パンの加工特性

野口智弘

(東京農業大学応用生物科学部食品加工技術センター)

The characteristics of bread during processing

Tomohiro Noguchi

*Food Processing Center, Faculty of Applied Bioscience, Tokyo University of Agriculture,
1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya-ku, Tokyo, 156-8502*

〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

Flour can be used to form dough with very high viscoelasticity by kneading well and adding water. The higher protein content in wheat flour helps form good dough that is suitable for making bread. However, there is the wheat which bread characteristics have bad though a protein content is high. In addition to the amount of gluten, the quality of the gluten has also been determined to be important. An increased interest in gluten quality has led to elucidation of the relationship between the sub-unit structures of gliadin and glutenin, and the baking quality. These studies have clearly shown that wheat containing “5+10” high molecular weight glutenin subunit (HMWG) exhibits excellent bread-making properties. Much of the wheat grown in North America and Europe contained “5+10”, but in Japan this was only true for a few varieties.

In recent years, varieties with “5+10” have started to be made in Japan, introduced by breeding.

The details of the mechanism of disulfide-binding (S-S bond) formation have not yet been determined. Protein disulfide isomerase (PDI) is the enzyme that catalyzes S-S bond formation in proteins. We think that PDI involved in wheat seed storage protein synthesis remains present in the flour, becoming involved in S-S bond formation in the bread-making process. We consider this hypothesis. As a result of PDI activity comparison of in flour, they tends to exhibit high PDI activity in bread making highly wheat was observed. As a result of the production of bread is added to the medium flour and PDI obtained by the *E. coli* expression system, it was found that improves the specific volume.

In the future, by advancing the research on the relationship with the flour subunit structures and S-S bond formation by PDI, it is considered that meaningful information is obtained.

1. はじめに

本日は日本食生活学会第50回記念にてお話をさせていただき機会をいただき誠にありがとうございます。本大会のテーマが「穀物の古今東西～小麦を中心に」ということから、私からは、「パンの加工特性」というタイトルでお話をさせていただきます。どうぞよろしくお願いいたします。

「一般家庭の食料品の支出額で2011年にパンがはじめてコメを上回った」というニュースは皆様も記憶に新しいと思います(図1)。パンの購入額が28,368円、コメが27,780円です。ただし、このグラフを見ていただきますとわかるように、パンが大幅に増えているわけではなく、コメの消費が大きく減少しているということです。しかしながら、消費の中心を担う若者が減少する中、このような結果となったことには、やはりパン食への移行

図1 日本におけるパンの現状
(1世帯あたりの米とパンの消費額の推移)

が進んでいると考えるべきです。

2. 小麦粉の加工特性と「質」

それでは、国内のパンの現状を見てみましょう。国内で用いられている小麦は約9割が輸入となっています(図2)。また、パンの製造に要求される生地の高い粘弾性は外国産小麦が優れ、国内におけるパン用小麦の栽培は非常に少ない状況があります。このような生地の良し悪しというものは、グルテンの量に左右されるとされてきましたが、近年の研究によってその量だけではなく、質も非常に重要であることがわかってきました。

では、パンに向く小麦の質とはどのようなものでしょうか。1980年代になってPayneらによって製パン性に影響を与える小麦粉中のタンパク質の解析が行われました(図3)。これらの研究から、小麦貯蔵タンパク質のうち、高分子グルテニンに「5」および「10」とナンバリングされたタンパク質をもつ小麦に高い製パン性があることが明らかになりました。パンに用いられる小麦、普通小麦は6倍体であり、3対の遺伝子上にタンパク質がコードされています。製パン性に影響を与えるタンパク質は、*Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1*上にコードされていますが、「5」および「10」この組み合わせで*Glu-D1*にコードされています。この2つのタンパク質は、高分子

側のx-タイプと低分子側のy-タイプが対になっていますが、x-タイプには通常他分子とジスルフィド結合を形成できる遊離のSH基が2つあります(図4)。一方、y-タイプは3つ有しており、このため、x-タイプでは直鎖状にジスルフィド結合(以後SS結合)が形成されグルテニンが結合するのに対し、y-タイプでは枝分かれ構造を形成することができたり、直鎖状に結合したグルテニン鎖間同士で結合を形成することができたりします。一方で、x-タイプでありながら「5」は特異的に3つの遊離SH基をもつことから、x-タイプ、y-タイプともに3つの遊離SH基をもつため、より複雑なグルテン構造をとることが可能になります。このため、「5+10」をもつ小麦は製パン性が良いとされ、パン用として日本に輸入される小麦の多くはこの「5+10」をもつということが知られております。

一方で、国内品種におけるこれらグルテニンの有無を2001年に調査した中村らの報告によると、「農林35号」および「ハルヒカリ」の2品種が「5+10」を有しているのみでした。そこで、パン用国産小麦の育種に際し、「5+10」を組み込み開発されたのが、「春よ恋」となります。国内産パン用小麦として人気の高かった、しかしながら「5+10」を持たない「ハルユタカ」を母に、「5+10」をもつ外国産パン用小麦「Stor」を父に、開発されましたが、現在国内産パン用小麦の代表品種となっています(図5)。また、平成21年度に開発された超強力品種「ゆめちから」もこの「5+10」をもっています。このように従来、日本の小麦は主にうどん用に品種が開発されていたことから、製パンには不適なものが多い現状がありましたが、現在では製パン性にすぐれた品種が開発されてきています。

ここ十数年の主要品種の作付面積をみますと、ここ数年で急激に「春よ恋」の作付けが増加していることがわかります(表1)。また、新品種である「ゆめちから」生産が開始され、スーパーなどで「ゆめちから」の文字をみることも多くなっていると思います。さらに、年を

平成25年度国内小麦消費量の国産、輸入比率

(農林水産省 食料需給表より)

図2 日本の小麦事情

1980年代Payneらによって、高分子グルテンサブユニット（HMW-GS）の組成と製パン性が検討された。
普通小麦（*Triticum aestivum* L.）

6倍体（AABBDD）のゲノム組成をもつ

1A, 1B, 1D染色体の長腕上に座する

(W. Maruyama-Funatsuki, 2004)

図3 製パン性と高分子グルテンサブユニット

図4 高分子グルテンサブユニットの種類と構造

HMW-GS構成			
	Glu-A1	Glu-B1	Glu-D1
「ハルユタカ」	1	17+18	7+12
「春よ恋」	2 *	7+9	5+10
「ゆめちから」	1	7+8	5+10

母「ハルユタカ」
父「Stoa」

①「ハルユタカ」より多収である。
②「ハルユタカ」より粒の千粒重、容積重が大きく原麦粒の形態の品質が優れる。
③「ハルユタカ」より穂発芽耐性が強い。
④「ハルユタカ」より病抵抗性が強い。
⑤「ハルユタカ」より製パン性が優れる。

図5 「春よ恋」のHMW-GSの構成と性質

追って小麦全体としての作付面積が増加しているとともに、内訳をみると強力粉の割合が増加していることがわかります。このように近年の食の国内産嗜好と相まって、国内産小麦の利用が拡大傾向になっています。

3. 製パンにおけるジスルフィド結合形成機序の解明

それでは、このSS結合がどのように製パン性に関与しているのかですが、製パン性はグルテンが非常に大きな影響を示すことはご存知だと思います。このグルテンは、イオン結合、疎水性相互作用、水素結合、SS結合などさまざまな相互作用、結合によって形成されます。そこで、生地特性を評価するファリのグラフ試験にて、SS

結合還元作用をもつ2-メルカプトエタノールを加えると、生地の形成性が著しく低下し、生地を形成できません（図6）。また、SH基修飾作用を持つN-エチルマレイミドを加えると、一度生地を形成したのち、急激に生地が弱化します。このようなことから、SS結合の存在、また形成が製パン性に大きな影響を示すことがわかりになると思います。

通常、SS結合のような共有結合を形成させるには、非常に大きなエネルギーが必要となります。しかしながら、製パン過程にそのような大きなエネルギーがかかる過程は焼成時以外になく、生地混捏、発酵時に何らかの酸化機構の存在が考えられます（図7）。そこで私たちは、この酸化に酵素が関与すると推察して、SS結合形成を触媒するプロテインジスルフィドイソメラーゼ（以下、PDI）に着目をいたしました。ここでは、私たちの取り組みであるこのPDIについての検討をご紹介します。

PDIは基質タンパク質中の遊離SH基を自らがもつSS結合によって酸化させ、基質タンパク質中にSS結合を形成させます。このPDI量を小麦出穂開花後、継時的にウエスタンブロットにて検出したところ、継時的にその量の増加が観察されました（図8）。また、収穫日

表1 北海道産小麦の品種別作付面積の推移

(単位:ha, %)

	平成11 年産	12年産	13年産	14年産	15年産	16年産	17年産	18年産	19年産	20年産	21年産	22年産	23年産 (シェア)
秋播き小麦	89,800	95,784	97,979	103,100	104,129	107,300	108,534	112,451	109,092	107,653	107,700	106,799	110,099 (92.4)
ホクシン	74,359	88,465	93,360	98,383	99,074	100,279	103,400	106,427	103,937	103,214	96,274	71,712	1,032 (0.9)
きたほなみ										90	7,415	31,456	106,389 (89.2)
チホクコムギ	10,138	4,101	1,622	721	1,270	539							(0.0)
キタノカオリ					26	132	1,160	1,354	1,976	1,432	1,507	1,400	1,003 (0.8)
ゆめちから												32	94 (0.1)
その他	5,303	3,218	2,997	3,996	3,759	6,350	3,974	4,670	3,179	2,917	2,504	2,231	1,675 (1.4)
春播き小麦	4,960	6,020	9,470	9,700	6,460	6,700	7,231	9,461	8,026	8,166	8,474	9,501	9,120 (7.6)
春よ恋			546	2,780	4,443	5,845	6,430	8,537	7,133	6,946	7,287	8,032	7,411 (6.2)
ハルユタカ	4,960	6,003	8,924	6,884	2,017	852	771	923	893	1,218	1,177	953	739 (0.6)
はるきりり									1	1	36	516	970 (0.8)
その他		17		36		3	30	1	0	2	10	0	0 (0.0)
合 計	94,700	103,200	107,500	112,800	112,700	114,000	115,500	120,500	117,100	115,700	116,300	116,300	119,219 (100.0)
強力小麦のシェア	5.2	5.8	8.8	8.6	5.8	6.0	7.3	9.0	8.5	8.3	8.6	9.4	8.6

(吉田行郷, 2012)

図6 小麦粉生地の形成とSS結合

に近い30日後においても、シグナルが多く観察されることから、小麦粉中においてもPDIの存在が推定されます。そこで、各種国内産小麦粉の製パン性とPDI活性を比較したところ、「ハナマンテン」や「ゆめかおり」などパン用小麦ではPDI活性が高い傾向をみました。また、ファリノグラフによる生地安定性も高く、「さとのそら」や「農林61号」といったうどん用である中力品種では活性が低く、生地安定性も低い結果となりました(図9)。

そこで、PDIの活性が製パン性に影響を与えと考え、中力粉に大腸菌のよう大量発現系にて調製したリコンビナントPDIを添加して製パン改良効果をみたところ、PDI添加によって製パン性の向上が観察されました(図10)。しかしながら、想定していたほどの改良効果がみ

られませんでした。PDIは一度基質を酸化すると自らは還元型となるため、酸化する能力を失います。このため、基質へ効率的にSS結合を形成させるためにはPDIの酸化再生が必要で、この機構が小麦中にも存在すると考えられます。そこで、他起源のPDIの酸化再生機構に関与していることが知られている、エンドプラズミクレットキユラムオキシドレダクターゼ1(以下、ERO1)を同様に大量発現させ、PDIとともに小麦アルブミンに作用させたところ、SS結合形成量はPDIのみの添加に比べ大きく増加しました(図11)。また、製パン試験を実施したところ、PDIとERO1を併用することで、製パン性が大きく向上し、中力粉でありながら、強力粉と同程度の非容積を示すパンが焼成されました(図12)。このことから、PDIがERO1によって酸化再

図7 製パンにおけるSS結合形成

プロテインジスルフィドイソメラーゼ (PDI)
によるSS結合形成

図8 プロテインイソメラーゼによるSS結合形成と小麦中での発現

試料	ハナマンテン 超強力粉	ゆめかおり 強力粉	さとのそら 中力粉	農林61号 薄力粉
生地安定時間 (min)	18.2	16.4	3.9	6.9
費容積 (%)	5.43	5.88	5.24	5.61
酸化活性 (Units/ flour 1 g)	1.12(±0.09)	1.55(±0.12) ^a	1.05(±0.50)	0.99(±0.02) ^b
還元活性 (Units/ flour 1 g)	2.18(±0.28) ^{a'}	3.51(±0.35) ^{b'}	2.32(±0.79) ^{a'}	1.84(±0.61) ^a

図9 各種小麦粉中のPDI活性と製パン性

	中力粉	中力粉+rPDI (+350 U/小麦粉100 g)	強力粉
PDI活性 (U/小麦粉100 g)	314	314+350	493

比容積 (cm ³ /g)	4.17±0.1 ^a	4.40±0.14 ^b	4.95±0.14 ^c
硬さ (N)	1.08±0.1 ^a	0.98±0.05 ^a	0.75±0.10 ^b

 $p<0.05$

図10 リコンビナント PDI 添加による製パン性改善試験

図11 小麦タンパク質に対する小麦 PDI, Ero 1 の SS 結合能解析

生されたことで、効率よく SS 結合の形成が進み、製パン性が改善したことが明らかとなり、PDI による SS 結合形成が製パン性に大きく関与することが推察されました。

また、私たちはアスコルビン酸の製パン改良効果についても検討を行いました。アスコルビン酸は、現在広く製パン改良材として用いられています。アスコルビン酸による製パン改良効果は、アスコルビン酸が小麦粉生地中でデヒドロアスコルビン酸に変化し、酸化剤として小麦タンパク質に作用することで SS 結合が形成されると考えられていますが、その詳細はまだ未解明です。

そこでまず、デヒドロアスコルビン酸によるタンパク質への SS 結合形成能について検討を行いました。モデルタンパク質としてオボアルブミンを還元変性したものに、デヒドロアスコルビン酸を作用させたところ、実際に製パンで用いられている量よりも大過剰に入れても、SS 結合形成量は大きくないという結果が得られました(図13)。一方で、小麦生地にデヒドロアスコルビン酸を加え SS 結合形成量の変化を測定したところ、無添加に比べ大きく SS 形成量が増加しました。これらのことから、SS 結合形成にはデヒドロアスコルビン酸に加え、小麦粉中の他の要因がプラスされる必要であることが推察さ

れました。

そこで、デヒドロアスコルビン酸の SS 結合形成すなわち、酸化能は、PDI の酸化再生に関与するのではないかと考えました。小麦粉からタンパク質を抽出するとともに内在性の酵素活性を失活させるために酢酸にて抽出を行ったタンパク質溶液に、PDI およびデヒドロアスコルビン酸を作用させた結果、併用によって SS 結合形成量は大きく増加したことから、PDI の酸化再生を ERO 1 と同様に行っていることが、明らかになりました。

以上のように製パン性には SS 結合が重要な要因を占めており、SS 結合を形成しやすいタンパク質の質があり、さらには SS 結合形成を促進させる機構、PDI やアスコルビン酸などが関与していると考えられます。

4. 最後に

最後に、本日は「パンの加工特性」という広いタイトルでお話をさせていただきましたが、パンの加工特性にタンパク質の量に加え、質が重要であること。そして、従来の国内産小麦は、この質がパンに向いていないということでした。現在はまだパン用小麦の国産比率は数%ですが、今新しい品種が次々に開発されており、今後国産比率の向上が期待されます。また、小麦粉の質

パンの加工特性

製パン試験における rPDI, rEro1, FAD添加量			
小麦粉	rPDI	rEro1	FAD
強力粉	—	—	—
中力粉	—	—	—
①中力粉	0.25 U	—	—
②中力粉	(0.08 nmol)	1.6 nmol	80 nmol

(小麦粉 1 g)

図12 製パン性に対する PDI および Ero 1 の影響

図13 SS 結合形成に対するデヒドロアスコルビン酸の関与について

に対し、私たちが取り組んでいる PDI がどのように関与しているのか、今後さらに研究を進めて参りたいと思

本稿は、第50回大会における主題講演をまとめたものである。