

〔生物工学会誌 第72巻 第4号 275-281, 1994〕

吟醸酒もろみ工程からの規範ルールの抽出とそれを用いた ファジィ制御方策の検討

花井 泰三¹・本多 裕之¹・高橋 伸幸²・西田 淑男³
深谷伊和男³・小林 猛^{1*}

名古屋大学工学部生物機能工学科,¹(株)タカハシ酒造,²愛知県食品工業技術センター³

¹〒464-01 名古屋市千種区不老町

²〒512 三重県四日市市松寺2-15-7

³〒451 名古屋市西区新福寺町2-1-1

(平成5年11月29日受付 平成6年4月7日受理)

Framework rules for control of the sake (*Ginjo*) making process and their application in fuzzy control. TAIZO HANAI,¹ HIROYUKI HONDA,¹ NOBUYUKI TAKAHASHI,² YOSHIO NISHIDA,³ IWAO FUKAYA,³ and TAKESHI KOBAYASHI^{1*} (*Department of Biotechnology, Faculty of Engineering, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-01*¹, *Takahashi Sake Co., Ltd, 2-15-7 Matsudera-cho, Yokkaichi, Mie 512*² and *Food Research Institute, Aichi Prefectural Government, 2-2-1 Shinpukuji-cho, Nishi-ku, Nagoya 451*³) *Seibutsu-kogaku* 72: 275-281, 1994.

From interviews with *Toji* (sake-brewing experts), the following framework rules for the control of *Ginjo moromi* fermentation were obtained: If the alcohol-Baumé curve (A-B plot) is a straight line and if the Baumé Multiplied Day (BMD) values decrease linearly, then the sake (*Ginjo*) produced will be of good quality. From an analysis of the data of 25 *Ginjo moromi* fermentations based on the above knowledge, framework rules for fuzzy control were constructed. Based on the rules, the control period was separated into four stages. Tuning of the membership functions was done using a simulation proposed by us in the accompanying paper. The suitability of the fuzzy rules was confirmed by the simulation.

後継者不足のため機械化が進展しつつある¹⁻⁴⁾清酒業界の中でも、近年の日本酒ブームの立役者となった吟醸酒の醸造工程は、いまだにほとんど手作業で行われ、製造熟練者である杜氏の勘に頼り行われているのが現状である。この理由として、①米の精米歩合が低いため原料処理が困難で機械化しにくいこと、②高品質酒であることが望まれるが、品質を考慮に入れた制御方法は単純なプラントでさえまだ確立されていないことなどがあげられる。吟醸酒醸造のうち発酵工程であるもろみ工程は、吟醸酒の特徴である香気成分生成を促進するため、一般酒に比べ低温で長期間行われる。この期間中に杜氏の品質を考慮した知識に基づく制御が行われているが、いまだその制御法の解析は報告さ

れていない。そこで著者らは、吟醸酒のもろみ工程の品質制御を含めた自動制御化を目標として、微生物発酵過程に適していると考えられるファジィ制御を用いた制御方法について研究を進めている。

前報⁵⁾で著者らは、25仕込みの吟醸もろみデータを統計処理して制御ルールを構築する方法を提案した。この方法は、データの蓄積を行えばルールの構築は容易であり、さまざまな現場への適用が可能である。本報ではデータ解析および杜氏からの聞き取り調査により、吟醸もろみに共通な原則を抽出し、この原則に基づいて規範ルールを構築する方法について報告する。この方法は、知識に基づいてルール化するため、知識を増やすことで初期条件の異常にも対応し得るルールが作成できると考えられる。さらに、その知識がもろみ工程中の酵母の生理的挙動を反映していれば、多く

* 連絡先, Corresponding author.

の検知データを入力することで酵母の代謝状態を制御することが可能なルールに拡張することができ、より厳密な品質管理が可能になると期待される。

解析方法

解析対象データ データ解析は、愛知県内の酒造メーカー17社で平成元年から3年度の間に収集した吟醸もろみ工程のデータをもとに行った。

測定項目は、ボーメ（比重）、アルコール濃度、アミノ酸度、酸度、グルコース濃度、全糖濃度、ピルビン酸濃度、 α -アミラーゼ、グルコアミラーゼの活性、および香気成分としてイソアミルアルコール、イソアミルアセテート、カブロン酸エチルの濃度に関するデータを同時に収集した。58仕込みに対するデータ収集を行ったが、前報⁵⁾同様ボーメ、アルコール濃度の経時変化が同じ傾向を示す25仕込み（最高ボーメ7.0以下）のデータを解析に使用した。

これら吟醸もろみは、同一の杜氏が行ったものではなく、17社のメーカーの杜氏がそれぞれの考えに基づいて制御を行ったものである。また原料米、麴、酵母および仕込み配合なども異なっている。よってこれらのデータより抽出される共通の制御原則は、一般性の高いものと考えられる。

解析装置 吟醸もろみデータの解析には、パーソナルコンピュータ PC-9801 RA2 (NEC) を、プログラム言語には N88-BASIC 言語を用いた。

結果と考察

吟醸もろみ制御に関する共通の規範ルールの抽出愛知県下の杜氏からの聞き取り調査により、吟醸もろみの管理は前報⁵⁾の Table 1 に示す方策により行われていることが確認された。さらに良質の吟醸酒を得るためには、本報の Table 1 に示すような知識が存在することが判明した。特に、10日目以降 A-B プロット（横軸にアルコール濃度、縦軸にボーメ値をとりプロットしたグラフ）が直線的に推移すること、および吟醸もろみ後半では BMD 値（ボーメともろみ日数をかけた値）がもろみ日数に対して直線的に減少すること、また吟醸もろみ終了日は約31日を目標としていることが重要との調査結果を得た。

この聞き取り調査の確認を実際のデータを用いて行った。Fig. 1 は、25仕込み中の3つのデータと平均データの A-B プロットである。もろみ中期以降、平均データおよび個々のデータともに直線上に並んでいること

Table 1. Knowledge obtained from interviews with *Toji* for producing *Ginjo* sake of good quality in *Ginjo moromi* fermentation.

- A long *moromi* period is disadvantageous for quality.
- Maintaining a low temperature at the end of the *moromi* period is beneficial for quality, especially for fragrance.
- In the middle of the *Ginjo moromi* period, temperature control based on a straight-line A-B plot leads to *Ginjo* sake of good quality.
- At the end of the *Ginjo moromi* period, temperature control based on a straight-line BMD curve gives *Ginjo* sake of good quality.

が確認でき、A-B プロットが直線的に推移するように杜氏が品温制御していると考えられた。したがって良質の吟醸酒を造るためには、各会社で過去数年間に作られたもろみの中から経過が順調で良質の酒となったものの平均値を A-B プロットとして、これをリファレンス（制御目標）とするのが妥当であろう。そうすることにより、個々のもろみデータとの差から発酵経過を推定し、個々のもろみの品温制御に利用することができる。

しかし、吟醸もろみ終了直前では、どの吟醸もろみもアルコール濃度は約15.5%、ボーメはほぼ0という一定の値に収束し、それぞれの日の変化量も小さくなる。このため、リファレンスとの差が小さくなり、ボーメ、アルコール濃度の測定誤差を考慮すると、もろみ終期においては A-B プロットが直線的に推移するように制御することはあまり得策ではない。Fig. 2 は、Fig. 1 と同じ3つのデータと平均データをプロット

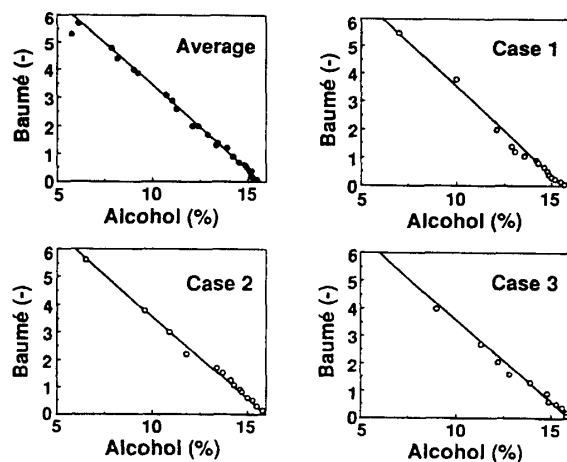


Fig. 1. A-B (Alcohol and Baumé) plots of average data of 25 *Ginjo moromi* fermentations and 3 arbitrarily chosen fermentations.

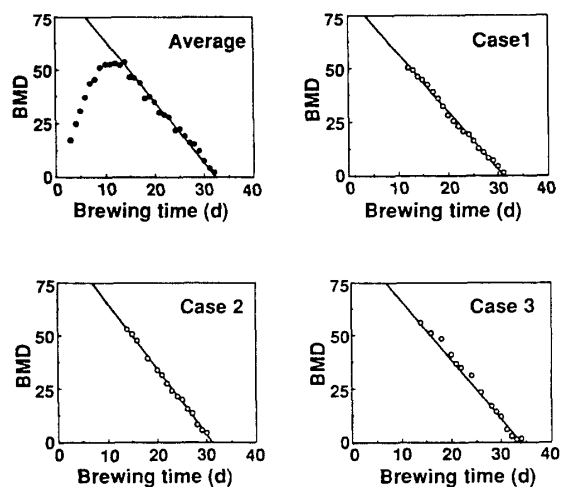


Fig. 2. BMD curves of average data of 25 *Ginjo moromi* fermentations and 3 arbitrarily chosen fermentations.

とした BMD 曲線 (BMD 値の経時変化グラフ) であり、このグラフよりもろみ後半において BMD 曲線が直線的に推移していることが確認できる。BMD 値はもろみ日数が後半になるほどわずかのボーメの変化も敏感に反映するという特徴を持つ。このためもろみ後半においては、A-B 直線による制御が困難となることと BMD 値の特徴から考えて、BMD 曲線が直線的になるように制御していると考えられた。また杜氏が BMD 曲線によるもろみ制御を行うときには、もろみ中期以降の BMD 曲線の減少部分から直線を外挿してリファレンス直線を求めていると予想された。

Fig. 3 は、25 仕込みのデータの平均値におけるある日とその前日との品温差つまり品温操作量の経時変化を示している。このグラフおよび 25 仕込みのデータから吟醸もろみの品温操作は、もろみ初日から約 12 日目まで (制御領域 1 と 2) は昇温操作のみ、約 12 日から約 22 日目まで (制御領域 3) は降温操作のみ、約 22 日目から最終日まで (制御領域 4) は昇温あるいは降温操作、の 3 つの領域に分けられることが判明した。さ

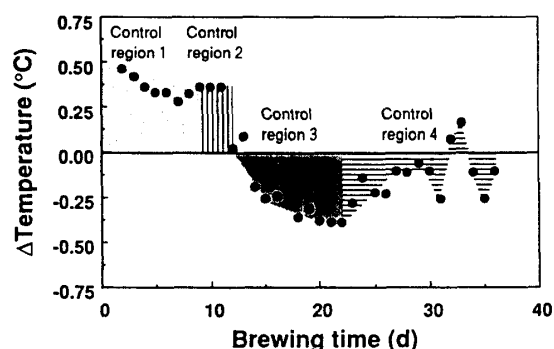


Fig. 3. Time course of average values of Δ Temperature data from 25 *Ginjo moromi* fermentations.

らにデータ解析により、約 12 日目に対応するのは坊主の日 (前報⁵⁾ よりアルコール 10.5% 以上とボーメ 3.5 以下が同時に成り立つ日)、22 日目に対応するのはボーメが 2.0 以下になる日であることが明らかになった。

吟醸もろみ初期 (初日から約 9 日目、制御領域 1) は、仕込終了日 (発酵初日) のもろみ品温は 6.1°C 、その後 9 日目までは品温を一定速度 ($0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}/\text{日}$) で昇温操作していると判明した。これは、もろみ初期においてはもろみに流動性がなく、内容物または品温などが不均一となり、信頼性のある測定データが入手できないため、測定項目の値に基づいて制御することはあまり有用ではないと考えられるためである。

規範ルールをもとにした制御方策の構築 抽出した規範ルールをもとにもろみ工程を 4 つの制御領域に分割した。制御領域 1 はもろみ初日から 9 日までの期間で、仕込み終了品温を 6°C とし、一定速度 ($0.4^{\circ}\text{C}/\text{日}$) で昇温操作する領域とした。制御領域 2 は 10 日目から坊主の日までの期間で、25 仕込みの平均データの A-B 直線をリファレンスとして品温操作量を決定し昇温操作する領域とした。制御領域 3 は、坊主の日からボーメが 2.0 以下になる日まで、制御領域 2 と同様に平均データの A-B 直線をリファレンスとして降温操作することとした。なお、制御領域 2 および

Table 2. Control strategies and references.

	Period	Temperature control	Reference
Control region 1	days 1-9	regular increases ($0.4^{\circ}\text{C}/\text{d}$)	—
Control region 2	day 10- <i>bouzu</i>	increases by fuzzy control	straight line A-B plot
Control region 3	<i>bouzu</i> -Baumé over 2.0	decreases by fuzzy control	
Control region 4	Baumé under 2.0	increases or decreases by fuzzy control	straight line BMD curve

"*bouzu*" means the disappearance of the fermentation foam from the *moromi*.

3における品温操作量決定方法は次節に述べる。

制御領域4は、ボーメ2.0以下になる日からもろみ終了日（ボーメが0になる日）までとし、BMD直線をリファレンスとして昇温または降温操作する領域とした。リファレンスのBMD直線は、以下の手順により求めた。まず、最高BMD値から制御領域3までの間のBMD値を最小2乗法によりフィッティング直線を引き、ボーメ0まで外挿しBMD直線とした。このときボーメが0になる日をもろみ予定終了日とした。もろみ終了日を29～33日にするため、もろみ予定終了日が29日以前の場合は29日を予定終了日とし、33日以降の場合は33日を予定終了日として制御領域4に入っ日のBMD値と予定終了日間でBMD直線を引き直すこととした。制御領域4における品温操作量決定方法も次節に述べる。

以上の制御方をまとめたのが Table 2 である。

制御方策に対するファジィルールの構築 A-B直線をリファレンスとして制御を行う領域（制御領域2および3）においては、A-Bプロットの挙動と品温の関係は Fig. 4 で示される。

① $n-1$ 日の品温(T_{n-1})が n 日(T_n)の品温と等しい($T_{n-1}=T_n$)なら、アルコール発酵の速度は同じであり、アルコールの生成量とボーメの減少量はそれぞれ前日の値と同じである。②高い品温($T_{n-1}<T_n$)なら、発酵速度は上昇し、アルコールの生成量とボーメの減少量は増加する。③低い品温($T_{n-1}>T_n$)なら、アルコール生成量、ボーメ減少量とも減少する。この関係をA-B直線のグラフ上で考えてみると以下のようなことがいえる。①の場合($T_{n-1}=T_n$)には同じ速度で発酵が進むので、点 P_1 と点 P_2 の距離(L_{n-1})とその線分 P_1P_2 が横軸と形成する角度(D_{n-1})は線分 P_2P_3 の間の距離(L_n)と角度(D_n)に等しい($L_{n-1}=L_n$, $D_{n-1}=D_n$)。

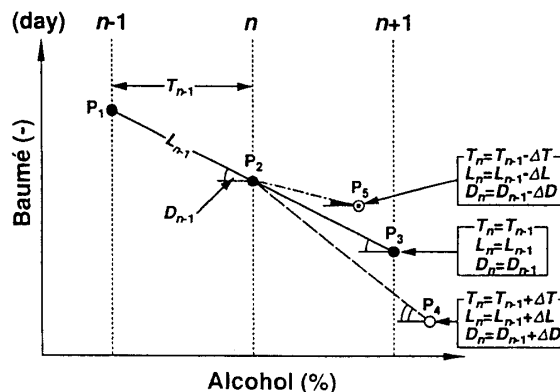


Fig. 4. Control strategy for *Ginjo moromi* fermentation.

また、②の場合($T_{n-1}<T_n$)には発酵速度は上昇するので $n+1$ 日には点 P_4 となり、その距離 L_n は L_{n-1} より長く($L_{n-1}<L_n$)、角度は急になる($D_{n-1}<D_n$)。逆に③の場合($T_{n-1}>T_n$)には発酵速度は遅くなるため $n+1$ 日には点 P_3 となり、距離 L_n は L_{n-1} より短く($L_{n-1}>L_n$)、角度は緩やかになる($D_{n-1}>D_n$)。

この関係を用い制御領域2と3の期間では、まず $n-1$ から n 日の間のA-B直線の距離(L_{n-1})と角度(D_{n-1})を求め、 n 日と $n+1$ 日の目標点（この場合、平均データから求めた $n+1$ 日のボーメとエタノール濃度の点）の間の距離(L_n)と角度(D_n)を求める。続いて $n-1$ 日と n 日の距離の比である L_n/L_{n-1} の値をratio of length, $n-1$ 日と n 日の角度の差である D_n-D_{n-1} の値を Δ Degreeとして求め、これらを用いてプロダクションルールの構築した(Fig. 5)。たとえば、Fig. 4で P_2 から P_4 へ変化させる場合、 L_{n-1} に比べ L_n が長くなるのでratio of lengthは大きくなる(ratio of length=B)。そして、制御領域2では昇温操作(Δ Temperature=PS or PM or PB)を、制御領域3では降温操作のみの領域であるため比較的小さな降温操作

Control region 2					Control region 3					Control region 4				
		ratio of length					ratio of length					Δ BMD		
		S	M	B			S	M	B			S	M	B
Δ Degree	S	ZE	ZE	PS	Δ Degree	S	NB	NM	NS	Temperature	S	NS	ZE	PS
	M	ZE	ZE	PM		M	NM	ZE	ZE		M	NM	NS	ZE
	B	PS	PM	PB		B	NS	ZE	ZE		B	NB	NM	NS

Fig. 5. Production rules for control regions 2, 3 and 4. Notations: B, big; M, medium; S, small; NB, negative big; NM, negative medium; NS, negative small; ZE, zero; PS, positive small; PM, positive medium; PB, positive big.

Table 3. Parameters of membership functions for control regions 2, 3 and 4.

		<i>s</i>	<i>b</i>
Control region 2	Ratio of length	0.5	1.5
	Δ Degree	-15	15
Control region 3	Ratio of length	0.5	1.5
	Δ Degree	-15	15
Control region 4	Δ BMD	-2	2
	Temperature	5.0	8.0

		<i>nb</i>	<i>nm</i>	<i>ns</i>	<i>ze</i>	<i>ps</i>	<i>pm</i>	<i>pb</i>
Δ Temperature	Control region 2	—	—	—	0	0.1	0.2	0.3
	Control region 3	-0.3	-0.2	-0.1	0	—	—	—
	Control region 4	-0.7	-0.5	-0.2	0	0.2	—	—

(Δ Temperature=ZE or NS)を行うこととした。また、 D_n は D_{n-1} より大きく(Δ Degree=B)なるので、同様の品温操作を行うこととした。逆に、Fig. 4で P_2 から P_3 へ変化させる場合には逆の品温操作を行うこととした。

Ratio of length, Δ Degree および品温操作量に関するメンバーシップ関数を Fig. 6 に示す。Fig. 6 のパラメータの値(*s*, *b*, *nb*, *nm*, *ns*, *ze*, *ps*, *pm*, *pb*)は、25仕込みデータの平均値、最大値、最小値を基に決定した。その値を Table 3 に示す。

BMD 直線をリファレンスとして制御を行う制御領域4においては、Fig. 3 に示されているように基本的には昇温操作よりは降温操作が多く行われている。したがって、BMD 値がリファレンスとほぼ同じ

(Δ BMD=M) 場合には比較的小さな降温操作(Δ Temperature=ZE or NS or NM)を行うこととした。BMD 値がリファレンスより高い(Δ BMD=B)場合にはボーマが減少するように、より昇温操作を多くした。逆に、低い(Δ BMD=S)場合にはボーマが減少しにくいように、より操作量を大きくした降温操作(Δ Temperature=NS or NM or NB)を行うこととした。また Table 1 より、もろみ後半は香気成分が生成するように品温を低くする(5~6°C)必要があるため、品温が高い(Temperature=B)場合にはより大きな降温操作(Δ Temperature=NS or NM or NB)を行うようにプロダクションルールを構築した(Fig. 5)。Fig. 7 に Δ BMD 値、品温および品温操作量に関するメンバーシップ関数を示す。また、Table 3 に Fig. 7 のパラメー

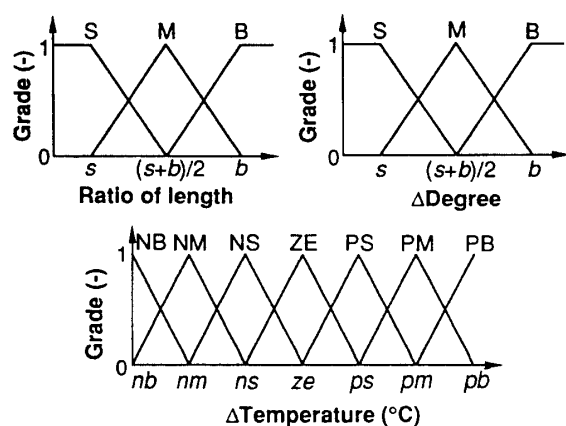


Fig. 6. Membership functions for control regions 2 and 3. Notations are the same as those of Fig. 5.

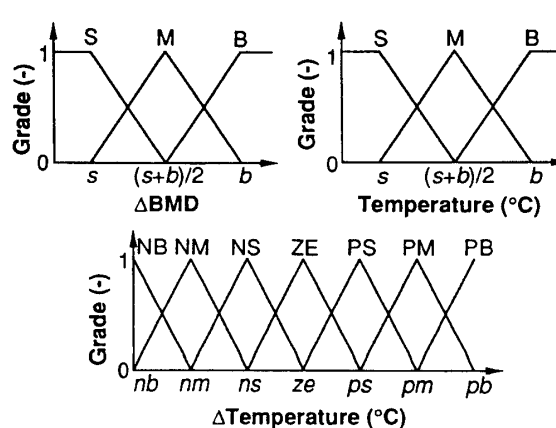


Fig. 7. Membership functions for control region 4. Notations are the same as those of Fig. 5.

Table 4. Comparison of calculated values with the average values of 25 *Ginjo moromi* fermentations.

		Brewing time (d)					
		10	15	20	25	31	32
Temperature (°C)	calculation	9.3	9.5	7.6	5.9	5.5	5.4
	measurement	9.3	9.3	7.5	6.1	5.2	5.2
	difference	0.0	0.2	0.1	-0.2	0.2	0.2
Baumé (—)	calculation	5.3	3.2	1.6	0.8	0.2	0.0
	measurement	5.3	3.1	1.7	0.9	0.2	0.1
	difference	0.0	0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1
Alcohol (%)	calculation	6.5	10.4	12.8	14.3	15.5	15.6
	measurement	5.8	10.7	12.9	14.3	15.3	15.3
	difference	0.7	-0.3	-0.1	0.0	0.2	0.3

タの値 (*s, b, nb, nm, ns, ze, ps, pm, pb*) を示す。これらの値は Table 3 と同様、25仕込みのデータの平均値、最大値、最小値を基に決定した。

なお、ファジィ化した値から品温操作量を求めるデファジィ化には MIN-加算-高さ法⁷⁾を用いた。

シミュレーション結果 シミュレーションは前報⁵⁾に従い、もろみ初日からの積算温度とボーメ、アルコールの間に存在する相関関係を用いて行った。シミュレーションの結果から品温、ボーメ、アルコール濃度変化が、25仕込みの平均値と比較し、その差が小さくなるようにチューニングを行った。特に、もろみ終了日が29～33日になることと、品温の経時変化において平均値とシミュレーション結果の差の絶対値がほぼ0.3以内に収まるようにチューニングを行った。この結果、制御領域2から3に移る日の判定をアルコール濃度10.5%以上かつボーメ3.5以下が同時に成立する日としていたのを、アルコール濃度10%以上またはボーメ4以下のどちらかが成立する日と修正した。

改良後のルールを用いてシミュレーションを行い、10, 15, 20, 25日およびもろみ終了日（ボーメ0以下になる日）前日ともろみ終了日である31, 32日における品温、ボーメ、アルコール濃度の計算値と25仕込みの平均値およびこれらの間の差を調べた。この結果を Table 4 に示す。各もろみ日数に対する計算値は、平均値とはほぼ一致した。品温、ボーメ、アルコール濃度に対する計算値と平均値の差は、品温では-0.2～0.2°C、ボーメは-0.1～0.1、アルコール濃度は-0.3～0.7%程度であった。ただし、このシミュレーションは、あくまでも25データのフィッティングにより求めたものであるため、平均データより大きくずれ

たもろみデータのシミュレーションには適さないと考えられる。しかし、シミュレータで確認できる範囲においては、本制御方策はおおむね良好であり、実際の吟醸もろみ工程にも十分応用できると考えられた。

このファジィ制御方策は、杜氏のノウハウを実際の吟醸もろみ工程変化のデータとつぎあわせてルール化したものであり、前報⁵⁾で報告した統計処理を利用したルール構築法では抽出することが不可能であった吟醸酒もろみ工程管理の原則を示しており、前報より複雑なルールとなるが、発酵過程の解析や品質制御を可能にするためのロバスト性の高い方法と考えられる。

要 約

吟醸もろみ制御に関して杜氏からの聞き取り調査を行い、A-B プロットおよび BMD 曲線が直線的に推移するように品温制御する方法が良質の吟醸酒を得るのに重要であるという基本的な原則を抽出できた。またこの原則に基づき、25仕込みの吟醸もろみのデータ解析を行い、もろみ工程を4つの制御領域に分割し、それぞれの領域についてファジィ制御ルールを構築した。ボーメおよびアルコール濃度と積算温度との関係を用いたシミュレーションからチューニングを行った。その結果、本研究で提案しているファジィ制御ルールは実際の吟醸もろみに適用可能であると考えられた。

文 献

- 1) 大石 薫, 富永光則, 川戸章嗣, 安部康久, 今安 聡: 醸造工学, 68, 483-491 (1990).
- 2) 大石 薫, 富永光則, 川戸章嗣, 今安 聡: 醸造工学, 70, 9-16 (1992).
- 3) 土屋義信, 小泉淳一, 末成和夫, 手島義春, 永井

- 史郎：醸酵工学，65，123-129 (1990).
- 4) Oishi, K., Tominaga, M., Kawato, A., Abe, Y.,
Imayasu, S., Nanba, A.: *J. Ferment. Technol.*, 72,
115-121 (1991).
- 5) 西田淑男，深谷伊和男，高橋伸幸，花井泰三，本
多裕之，小林 猛：生物学，72，267-274，
1994.
- 6) 布川弥太郎：清酒製造技術（難波康之祐），第5
版，p. 204-210，日本醸造協会，東京 (1992).
- 7) 水本雅晴：Computrol, 28, 32-45 (1993).