乾燥条件が無洗米の水浸割粒に及ぼす影響

川上晃司^{1*}, 藤田明子¹, Neoh Tze Loon², 吉井英文²

¹ 株式会社サタケ

² 香川大学農学部

Effect of Drying Conditions on Soaking Cracks in Rinse-free Rice

Koji Kawakami^{1*}, Akiko Fujita¹, Neoh Tze Loon² and Hidefumi Yoshii²

¹ Satake Co., Ltd., 2-30 Saijonishihonmachi, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8602

² Faculty of Agriculture, Kagawa University, 2393 Ikenobe, Miki, Kita, Kagawa 761-0795

To clarify the influence of drying conditions on moisture content and soaking cracks in rinse-free rice, the authors performed drying tests with rinse-free rice under various conditions (temperature, 30–50°C; relative humidity, 50–80%; air velocity, 0–1.5 m/s). Rice with a high rate of soaking cracks had a decreased yield in the milling process and lower quality after cooking. Therefore, it is important not to increase soaking cracks during the drying process in the production of rinse-free rice. At low relative humidity and high temperature, a remarkable increase in soaking cracks was observed. In contrast, the generation of soaking cracks was suppressed at high air velocity. The physical properties of the rice kernels changed dramatically when the temperature exceeded the glass transition temperature (T_g). Although soaking cracks increased slightly in the glassy region, they increased dramatically in the rubbery region.

(Received Sep. 9, 2011; Accepted Feb. 23, 2012)

Keywords : rinse-free rice, drying, moisture content, soaking crack, glass transition

キーワード : 無洗米, 乾燥, 含水率, 水浸割粒, ガラス転移

無洗米は、洗米時の水の使用量、人件費、排水処理代を低減できるため、学校給食や外食産業などの業務用を中心に使用されている。年間1人当たりの米の消費量が年々減少していく中で、無洗米の生産量は年々増加している。今まで、無洗米についての研究は、成分測定やご飯の官能評価を中心に行われている^{1)~4)}。さらに、我々は、無洗米の酒造適性および貯蔵性を解明するため、無洗米を用いてパイロットスケールでの醸造試験を行い、無洗米処理が製造工程を省力化して環境負荷を低減すると同時に、未処理の精白米を使用した場合と同等の品質を有する清酒が醸造可能であることを示した^{5)~7)}。無洗米の製造工程では、乾燥工程で水浸割粒を増加させないことが重要である。なお、水浸割粒とはお米を水に浸漬した際に腹側に割れを生じた粒のことを言う。なぜなら、水浸割粒の多い米は取扱いが難しく、生産ロスにもつながり⁸⁾、粒感のないご飯となるため消費者にとって魅力的ではない^{9)~11)}。乾燥速度は、初期含水率、乾燥温度、相対湿度、空気流量、穀類の種類、品種、乾燥機の種類など様々な要因に影響される¹²⁾。異なる温度

における含水率の等温収着曲線は、乾燥工程を適切にモデリングする上で不可欠である。

水浸割粒の発生について、小出ら¹⁰⁾はあきたこまちの精白米を用いて検討を行い、精白米の含水率が低いほど、また水温が低いほど発生率が高くなると報告している。また、佐藤ら¹³⁾は精米歩合40%の酒造用米を用いて検討を行い、水浸割粒の発生を防止するためには、精白米の含水率を10%以下もしくは14%以上(ウェットベース)にし、洗米・吸水時の水温を出来る限り低くすることが重要であると報告している。

そこで本研究では、恒温恒湿器を用いて、無洗米を異なる温度(30~50°C)、相対湿度(50~80%)、気流速度(0~1.5 m/s)で乾燥させ、乾燥による無洗米の含水率、および水浸割粒変化挙動について検討したので報告する。

実 験 方 法

1. 材 料

無洗米は、市販の2008年広島県産コシヒカリを使用した。初期含水率は18.74%(ドライベース)であった。無水塩化リチウム(LiCl)および硝酸カリウム(KNO₃)は、ナカライテスク株式会社より購入した。塩化マグネシウム・

¹ 〒739-8602 広島県東広島市西条西本町 2-30

² 〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸 2393

* 連絡先 (Corresponding author), k-kawakami@satake-japan.co.jp

6水和物 ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 硝酸マグネシウム・6水和物 ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) および無水塩化ストロンチウム (SrCl_2) は, 和光純薬工業株式会社から購入した. なお, 全ての試薬は特級を用いた.

2. 実験装置

実験装置は, 温度および相対湿度を一定に制御できる恒温恒湿器 (エスベック株式会社製: KHU-113) を使用した. この装置は, 温度 $-20 \sim 85^\circ\text{C}$, 相対湿度 $40 \sim 90\%$ の範囲で制御可能である. 気流速度の効果を検討するため, 遠心ファンを恒温恒湿器の内部に置き, 米の上側からブローした. 気流速度は, 風速計 (日本カノマックス株式会社製: Model 6621) を用いて測定した.

3. 米の等温収着曲線

等温収着曲線は, 特定の温度での平衡含水率と相対湿度の関係を表す. 無洗米 3g を, 平衡相対湿度を維持するために, 5つの異なる飽和塩溶液 (LiCl , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, SrCl_2 , KNO_3) を含むそれぞれのデシケーターに静置した. すべてのデシケーターを 50°C の恒温器に置き, サンプル重量の変動が3日連続の測定で 0.01g より小さくなるまで毎日モニターした. 平衡含水率は, ハロゲン水分計 (メトラー・トレド株式会社製: HB-43) を使用して測定した. 同様の実験を, 30 および 40°C の条件下で行った. デシケーター内の相対湿度を, Table 1 に示す. GAB 式(1)は, 食品の水分活性と含水率の関係を表現するために広く使用されている¹⁴⁾¹⁵⁾.

$$w^* = \frac{w_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (1)$$

なお, w^* は平衡含水率, w_m は GAB 単分子層含水率 (ドライベース), C は収着の単分子層熱に関連する定数, K は多分子層の収着熱に関連する定数, a_w は水分活性である.

4. 乾燥条件

無洗米は購入後, 実験をするまで冷蔵庫に保管した. 無洗米を薄い層にしてふるい (孔径: $600\mu\text{m}$) に置き, 温度を 30 , 40 および 50°C に調節した. それぞれの温度において, 相対湿度を 50 , 60 , 70 および 80% に調節した. さらに, 気流速度を 0 , 0.5 , 1.0 および 1.5m/s に調節した. なお, 気流速度 0m/s とはブローのない状態を指す. 空気は無洗米に対して垂直方向にあてた. 含水率および水浸割粒は, 80 分経過まで 10 分毎に測定した.

5. Efremov モデルへの適用

Efremov のモデルについて説明する¹⁶⁾. 一定乾燥空気条件下に, 湿潤固体を静置した場合の乾燥速度を, 1次元等方拡散のマクロ的にみた固体中の見かけの水分拡散係数を用いて以下のような拡散方程式で表すことができる.

Table 1 Saturated salt solutions and their corresponding relative humidity at 30 , 40 , 50°C

Salts	Temperature		
	30°C	40°C	50°C
LiCl	7%	6%	3%
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	31%	30%	36%
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50%	55%	50%
SrCl_2	80%	63%	63%
KNO_3	94%	91%	83%

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで, w は含水率, τ は時間, x は x 方向の距離, D は見かけの米内部拡散係数である. また, 表面での乾燥速度 J は, 平衡含水率 w^* を用いて表すことができる.

$$J = -D \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=0} = k(w^* - w) \quad (3)$$

ここで, k は表面での外部物質移動係数である. 式(2)に対してラプラス変換法を用いて, 無次元含水率として式(4)を得る.

$$\frac{w - w^*}{w_0 - w^*} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right) + e^{(k/D)x + (k^2/D)\tau} \text{erfc} \left(k\sqrt{\frac{\tau}{D}} + \frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right) \quad (4)$$

ここで, w_0 は初期含水率である. $x=0$ において,

$$\frac{w - w^*}{w_0 - w^*} = e^{(k^2/D)\tau} \text{erfc} \left(k\sqrt{\frac{\tau}{D}} \right) \quad (5)$$

とかける. 式(5)において, k と D の未知数を2つ含むため, 次のパラメータ σ (固有時間), n 指数を導入して, 式(5)を式(7)のように変形した.

$$\sigma = \frac{D}{\pi k^2} \quad (6)$$

$$\frac{w - w^*}{w_0 - w^*} = \exp((\tau/\sigma)^n/\pi) \text{erfc}(\sqrt{(\tau/\sigma)^n/\pi}) \quad (7)$$

なお, 含水率変化に最も相関できるように, σ と n のパラメータを決定した. 固有時間が大きいほど, 米表面からの水の揮散速度に比較して固体中の水の拡散移動が速くなり米表面の物質移動が小さくなるので, 乾燥速度が遅くなることを意味している. よって, 固有時間は乾燥速度を推算する上で最も重要なパラメータである.

6. 水浸割粒の計測

水浸割粒の評価方法として, いくつかの報告例がある⁹⁾¹⁰⁾. 水浸割粒測定時の浸漬時間は, 柳瀬および大坪⁹⁾ は 30 分

Fig. 1 Representation of the appearance of two types of soaking grains.

(a) not cracked grain, (b) open crack formation of rinse-free rice during soaking. The circle indicates a soaking crack.

間、小出ら¹⁰⁾は60分間と報告している。本研究では、100粒の無洗米を室温で20分間浸漬した後、Fig. 1のように腹側に割れを生じた粒を水浸割粒とした。

実験結果および考察

1. 等温収着曲線

Fig. 2に無洗米の等温収着曲線を示す。図中の実験点より、GAB式の吸着等温線パラメータを求めてTable 2に示した。30、40、50℃ともに、水分活性の上昇に伴い平衡含水率は増加した。また、一定の水分活性で温度が低下することで平衡含水率は増加した。温度が高くなると同じ水分活性においても水の運動性が高くなるために吸着水量が減少し、結果として平衡含水率が若干低下したと考えられる¹⁷⁾。Table 2に示すように、水の単分子吸着相を示すGAB式の平衡含水率パラメータの w_m が8-11%（ドライベース）である。一方、無洗米の含水率 w が約16-19%（ドライベース）のため、無洗米の乾燥過程は多分子層吸着の水の除去であると考えられる。

2. 無洗米の乾燥

乾燥試験のデータは、Table 3に示すようにEfremov式で解析した。定数の値は、従属する変数として無次元含水率を考慮して推定した。なお、初期含水率 w_0 は18.74%（ドライベース）であった。Fig. 4、5および6の乾燥速度の相関を表している実線は、すべてEfremov式で計算したものである。Fig. 3に示すように、固有時間 σ は気流速度の増加および温度の上昇で減少した。固有時間 σ は、米内部拡散係数(D)と外部物質移動係数(k)の関数に依存したパラメータである。乾燥温度の上昇や気流速度の増加で、固有時間は減少した。米内部拡散係数を定数とした場合、乾燥温度の上昇および気流速度の増加で外部物質移動係数が大きくなり、固有時間が減少すると考えられる。Efremov

Fig. 2 The relationship between water activity (a_w) and equilibrium moisture content.

◇, 30℃; □, 40℃; △, 50℃.

Table 2 Estimated parameters for GAB model isotherm equation and coefficient of determination

Temperature (℃)	Constants			r^2
	w_m (% dry basis)	K	C	
30	10.56	0.60	38.38	0.988
40	9.57	0.63	32.39	0.966
50	8.14	0.71	80.72	0.999

式は、米の乾燥挙動を固有時間 σ と指数 n （機構メカニズムのパラメータ）の2つのパラメータにより相関できることから非常に有用な乾燥挙動推算式であると考えている。相対湿度が80%と高い場合は、明確な結果が得られなかった。また、機構メカニズムのパラメータ n が乾燥空気湿度に大きく依存することから、各パラメータの乾燥空気温度、湿度、風速への依存は、十分検討する必要があると考えている。

無洗米の乾燥速度に及ぼす気流速度の影響を、横軸乾燥時間に対して縦軸無次元含水率でFig. 4に示す。気流速度がある場合、乾燥速度は速くなったものの、気流速度0.5 m/sより速い場合、気流速度の違いが乾燥速度に与える影響は認められなかった。この場合、乾燥についての律速段階は米粒表面からの水分移動ではなく、むしろ米粒内部での水分移動である。Iguazら¹⁸⁾は、米は気流速度が速いほど乾燥速度が速いものの、米を高温（35℃）で乾燥させた時は気流速度が無視できると報告している。本実験結果では、米を高温（50℃）で乾燥しているため、Iguazら¹⁸⁾の報告と同様の結果となった。

Fig. 5に、無洗米の乾燥に及ぼす乾燥空気の相対湿度の影響を、Fig. 4と同様の図で示す。相対湿度は、乾燥速度に大きな影響を与えた。相対湿度80%の場合は、80分経過後も無次元含水率0.84と、含水率低下はほとんど認めら

Table 3 Results of drying experiments and analysis using Efremov model equation

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Air velocity (m/s)	w_0 (% dry basis)	w^* (% dry basis)	n	σ (s)	r	SEM
30	50	0.0	18.74	14.00	1.80	47.81	0.974	0.021
30	60	0.0	18.74	16.74	1.95	46.51	0.977	0.019
30	60	0.5	18.74	16.74	1.57	25.16	0.977	0.024
30	60	1.0	18.74	16.74	1.23	27.36	0.982	0.020
30	60	1.5	18.74	16.74	1.39	26.89	0.990	0.014
40	50	0.0	18.74	12.99	1.62	37.37	0.984	0.018
50	50	0.0	18.74	12.50	1.73	22.34	0.977	0.022
50	50	0.5	18.74	12.50	1.75	11.59	0.983	0.027
50	50	1.0	18.74	12.50	1.45	8.79	0.984	0.026
50	50	1.5	18.74	12.50	1.76	11.13	0.982	0.026
50	60	0.0	18.74	13.49	2.23	37.09	0.977	0.025
50	60	0.5	18.74	13.49	1.43	24.13	0.998	0.007
50	60	1.0	18.74	13.49	1.04	14.22	0.996	0.009
50	60	1.5	18.74	13.49	1.13	14.44	0.998	0.006
50	70	0.0	18.74	16.02	3.16	48.64	0.977	0.027
50	70	0.5	18.74	16.02	1.45	10.53	0.998	0.009
50	70	1.0	18.74	16.02	1.83	18.18	0.980	0.027
50	70	1.5	18.74	16.02	1.36	11.62	0.998	0.009
50	80	0.0	18.74	16.47	3.53	169.69	0.958	0.007
50	80	0.5	18.74	16.47	0.73	396.18	0.992	0.005
50	80	1.0	18.74	16.47	1.33	161.97	0.978	0.011
50	80	1.5	18.74	16.47	0.52	298.62	0.984	0.008

Fig. 3 Evolution of the characteristic time as calculated from Efremov's equation according to air velocity.

◇, 50%; □, 60%; △, 70%. Closed symbols indicate the characteristic time at 30°C. Open symbols indicate the characteristic time at 50°C.

れなかった。一方、相対湿度 50~70% の場合は、相対湿度が低いほど乾燥速度は速いものの、80 分経過後には、全ての相対湿度で無次元含水率 0.3 程度と同程度となった。

無洗米の乾燥に及ぼす乾燥温度の影響を、Fig. 6 に示す。温度が高いほど乾燥速度が速く、温度 50°C の時、80 分経過

Fig. 4 Calculated and experimental moisture ratio at 50°C, 50% relative humidity and four different drying conditions.

◇, 0 m/s; □, 0.5 m/s; △, 1.0 m/s; ○, 1.5 m/s. Solid lines indicate the calculated curves with Efremov's equation. Symbols indicate the experimental data.

後には無次元含水率 0.3 となった。

3. 水浸割粒

Fig. 7 に、温度 50°C、相対湿度 50% での、水浸割粒の割合に対する気流速度的影響を示す。20 分経過では気流速度的の違いによる水浸割粒増加への影響は認められなかった

Fig. 5 Calculated and experimental moisture ratio at 50°C, 0 m/s air velocity and four different drying conditions.

◇, 50%; □, 60%; △, 70%; ○, 80%. Solid lines indicate the calculated curves with Efreimov's equation. Symbols indicate the experimental data.

Fig. 6 Calculated and experimental moisture ratio at 50% relative humidity, 0 m/s air velocity and three different drying conditions.

◇, 30°C; □, 40°C; △, 50°C. Solid lines indicate the calculated curves with Efreimov's equation. Symbols indicate the experimental data.

が、40 分経過以降は気流速度が速いほど水浸割粒の増加が少なかった。

遠心ファンを使用しない場合、すなわち気流速度 0 m/s、温度 50°C での、水浸割粒の割合に対する相対湿度の影響を、Fig. 8 に示す。相対湿度が 50% と低い場合、その他の相対湿度と比較して、水浸割粒の増加が明らかに多くなった。80 分経過後の水浸割粒の割合を比較すると、相対湿度 50% では水浸割粒の割合が 79% であるのに対し、相対湿度 60, 70, 80% では水浸割粒の割合はそれぞれ 46, 36, 27% であった。Lloyd および Siebenmorgen¹⁹⁾ が報告しているように、相対湿度が低くなると精白米表層から水分が

Fig. 7 Comparison of soaking cracks at 50°C, 50% relative humidity and four different drying conditions.

■, 0 m/s; ▨, 0.5 m/s; □, 1.0 m/s; ▩, 1.5 m/s.

Fig. 8 Comparison of soaking cracks at 50°C, 0 m/s air velocity and four different drying conditions.

■, 50%; ▨, 60%; □, 70%; ▩, 80%.

除去されることで表面亀裂や破碎の増加が認められ、結果として水浸割粒の増加に繋がったと考えられる。

Fig. 9 に、気流速度 0 m/s、相対湿度 50% での、水浸割粒の割合に対する温度の影響を示す。水浸割粒は、温度が高いほど増加した。80 分経過後の水浸割粒の割合を比較すると、温度 30, 40, 50°C の水浸割粒の割合は、それぞれ 32, 49, 79% となった。

4. 乾燥曲線と水浸割粒の割合の関係

Fig. 10 に示すように、無次元含水率が減少することで水浸割粒は増加した。特に、無次元含水率が 0.4 より小さい場合、水浸割粒が大幅に増加した。これは、歪の蓄積により水浸割粒の割合が増加する領域があることを示唆していると考えており、今後この点について検討したい。なお、温度 30°C の場合、80 分経過後も無次元含水率は 0.5 であ

Fig. 9 Comparison of soaking cracks at 50% relative humidity, 0 m/s air velocity and three different drying conditions.

■, 30°C; ▨, 40°C; □, 50°C.

Fig. 10 The relationship between moisture ratio and soaking cracks at 50°C, 50% relative humidity and 0 m/s air velocity.

△, moisture ratio; +, soaking cracks. A solid line indicates the calculated curves with Efreimov's equation. Triangles indicate the experimental data.

り、水浸割粒の大幅な増加は認められなかった。

米の乾燥を、乾燥においてよく用いられている含水率と乾燥物質のガラス転移温度で表す Fig. 11 で考察する²⁰⁾。Fig. 11 では横軸に含水率（ドライベース）、縦軸に温度を示し、実線で米のガラス転移温度曲線を示す。無洗米を 50°C で乾燥すると、無洗米は室温から 50°C まで温度上昇し、ガラス状態からガラス転移温度を超えてラバー状態へと変化する。米の乾燥後に温度を室温に戻すと、ラバー状態からガラス転移温度の線を横切って再びガラス状態に戻る。この米の温度上昇、温度低下に伴う軟化、硬化現象に伴う米内部の歪発生が割れと関連しており、乾燥温度が高

Fig. 11 Brown rice state diagram (as adapted from Perdon et al.²⁰⁾) and hypothetical drying process for a rice kernel depending on temperature.

—, Tg; ·····, 30°C; ---, 50°C. The circle indicates initial moisture content (18.74% db). A solid line indicates glass transition line. Dotted lines indicate 30 and 50°C drying process, respectively.

いほど大きな歪が発生するので水浸割粒が増加すると考えられる。一方、無洗米を 30°C で乾燥すると、無洗米は室温から 30°C まで温度上昇するが、ガラス転移温度を超えることはなくガラス状態のままである。Fig. 11 においては、割れについてガラス転移温度と含水率の関係線をまたぐ相転移のみで考察した。しかし、Fig. 10 に示すように割れが増加する領域が存在することより、乾燥履歴と歪の蓄積といった米の力学的履歴現象について今後検討する必要があると考えている。

要 約

恒温恒湿器を用い、温度 30~50°C、相対湿度 50~80%、気流速度 0~1.5 m/s の条件下で、無洗米の乾燥特性を調べ無洗米の等温収着曲線を測定した。乾燥空気相対湿度が低い場合、水浸割粒が著しく増加した。また、温度が高い場合も、同様に水浸割粒が増加した。気流速度が速くなると、水浸割粒は減少した。米粒の物理的性質は、米粒温度がガラス転移温度を越えることで劇的に変化すると考えられる。水浸割粒の結果より、ガラス状態では水浸割粒の増加がわずかなものの、ラバー状態では劇的に水浸割粒が増加すると考えられる。

文 献

- 1) 深井洋一, 松澤恒友, 石谷孝佑, 無洗米の品質特性および貯蔵性の評価, 日本食品科学工学会誌, **44**, 367-375 (1997).
- 2) 渡邊智子, 廣瀬理恵子, 安井明美, 無洗米とその米飯の成分挙動および嗜好性, 日本食品科学工学会誌, **46**, 731-738 (1999).
- 3) 大能俊久, 堀川あゆみ, 金子隆宏, 大久長範, 無洗米市販品

- の米飯特性の評価, 日本食品科学工学会誌, **51**, 686-689 (2004).
- 4) 小林由実, 山川敬恵, 清水祐美, 山となつみ, 小林宣子, 無洗米の品質評価の検証, 岐阜女子大学紀要, **38**, 13-19 (2009).
- 5) 川上晃司, 越智龍彦, 三上隆司, 藤井一嘉, 谷本昌太, 酒造用原料米の無洗米化とその酒造適性, 醸協, **102**, 146-154 (2007).
- 6) 川上晃司, 越智龍彦, 三上隆司, 藤井一嘉, 谷本昌太, 貯蔵中における無洗米の成分および酒造適性の変化, 広島食工技研報, **24**, 15-20 (2007).
- 7) 川上晃司, 越智龍彦, 三上隆司, 藤井一嘉, 谷本昌太, 無洗米を用いた清酒醸造, 醸協, **103**, 55-65 (2008).
- 8) Cnossen, A.G., Jiménez, M.J. and Siebenmorgen, T.J., Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering*, **59**, 61-69 (2003).
- 9) 柳瀬 肇, 大坪研一, 精米加工と米飯食味の関係 (第1報) 精米品質と米飯テクスチャーならびに炊飯特性の関係, 食総研報, **46**, 148-161 (1985).
- 10) 小出章二, 田子雅則, 西山喜雄, 胴割れ米とひび割れ米の水浸裂傷, 日本食品科学工学会誌, **48**, 69-72 (2001).
- 11) Genkawa, T., Uchino, T., Tanaka, F., Hamanaka, D. and Tomizawa, H., Effect of low-moisture preconditioning of rice on texture and eating quality. *Journal of JSAM*, **71**, 78-84 (2009).
- 12) Hacıhafızoglu, O., Cihan, A., Kahveci, K. and de Lima, A.G.B., A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. *European Food Research and Technology*, **226**, 787-793 (2008).
- 13) 佐藤稔英, 中山繁喜, 米倉裕一, 平野高広, 山口佑子, 遠山良, 水浸裂傷の発生要因の検討, 醸協, **106**, 103-111 (2011).
- 14) Timmermann, E.O., Chirife, J. and Iglesias, H.A., Water sorption isotherms of foods and foodstuffs : BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, **48**, 19-31 (2001).
- 15) Sablani, S.S., Bruno, L., Kasapis, S. and Symaladevi, R.M., Thermal transitions of rice : Development of a state diagram. *Journal of Food Engineering*, **90**, 110-118 (2009).
- 16) Efremov, G.I., Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions. *Drying Technology*, **20**, 55-66 (2002).
- 17) Mohamed, L.A., Kouhila, M., Jamali, A., Lahsasni, S. and Mahrouz, M., Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantium*). *Journal of Food Engineering*, **67**, 491-498 (2004).
- 18) Iguaz, A., San Martín, M.B., Maté, J.I., Fernández, T. and Vírveda, P., Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido* cultivar) at low drying temperature. *Journal of Food Engineering*, **59**, 253-258 (2003).
- 19) Lloyd, B.J. and Siebenmorgen, T.J., Environmental conditions causing milled rice kernel breakage in medium-grain varieties. *Cereal Chemistry*, **76**, 426-427 (1999).
- 20) Perdon, A., Siebenmorgen, T.J. and Mauromoustakos, A., Glassy state transition and rice drying : Development of a brown rice state diagram. *Cereal Chemistry*, **77**, 708-713 (2000).
- (平成23年9月9日受付, 平成24年2月23日受理)