間の平均気温と負の相関がみられることを Gibson and Paulsen (1999)、西尾ら (2011)、福嶌 (2012) が示しているが、本研究では気温との相関もみられなかった。なお、1粒重と穂数との相関も有意でなかった ($r=-0.259$)。

このような気象変動の収量構成要素に及ぼす効果が、全体として収量に影響する。第6表に示した1穂粒数のモデルの11~12月までの平均気温の回帰係数 (-0.092) を、収量のモデルの同期間の平均気温の回帰係数 (-0.109) と比べると、収量に及ぼす11~12月までの影響の大部分が1穂粒数への効果を通じて生じていることになる。同様

に出穂から成熟期間の総降水量が収量に及ぼす影響のほとんどが、5月の降水量が1穂粒数に及ぼす効果によると言える。すなわち、本研究で気象要素が収量に及ぼす影響は主として1穂粒数を通して生じたものと考えられる。

3. 今後のコムギ栽培への活用

以上の研究結果を踏まえて、年次変動する気象条件や進行する温暖化に対して、安定してコムギの収量を増加させていくための方策を考える。

地域気候モデルによる予測では平均気温は各期間・各地域において上昇し、降水量は東日本太平洋側で冬から春にかけて降水量が増加すると予測される(気象庁 2013)。また強雨の頻発によっても降水量が増加する(気象庁 2013)。多くの作物で予測されているように、このような気候変化は埼玉県のコムギ栽培にも大きな影響を及ぼす。本研究の結果より、気温上昇による収量の低下が主として1穂粒数の減少を通して起こることから、気象の年々変動と長期変化のいずれに対しても1穂粒数の確保が収量を安定させる上で重要となる。冬季温暖年、地球温暖化に伴う冬季気温の上昇に対しては、播種密度(川口 2001, 箕田 2011)、追肥時期(江口 1983, 倉井ら 1998, Toyotaら 2001)、耕深(川口 2001)などによって、1穂粒数を確保することが重要な対策となると考えられる。また本研究では穂数と1穂粒数に有意な負の相関($r=-0.321$)がみられたことから、1穂粒数を確保するためには穂数が過剰にならないような栽培方法が求められる。現在、追肥の時期や量は収量および子実タンパク含量の確保の点から定められているが、冬の温暖化に対応するためには1穂粒数の確保の視点からの検討も必要となる。

5月の降水量が多くても1穂粒数を維持するための対応策としては、排水の徹底が不可欠となる。とくに、土壤水分が高い場合、温暖化に伴って土壤温度が上昇すると土壤の還元化がすすむので、排水対策が一層重要となる(山崎 1952, Nakagamiら 2004)。排水によって稈長の伸長も抑制されると推察されるが、稈長には施肥も大きく影響する。茎立ち期追肥は収量を最も増加させると言われているが、この時期の追肥は稈長の伸長も大きく促進する。栃木県では茎立ち後20日に「農林61号」の追肥時期を設定(倉井ら 1998)している。生育状況を見て茎立ち期の追肥量を調節することや施肥時期をずらして茎立ち期後に追肥を行うなどして倒伏を防ぐことが必要である。

以上の結果は秋播性程度Ⅰの「農林61号」を供試して得られたものである。近年、関東地方では秋播性程度ⅠⅤの品種の導入が進んでいる。秋播性程度の大きい品種は幼穂の分化が遅く始まるので、11~12月の気温が高い年の1穂粒数の減少を回避できる可能性がある。このような品種についても、冬季の温度上昇が1穂粒数に及ぼす影響を詳細に検討する必要がある。また、冬季の高温による1穂粒数の減少の機構が明らかになれば、高温による影響の少な

い品種の開発に役立つ。5月の降雨の影響についても、そのしくみを明らかにすること、そして耐湿性の高い品種を育成することが、気象の年次変動と温暖化のどちらにも有効な対策となる。

本研究は、同一品種のコムギを45年間にわたってほぼ同じ方法で栽培した埼玉県農業試験場の調査結果に基づいているが、地域や作型が異なると気象変動の影響は異なる可能性がある(Lickerら 2013)。今後、他の地域で行われた長期圃場試験データを含めた解析を行うことにより、コムギに及ぼす気象変動の影響について、より一般性の高い知見を得ることが期待される。

謝辞：本研究では多くの埼玉県農業試験場職員の方々によって長期にわたり積み重ねられた試験成績を解析に使用させていただいた。また、試験成績のとりまとめにあたっては長い圃場試験を担当してこられた大塚一雄氏に貴重な情報の提供をいただいた。ここに記して深謝いたします。

引用文献

- Abbate, P.E., Andrade, F.H., and Culot, J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric.Sci. Camb.* 124: 351-360.
- 安達一明 1952. 気象と小麦の作況に関する一考察. *日作紀* 21: 162-163.
- Brooking, I.R. and Kirby, E.J.M. 1981. Interrelationships between stem and ear development in winter wheat: the effects of Norin 10 dwarfing gene, *Gai/Rht2*. *J. Agric. Sci. Camb.* 101: 337-344.
- 江口久夫 1983. 小麦の多収・良質化のための窒素施肥法. *農及園* 58: 790-794.
- 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.
- Fischer, R.A. and Stockman, Y.M. 1980. Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.): Responses to preanthesis shading. *Aust. J. Plant Physiol.* 7: 169-180.
- 福島陽 2012. 地球温暖化が日本におけるコムギの生育・収量に及ぼす影響-作期試験の解析を中心に-. *日作紀* 81: 83-88.
- Gebbing, T. and Schnyder, H. 1999. Pre-anthesis reserve utilization for protein and carbohydrate synthesis in grains of wheat. *Plant Physiol.* 121: 871-878.
- Gibson, L.R. and Paulsen, G.M. 1999. Yield component of wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. *Crop Sci.* 39: 1841-1846.
- 飯塚親広・新井文男・金井博 1987. 小麦の生育に及ぼす気温の影響と生育予測. *群馬農業研究 A 総合* 4: 45-50.
- 川口数美 2001. ムギ栽培の基礎理論Ⅰ 収量構成要素. 「*転作全書第一巻ムギ*」. 農文協, 東京. 175-194.
- 木村和義・田中丸重美 1999. 岡山県における小麦・大麦の作況指数変動に対する気象要素の影響. *岡大資生研報* 6: 13-19.
- 気象庁 1951~1996. 気象統計情報(熊谷). <http://www.data.jma.go.jp> (2009/1/29 閲覧).
- 気象庁 2013. 地球温暖化予測情報. <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html> (2014/5/6 閲覧).
- 気象庁 2012. 気候変化レポート2012-関東甲信・北陸・東海地方-.

- 18-20. http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/kikouhenka/index.html (2014/1/17 閲覧).
- 小林和弘・田村良文・小野祐幸・今井敏行 1991. ノンパラメトリックDVR法による小麦「農林61号」の生育ステージ予測. 群馬農業研究A 総合 8: 11-18.
- 近藤晃・飯塚親弘 1979. 小麦の作柄に及ぼす暖冬の影響. 群馬農試報 19: 1-6.
- 熊谷地方気象台 1951~1960. 埼玉県気象月報 (昭和27年~昭和35年).
- 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. 栃木農試研報 47: 1-12.
- Licker, R., Kucharik, C.J., Dore, T., Lindeman, M.J. and Makowski, D. 2013. Climatic impacts on winter wheat yields in Picardy, France and Rostov, Russia: 1973-2010. *Agric. For. Meteorol.* 176: 25-37.
- 松江勇次・陣内暢明・馬場孝秀・岩渕哲也・福島裕助・古庄雅彦 2001. 1999年における北部九州産麦類の多収要因の解析. 日作紀 70: 261-266.
- 箕田豊尚 2010. 埼玉県の畑作試験圃場におけるコムギ「農林61号」の収量に対する気象条件の影響. 日作紀 79: 62-68.
- 箕田豊尚 2011. 関東の栽培の特徴. 「作物栽培体系3 麦類の栽培と利用」. 小柳敦史・渡邊好昭編. 朝倉書店, 東京. 113.
- Nakagami, K., Ookawa, T. and Hirasawa, T. 2004. Effects of a reduction in soil moisture from one month before flowering through ripening on dry matter production and ecophysiological characteristics of wheat plants. *Plant Prod. Sci.* 7: 143-154.
- 中嶋泰則・井上隆雄・神谷杜夫・沢田守男 1988. 小麦「農林61号」の出芽期, 出穂期及び成熟期の予測. 愛知農総試研報 20: 121-127.
- 中園江 2011. 小麦作に対する温暖化の影響解明と評価法の開発. 農林水産技術会議事務局研究成果 483: 213-216.
- 西尾善太・伊藤美環子・田引正・中司啓二・長澤幸一・山内宏昭・広田知良 2011. 高温による小麦の減収要因. 北海道農研研報. 69: 15-21.
- 農林水産省大臣官房統計部 2013. 作物統計作況調査麦類. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html (2013/11/17 閲覧).
- Oh-e, I., Saitoh, K., and Kuroda, T. 2006. Effects of rising temperature on growth, yield and dry-matter production of winter wheat. *Sci. Fac. Agr. Okayama Univ.* 95: 57-62.
- 小柳敦史・川口健太郎 2009. 茨城県南部の水田圃場における土壌水分とコムギの草丈の関係-2 年延べ26圃場の調査結果-. 日作紀 78: 363-370.
- 佐藤暁子・末永一博・川口敷美 1993. コムギの穂数及び穂の諸形質に及ぼす時期別遮光処理の影響. 日作紀 62: 206-210.
- 田中浩平・大隈光善 1990. 小麦農林61号に及ぼす気象の影響と生育予測. 福岡農総試研報 A-10: 39-42.
- 田谷省三・荒木均・野中舜二 1981. コムギ「農林61号」の収量および諸形質に及ぼす気象条件の影響. 日作九支報 48: 15-18.
- Thorne, G.N. and Wood, D.W. 1987. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. *Ann. Bot.* 59: 413-426.
- Toyota, M., Tsutsui, I., Kusutani, A., and Asanuma, K. 2001. Initiation and development of spikelets and florets in wheat as influenced by shading and nitrogen supply at the spikelet phase. *Plant Prod. Sci.* 4: 283-290.
- 豊田正範・楠谷彰人・浅沼興一郎 2003. 温暖地における小麦主茎の葉, 小穂および小花の分化数成立過程のモデル解析. 日作紀 72: 450-460.
- 山崎伝 1952. 畑作物の湿害に関する土壌科学的並に植物生理学的研究. 農研技報 B1: 1-98.
- 吉田美夫・福岡寿夫 1964. 小麦作の災害に関する研究: IV. 長雨による1963年産小麦の筑後における被害様相. 日作九支報 22: 15-18.

Effects of Climatic Changes on Growth, Yield, and Yield Components of Winter Wheat Cultivar 'Norin 61' across 45 Years: Analysis of an Experimental Record in an Upland Test Field of Saitama Prefecture, Japan : Toyotaka MINODA^{1, 2)}, Kazuhiko KOBAYASHI³⁾ and Tadashi HIRASAWA²⁾ (¹⁾*Saitama Agric. Tech. Res. Cent., Kumagaya 360-0102, Japan;* ²⁾*Grad. Sch. of Agr., Tokyo Univ. of Agric. and Tech.;* ³⁾*Grad. Sch. of Agric. and Life Sci., The Univ. of Tokyo*)

Abstract : We analyzed the effects of climatic fluctuations on wheat (*Triticum aestivum*) cultivar 'Norin 61' grown by the same cultivation method on an experimental field in Saitama Prefecture from 1951 to 1996. The heading and maturity had become earlier and the number of days from heading to maturity increased during the 45 years. No trends were observed, however, in the culm length, yield, or yield components. Multiple-regression analysis was performed on the relationships between climatic fluctuations and the wheat growth and yield across the study period. The number of days from seeding to heading was significantly reduced by increase in mean air temperature from November to April. The number of days from seeding to maturity was also significantly reduced by the increase in mean air temperature for the same period and in May. The culm length was significantly increased under higher total precipitation from January to April and higher mean air temperature in March. Yield was reduced by higher mean air temperature from November to December and greater precipitation in the period from heading to maturity. The yield reduction was attributed to the reduced number of grains per spike due to the increased mean air temperature from November to December and increased precipitation in May. These results highlighted the number of grains per spike as a critical trait for stable wheat production against climatic fluctuations.

Key words : Climatic fluctuation, Global warming, Growth response, Long-term experiment, Multiple-regression analysis, Yield, Yield components, Wheat.