

粳のマイクロ波乾燥に関する基礎的研究*

中野浩平**・河野俊夫**・喜田環樹**

村田 敏**・内野敏剛**・井上眞一**

要 旨

誘電加熱法を穀物乾燥に応用するための基礎研究として、粳を対象にマイクロ波乾燥試験を行った。マイクロ波乾燥は従来型の乾燥法とは異なり独特の特徴を有している。乾燥特性については拡散理論を用いて、昇温特性については熱収支式をたて、重みつき残差法の一つである直交選点法により連立常微分方程式の形に分解し Runge-Kutta-Gill 法にて数値計算し、実測値との比較検討を行った。また、マイクロ波乾燥が穀物の品質に与える影響を検討するため、発芽率と脂肪酸度の測定を行った。

〔キーワード〕 マイクロ波乾燥, 誘電加熱, 拡散理論, 直交選点法, 発芽率, 脂肪酸度

Basic Study on Microwave Drying of Rough Rice*

Kohei NAKANO**, Toshio KAWANO**, Tamaki KIDA**,

Satoshi MURATA**, Toshitaka UCHINO**, Shin-ichi INOUE**

Abstract

As one of the basic study for applying dielectric heating method to the drying of grains, microwave drying test for rough rice was performed. The method is different from the conventional method and indicates unique characteristics in grain heating. Equations for drying and heating were introduced using diffusion theory and heat balance respectively. Then, the obtained equations were transformed into simultaneous differential equations with the orthogonal collocation method which is one of the method of the weighted residuals, and were calculated numerically with Runge-Kutta-Gill method to compare with experimental data. Moreover, the germination rate and the fatty acid content of rough rice were determined to investigate the effect of microwave drying on the quality of grains.

〔Keywords〕 microwave drying, dielectric heating, diffusion theory, orthogonal collocation method, germination rate, fatty acid content

I 緒 言

農産物乾燥は、産物の変質防止、貯蔵性や加工

性の向上を目的として行われる。農産物の形状は多様であり、乾燥上の制約がかなり相違するので、乾燥機の種類も多く、独自の構造をもったものが発達している。現在、普及の中心は穀物を対象にしたものであり、熱の利用上からは、熱風・常温の空気を利用する方法、及び補助的に熱源を利用する三つのタイプに分けられる¹⁾。しかし、

* 1995年4月 第54回農業機械学会年次大会(東京大学)にて一部講演

** 九州大学農学部(〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1 ☎092-642-2936) Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-81 Japan

このような外部加熱方式は、物質の表面が昇温し熱伝導により物質内部が加熱されるが、一般に穀物は熱伝導率が小さいため、物質全体を加熱・昇温するにはかなりの時間を必要とする。早く加熱昇温させようとして熱源の温度を高くすると、物質表面と内部の温度勾配が大きくなり、焦げる、過乾燥などの悪影響が生ずる²⁾とともに、物質内部の水分勾配も大きくなるので高水分の食品においては煮えや、玄米では胴割れなどの悪影響も生ずる。

そこで本研究では、従来の乾燥法のように外部加熱による方法とは異なる、マイクロ波独特の誘電加熱法を穀物乾燥に応用するための基礎研究として、一定電力のマイクロ波加熱による籾の乾燥試験を行って、その乾燥特性・昇温特性及びその品質に与える影響について検討した。

誘電加熱法においては、物質自身が発熱する内部加熱であるため、熱伝導に関係なく昇温させるため短時間にほぼ均一に加熱することができ、また被加熱物だけが発熱し、加熱炉や雰囲気などをほとんど加熱しないため熱効率が高い。電磁波は真空・減圧中でも伝送でき被加熱物を真空度相当の沸点で効率よく低温加熱・乾燥ができる。さらに加圧下でも同様に加熱できるとともに、スチーム・熱風・冷風の併用や窒素ガス封入下での加熱も可能である²⁾。

また、マイクロ波は電磁調理法の一つとして、今日では電子レンジの普及にみられるように広く一般に浸透してきているが、このマイクロ波調理・加熱に関する研究では、実験的にも試行錯誤的なものが多く、未だ穀物乾燥では理論的な解析が進んでいないのが現状である。

II 実験方法

供試材料の籾には平成7年度に福岡県粕屋郡粕屋町で収穫されたヒノヒカリを使用した。供試用の籾は実験に供するまでの間、庫内温度を約3°Cに設定した冷蔵庫にて保存されたものである。

図1はマイクロ波乾燥実験装置の概略である。マイクロ波オーブンは、家庭用電子レンジ(東芝製ER-500(B)・発振周波数2450MHz・定格マイクロ波出力500W)を改造したもので、マイクロ波出力は新たに作製したタイマーリレー回路

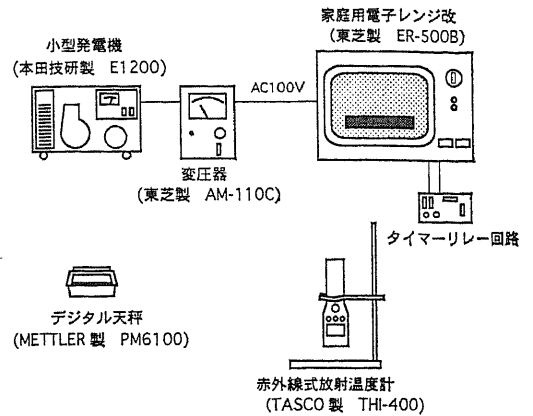


図1 実験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

にてマイクロ波照射を間欠的にオン-オフすることによって可変できるようになっている。出力調整したマイクロ波出力は、各オン-オフ時間条件について水負荷試験を行うことによって求めた。

水負荷試験とは、オープンの中に所定の水を入れたビーカーを静置し、所定時間マイクロ波を照射し、その温度上昇値を次式に代入することにより出力 P_w を求めるものである。

$$P_w = J \frac{m_w \Delta T}{t} \quad (1)$$

ここに、

J : 熱の仕事当量 [=4.19J/cal]

m_w : オープン内に静置した水の質量 [g]

ΔT : 温度上昇値 [K]

t : 加熱時間 [s]

今回の測定ではマイクロ波乾燥の基本特性を明らかにするため、できるだけ単純なモデルとする必要から、マイクロ波出力は一定でなければならない。そこでマイクロ波オープンに一定の電力を供給するため、電圧変動のある実験室内のコンセントから電源をとらず、外付けの発電機(本田技研製 E1200)から電源をとり、変圧器(東芝製 AM-110C)にてAC100Vに調整しマイクロ波オープンに入力した。また水負荷試験は、実験の間、マイクロ波出力が一定であったかどうか確認するために実験の始めと終わりに行った。その結果、マイクロ波出力は実験中終始一定であったことが確認された。

供試材料を保つ容器は、縦230mm・横170mm・高さ5mmのポリプロピレン製角形容器で、その中に供試材料140gを薄層になるように均一に広げ、マイクロ波オープン内で加熱した。容器の材料としてポリプロピレンを採用したのは、その誘電損失係数（電気エネルギーが吸収され熱に替わる割合）が水分を含む穀物と比較した場合きわめて小さく、マイクロ波環境下で加熱されずマイクロ波出力はすべて加熱対象物である供試穀物に吸収されるといった理由からである。

穀物温度の測定は、実験開始30分までは5分おきに、その後は10分おきに、供試穀物を容器ごとマイクロ波オープンから素早く取り出し、スタンドに固定してある読みとり精度1°Cの放射温度計（TASCO製THI-400）により穀物の表面温度を計測することによって行った。なお、放射温度計の補正は試験前、供試穀物の温度を熱電対温度計にて測定すると同時に放射温度計でも測定し、その指示が同一になるよう放射率を調整することによって行った³⁾。

穀物重量の測定は温度計測後、10mgまで計測可能なデジタル天秤（METTLER製PM-6100）でその重量を計測することによって行った。

各実験に供試する穀物は、あらかじめ水分を常圧定温乾燥法（10g粒-135°C-24h法）により算出した後、その水分を24%w.b.にするに必要な水を計量して加え、ヘッドスペースのない密閉状態で充填し、5日間適当な時間間隔ごとに攪拌しながら冷蔵庫内で水分分布の平滑化を行ったものである。また実験開始前、1時間程度実験室内に密閉状態のまま放置し室温に戻した後、実験に供試した。また、実験の仕上げ水分は14.5%w.b.とした。実験の開始水分・仕上げ水分量を上記のようにしているのは、籾の収穫時の水分及び貯蔵時の水分がその程度であるという理由からである。

乾燥試験終了後、マイクロ波乾燥が穀物の品質に及ぼす影響を検討するため、乾燥後の発芽率と脂肪酸度の経時変化を食糧庁の標準計測方法⁴⁾に従い測定した。

発芽率の検定は、発芽に適する水分・温度等の条件を与えて実際に発芽させてみる方法と、TTC検定法に代表される酵素活性の強弱等と薬品と

の反応で間接的に調べる方法とに大別されるが、本研究においては前者の置床試験による方法を採用した。

脂肪酸度については、乾燥試験直後、30日後、および60日後について測定し、サンプルはその間、3°Cに設定された冷蔵庫内にビニール袋に入れて保管した。

III マイクロ波乾燥理論

1. 籾の乾燥モデルについて

過去に行われてきた籾を対象にした乾燥試験によると、自由含水比の経時変化をプロットした結果、その切片の値は平板モデルの切片の値である0.8105に極めて近い値が観測され、ゆえに籾の乾燥特性を記述する拡散モデルは平板モデルが適当であるとされてきた。よって本研究においても物質拡散モデルとして平板モデルを適用した。

これまで行われてきた穀物温度一定条件下における乾燥に関する研究においては、拡散係数 D は一定値として計算されてきたが、マイクロ波乾燥では穀物温度は時間とともに変化するため拡散係数は時間の関数として記述される。

拡散係数 D を時間 θ の関数としたときの本研究の基礎方程式となる次元の拡散方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial m}{\partial \theta} = D(\theta) \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} \quad (2)$$

初期・境界条件は次のように示される。

I. C.

$$m = m_0, \theta = 0, 0 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

B. C.

$$D(\theta) \frac{\partial m}{\partial x} = -\kappa(m - m_e), \theta > 0, x = 1 \quad (4)$$

ここに、

m : 含水率 [decimal d. b.]

m_0 : 初期含水率 [decimal d. b.]

m_e : 平衡含水率 [decimal d. b.]

θ : 時間 [s]

D : 拡散係数 [m^2/s]

κ : 物質移動係数 [$1/\text{s}$]

境界条件(4)式は、物質表面の水分は外気の状態によって決定される平衡含水率 m_e と表面含水率 m の差が駆動力となって物質移動係数 κ に比例し

て放出されることを意味する。

ところで、(2)式は非線形な方程式であるので、これを解析的に解くことはできない。そこで、重みつき残差法の一つである直交選点法³⁾を用いて上式の数値解析を試みた。本研究においては、内部を5分割(N=6)して解いている。簡単に書くと、(2)式は直交選点法により各選点において以下のような連立常微分方程式の形で分解される。

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} = D(\theta) \sum_{j=1}^N B_{ij} m_j \quad (5)$$

また、境界条件(4)式より、

$$D(\theta) \left. \frac{\partial m}{\partial x} \right|_{x=1} = -D(\theta) \sum_{j=1}^N A_{Nj} m_j \\ = \kappa(m_N - m_e) \quad (6)$$

(6)式を変形すると

$$m_N = \{ \kappa m_e - D(\theta) \sum_{j=1}^{N-1} A_{Nj} m_j \} / \\ \{ \kappa + D(\theta) A_{NN} \} \quad (7)$$

拡散係数 $D(\theta)$ の値については、以下のように算出した。

乾燥速度係数 K は一般に次に示す Arrhenius 型の実験式に従うことが、多くの研究者らによって種々の穀物について確認されている。乾燥速度係数は次式によって与えられる。

$$K = d \exp\left(\frac{-f}{T}\right) \quad (8)$$

また、平板モデルでは、

$$K = \frac{D(\theta)\pi^2}{4}$$

の関係があるので、拡散係数は次式で示される。

$$D(\theta) = \frac{4K}{\pi^2} = \frac{4}{\pi^2} \cdot d \cdot \exp\left(-\frac{f}{T(\theta)}\right) \quad (9)$$

また、粗に対するパラメータは以下のとおりである⁶⁾。

$$d = 5.167 \quad [1/s] \\ f = 3290 \quad [K]$$

2. マイクロ波加熱方程式

マイクロ波加熱においては穀物温度は時間とともに変化する。含水率の経時変化や穀物の温度変化を数値計算するためにはマイクロ波加熱方程式が必要となるが、穀物内部の温度分布を無視して熱収支式をたてると、以下ようになる。

$$(1 + \bar{m}) W_d C \frac{\partial T}{\partial \theta} = P_c + \sigma W_d \frac{\partial \bar{m}}{\partial \theta} \\ - \alpha A_s (T - T_a) \quad (10)$$

ここに、

\bar{m} : 平均含水率 [decimal d. b.]

W_d : 乾物質量 [g]

C : 比熱 [J/gK]

T : 穀物温度 [K]

T_a : 外気温度 [K]

P_c : 穀物に作用する実効マイクロ波出力[W]

σ : 蒸発潜熱 [J/g]

α : 熱伝達率 [J/m²gK]

A_s : 熱伝達面積 [m²]

右辺第一項は穀物に与えられるマイクロ波の実効電力、第二項は水分の蒸発によって奪われる蒸発潜熱分、第三項は熱伝達分に相当する。

ここで、穀物に与えられる実効マイクロ波出力は以下のように与えた。

誘電体を電界内に置くと単位体積あたりの誘電体で消費される電力は次式で与えられる。

$$P = 2\pi f \epsilon_0 E^2 \epsilon_r \tan \delta \quad (11)$$

P : 単位体積あたりの消費電力 [W/m³]

f : 周波数 [Hz]

ϵ_0 : 真空の誘電率 [F/m]

E : 電界強度 [V/m]

ϵ_r : 比誘電率 [decimal]

$\tan \delta$: 誘電正接 [decimal]

よって水負荷試験によって求められた水に作用するマイクロ波の電力と粗層に作用するマイクロ波の電力の関係は以下のとおりである。

$$P_c = \frac{\epsilon_{rc} \tan \delta_c V_c}{\epsilon_{rw} \tan \delta_w V_w} P_w \gamma \quad (12)$$

ここに、

ϵ_{rc} , ϵ_{rw} : 粗・水の比誘電率 [decimal]

$\tan \delta_c$, $\tan \delta_w$: 粗・水の誘電正接 [decimal]

V_c : 粗層の体積 [m³]

V_w : 水負荷試験時の水の体積 [m³]

γ : マイクロ波が粗層に当たる確率 [%]

マイクロ波はオープン内で散乱しつつ粗層に達するわけであるが、その数%反射によって粗層に当たることなく損失としてマイクロ波発振器の方へ戻ってしまう。そこで、粗層へ当たることなく導波管開口部へ戻る確率をコンピュータによって

計算した結果、13.4%であった。よって籾層に当たる確率は86.6%とした。なお、籾の比誘電率・誘電正接は西山⁷⁾のデータを使用した。

$\partial \bar{m} / \partial \theta$ の値を知る必要があるが、これは直交選点法においては以下のように表現される。平均含水率 \bar{m} は次式で与えられるので、

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^N W_i m_i \tag{13}$$

(13)式を微分すると、

$$\frac{\partial \bar{m}}{\partial \theta} = \sum_{i=1}^N W_i \frac{\partial m_i}{\partial \theta} \tag{14}$$

さて、第三項の熱伝達分については自然対流熱伝達の式を適用し、比例定数 α は次式で与えられる。

$$\alpha = 1.32 \left(\frac{T - T_a}{L} \right)^{0.25} \tag{15}$$

L : 代表長さ [m]

左辺の比熱 C は一般に温度の関数であるが、村田ら⁸⁾のDSCによる穀物比熱の研究によれば、穀物の比熱は次式のように摂氏温度に対して二次関数的関係になることが判っている。

$$C = f \{ (aT_c^2 + bT_c + c)M + dT_c^2 + eT_c + f \} \tag{16}$$

ここに、

C : 比熱 [J/g°C]

J : 熱の仕事当量 [=4.19J/cal]

T_c : 温度 [°C]

M : 水分 [%w. b.]

$a \sim f$ はパラメータで籾に対しては次のとおりである。

$$a = 0.2749 \times 10^{-6}, \quad b = -0.3510 \times 10^{-4}$$

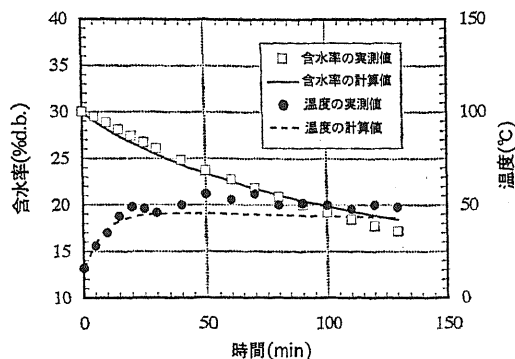
$$c = 0.7257 \times 10^{-2}, \quad d = 0.2453 \times 10^{-5}$$

$$e = 0.1215 \times 10^{-2}, \quad f = 0.2423$$

(7)式を(5)式に代入し、それぞれについて連立させ、Runge-Kutta-Gill法により逐次計算を行った。計算の時間幅は10秒として行っている。なお、物質移動係数 κ はシミュレーションによるあてはめによって決定した。また、平衡含水率 m_e はChen-Clayton式⁹⁾により決定した。

IV 結果と考察

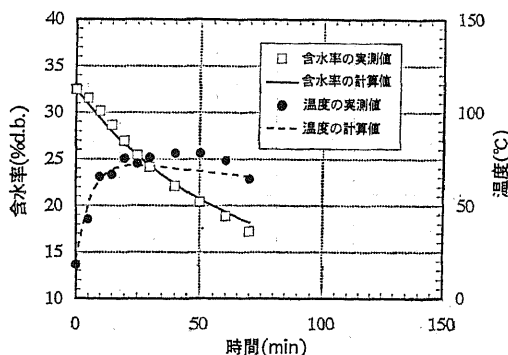
図2~4はそれぞれマイクロ波照射電力25, 50, 75Wの乾燥試験結果とシミュレーション結果



物質移動係数 $\kappa = 0.562 \times 10^{-3}$

図2 籾のマイクロ波乾燥シミュレーション (マイクロ波出力 25W, 2450MHz)

Fig. 2 Microwave drying simulation for rough rice (at microwave power of 25W, 2450MHz)



物質移動係数 $\kappa = 0.528 \times 10^{-3}$

図3 籾のマイクロ波乾燥シミュレーション (マイクロ波出力 50W, 2450MHz)

Fig. 3 Microwave drying simulation for rough rice (at microwave power of 50W, 2450MHz)

である。□印は含水率、●印は穀物温度の測定結果、実線及び波線はそれぞれ含水率・穀物温度の経時変化のシミュレーションを示している。

穀物温度の実測値について見てみると、乾燥初期30分まで急激に温度が上昇するが、25W, 50Wでは若干ではあるが、その後温度が下がる傾向が見られる。これは、乾燥が進むにつれ供試穀物の水分が少なくなるために、その誘電損失係数 ($\epsilon_{rc} \tan \delta_c$) が小さくなる、すなわち、籾層に作用する実効マイクロ波出力が減少するため起こる現象であると考えられる。シミュレーションでも同様の傾向が確認できる。

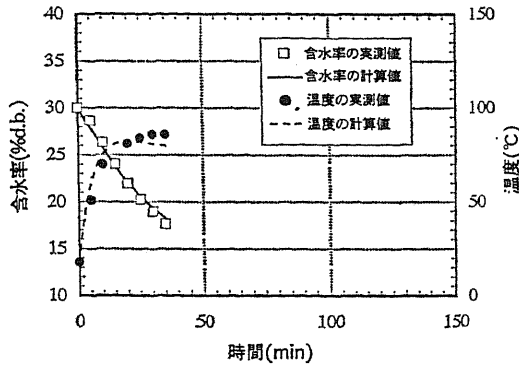


図4 粗のマイクロ波乾燥シミュレーション
(マイクロ波出力 75W, 2450MHz)

Fig. 4 Microwave drying simulation for rough rice (at microwave power of 75W, 2450MHz)

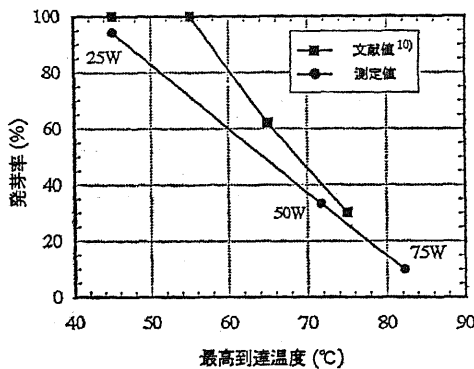


図5 発芽率と乾燥時の最高温度との関係
Fig. 5 The relationship between germination rate and maximum drying temperature

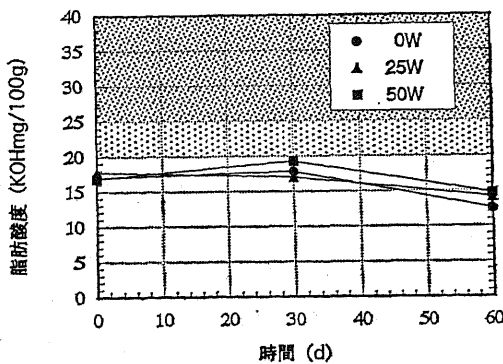


図6 脂肪酸度の経時変化
Fig. 6 Change of fatty acid content with time

含水率の経時変化については、シミュレーション値は実測値とよく一致している。仕上げ水分である 14.5%w. b. に達するまでに 25W・50W・75W ではそれぞれ 130分・70分・35分であった。

図5は発芽率と乾燥時の最高温度との関係である。■印は加藤ら¹⁰⁾による測定値、●印は本研究で得られた測定値である。ここでの発芽率は絶対値ではなく、マイクロ波照射を施していない粗の発芽率(文献値92%・本研究91%)との相対値である。文献値から100%の発芽率を保つには、最高温度が55°C以下であることが分かる。本研究のシミュレーションを用いると、最高温度が55°Cになるマイクロ波出力は32W/140gであることが推察された。すなわち、0.23W/g(初期水分24.5%w. b. 時)のマイクロ波出力が粗の発芽力を維持できるマイクロ波乾燥の限界出力と考えられる。

図6はマイクロ波乾燥を施した粗の脂肪酸度の経時変化をプロットしたものである。それぞれの実験条件ではほぼ同じ値をとっており、変質の兆候を示すといわれる¹¹⁾ 25KOHmg/100gを下回りマイクロ波乾燥の影響は見うけられなかった。

V 摘 要

粗のマイクロ波乾燥試験を行い、乾燥特性は拡散理論を用いて、昇温特性は新たに熱収支式をたてマイクロ波乾燥方程式を導出した。これを直交選点法より常微分方程式に分解しRunge-Kutta-Gill法により数値計算し実測値との比較を行った。乾燥特性・昇温特性ともに計算値は実測値とよく一致した。

また、シミュレーションから発芽率100%を維持できる限界マイクロ波出力は、0.23W/gであることが分かった。

脂肪酸度については、特にマイクロ波乾燥の影響は見いだされなかった。

参 考 文 献

- 1) 池田善郎, 山下律也: 新版農産機械学, 文永堂出版, 115-116, 1991
- 2) 大森豊明: 電磁波と食品, 光琳, 32-33, 1993
- 3) TASC0 編: 放射温度計取扱説明書
- 4) 食糧庁編: 標準計測方法, 68-88, 1994
- 5) Finlayson, B. A.: 重みつき残差法と変分原理, 培風館, 98-112, 1974
- 6) 農業機械学会編: 新版農業機械ハンドブック, コロナ社,

637—1987

- 7) 西山喜雄：第31回農業機械学会学会講演要旨, 133, 1972
 8) 村田 敏, 田川彰男, 石橋貞人：DSCによる穀物の比熱測定, 農機誌, 46(6), 547—554, 1987
 9) 村田 敏, 田川彰男, 石橋貞人：穀物水分蒸発潜熱の計

算式について, 農機誌, 50(3), 85—93, 1988

- 10) 加藤宏郎, 山下律也：高周波誘電加熱による穀物害虫の防除, 農機誌, 49(5), 443—450, 1987
 11) 全農開発・資材部編：コントリビューターへのびき (原稿受理平成8年3月21日・質問期限平成9年1月31日)

コメント

[読者のコメント]

すでに、マイクロ波乾燥機による籾、豆類の乾燥が行われており、これらは穀粒表面への水分拡散が「胴割れ」、「皮切れ・破砕」や「しわ粒」の発生回避に有効であることが理由です。現実レベルの出力25Wで15分以内の穀温や表面水分等の解析が必要と思われます。熱風乾燥と組み合わせて「胴割れ率」、「籾割れ」や「煮え」等の解析を今後も期待します。

[コメントに対する著者の見解]

ご指摘のとおり、マイクロ波加熱による乾燥は、ほぼ均一に穀物を加熱・昇温できる内部加熱

方式です。そのため、従来型の外部加熱方式による乾燥法と比較して穀物表面と内部との温度勾配・水分勾配が小さくなると考えられるので「胴割れ」等の発生回避に有効な乾燥手段と思われます。しかし一方で、穀物内部から外部への水分移動速度には限界があるとも考えられ、そのために高温となって内部に残留する水分による「煮え」などの悪影響も起こることがありますので、今後、実用レベルの照射電力での乾燥と通常の熱風乾燥との比較実験を行い、これら乾燥に伴う諸弊害について詳しく解析を進めていきたいと考えております。

＜新しい出版物＞

よりよい大学づくりをめざして Ver. 2

編集・発行 農業機械学会 平成8年7月

体裁・A4版 全253頁(講演要旨を含む)

価格：1セット 3,000円(送料別 380円)

本書は農業機械学会教育問題特別委員会が農業機械学教育について全国28大学に対して実施したアンケートの中間報告をまとめたものであり、平成8年度第55回年次大会(北海道美唄市)で農業工学の教育についての学術シンポジウムが日本農業工学会、日本食物工場学会、日本学術会議農業機械学研究連絡委員会と共催で実施された講演集もセットになっています。

アンケート回答大学は以下の通り：北海道大学、帯広畜産大学、弘前大学、岩手大学、山形大学、茨城大学、筑波大学、宇都宮大学、千葉大学、東京大学、東京農工大学、岐阜大学、三重大学、京都大学、神戸大学、鳥取大学、島根大学、岡山大学、山口大学、香川大学、愛媛大学、高知大学、九州大学、佐賀大学、宮崎大学、鹿児島大学、琉球大学、大阪府立大学
 申し込みは、氏名、所属、住所、連絡先電話番号、必要部数を明記して農業機械学会事務局へFAXでご連絡下さい。