魚類乾燥プロセスの実験的解析と 乾燥制御システム構成のための基礎的検討[†]

中 村 誠*・国 本 正 彦**・白 上 貞 三*・酒 井 義 郎***

Experimental Analysis and Fundamental Investigation on Constructing a Fish-Drying Process Control System

Makoto NAKAMURA*, Masahiko KUNIMOTO**, Teizoh SHIRAGAMI* and Yoshiro SAKAI***

A fish drying process control system is proposed in the present paper. The proposed system utilizes prediction of suitable drying conditions for the given material fish before drying together with the proper change in weight of material fish with time under that condition. This function of the system has its basis in the performance of a skilled worker in this field. In order to implement a human expertise of this sort, experimental analysis were made so as to find the characteristics which governs the drying process. The proposed system consists of two procedures for producing products of good quality, which are set following human expert's way as mentioned above: 1) The procedure before drying. 2) The one which is executed during drying. The procedure (1) is for setting drying conditions and the prediction of required drying time. In this procedure, the probable change in weight with time is inferred by using fuzzy reasoning. A proper set of drying conditions and the required drying time under that set of conditions are also obtained by using a regression model. The procedure (2) is for more accurate estimation about the progress in drying utilizing the observation during drying. A mathematical model is employed for this purpose. A good agreement between the experimental results and simulation results are obtained, which implies the usefulness of the present control system.

Key Words: fish drying control system, skilled worker, expertise, fuzzy reasoning, regression model

1. 緒 言

水産乾製品はわが国で最も古くから生産されている伝統食品の一つであるが、製造原理または技術面の研究が非常に遅れている製品でもある¹⁾。乾製品の生産企業はその多くが中小企業であり、業界は厳しい労働環境などのために慢性的な人手不足の状態が続いている。また、従業員の高齢化にも直面している。このような状態を解決するにあたっては、既存の省力化・自動化機器を導入

してそれに対処してゆくことが考えられる。しかし、原料魚の魚種やその成熟度の違い、加えて、製品の品種の多様性などにより、従来の定量的な制御方式を一律に適用してゆくことは困難である。したがって、現状では製造工程で最も重要な乾燥プロセスの作業は、その多くが熟練者の“勘どころ”に依存したものとなっている。

熟練者の専門的技術・知識は実に巧みに組み立てられている。よって、熟練者の専門的技術・知識の組立を解析し、乾燥の手続きに相当する処理を組み込んだシステムを開発すれば、人手不足の問題などへの解決の一助となり得ると考える。しかし、プロセスの自動化に向けて熟練者から知見とその根拠を引き出すことを試みた場合、一般的にその知識は断片的な言葉による定性的な表現でしか引き出せず、有用な指標を見さだめることは容易なものではない。ただし、システムの開発を試みる研究者および技術者が、熟練者の協力のもとに検討を重ねてゆくことで、次第に熟練者の“勘どころ”の意味するところが明確になるものと考ええる。

そこで、本研究では熟練者の乾燥の手続きに相当する処理を取り入れた新しい乾燥制御システム²⁾の開発を目

[†] Korean Automatic Control Conference (KACC) '92 (1992・10), KACC '93 (1993・10) で発表

* 山口県工業技術センター 山口市朝田湯垣 585-1

** 水産大学校製造学科 下関市永田本町 2-7-1

*** 山口大学工学部 宇部市常盤台 2557

* Industrial Technology Institute, Yamaguchi Prefectural Government, Yamaguchi

** Department of Food Science and Technology, Shimonoseki University of Fisheries, Shimonoseki

*** Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received November 29, 1993)
(Revised March 22, 1994)

指して、まず、熟練者の専門的技術・知識の組立を対話と観察で整理して、プロセスの自動化に向けて有用となり得る各種の指標を検索した。つぎに、熟練者の協力を得ながら分析と実験を繰り返すことで、各指標の有用性を検討した。さらに、有用性を確認した指標を用いて、乾燥前および乾燥中の熟練者の所要乾燥時間の推定ならびに乾燥条件の修正の手続きに相当する乾燥制御システムの基本構成を検討した。

2. 熟練者の専門的技術・知識⁴⁾と指標の検索

ところで、人工乾燥法は使用する乾燥空気の温度によって、35°C 程度の熱風乾燥と 20~25°C 程度の冷風乾燥に大別できるが、熱風乾燥は熱変性を嫌う製品には適さない³⁾などの問題を有している。一方、冷風乾燥はこのような問題がないことから、現在では最も普及したものとなっている。また、水産乾製品には、素干品、塩干品、煮干品などの多種多様の製品が存在するが、人工乾燥法で最も多く生産される製品は、通常干物といわれる塩干品である。

以上の理由から、本報では乾燥法の対象として冷風乾燥を、また、製品の対象として塩干品を扱うものとする。

2.1 作業手順と知識の組立

熟練者との対話と工程の観察から、熟練者の乾燥プロセスに係わる作業はつぎの 3 段階に整理できる。

Step 1 水揚げ時および乾燥開始直前の原料魚の知識と製品の知識を基に、適応する乾燥条件を決定するとともに所要乾燥時間を推定して乾燥室に原料魚を入庫する。

Step 2 随時原料魚の乾燥状態を触手と目視で確認し、必要に応じて乾燥条件を変更する。また、原料魚の乾燥状態を均一とする目的で台車の入れ替え作業を行う。

Step 3 推定した所要乾燥時間に近づくと、製品の知識を基として入念に製品の仕上がり状態を確認し、乾燥時間の修正を行った後、満足する製品に仕上がった時点で製品を乾燥室から出庫する。

これらの作業は、経験の蓄積で形成されたつぎの断片的な知識が集約されたものを背景として行われる。

(1) 原料魚に関する知識

a) 漁獲期および漁場 魚体の大きさ、すなわち成熟度と魚肉成分の構成が漁獲期および漁場により異なり、一定の乾燥条件のもとで乾燥すると乾燥速度に差が生じる。また、運搬、保存期間から鮮度が左右され、製品の外観、すなわち見ばえに影響が表われる。

b) 魚体の大きさ 成熟度の相違により魚肉成分の構成が異なり、乾燥速度に差が生じる。

c) 保存状態および鮮度 製品の外観に影響が表われる。

(2) 乾燥方法に関する知識

a) 乾燥温度、乾燥湿度、風速、風向 乾燥条件により乾燥速度が左右され、所要乾燥時間に差が生じる。また、製品の外観と品質に影響が表われる。

b) 所要乾燥時間 費やした乾燥時間により製品のかたさと外観ならびに品質に影響が表われる。

(3) 製品に関する知識

a) かたさ 乾燥状態および仕上がり状態は魚肉のかたさの程度に表われ、触手で計ることができる。

b) 外観 製品の目視で商品価値が左右され、目視で計ることができる。また、製品の品質も計ることができる。

Fig. 1 は自動化に向けて整理した熟練者の知識の組立の概略を示す。

2.2 自動化のための指標

プロセスの自動化に有用となる指標を、熟練者の乾燥の手続きに沿って、原料魚の状態を確認する作業に関する指標(確認指標という)、乾燥状態を制御する作業に関する指標(制御指標という)および製品を評価する作業に関する指標(評価指標という)に分類して検討する。

(1) 原料魚の確認指標

原料魚の魚肉の一般成分は水分、タンパク質、脂質、炭水化物および灰分から構成される。しかし、原料魚の多くは天然に生息するものを漁獲して使用するため、同一の魚種であっても漁場・漁期・成熟度などにより魚肉の成分値が変動し、また個体間の差も大きい⁴⁾。塩干品などの多くの乾製品に用いられるわが国周辺の主要魚、たとえばイワシを対象として、一般成分の変動を海域、季節あるいは魚体の大きさ別に調査した結果、このうち大きく変動する成分は主として水分と脂質であることが報告^{5)~8)}されている。また、このことは熟練者の用いる“大きさ”と“太り具合、脂ののり具合”という言葉からも確認できる。熟練者は乾燥前に使用する原料魚の成熟度を見て乾燥条件を決定し、仕上がり時間を推定する。すなわち、熟練者は原料魚の全長と体重のバランスから経験的に水分含量と脂質含量の大まかな構成を見積もり、乾燥速度と所要乾燥時間を推定するものと考えられる。

以上から、乾燥速度と所要乾燥時間に大きく影響を及ぼす確認指標は、全長と体重のほかに、水分含量と脂質含量の構成であると言える。しかし、その構成を求めるため、乾燥前に逐次成分分析を行うことは、多大な労力と時間を費やすことから現状では困難である。そこで、魚肉の水分含量と脂質含量の構成の性質を表わす可能性をもつ、以下のパラメータを指標として検討する。

原料魚の肥満度 fatness:

$$\text{肥満度} = \frac{\text{体重(g)}}{(\text{体長(cm)})^3} \times 1000 \quad (1)$$

ただし、体長＝全長－尾鰭の長さ

(2) 乾燥における制御指標

冷風乾燥の原理は、乾燥した冷風を原料魚にあて、吸湿した空気を凝縮させて除湿し、それを循環することで徐々に乾燥を行うものである。冷風乾燥機は一般的に Fig. 2 に示す構造のものが普及しており、主に乾燥室の温度を所定の値に保つための PID 制御方式が適用される。乾燥機の運転条件の設定を誤ると、肉むれや上乾きなどを起こして良品質の製品は得られない。熟練者は多くの経験により形成された知識を背景として、乾燥前に原料魚とその製造目標に適した乾燥機の運転条件、すなわち乾燥条件を設定し、乾燥速度と所要乾燥時間を見積

もる。また、乾燥中には必要に応じて乾燥の進行状態を確認し、乾燥条件を修正する。

以上から、乾燥条件、すなわち乾燥室内の温度、湿度、風速および風向を制御指標として設定し、これらが乾燥速度ならびに所要乾燥時間に及ぼす影響を検討する。

(3) 製品の評価指標

魚類の乾燥は原料魚から水分を蒸発させて微生物および酵素による腐敗や変質を防止するものである。したがって、製品に仕上がる段階では、品質ならびに安全性はいうに及ばず、まず製品の品種にみあった水分含量が、つぎに消費者受けする見ばえが求められる。熟練者は触手や目視などの官能的な観察から、乾燥を終了するタイミングとその時点での製品への仕上がり状態を見積もる。すなわち、目標とする水分含量の程度を触手で得るかたさの程度から、また、見ばえを目視で得る外観の状態を確認して総合的に仕上がり状態を判断し、さらに品質を推定しているといえる。なお、見ばえの良い製品に仕上がるものは、原料魚の鮮度が良いものに限られることを熟練者は指摘する。これは、冷凍や解凍の際の原料魚の表皮の剝離などの外的な要因と、保存期間中における自己消化や腐敗の進行などによる内的な要因が影響するためである。

以上のことから、製品のかたさと外観および乾燥前の冷凍保存期間を製品の評価指標として設定し、乾燥制御システムでの乾燥終了時間を決定する方法を検討する。

3. プロセスの解析

検索した各指標の有用性と熟練者の専門的技術・知識の関わりを明確なものにするため、以下の分析と実験を行った。

3.1 分析および実験

(1) 試料魚および製品

試料魚は山口県長門市近海で漁獲されたウルメイワシの鮮魚および冷凍品を、約 4% の食塩水中に 4～6 時間浸漬した後、軽く水洗して分析と実験に供した。Fig. 3 に試料魚の全長と体重の関係を示す。また、製品は塩干品の丸干し(堅干し、生干し)を製造するものとした。

(2) 分析および実験方法

一般成分の分析は、文献 4) に示された方法に則って行った。なお、試料は頭部、鰭部および内臓を除くことなく魚体全体を乳鉢中で摩砕し、これを分析に供した。

Fig. 1 Schematic of the relationship between categories of expert's knowledge

Fig. 2 Typical construction of fish drying room

乾燥実験は製品の品質を考慮して、最長 52 時間までの冷風乾燥を、恒温除湿乾燥機((株)田中化学機械 TN-2 改)を用いて行った。乾燥条件は温度、風速の及ぼす影響を検討するため、それぞれ 19~25°C、2.3~3.9 m/s の範囲内で 3 段階の設定値を定めた。なお、湿度は実験開始直後の相対湿度が約 70% になるよう調整した。また、風向の影響を検討するため、試料魚の腹部を循環空気に対して風上に向ける正方向(腹側乾燥という)および逆方向(背側乾燥という)の 2 方向に固定した。

製品は仕上がり状態を Table 1 に定める基準で、熟練者がかたさと外観を評価した。また、評価された製品の物性を検査するため、それぞれの階級の水分含量と押し込み力を求めた。水分含量は常圧乾燥法(105°C で恒量になるまで加熱)によって測定した。押し込み力は、レオメータ(不動工業(株)NRM-2002 J)に定距離圧縮用円形プランジャ(φ10 mm)を取り付け、これを押し込み速度 60 mm/min で製品に深さ 2.5 mm 押し込んだときの加重を押し込み力(kg)として測定した。

3.2 結果と考察

Table 2 に一般成分の分析結果と各成分の相関関係および相関係数の無相関の検定結果を示す。また、Fig. 4 に分析で得た脂質含量と水分含量の関係を示す。脂質含量と水分含量の合計値は試料魚 100 g 中ほぼ 75 g と一定の値を示しており、両者には強い負の相関関係(相関係数 = -0.778)が認められた。肥満度は一般成分中では脂質含量と最も高い正の相関性(相関係数 = 0.496)を示した。Table 3 に全長別にまとめた肥満度と脂質含量の相関係数とその無相関の検定結果を示す。表から全長が増すにつれて肥満度と脂質含量の相関性が高まる傾向がみられる。これは、一般に魚類は成熟度が増すにつれて魚肉成分における相対的な脂質含量が増加することから説明される。

Fig. 5 は乾燥中に各試料魚の重量の変化を測定した後、図中に示す区分で乾燥曲線を求めた結果を示したものであり、全長が小さなもの、体重の軽いもの、また肥満度の小さなものについて体重の減少率が高くなる傾向が顕著に表われた。

以上の結果から、原料魚の全長、体重および肥満度が乾燥制御システムに用いられる原料魚の確認指標として有用になると考える。ただし、肥満度は比較的成熟度の増した原料魚(全長 120 mm 以上)に対しての脂質含量の確認指標として有用になると推察される。

Fig. 6 は図中に示す乾燥条件のもとで各試料魚の重量の変化を測定した後、風向別に乾燥曲線を求めた結果を示している。図に示すとおり、腹側乾燥品と背側乾燥品では体重の変化率にほとんど差が表われないことから、

風向は乾燥速度に影響を及ぼさないとと言える。なお、実験結果から乾燥速度は第 1 に乾燥温度の影響を受け、つぎに風速の影響を受けることがわかった。よって、乾燥温度と風速が乾燥速度に影響を与える制御指標として有用になると考える。

製造した生干し製品について熟練者がかたさの評価を行い、その階級別に押し込み力と水分含量を求めた結果を Fig. 7 に示す。図からわかるように、押し込み力と水分含量値は熟練者の評価結果を良好に反映している。このことから、熟練者は触手による作業により、評価時のかたさ、すなわち原料魚の体重の減少の程度を的確に判断しているものといえる。したがってこの作業は、乾燥中の原料魚の体重の減少率を測定あるいは予測することで置き換えることができ、製品ごとに要するかたさをオンライン調整できる可能性が示唆される。

製造した堅干し製品 186 尾について熟練者が外観の評価を行い、その階級別に原料魚の乾燥前の冷凍保存期間と体格を求めた結果を Table 4 に示す。評価結果には第 1 に冷凍保存の有無とその期間の影響が顕著に表われており、第 2 に原料魚の個体差の影響が表われている。先に述べたように、魚類は成熟度が増すに従い魚肉成分における相対的な脂質含量が増加する。よって、同一の乾燥条件では高い成熟度の原料魚ほど魚体表面に湧出する脂質量が増し、魚体表面の光沢およびしわの形成状態に低い成熟度のものととの差異が表われる。このことから、

Fig. 3 Relationship between total length and weight

Table 1 Interpretation of ranking of evaluation

Rank	Texture	Appearance
	Judge by touch	Judge by seeing
1	Underdry*	Inferior*
2	Slightly underdry	Slightly inferior
3	Proper	Ordinary
4	Slightly overdry	Good
5	Overdry*	Superior

*: No commercial value

Table 2 Compositions and their correlations

Number of samples=146

Dimensions		Nature of fish body			Composition of fish meat				
		T-length (mm)	Weight (g)	Fatness	Water	Krotein	Lipid	Carbo- hydrates	Ash
	Average	133	20.1	12.3	72.2	19.6	2.67	0.714	4.81
	Maximum	191	60.5	14.3	75.9	22.6	6.90	1.60	7.00
	Minimum	95	6.06	10.6	66.8	17.4	0.90	0.10	2.90
Correlation coefficients	T-length	1							
	Weight	0.978**	1						
	Fatness	0.665**	0.701**	1					
	Water	-0.563**	-0.534**	-0.215**	1				
	Protein	0.364**	0.319**	0.073	-0.755**	1			
	Lipid	0.834**	0.853**	0.496**	-0.778**	0.422**	1		
	C-hydrates	0.161	0.131	0.165*	-0.066	-0.116	0.051	1	
	Ash	-0.366**	-0.411**	-0.403**	-0.423**	0.220**	-0.105	-0.086	1

* ; Significant at 5% level, ** ; Significant at 1% level, T-length ; Total length

Fig. 4 Relationship between lipid and water content

Table 3 Correlation coefficients between fatness and lipid content with fish length

Total (mm)	Number of samples	Correlation coefficient
100-119	37	0.170
120-139	32	0.431*
170-189	11	0.866**

* ; Significant at 5% level, ** ; Significant at 1% level

熟練者は光沢およびしわの形成状態から巧みに原料魚の鮮度と製品の品質を推察していることがうかがえる。よって、ビデオカメラを用いて乾燥中の原料魚の光沢の変化としわの形成状態を監視することで、原料魚ごとの最適な乾燥状態を得るための制御が可能である。

4. 乾燥制御システム

4.1 システムの構成

以上の検討結果をもとに、熟練者の乾燥の手続きに相当する処理を取り入れた魚類乾燥制御システムの基本的な構造を Fig. 8 に示す。本システムは乾燥前の処理と乾

燥中の処理との二つに大きく分割できる。

(1) 乾燥前の処理

乾燥前の処理は使用する原料魚の体格と製品の品種から、製品に適する体重の変化率を推定し、適応する乾燥条件と所要乾燥時間を求めて、これを制御系に出力するものである。処理の流れの概要を Fig. 9 に示す。

本システムではまず使用する原料魚の魚種、製品名および任意の乾燥条件を設定した後、平均的な試料とみなされる原料魚の体格(全長、体重)とサンプル数を入力して、(1)式で肥満度を求める。

つぎに、ファジィ推論によって希望する製品のかたさに対応する体重の変化率を推定する。(2)式に本システムのファジィ規則の構成を示す。ファジィ規則の前件部は原料魚の体格(全長、体重または肥満度)Materialと希望する製品のかたさの程度Expectationで、また、後件部は体重の変化率Productを変数として構成される。

If Material and Expectation then Product (2)

続いて、(3)式に示す重回帰モデルを用いて所要乾燥時間を推定する。本モデルは所要乾燥時間Timeを目的変数として、また、原料魚の体格(全長、体重または肥満度)Material、(2)式から得た体重の変化率Productおよび設定した乾燥条件(乾燥温度、風速、湿度)Conditionを説明変数として構成される。

$$\text{Time} = a_0 + a_{m1} \cdots \times \text{Material} + a_{p1} \cdots \times \text{Product} + a_{c1} \cdots \times \text{Condition} \quad (3)$$

ここに、 a_0 は定数、また、 $a_{m1} \cdots$ 、 $a_{p1} \cdots$ 、 $a_{c1} \cdots$ はそれぞれの説明変数をもつ値に乘ぜられる偏重回帰係数である。

Table 5 に原料魚の全長を二つの階級に分割して得た重回帰モデルを示す。

推定した所要乾燥時間と希望する乾燥時間とに大きく差がある場合は、その差を短縮する方向に自動的に乾燥条件を修正して希望値に近づける。すなわち、希望値を

(a) Total length

(b) Weight

(c) Fatness

Fig. 5 Drying curves in four groups of each of round herring with different nature of fish body () ; Number of samples
Drying conditions (Averaged over 28 hours) ;
Temperature=21.8°C
Relative humidity=53.1%
Wind flow rate=3.11 m/s
Direction of wind=Against (Facing the abdomen of material fishes)

得るまでまず乾燥温度を修正して(3)式で所要乾燥時間の演算を繰り返し、更に短縮を要する場合にはつぎに風速を修正して同様の演算を繰り返すものである。

(2) 乾燥中の処理

Nature of fish body (Averaged over 45 samples);
Total length=168.1mm, Body weight=37.1g, Fatness=12.62

Fig. 6 Effect of direction of wind
(Facing the abdomen of material fishes)

Fig. 7 Wedge force and moisture content with different ranks of texture judged by expert's texture
■ : Wedge force □ : Moisture content

乾燥中の処理は乾燥前の処理で得た乾燥条件を初期値として、乾燥速度を監視しながら乾燥条件を修正しつつ、推定した所要乾燥時間に製品を仕上げるものである。また、これらの履歴を蓄積する。

乾燥速度は(4)式によって定式化できる。

$$\begin{aligned} dx(t)/dt &= u(t) + v(t) \\ dv(t)/dt &= -\alpha \times v(t) \\ du(t)/dt &= -\beta \times u(t) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $x(t)$ を乾燥時刻 t における水分減少量を乾燥前の水分量で除して正規化したものとする。このとき、脱水速度 $dx(t)/dt$ は式(4)中の第1式に示すように、 $u(t)$ および $v(t)$ の二つの成分の和として表現できる。 $u(t)$ は一定速度の脱水速度成分を表わしている。 $v(t)$ は乾燥初期において原料魚の水分含量が大きいことによる過渡的で急激な脱水速度成分であり、急速に減衰するものである。基本的には乾燥経過時間に無関係な一定の脱水速度成分と考えることができるが、(4)式中の第3式のよ

Table 4 Appearance judged by expert's view with storing period and material fish
Drying conditions (Averaged over 44 hours);
Temperature=18.6°C, Relative humidity=51.0%, Wind flow rate=3.21 m/s

Rank	Storing period			Nature of fish body (Average)		
	Fresh (%)	7 days (%)	Above 10 days (%)	Total length (mm)	Weight (g)	Fatness
1	—	—	—	—	—	—
2	—	14.0	89.1	108	9.19	11.73
3	43.1	86.0	10.9	121	13.2	11.80
4	56.9	—	—	123	13.7	11.80
5	—	—	—	—	—	—

Fig. 8 Schematic of the authors' proposing control system for fish drying

うな時変表現(減衰係数 $\beta > 0$ は, $\alpha > 0$ に比して十分小さい)を用いるのは, より正確に脱水過程をモデル化できるからである。すなわち, 原料魚の水分含量は有限であるため, 最終的には脱水速度は 0 にならなければならないことを考慮したものである。なお, (4) 式の定式化を用いて, 時刻 t における乾燥速度を,

$$\text{乾燥速度} = |dx(t)/dt|$$

と定義する。このようにして乾燥中の原料魚の重量変化から乾燥速度を推定でき, このことを用いて, 目標のかたさの製品に仕上げるものである。本モデルのパラメータの推定方法に関する詳細な説明は文献 7) に譲る。

4.2 実験結果と推定結果の比較

3 章で得た実験結果と本システムの処理で得たシミュレーション結果の比較について述べる。

(1) 乾燥前の体重の変化率の推定

ファジィ推論を用いて希望する製品のかたさに対応する体重の変化率を推定する。Fig. 10 は堅干しおよび生干しの体重の変化率を推定するために用いるメンバシップ関数の構成を示す。堅干しの原料魚には通常小型のもの, ウルメイワシでは全長で 120 mm 程度までのものが使用される。よって, 堅干しの前件部変数には原料魚の全長, 体重, 希望する製品のかたさの程度を, また, 後件部変数には製品に至る体重の変化率を用いる。一方, 生干しは体格の制限がないことから, ここでは大型の原料

魚を想定して, 堅干しの前件部変数の体重に変えて, 肥満度を用いる。すなわち, ファジィ規則は,

堅干し: If (Total length is ZR) and (Weight is NS) and (Degree of dryness is N) then (Change in weight is NS)

生干し: If (Total length is PS) and (Fatness is NS) and (Degree of dryness is P) then (Change in weight is ZR)

のような構成となる。各変数のメンバシップ関数の形状は三角型とし, 関数のグレード値と台集合の幅は分析と実験結果および熟練者の評価結果から設定した。すなわち, 堅干しの場合では, まず前件部変数である全長の各関数のグレード値と区間を設定し, つぎにこれらの各関数の最大グレード値と最小のグレード値に対応する体重を試料魚から求めて, これを以て体重の各関数を構成した。また, 後件部変数の体重の変化率の関数の形状は, 実験で製造した製品のうち熟練者のかたさの評価を得た試料魚の評価時の体重の変化率とその評価結果をもとに構成した。なお, 若干し各変数の関数の形状も同様の展開で求めた。ファジィ規則は熟練者の経験則をもとにして種々設定した。確定演算方式は min-max 重心法を用いた。

また, シミュレーションには, 乾燥実験で得た 24 時間および 28 時間の経過時での実際の熟練者のかたさの評

価結果の平均値を、希望する製品のかたさの程度に置き換えて用いた。すなわち、おのおのの経過時での製品のかたさの程度として、堅干しの場合に 2.67 と 2.89 を、生干しの場合に 2.54 と 2.82 を用いた。

Table 6 に体重の変化率の実験値と推定値を比較した結果を示す。堅干しの推定値は実験結果とよく一致しており、24 時間および 28 時間の時点での実験値との差はともに約 1% 以内である。一方、生干しではそれぞれ

2.7% と 2.3% であり、堅干しの場合と比較すると大きい。この差は、原料魚の個体差、すなわち、Fig. 3 に示すように全長が増すにつれて体重の分布の幅が増大する傾向に由来しているものと推察される。したがって、より確度の高い推定を行うためには、大きな原料魚の全長の区間のさらなる分割と、それに伴うメンバシップ関数およびファジィ規則の改良が必要である。

(2) 所要乾燥時間の推定

実験結果と Table 5 に示すモデルを用いて所要乾燥時間を推定した結果を比較したものを Table 7 に示す。モデルの説明変数、すなわち原料魚、目標とする体重の変化率および乾燥条件の値は Table 6 に示すものを用いた。よって、期待する所要乾燥時間は 24 時間と 28 時間とした。堅干し推定値は期待する所要乾燥時間とよく一致しており、その差は約 22 分以内である。一方生干しでは、28 時間のもので約 1 時間程度の差が生じており、堅干しの場合と比較すると大きい。これは、対象となる原料魚の全長に大きな幅があるためと思われる。したがって、より確度の高い推定を行うには、全長の範囲をさらに分割する必要がある。

(3) 乾燥中の体重の減少率の推定

体重の減少率の実験値と (4) 式のモデルで得た推定値を比較した結果を Table 8 に示す。実験値は試料魚を 28 時間乾燥し、4 時間間隔で得た体重の減少率の平均値を示している。モデルのパラメータは $\alpha=0.444$, $\beta=0.025$, $u(0)=0.956$ および $v(0)=3.606$ とした。実験値と推定値の差は約 0.2% 以内であり非常に一致している。よって、ロード・セルなどを使用して乾燥中の原料魚の体重の変動をオンラインで測定し、本モデルを用いて体重の減少率を推定することで乾燥速度を求め、乾燥前の処理で見積もった所要乾燥時間との差違を算出し、その差違に応じて乾燥条件を適宜修正することで、見積もった所要乾燥時間で任意の乾燥度に到達することが可能となる。

5. 結 言

水産乾製品の生産企業が抱える労働力不足、後継者不

Fig. 9 Procedure of drying time estimation before drying

Table 5 Constant and partial regression coefficient of multiple regression analysis models
Multiple correlation coefficient; 0.978 (Class 70-119), 0.747 (Class 120-189)

Class	Constant	Partial regression coefficient						
		Total length	Weight	Fatness	Change in Weight	Temperature	Wind flow rate	Relative humidity
70-119 (mm)	85.2**	0.0338 [0.0529]	0.457** [0.160]	—	-36.0** [-0.416]	-1.40** [-0.418]	6.30** [0.261]	-0.896** [-0.825]
120-189 (mm)	-2.91	0.209** [1.30]	—	3.89** [0.633]	-56.0** [-2.18]	-0.654** [-0.500]	1.68* [0.195]	-0.177** [-0.545]

*; Significant at 5% at level, **; Significant at 1% level, [] ; Normalized partial regression coefficient

(a) Total length [mm]

(b) Weight [g] or Fatness

(c) Degree of dryness

(d) Ratio of change in weight

Fig. 10 Example of membership functions () ; Namaboshi

足の問題の解決の一助となるべく、新しい乾燥制御システムの開発を目指した。

本研究では、まず熟練者の乾燥の手続きに着目して、対話と観察で熟練者の専門的技術・知識の組立を整理するとともに、プロセスの自動化に有用となり得る各種の指標を検索した。つぎに、検索した各指標の有用性を分析と実験により検討した。さらに、熟練者の所要乾燥時間の推定ならびに乾燥条件の修正の手続きに相当する乾燥制御システムの構成について検討した。その結果、熟練者の乾燥の手続きを原料魚、乾燥方法ならびに製品の三つの項目に分割して検討することで、基本的なシステムが構築できることを示した。

本システムでは、原料魚の全長、体重または肥満度を確認指標として、乾燥室の温度と風速を制御指標として、また製品のかたさと外観を評価指標として用いている。

Table 6 Simulation results to infer the change in weight applying fuzzy inference

Nature of fish body (Averaged) and drying conditions (24-hour, 28-hour) ;

[Kataboshi] :

Total length=97.0 mm, Weight=6.77 g

Number of samples=250

Temperature=18.9°C, 18.8°C

Relative humidity=54.5%, 50.6%

Wind flow rate=3.15 m/s, 3.13 m/s

[Namaboshi] :

Total length=160.1 mm, Fatness=12.45

Number of samples=220

Temperature=20.3°C, 20.1°C

Relative humidity=45.5%, 39.7%

Wind flow rate=3.09 m/s, 3.15 m/s

Drying time (h)		24	28
Kataboshi	Experimental value	0.347	0.329
	Inferred value	0.343	0.339
	Error	-0.004	0.010
Namaboshi	Experimental value	0.683	0.662
	Inferred value	0.710	0.685
	Error	0.027	0.023

Table 7 Simulation results to estimate the drying time applying multiple regression analysis models

Required drying time (h)		24	28
Kataboshi	Estimated value	23.63	27.79
	Error	-0.37	-0.21
Namaboshi	Estimated value	24.59	27.03
	Error	0.59	-0.97

すなわち、本システムは乾燥前に用いる原料魚の確認指標などから、目標とする製品のかたさの程度に相当する体重の変化率、すなわち製品の評価指標を推定し、次いで所要乾燥時間の推定と乾燥開始時の乾燥条件を設定する。また、乾燥中には原料魚の乾燥速度を逐次求めて、乾燥前に見積もった所要乾燥時間で乾燥が終了するように、乾燥の制御指標、すなわち乾燥条件を適宜修正する。

ところで、塩干品に限ったことではないが、水産乾製品は原料魚の調理の形態により、魚体を加工せず使う丸干しと、開いて内臓を除去して使う開き干しに大別される³⁾。本研究では、製品の対象として丸干しを取り扱った。現在、著者らは開き干しの対象としてマアジとサヨリについても同様の検討を試みているが、ほぼ丸干しの場合と同様の展開でシステムを構築できる見通しをたてている。また、製品の外観は原料魚の光沢の変化ならびにしわの形成状態を監視することで、熟練者の作業に相当する自動化処理が可能なることを示した。製品の外観は商品価値のみならず、かたさや品質に対応していることがわかったので、自動化の観点からさらに検討を深めたい。

最後に、熟練者の培った専門的技術・知識は実に巧み

Table 8 Simulation results to predict the weight decrease applying the equations(4)

Drying conditions (Averaged over 28 hours);

Temperature=19.5°C, Relative humidity=51.8%, Wind flow rate=2.85 m/s

Nature of fish body (Averaged over 157 samples);

Total length=171.6 mm, Weight=40.2 g, Fatness=12.67

Drying time (h)	0	4	8	12	16	20	24	28
Experimental value (%)	0.00	10.50	14.70	18.10	20.80	23.20	25.60	27.40
Predicted value (%)	0.00	10.45	14.79	18.07	20.79	23.24	25.45	27.42
Error	0.00	0.05	-0.09	0.03	0.01	-0.04	0.15	-0.02

に組み立てられている。よって、プロセスの自動化を進めるにあたっては、開発者と熟練者がともに、分析、実験ならびに評価を繰り返し、自動化に必要な要素や方法を見定めてゆくことが大切であるとする。

本研究は、平成 3, 4 年度にかけて通商産業省の補助を受けて山口県が実施した、地域人材不足対策技術開発事業に基礎を成すことを記す。熟練者として実験に多大な協力を頂いた。国近商店(株)国近一行会長ならびに国近忠雄社長、同じく、プロジェクトの一員として多くの示唆を頂いた水産大学校製造学科河内正通教授ならびに学科の各氏、山口大学工学部高浪五男教授、トガイインフラロジック(株)戸貝正喜会長、山口県工業技術センター諸木保彦所長ならびに佐伯和正氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 中村, 藤井, 石川: マイワシの乾製品に関する研究 I, 東海水研報, 95, p 76 (1978)
- 2) M. Nakamura, T. Shiragami and Y. Sakai: A Study on Intelligent Fish-Drying Process Control System, Proc. of the KACC, 132/137 (1993)
- 3) 木村進編集: 乾燥食品辞典, 370/373, 朝倉書店(1984)
- 4) 科学技術庁資源調査会編集: 四訂日本食品標準成分表, p. 322, 大蔵省印刷局(1982)
- 5) 水産庁研究部研究課編集: 昭和 59 年度魚介類有効栄養成分利用技術研究成果の概要, 67/210(1985)
- 6) 水産庁研究部研究課編集: 昭和 60 年度魚介類有効栄養成分利用技術研究成果の概要, 77/336(1986)
- 7) 水産庁研究部研究課編集: 昭和 61 年度魚介類有効栄養成分利用技術研究成果の概要, 69/348(1987)
- 8) 水産庁研究部研究課編集: 昭和 62 年度魚介類有効栄養成分利用技術研究成果の概要, 87/521(1988)
- 9) Y. Sakai, K. Wada and H. Nakamura: Modeling and Parameter Estimation of a Fish-Drying Control System, Proc. of the KACC, 440/445 (1992)
- 10) Y. Sakai, M. Nakamura, T. Shiragami and M. Kochi: An Experimental Analysis and Expertise for a Fish-Drying Process Control, Proc. of the KACC, 118/123 (1992)

[著 者 紹 介]

中 村 誠 (正会員)

1979 年, 山口大学工学部電子工学科卒業。同年小野田セメント(株)勤務。83 年山口県技術吏員, 山口県工業技術センター勤務。93 年山口大学大学院工学研究科博士後期課程入学, 現在に至る。知的制御システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会, 日本ファジィ学会, 日本食品工業学会などの会員。

国 本 正 彦

1975 年, 北海道大学水産学研究科博士課程修了。同年東海物産(株)勤務。85 年農林水産省水産大学校製造学科講師, 90 年同助教授。食品加工への微生物機能の利用に関する研究に従事。日本水産学会の会員(水産学博士)。

白 上 貞 三

1969 年, 福岡大学工学部機械工学科卒業。同年山口県商工指導センター研究員。88 年山口県工業技術センター電子応用室長, 現在に至る。射出成形における計測・制御システムの研究に従事。日本機械学会, 精密工学会, 人工知能学会などの会員。

酒 井 義 郎 (正会員)

1976 年, 大阪府立大学大学院工学研究科博士課程修了。同年山口大学工学部助手。講師を経て現在助教授。88 年 7 月~12 月, 文部省短期在外研究員。知的なマン・マシンインタフェースの研究に従事(工学博士)。