

## ダイアレル交配による小麦製パン特性および 大麦精麦特性の組合せ能力とヘテロシス

吉川 亮<sup>\*1)</sup>・中村 和弘<sup>\*2)</sup>・伊藤美環子<sup>\*3)</sup>

**抄 録**：品質特性が異なる小麦・大麦の品種・系統を用いて完全ダイアレル交配（小麦 6×6、9×9、大麦 5×5）を行い、F<sub>1</sub> (F<sub>2</sub>種子) における小麦製パン特性および大麦精麦特性の一般組合せ能力 (GCA)、特定組合せ能力 (SCA)、狭義の遺伝率およびヘテロシスを調査した。小麦の製パン特性においては、GCA分散はほとんどの特性で有意であった。一方、SCA分散は小麦粉蛋白含量、ミキソグラム特性などは有意であったが、多くの特性は有意でなかった。GCA:SCA (GCA分散/SCA分散) はほとんどの特性で2以上の高い比率を示し、相加的遺伝子効果の方が非相加的遺伝子効果より非常に大きかった。高分子量グルテニンサブユニット5+10を持つ「Palo Duro」、「Recital」、「ハルイブキ」および「東北221号」はファリノグラムまたはミキソグラム特性で優れたGCA効果を示した。また、「ハルイブキ」と「東北221号」は製パン適性各特性のGCA効果も高かった。狭義の遺伝率は製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ファリノグラムのDTとVV、ミキソグラム特性で0.71~0.88と高く、パン総合評価点も0.66とやや高かった。ヘテロシスは6×6ダイアレル交配のファリノグラム特性で特に大きかった。

大麦の精麦特性では、GCA分散はほとんどの特性で有意であったが、SCA分散は有意な特性はなかった。GCA:SCAはすべての特性で4以上を示し、相加的遺伝子効果の重要性が示唆された。「シンジュボシ」は搗精時間、搗精白度、炊飯白度などの特性で最も優れたGCA効果を示した。狭義の遺伝率は搗精白度、精麦のL\*、炊飯白度および糊白度で0.81~0.89と高かった。ヘテロシスの程度は搗精時間、搗精白度で大きかった。

**キーワード**：小麦、大麦、育種、一般組合せ能力、特定組合せ能力、相加的遺伝子効果、狭義の遺伝率、ヘテロシス、製パン適性、精麦適性

### Combining Ability and Heterosis in Diallel Crosses for Bread-making Qualities in Wheat and Pearled Grain Qualities in Barley : Ryo YOSHIKAWA<sup>\*1)</sup>, Kazuhiro NAKAMURA<sup>\*2)</sup> and Miwako ITO<sup>\*3)</sup>

**Abstract** : Combining ability variances and effects, we investigated narrow sense heritabilities and heterosis for wheat bread-making quality and barley pearled grain quality in F<sub>1</sub>s (F<sub>2</sub> seeds) of 6x6 and 9x9 complete diallel crosses of wheat and a 5x5 complete diallel cross of barley.

In wheat, general combining ability (GCA) variances were significant in most bread-making traits. In contrast, specific combining ability (SCA) variances were not significant, except some traits of flour protein content, mixogram results (Ab, D, A), dough handling score and crumb color of bread-making quality, and the like. GCA:SCA (GCA variance/SCA variance) was greater than 2 in most bread-making traits. Therefore, the importance of additive gene effect was indicated in their inheritance. Varieties "Palo Duro", "Recital", "Haruibuki" and "Tohoku 221" with high molecular glutenin subunits 5+10 showed excellent effects of GCA in farinogram results (DT, Stab, VV) or mixogram results (D, A). Moreover, "Haruibuki" and "Tohoku 221" showed excellent effects of GCA in bread-making qualities. Narrow sense heritability was high in the flour yield, flour protein content, sedimentation value, farinogram results (DT, VV), mixogram results (Ab, D, A) and water absorption

\* 1) 現・農研機構 中央農業総合研究センター (NARO Agricultural Research Center, Tsukuba, Ibaraki 305-8666, Japan)

\* 2) 現・農研機構 九州沖縄農業研究センター (NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, Chikugo, Fukuoka 833-0041, Japan)

\* 3) 現・農研機構 北海道農業研究センター (NARO Hokkaido Agricultural Research Center, Memuro, Hokkaido 082-0081, Japan)

score of bread-making quality (0.71~0.88), and also was moderately high in the bread-making quality score (0.66). Mid-parent heterosis (MPH) was particularly high in farinogram characteristics, except Ab.

In barley, GCA variances were significant in most pearling quality traits, but SCA variances were not significant in any traits. GCA:SCA was greater than 4 in all traits, and the importance of additive gene effect in their inheritance was suggested. Variety "Shinjuboshi" showed the best effects of GCA in the important traits such as pearling time, pearled barley whiteness and boiled barley whiteness. Narrow sense heritability was high in pearled grain whiteness, L\* of pearled grains, boiled grain whiteness and paste whiteness (0.81~0.89). MPH was high in pearling time and pearled grain whiteness.

**Key Words** : Wheat, Barley, Breeding, General combining ability, Specific combining ability, Additive gene effect, Narrow sense heritability, Heterosis, Bread-making quality, Pearled barley quality

## I 緒 言

東北農業研究センター作物機能開発部麦育種研究室（現・畑作園芸研究領域畑作物育種担当）では、寒冷地向けの小麦・大麦の育種を行っている。特に近年は小麦育種、大麦育種ともに品質に重点化して選抜が行われ、小麦では製粉特性、製めん適性および製パン適性、大麦では精麦適性および炊飯適性が優れた、加工適性の高い品種を育成することが重要になってきている。しかし、これらの品質特性は一般に量的形質であり、小麦の製粉およびベーキング（製パン適性等）品質の遺伝は、収量性の遺伝と同様に非常に複雑であるため、品質の構成要素を整理して、各構成要素の遺伝を別々に分析する必要がある（Poehlman 1987）。

育種においては、第一に交配母本の選定と交配組合せが重要である。品種の組合せ能力は、Griffing (1956) の方法によって一般組合せ能力と特定組合せ能力が算出できる。一般組合せ能力は交配組合せの親品種の平均的成績を表して相加的遺伝分散の割合を示し、一方、特定組合せ能力はF<sub>1</sub>両親の一般組合せ能力だけでは説明できない表現型の残りの部分を表す（Brown and Caligari 2008）。また、一般組合せ能力分散は相加的遺伝分散ばかりでなく、相加的×相加的遺伝分散の一部を含むが、特定組合せ能力分散は優性分散の全てとその残りはエピスタシス分散を含む（Roy 2000）。

小麦・大麦組合せ能力の報告については、出穂期、稈長、穂長、穂数、収量等の生理・生態的特性に関するものが多くあるが、小麦の製粉性、小麦粉品質、製パン適性等に関する報告は少なく（Perenzin *et al.* 1992、Borghini *et al.* 1988、Borghini and Perenzin

1994、Barnard *et al.* 2002 など）、製パン適性の官能評価まで検討した報告は全くない。また、大麦精麦適性の組合せ能力の報告は全くない。

そこで、本研究では、高品質の小麦・大麦品種を育成するための参考資料を得るため、東北農業研究センター麦育種研究室で交配母本によく用いられている小麦・大麦品種・系統を用いてダイアレル交配を行い、小麦製パン特性および大麦精麦特性の組合せ能力とともにヘテロシスを調査した。

## II 材料と方法

### 1. 材料

小麦は、製粉特性、小麦粉品質特性および製パン適性が異なる品種・系統を用いて、1998年（年次は収穫年、以下同じ）は6×6、1999年は9×9のいずれも完全ダイアレル交配を行った。1998年交配の親として、東北農業研究センター（以下、東北農研）育成の「コユキコムギ」、「ゆきちから」、「東北195号」の3品種・系統と、外国育成の「Palo Duro」、「Recital」、「SK-26」の3品種の計6品種・系統を用いた。また、1999年交配の親は、東北農研育成の「ナンプコムギ」、「コユキコムギ」、「ハルイブキ」、「ゆきちから」、「東北168号」、「東北212号」、「東北215号」、「東北221号」および「さび保20」の9品種・系統を用いた（Table 1）。1998年交配親の「Palo Duro」、「Recital」と1999年交配親の「ハルイブキ」、「東北221号」の計4品種・系統は高分子量グルテニンサブユニット5+10（以下、HMW-GS 5+10）を持つが、未調査の「東北168号」を除くその他の品種・系統はこれを持たない。また、1999年交配親のうち、「東北212号」はW<sub>x</sub>-A1、W<sub>x</sub>-B1の2つのW<sub>x</sub>蛋白質が欠失している低アミロースタイ

ブの系統であるが、その他の品種・系統はWx蛋白質の欠失はなく正常なアミロース含量を示す。ダイアレル交配により1998年交配は36組合せ、1999年交配は81組合せの交配種子 (F<sub>1</sub>種子) を得た。

大麦は、1999年に精麦適性の異なる六条大麦「ミ

ノリムギ」、「シンジュボシ」、「会津6号」、「Banong」および「盛系C-262」の5品種・系統 (Table 2) を用いて、5×5の完全ダイアレル交配を行い、25組合せの交配種子 (F<sub>1</sub>種子) を得た。

以上の小麦・大麦親品種・系統の選定に当たって

**Table 1** Pedigree, country of origin, and main quality characteristics in the parents of wheat varieties using diallel crosses.

Year	Varieties	Pedigree	Origin	Kernel hardness	Flour yield (%)	Flour protein content (%)	Sedimentation value (ml)	High molecular weight glutenin subunit composition			Glu-1 quality score	Absorption (%)	Development time (min)	Bread-making quality score †
								A1	B1	D1				
1999	Tohoku 195	Tohoku 157 / Tosan 12	Japan	Hard	68.1	16.1	55.8	1	7+9	2+12	7	65.6 ‡	6.4 ‡	-
	Palo Duro	4*Tascosa / Norin	USA	Hard	65.3	15.3	67.5	2*	7+8	5+10	10	69.6 ‡	23.9 ‡	-
	Yukichikara	Tohoku 141 / Sabikei 23	Japan	Hard	68.0	14.7	51.5	1	7+8	4+12	7	64.1 ‡	6.9 ‡	-
	Koyukikomugi	Tohoku 126(Hanagasakomugi) / Yukichabo	Japan	Hard	66.0	14.6	51.0	1	7+9	2+12	7	67.7 ‡	6.7 ‡	-
	Recital	Mexique - 267 (R - 267) / 9369	France	Hard	64.5	12.4	44.5	2*	6+8	5+10	8	64.5 ‡	19.0 ‡	-
	SK - 26	Partizanka / Skopjanka // SK 302	Yugoslavia	Hard	57.6	14.8	60.0	1	7+9	2+12	7	67.4 ‡	6.2 ‡	-
LSD (5%)					3.4	0.8	2.8	-	-	-	-	2.8	7.8	
2000	Nanbukomugi	Norin 33 / Norin 27	Japan	Soft	62.2	15.7	67.0	1	7+8	4+12	7	70.0 ¶	2.7 ¶	68.0
	Koyukikomugi	Tohoku 126(Hanagasakomugi) / Yukichabo	Japan	Hard	67.8	13.7	47.3	1	7+9	2+12	7	76.0 ¶	3.1 ¶	68.1
	Tohoku 168	Tohoku 135 / Tohoku 129	Japan	Hard	66.6	10.8	35.5	-	-	-	-	64.0 ¶	4.6 ¶	65.9
	Haruibuki	Stozher / Tohoku 195	Japan	Hard	67.5	15.1	57.3	1	7+9	5+10	9	74.0 ¶	9.8 ¶	80.8
	Tohoku 212	Kanto 107 / Tohoku 187	Japan	Hard	67.9	15.6	55.0	2*	7+8	15kD+12	?	77.0 ¶	3.4 ¶	63.5
	Yukichikara	Tohoku 141 / Sabikei 23	Japan	Hard	66.4	15.6	50.5	1	7+8	4+12	7	76.0 ¶	3.2 ¶	71.3
	Tohoku 215	SK - 26 / Morikei b - B6500	Japan	Hard	66.6	16.7	52.5	1	7+9	2+12	7	77.0 ¶	3.4 ¶	71.5
	Tohoku 221	Monopol / (Stozher / Tohoku 195)F3 - 8	Japan	Hard	70.8	15.6	66.5	1	7+9	5+10	9	75.0 ¶	6.1 ¶	80.5
	Sabiho 20	Aobakomugi / Agent // 6*Aobakomugi	Japan	Soft	59.4	17.9	61.5	1	17+18	2+12	8	77.0 ¶	2.6 ¶	78.0
	LSD (5%)					4.6	0.9	7.2	-	-	-	-	2.8	1.4

Note. 1) Year refers to the harvest year of the parent.

2) †: Bread-making score (100-point full marks) = Water absorption score (20-point full marks) + Dough handling score (20-point full marks) + Total score of sensory evaluation (60-point full marks) .

3) ‡: Frarinogram, ¶: Mixogram.

**Table 2** Pedigree, country of origin, and main pearled grain quality traits in the parents of barley varieties.

Year	Varieties	Pedigree	Origin	55% pearled grain		50% pearled grain		
				Pearling time (sec)	Whiteness (%)	Whiteness of boiled grain (%)	Polyphenol content (mg/g)	Paste whiteness (%)
2000	Minorimugi	Tosankawa 1 / Kougenmugi	Japan	466	38.6	38.6	0.229	39.9
	Banong	unknown	unknown	577	35.3	44.4	0.209	45.5
	Aizu 6	Kenyoshi 1 / Iwateomugi 1	Japan	492	33.1	36.6	0.213	40.5
	Shinjuboshi	Tohokukawa 30 / Shunrai	Japan	446	44.1	43.6	0.216	45.0
	Morikei C-262	Tosankawa 91 / Miyukioomugi	Japan	445	40.5	42.1	0.209	45.3
	LSD (5%)				27.2	2.20	2.04	0.026

Note. 1) Year refers to the harvest year of the parent.

2) 55% pearled grain and 50% pearled grain present the grain of 55% and 50% yield pearled using the barley pearler (Satake corporation, Model TM-05).

3) Whiteness of 55% pearled grain, whiteness of boiled grain, and paste whiteness were measured using the whiteness (Kett Electric meter Laboratory, Model C-300).

4) Paste whiteness was measured using a paste sample cooled to room temperature after pasting property measurement by Rapid ViscoAnalyser.

は、①実際の品種育成の交配母本によく利用されている品種・系統であること、②品質特性が大きく異なり、またその年次間変動が小さく安定していること、③特定の品種に系譜が偏らないこと、④成熟期の差が小さいこと、を考慮して選定した。

## 2. 栽培法

以上の小麦・大麦交配種子は、東北農研試験圃場に秋播栽培してF<sub>1</sub>植物を養成した。小麦6×6ダイアレルは1999年、小麦9×9ダイアレルおよび大麦5×5ダイアレルは2000年に収穫して所定の種子を得た。F<sub>1</sub>の栽培法は、畦幅70 cm、株間12 cm、条間15 cmの二条千鳥1粒播による畦立栽培で、播種期は1999年が9月28日、2000年が9月24日のいずれも適期播とした。施肥量は石灰50kg/10a、重過リン酸石灰55kg/10aとともに、元肥は1999年ではN、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O各5.6、18.9、14.0 kg/10a、2000年ではN、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O各6.4、21.6、16.0 kg/10a施用し、追肥は両年とも4月上旬にNのみを2kg/10a施用した。開花期頃(6月上旬)にプロピコナゾール乳剤1000倍液を散布し、赤かび病防除を1回行った。一区面積は1999年が0.6㎡、2000年が0.7㎡で、反復数は2反復とし、乱塊法で試験区を配置した。

出穂期後の生育概況は、両年とも登熟期間中の天候は平年並で、縞萎縮病、うどんこ病、赤さび病の発生は少なく、赤かび病の発生は薬剤防除により発生がほとんどみられなかった。また、成熟期頃の降雨はなく、登熟は良好であった。

## 3. 品質試験法

### 1) 小麦

品質試験は1999年、2000年の各材料ともに各試験区別に行った。製粉試験は農林水産技術会議事務局(1968)の方法に準じて、ブラベンダーテストミルを用いて行い、製粉歩留を調査した。製粉試験で採取したA粉(上級小麦粉)について、1999年材料は小麦粉蛋白含量、高分子量グルテニンサブユニット(以下、HMW-GS)、セディメンテーション値およびファリノグラム、2000年材料は小麦粉蛋白含量、HMW-GS、セディメンテーション値、アミロース含量、ミキソグラムおよび製パン適性を調査した。小麦粉蛋白含量は近赤外分光分析機で測定した。アミロース含量はJuliano(1971)に準じた方法で測定した。HMW-GSはBietz and Wall(1972)によるSDSポリアクリルアミド電気泳動法で泳動後、その構成をBlackman and Payne(1987)、Payne *et al.*

(1987)の方法により調査した。セディメンテーション値とファリノグラムは農林水産技術会議事務局(1968)に従い測定したが、ファリノグラムとしてマイクロファリノグラムを用い、A粉量は10gとした。ミキソグラムはA粉量10gを用いて、機械付属のマニュアルに従い、吸水率(Ab)、生地形成時間(D)(生地を捏ね始めてから生地抵抗が最大に達するまでに要する時間)および面積(A)(グラフの立ち上がりからDの5分後の間で囲われる図形の面積)を調査した。そして、製パン適性は中種生地法によるA粉70gを用いた吉川ら(2011)の方法で調査し、官能評価は6~7名のパネラーで行った。

### 2) 大麦

品質試験は各試験区別に行った。搗精試験は原麦180gを供試して試験用小型搗精機(サタケ社製TM-05)を用いて行い、55%搗精および50%搗精における搗精時間、搗精麦の白度および色を調査した。なお、55%搗精、50%搗精は、それぞれはじめの原麦重の55%、50%歩留まで搗精したことを表す。通常55%搗精で完全搗精となるが、縦溝の深い材料は50%搗精でないと完全搗精に達しない場合があるので、55%搗精と50%搗精の両方を行った。

炊飯試験は、完全搗精の50%搗精麦30gを100 mlのピーカーに入れ、水を入れて箸でかき混ぜてよく洗った後、純水を100mlの目盛りまで入れ、4℃での定温器内に14時間静置し吸水させた。その後取り出して110 mlの目盛りまで純水を加え、蒸し器で35分間炊飯した。肉眼観察による炊飯麦の色の調査は炊飯後直ちに行い、色の良否を「ミノリムギ」を標準にして3(良)~0(中:「ミノリムギ」)~-3(不良)で調査した。炊飯麦の白度は炊飯後1~2時間後に、色は炊飯後2~3時間後にそれぞれ測定した。

また、ポリフェノール含量は50%搗精麦の粉碎粉を用いて、プルシアンブルー法(栃木県農業試験場栃木分場ビール麦醸造用品質改善指定試験地 1998)で測定した。アミロース含量は小麦と同じJuliano(1971)に準じた方法で測定した。また、ラピッドビスコアナライザー(以下、RVA)による糊化特性は、その粉碎粉3.5gに純水25 mlを加えて測定した。また、糊白度はRVA調査終了後、糊の入った測定容器を冷水に浮かべて冷却し、RVA終了1~2時間後に測定した。

上記の搗精白度、炊飯白度および糊白度は玄米・

精米白度計（ケット科学研究所製C-300）により測定した。また、搗精麦および炊飯麦の各色は分光測色計（コニカミノルタ社製CM-3500d）により、L\*（明度）、a\*（赤み程度）およびb\*（黄色み程度）をそれぞれ測定した。

#### 4. データ解析法

はじめに親自殖を含めた完全ダイアレル交配について、小麦・大麦品質の各特性を分散分析した。

組合せ能力の分析はGiffing（1956）のMethod 3およびModel 1の方法（親の自殖を含まない不完全ダイアレル）により、小麦・大麦品質の各特性について一般組合せ能力（以下、GCA）と特定組合せ能力（以下、SCA）の計算からGCA効果とSCA効果を算出した。これら効果はいずれも正逆交雑の平均値で示した。なお、この組合せ能力の分析方法はMethod 4およびModel 1の方法と同様に、組合せ能力および遺伝子効果の不偏な推定値を得るのに最も適している（Shattuck *et al.* 1993）。

一つの特性が主に相加的または非相加的（優性）遺伝子効果で制御されているかを調査するため、Giffing（1956）の分散分析におけるGCA、SCAの各分散の比、すなわちGCA:SCAはGCA分散/SCA分散により算出した。また、GCAとSCAの相対的重要性を知るために、相加的遺伝子作用（Additive gene action）はBarker（1978）の方法に従い、次式により算出した。

$$\text{相加的遺伝子作用} = 2 \times \text{GCA分散} / (2 \times \text{GCA分散} + \text{SCA分散})$$

なお、相加的遺伝子作用は1に近づくほど、ほとんどGCA単独によることを示す（Barker 1978）。

小麦・大麦品質特性について、親のGCA推定値と親の値との関係を確かめるため、両者の相関係数を算出した。

小麦・大麦品質特性の狭義の遺伝率は、Frey and Horner（1957）の方法により、各特性における両親の平均値とF<sub>1</sub>値の相関係数を算出した。この相関係数は狭義の遺伝率と等しい。

ヘテロシスの算出は鶴飼（2002）に従い、平均親ヘテロシス（Mid-parent heterosis, 以下MPH）および優良親ヘテロシス（High-parent heterosis, 以下HPH）は次式により算出した。

$$\text{MPH} (\%) = 100 \times (F_1 - \text{MP}) / \text{MP}$$

$$\text{HPH} (\%) = 100 \times (F_1 - \text{HP}) / \text{HP}$$

ただし、F<sub>1</sub>は各交配組合せの値、MPは両親の平

均値、HPは優良親の値を示す。また、これら両特性が優性効果にどの程度支配されているかを知るため、各特性とSCA効果との相関係数を算出した。

### Ⅲ 結 果

#### 1. 小麦製パン特性の組合せ能力とヘテロシス

F<sub>1</sub>および親を含めた製粉歩留、小麦粉品質特性および製パン適性の分散分析表をTable 3に示した。遺伝子型（Genotype）では、1999年産は全特性で、2000年産は内相の色（Crumb color）を除いた全特性で有意差が認められた。反復（Replication）においては、1999年産ではファリノグラム（Farinogram）のAb（吸水率）のみで有意差が見られたに過ぎないが、2000年産では逆にミキソグラム（Mixogram）のAbを除いた全特性で有意差が認められた。

Table 4に、F<sub>1</sub>のみを用いた製粉歩留、小麦粉品質および製パン適性における組合せ能力の分散分析、GCA:SCA並びに相加的遺伝子作用を示した。GCA分散は1999年のファリノグラムのStab（生地安定度）とWk（生地の弱化度）を除いたすべての特性で有意であった。一方、SCA分散では、1999年は小麦粉蛋白含量（Flour protein content）、2000年は製粉歩留（Flour yield）、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値（Sedimentation value）、ミキソグラムのAb（吸水率）、D（生地形成時間）、A（面積）および製パン適性の作業性（Dough handling score）・内相の色（Crumb color）で有意であったが、その他の特性は有意でなかった。正逆交雑差（REC）は2カ年ともすべての特性で有意でなかった（このため、REC効果の表は省略した）。GCA:SCAは2カ年の全特性とも1以上で、1999年StabとWk、2000年の製パン適性の作業性、表皮の焼色（Crust color）および内相の色を除いた特性は4以上の高い値を示した。また、相加的遺伝子作用もGCA:SCAと同様に、1999年StabとWk、2000年の製パン適性の作業性、表皮の焼色および内相の色を除いた特性は0.9以上の高い値を示した。

製粉歩留、小麦粉品質および製パン適性のGCA効果をTable 5に示した。各特性でイタリアック体数字は特性が優れる方から上位2位（1999年材料）、上位3位（2000年材料）を、その内下線が付いたものは1位を表す。1999年材料のGCA効果では、HMW-GS 5+10を持つ「Palo Duro」は製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ファリ

**Table 3** Analysis of variance for milling characteristics, flour qualities and bread-making qualities of F<sub>1</sub> progeny (F<sub>2</sub> seeds) and the parents in wheat.

Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Farinogram					
							Ab	DT	Stab	Wk	VV	
1999	6×6	Replications	1	3.74	0.00	2.00	3.97 *	6.01	2.57	0.06	9.39	
		Genotypes	35	10.93 **	2.17 **	135.63 **	4.93 **	139.05 **	101.66 **	978.91 **	360.92 **	
		Error	35	1.54	0.08	6.62	0.55	4.75	29.67	187.26	15.99	
Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Amylose content	Mixogram				
								Ab	D	A		
2000	9×9	Replications	1	45.23 **	1.39 *	296.06 **	4.21 **	0.01	3.29 **	138.89 **		
		Genotypes	80	13.90 **	4.08 **	137.84 **	2.46 **	21.02 **	4.56 **	177.32 **		
		Error	80	1.80	0.20	12.10	0.22	1.24	0.29	25.05		
Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Bread-making quality								
				Water absorption score	Dough handling score	Loaf volume	Specific loaf volume	Sensory evaluation				
								Loaf volume	Crust color	Crust thickness	Symmetry of shape	
2000	9×9	Replications	1	8.31 *	12.39 **	48291.4 **	4.70 **	43.46 **	3.92 *	6.32 **	4.53 **	
		Genotypes	80	12.07 **	5.17 **	4507.4 **	0.28 **	4.06 **	0.87 *	0.32 **	0.32 **	
		Error	80	1.45	2.32	1871.2	0.13	1.68	0.59	0.19	0.17	
Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Bread-making quality								
				Sensory evaluation				Bread-making quality score				
				Crumb color	Fineness of cell structure	Crumb firmness	Flavor and aroma	Taste	Total score			
2000	9×9	Replications	1	5.34 **	19.57 *	8.77 **	8.00 **	25.44 **	284.81 **	335.12 **		
		Genotypes	80	0.15	0.98 **	0.40 **	0.80 **	2.51 **	19.45 **	60.27 **		
		Error	80	0.11	0.55	0.16	0.44	0.75	9.38	16.15		

Note. 1) Ab: Absorption, DT: Dough development time, Stab: Stability, Wk: Weakness, VV: Valorimeter value, D: Development time, A: Area.

2) Bread-making score = Water absorption score + Dough handling score + Total score of sensory evaluation.

3) \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

ノグラムのDT、StabおよびVVという多くの特性において上位2位までの品種に入っており、セディメンテーション値とファリノグラムVVでは正の最大値を示した。また、同じくHMW-GS 5+10を持つ「Recital」も、ファリノグラムのDT、StabおよびVVは上位2位までの品種に入っており、DTとStabは正の最大値を示した。一方、HMW-GS 5+10を持たない「東北195号」は製粉歩留と小麦粉蛋白含量で正の最大値を示し、またファリノグラムWkでは負の最大値を示した。また、「SK-26」はファリノグラムAbで正の最大値を示した。

次に、2000年産材料のGCA効果においても、HMW-GS 5+10を持つ「ハルイブキ」はミキソグラムと製パンのうち、ミキソグラムのDとA、製パン

適性の吸水性、作業性、官能評価のパン体積を除く全特性において、正の最大値を示し、小麦粉蛋白含量、パン体積 (Loaf volume)、比容積 (Specific loaf volume) および官能評価のパン体積の各特性も上位3位以内に入った。また、同様にHMW-GS 5+10を持つ「東北221号」も製粉歩留で正の最大値を示し、セディメンテーション値、ミキソグラムのDとA、製パン適性の表皮の焼色を除く全特性で上位3位以内に入った。HMW-GS 5+10を持たない「さび保20」は小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値およびミキソグラムのAbで正の最大値を示した。また、同じくHMW-GS 5+10を持たない「ナンブコムギ」は、製パン適性のパン体積、比容積および官能評価のパン体積において正の最大値を示

**Table 4** Analysis of variances in combining ability analysis for milling characteristics, flour qualities and bread-making qualities in wheat.

Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Farinogram				
							Ab	DT	Stab	Wk	VV
1999	6×6	GCA	5	19.74 **	4.73 **	362.38 **	8.36 **	306.70 *	162.43	1229.44	666.03 *
		SCA	9	1.85	0.57 **	26.80	0.87	56.35	62.53	675.63	153.23
		REC	15	1.19	0.14	19.50	0.69	22.53	56.50	966.58	65.27
		Error	30	9.22	1.98	144.39	3.81	139.75	126.20	1001.38	331.85
		GCA:SCA Additive gene action		10.70 0.96	8.37 0.94	13.52 0.96	9.62 0.95	5.44 0.92	2.60 0.84	1.82 0.78	4.35 0.90

Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Amylose content	Mixogram		
								Ab	D	A
2000	9×9	GCA	8	33.55 **	13.85 **	350.41 **	6.32 **	76.39 **	14.19 **	585.61 **
		SCA	27	7.08 **	0.76 **	62.81 **	0.37	2.75 **	0.95 **	28.36 **
		REC	36	1.77	0.21	6.92	0.23	0.85	0.38	11.90
		Error	72	11.67	3.70	132.91	1.86	19.47	4.02	165.46
		GCA:SCA Additive gene action		4.74 0.90	18.12 0.97	5.58 0.92	17.25 0.97	27.76 0.98	14.88 0.97	20.65 0.98

Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Bread-making quality							
				Water absorption score	Dough handling score	Loaf volume	Specific loaf volume	Sensory evaluation			
								Loaf volume	Crust color	Crust thickness	Symmetry of shape
2000	9×9	GCA	8	35.98 **	9.79 *	14628.4 **	0.86 **	13.17 **	1.48 *	0.87 **	0.95 **
		SCA	27	2.75	3.27 *	1355.9	0.09	1.22	0.60	0.17	0.14
		REC	36	3.05	1.51	1612.1	0.10	1.45	0.43	0.16	0.10
		Error	72	10.89	6.77	6178.2	0.40	5.56	1.29	0.57	0.50
		GCA:SCA Additive gene action		13.08 0.96	2.99 0.86	10.79 0.96	9.95 0.95	10.79 0.96	2.46 0.83	5.23 0.91	6.91 0.93

Year	Diallel cross	Sources	Degree of freedom	Bread-making quality						
				Sensory evaluation				Bread-making quality score		
				Crumb color	Fineness of cell structure	Crumb firmness	Flavor and aroma	Taste	Total score	
2000	9×9	GCA	8	0.32 **	2.88 **	1.29 **	2.23 **	8.33 **	61.55 **	189.94 **
		SCA	27	0.10 *	0.42	0.13	0.36	0.56	7.15	17.28
		REC	36	0.05	0.37	0.14	0.33	1.11	6.29	12.48
		Error	72	0.30	1.69	0.61	1.24	3.17	29.80	71.97
		GCA:SCA Additive gene action		3.28 0.87	6.78 0.93	10.25 0.95	6.16 0.92	14.77 0.97	8.61 0.95	10.99 0.96

Note. 1) GCA=General combining ability, SCA=Specific combining ability, REC=Reciprocal.  
 2) GCA:SCA= GCA variance/SCA variance, Additive gene action=2×GCA variance/ (2×GCA variance+SCA variance).  
 3) \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

**Table 5** General combining ability effects for milling characteristics, flour qualities and bread-making qualities in wheat.

Year	Diallel cross	Varieties	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Farinogram				
						Ab	DT	Stab	Wk	VV
1999	6 × 6	Tohoku 195	<u>1.59</u>	<u>0.74</u>	<u>0.48</u>	-0.30	-6.35	-2.35	<u>-11.38</u>	-7.81
		Palo Duro	<u>1.26</u>	<u>0.53</u>	<u>12.57</u>	0.21	<u>7.42</u>	<u>3.78</u>	-4.50	<u>11.31</u>
		Yukichikara	1.24	0.26	-1.36	-0.82	-2.26	-0.81	<u>-5.31</u>	-0.81
		Koyukikomugi	-1.02	-0.31	-5.86	<u>0.86</u>	-2.30	-2.33	11.69	-6.13
		Recital	-1.11	-1.37	-5.36	-1.26	<u>7.54</u>	<u>5.77</u>	-1.06	<u>9.94</u>
		SK-26	-1.96	0.15	-0.46	<u>1.31</u>	-4.04	-4.06	10.56	-6.50
		LSD (5%)	0.95	0.17	2.45	0.38	2.52	3.43	14.04	3.48

Year	Diallel cross	Varieties	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Amylose content	Mixogram		
							Ab	D	A
2000	9 × 9	Nanbukomugi	-2.40	0.40	<u>5.64</u>	-0.28	-1.65	-0.63	-4.23
		Koyukikomugi	<u>0.90</u>	-1.02	-6.68	0.40	-0.29	-0.97	-7.44
		Tohoku 168	<u>1.51</u>	-2.12	-7.07	<u>0.58</u>	-5.36	<u>1.16</u>	<u>3.74</u>
		Haruibuki	-0.28	<u>0.46</u>	-0.32	0.07	0.46	<u>1.83</u>	<u>12.24</u>
		Tohoku 212	0.45	-0.16	0.56	-1.59	1.03	-0.12	0.02
		Yukichikara	0.52	0.15	-2.61	-0.16	<u>1.46</u>	-0.59	-3.76
		Tohoku 215	0.23	<u>0.92</u>	-3.03	<u>0.41</u>	<u>1.53</u>	-0.70	-4.55
		Tohoku 221	<u>2.09</u>	0.24	<u>6.31</u>	0.14	0.96	<u>0.91</u>	<u>7.10</u>
		Sabiho 20	-3.02	<u>1.13</u>	<u>7.20</u>	<u>0.44</u>	<u>1.85</u>	-0.89	-3.12
		LSD (5%)	0.85	0.30	2.24	0.34	0.80	0.31	2.61

Year	Diallel cross	Varieties	Bread-making quality							
			Water absorption score	Dough handling score	Loaf volume	Specific loaf volume	Sensory evaluation			
							Loaf volume	Crust color	Crust thickness	Symmetry of shape
2000	9 × 9	Nanbukomugi	-1.49	0.14	<u>41.86</u>	<u>0.32</u>	<u>1.26</u>	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	<u>0.29</u>
		Koyukikomugi	-0.70	-1.04	-46.64	-0.36	-1.40	-0.28	-0.23	-0.20
		Tohoku 168	-1.92	0.14	2.68	0.10	0.08	-0.20	-0.08	-0.04
		Haruibuki	<u>2.08</u>	<u>1.46</u>	<u>28.29</u>	<u>0.12</u>	<u>0.85</u>	<u>0.51</u>	<u>0.33</u>	<u>0.41</u>
		Tohoku 212	-0.87	-0.33	-20.50	-0.14	-0.61	<u>0.07</u>	-0.09	-0.10
		Yukichikara	0.73	-0.56	-19.61	-0.16	-0.59	-0.02	-0.15	-0.33
		Tohoku 215	-0.94	-0.74	-11.86	-0.04	-0.36	0.02	-0.15	-0.09
		Tohoku 221	<u>2.01</u>	<u>0.50</u>	<u>18.79</u>	<u>0.14</u>	<u>0.56</u>	-0.04	<u>0.22</u>	<u>0.07</u>
		Sabiho 20	<u>1.08</u>	<u>0.43</u>	7.00	0.01	0.21	-0.10	-0.01	0.00
		LSD (5%)	0.78	0.80	25.25	0.22	0.76	0.39	0.26	0.25

Year	Diallel cross	Varieties	Bread-making quality						
			Sensory evaluation					Bread-making quality score	
			Crumb color	Fineness of cell structure	Crumb firmness	Flavor and aroma	Taste		Total score
2000	9 × 9	Nanbukomugi	<u>0.14</u>	<u>0.45</u>	<u>0.26</u>	<u>0.48</u>	-1.49	<u>2.27</u>	1.00
		Koyukikomugi	0.01	-0.35	-0.33	-0.41	-0.70	-2.40	-4.06
		Tohoku 168	0.01	-0.10	-0.06	-0.18	-1.92	-0.52	-2.21
		Haruibuki	<u>0.16</u>	<u>0.77</u>	<u>0.44</u>	<u>0.53</u>	<u>2.08</u>	<u>3.02</u>	<u>6.65</u>
		Tohoku 212	-0.09	-0.17	-0.03	-0.20	-0.87	-0.89	-2.01
		Yukichikara	-0.14	-0.48	-0.32	-0.30	0.73	-1.86	-1.61
		Tohoku 215	-0.23	-0.27	-0.12	-0.19	-0.94	-0.95	-2.91
		Tohoku 221	<u>0.08</u>	<u>0.14</u>	<u>0.15</u>	<u>0.30</u>	<u>2.01</u>	<u>1.16</u>	<u>3.39</u>
		Sabiho 20	0.05	0.01	0.02	-0.04	<u>1.08</u>	0.17	<u>1.76</u>
		LSD (5%)	0.18	0.41	0.29	0.45	0.78	1.89	2.35

Note. A value which attached the underline presents the best. Also, the italic and boldface values present top two in 1999 and top three in 2000.

し、官能評価は味を除く全特性で上位3位以内に入った。低アミロースの「東北212号」は、アミロース含量 (Amylose content) においては負の最大値を示した。

Table 6に1999年材料の製粉歩留、小麦粉品質および製パン適性のSCA効果を示した。各特性でイタリアック体数字は上位3位を、その内下線は1位を表す。製粉歩留は「東北195号」/「コユキコムギ」、小麦粉蛋白含量は「Recital」/「SK-26」、セディメンテーション値は「ゆきちから」/「SK-26」がそれぞれ最大のSCA効果を示した。ファリノグラム特性においては、Abは「Palo Duro」/「コユキコムギ」、DTは「ゆきちから」/「SK-26」と「コユキコムギ」/「Recital」、Stabは「東北195号」/「Recital」、Wkは「Recital」/「SK-26」、そしてVVは「コユキコムギ」/「Recital」がそれぞれ最大のSCA効果を示した。また、「Palo Duro」/「SK-26」、「ゆきちから」/「SK-26」および「コユキコムギ」/「Recital」の3組合せはDT、Stab、VVの3特性はSCA効果が高かった。

Table 7に2000年材料の製粉歩留および小麦粉品質のSCA効果を示した。各特性でイタリアック体数字は上位5位を、その内下線は1位を表す (以下のTable 8も同様)。製粉歩留は「ナンブコムギ」/

「東北168号」、小麦粉蛋白含量は「コユキコムギ」/「東北221号」、アミロース含量は「さび保20」/「東北221号」、セディメンテーション値は「東北168号」/「さび保20」がそれぞれ最大値を示した。ミキソグラムにおいては、Abは「東北168号」/「東北212号」、Dは「ハルイブキ」/「さび保20」、Aは「ハルイブキ」/「東北221号」がそれぞれ最大値を示した。また、「東北168号」/「ハルイブキ」は小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ミキソグラムのAb、Aの4特性、「東北168号」/「さび保20」は上記のセディメンテーション値とともに製粉歩留、小麦粉蛋白含量の3特性がそれぞれ上位5以内に入った。

Table 8に製パン適性のSCA効果を示した。「ナンブコムギ」/「東北212号」は全15特性の内12特性で上位5位以内に入っていて、パン体積、官能評価のパン体積、皮質、形の均整、触感、味および合計点では1位であった。また、「東北168号」/「さび保20」も12特性で上位5位以内に入っており、表皮の焼色、内相の色では1位であった。次いで、「東北215号」/「東北221号」は11特性 (作業性、香りは1位)、「コユキコムギ」/「ハルイブキ」は10特性、「ハルイブキ」/「東北215号」は9特性 (すだち、パン総合評価点は1位) で、それぞれ上位5位以内に入った。以上の5組合せはパン総合評価点も上位

Table 6 Specific combining ability effects for flour yield and flour qualities in a 6×6 diallel cross of wheat in 1999.

Crosses	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Farinogram				
				Ab	DT	Stab	Wk	VV
Tohoku 195/Palo Duro	-0.79	<b>0.54</b>	-3.27	0.14	-3.73	-2.47	5.38	-4.10
Tohoku 195/Yukichikara	-0.77	-0.42	0.79	-0.22	2.95	-1.56	<b>12.19</b>	3.28
Tohoku 195/Koyukikomugi	<b>1.31</b>	0.33	1.79	0.24	0.03	-0.69	-4.31	-1.16
Tohoku 195/Recital	0.08	-0.21	1.04	0.07	-0.75	<b>5.82</b>	-10.06	3.78
Tohoku 195/SK-26	0.18	-0.24	-0.36	-0.23	1.50	-1.10	-3.19	-1.79
Palo Duro/Yukichikara	-0.07	0.09	-1.55	0.16	-4.72	-0.01	<b>5.81</b>	-4.85
Palo Duro/Koyukikomugi	-0.18	0.38	<b>2.70</b>	<b>0.82</b>	1.64	1.64	1.56	6.71
Palo Duro/Recital	0.51	-0.41	<b>3.33</b>	-0.90	2.81	-2.41	-2.69	-6.35
Palo Duro/SK-26	<b>0.53</b>	-0.61	-1.21	-0.22	<b>4.01</b>	3.25	-10.06	<b>8.59</b>
Yukichikara/Koyukikomugi	<b>0.71</b>	-0.20	-1.36	-0.59	-4.56	-3.98	-8.38	-10.16
Yukichikara/Recital	-0.14	0.04	-1.24	<b>0.39</b>	1.39	0.02	-4.88	3.28
Yukichikara/SK-26	0.28	<b>0.49</b>	<b>3.36</b>	0.27	<b>4.94</b>	<b>5.53</b>	-4.75	<b>8.46</b>
Koyukikomugi/Recital	-0.66	-0.14	-2.24	-0.10	<b>4.94</b>	<b>3.64</b>	5.38	<b>9.59</b>
Koyukikomugi/SK-26	-1.19	-0.37	-0.89	-0.37	-2.06	-0.60	5.75	-4.97
Recital/SK-26	0.21	<b>0.72</b>	-0.89	<b>0.55</b>	-8.39	-7.07	<b>12.25</b>	-10.29
LSD (5%)	1.05	0.36	3.70	0.91	3.28	7.65	23.79	6.80

Note. A value which attached the underline presents the best. Also, the italic and boldface values present top three.

5位以内に入っていて、製パン適性については優れた特定組合せ能力を示した。一方、他の組合せでは0～5特性しか上位5位以内に入っておらず、全36組合せの内17組合せはすべての特性とも上位5位以内に入らなかった。その中でも、パン総合評価点は「コユキコムギ」/「東北221号」と「ゆきちから」/「さび保20」は上記5組合せに次いで高い

SCA効果を示した。

製粉歩留、小麦粉品質特性および製パン適性におけるGCA効果と親の値との相関係数および狭義の遺伝力をTable 9に示した。GCA効果と親の値との相関においては、1999年の材料では、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ファリノグラムのDT、StabおよびVVにおいて、0.9以上の有意で高

Table 7 Specific combining ability effects for milling characteristics and flour qualities in a 9×9 diallel cross of wheat in 2000.

Crosses	Flour yield	Flour protein content	Sedimentation value	Amylose content	Mixogram		
					Ab	D	A
Nanbukomugi/Koyukikomugi	0.06	-0.61	-0.04	<b>0.40</b>	-1.22	<b>0.52</b>	1.50
Nanbukomugi/Tohoku 168	<u>2.35</u>	-0.86	-9.53	0.17	-2.15	-0.06	-2.18
Nanbukomugi/Haruibuki	0.06	0.36	3.22	-0.47	0.53	-0.40	-1.43
Nanbukomugi/Tohoku 212	0.56	0.20	2.85	<b>0.33</b>	-0.04	-0.41	-2.71
Nanbukomugi/Yukichikara	0.59	0.44	<b>5.51</b>	0.01	0.53	0.04	-0.18
Nanbukomugi/Tohoku 215	-1.37	0.25	3.94	-0.06	0.46	0.32	<b>3.86</b>
Nanbukomugi/Tohoku 221	-1.28	0.23	-1.15	-0.22	0.78	-0.11	1.21
Nanbukomugi/Sabiho 20	-0.97	-0.01	-4.79	-0.15	<b>1.13</b>	0.09	-0.07
Koyukikomugi/Tohoku 168	-0.93	-0.71	-8.58	<b>0.37</b>	-2.51	0.13	1.04
Koyukikomugi/Haruibuki	0.24	<b>0.46</b>	-1.33	-0.20	<b>0.92</b>	-0.11	-1.96
Koyukikomugi/Tohoku 212	0.46	-0.42	0.42	-0.11	0.35	0.38	2.25
Koyukikomugi/Yukichikara	0.41	0.24	<b>4.46</b>	-0.06	0.42	0.08	<b>3.29</b>
Koyukikomugi/Tohoku 215	0.23	0.10	0.13	0.09	0.35	-0.01	-0.68
Koyukikomugi/Tohoku 221	0.37	<u>1.05</u>	0.79	-0.34	0.67	-0.92	-2.32
Koyukikomugi/Sabiho 20	-0.85	-0.11	4.15	-0.15	<b>1.03</b>	-0.07	-3.11
Tohoku 168/Haruibuki	-0.85	<b>0.63</b>	<b>5.19</b>	-0.08	<b>1.74</b>	0.48	<b>3.61</b>
Tohoku 168/Tohoku 212	-1.12	0.20	-0.69	0.00	<u>1.92</u>	<b>0.67</b>	2.82
Tohoku 168/Yukichikara	0.55	0.31	0.22	-0.42	0.74	-0.36	-3.39
Tohoku 168/Tohoku 215	-0.08	-0.21	-1.72	0.16	0.17	-0.30	-1.61
Tohoku 168/Tohoku 221	-0.64	-0.10	<b>6.31</b>	-0.12	0.49	<b>0.47</b>	0.50
Tohoku 168/Sabiho 20	<b>0.72</b>	<b>0.76</b>	<u>8.79</u>	-0.08	-0.40	-1.03	-0.79
Haruibuki/Tohoku 212	<b>0.74</b>	0.00	-2.19	-0.06	-0.15	-0.27	-2.18
Haruibuki/Yukichikara	<b>0.72</b>	-0.39	-3.40	0.12	-0.33	-0.47	-3.14
Haruibuki/Tohoku 215	0.31	-0.29	0.28	<b>0.39</b>	-0.40	-0.49	-5.86
Haruibuki/Tohoku 221	-0.62	-0.13	-1.94	0.02	-0.58	<b>0.56</b>	<u>6.00</u>
Haruibuki/Sabiho 20	-0.59	-0.64	0.17	0.28	-1.72	<u>0.71</u>	<b>4.96</b>
Tohoku 212/Yukichikara	-0.73	-0.02	1.72	-0.05	-0.90	0.15	0.57
Tohoku 212/Tohoku 215	-0.19	0.01	-0.35	-0.05	-0.22	-0.07	-0.89
Tohoku 212/Tohoku 221	-0.32	0.13	1.12	-0.13	-0.65	-0.33	0.00
Tohoku 212/Sabiho 20	-0.97	-0.02	-0.83	-0.03	-0.29	0.08	0.68
Yukichikara/Tohoku 215	-0.34	-0.21	-2.19	0.18	-0.65	0.20	2.39
Yukichikara/Tohoku 221	-0.62	-0.38	-3.15	0.20	-0.08	0.30	-0.75
Yukichikara/Sabiho 20	-0.57	0.01	-3.17	0.04	0.28	0.05	1.21
Tohoku 215/Tohoku 221	-0.13	-0.19	2.15	-0.15	-0.15	0.21	0.79
Tohoku 215/Sabiho 20	<b>1.55</b>	<b>0.55</b>	-2.24	-0.56	0.46	0.13	2.00
Sabiho 20/Tohoku 221	<b>1.67</b>	-0.55	-2.08	<u>0.64</u>	-0.47	0.03	-4.89
LSD (5%)	1.96	0.53	3.76	0.59	1.31	0.71	5.10

Note. A value which attached the underline presents the best. Also, the italic and boldface values present top five.

い正の相関が認められた。また、2000年材料でも、製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、アミロース含量およびミキソグラム特性（Ab、D、A）で、0.9前後の有意で高い正の相関がみられた。また、製パン適性では吸水性とパン総合評価点は0.8以上の高い有意な正の相関を示し、パン体積、比容積、すだち、触感、味も0.6~0.7のやや高い有

意な相関を示したが、その他の特性は相関が有意でなく低かった。

次に、狭義の遺伝率に関しては、両年とも小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、アミロース含量（2000年のみ）はいずれも0.8前後の高い遺伝率を示した。また、製粉歩留の遺伝率も0.71~0.72と高かった。生地特性では1999年のファリノグラムは

Table 8 Specific combining ability effects for bread-making qualities in a 9×9 diallel cross of wheat in 2000.

Crosses	Water Dough				Sensory evaluation										Bread-making quality score
	absorption score	handling score	Loaf volume	Specific loaf volume	Loaf volume	Crust color	Crust thickness	Symmetry of shape	Crumb color	Fineness of cell structure	Crumb firmness	Flavor and aroma	Taste	Total score	
Nanbukomugi/Koyukikomugi	-1.24	0.30	-4.8	-0.04	-0.14	<i>0.67</i>	<i>0.20</i>	0.01	0.14	0.19	0.05	<i>0.40</i>	0.42	1.18	0.15
Nanbukomugi/Tohoku 168	-0.02	0.12	16.7	0.01	0.50	-0.56	-0.07	-0.16	0.12	0.15	-0.02	0.14	-0.03	-0.01	0.00
Nanbukomugi/Haruibuki	0.48	0.30	-18.5	-0.12	-0.55	-0.27	-0.26	-0.10	-0.28	-0.45	-0.15	-0.44	-0.55	-1.82	-1.13
Nanbukomugi/Tohoku 212	0.43	0.34	<u>42.1</u>	<i>0.27</i>	<u>1.26</u>	0.02	<u>0.47</u>	<u>0.55</u>	<i>0.24</i>	<i>0.67</i>	<u>0.35</u>	<i>0.56</i>	<u>1.20</u>	<u>3.17</u>	<i>3.85</i>
Nanbukomugi/Yukichikara	0.83	-0.68	4.7	0.09	0.14	0.06	0.12	0.09	-0.08	0.07	0.09	-0.03	-0.11	0.26	0.32
Nanbukomugi/Tohoku 215	-1.00	-0.49	-17.6	-0.08	-0.53	-0.20	0.00	-0.28	0.02	-0.21	0.06	-0.44	-0.45	-1.25	-2.47
Nanbukomugi/Tohoku 221	0.55	-0.48	-0.5	-0.08	-0.01	0.40	0.03	0.06	0.05	0.00	-0.08	0.04	-0.15	0.19	0.53
Nanbukomugi/Sabiho 20	-0.02	0.59	-22.2	-0.06	-0.67	-0.11	-0.49	-0.17	-0.22	-0.42	-0.30	-0.22	-0.33	-1.72	-1.25
Koyukikomugi/Tohoku 168	-0.81	<i>1.80</i>	2.2	-0.04	0.06	-0.21	0.01	0.08	0.05	0.14	0.09	-0.22	-0.09	-0.08	0.82
Koyukikomugi/Haruibuki	0.19	0.48	<i>28.0</i>	<i>0.29</i>	<i>0.84</i>	<i>0.73</i>	0.12	0.11	<i>0.26</i>	<i>0.41</i>	0.23	<i>0.44</i>	<i>0.77</i>	<i>2.35</i>	<i>2.94</i>
Koyukikomugi/Tohoku 212	-0.36	-0.73	-5.2	-0.03	-0.16	-0.33	0.10	-0.03	0.08	-0.14	0.01	-0.20	-0.23	-0.53	-1.71
Koyukikomugi/Yukichikara	0.05	-1.00	-18.3	-0.15	-0.55	-0.09	-0.25	-0.20	-0.25	-0.39	-0.28	-0.37	-0.54	-1.62	-2.66
Koyukikomugi/Tohoku 215	<u>1.72</u>	-2.32	-27.1	-0.20	-0.81	-0.50	-0.42	-0.21	-0.30	-0.42	-0.33	-0.23	-0.51	-2.40	-2.73
Koyukikomugi/Tohoku 221	-0.24	<i>1.69</i>	12.0	0.07	0.36	-0.19	0.07	0.07	0.06	0.15	0.13	-0.08	0.12	0.42	2.14
Koyukikomugi/Sabiho 20	0.69	-0.23	13.1	0.10	0.39	-0.08	0.17	<i>0.17</i>	-0.04	0.05	0.09	0.26	0.04	0.68	1.04
Tohoku 168/Haruibuki	<i>0.90</i>	-0.95	-30.0	-0.24	-0.90	0.10	-0.08	-0.21	-0.22	-0.60	-0.13	-0.06	-0.13	-1.38	-1.51
Tohoku 168/Tohoku 212	-0.64	0.34	6.0	0.12	0.18	0.19	0.05	0.10	-0.05	0.22	-0.03	0.07	-0.01	0.45	0.07
Tohoku 168/Yukichikara	0.26	0.57	-2.9	0.02	-0.09	-0.12	-0.02	0.08	0.00	0.15	0.08	0.10	0.10	0.20	0.94
Tohoku 168/Tohoku 215	-0.57	0.26	-7.6	-0.16	-0.23	0.37	0.13	0.07	0.00	-0.14	-0.02	0.12	-0.04	0.17	0.12
Tohoku 168/Tohoku 221	0.48	-2.23	-18.8	<i>0.17</i>	-0.56	-0.72	-0.29	-0.25	-0.24	-0.32	-0.21	-0.58	-0.36	-2.07	-3.56
Tohoku 168/Sabiho 20	0.40	0.09	<i>34.5</i>	0.12	<i>1.04</i>	<u>0.94</u>	<i>0.29</i>	<i>0.28</i>	<u>0.34</u>	<i>0.41</i>	<i>0.24</i>	<i>0.43</i>	<i>0.56</i>	<i>2.72</i>	<i>3.12</i>
Haruibuki/Tohoku 212	-0.14	0.02	8.2	0.14	0.24	<i>0.46</i>	-0.19	0.13	0.13	0.19	0.06	0.18	0.25	0.82	0.60
Haruibuki/Yukichikara	-0.24	0.25	16.3	-0.03	0.49	-0.35	-0.03	-0.03	-0.04	-0.01	0.00	-0.06	-0.06	-0.44	-0.52
Haruibuki/Tohoku 215	<i>0.93</i>	0.68	17.0	<i>0.17</i>	0.51	-0.04	<i>0.34</i>	<i>0.43</i>	<i>0.23</i>	<u>0.83</u>	<i>0.32</i>	0.28	0.42	<i>2.50</i>	<u>4.38</u>
Haruibuki/Tohoku 221	-1.52	-0.81	-19.1	-0.18	-0.57	-0.23	-0.10	-0.14	-0.09	-0.28	-0.37	-0.27	-0.52	-1.58	-3.64
Haruibuki/Sabiho 20	-0.60	0.02	-1.8	-0.03	-0.06	-0.39	<i>0.20</i>	-0.19	0.02	-0.09	0.04	-0.08	-0.18	-0.45	-1.12
Tohoku 212/Yukichikara	-0.78	0.67	2.0	0.11	0.06	0.44	-0.21	-0.18	0.05	-0.06	-0.07	-0.13	-0.19	-0.01	-0.22
Tohoku 212/Tohoku 215	0.21	-1.20	-6.7	0.01	-0.20	0.30	-0.33	-0.32	-0.23	-0.32	-0.25	-0.31	-0.40	-1.31	-2.01
Tohoku 212/Tohoku 221	0.00	<i>1.31</i>	-18.1	-0.20	-0.54	-0.24	-0.12	-0.10	-0.08	-0.14	0.07	-0.01	-0.04	-0.70	0.87
Tohoku 212/Sabiho 20	<i>0.86</i>	-0.94	-43.3	-0.47	-1.30	-0.63	-0.15	-0.36	-0.21	-0.65	-0.33	-0.52	-0.86	-3.01	-3.19
Yukichikara/Tohoku 215	-0.71	<i>1.20</i>	19.9	0.16	0.60	-0.53	<i>0.30</i>	<i>0.19</i>	0.10	0.08	<i>0.19</i>	0.07	0.38	0.73	1.49
Yukichikara/Tohoku 221	-0.17	-1.54	-33.0	-0.30	-0.99	0.32	-0.02	-0.10	0.03	-0.08	-0.13	0.02	-0.09	-0.60	-2.04
Yukichikara/Sabiho 20	0.76	0.53	11.3	0.11	0.34	0.26	0.11	0.15	0.19	0.23	0.13	0.41	<i>0.51</i>	1.48	2.69
Tohoku 215/Tohoku 221	<i>1.00</i>	<u>1.90</u>	<i>38.0</i>	<i>0.18</i>	<i>1.14</i>	<i>0.73</i>	0.08	0.13	<i>0.23</i>	0.07	0.14	<u>0.66</u>	<i>0.55</i>	<i>2.22</i>	<i>3.24</i>
Tohoku 215/Sabiho 20	-1.57	-0.03	-16.0	-0.07	-0.48	-0.13	-0.09	-0.01	-0.04	0.10	-0.12	-0.15	0.04	-0.67	-2.01
Sabiho 20/Tohoku 221	-0.52	-0.02	<i>24.4</i>	<u>0.30</u>	<i>0.73</i>	0.13	-0.03	0.12	-0.03	<i>0.36</i>	<i>0.26</i>	-0.14	0.22	0.99	0.72
LSD (5%)	1.74	1.74	49.38	0.38	1.48	0.93	0.53	0.45	0.37	0.89	0.45	0.72	1.06	3.35	4.74

Note. A value which attached the underline presents the best. Also, the italic and boldface values present top five.

DTとVVは0.8前後の高い遺伝率を示し、AbとStabは0.60~0.64とやや高かった。また、2000年のミキソグラムでは、Ab、DおよびAともに0.8以上の高い遺伝率を示した。一方、製パン適性では、吸水性は0.76、パン総合評価点は0.66と高いまたはやや高い遺伝率を示し、すだち、触感、味は0.5台の中位の遺伝率を示したものの、その他の官能評価項目とパン体積、比容積は0.20~0.47と低かった。

小麦品質および製パン適性のMPHおよびHPHの各平均 (Mean)、標準偏差 (Standard deviation)、最大値 (Maximum)、最小値 (Minimum)、最良組合せ (Best cross combination) とともに、これら各特性とSCA効果との相関係数 (SCA effect correlation)

をTable 10に示した。外国品種と日本品種・系統との組合せの1999年材料は、ファリノグラムのDT、StabではMPH・HPH平均値ともに正の極めて高いまたは高い値 (DT: 34.8%, 9.6%, Stab: 76.7%, 40.5%) を示し、VVもMPH平均値 (11.3%) で高かったため、これらの特性では強いヘテロシスを示した。一方、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値およびファリノグラムAbではこれらの平均値は負の値を示した。MPHおよびHPHが最も高い組合せは、すべて少なくとも片親に外国品種を用いた組合せであった。また、SCA効果との相関は、MPHでは小麦粉蛋白含量、DT、StabおよびVVが0.83~0.89と有意で高く、HPHではDT、StabおよびVVが

Table 9 Correlation coefficients between general combining ability effect and phenotypic value of parental variety, and narrow sense heritability estimates in wheat quality traits.

Wheat quality traits		Correlation coefficient		Narrow sense heritability		
		1999	2000	1999	2000	
Milling characteristics	Flour yield	0.78	0.93 **	0.71	0.72	
Flour characteristics	Flour protein content	0.97 **	0.96 **	0.87	0.88	
	Sedimentation value	0.90 *	0.92 **	0.84	0.76	
	Amylose content	—	0.98 **	—	0.86	
Dough mixing property	Farinogram	Ab	0.72	—	0.64	—
		DT	0.95 *	—	0.80	—
		Stab	0.90 *	—	0.60	—
		Wk	0.46	—	0.24	—
		VV	0.97 **	—	0.77	—
	Mixogram	Ab	—	0.97 **	—	0.81
		D	—	0.89 **	—	0.83
		A	—	0.93 **	—	0.86
		Water absorption score	—	0.91 **	—	0.76
		Dough handling score	—	0.54	—	0.32
Bread-making quality	Loaf volume	—	0.68 *	—	0.41	
	Specific loaf volume	—	0.69 *	—	0.36	
	Sensory evaluation					
	Loaf volume	—	0.68 *	—	0.41	
	Crust color	—	0.36	—	0.20	
	Crust thickness	—	0.66	—	0.42	
	Symmetry of shape	—	0.54	—	0.38	
	Crumb color	—	0.59	—	0.40	
	Fineness of cell structure	—	0.74 *	—	0.53	
	Crumb firmness	—	0.71 *	—	0.52	
	Flavor and aroma	—	0.57	—	0.41	
	Taste	—	0.71 *	—	0.53	
	Total score	—	0.64	—	0.47	
	Bread-making quality score	—	0.80 *	—	0.66	

Note. 1) Narrow sense heritability was calculated using the correlation coefficient of offspring and midparent.

2) \* and \*\* indicate significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively.

**Table 10** Estimates of mid-parent heterosis (MPH), high parent heterosis (HPH), and correlation coefficient between MPH or BPH and SCA effect for wheat quality traits.

Year (diallel cross)	Statistic	Flour yield		Flour protein content		Sedimentation value		Farinogram									
								Ab		DT		Stab		Wk		VV	
		MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1999	Mean	0.9	-2.6	-3.6	-8.2	-1.1	-8.7	-2.5	-4.4	34.8	9.6	76.7	40.5	-24.3	6.8	11.3	0.7
(6x6)	Standard deviation	2.5	2.2	3.4	5.3	8.6	6.2	1.5	2.2	40.1	36.8	50.7	47.7	24.7	35.1	9.8	10.0
	Maximum	6.2	1.2	2.0	0.0	16.7	-1.8	-0.2	-1.9	119.1	107.0	198.5	162.3	22.4	81.8	32.8	24.3
	Minimum	-3.9	-7.1	-8.7	-17.7	-14.1	-20.5	-6.3	-9.8	-12.6	-43.6	16.0	-22.4	-67.4	-60.5	-1.8	-16.6
	Best cross combination	P/S	P/S	Y/S	Y/S	P/R	P/R	Y/S	K/S	Y/S	Y/S	Y/S	Y/S	T/R	T/R	Y/S	Y/S
	SCA effect correlation	0.42	0.44	0.83**	0.53*	0.44	0.34	0.45	0.41	0.77**	0.74**	0.83**	0.60*	0.47	0.45	0.89**	0.63*

Year (diallel cross)	Statistic	Flour yield		Flour protein content		Sedimentation value		Amylose content		Mixogram					
										Ab		D		A	
		MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
2000	Mean	1.1	-1.5	0.2	-6.2	8.3	-1.1	1.5	-2.5	1.1	-2.1	1.4	-14.0	0.6	-7.4
(9x9)	Standard deviation	2.0	2.7	4.0	6.7	10.3	8.1	2.5	2.9	1.7	3.2	17.2	21.3	5.3	9.0
	Maximum	5.0	4.4	9.7	4.8	42.5	12.2	6.9	3.8	3.7	1.6	54.6	38.3	13.5	13.2
	Minimum	-3.2	-7.6	-7.8	-19.4	-12.9	-26.7	-2.6	-9.8	-3.6	-12.5	-27.6	-49.6	-11.0	-26.4
	Best cross combination	168/SA	168/Y	168/H	N/H	168/SA	168/SA	212/SA	SA/221	168/H	Y/SA	168/212	168/212	168/212	168/212
	SCA effect correlation	0.66**	0.44**	0.80**	0.40*	0.74**	0.64**	0.33	0.44**	0.87**	0.30	0.50**	0.44**	0.59**	0.45**

Year (diallel cross)	Statistic	Water absorption		Dough handling		Loaf volume		Specific loaf volume		Sensory evaluation							
										Loaf volume		Crust color		Crust thickness		Symmetry of shape	
		MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
2000	Mean	12.3	-3.7	7.4	0.2	0.7	-2.9	0.0	-3.7	0.7	-2.9	2.8	-4.5	3.2	-4.2	3.5	-3.4
(9x9)	Standard deviation	13.5	11.2	10.7	10.2	4.5	4.7	4.9	5.6	4.5	4.7	9.3	7.7	9.5	9.5	10.5	10.4
	Maximum	48.0	39.6	33.4	30.8	11.0	7.5	11.0	10.6	11.0	7.5	27.9	14.1	24.8	16.7	24.4	16.0
	Minimum	-6.7	-22.2	-22.2	-24.6	-9.1	-12.6	-10.0	-15.7	-9.1	-12.6	-15.3	-18.0	-19.2	-22.7	-14.3	-25.0
	Best cross combination	N/Y	N/212	N/SA	N/SA	H/212	H/212	H/212	H/212	H/212	H/212	168/SA	N/221	N/212	N/212	N/212	168/212
	SCA effect correlation	0.39*	0.22	0.63**	0.61**	0.51**	0.54**	0.53**	0.55**	0.51**	0.54**	0.61**	0.65**	0.68**	0.61**	0.57**	0.53**

Year (diallel cross)	Statistic	Sensory evaluation								Total score of sensory evaluation		Bread- making quality score			
		Crumb color		Fineness of cell structure		Crumb firmness		Flavor and aroma		Taste					
		MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
2000	Mean	3.5	-2.6	1.8	-4.8	0.3	-7.9	2.7	-1.1	3.5	-4.1	2.0	-2.3	4.3	-0.7
(9x9)	Standard deviation	7.9	8.6	7.7	6.9	9.5	8.1	4.8	4.5	8.3	6.0	5.7	5.3	5.1	5.1
	Maximum	24.4	22.2	16.5	10.0	16.7	11.6	11.4	8.0	19.2	9.2	10.5	6.9	19.1	15.5
	Minimum	-14.9	-22.6	-13.5	-19.2	-19.4	-23.2	-6.1	-9.7	-11.7	-16.3	-11.8	-13.8	-7.2	-9.1
	Best cross combination	168/SA	168/SA	168/212	168/212	168/Y	168/Y	N/212	N/212	168/Y	N/212	N/212	168/212	N/212	N/212
	SCA effect correlation	0.66**	0.58**	0.63**	0.61**	0.57**	0.49**	0.06	0.07	0.49**	0.49**	0.58**	0.56**	0.61**	0.53**

Note. 1) Best cross combination: K="Koyukikomugi", P="Palo Duro", R="Recital", S="SK-26", Y="Yukichikara", T="Tohoku 195"

168="Tohoku 168", 212="Tohoku 212", 221="Tohoku 221", SA="Sabiho 20", H="Haruibuki", N="Nanbukomugi"

2) \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

0.60~0.74と有意でやや高いまたは高く、いずれも正の相関を示した。次に、日本品種・系統同士の組合せの2000年材料は、MPH平均値においてセディメンテーション値、製パン適性の吸水性、作業性で7%以上の高い値を示し、パン総合評価点も4.3%とやや高かったが、ファリノグラムと同じ生地ミキシング特性のミキソグラム特性やパン体積では2%以下と低かった。MPHおよびHPHが最も高い組合せは、ミキソグラムのD、Aでは「東北168号」/「東北212号」、パン体積、比容積では「ハルイブキ」/「東北212号」、パン総合評価点では「ナンブコムギ」/「東北212号」であった。SCA効果との相関は、MPHでは製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ミキソグラムAb、製パン適性の作業性、表皮の焼色、皮質、内相の色、すだちおよびパン総合評価点で0.6以上の有意で高いまたはやや高い正の相関を示した。また、HPHではセディメンテーション値、作業性、表皮の焼色、皮質、すだちが0.6以上のやや高い正の相関を示した。

遺伝率が高かった1999年、2000年の小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、ファリノグラム (Ab、DT、VV)、ミキソグラム (Ab、D、A) における両親の中間値とF<sub>1</sub>値との関係を、Fig. 1に示した。図中の点線は両親の中間値とF<sub>1</sub>値が同じである場合を示し、図右下の四角内の\*、\*\*、NSは両親の中間値平均とF<sub>1</sub>値平均との差の有意差検定結果で、それぞれ5%、1%水準で有意および有意差なしを示す(以下のFig. 2、Fig. 3も同じ)。外国品種と日本品種・系統との組合せである1999年材料においては、小麦粉蛋白含量とファリノグラムのAbは、F<sub>1</sub>は点線より下にある場合がほとんどで両親の中間値平均とF<sub>1</sub>値平均との間に有意差が見られ、F<sub>1</sub>は低蛋白化して、Abも低くなる傾向を示した。これに対し、ファリノグラムのDTおよびVVでは逆にほとんどのF<sub>1</sub>が点線より上に位置し、両親の中間値平均とF<sub>1</sub>値平均との間に有意差が見られたことから、強いヘテロシスを示す組合せが多かった(図示はしなかったが、Stabも同じ結果であった)。セディメンテーション値ではF<sub>1</sub>は点線の上下ほぼ半々に位置した。一方、日本品種・系統同士の組合せである2000年材料においては、セディメンテーション値を除いた特性では、点線の上下ほぼ半々に位置し、両親の中間値平均とF<sub>1</sub>値平均との間に有意差が見られなかった。セディメンテーション値はF<sub>1</sub>が点線より上にあ

る場合が多いので、これらの平均値間に有意差が見られ、ヘテロシスを示す組合せが多かった。また、生地のミキシング特性である1999年のファリノグラムのDTとVV、2000年のミキソグラムのDとAにおいては、片親または両親にHMW-GS 5+10を持つ組合せはこれを持たない組合せより明らかに各値が高く有意差が認められた。従ってこれらのミキシング特性では、HMW-GS 5+10を持つ組合せはこれを持たない組合せより生地が強力な傾向を示した。また、2000年のセディメンテーション値はHMW-GS 5+10の有無による有意差が認められた。一方、小麦粉蛋白含量、ファリノグラム・ミキソグラムのAbなどは、HMW-GS 5+10の有無により差は明確には認められなかった。HMW-GS 5+10の有無によるヘテロシスの差異は1999年のファリノグラムAbでHMW-GS 5+10を持つ組合せはこれを持たないものより低くなる傾向を示したが、他の特性では明確でなかった。

2000年材料の製パン適性の吸水性、作業性、官能評価合計点およびパン総合評価点における両親の中間値とF<sub>1</sub>値との関係をFig. 2に示した。吸水性、作業性およびパン総合評価点においては、点線より上にあるF<sub>1</sub>組合せの割合が多く、両親の中間値平均とF<sub>1</sub>値平均の間に有意差があったので、これらの特性ではヘテロシスが見られる組合せが多かった。Table 10からMPH平均値はそれぞれ12.3%、7.4%および4.3%と吸水性が特に高かった。また、製パン適性の上記4特性とも、片親または両親にHMW-GS 5+10を持つ組合せはこれを持たない組合せより明らかに値が高い傾向があり、しかも両者に有意差が認められた。しかし、HMW-GS 5+10の有無によるヘテロシスの差異は見られなかった。

Table 11に2000年小麦のF<sub>1</sub>における品質間の相関係数を示した。小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値およびミキソグラムのD、Aは製パン適性の各特性とは、有意な正の相関を示す場合が多いものの、0.5以下と低かった。

## 2. 大麦精麦特性の組合せ能力とヘテロシス

Table 12に大麦精麦特性の分散分析表を示した。遺伝子型では、アミロース含量を除いたすべての特性で1%水準で有意であり、F<sub>1</sub>および親品種間に差異がみられた。一方、反復では、50%搗精麦(50% pearled grain)のa\*、b\*、ポリフェノール含量、アミロース含量およびRVAの最高粘度(Maximum

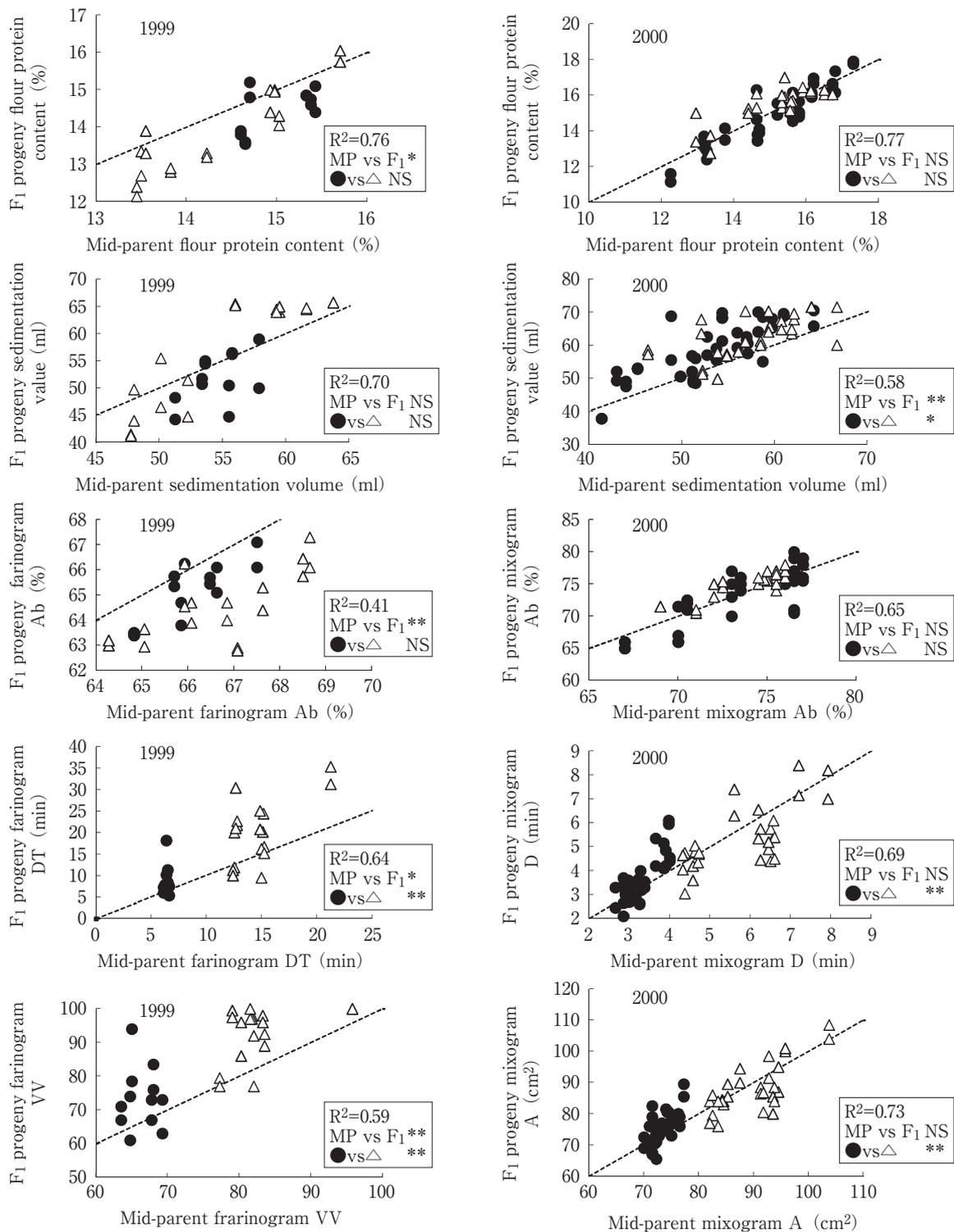


Fig. 1 Relationships between mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value on flour protein content, sedimentation value, and dough mixing property (farinogram, mixogram) in two diallel crosses of wheat in 1999 and 2000.

Note. 1) Mid-parent value = (P<sub>1</sub> value + P<sub>2</sub> value) / 2

2) Presence or absence of HMW-GS 5+10 in one parent of a cross : △ Presence, ● Absence.

3) A dotted line shows the case that mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value are equal.

4) MP vs F<sub>1</sub> and ● vs △ present t-test of mean differences between mid-parent mean and F<sub>1</sub> progeny, and between F<sub>1</sub> progeny with HMW-GS 5+10 and F<sub>1</sub> progeny without HMW-GS 5+10, respectively.

5) \* and \*\* indicate significance at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. NS indicates nonsignificance.

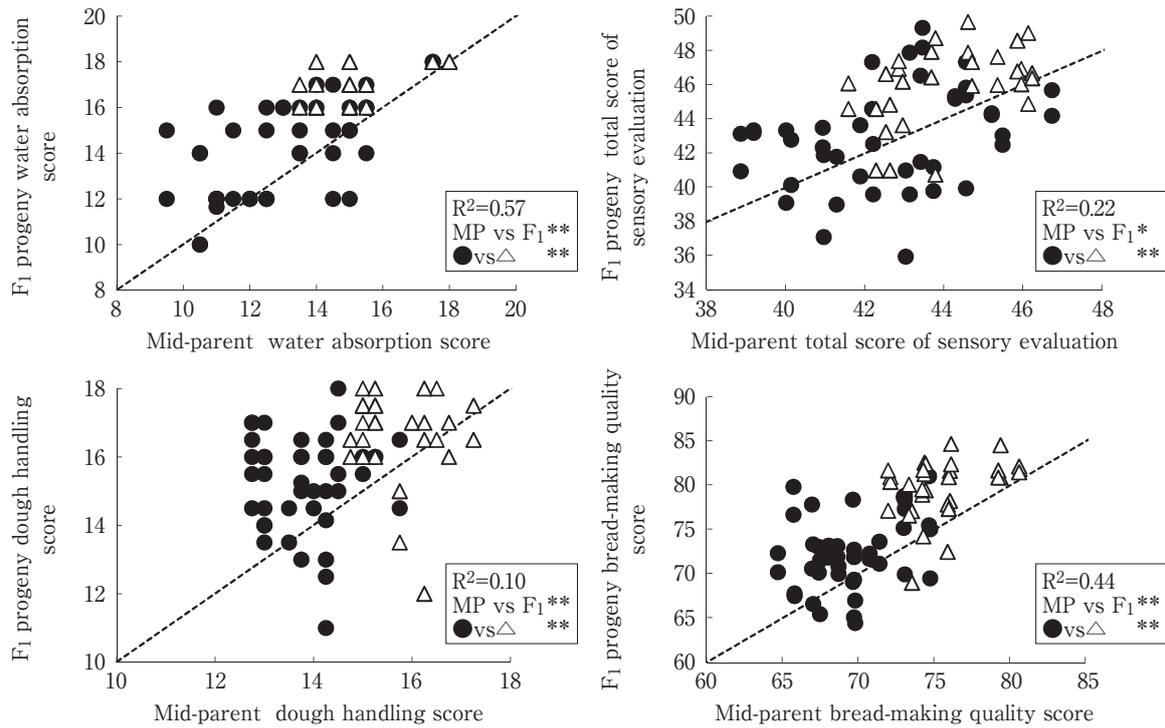


Fig. 2 Relationships between mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value on bread-making quality in a 9×9 diallel cross of wheat in 2000

Note. 1) Mid-parent value= (P1 value+P2 value) /2

2) Presence or absence of HMW-GS 5+10 in one parent of a cross : △Presence, ●Absence.

3) A dotted line shows the case that mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value are equal.

4) MP vs F<sub>1</sub> and ●vs△ present t-test of mean differences between mid-parent mean and F<sub>1</sub> progeny, and between F<sub>1</sub> progeny with HMW-GS 5+10 and F<sub>1</sub> progeny without HMW-GS 5+10, respectively.

5) \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

Table 11 Correlation coefficients among wheat quality traits in F<sub>1</sub> progeny of a 9×9 diallel cross in 2000.

Wheat quality traits	Flour protein content (FPC)	Sedimentation value (SV)	Amylose content (AC)	Mixogram			Bread-making quality							
				Ab	D	A	Water absorption score (WAS)	Dough handling score (DHS)	Loaf volume (LV)	Specific loaf volume (SLV)	Total score of sensory evaluation (TCSE)	Bread-making quality score (BQS)		
FPC	1													
SV	0.58**	1												
AM	-0.14	-0.19*	1											
Ab	0.73**	0.32**	-0.24**	1										
D	-0.31**	-0.07	0.07	-0.26**	1									
A	-0.08	0.14	0.00	-0.13	0.87**	1								
WAS	0.41**	0.38**	0.02	0.47**	0.22*	0.30**	1							
DHS	0.12	0.09	0.04	-0.09	0.27**	0.33**	0.16	1						
LV	0.20*	0.22*	0.10	-0.07	0.24**	0.24**	0.17*	0.47**	1					
SLV	0.08	0.13	0.08	-0.14	0.23**	0.19*	0.02	0.33**	0.92**	1				
TCSE	0.23*	0.18*	0.07	-0.02	0.28**	0.32**	0.20*	0.50**	0.91**	0.80**	1			
BQS	0.34**	0.29**	0.07	0.14	0.35**	0.42**	0.56**	0.69**	0.81**	0.63**	0.88**	1		

Note. \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

viscosity)、ブレイクダウン (Breakdown) は1%水準で有意となり反復間に差がみられたが、その他の特性では有意ではなかった。

大麦精麦特性の組合せ能力の分散分析表をTable 13に示した。GCAはアミロース含量、RVAの最高粘度およびブレイクダウンを除いたすべての特性で

有意差が認められた。一方、SCAでは有意差が認められた特性はなかった。また、RECもSCAと同様に有意な特性はなかった。このため、SCA効果およびREC効果の表は省略した。GCA:SCAはGCAが有意でなかった3特性を除いて5以上の値を示し、特に55%搗精麦、50%搗精麦 (50% pearled

Table 12 Analysis of variance for barley quality traits of F<sub>1</sub> progeny (F<sub>2</sub> seed) and the parents in barley.

Sources	Degree of freedom	55% pearled grain					50% pearled grain				
		Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*	Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*
Replications	1	0.1	2.21	0.30	0.02	0.41	297.7	3.18	0.98	0.27 **	2.97 **
Genotypes	24	2739.6 **	14.19 **	6.44 **	0.25 **	3.06 **	5180.3 **	12.81 **	4.80 **	0.18 **	2.55 **
Error	24	153.9	0.75	0.46	0.02	0.17	247.1	0.97	0.37	0.02	0.17

Sources	Degree of freedom	50% pearled grain									
		Boiled grain					Polyphenol content	Amylose content	Rapid ViscoAnalyser		Paste whiteness
Whiteness	Color	L*	a*	b*	Peak viscosity	Break-down					
Replications	1	0.23	1.45	1.77	0.050	0.82	0.00073 **	5.92 **	2257.9 **	848.7 **	1.51
Genotypes	24	8.20 **	2.69 **	2.33 **	0.118 **	2.83 **	0.00137 **	0.78	1830.6 **	713.4 **	6.91 **
Error	24	0.72	0.40	0.48	0.020	0.70	0.00008	0.77	137.7	86.4	0.40

Note. 1) L\* (Brightness), a\* (Red color degree), and b\* (Yellow color degree) were measured using color difference meter (Konica Minolta, Model CM-3500d).

2) Color was based on sensory evaluation.

3) \*\* indicates significance at P<0.01.

Table 13 Analysis of variances in combining ability analysis for barley quality traits in a 5×5 diallel cross of barley.

Sources	Degree of freedom	55% pearled grain					50% pearled grain				
		Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*	Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*
GCA	4	3332 *	17.23 **	10.24 **	0.32 **	2.64 *	6608 **	17.47 **	7.75 **	0.21 **	1.81 *
SCA	5	356	1.29	0.52	0.00	0.26	283	1.18	0.53	0.01	0.30
REC	10	632	0.76	0.73	0.05	0.58	1364	0.97	0.33	0.01	0.35
Error	20	1668	8.36	4.81	0.15	1.35	2994	8.63	3.80	0.12	1.14
GCA:SCA		9.35	13.32	19.69	209.46	10.20	23.32	14.77	14.67	15.94	5.94
Additive gene action		0.95	0.96	0.98	1.00	0.95	0.98	0.97	0.97	0.97	0.92

Sources	Degree of freedom	50% pearled grain									
		Boiled grain					Polyphenol content	Amylose content	Rapid ViscoAnalyser		Paste whiteness
Whiteness	Color	L*	a*	b*	Peak viscosity	Break-down					
GCA	4	13.11 **	3.80 *	4.05 **	0.22 **	3.03 **	0.00336 **	1.22	2874	1371.8	11.57 **
SCA	5	0.20	0.71	0.26	0.02	0.19	0.00030	0.29	684	275.6	0.87
REC	10	1.43	0.49	0.45	0.05	0.20	0.00014	0.33	350	170.3	0.75
Error	20	6.05	2.41	2.33	0.12	2.10	0.00160	1.54	1686	789.5	5.45
GCA:SCA		66.53	5.33	15.72	12.38	15.59	11.27	4.27	4.20	4.98	13.29
Additive gene action		0.99	0.91	0.97	0.96	0.97	0.96	0.90	0.89	0.91	0.96

Note. \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

grain) および炊飯麦 (Boiled grain) のそれぞれの白度、L\*、a\*では10以上の高い値を示した。また、相加的遺伝子作用は最高粘度を除く特性で0.9以上と高かった。

精麦特性のGCA効果をTable 14に示した。各特性で下線入りの数字は最も優れていることを表す。55%搗精麦と50%搗精麦の各GCA効果は同様な傾向を示し、「シンジュボシ」は搗精時間 (Pearling time) が最も短く、白度 (Whiteness) とL\* (明るさ) が最も高く、a\* (赤み) が最も低いため、精麦適性の組合せ能力が最も優れていた。一方、「Banong」は搗精時間が最も長く、白度とL\*が最も低く、a\*が最も高かったため、これらの特性の組合せ能力が最も劣った。標準品種の「ミノリムギ」はこれら2品種の中間的な組合せ能力を示した。「盛系C-262」は、b\* (黄み) を除いて「シンジュボシ」に次いで精麦適性の組合せ能力が高かった。50%搗精麦の炊飯特性のGCAでは、「シンジュボシ」が白度、官能評価の色 (Color)、L\*ともに最も高く、a\*とb\*が最も低かったため、炊飯麦の白さという面での炊飯適性の組合せ能力が最も優れていた。逆に、「会津6号」は白度、色、L\*ともに最も低く、a\*とb\*が最も高かったため、この組合せ能力が最も劣った。「ミノリムギ」はこれら2品種の

中間よりむしろ「会津6号」に近い組合せ能力を示した。ポリフェノール含量のGCAは「会津6号」は最も高いのに対し、「シンジュボシ」が最も低かった。アミロース含量のGCAは「シンジュボシ」が最も高いのに対し、「盛系C-262」が最も低かった。RVAのGCAでは、最高粘度では「ミノリムギ」が最も高く、ブレイクダウンでは「盛系C-262」が最も大きく、糊白度 (Paste whiteness) では「シンジュボシ」が最も高かった。

精麦特性についてGCA効果と親値との相関係数および狭義の遺伝率をTable 15に示した。GCA効果との有意な相関は55%搗精麦の搗精時間、白度、L\*、50%搗精麦のL\*、a\*、炊飯の白度、b\*および糊白度において認められ、相関は0.9前後と高かった。55%搗精麦のa\*、50%搗精麦の搗精時間、白度、炊飯のL\*も相関は有意でないものの0.8台の高い相関を示した。一方、ポリフェノール含量、アミロース含量、RVAの最高粘度、ブレイクダウンにおいては相関は低かった。

狭義の遺伝率は、55%搗精麦、50%搗精麦とともに白度は0.82~0.87、L\*は0.87~0.89、a\*は0.76~0.83といずれも高く、搗精時間も0.67~0.75とやや高いまたは高かった。炊飯麦では白度は0.81、L\*は0.77およびb\*は0.82といずれも高く、色とa\*は0.61

Table 14 General combining ability effects for barley quality traits.

Varieties	55% pearled grain					50% pearled grain				
	Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*	Pearling time	Whiteness	L*	a*	b*
Minorimugi	-0.9	-0.08	0.22	-0.10	0.43	-1.4	-0.07	0.20	-0.11	0.39
Banong	32.3	-1.98	-1.57	0.31	-0.31	43.4	-2.03	-1.33	0.26	-0.13
Aizu 6	-1.9	-1.00	-0.90	0.08	<u>-0.63</u>	-0.8	-0.95	-0.85	0.10	<u>-0.54</u>
Shinjuboshi	<u>-25.6</u>	<u>2.46</u>	<u>1.59</u>	<u>-0.21</u>	-0.19	<u>-35.3</u>	<u>2.44</u>	<u>1.52</u>	<u>-0.22</u>	-0.25
Morikei C-262	-4.0	0.59	0.66	-0.08	0.71	-5.9	0.62	0.46	-0.03	0.52
LSD (5%)	11.1	0.61	0.52	0.11	0.35	16.7	0.61	0.48	0.10	0.25

Varieties	50% pearled grain					Polyphenol content	Amylose content	Rapid ViscoAnalyser		Paste whiteness
	Boiled grain							Peak viscosity	Break-down	
	Whiteness	Color	L*	a*	b*					
Minorimugi	-0.94	-0.02	-0.77	0.04	0.12	0.0014	0.25	<u>24.1</u>	9.1	-1.53
Banong	0.55	0.03	0.22	0.10	-0.44	-0.0084	-0.09	-27.1	-20.9	0.57
Aizu 6	-1.58	-1.10	-0.82	0.18	0.41	0.0400	-0.29	14.5	10.0	-1.18
Shinjuboshi	<u>1.95</u>	<u>1.03</u>	<u>0.86</u>	<u>-0.22</u>	<u>-0.89</u>	<u>-0.0187</u>	0.60	-14.5	-8.6	<u>1.58</u>
Morikei C-262	0.01	0.07	0.51	-0.11	0.81	-0.0142	<u>-0.47</u>	3.0	<u>10.5</u>	0.57
LSD (5%)	0.76	0.44	0.57	0.13	0.52	0.0061	0.61	9.9	6.6	0.61

Note. A value which attached the underline presents the best.

**Table 15** Correlation coefficients between general combining ability effect and phenotypic value of parental variety, and narrow sense heritability estimates in barley quality traits.

Barley quality traits	Correlation coefficient	Narrow sense heritability
55% pearled grain		
Pearling time	0.91 *	0.75
Whiteness	0.92 *	0.87
L*	0.95 *	0.87
a*	0.87	0.76
b*	-0.05	0.03
50% pearled grain		
Pearling time	0.82	0.67
Whiteness	0.87	0.82
L*	0.93 *	0.89
a*	0.88 *	0.83
b*	0.05	0.04
Boiled grain		
Whiteness	0.88 *	0.81
Color	0.80	0.68
L*	0.87	0.77
a*	0.76	0.61
b*	0.90 *	0.82
Polyphenol content	0.07	0.05
Amylose content	0.27	0.22
RVA Peak viscosity	0.46	0.39
RVA Breakdown	0.56	0.47
Paste whiteness	0.93 *	0.84

Note. 1) RVA=Rapid ViscoAnalyser.  
 2) Narrow sense heritability was calculated using the correlation coefficient of offspring and midparent.  
 3) \* indicates significance at  $P < 0.05$ .

～0.68とやや高かった。また、糊白度も0.84と高かった。一方、ポリフェノール含量、アミロース含量およびRVAの最高粘度、ブレイクダウンは0.05～0.47と低かった。

大麦精麦特性におけるMPH、HPHの各平均、標準偏差、最大値、最小値および最良組合せをTable 16に示した。MPH、HPH平均値ともに高い特性は炊飯麦のa\* (20.0%、47.2%) とポリフェノール含量 (7.6%、11.0%) で、これらの特性では強いヘテロシスを示した。MPHでは55%搗精白度 (5.6%) がやや高く、HPHでは55%搗精麦a\* (12.2%)、炊飯麦b\* (9.4%) が高かった。一方、55%搗精および50%搗精の搗精時間、a\*、b\*の各MPHは負の高い値を示した。MPHが最も高い組合せは55%搗精・

50%搗精の搗精時間・搗精白度・a\*、炊飯白度および糊白度では「会津6号」/「シンジュボシ」で、この組合せは精麦適性が不良と良の組合せであった。

主な大麦精麦特性における両親平均値とF<sub>1</sub>値との関係を、Fig. 3に示した。55%搗精時間では全てのF<sub>1</sub>が点線より下にあるのに対し、55%搗精白度は点線より上にあった。従って、すべてのF<sub>1</sub>において搗精時間は短い方への、搗精白度は高い方への、明確なヘテロシスを示した。また、55%搗精麦L\*と炊飯麦a\*もほとんどのF<sub>1</sub>が点線より上にあったので、ヘテロシスを示す組合せが多かった。ポリフェノール含量で強いヘテロシスを示した組合せは、「会津6号」との組合せだけであった。以上の特性では両親平均値平均とF<sub>1</sub>値平均との間に有意差が見られた。一方、炊飯白度はF<sub>1</sub>が点線上近くに並んだので、ヘテロシス程度は小さく、炊飯麦L\*と糊白度は点線より下のF<sub>1</sub>が大部分で、F<sub>1</sub>の方が両親平均値より低い組合せが多く、ヘテロシスの見られる組合せは少なかった (いずれも上記平均間に有意差なし)。精麦適性が優れた「シンジュボシ」との組合せは他の親との組合せに比べて、55%搗精時間が短く、55%搗精白度、55%搗精麦のL\*、炊飯白度および糊白度が高く、炊飯麦a\*が低い傾向が見られ、両者の平均値間に有意差が認められた。

#### IV 考 察

小麦の組合せ能力の分散分析におけるGCA分散、SCA分散の有意性に関しては、製粉歩留ではGCA、SCA各分散ともに有意と報告されている (Labuschagne *et al.* 1996, Akram *et al.* 2001, Barnard *et al.* 2002)。本報告では2000年でGCA、SCA各分散ともに有意であり、上記の報告と一致したが、1999年はGCAのみが有意であった。原粒または小麦粉蛋白含量ではGCA、SCA各分散ともに有意である報告 (Brown *et al.* 1966, Raina *et al.* 1979 (F<sub>1</sub>のみ有意)、Kraljević-Balalić *et al.* 1982, Borghi and Perenzin 1994, Labuschagne *et al.* 1996, Perenzin *et al.* 1998, Joshi *et al.* 2004, Subhashchandra *et al.* 2010, Kamaluddin *et al.* 2011) が多く、GCA分散のみに有意であったのはBarnard *et al.* (2002) の報告のみであった。本報告でも、2カ年 (2つのダイアレル交配) とともに、小麦粉蛋白含量のGCA、SCA各分散ともに有意であったので、上記の多くの研究報告と一致した結果が

Table 16 Estimates of mid-parent heterosis (MPH) and high parent heterosis (HPH) of pearled barley traits.

Statistic	55% pearled grain										50% pearled grain									
	Pearling time		Whiteness		L*		a*		b*		Pearling time		Whiteness		L*		a*		b*	
	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Mean	-7.7	-1.5	5.6	-1.0	1.0	-1.3	-7.2	12.2	-10.2	-3.5	-7.7	0.7	3.8	-2.2	1.1	-0.8	-8.3	5.6	-9.5	-2.8
Standard deviation	3.3	4.9	3.2	3.8	0.9	1.6	6.9	20.0	7.6	9.9	4.7	7.6	3.1	2.7	0.8	1.3	5.3	10.6	7.2	8.2
Maximum	-3.0	4.9	10.7	6.4	2.8	1.2	6.5	54.0	-2.5	11.8	-1.2	13.0	9.9	2.4	2.5	0.8	-0.7	27.1	-1.1	10.1
Minimum	-13.7	-9.3	1.7	-8.5	-0.3	-3.7	-16.2	-14.6	-25.0	-18.4	-15.7	-11.0	0.9	-7.6	-0.1	-3.1	-14.1	-10.6	-19.9	-15.3
Best cross combination	A/S	A/S	A/S	B/A	A/S	B/A	B/A	B/A	B/A	B/A	A/S	A/S	A/S	B/A	A/S	B/A	A/262	B/A	B/A	A/262

Statistic	50% pearled grain																	
	Boiled grain								Polyphenol content	Amylose content	RVA				Paste whiteness			
	Whiteness		L*		a*		b*				Maximum viscosity		Break-down					
	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH	MPH	HPH				
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)					
Mean	-0.3	-4.9	-0.6	-1.9	20.0	47.2	-3.8	9.4	7.6	11.0	0.4	1.1	2.4	0.2	1.5	-0.8	-1.1	-4.6
Standard deviation	2.1	3.3	0.8	0.8	15.7	26.6	4.6	10.1	12.3	13.5	2.4	2.3	4.7	5.1	4.5	5.9	1.9	2.5
Maximum	2.6	0.0	0.6	-0.7	52.7	92.9	3.4	20.2	29.8	32.2	4.9	4.2	9.8	7.3	8.7	9.3	2.4	-0.7
Minimum	-4.6	-9.4	-1.8	-3.0	-1.8	17.2	-10.3	-8.1	-4.3	-2.2	-3.2	-2.1	-4.0	-9.3	-5.4	-10.3	-4.3	-8.0
Best cross combination	M/S	M/A	A/S	S/262	M/S	S/262	M/A	M/A	S/262	S/262	A/262	A/S	A/262	A/262	A/262	A/262	A/S	S/262

Note. Best cross combination : M="Minorimugi", S="Shinjuboshi", A="Aizu 6", B="Banong", 262="Morikei C-262"

得られた。また、セディメンテーション値 (SDS-セディメンテーション値含む) ではBorghi and Perenzin (1994) とSubhashchandra *et al.* (2010) はGCA、SCA各分散ともに有意であると報告している。本報告でも2000年でGCA、SCA各分散が有意であり、これらの報告と一致したが、1999年はGCAのみが有意であった。

生地物性のファリノグラムおよびミキソグラム特性では、Borghi and Perenzin (1994) はファリノグラムのAb、DT、Stab、Wkの各GCA分散は有意であるが、SCA分散ではいずれも有意でないと報告しており、Labuschagne *et al.* (1996) もファリノグラムのAbとDT、ミキソグラムのDで同様の結果を報告している。本報告では、2000年のファリノグラムAb、DTおよびVVにおいてこれらの報告とよく一致した結果が得られた。しかし、1999年のミキソグラムのAb、DおよびAともにGCA、SCA各分散は有意となり、Labuschagne *et al.* (1996) の結果と異なった。これはダイアル交配に用いた品種の違いによると考えられる。

なお、本報告では調査していないが、主にヨーロッパ諸国で製パン適性の指標に用いられているアル

ベオグラフについては、P (粘性) はGCA、SCA各分散とも有意であるが、L (展性) とW (焼結強度) はGCAのみ有意であると報告されている (Borghi and Perenzin 1994、Perenzin *et al.* 1998)。

RECに関しては、Ekiz *et al.* (1998) は蛋白含量とSDS-セディメンテーション値は有意であり、*Aegilops cylindrica*、*Ae. variabilis*、および*Ae. uniaristata*細胞質は蛋白含量の向上に効果があり、*T. aestivum*細胞質は他の細胞質よりSDS-セディメンテーション値が優れ、また、普通系パン用小麦品種のBolal 2973、Kirac 66、およびBezostaja 1の細胞質はいくつかの交配でSDS-セディメンテーション値を増加させたと報告し、小麦品質への母親細胞質の関与を示唆した。Akram *et al.* (2011) も、製粉歩留のREC分散は有意で高かったため、交雑での母親の重要性を指摘している。本報告では、RECは2カ年とも全ての特性で有意でなかったため、品質への母親の細胞質による影響はほとんどないものと考えられるが、上記の報告のように普通系小麦品種でも品質に細胞質が関与する組合せがあるので、今後検討する余地はある。

GCA:SCAまたはGCA、SCA各分散の大小に関す

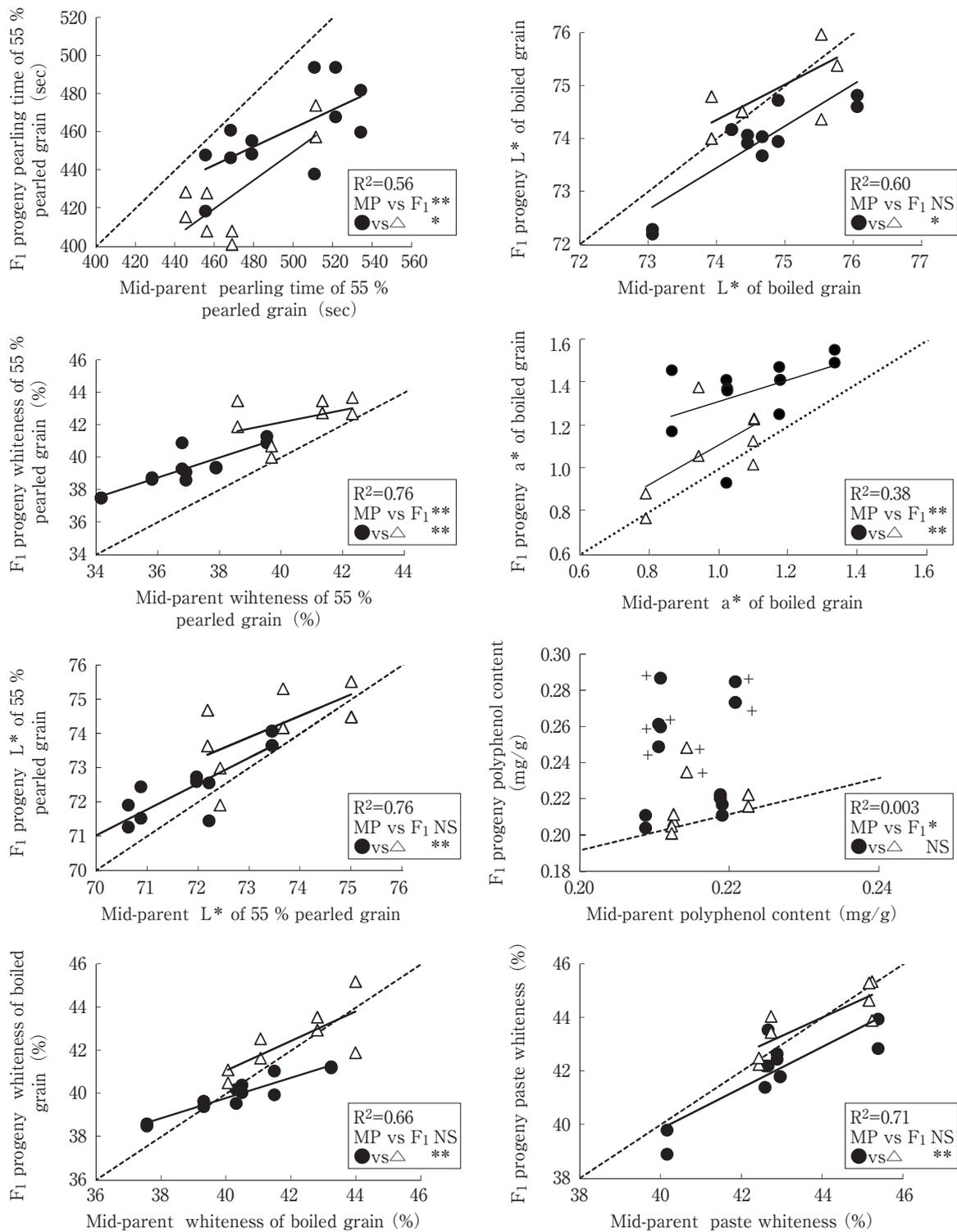


Fig. 3 Relationships between mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value on pearled grain qualities in a 5×5 diallel cross of barley.

Note. 1) Mid-parent value= (P1 value+P2 value) /2

2) Presence or absence of one parent, "Shinjuboshi" in cross combination : △Presence, ●Absence.

3) "+" in polyphenol content figure shows the cross combination with one parent "Aizu 6"

4) A dotted line shows the case that mid-parent value and F<sub>1</sub> progeny value are equal.

MP vs F<sub>1</sub> and ●vs△ present t-test of mean differences between mid-parent mean and F<sub>1</sub> progeny, and between F<sub>1</sub> progeny with "Shinjuboshi" and F<sub>1</sub> progeny without "Shinjuboshi", respectively.

5) \* and \*\* indicate significance at P<0.05 and P<0.01, respectively. NS indicates nonsignificance.

る報告では、製粉歩留 (Labuschagne *et al.* 1996、Barnard *et al.* 2002)、原粒または小麦粉蛋白含量 (Brown *et al.* 1966、Borghini and Perenzin 1994、Labuschagne *et al.* 1996、Ekiz *et al.* 1998、Akram *et al.* 2001、Barnard *et al.* 2002、Joshi *et al.* 2004、Iqbal and Khan 2006、Subhashchandra *et al.* 2010、Kamaluddin *et al.* 2011)、セディメンテーション値 (Subhashchandra *et al.* 2010)、SDS-セディメンテーション値 (Borghini and Perenzin 1994)、ファリノグラム (Borghini and Perenzin 1994、Labuschagne *et al.* 1996)、ミキソグラム (Labuschagne *et al.* 1996、Barnard *et al.* 2002)、アルベオグラフ (Borghini and Perenzin 1994、Labuschagne *et al.* 1996) パン体積 (Barnard *et al.* 2002) の各特性はGCA分散の方がSCA分散に比べ非常に大きい (GCA:SCAが2以上) とされている。そして、いずれの報告も、これらの特性の遺伝は主として相加的遺伝子効果により制御されていると結論付けている。本報告でも、GCA:SCAは2カ年とも製粉・小麦粉特性および製パン適性のほとんどの特性でそれぞれ4以上の高い値を示したことから、上記の報告とよく一致した結果が得られた。また、相加的遺伝子作用もこれらの特性の大部分は0.9以上と高かった。従って、一般に相加的遺伝子効果の小麦品質の遺伝的制御への影響は非相加的遺伝子効果に比べ非常に大きいと考えられる。

小麦のGCA効果については、HMW-GS 5+10を持つ品種・系統の「Palo Duro」、「Recital」、「ハルイブキ」、「東北221号」はこれを持たない品種・系統に比べて、ファリノグラムおよびミキソグラムのAbを除く特性で正の高い値を示した。また、製パン適性の高い「ハルイブキ」と「東北221号」は、製パン適性の各特性でも全般にGCA効果は正の高い値を示した。以上の結果、HMW-GS 5+10を持つ小麦品種は、一般に製パン特性のGCA効果が高いと考えられる。HMW-GS 5+10を持つ系統はこれを持たない系統より、一般に製パン適性が優れる傾向にあることが報告されている (Takata *et al.* 2000、Pirozi *et al.* 2008) が、本報告の製パン特性のGCA効果も同様な傾向となった。

一方、Borghini and Perenzin (1994) は、最適なHMW-GS構成 (5+10サブユニット有) で最高の品質スコアを持つ「Maestra」は製パン適性関連特性のアルベオグラフW、ファリノグラムStab、Wkで

正のGCA効果を示したが、これらの特性で最大のGCA効果を持つ品種は「Golia」(5+10サブユニット無) で、HMW-GSの品質スコアは「Maestra」が16点に対し「Golia」は11点と低かった。そして「Golia」の製パン適性関連特性のGCA効果が高い理由は、蛋白含量のGCA効果も最大であったことに起因するとした。本報告でも、1999年のHMW-GS 5+10を持たない「東北195号」は製粉歩留、小麦粉蛋白含量およびファリノグラムWkで、2000年のHMW-GS 5+10を持たない「さび保20」は小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値でそれぞれ最大値を示したにもかかわらず、Glu-1 品質スコアは「東北195号」は7点、「さび保20」8点とHMW-GS 5+10を持つ「Palo Duro」10点、「ハルイブキ」9点に比べて低かった (Table 1) ので、Borghini and Perenzin (1994) と同様の結果が得られた。

GCA効果と親値との相関は、製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、アミロース含量、ファリノグラムのDT、Stab、VV、ミキソグラム特性および製パン適性の吸水性、パン総合評価点についていずれも0.8以上の有意で高い正の相関を示した。従って、これらの特性では相加的遺伝子作用により強く制御されているので、親値から一般組合せ能力を推定することができると考えられる。一方、製パン適性の多くの特性では相関が低い特性が多いので、親値からGCA効果を推定することができないと考えられる。

SCA効果においては、1999年材料の「Palo Duro」/「SK-26」などの3組合せで、ファリノグラムDT、Stab、VVの3特性において高いSCA効果を示した。また、2000年材料では、36組合せの内、「ナンブコムギ」/「東北212号」などの5組合せだけが、特異的に製パン適性の全15特性の内9~12特性 (パン総合評価点も含む) が上位5位以内に入り、製パン適性について優れた特定組合せ能力を示した。以上のように、多くの品質特性で特定の組合せのみにSCA効果が高かった。これらの親品種・系統の系譜からみて遺伝的に非常に遠い組合せであるため、多くの品質特性でSCA効果が高まったと考えられる。

狭義の遺伝率は、製粉歩留、小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、アミロース含量、ファリノグラムのDTとVV、およびミキソグラムのAb、DおよびAで高かったため、これらの特性では初期世代からの選抜が有効であると考えられる。一方、製

パン適性はやや高い遺伝率の吸水性とパン総合評価点を除いて、中位または低い遺伝率を示した。製パン適性は多くの品質特性が関係した複雑な特性であるため、遺伝率の高い個々の特性の選抜を積み上げた中期世代以降に選抜することが重要であると推察される。F<sub>1</sub>では小麦粉蛋白含量、セディメンテーション値、生地物性と製パン適性との相関は高くないので (Table 11)、製パン適性関連特性の選抜は、最初に初期世代でHMW-GS 5+10の有無で選抜し、その後少量サンプルで測定できる蛋白含量、セディメンテーション値で選抜し、中期世代でミキソグラムのD、Aで選抜することが有効であると考えられる。

狭義の遺伝率の報告に関しては、製粉歩留は中位 (Pearson *et al.* 1981) または高い (Barnard *et al.* 2002)、蛋白含量は高い (Ekiz *et al.* 1998) または低い (Pearson *et al.* 1981)、セディメンテーション値は高い (Baker and Campbell 1971)、ミキソグラムのDは低い (Baker and Campbell 1971, Barnard *et al.* 2002)、そしてパン体積は低い (Barnard *et al.* 2002) とそれぞれ報告されている。これらの報告は本報告と製粉歩留、セディメンテーション値、パン体積についてはほぼ一致し、蛋白含量も高い方で一致したが、ミキソグラムのDは全く反対の結果となった。

小麦品質のヘテロシスに関しては、外国品種と日本品種・系統の組合せの1999年材料では、F<sub>1</sub>は平均親に比べて低蛋白化したにもかかわらず、ファリノグラムのDT、StabおよびVVのF<sub>1</sub>は平均親より高くなる組合せが大部分であり、F<sub>1</sub>の多くは生地がより強力になるというヘテロシスを示した。また、MPHおよびHPH最大値の組合せは、全特性において片親または両親が外国品種であった。一方、日本品種・系統同士の組合せの2000年材料は、小麦粉蛋白含量とミキソグラム特性ではヘテロシスはみられなかった。また、MPHとSCA効果との相関はファリノグラムのDT、StabおよびVVにおいて高かった。以上のことから、組合せには遺伝的にかなり異なる品種を用いた方が、生地ミキシング特性のヘテロシス程度が大きくなり、このヘテロシスは優性効果とエピスタシスによると考えられる。Falconer (1972) は、2系統または集団間の交雑によるヘテロシス程度は系統・集団間の遺伝子頻度差異の平方に依存するとした。このため、1999年材料においては、ファリノグラムのDT、StabおよびVVの遺伝子頻

度の差異が外国品種と日本品種・系統の間で大きかったため、強いヘテロシスが発揮されたものと考えられる。2000年材料では、セディメンテーション値と製パン適性の吸水性、作業性およびパン総合評価点にヘテロシスがみられた。しかし、これらの製パン適性とセディメンテーション値との相関は低く、しかもミキソグラムのD、Aとの相関も低かったため、これらの製パン適性のヘテロシスは製パン適性関連特性では十分説明ができなかった。このため、製パン適性のヘテロシス解析はファリノグラム、エキステンソグラムなどの新たな品質特性を加えて検討する必要がある。

小麦品質のヘテロシスの報告については、原粒蛋白含量ではF<sub>1</sub>平均が平均親対比で100%となり、有意に平均親より高いまたは低いというF<sub>1</sub>は見られなかった (Brown *et al.* 1966)。アルベオグラフのWから推定したF<sub>1</sub>の製パン適性は、両親の中間かまたは製パン適性の低い親品種により近い組合せが多かった (Borghini *et al.* 1988)。ハイブリッド小麦は親と比べて蛋白含量が高く、生地伸長性が大きくグルテンが弱い傾向であった (Perenzin *et al.* 1992)。以上の報告は本報告と一部一致している場合 (Brown *et al.* 1966の結果は1999年材料の小麦粉蛋白含量において一致) はあるものの、全く反対の結果となった。この原因は本報告で用いた2カ年の材料でも同じ特性で、ヘテロシスの差異があったので、供試品種の違いが品質特性のヘテロシスの差異を生み出したものと考えられる。

HMW-GS 5+10の有無は、Figs.1~2から明らかのように、1999年材料ではファリノグラムのDT、StabおよびVV、2000年材料ではセディメンテーション値、ミキソグラムのDとA、製パン適性の吸水性、作業性、官能評価合計点およびパン総合評価点で有意差があった。特に、ファリノグラムとミキソグラムの各特性ではHMW-GS 5+10の有無の差が明確に認められたため、HMW-GS 5+10は生地ミキシング特性に強く関係していると考えられる。

大麦精麦特性の組合せ能力の分散分析では、GCA分散はほとんどの特性で有意であったが、SCA分散とREC分散は逆に有意な特性はみられなかった。また、GCA:SCAはすべての特性で4以上、相加的遺伝子作用は最高粘度を除いて0.9以上といずれも高かった。従って、大麦の精麦特性の遺伝的制御には、小麦品質と同様に、主に相加的遺伝子効

果が関わっており、非相加的遺伝子効果や母親の細胞質の影響は小さいと考えられる。Hockett *et al.* (1993) は、GCA分散は $F_1$ および $F_2$ におけるビール大麦品質の全特性で有意であったが、SCA分散は $F_1$ の麦芽蛋白質と麦芽汁蛋白含量のみ有意で、REC分散は有意でないとして報告した。また、Zhou *et al.* (2008) は、RVAによる大麦糊化温度はGCAは有意であったがSCAは有意でないとした。以上の報告はビール大麦品質の組合せ能力に関する報告であるが、本報告の精麦適性のGCA分散は有意、SCA・REC分散は有意でないという結果と比較的よく一致した。

大麦品種のGCA効果に関しては、「シンジュボシ」は搗精時間、搗精白度、炊飯白度およびポリフェノール含量などの多くの重要な特性で、最も優れたGCA効果を示した。「シンジュボシ」は早生で外観品質が優れ、精麦適性・炊飯適性ともに優れる品種であるが(吉川ら 2009)、精麦適性の一般組合せ能力も優れているので、高精麦適性母本として優れていると考えられる。一方、標準品種である「ミノリムギ」は、精麦適性・炊飯適性のGCA効果は中程度で「シンジュボシ」より劣るが、RVA最高粘度のGCA効果は最大値を示したので、最高粘度の改良のための母本として有用であると考えられる。Zhou *et al.* (2008) は、麦芽エキスと関係のあるRVAの糊化温度のGCA効果はビール大麦品種では負の値を示すが、飼料用大麦品種では正の値を示すことを明らかにし、糊化温度は初期世代から選抜が可能であるとした。本報告では糊化温度は調査していないが、RVAは少量サンプルかつ短時間で糊化特性を測定できるので、糊化温度、最高粘度、ブレイクダウンなどの特性の選抜に有効であると考えられる。

GCA効果と親値との有意で高い相関(相関係数0.9以上)は、55%精麦の搗精時間、白度、 $L^*$ 、炊飯白度および糊白度などで認められたので、これらの特性では親値から一般組合せ能力を推定することができると考えられる。

大麦の狭義の遺伝率は、搗精白度、搗精麦の $L^*$ 、炊飯白度、炊飯の $L^*$ と $a^*$ 、および糊白度が高かったことから、搗精麦および炊飯麦の色に関する選抜は初期世代から有効であると推測される。一方、加熱褐変および炊飯白度と関係のあるポリフェノール含量(藤田ら2000、吉川ら2000)は遺伝率が低いた

め、初期世代からの選抜は有効でないと考えられる。中村ら(2008)は精麦白度そのものに有意な品種間差は認められず、遺伝率(広義)は0.26と低いと報告している。これは本報告との供試材料の違いによると思われる。

精麦適性のヘテロシスに関しては、55%搗精の搗精時間は短い方へ、搗精白度は高い方への明確なヘテロシスを示した。また、炊飯麦の $a^*$ およびポリフェノール含量は高い方へのヘテロシスを示したが、ポリフェノール含量でヘテロシスを示したのは「会津6号」との組合せに限られた。従って、 $F_1$ はヘテロシスにより平均親より精麦適性は向上するが、炊飯麦の赤味程度 $a^*$ が大きくなった。この $F_1$ の精麦適性が高まる品質要因として、粒質が親より軟質傾向になり精麦適性が向上したものと推察される。本試験では粒硬度および蛋白含量を調査しなかったが、1999年小麦では $F_1$ は平均親より低蛋白になったので、大麦でも同様なことが起こった可能性がある。今後、これらの特性を新たに調査することにより更に精麦適性向上の要因解析が進むと考えられる。ポリフェノール含量は「会津6号」の組合せで強いヘテロシスを示したことは、「会津6号」と他の品種とは遺伝的にかなりかけ離れていて、優性遺伝子効果によりポリフェノール含量が高まったと考えられる。

以上のように、小麦・大麦品質のダイアレル交配による組合せ能力およびヘテロシスの解析は、特性の相加的・非相加的遺伝子効果の遺伝情報のみならず、GCA・SCA効果、狭義の遺伝率、ヘテロシスの強弱などの情報も同時に得られる。従って、小麦および大麦の品質育種においても交配母本選定および選抜方法の強力な手法になると思われる。ただし、GCAおよびSCAの分散、効果などの推定値は個々のダイアレル交配特有なもので、ダイアレル交配に用いる親により変動することに注意する必要がある。

残された課題として、①東北農研(盛岡)の畑圃場は肥沃土が高いため、小麦が高蛋白で生地物性が強く製パン適性が高くなり、大麦は硬質ぎみになる傾向がある。このため、低蛋白で軟質傾向となりやすい水田圃場での検討も必要である。②1999年小麦材料は製パン適性が調査できなかったため、その調査が必要である。③大麦については精麦特性に加えて、粒硬度、蛋白含量の調査が必要である。

## 謝 辞

本試験に当たり、東北農業研究センター企画調整部業務第1科の技術専門職員および契約職員には研究支援の面で、麦育種研究室の契約職員には研究補助の面でそれぞれご尽力いただいた。これらの方々に感謝を申し上げます。

## 引用文献

- 1) Akram, Z.; Ajmal, S. U.; Khan, K. S.; Qureshi, R.; Zubair, M. 2011. Combining ability estimates of some yield and quality related traits in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). Pak. J. Bot. 43 : 221-231.
- 2) Baker, R. J.; Campbell, A. B. 1971. Evaluation of screening tests for quality of bread wheat. Can. J. Plant Sci. 51 : 449-455.
- 3) Barker, R. J. 1978. Issues in diallel analysis. Crop Sci. 4 : 533-536.
- 4) Barnard, A. D.; Labuschagne, M. T.; van Niekerk, H. A. 2002. Heritability estimates of bread wheat quality traits in the Western Cape province of South Africa. Euphytica 127 : 115-122.
- 5) Bietz, J.; Wall, J. S. 1972. Wheat gluten subunits: molecular weights determined by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. Cereal Chem. 49 : 416-430.
- 6) Blackman, J. A.; Payne, P. I. 1987. Grain quality. (Lupton, F.G.H. ed., Wheat breeding-Its scientific basis.). London. Chapman and Hall. p. 455-485.
- 7) Borghi, B.; Perenzin, M.; Nash, R. J. 1988. Agronomic and qualitative characteristics of ten bread wheat hybrids produced using a chemical hybridizing agent. Euphytica 39 : 185-194.
- 8) Borghi, B.; Perenzin, M. 1994. Diallel analysis to predict heterosis and combining ability for grain yield, yield components and bread-making quality in bread wheat (*T. aestivum*). Theor. Appl. Genet. 89 : 975-981.
- 9) Brown, C. M.; Weibel, R. O.; Seif, R. D. 1966. Heterosis and combining ability in common winter wheat. Crop Sci. 6 : 382-383.
- 10) Brown, J.; Caligari, P. 2008. Predictions. (An introduction to plant breeding.) Oxford, UK. Blackwell Publishing. p.96-115.
- 11) Ekiz, H.; Safi Kiral, A.; Akcin, A.; Simsek, L. 1998. Cytoplasmic effects on quality traits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Euphytica 100 : 189-196.
- 12) Falconer, D. S. 1972. Heterosis. (Introduction to quantitative genetics.). New York. The Ronald Press Company. p.254-263.
- 13) Frey, K. J.; Horner, T. W. 1957. Heritability in standard units. Agron. J. 49 : 59-62.
- 14) 藤田雅也, 武田和義, 神山紀子, 土門英司, 土井芳憲. 2000. オオムギにおける穀粒の加熱褐変とポリフェノール含量の品種間差異. 四国農試報 65 : 9-16.
- 15) Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Aust. J. Biol. Sci. 9 : 463-493.
- 16) Hockett, E.A.; Cook, A. F.; Khan, M. A.; Martin, J. M.; Jones, B. L. 1993. Hybrid performance and combining ability for yield and malt quality in a diallel cross of barley. Crop Sci. 33 : 1239-1244.
- 17) Iqbal, M.; Khan, A. A. 2006. Estimation of combining ability effects for plant biomass, grain yield and protein content in wheat (*Triticum aestivum* L.). Int. J. Agri. Biol. 8 : 688-690.
- 18) Joshi, S. K.; Sharma, S. N.; Singhanian, D. L.; Sain, R. S. 2004. Combining ability in the F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> generations of diallel cross in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L. em. Thell). Hereditas 141 : 115-121.
- 19) Juliano, B. O. A. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today. 16 : 334-360.
- 20) Kamaluddin; Singh, R. M.; Khan, M. A. 2011. Combining ability analyses for protein content and maturity traits in spring wheat (*Triticum aestivum*). J. Phytol. 3 : 38-43.
- 21) Kraljević-Balalić, M.; Štajner, D.; Gašić, O. 1982. Inheritance of grain proteins in wheat. Theor. Appl. Genet. 63 : 121-124.
- 22) Labuschagne, M. T.; Coetzee, M. C. B.; van

- Deventer, C. S. 1996. General combining ability of six genotypes of spring wheat (*Triticum aestivum*) for biscuit-making quality characteristics. *Plant Breed.* 115 : 279-281.
- 23) 中村和弘, 細野 哲, 上原 泰, 牛島智彦. 2008. 六条オオムギの精麦白度関連形質の要因解析と品種特性. *育種学研究* 10 : 49-55.
- 24) 農林水産技術会議事務局. 1968. 小麦品質検定方法 - 小麦育種試験における -. *研究成果* 35 : 1-70.
- 25) Payne, P. I.; Nightngale, M. A.; Krattiger, A. F.; Holt, L. M. 1987. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J. Sci. Food Agric.* 40 : 51-65.
- 26) Pearson, D. C.; Rosielle, A. A.; Boyd, W. J. R. 1981. Heritabilities of five wheat quality traits for early generation selection. *Aust. J. Exp. Agric. Anim.* 21 : 512-515.
- 27) Perenzin, M.; Pogna, N. E.; Borghi, B. 1992. Combining ability for breadmaking quality in wheat. *Can. J. Plant Sci.* 72 : 743-754.
- 28) Perenzin, M.; Corbellini, M.; Accerbi, M.; Vaccino, P.; Borghi, B. 1998. Bread wheat: F<sub>1</sub> hybrid performance and parental diversity estimates using molecular markers. *Euphytica* 100 : 273-279.
- 29) Pirozi, M. R.; Margiotta, B.; Lafiandra, D.; MacRitchie, F. 2008. Composition of polymeric proteins and bread-making quality of wheat lines with allelic HMW-GS differing in number of cysteines. *J. Cereal Sci.* 48 : 117-122.
- 30) Poehlman, J. M. 1987. *Breeding wheat and triticale. (Breeding field crops.)* Westport, Connecticut, USA. AVI Publishing Company, Inc. p.290-339.
- 31) Raina, R.; Singh, R. B.; Sharma, G. S. 1979. Combining ability for grain quality in spring wheat. *Indian J. Gen. Plant Breed.* 39 : 225-229.
- 32) Roy, D. 2000. Combining ability analysis. (*Plant breeding: analysis and exploitation of variation*). UK. Alpha Science International Ltd. p.149-152.
- 33) Shattuck, V. I.; Christie, B.; Corso, C. 1993. Principles for Griffing's combining ability analysis. *Genetica* 90 : 73-77.
- 34) Subhashchandra, B.; Lohithasway, H. C.; Desai, S. A.; Kalapranavar, I. K.; Math, K. K.; Hanchinal, R. R.; Salimath, P. M. 2010. Combining ability analysis for yield, quality and other quantitative traits in tetraploid wheat. *Karnataka J. Agric. Sci.* 23 : 554-556.
- 35) Takata, K.; Yamauchi, H.; Nishio, Z.; Kuwabara, T. 2000. Effect of high molecular weight glutenin subunits on bread-making quality using near-isogenic lines. *Breed. Sci.* 50 : 303-308.
- 36) 栃木県農業試験場栃木分場ビール麦醸造用品質改善指定試験地. 1998. ポリフェノール総量 (品質改良のためのビール麦品質検定法 第3版). p.22-23.
- 37) 鶴飼保雄. 2002. ヘテロシス (量的形質の遺伝解析). 東京. 医学出版. p.124-148.
- 38) 吉川 亮, 中村和弘, 伊藤美環子, 八田浩一. 2000. 大麦の精麦白度, 炊飯白度及びポリフェノール含量の品種・地域間差異. *東北農業研究* 53 : 79-80.
- 39) 吉川 亮, 中村和弘, 伊藤美環子, 伊藤裕之, 佐藤暁子, 伊藤誠治, 八田浩一, 中村 洋, 星野次汪. 2009. 寒冷地向け大麦品種「シンジュボシ」の育成とその特性. *東北農研研報* 110 : 67-82.
- 40) 吉川 亮, 中村和弘, 伊藤美環子. 2011. 新形質小麦品種・系統の小麦粉ブレンドによる製パン適性の向上技術. *東北農研研報* 113 : 97-122.
- 41) Zhou, M. X.; Li, H. B.; Chen, Z. H.; Mendham, N. J. 2008. Combining ability of barley flour pasting properties. *J. Cereal Sci.* 48 : 789-793.