魚類乾燥プロセスにおける乾燥制御の一方法[†]

中 村 誠*・藤 本 正 克*・酒 井 義 郎**

Drying State Regulation Method for Fish-Drying Process

Makoto NAKAMURA*, Masakatsu FUJIMOTO* and Yoshiro SAKAI**

Proposed in this paper is a control method based on skilled worker's performance during drying in fish-drying process, which utilizes prediction of the state of material at the end of drying and regulation of drying conditions to attain the prescribed goal before drying. Experimental results showed the usefulness and the applicability of the present method.

Key Words: fish-drying process, drying state regulation method, prediction during drying

1. はじめに

水産乾製品の製造現場では、乾燥工程が梱包、貯蔵ならびに発送などの後工程の計画に直接大きく影響することから、乾燥工程に係わる時間管理、特に乾燥中の被乾燥物の脱水速度と乾燥条件の厳密な管理が重要となる。

著者らは前報¹⁾で、熟練者の乾燥の手続きに相当する処理を組み込んだ魚類乾燥制御システムの基本構成を検討し、実用化に向けてシミュレーションでその有用性を確認した。そこで本稿では、前報で報告した基本構成を基に、乾燥中における乾燥条件の調整法と実用的な処理系の構成について検討を加え、試作したバッチ型の乾燥機²⁾を用いた実験によりその有用性を検証³⁾する。

2. 乾燥条件の調整と処理

前報のシステムは乾燥前と乾燥中の二つの処理系で構成される。乾燥前の処理系は製品にみあった原料魚の乾燥率の推定値(乾燥率目標値 RW_{e0} とよぶ)、乾燥条件の初期値および所要乾燥時間の予測値 Time を求めて制御系に出力する。また乾燥中の処理系は、乾燥終了予定時刻の乾燥率 RW_{ei} を推定して乾燥条件を調整し、製品の仕上げを目指す。ここに、時刻 t における乾燥率 RW_t は原料魚の重量 W_t を乾燥前の重量 W_0 で除した値で定義するものであり、脱水率 DW_t と $DW_t = 1 - RW_t$ の関

係にある。

水産乾製品の仕上げは乾燥の進行とともに脱水速度が減少を続ける減率乾燥期に行われる。減率乾燥期には脱水速度が急激な減少傾向を呈する期間と、その後の緩やかな減少傾向の期間(以下、それぞれ第1段、第2段という)があり、脱水速度が時々刻々と変化することから、乾燥中の乾燥条件の調整はこれらを十分考慮する必要がある。一般に開き干し製品の仕上げは第1段で、また、丸干し製品では第2段までで行われる。本稿では、イワシ類の丸干し製品を対象として乾燥条件の調整方法を述べる。

Fig. 1 はカタクチイワシの丸干し製品を冷風乾燥法で製造した 48 時間の乾燥過程について、試料魚を全長別に分類して含水率 W_f と脱水速度 dDW/dt の関係性を求めた乾燥特性曲線を示す。脱水の進行は乾燥開始から約 3 時間までの第1段と、それに続く曲線的な変化が顕著な期間(遷移期とよぶ)を経て、約 10 時間前後から第2段に移行している。また、遷移期では大型の魚ほど脱水速度の変化の程度が大きい。製造現場では大型の原料魚も多く扱うため、この遷移期における乾燥条件の調整は有用

Fig. 1 Drying curves of 3 groups of anchovy

[†] '94 Korean Automatic Control Conference で一部発表 (1994・10)

* 山口県工業技術センター 山口市朝田湯垣 585-1

** 山口大学工学部 宇部市常盤台 2557

* Industrial Technology Institute, Yamaguchi Prefectural Government, Yamaguchi

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube (Received December 27, 1994)

(Revised March 2, 1995)

となる。そこで乾燥中の処理系では、乾燥前の処理系で設定する乾燥条件を初期値として、まず第1段の乾燥にこれを適用し、つぎに遷移期と第2段の期間で乾燥条件を調整する。

乾燥条件の調整は以下の方法で行う。

Step 1 調整時刻までの乾燥時間を9分割し、ロードセルで端点を含む計10点の時刻で原料魚の重量 W_t [g] を測定して、それらの時刻の脱水率 DW_t を計算する。

Step 2 (1)式で乾燥終了予定時刻における脱水率 DW_{ei} を推定する。

$$DW_{ei} = u(1 - e^{-\beta t}) / \beta + v(1 - e^{-\alpha t}) / \alpha \quad (1)$$

ここで、パラメータ u は一定速度の脱水速度成分、 v は過渡的な脱水速度成分、 α , β はそれぞれ減衰係数を表わし、これらの値はつぎの α - β 解法^{1),4)} で順次推定する。

① α , β の最大値と最小値を組み合わせた4点 $P(\alpha_{\min}, \beta_{\min})$, $Q(\alpha_{\max}, \beta_{\min})$, $R(\alpha_{\min}, \beta_{\max})$, $S(\alpha_{\max}, \beta_{\max})$ から成る α , β の探索域と、 α の収束値 α_{con} を設定する。

② (1)式に各点の α , β の値と脱水率 DW_t を代入して、最小二乗法で u , v の仮値 u_{tem} , v_{tem} を求める。

③ (1)式に u_{tem} , v_{tem} , 脱水率 DW_t を代入して、最小二乗法で α , β の仮値 α_{tem} , β_{tem} を求め、 $Z(\alpha_{\text{tem}}, \beta_{\text{tem}})$ 点を構成する。 P , Q , R , S の各点の中から Z 点への最短距離の点を選択し、この点を基準に α , β の探索域を縮小して α , β の最大値と最小値を更新する。

④ $\alpha_{\max} - \alpha_{\min} \leq \alpha_{\text{con}}$ となるまで②と③を繰り返し、収束時の α , β を(1)式に適用するものとする。(1)式に求めた α , β , 脱水率 DW_t を代入して、最小二乗法で適用する u , v を求める。

Fig. 2 Flowchart of the present control method

Step 3 乾燥率 RW_{ei} を算出し、これと乾燥率目標値 RW_{e0} との偏差に応じてファジィ推論で乾燥温度の調整値 ΔTE_i を求める。ファジィ規則の基本形は(2)式に示す速度型とし、確定演算方式には min-max 重心法を用いる。

If E_i is A_i and ΔE_i is B_i then ΔTE_i is C_i

$$(i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ここで、 $E_i = RW_{e0} - RW_{ei}$, $\Delta E_i = E_i - E_{i-1}$, $\Delta TE_i = TE_i - TE_{i-1}$ であり、 TE_i は調整時 i における乾燥温度の目標値を表わす。 A_i , B_i , C_i はファジィラベルである。

各調整時刻で以上の処理を繰り返すことで、乾燥前に予定した所要乾燥時間 Time で製品を得る (Fig. 2)。

3. 実験および考察³⁾

試料魚はカタクチワシの冷凍品 250 尾を約 4% の食塩水に浸漬した後、軽く水洗して用いた。製品は丸干しの生干しとした。Table 1 に試料魚の体格の平均値と乾燥前の処理系で設定した乾燥条件の初期値を示す。なお、乾燥率目標値 RW_{e0} は前報のファジィモデルの構成を基本に、希望する製品のかたさの程度を平均 2.9 (通常のかたさ 3.0 からやや柔らかめ) と定めて 0.459 と推定した。また、所要乾燥時間 Time [h] は、説明変量を全長 LE [mm], 肥満度 FA [1000·g/cm³], 乾燥率 RW , 乾燥温度 TE [°C], 風速 FL [m/s] および湿度 HU [%] として重回帰分析を行って得た、(3)式に示すモデルで 38 時間と予測した。

$$\text{Time} = 56.493 + 0.062 \ 0 \ LE + 4.480 \ 3 \ FA$$

$$- 89.02 \ RW - 1.415 \ 4 \ TE - 0.615 \ 2 \ FL$$

$$+ 0.004 \ 9 \ HU \quad (3)$$

Fig. 3 Change in relative weight with elapsed drying time and parameters of Eq. 1 estimated in process

Table 1 Experimental conditions

Nature of fish boody		Drying conditions			
Total length (mm)	Fatness (1000·g/cm ³)	Temperature (°C)	Air flow rate (m/s)	Relative humidity (%)	Direction of air flow
126.1	10.26	21.0	3.00	30.0	Fixed

Table 2 Estimated relative weight and regulated drying temperature

Time (h)	Relative weight		Temperature(°C)
	Inferred value	Error	
5	0.454	0.005	21.0
10	0.393	0.066	18.8
24	0.439	0.020	18.3

Table 3 Effectiveness of the present drying control method

	Dryness	Relative weight
Target before drying	2.9	0.459
Result obtained	2.91	0.455
Error	-0.01	0.004

乾燥法は乾燥機²⁾を用いて冷風乾燥法を適用し、乾燥温度は遷移期で1回、続いて第2段で2回調整した。(1)式の減衰係数 α , β の探索域の初期値はそれぞれ0.20~1.50, 0.02~0.15, また収束値 α_{con} は 5×10^{-5} とした。

Fig. 3は試料魚の乾燥率 RW_i (Relative weightと記す)の経時変化と乾燥温度の調整時刻ならびに各調整時刻で推定した(1)式のパラメータの値を表わす。また**Table 2**は同時刻に求めた乾燥率 RW_{ei} の平均値と乾燥率目標値 RW_{e0} との偏差, ならびに(2)式で調整後の乾燥温度の目標値 TE_i を示す。**Table 2**が示すとおり, 乾燥率の偏差は10時間経過時のものが大きい。これは, 試料魚の魚肉成分に占める脂質含量が乾燥前の見込みより低かったことか, あるいは, 5時間経過時からこの間に乾燥を促進する何らかの外乱の影響を受けたため, 脱水速度が速まったことに起因する。この推定により, 制御システムは乾燥の進行が遅れるよう乾燥温度 TE_i を調整してこれらの影響を効果的に抑制している。このことは24時間経過時での乾燥率の偏差が減少していることから説明され, 適切な処理が行われたことを示している。

Table 3に乾燥前に期待した製品のかたさの程度と乾燥終了時の熟練者の評価値を, また乾燥率目標値 RW_{e0} と実測値を比較した結果を示す。熟練者の評価値は製品のかたさを評価するカテゴリーとして, “非常に柔らかい, やや柔らかい, 通常のかたさ, やや硬い, 非常に硬

い”の五つを定めてそれぞれを1~5に数値化し, 熟練者が触手で分類した結果の重心を求めたものである。乾燥率目標値 RW_{e0} に対し実測値がきわめて精度良く得られている。また期待した製品のかたさの程度と評価値もよく一致しており, 本方式の有用性を示している。

4. おわりに

前報で述べたとおり, 熟練者は乾燥中に数回乾燥の進行状態を確認し, 必要に応じて乾燥条件の調整や乾燥終了時刻の変更をする。本稿では, この手続きを工程の時間管理の観点からとらえ, 乾燥条件の調整方法と実用的な処理系について検討し, その有用性を実験で確認した。

今後は, より円滑な工程管理を目指して意思決定支援システムの構築について研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 中村, 国本, 白上, 酒井: 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, 計測自動制御学会論文集, **30**-7, 861/870 (1994)
- 2) M. Nakamura, et al.: An Automated Drying Room for Industrial Use Equipped with Inference and Prediction System, Proc. of 10th ISPE/IFAC Int. Conf., Ottawa, Canada, 559/564 (1994)
- 3) M. Nakamura, et al.: A Fish-Drying Control Method Based on Skilled Worker's Performance, Proc. of '94 KACC, Taejeon, Korea, 379/384 (1994)
- 4) Y. Sakai, et al.: Modeling and Parameter Estimation of a Fish-Drying Control System, Proc. of '92 KACC, Seoul, Korea, 440/445 (1992)