

# ファジィ制御による農産物用多機能乾燥システムの開発 (第1報)

－ファジィ制御システムの開発と農産物最適乾燥への応用－

長尾 信一, 高橋 裕之, 大村 功,  
波 通隆, 澤山 一博, 森田 穰,  
本田 重司, 清水 條資, 尾谷 賢,  
内山 智幸, 山内 順一, 多田 達実

Development of Multi-functional Dryer System for Agricultural Products using Fuzzy Control (Part I)  
－ Development of Fuzzy Control System and Application to Optimum Control of Agricultural Products －

Shinichi NAGAO, Hiroyuki TAKAHASHI, Isao OHMURA  
Michitaka NAMI, Kazuhiro SAWAYAMA, Minoru MORITA  
Shigeshi HONDA, Jyohsuke SHIMIZU, Masaru OTANI  
Mitutaka UTIYAMA, Zyunichi YAMAUTI, Tatumi TADA

## 抄 録

道内食品加工技術の中で、乾燥加工技術の占める割合は大きく、より高品位、高効率な製品の製造技術が必要である。しかし、原料の性状が不均一な農水産物の乾燥加工は難しく、熟練作業者の経験的な工程管理に負うところが大きい。本研究では、ファジィ制御により熟練者の経験則の代行機能を備えた自動化システムの開発を行い、同時に、インプロセス計測により乾燥工程中の被乾燥物の品質評価を行う。システムは汎用ファジィ制御システム、インプロセス計測システム、乾燥機本体からなり各システムの開発を行い、統合化することで多機能化を図った。さらに、本システムを用いて、シイタケの品質パラメータ制御による最適乾燥試験を行った。

## 1. はじめに

近年、食品工業における乾燥技術としては、遠赤外線、マイクロ波、フリーズドライ、真空等の各種技術が利用されている。当社においても、ハーブ、生薬等道産植物資源をはじめ各種農産物の高品位乾燥技術に関する研究を積極的に進めている<sup>1)</sup>。しかし、原料の性状が不均一な農水産物の乾燥加工は難しく、製品の高品位化を図るためには、さらに新たな乾燥方法を取り入れたり、よりフレキシブルな乾燥制御ができる先進的な計測制御技術の導入が不可欠である。

一方、最近、ファジィ制御が各分野で応用され、脚光を浴びている。ファジィ制御では人間のあいまいな判断をファジィ集合を用いて定量化し、人間の経験則に従い制御量の推論を行い、実行するものである。特に、農産物の乾燥工程では、熟練者の経験的な判断で工程管理を行うことが多いことから、ファジィ制御の適用は非常に効果的な手段と考えられる。

本研究では各種農産物の乾燥加工の高品位化、効率化を図るためにファジィ制御を用いた多機能な自動乾燥システムの開発を行った。さらに、道産キノコの最適乾燥加工への適用試験を行った。

## 2. ファジ理論の制御への応用

ファジ理論は1965年、L.A.Zadeh教授（カリフォルニア大学）により提唱された。その後、1974年、E.H.Mamdani教授（ロンドン大学）が従来の制御理論では難しかったスチームエンジンの制御にファジ理論を適用したことから、ファジ制御の有効性が注目された。以来、実用化に関する研究が進められ、最近、仙台市地下鉄の自動運転システムをはじめ、制御の分野で多くの実用化例が報告されるようになった。

ファジ制御の大きな特徴には次の点が上げられる。

- ① 熟練者の経験的ノウハウを言葉で表現できる。
- ② 制御対象の数式モデルの代わりに、簡単なルールの設定で行える。
- ③ 並列推論であるため、複数の判断が行える。

従来の2値論理をベースにした集合論(クリスパ)に対して、ファジ制御ではあいまいさを含む述語表現をファジ集合、ファジ推論、により表す<sup>2)3)</sup>。

具体的なファジ制御の方法を、「人が温度計を監視しながら手で温度制御する場合」を例にとり説明する。(図1)人間の言葉(温度が高い、少し下げる等)による

判断、操作をファジ集合を用い、メンバーシップ関数として定量化する。さらに経験則をIF～THEN形式のプロダクションルールを用いてファジルール化(IF温度が高い場合、THEN出力を下げる等)する。実際には多数のファジルールが作成される。これら複数のルールに対してファジ多重推論を行う。いくつかの推論方法が提案されているが、MIN-MAX合成法を用いるのが一般的である。推論結果を制御に変換するために重心法を用いて非ファジ化する。

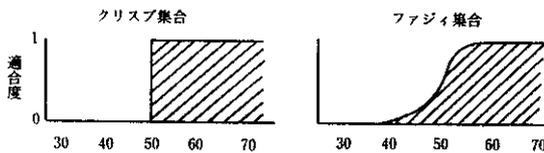
## 3. ファジ多機能乾燥システムの開発

### 3.1 システムの開発方針と全体概念

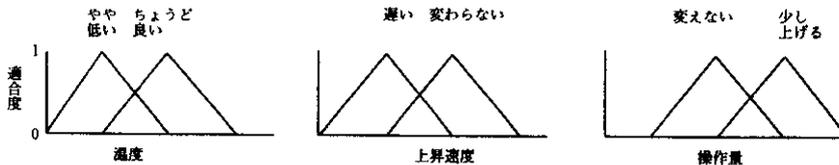
ファジ多機能乾燥システムの開発にあたっては次の項目に留意した。

- ① 加工品の高品位化を図るために、乾燥工程、被乾燥物のインプロセス計測およびモニタ機能を有し、工程中の品質評価が十分に行えること。
- ② ファジ制御により熟練者の経験則の代行機能を備えた自動化システムとする。
- ③ 新製品の開発支援が可能なように各種乾燥技術の

#### ◎ファジ集合 (温度が高い)



#### ◎メンバーシップ関数



#### ◎制御ルールとファジ推論

【ルール1】もし 温度がやや低く かつ 上昇速度が遅い ならば 出力を少し上げる

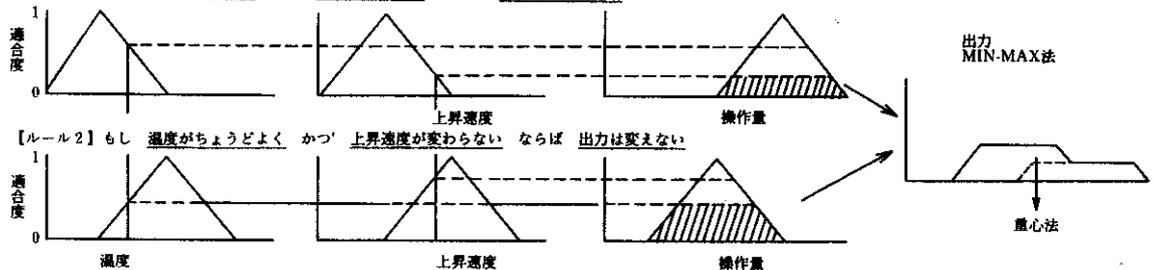


図1 ファジ推論による制御の方法

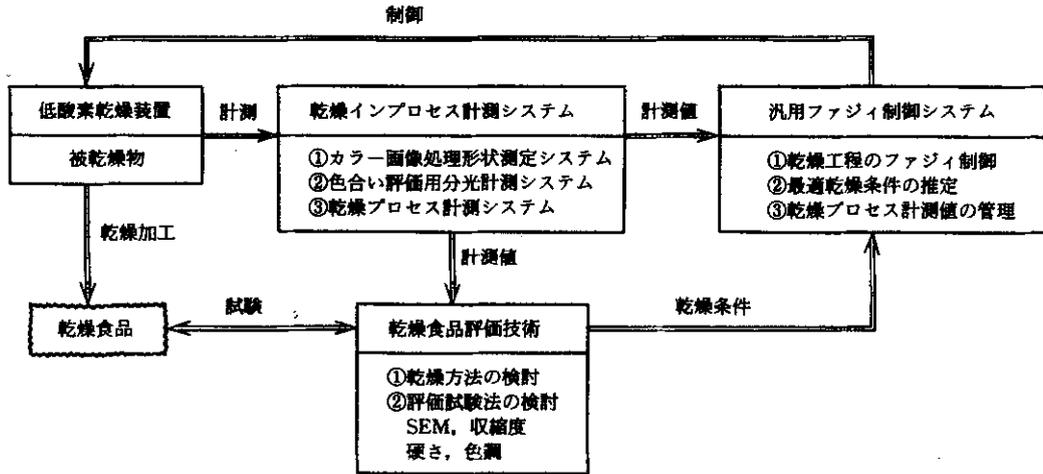


図2 ファジィ多機能乾燥システムの全体概念図

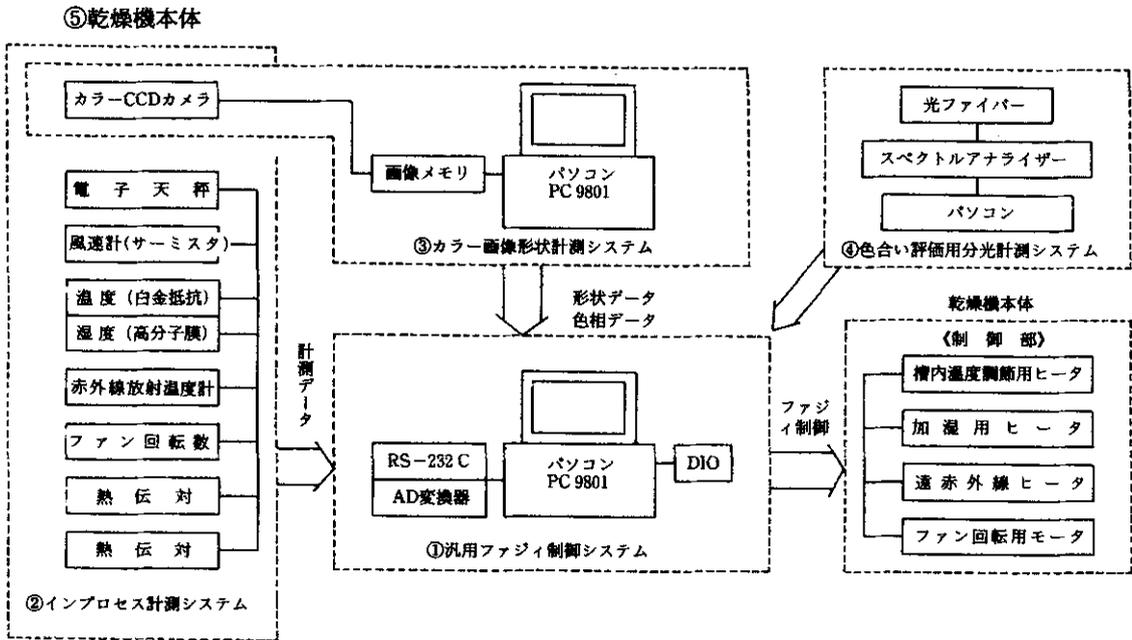


図3 ファジィ多機能乾燥機の計測制御フローおよび開発システム群

複合化が可能な方式とする。

以上の基本仕様を満たすために、本システムでは次の要素システムを開発し、最終的に統合化し全体システムとした。

- ① 乾燥機本体
- ② 乾燥インプロセス計測システム
- ③ 汎用ファジィ制御システム
- ④ 乾燥食品評価技術

図2に全体システムの概念図を示す。図3は全体システムの計測制御フロー図を示す。写真1-a)は開発した

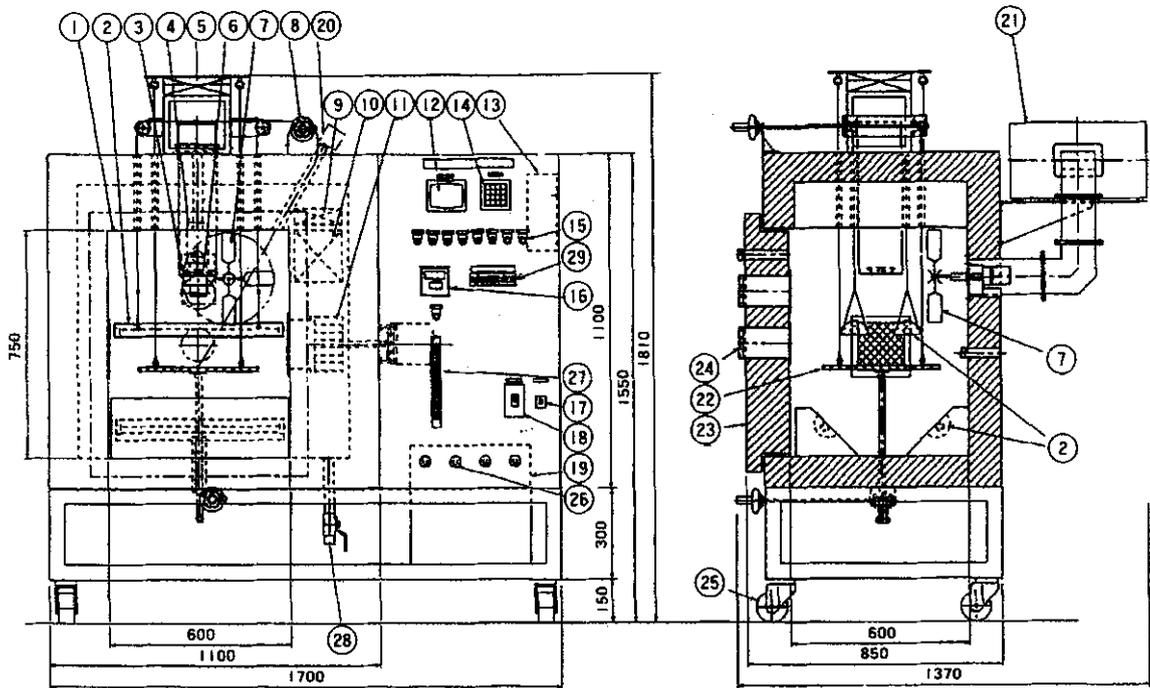
ファジィ多機能乾燥システムの全体風景である。

### 3.2 乾燥機本体の試作

図4に乾燥機本体の構造図を示す。試作にあたっては乾燥方式、インプロセス計測機器の取付機構、制御機器に留意した。

#### ○乾燥方式

遠赤外線乾燥、温風乾燥、冷風乾燥を組み合わせた複合乾燥方式を採用した。また、酸化抑制雰囲気での乾燥加工も可能とするために、N<sub>2</sub>ガス、あるいはCO<sub>2</sub>ガスに



15	各制御用スイッチ (表示灯付き)		30				
14	キーボード		29	入力信号切り替えスイッチ			
13	コンピュータコントローラ		28	排気バルブ (25A)			
12	CRT (コンピュータコントローラ表示器)		27	N <sub>2</sub> 流量計 (10-100L)			
11	風速制御循環ファン		26	サービスコンセント			
10	槽内冷却用熱交換器		25	キャスト (ストッパ付き)			
9	槽内温度調節ヒータ		24	試料投入口 (前面φ100×2, φ30×1)			
8	遠赤外線ヒータ巻き上げハンドル		23	恒温槽扉			
7	スターラファン		22	試料台 (金網)			
6	マイクロ波放射口		21	マグネトロン			
5	天板架台		20	放射温度計取付口			
4	ビデオカメラ取付口		19	冷凍機			
3	カメラ照明用ランプ		18	AC200V 電源漏過電流ブレーカ			
2	遠赤外線ヒータ		17	AC100V 電源漏過電流ブレーカ			
1	恒温装置内槽		16	放射温度指示計			
番号	名	称	材質	番号	名	称	材質

図4 乾燥機本体の構造図

よりチャンパー内の低酸素雰囲気を得ることとした。注入ガスは流量計を介して槽内に導入される。

熱源には温風 (2kW)、シース型遠赤外線ヒータ (4×1kW) を用いた。遠赤外加熱距離は任意に設定できるように移動機構を設けた。また、マイクロ波乾燥も可能とするために、マグネトロン (東芝) の取り付け機構、拡散用スターラファン、およびドアおよび開孔部に電磁シールド対策を施している。

除湿、槽内冷却には空冷式冷凍機 (600W) を併用して用いた。

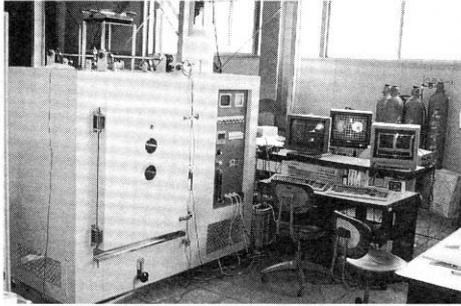
乾燥工程において風速は大きな影響因子であることから、風速制御循環ファンを取り付け最大風速 0.5m/sec までの可変とした。

#### ○インプロセス計測用機器

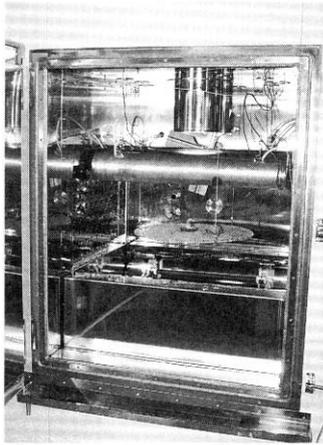
乾燥機には乾燥工程計測用各種計測センサ、機器を取り付けた。

#### 画像処理用機器：

小型カラー CCD カメラ (SONY XC-711RR) およびリングライト (テックス (株) HF-8010) を一体化し防湿フード内に取り付けた。防湿フードはスライド機構と



a) 全体風景



b) チャンバー内部

### 写真1 ファジィ多機能乾燥システム

なっており被測定物の画像取り込み調節を容易にしている。

品温測定：

非接触での品温測定に赤外線放射温度計（㈱キーエンス IT 02）を用いた。

被乾燥物重量計測：

被乾燥物の水分蒸発率をリアルタイムに測定するために、乾燥機上部に電子天秤（ザルトリウス L 610）取り付け、チャンバー内の資料台をワイヤーで吊り下げる構造とした。

風速・温湿度計測：

熱式風速・温湿度計（アイ電子技研，Model VH - 01 - ANdp）を用いた。本機は小型サーミスタを用いた風速センサ，白金抵抗素子，高分子膜静電容量素子による湿度センサを用いた。また，多数の熱伝対を使用した。

制御機器：

乾燥機単独での使用が可能ないように通信機能（RS - 232 C）付きプログラマブルコントローラを装備した。

また，汎用ファジィ制御システムによる計測・制御を行うための外部入出力端子，および，外部機器により直接プログラマブルコントローラを制御するための RS - 232 C コネクタを設けた。

乾燥機本体チャンバー内部を写真 1 - b) に示す。

### 3.3 乾燥インプロセス計測システムの開発

乾燥工程のインプロセス計測は従来，温度，湿度，風速など乾燥環境の計測がおもに行われてきた。しかし，キノコのような農産物では被乾燥物の品質を直接決定する形状，色合い，香り，乾燥度合（水分率）などのインプロセス計測が重要となる。

そこで，本研究では被乾燥物の形状変化，色調変化の計測に重点をおきながら，次のシステム開発を行った。

- ① カラー画像処理による形状計測システム
  - ② 色あい評価用分光計測システム
  - ③ 温湿度，品温，水分率等の乾燥環境計測システム
- 各々のシステムで計測されたデータは汎用ファジィ制御システムで集中管理され，最適制御量の判断が行われ乾燥機本体にフィードバックされる。

#### 3.4.1 カラー画像処理による形状測定システム<sup>2)</sup>

人間の情報判断の中で視覚情報は非常に大きな比重を占めている。乾燥工程の管理においても作業者の視覚を代行する画像処理技術は今後とも非常に大きな利用範囲が考えられる。農産物の識別を行う場合，形状識別，色合いなど総合的な判断が必要なことから多量の情報量を有するカラー画像処理の利用は不可欠である。

また，本乾燥システムの資料台は重量測定のために支持機構がワイヤー吊り下げ方式になっているため，計測時の資料の固定が難しく，画像シーンからの被乾燥物の形状抽出が難しい。本システムでは色相，彩度をしきい値に用いることで，対象物形状の抽出を的確に行うものである。

カラー画像処理システムはパソコンおよび画像メモリボードから構成される。形状抽出処理後，面積，色相値が計算され，RC - 232C により汎用ファジィ制御システムに転送される。

処理結果例を写真 2 に示す。

（カラー画像処理システムの詳細は本報告（第 2 報）を参照）

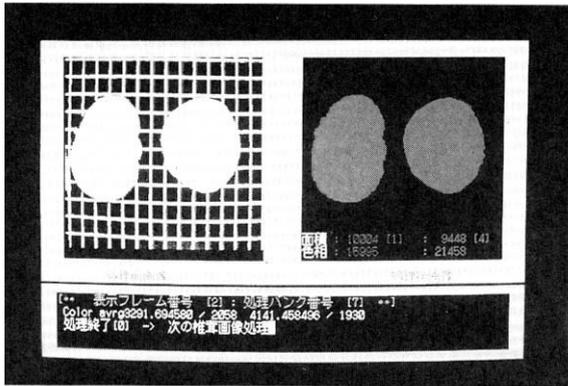


写真2 カラー画像処理形状測定システム処理結果例

### 3.4.2 色合い評価用分光計測システム

#### 1) 色の計測方法

一般に、人間の目に感じられる色は、光をR(赤)、G(緑)、B(青)に分解した場合の各強度の分布によると考えられている。現在一般的に用いられている色の表示方法・測定方法はこの考えに基づいたものである。市販されている色差計は、反射光をR・G・Bの各透過フィルターを通して各々の透過光の強度を測定している。この方法は、汎用性が高く、比較的安価で、ほぼ人間の感覚と同じ結果が得られるため、工業製品の色チェックなどでは有効である。

一方、試料の状態の変化などを光学的な変化として捉えようとした場合には、反射光のスペクトル強度分布そのものを捉える必要がある。上記の3原色に分ける方法では、スペクトル強度の分布が変わっても同一色と判断される場合があり、人間に対する色の表示方法という点では適していても、光学的な変化を捉えるには十分ではない。

本研究では、食品の乾燥の状態による色合いの変化を計測し、乾燥機の制御情報の一つとして利用するための

光学的計測について検討を行った。したがって、3原色の強度による方法ではなく、反射スペクトルの強度分布の変化を捉えて、乾燥状態と関係づけることを行っている。

#### 2) 分光計測システム

本研究で使用した分光計測システムを図5に示す。本システムは、光スペクトラムアナライザ、白色光源、および、データ処理用のパーソナルコンピュータからなっている。

白色光源としては、波長950nm以上の成分をカットした冷光源を使用し、光ファイバを束ねた専用のライトガイドで測定部まで照明光を導いている。測定部は、条件を一定にするため、治具によりライトガイドと反射光取込み用の光ファイバを約30度の角度で固定している。また、外乱光を遮断し、測定対象物との距離を約3cmに保つため、樹脂製のカバーにより覆っている。カバーは内部を黒色に塗装し、測定用に約1.5cm角の窓が開けられたものである。測定対象物はこの窓の部分にセットされ、ライトガイドに導かれた照明光の対象物による反射が受光用ファイバへと取り込まれる。受光用ファイバは、コア径800 $\mu$ mのものをを用い、レンズなどの光学系なしで十分な強度の測定光を取り込むことが出来るものである。取り込まれた反射光は光スペクトラムアナライザへと導かれ、分光強度の測定が行われる。

また、光スペクトラムアナライザはGP-IBインターフェースによりパーソナルコンピュータと接続され、測定されたデータは直接パーソナルコンピュータ上へ送られるように構成されている。

パーソナルコンピュータ上では、おもに次のような点を考慮して、測定データの処理が行われる。

- ① 照明光のスペクトル変化の影響の低減
- ② 測定状態による反射強度のばらつきの低減

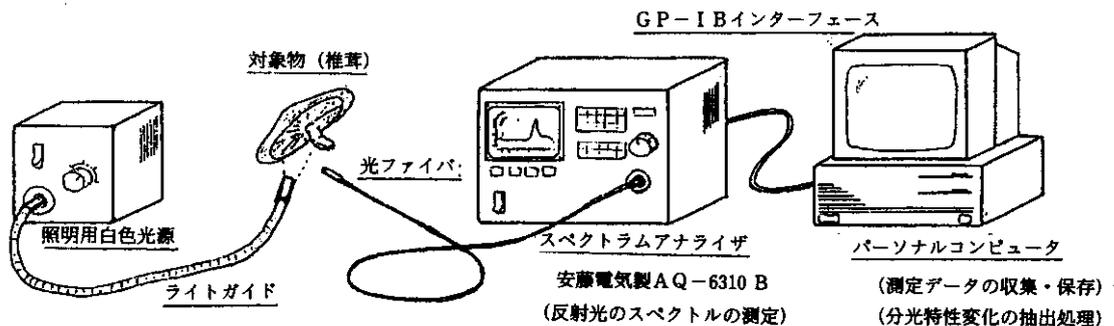


図5 分光計測システム

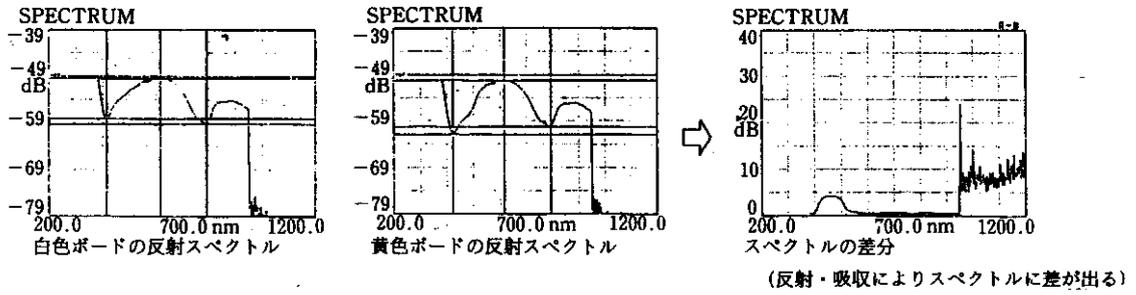
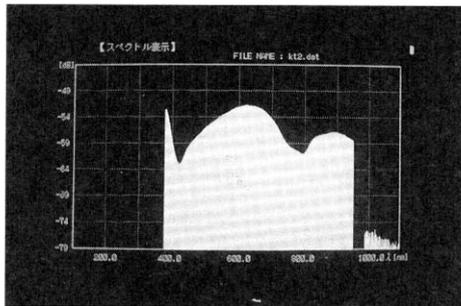
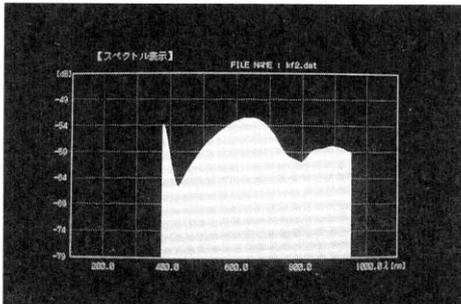


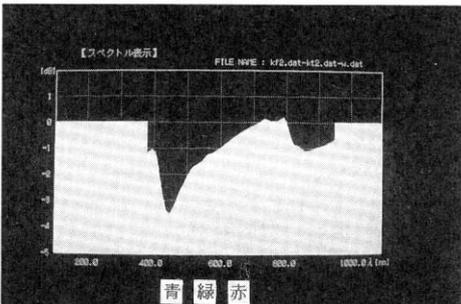
図6 カラーサンプルボードによる測定例



a) 乾燥前のスペクトル強度 S (入)



b) 乾燥後のスペクトル強度 S (入)



c) 乾燥前後のパラメータ比  $R'(\lambda)/R(\lambda)$

図7 乾燥前後のスペクトル強度の比較およびパラメータの比 (ひだ部分)

③ ノイズ等外乱による影響の低減

光源のスペクトル強度分布には偏りや変動があるため、試料測定時は、基準用に決めたホワイトボードの反射スペクトル強度  $W(\lambda)$  を同時に測定し、試料のスペクトル強度  $S(\lambda)$  との比  $S(\lambda)/W(\lambda)$  を反射率に対応したパラメータ  $R(\lambda)$  として用いることにした。カラーサンプルボードを用いた測定例を図6に示す。

対象となる試料は食品であり、同一の試料を測定する場合でも乾燥による形状の変化があるため、乾燥前後の反射強度を直接、比較することは難しい。したがって、いくつかの波長帯に分け、各々の積分値が全体の強度に占める割合を計算し、比較することで傾向の変化を捉えることにした。

本システムでは、光学的な計測を検討するため、光スペクトルアナライザを使用したが、実用化するには、価格、測定速度の点から、特長的な波長のみを計測する専用システムとすることが望ましい。

3) シイタケの乾燥状態とスペクトル強度分布

シイタケ12個の乾燥前後についてスペクトル強度分布の測定を行った。かさ部分の肉厚の厚いものはひだの部分が見え、測定が難しいことから、かさが広く、肉厚の薄いものを使用した。

乾燥前と乾燥後にそれぞれかさの面とひだの面について反射スペクトル強度を測定し、比較、検討を行った。測定した乾燥前のスペクトル強度  $S(\lambda)$  のグラフを図7-a)に、乾燥後のスペクトル強度  $S'(\lambda)$  のグラフを図7-b)に示す。なお、図はひだの測定結果である。

スペクトル強度の変化を見るため、乾燥前と乾燥後のパラメータの比  $R'(\lambda)/R(\lambda)$  を計算したものを図7-c)に示す。これは乾燥前後の相対的な反射率で、グラフの変化が反射強度の変化を表している。グラフから、ひだの面では全体に反射強度が小さくなり、特に波長の短

いスペクトル帯での反射率の低下が大きいことがわかる。また、かさの面では逆に長波長側の反射率が低下し、波長の短い側では変化が少ない傾向にある。測定した他のシイタケについても、検討の結果、同様の傾向を示していることから、乾燥による色合いの変化の傾向は一致していることが分かる。

しかしながら、測定したシイタケは、個体差もあり、また乾燥後は形状が変わり、硬化するために、色合いのみによる反射強度を得ることは難しい。このため、スペクトル強度の変化も試料によって違い、分布の様子は類似しているものの、乾燥状態と関連づけるには、今後さらに多量の計測データを蓄積し、統計的な処理手法の導入も必要と考える。

#### 4) 結果とまとめ

本研究では、試料としてシイタケを用い、光学的測定を検討したが、十分な測定データ数を検討することで、乾燥状態と関連づけることができると考えられる。しかしながら、実際には色合いの変化は、単純に乾燥状態と関連しているものではなく、乾燥の過程で変化の度合いが決められる。したがって、乾燥の過程との関連も調査する必要があり、これは今後、食品の最適な乾燥過程の問題と併せて、研究していく必要がある。

また、今回測定したシイタケでは、測定の結果から、波長 440nm 付近の反射率が大きく変わり、770nm 付近が最も変化の少ないことが分かる。このことから、シイタケの乾燥では、この 2つの波長の変化の割合を計測することで、色合いの変化を推定することが出来るということがわかる。このことから、実用的なシステムとしては、反射光を上記 2つの波長を透過するフィルターを通過させた後、それぞれ光検出器でその強度を測定する装置とし、この 2つの検出器からの透過光の強度の比と、予め測定した乾燥状態のデータとを比較処理することより、乾燥状態を推定することが出来る。この方法は、高価な装置を必要とせず、専用システムとして比較的安価に製作することが出来る。

分光計測は、食品の色合い測定などでかなり有効な計測手段であると考えられる。そのため、今後も、測定系、データ処理などの調査、研究を進め、光学的色合い計測技術としての確立を目指すと同時に、幅広い応用を検討していく予定である。

#### 3.4.3 乾燥プロセス計測システム

槽内温度、風速、湿度、品温、重量変化等 12 項目の計測機器を乾燥機本体に装備した。計測値はアナログ信号、あるいは通信機能を利用して出力される。計測データは次項で述べるファジィ制御システムの入出力インターフェイス部分で処理される。

#### 3.5 汎用ファジィ制御システムの開発

##### 3.5.1 開発方針

本多機能乾燥システムの制御用ファジィシステムには、計測機器とのインターフェイス、計測データの 2 次処理、乾燥機本体の制御機器とのインターフェイスなど、特殊な入出力機能が要求される。現在、数社のファジィ制御システムと開発環境が商品化されている。しかし、実際に利用する場合、入出力系や処理系の改造が不可避であり、本システムへの導入は難しい。そこで、本研究では新たにパソコンをベースにした汎用ファジィ制御システムの開発を行った。開発にあたり次の点を考慮した。

- ① 本乾燥システム以外の処理システムにも容易に使用できるような汎用性を持つこと。
- ② 計測データの入力インターフェイスに柔軟性があること。
- ③ 制御出力に柔軟性があること。
- ④ 乾燥工程管理のための各種計測パラメータのモニタ機能を併合していること。
- ⑤ システムのプログラマブルコントロールが可能なこと。
- ⑥ ファジィ多重推論の割付が自動で行えること。
- ⑦ ファジィ推論過程のモニタが可能なこと。
- ⑧ ファジィ制御環境(メンバーシップ関数、ファジィ



写真 3 汎用ファジィ制御システムと形状測定システム

ルール) の設定が容易にできること。

### 3.5.2 汎用ファジィ制御システムの開発

上記方針に従って、システム開発を行った。開発システムを写真3に示す。システムはパソコン(日本電気PC9801)をベースにAD変換ボード、DA変換ボード、

DIOボード、RS-232Cボードのアドオンボードから構成されている。システム全体の機能フローを図8に示す。以下、システム機能について述べる。

#### 1) メンバーシップ関数の設定 (写真4-1)

メンバーシップ関数の定義は三角形、台形、矩形要素で指定する。入力方法は関数名、前件部、結論部の指定

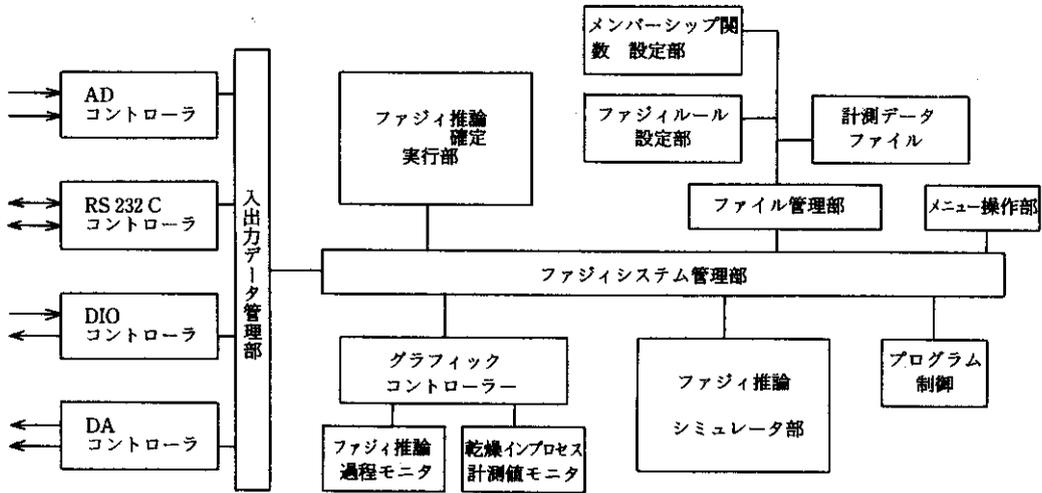
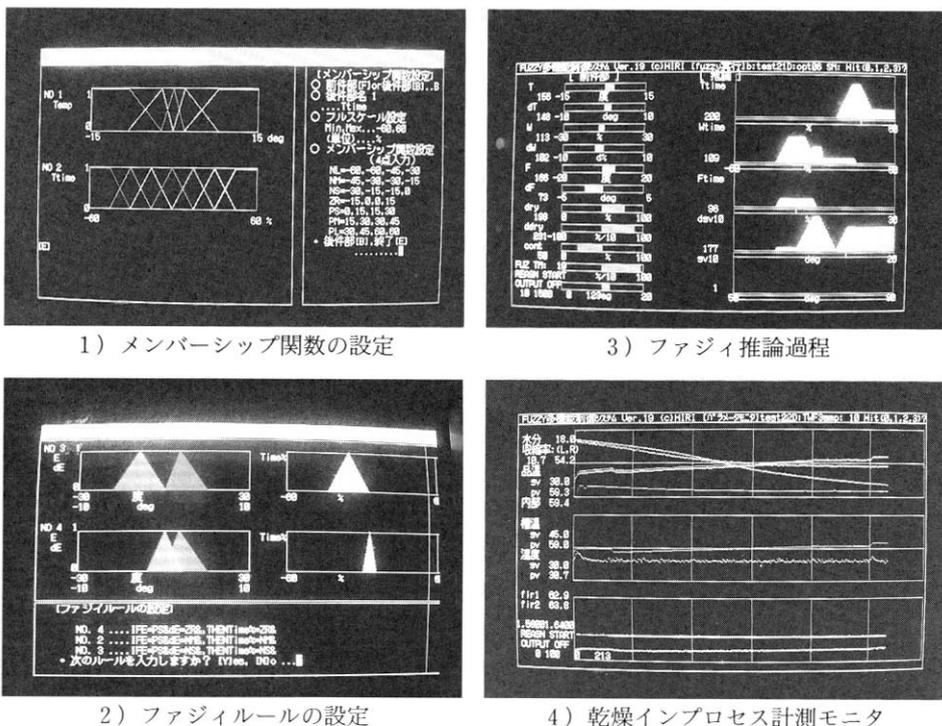


図8 汎用ファジィ制御システムの機能



1) メンバーシップ関数の設定

3) ファジィ推論過程

2) ファジィルールの設定

4) 乾燥インプロセス計測モニタ

写真4 汎用ファジィ制御システムの機能

を行い、関数の最大値、最小値を入力後、4点入力で行う。ランクはNL (Negative Large), NM, NS, ZR, PS, PM, PL (Positive Small) の7分割とする。各メンバーシップの分解能はフルスケールに対して256分割、及び適合度1に対して64分割で行う。関数定義結果はCRT上にグラフィック表示され、確認後登録する。結果は実行用参照ファイルとして保存される。

2) ファジィルールの設定 (写真4-2)

IF～THEN形式のプロダクションルールで直接設定する。100ルールまでの設定が可能である。また、1ルールあたり前件部、後件部合計15までの条件設定が可能である。

3) ファジィ推論および確定法 (写真4-3)

ファジィ推論にはMin-Max合成法を用いた。確定法には重心法を用い、分解能256の離散データとして非ファジィ化する。ファジィ制御では推論、確定の計算処理に多くの時間を要する。本システムでは、予め必要な計算範囲を計算用ベクトルテーブルに示し、これを参照することで不必要な計算を省き、処理速度の向上を図った。処理時間は設定条件により変動があるが、2前件部、1結論、2ルールの場合で約100m/secの時間を要する。本システムではパソコンにPC9801VX (クロック10MHz) を使用したがさらに高速な機種を用いることで、推論時間の短縮は可能である。

推論過程はリアルタイムにグラフィック表示され、推論の過程が十分に観察できる。

4) 計測データ管理部 (写真4-4)

本乾燥システムでは温度4点、湿度、遠赤外線ヒータ表面温度2点、風速、ファン回転数、重量変化、画像データ等の計測データが入力インターフェイスを介して取り込まれる。各々のデータは時系列データとして任意のタイムスケールに合わせて、モニタ画面上に表示される。また、計測データはファイル保存される。

5) グラフィック機能

パソコングラフィック機能の2画面を管理する。1画面にファジィ推論過程、2画面に計測データをリアルタイムに書き込む。画面切り替えは任意に選択でき、処理過程の観察が十分行える。

6) データ入力インターフェイス

各々の計測センサからの信号は増幅器を経由して10chAD変換器に入力される。また、RS-232Cの通信機能を用いて画像処理システム、電子天秤とのデータ転送

を行う。取り込み処理は変換器専用ルーチンで行い、データは工学単位に変換される。また、必要に応じて、偏差、偏差率などの2次計算を行い、メインプログラムに引き渡す。他システムへの転用を図る場合には、入力ルーチンの変換で容易に行える。

7) 出力インターフェイス

乾燥機本体の温度、湿度、遠赤外線等の制御は時分割制御で行う。ファジィ推論、確定結果の制御量はパルスに変換され出力される。さらに、フォトカップラを介して、乾燥機本体ソリッドステートリレーを直接駆動する。パルス変換は出力専用ルーチンにより行う。

8) ファイル作成

計測データはすべてファイル保存でき、必要に応じて再度呼び出し試験過程の検討が行える。また、シミュレーション用データとしても使用が可能であり、メンバーシップ関数、ルール設定の確認試験に用いることができる。

9) 工程スケジュールプログラミング機能

本制御システムのプログラム設定は4方法で行える。

- ① マニュアル操作により直接設定値を設定
- ② 設定値、時間をプログラム設定
- ③ ファジィ推論による最適設定値の自動設定
- ④ 上記3方法の複合型

3.5.3 ファジィ制御システムの評価試験

1) 槽内温度制御への適用

ファジィ制御を乾燥機槽内温度制御に適用した場合について検討した。ファジィ制御のブロック図を図9に示す。

メンバーシップ関数、ルール設定にあたっては、作業者が通常行っているマニュアル操作を参考にした。すな

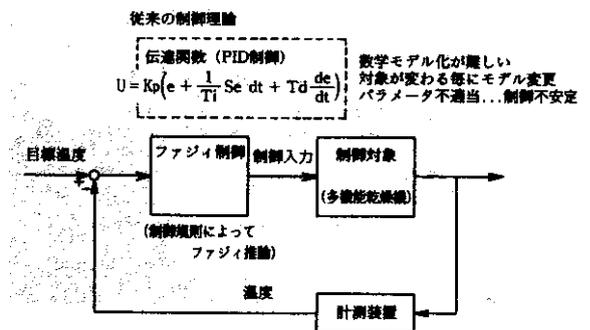


図9 ファジィ制御ブロック図

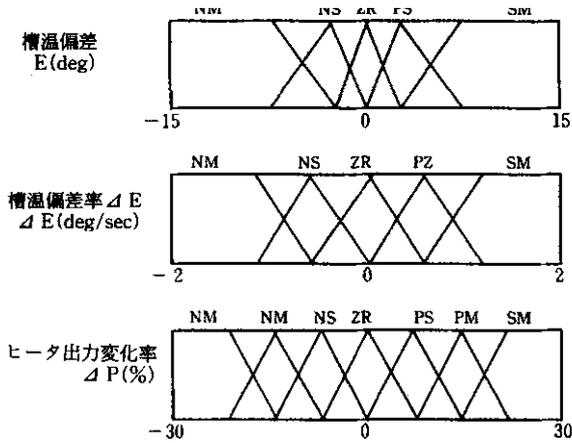
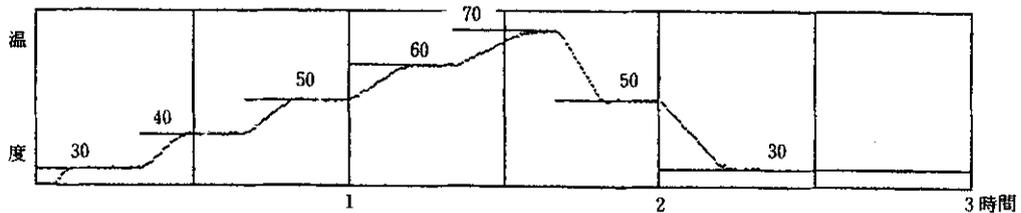


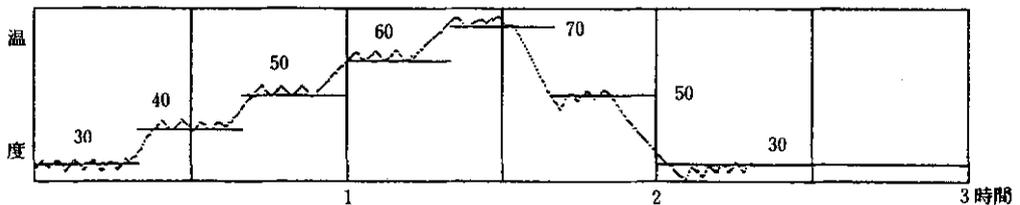
図10 槽温制御用メンバーシップ関数

表1 槽温ファジィ制御用ルールマトリックス

		槽 温 偏 差 E						
		NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
槽 温 偏 差 率 dE	PL							
	PM		ZR	PS	PM	PL	PL	
	PS		NS	ZR	PS	PM	PL	
	ZR		NM	NS	ZR	PS	PM	
	NS		NL	NM	NS	ZR	PS	
	NM		NL	NL	NM	NS	ZR	
	NL							



1) ファジィ制御



2) 本体コントローラによる制御

図11 乾燥機槽内温度制御結果

わち、操作員がマニュアルで温度制御を行う場合、次の要領で行っている。

「IF

温度が設定温度よりやや低く & 温度上昇速度が速い場合、

THEN

操作レバーを現在よりやや下げる」

(2)

これを目標値 sv に対する現在値 pv から温度偏差 E と温度偏差率 ΔE で表した。

$$E = sv - pv$$

$$\Delta E = E / \Delta t \quad (3)$$

温度偏差 E, 偏差率 ΔE のランクを図 10 のメンバーシップ関数で表わした。また、(2) 式の操作マニュアルを表 1 に示すファジィルールマトリックスとして表わした。これらのファジィ制御条件をもとに槽内温度の制御を行った。目標温度を数点設定し、オーバーシュート、定常状態の安定性、外乱時の復旧性を検討した。結果例を図 11 に示す。

立ち上がり時にはオーバーシュートの発生はほとんど認められない。ただ、目標値到達手前で、一時停滞する箇所がある。目標値到達後はややハンチングを生ずるが非常によく安定しており、0.5 度以内の制御が可能なのが確認された。

また、本体に装備されているコントローラのPID制御を用いて同様の制御を行った場合の温度履歴を示す。PID制御のパラメータ設定を誤ると制御系が不安定になってしまう。今回使用したファジィルール、メンバーシップ関数をそのままは他の温度制御系に使用しても同等の制御精度が維持できることが確認されており、PID制御のように対象物毎にパラメータを変更する必要がなく、非常にフレキシブルな制御方法であることが確認できた。

また、外乱に対しても、その応答性は早く、外乱にも十分有効な制御手法であることが確認できた。

#### 2) 槽内湿度制御への適用試験

同じく、湿度制御に関する適用試験を行った。ファジィルール、メンバーシップ関数は温度制御と同一な条件を使用した。乾燥機の加湿、除湿機構の時定数が大きいため、制御はかなり難しくなっている。しかし、乾燥機付属のPID制御器を使用するより十分な制御精度を有していることが確認できた。

#### 3) 品温の表面温度による遠赤外線ヒータ制御

キノコの表面に熱伝対を挿入し、この温度が一定になるよう表面から15cm離れた遠赤外線ヒータの出力制御を行った。

ヒータの時定数が非常に遅いため、従来の温調器を用いては大きなハンチングを生ずると考えられる。しかし、ファジィ制御ではややハンチングを生ずるものの十分な制御精度が得られることが解った。

### 3.6 品質パラメータ制御によるキノコ最適乾燥試験

人工栽培による道産シイタケの生産額は毎年増加している。しかしその大部分は生鮮品として出荷されており乾燥シイタケとして加工されるものは非常に少ない。生シイタケは採取して自然のまま放置しておく、自ら溶化現象を起こし生シイタケとしての味を失ってしまう。しかし、乾燥加工した乾シイタケは長期間保管しても味と香りに変化を生じないばかりか、その栄養面と生理活性成分が高いこと等から乾燥加工は非常に有効な方法である。

乾燥シイタケは収穫時期により形状、水分率などの性状が不均一でありその乾燥工程には熟練が必要である。しかし、最近では熟練者の高齢化が進み道内では次第に生産事業者が減少している。従って、これら生産者のノウハウをファジィルール化し原料の性状に合わせた最適

乾燥加工が可能な自動化システムの開発が必要と考えられる。

本研究では、これら乾燥熟練者のノウハウを定量化すると同時に、乾燥食品評価技術からの検討も加え乾燥操作のファジィルールを作成した。さらに、キノコの最適乾燥試験を行い検討を加えた。

#### 3.6.1 乾燥シイタケの加工方法の検討<sup>4)</sup>

##### 1) 仕上げ目標

商品価値の高い良質の乾燥シイタケは次の項目を満足する必要がある。

- 採取した時の生シイタケの形状をくずさずにそのままの姿で仕上がっていること。
- かさには光沢があること。
- ひだは倒れずに、山吹色を呈していること。

乾燥シイタケは大きさと形によって、上級品、並級品、低級品に区別されている。これらは、原料の優劣も大きな要因ではあるが、採取時期、乾燥方法によって大きく左右される。

##### 2) 乾燥工程とシイタケの変化

シイタケ乾燥は80~90%の水分を13%程度まで下げる作業である。乾燥の初期と後期では、シイタケそのものが変化し、その過程においても常に変化している。乾燥の工程は予備乾燥期、本乾燥期、後期乾燥期、仕上げ期の4工程に分けられる。各乾燥工程の概要を図12に示す。

##### 予備乾燥期

90%以上の水分(雨水)を75~80%の水分に下げる。また、生きたまま乾燥すると胞子を飛ばしてかさをきたなくしてしまうため、短期間に殺す必要がある。

##### 本乾燥期

シイタケは軟化し、その後水分がぬけて硬化してゆく。シイタケのかさは縁が薄いことから、最初、縁から硬化しだし、次第に形が決って行く。6~7時間でかさにつやがでる。この時の温度が46~53度の間にないとつやがでない。また、水分蒸発割合を1時間当たり6パーセントくらいに安定させておく。さらに乾燥が進み、ひだが鮮明な山吹色になる。ただし、乾燥温度を52~55度にする必要はある。

乾燥が進むと温度を上げても蒸発割合が下がってくる。

##### 後期乾燥期

温度を次第に上げて行っても水分蒸発割合が低くなる。この期に残っている水分を完全に蒸発させ、完全に

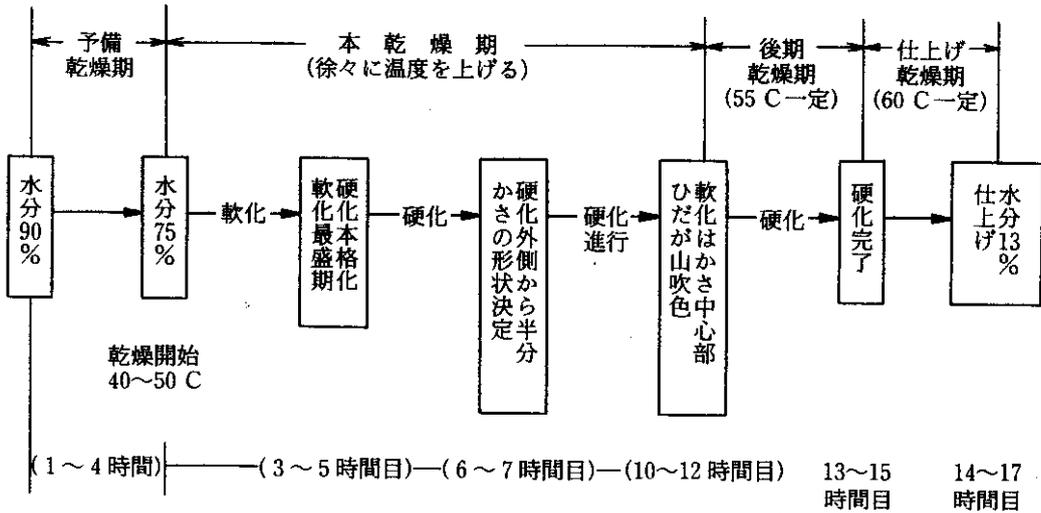


図12 シイタケ乾燥の過程

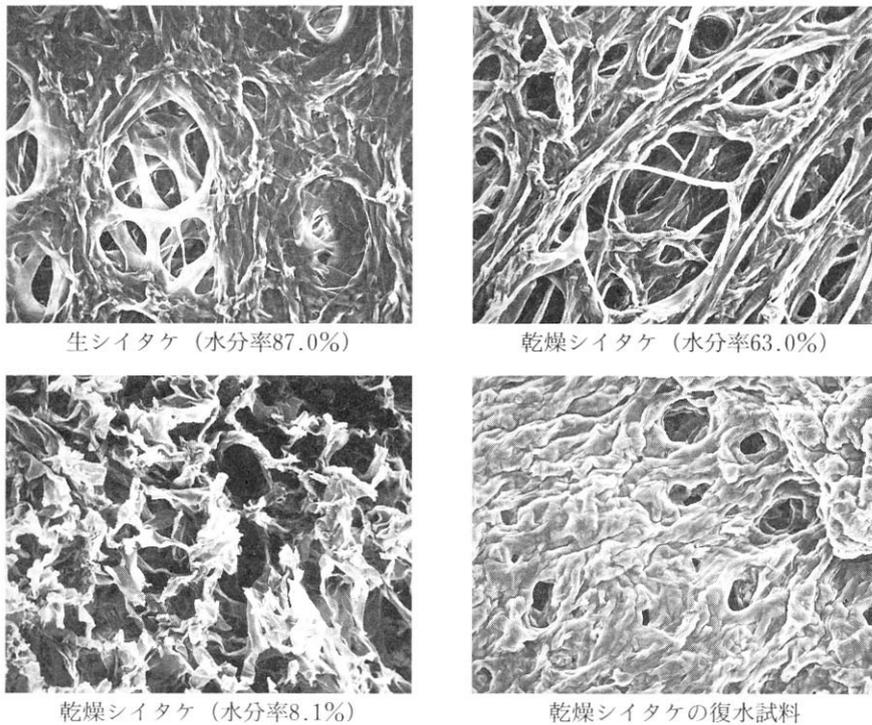


写真5 乾燥シイタケ(傘部分)のSEM写真

乾燥する。仕上がった時はシイタケの内部温度も表面温度も、乾燥温度もほぼ同じになる。

仕上げ期

後期乾燥で仕上がったものを完全な物とする。水分13% 60度仕上げとする。(農林規格)

3) シイタケの乾燥工程における組織の変化

乾燥工程中のシイタケかさ部分の電子顕微鏡 (SEM) 写真を写真5に示す。

シイタケは外観上、かさ、ひだ、茎に分けられ内部組織は菌糸が、絡み合った構造をなしている。SEMによる観察では、乾燥度の進行に伴い菌糸の細化、空隙の増加が確認された。また、乾燥シイタケの復水状態は、ほ

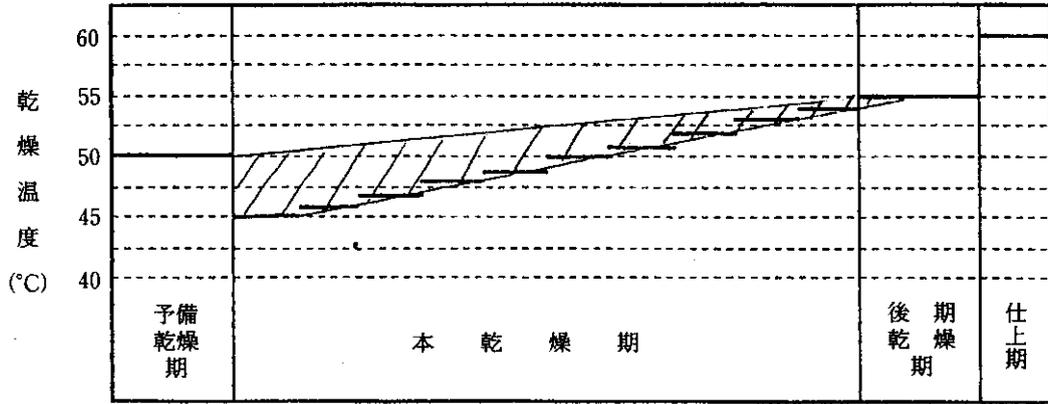


図13 強制送風乾燥機の設定温度基準

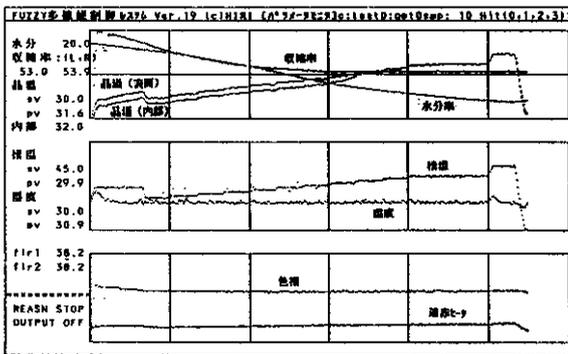


図14 設定基準乾燥時の乾燥プロセス計測結果

ぼ生の状態に近いものであることが認められた。

4) 強制送風乾燥における乾燥スケジューリング

最近では、シイタケ乾燥は強制送風による乾燥加工が一般的になりつつある。図12の乾燥工程を行うために、図13に示す設定温度基準が用いられている。しかし、原料キノコの性状、乾燥工程上の品質を監視しながら、経

験により乾燥工程の調節をするのが現状である。

5) 設定基準による乾燥工程中のパラメータ変化

本乾燥システムを用いて、上記設定温度基準に従った乾燥加工を行った。工程中の品質パラメータの変化を図14に示す。

3.6.2 ファジィ制御によるシイタケ乾燥の最適化

以上、シイタケ乾燥技術の要点を述べた。シイタケ乾燥の場合、その品質制御パラメータとして、形状変化、水分蒸発率、色調、品温が重要な項目であることが分かった。従って、各工程毎に各パラメータによる制御試験を行った。

図15に乾燥工程の最適制御を行うための制御ブロック図を示す。制御部分は直列2系統の制御系から構成され、各々にファジィ制御を用いている。1段目の制御系では目標とする品質パラメータに対して乾燥条件の最適設定値を推定するものである。この最適設定値に対して、2段目のファジィ推論部分で直接乾燥機の制御機器を制

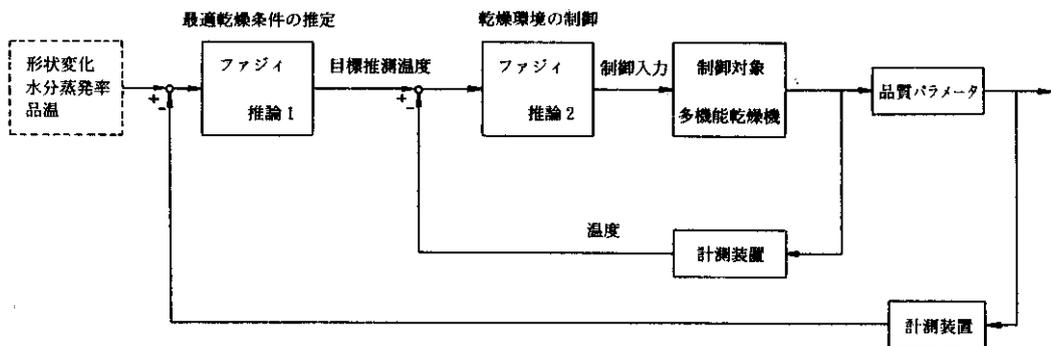
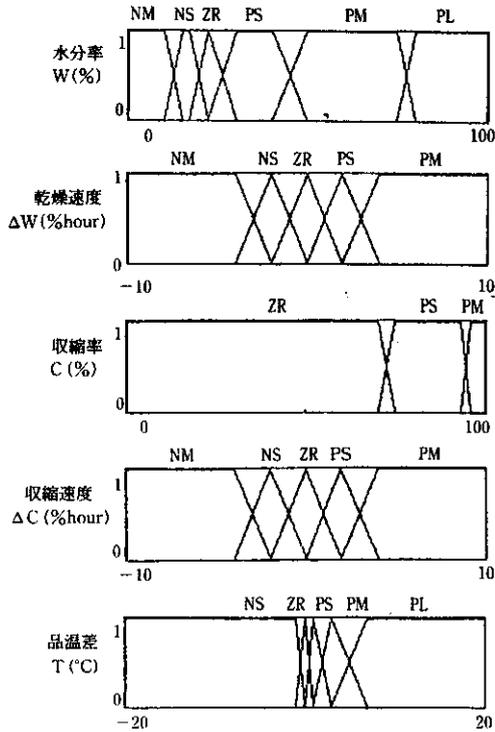
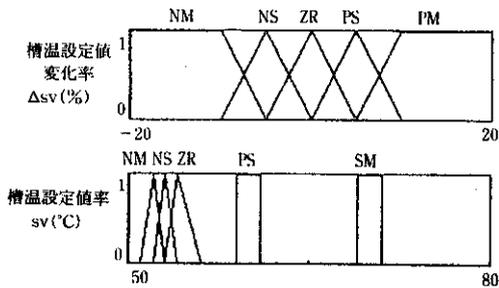


図15 最適乾燥工程のファジィ制御ブロック図



前件部



結論部

図16 品質パラメータ制御用メンバーシップ関数

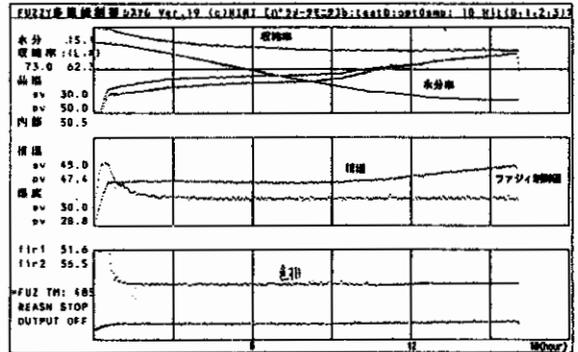
御する。

品質パラメータ制御にあたり、経験値、評価値をもとにメンバーシップ関数を図 16 の通り設定した。

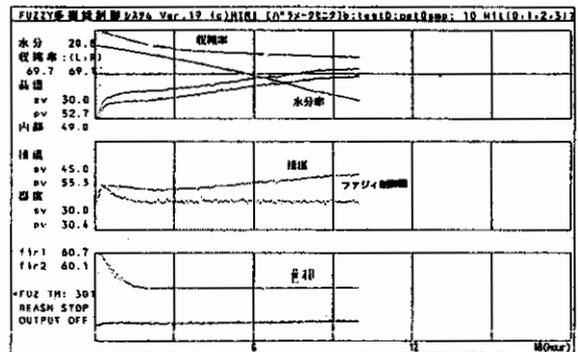
これらの制御条件をもとに以下の最適化試験を行った。

1) 水分率のファジィ制御

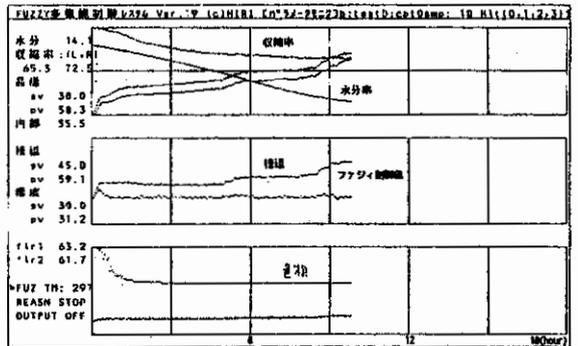
水分率は乾燥工程全体の制御パラメータとして、非常に重要である。予備乾燥終了、本乾燥終了、仕上げ乾



1) 水分率のファジィ制御



2) 形状収縮率のファジィ制御



3) 未着

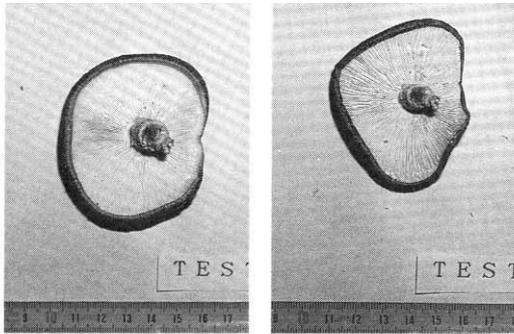
図17 乾燥工程中の品質パラメータの挙動

燥終了の判定パラメータとして重要である。

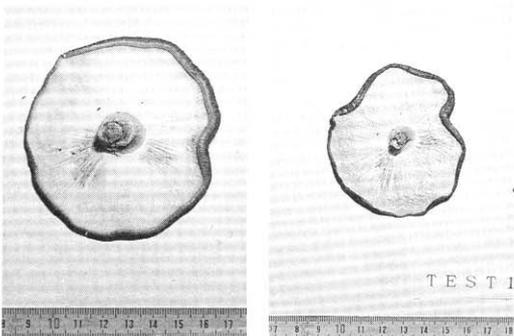
そこで、水分率の変化速度を一定にする制御を行った。結果を図 17 - 1), 写真 6 - 1) に示す。非常に簡単なルールで十分な効果を得た。

2) 形状変化率のファジィ制御

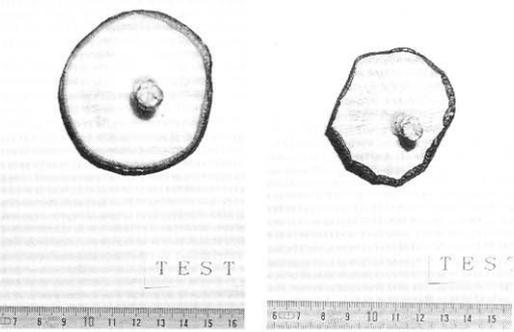
形状収縮の変化率を一定にする制御を行った。変化率を任意に設定し、これに対して槽内温度を変化させ、収



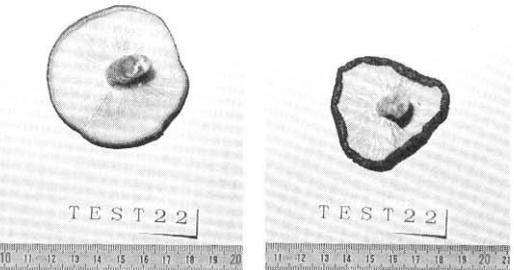
乾燥前 乾燥後  
1) 水分率のファジィ制御 (収縮率27%)



乾燥前 乾燥後  
2) 形状収縮率のファジィ制御 (収縮率30%)



乾燥前 乾燥後  
3) 乾燥経験則をもとにしたファジィ制御 (収縮率35%)



乾燥前 乾燥後  
4) 乾燥基準設定値による乾燥 (収縮率47%)

写真6 乾燥前後のシタケ形状の比較

表2 品質パラメータ制御用ファジィルール

前 件 部					結 論 部	
W	ΔW	C	ΔC	T	ΔSV	SV
PL	PM				PM	
PL	PS				PS	
PL	ZR				ZR	
PL	NS				NS	
PL	NM				NM	
PM		PS	PM		PM	
PM		PS	PS		PS	
PM		PS	ZR		ZR	
PM		PS	NS		NS	
PM		PS	NM		NM	
PS		PS				NS
PS		ZR				ZR
ZR						PS
NS						PM
NM						PL
				ZR	PS	
				PS	ZR	
				PM	NS	
				PL	PM	
ZR				PS	PM	

縮率の制御を行った。シタケの初期水分が多い時には、収縮率が大きく、水分蒸発量が多くなるに従って、次第に収縮率の割合が少なくなってくる。従って、乾燥初期に形状を決定するには、非常に重要なパラメータとなる。結果を図 17-2)、写真 6-2) に示す。制御範囲が非常に狭いが、おおむね期待した結果が得られた。

3) 乾燥経験則にもとづいたファジィ制御

各制御パラメータの有効性が確認できたので、乾燥工程全体の最適化を図った。

全工程を 4 工程に分け、各々の工程に併せて、制御パラメータを設定した。設定条件を図 18 に示す。

これらの条件をファジィルールで表現した (表 2)。この操作により乾燥工程の目標値を推論しこれに対してさらに乾燥機のヒータ制御をファジィ温度制御で行った。なお、湿度は 30%一定とした。

制御結果を図 17-3)、写真 6-3) に示す。目標値が変化しながら制御が行われているのが確認できる。

4) 結果と考察

各制御法での乾燥試験の結果、形状収縮率に関しては水分率の制御を行った場合、収縮率が非常に小さく、原型のままに近い乾燥加工ができることが分かった。ただ

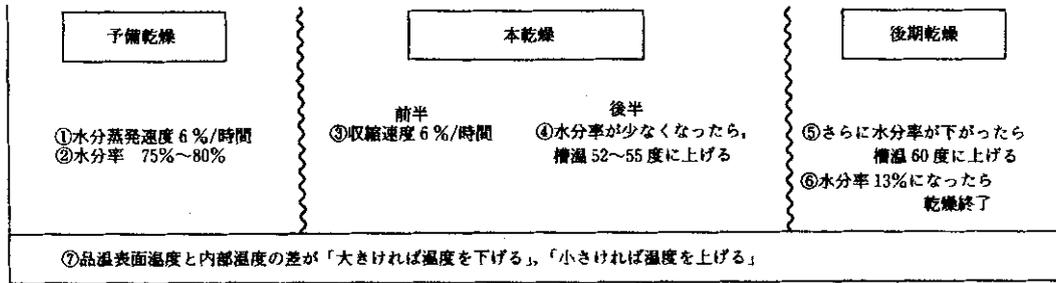


図11 乾燥工程の最適制御のためのファジィ制御ルール

し、ひだ部分の色合いは薄く、品質的に検討が必要である。次いで、形状ファジィ制御、乾燥経験則をもとにしたファジィ制御、従来の乾燥スケジューリングによる制御の順で収縮率が增大する。経験則による乾燥では、収縮率、色合い共に従来法より優れていることが確認できた。従って、形状を重要視する乾燥加工に大きな効果が得られることが期待できる。

乾燥時間の効率の課題に対しては、従来の方法では乾燥時間が 15~16 時間程度要する。ファジィ乾燥では乾燥時間が 12 時間程度と従来の乾燥法に比べ加工時間が短縮された。

#### 4. おわりに

以上、ファジィ制御を用いた農産物用多機能乾燥システムの開発、およびシイタケ最適乾燥への適用化試験について報告した。

本システムでは熟練作業者に依っていた乾燥工程管理をファジィ制御を用いて自動化した。また、乾燥工程、被乾燥物のインプロセス計測から形状、色合いなどの品質評価が可能になったことから、製品の高品位化、工程の高効率化が図られるようになった。

さらに、本システムをシイタケ最適乾燥へ適用し、作業者の経験値をルール化し最適乾燥を行った結果、形状の安定した乾燥加工が可能になった。

最近、食品加工業における人手不足は深刻な問題であるが、本システムのように熟練作業者の判断機能を代行する自動化システムの開発は重要な課題である。今後、各種乾燥加工への応用試験を進めると同時に自動化システムとして他の食品機械への応用を図って行く予定である。

#### 引用文献

- 1) 本田重司ほか：遠赤外線放射による農産物の乾燥；北海道立工業試験場報告，No.288，61-72(1989)
- 2) 寺野，浅井，菅野：ファジィシステム入門（昭62），オーム社
- 3) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用（1989），サイエンス社
- 3) 高橋裕之ほか：ファジィ制御による農産物用多機能乾燥システムの開発（第2報）；北海道立工業試験場報告，No.290（1991），投稿中
- 4) 平尾武司：シイタケ乾燥法（昭58）農文社