蒸煮米の振動流動層凍結乾燥とその製品特性

鈴木寛一*・松本光雅*・久保田清*・江坂宗春*

Freeze Drying of Cooked Rice in a Vibrated Bed and Product Properties

Kanichi SUZUKI*, Mitsumasa MATSUMOTO*, Kiyoshi KUBOTA*
and Muneharu ESAKA*

* *Department of Applied Biological Science, Hiroshima University,
2-17 Midori-machi, Fukuyama, 720*

Cooked rice was freeze dried in a vibrated bed freeze dryer. Weight ratios of water added to raw rice before cooking were 1.4, 1.5, and 1.7 for polished rice, and 2.0 for brown rice. Cooked rice was treated with potato starch before freezing to diminish stickiness of the product. Particles of frozen rice were mixed well in the drying chamber by vibration. Bed temperature could be kept low and nearly uniform during the most part of the drying processes. The drying rates were nearly $3 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Packing densities of the freeze dried products ranged from 435 to 465 kg/m^3 , and the values decreased with increasing the moisture content of the cooked rice. About 5 minutes rehydration of the dried products in boiling water made the moisture content the same value of the cooked rice. The rehydrated rice had almost the same appearance as the cooked rice. The texture profile analysis for each particle of the rehydrated dried rice products was applied to discuss the quality of the products. Total work and gumminess (cohesiveness $\times$ hardness) of properly rehydrated products were very close to the values of the cooked rice. The value of adhesiveness/hardness was also useful index for quality evaluation.

(Received Jul. 10, 1987)

米飯は日本人の主食として欠くことの出来ない重要な地位を占めているが、近年、この米飯または米飯を用いた食品についても即席化が指向されるようになった。米飯を用いた保存食品または即席食品としては、従来よりいわゆる α 化米があり、また、缶詰やレトルトパウチ製品が商品化されてきている¹⁾²⁾。さらに最近では、調理の簡便性が大幅に改善された即席雑炊や即席茶漬など乾燥米飯を主体とした一連の即席米飯製品が商品化されている。これは、加工および調味技術の進歩に拠るところが大であると考えるが、主材料である乾燥米飯に関しては、その製品性状や復水後の外観、食感等にまだ改善すべき多くの問題を残している。

乾燥米飯の製造には、熱風乾燥、パフ乾燥、凍結乾燥などの乾燥法が考えられるが、市販製品の大半は前2者のいずれかで製造されたものである。これに対して、米

飯の凍結乾燥に関してはその例が少なく³⁾、製品性状についても不明な点が多い。特に、現在一般的に用いられている棚段式凍結乾燥装置による乾燥では、乾燥コスト^{4)~6)}の面に加えて、蒸煮米の乾燥前処理と乾燥後の解砕処理等による品質への影響が問題となる。

著者らは、これまで、粒状食品の凍結乾燥には、振動流動層凍結乾燥装置が、乾燥特性および乾燥速度の両面で有用であることを明らかにしてきた⁷⁾⁸⁾。本研究では、さらに一粒ずつが完全に分離した粒状の凍結乾燥米飯を得る目的で、この振動流動層凍結乾燥装置を用いた蒸煮米の凍結乾燥を試み、その乾燥特性を明らかにすると共に、得られた製品性状について、主に物性面から検討を加えた。即ち、凍結乾燥中における材料温度の変化、材料-加熱体間の伝熱係数とその圧力依存性、乾燥速度、乾燥製品の充填密度、復水性と復水後の製品のテクス

* 広島大学生物生産学部 (〒720 福山市緑町 2-17)

チャーおよびそれらへの炊飯時の水加減の影響等を検討した。製品性状については、常法にて炊飯した米飯、即ち、御飯の値を標準とし、市販されているいくつかの即席米飯製品の性状とも比較して考察した。

実験方法

1. 実験装置

用いた振動流動層凍結乾燥実験装置を Fig. 1 に示す。乾燥室本体は内径 110 mm の円筒形で、ステンレス製である。乾燥室内の加熱体は高さ 30 mm、長さ 100 mm の平板型とした。乾燥中、加熱体全体が材料層の内部にあるように、材料の充填層高は約 50 mm とした。材料層内各点、加熱体表面温度、その他必要な箇所の温度測定には素線外径 0.1 mm またはシース外径 1 mm の銅-コンスタンタン熱電対を用いた。コールドトラップには、 -60°C まで冷却可能な投げ込み式冷却器を用いたが、トラップ中の氷表面温度は測定していない。伝熱係数の測定や壁面からの加熱など必要に応じ、ジャケットで乾燥室側壁および底板の温度を調節した⁷⁾。

2. 実験材料

実験に用いた材料は、コシヒカリ（60 年度新潟県産、水分 14.8%）、ヤマビコ（60 年度広島県産、水分 15.2%）および玄米（60 年度、産地不明、水分 14.2%）である。他に、製品性状の比較の為に、即席雑炊など市販の即席乾燥米飯製品 7 品を用いた。これら市販品は便宣上 A~G 社製と表し、夫々の乾燥米の製法を Table 1 に示す。

3. 材料の調整方法

本研究では、振動流動層を用いて凍結乾燥を行うため、米飯の付着性を除き、粒状の凍結材料を得なければならない必要上、材料は以下に示すように調整した。炊飯に

は電気釜炊飯器（東芝製 RC-69 型）を用い、一回の炊飯に生米 300 g を用いた。炊飯方法は、通常の米飯の場合の常法に従い、精白米については、洗米後 25°C で 30 分の予備浸水を行い、蒸らし時間は 15 分とした。但し、

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

- 1: Drying chamber 2: Sample 3: Jacket
4: Plate heater 5: Coolant circulator
6: Manometer 7: Condenser 8: Filter
9: Vacuum pump 10: Temperature recorder
11: Vibrator 12: Inverter 13: Voltage regulator 14: Heat insulator

Table 1 Drying methods of dried rice products on the market used in this study for comparison of product characteristics

Product	Kind	Drying method
A	Polished rice	Freeze drying*
B	"	FHA drying**
C	"	"
D	"	Puff drying
E	"	"
F	Brown rice	"
G	Polished rice	FHA drying

* Estimated from product properties.

** Forced hot air drying.

玄米については8時間の予備浸水、20分間の蒸らしとした。炊飯時の水加減は生米に対する水の重量比で表し、精白米では1.4倍、1.5倍、1.7倍、玄米では2倍とした。これらの炊飯米（以後、蒸煮米と呼ぶ）は、短時間に冷却して品質の低下を抑えるために、表面の水分を除き米粒の付着性を減少させるために、蒸らし後直ちに軽く混ぜながらドライヤーの冷風で冷却した。この冷却した蒸煮米に、重量比で1/4量のバレイショデンプンをまぶして攪拌（松下電器産業製ケーキマスター MK-710にて約30秒間）し、米粒の付着性を除いて一粒ずつ分離させ、次いで篩に分けにより、余分のデンプンを分離した後フリーザーで凍結させた。この凍結蒸煮米をフリーザー中で攪拌し、米粒表面に若干残っているデンプンおよび生成した針状氷結晶を分離させ、篩い分けしてから乾燥に供した。このデンプン処理により、製品性状が未処理の場合とは異なることが考えられるが、未処理の場合には炊き上がり時の米飯形状を良く保ったままで粒状化が出来ないことから、振動流動層凍結乾燥による製品の比較は行っていない。

4. 製品性状の測定

製品性状は、充填密度、圧縮崩壊荷重値、復水特性、復水後の製品のテクスチャーを測定して検討した。圧縮崩壊荷重値とは、平行平板間に乾燥製品を置き、圧縮して崩壊したときの荷重値で示し、測定には後述の装置（Fig. 2）を用いた。テクスチャー測定には、プランジャーの上下往復運動が可能な圧縮試験機（Fig. 2）を自作し、テクスチャープロファイル法⁹⁾¹⁰⁾を適用して、米粒一粒ずつについての各特性値を求めた。プランジャー速度は、加藤の用いた条件¹¹⁾にほぼ等しい5 mm/min

Fig. 2 Texture measuring device

- 1: Sample 2: Load cell 3: Plunger
4: Screw shaft 5: Stepless speed changer
6: Brake 7: Gear head 8: Synchronous motor 9: Strain amplifier 10: Recorder

で、下降、上昇とも20 s ずつとした。得られるテクスチャー測定曲線および各特性値の説明を Fig. 3 に示す。

実験結果および考察

1. 乾燥特性

得られた乾燥工程の一例を Fig. 4 に示す。 T_h , T_s , T_w , q , W は夫々加熱体表面温度、材料層温度、乾燥室内壁温度、加熱体への供給熱量、含水率を表している。材料粒子は加熱体と接触することにより乾燥熱を受けるが、振動流動により加熱体表面での滞留時間がごく短いので品温の部分的過熱はない。加熱体表面温度は、加熱開始後次第に上昇し、後にほぼ一定値となる。これには、加熱初期における材料、乾燥室などの熱的非定常の状態と、材料粒子表面から形成される乾燥層が材料-加熱体間の総括伝熱係数に与える影響が考えられる。材料粒子は良く移動・混合するから材料層内の温度分布はほとんどなく均一で、乾燥室内の圧力に対応した氷の昇華温度に近い値に保持される。この例では、材料温度（米粒表面温度）が0℃以下の間に、水分の約70%が乾燥した。材料温度が上昇し始めると、加熱体の温度も上昇するが、供給熱量を変えない場合には、乾燥は恒率乾燥的に進んだ。

Fig. 3 An example of force-time curves and texture parameters used in this study

Cohesiveness (CO)	$= A_2/A_1$	(-)
Hardness (HA)	$= H/g$	(kg)
Adhesiveness (AD)	$= A_3$	(J)
Gumminess (GU)	$= CO \times HA$	(kg)
Total work (TW)	$= A_{11}$	(J)
Adhesiveness/Hardness (AD/HA)	$= A_3g/H$	(m)

本研究では、仕上げ乾燥時の材料温度は 50°C を越えないようにした。製品の水分は、約 3% であった。仕上げ乾燥時間も含めた全乾燥時間平均の乾燥速度は、約 $3 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ であった。この値は装置の排気系の能力によって制約されたものであったが、棚段式凍結乾燥装置の平均乾燥速度 $0.5 \sim 0.7 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ⁶⁾ と比べても、かなり大きな値となっている。材料-加熱体間の総括伝熱係数 U は、Fig. 5 に示すように乾燥室内圧力によって影響を受け¹²⁾、圧力の低下により減少した。また、この U の値は、振動強度にも依存した。振動強度の増加に伴い U の値が増加し、振動加速度が重力速度の $3.5 \sim 4.0$ 倍付近で平均値 $53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の最高値を示したが、5 倍付近では若干減少した。

Fig. 4 Graphical explanation of vibrated bed freeze drying process of cooked rice (bed height = 50 mm, T_h ; heater surface temperature, T_s ; bed temperature, T_w ; wall temperature)

2. 乾燥製品性状

上記のような乾燥特性のもとで得られた凍結乾燥製品は、米飯粒の形状をほぼ完全に保持したまま、一粒ずつ分離していて、取り扱いが非常に容易である。精白粳米からの凍結乾燥製品は、きれいな白色を呈しており、玄米も含めて米粒内部は、ほぼ均一な白色の多孔質状となっていた。製品の充填密度と圧縮崩壊荷重値の測定結果を Table 2 に示す。熱風乾燥製品を解砕してサイズを小さくした市販品の一品を除き、本研究で得られた製品の充填密度は市販品に比べて大きく、また、機械的強度も大であることが分かった。これらの測定結果から、本製品は充填や包装に都合が良いばかりでなく、輸送中などでの製品の品傷みも少ないものと考えられる。充填密

Fig. 5 Effect of pressure on heat transfer coefficient between heater surface and bed of rice particles

Table 2 Packing density (P.D.) and compression breakdown point (B.P.) of dried rice products

Product	Code	P.D. (kg/m^3)	B.P. (kg)
Koshihikari ($1.5 \text{ H}_2\text{O}^*$)	KH (1.5)	464	2.3~4.0
Yamabiko ($1.5 \text{ H}_2\text{O}^*$)	YA (1.5)	465	3.0~6.2
Koshihikari ($1.7 \text{ H}_2\text{O}^*$)	KH (1.7)	436	2.1~4.0
brown rice	BR	455	1.3~3.5
A (on the market)	A	190	0.7~2.8
B (")	B	446	1.5~3.0
C (")	C	407	2.5~3.0
D (")	D	270	0.9~2.3
E (")	E	158	0.5~1.2
F (")	F	343	**
G (")	G	373	1.0~2.0

* Ratio of water added to rice before cooking

** Deformed, but B.P. was not measured

度は、炊飯時の水加減が多い程小さな値となったが、水加減が多い場合は製品サイズが若干大きくなっていた。

3. 復水特性

コシヒカリの復水実験の結果を Fig. 6 に示す。ヤマビコの実験結果との差はほとんど無く、玄米については水加減も異なることから、若干の差があったが、ほぼ同程度の復水性を示した。比較の為に、市販品の幾つかの測定例も同図に示した。通常の御飯の含水率は $1.5 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-固形分}$ 程度であり、この含水率まで復水するのに、沸騰水および 98°C の水では約 5 分、 70°C では約 10 分、この図には示していないが 30°C では約 30 分を要した。本製品の復水性は、炊飯時の水加減の多い方が良く、短時間で復水した。市販品の調理時間は 5 分またはそれ以上と表示してあるものが大半であるが、市販品では 5 分の復水でかなり含水率が高くなるものがある。市販品は即席雑炊や即席茶漬として売り出されているものであり、復水性を向上させる工夫がなされていることから、これは当然の結果と思われる。

4. 復水製品のテクスチャー

測定結果から、Fig. 4 で示す総てのテクスチャー特性値を求めたが、紙面の都合上ここでは、製品によるそれら特性値の差異を良く表していると思われる総仕事量¹³⁾、付着性/硬さ、ガム性を Figs. 7, 8, 9 に示す。また、玄米についてはそれらの結果をまとめて Fig. 10 に示す。米飯の品質評価の指標として、硬さ/付着性の値を用いるのが有効であるとする報告があるが¹⁴⁾、付着

Fig. 6 Rehydration curves of dried rice products in this work and those on the market

---- in boiling water, — in 98°C water
 in 70°C water, ○; KH (1.5),
 ●; KH (1.7). ▲; A, △; B, △; F, ▲; G in
 98°C water (Codes are the same as those
 in Table 2)

Fig. 7 Total work for compression of cooked and of rehydrated dried rice (Codes are the same as those in Table 2)

⊕; cooked rice, ○, ●, ●; rice rehydrated for 3, 5, 7 min, ⊖; rice rehydrated for 5 min
 * 98°C water.

** Boiling water.

*** Rehydrated for 1 min in a polystyrene from cup, followed by 5 min tempering after water draining according to the direction on a label.

Fig. 8 Adhesiveness/Hardness values of cooked and rehydrated dried rice (Codes and keys are the same as those in Table 2 and in Fig. 7)

Fig. 9 Gumminess of cooked and rehydrate dried rices (Codes and keys are the same as those in Table 2 and in Fig. 7)

Fig. 10 Comparison of texture parameters of cooked brown rice and rehydrated freeze dried brown rice

○: Cooked brown rice
●: Rehydrated freeze dried brown rice (in boiling water for 5 min)

性が少ない場合には、この値が非常に大きくなり、表示に不便であった。そこで、ここでは表示の便利さの面から付着性/硬さの値を用いた。各測定値は、精白米については、水加減 1.5 倍で炊飯した蒸煮米の値を標準とし¹³⁾、コシヒカリとヤマビコの平均値を点線で示した。テクスチャー測定は、蒸煮米については蒸煮後、復水米については復水後、30 分から 1 時間の間に行った。測定条件を一定としたため、米粒個々のサイズの違いがデータのばらつきの大きな原因となっが、図には、それらのばらつきと平均値を示した。比較の為に測定した市販品は、米粒の形状を比較的良く止めているものを選び、短時間の調理を指示してあった D 社製については指示通り、その他は 98℃ の水中で 5 分間復水した。本

Fig. 11 Effect of tempering on texture parameters of rehydrated freeze dried rice (KH (1.5))

⊕: Cooked rice
○: Rehydrated in boiling water for 5 min
○: Rehydrated in polystyrene foam cup with boiling water for 5 min, followed by tempering for 3 min in the cup after draining
●: Rehydrated in polystyrene foam cup with boiling water for 5 min, followed by tempering for 5 min in the cup after draining

研究で得られた製品は、沸騰水中または 98℃ の水中で概ね 5 分から 7 分復水すると、そのテクスチャー測定値はいずれも蒸煮米の標準値、即ち、御飯のテクスチャー値に極めて近い値を示すことが分かった。これらの測定結果から、炊飯時の水加減や復水条件が食感に微妙に影響を与えることが分かる。復水性の測定結果からは、沸騰水中の方が 98℃ の水に比べて若干復水性は良く、テクスチャーにもその影響が現れているように見えるが、その差はあまり大きくない。炊飯時の水加減を増やすと、復水時間を短縮できることは、テクスチャー測定の結果からもいえる。また、復水米の食感は、蒸らし操作を加えることによって改善できたが、その一例を Fig. 11 に示す。これは、市販のインスタントカップ雑炊用の発泡プラスチック容器に本製品を入れ、熱湯を注いで 5 分間復水した後水切りし、そのまま容器中で 3 分または 5 分間蒸らししたもののテクスチャー測定値である。このときのカップ内の平均温度は約 95℃ であったが、各テクスチャー値は、沸騰水中で 5 分間復水させた場合と同等またはそれ以上の値を示した。沸騰水中で 5 分間復水し、更に蒸らしを行った場合には、その食感はより米飯に近いものとなった。また、蒸らしを行った本製品の復水米の艶および色調は、共に蒸煮米と大差の無いものであ

た。

これに対して、市販品を復水した場合には、表面の艶が少なく、熱風乾燥製品では、米粒の形状を良く止めているものが少ない。パフ乾燥法によるものは、比較的米粒の形に近いが、膨化が大きく、食感が頼りない。テクスチャーの測定結果からも、概して市販品は、軟らかいのに弾性的変形回復が比較的大きい半面、付着性/硬さの値の小さいものが多く、品質特性に差の大きいことがわかった。それ故、市販品は雑炊や茶漬のように、いわゆる粥状の食品として利用する場合は良いが、米飯としての利用にはまだ改善すべき点が多いと思われる。

本報告では、復水製品の性状は、テクスチャープロファイル法に準じた測定結果によって概括的に比較検討したが、更に米飯の持つ微妙な食感や食品の価値との比較を行う場合には、前掲の引用文献の他に、例えば竹生ら¹⁵⁾¹⁶⁾や倉沢ら¹⁷⁾他の研究が指摘している香味性や色、光沢、粘りと弾力性、米の品種の違いによる炊飯条件の検討、更に米デンプンの α 化度や復元性などの点を総合的に考慮しなければならないであろう。これらについては今後の課題である。

要 約

振動流動層凍結乾燥装置を用いて、蒸煮米の凍結乾燥を行い、乾燥特性、伝熱係数、製品特性、復水製品のテクスチャーを検討した。蒸煮米の凍結に先立ち、デンプンを用いて米粒の付着性を除く処理を加えた。得られた結果はつぎの通りである。

(1) 材料表面温度は、層全体ではほぼ均一であり、0℃以下の間に約80%の水分が乾燥した。仕上げ乾燥時間も含めた全乾燥時間平均の乾燥速度は、約3 kg-H₂O/(m²・h)であった。

(2) 乾燥製品は、米飯粒の形状を良く止どめ、一粒ずつが分離しており、充填密度、圧縮崩壊荷重値は共に市販の即席乾燥米飯より大であった。

(3) 復水性は、炊飯時の水加減によって影響を受けるが、水加減1.5倍の場合では、沸騰水または98℃の水

で約5分で蒸煮米の水分まで復水した。

(4) 復水製品の外觀およびテクスチャーは、蒸煮米と大差なく、本製品は、適当な水加減と復水条件により、粥状食品は勿論、米飯としても利用出来る可能性があることが分かった。

本研究の要は、日本食品工業学会第34回大会(昭和62年3月、於富山)で発表した。

尚、本研究費の一部は財団法人食品科学振興財団、昭和59年度学術研究助成金によった。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 川島四郎：炊飯の科学，(光生館，東京)，(1974)。
- 2) 赤木弘道：食の科学，**69**，50 (1982)。
- 3) (株) 命糧，特開60-41452 (1985)。
- 4) MOY, J.H. and SPIELMAN, H.: *Food Technol.*, **34** (2), 32 (1980)。
- 5) 木村 進：乾燥食品，(光琳書院，東京)，(1974)。
- 6) 佐原幸雄：食品工業，**23** (10下)，48 (1980)。
- 7) 鈴木寛一・池田正昭・大西博司・久保田清：日食工誌，**31**，153 (1984)。
- 8) 鈴木寛一：エネルギー・資源，**6** (4)，88 (1985)。
- 9) BREENE, W.B.: *J. Tex. Stud.*, **6**，53 (1975)。
- 10) 岡部 巍：食品の物性，第1集，(食品資材研究会，東京)，p. 79 (1975)。
- 11) 加藤寿美子：食品の物性，第2集，(食品資材研究会，東京)，p. 57 (1976)。
- 12) MELLOR, J.D.: *Fundamentals of Freeze-Drying*, (Academic Press, London), p. 80 (1978)。
- 13) 渋川祥子・福場博保：家政誌，**25**，461 (1974)。
- 14) 山野善正・高川美智子・福井義明：日食工誌，**19**，280 (1972)。
- 15) 竹生新治郎・遠藤 勲・谷 達雄：栄養と食糧，**16**，407 (1964)。
- 16) 竹生新治郎・遠藤 勲・谷 達雄：栄養と食糧，**21**，265 (1968)。
- 17) 倉沢文夫：調理科学，**12**，2 (1979)。

(昭和62年7月10日受理)