

食品のマイクロ波加熱乾燥速度式に関する研究

呂 聯通・久保田 清・鈴木 寛一
岡崎 尚・山下 洋右

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1990年10月27日 受付

要 旨 各種のマイクロ波加熱乾燥装置の設計を進めていくためには, 簡単な乾燥モデルに基づいた乾燥速度式を設定していくことが必要となる。前報(久保田ら, 1990)において, 簡便なマイクロ波加熱乾燥装置の試作を行い, ジャガイモを例として, 既報(KUBOTA, 1979-1, 1979-2)で示した簡便な経験速度式を使った簡単な乾燥速度式の設定に関する研究を行った。

本研究では, 恒率乾燥期間におけるマイクロ波乾燥速度に関する考察を各種条件下に対して行い, 恒率乾燥期間を考慮した簡便な乾燥モデルに基づいた乾燥速度式の設定に関する研究を行った。

緒 言

食品をマイクロ波加熱乾燥する各種装置の最適化設計, 操作計算を進めていくためには, 乾燥速度式の設定に関する研究を進めていくことが必要となる。本研究では, 平板状ジャガイモなどを例として, 乾燥速度式の設定に関する研究を行った結果について報告する。

マイクロ波加熱の利用として, 家庭用の電子レンジが普及してきている。また, 工業的にも発泡乾燥卵の製造装置(荒木, 1987)など各種工業用装置が開発され(編集部, 1988), 成書など(露木, 1974, 肥後, 1987)が出されてきている。しかし, 化学工学的研究いわゆる速度論的研究となると, 筆者らによるクッキング(KUBOTA *et al*, 1986, 久保田ら, 1988), 乾燥(久保田ら, 1990)に関する研究を除くと皆無といっても過言でない。

マイクロ波加熱は, 装置を加熱しないで食品だけを加熱して, 内部加熱ができ, 迅速加熱ができ, 制御が容易などの特徴がありながら, 利用が少ないのは, 速度論的研究が皆無という理由に加えて, もう一つの理由として, 試料の不均一加熱が問題になっているためと考えられる。これを解決するためには, 通風(久保田ら, 1990, 小島ら, 1980, 赤星ら, 1982, 1990)を行ったマイクロ波加熱乾燥などが考えられる。不均一加熱を解決して良い品質の製品を得るためには, マイクロ波加熱による乾燥機構を解明し, 速度論的研究を進めていくことが必要となる。

本研究では, ジャガイモなどを試料としてマイクロ波加熱乾燥実験を行い, 最も重要な段階となる恒率乾燥期間をとりあげ熱と物質の移動に関する基礎式を設定して, 乾燥機構に関する考察を行った。乾燥速度に対して, マイクロ波加熱出力, 試料の厚さ, 表面温度, 物性値などが影響する結果を得たので報告する。また, 恒率乾燥速度式に前報(久保田ら, 1990)で示した簡便な経験速度式(KUBOTA, 1979-1, 1979-2)を併用して示す乾燥速度式の設定についても合わせて検討したので報告する。

実 験 方 法

試料 市販のジャガイモ, 人参, バナナを試料として用いた。初期温度と初期含水率を安定させる目的で20°Cの水浴中に4時間浸漬したものを試料作製用として準備した。乾燥実験の直前に, カッタにより各種形状に整形して試料とした。含水量は, 115°Cの絶乾重量測定により求めた。

実験装置 前報(久保田ら, 1990)に示したマイクロ波加熱乾燥装置を使用した。これは, 松下住設機器の好意により電磁波強度を広範囲に変えられる目盛(15から600)を取りつける改良をして頂いた電子レンジNEA-90を, 更に改造して通風ができ, 試料の重量変化が自動測定できるようにしたものである。電子レンジの改造に伴って電磁波漏れが起こっていない確認は, HOLADAY社製の電波漏洩量測定器HI-1501

型によって行った。更に、十分な安全をとるため、装置周辺部に可動できるステンレス網張り板を取りつけた。

加熱出力 P_w [W] は、蒸留水を TPX プラスチック製の三角フラスコ 200 cc に入れ、温度変化を測定することによって求めた。三角フラスコの細口部分まで蒸留水を入れ、その表面に、水分蒸発を妨ぎさせる目的で少量の流動パラフィンを入れた。温度変化の測定は、マイクロ波加熱を所定時間行った後、電子レンジから取り出し、マグネティックスターラーで攪拌しながら市販のアルメル・クロメル熱電対（ステンレス保護管径 1 mm）を用いて行った。

通風した空気は、ポンプからの空気を用い、流量調節バルブを通しロータメータで流量を測定し、水温を変えて飽和湿度を与えることができる調湿器を通し、導管部にリボンヒータを巻き温度調節器を取りつけた加熱部を通して電子レンジに導入した。空気温度は、電子レンジの入口部分で測定して調節した。

重量変化の測定 多量の試料を用いる場合は、市販の電子レンジ NE-6330 型を用い、回転皿を使用した。試料が並べられる台をテフロン糸を網状に張って作り（久保田ら、1990）、重量変化は、台を 2.5 分毎に取り出すことによって測定した。また、少量の試料を用いる場合は、電子レンジ内にポリアクリル製通風筒（内径 4 cm、長さ 10 cm）を取りつけ、その中に試料を吊して重量変化を自動測定した。空気は、通風筒の底部にロートを取りつけて送り込んだ。電子レンジ内での空間での位置は同じになるようにした。

熱、物質収支式

乾燥機構 前報（久保田ら、1990）では、ジャガイモと茹でうどんのマイクロ波加熱乾燥を行った。その結果、乾燥曲線が、乾燥初期に試料温度が上昇して S 字型の形状を示したため、全乾燥期間に対しては、S 字べき乗型速度式の設定を行った。また、エネルギー吸収効率 η [-] を求めて 100°C に到達する時間を推算し、十分に 100°C になって乾燥が進行すると考えられる領域に対して、べき乗型速度式の設定を行った。マイクロ波加熱による乾燥速度は、加熱電力によって大きく変わる結果が得られた。外部加熱による乾燥では、熱風温度とか試料の大きさなどが速度に大きく影響するが、マイクロ波加熱による乾燥では、外部加熱と比較して僅かであった。試料の大きさ、加熱出力などが適当でないと考えられる場合は、試料温度上昇に伴う速度上昇期間が長くなったり、不均一加熱が起こって褐変するなどした。乾燥機構に関する考察を行って乾燥速度式を設定する場合には、褐変を妨ぐ実験条件を探索して実験を行っていくことが必要であると考えられた。

本研究では、乾燥機構を熱、物質収支に観点をおいて解析をして、乾燥速度式の設定を試みた。初期含水率が大きい食品を常圧下で好ましい実験条件を探索して乾燥した結果、外部加熱による乾燥と同様に恒率乾燥期間がみられたことから、乾燥期間を、速度上昇期間、恒率乾燥期間、減率乾燥期間の 3 つの区間に大別することにした。

速度上昇期間は、試料の初期温度が空気の湿球温度より低いので湿球温度以上に上昇して速度が大きくなっていく期間と考えられる。恒率乾燥期間は、通常の外部加熱では、試料の表面に自由水が十分に存在して試料の外表面が湿球温度になり速度が一定する期間と考えられている。これと異なって、マイクロ波加熱では、吸収熱量と蒸発潜熱で持ち去られる熱量とが等しくなる定常状態が起こって速度が一定しているのではないかと考えられる。空気温度に対する飽和水蒸気濃度を越える蒸発は起こらないと考えられる。試料の温度を過度に上げすぎる加熱を行わないようにして、この恒率乾燥期間を長く維持する条件を設定していくと、加熱効率を大きく、品質を良くする乾燥を行うことができると考えられる。加熱出力を大きくしすぎると、加熱効率が低下し、試料温度が上昇して焦げるなどして好ましくない結果になると考えられる。発泡乾燥を目的とする場合には、試料内部の全圧を上昇させるまで加熱出力を大きくすることになるが、目的以上の過度の加熱はやはり好ましくない結果になると考えられる。減率乾燥期間は、試料の水分が低下して、速度が小さくなっていく期間と考えられる。

乾燥率の設定 試料の重量変化の測定から乾燥率を次式により表わす。

$$G = (g_0 - g) / (g_0 - g_e) \quad (1)$$

ここで、 g [kg] または [g] および G [-] は、時間 S [s] または [min] における重量および乾燥率である。添字 o および e は、初期および平衡時の値を示す。マイクロ波乾燥では、水分がある限り乾燥が進行して

いくことが可能であるため、115°C の絶乾重量測定により得られた重量を上式における平衡重量 g_e の値とした。長さ、幅、厚さ $2l_x=4.0$, $2l_y=3.0$, $2l_z=0.1$ cm のジャガイモ $g_0=49.88$ g をテフロン糸の網の上に並べてターンテーブル上に置いて、マイクロ波加熱出力 $P_w=187$ W で乾燥した結果を Fig. 1 に示す。これは、恒率乾燥期間が $G=0.1\sim 0.7$ にわたって得られた条件下に対する結果を示したものである。

熱収支式 試料内の微小部分に対して熱収支を考えると、熱収支式は次式で表わされる。試料の吸収熱量と各物性値は、簡単のため温度、含水率の変化によって変わらないものと仮定する。

$$\frac{\partial t}{\partial S} = \alpha \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] + \frac{P}{\rho C_p} + \frac{\gamma_v}{\rho C_p} \frac{\partial c_v}{\partial S} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \alpha = \lambda / \rho C_p$$

ここで、 P [W/m³] は試料の単位体積当たりの吸収熱量、 t [K] は時間 S [s] における試料の厚さ、幅、長さ、方向の中心からの距離 x, y, z [m] における温度である。 α [m²/s], λ [W/m·K], ρ [kg/m³], C_p [J/kg·K] は、それぞれ試料の熱拡散率、熱伝導度、密度、比熱である。 C_v [kg-H₂O/m³] は温度 t に対する飽和水蒸気濃度、 γ_v [J/kg-H₂O] は水の蒸発潜熱である。式(2)において、温度の定常状態を考えると、 $\partial t / \partial S = 0$ となり、無限平板を仮定すると次式となる。

$$\alpha (\partial^2 t / \partial x^2) + P / \rho C_p + (\gamma_v / \rho C_p) (\partial c_v / \partial S) = 0 \quad (3)$$

$$\text{境界条件 } x = \pm l: t = t_s \quad (4)$$

$$x = 0: \partial t / \partial x = 0 \quad (5)$$

ここで、 x [m] は試料の厚さ方向の中心からの距離、 l [m] は半厚さ、 t_s [K] は表面温度である。

物質収支式 熱風乾燥では、試料表面の水分が蒸発をして、表面の水分量が内部の水分量よりも小さくなり、水分の濃度差で水分移動が起こると考えられる。これと異なって、マイクロ波加熱乾燥では、試料内部の温度が空気温度より高く、飽和水蒸気濃度が大きくなり、飽和水蒸気圧差で水分移動が起こると考えられる。吸収熱量が過大となって沸点を越えて試料内部の全圧が上昇する場合とか減圧乾燥をする場合は、全圧差による水分移動も起こると考えられる。ここでは、常圧下における試料温度が沸点以下での試料内の微小部分に対して物質収支を考える。物質収支式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial c_v}{\partial S} = D_v \left[\frac{\partial^2 c_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_v}{\partial z^2} \right] \quad (6)$$

ここで、 D_v [m²/s] は試料内での水蒸気の有効拡散係数である。無限平板を仮定すると次式となる。

$$\partial c_v / \partial S = D_v (\partial^2 c_v / \partial x^2) \quad (7)$$

$$\text{境界条件 } x = \pm l: c_v = c_{vs} \quad (8)$$

$$x = 0: \partial c_v / \partial x = 0 \quad (9)$$

ここで、 c_{vs} [g-H₂O/m³] は温度 t_s における飽和水蒸気濃度である。

飽和水蒸気濃度と温度関係式 飽和水蒸気濃度と温度の関係を、式(3)および式(7)が解ける形の関係式で与えると取り扱いが簡単になると考えられる。次式で表わす。

$$C = b T^m \quad (10)$$

$$\text{ただし、} C = c_v / c_{vs}, T = t / t_s$$

ここで、 b, m は飽和水蒸気表より求めることになるパラメータである。

c_v と t との関係を求めた結果を Fig. 2 に示す。曲線は、 $t_s = 293.2$ K, $t = 373.2$ K として得られた $b = 1.097$, $m = 14.67$ による $t = 293.2 \sim 373.2$ K に対する C_v の計算値を示したものである。

熱、物質収支式 式(3)、(7)および(10)から、熱、物質収支式を示すと次式となる。

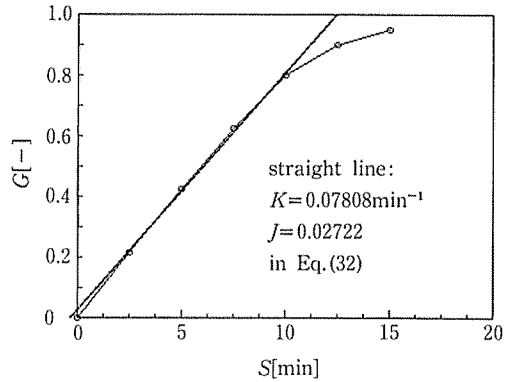


Fig. 1. Relations among the drying-ratio G [-] and the drying time S [min].

Sample: potato ($4.0 \times 3.0 \times 0.1$ cm samples), $g_0 = 49.88$ g, $P_w = 187$ W, $t_a = 25.0^\circ\text{C}$, $t_w = 20.0^\circ\text{C}$.

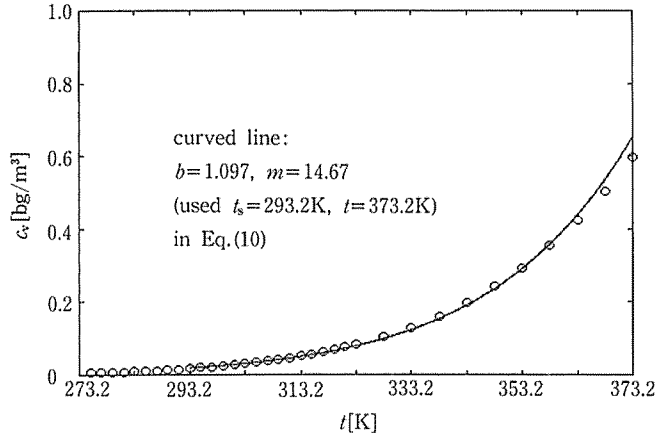


Fig. 2. Relations among the saturated steam concentration c_s [kg/m³] and the sample temperature t [K].

$$\partial^2 T / \partial X^2 + P_c + (bR/L_c) (\partial^2 T^m / \partial X^2) = 0 \quad (11)$$

$$\text{ただし, } X = x/l, \quad P_c = PP/\lambda t_s$$

$$R = \gamma_v c_{vs} / \rho C_p t_s, \quad L_c = \alpha / D_v$$

$$\text{境界条件 } X=1: T=1 \quad (12)$$

$$X=0: \partial T / \partial X = 0 \quad (13)$$

式(11) は, 式(12), (13)の境界条件下で解くと次式となる。

$$T + (bR/L_c) T^m = 1 + bR/L_c + P_c (1 - X^2) / 2 \quad (14)$$

試料の中心部分では, $X=0: t=t_c$ として表わして, 次式となる。

$$T_c + (R/L_c) C_c = 1 + bR/L_c + P_c / 2 \quad (15)$$

$$\text{ただし, } T_c = t_c / t_s, \quad C_c = c_{vc} / c_{vs}$$

ここで, 物性値 α , D_v などが既知であれば, 試料の吸収熱量 P , 半厚さ l を与えて試料の中心温度 t_c を求めることができるが測定が困難である。そこで, 式(15)を陰関数に変形して微分法則により導かれる式からの検討を行う。

$$f(t_c, t_s, P, l, \dots) = t_c + \gamma_v D_v c_{vc} / \lambda - (t_s + b \gamma_v D_v c_{vs} / \lambda + PP/2\lambda) = 0 \quad (16)$$

$$\partial t_c / \partial t_s = -f_{ts} / f_{tc}, \quad \partial t_c / \partial l = -f_l / f_{tc}, \quad \partial t_c / \partial P = -f_P / f_{tc} \quad (17)$$

ただし,

$$f_{tc} = \partial f / \partial t_c = 1 + (\gamma_v D_v / \lambda) (\partial c_{vc} / \partial t_c) \quad (18)$$

$$f_{ts} = \partial f / \partial t_s = -[1 + (b \gamma_v D_v / \lambda) (\partial c_{vs} / \partial t_s)] \quad (19)$$

$$f_l = \partial f / \partial l = -Pl / \lambda \quad (20)$$

$$f_P = \partial f / \partial P = -P/2\lambda \quad (21)$$

試料の表面温度の影響: 式(17)~式(19)から次式が得られる。

$$\partial t_c / \partial t_s = [\lambda / \gamma_v D_v + b (\partial c_{vs} / \partial t_s)] / (\lambda / \gamma_v D_v + \partial c_{vc} / \partial t_c) \quad (22)$$

飽和水蒸気の特徴から $\partial c_{vs} / \partial t_s > 0$ となり, 式(22)において $\partial c_{vs} / \partial t_s > 0$, $\partial c_{vc} / \partial t_c > 0$ とおくことができる。式(22)から $\partial t_c / \partial t_s > 0$ となる。中心温度 t_c を上げ下げしたい場合には表面温度 t_s を上げ下げすれば良いということを示している。

試料の厚さの影響: 同様にして次式が得られる。

$$\partial t_c / \partial l = Pl / [\lambda + b \gamma_v D_v (\partial c_{vc} / \partial t_c)] \quad (23)$$

上式から, $\partial t_c / \partial l > 0$ となる。中心温度 t_c を上げ下げしたい場合には厚さ l を厚く薄くすれば良いということを示している。

試料の吸収熱量の影響: 同様にして次式が得られる。

$$\partial t_c / \partial P = P / 2 [\lambda + b \gamma_v D_v (\partial c_{vc} / \partial t_c)] \quad (24)$$

上式から、 $\partial t_c / \partial P > 0$ となる。中心温度 t_c を上げ下げしたい場合には吸収熱量 P を上げ下げすれば良いということを示している。

熱風乾燥では、試料の温度が空気の温度以上になることがないが、マイクロ波加熱では、通風をしていても試料の中心温度は表面温度よりも高くなっていくことが起こり得て、褐変化をして品質劣化をしたり、また、発火に至って燃えることもあり得るので、上記の各種関係式を使つての検討が必要となる。

熱、物質流束式 試料内の表面部分において、熱、物質流束式いわゆるフーリエの法則、フィックの法則の一次元式を適用して、エネルギー配向についての検討が可能である。

試料内の表面部分における熱流束式は次式となる。

$$\begin{aligned} q_h &= -\lambda (dt/dx)_{x=l} \\ &= -(\lambda t_s / l) (dT/dX)_{X=1, T=1} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 q_h [J/m²·s] は熱流束である。式(25)は、式(14)を陰関数に変形して、微分法則により導かれる式を代入して次式となる。

$$q_h = P \lambda / (\lambda + S_1 D_v) \quad (26)$$

ただし、

$$S_1 = b m \gamma_v c_{vs} / t_s \quad (27)$$

ここで、式(27)に示す S_1 [J/m³·K] は試料表面における飽和水蒸気に関する温度、濃度、潜熱などを含む物性値に関する値として表わされる。

試料内の表面部分における水蒸気についての物質流束式は次式となる。

$$\begin{aligned} w_v &= -D_v (dc_v/dx)_{x=l} \\ &= -(D_v c_{vs} / l) (dC/dX)_{X=1, C=1} \end{aligned} \quad (28)$$

ここで、 w_v [kg-H₂O/m²·s] は水蒸气流束である。単位表面積当たりの乾燥速度に相当する。式(28)は、熱流束の場合と同様にして次式となる。

$$w_v = P l S_1 D_v / \gamma_v (\lambda + S_1 D_v) \quad (29)$$

吸収エネルギーの配向 吸収エネルギーは、試料内の表面部分において、式(26)および式(29)から次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} P_o &= Q_h + Q_v = 2A (q_h + q_v) \\ &= 2A (q_h + w_v \gamma_v) \\ &= P l S_1 D_v (\lambda + S_1 D_v) \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 P_o [J/s] は吸収エネルギー、 Q_h と Q_v [J/s] は、伝熱と蒸発に関するエネルギー、 q_v [J/m²·s] は蒸発に関する熱流束、 A [m²] は試料の片表面積である。

吸収エネルギーの配向は、式(30)から次式のように表わされる。

$$Q_s = q_v / q_h = (D_v / \lambda) S_1 \quad (31)$$

ここで、 Q_s [-] を吸収エネルギーの配向因子と定義する。 Q_s の値を大きくするには、式(31)から S_1 を大きくするのが良いことになる。また、式(27)から、 b , m , γ_v の値は大きく変化をしないから、 c_{vs}/t_s の値を大きくするのが良いことになる。 S_1 と t_s の関係を、 $t_s = 293.2 \sim 323.2$ K に対し、 $t = 323.2 \sim 373.2$ K として求めた結果を Fig. 3 に示す。 S_1 と c_{vs}/t_s は、 t_s が大きくなると大きく変わる。試料の品質を良くするには t_s を小さくする方が良い

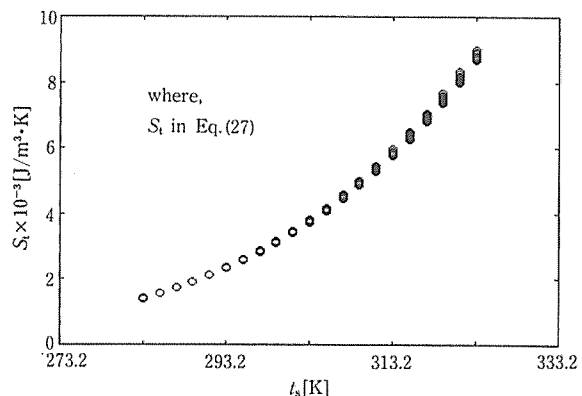


Fig. 3. Relations among the steam physical value S_1 [J/m³·K] and the sample surface temperature t_s [K].

ということと逆の関係となり、最適な妥協できる条件を算出していくことが必要となる。

乾燥速度式

恒率乾燥速度式 恒率乾燥期間では、乾燥率 G と時間 S が一次式で表わされ次式となる。

$$G = J + KS \quad (32)$$

ここで、 J, K は実験結果から求めることになるパラメータである。 J をゼロとしない場合は、 $S=0$ において $G=0$ とならなくなるが、恒率乾燥期間での実験データと計算値との一致が良くなる。 S が 0 から $S_0 = -J/K$ までは、速度上昇期間として、 $G=0$ として取り扱うことになる。また、式(32)は次のように表わされる。

$$K = dG/dS = -[1/(g_0 - g_e)](dg/dS) \quad (33)$$

式(33)の dg/dS は、式(29)を用いて次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} -dg/dS &= 2Aw_v \\ &= P_w \eta S_v D_v / \gamma_v (\lambda + S_v D_v) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{ただし、} P_0 = PV = P_w \eta, \quad V = 2Al$$

ここで、 $V[\text{m}^3]$ は試料の体積、 $\eta[-]$ は加熱効率である。

条件を変えて K の値を比較するときに、式(33)、(34)からわかるように $(g_0 - g_e)$ の値で K の値が変動するので、次式により補正值 K_{0ij} を求めた。

$$K_{0ij} = K_{ij} (g_{0ij} - g_{eij}) / \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_{0ij} - g_{eij}) / nm \right] \quad (35)$$

べき乗型速度式 試料温度上昇に伴う速度上昇期間が無視できる場合には、総括的に乾燥速度式を次に示すべき乗型速度式で表わすことができる。

$$dG/dS = K_N (1-G)^N \quad (36)$$

ここで、 K_N, N は実験結果から求めることになるパラメータである。また、式(33)は次のように表わされる。

$$K_N = -[(g_0 - g_e)^{N-1} / (g - g_e)^N] dg/dS \quad (37)$$

S字べき乗型速度式 試料温度上昇に伴う速度上昇期間が無視できない場合には、総括的に乾燥速度式を次に示すS字べき乗型速度式で表わすことができる。

$$dG/dS = K_S (1-G)^M (G+B) \quad (38)$$

ここで、 K_S, M および B は、実験結果から求めることになるパラメータである。

式(36)および式(38)は、前報(久保田ら、1990)で示したような恒率乾燥期間が得られないような実験条件下に対して有用な速度式と考えられる。

減率乾燥速度式 恒率乾燥期間が顕著に得られて恒率乾燥速度式が設定できる場合には、これに引き続いて起こる減率乾燥期間に対する減率乾燥速度式の設定が必要となる。式(36)を積分して得られる次式を式(32)と並用していく方法が考えられる。

$n \neq 1$ の場合

$$[(n-1)(1-G)^{n-1}]^{-1} = kS + c \quad (39)$$

$n=1$ の場合

$$-\ln(1-G) = kS + c \quad (40)$$

ここで、 k, n および c は、実験結果から求めることになるパラメータである。積分定数 c をゼロとしない場合は、 $S=0$ において $G=0$ とならなくなるが、減率乾燥期間での実験データと計算値との一致を良くすることができるので c をゼロとしないことにする。

式(32)と式(39)または式(40)との交点 (G_x, S_x) が、恒率乾燥期間から減率乾燥期間への切替え点となる。式(36)または式(38)を総括的な乾燥速度式として使用する方法(久保田ら、1990)は、不連続点を持たないということにより便利であったが、乾燥機構を考慮していなかった。式(32)と式(39)または式(40)とを合わせて用いて総括的な乾燥速度式を表わす方法は、現段階では切替え点を推算することができなく、また、減率乾燥期間における乾燥機構についての検討も現段階では行っていない、取り扱いが複雑で長所はみられない。現段階では、恒率乾燥期間が得られる実験結果に対して、その期間でパラメータを求めて、実験結果を比較

することができる。式(36)または式(38)を用いて実験結果を比較する場合(久保田ら, 1990), K_N の値が N の値の変動により, また, K_S の値が M と B の値の変動により変動をして, 実験結果の比較が困難であった。

実験結果と考察

試料の大きさの影響 試料の大きさの影響を調べる実験を, 試料をジャガイモ g_0 = 約 50 g とし, テフロン糸の網上に並べて, 加熱出力 P_w = 187 W として行った。厚さ $2l_x$ を 0.5 cm と

Table 1. Calculated values of the parameter $K_0 \times 10^2$ [min^{-1}] used Eq. (35) in Eq. (32).

$2l_y \backslash 2l_z$	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
2.0	4.96	6.04	6.73	7.40	7.24
3.0	—	7.15	7.58	8.03	7.66
4.0	—	—	7.64	7.90	8.32
5.0	—	—	—	7.63	8.49
6.0	—	—	—	—	8.29

Sample: potato ($2l_z$ [cm] \times $2l_y$ [cm] \times $2l_x$ = 0.5 cm, samples), g_0 = 50 g, P_w = 187 W

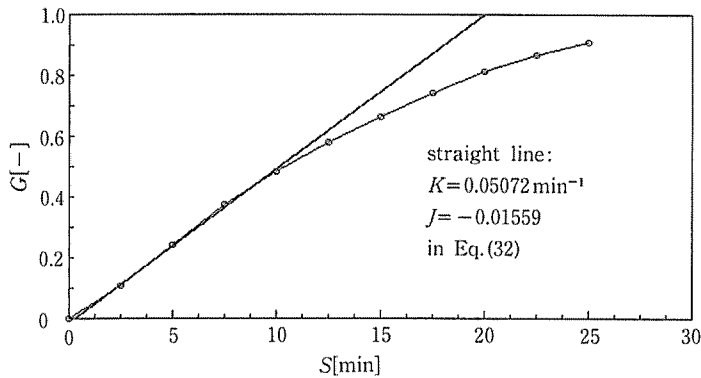


Fig. 4. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato (2.0 \times 2.0 \times 0.5 cm samples), g_0 = 50 g, P_w = 187 W.

一定にして, 長さ $2l_z$ と幅 $2l_y$ を 2.0~6.0 cm と変えて比較を行った。式(32)を適用して得られる K の値の式(35)による補正值 K_0 を Table 1 に一覧して示す。また, $2l_z \times 2l_y$ = 2.0 \times 2.0, 4.0 \times 4.0 および 6.0 \times 6.0 に対する結果を例として, Fig. 4~Fig. 6 に示す。以上の結果によると, 試料の長さや幅が 2.0 cm 以下になると乾燥速度が急激に小さく吸収熱量が減少している。長さや幅が大きくなっていくと, 吸収熱量が大きくなっていく。しかし, ある程度以上に大きくなると大きさの違いによる影響がなくなっている。これは, 試料中

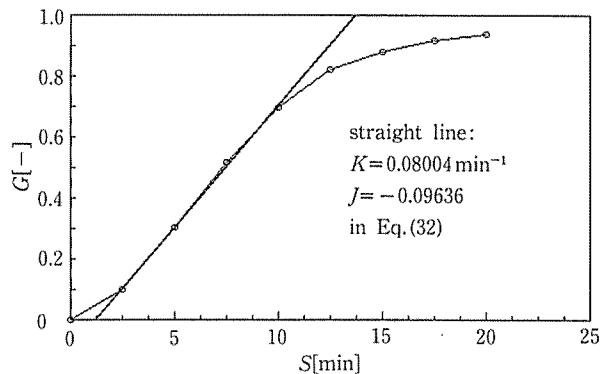


Fig. 5. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato (4.0 \times 4.0 \times 0.5 cm samples), g_0 = 50 g, P_w = 187 W.

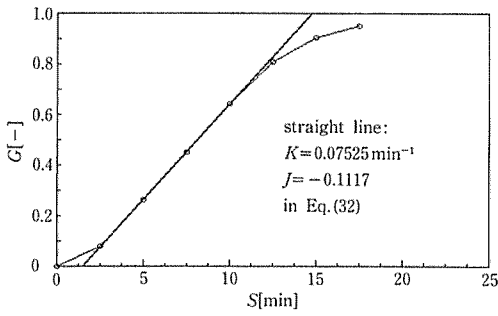


Fig. 6. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato ($6.0 \times 6.0 \times 0.5$ cm samples), $g_0=50$ g, $P_w=187$ W.

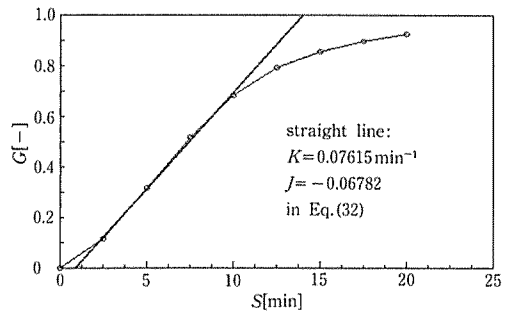


Fig. 7. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato ($4.0 \times 3.0 \times 0.5$ cm samples), $g_0=50$ g, $P_w=187$ W, $t_a=25.0^\circ\text{C}$, $t_w=20.0^\circ\text{C}$.

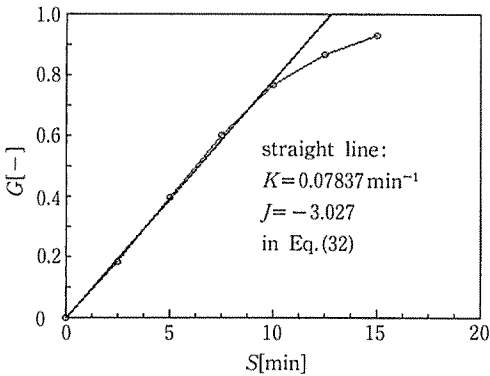


Fig. 8. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato ($4.0 \times 3.0 \times 0.15$ cm samples), $g_0=50$ g, $P_w=187$ W, $t_a=25.0^\circ\text{C}$, $t_w=2.0^\circ\text{C}$.

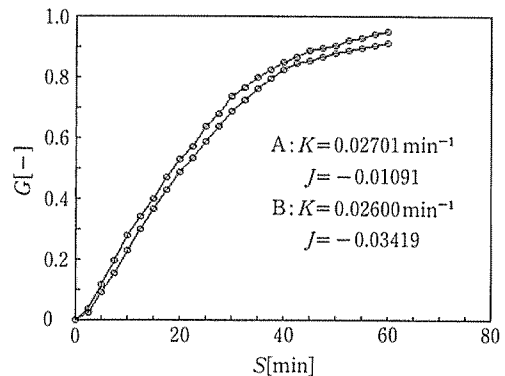


Fig. 9. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato (A: $5.0 \times 2.9 \times 0.33$ cm, 3 samples, $g_0=15.78$ g; B: $5.0 \times 2.9 \times 1.0$ cm 1 sample, $g_0=16.63$ g), $P_w=50$ W, $t_a=40.0^\circ\text{C}$, $t_d=20.0^\circ\text{C}$, $u_a=47$ cm/s.

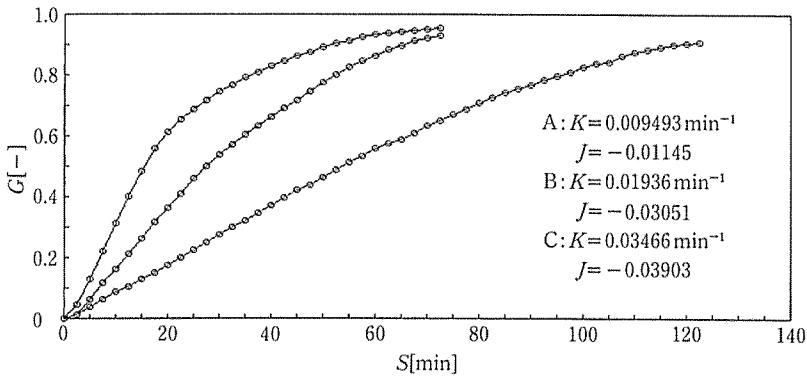


Fig. 10. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
Sample: potato ($5.0 \times 2.9 \times 0.33$ cm, 3 samples), $g_0=16$ g, $P_w=A, B, C$: 18.2, 42.3, 65.0 W, $t_a=27.5^\circ\text{C}$, $t_d=25.0^\circ\text{C}$, $u_a=47$ cm/s.

に定在波が発生して、その影響があることが原因ではないかと考えられる。以下の実験では、長さと同幅とを、影響が少ないところで一定させて行うことにした。

試料の厚さの影響 試料の厚さの影響を調べる実験を、試料をジャガイモ約 50 g とし、テフロン系の網上に並べて、加熱出力 187 W として行った。室内の乾球温度 $t_a=25.0^\circ\text{C}$ 、湿球温度 $t_w=20.0^\circ\text{C}$ であった。長さ 4.0 cm、幅 3.0 cm と一定させて、厚さを 0.5, 0.15, 0.1 cm と変えて実験を行った。式(32)を適用して得られる K の値の補正值 K_0 は、それぞれ 0.07563, 0.07996, 0.07703 min^{-1} になった。厚さ 0.1 cm の場合の結果は、既に Fig.1 に示している。厚さ 0.5, 0.15 cm に対する結果を Fig. 7 および 8 に示す。以上の結果によると、厚さ 0.1~0.5 cm の範囲で大差ない結果になっていると考えられる。

試料の厚さの影響を調べる実験を、試料をジャガイモ約 16 g とし、通風条件下 (空気温度 $t_a=40.0^\circ\text{C}$ 、調湿器温度 $t_d=20.0^\circ\text{C}$ 、流速 $u_a=47.0$ cm/s) に吊して、加熱出力 50 W として行った。 $2l_x \times 2l_y \times 2l_z = 5.0 \times 2.9 \times 0.33$ を 3 個と $5.0 \times 2.9 \times 1.0$ を 1 個と変えて比較を行った。式(32)を適用して得られる K の値の平均値 K_0 は、それぞれ 0.02616, 0.02685 min^{-1} になった。これらの結果を Fig. 9 に示す。以上の結果と前述の結果を合わせると、 K_0 の値が厚さ 0.1~1.0 cm の範囲で大差ない結果になると考えられる。式(33)と式(34)とによると K の値は厚さの関数になってきていないが、その結果と一致する結果が得られたことになる。しかし、厚くなると、式(23)で検討を行ったように、中心温度が上昇することになるので、褐変が起こるなどして品質が問題になってくるために注意を要する。褐変を妨ぐには厚さを 0.1 cm 程度以下にすることが必要であった。

前報において、質量を同じにして表面積を変える実験を行って、乾燥速度が、直方体 (長さ×幅×厚さ) で、 $3.4 \times 3.4 \times 0.3$ cm, $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ cm, $2.7 \times 2.7 \times 0.5$ cm の順に、また円柱体 (直径×長さ) で、 3.75×0.3 , 1.7×1.6 , 3.0×0.5 cm の順に大きくなって傾向が逆転している。また、秋永ら (1986) によるジャガイモ軟化の最適加熱温度が、立方体 (一辺長さ) で、2.0, 1.0, 3.0, 4.0 cm の順に大きかったという逆転の報告がある。試料の体積、単位体積当たりの表面積、一辺の長さの大小などが複雑に相関し、加熱速度に関係していると考えられる。定在波の波長 0.8 cm など関係しているのではないかと考えられる。加熱速度が速くても加熱むらが発生すると食品の乾燥、殺菌などでは大きな問題となるので、このあたりは、今後の重要な課題として考えられる。

加熱出力の影響 加熱出力の影響を調べる実験を、試料をジャガイモ約 16 g ($5.0 \times 2.9 \times 0.33$ cm を 3 個) とし、通風条件下 (空気温度 27.5°C 、調湿器温度 25.0°C 、流速 47 cm/s) に吊して行った。加熱出力を 18.2, 42.3, 65.0 W と変えて比較を行った。式(32)を適用して得られる K の値の補正值 K_0 は、それぞれ 0.009119, 0.01991, 0.03515 min^{-1} になった。これらの結果を Fig. 10 に示す。以上の結果によると、 K_0 の値が加熱出力 18.2~65.0 W の範囲で加熱出力の値にほぼ比例して大きくなっている。式(33)と式(34)によると K の値が加熱出力 P_w に比例する関係になっているが、これと一致する実験結果になっている。しかし、加熱速度を大きくしようと加熱出力を大きくすると、式(24)で検討を行ったように、中心温度が上昇して褐変が起こるなどして品質が問題になってくるために注意を要する。

加熱出力を 42.3, 65.0 W に対して得られた上記の実験結果に、参考までに式(36)と式(39)を適用する計算を行った。その結果、式(36)における N の値は 0.574, 1.055, K_N の値は 0.02095, 0.04500 min^{-1} になり、式(39)における n の値は 0.788, 1.230, k の値は 0.02984, 0.06538 min^{-1} , c の値は -4.845, 4.191 になった。 K_N および k の値は、それぞれべき乗のパラメータ N および n の値が僅かな変動をしても大きく影響を受けて変動する。そこでこれらのパラメータ K_N および k を用いた比較をすることは困難である。Fig. 10 の曲線の形状を比較しても判断できるように、べき乗のパラメータ N および n の値は、加熱出力の増加に伴って大きくなっている。加熱出力を大きくすると初期に乾燥速度が大きく、乾燥の進行に伴って急激に減少をする。加熱出

Table 2. Calculated values of the parameter $K_0 \times 10^2$ [min^{-1}] used Eq. (35) in Eq. (32).

t_d	t_a	30	40	50
		4	2.70	2.66
20		2.63	2.77	2.67
30		2.58	2.77	2.84

Sample: potato ($5.0 \times 2.9 \times 0.35$ cm, 3 samples), $g_0=16\sim 17$ g, $P_w=50$ W, t_a [$^\circ\text{C}$], t_d [$^\circ\text{C}$], $u_a=47$ cm/s

力を小さくすると乾燥時間が長くなるが、恒率乾燥期間が長く、乾燥速度の急激な減少もなく、品質が良い製品が得られると考えられる。本研究で加熱出力を変えた範囲は加熱効率が良い理想条件下になっているが、試料の投入量に対して必要以上に加熱出力を上げていくと、赤星ら (1990) に示されるように、加熱効率が低下し、試料の中心温度が上昇していく領域に入っていくことになり、注意を要する。

空気温度と湿度の影響 空気温度と湿度の影響を調べる実験を、試料をジャガイモ 16~17 g (5.0×2.9×0.35 cm を 3 個) とし、通風条件下 (流速 47 cm/s) に吊して、加熱出力 50 W として行った。空気の温度を 30, 40, 50°C, 調湿器の温度を 4, 20, 30°C と変えて比較を行った。式 (32) を適用して得られる K の値の補正值 K_0 を Table 2 に示す。Table 2 によると、 K_0 の値が、本研究で温度、湿度を変えた範囲では、これらの影響を受けない結果になっている。この原因は、試料の表面温度を測定するとか推算することができれば、前述の関係式から検討していくことができることになる。今後の興味深い課題である。試料の表面温度が上昇すると、式 (22) で検討を行ったように、中心温度が上昇して褐変が起こるなどして品質が問題になってくるため、必要以上に空気温度を上昇させないように注意を要する。熱エネルギーの損失にもなる。

空気流速の影響 空気流速の影響を調べる実験を、試料をジャガイモ 16~17 g (5.0×2.9×0.35

Table 3. Calculated values of the parameter $K_0 \times 10^2 [\text{min}^{-1}]$ used Eq. (35) in Eq. (32).

Sample	t_a (t_d)		
	30.0 (4.0)	40.0 (20.0)	50.0 (30.0)
carrot	3.06	3.29	3.34
potato	2.95	3.08	3.06
banana	2.80	2.88	3.07

Sample: (5.0×2.9×0.35 cm, 3 samples), $g_0 = 16 \sim 17$ g, $P_w = 50$ W, $t_a [^\circ\text{C}]$, $t_d [^\circ\text{C}]$, $u_a = 47$ cm/s

Table 4. Calculated values of the parameter $K \times 10^2 [\text{min}^{-1}]$, $J \times 10^2 [-]$ in Eq. (32), $k \times 10^2 [\text{min}^{-1}]$, $n [-]$, $c [-]$ in Eq. (39) and start point value $S_0 [\text{min}]$, cross point values $G_x [-]$, $S_x [\text{min}]$.

Sample	K	J	k	n	c	S_0	G_x	S_x
carrot	2.945	-3.471	6.368	1.119	8.203	1.179	0.7490	26.61
potato	2.904	-3.390	6.019	1.083	11.94	1.167	0.7390	26.61
banana	3.232	-2.518	7.514	1.194	4.952	0.779	0.7570	24.20

Sample: (5.0×2.9×0.35 cm, 3 samples), $g_0 = 16 \sim 17$ g, $P_w = 50$ W, $t_a = 40^\circ\text{C}$, $t_d = 20^\circ\text{C}$, $u_a = 47$ cm/s

cm を 3 個) とし、通風条件下 (空気温度 30°C, 調湿器温度 4°C) に吊して、加熱出力 50 W として行った。空気の流速を 47, 1.3 cm/s と変えて比較を行った。式 (32) を適用して得られる K の値の補正值 K_0 は、それぞれ 0.02939, 0.02951 min^{-1} になった。 K_0 の値が本実験条件下では、空気の流速の影響を受けない結果になっている。

試料の投入量に対してマイクロ波加熱の加熱出力が小さくなるなどすると、赤星ら (1982, 1990) に示されているように、熱風の温度、湿度、流速が影響する領域があると考えられる。乾燥速度、品質向上などに対する効果

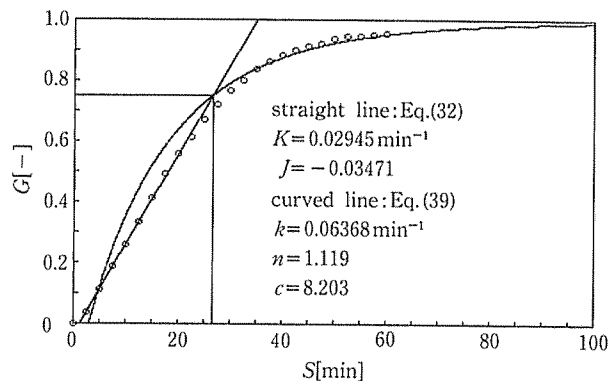


Fig. 11. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.

Sample: carrot (5.0×2.9×0.35 cm, 3 samples), $g_0 = 16.14$ g, $P_w = 50$ W, $t_a = 40^\circ\text{C}$, $t_d = 20^\circ\text{C}$, $u_a = 47$ cm/s.

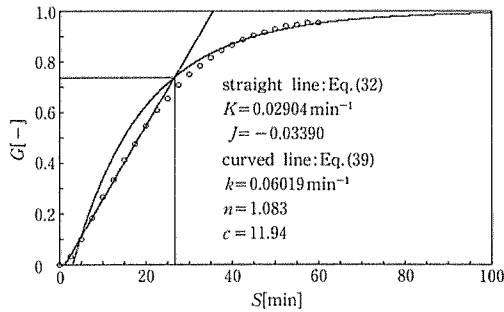


Fig. 12. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
 Sample: potato ($5.0 \times 2.9 \times 0.35 \text{ cm}$,
 3 samples), $g_0=16.51 \text{ g}$, $P_w=50 \text{ W}$,
 $t_a=40^\circ\text{C}$, $t_d=20^\circ\text{C}$, $u_a=47 \text{ cm/s}$.

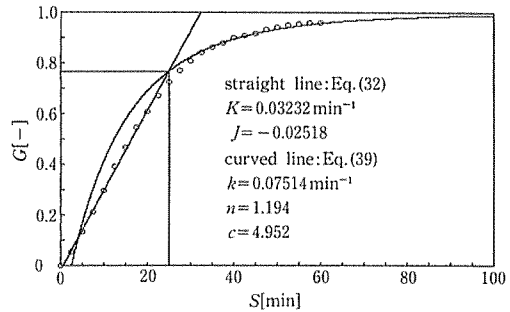


Fig. 13. Relations among the drying-ratio $G[-]$ and the drying time $S[\text{min}]$.
 Sample: potato ($5.0 \times 2.9 \times 0.35 \text{ cm}$,
 3 samples), $g_0=15.30 \text{ g}$, $P_w=50 \text{ W}$,
 $t_a=40^\circ\text{C}$, $t_d=20^\circ\text{C}$, $u_a=47 \text{ cm/s}$.

のない領域で、熱風流速を上げるなどすると、熱エネルギーの損失になるので注意を要する。

試料の種類の違いによる影響 試料の種類の違いによる影響を調べる実験を、試料 16~17 g ($5.0 \times 2.9 \times 0.35 \text{ cm}$ を 3 個) とし、通風条件下 (空気流速 47 cm/s) に吊して、加熱出力 50 W として行った。試料を人参、ジャガイモ、バナナと変え、空気温度、調湿器温度をそれぞれ $30.0, 4.0^\circ\text{C}$; $40.0, 20.0^\circ\text{C}$; $50.0, 30.0^\circ\text{C}$ と変えて行った。式(32)を適用して得られる K の値の補正值 K_0 を Table 3 に一覧して示す。 K_0 の値が試料の種類で異なり、人参、ジャガイモ、バナナの順に僅かながら大きくなっている。水分量を参考までに求めた結果、人参、ジャガイモ、バナナに対して、それぞれ $89.7, 80.7, 73.5\%$ であった。 K_0 の値は、試料の種類によって水分以外にも成分、組織構造などが異なり影響すると考えられるが、水分量が大きい場合に大きくなる結果が得られたため、水分量がいくらか関係しているのではないかと考えられる。

上記の実験結果に、式(39)を適用して、 n, k および c の値を求め、恒率乾燥期間と減率乾燥期間の交点 $G_s[-]$, $S_s[\text{min}]$ を求める計算を行った。パラメータを求めた一例を Table 4 に示し、実験データと計算結果を比較したものを Fig. 11~13 に示す。 $S_0[\text{min}]$ は、前述した速度上昇期間である。乾燥期間を 3 つの期間に別けて求める乾燥速度式は、取り扱いが複雑な上に、恒率乾燥期間以外での実験データと計算結果との一致が良くなく、今後、減率乾燥期間を合わせての乾燥機構の検討を進めて乾燥速度式を得る研究が必要であると考えられる。

結 言

マイクロ波加熱による総合的な乾燥速度式の設定について、前報 (久保田ら, 1990) で報告した。本研究では、マイクロ波加熱による恒率乾燥期間における乾燥機構に関する解析を行って、乾燥速度式を、速度上昇期間、恒率乾燥期間、減率乾燥期間に別けて示す方法に関する研究を行った。

試料の大きさ、加熱出力、空気温度、湿度、流速、試料の種類を変えた乾燥実験を行って、恒率乾燥期間における乾燥速度式のパラメータを求めて、乾燥機構の解析結果から得られた関係式を参考にした考察を行った。今後、試料表面温度の推算が必要であると考えられた。また、試料の大きさ、形状の検討結果から定在波の発生の可能性が考えられ、試料の大きさ、形状と吸収効率の検討を進めることが必要であると考えられた。

乾燥期間を 3 つの期間に別けて求める乾燥速度式は、取り扱いが複雑な上に、恒率乾燥期間以外での実験データと計算結果との一致が良くなく、今後、減率乾燥期間を合わせての乾燥機構の検討を進めて乾燥速度式を得る研究が必要であると考えられる。

なお、本研究の一部は、平成 2 年 10 月 13 日の金沢市 (金沢大学) における化学工学会第 23 回秋季大会において報告したものである。

謝 辞

本研究の一部は、中塾研究奨励会の援助（1989年）を受けたものである。また、本研究で改良した電子レンジの松下電器産業製 NE-6330 型は、松下住設機器(株)の好意を受けたものである。付記させて頂いて謝意を表す。

使 用 記 号

A	: 試料の片表面積 [m ²]	P_w	: 加熱出力 [W]
B, b	: 式(38), 式(10)のパラメータ	Q_h, Q_v	: 伝熱, 蒸発に関する熱量 [J/s]
C	: c_v/c_{vs} [-]	Q_s	: q_v/q_h [-]
C_p	: 試料の比熱 [J/kg·K]		吸収エネルギーの配向因子
c_v	: 試料中の飽和水蒸気濃度 [kg-H ₂ O/m ³]	q_h	: 伝熱に関する熱流束 [J/m ² ·s]
c	: 式(39)のパラメータ	q_v	: $w_v\gamma_v$ [J/m ² ·s]
D_v	: 試料内の水蒸気の有効拡散係数 [m ² /s]	R	: $\gamma_v c_{vs}/\rho C_p t_s$ [-]
f	: 式(16)で示す関数	S	: 加熱時間 [s], [min]
G	: 式(1)で定義する乾燥率 [-]	S_0	: 速度上昇期間 $-J/K$ [min]
G_x	: 恒率乾燥期間と減率乾燥期間の切替 え点の G の値	S_t	: $bm\gamma_v c_{vs}/t_s$ [J/m ³ ·K]
g	: 試料の重量 [kg], [g]	S_x	: 恒率乾燥期間と減率乾燥期間の切替 え点の S の値
J	: 式(32)のパラメータ	T	: t/t_s [-]
K	: 式(32)のパラメータ	t	: 試料の温度 [K]
K_0	: K の値の補正值	t_a	: 通風空気の温度 [°C]
K_N, K_S	: 式(36), 式(38)のパラメータ	t_d	: 調湿器の温度 [°C]
k	: 式(39)のパラメータ	t_w	: 通風空気の湿球温度 [°C]
L_c	: α/D_v [-]	u_a	: 通風空気の流速 [cm/s]
l	: 試料の半厚さ [m], [cm]	V	: 試料の体積 [m ³]
$2l_z, 2l_y, 2l_x$: 試料の長さ, 幅, 厚さ [m], [cm]	w_v	: 水蒸气流束 [kg-H ₂ O/m ² ·s]
M, m	: 式(38), 式(10)のパラメータ	X	: x/l [-]
N, n	: 式(36), 式(39)のパラメータ	x, y, z	: 試料の厚さ, 幅, 長さ, 方向の中心 からの距離 [m]
P	: P_0/V [W/m ³] 試料の吸収熱量	α	: 試料の熱拡散率 [m ² /s]
P_0	: $P_w\eta$ [W] 試料の吸収熱量	γ_v	: 水の蒸発潜熱 [J/kg-H ₂ O]
P_c	: $PP/\lambda t_s$ [-]	η	: 加熱効率 [-]
		λ	: 試料の熱伝導度 [W/m·K]
		ρ	: 試料の密度 [kg/m ³]

添字:

- o : 初期値, e : 平衡値
- x : 恒率, 減率切替え点, c : 試料の中心
- s : 試料の表面

引 用 文 献

- 赤星亮一・又重英一, 1982, マイクロ波を利用した食品モデル試料の通風乾燥とその機構について. 日食工誌, 29 : 587-595.
- 赤星亮一・又重英一, 1990, マイクロ波を利用した馬鈴薯の通風乾燥. 日食工誌, 37 : 581-588.
- 秋永優子・香西みどり・畑江敬子・島田淳子, 1986, 電子レンジ調理におけるジャガイモの軟化に及ぼす調

- 理条件の影響. 家政学雑誌, 37 : 955-960.
- 荒木英之, 1987, マイクロ波の束縛加熱利用. 食品機械装置, 24(1) : 45-56.
- 編集部, 1988, マイクロ波応用機器. 食品と開発, 23(1) : 73-75.
- 肥後温子編, 1987, 電子レンジ・マイクロ波食品利用ハンドブック, 日本工業新聞社, 東京.
- 小島敏忠・葛見裕子, 1980, 熱風循環装置付き電子レンジを利用した食品乾燥法について. *Sanyo Technical Review*, 18(2):121-127.
- KUBOTA, K., ARAKI, H., SUZUKI, K. and ESAKA, M., 1986, Study on the Cooking-rate Equations by Microwave Heated Cooking of Potato Slices. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 25:1-9.
- 久保田清・黒川眞行・鈴木寛一・江坂宗春, 1988, 円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱におけるクッキング速度式の設定に関する研究. 日食工誌, 35 : 78-82.
- KUBOTA, K., 1979-1, Determination of the Empirical Rate Equation for the Chemical and Physical Transformations of Foods. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18:11-30.
- KUBOTA, K., 1979-2, Inference of the Pseudo Transforming Mechanisms of Foods used a Simple Rate Equation. *ibid.*, 18:171-184.
- 久保田清・呂 聯通・山下洋右・岡崎 尚・望月博範・黒川眞行・鈴木寛一・江坂宗春, 1990, マイクロ波加熱乾燥装置の試作とジャガイモ乾燥に関する研究. 広島大学生物生産学部紀要, 29 : 51-62.
- 露木英男・首藤 厚, 1974, 食品のマイクロ波加熱, 建帛社, 東京.

Studies on Microwave Heated Drying-rate Equations of Foods

Liang Tong LU, Kiyoshi KUBOTA, Kanichi SUZUKI,
Takashi OKAZAKI and Yousuke YAMASHITA

*Faculty Applied Biological Science, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 724, Japan*

In order to design various microwave heated drying apparatuses, we must take drying-rate equations which are based on simple drying-rate models. In a previous paper (KUBOTA, *et al.*, 1990), we have studied a convenient microwave heated drying instrument, and studied the simple drying-rate equations of potato and so on by using the simple empirical rate equations that have been reported in previous papers (KUBOTA, 1979-1, 1979-2).

In this paper, we studied the microwave drying rate of the constant rate period for the various experimental conditions, and the drying-rate equations could be determined based on the simple drying models which have constant rate period.