

# 干物加工場におけるエネルギーの有効利用に関する研究

—魚の乾燥特性—

松 岡 孝 尚

(農学部機械工学研究室)

## Studies on the Efficient Use of Energy in a Dried-Fish Factory

—Drying Characteristics of Fish—

Takahisa MATSUOKA

*Laboratory of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture*

**Abstract:** In the present report the author researches to establish the drying system with heat pumps in a dried-fish factory from the viewpoint of saving energy. Furthermore, this report deals with drying characteristics of fish as indispensable factors for the rational design and operation of the processing plant.

The drying characteristics of split horse mackerel were determined under several conditions and the results were obtained as follows.

- (1) The drying rate of fish is larger as higher concentration of salt in water to immerse the raw material.
- (2) The fatty fish has a smaller drying rate than the standard fish.
- (3) The fresh fish has a larger drying rate than the thawed fish.
- (4) The equilibrium moisture data of horse mackerel (fillet) were obtained by the saturation points of salts method.
- (5) The effective moisture diffusivity for horse mackerel (fillet) were determined experimentally and the measured values are  $4.41 \times 10^{-7}$ ,  $3.58 \times 10^{-7}$  and  $1.41 \times 10^{-7}$  [ $\text{m}^2/\text{hr}$ ] for the fresh fish, the thawed fish and the epidermis respectively.

### 緒 言

食品の乾燥法として、従来、天日乾燥や熱風乾燥が一般的に利用されてきた。しかしこれらの方法は、天候や外気の温湿度の条件に大きく左右され、また高温による変質など品質の安定性に欠けるという問題点があった。そこで、これらの欠点を補う方法として冷風乾燥機が開発された。冷風乾燥は冷凍機による冷却除湿空気を用い、一定の乾燥空気温度(18~28℃)を得るために、ヒートポンプの原理を応用した再熱運転を行う。したがって、エネルギー効率がよく運転費も安価である。また、乾燥空気温度が低いため、製品の色合いを変えず、香りを残した同一の製品が得られるなどの特徴を有する。このようなことから、最近、干物の製造に冷風乾燥機が広く利用されるようになった。

一方、干物加工場は、一般に小規模で家内工業的なものが多く、製造システムや運転方法などそ

れぞれ経験による独自の方法がとられており、体系的な検討がなされていないのが実状である。また、冷風乾燥機の機能を十分に生かし、エネルギーの有効利用を図るためには、原料魚の特性に応じた装置の設計や操作が必要であるが、これらの基礎となる魚の乾燥特性について公表されたデータはほとんど見あたらない。そこで、本研究では、高知県の干物加工場における製造システムについて調査を行い、さらに、エネルギー効率のよい合理的な干物加工システムを確立するための基礎データとして、魚の乾燥特性値を実験的に求めた。

本研究は、昭和62年度及び昭和63年度文部省科学研究費総合研究(A)(分担)の補助を得て行った。また、本研究を行うにあたり、水産利用学講座小畠渥教授には有益なご助言を賜った。なお、実験は専攻生小椋洋一郎君の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

### 干物加工場の調査

1. 高知県の干物加工業 高知県における海産物加工業は重要な地場産業の一つであり、主な製品は鯉節、ひらき、丸干し、みりん干し、ちりめんじゃこ、およびそれらの加工品、さらに蒲鉾などの練り製品である。これらの業者のうち、干物加工業は約130業者、鯉節加工業は約60業者である。このうち、冷風乾燥機を導入している業者は約20業者である<sup>1)</sup>。なお、これらの加工場の従業員数は、数名から30名程で、ほとんどの工場の規模は小さく、家内工業的なものが多い。

2. 干物製造工場の調査結果 干物加工場における製造工程や装置の運転方法は、事業所や製品の種類によって大きく異なっている。そこで、主にひらきを生産しているT事業所について調査した結果を以下に述べる。

1) 事業所の概要 調査したT事業所は主にひらきを生産しており、従業員数約15名であり、この業種では比較的規模の大きい工場である。主要設備は冷風乾燥機4台(合計39.8KW)、冷蔵庫3台(合計6.75KW)、冷凍庫1台(11KW)、包装機1台、洗浄ポンプ1台、ホイスト1台、冷暖房機2台(10.55KW)であり、合計約71KWである。生産量は約3~4 ton/日で使用電気料は約55~60万円/月である。

2) 生産工程 ひらき生産工程のフローシートをFig. 1に示した。原料として、ひらき加工に使

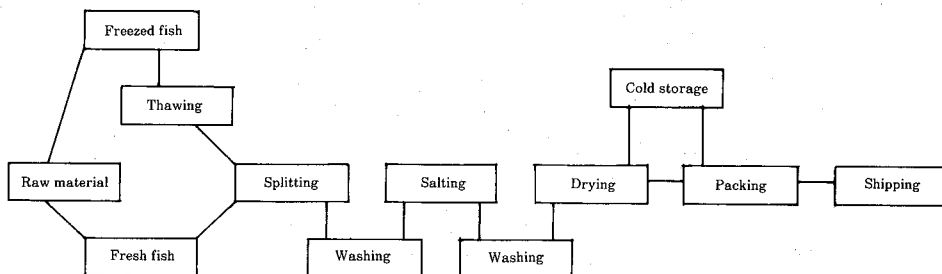


Fig. 1. Manufacturing process of salted and semi-dried fish (split).

用している魚種はアジ、カマス、サバその他で、その割合はそれぞれ50%、20%、10%である。魚体はアジの場合、重量100~150gr、寸法約20cm、サバの場合、重量450~500gr、寸法30~35cmである。なお、鮮魚と冷凍魚の割合は月により異なるが、ほぼ50%ずつである。冷凍魚(-25°C)の場合、解凍の仕方が製品の品質に大きく影響する。すなわち、解凍は貯めた水で長時間かけて行うよりも、流水で短時間で行った方が、身われ、身くずれをしないので製品の品質がよく、乾燥時間も短いと言われている。なお、解凍後、短時間の間にひらき加工・処理を行う方が、色、

硬さなどの点で品質がよい。原料魚はひらき加工、水洗いの後、塩水漬けを行う。塩水の濃度は13~14%で、浸漬時間は、塩水温度によって多少の違いはあるが、脂肪分の多いもので30分、少ないもので20分程度である。なお、塩水には、鮮度保持剤やグルタミンを添加している。所定の時間塩水漬けを行った魚は、再度水洗いをして、水切りした後、網棚に並べ、これをキャスター付きの台車に載せる。なお、網棚一枚には、アジのひらきで約85匹、台車には24段の網棚がセットできる。次に、セットされた台車を乾燥室に入れて乾燥を開始する。この乾燥工程では、台車の入れ替えなど操作の仕方が消費電力に大きく影響するので、経験的に独自の方法で行われている。乾燥を終了した製品は、冷蔵庫で一時的に冷蔵される場合と、ただちに包装、出荷される場合とがある。

### 3. 原料および運転方法に関するエネルギー的検討

1) 原料魚の特性と消費エネルギー 被乾燥物としての魚は、魚種による肉質の違い、寸法、重量の外、ひらきと丸干しの違い、さらに仕上がりが乾燥度合いの違いなどその条件がきわめて広範であり、したがってその乾燥特性も大きく異なっている。このため、これらの条件によって製品に対する所要エネルギーも大幅に異なる。乾燥機的能力および実際の乾燥終了までの運転時間より計算し、Table 1に原料(アジ) 1kg当りのひらきと丸干しの消費エネルギーの違いを示した。すな

Table 1. Difference of energy consumed between split fish and round fish

	Energy consumed [Whr/kg]	Quantity of dehydration [H <sub>2</sub> O kg/hr]
Split fish	216.6	16.07
Round fish (Standard)	408.5	8.37
Round fish (Fatty)	684.0	5.0

わち、丸干しはひらきの約2~3倍のエネルギーを要することになる。

また、同一魚種であっても、脂肪分の含有量により消費エネルギーは大きく異なり、アジのひらきの場合、脂肪分の少ないものは多いものに比べて2時間ほど乾燥時間が短かくてすむ。丸干しの場合、この差がさらに著しくなる。解凍魚と鮮魚においても乾燥速度に差があり、鮮魚の方が短時間に仕上がる。これには冷凍及び解凍技術が関係しているものと思われる。さらに、塩漬処理水の塩分濃度も乾燥速度にかかわりをもっており、塩分濃度が高いほど乾燥時間は短い、最近の減塩志向から塩分濃度をできるだけ薄くする必要がある。

2) 運転方法と消費エネルギー 工場では製品の種類によって、冷風乾燥装置の操作方法を経験的に工夫しており、乾燥時間の短縮化、製品の均質化を図っている。すなわち、操作条件は風向に対する魚の姿勢、台車の入れ替え、処理量の調節などであるが、これらの条件と消費エネルギーとの関係はこれまで定量的に把握されていないため、今後、検討されなければならない。

4. 冷風乾燥装置 ヒートポンプ式の冷風乾燥機は、魚類の乾燥だけでなく、海藻類、麺類、野菜類、畜肉類、木材、和紙などの乾燥に広く利用されているが、対象とする原料の特性によって乾燥空気温度や乾燥室の構造が異なっている。さらに、魚類の中でも製品の種類(魚種、形態)によって、乾燥空気温度帯が異なる。

1) 冷風乾燥機の構造 冷風乾燥機の構造はFig. 2に示すように、冷風乾燥機ユニットと乾燥室とから構成されている。各部の機能および循環サイクルは次のようである。1. 台車に被乾燥

物を積載し、乾燥室に収容する。2. 攪拌送風機により適正な風量を循環させる。3. 風向整流板により均一に乾燥するよう風向を調整する。4. 除湿コイルにより結露させて水分を奪う。5. 再熱コイルにより再熱し乾燥空気となる。このサイクルを繰り返しながら庫内を循環し、被乾燥物から水分を奪う。なお、庫内の空気温度を一定に保つため、再熱しない場合は外部のコンデンスングユニットで放熱する。

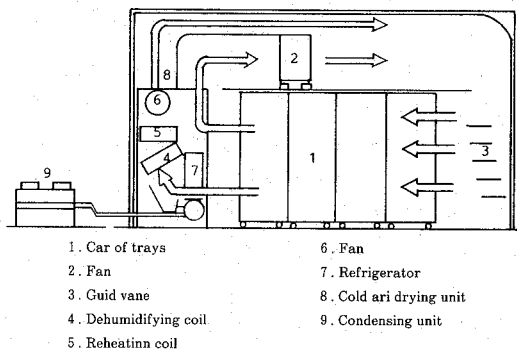


Fig. 2. Cold air dryer using heat pump.

2) 冷風乾燥機の性能 冷風乾燥機に使われている冷凍装置はヒートポンプを利用しているため、そのエネルギー効率はきわめて高い。一般に、冷風乾燥機の性能を表す方法として、1冷凍トン当りの除湿能力が用いられ、22°C、80%RHにおいて3ℓを規準としている。除湿量には、空気温度、湿度条件と除湿器の性能が関係しており、後者については蒸発器を大きく、風速を低めに設計する必要がある。また、冷凍機による除湿効率は、低湿度になるほど低下する。したがって、冷風乾燥運転において、乾燥初期は除湿効率は高いが、乾燥が進行するにつれて被乾燥物からの水分蒸発量が減少し、除湿効率は低下する。これは丸干しや上乾の干物のように低水分まで乾燥する場合に起こる現象である。このような場合、除湿コイルの前に特殊冷却装置を取り付け、空気の顕熱を減少し、相対湿度を高くして除湿効率を向上させる方法がある。この方法はエネルギー効率向上の点では優れているが、装置の空気低抗やメンテナンスの問題もあり、使用目的に応じた利用が必要であろう。この外、乾燥室内空気の設定温度での再熱運転を行う際、三方弁の切り替えによる冷媒の流量減少のため、効率が低下する。とくに三方弁の切り替えが頻繁に起こる場合には、補助冷凍機を付加することにより、効率の改善が可能となる。

### 魚の冷風乾燥特性

干物加工場では、原料魚の特性を考慮して冷風乾燥機の効率的な運転を試みているが、製品の形態が多様であるため、それぞれ工場独自の経験で操業されているのが実状である。したがって、熱効率のよい干物加工システムの体系化のためには、冷風乾燥装置の設計や操作の基礎となる魚の乾燥特性を把握する必要がある。そこで、干物として多量に生産されているアジについて乾燥特性を実験的に求めた。

### 実験装置及び方法

実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。乾燥実験には、試験用冷風乾燥機 1 (KR 社製 SDM-30型) を用いた。試料の重量変化の測定は、乾燥室内に電子天秤 2 (秤量: 3000 gr, 感量 10mg) をセットし、これより RS-232C インターフェイスを介してパソコン 7 (PC 9801) に取り込んだ。また、空気温度及び試料の温度は熱電対 6、湿度は湿度センサによりデータロガー 4 を介して同様にパソコンに取り込み、一定時間間隔で出力させた。試料条件として、一匹のアジについて塩分濃度、鮮魚と冷凍魚、脂肪分の多少を変えて乾燥実験を行った。乾燥時間の設定は、試料初期重量の 70%

(7分乾)を目安とした。また、アジの切身を用いて、平衡含水率および有効水分拡散係数を求めた。乾燥空気条件は、温度約20℃、湿度25~60% RH、風速4.5 m/secとしたが、試料条件による乾燥特性の比較実験はすべて同一空気条件に揃えた。魚の含水率は105℃恒量法により求めた。また、魚の平衡含水率は、20℃恒温室で飽和塩の定点法により4点求めた。

実験結果及び考察

1. 塩水処理の有無と乾燥速度 塩水処理の有無と含水率変化および乾燥速度の違いを、Fig. 4 および Fig. 5 に示した。これらの結果から、塩水処理した場合は、無処理の場合に比べて明らかに乾燥速度が大きいことが分かる。また、乾燥が進行し、含水率が低下するにつれて、その差が著しくなるといえる。乾燥終了までの平均乾減率を比較すると、塩水処理をした試料は1.36 (% w. b./hr)、無処理の試料は1.01 (% w. b./hr)であった。

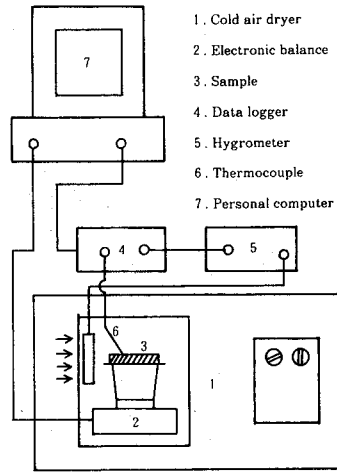


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

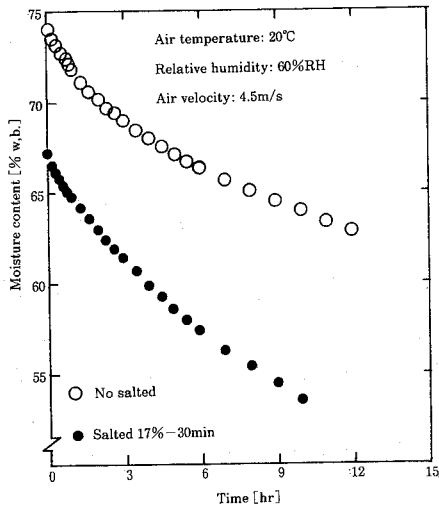


Fig. 4. Changes of moisture content for salted fish and no salted fish.

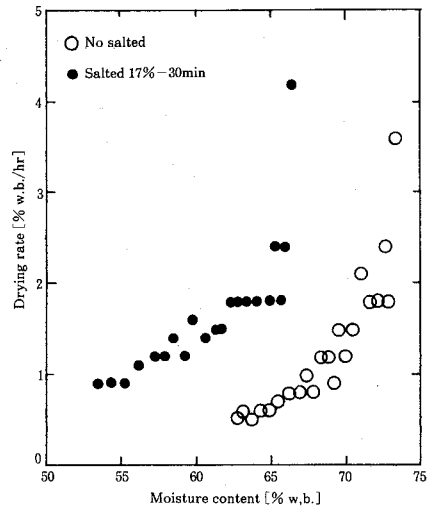


Fig. 5. Difference of drying rate between salted fish and no salted fish.

なお、このデータは外気の湿度が高い夏季に行ったもので、乾燥空気湿度は60 (% RH) とかなり高い条件である。

2. 塩分濃度と乾燥速度 干物加工場では、季節や原料、水温によって塩水濃度を調節しているが、アジのひらきについては、塩水濃度13~14 (%), 浸漬時間20~30 (分) の範囲のようである。そこで、試料の塩水濃度を10 (%), 15 (%), 20 (%), の3種類とし、塩漬時間は20分一定とした。これらの試料の乾燥速度と含水率との関係を Fig. 6 に示した。この結果からも塩水濃度が高いほ

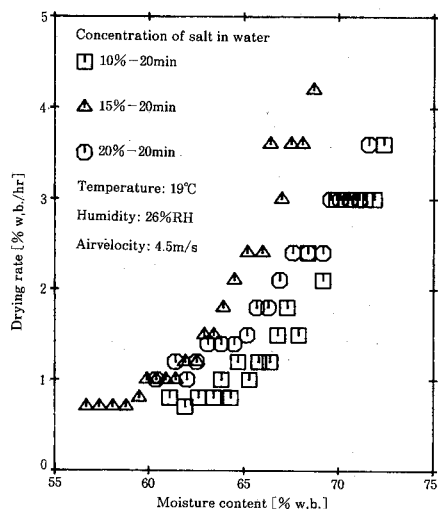


Fig. 6. Influence of concentration of salt in water on the drying rate of fish.

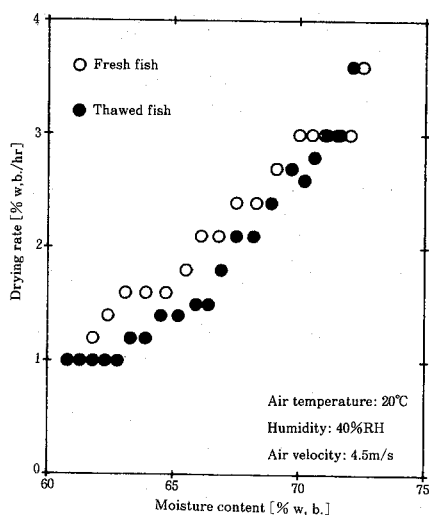


Fig. 7. Difference of drying rate between fresh fish and thawed fish.

ど、乾燥が進行しても乾燥速度の低下が少ないことがわかる。また、乾燥終了までの平均乾燥率は、塩水濃度10, 15, 20 (%), の試料に対して、それぞれ1.47, 1.54, 1.69 (% w. b./hr)であった。

3. 鮮魚と解凍魚の乾燥速度の違い 塩水処理15%—30分の鮮魚と解凍魚について、含水率と乾燥速度との関係を Fig. 7 に示す。鮮魚の乾燥速度は、含水率のほぼ全範囲にわたって解凍魚の乾燥速度を上回っている。この理由は冷凍魚の場合、凍結あるいは解凍の過程で細胞破損などによるものであると考えられる<sup>2)</sup>。なお、乾燥終了までの平均乾燥率は、鮮魚2.00 (% w. b./hr), 解凍魚1.73 (% w. b./hr)であった。

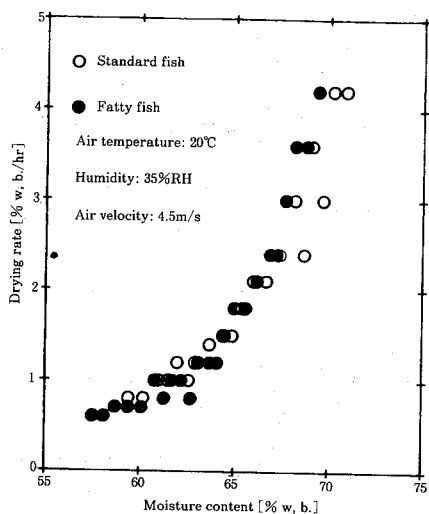


Fig. 8. Influence of fat content on the drying rate of fish.

4. 脂肪の多少と乾燥速度 同一魚種でも、季節や漁場によって魚肉に含まれる脂肪の状態が大きく異なる。本実験では脂肪含量の定量分析は行わなかったが、干物加工場で選んだ2種類の試料について乾燥実験を行った。その結果は Fig. 8 に示すように脂肪分が多い試料は、標準の試料に比べて、乾燥が進行するにつれて急激に乾燥速度が小さくなることがわかった。これは脂肪分の多い魚肉は相対的に水分含量が少ないためであると考えられる。なお、乾燥終了までの平均乾燥率は、脂肪分の少ない試料1.53 (% w. b./hr)標準の試料1.34 (% w. b./hr)であった。

5. アジの平衡含水率 魚の乾燥特性を解析するためには、平衡含水率を知る必要がある。しかし既往データが見あたらないので、アジの切身について飽和塩法<sup>2)</sup>によって求めた。ここで使用した塩類の飽和水溶液とそれに平衡な20°Cにおける空気の相対湿度は<sup>3)</sup>, LiCl: 12%RH, MgCl<sub>2</sub>・

6 H<sub>2</sub>O:33%RH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>・2H<sub>2</sub>O:44%RH, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>・6H<sub>2</sub>O:54%RH, NaCl:75%RH の5種類である。試料として用いた魚肉の寸法は20×20×10mmとし、できるだけ長期の貯蔵に耐えられるよう配慮した。貯蔵期間中、適宜試料の質量測定を行い、21日後の値を平衡に達したものと採用した。なお、相対湿度75%RHの試料については腐敗臭がしたので除外した。結果はFig. 9に示すように、試料の条件による違いは明確でないが、穀物などの平衡含水率と同様な逆S字曲線<sup>2)</sup>が得られた。

6. アジの水分拡散係数 アジの切身の乾燥速度曲線の一例をFig.10に示す。この結果は、アジの

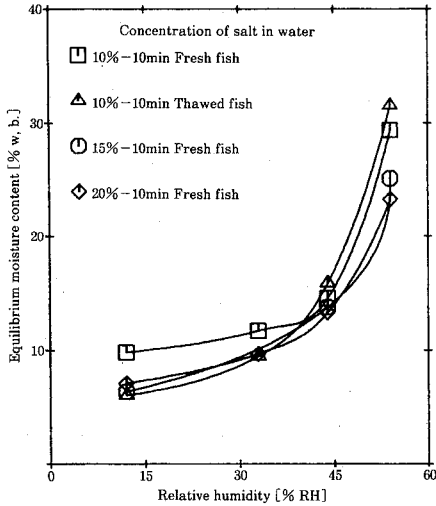


Fig. 9. Equilibrium moisture data of horse mackerel at 20°C.

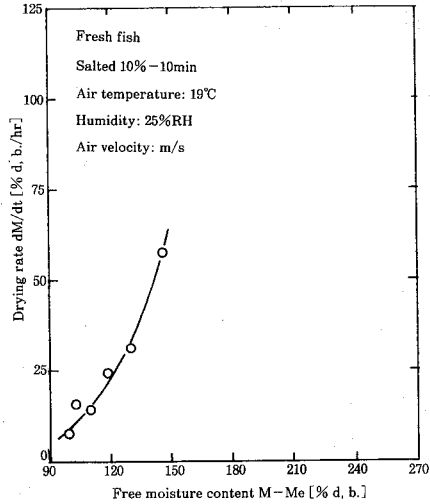


Fig. 10. Drying rate curve of horse mackerel (split fresh fish).

ひらきの乾燥速度曲線 (Fig. 5～Fig. 8)と同様に、魚肉の乾燥過程は、乾燥速度が含水率に比例しない、いわゆる減率乾燥第二段であることを示している。これは、水分の移動が内部拡散に支配されることを意味する<sup>4)</sup>。そこで、魚肉内の水分拡散を一次元とすれば、拡散の方程式は、

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial X^2} \quad (1)$$

で表される<sup>5)</sup>。

ここに、M:含水率 [% d. b.], t:時間 [hr], D:水分拡散係数 [m<sup>2</sup>/hr], X [m] は魚肉内にとった距離を表す軸である。

いま、魚肉の形を無限平板と考えると、式(1)を解けば、

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp\left(-Dt \frac{\pi^2}{4a^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-9Dt \frac{\pi^2}{4a^2}\right) + \frac{1}{25} \exp\left(-25Dt \frac{\pi^2}{4a^2}\right) + \dots \right\} \quad (2)$$

となる<sup>6)</sup>。

ここに、M<sub>0</sub>:初期含水率 [% d. b.] M<sub>e</sub>:平衡含水率 [% d. b.], 2a:平板の厚さ [m] である。ここで、時間tが十分大きい場合には、式(2)の右辺第2項目以降を省略でき、

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp\left(-Dt \frac{\pi^2}{4a^2}\right) \right\} \quad (3)$$

となる。したがって、水分比  $(M - M_e) / (M_0 - M_e)$  と時間  $t$  との関係は片対数グラフ上で直線となり、その勾配  $-\pi^2 D / 4 a^2$  より水分拡散係数  $D$  が求められる。

ところで、固体内の物質拡散係数は、固体を構成している組織や構造が複雑であるため、理論的に予測することは困難である。したがって、実験的に求めるのが普通であり、これを有効物質拡散係数と呼んでいる<sup>7)</sup>。魚肉内の水分拡散についても同様に、拡散経路が極めて複雑であるため、拡散速度が必ずしも水分(濃度)勾配に比例するとは言えない。しかも内部の水分移動抵抗が、液状拡散によるのか、蒸気拡散によるのか、厳密な区別が困難である。そこで、ここでは魚肉の乾燥過程において、乾燥収縮の影響が少ない、比較的初期の段階における水分拡散係数を実験的に求め、これを有効水分拡散係数とした。

アジの切身の乾燥データを、水分比と時間の関係でプロットした結果を Fig.11 に示す。鮮魚、解凍魚および皮のデータは、それぞれ勾配の異なる3本の直線で表され、これらの直線の勾配より有効水分拡散係数を求め、Table 2 に示した。魚の有効水分拡散係数は、温度、含水率さらに乾燥

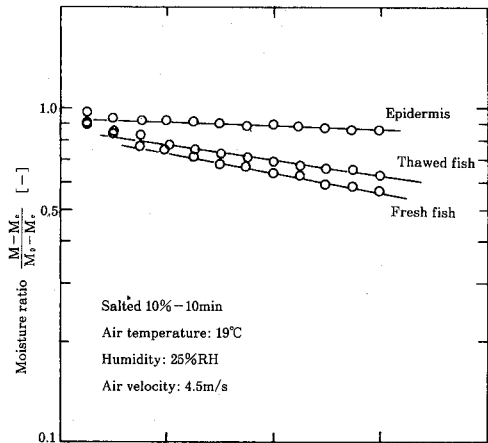


Fig. 11. Observed values of moisture ratio for split horse mackerel during aeration drying at 19°C.

Table 2. Effective moisture diffusivity for the fillet of horse mackerel

	Fresh fish	Thawed fish	Epidermis
Effective moisture diffusivity [ $\text{m}^2/\text{hr}$ ]	$4.408 \times 10^{-7}$	$3.575 \times 10^{-7}$	$1.407 \times 10^{-7}$

収縮による密度変化などによって影響を受けるが、アジのひらきは20~30%の重量減少の範囲であるので、これらの数値は、実用上十分な精度で利用できるものと思われる。また、この数値を単純に比較すれば、解凍魚は鮮魚より20%以上多くのエネルギーを要し、丸干しは、ひらきの2.5~3倍のエネルギーを要するといえる。これは実際の運転時間から計算した Table 1 の結果ともよく一致している。

## 要 約

熱の有効利用を目的として、ヒートポンプ式冷風乾燥装置を組み込んだ干物加工システムの調査および実験研究を行った。干物加工工程の中で消費されるエネルギーの大部分は、冷風乾燥機の消費電力である。使用電気料は、ひらきをおもに加工しているT事業所で、年間約700万円、丸干しを加工しているK事業所では年間約3000万円であり、生産コストに占める電気料の割合はかなり大



きい。このため干物加工場において、電力を節約することはきわめて重要である。

そこで、魚の乾燥所要電力に関与する因子を整理すると、(1)魚の乾燥特性、(2)冷風乾燥装置の性能、(3)冷風乾燥装置の操作方法などである。魚の乾燥特性は、魚種、寸法、形態(ひらき、丸干し、みりん干しなど)、鮮魚と解凍魚、塩水処理濃度、脂肪含有量など多くの条件によって異なる。また、冷風乾燥装置の性能は、冷凍機の成績係数や除湿能力あるいは乾燥室内の風速分布などによって評価される。さらに、冷風乾燥装置の操作方は、魚の条件、処理量、台車の入れ替え、風向に対する魚の姿勢、外気導入条件などが重要な要素となる。しかし、干物加工場においては、経験に基づく独自の方法がとられており、乾燥所要電力にかかわる前述の因子の定量的な分析はもちろんのこと、それらの相互関係についての体系的な検討がなされていない。そこで、冷風乾燥装置の設計や操作方法の基礎データとして欠くことのできない魚の乾燥特性を実験的に調べた。その結果、アジのひらきの乾燥速度は、塩水濃度、鮮魚と解凍魚、脂肪分の多少などによって異なることが分かった。また、アジの切身について平衡含水率を測定し、切身を無限平板として、その乾燥過程から有効水分拡散係数を求めた。乾燥速度曲線から、魚の乾燥は、乾燥過程のほとんどが内部拡散による水分移動であるといえるが、乾燥の進行に伴って、乾燥収縮の影響が無視できなくなる。したがって、魚の有効水分拡散係数は、温度、湿度条件だけでなく、製品の乾燥度合によっては含水率も無視できない要因となる。

以上のように、アジのひらきについて、その乾燥特性をある程度明らかにすることができた。しかし、今後、干物加工の効率的技術の体系化のためには、魚種、形態、温度湿度条件、魚の配列、風向と姿勢、魚体寸法など、乾燥特性にかかわる多くの要因との関係を、さらに明らかにしはげなければならない。そして、これらのデータが蓄積されることにより、それぞれの乾燥特性に応じた最もエネルギー効率のよい装置の設計や運転方法の確立が可能となろう。

## 文 献

- 1) 高知県工業名鑑, p. 2—139, 高知県商工労働部, (1988).
- 2) 食品の水, 日本水産学会編, p. 50—80, 恒星社厚生閣, 東京 (1984).
- 3) 芝亀吉: 湿度と水分, p. 141, コロナ社, 東京 (1975).
- 4) 太田冬雄: 水産加工技術, p. 85, 恒星社厚生閣, 東京 (1986).
- 5) 宝谷幸男: 水産加工機械, p. 189, 恒星社厚生閣, 東京 (1987).
- 6) Henderson, S. M. and Perry, R. L.: Agricultural process engineering, 2nd ed., p. 306, Library of Congress Catalog Card Number: 54—12684, U. S. A. (1966).
- 7) Ozisik, M. N.: Heat transfer, p. 722, McGraw-Hill, New York (1985).

(平成元年9月26日受理)

(平成元年12月27日発行)

