

春播きコムギ品種「はるきらり」×スペルトコムギ由来の 戻し交雑自殖系統における子実タンパク質含有率の評価

坂井祐希¹・来嶋正朋²・足利奈奈²・神野裕信²・三浦秀穂¹・大西一光^{1*}

(受付：2016年4月28日，受理：2016年6月3日)

Evaluation of grain protein concentration in backcross inbred lines derived from
spring wheat cultivar “Harukirari” × spelt cross

Yuki SAKAI¹, Masatomo KURUSHIMA², Nana ASHIKAGA², Hironobu JINNO²,
Hideho MIURA¹ and Kazumitsu ONISHI^{1*}

摘 要

コムギの子実タンパク質含有率は、小麦粉の品質や物性に大きく関わる重要な形質である。本研究では、北海道の春播きコムギ品種「はるきらり」を反復親、スペルトコムギ系統 (KU-1025) を一回親として育成した戻し交雑自殖系統 (Backcross Inbred Line : BILs) BC₁F₅ 世代 32 系統を用いて、子実タンパク質含有率および子実窒素吸収量について評価を行った。北見および帯広で栽培試験を行った結果、「KU-1025」の子実タンパク質含有率は、両試験区で「はるきらり」より高い値を示した。BILs における子実タンパク質含有率と子実収量の間には両試験区ともに有意な負の相関が認められ、子実タンパク質含有率・子実収量ともに「はるきらり」を上回る系統が複数認められた。子実タンパク質含有率と同様に子実窒素吸収量についても「KU-1025」は「はるきらり」より高い値を示し、BILs の中には子実窒素吸収量および子実収量ともに「はるきらり」を上回る系統が複数認められた。以上の結果から、「KU-1025」は、子実タンパク質含有率および子実窒素吸収量に優れており、高タンパク質含有率かつ高収量を示すパンコムギ品種の作出に貢献できる変異を有すると考えられた。

キーワード：スペルトコムギ 子実タンパク質含有率 子実窒素吸収量 戻し交雑自殖系統
春播きコムギ

¹帯広畜産大学

²北海道立総合研究機構 北見農業試験場

¹Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

²Hokkaido Research Organization Kitami Agricultural Experiment Station

* 連絡責任者 (e-mail: onishi@obihiro.ac.jp)

*Corresponding author (e-mail: onishi@obihiro.ac.jp)

緒 言

スペルトコムギ (*Triticum aestivum* subsp. *spelta*) は、ABD ゲノムからなる6倍性の普通系コムギの一つである。現在、世界中で最も広く栽培されているパンコムギ (*Triticum aestivum*) の亜種にあたり、パンコムギとの交配も容易に行える。スペルトコムギは、20世紀初めにかけてヨーロッパで広く栽培されていたが (大田 2010)、近年では収量性や品質に優れるパンコムギに置き換えられほとんど栽培されていない。スペルトコムギはパンコムギにはない有用な遺伝的変異を持つ可能性が指摘されているものの、多くのスペルトコムギにおいて晩生・長稈・難脱穀性という育種上不利な形質を併せ持っているため、日本における有用性の評価や育種利用はほとんどなされていないのが現状である。

コムギにおいて子実タンパク質含有率は、小麦粉の品質や物性に深く関わる重要な形質であり、高タンパク質含有率を示す品種の育成は、重要な育種目標の一つであるとされている。しかし、一般的に収量性と子実タンパク質含有率はトレードオフの関係を示すことが知られており (Blanco et al. 2011)、高収量かつ高タンパク質含有率を示す品種の育成が課題となっている。これまでにタンパク質含有率に関する遺伝子として、登熟・老化を促進し、子実タンパク質含有率を向上させる *Gpc-B1* 遺伝子が単離されている (Uauy et al. 2006)。 *Gpc-B1* を既存の品種に導入し、その効果を検証した研究では、収量と子実タンパク質含有率の間に有意な負の相関関係は認められなかったとする報告も見られるが (Kumar et al. 2011)、子実タンパク質含有率の増加には小粒化や収量の減少を伴うことが多数報告されており (Balyan et al. 2013)、日本における実用品種への利用には至っていない (山下ら 2014, 来嶋ら 2016)。このほかにも子実タンパク質含有率に関する量的形質遺伝子座 (Quantitative Trait Loci : QTL) は複数検出されているものの (Prasad et al. 2003, Huang et al. 2006)、遺伝子効果や育種的有用性の検討が行われた事例は極めて少ない。今後、より広範な遺伝資源を評価し、他の農

業形質に負の効果を及ぼさず子実タンパク質含有率を向上させる QTL および遺伝子の探索が必要であると考えられる。

これまでにスペルトコムギの子実タンパク質含有率は、パンコムギ品種と比べ比較的高いことが報告されており (Ranhotra et al. 1996, Bonafaccia et al. 2000)、スペルトコムギ内に子実タンパク質含有率の向上に関わる育種的に有用な変異が存在する可能性が示唆されている。本研究では、高い子実タンパク質含有率を示すスペイン由来のスペルトコムギ系統に着目し、スペルトコムギが持つ子実タンパク質含有率および子実窒素吸収量を評価するとともに農業形質との関連性を検討した。ただし、原系統のスペルトコムギをパンコムギと直接比較すると、前述のように晩生、長稈、難脱穀性などの難点がスペルトコムギの持つ有用性を不明瞭にすることが予測された。そこで本研究には、北海道で育成された春播きコムギ品種である「はるきらり」を反復親、スペイン由来のスペルトコムギ系統である「KU-1025」を一回親とした、戻し交雑自殖系統 (BILs) を供試し、スペルトコムギの持つ遺伝的変異の育種的有用性を検討した。

材料および方法

供試材料

本研究には、北海道で育成された春播きコムギ品種である「はるきらり」を反復親、「KU-1025」を一回親とする BILs BC₁F₅ 世代を供試した。「KU-1025」は NBRP (ナショナルバイオリソースプロジェクト) ・コムギより分譲されたスペイン由来のスペルトコムギ系統である。本試験では、BILs 103 系統のうち、2014 年度における予備試験の結果から稈長が著しく高く、難脱穀性を示す系統を除いた 42 系統を選抜して実験に使用した。

栽培方法および形質調査

栽培試験は北見農業試験場 (訓子府町) と帯広畜産大学精密圃場 (帯広市) の 2 条件で行った。両試験区とも

畦長 1.6m、畝間 60cm の畝に約 50 粒筋まきました。施肥条件は、北見で N:5kg・P:9 kg・K:6 kg / 10a、帯広で N:4 kg・P:9 kg・K:4.5 kg / 10a の水準とした。BILs は両試験区とも各系統 1 反復とし、親系統については、北見で「はるきらり」3 反復と「KU-1025」1 反復、帯広で「はるきらり」18 反復と「KU-1025」4 反復とした。北見は 2015 年 5 月 1 日、帯広では 2015 年 4 月 30 日に播種し、登熟期に収穫を行った。本研究では、播種を行った 1.6m のうち欠株および生育不良個体のない、連続した部分を収穫した。なお、収穫できた畝長が 0.6m 未満の系統は、収量の値が正確でない可能性が考えられたため、解析データからは除外した。この基準を適用し、データ解析には栽培した 42 系統のうち 32 系統を用いた。

調査項目は、到穂日数・稈長・穂長・一穂小穂数・千粒重・子実収量・子実タンパク質含有率とした。出穂日は、系統内の約 50% の個体において穂最上部の小穂が止葉の葉鞘から出た日とし、播種日から出穂日までの暦日を到穂日数とした。稈長・穂長・一穂小穂数については、5 個体をランダムに選び測定した。子実収量は脱穀後に重量を測定し、サンプリングした畦長から単位面積あたりの子実収量 (g/ m²) を算出した。子実タンパク質含有率は、子実収量を測定したのちに未整粒の子実について Infratec nova (Foss Japan Ltd.) を用いて測定し、13.5% 水分に換算した値を示した。

結果および考察

BILs における子実タンパク質含有率の評価

調査したそれぞれの形質について、北見および帯広で栽培した「はるきらり」、「KU-1025」および BILs32 系統の平均とレンジを表 1 に示した。子実タンパク質含有率は、北見および帯広の両試験区において「KU-1025」が「はるきらり」に比べて 3～4% 高い値を示した。北見ではサンプル数の都合から、統計検定を行うことができなかったが、帯広では「KU-1025」の子実タンパク質含有率 17.5% が「はるきらり」の 13.2% に比べ有意に高かった。また、BILs の子実タンパク質含有率は北見で 11.5～14.9%、帯広で 12.4～15.4% と幅広い変異のあることが明らかとなった。ただし、「はるきらり」を上回る子実タンパク質含有率を示す系統は多数見られたものの、「KU-1025」を上回る系統は認められなかった。

子実タンパク質含有率について、北見および帯広の値を比較すると、北見に比べ帯広における子実タンパク質含有率の値が大きくなる傾向が見られた。しかし、両試験区における子実タンパク質含有率の相関係数は $r = 0.64$ ($P < 0.001$) と有意な正の相関を示したことから (図 1-A)、各試験区における子実タンパク質含有率の違いは栽培環境の影響によるものと考えられる。本試験は 2015 年のみの結果ではあるが、北見と帯広の異なる環境条件間において BILs の子実タンパク質含有率および子実収量にそれぞれ有意な正の相関関係が認められ (図 1)、地域間で再現性のあることが示された。また、両試験区における子実収量の相関係数 ($r = 0.53$, $P < 0.01$, 図 1-B) に比べ、子実タンパク質含有率の相関係数は高い値と

表 1. 子実タンパク質含有率および農業形質の測定値

形質	北見				帯広			
	はるきらり	KU-1025	BILs		はるきらり	KU-1025	BILs	
			平均値	範囲			平均値	範囲
子実タンパク質含有率 (%)	12.8	15.5	13.1	11.5-14.9	13.2	17.5	14.2	12.4-15.4
子実収量 (g / m ²)	439.3	493.3	425.4	184.4-611.9	408.6	375.0	384.9	260.0-666.7
到穂日数 (日)	59.0	71.0	59.4	53.0-64.0	53.0	72.0	56.3	52.0-63.0
稈長 (cm)	85.7	130.6	90.3	68.8-107.8	77.1	119.4	80.3	63.2-97.8
穂長 (cm)	7.8	14.9	8.6	7.1-10.5	8.2	15.0	9.1	7.4-13.3
1穂小穂数	14.7	18.2	15.1	13.4-17.0	16.2	18.2	16.6	14.4-18.8
千粒重 (g)	36.8	44.6	37.4	28.1-48.6	34.7	41.0	34.6	29.4-42.0

なったことから子実タンパク質含有率は、子実収量に比べて遺伝率が高い形質であることが示唆された。

子実タンパク質含有率と農業特性の関係

子実タンパク質含有率と他の農業形質との関係を北見と帯広に分けて求め、表2に示した。子実収量の間には、両試験区において5%水準で有意な負の相関（北見 $r = -0.42$ 、帯広 $r = -0.45$ ）が認められた。過去の研究が指摘するように（Kibite and Evans 1984, Triboi et al. 2006）、本試験においても子実タンパク質含有率と収量性の中にトレードオフの関係が認められた。しかし、本BILs 集団の中には、「はるきらり」と同等レベルの収量性を持ちながらも、高い子実タンパク質含有率を示した系統が複数存在した（図2-A, B）。

両試験区を通じて子実収量以外に子実タンパク質含有率との間に有意な相関を示した農業形質は存在しなかったことから、子実タンパク質含有率に関する遺伝的要因と各農業形質を支配する遺伝的要因はそれぞれ独立であることが示唆された。北見では、子実タンパク質含有率と稈長（ $r = -0.44$ ）および穂長の間（ $r = -0.51$ ）にそれぞれ5%、1%水準で有意な負の相関が認められたが、帯広では認められなかった。一般的に稈長が大きくなると植物体のバイオマス量が増加し光合成能力も向上するとされるため、稈長と子実収量の間には正の相関が認められることは十分考えられる。本研究においても北見で稈長と子実収量の間には0.1%水準で有意な正の相関が認められたことから、これは、子実収量を介した間接的な相関関係である可能性がある。また、穂長と子実タンパ

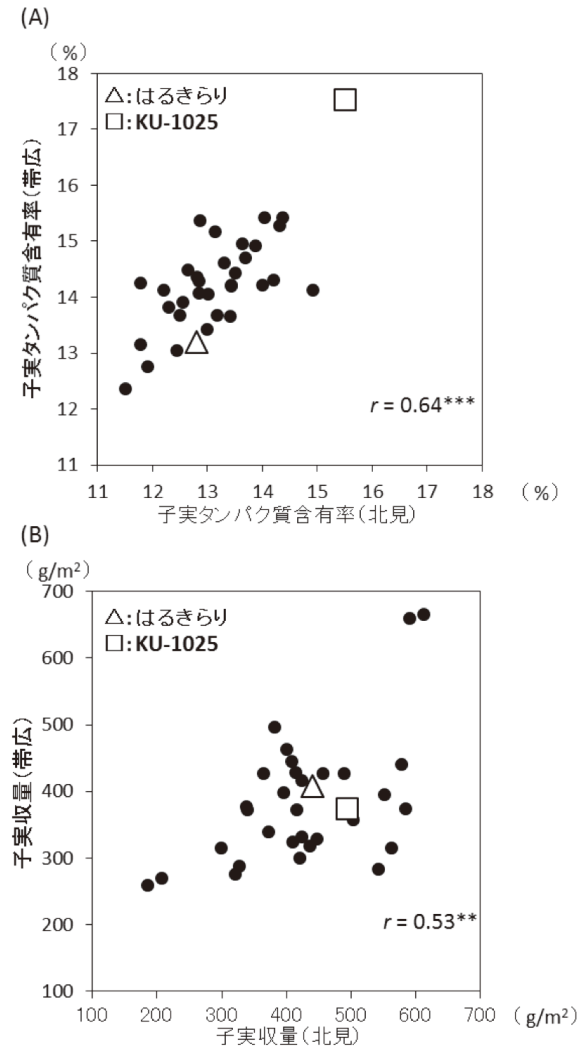


図1. 子実タンパク質含有率および子実収量の相関関係。
***, **はそれぞれ0.1%水準、1%水準で有意な相関があることを示す。

表2. 北見および帯広における形質間の相関関係

形質	子実収量	到穂日数	稈長	穂長	1穂小穂数	千粒重
(A) 子実タンパク質含有率	-0.42*	0.21	-0.44*	-0.51**	0.18	-0.34
子実収量		0.04	0.58***	0.18	-0.13	0.56***
到穂日数			0.07	-0.08	0.44*	0.02
稈長				0.36*	0.13	0.77***
穂長					0.03	0.42*
1穂小穂数						-0.07
(B) 子実タンパク質含有率	-0.45*	0.15	0.17	-0.27	0.01	-0.15
子実収量		0.22	0.12	0.28	-0.07	0.61***
到穂日数			0.04	-0.21	0.29	-0.08
稈長				0.11	0.10	0.34
穂長					0.25	0.35
1穂小穂数						-0.23

(A)は北見、(B)は帯広における相関係数。

***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意な相関があることを示す。

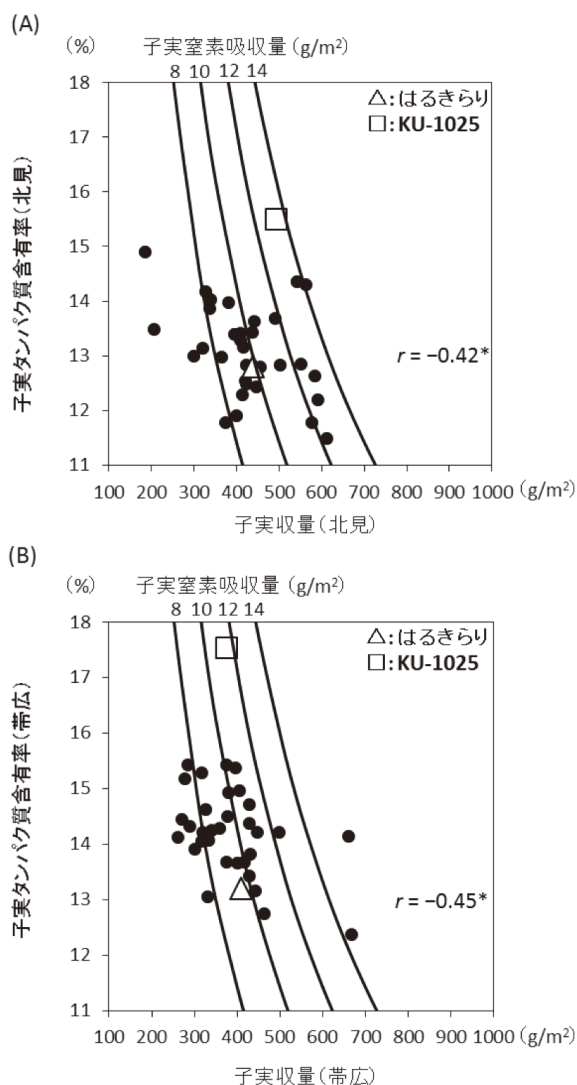


図2. 子実タンパク質含有率と子実収量および子実窒素吸収量の関係
 図中の曲線は、子実窒素吸収量を示す。
 *は5%水準で有意な相関があることを示す。

ク質含有率の間の負の相関関係については、栽培環境による影響もしくは、遺伝的連鎖の可能性も考えられるが現時点で詳細は不明である。

高い子実タンパク質含有率を示す品種の育成においては、収量性や他の農業形質に負の影響を及ぼすことなく子実タンパク質含有率を高めることのできる変異の探索が最大の課題となっている。Groos et al. (2003) は、子実窒素含有率と収量の QTL の間には関連性が認められなかったとし、このような QTL を集積して利用することが可能であることを示唆した。BILs 内には収量性にほとんど影響を与えないにも関わらず、高い子実タンパク質

含有率を示す系統が複数見出されていることから、「KU-1025」には育種上有用な変異が含まれていると考えられた。

子実窒素吸収量による評価

子実タンパク質含有率は、植物が獲得する窒素の量と子実 1 粒あたりの窒素の需要量、および子実への窒素の分配率によって決定されると考えられる。子実 1 粒あたりの窒素の需要量には、品種固有の上限値が存在することが示唆されている (島崎・渡邊 2010)。子実タンパク質の量は、上限値までは、窒素の施用量と基本的に比例関係を示すことから (江口ら 1969)、尿素の葉面散布により追肥を行う管理技術 (佐藤ら 2009) などを用い、品種が持つ上限値に近づける栽培法がとられている。子実タンパク質含有率による選抜は子実に蓄積できる窒素の上限値を高めることに貢献すると考えられる。しかし、供給される窒素の総量が不足する場合には子実タンパク質含有率の増加には結びつかない。子実タンパク質含有率に加え、収量性に優れた品種を育成するためには、子実タンパク質含有率自体の選抜だけでなく、子実に蓄積した窒素の絶対量を選抜指標に加え、子実が獲得する窒素の総量を高める必要があると考えられる。子実が種子に蓄えた窒素の総量は、子実窒素吸収量 (子実収量×子実タンパク質含有率/100/タンパク質換算係数*) の概念により求めることが可能であり (*タンパク質換算係数: 5.7、農林水産技術会議事務局 1968)、この値を選抜指標の 1 つとすることが、子実タンパク質含有率かつ収量性に優れた品種を育成するために有効であると考えられる。

本試験において、子実窒素吸収量を算出したところ、表 3 に示すように「はるきらり」が両試験区とも 10g/m² 程度であったのに対し、「KU-1025」では北見で 13.4g/m²、帯広で 11.5g/m² といずれも「はるきらり」より高い値を示した。BILs 32 系統では北見で 4.8 ~ 14.1g/m²、帯広で 6.4 ~ 16.3g/m² と幅広い変異が認められ、特に北見で子実窒素吸収量が高くなった系統が多数みられた (図 2-A, B)。両試験区間では、1% 水準で有意な

表3. 算出された子実窒素吸収量(g /m²)

試験地	はるきらり	KU-1025	BILs	
			平均値	範囲
北見	9.85	13.39	9.74	4.82-14.05
帯広	9.45	11.51	9.50	6.43-16.34

正の相関 ($r = 0.46$) が認められ、異なる栽培環境下における試験でも子実窒素吸収量は十分選抜に利用できる形質であることが示唆された。BILs の中には、「はるきらり」に比べ、子実タンパク質含有率が高いが収量性が低く、子実窒素吸収量が劣るか同程度である系統が多数認められた一方、子実窒素吸収量が「はるきらり」を上回る系統も存在した。子実窒素吸収量が高くなる要因としては、子実タンパク質含有率の増加もしくは収量の増加が考えられるが本試験では、どちらのタイプも認められた。結果として、子実タンパク質含有率と異なり、BILs のなかには「KU-1025」を上回る子実窒素吸収量を示した系統がみられた。また、子実タンパク質含有率および子実収量のいずれについても優れるために子実窒素吸収量の値が高くなった BILs も存在した。以上のことから、「KU-1025」は、子実窒素吸収量の向上に貢献する遺伝的変異を有することが示唆された。この変異は、子実タンパク質含有率かつ収量性に優れる系統の育成に利用できる可能性があると考えられる。

結 論

子実タンパク質含有率は、収量との関連性を考慮する必要があるため初期世代での選抜が難しい。また複雑な遺伝様式を示すとともに環境変動も大きいため育種が難しい“複雑形質”と考えられる。複雑形質においては、マーカー利用選抜 (MAS) 技術の適用が望まれており、形質に関連する遺伝解析および DNA マーカーの開発が期待されている (小田 2014)。本研究では、スペルトコムギ系統「KU-1025」に由来すると考えられる子実タンパク質

含有率および子実窒素吸収量に優れる BILs を確認できたことから、「KU-1025」は、子実タンパク質含有率かつ収量性に優れる品種の育成に貢献できる遺伝資源である可能性が示唆された。本試験は、各系統あたりの栽培面積が約 1 m² の小規模な試験であったため有望と判断した系統については試験規模を拡大するとともに反復数を増やし、より厳密な収量性を評価する必要がある。今後は、年次間差を含めた再現性の検証を行う予定である。また、BILs を用いた子実タンパク質含有率および子実窒素吸収量といった子実タンパク質関連形質について QTL 解析を進め、「KU-1025」が有すると考えられる変異の詳細および遺伝機構を明らかにすることが期待される。

引用文献

- Balyan, H. S., Gupta, P. K., Kumar, S., Dhariwal, R., Jaiswal, V., Tyagi, S., Agarwal, P., Gahlaut, V., Kumari, S. 2013. Genetic improvement of grain protein content and other health-related constituents of wheat grain. *Plant Breed* 132: 446 - 457
- Blanco, A., Mangini, G., Giancaspro, A., Giove, S., Colasuonno, P., Simeone, R., Signorile, A., De Vita, P., Mastrangelo, A. M., Cattivelli, L., Gadaleta, A. 2011. Relationships between grain protein content and grain yield components through quantitative trait locus analyses in a recombinant inbred line population derived from two elite durum wheat cultivars. *Mol Breed* 30:

- 79 - 92
- Bonafaccia, G., Galli, V., Francisci, R., Mair, V., Skrabanja, V., Kreft, I. 2000. Characteristics of spelt wheat products and nutritional value of spelt wheat-based bread. *Food Chem* 68: 437 - 441
- 江口久夫、平野寿助、吉田博哉. 1969. 暖地における小麦の良質化栽培に関する研究 (第2報) 3要素施肥量および窒素の施用時期・用法と品質との関係. *中国農業試験場報告 A17*: 81 - 111
- Groos, C., Robert, N., Bervas, E., Charmet, G. 2003. Genetic analysis of grain protein content, grain yield and thousand-kernel weight in bread wheat. *Theor Appl Genet* 106: 1032 - 1040
- Huang, X.Q., Cloutier, S., Lycar, L., Radovanovic, N., Humphreys, D.G., Noll, J. S., Somers, D. J., Brown, P. D. 2006. Molecular detection of QTLs for agronomic and quality traits in a doubled haploid population derived from two Canadian wheats (*Triticum aestivum L.*). *Theor Appl Genet* 113: 753 - 766
- Kibite, S., Evans, L.E. 1984. Causes of negative correlations between grain yield and grain protein concentration in common wheat. *Euphytica* 33: 801-810
- Kumar, J., Jaiswal, V., Kumar, A., Kumar, N., Mir, R.R., Kumar, S., Dhariwal, R., Tyagi, S., Khandelwal, M., Prabhu, K.V., Prasad, R., Balyan, H.S., Gupta, P.K. 2011. Introgression of a major gene for high grain protein content in some Indian bread wheat cultivars. *Field Crops Res* 123: 226 - 233
- 来嶋正朋、山下陽子、足利奈奈、神野裕信. 2016. タンパク質含有率に関わる遺伝子 Gpc-B1 の導入が春まきコムギの農業特性へ及ぼす影響. *育種学研究* 18 (別1) :118
- 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—. 農林水産技術会議事務局 プロジェクト研究成果シリーズ 35: 1 - 70
- 小田俊介. 2014. コムギにおける DNA マーカー開発と育種への応用. *JATAFF ジャーナル* 第2巻 第9号: 10 - 14
- 大田正次. 2010. 日常の生活が育んだ在来コムギの品種多様性 難脱穀性コムギの遺传的栽培と伝統的利用をめぐる. 佐藤洋一郎・加藤鎌司 編著 麦の自然史 人と自然が育んだムギ農耕 北海道大学出版会 pp.281-307
- Prasad, M., Kumar, N., Kulwal, P. L., Roder, M. S., Balyan, H.S., Dhaliwal, H. S., Gupta, P. K. 2003. QTL analysis for grain protein content using SSR markers and validation studies using NILs in bread wheat. *Theor Appl Genet* 106: 659 - 667
- Ranhotra, G. S., Gelroth, J.A., Glaser, B. K., Stallknecht, G. F. 1996. Nutritional profile of three spelt wheat cultivars grown at five different locations. *Cereal Chem* 73: 533 - 535
- 佐藤三佳子、五十嵐俊成、櫻井道彦、鈴木和織、柳原哲司、奥村正敏. 2009. 北海道北部地域における春まきコムギ「春よ恋」に対する開花期以降の尿素葉面散布が子実タンパク質含有率と収量に及ぼす効果およびその変動要因. *日作紀* 78: 9 - 16
- 島崎由美、渡邊好昭. 2010. コムギの子実タンパク質含有率—栽培による制御の可能性—. *日作紀* 79: 407 - 413
- Triboi, E., Martre, P., Girousse, C., Ravel, C., Triboi-Blondel, A. 2006. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. *Europ J Agron* 25: 108 - 118
- Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima, T., Blechl, A., Dubcovsky, J. 2006. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and

iron content in wheat. *Science* 314: 1298-1301

山下陽子、神野裕信、大西志全、粕谷雅志、其田達也。

2014. タンパク質含有率に関わる遺伝子 *Gpc-b1* を導入した秋まき小麦系統のタンパク質含有率と農業特性. 育種・作物学会北海道談話会会報 55:45-46

Abstract

Grain protein concentration (GPC) is one of the important characteristics for quality and physical property of wheat flour. In this study, GPC and grain nitrogen content (GNC) were evaluated in the backcross inbred lines (BILs) derived from the cross between spring bread wheat cultivar “Harukirari” as the recurrent parent and spelt wheat strain “KU-1025” as the donor parent. Thirty-two BC₁F₅ lines were cultivated at Kitami and Obihiro in 2015. GPC of “KU-1025” was higher than that of “Harukirari” in both locations. Although significant negative correlation was found between GPC and grain yield (GY), there were several BILs having higher values of GPC as well as GY compared to the recurrent parent “Harukirari”. Similar to GPC, GNC of “KU-1025” was also higher than that of “Harukirari” and several BILs exhibited higher value of GNC and GY than those of “Harukirari”. These results indicate that “KU-1025” is a useful genetic resource for breeding of bread wheat cultivar having high levels of GPC coupled with high GY.

Key Words: *Triticum aestivum* subsp. *spelta*, Grain protein concentration, Grain nitrogen content, Backcross inbred line, Spring wheat