

## 技術論文

# ニューラルネットワークを用いた煮繭エキスパートシステムの開発

謝瑞娟<sup>1)</sup> 徐回祥<sup>1)</sup> 趙東標<sup>2)</sup> 森川英明<sup>3)\*</sup> 王建民<sup>1)</sup>

1) 蘇州大学材料工程学院, 中華人民共和国・江蘇省蘇州市干将路178号

2) 南京航空航天大学機電学院, 中華人民共和国・南京市御道街29号

3) 信州大学繊維学部, 〒386-8567長野県上田市常田3-15-1

(平成20年8月31日受領)

## Development of an Expert System for Cocoon Cooking by using Neural Network Technology

Xie Ruijuan<sup>1)</sup>, Xu Huixiang<sup>1)</sup>, Zhao Dongbiao<sup>2)</sup>, Hideaki Morikawa<sup>3)\*</sup> and Wang Jianmin<sup>1)</sup>

The cocoon-cooking process is an important contributor to producing high-quality raw silk, but it is difficult to set its conditions. We have attempted to develop a system for optimizing the processing conditions of a cocoon-boiling machine by using an expert system and a neural network running a Back Propagation Algorithm. This expert system works under the Windows OS. The information it requires includes the silkworm rearing period, weight of cocoons, reelability percentage, breakage rate of reeling thread, and knots. We carried out cocoon-boiling experiments to obtain fundamental data, which we fed into the neural network. The results showed that our system can achieve better boiling conditions than achievable using conventional techniques.

(\*: To whom correspondence should be addressed, E mail: morikaw@shinshu-u.ac.jp)

**Key Words:** cocoon cooking, expert system, neural network, optimization, reeling

### 1. 緒言

煮繭工程は、製糸において重要なプロセスであり、生糸の品質、生産能率、収率（糸歩）等と深く関係している。一方で煮繭工程は、原料繭特性や生産環境、煮繭技術者の経験・技能など、多くの要素に依存しており、各製糸工場では参考にできる特定の煮繭条件を有しているわけではない。これら煮繭条件の設定については、各製糸工場が実際の煮繭工程（あるいは試験的生産）の中で模索しているのが現状である。これら煮繭工程に関与する因子には煮繭技術者の経験が特に重要となることから、煮繭エキスパートシステムの研究が重要視されている。これまで大浦・清水<sup>1)</sup> (1993) や木下ら<sup>2-8)</sup> (1988, 1990, 1991, 1993, 1996, 1997) は、多変量解析を用いた煮繭関連因子間の関係性を踏まえた上で、ファジィ理論を用いた煮繭エキスパートシステムの構築を行っている。筆者らも 1995 年ごろから煮繭エキス

パートシステムの研究を進めてきたが、当時のプログラムは Prolog で書かれていること、また一定のルールだけにももつづく単純なモデルを採用していたことから、その効果には限界があった（謝瑞娟ら<sup>10)</sup>, 1999）。本研究では、原料繭特性、生産環境、生糸品質特性の情報をもとに、ファジィ理論、ニューラルネットワークの技術を用いて最適な煮繭工程条件を与えるエキスパートシステムの開発を行った。このシステムではまず原料繭のファジィ分類を効果的に行い、さらに煮繭機制御への入力パラメータと出力パラメータの適当な写像関係（Mapping relation）をニューラルネットワークの学習機能を用いて得ることにより、最適で迅速な煮繭工程条件設定が可能になると考える。

### 2. 煮繭エキスパートシステムの処理フロー

本研究で構築した煮繭エキスパートシステムの

フローチャートをFig. 1に示す. 煮繭エキスパートシステムの入力情報としては, 原料繭荷口の特性(蚕期, 繭の重さ, セリシン溶解率など), 目標とする生糸品質特性(解舒率, 小節, 大節, 糸故障数(生糸 10,000mあたりの糸故障数), 糸歩など)であらわし, 煮繭の状態は, 小節, 大節, 糸故障, 糸歩等により評価する. 生産環境因子としては, 製糸用水の硬度, アルカリ度, pH等を用いた.

また原料繭の荷口が変わると, 煮繭機各部の設定温度も変える必要があるが, 試験的に2~3日間生産して得た繰糸成績をフィードバックし, 最終的に煮繭機各部の適正な温度条件を設定している. ここで2~3日間にわたって試験的に生産することを試験生産と呼ぶ.

### 3. ファジィ理論による原料繭特性の評価

製糸プロセスの評価は, 生糸の品質, 収率, 生産効率等の状況を総合的に考えなければならない. 一方, 生糸品質, 収率, 生産効率に関係する指標は多く, ある指標は煮繭工程に直接関係し, 織度偏差など他の指標は繰糸工程また原料繭特性に強く関係している. 製糸工場においては, 繰糸工程の最適な生産条件を決定することはできるが, 煮繭工程は原料繭特性によって変化することから, 原料繭の特性を正しく評価することが重要である. 煮繭工程に

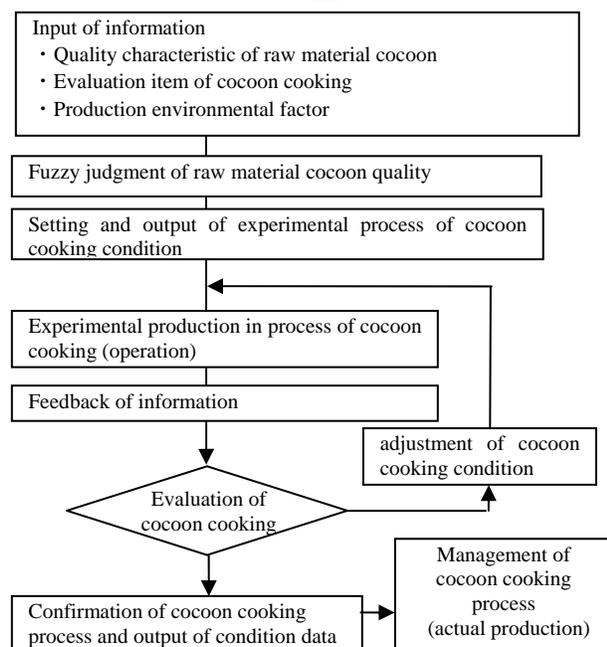


Fig. 1. Processing flow chart of cocoon cooking expert system

関する指標には, 生糸品質を反映する小節, 大節と生産効率を反映する糸故障数, 解舒率, 原料繭の歩留を反映する生糸収率(糸歩)が特に重要と考えられる. これら5つの指標(小節, 大節, 糸故障数, 解舒率, 生糸収率(糸歩))から, どのようにして繭の品質特性を評価するかは, よく検討しなければならない. 一般的に, 複数の指標に対して総合評価することは困難であるが, ファジィ理論は多因子により総合評価できることから, 本研究では最適な煮繭工程の目標値から出発し, ファジィ理論によって原料繭品質の総合評価を行った.

ファジィ理論に基づいて, まず繭品質の指標集合(Index set)を,  $U = \{\text{小節, 大節, 解舒率, 糸故障数, 生糸収率}\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ , さらに原料繭特性のコメント集合(Comment)を,  $V = \{\text{優, 良, 合格, 不合格}\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ と定義する. 次に各原料繭荷口の品質特性に基づいて, Fig. 2に示すようなメンバシップ関数(Membership function)を設定した.

原料繭品質の指標の重要性に応じて, 因子の重み付け(Weight)が異なることから, ここでは小節, 大節, 糸故障数, 解舒率, 生糸収率(糸歩)の5つの指標の重み付けを,  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ として可変とする. ある原料荷口の繭について, 5つの指標のデータを入力し, メンバシップ関数を使ってマトリックス  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ を計算する. これを元に原料繭荷口の等級  $V$ を, 次式で算出する.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i k_i}{k_i}$$

### 4. ニューラルネットワーク技術の応用

#### 4.1 ニューラルネットワーク技術を採用したエキスパートシステムの機能と構造

ニューラルネットワークを導入することによって, これまでのエキスパートシステムの構造を根本的に変えることができた. ニューラルネットワークは, 情報記憶(Information storage)と統一処理の両特性を持つネットワークである. ニューラルネットワーク技術を採用したエキスパートシステムには, 知識の蓄積と解答を求める過程における推論過程を, このニューラルネットワークモジュール部分で行っている. このようなニューラルネットワーク技術を導入したエキスパートシステムの機能と構造をFig. 3に示す.

このニューラルネットワーク型のエキスパートシステムのオペレーション(Operation)は, 二段

階に分割できる．第1の段階は，自己学習 (Self-learning) 段階で，システムは専門家の経験と実例に基づいて，ニューラルネットワーク中の重み付け (Weight) を調整し，システムの希望の入力・出力要求に適応させる．第2の段階は応用段階で，これはシステムが外部の反応によって記憶情報の転換操作を実現し，システムの入力に対して適正に応答する過程である．

#### 4.2 バックプロパゲーション法 (BP 法)

ニューラルネットワークは神経科学を基礎とした情報理論であり，大量の処理ユニットが互いにつながってネットワークを構成し，さらに学習機能を持つことでシステムの最適化を行う手法である．本研究では，ニューラルネットワーク手法のうち，階層型の一学習法であるバックプロパゲーション法 (Back Propagation Algorithm: 誤差逆伝搬法) を用いた．この BP 法は，出力層に対して正しい解答 (希望する出力) を情報として伝達し，さらにその情報と実際の出力との誤差を最小になるように，最急降下法を用いて入力層における結合の重み付けを変更する手法である．3層の BP 法ニューラルネットワークの構造を Fig. 4 に示す．この場合 BP ネットワークは，入力層・中間層・出力層から構成される．

ただし BP 法によるニューラルネットワークは，非線形写像 (Nonlinear mapping) の処理能力は非常に高いが，実際に応用するにはいくつかの欠点もある．本研究では，BP 法の計算上の欠点をなくし改良 BP 法 (Levenberg-Marquardt 計算法: LM 法) を利用した．改良 BP 法は，ガウス-ニュートン法 (Gauss-Newton Method) の局所的収束性と最急降下法 (Gradient Descent Method) の特性を持ち合わせており，結果の安定性が向上する．またネットワークは，各トレーニング段階で得られた残差が，期待される残差以下に達した場合，あるいはトレーニングが設定された最大回数に達するまで計算を繰り返すようにした．

#### 4.3 改良 BP 法を用いた検証実験

ある製糸工場の煮繭工程データをもとに，簡単な3層ニューラルネットワークを用いて最適化を行った．この検証実験では，出力に影響する諸因子から，原料繭の品質特性，蚕期，煮繭工程の浸透方法の3つの入力変数を選択した．また原料繭の品質特性は，前述のファジィ・ジャッジメント (Fuzzy judgment) に基づいて得た評価結果を用いた．

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 89 \\ 2\left(\frac{x-89}{6}\right)^2 & 89 < x \leq 92 \\ 1 - 2\left(\frac{x-94}{4}\right)^2 & 92 < x \leq 94 \\ 1 & x > 94 \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 94 \\ 2\left(\frac{x-94}{6}\right)^2 & 94 < x \leq 97 \\ 1 - 2\left(\frac{x-98}{2}\right)^2 & 97 < x \leq 98 \\ 1 & x > 98 \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 50 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{x-50}{10}\right)^2 & 50 < x \leq 60 \\ 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x-70}{10}\right)^2 & 60 < x \leq 70 \\ 1 & x > 70 \end{cases}$$

$$\mu_4(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 2.5 \\ 1 - 2(x-2.5)^2 & 2.5 < x \leq 3.0 \\ 2\left(\frac{x-4}{2}\right)^2 & 3.0 < x \leq 4.0 \\ 0 & x > 4.0 \end{cases}$$

$$\mu_5(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 33 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{x-33}{3}\right)^2 & 33 < x \leq 36 \\ 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x-40}{4}\right)^2 & 36 < x \leq 40 \\ 1 & x > 40 \end{cases}$$

Fig. 2. member function for evaluating raw cocoon material

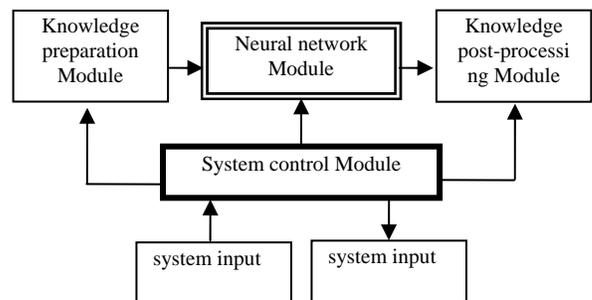


Fig. 3. Structure of Expert System that introduces neural network technology.

出力変数としては、煮繭機の回転速度、煮繭の蒸気圧、真空度、吸水のための温度、真空操作回数、繭の浸漬温度、高温浸透部の圧力、低温浸透部の温度、吐水温度、蒸煮部の温度（蒸気圧を指標として使用）、調整前部・調整中部・調整後部の各温度、煮上部の温度、バスケット中の繭量の計14個である。システム操作画面の一部をFig.4~7に示す。

・基本情報の入力 (Fig. 4) : 本事例における入力項目には、「飼育季節(蚕期)」に中秋, 「500gあたりの繭数」は697粒, 「糸故障数」(一粒繰糸にて一万メートルの繭糸を繰った際の糸故障回数)は2.58回, セリシン溶解率は4.5%とした。また小節点の成績は94.5点, 中節点の成績は97点, 乾繭糸歩は42%である。本システムでは, 原料繭品質の優劣判断方法としてファジィ・ジャジメントによる方法と解舒率による方法を用意している。ここではファジィ・ジャジメントを選択し「繭品質の優劣判断」というボタンをクリックすることで前述のメンバシップ関数に基づき評価を行う (Fig. 4の場合は「優」を表示)。

・煮繭工程の設定値 (Fig. 5) : 与えられた情報に元, 最適な煮繭工程設定条件が提示される。例えば, 「ウォームの回転速度」106rpm, 「真空吸水温度」29℃, 「浸漬部温度」66℃, 「高温浸透部の蒸気圧」0.0MP (真空吸水だから, 高温浸透部に蒸気は使わない), 「低温部の吸水温度」54℃, 「熟成部の蒸気バルブ1のオープン方向の回転数(範囲: 0~3)」2.05, 「バルブ2の回転数」1.17, 「調整部1の煮繭湯温度」60℃, 「調整部2の煮繭湯温度」50℃, 「調整部3の煮繭湯温度」40℃, 「調整部4の煮繭湯温度」30℃, 「煮上部温度」29℃などの出力データ (煮繭工程の設定値) が表示される。さらにここでは, 飼育季節に中秋, 職場は第二自動繰糸工場, 煮繭工程の浸透方法は真空浸透等を入力し, “煮繭工程シート” ボタンをクリックすることにより, 入力情報に基づいて煮繭工程の (最適) 設定条件が提示される。もし, 煮繭による生糸品質の改良について注力すべき項目がある場合は, 対応する項目 (小節, 大節, 糸故障数, 糸歩) を選定してから, “煮繭工程シートを調整する” ボタンをクリックする。このことで, 特定項目を調整した後の煮繭工程設定値が再度表示されるようになっている。

・特定生糸品質項目による調整 (Fig. 6, Fig. 7) : 煮繭の試験生産以後は, 繰糸プロセスからフィードバックした情報に基づき, 煮繭により期待される生

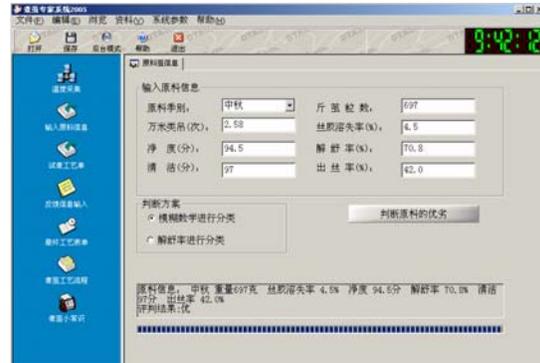


Fig. 4. Fuzzy Judgment for raw material cocoon.



Fig. 5. Output view of cocoon cooking sheet.



Fig. 6. Adjustments of cocoon cooking condition.



Fig. 7. Definite answer of cocoon cooking condition.

糸品質目標値から外れている項目に注目して, それぞれの煮繭条件を修正する。ここでは「糸故障数」

を例として説明する。先ず“インフォメーションのフィードバック”ボタンをクリックし、次に糸歩、小節、糸故障数、大節から“糸故障数インフォメーションのフィードバック”ボタンを選択する (Fig. 6)。ここで対応するインフォメーションを入力し、“煮繭工程シートを出力”ボタンをクリックすると、Fig. 7 のように決定の煮繭工程シートが表示されている。

## 5. まとめ

本エキスパートシステムは、良好な結果を得た煮繭工程条件と専門家の経験を、サンプルのトレーニングによって効果的に継承し、さらに自己学習機能によって精度を向上させている。実際に、ある製糸会社の2000年から2004年までの原料繭品質と煮繭工程条件の資料(データ)をサンプルとしてトレーニングし、サンプル・トレーニング終了後、新しい原料繭荷口に関する情報を入力して本エキスパートシステムを操作した結果、出力として得られた煮繭工程条件シートは、この製糸会社の煮繭工程実績と良く一致していることを確認した。

本エキスパートシステムの特徴を列挙する。

- 1) ファジィ理論を用いて原料繭の品質特性を評価することができた。この際、諸指標に基づいてメンバシップ関数を建てて、繭品質に対してファジィ・ジャジメントをすることができる。
- 2) ニューラルネットワーク技術を導入して、自己学習の機能を持つエキスパートシステムを構築した。ファジィ・ジャジメントの結果と特に要求する生糸品質項目に基づいて、煮繭工程条件を最適化することが可能である。
- 3) 試験的生産の結果(データ)に基づいて、煮繭工程条件を自動的に調整することができる。
- 4) 累積データが多くなると、自己学習機能によりシステムの性能が向上する。

## 6. 摘要

煮繭工程の最適条件を求めるために、ニューラルネットワークおよびファジィ理論を利用したエキスパートシステムの構築を試みた。産地、蚕期、飼育上層環境等の原料繭特性や生糸生産現場で得られた解じょ率、糸故障、小節、大節の数などの繰糸成績を入力することによって、ニューラルネットワークの学習機能により最適な工程条件を提示できるようにした。このシステムは、より最良

な工程条件を出力するために、階層型の一学習法であるバックプロパゲーション法を利用していることを特徴とする。またシステムはWindows OS上で動作するようにプログラム開発した。本システムにより、製糸工場の熟練技術者が原料繭荷口の特性に併せて個別に設定していた従来の煮繭工程条件に、より近い最適条件を提示できることが確認できた。今後、製糸工場などで利用が進むことが期待できる。

## 文 献

- 1) 大浦正伸・清水重人 (1993) : ワークステーションによる煮繭対策基本エキスパートシステムの開発, 第2回農林水産情報研究会講演集, 108-109.
- 2) 木下晴夫・但馬文昭 (1988) : 煮繭のエキスパートシステムの構築, コンピュータ技術, 19(2), 58-65.
- 3) 木下晴夫・但馬文昭・一ノ瀬公男 (1988) : 煮繭の多変量解析を応用したエキスパートシステムについて, 日本蚕糸学雑誌, 58(5), 412-418.
- 4) 木下晴夫・但馬文昭 (1990) : ファジィルールによる煮繭のエキスパートシステム, 日本蚕糸学雑誌, 59(4), 311-315.
- 5) 木下晴夫・但馬文昭 (1991) : ファジィルールを応用した煮繭のエキスパートシステム, ファジィ学会北信越支部研究会講演要旨集, 1, 6.
- 6) 木下晴夫 (1993) : 煮繭のシステム化に関する研究—繰糸張力を指標とする煮繭条件の最適化への試み—, 製糸絹研究会誌, 2, 1-6.
- 7) Kinoshita H.・Tajima F.・Watase H. (1993) : Studies on the systematization of cocoon cooking: -Application of fuzzy expert system-, J.Seric.Sci.Jpn., 33, 141-146.
- 8) 木下晴夫 (1997) : エキスパートシステムによる煮繭最適制御法の確立, 蚕糸・昆虫農業技術研究所研究報告, 19, 1-119.
- 9) 謝瑞娟ら (1999) : 人工知能の煮繭工程設計への応用, 絲綢, 6, 31-34 (中国語).
- 10) 王耀南 (1996) : ファジィコントロール・システム: ファジィロジック・エキスパートシステム・ニューラルネットワークコントロール, 湖南大学出版社, 長沙 (中国語).
- 11) 劉有才ら (1996) : ファジィエキスパートシステムの原理と設計, 北京航空航天大学出版社, 北京 (中国語).