

海産物の乾燥過程における内部輸送抵抗の評価*

(マイクロ波減圧乾燥と温風乾燥との比較)

林 伊久^{*1}, 鶴田隆治^{*2}

Evaluation of Internal Resistance of Sea Food in Drying Process (Comparison between Microwave-vacuum Drying and Warm-air Drying)

Tadahisa HAYASHI^{*3} and Takaharu TSURUTA

^{*3} Fukuoka Industrial Technology Center,
3-6-1 Norimatsu, Yahatanishi, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 807-0831 Japan

We present a novel microwave drying as an effective drying method for seafood. The drying time was successfully shortened compared with the warm-air drying and the drying at room-temperature results in good quality for dried seafood. In this study, we examined the internal resistance for water transport based on the porous media model. The permeability of scallop was estimated experimentally by measuring the perfusion rate of water injected from a syringe into the scallop. And we examined the morphological change of the muscular fiber-cell. It is found that the microwave-vacuum drying can prevent the surface shrinkage and the expansion of inner-cell due to the increase of osmotic pressure observed in the warm-air drying. The internal channel for the water transportation can be kept during the microwave-vacuum drying and this results in the high permeability at the wide range of moisture content. The porous media model agrees very well with both experiments of the microwave-vacuum drying and warm-air drying.

Key Words: Drying, Internal Resistance, Porous Media Model, Permeability

1. 緒 論

海産物等の乾燥は、設備の単純さや生産コストが安価などの理由で温風乾燥が主流となっている。しかし、未だに乾燥時間の短縮化、品質向上など技術課題が多い。業界では、品質を維持したまま短時間で乾燥できる新しい乾燥機を模索している。

そこで、著者らは温風乾燥の技術課題の原因を究明し^①、その結果をもとに技術課題を解決できる乾燥法として新方式の大気導入型マイクロ波減圧乾燥法の開発を行ってきた^②。要約すれば、外部加熱である温風乾燥では、ホタテ貝柱表面の過乾燥により表面近傍の筋繊維が収縮し、内部から表面へ水分が移動する流路を閉塞させる。また、ホタテ貝柱の表面へ移動できなくなった水分は、温度上昇に伴う浸透圧の増大により細胞内へ流入し、筋繊維を膨潤させる。これにより筋繊維相互間のすきまが閉塞されて、さらに水分の移動を阻害する。したがって、水分移動の障害となるこれら2つの内部輸送抵抗が、乾燥開始直後に増大することにより、物質輸送の急激な低下を引き起こし、恒率乾燥期がほとんど無く、減率乾燥期が早期に始まる。

これに対し、ホタテ貝柱の表面温度を 66kPa の蒸発

温度である約 38°Cの低温に保ちながら乾燥させるマイクロ波減圧乾燥では、恒率乾燥期間が増大するとともに内部の水分分布が均等に降下することを確認した。さらに、細胞組織の観察においても、表面近傍の筋繊維の収縮や内部の筋繊維の膨潤による水分流路の閉塞もなく、良質な乾燥状態となっていた。

以上のように、乾燥時間等の乾燥特性には内部構造と水分輸送とが密接に関連するため、その内部輸送抵抗を正確に把握しておくことが必要となる。

そこで本研究では、乾燥プロセスにおける筋繊維の膨潤あるいは収縮による流路の閉塞が内部輸送抵抗の重要な因子であると考え、その内部構造と水分輸送との関連性について検証することを目的とした。そのために内部輸送抵抗の評価をマイクロ波減圧乾燥と温風乾燥の実験結果に基づいて行った。具体的には、マイクロ波減圧乾燥と温風乾燥の各乾燥過程でのホタテ貝柱の透過率を、シリンダーからホタテ貝柱内部に注入した水の透過量の測定により実験的に求め、多孔質体の物質伝達モデルに基づいて内部輸送抵抗を定量的に評価した。また、内部輸送抵抗を考慮したマイクロ波減圧乾燥および温風乾燥のモデル解析を行い、評価した内部輸送抵抗の妥当性を検証した。なお、これまでの果実^③、野菜^④や布^⑤などの乾燥機構に関する研究では、乾燥過程における被乾燥物の含水率に対する熱物性の変化を実験的に求めることを

* 原稿受付 2005年12月20日。

^{*1} 正員、福岡工業技術センター(☎ 807-0831 北九州市八幡西区則松3-6-1)。

^{*2} 正員、九州工業大学工学部(☎ 804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

E-mail: thayashi@fitc.pref.fukuoka.jp

行っているが内部構造の変化との関連を定量的に評価した例はないようである。

おもな記号

A	: 面積 [m ²]
C	: 比熱 [J/kgK]
D	: 拡散係数 [m ² /s]
D_0	: ホタテ貝柱からの染色液流出部の直径 [m]
h	: ホタテ表面での熱伝達率 [W/m ² K]
h_D	: ホタテ表面での物質伝達率 [m/s]
k	: 透過率 [m ²]
K	: 総括物質伝達率 [m/s]
ℓ	: 温風乾燥矩形流路のぬれぶち長さ [m]
L_w	: 水の蒸発潜熱 [J/kg]
\dot{m}	: 物質伝達量 [kg/m ² s]
M	: 質量 [kg]
Nu	: ヌセルト数
P	: 大気圧 [Pa]
P_1	: 分圧 [Pa]
Pr	: プラントル数
Q_{in}	: ホタテ貝柱への入熱量 [W]
Re	: レイノズル数
R	: 物質輸送抵抗 [s/m]
Sc	: シュミット数
Sh	: シャーウッド数
T	: ホタテ貝柱温度 [K]
T_∞	: 雰囲気温度 [K]
u	: 流速 [m/s]
V	: 染色液流出量 [m ³]
ω_1	: 水分率
Δx	: ホタテ貝柱中央からの距離 [m]
δ_d	: ホタテ貝柱表面から乾燥界面までの距離 [m]
λ	: 熱伝導率 [W/m·k]
μ	: 動粘性係数 [Pa·s]
ρ	: 密度 [kg/m ³]

添字

a	: 空気
i	: 注射器の断面
l	: 染色液
m	: 重り
s	: ホタテ貝柱
sb	: ホタテ貝柱内部の乾燥界面
si	: ホタテ貝柱内部
ss	: ホタテ貝柱表面
su	: ホタテ貝柱の上下面
v	: 蒸気
w	: 水

w_s : 容器内の水の蒸発面

∞ : 遠方

2. 実験

2.1 ホタテ貝柱の透過率測定実験 ホタテ貝柱の表面層は、表皮と内皮およびこれらによって挟まれた筋肉層から構成されている。表皮は、4層程度であり内皮は2層程度である⁹⁾。これによりホタテ貝柱は、外部からの水の侵入を防いでいると考えられる。このため、従来の透水試験のように測定物外部から水を加圧注入して単位時間に流出する水分量を測定して透過率を得ることは難しい。そこで図1に示すように、ホタテ貝柱内部に注射器を用いて一定圧力で水を注入し、単位時間あたりに側面より流出する水量を測定することによって透過率を評価した。

具体的な方法は、次のとおりである。内径20mmで長さ120mmの注射器に、ホタテ貝柱内での水の流動状態が目視できるように染色液(3%メチレンブルー水溶液)を入れホタテ貝柱C面から中心に針を刺し、重り M_m を注射器上部に載せた一定圧力の状態でホタテ貝柱内部に染色液を注入する。染色液は、ホタテ貝柱内部を筋繊維方向に拡がり側面より流出する。染色液の流量 V は、90秒間の流出量から測定した。染色液がホタテ貝柱の表面から流出する際の流出径 D_0 は、流量 V を測定した後、ホタテ貝柱を筋繊維方向に切断して染色液で染まった流出径路から求めた。

ホタテ貝柱の透過率 k は、式(1)のダルシー則から求めた。

$$u_\ell = \frac{k}{\mu_w} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (1)$$

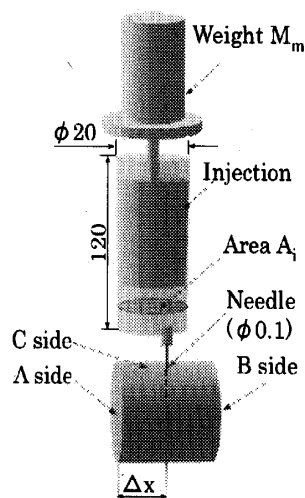


Fig.1 Experimental method

圧力差 ΔP は、ホタテ貝柱の内部圧力 P_{in} と外部圧力 P_{out} の差が、注射器の上部に載せた重りと釣り合うことから

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = \frac{M_m \cdot g}{A_i} \quad (2)$$

の関係にあり、これを用いると透過率は次式となる。

$$k = \mu_w \cdot u_l \cdot \frac{A_i}{M_m \cdot g} \cdot \Delta x \quad (3)$$

ここに、染色液のみかけの流速 u_l は、中心から A, B 両方向への流出を考慮して式(4)で与えられる。

$$u_l = \frac{\frac{V}{2}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_0^2} \quad (4)$$

透過率の測定は、マイクロ波減圧乾燥にてマイクロ波出力 100W、圧力 2700Pa、窒素導入量 2L/min の乾燥条件で、乾燥時間を 15 分、30 分、45 分、60 分、75 分、90 分、105 分、120 分とした 8 ケースについて行った。また、温風乾燥においても温風温度 40°C、温風流速 3.6m/s の乾燥条件で、乾燥時間を 15 分、30 分、45 分、60 分、90 分、210 分とした 7 ケースについて行った。測定は、ホタテ貝柱 3 個を使用して 1 個あたり 3 回行い、合計 9 回の測定を平均した。

3. 実験結果と考察

3.1 ホタテ貝柱の透過率 図 2 は、透過率測定後に筋繊維方向に切断した写真である。注入した染色液は、ホ

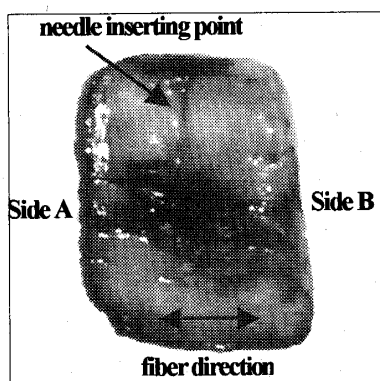


Fig. 2 Cross section along muscular fiber cells

タテ貝柱内の筋繊維方向に沿って左右両面(A, B 面)に移動していることが確認できる。したがってホタテ貝柱内の物質伝達は、筋繊維方向が支配的であると考えて良い。

図 3 は、測定した透過率を乾燥過程の含水率に対してプロットしたものである。マイクロ波減圧乾燥でのホタテ貝柱の透過率は、含水率約 13 以上において若干の減少はあるがほぼ一定で推移しており、その後急速に低下している。一方温風乾燥では、乾燥初期(含水率約 25)から透過率は急速に低下している。つまり、マイクロ波減圧乾燥と温風乾燥の透過率を比較すると、マイクロ波減圧乾燥の透過率が含水率の広い範囲で温風乾燥より高い値となっている。これは、温風乾燥が水分流路の構造を変形させてしまうのに対して、常温程度でのマイクロ波減圧乾燥は乾燥前の細胞組織の形態をそのまま維持できることを示している。そこで、この細胞組織の形態変化について、図 4 に示す細胞組織写真をもとに検討した。

温風乾燥では、外部加熱により表面近傍の細胞が収縮し、ホタテ貝柱内部の水分が表面へ移動する流路を閉塞させる。図 4a-1 と図 4b-1 から、乾燥前と乾燥開始 2 時間後(含水率約 2)の表面層における流路面積が、乾燥前では貝柱全体の 52%であったのに対して、2 時間後では 17%であった。ここで、流路面積は筋細胞間の結合組織部(白色部分)の面積が対応する⁹⁾。なお、ホタテ貝柱内部では、温度上昇にともなう浸透圧の増大によって、細胞が膨潤し、流路を閉塞させる⁹⁾。図 4a-2 と図 4b-2 から内部の流路面積を求めると、乾燥前は 56%であったのに対し、乾燥開始 2 時間後は 24%に減少していた。したがって、温風乾燥ではホタテ貝柱の表面近傍および内部の透過率が乾燥開始から急速に低下していることが確認できる。

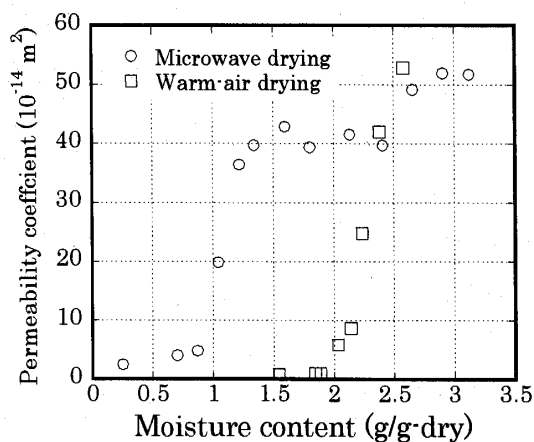


Fig. 3 Variations of permeability coefficient during drying process

マイクロ波減圧乾燥では、温風乾燥と同じ含水率(約 2)となる 50 分後においても、図 4c に示すように、表面層では約 56%、内部では約 45%の流路面積となっている。このことから、マイクロ波減圧乾燥では細胞組織の形態変形が生じず、水分が貝柱内部から表面へ移動する流路を閉塞させることなく、乾燥前の状態を保ち続けていると考えられる。ただし、ホタテ貝柱内部の細胞に関しては、温度上昇に伴う浸透圧の上昇により多少膨潤が生じて流路面積が 20%程度減少している。また、含水率が大きく低下した減率乾燥期間では、全体的な収縮による内部輸送抵抗の増加を考える必要がある。

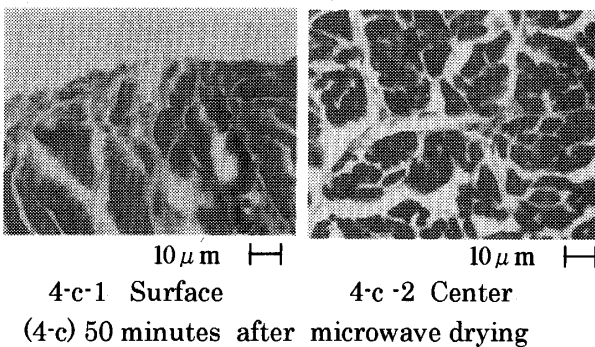
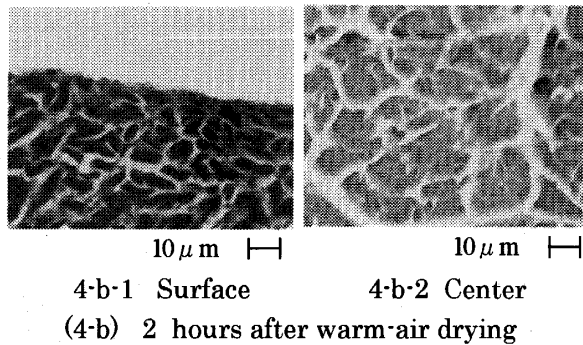
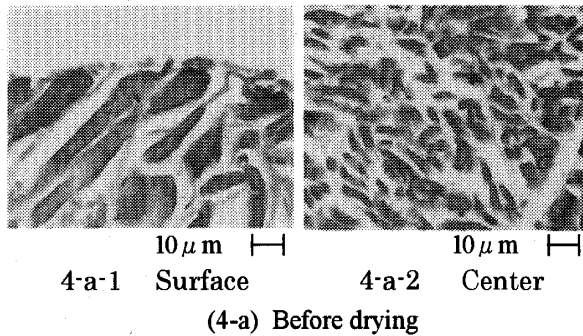


Fig.4 Microphotographs of scallop

3・2 物質輸送抵抗の評価 図 4 から分かるようにホタテ貝柱は筋繊維で構成されており、筋繊維相互は結合繊維である筋内膜で隔てられている。なお、筋繊維内外の物質移動抵抗は、筋繊維の膨潤あるいは収縮に伴う

流路の閉塞による内部輸送抵抗に対して非常に小さいため、内部輸送抵抗には考慮していない。ここではホタテ貝柱を多孔質体として取り扱い、図 5 のような多孔質体の乾燥機構に関する一次元モデルを考え、物質輸送抵抗を定量的に評価した。恒率乾燥期間においては表面には十分に水分があり、外部の気体側の物質輸送によって乾燥速度が決まる。減率乾燥期間に対しては内部に生ずる乾燥界面(表面からの距離 δ_d)で蒸発し、蒸気が流路を通って表面へ移動すると考える。この流路は、ホタテ貝柱については筋繊維間の空隙部が対応し、筋繊維と直交する貝柱表面での面積割合は、空隙率 ε の関数になると考えられる。その割合を $a(\varepsilon)$ と表すことにし、実際には、図 4 の貝柱表面近傍の細胞組織写真から求めた。

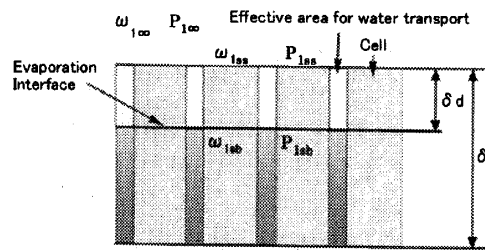


Fig.5 Porous media model on drying

ホタテ貝柱表面での物質移動量 \dot{m} は、貝柱表面においては次式となる。

$$\dot{m} = \frac{\rho_a \cdot (\omega_{1ss} - \omega_{1\infty})}{R_{ss}} \quad (5)$$

ここに ρ_a は空気の密度、 ω_{1ss} と $\omega_{1\infty}$ はそれぞれ表面と周囲の水分率であり R_{ss} はこの間の物質移動抵抗である。蒸気の移動についてダルシー則を用いると式(6)となる。

$$\dot{m} = \rho_v u_v = \rho_v \frac{k}{\mu_v} \frac{(P_{1sb} - P_{1ss})}{\delta_d} \quad (6)$$

乾燥界面は、蒸発とともに進行するため、

$$\frac{d\delta_d}{dt} = \frac{\dot{m}}{\rho_w \cdot a(\varepsilon)} \quad (7)$$

の関係にある。

水蒸気と空気を理想気体と考え、両者の分子量の比を近似的に 1 とみなせば、ホタテ貝柱の乾燥界面での水分率 ω_{1sb} 、ホタテ貝柱表面での水分率 ω_{1ss} と遠方の水分率 $\omega_{1\infty}$ は、以下のように分圧で表される。

$$\omega_{1sb} = \frac{P_{1sb}}{P}, \quad \omega_{1ss} = \frac{P_{1ss}}{P}, \quad \omega_{1\infty} = \frac{P_{1\infty}}{P} \quad (8)$$

なお分子量の比を1に近似することにより、水分率には約30%の差が生じる。物質伝達量 \dot{m} は、次式となる。

$$\dot{m} = \frac{\rho_a}{R_{ss} + R_{si}} \left(\frac{P_{1sb}}{P} - \frac{P_{1\infty}}{P} \right) \quad (9)$$

すなわち、表面での物質輸送抵抗 R_{ss} に内部抵抗 R_{si}

$$R_{si} = \frac{\rho_a \cdot \mu_v \cdot \delta_d}{\rho_v \cdot k \cdot P} \quad (10)$$

が加わり、内部の乾燥の進行とともに蒸発速度は減少していく。以下、二つの抵抗を総括した物質伝達率を次のように表記し、温風乾燥とマイクロ波減圧乾燥についてその中身を評価していく。

$$\dot{m} = K \cdot \rho_a \cdot (\omega_{1sb} - \omega_{1\infty}) \quad (11)$$

$$\frac{1}{K} = R_{ss} + R_{si} \quad (12)$$

温風乾燥

$$\text{恒率乾燥期間 } R_{ss} = \frac{1}{h_D}, \quad R_{si} = 0 \quad (13)$$

$$\text{減率乾燥期間 } R_{ss} = \frac{1}{h_D \cdot a(\varepsilon)}, \quad R_{si} = \frac{\rho_a \cdot \mu_v \cdot \delta_d}{\rho_v \cdot k \cdot P} \quad (14)$$

【マイクロ波減率乾燥期】

$$\text{恒率乾燥期間 } R_{ss} = \frac{1}{K_0}, \quad R_{si} = 0 \quad (15)$$

$$\text{減率乾燥期間 } R_{ss} = \frac{1}{K_0 \cdot a(\varepsilon)}, \quad R_{si} = \frac{\rho_a \cdot \mu_v \cdot \delta_d}{\rho_v \cdot k \cdot P} \quad (16)$$

ここで、温風乾燥の物質伝達率 h_D については、スポンジ状の円筒形多孔質樹脂で蒸発実験を行い、熱・物質伝達のアナロジーから得た以下の実験式⁽¹⁾で与えられる。

$$Nu = \frac{h\ell}{\lambda_a} = 0.1552 Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad (17)$$

$$Sh = \frac{h_D \ell}{D} = 0.1552 Re^{0.8} Sc^{0.5} \quad (18)$$

また、マイクロ波減圧乾燥の K_0 については、容器(直径140mm, 高さ100mm)内の水 M_w (200g)にマイクロ波100Wを連続照射する蒸発実験を行って評価した。

図6は、蒸発実験での水の質量と水温の時間変化である。 K_0 は、この蒸発速度から表面での物質伝達に関する式(19)より算出した。また、蒸発速度が一定であるとともに水温も2700Paの蒸発温度約23°Cで一定であるため、マイクロ波による水への入熱量がすべて蒸発潜熱に供給されていると考えられる。したがって、単位質量の水に吸収されるマイクロ波のエネルギー q_{M-in} は、式(20)によって求めることができる。

$$K_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot (\omega_{1ws} - \omega_{1\infty})} \quad (19)$$

$$q_{M-in} = \frac{\dot{m} \cdot L_w \cdot A_{ws}}{M_w} \quad (20)$$

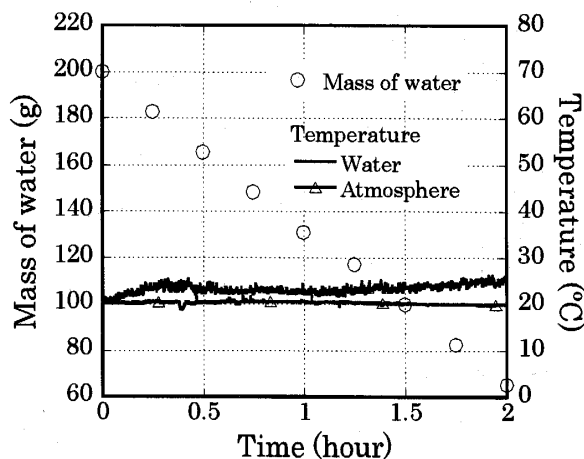


Fig.6 Time transients of temperature and mass of water under 100W irradiation at 2700Pa

図7は、マイクロ波減圧乾燥および温風乾燥における内部の物質輸送抵抗 R_{si} である。温風乾燥では、乾燥直後からホタテ貝柱表面の細胞変質および浸透圧の上昇に伴う細胞の膨潤による水分流路の閉塞が生じ、図3に示した透過率が急速に減少するため、内部輸送抵抗 R_{si} が急速に増加する。これに対してマイクロ波減圧乾燥では、図3の透過率は乾燥開始から含水率約1.3までは多少変化しているが平均的にはほぼ一定であり、ホタテ貝柱表面および内部の細胞組織の形態もあまり変化しないため、含水率約1.3までの内部輸送抵抗 R_{si} は無視できるほど小さい。しかし、含水率約1.3以下ではホタテ貝柱全体

が収縮することにより、内部の水分流路が閉塞されて内部輸送抵抗 R_{si} は増加する。

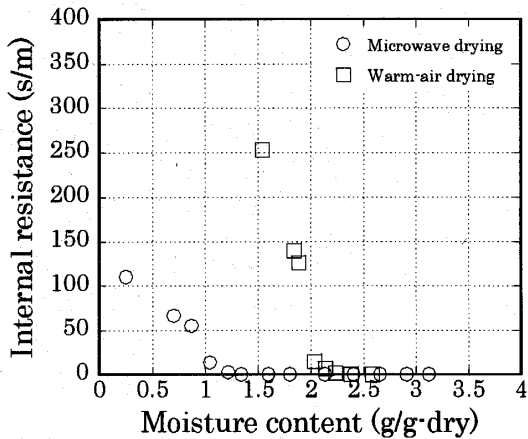


Fig.7 Internal transport resistance as a function of moisture content

3・3 乾燥特性の近似解析による検証 ホタテ貝柱のマイクロ波減圧乾燥および温風乾燥における内部輸送抵抗の評価の妥当性について、図5に示している多孔質体モデルをもとに検討した。その熱・物質伝達モデルは、集中定数系としての取り扱いを仮定すれば、次式のように表すことができる。

$$\frac{d[M_s C_s T]}{dt} = Q_{in} - \dot{m} \cdot L_w \cdot A_{su} \quad (21)$$

$$\frac{dM_s}{dt} = -\dot{m} \cdot A_{su} = K \cdot \rho_a \cdot (\omega_{1sb} - \omega_{1\infty}) \cdot A_{su} \quad (22)$$

ここにホタテ貝柱への入熱量 Q_{in} は、マイクロ波減圧乾燥では初期水分量をもとに式(20)で評価し、温風乾燥では熱伝達による入熱量 $h \cdot (T_{\infty} - T) \cdot A_{ss}$ となる。ただし、温風乾燥における伝熱面積 A_{ss} はホタテ貝柱の全表面積となる。マイクロ波減圧乾燥では、ホタテ貝柱外部からの熱伝達は無視し、ホタテ貝柱の入熱はマイクロ波の照射エネルギーのみとした。

総括物質伝達率 K には、温風乾燥およびマイクロ波減圧乾燥の恒率乾燥期と減率乾燥期に対応した物質輸送抵抗である式(13)から式(16)を適用した。また、ホタテ貝柱の蒸発面は、図2の筋繊維方向ホタテ貝柱の断面で確認したように、ホタテ貝柱内部の水分が筋繊維方向に移動するため、ホタテ貝柱上下面 A_{su} のみとした。

マイクロ波減圧乾燥および温風乾燥に対する近似解析と実験とを比較した結果を図8、図9と図10に示す。

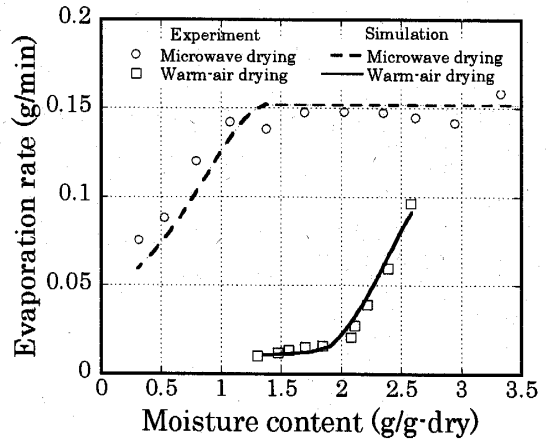


Fig.8 Drying characteristic curves

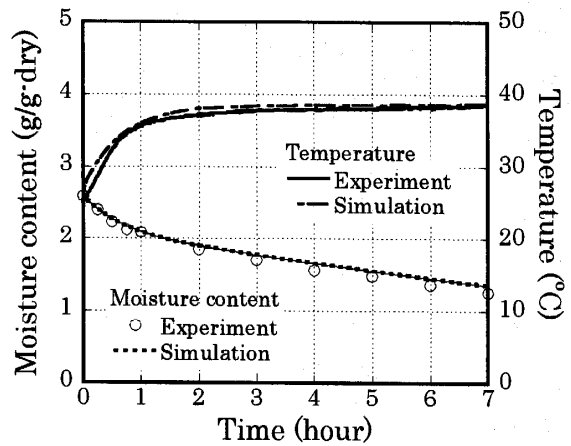


Fig.9 Time transients of moisture content and temperature in warm-air drying

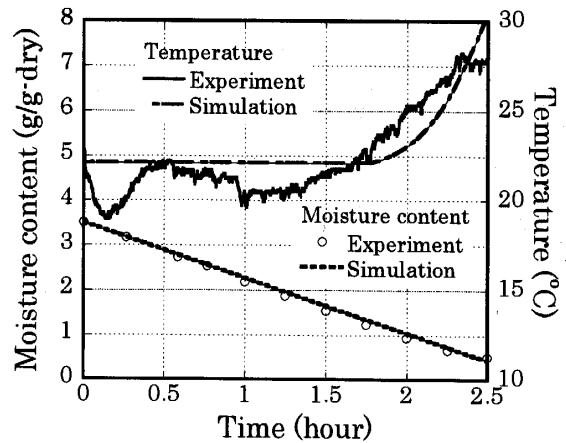


Fig.10 Time transients of moisture content and temperature in microwave drying

図8は、乾燥特性曲線であり、含水率に対する蒸発速度を比較している。図9と図10は、それぞれ温風乾燥とマイクロ波減圧乾燥に対する含水率と表面温度の過渡変化である。図8の乾燥特性曲線より、温風乾燥においてはほとんど恒率乾燥期間は見られず、当初より減率乾燥

期間となり、その傾向を実測した透過率を用いた近似解析によって良く再現されていることがわかる。また、マイクロ波減圧乾燥においても近似解析と実験値とは良く一致しており、恒率乾燥期間がかなり拡大しており、温風乾燥と比較してかなりの高速乾燥となることがうかがえる。実際、図9と図10の過渡変化を見れば、温風乾燥では直ちに温度が上昇しており、含水率の減少も遅いものになっているのに対し、マイクロ波減圧乾燥では2時間程度まで温度はほぼ一定に保たれており、含水率の低下も直線的である。また、これらの温度と含水率の時間変化を近似解析は非常に良く表現しており、実測した透過率を用いた多孔質体モデルによる内部輸送抵抗の評価と近似解析が有効であることがわかる。

最後にマイクロ波減圧乾燥は常温乾燥を実現できるため、被乾燥物の変質・変形がもたらす内部抵抗の増加が抑制され、入熱量のほぼ全てを蒸発潜熱とすることができ、恒率乾燥期が増大するという特長を有していると言える。これが、マイクロ波減圧乾燥が乾燥時間を極端に短くする要因である。

4. 結論

本研究により以下の知見が得られた。

- (1) ホタテ貝柱の内部輸送抵抗は、多孔質体モデルをもとに実験的に求めたホタテ貝柱の透過率により定量的に評価することができる。
- (2) 内部輸送抵抗は、透過率の減少、すなわち被乾燥体内の水分流路の閉塞により増加する。温風乾燥では、乾燥早期から減率乾燥期が始まり、透過率が低下することにより内部輸送抵抗が急増する。この内部輸送抵抗が物質輸送に対して支配的になり、蒸発速度がさらに低下する。
- (3) マイクロ波減圧乾燥は、細胞組織の形態変形が生じず、内部から表面へ移動する水分流路を閉塞させる

ことなく乾燥前の状態を保ち続けるため、透過率の低下を抑えることができる。これにより、内部輸送抵抗を抑制することができるとともに、マイクロ波による入熱量がすべて蒸発潜熱となり、常に高い蒸発速度を維持することができる。海産物に対して高効率な乾燥法であると考えられる。

文献

- (1) Hayashi, T. and et al., Heat and Mass Transfer in Warm-air Drying of Seafood, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 72-715, B(2006), pp.723-729
- (2) Tsuruta, T. and Hayashi, T., Enhancement of Microwave Drying Under Reduced Pressure Condition by Irradiation Control and External Air Supply, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, (No.05-1115)
- (3) A.G. Ghiaus et al., Mathematical Modeling of the Convective Drying of Fruits and Vegetables, Journal of Food Science, Volume 62, No.6 (1997), pp.1154-1157
- (4) Goncalo, L. and Alberto, M. Sereno., Physical and Transport Properties of Peas During Warm Air Drying, Journal of Food Engineering, Vol.21, No.3 (1994), pp.355-363
- (5) Nakajima, T. et al, Drying Processes of Fabrics, the Society of Fiber Science and Technology, Japan, Vol.37, No.9 (1981), pp.41-47
- (6) Suyama, M. and Konos, S., Marine Food Science (in Japan), Koseisha Koseikaku, (1999), pp.8
- (7) JSME Data Book : Heat Transfer 4th Edition, The Japan Society of Mechanical Engineers, (1986), pp.114-115