

米粒の胴割発生機構について

上 出 順 一

(山形大学農学部農業機械学研究室)
(昭和61年9月1日受理)

On the Formation of crack in Rice during Drying and Wetting

Junichi KAMIDE

Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture,
Yamagata University Tsuruoka 997, Japan
(Received September 1, 1986)

I. 緒 言

米粒の内部に生ずる亀裂を胴割れといふ、食糧庁は亀裂を有する米粒、すなわち胴割米を被害粒とみなし、出荷米への混入をきびしく規制している²⁷⁾。胴割は収穫時及びその後のハンドリングの過程での機械的衝撃作用を受けることによって発生するが、大きな問題とされるのは乾燥または吸湿過程における胴割発生であり、人工乾燥において胴割発生をいかに防止するかが重要な課題の一つである。

本報では、乾燥及び吸湿過程での胴割について取り上げる。乾燥または吸湿過程における胴割の発生は米粒内における不均一な水分分布に起因する内部(引張)応力にあると考えられている。胴割は立毛中においても発生する⁴⁾⁵⁾²⁰⁾が、そのメカニズムは乾燥・吸湿過程の場合と同じである。また、胴割の程度は品種によっても異なり、寺中ら³¹⁾は米粒構成物質及びその理化学的性質の差、すなわち澱粉の粘性等が胴割に影響していることを報告している。米粒は、その構造組成及び力学的にも均質な固体ではなく、水分変化に対する特性は粒内部位、方向によって異なることが予想され、このことが乾燥・吸湿過程における胴割発生に大きく関与していると考えられる。

米粒の乾燥及び吸湿における胴割については多くの研究がある²⁾¹²⁾¹³⁾¹⁶⁾¹⁸⁾²¹⁾²⁸⁾が、本研究においては、米粒内の部位による不均質性に着目し、とくに胚乳と糠層の水分特性の違いを実験によってあきらかにし、胴割発生機構について考察した。なお、本論文の一部は農業機械学会において発表したものである⁶⁾。実験に当たっては、梅木幸子技官及び専攻学生矢口喜朗、安彦賢一両君の協力を得た、記して謝意を表する次第である。

II. 玄米及び白米の平衡含水率並びに乾燥速度

米粒内の部位(糠層、胚乳)による水分特性の違いは、玄米及び白米の水分特性に反映されると考えられる。ここでは両者の平衡含水率及び吸湿速度を測定した。

1. 実験方法

玄米及び白米を約15gずつビニール製網袋に入れ、飽和塩溶液によって湿度を調節したデシケータ内に、試料の重量が恒量に達するまで長期間貯蔵し、各相対湿度に対する平衡含水率を測定した。デシケータは20℃に調節した恒温室に置いた。米粒の含水率は105℃—24h—Oven法で測定した。品種はフジミノリで、通常の方法で収穫、乾燥、籾摺を行なったものである。白米の搗精歩合はおよそ90%であり、剥離された表層の厚さは25~150 μm で、糠層はほぼ除去されたとみられる²²⁾。粒の大きさはダイヤルキャリパー(1/100mm)で測定した。米粒の長、中、短軸をそれぞれx, y, z軸であらわした。

吸湿速度は、含水率11%程度に乾燥した玄米及び白米をビニール製網袋に入れ、これを温度20℃、相対湿度85%、風速0.3m/sの恒温恒湿槽で吸湿させ、一定時間ごとの重量変化から計算した。

2. 実験結果及び考察

各相対湿度に対する玄米及び白米の平衡含水率及び諸元を表-1に示す。白米の平衡含水率は高湿度では玄米より低く、低湿度では高い傾向にあったが、その差は僅少であった。米粒は含水率の増大に伴って膨張し、粒重も増加する。含水率と粒径との関係を図-1に示す。含水率による粒径の変化は玄米よりも白米で大きかった。なお、相対湿度12%における粒径を基準にとると、粒径

Table-1. Equilibrium moisture contents and dimensions of brown rice and milled rice

type	relative humidity (%)	equilibrium m. c. (% wb)	grain weight (mg)	size(mm)			volume (mm ³)	specific gravity
				x	y	z		
brown rice	97	20.1	22.52	5.07	2.88	2.17	16.57	1.36
	75	15.1	22.05	5.05	2.85	2.14	16.08	1.37
	53	10.7	21.39	5.04	2.81	2.08	15.43	1.39
	33	9.7	20.95	4.97	2.79	2.07	15.04	1.39
	12	7.1	20.27	4.92	2.78	1.99	14.29	1.42
milled rice	94	20.0	19.43	4.95	2.86	2.06	15.24	1.27
	75	14.7	19.37	4.85	2.80	2.01	14.24	1.36
	53	11.0	18.63	4.72	2.72	2.00	13.46	1.38
	33	10.1	18.21	4.64	2.69	1.95	12.72	1.42
	12	7.1	17.33	4.61	2.71	1.97	12.96	1.34

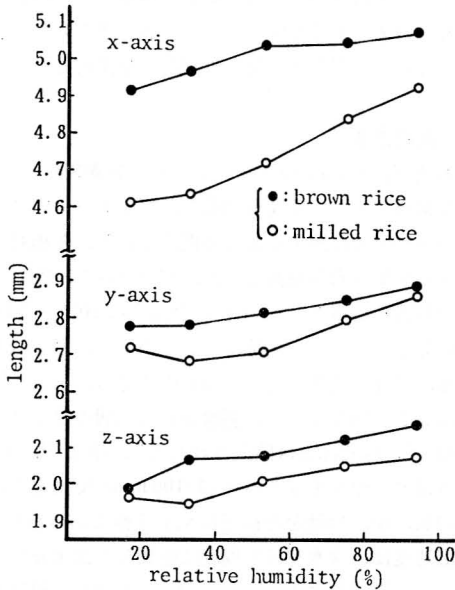


Fig. 1. Relation between relative humidity and size of rice kernel

変化量は、玄米ではz軸方向が最も大きく、白米ではx軸方向で最大で、z軸が最も小さかった。玄米は果皮によって拘束されるとともに、後述のように、糠層の水分に対する膨張率が胚乳部よりも小さいことによるものと考えられる。

米粒を楕円体と見なして3軸長から粒体積を計算し、米粒の比重及び湿り比容積vを求めたが、含水率による湿り比容積の変化は白米で大きかった。玄米の含水率0%時の比容積はv=0.68 (mm³/mg), 含水率変化によ

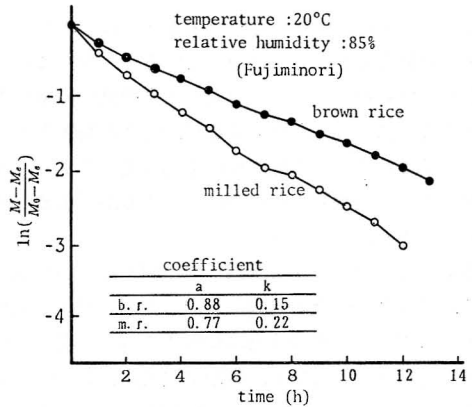


Fig. 2. Coefficient of absorption rate of brown rice and milled rice

る体膨張係数は0.0146(% db)⁻¹と推定され、既往の結果³²⁾とほぼ一致する。

玄米及び白米の吸湿時間と含水率の関係を図-2に示す。図から明らかなように白米の吸湿は玄米より速く進行する。薄層乾燥では次式の関係がある³⁾。これを吸湿過程に適用して、温度20℃、相対湿度85%における速度定数kを求めると、玄米は0.15、白米は0.22で、白米の速度定数は玄米のおよそ1.5倍であった。

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-k\theta) \tag{1}$$

- ただし M : ある時刻の含水率
- M_o : 初期含水率
- M_e : 平衡含水率
- a : 形状係数

k : 乾燥速度定数

θ : 乾燥時間

III. 含水率による米粒の局所膨張係数

乾燥・吸湿過程で米粒内部に亀裂を生ずる現象は、その過程で粒の内部に引張応力が生ずることを意味するが、その要因の一つとして粒内部位によって水分収縮率が異なることが考えられる。ここでは糠層及び胚乳の水分に対する膨張率を測定した。

1. 実験方法

玄米の周辺部(糠層)及び中央部(胚乳)から、カミソリの刃によって、図-3の斜線部に示すようにx, y, z軸に平行な面で切り出し、直方六面体に整形した試片を

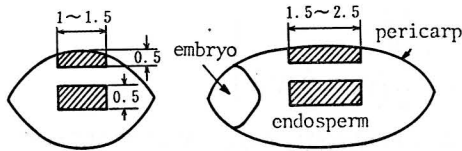


Fig. 3. Test piece for measuring moisture expansion

作る。これらの試片を、スライドガラスに測定中に移動しないようにのり付けし、相対湿度94%及び33%に調湿されているデシケータに20日間貯蔵し、平衡含水率に達

した試片を解剖顕微鏡につけた測微計(読み取り精度: 2 μ m)により、その長さ*l*を測定する。測定した試片は相互にデシケータに移しかえて貯蔵し、同様の測定を行なう。貯蔵中の試片に亀裂の生ずるものがあったが、顕微鏡的に亀裂損傷の認められたものは除外した。供試品種はフジミノリおよびキヨニシキである。

2. 実験結果及び考察

実験結果を表-2に示す。米粒の水分変化に対する線膨張係数は品種、生産年によって若干異なるようであるが、水分1% db 当たり 0.28~0.43 $\times 10^{-2}$ の範囲にあった。部位別にみると、x軸方向の平均膨張係数は糠層で 0.28~0.34 $\times 10^{-2}/\%$ db, 胚乳では 0.36~0.43 $\times 10^{-2}/\%$ dbの範囲にあり、胚乳の膨張係数は糠層のそれよりも有意に大きかった。y軸方向の膨張係数については、糠層及び胚乳ともx軸方向よりも小さい傾向があったが、有意な差は認められなかった。

米粒の水分に対する局所変形量については、加藤ら⁸⁾、山口ら³⁰⁾の実験がある。加藤らは品種ニホンマサリで、胚乳と糠層の水分収縮率に著しい差があり、前者が大きいことを示しているが、山口らの実験では、品種は明らかでないが、米粒の周辺部と中央部では線膨張係数に差はみられない。品種、登熟度等が影響していることが予想される。

Table-2. Hygrscopic expansion of pericarp and endosperm of rice kernels

variety	part*	direction (axis)	coefficient of expansion $\times 10^{-2}(\%db)^{-1}$	$\frac{①-②}{\times 10^{-3}(\%db)^{-1}}$	t-test for mean difference
Kiyonishiki	① I	x	0.43	0.74	$t_0=1.475$ $> t(9, 0.2)$
	② O	〃	0.34		
Fujiminori	① I	x	0.38	0.97	$t_0=2.497$ $> t(10, 0.1)$
	② O	〃	0.28		
Kiyonishiki	① I	x	0.36	0.79	$t_0=4.237$ $> t(19, 0.01)$
	② O	〃	0.28		
〃	O	① x	0.32	0.34	$t_0=0.814$ $< t(10, 0.2)$
		② y	0.28		
〃	O	① x	0.35	0.21	$t_0=0.344$ $< t(7, 0.2)$
		② y	0.33		

* I ; inner part (endosperm), O ; outer part (pericarp)

IV. 玄米果皮及び胚の吸湿速度

玄米の果皮表面はクチクラ層を形成して水を通さないとの記述がある⁷⁾。一方、長戸ら¹⁵⁾は種皮を通しての吸水はほとんど認められないが、乾燥は行なわれると報告している。また、小林ら¹⁵⁾は玄米の表面の一部をコーティングして乾燥及び吸湿速度を測定し、胚は種皮の2~4倍大きいことを報告している。ここでは、小林らの実験を参考にして、玄米の果皮及び胚の吸湿速度を測定した。

1. 実験方法

実験 I は図4-4-(a)に示すように、胚を含む粒表面の1/2を酢酸ビニールでコーティングしたもの、及び胚を含まない粒表面の1/2をコーティングした試料を、温度29℃、相対湿度90%の恒温恒湿槽で吸湿させながら、1時間毎に試料の重量を測定し、吸湿速度を求め

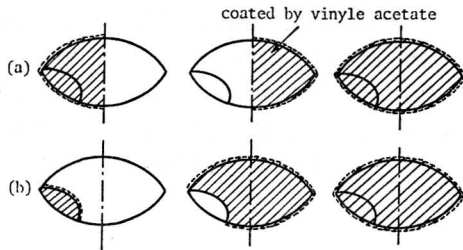


Fig. 4. Brown rice coated by vinyl acetate for measuring absorption rate

た。実験 II では同図-(b)に示すように、玄米の胚表面及び胚を残して果皮全体をコーティングした試料を、25℃、93%に調整したデシケータ内に静置し、米粒の重量変化から吸湿速度を求めた。胚面積は、胚の正面から顕微鏡写真を撮り、これをスクリーンに投影して測定した。果皮の表面積は、米粒を楕円体とみなし次式²⁰⁾により計算した。

$$S = 2\pi abc \left(\frac{c^2}{ab} + \alpha \int_0^{\phi_0} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi + \frac{1 - \alpha^2}{\alpha} \int_0^{\phi_0} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}} \right) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \alpha = 1 - \frac{c^2}{a^2}$$

$$\beta = 1 - \frac{c^2}{b^2}$$

$$k = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \alpha$$

本方法による粒表面積は、米粒をx軸に垂直な平面でいくつかの楕円台に分割し、その側面積の総和から求める区分求積法に比べ若干大きく計算されたが、その差は2%以下であった。実験 I の単位面積当たり吸湿速度は次のようにして求めた。米粒を上下に2分割し、胚の表面積をa、胚を除く基部側の果皮表面積をA、頂部側表面積をBとする。胚及び果皮の単位面積当たり吸湿速度をq及びQ、頂部側表面からの吸湿量をV_B、胚を含む基部側表面からの吸湿量をV_Aとすると、次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} B \cdot Q &= V_B \\ a \cdot q + A \cdot Q &= V_A \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

したがって、単位表面積当たり吸湿速度は次式により計算される。

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{V_B}{B} \\ q &= \frac{1}{a} \left(V_A - \frac{A}{B} V_B \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

供試玄米の表面積は平均して果皮部は31.7 mm²、胚は2.1 mm²であった。

2. 実験結果及び考察

実験 I の結果を図5に示す。粒表面を酢酸ビニールでコーティングすることで吸湿はほぼ防止できた。V_B>

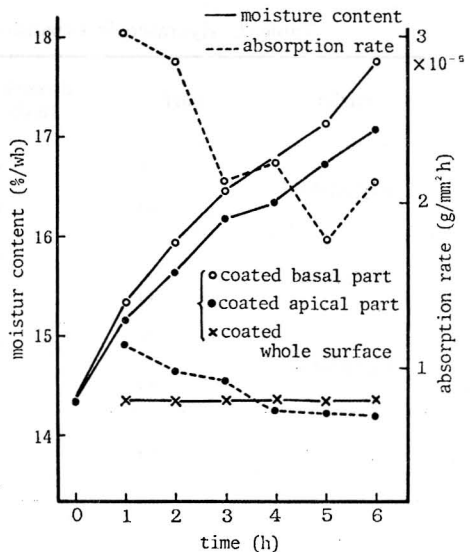


Fig. 5. Change of moisture content and absorption rate of brown rice in the test I

0から果皮を通して吸湿が行なわれることが明らかである。また、 $V_A > V_B$ は胚からの吸湿量は果皮より多いことを示している。吸湿速度は時間の経過とともに小さくなり、4時間後で $q = 2.29 \times 10^{-2}$ (g/mm²h), $Q = 0.75 \times 10^{-2}$ (g/mm²h), 吸湿開始から6時間までは胚の吸湿速度は果皮の2~3倍大きかった。これらは小林らの実験結果(器内空気循環)¹⁵⁾とほぼ一致している。

図-6に実験Ⅱによる吸湿速度を示す。胚の吸湿速度は果皮の4~6倍であったが、いずれも実験Ⅰの0.6~0.8程度に小さかった。実験Ⅰでは吸湿が急速に進行するため胴割の発生が認められ、亀裂が果皮の吸湿速度に影響していることが考えられる。

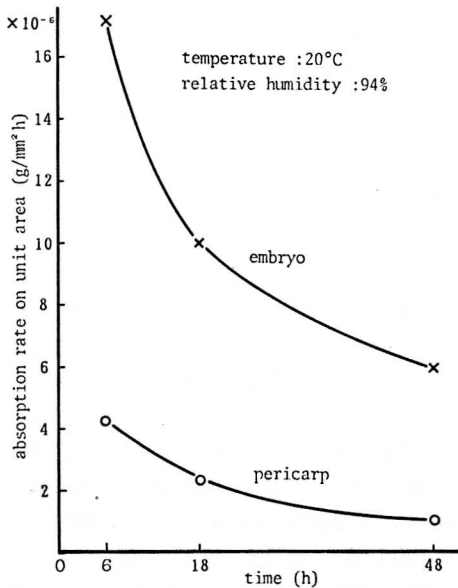


Fig. 6. Absorption rate on the unit area of embryo and pericarp of brown rice

長戸ら¹⁶⁾は米粒内の水分の移動経路を調べ、吸水過程では水は胚の周りから浸透して胚乳周縁部を上に進み、同時に周縁部より内部にも徐々に浸透することを観察し、また、乾燥の場合は、種皮の透水性は吸水のときと異なるが、水分の移動経路は吸水の場合と同じであることを報告している。本実験は吸水過程のみであるが、長戸ら及び小林らの研究からみて、乾燥過程においても胚と果皮の水分浸透に対する影響はほぼ同じであると考えられる。

西山ら²⁰⁾は乾燥モデルの構築に当たって、米粒の均質性と、乾燥が粒表面から一様に行なわれることを仮定

し、また、山口ら³⁷⁾は米粒内の応力計算で同じ前提をおいているが、実験結果からみて米粒の乾燥・吸湿過程における水分の浸透には胚が重要な役割をしていることが明らかである。果皮の吸湿速度は胚の1/2~1/6であるが、表面積は胚の約15倍、粒全体の94%を占めているので、乾燥・吸湿過程における果皮の水分浸透への寄与率は73~89%である。したがって、胚の寄与率は11~27%程度と考えられる。

IV. 乾燥及び吸湿過程における亀裂の成長

胴割の程度は、乾燥処理条件によって異なり、また、乾燥後の貯蔵中においても胴割は増加する¹⁴⁾²¹⁾³⁵⁾。ここでは、乾燥または吸湿による胴割の発生状況を調べた。

1. 実験方法

供試材料は長期間一定の条件で貯蔵して水分を平衡させた。上記材料から胴割のないものを選び、デシケーター及び恒温恒湿槽で乾燥または吸湿させ、胴割率の変化、及び亀裂の成長を肉眼的に観察するとともに、顕微鏡写真によって胴割の状態を調べた。実験条件を表-3に示す。胴割は透視法によって判定し、軽度²⁾のものも胴割粒とみなした。

2. 実験結果及び考察

実験Ⅰにおける胴割発生の推移及び終極胴割率を図-7に示す。なお、供試材料の初期含水率は14.5%wbであるから、空気湿度条件と平衡含水率からみて、相対湿度94%区では吸湿、53%区、33%区、及び12%区では乾燥過程であり、75%区は殆ど水分変化を与えない低度の吸湿過程とみられる。

胴割率の推移をみると、玄米で胴割発生が認められたのは吸湿過程の94%区の場合のみであった。胴割は実験開始約10時間後から発生し、85時間で増加は終了する。白米では、実験開始直後から急激に胴割発生が認められ、終極胴割率の最も高かったのは94%区の場合で、ついで、乾燥過程の12%区と吸湿過程の75%区であった。53%区と33%区では白米においても胴割は僅少であった。米粒の胴割発生は、乾燥よりも吸湿過程において急激で、かつ多く、危険性が高く、また、玄米より白米が胴割しやすいことが明らかである。

次に、亀裂の発生過程をみる。実験Ⅰの相対湿度94%区においては、亀裂は玄米及び白米とも粒の内部から発生する。なお玄米では一条割れのみであるが、白米では

Table-3. Experimental conditions

test No.	type	initial m. c. (%wb)	ambient		difference between i. m. c. and equilibrium m. c.
			temp(°C)	r. h.(%)	
I *1	brown rice	14.5	20	94	+ 5.4 (+5.8*2)
			20	75	+ 0.4 (+0.5)
			20	53	- 4.0 (-3.2)
	milled rice	14.5	20	33	- 5.0 (-4.2)
			20	11	- 7.7 (-7.1)
II	brown rice	20	26	36	-10.1
		11	"	"	- 0.7
	milled rice	20	"	"	- 9.7
		11	"	"	- 0.6
III	brown rice	10	26	98	+14.3
		7	"	"	+17.0
	milled rice	10	"	"	+14.0
		7	"	"	+17.0

*1 I ; tested in desicator, II, III ; tested in thermo hygrostate

*2 difference in milled rice

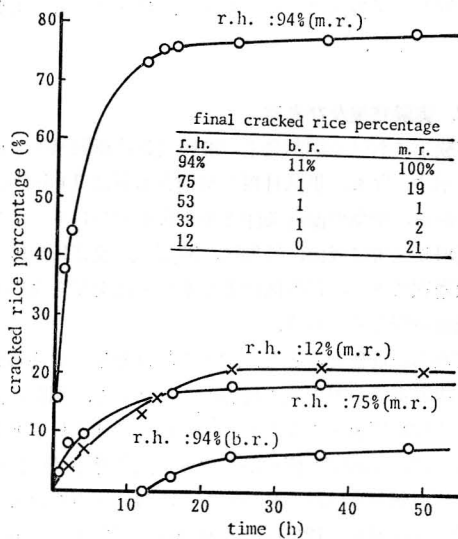


Fig. 7. Change of cracked rice percentage during drying and wetting

次第に粒表面に縦横に微細な亀裂が見えるようになる。75%区では、玄米及び白米とも横方向に軽度の一条亀裂が粒内部に生じた。53%区では、玄米は粒内部に軽度の一条割れが、白米には表面に横方向の微細な亀裂が多数認められた。33%区では、玄米、白米とも53%区の場合

と同じである。12%区の場合は、白米の表面に縦方向の微細な亀裂が現われた。実験II(急速乾燥過程)における胴割の特徴は次の通りである。白米では、初期含水率20%及び11%の区とも実験開始30分で全粒の表面に亀甲状の微細な亀裂が見られ、1時間後には20%区のもの内部まで亀裂が進行した。3時間半後では、両区とも亀裂は内部に達するが11%区の亀裂は浅い。玄米については、11%区では亀裂は認められなかった。20%区では1時間後に約7%、4時間後に12%の亀裂が認められたが、いずれも粒内部の軽度の一条亀裂であった。実験III(急速吸湿過程)における胴割の特徴は次の通りである。玄米の胴割は、30分後に24~40%、2時間後には80~99%で、いずれも一条または二条の重度の割れであった。白米では、実験開始30分ではほぼ全数に胴割が見られたが、亀裂は亀甲状であるが乾燥過程よりも粗く、直線的で横方向のものが多く、亀裂の本数も少ない。亀裂はいずれも粒内部から発生し、1時間後には亀裂は粒周縁部に達する。2時間半後には7%区のもの亀裂によって変形し、指で押すと容易に崩れるものもあった。実験IIIでは初期含水率と各実験条件における平衡含水率との落差が実験IIよりも大きかったことにもよるが、胴割発生はIIより急であり、亀裂の状態にもIIとは明らかな違いが見られた。

以上の観察から明らかなように、乾燥過程における亀裂は玄米では粒内部から、白米では粒表面から生ずる。一方、吸湿過程においては、玄米、白米とも胴割は粒内部に発生する。なお、玄米の胴割は観察しただけではそれが乾燥によるものか吸湿によるものかは識別できない。

V. 総 合 考 察

米粒の乾燥、吸湿過程における胴割は内部応力に起因するいわゆる応力割れであるが、熱応力主因説¹¹⁾については、垂井³⁰⁾、山口³⁴⁾らの研究によって否定され、一般に胴割れの主要因は粒内の水分勾配による不均一な膨張、収縮と、それに伴う水分差応力であると考えられる。なお、内部応力が胴割発生¹⁾の主要因であるにしても、これがどのような経過で発生し、米粒のどのような物理性との関わりの中で亀裂が成長するかについては不明の点がある。胴割の発生に米粒の機械的強度及び構成物質の物理的性質が影響することは当然であるが、さらにこれらの三次元的分布及び非均質性が大きく関与するであろうと考えられる。これまでの成果から、胴割に係る米粒の力学的及び形質的特徴として次のように整理されよう。

① 米粒内の水分移動には一定の経路があり¹⁸⁾、水分のx軸方向の移動速度はy軸方向のそれより3~5倍大きい¹⁵⁾。

② 米粒の部位による水分収縮率は糠層よりも胚乳で大きい。

③ 米粒中央部(胚乳)の引張強さは26~35 kg/cm²で¹¹⁾¹³⁾、圧縮強さの1/10程度である¹¹⁾。また、周縁部(果皮、糠層)の引張強さは中央部に比べ20倍以上大きい²¹⁾。

④ 米粒は低含水率では弾性的である¹¹⁾が、一般には弾性体とみなしがたく²⁰⁾、粘弾性的挙動を示し³⁴⁾、とくに胚乳部は柔軟性大で可塑性に富む¹⁸⁾。

⑤ 米粒の乾燥及び吸湿は粒表面から一様に行なわれるのではなく、胚からの乾燥・吸湿速度は果皮より数倍大きい。

以下に、本研究及び既往の成果に基づいて米粒の乾燥・吸湿過程における胴割発生機構について考察する。

吸湿過程：吸湿過程においては、玄米及び白米とも亀裂は粒内部から発生する。糠層の除去された白米では粒表面からほぼ一様に吸湿し、表層は急速に膨張する。これに伴って中央部に引張応力が発生し、これが胚乳の引

張強度以上になると亀裂が発生する。白米の粒表面からの吸湿速度は大きく、亀裂の成長は玄米よりも急激である。玄米の場合は、果皮の吸湿速度は胚よりも小さいが、胚及びその周囲から侵入した水分は粒周縁部を通過して頂部に浸透する。したがって吸湿による膨張は内部よりも表層部が速く進行し、内部に引張応力が生ずる。亀裂発生¹⁾のメカニズムは白米のそれと同じである。

乾燥過程：白米では、亀裂は表層から発生する。乾燥は粒表面から一様に行なわれ、表層は収縮しようとするが、内部はまだ高水分であるため収縮しないので、表層には接線方向に引張応力が発生し、これが引張強度以上になると亀裂が生ずる。

玄米は強靱な果皮によって覆われている。玄米では果皮よりも胚からの乾燥速度が大きいので、表層部と中央部の乾燥はほぼ同時に進行する(水分の浸透経路からみて、周縁部が若干速く乾燥することが考えられる)。胚乳の水分収縮率は糠層よりも大きいから、収縮差による引張応力が粒内部に発生する。このとき、収縮速度に対して胚乳部の塑性変形、応力緩和が追従しなく、引張応力が引張強度以上になると内部に亀裂が発生する。米粒は粘弾性体で、柔軟性を有するが、仮に弾性体とみなして収縮差による内部応力を計算すると、乾減率10%で3~5 kg/mm²になり胚乳部に引張強さ¹³⁾を超える応力を生ずる。したがって、応力緩和時間に対して十分速い乾燥において、あるいは、乾燥の進行過程においても胴割は容易に発生し得る。

山口ら³⁰⁾は乾燥過程における米粒の応力割れについて、米粒は均質で、乾燥は表面から一様に行なわれるものとして、次のように説明している。すなわち、乾燥によってまず粒表面は収縮し、表層には引張応力が生じ、内部には圧縮応力が生ずる。このとき表層は引張強さが大きいので破壊されずに塑性変形して、応力が緩和される。乾燥が進行して粒中心部の含水率が低下し、収縮しようとするが、すでに塑性変形している表層によって束縛され、内部に引張応力が生じ、亀裂が生ずる。なお、このような説は木材の乾燥割れ¹⁷⁾、ラップ碍子の乾燥切れ²³⁾等についてもとられている。

また、山口ら³⁰⁾は球乾燥モデル²⁰⁾による計算結果からもこの応力割れ機構の解釈が支持されるとしている。しかし、球モデルは乾燥過程のマクロな現象との一致性はあるにしても、米粒の等方性、均質性及び粒表面からの一様な乾燥を前提としており、必ずしも米粒の乾燥過程を厳密に表現するものでない。

加藤ら¹⁰⁾は米粒の表層部と内部に乾燥速度差がないように、粒を切断して実験を行ない、この場合も、通常の方法で乾燥した場合と同じように胴割が生ずることを認め、胴割発生の主要因は糠層と胚乳部との水分収縮差であり、乾燥初期における表層部の塑性変形は二次的要因であると報告している。このことは筆者の考えを支えるものである。

米粒の部位による水分収縮差が胴割発生の主要な原因であることを確かめるため、粘土(八郎潟ヘドロ、関東ローム、白狐山下層土)を供試して次のような模型乾燥実験を行なった。種々の含水比に調節した、大、小2種類の円盤状(大:72φmm×20mm, 小:67φmm×20mm)の試料をつくり、恒温器で55~65時間乾燥させた。なお、円盤の両側切り口にグリースを塗った紙をはり乾燥が円盤の側面からのみ行なわれるようにしたものと、全表面から一様に乾燥が行なわれるようにしたものについて実験を行なった。このような実験によって、米粒の乾燥過程における乾燥初期の表層部の塑性変形と水分差応力の関係が確かめられよう。すなわち、乾燥によりまず円盤周縁部が収縮し、塑性変形して固結した後、つづいて中央部が乾燥収縮する現象を観察できる。

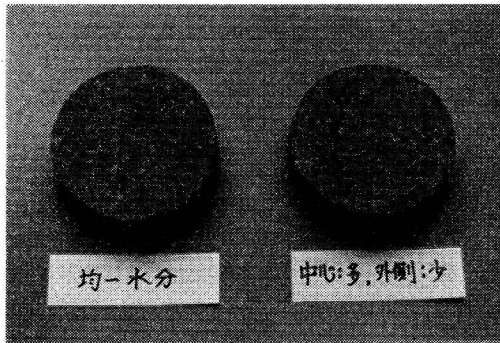


Fig. 8. A example of drying crack

実験の結果は、いずれの場合も円盤中央部に亀裂は認められなかった。上記実験は、各試料とも各部が均質に成形したものであるが、つぎに、部位によって収縮率が異なるように、周縁部を低水分、中央部を高水分の粘土で成形した2重構造の試料によって同様の実験を行なった。このような試料では図-8に示すように、試料中央部に亀裂の生ずるものがあった。模型による実験結果は米粒の胴割発生機構についての山口らの考えを完全に否定するものではないが、米粒の部位による非均質性すなわち糠層と胚乳部の水分収縮率差が胴割の発生に大

きく関与していることを示唆している。

VI. 摘 要

米粒の乾燥及び吸湿過程における胴割れ発生機構を解明するため、粒の部位による水分特性の違いに着目した実験を行ない、胴割発生機構について考察した。

1. 平衡含水率は玄米と白米で大きな差はない。白米の吸湿速度は玄米より大きく、速度定数kは玄米の1.5倍であった。

2. 米粒の水分による膨張係数を測定した。x軸方向の膨張係数は胚乳部で $0.36\sim 0.43 \times 10^{-2}/\% \text{ db}$ 、糠層で $0.28\sim 0.34 \times 10^{-2}/\% \text{ db}$ であり、前者が有意に大きかった。y軸方向については有意な差はみられなかった。

3. 玄米の果皮からの単位面積当たり吸湿速度は胚の $1/2\sim 1/6$ であった。胚の面積は約6%であり、吸湿における胚の寄与率は11~27%程度とみられる。

4. 亀裂の成長をみると、吸湿過程では玄米及び白米とも亀裂は内部から発生するが、乾燥過程では玄米は内部に、白米は表層に発生する。米粒の胴割は強靱な果皮の有無によって特徴的に現われる。

5. 米粒の応力割れについては、糠層と胚乳の収縮率差が主要な因子の一つであり、胴割発生に大きく関わっていることが明らかである。

文 献

- 1) Arora V. K., S. M. Henderson and T. H. Buckhardt: Rice drying cracking versus thermal and mechanical properties, Trans. ASAE 16(2), 1973
- 2) 伴 敏三: 人工乾燥における籾の胴割に関する研究, 農機研究所報告(8), 1971
- 3) Henderson S. M. and S. Pabis: Grain drying theory (1), J. Agri. Eng. Research 6(3), 1961
- 4) 石倉教光, 升尾洋一郎: 水稻の立毛胴割米の発生, 農業技術(22), 1967
- 5) 上出順一, 蓼内常雄: 立毛頭の水分変動および籾の吸湿特性, 山形農林学会報(31), 1974
- 6) 上出順一: 胴割の発生機構について, 農機学会第36回総会講演要旨, 1977
- 7) 神立 誠, 保井 保: 食品材料学, 光生館, 1967
- 8) 加藤宏郎, 山下律也: 胴割発生防止法に関する研究(1), 農機学会第37回総会講演要旨, 1978
- 9) 加藤宏郎, 山下律也: 胴割発生防止法に関する研究(2), 農機学会第38回総会講演要旨, 1979

- 10) 加藤宏郎, 山下律也: 胴割発生防止法に関する研究 (3), 農機学会第38回総会講演要旨, 1979
- 11) 川村 登, 堀尾尚志, 佐々木泰弘: 籾の脱稈性と米粒の引張・圧縮強さについて, 農機誌 30(2), 1968
- 12) Kunze O. R. and C. W. Hall: Moisture adsorption characteristics of brown rice, Trans. ASAE 10(4), 1967
- 13) Kunze O. R. and M. S. U. Choudhury: Moisture adsorption related to the tensile strength of rice, Cereal chem. (49), 1972
- 14) Kunze O. R.: Fissuring of rice grain after heated air drying, Trans. ASAE 22(5), 1979
- 15) 小林 一, 松田良一, 三輪精博, 増田和彦: 玄米内水分の拡散に伴う物理定数の測定に関する研究, 岐阜大農研報 (31), 1971
- 16) 小林 一, 三輪精博, 早川 謙: 乾燥過程における米の胴割発生機構に関する研究, 岐阜大農研報 (33), 1972
- 17) 満久崇磨: 木材の乾燥, 森北出版, 1965
- 18) 長戸一雄, 江幡守衛, 石川雅志: 胴割米の発生に関する研究, 日作紀 (33), 1964
- 19) 中村公則, 原城 隆: 胴割米の発生機構の解析に関する研究 (1), 東北農試研究速報 (6), 1966
- 20) 西山喜雄, 細川 明: 球乾燥モデルを使った穀粒間断乾燥の計算法, 農機誌37 (2), 1975
- 21) Nishiyama Y., M. Satoh and H. Shimizu: Cracking generation of rough rice after drying, Journal of the Faculty of agric. Iwate Univ. 14(3), 1979
- 22) 農林省食糧研究所: 米の品質と貯蔵・利用, 1969
- 23) 抜山四郎, 大谷茂盛, 大内義三: 熱と水分の並び流れによる乾燥法, 化学工学 24(12), 1964
- 25) 佐藤正夫: 籾の胴割機構について, 農及園 39(9), 1964
- 26) 清水 浩, 坂井正幸: 曲げ荷重を用いる米粒の力学的性質の探究, 農機誌 36(1), 1974
- 27) 食糧庁: 国産米穀被害等限界基準品解説書, 1966
- 28) Stermer R. A.: Environmental condition and stress cracks in milled rice, Cereal chem. (45), 1968
- 29) 高木貞治: 解析概論, 岩波書店, 1979
- 30) 垂井不二男: コンバイン収穫による異常籾の発生と乾燥, 農機誌 28(2), 1966
- 31) 寺中吉造, 原城 隆: 胴割米の発生機構の解析に関する研究 (2), 東北農試研究速報 (7), 1967
- 32) 山口信吉, 若林嘉一郎, 細野八郎: 米粒の含水率による容積変化特性, 農機誌 39(2), 1977
- 33) 山口信吉, 柴田利治, 若林嘉一郎, 山沢新吾: 米粒の局所的乾燥収縮特性, 農機学会第37回総会講演要旨, 1978
- 34) 山口信吉, 山沢新吾, 若林嘉一郎, 細野八郎: 米粒の内部応力割れ発生に関する実験的研究 (2), 農機誌 42(2), 1980
- 35) 山口信吉, 山沢新吾, 若林嘉一郎, 堀内恵三: 米粒の内部応力割れ発生に関する実験的研究 (3), 農機誌 42(3), 1980
- 36) 山口信吉, 山沢新吾, 若林嘉一郎, 館谷敏泰: 米粒の内部応力割れ発生に関する実験的研究 (4), 農機誌 42(4), 1981
- 37) 山口信吉, 山沢新吾, 若林嘉一郎: 乾燥過程における米粒内部応力の数値的解析法, 農機誌 43(3), 1981

Summary

In this paper, the moisture characteristics of pericarp and endosperm of rice was investigated experimentally, and the mechanism of cracking generation in rice kernels during drying and wetting was analyzed.

1. The equilibrium moisture content of brown rice and milled rice was nearly equal at each relative humidity in the environment. The absorption rate of milled rice was 1.5 times more than that of brown rice.

2. The coefficients of moisture expansion (or shrinkage) of endosperm and pericarp were $0.36 \sim 0.43 \times 10^{-2}/\% \text{ db}$ and $0.28 \sim 0.34 \times 10^{-2}/\% \text{ db}$ along x axis respectively, and the former was satisfactorily higher than the latter.

3. The absorption rate of embryo was 2~6 times larger than that of pericarp. It was estimated that the moisture absorption of 11~27% in brown rice was depended on the embryo.

4. In the wetting process, the cracks of brown rice and milled rice were formed at the center of kernels where the tensile stress was generated by expansion of surface layer.

In the drying process, the cracks were generated at the surface of kernels in milled rice, and at the center of ones in brown rice.

5. It was shown that the main cause of stress cracking formation during drying and wetting was the unequal shrinking (or expanding) of endosperm and pericarp.