

日本食品保蔵科学会誌

VOL. 40 NO. 1

会 長	高井 陸雄	副 会 長	太田 英明	小宮山美弘	早坂 薫
編集委員長	太田 英明				
編 集 委 員	石田 裕	稲熊 隆博	井上 茂孝	今堀 義洋	竹永 章生
	津久井亜紀夫	東尾 久雄	古庄 律	松田 茂樹	

<報 文>

小麦粉生地形成に及ぼす β -ラクトグロブリンによるグリアジンの特性変化について…………… (3)
 /岡 大貴・大原慎太郎・塩野弘二
 野口智弘・高野克己

還元的TCA回路を利用した*Lactobacillus plantarum*による有機酸生産…………… (9)
 /佐藤英一・梶川揚申・HOLS Pascal
 岡田早苗・辻 聡

<研究ノート>

即席麺の蒸し処理が乾燥速度に与える影響…………… (15)
 /杉山 久・川井清司・羽倉義雄

バオブアプフルーツ (*Andsonia digitata*) 粉末摂取は高コレステロール負荷食を与えたラットの
 体重増加と血清コレステロール濃度の上昇を抑制する…………… (21)
 /米澤加代・野口有希・谷岡由梨
 石田 裕・島田剛志・古庄 律

<総 説>

シミュレーションモデルに基づく青果物の収穫後品質制御に関する研究…………… (25)
 /椎名武夫

<講 座>

身近な野菜・果物～その起源から生産・消費まで (23) 実エンドウ…………… (31)
 /伊東卓爾

<情 報>

HACCP教育講座 (5)
 HACCP制度の現状と展望…………… (39)
 /池戸重信

<文献抄録>…………… (43)

Food Preservation Science

CONTENTS OF VOL. 40 NO. 1 (2014)

<Article> (Japanese)

- Characteristic Change of Gliadin by β -lactoglobulin on the Dough Formation
 OKA Daiki, OHARA Shintaro, SHIONO Kouji,
 NOGUCHI Tomohiro and TAKANO Katsumi (3)

- Metabolic Engineering of *Lactobacillus plantarum* for Fumaric Acid Production
 Through Activation of the Reductive Branch of the Tricarboxylic Acid Cycle
 SATOH Eiichi, KAJIKAWA Akinobu, HOLS Pascal,
 OKADA Sanae and TSUJI Akira (9)

<Research Note> (Japanese)

- Effect of Steaming Treatment on Drying Rate of Noodle Sheets
 SUGIYAMA Hisashi, KAWAI Kiyoshi and HAGURA Yoshio (15)

- Intake of Baobab (*Andersonia digitana*) Fruit Powder Suppress Elevation
 of Body Weight Gain and Serum Cholesterol Level in High-Cholesterol Diet Fed Rats
 YONEZAWA Kayo, NOGUCHI Yuki, TANIOKA Yuri,
 ISHIDA Hiroshi, SHIMADA Tsuyoshi and FURUSHO Tadasu (21)

<Review> (Japanese)

- The Use of Mathematical Model and Simulation
 for Managing the Postharvest Quality of Fresh Produce
 SHIINA Takeo (25)

<Serialization Lecture> (Japanese)

- Peas
 ITO Takuji (31)

<Information> (Japanese)

- The Present State and Future Direction of HACCP System
 IKEDO Shigenobu (39)

小麦粉生地形成に及ぼす β -ラクトグロブリンによる グリアジンの特性変化について

岡 大 貴^{*1}・大原慎太郎^{*2}・塩 野 弘 二^{*2}
野 口 智 弘^{*1§}・高 野 克 己^{*2}

* 1 東京農業大学応用生物科学部食品加工技術センター

* 2 東京農業大学応用生物科学部生物応用化学科

Characteristic Change of Gliadin by β -lactoglobulin on the Dough Formation

OKA Daiki^{*1}, OHARA Shintaro^{*2}, SHIONO Kouji^{*2},
NOGUUCHI Tomohiro^{*1§} and TAKANO Katsumi^{*2}

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

* 2 Department of Applied Biology and Chemistry, Department of Applied Bioscience, Tokyo University of Agriculture,
1-1-1 Sakuragaoka, Setagaya-ku 156-8502

We here investigated the mechanism underlying changes in baking quality when ω -gliadin is desorbed from gliadin aggregates due to the action of β -lactoglobulin (β -Lg). As a result of ω -gliadin desorption, gliadin became hardened and less sticky. In addition, the surface hydrophobicity of gliadin and the hydrophobic interactions between gliadin molecules increased as a result of ω -gliadin desorption. The intermolecular protein interactions in the dough were analyzed using a protein cross-linking experiment, and the results revealed that the intermolecular distances of α -, β -, and γ -gliadin decreased, thereby increasing their associative forces. These results revealed that ω -gliadin desorption led to an increase in the hydrophobic interactions among gliadin molecules, including increased hardening and decreased stickiness. Gliadin confers increased extensibility characteristics to the dough; therefore, these changes in gliadin properties would likely affect the extensibility of gluten degradation and degrade the baking quality of dough.

(Received Mar. 21, 2013 ; Accepted Sep. 10, 2013)

Key words : β -lactoglobulin, ω -gliadin, gluten formation, hydrophobic interaction, protein crosslinking

β -ラクトグロブリン, ω -グリアジン, グルテン形成, 疎水性相互作用, タンパク質架橋

パンに脱脂粉乳を加えることで、味や香りの向上、焼き色の良色化、栄養価の向上が期待されている¹⁾が、その一方、低度加熱処理した脱脂粉乳を用いると、クラムの硬さの増加や比容積の減少など製パン性の低下がみられ^{2),3)}、高度加熱処理した脱脂粉乳では、製パン性低下が抑制されることが経験的に知られている⁴⁾。筆者らは、ホエータンパク質である β -ラクトグロブリン (β -Lg) が未変性状態であると製パン性を低下させること⁵⁾、脱脂乳の加熱処理によって β -Lgと κ -カゼイン (κ -CN) がジスルフィド結合 (SS結合) により複合体を形成するこ

とで、その製パン性阻害が消失することを明らかにした^{5),6)}。さらに、未変性の β -Lgの作用によって α -, β -, γ -, ω からなるグリアジン会合体から ω -グリアジンが脱離することを明らかにした⁷⁾。

グリアジンは α -, β -, γ -, ω -グリアジンが互いに疎水性相互作用など非共有結合により会合体を形成していることから、 ω -グリアジンの脱離によってグリアジン会合体の相互作用が変化しグリアジンの性状に影響を与えることが推察されるが、その詳細は不明である。

そこで本報では、 ω -グリアジンの脱離による製パン

* 1 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

§ Corresponding author: E-mail: tomo@nodai.ac.jp

* 2 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

性および小麦粉生地形成に与える影響機序を解明するため、生地すなわちグルテンの伸展性にかかわるグリアジンの性状変化を検討し、新たな知見が得られたので報告する。

試料および実験方法

1. 試料

東京農業大学富士農場で飼育されている乳牛（ホルスタイン種）より生乳を搾乳し、クリームセパレーターにて40℃の加温条件下で乳脂肪を分離除去し非加熱脱脂乳を得た。小麦粉にはカメリア（日清製粉社製）を用い、グリアジンとしてグリアA（アサマ化成社製）を用い試験に供した。

2. β -ラクトグロブリンの分画

未変性の β -LgはASCHAFFEBURG⁹⁾の方法に従い、非加熱脱脂乳より分画精製し、凍結乾燥（RLE II-205, 共和真空技術社）させ試料とした。

3. ω -グリアジンを脱離させたグリアジンの調製

グリアジン1gあたり β -Lg溶液1ml（タンパク質量として5mg）を添加し十分に混捏した。その後、5倍量の純水を加えホモジネート（ヒスコトン, マイクロテック・ニチオン社製）後、遠心分離（6,000×g, 20分間, 20℃）により水溶化した ω -グリアジンを除去し、沈殿物を凍結乾燥させ試料とした。なお、 ω -グリアジンの脱離および除去の確認にはSDS-PAGE（12.5%, Me+）を用いて行った。

4. グリアジンの物性測定

グリアジン0.5gに純水0.8mlを加え生地を調製後、圧縮型物性測定器テンシプレッサー（My Boy II; タケトモ電機社製）を用いて1バイト法によりグリアジンの硬さおよび粘りを測定した。グリアジン生地の厚さは約10mmに調整し、直径1.0mmの円柱型プランジャーを用いて圧縮率80%時の硬さ（gw/cm²）および粘り（gw/cm²）を測定した。なお、測定は同試験区にて30回行い、多重比較検定（Fisherの最小有意差法, $p < 0.05$ ）を用いて統計処理を行った。

5. グリアジンの表面疎水性度測定

グリアジンを0.1N酢酸溶液にて溶解しタンパク質量0.1mg/mlに調整後、NAKAI^{9),10)}らの方法に従いグリアジンの表面疎水性度を測定した。なお、タンパク質1mgあたりの蛍光強度（Em. 350nm, Ex. 380nm）を表面疎水性度（F.I./mg）とした。

6. 動的光散乱法によるグリアジン分子間の凝集性の評価

グリアジンは分子間で疎水性相互作用により複雑な会合体を形成し巨大分子として存在していると考えられる。そのため、その会合状態を解析することで、グリアジン分子間の相互作用性を評価できると推察し、動的光散乱測定器（DynaPro NanoStar; Wyatt社製）を用いてグリアジンの粒子径を測定した。

すなわち、グリアジンを70%エタノールにて溶解しタンパク質量1mg/mlになるよう調整後、10 μ lを専用セルに入れ、25℃の条件下で動的光散乱測定器に供し、重量を基準とした成分比率（%Mass）により粒子径分布を得た。また、キュムラント法にて平均粒子径（ $n=10$ ）を求めた。

7. 小麦粉生地中のタンパク質分子間距離の解析

タンパク質分子間相互作用の変化により、分子間距離に変化が生じることが推察される。そこで、URADE^{11),12)}の方法を改良し、アミノ基（-NH₂）に結合能を有する官能基スクシンイミドを分子両端にもつアーム長の異なる3種のタンパク質架橋剤、DSP（Dithiobis[succinimidyl propionate], スペーサーアーム長12Å）、DSG（Disuccinimidyl glutarate, 7.7Å）、DST（Disuccinimidyl tartrate, 6.4Å）を用い、各架橋剤によって架橋され不溶化したタンパク質を解析し、小麦粉生地中のタンパク質の分子間距離を測定した。すなわち、小麦粉1gに β -Lg溶液1ml（タンパク質量として5mg）を添加し十分に混捏後、繰り返し純水にて洗浄を行い、 ω -グリアジンとともに澱粉を除去しグルテンを回収した。このグルテンに対して、2.5mMの架橋剤を加え室温で2時間振盪反応後、10%グリシンにて反応停止させ架橋反応を行った。その後、遠心分離（6,000×g, 20分間, 室温）により回収した沈殿物のグルテンを0.1%SDS溶液にて溶解後、BCA法にてSDS可溶性タンパク質量を定量しグルテンの可溶化率（%）を求めた。また、可溶性タンパク質をSDS-PAGE（12.5%, Me+）に供し、そのバンドパターンよりタンパク質の架橋状態を確認した。

実験結果

1. ω -グリアジンの脱離によるグリアジンの性状変化

β -Lgを作用させたグリアジンをSDS-PAGE（Me+）に供したところ、55kDa付近の ω -グリアジンのバンドが消失していることを確認した（Fig. 1）。そこで、 ω -グリアジンの脱離によりグリアジンの性質に影響を与えることが推察されたため、 ω -グリアジンを脱離・除去させたグリアジンの物性測定を行ったところ、 β -Lg未処理のグリアジンの硬さ（gw/cm²）は591.4 $\pm$ 84.6（ $\pm$ SD）、粘り（gw/cm²）は233.8 $\pm$ 59.1を示したのに対し、652.2 $\pm$ 97.7および112.2 $\pm$ 22.7を示し、グリアジンが硬く粘性が低下した（Table 1）。

2. グリアジンの性状に対する疎水性相互作用の影響

前述の試験において、グリアジン会合体から ω -グリアジンが脱離するとその物性が大きく変化した。このような変化は、 ω -グリアジンの脱離によって生じるグリアジン分子間の疎水性相互作用の変化によるものと推察された。

そこで、グリアジンの表面疎水性度（F.I./mg）を測定したところ、 β -Lg未処理のグリアジンでは240 $\pm$ 4.0（ $\pm$ SD）を示したが、 β -Lg処理によって ω -グリアジンを

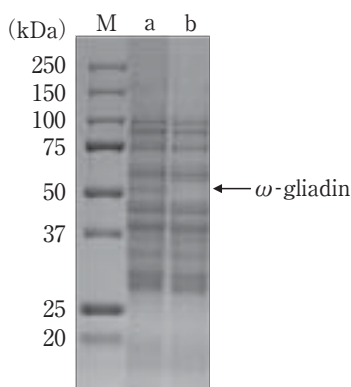


Fig. 1 Confirmation of ω -gliadin-deficient gliadin by the action of β -Lg using SDS-PAGE

a, Untreated gliadin (β -Lg non-addition); b, ω -gliadin deficient gliadin by the action of β -Lg (β -Lg addition)

Table 1 Physical properties of ω -gliadin-deficient gliadin by the action of β -Lg

	Untreated gliadin (non-addition)	ω -gliadin-deficient gliadin (β -Lg addition)
Stickiness [gw/cm ²]	234 $\pm$ 59	112 $\pm$ 23*
Hardness [gw/cm ²]	591 $\pm$ 85	652 $\pm$ 98*

Physical properties were measured by using Tensipresser™ (TAKETOMO). The stickiness and hardness experiment was repeated 30 times. The asterisks indicate a significant difference from the untreated gliadin sample ($p < 0.05$).

脱離させたグリアジンでは 278 ± 6.7 と有意に表面疎水性度が上昇した (Fig. 2)。さらに、動的光散乱測定器を用いて70%エタノール溶液分散系におけるグリアジンの粒子径分布を測定したところ、 ω -グリアジンの脱離によって分布が大粒子側にシフトし平均粒子径 (nm) は 107.0 ± 32.1 から 357.0 ± 48.6 に変化した (Fig. 3, Table 2)。

ω -グリアジンは各グリアジンの中で最も疎水性度が低いと報告¹³⁾があることから、 ω -グリアジンが脱離することによって、グリアジンの表面疎水性度が高くなり、グリアジン分子間の疎水性相互作用が強まることでグリアジン会合体が大きくなることが示唆された。

3. 小麦粉タンパク質間の疎水性相互作用の解析

前述の試験の結果、 ω -グリアジンの脱離によってグリアジン分子間の疎水性相互作用が強まることが示唆されたが、小麦粉生地中においてもグリアジンの表面疎水性度の変化によってタンパク質分子間の相互作用に影響を及ぼすのか検討を行うため、タンパク質架橋剤であるDSP (12Å), DSG (7.7Å), DST (6.4Å) を用いて、小麦粉生地中のタンパク質分子間距離の変化を測定した。グルテンに対し架橋反応後、0.1%SDS溶液にて溶解し

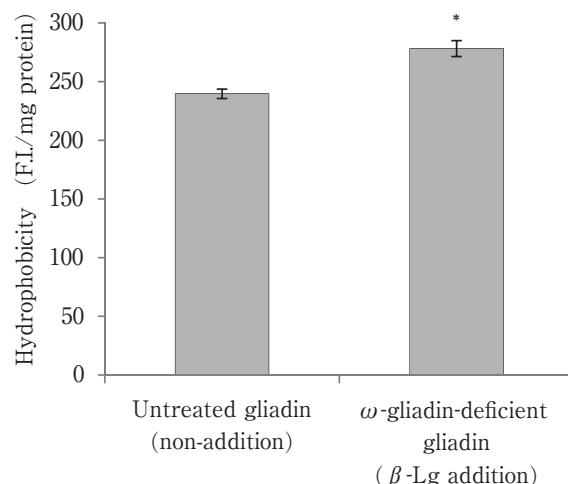


Fig. 2 Surface hydrophobicity of ω -gliadin-deficient gliadin

The surface hydrophobicity was measured using the ANS method. The hydrophobicity experiment was repeated 9 times. The asterisks indicate a significant difference from the untreated gliadin sample ($p < 0.05$).

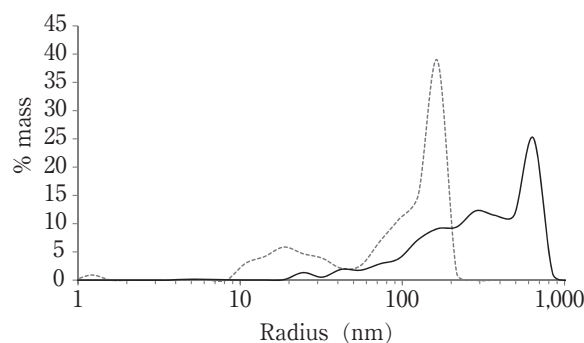


Fig. 3 Size distribution chart of ω -gliadin-deficient gliadin based on dynamic light scattering

The particle size of gliadin that is dissolved with 70% ethanol was measured using dynamic light scattering method, and the distribution chart is shown as the ratio of components (% mass) to total weight.

Symbols, ----- Untreated gliadin; — ω -gliadin-deficient gliadin

Table 2 Average particle size of ω -gliadin-deficient gliadin

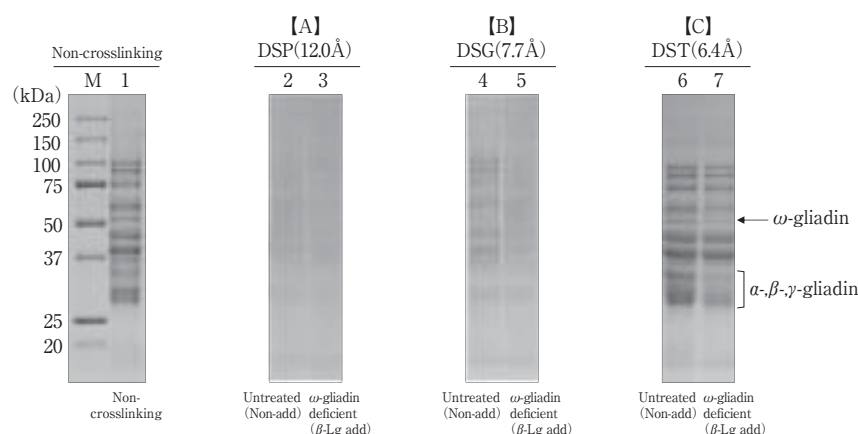
	Untreated gliadin (non-addition)	ω -gliadin-deficient gliadin (β -Lg addition)
Average particle size [nm]	107 $\pm$ 32.1	357 $\pm$ 48.6*

The particle size of gliadin that is dissolved with 70% ethanol was measured using dynamic light scattering method, and the average particle size was calculated by using the cumulant approach. The dynamic light scanning experiment was repeated 10 times. The asterisks indicate significant difference from the untreated gliadin sample ($p < 0.05$).

Table 3 Solubilization ratio (%) of crosslinking-treated gluten

	DSP (12.0 Å)	DSG (7.7 Å)	DSP (6.4 Å)
Untreated gluten (non-addition)	14.8 ± 1.8	18.5 ± 2.9	80.9 ± 3.0
ω -gliadin-deficient gluten (β -Lg addition)	13.7 ± 2.2	16.5 ± 3.5	50.6 ± 2.3*

The soluble protein amount was measured BCA assay. Solubilization ratio (%) = 0.1% SDS soluble protein amount of crosslinking-treated gluten (mg)/0.1% SDS soluble protein amount of non-crosslinking-treated gluten (mg) $\times$ 100. The asterisks indicate a significant difference from the untreated gluten sample ($p < 0.05$, $n = 3$).

**Fig. 4** Effect of ω -gliadin-deficient gliadin on the crosslinking of gluten

0.1% SDS soluble proteins of crosslinking-treated gluten (A, B, C) in which ω -gliadin was desorbed due to the action of β -Lg were analyzed using SDS-PAGE (Me+, T = 12.5%). A, DSP crosslinking-treated gluten (lanes 2 and 3); B, DSG crosslinking-treated gluten (lanes 4 and 5); C, DST crosslinking-treated gluten (lanes 6 and 7); lane 1, Non-crosslinking; lane 2, 4 and 6, β -Lg-non-addition; lane 3, 5 and 7, ω -gliadin-deficient gluten by β -Lg addition; M, Protein Marker

たタンパク質量を求め、架橋反応を行っていないグルテンのタンパク質量を100とした際の可溶化率(%)を算出した。その結果、アーム長が長いDSPにおいて、 β -Lg未処理のグルテンの可溶化率(%)は 14.8 ± 1.8 ($\pm$ SD)を示したのに対し、 β -Lg処理によって ω -グリアジンを脱離させたグルテンは 13.7 ± 2.2 を示し有意差はみられなかった (Table 3)。また、DSGにおいてもそれぞれ 18.5 ± 2.9 , 16.5 ± 3.5 と有意差はみられなかった。DSPおよびDSGはアーム長が長いため、 β -Lg未処理、処理にかかわらず大半のグルテンが架橋され不溶化したものと推察された。一方、DSTでは未処理グルテンは 80.9 ± 3.0 、 ω -グリアジンを脱離させたグルテンは 50.6 ± 2.3 を示し、 ω -グリアジンの脱離によって可溶性タンパク質量が減少したことから、生地中のタンパク質分子間の距離が近接することが明らかとなった。

さらに、SDS可溶性タンパク質をSDS-PAGE (Me+)に供しバンドパターンを確認したところ、DSP、DSGにおいては、未処理グルテンおよび ω -グリアジンを脱離させたグルテンともにタンパク質バンドが確認できずほ

とんどのタンパク質の架橋がみられた (Fig. 4 A, 4 B)。一方、DSTにおいては、未処理グルテンと比較し ω -グリアジンを脱離させたグルテンは55kDa付近の ω -グリアジンのバンドの消失とともに25–35kDa付近の α -, β -, γ -グリアジンの分子量域の染色濃度が淡くなっていることが確認された (Fig. 4 C)。

以上、 ω -グリアジンの脱離によって α -, β -, γ -グリアジンの分子間距離が近接することから、小麦粉生地においても ω -グリアジンが脱離することで、グリアジン分子間の相互作用が強まることが明らかになった。グリアジンは生地すなわちグルテンに伸展性を付与することから、同現象によってグリアジンが硬化し粘性が低下することで、グルテンの伸展性が低下し製パン性が低下することが示唆された。

本結果より、 ω -グリアジンはグルテンの伸展性に大きな影響を及ぼすタンパク質であることが示唆されたため、今後は ω -グリアジンと製パン性との関係について検討を進めたい。

要 約

本研究では、脱脂粉乳中の β -Lgによる製パン性の低下要因を解明するため、 β -Lg的作用によってグリアジン会合体から ω -グリアジンが脱離することによる製パン性への影響機序を検討した。その結果、 ω -グリアジンが脱離することによってグリアジンが硬化し粘性が低下した。また、同現象によってグリアジンの表面疎水性度が上昇し、グリアジン分子間の疎水性相互作用が強まることが示唆された。タンパク質架橋法を用いて小麦粉生地中におけるタンパク質分子間相互作用を解析したところ、 ω -グリアジンの脱離によって、 α -、 β -、 γ -グリアジン分子間の距離が近接し相互作用が強まることが明らかになった。

以上、 ω -グリアジンの脱離によってグリアジン分子間の疎水性相互作用が強まり、グリアジンの硬化および粘性の低下が引き起こされることが明らかになった。グリアジンは生地すなわちグルテンに伸展性を付与することから、これらの変化によってグルテンの伸展性が低下し製パン性が低下することが示唆された。

謝 辞 本研究遂行にあたり、試料のご提供をして下さいましたアサマ化成株式会社、新井千秋様、丹下幹子様、動的光散乱測定器 (DynaPro NanoStar) による測定にご協力いただいた昭光サイエンティフィック株式会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 製パン材料の科学, 製パンの科学Ⅱ (田中康夫・松本 博編) (光琳, 東京), pp.160~161 (1992)
- 2) LARSON, B. L., JENNESS, R., GEDDES, W. F. and COULTER, S. T.: An evaluation of the methods used for determining the baking quality of nonfat dry milk solids, *Cereal Chem.*, **28**, 351~370 (1951)
- 3) VOLPE, T. and ZABIK, M. E.: A whey protein contributing to loaf volume depression, *Cereal Chem.*, **52**, 188~197 (1975)
- 4) HARPER, W. J. and ZADOW, J. G.: Heat induced changes in whey protein concentrates as related to bread manufacture, *N. Z. J. Dairy Sci. Technol.*, **19**, 229~237 (1984)
- 5) 菊池千尋・岡 大貴・上野 宏・塩田 誠・野口智弘・高野克己: 脱脂乳による製パン性阻害に対する乳タンパク質の熱変性の影響, *日食保蔵誌*, **38**, 211~215 (2012)
- 6) 岡 大貴・菊池千尋・塩野弘二・内田達也・野口智弘・高野克己: 小麦粉生地形成に対する乳タンパク質と小麦粉タンパク質の分子間相互作用について, *日食保蔵誌*, **39**, 87~91 (2013)
- 7) OKA, D., KIKUCHI, C., SHIONO, K., UCHIDA, T., NOGUCHI, T. and TAKANO, K.: Effect of the molecular interactions between β -lactoglobulin and gliadin on the baking quality, *Food Preservation Sci.*, **39**, 325~329 (2013)
- 8) ASCHAFFENBURG, R. and DREWRY, J.: Improved method for the preparation of crystalline β -Lactoglobulin and α -Lactalbumin from cow's milk, *J. Biochem.*, **65**, 273~277 (1957)
- 9) HAYAKAWA, S. and NAKAI, S.: Relationships of hydrophobicity and net charge to the solubility of milk and soy proteins, *J. Food Sci.*, **50**, 486~491 (1985)
- 10) BONOMI, F., MORA, G., PAGANI, M.A. and IAMETTI, S.: Probing structural features of water-insoluble proteins by front-face fluorescence, *Anal. Biochem.*, **199**, 223~231 (1991)
- 11) 裏出令子: グルテンタンパク質のネットワーク形成における食塩の役割, *食品と技術*, **450**, 1~9 (2008)
- 12) UKAI, T., MATSUMURA, Y. and URADE, R.: Disaggregation and reaggregation of gluten proteins by sodium chloride, *J. Agric. Food Chem.*, **56**, 1122~1130 (2008)
- 13) OERNEBRO, J., WAHLGREN, M., ELIASSON, A. C., FIDO, R. J. and TATHAM, A. S.: Absorption of α -、 β -、 γ - and ω -gliadin onto hydrophobic surfaces, *J. Cereal Sci.*, **30**, 105~114 (1999)

(平成25年3月21日受付, 平成25年9月10日受理)

還元的TCA回路を利用した*Lactobacillus plantarum*による有機酸生産

佐藤 英一^{*1}・梶川 揚申^{*1}・HOLS Pascal^{*2}

岡田 早苗^{*1}・辻 聡^{*1§}

^{*1} 東京農業大学応用生物科学部生物応用化学科

^{*2} ルヴァンカトリック大学生命科学研究科遺伝学部門

Metabolic Engineering of *Lactobacillus plantarum* for Fumaric Acid Production Through Activation of the Reductive Branch of the Tricarboxylic Acid Cycle

SATOH Eiichi^{*1}, KAJIKAWA Akinobu^{*1}, HOLLS Pascal^{*2},

OKADA Sanae^{*1} and TSUJI Akira^{*1§}

^{*1} Department of Applied Biology and Chemistry, Tokyo University of Agriculture, 1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya-ku, Tokyo 156-8502, Japan

^{*2} Institut des Sciences de la Vie, Université Catholique de Louvain, Place Croix du Sud, B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgium

We report the metabolic engineering of *Lactobacillus plantarum*, a lactic acid bacterium, for biosynthesis of fumaric acid. A disruptant of the fumarate reductase gene was derived from an *L. plantarum* lactate dehydrogenase (LDH)-deficient mutant strain, VL103, which accumulated fumaric acid. However, increasing the flux of pyruvate to the TCA cycle did not enhance fumaric acid production; instead, it resulted in the production of lactate. We believe that the fumarate was converted to malate and finally to lactate via the malolactic fermentation pathway. We also observed a marked reduction in cell growth of this mutant strain. Therefore, due to the inefficiency of the fumaric acid transport system in strain VL103, lactic acid accumulation was observed in the cells. We concluded that blocking the malolactic fermentation system and enhancing transporter influx are necessary for application of *L. plantarum* VL103 in fumaric acid production.

(Received Jul. 22, 2013 ; Accepted Oct. 31, 2013)

Key words : *Lactobacillus plantarum*, C4-dicarboxylic acid, metabolic analysis, fumarate reductase, lactic acid bacteria,

ラクトバチルスプラントルム, C4-ジカルボン酸, 代謝解析, フマル酸還元酵素, 乳酸菌

これまでは発酵菌として認識されることの多かった乳酸菌であるが¹⁾, 筆者らは乳酸菌に代謝工学を駆使し, 物質生産菌としての応用を試みている^{2), 3)}。乳酸菌を物質生産の宿主とする利点は, その耐酸性と通性嫌気性の特性である^{4)~6)}。乳酸菌を培養すると代謝産物として乳酸を生成し, 培養液のpHの低下に伴い一般的な細菌の生育は抑えられ, 最終的には耐酸性のある乳酸菌も生育が抑制されるようになる。しかし, 乳酸よりpKaの大きな酸を生成する場合には, 菌の生育抑制の影響は少ないと考えられる。

また, 通性嫌気性であることの利点についてはこれまでの検討で*Lactobacillus plantarum* NCIMB 8826 (以下, 野生株と略記) を利用したコハク酸生産について報告している⁷⁾。これは野生株が保持するオキサロ酢酸からリンゴ酸, フマル酸, コハク酸までの不完全なTCA回路関連遺伝子を利用し, 嫌気条件下での還元的な反応によりコハク酸生成を試みたものである。この報告では, 野生株の乳酸生成経路欠損株である*L. plantarum* VL103 (以下, VL103と略記) を利用して, 代謝改変により還元的なTCA回路へ代謝流量を増加させることにより,

^{*1} 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

[§] Corresponding author, E-mail: at202493@nodai.ac.jp

^{*2} Place Croix du Sud, B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgium

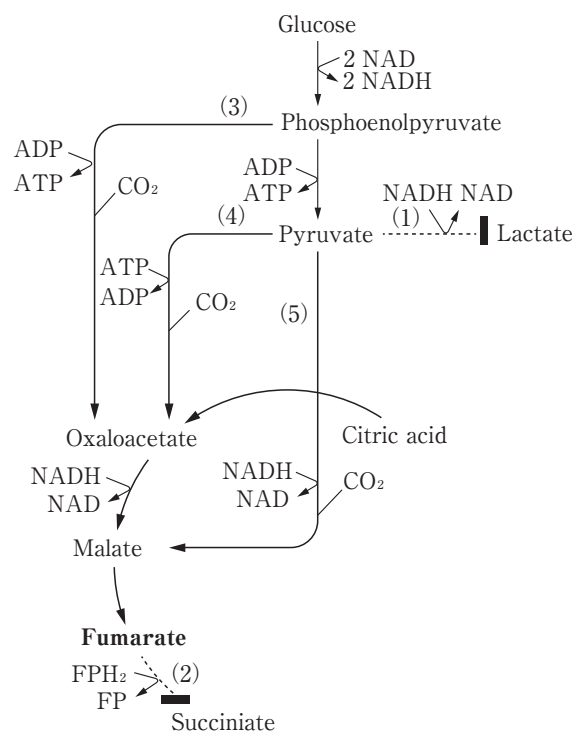


Fig. 1 Strategy for metabolically engineering fumarate production in *Lactobacillus plantarum* VL103

(1) lactate dehydrogenase; (2) fumarate reductase; (3) phosphoenolpyruvate carboxykinase; (4) pyruvate carboxylase; (5) malic enzyme.

コハク酸生成量を向上させている。この研究成果より、還元的TCA回路を利用することでVL103はコハク酸生成以外の有機酸も生成可能であると考えられた。

TCA回路の中間代謝産物であるフマル酸は食品添加物や不飽和ポリエステル樹脂、サイズ剤の合成原料に用いられている。微生物による発酵法では、*Rhizopus nigricans*や*R. oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*などの微生物種を利用して生産されている^{8)~10)}。これらの菌種において、培養工学や分子育種の手法を用いて改良が試みられている。しかし、いまだに化学合成による工業的な大量生産が主流であるため、筆者らは新たな発酵菌として乳酸菌の改良に着目した。

具体的にはVL103の保持するフマル酸からコハク酸への変換酵素Fumarate reductase (FRD) 遺伝子を破壊することでフマル酸を蓄積するようになると考えられる (Fig. 1)。そこで本稿では、乳酸生成経路欠損株VL103から二重破壊株を作出し、代謝改変により還元的TCA回路を利用したフマル酸生成を試みた。

実験方法

1. 供試菌株および培養

VL103はMRS液体培地 (Difco社製) を用い37℃で静置培養した。また、各形質転換体はMRS培地にエリスロマイシン (Em) を5 µg/mlになるように添加して使用

した。各培地10mlに14~16時間前培養したVL103または形質転換体を1%量接種し、37℃で24時間静置培養した。これらの培養液を用いて分光光度計 (SHIMADZU UV-2000) により660nmにおける吸光度を測定し生育を比較した。有機酸分析、残糖分析に際しては50mMの炭酸水素ナトリウムを添加したMRS培地を用いて生育測定試験と同様の条件で培養した。

2. *frd* 遺伝子破壊株の作出

遺伝子破壊用プラスミドとして温度感受性プラスミド pBTEを用いた。まず、野生株の染色体遺伝子を鋳型に*frd* 遺伝子の上流約300bpと下流約300bpをそれぞれPCR法にて取得した。そして、増幅した各DNA断片を用いてオーバーラップPCR法にて約600bpの Δfrd を作成した。このDNA断片を制限酵素*Pst* Iと*Bam* HIを用いて消化し、同制限酵素により消化したpBTEにライゲーションし、*frd* 遺伝子破壊用プラスミドpBTE:: Δfrd を構築した。これらのプラスミドをエレクトロポレーション法によりVL103に形質転換した¹¹⁾。pBTE:: Δfrd を用いて二重交叉相同組換え法によりVL103のFRDを欠損した Δfrd 株 (以下、破壊株と呼称) を作出した。

3. 炭酸固定酵素高発現株の作出

各酵素の高発現には、以前に構築した遺伝子発現用プラスミドpMH::*pycA*, pMH::*pckA*, pMH::*mae*を用いた⁷⁾。これらの各プラスミドをエレクトロポレーション法により破壊株に形質転換した¹¹⁾。得られた形質転換株をそれぞれ Δfrd (pMH::*pycA*), Δfrd (pMH::*pckA*), Δfrd (pMH::*mae*) とした。なお、各酵素の高発現はウエスタンブロット解析により確認した (データ示さず)。

4. 酵素活性測定

各供試菌株を24時間前培養したものを50mMの炭酸水素ナトリウムを添加したMRS液体培地 5 mlに1%量接種し、同様に培養した。得られた菌体を50mMリン酸緩衝液 (pH7.0) で洗浄し、回収した菌体を300 µlの氷冷したリン酸緩衝液に懸濁し、ガラスビーズ0.1gを加えた後に冷却しながら10分間激しく振盪して菌体を破碎した。得られた破碎液を遠心分離 (13,000 × g, 10min, 4℃) し、上清を酵素活性測定に用いた。各酵素の活性は文献を参考にピルビン酸もしくはホスホエノールピルビン酸を基質とし、目的物質の生成に伴い減少するNADHを340nmの吸光度の減少により測定した⁷⁾。

5. HPLCによる有機酸分析、残糖分析

培養24時間後の培養液 2 mlを遠心分離し (13,000 × g, 1min, 4℃), 上清中の有機酸をHPLC (Waters 2695 Separation Module, Waters 2996 Photodiode Array, カラム; Rspak KC-811, Rspak KGG, 移動相; 0.08% HClO₄) により分析した。また、上清中の残糖はHPLC (Waters 2695 Separation Module, Waters 2414 Refractive Index Detector, カラム; Shodex Asahipak NH2P-50 4E, 移動相; 75% CH₃CN) により分析した。

実験結果および考察

1. FRD欠損二重破壊株の作出と代謝解析

VL103と破壊株の代謝産物をTable 1に、生育をFig.2に示した。破壊株ではコハク酸生成が消失しており、少量のフマル酸とリンゴ酸を生成していた。この結果より、FRDの欠損によりフマル酸を生成可能な菌株を取得した。

また、破壊株はVL103と比べて生育が著しく低下していた。これはフマル酸⇌コハク酸間の反応が停止したためにNADHの再酸化に支障をきたしているためだと考えられる。この反応は培地中に55mM程度含まれている酢酸が破壊株では消費されていることから裏づけられる。乳酸菌はNADHの再酸化の補完経路として酢酸をエタノールに変換する経路を保持している⁴⁾。VL103においてもエタノールの生成は確認できないが酢酸を消費して何らかの代謝産物に変換することで、NADHの再酸化を行っていると考えられている⁷⁾。そのため、破壊株も同様の代謝経路を利用していると判断した。

さらに、破壊株の代謝産物総量はVL103と比べて低い値を示している。しかし、両菌株ともに培地中のグルコースは全て消費していることから、破壊株では代謝の停滞または本実験で測定した代謝産物以外の代謝産物に多くの炭素源が利用されている可能性がある。

2. FRD欠損二重破壊株における酵素高発現と代謝解析

作出した破壊株はフマル酸を生成したものの、その生成量は微量であった。そこで、VL103のコハク酸生成量を向上させた代謝改変実績を基にTCA回路への炭素流量の向上を試みた。破壊株に各酵素を高発現した代謝改変株を作出した。各酵素高発現株の酵素活性を測定し、VL103と比較した (Table 2)。その結果、各酵素はVL103に対してPCでは1.5倍、PEPCKでは1.3倍、MEでは1.4倍程度高い酵素活性を示していた。これにより各酵素の活性上昇を確認した。

各酵素高発現株の代謝産物をTable 3に、生育をFig.3に示した。各代謝改変株のフマル酸生成量は破壊株と同程度かそれよりも低い値を示した。また、リンゴ酸やコハク酸、酢酸は破壊株と同様の挙動を示していた。

Table 1 Fermentation product concentrations in modified MRS medium produced by *Lactobacillus plantarum* VL103 and Δfrd strain

<i>L. plantarum</i> strains	Fermentation product (mM)						
	Succinate	Malate	Fumarate	Acetate	Formate	Acetoin	Lactate
VL103	16.9 ± 0.9	ND	ND	59.0 ± 2.5	16.3 ± 0.5	75.1 ± 1.2	ND
VL103 Δfrd	ND	12.8 ± 1.1	2.0 ± 0.2	19.5 ± 1.3	3.5 ± 1.2	14.1 ± 0.4	9.4 ± 2.6

ND, not detected

Values represent the mean and standard error derived from three independent experiments, with each experiment performed in triplicate.

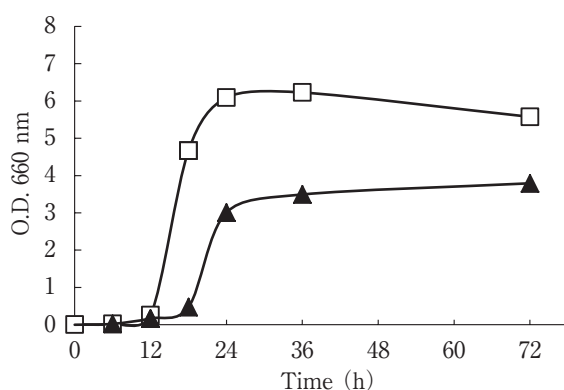


Fig. 2 Cell growth of *L. plantarum* VL103 and Δfrd strain in a modified MRS medium, ascertained by measuring the increase in optical density at 660nm

These data are mean of three independent experiments and those in parentheses are standard deviation.

Symbols: ▲, VL103; □, Δfrd strain.

Table 2 Enzymatic activities detected in cell extracts^a from the *Lactobacillus plantarum* VL103 Δfrd and derivatives

<i>L. plantarum</i> VL103 Δfrd strains	Enzymatic activity ^b (U/mg of protein) of strain		
	PC	PEPCK	ME
pMH	0.29 ± 0.06	0.38 ± 0.04	0.36 ± 0.01
pMH :: <i>pycA</i>	0.43 ± 0.04	—	—
pMH :: <i>pckA</i>	—	0.50 ± 0.01	—
pMH :: <i>mae</i>	—	—	0.51 ± 0.06

^a Cellextracts were prepared according to the method described in Materials and methods.

^b One unit of activity corresponds to the conversion of 1 mmol substrate per minute.

Values represent the mean and standard error derived from three independent experiments, with each experiment performed in triplicate.

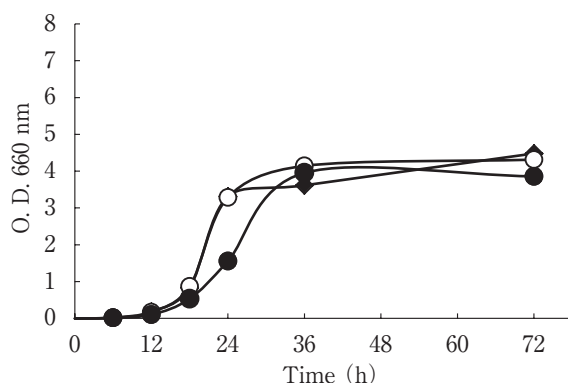
PC, pyruvate carboxylase; PEPCK, phosphoenolpyruvate carboxykinase; ME, malic enzyme

Table 3 Fermentation product concentrations in modified MRS medium produced by *Lactobacillus plantarum* VL103 Δ frd derivatives

<i>L. plantarum</i> VL103 Δ frd strains	Fermentation product (mM)						
	Succinate	Malate	Fumarate	Acetate	Formate	Acetoin	Lactate
pMH::pycA	ND	5.0 $\pm$ 0.6	ND	20.1 $\pm$ 1.0	10.5 $\pm$ 1.0	13.5 $\pm$ 0.1	44.8 $\pm$ 4.1
pMH::pckA	ND	10.3 $\pm$ 1.5	1.7 $\pm$ 0.1	29.6 $\pm$ 0.7	10.1 $\pm$ 0.7	12.9 $\pm$ 0.7	13.1 $\pm$ 0.2
pMH::mae	ND	10.7 $\pm$ 1.3	1.4 $\pm$ 0.1	25.3 $\pm$ 1.1	8.4 $\pm$ 1.4	9.9 $\pm$ 0.4	12.7 $\pm$ 0.6

ND, not detected

Values represent the mean and standard error derived from three independent experiments, with each experiment performed in triplicate.

**Fig. 3** Cell growth of *L. plantarum* Δ frd strain and derivatives in a modified MRS medium, ascertained by measuring the increase in optical density at 660nm

These data are mean of three independent experiments and those in parentheses are standard deviation.

Symbols: ●, Δ frd (pMH::pycA); ◆, Δ frd (pMH::pckA); ○, Δ frd (pMH::mae).

しかし、LDHの欠損により生成経路が遮断された乳酸が検出された。その中でもPC高発現株は44mM程度と高い乳酸生成量を示している。しかし、破壊株のLDH活性は復帰しておらず、同様の培養条件で野生株が生成する乳酸量（約170mM）よりも低い値である¹²⁾。そのため、乳酸が生成された原因としてマロラクティック発酵が考えられた。この発酵はリンゴ酸を乳酸に変換し、マロラクティックトランスポーターにより細胞外に放出することで、細胞内外のpHバランスを整える発酵である¹³⁾。

また、フマル酸の生成量が高発現株においても増加しなかったことから、VL103はフマル酸の排出能が低く、溶解度の低いフマル酸を菌体内で蓄積できずにリンゴ酸を生成していると考えられる。この生成物の蓄積による菌体内pHの低下が、生育の低下につながると推察した。そして、生成蓄積されたリンゴ酸による菌体負荷を軽減するために、マロラクティック発酵を行っているのではないかと考えた。これらの結果からVL103のコハク酸排出経路は、フマル酸などの他のC4-ジカルボン酸への基

質親和性が著しく低いことが示唆された。

また、破壊株への遺伝子高発現ではフマル酸生成の向上には至らなかった。そのため、VL103を利用したフマル酸生成菌の作出には、マロラクティック酵素の欠損やフマル酸排出経路の構築や強化などが必要であると考えられる。

要 約

本研究では、乳酸菌の嫌気条件下で多様な有機酸生成宿主としての可能性を追求するために、フマル酸生成経路の構築を試みた。宿主として供試した*L. plantarum* VL103では、代謝改変によりコハク酸発酵生成系の構築が試みられている。そのため、コハク酸と同様にTCA回路に存在する他の有機酸生成にも利用できると考えられた。そこで、VL103の保持するフマル酸からコハク酸への変換酵素Fumarate reductase破壊株を作出し、フマル酸生成能を測定した。

その結果、破壊株はVL103と比較して生育の減少がみられるものの、コハク酸を生成不能となりフマル酸を生成した。そのため、VL103を利用したフマル酸の発酵生成は可能であると考えられた。

次に、破壊株のフマル酸生成量を向上させるために、TCA回路への炭素流量の向上を試みた。しかし、フマル酸生成量は向上せず、乳酸が生成された。これは、菌体内で生成されたフマル酸がリンゴ酸に変換されたのちに、マロラクティック発酵により生成されていると判断した。これはVL103のフマル酸排出経路の機能が弱く、フマル酸が菌体内に蓄積するためであると考えられる。そのため、VL103をフマル酸生成菌として利用するためには、排出経路の強化やマロラクティック発酵系の遮断が必要であることが判明した。

文 献

- 1) LEROY, F. and VUYST, L. D. : Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry, *Trends in Food Science & Technology*, **15**, 67~78 (2004)
- 2) JOHN, R. P., NAMPOOTHIRI, K. M. and PANDEY, A.

- : Fermentative production of lactic acid from biomass: an overview on process developments and future perspectives, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **74**, 524~534 (2007)
- 3) CHONG, B. F., BLANK, L. M., MCLAUGHLIN, R. and NIELSEN, L. K. : Microbial hyaluronic acid production, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **66**, 341~351 (2005)
- 4) KLEEREBEZEM, M., HOLS, P. and HUGENHOLTZ, J. : Lactic acid bacteria as a cell factory: rerouting of carbon metabolism in *Lactococcus lactis* by metabolic engineering, *Enzyme Microb. Technol.*, **26**, 840~848 (2000)
- 5) PAPAGIANNI, M. : Recent advances in engineering the central carbon metabolism of industrially important bacteria, *Microb. Cell Fact.*, **11**, 50 (2012)
- 6) DE VOS, W. M. and Hugenholtz, J. : Engineering metabolic highways in Lactococci and other lactic acid bacteria, *Trends Biotechnol.*, **22**, 72~79 (2004)
- 7) TSUJI, A., OKADA, S., HOLS, P. and SATOH, E. : Metabolic engineering of *Lactobacillus plantarum* for succinic acid production through activation of the reductive branch of the tricarboxylic acid cycle, *Enzyme Microb. Technol.*, **53**, 97~103 (2013)
- 8) RISCALDATI, E., MORESI, M., FEDERICI, F. and PETRUCCIOLI, M. : Direct ammonium fumarate production by *Rhizopus arrhizus* under phosphorous limitation, *Biotechnology Letters.*, **22**, 1043~1047 (2000)
- 9) ROA ENGEL, C. A., VAN GULIK, W. M., MARANG, L., VAN DER WIELEN, L. A. and STRAATHOF, A. J. : Development of a low pH fermentation strategy for fumaric acid production by *Rhizopus oryzae*, *Enzyme Microb. Technol.*, **48**, 39~47 (2011)
- 10) XU, Q., LI, S., HUANG, H. and WEN, J. : Key technologies for the industrial production of fumaric acid by fermentation, *Biotechnol. Adv.*, **30**, 1685~1696 (2012)
- 11) AUKRUST, T. and BLOM, H. : Transformation of *Lactobacillus* strains used in meat and vegetable fermentations, *Food Res. Int.*, **25**, 253~261 (1992)
- 12) 辻 聡・梶川揚申・岡田早苗・HOLS, P.・佐藤英一：ホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼの発現強化による*Lactobacillus plantarum*のピルビン酸生成反応の迂回経路の構築，日本乳酸菌学会誌，**24**，88~92 (2013)。
- 13) DU TOIT, M., ENGELBRECHT, L., LERM, E. and KRIEGER-WEBER, S. : *Lactobacillus* : the next generation of malolactic fermentation starter cultures - an overview, *Food and Bioprocess Technology*, **4**, 876~906 (2011)
- (平成25年7月22日受付，平成25年10月31日受理)

即席麺の蒸し処理が乾燥速度に与える影響

杉山 久^{*1*2§}・川井清司^{*1}・羽倉義雄^{*1}

^{*1} 広島大学大学院生物圏科学研究科

^{*2} 東洋水産(株)総合研究所

Effect of Steaming Treatment on Drying Rate of Noodle Sheets

SUGIYAMA Hisashi^{*1*2§}, KAWAI Kiyoshi^{*1} and HAGURA Yoshio^{*1}

^{*1} Graduate school of Biosphere Science, Hiroshima University, 1-4-4,
Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528

^{*2} R&D center, Toyo Suisan Kaisya, Ltd., 4-32, Shiohama 2-shome, Koto-ku, Tokyo 135-0043

In this study, the effect of steam treatment (pre-cooking) on the drying rate of a noodle sheet during the manufacture of instant noodles was examined. The noodle sheet was dried using a forced convection dryer with an air velocity of 2.5m/s. Air temperatures ranging 80~110°C were set as the drying conditions. Since measured values of relative humidity of air used for the drying tests were 1% or less, we described the relative humidity with 0%. The noodle sheet subjected to steam treatment dried faster than a noodle sheet not subjected to steam treatment when the drying temperature was same. The drying contraction of the noodle sheet subjected to steam treatment was less than that of the noodle sheet not subjected to steam treatment. The steam-treated noodle sheet dried faster than the untreated noodle sheet because the decrease in the evaporation area of water was small on the steam-treated noodle sheet. As a result of evaluating the relationship between quality (good quality implied a noodle sheet without foaming) and the drying rate of a noodle sheet, it was found that drying at 100°C was suitable for steam-treated noodle sheets. Moreover, drying at 90°C was suitable for noodle sheets that are not steam-treated.

(Received Mar. 28, 2013 ; Accepted Nov. 14, 2013)

Key words : Instant Noodle, Drying, Steam Treatment, Drying Rate, Foaming

即席麺, 乾燥, 蒸し処理, 乾燥速度, 発泡

乾燥麺類である即席麺は世界で年間約950億食が生産されており、日本では年間約53億食が生産されている乾燥食品である。即席麺は調理の簡便性や保存性の観点から現在広く利用されている乾燥食品の1つである。即席麺の製造方法は、通常の麺と同じように小麦粉に水を加え、混捏を行い、生地をつくる。この生地を帯状にし、薄くするための圧延を行い、切り出される。即席性を保持するためにあらかじめプレクッキングの操作である蒸し操作や茹で操作を行い、その後、乾燥を行う。即席麺は乾燥の種類により大きく2つに分類されている。1つは麺を油で揚げることによって乾燥させる「フライ麺」である。これは、麺塊を金属枠ごと140~160°Cの揚げ油に入れ、1~2分通過させ、生地の段階で30~40%あった水分を3~6%に脱水させる乾燥方法である。もう1つは

熱風を利用し、乾燥させる「ノンフライ麺」である。これは、麺塊を金属枠ごと熱風乾燥機に入れ、80°C前後の熱風で30分以上乾燥させ、生地の段階で30~40%あった水分を10%前後に減少させる乾燥方法である。フライ麺の乾燥は被乾燥物(麺)と熱媒体(油)が直接接触するため、伝熱効率がよい。一方、ノンフライ麺は熱媒体が熱風であるため、伝熱効率が悪く、乾燥時間も長い。

乾燥操作は多くの食品で利用されている加工操作の1つである。食品加工技術としての「乾燥」の目的は、「貯蔵・運搬のための容量減」とともに「保存安定性」の向上である¹⁾。乾燥操作を行うことにより食品中の水分を減少させ、食品の変敗を引き起こす原因となる微生物の増殖や種々の反応を抑制させることで保存安定性が向上する。代表的な乾燥食品としては、乾燥果物(水分

^{*1} 〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4

^{*2} 〒135-0043 東京都江東区塩浜2丁目4-32

§ Corresponding author, E-mail: sugiyamahi@maruchan.co.jp

15～20%), 乾燥麺類 (水分12%), 乾燥野菜 (水分5%), コーンフレーク (水分5%), 全粉乳 (水分2～3%) などがある²⁾。

食品の乾燥操作には熱風乾燥, マイクロ波乾燥, 真空凍結乾燥などがある。それぞれの乾燥操作の特徴を活かし, 食品の用途に合わせて乾燥方法を設定している。乾燥に関する既往の研究には, MENGESとERTEKIN (2006)³⁾のリングの乾燥特性に与える風速と乾燥温度の影響に関する研究がある。この研究では, 乾燥温度を60～80℃, 風速を1～3 m/sの間で変化させ, リングの乾燥曲線を求めている。また, PALとCHAKRAVERTY (1997)⁴⁾の研究では, マッシュルームの乾燥において乾燥時間と品質との関係に注目し, 乾燥温度を45～60℃, 風速を0.9～1.6 m/sの間で変化させ, マッシュルームの最適乾燥条件を明らかにしている。その他, 乾燥食品に関する研究報告では, ぶどう⁵⁾, りんご⁶⁾, バナナ⁷⁾, 梨⁸⁾, プラム⁹⁾などの果物を対象とし, 数学的モデルを利用して, その乾燥特性を評価したものが多い。

麺類の乾燥に関する研究としては, 生うどんを温度40℃, 湿度70%で乾燥した際の水分含量と風速の関係を明らかにした研究報告¹⁰⁾がある。この研究では乾燥期間ごとに検討を行っている。すなわち, 初期乾燥期では風速2.0m/sまでは風速が乾燥速度に影響を与えるが, それ以上の風速では乾燥速度に影響を与えないことを明らかにしている。また, 乾燥期間の後半で, 風速を1.0m/s以上に設定しても乾燥速度に影響を与えないことを明らかにしている。

数学的モデルを用いて, 生うどんを乾燥した際の乾燥曲線を解析した研究報告¹¹⁾もある。ここでは, 乾燥温度15～65℃, 湿度60～80%で生うどんを乾燥し, 乾燥工程中のある時間における水分含量を予測する方法を提案している。多くの研究報告は, 試験サンプルとして生の麺を使用し, その乾燥特性を調査している。しかし, 生の麺に対してプレクッキング (蒸し, 茹で) 処理を施し, それを乾燥させてつくる即席麺の乾燥特性に関する研究はほとんどない。

そこで本研究では, 即席麺の製造において一般的な乾燥条件 (風速2.5m/s, 乾燥温度80～110℃) を用い, 即席麺の製造工程における蒸し工程 (プレクッキング操作) が乾燥速度に与える影響を明らかにすることを目的とした。

実験方法

1. 試料調製

試験に供した麺皮の調製には市販の北海道産小麦粉 (強力粉) を用いた。小麦粉100.0 gと水32.0 gをミキサーで混合し, その後, 手で捏ねてそばろ状の生地を作製した。次に, パスタマシンを用いて複合・圧延を行い, 厚み2.0mmの麺帯を作製した。この麺帯を60mm×60mmに切断したものを「生麺皮」 (蒸し処理を行っていない麺

皮) とした。また, この生麺皮をセイロ蒸し器を用いて, ガス流量6.6 ℓ/min (強火) で2分間蒸したものを「蒸し麺皮」 (蒸し処理を行った麺皮) とした。これらの生麺皮と蒸し麺皮を用いて, 乾燥試験を行った。

2. 乾燥装置

本研究で使用した強制対流式の乾燥装置では, 乾燥速度を決める重要な条件因子である乾燥空気温度と風速が乾燥特性に与える影響を検討することができる。実験装置の概略をFig. 1に示した。この乾燥装置は, インバーター制御された送風ファンおよび温度制御可能なヒーターから成る熱風発生部において乾燥空気温度と風速を設定できる仕組みになっている。

乾燥筒内の金網 (試料台) の上部250mmの位置にK型熱電対を設置し, 送風空気温度の測定を行った。また, 乾燥装置の送風空気出口に風速計を設置し, 乾燥筒内の平均風速の測定を行った。乾燥装置は乾燥空気温度, 風速を設定した後, 約30分で定常状態に達した。乾燥装置が所定の乾燥条件で定常状態に達した後, 再度, 乾燥空気温度, 風速の確認を行った。定常状態を確認した後, 金網 (目開き12mm) に麺皮を乗せ, 上部より強制対流により熱風 (乾燥空気) を吹き付け, 乾燥操作を行った。

3. 乾燥試験

強制対流による乾燥試験は風速2.5m/sの下で4つの乾燥温度 (80℃, 90℃, 100℃, 110℃) で乾燥速度の評価を行った。すべての実験で使用した空気の相対湿度が1%以下であったため, 相対湿度を0%と表示した。試料には生麺皮と蒸し麺皮を用いた。乾燥試験中5分毎に試料を乾燥装置から取り出し, 電子天秤 (Chyo Balance Co., MP-3000) によって重量を測定し, 同時にノギスで麺皮の寸法 (縦, 横) を測定した。本研究では乾燥試験を2回行い, その再現性を確認した。乾燥の終了時期は, 生麺皮, 蒸し麺皮の含水率が0.165 (kg-water/kg-solid) になるまでとした。乾燥試験終了後, 乾燥減量試験法 (105℃, 3時間)¹²⁾により両麺皮の絶乾重量を測定した。

被乾燥試料の含水率 W (kg-water/kg-solid) は式 (1) を用いて計算した。ここで, w はある時間の重量 (kg-water and solid), w_0 は絶乾重量 (kg-solid) である。

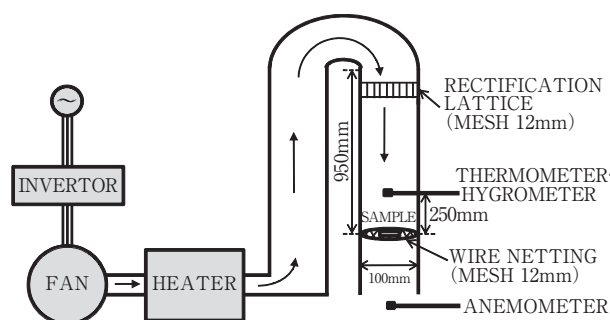


Fig. 1 Schematic drawing of forced convection drier

$$W = \frac{w - w_0}{w_0} \dots\dots\dots (1)$$

実験結果および考察

1. 乾燥温度と乾燥時間との関係

各乾燥温度における乾燥後の麺皮の外見的品质について検討を行った。すべての生麺皮および蒸し麺皮において、乾燥による反りはみられなかった。生麺皮では100℃、110℃による乾燥において麺皮に部分的な発泡現象が観察された。また蒸し麺皮では、110℃による乾燥において部分的な発泡現象が観察された。発泡現象は乾燥時の温度上昇により、麺皮内部で水から水蒸気への相転移が急激に起こり、麺皮内部に気泡が発生する現象である。即席麺の製造工程ではこの発泡現象の発生を避ける必要がある。本研究では、発泡現象の発生を抑えた上で、乾燥を効率的に行う条件の検討を行った。

各乾燥温度での生麺皮と蒸し麺皮の含水率の変化をFig.2 (a) ~ (d) に示した。即席麺の品質規格である日本農林規格 (JAS法)¹³⁾によると、「水分は、油処理により乾燥したもの以外のものにあっては、14.5%以下であること」と規定されている。そこで、本研究では乾燥の終点を水分14%近辺に相当する含水率0.165に設定した。

Fig.2では、蒸し処理の有無にかかわらず乾燥温度を高く設定することにより、乾燥時間が短くなっていることがわかる。生麺皮の乾燥終点 (含水率 $W=0.165$) までの所要時間は乾燥温度が80, 90, 100, 110℃でそれぞれ3,600, 3,000, 1,890, 1,360秒であった。一方、蒸し麺皮の乾燥終点 (含水率 $W=0.165$) までの所要時間は乾燥温度が80, 90, 100, 110℃でそれぞれ3,000, 2,400, 1,920, 1,390秒であった。蒸し麺皮では乾燥時間0sでの含水率が生麺皮より大きくなっている。これは、蒸し処理を行うことで蒸し麺皮の小麦澱粉が糊化し、その結果、生麺皮よりも水分が増えたと考えられる。蒸し処理を加え、初期含水率が高くなっているにもかかわらず、80℃と90℃では乾燥時間が短くなっていた。一方、100℃と110℃では最終的な乾燥終了時間はほぼ同

じであった。蒸し麺皮の80℃と90℃の乾燥操作で乾燥が早く進む理由としては、蒸し処理を行うことで麺皮の収縮が抑制されることが考えられる。すなわち蒸し麺皮では収縮が抑制されることにより、水分の蒸発面積が急激に減少せず乾燥が進行するが、生麺皮では収縮により蒸発面積が急激に減少し、乾燥の進行が遅れている可能性が考えられる。

そこで、蒸し処理の有無による麺皮の面積変化を乾燥温度ごとに経時的に測定し、収縮率を式 (2) より求めた。

$$CR = \frac{S_t}{S_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S_t はある時間の麺皮の面積 (m^2)、 S_0 は初期の麺皮の面積 (m^2) である。

収縮率の経時変化を調べたところ、蒸し麺皮では乾燥時間とともに徐々に収縮していた。一方、生麺皮では乾燥初期の段階で急激に収縮していた。生麺皮の乾燥終点 (含水率 $W=0.165$) における収縮率は、乾燥温度が80, 90, 100, 110℃でそれぞれ0.86, 0.86, 0.85, 0.83であった。一方、蒸し麺皮の乾燥終点 (含水率 $W=0.165$) における収縮率は、乾燥温度が80, 90, 100, 110℃でそれぞれ0.89, 0.90, 0.88, 0.87であった。蒸し処理を施すことで麺皮の収縮が抑制されていることが明らかとなった。

麺皮の蒸し処理では、麺皮の構成成分である小麦澱粉の糊化が起こる。澱粉の糊化ではアミロースとアミロペクチンからなる規則正しい配列 (ミセルや分子間結合) が崩れて、水分子と水和し、澱粉粒子は大きく膨潤する (糊化)¹⁰⁾。糊化した麺皮の乾燥操作では、ミセルや分子間結合で規則正しい配列が崩壊した澱粉の構造内に存在する水分は蒸発するが、元に戻すための結合がなくなった澱粉の構造は規則正しい配列が崩壊したままである。そのため、蒸し麺皮では乾燥による収縮が起こりにくくなったと考えられる。

以上の結果より、蒸し処理は麺皮の収縮を抑制し、乾燥速度の低下を抑える効果があると考えられる。

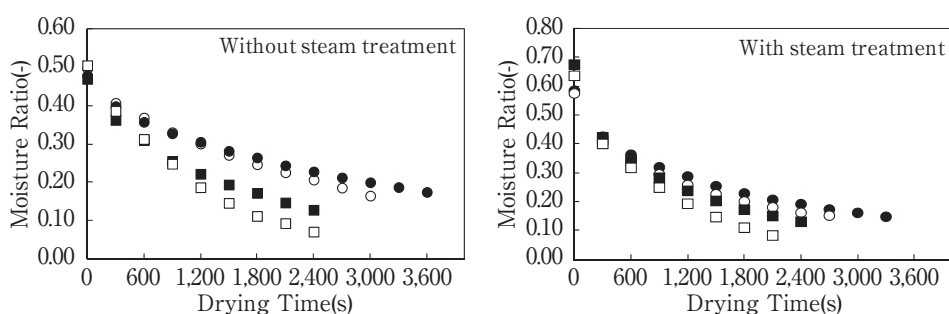


Fig.2 Comparison of transient moisture ratio of noodle sheet with and without steam treatment dried at 80, 90, 100 and 110℃

Symbols indicate experimental data. ● : 80℃ ○ : 90℃ ■ : 100℃ □ : 110℃

2. 麺皮の乾燥速度

本研究では、乾燥に伴う麺皮の大きさの変化を標準化するため、単位面積当たりの乾燥速度を求めた。一般に乾燥速度は、単位時間、単位面積当たりの水分蒸発量と定義される。乾燥速度 J (kg-water/(m²・s)) は乾燥材料の重量 w (kg) と乾燥時間 t (s) の測定値から式(3)¹⁵⁾を用いて求めることができる。ここで、 A は乾燥(蒸発)面積 (m²) である。

$$J = \frac{1}{A} \cdot \left(-\frac{dw}{dt} \right) \dots\dots\dots (3)$$

各乾燥温度での蒸し処理の有無による乾燥速度の変化を乾燥特性曲線としてFig.3 (a) ~ (d) に示した。各乾燥温度において、同じ含水率での生麺皮と蒸し麺皮の乾燥速度を比較すると、蒸し麺皮の乾燥速度が生麺皮の乾燥速度よりも常に速いことがわかる。調理による過度の硬化や収縮がなければ、調理済みの野菜、肉、魚類の乾燥は、新鮮物よりも容易である。また、ブランチングや調理をすることによって植物や動物の細胞組織は容易に水を通しやすくなる¹⁶⁾との報告があるように、麺皮も蒸し処理を行うことにより、乾燥しやすい状態となっていると考えられる。

2種類の麺皮の乾燥特性曲線 (Fig.3) を式(4)に当てはめ、その適合性を R^2 検定で評価した。

$$J = a \exp(kW) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 J は乾燥速度 (kg-water/(m²・s)), k は乾燥

速度係数 (-), a は乾燥速度定数 (kg-water/(m²・s)), W は含水率 (kg-water/kg-solid) である。

式(4)を用いて近似した乾燥特性曲線をFig.3に破線で示した。また、近似に用いた乾燥速度係数 k , 乾燥速度定数 a , 相関係数 R^2 をFig.3の中に合わせて記入した。

乾燥速度定数 a は、各乾燥温度における乾燥速度の速さを表している。2種類の麺皮とも乾燥温度が高くなるに従って、乾燥速度定数 a が大きくなる傾向を示した。また、乾燥温度80, 100, 110℃において、蒸し麺皮の a のほうが生麺皮の a よりも大きくなった。これは、蒸し処理による収縮抑制の影響によるものと考えられる。

乾燥速度係数 k は、含水率が減少する際の乾燥特性曲線の急激な下降を表しており、 k が小さいほど乾燥特性曲線が緩やかに減少することになる。乾燥温度80, 90, 110℃において、蒸し麺皮の k のほうが生麺皮の k よりも大きくなった。

以上の結果をもとに、強制対流乾燥における麺皮の品質の評価(発泡の有無)と乾燥速度の評価(乾燥速度定数 a の評価)を行い、Table 1に示した。発泡が起らない乾燥温度は蒸し麺皮では80~100℃、生麺皮では80~90℃であった。乾燥速度は高温ほど乾燥速度定数 a が大きくなった。したがって、蒸し麺皮では100℃での乾燥が乾燥速度が速く、発泡も起らないことから、乾燥の操作条件として適していると考えられる。一方、生麺皮では90℃での乾燥が発泡の起らない最も高い乾燥温度であり、乾燥速度を考慮すると4つの乾燥温度の中では

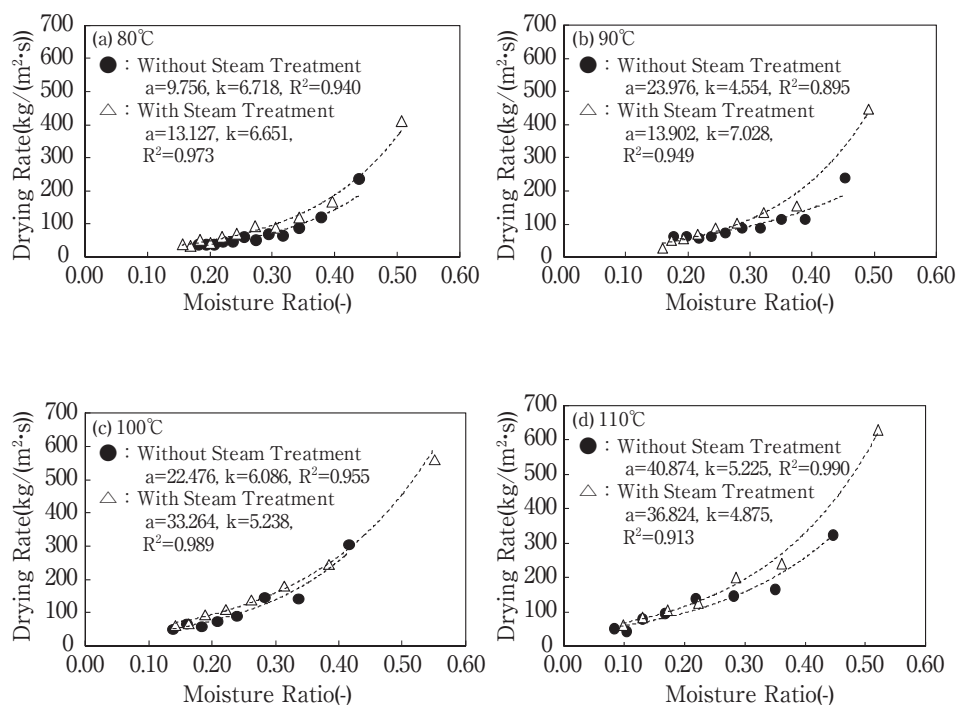


Fig. 3 Drying rate VS. moisture ratio of noodle sheet with and without steam treatment dried at 80, 90, 100 and 110°C

Symbols indicate graphical differentiation of drying curves based on experimental data; lines indicate values calculated based on Eq. (4).

Table 1 Comparison of drying rate and quality of noodle sheet with and without steam treatment dried at 80, 90, 100 and 110℃

Drying temperature	Noodle with steam treatment		Noodle without steam treatment	
	Drying rate	Quality	Drying rate	Quality
80℃	×	○	×	○
90℃	×	○	△	○
100℃	○	○	△	×
110℃	◎	×	◎	×

Drying rate was evaluated based on the drying rate coefficient (a).

× : $a < 15$, △ : $15 < a < 25$, ○ : $25 < a < 35$, ◎ : $35 < a$

Noodle sheet which did not foam was evaluated as good quality.

最もよい条件であると考えられる。

要 旨

本研究では、市場規模の大きい即席麺の製造工程を想定し、プレクッキングである蒸し処理が乾燥速度に与える影響を明らかにすることを目的とした。具体的には即席麺の乾燥温度が生麺皮と蒸し麺皮の乾燥速度に与える影響を検討した。乾燥温度・風速の限定された条件で得られた結果から、以下のことが明らかとなった。

- ① 乾燥温度が高くなると、生麺皮と蒸し麺皮の乾燥速度はともに速くなることが示された。
- ② 同じ乾燥温度では、蒸し麺皮のほうが生麺皮よりも早く乾燥が進むことが示された。この理由として、麺皮の蒸し処理により、乾燥しやすい状態となることや、麺皮の乾燥に伴う収縮が抑制されることに起因すると考察した。
- ③ 麺皮の品質評価（発泡の有無）と乾燥速度の評価を行ったところ、蒸し麺皮では100℃での乾燥が適していることが示された。また、生麺皮では90℃での乾燥が4つの乾燥温度の中では最もよい条件であることが示された。

文 献

- 1) 日本食品工業会：食品工学(朝倉書店、東京)、p.107 (2012)
- 2) 松野隆一：食品工学基礎講座6 「濃縮と乾燥」(光琳、東京)、pp.1～5 (1988)
- 3) MENGES, H.O. and ERTEKIN, C. : Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples, *J. Food Eng.*, **77**, 119～125 (2006)
- 4) PAL, U.S. and CHAKRAVERTY, A. : Thin Layer convection-drying of mushrooms, *Energy Convers. Mgmt.*, **38** (2), 107～113 (1997)
- 5) EL-GHETANY, H.H. : Experimental investigation and empirical correlations of thin layer drying characteristics of seedless grapes, *Energy Convers. Mgmt.*, **47**, 1610～1620 (2006)
- 6) VELIC, D., PLANINIC, M., TOMAS, S. and BILIC, M. : Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, *J. Food Eng.*, **64**, 94～102 (2004)
- 7) KARIM, M. A. and HAWLADER, M.N. A. : Drying characteristics of banana : theoretical modeling and experimental validation, *J. Food Eng.*, **70**, 35～45 (2005)
- 8) GUINE, R. P. F., RODRIGUES, A. E. and Figueiredo, M. M. : Modeling and simulation of pear drying, *Applied Mathematics and Computation*, **192**, 69～77 (2007)
- 9) DOYMAZ, I. : Effect of dipping treatment on air drying of plums, *J. Food Eng.*, **64**, 465～470 (2004)
- 10) INAZU, T., IWASAKI, K. and FURUTA, T. : Effect of air velocity on fresh Japanese noodle (Udon) drying, *Lebensm. -Wiss. U.-Technol.*, **36**, 277～280 (2003)
- 11) CHEN, J. Y., ISOBE, K., ZHANG, H. and MATSUNAGA, R. : Hot-Air Drying Model for Udon Noodles, *Food Sci. Technol. Res.*, **6** (4), 284～287 (2000)
- 12) 厚生労働省：第五版食品添加物公定書, p.11 (1986)
- 13) 農林水産省：「即席めんの日本文林規格」(平成21年4月9日農林水産省告示第484号) (2009)
- 14) 渋谷祥子：調理科学 (同文書院、東京)、pp.47～50 (1996)
- 15) 日本食品工業会：食品工学(朝倉書店、東京)、p.112 (2012)
- 16) NORMAN, N. P. : 総合食品科学 (建帛社、東京)、pp.226 (1975)

(平成25年3月28日受付、平成25年11月14日受理)

バオバブフルーツ (*Andasonia digitata*) 粉末摂取は 高コレステロール負荷食を与えたラットの 体重増加と血清コレステロール濃度の上昇を抑制する

米澤 加代^{*1}・野口 有希^{*1}・谷岡 由梨^{*1}
石田 裕^{*1}・島田 剛志^{*2}・古庄 律^{*1§}

* 1 東京農業大学短期大学部栄養学科

* 2 (株)エコロジーヘルスラボ

Intake of Baobab (*Andasonia digitata*) Fruit Powder Suppress Elevation of Body Weight Gain and Serum Cholesterol Level in High-Cholesterol Diet Fed Rats

YONEZAWA Kayo^{*1}, NOGUCHI Yuki^{*1}, TANIOKA Yuri^{*1},
ISHIDA Hiroshi^{*1}, SHIMADA Tsuyoshi^{*2} and FURUSHO Tadasu^{*1§}

* 1 Department of Nutrition, Junior College of Tokyo University of Agriculture,
1-1-1 Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-8502

* 2 Ecology Health Labo Inc, 1-3-8 Nakamura-kita, - Nerima, Tokyo 176-0023

Intake of baobab fruit powder (BBFP) significantly suppressed body weight gain and decreased the levels of serum and liver cholesterol levels in rats fed a high-cholesterol diet. These results suggest that these effects may be due to the soluble dietary fiber that is present in substantial amounts in the fruit.

(Received Nov. 25, 2013 ; Accepted Jan. 8, 2014)

Key words : serum cholesterol, hepatic cholesterol, baobab fruit, soluble dietary fiber, body weight gain
血中コレステロール, 肝臓中コレステロール, バオバブフルーツ, 水溶性食物繊維,
体重上昇抑制

生活習慣病のうち、心疾患や脳血管疾患などの循環器系による日本の死亡率は、全死亡率の約3割を占めている。これらの疾患は脂肪をはじめとするエネルギーの過剰摂取や運動不足などの生活習慣が長期間続いた場合に引き起こされる高コレステロール血症や高脂血症を起因とすることが多い。したがって、生活習慣の改善および食品成分によるコレステロール代謝の調節が非常に重要である。食物繊維は、小腸における消化・吸収を受けず大腸に到達する。そこで、腸内細菌による発酵によって短鎖脂肪酸が生成される。短鎖脂肪酸のうち、プロピオン酸が肝臓におけるコレステロール合成を阻害することが報告されておりコレステロール代謝調節に重要であることが示唆されている¹⁾。また、食物繊維の摂取により

胆汁酸排泄量が増加し、生体内のコレステロールプールを減少させ、血漿中コレステロール濃度の低下にも関与している可能性が示唆されている^{1),2)}。

バオバブ (*Andasonia digitata*) は、アフリカ全土に広く自生する樹木で、樹齢100年を越える頃から開花・結実することが知られている。現地では完熟して乾燥した果実を食用としているが、果実以外にも根や葉、樹皮に至るまで広く利用されている。乾燥した果実内は繊維状の白い果肉と淡褐色の種衣に覆われた種子が存在し、そのまま菓子として食用にされたり、種衣を水に溶かし、ジュースとして飲用されたりしている³⁾。バオバブフルーツ (BBF) は、ビタミンやミネラルなどが豊富で非常に栄養価が高い⁴⁾。また、食物繊維 (DF) も豊富に含

* 1 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

§ Corresponding author, E-mail: tfurusho@nodai.ac.jp

* 2 〒176-0023 東京都練馬区中村北 1-3-8

まれており、特に水溶性食物繊維（SDF）は100g乾燥重量あたり約30gと他の果物に比べ非常に多い。2011年には欧州ノベルフード認定を取得し、日本でもスーパーフルーツ素材として注目されている食品の一つである³⁾。しかしながら、ノベルフードとして認定してから日も浅く、主要成分である食物繊維を含めてBBFの生体調節機能に関する研究はほとんど報告されていないのが現状である。

そこで今回、筆者らはBBFのSDFに着目し、その機能性を実証することを目的として、動物実験を用いて粉末化したバオバブフルーツ（BBFP）の体重増加抑制効果、血清および肝臓コレステロール濃度上昇抑制効果について検討した。その結果、コレステロール負荷食においてBBFPを添加した群は、SDFによる胆汁酸ミセル形成の阻害に伴う脂質の吸収抑制が原因と考えられるエネルギー摂取量低下による体重増加の抑制、さらに血清および肝臓中コレステロール濃度の低下、糞中へのコレステロール排泄促進作用が確認されたので報告する。

実験方法

1. 実験材料

実験試料として用いたBBFPは、エコロジーヘルスラボ株式会社から供与されたナイジェリア産のものを使用した。BBFPの成分組成をTable 1に示した。分析値はエコロジーヘルスラボ(株)で求めた値を使用した。飼料調製には、カゼイン（ニュージーランド産）、コーンスターチ（日本コーンスターチ(株)）、セルロース（オリエンタル酵母工業(株)）を用いた。ビタミン混合およびミネラル混合の調製のための試薬、コレステロール、コール酸ナトリウム、DL-メチオニン、塩化コリン、大豆油は和光純薬工業(株)より購入した。

2. 実験動物および飼育条件

8週齢のSprague Dawley (SD) 系雄ラットを東京実験動物(株)より購入し実験に供した。本実験の基準飼料は、AIN76飼料組成に従いTable 2のように調製した。対照群（n = 6；以下CO群）に1%コレステロールおよび0.5%コール酸ナトリウムを添加した群を高コレステロール群（n = 6；以下HC群）とした。また、HC群のセルロースの代わりにBBFPを10%添加し、総食物繊維量を100g飼料あたり4.2gにした群をバオバブフルーツ投与群（n = 6；以下BBF群）とした。ラットを個別に金網ケージに入れ、室温23±1℃、湿度50±5%、12時間の明暗サイクル（明期8：00–20：00）の環境下において飼育した。固形飼料（MF：オリエンタル酵母(株)）で1週間馴化後、平均体重が等しくなるように3群に分け、BBF群に対するpair-feedingで各群の飼料により30日間飼育した。採血は15時間の絶食後、ネンブター麻酔下で心臓採血を行い、遠心分離（2,500rpm, 15分間）によって血清を調製した。絶命直後に肝臓を摘出し、生理食塩水で還流して脱血した後、分析時まで–80℃

Table 1 Composition of Baobab fruit powder (g/100g dry weight)

Component	Baobab fruit powder
Crude protein	1.6
Crude fat	1.0
Carbohydrate	84.6
Dietary fiber*	
Soluble dietary fiber	30.6
Insoluble dietary fiber	11.0
Moisture	8.8
Ash	4.0

* Dietary fiber is determined by a modified enzymatic-gravimetric method of PROSKY, *et al.* : JAOAC Int., **77** (3), 690–694 (1994)

Table 2 Composition of experimental diets (weight %)

Ingredient	Diet group		
	CO	HC	BBF
Casein	20.0	20.0	20.0
Corn starch	65.0	63.5	58.5
Soybean oil	5.0	5.0	5.0
Cellulose	5.0	5.0	0
Baobab fruit powder	0	0	10.0
Vitamin mix (AIN-76G-VX)	1.0	1.0	1.0
Mineral mix (AIN-76G-MX)	3.5	3.5	3.5
Sodium Cholate	0.2	0.2	0.2
DL-methionine	0.3	0.3	0.3
Cholesterol	0	1.0	1.0
Choline bitartrate	0	0.5	0.5
Total	100	100	100

で保存した。また、飼育終了日の糞を採取し、分析時まで–80℃で保存した。なお、本動物実験は東京農業大学動物実験指針に基づいて実施した。

3. 分析方法

血清中の総コレステロール、HDLコレステロール、は、それぞれ市販の測定キットであるコレステロールE-テストワコー、HDLコレステロールE-テストワコー（和光純薬工業(株)）を用いて測定した。肝臓および糞中脂質の抽出は、FOLCHら⁵⁾の方法に従い、クロロホルム–メタノール溶液で抽出した後、溶媒を留去して粗脂肪とした。抽出した粗脂肪は、5% TritonX-100を含むイソプロパノールに溶解し、上述の血清分析時と同様のキットを用いて、肝臓および糞中総コレステロールを測定した。

4. 統計処理

各実験結果は平均値±標準偏差（mean±SD）で示し

た。有意差検定は、統計ソフト‘Statcel 2’を用いて Bonferroni/Dunnの多重比較検定を行い、 $p < 0.01$ で統計的に有意とした。

実験結果および考察

1. 体重増加、摂餌効率

各群の体重増加量および飼育期間中の摂餌効率についてTable 3に示した。摂餌効率は各群間に有意な差異は認められなかったが、体重増加量においてHC群はCO群と比べ有意に増加したのに対し、BBF群ではCO群およびHC群よりも有意に上昇が抑制されていた ($p < 0.01$)。BBF群の有意な体重上昇抑制は、BBFに含まれるSDFの摂取による脂質の吸収抑制によるエネルギー摂取の抑制が考えられる。データには示さないが、血清トリアシルグリセロール濃度を測定した結果は、BBF群がCOおよびHC群に比較して有意に低下していることから、BBF由来のSDFの摂取により胆汁酸排泄が亢進されたことで、ミセル形成が阻害され、飼料に添加した脂質の吸収抑制が起こり、それに伴いエネルギー摂取量が低下し、体重増加抑制に至ったものと推察される。

2. コレステロール濃度に及ぼす影響

各群の血清、肝臓および糞中コレステロール濃度をTable 4に示した。BBFP摂取により、血清総コレステロールおよびLDL+VLDLコレステロール濃度は、HC群に比べ有意に低値を示した ($p < 0.01$)。肝臓中の総コレステロール濃度はCO群に比べ他の2群はいずれも高値を示したもののHC群と比べBBF群は有意に低値を示した ($p < 0.01$)。これらの現象は、BBFPに多量に含まれるSDFの以下のような生理作用によるものと考えられる。まず、① SDFの高粘度による食事中コレステロールの腸管壁への移動が遅延。② コレステロールとSDFとのイオン結合・水素結合によるコレステロールの吸収効率低下、③ ゲル形成による疎水化で脂質成分のミセル化阻害によるコレステロールの吸収低下、④ 胆汁酸がSDFに吸着し、排泄が促進されたことにより、腸肝循環が阻害され肝臓内のコレステロールプールが減少したこと。これらにより、血中コレステロールの肝臓への取り込みが増加し、血中コレステロール値低下の誘導が起こる。糞中総コレステロール排泄量が、HC群に比べてBBF群が有意に高値であった ($p < 0.01$) ことは、これ

Table 3 Effects of baobab fruit powder on body weight gain and food efficiency of rats fed a high-cholesterol diet¹

	Diet group		
	CO	HC	BBF
Body weight gain (g/30d)	172.0 ± 23.7 ^a	184.3 ± 16.6 ^b	161.6 ± 13.0 ^c
Food efficiency (body weight gain g/g diet)	0.27	0.27	0.24

CO, control; HC, high-cholesterol; BBF; baobab fruit

¹Values are means ± SD, N = 6. Means in a row with superscripts without a common letter differ, $P < 0.01$

Table 4 Effects of baobab fruit powder on serum, liver and fecal cholesterol concentrations of rats fed a high-cholesterol diet

	Diet group		
	CO	HC	BBF
Serum (mg/dl)			
Total cholesterol	89.0 ± 13.7 ^a	167.2 ± 15.4 ^b	125.7 ± 7.7 ^c
HDL-cholesterol	60.7 ± 6.0 ^a	27.1 ± 4.0 ^b	32.5 ± 5.5 ^b
LDL+VLDL-cholesterol ²	21.4 ± 7.1 ^a	126.9 ± 11.3 ^b	70.4 ± 3.3 ^c
Liver (mg/g liver)			
Total cholesterol	1.3 ± 0.2 ^a	32.0 ± 5.6 ^b	23.4 ± 2.4 ^c
Feces (mg/g feces)			
Total cholesterol	1.8 ± 0.7 ^a	26.4 ± 3.7 ^b	36.1 ± 3.4 ^c

CO, control; HC, high-cholesterol; BBF; baobab fruit

¹Values are means ± SD, N = 6. Means in a row with superscripts without a common letter differ, $P < 0.01$

²Values were calculated as follows: LDL+VLDL cholesterol = Total cholesterol - HDL cholesterol.

らの結果を反映するものと考えられた。

一般的に果物のSDFはペクチンであり、FRUCTOSO⁷⁾は、ラットへのペクチン投与により血清および肝臓コレステロールが低下することを報告している。また、TERPSTRA⁸⁾も、高コレステロール負荷ハムスターにレモン由来ペクチンを供与したところ、血漿および肝臓コレステロール濃度がコントロールに比べ有意に低下することを報告している。本実験における血清および肝臓コレステロール低下作用は、BBFに含有されるペクチンによって発現していると推測されるが、今回はBBFPからSDFを抽出し、構成糖、粘度測定等を行っていないので今後の検討課題としたい。印南⁹⁾は、コレステロール非負荷ラットを用いてモロヘイヤ由来SDFを1.6%の割合で飼料に添加すると血清および肝臓コレステロール濃度が減少することを報告している。本研究におけるBBF群飼料100gあたりには、約4.2gのDFが添加されていたことになり、セルロースを5%添加したコントロール食に比べると84%に留まっている。しかし、SDF量を算出すると約3gと多量に含まれていることから、SDFとしての生理機能が十分に発現されたと推察される。

以上のことから、BBFはコレステロール吸収を阻害することで血清および肝臓コレステロール濃度を低下させる水溶性食物繊維としての機能を十分に備えたとともに、体重増加抑制の効果をもたらす機能性食品素材であることが示唆された。

要 約

バオブアブフルーツ (BBF) には水溶性食物繊維が約30%含まれている。高コレステロール負荷食を与えたラットを用いて、粉末化したバオブアブフルーツ (BBFP) 摂取による体重増加および血清、肝臓および糞中コレステロール濃度を測定した。その結果、BBF添加群は高コレステロール食群に比べ体重増加が有意に抑制され、血清および肝臓コレステロールも有意に低値を示した ($p < 0.01$)。さらに、BBFP投与により糞中へのコレステロール排泄が促進されていた。以上のことから、BBFは高コレステロール血症予防のための機能性食品として利用可能であることが明らかとなった。

文 献

- 1) 日本食物繊維学会監修：食物繊維—基礎と応用—第3版（第一出版 東京），pp.136～141（2008）
- 2) LEVRAT-VERNY, M.A., BEHR, S., MUSTAD, V., RÉMÉSY, C. and DEMIGNÉ, C. : Low levels of viscous hydrocolloids lower plasma cholesterol in rats primarily by impairing cholesterol absorption, *J. Nutr.*, **130**, 243～248（2000）
- 3) ODETOKUN, S. M. : The nutritive value of Baobab fruit (*Andersonia digitata*), *Rivista -Italiana -delle -Sostanze-Grasse*, **73**, 371～373（1996）
- 4) BERRY, R. E. : Tropical fruits and vegetables as potential protein sources, *FOOD TECHNOL - CHICAGO*, **35**, 45～49（1981）
- 5) スーパーフルーツ素材の市場動向，食品と開発，**44**, 51～56（2009）
- 6) FOLCH, J., LEES, M. and STANLEY, G.H.S. : A simple method for isolation and purification of total lipids from animal tissues, *J. Biol Chem*, **226**, 497～509（1957）
- 7) GARCIA-DIEZ, F., GARCIA-MEDIAVILLA, V., ENRIQUE BAYON, J. and GONZALEZ-GALLEGO, J. : Pectin feeding influences fecal bile acid excretion, Hepatic bile acid and cholesterol synthesis and serum cholesterol in rats, *J. Nutr.*, **126**, 1766～1771（1996）
- 8) TERPSTRA, A. H. M., LAPRE, J. A., DEVRIES, H. T. and BEYNEN, A. C. : The hypocholesterolemic effect of lemon peels, lemon pectin, and the waste stream material of lemon peels in hybrid F1 B hamsters, *Eur. J. Nutr.*, **41**, 19～26（2002）
- 9) INNAMI, S., TABATA, K., SHIMIZU, J., KUSUNOKI, K., ISHIDA, H., MATSUGUMA, M., WADA, M., SUGIYAMA, N. and KONDO, M. : Dried green leaf poeders of Jew's mellow (*Corchorus*), permission (*Diosphyros kaki*) and sweet potato (*Ipomoea batatas* poir) lower hepatic cholesterol concentration and increase fecal bile acid excretion in rats fed a cholesterol-free diet, *Plant Food Hum Nutr.*, **52**, 55～65（1998）
（平成25年11月25日受付，平成26年1月8日受理）

シミュレーションモデルに基づく 青果物の収穫後品質制御に関する研究

平成24年度日本食品保蔵科学会学会賞

椎 名 武 夫*§

* (独) 農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

The Use of Mathematical Model and Simulation for Managing the Postharvest Quality of Fresh Produce

SHIINA Takeo*§

* National Food Research Institute, NARO, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8642

Key words : fresh fruits and vegetables, quality management, mathematical model, simulation

青果物, 品質管理, 数学モデル, シミュレーション

収穫後の青果物は、品質変化が急激に進むため、品質を維持したまま最終消費者に届けるためには、各青果物の特性に応じた適正条件での取り扱いが不可欠である。具体的にどのような環境条件が品質保持に適しているかという点に関しては、国内外のこれまでの研究により品目ごとによりデータが蓄積され、温度、湿度、ガス組成などの主要な環境因子の適正条件が一覧表として公表されている（例えばUSDAハンドブック¹⁾）。

しかしながら、例えばMA包装を施したときの包装内ガス組成変化のダイナミクスや、既存システムを変更したり新たな品質管理技術を開発したりする際に、新たな操作条件が適用されることで環境条件がどのように変化し、結果として青果物の品質変化にどのような影響を及ぼすのかという点に関しては、十分な知見が得られているとは言えない状況であった。

筆者は、このような状況を打開するため、ポストハーベストプロセスとそれに伴う青果物の品質変化に関するシミュレーションモデルを構築するとともに、開発したモデルを用いた品質制御の最適化について研究を行ってきた。本稿では、日本食品保蔵科学会学会賞の受賞対象となった現在の職場（1982～1991年、1997年～）と途中で勤務した北海道農業試験場畑作研究センター（1991～1997年）において実施した研究の概要を紹介するとともに、その後の研究テーマについても簡単にふれたい。

1. ポストハーベストシステムと シミュレーション

(1) シミュレーションと数学モデル

まず、「シミュレーション」とは何かについて考えておきたい。近藤²⁾は、シミュレーションを、「現象のモデルによる再現であって、広い意味では各種の物理実験や化学実験などが含まれる」と定義している。

同じく、近藤²⁾は、シミュレーションの効用について、次のような論考を加えている。

「数学モデルを用いた現象の再現、すなわちシミュレーションを行うことで、現象のより深い理解が可能となったり、システム設計等の工学的な利用が可能となったりする。」

さらに、上記文章の冒頭に出てくる「数学モデル」については、以下のように論述している²⁾。

「数学モデルとは、現象の特徴または本質を数学的に表現したものである。これは模型（モデル）の一種類である。単純化・抽象化が行われているため数学モデルは、数式で表された仮定である。現象の数式化の思想は、Galileo Galileiにまで遡ることができる。モデルの条件としては、① 特定の二、三の事実だけでなく、多くの事実を説明することができなければならない、② そのモデルを利用して予測した事がらが、その通りに成立することが、誰にでも認められるようなものでなければならない。」

* 〒305-8642 茨城県つくば市観音台2-1-12

§ E-mail : shiina@affrc.go.jp

(2) ポストハーベストシステムのシミュレーション

上記の「シミュレーション」と「数学モデル」の考え方や手法を、青果物のポストハーベストプロセスに応用することで、青果物を取り巻く環境とその変化にかかわる現象の理解が進み、品質制御のための知見が得られるものと期待される。

(3) 受賞研究のテーマ

受賞タイトルである「シミュレーションモデルに基づく青果物の収穫後品質制御に関する研究」の基本理念は、数学モデルに基づくシミュレーションモデルを開発することで、定性的な説明にとどまっていた青果物の品質変化を、定量的に示すことを可能とするとともに、数量的な予測を可能とし、ひいては、最適品質制御手法の開発に結びつけることである。

2. 受賞対象研究の概要

(1) 研究者としてのスタート

食品総合研究所で配属先となった食品工学部流通工学研究室では、農林水産省のプロジェクト研究「業務用野菜の生産及び一次加工技術の確立（1982～1984年度）」がスタートしたばかりで、研究の企画立案、実行、報告、論文投稿に至る研究の流れを、若干ではあるが体得することができた。

以下、紙面の都合で、受賞対象となった研究の一部について、その概要を紹介する。

(2) MA包装に関するシミュレーションモデルの開発

最初の筆頭筆者論文となった、「シミュレーションモデルによるカット野菜包装における内部ガス組成の解析」³⁾においては、現在、多くの青果物で実用化されているMA包装における、ガス組成変動に関する数理モデルを構築し、その妥当性を検証した。当時、日本においては、MA包装という用語すら存在しなかった（一般的にはCA包装と呼ばれていた）ものの、筆者は、所属研究室の先輩の主任研究官である河野澄夫博士（現在、鹿児島大学教授）の指導の下、カット野菜包装を事例として、酸素、二酸化炭素、窒素という主要3成分ガスのすべてを含むMA包装内のガス組成変動予測モデルを開発した。

この論文で特筆すべき点として、①それまで指数曲線等の経験式への回帰モデルで説明されることの多かったガス組成変動¹⁾を、物質移動現象に基づく移動速度論

により定式化したこと、②普及しつつあったマイクロコンピュータ（ヒューレットパッカード製、HP-85。現在のパーソナルコンピュータ（PC）に相当。）でのシミュレーションを実現したこと、などがあげられる。学会誌に論文が掲載された際に、流通工学研究室長であった岩元陸夫博士に、「良い論文ができたな」と言って頂いたことに喜んだことと、しばらくして日本語論文であったにもかかわらず、ポストハーベスト研究に大きな足跡を残して昨年亡くなられたUC DavisのAdel A. Kader教授から論文別刷請求があり、この分野の世界的権威に論文の重要性を認めて頂いたものと勝手に思い込んだことを記憶している。

開発したシミュレーションモデルは、青果物の包装量と呼吸速度、包装資材の表面積とガス透過性を与えることで、密封包装後の包装内ガス組成変化の予測を可能とするものであり、MA包装における最適包装条件の設計に非常に有益であった（図1、図2）。この研究成果は、その後のMA包装の実用化と発展に多少なりとも寄与したと考えている。

(3) 一次加工野菜の品質保持とモデリング

2報目の筆頭筆者論文となった研究は、「カットキャベツの品質保持と低温管理」⁵⁾である。この研究は、品質変化が急激なカット野菜の品質を維持するうえで極めて重要な低温管理（カット野菜の製造や流通において、HACCP、GMP、GDPのCritical Control Point、CCPと位置づけられよう）のための急速冷却と流通時の保冷輸送方法について検討したものである。

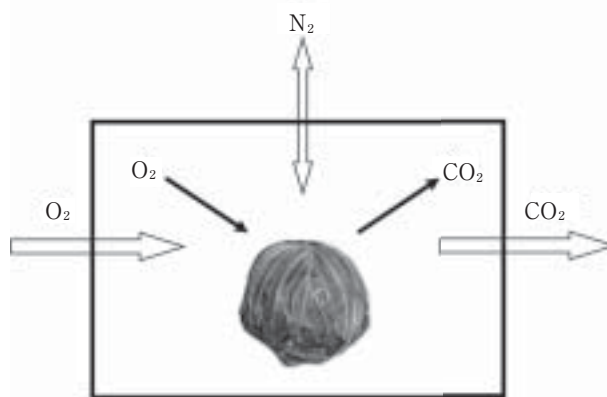


図1 小袋包装（均質フィルム）のガス移動モデル

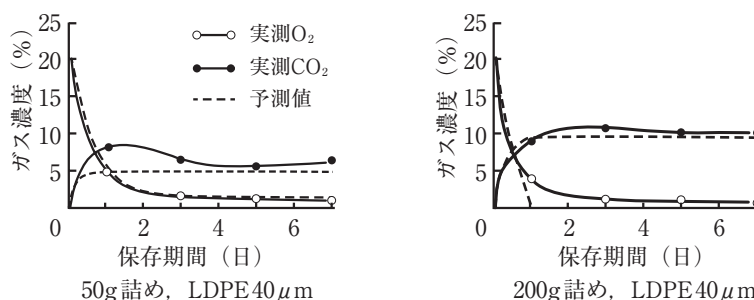


図2 シミュレーションモデルによる包装内ガス組成の推定（2mm幅カットキャベツ、保存温度5℃）

カット野菜の衛生性を担保しながらの急速冷却に関しては、平板状および球状に密封包装した後の冷水冷却を取り上げ、その冷却過程を非定常熱伝導に関するGurney-Lurieの図解法により解析した(図3)。また、解析結果を利用して、カットキャベツについて冷却速度を規定する温度伝導率を算出するとともに、30分以内の冷却を可能とするための包装形状とその寸法を示した(表1)。

また、真空冷却によるカットキャベツの冷却過程を解析し、カットキャベツは切断面が多く水分蒸発が容易なため迅速な冷却が可能であることを示すとともに、品温が真空槽の圧力で規定される湿球温度にほぼ等しく、冷却過程を槽内圧力の調節により制御可能であることを示した。真空槽内の圧力制御の自動化に関しては、MA包装シミュレーションでもふれたマイクロコンピュータ(HP-85)を使用するシステムを独自に開発した(図4)。現在、計測機器の制御とデータ収集にはPCが使用されるが、当時はスタンドアローンの計測制御装置が一般的で、新たな装置開発には高額の開発費が必要であった。開発したシステムは、前記のHP-85を利用することで、GP-IB(正式名称はGeneral Purpose Interface Busで、HP社が開発したHP-IBと同一規格。)接続の制御ユニット(AD/DA変換)と真空槽内の圧力を測定するための

圧力発信器を追加購入するだけでシステムを構築することができた。なお、HP-85のプログラミングとGP-IBによる機器制御の基礎については、計測工学研究室の先輩研究者である魚住純博士(現在、北海学園大学教授)に新人研修等でご指導頂いた。

さらに、カットレタスの配送実態を調査し、冷凍車を使用した場合でも、扉の開閉が頻繁なため品温を低く維

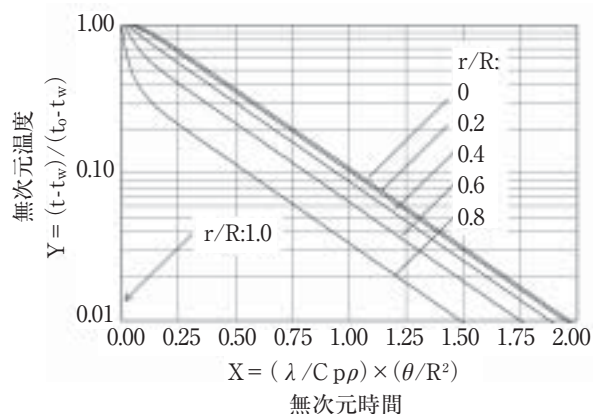


図3 平板の非定常熱伝導解析(Gurney-Lurie図)

Rは半径, rは中心からの距離で、表面熱伝達抵抗が無視できる場合の線図。

表1 氷水(0℃)によってカットキャベツを30分以内に冷却を完了させるための包装条件探索
(初期品温25℃, 目標品温5℃: 無次元温度0.2)

平板状包装の場合			球状包装の場合		
厚さの1/2 R (cm)	時間θ (min)		半径 R (cm)	時間θ (min)	
	普通包装	減圧包装		普通包装	減圧包装
0.5	1.2	0.9	1.0	3	2
1.0	4.7	3.6	2.0	12	10
1.5	10.6	8.1	3.0	27	21
2.0	18.9	14.3	4.0	48	38
2.5	29.5	22.4	5.0	76	60
3.0	42.4	32.3	7.5	170	134
			10.0	302	238

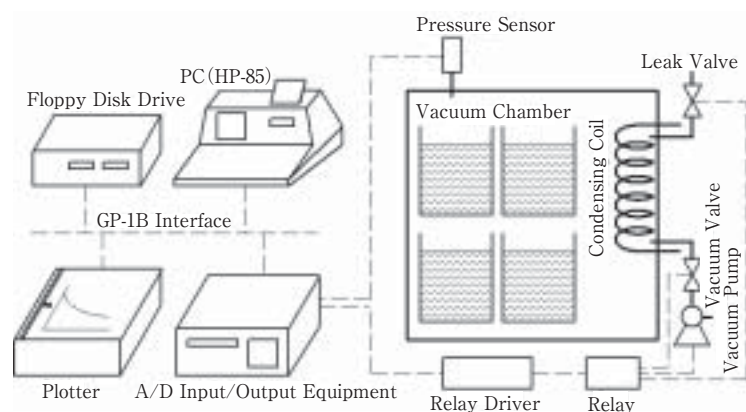


図4 パーソナルコンピュータによる真空冷却制御装置の概略図(制御圧力の任意制御)

持することが困難であることを示した。そこで改善策として、発泡スチロール容器と氷詰めによる低温流通方式を提案し、輸送シミュレーションによりその品質保持効果を確認した。

これらの研究成果は、カット野菜の品質管理の高度化を可能とするもので、カット青果物のCCPとその管理手法を示した実用的研究として位置づけることができる。

(4) 不均質青果物の冷却過程モデリング

学位論文「熱物質移動制御による青果物の品質保持に関する研究」⁶⁾では、上記の研究内容に加えて、キャベツを青果物の代表として取り上げ、空気および冷水による冷却過程を、それまでほとんど適用例がなかった非定常熱伝導理論（フーリエの法則）の解析解に基づいて解析した。キャベツの充実度（仮比重）、体積（球と仮定すると半径と同義）、質量のうち、冷却速度に最も大きな影響を及ぼすのは質量であることを明らかにし、質量から得られる球相当直径を用いたシミュレーションモデルを構築した。本モデルにより、充実度や寸法の異なるキャベツの冷却過程を統一的に示すことができることを示すとともに、計測が容易な質量を測定することで、ある冷却条件に置かれたキャベツの冷却過程の予測を可能とした（図5）。開発したモデルは、結球野菜という不均質な物体を対象としながら、理論的かつ実用的な冷却過程のモデルであり、低温流体（冷風・冷水）による青果物の冷却過程の解析と予冷システムの設計に有益である。

さらに、空気冷却と冷水冷却における冷却過程を、表面熱伝達率、熱伝導率、半径で規定される無次元数（ビオ一数）に基づいて解析し、キャベツのように内部の伝熱抵抗が大きく（熱伝導率が小さい）、伝熱距離（半径）の大きな青果物では、空気冷却と冷水冷却で冷却速度に大きな違いがないことを示した。これらの知見は、冷却速度が大きく、迅速でかつ個体ごとにばらつきの無い均一な冷却を実現する予冷技術の開発の必要性を強く示唆するものであり、予冷技術の革新につながるものと期待される。

この研究を実施したのは、北海道農業試験場畑作研究センター在籍中であった。広大な実験圃場の一部を占有させて頂き、業務科の方々の協力を得て大量のキャベツを栽培し、実験に必要な試料を厳選することができたことが、研究成果に結びついたと考えている。

(5) トマト追熟生理のモデリング

本学会誌に掲載された、「トマト『桃太郎』緑熟果実の追熟過程における果皮色および果実硬度変化の積算エチレン生成量による予測」⁷⁾は、流通工学ユニットの主任研究員である中村宣貴博士が筆頭筆者として取りまとめたものである。本論文では、追熟性青果物の代表であるトマト果実について、緑熟収穫果の追熟過程を解析し、個体ごとに異なる追熟過程を、エチレン累積生成量により統一的に表現する手法を開発した。具体的には、

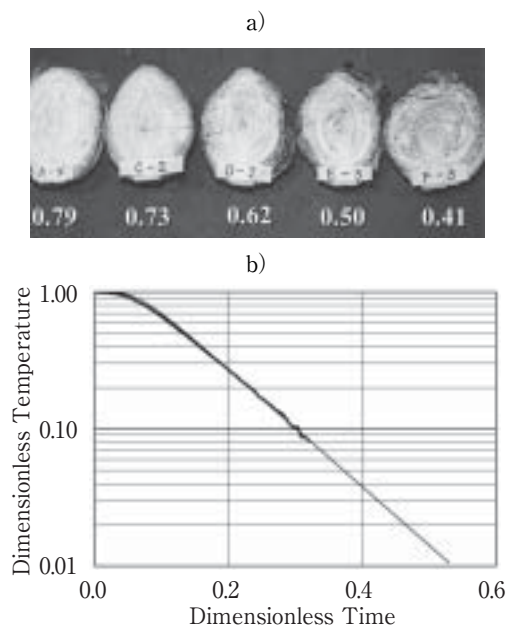


図5 フーリエの法則に基づくキャベツの強制通風冷却過程の解析

a) は充実度仮比重の異なる供試キャベツの垂直切断面。
b) は未成熟キャベツ (F-3) のモデル適合性確認結果。

累積エチレン生成量と着色 (a^* 値)・果実硬度との関係を表現するもので、時間軸上では個体ごとに存在する成熟パターンの違いが、この曲線では個体によらず一定であることを示した。本論文に対しては、平成23年度の論文賞が授与されたが、本研究開始時においては、筑波大学大学院博士課程に在籍し食品総合研究所で研究を行っていた、白田浩幸博士（現在、NEDO）の貢献がある。

本学会誌に続報として掲載された「成熟遺伝子型の異なるトマト緑熟果実の果皮色変動予測モデル」⁸⁾は、ripening inhibitor (*rin*) 変異体および正常型という成熟を制御する遺伝子型の異なるトマト果実に対して既報と同様の手法を適用し、さらに、新たに開発したシグモイド曲線モデルが遺伝子型によらず普遍的に適用できることを示したものである。なお、本研究の成果は、共同研究により *rin* 変異体 (*rin/rin*)、ヘテロ型 (*RIN/rin*)、正常型 (*RIN/RIN*) 等の多様な果実の提供を頂いたカゴメ (株) の貢献によるところが大きい。

これら2つの論文の研究成果は、トマトの着色とエチレン生成との間に存在する生理メカニズムの解明のための糸口を与えるものであり、ポストハーベスト分野の基礎研究の進展に対する寄与や、トマトの実用的な品質制御技術の開発への応用も期待される。

(6) ま と め

(2)～(5)の研究は、それまで主として園芸学分野の研究者が研究対象としてきた青果物の品質保持に関して、化学工学、システム工学などの視点を取り入れて、ポストハーベストシステムの理解を深め、システム設計等の工学的な利用を可能としたものであり、収穫後工学

研究 (Postharvest Engineering Research) と位置づけることができる。

3. 現在の研究と今後の展望

平成22～24年度には、農林水産省の提案公募型研究事業である「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業 (略称：実用技術開発事業)」による、「コスト・環境負荷同時低減のためのバルクコンテナ物流技術の開発 (課題番号22014)」を、Manasikan Thammawong 博士 (現在JSPS外国人特別研究員)、兼田朋子博士 (現在、徳島県立農林水産総合技術支援センター) が博士研究員として参画して実施した。その成果については、本学会誌^{9)～12)}および本学会大会において報告させて頂いている。この研究において、バルクハンドリングに伴う衝撃等の物理ストレスが青果物の品質に及ぼす影響解明の一環として、定量リアルタイムPCR (qRT-PCR) によりカルシウム結合タンパク質であるCalmodulin (CaM) 等をコードするストレス関連遺伝子の発現解析を実施したが、その中核を担ったThammawong博士は、今年度の本学会奨励賞の受賞者となった。なお、本研究の実施に当たっては、食品総合研究所の生物機能制御ユニット主任研究員である伊藤康博博士にご指導頂いた。

この研究においても一つの重要な研究手法として、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) がある。筆者がLCA研究を本格的に開始したのは、2004年に筑波大学大学院博士課程を修了したROY博士を博士研究員として受け入れてからである。ROY博士は、当時の木村俊範教授の下で、パーボイルドライスの製造と品質に関する研究で学位を取得しているが、その過程でパーボイルドライス製造過程のエネルギー消費に関する研究を実施していた。筆者の方は、それまではほとんど研究例のなかったポストハーベストプロセスへのLCAの適用を構想し、生産段階を含めたLCAによる食料供給の最適化を標榜していた。両者が共同研究を進めることで、当グループのLCA研究のフィールドを食産業全般に広げることができ、研究成果をあげることができた^{13)～19)}。現在は、主として稲わらからのバイオエタノール生産のLCAについて、その後博士研究員として研究に加わった折笠貴寛博士 (現在、岩手大学准教授) とも共同で研究を実施し、グループの研究成果を報告している^{20)～24)}。

その他の研究としては、農林水産省の新規提案公募型研究事業「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業 (略称：農食事業)」により、H25年度から「地域ブランドを創出するメロンの食べごろ保証技術の開発 (課題番号25043B)」を実施している。また、同じく今年度からH24年度補正予算で開始された「機能性を持つ農林水産物・食品開発プロジェクト」の中で、「機能性を持つ農林水産物のデータベースの構築及び個人の健康状態に応じた栄養指導システムの開発 (課題番号C-1)」を担当し、

主として「健康に寄与する農林水産物データベース (DB) の開発」に取り組んでいる。この研究では、開発済みの「食事バランスDBシステム」を基礎に、栄養成分に加えて、対象農産物およびその加工品について、機能性成分の種類と含有量、機能性成分の健康への影響評価に関する科学的エビデンスデータを網羅的に収集し、それらの情報に基づく健康の維持・増進を図ることが期待されるメニューの開発を可能とするDB開発を目的としている。

これらの研究によって、地球という奇跡の惑星の一員として、人類が将来にわたって安全に暮らし健康で豊かな食生活を送ることのできる持続的社会的実現に向けて、微力を尽くしたいと考えている。

4. おわりに

この度、栄えある日本食品保蔵科学会学会賞を受賞させて頂くに当たり、ご推薦頂いた本学会副会長の小宮山美弘先生、授賞選考委員の先生方をはじめ、ご尽力頂いた皆様に心よりお礼申し上げます。

筆者が研究者としての道を歩き始めた場所は、思いもよらず公務員試験 (農業工学のうち農業機械) に合格し、就職先となった農林水産省食品総合研究所であった。大学在籍中、周囲や知人に研究機関に所属する人がほとんどおらず、研究関係の職場のことには全く知識がなかった。1982年3月8日付の食品総合研究所からの配属通知で、初めて同研究所の存在を知ったといえ、状況をご理解頂けると思う。

Wikipediaによれば、「On the Job Trainingは、企業内で行われる企業内教育・教育訓練手法のひとつで、職場の上司や先輩が部下や後輩に対し具体的な仕事を通じて仕事に必要な知識・技術・技能・態度などを意図的・計画的・継続的に指導し、修得させることによって全体的な業務処理能力や力量を育成するすべての活動である」、とのことである。研究者としての準備が全くなかった筆者の場合、まさにOJTのおかげで何とか一人前の研究者になることができたと思っている。これまでご指導頂いた諸先輩をはじめ、研究推進にご協力頂いた方々に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

最後に、日々の研究者生活を陰で支えてくれた家族に感謝したい。

文 献

- 1) HARDENBURG, R.E., WATADA, A.E. and WANG, C. Y.: The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks, USDA Handbook No.66, pp.1～130 (1986)
- 2) 近藤次郎：数学モデル—現象の数式化— (丸善、東京) (1976)
- 3) 椎名 (小野寺) 武夫・河野澄夫・岩元陸夫：シミュレーションモデルによるカット野菜包装における内部

- ガス組成の解析, 園芸学会雑誌, **56** (4), 486~492 (1988)
- 4) 椎名武夫: MA包装に関する研究の最新動向, 特集「青果物の鮮度保持包装」, 日本包装学会誌, **17** (3), 133~144 (2008)
- 5) 椎名武夫・河野澄夫・山下昭道・岩元睦夫: カットキャベツの品質保持と低温管理, 日本食品工業学会誌, **41** (2), 94~101 (1994)
- 6) 椎名武夫: 熱物質移動制御による青果物の品質保持に関する研究, 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士 (農学) 学位論文, 1~155 (2002)
- 7) 中村宣貴・徐 歩前・マナシカンタンマウオン・伊藤博孝・北川麻美子・稲熊隆博・伊藤康博・椎名武夫: トマト「桃太郎」緑熟果実の追熟過程における果皮色および果実硬度変化の積算エチレン生成量による予測, 日本食品保蔵科学会誌, **36** (2), 67~74 (2010)
- 8) 中村宣貴・タンマウオン マナシカン・金原淳司・伊藤博孝・北川麻美子・稲熊隆博・伊藤康博・北澤裕明・石川 豊・春見隆文・椎名武夫: 成熟遺伝子型の異なるトマト緑熟果実の果皮色変動予測モデル, 日本食品保蔵科学会誌, **37** (2), 61~67 (2011)
- 9) THAMMAWONG, M., KANETA, T., NAKAMURA, N., YOSHIDA, M., SOGA, A. and SHIINA, T.: Influence of impact stress on the postharvest physiological and chemical properties of cabbage heads, *Food Preservation Science*, **37** (6), 273~282 (2011)
- 10) THAMMAWONG, M., HEWAJULIGE, GANGA, N. I., KANETA T., NAKAMURA N., ITO Y. and SHIINA T.: The Calmodulin - Encoding Gene *BoCam 1*: A Sensitive Wound - Responsive Gene in Cabbage, *Food Preservation Science*, **38** (5), 15~21 (2012)
- 11) 兼田朋子・中村宣貴・タンマウオン マナスイカン・曾我綾香・吉田 誠・新實誉也・横山幸一・椎名武夫: 新規パルクコンテナ輸送に伴うダイコンの加速度および接触部位応力が損傷特性に及ぼす影響の解明, 日本食品保蔵科学会誌, **39** (2), 67~74 (2013)
- 12) 兼田朋子・中村宣貴・タンマウオン マナスイカン・北澤裕明・曾我綾香・吉田 誠・福島崇志・椎名武夫: 加振周波数と包装資材が多段積載されたダイコンの加速度, 回転, 損傷特性に及ぼす影響, 日本食品保蔵科学会誌, **39** (5), 255~261 (2013)
- 13) ROY, P., SHIMIZU, N., SHIINA, T. and KIMURA, T.: Energy consumption and cost analysis of local parboiling processes, *Journal of Food Engineering*, **76** (4), 646~655 (2006)
- 14) ROY, P., SHIMIZU, N., OKADOME, H., SHIINA, T. and KIMURA, T.: Life cycle of rice: Challenges and choices for Bangladesh, *Journal of Food Engineering*, **79** (4), 1250~1255 (2007)
- 15) ROY, P., NEI, D., OKADOME, H., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: Life cycle inventory analysis of fresh tomato distribution systems in Japan considering the quality aspect, *Journal of Food Engineering*, **86** (2), 225~233 (2008)
- 16) ROY, P., IJIRI, T., OKADOME, H., NEI, D., ORIKASA, T., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: Effect of processing conditions on overall energy consumption and quality of rice (*Oryza sativa* L.), *Journal of Food Engineering*, **89** (3), 343~348 (2008)
- 17) ROY, P., NEI, D., ORIKASA, T., XU, Q., OKADOME, H., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) on some Food Products, *Journal of Food Engineering*, **90** (1), 1~10 (2009)
- 18) ROY, P., ORIKASA, T., THAMMAWONG, M., NAKAMURA, N., XU, Q. and SHIINA, T.: Life cycle of meats: An opportunity to abate the greenhouse gas emission from meat industry in Japan, *Journal of Environmental Management*, **93** (1), 218~224 (2011)
- 19) 折笠貴寛・ロイポリトシュ・根井大介・中村宣貴・椎名武夫: 卸売市場流通におけるCO₂排出量削減の可能性, 宮城大学紀要, **4** (1), 23~28 (2010)
- 20) 折笠貴寛・徳安 健・井上貴至・小島浩司・中村宣貴・椎名武夫: 稲わら由来のバイオエタノール生産におけるエタノール変換効率の違いがコスト, CO₂排出およびエネルギー収支に及ぼす影響, 農業機械学会誌, **71** (5), 45~53 (2009)
- 21) ROY, P., TOKUYASU, K., ORIKASA, T., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: A Review of life cycle assessment (LCA) of bioethanol from lignocellulosic biomass, *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)*, **46** (1), 41~57 (2012)
- 22) ROY, P., TOKUYASU, K., ORIKASA, T., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: A techno - economic and environmental evaluation of the life cycle of bioethanol produced from rice straw by RT - CaCCO process, *Biomass and Bioenergy*, **37**, 188~195 (2012)
- 23) SRICHUWONG, S., ORIKASA, T., MATSUKI, J., SHIINA, T., KOBAYASHI, T. and TOKUYASU, K.: Sweet potato having a low temperature - gelatinizing starch as a promising feedstock for bioethanol production, *Biomass and Bioenergy*, **39**, 120~127 (2012)
- 24) ROY, R., ORIKASA, T., TOKUYASU, K., NAKAMURA, N. and SHIINA, T.: Evaluation of the life cycle of bioethanol produced from rice straws, *Bioresource Technology*, **110**, 239~244 (2012)