

多孔質内の水分輸送モデルと食品乾燥過程への応用*
 (マイクロ波減圧乾燥における特異な水分分布)

Moisture Transport Model for Porous Media and Application to Food Drying
 (A Characteristics of Moisture Distributions in Food During Microwave Vacuum Drying)

鶴田 隆 治**
 TSURUTA Takaharu

谷川 洋 文**
 TANIGAWA Hirofumi

Abstract Moisture transport is an important phenomenon in many technological fields. We summarize a fundamental description method with use of the relative permeability and the moisture diffusion coefficient. The theoretical approach for the two-phase flow in the porous media is based on the extended Darcy model. The relative permeability and the moisture diffusion coefficient are functions of the moisture content and they express the effects of the friction loss and the capillary pressure, respectively. The model is applied to the microwave vacuum drying of food, where the vapor pressure drives the moisture from the inner to the outer because of the internal heating by the microwave irradiation. The numerical moisture-distributions are compared with the experimental results obtained by the MRI. It is shown that the microwave vacuum drying gives a desirable moisture-distribution for the drying.

Keywords: Moisture transport, Porous media, Two-phase, Microwave vacuum drying, Food

1. はじめに

多孔質内に存在する水分の輸送問題は、油田への蒸気注入による油回収や地熱エネルギー開発、石炭ガス化、食品乾燥など、多くの分野において現象解明と応用技術開発が精力的に行われてきた。それゆえ、関連研究のレビューも多く公表されているが、Cheng-Yang [1]のレビューが代表的である。また、福島事故からさかのぼり、1979年の米国スリーマイル島原子力発電所における過酷事故を機に、多孔質内の沸騰冷却についても多くの研究が行われた[2]。さらに近年では、固体高分子形燃料電池のガス拡散層内における水分管理の重要性からも多孔質内における水分輸送には注目が集まっている。

この報告では、多孔質内の気液二相流を記述する方法の概略を述べたのち、著者らが開発したマ

イクロ波常温乾燥法[3]について触れ、その乾燥過程においては内部より水分が減少するという特異な水分分布を呈することを紹介する。同時に、その理由を明らかにするための数値解析とMRI計測を用いた検討内容を報告する。

多孔質内の気液二相流の解析法には、ここで紹介する方法の他に、格子ボルツマン法(LBM)や格子ガス法(LGA)なども現象を理解するのに効果的な解析法である。例を挙げれば、InamuroらのグループのLBM解析[4, 5]や、Inoueらの燃料電池内水分管理問題についてのLBM解析[6]も注目される。著者らも燃料電池に関してLGA解析を行い、水分挙動に及ぼすガス流路形状の影響を検討している[7, 8]。

一方で、水分量の減少とともに多孔質を構成する固体部は収縮するため、水分輸送への影響も現

* 2013. 8. 1 受付

** 九州工業大学大学院 工学研究院 機械知能工学研究系 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
 TEL: (093)884-3140 FAX: (093)871-8550 E-mail: tsuruta@mech.kyutech.ac.jp

れるが、収縮機構の解明は未だ十分には進んでいない。しかしながら、印刷工程でのインクの乾燥定着操作において生じる紙の反りや皺の問題は、OA 機器開発分野において非常に重要となっている。水分が移動する側ほど収縮するなどの興味深い報告[9]もあるが、まだ不明な点も多く、今後の課題となっている。本稿では、この収縮問題には触れないことにする。

2. 水分移動モデルの概要

2.1 相対透過率を用いた二相流の扱い

多孔質内の流動は、その複雑な流路構造の影響を透過率 k で表現する Darcy 則で記述される。

$$\dot{m} = -\rho u = -\rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

流速の小さな单相流の場合を対象とするが、透過率 k としては、直径 d_p の粒子からなる空隙率 ε の充填層を例にとると、以下の Blake-Kozeny 式で与えられる[10]。

$$k = \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} d_p^2 \quad (2)$$

この式からわかるように、透過率は長さの 2 乗の次元を持ち、多孔質のマトリックスを表す固相の代表長さとして特徴づけられ、多孔質内空隙の平均的な代表サイズは \sqrt{k} 程度であるとされている (Fig. 1 参照)。具体的な数値を上げておけば、 $1\mu\text{m}$ の粒子が空隙率 0.4 で充填されてい

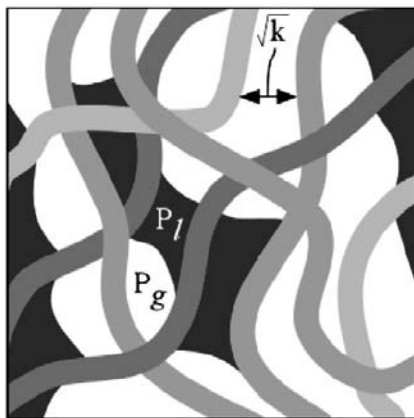


Fig.1 Unsaturated porous structure.

る場合に、透過率は $k = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、空隙のサイズは 35nm 程度と評価される。

多孔質内に気液の二相が共存する状態、いわゆる不飽和状態に対しては、式(1)の Darcy 則を気液それぞれの流動に単純に拡張する方法が用いられている[11]。

$$\dot{m}_l = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_l}{\partial x} \quad (3)$$

$$\dot{m}_g = -\rho_g \frac{kk_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} \quad (4)$$

ここに、 k_{rl} と k_{rg} は相対透過率と呼ばれ、空隙を占める液相の割合を飽和度 s として表した場合に、飽和度によって 0~1 の間の値をとる。すなわち、液相および気相が単独で空隙を占める場合にはそれぞれ 1 となり、その相が存在しない場合には 0 とされる。この気液二相問題に拡張された Darcy 則は、1930 年代半ばに導入されたが、現在においても理論的な取り組みを可能にする方法として活用されている。

2.2 相対透過率について

相対透過率の値は実験的に求められ、飽和度の関数として表されている。もちろん多孔質材料によって異なるが、文献[12]には主として砂や土壌についての報告値が幾つか整理されている。これによれば、その多くが以下の関数関係にある。

$$k_{rl} = s^m, \quad k_{rg} = (1-s)^n \quad (5), (6)$$

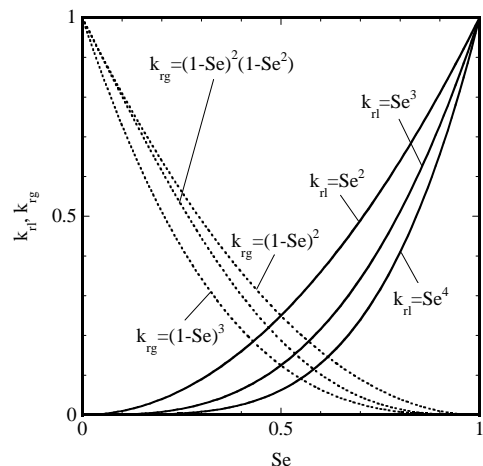


Fig.2 Example of relative permeability curves.

Fig. 2 に代表的な指数 m 、 n について紹介するが、それぞれの相が占める割合が増加するとともに相対透過率は増加する。ここで、指数 m 、 n による差については、例えば良く用いられる 2 乗と 3 乗とを比較すると最大で 15% 程度の差である。厳密には、次に述べるキャピラリー効果によって完全に液相を無くすことはできず、排出不能となる限界飽和度 s_{ir} が存在する。これを考慮し、以下の有効飽和度 s_e を式(5)、(6)の s に代えて使用する。

$$s_e = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir}} \quad (7)$$

2.3 キャピラリー効果について

Fig. 1 に不飽和状態にある多孔質内の様子を模式的に示すが、気液の界面は液体の表面張力および固相とのぬれ性によってその形状は変化し、いわゆるキャピラリー効果によって気液に圧力差が生じる。その差を毛細管圧力 p_c とすれば、

$$p_c = p_g - p_l \quad (8)$$

液体表面が Fig. 1 のように凹面であれば、気液界面の曲率半径を r_e として以下のラプラスの式が成立する。

$$p_g - p_l = \frac{2\sigma}{r_e} \quad (9)$$

なお、その場の温度を T とし、対する飽和蒸気圧力を p_s とした場合、気相側の圧力はトムソンの式によって以下のように関係づけられる。

$$\ln\left(\frac{p_s}{p_g}\right) = \frac{2\sigma}{\rho_l R T r_e} \quad (10)$$

すなわち、気相の圧力は飽和蒸気圧よりも低い側にあり、液体の圧力は毛細管圧力の分さらに低くなるため、液体は加熱液の状態で相平衡になる。それゆえ、微小な液体は加熱による蒸発乾燥が難しくなっている。

実際には、液面の曲率半径は空隙サイズと水量である飽和度に依存すると考えられ、式(9)は

$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{\sqrt{k/\epsilon}} f(s_e) \quad (11)$$

と表されている。 $f(s_e)$ は、最初に導入した人物の名をとって Leverett 関数[11]と呼ばれている。

具体的な関数形についても、文献[12]に代表的なものが紹介されている。

ここで、気相圧力で輸送される液体の質量流束を考える場合、毛細管圧力を用いて式(3)を書き換えれば、

$$\dot{m}_l = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} \quad (12)$$

つまり、気相圧力による水分輸送項と、キャピラリー効果による輸送項とに分けて表現できる。そこで、

$$D = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial s} \quad (13)$$

を水分拡散係数として導入すれば、

$$\dot{m}_l = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_l D \frac{\partial s}{\partial x} \quad (14)$$

というように、右辺第二項はフィックの拡散法則と類似した形となり、キャピラリー効果によって水分分布のこう配に比例した水分輸送が生じることと解釈でき、理解が容易になる。

いずれにしても、キャピラリー効果を表現するには、Leverett 関数か、あるいは水分拡散係数の値が必要である。もちろん、圧力差が相対的に大きい場合にはキャピラリー効果を無視することは可能であり[13]、逆に、重力や浮力が影響する場合にはキャピラリー効果が重要となる[1]。

3. マイクロ波常温乾燥について

3.1 マイクロ波常温乾燥法の概要

食品を乾燥対象とし、高品位化と省エネルギー化を実現するために開発したマイクロ波常温乾燥法を紹介する。マイクロ波は水によく吸収されるため、被乾燥物内部に存在する水分に選択的にエネルギーを供給することが可能である。外部から加熱昇温する温風乾燥や、逆に冷却する凍結乾燥では、蒸発あるいは昇華潜熱を加える以外に、常温からの昇温や冷却のためのエネルギーが必要である。これらのエネルギーを供給することなく、常温で蒸発潜熱のみを与えることができれば、加熱による変質や変性、および凍結による損傷とは無関係に、高品位で高効率な乾燥を実現できると考え、その方法としてマイクロ波減圧乾燥法に着目した。すなわち、蒸発乾燥に必要なエネルギーのみを低沸点下において供給することにより、過剰エネ

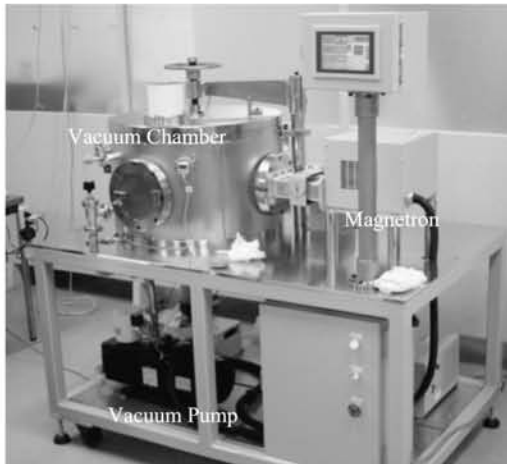


Fig. 3 Microwave vacuum drying system.

ルギによる品質劣化を抑え、高効率な高品位乾燥とすることである。

マイクロ波常温乾燥の実験機を Fig. 3 に示す。乾燥対象物を入れる真空容器と真空ポンプ、そしてマイクロ波照射設備の三点が基本である。減圧すると沸点が下がるため水分は蒸発し、その際に蒸発潜熱が奪われて乾燥対象物の温度は低下し、やがて凍結する。凍結乾燥の一プロセスであるが、本法では凍結しないように蒸発潜熱のみをマイクロ波照射によって供給し、無駄な温度上昇を抑えて室温程度の常温で乾燥を行うものである。そのために、マイクロ波の照射制御による温度コントロールを重視し、ON/OFF 制御や低出力の照射を行う。ここで、真空容器内に微量（毎分数リットル程度）の気体を導入することを一つの特徴としており、これにより蒸発乾燥を促進させる。気体は外気である空気でもよいが、食品の場合には非酸化雰囲気とするために窒素ガスを導入することが好ましい。なお、マイクロ波の周波数は、広く一般に用いられている 2.45GHz である。

温度波形の一例として、イチゴを乾燥させた際の過渡変化を Fig. 4 に示す。減圧容器内の圧力は 5kPa 程度に一定となっているが、イチゴの温度は中心、表面とも 15°C から 25°C の範囲内で変動している。マイクロ波の照射によって急激に温度は上昇するが、照射を止めると蒸発潜熱が奪われて温度が降下する。この繰返しにより温度が一定範囲内に収められ、乾燥がほぼ常温で進行する。ここで注目すべきは、表面温度が中心より低いこ

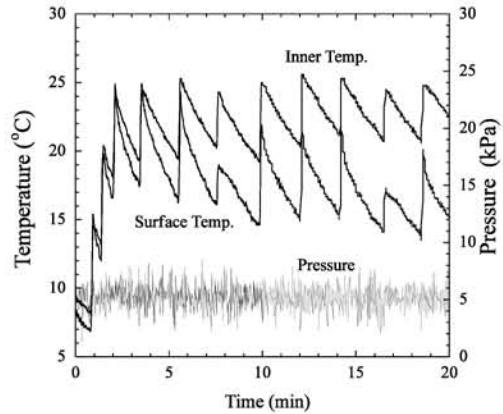


Fig. 4 Temperature and pressure transients.

とである。マイクロ波はイチゴの内部にまで浸透することができ、内部に存在する水分に吸収されて発熱するが、表面では蒸発によって潜熱が奪われるために内部よりも低い温度となる。この場合に水分の移動方向と熱移動の方向とが同じ向きに揃うことになり、乾燥には効果的な状況である。温風乾燥のような外部加熱方式ではこのような温度分布を実現することは難しく、表面がすでに乾燥状態にあっても加熱しなければ内部の水分に蒸発潜熱を供給することはできない。そのため、表面層は過乾燥となり、変性のみならず、収縮や亀裂が発生し、製品としての品質は低下する。

3.2 乾燥特性と水分分布

マイクロ波常温乾燥法の乾燥特性について、ホタテの貝柱を用いて調べた結果を紹介する[3]。Fig. 5 に含水率の時間変化を温風乾燥と比較して

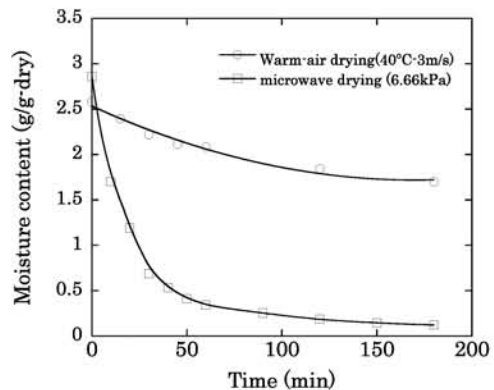


Fig. 5 Comparison of drying speed.

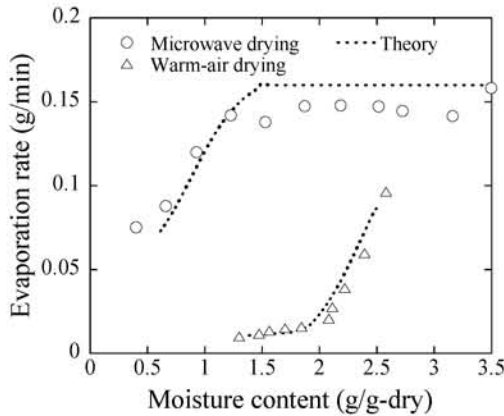


Fig. 6 Drying characteristic curve.

いるが、40℃の温風乾燥よりも乾燥速度が極めて速く、2時間程度でほぼ絶乾に近い状態にまで達している。このときの乾燥特性曲線を Fig. 6 に見れば、マイクロ波常温乾燥においては乾燥速度の大きい恒率（定率）乾燥期間が広範な含水率範囲に及んでいることがわかる[14]。すなわち、乾燥速度が遅くなり始める限界含水率が低下しており、低含水率まで高速乾燥が行われている。一般に、恒率乾燥期間では表面層への水分供給が行われ、水分が多く存在する状況下にあると言われる。この点に関連し、マイクロ波常温乾燥において恒率乾燥期間が長く続く理由を以下に紹介する。

Fig. 7 は、水分子中のプロトンを計測可能とする小型 MRI 装置を用い、3cm 角の立方体状に切

り出したダイコンについて、マイクロ波常温乾燥過程における内部水分分布を可視化したものである[15]。下部の映像で白く写っている部分が水分の多い箇所であり、水分の減少とともに映像は暗くなる。その水分分布を相対的に定量化したものを上部に示している。これらからわかるように、乾燥とともに中心部から水分が減少し、初期水分量の 1/4 程度になった時点においても、ダイコンの表面部には水分が多く存在している。また、内部の低水分領域が拡張し、内部から表面層に達して噴出孔が形成されているようにも見受けられる。温度計測からも内部温度が高く、その蒸気圧によって水分が内部から表面に滲み出し、表面で蒸発するものと理解される。つまり、低含水率まで表面がぬれた状態で乾燥が進行することから、恒率乾燥期間が長くなり、高速乾燥になっていると考えられる。表面からの熱供給によって乾燥する他の乾燥法との相違がここにあり、水分分布の大きな特徴である。この特徴をより明瞭にするため、数値解析の一部を次章に紹介する。

4. 数値解析による水分分布の予測

4.1 解析モデルと方法

減圧下におけるマイクロ波常温乾燥では、水単成分の輸送であり、マイクロ波加熱がもたらす温度差、つまり蒸気圧差による二相流問題と考えられる。したがって、2 章で紹介した式(14)により水分輸送が記述できる状況にある。

解析では、被乾燥物を 2 次元の含水多孔質体と

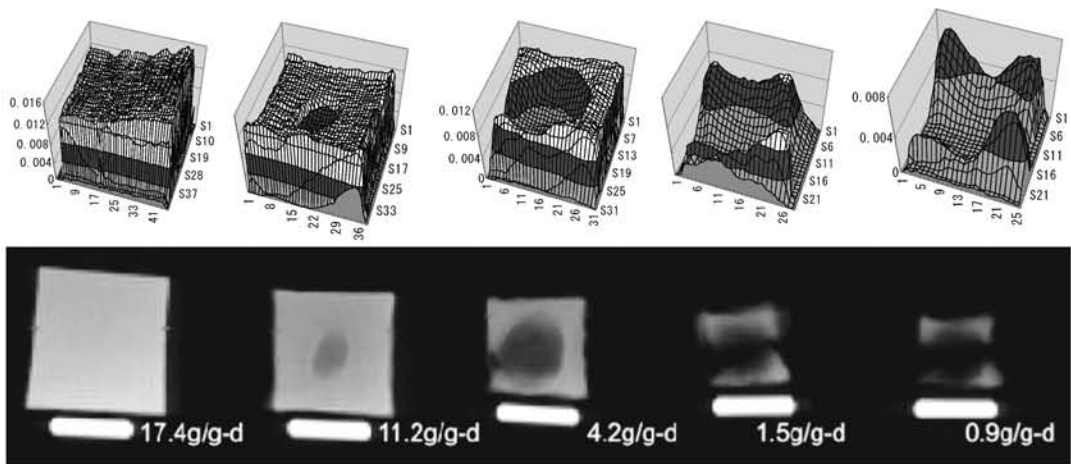


Fig. 7 MRI measurements of water distribution inside radish of 3 cm cubic size.

みなし、減圧下において試料全体を均一にマイクロ波加熱する状況を考える。乾燥は試料外表面からの蒸発のみとし、収縮は考慮しない。内部における水分輸送は、液相が主であり、気相状態での輸送量は小さいものと考え、無視できるとする。また、マイクロ波による加熱は、マイクロ波が水分に優先的に吸収されることから、その発熱量が含水率に比例するものとした。厳密には、誘電損失率によってエネルギーの浸透深さも変化するため複雑となるが、含水率にのみ依存するとして簡略化する[16]。

以下に基礎式を示す。

質量保存の式

$$\rho_l \varepsilon \frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{m}_{lx}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{m}_{ly}}{\partial y} \quad (15)$$

運動量式

$$\dot{m}_{lx} = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_l D \frac{\partial s}{\partial x} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{ly} = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_g}{\partial y} - \rho_l D \frac{\partial s}{\partial y} \quad (17)$$

エネルギー式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ (\rho c_p)_T T \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\dot{m}_{lx} c_{pl} T) - \frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_{ly} c_{pl} T) + q \quad (18)$$

ここに、 q がマイクロ波による加熱量であり、単位体積・単位時間あたりで与える。熱容量と熱伝導率はその場の水分率に依存するため、液相割合と固相とによる加重平均を考える。

相対透過率 k_{rl} と水分拡散係数 D については、

ともに飽和度 s の3乗に比例するモデルを採用している[4, 6]。

$$k_{rl} = s_e^3, \quad D = D_{eff} \cdot s_e^3 \quad (19)$$

ただし、透過率と有効拡散係数 D_{eff} の値については特に固定せず、パラメータ的にその影響を評価することとした。

外表面における単位面積あたりの蒸発速度 \dot{m}_e は、物質伝達率 h_D を用いて次式で近似した。

$$\dot{m}_e = \rho_g h_D (\omega_s - \omega_\infty) \approx \rho_g h_D \left(\frac{P_s}{P} - \frac{P_{sz}}{P} \right) \quad (20)$$

物質伝達率の値は、容器に入れた水を用いて実際に評価し、 $h_D = 0.05 \text{ m/s}$ と推定した。エネルギーの境界条件としては、この蒸発による潜熱 L が奪われることを考え、式(21)を適用する。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\text{surface}} = -\varepsilon \dot{m}_e L \quad (21)$$

なお、乾燥が進んで減率乾燥期間になると、蒸発乾燥面は表面層内部に進展することが考えられる。この場合には、表面の乾燥部がもたらす新たな抵抗を考慮する必要がある[17]。

試料の大きさは一辺 30mm とし、初期温度を 15°C 、初期含水率は1とした。空隙率、透過率と水分拡散係数については、紙の値を参考に、それぞれ $\varepsilon = 0.8$ 、 $k = 1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $D_{eff} = 1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲とした[17]。なお、雰囲気温度も 15°C としたが、圧力は 5 kPa に設定した。加熱条件はマイクロ波の連続照射を仮定し、 $q = 600 \text{ kW/m}^3$ 、 300 kW/m^3 としている。

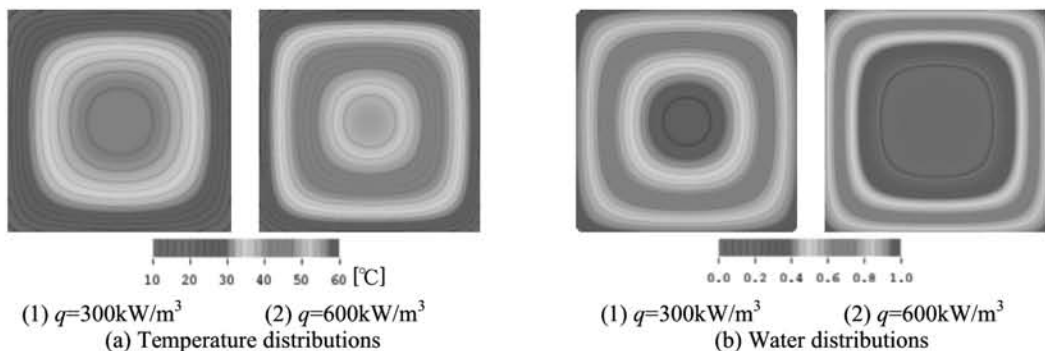


Fig.8 Numerical temperature and water distributions ($k = 1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, $D_{eff} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $t = 22 \text{ min}$.)

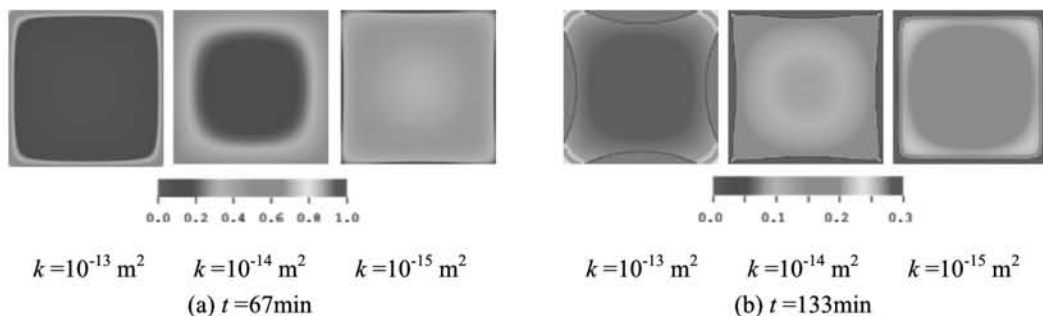


Fig.9 Effect of permeability on water distributions
 $(q = 600 \text{ kW/m}^3, D_{\text{eff}} = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})$.

4.2 解析結果

Fig. 8 に温度分布と水分分布の解析結果を加熱量で比較して示す。マイクロ波加熱では表面からの乾燥による蒸発潜熱放熱のため内部温度が表面よりも高くなっている。また、加熱量が大きいほど内外の温度差も大きい。水分は、実験と同様に内部から減少しており、加熱量が小さい時は同心円状の分布になるのに対し、加熱量が大きくなると外形を反映した矩形状の分布となっている。

水分分布に及ぼす透過率の影響を、有効拡散係数 $D_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合について Fig. 9 に示す。二つの乾燥時刻について比較しており、時刻が進んだ(b)については、分布の基準スケールを低水分側に拡大し、水分分布を強調して表示している。透過率が $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ より大きい場合には、内部から水分が減少しているのが明瞭にわかる。これに対し、透過率が $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 程度に小さくなると、表面層からも水分が減少し、内部での水分移動が抑制されている。温度差起因の飽和蒸気圧差による内部から表面への水分駆動力が、その流動抵抗によって抑制され、乾燥速度が低下している状況がうかがえる。

さらに乾燥時間が進むと、全ての透過率に対して表面での水分減少が進行するが、透過率が 10^{-13} m^2 の場合には、角部近傍に水分が多く存在するという特徴的な分布を示している。水分が多いため、この角部でのマイクロ波の吸収は他に比べて多いが、蒸発量も多いため潜熱輸送によって温度は低く保たれる。蒸発量の多い角部に他から水分が輸送されていることになり、透過率の大きな場合にこの効果が顕著になっていることがわかる。この角部に水分が多く存在するという解析結果

は、Fig. 7 に示したダイコンの MRI 計測結果と良く一致している。実際のダイコンの MRI 画像では、収縮によって変形が進み、金平糖に似た角部が飛び出た形状を呈している。素材の収縮挙動は水分率と密接に関連し、水分減少とともに収縮は進む[18]。乾燥が進んだ状況に対する解析結果の Fig. 9(b)でも、その収縮変形を予想させるような水分分布となっている。また、今回紹介したマイクロ波常温乾燥では、いわゆる膨化乾燥が期待できると評価されている。内部加熱による内圧上昇がその理由であるが、水分と熱輸送の解析モデルに変形といった材料特性を加味することにより、乾燥収縮挙動の現象解明を行うことが今後の課題である。

5. おわりに

多孔質内の気液二相問題に関し、食品のマイクロ波減圧乾燥を題材に、主として気相圧力による水分輸送について、現在の著者らの知見を紹介した。相対透過率やキャピラリ-効果についての理解は十分とは言えないが、ナノスケール空間におけるぬれ性とも関連し、冒頭に紹介した分野以外にも新たな展開が予想される。今後のさらなる現象解明に期待したい。

Nomenclature

c_p	: specific heat at constant pressure	[J/(kgK)]
D	: moisture diffusion coefficient	[m ² /s]
h_D	: mass transfer coefficient	[m/s]
k	: permeability	[m ²]
k_r	: relative permeability	[-]
L	: latent heat	[J/kg]

\dot{m}	: mass flux	$[kg/(m^2s)]$
p	: pressure	[Pa]
q	: volumetric heat source	$[W/m^3]$
R	: gas constant	$[J/(kgK)]$
s	: saturation, moisture content	[-]
T	: temperature	$[^{\circ}C]$

Greek letters

ε	: porosity	[-]
λ	: thermal conductivity	$[W/(mK)]$
μ	: viscosity	[Pa s]
ρ	: density	$[kg/m^3]$
σ	: surface tension	[N/m]

Subscripts

g	: gas phase
ir	: irreducible water
l	: liquid phase
s	: saturation point

参考文献

- [1] Wan, C. Y. and Cheng, P., Multiphase Flow and Heat Transfer in Porous Media, Advances in Heat Transfer, Vol. 30, 93–196, Academic Press (1997).
- [2] Dhir, V. K., Boiling and Two-Phase Flow in Porous Media, Annual Review of Heat Transfer, Vol. 5, 303–350, CRC Press (1994).
- [3] Tsuruta, T. and Hayashi, T., Enhancement of Microwave Drying under Reduced Pressure Condition by Irradiation Control and External Air Supply, Transactions of JSME (in Japanese), Series B, Vol.72 No.723, 2761–2766 (2006).
- [4] Inamuro, T., Ogata, T., Tajima, S. and Konishi, N., A Lattice Boltzmann Method for Incompressible Two-phase Flow with Large Density Differences, Journal of Computational Physics, Vol. 198, 628–644 (2004).
- [5] Tomiyasu, J. and Inamuro, T., Numerical Simulations of Gas-Liquid Two-phase Flows in A Micro Porous Structure, The European Physical Journal Special Topics, Vol. 171, 123–127 (2009).
- [6] Inoue, G. Yoshimoto, T., Matsukuma, Y. and Minemoto, M., Development of Simulated Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cells and Evaluation of Its Structure, Journal of Power Sources, Vol. 175, 145–158 (2008).
- [7] Tanigawa, H., Miyazaki, Y. and Tsuruta, T., Effect of Gas Channel on Water Formation in Polymer Electrolyte Fuel Cell: 1st Report, Two-Dimensional Analyses with Lattice Gas Automaton Method, Transactions of JSME (in Japanese), Series B, Vol.75 No.759, 2280–2285 (2009).
- [8] Tanigawa, H., Miyazaki, Y. and Tsuruta, T., Effect of Gas Channel on Water Formation in Polymer Electrolyte Fuel Cell: 2nd Report, Experimental and Three-Dimensional Analyses with Lattice Gas Automaton Method, Transactions of JSME (in Japanese), Series B, Vol.75 No.759, 2286–2292 (2009).
- [9] Oohara, S. and Hayama, Y., Study on Paper Curl in the Fusing Process of Electrophotography, Transactions of JSME (in Japanese), Series C, Vol.78 No.790, 2218–2228 (2012).
- [10] Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, 196–200, Wiley International (1960).
- [11] Scheidegger, A. E., The Physics of Flow Through Porous Media, 3rd ed., 245–269, University of Toronto Press (1974).
- [12] Kawamura, H. and Hijikata, K., Simulation of Heat and Flow (in Japanese), 165–185, Maruzen (1995).
- [13] Tsuruta, T., Narazaki, K. and Masuoka, T., Transient Condensing Two-Phase Flow Through an Initially Subcooled Porous Medium, JSME International Journal, Series II, Vol. 31, No.1, 81–87 (1988).
- [14] Tsuruta, T. and Hayashi, T., Internal Resistance to Water Mobility in Seafood during Warm Air Drying and Microwave-Vacuum Drying, Drying Technology, Vol. 25, 1393–1399 (2007).
- [15] Kawano, K., Morimoto, T., Tanigawa, H. and Tsuruta, T., Study on Microwave Room-Temperature Drying, Proc. of the 46th National Heat Transfer Symposium of Japan (in Japanese), Vol.2+3, 729–730 (2009).
- [16] Ni, H., Datta, A. K. and Torrance, K. E., Moisture Transport in Intensive Microwave Heating of Biomaterials: A Multiphase Porous Media Model, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42, 1501–1512 (1999).
- [17] Hayashi, T., Tsuruta, T. and Tanigawa, H., Heat and Mass Transfer in Warm-Air Drying of Seafood, Transactions of JSME (in Japanese), Series B, Vol.72 No.715, P723–729, (2006)
- [18] Kawamizu, T., Kanako, T., Suzuki, S. and Tsuruta, T., Study on Condensation Heat Transfer Characteristics of Wet Paper in Steam Heating Process, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52, 805–813 (2009).
- [19] Tanigawa, H., Sashi, H., Kawasaki, A. and Tsuruta, T., Shrinkage Deformation of Food in Microwave Room-Temperature Drying Process, Proceedings of the 50th National Heat Transfer Symposium of Japan (in Japanese), Vol.2+3, 460–461 (2013).