

海産物の温風乾燥における熱・物質伝達*

林 伊久*¹, 鶴田隆治*², 谷川洋文*²

Heat and Mass Transfer in Warm-air Drying of Seafood

Tadahisa HAYASHI*³, Takaharu TSURUTA and Hirofumi TANIGAWA*³ Fukuoka Industrial Technology Center,
3-6-1 Norimatsu, Yahatanishi-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 807-0831 Japan

The purpose of this study is to develop effective drying method for seafood. We conducted the warm-air drying experiments using the scallop and investigated the heat and mass transfer mechanism. We have observed morphological changes of muscular fibers of scallop during the drying process. It is found that the surface shrinks due to the rapid drying which results in an additional resistance for water transport and reduces the evaporation rate. This decrease of evaporation rate raises the scallop temperature and increase the water content inside the muscular cell due to osmotic pressure change. This is an additional resistance for mass transfer. A heat and mass transfer model is made by considering these two resistances and we have good agreement with the experiments.

Key Words: Drying, Heat and Mass Transfer, Forced Convection, Seafood, Scallop

1. 結 論

現在, ホタテ貝柱や海苔等の海産物の乾燥方式としては, 主に温風乾燥が用いられている。バッチ式が多く, 一度に 100~300kg を乾燥させるが, 乾燥物の品質改善などのために温風温度を 40~60°C程度に抑えて運転されており, 乾燥時間もかなり長い上に, 変色や割れなどによる歩留まりが悪いなど, 未だに多くの技術課題を抱えている。また, 現状の温風乾燥機的设计では, 海産物内部の乾燥機構を十分に考慮しているとは言えず, 入熱の約 50%以上が排出される場合もある。従って, エネルギー効率の面からも温風乾燥の技術課題を改善する必要がある。乾燥プロセスにおいて重要となるのは, いわゆる減率乾燥期間であり, その乾燥特性は乾燥物の内部特性によって著しく変化するため, 個々の内的性質を調べておく必要がある^①。これまでの魚肉の乾燥速度^②や乾燥法^③に関する研究では, 温風乾燥においてはその初期に表面皮膜が形成されて水分の移動抵抗になることが示されているが, 減率乾燥期間における内部移動抵抗の特性とその機構については明確

になっているとは言い難く, 海産物における乾燥機構を生体組織の熱・物質伝達として把握する必要があると考える。そこで本研究では, 温風乾燥時の海産物の熱・物質伝達を調べることにより, その乾燥機構を明らかにし, 乾燥速度やエネルギー効率の低下等の原因を究明することを目的とした。具体的には, 海産物としてホタテ貝柱を使用した温風乾燥実験^{④⑤}を行い, 乾燥特性を把握するとともに各乾燥過程におけるホタテ貝柱内部の含水率分布測定および細胞組織の観察を行って実験的にその温風乾燥機構を調べた。また, 実験で得られたデータをもとに近似的解析を行い, 温風乾燥機構を検証した。

おもな記号

- A : ホタテ貝柱表面積 [m²]
 C_{sc} : ホタテ貝柱の比熱 [J/kg K]
 D : 拡散係数 [m²/s]
 D_s : 乾燥物の直径 [m]
 d_e : 矩形経路断面の代表長さ [m]
 H : 乾燥物の高さ [m]
 h : 熱伝達率 [W/m² K]
 h_D : ホタテ表面での物質伝達率 [m/s]
 K_m : 物質伝達率 [m/s]
 L : 矩形流路のぬれぶち長さ [m]

* 原稿受付 2005年5月6日。

^① 正員, 福岡県工業技術センター(☎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

- L_w : 水の蒸発潜熱 [J/kg]
 M : ほたて貝柱 1 個の平均質量 [kg]
 \dot{m} : 物質伝達量 [kg/m²s]
 Nu : ヌセルト数
 Pr : プラントル数
 Re : レイノズル数
 R_{ms} : ホタテ貝柱内部の物質移動抵抗 [s/m]
 R_{mc} : 貝柱内部の収縮付加物質移動抵抗 [s/m]
 S : 矩形流路の断面積 [m²]
 Sc : シュミット数
 Sh : シャーウッド数
 T : ホタテ貝柱表面温度 [K]
 T_∞ : 温風温度 [K]
 u_m : 矩形流路内での平均速度 [m/s]
 $W_{1\omega}$: ホタテ貝柱表面での水分質量分率
 $W_{1\infty}$: 温風の水分質量分率
 μ : 空気の動粘性係数 [Pa·s]
 ρ : 空気の密度 [kg/m³]
 ω : ホタテ貝柱の含水率

2 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置は、図 1 に示すように温風発生機、整流器と乾燥室の 3 つの装置で構成されている。温風は、温風発生器で乾燥室入口の温風温度と流速を一定に制御し、整流器により整流されて乾燥室に流入する。乾燥室は、幅 350mm、高さ 300mm、長さ 800mm のダクト状の透明な容器であり、中央部に棚を 3 段設けている。棚 1 段あたりの流路形状は、図 1 に示すように幅 350mm、高さ 75mm、長さ 800mm の矩形流路となる。また、棚には 4×4 のメッシュ状の網を使用した。被乾燥物は、棚 1 段あたりに 9 行×21 列の千鳥配置とした。このとき、被乾燥物相互の間隔は 76mm となる。なお、入口より約 650mm の 16 列までは、ホタテ貝柱を模擬した円筒形樹脂(平均径: 20mm、平均高さ: 20mm)を配置し、後方の 17 列目以降にホタテ貝柱 9 個(平均径 36.12mm、平均高さ 18.5mm、平均質量: 23.78g)を円筒形樹脂とともに配置した。ホタテ貝柱をすべて配置したとしても、16 列までのホタテ貝柱の蒸発量が、温風に含まれる水蒸気の約 3% 以下であるため、17 列以降のホタテ貝柱の熱・物質伝達への影響がほとんどない。また本実験では、長期保存が可能な冷凍されたホタテ貝柱を解冻して使用したが、冷凍されたホタテ貝柱が生のホタテ貝柱と比べて乾燥特性及び細胞組織とも変化のないことを確認している。

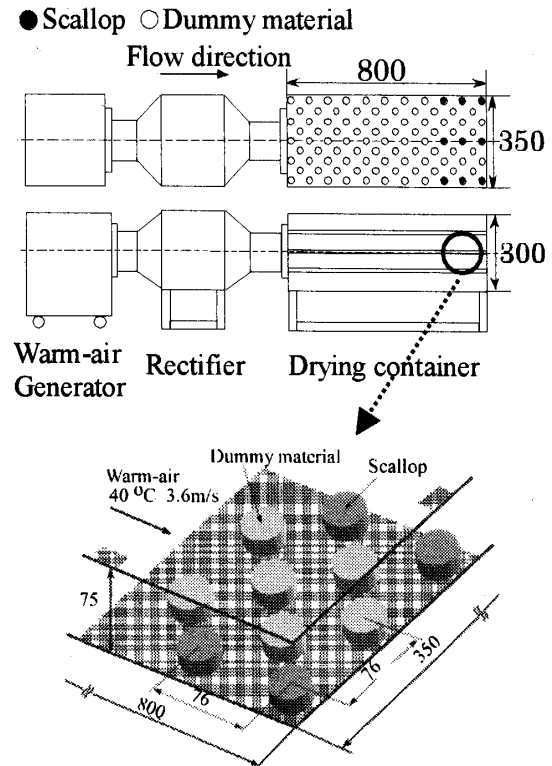


Fig.1 Experimental apparatus

2.2 実験方法 温風乾燥実験は、温風温度を 40°C、相対湿度を 30%、流速を 3.3m/s に固定して行った。測定するホタテ貝柱は、棚 1 段当たり 9 個であり、棚 3 段で合計 27 個である。実験では、乾燥開始から 1 時間おきにホタテ貝柱 27 個の平均含水率と平均蒸発速度を測定した。含水率は、常圧加熱乾燥法を用いて測定した。乾燥前のホタテ貝柱の重量を M_a とし、乾燥温度 80°C、乾燥時間 24 時間で完全乾燥を行った後のホタテ貝柱の質量を M_b とした場合、含水率 ω は、式(1)のように求められる。

$$\omega = \frac{M_a - M_b}{M_b} \quad (1)$$

ホタテ貝柱の温度は、表面と中心温度を測定した。温度測定には、棚 2 段目の 5 行 17 列目のホタテ貝柱を用いた。さらに温風乾燥過程における内部の水分移動を調べるためにホタテ貝柱の含水率分布と断面の組織観察を行った。含水率分布は、図 2 に示すようにホタテ貝柱の中央部を縦方向に 2mm 角として 10 等分し、各試料の含水率を測定した。その測定は、温風乾燥試験と同様に常圧加熱乾燥法を用いた。含水率分布測定は 6 回行い、その平均値を 1 試料の含水率とした。また、乾燥時間は、乾燥前、乾燥開始 2 時間後、

4 時間後, 8 時間後の 4 ケースとした. ホタテ貝柱の組織観察は, 乾燥前と乾燥開始 2 時間後のホタテ貝柱について行い, 表面近傍と内部組織の乾燥による形態変化を観察した.

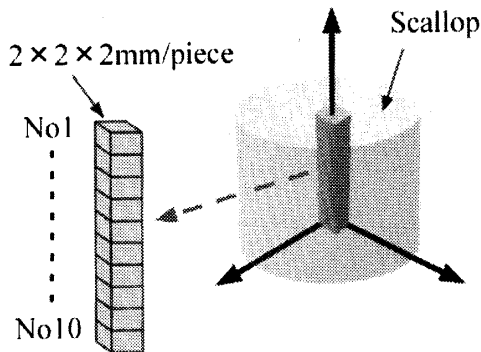


Fig.2 Measuring points of moisture content

2・3 熱伝達と物質伝達の測定 ホタテ貝柱表面での熱伝達率は, 物質伝達とのアナロジーを利用して模擬物質からの水の蒸発量より求めた. すなわち, 孔径が 0.3mm と大きく内部抵抗の無視できる, 水を含んだスポンジ状の多孔質樹脂を用いて測定した.

スポンジ状の多孔質樹脂は, (径 20mm 高さ 20mm), (径 20mm 高さ 10mm) と (径 30mm 高さ 20mm) の合計 3 種類を使用し, ホタテ貝柱の温風乾燥実験と同様に物質伝達率が列位置に依存しないように $\phi 17$ 列目から円筒形樹脂の間に 9 個配置した. 実験では, 温風温度を 40°C に固定し, 流速を 2m/s, 2.4m/s, 2.9m/s, 3.4m/s, 4.2m/s, 5m/s, 5.6m/s の計 7 段階に変化させて, 10 分おきにスポンジ状の多孔質樹脂の質量を測定し, 単位面積および単位時間あたりの蒸発量を測定した. 蒸発量は, 9 個の平均値とした.

表面の物質伝達率は, 測定した平均蒸発量から求めた. また, 熱伝達率は物質伝達のアナロジーの関係から求めている. なお, レイノズル数は, 矩形流路内の流れとして次式により算出した.

$$Re = \frac{\rho u_m d_e}{\mu} \quad (2)$$

$$d_e = \frac{4S}{L} \quad (3)$$

3. 実験結果と考察

3・1 温風乾燥機構 図 3 にホタテ貝柱の含水率と表面温度および中心温度の過渡変化を示す. 図 3 からホタテ貝柱の表面及び中心温度が, 全乾燥過程においてほぼ等しく, ホタテ貝柱内部の熱抵抗が無視できるほど小さいことが確認できる. また, 乾燥開始直

後から貝柱の温度が温風温度付近まで上昇していることから, 予熱期間および恒率乾燥期間がかなり短く, 早期に減率乾燥期間が始まっていると考えられる. さらに図 4 に示す乾燥特性曲線から, ホタテ貝柱の減率乾燥期間では, 含水率が約 2 (乾燥開始後約 90 分) を境に, 減率乾燥第 1 段と減率乾燥第 2 段とに分かれる特徴を持つようである. この減率乾燥第 1 段と減率乾燥第 2 段とを比較すると, 減率第 2 段では蒸発速度が最大で約 80% 低下している. この蒸発速度が急激に低下する要因について, ホタテ貝柱内の含水率分布とホタテ貝柱の細胞組織写真を用いて検討を行った.

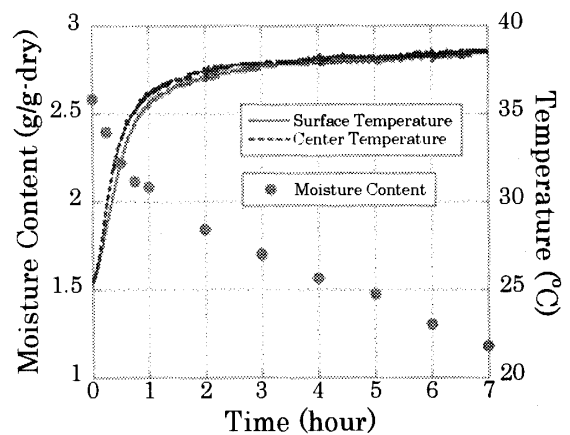


Fig.3 Transients of moisture content and temperatures

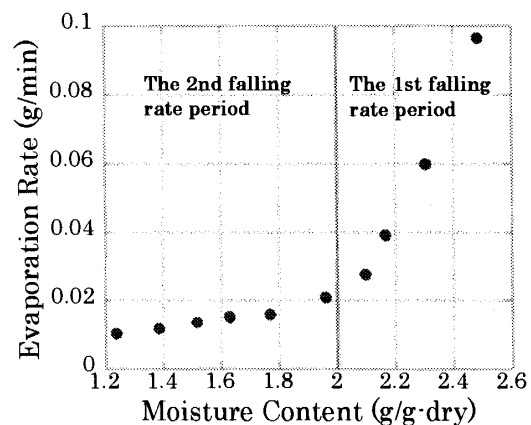


Fig.4 Drying characteristic curve

図 5 は, ホタテ貝柱の中央部分の含水率分布である. 横軸は, 縦方向位置を示す番号で, 1 と 10 が貝柱の上下の表面である. 乾燥開始から 2 時間後に貝柱の温度上昇に伴って表面近傍の含水率が急激に低下する反面, 内部の含水率が初期含水率よりも多くなっている. ことがわかる. この現象は, 図 7 に示す断面写真から 2 つのことに起因していることがわかる. その 1 つは,

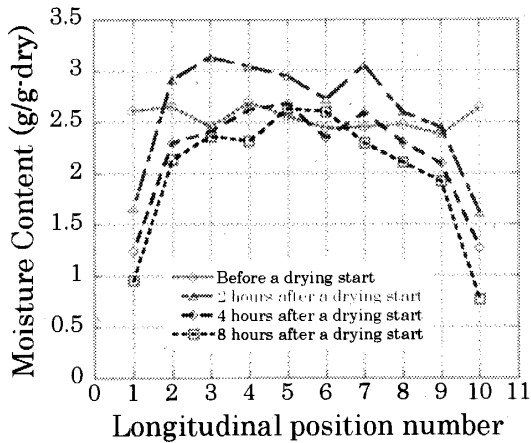


Fig. 5 Distribution of moisture content inside a scallop (Vertical profile)

ホタテ貝柱近傍に生じる組織変性である。図6からもわかるように、表面からの乾燥によって表面被膜のような組織変性が生じ、この皮膜が蒸発乾燥を抑制する作用を持つものと考えられる。この表面部分の顕微鏡写真を示したものが図7である。ホタテ貝柱は筋繊維で構成され、筋繊維相互は結合組織である筋内膜で隔てられている⁷⁾。図7の着色部分は筋繊維を示し、白色部分は水分が移動する筋繊維相互間の流路を示している。水分は、筋繊維と筋繊維相互間の流路内に存在し、乾燥時に流路を通して内部から表面へ移動すると考えられる。ここで、乾燥前(図7-a-1)と乾燥2時間後(図7-a-2)とを比較すれば、ホタテ貝柱の筋繊維が乾燥によって収縮しているとともに、かなり密集し、水分が移動する流路の径が収縮していることがわかる。その結果、外表面への水分移動が抑制され、蒸発速度が低下しているものと思われる。もう1点は、ホタテ貝柱内部から表面に移動できない水分が、温度上昇による細胞内外の浸透圧の上昇⁸⁾によって筋繊維内に流入していることである。図7-b、図7-cに示したホタテ貝柱中央部の縦・横断面の筋繊維の形状変化から、明らかに細胞内に流入していることが確認される。細胞の膨潤は、水分が表面に移動するホタテ貝柱内部の経路の径を収縮させる。これが乾燥速度を低下させるもう1つの要因である。なお、図7-a、図7-bからホタテ貝柱の表面近傍および内部の平均流路径を測定した。表面近傍の流路径は、平均約4.9 μm から平均約1.7 μm まで収縮している。ホタテ貝柱内部の流路径は、平均約6.3 μm から平均約2.5 μm まで収縮している。

3・2 熱伝達率と物質伝達率の測定 図8は、温風温度40 $^{\circ}\text{C}$ 、温風速度3.4m/sでのスポンジ状の多孔質樹脂9個(径20mm高さ20mm)の含水率の時間変化

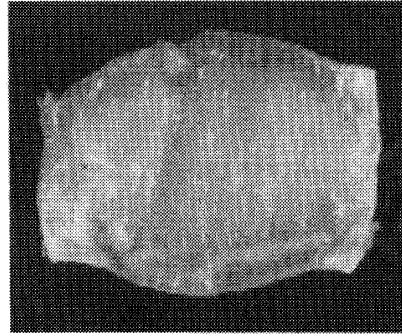


Fig. 6 Longitudinal cross section of the scallop

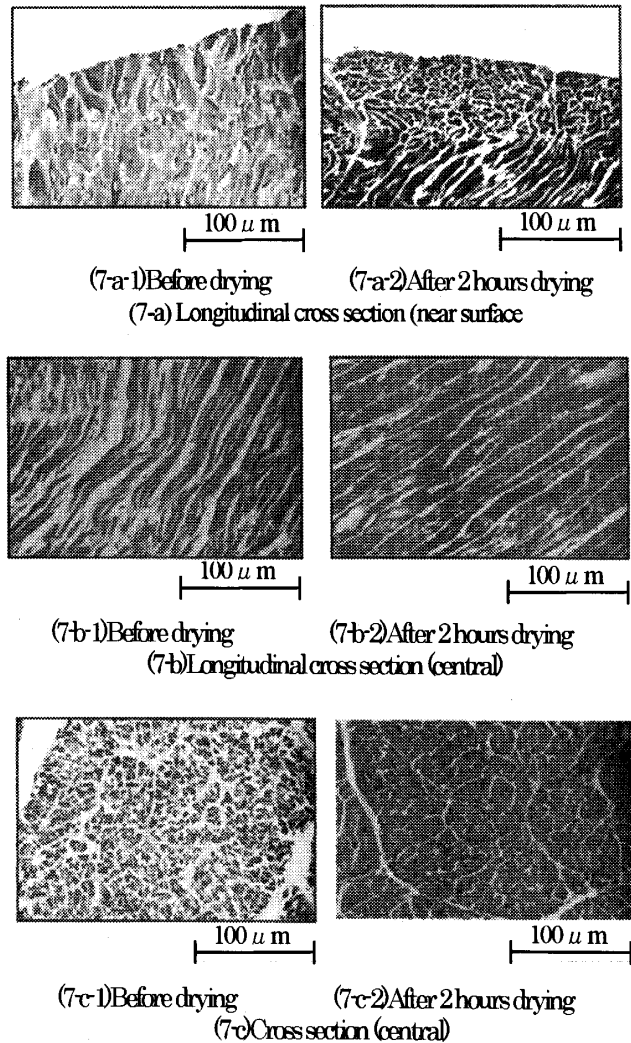


Fig. 7 Microphotographs of scallop ($\times 400$)

である。図8に示すように乾燥全域がほぼ恒率乾燥期であり、多孔質樹脂の内部抵抗を無視できることが確認できる。図9は、スポンジ状の多孔質樹脂を用いた熱伝達の測定結果である。実線は、矩形流路内乱流熱伝達に対するDalle Donneの式⁹⁾を示す。Dalle Donneの式は、図1に示すようなダクト内に対して被乾燥物等

の突起物がない場合の熱伝達の整理式である。この式を用いれば、熱伝達率および物質伝達率は次式で与えられる。

$$Nu = 0.019 Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad (4)$$

$$Sh = 0.019 Re^{0.8} Sc^{0.5} \quad (5)$$

図1のように多孔質樹脂を千鳥配置した場合の熱伝達は、多孔質樹脂がダクト底面の突起群となり温風の流れを乱し、熱伝達を促進する。図9に熱伝達に及ぼす多孔質樹脂の径と高さの比の影響を示すが、径と高さの比が大きい場合に熱伝達率が大きくなっていることがわかる。そこで、多孔質樹脂の径と高さの比 $\frac{H}{D_s}$ と $\frac{Nu}{0.019 Re^{0.8} Pr^{0.5}}$ の関係を調べた。その結果を図10に示す。図10について最小二乗法で近似し、

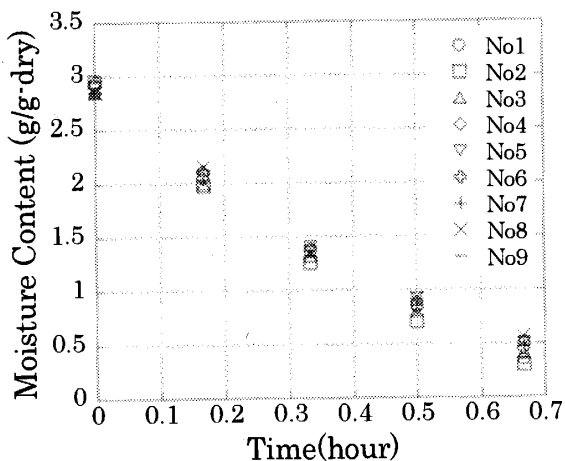


Fig.8 Transient of moisture content of nine porous materials

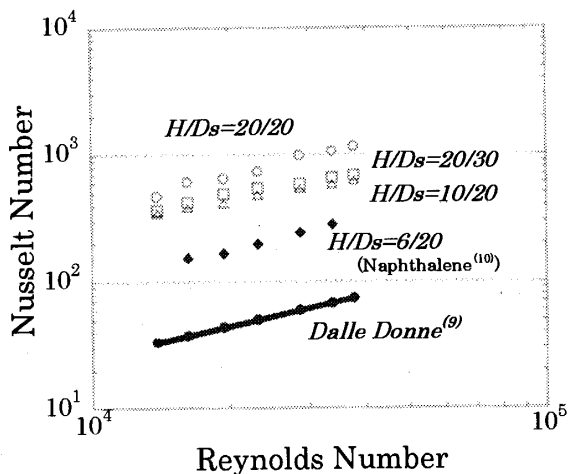


Fig.9 Heat transfer coefficient

$\frac{Nu}{0.019 Re^{0.8} Pr^{0.5}}$ を f とおけば式(6)のように表すことができる。

$$f = 1 + 14 \times \frac{H}{D_s} \quad (6)$$

したがって、矩形経路底部に円筒多孔質樹脂を千鳥配置した場合の熱伝達と物質伝達は、式(6)の f を使って式(7)(8)のように表すことができる。

$$Nu = 0.019 f Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad (7)$$

$$Sh = 0.019 f Re^{0.8} Sc^{0.5} \quad (8)$$

なお、図9と図10には、西川ら⁽¹⁰⁾が図1に示す実験装置を使用して径20mm、高さ6mmのナフタリンを用いて行った昇華実験の結果も含めて比較している。式(6)からナフタリンの径と高さ比 $H/D_s = 0.3$ を用いて f を予測すれば5.2の値を与えるのに対し、昇華実験による Re 数と Nu 数との関係式(7)から f を求めると3.5という値となり、おおよそ近い値になっている。

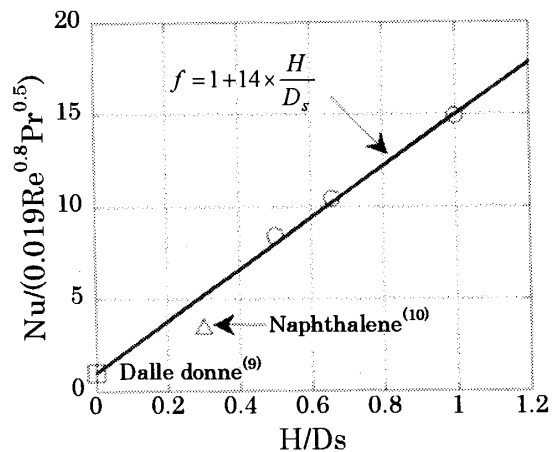


Fig.10 Correlation between $\frac{Nu}{0.019 Re^{0.8} Pr^{0.5}}$ and $\frac{H}{D_s}$

3・3 乾燥機構の検討

スポンジ状の円筒形多孔質樹脂での蒸発実験により求めた気流側の熱伝達率と物質伝達率を適用し、簡単なモデル解析によりホタテ貝柱の乾燥機構を検討する。その熱・物質伝達モデルは、集中定数系として取り扱いを仮定すれば、次式に表すことができる。

$$\frac{d[MC_{sc}T]}{dt} = [h(T_{\infty} - T) - mL_w]A \quad (9)$$

$$\frac{dM}{dt} = -mA = h_D \rho (W_{1\omega} - W_{1\infty})A \quad (10)$$

なお、ホタテ貝柱表面積 A は、4 時間の温風乾燥で乾燥前に比べて 4%程度減少するが、微小の変化であるため乾燥前の表面積を適用している。熱伝達率 h とホタテ貝柱表面の気流側の物質伝達率 h_D は、式(7)(8)から求まる。ここで、ホタテ貝柱の平均径 36.12mm、平均高さ 18.5mm から径と高さの比は 0.512 となり、式(6)から f は 8.16 となる。したがって気流側の熱・物質伝達率は、それぞれ次式で与えられる。

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = 0.1552 Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad (11)$$

$$Sh = \frac{h_D L}{D} = 0.1552 Re^{0.8} Sc^{0.5} \quad (12)$$

ただし、物質伝達においてはホタテ貝柱内の内部抵抗を考慮しなければ減率乾燥期間を取り扱うことができない。そこで、乾燥前のホタテ貝柱内部に存在する 5~6 μm 程度の微小な水分流路に関する物質移動抵抗 R_{ms} と、表面層の乾燥とともに生じる表面層の変質、および細胞内への水の浸透による水分経路の収縮に対する物質移動抵抗 R_{mc} の二つを導入する。つまり、減率乾燥第 1 段(乾燥開始約 90 分まで)においては、ホタテ貝柱内部の微小な水分流路の影響を考慮して、

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{h_D} + R_{ms} \quad (13)$$

によってあらわされる通過率 K_m を式(10)の物質伝達率 h_D に代えて適用し、減率乾燥第 2 段からは、新たに表面皮膜の影響と温度上昇による浸透圧効果を加味して、次式を適用した。

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{h_D} + R_{ms} + R_{mc} \quad (14)$$

すなわち含水率 2(乾燥開始 90 分)までは、式(13)を適用し、含水率 2 に達すると減率乾燥第 2 段になったと判断して式(14)を適用した。図 11 は、両内部抵抗の値を $R_{ms} = 68(\text{s/m})$ および $R_{mc} = 20(\text{s/m})$ とした時の温度と含水率の過渡変化を実験と比較して示したものである。また、参考として、両内部抵抗を無視した恒率乾燥期間に相当する場合と、 R_{ms} のみを考慮した場合の含水率の過渡変化も図 11 に示している。内部抵抗が一切ないとした場合には、乾燥のごく初期においては実験結果に近いものとなっているが、それ以降では含水率は急速に低下し、当然のことながら減率乾燥期間の予測は不可能である。抵抗 R_{ms} を加味することで乾燥開始 90 分程度までは、含水率の過渡変化が実験値と比較的良く一致することになる。しかしながら、含水率が 2 程度のところから、再び実験の乾燥速度は低下している。そこで、さらに内部抵抗 R_{mc} を加味することで、含水率の過渡変化の実験値を再現すること

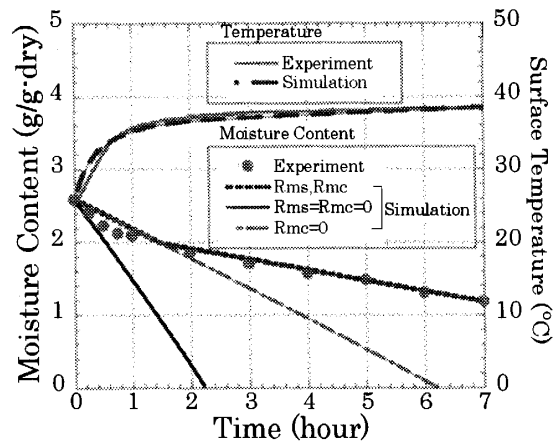


Fig.11 Comparison between analysis and experiment

ができることがわかる。この一連の操作を行って予測した場合の温度変化が図 11 に示されているが、温度の過渡変化も非常に良く再現できており、二つの内部抵抗の評価と必要性が妥当なことが確認できる。以上の結果から、温風乾燥においては二つの内部抵抗 R_{ms} と R_{mc} を考慮する必要があることが明らかとなった。また逆に、この二つの内部抵抗を抑制できれば、減率乾燥期間の短縮が可能であり、その意味からも生体情報を把握した乾燥法の検討によって乾燥技術の高度化が達成できるものと考えられる。

4. 結論

本研究により以下の知見が得られた。

- (1) ホタテ貝柱の温風乾燥では、予熱期間、恒率乾燥期間が短く、乾燥開始後直ちに減率乾燥期間が始まる。また、ホタテ貝柱の減率乾燥期間には、含水率 2 を境に減率乾燥第 1 段と減率乾燥第 2 段が存在することを確認した。
- (2) 蒸発速度の低下の要因が、物質伝達に関する二つの内部抵抗がもたらす表面への水分移動の抑制によるものであることを実験的に確認した。1 つは、ホタテ貝柱内部の微小な水分流路による抵抗であり、もう 1 つは表面近傍に生じる皮膜状の組織変性による抵抗と温度上昇に伴う浸透圧上昇による細胞の膨潤による抵抗である。
- (3) 温風乾燥に利用した矩形流路内において、ホタテ貝柱表面での熱・物質伝達率が、ホタテ貝柱の径と高さの比に従って線形的に変化することを実験によって確認した。また、その熱・物質伝達率の表示式を得た。

おわりに、ナフタリン昇華実験の貴重な実験データを提供して頂いた西川日出男元九州工業大学教授、および元大学院学生の松藤良太氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 架谷昌信, 輸送現象, 裳華房, (1992), 197.
- (2) 酒井信, 日本食品工業学会誌, Vol40, No12, (1993), 849.
- (3) 青木秀敏, ケミカルエンジニアリング VOL.39, (1994), 58.
- (4) 林伊久, 鶴田隆治, 谷川洋文, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2003, (2003), 509.
- (5) 林伊久, 鶴田隆治, 谷川洋文, 日本機械学会, *The First International Forum on Heat Transfer*, (2004), 165.
- (6) 伝熱工学資料改訂第 4 版, 日本機械学会, (1986), 64.
- (7) 水産食品学, 須山三千三, 恒星社厚生閣, (1999), 8.
- (8) 近藤保, 生物物理化学, 三共出版, (1992), 46.
- (9) Dalle Donne, M. and Meerweald, E., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16-4(1973), 787.
- (10) 西川日出男, 谷川洋文, 松藤良太, 日本機械学会 九州支部講演論文集, No.028-1(2003), 201.