

報 文

ベタイン添加食パン生地の製パン性の改善

葛西大介^{1,2}, 輿水美奈², 大庭 潔², 長谷川秀樹³, 名倉泰三³, 山内宏昭⁴,
韓 圭鎬⁴, 島田謙一郎^{4*}, 福島道広⁴

¹ 岩手大学大学院連合農学研究科

² 公益財団法人とちぎ財団

³ 日本甜菜製糖株式会社総合研究所

⁴ 帯広畜産大学食品科学研究部門

Improvement of Bread-making Quality by the Addition of Betaine

Daisuke Kasai^{1,2}, Mina Koshimizu², Kiyoshi Ohba², Hideki Hasegawa³, Taizo Nagura³,
Hiroaki Yamauchi⁴, Kyu-Ho Han⁴, Kenichiro Shimada^{4*} and Michihiro Fukushima⁴

¹ The Graduate School of Agricultural Science, Iwate University, Morioka, Iwate 020-8550

² Research & Development Section, Tokachi Foundation, Obihiro, Hokkaido 080-2462

³ Research Center, Nippon Beet Sugar Manufacturing Co. Ltd, Inada, Obihiro, Hokkaido 080-0831

⁴ Department of Food Science, Obihiro University of Agriculture and
Veterinary Medicine, Inada, Obihiro, Hokkaido 080-8555

The functionality of betaine has recently become clearer. The influence of betaine on bread-making quality was examined in order to evaluate the utility of betaine in general processed foods. Breads with added betaine were produced using two methods: adding betaine before dough mixing (positive control group), or adding during dough mixing (late addition group). These breads were compared with normal bread (negative control group). The results indicated that the gassing characteristics and gas retention of the positive control group significantly decreased compared to that of the negative control group ($p < 0.05$). The positive control group showed lower specific loaf volume ($p < 0.05$) and increased hardness of the crumbs ($p < 0.05$) and these characteristics affected the texture upon sensory evaluation. The late addition group showed improved specific loaf volume and hardness of the crumbs. Therefore, delaying the time of addition of betaine improves the bread-making quality of breads containing betaine.

(Received Apr. 13, 2016; Accepted Jun. 10, 2016)

Keywords : betaine, bread-making quality, dough, physical property

キーワード : ベタイン, 製パン性, パン生地, 物性

ベタイン (トリメチルグリシン) は海産物の頭足類, 甲殻類, 貝類¹⁾²⁾ やほうれん草, 甜菜などのヒユ科植物, 麦類などのイネ科植物^{3)~5)}, キノコ, たけのこ等に多く含まれる天然の有機化合物である。食品用のベタインの製造は, 砂糖大根を使った甜菜糖製造プロセスにおいて分離された糖蜜から精製されている⁶⁾。その加工食品分野での利用は, 調味料用途で使用される既存添加物であり, その呈味については既に報告がなされている^{5)~9)}。

ベタインの食品加工特性は主に酸味刺激や塩辛さ (塩カド) を緩和する¹⁰⁾, アルコール刺激を緩和する¹¹⁾ など, 全体的にまろやかな風味を得ることに効果的であることが知られている。また, 高い保湿作用やグリシンと同等の水分活

性低下作用により, 水分保持や保存性向上効果があることも知られている⁶⁾¹²⁾¹³⁾。以上の特性から, ベタインは塩分の高い水産加工品のほか, 加工食品全般において酸味料や pH 調整剤と併用して利用されている¹²⁾。

一方, ベタインは肝臓中のメチオニンサイクルにおいてメチル基供与体として重要な働きをしており¹⁴⁾, その生理機能の研究も多く報告され, 肝機能改善や血圧低下, ロコモティブシンドローム改善などの効果が期待されている^{15)~18)}。このため, サプリメント等による製品も販売されているが, 打錠やカプセル化に吸湿性の強いベタインを多く配合することは一般的に難しく, 欧州食品安全機関 (EFSA) が示す 1 日有効摂取量 1.5 g 以上を配合しようと

¹ 〒020-8560 岩手県盛岡市上田 3-18-8, ² 〒080-2462 北海道帯広市西 22 条北 2-23-10, ³ 〒080-0831 北海道帯広市稲田町南 9 線西 13

⁴ 〒080-8555 北海道帯広市稲田町西 2 線 11

*連絡先 (Corresponding author), kshimada@obihiro.ac.jp

すると、粒が大きくなったり、摂取する粒数が多くなるといった問題がある。従って、ベタインの機能性を付与した日常的な加工食品の開発が期待される。食品にベタインの機能性を付与するには、Kawakami らの研究¹⁶⁾によって、NASH モデルマウスに対して 50mg/体重 kg/回のベタインを 1日2回の経口投与で3週間投与することにより、肝機能の改善が認められていることから、体重 60kg のヒトでの摂取量を計算して、1食あたり 3g のベタインを配合することが望ましいと考えられる。

このような背景から、筆者らは日常的に十分量を摂取でき、且つ、様々な調理方法が可能な加工食品の検討を行ってきたが、機能性付与のために、1食あたり必要摂取量のベタインを配合すると、ベタインが有する味質の特性上、逆に食品の風味や物性を損ねることが多い。特に、食パンにベタインを配合するには、1食あたり 100g の食パン（4枚スライスパン約1枚分）を摂取するとした場合、パン生地的小麦粉に対して 5.4% を添加することで 3g のベタインが摂取できる。しかし、ベタインを 1.5g 以上高配合すると、風味への影響は少ない反面、製パン性が劣り柔らかな食パンができないことを経験しており、製パン性の改善が重要な課題となっていた。

そこで本研究では、通常どおりベタインを加えた食パンを製造して、ベタインの添加による製パン性の低下を評価するとともに、それを改良する手段として生地ミキシング時のベタインの添加時期を遅らせたパン生地の製パン性を、種々の方法で評価し、ベタイン添加食パンの製パン性を改善できるか否かを検討した。

実験方法

1. 食パンの調製

食パンの製法は小麦粉 1kg 仕込みのストレート法¹⁹⁾で行い、角型食パンと山型食パンを調製した。製パン材料の配合は長澤らの報告²⁰⁾を参考に決定し、小麦粉 100g に対して、砂糖 5g、食塩 2g、ショートニング 5g、イースト 2g、L-アスコルビン酸 0.01g、ベタイン 0~5.4g、蒸留水 64~66.5ml とした。その際、原料の小麦粉は日清製粉(株)製の強力粉(商品名:カメリヤ、水分 14.0%、タンパク質 12.0%、灰分 0.4%)、砂糖は日本甜菜製糖(株)製のグラニュー糖、食塩は塩事業センターの精製塩、ショートニングは(株)カネカ製のスノーライト、イーストは日本甜菜製糖(株)製のレギュラーイースト、L-アスコルビン酸(以後、ASA と略記する)は和光純薬工業(株)製の特級試薬、ベタインは日本甜菜製糖(株)製のもの(商品名:ニッテンベタイン、純度 99%)を使用した。

上記配合の材料を 25Q の縦型ミキサー(マイティー 25/15H ミキサー、愛工社(株)製)を用いて捏ね上げ時の温度を 30℃ にして最適ミキシングし、得られた生地を分割して角型食パン(230g×4つ)と山型食パン(100g×3つ)

Table 1 Procedure of bread making for dough method

Process	Condition
Mixing	Before adding shortening, low speed 4 min, medium speed 1 min After adding shortening, low speed 5 min, medium speed 2.5 min
First fermentation	30°C, RH75%, 60 min
Punch	Dough folding
Second fermentation	30°C, RH75%, 30 min
Dividing, rounding	Pullman bread; 230 g, one-loaf bread; 100 g Hand rounding
Bench time	30°C, 20 min
Sheeting and molding	First sheeting clearance: Pullman; 0.80 cm, one-loaf; 0.79 cm Second sheeting clearance: Pullman; 0.40 cm, one-loaf; 0.47 cm
Proofing	38°C, RH85%
Baking	Pullman; 200°C, 16 min, one-loaf; 200°C, 35 min

の製パン試験に供した。残りの生地から 20g ずつを分割し、20分のベンチタイム(30°C, RH 80%)後に生地のガス発生量²¹⁾、生地ガス保持性試験²²⁾に供した。

製パン工程は Table 1 に示すように、1次発酵および2次発酵を経た後、分割・成形した生地を 20分のベンチタイム(30°C, RH80%)を経て、モルダー(ツインモルダー、型式 MMR230-2、愛工社(株)製)に供して、角型食パンと山型食パンに成型した。これを型に入れ、ホイロにて 38°C, RH85% の条件で、一定時間の最終発酵を行い、200°C で焼成した。焼成時間は角型食パンを 16分、山型食パンを 35分とした。

2. 製パン性評価

(1) ベタイン添加量の影響

まず、ベタイン添加による製パン性の低下を確認するため、パン生地的小麦粉に対してベタインを 0%, 1%, 2.5%, 5% となるよう添加し、製パン工程のホイロ時間を型上 2cm まで生地が膨張するよう最終発酵を行い、山型食パンを調製してパン生地のホイロ時間、ガス発生量と焼成した山型食パンの比容積、物性(クラム硬さ)の測定を行った。

(2) ベタイン添加時期の影響

次に、ベタイン添加時期の違いが製パン性に与える影響を評価するため、添加時期を変えた山型食パンおよび角型食パンを調製して、パン生地のガス発生量、ガス保持性および焼成した食パンの比容積、物性(クラム硬さ、クラスト硬さ)、組織構造の SEM 画像観察、官能評価を行った。

ベタインを添加しない試験区をネガティブコントロールとし、ベタインを添加する試験区は、通常の副原料と同様にミキシング前に添加した試験区(以降、ポジティブコン

トロールとする)と、Table 1 に示すミキシング後半に添加した試験区(以降、改良区とする)の2種とした。

ベタインの添加量は、全体量の3%となるよう、パン生地の小麦粉に対して5.4%を添加した。製パン工程のホイロ時間は一律55分とし、最終発酵時間が同じ場合のベタイン添加時期による製パン性を評価した。

3. 生地、パンの評価

(1) ホイロ時間の測定

パン生地の発酵性の指標として、ホイロでの発酵時に生地が型上2cmまで膨張する時間を計測した。

(2) 生地のガス発生量の測定

パン生地のトータルガス発生量を、パン生地20g ($n=3$)を用いてファーモグラフ(AF-1100-20, ATTO製)にて10分ごとに測定し、平均値を測定データとした²¹⁾。

(3) 生地のガス保持性の測定

パン生地の減圧下での最大膨張量を測定し、生地のガス保持性を評価した。パン生地20g ($n=3$)を500mlメスシリンドラーに詰め、真空デシケーター中で減圧しながら生地を膨張させた時の生地の高さを1分毎に測定し、最大高さの平均値を測定データとした²²⁾。

(4) パンの比容積

比容積は、焼成し1時間常温で冷却した山型食パン ($n=3$)を用いて菜種置換法²³⁾で体積を測定し、体積を重量で除して算出し、平均値を測定データとした。

(5) 物性の測定

ポリエチレン袋中で20°C、RH70%で焼成1日保存した山型食パンのクラム(内相)、角型食パンのクラムおよびクラスト(外相)について、テクスチャーアナライザー(Stable Micro System TA-XT2, 英弘精機(株)製)を用いて物性を測定した。山型食パン、角型食パンとも、クラム($n=5$)の硬さは厚さ20mmにスライスしたパンを用い、直径20mmの円筒型プランジャーにより圧縮率40%、圧縮速度1.0mm/sで実施し、最大圧縮応力を求めた。角型食パンのクラスト($n=5$)の硬さは、側面から10mmの厚さを切り出して、直径2mmの円筒型プランジャーと直径10mmの穴あきテーブルにより、圧縮率150%、圧縮速度0.5mm/sで実施し、最大突刺応力(硬さ)を求めた。

(6) 組織観察(走査型電子顕微鏡による微細構造の観察)

物性測定の場合と同様に保存した焼成1日後の角型食パン用いて、厚さ10mmにスライスした試料を凍結乾燥後、試料の表面をファインコーター(JFC-I600, JEOL製)でプラチナ蒸着し、走査型電子顕微鏡(JSM-6060LV, JEOL製)にて観察した。観察倍率はクラムで750倍、クラストで40倍とした。

(7) 官能評価

官能評価は物性と関係する食感について、物性測定の場合と同様に保存した焼成1日後の角型食パンを用い、クラムとクラストに分けて盲検による評点法で行った。クラム

は周辺のクラスト部分10mmを除いて厚さ20mmにスライスした試料について、硬さ、噛み切り易さ、口どけを評価項目として評価した。クラストは物性測定に用いたサンプルと同条件で切り出した試料について、硬さ、噛み切り易さ、口どけを評価項目として評価した。評価は12名のパネラー(30代~50代、男女比1:1)で各試験区のパンについて1~5点で評価した。硬さは1点:柔らかい、5点:硬いとし、噛み切り易さは1点:噛み切りにくい、5点:噛み切り易い、口どけは1点:悪い、5点:良い、という評点とした。

(8) 統計処理

各試料間の有意差検定は、ベタインの添加濃度あるいはベタインの添加時期を要因とした一元配置の分散分析をSASのANOVAプロシジャ²⁴⁾を用いて実施し、危険率5%でTukeyの多重比較検定を行った。データ間の相関性評価についてEXCEL2007により単相関の寄与率(R^2)を求めた。また、グラフ中の縦のバーで標準偏差を示した。

実験結果

1. ベタイン添加量の違いによる製パン性への影響

(1) 生地のホイロ時間とガス発生量

パン生地にベタインを添加すると、添加量が多くなるに従いホイロ時間が長くなり、特に、2.5%および5%添加パンではネガティブコントロールの0%と比べて有意($p<0.05$)に長くなり、生地の膨張に時間がかかることが確認された(Fig. 1a)。ガス発生量は発酵150分で比較するとホイロ時間と同様にベタインの添加量に依存して2.5%および5%添加パンでは有意に($p<0.05$)低下し、特に5%添加パンでは著しく低下した(Fig. 1b)。

(2) 山型食パンの比容積と物性

ホイロ時間の延長により最終発酵での生地膨張が一定であるにも関わらず、ベタインを高配合した5%添加パンの比容積はネガティブコントロールの0%と比べて有意に($p<0.05$)低下し(Fig. 2a)、クラムの硬さはベタインの2.5%添加まで変化しなかったが、やや硬くなり、特に5%添加になると、ネガティブコントロールの0%と比べて有意に($p<0.05$)硬いことが確認された(Fig. 2b)。また、5%添加パンではベタインの添加量だけ水分を減らしたにも関わらず、生地がべたつき、正常な生地の形成ができなかった。

2. ベタイン添加時期の違いによる製パン性への影響

(1) 生地のガス発生量とガス保持性

食パン生地のトータルガス発生量(a)とガス保持性(b)をFig. 3に示した。改良区のガス発生量はネガティブコントロールを100%とした時の割合で示すと、発酵時間30分で79%、120分で91%、150分で93%と有意に($p<0.05$)低くなったが、同じ発酵時間150分におけるポジティブコントロールの76%に比べると、改良区のガス発生量は有

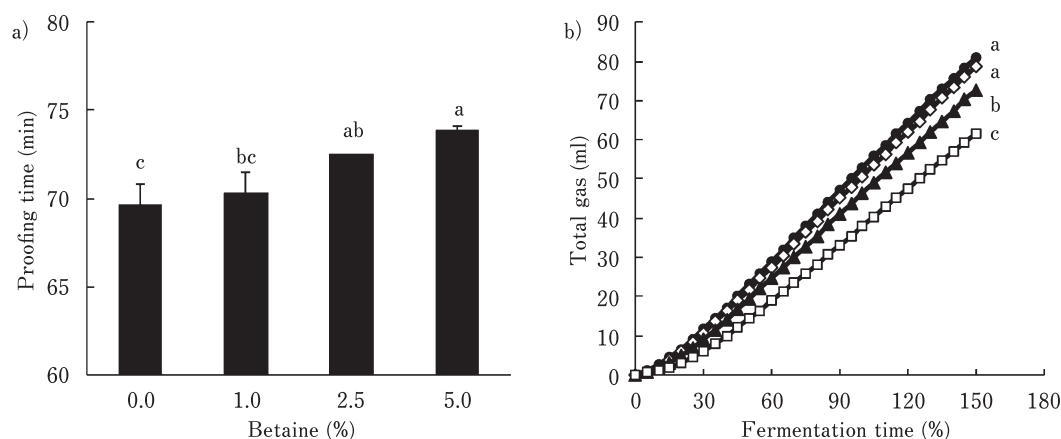


Fig. 1 Proofing time in bread-making and gassing power of dough added betaine

(a) proofing time in bread-making added betaine; (b) gassing power of dough added betaine. Closed circle (●) showed 0% betaine (control), open diamond (◇) showed 1% betaine, closed triangle (▲) showed 2.5% betaine, and open square (□) showed 5% betaine. Values are expressed as means±SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

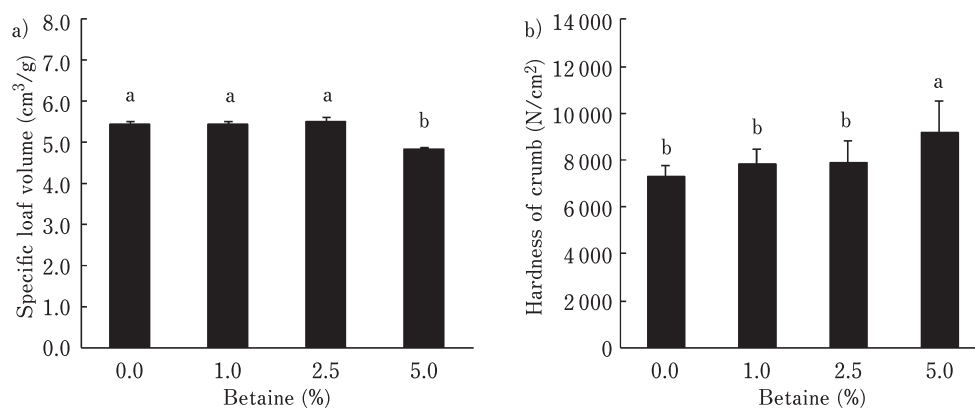


Fig. 2 Specific loaf volume and hardness of crumb part of one-loaf bread added betaine

(a) specific loaf volume of one-loaf bread added betaine; (b) hardness of crumb part of one-loaf bread added betaine. Values are expressed as means±SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

意に ($p < 0.05$) 高い値を示した。ガス保持性 (Fig. 3b) においても、ガス発生量と同様に改良区は、最大膨張時でネガティブコントロールの 88% であったが ($p < 0.05$)、ポジティブコントロールのガス保持性はさらに低く、ネガティブコントロールの 63% であった ($p < 0.05$)。

(2) 山型食パンの比容積と物性

上記のパン生地を焼成した山型食パンの写真を Fig. 4 に示し、その比容積 (a) と保存 1 日後のクラムの硬さ (b) を Fig. 5 に示した。改良区の比容積は、ネガティブコントロールに対して比容積 (Fig. 5a) が 83% であり、ポジティブコントロールの 71% よりも有意に ($p < 0.05$) 増加した。この比容積の結果は、Fig. 4 の写真から見てとれる容積の変化と一致する。クラムの硬さはベタイン添加によりいずれもネガティブコントロールのクラムの硬さに比べて増加したが (Fig. 5b)、ネガティブコントロールに比べてポジティブコントロールのクラムの硬さは 226% であったのに

対して、改良区では 173% に低下した ($p < 0.05$)。これらのデータにおいて比容積とクラムの硬さの間には、負の高い相関関係が認められた ($R^2 = 0.9997$)。

(3) 角型食パンの走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察

焼成 1 日後の角型食パンのクラムおよびクラストの組織構造を観察した SEM 画像を Fig. 6 に示す。クラムの組織構造 (Fig. 6a~c) において矢印の箇所と比較すると、ネガティブコントロールではでんぷん粒がグルテンネットワークに十分取り込まれ、薄く均一な組織となっている (Fig. 6a) のに対し、ポジティブコントロールではでんぷん粒が十分に取り込まれず、グルテンネットワークの層表面に突出していた (Fig. 6b)。一方、改良区ではでんぷん粒の生地への取り込みがやや改善され、ネットワークに埋め込まれていないでんぷん粒はほとんど観察されなかった (Fig. 6c)。

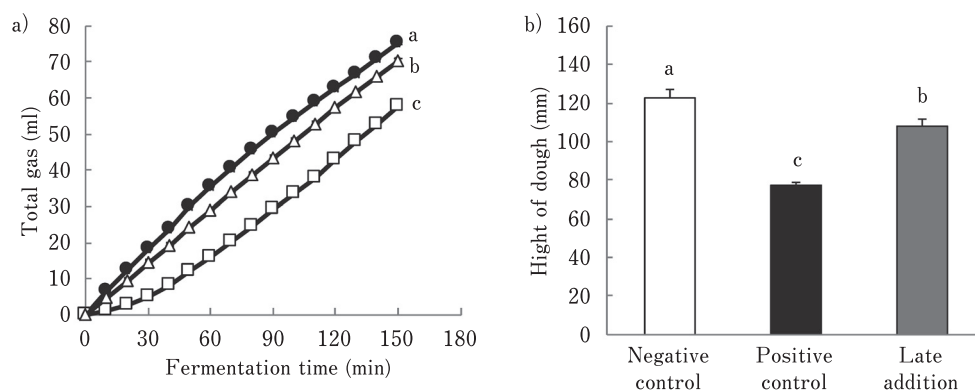


Fig. 3 Gassing power and gas retention of dough different in addition timing of betaine

(a) gassing power of dough different in addition timing of betaine; (b) gas retention of dough different in addition timing of betaine. Closed circle (●), open square (□), and open triangle (△) showed negative control, positive control and late addition group. Values are expressed as means \pm SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

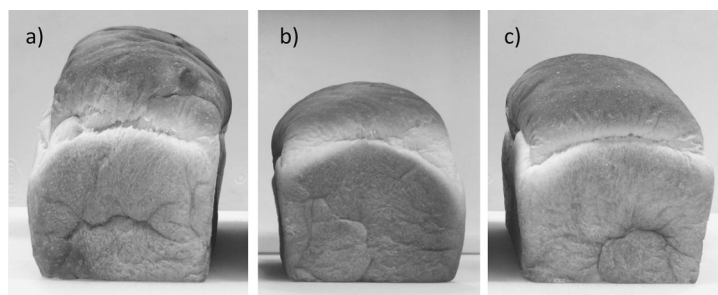


Fig. 4 Photographs of three types of one-loaf breads

(a) Negative control; (b) Positive control; (c) Late addition.

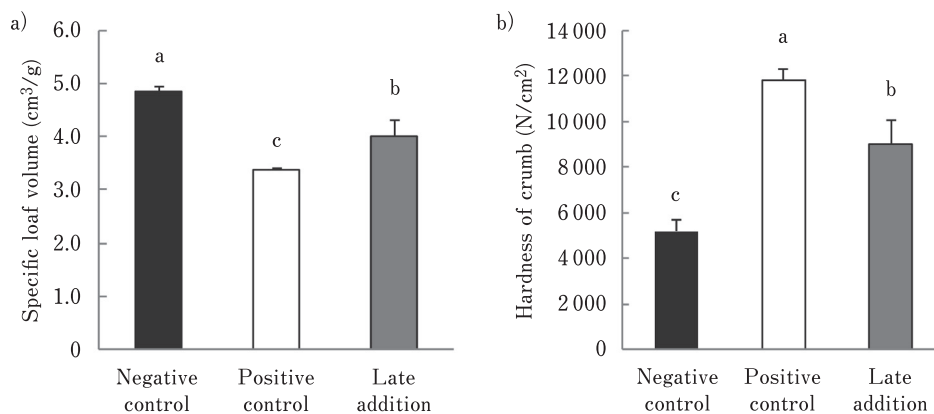


Fig. 5 Specific loaf volume and hardness of crumb part of one-loaf breads different in addition timing of betaine

(a) specific loaf volume of one-loaf breads; (b) hardness of crumb part of one-loaf breads. Values are expressed as means \pm SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

食パンのクラスト構造にはドライクラストとサブクラストの2種の異なる構造があることが知られており²⁵⁾、ドライクラストは均質で厚めの層(約100–200 μ m)を形成し、サブクラストはグルテンネットワークが積層した高密度な構造を形成する。本試験で試作した食パンのクラスト構造(Fig. 6d–f)を比較すると、ネガティブコントロールでは

焼成時の膨化により型に押し付けられたネットワークは組織を維持したまま潰れて層状に積層し、密度の高い緻密なサブクラスト層を形成してドライクラストと明確に判別できた(Fig. 6d)。これに対し、ポジティブコントロールでは積層したネットワーク組織が粗く、密度の低いサブクラスト層を形成しており、ドライクラストとサブクラストの領

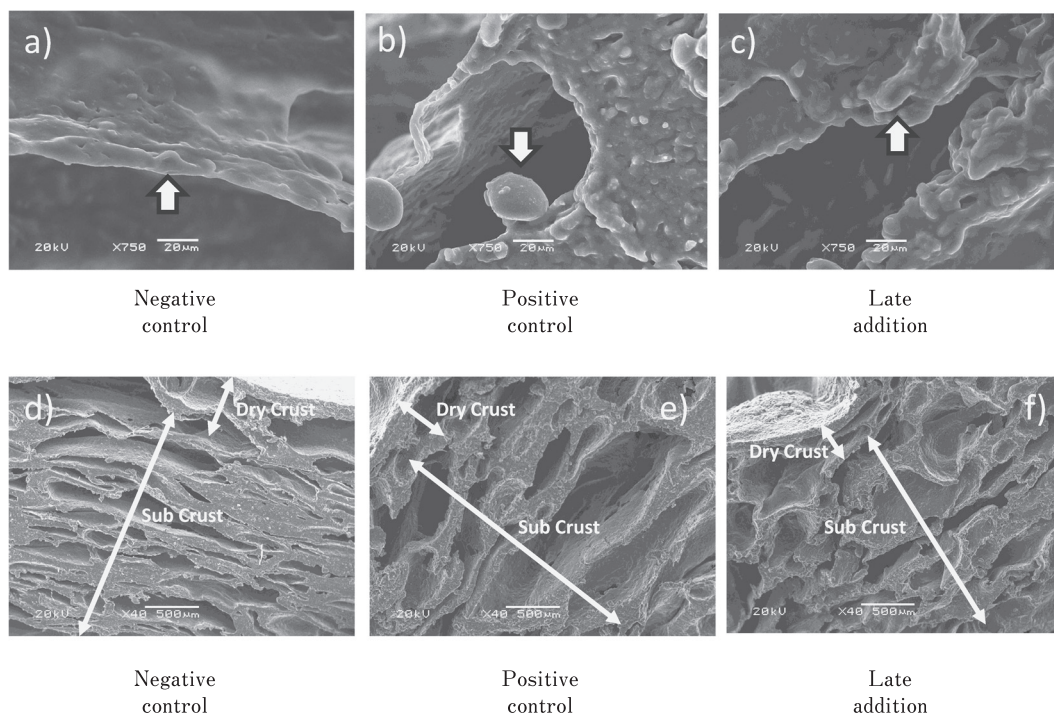


Fig. 6 Scanning electron micrographs of Pullman breads different in addition timing of betaine
Upper micrographs (a, b, c) are the crumb part of Pullman breads, and are magnified 750 \times (scale bar : 20 μ m).
Lower micrographs (d, e, f) are the crust part of Pullman breads, and magnified 40 \times (scale bar : 500 μ m).

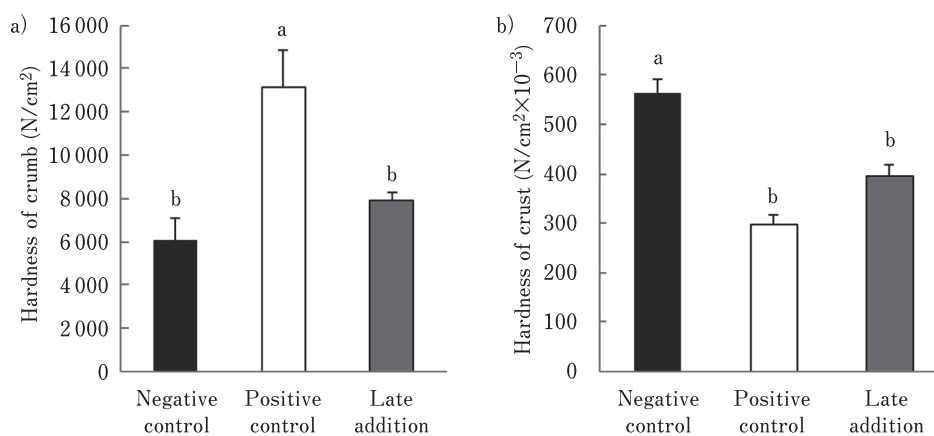


Fig. 7 Hardness of Pullman breads different in addition timing of betaine

(a) hardness of crumb part of Pullman breads different in addition timing of betaine; (b) hardness of crust part of Pullman breads different in addition timing of betaine. Values are expressed as means \pm SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

域が不明瞭であった (Fig. 6e). 一方、改良区ではネガティブコントロールほどの緻密な組織にはなっておらず、ポジティブコントロールと比べて密度の高いサブクラスト構造に改善されたことが観てとれた (Fig. 6f).

(4) 角型食パンの物性

次に、比容積の影響をできるだけ排除して、食パンの体積がほぼ一定である焼成1日後の角型食パンのクラムとクラストの硬さを測定した (Fig. 7). 比容積がほぼ一定の角

型食パンにおいても、クラムの硬さは、ポジティブコントロールはネガティブコントロールに比べて217%と増加した ($p < 0.05$). 改良区のクラムの硬さはポジティブコントロールの60%にまで ($p < 0.05$) 低下し、ネガティブコントロールに対して130%とやや高い値を示したが有意差は認められなかった (Fig. 7a). 一方、クラストの硬さはクラムの硬さとは逆の傾向を示し、ポジティブコントロールではネガティブコントロールの53%に低下し ($p < 0.05$), 柔ら

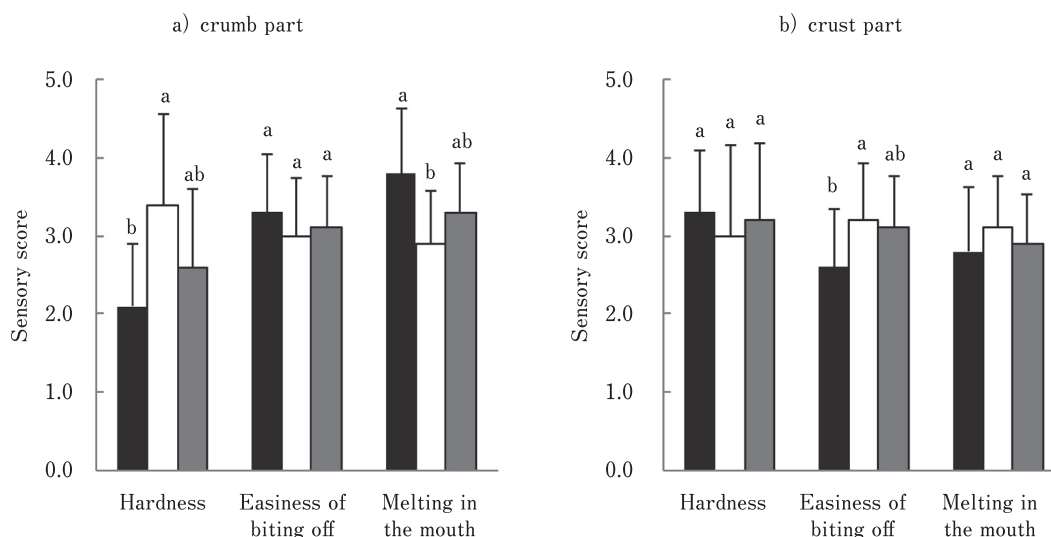


Fig. 8 Sensory evaluation score of Pullman breads different in addition timing of betaine

(a) sensory evaluation of crumb part of Pullman breads; (b) sensory evaluation of crust part of Pullman breads. Open square (■), closed square (□) and gray colored square (▒) showed negative control, positive control and late addition group. Values are expressed as means ± SD. Means with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$.

かなくなった。改良区のクラストの硬さはネガティブコントロールの71%に低下したが ($p < 0.05$)、ポジティブコントロールに比べて133%増加し、ネガティブコントロールのクラストの硬さに近づいた (Fig. 7b)。

(5) 角型食パンの官能評価

焼成1日後の角型食パンの官能評価の結果を Fig. 8 に示す。ポジティブコントロールでは、評価項目の中で、クラムの硬さが有意に ($p < 0.05$) 増加し、クラムの口どけが有意に ($p < 0.05$) 低下した (Fig. 8a)。また、クラストの噛み切り易さが有意に ($p < 0.05$) 増加し、噛み切り易くなった (Fig. 8b)。一方、改良区はネガティブコントロールに官能評価得点が近づく結果となっており、ネガティブコントロールに比べて全ての評価項目で有意差は認められなかった。また、官能評価得点とパン物性の間に高い相関が認められ、相関寄与率は物性測定におけるクラムの硬さと官能評価におけるクラムの硬さで $R^2 = 0.9803$ 、物性測定におけるクラストの硬さと官能評価におけるクラストの硬さで $R^2 = 0.9978$ であった。

考 察

1. ベタイン添加による製パン性の低下

パン生地にベタインを添加すると、添加量が多くなるにつれて、ホイロ時間の延長やガス発生量の低下が確認され (Fig. 1)、特に機能性付与が期待できる5%添加パンでは比容積が有意に ($p < 0.05$) 低下し、クラムも有意に ($p < 0.05$) 硬くなった (Fig. 2)。この際、生地へのべたつきも見受けられたことから、ベタインの添加は、生地の発酵性やグルテンネットワークの形成に大きな影響を及ぼし、製パン性を低下させることが示唆された。

食パンの焼成工程では、生地が十分にグルテンネットワークを形成した後、生地の膨化によりネットワーク間の空隙が拡がり、密度の低い組織構造となるため、ふんわりとした柔らかいクラムが形成される。一方、クラストにおいては、特に角型食パンの場合、膨化の際にネットワークを維持したまま型に押し付けられ、密度の高い組織となり、型壁面の高熱により焼き色が付いてクラムよりも硬い構造が形成される。

従って、膨化が十分でないと、クラムは密度の高い組織構造となり、クラストは膨化の圧力が少なくなるため、ネットワーク層が潰れずに密度の低い層ができ上がると考えられる。このような例として、乾燥オカラを添加したパンで同様な結果が報告されており、その主要因はオカラに含まれる繊維や大豆タンパク質がグルテンネットワークの形成を阻害し、その結果として膨化が抑制されることにあると考えられている²⁶⁾。

本研究の結果でもベタインの添加がこのようなグルテンネットワークの形成に影響を与えて、膨化が不十分となることで製パン性が低下すると推察された。パンの膨化性はパン生地のタンパク質含量²⁷⁾、グルテン性状²⁸⁾、でんぷんの糊化特性²⁷⁾などに影響されるとされ、ベタインの添加により、これらの性質に何らかの変化が起こる可能性が推察される。例えば、添加したベタインがパン生地中の水分を取り込み、でんぷんの糊化に利用される水分が減少してでんぷん糊の粘性が低下した結果、水蒸気が散逸しやすくなり膨化性が低下するなどの可能性であるが、詳細については不明であり、今後の検討としたい。

2. ベタイン添加時期の変更による製パン性の改善

ベタインの添加を遅らせること (改良区) で、製パン性

への影響を小さくすることができるかを確認するため、パン生地的小麦粉に対して5.4%を添加した食パンを、ホイロ時間を一定にして調製し、ベタイン添加時期の違いが製パン性に与える影響を詳細に評価した。

この結果、ベタインの添加時期はガス発生量やガス保持性に大きく影響し、改良区では、ポジティブコントロールに比べてガス発生量やガス保持性が有意に ($p < 0.05$) 増加し、製パン性が大幅に改善された (Fig. 3a, Fig. 3b)。

長澤らは、国産もち小麦を含む小麦パンの製パン性においてガス発生量やガス保持性の低下を報告しており、特にガス保持性の低下が比容積の低下に影響していると推察している²⁰⁾。実際に、ベタインを添加したパン生地を用いて山型食パンを焼成すると、ポジティブコントロールおよび改良区の比容積はネガティブコントロールに対して有意に ($p < 0.05$) 低下した (Fig. 5a) が、改良区はポジティブコントロールに比べて有意に ($p < 0.05$) 増加しており、改善がみられた。この時のガス発生量と比容積およびガス保持性と比容積の間に高い相関関係 ($R^2 = 0.9092$ および $R^2 = 0.9218$) が認められた。また、クラムの硬さも、ネガティブコントロールに対して有意に ($p < 0.05$) 増加した (Fig. 5b) が、改良区はポジティブコントロールに比べて有意に ($p < 0.05$) 低下しており、大幅な改善がみられた。この時の比容積とクラムの硬さの間には高い相関関係 ($R^2 = 0.9997$) が認められた。従って、ガス発生量やガス保持性の低下が食パンの比容積の低下に大きく影響し、これによるクラム密度の増大がクラムの硬さに影響してパンのクラムを硬くしていると考えられた。

このことから、改良区は、ガス発生量やガス保持性が改善されたことで、比容積やクラムの硬さも改善されたと考えられる。

一方で、ガス保持性の低下は、グルテンネットワークの形成が不十分なことにより、組織の網目構造に炭酸ガスを閉じ込めておくことができなくなっているためと考えられる。ベタインをミキシング後半に添加することでガス保持性が改善されたことは、パン生地の状態が変化したことを示唆しており、グルテンネットワークの形成状況を確認するため、比容積がほぼ一定な角型食パンを調製して組織を観察した。

角型食パンの組織観察の結果 (Fig. 6) から、ポジティブコントロールは、パン生地におけるグルテンネットワークの形成が不十分で、焼成時の膨化の際に発生したガスを包み込めずにガス抜けする構造となったことが示唆され、ガス保持性の低下の要因となったと考えられた。また、これにより、食パンの十分な膨化が起らず、クラストにおいては型に押し付けられる圧力が低下したと考えられる。このような例として、クラストの厚さの違うパンでも同様の結果が報告されており、パン組織の圧縮度合の違いにより、組織構造や食感が異なることが報告されている²⁶⁾。従って、

ポジティブコントロールでは、クラムにおいては空隙が少なく、密度の高い構造となり、クラストにおいてはクラスト層が潰れにくくなって層状に積層せず、密度の低いサブクラスト構造となったと考えられるが、改良区ではベタインをミキシング後半に添加することで、ベタインの添加前にグルテンネットワークの形成が進み、組織構造にも良好な影響を与えることが示唆され、組織構造が改善されることが確認された。

組織構造の違いは、角型食パンの物性にも影響を及ぼし、ポジティブコントロールは、ネガティブコントロールに比べてクラムが有意に ($p < 0.05$) 硬く、クラストが有意に ($p < 0.05$) 柔らかい物性となったが、改良区はポジティブコントロールに比べてクラムが有意に ($p < 0.05$) 柔らかく、クラストがやや硬くなり、物性が大幅に改善されてネガティブコントロールに近づいた (Fig. 7a, Fig. 7b)。官能評価においても、物性の測定結果と同様の評価結果が示され (Fig. 8)、角型食パンのクラムの硬さと官能評価によるクラムの硬さの間に正の相関関係 ($R^2 = 0.9803$) が、クラストの硬さと官能評価によるクラストの硬さに負の相関関係 ($R^2 = 0.9978$) が認められた。従って、組織構造の違いがクラムおよびクラストの物性の違いや官能評価における食感にも影響を与えていることが示唆され、ベタインをミキシング後半に添加することで、食パンの組織や物性を改善し、官能評価ではネガティブコントロールと有意差のない食感を得られることが確認された。

以上の結果から、ベタインをミキシング後半に添加することによって、食パン生地の製パン性は改善され、ベタインを添加しないネガティブコントロールに物性を近づけ、官能評価においても、ネガティブコントロールとほぼ変わらない食感とすることができた。

また、データは示さないが、ガス発生量の試験において、発酵時間を180分まで延長してもガス発生は続くため、発酵時間の延長により発酵性についても改善が可能であると考えられる。実際にベタイン添加量の違いによる山型食パンの評価において、製パン工程のホイロによる最終発酵の時間を延長したことにより、ベタイン2.5%添加まではネガティブコントロールと同等の比容積を示す (Fig. 2a) ことから、発酵時間の増加によっても食パンの比容積を改善できることが示唆され、ベタインをミキシング後半に添加する方法と併用してホイロ時間を延長することで、さらなる改善が期待できる。

従って、ベタインを食パンに添加する場合、添加する時期を遅らせることにより、予めグルテンネットワークを形成させることで、比容積や食感において大幅な改善が可能で、ホイロ時間の延長と併用することにより、ベタインの機能性を付与した付加価値の高い食パンの開発が可能であると考えられる。

一方で、食パン製造工程におけるベタインの変化について

て、筆者らは日清スーパーカメリヤドライイーストを用いて予め予備試験としてベタインの資化試験 ($n=2$) を実施しており、1% ベタイン水溶液にドライイーストを6% 添加して25°Cで3日間培養した結果、ベタイン残存率は93%であった。さらに、1% ベタイン水溶液に10% 砂糖を溶解した際に、ベタイン残存率は100%であった。このことから、砂糖を含む食パン生地中ではベタインは発酵により資化されず、そのまま残存すると考えられた。また、ベタインは熱安定性が高く、200°C以下では分解されないことが知られており²⁹⁾、遊離のアミノ基を持たないため、他のアミノ酸に見られる糖とのメイラード反応が起きないことが知られている²⁹⁾。従って、食パンに添加されたベタインは製造工程において変化せず、期待する機能性に影響を及ぼさないと考えられる。

今後はベタインを添加した食パンが実際に機能性を有しているのか、動物試験およびヒト試験による肝機能改善効果、血圧低下効果等について検討を行っていきたい。

要 約

近年、機能性が注目されているベタインを一般的な加工食品に利用することを目的に、食パン生地にベタインを高配合したときの製パン性に与える影響を検討した。まず、食パンに、ベタインをパン生地の小麦粉に対して1~5% 添加したところ、生地からのガス発生量は、ベタイン添加量に依存して減少し、ホイロ時間が増加した。特に、機能性付与を目的とした5%の配合では、製パン性は大きく劣化し、比容積は11%低下した。次に、食パンにベタインを高濃度に配合したときの影響を低減する方法として、ミキシング前に添加する方法に対して、ミキシング後半に添加した場合の食パンの物理特性や食感に及ぼす影響を詳細に調べた。その結果、ベタイン添加によるガス発生量およびガス保持性の低下は、ミキシング後半に添加することで大幅に改善し、比容積も有意に ($p<0.05$) 改善した。ベタイン添加による比容積の低下は、クラムの硬さと高い負の相関がみられ、クラムの硬さが有意に ($p<0.05$) 増加するとともに、クラムの硬さが低下したが、ベタインの添加をミキシング後半とすることで、ネガティブコントロールの硬さに近い値にまで改善された。これらの結果は、食感に関する官能評価の結果とも一致していた。走査型電子顕微鏡 (SEM) による生地の組織像から、ベタインを高配合すると、ミキシングおよび発酵時にグルテンネットワークの形成が十分に形成できていないこと、ミキシング後半の添加とすることで、無添加の生地に近い状態に改善する様子が観察された。以上の結果から、食パンにベタインを高配合する場合は、添加時期を遅らせることで製パン性への影響を小さくできると考えられた。

本研究の一部は文部科学省地域イノベーション戦略支援

プログラム (都市エリア型) (発展) 補助金によった。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 太田静行, 戸井田貞子, ベタイン (Betaine), 日本調理科学会誌, **18**, 162-166 (1985).
- 2) 鴻巣章二, 魚介類の味, 日本食品工業学会誌, **20**, 38-44 (1973).
- 3) 高倍鉄子, 中村敏英, 村元靖典, 植物耐塩性の分子機構と形質転換体作出, 日本作物学会誌, **68**, 337-340 (1999).
- 4) Kim, Y.H., Shim, I.S., Kobayashi, K. and Usui, K., Accumulation of amino acids and glycinebetaine by NaCl treatment and its relation to salt tolerance in three gramineous plants. *J. Weed Sci. Tech.*, **45**, 96-103 (2000).
- 5) 王 羽梅, 藤井清永, 原田健一, 新居直祐, 各種の塩処理がアマランサスの成長, イオン含量ならびにグリシンベタイン含量とその生成酵素の発現に及ぼす影響, 名城大学農学部学術報告, **37**, 119-127 (2001).
- 6) (社)糖業協会編, ベタイン, 「現代糖業技術史」, 初版, (丸善プラネット, 東京), pp. 369-372 (2006).
- 7) 小原正美, 天然食品の特殊呈味成分, 「食品の味」, 第6版, (光琳, 東京), pp. 76 (1966).
- 8) 道川恭子, 大野知美, 渡辺勝子, 山口勝己, 鴻巣章二, グリシンベタインの味質とエゾボラにおける呈味効果, 日本食品科学工学会誌, **42**, 1019-1026 (1995).
- 9) 橋本芳郎, 水産物の味, 調理科学研究会誌, **5**, 1-7 (1972).
- 10) 名倉泰三, ベタインの食品加工特性と栄養機能性, JAFAN, **32**, 259-269 (2012).
- 11) 日本甜菜製糖株式会社, アルコール含有食品, 特許第3711074号, (2003/07/22).
- 12) 菊地裕人, てん菜の有効利用—日本甜菜製糖(株)の取組—, 砂糖類情報, 3月号, pp. 1-6 (2008).
- 13) 佐山晃司, ベタインを原料とする調味料とその使用効果, ジャパンフードサイエンス, **28**, 38-42 (1989).
- 14) 橋本隆男, 篠原佳彦, 長谷川弘, ホモシステイン代謝, The Pharmaceutical Society of Japan, **127**, 1579-1592 (2007).
- 15) Okada, T., Kawakami, S., Nakamura, Y., Han, K.-H., Ohba, K., Aritsuka, T., Uchino, H., Shimada, K., Sekikawa, M., Ishii, H. and Fukushima, M., Amelioration of D-galactosamine-induced acute liver injury in rats by dietary supplementation with betaine derived from sugar beet molasses. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **75**, 1335-1341 (2011).
- 16) Kawakami, S., Han, K.-H., Nakamura, Y., Shimada, K., Kitano, T., Aritsuka, T., Nagura, T., Ohaba, K., Nakamura, K. and Fukushima, M., Effects of dietary supplementation with betaine on a nonalcoholic steatohepatitis (NASH) mouse model. *J. Nutr. Sci. Vitaminal*, **58**, 371-375 (2012).
- 17) Olthof, M.R. and Verhoef, P., Effects of betaine intake on plasma homocysteine concentrations and consequences for health. *Current Drug Metabolism*, **6**, 15-22 (2005).
- 18) フィンフィーズ フィンランド オイ, 血圧低下効果を有する機能製品中のベタインの使用, WO2002/055069 (2002/07/18).
- 19) 長尾精一, 小麦の加工と利用, 「小麦とその加工」, 第2版, (建帛社, 東京), pp. 223 (1989).
- 20) 長澤幸一, 田引 正, 西尾善太, 伊藤美環子, 中村和弘, 谷口義則, 山内宏昭, 国産もち小麦「もち姫」を含む国産小麦パンの製パン性および特徴的物性の解析, 日本調理科学会誌, **44**, 214-222 (2011).
- 21) 山内宏昭, 一ノ瀬靖則, 高田兼則, 入来規雄, 椎名武夫, 小林 猛, 冷凍生地食パンの老化に関する速度論的解析, 日本食品科学工学会誌, **46**, 212-219 (1999).

- 22) 山内宏昭, 一ノ瀬靖則, 高田兼則, 入来規雄, 桑原達雄, 改良真空生地膨張量測定による小麦粉の製パン性の簡易評価, 日本食品科学工学会誌, **47**, 46-49 (2000).
- 23) 大羽和子, 川端晶子編, 調理科学に関する基礎実験, 「調理科学実験」, 初版, (学建書院, 東京), pp.12-13 (2003).
- 24) 竹内 啓, 市川信一, 大橋康雄, 岸本淳司, 浜田知久馬, 「SASによるデータ解析入門」, 第2版, (東京大学出版, 東京), pp.149-155 (1987).
- 25) Altamirano-Fortoul, R., Hernando, I. and Rosel, C.M., Texture of bread crust : puncturing settings effect and its relationship to microstructure. *J. Texture Studies*, **44**, 85-94 (2013).
- 26) 堀内理恵, 杉原好枝, 福田 満, 乾燥オカラ添加が製パン性に及ぼす影響, 日本食生活学会誌, **14**, 324-338 (2004).
- 27) 田中康夫, 松本 博, 製パンの科学 (I) 製パンプロセスの科学, (光琳, 東京), pp.52-57 (1991).
- 28) Khan, K. and Bushuk, W., Glutenin : Structure and functionality in breadmaking., *Baker's Dig*, **52**, 14-16 (1978).
- 29) 佐藤真一, 恵本 司, 菅野恭志, ベタインの食品素材としての特性, 月間フードケミカル, **11**, 81-85 (2000).
- (平成28年4月13日受付, 平成28年6月10日受理)
-