

水浸時の精白米の裂傷に関する研究*

村田 敏**・小出章二**・河野俊夫**

要 旨

水浸時の精白米の裂傷発生条件と裂傷発生のメカニズムを明らかにするため、種々の水分・水温の条件下で一定時間水浸させ、裂傷粒発生率を測定した。

その結果、裂傷粒発生は、その水分や水温と密接な関係があることが明らかとなった。

さらに、発生した裂傷粒を観察すると亀裂に方向性が見出された。このことから精白米を腹部側と背部側とに二分し、両者の熱膨張・水分膨張係数、水分差を測定した。

温度差（水分差）のある合板の応力モデルによって解析した結果、裂傷の発生は穀物粒内の部位的な水分浸透の差に依存していることが明らかとなった。

Study on the Cracking of Polished Rice Soaked in Water*

Satoshi MURATA**, Shoji KOIDE**, Toshio KAWANO**

Abstract

The ratio of the cracked rice which were immersed in water for a limited time was measured under the various conditions of the rice grain and the temperature of water in order to reveal the cracking mechanism of polished rice during soaking.

The measurement showed that the cracking closely related with moisture content and water temperature.

From the observation of the cracked grains a particular direction was observed for the developed line of cracks. Therefore the polished rice grains were cut into ventral portions and dorsal portions, and the coefficients of thermal and hygroscopic expansion, and the difference of partial water penetration were measured.

The analyzed data showed that the formation of the cracks depended on the partial difference of water penetration into the grains.

[Keyword] polished rice, cracking, soaking, hygroscopic expansion

I 緒 言

精白米の水洗・炊飯時に発生する水浸裂傷粒

* 平成2年4月農業機械学会年次大会（宮崎大学）にて講演

** 九州大学農学部（〒812 福岡市東区箱崎6-10-1 ☎092-641-1101）Faculty of agriculture, Kyushu Univ., Fukuoka, 812 Japan

は、炊飯後飯粒が崩れ、食味に悪影響を及ぼすことが知られている。しかし、その基本的特性である水浸時の裂傷粒発生と水温・水分との関係については詳細な測定が行われていない。これまで、粳・玄米の胴割れについては、数多くの研究報告が提出されてきたが、水浸時の精白米の裂傷に関

する研究は極めて少ないようである。

そこで、水浸時の精白米の力学的特性を測定し解析することにより、裂傷発生機構についての説明を試みた。本研究で測定した内容は次の4項目である。

(1) 精白米を種々の条件(精白米については含水率・浸漬水側については水温)下で浸した場合の、裂傷粒割合の変化の測定。

(2) 精白米の腹部と背部の熱膨張係数と水分膨張係数の測定。

(3) 精白米の腹部と背部の水分差の測定。

(4) 精白米の含水率と剛度(rigidity, breaking load)の関係。

第1項については裂傷の条件を把握するためのものであり、第2項は腹部あるいは胚部より裂傷が起きることから、その原因を膨張係数の測定より明らかにしようとしたものであり、第3項はこれを水分差の相違で求めようとしたものである。また第4項は浸漬によって生じる裂傷の発生の原因の一つが、含水率の増加による強度の低下にあることを示すためである。

II 測定方法

1. 供試材料：供試した精白米は、平成元年度産(収穫：10月14日)の黄金晴を粳摺り、搗精したものである。収穫場所は福岡県粕屋郡須恵町で、収穫した粳は約22(%, w. b.)と高水分であったので、陰干しにて約19(%, w. b.)まで乾燥させた後、庫内温度5°Cの冷蔵庫に入れて測定期間中の品質保持に努めた。この粳を、熱風乾燥を行いながら、水分を13~17(%, w. b.)まで約1%ごとになるように調整した後、これらを小型ビン(ガラス製、容量50cc)の中に密封させ40°Cで24時間テンパリングさせることにより水分分布のばらつきを防いだ。こうして水分調整をした粳を粳摺り機(SATAKE MOTOR PASS)で玄米にし、さらにこれを搗精機(SATAKE GRAIN TESTING MILL)にかけ精白米とした。この精白米を再び小型ビンの中に密封し吸湿を防いだ。なお、水分の測定はすべて10g粒-135°C-24時間-0.008kg/kg'法¹⁾に従って行った。

2. 水浸条件の違いによる裂傷粒発生率の変化：
水浸条件は表1に示すように水浸時間を30分と

表1 裂傷測定における水温と水分
Table 1 Temperature of water and moisture content in cracking measurement

水分(%, w. b.)	12.0, 13.8, 14.5, 15.9, 17.0
水温(°C)	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60

* 浸水時間 30分 * 組合せ 5×7=35(通り)

おき、水分を5段階、それぞれに対し水温を7通り設定した。測定においては、胴割れ米・腹白米・心白米などの不完全米や、ひび割れ米・未熟米・屑米を除いた精白米100粒を1試料とし、1回の測定にあたり2試料用いた。これをウォーターバスに水浸させ、水浸30分後の裂傷粒を計数し裂傷粒発生率をもとめた。裂傷粒はこの場合、目測で少しでも外部に亀裂の生じたものを計数した。また白濁化も顕微鏡的には破壊が行われている可能性があるがこの場合は計数には入れなかった。

3. 精白米の腹部側と背部側の膨張係数の測定：

水浸により発生した裂傷粒を観察すると、図1のようにそのほとんどが腹部側もしくは胚部側より裂傷が進行していた。この裂傷は水浸時の粒内の不均一な膨張により生じた応力によるものと考えられる。そこで精白米をカッターナイフで腹部側と背部側とに二分割し、トルエンを使用した液体置換法²⁾により各々の密度を測定し、米粒粒内の応力計算の際に必要な熱膨張・水分膨張係数の算出を行った。測定は1回あたりの試料重量を約10gとし、表2に示すように、それぞれ20通りの温度・含水率の組合わせについて行った。

4. 水浸による精白米の腹部側・背部側の水分変化：精白米を水浸させると、白濁した部分が現れてくる。著者らの観察によると、この白濁する部

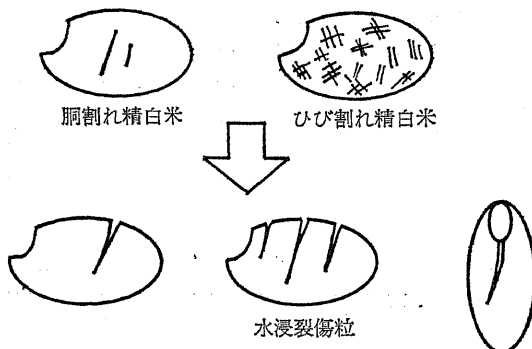


図1 精白米の裂傷

Fig. 1 Cracks of polished rice

表2 密度測定の水温と含水率
Table 2 Temperature of water and moisture content in density measurement

腹部側	
含水率 (% , d. b.)	0.0, 16.4, 19.0, 24.1
温度 (°C)	20, 30, 40, 50, 60
背部側	
含水率 (% , d. b.)	0.0, 16.0, 18.1, 24.0
温度 (°C)	20, 30, 40, 50, 60

分は腹部側の方が背部側より多い傾向がみられたが、これは腹部側と背部側とで水分浸透に差があることによるものと考えられる。そこで精白米を一定時間浸漬させ、腹部側・背部側の水分変化を測定した。

測定は、30分間水浸した精白米をすばやく1粒ずつ取り出し乾布で付着水分を拭いた後、カッターナイフで腹部側と背部側とに二分割し、重量を測定した。これを絶乾させることにより、それぞれの含水率を算出した。

5. 精白米の含水率と剛度の関係：精白米の含水率を7段階(14.9~42.6%, d. b.)として、温度20°Cの条件のもと、木屋式剛度計を使用して、圧碎剛度を測定した。なお高含水率の精白米(30.5%, d. b.以上)は、水温20°Cで一定時間浸漬させたのち、これを24時間密封保存したものを使用している。

III 測定結果及び考察

1. 水浸条件の違いによる裂傷粒の発生率 図2に種々の水分・水温の条件における裂傷粒の発生率を示す。図2によれば、精白米は高水分であるほど、裂傷粒の発生は少なくなっており、また低水温になるにつれ発生率は高くなる傾向を示している。特に水分17%においては、裂傷粒の発生はほとんどみられない。
2. 精白米の腹部側・背部側の膨張係数 比容積と温度・含水率との関係には、前回⁵⁾同様、次の実験式を当てはめた。

$$\ln V = (a m_a^2 + b m_a + c) T + (d m_a^2 + e m_a + f) \quad (1)$$

熱膨張・水分膨張係数の定義は次の2式で表される。

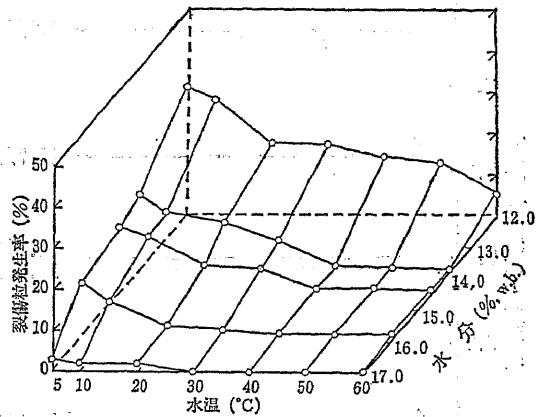


図2 水浸裂傷粒発生率
Fig. 2 The ratio of the cracked rice

$$\text{熱膨張係数 } \alpha = \frac{\partial}{\partial T} (\ln V) \quad (2)$$

$$\text{水分膨張係数 } \beta = \frac{\partial}{\partial m_a} (\ln V) \quad (3)$$

これより膨張係数はそれぞれ次のようになる。

$$\alpha = a m_a^2 + b m_a + c \quad (4)$$

$$\beta = (2a m_a + b) T + (2d m_a + e) \quad (5)$$

精白米および精白米の腹部側・背部側の比容積を測定し、式(1)に代入して最小自乗法により計算されたパラメータ値を表3に示す。ここで図3に精白米の比容積と温度との関係を示す。図中実線は計算値であり測定値とよく一致している。これらのパラメータより、温度20°Cにおける精白米の腹部側・背部側の水分膨張係数を計算した結果が図4である。両者を比較して明らかな水分膨張係数の差は認められなかった。ここで熱膨張係数は含水率0~30(% , b. d.)の範囲において腹部側、背部側とも 3.0×10^{-4} 以下の値となっており水分

表3 パラメータ値
Table 3 Parameters of polished rice expansion equation (1)

精 米	a = -2.577 × 10 ⁻⁷ d = 1.417 × 10 ⁻⁴ SD = 9.754 × 10 ⁻³	b = 1.230 × 10 ⁻⁵ e = 9.122 × 10 ⁻³ m _a (0~32.8%)	c = -9.161 × 10 ⁻⁵ f = -7.265 T(20~60°C)
腹 部 側	a = 1.053 × 10 ⁻⁷ d = 1.156 × 10 ⁻⁴ SD = 2.380 × 10 ⁻³	b = 7.069 × 10 ⁻⁶ e = 8.886 × 10 ⁻³ m _a (0~32.8%)	c = -8.684 × 10 ⁻⁵ f = -7.260 T(20~60°C)
背 部 側	a = -2.671 × 10 ⁻⁷ d = 1.097 × 10 ⁻⁴ SD = 8.641 × 10 ⁻³	b = 2.332 × 10 ⁻⁵ e = 9.216 × 10 ⁻³ m _a (0~32.8%)	c = -2.362 × 10 ⁻⁵ f = -7.260 T(20~60°C)

※SD : ln V に対する標準偏差 ln(m³/kg)

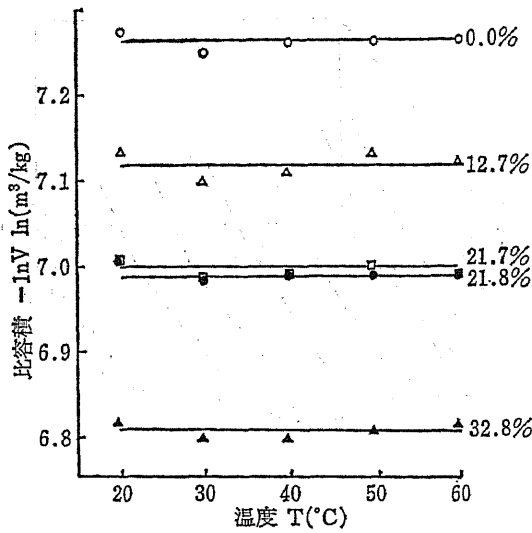


図3 精白米の比容積と含水率の関係
Fig. 3 Relationships between specific volume of polished rice and its moisture content

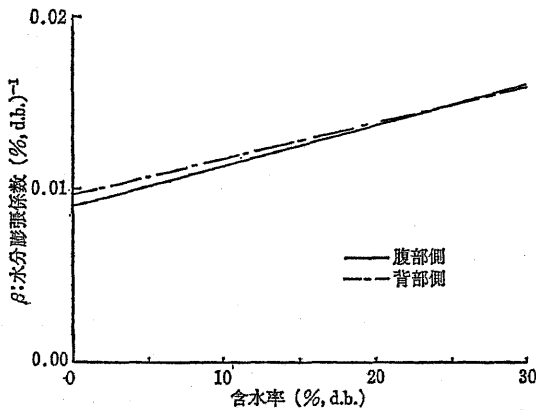


図4 20°Cにおける精白米の腹部側と背部側の水分膨張係数
Fig. 4 Coefficient of hygroscopic expansion for ventral and dorsal portion of polished rice at the temperature of 20°C

膨張係数と比較して非常に小さい値となった。
3. 水浸による精白米の腹部側・背部側の水分変化
水浸後30分経過したときの、精白米の腹部側・背部側の水分は表4に示す通りである。これより水浸時において、腹部側の方が背部側に比べ、吸水速度が大きいことがわかる。このことは腹部側での水分膨張が背部側より速いことを意味する。また表5に精白米の含水率と剛度（剛度）の関係を示す。これをみると含水率増加に伴い圧縮剛度が著

表4 浸水30分後の精米の腹部側と背部側の含水率

Table 4 Moisture content of ventral and dorsal portion of polished rice after soaking 30 minutes

水温 (°C)	初期含水率 (%, d. b.)	浸水30分後の含水率(%, d. b.)	
		腹部側	背部側
10	13.6	38.0	29.9
	20.0	33.1	31.4
	20.0	36.8	35.4
30	13.6	40.6	38.2
	16.7	40.9	38.1
	20.0	36.8	35.4

しく低下することがわかる。

さて裂傷粒の亀裂がほとんど腹部・胚部側より成長していたことより、裂傷粒の亀裂発生は、水分差により腹部側から背部側に曲げモーメントが作用して、それにより腹部側に引張応力が生じることによるものとする。そこで米粒を図5に示すような温度差（水分差）のある合板の応力モデルの問題³⁾ にならって応力を解析することにした。このモデルでは、近似的に、縦弾性係数と膨張係数が一定で一樣（場所によらない）とする線形弾性体を仮定している。膨張係数は式(5)に見るように、その実質的な変動は小さいので、変形前（ここでは、水浸前）の状態における値をとる。このように、線形弾性歪みを仮定すると、図5の下図

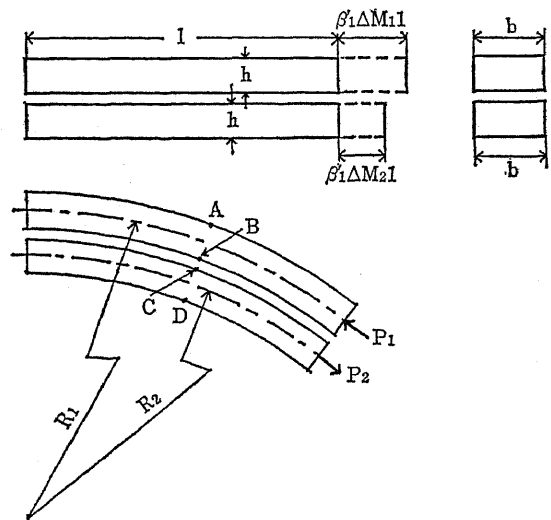


図5 精白米の裂傷発生メカニズム
Fig. 5 Cracking mechanism of polished rice

において両方の歪は接触面B, Cで等しくなくてはならないので

$$\beta'_1 \Delta m_{d1} - \frac{P_1}{AE_1} - \frac{h}{2R_1} = \beta'_2 \Delta m_{d2} + \frac{P_2}{AE_2} + \frac{h}{2R_2} \quad (6)$$

さらに曲げモーメントに関して次式を得る。

$$M_1 = \frac{E_1 I}{R_1}, M_2 = \frac{E_2 I}{R_2} \quad (7)$$

ただし

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

ここで外力は作用していないので

$$P_1 = P_2 = P \quad (9)$$

$$M_1 + M_2 - Ph = 0 \quad (10)$$

となる。ここで米粒の厚さは曲率半径Rに対して非常に小さいと考え、 $R_1 = R_2 = R$ とおき、また $E_1 = E_2 = E$ と仮定すると、式(7)より $M_1 = M_2$ が得られる。次に式(10)より

$$P = \frac{2M}{h} \quad (11)$$

が得られ、再び式(7)より

$$P = \frac{2EI}{Rh} \quad (12)$$

が得られる。これを式(6)に代入して整理すると曲率に関する次式が得られる。

$$\frac{1}{R} = \frac{3(\beta'_1 \Delta m_{d1} - \beta'_2 \Delta m_{d2})}{4h} \quad (13)$$

これより式(7)から曲げモーメントMが、式(12)よりPが求まり、このMとPを用いて、図5に示したモデルの各点の応力は引張応力を正として、次式で計算することができる。

$$\begin{aligned} \sigma_A &= M/Z - P/(b/h) \\ \sigma_B &= -M/Z - P/(b/h) \\ \sigma_C &= M/Z + P/(b/h) \\ \sigma_D &= -M/Z + P/(b/h) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (14)$$

ここで用いたモデルでは精白米を水分浸透の異なる二枚の板で表現し、縦弾性係数の一様性を仮定しており、厳密な応力計算ではない。しかし、米粒の裂傷の応力発生メカニズムを少なくとも定性的に証明できると考える。

例として表4の水温10°C, 含水率13.6(% d.b.)

表5 精白米の含水率と剛度 (20°C)
Table 5 Moisture content and rigidity of polished rice (20°C)

含水率 (%, d.b)	圧砕剛度 (kgf)
14.9	8.86
17.6	7.73
19.8	5.11
30.5	3.31
33.4	2.39
39.9	1.68
42.6	1.45

について計算する。まず、これより

$$\Delta m_{b1} = 38.0 - 13.6 = 24.4 \text{ (% d.b.)}$$

$$\Delta m_{b2} = 29.9 - 13.6 = 16.3 \text{ (% d.b.)}$$

が計算され、 $T = 10^\circ\text{C}$, $m_b = 13.6 \text{ (% d.b.)}$ における体膨張係数を計算し、その3分の1をとると線膨張係数 $\beta'_1 = 4.0 \times 10^{-3}$, $\beta'_2 = 4.1 \times 10^{-3}$ が得られる。これらを用いて、 $b = 10^{-3} \text{ m}$, $h = 10^{-3} \text{ m}$ とおき、米粒の弾性係数を $4.9 \times 10^6 \text{ (kPa)}$ ¹⁾ として応力を計算すると $\sigma_A = 4.8 \times 10^4 \text{ (kPa)}$, $\sigma_B = -6.7 \times 10^4 \text{ (kPa)}$, $\sigma_C = 6.7 \times 10^4 \text{ (kPa)}$, $\sigma_D = -4.8 \times 10^4 \text{ (kPa)}$ となる。この計算によると、この4点のうち引張応力は腹部側の外部のA点と内部点のC点に生じ、他の点は圧縮応力である。ここで引張応力は内部のC点が腹部側外端A点よりやや大きいにもかかわらず裂傷が腹部側から発生するのは吸水の速い外端の強度の低下によるものと考えられる。精白米が含水率の増加によって著しく強度の低下することは、表5の含水率と剛度に関する測定結果や含水率と引張強度に関する川村ら²⁾の測定結果から明らかである。

IV 結 論

精白米の水浸時に発生する裂傷粒について測定を行い、さらに水浸時での精白米の応力特性を知るために部分的な膨張係数および水分変化について測定を行った結果、次のことが明らかとなった。

1. 水浸裂傷粒の発生割合は高水分・高水温において発生が少ない。
2. 精白米を腹部側と背部側とに分け、それぞれの膨張係数を算出し、比較を行ったところ、両者にあまり差が認められなかった。

3. 一定時間水浸後の腹部側と背部側の含水率変化の測定を行った結果、腹部側が背部側に比べ、水分の浸透速度が大である傾向を示した。
4. 水浸時に発生する裂傷粒の亀裂の主要因は、腹部側に生じる引張応力と、水分の増加に伴う強度の低下に起因するものと思われる。

V 記号 (Nomenclature)

- A : 面積 (Area, m^2)
- E : 縦弾性係数 (Modulus of longitudinal elasticity, Pa)
- h : 厚み (Thickness, m)
- I : 断面二次モーメント (Moment of inertia of area, m^4)
- M : 曲げモーメント (Bending moment, N·m)
- m_a : 乾量基準含水率 (Dry basis moisture content, %, d.b.)
- P : 荷重 (Load, N)
- R : 曲率半径 (Radius of curvature, m)
- T : セルシウス温度 (Celsius' temperature, $^{\circ}C$)
- V : 乾量基準の比容積 (Dry basis specific volume, m^3/kg , dry matter)
- Z : 断面係数 (Modulus of section, m^2)
- Δm_a : 含水率の増分 (Increment of dry basis moisture content, %, d.b.)

- α : 熱体膨張係数 (Coefficient of the cubical thermal expansion, $^{\circ}C^{-1}$)
- β : 水分体膨張係数 (Coefficient of the cubical hygroscopic expansion, %, d.b. $^{-1}$)
- β' : 水分線膨張係数 (Coefficient of the linear hygroscopic expansion, %, d.b. $^{-1}$)
- ε : 水分膨張によって生じる歪 (Elastic strain caused by hygroscopic expansion, -)
- σ : 引張応力 (Tensile stress, Pa)

参考文献

- 1) 伴 敏三, 諏沢健三, 鷹尾宏之進: 穀物に関する測定法, 農業機械化研究所, pp. 45-47, 農業機械化研究所, (1970)
 - 2) 川村 登, 堀尾尚志, 佐々木泰弘: 籾の脱粒性と米粒の引張・圧縮強さについて, 農業機械学会誌, 30(2), pp. 88-92, (1968)
 - 3) 中原一郎: 材料力学上巻, pp. 152-153, 養賢堂 (1972)
 - 4) 農業機械学会編: 農業機械・施設試験方法便覧 I, 農業機械学会, pp. 218, (1977)
 - 5) 村田 敏, 河野俊夫, 小出章二, 田川彰男: ソバの乾燥特性の測定, 農業機械学会誌, 52(3), pp. 61-67, (1990)
 - 6) 山下律也, 後藤清和: 農産物の物性および測定法に関する総合的研究, 農業機械学会農産物性研究グループ, pp. 1-22, (1979)
- (原稿受理平成2年10月3日・質問期限平成4年1月31日)