

日本麺用コムギにおける *Glu-A1* 座および *Glu-D1* 座支配のグルテニンサブユニット構成, タンパク質含有率の違いが製菓適性に及ぼす影響

谷中美貴子・高田兼則・船附稚子・石川直幸

(農研機構西日本農業研究センター)

要旨: *Glu-A1* 座および *Glu-D1* 座支配のグルテニンサブユニット構成が異なる 4 種類の日本麺用コムギの準同質遺伝子系統を開花期窒素施用量を変えて栽培し, 得られた小麦粉タンパク質含有率が異なる小麦粉を用いて, グルテニンサブユニット構成, タンパク質含有率の違いが製菓適性に及ぼす影響を, スポンジケーキ試験, クッキー試験および SRC (Solvent Retention Capacity) により調査した. 小麦粉タンパク質含有率は 7.7~11.7% で, 小麦粉タンパク質含有率が高まると, スポンジケーキの比容積, クッキーの直径, スプレッドファクターは有意に小さくなり, 小麦粉タンパク質含有率と有意な負の相関関係を示した. スポンジケーキの比容積には系統間で有意な差はなかった. クッキーの直径, スプレッドファクター, 乳酸 SRC には系統間で有意な差がみられ, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失した系統では, *Glu-A1* 座サブユニット 1 を持つ系統に比べて, クッキーの直径とスプレッドファクターが大きく, 乳酸 SRC が低かった. スポンジケーキの比容積とクッキーの直径およびスプレッドファクターは, グルテンの強さを示す乳酸 SRC と有意な負の相関関係を示したが, その相関関係は小麦粉タンパク質含有率との相関関係より弱かった. これらの結果から, 製菓適性には小麦粉タンパク質含有率が強く影響すること, クッキー適性にはグルテニンサブユニット構成が影響し, *Glu-A1* 座サブユニットの欠失がクッキーの直径やスプレッドファクターに正の効果を持つことが示唆された.

キーワード: クッキー適性, 高分子量グルテニンサブユニット, コムギ, スポンジケーキ適性, タンパク質含有率.

日本では, 粒が軟らかい軟質コムギの大部分は, うどんなどの日本麺用や菓子用で使用されている. 国産コムギの品質ランク区分は日本麺用, パン・中華麺用, 醸造用の 3 つで, 菓子用という区分がないため, 菓子用には, 軟質の日本麺用コムギでタンパク質含有率の低いものが利用されているのが現状である.

製菓適性は主にスポンジケーキやクッキーへの加工適性で評価される. 我が国では, スポンジケーキ適性は主に Nagao ら (1976) が開発した Japanese sponge cake test により評価されている. スポンジケーキは, 体積が大きく, 内相が細かく均一で, しつとりとソフトな食感であることがよい. スポンジケーキの体積は小麦粉タンパク質含有率 (Nagao ら 1977, Gaines 1985, Yamamoto ら 1996, Moiraghi ら 2013a) や小麦粉の粒径 (Gaines 1985, Yamamoto ら 1996, Moiraghi ら 2013a), 損傷澱粉量 (Gaines 1985, Yamamoto ら 1996, Moiraghi ら 2013a) と負の相関関係にあることが報告されている. クッキーの作成方法には配合が異なる複数の方法があるが, クッキー適性は, クッキーの直径, 厚み, 直径を厚みで除したスプレッドファクターにより評価される. 直径が最も信頼できるパラメーターで, 直径が大きく, 厚みが薄く, スプレッドファクターが大きいことがよい (AACC International 1999). クッキーの直径は小麦粉タンパク質含有率 (Gaines ら 1985, Bettge and Morris 2000), 小麦粉の粒径 (Gaines ら 1985, Yamamoto ら 1996, Moiraghi ら 2013b), 損傷澱粉量 (Yamamoto ら 1996, Moiraghi ら 2013b), アラビ

ノキシラン含量 (Bettge and Morris 2000, Moiraghi ら 2013b) と負の相関関係にあることが報告されている. これらの報告は, 菓子用には, タンパク質含有率が低く, 粒径が小さく, 損傷澱粉量が少なく, アラビノキシラン含量が少ない小麦粉が適することを示唆している.

日本では, 菓子用にタンパク質含有率が低い薄力粉が使用されることが多いが, 小麦粉生地はタンパク質の“量”を表すタンパク質含有率と, “質”を表すグルテニンやグリアジンなどのグルテン構成タンパク質の遺伝子型構成に強く影響される. ゆえに, 製菓適性には小麦粉タンパク質含有率だけでなく, グルテニンやグリアジンなどの小麦粉タンパク質の組成も影響を及ぼすと考えられる. Nakamura ら (1999) によると, 我が国の日本麺用品種の高分子量グルテニンサブユニット構成は, *Glu-A1* 座支配のグルテニンサブユニット (以下, *Glu-A1* 座サブユニット) が 1 か, 2* または欠失のいずれか, *Glu-D1* 座支配のグルテニンサブユニット (以下, *Glu-D1* 座サブユニット) が 2+12 か 2.2+12 のいずれか, である場合が多い. これらのサブユニット構成の違いは生地物性に影響し, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失すると生地物性が弱くなり (Payne ら 1979, Moonen ら 1982), *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 を持つとサブユニット 2+12 を持つ場合より生地物性が弱くなる (Takata ら 2000, 2002). また, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失し, かつ, *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 を持つと, *Glu-A1* 座サブユニット 1 を持つ場合や *Glu-D1* 座サ

ブユニット 2+12 を持つ場合と比べて顕著に生地物性が弱い (高田ら 2008, 谷中ら 2016, 2017). 著者らは, 前報 (谷中ら 2017) において, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失し, かつ, *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 を持つ場合に, 生麺が切れやすくゆで麺が軟らかくなるという製麺適性への負の影響を報告し, この差異が製菓適性にも影響を及ぼしている可能性があると考えた. 製菓適性と高分子量グルテニンサブユニットとの関係に関する報告は少なく, Souza ら (1994) は, 51 品種のクッキー適性を評価し, 小麦粉タンパク質組成の効果は小麦粉タンパク質含有率の効果より小さいことを述べ, 高分子量グルテニンサブユニットのほとんどで有意な効果がみられなかったことを報告している. 一方で, 高分子量グルテニンサブユニットの生地物性を強める効果が大きいと評点が高くなるグルテニンランクの合計値 (GRS) については, クッキーの直径と負の相関関係を示したことを述べており, その相関は小麦粉タンパク質含有率の高い年に低く, 小麦粉タンパク質含有率の低い年には高かったことから, グルテニンサブユニット構成の効果はタンパク質含有率によりマスクされうることを報告している. Hou ら (1996) は, 17 品種を用いて, *Glu-A1* 座サブユニット 1 を持つ品種はサブユニット 2* を持つ品種よりスポンジケーキ比容積やクッキー直径が大きいことを報告している. また, Moiraghi ら (2013b) は, 44 品種を用いて, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失した品種はサブユニット 1 あるいは 2* を持つ品種よりクッキーのスプレッドファクターが大きかったことを報告している. Zhang ら (2018) は, *Glu-A1* 座サブユニットまたは *Glu-D1* 座サブユニットが欠失した準同質遺伝子系統を用いて, サブユニットが欠失していない場合あるいは *Glu-A1* 座サブユニットが欠失した場合より *Glu-D1* 座サブユニットを欠失した場合に, また, *Glu-A1* 座サブユニットを単一欠失した場合より *Glu-A1* 座サブユニットと *Glu-D1* 座サブユニットを二重欠失した場合に, クッキーの直径が大きく, 厚みが薄くなったことを報告している. これらの報告から, 日本麺用品種においても高分子量グルテニンサブユニット構成の違いが製菓適性に影響を及ぼすことが予想される.

製菓適性を簡易に評価する方法として, Solvent Retention Capacity (SRC) 法が開発されている. SRC 法は, 小麦粉の 4 種の溶媒 (5% 乳酸, 5% 炭酸ナトリウム (以下, 炭酸 Na), 50% スクロース, 水) に対する遠心後の保持能力を調べ, それぞれの溶媒に対する保持能力から製菓適性を推定する方法で (AACC International 2009), 遺伝的要因や環境的要因が多様な材料における評価方法として優れているため, 育種現場などで広く用いられている (Kweon ら 2011). 一般的に, 乳酸 SRC はグルテンの強さに, 炭酸 NaSRC は損傷澱粉量に, スクロース SRC はペントサンとグリアジンの量に, 水 SRC はすべての要素に関係する (Gaines 2000). スポンジケーキ比容積は, 水 SRC (Nakamura ら 2010, Moiraghi ら 2013a), 炭酸 NaSRC (Moiraghi ら

2013a), スクロース SRC (Nakamura ら 2010, Moiraghi ら 2013a), 乳酸 SRC (Moiraghi ら 2013a) と負の相関関係を示すことが報告されており, クッキー直径やスプレッドファクターは, 炭酸 NaSRC (Guttieri and Souza 2003, Guttieri ら 2004, Moiraghi ら 2013b), スクロース SRC (Guttieri and Souza 2003, Gaines 2004, Guttieri ら 2004, Moiraghi ら 2013b), 水 SRC (Guttieri and Souza 2003, Moiraghi ら 2013b), 乳酸 SRC (Guttieri and Souza 2003, Gaines 2004) と負の相関関係を示すことが報告されている. タンパク質の量や質と SRC との関係についての報告の多くは, 品種・系統間の比較に基づくものであり, タンパク質の量や質以外の影響も含んでいる. タンパク質以外の要因の影響をできるだけ除外した材料に基づく報告は, 同一品種で小麦粉タンパク質含有率が乳酸 SRC およびスクロース SRC と正の相関関係を示したこと (Guttieri ら 2002), 準同質遺伝子系統でサブユニットの欠失により乳酸 SRC が有意に低下したこと (Zhang ら 2018), に限られている.

そこで, 本研究では, 日本麺用コムギの *Glu-A1* 座および *Glu-D1* 座のグルテニンサブユニット構成とタンパク質含有率の違いが, 製菓適性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした. グルテニンサブユニット構成の異なる準同質遺伝子系統を開花期窒素追肥量を変えて栽培し, 得られたタンパク質含有率の異なる小麦粉の製菓適性を, スポンジケーキ試験, クッキー試験および SRC により調査した. また, 小麦粉タンパク質含有率と製菓適性との関連についても調査した.

材料と方法

1. 供試材料と栽培方法

反復親を日本麺用コムギ品種「ふくさやか」(石川ら 2005) とする *Glu-A1* 座, *Glu-D1* 座のグルテニンサブユニットに関する 4 種類の準同質遺伝子系統 (高田ら 2008) を用いた. 供試した準同質遺伝子系統の高分子量グルテニンサブユニット構成を第 1 表に示す. 各系統の *Glu-A1* 座, *Glu-B1* 座, *Glu-D1* 座のグルテニンサブユニット構成は, 系統 A: 1, 7+8, 2+12, 系統 B: 1, 7+8, 2.2+12, 系統 C: null (欠失), 7+8, 2+12, 系統 D: null (欠失), 7+8, 2.2+12 であり, 系統 D の構成は反復親の「ふくさやか」と同じである.

これらを農研機構近畿中国四国農業研究センター (現: 西日本農業研究センター, 広島県福山市) の圃場において, 2013 年 11 月に 1 区面積 4.2 m² (畦幅 70 cm, 播幅 14 cm, 播長 6.0 m), 播種量 100 粒 m² として播種し, 2014 年 6 月に収穫した. 基肥として N, P₂O₅, K₂O をそれぞれ 1 m² あたり 6.5, 6.5, 6.5 g 施用し, 2014 年 2 月 5 日と 3 月 12 日に N, P₂O₅, K₂O をそれぞれ 1 m² あたり 2.0, 1.4, 1.9 g 施用した. 異なる子実タンパク質含有率を得るため, 開花期に硫安を施用しない区と, 硫安を N として 1 m² あたり 4.0, 8.0 g を施用した区を設け, 各試験区は 4 反復で行った.

第1表 各準同質遺伝子系統および各開花期窒素施用量における小麦粉タンパク質含有率, スポンジケーキ試験およびクッキー試験の結果.

系統	高分子量グルテニンサブユニット			系統または開花期窒素施用量	小麦粉タンパク質含有率 (%)	スポンジケーキ比容積 (mL/g)	クッキー直径 (W) (mm)	クッキー厚み (T) (mm)	クッキースプレッドファクター (W/T)
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>						
A	1	7+8	2+12	0	8.2	3.96	86.8	9.54	9.1
				4	9.9	3.67	85.4	10.11	8.5
				8	11.2	3.58	84.2	10.05	8.4
B	1	7+8	2.2+12	0	8.5	3.91	87.8	9.79	9.0
				4	9.9	3.71	86.2	9.98	8.6
				8	11.3	3.60	84.9	10.02	8.5
C	null	7+8	2+12	0	8.1	3.89	88.7	9.52	9.3
				4	9.6	3.83	87.1	9.56	9.1
				8	11.1	3.48	85.7	9.83	8.7
D	null	7+8	2.2+12	0	8.5	3.74	87.5	9.63	9.1
				4	10.2	3.57	86.5	9.74	8.9
				8	11.5	3.53	84.7	9.77	8.7
各系統における 平均値 (全処理込み)				A	9.8 ^{ab}	3.73 ^a	85.5 ^c	9.90 ^a	8.6 ^a
				B	9.9 ^{ab}	3.74 ^a	86.3 ^b	9.93 ^a	8.7 ^a
				C	9.6 ^b	3.73 ^a	87.2 ^a	9.64 ^b	9.1 ^b
				D	10.1 ^a	3.61 ^a	86.2 ^{bc}	9.71 ^{ab}	8.9 ^{ab}
各開花期窒素施用量における 平均値 (全系統込み)				0	8.3 ^c	3.87 ^a	87.7 ^a	9.62 ^b	9.1 ^a
				4	9.9 ^b	3.69 ^b	86.3 ^b	9.85 ^a	8.8 ^b
				8	11.3 ^a	3.55 ^c	84.9 ^c	9.92 ^a	8.6 ^c
系統					**	ns	**	**	**
<i>Glu-A1</i> 座サブユニット					ns	ns	*	**	**
<i>Glu-D1</i> 座サブユニット					ns	ns	ns	ns	ns
<i>Glu-A1</i> 座 × <i>Glu-D1</i> 座					ns	ns	*	ns	ns
開花期窒素施用量					**	**	**	**	**
系統 × 開花期窒素施用量					ns	ns	ns	ns	ns

各系統における平均値は全開花期窒素施用量区込みの, 各開花期窒素施用量における平均値は全系統込みの平均値. 英文字が同一であることは系統間または開花期窒素施用量間で5%水準で有意差がないことを示す (Tukey-Kramer の多重比較). **, * はそれぞれ1%, 5%水準で有意であり, ns は有意でないことを示す.

2. 製粉および小麦粉の分析

4 反復それぞれの収穫物に対し, 以下の分析を行った.

収穫物は, 近赤外分光分析装置 (Infratec1241, FOSS 社) を用いて子実水分, 子実タンパク質含有率 (タンパク質換算係数 5.70, 水分 13.5%換算) を測定した. 小麦品質検定法 (農林水産技術会議事務局 1968) に従って, 子実水分 14.5% にテンパリング後, ビューラーテストミル (MLU-202, Buhler 社) で製粉し, 小麦粉 (60%粉) を調整した.

小麦粉タンパク質含有率 (タンパク質換算係数 5.70, 水分 13.5%換算) は, 近赤外分光分析装置 (Infratec1241, FOSS 社) を用いて測定した.

Solvent Retention Capacity (SRC) は AACC 56-11.02 (AACC International 2009) に従って測定した. 小麦粉 5.0 g に対し, 25 mL の水, 50%スクロース水溶液, 5%炭酸 Na 水溶液, 5%乳酸水溶液をそれぞれ加え, 5分おきによく攪拌しながら 20分間懸濁した. 1,000 × g で 15分間遠心した後, 上清を捨て, 上下逆さまにしてペーパータオルの上で 10分間保

持した後, 沈殿の重さを測定した. 小麦粉重量 (水分 14%ベース) に対し, 小麦粉が保持した各溶媒の重量の割合を SRC として算出し, 使用した溶媒に応じて, 水 SRC, スクロース SRC, 炭酸 NaSRC, 乳酸 SRC とした. 分析は 2 反復で行った.

3. 製菓適性の評価

スポンジケーキ試験は Nagao ら (1976) の方法に従って, 以下のように実施した. ケーキ 1 個あたりの配合は小麦粉 100 g (水分 14%ベース), 砂糖 100 g, 卵 100 g, 水 40 mL で, 1 回の試験で対照 1 点を含む 4 点を評価した. まず, ボウルに秤量した約 500 g の卵と等量の砂糖を入れ, ウォーターバス上で攪拌しながら温度が 40~41°C になるまで湯煎した. その後, ホイッパーを付けたミキサー (SK-20, 関東混合機工業社製) にセットした. 高速で 3分間攪拌した後, 卵の重量の 0.2 倍量の水を加え, さらに高速で 1分間攪拌後, 卵の重量の 0.2 倍量の水を再度加えた. 生地の状態

態を見ながら、生地比重が0.25程度になるまで、高速で2分間攪拌を続け、最後に低速で30秒間攪拌した。生地比重を測定し、必要に応じて再度高速で攪拌し、その後低速で攪拌することで、生地比重が 0.25 ± 0.01 になるよう調整した。なお、攪拌中はボウルを湯煎し、生地温度が40℃程度になるよう保温した。生地240gをボウルに量りとり、小麦粉100gを加え、木べらで半円を描きながら混ぜ合わせる作業を20回行った。ボウルおよび木べらに付着した生地をこすり落とし、混ぜ合わせる作業を20回行い、小麦粉と生地をよく混ぜ合わせた。型紙を敷いたケーキ型(5号型、直径15cm)に生地280gを移し、表面を滑らかにした後、200℃で25分間焼成し、オーブン内に空気を入れた後、1分間保持した。焼成直後、ケーキ型を約30cmの高さから水平に落とし、ケーキの収縮を防いだ。型紙がついたままのケーキを取り出し、ラック上で放冷した。十分に冷ました後、ケーキ体積を菜種置換法により測定し、ケーキ重量を測定し、体積を重量で除した比容積を算出した。比容積が大きいほど、ケーキが膨らんでいることを示す。

クッキー試験はAACC10-50.05 (AACC International 1999)に基づき、以下のように実施した。1回の試験で、小麦粉150g(水分14%ベース)、砂糖86.7g、ショートニング42.7g、炭酸水素ナトリウム1.7g、塩化ナトリウム1.4g、デキストロース溶液(デキストロース8.9gを水150mLで溶解)22g、水10.7gを用いて行った。ショートニング、砂糖、塩化ナトリウム、炭酸水素ナトリウムをボウルに加え、ミキサー(KSM5, KitchenAid)を用いて、スピード3で1分ごとに壁面についた生地をこすり落としながら3分間攪拌し、クリーム生地を作成した。これにデキストロース溶液と水を加え、スピード1で1分間ミキシングし、壁面の生地をこすり落としした後、スピード2で1分間ミキシングした。小麦粉を加え、スピード1で30秒ごとに壁面についた生地をこすり落としながら、2分間ミキシングした。生地を取り出し、6等分した生地を7mmの厚さに圧延し、直径60mmのクッキー型で型抜きした。205℃で10分間焼成し、焼成後、クッキーをオープンシェルフからはがし、ラック上で放冷した。十分に冷ました後、6枚のクッキーを横に並べて6枚分の幅を測定し、90度回転させた後に再度測定した。また、6枚のクッキーを積み重ねて6枚分の厚みを測定し、順番を並び替えて再度測定した。6枚分のクッキーの幅、厚みのそれぞれ2回の測定値の平均を6で除し、クッキーの直径、厚みを算出した。直径を厚みで除したスプレッドファクターを算出した。スプレッドファクターが大きいほど、クッキー生地が広がったことを示す。

4. 統計処理

各形質について系統および開花期窒素施用量を要因とする分散分析を行った。また、*Glu-1*座のグルテニンサブユニットの差異が及ぼす影響を調べるため、*Glu-A1*座サブユ

ニット、*Glu-D1*座サブユニットを要因とする分散分析を行った。いずれも有意水準は $p < 0.05$ および $p < 0.01$ とした。多重比較はTukey-Kramerの方法で有意水準を $p < 0.05$ として行った。統計解析はStatView5.0 (SAS Institute Inc.)を用いて行った。小麦粉タンパク質含有率、各SRC特性値とスポンジケーキ比容積、クッキー特性(直径、厚み、スプレッドファクター)のピアソンの積率相関係数を求め、無相関の検定を行った。また、小麦粉タンパク質含有率の影響を除いた各SRC特性値とスポンジケーキ比容積、クッキー特性(直径、厚み、スプレッドファクター)の偏相関係数を求め、無相関の検定を行った。

結 果

1. 製菓適性における準同質遺伝子系統間および開花期窒素施用量間差異

第1表に各準同質遺伝子系統および各開花期窒素施用量における小麦粉タンパク質含有率とスポンジケーキ試験およびクッキー試験の結果を示した。小麦粉タンパク質含有率は、系統間で有意に異なり、系統Dで系統Cより有意に高かった。*Glu-A1*座サブユニット間、また、*Glu-D1*座サブユニット間で有意な差はなかった。スポンジケーキ比容積は系統間で有意な差はなく、また、*Glu-A1*座サブユニット間、*Glu-D1*座サブユニット間で有意な差はなかった。クッキーの直径と厚みおよびスプレッドファクターは、系統間で有意に異なり、*Glu-A1*座サブユニット間で有意に異なった。クッキーの直径は、系統Cで他の3系統より有意に大きく、系統Bで系統Aより有意に大きかった。また、*Glu-A1*座サブユニットが欠失した系統で*Glu-A1*座サブユニット1を持つ系統より有意に大きかった。ただし、*Glu-A1*座サブユニットと*Glu-D1*座サブユニットの交互作用により、*Glu-A1*座サブユニットの効果は*Glu-D1*座サブユニット2+12の場合に限定された。クッキーの厚みは、系統Cで系統A、系統Bより有意に薄く、*Glu-A1*座サブユニットが欠失した系統で*Glu-A1*座サブユニット1を持つ系統より有意に薄かった。スプレッドファクターは、系統Cで系統A、系統Bより有意に大きく、*Glu-A1*座サブユニットが欠失した系統で*Glu-A1*座サブユニット1を持つ系統より有意に大きかった。

小麦粉タンパク質含有率、スポンジケーキ比容積、クッキーの直径、厚み、スプレッドファクターは、開花期窒素施用量間で有意に異なった。開花期窒素施用量が増加すると、小麦粉タンパク質含有率は有意に高くなり、スポンジケーキ比容積、クッキーの直径、スプレッドファクターは有意に小さくなった。クッキーの厚みは開花期に窒素を施用した区で有意に厚くなった。

2. SRCにおける準同質遺伝子系統間および開花期窒素施用量間差異

第2表に各準同質遺伝子系統および各開花期窒素施用量

第2表 各準同質遺伝子系統および各開花期窒素施用量における SRC 特性.

系統	高分子量グルテニンサブユニット			系統または開花期窒素施用量	水 SRC	炭酸 Na SRC	乳酸 SRC	スクロース SRC
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>					
A	1	7+8	2+12	0	52.9	64.1	106	88.4
				4	54.9	63.7	119	90.3
				8	55.8	65.0	126	93.4
B	1	7+8	2.2+12	0	53.3	62.9	109	88.5
				4	54.1	62.8	122	89.9
				8	55.4	63.0	133	91.7
C	null	7+8	2+12	0	52.8	64.9	103	89.8
				4	53.5	63.2	109	89.3
				8	55.0	63.3	122	90.6
D	null	7+8	2.2+12	0	52.7	63.9	90	87.6
				4	54.6	62.9	100	87.1
				8	56.2	64.2	112	92.0
各系統における 平均値 (全処理込み)				A	54.5 ^a	64.3 ^a	117 ^{ab}	90.7 ^a
				B	54.2 ^a	62.9 ^b	121 ^a	90.0 ^a
				C	53.8 ^a	63.8 ^{ab}	111 ^b	89.9 ^a
				D	54.5 ^a	63.7 ^{ab}	100 ^c	88.9 ^a
各開花期窒素施用量における 平均値 (全系統込み)				0	52.9 ^c	63.9 ^a	102 ^c	88.6 ^b
				4	54.3 ^b	63.2 ^a	112 ^b	89.1 ^b
				8	55.6 ^a	63.9 ^a	123 ^a	91.9 ^a
系統					ns	*	**	ns
<i>Glu-A1</i> 座サブユニット					ns	ns	**	ns
<i>Glu-D1</i> 座サブユニット					ns	*	ns	ns
<i>Glu-A1</i> 座× <i>Glu-D1</i> 座					ns	*	*	ns
開花期窒素施用量					**	ns	**	**
系統×開花期窒素施用量					ns	ns	ns	ns

各系統における平均値は全開花期窒素施用量区込みの, 各開花期窒素施用量における平均値は全系統込みの平均値. 英文字が同一であることは系統間または開花期窒素施用量間で5%水準で有意差がないことを示す (Tukey-Kramer の多重比較). **, * はそれぞれ1%, 5%水準で有意であり, ns は有意でないことを示す.

における SRC 特性を示した. 炭酸 NaSRC, 乳酸 SRC は系統間で有意に異なった. 炭酸 NaSRC は *Glu-D1* 座サブユニット間で有意に異なり, 乳酸 SRC は *Glu-A1* 座サブユニット間で有意に異なった. 炭酸 NaSRC は系統 A で系統 B より有意に高く, *Glu-D1* 座サブユニット 2+12 を持つ系統でサブユニット 2.2+12 を持つ系統より高かった. ただし, *Glu-A1* 座サブユニットと *Glu-D1* 座サブユニットの交互作用により, *Glu-D1* 座サブユニットの効果は *Glu-A1* 座サブユニット 1 を持つ場合に限定された. 乳酸 SRC は, 系統 B で系統 C と系統 D より有意に高く, 系統 C で系統 D より有意に高かった. また, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失した系統で *Glu-A1* 座サブユニット 1 を持つ系統より有意に低かった. ただし, *Glu-A1* 座サブユニットと *Glu-D1* 座サブユニットの交互作用が認められ, *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 の場合でより強い影響を受けた. 水 SRC とスクロース SRC は, 系統間で有意な差はなく, また, *Glu-A1* 座サブユニット間, *Glu-D1* 座サブユニット間で有意な差

はなかった.

水 SRC, 乳酸 SRC, スクロース SRC は開花期窒素施用量間で有意に異なり, いずれも開花期窒素施用量が増加すると有意に大きくなった. スクロース SRC は開花期窒素施用量 8 gm⁻² 施用した区で他の区より有意に大きかった. 炭酸 NaSRC は開花期窒素施用量間で有意な差はなかった.

3. 各形質間の相関関係

第3表に小麦粉タンパク質含有率と各 SRC, 小麦粉タンパク質含有率, 各 SRC とスポンジケーキ比容積, クッキー直径, クッキー厚み, クッキースプレッドファクターとの相関係数を示した. 小麦粉タンパク質含有率は水 SRC, 乳酸 SRC, スクロース SRC と有意な正の相関関係を示した. スポンジケーキ比容積, クッキーの直径, スプレッドファクターは, 小麦粉タンパク質含有率, 水 SRC, 乳酸 SRC, スクロース SRC と有意な負の相関関係を, クッキーの厚みは, 小麦粉タンパク質含有率, 水 SRC, 乳酸 SRC, ス

第3表 小麦粉タンパク質含有率と各SRC, 小麦粉タンパク質含有率, 各SRCとスポンジケーキ比容積, クッキー直径, クッキー厚み, クッキースプレッドファクターとの相関係数.

	小麦粉 タンパク質 含有率	スポンジ ケーキ 比容積	クッキー 直径 (W)	クッキー 厚み (T)	クッキー スプレッド ファクター (W/T)
小麦粉タンパク質含有率	-	-0.75**	-0.79**	0.47**	-0.67**
水SRC	0.76**	-0.69**	-0.63**	0.43**	-0.56**
炭酸NaSRC	-0.05 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.10 ^{ns}
乳酸SRC	0.62**	-0.35*	-0.57**	0.48**	-0.57**
スクロースSRC	0.48**	-0.32*	-0.49**	0.31*	-0.42**

全系統込みで相関分析を行った.

**、*はそれぞれ1%、5%水準で有意であり、nsは有意でないことを示す.

クローズSRCと有意な正の相関関係を示した。水SRC、乳酸SRC、スクロースSRCは小麦粉タンパク質含有率の影響を強く受けていたため、スポンジケーキの比容積、クッキーの直径、厚み、スプレッドファクターと炭酸NaSRCを除いた各SRCとの相関関係について、小麦粉タンパク質含有率の影響を除いた偏相関係数を算出したところ、有意な相関関係はなかった（データ省略）。小麦粉タンパク質含有率、スポンジケーキ比容積、クッキーの直径、厚み、スプレッドファクターは、いずれも炭酸NaSRCとの間に有意な相関関係はなかった。

考 察

本研究では、高分子量グルテニンサブユニット構成と小麦粉タンパク質含有率の違いがスポンジケーキ適性、クッキー適性およびSRCに及ぼす影響について調査した。

本研究における小麦粉タンパク質含有率は7.7~11.7%の範囲であった。スポンジケーキの体積は小麦粉タンパク質含有率と負の相関関係にあることが報告されている(Nagaoら1977, Gaines1985, Yamamotoら1996, Moiraghiら2013a)。本研究においても、スポンジケーキの比容積は、開花期窒素施用量が増加し、小麦粉タンパク質含有率が高まると有意に小さくなり(第1表)、小麦粉タンパク質含有率と有意な負の相関関係($r = -0.75^{**}$)を示した(第3表)。したがって、小麦粉タンパク質含有率が低いとスポンジケーキ適性が優れるといえる。一方、スポンジケーキの比容積はグルテニンサブユニット間で有意な差がなかった(第1表)。本研究において、グルテンの強さを示す乳酸SRCはGlu-A1座サブユニットが欠失すると小さくなり、Glu-A1座サブユニットが欠失し、かつ、Glu-D1座サブユニット2.2+12を持つ系統Dで他の系統より有意に小さくなった(第2表)。本結果は、小麦粉の生地物性がGlu-A1座サブユニットが欠失すると弱くなり(Payneら1979, Moonenら1982)、Glu-D1座サブユニット2.2+12を合わせ持つとさらに弱くなるという既報(高田ら2008, 谷中ら2016, 2017)と同様であった。スポンジケーキの比容積は、Moiraghiら(2013a)と同様、乳酸SRCと有意な

負の相関関係($r = -0.35^{**}$)を示したが、その相関係数は小麦粉タンパク質含有率との相関係数($r = -0.75^{**}$)より小さかった(第3表)。これは、乳酸SRCが有意に低い系統Dのスポンジケーキの比容積が他の系統より小さい傾向にあったことが影響していた。スポンジケーキの比容積は小麦粉タンパク質含有率と負の相関関係にあり、高分子量グルテニンサブユニット構成に関わらず、この傾向は一致していた。ただし、系統Dのスポンジケーキの比容積は、特に小麦粉タンパク質含有率が低い場合において、小麦粉タンパク質含有率との負の相関関係から予想される値よりも低かった。AACC-56.11.02では、スポンジケーキ用小麦粉は、水SRCは57%以下、炭酸NaSRCは72%以下、乳酸SRCは100%以上、スクロースSRCは96%以下であることが望ましいとされている(AACC International 2009)。この基準を適用すると、系統Dの開花期窒素施用なしの小麦粉タンパク質含有率8.5%の乳酸SRCは90%で基準より低く、開花期に窒素4 gm²施用した小麦粉タンパク質含有率10.2%の乳酸SRCは100%で基準下限であった。乳酸SRCはグルテンの強さが関与することから、系統Dの生地物性はスポンジケーキ用としては弱すぎる可能性が示唆された。これらの結果から、スポンジケーキの比容積は小麦粉タンパク質含有率の影響を強く受けることが示唆された。

クッキーの直径は小麦粉タンパク質含有率と負の相関関係を示すことが報告されている(Gaines 1985, Bettge and Morris 2000)。本研究においても、開花期窒素施用量の増加により小麦粉タンパク質含有率が高まると、クッキーの直径とスプレッドファクターは有意に小さく、クッキーの厚みは有意に厚くなり(第1表)、クッキーの直径とスプレッドファクターは小麦粉タンパク質含有率と有意な負の相関関係($r = -0.79^{**}$, -0.67^{**})を、クッキーの厚みは小麦粉タンパク質含有率と有意な正の相関関係($r = 0.47^{**}$)を示した(第3表)。したがって、小麦粉タンパク質含有率が低いと、クッキーの直径が大きく、厚みが薄く、スプレッドがよく、クッキー適性が優れるといえる。クッキーの直径、厚み、スプレッドファクターはグルテニ

ンサブユニット構成の影響を受け, *Glu-A1* 座サブユニットが欠失すると, クッキーの直径は有意に大きく, 厚みは有意に薄く, スプレッドファクターは有意に大きくなった(第1表). Moiraghi ら (2013b) は 44 品種を用いて *Glu-A1* 座サブユニット 1, 2*, null (欠失) を比較し, クッキーのスプレッドファクターは *Glu-A1* 座サブユニットの欠失でサブユニット 1 または 2* より大きいことを報告している. 一方, Zhang ら (2018) は, *Glu-A1* 座サブユニットまたは *Glu-D1* 座サブユニットが欠失した準同質遺伝子系統を用いて, クッキーの直径が *Glu-A1* 座サブユニットの欠失とサブユニット 1 との間に有意な差がなかったことを報告している. これらの報告の差異は供試材料のタンパク質含有率に由来すると考えられた. Moiraghi ら (2013b) の試験では, 小麦粉タンパク質含有率が 9~10% 程度であったのに対し, Zhang ら (2018) の試験では, 子実タンパク質含有率が 12~13% 程度と高く, グルテニンサブユニット構成の効果はタンパク質含有率によりマスクされうることから (Souza ら 1994), Zhang ら (2018) の試験では *Glu-A1* 座サブユニットの欠失の効果がなかったと考えられた. これらの結果から, 我が国の日本麵用品種の高分子量グルテニンサブユニットにおいて *Glu-A1* 座サブユニットの欠失はクッキー適性に正の効果を持つことが示唆された. クッキーの直径は *Glu-A1* 座サブユニットと *Glu-D1* 座サブユニットの交互作用が認められ, *Glu-A1* 座サブユニットの欠失による正の効果は *Glu-D1* 座サブユニット 2+12 の場合に限定された(第1表). 本効果が *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 でみられなかった要因として, *Glu-D1* 座サブユニット 2.2+12 を持つ系統 B と系統 D において, クッキーの直径が系統 B で系統 A より有意に大きく, 系統 D で系統 C より有意に小さく, 系統 B と系統 D との差異が小さくなったことによると考えられた(第1表). 系統 D は小麦粉タンパク質含有率が系統 C より有意に高く, 小麦粉タンパク質含有率はクッキーの直径と高い負の相関関係 ($r=-0.79^{**}$) を示したため(第3表), クッキーの直径は系統 D で系統 C より有意に小さくなったと考えられた. 炭酸 NaSRC は *Glu-D1* 座サブユニットによる差異がみられ, その効果は交互作用により *Glu-A1* 座サブユニット 1 の場合に限定され, 系統 B で系統 A より低かった(第2表). 系統 A と系統 B の間で炭酸 NaSRC 以外に有意な差がないこと, また, クッキーの直径は炭酸 NaSRC と負の相関を示すことが報告されていることから (Guttieri and Souza 2003, Guttieri ら 2004, Moiraghi ら 2013b), クッキーの直径は炭酸 NaSRC が低い系統 B で系統 A より有意に大きくなったと考えられた. ただし, *Glu-D1* 座サブユニット間で炭酸 NaSRC に関する損傷澱粉量に有意な差はなく(データ省略), *Glu-D1* 座サブユニット間で炭酸 NaSRC の差異が生じた理由は不明であった. AACC-56.11.02 では, クッキー用小麦粉は, 水 SRC は 51% 以下, 炭酸 NaSRC は 64% 以下, 乳酸 SRC は 87% 以上, スクロース SRC は 89% 以下である

ことが望ましいとされる (AACC International 2009). この基準を適用すると, 本研究における乳酸 SRC はいずれも基準範囲内であった.

スポンジケーキの比容積, クッキーの直径, 厚み, スプレッドファクターは, 小麦粉タンパク質含有率および炭酸 NaSRC を除いた各 SRC と有意な相関関係を示した(第3表). スポンジケーキと水 SRC, スクロース SRC との相関については, Nakamura ら (2010) や Moiraghi ら (2013a) の報告と, クッキー直径やスプレッドファクターと水 SRC, スクロース SRC および乳酸 SRC との相関については, Guttieri and Souza (2003), Gaines (2004), Guttieri ら (2004), Moiraghi ら (2013b) の報告と同様であった. スポンジケーキの比容積, クッキーの直径, スプレッドファクターと乳酸 SRC の相関係数 ($r=-0.35^*$, -0.57^{**} , -0.57^{**}) は, いずれも小麦粉タンパク質含有率との相関係数 ($r=-0.75^{**}$, -0.79^{**} , -0.67^{**}) より小さく, 小麦粉タンパク質の量の効果が大きいと考えられた. 小麦粉タンパク質含有率は, 炭酸 NaSRC を除いた各 SRC と有意な正の相関関係を示した(第3表). 小麦粉タンパク質含有率と乳酸 SRC, スクロース SRC との間の正の相関関係 ($r=0.62^{**}$, 0.48^{**}) は Guttieri ら (2002) の報告と一致した. 小麦粉タンパク質含有率と水 SRC との間の正の相関関係 ($r=0.76^{**}$) はグルテンタンパク質による水の保持 (Kweon ら 2011) を反映していると考えられた(第3表). スポンジケーキの比容積, クッキーの直径, 厚み, スプレッドファクターと炭酸 NaSRC を除いた各 SRC との相関関係について, 小麦粉タンパク質含有率の影響を除いた偏相関係数を算出したところ, 有意な相関関係はなかった(データ省略). ゆえに, スポンジケーキの比容積, クッキーの直径, 厚み, スプレッドファクターと, 炭酸 NaSRC を除く各 SRC との相関関係は小麦粉タンパク質含有率の影響によるものであると考えられた.

国産コムギは日本麵用, パン・中華麵用, 醸造用の 3 つの品質ランク区分がなく, 菓子用という区分がないため, 日本麵用コムギが菓子用に利用されているのが現状である. 本研究により, スポンジケーキ適性やクッキー適性は, 小麦粉タンパク質含有率の影響を強く受けること, グルテニンサブユニット構成はスポンジケーキ適性に有意な効果を示さなかったが, クッキー適性においては *Glu-A1* 座サブユニットの欠失によりクッキーの直径やスプレッドファクターが大きくなることが明らかになった. したがって, 日本麵用コムギを菓子用へ利用するには, 小麦粉タンパク質含有率が低いことが重要で, クッキー等への利用においては *Glu-A1* 座サブユニットが欠失したコムギの方がよいといえる.

謝辞: 本研究の実施にあたり, 近畿中国四国農業研究センター(現:西日本農業研究センター)業務第1科の諸氏には系統の栽培において, 小麦育種グループ(現:麦類育

種グループ)の契約職員, 松井孝子氏, 有馬奈津美氏, 西川仁美氏, 萩原理恵子氏, 山下久美氏には製粉と品質分析にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- AACC International 1999. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 10-50.05. Baking Quality of Cookie Flour. Approved Nov 3, 1999. AACC International, St. Paul, MN, U.S.A. <http://dx.doi.org/10.1094/AACCIntMethod-10-50.05> (2020/8/14 閲覧).
- AACC International 2009. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 56-11.02. Solvent Retention Capacity Profile. Approved June 3, 2009. AACC International, St. Paul, MN, U.S.A. <http://dx.doi.org/10.1094/AACCIntMethod-56-11.02> (2020/8/14 閲覧).
- Bettge, A.D. and Morris, C.F. 2000. Relationships among grain hardness, pentosane fractions, and end-use quality of wheat. *Cereal Chem.* 77: 241-247.
- Gaines, C. S. 1985. Associations among soft wheat flour particle size, protein content, chlorine response, kernel hardness, milling quality, white layer cake volume, and sugar-snap cookie spread. *Cereal Chem.* 62: 290-292.
- Gaines, C. S. 2000. Collaborative study of methods for solvent retention capacity profiles (AACC Methods 56-11). *Cereal Foods World* 45: 303-306.
- Gaines, C. S. 2004. Prediction of sugar-snap cookie diameter using sucrose solvent retention capacity, milling softness, and flour protein content. *Cereal Chem.* 81: 549-552.
- Guttieri, M. J., McLean, R. Lanning S. P. Talbert, L. E. and Souza, E. J. 2002. Assessing environmental influences on solvent retention capacities of two soft white spring wheat cultivars. *Cereal Chem.* 79: 880-884.
- Guttieri, M. J. and Souza, E. 2003. Sources of variation in the solvent retention capacity test of wheat flour. *Crop Sci.* 43: 1628-1633.
- Guttieri, M. J., Becker, C. and Souza, E. J. 2004. Application of wheat meal solvent retention capacity tests within soft wheat breeding populations. *Cereal Chem.* 81: 261-266.
- Hou, G., Yamamoto, H. and Ng, P.K.W. 1996. Relationships of quantity of glutenin subunits of selected U.S. soft wheat flours to rheological and baking properties. *Cereal Chem.* 73: 358-363.
- 石川直幸・長嶺敬・谷中美貴子・高山敏之・田谷省三・甲斐由美・谷尾昌彦・佐藤淳一・村上泰臣・住田哲也 2005. 製麺適性の優れた早生・短稈小麦新品種「ふくさやか」の育成. 近中四農研報 4: 25-37.
- Kweon, M., Slade, L. and Levine, H. 2011. Solvent Retention Capacity (SRC) testing of wheat flour: Principles and value in predicting flour functionality in different wheat-based food processed and in wheat breeding -A review. *Cereal Chem.* 88: 537-552.
- Moiraghi, M., dela Hera, E., Perez, G. T. and Gomez, M. 2013a. Effect of wheat flour characteristics on sponge cake quality. *J. Sci Food Agric.* 93: 542-549.
- Moiraghi, M., Perez, G. T., Pflüger, L., Leonardo, V. and Marcelo, H. 2013b. Effect of high molecular weight glutenins and rye translocations on soft wheat flour cookie quality. *J. Cereal Sci.* 58: 424-430.
- Moonen, J.H.E., Scheepstra, A. and Graveland, A. 1982. Use of the SDS-sedimentation test and SDS-polyacrylamide gel electrophoresis for screening breeder's samples of wheat for bread-making quality. *Euphytica* 31: 677-690.
- Nagao, S., Imai, S., Sato, T., Kaneko, Y. and Otsubo, H. 1976. Quality characteristics of soft wheats and their use in Japan. I. Methods of assessing wheat suitability for Japanese products. *Cereal Chem.* 53: 988-997.
- Nagao, S., Ishibashi, S., Imai, S., Sato, T., Kanbe, T., Kaneko, Y. and Otsubo, H. 1977. Quality characteristics of soft wheats and their utilization in Japan. III. Effects of crop year and protein content on product quality. *Cereal Chem.* 54: 300-306.
- Nakamura, H. Inazu, A. and Hirano, H. 1999. Allelic variation in high-molecular-weight glutenin subunit loci of *Glu-1* in Japanese common wheats. *Euphytica* 106: 131-138.
- Nakamura, K., Taniguchi, Y., Taira, M. and Ito, H. 2010. Prediction of specific Japanese sponge cake volume using pasting properties of flour. *Cereal Chem.* 87(6): 505-510.
- 農林水産技術会議事務局 1968. 小麦品質検定法 - 小麦育種試験における - (研究成果シリーズ 35). 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京. 1-70.
- Payne, P.L., Corfield, K.G. and Blackman, J.A. 1979. Identification of a high-molecular-weight subunit of glutenin whose presence correlates with bread-making quality in wheats of related pedigree. *Theor. Appl. Genet.* 55: 153-159.
- Souza, E., Kruk, M. and Sunderman, D.W. 1994. Associations of sugar-snap quality with high molecular weight glutenin alleles in soft white spring wheats. *Cereal Chem.* 71: 601-605.
- Takata, K., Yamauchi, H., Nishio, Z. and Kuwabara, T. 2000. Effect of high molecular weight glutenin subunits on bread-making quality using near-isogenic lines. *Breed. Sci.* 50: 303-308.
- Takata, K., Yamauchi, H., Nishio, Z., Funatsuki, W. and Kuwabara, T. 2002. Effect of high-molecular-weight glutenin subunits with different protein contents on bread-making quality. *Food Sci. Technol. Res.* 8: 178-182.
- 高田兼則・谷中美貴子・池田達哉・石川直幸 2008. 日本麵用小麦の生地物性に対する *Glu-A1* と *Glu-D1* 対立遺伝子の相互作用と *Glu-A1* 対立遺伝子のPCR マーカーの開発. 育種学研究 10: 41-48.
- Yamamoto, H., Worthington, S. T., Hou, G. and Ng, P. K. W. 1996. Rheological properties and baking qualities of selected soft wheats grown in the United States. *Cereal Chem.* 73: 215-221.
- 谷中美貴子・高田兼則・石川直幸・高橋肇 2016. 日本麵用コムギにおける *Glu-A1* および *Glu-D1* 座サブユニット構成の違いがタンパク質組成に及ぼす影響. 日作紀 85: 403-410.
- 谷中美貴子・高田兼則・船附稚子・石川直幸・高橋肇 2017. 日本麵用コムギにおける *Glu-A1* 座と *Glu-D1* 座支配のグルテニンサブユニット構成, タンパク質含有率の違いが製麺適性に及ぼす影響. 日作紀 86: 169-176.
- Zhang, X., Zhang, B., Wu, H., Lu, C., Lu, G., Liu, D., Li, M., Jiang, W., Song, G. and Gao, D. 2018. Effect of high-molecular-weight glutenin subunit deletion on soft wheat quality properties and sugar-snap cookie quality estimated through near-isogenic lines. *J. Integ. Agric.* 17(5): 1066-1073.

Effects of the Composition of Glutenin Subunits at *Glu-A1* and *Glu-D1* loci and Protein Content in Japanese Soft Wheat on the Japanese Sponge Cake and Cookie Quality : Mikiko YANAKA, Kanenori TAKATA, Wakako FUNATSUKI and Naoyuki ISHIKAWA (*NARO Western Region Agricultural Research Center, Fukuyama 721-8514, Japan*)

Abstract : Four near-isogenic lines (NILs) of Japanese soft wheat with different compositions of high-molecular-weight glutenin subunits, which are controlled by *Glu-A1* and *Glu-D1* genes were cultivated with different amounts of nitrogen fertilizer applied at flowering time. Using these flours, the effects of protein quantity and protein quality on baking quality (Japanese sponge cake (JSC) quality, sugar-snap cookie (SSC) quality and solvent retention capacity (SRC)) were evaluated. The flour protein content ranged from 7.7 to 11.7%. As flour protein content increased, JSC specific volume, SSC diameter and SSC spread factor decreased and showed a significant negative correlation with flour protein content. JSC specific volume was not significantly different among the NILs. SSC diameter, SSC spread factor and lactic acid SRC were significantly different and null at the *Glu-A1* locus (*Glu-A1c*) was associated with larger SSC diameter, larger SSC spread factor and lower lactic acid SRC. JSC specific volume, SSC diameter and SSC spread factor showed a negative correlation with lactic acid SRC, but the correlation with lactic acid SRC was weaker than that with flour protein content. These results suggested that protein quantity strongly affected baking quality and suggested that *Glu-A1c* had a positive effect on SSC quality.

Key words : Cookie quality, High-molecular-weight glutenin subunit, Protein content, Sponge cake quality, Wheat (*Triticum aestivum* L.).
