

粳の高周波乾燥に関する研究（第1報） マイクロ波による粳の乾燥特性

上出 順一・土屋 功位
（山形大学農学部 農業機械学研究室）
（昭和50年9月30日受理）

Studies on the Drying of Paddy Grains with High-Frequency(1)
On the Drying Characteristics of Grains with Microwave

Junich KAMIDE and Masanori TSUCHIYA

(Laboratory of Agricultural Machinery,
Faculty of Agriculture, Yamagata University)

I 緒 言

粳の乾燥処理は収穫作業の中で最も重要な作業の1つであり、とくにコンバインの普及に伴い、生粳乾燥の合理化が望まれている。

乾燥処理法には貯蔵乾燥（Storedrying）のように、比較的ゆっくり乾燥する方法と、出来るだけ速く乾燥させる方法があるが、後者は商品価値を下げ搗精歩留り低下の原因となる胴割が生じ易い問題がある。胴割発生は乾燥と吸湿に伴う米粒内の水分々布の不均一さに起因するところが大きいとされており、熱風乾燥では水分傾斜による拡散移動が支配的で、必然的に胴割発生の危険性を内在しているので、乾燥速度をあまり高めることはできない。そこで品質に大きな影響を与えず、いかに乾燥速度を高めるかが問題となるが、その解決法の一つとして高周波の利用が考えられる。木材乾燥においてはすでに一部で実用化されており、農産物の乾燥においてもその有効性が示唆されている。^{5), 6), 10), 11)}

本研究は穀物乾燥における高周波の実用化をねらいとし、高含水粳のマイクロ波による乾燥特性を実験的に検討したものである。

なお本研究は文部省科学研究費の補助をうけて行ったもので、斎藤農機製作所からは装置の設計製作について、また実験では梅木幸子技官、卒業生佐々木央、横尾繁両君の御協力をいただいた。ここに謝意を表す。

II 高周波乾燥の原理と特徴

穀物などの誘電体を高周波電場内にいれると、誘電体損によって物体は内部から加熱される。加熱速度は物体の誘電的性質と高周波出力によって定まり、単位体積当吸収電力は次式で示される。⁹⁾

$$P_0 = 0.556 f E^2 \cdot \epsilon \tan \delta \text{ (W/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(1)$$

f : 周波数 (MHz)

E : 電界強度 (KV/cm)

ϵ : 比誘電率

$\tan \delta$: 誘電損失

発熱量は P_0 に比例するから電界強度(出力)や周波数の大きいほど加熱は速い。また ϵ , $\tan \delta$ は誘電体固有の特性値で、一般に含水率の多い場合に ϵ は大きく発熱が著しい。

高周波乾燥では、物体の内部水分の表面への移動は内部高の温度勾配によるので、水分の移動速度は水分勾配による拡散移動が支配的な熱風乾燥の場合よりも速く⁴⁾、また胴割発生^{1),2)}の主要な原因である粒体内の水分勾配も小さい。熱風乾燥においては乾燥速度を高めるとき、粒体内の著しい水分勾配が生起するが、一様な内部加熱と比較的均等な水分分布の得られる高周波乾燥は、品質維持と乾燥速度の面で熱風乾燥よりも多くの利点がある。

なお木材乾燥などに利用されているデカメートル波(3~30 MHz)では、被加熱物を極板ではさむ必要があるが、マイクロ波(デシメートル波)は輻射であるから無極でよいから、被加熱物に対する幾何的制約がほとんどないので、乾燥装置の設計上の困難さは少ない。

Ⅲ 実験装置および方法

a, 供試材料

供試材料は水稻キヨニシキで、自脱コンバインで収穫したものである。実験に先立って風選によりしいな、わらくずをできるだけ除去した。

b, 加熱乾燥装置

装置の概要を第1図に示す。連続乾燥では、ホッパー①に投入された籾はマイクロ波シャ断用金網②を通して加熱室③に入り加熱される。加熱時間は無段変速モーターで駆動される籾線出しロール⑤の回転速度によって変化させた。加熱された籾は乾燥室④へ送られ、通風により水分が除去される。なお、通風による熱的影響を小さくするため送風量はできるだけ少なくした。

パッチ式乾燥では加熱室のみを用い、籾は静止状態で加熱乾燥される。この場合はブロー⑧を加熱室に付け替えて通風する。本研究では主としてパッチ式にて実験を行った。加熱室および乾燥室は、厚さ1mmの鋼板、および孔径3mmφ、厚さ1mmの打抜鋼板で製作した。加熱室容積は $5,224\text{cm}^3$ (23cm×38cm×6 cm) で、約4kgの籾が入る。

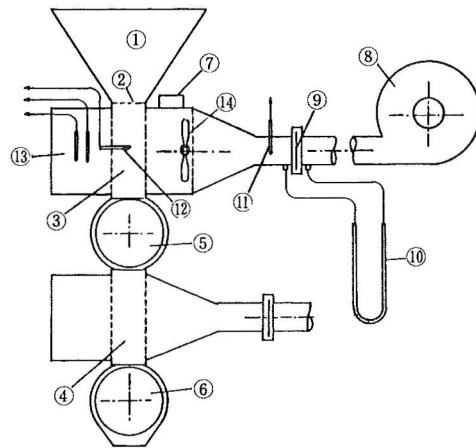


Fig. 1. Apparatus.

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 1 Hopper | 7 Waveguide |
| 2 Screen | 8 Blower |
| 3 Heating Chamber | 9 Orifice |
| 4 Drying Chamber | 10 Manometer |
| 5 Upper Feed Roll | 11, 12, 13 Thermister |
| 6 Lower Feed Roll | 14 Stirrer |

c, マイクロ波発生装置

既製の電子レンジ (ER-1002) を使用した。その諸元を第1表に示す。

導波管によってマイクロ波を加熱室背部に導き、スタラーファンにより加熱室に様に散乱照射される。

実験ではスライダックによりマグネトロンのアノード電流を 50 ~ 350 mA の範囲で連続可変し、マイクロ波出力を変化させた。供試マグネトロンのアノード電流と出力の関係を第2図に示す。なおマイクロ波出力は全水負荷 (2kg), 2 分間照射法により測定し、次式(2)によって求めた。

$$P_o = 4.186 MC \Delta T (KW) \dots\dots\dots(2)$$

ただし、M: 水の量 (kg)

C: 比熱 (kcal/kg °C)

ΔT : 温度上昇 (°C/S)

d, 測定法

(1) 送風量; 最大風量 2.6 m³/min の遠心型ブローワ (45W) で通風を行い、送風量は管路直径 5 cm, 開口比 (絞り比) 0.3 の DIN 標準オリフス板により測定した。

$$Q = 0.0002087 m \alpha D^2 \epsilon \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma_1}} \dots(3)$$

Q: 送風量 (m³/min)

m: 絞り比 (0.3)

α : 流量係数

D: 管径 (mm)

ϵ : 圧縮係数

P₁-P₂: 差圧 (kg/m²)

γ_1 : 空気密度 (kg/m³)

送風量は各実験とも一定 (0.623 m³/min) にした。

(2) 温度, 湿度; 送風空気の温度と湿度および籾温度はサーミスタにて測定し、打点式記録計に自記させた。籾温度は針型サーミスタを加熱室中央部に挿入して測定した。籾を充填している場合は、サーミスタに対するマイクロ波の直接の温度的影響はほとんど認められなかった。

(3) 含水率; 試料を十分攪拌した後サンプリングし、105 °C—24時間 oven 法により測定した。

(4) 胴割; サンプリング後約12時間を経過した籾を手むきし、肉眼判定した。なお等級は食糧庁穀物検査基準によって行い重胴割のみ被害粒とした。

第1表 電子レンジの諸元
Table 1. Characteristics of electronic range.

電 源	単相 200 V, 2.6 KW (定格)
発 振 管	T社, マグネトロン. M4546
発振周波数	2450 ± 50 MHz
公 称 出 力	1.0 KW, 650 W (2 段切替)

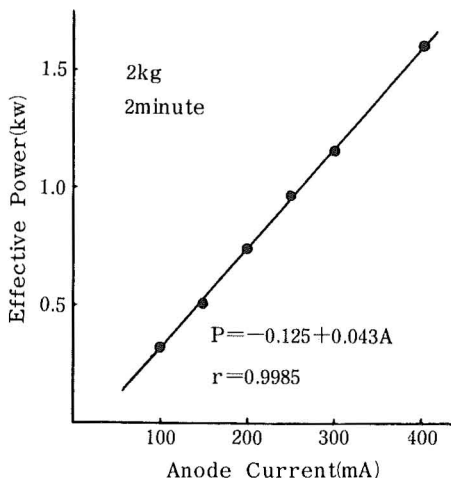


Fig. 2. Effective power of magnetron.

IV 実験結果および考察

(1) 乾燥速度の時間的变化

マイクロ波乾燥においては、乾燥の時間的变化を連続的に直接測定することは困難である。そこで本実験では、通風の際の入、排気の状態量の変化から間接的に求めた。入、排気の絶対温度を H_1 , H_2 、通風の質量風速を G (kg/min) とすると、乾き空気 1kg 当り単位時間の水分増加量 Δx (kg/min) は(4)式で表される。

$$\Delta x = G (H_2 - H_1) \dots\dots\dots(4)$$

Δx は籾の乾減水分量であり、また実験中 G はほぼ一定だから、絶対温度の増加量 $\Delta H = H_2 - H_1$ は籾の乾燥速度を反映している。なお絶対湿度は入、排気の乾湿球温度から湿り空気線図により求めた。

乾燥速度の時間的变化を第3図および第4図に示す。乾燥速度は加熱直後に急速に増大し、4~5分後に一定値、(飽和点)に達するが、初期含水率が低いほど早く一定値に達しその乾燥速度を持続する。ただし高水分の場合は、その後もゆるやかな増加傾向がみられる。通風乾燥においては乾燥速度が時間経過とともに低下し、含水率の変化曲線は一般に下に凸であるのに対し、マイクロ波乾燥においては、乾燥速度の低下はなく含水率曲線はほぼ直線的に変化している。これは、通風乾燥では籾温はほぼ一定で経過するのに対し、マイクロ波乾燥では後述のように籾温は次第に高くなり、水分移動に対する熱的効果が増大するためと考える。

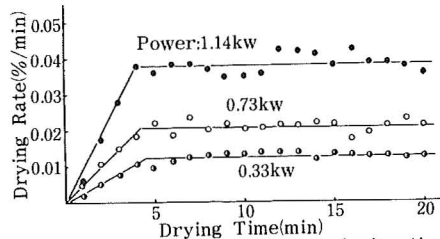


Fig. 3. Change of drying rate vs drying time. (Moisture content: 20.3%)

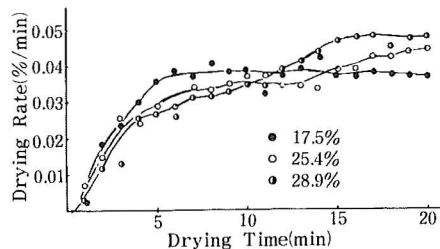


Fig. 4. Change of drying rate vs drying time. (Power: 1.14%)

(2) 籾温の変化

マイクロ波乾燥における籾温の推移は、第5図に示すように指数曲線的に上昇し、籾含水率およびマイクロ波出力にもよるが、照射後5分で 35°C (0.33kW) ~ 70°C (1.14kW)、10分で 40°C (0.33kW) ~ 75°C (1.14kW) に達した。出力が一定の場合は、低水分籾ほど温

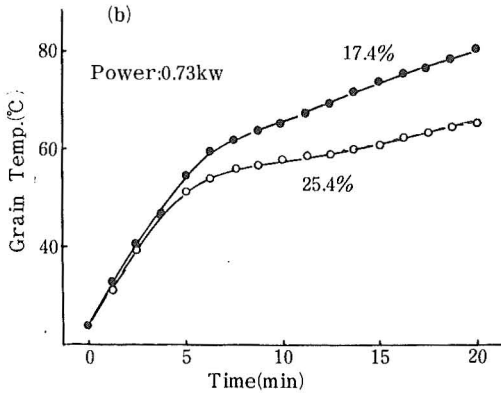
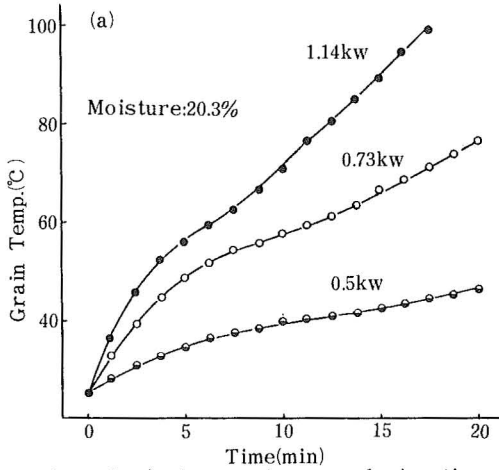


Fig. 5. Grain temperature vs drying time.

Fig. 5. Grain temperature vs drying time.

度上昇は大きく、出力 1.14 kWでは 100 °Cを越す場合もしばしばあった。籾温度曲線を見ると、加熱後 5分前後のところに籾温が大きく変化する点があるが、これは前述の乾燥速度曲線の飽和点にはほぼ一致している。

(3) 出力と乾燥特性

マイクロ波出力を 0.33 kWから 1.14 kW範囲に変化させて実験を行った。籾 1kg 当熱量は 1.2kcal/min (0.33 kW) から 4kcal/min (1.14 kW) である。

乾燥速度は第 6 図に示すように、出力に対してはほぼ直線的に増大し、加熱時間 20 分の場合には 0.33 kWで約 4 %/h、0.73 kWで約 10 %/h、1.14 kWで約 18 %/h であった。なおこれらの値は籾量および含水率によっても異なる。一方胴割発生は出力の高い場合に多いが、加熱時間によっても大きく異なる。これについては後述する。

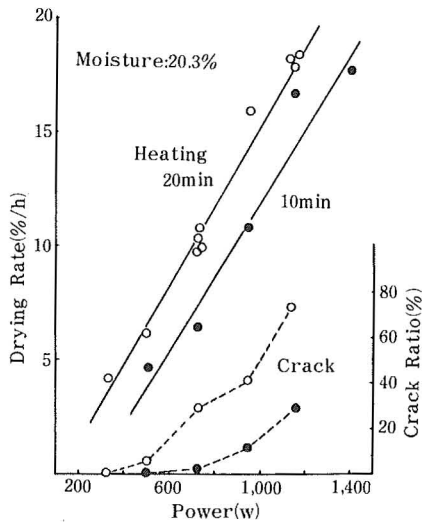


Fig. 6. Drying rate vs power of micro-wave.

(4) 初期含水率と乾燥特性

第 7 図は初期含水率と乾燥速度の関係をマイクロ波出力をパラメータとして示したもので、両者の間には直線的関係があった。

一方胴割発生は加熱時間一定の場合、含水率の低い籾ほど、また高出力ほど多い傾向があった。これは通風乾燥では高水分籾ほど胴割発生が多いのに比べ著しく異なる特徴で、両者の籾内水分の移動メカニズムの違いによるものと考えられる。

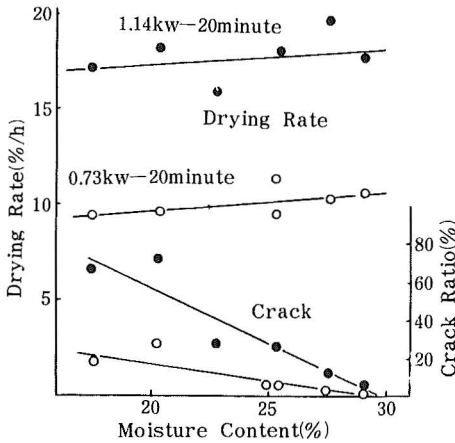


Fig. 7. Drying rate vs grain moisture.

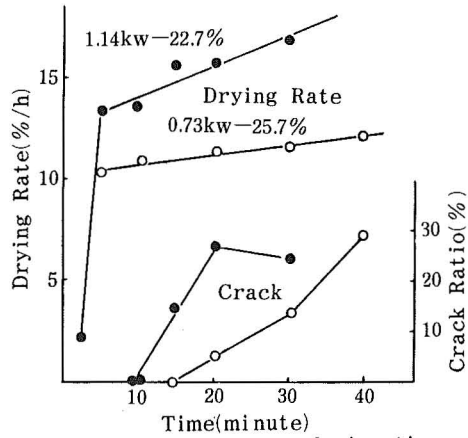


Fig. 8. Drying rate vs drying time.

(5) 加熱時間と乾燥特性

第8図に加熱時間と乾燥特性の関係を示す。加熱時間5分および30分における乾燥速度を比較すると、出力0.733KWでは10.5%/hおよび11.3%/h、1.14KWでは13.4%/hおよび16.7%/hで、加熱時間が長いほど乾燥速度は大きく、またマイクロ波出力が高いほど乾減率におよぼす加熱時間の影響は大きかった。加熱時間が5分以下では籾がまだ十分加熱されないため乾減率は極めて低かった。

一方胴割は0.73KWの場合は加熱時間15分、1.14KWでは10分で発生する。いま胴割発生の許容値を5%とすると、許容加熱時間は0.73KWでは約20分、1.14KWでは約12分とみなされる。

(6) 総熱量と乾減率および胴割

乾燥速度は前述の如く出力、籾含水率、加熱時間によって異り、とくに出力による影響が大きいが、総乾減率(乾前含水率-乾後含水率)は加えた総熱量によってきまる。(第9図)

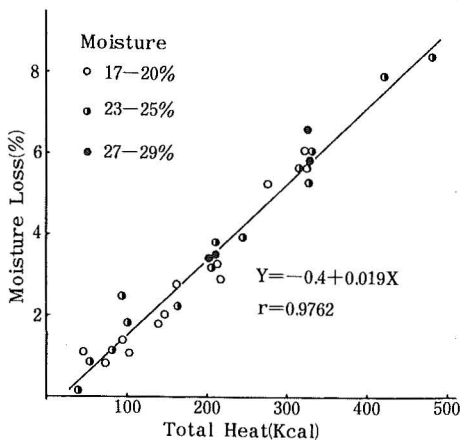


Fig. 9. Drying moisture vs total heat.

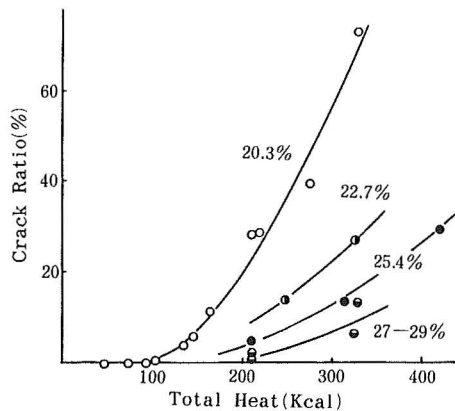


Fig. 10. Crack ratio vs total heat.

加熱量 1 kcal 当乾燥水量は 0.83 ± 0.23 g の範囲で、高水分籾が若干多かった。

第10図に総熱量と胴割の関係を示す。加熱量が多いほど胴割は多く、しかも含水率の低い籾ほど増加傾向が強い。いま胴割 5% 発生時の加熱量をみると、含水率 20.25%, 22.7%, 25.5% および 28% 籾では 145 kcal, 180 kcal, 220 kcal, および 280 kcal で、この加熱量と含水率の間にはほぼ直線の関係がみられた。また高水分籾ほど胴割出現時の温度は高かった。

(7) 熱収支および乾燥効率

籾に吸収されたマイクロ波エネルギー (P_0) の大部分は水分蒸発 (P_1)、籾温上昇 (P_2) のために消費されるが、ほかに放射 (P_3)、対流 (P_4)、伝導 (P_5) の損失がある。 P_3, P_5 は被加熱物と周囲の温度条件によってきまるもので、多くの場合無視しても差し支えない。 P_4 は本実験では通風によって持ち去られる熱的損失である。

マグネトロンから発射されたマイクロ波の一部は反射し、吸収エネルギー量は籾の状態によって異なる。本実験では前述の方法によりマグネトロンの実効出力を求め、乾燥効率の計算の分母とした。

いま乾燥における総熱量の収支を考える。

$$\textcircled{1} \text{ 籾温上昇顕熱 } q_1 = C_s M \Delta \theta \text{ (kcal)} \dots\dots\dots(5)$$

ただし M : 籾全重量 (kg)
 C_s : 籾の湿潤比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
 $\Delta \theta$: 温度上昇 ($^{\circ}$ C)

なお M は乾前重量を用いた。

$$\textcircled{2} \text{ 籾水分の蒸発潜熱 } q_2 = \Delta W q_c \dots\dots\dots(6)$$

ただし ΔW : 蒸発水分量 (kg)
 q_c : 蒸発潜熱 (kcal/kg)

$$\textcircled{3} \text{ 通風による熱損 } q_3 = Q r_a C_H (T_o - T_i) t \dots\dots\dots(7)$$

ただし Q : 毎分通風量 (m 3 /min)
 r_a : 空気比重 (kg/m 3)
 C_H : 湿り空気比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
 T_i, T_o : 入, 排気温度 ($^{\circ}$ C)
 t : 乾燥時間 (min)

誘電特性からみて通風空気温度上昇はマイクロ波による直接加熱よりも、籾による間接加熱の影響が大きい。入気温度と籾の初期温度が同じなら通風による籾への熱的效果は零で、通風はたんに蒸発水分運搬の役目を果たすにすぎない。なお籾からの蒸発水分は全て通気に含まれるから、入気および排気のエンタルピをそれぞれ i_i, i_o とすると(8)式が成立つ。

$$(i_o - i_i) \cdot G \cdot t = q_2 + q_3 \dots\dots\dots(8)$$

④ 乾燥熱効率; 放射および伝導による熱損失を q_4 , 全消費熱量を q_0 とすると、(9)の熱収支式が成立し、また乾燥熱効率は(10)式で表される。

$$q_0 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \text{ (kcal)} \dots\dots\dots(9)$$

$$\eta = \frac{q_2}{q_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(10)$$

第11図に籾含水率とマイクロ波吸収率の関係を示す。実験範囲では乾燥熱効率率は40~60%で高水分籾ほど大きく、その増加割合はマイクロ波出力が高いほど大きい。これは含水率の高い籾ほど内部水分の移行が容易であることを意味しており、さきの乾燥速度の傾向と一致する。一方籾温上昇顕熱は含水率が低いほど大きく q_0 の17~25%であった。また

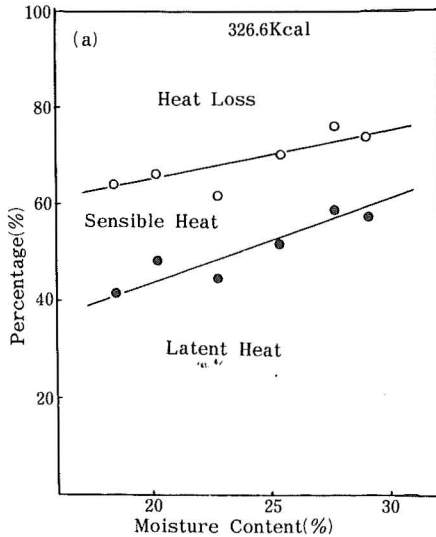


Fig. 11. Energy absorption vs grain moisture

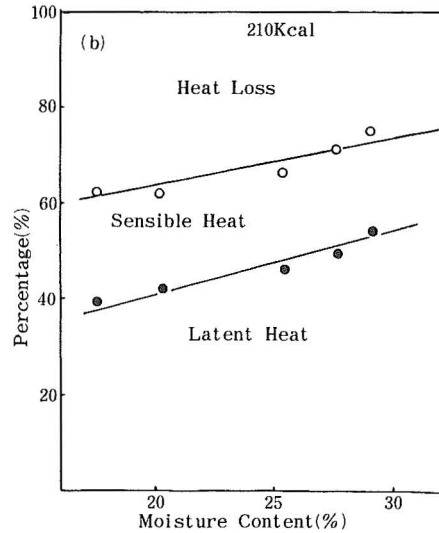


Fig. 11. Energy absorption vs grain moisture.

$q_1 + q_2$ は q_0 の60~75%で、高水分籾ほど大きかった。なお通風による熱損 q_3 は25~40%であり、また q_4 は微少であった。 q_3 は Q によって変化するが q_1 と q_3 は逆関係にあり、 q_3 を大きくすると q_1 は小さくなる。 Q を増すと乾燥速度は増大すると考えられるが、籾内外の温度差および水分差を高め、胴割を増加させることになる。このことについてはさらに検討を要する。

(8) 籾温分布と乾燥むら

第12図の①,②は出力 1.14 kW, 15分加熱後の含水率および胴割発生状況のマトリクスを示す。部位別の乾燥むらが見られるが、これは導波管取付位置の影響とスタラファンの機能が十分でなかったためと考えられる。

また第13図は上部籾繰出しロールを取外し加熱室と乾燥室を直結して籾を充填し加熱した場合の籾温分布を示す。この場合導波管は

23		
11 ① 13.7 ② 88.3	12 ① 12.9 ② 100	13 ① 15.2 ② 76.7
21 ① 16.0	22 ① 13.9	23 ① 14.7
31 ① 14.8 ② 79.3	32 ① 14.0 ② 88.2	33 ① 15.0 ② 84.7
41 ① 14.4	42 ① 13.9	43 ① 16.8
51 ① 13.5 ② 85.4	52 ① 14.5 ② 61.6	53 ① 15.2 ② 83.2

Fig. 12. Difference of grain temperature and moisture content in the heating chamber.

- ① Moisture content.(%)
- ② Grain temp.(deg C)

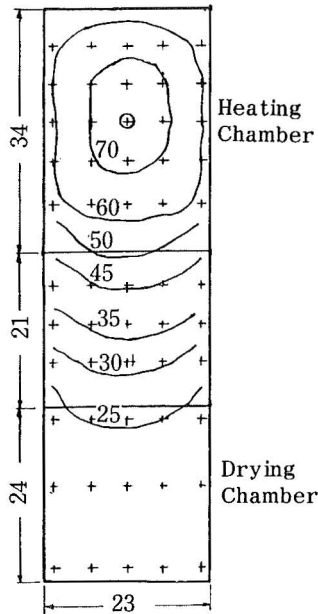


Fig. 13. Distribution of grain temperature in dryer.

加熱室の中央の⊕印の位置に開放されている。籾含水率は、24.6%、マイクロ波出力は520 W、加熱時間は25分で、加熱中は通風をとめた。籾温は加熱室中央部が70°Cで最も高く、周壁1cm付近は約60°Cで、10°C程度の差があった。最下部では外気温(23°C)とほとんど差はなかった。

摘 要

籾乾燥での高周波利用の有効性が示唆されている。ここでは周波数 2450 ± 50 MHz のマイクロ波を利用し、出力、加熱時間および含水率の違いによる籾の乾燥特性を実験的に明らかにした。以下に結果の要約を列記する。

1. 既製の電子レンジを利用した乾燥装置を製作した。本装置によって籾の連続乾燥が可能であるが、ここではパッチ式乾燥により実験を行った。1回当り量は約4kgである。
2. 籾温はマイクロ波の照射により指数曲線的に上昇し、10分後には40～75°Cに達する。上昇温度は高出力、低水分籾ほど高い。
3. 温度上昇につれて乾燥速度は増大するが、4～5分で一定値に達した後はその乾燥速度を持続するか、または若干上向きに経過する。
4. 乾燥速度は出力に対して直線的に増大し、また含水率が高く加熱時間が長いほど大きい。出力1.14 kW、含水率22.7%の場合、10分加熱で約14%/h、30分加熱で約18%/hであった。なお総乾減量は加えられた熱量によってほぼきまり、出力、加熱時間の違いによる影響はあまりなかった。
5. 胴割発生は高出力で、加熱時間が長いほど多い。0.73 kWでは15分、1.14 kWでは10分以上加熱すると胴割がみとめられる。ただし高含水籾ほど胴割発生は少なかった。胴割発生状況から加熱時間は10～15分が適当とみられ、この場合の乾減率は5～8%/hとなる。
6. 乾燥熱効率は40～60%で、高含水率の籾ほど高く、一方籾温上昇顕熱は17～25%で低含水率のものほど高かった。通風による熱損失は25～40%で伝導による熱損失は極めて少なかった。
7. 加熱室内の籾温は導波管の開放部位近くが最も高く、周辺部とは約10°Cの差があった。このため位置による乾燥むらがみとめられた。

参 考 文 献

- 1) 垂井不二男；水稻生籾の脱穀と乾燥に関する実験的研究，福井農試特別報告第2号，(1966)
- 2) 長戸一雄ほか2；胴割米の発生に関する研究，日作紀，第33号，(1964)
- 3) 佐藤正夫；胴割機構，農業および園芸，第39号，(1964)
- 4) 満久崇磨；木材の乾燥，森北出版KK，(1965)
- 5) 西山喜雄ほか2；高周波の農産物への応用(1)，第28回農機学会講演要旨，(1969)

- 6) 西山喜雄ほか2 ; 高周波の農産物への応用(2), 第29回農機学会講演要旨. (1970)
- 7) 工学技術院中央計量検定所 ; 計量技術ハンドブック, コロナ社. (1969)
- 8) 伴 敏三 ; 人工乾燥における米の胴割に関する実験的研究, 研究所報告第8号, (1971)
- 9) 吉村順一 ; 高周波加熱用電子管発振装置の設計と調整, 誠文堂新光社. (1967)
- 10) Malcolm, E. WRIGHT, Joy, G. RORTERFIELD ; Heating and drying peanuts with radio-frequency energy. Trans. ASAE. 14(4). (1971)
- 11) L. E. STETSON, S. O. NELSON ; Effectiveness of hot-air, 39-MHz dielectric, and 2450-MHz microwave heating for hard-seed reduction in alfalfa. Trans. ASAE, 15(3). (1972)

Summary

The moisture removal in the excessive rate by a hot air dryer gives rise to damage of rice grains. The microwave (MW) heating, dielectric heating, to provide energy for moisture removal is supposed to be a means of overcoming these disadvantages.

In order to apply MW heating for drying of paddy grains, the drying characteristics of the material were investigated experimentally with MW of 2450 MHz. The results obtained were as follows :

1) The drying equipment was consisted of a drying chamber, a heating chamber, a grain hopper, two feed rolls and MW generator which had the function of changing the power out-put from 0.33 to 1.14 kw. For the batch drying, the material of 4kg was used for one round.

2) The grain temperature increased exponentially with the heating time and reached from 40 to 75 degrees Centigrade according to the MW power after about 10 minutes.

The higher the MW power and the lower the moisture content, the higher the grain temperature in the same condition of test.

3) Drying rate increased rapidly with grain temperature and reached a certain value within about 5 minutes and then it kept the value or raised a little gradually.

4) Drying rate increased with MW power, grain moisture contents and heating time. It was about 14 %/h when heated for 10 minutes and about 18 %/h for 30 minutes at 1.14 kw. Moisture loss was proportional to the total heat quantity which is the product of MW power and heating time.

5) The higher the MW power and the longer the heating time, the greater the cracked grain. The heating above 15 minutes at 0.73 kw and above 10 minutes at 1.14 kw was apt to produce the crack.

6) The thermal efficiency of drying increased with the moisture content of grains and was in the range of 40 to 60 %. The sensible heat that required to raise the grain temperature was from 17 to 25 %. The heat loss due to the ventilated air was between 25 to 40 % and the conductive heat loss was very few.

7) In the heating chamber, the difference of temperature of grains was about 10 degrees Centigrade between the center (near the waveguide) and the walls of the chamber, therefore the drying degree depended on the location.