九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

精白米の真空下における吸湿特性の研究

村田, 敏 九州大学農学部農産機械工学教室

アマラトゥンガ, K. S. P. 九州大学農学部農産機械工学教室

田中, 史彦 九州大学農学部農産機械工学教室

宮内, 樹代史 高知大学農学部

他

https://doi.org/10.15017/23512

出版情報:九州大學農學部學藝雜誌. 48 (3/4), pp.139-149, 1994-03. 九州大學農學部 バージョン: 権利関係:

精白米の真空下における吸湿特性の研究

村 田 敏・K. S. P. アマラトゥンガ 田 中 史 彦・宮 内 樹代史* 堀 善 昭 九州大学農学部農産機械工学教室 (1993 年 10 月 15 日受理)

Moisture Adsorption Characteristics of Polished Rice under Reduced Pressure Conditions

Satoshi MURATA, K. S. P. AMARATUNGA, Fumihiko TANAKA, Kiyoshi MIYAUCHI and Yoshiaki HORI Laboratory of Agricultural Process Engineering, Faculty of Agriculture, Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

緒言

農産物の吸湿特性についての研究はこれまで多く報 告されている(Banaszek et al., 1990, Chen et al., 1971, 1989, Kunze, 1991). 著者ら(1993) は先に精 白米の吸湿に関する基礎データを提示し,常圧下にお ける吸湿特性について整理したが、今回は精白米加湿 のコスト低減の一助となり得る真空下における精白米 の吸湿について整理する。

さて、農産物の乾燥及び吸湿の際の水分移動速度は 雰囲気の圧力に影響されることがこれまでの研究で明 らかになっている(例えば Rizvi, 1984).例えば、真 空下で蒸気分圧を大きくすれば吸湿は速やかに行われ ることとなるし、堆積層においても水分のむらの少な い水分調整が可能となる.精白米の攪拌を必要としな い調湿装置設計のためには真空下における精白米の吸 湿特性を測定・解析する必要があり、今回は様々な真 空圧の下で厚層及び単層の精白米の吸湿(及び乾燥) 特性を整理した.その結果、厚層では真空度が大きい ほど水分むらの小さい吸湿が行われた.また、単層の 吸湿測定の結果、吸湿が減率第一段式により説明され ることが分かり、各温度における吸湿速度定数kが算 出された.

さらに、真空圧3, 40, 130, 200, 380mm Hg に

*高知大学農学部

おいて,初期水分の違いによる精白米の胴割れについ ても研究を行い,真空圧と初期水分の胴割れへの影響 について検討した。その結果,初期含水率が高いほど 胴割れは発生しにくいことが分かった。同じく真空中 の湿度の胴割れに与える影響について測定を行い,胴 割れ防止について考察した。

材料及び方法

1. 供試材料

本測定に供試した材料は 1992 年 10 月福岡産のヒノ ヒカリである。籾すり,精米(歩留まり 90%)の後, 約2kg ずつを3段階の水分に調整し測定に供試した。



Fig. 1. Drying characteristics of ventilator.

-139-

水分調整は加熱通風乾燥(30°C以下)により行い,含 水率10,14,16%d.b.とした.なお,調湿に用いた 送風機の送風特性を図1に示す.

2. 測定装置

図2に測定装置の概略を示す。測定装置は真空タン ク(鉄製,容量約50.31,写真1参照),ボイラ(容量 約4.41),真空ポンプ(日立製作所製TYPE 4VP-C3

排気容量 1001/min) 及び記録計から構成される。 測定は大型温度制御チャンバ(前川製作所製 S005) 内で行い,ボイラのみを外付けとした。真空タンク内



Plate 1. Equilibration chamber.

部の温度及び試料重量はハーメチックシールを介した c-c 熱電対及び U ゲージ (SHINKOU TYPE UT No. 681780) で測定され、測定中の胴割れはタンク 上蓋に設けたガラス窓から観察される。また、真空タ ンクとボイラ,コールドトラップを介した真空ポンプ 及び水銀マノメータはバルブを介し接続され、それぞ れボイラ内の圧力を安全弁で一定に(1.5kg/cm²)保っ た。タンク内の圧力は光センサでマノメータをセンシ ングし,所定の圧力を保つよう(0.5~1mm Hg以 内) 電磁式バルブ (KITZ 製) を開閉し制御した。な お、重量測定用の U ゲージの出力電圧はストレイン アンプ (横河製 TYPE 3126) で増幅し、ペンレコー ダ(ナショナル製 Model VP-654B)に記録した.測 定中の温度は流入蒸気,真空タンク上部,下部及びダ ミーサンプルについて測定し打点記録計(横河製 TYPE UR 100Model 4156) に記録した.

測定装置の諸特性を図3及び表1に整理した.真空 下における空気の重量測定に与える影響は PV=nRTから容易に計算でき,図4のような結果を得る.この 計算によると1lの容積の物体の重量は圧力が10mm Hgから30mm Hgに変化した場合,わずか0.18gし か変わらず,精白米のかさ密度を0.8kg/l(800kg/m³) としても0.02%程度で充分に無視できる.なお,U



Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 3. Vacuum characteristics of equilibration chamber.

Table 1.	Vacuum characteristic data or	f
	equilibration chamber	

Time (min)	Pressure (mm Hg)
63	225
74	175
91	115
102	80
120	50
139	35
160	20
170	18
198	11
226	8
256	6
290	3

ゲージの特性を図5及び表2に示す。図に示すように 重量2kg以下において出力電圧と質量の間には一次 の比例関係が成り立つ。

3. 測定方法

(1)厚層の吸湿

一方開放端からの厚層の吸湿水分分布を調べる研究 では、図6に示すブリキ製容器1 (高さ210mm,直 径117mm ϕ ,精白米堆積層厚150mm,写真2参照) が用いられた。この容器はピストン構造になっており、 中央の棒を引き上げることにより順次,高さごとの精 白米が取り出せるように工夫されている。この試験で は30mm ごとの精白米層を取り出し、圧力の違い (25mm Hg及び406mm Hg,詳細は表3参照)によ る水分むら及び胴割れについて測定を行った。水分は 10g粒-135°C-24時間炉乾法により決定し、胴割れ 率は100粒についてその発生率をカウントした。



Fig. 4. Up thrust due to air at different pressure.



Fig. 5. Calibration curve of "U" gauge.

Table 2. "U" Gauge calibration data

Load (g)	Micro strain
$\begin{array}{c} 0.00\\ 369.68\\ 523.10\\ 816.31\\ 964.94\\ 1113.73\\ 1265.91\\ 1417.46\\ 1565.28\\ 1715.25\\ 1860.77\\ 1997.41\\ 2081.00\\ 2134.95 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.0\\ 696.0\\ 985.6\\ 1553.6\\ 1827.6\\ 2105.6\\ 2385.6\\ 2674.6\\ 2960.6\\ 3237.6\\ 3521.6\\ 3795.6\\ 4054.6\\ 4211.6\end{array}$
2289.04	4308.6



Fig. 6. Vessel No. 1. The vessel used for moisture gradient test.



Plate 2. Vessel No. 1, the vessel used for moisture gradient test.

測定の手順は、まず容器1 (写真2参照) 400gの 精白米を入れ、前述のUゲージに吊るす. 真空タン クの上蓋を閉じた後、蒸気入口のバルブを閉め、光セ ンサを働かせた状態で真空ポンプにより排気を開始す

 Table 3.
 Conditions for moisture gradient determination trial

Pressure	T	M. C.	Crack %
(mm Hg)	(°C)	(%d. b.)	
406	20	17.73	5
25	20	15.55	4

る.内圧が3mm Hg に達したところで蒸気入口を開 け,蒸気を流入させる.なお,このときボイラ内圧は 約1.5kg/cm²である.設定圧力に達したところで蒸気 バルブは閉じ,以降,自動的に制御される.この方法 によりタンク内は約30分で蒸気で満たされることと なる.測定はタンク内の圧力が所定の条件を満たした 時点を開始点とし,24時間後まで行った.

(2)単層の吸湿

精白米の吸湿シミュレーションを行うためには単層 における吸湿特性を整理する必要がある。そこで単層 における測定を表4に示す温度,圧力条件下で行った。 この測定には図7に示す容器2(直径230mm ϕ , プ ラスティック製ネット(メッシュ2mm),写真3参 照)が用いられ,100g試料の単層について吸湿試験 が行われた。測定手順は厚層試験の場合とほとんど同

Table 4.	Air conditions used to collect	sorption
	data for thin layer adsorption	trial

Temperature (°C)	Pressure (mm Hg)
3 8 20 30 30 20	5 7 15 27 16



Fig. 7. Vessel No. 2. The vessel used for one seed layer absorption test.



Plate 3. Vessel No. 2, the vessel used for one seed layer adsorption test.

じであるが、今回は排気による温度降下を抑えるため ヒータでタンク内を加熱し対処した(図2参照).

次に,単層試験は理論的解析について述べる.吸湿 は乾燥の逆過程の現象であるので,吸湿の解析にも乾 燥速度式が利用される.今回は測定データに減率第一 段式を当てはめ,吸湿特性を整理した.減率一段式は 次式で与えられる.すなわち,

 $M = (Mo - Me) \times \exp((-k \times t) + Me)$ (1) $\tau a a, z \in \tau,$

M :時刻tにおける含水率 (%d.b.)

Mo:初期含水率(%d.b.)

Me:平衡含水率 (%d. b.)

- t :測定時間(h)
- k :吸湿速度定数 (l/h)

式(1)のパラメータk, Me は測定データを基に非線 形最小自乗法により決定した.また、この測定データ への適合制度は次の2式により評価した.

$$P = \frac{100}{N} \times \Sigma \frac{|Y - Y'|}{Y}$$
(2)

$$S. E. = \sqrt{\frac{\Sigma (Y-Y')^2}{df}} \qquad (3)$$

ただし,

Y:含水率測定值(%d.b.)

- Y':含水率計算值(%d.b.)
- N:データ数

df:自由度

また,吸湿速度定数の温度依存性を整理するため, 次の Arrhenius 式が用いられた.すなわち,

 $k = d \times \exp((-f/T))$

Table 5.Pressure and initial moisture combina
tions used in the test of grain damage
due to low pressure

M. C. (%d. b.)	Pressure (mm Hg)				
	3	40	130	200	380
16.9	*	*	*	*	*
14.8	*	*	*	*	*
13.2	*	*	*	*	*

ここで,

d:式(4)のパラメータ (l/h) f:式(4)のパラメータ (K) T:絶対温度 (K)

(3) 胴割れ試験

表5の無加湿条件で胴割れ発生状況を観察し,初期 含水率及び圧力の違いによる胴割れ率について考察を 行った.温度設定を行った後,真空タンク内に種々の 含水率試料を入れ,バックライト式透過プレート上の 精白米の胴割れ(100粒)を一定時間ごとに2時間ま でカウントする.さらに,先同様の手順により蒸気を 流入させた場合の胴割れについても前述の測定を行い, 胴割れ率の経時変化を測定した.

結果及び考察

1. 厚層の吸湿特性

図8,図9及び表6,表7に測定中の精白米厚層含 水率の経時変化を示す。図に示すように同じ測定温度 においても圧力の違いにより吸湿特性は大きく変わり、 小さい圧力ほど吸湿は急激に行われる。例えば測定開 始から含水率が1%d.b.増加するのに25mm Hg で は約15分,406mm Hg では約260分を要した。吸湿 速度のみを重視すれば低圧ほど有利である。次に、図 10に開放端からの水分勾配を示す(詳細は表8参照)。 この図を見ると圧力が小さいほど水分むらが発生しに くいことが明らかである。

2. 単層の吸湿特性

20°C, 16mm Hg, 初期含水率 16.14%d. b.におけ る吸湿曲線を図 11 に示す。実線は式(1)による計算 結果で,他の測定条件におけるデータへの適合性も良 好であった。図 12 は自由含水比の経時変化であるが, 片対数グラフ上では切片 1 の直線的減少傾向が顕著に 示された。表 9 にあげた平衡含水率 Me 及び吸湿速度 定数 k はいずれも非線形最小自乗法により算出したも

Time (min)	M. C. (%d. b.)
0	17.78
30	17.95
60	18.15
91	18.35
109	18.41
169	18.58
229	18.72
259	18.77
319	18.88
349	18.93
409	19.03
439	19.07
499	19.16
529	19.19
589	19.25
619	19.27
679	19.32
709	19.34
769	19.39
799	19.41
859	19.45
889	19.47
949	19.51
979	19.52
1039	19.56
1069	19.58
1129	19.61
1159	19.63
1219	19.67
1249	19.68
1309	19.71
1339	19.73
1399	19.74
1429	19.74

 Table 6.
 Sorption data based on total weight for polished rice at 406mm Hg pressure

Time (min)	M. C. (%d. b.)
0	17.74
15	18.72
30	19.22
90	18.78
150	18.81
210	18.86
270	18.86
330	18.90
390	18.92
450	18.94
510	18.98
570	18.98
630	18.99
690	18.98
750	18.99
810	19.01
870	19.01
930	19.04
990	19.04
1050	19.07
1110	19.10
1170	19.11
1230	19.14
1290	19.16
1350	19.16
1410	19.10
1440	19.16

Table 7.Sorption data based on total weight for
polished rice at 25mm Hg pressure





ので、この曲線の適合性を評価する指標として式(2)、 (3)で示した P 及び S. E.をあわせ付している. この 場合、例えば S. E. で 0.02~0.33% d. b. 程度の精度が 補償された. さて、圧力の吸湿に与える影響であるが、 図 13 に示すように温度が同じ (30°C) でも圧力の違



Fig. 8. Moisture adsorption characteristics based on total weight at 20°C and 25mm Hg pressure.



- Fig. 10. Moisture content variation along the sample profile after 24 hours of adsorption.
- Table 8. Moisture content Variation after 24
hours along the sample profile at
25 and 406mm Hg pressure

Mean depth	Pressure	(mm Hg)
(mm)	25	406
$15 \\ 45 \\ 75 \\ 105 \\ 135$	18.23 17.75 17.73 17.63 18.05	21.22 19.32 18.62 18.36 18.28



Fig. 11. Sorption curve for the air temperature of 20°C and absolute pressure of 15mm Hg for 16.14%d.b. initial moisture polished rice.



Fig. 12. Relationship of moisture ratio with time for 16.14%d. b. initial moisture polished rice at 20°C and 15mm Hg pressure.



Fig. 13. Sorption curves for the air temperature of 30°C under different pressure.

いで吸湿曲線は変化することがわかる. なお, 真空ポ ンプを稼働させながら蒸気を 30 分流入させるこの方 法によると, タンク内圧はそのまま蒸気圧と考えて良 い. 各測定温度に対応する飽和蒸気圧とこれに対する タンク内圧の比から相対湿度を算出し, これを表 10 に記した.

3. 温度の吸湿に及ぼす影響

図 14 に初期含水率 14~15%d. b. 精白米の 3, 8, 20, 30℃における吸湿曲線を示す。この図から温度 が吸湿の支配因子のひとつであることがわかる。平衡 含水率について見ると,高温ほど低くなり,一方,吸

Table 9. Initial moisture content (M_0) , sorption coefficient (k) of Equation 1, equilibrium moisture content (M_e) calculated by non-linear least squares method, standard error of the estimate and mean relative percentage deviation (P) under each temperature/relative humidity condition

T=30°C	P=27mm Hg			
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	S. E.	Р
15 1991	.3666	22.2185	.41672	1.6899
14.6245	.1162	28.0518	.24851	.9102
16.8753	.3599	21.6372	.31758	1.1203
T=30°C	P=16mm Hg			
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	S. E.	Р
10.1683	.3396	9.9839	.0204	.1578
14.6099	.0039	21.4455	.05098	.263
16.67	.4717	15.7086	.04527	.2193
T=30°C	P=7mm Hg			
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	S. E.	Р
10.2051	.1269	9.5803	.02294	.1799
14.857	.6928	12.1867	.21227	1.4363
16.9903	.699	13.0111	.30125	1.763
T=20°C	P=15mm Hg			
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	<i>S. E.</i>	Р
10.4783	.3122	18.4403	.48691	2.3926
14.4527	.1681	25.8449	.21297	.774
16.144	.0922	29.3511	.15306	.5197
T=8°C	P=7mm Hg			
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	<i>S. E</i> .	Р
10.1698	.1003	27.8169	.20011	.7776
14.9402	.0804	28.4609	.18804	.7222
16.9107	.0713	29.0175	.07898	.2785
T=3°C	P=5mm Hg			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
M_0 (%d. b)	k(-l/h)	M_e (%d. b)	S. E.	Р
14.7389	.0854	28.5086	.20194	.7269
14.7227	.0444	35.4604	.32893	1.2147
10.9017	.0926	27.5238	.1665	.7041
16.1415	.0969	27.0462	.30499	1.1349

湿速度は増加する。例えば低温 3 °C 及び 8 °C の吸湿 曲線を見ると 24 時間では平衡に達しない。このよう に吸湿速度定数 k は低温ほど小さく、温度に強く依存 する。精白米の吸湿においては吸湿速度定数 kArrhenius型の温度依存性を持つことが図 15 から確 認された。ここで表 11 に計算の結果得られた式(4) のパラメータ d, f及び標準誤差 S. E. を整理する。

4. 胴割れ

無加湿の胴割れ試験では、低圧ほど早期に胴割れが

観察された.特に表面のひび割れが多く,また長時間 経過後ではわずかながら内部の軽胴割れが発生した. このように胴割れの進行様式や発生は精白米の初期含 水率により大きく異なった.次に,図16は同材料3 mm Hg,20℃の測定結果であるが,圧力の違いによ る影響が顕著に表れている. 圧力の影響をより詳し く検討するために図17~図20に圧力40,130,200 及び380mm Hgにおける胴割れ率の経時変化を示す. これらの図から胴割れの過程は前述のように圧力と初







Fig. 15. Arrhenius plot for sorption of polished rice.



Fig. 16. Grain damage of polished rice at 20°C and 3mm Hg Pressure.

期含水率に依存することがわかる。低圧下では胴割れ の進行は非常に速く、短時間で全粒が割れてしまう。 村田ら(1992)によると精白米の吸湿過程では材料内



Fig. 17. Grain damage of polished rice at 20°C and 40mm Hg Pressure.



Fig. 18. Grain damage of polished rice at 20°C and 130mm Hg Pressure.



Fig. 19. Grain damage of polished rice at 20°C and 200mm Hg Pressure.

に水分勾配ができ、これによる内部応力の発生で胴割 れが誘発されることが論述されており、本測定結果も この理論が適用されるものと考える.この胴割れ防止



Fig. 20. Grain damage of polished rice at 20°C and 380mm Hg Pressure.



Fig. 21. Grain damage at 20°C and 40mm Hg pressure with the introduction of steam.

策として雰囲気の湿度の制御が考えられる.

次に加湿中の胴割れについて検討する. 図 21 は 40mm Hg 加湿中の胴割れの測定結果であるが,初期 含水率の違いによる胴割れの発生の相違が顕著に示さ れている.例えば,初期含水率 14.8%d. b.,温度 20 °C,圧力 40mm Hg で蒸気を流入させ湿度を調整し た場合,40分後に 18%の胴割れが発生した.実際は 含水率 17.0%d. b. (水分 14.5%w. b.)から 19.0%d. b. (16%w. b.) への加湿が重要であるが,図 21 に示 すように初期含水率が 16.9%d. b.の場合,胴割れは 発生しなかった。精白米の真空加湿は極めて有効な手 段であると考える.

要 約

真空下における精白米の吸湿試験の結果,その吸湿 特性が明らかとなった。厚層の吸湿試験では低圧ほど 層ごとの水分むらが小さいことがわかり,単層試験で は吸湿の機構が減率第一段式に従うことが明らかとな た、また,この式の測定データへの適合性は良好で, 0.02~0.33%d. b. の標準誤差を含んだ. さらに, 非 線形最小自乗法で算出した吸湿速度定数 k に Arrhenius型の温度依存性があることを確認した. 無 加湿の胴割れ試験では低圧ほど表面のひび割れが発生 しやすく,特に高含水率ほど胴割れが多かった. しか し,加湿中の胴割れ試験では高含水率ほど胴割れは低 減された.

今後の課題としては、例えば3℃において相対湿度0~100%には蒸気圧換算でわずか5.682mm Hgの変化しか無く、これを精度良く調整するためには真空タンク内の湿度制御装置を現在の光センサ付き水銀マノメータ(制御精度0.5mm Hg)からより高精度のものに取り替える必要がある。低温における湿度制御が課題となる。しかしながら本研究はこれまで報告の少なかった精白米の真空調湿について、組織的なデータを示したところに意義がある。

辞

実際の測定に当たっては、本研究室専攻生廣瀬孝志 氏、渋谷和子氏の御協力を得た.ここに記して感謝の 意を表する.

謝

文

献

- Banaszek, M. M. and T. J. Siebenmorgen 1990 Adsorption Equilibrium Moisture Content of Long-Grain Rough Rice, J. Am. Soc. Agr. Eng., 33 (1), 247-252
- Chen, C. C. and R. V. Morey 1989 Equilibrium Relative Humidity Relationships for Yellow-Dent Corn. J. Am. Soc. Agr. Eng., **32** (3), 999 -1006
- Chen, C. S. and J. T. Clayton 1971 The Effect of Temperature on Sorption Isotherms of Biological Materials, Trans. of ASAE., 14 (5), 927 -929
- Kunze, O. R. 1991 Moisture Adsorption in Cereal Grain Technology Review with Emphasis on Rice, J. Applied Engineering in Agriculture, 7 (6), 717-723
- 村田 敏,小出章二,宮内樹代史 1992 精白米の水 浸裂傷に関する研究,農業機械学会誌,54(1), 67-72
- Murata, S., K. S. P. Amaratunga, F. Tanaka and Y. Hori 1993 J. Fac. Agr., Kyushu Univ., 38 (1-2), 印刷中
- Rizvi, S. S. H. and N. Santos, Nigogosyan 1984 An Accelerated Method for Adjustment of Equilibrium Moisture Content of Foods, J. Food Engineering, 0260-8774, 3-11

Summary

Driving force for moisture transfer can be conceptually increased by maintaining head space at very high or very low vapour pressures. Under sub atmospheric pressures the sorption resistance due to interstitial air is low. Using this concept, the adsorption and desorption properties for polished rice have been measured under reduced pressure for theoretical interpretation of the process which can be used in commercial moisture adjusters to get even sorption of batch and to get rid of costly agitation. Data were collected for thick and one seed layers under different pressure conditions. In the thick layer trial, higher uniformity of sorption was found at lower total pressure conditions. One seed layer sorption trial was conducted for the determination of sorption coefficient "k" of the first falling rate moisture transfer equation for different temperature conditions. Predicted values of moisture were found to be in good agreement with observed data. Grain damage due to low pressure was investigated for different initial moisture polished rice, under 3, 40, 130, 200 and 380mm Hg pressure. Higher moisture polished rice was more liable to crack under reduced pressure. In the same trial the effect of head space humidity on seed damage was investigated introducing steam under pressure of 1.5kg/cm² into the equilibration chamber. According to the results cracks were all middle cracks and also high in low initial moisture polished rice.