スポンジケーキの物性に及ぼすトランスグルタミナーゼの影響

山崎勝利[§], 鳴戸 康*, 上田要一*

(株)あじかん 研究開発センター (元 味の素(株) 商品開発センター)

* 味の素(株) 商品開発センター

Effects of Microbial Transglutaminase on Mechanical Properties of Sponge Cake

Katsutoshi Yamazaki[§], Yasushi Naruto* and Youichi Ueda*Ahjikan CO., LTD. Research & Development Laboratories, 5-5-24, syoukoucenter westside,
Hirosima city, Hirosima 733-0833* Ajinomoto CO., LTD. Research & Development Laboratories, 1-1, Suzuki-cho, Kawasaki-ku,
Kawasaki, Kanagawa 210-8681

Effects of transglutaminase derived from microorganisms (MTG) on mechanical properties of sponge cake were evaluated. The specific volume of sponge cake increased by the addition of MTG at 0.5-5.6 u/gp. When MTG was used with other quality-improving agents, its effect was enhanced by the concomitant use of an emulsifier, a viscosity-increasing polysaccharide, and a wheat degradation product. The specific volume was increased to about 1.2 times by the use of 1.4 u MTG and 0.2% emulsifier compared with MTG alone. By the addition of MTG, sponge cake with a better appearance having no depression or creases on the top surface was obtained, and the optimal dosage of MTG was 0.5-1.4 u/gp. When MTG was added at more than 2.8 u/gp, the surface tended to be slightly hardened, but a crumb with a good shape-retaining property was obtained by the simultaneous addition of an emulsifier and a viscosity-increasing polysaccharide, air bubbles were distributed adequately, and a moist and soft feeling on eating was obtained. On testing of mechanical properties by the breaking test, the breaking distance as well as the breaking strength increased by the addition of 1.4 u/gp MTG compared with no MTG, suggesting improvements in both elasticity and softness. On SDS-PAGE, a decrease in low-molecular-weight gliadin was noted, indicating the usefulness of MTG for improving the quality of sponge cake and its primary substrate protein.

(Received Oct. 4, 2004 ; Accepted Mar. 2, 2005)

近年、嗜好の多様化により調理パン、フランスパンやケーキ類の需要が伸びており、特に、手作り志向から、オープンベーカリーシステムが好まれている。そして、料理の手間が省けて家庭や職場に持ちかえって食べられる調理済みパンや小麦粉ベースにすべての素材が配合された「スポンジケーキの素」などの開発も進んでいる。

スポンジケーキは卵、砂糖、小麦粉を主原料に、卵の起泡性とその安定性を利用したスポンジ状の組織を形成するケーキ類の総称である。スポンジケーキの品質に影響する小麦粉の種類¹⁾や副原料の砂糖²⁾³⁾やバターなどの配合量⁴⁾⁵⁾や攪拌^{6)~8)}、焼成温度や時間^{9)~12)}などの調製条件¹⁴⁾については既に多くの研究¹⁹⁾²⁰⁾がなされている。主原料の小麦粉についてみると、武田ら¹³⁾は小麦粉を適正条件下で長期保存(エージング)することによってスポンジケーキの膨化がよくなるとしている。また、藤井ら¹⁵⁾は小麦デン

ブで調製したスポンジケーキの生地特性を明かにしている。そして、藤井ら¹⁶⁾はスポンジケーキに必要な品質要件として、第一に十分に膨化していること。第二には、外観は凹みや皺がなく、均質で焼き色が濃く、固くてしっかりしたクラストが形成されていること。第三には、しっとりして、ふんわりした柔らかいテクスチャーなどの点を満たされることを挙げている。

現在、タンパク質架橋重合化機能を持つトランスグルタミナーゼ(以下、MTGと略す)¹⁷⁾はタンパク質中のGln残基とLys残基間の結合を触媒する酵素であり、原料小麦粉の小麦タンパク質であるグルテンに作用させて、タンパク質分子内および分子間にε-(γ-Glu)Lys架橋結合(以下、G-L結合と略す)を形成する。

このようなことから、本報では、スポンジケーキの基本原料である卵:小麦粉:砂糖:バターの一般的配合比率を参考に190:100:100:40を基に、MTGの小麦タンパク質への架橋重合反応によりグルテンのネットワーク構造が強化されると予想された。そこで、スポンジケーキ生地中

〒733-0833 広島市西区商工センター5丁目5-24

* 〒210-8681 川崎市川崎区鈴木町1-1

§ 連絡先 (Corresponding author), k-yamazaki@ahjikan.co.jp

に及ぼすバターの特性や焼成過程に表れる嵩比容などを評価し、ふっくらとして柔らかい食感への効果や、凹みや皺のない内相の形成が MTG による小麦タンパク質の改質によるものかを検討し、スポンジケーキ調製における加工特性に及ぼす MTG の影響を明かにすることを目的に実験を行った。

実 験 方 法

1. 試 料

原料の卵は市販のものを卵黄と卵白量の比を一定量にあわせて使用、砂糖は新日本製糖(株)の「上白糖」、バターはよつば乳業(株)の「無塩バター」(水分 14.5%, ヨウ素価 31.5, 酸化 1.04)。小麦粉は日清製粉(株)の「バイオレット」(タンパク質 7.10%, 灰分 0.33%), 乳化剤は三菱化成食品(株)の「リョートーシュガーエステル S-990」(HLB = 16), 増粘多糖類は大日本製薬(株)の「グアーガム」を用いた。MTG は味の素(株)の「アクティバ」TG-M コシキープ (MTG 酵素力価は 20 unit/g) で DMV ジャパン(株)製のタンパク部分分解物「グルタミンペプチド」(平均分子量約 3000) を 2% 配合したもの。小麦タンパク分解物は片山化学工業(株)の「グルパール No. 572C」を用いた。

2. スポンジケーキの調製

スポンジケーキ (以下、ケーキと略称する) の調製法には、大別して共立て法と別立て法がある。本報では、生地バターの攪拌や焼成などの調製条件の影響を受けないように山上ら¹⁴⁾の報告から Fig. 1 のフローに従って室温 20℃ のテストベーキング室にて共立て法で行った。混練機は(株)エフ・エム・アイ製の縦型ミキサー「KitchenAid KSM-5 型」にて、プランジャーにワイヤー・ホイップを用いて行った。バター調製ではバター見かけ比重が重要な要因であるので、0.212~0.250 にそろえた。すなわち、20℃ の全卵 380 g (卵黄 152 g と卵白 228 g) をステンレス・スチール・ボウルに計量し、上白糖 200 g を半量ずつ 2 回に分けて投入して、回転数 200 rpm で 10 分間攪拌を行った。山上¹⁴⁾らは生地バターの攪拌の過不足がケーキ内相の状態および焼成後の比容積に影響するとしているので、小麦粉 200 g に MTG を 0, 0.5, 1.4, 2.8, 5.6, および 14 u/g protein 量を各々混合して加えた後、KitchenAid の混練速度は 80 rpm で 1 分間とした。次に、40℃ に溶かしたバター 80 g を加えて川染ら⁶⁾のデータからも安定する 80 rpm で 50 sec 攪拌を行い、焼成前のバター比重を 25~28℃ で 0.430~0.470 に設定した。

このスポンジケーキバターをケーキ型 No.「B-104」直径 130 mm×高さ 40 mm のケーキ用型枠にグラシン紙をケーキ枠および底辺に敷き詰めてセットし、スポンジケーキバター 140 g を気泡を壊さないように静かに加えた。

各 5 つのケーキ型に分注した後、藤沢製作所(株)の焼成

機「プリンスオープンⅡ3 段デッキオープン」にて 180℃ で 15 分間焼成した。

3. バター及びスポンジケーキの諸測定

(1) バターの比重

調製直後のバターを 40 ml 容の計量カップに隙間なく詰め、重量を測定して、同容器中の水の重さで除して比重を測定した。

(2) ケーキの比容積の測定

焼成後、オープンより取りだし 40 分放冷し、室温に戻ってから比容積を(株)アステックス社製の 3DLaser Scanner 式 3 次元イメージ計測計「SELNAC-VM150 型」にて容積、高さ、外径 (1, 2) を測定し、比容積は容積 cm³/重量で表し試料 5 回の平均値で示した。

(3) ケーキの物性

ケーキの物性測定は、焼成したケーキの上面を 10 mm カットし縦、横、高さが 30×30×30 mm の正方形にて、不動工業(株)のレオメータ「2202 型」により破断試験を行った。検出器 2 kg, レンジ 200 g, テスト速度: 6 cm/min, プランジャー: 8 mmφ 平板プランジャーを用いて 2 試料につき各 5 個の計 10 ケーキ片を測定して平均値を求めた。

(4) ケーキの官能評価

ケーキの官能評価は外観の色調、内層の柔らかさ、しっとり感、保形性、総合評価の 5 項目を評価した。無添加品を 5 点としてパネラー 10 名による 10 段階評点法で評価した。

(5) ケーキの SDS-PAGE 測定

焼成したケーキの MTG による小麦タンパク質の作用性をみるために、Laemmli の方法¹⁸⁾に従って SDS-PAGE を測定した。ケーキ各 1 g を 50 ml に溶解し、100 μl に対して 4% の SDS を含む 0.01 M トリス塩酸緩衝液 (pH 6.8) を 100 μl 溶解し、5 μl をそれぞれ電気泳動に供した。ポリアクリルアミドの濃度は 10% とし染色はクマシーブリリアントブルー R-250 を用いた。デンストメトリーは島津製作所(株)製の二波長フライングスポットスキャナー「CS-9000P/N206-13300 型」を用いて波長 640 nm で測定した。

(6) ケーキの外観および断面図測定

外観は MINOLTA 社「DIMAGE20 型」デジカメで撮影し、断面はカットした後にリコーのコピー機にて複写した。

(7) ケーキの水分

焼成後のケーキをケット(株)の「Kett 水分計 FD600-2 型」にて 130℃、20 分の条件で水分を測定した。

実験結果および考察

1. バター比重と比容積

ケーキの調製は Fig. 1 に示したバター生地配合及び調製条件で行った。全卵の第一段階の攪拌では、各調製段階の比重は 25~28℃ で 0.212~0.250 とほぼ一定となり、卵白の起泡性による安定したバターを形成した。小麦粉を

Fig. 1 Preparation of sponge cake

加えた第2段階では0.430～0.470に設定した。川染・山野²⁾井川¹²⁾はバターの比重を0.430が適切としており、0.470以上ではバター比重とケーキ比容積の間には負の相関があるとした適切な範囲内であった。本条件で調製したこのデータからFig. 1に示すフローの条件にて調製した結果、ケーキの比容積はFig. 2に示すようにMTGの添加量によって無添加に対して向上する傾向を示した。バターの泡立て温度はMizukoshi³⁾越智⁸⁾らの標準とする28℃で行い、越智らの泡立て温度からも、無添加に対して安定した比容積が得られ、MTGの添加量の増加に従って比容積が向上した。MTG 5.6 u/gp 量において最も高い嵩比容が得られ、MTGによる小麦タンパク質の架橋重合化の影響であることが示唆された。

MTG添加量の最も高い14 u/gpでは、比容積の減少がみられ、このことは、逆に、MTG添加量の増加により架橋重合化がさらに進み、小麦タンパク質の網目構造の強化によって膨化が抑制されたためと考えられる。

2. MTGと改質材併用による比容積

MTG単独に対して他の改質材として乳化剤、増粘多糖類および小麦タンパク分解物の単独および併用における効果をみた。経済性の点からMTG添加量は0.5 u/gp量に固定して他の改質材0.2%および0.5%との併用を試みた結果、乳化剤との併用では、Fig. 3のように、MTG単独の場合よりもMTG 0.5 u/gpと乳化剤0.2%併用では、増粘多糖類、小麦タンパク質分解物、乳化剤の順に高い比容積の発現がみられ、改質材は0.5%添加で乳化剤、増粘多糖類、小麦タンパク分解物の順に効果が得られた。さらに、図に

Fig. 2 The effect of MTG content at level of 0, 0.5, 1.4, 2.8, 5.6 and 14 u/g protein on specific volume of sponge cake

Fig. 3 Effect of food additives on specific volume

Cont, MTG 0.5 u/gp ;
 A-1, emulsifying agent only 0.2% ;
 A-2, MTG 0.5 u/gp+emulsifying agent 0.2% ;
 A-3, MTG 0.5 u/gp+emulsifying agent 0.5% ;
 B-1, guar gum only 0.2% ;
 B-2, MTG 0.5 u/gp+guar gum 0.2% ;
 B-3, MTG 0.5 u/gp+guar gum 0.5% ;
 C-1, wheat hydrolyzed agent only 0.2% ;
 C-2, MTG 0.5 u/gp+wheat hydrolyzed agent 0.2% ;
 C-3, MTG 0.5 u/gp+wheat hydrolyzed agent 0.5%.

は示していないが、乳化剤0.5%ではMTG単独の1.4 u/gpで比容積が3.48に対して併用で1.2倍の3.92まで向上した。越智⁸⁾はショ糖エステルを加えると分散性、起泡性が改良するとしており、ショ糖エステルは生地調整剤としてグルテンと特異的な結合性を有し、また、澱粉中のアミロース、アミロペクチンとも複合体を形成するなどによりケーキのしっとりした食感に寄与されMTGとの併用によりFig. 4にみられるようなしっかりした形状のケーキが得られた。これらのことから、MTGと乳化剤との併用により、小麦タンパク質との架橋形成による卵白生地

(foam) の安定性が向上されたものと推察された。

一方、増粘多糖類との併用では、図には示していないが、MTG 1.4 u/gp と増粘多糖類 0.2% 併用では比容積が MTG 単独より向上した。MTG 2.8 u/gp では乳化剤 0.2% との併用では、比容積 3.53、増粘多糖類 0.2% との併用では比容積 3.48 を示し、MTG 単独の場合よりも嵩比容はやや低い傾向を示した。

Fig. 4 Cross section of sponge cake with containing MTG 0~14 u/gp (flour basis)

小麦タンパク分解物との併用では、小麦タンパク質を添加することとなり、タンパク質架橋重合化が進み、比容積は小麦タンパク質の場合は、乳化剤、増粘多糖類の場合よりもやや低下した。このことは、小麦タンパク質の増加が適性以上に架橋重合化を促進させたためと推察された。

3. 物性値と官能評価の関係

破断試験によるケーキ物性は Fig. 5 から、MTG 0.5~1.4 u/gp が最適添加量であった。破断強度および破断距離も向上し、弾力があり、内層が柔らかく、しっとりした食感の傾向が得られた。さらに、Fig. 6 に MTG 0.5 u/gp 単独に対して各改質材 0.2% および 0.5% との併用系の結果を示した。乳化剤との併用では破断距離は低下し、増粘多糖類および小麦タンパク分解物との併用では破断距離の向上がみられた。MTG 1.4 u/gp の結果は図には示していないが、同様の結果を示した。官能評価による外観の色調、内層の柔らかさ、しっとり感、保形性、総合評価の 5 項目を評価した結果、Fig. 7 に示すように、MTG および乳化剤との系では「柔らかさ」「しっとり感」が向上し、しなやかな食感が得られ、MTG および増粘多糖類、小麦タンパク分解物では「保形性」が高く、クラスト部も厚くしっかりした形状であった。

増粘多糖類単独では破断強度の低下がやや見られ、MTG との併用による破断距離は向上して、ふんわりしてやわらかい物性が得られたが、小麦タンパク分解物では増粘多糖類と同様の傾向を示し、図には示していないが、MTG 1.4 u/g との併用により破断強度は 1.3 倍と高くなり、やや固めの食感となり好ましい物性は得られなかった。このようなことから MTG と改質材との併用によって、原料小麦粉中の小麦タンパク質のネットワーク構造が形成されたものと推察された。

4. 保形性の評価

MTG によるケーキ焼成後の保形性への影響は、焼成後 40 分放冷した断面の状態で評価した結果、MTG を添加したものでは Fig. 4 のように、ケーキ全体に膨らみがみら

Fig. 5 Effect of MTG on the physical properties of sponge cake

れ、上面中央部がやや高い形であり、凹み、皺など全くみられなかった。無添加品は上面が僅かに凹みと、特に、しわが多くみられ、冷却中の形状変化が大きかった。MTG 2.8 u/gp 以上では MTG 単独で用いると表皮部がやや硬くなる傾向を示したが、乳化剤および増粘多糖類 0.2% との併用においては、保形性のよいクラムが形成され、気泡がよくのびて、しっとりして柔らかい食感が得られた。特に、

MTG 0.5 u/gp と乳化剤 0.5% の併用では、細かい気泡が多くみられ、膨らみがよくなる傾向となった。

5. ケーキの水分

ケーキ焼成後、室温まで冷えてから水分を測定した結果 Fig. 8 のように、MTG 1.4~14 u/gp 添加では、微量であるが水分値が高く保水効果がみられた。川染, 山野⁶⁾らは焼成によって薄い膜を形成して水分蒸発を防ぐとしている。

Fig. 6 Effect of MTG and improvement substances on sponge cake properties

Cont, MTG 0.5 u/gp ;
a-1, emulsifying agent only 0.2% ;
a-2, MTG 0.5 u/gp + emulsifying agent 0.2% ;
a-3, MTG 0.5 u/gp + emulsifying agent 0.5% ;
b-1, guar gum only 0.2% ;
b-2, MTG 0.5 u/gp + guar gum 0.2% ;
b-3, MTG 0.5 u/gp + guar gum 0.5% ;
c-1, wheat hydrolyzed agent only 0.2% ;
c-2, MTG 0.5 u/gp + wheat hydrolyzed agent 0.2% ;
c-3, MTG 0.5 u/gp + wheat hydrolyzed agent 0.5% .

Fig. 7 Results of sensory evaluation of the sponge cake made with MTG and improvement substances (MTG : 0.5 u/gp and each 0.2%)

Fig. 8 Effect of MTG content at level of 0, 0.5, 1.4, 2.8, 5.6 and 14 u/gp on moisture of sponge cake

また、藤井ら¹⁵⁾は水の量が増すに従って膨化率は低下するが、ケーキの硬さ、弾力性、テクスチャー等が良好になると報告している。小麦タンパク質の架橋重合化によりケーキの表皮部がしっかりした構造に形成されることにより水分の飛散が抑制され、水分の保持量がMTG添加でやや増大することによって、力学物性が好ましい方向に改善され官能評価でのしっとり感の向上に寄与したものと推定された。

6. 電気泳動パターンの変化

MTG添加によるケーキの電気泳動図をFig. 9に示した。

この結果、MTG添加のケーキは、MTG 1.4 u/gp以上の酵素濃度で分子量 4.3×10^4 のバンド（矢印 a）が僅かに濃度が濃くなり、MTG 0.5 u/gp以上では、分子量 3×10^4 のバンド（矢印 b）および 1.4×10^4 のバンド（矢印 c および d）の消失傾向が認められ、重合化により小麦タンパク質のかかなりの部分が不溶化したものと考えられる。そして、比容積の向上、物性および官能評価などの変化からもMTGによって小麦タンパク質の架橋が形成されることは明らかに、架橋形成の結果比容積、物性および官能評価の改善がなされたものと考えられた。

要 約

本研究では、タンパク質架橋重合化酵素であるトランスグルタミナーゼ（以下、MTGと略す）に着目して、スポンジケーキの調製工程における有用性について検討した。その結果、スポンジケーキの要件を満たすことが可能となり、以下のような有用性をみる事ができた。

(1) MTGによりスポンジケーキの比容積の向上が図れた。

i) MTG 0.5 u/gp～5.6 u/gp 最も効果を発現された。14 u/gpでは比容積の減少がみられた。ii) MTGと他の改質材 0.5%との併用においては、乳化剤、増粘多糖類、小麦タンパク分解物の順に作用性が高く得られた。iii) MTG 1.4

Fig. 9 SDS-PAGE patterns of MTG sponge cake

u/gpと乳化剤 0.2%の併用において、MTG単独に対して、約 1.2 倍の比容積を得た。

(2) MTGの添加により、スポンジケーキの上面の凹みや、皺もみられず形状の整ったスポンジケーキが得られた。i) MTGの最適添加量は 0.5～1.4 u/gpであった。ii) 2.8 u/gp以上では表皮部がやや硬くなる傾向を示したが、乳化剤、増粘多糖類 0.2%との併用において、保形性のよいクラムが形成され、気泡がよくのびて、しっとりして柔らかい食感が得られた。

(3) 破断試験による物性評価では、無添加に対して、MTG 1.4 u/gp添加において破断強度が高くなり、破断距離ものびたことから、弾力と柔らかさが向上する傾向が得られるものと推定された。

(4) SDS-PAGEからも低分子グリアジン画分の減少が認められた。これらのことからMTGによるスポンジケーキの有用性および主な反応基質タンパク質などが示唆された。

最後に、本研究にあたり、官能検査にご協力いただいた味の素(株) 商品開発センターの皆様へ感謝いたします。

本論文の概要は、平成 15 年 9 月、東京農業大学での日本食品科学工学会第 50 回大会において発表した。

文 献

- 1) 山木一史, 榎 賢治, 田中 彰, 田中常雄, 山木 携, 北海道産小麦のスポンジケーキへの利用, 北海道立食品加工研究センター報告, 2, 5-10 (1996).
- 2) 川染節江, 山野善正, バタースポンジケーキのテクスチャーに及ぼす砂糖含量の影響, 家政誌, 42, 53-60 (1991).
- 3) Mizukoshi, M., Kawada, T. and Matsui, N., Model Studies of Cake Baking. V. Cake Shrinkage and Shear Modulus of Cake Batter During Baking. *Cereal Chem.*, 62, 242-246 (1985).
- 4) 川染節江, 山野善正, バタースポンジケーキのテクスチャー

- に及ぼすバター含量の影響, 家政誌, **37**, 759-766 (1986).
- 5) 前田智子, 浅川具美, 森田尚文, スポンジケーキの性状におよぼすバター添加温度の影響, 家政誌, **50**, 571-579 (1999).
- 6) 川染節江, 山野善正, バタースポンジケーキのテクスチャーに及ぼすバター攪拌時間の影響, 家政誌, **38**, 559-566 (1987).
- 7) 藤井淑子, 林ひろみ, 島田淳子, 吉松藤子, パウンドケーキの品質に与える攪拌の影響, 家政誌, **30**, 505-510 (1979).
- 8) 越智知子, 総説 スポンジケーキの物性, 日調科誌, **22**, 84-93 (1989).
- 9) 渡辺豊子, 喜代吉夏子, 山田光江, ケーキ焙焼過程における生地温度履歴と製品への影響 (第1報), 日調科誌, **25**, 293-300 (1992).
- 10) 渡辺豊子, 北尾敦子, 大喜多祥子, 山田光江, スポンジ・パウンドの焼成過程における生地温度履歴と製品への影響 (第2報), 日調科誌, **27**, 39-44 (1994).
- 11) 渡辺豊子, 大喜多祥子, 福本タミ子, 山田光江, スポンジケーキ・パウンドケーキの焼成過程における生地温度履歴と製品への影響 (第4報), 日調科誌, **30**, 308-314 (1997).
- 12) 井川佳子, スポンジケーキの焼成過程に及ぼす糖代替の影響, 食科工, **45**, 357-363 (1998).
- 13) 武田紀久子, 小麦粉成分および特性がスポンジケーキの膨化に及ぼす影響 (第4報), 粉のエージングの影響, 家政誌, **43**, 765-771 (1992).
- 14) 山上ユリ子, スポンジケーキ・バターの物性と調理, 「食品と物性」, 第2集, 山野善正, 松本幸雄編, ((株)食品資材研究会), pp. 41-57 (1976).
- 15) 藤井淑子, 島田淳子, 澱粉ケーキの調製条件とその性状, 家政誌, **34**, 616-623 (1983).
- 16) 武田紀久子, 小麦粉成分および特性がスポンジケーキの膨化に及ぼす影響 (第4報), 粉のエージングの影響, 家政誌, **43**, 765-771 (1992).
- 17) Folk, J.E. and Chung, S.I., Molecular and Catalytic Properties of Transglutaminases. *Adv. Enzymol.* **38**, 110-171 (1973).
- 18) Laemmli, U.K., Cleavage of Structure Proteins during the Assembly the Head of Bacteriophage T4. *Nature*, **227**, 680-685 (1970).
- 19) Kusunose, C., Kimura, T. and Fujii, T., Size Effects of Starch Granules on Porous Structure formation of Sponge Cakes made from Potato Starch. 日調科誌, **35**, 10-18 (2002).
- 20) 藤井恵子, 高橋貞幸, 木内留美子, 絹フィブロインと複合化した米粉のスポンジケーキ調製とその特性, 食科工, **47**, 363-368 (2000).
- (平成16年10月4日受付, 平成17年3月2日受理)