小麦品質関連遺伝子の解析による国内品種と輸入小麦銘柄の特徴付け

誌名	日本食品科学工学会誌 : Nippon shokuhin kagaku kogaku kaishi = Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology
ISSN	1341027X
著者名	池田,達哉
発行元	日本食品科学工学会
巻/号	64巻3号
掲載ページ	p. 171-176
発行年月	2017年3月

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

Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **64** (3), 171-176, 2017
Copyright© 2017, Japanese Society for Food Science and Technology
doi : 10.3136/nskkk.64.171

http://www.jsfst.or.jp

シリーズ—研究小集会（第28回）穀物部会

解　説

小麦品質関連遺伝子の解析による国内品種と輸入小麦銘柄の特徴付け

池　田　達　哉

（国研）農研機構 西日本農業研究センター

Characterization of Imported Wheat Classes and Domestic Wheat Cultivars by Comparison of Quality-Related Alleles

Tatsuya M. Ikeda

National Agriculture and Food Research Organization (NARO), Western Region Agricultural Research Center, 6-12-1 Nishifukatsu, Fukuyama, Hiroshima 721-8514

Glutenin subunit composition, amylose content, and grain hardness are critical determinants for the end-use properties of wheat. Glutenin composition determines gluten strength, which is important for bread-making. Lower amylose content increases springiness, which is important in white salted noodle production. Grain hardness affects the damaged starch content in flour ; a high damaged starch content increases water absorption and facilitates dough fermentation. These qualtiy attributes are genetically determined. Here, I review these genetic traits based on their allelic variation in imported wheat classes and domestic wheat cultivars. It is thus potentially possible to optimize the allelic compositions of these traits in order to improve the end-use properties of domestic wheat cultivars.
(Accepted Dec. 22, 2016)

Keywords : wheat, gluten, glutenin, starch, grain hardness
キーワード : 小麦，グルテン，澱粉，種子の硬軟質性

1.　小麦の品質関連遺伝子

小麦を用いた加工品にはパン，麺，菓子など様々なものがある．この小麦の優れた加工適性の元になっている生地の粘弾性はグルテンに由来し，その加工品の食感には澱粉の特性が関わっている．これら小麦の品質に関わる要因としては，栽培条件による環境要因や製粉，加工法など技術的要因だけでなく，遺伝的要因も大きく寄与している．パンやうどんに用いられる普通系小麦は，2つのゲノムセット（AABB）を持つデュラム小麦の祖先種に近縁野生種であるタルホ小麦（DD）が交雑して複2倍体化することで生じた3つのゲノムセット（AABBDD）を持つもので，ほとんどの遺伝子はゲノムに対応して3セットずつ存在している．これら品質関連遺伝子の遺伝子型の加工適性への影響と，それを用いた輸入小麦銘柄と国内品種の特徴について解説する．

2.　グルテンの遺伝子型

一昔前までは，国産小麦は加工適性が輸入小麦に比べて劣っていることから，あまり評価されていなかったが，近年の国内品種の遺伝的改良によりその評価が高まり，様々な用途に国産小麦が使われるようになってきた．それに最も貢献したのは小麦の生地の粘弾性の遺伝的改良による製パン性の向上である．生地の粘弾性はグルテンに由来し，グルテンは主にグルテニンとグリアジンからなり，グルテニンはグルテニンの個々のサブユニット間でジスルフィド結合して網目構造を形成し，グリアジンはお互いが水素結合や疎水結合により弱く結合している．これらの特徴から，グルテニンはグルテンの弾力（強さ）に関与し，グリアジンはグルテンの粘り（伸び）に関与していると考えられている．グルテニンは，さらに分子量の大きさの違いを元に，高分子量グルテニン・サブユニットと低分子量グルテニン・サブユニットの2種類に分類され．高分子量グルテニン・サブユニットは，*Glu-A1*，*Glu-B1*，*Glu-D1* 遺伝

〒721-8514 広島県福山市西深津町 6-12-1
連絡先 (Corresponding author)，tmikeda@affrc.go.jp

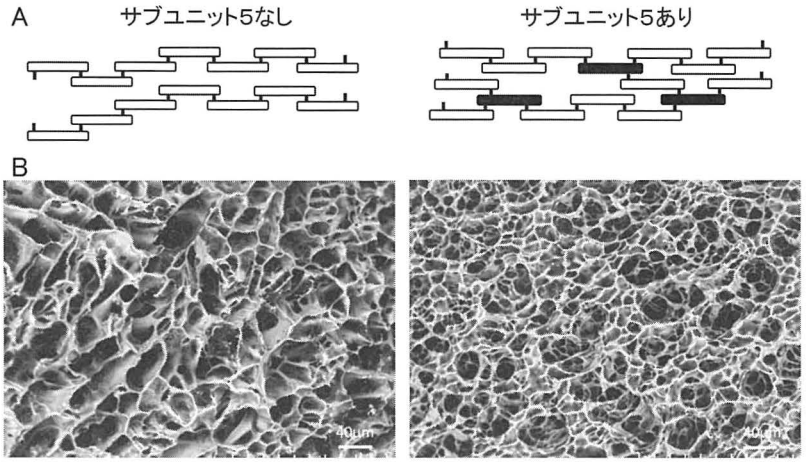

図 1　グルテンの網目構造に対するサブユニット5の効果

A. サブユニット5の効果を示す模式図（黒色がサブユニット5）．B. サブユニット5がない系統のグルテニンのポリマーとサブユニット5がある系統のグルテニンのポリマーの走査型電子顕微鏡画像．

子座にコードされ，低分子量グルテニン・サブユニットは，*Glu-A3*，*Glu-B3*，*Glu-D3* 遺伝子座にコードされている．グリアジンは分子量と等電点の違いから α，β，γ，ω の4種類に分類されている．α/β-グリアジンは *Gli-A2*，*Gli-B2*，*Gli-D2* 遺伝子座に，γ/ω-グリアジンは *Gli-A1*，*Gli-B1*，*Gli-D1* 遺伝子座にコードされている．*Glu-D1* 遺伝子座の遺伝子の1つである *Glu-D1d* 遺伝子型はサブユニット5とサブユニット10（5+10）をコードし，サブユニット5では，他のサブユニットが2個のシステインで分子間ジスルフィド結合して直鎖状のポリマーになるのに対して，遺伝子の変異によりシステインが1カ所増えることで3個のシステインで分子間ジスルフィド結合することで網目が密な構造になり，生地を強める効果が高い（図1）[1]．

グルテニンの発現量が多い遺伝子型（*Glu-B1al*，*Glu-B3g* など）は網目構造を増やすことでグルテンを強める効果がある．一方で遺伝子の欠失型や発現量が低いタイプ（*Glu-A1c*，*Glu-B3ae* など）では網目構造を減らし，グルテンを弱める効果がある．網目構造が密でその量も多い遺伝子型組合せ（*Glu-D1d* と *Glu-B3g* など）では，グルテンの弾力が非常に強い超強力的になり，網目構造を減らす組合せでは薄力的になる[2)~5)]．

グルテニン・サブユニット遺伝子型の組合せから国内品種と輸入銘柄のグルテンの質を分類することが出来る（図2）．輸入銘柄については，数多くの品種のブレンドであることから，個々の種子の遺伝子型を調査してその構成を明らかにした[6)7)]．強力粉の輸入銘柄であるカナダの硬質春赤小麦品種のブレンド，1CW（No. 1 カナダ・ウエスタン），米国の硬質春赤小麦品種のブレンド，DNS（ダーク・ノーザン・スプリング），米国の硬質冬赤小麦品種のブレンド，HRW（ハード・レッド・ウインター）は，ほとんど全ての品種が生地を強める *Glu-D1d* を持っていたが，1CW は生地を弱める遺伝子型（*Glu-A3e* や *Glu-A3f*）の割合が多いことで DNS より弱めのグルテンの質になっていた．一方，HRW は 1CW や DNS と大きく異なり，生地を強める遺伝子型（*Glu-B3b* や *Glu-B3g*）が大半で，グルテンの質は超強力的になると予想された．このことは，1CW の生地が適度な強さで伸展性がよく，HRW の生地が硬く伸展性が劣ることと対応づけられる．中華麺用として使われている豪州の APH（オーストラリア・プライム・ハード）では *Glu-D1d* の割合が少なく，同等の高蛋白質なものでも北米の銘柄とはグルテンの質が異なっており，中華麺適性にはグルテンの質が比較的弱めで麺の歯切れが良いことが求められていると考えられる．うどん用の豪州の ASW（オーストラリア・スタンダード・ホワイト）では，うどんに適した中力的な遺伝子型の組成になっており，菓子用として用いられる米国の WW（ウエスタン・ホワイト）では，生地を弱める遺伝子型である欠失型（*Glu-A1c*，*Glu-B1an*）の割合が高くなっていた．これらのことから，輸入小麦銘柄が蛋白質含量だけでなく，グルテンの質も個々の用途に合わせたものになっていることが明らかとなった（図2）．

国内品種をみると，「ゆめちから」や「銀河のちから」が超強力的なグルテンの質を持っており，「春よ恋」は強力的なグルテンの質を持っている．一方，「キタノカオリ」はグルテンを弱める *Glu-B3j* を持っていることから，「春よ恋」より弱いグルテンの質を持っている（図2）．「春よ恋」は *Glu-D1d* を持った国内品種で初めて本格的に普及した品種で，*Glu-D1d* を持たない「ハルユタカ」に比べて製パン性が優れていたことから，「春よ恋」が国産パン用品種の評価を高める端緒となった[8)]．また，超強力でブレンド適性に優れる「ゆめちから」の登場により，国産小麦を用いたパンの需要が拡大している[9)]．一方，比較的製パン性が良いとされている「ミナミノカオリ」は，*Glu-D1d* を持たないが，

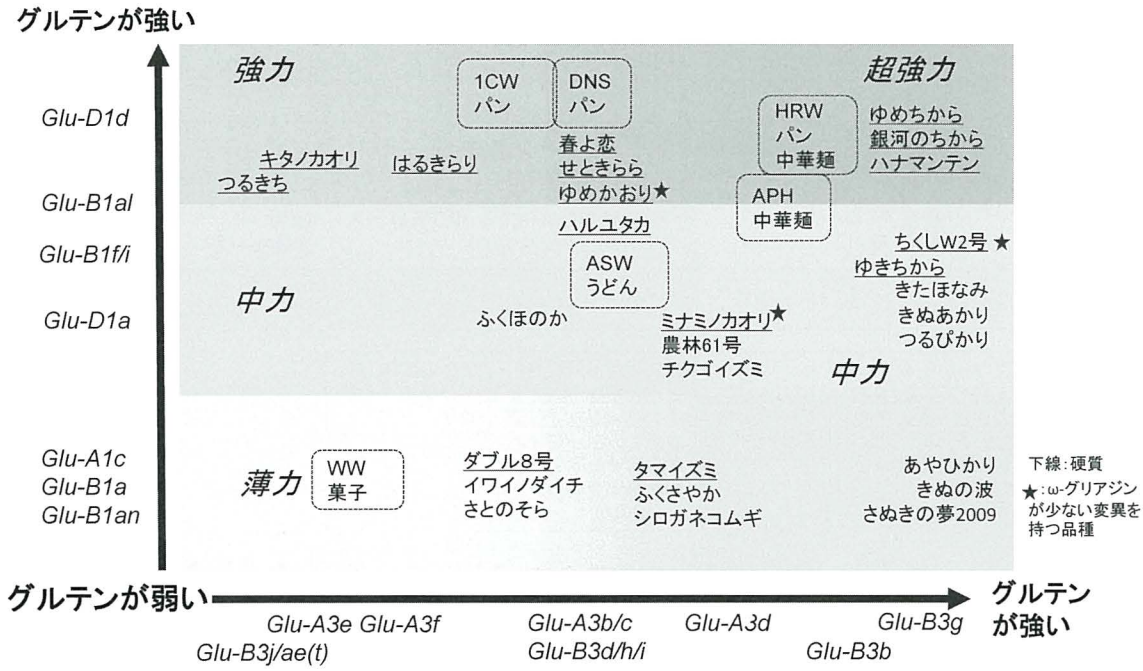

図 2　グルテニンのサブユニット遺伝子型による輸入銘柄と国内品種の分類

ω-グリアジンが少なくなる変異があるため，相対的に網目構造が増え，生地が強めになる性質を持っている．この遺伝子型は「ゆめかおり」や北米の輸入銘柄の構成品種でも見られる．ラー麦として知られている中華麺用の「ちくしW2号」もこの遺伝子型と *Glu-B3g* を持っており，中力の中でも強めなグルテンの質を持っている．北海道の主要な麺用品種である「きたほなみ」や愛知県で普及している「きぬあかり」も *Glu-B3g* を持っており強めなグルテンの質を持っている．中力的なグルテンの質を持つ「農林 61 号」の後継品種である「さとのそら」は，生地を弱める遺伝子型（*Glu-A1c*）により薄力的なグルテンの質を持っている．このようにして遺伝子型を元にして国内品種のグルテンの質の評価ができる（図 2）．

3.　澱粉の成分に関する遺伝子型

小麦種子の 7 割程度を占めるデンプンは，アミロースとアミロペクチンから成っており，アミロペクチンは糊化時の粘性が高く，柔らかさや弾力からなるもちもち感の元になる．アミロースはアミロース合成酵素（*Wx-1* 遺伝子）によって合成され，その量は *Wx-A1*，*Wx-B1* と *Wx-D1* の 3 つの遺伝子によって決まる．3 つとも野生型で機能しているものはアミロース含量が 30％程度になり，通常アミロースに分類され，1 つでも欠失して機能していない場合はアミロース含量が低下し，特に *Wx-B1* の欠失（*Wx-B1b*）の場合はその効果が大きく，やや低アミロースに分類される．また，*Wx-A1* と *Wx-B1* の両方が欠失している品種（*Wx-A1b*/*Wx-B1b*）は，よりアミロースが下がる低アミロースに分類され，3 つとも欠失している場合（*Wx-A1b*/*Wx-B1b*/*Wx-D1b*）はアミロースが無いモチになる（図 3）[10)11)]．アミロースの割合が下がるに従って澱粉中のアミロペクチンが増えるため，柔らかさや弾力も大きくなり，やや低アミロースの澱粉を含む小麦粉からパンや麺を作ると適度な柔らかさや弾力が得られ，パンでは老化を遅らせる効果がある[12)]．

北海道の現在の主要なパン・中華麺用品種は全てやや低アミロースだが，本州のパン・中華麺用品種である「ゆめかおり」や九州の「ミナミノカオリ」などは通常アミロースのタイプで，国産＝もちもち，というわけではない（図 3）．一方，輸入小麦では，1CW や HRW，WW は大半が通常アミロースで，DNS では年次によっては 2～4 割程度やや低アミロースの品種が入っていることがある[6)7)]．輸入銘柄との差別化という点では，北海道のパン用品種のやや低アミロースの特性は有効だが，輸入小麦と代替できるものとして通常アミロースのパン用品種も必要と考えられる．一方，うどん用小麦では国内の麺用品種の多くがやや低アミロースの遺伝子型を持っており，豪州の ASW でも大半がやや低アミロースで，中華麺用の APH も一部はこの遺伝子型を持っている．うどんや中華麺では，適度な柔らかさや弾力がやや低アミロース遺伝子型によってもたらされていると考えられる．

4.　種子の硬軟質に関する遺伝子型

小麦は種子の硬さ（硬軟質性）に基づいて，硬質小麦と軟質小麦に分類される．硬質小麦は高蛋白質で種子がアメ色に見える硝子質のものが多く，一方，軟質小麦は蛋白質が低めで種子が白っぽく見える粉状質のものが多い．しか

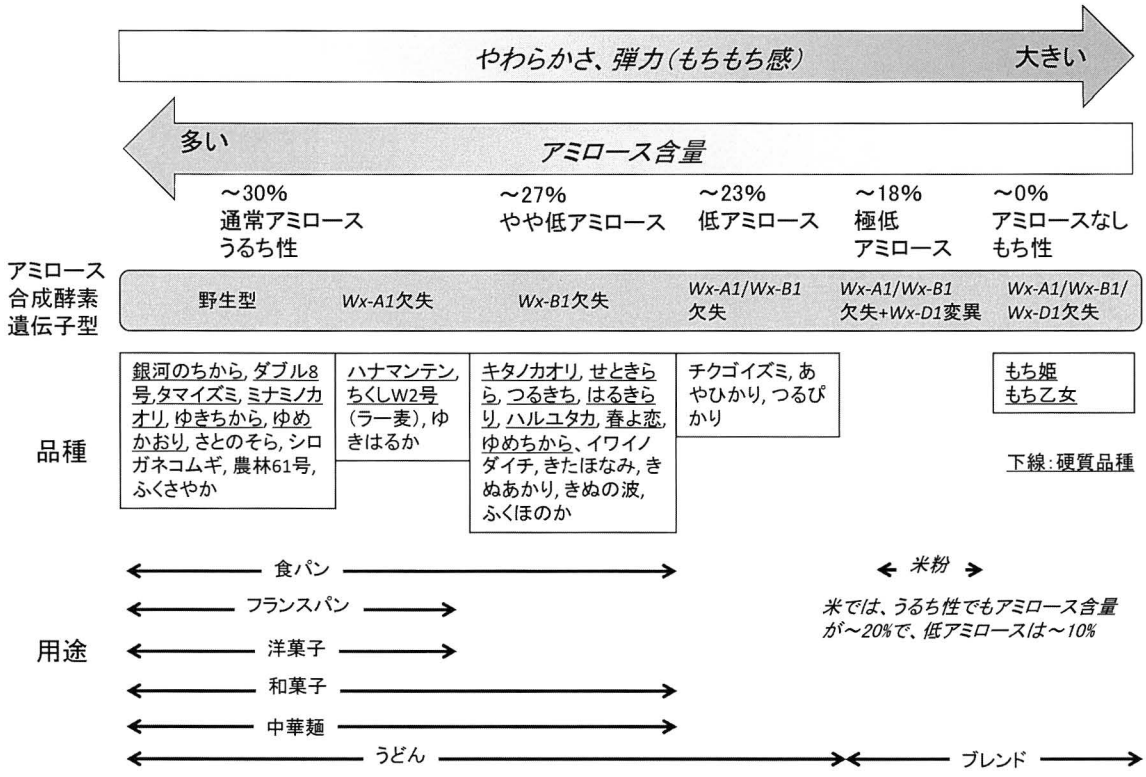

図 3　アミロース合成酵素遺伝子型による品種の分類と用途

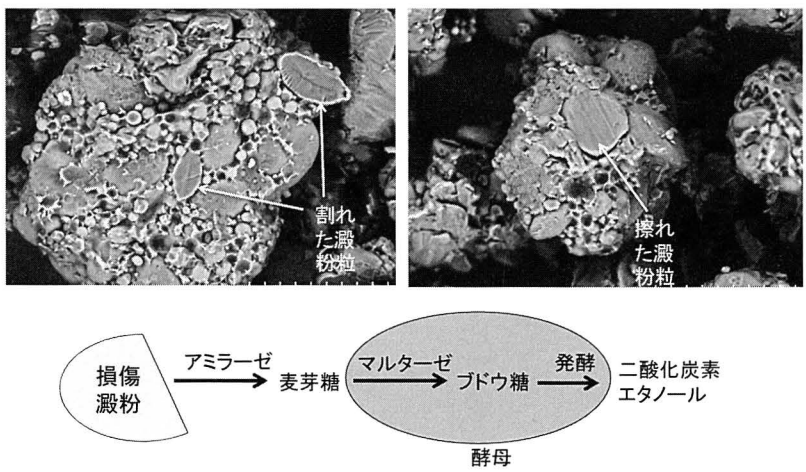

図 4　硬質小麦の製粉時に生じる損傷澱粉とその発酵における効果

し，硬質・軟質と硝子質・粉状質はそれぞれ別の特性であり，硝子質・粉状質は蛋白質含量に大きく影響されるが，種子の硬軟質性は，ピュロインドリン-a (*Pina-D1*) とピュロインドリン-b (*Pinb-D1*) という2種の蛋白質の遺伝子の変異によって決定される．野生型が軟質で，ピュロインドリンが澱粉表面に結合することで，周りにある細胞質蛋白質と澱粉が結合できなくなり，澱粉と細胞質蛋白質の間に隙間ができることで光が乱反射して粉状質になり，種子の硬度が低くなる．一方，これらの遺伝子に変異が起きると硬質になり，ピュロインドリンが澱粉の表面に結合できなくなり，それにより細胞質蛋白質が澱粉表面と強く結合し，隙間が無くなることで乱反射しないために硝子質になり，種子の硬度が高くなる[13]．この違いにより小麦粉の品質にも違いが生じ，軟質小麦では，澱粉と細胞質蛋白質が結合していないため，遊離澱粉を多く含む細かい粉になるのに対して，硬質小麦では澱粉と細胞質蛋白質が結合しているため，粗い粉になり，澱粉に損傷が付きやすくなる．損傷澱粉の割合が大きい硬質小麦由来の小麦粉では吸水性が高まるとともに，損傷澱粉はアミラーゼによる分解を受けやすく，製パン時には酵母の発酵性を高める効果もあり

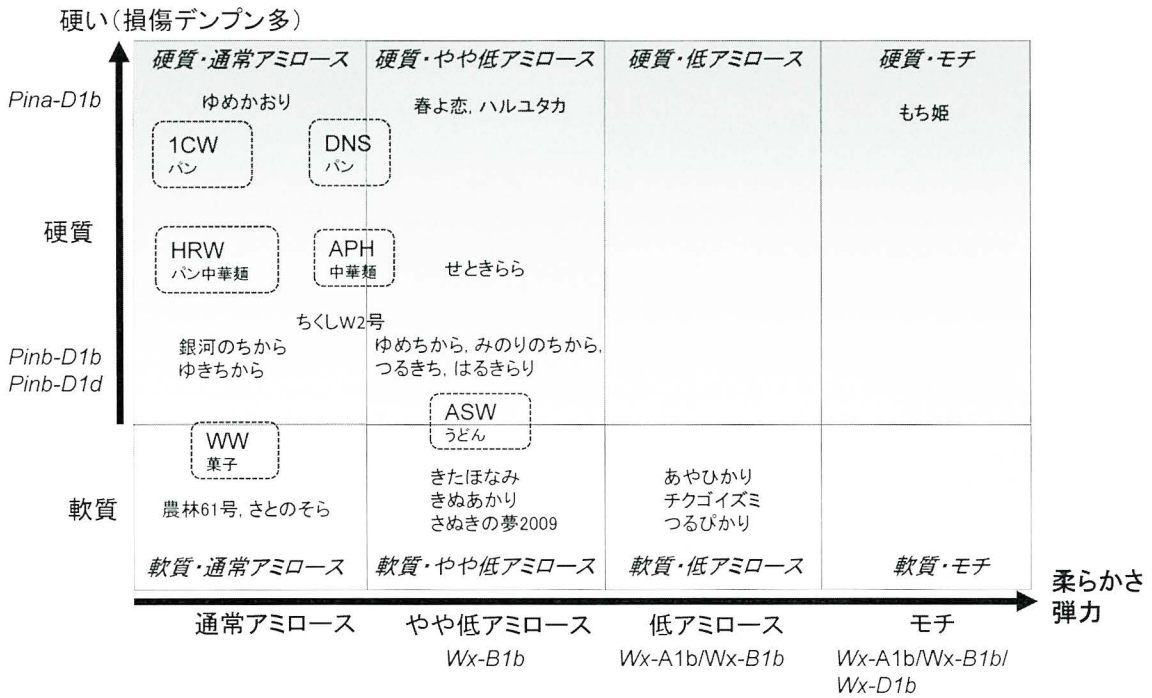

図 5　デンプン特性に関する遺伝子型による輸入銘柄と国内品種の分類

パン用に適している（図4）．

ピュロインドリンの遺伝子型には欠失型とアミノ酸置換型の変異が有り，欠失型の *Pina-D1b* が最も種子が硬くなり，小麦粉の損傷澱粉量が増えることが明らかになっている[14]．DNS と 1CW でこの欠失型が多く，これら銘柄の製パン性の高さにこの遺伝子型が貢献しているものと考えられる[6)7)]．国内品種では「春よ恋」などがこの遺伝子型を持っている[15]．

種子の硬軟質性に伴う損傷澱粉量と澱粉のアミロース含量について，輸入銘柄と代表的な国内品種をプロットしたのが図5である．この図から分かるように，“硬質・やや低アミロース”のものは一部の輸入銘柄に含まれているものの，単一品種で入手できるものでは国産小麦しかないことが分かる．

5.　おわりに

小麦の品質は栽培条件の年次間差異や評価法の影響を大きく受けるため，その遺伝的素質を評価することがこれまで困難であったが，本研究により，グルテン，アミロース合成酵素，種子の硬軟質性に関する遺伝子型変異を組み合わせることで，輸入銘柄や国内品種の遺伝的な違いを総合的に理解できるようになってきた．これを元に様々な加工現場でどの国内品種を使うことが目的とする製品に適しているか予想することが出来る．また，品種育成においては，用途に合わせて遺伝子型組合せを事前に設計する育種（テーラーメイド育種）も可能になっており，この手法を用いて西日本のパン用小麦品種「せときらら」が育成されている[16]．小麦粉の蛋白質含量を制御する因子や，風味に関わる因子など研究面では解明すべきことはまだまだあるが，様々な分野の関係者が，今後求められる小麦の特性について，相互理解を深めていく必要がある．それをもとに今後の需要を把握し，品種育成を行うことで，国産小麦を一層使いやすく，美味しくするとともに，現在13％しかない小麦の自給率の向上に貢献できればと願っている．

文　　献

1) Shewry, P.R., Halford, N.G., Tatham, A.S., Popineau, Y., Lafiandra, D., and Belton, P.S. (2003). The high molecular weight subunits of wheat glutenin and their role in determining wheat processing properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, **45**, 221-302.

2) Tabiki, T., Ikeguchi, S., and Ikeda, T.M. (2006). Effects of high-molecular-weight and low-molecular-weight glutenin subunit alleles on common wheat flour quality. *Breeding Science*, **56**, 131-136.

3) Ito, M., Fushie, S., Maruyama-Funatsuki, W., Ikeda, T.M., Nishio, Z., Nagasawa, K., Tabiki, T., and Yamauchi, H. (2011). Effect of allelic variation in three glutenin loci on dough properties and bread-making qualities of winter wheat. *Breeding Science*, **61**, 281-287.

4) Ito, M., Maruyama-Funatsuki, W., Ikeda, T.M., Nishio, Z., Nagasawa, K., and Tabiki, T. (2015). Dough properties and bread-making quality-related characteristics of Yumechikara near-isogenic wheat lines carrying different *Glu-B3* alleles. *Breeding Science*, **65**, 241-248.

5) 池田達哉（2015）．小麦の品質に関わるグルテンの遺伝的素質について．米麦改良，**10**，1-8.

6) 池田達哉（2016）．輸入小麦銘柄の品質関連遺伝子型の頻度による特徴付け．米麦改良，**8**，2-8.

7) Ikeda, T.M., Yanaka, M., and Takata, K. (2014). Comparison of quality-related alleles among Australian and North American wheat classes exported to Japan. *Cereal Chemistry*, **91**, 616-622.

8) 池口正二郎，立石和弘 (2014). 春まき小麦「春よ恋」の開発経過および普及 北海道におけるパン・中華めん用小麦品種の現状と今後について. 日本の小麦の底力 国内産小麦に関する研究レポート. http://nihonnomugi.com/img/new2015/technologies/140611ikeguchi.pdf

9) 原田昌博 (2015). ゆめちからを認めた者が語る，ゆめちからが得意とする製パンについて. 日本の小麦の底力 国内産小麦に関する研究レポート. http://nihonnomugi.com/img/new2015/technologies/150729harada.pdf

10) Yamamori, M., Nakamura, T., Endo, T.R., and Nagamine, T. (1994). Waxy protein deficiency and chromosomal location of coding genes in common wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, **89**, 179-184.

11) Nakamura, T., Yamamori, M., Hirano, H., Hidaka, S., and Nagamine, T. (1995). Production of waxy (amylose-free) wheats. *Molecular and General Genetics*, **248**, 253-259.

12) Ito, M., Kim, S.-J., Sarker, Z.-I., Hashimoto, N., Noda, T., Takigawa, S., Matsuura-Endo, C., Horibata, T., Nakaura, Y., Inouchi, N., Fukushima, M., and Yamauchi, H. (2007). Staling and texture of bread prepared from new Japanese bread wheat varieties with slightly low-amylose starch. *Food Science and Technology Research*, **13**, 121-128.

13) Barlow, K.K., Buttrose, M.S., Simmonds, D.H., and Vesk, M. (1973). The nature of the starch-protein interface in wheat endosperm. *Cereal Chemistry*, **50**, 443-454.

14) Takata, K., Ikeda, T.M., Yanaka, M., Matsunaka, H., Seki, M., Ishikawa, N., and Yamauchi, H. (2010). Comparison of five puroindoline alleles on grain hardness and flour properties using near isogenic wheat lines. *Breeding Science*, **60**, 228-232.

15) Ikeda, T.M., Ohnishi, N., Nagamine, T., Oda, S., Hisatomi, T., and Yano, H. (2005). Identification of new puroindoline genotypes and their relationship to flour texture among wheat cultivars. *Journal of Cereal Science*, **41**, 1-6.

16) 高田兼則，谷中美貴子，石川直幸，池田達哉，船附稚子 (2012). 製パン性に優れ，多収のパン用小麦新品種「せときらら」. 近畿中国四国農業研究センター成果情報. http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/warc/2012/112d0_01_13.html

(平成28年12月22日受理)