

論文

米飯の老化と難消化性デンプン生成

菅原正義¹

¹物質工学科 (Department of Materials Engineering, Nagaoka National College of Technology)

STARCH RETROGRADATION AND PRODUCTION OF RESISTANT STARCH IN COOKED RICE

Masayoshi SUGAWARA¹

Abstract

After rice cooking, retrogradation of starch in a cooked rice progresses quickly at under gelatinization temperature. Cold rice (aging rice) is tasteless, firm and digested slowly. My aim in this report is explained the relationship between cold rice tasteless and indexes of starch retrogradation. Starch gelatinization degree, starch whiteness index and resistant starch content that were indexes of starch retrogradation did not change remarkably of cold and aging rice that were very firm and bad eating quality by the sensory test. In spite of low resistant starch content of aging rice, the cecal content short chain fatty acids and starch content of rat fed aging rice powder were higher than that of rat fed fresh and warm rice powder.

Key Words : *cooked rice, starch retrogradation, aging, resistant starch*

1. はじめに

忘れもしない2004年10月23日午後5時56分。私は、新発田市で行われた中学生向け移動公開講座を終え高専に戻り、使った実験器具を片付けて2階にある教員室の椅子に座わり一息ついたその時である。突然の揺れ、まず縦方向の揺れで棚類が上に飛び上がり、次の横方向の揺れで倒れ、目の前の両袖机は大きな棚が倒れてきて、あっという間に潰れた。視界の中を物体が跳ねたり落ちたり倒れたりしていたが、幸いに直接ぶつかることもなく無傷ですんだ。本震が終わり一息したところに次々襲いかかる震度5強以上の余震。教員室内は滅茶苦茶でドアに到達するにも多くの転倒した物品をよけながら進む必要があり、さらに内開きのドアの前にも本棚が倒れていて戸が開かず、棚を何とかよけて廊下に出る

ことができた。3階の研究室には専攻科生が研究を行っていたので、廊下に散乱した物品をよけ、閉じた防火扉を開けて階段を登り研究室に駆けつけてみると、やはり倒壊物でドアが開かない。ドア越しに声をかけると女子専攻科生は泣きながらではあったが無事が確認できた。部屋の内と外から協力してドア付近の邪魔者を排除して何とか部屋に入ると、割れた試薬ビンから薬品が溢れ、ガラス器具の粉碎物が飛散、実験台や試薬棚等は固定していたため倒れずにすんだが、内部でガラス器具類が散乱して破損、実験台上の物が落下した状態で学生共々奇跡的なお互いの無事を喜んだ。

この地震で私たちは、高専周囲の職員宿舎の半壊認定により、長期の避難所生活を送ることになる。避難所生活の間、近隣自治体、大学・高専、企業や個人から多大なる励ましや救援物資をいただき、今

も心から感謝している。ところが実際にこの避難生活を体験してみると、これまで大きな災害の度に多くの問題点が指摘されて次第に改善されてきているはずであるが、まだまだ避難生活には問題があることを見聞・実感した。私の専門である「食」についても多くの問題を見聞した。地震当初、菓子パンやフィルム包装おにぎり、弁当などの救援食や乾パン、アルファ米などの災害用備蓄食などが提供された。これについてあまり好ましい印象はない。実際多くの体力的に弱者である老人や子供の中には、これらの食品を食べて消化不良を起こした事例を多く見聞した。

これは、なぜか。被災によるショックやストレスによって消化管機能が低下したのが主要原因の一つである。しかし、さらにこれに加えて米飯食品中のデンプンの老化が関与していると考えられる。米飯の主栄養素であるデンプンは、グルコースがグルコシド結合によって連鎖した高分子化合物である¹⁾。特に避難所で喜ばれたフィルム包装おにぎりや弁当などの米飯食品は、自衛隊やボランティアによる炊き出しが整備された地震数日後まで中越近郊で製造することが難しく、かなりの遠隔地を含む多くの地域から運ばれてきた。したがって多くの米飯食品が消費期限内ではあるが、比較的長い時間をかけて中越地域に運ばれ、さらに救援物資分配の不手際からさらに時間を経た後、各避難所に分配された。このときどのようなことが米飯におこっていたのだろうか。デンプンを生で食べることは、とろろ芋やバナナなど皆無ではないが、基本的には加熱調理後食用とする。これは、生のデンプンが美味しくなく、さらに小腸で消化されないためである。デンプンは水と共に加熱すると60~70℃程度から「糊化」をおこし、水に不溶で沈殿していたものが透明になって溶解したりヨウ素反応が消失したり多くの変化がおこる²⁾。消化酵素による消化分解性もデンプンが糊化することによって向上する³⁾。炊きたてのご飯は、美味しく消化がよい。では、炊飯後、常温で長距離輸送するとどうなるだろうか。冷や飯になる。糊化したデンプンは、糊化温度以下になると周りの水と共に、元の生デンプンに戻ろうとする現象「老化」が起こる。老化デンプンは生デンプンに性質が近いので、粘りがなく、硬く、消化が悪い。避難所で見られた消化不良は、ストレスで弱った消化管に対して、長時間輸送で老化の進んだ消化のよくないデンプンを含む米飯を食べたことが原因であることが考えられる。

しかし、災害時ではない日常において食味低下を

おこさないレベルでは、これらの消化の悪いデンプン（難消化性デンプン）の存在は、デンプンが消化吸収された後におこる血糖値の急激な上昇を抑制し、大腸に常在する腸内細菌に糖質を供給し、大腸機能を正常に保つなど多くの生理的機能性が期待されている⁴⁾。

本研究は地震被災直後に計画したもので、災害時には消化不良などの害をもたらす、平時には生理的機能性として益をもたらすデンプン老化を制御することを目的とした。まず、米の品種、炊飯条件、保存温度を変え、デンプン初期老化の指標である糊化度、難消化性デンプン、白色度への影響を検討した。次に、炊きたての飯と老化した冷や飯をラットに投与して *in vivo* における影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試米と米飯

平成16年度新潟県産こしいぶきと平成17年度新潟県産春陽を実験に用いた。両米試料は、玄米として購入し、実験使用時まで5℃の低温室内で保管した。実験使用1日前に低温室から必要分を出し、室温に戻した後、縦型試験精米機（山本製作所、VP-32T）を用いて、流量：3、白度：2の条件で3回精米を行い、精米重量を測定して精米歩合が90%になるようにした。また、精米水分を米穀水分計（ケツト科学、ライスタm5型）を用いて測定し、15~16%の範囲に入っていることを確認した。精米は、ステンレス製ボールに入れて脱イオン水を加え、手で10回攪拌後に水切りする操作を5回繰り返した後、ざるにあげて洗米した。洗米後、速やかに加水して1時間浸漬後、IH式電気炊飯器（象印、NH-KA10型）を用いて炊飯した。

2.2 炊飯条件と老化条件による影響

炊飯後の保存温度、炊飯時加水率、米品種の違いがデンプン老化と難消化性デンプン生成にあたる影響について検討した。①炊飯後の保存温度の影響については、米品種としてこしいぶきを用いて、洗米後、白米重量の1.3倍に加水し1時間浸漬して炊飯した。炊飯後、5、20℃で保存し、経時的にデンプン老化、難消化性デンプン含量を測定した。②炊飯時の加水率の影響については、米品種としてこしいぶきを用いて、洗米後、白米重量の1.1、1.2、1.3、1.4倍に加水して1時間浸漬後、炊飯した。炊飯後は5℃で保存し、経時的にデンプン老化、難消化性デンプン含量を測定した。③米品種

の影響については、米品種としてこしいぶきと春陽の2品種を用いて、洗米後、白米重量の1.3倍に加水し1時間浸漬して炊飯した。炊飯後は5°Cで保存し、経時的にデンプン老化、難消化性デンプン含量を測定した。

(1) 米飯試料粉末の調製

①から③の実験において炊飯後の保存中、経時的(0、1、3、24、48時間)に採取した米飯試料は、速やかに液体窒素中に入れ凍結した。凍結後、真空凍結乾燥機(タイテック、VD-259F)を用いて凍結乾燥、ミキサーを用いて粉碎し500µmの篩をパスした粉末を米飯粉末としてデンプン糊化度、難消化性デンプン含量の測定に用いた。

(2) デンプン老化と難消化性デンプン含量の測定

各米飯試料のデンプン老化の程度は、貝沼らのβ-アミラーゼ-プルラナーゼ法(BAP法)⁵⁾によるデンプン糊化度の変化と凍結前の米飯の白色度の変化を測定した。また、難消化性デンプン含量は、Barryらの方法⁶⁾によって測定した。

糊化度の測定は、米飯粉末80mgをポッター型ガラスホモジナイザーに入れ、純水8mlを加えて分散した。この分散した溶液2.0mlを2本の25ml容メスフラスコに分注し、1本は0.8M酢酸緩衝液(pH6.0)で定容とし試料溶液とした。もう1本は0.2mlの10M水酸化ナトリウム溶液を加え、50°C湯浴中で4分間加温し完全糊化させ、2M酢酸溶液1.0mlを加えて中和した。0.8M酢酸緩衝液(pH6.0)で定容とし完全糊化試料溶液とした。両試料溶液4mlに酵素溶液(β-アミラーゼ1mg(長瀬産業、1.5×10⁴AUN/g)、プルラナーゼ17mg(林原生物化学研究所、crude、2000unit/g)を0.8M酢酸緩衝液(pH6.0)10mlに溶解)1.0mlを加え、40°C振盪恒温水槽中で30分間加温した。反応終了後、沸騰浴中で5分間加熱して酵素を失活させ、水で5倍希釈してSomogyi-Nelson法^{7,8)}を用いて還元糖、フェノール硫酸法⁹⁾を用いて全糖を測定した。還元糖と全糖の測定結果から完全糊化試料溶液の分解率を100として、試料溶液の分解率を算出した。

米飯の白色度は、各試料を経時的に採取後、ガラスシャーレ中に入れ、分光測色計(コニカミノルタ、CM-3500d)を用いてハンター白色度(WI(Hunter))を測定した。

難消化性デンプンは、Barryらの方法⁶⁾に準拠した測定キット(Megazyme、Resistant starch assay kit、Ireland)を用いて測定した。試料100mgをキャップ付き試験管に入れ、酵素液(アミログルコシダーゼ10µl(3,300unit/ml)、腭α-アミラー

ゼ100mg(3unit/mg)を0.1Mマレイン酸緩衝液(pH6.0)10mlに溶解)4.0mlを加え、37°C振盪恒温水槽中(100往復/分)で正確に16時間加温した。99%エタノール4.0mlを加え、3,000rpmで10分間遠心分離をおこない沈殿を分離、沈殿に50%エタノール8mlを加え攪拌して遠心分離後上清を捨てる操作を2回おこなって洗浄した。沈殿に2M水酸化カリウム溶液2mlを加え、氷水中で20分間攪拌した後、1.2M酢酸ナトリウム緩衝液(pH3.8)8mlを加え50°Cで30分間加温した。生成したグルコースをグルコースオキシダーゼ-プルラナーゼ法¹⁰⁾を用いてグルコースを測定、難消化性デンプン含量を算出した。

2.3 老化デンプンのラットにおける消化性

炊飯後5°Cで24時間保存して老化させた老化飯試料(aging rice; AR)と炊飯直後の炊きたて飯試料(fresh rice; FR)を調製し、ラットに投与して*in vivo*における消化性について検討した。

(1) 米飯試料粉末の調製

平成16年度新潟県産こしいぶきを実験に用いた。加水率1.3で炊飯後、炊きたて飯試料は炊飯後速やかに液体窒素を用いて凍結、老化飯試料は炊飯後5°Cで24時間保存して凍結した。両凍結試料は、真空凍結乾燥機を用いて乾燥、ミキサーを用いて粉碎し1mmの篩をパスした粉末を用いた。試料の一般成分を常法により測定、糊化度をBAP法⁵⁾、難消化性デンプン含量をBarryらの方法⁶⁾を用いて測定した。各試料の分析値を表-1に示す。

表-1 Composition of fresh and aging rice powders.

| | | Fresh rice | Aging rice |
|-----------------------|-----|------------|------------|
| Water | (%) | 8.3 | 8.1 |
| Ash | (%) | 0.2 (0.2) | 0.2 (0.2) |
| Protein | (%) | 4.6 (5.0) | 4.6 (5.0) |
| Fat | (%) | 0.1 (0.2) | 0.1 (0.2) |
| Resistant starch | (%) | 0.3 (0.3) | 0.6 (0.7) |
| Retrogradation degree | | 98 | 83 |

(): DS%

(2) 動物実験

実験動物としてWistar系雄ラット(日本チャールスリバー(株)、SPF/VAF Crlj: WI)24匹を用いた。ラットは4週齢で導入後、7日間動物実験環境に馴化させるため、対照飼料を用いて予備飼育をおこなった。1匹ずつ独立したステンレス金網底ケージに入れ、準閉鎖式実験動物飼育装置(名文館器械工業NK式)を用いて温度:24°C、湿度:50~60%、8:00~20:00を暗期、20:00~8:00を明期とした昼夜逆転の制御環境下で自由給餌、給水で飼育した。予

備飼育後、各試験群の平均体重の差が小さくなるように留意して、1群8匹、3試験群（対照群、炊きたて飯群（FR）、老化飯群（AR））に群分けを行った。

各試験群は、予備飼育と同様の条件で各試験飼料を用いて9日間飼育し、体重、飼料摂取量を毎日測定、本飼育4日目から採糞をおこなった糞は、飼育ケージの受け皿上にアルミ箔製オープントースターマット（日本製箱、大型）を1匹ずつ敷き、毎日採糞をおこない、ラット毎にまとめて凍結した。1日当たりの糞湿重量を測定した。

動物実験に用いた飼料の組成を表-2に示す。対照飼料はAIN-76A飼料組成¹¹⁾のショ糖をすべてアルファコーンスターチに置換した組成であり、各試験飼料は対照飼料のアルファコーンスターチを米試料に置換した。

表-2 Composition of test feed. (g/kg of diet)

| | Control | FR | AR |
|------------------------------|---------|-----|-----|
| Casein | 200 | 165 | 165 |
| Corn oil | 50 | 50 | 50 |
| DL-methionine | 3 | 3 | 3 |
| Choline hydrogen tartrate | 2 | 2 | 2 |
| Mineral mixture ^a | 35 | 35 | 35 |
| Vitamin mixture ^a | 19 | 19 | 19 |
| Corn starch (pregelatinize) | 680 | 35 | 35 |
| Experimental rice powder | 0 | 680 | 680 |
| Cellulose powder | 20 | 20 | 20 |

^a AIN-76 mixture (Oriental Yeast Co., Ltd)

^b Rice: Freeze-dried fresh cooked rice (FR) and aging rice for 24 hours at 5°C after cooking (AR).

10日目終体重測定後、ラットはペントバルビタール（大日本製薬、ネンブタール注）腹腔内注射により麻酔し、開腹後心臓穿刺により採血し失血死させ、速やかに盲腸を摘出した。

摘出した盲腸は、速やかに氷上で切開し内容物を3つに分け（水分測定、pH測定、短鎖脂肪酸測定用）した。盲腸内容物 pH は、盲腸内容物の一部を秤取して4倍量の純水を加え良く懸濁後、試験管用ガラス電極（堀場製作所、6378-10D）を用いて測定した。盲腸内容物短鎖脂肪酸は、予め1mlの純水を分注した氷冷マイクロチューブ中に盲腸内容物の一部を加え、遠心分離上清を高速液体グラフ装置（島津製作所、LC-20A）を用いて測定した（カラム：Aminex HPX-87H（300 mm×7.8 mm、BioRad）、移動相：25mM 硫酸、流速：0.6 ml/分、カラム温度：40°C、検出器：電気伝導度検出器）。

飼育期間中採取してあった糞と盲腸内容物の水分は、アルミホイル製皿に糞と盲腸内容物の一部をと

り、105°C常圧乾燥法によって測定した。また、糞は80°Cの送風乾燥機、盲腸内容物は真空凍結乾燥機を用いて乾燥した。糞と盲腸内容粉末は、2.5%塩酸を加え100°C150分間還流下で加水分解し、1M水酸化ナトリウムで中和後、上清中のグルコースをグルコースオキシダーゼ-パーオキシダーゼ法¹⁰⁾を用いて測定し、デンプン含量を測定した

(3) 統計解析

各測定項目は測定値を平均値±標準誤差で示し、有意差の検定は市販パソコン用解析パッケージ（SAS インスティテュート、JMP Ver.5）を用いて、一元配置分散分析後、Tukey-Kramer の HSD 検定法を用いて危険率 5%以下での有意差を検定した。

3. 実験結果と考察

3.1 炊飯条件と老化条件による影響

図-1 に炊飯後の保存温度の違いによるデンプン糊化度と難消化性デンプンの変化を示す。

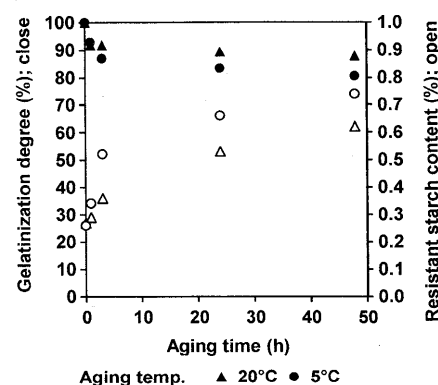


図-1 Effect of aging temperature on starch aging and resistant starch production.

Rice cultivar; Koshihikari, Water/rice ratio; 1.3

糊化度の低下（老化の進行）は、20°Cに比較して5°Cのほうが速く、難消化性デンプン生成速度も20°Cに比較して5°Cのほうが速いことが確認された。白色度は、炊きたて時である0時間目に68.0を示し、5、20°C共に1時間後の68.3に増加し、その後変化しなかった。したがって以後の実験は、すべて老化がおりやすい5°C保存を用いた。

図-2に炊飯後における米に対する加水率の違いによるデンプン糊化度と難消化性デンプンの変化を示す。糊化度の低下と難消化性デンプンの生成は、加水率1.1<1.2<1.3<1.4となった。炊飯適量と考えられる1.3と1.4の差は少なく、1.4の炊きたて状態

の飯は、軟らかい傾向が認められた。また、1.1と1.2では飯が硬い傾向が認められ、炊きたて時の糊化度も各々94.8、96.4%となり炊飯時の糊化も完全でないことが示唆された。加水率の差は、老化速度に大きな影響が認められなかったが、難消化性デンプン生成速度には差が認められた。炊飯時の糊化が不完全な加水率1.1、1.2に比較して、糊化が完全な1.3、1.4での難消化性デンプン生成速度が遅かった。

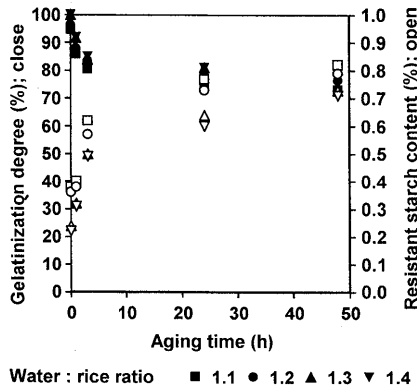


図-2 Effect of water/rice ration at cooking on starch aging and resistant starch production. Rice cultivar; Koshiibuki, Aging temp.; 5°C

また、白色度は炊きたて時、加水量 1.1 : 68.3、1.2 : 68.3、1.3 : 67.9、1.4 : 67.8 であったが、その後 1 時間目にすべて 68.3 に増加し、その後変化しなかった。したがって、炊飯時の水分が不足糊化が不十分な硬い飯は、老化進行速度と難消化性デンプン生成速度が速く、完全に糊化した柔らかめの飯は遅いことが確認された。なお、以後の実験では炊飯が完全な条件であり軟らかくもならない加水量 1.3 の条件を用いた。

図-3 に米品種の違いによるデンプン糊化度と難消化性デンプンの変化を示す。

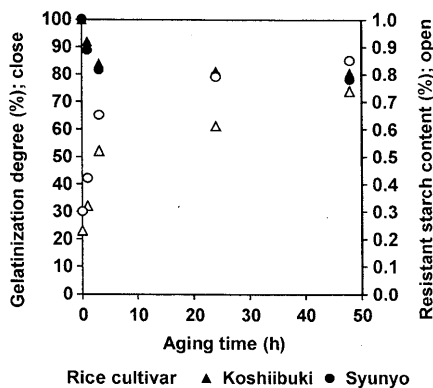


図-3 Effect of rice cultivar on starch aging and resistant starch production. Water/rice ratio; 1.3, Aging temp.; 5°C

老化進行速度には、2 品種間の顕著な差は認められなかったが、難消化性デンプン生成速度には差が認められた。春陽は、こしいぶきに比較して難消化性デンプンの生成速度が速かった。白色度は、炊きたて時、こしいぶき : 68.1、春陽 : 68.5 であったが、その後 1 時間目にすべてこしいぶき : 68.3、春陽 : 68.7 に増加し、その後変化しなかった。春陽は、農業・生物系特定産業技術研究機構中央農業総合研究センター北陸研究センターにおいて育成された新形質米品種であり、米中のタンパク質であるグルテリンが少なく、デンプンを構成するアミロース分子の割合が高い品種である。アミロースは、分枝のない直鎖の分子で老化時の立体障害がないことからアミロペクチンに比べて老化速度が速いことが知られている。

今回、低温保存、低水分、アミロース含量が高いなど、一般的に老化速度（冷や飯化速度）が速い条件でも、老化指標の変化が少なかった。今回用いた糊化度、難消化性デンプン、白色度などの指標は、米飯の老化による初期変動を顕著に反映しているとは言えないことが確認された。これらの項目は、デンプン老化の指標としてよく採用されているものであるが、米飯では官能的な食味低下に比べて変動が少なかった。単離デンプン粒の老化とは異なり、米飯はデンプン粒が炊飯によって壊れかけた米細胞内でアミロプラストを形成して存在し¹²⁾、また、米粒構造の影響や共存する他成分などの影響により単純なデンプンの老化のみで米飯保存中の食味低下を判断するのは難しいことが考えられる。物性変化によって食味低下を測定する試みもなされているが、米飯の物性測定値は、測定装置の機種に依存する点が大きく、広く比較することが難しい。さらに粒食である米飯は、米粒間の相互影響も食味に影響することが考えられるが、現在よく使われている 1、3 粒法などの物性測定¹³⁾では、それを反映することができない。貝沼の伝導型微少熱量計を用いた老化熱を測定する報告¹⁴⁾や井川らによる白色度、示差走査熱量計、X 線回折による初期老化評価の報告¹⁵⁾もあるが、いずれも初期老化の鋭敏な指標として問題がある。今後、米飯の官能的な食味低下を鋭敏に反映する指標の確立が重要であると考えられる。

3. 2 老化デンプンのラットにおける消化性

実験期間中、各ラットは恒常な成長を示した。ラットの成長結果を表-3 に示す。

表-3 Effect of fresh and aging rice on rat growth. (g)

| | Control | | FR | | AR | |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Initial body weight | 151 ± 2 | 151 ± 3 | 151 ± 2 | 151 ± 3 | 151 ± 2 | 151 ± 3 |
| Final body weight | 222 ± 2 | 221 ± 4 | 222 ± 3 | 222 ± 4 | 222 ± 3 | 222 ± 4 |
| Body weight gain | 72 ± 1 | 71 ± 3 | 72 ± 2 | 71 ± 3 | 72 ± 2 | 71 ± 3 |
| Carcass weight | 168 ± 4 | 167 ± 3 | 167 ± 5 | 167 ± 3 | 167 ± 5 | 167 ± 3 |
| Feed intake (g/d) | 18.5 ± 0.1 | 18.4 ± 0.1 | 18.5 ± 0.1 | 18.4 ± 0.1 | 18.5 ± 0.1 | 18.4 ± 0.1 |
| Feed efficiency * | 0.4 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 |

* Values are gram of body weight gain / gram of feed.

Values are means ± SEM (n=8)

FR: freeze-dried fresh cooked rice, AR: freeze-dried aging rice for 24 hours at 5°C after cooking.

体重、内臓摘出屠体重、飼料摂取量、飼料効率に差が認められず、米飼料投与によるラットの成長への影響は認められなかった。

糞と盲腸内容物に関する性状を表-4 に示す。

表-4 Effect of fresh and aging rice on rat cecal and fecal properties.

| | Control | | FR | | AR | |
|-------------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cecal content: | | | | | | |
| Weight (g) | 2.8 ± 0.5 | 3.0 ± 0.4 | 3.4 ± 0.4 | 3.4 ± 0.4 | 3.4 ± 0.4 | 3.4 ± 0.4 |
| pH | 7.2 ± 0.1 | 7.2 ± 0.2 | 6.8 ± 0.1 ^{ab} | 6.8 ± 0.1 ^{ab} | 6.8 ± 0.1 ^{ab} | 6.8 ± 0.1 ^{ab} |
| Water (%) | 72 ± 2 | 70 ± 4 | 74 ± 2 | 74 ± 2 | 74 ± 2 | 74 ± 2 |
| Starch (mg/g) | 8.1 ± 0.4 | 8.2 ± 0.7 | 9.8 ± 0.5 ^a | 9.8 ± 0.5 ^a | 9.8 ± 0.5 ^a | 9.8 ± 0.5 ^a |
| Acetate (μmol/g) | 51 ± 8 | 53 ± 7 | 63 ± 5 | 63 ± 5 | 63 ± 5 | 63 ± 5 |
| Propionate | 19 ± 4 | 20 ± 5 | 22 ± 5 | 22 ± 5 | 22 ± 5 | 22 ± 5 |
| Butyrate | 9 ± 2 | 8 ± 2 | 12 ± 4 | 12 ± 4 | 12 ± 4 | 12 ± 4 |
| Feces: | | | | | | |
| Weight (mg/day) | 510 ± 56 | 518 ± 63 | 608 ± 48 | 608 ± 48 | 608 ± 48 | 608 ± 48 |
| Moisture (%) | 21 ± 2 | 23 ± 3 | 25 ± 3 | 25 ± 3 | 25 ± 3 | 25 ± 3 |
| Starch (mg/g) | 3.0 ± 1.1 | 3.4 ± 1.3 | 3.3 ± 1.6 | 3.3 ± 1.6 | 3.3 ± 1.6 | 3.3 ± 1.6 |
| Daily output (mg) | 1.4 ± 0.5 | 1.6 ± 0.4 | 1.7 ± 0.5 | 1.7 ± 0.5 | 1.7 ± 0.5 | 1.7 ± 0.5 |

Values are means ± SEM (n=8)

FR: freeze-dried fresh cooked rice, AR: freeze-dried aging rice for 24 hours at 5°C after cooking.

^a Significantly different from the control group ($p < 0.05$).

^b Significantly different from the FR group ($p < 0.05$).

盲腸内容物では、pH が対照、FR と比較して AR で有意な低下を示した。これにともない盲腸内有機酸濃度は、酢酸、プロピオン酸、酪酸ともに対照、FR と比較して AR で増加傾向を示した。しかし、pH、有機酸ともに対照と FR 間に差は認められなかった。また、盲腸内デンプン濃度は、対照と比較して AR で有意な増加を示し、FR と比較しても AR で増加傾向を示した。しかし、対照と FR 間に差が認められなかった。

糞重量は、対照、FR と比較して AR で増加する傾向が認められた。また、糞中デンプン濃度、1 日当たりの排泄量ともに 3 試験群間に差が認められなかった。

以上の結果より盲腸内容物の pH 低下は、酢酸、プロピオン酸、酪酸などの短鎖脂肪酸濃度の増加によることが示唆された。これらの短鎖脂肪酸は、盲腸をはじめとする大腸内に常在する腸内細菌が、消化吸収されなかったデンプンや食物繊維などの発酵性多糖類を発酵した結果生成すると考えられる¹⁶⁾。盲腸内で生成した短鎖脂肪酸によって盲腸内 pH が低下すると、低 pH 条件で増殖できない大腸菌やウエルシュ菌をはじめとする腸内腐敗細菌の増殖が抑制され、腸内環境が改善される¹⁷⁾。大腸内の糖質が適度に豊富である場合、腸内細菌は糖質を主エネルギー源として利用し、その結果短鎖脂肪酸が生成するが、糖質が少ない場合、腸内細菌はタンパク質由来のアミノ酸をエネルギー源として利用し、その結果、分岐鎖脂肪酸、アンモニア、ヒスタミンなどの生理活性アミン、フェノール、インドール、スカトール、硫化水素など有害成分が生成する¹⁷⁾。また、糖質から生成する酢酸やプロピオン酸は、盲腸から吸収され宿主のエネルギー源として利用されるほか、プロピオン酸は肝臓におけるコレステロール合成を抑制するという報告¹⁸⁾もあり、高コレステロール症などの脂質代謝異常の改善が期待されている。酪酸は、大腸上皮細胞のエネルギー源として利用され、大腸機能の維持に必須であると考えられている。また、生成した短鎖脂肪酸は、大腸の蠕動運動を刺激し、内容物の排泄を促進すると考えられ、便秘改善効果を有する。

今回の実験では、AR のみで、盲腸内デンプン増加、pH 低下、短鎖脂肪酸増加、糞排泄重量の増加が認められた。これらの現象は、AR 中のデンプンの一部が消化吸収されずに盲腸にまで到達し、腸内細菌に発酵され、その結果として細菌菌体の増加により糞排泄量が増加し、糞中デンプンは増加せずに AR 中の消化されなかったデンプンは、腸内細菌によって完全に発酵されたと考えられる。

しかし、分析による FR と AR の難消化性デンプン含量は、各々 0.3、0.7% であり非常に少ない。ラット盲腸内で実際に発酵されたデンプン量を推定することは本実験のデータからはできないが、この難消化性デンプンの分析値では、説明ができない。実際に盲腸に消化吸収されずに到達し発酵されるデンプン量は、現在使用されている難消化性デンプンの分析値より大きく、FR と AR の差も大きいことが考えられる。今後、実際の *in vivo* に即した難消化性デンプン測定法の必要性がある。

今回の米飯老化の検証と老化デンプンの盲腸内発酵について行った実験では、官能的食味低下に比較

して物性値や分析値の変化が小さく、その評価が困難なことがわかり、さらに食味低下（冷や飯化）にともなって難消化性デンプン測定法には反映しない消化吸収されずに大腸に達する非消化デンプンが存在することが明らかになった。災害時に、比較的弱い老人や子供に認められた消化不良も、冷や飯化した米飯食品による非消化デンプン増加が原因していることも考えられる。これらの非消化性デンプンは、災害以外の平常時には、適度な大腸への糖質供給源として有効であると考えられるため、米飯の初期老化の評価法と正味の非消化性デンプン量の評価法の開発が求められる。

4. まとめ

この研究は、米飯老化時の食味低下と相関性を持って変化する指標を明らかにし、その指標を用いて米飯デンプン老化の制御条件を検討すること、米飯が老化した結果、生成する難消化性デンプンの生理的意義について検討することを目的としておこなった。しかし、デンプン老化に関与する指標は、米飯の官能的食味低下に比べて変動が小さく、指標として不十分であった。また、米飯老化時に生成する難消化性デンプン量は、現在広く用いられている測定法では一部しか検出されないが、実際には消化吸収されずに大腸に達して発酵されるデンプンが存在することがわかった。以上の結果から、現行の米飯老化の指標、生成した難消化性デンプンの測定法には問題が多く、評価系の開発が望まれる。

災害食は、食べ物さえあればよいという発想によって考えられる場合が多いが、災害時でも温かで美味しい（平常時の美味しいとは違った）元気が出る食物が、被災者の二次被害予防の点から重要となる。「緊急時だから贅沢だ」というのは、被災して疲労と多くのストレスにさらされる現代の避難現場にはそぐわない。一般的に災害では直後の一次被害ばかりが報道されるが、一次被害は規模も小さくその復旧は比較的速い。大きな被害を被災者、特に災害弱者にもたらし、その復興が困難な二次被害は、あまり報道されず被災地以外では無関心である。生活復興に時間がかかると、その間に新たな二次災害が発生し、さらに復興が遅れるという負のスパイラルに入りこみ、災害の総被害がどんどん増大していく。災害後、早い段階で復興に取り組もうという気力や元気を与えるのが、「食」である。被災直後の温かく美味しい食事は、被災者に元気を与える。このよ

うな観点から、デンプン老化の制御により被災地に日本人に元気を与えてくれる美味しい米飯の提供は今後とも重要な課題である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(C)、平成17-19年度、課題番号17500571、研究課題：米飯炊飯後の難消化性澱粉生成とその腸内細菌叢に与える影響）によって行った。また、本研究は、平成14~19年度に在籍した卒業研究生、専攻科生の助力により行われたものでここに感謝する。

参考文献

- 1) 馬場忠：澱粉の構成成分とその化学構造，澱粉・関連糖質実験法（中村道徳，貝沼圭二編），pp. 83-94，学会出版センター，1986.
- 2) 渋川祥子，杉山久仁子：加熱に伴う食品成分の変化，加熱食品の科学（渋川祥子編），pp. 74-103，朝倉書店，1996.
- 3) 合田敏尚：糖質の管腔内消化，消化・吸収（武藤泰敏編），pp. 237-239，第一出版，2002.
- 4) 早川享志，柘植治人：デンプンの摂取と健康 難消化性デンプンの生理機能，日本食物繊維研究会誌，Vol. 3，pp. 55-64，1999.
- 5) 貝沼圭二，松永暁子，板川正秀，小林昭一： β -アマラーゼ-プルラナーゼ (BAP) 系を用いた澱粉の糊化度、老化度の新測定法，澱粉科学，Vol. 28，pp. 235-240，1981.
- 6) Barry, V., McCleary, B.V. and Monaghan, D.A. : Measurement of Resistant Starch, *J. AOAC international*, Vol. 85, pp. 665-675, 2002.
- 7) Somogyi, M. : Notes of Sugar Determination, *J. Biol. Chem.*, Vol. 195, pp. 19-23, 1952.
- 8) Nelson, N. : A Photometric Adaptation of the Somogyi Method for the Determination of Glucose, *J. Biol. Chem.*, Vol. 153, pp. 375-380, 1944
- 9) Dubois, M., Giles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. : Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *Anal. Biochem.*, Vol. 4, pp. 330-334.
- 10) Papadopoulas, N.M. and Hess, W.C. : Determination of neuraminic (sialic) acid, glucose and fructose in spinal fluid, *Arch. Biochem. Biophys.*, Vol. 88, pp. 167-171, 1960
- 11) Bieri, J.G. : Second Report of the ad hoc Committee on Standards for Nutritional Studies, *J.Nutr.* Vol. 110, pp. 1726 (1980)
- 12) 大坪研一：米の形態，米の科学（石谷孝佑，大坪研一

- 編) , pp. 13-18, 朝倉書店, 1995
- 13) 岡留博司, 豊島英親, 須藤充, 安東郁男, 沼田憲治, 堀末登, 大坪研一: 米飯1粒の多面的物性測定に基づく米の食味評価, 日本食品科学工学会誌, Vol. **45**, pp. 698-407, 1998
- 14) 貝沼やす子, 佐原秀子, 原田茂治: 米飯の老化熱とテクスチャーの関係, 日本食品科学工学会誌, Vol. **51**, pp. 665-671, 2004.
- 15) 井川桂子, 菊池智恵美, 兼平咲江, 村川由紀子, 居尻哲: 米飯における初期老化の評価方法, *J. Appl. Glycosci.*, Vol. **49**, pp. 29-33, 2002
- 16) 原健次: 短鎖脂肪酸の生理活性物質としての意義, 短鎖脂肪酸の生化学と応用, pp. 1-31, 幸書房, 2000.
- 17) 光岡知足: 腸内代謝, 腸内菌叢の分類と生態, pp. 303-339, 食生活研究会, 1986.
- 18) Kishimoto, Y., Wakabayashi, S. and Takeda, H. : Effects of intravenous injection and intraperitoneal continual administration of sodium propionate on serum cholesterol levels in rats., *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, Vol. **41**, pp.73-81, 1995.

(2008. 1. 22 受付)