ジャガイモ生でんぷんのラット消化管内における消化過程

多田 洋, 河合 文雄

甲子園大学栄養学部栄養学科

Digestive Process of Potato Starch Granules in Rat Alimentary Tract

Hiroshi TADA, Fumio KAWAI

Faculty of Nutrition, Koshien University, Takarazuka, Hyogo

Raw potato starch is very difficult to be digested *in vitro* and also *in vivo*. We confirmed the digestive nature of potato starch comparing with other starches and studied the mechanism or process of digestion of raw starch *in vivo* using this potato starch.

Observation of starch granules taken from some parts of the alimentary tract of rat fed the raw potato starch diet under the optical and the scanning electron microscope revealed that the destructive process had already begun in the stomach: many granules with fissure or ditch was found in the contents of stomach and this fissure seemed to be widened and scooped out by the action of amylase in small intestine.

In order to make clear the "gastric factor," we examined the effect of amylase and hydrochloric acid treatment and drew an inference that a synergetic action of salivary amylase and hydrochloric acid in gastric juice carries out the first step of the destructive process of starch granules.

(Received July 26, 1976)

生でんぷんの *in vivo* における消化性については、従来より多くの研究があり、わが国で普通に利用できる生でんぷんの中では、ジャガイモ生でんぷんがとくに消化性が悪いことが知られている^{1)~7)}。最近、ジャガイモでんぷんなどの生でんぷんの消化についての研究に走査型電子顕微鏡が用いられるようになり、消化管内における消化機構がしだいに明らかにされてきている^{8)~10)}。

著者らは、生でんぷんの消化機構を明らかにする目的で、とくに消化性の悪いジャガイモ生でんぷんを用いて実験を行なった。まず、ジャガイモ生でんぷんの消化特性を明らかにするために、種々の生でんぷんの試験管内およびラット消化管内での消化性を調べ、従来の知見を再確認した。ついで、ラットにおけるジャガイモ生でんぷん粒の消化過程を知るために、消化管内より回収したでんぷん粒の構造変化を、光学ならびに走査型電子顕微鏡的観察により調べた。その結果、炭水化物の消化に対してあまり大きな働きをしていないと思われていた胃内で、重要な作用を受けていることが明らかになったので、その作用を解明するために、あわせて二、三の実験を行なった。

実験方法

1. ラットおよびでんぷん

本研究に使用したラットは、いずれもウィスター系雄である。飼料中でのでんぷんの種類を変えて消化率を測定した実験では、初体重約80gの幼ラットを、他の実験では200g以上の成ラットを使用した。ジャガイモでんぷんは、とくにことわらない限り市販のでんぷんを使用した。他のトウモロコシ、コムギ、サツマイモでんぷんは、すべて市販のものを使用した。コメの場合はでんぷんが入手できなかったため、実験室で製粉したコメ粉をでんぷん試料として使用した。

2. ラットにおける消化率の測定

ラットにおける消化率は、Table 1の組成の飼料を毎日重量を計って与え、エサの残りと糞とを別々に回収し、105°Cで1日乾燥して重量を計り、次の計算式により求めた。

$$\text{消化率(\%)} = \left\{ \frac{(\text{でんぷん摂食量} - \text{排泄量})}{\text{でんぷん摂食量}} \right\} \times 100$$

(ここで、でんぷん摂食量 = (給餌量 - 残量) × 飼料中でんぷん含有率。いずれも乾燥重量換算)

Table 1. Composition of diet.

Starch*	77(%)
Casein	10
Oil**	8
Salt mixture***	4
Vitamin mixture****	1

* Potato, corn, sweet potato, wheat starch.

** Soybean oil (80%) + liver oil (20%).

*** After A. E. Harper (*J. Nutr.*, 68, 405, 1959)

**** Final concentration of each water-soluble vitamin in the diet is the same as that of the Harper's Diet (*ibid.*).

1. Raw starch diet is prepared by mixing with water.
2. α -Starch diet is prepared by heating the raw starch diet in the electron range.
3. Rice starch diet: rice flour 82 (%), casein 5, oil 8, salt mix. 4, vitamin mix. 1.

3. 試験管内加水分解率の測定

試験管内の加水分解率測定は、次の手順によった。1) でんぷん試料 200 mg を 10 ml の 0.02 mol リン酸バッファー (pH=7, 0.0067 mol NaCl を含む) に懸濁し、10 ml の酵素液 (酵素 200 mg を 100 ml の同じバッファーに溶かしたもの) を加えて振とうしながら、37°C にインキュベートする。2) 10, 20, 30, 60, 120, 180 分ごとに 2 ml ずつ反応液を取り出し、別に用意した 2 ml のジニトロサリチル酸試薬 (ジニトロサリチル酸 2 g, ロッセル塩 60 g, NaOH 3.2 g を水に溶かして 200 ml 溶液にしたもの) の入った試験管に入れてよく混ぜる。3) 沸騰水中に 5 分間つけて発色させた後、氷水中で急冷し、蒸留水を加えて 20 ml にした後、540 m μ の波長で

O. D. を測定する。4) 分解産物はすべてマルトースであるとみなし、既知濃度のマルトース溶液で同じ要領で O. D. を測定し、検量線を引いておく。このとき、検量線はほぼ $y=1/2x$ (y : O. D. 値, x : マルトース濃度 mg/ml) であった。5) 測定した O. D. 値より、次の計算式で加水分解率を算出した。

$$\text{加水分解率}(\%) = \{(2 \times 2 \times \text{O. D.}) \div (0.1 \times \text{でんぷん試料重量} \times \text{でんぶん価} \times 1.06)\} \times 100$$

(ここで、でんぶん価はウィルステッター法により求めた。1.06 という値は、でんぶん基質 1 に対して加水分解してできるマルトースは 1.05 であるからである)。

4. 酵 素

市販のブタ膵臓のパンクレアチンと、実験室で調製したラット膵臓アセトンパウダーを使用した。後者はラットより摘出した膵臓を急冷し、冷却アセトン中でホモゲナイズし、冷却遠沈して上澄を捨てる操作を繰り返して脂肪と水分を取り除き、アセトンを飛ばして粉末としたものである。

なお、他の詳細については、個々の実験結果の項に述べる。

実 験 結 果

1. 各種でんぷんの *in vivo* と *in vitro* における消化性

Table 1 の組成の飼料で、でんぷんとして、ジャガイモ、サツマイモ、トウモロコシ、コムギ、コメででんぷんを用い、1つのでんぷん飼料につき、生でんぷん食と糊化でんぷん食に調製して幼ラットを各区 2 匹ずつ 14 日間飼育し、体重と消化率を測定した。生でんぷん食は、飼料をそのまま水でといて与え、糊化でんぷん食は生でんぷん食を電子レンジに約 2 分間かけて、飼料が透明にな

Table 2. Digestibility of starches in rat.

Starch		Gain in body weight (2 weeks)	Starch			Coeff. of digest.
			Eaten	Excreted	Utilized	
Potato	raw	55 (g)	182 (g)	87 (g)	95 (g)	52 (%)
	α	74	169	7	162	96
Corn	raw	80	172	3	169	98
	α	78	160	6	154	96
Sweet potato	raw	61	144	4	140	97
	α	89	200	7	193	97
Wheat	raw	55	139	3	136	98
	α	83	182	5	177	97
Rice	raw	109	206	6	200	97
	α	115	221	8	213	96

Diet composition: starch 77(%), casein 10, oil 8, salt mixture 4, vitamin mixture 1.

ったのを確認して与えた。その結果は各区2匹ずつの平均値なので、予備実験の域を出ないが、Table 2のごとく、ジャガイモ生でんぷん飼料のでんぷんの消化率52%を除いて、ジャガイモ糊化でんぷんや他の生、糊化でんぷんの消化率はいずれも96%以上で差はなく、消化は良好であった。またサツマイモ、コムギでは生、糊化で消化率に差がないにもかかわらず体重増加量に差がでたが、体重増加は消化率に直接関係なく、吸収した量に比例している。

これら飼料に使用した生でんぷん試料を基質とし、酵素にラット膵臓アセトンパウダーを使用して試験管内加水分解率を測定したところ、Fig. 1のごとく他のでんぷんでは3時間で30%以上の加水分解率を示したが、ジャガイモ生でんぷんでは約8%と低かった。このように、いずれの場合もジャガイモ生でんぷんが他のでんぷんと比較して著しく消化しにくいということが再確認できた。

2. ラットの腸内細菌の影響

成熟雄ラットを用いて、ジャガイモ生でんぷん飼料にスルファ剤のスルファニルアミドを1%、あるいは抗生物質のカナマイシンを0.3%混入して、各3匹のラットに与え、投与前、投与後と比較して、腸内細菌の働きを抑えて消化率が低下するかどうかを調べたところ、Table 3のように投与前、投与中、投与後と消化率に変化はなかった。

3. ラット消化管から回収したジャガイモでんぷん粒の性状

成熟雄ラットを1日絶食させた後、ジャガイモ生でんぷん飼料を摂食させて3時間後に解剖して消化管を胃、小腸、盲腸に分けて内容物を回収し、水洗・遠沈をくり返して風乾したでんぷんを基質とし、市販のパンクレアチンを酵素として試験管内で消化性を調べたところ、Fig. 2のように各消化管から回収したでんぷん粒は、明らかに元の生でんぷんより消化性が高くなっており、とくに胃から回収したでんぷん粒の消化性が高くなっていった。

また、胃、小腸上・中・下部、盲腸、大腸の6部位より先と同じ方法で回収したでんぷん粒について、光学ならびに走査型電子顕微鏡で観察した。光学顕微鏡の観察は試料を水でマウントし、走査型電顕には試料を炭酸ガス臨界点乾燥し、金蒸着して観察した。その結果は、Fig. 4~Fig. 15に示す。顕微鏡観察により明らかになったことを列挙すると、(1)胃から回収したでんぷん粒は表面がざらついている (Fig. 11) が、そのまま表面から一様に消化されるのではないこと、(2)胃から回収したでんぷん粒には傷がついたものや、溝状にはれたものが多数観察される (Fig. 5, 11) が、それらの率は小腸を下るにつ

Fig. 1. *In vitro* hydrolysis of raw starches by rat pancreatic amylase.

1: potato, 2: sweet potato, 3: corn, 4: wheat, 5: rice.

Table 3. Effect of sulfanilamide and kanamycin on digestibility of potato starch in rat.

	Coefficient of digestibility	
	Sulfanilamide*	Kanamycin**
Before administration	46(%) (3 days)	46(%) (11 days)
Administration	47 (7 days)	51 (16 days)
After administration	—	51 (13 days)

* Sulfanilamide was administered orally with the raw potato starch diet in the concentration of 1 per cent during the test period (7 days).

** Kanamycin was administered in the concentration of 0.67 per cent for first 3 days and then decreased to 0.33 per cent for following 13 days.

Fig. 2. Enzymic hydrolysis of potato starches collected from rat alimentary canal.

1: from stomach, 2: from small intestine, 3: from caecum, 0: original starch.

Fig. 3. Enzymic hydrolysis of potato starch treated with HCl.

* AP: pancreatic amylase pretreatment.

** C: control.

れて減少すること, (3)逆に傷のえぐれが大きくなったものや, 中空になったもの (Fig. 12, 13), あるいは断片状になったものの率が小腸を下るにつれて多くなる (Fig. 7) こと, (4)盲腸や大腸では中空や断片状のものが減り, 小穴がたくさんあいた形のものが多数観察される (Fig. 8, 14, 15) こと, (5)無傷やひっかき傷のままで排泄されるものもかなりある (Fig. 15) ことなどである。

4. 塩酸処理, アミラーゼ塩酸処理の影響

実験室で調製したジャガイモ生でんぷんを 0.1, 1, 2 3 N の塩酸溶液に 37°C, 30 分間インキュベートした後, 等規定, 等量の水酸化ナトリウム溶液で中和し, リン酸バッファーで pH を 7 に調整して, 市販のパンクレアチンで消化性を調べたところ, Fig. 3 のように 3 N という高濃度で前処理したでんぷんは, 明らかにアミラーゼによる加水分解をよく受けたが, 1 N 以下の濃度ではほとんど無処理と差はなかった。

ついで, 実験室で調製したジャガイモ生でんぷんを市販のパンクレアチンで, 常法どおり 37°C, 30 分間処理をして, 単独ではほとんど作用のなかった 1 N の塩酸溶液で処理をし, 中和した後, 再びアミラーゼ (パンクレアチン) による消化性を調べたところ, Fig. 3 の AP+1N の曲線に示すように, 1 N 塩酸処理よりは明らかに高い消化率を示した。また, これらの処理をしたでんぷんを光学顕微鏡で観察したところ, 1 N 塩酸処理ではほとんど無処理のものと変わらなかったが, アミラーゼ, 塩酸処理をしたでんぷんでは, ラット胃から回収したでんぷん類に見られるように傷を受けた粒が比較的多く観察された (Fig. 9)。

考 察

杉本ら⁸⁾⁹⁾, および福場¹⁰⁾らは, ラットの消化管内容

物あるいは糞中より分離したでんぷん粒について, 走査型電顕で観察している。杉本らはジャガイモ生でんぷんについて, でんぷん表面に消化酵素の攻撃のあとを観察し, また小さい穴が多数あいた型も観察しているが, 消化酵素による攻撃は小腸あるいはそれ以前に受けていること, 盲腸では腸内細菌の酵素による攻撃を受けていることを明らかにした。福場らは, 糞中から回収したでんぷん粒の観察により, でんぷん粒が種々の程度やパターンの分解を受けていることを明らかにしたが, それらの分解は咀嚼による粒の損傷, 腸内細菌による侵食, 消化酵素によるものとし, 一方, 完全な形で残っているものもあるので, ジャガイモ生でんぷんは構造的に他のでんぷんより強固で, 腸内細菌による損傷を受けて初めて消化酵素が働くのではないかと考えている。このように, 消化管内における生でんぷん粒の消化機構がしだいに明らかになってきてはいるが, 消化管各部位において, それぞれどのような作用を受け, またその作用の原因が何であるのかという組織だった考えにまとまってはいない。

著者らの実験において, 消化酵素の濃度, 基質と酵素の量的割合等がラット消化管内と試験管内とは異なるので, 一概に論じるわけにはいかないが, ジャガイモ生でんぷんの試験管内消化率と, ラットにおけるそれとを比較した場合, ラット消化管内で何か特別な機構が存在して, 消化性の悪いジャガイモ生でんぷんの消化率を, 他の生でんぷんと比較すると低いとはいえず, 50%台にまで引き上げているように思われる。まず初めに考えられる要因として, 腸内微生物の役割が考えられるが, Table 3 のとおり, 腸内細菌の働きを完全に抑えた保証はないが, 消化率に変化はなく, ジャガイモ生でんぷんの消化には直接腸内細菌は関係していないように思われた。しかしながら, 盲腸や糞から回収したでんぷん粒には, 傷の内部に多数桿菌の付着した像が観察され, それらの損傷ないしは消化になんらかの関係がありとする杉本ら⁹⁾, 福場¹⁰⁾らの考えと相反するので, 今一度検討する必要があるものと思われる。また, 胃から回収したでんぷん粒は, 明らかに無処理のものと比較して消化性が良くなっており (Fig. 2), 多数傷ついた粒が観察された (Fig. 5, 11) ので, 口腔から胃のどこかで, なんらかの作用を受けたことは明らかである。まず第 1 に, 胃液の塩酸がその作用をしているのではないかと考えられるが, 試験管内塩酸処理の実験で, 明らかに影響のあった 3 N という高濃度は胃液の塩酸の濃度としては考えられず, 塩酸単独の作用ではないことは明らかである。また, だ液アミラーゼ単独の作用でもないであろうことは, ラット膵臓アミラーゼによっても, ジャガイモ生でんぷんはきわめて消化が悪いことから明らかである。そ

Fig. 4. Light micrograph (LM) of untreated potato starch granules.

Fig. 5. LM of potato starch granules isolated from stomach of rat.

Fig. 6. LM of potato starch granules isolated from upper part of small intestine of rat.

Fig. 7. LM of potato starch granules isolated from lower part of small intestine of rat.

Fig. 8. LM of potato starch granules isolated from caecum of rat.

Fig. 9. LM of potato starch granules treated with pancreatin and HCl.

ここで、口腔のだ液アミラーゼと胃液の塩酸の相乗効果的作用が存在するのではないかと考えて、アミラーゼ処理をした後、塩酸処理を行なった結果、明らかに塩酸単独処理より高い消化率が得られ、また、顕微鏡観察でもラットの胃から回収したでんぷんと似た傷がついた粒が比較的多く観察されたので、でんぷん粒に傷をつけ、消化性を高くしている作用の少なくとも一部は、だ液アミラーゼと胃液の塩酸の相乗効果的作用であると推定することができた。

これらの結果と、顕微鏡による観察の結果得られた知見とを併せて、ジャガイモ生でんぷん粒の消化過程を考えると、ジャガイモでんぷん粒は表面から一様に徐々に消化されるのではなくて、口腔のアミラーゼと胃液の塩酸の作用などによってつけられた傷を中心に、小腸を上

から下るにつれて酵素的に消化され、内部構造のほうは消化されやすいので、粒の内側からえぐられて、中空になり、断片になり、最後に吸収されてしまうが、傷がつかなかった粒は消化されにくく、そのまま排泄されたり、あるいは、傷がついたものでも、消化途中で排泄されたりして、結果として消化率が50%程度になるように思われる。

また盲腸、大腸より回収したでんぷんには、小さい穴がたくさんあいた形 (Fig. 14) が多数観察されたが、盲腸の微生物の働きによるものと推察されることのほかラット自体にとっての栄養学的意義などは不明である。ただ、発芽種子中のトウモロコシでんぷんなどに見られるもの¹¹⁾と非常によく似ている点興味深い。

Fig. 10. Scanning electron micrograph (SEM) of untreated potato starch granules.
 Fig. 11. SEM of potato starch granules isolated from stomach of rat.
 Fig. 12. SEM of potato starch granules isolated from middle part of small intestine of rat.
 Fig. 13. SEM of potato starch granules isolated from lower part of small intestine of rat.
 Fig. 14. SEM of potato starch granule isolated from caecum of rat.
 Fig. 15. SEM of potato starch granules isolated from large intestine of rat.

要 約

ジャガイモ生でんぶんのラットにおける消化過程を明らかにする目的で、ラット消化管各部から回収したでんぶん粒の化学的、顕微鏡的性質を調べた。ラット胃から回収したでんぶん粒は、無処理のものと比較して明らかに消化性が高くなっており、また傷がついた粒が多数観察された。このように、胃でジャガイモでんぶんに傷をつけ、消化されやすい形にしている要因としては、胃液の塩酸単独の作用ではなく、だ液アミラーゼと胃液の塩酸の相乗的な作用が働いていることが明らかになり、今まで炭水化物の消化にはあまり関係がないと思われていた胃が、重要な役割を果たしていることが明らかになった。

これらの結果考えられるジャガイモ生でんぶんのラット消化管における消化過程は、次のとおりである。(1)口

腔でだ液と混ぜられ、胃に送られ、胃液の塩酸と混ぜられる。このとき、その具体的な機構は明らかではないが、だ液アミラーゼと塩酸の相乗作用により傷をつけられる粒が多数生じる。(2)小腸を下るにつれて、その傷を中心に消化酵素によってえぐられ、粒の内部構造のほうが外層部より酵素に対する抵抗性が弱いので、内側からえぐられ中空になり、断片になるものが増加し、消化されてしまう。(3)胃で傷を受けなかったものは消化途中の形で排泄されるものもかなりある。(4)盲腸、大腸では小腸におけるでんぶんの消化過程のタイプとはまったく別のそれまでの傷に付加的に小さい穴が多数あけられたものが観察されるが、その原因や意義については確かなことはわからない。

最後に、走査型電子顕微鏡の使用に便宜をはかってくださった大阪市大医学部解剖学研究室の山形教授をはじめ

め、使用にあたってご指導くださった大西助手にあつくお礼申しあげる。また、本研究には、和久意志男、大善正夫、常深貞夫、浦貴陽、岸本雅清、北沢直樹、高田昌彦の諸氏に実験を手伝っていただいた。深く感謝する。

なお、この研究は第30回日本栄養・食糧学会（1976年4月、仙台）で講演発表した。

文 献

- 1) Jelinek, B., Katayama, M. C., Harper, A. E.: *Can. J. Med. Sci.*, **30**, 447 (1952)
- 2) Booher, L. E., Behan, I., McMeans, E.: *J. Nutr.*, **45**, 75 (1951)
- 3) 吉田 実, 森本 宏: 農化, **37**, 337 (1963)
- 4) Reussner, G., Jr., Andros, J., Thiessen, R., Jr.: *J. Nutr.*, **80**, 291 (1963)
- 5) 桜井芳人, 増原泰三, 渡辺至子, 早川清一: 農林省食研報告, **5**, 41 (1951)
- 6) 桜井芳人, 増原泰三, 横沢一二, 渡辺至子, 早川清一: 農林省食研報告, **6**, 125 (1952)
- 7) 岩尾裕之, 岡田澄子, 高田百合子: 国立栄研研究報告, **35**, 38 (1969)
- 8) 杉本温美, 高谷友久, 不破英次: 澱粉科学, **22**, 103 (1975)
- 9) 杉本温美, 高谷友久, 不破英次: 澱粉科学, **23**, 42 (1976)
- 10) 福場博保, 毛利仁美: 澱粉科学, **23**, 26 (1976)
- 11) 川上いつゑ: デンプンの形態, 222 (1975), 医歯薬出版 (東京)

(昭和51年7月26日受理)